

국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가

탄소중립 이행 리스크 전파 경로 분석

Building and Assessing Adaptive Capacity to Climate Change for the
National Risk Management

채여라 외

K O R E A
E N V I R O N M E N T
I N S T I T U T E

저자

채여라, 박주영, 문종우, 이정은, 최영웅, 공현숙, 박종철, 서승범, 성재훈, 안현진

연구진

연구책임자 장 훈 한국환경연구원 선임연구위원

참여연구원 채여라 한국환경연구원 선임연구위원

박주영 한국환경연구원 연구위원

문종우 한국환경연구원 부연구위원

이정은 한국환경연구원 부연구위원

최영웅 한국환경연구원 책임연구원

공현숙 한국환경연구원 전문연구원

박종철 공주대학교 지리학과 교수

서승범 서울시립대학교 국제도시과학대학원 교수

성재훈 한국농촌경제연구원 연구위원

안현진 한국농촌경제연구원 연구위원

연구자문위원(가나다순)

김관수 서울대학교 농업생명과학대 교수

김길호 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원

김성진 한국환경연구원 탄소중립연구실 연구위원

김지수 환경부 기후적응과 과장

김태현 한국환경연구원 환경계획연구실 선임연구위원

김현규 한국환경연구원 국가기후위기적응센터 부연구위원

신지영 한국환경연구원 연구위원

윤동근 연세대학교 도시공학과 교수

임형우 한국환경연구원 탄소중립연구실 부연구위원

전호철 충남대학교 경제학과 교수

조용성 고려대학교 식품자원경제학과 교수

| 사업보고서 2024-03 |

국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가: 탄소중립 이행 리스크 전파 경로 분석

Building and Assessing Adaptive Capacity to Climate Change for the National Risk Management: Analysis of Carbon Neutral Transition Risk Propagation Paths

© 2024 한국환경연구원

발행인 이 창 훈

발행처 한국환경연구원

(30147) 세종특별자치시 시청대로 370

세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)

전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799

www.kei.re.kr

인 쇄 2024년 12월 26일

발 행 2024년 12월 31일

등 록 제 2015-000009호(1998년 1월 30일)

ISBN 979-11-5980-965-1 93530

인쇄처 에코디자인 044-868-0054

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.

채여라 외(2024), 「국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가: 탄소중립 이행리스크 전파 경로 분석」, 한국환경연구원.

값 9,000원

서언

우리나라는 2050년까지 탄소중립을 선언하고 탄소중립 기본계획을 발표하였습니다. 탄소중립 정책 이행 과정 중 또는 결과적으로 발생할 수 있는 리스크가 존재하게 됩니다. 탄소배출을 줄이는 기술을 도입하는데 소요되는 초기 비용, 에너지 집약적인 산업의 경쟁력 약화, 새로운 산업으로 전환하는 과정에서 일자리 재창출 문제, 재생에너지의 불안전성에 기인한 에너지 비용 부담 증가 등은 많이 다루는 문제입니다.

이 연구는 탄소중립 정책 가운데 재생에너지 확대에 따른 리스크의 전파 경로를 분석하였습니다. 또한 전 국민을 대상으로 설문조사를 실시해 탄소중립 정책에 대한 인식과 수용성 확대를 위한 분석도 진행하였습니다. 이로써 재생에너지 확대 정책 수립 시 고려해야 할 기초자료로 활용할 수 있을 것입니다.

본 연구를 수행한 한국환경연구원 녹색전환연구실 박주영 박사, 탄소중립연구실 채여라 박사, 문종우 박사, 이정은 박사, 최영웅 연구원, 공현숙 연구원, 서울시립대학교 서승범 교수, 농촌경제연구원 성재훈 박사, 안현진 박사, 공주대학교 박종철 교수께 감사를 표합니다. 자문을 맡아준 김관수 교수, 김길호 박사, 김지수 환경부 과장, 윤동근 교수, 전호철 교수, 조용성 교수와 우리 원의 김성진 박사, 김태현 박사, 김현규 박사, 임형우 박사, 신지영 박사께도 감사를 전합니다.

2024년 12월
한국환경연구원
원장 이창훈

국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가

탄소중립 이행 리스크 전파경로 분석

채여라 외

1. 탄소중립 정책과 이행 리스크

1.1 탄소중립 이행 리스크 정의와 분류

본 연구에서 탄소중립 이행 리스크는 기후변화 완화 및 적응 등 탄소중립 정책 이행으로 발생할 수 있는 잠재적인 영향으로 정의한다. 특히 본 연구에서는 선행연구를 기반으로 탄소중립 이행 리스크를 단계적 측면에서 '이행 과정 리스크(IR)'와 '이행 결과 리스크(CR)'로 크게 구분하였다. 과정 리스크는 탄소중립 이행 과정에서 발생하는 리스크이며, 탄소중립 정책의 실행 및 목표 달성, 기술 개발, 시스템 전환에서의 불확실성을 포괄한다. 결과 리스크는 탄소중립 실현에 따른 결과 측면에서 탄소중립 정책의 이행으로 발생할 수 있는 생태계 및 인간, 건강, 경제, 사회, 환경 등에 미치는 부정적인 영향을 일컫는다.



자료: 저자 작성.

그림 1 탄소중립 이행 리스크 및 영향 부문

1.2 탄소중립 정책 현황

대표적인 탄소중립 정책으로 『제1차 탄소중립 녹색성장 기본계획』의 부문별 중장기 온실가스 감축 대책을 주로 확인하였다. 기본계획의 세부 정책과 각 부문별 구체적인 전략 및 목표를 매칭하기 위해 전환 부문의 경우 '전력수급기본계획'을, 농업 부문에서는 '2050 농식품 탄소중립 추진전략'을, 산림 부문에서는 '2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략'을, 수자원 부문에서는 '물관리분야, 공공 주도의 과감한 2050 탄소중립 전략'과 'K-water 2050 탄소중립 로드맵' 등을 검토하였다.

1.3 탄소중립 정책의 이행 리스크

탄소중립 이행에 따른 리스크 요인은 온실가스 배출량, 에너지 수요, 에너지 가격, 발전 믹스, 식품 수요, GDP, 투자, 농업 수요, 농업 생산량, 토지 피복도, 정책(행정) 비용, 무역 등으로 매우 다양하다. 이를 포괄하기 위해 앞서 탄소중립 정책의 이행 리스크를 두 가지 리스크(과정 및 결과)로 구분하였고, 영향 부문은 사회, 경제, 환경, 정책, 기술, 건강 측면으로 구분하였다. 경제적 측면으로는 전기요금 인상이 있으며, 사회적 측면으로는 석탄화력 노동자와 지역 주민의 갈등, 환경적 측면으로는 대기오염물질 배출량 감소, 기술적 측면으로는 재생에너지 간헐성으로 계통 출력 불안정, 정책적 측면으로는 환경영향평가 등 규제 환경 리스크, 건강 측면으로는 저소득 계층 극한 기후 대응력 감소, 위험 노출 가능성 증가 등의 영향이 있다.

1.4 이행 리스크 분석을 위한 정책 시나리오

탄소중립 이행 리스크의 파급경로를 분석하는 정책 시나리오를 도출하고자 탄소중립 정책 이행에 따른 부문별 영향 경로를 우선 그려보았다. 부문별 대표 정책은 직접적으로 해당 부문에 영향을 주며, 간접적으로는 타 부문에까지 영향을 미치게 된다. 다양한 감축 이행 전략 중 전 부문에 걸친 영향 경로를 보여주는 정책으로는 재생에너지 확대가 있으며, 이를 공통 정책 시나리오로 도출하였다.

2. 부문별 탄소중립 이행 리스크 영향 분석

2.1 에너지

재생에너지 확대는 전력 부문의 탄소중립 전환에 필수적이거나, 간헐성에 따라 전력 생산을 예측하기 어려워 전력 수급의 불안정성이 확대될 수 있다. 전력 수요에 비해 신재생에너지 공급이 과도하게 증가할 경우, 전력망 안정성을 유지하려면 신재생에너지로 생산된 전력을 전력망에 들어오지 못하게 출력을 제한해야 하며, 이는 전력 시스템 운영 비용 증가로 이어진다. 또한 향후 탄소중립 전환 과정에서 재생에너지 비중이 높아지면 전력 주파수 및 전압의 불안정성이 높아질 수 있다는 리스크도 존재한다. 이러한 측면을 고려할 때 재생에너지의 간헐성을 보완하려면 유연성 자원을 확보해야 한다. 또한 현재 국내 신재생에너지 발전비용은 다른 국가나 다른 발전원에 비해 상대적으로 높은 수준이며, 아직 공급 증가가 제한적인 상황이다. 반면 최근 RE100 등으로 기업들이 증가한다는 점은 기업의 재생에너지 구매 비용 증가로 이어질 수 있음을 의미한다.

정책 측면에서도 보조금, 기술 개발 지원 등 신재생에너지 지원 정책은 신재생에너지 기술 발전을 가속화하여 미래 발전비용을 낮춰 전력 가격을 낮추는 효과도 나타날 수 있다. 이렇게 긍정적인 효과가 있을 수도 있으나, 재생에너지 지원 정책의 일관성이 부족하면 재생에너지 확대를 저해할 수도 있다. 재생에너지 투자는 초기 투자비가 높고 장기간에 걸쳐 회수하는 구조여서 장기적으로 안정적이며 일관성이 있는 재생에너지 지원 정책이 제시되어야 재생에너지에 지속적으로 투자할 수 있을 것이다. 또한 현재의 복잡한 인허가 절차와 주민 갈등 등은 재생에너지 확대를 저해하는 요인이며 탄소중립을 이행하려면 해결해야 할 문제이다.

2.2 수자원

현재 시점에서 발생하는 ‘implementation risk’를 저감하는 정책적 시사점으로 Co-creation 접근법을 활용하여 사회적 수용성을 강화하는 방안을 우선적으로 제시하고자 한다. 기술 혁신에 대한 불신을 줄이고 효과적으로 실현하려면 다양한 이해관계자의 참여가 필요하다. 이러한 적극적인 참여와 공동의 논의를

유도한 사례로는 정책과 기술 개발을 동시에 설계한 오스트리아 철강 및 전력 부문 전환 프로젝트를 참고할 수 있다(Bachner et al., 2020). 또한 재생에너지 마이크로그리드와 에너지 저장 시스템을 연결하여 전력 계통 안정성을 확보하고, 소수력 발전과 수상태양광 전력망 연계 등 지역에서 생산되는 발전원을 다원화할 수 있다. 더불어 이를 토대로 지역 맞춤형 에너지 자립 정책을 시행하는 접근이 필요하다.

미래 시점에서 발생하는 ‘consequential risk’를 저감하는 방안으로는 재정적 인센티브 제공과 가격 안정화 정책, 사후환경영향평가 제도의 개선 등을 고려해야 한다. 지역 주민이 참여하는 경제 모델을 활용하여 탄소중립 에너지 전환이 지역 경제를 활성화하는 수단으로 활용되어 시너지를 도출할 수 있다. 임하댐 수상태양광의 경우, 주민참여형 수익 공유 모델로 지역사회에 경제적 혜택을 제공함으로써 수용성을 높이는 계획을 마련하였다. 더불어 사후환경영향평가 제도를 개선해 재생에너지원별 표준화된 평가 기준을 마련해야 한다. 사후 모니터링 및 평가 결과를 바탕으로 정책을 수정하고 대안을 마련하려면 예측하지 못한 환경 변화에 대응할 법적 권한과 제도적 절차를 개선해야 한다.

2.3 농업

영농형 태양광은 기존의 농지전용 태양광과는 달리 에너지 생산과 농지 보존을 동시에 달성할 수 있는 수단이며 이에 대한 정책적 관심이 높아지고 있다. 국내의 구조적인 쌀 과잉 문제를 고려할 때, 영농형 태양광 설치에 따른 쌀 생산량의 감소가 실제 식량안보와 쌀 가격, 소비자 후생에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상된다. 이에 문헌연구를 바탕으로 영농형 태양광 확대 이행 리스크를 식량안보 및 물가 등 경제 전반에 미치는 영향을 제외하여 정리하였다. 구체적으로 본 연구에서는 문헌연구를 바탕으로 현재 영농형 태양광 확대의 리스크로 작용할 수 있는 요소를 농지 이용 규제와의 상충, 한국형 FIT 제도 등 지원 정책의 축소, 영농형 태양광 설치에 따른 생산비 증가, 농업생산성/품질 감소, 지역적 편중 심화, 농기자 격 상승, 농업환경자원 훼손으로 식별하였다.

또한 앞서 언급한 영농형 태양광 확대 리스크의 파급효과로 농가소득 감소를 선정하였다. 이는 농지이용 규제에 따른 불충분한 영농형 태양광 운영 기간, 전력 판매 가격 변동, 지역적 편중에 따른 이격거리 증가와 이자율 등 거시변수 변동에 따른 생산비 증가는 영농형 태양광을 설치한 농가소득에 부정적인 영향을 미칠 것이 확실시되기 때문이다. 마지막으로 영농형 태양광 확대에 의한 농업환경자원 훼손과 농지가격 상승은 영농형 태양광에 대한 부정적 인식을 높이고, 정책 확산에 걸림돌로 작용할 것으로 예상된다.

2.4 산림

재생에너지는 탄소중립과 환경 보호를 위한 중요한 대안이지만, 산림지역의 풍력발전 확대는 여러 가지 환경적, 사회적, 경제적 리스크를 동반한다. 산지에 풍력발전단지를 조성하는 과정에서 발생하는 산림 훼손, 생태계 교란, 소음과 경관 훼손 등의 문제는 재생에너지 확대와 산림보호 간의 갈등을 보여준다. 이러한 문제는 산림을 보호하는 동시에 재생에너지를 확대하려는 정책적 목표와 상충할 수 있으며, 지속 가능한 발전을 위해서는 더욱 세심한 계획의 수립과 조율이 필요하다.

산지에 풍력발전단지를 설치하는 과정에서 발생하는 산림 훼손과 생태계 교란을 최소화하는 방안이 필요하다. 이를 위해 풍력발전단지의 입지를 신중히 선정하고, 풍력발전에 따른 환경적 피해를 완화할 수 있는 기술적 대안을 적극 도입해야 한다. 풍력발전 설비가 지역 주민에게 미치는 소음과 경관 훼손 등의 문제를 해결하도록 주민과 소통과 협력을 강화해야 한다. 피해 지역 주민에게 보상 정책을 마련하고, 이들의 참여로 재생에너지 프로젝트의 사회적 수용성을 높이는 것이 중요하다. 특히 우리나라는 민가와 풍력발전 단지 사이의 적정 거리를 구체적으로 규정하지 않고 권고 수준에 머물고 있으므로 이에 대한 확고한 법적 기준을 수립하는 것이 선행되어야 할 것이다.

풍력발전이 야생동물 서식지에 미치는 부정적 영향을 줄이려면 생태계 보호 대책을 강화해야 한다. 이동성 동물의 피해를 줄이는 모니터링 시스템을 도입하고, 피해가 발생할 가능성이 높은 지역에는 발전소를 설치하지 않는 방안이 필요하다.

2.5 건강

재생에너지 확대의 건강 영향은 보편적 차원과 지역적 차원에서 다소 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 보편적으로, 재생에너지는 기후변화 완화로 폭염, 가뭄 등의 기후 재해를 줄이고, 대기질을 개선해 호흡기 및 심혈관계 질환의 발생률을 낮출 것으로 기대된다. 이러한 변화는 전체적으로 초과사망을 감소에 기여하며, 질병 예방 및 건강 증진에 긍정적 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 미세먼지(PM2.5, PM10) 농도 감소는 천식, 심혈관계 질환 등과 같은 주요 질병의 발생을 억제할 수 있다는 연구 결과가 있다.

반면, 보편적 차원에서도 부정적 영향이 존재한다. 재생에너지 확대에 따른 전력 가격 및 용수 비용의 변동성은 경제적으로 취약한 계층에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 특히, 에너지 빈곤층은 전기료가 상승하면 폭염 및 혹한기에 적절한 냉난방을 유지하지 못해 건강이 악화할 위험이 있다.

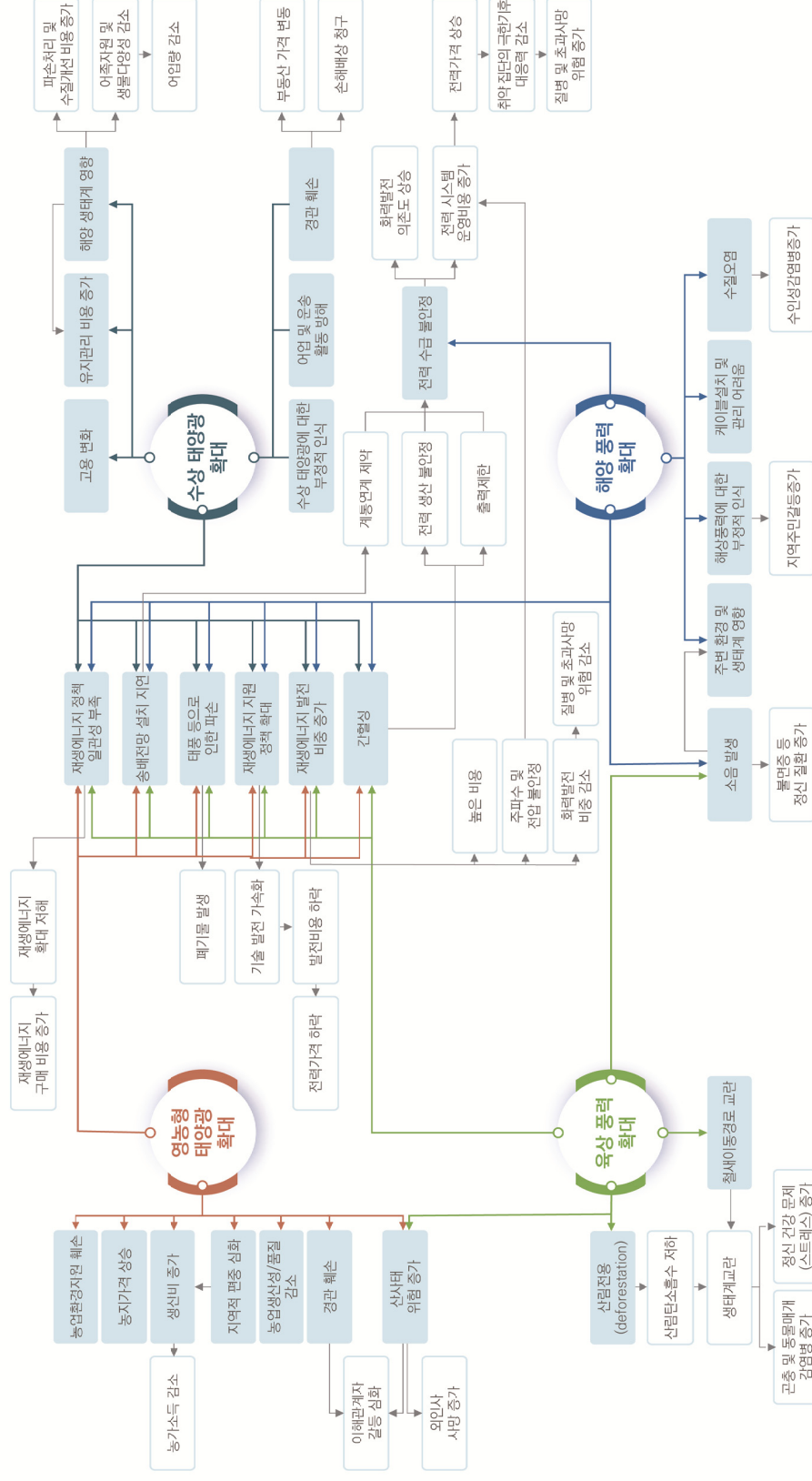
지역적 차원에서는 재생에너지 확대가 다양한 결과를 초래한다. 일부 농촌 지역에서는 태양광 발전소 건설로 지역 주민 간에 갈등이 발생하고 있으며, 이는 지역사회의 결속력을 약화하고 재난 대응력을 저하할 우려가 있다. 풍력발전의 경우, 저주파 소음과 같은 환경적 요인이 인근 주민의 수면 장애와 스트레스 증가 같은 건강 문제를 일으킬 수 있다는 연구가 존재한다. 또한 풍력발전 시설 설치 과정에서 발생할 수 있는 토양 침식과 수질 오염은 생태계와 인간 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있으며, 이는 장기적으로 농업 생산성 감소와 식량 안보 문제로 이어질 가능성이 있다.

3. 탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로 및 정책 수용성 분석

3.1 탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로

재생에너지 발전시설의 확대는 이행 단계에서 불확실성을 수반한다. 재생에너지 정책의 일관성 부족, 송배전망 설치 지연, 간헐성 문제 등이 그 예이다. 영농형 태양광, 수상태양광, 육상풍력, 해상풍력 모두 재생에너지 정책 관련 불확실성과 태풍과 같은 물리적인 외부 영향에 취약하므로 이 요소들이 공통적으로 주요 노드로 작용한다. 재생에너지 간헐성 문제는 다시 전력수급 불안정으로 이어져 물가 상승, 취약계층에 대한 부정적 건강 영향까지 이어지게 된다. 한편, 재생에너지에 확대는 이에 대한 지원 확대와 재생에너지 발전 비중을 증가시켜 화력발전 비중을 상대적으로 감소시키고 결국 긍정적 건강 영향을 야기하기도 한다. 동시에, 기술 발전을 가속화해 전력 가격이 하락하는 긍정적 효과도 있을 수 있다.

영농형 태양광 확대만 살펴봤을 때 생산물 비용 증가, 농지가격 상승 등의 부정적 영향이 농업 부문에 집중된 것으로 파악된다. 육상풍력 확대로 인해 산림전용과 철새 이동경로 교란 등이 생태계 교란까지 이어지며 이로 말미암아 산림 및 생태계 문제가 주요 문제로 파악되는 것으로 나타났다. 수상태양광 확대로 인해 해양 생태계에 미치는 영향이 두드러졌으며 어업에 미치는 부정적 영향도 발생할 수 있는 것으로 보인다. 해양 풍력 확대 관련 수질 오염 및 주변 생태계 영향이 주요 노드로 파악되었다.



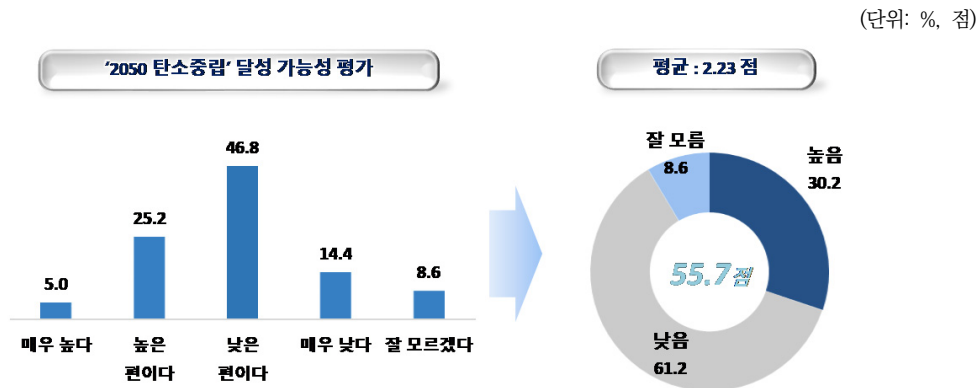
자료: 저자 작성.

모든 재생에너지 발전시설과 관련하여 최종적으로 지역사회 일원의 건강 악화와 갈등 문제로 이어졌다. 영농형 태양광과 수상태양광 확대는 공통적으로 경관 훼손을 야기하여 결국 지역사회 갈등 문제로 이어지며, 육상풍력과 해상풍력 확대는 공통적으로 소음으로 정신 질환 문제를 발생시키는 것으로 보인다. 또 발전 시설이 확대되면서 특정 산업 또는 업종이 타격을 입어 소득 감소로 이어지기도 한다. 이런 현상은 박주영 외(2023)에서 기후 리스크의 전파 경로를 분석하였을 때의 결과와도 매우 비슷하다. 즉, 기후 리스크에 따르는 부정적인 영향에 대처하려고 탄소중립 정책을 수립하고 이행하고 있지만 이런 정책 때문에 부정적인 결과가 불가피하게 발생하는 것이다. 이는 탄소중립 정책이 야기하는 경제적, 사회적, 환경적 측면의 복잡한 문제를 해결하려면 균형 잡힌 접근이 필요할 것으로 보인다.

3.2. 탄소중립 정책 수용성 분석

일반 국민의 탄소중립 정책 이해도, 신뢰도와 영향의 정도 및 발생 가능성에 대해서 탄소중립을 들어본 적이 있는 국민 500명을 대상으로 인식조사를 실시하였으며, 이로써 정책 수용성을 고려한 기후변화 리스크 적응역량 강화 방안을 제시하는 데 기초자료를 제공하고자 한다.

‘2050 탄소중립’ 달성 가능성에 대해 응답자의 30.2%가 ‘높음’으로, 61.2%가 ‘낮음’으로 응답하여 달성 가능성을 낮게 평가하는 것으로 나타났다. 달성 가능성 평가는 4점 평균 2.23점으로 분석되었다. 여성(2.30점)이 남성(2.16점)보다 달성 가능성을 다소 높게 평가하였으며, 연령별로는 60세 이상(2.37점)이 가장 높게 평가하였으며, 다음으로 30대(2.30점), 20대(2.20점) 순으로 나타났다. 거주지역별로 살펴봤을 때 충청/강원권에 거주하는 응답자가 달성 가능성을 높게 평가하였으며 수도권 응답자가 가장 낮게 평가하였다.

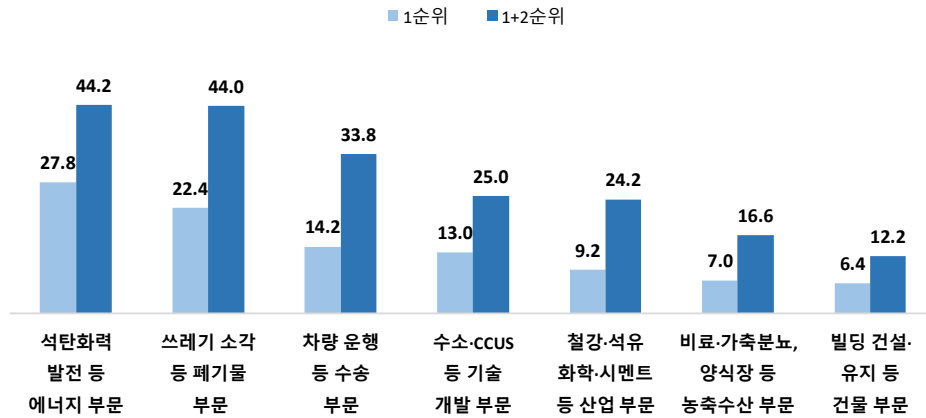


자료: 저자 작성.

그림 3 ‘2050 탄소중립’ 달성 가능성 평가

‘2050 탄소중립’을 달성하려면 ‘석탄화력발전 등 에너지 부문’이 중요하다는 의견이 가장 많았으며, 다음으로 ‘쓰레기 소각 등 폐기물 부문’, ‘차량 운행 등 수송 부문’, ‘수소·CCUS’ 등 기술 개발 부문 등의 순이었다. 남성은 ‘석탄화력발전 등 에너지 부문’을, 여성은 ‘쓰레기 소각 등 폐기물 부문’을 가장 중요하게 생각하는 것으로 조사되었다. 연령별로는 대다수 연령에서 에너지 부문의 역할을 가장 중요하게 생각하는 반면, 20대에서는 폐기물 부문을, 30대에서는 수소·CCUS 등 기술 개발을 상대적으로 더 중요하게 생각하는 것으로 나타났다. 또 연령이 높아질수록 에너지 부문의 역할이 중요하다는 의견이 증가하는 경향을 보였다.

(단위: %)



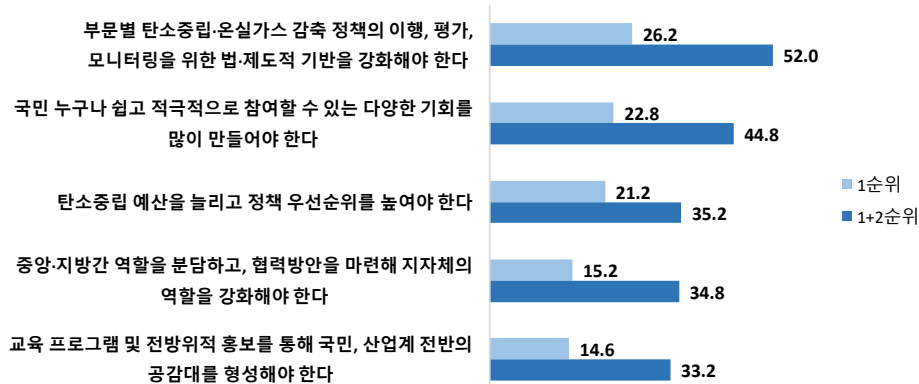
자료: 저자 작성.

그림 4 '2050 탄소중립' 달성을 위해 중요한 부문 - 1, 2순위

'2050 탄소중립' 달성을 위해 현시점에서 가장 중요한 정부의 역할로 '탄소중립·온실가스 감축 정책의 이행, 평가, 모니터링을 위한 법·제도적 기반을 강화해야 한다'는 의견이 가장 많았으며, 다음으로 '국민 누구나 쉽고 적극적으로 참여할 수 있는 다양한 기회를 많이 만들어야 한다', '탄소중립 예산을 늘리고 정책 우선순위를 높여야 한다' 등의 순으로 나타났다.

1순위 기준, 남성은 '2050 탄소중립' 달성을 위해 현시점에서 가장 중요한 정부 역할로 '탄소중립 예산을 늘리고 정책 우선순위를 높여야 한다'라는 의견이 가장 많은 반면, 여성은 '부문별 탄소중립·온실가스 감축 정책의 이행, 평가, 모니터링을 위한 법·제도적 기반을 강화해야 한다'라는 의견이 가장 많았다. 연령별로는 20대와 60대가 '국민 누구나 쉽고 적극적으로 참여할 수 있는 다양한 기회를 많이 만들어야 한다', 30대와 50대는 '법·제도적 기반 강화', 40대는 '예산 증대 및 정책 우선순위를 높임'에 응답이 가장 많은 것으로 나타났다.

(단위: %)



자료: 저자 작성.

그림 5 '2050 탄소중립' 달성을 위해 가장 중요한 정부 역할 - 1, 2순위

주제어 탄소중립, 이행 리스크, 재생에너지, 기후변화

CONTENTS

국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가:
탄소중립 이행 리스크 전파 경로 분석

국문요약	i
------	---

제1장	서론	
	1. 연구의 필요성	1
	2. 연구의 차별성	6
	3. 연구수행 체계	8

제2장	탄소중립 정책과 이행 리스크	
	1. 탄소중립 이행 리스크 정의와 분류	9
	2. 탄소중립 정책 현황	15
	3. 탄소중립 정책의 이행 리스크	25
	4. 이행 리스크 분석을 위한 정책 시나리오	47

제3장	부문별 탄소중립 이행 리스크 영향 분석	
	1. 에너지	49
	2. 수자원	62
	3. 농업	72
	4. 산림	96
	5. 건강	119

제4장	탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로 및 정책 수용성 분석	
	1. 탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로	133
	2. 탄소중립 정책 수용성 분석	136
제5장	결론	
	1. 요약	148
	2. 정책적 시사점	152
참고문헌		153
Executive Summary		175

표차례

표 1-1	선행연구와의 차별성	7
표 2-1	기후변화 이행 리스크 유형별 잠재적 영향 예시	11
표 2-2	태양광 발전에서의 이행 리스크	12
표 2-3	저탄소 전환 경로에서의 리스크	13
표 2-4	탄소중립 이행 리스크로 인한 부문별 잠재적 영향	14
표 2-5	제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획에 기반한 부문별 세부정책 및 목표	18
표 2-6	탄소중립 정책의 이행 리스크로 인한 부문별 파급효과	26
표 3-1	에너지 부문 이행 리스크 분석에 활용된 참고문헌	58
표 3-2	탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획: 수자원 부문 관련 정책	62
표 3-3	2021년 환경부 탄소중립 이행계획(2021): 수자원 부문 관련 정책	63
표 3-4	수상태양광 확대 이행 리스크 선행연구	66
표 3-5	해상풍력 확대 이행 리스크 선행연구	67
표 3-6	수력·양수 발전 확대 이행 리스크 선행연구	69
표 3-7	탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획: 농수산 부문	72
표 3-8	농식품 분야 탄소중립 정책 이행 리스크 관련 선행연구	76
표 3-9	실증단지 주요 재배 품목 및 단수 감수율 현황	79
표 3-10	장기 고정가격 계약 방식 및 공급인증서 지급단가(2023년 기준)	80
표 3-11	농지법의 농지의 타용도 일시사용허가 등 및 용도구역에서의 행위 제한	82
표 3-12	농지법 시행령의 농업보호구역 가능 행위 및 타용도 일시사용	83
표 3-13	영농형 태양광을 부정적으로 평가하는 이유 응답 결과	84
표 3-14	영농형 태양광을 설치하지 않는 이유	84
표 3-15	남부 캘리포니아 대형 태양광 발전(USSE)시설의 추정 조류 폐사율	87
표 3-16	태양광 발전시설로 인한 야생동물들의 부상 및 폐사 예시	88
표 3-17	쌀 재배면적 반응함수 추정 결과	89
표 3-18	영농형 태양광 확대 이행 리스크 및 대응 관련 선행연구	91
표 3-19	2050 탄소중립 정책 방향과 핵심과제	96
표 3-20	2050 탄소중립 정책 목표와 관련 부문	101
표 3-21	탄소중립 정책 산림 부문 이행 리스크 분석에 활용된 참고문헌	103
표 3-22	최근 5년간 수종별 평균 벌채량	104
표 3-23	시나리오별 수확 벌채량	105
표 3-24	국내 산림의 임상별 이산화탄소 흡수량	106

표 3-25	베이스라인(현행 유지) 산림의 영급별 이산화탄소 흡수량 변화	107
표 3-26	목재공급계획에 따른 산림의 영급별 이산화탄소 흡수량 변화	108
표 3-27	시나리오별 총 목재 생산을 위한 벌채량	109
표 3-28	목재제품 생산을 위한 국산 목재 투입량	110
표 3-29	목재제품 생산을 위한 목재(국산재, 수입재) 투입량	110
표 3-30	현 상태 유지 시나리오의 목재제품 생산을 위한 벌채량 대비 국산 목재 투입 비율 ...	110
표 3-31	목재공급계획 시나리오의 목재제품 생산을 위한 목재 투입량	111
표 3-32	국내 목재제품 수요 충족을 위한 국산 목재 투입에 따른 탄소 흡수량	112
표 3-33	산지 풍력발전 확대 이행 리스크 분석에 활용된 참고문헌	116
표 3-34	재생에너지 확대에 따른 건강 부문 영향 참고문헌	125
표 4-1	탄소중립 정책 인식조사 표본	136
표 5-1	탄소중립 정책의 리스크와 기회 요인	150



■ 그림차례

그림 1-1	탄소중립 정책과 온실가스 배출량	3
그림 1-2	탄소중립 전환 시 수송 부문 고용 변화	4
그림 1-3	탄소중립 전환 시 고용 불균형	4
그림 1-4	탄소중립에 따른 이행 리스크(IR)와 결과적 리스크(CR)	6
그림 1-5	탄소중립에 따른 리스크 분석 부문	6
그림 1-6	연구 체계	8
그림 1-7	연도별 연구 체계도	8
그림 2-1	기후 리스크 분류 체계	10
그림 2-2	저탄소 전환 경로에서의 이행 및 결과적 리스크 프레이밍	11
그림 2-3	탄소중립 이행 리스크 및 영향 부문	14
그림 2-4	제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획의 부문별 (대표)감축정책	15
그림 2-5	탄소가격제 정책 이행 리스크 영향 경로	25
그림 2-6	탄소중립 정책(부문별 감축대책) 영향 경로	47
그림 2-7	대표 정책(재생에너지 확대) 시나리오의 이행 리스크 파급 경로 예시	48
그림 3-1	제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획의 부문별 감축정책	49
그림 3-2	시나리오별 기후변화 물리 및 이행 리스크 분석 결과	51
그림 3-3	NGFS의 Net Zero 2050, Current Policies 시나리오의 전력 믹스 비교	51
그림 3-4	이행 리스크 파급 경로와 그에 따른 고탄소산업의 부가가치 변화	52
그림 3-5	수소 관련 에너지 부문 탄소중립 이행 리스크 영향 경로	53
그림 3-6	재생에너지 확대에 따른 에너지 부문 탄소중립 이행 리스크 영향 경로	57
그림 3-7	풍력 및 태양광 확대 관련 에너지 부문 탄소중립 이행 리스크 영향 경로	58
그림 3-8	K-water 2050 탄소중립 로드맵 및 4대 전략	64
그림 3-9	참고한 선행연구의 리스크 기준 및 요인	65
그림 3-10	수자원 부문 이행 리스크 영향 경로: 수상태양광 확대	66
그림 3-11	수자원 부문 이행 리스크 영향 경로: 해상풍력 확대	67
그림 3-12	수자원 부문 이행 리스크 영향 경로: 수력·양수 발전 확대	69
그림 3-13	2050 농식품 탄소중립 추진 전략 로드맵	73
그림 3-14	축산 부문 2030 온실가스 감축 로드맵	74
그림 3-15	농식품 분야 탄소중립 정책의 주요 이행 리스크	76
그림 3-16	태양광 발전시설 구분	77
그림 3-17	태양광 발전시설 종류	86
그림 3-18	영농형 태양광 확대 이행 리스크	90

그림 3-19	영농형 태양광 확대 이행 리스크 완화를 위한 정책 대응	92
그림 3-20	태양 복사 감소에 따른 작물별 생산성 변화	94
그림 3-21	2050 탄소중립 산림 부문 목표치	97
그림 3-22	탄소중립 정책 산림 부문 이행 리스크	103
그림 3-23	시나리오 간 이산화탄소 흡수량 변화 비교	108
그림 3-24	산림 능선에 위치한 풍력발전단지	114
그림 3-25	산지 풍력발전 확대 정책 이행 리스크	115
그림 3-26	재생에너지 확대에 따른 건강 영향	119
그림 3-27	일부 지역에서 풍력발전 확대 과정에 나타날 수 있는 건강 영향	122
그림 3-28	일부 지역에서 태양광 발전 확대 과정에 나타날 수 있는 건강 영향	125
그림 3-29	LNG 발전 증가의 건강 부문 영향	126
그림 3-30	석탄발전 감축의 건강 부문 영향	127
그림 3-31	연비 기준 및 온실가스 배출 기준 강화 정책에 따른 건강 부문 영향	128
그림 3-32	내연기관차의 단계적 폐지 정책에 따른 건강 부문 영향	129
그림 3-33	그린리모델링의 건강 부문 영향	131
그림 4-1	탄소중립 이행 리스크 전파 경로	135
그림 4-2	이상기후 및 자연재해의 기후변화 관련성 평가	137
그림 4-3	기후변화로 인한 이상기후 및 자연재해 심각성 평가	138
그림 4-4	기후변화의 일상생활 영향 정도 평가	138
그림 4-5	탄소중립 관련 소식 및 내용 인지 경로	139
그림 4-6	‘2050 탄소중립’ 달성 가능성 평가	139
그림 4-7	‘2050 탄소중립’ 달성을 위해 중요한 부문 - 1, 2순위	140
그림 4-8	재생에너지 확대 위한 태양광 및 풍력발전 설치에 적합한 지역 및 시설	141
그림 4-9	탄소중립 달성 위한 ‘영농형 태양광 확대’ 정책 인지도	141
그림 4-10	탄소중립 달성 위한 ‘수상태양광 확대’ 정책 인지도	142
그림 4-11	탄소중립 달성 위한 ‘육상풍력 확대’ 정책 인지도	143
그림 4-12	탄소중립 달성 위한 ‘해상풍력 확대’ 정책 인지도	143
그림 4-13	‘2050 탄소중립’ 달성을 위해 가장 중요한 정부 역할 - 1, 2순위	144
그림 4-14	탄소중립 추진 과정에서 발생하는 비용 부담 형태	145
그림 4-15	탄소중립 추진 시 수용할 수 있는 불편사항	145
그림 4-16	탄소중립 추진으로 인한 일상생활 불편 증가	146
그림 4-17	탄소중립 추진으로 인한 비용 지출 증가	146
그림 4-18	탄소중립 추진으로 인한 지출비용 수용 가능 금액	147

제 1 장

서론

1. 연구의 필요성
2. 연구의 차별성
3. 연구수행 체계

1. 연구의 필요성

과거부터 현재까지 인류의 사회경제 활동에 따른 온실가스 배출량은 이미 높은 수준이며, 기후 리스크로 영향과 피해가 나타나 각국의 지속가능발전에 치명적인 장애 요인으로 작용하고 있다. 기후변화 리스크가 심화하며 우리나라를 포함함 전 세계는 지속적으로 ‘경험해보지 못한’, ‘사상 최고의’ 극한 기상을 경험하며 많은 피해를 입고 있다. 2024년 인도 북부에 52도를 넘는 폭염에 열사병 환자 2만 6,000명이 발생하고 190명이 사망하였으며, 사우디아라비아 메카 순례 중 1,300명이 사망했으며, 미국 북동부에서는 열돔 현상으로 링컨 밀랍 조형물이 녹아내리는 사건이 발생하기도 했다. 동아프리카의 홍수로 많은 사상자가 발생했으며, 아랍에미리트 두바이에서는 12시간에 1년 강우량에 맞먹는 폭우가 발생하였다. 국내에서는 추석을 지나서까지 긴 폭염을 경험하며 9월 중 가장 늦은 폭염경보가 발생했다.

이와 같은 기후변화 리스크와 영향을 저감하는 주요 방법은 크게 기후변화 적응과 온실가스 저감이다. 기후 리스크에 따른 되돌릴 수 없는(irreversible) 심각한 피해를 막으려면 2100년까지 기온 상승을 1.5도 이하로 안정화가 필요하다고 많은 과학자가 주장하고 있다(IPCC, 2018). 이에 기반해 파리에서 열린 제21차 UN 주관 기후변화 당사국총회에서 전 세계 196개국은 2100년까지 기온 상승을 2도보다 훨씬 아래로 안정화하는 노력에 동참하기를 합의했다. 국제사회는 기후변화에 따른 부정적 영향을 최소화하고자 2015년 12월 UNFCCC 당사국총회(COP21)에서 신기후체제(post-2020)의 기반이 되는 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였으며, 2016년 11월 4일 발효되었다. 파리협정은 지구표면 평균 온도의 상승을 2℃ 이하로 유지하며(1.5℃ 목표 달성 노력) 온실가스 감축, 적응 행동에 대한 투명성 강화를

명시했다. 각국은 “국가별 기여방안(INDC: Intended Nationally Determined Contributions)”이라는 온실가스 감축목표를 스스로 정해 국제사회에 약속하고 이를 실천해야 하며, 파리협정 당사국총회는 당사국이 제출한 INDC가 목표에 부합하는지 검토하고 목표를 달성하려면 얼마나 더 노력하여야 하는지에 초점을 맞춰 글로벌 이행점검을하기로 합의하였다.

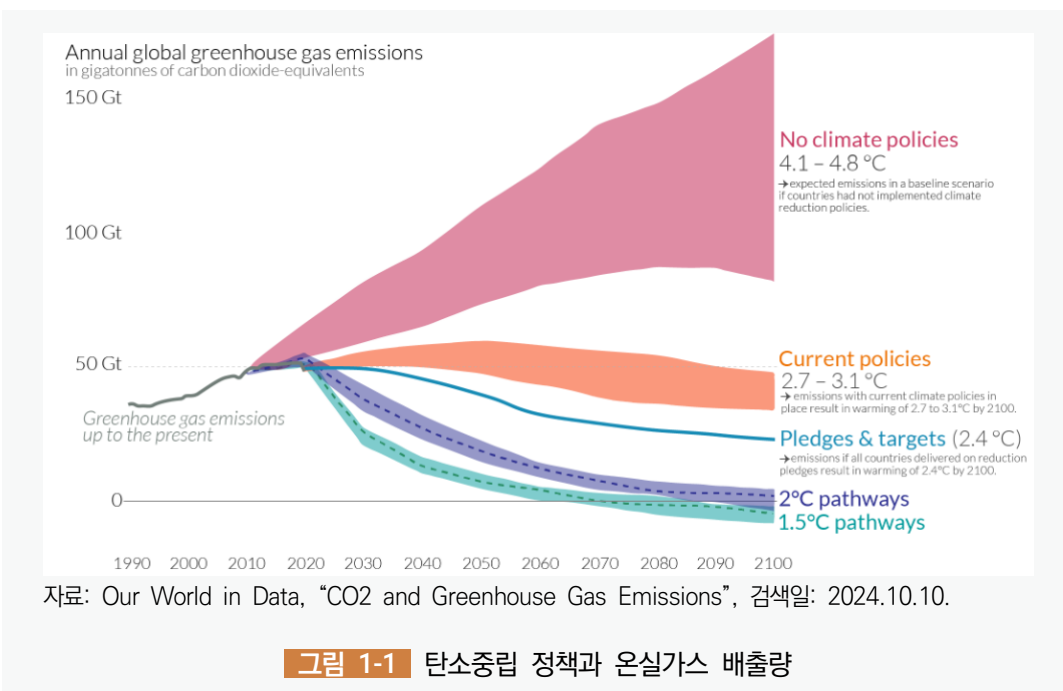
2019년 12월 EU를 시작으로 주요국은 기후위기에 대응하고자 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 발표하였다. 한국은 2020년 10월, 2050년을 목표로 탄소중립을 선언하였다. 탄소중립은 기후 리스크로 인한 극단적 피해를 줄려면 필수적이며 에너지, 수송, 산업 등 많은 부문의 정책 이행과 기술 개발이 필요하다. 우리나라는 『탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획』을 2023년에 발표하였다. 계획에는 2030년까지 2018년 대비 온실가스 배출량을 40% 감축하려는 부문별 감축계획과 에너지 전환, 산업구조, 탄소흡수원, 기술혁신, 국제협력 등을 활용하여 탄소중립 달성을 목표로 제시하였다.

탄소중립은 도전적인 과제이기에 정책 목표를 달성하는 이행 과정에 많은 리스크를 수반한다. 리스크는 위험과 기회를 모두 포함하는 개념으로, 기후 리스크는 피해뿐 아니라 많은 기회 요인을 포함한다. 탄소중립 이행에 따른 비용 및 경제적 영향은 많은 연구에서 분석, 논의되고 있다. 온실가스 배출을 저감하는 근본적인 방법은 화석연료 사용 중지이며, 이를 위한 방안은 신재생에너지로의 전환, 에너지 효율 향상, 에너지 수요 관리 등이 대표적이다. 현재의 기술 수준은 탄소중립 이행을 위한 대책 및 기술에 추가적인 비용이 소요되며 이는 사회에 경제적 부담으로 작용할 수 있다. 한국전력공사 경제경영연구원(2019)에 따르면, 전환부문의 경우 온실가스 저감에 따른 한계 비용을 3만 8,000원으로 제시하였다. 탄소중립 정책 이행 과정 중 또는 결과적으로 발생할 수 있는 리스크가 존재한다. 탄소배출을 줄이는 기술을 도입하는 데 소요되는 초기 비용, 에너지 집약 산업의 경쟁력 약화, 새로운 산업으로 전환하는 과정에서 일자리 재창출 문제, 재생에너지의 불안전성에 기인한 에너지 비용 부담 증가 등은 흔히 거론되는 문제이다. McKinsey and Company(2022)에서는 탄소중립으로 전환 시 수송 부문 고용 변화를 <그림 1-2>와 같이 제시하였는데, 이에 따르면 2050년 수송 부문에는 일자리 1,400만 개가 없어질 것으로 예측하였다. 그뿐 아니라 IRENA(2024)에서도 에너지 부문과 경제 전체에서 발생할 수 있는 고용 불균형을 설명한 바 있다. 탄소중립 정책의 부정적인 영향은 경제 부문에만 머무르지 않는다. 에너지 비용 상승은 취약계층에 더 큰 경제적 부담을 줄 수 있으며 탄소중립 정책에 영향을 받는 지역이 소외되거나 경제적 타격을 받을 수 있고, 이와 관련하여 특정 집단 간 사회적 갈등이 심화할 수 있다.

탄소중립에 따르는 대표적 편익으로는 온실가스 배출을 줄여 지구 온난화를 억제하고 극단적인 기후 현상을 방지 또는 완화하는 것이다. 재생에너지를 확대하면 화석연료 사용을 감소시켜 미세먼지와 대기오염물질을 줄이고 인간과 생태계 건강에 긍정적인 영향을 미칠 수

있다. 또 기후변화에 따른 서식지 파괴가 줄어들어 동식물의 멸종 위기를 완화할 수 있으며, 자연순환 시스템의 균형을 회복하고 장기적으로 안정성을 제공할 수 있다. 경제적으로도 긍정적인 파급효과가 있을 수 있다. 재생에너지, 전기차, 에너지 효율화 기술 등과 같은 녹색 산업의 성장이 촉진될 것이며 관련 분야에서 일자리가 창출될 것이다. 화석연료 수입 의존도를 줄여 에너지 안보를 강화하고 외환 지출을 절감할 수도 있다. 장기적으로는 기후변화에 따른 재난 비용을 감소시키며, 지속 가능한 에너지는 화석연료 대비 유지 비용이 낮아 경제적이 될 수 있다.

탄소중립은 부수적인 편익도 따른다. 화석연료 사용 저감에 기인한 대기오염 감소로 호흡기 질환, 심혈관 질환 등 건강 문제가 줄어들 수 있으며, 기후변화에 따른 식량 위기, 물부족, 난민 발생 등을 예방하여 사회적 불안을 감소시킬 수 있다. 이런 측면에서 탄소중립은 환경, 경제, 사회 모든 측면에서 긍정적인 영향을 미칠 것이며, 기후위기를 넘어 지속 가능한 발전의 기반을 제공할 것이다.



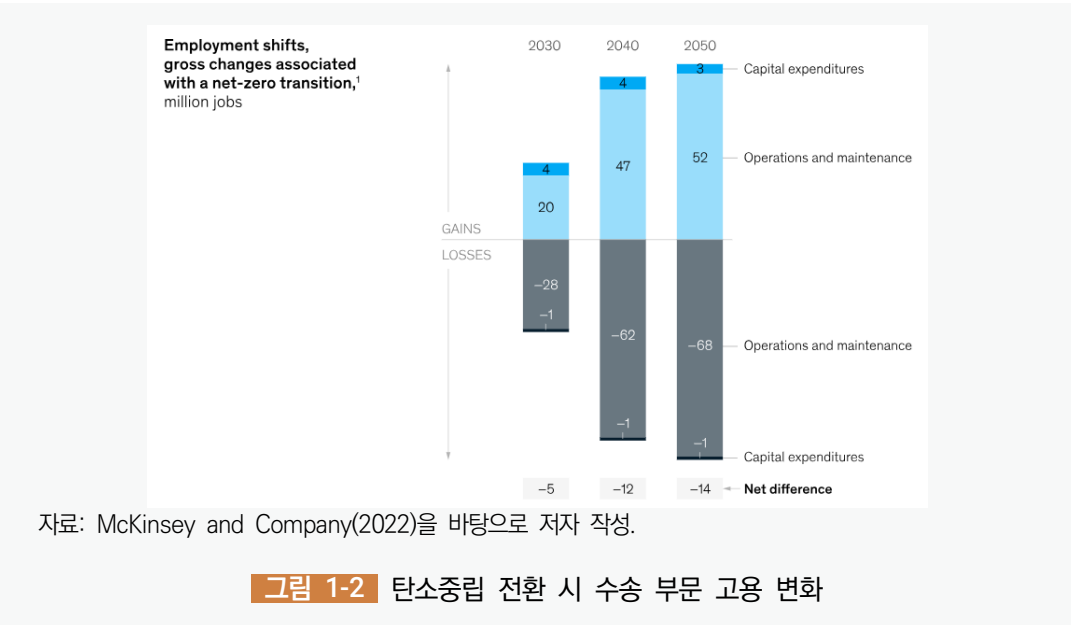


그림 1-2 탄소중립 전환 시 수송 부문 고용 변화

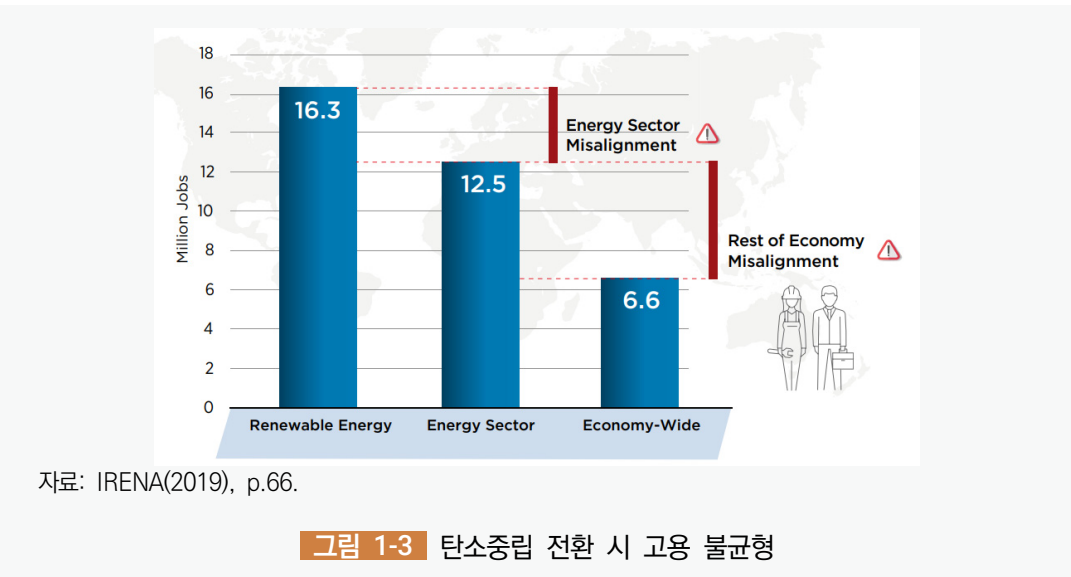


그림 1-3 탄소중립 전환 시 고용 불균형

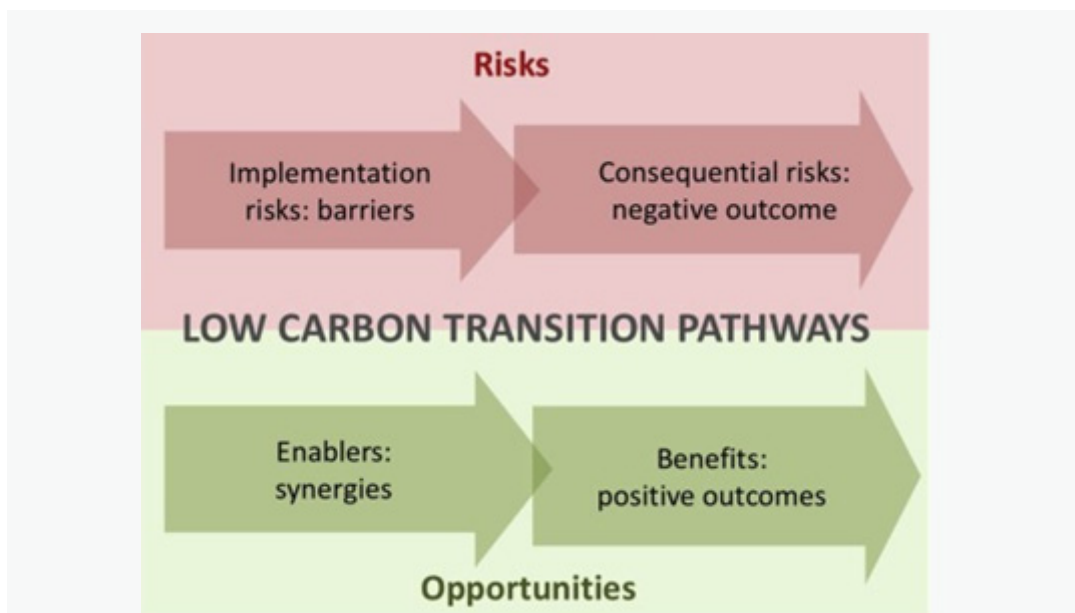
IPCC 6차 보고서(IPCC, 2023)는 지속가능발전을 위한 기후변화 적응과 온실가스 감축 행동 전략을 포함하는 기후탄력적 발전의 중요성을 강조하였다. 대다수 국가에서 온실가스 감축과 기후변화 적응에 별도로 대응하며 상호 간의 공편익 및 시너지를 적극적으로 고려하지 않고 있다. 탄소중립 및 기후변화 적응의 궁극적인 목표는 지속 가능한 발전이며 이를 위한 상호 간의 연계성 분석은 매우 중요한데도 목표 설정과 의사결정이 개별적으로 이루어져 왔다. 탄소중립을 위한 온실가스 저감은 비용 증가 및 편익성 저감이라는 직접적 비용 외 간접적 파급효과와 편익을 가지고 있다. 부문별 탄소중립 정책 이행에 따른 직접적 리스크는 사회적·경제적·환경적 측면에 파급되어 간접적 리스크가 발생한다. 기후변화 적응 정책 및 다른 국가 정책과 충돌하거나 시너지를 내기도 하며 건강, 수자원, 농업, 산림 등 사회경제 시스템 여러 부문으로 전파된다.

본 연구에서는 탄소중립 정책의 이행 과정(IR: Implementation Risk) 중 또는 결과적으로 발생할 수 있는 리스크(CR: Consequential Risk)를 분석해 기후변화 적응역량 및 지속 가능한 발전을 위한 정책적인 시사점을 제공하고자 한다. 대부분의 탄소중립 관련 연구는 온실가스 저감의 경제적인 영향 분석에 초점을 맞추어 진행되고 있다. 부문별 탄소중립 정책은 비용 증대 외에 많은 사회적·경제적·환경적 영향을 내포하며 부정적 영향을 최소화하고 긍정적 영향을 최대화해 정책 편익을 극대화 할 필요가 있다. 본 연구는 부문별 탄소중립 정책의 사회적·경제적·환경적 파급효과(CR)를 분석함으로써 지속 가능한 탄소중립을 이행하고 적응 정책과의 시너지를 극대화하는 것을 목표로 한다.

본 연구에서는 국내외 탄소중립 정책을 종합적으로 분석하고 에너지, 수자원, 농업, 산림 부문의 대표적 탄소중립 정책 이행에 따른 리스크(IR)와 사회적·경제적·환경적 파급효과(CR)를 분석하였다. 부문 간으로 파급되는 통합 리스크를 분석하고자 영농형 태양광, 수상 태양광, 육상풍력, 해상풍력의 대표적인 탄소중립 정책을 중점 분석하였다. 탄소중립 정책의 수용성을 분석하고자 전 국민 대상의 탄소중립 정책관련 온라인 설문 분석을 이행하였고, 이를 종합해 기후안전발전 경로로 이행하기 위한 시사점을 제시하였다.

2. 연구의 차별성

본 연구에서는 탄소중립 이행에 따른 리스크를 분석하였다. 그간 탄소중립 연구와 탄소중립 이행에 따른 직접적인 영향 분석에 집중되어 왔으나, 본 연구에서는 탄소중립의 궁극적인 목표인 지속가능발전을 위해 탄소중립의 부정적 영향을 최소화하고 긍정적 영향을 극대화하고자 탄소중립 이행에 따른 직접적 영향(이행 리스크, IR)과 이에 따른 파급효과(결과적 리스크, CR)를 분석하였다.



자료: Lieu et al.(2020), p.262.

그림 1-4 탄소중립에 따른 이행 리스크(IR)와 결과적 리스크(CR)



자료: 저자 작성.

그림 1-5 탄소중립에 따른 리스크 분석 부문

표 1-1 선행연구와의 차별성

연구명	목적	주요 내용
기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 (한화진, 2006)	기후변화의 영향을 종합적으로 분석, 평가 예측하는 과학적 체계 구축	- 부문별(농업, 산림, 산업, 보건, 수자원) 기후변화 영향평가 및 취약성 평가 방법론의 정립 - 국가 차원의 기후변화 적응 정책 수립
기후변화 통합영향평가 모형 체계 개발-정책연계모형 개발을 중심으로 (전성우/정희철, 2011)	부문별 영향의 확률적 예측 결과에 근거한 통합 영향평가 모형을 개발	- 다수의 IPCC 기후자료 및 RCM 수집 및 시공간 보정·상세화 방법 고찰 - 분야별 영향평가 모형체계 구축/검증 - 기후자료 시나리오를 이용한 다양한 분야의 확률적 기후변화 영향 예측
부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 기반구축 및 활용기술 개발 (송영일, 2021)	기후변화에 따른 영향 및 취약성, 리스크를 파악 가능한 평가 모형 구축	해양·수산 부문의 평가모형 및 결과 표출도구와 DB와 리스크 평가기법 개발을 통한 기후변화 통합 영향 및 취약성 평가 플랫폼 개발
국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 평가·구축 (채여라, 2021)	데이터 기반 폭염, 한파의 영향 분석 및 리스크 관리 방안 구축	- 부문별 리스크 영향요인 도출 - 국제기구 및 주요 국가 리스크 분석 방법 및 소통체계 현황 검토
본 연구	부문별 리스크의 영향전파 경로 분석을 통해 핵심 노드에 대한 적응역량 강화 방안 구축	- 탄소중립 이행 리스크 분석 - 부문별 탄소중립 이행 리스크의 직간접적 리스크 전파 경로 분석 - 탄소중립 이행 리스크의 통합적 전파 경로 분석

자료: 한화진(2006); 전성우 외(2011); 송영일(2021); 채여라(2021)을 바탕으로 저자 작성.

3. 연구수행 체계

본 연구의 1차 연도에는 폭염, 한파, 홍수, 가뭄 등의 기후 리스크와 팬데믹, 전쟁, 인플레이션 등 글로벌 리스크의 국내 전파 경로를 분석하고 이에 대한 적응역량 강화 방안을 제시하였다. 2차 연도인 본 연구에서는 탄소중립 이행에 따른 리스크를 조사하고 이에 따른 전파 경로를 분석하였다. 탄소중립 정책에 대한 종합적인 분석을 수행하고 에너지 부문을 중심으로 이행 리스크와 결과적 리스크를 분석하였다. 수자원, 농업, 산림, 건강 부문의 부문별 탄소중립 정책을 분석하고 이행 리스크와 파급효과를 분석하였다. 탄소중립 정책의 사회적·경제적·환경적 파급효과와 긍정적 기회, 다른 정책과의 충돌성 등을 종합해 기후안전사회로 전환하기 위한 안전한 탄소중립 실현과 기후변화 적응역량 강화를 위한 시사점을 제시하였다. 3차 연도에서는 기후 리스크, 글로벌 리스크, 탄소중립 이행 리스크가 동시에 복합적으로 작용하는 시나리오와 관련하여 전파 경로를 분석하고 적응역량 강화 방안에 대한 시사점을 도출할 계획이다.



제2장

탄소중립 정책과 이행 리스크

1. 탄소중립 이행 리스크 정의와 분류
2. 탄소중립 정책 현황
3. 탄소중립 정책의 이행 리스크
4. 이행 리스크 분석을 위한 정책 시나리오

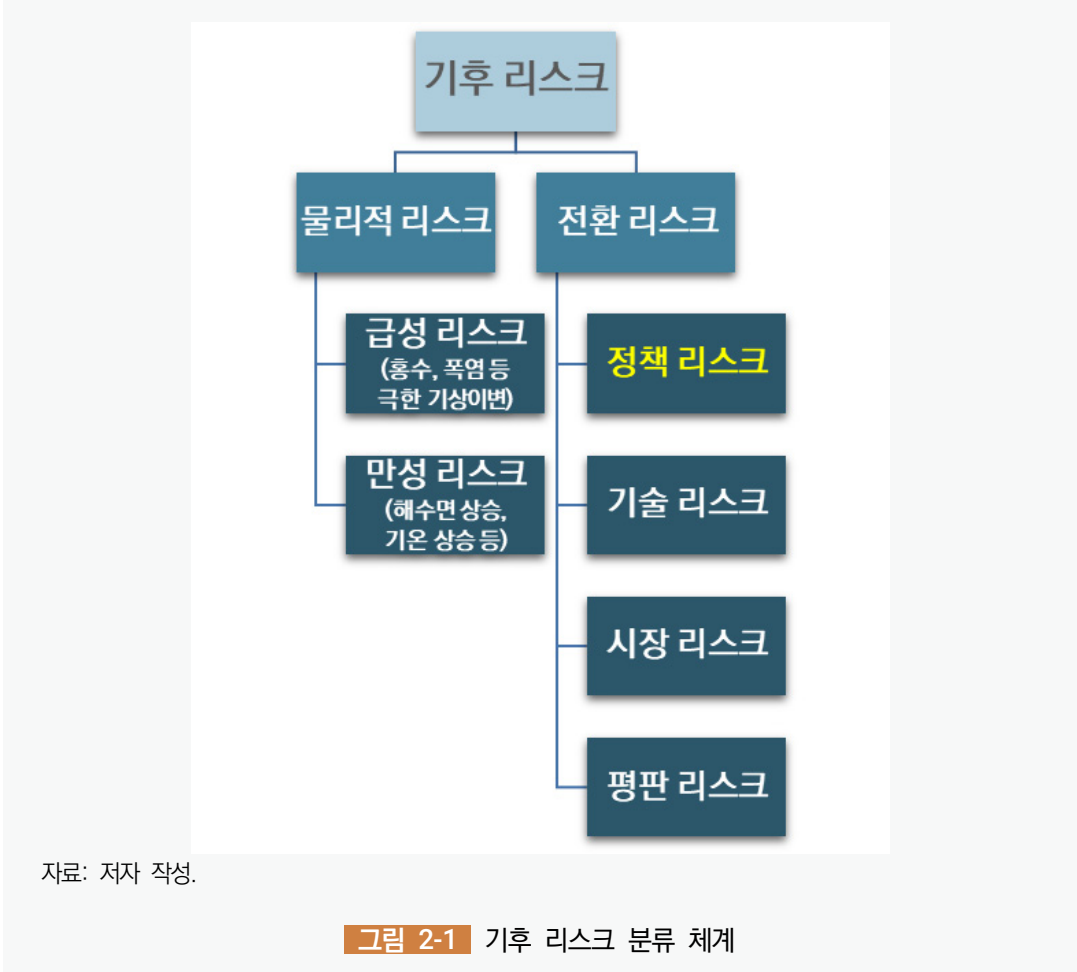
1. 탄소중립 이행 리스크 정의와 분류

기후변화에 따른 리스크는 크게 물리적 리스크(physical risk)와 전환 리스크(transition risk)로 구분된다. 세계 중앙은행과 금융기관이 자발적으로 참여한 네트워크(TCFD: Task Force on Climate-Related Financial Disclosures) 가이드라인에 따르면, 물리적 리스크를 홍수, 폭염 등 극한 기상이변으로 인한 급성 리스크와 기온 및 해수면 상승 등으로 인한 만성 리스크로 구분하여 기후변화에 따른 영향을 분석하고자 하였다. 한편 전환 리스크는 저탄소 경제로 전환하는 과정에서 발생하는 정책·사회·경제적 요소 변화로 인한 리스크를 의미하며, 크게 정책 리스크와 기술 리스크, 시장 리스크, 평판 리스크로 구분한다. 정책 리스크는 기후변화 완화 및 적응 정책에 대한 규제 등으로 발생할 수 있는 부정적 영향을 의미한다. 예를 들어 NDC를 비롯한 국가의 온실가스 감축 전략, 배출권거래제 및 탄소세를 비롯한 탄소가격제, 에너지 전환 등으로 발생할 수 있는 리스크가 있다. 기술 리스크는 저탄소 기술(재생에너지, 배터리, CCS 등) 개발 및 상용화에 대한 불확실성과 기존 고탄소기술의 경쟁력 약화 등을 포괄한다. 시장 및 평판 리스크는 특정 상품 및 서비스에 대한 수요·공급 변화, 고객 및 지역사회 인식 변화 등을 일컫는다.¹⁾

금융감독원(2021, p.2)의 ‘기후 리스크 관리 지침서’에서도 기후 리스크를 기상이변에 따른 물리적 리스크와 저탄소 경제로의 전환에서 발생하는 리스크로 구분하였다. 특히 금융 측면에서 공공정책 변화, 급진적 기술 개발, 고객 및 투자자 선호 변화 등으로 인한 금융 부문의

1) TCFD(2017), pp.5-6.

손실을 이행 리스크로 다룬다. 금융 분야의 환경 및 기후 리스크를 관리하고 지속 가능한 경제로의 전환을 지원하기 위해 설립된 네트워크(NGFS: Network for Greening the Financial System)에서는 공통 시나리오를 개발하여 기후 리스크에 따른 경제적 영향을 전망한다. 여기서 검토하는 전환 리스크 역시 기후 정책, 규제 및 기술 변화와 소비자 선호로 인한 리스크를 의미하며 금융적 측면의 손실을 주로 다룬다.



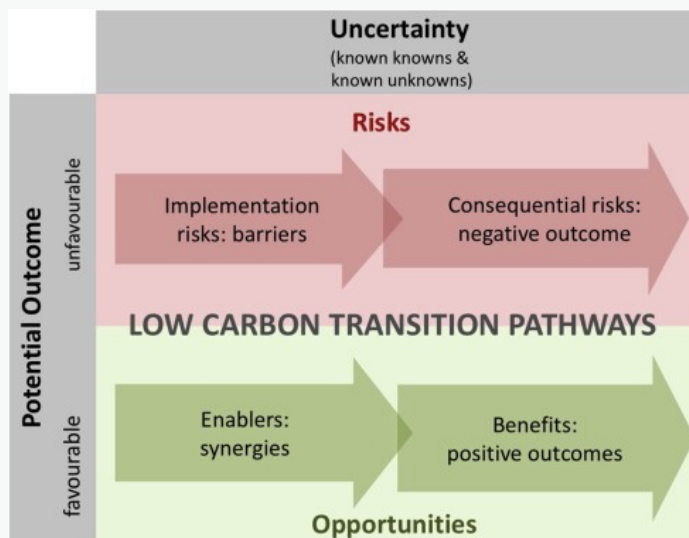
국내 다양한 기관에서도 기후변화에 따른 이행 리스크의 유형과 영향을 분석하였으나 대부분 금융시장과 거시경제에 미치는 영향을 주로 분석하였다. 박경훈 외(2021)는 기후 리스크와 이행 리스크가 국내 경제에 미치는 영향을 분석하고, 기후변화에 대응하는 대표 정책으로 탄소세가 거시경제에 미치는 영향을 분석하였다. 박종욱, 이나운(2021)은 기후변화 대응을 위한 탄소세가 산업별 배출량, 생산비용, 산업구조 등에 미치는 영향을 분석하였으며, 황인창 외(2021)는 산업의 기후변화 리스크를 확인하고자 물리적 리스크와 규제 리스크로서 탄소세의 거시경제 영향을 분석하였다. 김재윤, 전은경(2021)은 이행 리스크가 금융시스템의 건전성에 미치는 영향을 분석하였고, 박혜진(2023)은 배출권거래제 시행에 따른 주식수익률 관계를 바탕으로 이행 리스크가 금융 부문에 미치는 영향을 분석하였다.

표 2-1 기후변화 이행 리스크 유형별 잠재적 영향 예시

리스크	사례	잠재적 영향
정책 리스크	- 탄소배출 가격 인상 - 배출관리 관련 규제 강화	- 배출 비용 증가에 따른 생산 비용 증가 - 기존 화석연료 자산의 조기 상각 및 좌초자산화 - 배출규제 준수를 위한 설비 투자 등 자본 지출 증가
기술혁신 리스크	- 저탄소 기술 전환 실패 - 저탄소 제품 및 서비스 대체	- 저탄소 기술에 대한 연구 개발 비용 지출 - 기존 제품 및 서비스 수요 감소
시장 및 평판 리스크	- 에너지 가격 변동성 증가 - 소비자 및 투자자 선호 변화	- 투입가격 변화로 생산비용 증가 - 고탄소제품 수요 감소로 수익 감소 - 고탄소업체의 자금조달비용 상승

자료: TCFD(2017), p.10을 참조하여 저자 작성.

해외 연구에서도 저탄소 전환에서 발생하는 리스크에 대한 개념적 접근이 있었다. Lieu et al. (2020)은 저탄소 전환 경로 맥락(context)에서 리스크를 두 가지 관점으로 구분하였다. 이행 리스크는 저탄소 경로 이행(실행)에 대한 부정적 영향의 가능성이고, 결과적 리스크는 저탄소 경로 이행으로 발생하는 부정적 영향을 일컫는다. 두 리스크를 구분하는 것은 쉽지 않으며, 리스크가 대부분 독립된 방식으로 발생하지 않고 식별하기 어려운 원인과 결과에 기인한다. 예를 들어 대부분의 온실가스 감축 정책은 특정 기술을 지원하고 이 기술은 차례로 환경, 건강 등에 긍정적 영향을 미치고, 시장 및 경쟁관계에 있는 기술에는 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 지역사회에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 탄소 전환 경로에서 리스크는 영향을 미치는 측면에서 환경적, 사회적, 경제적, 정치적, 정책적, 기술적 요인으로 구분될 수 있다.



자료: Lieu et al.(2020), p.262.

그림 2-2 저탄소 전환 경로에서의 이행 및 결과적 리스크 프레임

Mayer et al.(2020)은 네덜란드의 태양광 발전 확대를 사례로 하여 리스크를 평가하였다. 이전 연구와 마찬가지로 이 연구에서도 리스크를 이행 리스크와 결과적 리스크로 구분하여 리스크를 프레임링(framing)하였다. 우선 이행 리스크는 태양광 발전 확대를 방해하는 시스템 및 시장 수준의 장벽을 의미하며, 크게 재정, 기술, 공간, 사회적 범주로 구분하였다. 재정적 측면은 신기술 투자 등에 대한 금융 제약을 의미하며, 기술 측면에서는 전력망, 네트워크 등에 대한 인프라 계획에서의 리스크로 분류하였다. 공간은 신규 설치 공간 계획 측면의 리스크를 의미하며, 사회적 측면으로는 고용 및 신규 직업에 대한 인력 가용성, 사회적 수용성 등을 예시로 들었다. 결과적 리스크는 태양광 발전 확대에 대한 결과적 영향을 의미하고, 거시경제적 비용 및 전력 가격 증가 등을 고려할 수 있다.

표 2-2 태양광 발전에서의 이행 리스크

리스크 부문	예시
재정	• PV 기술 투자 및 기존 전력 인프라 변경 및 확장 비용 및 재정적 제약
기술	• 재생에너지 변동성으로 인한 그리드(수요/공급) 불균형
공간	• 신규 설치 공간 활용
사회	• 고용 영향 및 신규 직업 가용성, 기존 발전 부문의 일자리 손실, 사회적 수용성

자료: Mayer et al.(2020), pp.364-365.

Bachner et al.(2020)은 오스트리아의 배출집약 산업(철강 및 전력)의 이해관계자를 대상으로 인터뷰를 진행해 탄소중립 이행 경로에서의 리스크를 평가하였다. 저탄소 전환에서 식별한 리스크는 이행 리스크(IR)와 결과적 리스크(CR)로 구분하였으며, 이행 리스크는 구현 과정의 장벽을 고려하고 결과적 리스크는 구현시 나타나는 의도치 않은 부정적 결과로 간주하였다. 하지만 리스크 유형을 구분하기에는 복합적인 특징이 있기 때문에 부문별로 구분하여 우선순위를 도출하였다. 부문의 경우 크게 에너지 인프라, 정책 및 규제, 환경 및 수용성, 시장, 기술로 구분하였다. 에너지 인프라 측면에서 가장 우선순위가 높게 평가된 리스크는 재생에너지 변동성에 따른 그리드의 안정성과 에너지 시스템의 유연성에 대한 우려이며, 그리드와 에너지 저장에 대한 투자가 부족함을 시사하였다. 정책 측면에서는 국가의 구체적인 기후와 에너지 전략이 부족하였으며 명확한 규제 간 프레임워크가 없다고 보았다. 환경 및 소비자 측면에서는 전환이 사회 정의에 기여해야 하는 소통의 부족을, 시장 측면에서는 명확한 재정적 인센티브가 없음을 높은 리스크로 보았으며, 이는 결국 기술 부문의 R&D 자금 부족 등으로 이어질 수 있다.

표 2-3 저탄소 전환 경로에서의 리스크

리스크	부문	잠재적 영향
이행 리스크 (IR)	에너지 인프라	- 경제적으로 정확한 가격이 없는 시장 구조(외부비용의 내재화 부족) - 관리 및 승인 절차의 복잡성
	정책/규제	- 국가 기후 및 에너지 전략 부족 - 정치적 리더십 부족 - 전력산업의 시장 왜곡 - 명확한 규제 간 프레임워크 부족 - 부적절하고 예측 불가능한 CO₂ 가격 - 예상치 못한 법률 변경
	환경/수용성	- 소비자를 위한 투자 및 계획 부족 - 분산형 시스템에 대한 투자 부족 - 기후 감축과 사회적 정의 사이의 상충 - 신규 투자 프로젝트에 대한 사회적 저항
	시장	금융시장의 리스크
	기술	- R&D나 기술 확대에서의 자금부족 리스크 - 정보 흐름 및 인프라 부족으로 인한 신기술 도입 시기의 불확실성 - 전환에 대한 불확실성
결과적 리스크 (CR)	에너지 인프라	- 투자 부족 및 고비용으로 인한 전력망 불안정성 - 저장공간 부족
	환경/수용성	- 전환 과정에서 행동 변화를 고려하지 않음 - 자원 소비를 고려하지 않은 프로젝트 계획 - 저소득층에 대한 신기술의 접근성 부족
	시장	- 시장 역학/경쟁조건 등의 과소평가 - 신기술 구현 시 가격 리스크 - 가계가 전환비용의 큰 부분을 부담

자료: Bachner et al.(2020), p.326.

선행연구를 바탕으로 본 연구에서 분석하고자 하는 탄소중립 이행 리스크는 기후변화 완화 및 적응 등 탄소중립 정책 이행으로 발생할 수 있는 잠재적인 영향으로 정의한다. 특히 본 연구에서는 선행연구를 기반으로 탄소중립 이행 리스크를 단계적 측면에서 크게 ‘이행 과정 리스크(IR)’와 ‘이행 결과 리스크(CR)’로 구분하였다. 과정 리스크는 탄소중립 이행 과정에서 발생하는 리스크이며, 탄소중립 정책의 실행 및 목표 달성, 기술 개발, 시스템 전환에서의 불확실성을 포괄한다. 결과 리스크는 탄소중립 실현으로 인한 결과 측면에서 탄소중립 정책을 이행함으로써 발생할 수 있는 생태계 및 인간, 건강, 경제, 사회, 환경 등에 미치는 부정적 영향을 일컫는다.



탄소중립 이행 리스크에 따른 파급효과는 영향을 받는 측면을 고려하여 정책, 기술, 사회, 경제(시장), 환경, 건강으로 구분하였다. 정책 부문의 이행 리스크 파급효과는 타 정책과의 충돌 및 정책 이행의 불확실성, 정책 이행으로 발생할 수 있는 부정적 영향(side-effect)을 일컫는다. 기술 부문의 이행 리스크 파급효과는 신기술 개발의 불확실성, 기존 기술의 경쟁력 약화, 급진적 기술 개발로 발생할 수 있는 부정적 영향을 의미한다. 경제 및 시장 측면의 리스크 파급효과는 자원 분배 및 경쟁관계에 있는 기존 시장(수요) 변화 및 경제 전반에 걸친 부정적인 영향을 의미하며, 사회적 측면의 리스크 파급효과는 지역사회를 비롯한 다양한 사회 집단에 미치는 부정적 영향(수용성, 불평등 등)을 의미한다. 환경에 미치는 리스크 파급효과는 탄소중립 정책 이행이 타 환경 분야에 미치는 부정적 영향 및 충돌을 의미하며, 마지막으로 건강 부문의 리스크 파급효과는 오염물질 변화 및 사회적 영향으로 인한 건강상의 위험을 포괄한다.

표 2-4 탄소중립 이행 리스크로 인한 부문별 잠재적 영향

부문	잠재적 영향
정책	• 타 정책과의 충돌 및 정책 이행의 불확실성, 정책 이행으로 발생할 수 있는 부정적 영향(side-effect)
기술	• 신기술 개발의 불확실성 및 기존 기술의 경쟁력 약화, 급진적 기술 개발로 발생할 수 있는 부정적 영향
사회	• 지역사회를 비롯한 다양한 사회 집단에 미치는 부정적인 영향(수용성, 불평등 등)
경제(시장)	• 자원 분배 및 경쟁관계에 있는 기존 시장, 경제 일부 및 전체에 미치는 부정적인 재정적 영향
환경	• 탄소중립 정책 이행으로 인해 환경 분야에 미치는 부정적 영향 및 충돌
건강	• 오염물질 변화 및 사회적 영향으로 인한 건강상의 위험

자료: 저자 작성.

2. 탄소중립 정책 현황

가. 탄소중립·녹색성장 기본계획²⁾

국내 탄소중립 정책의 대표 계획에는 2023년 4월에 발표한 『탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획』이 있다. 이 기본계획에는 부문별 온실가스 감축 대책과 기후변화 적응대책, 녹색산업 성장, 정의로운 전환, 지역 주도의 탄소중립·녹색성장 확산 등 전 분야에 걸쳐 전략이 제시되었다.

우선 부문별 중장기 감축 대책에는 주요 부문별 감축 추진방안과 과제를 나열하였다. 전환 부문은 석탄발전을 재생에너지 및 원전으로 대체하는 청정에너지 전환 정책이 대표적이며, 재생에너지 기반 확충, 전력수요 효율화, 전력수급체계 혁신 등을 고려하였다. 농축수산 부문에는 저탄소 농업 구조전환, 농업(재배)·축산 분야 온실가스 배출 감축, 에너지 전환과 에너지 이용 효율화 및 농촌 재생에너지 확대 등을 다루었다. 수소 부문에는 수소 생산기지와 공급망 구축, 수소 인프라 및 수소 활용 확대, 수소산업 생태계 기반 강화를 위한 전략을 제시하였다. 흡수원 부문에는 산림 부문의 탄소 흡수·저장 기능 증진, 흡수원의 체계적 복원 관리 등 국내 온실가스 감축을 위한 전략을 다양하게 제시하였다.

부문별 감축정책	전 환	산 업	건 물	수 송	농축수산
	· 석탄발전 감축 · 원전+재생e↑ · 수요 효율화	· 핵심기술 확보 · 기업지원 · 배출권 고도화	· 제로에너지 건축물 확대 · 그린리모델링	· 무공해차 보급 · 철도·항공·해운 저탄소화	· 저탄소 농업구조 전환 · 어선 및 시설 저탄소화
	폐기물	수 소	흡수원	CCUS	국제감축
	· 지속가능한 생산·소비체계 · 자원 순환 이용 확대	· 청정수소 공급 확대 · 수소활용 생태계 강화	· 산림순환경영 · 내륙·연안습지 복원 및 보호	· 법령, 저장소 등 인프라 마련 · 기술확보상용화 R&D	· 민관합동지원플랫폼 · 부문별 사업 발굴 및 이행

자료: 관계부처 합동(2023), p.24.

그림 2-4 제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획의 부문별 (대표)감축정책

2) 관계부처 합동(2023), pp.25-95.

나. 부문별 탄소중립 정책

국내 탄소중립 정책의 이행 리스크를 도출하고자 『제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획』의 주요 내용뿐 아니라 부처별 탄소중립 이행 전략 및 관련 정책을 검토하였다. 예를 들어 전환 부문에서는 국가 중장기 전력수급 전망 및 발전 계획 등을 담은 ‘전력수급기본계획’을 검토하였고, 농업 부문에서는 ‘2050 농식품 탄소중립 추진전략’을, 산림 부문에서는 ‘2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략’을 검토하였다. 수자원 부문에서는 ‘물관리분야, 공공주도의 과감한 2050 탄소중립 전략’과 ‘K-water 2050 탄소중립 로드맵’ 등을 검토하였다. 탄소중립 이행을 위한 부문별 구체적인 전략 및 목표를 탄소중립 기본계획의 세부 정책과 매칭하였다.

1) 전력수급기본계획³⁾

전환 부문의 대표 정책인 ‘전력수급기본계획’은 2024년 기준 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』을 따르고 있으며, 2024년 10월 기준 『제11차 전력수급기본계획』의 초안이 발표된 상태이다. 『제11차 전력수급기본계획(안)』은 첨단산업 성장 및 전기화 등을 고려하여 중장기 전력수요를 과학적으로 산정하고 탄소중립 달성과 공급의 안정성 등을 고려하여 전력 구성을 계획하고, 수요 관리와 설비 확충으로 안정적인 전력 공급을 보장하려는 전략이다. 주요 내용으로는 ①전력 수요: 데이터센터, 전기화, 첨단산업 등의 신규 수요를 반영하여 2038년 목표수요 129.3GW 전망, ②전력 공급: 대형원전(3기)을 포함하여 신재생에너지(태양광·풍력) 보급 확대 등 무탄소 발전 강화 등이 있다. ‘전력수급기본계획’에서 제시하는 구체적인 목표와 발전 설비 확충 계획을 반영하여 『제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획』의 전환 부문 탄소중립 전략의 구체적인 목표를 정리하였다.

2) 2050 농식품 탄소중립 추진전략⁴⁾

농림축산식품부는 ‘2050 농식품 탄소중립 추진전략’을 2021년에 세운 바 있으며, 주요 내용이 『제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획』과 유사하게 구성되어 있다. 본 추진전략에서는 2050 탄소중립 목표에 맞춰 농식품 부문의 지속 가능한 전환이 필요하다고 보았다. 주요 추진 방향으로는 ①저탄소 농업구조 전환, ②메탄가스 등 온실가스 배출 저감, ③농촌 지역 재생에너지 확대 등 에너지 전환, ④탄소 저장 능력 강화 등이 있다.

3) 산업통상자원부(2023), p.36. p.40, p.43; 산업통상자원부(2024).

4) 농림축산식품부(2021).

3) 2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략⁵⁾

산림청에서는 ‘2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략’을 2021년에 발표하였다. 산림 부문의 경우 탄소중립 달성을 위한 대표적인 흡수원으로서 산림의 순환경영과 보전·복원을 통해 온실가스 흡수량을 확대하고자 한다. 산림부문의 4대 정책 방향 및 핵심과제로 ①신규 산림탄소흡수원 확충, ②산림 탄소흡수능력 강화, ③목재 및 산림바이오매스 활용, ④산림 탄소흡수원 보전 및 복원 등이 있다. 산림 분야의 탄소중립을 위해 단기적(~2030년)으로는 탄소흡수량 기반을 구축하고, 중기적(2031~2040년)으로는 산림 복원 확대를 통해 장기적(2041~2050년)으로 탄소흡수량을 극대화하고자 한다.

4) 수자원 부문의 탄소중립 로드맵⁶⁾

수자원 부문의 경우 한국수자원공사의 ‘K-water 2050 탄소중립 로드맵’과 국가물관리위원회의 ‘물관리분야, 공공 주도의 과감한 2050 탄소중립 전략’이 대표적인 탄소중립 정책으로 발표되었다. 물관리 분야의 탄소중립 실현을 위한 4대 추진과제로는 ①물 관련 신재생에너지(수열 에너지, 수상태양광, 바이오가스, 수소 등) 육성, ②디지털·지역 특화 물산업 육성 기반 구축, ③저에너지 물공급 기술 및 담수화 기술 등 연구개발(R&D) 강화, ④제도 개선이 있다. 특히 수자원 분야에서는 바이오가스 및 그린수소 생산으로 탄소중립을 실현하고자 한다.

5) 산림청(2021).

6) 한국수자원공사, “K-water 2050 탄소중립 로드맵”, 검색일: 2024.6.23.

표 2-5 제1차 탄소중립 로드맵에 기반한 부문별 성장률 전망치

정책	부문	잠재적 영향	구체적 목표
제1차 탄소중립· 녹색성장 기본계획	전환	석탄발전 감축	· '36년까지 석탄발전 28기 폐지 및 LNG발전으로 전환 추진
			· 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』 - 노후 석탄 LNG 대체에 따른 설비폐지[석탄발전 설비용량: ('23년) 40.2GW→('26년) 37.6GW→('30년) 31.7GW→('36년) 27.1GW]
			· 노후 석탄 28기 LNG 전환[LNG 발전 설비용량: ('23년) 43.5GW→('26년) 52.4GW→('30년) 58.3GW→('36년) 62.9GW]
			· 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』 - 원전 계속운전 및 신규원전 준공[원자력 발전 설비용량: ('23년) 26.1GW→('26년) 28.9GW→('30년) 28.9GW→('36년) 31.7GW]
		재생에너지 확대	· "2030 NDC" 신재생에너지 발전 비중 ('22년) 9.2% → ('30년) 21.6%+α
			· "2050 탄소중립 시나리오" 2050 재생에너지 발전 비중(A안: 70.8%, B안: 60.9%)
		재생에너지 확대	· 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』(신재생에너지 현실적 보급 전망) - 신재생 발전 설비용량: ('23년) 32.8GW→('26년) 44.8GW→('30년) 72.7GW→('36년) 108.3GW
			- '36년 실효 용량: (태양광) 9,132MW, (풍력) 750MW, (수력) 481MW, (바이오)1,029MW, (연료전지)2,716MW, (IGCC)346MW - 신재생에너지 발전비중: ('30년) 21.6%(134.1TWh), ('36년) 30.6%(204.4TWh)
		해상풍력 확대	· 『제11차 전력수급기본계획(2024-2038)』 - '30년 태양광·풍력 설비용량: 72GW, '38년 재생에너지 보급 전망: 119.5GW(태양광·풍력 115.5GW)
			- 신재생에너지 발전비중: ('30년) 21.6%(138.4TWh), ('38년) 32.9%(230.8TWh)
(1) 부문별 증장기 감축 대책		해상풍력 확대	· 태양광·풍력 비율: ('21) 87:13 → ('30) 60:40
			· 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』 - 신재생에너지 설비용량(풍력): ('30년) 19.3GW, ('36년) 34.1GW - 신재생에너지 실효용량(풍력): ('30년) 425MW, ('36년) 750MW - 신재생에너지 발전비중(풍력): ('30년) 38.9TWh(신재생에너지 기준 29%), ('36년) 77.3TWh(신재생에너지 기준 37.8%)
		육상풍력 확대	· 『제11차 전력수급기본계획(2024-2038)』 - '30년 태양광·풍력 설비용량: 72GW, '38년 재생에너지 보급 전망: 119.5GW(태양광·풍력 115.5GW)
			· 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』 - 신재생에너지 설비용량(풍력): ('30년) 19.3GW, ('36년) 34.1GW - 신재생에너지 실효용량(풍력): ('30년) 425MW, ('36년) 750MW - 신재생에너지 발전비중(풍력): ('30년) 38.9TWh(신재생에너지 기준 29%), ('36년) 77.3TWh(신재생에너지 기준 37.8%)

표 2-5의 계속

정책	부문	집재적 영향	구체적 목표
제1차 탄소중립· 녹색성장기본 계획 (1) 부문별 증상기 감축 대책	전환	영농형 태양광 확대	『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』 - 신재생에너지 설비용량(태양광): ('30년) 46.5GW, ('36년) 65.7GW - 신재생에너지 실효용량(태양광): ('30년) 6,463MW, ('36년) 9,132MW - 신재생에너지 발전비중(태양광): ('30년) 58.9TWh(신재생에너지 기준 43.9%), ('36년) 82.2TWh(신재생에너지 기준 40.2%) 『제11차 전력수급기본계획(2024-2038)』 - '30년 태양광·풍력 설비용량: 72GW, '38년 재생에너지 보급 전망: 119.5GW(태양광·풍력 115.5GW)
		수상태양광 확대	"K-water 2050 탄소중립 로드맵(4대 전략 12대 이행과제)" - (수상)태양광 발전시설('30) 2.6GW 확대)
		수소·암모니아 혼소발전증대	- 암모니아 혼소율 ('22년) 0% → ('30년) 20% 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』 - 공급 및 비용을 고려한 수소·암모니아 발전량 결정(수소·암모니아 발전량: ('30년) 13TWh→('36년) 47.4TWh]
		청정수소 생산	"K-water 2050 탄소중립 로드맵(4대 전략 12대 이행과제)" - 그린수소 확대(2050년까지 연간 3만 4천 톤 생산)
	농축수산	저탄소 농업기술 (디지털·그린·바이오 기술을 활용)	- 스마트 농업 확산, 그린바이오기술(대체식품, 마이크로바이옴 등)을 활용한 저탄소 농업기술 개발 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 대체식품 확대를 통해 2030년까지 6.3만 톤 감축 - DNA 기반 정밀농업 확산[정밀 농업기술 보급 ('30년) 10% → ('40년) 30% → ('50년) 60%]
		친환경농산물 생산·유통·소비 활성화	- 친환경농산물 생산 유통 소비 활성화 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - (생산) 환경친화적 농업 확산[친환경농업 실천 면적(전체 경지면적 대비 %): ('30년) 12 → ('40년) 20 → ('50) 30] - (유통) 농식품유통거리 축소[로컬푸드직매장: ('20년) 554개소 → ('30년) 1,200개소 → ('40년) 1,500개소 → ('50년) 1,800개소] - (소비) 식생활 개선 및 음식물 낭비 저감[음식폐기물 발생량 저감: ('19년) 14,317톤/일 → ('30년) 12,885톤/일 → ('40년) 10,737톤/일 → ('50년) 7,158톤/일]
		농물관리 기술 개발 보급	- 저탄소 농물관리 모델 개발, 배출계수 구축 등 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 농물관리를 통해 2030년까지 54만 톤 감축 - 2주 이상 간단관개비중: ('19년) 40.3% → ('30년) 61.1% - 논물 양개 대기: ('30년) 간단관개면적의 10%

정책		부문	잠재적 영향	구체적 목표	표 2-5의 계속
제1차 탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1) 부문별 증상기 감축 대책		농축수산	화학비료 (질소·질비료) 사용 감축	- 질소·질비료 감축: 시비처방전, 비료사용 매뉴얼, 친환경 직불 확대 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 질소·질비료 감축을 통해 2030년까지 26.7만톤 감축 [질소·질비료 사용량: ('17년) 149kg/ha → ('30년 이후) 115kg/ha]	
			바이오차개발· 보급을 통한 토양 탄소 저장능력 제고	- 바이오차를 활용한 탄소저장 기능 강화 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 바이오차 활용 2030년까지 5.8만CO₂eq톤 감축[('40년) 6.2 → ('50년) 6.5] "축산업 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략" - 축분 바이오차 활용 농경지 탄소격리 2030년까지 15만 톤	
			저메탄사료 및 저단백사료 개발·보급	- 저메탄사료, 적정단백질 사료 보급 확대 "축산업 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략" - 축종별 생산성 향상으로 2030년까지 24만 톤 감축 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 저메탄사료 보급률(2세 이상): ('20년) 0% → ('30년) 30% → ('40년) 65% → ('50년) 100% - 양질조사로 공급: ('20년) 41.2% → ('30년) 45% → ('40년) 50% → ('50년) 55%	
			생산성 향상을 통한 온실가스 및 가축분뇨 저감	- 생산성 향상을 통한 단위당 배출량 저감 - ICT 장비 도입 등을 통한 적정 투입 사육구조 확립 "축산업 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략" - 축종별 생산성 향상으로 2030년까지 24만 톤 감축 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 스마트축사 보급률(%): ('30년) 30 → ('40년) 40 → ('50년) 50 - 소 사육기간 단축: ('26년) 29개월 → ('30년) 28개월	
			가축분뇨 활용 확대(에너지화)	- 정화처리 확대, 온실가스 배출량 산정 방식 고도화 - 가축분뇨 에너지화 확대 - 가축분뇨의 산업용 소재(바이오 차 등) 활성화 기반 마련 "축산업 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략" - 분뇨처리방식 개선 2030년까지 220만 톤 감축 - 2030년까지 농경지 분뇨 투입량 저감(정화처리 25%+에너지화 15%) 40% 확대 → 농경지토양 비점오염관리를 통한 온실가스 감축 가능 - 비농업계이용(정화처리·에너지화 비율) 비중: ('30년) 33% → ('40년) 34% → ('50년) 35%	

표 2-5의 계속

정책	부문	잠재적 영향	구체적 목표
제1차 탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1) 부문별 증강기 감축 대책	농축수산	시설농업의 저탄소 에너지 전환	- 시설원에 에너지 이용실태 DB 구축 - 에너지절약형 기준 설정, 에너지 절감시설 개발 보급 - 집단화된 단지중심의 재생에너지 보급 확대 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 에너지절감시설 보급: ('19년) 22,821ha → ('30년) 25,259ha → ('40년) 27,990ha → ('50년) 30,452ha - 재생에너지시설 보급: ('19년) 849ha → ('30년) 1,196ha → ('40년) 1,511ha → ('50년) 1,826ha - 농산물 유통시설 에너지 효율화(저온시설 고효율 에너지 장치·장비 사용: ('21년~) 권장 → ('31년~) 단계적 확대 → ('50년) 의무화) - 전기 및 수소용 농기계 연구 개발 추진 - 전기 및 수소용 농기계 보급 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - 임대용 농기계 보급(2030년까지 5,000대), 13년 이전 노후 농기계 조기 폐차 지원 - 경유/등유 수요 감소를 통해 2030년까지 3.5만 톤 감축 - 고효율에너지 설비를 통해 2030년까지 1.4만 톤 감축 - 전기 및 전기·수소용 농기계 보급: ('30년) 5,000대 → ('40년) 15,000대 → ('50년) 25,000대
		친환경 농기계 개발·보급	- 영농형 태양광 도입 기반 구축 - 주민참여, 이익 공유형 재생에너지 사업 추진 - 농식품부(2024.4.29) "영농형 태양광 도입전략" 발표 (정량적 목표 없음. 기반 조성에 초점) - 마을 발전소, 가공유통시설 등에 재생에너지 설치 지원 "2050 농식품탄소중립 추진전략" - RE100실증지원(2022~2025년) 사업으로 12개소 시범 추진
		농촌마을 RE100 추진	- 숲가꾸기사업 확대: ('21년) 21만ha → ('50년) 48만ha "2050탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" 경제림 중심의 산림순환경영 활성화 - 전체숲가꾸기: ('30년) 300천ha, ('50년) 480천ha - 큰나무가꾸기: ('30년) 100천ha, ('50년) 288천ha - 국산목재생산확대: ('20) 440만m³ → ('50년) 800만m³ - 목재생산량: ('30년) 550만m³, ('50년) 800만m³
	흡수원	조림, 숲가꾸기, 목재수확 확대를 통한 흡수기능 강화	

표 2-5의 계속

정책	부문	잠재적 영향	구체적 목표
제1차 탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1) 부문별 증상기 감축 대책	흡수원	임도, 임업기계 등 산림순환경영 기반 구축	30년까지 임도밀도를 현재의 1.8배 수준으로 증대 "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" 경제림 중심의 산림순환경영 활성화 - 경제림임도: ('30년) 8.96m/ha, ('50년) 16.0m/ha
		고부가가치 목재이용 활성화로 탄소 저장고 확대	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" 목재 수요 공급 선순환 체계 구축 1인당 연간 목재사용량(m³): ('30년)1.2, ('50년)2.0 - 연간 HWP 탄소저장량(CO₂): ('30년)150만, ('50년)220만
		미이용 산림바이오매스의 재생에너지 활용	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" - 산림바이오매스의 지속 가능한 이용과 관련 산업 육성 [미이용산림바이오매스생산량: ('30년)150만톤, ('50년)300만톤]
		바다숲 확대 조성 및 조성방안 다각화	바다숲조성 면적: ('22년) 292km² → ('30년) 540km²
		산림의 생태적 복원 및 보호지역 확대	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" - 산림보호지역 관리 선진화[보호지역: ('30년)100만ha, ('50년)120만ha] "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" - 섬 지역 산림생태계 가치 증진[섬 지역 복원 면적(ha, 누계): ('30년) 805, ('50년) 2,505] "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" 남북산림협력력을 통한 탄소흡수원 확충 - 남북산림협력: 산간나지 5만ha, 황폐산지 142만ha, 임목지 677만ha
		산불, 산사태, 병해충 등 산림재해 예방 및 최소화	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" 산림재해 예방 및 피해 최소화 - 산불 평균피해면적: 2,241ha('20~'30년), 1,037ha('31~'50년) - 산사태 평균피해면적: 400ha('20~'30년), 300ha('31~'50년) - 병해충 평균피해면적: 66천ha('20~'30년), 22천ha('31~'50년)
		도시숲 조성, 유휴토지 조림 등 신규 흡수원 확충	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" - 도시숲조성 확대 및 체계적 관리[1인당 생활권 도시숲: ('30년)15㎡, ('50년)20㎡] "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" - 유휴토지 나무심기 확대[유휴토지 나무심기: ('30년)500ha, ('50년)1500ha] - 덤불수터, 4대강 수변구변매수토지에 습지 및 생태숲 등 흡수원 조성 ('20년) 29.66km² → ('30년) 83.75km² → ('50년) 115.92km²

표 2-5의 계속

정책	부문	잠재적 영향	구체적 목표
제1차 탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1) 부문별 증상기 감축 대책	LULUCF	산림 분야 산림 활용 탄소저감활동 (REDD+) 확대	“2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략” - 해외산림협력력을 통한 탄소흡수원 확충(해외산림협력: 500만 톤 규모의 감축실적 확보)
	생태계	생물다양성 증진 및 생태계 건강성 증진	“2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략” 기후위기 대응 미래수종 적응 확대 - 채종원산갱신조림: (‘30년)10천ha, (‘50년)16천ha
제1차 탄소중립· 녹색성장 기본계획 (2) 기후변화 적응대책	수자원/ 재난관리	과학기반 기후위기 감시 예측 및 적응정보 고도화	기후위험지도 구축을 통해 적응정보 고도화
		기후재난 위험을 극복한 안전사회 실현	- 홍수 예경보시스템 신속성 강화(‘21년 3시간 전 → ‘25년 6시간 전) - 기후위기 적응형 인프라 개선 확충, 소하천설계빈도(최대 100년 → 200년) - 댐-보-하굿둑연계 운영, 기상기후 전망(현 1~3개월 → 3개월 이상), 시설 설계기준 강화
		홍수 가뭄에 대비한 물안보강화	가뭄취약지도 구축, 물 재이용 활성화, 데이터 기반 물순환관리체계 구축 지원
		자연재난 신속대응 체계 구축	하천지역 배수시설 원격 제어 시스템 확충, 노후 저수지 비상수문 설치 확대(~‘50년)
		재난대응 인프라 확대	- 침수 예방 인프라 확대 [대심도 빗물터널 추가설치(강남, 광화문) 및 하수관로정비·지하방수로(도림천)·강변저류지(목감천) 신설] - 수원연계(도수로) 및 대체수자원(지하수저류지) 확보 기물 대응기반 강화

표 2-5의 계속

정책	부문	잠재적 영향	구체적 목표
제1차 탄소중립·녹 색성장 기본계획	수자원	공공부문이 선도하는 지역단위 탄소중립·에너지 효율화 사업 확산	“K-water 2050 탄소중립 로드맵(4대 전략 12대 이행과제)” - 광역상수도 탄소중립(고효율 설비 교체(변압기, 전동기 등)) - 지방상수도 탄소중립(에너지 저감 기술) - 지방상수도 탄소중립(지방상수도 관망정비를 통한 유수율 개선) “K-water 2050 탄소중립 로드맵(4대 전략 12대 이행과제)” - 친환경 수력발전 - 수열에너지 보급[조력발전] (‘30년) 435.6MW 전력 개발
		물 관련 신재생에너지 (수열, 태양광, 바이오가스, 수소) 활성화	- 공공 건축물 수열에너지 시범적용 - 민간건축물 수열에너지 보급 지원(‘22~’25년) - 수상태양광 확대(∼’30년 2.1GW) - 정수장소수력발전을 활용한 수소 생산 시범사업
		물환경분야 기초시설 온실가스 저감 및 그린수소 생성사업 추진	- 스마트 하수도 관리체계 구축(33개소)을 위한 스마트 생태공장 구축 사업(100개소) 추진 - 하수처리시설 등 통합 바이오가스 시설 확충(96개소) 및 그린수소 생성 사업 추진(27개소) - 하폐수열에너지 활용 시범사업(1개소) 추진
		물순환전과정 효율적인 물관리 (그린인프라, 청정에너지, Net-zero)	- 저탄소 그린인프라전환(수질, 생태계 등), 태양광사업[∼’28년 10.5GW(수상9.4, 육상1.1)], 수열에너지(∼’28년 1.1GW) - Net-Zero수도사업장 구현(43개)
(5) 지역 주도의 탄소중립·녹 색성장 확산		하이테크 산업 전환 기술투위기 대응형 물관리시스템 구축	디지털 기반 스마트 관리체계 구축(48개 광역 및 161개 지방 상수도 연계)
		미래 친환경 담수와 융합 혁신	친환경 탄소중립 담수기술 개발(‘23~’30년)

주: 기본계획상의 모든 부문4을 다루지 않고 전환, 농축수산, 흡수원, 수자원 부문을 대표하여 기술.
 자료: 관계부처 합동(2023), pp.25~109, p.148; 산업통상자원부(2023), p36. p.40, p.43; 한국수자원공사, “K-water 2050 탄소중립 로드맵”을 참고하여 저자 작성.

3. 탄소중립 정책의 이행 리스크

본 절은 탄소중립 정책 이행에 대한 부문별 영향 경로 파악을 위한 기초 작업으로, 탄소중립 정책 이행 과정 및 결과에 따른 리스크(요인) 및 부문별 직간접 영향(파급효과)를 도출하였다. 탄소중립 이행에 따른 리스크 요인은 온실가스 배출량, 에너지 수요, 에너지 가격, 발전 믹스, 식품 수요, GDP, 투자, 농업 수요, 농업 생산량, 토지 피복도, 정책(행정) 비용, 무역 등으로 매우 다양하다. 이를 포괄하고자 앞서 탄소중립 정책의 이행 리스크를 두 가지 리스크(과정 및 결과)로 구분하였고, 영향 부문은 사회, 경제, 환경, 정책, 기술, 건강 측면으로 구분하였다. 예를 들어 경제적 측면에는 전기요금 인상이 있으며, 사회적 측면에는 석탄화력 노동자 및 지역 주민 갈등이 있다. 환경적 측면에는 대기오염물질 배출량 감소가 있고, 기술적 측면에는 재생에너지 간헐성에 따른 계통 출력 불안정이 있다. 정책적 측면에는 환경영향평가 등 규제 환경 리스크가 있고, 마지막으로 건강 측면으로는 저소득 계층 극한 기후 대응력 감소, 위험 노출 가능성 증가 등의 영향을 검토할 수 있다.

대표적으로 탄소세 및 배출권거래제 등 탄소가격제 강화 정책 이행 과정에서 정책적 측면으로는 기존 타 정책과 상충 및 중복으로 행정비용이 발생할 수 있으며, 기술적 측면으로는 신기술 개발 및 저탄소 기술로의 전환에 대한 불확실성이 발생할 수 있다. 또한 사회적 측면으로는 탄소가격 제도의 사회적 수용성이 낮거나 행동 변화가 부족하여 탄소배출을 감축하는데 어려움을 초래할 수 있다. 이로 인해 결과적으로 저탄소 신규 설비 및 원자재 비용이 증가하고 탄소집약적 산업의 자산가치가 하락하는 등 생산 비용이 증가하여 물가상승을 비롯해 경제에 부정적 영향을 초래할 수 있다. 반면 CCS를 비롯한 신기술 투자 증가로 기술 개발 및 상용화 시기가 앞당겨져 탄소배출 감축에 긍정적 영향을 줄 수 있다. 또한 탄소비용이 증가해 석탄화력발전이 축소하거나 탄소집약적 산업의 배출량이 감소하면, 미세먼지 등 대기 오염 개선을 유도하여 건강 부문에 긍정적 영향을 줄 수 있다.

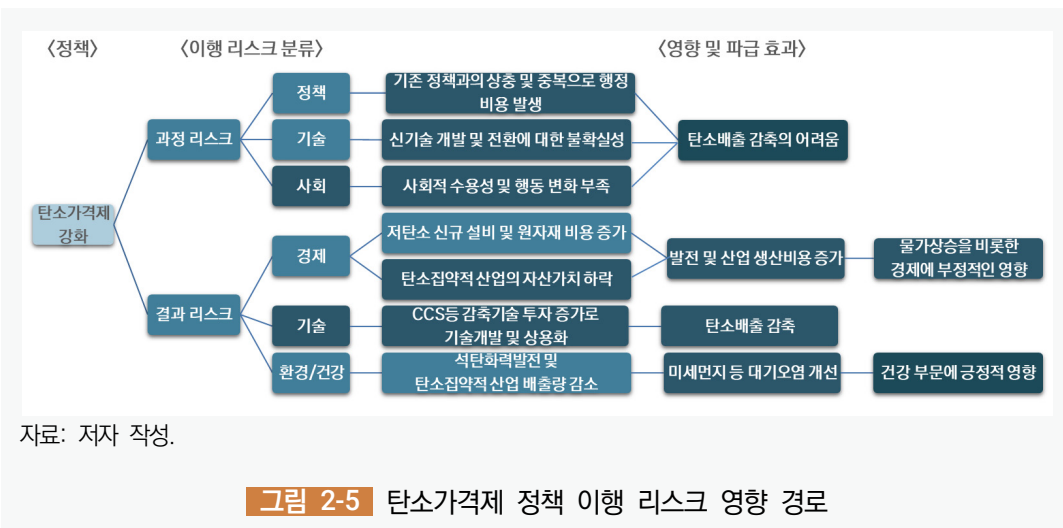


표 2-6 탄소중립 정책의 이행 리스크로 인한 부문별 파급효과

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립·녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	에너지효율 향상	신재생에너지 등 타 에너지원 발전 확대	IR	(기술) 신재생에너지 확대에 따른 간헐성 확대	(기술) 전력 수급 불안정성 확대	(경제) 전력 시스템 운영 비용 증가
				CR	(경제) 해당 사업 종사자 감소 (탄광, 발전소, 수송)	(사회) 지역사회, 경제적 취약 집단 증가	(건강) 건강에 부정적 영향
			석탄발전 감소	CR	(경제) 석탄화력발전소 등 좌초 자산 발생	(경제) 일자리 감소	
				CR	(환경) 석탄발전 감소	(사회) 석탄화력 노동자 및 지역 주민 갈등	
		에너지효율 향상	LNG 발전 증가	CR	(환경) 미세먼지 감소	(건강) 건강에 긍정적 영향	(건강) 극한 기후 대응력 감소
				CR	(경제) 석탄발전에 비해 원료비 증가	(경제) 전기 사용료 증가	(환경) 미세먼지 배출량 증가(기동 초기 불안전 연소로 대기오염물질(CO, THC) 다량 배출)
			원자력 발전 및 운영 증가	CR	(경제) 해당 사업 종사자 증가(발전소, 수송)	(사회) 경제력 취약 집단 감소	
				CR	(환경) 방사성 폐기물 발생 증가	(사회) 방사성 폐기물 처리장 관련 사회적 갈등 증가	
				CR	(기술) 화력발전 의존도 감소	(경제) 석탄 및 천연가스 등 의존도 감소	(건강) 건강에 긍정적인 영향
				CR	(사회) 신규 원전 계획 시 지역 주민 갈등		
				CR	(경제) 발전자회사 배출권 관련 비용 부담 감소		

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			N차**
					1차	2차	3차	
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	원전·활용 확대	원자력 발전 및 운영 증가	CR	(경제) 원자력 관련 일자리 증가	(사회) 경제적 취약 집단 감소	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소	
				CR	(경제) 낮은 원자력 발전 비용에 따른 전력 가격 하락 효과	(건강) 극한 기후 대응력 증가	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소	
			영구처분 시설 관련 특별법	CR	(환경) 냉각수 사용에 따른 수생태계 환경 변화	(경제) 수자원 관리비용(냉각수 후처리) 증가		
				CR	(사회) 해당 지역 주민의 반발	(경제) 설치 지역 주민에 대한 보상 증가	(사회) 경제적 취약 집단 감소	(건강) 건강에 부정 적인 요소 감소
			농지전용 증가로 인한 농업생산 감소, 경관 훼손	CR	(환경) 난개발로 인한 농업환경 자원 훼손	(경제) 식량안보 위협		
				CR	(사회) 비농업인과 농업인 간의 갈등 유발			
			송배전망 설치 지연	IR	(기술) 신재생에너지 연계 제약			
				IR	(기술) 지역 간 전력 수요-공급 불균형 확대	(기술) 전력 시스템 운영 안정성 저해	(경제) 전력 시스템 운영 비용 증가	
		재생에너지 확대	전력망 내 신재생에너지 발전 비중 증가	IR	(기술) 불안정한 전력 생산	(경제) 수요 대비 높은 발전량에 따른 출력제한	(경제) 전력 시스템 운영 비용 증가	
				IR	(기술) 주파수 및 전압 불안정성 증가	(기술) 유연성 자원 필요성 증가	(경제) 전력 시스템 운영 비용 증가	
			재생에너지 지원 정책 변화	CR	(기술) 화력발전 비중 감소			
		복잡한 인허가 절차	복잡한 인허가 절차	IR	(정책) 재생에너지 지원 정책 일관성 부족	(경제) 신재생 사업자 비용 증가	(경제) 신재생에너지 투자 저해	
				IR	(정책) 복잡한 인허가 절차에 따른 재생에너지 도입 지연			

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (I/R/CR)	파급효과			N차**
					1차	2차	3차	
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	태양광, 풍력, 수력 발전소 조성 과정에서 산지 손실 발생	CR	(사회) 발전소 조성 토지 이용에 대한 지역 주민과의 갈등 발생 (정책) 기존 산지법과 마찰 발생 가능성 증가	(환경) 산지 감소로 인한 산림자원 및 생물 다양성 감소 (환경) 발전소 건설로 인한 토양 침식 및 황폐화, 산사태 증가	(건강) 경관 변화로 인한 주민들의 심리적 정서 저하 (건강) 발전소 폐기물로 인한 토양 건강, 주민건강 악화 가능성	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소	
				(환경) 태양광 생산 에너지량 증가	(경제) 전기 사용료 감소	(건강) 극한 기후 대응력 증가	(건강) 건강에 부정적 영향	
				(경제) 태양광 발전을 위한 패널 생산 증가	(경제) 패널 설비 생산을 위한 지원 필요	(환경) 설비 폐기물 증가	(건강) 건강에 부정적 영향	
		신재생에너지 관련 정부지원 증가	CR	(경제) 경쟁 업체 증가	(경제) 난개발 가능성 증가	(사회) 주민 의견 수렴 어려움, 주민 갈등 심화 (경제) 고령자의 수입 감소	(사회) 지역 커뮤니티 붕괴 (사회) 경제적 취약성 증가	
				(환경) 풍력 터빈 설치에 따른 해양 환경 변화				
				(기술) 풍력발전 간헐성에 따른 발전량 변동	(기술) 간헐성 등으로 인한 전력 시스템 불안정성 증가	(경제) 전력시스템 불안 정성 대응 비용 증가		
		해상풍력발전 비중 확대, 운영 증가	CR	(사회) 지역 주민 갈등				
				(기술) 화력발전 비중 감소	(환경) 미세먼지 감소	(건강) 건강에 긍정적인 영향		
				(경제) 경쟁 업체 증가	(경제) 난개발 가능성 증가	(사회) 주민 의견 수렴 어려움, 주민 갈등 심화 (경제) 고령자의 수입 감소	(사회) 지역 커뮤니티 붕괴 (사회) 경제적 취약성 증가	
		해상풍력 확대						

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			
					1차	2차	3차	N차**
탄소중립. 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	해상풍력 확대	해상풍력 확대 정책 시행	IR	(정책) 해상풍력 관련 복잡한 인 허가 절차	(기술) 해상풍력 도입 지연	(정책) 재생에너지 목표 달성 어려움 증가	
				IR	(기술) 환경영향 고려 해상풍력 건설		(경제) 해상풍력 사업자의 비용 증가	
				IR	(정책) 해상풍력 정책 일관성 부족	(경제) 해상풍력 사업자의 비용 증가 (건강) 건강에 부정적인 요소		
		육상풍력 확대	육상풍력발전 비중 확대, 운영 증가	CR	(환경) 소음 등 환경영향	(환경) 철새 이동 방해 등 생태계 부정적 영향		
				IR	(기술) 풍력발전 간헐성에 따른 발전량 변동	(사회) 지역 주민과 갈등	(경제) 전력시스템 불안정성 대응 비용 증가	
				IR	(정책) 육상풍력 관련 복잡한 인 허가 절차	(기술) 육상풍력 도입 지연	(경제) 해상풍력 사업자의 비용 증가	
		영농형 태양광 확대	농업생산 감소, 경관 훼손 영농형 태양광 발전 비중 확대	CR	(환경) 농업환경자원 훼손	(경제) 식량안보 위험		
				IR	(사회) 비농업인과 농업인 간의 갈등 유발			
				CR	(경제) 농가소득 증가			
		수상태양광 확대	수상태양광 발전 비중 확대	IR	(기술) 간헐성 증가로 전력 수급 불안정성 확대			
				IR	(정책) 환경영향평가 등 규제 환경 리스크 노출			
				IR	(기술) 상대적으로 낮은 내구성 및 높은 기술 난이도	(기술) 설치 및 유지보수 복잡성 증가	(경제) 유지보수 비용 증가	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	수상태양광 확대	수상태양광 발전 비중 확대	IR	(기술) 상대적으로 낮은 내구성 및 높은 기술 난이도	(환경) 강풍 등 파손 시 수질오염	(경제) 파손 처리 및 수질 개선 발생
				CR	(경제) 수상관광 등에 부정적 영향		
				CR	(환경) 패널 치광 효과에 따른 녹조 감소 효과	(경제) 높은 기술(설치, 유지 보수 등) 비용	(경제) 전력 가격 상승
				CR	(환경) 태양광 패널 구조물에 의한 수질 오염 위험		(사회) 수변 및 저수지/해상 활동 제약으로 레크리에이션 및 어업활동 제약
				CR	(경제) 수상 생산 위한 신산업 육성		
		수소 확대	수소 공급 및 활용 확대	IR	(기술) 그린수소 생산에 필요한 신재생에너지 생산 부족	(기술) 그린수소 생산 한계	(경제) 그린수소 비용 증가
				IR	(기술) 그린수소 생산을 위한 인프라 부족	(경제) 인프라 구축을 위한 대규모 투자	(사회) 수소 생산 및 저장 시설의 안정성 우려
				IR	(기술) 수소 생산 기술의 상용화 불확실성	(경제) 높은 수소 생산 비용	(경제) 수소 발전량 증가에 따른 전력 가격 상승 가능성
				IR	(기술) 수소 활용 기술의 불확실성	(기술) 수소 수요 측면 미래 불확 실성 증가	(경제) 수소 수요-공급 불 확실성 확대
				CR	(사회) 수소의 안정성에 대한 우려	(사회) 수소 인프라 구축에 대한 사회적 갈등 증가	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	피급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	수소 확대	수소 공급 및 활용 확대	IR	(정책) 수소 정책의 불확실성	(경제) 수소 기술 및 인프라 투자 유인 저하	
				IR	(경제) 해외 수소 생산 및 인프라 구축 불확실성	(경제) 해외 수소 수입 불안정	(경제) 수소 활용 산업 비용 상승
				CR	(환경) 전기분해 과정의 수자원 사용량 증가	(경제) 수자원 사용 및 폐수 처리 비용 등 운영 비용 증가	(기술) 전기분해 과정의 촉매 물질 및 폐수 처리 기술의 안정성
				IR	(기술) 재생에너지 간헐성에 따른 재생에너지 발전 불안정성 증가	(기술) 전력 수급 불안정성 확대	(경제) 전력 시스템 운영 비용 증가
		재생에너지 공급 확대 전력수급불안정성증가	재생에너지 공급 확대 전력수급불안정성증가	IR	(경제) 상대적으로 높은 재생 에너지 발전 비용	(경제) 전력 가격 상승	
				CR	(환경) 파손 및 폐기 시 재활용 및 폐기물 처리 비용		
				CR	(환경) 풍력 및 태양광 설치에 따른 농지 및 산림 훼손		
				CR	(환경) 저수지, 댐 설비 증대로 생태계 영향 가능성	(경제) 내수면 어업 부정적 영향	(건강) 건강에 부정적 영향
		유후부지 중심 사업 개편 신재생에너지 관련 정부지원 증가	유후부지 중심 사업 개편 신재생에너지 관련 정부지원 증가	CR	(경제) 경쟁 업체 증가	(경제) 난개발 가능성 증가	(사회) 주민 의견 수렴 어려움, 주민 갈등 심화
				CR			(경제) 고령자의 수입 감소 취약성 증가
						(경제) 식량 안보 문제	
				CR	(경제) 농업으로 인한 수익 < 발전 으로 인한 수익	(경제) 농업, 어업 생산 가능 구역 감소	(사회) 인근 마을 인구 소멸 가능성 증대 → 지역 커뮤니티 붕괴

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			N차**
					1차	2차	3차	
탄소중립·녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	재생에너지 보급 기반 구축	에너지 캐시백 인센티브 확대	CR	(사회) 가구 전력 소비 감소 유인 증가	(기술) 전력 수요 감소에 따른 필요 전력설비 감소	(경제) 에너지 시스템 투자 비용 감소	(건강) 건강에 부정적 영향
			고효율 제품 구입을 위한 가구 내 비용 증가	CR	(사회) 저소득, 고령자의 가정기기 교체 한계	(사회) 저소득, 고령자의 전기 사용량 감소	(건강) 극한 기후 대응력 감소	(건강) 건강에 부정적 영향
			에너지 정보 수집 및 분석 기술 개발 필요	CR	(경제) 해당 산업 성장	(경제) 일자리 창출	(사회) 경제적 취약 집단 감소	(건강) 건강에 부정적 영향
			관련 설비 및 기술 개발을 위한 비용 증가	IR	(경제) 기업의 재생에너지 투자 및 구매 비용 증가	(경제) 기업의 고용 위축	(사회) 경제적 취약 집단 증가	(건강) 건강에 부정적 영향
			재생에너지 공급인증서 가격 상승 기업생산비용 상승	CR	(경제) RE100 참여 기업 증가	(경제) 재생에너지 공급인증서 수요 증가	(경제) 재생에너지 공급 인증서 가격 상승	(경제) RE100 이행 비용 증가 → 기업 생산비용 증가
		RE100 이행기반 구축	기업생산비용 상승	IR	(기술) 신재생에너지 공급 부족	(경제) 재생에너지 공급인증서 가격 상승		
			기업생산비용 상승	IR	(기술) 재생에너지 간헐성에 따른 재생에너지 발전 불안정성 증가	(기술) 전력 수급 불안정성 확대	(경제) 전력 가격 상승	
			공급 강화로 국내 대기업 자체 신재생에너지 발전시설 증가	IR	(경제) 대기업 신재생에너지 자가 발전 증가	(경제) 신재생 사업 시작에 많은 초기 비용 발생	(사회) 단기적 대기업 관련 분야 사업 위축	(사회) 연계 기업 고용 위축
							(경제) 장기적: 신산업 유치로 기업 확장	(사회) 연계 기업 고용 활성화

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	전환 (에너지)	수요 효율화	산업 전력 및 에너지 수요 감소 및 부하 패턴 변화	IR	(정책) 에너지 소비가 필요한 적응 정책과 상충		
				IR	(기술) 수요 관리에 따른 필요 전력 시스템 규모 감소		
				IR	(기술) 전력 및 에너지 총수요와 부하 패턴 변화	(경제) 전력시스템 투자비용 감소	
				CR	(경제) 각 부문의 에너지 소비 비용 부담 감소		
				IR	(사회) 에너지 수요효율화 인식 부족	(사회) 에너지 수요효율화 촉진에 위한 행동변화 부족	(기술) 미미한 에너지 수요 변화
		중소, 중견 기업 에너지 관련 설비 증가	계시별 요금제/ DR (플러스 수요 반응) 요금제	CR	(경제) 수요 많은 시간 전기 사용량 감소	(건장) 저소득 계층 극한 기후 대응력 감소, 위험 노출 가능성 증가	(건장) 건장에 부정적 영향
				IR	(경제) 기업, 설비 설치 및 유지에 대한 금전 부담 증가	(경제) 기업의 고용 위축	(사회) 경제적 취약 집단 증가
				CR	(경제) 기업의 장기적 에너지 비용 감소	(경제) 기업의 고용 증가	(사회) 경제적 취약 집단 감소
				IR	(기술) 수요 및 암모니아 국내 생산 인프라 부족	(기술) 수요 및 암모니아 국내 생산 부족	(경제) 수요 및 암모니아 수입 비용 증가
				IR	(경제) 수요 및 암모니아 인프라 확대	(기술) 기존 수소로 폭발 등 사고 위험 증가	(사회) 수요 및 암모니아 생산 및 저장 시설 안정성 우려
		수소· 암모니아 혼소발전 증대	수소 및 암모니아 활용 증가	IR	(경제) 수요 및 암모니아 인프라 확대	(기술) 혼소발전으로 부품 수명 단축	
				CR	(환경) 질소산화물 발생량 증가	(건장) 건장에 부정적인 영향	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립·녹색성장 기본계획	전환 (에너지)	수소·암모니아 혼소발전 증대	수소 및 암모니아 활용 증가	IR	(기술) 수소 및 암모니아 생산 및 수송 기술 상용화 리스크	(경제) 수소 및 암모니아 생산 비용 증가	(경제) 기업 및 발전 비용 상승
		(소)수력 발전 확대	수력발전 확대	CR	(환경) 화력발전 비중 감소	(환경) 미세먼지 감소	(건강) 건강에 긍정적인 영향
		(소)수력 발전 확대	수력발전 확대	CR	(경제) 소수력 활용을 통한 에너지 효율 제고		
		바이오연료 활용	바이오연료 수요 증가	IR	(기술) 국내 생산 기술 및 시설 부족	(경제) 해외 수입 확대	
				CR	(환경) 원료와 식량작물 간 토지활용 경쟁 심화	(경제) 식량 및 바이오연료 가격 변동 확대	
(1. 부문별 중장기 감축대책)	산업			CR	(경제) 에너지 소비 비용 감소	(경제) 가계 및 기업 에너지 비용 감소	
		에너지 효율 개선	산업 전력 및 에너지 수요 감소	IR	(경제) 효율 향상 위한 투자 증가	(경제) 효율 향상 투자에 따른 단기적 생산비용 증가	
				CR	(경제) 기업의 장기적 에너지 비용 감소	(경제) 기업의 고용 증가	
				IR	(경제) 데이터센터 등 전력 수요 상승	(경제) 전력 가격 상승	
				CR	(환경) 데이터센터 냉각수 활용 증가	(기술) 전력 수급을 위한 전력 시스템 확대 필요	(경제) 전력 시스템 투자 증가
건물	에너지 성능 강화		건물 에너지 소비 감소	CR	(경제) 건물 냉난방 에너지 비용 감소		

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			
					1차	2차	3차	N차**
탄소중립· 녹색성장 기본계획	건물	에너지 성능 강화	신축 건축물 제로에너지 건축 인증 의무화	IR	(경제) 초기 건설 비용 증가	(경제) 단계적 기업의 고용 위축 (경제) 장기적 에너지 사용량 감소로 사용료 감소	(사회) 경제적 취약 집단 증가 (환경) 에너지 사용량 감 소로 유해물질 배출 완화	(건강) 건강에 부정적 영향 (건강) 건강에 부정 적인 요소 감소
				CR	(경제) 건물 에너지 비용 감소			
		그린리 모델링	건물 에너지 소비 감소	IR	(경제) 기존 건물 리모델링 비용	(경제) 비용 전가에 따른 건물 임대 및 주거 비용 상승		
			노후 공공 건축물 (보건소, 지역거점 의료시설, 유치원) 리모델링 정책	CR	(사회) 지방 공공 시설 개선 투자 확대	(건강) 보건소 시설 개선 (사회) 지역 인프라 개선	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소 (건강) 건강에 부정적인 요소 감소	
(1. 부문별 중장기 감축대책)	수송	내연기관차 단계적 폐지	수송 부문 에너지 전환	CR	(경제) 기존 내연기관차량 생산 감소	(경제) 기존 내연기관차량 관련 일자리 감소 (경제) 좌초자산 증가		
				IR	(사회) 전기차 충전소 부족	(경제) 전기차 충전 인프라 확대	(경제) 전기차 충전 인프라 투자 비용 증가	
				IR	(기술) 전기차 충전 수요 증가	(기술) 전력 수요 증가 및 부하패턴 변화	(경제) 전력 가격 상승 (기술) 전력 인프라 부담 증가	(경제) 전력 인프라 투자 증가 (경제) 전력 인프라
				CR	(경제) 교통세 등 세수 감소			(경제) 전력 인프라 투자 증가 (경제) 전력 인프라
			전기, 수소차의 다량 보급 후 급발진 폭발 사고 등의 대처 부족	IR	(사회) 신차 차량 결함으로 인한 사고 발생 및 대처 미흡 등 전기 차에 대한 부정적 여론 생성	(경제) 전기차 판매량 감소 (경제) 전기차 관련 감소에 둔화	(건강) 건강에 부정적 영향	

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			N차**
					1차	2차	3차	
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	수송	내연기관 차 단계적 폐지	노후 경유차 전기차로의 개조	CR	(환경) 배출되는 대기오염물질 감소, 미세먼지 감소	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소		
				CR	(정책) 내연차 숫자 감소로 인한 유류세 세수 부족	(사회) 취약 계층에 대한 지원 감소	(건강) 극한 기후 대응력 감소	(건강) 건강에 부정적 영향
				CR	(경제) 연료 소비 감소에 따른 세수 감소			
		연비 기준 강화	차량 연비 개선에 따른 연료 소비 감소 (2030년에는 70g/km, 33.1km/L)	CR	(경제) 유류비 지출 감소	(건강) 극한 기후 대응력 증가	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소	
				CR	(환경) 미세먼지 감소	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소		
				CR	(환경) 미세먼지 감소	(건강) 건강에 긍정적인 효과		
		온실가스 배출 기준 강화	전 과정 평가 기업, 탄소배출 감소를 위한 저탄소배출 기술 발전	IR	(경제) 기술 발전을 위한 기업의 투자 비용 증가	(경제) 상품 가격 상승	(사회) 경제적 빈곤층 어려움 증가	(건강) 건강에 부정적 영향
				CR	(환경) 미세먼지 감소	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소		
				IR	(사회) 전기차 충전소 부족	(경제) 전기차 충전 인프라 확대	(경제) 전기차 충전 인프라 투자 비용 증가	
		친환경차 보급	수송 부문 전력 소비 증가	IR	(기술) 전기차 충전 수요 증가	(기술) 전력 수요 증가 및 부하배턴 변화	(경제) 전력 가격 상승 (기술) 전력 인프라 부담 증가	(경제) 전력 인프라 투자 증가
				IR	(기술) 수소 인프라 부족	(경제) 수소 인프라 투자 확대	(사회) 수소 생산 시설 및 차량 안정성에 대한 사회적 우려	
				CR	(경제) 기존 내연기관차량 생산 감소	(경제) 기존 내연기관차량 관련 일자리 감소 (경제) 좌초자산 증가		

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	피급효과			
					1차	2차	3차	N차**
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	수송	친환경차 보급	전기·수소차 충전 인프라 구축 지방세수 결손 우려	CR	(사회) 다른 분야에 쓰이는 지방세수 인프라 구축에 사용될 가능성 높음	(사회) 취약 계층에 대한 지원 감소	(사회) 경제적 빈곤층 어려움 증가	(건강) 건강에 부정적 영향
			수송 부문 에너지원 전환	IR	(기술) 친환경 선박 등 철도, 항공, 해운 친환경 기술 불확실성			
		이동수단의 저탄소화	전 과정 평가 기업, 탄소배출 감소를 위한 저탄소배출 기술 발전	IR	(경제) 기술 발전을 위한 기업의 투자 비용 증가	(경제) 상품 가격 및 물가 상승	(사회) 경제적 빈곤층 어려움 증가	(건강) 건강에 부정적 영향
			노후 경유차 전기차로의 개조	IR	(환경) 배출되는 대기오염물질 감소, 미세먼지 감소	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소		
		연료 전환 (지속가능 항공유 등)	연료별 수요 변화	IR	(기술) 새로운 연료 생산 및 활용 기술 불확실성			
				IR	(경제) 고탄소 사업에 비해 운송에 드는 연료 비용 증가	(경제) 수입 품목 가격 상승 → 물가 상승	(사회) 경제적 빈곤층 어려움 증가	(건강) 건강에 부정적 영향
	농축수산	저탄소 농업기술	대체식품 확대로 육류 수요 감소	CR	(사회) 대체육 소비 증가 및 육류소비 감소	(경제) 육류 가격 하락으로 인한 축산 농가 수익성 저하	(경제) 과잉생산구조 야기	
			스마트 농업 증가	IR	(경제) 스마트 농업 관련 설비 및 교육, 유지 보수에 많은 비용 투자 필요	(건강) 극한 기후 대응력 감소	(건강) 건강에 부정적 영향	
		친환경 농산물 생산·유통· 소비 활성화	생산성 감소, 화학비료 및 농약 사용 절감으로 인한 수질 향상	CR	(환경) 수질비점오염 감소			
				CR	(사회) 식생활 개선으로 육류소비 감소	(경제) 육류 가격 하락으로 인한 축산 농가 수익성 저하	(경제) 과잉생산구조 야기	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	농축수산	농물관리 기술 개발 보급	농물관리	IR	(경제) 정밀 관개 시스템 도입을 위한 초기 비용 증가		
		화학비료 (질소·인·인)	화학비료 감축을 통한 비점오염 감소, 적정비료로 생산량 감소 최소화	CR	(기술) 농물관리 기술 미흡에 의한 수질 오염 위험도 증가	(환경) 수질 악화	
		화학비료 (질소·인·인)	화학비료 감축을 통한 비점오염 감소, 적정비료로 생산량 감소 최소화	CR	(환경) 수질비점오염 감소		
		바이오차 개발·보급을 통한 토양 탄소 저장능력 제고	바이오차 생산 증가	CR	(환경) 영농부산물 및 축분 농경지 투입 감소	(환경) 수질비점오염 감소	
		바이오차 개발·보급을 통한 토양 탄소 저장능력 제고	가축 분뇨 바이오차 확대에 따른 정부 지원금 증가	CR	(환경) 가축 분뇨 투기로 인한 토양, 수질 오염 방지 가능	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소	
		바이오차 개발·보급을 통한 토양 탄소 저장능력 제고	가축 분뇨 바이오차 확대에 따른 정부 지원금 증가	CR	(경제) 기존 가축 분뇨 처리 사업 위축	(경제) 기업의 고용 위축	(사회) 경제적 취약 집단 증가
		바이오차 개발·보급을 통한 토양 탄소 저장능력 제고	가축 분뇨 바이오차 확대에 따른 정부 지원금 증가	CR	(경제) 신산업 출현	(경제) 기업의 고용 증가	(사회) 경제적 취약 집단 감소
		저메탄사료 및 저탄배사료 개발·보급	저메탄 사료 기술에 대한 충분한 연구개발이 이루어지지 않음	IR	(경제) 저메탄사료 기술 개발 비용 지출		
		저탄배사료 개발·보급	저탄배사료 개발·보급	IR	(경제) 저탄배사료로 인한 생산성 저하 및 저메탄사료의 높은 가격 으로 인한 경영비 상승	(경제) 육류 생산비용 증가 및 축산 농가 수익성 저하	
		저탄배사료 개발·보급	저탄배사료 개발·보급	IR	(경제) 저탄배사료로 인한 생산성 저하 및 저메탄사료의 높은 가격 으로 인한 경영비 상승	(경제) 육류 생산비용 증가 및 축산 농가 수익성 저하	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			
					1차	2차	3차	
탄소중립·녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	농축수산	생산성 향상을 통한 온실가스, 가축분뇨 저감	생산성 증대로 인한 가격 하락	IR	(경제) 생산성 증가로 사육두수 증가 (경제) 가격 하락으로 인한 축산 농가의 수익성 악화	(환경) 사육두수 증가로 인해 온실가스 감축 효과 저감, 수질오염 증가 (경제) 과잉생산구조 야기	N차**	
		가축분뇨 활용 확대 (에너지화)	정화 처리 확대	IR	(경제) 고체연료, 바이오차 관련 기술 개발 비용 지출			
			온실가스 감축을 위한 신규 설비 필요	CR	(환경) 에너지 사용 증가 및 수질 악화			
		시설농업의 저탄소 에너지 전환	에너지 절감 가능, 다만, 시설설치비는 농가 경영 부담으로 작용 가능	IR	(경제) 신규 설비를 위한 투자 필요	(경제) 농기소득 감소	(건강) 건강에 부정적 영향	
			친환경 농기계 개발·보급	에너지 절감 가능, 친환경농기계 구입은 농가경영부담으로 작용	IR	(경제) 에너지 절감시설 개발 비용 지출		
		농촌태양광 등 재생에너지 공급 확대	에너지 절감 가능, 영농형 태양광의 경우, 생산성 감소와 농업환경자원의 훼손 유발	IR	(경제) 친환경 농기계 기술 개발 비용 지출			
				에너지 절감 가능, 영농형 태양광의 경우, 생산성 감소와 농업환경자원의 훼손 유발	IR	(경제) FIT 제도 종료로 수익성 악화 (기술) 발전단가가 낮은 에너지 원들의 발전 출력 상쇄	(환경) 농업환경자원 훼손 (사회) 비농업인과 농업인 간의 갈등 유발	(경제) 식량안보 위협
					(환경) 농지전용 증가			

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	피급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획	농축수산	농축대응 재생에너지 공급 확대	농지 태양광을 영농형 태양광으로 대체 농경에는 문제가 없는 곳 영해 판정 (간척 농지)	IR	(환경) 농촌 에너지 생산	(경제) 농업인, 농경 이외 수익 증가	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소
				IR		(경제) 생산에너지 사용으로 전력 비용 감소	(건강) 건강에 부정적인 요소 감소
				IR	(경제) 태양광시설 설치, 정비 수요 증가	(경제) 태양광시설 설치, 정비 사업체 증가	(사회) 경제적 취약 집단 감소
		농촌마을 RE100 추진	에너지 절감 가능, 시설 설치비는 농가에 부담으로 작용	IR	(경제) 저가 농지에서의 태양광 사업 증가로 농지 경제성 증가	(경제) 땅 주인 농업 불가 고령인 농지에 태양광 사업 진행	(경제) 관련 사업 활성화 (환경) 극한 기후, 기후 재해 감소
				IR	(경제) RE100 사업 지원 비용 지출		
(1. 부문별 중장기 감축대책)	수소	청정수소 생산	그린수소를 통한 친환경에너지 공급 비용 확대	IR	(정책) 제도 및 운영관리 체계 미흡 (기술) 전기분해 과정의 촉매물질 및 폐수처리 기술의 불안정성		
				CR	(환경) 전기분해 과정의 수자원 사용량 증가	(경제) 수자원 사용 및 폐수 처리 비용 등 운영 비용 증가	
	흡수원	조림, 숲 가꾸기, 목재 수확 확대 통한 흡수기능 강화	산림 건전성 확보, 부산물 바이오매스로 활용 가능	IR	(사회) 때로 숲가꾸기 벌채에 부정적인 인식을 지닌 지역 주민과 갈등 초래	(경제) 숲가꾸기 사업으로 목재 공급이 증가하면 목재 가격이 하락할 수 있음	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	흡수원	조림, 숲가꾸기, 목재수확 확대 통한 흡수기능 강화	산림 건전성 및 탄소 흡수능력 증대 목재제품 사용 증가로 탄소 흡수량 증대. 친환경 제품 사용으로 건강 증진	CR	(경제) 단기의 과도한 숲가꾸기가 오히려 관광, 생태 등 기존 산림의 경제적 가치 훼손 가능성 (경제) 적절한 수요처가 없을 경우 생산된 목재 처분 문제 발생	(환경) 과도한 숲가꾸기 작업이 특정 종의 서식지 파괴와 생물 다양성 감소로 이어질 가능성 (환경) 인공림 조성 및 관리 과정에서 실충제 등 환경 문제 발생	(환경) 경제림은 단일 수종으로 조성되는데 이때 생물 다양성 감소
		임도, 임업기계 등 산림순환 경영 기반 구축	숲가꾸기, 수확, 산림부산물 수집 등 산림내 작업 원활화로 인한 생산성 확대 임도 증가	CR	(환경) 산림 내 도로를 조성함으로써 주변 생태 파괴 위험 (환경) 경사급변 지점 생성으로 산사태 유발	(환경) 임도 건설 과정에서 먼지와 오염물질로 공기질 일시적 악화 (건강) 이로 인한 부상 및 사망 사고 발생	(환경) 산림 내 접근성이 높아져 산불, 병해충 확산 등 재해 위험 커짐
		고부가가치 목재이용 활성화로 탄소 저장고 확대	목재 이산화탄소 저장량 확대, 친환경 제품 사용 확대	IR	(경제) 목재 사용량 증가와 공급 산순환 체계 구축을 위한 초기 투자와 운영 비용이 증가하여 경제적 부담이 발생할 수 있음 (경제) 목재생산 인공림 조성과정에서 생물다양성 감소, 서식지 파괴 등 환경에 부정적 영향 나타날 수 있음	(경제) 수익성이 높은 수요처와 지속 가능한 수요가 없다면 장기적으로 초기 투자비용을 상쇄할 위험이 있음 (경제) 수익성이 높은 수요처와 지속 가능한 수요가 없다면 장기적으로 초기 투자비용을 상쇄할 위험이 있음	(경제) 수익성이 높은 수요처와 지속 가능한 수요가 없다면 장기적으로 초기 투자비용을 상쇄할 위험이 있음
		미이용 산림바이오매스의 재생에너지 활용	친환경 목질 에너지 사용 확대, 에너지 전환	IR	(경제) 산림바이오매스 이용과 관련 하여 정책 조정이 필요하며 이에 따른 행정 비용 증가. 특히 초기 낮은 수익성으로 보조금 지급 등 정부지출 증가 (경제) 바이오매스 사용이 증가하면 다른 친환경에너지 수요가 감소하여 대체자원 시장에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 바이오매스의 친환경성에 대한 논란 지속	(경제) 바이오매스 사용이 증가하면 다른 친환경에너지 수요가 감소하여 대체자원 시장에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 바이오매스의 친환경성에 대한 논란 지속	(경제) 바이오매스 사용이 증가하면 다른 친환경에너지 수요가 감소하여 대체자원 시장에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 바이오매스의 친환경성에 대한 논란 지속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과			표 2-6의 계속
					1차	2차	3차	
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (1. 부문별 중장기 감축대책)	흡수원	산림의 생태적 복원 및 보호지역 확대	산림의 환경 가치 증진	CR	(사회) 토지 이용 기회 비용 발생. 지역 주민과의 토지이용 갈등 증가	(경제) 보호지역 관리와 유지 비용이 증가하고 보호지역 내 자원 (목재, 광물) 등 이용이 제한됨	(사회) 보호지역 확대로 지역사회의 경제적 변화와 갈등이 장기적으로는 지역 주민의 소득 증가를 막고 지역 발전을 저해할 가능 성이 있음	N차**
		탄소흡수원 확대, 생물다양성 증가, 환경 개선		IR	(정책) 조성한 산림지역에 대한 적절한 사후 관리 부재 시 정책 효과 감소	(경제) 산림복원 및 관리 비용이 증가하면서 행정 비용 상승		
		산불, 산사태, 병해충 등 산림재해 예방 및 최소화	산불 및 산사태로 인명 및 재산 손실 감소, 산림 손실로 수자원의 질 저하 감소	CR	(정책) 산림재해 예방 및 복구와 관련된 법적 규제가 강화되면서 기업과 주민들이 적응하는 데 어려 움을 겪을 수 있음	(건강) 병해충 예방 과정에서 살포 되는 살충제 등에 주민 건강 영향 되는 살충제 등에 주민 건강 영향	(사회) 산불에 따른 주민 들의 야외 활동 제약으로 사회적 갈등 발생 가능	
		도시숲 조성, 유류도지 조림 등 신규 흡수원 확충	호흡기질환 감소 및 심신건강 증진	IR	(경제) 도시 숲 공간 확보를 위한 추가 비용 발생, 관리비용 증가	(환경) 미세먼지 감소 효과가 있으나 비용대비 효율성에 대한 추가 검증 필요	(경제) 도시숲 조성으로 지역 부동산 가격이 변동할 수 있으며 부동산시장에 영향을 미칠 수 있음	
		이산화탄소 흡수원 확대, 수자원의 질 개선, 산사태 방지	이산화탄소 흡수원 확대, 수자원의 질 개선, 산사태 방지	CR	(사회) 개발 공간 활용 기회 저하	(환경) 특정 수종의 나무를 집중 해서 심는다면 생물 다양성 감소 초래		

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획	LULUCF	산림 분야 산림 활용 탄소저감 활동 (REDD+) 확대	탄소흡수원 확대, 생물다양성 증가, 환경 개선	IR	(정책) 조성한 산림지역에 대한 적절한 사후 관리 부재 시 정책 효과 감소	(사회) 조성 및 관리 과정에서 지역 주민과 갈등 발생	(경제) 산림을 생계로 삼는 지역 주민의 소득 감소
		(생태계)	기후변화에 적응 가능한 산림 건전성 확대	IR	(경제) 종묘 관리 등에 따른 추가 비용 발생	(경제) 묘목 가격 상승으로 임업인 부담 상승	
	수자원/ 재난관리	과학기반 기후 위기 감시 예측 및 적응 정보 고도화	기후변화 위기에 적응 가능한 사회 구축	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용		
		기후재난 위험을 극복한 안전사회 실현	기후변화 위기에 적응 가능한 사회 구축	CR	(정책) 인프라 구축에 따른 에너지 사용 증가로 탄소중립(원화) 정책과 충돌	(사회) 과도한 정보 제공으로 시민 불안정 초래	
		홍수 기림에 대비한 물안보 강화	기후변화 위기에 적응 가능한 사회 구축	CR	(환경) 인프라 구축에 따른 환경 오염	(사회) 시설 위치에 따른 불평등 및 갈등	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (2. 기후변화 적응대책)	수자원/ 재난관리	자연재난 신속대응 체계 구축	기후변화 위기에 적응 가능한 사회 구축	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용		
		재난대응 인프라 확대	기후변화 위기에 적응 가능한 사회 구축	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용		
		공공부문이 선도하는 지역단위 탄소중립· 에너지 효율화 사업 확산	에너지 효율화 및 에너지 절감 기술을 통한 온실가스 저감	IR	(기술) 기존 시스템과의 통합/호환 문제		
탄소중립· 녹색성장 기본계획 (5. 지역 주도의 탄소중립· 녹색성장 확산)	수자원	새로운 에너지원 으로 유역 활용	재생에너지 공급 비율 확대	CR	(경제) 높은 초기 투자 및 유지 관리 비용	(경제) 유지보수 비용 증가로 수도요금 인상	(사회) 수도요금 인상에 따른 사회적 저항 발생
				IR	(정책) 기존 수자원 정책과 충돌	(사회) 생활 농공업용수 공급 부족	
				CR	(환경) 인프라 구축에 따른 환경 오염	(경제) 수질관리 비용 증가	
				CR	(경제) 높은 초기 투자 비용	(경제) 전력 발전 비용 증가에 따른 전기 가격 인상	
				IR	(사회) 제한된 설치지점	(사회) 시설 위치에 따른 불평등 및 갈등	
				IR	(사회) 전력계통 부족	(기술) 전력수급 불안정	(경제) 전력 시스템 운영 비용 증가

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
물관리 분야 공공 주도의 과감한 2050 탄소중립 전략 (보도자료)	수자원	물 관련 신재생에너지 (수열, 태양광, 바이오가스, 수소) 활성화	재생에너지 공급 비율 확대	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용	(경제) 전력 발전 비용 증가에 따른 전기 가격 인상	
		물환경분야 기초시설 온실가스 저감 및 그린수소 생산사업 추진	스마트 관리체계 구축을 통한 에너지 효율 증대 그린수소를 통한 친환경에너지 공급 비율 확대	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용	(경제) 전력 발전 비용 증가에 따른 전기 가격 인상	
				IR	(정책) 정책의 불확실성 및 지원 부족		
				IR	(기술) 수송/저장 인프라 부족		
		물순환 전 과정 효율적인 물관리	태양광, 수열에너지를 통한 재생에너지 공급 비율 확대	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용	(경제) 전력 발전 비용 증가에 따른 전기 가격 인상	
				IR	(정책) 제도 및 운영관리 체계 미흡		
		하이테크 산업 전환 기후위기 대응형 물관리 시스템 구축	디지털 기반 물관리 시스템 구축을 통한 수자원 시설 효율성 증가	CR	(사회) 정전 혹은 해킹으로 인한 시스템 중단		
				CR	(사회) 경제적 측면 고려에 따른 공익성 훼손 우려	(경제) 특정 기업의 독식 우려	

표 2-6의 계속

정책	부문	세부정책 및 계획	예상 결과	리스크* (IR/CR)	파급효과		
					1차	2차	3차
물관리 분야 공공 주도의 과감한 2050 탄소중립 전략 (보도자료)	수자원	미래 친환경 담수화 융합 혁신	친환경 탄소중립 담수기술 개발	CR	(경제) 높은 초기 투자 비용	(경제) 유지보수 비용 증가로 수도요금 인상	(사회) 수도요금 인상에 따른 사회적 저항 발생
				CR	(환경) 환경 및 해양 생태계 파괴	(사회) 해수 사용에 대한 부정적 인식	
				IR	(정책) 관련 정책 지원 및 방향 부족		

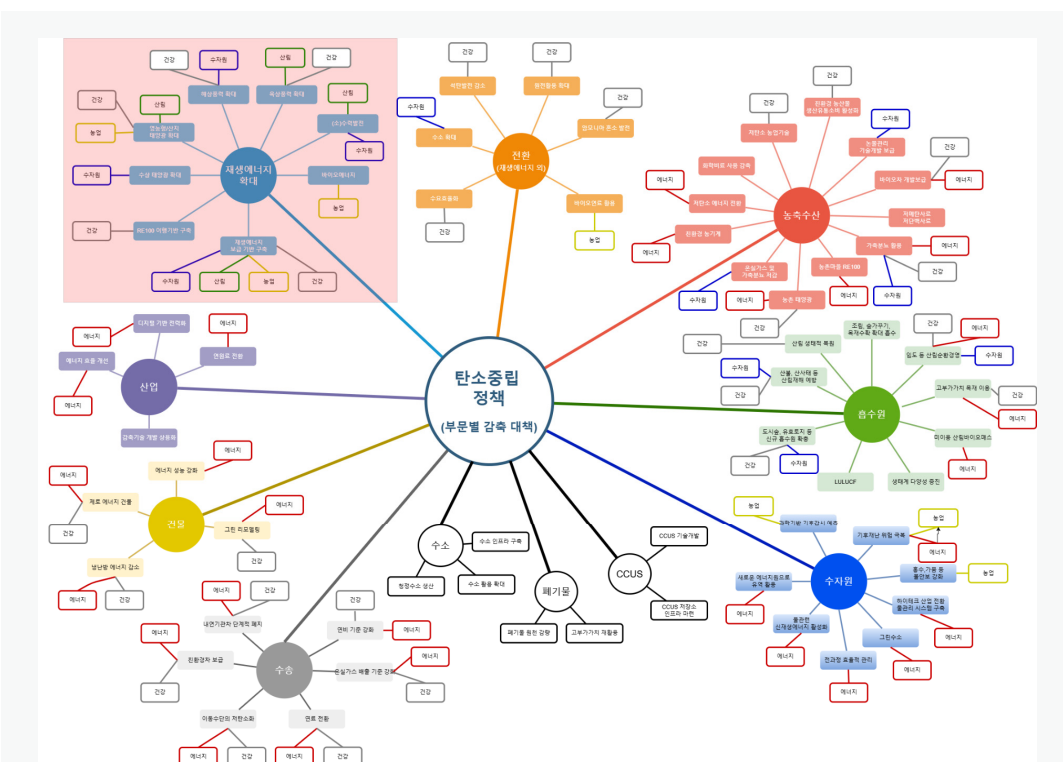
주: * 이행 리스크 구분은 1차 영향을 기준으로 작성함.

** N치는 4차부터 그 이후까지를 포괄함.

자료: 자자 작성.

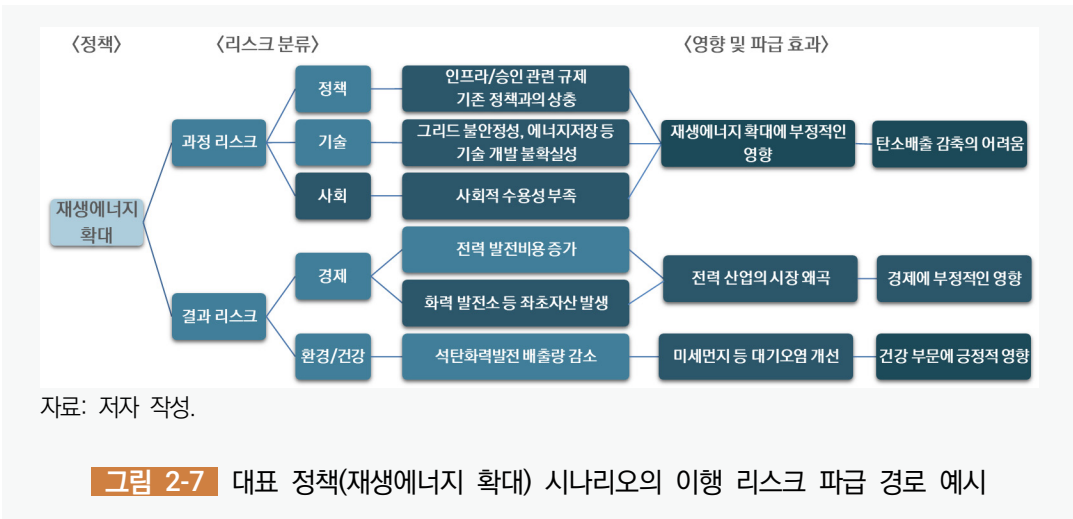
4. 이행 리스크 분석을 위한 정책 시나리오

부문별 탄소중립 이행 리스크의 파급경로를 분석하는 정책 시나리오를 도출하고자 탄소중립 정책 이행에 따른 부문별 영향 경로를 도출하였다. 부문별 대표 정책은 직접적으로 해당 부문에 영향을 주며, 간접적으로는 타 부문에까지 영향을 미치게 된다. 예를 들어 탄소중립 대표 정책으로 디지털 기반의 탄소중립 정책(전력화)은 전력 수요 증가를 증가시켜 청정에너지 발전량 증가로 이어져 에너지 분야에 영향을 주며, 데이터 센터 등에서 냉각수 활용으로 수자원 분야까지 영향이 도달할 수 있다. 그중 전 부문에 걸친 영향 경로를 보여주는 정책으로는 재생에너지 확대가 있다. 재생에너지 확대 정책은 전환(에너지) 부문의 직접적인 영향에서 시작하여 영농형 태양광 확대는 농업 부문에, 산지 풍력은 산림 부문에, 수상태양광 및 해상풍력은 수자원 부문에 영향을 주며, 최종적으로 건강 부문에 미치는 간접적 영향까지 분석할 수 있다. 따라서 다음 장에서는 공통 정책 시나리오로 재생에너지 확대 시나리오를 다루며, 부문별로 탄소중립 이행에서 주요하게 영향을 미치는 이행 전략을 바탕으로 파급 효과를 분석한다.



자료: 저자 작성.

그림 2-6 탄소중립 정책(부문별 감축대책) 영향 경로



제3장

부문별 탄소중립 이행 리스크 영향 분석

1. 에너지
2. 수자원
3. 농축산
4. 산림
5. 건강

1. 에너지

가. 탄소중립 정책

1) 탄소중립 정책과 이행 리스크

에너지 부문은 탄소중립 이행에서 핵심 부분이며, 탄소중립 정책은 대부분 에너지 부문과 밀접한 연관이 있다. 『제1차 탄소중립 녹색성장 기본계획』에서 제시하는 전환, 산업, 건물, 수송, 수소 등 부문별 감축 정책의 주요 세부 정책을 살펴보면 에너지 부문과 관련이 높은 정책이 많은 것을 알 수 있다.

부문별 감축정책	전환	산업	건물	수송	농축수산
	- 석탄발전 감축 - 원전+재생에너지 - 수요 효율화	- 핵심기술 확보 - 기업지원 - 배출권 고도화	- 제로에너지 건축물 확대 - 그린리모델링	- 무공해차 보급 - 철도·항공·해운 저탄소화	- 저탄소 농업구조 전환 - 어선 및 시설 저탄소화
	폐기물	수소	흡수원	CCUS	국제감축
	- 지속가능한 생산·소비체계 - 자원 순환 이용 확대	- 청정수소 공급 확대 - 수소활용 생태계 강화	- 산림순환경영 - 내륙·연안습지 복원 및 보호	- 법령, 저장소 등 인프라 마련 - 기술확보·상용화 R&D	- 민관합동 지원 플랫폼 - 부문별 사업 발굴 및 이행

자료: 관계부처 합동(2023), p.24.

그림 3-1 제1차 탄소중립녹색성장 기본계획의 부문별 감축정책

에너지 부문과 직접적인 관련이 있는 전환과 수소 부문뿐 아니라 수송, 건물 부문 등에서도 에너지 소비를 줄이는 제로에너지 건축물 확대, 무공해차 보급을 통한 화석연료에서 전기 및 수소로 에너지원 전환 등의 정책을 포괄적으로 다루고 있다.

『제10차 전력수급기본계획』에서는 원자력 발전 비율 확대, 신재생에너지의 합리적 수준 보급, 석탄발전의 합리적 감축 유도 및 무탄소 전원 활용을 강조하고 있다(산업통상자원부, 2023, p.13). 이렇게 탄소중립 이행 관련 정책이 에너지 부문과 밀접한 연관이 있는 만큼 에너지 부문은 높은 수준의 이행 리스크에 노출되어 있다. 예를 들어, 석탄발전 감축 및 원자력과 재생에너지 발전 확대와 같은 정책은 기존 석탄발전설비 등 좌초자산을 야기할 수 있으며, 간헐적인 특성을 지닌 신재생에너지 비중 확대에 따라 전력망의 안정성이 저해되고 전력 수급의 불안정을 가져올 수도 있다. 이 외에도 에너지 부문의 이행 리스크 요인으로 에너지 효율 향상 및 수요효율화 정책, 탄소가격 도입 및 상승, 수소 및 CCUS 기술 확대 등이 있다. 이러한 요인들은 국내 탄소가격 상승, 기존 화력발전 좌초자산 확대, 비교적 비용이 높은 신재생에너지 확대로 발전 및 산업 생산비용 증가와 같은 영향을 가져올 수 있다. 또한 에너지 수요관리 및 효율 향상 정책들은 에너지 수요 전망을 변화시키고 부하 패턴을 변화시킴으로써 이를 충족하기 위한 전력 믹스의 변화와 이에 따른 투자 및 전력 가격 변화로 영향을 미칠 수 있다. 환경적으로도 태양광과 풍력발전을 확대하는 과정에서 산지 손실, 토양 및 수질 오염 등의 영향을 미칠 수 있다.

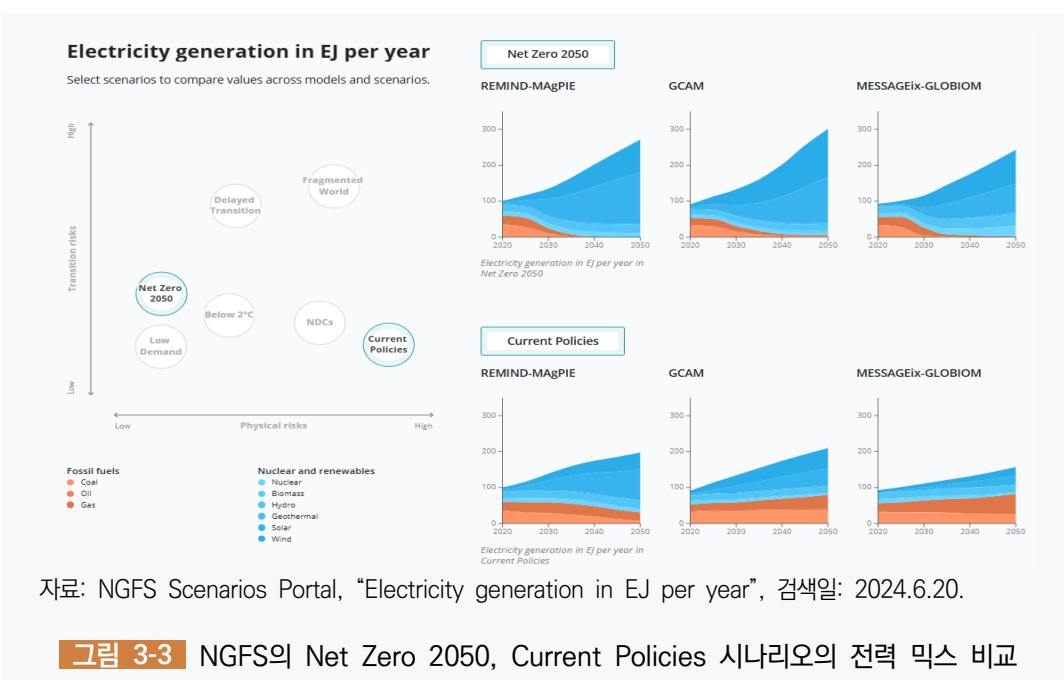
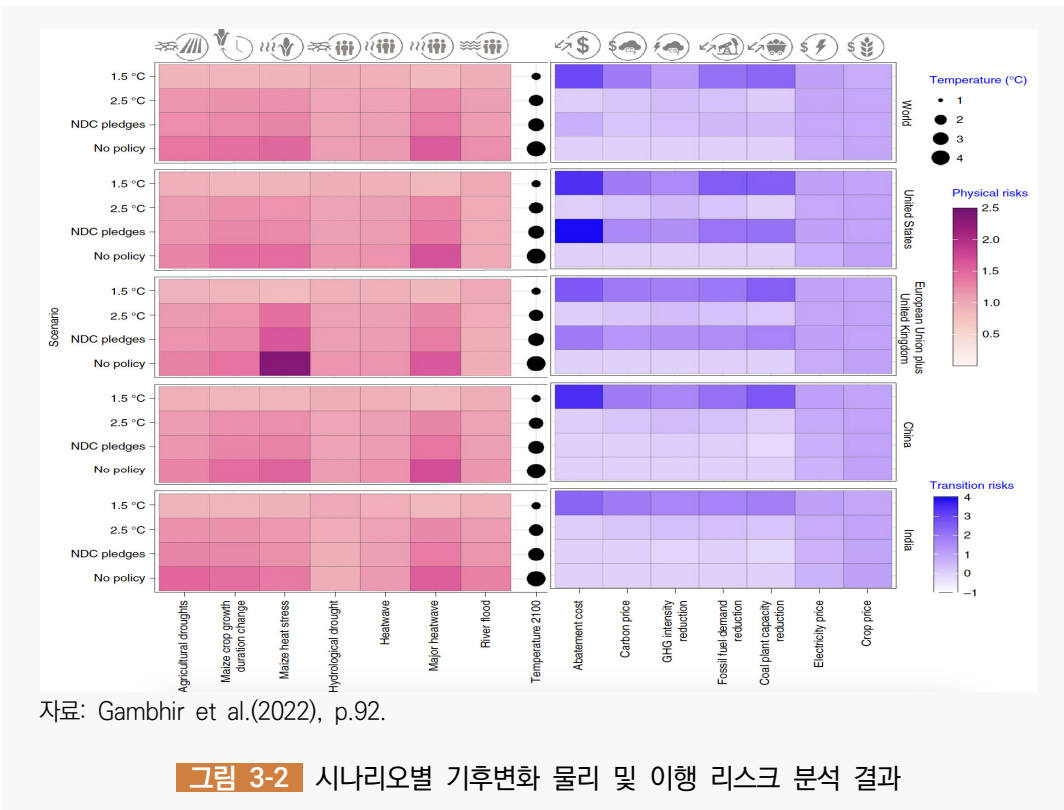
국내뿐 아니라 글로벌 정책 및 이니셔티브에 따른 에너지 부문의 탄소중립 이행 리스크도 존재한다. COP28의 UAE 합의문에서는 2030년까지 재생에너지 용량을 3배로 확대하고, 에너지 효율을 2배로 향상시키기로 합의하였다. 또한 화석연료에서 벗어나는 전환을 가속화하기로 하였다.⁷⁾ 한국을 포함한 참가국의 만장일치로 합의문이 채택된 만큼, 탄소중립을 달성하려는 전환이 가속화될 것이며 에너지 부문에도 영향을 미칠 것이다. 그리고 기업들이 사용하는 전력을 모두 신재생에너지에서 발전된 전력으로 충당하겠다는 RE100도 신재생 에너지 확대를 촉진하는 등 에너지 부문의 탄소중립 이행 리스크를 확대하는 데 영향을 미칠 수 있다.

2) 에너지 부문 이행 리스크 선행연구

에너지 부문 이행 리스크와 그 파급효과에 대한 연구는 주로 모형을 활용한 시나리오 분석, 이행 리스크 지표 연구, 전환에 따른 경제적 영향을 분석하는 데 초점이 맞춰졌다. Gambhir et al.(2022)에서는 GCAM 모형을 활용하여 시나리오별 기후변화 물리 및 이행 리스크를 분석하였다. 여기서 이행 리스크를 분석하고자 저탄소 전환 비용, 탄소 가격, 탄소집약도

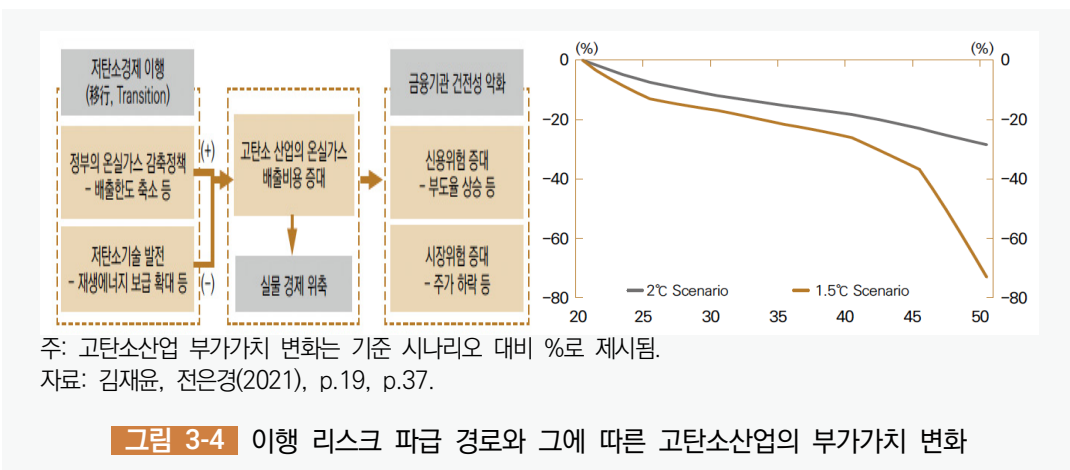
7) COP28 UAE(2023), "COP 28 UAE Consensus Brochure", 검색일: 2024.2.20.

감소, 화석연료 수요 감소, 석탄발전소 용량 감소, 전력 가격, 작물 가격의 7가지 지표로 구분하였다. 이 중 대부분이 에너지 관련 지표로 구성되었으며, 높은 수준에서 전환이 이뤄진다면 지역 간 차이는 존재하지만 주요 에너지 관련 지표의 이행 리스크는 크게 높아질 수 있다는 점을 나타낸다. 특히 1.5도 목표를 달성하는 시나리오하에서는 감축비용과 관련된 이행 리스크가 상당히 높아진다는 점을 나타내고 있다.



중앙은행과 금융감독기관이 모인 NGFS(Network for Greening the Financial System)에서는 물리 및 이행 리스크를 분석하고 이들의 거시-금융(macro-financial) 영향을 글로벌 통합평가모형을 활용하여 분석하였다. 각기 다른 물리 및 이행 리스크 수준에 따라 시나리오를 구성하고 이들의 거시경제와 금융시장에 미치는 영향을 분석하였다.

김재윤, 전은경(2021)에서는 국내 이행 리스크의 파급경로를 분석하고, 이행 리스크 스트레스 테스트 결과를 제시하였다. NGFS에서 제시하는 탄소중립 이행 시나리오를 고려하며, 기업들의 온실가스 저감비용 증감에 따른 부가가치 변동폭, 은행시스템의 주식, 채권, 대출 가치 변화에 따른 BIS 자기자본비율 변화 등을 살펴보았다. 이로써 실물 부문의 영향을 분석하였으며, 저탄소경제로 전환됨에 따라 고탄소산업의 생산비용이 증가하고, 부가가치가 크게 감소하는 것으로 제시하였다.



김기환(2022)에서는 CGE 모형을 활용하여 재생에너지 확대에 따른 GDP, 실업률, 산업별 생산량 등의 영향을 분석하였으며, 주요 결과 중 하나로 신재생에너지가 확대되면 소득분배에는 역진적인 영향이 나타나며, 배출권거래제 정책은 누진적인 결과가 나타난다는 점을 제시하였다.

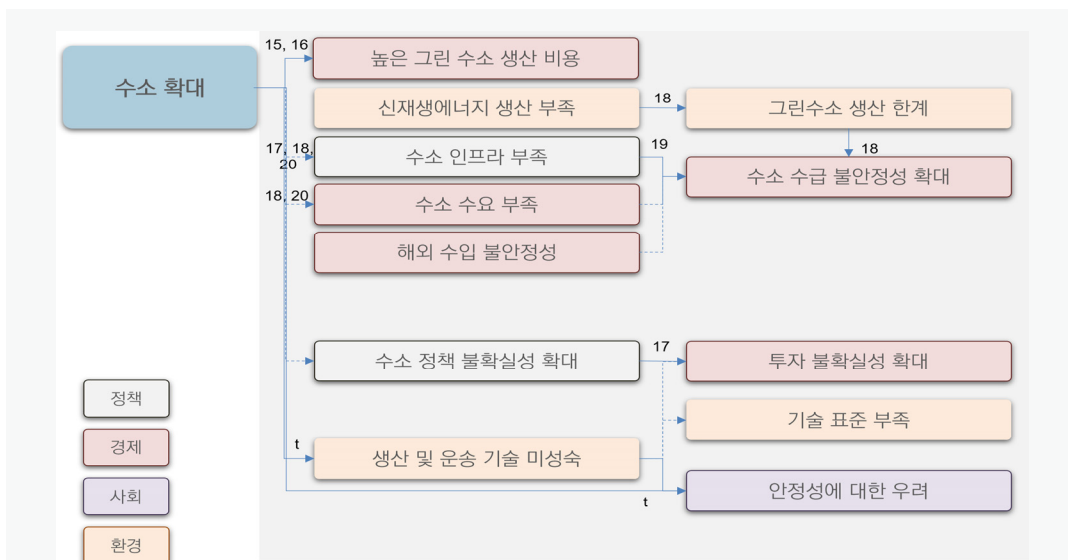
나. 탄소중립 정책 이행 리스크 영향 경로 파악

주요 탄소중립 정책의 에너지 부문 이행 리스크를 파악하고, 이행 리스크 요인이 미치는 파급효과를 살펴보고자 한다. 이를 위해 앞서 살펴본 주요 탄소중립 정책의 세부정책 및 계획 중에서 에너지 부문과 관련이 깊은 정책 및 계획을 파악하고, 그에 따른 예상 결과와 직간접적인 영향을 분석하고자 한다.

먼저, 탄소중립 녹색성장 기본계획, 전력수급기본계획, UAE 합의문 등에서 제시된 석탄화력 발전 감축은 크게 석탄화력발전 비율 감소, 신재생에너지 및 LNG 발전 비율 증가로 이어질 수 있다. 석탄화력발전 감소는 기존 수명이 남아 있는 석탄화력발전소의 이용률 감소 및 폐쇄

등으로 좌초자산 발생으로 이어질 수 있다(안영환, 2023, pp.34-38).⁸⁾ 이는 석탄화력발전과 관련된 일자리가 줄어들며, 주변 지역사회의 경제에도 부정적 영향을 미칠 수 있어 이와 관련된 사회적 비용을 상승시키는 영향도 야기할 수 있다(Auger et al., 2021, pp.1471-1475).⁹⁾ 하지만 동시에 석탄화력 비율 감소는 미세먼지 감소로 이어져 건강에 부정적 영향¹⁰⁾을 줄일 수도 있다. 신재생에너지 발전 확대는 신재생에너지의 간헐성으로 인해 전력 시스템의 운영 비용이 증가할 수 있으며, 비교적 높은 발전 비용, 신규설비 확충 등으로 전력 생산 가격이 높아질 수도 있다.¹¹⁾¹²⁾ LNG 발전 확대 역시 전력 생산 가격을 높이는 영향을 줄 수 있다.

원자력 발전 확대 정책은 환경적으로 방사성 폐기물 발생을 증가시킬 수 있으며, 이를 처리하는 데 사회적 갈등을 증가시키는 영향을 야기할 수 있다.¹³⁾¹⁴⁾ 또한 신규 원전을 계획한다면 주변 지역 주민과 갈등이 발생할 수도 있다(정정화, 2015, pp.176-181).¹⁵⁾ 하지만 원자력 발전 비중이 높아지면 발전회사의 탄소배출이 줄어들어 배출권 관련 비용 부담이 줄어드는 효과가 나타날 수 있으며, 원자력 발전 관련 일자리가 증가하는 영향도 기대할 수 있다.



자료: 저자 작성.

그림 3-5 수소 관련 에너지 부문 탄소중립 이행 리스크 영향 경로

- 8) Greenium(2024.6.14), “2050 탄소중립 시대, 韓 탈석탄 미래는? 넥스트·BNEF ‘비용효율적 탈석탄 로드맵 필요’”, 검색일: 2024.8.22.
- 9) 문화일보(2023.10.10), “‘석탄발전 폐쇄 손실 최소화’…출구전략으로 ‘원전 전환’ 부상”, 검색일: 2024.10.15.
- 10) 동아사이언스(2023.11.24), “석탄화력에서 배출되는 미세먼지, 사망률 2배 높다”, 검색일: 2024.7.9.
- 11) 경향신문(2020.12.24), “2030년까지 전기요금 10% 인상”, 검색일: 2024.10.1.
- 12) 매일경제(2022.10.2), “[단독] 태양광 전기 생산가격, 원자력 발전의 3.5배”, 검색일: 2024.5.13.
- 13) 동아사이언스(2023.1.16), “원전 확대 필수조건 ‘사용후핵연료’ 처분…기술은 ‘성숙’ 실증은 ‘아직’”, 검색일: 2024.9.6.
- 14) 한겨레(2024.7.13), “사용후핵연료 해법, ‘죄수의 딜레마’에 빠져 실패”, 검색일: 2024.9.6.
- 15) 경향신문(2023.8.31), “서울원전 추가 유치 놓고 두 쪽 난 주민들”, 검색일: 2024.7.18.

수소 확대 정책은 수소 생산을 위한 신산업을 육성하는 경제적 효과를 기대할 수도 있다. 하지만 그린수소 생산, 저장 및 유통과 관련하여 인프라가 크게 부족하며¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾ 인프라를 구축하려면 대규모 투자가 필요할 수 있다. 그린수소를 생산하려면 경제성이 있고 충분한 신재생에너지 발전이 뒷받침되어야 하나, 신재생에너지 확대가 부족하면, 그린수소를 충분히 생산하기 어려울 수 있어¹⁹⁾²⁰⁾ 수소 공급의 불안정성을 확대시킬 수도 있다. 또한 수소 인프라 구축 과정에서 수소 생산 및 저장 시설의 안전성에 대한 사회적 우려도 발생할 수 있다.²¹⁾²²⁾ 기술적 측면에서 수소 생산 기술의 상용화에 대한 불확실성도 존재한다(한국산업기술진흥원, 2024, pp.1-10). 기술 개발의 불확실성은 수소 생산 비용을 높이는 방향으로 이어질 수 있으며, 이는 수소를 활용하는 산업의 생산비용뿐만 아니라 수소를 활용한 발전 비용도 높여 제품 가격 및 물가 상승 압박을 강화시킬 수도 있다(Rasul et al., 2022). 또한 수소를 확대하려고 해외에서 생산되는 수소를 수입해오는 것을 계획하고 있으나 생산 및 운송 기술도 아직 미성숙한 상황이므로(Rasul et al., 2022; 임지훈, 장현숙(2023) 해외에서 안정적이며 저렴한 가격의 수소를 수입하는 데 대한 불확실성도 존재한다. 해외 생산 수소의 불안정한 수입은 수소 공급의 불안정성을 확대시킬 뿐 아니라 수소를 활용하는 산업에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 기술 및 정책적 불확실성은 수소 경제의 전망에 대한 불확실성도 높여 민간의 투자 불확실성도 확대시킬 수 있다(한국무역협회, 2023, p.2; 안지영, 2024, pp.1-3).

산업, 가정 및 상업 건물, 수송 등 에너지 수요 절감 및 에너지 효율 향상을 위한 수요 효율화 정책은 에너지 수요를 감소시켜 필요한 전력 시스템의 규모를 줄여 궁극적으로 필요한 투자 수준을 낮추는 영향을 미칠 수도 있다(김지효, 2023, pp.1-3). 또한 각 부문의 에너지 수요 감소는 에너지 소비에 필요한 비용을 낮춰 각 부문의 경제적 부담을 경감시키는 효과도 가져올 수 있다. 하지만 수요효율화 정책은 주로 에너지를 추가로 소비하는 기후변화 적응 정책과는 상충할 수 있으며, 사회적으로 낮은 에너지 수요 감소 및 효율화에 대한 인식은 정책이 도입되었더라도 수요 효율화를 촉진시키려는 행동 변화의 부족으로 이어질 수 있으며, 결국 에너지 수요 변화는 크지 않은 수준에 머무를 수도 있다.

-
- 16) 머니투데이(2023.6.16), “‘수소’ 시장에 풀리는데...‘인프라 부족하다’ 한목소리 나온 이유”, 검색일: 2024.8.23.
 - 17) 인사이트에너지뉴스(2023.12.29), “[신년 특집] 청정수소경제 인프라 구축, ‘어려워도 해야 한다’”, 검색일: 2024.10.9.
 - 18) 글로벌이코노믹(2024.8.19), “‘수소’에 뛰어든 기업들...아직 부족한 수요와 인프라”, 검색일: 2024.10.7.
 - 19) Greenium(2024.1.31), “그린수소 생산 전망 대폭 하향...IEA, 2028 그린수소 프로젝트 단 7% 가동 예상”, 검색일: 2024.10.10.
 - 20) 한경ESG(2024.10.5), “탈탄소 위해 그린 수소 생산 인프라 구축해야”, 검색일: 2024.10.10.
 - 21) 에너지신문(2024.5.22), “수소경제 핵심키워드 ‘안전’...수소안전 어디까지 왔나”, 검색일: 2024.9.27.
 - 22) 시사위크(2021.2.4), “[수소경제, 미래를 열다] 강릉 수소폭발사고 2년, 어떤 교훈 얻었나”, 검색일: 2024.9.27.

재생에너지 확대 정책을 중심으로 에너지 부문에 미치는 영향을 살펴보면, 먼저 국내 송배전망 설치 지연은 계통연계 제약으로 연결될 수 있다.²³⁾²⁴⁾ 빠르게 증가하는 발전 수요에 맞춰 발전설비 역시 빠르게 증가하고 있으나 현재 동해안 신규 송전선로를 비롯하여 송배전망 건설이 지연됨에 따라 안정적인 전력 공급에 문제가 예상된다.²⁵⁾²⁶⁾ 이러한 이슈는 전력 수급 불안정성을 강화시킬 수 있다. 또한 날씨 등으로 인한 간헐성이 존재하는 신재생 에너지 설비가 확대됨에 따라 전력 생산의 불확실성과 불안정성이 높아지고 있다.²⁷⁾²⁸⁾ 일조량이나 풍속 등에 따라 태양광과 풍력발전의 발전량이 달라지며, 이는 신재생에너지를 통한 전력 생산량을 예측하기가 어렵게 만든다(이유수, 2020, pp.44-45).²⁹⁾ 수요 대비 많은 전력이 생산되면, 전력계통이 불안정해지는 것을 막으려고 신재생에너지 출력제한을 시행하게 된다(김완수, 조하현, 2020, pp.43-45). 2017년부터 2024년 9월까지 약 8년간 신재생에너지 출력제한 조치로 발생한 손실은 약 210억 원 수준으로 나타났으며,³⁰⁾ 신재생에너지 설비가 확장되고 충분한 전력망 설비가 확보되지 않는다면 전력망 불안정성이 높아질 수 있으며, 출력제한에 따른 영향은 점차 커질 수 있다(진태영, 이태의, 2023, pp.320-322).³¹⁾ 이를 해소하려면 불확실성에 대응할 수 있는 유연성을 확보해야 한다.³²⁾ 전력수급이 불안정하게 되면, 신재생에너지의 간헐성에 대응하려고 결국 기존 화력발전에 계속 의존할 수 있다. 그리고 재생에너지 발전량이 확대되면 주파수 및 전압의 불안정성이 증가하는 문제도 야기될 수 있다(김완수, 조하현, 2020, pp.38-40). 기존 화력발전은 시스템 부하에 맞춰 발전기 터빈의 회전 속도를 조정하는 등의 방법으로 안정적인 주파수를 유지할 수 있도록 하나, 예측이 어려운 태양광과 풍력 등 신재생에너지의 비중이 커질수록 전력수급 불균형도 확대되어 계통 주파수 변동 역시 커질 수 있다. 또한 신재생에너지가 증가하면 전압상승에 따른 설비 및 기기 문제도 야기할 수 있다(이유수, 2010, pp.44-48). 충분한 유연성 자원이 확보되지 않으면 결국 출력제한으로 이어질 수 있기 때문에, 궁극적으로 전력 시스템 운영 비용이 높아질 수 있다(조종성, 2022, pp.3-5).

23) 전기저널(2023.12.15), “국내 송전망의 현황과 주요 이슈”, 검색일: 2024.10.1.

24) 경향신문(2023.10.25), “전력망 구축 지연…재생에너지 발전 사업자 손실 10조원 넘어”, 검색일: 2024.9.30.

25) 전기신문(2023.12.30), “동맥경화 걸린 송전망…전력대란 경고등 울린다”, 검색일: 2024.4.15.

26) 머니투데이(2024.8.28), “수도권 송전선 지연 ‘7,000억’ 비용 발생…전기요금 인상 부담으로”, 검색일: 2024.9.27.

27) 이유수(2020).

28) 경향신문(2024.3.19), “작년보다 더 큰 ‘대정전 위기’ 오나…봄철 전력수급 불균형 심각”, 검색일: 2024.9.30.

29) 한국원자력신문(2024.4.22), “[칼럼] 수치로 분석한 RE100은 전력설비 이용률 저하와 전기요금 상승요인”, 검색일: 2024.10.8.

30) 에너지플랫폼뉴스(2024.10.14), “과도한 태양광 공급 따른 출력제어조치로 손실비용 ‘500억원’”, 검색일: 2024.10.16.

31) 한경ESG(2023.12.6), “전력망 확충 없이 재생에너지 전환 불가능”, 검색일: 2024.10.16.

32) 이유수(2020).

현재의 상대적으로 높은 신재생에너지 발전 비용(Lee and Jung, 2024; Kim M. C., 2024)은 기업의 재생에너지 구매 비용 부담 증가로도 이어질 수 있다.³³⁾ 점차 많은 기업에서 재생에너지로 생산된 전력만 소비하고자 하는 RE100에 관심을 가지고 참여하고 있다. 하지만 현재 우리나라의 신재생에너지 발전 비용은 다른 석탄, 천연가스, 원자력 발전에 비해 높은 수준으로 나타난다(Lee and Jung, 2024; Kim M. C., 2024). 주요 국가와 비교해도 신재생에너지의 에너지균등화비용(LCOE)이 높은 수준이다.³⁴⁾ 재생에너지 전력 수요는 증가하지만 재생에너지 단가가 높아 신재생에너지 도입 확대가 더딘 상황이다. RE100에 참여하는 기업은 증가하고 있으며, RE100를 달성하려고 국내에서는 기업들이 전력구매계약(PPA: Power Purchasing Agreement)이나 신재생에너지공급인증서(REC: Renewable Energy Certificate) 구매 등을 활용할 수 있다.³⁵⁾ 하지만 높은 신재생에너지 발전 비용과 제한적인 공급은 기업들의 재생에너지 구매 비용을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다.

정책적 측면에서도 재생에너지 지원 정책 확대는 기술발전을 가속화할 수 있다(Samant, Thakur-Wernz, and Hatfield, 2020; Gambhir et al., 2021; Sanchez, Segovia, and Lopex, 2019; IRENA, 2024). 재생에너지 관련 보조금 및 지원 정책으로 신재생에너지 확산을 가져올 수 있을 뿐만 아니라 관련 기술을 지원해 재생에너지 관련 기술이 발전하게 되고, 이는 발전 비용을 낮추는 효과도 가져올 수 있다. 예를 들어, 신재생에너지 경쟁입찰 장기계약 방식 등을 통한 지원은 신재생에너지 발전의 불확실성에 따른 신재생에너지 공급자의 불안정한 수익을 보완함으로써 신재생에너지 발전을 확대하는 데 기여할 수 있다. 하지만 이러한 역할을 하는 재생에너지 지원 정책이 계속 변경되거나 일관성이 부족해지면 재생에너지 확대를 저해할 수도 있다(김은성, 2022; May and Chiappinelli, 2018).³⁶⁾ 재생에너지는 일반적으로 초기 투자비용이 높으며, 장기간에 걸쳐 비용을 회수하는 구조이다. 현재 국내 주요 신재생에너지 지원 정책인 신재생에너지 고정가격계약 경쟁입찰이나 REC 가중치 등은 정책 도입 이후 빈번하게 변경되었으며, 이러한 정책환경의 불확실성은 신재생에너지 사업에 대한 민간 투자 유인을 약화시킬 수 있다(김은성, 2022). 이와 함께 현재 풍력 등 재생에너지 투자 및 설치에 대한 복잡한 인허가 절차는 재생에너지 확대를 저해하는 요인으로 작용할 수 있다(정훈, 2023). 해상풍력을 개발하려면 입지 발굴과 주민수용성을 확보해야 함과 동시에 최대 10개 부처 29개 법률의 인허가를 받아야 하여, 사업 진행에 최소 6년이

33) 머니투데이(2024.3.18), “발빠르게 ‘RE100’ 선언해도… ‘공급부족, 비싼가격’ 기업들 속탄다”, 검색일: 2024.10.4.

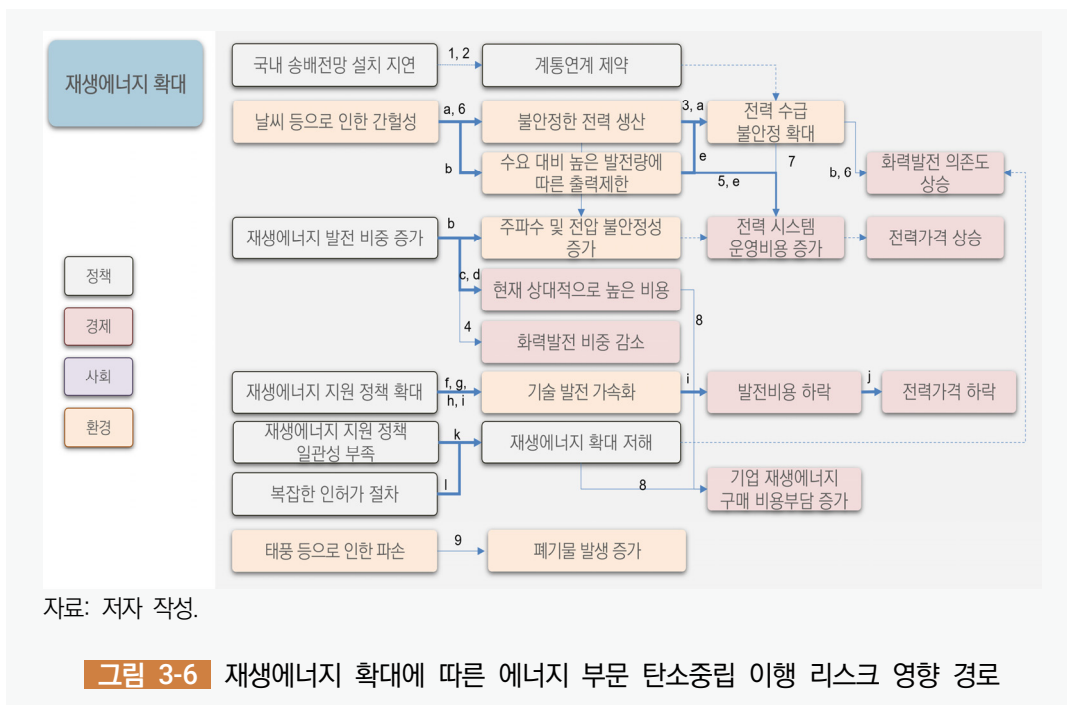
34) 한국일보(2023.10.21), “한국 재생에너지 단가 비싸…태양광·해상풍력 미국의 두배 넘어[갈길 먼 RE100]”, 검색일: 2024.10.4.

35) 에너지경제신문(2021.8.26), “탄소배출권 가격 급상승에 RE100 활성화 기대감↑… ‘아직 속단 어렵다’ 견해도”, 검색일: 2024.10.4.

36) 에너지산업신문(2024.6.11), “[기고]윤석열 정부 신재생 에너지 정책의 세 가지 문제점”, 검색일: 2024.9.24.

소요되는 것으로 나타나 개발이 더딘 상황이다(류경주, 2022, p.3).³⁷⁾³⁸⁾ 이렇게 재생에너지 확대가 저해된다면, 기존 화석연료를 활용한 에너지 시스템에서 저탄소 에너지 시스템으로 전환하는 데 어려움을 겪을 수밖에 없다.

추가적으로 풍력 확대를 살펴보면, 풍력에 대한 부정적인 인식이 지역 주민 갈등에도 영향을 미칠 수 있다(류경주, 2022, pp.3-4; 박성우, 전의찬, 2022; 박종문 외, 2021).³⁹⁾ 예를 들어, 해상풍력 설치에 따라 조업구역이 줄어들 수 있으며, 주변 생태자원에도 영향을 미칠 수 있어 지역 주민 및 어민과 갈등이 야기될 수 있다(류경주, 2022). 풍력발전기가 내는 저주파 소음도 주변 지역 주민의 건강이나 삶의 질에 영향을 미칠 수 있으며, 풍력발전기 설치 및 운영에 대한 지역 주민의 갈등으로 이어질 수 있다.⁴⁰⁾⁴¹⁾ 그리고 해상풍력은 풍력발전기 설치 주변 환경 및 생태계에 영향을 미칠 수 있다는 점(Daewel et al., 2022; Haelters et al., 2013)에서 환경영향을 고려한 풍력발전기를 설치해야 할 필요성이 있다. 이 외의 풍력 관련 탄소중립 이행 리스크를 살펴보면, 태풍 등으로 해상풍력 시설의 파손이나 부식에 따른 주변 환경영향(Kirchgeorg et al., 2018)이나, 해상 케이블 설치 및 관리 어려움에 따른 유지관리 비용 증가 요인도 생길 수 있다.



37) 전기신문(2024.9.27), “김원이 의원, 복잡한 해상풍력-전력망 인허가 한번에 잡는다”, 검색일: 2024.10.4.
 38) 엔지니어링데일리(2024.9.4), “꼭 막힌 해상풍력…‘민간사업자, 인허가 각개격파 한계’”, 검색일: 2024.10.4.

39) 한국해양(2024.6.11), 해상풍력발전 갈등 해결책 찾기(검색일: 2024.10.4)

40) YTN(2023.2.20), “1.5km의 ‘권고’…소음 피해를 주민 몫”, 검색일: 2024.9.30.

41) 농수축산신문(2024.4.16), “해상풍력 두고 지역상회 갈등 ‘심화’…정부가 나서야”, 검색일: 2024.9.30.

태양광 확대에 따른 탄소중립 이행 리스크를 살펴보면, 먼저 산지에 설치되는 태양광은 산사태 위험을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다.⁴²⁾⁴³⁾ 산사태 위험 지역에 설치하는 것을 피하고 토사 유출을 막는 설비 등 대책을 고려해 설치하면 이러한 리스크를 줄일 수 있을 것이다. 또한 태양광 설치 주변 경관훼손 우려도 야기할 수 있다(이상준 외, 2020, pp.34-57). 이러한 리스크들은 이해관계자 간의 갈등을 심화시키는 요인으로 작용할 수 있다(이상준 외, 2020, pp.34-57).

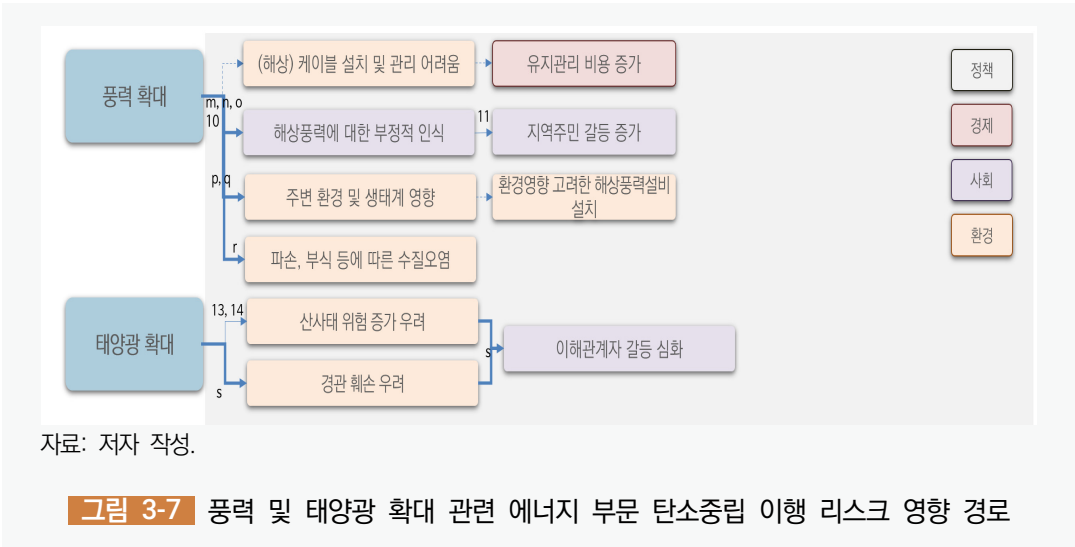


표 3-1 에너지 부문 이행 리스크 분석에 활용된 참고문헌	
구분	참고문헌
논문 및 보고서	a. 이유수(2020), b. 김완수, 조하현(2020), c. Lee, S-T. and Jung, S-M.,(2024) d. Kim M. C.(2024), e. 진태영, 이태익(2023), f. Samant, S., Thakur-Wernz, P., and Hatfield, D. E.,(2020), g. Gambhir et al.(2021), h. Sanchez, S. M. F., Segovia, M. A. F., and Lopex, L. C. R., (2019), i. IRENA(2024), j. Kolb, S. et al.(2020), k. May, N. and Chiappinelli, O.,(2018), l. 정훈(2023), m. 류경주(2022) n. 박성우, 전의찬(2022), o. 박종문 외(2021), p. Daewel, U. et al.(2022), q. Haelters, J. et al.(2013), r. Kirchgeorg, T. et al.(2018), s. 이상준 외(2020), t. Rasul, M. G. et al.(2022)

42) 연합뉴스(2020.8.8), “[팩트체크]산지 태양광설비와 산사태 연관성은?”, 검색일: 2024.10.9.
 43) KBS뉴스(2023.7.25), “[기후는 말한다] ‘산사태 취약’ 산지 태양광 870곳…위치는 비공개?”, 검색일: 2024.10.8.

표 3-1의 계속

구분	참고문헌
미디어 자료	1) 전기저널(2023.12.15), “국내 송전망의 현황과 주요 이슈”
	2) 경향신문(2023.10.25), “전력망구축 지연…재생에너지 발전 사업자 손실 10조원 넘어”
	3) 경향신문(2024.3.19), “작년보다 더 큰 ‘대정전위기’ 오나…봄철 전력수급 불균형 심각”
	4) e-나라지표(2024.8.18), “에너지원별 발전량 현황(2009-2023)”
	5) 월간수소경제(2024.6.19), “전력 수급체계 대변혁 첫발 내디뎌…업계는 ‘실망’”
	6) 한국원자력신문(2024.4.22), “수치로 분석한 RE100은 전력설비 이용률 저하와 전기 요금 상승요인”
	7) 전기저널(2022.1.7), “재생에너지 확산과 미래의 시스템비용”
	8) 머니투데이(2024.3.18), “발빠르게 ‘RE100’ 선언해도… ‘공급부족, 비싼가격’ 기업들 속탄다”
	9) 뉴시스(2024.1.30), “태양광 폐패널, 그저 폐기물?...알고 보니 “버릴 게 없다””
	10) 한국해양(2024.6.11), “해상풍력발전 갈등 해결책 찾기, 현대해양”
	11) 농수축산신문(2024.4.16), “해상풍력 두고 지역사회 갈등 ‘심화’…정부가 나서야”
	12) 서울경제(2022.4.25), “해상풍력단지 주변 어족자원 풍부해져… 생물다양성 증가”
	13) 연합뉴스(2020.8.8), “산지 태양광설비와 산사태 연관성은?”
	14) KBS뉴스(2023.7.25), “‘산사태 취약’ 산지 태양광 870곳…위치는 비공개?”
	15) 월간수소경제(2021.2.27), “수소 생산비용 절감을 위한 정책적 지원 필요”
	16) 김나연(2023), 중국의 수소생산 능력 및 비용 분석
	17) 머니투데이(2023.6.16), “‘수소’시장에 풀리는데… ‘인프라 부족하다’ 한목소리 나온 이유”
	18) 인사이트에너지뉴스(2023.12.29), “청정수소경제 인프라 구축, ‘어려워도 해야 한다’”
	19) 전기신문(2024.3.28), “해외 의존도 높은 청정수소 도입 코앞인데…국내 비축체계 시급”
	20) 글로벌이코노믹(2024.8.19), “‘수소’에 뛰어든 기업들…아직 부족한 수요와 인프라”

자료: 저자 작성.

다. 재생에너지 확대에 따른 영향

에너지 부문의 탄소중립 이행 리스크와 그 파급효과는 재생에너지 확대와 밀접한 연관성이 있다. 에너지 부문의 탄소중립 이행은 기존 화석연료 기반의 에너지 시스템에서 신재생에너지, 수소 등 무탄소 에너지원으로 전환하는 것이며, 앞서 살펴본 탄소중립 이행 리스크 경로는 재생에너지 확대에 따른 영향을 포괄한다고 할 수 있다.

재생에너지의 큰 특징 중 하나는 간헐성이며, 환경적인 요인에 따라 발전량의 변동성이 크게 나타나고 다른 발전원과 달리 발전량을 인위적으로 제어하기가 어렵다. 수요와 공급이 적절한 균형을 맞춰야 하는 에너지 시스템의 특성상 재생에너지의 간헐성 때문에 균형을 맞추기 어려워지며, 공급이 과도하거나 부족한 현상이 발생하여 전력 시스템의 불안정성을 높이는 것이 주된 영향이라고 할 수 있다(이유수, 2020, pp.44-45; 진태영, 이태의, 2023, pp.320-322). 이러한 불안정성을 해소하려면 유연성 자원을 충분히 확보하는 것이 중요하며,⁴⁴⁾ 만약 신재생

44) 전기저널(2020.9.8), “재생에너지 확대에 따른 전력시장제도의 문제점 및 개선방향”, 검색일:

에너지가 확대되는 가운데 불안정성을 해소하지 못한다면 재생에너지 출력제한⁴⁵⁾이 발생하거나 공급 부족에 따른 정전⁴⁶⁾이 발생할 우려도 존재한다. 또한 재생에너지의 발전량이 증가하면 재생에너지의 특성상 전력 시스템 주파수 및 전압 불안정성도 증가할 수 있으며 (김완수, 조하현, 2020, pp.38-40), 이를 대응할 고도화된 전력 시스템이 필요하다.

재생에너지를 확대하는 정책적 관점에서는 일관성 있는 재생에너지 지원 정책이 확대되어야 하며, 재생에너지 확대를 저해하는 인허가 절차를 간소화하거나 사회적 갈등 해소를 중요하게 고려할 수 있다. 재생에너지는 초기 투자비용이 높은 반면, 연료비가 들지 않고 유지보수 비용이 낮아 장기간 전력판매 수입으로 충당하는 구조이기에 신재생에너지 정책의 일관성이 투자 결정에 중요한 요인으로 작용한다. 그리고 해상풍력 등 신재생에너지가 확대되려면 인허가 절차 간소화와 함께 지역 주민과의 갈등 등 사회적 갈등 해소가 중요하며, 정책적으로 이해관계자의 의견을 수렴하고, 갈등을 조정해나가는 절차가 필요하다고 할 수 있다.

라. 소결

에너지 부문은 탄소중립 이행과 직접적으로 연관이 되며, 주요 탄소중립 정책은 에너지 부문에 직간접적으로 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 에너지 부문의 탄소중립 이행 리스크와 그 파급경로를 살펴보았다. 특히, 탄소중립 전환은 기존 화석연료에서 벗어나 신재생에너지 등 에너지 전환과 밀접하게 연관되어 있어 에너지 부문에서는 신재생에너지 확대에 주로 초점을 맞춰 이행 리스크와 파급경로를 살펴보고, 추가적으로 수소 확대의 영향도 살펴보았다.

재생에너지 확대는 전력 부문의 탄소중립 전환에 필수적이나, 간헐성에 따라 전력 생산을 예측하기 어려워 전력 공급의 불안정성이 확대될 수 있다. 전력 수요에 비해 신재생에너지 공급이 과도하게 증가하면, 전력망 안정성을 유지하기 위해 신재생에너지로 생산된 전력을 전력망에 들어오지 못하게 출력제한을 해야 하며, 이는 전력 시스템 운영 비용 증가로 이어진다. 또한 향후 탄소중립 전환 과정에서 재생에너지 비중이 높아지면 전력 주파수 및 전압의 불안정성이 높아질 수 있다는 리스크도 존재한다. 이러한 측면을 고려할 때 재생에너지의 간헐성을 보완하려면 유연성 자원을 확보해야 한다. 또한 현재 국내 신재생에너지 발전비용은 다른 국가들에 비해서나 다른 발전원에 비해 상대적으로 높은 수준이며, 아직 공급 증가가 제한적인 상황이다. 반면 최근 RE100 등으로 기업들의 신재생에너지 전력 수요가 빠르게 증가한다는 점은 기업의 재생에너지 구매 비용 증가로 이어질 수 있다.

2024.10.2.

45) 조종선(2022).

46) 전기신문(2023.5.11), “2030년 이후 대정전 경고…재생에너지 불안요소는?”, 검색일: 2024.11.12.

정책적인 측면에서도 보조금, 기술 개발 지원 등 신재생에너지 지원 정책은 신재생에너지 기술 발전을 가속화하여 미래 발전비용을 낮춰 전력 가격을 낮추는 효과도 가져올 수 있다. 이렇게 긍정적 효과가 있을 수도 있으나, 오히려 일관성이 부족한 재생에너지 지원 정책은 재생에너지 확대를 저해할 수도 있다. 재생에너지는 초기 투자비가 높고 장기간에 걸쳐 회수하는 구조여서 장기적으로 안정적이며 일관성 있는 재생에너지 지원 정책이 제시되어야 재생 에너지에 지속적으로 투자할 수 있을 것이다. 또한 현재의 복잡한 인허가 절차와 주민 갈등 등은 재생에너지 확대를 저해하는 요인이므로 탄소중립을 이행하려면 해결해야 할 것이다.

본 연구에서는 수소 확대에 따른 이행 리스크도 일부 살펴보았다. 수소는 현재 생산, 저장 및 운송 기술의 불확실성이 높은 상황이며, 수소 생산, 저장 및 운송 인프라가 부족하다 보니 수소 공급의 불안정성이 확대될 수 있다. 향후 수소환원제철 등 미래 기술 발전에 따라 수소 수요가 증가할 수 있으나, 이러한 기술들도 불확실성이 크기에 수소 수요처에 대한 불확실성도 존재하여 수요 및 공급 측면 모두에서 불확실성이 존재한다. 수소의 공급과 수요 측면의 기술적 불확실성이 존재하며, 안정적인 수소 시스템을 마련하려면 대규모 투자와 인프라가 구축되어야 한다는 점을 고려하면 앞선 재생에너지 사례와 유사하게 일관성 있는 정책이 필요하다. 일관성이 부족한 수소 정책과 불확실성의 확대는 민간의 투자 불확실성을 높여 수소 생산 및 활용을 저해하는 리스크를 야기할 수 있다.

2. 수자원

가. 탄소중립 정책

본 연구에서 수행한 수자원 부문 탄소중립 정책 조사는 ‘탄소중립 녹색성장 국가전략’ 및 『제1차 국가 기본계획』(이하, 제1차 기본계획)을 중점으로 실시하였다(관계부처 합동, 2023). 또한 수자원 관련 정책 및 전략은 『2021년 환경부 탄소중립 이행계획』(환경부, 2021), 「물관리 분야 공공 주도의 과감한 2050 탄소중립 전략」, 「K-water 2050 탄소중립 로드맵」을 참고하였고, 수자원 관련 재생에너지원별 자료는 『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』을 참고하였다(산업통상자원부, 2023).

수자원 부문은 『제1차 기본계획』의 10대 부문 내 독립적으로 존재하지 않으나, 공공자원이자 물을 활용하거나 물 환경과 관련된 신재생에너지(수력, 수열, 수상태양광, 해상풍력, 폐수-바이오가스, 소수 등)와 수자원 시설(상·하수도 시설, 댐·홍수터 등)은 전환, 폐기물, 수소, 건물, 흡수원 등의 부문에 포괄적으로 포함된다. 『제1차 기본계획』 내 수자원 부문 관련 정책은 아래의 <표 3-2>와 같이 정리하였다.

표 3-2 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획: 수자원 부문 관련 정책

관리번호	과제명	주관부처 (협조부처)
1-1-1	청정에너지 시스템으로의 전환 가속화	
	③ 합리적이고 실현 가능한 재생에너지 확대 해상풍력 확대를 통한 재생에너지 원별 균형 보급 * 태양광:풍력 비율: ('21년) 87:13 → ('30년) 60:40	산업부
	④ 청정에너지 추가 확대 태양광, 수소 등 청정에너지 확대하여 『제10차 전력수급기본계획』 대비 온실가스의 추가 감축을 추진	산업부
1-8-2	해양 흡수원의 체계적 복원·관리 및 흡수력 규명 확대 ② 바다숲 확대 조성 및 조성방안 다각화 * 바다숲 조성 면적(누적): ('22년) 292km ² → ('30년) 540km ²	해수부
1-8-3	산림흡수원의 보전·복원 및 신규 흡수원 확대	
	① 내륙습지의 탄소흡수 활용 증진	환경부
	② 도시숲 조성, 유허토지 조림 등 신규 흡수원 확충 댐홍수터, 4대강 수변구역 매수토지에 습지 및 생태숲 등 흡수원 조성 * 댐홍수터, 수변구역 등 생태 흡수원 조성 : ('20년) 29.66km ² → ('30년) 83.75km ² → ('50년) 115.92km ²	산림청 (국토부, 환경부, 농식품부)
2-2-1	홍수·가뭄에 대비한 물안보 강화	
	① 지역 맞춤형 실시간 홍수대응력 강화	환경부 (통일부, 행안부, 기상청)
	② 가뭄 대비 수자원 안정성 및 활용성 제고	환경부(행안부, 기상청)
	③ 물순환체계 수질 회복으로 건전한 물환경 조성	환경부

자료: 관계부처 합동(2023)을 바탕으로 저자 재작성.

『2021년 환경부 탄소중립 이행계획』(환경부, 2021)은 2050 탄소중립 사회 실현을 위한 세부과제 내 수자원 부문에 해당하는 에너지 전환, 흡수원 관리, 농축산·식품 부문 관리와 관련된 계획을 제시하였다(표 3-3 참조). 에너지 전환 과제는 『제1차 기본계획』보다 환경부 이행계획이 수자원 활용 에너지에 대한 세부적 목표를 자세히 제시하여 목표연도, 목표 발전량, 목표 시설 개소를 명시하고 있다. 흡수원 관리 과제는 『제1차 기본계획』에서 동일하게 언급되고 있다.

표 3-3 2021년 환경부 탄소중립 이행계획(2021): 수자원 부문 관련 정책

분류	세부과제
1-1 경제구조의 저탄소화	① 에너지 전환 - 주민참여형 수상태양광 개발 확대: '30년까지 2.1GW 공급 목표 - 친환경 수열에너지 활성화: '40년까지 1GW 공급 목표 - 환경기초시설 신재생에너지(수소연료 포함) 생산·보급 기지화 * 광역정수장 등 환경기초시설에 재생에너지(태양광 등) 생산시설 설치 지원 * 하수찌꺼기 활용한 바이오가스 생산 확대: '24년까지 13개소
	⑤ 흡수원 관리 - 보호지역 탄소흡수원 확대: '30년까지 해양 30% - 도심·수변 등의 탄소흡수원 확대 * 댐 유역 주변 훼손지 대상 생태 복원사업 시행: '25년까지 37개 댐 주변 훼손부지 복원
	⑦ 농축산·식품 부문 관리 - 저탄소 농업 기반 구축 - 가축분뇨 활용 친환경 에너지 생산 확대 * 가축분뇨처리시설 20개소 이상 바이오에너지화 시설 도입

자료: 환경부(2021)을 바탕으로 저자 재작성.

환경부는 2021년 5월 한국수자원공사, 한국환경공단, 한국환경산업기술원 등 산하 공공기관과 함께 『물관리 분야 공공 주도의 과감한 2050 탄소중립 전략』을 제시하였다. 환경부는 신재생에너지 활성화 방안으로 공공 건축물 수열에너지 시범적용('21년~), 민간 건축물 수열에너지 보급 지원('22~'25년), 강원도 수열 융복합 클러스터 조성(~'27년), 주민참여형 수상태양광 확대(~'30년, 2.1GW), 물환경 기초시설 신재생에너지 개발, 정수장 소수력 발전을 활용한 수소 생산 시범사업 추진 등의 내용을 제시하였다. 환경공단은 하폐수 분야 에너지효율 향상, 바이오가스 시설 확충(96개소), 그린수소 생성 사업(27개소), 하폐수 열에너지 활용 시범사업(1개소) 추진을 발표하였다. 한국수자원공사는 2021년 12월에 'K-water 2050 탄소중립 로드맵'을 수립하여 2050년까지 온실가스 706만 톤 감축을 목표로 설정하고, 탄소제로 물관리, 물에너지 확대, 그린수소 활성화, 흡수원 조성이라는 4대 전략을 제시하였다.



『제10차 전력수급기본계획(2022-2036)』(산업통상자원부, 2023)에 포함된 수자원 부문 관련 재생에너지원 중 태양광이 가장 큰 비율을 차지하며, 발전소 연계와 관련하여 새만금 수상 태양광 1·2단계(1,200MW, 900MW) 설비계획이 작성되어 있다. 해상풍력의 경우, 에너지원의 다각화를 위한 태양광·풍력 간 발전량 비율 개선(『제1차 기본계획』과 동일한 내용)과 더불어 국내 산업발전 내 해상풍력 배후항만 적기 조성, 해상풍력 O&M 서비스 육성 등의 내용이 명시되어 있다. 수력발전은 저탄소전원 전용 전력시장 다원화 방안 대상으로 언급되었고, 양수발전은 신규 전력수급 전망 자료에서 3개 지역과 설비내역(영동1·2 각 250MW, 홍천1·2 각 300MW, 포천1·2 각 350MW)이 작성되었다. 양수발전은 발전설비 정격용량 기준 2023년 4.7GW에서 2036년 6.5GW로 증가하는 전망 결과가 제시되었다.

나. 탄소중립 정책 이행 리스크 영향 경로 파악

탄소중립 정책에 따른 수자원 부문 이행 리스크 영향 경로 분석은 논문, 보고서, 기사 등 문헌조사로 파악하였다. 기존 문헌에서 언급된 정책 시행 과정 및 결과에 따른 리스크를 조사하고자, 선행연구 내 ‘transition risk’, ‘risk’, ‘impact’, ‘effect’, ‘challenge’, ‘barrier’, ‘concern’, ‘side effect’ 등의 용어를 포함하는 내용을 바탕으로 영향 리스트를 구성하였다. 각 리스크는 4가지 이행 리스크(정책, 경제, 사회, 환경)와 직간접 영향으로 구분하였다. 직접 영향은 선행연구 내 연구자가 리스크 평가를 진행하여 언급한 영향이며, 간접 영향은 문헌 내 정성적 분석 및 직접 영향에 따른 후속 현상 및 결과로 발생한다고 언급된 영향으로 조사하였다. 각 전파 경로의 유의성(significance) 정도를 나타내려고 참조한 선행연구 중 학술 논문은 굵은 실선으로 표시하고, 보고서와 기사는 가는 실선, 연구자의 견해는 점선으로 표시하였다.

Table 2
Risk assessment criteria system of offshore PV projects.

	Criteria	Explanations
(C1) Economic risks	(C11) Initial investment risk [17]	Initial investment mainly includes equipment purchase cost, installation cost, construction cost, reserve cost, interest in period of construction, etc. Any one or several of the cost overruns will put tremendous pressure on the investors' funds.
	(C12) Operation and maintenance cost risk [25]	Due to sea salt corrosion, sea breeze invasion and other reasons, PV equipment is prone to face problems such as deformation, metal corrosion, material aging etc. The operation and maintenance costs will gradually increase with the operating period.
	(C13) Solvency risk	Compared with onshore PV, offshore PV projects need to invest more funds for plant construction, operation and maintenance. The loan portion of offshore PV project investment accounts for a large proportion, so it faces a large debt repayment risk.
	(C14) financing risk [12]	The financing risk indicates the uncertainties generated from financing activities such as financing channel selection and financing guarantees, etc.
(C2) Technical risks	(C21) Equipment selection risk	Equipment selection mainly includes the selection of PV modules and inverters. The failure of the PV module and inverter may lead to the loss of total power generation.
	(C22) Grid-connected technology risk [24]	Unreasonable grid-connected technology poses great risks to the safety and stability of grid power.
	(C23) PV array design risk	Irrational PV array design may result in insufficient utilization of solar radiation and reduce the power output of the project.
	(C24) Floating bracket design risk	The floating bracket material needs to have performances of durability and corrosion resistance, and without polluting the water environment.
(C3) Environmental risks	(C25) Site selection risk	Improper site selection may cause the project not to be constructed as scheduled, and the project may fail to achieve the expected amount of power generation.
	(C31) Policy support Risk [14]	China's offshore PV projects are still in the pilot phase, relevant policy support and guidance are lacking. Policy support risk needs to be highly valued.
	(C32) Solar resource risk [21]	Unfavorable weather conditions such as continuous rainfall or cloud cover may cause solar radiation not able to meet the requirements of the power generation voltage.
	(C33) Marine environment risk	Bad weather such as typhoons, thunderstorms, etc., or marine disasters such as tidal sand and tsunamis may cause devastating damage to offshore PV power plants.
(C4) Market risk	(C34) Visual effect risk [4]	The reflection phenomenon may cause a visual impact on coastal residents. Besides, large-scale PV power farms also generate visual impacts on the coastal landscapes.
	(C35) Ecological damage risk	Ecological damage risk refers to the negative impact of the project on the surrounding natural ecological environment. For example, it affects the propagation of plankton and occupies the coastal habitat of birds.
	(C41) Demand risk	The market demand depends on the current market capacity and potential market scale. In general, the economically developed eastern coastal areas have less demand risk.
	(C42) Market competition risk	Competitors for offshore PV projects include conventional coal-fired thermal power and other forms of new energy generation.
	(C43) Grid access risk [18]	The output of offshore PV power generation systems is characterized by intermittent and random nature. Power grid companies will impose some restrictions on the grid connection of offshore PV power generation for the sake of their own interests.

1차 영향 조사의 표 예시

자료: Gao et al.(2021)(좌); Chen and Su(2022)(우).

2차 영향 조사의 문장 예시

그림 3-9 참고한 선행연구의 리스크 기준 및 요인

The papers that were selected in this study indicated that the most prevalent ecological impacts of offshore wind turbines are the noise and electromagnetic fields that are generated during installation and operation, which affect various marine animals and birds. The construction of offshore wind turbines may also change or disturb the marine environment, such as water quality, sediment, and topography. This may directly or indirectly affect the physiology or behavior of marine life and, in turn, the structures and functions of marine ecosystems, food webs, trophic levels, and even fishery resources [53]. Offshore wind turbines are installed at sea, which inevitably has

수자원 부문에서는 재생에너지 확대 정책 중 수자원과 관련된 수상태양광 확대, (소)수력·양수 발전 확대 정책과 연안 물 환경에 직간접 영향을 미칠 수 있는 해상풍력 확대를 대상으로 전파 경로를 조사하였다. 먼저, 수상태양광 발전은 호수, 댐, 저수지, 연못 등의 수면을 활용하여 부유식으로 설치한 태양광 발전시스템 시설이다. 수상태양광은 육상태양광과 비교하여 음영 회피지역에 대한 적은 제약, 지반 대비 낮은 수온과 수변반사 산란파에 의한 높은 발전효율, 비교적 적은 환경 훼손과 광합성 저하로 인한 녹조 발생 저감 효과 등의 장점이 있다(박형욱, 2022).

수상태양광 확대 정책에 따른 이행 리스크 영향 경로는 아래 그림으로 도식화하였으며, 분석한 문헌리 스트는 아래 <표 3-4>에 정리하였다. 조사한 리스크가 발생하게 되는 시점을 기준으로 분류한다면, 정책을 시행하는 현재 시점에서는 전력계통 부족, 기술 불안정성, 기존 수자원 정책과의 상충, 정책 지원 및 방향 부족, 높은 초기 투자, 부정적 인식과 같은 리스크가 나타날 수 있다. 반면, 확대 정책된 이후 미래 시점에서는 유지관리 비용 상승, 어업 및 운송 활동 방해, 해양 생태계 영향, 수상 레크리에이션 지장, 고용 변화 및 경관 훼손과 같은 리스크가 언급되었다. 수상태양광 확대 정책에 따른 이행 리스크를 분석한 결과, 1차 영향으로는 환경 리스크가 네 가지 형태로 가장 빈번하게 언급되었으며, 이 외에도 경제, 정책, 사회 리스크와 함께 기술적 리스크가 추가로 구분되어 나타났다. 2차 영향으로는 전력 판매 가격 변동, 용수 공급 부족, 어업량 감소, 부동산 가격 변동 등 다양한 경제 리스크가 두드러졌다. 경제 리스크 중 초기 투자 비용은 정량적으로 계산되어 기존 지상 태양광 프로젝트보다 4~30% 높다는 점이 확인되었으며(Almeida et al., 2022; Kumar et al., 2021), 생태계 영향이나 정책 지원 부족 등의 리스크는 정성적으로 언급되었다. 특히, 자연경관 훼손과 수상 레크리에이션 활동 제한 등의 리스크는 저수지나 댐 수면에 설치되는 수상태양광 확대 정책에서 고유하게 나타나는 이행 리스크로 언급되었다(Almeida et al., 2022).

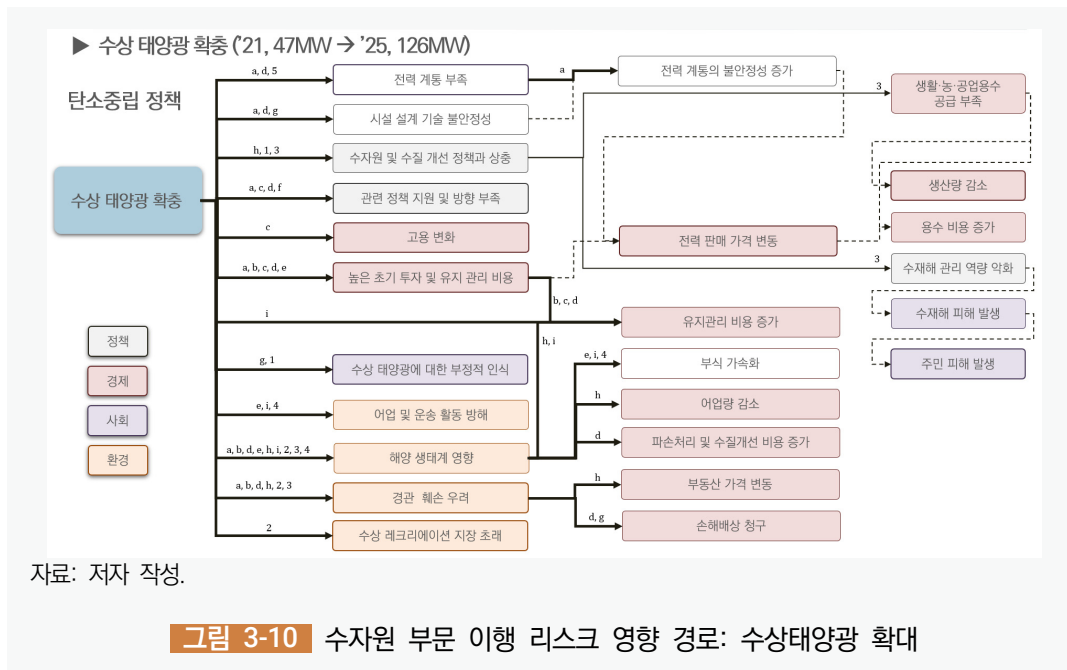


표 3-4 수상태양광 확대 이행 리스크 선행연구

구분	참고문헌
논문	a) Gao, J., Guo, F., Li, X., Huang, X., and Men, H.(2021), b) Wu, Y., Li, L., Song, Z., and Lin, X.(2019), c) Mayer, J. et al.(2020), d) Kumar, M., Niyaz, H. M., and Gupta, R.(2021), e) Wang, J., and Lund, P. D.(2022), f) Mateo, C. et al.(2018), g) Gatzert, N., and Kosub, T.(2016), h) Almeida, R. M. et al.(2022), i) Djalab, A. et al.(2024)
미디어 자료	1) 한수원, 군위댐 수상태양광 발전시설 설치추진에 주민들 분노 - 프레시안 2) 스위스 수상태양광 발전 현황 및 쟁점(kotra.or.kr) - KOTRA 해외시장뉴스 3) “군위댐에 수상태양광 발전소 설치 절대 안 된다” - 경매매일신문 4) 에너지 전환 무엇이 문제인가? (4)수상태양광발전 - 뉴스서천 5) 답답했던 국내 최대 임하수상태양광건설, 재개되나 - 전기신문

자료: 저자 작성.

해상풍력발전은 해상에 설치되는 풍력발전 시스템 시설로서 육상풍력발전에 비해 지역적 제약이 낮아 대규모 단지 개발에 유리하고 해상의 높은 풍속으로 발전효율이 우수하다는 장점이 있다(류경주, 2022). 해상풍력 확대에 따른 이행 리스크를 현재 시점과 미래 시점으로 분류해보면, 우선 전력계통 부족, 국내 기술 부족, 복잡한 인허가 과정, 정책 불확실성 및 지원 부족 등 정책 리스크와 높은 비용, 부정적 인식의 경제·사회 리스크가 나타날 수 있다. 국내 기술 부족과 정책의 불확실성을 정량화한 연구로 Park and Kim(2019)은 정권 교체에 따라 국산 풍력 터빈 시스템의 국산화율이 90%에서 50~70%까지 감소한 것으로 추정함을 언급하였다. 미래 시점에는 대부분의 환경 리스크(어업 및 운송 활동 방해, 해양 생태계 영향, 소음 발생, 수질오염 증가)가 나타날 수 있다.

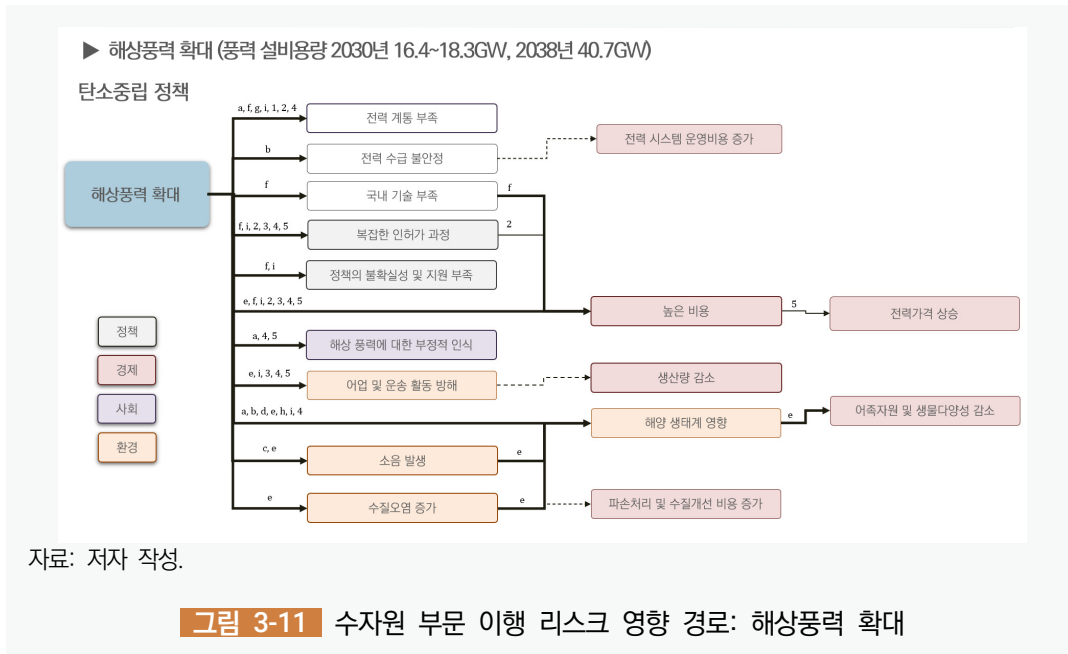


표 3-5 해상풍력 확대 이행 리스크 선행연구

구분	참고문헌
논문	a) Staid, A. and S. D. Guikema(2015) b) Perveen, R., N. Kishor, and S. R. Mohanty(2014) c) Hastings, M. C. and A. N. Popper(2005) d) Drewitt, A. L. and R. H. Langston(2006), e) Chen, C. H. and N. J. Su(2022) f) Park, J. and B. Kim(2019), g) Koh, J. H., and E. Y. K. Ng(2016) h) Li, C. et al.(2022), i) Govindan, K(2023).
미디어 자료	1) 2024, 해상풍력 '비상의 해' 뿔까(에너지신문). 2) 2050 탄소중립 이행의 핵심, 해상풍력(한국일보). 3) Offshore wind industry faces challenges and opportunities as global growth continues. 4) A turning point for offshore wind - Global opportunities and risk trends. 5) Broken Blades, Angry Fishermen and Rising Costs Slow Offshore Wind.

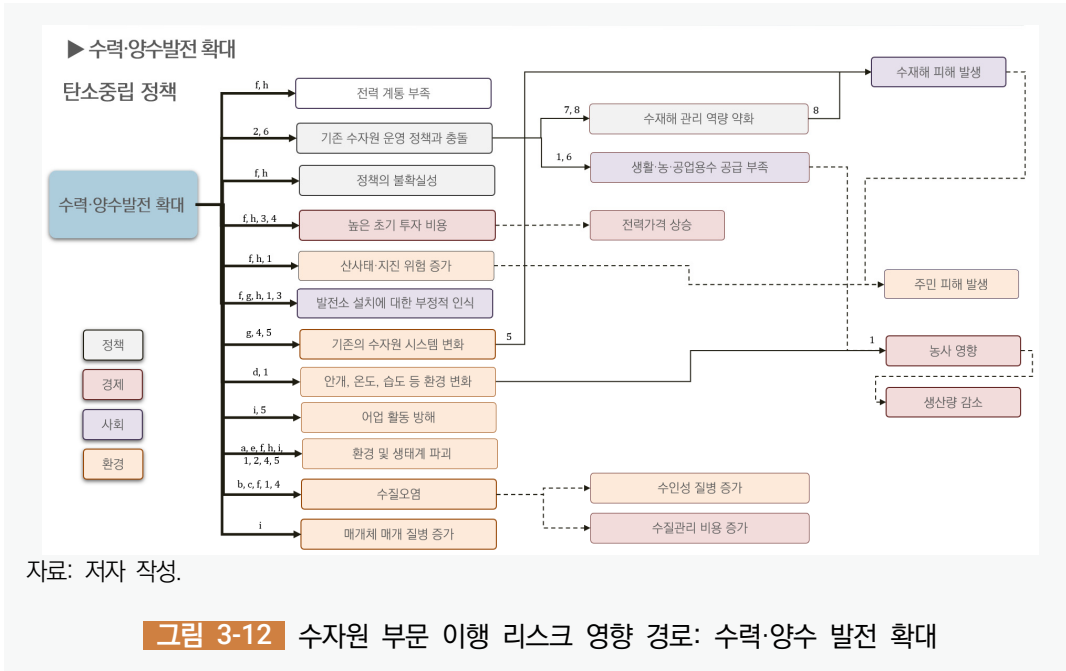
자료: 저자 작성.

해상풍력 확대 정책에 따른 이행 리스크의 1, 2차 영향을 살펴보면, 대부분의 경제 리스크가 2차 영향에 해당하는 것을 확인하였다. 높은 비용의 경우, 많은 선행연구에서 1차 영향으로도 언급되었지만, 국내 기술 부족, 복잡한 인허가 과정 등에 따른 2차 영향으로 주로 언급되었다. 환경 리스크 중 해양 생태계 영향은 주요한 1차 영향으로 나타났지만, 해상풍력발전단지 설치로 인한 소음이 어류와 수생 생물에 청각 장애, 방향 감각을 잃는 것 등 영향을 미칠 수 있음에 따라 2차 영향으로도 분류되었다(Chen and Su, 2022). 해상풍력 확대 정책에 따른 전파 경로 분석을 진행한 연구로 Govindan(2023)은 DEMATEL(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) 방법론을 적용하여 인도의 해상풍력 에너지 구현에서 기술적·기능적 장벽을 분석하여 인식 부족이 가장 큰 영향을 미친다는 결과를 도출하였다.

마지막으로 수력발전은 물의 위치에너지를 수차를 돌려 기계에너지로 변환하고 수차의 축에 부착된 발전기를 작동시켜 전기에너지로 변환하는 발전 방식이며, 다른 재생에너지와 비교하여 발전기로 유입되는 물의 양을 쉽게 조절할 수 있어 출력이 안정적이라는 장점이 있다. 또한 양수발전은 에너지저장장치의 대안으로 제안되며 전력수요가 적고 가격이 저렴한 시간대에 양수기를 사용하여 상부 댐에 물을 올리고 전력수요가 높은 시간대에 수력발전을 하며 전력을 저장할 수 있다는 특징이 있다. <그림 3-12>는 수력·양수발전 확대에 의한 이행 리스크 전파 경로를 보여준다.

수력·양수 발전 확대에 따른 이행 리스크 중 현재 시점에서 발생하게 되는 리스크로는 정책의 불확실성, 높은 초기 투자 비용, 부정적 인식으로 분석되었지만, 수상태양광과 해상풍력 대비 상대적으로 언급이 적었다. 본 연구에서 조사한 3가지 재생에너지원 중 수력·양수 발전이 가장 오래된 발전원으로 현재 시점에서 리스크는 가장 적은 것으로 사료된다. 그러나 수력·양수 발전은 기존 토지이용과 환경을 변화시키는 형태로 미래 시점에 발생하게 되는 리스크가 가장 많았다. 특히, 환경 리스크가 주로 언급되며, 산사태·지진 위험 증가, 기존 수자원 시스템 변화, 안개·온도·습도 등 환경 변화, 어업 활동 방해, 환경 및 생태계 파괴, 수질오염, 매개체 매개 질병 증가 등이 언급되었다. Kuriqi et al.(2021)은 33개국의 기존 수력·양수 발전에 따른 생물, 수질, 수문학적 변화 및 지형에 미치는 영향 중 하류의 수자원 고갈, 수질 오염, 서식지 파괴, 생물 다양성 악화 등이 공통적으로 나타났음을 조사하였다.

이와 같이 수력·양수 발전 확대에 언급된 1차 영향은 환경 리스크가 가장 많았으며, 2차 영향으로는 수재해 피해, 용수 공급 부족, 수재해 관리 역량 악화 등 사회 리스크와 농사 영향인 경제 리스크가 미디어 자료에서 조사되었고, 연구진에서는 전력 가격 상승, 주민 피해 발생, 수인성 질병 증가, 수질관리 비용 증가 등의 영향을 2차 영향으로 제시하였다. Ezcurra et al.(2019)은 멕시코 연안의 댐 건설 유무에 따른 해안 침식이 연간 7.9~21.5ha에 달하고, 이에 따른 어업 서식지 손실과 생물 다양성 저하 등의 환경 피해 비용이 수력 발전 이익의 2배에 달할 것으로 추정하였다.

**표 3-6** 수력·양수 발전 확대 이행 리스크 선행연구

구분	참고문헌
논문	a) Rahman, A., Farrok, O., and Haque, M. M(2022), b) Fearnside, P. M(2016), c) Ezcurra, E. et al.(2019), d) Xu, X., Tan, Y., and Yang, G(2013), e) Kuriqi, A. et al.(2021), f) Shaktawat, A., and Vadhera, S(2021), g) Evans, A., Strezov, V., and Evans, T. J(2009), h) Kucukali, S(2014), i) Markandya, A., and Wilkinson, P(2007).
미디어 자료	1) 홍천양수발전소 건설계획의 문제점 조명. 2) Addressing the risks of pumped storage hydropower for a net zero world. 3) 한국경제(2024.3.5), “‘24시간 풀가동 문제 없다’…전 세계가 베풀하는 ‘물 배터리’” 4) The Top Pros And Cons of Hydropower. 5) Hydropower projects threatened by increasing floods and droughts due to climate change, warns WWF study. 6) 담양자치신문(2023.7.5), 모내기철 외동제 용수공급 차질 ‘말뚝’ 7) 발전용 댐, 가뭄·홍수조절에도 활용한다. 8) 전국 10개 수력발전댐기능조정 진통…일부 댐 수해 키워.

자료: 저자 작성.

다. 재생에너지 확대에 따른 영향

재생에너지 확대에 따른 수자원 부문의 영향은 단기적 영향과 중장기적 영향으로 구분할 수 있다. 단기적 영향은 현재 시점에서 정책을 시행하는 과정에서 발생하는 리스크이며, 주로 수상태양광, 해상풍력, 수력·양수 발전 확대에 따른 전력계통 부족, 기술 불안정성, 정책 불확실성, 인허가 과정 등과 같은 정책 리스크로 나타난다. 이러한 리스크는 정책 실행 과정인 현재 시점에서 발생하므로 단기적 영향으로 분류된다. 이러한 단기적 영향은 선행연구에서의 ‘implementation risk’로 설명될 수 있다(Bachner, G et al., 2020; Van Vliet et al., 2020).

반면, 중장기적 영향은 정책 시행 이후 나타날 수 있는 현상 및 결과로 이어지는 영향이며 ‘consequential risk’로 설명되는 바와 같이 미래 시점에서 결과로 나타나는 리스크로 설명된다. 주로 경제, 사회 및 환경 리스크가 해당한다. 경제 리스크로는 전력 판매 가격 변동, 유지 관리 비용 증가, 생산량 감소 등의 결과가 간접적인 영향으로 언급되었고, 환경 리스크로는 환경 변화, 생태계 영향, 수질·소음 등 환경오염 발생 등이 직접적인 영향으로 언급되었다.

수자원 부문 재생에너지원에서 전력계통 부족, 세부 이행계획 부족, 부정적 인식 문제, 생태계 영향 등이 가장 빈번하게 논의되는 공통된 이행 리스크로 나타났다. 특히, 전력계통 문제는 에너지 확보에서 지속적으로 제기되는 주요 문제로 언급된다. 재생에너지원별 세부 정책과 이행 계획 부족은 비교적 근래에 추진되기 시작한 재생에너지 확대 정책으로 인한 이행 지표 및 평가의 미흡과 지속적으로 변화하는 정치적인 영향 또한 존재하여 산업 내 불확실성을 높이는 리스크로 야기된다.

또한 재생에너지 발전소 건설에 대한 부정적 인식은 에너지원 확대뿐 아니라 전력계통도와도 밀접한 관련이 있어 정책 시행과 전력의 안정적 공급에 영향을 미치는 주요한 리스크 요인으로 언급된다. 이와 관련해, 탄소중립 정책의 이행 리스크를 평가하는 데 부정적 측면과 긍정적 측면에 대한 정성적인 논의는 많지만, 중립적인 입장에서 이행 리스크를 평가하고 분석하는 신뢰도 있는 자료 기반의 정량적 연구가 아직 부족하다. 더불어 이로 인해 부정적 인식에 대응하는 역량이 부족한 것으로 사료된다.

마지막으로, 물 환경에 시설과 장비가 설치되는 수자원 부문 관련 재생에너지원의 대표적 환경 리스크로서 생태계 영향 요인은 사회적 인식과 경제 활동 변화를 일으킬 수 있는 주요한 리스크로 많은 연구에서 언급되고 있다. 그럼에도 불구하고 여전히 그 정량적인 영향에 대한 평가 및 모니터링은 부족한 상황이다.

라. 소결

수자원 부문 관련 재생에너지 이행 리스크 분석은 수상태양광, 해상풍력, 수력·양수 발전 확대 정책에 따른 영향을 중심으로 이루어졌다. 다양한 학술논문, 보고서, 미디어 등의 문헌을 조사하여 직간접적 영향을 도출하고, 이를 5가지 이행 리스크 분야로 구분하여 전파 경로를 제시하였다.

현재 시점에서 발생하는 ‘implementation risk’를 저감하는 정책적 시사점으로 Co-creation 접근법을 활용하여 사회적 수용성을 강화하는 방안을 우선적으로 제시하고자 한다. 기술 혁신에 대한 불신을 줄이고 효과적으로 실현하려면 다양한 이해관계자가 참여해야 하며, 이러한 적극적인 참여 및 공동의 논의를 유도한 사례로는 정책과 기술 개발을 동시에 설계한 오스트리아 철강 및 전력 부문 전환 프로젝트를 참고할 수 있다(Bachner et al., 2020). 또한 재생에너지 마이크로그리드와 에너지 저장 시스템을 연결하여 전력계통 안정성을 확보하고, 소수력 발전과 수상태양광 전력망 연계 등 지역에서 생산되는 발전원을 다원화할 수 있다. 더불어 이를 토대로 지역 맞춤형 에너지 자립 정책을 시행해야 할 것이다.

미래 시점에서 발생하는 ‘consequential risk’를 저감하는 방안으로는 재정적 인센티브 제공과 가격 안정화 정책, 사후환경영향평가 제도의 개선 등을 고려해야 한다. 지역 주민이 참여하는 경제 모델을 활용하여 탄소중립 에너지 전환이 지역 경제를 활성화하는 수단으로 활용되어 시너지를 도출할 수 있다. 임하담 수상태양광의 경우, 주민참여형 수익 공유 모델을 적용해 지역사회에 경제적 혜택을 제공함으로써 이를 바탕으로 수용성을 높이는 계획을 마련하였다. 더불어 사후환경영향평가 제도를 개선해 재생에너지원별 표준화된 평가 기준을 마련해야 한다. 사후 모니터링 및 평가 결과를 바탕으로 정책을 수정하고 대안을 마련하려면 예측하지 못한 환경 변화에 대응할 법적 권한과 제도적 절차 개선이 필수적이다.

마지막으로, 본 연구를 포함한 기존의 탄소중립 이행 리스크의 분석 연구는 주로 정성적인 방법으로 이행되었다. 여기에 분석 결과의 신뢰도를 높이고 객관적으로 논의를 위한 정량적인 분석을 함께 수행할 필요가 있다. 정량적인 영향평가 결과를 제공하려면 기초자료의 구축과 관련 모형의 개발 및 고도화가 매우 중요하다. 예를 들어, 김재화와 김현석(2015), 윤정혜와 강상목(2020)은 재생에너지 발전량에 따른 이산화탄소 배출량을 계산하였고, Mekonnen et al.(2015)은 신재생에너지 발전소 건설 및 운영, 송전계통 설비 시설 등 제조과정을 포함하여 증가하는 물사용량 변화량을 정량화하고 물발자국을 계산하였다. 이처럼 정량적인 방법을 활용하여 탄소배출 저감량, 자원 활용 및 사회경제적 비용을 산정하고, 이를 비용-편익 관점에서 정책을 분석하여 탄소중립 목표를 달성하는 최적의 정책 방향을 수립해야 한다. 이로써 수자원 부문의 이행 리스크를 사전에 예측하고, 정책적 대응을 강화함으로써 지속 가능한 발전의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

3. 농업

가. 탄소중립 정책

농업부문 탄소중립 정책은 ‘2050 농식품 탄소중립 추진전략’⁴⁷⁾과 ‘2050 탄소중립을 위한 축산부문 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략’(이하, 축산부문 감축 전략)(농림축산식품부, 2024a), 그리고 이들을 요약 및 현행화한 『탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획』(이하, 제1차 기본계획)에 명시되어 있다(관계부처 합동, 2023). 본 연구는 『제1차 국가 기본계획』에 속한 감축 정책을 중심으로 분석하되, 『제1차 국가계획』에 포함되어 있지 않은 수단별 목표치는 농식품 탄소중립추진전략과 축산부문 감축 전략을 활용하였다.

우선 『제1차 기본계획』의 2030년 농축수산부문 감축목표는 2018년 농축수산부문 배출량의 27.1%를 감축한 18.0백만 톤 CO₂eq이며, 감축 목표 달성을 위한 농축산부문 과제는 <표 3-7>과 같다.

표 3-7 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획: 농수산 부문

관리번호	과제명	주관부처(협조부처)
1-5-1	저탄소 농업기술 및 친환경농업 확산을 위한 농업구조 전환	
	① 디지털·그린바이오 기술을 활용한 저탄소 농업기반 마련	농식품부(농진청)
	② 친환경농산물 생산·유통·소비 활성화를 위한 친환경농업 확산	농식품부(농진청)
1-5-2	농업(재배) 분야 온실가스 배출 감축	
	① 논물관리 기술 개발 및 보급	농식품부(농진청)
	② 화학비료(질소질비료) 사용 감축	농식품부(농진청)
	③ 바이오차 개발·보급을 통한 토양 탄소 저장 능력 제고	농식품부(농진청)
1-5-3	축산 분야 온실가스 배출 감축	
	① 저메탄사료 및 저단백사료 개발·보급	농식품부(농진청)
	② 생산성 향상을 통한 온실가스 및 가축 분뇨 저감	농식품부(농진청)
	③ 가축분뇨 활용 확대	농식품부(농진청)
1-5-4	농업 분야 화석에너지 사용 축소 및 에너지 전환	
	① 시설농업의 저탄소 에너지 전환	농식품부(농진청)
	② 친환경 농기계 개발 보급	농식품부
1-5-5	농촌 재생에너지 확대	
	① 농촌태양광 등 재생에너지 공급 확대	농식품부
	② 농촌마을 RE100 추진	농식품부

자료: 관계부처 합동(2023), p.63.

47) 농림축산식품부(2021).

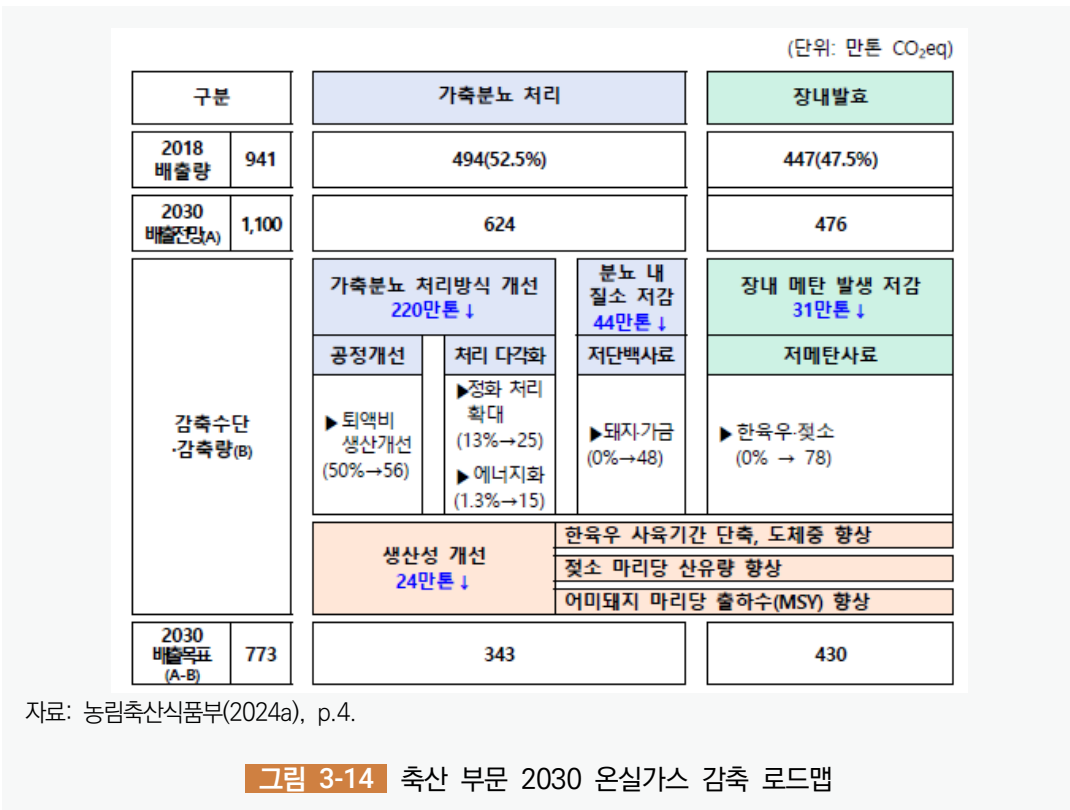
구 분(천톤CO ₂)			2030년		2040년		2050년	
			목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
농업	합 계			5,809		6,460		8,012
	지표	소계		540		540		540
		간단관계(중간물때기)(2주, %)	61.1	474	61.1	474	61.1	474
		논물알개대기(%)	10	66	10	66	10	66
	수단	•농업용수 이용 효율화	•용수관리 자동화·디지털화		•용수공급체계 개편		•용수관리 효율화·고도화	
		•논물관리 체계 구축	•기술 및 배출계수 개발		•현장보급·적용, 컨텐츠 개발		•유역 물관리 고도화	
		•배출량 통계 구축	•물관리 및 유기물사용 통계구축		•관련 통계 적용		•관련 통계 고도화	
		•저감기술 효과 검증	•측정 및 검증 체계 구축		•신규 저감기술 개발		•신규 저감기술 적용	
	지표	소계		2,008		2,144		2,269
		질소비료 저감(kg/ha)	115	267	115	268	115	268
		바이오차보급(토양개량제 대비 보급률%)	9	58	9.5	62	10	65
		농경지 투입 분뇨량 저감(%)	33	1,683	34	1,814	35	1,936
	수단	•비료감축 및 시비 처방 확대	•기초데이터 수집·기술개발		•데이터 개선·기술 사용화		•데이터 개선 및 기술 고도화	
		•농약적정사용 체계구축	•시스템 구축		•시스템 유지·보수		•시스템 고도화	
		•바이오차 검증 및 농가보급	•방법론등록/제조사설·구축 및 보급사업화 방안마련		•바이오차 보급		•바이오차 보급 확대	
		•경운 최소화	•친환경 집적지구 자장법제화 검토		•집적지구 확대(20%)		•집적지구 확대(30%)	
	지표	소계		751		915		1,075
		저메탄사료 보급(2세이상 %)	30	121	65	261	100	402
		분뇨내 질소 저감(%)	13.2	630	13.2	654	13.2	673
	수단	•저메탄사료 개발	•2세 이상 한우우·젖소 저메탄 사료 30% 보급		•2세 이상 한우우·젖소 저메탄 사료 65% 보급		•2세 이상 한우우·젖소 저메탄 사료 100% 보급	
		•저단백사료 개발	•조단백질 함량 2% 감축		•조단백질 함량 2% 감축		•조단백질 함량 2% 감축	
	지표	비농업계이용(에너지와 정화처리비율%)	33	2,058	34	2,212	35	2,355
	수단	•가축분뇨 에너지화 시설 확충	•지역주민 이익공유방안 마련		•에너지 수요처 인근 시설 확충		•가축분뇨연소량 10%에너지화	
		•가축분뇨이용바이오차생산	•바이오차 고체연료, 퇴비수출 등 비농업계 이용 기반마련		•바이오차 고체연료 등 퇴비의 비농업계 이용 확대		•가축분뇨의 새로운 처리방식 개발	
	지표	소계		452		649		1,773
		식단변화 가축 감소율(%)	-	-	-	-	10.2	995
		축산생산성 향상(스마트축사 보급율%)	30	389	40	507	50	579
		대체식품(%)	4.4	63	9.7	142	15	200
	수단	•식생활소비 개선	•전문인력양성·교육기관 지정		•우수체험공간 지정·교육확대		•체험공간 및 교육 지속 확대	
		•저탄소·대형 식자재 공급·반·구축	•대체식품 소재 발굴 및 기술개발		•대체식품 소재 상품화 및 시장형성		•대체식품 소재 시장 고도화	
에너지	합계			49		141		231
	지표	고효율 에너지설비(중유감소 %)	9	14	30	28	50	41
		농기계(경유/등유수요 %)	10/5	35	50/25	113	100/50	190
	수단	•시설원에 에너지 절감	•넷제로 기초DB 구축		•에너지 절감시설 확충		•에너지 절감시설 확대	
		•유통시설 에너지 절감	•관리시스템 도입		•시설 도입 지원		•시설 도입 지원강화	
		•저탄소 축산업 기반 마련	•에너지 관련 연구용역		•에너지 사용량 통계 고도화		•통계기반 감축 활동	
		•농기계 에너지 전환	•노후 농업기계 폐차 지원		•전기 농기계 등 개발 및 보급		•전기 충전소 등 설치 지원	
	감축량 총계(A)			5,858		6,601		8,243
	배출전망(B)			24,653		24,401		24,450
	감축 후 배출량(B-A) (수산 포함한 농축수산 전체목표)			17,940		16,744		15,454

자료: 농림축산식품부(2021), p.9.

그림 3-13 2050 농식품 탄소중립 추진 전략 로드맵

농식품 탄소중립추진전략은 『제1차 기본계획』에 포함한 수단들에 대한 구체적인 감축목표를 명시하고 있다. 구체적으로 농식품 탄소중립 추진전략은 논물관리(54만 톤), 농경지 분뇨 및 질소 투입 저감(201만 톤), 저메탄 및 저단백 사료 보급(75만 톤), 정화처리 확대 등 가축분뇨의 비농업계 이동(206만 톤), 대체식품 개발 및 가축부문 생산성 향상(45만 톤), 농업부문 에너지 전환(5만 톤)을 바탕으로 2030년까지 586만 톤 감축을 목표로 설정하였으며, 이는 앞서 언급한 『제1차 기본계획』의 감축목표와 거의 일치한다.

축산부문 감축 전략은 2030년까지 2018년 축산부문 배출량의 18%인 168만 톤 CO₂eq 감축을 목표로 설정하였다. 축산부문 감축 전략의 수단별 감축목표는 앞서 언급한 농식품 탄소중립 추진전략의 수단별 감축목표와 크게 다르지 않다. 다만, 축산부문 감축 전략의 경우, 농식품 탄소중립 추진전략에 비해 가축분뇨처리 개선을 통한 감축은 증가한 반면, 생산성 향상을 통한 감축은 감소한 것이 특징이다.



농축산업의 온실가스 발생량은 우리나라 전체 발생량의 약 3%로 매우 작은 부분을 차지한다. 하지만 2050년까지 비용 효과적인 넷제로를 달성하려면 농축산업의 온실가스 감축이 매우 중요하며, 이러한 중요성은 시간이 갈수록 더욱 커질 것으로 예상된다. 다만, 농식품 탄소중립 추진전략과 축산부문 감축 전략의 경우, 감축수단 간의 경로의존성을 고려하지 않은 단점이 있다. 또한 현재까지 감축 이행에 따르는 리스크와 파급효과 관련 연구 역시 매우 부족한 실정이다. 따라서 농축산업을 대상으로 한 감축정책 추진 리스크와 파급효과에 대한 연구를

바탕으로 예상치 못한 정책효과를 줄이고, 감축 수단 간의 상승효과를 극대화할 수 있는 효과적인 감축 정책 설계가 필요한 시점이다.

마지막으로 태양광 발전에 대한 사회적 수요 증가와 태양광 발전을 위한 토지 수요 증가로 영농형 태양광에 대한 사회적 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 구체적으로 『재생에너지 3020 이행계획』(산업통상자원부, 2017)은 농촌지역 태양광 10GW 공급을 정책 목표로 설정하였다. ‘2050 농식품 탄소중립 추진전략’(농림축산식품부, 2021)은 동 목표를 재생에너지 확대 필요성에 명시하고, 이를 위한 장단기 로드맵을 제시하였다. 또한 『제10차 전력수급기본 계획(2022-2036)』(산업통상자원부, 2023) 역시 2036년까지 태양광 발전 정격 용량을 65,700MW까지 확대하는 것으로 정책 목표로 설정하였다.

이러한 사회적 관심에 대응하고자 최근 정부는 ‘영농형 태양광 도입 전략’(농림축산식품부, 2024)을 발표하였다. 주요 내용은 다음과 같다: 1) 영농형 태양광 발전 주체를 농업인으로 설정하여 영농형 태양광 발전 수익을 농업인에게 귀속되게 함. 2) 비우량농지 중심으로 집적화를 유도하려고 농업진흥지역 외 농지에 한해 타용도 일시사용허가 기간을 8년에서 23년으로 연장하고 관련 인센티브를 제공함. 3) 고도화된 관리체계를 구축하여 부실 사업자를 방지함. 하지만 정부의 영농형 태양광 확장 의지에도 불구하고 영농형 태양광 이슈는 최근 규제 혁신, 농촌공간재구조화, FIT 일몰 등 다양한 이슈와 맞물려 정책 이행 리스크가 확대되는 실정이다.

이에 본 연구에서는 농식품분야 탄소중립 정책 이행 리스크를 간략히 살펴보고, 최근 이슈화 되는 영농형 태양광 확대에 의한 이행 리스크를 더욱 중점적으로 분석하고자 한다.

나. 농식품 분야 탄소중립 이행 리스크

농식품 분야 탄소중립 정책은 크게 재생에너지 확대를 포함한 에너지 전환, 축산분야 감축, 그리고 논물 관리 및 화학비료 저감을 포함한 경종 부문 감축으로 구성된다. 이 중 축산 부문 감축량은 농식품분야 목표 감축량에서 차지하는 비율이 매우 클 뿐만 아니라 관련 감축 수단의 이행 리스크 역시 다른 부문에 비해 큰 편이다.

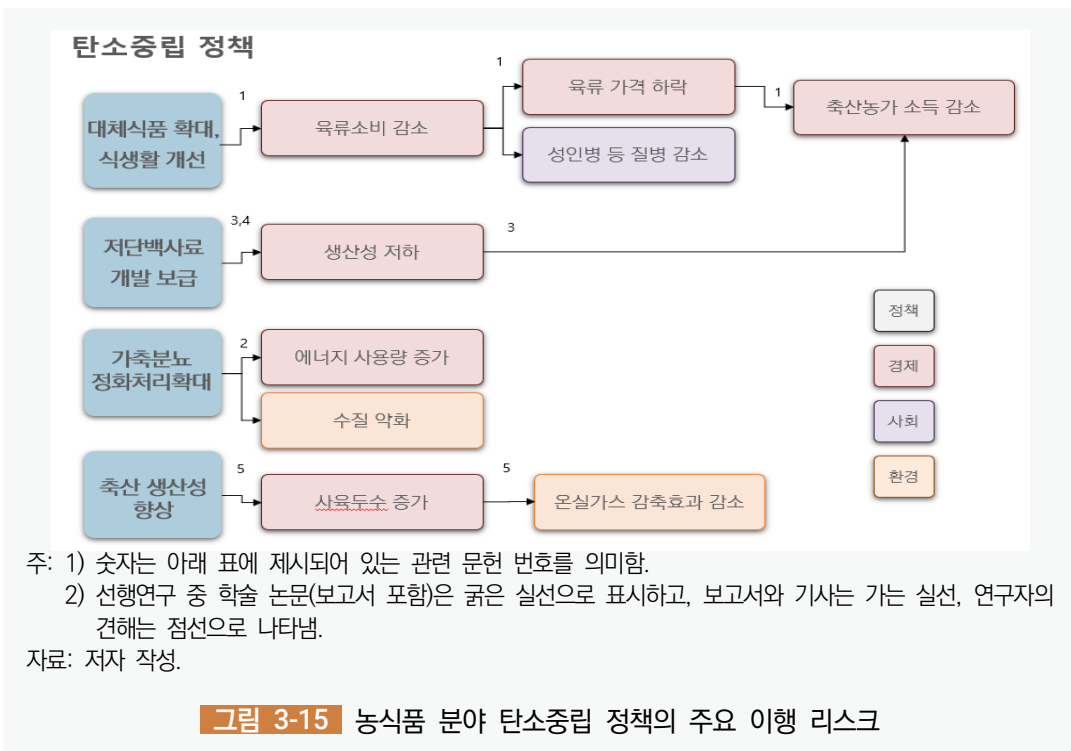


표 3-8 농식품 분야 탄소중립 정책 이행 리스크 관련 선행연구

구분	참고문헌
보고서	1) 홍연아 외(2022), 2) 국가물관리위원회(2022), 3) 정학균 외(2021), 4) 정학균 외(2022), 5) 이용건 외(2023)

자료: 저자 작성.

이에 본 연구는 『제1차 기본계획』에 속한 축산 관련 감축수단을 바탕으로 농식품부문 탄소중립 이행 리스크를 분석하였다. 특히, 축산 관련 감축수단에는 공급관리(축산생산성 향상)와 수요관리(대체식품 확대, 식생활 개선)가 동시에 포함되어 있다.⁴⁸⁾ 이 중 축산생산성 향상수단은 비육기간 단축(한우), 두당 산유량 향상(젓소), MSY⁴⁹⁾ 향상(돼지)을 포함한다. 하지만

48) 각 정책의 경제적 파급효과에 대한 자세한 내용은 홍연아 외(2022)와 이용건 외(2023)를 참조 바람.

49) Marketed-pigs per Sow per Year의 약자이며, 1년 동안 모든 한 마리가 출하하는 비육돈 마릿수를 의미함.

축산 생산성 향상은 축산물의 가격하락과 이로 인한 수요상승 및 사육두수 증가로 이어질 수 있으며, 이는 생산성 향상 정책의 탄소감축 효과를 감소시킬 위험이 있다. 실제 이용건 외(2023)의 연구 분석 결과, 축산업 생산성 향상이 가격 하락과 축산업의 생산 증가 및 온실가스 배출 증가를 유발하는 것으로 나타났다. 이에 반해 수요관리 수단인 대체식품 확대와 식생활 개선은 축산관련 농식품 산업의 생산감소를 유발하는 것으로 분석되었다(홍연아 외, 2022). 이는 축산 부문의 효율적인 감축과 이행 리스크 관리를 위해서는 공급관리와 수요관리의 통합적 접근으로 관련 산업의 생산과 감축 간의 상충효과를 최소화하는 노력이 필요함을 의미한다.

그 외에도 퇴비·액비 살포량 감축을 위한 축산분뇨의 정화처리 증가는 정화처리 및 가축분뇨 운반에 필요한 에너지사용량(국가물관리위원회, 2022)과 수질오염 부하량을 증가시킬 위험이 있다. 마지막으로 한우 비육후기 저단백사료 급여 시 평균 도체중은 일반사료 급여에 비해 14.4kg/마리 감소하며 이로 인해 마리당 기대수익이 13만 9,175원 감소하는 것으로 분석되었다(정학균 외, 2021). 이러한 가축분뇨 정화처리 증가와 저단백사료 급여 확대라는 의도치 않은 정책효과는 정책의 지속가능성과 정책 수용성에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

다. 영농형 태양광 확대에 따른 이행 리스크

1) 영농형 태양광 정의 및 종류⁵⁰⁾

본 연구에서는 재생에너지 중 영농형 태양광을 중심으로 재생에너지 확대에 따른 이행 리스크를 분석하였다. 영농형 태양광은 농지를 활용한 태양광 발전시설 중 영농과 발전을 병행할 수 있는 시설을 의미한다. 영농형 태양광의 이론적 배경은 일조량 중 작물의 생장에 필요한 수준 이상의 일조량을 활용하여 전기를 생산하는 것이다. 따라서 이러한 영농형 태양광은 농지전용이 필요하지 않다는 점에서 농지전용 태양광과 구별되며, 생산이 동시에 이루어진다는 점에서 염해농지 태양광과도 구별된다.



자료: 김종익, 조상민(2023), p.8.

그림 3-16 태양광 발전시설 구분

50) 정학균 외(2023a).

2) 영농형 태양광 장단점

영농형 태양광의 가장 큰 장점은 앞서 언급한 것과 같이 농작물 재배와 태양광 발전이 동시에 가능하다는 점이다. 이는 영농형 태양광이 농가소득 증진과 동시에 기존의 농촌형 태양광의 문제점으로 지적되던 재생에너지 생산을 위한 농지전용을 최소화할 수 있음을 의미한다.⁵¹⁾ 부수적으로는 영농형 태양광을 설치해 과도한 강수 및 강설, 높은 일사량과 수분 부족으로 인한 피해 역시 줄일 수 있다.

반면, 영농형 태양광의 단점은 수익성이 불안정하다는 점이다. 실제 영농형 태양광 관련 연구 대부분은 영농형 태양광의 수익성 분석에 초점을 맞추고 있다(정학균 외, 2023a; 김종익, 조상민, 2023). 영농형 태양광의 수익성을 결정짓는 요소는 설치 비용(공사비, 농지보전 부담금, 한전 계통연결 비용) 및 운영비용(인버터 교체 비용, 전기 안전 관리 대행 비용, 보험료, 폐기물 처리 비용, 전기료 및 수선비 등), 발전량, 전력 판매 가격, 작물 재배 수입 등이다. 이 중 초기 비용과 발전 가격, 대출금리, 영농형 태양광 운영기간 등은 시장과 제도에 따라 유동적으로 변할 수 있어 높은 초기 설치비용과 함께 영농형 태양광 설치 농가의 소득 안정성의 위험요인으로 작용할 수 있다. 또한 부채지주에게 발전 수익 부담 귀속 가능성 역시 존재한다. 마지막으로 영농형 태양광 설치로 인한 일조량 감소는 함께 재배하는 작물의 단수를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

영농형 태양광의 확대는 기술적인 문제로 전력계통에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.⁵²⁾ 구체적으로 기상조건 혹은 밤과 낮에 따라 출력 변동성이 심한 영농형 태양광이 확대되면 안정적 전력망 운영에 필요한 순부하량을 예측하기 어려워진다. 특히, 전남과 전북같이 태양광 발전 비중이 높은 지역에서는 영농형 태양광 확대로 낮에는 전력을 과잉 생산하는 대신, 저녁에는 전력이 부족하여 다른 발전원을 새로이 가동해야 하는 ‘오리 부하곡선’이 발생할 수 있다. 또한 상대적으로 발전단가가 낮은 원자력 등의 발전 출력을 상쇄시켜 발전단가를 상승시킬 수도 있다. 마지막으로 계통연계 이격거리 증가 역시 영농형 태양광 설치 및 운영 비용을 증가시키는 요인 중 하나이다.

본 연구에서는 앞서 언급한 영농형 태양광의 장단점을 바탕으로 영농형 태양광 확대의 이행 리스크를 수익성, 농지제도와 상충, 농업환경자원 훼손을 중심으로 분석하고자 한다.⁵³⁾

51) 2017년부터 2022년 5월까지 태양광 발전을 위해 전용된 농지는 1만 342ha임.

52) 이윤희(2020); 유재국(2024).

53) 다만, 전력계통 불안정성에 관한 내용은 신재생에너지의 공통된 부분임을 고려하여 제외함.

3) 영농형 태양광 확대 이행 리스크: 경제성

영농형 태양광에 대한 국내 연구 대부분은 영농형 태양광의 경제성 분석에 초점을 맞추고 있다.⁵⁴⁾ 이는 영농형 태양광의 경제성 확보가 정책 목표 달성을 위한 농가 수용성 증대의 전제조건이기 때문이다.

영농형 태양광 설치로 인한 경제성은 농업소득과 발전소득을 기반으로 한다. 우선, 영농형 태양광 설치에 함께 재배하는 작물의 단위면적당 생산성 변화를 통해 농가소득에 영향을 미친다. 구체적으로 녹색에너지연구원 자료를 참고한 정학균 외(2023a)에 따르면, 녹차를 제외한 실험에 참여한 모든 작물, 즉 벼(12.6%), 마늘(21.5%), 양파(16.0%), 감자(10.0%), 배추(15.1%), 포도(2.0%)의 단위면적당 생산성은 모두 감소하는 것으로 나타났다(표 3-9 참조). 또한 이상호(2023a)는 영농형 태양광 설치로 인한 작물별 감수율을 벼 15.7%, 포도 24.0%, 배추 12.2%, 마늘 22.4% 배 6.7%, 양파 17.6%, 콩 16.4%로 설정하였다. 이상호(2023b)는 영농형 태양광 설치가 벼와 배추의 단위면적당 생산성을 각각 20.0%, 13.0% 감소시키는 반면, 포도의 생산성에는 영향을 주지 못한다고 가정하였다. 마지막으로 벼 재배를 가정한 연구 대부분은 영농형 태양광으로 인한 감소율을 20%로 가정하였다.⁵⁵⁾

표 3-9 실증단지 주요 재배 품목 및 단수 감소율 현황

(단위: 개, %)

품목	벼	마늘	양파	배	포도	감자	배추	녹차
농가 수	20	9	12	3	4	10	6	2
단수 감소율	12.6 (15)	21.5 (3)	16.0 (4)	22.0 (2)	2.0 (3)	10.0 (2)	15.1 (3)	-29.8 (2)

주: 단수 증가율의 ()는 실제 조사 농가 수를 나타냄.
자료: 정학균 외(2023a), p.16.

영농형 태양광 설치로 인한 발전소득은 태양광 설비 유형, 시설 규모, 사업 기간, 자기 자본, 이자율, 전력판매가격, 발전효율 감소율 등 다양한 변수에 영향을 받는다. 이 중 발전효율 감소율, 태양광 발전 설비 유형, 시설규모, 자기자본 등은 당해 기술 수준과 영농형 태양광 사업자 개인의 선택에 의존하는 반면, 전력판매가격과 이자율, 사업기간 등은 거시 경제 혹은 제도적 여건에 크게 좌우된다.⁵⁶⁾ 이에 본 연구에서는 제도적 여건이 태양광 발전소득에

54) 신동원 외(2021); 순병민, 신동원(2021); 정학균 외(2023a, 2023b); 김종익, 조상민(2023); 이상호(2023a, 2023b).

55) 신동원 외(2021); 순병민, 신동원(2021); 김종익, 조상민(2023); 이상호(2023a, 2023b).

56) 태양광 설비 유형, 사업규모, 자기자본 비중은 태양광 발전 설비 비용에 포함되는 직접 재료비와 노무비, 간접비, 토지비, 운영유지비 등을 직접적으로 결정함. 이러한 요소들은 설치 시 결정되는 요소임을 고려한다면, 해당 요소에 관한 시나리오를 바탕으로 영농형 태양광 발전소득의 불확실성을 분석하는 데는 한계가 있을 것으로 판단됨.

미치는 영향을 문헌연구를 통해 보다 구체적으로 분석하고자 한다.

우선, 대부분의 문헌에서 태양광 발전 전력판매가격 시나리오는 현재 운영되는 장기고정가격 입찰제도의 경쟁입찰 상한가 변화를 바탕으로 구성하였다.⁵⁷⁾ 장기 고정가격 입찰제도는 경쟁 입찰로 성전된 재생에너지 발전사업자가 신재생에너지 공급의무자⁵⁸⁾와 20년간 고정된 가격으로 신재생에너지 공급인증서(REC: Renewable Energy Certificate)를 공급하는 계약을 체결하는 제도이다.⁵⁹⁾ 장기 고정가격 입찰 전력판매 가격은 <표 3-10>과 같이 산정된다.⁶⁰⁾

표 3-10 장기 고정가격 계약 방식 및 공급인증서 지급단가(2023년 기준)

고정가격 계약 방식
고정가격 = 기준전력거래가격 + (입찰가격 - 기준전력거래가격) × 가중치 - 단, SMP는 계약체결을 위해서 제시된 기준전력거래가격을 적용 [기준전력거래가격: 86,350원/MWh(통합)] - 가중치는 입찰 참여서 신청내용을 기준으로 산정함. 단, 설비확인, 설비변경 및 사후관리 등으로 고정가격 산정 시 적용된 가중치가 변경되는 경우 변경된 가중치를 적용한 고정가격으로 변경 계약하여야 함
공급인증서 지급단가
공급인증서(REC) 지급단가 = (고정가격 - 월 단위 전력거래가격) ÷ 가중치 - 월단위 전력거래가격이 고정가격을 초과하면 공급인증서(REC) 지급단가는 '0'으로 적용 - 월단위 전력거래가격은 전력거래처에 따라 한국전력공사에서는 월 가중평균 SMP를, 전력거래소에서는 시간대별 SMP를 적용

자료: 정학균 외(2023a), p37.

각 연구에서 사용한 시나리오는 고정가격을 차지하는 입찰가격과 경쟁입찰 상한가와 동일하다고 가정하였다. 경쟁입찰 상한가의 변동 정도는 계통한계가격(SMP: System Marginal Prices)와 REC 가격 전망치를 활용하거나(정학균 외, 2023a), 5~10% 등락을 일괄적으로 적용하기도 하였다(신동원 외, 2021; 김종익, 조상민, 2023). 시나리오 분석 결과, 고정가격변화에 따른 B/C의 변동폭은 약 -12.1~9.2%로 나타났다(정학균 외, 2023a; 김종익, 조상민, 2023).⁶¹⁾

둘째, 현 「농지법」하에서 영농형 태양광을 설치한 농가가 영농형 태양광을 운용할 수 있는 타용도 일시사용허가 기간은 8년이다. 하지만 영농형 태양광 운영 기간이 8년이면 영농형

57) 고정가격 매입제도는 '신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침(산업부 고시)' 및 '공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙(신·재생에너지센터 공고)'을 바탕으로 하며, 소형태양광에 대한 고정가격계약제도(2023년 7월 28일 폐지)와 장기 고정가격 입찰제도가 있음.

58) 신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Energy Portfolio Standard)에 따라 총발전량의 일정 비율을 신재생에너지로 공급해야 하는 대규모 발전사업자를 의미함.

59) 정학균 외(2023a), pp.36~37.

60) 정학균 외(2023a), pp.38~39.

61) 신동원 외(2021)는 고정가격 하락 시나리오(SMP와 REC 가격이 20년 가격 대비 연간 5%, 2%씩 각각 하락)를 분석함. 분석 결과, 고정 전력판매가격의 하락은 영농형 태양광 설치 농가의 농가소득을 설치 전 농가소득에 비해 약 3.5% 하락시키는 것으로 나타남.

태양광의 B/C는 1보다 적은 것으로 분석되었으며(정학균 외, 2023a, 2023b; 김종익, 조상민, 2023), 대부분의 연구에서 앞서 언급한 장기 고정계약 입찰제도의 계약기간 혹은 영농형 태양광의 경제수명인 20년을 영농형 태양광 운영 기간으로 설정하였다(신동원 외, 2021; 순병민, 신동원, 2021; 정학균 외, 2023a, 2023b; 김종익, 조상민, 2023; 이상호, 2023a, 2023b). 구체적으로 영농형 태양광 운영기간을 8년에서 20년으로 늘리면, 영농형 태양광의 B/C는 약 60% 이상 증가하는 것으로 나타났다(정학균 외, 2023a; 김종익, 조상민, 2023). 이러한 결과는 비록 제한된 시나리오를 바탕으로 한 결과이기는 하지만 농지제도 관련 위험이 고정가격 변동에 따른 영농형 태양광 수익 위험에 비해 상대적으로 크다는 것을 의미한다.

마지막으로 거시변수의 변화로는 금리변동을 활용하였다(신동원 외, 2021; 정학균 외, 2023a; 김종익, 조상민, 2023). 이는 높은 영농형 태양광 설치비가 비용으로 인해 자기자본이 아닌 대출로 영농형 태양광을 설치하는 것이 일반적이기 때문이다. 분석 결과, 대출금리에 변동에 따른 경제성의 변화는 크지 않은 것으로 분석되었다. 구체적으로 정학균 외(2023a)는 대출 금리가 2.8%에서 1.75%로 하락하면 영농형 태양광의 경제성이 4.8% 개선된다고 계산하였으며, 김종익, 조상민(2023)은 금리가 2.25%에서 4.5%로 증가할 경우, 영농형 태양광의 경제성이 11.3~11.6% 악화하는 것으로 분석되었다.⁶²⁾

지금까지 분석한 문헌에서는 대부분 발전수익의 변동성을 중심으로 분석하였으며, 분석 결과 발전 수익에는 영농형 태양광 운영기간이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 영농형 태양광의 경제성은 크게는 함께 재배하는 농작물 생산과 발전 수익으로 나뉘며, 농작물 생산으로 인한 수익은 영농형 태양광 편익의 30% 이상을 차지할 것으로 예상된다(정학균 외, 2023a). 따라서 발전소득 관련 위험 연구와 더불어 영농형 태양광 설치로 인한 생산성 변화와 농업소득의 변화에 대한 연구 역시 추가로 진행될 필요가 있다.

4) 영농형 태양광 확대 이행 리스크: 농지제도와 상충⁶³⁾

영농형 태양광 확대의 가장 큰 제도 및 정책적 리스크는 농지제도와 상충한다는 점이다. 현재 농지에 대한 구체적인 행위 제한은 「농지법」 제32조(용도구역에서의 행위 제한)에 따라 농업진흥구역과 농업보호구역으로 구성된 농업진흥지역에만 적용된다. 우선, 농업진흥구역의 경우, 농수산물 가공 및 처리시설, 공동시설 등 농업 행위와 직접적으로 연관된 시설만 허용하고 있어 영농형 태양광 발전시설의 설치 원칙적으로 불가능하다.

62) 다만, 두 연구에서 가정한 자기자본 비율과 설치비 등이 상이하여 시나리오에 따른 경제성 변화를 일반화하는 데는 한계가 있음.

63) 해당 내용은 정학균 외(2023a)와 김종익, 조상민(2023)을 요약함.

표 3-11 농지법의 농지의 타용도 일시사용허가 등 및 용도구역에서의 행위 제한

제32조(용도구역에서의 행위 제한)

- ① 농업진흥구역에서는 농업 생산 또는 농지 개량과 직접적으로 관련된 행위로서 대통령령으로 정하는 행위 외의 토지이용행위를 할 수 없다. 다만, 다음 각 호의 토지이용행위는 그러하지 아니하다.
1. 대통령령으로 정하는 농수산물(농산물·임산물·축산물·수산물을 말한다. 이하 같다)의 가공·처리 시설의 설치 및 농수산업(농업·임업·축산업·수산업을 말한다. 이하 같다) 관련 시험·연구 시설의 설치
 2. 어린이놀이터, 마을회관, 그 밖에 대통령령으로 정하는 농업인의 공동생활에 필요한 편의 시설 및 이용 시설의 설치
 3. 대통령령으로 정하는 농업인 주택, 어업인 주택, 농업용 시설, 축산업용 시설 또는 어업용 시설의 설치
 4. 국방·군사 시설의 설치
 5. 하천, 제방, 그 밖에 이에 준하는 국토 보존 시설의 설치
 6. 「국가유산기본법」 제3조에 따른 국가유산의 보수·복원·이전, 매장유산의 발굴, 비석이나 기념탑, 그 밖에 이와 비슷한 공작물의 설치
 7. 도로, 철도, 그 밖에 대통령령으로 정하는 공공시설의 설치
 8. 지하자원 개발을 위한 탐사 또는 지하광물 채광(採鑛)과 광석의 선별 및 적치(積置)를 위한 장소로 사용하는 행위
 9. 농어촌 소득원 개발 등 농어촌 발전에 필요한 시설로서 대통령령으로 정하는 시설의 설치
- ② 농업보호구역에서는 다음 각 호 외의 토지이용행위를 할 수 없다.
1. 제1항에 따라 허용되는 토지이용행위
 2. 농업인 소득 증대에 필요한 시설로서 대통령령으로 정하는 건축물·공작물, 그 밖의 시설의 설치
 3. 농업인의 생활 여건을 개선하기 위하여 필요한 시설로서 대통령령으로 정하는 건축물·공작물, 그 밖의 시설의 설치

제36조(농지의 타용도 일시사용허가 등)

- ① 농지를 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 용도로 일시 사용하려는 자는 대통령령으로 정하는 바에 따라 일정 기간 사용한 후 농지로 복구한다는 조건으로 시장·군수 또는 자치구구청장의 허가를 받아야 한다. 허가받은 사항을 변경하려는 경우에도 또한 같다. 다만, 국가나 지방자치단체의 경우에는 시장·군수 또는 자치구구청장과 협의하여야 한다.
4. 「전기사업법」 제2조제1호의 전기사업을 영위하기 위한 목적으로 설치하는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 제2조제2호가목에 따른 태양에너지 발전설비(이하 “태양에너지 발전설비”라 한다)로서 다음 각 목의 요건을 모두 갖춘 경우
 - 가. 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제2조에 따른 공유수면매립을 통하여 조성한 토지 중 토양 염도가 일정 수준 이상인 지역 등 농림축산식품부령으로 정하는 지역에 설치하는 시설일 것
 - 나. 설치 규모, 염도 측정방법 등 농림축산식품부장관이 별도로 정한 요건에 적합하게 설치하는 시설일 것
- ② 시장·군수 또는 자치구구청장은 주무부장관이나 지방자치단체의 장이 다른 법률에 따른 사업 또는 사업계획 등의 인가·허가 또는 승인 등과 관련하여 농지의 타용도 일시사용 협의를 요청하면, 그 인가·허가 또는 승인 등을 할 때에 해당 사업을 시행하려는 자에게 일정 기간 그 농지를 사용한 후 농지로 복구한다는 조건을 붙일 것을 전제로 협의할 수 있다.

자료: 국가법령정보센터, “농지법”.

이에 반해 농업보호구역의 경우, 「농지법」 제32조 제2항 제2호에 따라 농업소득에 필요한 시설을 설치할 수 있는 것으로 명시되어 있으며, 「농지법 시행령」 제30조 제1항은 이러한 시설에 1만 제곱미터 미만의 태양광 발전시설이 포함됨을 명시하고 있다. 요약하자면, 농업진흥진흥구역을 제외하곤 영농형 태양광 설치가 가능하며, 이는 앞서 언급한 ‘영농형 태양광 도입 전략’(농림축산식품부, 2024b)에서 비농업진흥구역만 언급한 요인 중의 하나이다.

표 3-12 농지법 시행령의 농업보호구역 가능 행위 및 타용도 일시사용

제30조(농업보호구역에서 할 수 있는 행위)

- ① 법 제32조제2항제2호에서 “농업인 소득 증대에 필요한 시설로서 대통령령으로 정하는 건축물·공작물, 그 밖의 시설”이란 다음 각 호의 시설을 말한다.
 1. 「농어촌정비법」 제2조제16호나목에 따른 관광농원사업으로 설치하는 시설로서 농업보호구역 안의 부지 면적이 2만제곱미터 미만인 것
 2. 「농어촌정비법」 제2조제16호다목에 따른 주말농원사업으로 설치하는 시설로서 농업보호구역 안의 부지 면적이 3천제곱미터 미만인 것
 3. 태양에너지 발전설비로서 농업보호구역 안의 부지 면적이 1만제곱미터 미만인 것
 4. 그 밖에 농촌지역 경제활성화를 통하여 농업인 소득증대에 기여하는 농수산업 관련 시설로서 농림축산식품부령으로 정하는 시설

제38조(농지의 타용도 일시사용허가·신고의 기간 등)

- ① 법 제36조제1항에 따른 허가·협의, 같은 조 제2항에 따른 협의, 법 제36조의2제1항에 따른 신고·협의 및 같은 조 제2항에 따른 협의의 경우 농지의 타용도 일시사용기간은 다음 각 호와 같다.
 2. 법 제36조제2항에 따른 협의
 - 가. 법 제36조제1항제2호의 용도로 일시사용하는 경우: 그 주목적 사업의 시행에 필요한 기간 이내
 - 나. 법 제36조제1항제5호의 용도로 일시사용하는 경우: 7년 이내
 - 다. 가목 및 나목 외의 경우: 5년 이내
- ② 시장·군수 또는 자치구구청장은 제1항(같은 항 제3호의 경우는 제외한다)에 따른 농지의 타용도 일시사용기간이 만료되기 전에 다음 각 호의 기간을 초과하지 않는 범위에서 연장할 수 있다.
 2. 법 제36조제2항에 따른 협의
 - 가. 법 제36조제1항제4호의 용도로 일시사용하는 경우: 18년. 이 경우 1회 연장기간은 3년을 초과할 수 없다.
 - 나. 법 제36조제1항제5호의 용도로 일시사용하는 경우: 9년. 이 경우 1회 연장기간은 3년을 초과할 수 없다.
 - 다. 가목 및 나목 외의 경우: 3년

자료: 국가법령정보센터, “농지법 시행령”.

비농업진흥구역 영농형 태양광 설치하는 「농지법」 제36조(농지의 타용도 일시사용허가 등)를 바탕으로 한다. 구체적으로 「농지법」 제36조 제1항 제4조는 농지로 활용하기 어려운 간척지를 활용한 태양광 시설 일시사용허가를 명시하고 있다. 영농형 태양광의 경우, 「농지법」 제36조 제2항의 다른 법률에 따른 사업 또한 사업계획에 속하며, 법령에 따라 지방자치단체의 장이나 주무부 장관의 요청에 따라 농지의 타용도 일시사용 협의를 거쳐 영농형 태양광을 설치할 수 있다.

비농업진흥구역의 영농형 태양광 설치 가능 기간은 「농지법 시행령」 제38조로 알 수 있다. 구체적으로 「농지법 시행령」 제38조는 「농지법」 제36조 제2항에 협의에 따른 농지의 타용도 일시사용기간을 명시하고 있다. 영농형 태양광의 경우, 「농지법 시행령」 제38조 제1항 다목에 해당하며, 영농형 태양광 활용 기간은 5년 이내이다. 「농지법 시행령」 제38조 제2항은 농지의 타용도 일시사용기간 연장을 명시하고 있다. 구체적으로 앞서 언급한 간척지를 활용한 태양광은 18년을 추가로 연장할 수 있다. 하지만 간척지가 아닌 비농업진흥구역은 3년까지만 농지의 타용도 일시사용기간을 연장할 수 있다.

요약하자면, 현행 「농지법」 체계하에서는 협의를 통해 영농형 태양광을 최대 8년 동안만 설치할 수 있으며(염해간척지 제외), 이는 영농형 태양광 사업의 수익성 확보에 가장 큰 장애 요인으로 예상된다.

표 3-13 영농형 태양광을 부정적으로 평가하는 이유 응답 결과

(단위: 명, %)

응답 구분	응답자 수	비율
비농업인(외부 투자자 등)이 이익을 가져갈 수 있다.	13	10.6
태양광 시설을 설치하면 작물 생산량이 감소한다.	22	17.9
농지 전용을 부추기거나 농지 가격이 더 오르는 원인이 될 수 있다.	7	5.7
농촌 난개발을 심화시키거나 주민 간 갈등을 불러일으킬 수 있다.	81	65.9

자료: 정학균 외(2023a), p.68.

표 3-14 영농형 태양광을 설치하지 않는 이유

(단위: 명, %)

내용	응답자 수	비율
수익의 불확실성	30	32.3
초기 자본 등 자본 부족	22	23.7
농업경관 훼손	14	15.1
식량안보 문제	8	8.6
태양광 패널로 인한 환경오염	7	7.5
건강 피해 우려	7	7.5
비농업인의 악용 가능성	4	4.3
기타	1	1.1
합계	93	100.0

자료: 이상호(2023a), p.223을 토대로 저자 작성.

5) 영농형 태양광 확대 이행 리스크: 농업환경자원 훼손 우려

정학균 외(2023a)의 농업인의 영농형 태양광 수용성에 관한 설문조사 결과에 따르면, 영농형 태양광을 부정적으로 평가하는 가장 큰 이유로 농촌 난개발을 심화시키고 주민 간 갈등을 불러일으키기 때문이라고 응답하였다(표 3-11 참조). 이는 농지전용 태양광에서 경험한 주민 갈등과 경관 훼손에 대한 우려가 반영되었다고 해석할 수 있다. 또한 이상호(2023a)의 설문조사 결과에 따르면, 영농형 태양광을 설치하지 않겠다고 응답한 농가 중 가장 많은 수가 수익의 불확실성(32.3%)을 가장 중요한 이유로 선택하였으며, 자본부족(23.7%)과 농촌 경관 훼손(15.1%)이 그 뒤를 따르는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 영농형 태양광 수용성에 부정적인 영향을 미치는 영농형 태양광의 농업환경 자원 훼손 우려를 경관과 생태계에 미치는 영향을 중심으로 분석하였다. 우선, 영농형 태양광 확대가 경관에 미치는 영향을 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다(Sirnik et al., 2023; Ghosh, 2023). 구체적으로 Sirnik et al.(2024)은 네덜란드 4개 지역 경관 변화를 10개 경관 변화 지표(Landscape change indicator)를 활용하여 분석하였다.⁶⁴⁾ 분석 결과, 4개 지역 모두가 경관 변화 지표가 3개 이상 변화한 것으로 나타났으며, 이는 영농형 태양광 설치가 경관에 큰 영향을 미침을 의미한다. 특히, 영농형 태양광으로 인해 모든 지역에서 개방성이 유의미하게 변화한 것으로 분석되었다. Sirnik et al.(2023)은 네덜란드 영농형 태양광 설치 지역 10곳을 영농형 태양광의 수용성에 영향을 미치는 경관 경험(landscape experience) 구성요소, 즉 접근성(accessibility), 가시성(visibility), 패치 구성(patch configuration), 패널기반 경지 활용(Agricultural land use underneath PV)을 바탕으로 분석하였다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 영농형 태양광은 일정 높이를 가진 구조물이기 때문에 해당 구조물에 대한 가시성을 낮추는 것이 경관 경험에 긍정적인 영향을 미친다. 예를 들어, 네덜란드는 연구 대상 대부분 지역이 영농형 태양광 설치물 주위에 생울타리 등을 설치하고 있으며 이로 인해 영농형 태양광의 가시성이 낮은 것으로 나타났다. 2) 경관 경험에 긍정적 영향을 주는 영농형 태양광에 대한 접근성은 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 이러한 영농형 태양광의 낮은 접근성은 영농형 태양광 관련 경험을 통한 수용성 확대의 제약요인으로 작용하는 것으로 나타났다.

영농형 태양광 설치가 생태계에 미치는 영향에 대한 연구 역시 매우 제한적이다. 이에 본 연구는 대형 태양광 설비(utility scale solar energy)가 생태계에 미치는 영향을 바탕으로 영농형 태양광이 생태계에 미치는 영향을 간접적으로 분석하고자 한다.

64) 경관 변화 지표 10가지는 다음과 같다: 1) 경지 이용 변화(land use change), 2) 재배 작물 변화(crop change), 3) 비농업 식생의 높이 변화(change in vertical non-agricultural vegetation), 4) 지형 변화(change of relief), 5) 역사적 선형 경관 구조의 변화(change of historical linear landscape structures), 6) 작물 생산 지원 시스템 변화(change in crop support system), 7) 울타리 변화(change of fences), 8) 영농형 태양광 시스템의 구조 변화(change of agrivoltaic system structure), 9) 농업경관의 패턴 변화(change in the pattern of the agricultural landscape), 10) 개방성 변화(change in openness).



자료: Hernandez et al.(2014), p.767을 토대로 저자 작성.

그림 3-17 태양광 발전시설 종류

우선, Harrison et al.(2017)은 건물의 옥상 등이 아닌 대형 태양광 패널 설비(utility scale solar PV) 설치가 생태계에 미치는 영향을 문헌연구를 바탕으로 분석하였다. 분석 결과, 양광 패널보다는 태양광 패널을 구성하는 구조물의 조류 충돌 위험이 더욱 큰 것으로 나타났다. 또한 패널이 햇빛을 반사하기 때문에 특정 곤충을 유인할 수 있으며, 새들이 태양광 패널을 물웅덩이 등으로 오인할 수 있는 것으로 분석되었다. 다만, 태양광 설치가 생태계에 미치는 영향에 대한 과학적 분석과 이를 바탕으로 한 논문이 극히 적어, 태양광 설치의 생태계 영향을 규명할 수 없다고 결론지었다. Tsafack et al.(2022)은 척박한 땅에서의 태양광 패널 설치가 거저릿과 딱정벌레(tenebrionid beetles)에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 태양광 패널 설치는 거저릿과 딱정벌레의 개체 수에는 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 다만, 태양광 패널 설치로 환경조건이 개선되어 태양광 패널 밑에 서식하는 거저릿과 딱정벌레의 다양성은 증가하는 것으로 나타났다.

이에 반해 Walston et al.(2016)은 캘리포니아 세 지역의 대형 태양광 설비의 특징과 폐사율을 조사하여 발전 용량에 따른 조류 폐사율을 도출하였다. 구체적으로 Walston et al.(2016)은 대형 태양광 설비를 태양광 타워(solar tower)와 태양광 패널(PV)로 구분하고 각 유형에 따른 조류 폐사 원인과 폐사율을 분석하였다(표 3-13 참조). 분석 결과, 영농형 태양광 발전과 유사한 태양광 패널의 경우, 태양광 패널 설치로 인한 조류 폐사율은 10.70 마리/MW/연으로 나타났으며, 이는 태양광 타워를 설치한 두 지역의 조류 폐사율보다 높은 수치이다. 또한 태양광 패널로 인한 조류 폐사는 이유를 알 수 없는 경우가 95% 이상으로 나타났다. 마지막으로 <표 3-13>에 나타난 발전 용량 가중 평균 폐사율을 바탕으로 연간 태양광 발전으로 인한 조류 폐사를 추정한 결과, 매년 조류 폐사 16,200~59,400건이 남부 캘리포니아에 설치된 대형 태양광 설비에 기인한 것으로 분석되었다.

표 3-15 남부 캘리포니아 대형 태양광 발전(USSE)시설의 추정 조류 폐사율

프로젝트	태양광 발전 유형 ¹⁾ 및 용량(MW)	USSE 관련 폐사/폐사율(a) ²⁾	USSE 관련된 원인 불명의 폐사/폐사율(b) ³⁾	합계(a+b)
California Solar One	CSP-Power Tower(10)	10.24(3.90)	0.00(0.00)	10.24(3.90)
California Valley Solar Ranch	PV(250)	0.50(0.23)	10.20(3.89)	10.70(4.08)
Ivanpah	CSP-Power Tower(377)	3.96(1.53)	5.34(2.05)	9.30(3.55)
발전 용량 가중 평균 폐사율(마리/MW/연)		2.7(1.06)	7.3(2.79)	9.9(3.78)

주: 1) CSP-Power tower는 태양광 타워, PV는 태양광 패널을 의미함.

2) 시설과 직접적으로 관련된 것으로 알려진 사망 사례(예: 관찰 가능한 충돌 외상 또는 그을린 깃털)를 바탕으로 추정된 사망률을 의미함. 사망률은 이상적인 조건에서 생산되는 전기 1메가와트당 추정된 연간 조류 사망 수를 나타냄. 팔호 안의 값은 30%의 가동률을 가정하여 기가와트시(GWh) 단위로 생산된 전기량을 기준으로 추정된 연간 사망률을 의미함.

3) 프로젝트 현장에서 발견된 원인 불명의 사체(예: 관찰 가능한 USSE와 관련된 사망 원인이 없는 경우)를 바탕으로 추정된 사망률을 의미함. 사망률은 이상적인 조건에서 생산되는 전기 1메가와트당 추정된 연간 조류 사망 수를 나타냄. 팔호 안의 값은 30%의 가동률을 가정하여 기가와트시(GWh) 단위로 생산된 전기량을 기준으로 추정된 연간 사망률을 의미함.

자료: Walston et al.(2016), p.407을 토대로 저자 작성.

마지막으로 Chock et al.(2021)은 문헌 연구를 통해 태양광 설비가 야생동물에게 미치는 영향을 아래와 같이 정리하였다(표 3-14 참조). 특히, 대규모 태양광 패널은 조류 등에게 호수로 보일 수 있으며(lake effect), 이로 인해 조류 등이 착지 과정에서 충돌 등으로 부상 혹은 폐사할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 태양광 관련 설비와 운영 역시 야생동물의 부상과 폐사의 주요한 원인으로 지적되었다.

태양광 발전이 생태계에 미치는 영향에 대한 문헌은 영농형 태양광 발전 역시 주위 생태계에 일정 정도 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 특히, 영농형 태양광이 대규모로 논 위에 설치되면 앞서 언급한 호수 효과가 일어날 수 있으며 이로 인해 조류 등과 태양광 패널 간의 충돌로 부상 혹은 사망이 증가할 수 있다.

그 외에도 구조물 설치로 농지 감소와 태양광 패널로 인한 토양 및 농작물의 농작물 오염 등도 역시 영농형 태양광 확대의 위험요인으로 작용한다(Ghosh, 2023). 하지만 국내 시범 사업을 분석한 결과, 태양광 모듈 설치로 인한 토양 및 작물의 중금속 오염 위험은 크지 않는 것으로 나타났다(신동원 외, 2021).

표 3-16 태양광 발전시설로 인한 야생동물들의 부상 및 폐사 예시

영향		영향받는 종
직접적인 부상/폐사	태양 복사(Solar flux)	조류, 곤충류
	불특정 외상(Undefined trauma)	조류
	충격 외상(Impact trauma)	조류, 박쥐류
	감전사(Electrocution)	조류
	물 취수 구조물 혹은 증발지에서 갇힘/익사 (Entrapment/drowning in water intake structures and evaporation ponds)	조류, 포유류, 곤충
	차량 통행으로 인한 바퀴 자국에 갇힘 (Entrapment in soil ruts from vehicle passage)	양서류, 파충류
2차 폐사	포식자에 의해 발생한 신체 손상(Predation trauma)	조류, 양서류, 파충류
	인공적인 빛으로 인한 환경 오염(Light pollution)	조류, 양서류, 파충류, 박쥐류, 곤충류, 기타 포유류
	전자기장 효과(Electromagnetic field effects)	양서류, 파충류, 박쥐류, 곤충류,
	기타 인위적 영향(Other anthropogenic effects)	조류, 양서류, 파충류, 박쥐류, 곤충류, 기타 포유류

주: 정부 및 동료 심사를 거친 저널을 바탕으로 작성하였으나, 관련 문헌 전체를 구조적으로 검색 및 분석한 내용은 아님. 각 영향과 관련된 문헌은 Chock et al.(2021)의 Table 1을 참조 바람.

자료: Chock et al.(2021), p.3을 토대로 저자 작성.

6) 영농형 태양광 확대 파급효과 분석

현재 시범사업 단계인 영농형 태양광 사업의 파급 효과를 실증적으로 분석하기에는 한계가 있다. 특히, 「농지법」 개정 및 지원사업이 부족한 상황에서는 영농형 태양광 사업의 확대 역시 어려운 상황이다. 본 연구에서는 문헌을 바탕으로 정책 및 경제성 관련 시나리오를 구성하고 이를 바탕으로 영농형 태양광 확대 영향을 분석하였다. 단, 기후변화로 인한 단수 변화, 농지면적 변화 등 영농형 태양광 관련 사업 외의 조건은 현재(2023년)와 동일하다고 가정하였다.

우선, 본 연구에서는 『제10차 전력수급계획』의 2036년 태양광 보급 목표량(42,005MW)을 영농형 태양광으로 공급하는 시나리오를 분석하였다. 구체적으로 앞서 언급한 2036년 태양광 보급 목표량을 영농형 태양광으로 공급하려면 농지 약 84,010ha가 필요하다(유재국, 2024). 이에 본 연구에서는 영농형 태양광 전부를 논에 설치하는 시나리오를 설정하고, 영농형 태양광 설치로 인한 감수율은 20%로 가정하였다.

영농형 태양광 확대와 이에 따른 수확량 감소 영향을 분석하고자 김종진 외(2017)의 수확기 쌀 가격 예측 모형을 활용하였다(식 3-1 참조). 구체적으로 본 연구에서는 (식 3-1)의 공급량에 대한 가격 탄성치를 나타내는 β_1 의 값(-0.545)을 바탕으로 시나리오 분석을 실시하였다. 다만, 생산량 변화로 인한 파급효과만 계측하고자 초과수요 여부를 나타내는 I_t 의 효과는 제외하였으며, 생산량(Q_t)을 제외한 기말재고량(S_{t-1})과 전년도 쌀의 단경기 가격(P_{t-1}^2), GDP_t , 정부 매입량(G_t), 추세(t), 그리고 감모율(w)은 동일하다고 가정하였다. 분석 결과, 논 약 84,010ha에 영농형 태양광을 설치하면 쌀 가격은 0.1% 증가하며, 농가 전체 쌀 판매 수익은 2.15% 감소하는 것으로 분석되었다.

$$\log P_t^1 = \alpha + \beta_1 \log(wQ_t - G_t) + \gamma \log(wQ_t - G_t)I_t + \eta I_t + \beta_2 \log(S_{t-1}) \quad (\text{식 3-1}) \\ + \beta_3 \log(P_{t-1}^2) + \beta_4 \log(GDP_t) + \beta_5 t + \epsilon_t$$

두 번째로 본 연구에서는 유찬희 외(2017)의 쌀 재배면적 반응함수를 활용하여 영농형 태양광 설치로 인한 기대수익 향상이 쌀 재배면적에 미치는 영향을 분석하였다. 구체적으로 유찬희 외(2017)는 쌀 재배면적 반응함수를 쌀 수익성(=단위면적당 조수입/단위면적당 경영비), 전년도 재배면적, 쌀의 생산대체 작목인 콩의 수익성을 활용하여 추정하였다. 본 연구에서는 영농형 태양광 설치가 영농과 관련된 농가의 장기적인 선택인 점을 고려하여 쌀 재배면적의 장기 탄력성을 활용하였다. 구체적으로 장기 균형에서는 당해 재배면적과 전년 재배면적이 동일하다고 가정하였으며, 이를 바탕으로 쌀 재배면적의 기대수익성에 대한 장기탄력성 0.536을 도출하였다.

표 3-17 쌀 재배면적 반응함수 추정 결과

종속변수	추정기간	설명변수	계수	D-W 값	Adj. R2
재배면적 (log-log)	1986- 2015	상수항	1.3617**	1.4102	0.9911
		전년도 쌀 재배면적	0.7927***		
		쌀 재배 수익성	0.1112***		
		콩 재배 수익성	-0.0200**		
		추세변수	-0.0022*		

자료: 유찬희 외(2017)를 바탕으로 저자 작성.

쌀 재배를 통한 기대수익성은 문헌에서 활용한 최근 5년간(2019~2023년) 농축산물생산비 조사의 5개년 평균 총수입/생산비(1.50)를 활용하였으며, 영농형 태양광의 기대수익성은 영농형 태양광의 경제성을 분석한 문헌들의 B/C ratio를 활용하였다. 다만, 문헌 분석 결과, 영농형 태양광 설치에 따른 기대수익성이 쌀 재배 기대수익성을 넘는 경우는 1) SMP+REC 가격이 10% 상승하거나(1.54) 2) 영농형 태양광 일시사용기간을 30년으로 연장하는 시나리오

(1.57), 3) 일시사용기간을 30년 연장하고 주민참여형 사업을 시행하는 시나리오(1.67)뿐인 것으로 나타났다(김종익, 조상익, 2023). 마지막으로 기대수익성이 쌀 재배 수익성보다 높은 두 시나리오를 쌀 재배면적의 장기탄력성을 바탕으로 분석한 결과, 영농형 태양광 설치 농가의 쌀 재배면적이 1.43~6.07% 증가하는 것으로 나타났다.

요약하자면, 본 연구에서 활용한 시나리오가 영농형 태양광 확대의 최대치 혹은 영농형 태양광 수익성의 최대치임을 고려한다면, 영농형 태양광 확대가 실제 쌀 가격과 재배면적에 미치는 영향은 실제 크지 않은 것으로 분석되었다. 이는 영농형 태양광 확대 정책의 이행 리스크를 효과적으로 관리하려면 영농형 태양광을 설치한 농가의 소득 및 경영, 그리고 농업환경자원에 더욱 초점을 맞추어야 함을 의미한다.

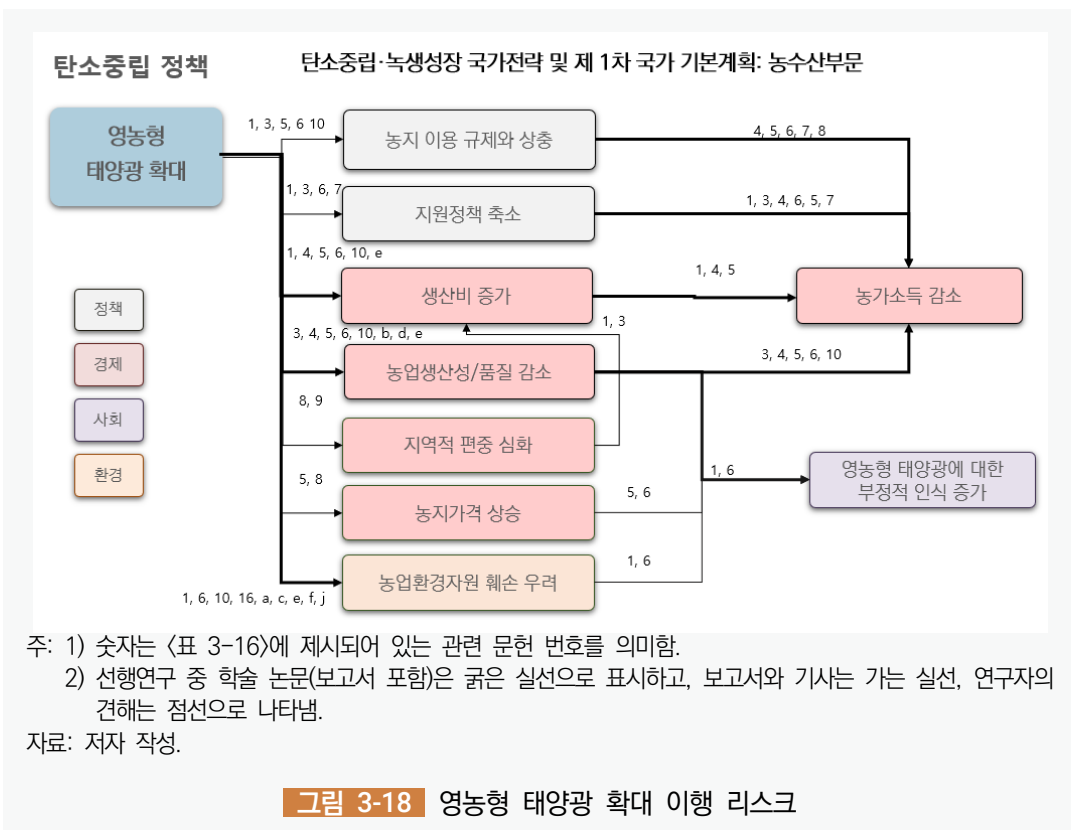


표 3-18 영농형 태양광 확대 이행 리스크 및 대응 관련 선행연구

구분	참고문헌	
논문 및 보고서	1) 김연중 외(2018). 2) 신동원 외(2021). 3) 김연중 외(2021). 4) 순병민, 신동원(2021). 5) 김종익, 조상민(2023). 6) 정학균 외(2023a). 7) 정학균 외(2023b). 8) 유재국(2024). 9) 이유수(2020). 10) 김종익(2024).	a) Sirnik et al.(2024). b) Pataczek et al.(2022). c) Sirnik et al.(2023). d) Widmer et al.(2024). e) Ghosh(2023). f) Toledo and Scognamiglio(2021). g) Chock et al.(2021). h) Walston et al.(2016). i) Tsafack et al.(2022). j) Harrison et al.(2017).

자료: 저자 작성.

7) 소결: 영농형 태양광 확대 이행 리스크

영농형 태양광은 기존의 농지전용 태양광과는 달리 에너지 생산과 농지 보존을 동시에 달성할 수 있는 수단이며 이에 대한 정책적 관심이 높아지고 있다. 또한 국내의 구조적인 쌀 과잉 문제를 고려할 때, 영농형 태양광 설치로 인한 쌀 생산량 감소 역시 실제 식량안보와 쌀 가격, 그리고 소비자 후생에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 문헌연구를 바탕으로 영농형 태양광 확대 이행 리스크를 식량안보 및 물가 등 경제전반에 미치는 영향을 제외하고 <그림 3-19>와 같이 정리하였다. 구체적으로 본 연구에서는 문헌 연구를 바탕으로 현재 영농형 태양광 확대의 리스크로 작용할 수 있는 요소로 농지 이용 규제와 상충, 한국형 FIT 제도 등 지원 정책 축소, 영농형 태양광 설치로 인한 생산비 증가, 농업생산성/품질 감소, 지역적 편중 심화, 농지가격 상승, 농업환경자원 훼손으로 식별하였다.⁶⁵⁾

또한 앞서 언급한 영농형 태양광 확대 리스크의 파급효과로 농가소득 감소를 선정하였다. 이는 농지이용 규제로 인한 불충분한 영농형 태양광 운영 기간, 전력 판매 가격 변동, 지역적 편중으로 인한 이격거리 증가, 이자율 등 거시변수 변동에 따른 생산비 증가는 영농형 태양광을 설치한 농가소득에 부정적인 영향을 미칠 것이 확실시되기 때문이다. 마지막으로 영농형 태양광 확대에 의한 농업환경자원 훼손과 농지가격 상승은 영농형 태양광에 대한 부정적인 인식을 증가시키고, 정책 확산에 걸림돌로 작용할 것으로 예상된다.

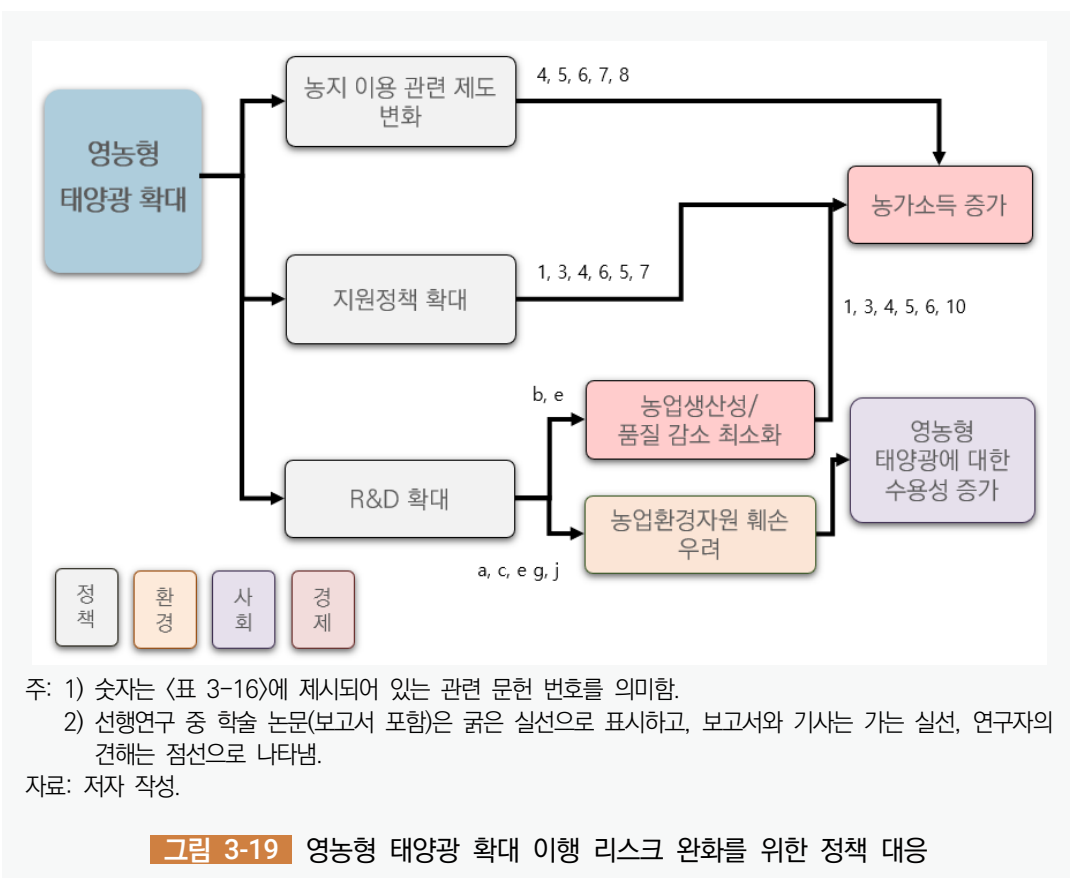
65) 전력계통 불안정성에 관한 내용은 신재생에너지의 공통된 부분임을 고려하여 제외함.

라. 영농형 태양광 확대 이행 리스크 완화를 위한 정책 대응

1) 영농형 태양광의 경제성 확보

농가소득, 즉 영농형 태양광의 경제성에 영향을 미치는 주요 요소로는 농지이용 규제에 의한 불충분한 영농형 태양광 운영 기간 및 금리, 전력판매 가격, 영농형 태양광 설치로 인한 농작물의 생산성 하락 등이 있다.

우선, 영농형 태양광의 경제성을 확보하려면 「농지법」을 개정해 영농형 태양광 운영기간을 충분히 확보해야 한다. 특히, 영농형 태양광 운영이 현재와 같이 8년으로 제한되면 영농형 태양광 사업은 경제성 부족으로 현재 시범사업 단계를 벗어나기 쉽지 않을 것으로 예상된다. 다만, 농식품부가 농업진흥지역 외 농지에 한해 타용도 일시사용허가 기간을 8년에서 23년으로 연장하는 내용을 ‘영농형 태양광 도입 전략’(농림축산식품부, 2024)에 명시하였으며, 내년까지 이에 대한 법적 근거 마련을 추진하고 있어 조만간 영농형 태양광 운영 기간 확보를 위한 제도적 기반이 마련될 것으로 예상된다.⁶⁶⁾



66) 김종익, 조상민(2023).

영농형 태양광으로 인한 생산성 및 품질 저하 최소화 역시 경제성 확보를 위한 주요한 요소이다. 영농형 태양광 설치는 주변 대기 온도, 습도, 풍속, 풍향, 토양 온도, 토양 습도, 작물 온도(Crop temperature)와 성장률, 포화 수증기압(Vapor Pressure Deficit), 광합성 유효복사(PAR: Photosynthetically Active Radiation) 등을 변화시키며, 이는 작물의 생산성에 직간접적으로 영향을 미치며 그 영향 정도 역시 작물에 따라 상이하다.⁶⁷⁾ 예를 들어, PAR 감소에 따른 작물들의 반응은 서로 상이하다. 따라서 영농형 태양광으로 인한 생산성 및 품질 저하를 최소화하려면 영농형 태양광 발전 설비의 특징과 작물의 작기 등을 고려해 통합적으로 접근해야 한다.

특히, 앞서 언급한 국내 연구 결과에서 볼 수 있듯이, 연구에 따라 동일 작물의 생산성 변화가 상이하게 나타났다. 국외 연구 역시 영농형 태양광이 작물 생산성에 미치는 영향은 작물이 생산되는 지역과 영농형 태양광 설비 형태에 따라 달라지는 것으로 나타났다(Ghosh, 2023; Laub et al., 2022). 이는 영농형 태양광 확대에 따른 위험을 감소하려면 영농형 태양광 설치가 작물의 생산성에 미치는 영향에 대한 추가 연구가 필수이며, 이를 바탕으로 한 작물 생산 관련 가이드라인 등을 개발해야 함을 의미한다.

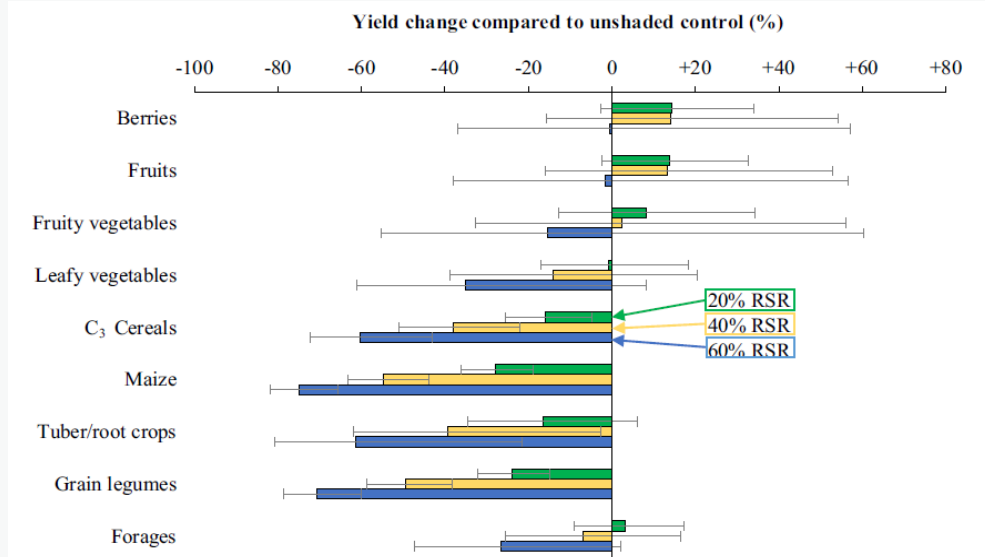
앞선 설문조사 결과와 같이 설치비가 많이 드는 영농형 태양광의 경우, 초기자본 부족과 설치 이후 이자부담은 영농형 태양광 설비 도입의 주요 장애요인 중 하나이다(표 3-12 참조). 또한 문헌연구 결과, 자기자본 비중과 이자율, 거치기간은 영농형 태양광의 경제성에 큰 영향을 끼치는 요인으로 나타났다(정학균 외, 2023a; 김종익, 조상익, 2023). 유사한 사례로 농촌태양광 사업은 높은 초기투자 비용과 운영비용으로 인해 외부 투자자나 소득이 높은 농업인 위주로 진행되었다(김연중 외, 2018; 변재연, 2021). 즉, 큰 초기 투자비용과 운영비 부담은 영농형 태양광의 위험관리에 부정적인 영향을 미칠 수밖에 없다. 또한 국내 농가 대부분 담보능력이 부족하여 저리의 정책 자금에 대한 접근성이 떨어질 수밖에 없다(변재연, 2021). 따라서 영농형 태양광 사업에 참여하고자 하는 농가들에 추가로 금융을 지원해 영농형 태양광 설치와 관련된 위험을 저감시킬 필요가 있다. 현재 산업통상자원부는 신재생에너지 금융지원사업으로 농촌형 및 영농형 태양광에 대한 금융지원사업을 진행하고 있다.⁶⁸⁾ 동 사업에 대한 농가들의 접근성을 평가하고 부족한 부분을 추가로 지원하는 방안 역시 검토해볼 필요가 있다.

마지막으로는 작물 생산성 변동, 정책금리, 발전가격, REC 가중치 등을 고려한 비즈니스 모델 개발이 필요하다(김종익, 조상익, 2023). 즉, 영농형 태양광의 경제성 관련 불확실성을

67) Mamun et al.(2022). 영농형 태양광으로 인한 환경 변화가 각 작물에 미치는 영향에 대한 정성적인 평가는 Table 2를 참조 바람.

68) 동 사업의 2024년 4/4분기 대출금리는 1.75%임. 보다 자세한 사업 내용은 신재생에너지 금융지원사업 관련 사이트를 참조 바람.

최소화하고 농업인들이 더 안정적으로 수익을 창출할 수 있는 모델 개발과 이를 바탕으로 한 사업확장으로 영농형 태양광에 대한 접근성 및 수용성 향상을 도모할 수 있을 것으로 생각된다.



주: 다양한 태양 복사 감소(reduction in solar radiation) 수준에 따른 서로 다른 작물 유형의 수확량 반응을 의미함. 표시된 값은 메타분석을 통해 추정된 평균이며, 오차 막대는 95% 신뢰 구간을 나타냄.
자료: Laub et al.(2022), p.59.

그림 3-20 태양 복사 감소에 따른 작물별 생산성 변화

2) 생태계 및 경관 영향 최소화

국내 농촌 태양광 사업으로 경관훼손이 지역사회 갈등을 일으킨 사례는 경관훼손이 영농형 태양광에 대한 수용성과 사업 확대에 큰 걸림돌이 될 수 있음을 의미한다(김연중 외, 2018). 네덜란드 영농형 태양광 사례를 분석한 결과, 영농형 태양광으로 인한 농촌 경관의 변화는 영농형 태양광의 디자인과 영농형 태양광이 설치된 위치에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다(Sirnik, Oudes, and 1Stremke, 2024). 또한 「농지법」이 개정되면 영농형 태양광 운영 기간이 20년 이상으로 연장된다는 점을 고려한다면, 농지 이용과 주변 시설의 변화 등을 고려하여 영농형 태양광의 디자인과 위치를 설정할 필요가 있다. 따라서 영농형 태양광이 경관에 미치는 부정적인 영향을 최소화하도록 영농형 태양광 디자인과 설치 장소에 대한 가이드라인 구축이 필요하다.

가이드라인을 구축하려면 영농형 태양광 디자인과 설치 장소에 따른 경관 변화를 연구해야 한다. 영농형 태양광 확대가 경관에 미치는 영향에 대한 국내외 연구가 매우 제한적인 점을 고려한다면(Sirnik et al., 2023), 정부가 더 적극적으로 연구개발에 투자해야 한다. 특히, 영농형 태양광에 대한 수용성에 직접적으로 영향을 미치는 영농형 태양광 설치로 인한 경관의

질적 변화와 이해당사자의 인식에 대한 연구는 실효성 있는 가이드라인 구축에 큰 도움이 될 것이다(Biró-Varga et al., 2024).

영농형 태양광이 주변 생태계에 미치는 영향에 대한 연구 역시 필요하다. 앞서 언급하였듯이 영농형 태양광은 태양광 주변 환경에 영향을 미친다(Mamun et al., 2022). 이는 영농형 태양광 설치가 작물의 생산성뿐만 아니라 곤충을 포함한 주변 생태계에도 영향을 미침을 의미한다(Tsafack et al., 2022; Hernandez et al., 2014). 또한 영농형 태양광이 「농촌공간 재구조화 및 재생지원에 관한 법률」에 따라 설정한 재생에너지지구에 집적화되면 앞서 언급한 대형 태양광 발전시설의 예시와 같이 주변 야생동물의 부상과 폐사에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있다. 하지만 영농형 태양광이 주변 생태계에 미치는 경험적 연구는 역시 매우 제한적이며(Sirnik et al., 2023), 국내 연구는 전무한 실정이다. 따라서 현재 진행하는 시범사업의 모니터링과 관련 R&D 등으로 경험적 연구를 축적하고, 이를 바탕으로 영농형 태양광 설치 관련 가이드라인을 구축할 필요가 있다.

4. 산림

가. 탄소중립 정책

우리 정부는 2050 탄소중립 선언에 따라 2050년 순배출량 '0' 달성을 위한 시나리오를 수립하였고 산림 흡수원 23.6백만 톤 활용 계획을 명시하였다. 이에 따라 전체 흡수원 25.3백만 톤 중 산림·임업 부문이 93%를 담당하게 되었다. NDC 상향 안에 따라 2018년 배출량(727.6백만 톤) 대비 40%(291백만 톤)를 감축하여 2030년 순배출량을 436.6백만 톤까지 줄이는 계획을 수립하고, 산림 흡수원 25.5백만 톤을 활용해 감축을 이행하였다. 2050 탄소중립을 위해 4+1 실행전략을 추진하였고, 실행전략과 핵심과제 및 핵심 과제별로 달성할 수 있는 구체적인 탄소흡수 목표 전망치 등을 제시하였다.

표 3-19 2050 탄소중립 정책 방향과 핵심과제

정책방향	핵심과제
신규 산림탄소흡수원 확충	1. 도시숲 조성 확대 및 체계적 관리
	2. 유휴토지 나무심기 확대
	3. 섬지역 산림생태계 가치 증진
	4. 남북 및 해외 산림협력
산림탄소흡수능력 강화	1. 경제림 중심의 산림순환경영 활성화
	2. 기후위기 대응 미래수종 적용 확대
목재와 산림바이오매스 이용 활성화	1. 목재 수요 공급 선순환 체계 구축
	2. 산림바이오매스의 지속 가능한 이용과 관련 산업 육성
산림자원 관리	1. 산림보호지역 관리 선진화
	2. 산림생태계 복원 및 산지 전용 감소
	3. 산림재해 예방 및 피해 최소화

자료: 산림청(2021)을 바탕으로 저자 작성.

구분	2050 전망 (As-Is)	2050 변화 (To-Be)																				
흡수원	<table><tr><td>합계</td><td>1,520만 톤</td></tr><tr><td>신규 흡수원 확충</td><td>20만 톤</td></tr><tr><td>흡수능력 강화</td><td>1,510만 톤</td></tr><tr><td>목재 이용</td><td>120만 톤</td></tr><tr><td>흡수원 보전·복원</td><td>△130만 톤</td></tr></table>	합계	1,520만 톤	신규 흡수원 확충	20만 톤	흡수능력 강화	1,510만 톤	목재 이용	120만 톤	흡수원 보전·복원	△130만 톤	<table><tr><td>합계</td><td>2,360만 톤</td></tr><tr><td>신규 흡수원 확충</td><td>60만 톤</td></tr><tr><td>흡수능력 강화</td><td>2,080만 톤</td></tr><tr><td>목재 이용</td><td>220만 톤</td></tr><tr><td>흡수원 보전·복원</td><td>-</td></tr></table>	합계	2,360만 톤	신규 흡수원 확충	60만 톤	흡수능력 강화	2,080만 톤	목재 이용	220만 톤	흡수원 보전·복원	-
	합계	1,520만 톤																				
	신규 흡수원 확충	20만 톤																				
	흡수능력 강화	1,510만 톤																				
	목재 이용	120만 톤																				
흡수원 보전·복원	△130만 톤																					
합계	2,360만 톤																					
신규 흡수원 확충	60만 톤																					
흡수능력 강화	2,080만 톤																					
목재 이용	220만 톤																					
흡수원 보전·복원	-																					
신규 흡수원 확충	▶유희토지 조림, 도시숲·생활숲(30년간) 1.7만 ha ⇒ 흡수량: 20만 톤	▶유희토지 조림, 도시숲·생활숲(30년간) 6.1만 ha ⇒ 흡수량: 60만 톤																				
흡수 능력 강화	▶목재수확량 490만 m ³ 채종원 산 묘목 조림 7,000ha 큰나무가꾸기 4만 8,000ha ⇒ 흡수량: 1,510만 톤	▶목재수확량 800만 m ³ 채종원 산 묘목 조림 1만 6,000ha 큰나무가꾸기 28만 8,000ha ⇒ 흡수량: 2,080만 톤																				
목재 이용	▶국산 목재제품 이용 290만 m ³ ⇒ 탄소 저장량: 120만 톤	▶국산 목재제품 이용 500만 m ³ ⇒ 탄소 저장량: 220만 톤																				
흡수원 보전·복원	▶생태복원 (30년간) 4,000ha ⇒ 흡수량: 3만 톤(총괄 미반영) ▶재해피해면적 2,339ha ⇒ 배출량: △130만 톤	▶생태복원 (30년간) 1만 1,000ha ⇒ 흡수량: 10만 톤 ▶재해피해면적 636ha ⇒ 배출량: △10만 톤																				
전환	▶산림바이오매스 에너지 활용 40만 톤(ton) ⇒ 감축량: 40만 톤(tCO ₂)	▶산림바이오매스 에너지 활용 300만 톤(ton) ⇒ 감축량: 310만 톤(tCO ₂)																				

자료: 산림청(2021), p.7.

그림 3-21 2050 탄소중립 산림 부문 목표치

산림 부문 탄소중립 정책의 특징과 시사점은 다음과 같다. 먼저 구체적인 감축 목표를 설정하였다. 2050년까지 순배출량 '0'을 달성하기 위한 구체적이고 장기적인 시나리오를 수립하였고, 이는 정책의 일관성과 지속가능성을 보장하며, 관련 이해관계자에게 명확한 목표를 제시한다. 탄소중립 정책에서 산림 부분의 중요성을 강조하고 구체적인 실행전략과 핵심 과제를 제시하였다. 산림흡수원 23.6백만 톤을 포함하여 전체 흡수원 중 93%를 산림·임업 부문이 담당하도록 계획하였고, 이는 산림의 탄소흡수 능력을 최대한 활용하여 목표 달성에

기여하도록 하였다. 4+1 실행전략으로 신규 산림탄소흡수원 확충, 산림탄소흡수능력 강화, 목재와 산림바이오매스 이용 활성화, 산림자원 관리 등 구체적인 실행과제를 제시하였으며, 이는 부문별로 명확한 목표와 방법론을 제공하여 실효성을 높였다.

산림 부문 정책으로 탄소중립 목표를 달성하는데 산림의 역할이 다시금 중요하게 부각되었다. 이는 산림보호와 관리의 필요성을 재인식하게 하고, 산림생태계의 지속가능성을 강화하는 계기가 될 것으로 예상된다. 그러나 세부 추진계획 등은 다소 변화가 있지만 과거에 제시되었던 탄소흡수원 증진 종합계획 등과 큰 틀에서 목표와 과제의 변동은 작아 보인다. 우리나라 산림 분야 국내 부문 기후변화 정책은 대부분 탄소흡수원으로서 역할에 초점을 맞추고 있다. 그 내용은 1) 흡수원을 확대하거나 흡수능력을 높여 탄소흡수량을 늘리고, 2) 기존의 흡수원을 산림재해에서 보호하여 흡수량 감소를 방지하는 것이다. 기후변화 정책 달성도를 평가하는 지표가 탄소흡수량에 초점이 맞추어진 경향이 있으며, 탄소중립 정책 또한 적응보다는 완화에 무게중심이 실릴 가능성이 있다.

탄소중립 목표 달성을 위해 산림, 에너지, 농업, 수자원, 건강 등 다양한 부문과 통합적인 접근이 필요하며 각 부문이 상호 연계되어야만 효과를 거둘 수 있을 것으로 보인다. 각 부문의 정책이 서로 유기적으로 연계되어 상충하는 부분을 최소화하여야 할 것이다. 탄소중립을 위한 정책은 산림, 에너지, 농업, 수자원 등 여러 부문에 걸쳐 있기에, 이들 부문 간의 리스크를 종합적으로 판단하는 연구가 필요하다. 이는 부문 간 정보 공유와 협력으로 실현될 수 있으며, 정책 수립 시 각 부문의 리스크가 상호 영향을 미치지 않도록 조율해야 할 것이다.

나. 탄소중립 정책 이행 리스크 영향 경로 파악

2050 탄소중립 목표 달성을 위한 산림 부문 추진전략은 다양한 세부 정책과 구체적인 목표를 포함하지만, 이를 이행하는 과정에서 여러 가지 리스크가 존재할 수 있다. 숲가꾸기 및 조림 사업 확대는 산림관리 비용 증가와 인력 부족 문제를 야기할 수 있다. 산림관리 비용이 증가해 바이오매스 에너지의 경제성이 저하될 수 있으며, 안정적인 공급이 어려워질 가능성이 있다. 산림관리 인력의 건강과 안전 문제가 중요해지며, 야외 작업 환경에서 위험에 노출될 수 있다.

목재생산량을 확대하려면 대규모 인공림과 지속 가능한 산림경영이 필요하며, 이는 초기 투자 비용을 확보하기 경제적 타당성이 증가해 어려울 수 있다. 목재 생산은 목재 가공 산업의 성장 가능성은 있지만, 시장 수요 변동에 따른 경제적 리스크가 존재한다. 또한 대규모 목재 생산 과정에서 산림생태계 교란 및 토양 침식 등의 환경 문제가 발생할 수 있다. 임도 밀도를 증대시키는 과정에서 자연환경 훼손과 토양 침식 위험이 증가할 수 있다. 또한 임업기계 사용 확대로 에너지 소비 증가와 탄소배출을 초래할 수 있다. 임도 개발로 접근성이 좋아지면 과도한 자원 채취가 일어날 수 있으며 도로 주변 생태계 파괴, 산불 및 병해충 위험이 증가할 수 있다.

고부가가치 목재 이용 활성화로 탄소 저장고를 확대하려는 정책은 목재 수요와 공급 선순환 체계를 구축하는 과정에서 시장 변동성과 경제적 불확실성이 존재한다. 또한 고부가가치 목재제품의 생산과 유통에 필요한 기술 및 인프라 부족 문제가 발생할 수 있다. 목재 이용을 확대하려면 벌채 확대가 나타나야 하며, 이로 인해 단기적으로는 탄소 손실이 발생할 수 있다. 또한 벌채 확대는 생물 서식지를 파괴하여 생물 다양성 감소가 야기된다. 벌채 작업 소음으로 주민들과 갈등을 빚을 수 있다. 고부가가치 목재를 생산하려면 기술적 지원과 설비 투자가 필요하며 초기에 높은 투자가 발생하게 된다. 수익성이 높지 않아 대부분 초기 투자 비용은 정부 보조금으로 운용됨에 따라 보조금 확대에 의한 재정 부담이 커질 수 있다. 또한 벌채 확대는 울창한 숲의 경관을 기대하는 관광객을 감소하게 만들어 지역 수입이 저하할 수 있다. 또한 벌채 문제로 지역 주민, 환경단체와 갈등이 발생하게 된다. 우리나라 국민은 산림 보존 인식이 강하여 벌채를 부정적으로 인식하는 편이다. 이로 인해 합법적인 벌채여도 민원이 접수되는 경우가 실제로도 자주 발생한다. 주민 및 환경단체와 갈등이 커져 벌채 확대가 저하된다면 목재제품을 원활하게 수급하기 어려워질 수 있다.

미이용 산림바이오매스 활용 정책에서 산림바이오매스의 재생에너지 활용은 안정적인 바이오매스 공급과 경제성이 중요한데, 바이오매스 에너지를 안정적으로 공급하기 어려워 에너지 가격 변동과 공급 불안정 문제가 발생할 수 있다. 산림바이오매스 에너지 산업은 성장 가능성이 있지만, 기술적·경제적 도전이 존재한다. 국내 목질 보일러 기술이 충분하지 못하여 독일 등지에서 대부분 수입해 온다. 그래서 수리와 부품 교체 등에 추가 비용이 발생하며 기술자의 숫자 또한 매우 적어 이용 면에서 불편하여 화석연료를 완전히 대체하기는 아직 어려운 실정이다. 또한 산림바이오매스에는 아직 친환경성 논란이 남아 있다. 유럽 등지에서는 산림바이오매스를 화석 연료를 대체하는 친환경 연료로 여기는 편이지만, 미국 등에서는 산림바이오매스 자체가 벌채를 야기하며 높은 이산화탄소 발생원이라고 주장하는 편이다. 만일 산림바이오매스의 친환경성이 제대로 증명되지 않는다면 탄소 발생 연료를 정책적으로 확대하는 결과를 불러오게 된다.

산림 생태적 복원 및 보호지역 확대는 장기적인 투자와 관리가 필요하며, 이에 따른 재정적 부담이 존재한다. 또한 생태계 복원의 성과를 측정하고 유지하는 데 어려움이 있다. 생태계를 복원함으로써 환경 보호 효과를 기대할 수 있지만, 단기적으로는 환경 교란이 발생할 수 있다. 생태계 복원 과정에서 수자원의 질과 양에 긍정적 영향을 미칠 수 있지만, 초기에는 관리와 조정이 필요하다. 산불, 산사태, 병해충 등 산림재해 예방을 강화하려면 높은 수준으로 기술과 재정적 투자를 해야 한다. 병해충 관리를 강화하는 과정에서 살충제 등에 지역 주민과 등산객이 살충제에 노출될 수 있다. 살충제는 또한 수자원을 오염시킬 수 있다.

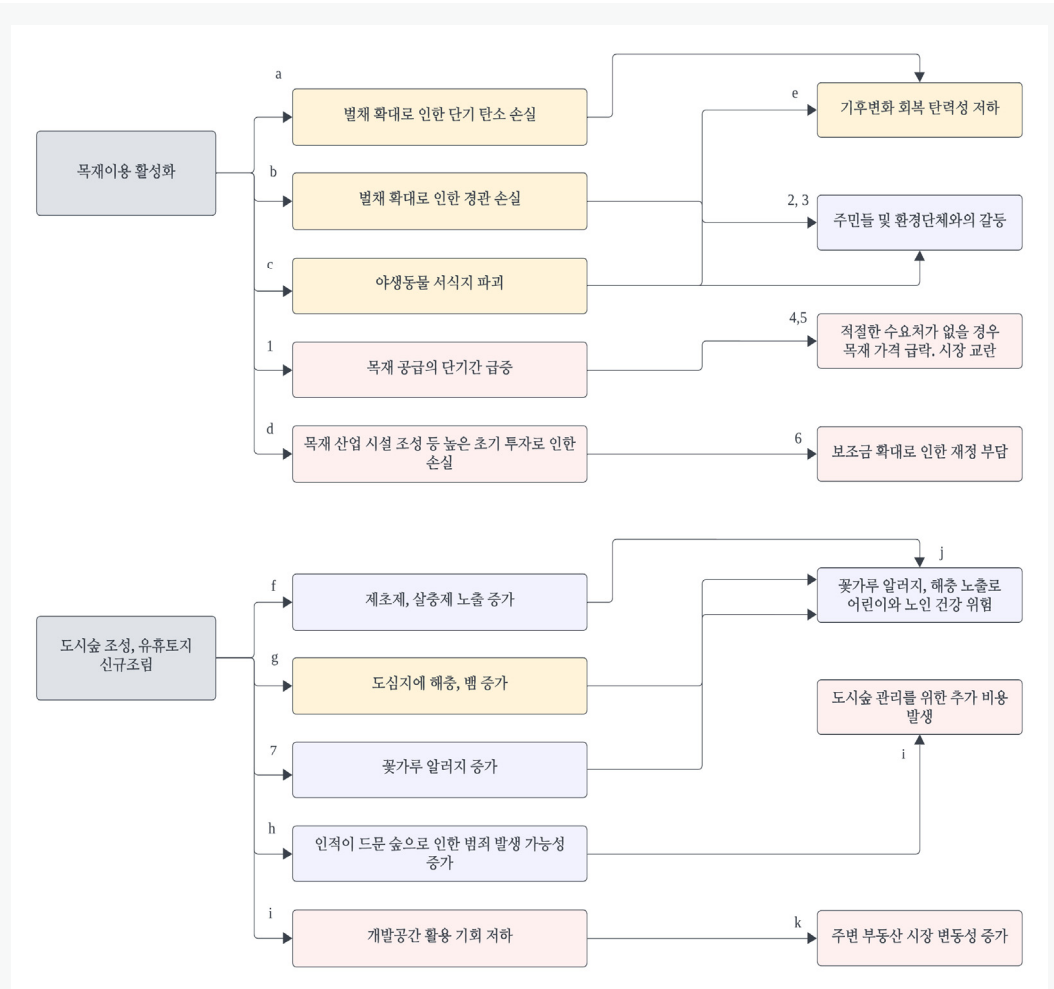
탄소흡수원을 확대하려고 도시숲, 유허토지 신규 조림 등 자투리 공간을 활용하여 조림을 확대하는 정책을 시도하고 있다. 우리나라는 국토의 60% 이상이 산림이며 토지 개발 수요가

높기 때문에 신규 조림을 위한 공간은 이미 포화 상태에 이르렀다. 따라서 도시숲, 유헤토지 등 자투리 공간을 활용하여 조림을 확대하는 정책을 시행하는 것이다. 도시숲과 유헤토지에 신규 조림을 실시한다면 탄소 흡수력 증진뿐 아니라 경관효과, 도시민에게 쉼터 제공, 미세먼지 저감 효과 등 많은 이점이 있지만 이에 따른 리스크도 존재한다. 도시지역 숲에 뿌려진 살충제는 산림지역에 위치했을 때보다 더욱더 많은 사람에게 영향을 미칠 수 있다. 도시숲 조성으로 생물다양성이 증가하지만 해충, 뱀 등 사람에게 위해를 미치는 생물에 많은 주민이 노출될 수 있다. 꽃가루로 인한 알레르기는 호흡기 질환을 야기하기도 한다. 해충과 알레르기 등은 특히 몸이 약한 어린이와 노인에게 더 큰 영향을 미치게 될 것이다. 숲을 관리하는 데 꾸준한 추가 비용이 발생하며, 주거지나 쇼핑몰 등 주민 편의를 확대하는 시설 개발을 위한 공간 활용 기회가 저하된다. 숲세권 등 숲 주변의 주거지 수요가 증가함에 따라 주변 부동산 가격이 동반 상승하여 부동산 시장의 변동성이 증가할 수 있다. 도시숲은 또한 범죄와 비행 청소년의 온상이 될 수 있으며, 이에 따라 CCTV 및 가로등 설치, 순찰구역 확대 등 방법 비용이 상승할 수 있다.

탄소중립 목표를 달성하려고 산림 부문에서 다양한 세부 정책과 구체적인 목표를 설정하였지만, 이를 이행하는 과정에 여러 가지 리스크가 존재한다. 부문별로 발생할 수 있는 리스크를 종합적으로 관리하고, 상호 연계된 전략을 수립하는 것이 중요하다고 판단된다. 이로써 산림 부문이 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있으며, 다양한 부문에 미치는 부정적 영향을 최소화할 수 있을 것으로 보인다.

표 3-20 2050 탄소중립 정책 목표와 관련 부문

세부 정책	구체적 목표	건강	에너지	수자원	농업	산림
조림, 숲가꾸기, 목재수확 확대를 통한 흡수기능 강화	*숲가꾸기사업 확대: ('21년) 21만ha→('50년) 48만ha "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" ** 경제림 중심의 산림순환경영 활성화 전체 숲가꾸기: 300천ha('30년), 480천ha('50년) 큰나무가꾸기: 100천ha('30년), 288천ha('50년) *국산목재생산확대: ('20년) 440만m³→('50년) 800만m³ "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" ** 경제림 중심의 산림순환경영 활성화 목재생산량: 550만m³('30년), 800만m³('50년)	○	○			○
임도, 임업기계 등 산림순환경영 기반 구축	*30년까지 임도 밀도를 현재의 1.8배 수준으로 증대 "2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" ** 경제림 중심의 산림순환경영 활성화 경제림 임도: 8.96m/ha('30년), 16.0m/ha('50년) *30년까지 임도 밀도를 현재의 1.8배 수준으로 증대	○				
고부가가치 목재 이용 활성화로 탄소 저장고 확대	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" ** 목재 수요·공급 선순환 체계 구축 1인당 연간 목재사용량(m³) : 1.2('30년), 2.0('50년) 연간 HWP 탄소저장량(tCO₂): 150만('30년), 220만('50년)	○				○
미이용 산림바이오매스의 재생에너지 활용	"2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략" ** 산림바이오매스의 지속 가능한 이용과 관련 산업 육성(미이용 산림바이오매스 생산량: 150만 톤('30년), 300만 톤('50년))		○			○
바다숲확대 조성 및 조성방안 다각화	바다숲 조성 면적 ('22년) 292km ² → ('30년) 540km ²					



자료: 저자 작성.

그림 3-22 탄소중립 정책 산림 부문 이행 리스크

표 3-21 탄소중립 정책 산림 부문 이행 리스크 분석에 활용된 참고문헌

구분	참고문헌
논문 및 보고서	a. Peng et al.(2023), b. Wallace et al.(2023), c. 김미현(2018), d. 남경수 외(2021), e. 이덕만(2008), f. Marselle et al.(2021), g. Xing et al.(2023), h. 이규범, 김도우(2015), i. 장철수, 석현덕, 장우환(2002), j. Patella et al.(2018), k. Syphard et al.(2012)
미디어 자료	1) 산림청 보도자료(2020), “국산목재 지난해보다 늘어난 5백만 m ³ 공급한다” 2) KJtimes (2022), “천연림 벌채, 환경·노동·불법 수입 리스크 심각[산림벌채의 민낯]” 3) 한겨레(2021), “벌채 논란 번진 산림청 탄소중립 전략, 학계 얘기 들어보니” 4) 나무신문(2023), “2024 목재산업 경기전망 혼란하다 혼란해” 5) Forestry(2024), “Economic Impact of Lumber Production on Global Timber Markets” 6) 한국목재신문(2018), 지자체 “업체들, 목재산업시설 현대화사업 보조금 부가세 9월까지 납부해라” 7) New York Post(2024), “Majority of tree in NYC could be making air quality worse: Columbia researchers”

자료: 저자 작성.

다. 탄소중립 정책에 따른 산림 탄소흡수 효과 분석

본 연구에서는 산림 부문 탄소중립 정책의 산림 탄소흡수 효과를 도출하고 향후 정책을 효율적으로 운용하려는 방향성을 제시하고자 한다. 산림 탄소중립 정책에서 핵심이라 할 수 있는 벌채, 재조림, 목재 이용의 순환을 바탕으로 탄소흡수원 확보 효과를 분석하였다.

산림 분야 탄소흡수량 변화를 알아보려면 먼저 벌채량을 가정하여야 한다. 첫 번째 시나리오인 베이스라인은 현 상태를 유지할 때 미래의 탄소흡수량 변화를 추정한 것으로 설정하였다. 연간 벌채면적은 2017년과 2018년 수확벌채재적(m^3)을 벌채수령의 면적으로 환산(ha당 재적을 이용)하여 적용하였다. 벌채면적 계산에는 수확벌채와 피해지 및 기타 벌채 포함하였고 불량림 갱신은 “영”으로 처리하였다. 숲가꾸기의 경우 간벌로 목재가 생산되어 조림면적으로 전환되지 않으므로 계산을 간소화하도록 벌채면적에서 제외하였다. 연간 조림면적은 전년도 벌채면적과 동일하다고 가정하였고 전체 시업지 면적은 2015년 면적과 동일하다고 가정한 후 연도별 영급별 면적을 계산하였다.

표 3-22 최근 5년간 수종별 평균 벌채량

(단위: 천 m^3)

	평균	침엽수	활엽수
합계	6,104.4	3,732.2	2,372.2
수확벌채	2,324	1,371	953
수익간벌	178.0	141.2	36.8
숲가꾸기	1,639.9	971.7	668.2
수종갱신	796.5	394.3	402.2
피해목벌채	714.5	671.7	42.8
산지전용	432.5	242.3	190.1
기타	39.1	22.9	16.2

자료: 산림청, “목재수급실적 각연도”, 검색일: 2024.9.12.

두 번째 목재공급계획 시나리오에서는 2011년 말 마련된 ‘목재산업 진흥 종합계획’에 따라 산림을 벌채할 경우 산림면적의 변화에 따른 탄소흡수량 변화를 추정하였다. 본 종합계획에서 산림을 이용한 목재공급계획을 살펴보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 산림의 영급 구조를 지속 가능하게 개선하고자 벌기령에 달한 임목을 적기에 벌채하여 연간 약 15만 m^3 원목을 추가로 공급하여 2010년 연간 105만 7,000 m^3 인 원목 공급량을 2016년에는 연간 200만 m^3 까지 늘린다. 2016년까지 불량림 14만ha, 2020년까지 28만ha에 대한 수종갱신으로 연간 약 60만 m^3 목재를 공급한다. 벌채 및 숲가꾸기 산물에 대한 수집 및 활용도를 49%에서 60% 수준으로 올려 현행 372만 m^3 에서 450만 m^3 로 확대한다. 각 시나리오에 따른 연도별 수확 벌채량은 다음과 같다.

표 3-23 시나리오별 수확 벌채량

(단위: 천m³)

연도	현 상태 유지			목재공급계획		
	합계	침엽수	활엽수	합계	침엽수	활엽수
2025	2,324	1,371	953	3,251	1,911	1,340
2035	2,324	1,371	953	4,810	2,819	1,991
2045	2,324	1,371	953	6,368	3,726	2,642
2055	2,324	1,371	953	7,926	4,633	3,293
2065	2,324	1,371	953	9,484	5,540	3,944
2075	2,324	1,371	953	11,043	6,448	4,595

자료: 저자 작성.

시나리오에서 벌채량은 외부 계획에 따라 주어지므로 탄소 흡수량 변화와 영급 면적 변화는 영급 Cohort 모형(안현진 외, 2019)을 활용하였다. 영급 코호트 모델은 동태분석에 이용되는 운동방정식을 의미한다. 이상민 외(2013)의 연구에서 이용된 영급별 면적의 코호트식을 이용하여 벌채 계획에 따른 산림면적 변화, 벌채면적 변화 등을 예측할 수 있다. 이때 동태 관계식은 입목(standing tree)의 성장에 따라 변화하는 산림현황을 나타낸다.

영급별 면적의 코호트 관계는 다음과 같다. 산림 영급 면적 변화는 시간에 따라 변화하는 동태적 성격을 띠므로 벌채가 없다고 가정하면 t년의 i영급 면적은 t-1년~t-10년의 (i-1)영급 면적에서 동 기간 산불, 병해충 등 재해로 인한 고사 면적을 제외한 부분으로 계산되며, 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_t^i = \sum_{k=1}^{10} ((A_{t-k}^{i-1} - D_k^{i-1}) \times \frac{1}{10}) \quad (\text{식 3-2})$$

A_t^i = t기의 i 영급 면적, A_{t-k}^{i-1} = (t-k)기의 (i-1)영급 면적
 D_k^{i-1} = k년간 (i-1)영급 고사면적

매년 (i-1)영급 산림의 생존(survival) 면적이 전년도 (i-1)영급의 일정 비율만큼 고사한다고 가정하면 고사 면적은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_k^{i-1} = \delta(1-\delta)^{k-1} A_{t-k}^{i-1} \quad (\text{식 3-3})$$

A_t^i = t기의 i 영급 면적

(식 3-2)에 (식 3-3)을 대입하면 (식 3-4)와 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$A_t^i = \sum_{k=1}^{10} ((1-\delta)^k A_{t-k}^{i-1}) \times \frac{1}{10} \quad (\text{식 3-4})$$

따라서 t년 (i)영급의 산림면적은 다음 식4와 같은 코호트 관계식을 만족한다. 이때 t년의 1영급 면적은 t-9년부터 t년까지 조림면적의 합과 같으며, 6영급 이상은 6영급에 모두 포함하도록 한다.

$$A_t^i = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{k=1}^{10} (1-\delta)^k I_{t-(k-1)}, & i = 1 \\ \sum_{k=1}^{10} ((1-\delta)^k A_{t-k}^{i-1}) \times \frac{1}{10}, & i = 2, 3, 4, 5, \\ \sum_{i=6}^{\infty} \sum_{k=1}^{10} ((1-\delta)^k A_{t-k}^{i-1}) \times \frac{1}{10}, & i = 6 \end{array} \right\} \quad (\text{식 3-5})$$

$I_{t-(k-1)} = t-(k-1)\text{기의 조림면적}$

식4를 이용하면 각 연도의 영급별 면적을 전망할 수 있다. 1영급은 향후 10년간 조림면적을 이용하여 전망하며, t-1년 벌채면적은 t년 조림면적과 동일한 것으로 가정한다. 연도별 벌채 계획은 외부적으로 결정된다고 가정한다. 코호트 관계식을 이용하여 이의 벌채 계획을 따르면 향후 국내 산림 영급 면적 변화와 목재 생산 추이를 예측할 수 있다. 시작 시점의 산림은 2015년 산림의 소유별·영급별 면적을 이용하여 계산하였고, 2015년 기준 조림면적에는 조림 허가실적을 적용하였다. 국립산림과학원에서 제시한 임상별 영급의 단위면적당 이산화탄소 흡수량을 활용하여 국내 산림의 영급 변화에 따른 이산화탄소 흡수량을 계산하였다. 산림의 면적은 6영급까지만 구분되었으므로 6영급 이상의 이산화탄소 흡수량은 수령 60년을 기준으로 계산하였다.

표 3-24 국내 산림의 임상별 이산화탄소 흡수량

(단위: tCO₂/ha/연)

구분	임령별 이산화탄소 흡수량									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
침엽수	5.6	10.2	9.0	6.1	3.7	2.1	1.2	0.7	0.4	0.2
활엽수	6.8	13.0	11.8	8.2	5.1	2.9	1.6	0.9	0.5	0.3

자료: 산림청(2021)을 바탕으로 저자 작성.

1) 베이스라인 시나리오 이산화탄소 흡수량 변화

현행의 벌채 수준을 그대로 유지할 경우 연도별 영급별 면적을 구한 다음, 산림의 이산화탄소 흡수량을 계산하면 <표 3-23>과 같다.

표 3-25 베이스라인(현행 유지) 산림의 영급별 이산화탄소 흡수량 변화

(단위: 1,000tCO₂/연)

연도	합계	영급					
		1	2	3	4	5	6
2015	39,924	1,212	1,788	13,132	18,332	4,509	965
2025	22,507	1,795	2,733	2,067	2,911	4,355	8,664
2035	20,756	1,683	3,118	2,570	1,483	1,026	10,893
2045	20,647	1,568	2,905	2,579	1,717	949	10,946
2055	20,299	1,470	2,724	2,418	1,646	997	11,062
2065	19,937	1,386	2,568	2,279	1,552	945	11,225
2075	19,621	1,313	2,432	2,159	1,470	895	11,370

자료: 산림청, “목재수급실적 각연도”, 검색일: 2024.9.12.

현행의 벌채 수준을 유지한다면 산림 이산화탄소량은 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 2015년 이산화탄소 약 4,000만 톤을 흡수한 산림은 10년 만에 2,250만 톤으로 줄어들고, 2065년부터는 2,000만 톤 아래로 흡수하는 것으로 전망되었다. 이러한 결과는 이산화탄소 흡수가 가장 활발한 2영급과 3영급 면적이 줄어들고 이산화탄소 흡수 능력이 가장 낮은 6영급 면적이 늘어나는 변화로 쉽게 예측할 수 있다. 현재와 같은 벌채 수준을 유지한다면 우리나라 산림의 이산화탄소 흡수량은 크게 줄어들 것으로 예상된다.

2) 목재공급계획 시나리오에 따른 이산화탄소 흡수량 변화

목재공급계획에 따라 원목을 연간 약 15만m³ 추가로 공급하더라도 산림면적은 위의 현행 유지와 비슷하게 6영급의 면적이 늘어나는 것을 알 수 있다. 그러나 산림의 이산화탄소 흡수량은 2035년을 기점으로 매우 느리지만 서서히 증가하고 있어 현행 유지 시나리오에 비해 이산화탄소 흡수량이 증가할 것으로 예상된다.

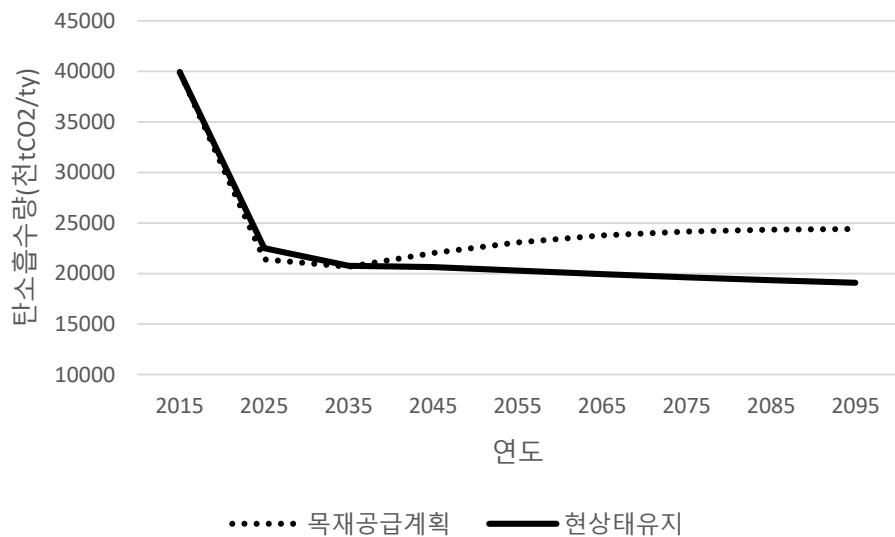
표 3-26 목재공급계획에 따른 산림의 영급별 이산화탄소 흡수량 변화

(단위: 1,000tCO₂/연)

연도	합계	영급					
		1	2	3	4	5	6
2015	39,924	1,212	1,788	13,133	18,333	4,509	966
2025	21,385	1,570	2,291	1,785	2,575	3,869	9,319
2035	20,677	2,032	3,212	2,334	1,290	907	10,931
2045	22,018	2,327	3,813	2,943	1,696	847	10,427
2055	23,078	2,525	4,232	3,361	2,018	1,064	9,919
2065	23,768	2,642	4,497	3,639	2,237	1,217	9,585
2075	24,167	2,695	4,640	3,806	2,377	1,318	9,386

자료: 산림청, “목재수급실적 각연도”, 검색일: 2024.9.12.

두 가지 시나리오를 적용한 산림의 연간 이산화탄소 흡수량을 비교하였다. 현 상태를 유지할 경우(베이스라인)와 목재공급계획을 따를 경우 모두 2035년까지 이산화탄소 흡수량이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 2045년 이후 목재공급계획에 따른 시나리오에서는 이산화탄소 흡수량이 점차 증가함을 알 수 있다. 그러나 두 시나리오 모두 미래에는 현재에 비해 산림 이산화탄소 흡수량이 크게 감소함을 알 수 있다.



자료: 저자 작성.

그림 3-23 시나리오 간 이산화탄소 흡수량 변화 비교

3) 시나리오별 목재 생산

영급구조 변화에 따른 이산화탄소 흡수량 변화를 추정하고자 실제로 나무가 존재하는 면적인 입목면적의 변화를 일으키는 주요 원인인 수확벌채만 대상으로 하였다. 숲가꾸기, 간벌 등은 벌채로 목재생산을 하지만 즉시 조림하지 못하므로 입목면적 변화의 원인이 되지 않기 때문이다. 그러나 목재 생산량을 계산하려면 수확벌채 후 변화한(대부분 늘어난) 조림면적에 대해 간벌과 숲가꾸기 벌채가 수행될 예정이므로, 늘어난 면적의 비율에 간벌과 숲가꾸기 벌채량을 추가하는 것이 바람직하다. 피해목 벌채량, 수종갱신 벌채량, 산지전용 벌채량 등은 과거(2016~2020년)와 동일하다고 가정하였다.

영급별 면적변화로 계산한 벌채면적을 벌기령(영급)의 헥타르당 부피로 환산하면 벌채량을 구할 수 있으며, <표 3-25>에 명시된 시나리오별 수확벌채량 변화에 간벌과 숲가꾸기 벌채량을 추가하여 목재 생산을 위한 벌채량을 도출하였다. 수익간벌과 숲가꾸기 면적이 수확벌채 면적에 비례한다고 가정하면 목재공급 시나리오의 경우 현 상태 유지에 비해 2.6~11.3배(침엽수: 1.3~5.7, 활엽수: 1.3~5.5) 늘어남을 알 수 있다.

표 3-27 시나리오별 총 목재 생산을 위한 벌채량

(단위: 천^m³)

연도	현 상태 유지			목재공급계획		
	합계	침엽수	활엽수	합계	침엽수	활엽수
2025	6,125	3,815	2,309	7,594	4,722	2,873
2035	6,125	3,815	2,309	10,936	6,983	3,953
2045	6,125	3,815	2,309	13,627	8,592	5,034
2055	6,125	3,815	2,309	16,317	10,202	6,115
2065	6,125	3,815	2,309	19,008	11,811	7,196
2075	6,125	3,815	2,309	21,698	13,421	8,277

자료: 저자 작성.

4) 목제품 탄소 고정 효과 비교

목제품 수급모형(안현진 외, 2019)을 이용하여 전망한 제품별 목재 투입량은 <표 3-26>과 같다. 투입량은 국산재와 수입재를 나누어 도출하였다.

표 3-28 목재제품 생산을 위한 국산 목재 투입량

(단위: 천m³)

연도	제재용		펄프용		보드용	
	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수
2025	151	25	124	504	1,700	189
2035	162	25	124	508	1,813	201
2045	183	25	124	504	1,925	214
2055	208	25	124	497	2,028	225

자료: 저자 작성.

표 3-29 목재제품 생산을 위한 목재(국산재, 수입재) 투입량

(단위: 천m³)

연도	제재용		펄프용		보드용		합판용 (침엽수)
	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수	
2025	6,067	408	477	1,937	4,251	472	1,320
2035	5,582	408	477	1,956	4,532	504	1,155
2045	5,204	408	477	1,938	4,811	535	990
2055	4,864	408	477	1,912	5,070	563	824

자료: 저자 작성.

현 상태 유지 시나리오로 별채한 목재를 목제품 생산에 투입하는 비율을 구하면 <표 3-28>과 같으며, 이는 시나리오별 목재 생산을 위한 별채량과 목재제품 생산을 위한 국내재 투입량을 이용하여 도출한 것이다. 제재용의 경우 침엽수는 4~5.5% 정도이며, 활엽수는 1.1% 정도이나 보드용은 침엽수가 44.6~53.2%이며, 활엽수가 8.2~9.8%로 나타났다.

표 3-30 현 상태 유지 시나리오의 목재제품 생산을 위한 별채량 대비 국산 목재 투입 비율

연도	제재용		펄프용		보드용	
	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수
2025	0.040	0.011	0.033	0.218	0.446	0.082
2035	0.042	0.011	0.033	0.220	0.475	0.087
2045	0.048	0.011	0.033	0.218	0.504	0.093
2055	0.055	0.011	0.033	0.215	0.532	0.098

자료: 정학균 외(2021), p.76.

<표 3-28>의 국산 목재 투입 비율을 그대로 다른 별채 시나리오에 적용하면 기술변화 없이 각 제품 생산에 투입하는 국산 목재의 양을 구할 수 있다. 또한 그 양을 목제품 생산을 위한

목재(국산재, 수입재) 투입량과 비교하면 별채 시나리오를 변화시켜 제품별 투입되는 국산재 비율을 계산할 수 있다. 이때 늘어난 국산재 투입량만큼 변화하는 이산화탄소 흡수량을 도출할 수 있다.

표 3-31 목재공급계획 시나리오의 목재제품 생산을 위한 목재 투입량

(단위: 천m³)

연도	제재용		펠프용		보드용	
	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수	침엽수	활엽수
2025	187	32	153	626	2,104	235
2035	297	44	227	870	3,318	345
2045	413	56	279	1,098	4,334	466
2055	557	67	332	1,316	5,423	597

자료: 정학균 외(2021), p.77.

〈표 3-29〉의 국산 목재 투입 비율을 그대로 다른 별채 시나리오에 적용하면 기술변화 없이 각 제품 생산을 위해 투입하는 국산 목재의 양을 구할 수 있다. 또한 그 양을 목제품 생산을 위한 목재(국산재, 수입재) 투입량과 비교하면 별채 시나리오를 변화시켜 제품별 투입되는 국산재 비율을 계산할 수 있다. 이때 늘어난 국산재 투입량만큼 변화하는 이산화탄소 흡수량을 도출할 수 있다.

미래의 목제품 수요를 충족하려고 투입되는 국산재의 연도별 이산화탄소 저장량을 보면 현 상태를 유지할 경우 2025년 5,401천 톤CO₂eq에서 2055년 5,925천 톤CO₂eq로 약 9.7% 늘어나는 것을 알 수 있다. 반면 현 상태 유지 시나리오보다 많은 양을 별채하는 목재공급계획 시나리오의 경우 그 양이 6,210천 톤CO₂eq에서 11,904천 톤CO₂eq로 91.6% 늘어난다.

위에서 보았듯이 산림으로 흡수되는 이산화탄소 연간 흡수량이 20,000 톤CO₂eq~25,000톤 CO₂eq 정도 임을 감안하면, 목재제품에서 저장하는 이산화탄소의 양이 상당히 많은 것을 알 수 있다. 따라서 현재의 양보다 더 많이 별채하고, 별채된 목재를 목제품으로 가공하면 더 많은 탄소를 저장할 수 있게 된다. 국산재를 이용한 목재제품 가공기술이 발달하여 국산재 투입량이 늘어날수록 이산화탄소 저장량은 많아질 것이다. 이러한 효과는 국산재를 반감기가 긴 제재용이나 보드용으로 이용할 때 더욱 크게 나타난다.

표 3-32 국내 목재제품 수요 충족을 위한 국산 목재 투입에 따른 탄소 흡수량

(단위: 1,000tCO₂eq)

시나리오	용도		2025년	2035년	2045년	2055년
현 상태 유지	합계		5,401	5,581	5,758	5,925
	제재용	침엽수	176	189	214	243
		활엽수	38	38	38	38
	펄프용	침엽수	145	145	145	145
		활엽수	750	757	750	740
	보드용	침엽수	1,986	2,117	2,248	2,369
		활엽수	281	300	318	335
목재공급 계획	합계		6,210	7,977	9,882	11,904
	제재용	침엽수	218	314	445	609
		활엽수	47	65	83	100
	펄프용	침엽수	179	240	301	363
		활엽수	933	1,296	1,635	1,959
	보드용	침엽수	2,457	3,513	46,78	5,929
		활엽수	350	513	694	888

자료: 저자 작성.

산림 벌채를 확대하여 목재를 생산하고, 목재제품을 이용하여 탄소를 고정하는 정책의 효과를 요약하면 다음과 같다. 산림 부문의 탄소흡수를 높이려면 산림의 흡수력 증진이 필수적이다. 현행 벌채를 유지하면 흡수력 증진이 시간이 지남에 따라 감소함을 알 수 있다. 목재공급 계획에 따른 벌채는 탄소 흡수가 현행 벌채에 비해 다소 증가하지만, 시간에 따라 감소하는 것은 현행 벌채와 같다. 따라서 벌채 수준을 높여 영급구조를 개선함으로써 산림의 흡수력을 증진하는 것이 탄소중립을 위해서도 매우 중요함을 알 수 있다. 이는 목재공급계획 수준보다 더 많은 벌채를 수행해야 함을 시사한다. 그러나 목재 생산으로 탄소흡수를 증대할 수 있으나 하는 문제는 벌채 후 배출된 탄소를 목재제품 생산으로 다시 감축하느냐에 달려 있음을 알 수 있다. 국내에서 벌채된 목재를 이용한 목재제품 생산을 늘리고, 탄소저장 효과를 증대시킴으로써 탄소중립 목표 달성에 가까워질 수 있을 것이다. 벌채된 목재를 목재제품으로 이용하지 않는다면 탄소저장 효과는 크게 줄어들 것으로 예상된다.

결론적으로 탄소중립을 효과적으로 달성하려면 산림 벌채와 목재 이용의 균형이 중요하다. 탄소중립을 위해서는 목재 공급과 산림의 탄소흡수 능력을 동시에 고려해야 하며, 지속 가능한 벌채 방법과 목재 생산이 필수적이다. 또한 목재제품의 수명 연장과 재활용이 탄소저장 효과를 극대화하는 데 중요한 역할을 한다. 목재제품의 사용 기간이 길수록 그만큼 탄소가 오랫동안 저장되므로, 내구성 있는 고품질 목재제품을 생산하고, 제품 재사용과 재활용을 장려해야

한다. 또한 에너지 전환, 재생 가능 에너지원 도입 등 다른 기후 대응 정책과 연계해야 탄소 흡수 능력을 높일 수 있다. 이러한 점들은 산림 별채와 목재 이용으로 탄소중립 정책이 성공하려면 고려해야 할 주요 요인들이며, 이로써 더욱 지속 가능한 환경 목표를 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

라. 재생에너지 확대에 따른 영향

1) 재생에너지가 산림에 미치는 파급효과

『제2차 국가에너지기본계획(2013-2035)』에서는 원자력 비율을 41%에서 22~29%로 조정하고 신재생에너지 보급 비율은 총에너지 대비 11%를 유지하도록 계획을 수립하였다. 이에 따라 태양광은 2035년까지 30GW, 풍력은 2035년까지 육상에서 2.5GW, 해상에서 10.6GW를 보급한다는 건설계획을 수립하였다. 2017년 12월 산업통상자원부는 『재생에너지 3020 이행계획』을 발표하였는데, 핵심 내용은 정부가 2030년까지 재생에너지 발전량 비율을 20%까지 확대한다는 것이며, 기존의 국가 에너지 기본계획의 목표치가 확대되었다. 중간 목표로 2030년까지 풍력과 태양광을 각각 19.3GW와 46.5GW 규모로 키울 예정이다. 같은 기간 육상풍력은 4.5GW, 해상풍력은 14.3GW까지 확대하는 것으로 계획되었다.⁶⁹⁾

우리나라의 풍력발전은 2001년 8MW에서 시작하여 2021년 1,709MW, 2022년 1,804MW로 총 설치 용량이 꾸준히 증가하고 있다. 국내 풍력발전단지는 풍향에 따라 좌우되며 풍향이 우수한 백두대간의 산간 지역이나 해안 지역에 집중 분포되어 있다(권순덕 외, 2014). 2016년 기준 산지에 설치된 풍력발전단지는 총 18개소이며, 이 중 강원도에 12개가 설치되어 있다. 2004년부터 2013년까지 10년간 강원도에 설치된 풍력발전단지는 11개소이다(구자춘 외, 2016). 해발고도는 평균 795m이며, 해안가 저지대를 제외하면 대부분 1,000미터 이상 고도에 있다. 대부분의 산지 풍력발전은 국공유림에 설치되어 있으며 산지 전용·일시 사용 허가⁷⁰⁾를 통해 운용되고 있다.

풍력발전이 가능한 지역은 풍량이 우수한 지역을 우선 대상으로 하며 대부분 인간의 간섭이 적고 생태가 양호한 지역에 분포하고 있다. 따라서 풍력발전단지 조성 시 대규모 산지 및 생태계 훼손 가능성이 크다. 권순덕 외(2014)의 연구에서는 산지 풍력발전에 따른 리스크로 자연현상 및 지형 피해, 생태계 피해, 사회적 현상 및 인근 주민 피해 등을 제시하였다. 자연 현상 및 지형 피해로는 국내 산지 내 설치되어 있거나 계획된 풍력발전단지가 대부분 급경사로

69) 일렉트릭파워(2023.1.12), “2036년 풍력 등 재생에너지 발전비중 28.9% 목표”, 검색일: 2024.6.20.

70) 산지전용: 산지를 다른 용도로 사용하고자 형질을 변경하는 것.

산지일시사용: 산지를 복구할 것을 조건으로 조림, 숲가꾸기, 임목의 별채·굴취, 토석 등 임산물의 채취 외의 용도로 일정 기간 사용하거나 이를 위하여 산지의 형질을 변경하는 것.

이루어진 능선부에 위치하여 상당 규모의 절·성토를 유발하여 능선부의 지형변화를 초래할 가능성을 들 수 있다. 풍력발전단지를 조성할 때 지형 및 산림 훼손이 발생하기 때문에 산사태 등 재해에 취약하여 토사유출로 주변 생태계를 교란하는 결과를 가져올 가능성이 크기 때문이다. 공사 장비 진입로와 크레인 부지 등 추가 부지, 발전단지 외에 전력계통 연계를 위한 송전선로 개설은 추가적 산림 훼손을 야기한다.

풍력이 좋은 고산지대는 대부분 인간의 간섭이 적어 식생이 우수하고 생태계가 잘 보존되어 있으며, 야생동식물의 중요한 서식지이다. 특히 산지 풍력발전단지가 대부분 위치하는 백두대간은 한반도의 주요한 생태축의 기능을 하고 있다. 풍력발전단지와 진입도로 건설로 인한 지형 훼손은 산사태 피해뿐 아니라 생태계 피해를 발생시킨다. 한 예로 양산 풍력발전소가 위치한 원동면 내포리 산지 일대는 청정 자연 지역으로 고로쇠나무, 반딧불이 등 천연기념물의 서식지이다. 건설 당시 천연기념물 서식지 훼손과 같은 문제로 여러 논란이 야기되기도 하였다. 풍력발전기의 회전하는 블레이드에 이동 조류 및 월동 조류의 충돌 피해가 발생하기도 한다. 텃새보다는 철새에게 큰 피해를 주지만 독수리, 박쥐 등도 풍력발전기에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.



자료: 저자 작성.

그림 3-24 산림 능선에 위치한 풍력발전단지

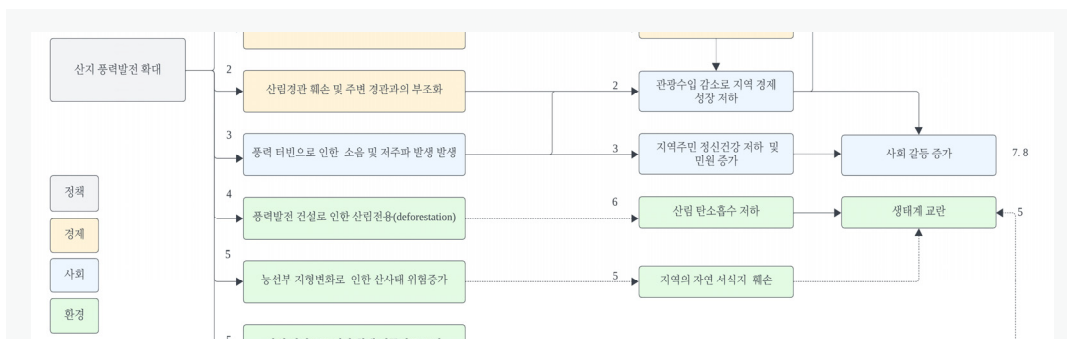
풍력발전의 대표적인 사회적 피해는 소음을 들 수 있다. 이론상 풍력발전기에서 발생하는 소음은 최소 300미터 정도 이격되면 국내 생활 소음 기준을 만족한다. 주변에 민가가 많지 않은 국내 조성 사례를 미루어 보아 직접적 소음의 영향이 크지 않을 것으로 예상되지만 민원은 끊이지 않고 있는 실정이다. 2023년 강원 평창 진부면, 용평면 주민들은 일대의 산에 들어서는 육상풍력발전 설비가 마을과 너무 가깝다며 소음 피해 우려를 전달하였다.⁷¹⁾ 사업 계획에 따르면 2024년까지 이곳에 산 능선을 따라 풍력발전 9기가 세워진다. 주민들은 발전기

71) 머니투데이(2023.1.17), “풍력발전 좋다지만…저주파 소음 피해는?…속사 주민 반발”, 검색일: 2024.10.2.

건설 과정에서 산림이 훼손되고 자연친화 환경도 일정 부분 위협받을 것에 대한 우려도 전달하였다. 풍력발전으로 인한 소음과 함께 저주파 피해가 부각되고 있으나 국내에서는 아직 규제 기준이 없으며 민가에서 1.5km 이상 떨어진 지역에 설치하기를 권고하는 수준이다. 풍력발전기 날개 그림자에 일정 시간 지속적으로 노출되면 스트레스로 인체 영향이 심각하다는 연구 결과도 있다.⁷²⁾

풍력발전이 주변 경관을 해치고 소음을 유발하기 때문에 지역의 관광 수입과 경제활동에 악영향을 미친다는 의견도 나타난다. 스페인의 북서부 갈리시아 지역은 산티아고 순례길이 위치한 유명한 관광지이다. 그러나 스페인 정부가 이곳에 재생에너지 확대를 이유로 대규모 풍력발전단지를 조성하고 있어서 지역 주민들과 갈등이 커지고 있다.⁷³⁾ 지역 주민들은 풍력발전소가 조용한 순례길의 이미지를 망치고 문화재 보존에도 악영향을 준다고 항의 시위에 나섰다. 풍력발전기 소음이 관광업을 주 수익원으로 하는 일부 지역에 치명타가 되고 있다는 주장이다. 노르웨이에서도 중부 포센란드에 있는 풍력발전 터빈 151개의 철거를 요구하는 시위가 벌어졌는데, 풍력발전이 이 지역에서 몇백 년 동안 순록을 키워온 북유럽 원주민의 권리를 침해한다는 이유에서다.⁷⁴⁾ 이들은 거대한 풍력발전기와 여기서 나는 소리가 순록을 두려움에 떨게 해 순록 방목이 불가능해지고 있다고 지적하였고, 노르웨이 대법원도 이들의 권리 침해를 인정하는 판결을 내린 바 있다.

풍력발전단지 및 연계된 송전선로가 주변 경관과 부조화를 유발한다는 의견도 제기되고 있다. 경관에 대한 영향은 개인마다 느끼는 차이가 있고 정량적으로 산정하기 어려우나 우리나라에서는 입지 특성상 능선부에 풍력발전이 조성되기 때문에 발전기 간 이격거리를 확보하려면 상당히 넓은 범위에 걸쳐 조성되어 주변 경관에 미치는 영향이 상당하다고 판단된다. 우리나라는 산지 풍력발전이 가능한 입지가 제한적이기 때문에 입지 대안을 검토할 수 있는 여지가 없다.



자료: 저자 작성.

그림 3-25 산지 풍력발전 확대 정책 이행 리스크

72) 이상범 외(2011).

73) 한국일보(2023.1.3), “산업이나 관광이나.. 재생에너지 놓고 갈등 커진 유럽”, 검색일: 2024.10.2.

74) 한겨레(2023.3.2), “발전시 소음탓에 순록 못키우겠다... 툰베리도 시위 합류”, 검색일: 2024.10.2.

표 3-33 산지 풍력발전 확대 이행 리스크 분석에 활용된 참고문헌

구분	참고문헌
논문 및 보고서	a. Wretling, Balfors, and Mortberg(2022), b. Greene, J. S. and M. Geisken(2013), c. Avila, S.(2018), d. Voigt, et al.(2024), e. Haggett(2012), f. Kirkegaard et al.(2023)
미디어 자료	1) Sexton Chrissy(2014), "The Hidden Environmental Costs of Transitioning to Wind Power" 2) Peach(2021), "The Hidden Environmental Costs of Transitioning to Wind Power."

자료: 저자 작성.

마. 소결

우리 정부는 2050년 탄소중립 목표를 달성하고자 산림 흡수원을 주요 수단으로 활용하는 정책을 수립했다. 전체 흡수량의 93%를 산림·임업 부문에서 담당하게 하여 23.6백만 톤의 탄소를 흡수할 계획이다. 이 정책은 구체적인 목표와 실행전략을 제시하며, 신규 산림탄소흡수원 확충, 목재와 바이오매스 활용 활성화, 산림자원 관리 등을 포함한다. 또한 2030년까지 2018년 대비 40% 감축하는 목표를 세웠으며, 목재를 이용해 탄소를 저장하는 것은 핵심 전략 중 하나이다.

목재제품의 탄소 고정 효과는 매우 중요하다. 벌채 후 목재를 고부가가치 제품으로 가공해 장기간 탄소를 저장할 수 있으며, 목재제품의 수명이 길수록 탄소저장 효과가 커진다. 영급 구조 불균형 등으로 감소하는 산림탄소 흡수를 보완하도록 벌채를 확대하고 목재제품을 적절히 활용한다면, 장기적으로 탄소중립에 기여할 수 있음을 시사한다. 그러나 정책 이행 과정에서 여러 리스크가 존재한다. 벌채로 인한 단기 탄소 손실, 생물다양성 감소, 벌채 확대로 인한 환경단체 및 지역 주민과 갈등 등 환경적·경제적 리스크가 발생할 수 있다. 또한 목재생산 확대는 초기에 높은 비용과 기술적 어려움을 동반하며, 단기적으로는 경제적 손실도 예상된다. 고부가가치 목재제품을 생산하는 데는 설비와 기술 개발이 필요하지만, 초기 투자 부담이 크고 수익성이 높지 않다면 재정 압박이 가중될 수 있다. 목재 수요 변동에 따른 경제적 불확실성도 존재한다. 따라서 탄소중립 목표를 달성하려면 산림관리와 목재 이용의 균형을 유지하면서, 정책 이행 리스크를 종합적으로 관리하는 전략으로 지속 가능한 탄소중립 정책을 추진할 수 있을 것이다. 또한 목재제품의 다양화 및 고부가가치화를 위해 노력하여야 할 것이다. 국산 목재로 생산되는 제품은 주로 거푸집 등 저가용 건축자재로 활용되는 실정이다. 전통 건축 자재 외에도 친환경 건축 자재, 바이오 기반 제품 등 다양한 목재제품군을 개발하여 경제적 가치를 높이도록 노력해야 한다. 고부가가치 목재제품은 장기적으로 더 많은 탄소를 저장할 수 있으며, 더 큰 경제적 이익을 창출할 수 있다.

산림관리 및 목재 이용을 위한 탄소흡수 증진과 함께 산림 부문을 통한 에너지 전환, 신재생 에너지 도입 확대 등 다른 기후 대응 정책과 연계한다면 탄소흡수 능력을 높일 수 있다. 그러나 이에 따른 환경적, 사회적, 경제적 리스크 또한 고려해야 한다. 산림과 관련된 대표적인 재생에너지 확대 정책으로는 산지 풍력발전 보급 확대 정책이 있다. 우리나라의 경우 산지 풍력발전에 적합한 입지가 매우 한정되어 다수의 풍력발전단지가 백두대간을 중심으로 한 강원도 산간 지역에 설치되었다. 풍력발전으로 인한 이점도 많지만 천연 식생이 풍부한 지역에 입지한 풍력발전이 생태계에 미치는 부정적 영향에 대한 우려도 커지고 있다. 산지 풍력발전의 주요 리스크는 자연현상 및 지형에 대한 피해, 생태계 훼손, 그리고 사회적·경제적 갈등이다. 풍력발전단지 조성 과정에서 대규모 절·성토 작업으로 산사태 등 재해 위험이 증가하고, 토사 유출로 주변 생태계가 교란될 수 있다. 또한 진입로와 송전선로 건설로 추가적인 산림 훼손이 발생한다.

산림지역에 설치된 풍력발전단지는 야생동식물 서식지 파괴로 이어질 수 있으며, 특히 철새와 박쥐 같은 이동성 동물이 풍력발전기의 회전 날개와 충돌해 피해를 입는 경우가 발생한다. 또한 풍력발전 소음과 저주파는 인근 주민에게 불편을 초래하며, 이는 건강 문제와 사회적 갈등을 야기할 수 있다. 실제로 강원도 같은 지역에서 주민들은 풍력발전 설비로 인한 소음 피해를 호소하며 반발하고 있다.

경관 훼손 역시 중요한 문제로 제기되고 있다. 산지 풍력발전은 고지대 능선에 설치되므로 대규모 설치로 주변 경관이 훼손되며, 이로 인해 지역 관광업에 악영향을 미칠 수 있다. 스페인의 갈리시아 지역과 노르웨이 포센반도의 사례에서 보듯, 풍력발전단지가 지역 관광지와 자연 보존지에 미치는 부정적 영향으로 주민들과 갈등이 발생하고 있다. 노르웨이에서는 순록 방목 지역에 설치된 풍력발전단지가 원주민의 전통적인 방목 활동을 방해하여 법적 분쟁으로 이어지기도 했다.

재생에너지는 탄소중립과 환경 보호를 위한 중요한 대안이지만, 산림지역의 풍력발전 확대는 여러 가지 환경적, 사회적, 경제적 리스크를 동반한다. 산지에 풍력발전단지를 조성하는 과정에서 발생하는 산림 훼손, 생태계 교란, 소음과 경관 훼손 등의 문제는 재생에너지 확대와 산림보호 간의 갈등을 보여준다. 이러한 문제들은 산림을 보호하는 동시에 재생에너지를 확대하려는 정책적 목표와 상충할 수 있으며, 지속 가능한 발전을 이루려면 더 세심하게 계획하고 조율해야 할 것이다.

산지에 풍력발전단지를 설치하는 과정에서 발생하는 산림 훼손과 생태계 교란을 최소화하는 방안이 필요하다. 이를 위해 풍력발전단지의 입지를 신중히 선정하고, 풍력발전으로 인한 환경적 피해를 완화할 수 있는 기술적 대안을 적극 도입해야 한다. 풍력발전 설비가 지역

주민에게 미치는 소음과 경관 훼손 등의 문제를 해결하려면 주민과 소통과 협력을 강화해야 한다. 피해 지역 주민에게 보상 정책을 마련하고, 이들의 참여를 바탕으로 재생에너지 프로젝트의 사회적 수용성을 높이는 것이 중요하다. 특히 우리나라는 민가와 풍력발전단지 사이의 적정 거리에 대해 구체적인 규정이 부재하고 권고 수준에 머물고 있으므로 이에 대한 확고한 법적 기준을 수립해야 할 것이다.

풍력발전이 야생동물 서식지에 미치는 부정적 영향을 줄이도록 생태계 보호 대책을 강화해야 한다. 이동성 동물의 피해를 줄이는 모니터링 시스템을 도입하고, 피해가 발생할 가능성이 높은 지역에는 발전소를 설치하지 않는 방안이 필요하다.

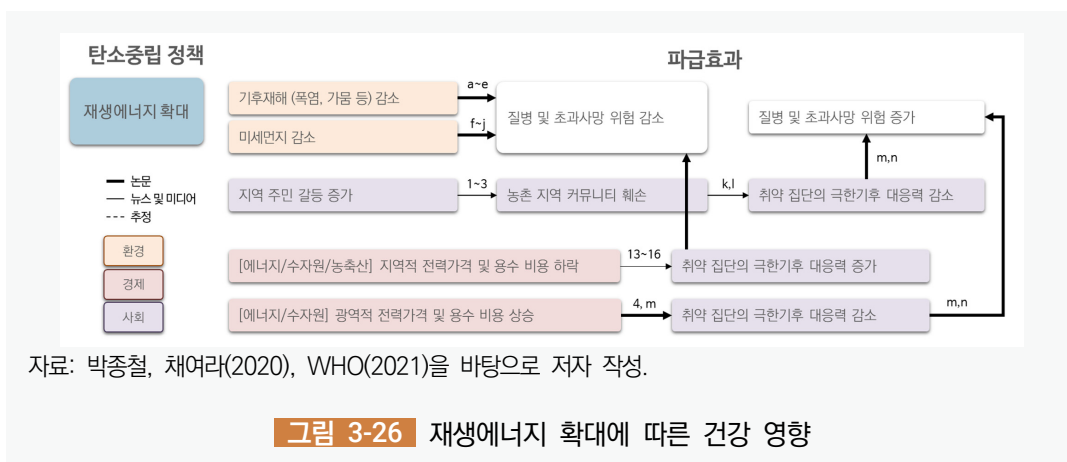
풍력발전이 관광지나 자연보호 지역에 미치는 영향을 최소화하도록 경관 관리 방안을 마련하고, 친환경 관광지로서 이미지를 유지할 수 있는 대책을 모색해야 한다. 지역 경제와 재생에너지 프로젝트가 조화를 이루는 방식으로 발전해야 한다. 또한 산림에 의존하지 않고 재생 에너지를 발전할 수 있는 다른 입지를 검토해야 한다. 종합해보면, 재생에너지 확대는 필수이지만, 산림 생태계를 보존하고 지역 주민 삶의 질을 보장하는 세심한 정책 설계가 필요하다. 이로써 재생에너지와 환경 보호라는 두 가지 목표를 균형 있게 달성할 수 있을 것이다.

5. 건강

가. 탄소중립 이행 리스크 영향 경로

1) 재생에너지 확대에 따른 전반적인 건강 영향

건강 부문에서는 탄소중립 정책과 각 부문에서 분석된 파급효과가 건강 부문에 미치는 영향을 분석하였다. 재생에너지 확대는 기후변화를 완화하여 폭염, 가뭄 등 기후재해를 감소시키는 데 기여하고 미세먼지 또한 감소시킬 것으로 기대된다. 이는 우리나라 전 지역에서 긍정적인 효과로 나타나며, 질병 및 초과사망 위험을 감소시킬 것으로 기대된다. 반면, 일부 농촌 지역에서 경관 및 생태계 영향, 소득 분배 등으로 주민 갈등이 발생하고, 이는 취약 집단의 극한 기후 대응력을 감소시켜 건강상의 피해로 연결될 우려가 있다. 또한 전력 가격 및 용수 비용의 변동성은 공간적 규모에 따라 다른 양상으로 건강에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이와 관련된 문헌 조사 결과를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.



기후변화에 세계 여러 나라에서 폭염으로 피해가 발생하고 있으며, 우리나라 역시 마찬가지이다. Mora et al.(2017)은 폭염이 신체의 다양한 부위에 영향을 미칠 수 있으며, 죽음에 이를 수 있는 경로가 27개에 달한다고 언급하였다. Robine et al.(2008)에 의하면, 2003년 유럽 폭염으로 7만 명 이상 초과사망자가 발생한 것으로 분석되었다. 그 이후로 폭염에 대한 위험 인식 변화와 예경보 시스템 등으로 폭염 피해 규모가 감소하기는 하였지만, 영국과 프랑스 등에서 매년 발간되는 보고서에 따르면 폭염으로 인한 초과사망자는 매년 발생하고 있다(Chae and Park, 2021). 2018년 우리나라에서는 온열질환자 44,060명과 초과사망자 929명(95% 신뢰구간: 739~1,143명)이 발생하였다(박종철, 채여라, 2020). 재생에너지 확대로 폭염 발생이 감소한다면, 그로 인한 초과사망 역시 감소할 것으로 기대된다. 가뭄으로 인한 건강 영향은 한국에서는 관련 연구를 찾아보기 어렵지만, Mani, Khorram-Manesh, and Goniewicz(2024)에 따르면, 아프리카 여러 나라와 인도, 중국 등에서 가뭄으로 인한 영양실조, 수인성 질병 확산, 정신 강 문제 등이 보고되었다.

재생에너지 확대에 의한 미세먼지 감소 역시 질병 및 초과사망 위험 감소에 기여할 것으로 기대된다. 여러 연구가 고농도 미세먼지와 건강의 관계를 밝혀왔다. 예를 들어, Lee et al. (2002)에서는 서울에서 15세 이하 어린이의 천식 입원율과 대기오염 수준 간의 관계를 분석하였다. 연구 결과 PM₁₀(미세먼지)과 이산화질소(NO₂) 같은 오염물질 농도가 높을수록 천식으로 인한 병원 입원율이 유의하게 증가함을 밝혔다. Loxham, Davies, and Holgate(2019)은 PM_{2.5}와 같은 미세먼지가 단순히 호흡기뿐만 아니라, 심혈관계 및 신경계 등 여러 기관에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 하였으며, 2018년 전 세계적으로 약 900만 명에 이르는 조기 사망이 PM_{2.5} 노출과 연관되어 있고, 광범위한 건강 영향 증거가 계속해서 증가하고 있다고 언급하였다. 세계보건기구(WHO: World Health Organization)는 고농도 미세먼지에 장기적 노출뿐 아니라 단기적 노출도 건강에 악영향을 미친다고 인정하고 대기질 가이드라인(Air Quality Guideline)으로 권고 기준을 강화하였다. 또한 Wan Mahiyuddin et al.(2023), Garcia et al.(2023)은 다양한 지역과 기간의 연구 결과를 비교하고, PM_{2.5} 노출이 건강에 미치는 단기적 및 장기적 영향을 제시하였다. 지금까지 밝혀진 미세먼지의 건강 영향을 고려할 때 미세먼지 농도의 저감은 건강 위험을 감소시킬 것으로 기대된다.

한편 재생에너지 확대는 일부 농촌 지역에서는 주민 갈등의 요인이 되는 것으로 여겨진다. 완도군 관산포 일대에서는 대규모 태양광 발전소 건설로 농어촌 주민 간 갈등이 심화하는 사례도 있었다. 농사짓기 어려운 노년층은 태양광 발전으로 더 높은 임대료 수익을 기대하며 찬성하는 반면, 농업에 종사하는 청년층은 농지를 유지해야 한다며 반대하였다. 이러한 갈등 속에서 완도군은 명확한 입장을 제시하지 못하였고, 주민들의 의견 차이로 태양광 발전사업의 2차 심의가 보류되는 사례가 있었다⁷⁵⁾. 강원도 평창군 봉황마을 등지에서 태양광 발전소 건설로 주민들과 사업자 간의 갈등이 심화하고 있다고 보도되었다. 주민들은 청정 휴양 마을로 발전시키려고 지원 받았던 지역에 대규모 태양광 발전소가 들어서는 것에 반대하며 시위와 소송을 벌이고 있으며, 태양광 패널이 마을과 가까워 경관 훼손과 생활 불편을 초래한다고 주장한다. 그러나 현행법상 주민 동의 없이도 사업이 가능해 갈등을 해결하기 어려운 상황이며, 이에 대한 제도적 보완이 필요하다는 지적이 나오고 있다⁷⁶⁾. 전남 해남군과 전북 임실군 등 일부 지자체에서는 태양광 발전사업 확대에 따른 이격 거리 규제를 둘러싸고 지역 주민 간 갈등이 심화한 사례도 있다. 지자체는 경제 활성화와 재생에너지 확대를 이유로 이격 거리 규제를 완화하고 있지만, 이에 반대하는 주민들은 농지 감소와 자연 훼손을 우려하며 반발하였다. 특히 해남군에서는 노년층이 태양광 사업에 찬성하는 반면, 임실군의 청년층과 일부 환경단체는 농촌 공동체와 생태계가 훼손된다고 주장하였다. 경남 창녕군과 경남 함양군에서는 이격 거리 규제를 완화하면서 주민들의 생존권이 위협받고 자연경관이 파괴된다는 비판이 제기되

75) 목포MBC 뉴스데스크(2021.10.31), “태양광 주민갈등에 지자체 ‘곤혹’”, 검색일: 2024.10.1.

76) SBS News(2024.5.16), “‘명품마을’ 발각, 울컥한 농부…‘태양광’에 갈등 깊어진 이유”, 검색일: 2024.10.1.

며 갈등이 더욱 깊어졌다. 이러한 갈등으로 일부 지역에서는 태양광 발전 사업이 중단되거나 심의가 연기되었으며, 지자체가 규제를 완화하는 과정에서 주민 간 불화와 커뮤니티 훼손이 심화되었다⁷⁷⁾.

주민 간 불화는 농촌 지역 커뮤니티를 훼손하여 여러 자연재해 상황에서 지역의 대응력과 회복력을 저하시킬 우려가 있다. Shin and Jung(2020)은 개인이나 집단이 자신이 속한 지역사회의 활동이나 의사결정 과정에 적극적으로 참여함으로써 삶의 질이 향상된다고 하였다. 반면 사회적 갈등은 삶의 질에 부정적인 영향을 미친다고 언급하였다. Park, Shin, and Lee(2023)에 의하면, 재난으로 영향을 받은 사람들은 사회적 관계의 어려움, 수면 장애, 불안, 우울증 등의 문제를 경험할 수 있다. 그러나 이러한 위기 상황에서 스트레스를 회복하고 극복하는 데는 지역사회의 회복력이 매우 중요하다. 지역사회의 회복력이란, 자연재해나 경제적 위기와 같은 어려움에 직면했을 때 커뮤니티가 어떻게 대응하고 지속가능성을 유지하는지를 의미한다. 연구에 따르면, 회복력이 높은 지역사회는 재난에 대한 취약성이 감소하는 경향이 있다. 또한 유엔 재난위험감소세계회의(World Conference on Disaster Risk Reduction)에서는 지역사회의 회복력을 강조하며, 재난 위험 감소의 핵심으로 지역 기반 지원 강화를 권장한 바 있다. 농촌 사회에서는 도시 보다 커뮤니티의 중요성이 강조되며, 이는 폭염과 한파, 폭우 등 자연재해 상황에서 취약 집단의 대응력과 회복력과 직결된다. 커뮤니티의 훼손은 취약 집단에 대한 무관심으로 이어져 취약 집단의 극한 기후 대응력을 감소시킬 우려가 있다.

재생에너지 확대에 따른 전력 가격 및 용수 비용의 변화에 대해서는 하락과 상승 전망이 양존하여 불확실성이 높은 것으로 여겨진다. 일부 지역에서는 재생에너지 사용으로 전기 비용 부담이 감소하였다는 기사가 있었다. 예를 들어, 경기도의 50가구에 대한 표본 조사 결과, 주택 태양광 지원 사업에 참여한 가구의 전기료가 평균 7만 700원 절감되었다는 기사가 있었다.⁷⁸⁾ 이와 같은 태양광 설치 가구의 전기료 절감 효과는 여러 기사⁷⁹⁾⁸⁰⁾에서도 확인할 수 있다. 특히, 이로 인해 폭염 시기에 전기료 부담이 없었다는 기사⁸¹⁾는 전기료 절감 효과가 폭염 같은 자연재해에 대한 대응력을 증가시킬 수 있음을 보여준다.

재생에너지 확대로 전력 가격과 용수 비용 등이 증가할 가능성도 언급되는데, 이는 취약 집단의 극한 기후 대응력을 감소시킬 가능성도 있다. 에너지경제연구원의 연구 결과를 인용하여 전국 130만 가구가 ‘연료 빈곤층’이라고도 불리는 에너지 빈곤층이므로 적정 수준의 에너지 소비를

77) 쿠키뉴스(2024.8.2), “태양광 사업 놓고 커지는 주민 갈등…이격거리논란에 정부는 ‘불구경’”, 검색일: 2024.10.1.

78) 이데일리(2024.8.29), “‘17만원→2만원’ 전기세 확 줄인 ‘이 동네’…비결 뭘길래”, 검색일: 2024.10.1.

79) 한국일보(2021.10.3), “‘한 달 전기요금 6000원’ 적히자...이웃들도 줄줄이 태양광 달았다”, 검색일: 2024.10.1.

80) 뉴시스(2024.10.16), “경기도 ‘미니태양광, 전기요금 절감 효과 톡톡’”, 검색일: 2024.10.30.

81) 충북일보(2024.10.14), “폭염 속 전기료 걱정 없는 충주시, 태양광 지원사업 효과 입증”, 검색일: 2024.10.1.

감당할 경제적 수준이 안 된다고 보도하였다.⁸²⁾ 에너지 빈곤층은 전기 사용에 대한 경제적 부담으로 폭한과 폭서기에 어려움을 겪고 있다고 보도하였다. Brown et al.(2020)은 저소득 가정이 높은 에너지 비용 부담을 겪고 있으며, 에너지 비용을 감당하려고 다른 필수 가계 지출을 포기하여 생활 수준을 저하시키고 적절한 실내 냉난방 환경을 유지 하지 못해 호흡기 질환과 온열 질환 등에 노출되어, 정신 건강 문제도 발생할 수 있다고 언급하였다.

2) 풍력발전 확대에 따른 건강 영향

풍력발전 확대 과정에서 나타날 수 있는 국지적인 건강 영향으로는 불면증, 스트레스, 감염병 등이 있다. 풍력발전기 소음이 건강에 미치는 부정적 영향에 대해서는 관계부처에서도 오래전부터 인식해왔고, 그로 인한 주민의 피해가 인정된 사례도 있다. 2016년 환경부 관계자는 풍력단지 개발 과정에서 민가와 같은 정온 시설에 대한 소음 문제 해결이 어렵다고 언급한 바 있으며, 2014년 이후 해당 소음으로 지역 주민들의 민원이 지속적으로 발생하여 당시 국정감사에서 소음 문제 해결을 위한 대안이 강하게 요구된 사례가 있다.⁸³⁾ 전라남도 영광군의 두 마을에 거주하는 주민 163명은 2017년부터 시작된 풍력발전기 건설로 인해 저주파 소음 피해를 주장하며 2억 4,450만 원 배상을 요구하였다. 소음 전문가의 실측 결과에 따르면, 두 마을 모두 저주파 소음이 수인 한도를 초과한 것으로 나타났다. 이에 따라 인근 주민들에게 정신적 피해 배상이 이뤄졌다.⁸⁴⁾ 전라남도 무안의 한 농촌 마을에서는 주민들이 발전기와 근접성으로 인해 저주파 소음 민원을 제기하였으며, 일부 주민은 수면 장애 같은 건강 문제를 호소하였다. 발전기가 주거지에서 300m도 떨어지지 않은 곳에 있지만 환경부의 권고는 강제력이 없어 실질적으로 지켜지지 않는 상황이었다.⁸⁵⁾ 이와 같은 사례들은 풍력발전 소음이 지역 주민의 건강과 생활에 부정적 영향을 미치고 있음을 시사한다.



자료: Chiu et al.(2021); Ellenbogen, Kellam, and Hankard(2024)을 바탕으로 저자 작성.

그림 3-27 일부 지역에서 풍력발전 확대 과정에 나타날 수 있는 건강 영향

82) 가톨릭신문(2023.6.27), “뜨거워지는 여름, 에너지 빈곤층 숨통 조이다”, 검색일: 2024.10.1.

83) 투데이에너지(2016.1.25), “육상풍력 소음문제 해결에 환경부 ‘딜레마’”, 검색일: 2024.6.1.

84) 한국경제(2022.6.6), ““풍력발전기 소음에 인근 주민 정신적 피해도 배상해야”…최초 사례 나왔다”, 검색일: 2024.10.1.

85) YTN(2023.2.20), “1.5km의 ‘권고’…소음 피해는 주민 몫”, 검색일: 2024.9.30.

풍력 터빈에서 발생하는 소음으로 인한 건강 영향은 문헌에서도 통해서도 확인된다. Schmidt and Klokke(2014)는 풍력 터빈 소음 노출과 관련된 건강 영향을 체계적으로 검토하였으며, 연구 결과에 따르면 풍력 터빈 소음은 불쾌감과 수면 방해를 증가시키는 경향이 있었다. 다만 이러한 영향은 거리와 함께 감소하며, 이명, 청력 손실, 어지러움 또는 두통과는 통계적으로 유의미한 연관성이 발견되지 않았다고 하였다. 하지만 Chiu et al.(2021)의 연구는 풍력 터빈에서 발생하는 저주파 소음(LFN: Low-Frequency Noise)이 건강한 사람의 심박수 변동성(HRV: Heart Rate Variability)에 미치는 영향을 평가하여 추가적인 건강 영향을 확인하였다. 500m 이내에 거주하는 피험자 30명을 대상으로 LFN 노출과 HRV 변화를 분석한 결과, LFN 노출이 심박수 변동성을 유의미하게 감소시키는 것으로 나타났다. 저주파 소음 노출은 두통, 집중력 저하, 짜증, 피로, 어지러움, 이명, 수면 장애, 불쾌감과 같은 다양한 건강 문제를 유발할 수 있으며, 이는 심혈관계 문제와 관상동맥 질환의 위험을 증가시킬 수 있다고 언급하였다. 아울러 HRV는 심장 박동 간의 시간 변화를 나타내고 자율신경계의 활동을 반영하는 지표이며, 자율신경계의 불균형은 HRV를 감소시켜 심혈관 질환의 이환율 및 사망률을 높일 수 있다고 하였다. Ellenbogen, Kellam, and Hankard(2024)의 연구 역시 풍력 터빈 소음이 인근 주민의 수면을 방해한다고 하였다. 이러한 연구 결과는 풍력 터빈이 인근 주민들의 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

에너지와 수자원 분야에서는 풍력발전 시설의 파손과 부식 등에 따른 수질 오염 발생 가능성이 언급되었다. 수질 오염이 발생한다면 이는 수인성 감염병을 유발할 수 있다. 다만, 국내에서는 수인성 감염병이 비교적 제한된 환경에서 발생한다고 알려져 있어 실제 파손과 부식에 의한 수질 오염이 수인성 감염병으로까지 연결될 가능성은 높지 않을 것으로 여겨진다(질병관리청 국가건강정보포털, 2024; 김영룡, 최영화, 2024).

풍력발전 시설을 산지에 설치하는 과정에서 발생할 수 있는 토양 침식과 오염은 생태계와 인간에게 영향을 줄 수 있다. Lal(2015)에 의하면 토양 침식은 자연재해 위험성을 높이고, 토양 유기탄소 고갈은 생태계 서비스로 감소로 이어져 인간의 건강, 특히 기후변화와 연관된 위험을 증가시킬 수 있다고 언급하였다. 아울러 신경희(2013)는 토양 자원은 생태계와 농업 생산성에 필수적이며, 유실을 방지하는 것이 중요하다고 언급하였다. 토양이 유실되면 농작물 생산성이 감소하고, 이는 식량 안보에 위협이 되어 결국 생태계 전반에 부정적 영향을 미친다. 또한 침식된 토양이 수계로 유입되면 오염이 발생하여 수생 생물의 생태계에 악영향을 미치며, 서식지가 파괴됨에 따라 다양한 종이 사라질 위험이 증가하고, 이는 생물다양성 감소로 이어진다. 침식이 발생하면 홍수나 토사 유출 같은 자연재해 위험이 증가하여 환경 재해가 잦아질 수 있다. 마지막으로, 미생물과 같은 토양 생태계가 파괴되면 장기적으로 토양 건강이 저하되어 지속 가능한 농업이 어려워진다.

서식지와 생태계 파괴는 인간에게 직간접적으로 영향을 미칠 수 있다. 직접적으로는 생태계 붕괴로 농업, 어업, 임업 같은 인간의 생계가 위협 받게 되며, 이는 식량과 자원의 공급 부족으로 이어질 수 있다. 간접적으로는 생태계 파괴로 기후변화, 대기 및 수질 오염 등이 인간의 건강과 생활 환경에 악영향을 미칠 수 있다. 특히 토양 침식이나 수질 오염 같은 문제는 인간이 마시는 물의 품질을 저하시켜 수인성 질병의 위험을 높이며, 생태계 서비스가 저하됨에 따라 인간의 경제적, 사회적 안정성에도 부정적 영향을 미친다(Pearson, 2024). 생태계 파괴는 인간의 정신 건강에도 부정적 영향을 미칠 수 있다(Filipova et al., 2020). Thoma et al.(2021)은 기후 및 환경 위기가 신체 건강뿐만 아니라 전 세계 수백만 명의 정신 건강에도 심각한 위협이 된다고 주장하였다. 따뜻한 기후가 지속되면 자살률이 증가하는 경향이 있었으며, 과도한 열은 정신적 스트레스와 관련이 있어 더위에 노출된 개인은 우울증과 불안이 증가하는 것을 경험하였다. 반면 사람이 자연과 접촉할 때, 스트레스 호르몬인 코르티솔이 감소하여 정신적 피로를 줄여 주는 것으로 나타났다. 생태적 다양성이 감소한다면 이러한 이점 또한 감소할 것이다.

서식지 파괴는 곤충 및 동물 매개 감염병 증가로 이어질 가능성도 있다. Ferraguti et al. (2023)의 연구에서 토지 이용 변화가 높은 지역에서는 벡터 유발 질병의 감염률이 증가하는 경향을 보이고, 토지 이용에서 인간의 영향을 적게 받은 자연 서식지가 보존되어야 감염원과 접촉을 줄이는 데 도움이 된다고 주장하였다. 인간의 활동으로 인한 토지 이용 변화와 생태계 교란이 인간과 야생동물, 매개체 간 상호작용을 증가시켜 새로운 감염병을 촉발하고 동물과 인간 사이의 질병 전파 가능성을 높일 수 있다는 연구는 Morand and Lajaunie(2021), Diuk-Wasser et al.(2021), Gottdenker et al.(2014) 연구에서도 확인할 수 있다.

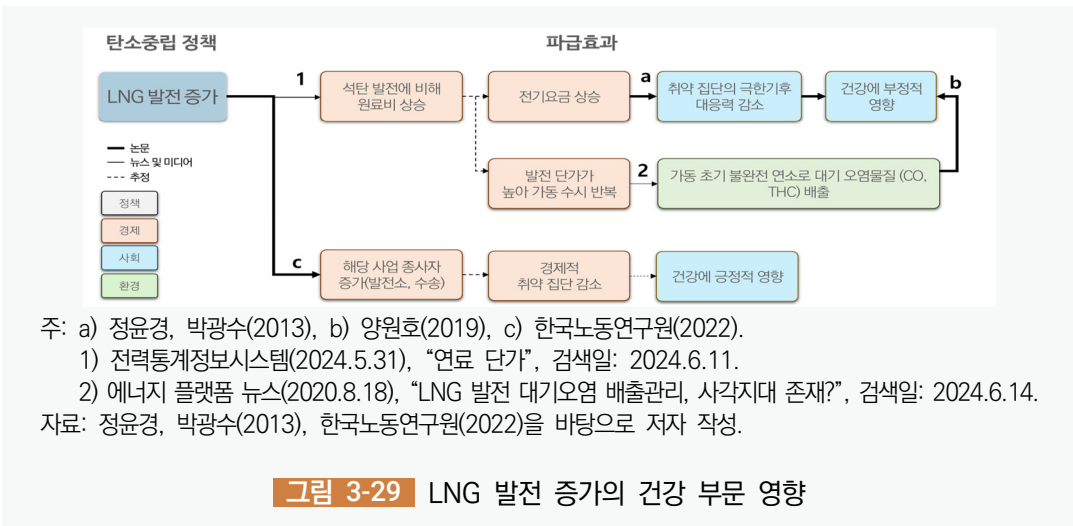
3) 태양광 발전 확대에 따른 건강 영향

태양광 발전 확대 과정에서 농경지 감소와 식량 공급 불안정이 발생하면 식량 가격 상승으로 이어져 저소득층의 건강 문제를 야기할 수 있다. 식량 공급 불안정은 저소득 층에서 질병 발생률과 사망률 증가(Blössner, Onis, and Prüss-Üstün, 2005), 아동 발육 부진, 가임기 여성의 빈혈과 저체중 출생아 발생 위험을 증가시킬 수 있다(Maitra, 2018). 국내에서는 팬데믹 기간 동안 경제적 어려움으로 저소득 가정 학생들의 에너지 및 영양소 섭취량이 저하되었다는 보고가 있었는데(정채은 외, 2024), 이는 식량 공급 불안정이 저소득층의 건강 불균형을 악화시킬 가능성을 보여준다. 정채은 외(2024)에 의하면, 팬데믹 이전에는 저소득 가정 학생의 8.5%가 음식을 충분히 섭취하지 못하였으나, 팬데믹 동안에 이 수치는 21.3%로 증가하였다(정채은 외, 2024). 태양광 발전시설 설치로 산사태 또는 수재해가 발생한다면, 그로 인한 인명 피해가 우려된다. 그러나 태양광이 재해 발생에 미치는 영향에는 두 가지 상반된 시각이 존재한다. 재해 발생에 영향을 미친다고 보는 시각⁸⁶⁾과 그 영향이 명확하지 않다는 시각⁸⁸⁾이 공존하는 것이다.

86) 중앙일보(2023.5.26), “폭우 처음 아니었는데…태양광 산사태, 주변은 벌목과 흙다짐?”, 검색일: 2024.10.

4) LNG 발전 증가에 따른 건강 부문의 영향

LNG 발전이 증가하면서 석탄발전에 비해 원료비와 전기 사용료가 상승하며, 에너지 발전 단가가 높아 가동이 수시로 반복되어 미세먼지와 가동 초기 불완전 연소에 따른 대기오염물질(CO, THC)이 다량 배출되어 건강에 부정적 영향을 끼칠 수 있다. 다만, ‘LNG 발전 대기오염 배출관리, 사각지대 존재?’ 기사에 따르면⁹⁰⁾, 발전업계 관계자는 가동 초기 등 불완전 연소 시 일산화탄소와 미연탄화수소가 배출되는 것은 사실이지만, 정상 운전 시에는 거의 배출되지 않는다고 반박했다. LNG 발전 증가로 해당 사업 종사자(발전소, 수송)의 수가 증가하며 경제적 취약 집단이 감소할 것으로 보이며, 이는 건강에 긍정적 영향을 줄 수 있다. 『제10차 전력수급기본계획』에 따르면, 2030년에는 2019년에 비해 LNG 발전 대체로 고용이 약 3,000명 증가한다고 전망하였다(오상봉 외, 2022).

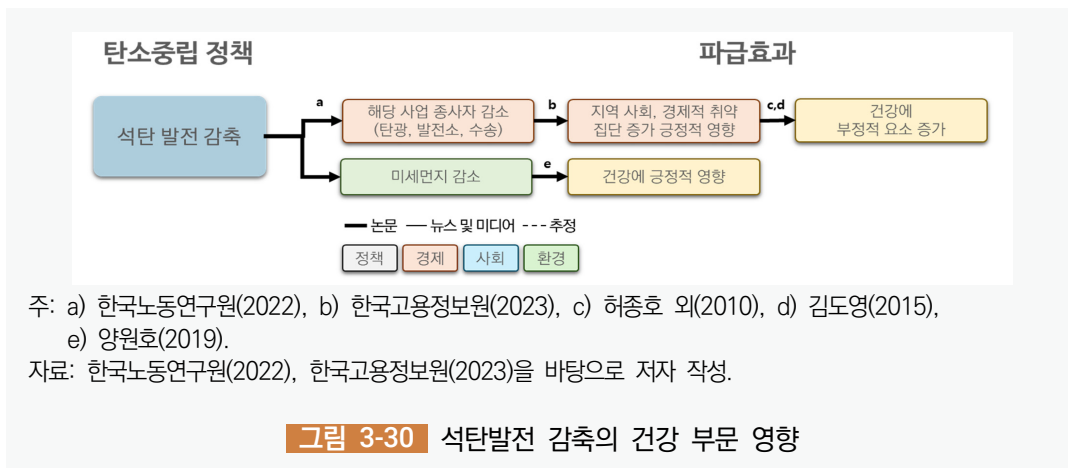


5) 석탄발전 감축에 따른 건강 부문의 영향

석탄발전 감축 정책은 다음과 같이 두 방향으로 영향을 미칠 수 있다. 첫째는 미세먼지를 감축해 질환 및 사망 위험을 저감하여 건강에 긍정적 영향을 미친다. 양원호(2019)의 ‘기후 변화에 따른 대기오염물질 농도 변화 및 미세먼지 노출에 의한 건강 영향’에 따르면 미세먼지 노출에 따른 건강 영향은 호흡기 증상, 만성호흡기 및 심혈관계질환의 심화, 폐기능 감소, 조기 사망률 증가, 또 두뇌에도 영향을 주기 때문에 치매, 알츠하이머 질환자 증가에 영향을 미칠 수 있다. 미세먼지에 만성적으로 노출되면 천식과 만성폐색성폐질환(COPD)을 일으킬 수 있다. 천식 질환자는 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때마다 병원 입원율이 18% 증가하였다. 이 외에도 미세먼지의 건강 영향은 다양한 연구에서 밝혀졌다(Han et al., 2018; Zoran et al., 2020; Thangavel et al., 2022).

90) 에너지플랫폼뉴스(2020.8.18), “LNG 발전 대기오염 배출관리, 사각지대 존재?”, 검색일: 2024.6.14.

둘째는 발전 감축으로 해당 사업(탄광, 발전소, 수송 분야)의 종사자가 감소하여 경제적 빈곤과 같은 극한 기후 대응력이 낮아지고, 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 한국노동연구원(2022)의 ‘석탄 화력발전소 폐지가 고용에 미치는 영향’에 의하면, 석탄발전 감축으로 민간기업인 한전산업개발은 신규채용을 아예 하지 않는 극단적인 방법을 쓰지 않는 한 구조조정을 피하기 어려울 것이라고 말했다. 실제로 『제10차 전력수급 기본계획』으로 석탄화력을 폐기하면 2030년에는 2019년에 비해 약 1만 6,000명에 이르는 고용이 감소할 것이라고 보았다. 한국고용정보원(2023)의 에너지 전환정책에 따른 경남의 고용충격과 대응방향에 따르면, 지역 내 모든 석탄화력 발전소가 LNG복합연료발전소로 전환된다고 가정할 때, 고용충격은 지역 내 노동소득의 감소와 연관되어 2026~2028년에는 급격한 소득 감소폭이 예상되고, 2031년 기준에는 현재 소득의 85~90% 수준으로 총소득이 저하될 것을 보여준다. 이러한 고용소득의 감소는 지역 내 소비 및 연관 산업에도 파급되어 지역 경제에 악영향을 줄 가능성이 높다. 이러한 사회경제적 박탈을 많이 경험할수록 주관적 건강수준은 낮아지고 만성질환 이환율은 높아지는 것으로 나타났다(허종호 외, 2010). 사회경제적 지위가 낮은 계층에 비하여 해로운 환경에 노출될 확률이 상대적으로 낮은 반면, 건강을 위해 예방 및 치료 활동에 더욱 적극적인 관심을 기울이고 건강을 유지할 가능성이 높아진다(김도영, 2015).

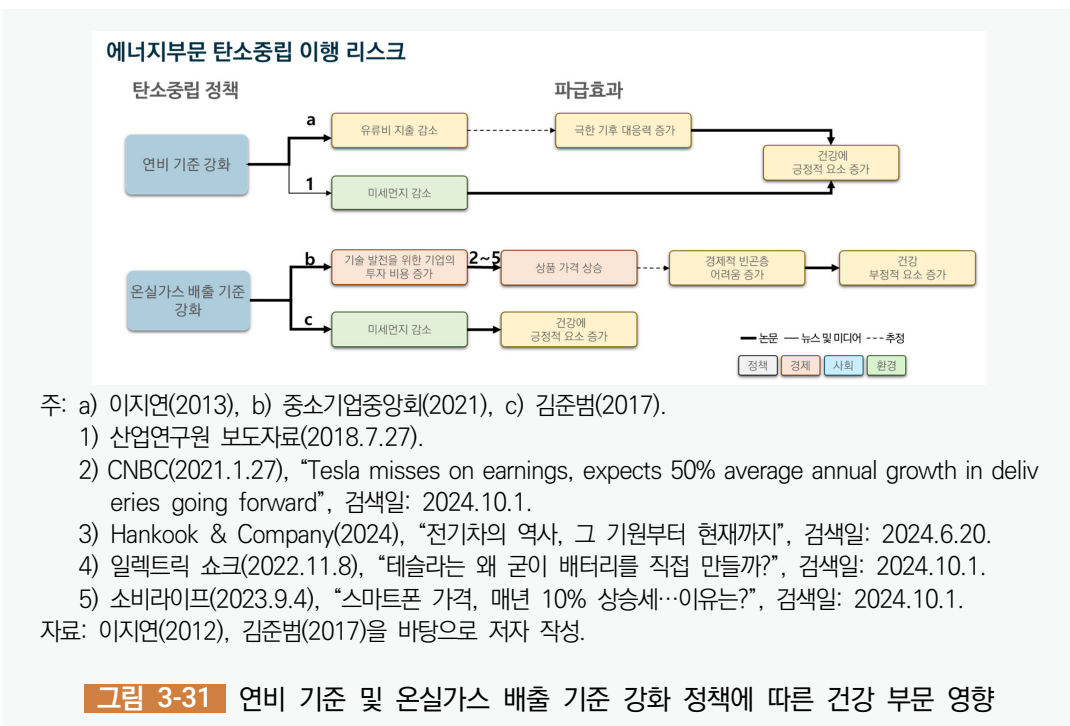


6) 연비 기준 및 온실가스 배출 기준 강화 정책에 따른 건강 부문의 영향

연비 기준 강화 정책으로 유류비 지출이 감소하여 이에 대한 부담이 줄어들고, 극한 기후 대응력이 증가할 수 있다. 또한 미세먼지가 감소하여 건강에 긍정적 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이지연(2013)의 ‘수송연료 가격과 자동차 연비 간의 상관관계 분석’에 따르면, 평균 연료 가격을 1,584원으로 가정했을 때 연료 가격이 1% 상승하면 연비 구간별로 판매량에 변화가 나타난다. 연비가 7km/L인 자동차의 판매량은 연료 가격이 1% 상승하면 2.3% 감소하지만, 연비가 10km/L인 자동차의 판매량은 오히려 0.59% 증가하여 연비가 높아질

수출 판매량 증가율도 상승하는 것으로 나타났다. 추정 결과를 바탕으로 연료 가격이 1% 변화할 때 소비자가 연비가 더 좋은 차량을 신규로 구입할 경우의 차량 1대당 월평균 연료비용 변화를 도출한 결과, 현재 연료 가격을 1,584원/L로 가정하면 월간 연료비용은 170,440원에서 167,941원으로 약 2,500원 감소하고, 1,900원/L로 가정하면 150,139원에서 147,390원으로 약 2,800원 감소하는 것으로 나타났다.

미세먼지와 질소산화물(NO_x) 등 특정 지역의 공해 문제를 해결하려면 운행 단계에서 발생하는 공해를 더욱 중요하게 다뤄야 한다.⁹¹⁾ 일반적으로 순수 전기자동차나 수소연료 전기자동차는 운행 과정에서 전혀 공해를 발생시키지 않는 무공해 자동차이다. 현시점에서 에너지 발생 단계를 고려한 온실가스 배출을 기준으로 하더라도, 가솔린 자동차에 비해 전기자동차가 두 배 이상 친환경적이다. 플러그인 하이브리드 자동차도 가솔린 자동차에 비해 CO₂ 배출량이 크게 낮은 것으로 나타났다.



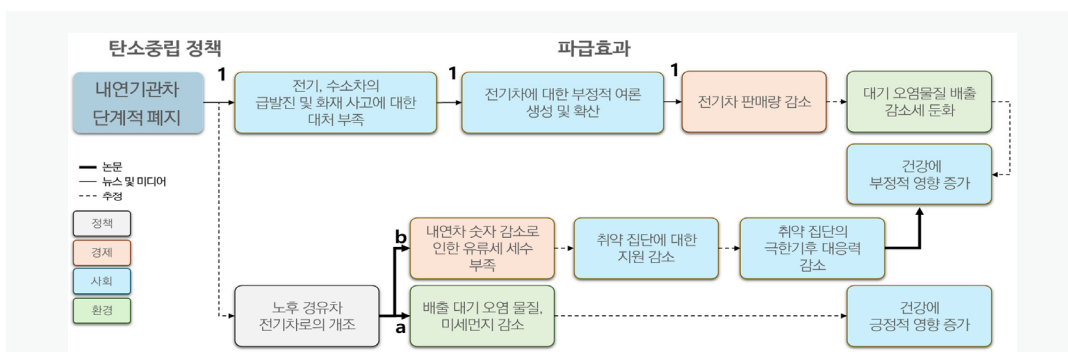
하지만 온실가스 배출 기준 강화 정책 때문에 기술 발전을 위한 기업의 투자비용이 증가하면 상품 가격이 상승하고, 이로 인해 경제적 빈곤층의 상품 구매 능력이 떨어져 건강에 부정적 영향을 미칠 수도 있다. 기업의 기술 발전과 상품 가격이 연관된 사례는 테슬라와 애플, 반도체 산업 등에서 찾아볼 수 있다. 일례로, 테슬라의 2021년 연례 보고서⁹²⁾에 따르면, 배터리 기술 개선에 수십억 달러를 투자했다고 밝혔다. 초기 전기차 가격이 높았던 이유는 배터리

91) 산업연구원 보도자료(2018.7.27), "친환경 자동차 정책의 평가와 개편 방향", 검색일: 2024.10.1.
 92) CNBC(2021.1.27), "Tesla misses on earnings, expects 50% average annual growth in deliveries going forward", 검색일: 2024.10.1.

제조 비용 때문이었고, 이는 테슬라뿐만 아니라 모든 전기차 제조업체에 적용되는 상황이다 (Hankook and Company, 2024). 여러 기술적 진보가 있었지만, 높은 배터리 가격은 여전히 전기차의 가격이 높은 이유 중 하나이다.⁹³⁾ 삼성과 애플은 5G 기술을 도입하는 데 도입을 위해 많은 자금을 투자하였으며, 5G 칩셋과 관련된 부품이 고급 기술이기 때문에 이에 따라 가격이 상승했다. 삼성 갤럭시 S20 모델은 5G 탑재로 4G 모델에 비해 가격이 높았다. 반도체 가격 상승은 스마트폰 제조사의 수익률을 악화시키고, 소비자 부담을 가중시키는 측면이 있다 (유신우, 2023). 다만, 배출 기준 강화 정책은 미세먼지를 감소시켜 전반적으로는 건강에 긍정적인 영향을 줄 것이다. 한국은행(2022)의 ‘온실가스 배출권 가격 급등이 산업별 부가가치에 미치는 영향’에 따르면, 저탄소 경제로 전환하는 과정에서 배출권 거래제 강화의 부정적 영향이 친환경 기술 발전의 긍정적 영향을 상회할 경우, 온실가스를 많이 배출하는 기업의 자산 가치가 하락할 가능성이 높다. 김요섭 외(2021)의 ‘기후변화영향평가 제도 도입 논의와 탄소다배출 산업에 대한 영향’에 따르면, 철강, 석유화학, 시멘트 등 주요 탄소배출 산업은 장기적인 인프라 구축과 운영이 산업 경쟁력을 결정하는 요소이며, 탄소중립을 실현하는 데는 이들 업종에서 2050년까지 최소 400조 원이 인프라 구축에 소요될 것으로 전망된다. 이에 따라 탄소배출이 많은 기업의 경제적 부담이 증가하여 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있다.

7) 내연기관차의 단계적 폐지 정책에 따른 건강 부문의 영향

내연기관차 단계적 폐지 정책으로 전기차와 수소차가 대량 보급되지만, 급발진 및 폭발 사고 등에 대한 대처가 부족하고 미흡하다면, 전기차에 대한 부정적 여론이 형성될 수 있다. 이로 인해 전기차 판매량이 감소하고, 대기오염물질 배출 감소세가 둔화하면 전기차 보급에 따른 건강 부문에서의 긍정적 영향을 기대하기 어려울 것이다.



주: a) 고준호, 기현균, 정상미(2017).

b) 국회예산정책처(2022).

1) 노컷뉴스(2024.6.14), “전기차 시장 ‘보릿고개’...‘이것’ 안 바뀌면 못 넘는다”, 검색일: 2024.10.1.

자료: 고준호 외(2017), 국회예산정책처(2022)을 바탕으로 저자 작성.

그림 3-32 내연기관차의 단계적 폐지 정책에 따른 건강 부문 영향

93) 일렉트릭 쇼크(2022.11.8), “테슬라는 왜 굳이 배터리를 직접 만들까?”, 검색일: 2024.10.9.

한국자동차 모빌리티 산업협회에 따르면, 2024년 1~4월 국내 전기차 판매량은 3만 6,273대이며, 2023년 같은 기간의 5만 438대보다 28.1% 감소했다. 얼리어답터 중심의 초기 수요가 소진되면서 예상보다 일찍 침체기가 찾아온 것이다. 2023년 국내 전기차 판매량은 전년 대비 1.1% 감소하여 주요 자동차 시장에서 유일하게 역성장을 보였다. 전기차사용자협회가 전기차 보유자 128명과 비보유자 401명을 상대로 실시한 설문조사에 따르면, 전기차 시장을 확대하는데 필요한 해결책으로 ‘안전 불안감을 해소해야 한다’라고 답한 응답자가 23.4%로 가장 많았다. 기존 조사에서 언급된 ‘배터리 효율·주행거리 증가’(18.3%)나 ‘충전 인프라 확대’(17.2%)는 안전 불안감을 따라가지 못했다. 부정적 인식은 전기차 보유자보다 비보유자에서 특히 강했다. 비보유자의 절반이 넘는 55.2%가 내연기관차보다 전기차의 화재나 급발진 사고 빈도가 더 높을 것으로 생각하고 있었다. 또한 전기차를 보유한 경우 90.6%가 전기차 경험에 만족한다고 답한 반면, 비보유자는 67.4%만 전기차 경험에 만족했다⁹⁴⁾. 이러한 전기차와 수소차의 판매량 감소는 내연기관차 사용 감소로 미세먼지를 저감하려는 정책에 리스크로 작용할 것이다. 따라서 전기차 및 수소차에 대한 시장의 부정적 평판은 건강에 부정적 요소로 작용할 것이다.

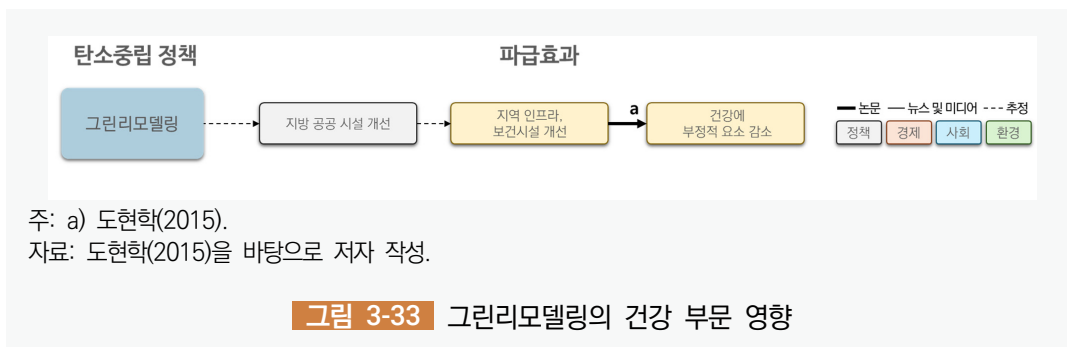
내연기관차의 단계적 폐지 정책으로 노후 경유차가 전기차로 개조되면서 두 가지 주요 분야에 영향을 미칠 수 있다. 첫째, 기존에 배출되던 대기오염물질과 미세먼지가 감소하여 건강에 긍정적 영향을 미칠 것으로 예상된다. 고준호 외(2017)에 따르면, 자동차 등록 대수(승용차, 택시, 버스)가 유지된다는 가정하에 전기차로 전환되었을 때 감축되는 대기오염물질 배출량을 분석한 결과, 2050년에는 2016년 대비 오염물질 배출량이 7,798.5%, 온실가스 배출량이 6,696.4% 감소할 것으로 나타났다. 이는 전기차 보급이 확산되면 교통 부문에서 배출하는 오염물질과 온실가스가 크게 줄어들어 환경적으로 긍정적 효과가 예상된다는 것을 의미한다.

둘째, 내연차 감소에 따른 유류세 세수 감소의 영향이다. 이는 취약 계층 지원 감소로 이어질 수 있고, 그들의 극한 기후 대응력을 감소시켜 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 국회예산정책처(2022)의 NABO 재정추계 & 세제 이슈에 따르면, IEA의 분석에서 주요 국가의 친환경 자동차 보급 정책이 시행되는 시나리오(STEPS)에서는 2030년 순세수 손실액이 400억 달러, 온실가스 감축 목표를 달성하는 시나리오(SDS)에서는 순세수 손실이 550억 달러 발생할 것으로 전망되었다. 우리나라는 교통·에너지·환경세 및 주행세로 교통 기반시설의 유지 등에 필요한 재원을 조달하는데, 이 세금은 휘발유와 경유 소비량을 과세 대상으로 하여 친환경 자동차 보급이 확대되면 세수 감소가 예상된다. 따라서 사회복지 분야의 지출 수요 증가에 따른 재원 조달 방안에 대한 정책적 고민과 경제 성장과 조화 가능성 측면을 검토해야 한다.

94) 노컷뉴스(2024.6.14), “전기차 시장 ‘보릿고개’…‘이것’ 안 바뀌면 못 넘는다”, 검색일: 2024.10.1.

8) 그린리모델링에 따른 건강 부문의 영향

그린리모델링 정책으로 지방 시설과 지역 인프라, 보건시설이 개선되며, 건강에 부정적 요소가 감소될 것으로 예상된다. 그린리모델링 정책의 주요 목표 중 하나는 환경친화적이고 에너지 효율적인 건축물을 만드는 것이다. 이는 여러 가지 면에서 건강에 긍정적 영향을 줄 수 있다. 더 나은 환기 시스템과 친환경 건축 자재를 사용함으로써 실내 공기질을 개선할 수 있고, 이는 호흡기 질환, 알레르기, 천식 등과 같은 건강 문제를 줄이는 데 도움이 될 수 있다. Li and Yang(2004)은 건축 자재의 종류와 상태가 곰팡이 성장에 큰 영향을 미치며, 부적절한 공기 순환 및 유지보수가 부족하면 곰팡이 포자의 농도가 증가할 수 있다고 하였다. Jaafar et al. (2014)과 Basińska et al.(2019)은 실내 청결 활동, 예를 들어 청소 방법과 실내 공기의 흐름이 실내 공기의 세균량에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 에너지 효율적인 건물은 난방 및 냉방 비용을 줄여주며, 이는 저소득 가구에 경제적 부담을 줄여줄 수 있다. 경제적 안정은 스트레스를 줄이고 전반적인 건강에 긍정적 영향을 미칠 수 있다.



나. 요약 및 시사점

재생에너지 확대의 건강 영향은 보편적 차원과 지역적 차원에서 다소 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 보편적으로 재생에너지는 기후변화 완화로 폭염, 가뭄 등의 기후 재해를 줄이고, 대기질을 개선해 호흡기 및 심혈관계 질환의 발생률을 감소시킬 것으로 기대된다. 이러한 변화는 전체적으로 초과사망을 감소에 기여하며, 질병 예방 및 건강 증진에 긍정적 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10}) 농도의 감소는 천식, 심혈관계 질환 등과 같은 주요 질병의 발생을 억제할 수 있다는 연구 결과가 있다.

반면, 보편적 차원에서도 부정적인 영향이 존재한다. 재생에너지 확대에 따른 전력 가격 및 용수 비용의 변동성은 경제적으로 취약한 계층에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 특히, 에너지 빈곤층은 전기료가 상승하면 폭염 및 혹한기에 적절한 냉난방을 유지하지 못해 건강이 악화할 위험이 있다.

지역 차원에서는 재생에너지 확대가 다양한 결과를 초래한다. 일부 농촌 지역에서는 태양광 발전소 건설로 지역 주민 간의 갈등이 발생하고 있으며, 이는 지역사회의 결속력을 약화시키고 재난 대응력을 저하시킬 우려가 있다. 풍력발전의 경우, 저주파 소음 같은 환경적 요인이 인근 주민의 수면 장애 및 스트레스 증가와 같은 건강 문제를 일으킬 수 있다는 연구가 존재한다. 또한 풍력발전 시설 설치 과정에서 발생할 수 있는 토양 침식과 수질 오염은 생태계와 인간 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있으며, 이는 장기적으로 농업 생산성 감소와 식량 안보 문제로 이어질 가능성이 있다.

위와 같이 재생에너지 확대는 보편적 차원에서 긍정적인 건강 효과가 있는 동시에, 지역적 차원에서 갈등과 건강 위험을 야기할 가능성이 있다. 따라서 재생에너지 정책은 지역적 특수성과 사회적 맥락을 고려해 세심하게 접근해야 하며, 이로써 보편적 건강 증진과 지역적 부작용을 모두 완화할 수 있는 방향으로 추진해야 할 것이다.

특히, 지역적으로 발생할 수 있는 부정적 건강 영향을 최소화하려면 다음 사항을 고려할 필요가 있다. 풍력발전과 태양광 발전에서 발생하는 소음, 수질 오염, 토양 침식, 오염과 같은 국지적 영향을 충분히 이해하고, 이에 대한 적극적인 대응 방안을 마련해야 한다. 이러한 환경적 요인은 인근 지역 주민의 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있으며, 이를 방지하도록 정책적으로 고려해야 한다.

아울러 풍력 및 태양광 발전시설 설치로 인한 산사태 및 수재해 발생 가능성에 대해서는 다양한 주장이 존재한다. 일부는 이러한 시설이 재해 발생에 영향을 미칠 수 있다고 주장하는 반면, 그 영향이 명확하지 않다고 보는 시각도 있다. 그러나 이와 관련된 연구는 여전히 제한적이기 때문에, 향후 지속적인 관심과 추가 연구가 필요하다. 이를 통해 지역적 재해 발생 가능성을 명확히 규명하고, 장기적인 대응 방안을 마련해야 할 것이다.

이러한 연구 결과는 정책 결정자와 관련 기관이 재생에너지 확대 과정에서 발생할 수 있는 건강 영향을 보다 깊이 이해하게 하며, 피해 대응 중심 접근에서 예방 및 대비 중심 접근으로 전환하는 데 기여할 것이다. 이로써 재생에너지 확대 과정에서 발생하는 잠재적 피해를 줄이고, 보다 안전하고 지속 가능한 탄소중립 이행을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

제4장

탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로 및 정책 수용성 분석

1. 탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로
2. 탄소중립 정책 수용성 분석

1. 탄소중립 이행 리스크를 고려한 전파 경로

제3장에서는 에너지, 수자원, 농업, 산림, 건강 부문에서 재생에너지 관련 탄소중립 정책 이행과 동반되거나 이행 후 결과적으로 일어나는 영향을 분석하였다. 제4장에서는 영농형 태양광, 수상태양광, 육상풍력, 해상풍력 확대에 따른 전파 경로를 분석하였다. 특히, 앞서 제3장에서 분석한 영향 경로를 결합하여 부문 간 주고받는 영향을 고려하였으며 모든 부문을 고려하였을 때 부각되는 주요 노드를 파악하였다. 종합적인 전파 경로를 <그림 4-1>에 제시하였다.

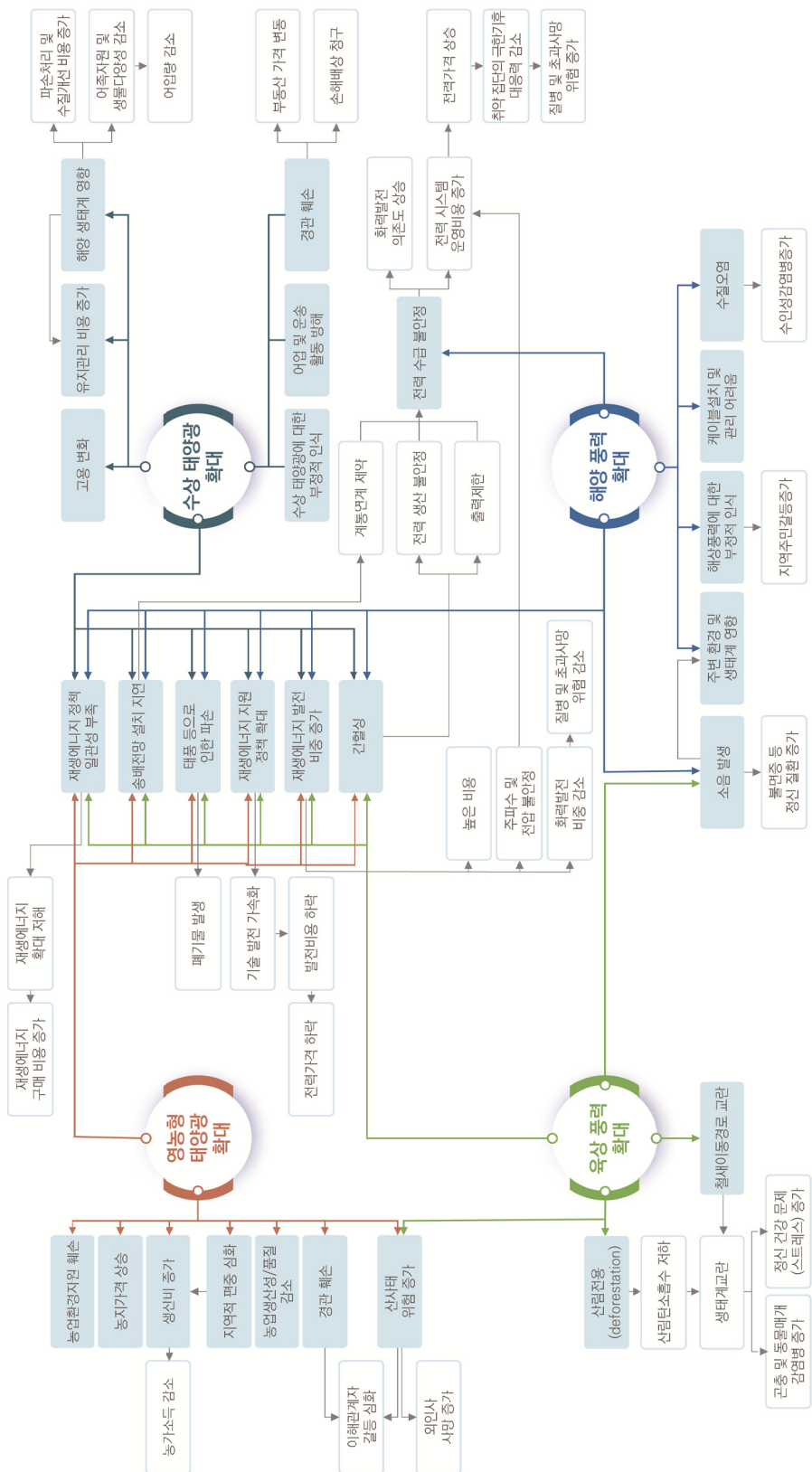
우선 에너지 부문에서 살펴봤듯이 재생에너지 발전시설 확대는 이행 단계의 불확실성을 수반한다. 재생에너지 정책의 일관성 부족, 송배전망 설치 지연, 간헐성 문제 등이 그 예이다. 영농형 태양광, 수상태양광, 육상풍력, 해상풍력 모두 재생에너지 정책 관련 불확실성과 태풍 같은 물리적인 외부 영향에 취약하기 때문에 이 요소들이 공통된 주요 노드로 작용하였다. 재생에너지 간헐성 문제는 다시 전력수급 불안정으로 이어져 물가 상승, 취약계층에 대한 부정적 건강 영향까지 이어지게 된다. 한편, 재생에너지 확대는 이에 대한 지원 확대와 재생에너지 발전 비중을 증가시켜 화력발전 비중을 상대적으로 감소시키고 결국 긍정적인 건강 영향을 야기하는 동시에, 기술 발전을 가속화해 전력 가격이 하락하는 긍정적 효과도 나타날 수 있다.

영농형 태양광 확대만 살펴봤을 때 생산물 비용 증가, 농지가격 상승 등의 부정적 영향이 농업 부문에 집중된 것으로 파악된다. 육상풍력 확대는 산림전용과 철새 이동경로 교란 등이 생태계 교란까지 이어져 산림 및 생태계 문제가 주요 문제로 파악되었다. 수상태양광 확대는

해양 생태계에 미치는 영향이 두드러졌으며 어업에 대한 부정적 영향도 발생할 수 있는 것으로 보인다. 해양 풍력 확대 관련 수질 오염 및 주변 생태계 영향이 주요 노드로 파악되었다.

모든 재생에너지 발전시설과 관련하여 최종적으로 지역사회 일원의 건강 악화와 갈등 문제로 이어졌다. 영농형 태양광과 수상태양광 확대는 공통적으로 경관 훼손을 야기하여 결국에 지역사회 갈등 문제로 이어지며, 육상풍력과 해상풍력 확대는 공통적으로 소음을 발생시켜 정신 질환 문제를 일으키는 것으로 보인다. 또 발전시설이 확대되면서 특정 산업 또는 업종이 타격을 입어 소득 감소로 이어지기도 한다. 이런 현상은 박주영 외(2023)에서 기후 리스크의 전파 경로를 분석하였을 때 나타난 결과와도 매우 비슷하다. 즉, 기후 리스크로 인한 부정적 영향에 대처하고자 탄소중립 정책을 수립하고 이행하지만 이런 정책으로 부정적 결과가 발생하는 것이다. 이는 탄소중립 정책이 야기하는 경제적, 사회, 환경 측면의 복잡한 문제를 해결하려면 균형 잡힌 접근이 필요해 보인다.

그림 4-1 탄소중립 이행 리스크 전파 경로



자료: 저자 작성.

2. 탄소중립 정책 수용성 분석

1절에서는 탄소중립 정책 이행이 결과적으로 지역사회와 국민에게 경제 및 사회적으로 부정적인 영향을 야기할 수 있음을 논의했다. 이런 맥락에서 탄소중립 정책에 대한 일반 국민의 인지도와 인식을 분석하는 것은 이행 리스크를 줄이는 한 방법이 될 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 일반 국민의 탄소중립 정책 이해도, 신뢰도와 영향 정도, 발생 가능성에 대해서 인식조사를 실시하였으며, 이로써 정책 수용성을 고려한 기후변화 리스크 적응역량 강화 방안을 제시하는데 기초자료를 제공하고자 한다.

본 조사는 탄소중립을 들어본 적이 있는 국민 500명을 대상으로 실시하였으며 표본 규모와 특성은 <표 4-1>과 같다.

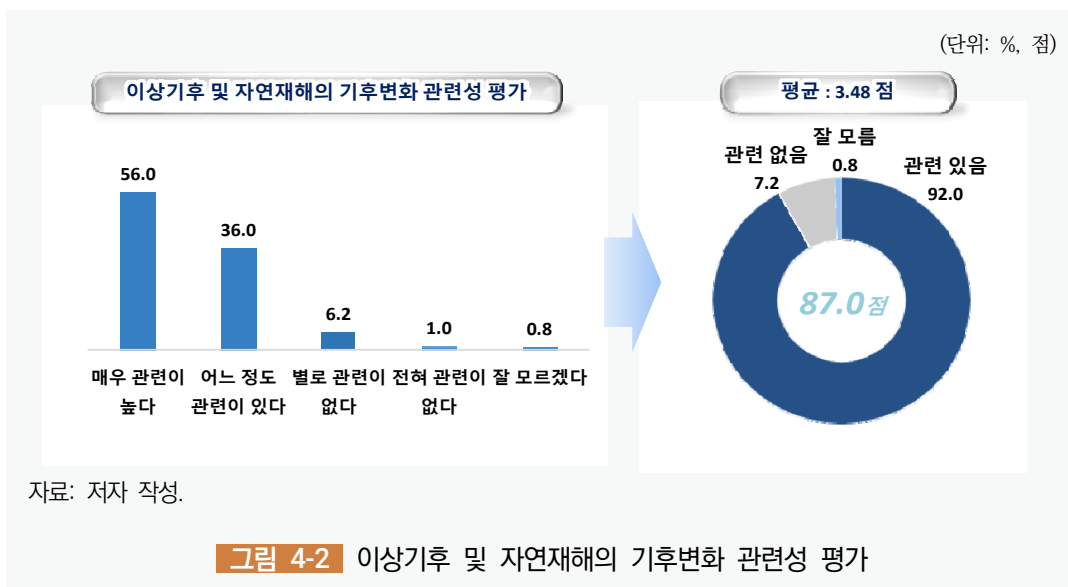
표 4-1 탄소중립 정책 인식조사 표본

		(단위: 명, %)	
구분		사례 수(명)	비율(%)
전체		500	100.0
거주지역	수도권	230	46.0
	비수도권	270	54.0
성별	남자	250	50.0
	여자	250	50.0
연령	20대	100	20.0
	30대	100	20.0
	40대	100	20.0
	50대	100	20.0
	60대 이상	100	20.0
가구원 수	1인	77	15.4
	2인	105	21.0
	3인	150	30.0
	4인	147	29.4
	5인	15	3.0
	6인 이상	6	1.2
최종학력	중졸 이하	2	0.4
	고졸	90	18.0
	대재	21	4.2
	대졸	340	68.0
	대학원 재학 이상	47	9.4
월평균 가구소득	200만 원 이상	48	9.6
	200만원~400만 원 미만	137	27.4
	400만~600만 원 미만	140	28.0
	600만~800만 원 미만	97	19.4
	800만~1,000만 원 미만	49	9.8
	1,000만 원 이상	29	5.8

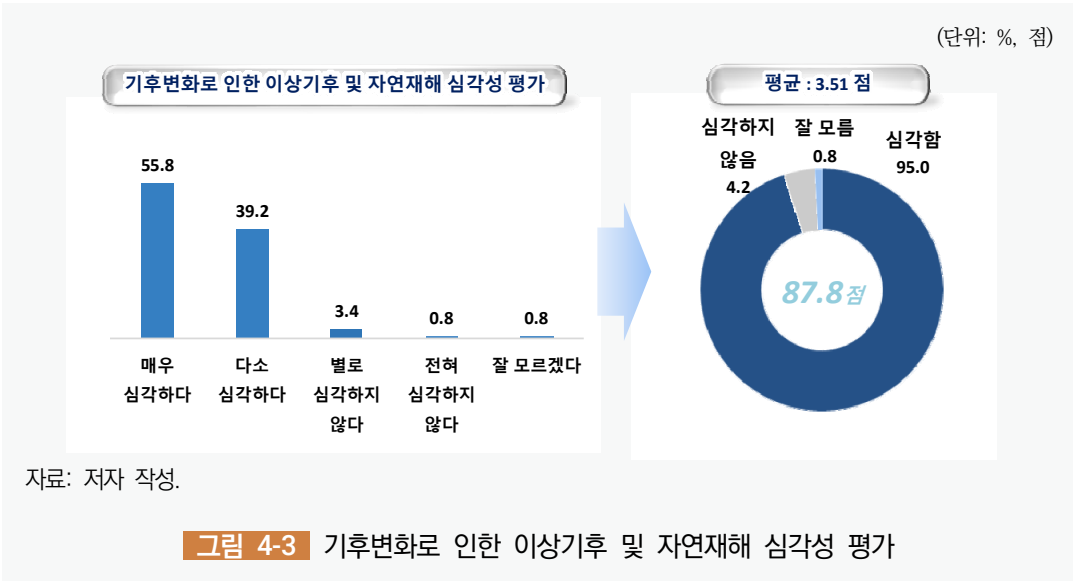
자료: 저자 작성.

수도권과 비수도권 거주자는 각각 230명, 270명이며 전체 표본의 46%, 54%를 차지하였다. 남자와 여자는 각각 250명으로 사례 수가 같았으며 20대부터 60대 이상까지 10년 단위 간격으로 100명씩 조사되었다. 세대의 인원수를 살펴봤을 때 3인 가구, 4인 가구, 2인 가구 순으로 많았다. 최종학력은 대졸이 월등하게 많았으며, 월평균 가구소득은 400만~600만 원 미만, 200만~400만 원 미만 집단에 속하는 응답자가 가장 많았다.

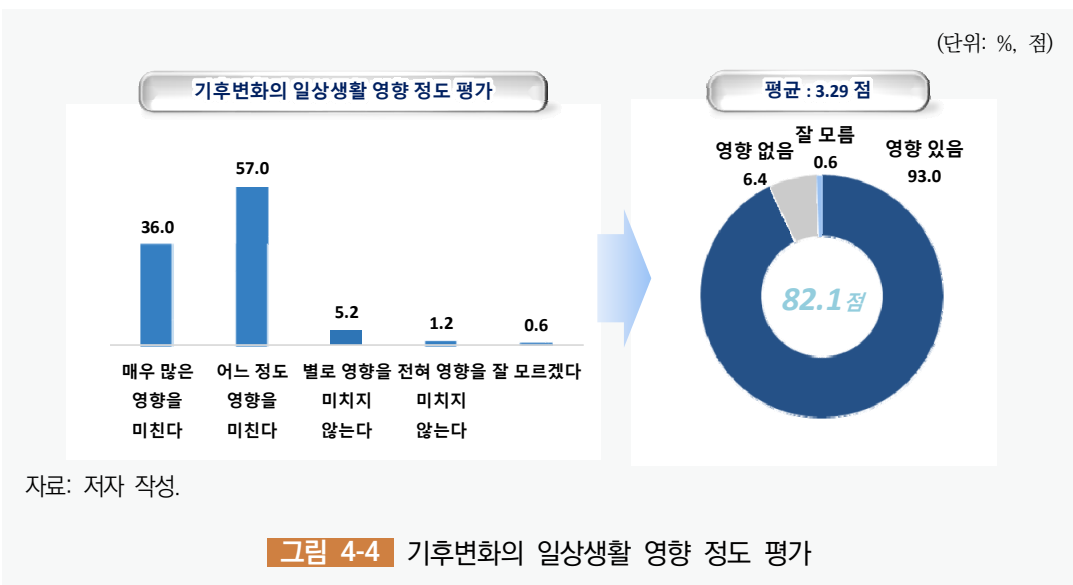
본 설문은 탄소중립 정책 인식을 조사하는 것이 주요 목적이지만 그에 앞서 기후변화 체감 및 인식에 대하여 물어봤다. 폭염, 열대야 등의 이상기후와 홍수, 태풍, 산불, 지진 등의 자연재해가 기후변화와 어느 정도와 관련이 있다고 생각하는지에 대해 10명 중 9명 이상은 '관련이 있다(92%)'라고 생각하는 것으로 나타났으며, 특히 '매우 관련이 높다'라는 응답 비율은 56%로 과반수를 초과했다. 이상기후 및 자연재해의 기후변화 관련성 평가는 4점 평균 3.48점으로 분석되어 대부분 이상기후 및 자연재해의 기후변화 관련성을 높게 생각하는 것으로 나타났다. 특히, 여성(3.58점)이 남성(3.38점)보다 기후변화 관련성을 더 높게 평가하는 것으로 조사되었다. 기후변화 관련성이 매우 높다고 응답한 비율이 20대는 44%, 30대는 53%, 40대는 58%, 50대는 62%, 60대 이상은 63%로 조사되어 대체로 연령이 높을수록 기후변화 관련성이 더 높다고 생각하는 것으로 나타났다.



기후변화로 인한 폭염, 폭한 등의 이상기후, 홍수, 태풍 등의 자연재해가 얼마나 심각한지에 대해 10명 중 9명 이상이 '심각하다(95.0%)'라고 생각하는 것으로 나타났으며, 그 심각성에 대한 평가는 4점 평균 3.51점으로 분석되었다. 응답자 중 55.8%가 '매우 심각하다'로 응답하여 일반적으로 기후변화로 인한 극한 기후 현상의 심각성을 인지하고 있음을 알 수 있었다. 이 문항에서도 여성(3.54점)이 남성(3.48점)보다, 연령이 높을수록 기후변화로 인한 이상기후의 심각성이 더 크다고 평가하는 것으로 나타났다.

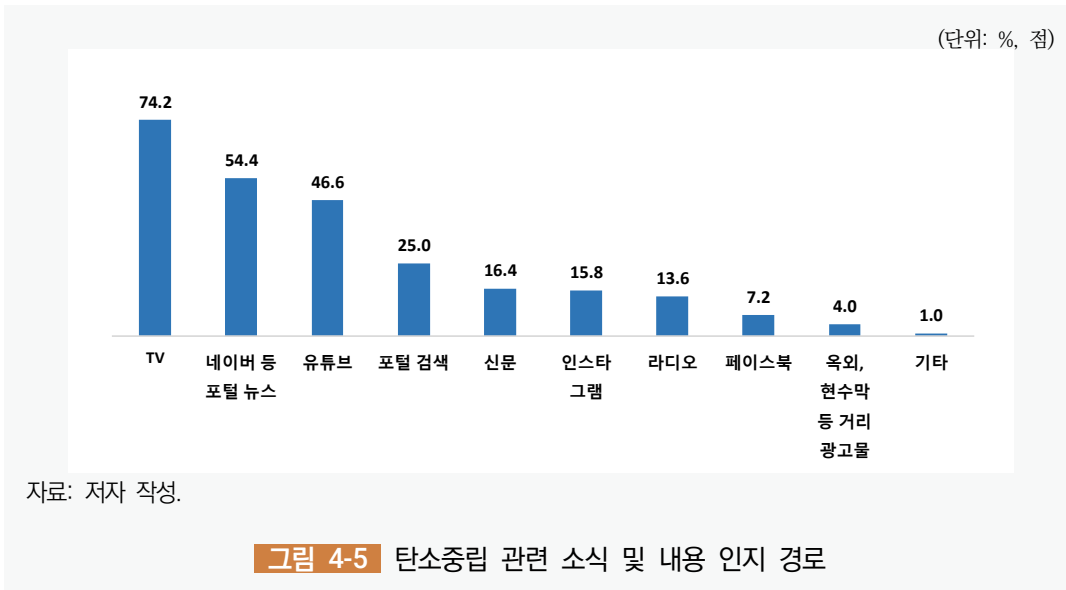


기후변화가 일상생활에 어느 정도 직접적 영향을 미치고 있다고 생각하는지에 대해 ‘영향이 있다(93%)’라는 응답이 ‘영향이 없다(6.4%)’라는 의견보다 압도적으로 더 많았다. 4점 평균 정도 평가를 살펴봤을 때 여성(3.34)이 남성(3.23)보다 기후변화가 일상생활에 직접적인 영향이 더 클 것이라고 생각하는 것으로 조사되었다. 연령별로는 40대 연령층에서 무려 98%가 기후변화가 일상생활에 영향을 미친다고 응답하여 기후변화의 일상생활 영향력을 가장 높게 평가하였고 20대에서 가장 낮게 평가하는 것으로 나타났다.

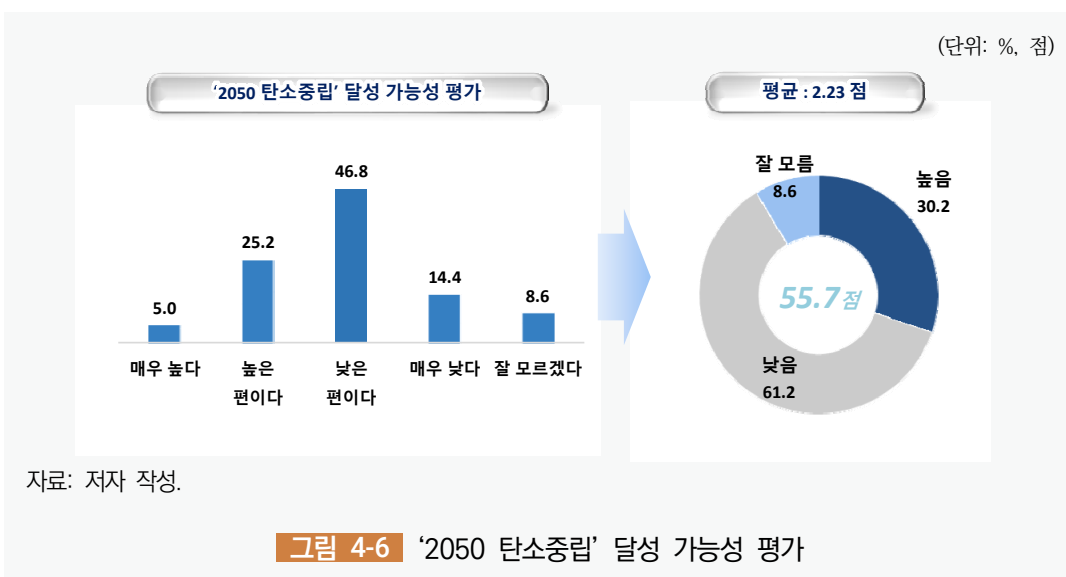


탄소중립 정책에 대한 지식과 인식을 묻기 전에 탄소중립 관련 소식을 접하는 경로를 물어봤다. 탄소중립 관련 소식 및 내용을 접하는 주요 경로는 ‘TV(74.2%)’라는 응답이 가장 많았고, 다음으로 ‘네이버 등 포털 뉴스(54.4%)’, ‘유튜브(46.6%)’, ‘포털 검색(25.0%)’, ‘신문(16.4%)’, ‘인스타그램(15.8%)’ 등의 순으로 나타났다. 남성이 여성보다 TV, 유튜브, 신문 및 라디오로

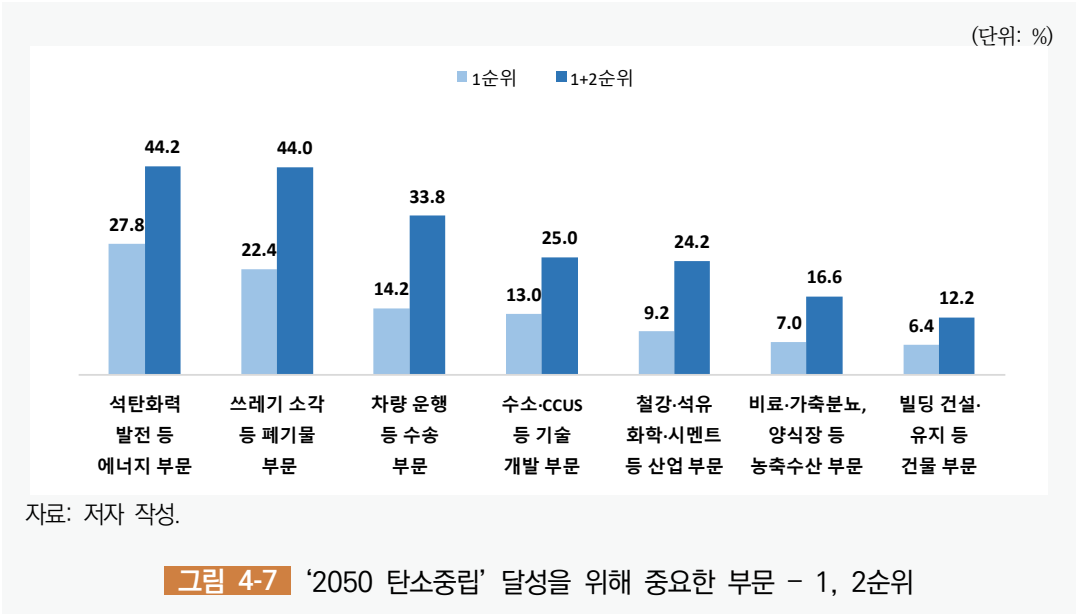
탄소중립 관련 소식을 접하는 비율이 상대적으로 더 높았다. 연령이 높을수록 TV 매체로 접하는 비율이 더 높아지는 경향을 보여 전통적 매체에 익숙한 것으로 나타났으며, 연령이 낮을수록 유튜브나 인스타그램 같은 SNS로 소식을 접하는 비율이 더 높았다. ‘네이버 등 포털 뉴스’는 50대에서, ‘신문’ 매체는 60세 이상 연령층에서 응답비율이 가장 높았다.



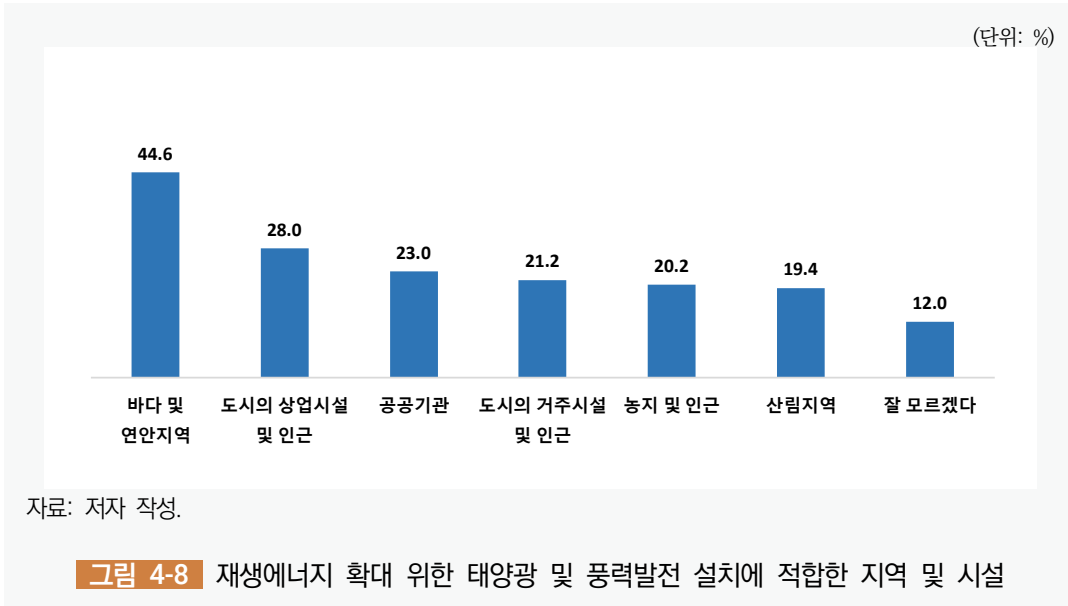
‘2050 탄소중립’ 달성 가능성에 대해 응답자의 30.2%가 ‘높음’으로, 61.2%가 ‘낮음’으로 응답하여 달성 가능성을 낮게 평가하는 것으로 나타났다. 달성 가능성 평가는 4점 평균 2.23 점으로 분석되었고, 여성(2.30점)이 남성(2.16점)보다 달성 가능성을 다소 높게 평가하였다. 연령별로는 60세 이상(2.37점)이 가장 높게 평가하였으며, 다음으로 30대(2.30점), 20대(2.20점) 순으로 나타났다. 거주지역별은 충청/강원권 거주하는 응답자가 달성 가능성을 높게 평가하였으며 수도권 응답자가 가장 낮게 평가하였다.



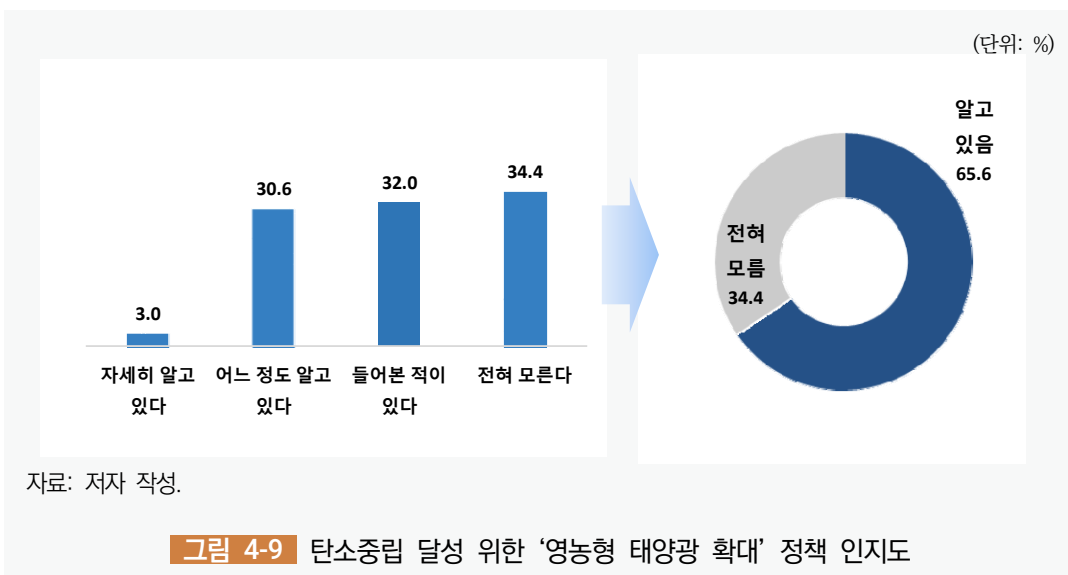
‘2050 탄소중립’을 달성하려면 ‘석탄화력발전 등 에너지 부문’이 중요하다는 의견이 가장 많았고, 다음으로 ‘쓰레기 소각 등 폐기물 부문’, ‘차량 운행 등 수송 부문’, ‘수소·CCUS’ 등 기술 개발 부문 등의 순으로 나타났다. 남성은 ‘석탄화력발전 등 에너지 부문’을, 여성은 ‘쓰레기 소각 등 폐기물 부문’을 가장 중요하게 생각하는 것으로 조사되었다. 연령별로는 대부분 연령에서 에너지 부문의 역할을 가장 중요하게 생각하는 반면, 20대에서는 폐기물 부문을, 30대에서는 수소·CCUS 등 기술 개발을 상대적으로 더 중요하게 생각하는 것으로 나타났다. 또 연령이 높아질수록 에너지 부문의 역할이 중요하다는 의견이 증가하는 경향을 보였다.



응답자에게 재생에너지를 확대하려면 태양광 및 풍력발전을 설치해야 하는 지역 및 시설을 물어봤다. ‘바다 및 연안지역(44.6%)’이 적합하다는 의견이 가장 많았고, 다음으로 ‘도시의 상업시설 및 인근(28.0%)’, ‘공공기관(23.0%)’, ‘도시의 거주시설 및 인근(21.2%)’, ‘농지 및 인근(20.2%)’ 등의 순으로 조사되었다. ‘바다 및 연안지역’이 적합하다는 의견은 연령이 높을수록 응답률이 높아지는 경향을 보이는 반면, ‘농지 및 인근’ 및 ‘산림지역’이 적합하다는 의견은 연령이 낮을수록 응답률이 높아지는 경향을 보였다. ‘바다 및 연안지역’이 적합하다는 의견은 수도권 거주자가 가장 응답률이 높았으며, ‘도시의 상업시설 및 인근’과 ‘공공기관’이 적합하다는 의견은 영남권 거주자가 가장 응답률이 높았다. 산림지역이 가장 적합하다는 의견이 가장 적었는데 그중 전라도와 제주권 거주자의 응답률이 가장 높았다.



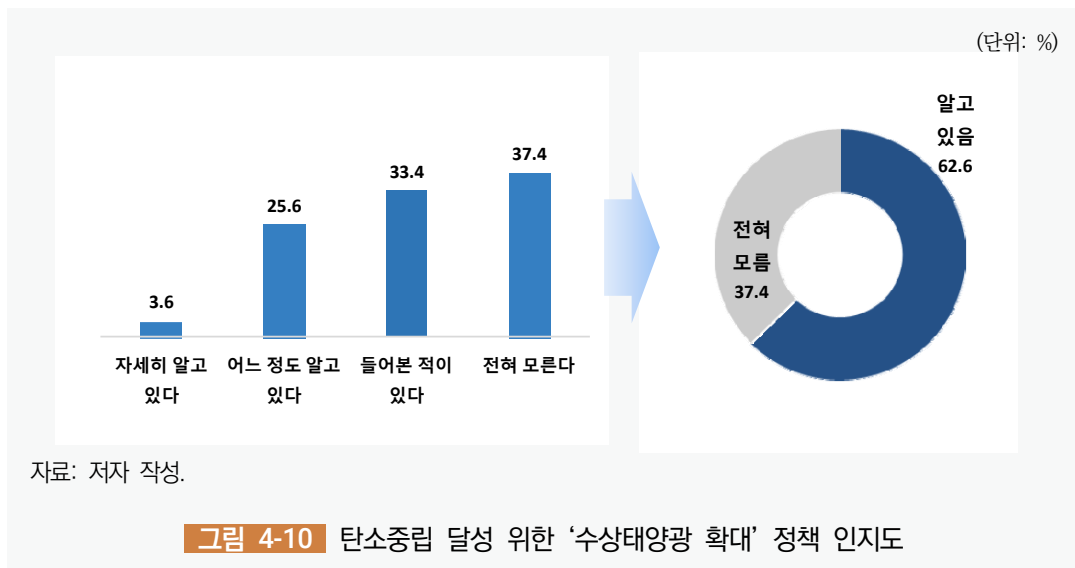
다음으로는 본 연구에서 주요 분석대상인 재생에너지 발전시설에 대한 인지도를 물어봤다. 탄소중립 달성을 위한 ‘영농형 태양광 확대’ 세부 정책에 대한 인지율은 65.6%로 나타났다. 남성(69.2%)이 여성(62.0%)보다 다소 높았으며 여성 응답자의 38.0%가 세부 정책은 전혀 모른다고 응답하였다. 60세 이상(80%)에서 인지도가 가장 높았고, 다음으로 40대(73.0%), 30대(63.0%), 20대(58.0%) 등의 순으로 나타났다. 50대 응답자의 46.0%, 20대 응답자의 42.0%가 세부 정책을 전혀 모른다고 응답하였으며, 전라도와 제주도 응답자의 41.4%가 전혀 모른다고 응답하였다.



응답자에게 영농형 태양광 발전이 에너지 부문, 수자원 부문, 농업 부문, 산림 부문, 건강 부문에 미치는 영향력을 얼마나 긍정적으로 또는 부정적으로 평가하는지 물어봤다. 영농형

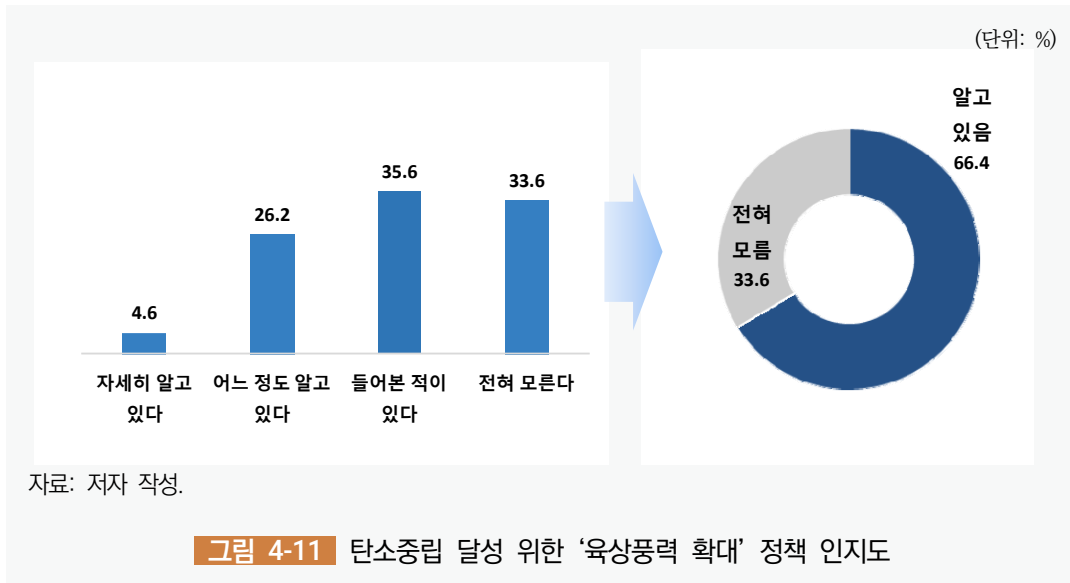
태양광 발전을 전혀 모르는 응답자의 비율이 34.4%이지만, 그 영향력은 상당히 긍정적으로 평가하는 것으로 나타났다. 에너지 부문에는 응답자의 55.2%가 긍정적 영향을 미칠 것이라고 평가하였으며, 농업 부문에는 44.2%, 수자원에는 41.8%가 긍정적 방향으로 응답하였다. 여성이 상대적으로 영농형 태양광 발전이 각 부문에 미치는 영향력을 긍정적으로 평가하였으며, 연령이 높아질수록 영향력을 더 긍정적으로 평가하는 것으로 조사되었다. 반면, 응답자의 28.4%가 영농형 태양광 발전이 농업 부문에 부정적 영향을 미칠 것이라고 평가하였으며, 이는 에너지 부문(22.8%)과 대조되는 지점이다.

탄소중립 달성을 위한 '수상태양광 확대' 세부 정책에 대한 인지율은 62.6%로 조사되었다. 영농형 태양광과 마찬가지로 남성이 여성보다 더 많이 인지하는 것으로 나타났다. 연령별로는 60세 이상(80%)에서 인지도가 가장 높았고, 다음으로 40대(69.0%), 20대(57.0%), 30대(54.0%) 등의 순으로 나타났다.



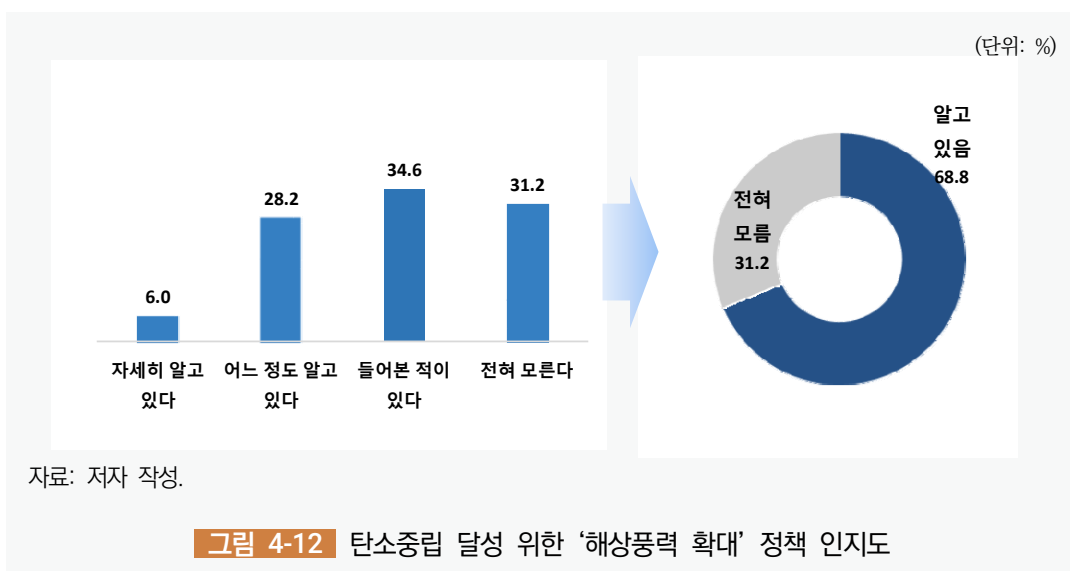
수상태양광 발전이 각 부문에 미치는 영향을 조사한 결과, 에너지 부문에 대한 긍정적 평가가 가장 높았으며, 다음으로 수자원 부문, 농업 부문, 건강 부문 순으로 높았다. 영농형 태양광 발전과 마찬가지로 여성이 더 긍정적으로 평가하였으며 연령이 높아질수록 수상태양광 발전의 영향력을 더 긍정적으로 평가하는 경향을 보였다. 반면, 응답자의 26.6%가 수상태양광 발전의 영향력을 부정적으로 평가하는 것으로 나타났다.

육상풍력 확대 세부 정책은 응답자의 66.4%가 인지하는 것으로 나타났다. 남성(71.2%)이 여성(61.6%)보다 육상풍력발전 세부 정책을 더 많이 인지하는 것으로 나타났으며 연령별로는 60세 이상(83.0%)의 인지도가 가장 높았고 다음으로 40대(73.0%), 30대 및 50대(각각 61.0%) 등의 순으로 나타났다.



육상풍력발전의 영향력을 평가한 결과 에너지 부문에 대한 평가가 가장 긍정적이었으며 다음으로 수자원, 농업 부문 순이었다. 다른 재생에너지 발전시설과 마찬가지로 여성이 남성보다 평가가 상대적으로 더 긍정적이었으며 연령이 높아질수록 평가가 긍정적이었다. 반면, 응답자의 1/4이 건강 부문에 부정적 영향을 미칠 것이라고 평가하였다.

탄소중립 달성을 위한 해상풍력 확대 세부 정책에 대한 인지율은 68.8%로 조사되었다. 남성(76.0%)이 여성(61.6%)보다 인지도가 더 높았으며 연령별로는 60세 이상(87.0%), 40대(76.0%), 50대(66.0%), 30대(59.0%) 등의 순으로 나타났다.

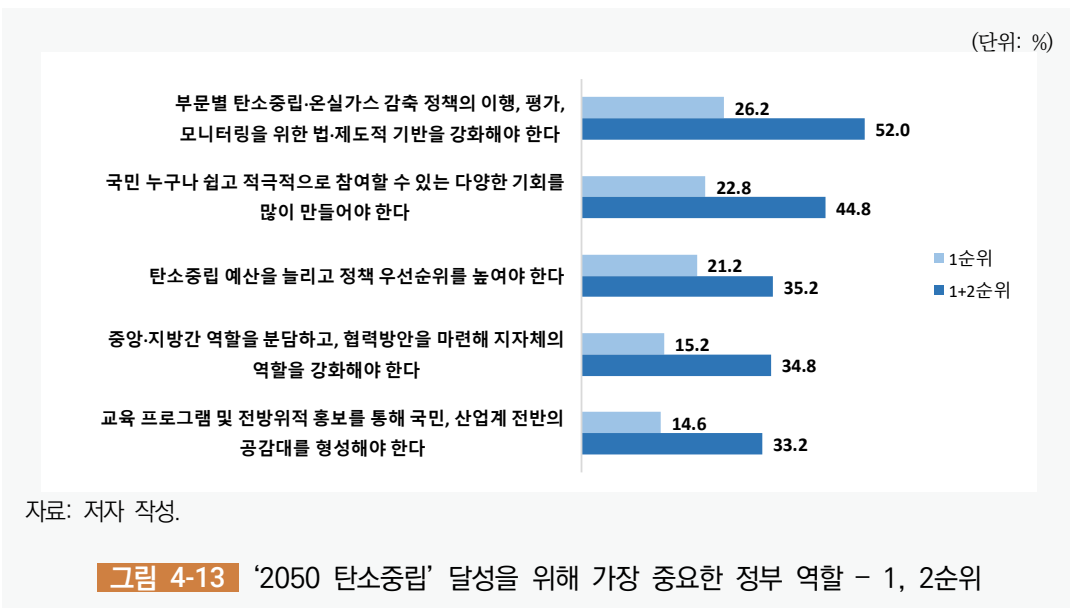


해상풍력발전의 영향력은 에너지 부문이 가장 긍정적으로 평가되었고, 건강 부문이 상대적으로 가장 낮게 평가되었다. 다른 재생에너지 발전시설이 건강 부문에 미치는 부정적 영향에

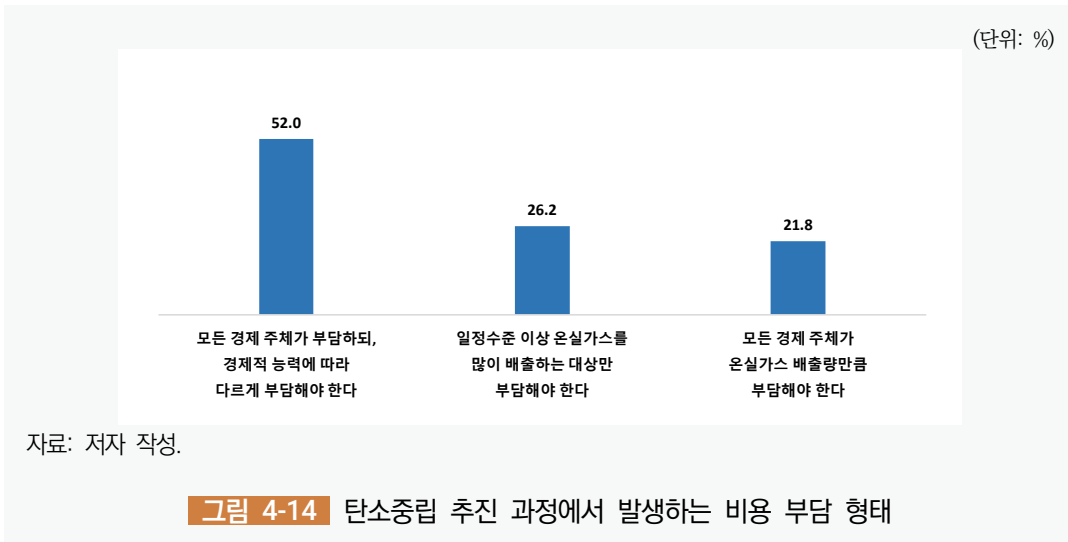
대한 응답률이 가장 높았다면, 해상풍력발전은 수자원 부문에 미치는 부정적 영향에 대한 응답률이 가장 높았다.

‘2050 탄소중립’을 달성하려면 현시점에서 가장 중요한 정부의 역할로 ‘탄소중립·온실가스 감축 정책의 이행, 평가, 모니터링을 위한 법·제도적 기반을 강화해야 한다’는 의견이 가장 많았으며, 다음으로 ‘국민 누구나 쉽고 적극적으로 참여할 수 있는 다양한 기회를 많이 만들어야 한다’, ‘탄소중립 예산을 늘리고 정책 우선순위를 높여야 한다’ 등의 순으로 나타났다.

1순위 기준, 남성은 ‘2050 탄소중립’을 달성하려면 현시점에서 가장 중요한 정부의 역할로 ‘탄소중립 예산을 늘리고 정책 우선순위를 높여야 한다’는 의견이 가장 많은 반면, 여성은 ‘부문별 탄소중립·온실가스 감축 정책의 이행, 평가, 모니터링을 위한 법·제도적 기반을 강화해야 한다’는 의견이 가장 많았다. 연령별로는 20대와 60대는 ‘국민 누구나 쉽고 적극적으로 참여할 수 있는 다양한 기회를 많이 만들어야 한다’, 30대와 50대는 ‘법·제도적 기반 강화’, 40대는 ‘예산 증대 및 정책 우선순위를 높임’에 대한 응답이 가장 많았다.



탄소중립 추진 과정에서 발생하는 비용 부담에 대해서 ‘모든 경제 주체가 부담하되, 경제적 능력에 따라 다르게 부담해야 한다’는 의견이 52.0%로 가장 많게 조사되어 일반 국민 과반수가 탄소중립 추진 비용은 경제력에 따라 부담해야 한다고 생각하는 것으로 나타났다. 다음으로 ‘일정 수준 이상 온실가스를 많이 배출하는 대상만 부담해야 한다(26.0%)’, ‘모든 경제 주체가 온실가스 배출량만큼 부담해야 한다(21.8%)’ 순으로 나타났다. 남성과 여성 모두 경제력에 따른 차등 부담해야 한다는 의견이 가장 많았다. 60세 이상을 제외한 모든 연령대에서 과반수가 경제력에 따른 차등 부담 방식을 선호하는 것으로 나타났다.

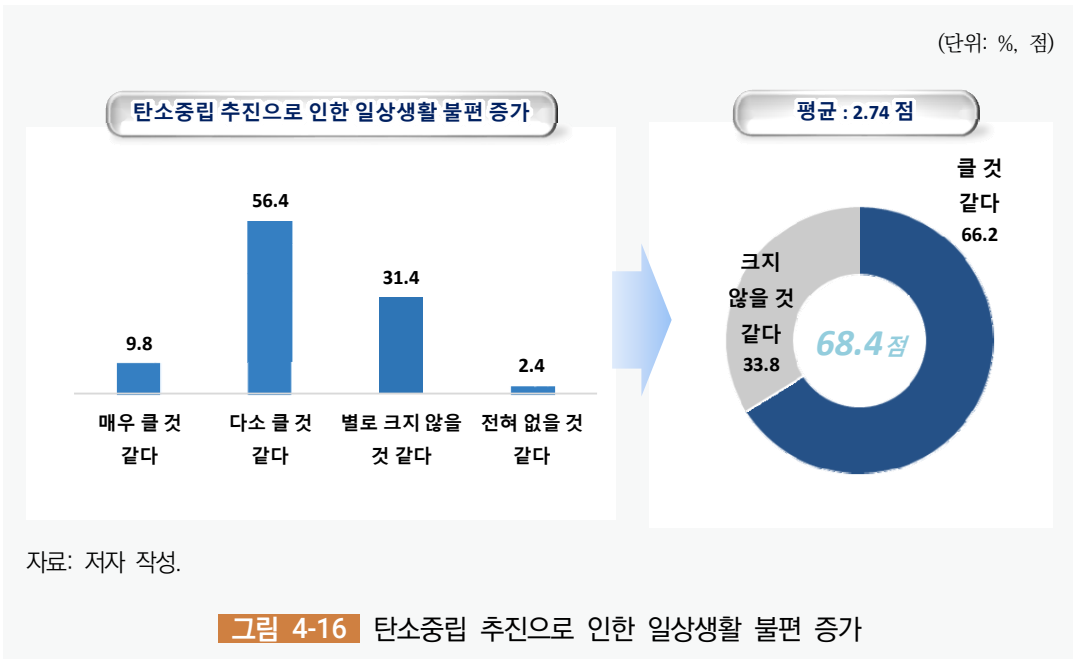


탄소중립을 추진하는 데 따르는 여러 가지 불편사항 중에서 수용할 수 있는 사항은 ‘차량 온실가스 배출규제 강화 및 대상 차종 확대(50.0%)’라는 응답이 가장 많았다. 다음으로 ‘일회용품 사용 금지 또는 사용 부담금 부과(46.2%)’, ‘혼잡통행료 부과 및 저오염배출지역 지정(차량 운행 제한) 확대(38.4%)’, ‘온실가스 저감 기술 개발 및 적용에 따른 제품·서비스 비용 상승(37.0%)’ 등의 순으로 나타났다. 반면, ‘도심 주차료 인상 등 차량 이용 부담 강화(28.8%)’에 대한 선호도가 가장 낮았다.

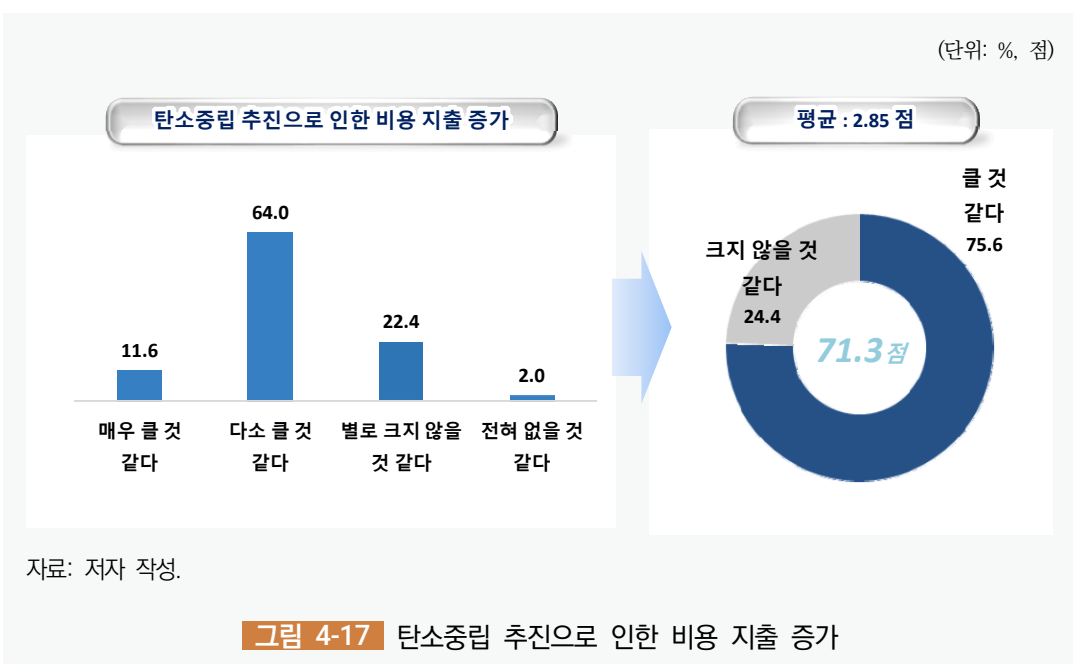
남성과 여성 모두 수용할 수 있는 불편사항으로 ‘차량 온실가스 배출규제 강화 및 대상 차종 확대’라고 가장 많이 응답하였다. 모든 연령대에서 차량 온실가스 배출규제 강화에 대한 선호도가 가장 높은 반면, 60대 이상은 일회용품 사용 금지에 대한 선호도가 가장 높았다. 반면, 30대의 12.0%가 선택지에 제시된 모든 사항을 수용할 수 없다고 응답하여 일상생활에서의 불편함에 대한 저항 정도가 상대적으로 가장 높았다.



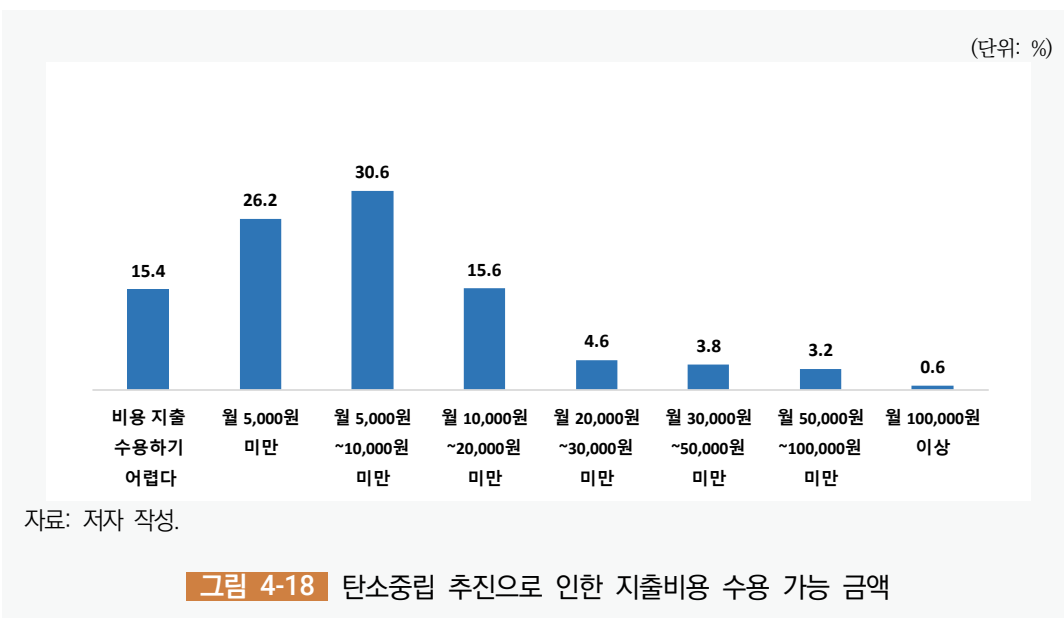
탄소중립 추진에 따른 일상생활 불편 정도가 ‘클 것 같다(66.2%)’라는 응답이 ‘크지 않을 것 같다(33.8%)’라는 응답보다 훨씬 많았다. 남성이 여성보다 불편 증가에 부담을 크게 느끼는 것으로 평가되지만 그 차이는 크지 않았다. 연령별로는 40대에서 불편 증가에 대한 평가가 가장 높았다.



탄소중립 추진에 따른 비용 지출 증가에 대해 ‘클 것 같다(75.6%)’라는 응답이 ‘크지 않을 것 같다(24.4%)’라는 응답보다 훨씬 많았다. 여성이 남성보다 지출 증가를 더 높게 평가하였으며 연령별로는 불편 증가 여부에 대한 문항과 마찬가지로 40대에서 가장 높았다.



탄소중립 추진에 따른 비용 지출을 어느 정도로 수용할 수 있을 것 같은가에 대해 ‘월 5,000원~10,000원 미만(30.6%)’이 가장 많았고, 다음으로 ‘월 5,000원 미만(26.2%)’, ‘월 10,000원~20,000원 미만(15.6%)’ 등의 순이었으며, ‘비용 지출을 수용하기 어렵다’는 의견은 15.4%로 조사되어 응답자의 상당수가 비용 지출에 대한 거부 의사가 있었다. 연령별로는 20~40대는 ‘월 5,000~10,000원 미만’ 의견이 가장 많은 반면, 50대 및 60세 이상은 ‘월 5,000원 미만’이 가장 많아 50대 이상보다 40대 이하에서 상대적으로 더 큰 비용을 수용할 수 있다고 응답하였다. 반면, 소수이지만 40대와 50대의 각각 5.0%, 6.0%가 ‘월 50,000~100,000원 미만’을 수용할 수 있다고 응답하여 응답자 중 소수는 큰 비용을 지출할 의사가 있는 것으로 조사되었다.



제5장

결론

1. 요약
2. 정책적 시사점

1. 요약

본 연구에서는 탄소중립 정책을 이행할 때 발생할 수 있는 리스크를 예측하고 적응역량을 구축하고자 탄소중립 정책 리스크의 영향 경로를 분석하였다. 우선, 리스크의 정의와 영향의 범위를 고민하였다. 탄소중립 이행 리스크를 이행 과정 리스크와 이행 결과 리스크로 구분하여 탄소중립 정책 실행 중 발생하는 불확실성 문제와 탄소중립 정책 실현 후 발생할 수 있는 부정적 영향으로 구분하였다. 리스크로 인한 파급효과는 영향의 성격을 반영하여 정책, 기술, 사회, 경제(시장), 환경, 건강으로 구분하였다. 에너지, 수자원, 농업, 산림, 건강 부문에서 영향 경로를 분석하기에 앞서 『탄소중립녹색성장 기본계획』뿐만 아니라 각 부문에 해당하는 세부 정책을 조사하였다. 각 세부 정책의 파급효과를 정리하였으며 이를 바탕으로 모든 부문에 공통으로 해당하는 재생에너지 정책의 시나리오를 분석하였다.

에너지 부문은 탄소중립 정책 이행과 연관성이 높은 부문이며, 다른 부문에 영향을 미치는 시발점이기도 하다. 신재생에너지 확대에 따른 이행 리스크와 파급경로를 분석하였는데, 기술 발전을 가속화하여 결과적으로 발전비용을 낮출 수 있는 긍정적 영향도 있지만 전력 수급 불안전성, 재생에너지 비용 증가, 정책 일관성 부족 등의 부정적 리스크가 존재하였다. 수자원 부문에서는 수상태양광, 해상풍력, 수력양수발전 확대 정책의 영향을 분석하였다. 단기적으로는 전력계통 부족, 기술 불안전성, 정책 불확실성 등이 주요 위험 요인으로 분석되었으며 중장기적 영향으로는 전력 판매 가격 변동, 유지 관리 비용 증가, 생산량 감소, 생태계 영향, 수질 및 소음 등의 환경영향 등이 리스크 요인으로 분석되었다. 농업 부문에서는 영농형 태양광 확대를 중심으로 분석하였는데, 농지 이용 규제, 지원 정책 축소, 생산비 증가, 생산성

및 품질 감소, 지역적 편중 심화, 농지가격 상승, 농업환경자원 훼손 등을 주요 리스크로 도출하였다. 이는 결과적으로 농가소득에 부정적 영향을 미칠 것으로 예상되며 이는 영농형 태양광에 대한 부정적인 인식을 확산시킬 것으로 우려된다. 산림 부문에서는 풍력발전을 중심으로 분석하였으며, 야생동식물 서식지 파괴, 소음 피해, 경관 훼손 등의 영향이 파악되었다. 이 외에 탄소중립 정책에 따른 산림 탄소흡수 효과도 분석하였다. 마지막으로, 건강 부문은 에너지 부문에서 시작한 영향이 수자원, 농업, 산림 부문을 거쳐 최종적으로 도착하는 종착지이기도 하다. 재생에너지 확대는 기후 재해를 감소시키며 미세먼지를 줄이고 질병 및 초과사망 위험을 낮추는 긍정적 영향이 분명히 존재한다. 단, 일부 지역에서 발생할 수 있는 경관 및 생태계 영향, 소득 분배에 따른 주민 갈등, 전력 가격 불확실성으로 인한 건강 위험 등은 리스크 요인으로 꼽힌다.

〈표 5-1〉에는 대표적 탄소중립 정책의 위험과 기회 요인을 정리하였다. 궁극적으로 탄소중립 정책은 온실가스 배출을 저감해 기후변화 리스크에 따른 피해를 줄인다. 주요 이행 리스크(IR) 및 결과적 리스크(CR)는 재생에너지 발전시설 설치에 따른 생태계 및 경관 훼손, 주민 갈등, 발전 간헐성에 따른 에너지 공급 불안전성, 에너지 가격 상승 등으로 나타났다. 긍정적 기회 요인으로는 화석연료 사용 절감으로 대기질 개선, 건강 영향 저감, 녹조 감소, 농가소득 증가 등으로 나타났다. 주민 갈등 및 주민 수용성 문제는 재생에너지 부지 선정과 합리적 이익 배분 등으로 해결할 수 있을 것으로 사료된다. 재생에너지로 전환하는 데 따른 단기적 에너지 비용 상승은 기존 화석연료의 환경적 사회적 비용을 고려한다면 단계적으로 전환해 수요 관리와 세제 제도 개편으로 합리적 비용을 배분할 수 있다. 재생에너지로 전환하는 일은 장기적으로 볼 때 연료를 대부분 수입하는 우리나라에서는 에너지 안보에 매우 중요하며 전환 시설 투자가 마무리되면 연료 비용이 감소되어 오히려 에너지 비용이 감소하는 효과가 있을 것으로 기대된다. 부수적으로 화석연료에 의한 미세먼지 배출이 감소되어 건강에 긍정적 영향이 나타난다.

현재 탄소중립 정책 이행에 수반되는 에너지 비용 상승과 관련해 산업계를 비롯한 가계 경제의 부담의 주요 이슈로 논의되고 있다. 단기적 비용 상승의 부담을 어떻게 언제 누가 부담할 것이냐에 대한 사회적 갈등 해결은 탄소중립 이행을 위한 중요 요소이다. 지역적으로 볼 때는 재생에너지 발전시설 설치에 관한 지역사회의 갈등도 진행 중이다. 일부 시설에 대해서는 재생에너지 발전시설 설치에 의한 환경 생태적 이슈도 중요하게 대두되고 있다. 이러한 문제점 및 리스크는 지역 주민을 대상으로 하는 재생에너지 발전의 장기적 효과 및 당위성에 대한 교육과 주민 협의가 매우 중요함을 시사한다. 기후위기의 심각성 인식 확대와 탄소중립의 필요성에 대한 국민 합의가 이루어지면 많은 갈등 요소가 감소할 것으로 사료된다. 경제적 및 환경·생태·사회적 비용 부담은 탄소중립 정책의 장단기적 비용 및 편익을 분석해 합리적으로 배분되어야 하며 미래사회의 가치를 국가 차원에서 논의해야 할 것이다,

표 5-1 탄소중립 정책의 리스크와 기회 요인

탄소중립 정책	위험	기회
석탄발전 감축	- 에너지 공급 간헐성 확대 - 해당 사업 종사자 감소 - 좌초자산 발생 - 전력 운영 비용 증가	대기질 개선
원전 확대	- 방사성 폐기물 발생 증가 - 지역 주민 갈등 - 수생태 환경 변화	- 화력발전 의존도 감소 - 대기질 개선 - 일자리 증가 - 전력 가격 하락
재생에너지 확대	- 경관 훼손 - 주민 갈등 유발 - 전력 시스템 운영 안정성 저하 - 발전소 건설로 인한 토양 침식 및 황폐화, 산사태 증가 (단기적) 전력 가격 상승	(장기적) 에너지 비용 감소 - 대기질 개선 - 태양광 발전을 위한 패널 생산 증가 (신산업) - 농가소득 증가 - 에너지 자급력 확대
해상풍력 확대	- 풍력 터빈 설치에 따른 주변 환경 변화 - 경관 훼손 - 소음 등 환경영향 - 지역 주민 갈등 - 전력 시스템 운영 안정성 저하 (단기적) 전력 가격 상승	(장기적) 에너지 비용 감소 - 대기질 개선 - 에너지 자급력 확대
육상풍력 확대	- 소음 등 환경영향 - 풍력발전 간헐성에 따른 발전량 변동 - 지역 주민과의 갈등 - 철새 이동 방해 등 생태계 부정적 영향 (단기적) 전력 가격 상승	(장기적) 에너지 비용 감소 - 대기질 개선 - 에너지 자급력 확대
수상태양광	- 수상관광 등에 부정적 영향 - 태양광 패널 구조물에 의한 수질 오염 위험 - 태양광 패널에 따른 수온 변화 및 수생생물 서식 적합도 저하 (단기적) 전력 가격 상승	(장기적) 에너지 비용 감소 - 대기질 개선 - 패널 차광 효과에 따른 녹조 감소 효과 - 에너지 자급력 확대
수소 확대	- 인프라 구축을 위한 대규모 투자 - 수소 인프라 구축에 대한 사회적 갈등 증가	수소 생산 위한 신산업 육성

자료: 저자 작성.

본 연구에서 분석한 탄소중립 정책의 이행 리스크와 결과적 리스크 분석은 부문별 정책의 단편적 비용 논의와 함께 사회경제 환경적 영향과 기후변화 적응, 지속가능발전을 고려한 통합적 논의에 중요한 정보를 제공할 것으로 사료된다. IPCC 6차 보고서(IPCC, 2023)에서 강조된 기후변화 적응, 온실가스 감축, 지속 가능한 발전을 동시에 고려하는 기후탄력적 발전 경로로 전환하려면 개별 정책의 단편적 분석 외 다른 부문에 영향 및 파급효과, 장단기적 영향, 적응정책과 시너지 확보, 지속가능발전과 정합성 확보 등을 고려하는 통합적 분석이 매우 중요하다. 향후 탄소중립 및 기후변화 정책의 정합성, 시너지, 트레이드오프 분석 및 글로벌 리스크의 영향, 복합 리스크의 영향 분석 등 후속 연구가 필요하다.

각 부문에서 분석한 탄소중립 이행 리스크의 전파 경로를 결합하여 종합 시사점을 도출하였다. 본 연구에서 대표 시나리오로 선정한 재생에너지 확대 정책은 모두 정책의 일관성 부족, 송배전망 설치 지연, 간헐성 문제 등의 이행 과정 리스크에 취약한 것으로 나타났다. 최종적으로는 물가 상승, 지역사회 건강 악화, 소득 감소, 경관 훼손 및 소음 발생 등의 환경 문제가 주요 노드로 파악되었다. 탄소중립 정책 수용성은 정책 이행의 불확실성 문제와도 연결된다. 본 연구에서 실시한 설문조사 결과, 응답자들은 대체로 재생에너지 발전 관련 정책을 인지하고 있으며 이에 따른 긍정적 영향을 인정하지만 2050 탄소중립 달성 가능성에 부정적이었으며, 정책에 따른 비용 및 일상생활 불편 증가에 부담을 느끼는 것으로 조사되었다. 따라서 탄소중립 정책에 따른 복잡한 리스크 영향 경로에 대처하려면 정책 이행에 신중을 기해야 할 것으로 보인다.

2. 정책적 시사점

탄소중립 정책의 필요성을 주장하고 긍정적 영향을 분석한 연구는 다수 존재한다. 하지만 모든 정책은 과정 중에 또는 결과적으로 나타날 수 있는 리스크가 존재하기 때문에 대비를 해야 한다. 부정적 영향을 미리 인식하고 이를 최소화하는 정책을 설계할 수 있을 뿐만 아니라 결과적으로 정책 목표를 더 효과적으로 달성할 수 있다. 또 사회, 경제, 환경에서 나타날 수 있는 부정적 영향을 분석하여 균형 잡힌 정책 이행하는 데 도움이 될 수 있다. 이런 측면에서, 본 연구가 기여하는 바가 크다.

본 연구의 한계점도 명확히 존재한다. 연구사업의 일관성을 유지하고자 본 연구에서는 부문을 에너지, 수자원, 농업, 산림, 건강으로 한정하여 탄소중립 이행 리스크의 영향을 분석하였지만 이외 리스크에 취약한 부문이 당연히 있다. 교통 및 운송 분야는 내연기관 차량 제한 및 친환경 차량 보급 확대로 영향을 받을 것이며, 자원순환 분야도 인프라 부족, 기술 개발 비용, 재활용 시장의 가격 변동성, 재활용 품질 문제에서 자유로울 수 없을 것이다.

마지막으로, 본 연구의 1차 연도에서는 기후 리스크의 영향 경로를 분석하였으며, 올해 2차 연도에서는 기후 리스크에 대응하는 탄소중립 정책이 불가피하게 지나는 위험 요인과 그에 따른 영향을 분석하였다. 즉, 두 연구 모두 한 가지 경우에 대한 리스크 영향 경로를 분석하였다는 한계점이 있다. 기후 리스크의 영향과 탄소중립 정책에 따른 리스크가 복합적으로 작용할 때 나타나는 긍정, 부정 영향의 상대적 크기를 파악하고 그 경로를 분석하여야 비로소 현실성 있는 시사점을 도출할 수 있을 것이다. 따라서 이 영역은 후속 연구과제로 남긴다.

참고문헌

[국내문헌]

- 고준호, 기현균, 정상미(2017), 「친환경차 보급 동향과 서울시 정책 방향」, 서울연구원, pp.1-62.
- 관계부처 합동(2020), 「제3차 국가 기후변화적응대책(2021-2025)」, p.35, pp.113-114.
- 관계부처 합동(2023), 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」, pp.24-109.
- 구자춘, 안현진, 최준영(2016), 「2016년 신설·강화 규제 및 상쇄과제 비용분석 용역」, 한국농촌경제연구원.
- 국가물관리위원회(2022), 「물 분야 2050 탄소중립 이행을 위한 로드맵 구축 연구」.
- 국립재난안전연구원(2022), 「사회변화에 따른 안전기준 분석 및 개선기술 개발」, p.98.
- 국회예산정책처(2022), “NABO 재정추계&세제 이슈”, 「재정추계&세제 이슈」, 4(21).
- 권순덕 외(2014), 「풍력발전단지 설치에 따른 산지관리방안 연구」, 국립산림과학원.
- 금융감독원(2021), 「기후리스크 관리 지침서」.
- 김기환(2022), 「재생에너지 확대의 국민경제 파급효과 분석(4/4)」, 에너지경제연구원.
- 김나연(2023), “중국의 수소생산 능력 및 비용 분석”, 「세계 에너지시장 인사이트」, 제23-14호, 에너지경제연구원, pp.1-9.
- 김도영(2015), “사회경제적 지위가 건강수준과 의료서비스 이용에 미치는 영향에 관한 연구”, 「인문 사회과학연구」, 16(4), pp.329-369.
- 김미현(2018), “보전 지역과 벌채 시행 지역 내 서식하는 산림중대형포유류 군집에 미치는 인위적인 영향 파악”, 경북대학교 대학원 석사학위 논문.
- 김연중 외(2018), 「농촌태양광 보급의 문제점과 개선 방안 연구」, 한국농촌경제연구원.
- 김연중 외(2021), 「탄소중립, 농촌 태양광의 이슈와 과제」, 「KREI 농정포커스」, 제199호, 한국농촌경제연구원.
- 김영룡, 최영화(2024), “물과 관련된 의료관련감염 사례의 고찰과 예방전략”, 「의료관련감염관리」, 29(1), pp.27-39.
- 김완수, 조하현(2020), “우리나라 전력시스템에 대한 태양광발전 확대의 영향과 대응방안: 계통

- 및 수급안정성을 중심으로”, 「한국경제학보」, 27(1), 연세대학교 경제연구소, pp.23-65.
- 김요섭 외(2021), “기후변화영향평가 제도 도입 논의와 탄소다배출 산업에 대한 영향”, 「GTC FOCUS」, 2(2), 국가녹색기술연구소.
- 김은성(2022), “RPS 제도의 한계점 및 대안 모색”, 「Next Group」, WP 2202-04, 사단법인 넥스트, pp.1-47.
- 김재윤, 전은경(2021), “기후변화 이행 리스크와 금융안정”, 「조사통계월보」, 75(12), 한국은행.
- 김재화, 김현석(2015), “신재생에너지 발전이 우리나라 CO₂ 배출에 미치는 영향분석”, 「에너지경제 연구」, 14(3), pp.185-201.
- 김종익(2024), “영농형 태양광 주요 논의 동향과 시사점”, 「세계 에너지시장 인사이트」, 24(14), 에너지경제연구원.
- 김종익, 조상민(2023), 「영농형 태양광 보급 확대를 위한 정책 방안: 경제성 측면을 중심으로」, 에너지경제연구원.
- 김종진, 김종인, 조남욱(2017), “수확기 쌀 가격 예측 모형 개선에 관한 연구”, 「농촌경제」, 40(3), pp.1-22.
- 김준범(2017), “국내 산업 및 시도별 대기오염물질 배출량자료를 이용한 미세먼지 형성 가능성 및 인체 호흡기 영향 평가추정”, 「대한환경공학회지」, 39(4), pp.220-228.
- 김지효(2023), 「산업부문 에너지효율 향상의 비용효과성 분석」, 에너지경제연구원.
- 남경수 외(2021), “국내 목재 산업의 국가 경제 기여도와 성장요인 분해분석”, 「농촌경제」, 44(3), pp.53-74.
- 농림축산식품부(2021), 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」.
- 농림축산식품부(2024a), 「2050 탄소중립을 위한 축산부문 2030 온실가스 감축 및 녹색 성장 전략」.
- 농림축산식품부(2024b), 「영농형 태양광 도입 전략」.
- 도현학(2015), “농촌마을 리모델링 개선방안에 관한 연구: 한국과 독일의 농촌마을 사례연구를 통해서», 「한국농촌건축학회논문집」, 17(1), pp.35-44.
- 류경주(2022), “해상풍력 현황 및 향후과제: 인·허가 지연 개선 및 주민 수용성 확보를 중심으로», 「이슈와 논점」, 제2032호, pp.1-4.
- 박경훈 외(2021), “기후변화 대응이 거시경제에 미치는 영향”, 「BOK 이슈노트」, 제2021-23호, 한국은행.
- 박성우, 전의찬(2022), “풍력발전사업의 주요 장애요인 분석과 시사점: 풍력발전 사업주체의 관점에서», 「한국기후변화학회지」, 13(1), pp.11-21.
- 박종문 외(2021), “해상풍력 수용성에 대한 어민 인식 조사», 「환경정책」, 29(4), pp.83-109.
- 박종욱, 이나운(2021), “기후변화 대응이 산업에 미치는 영향», 「조사통계월보」, 75(9), 한국은행.
- 박종철, 채여라(2020), “2018년 폭염으로 인한 온열질환자와 초과사망자 분석», 「대한지리학회지」, 55(4), pp.391-408.
- 박주영 외(2023), 「국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가」, 한국환경연구원.

박형욱(2022), “ASTI MARKET INSIGHT 76: 수상 태양광”, 「ASTI MARKET INSIGHT」, 2022-076, 한국과학기술정보연구원.

박혜진(2023), 「기후리스크와 자산가격의 관계에 대한 조사 및 분석」, 자본시장연구원.

변재연(2021), 「농가소득 증진을 위한 농촌태양광 사업 분석」, 국회예산정책처.

산림청(2011), 「목재산업진흥 종합계획」.

산림청(2021), 「2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략」.

산업통상자원부(2013), 「제2차 국가 에너지 기본계획」.

산업통상자원부(2017), 「재생에너지 3020 이행계획」.

산업통상자원부(2023), 「제10차 전력수급기본계획(2022-2036)」, p.36, p.40, p.43.

산업통상자원부(2024), 「제11차 전력수급기본계획(안) 주요 내용」.

송영일 외(2021), 「부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 기반구축 및 활용기술 개발」, 한국환경정책·평가연구원.

순병민, 신동원(2021), “영농형 태양광 설치에 따른 농가소득 영향분석”, 「한국기후변화학회지」, 12(5), pp.409-419.

신경희(2013), 「토양자원 유실 최소화를 위한 국내의 환경영향평가 사례 연구」, 한국환경정책·평가연구원.

신동원 외(2021), 「영농형 태양광 추진을 위한 정책방안 마련 연구」, 환경연구원.

안영환(2023), “석탄발전 좌초자산 규모와 대응 방안”, 「전기저널」, 통권 제562호, pp.34-38.

안지영(2024), “주요국 청정수소 지원 정책 및 국내 시사점”, 「과학기술&ICT정책·기술동향」, 제270호, 한국과학기술기획평가원, pp.1-15.

안현진, 이상민, 조성주(2019), 「산림자원 순환경제 기반마련을 위한 산림관리 효율화 방향」, 한국농촌경제연구원.

양원호(2019), “기후변화에 따른 대기오염물질 농도 변화 및 미세먼지 노출에 의한 건강 영향”, 「보건복지포럼」, 통권 제269호, pp.20-31.

오상봉 외(2022), 「석탄 화력발전소 폐지가 고용에 미치는 영향」, 한국노동연구원.

유재국(2024), “영농형 태양광 보급 활성화를 위한 전략”, 「이슈와 논점」, 제2197호, 국회입법조사처.

유찬희 외(2017), “쌀 과잉 공급, 높은 목표가격이 원인인가?”, 「농촌경제」, 40(4), pp.1-27.

윤정혜, 강상목(2020), “CO2 배출, 원자력에너지, 신재생에너지 발전량과의 관계분석: 한국, 일본, 독일을 중심으로”, 「신재생에너지」, 16(4), 한국신·재생에너지학회, pp.9-22.

이규범, 김도우(2015), “서울시 도시근린공원의 범죄발생 특성에 관한 연구: 공간적 분석기법을 중심으로”, 「한국셰프테드학회지」, 6(2), pp.63-86.

이상민, 김정덕, 송성환(2013), 「임산물 수급모형 구축 및 전망」, 한국농촌경제연구원.

이상범 외(2011), 「풍력발전단지 환경평가 방안 연구: I. 육상, II. 해상」, 한국환경연구원.

이상준 외(2020), “농어촌지역 재생에너지 보급사업의 갈등요인 분석과 해결방안 연구”, 「정책 이슈

- 페이퍼」, 21-08, 에너지경제연구원, pp.34-57.
- 이상호(2023a), “영농형태양광의 농가의향 및 비용-편익 분석”, 「한국산학기술학회논문지」, 24(1), pp.221-227.
- 이상호(2023b), 「작물별 영농형 태양광 경제성 평가 및 정책 가이드라인 개발」, 농림축산식품부·농림식품기술기획평가원.
- 이용건 외(2023), 「탄소중립 실현을 위한 가축 사육단계 온실가스 감축 방안」, 한국농촌경제연구원.
- 이유수(2020), “태양광 및 풍력발전의 전력계통 영향과 시사점”, 「에너지포커스」, 제77권, 에너지경제연구원.
- 이지연(2013), 「수송연료 가격과 자동차 연비 간의 상관관계 분석」, 에너지경제연구원. pp.13-20.
- 임지훈, 장현숙(2023), “수소산업 경쟁력 강화를 위한 정책 연구: 수소 저장-운송 산업 육성 현황과 정책과제”, 「Trade Focus」, 2023년14호, 한국무역협회, pp.1-38.
- 장철수, 석현덕, 장우환(2002), “도시립 관리정책의 개선방향”, 「농촌경제」, 25(2), 한국농촌경제연구원.
- 전성우 외(2011), 「기후변화 통합영향평가모형 체계 개발: 정책연계모형개발을 중심으로」, 한국환경정책·평가연구원.
- 정윤경, 박광수(2013), 「가구특성별 에너지 소비지출 분석 연구」, 에너지경제연구원.
- 정정화(2015), “원전 건설의 주민수용성: 삼척 신규원전 갈등사례를 중심으로”, 「한국사회와 행정연구」, 26(3), pp.167-199.
- 정채은, 이희진, 이정은(2024), “코로나19 팬데믹 전후 초·중·고등학생의 가구소득별 에너지 및 다량영양소 섭취: 국민건강영양조사(2016-2022) 자료 활용”, 「대한지역사회영양학회지」, 29(3).
- 정학균 외(2021), 「농림업 부문 녹색경제 활성화방안 연구(1/3차년도)」, 한국농촌경제연구원.
- 정학균 외(2022), 「농림업 부문 녹색경제 활성화방안 연구(2/3차년도)」, 한국농촌경제연구원.
- 정학균 외(2023a), 「영농형 태양광 도입의 경제성 분석과 정책적 시사점」, 한국농촌경제연구원.
- 정학균 외(2023b), “한국형 소형태양광 고정가격 계약 매입제도 일몰! 영농형 태양광 사업의 미래는?”, 「KREI 이슈리포트」, 제3호, 한국농촌경제연구원.
- 정훈(2023), “재생에너지 단계별 주요 갈등 이슈 분석과 시사점”, 「국가미래전략 Insight」, 제78호, 국회미래연구원, pp.1-24.
- 조종선(2022), 「재생에너지발전 출력제한 이슈 및 대응현황」, KDB산업은행 미래전략연구소, pp.3-5.
- 중소기업중앙회(2021), 「2050 탄소중립 관련 중소기업 실태조사 결과 보고서」.
- 진태영, 이태의(2023), “국내 제조업 부문 공급지장비용(VoLL) 분석 및 유연성 자원 확보를 위한 시사점”, 「에너지경제연구」, 22(1), pp.319-350.
- 채여라 외(2021), 「국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가」, 한국환경연구원.
- 한국산업기술진흥원(2024), “수소의 현실적 한계와 대응 정책 고찰”, 「정책브리프」, 2024-02,

pp.1-23.

한국은행(2022), 「금융안정보고서(2022년 6월)」, 참고 7.

한국전력공사 경제경영연구원(2019), “국내외 전환부문 온실가스 한계저감비용 사례 비교”, 「KEMRI 전력경제 REVIEW」, 제13호.

한화진 외(2006), 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축」, 한국환경정책·평가연구원.

허중호, 조영태, 권순만(2010), “사회경제적 박탈이 건강에 미치는 영향”, 「한국사회학」, 44(2), pp.93-120.

홍연아 외(2022), 「탄소중립을 위한 식품소비 단계의 온실가스 감축 대안과 효과분석」, 한국농촌경제연구원.

환경부(2021), 「2021년 환경부 탄소중립 이행계획」.

황인창 외(2021), 「서울시 산업경제부문 기후변화 리스크 분석」, 서울연구원.

K-water(2023), 「2023 K-water 지속가능경영보고서」.

[국외문헌]

Almeida, R. M. et al.(2022), “Floating Solar Power Could Help Fight Climate Change—Let’s Get It Right”, *Nature*, Vol.606, pp.246-249.

Auger, T. et al.(2021), “The Future of Coal Investment, Trade, and Stranded Assets”, *Joule*, Vol.5, pp.1462-1484.

Avila, S.(2018), “Environmental Justice and the Expanding Geography of Wind Power Conflicts”, *Sustainability Science*, 13(3), pp.599-616.

Bachner, G. et al.(2020), “Risk Assessment of the Low-Carbon Transition of Austria’s Steel and Electricity Sectors”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol.35, pp.309-332.

Basińska, M., M. Michalkiewicz, and K. Ratajczak(2019), “Impact of Physical and Microbiological Parameters on Proper Indoor Air Quality in Nursery”, *Environment international*, Vol.132, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105098>.

Biró-Varga, K., I. Sirnik, and S. Stremke(2024), “Landscape User Experiences of Interspace and Overhead Agrivoltaics: A Comparative Analysis of Two Novel Types of Solar Landscapes in the Netherlands”, *Energy Research & Social Science*, Vol.109.

Blössner, M., M. de. Onis., and A. Prüss-Ustün(2005), “Malnutrition: Quantifying the Health Impact at National and Local Levels”, *Environmental Burden of Disease Series*, No.12, World Health Organization.

Brown, M. A. et al.(2020), “High Energy Burden and Low-income Energy

- Affordability: Conclusions from a Literature Review”, *Progress in Energy*, 2(4), DOI: <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abb954>.
- Chae, Y. and J. Park(2021), “Analysis on Effectiveness of Impact-based Heatwave Warning Considering Severity and Likelihood of Health Impacts in Seoul, Korea”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), pp.1-17, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052380>.
- Chen, C. H. and N. J. Su(2022), “Global Trends and Characteristics of Offshore Wind Farm Research over The Past Three Decades: A Bibliometric Analysis”, *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10).
- Chiu, C. H. et al.(2021), “Effects of Low-frequency Noise from Wind Turbines on Heart Rate Variability in Healthy Individuals”, *Scientific Reports*, 11(1), DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97107-8>.
- Chock, R. Y. et al.(2021), “Evaluating Potential Effects of Solar Power Facilities on Wildlife from an Animal Behavior Perspective”, *Conservation Science and Practice*, 3(2).
- Daewel, U. et al.(2022), “Offshore Wind Farms are Projected to Impact Primary Production and Bottom Water Deoxygenation in the North Sea”, *Communications Earth & Environment*, 3(1).
- Diuk-Wasser, M. A., M. C. VanAcker, and M. P. Fernandez(2021), “Impact of Land Use Changes and Habitat Fragmentation on the Eco-epidemiology of Tick-borne Diseases”, *Journal of Medical Entomology*, 58(4), pp.1546-1564, DOI: <https://doi.org/10.1093/jme/tjaa209>.
- Djalab, A. et al.(2024), “A Comprehensive Review of Floating Photovoltaic Systems: Tech Advances, Marine Environmental Influences on Offshore PV Systems, and Economic Feasibility Analysis”, *Solar Energy*, Vol.277.
- Drewitt, A. L. and R. H. Langston(2006), “Assessing the Impacts of Wind Farms on Birds”, *International Journal of Avian Science: Ibis*, Vol.148, pp.29-42.
- Ellenbogen, J. M., C. B. Kellam, and M. Hankard(2024), “Noise-induced Sleep Disruption from Wind Turbines: Scientific Updates and Acoustical Standards”, *Sleep*, 47(2), DOI: <https://doi.org/10.1093/sleep/zsad286>.
- Evans, A., V. Strezov, and T. J. Evans(2009), “Assessment of Sustainability Indicators for Renewable Energy Technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), pp.1082-1088.
- Ezcurra, E. et al.(2019), “A Natural Experiment Reveals the Impact of Hydroelectric Dams on the Estuaries of Tropical Rivers”, *Science Advances*,

5(3).

- Fearnside, P. M.(2016), “Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry”, *World development*, Vol.77, pp.48-65.
- Ferraguti, M. et al. (2023), “Does Land-use and Land Cover Affect Vector-borne Diseases? A Systematic Review and Meta-analysis”, *Landscape Ecology*, Vol.38, pp.2433-2451, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01746-3>.
- Filipova, T. et al.(2020), *Mental Health and the Environment: Environmental Degradation's Impact on Mental Health and Wellbeing*, Institute for European Environmental Policy and Barcelona Institute for Global Health, pp.1-73.
- Gambhir, A. et al.(2022), “Near-term Transition and Longer-term Physical Climate Risks of Greenhouse Gas Emissions Pathways”, *Nature Climate Change*, Vol.12, pp.88-96.
- Gambhir, A. et al.(2021), “How are Future Energy Technology Costs Estimated? Can We Do Better?”, *International Review of Environmental and Resource Economics*,14(3-4), pp.187-257, pp.271-318.
- Gao, J. et al.(2021), “Risk Assessment of Offshore Photovoltaic Projects under Probabilistic Linguistic Environment”, *Renewable Energy*, Vol.163, pp.172-187.
- Garcia, A. et al(2023), “Toxicological Effects of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}): Health Risks and Associated Systemic Injuries-Systematic Review”, *Water Air Soil Pollution*, 234(6), p.346, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06278-9>.
- Gatzert, N. and T. Kosub(2016), “Risks and Risk Management of Renewable Energy Projects: The Case of Onshore and Offshore Wind Parks”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.60, pp.982-998.
- Ghosh, A. (2023), “Nexus between Agriculture and Photovoltaics(Agrivoltaics, Agriphotovoltaics) for Sustainable Development Goal: A Review”, *Solar Energy*, Vol.266.
- Gottdenker, N. L. et al.(2014), “Anthropogenic Land Use Change and Infectious Diseases: A Review of the Evidence”, *EcoHealth*, Vol.11, pp.619-632, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10393-014-0941-z>.
- Govindan, K.(2023), “Pathways to Low Carbon Energy Transition through Multi Criteria Assessment of Offshore Wind Energy Barriers”, *Technological*

- Forecasting and Social Change*, Vol.187.
- Greene, J. S. and M. Geisken(2013), “Socioeconomic Impacts of Wind Farm Development: A Case Study of Weatherford, Oklahoma”, *Energy, Sustainability and Society*, Vol.3: 2, DOI: <https://doi.org/10.1186/2192-0567-3-2>.
- Haelters, J. et al.(2013), “The Effects of Pile Driving on Marine Mammals and Fish in Belgian Waters”, Degraer, S., R. Brabant, and B. Rumes, Eds., *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Learning from the Past to Optimise Future Monitoring Programmes*, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, pp.121-134.
- Haggett, C.(2012), “The Social Experience of Noise from Wind Farms”, Szarka, J. et al., Eds., *Learning from Wind Power: Governance, Societal and Policy Perspectives on Sustainable Energy*, London: Palgrave Macmillan UK, pp.153-173, DOI: https://doi.org/10.1057/9781137265272_8.
- Han, L., W. Zhou, and W. Li(2018), “Growing Urbanization and the Impact on Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Dynamics”, *Sustainability*, 10(6), DOI: <https://doi.org/10.3390/su10061696>.
- Harrison, C., H. Lloyd, and C. Field(2017), *Evidence Review of the Impact of Solar Farms on Birds, Bats and General Ecology*, Natural England.
- Hastings, M. C. and A. N. Popper(2005), *Effects of Sound on Fish*, California Department of Transportation Contract No.43A0139, Task Order 1 Trans.
- Hernandez, R. R. et al.(2014), “Environmental Impacts of Utility-scale Solar Energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.29, pp.766-779.
- Kim M. C.(2024), *South Korea’s Power Trilemma: Unravelling the Root Causes of Rising Electricity Bills*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, pp.1-41.
- Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC(2018), *Global Warming of 1.5°C*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC(2023), *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*.
- International Renewable Energy Agency: IRENA(2019), *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-economic Aspects*, International Renewable Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency: IRENA(2024), *Renewable Power Generation Costs in 2023*, International Renewable Energy Agency: Abu

- Dhabi, pp.33-38, 51-63, 124-125.
- Jaafar et al.(2014), "Indoor Air Quality: Microbe and Its Relationship toward Temperature, Relative Humidity and Carbon Dioxide Concentration", *3rd Scientific Conference on Occupational Safety and Health: Sci- Cosh 2014*, Oct 15-16, Malaysia: National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Khatana, S. A. M. et al.(2022), "Association of Extreme Heat with All-cause Mortality in the Contiguous US, 2008-2017", *JAMA Network Open*, 5(5), DOI: <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.12957>.
- Kirchgeorg, T. et al.(2018), "Emissions from Corrosion Protection Systems of Offshore Wind Farms: Evaluation of the Potential Impact on the Marine Environment", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.136, pp.257-268.
- Kirkegaard, J. K. et al.(2023), "Tackling Grand Challenges in Wind Energy through a Socio-Technical Perspective", *Nature Energy*, 8(7), pp.655-664, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01266-z>.
- Koh, J. H., and E. Y. K. Ng(2016), "Downwind Offshore Wind Turbines: Opportunities, Trends and Technical Challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.54, pp.797-808.
- Kolb, S. et al.(2020), "The Impact if Renewables on Electricity Prices in Germany: An Update for the Years 2014-2018", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.134.
- Kucukali, S.(2014), "Risk Assessment in Hydroenergy Projects: Learning from Experts and Data", Leal Filho, W., Ed., *Handbook of Renewable Energy*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.1-17.
- Kumar, M., H. M. Niyaz, and R. Gupta(2021), "Challenges and Opportunities towards the Development of Floating Photovoltaic Systems", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.233.
- Kuriqi, A. et al.(2021), "Ecological Impacts of Run-of-river Hydropower Plants-Current Status and Future Prospects on the Brink of Energy Transition", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.142.
- Lal, R.(2015), "Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation", *Sustainability*, 7(5), DOI: <https://doi.org/10.3390/su7055875>.
- Laub, M. et al.(2022), "Contrasting Yield Responses at Varying Levels of Shade Suggest Different Suitability of Crops for Dual Land-use Systems: A Meta-Analysis", *Agronomy for Sustainable Development*, 42(3): 51.

- Lee J-T. et al.(2002), “Air Pollution and Asthma among Children in Seoul, Korea”, *Epidemiology*, 13(4), pp.481-484.
- Lee, S-T. and S-M. Jung(2024), “Subsidizing the Shift to Renewable Energy in Korea: A Levelized Cost Analysis and Computation of Required Subsidies”, *Sage Open*, 14(2), pp.1-13.
- Li, D. W. and C. S. Yang(2004), “Fungal Contamination as a Major Contributor to Sick Building Syndrome”, *Advances in Applied Microbiology*, Vol.55, pp.31-112, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(04\)55002-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(04)55002-5).
- Li, C. et al.(2022), “Environmental Impacts of Global Offshore Wind Energy Development until 2040”, *Environmental Science & Technology*, 56(16), pp.11567-11577.
- Lieu, J. et al.(2020), “Assessing Risks of Low-Carbon Transition Pathways”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol.35, pp.261-270.
- Loxham M., D. E. Davies, and S. T. Holgate(2019), “The Health Effects of Fine Particulate Air Pollution”, *BMJ*, Vol.367, DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.l6609>.
- Maitra, C.(2018), *A Review of Studies Examining the Link between Food Insecurity and Malnutrition*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Mamun, M. A. A. et al.(2022), “A Review of Research on Agrivoltaic Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.161.
- Mani, Z. A., A. Khorram-Manesh, and K. Goniewicz(2024), “Global Health Emergencies of Extreme Drought Events: Historical Impacts and Future Preparedness”, *Atmosphere*, 15(9), DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15091137>.
- Markandya, A. and P. Wilkinson(2007), “Electricity Generation and Health”, *The Lancet*, 370(9591), pp.979-990.
- Marselle, M. R., S. Lindley, and A. Bonn(2021), “Biodiversity and Health in the Urban Environment”, *Current Environmental Health Reports*, 8(2), pp.146-156, DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-021-00313-9>.
- Mateo, C. et al.(2018), “Impact of Solar PV Self-Consumption Policies on Distribution Networks and Regulatory Implications”, *Solar Energy*, Vol.176, pp.62-72.
- May, N. and O. Chiappinelli(2018), “Too Good to Be True? How Time-inconsistent Renewable Energy Policies Can Deter Investments”, *DIW*

Berlin Discussion Paper, No.1726, pp.1-27.

Mayer, J. et al.(2020), “Qualitative and quantitative risk assessment of expanding photovoltaics in the Netherlands”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol.35, pp.357-368.

McKinsey and Company(2022), *The Net-Zero Transition: What It Would Cost, What It Could Bring*.

Mekonnen, M. M., P. W. Gerbens-Leenes, and A. Y. Hoekstra(2015), “The Consumptive Water Footprint of Electricity and Heat: A Global Assessment”, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1(3), pp.285-297.

Mora, C. et al.(2017), “Twenty-seven Ways a Heat Wave Can Kill You: Deadly Heat in the Era of Climate Change”, *Circulation: Cardiovascular Quality and Outcomes*, 10(11), DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCOUTCOMES.117.004233>.

Morand, S. and C. Lajaunie(2021), “Outbreaks of Vector-borne and Zoonotic Diseases are Associated with Changes in Forest Cover and Oil Palm Expansion at Global Scale”, *Frontiers in Veterinary Science*, Vol.8, DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.661063>.

Park, H., Y. Shin, and S. Lee(2023), “Relationship Between Community Resilience and Quality of Life of Disaster-Affected People: Reinforcement Effects of the Perception of Government Relief Services in South Korea”, *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, Vol.17.

Park, J. and B. Kim(2019), “An Analysis of South Korea’s Energy Transition Policy with Regards to Offshore Wind Power Development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.109, pp.71-84.

Patella, V. et al(2018), “Urban Air Pollution and Climate Change: ‘The Decalogue: Allergy Safe Tree’ for Allergic and Respiratory Diseases Care”, *Clinical and Molecular Allergy*, 16(1): 20, DOI: <https://doi.org/10.1186/s12948-018-0098-3>.

Pearson, H. (2024), “The Rise of Eco-anxiety: Scientists Wake Up to the Mental-health Toll of Climate Change”, *Nature*, 628(8007), pp.256-258. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00998-6>.

Peng, L. et al.(2023), “The Carbon Costs of Global Wood Harvests”, *Nature*, Vol.620, pp.110-115, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06187-1>.

Perveen, R., N. Kishor, and S. R. Mohanty(2014), “Off-shore Wind Farm

- Development: Present Status and Challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.29, pp.780-792.
- Rahman, A., O. Farrok, and M. M. Haque(2022), “Environmental Impact of Renewable Energy Source Based Electrical Power Plants: Solar, Wind, Hydroelectric, Biomass, Geothermal, Tidal, Ocean, and Osmotic”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.161.
- Rasul, M. G. et al.(2022), “The Future of Hydrogen: Challenges on Production, Storage and Applications”, *Energy Conversion and Management*, Vol.272.
- Robine, J. M. et al.(2008), “Death Toll Exceeded 70,000 in Europe during the Summer of 2003”, *Comptes Rendus Biologies*, 331(2), pp.171-178, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.12.001>.
- Samant, S., P. Thakur-Wernz, and D. E. Hatfield(2020), “Does the Focus of Renewable Energy Policy Impact the Nature of Innovation? Evidence from Emerging Economies”, *Energy Policy*, Vol.137.
- Sanchez, S. M. F., M. A. F. Segovia, and L. C. R. Lopex(2019), “Impact of Public Policies on the Technological Innovation in the Renewable Energy Sector”, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(2), pp.139-159.
- Schmidt, J. H., and M. Klokke(2014), “Health Effects Related to Wind Turbine Noise Exposure: A Systematic Review”, *PLOS ONE*, 9(12), DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114183>.
- Shafii, N. Z. et al.(2023), “Association of Flood Risk Patterns with Waterborne Bacterial Diseases in Malaysia”, *Water*, 15(11), DOI: <https://doi.org/10.3390/w15112121>.
- Shaktawat, A., and S. Vadhera(2021), “Risk Management of Hydropower Projects for Sustainable Development: A Review”, *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), pp.45-76.
- Shin, S., and K. Jung(2020), “Mediating Role of Community Participation between Physical Environments, Social Relationships, Social Conflicts, and Quality of Life: Evidence from South Korea”, *Applied Research in Quality of Life*, Vol.15, pp.1433-1450, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11482-019-09747-8>.
- Sirnik, I., D. Oudes, and S. Stremke(2024), “Agrivoltaics and Landscape Change: First Evidence from Built Cases in the Netherlands”, *Land Use Policy*, Vol.140.
- Sirnik, I. et al.(2023), “Circularity and Landscape Experience of Agrivoltaics: A

- Systematic Review of Literature and Built Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.178.
- Staid, A. and S. D. Guikema(2015), “Risk Analysis for US Offshore Wind Farms: the Need for an Integrated Approach”, *Risk Analysis*, 35(4), pp.587-593.
- Syphard, A. D. et al.(2012), “Housing Arrangement and Location Determine the Likelihood of Housing Loss Due to Wildfire”, *PLoS ONE*, 7(3), DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033954>.
- Task force on Climate-related Financial Disclosures: TCFD(2017), *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*, pp.5-6, p.10.
- Thangavel, P., D. Park, and Y. C Lee(2022), “Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12).
- Thoma, M. V., N. Rohleder, and S. L. Rohner(2021), “Clinical Ecopsychology: The Mental Health Impacts and Underlying Pathways of the Climate and Environmental Crisis”, *Front Psychiatry*, Vol.12, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsy.2021.675936>.
- Toledo, C. and A. Scognamiglio(2021), “Agrivoltaicsystems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)”, *Sustainability*, 13(12).
- Tsafack, N. et al.(2022), “Influence of Grazing and Solar Panel Installation on Tenebrionid Beetles (Coleoptera Tenebrionidae) of a Central Asian Steppe”, *Journal of environmental management*, Vol.320.
- Van Vliet, O. et al.(2020), “The Importance of Stakeholders in Scoping Risk Assessments-Lessons from Low-Carbon Tansitions”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol.35, pp.400-413.
- Economics*, Vol.152, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.102979>.
- Voigt, C. C. et al.(2024), “Toward Solving the Global Green-Green Dilemma between Wind Energy Production and Bat Conservation”, *BioScience*, 74(4), pp.240-252, DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biae023>.
- Wallace, K., S. Jordan, and D. W. McCollum(2023), “Camping in Clearcuts: The Impacts of Timber Harvesting on USFS Campground Utilization”, *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, Vol.44, Part B, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jort.2023.100690>.

- Walston Jr, L. J. et al.(2016), “A Preliminary Assessment of Avian Mortality at Utility-Scale Solar Energy Facilities in the United States”, *Renewable Energy*, Vol.92, pp.405-414.
- Wan Mahiyuddin, W. R. et al.(2023), “Cardiovascular and Respiratory Health Effects of Fine Particulate Matters (PM_{2.5}): A Review on Time Series Studies”, *Atmosphere*, 14(5), DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14050856>.
- Wang, J. and P. D. Lund(2022), “Review of Recent Offshore Photovoltaics Development”, *Energies*, 15(20).
- WHO: World Health Organization(2021), *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*.
- Widmer, J. et al.(2024), “Agrivoltaics, a Promising New Tool for Electricity and Food Production: A Systematic Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.192.
- Wretling, V., B. Balfors, and U. Mortberg(2022), “Balancing Wind Power Deployment and Sustainability Objectives in Swedish Planning and Permitting”, *Energy, Sustainability and Society*, 12(1): 48.
- Wu, Y. et al.(2019), “Risk Assessment on Offshore Photovoltaic Power Generation Projects in China Based on a Fuzzy Analysis Framework”, *Journal of Cleaner Production*, Vol.215, pp.46-62.
- Xing, J. et al.(2023), “Urban Forests: Environmental Health Values and Risks”, *NBER Working Paper*, No.w31554, National Bureau of Economic Research: NBER.
- Xu, X., Y. Tan, and G. Yang(2013), “Environmental Impact Assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and Interventions”, *Earth-Science Reviews*, Vol.124, pp.115-125.
- Zoran M. A. et al.(2020), “Assessing the Relationship between Surface Levels of PM_{2.5} and PM₁₀ Particulate Matter Impact on COVID-19 in Milan, Italy”, *The Science of the Total Environment*, Vol.738, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>.

[온라인 자료]

- 가톨릭신문(2023.6.27), “뜨거워지는 여름, 에너지 빈곤층 숨통 조이다”, <https://www.catholicimes.org/article/202306270189265#:~:text=%EB%8F%88%EC%9D%B4%20%EC%9>

7%86%EC%96%B4%20%ED%8F%AD%EC%97%BC%EC%9D%B4%EB%82%98,%EB%A
A%BB%ED%95%98%EB%8A%94%20%EC%82%AC%EB%9E%8C%EB%93%A4%EC%9
D%B4%EB%9D%BC%EB%8A%94%20%EC%96%98%EA%B8%B0%EB%8B%A4., 검색일:
2024.10.1.

경상매일신문(2021.10.28), “군위댐에 수상태양광 발전소 설치 절대 안된다”, <http://www.ksmnews.co.kr/news/view.php?idx=354819>, 검색일: 2024.9.27.

경향신문(2020.12.24), “2030년까지 전기요금 10% 인상”, <https://www.khan.co.kr/economy/industry-trade/article/202012242144015>, 검색일: 2024.10.1.

경향신문(2023.8.31), “새울원전 추가 유치 놓고 두 쪽 난 주민들”, <https://www.khan.co.kr/local/Ulsan/article/202308312138015>, 검색일: 2024.7.18.

경향신문(2023.10.25), “전력망 구축 지연…재생에너지 발전 사업자 손실 10조원 넘어”, <https://www.khan.co.kr/economy/economy-general/article/202310251606001>, 검색일: 2024.9.30.

경향신문(2024.3.19), “작년보다 더 큰 ‘대정전 위기’ 오나…봄철 전력수급 불균형 심각”, <https://www.khan.co.kr/economy/economy-general/article/202403191606001>, 검색일: 2024.9.30.

국가법령정보센터, “농지법”, <https://www.law.go.kr/법령/농지법>, 검색일: 2024.11.4.

국가법령정보센터, “농지법 시행령”, https://www.law.go.kr/법령/농지법_시행령, 검색일: 2024.11.4.

국민일보(2020.8.12), “태양광, 홍수 피해 키웠나…정부 ‘그럴 리가’, 전문가 ‘그럴 수도’”, <https://www.kmib.co.kr/article/view.asp?arcid=0924151336>, 검색일: 2024.10.1.

글로벌이코노믹(2024.8.19), “‘수소’에 뛰어든 기업들…아직 부족한 수요와 인프라”, https://www.g-enews.com/article/Industry/2024/08/2024081809192485107bdb7041ec_1, 검색일: 2024.10.7.

나무신문(2023.9.5), “2024 목재산업 경기전망 ‘혼란하다 혼란해’”, <https://www.imwood.co.kr/news/articleView.html?idxno=30631>, 검색일: 2024.10.4.

노컷뉴스(2024.6.14), “전기차 시장 ‘보릿고개’…‘이것’ 안 바뀌면 못 넘는다”, https://www.nocutnews.co.kr/news/6160445?utm_source=naver&utm_medium=article&utm_campaign=20240614050058, 검색일: 2024.10.1.

농수축산신문(2024.4.16), “해상풍력 두고 지역상회 갈등 ‘심화’…정부가 나서야”, <https://www.afnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=269383>, 검색일: 2024.9.30.

뉴스서천(2022.8.19), “기획취재 / 에너지 전환 무엇이 문제인가? (4)수상태양광발전”, <https://www.newssc.co.kr/news/articleView.html?idxno=51020>, 검색일: 2024.9.27.

뉴시스(2024.1.30), “태양광 폐패널, 그저 폐기물?…알고 보니 ‘버릴 게 없다’”, https://www.newsis.com/view/NISX20240129_0002609014, 검색일: 2024.9.12.

D%98,%EB%B9%84%EC%A4%91%EC%9D%80%2040%25%EC%97%90%20%EB%8B%A
C%ED%95%9C%EB%8B%A4., 검색일: 2024.10.1.

시사위크(2021.2.4), “[수소경제, 미래를 열다] 강릉 수소폭발사고 2년, 어떤 교훈 얻었나”, <https://www.sisaweek.com/news/articleView.html?idxno=141570>, 검색일: 2024.9.27.

에너지경제신문(2021.8.26), “탄소배출권 가격 급상승에 RE100 활성화 기대감↑…‘아직 속단 어렵다’ 견해도”, <https://www.ekn.kr/web/view.php?key=20210826010004469>, 검색일: 2024.10.4.

에너지산업신문(2024.6.11), “[기고] 윤석열 정부 신재생 에너지 정책의 세 가지 문제점”, <http://etimes.kr/View.aspx?No=3262766>, 검색일: 2024.9.24.

에너지신문(2024.1.3), “2024, 해상풍력 ‘비상의 해’ 될까”, <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=92080>, 검색일: 2024.9.28.

에너지신문(2024.5.22), “수소경제 핵심키워드 ‘안전’…수소안전 어디까지 왔나”, <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=202863>, 검색일: 2024.9.27.

에너지플랫폼뉴스(2020.8.18), “LNG 발전 대기오염 배출관리, 사각지대 존재?”, <https://www.e-platform.net/news/articleView.html?idxno=59306>, 검색일: 2024.6.14.

에너지플랫폼뉴스(2024.10.14), “과도한 태양광 공급 따른 출력제어조치로 손실비용 ‘500억원’”, <https://www.e-platform.net/news/articleView.html?idxno=88543>, 검색일: 2024.10.16.

엔지니어링데일리(2024.9.4), “꽉 막힌 해상풍력…‘민간사업자, 인허가 각개격파 한계’”, <https://www.engdaily.com/news/articleView.html?idxno=18332>, 검색일: 2024.10.4.

연합뉴스(2020.8.8), “[팩트체크] 산지 태양광설비와 산사태 연관성은?”, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200807113400502>, 검색일: 2024.10.9.

월간수소경제(2021.2.27), “수소 생산비용 절감을 위한 정책적 지원 필요”, <https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=8820>, 검색일: 2024.9.27.

월간수소경제(2024.6.19), “전력 수급체계 대변혁 첫발 내디더…업계는 ‘실망’”, <https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=12563>, 검색일: 2024.10.9.

이데일리(2024.8.29), “‘17만원→2만원’ 전기세 확 줄인 ‘이 동네’…비결 뭐길래”, <https://m.edaily.co.kr/News/Read?newsId=03735926638992240&mediaCodeNo=257>, 검색일: 2024.10.1.

인사이트에너지뉴스(2023.12.29), “[신년 특집] 청정수소경제 인프라 구축, ‘어려워도 해야 한다’”, <https://www.inenews.kr/news/articleView.html?idxno=9897>, 검색일: 2024.10.9.

일렉트릭 쇼크(2022.11.8), “테슬라는 왜 굳이 배터리를 직접 만들까?”, <https://maily.so/electricshock/posts/wdr9lvm1rlx>, 검색일: 2024.10.1.

일렉트릭파워(2023.1.12), “2036년 풍력 등 재생에너지 발전비중 28.9% 목표”, <https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=31848>, 검색일: 2024.6.20.

- 전기신문(2023.5.11), “2030년 이후 대정전 경고...재생에너지 불안요소는?” <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=319814>, 검색일: 2024.11.12.
- 전기신문(2023.12.30), “동맥경화 걸린 송전망...전력대란 경고등 올린다”, <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=330818>, 검색일: 2024.4.15.
- 전기신문(2024.3.28), “해외 의존도 높은 청정수소 도입 코앞인데...국내 비축체계 시급”, <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=334736>, 검색일: 2024.10.4.
- 전기신문(2024.5.2), “답답했던 국내 최대 임하수상태양광 건설, 재개되나”, <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=336010>, 검색일: 2024.10.10.
- 전기저널(2020.9.8), “재생에너지 확대에 따른 전력시장제도의 문제점 및 개선방향”, <http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=3602>, 검색일: 2024.10.2.
- 전기저널(2022.1.7), “재생에너지 확산과 미래의 시스템비용”, <http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=4403>, 검색일: 2024.10.8.
- 전기저널(2023.12.15), “국내 송전망의 현황과 주요 이슈”, <http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=5271>, 검색일: 2024.10.1.
- 전기신문(2024.9.27), “김원이 의원, 복잡한 해상풍력-전력망 인허가 한번에 잡는다”, <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=343687>, 검색일: 2024.10.4.
- 전력통계정보시스템(2024.5.31), “연료 단가”, <https://epsis.kpx.or.kr>, 검색일: 2024.6.11.
- 중앙일보(2023.5.26), “폭우 처음 아니었는데...태양광 산사태, 주범은 벌목과 흙다짐?”, <https://v.daum.net/v/20230526060211472>, 검색일: 2024.10.1.
- 질병관리청 국가건강정보포털(2024), “수질오염”, <https://health.kdca.go.kr/healthinfo/biz/health/gnrlzHealthInfo/gnrlzHealthInfo/gnrlzHealthInfoView.do>, 검색일: 2024.10.1.
- 충북일보(2024.10.14), “폭염 속 전기로 걱정 없는 충주시, 태양광 지원사업 효과 입증”, <https://www.inews365.com/news/article.html?no=834594#:~:text=2023%EB%85%84%20%EC%A3%BC%ED%83%9D%20%ED%83%9C%EC%96%91%EA%B4%91,%EC%A0%84%EA%B8%B0%EC%9A%94%EA%B8%88%EC%9D%B4%20%EC%95%BD%2070%25>, 검색일: 2024.10.1.
- 쿠키뉴스(2024.8.2), “태양광 사업 놓고 커지는 주민 갈등...이격거리논란에 정부는 ‘불구경’”, https://m.kukinews.com/article/view/kuk202408210153#_enliple, 검색일: 2024.10.1.
- 투데이에너지(2016.1.25), “육상풍력 소음문제 해결에 환경부 ‘딜레마’”, <https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=110931>, 검색일: 2024.6.1.
- 프레스리안(2021.10.26), “한수원, 군위댐 수상 태양광발전시설 설치추진에 주민들 분노”, <https://www.pressian.com/pages/articles/2021102614512305938>, 검색일: 2024.4.7.
- 한겨레(2021.5.19), “‘벌채’ 논란 번진 산림청 탄소중립 전략, 학계 얘기 들어보니”, <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/995800.html>, 검색일: 2024.10.3.
- 한겨레(2023.3.2), “‘발전소 소음 탓에 순록 못 키우겠다’...툰베리도 시위 합류”, <https://www.han>

i.co.kr/arti/international/international_general/1081876.html, 검색일: 2024.10.2.

한겨레(2024.7.13), “사용후핵연료 해법, ‘죄수의 딜레마’에 빠져 실패”, https://www.hani.co.kr/arti/economy/economy_general/1066742.html, 검색일: 2024.9.6.

한경ESG(2023.12.6), “전력망 확충 없이 재생에너지 전환 불가능”, <https://www.hankyung.com/article/202311275662i>, 검색일: 2024.10.16.

한경ESG(2024.10.5), “탈탄소 위해 그린 수소 생산 인프라 구축해야”, <https://www.hankyung.com/article/202409244711i>, 검색일: 2024.10.10.

한국경제(2022.6.6), “‘풍력발전기 소음에 인근 주민 정신적 피해도 배상해야’…최초 사례 나왔다”, <https://www.hankyung.com/article/202206054334i>, 검색일: 2024.10.1.

한국경제(2024.3.5), “‘24시간 풀가동 문제 없다’…전 세계가 베풀하는 ‘물 배터리’”, <https://www.hankyung.com/article/202401197557i>, 검색일: 2024.10.1.

한국목재신문(2018.8.18), “지자체 ‘업체들, 목재산업시설 현대화사업 보조금 부가세 9월까지 납부 해라’”, <https://www.woodkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=29832>, 검색일: 2024.5.10.

한국수자원공사, “K-water 2050 탄소중립 로드맵”, https://www.kwater.or.kr/water/sub04/sub01/renePage.do?s_mid=151, 검색일: 2024.6.23.

한국일보(2020.8.12), “태양광 시설 중 산사태 피해 0.09% ‘무슨 근거로 쫓나’”, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2020081117300003644>, 검색일: 2024.10.1.

한국일보(2021.10.3), “‘한 달 전기요금 6000원’ 찍히자…이웃들도 줄줄이 태양광 달았다”, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2021091016390001135>, 검색일: 2024.10.1.

한국일보(2023.1.3), “‘산업이나 관광이나’…재생에너지 놓고 갈등 커진 유럽”, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2023010316070000829>, 검색일: 2024.10.2.

한국일보(2023.10.21), “한국 재생에너지 단가 비싸…태양광·해상풍력 미국의 두배 넘어 [갈 길 먼 RE100]”, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2023101611280003604>, 검색일: 2024.10.4.

한국일보(2024.7.16), “2050 탄소중립 이행의 핵심, 해상풍력”, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2024071610500003379>, 검색일: 2024.10.2.

한국원자력신문(2024.4.22), “[칼럼] 수치로 분석한 RE100은 전력설비 이용률 저하와 전기요금 상승요인”, <https://www.knpnews.com/news/articleView.html?idxno=30893>, 검색일: 2024.10.8.

한국해양(2024.6.11), “해상풍력발전 갈등 해결책 찾기, 현대해양”, <https://www.hdhy.co.kr/news/articleView.html?idxno=20719>, 검색일: 2024.10.4.

e-나라지표(2024.8.18), “에너지원별 발전량 현황 (2009-2023)”, https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339, 검색일: 2024.10.10.

Greenium(2024.1.31), “그린수소 생산 전망 대폭 하향…”IEA, 2028 그린수소 프로젝트 단 7%

- 가동 예상”, <https://greenium.kr/news/30607/>, 검색일: 2024.10.10.
- Greenium(2024.6.14), “2050 탄소중립 시대, 韓 탈선탄 미래는? 넥스트·BNEF ‘비용효율적 탈선탄 로드맵 필요’”, <https://greenium.kr/news/33821/>, 검색일: 2024.8.22.
- Hankook & Company(2024), “전기차의 역사, 그 기원부터 현재까지”, <https://www.hankookandcompany.com/ko/innovation/innovation-224.do>, 검색일: 2024.6.20.
- KBS뉴스(2023.7.25), “[기후는 말한다] ‘산사태 취약 산지 태양광 870곳…위치는 비공개?’, <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=7732209>, 검색일: 2024.10.8.
- KJtimes(2022.4.20), “천연림 벌채, 환경·노동·불법 수입 리스크 심각[산림벌채의 민낯]”, <https://www.kjtimes.com/news/article.html?no=72305>, 검색일: 2024.10.3.
- KOTRA 해외시장뉴스(2023.5.9), “스위스 수상태양광 발전 현황 및 쟁점”, https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?pageNo=2&pagePerCnt=10&SITE_NO=3&MENU_ID=170&CONTENTS_NO=1&bbsGbn=01&bbsSn=243%2C403%2C257%2C254&pNttSn=202382&recordCountPerPage=10&viewType=&pStartDt=&pEndDt=&sSearchVal=&pRegnCd=&pNatCd=&pKbcCd=&pIndustCd=&pHsCode=&pHsCodeNm=&pHsCdType=&sSearchVal=, 검색일: 2024.4.7.
- SBS News(2024.5.16), “‘명품마을’ 발각, 울컥한 농부…‘태양광’에 갈등 깊어진 이유”, https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1007649762, 검색일: 2024.10.1.
- YTN(2023.2.20), “1.5km의 ‘권고’…소음 피해는 주민 몫”, https://www.ytn.co.kr/_ln/0115_202302200542003183, 검색일: 2024.9.30.
- 4C Offshore(2023.9.21), “Offshore Wind Industry Faces Challenges and Opportunities as Global Growth Continues”, <https://www.4coffshore.com/news/offshore-wind-industry-faces-challenges-and-opportunities-as-global-growth-continues-nid28083.html>, 검색일: 2024.10.20.
- Allianz(2023.9), “A Turning Point for Offshore Wind – Global Opportunities and Risk Trends”, <https://commercial.allianz.com/news-and-insights/reports/offshore-wind-opportunities-risks.html>, 검색일: 2024.9.29.
- Biodiversity & Environment(2024.8.21), “DAILY UPDATES: Critical Threats Facing the Aravallis”, <https://www.drishtiias.com/daily-updates/daily-news-analysis/critical-threats-facing-the-aravallis>, 검색일: 2024.10.1.
- CNBC(2021.1.27), “Tesla Misses on Earnings, Expects 50% Average Annual Growth in Deliveries Going Forward”, <https://www.cnbc.com/2021/01/27/tesla-tsla-earnings-q4-2020.html>, 검색일: 2024.10.1.
- COP28(2023), “COP 28 UAE Consensus Brochure”, <https://www.google.com/url?sa=t&rc=t=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj98uPhlemGAXW4hlYBHfj1DtQQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fcop28.com%2FUAEconsen>

sus&usg=AOvVaw23YyKbgPV2LVf87Go9b7PL&opi=89978449, 검색일: 2024.2.20.
Earth.Com(2018.10.4), “The Hidden Environmental Costs of Transitioning to Wind Power”,
<https://www.earth.com/news/environmental-costs-wind-power/>, 검색일: 2024.1
0.2.
Forestry(2024.8.22), “Economic Impact of Lumber Production on Global Timber Market
s”, [https://forestry.com/forestry-management/forestry-markets/economic-imp
act-of-lumber-production-on-global-timber-markets/](https://forestry.com/forestry-management/forestry-markets/economic-impact-of-lumber-production-on-global-timber-markets/), 검색일: 2024.9.11.
New York Post(2024.8.5), “Majority of Tree in NYC Could Be Making Air Quality Worse:
Columbia Researchers”, [https://nypost.com/2024/08/05/lifestyle/majority-of-tre
es-in-nyc-could-be-making-air-quality-worse-columbia-researchers/](https://nypost.com/2024/08/05/lifestyle/majority-of-trees-in-nyc-could-be-making-air-quality-worse-columbia-researchers/), 검색일: 20
24.9.27.
Network for Greening the Financial System: NGFS Scenarios Portal, “Electricity Generati
on in EJ per Year”, <https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/explore>, 검색일:
2024.6.20.
Our World in Data, “CO2 and Greenhouse Gas Emissions”, [https://ourworldindata.org/c
o2-and-greenhouse-gas-emissions](https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions), 검색일: 2024.10.10.

Building and Assessing Adaptive Capacity to Climate Change for the National Risk Management

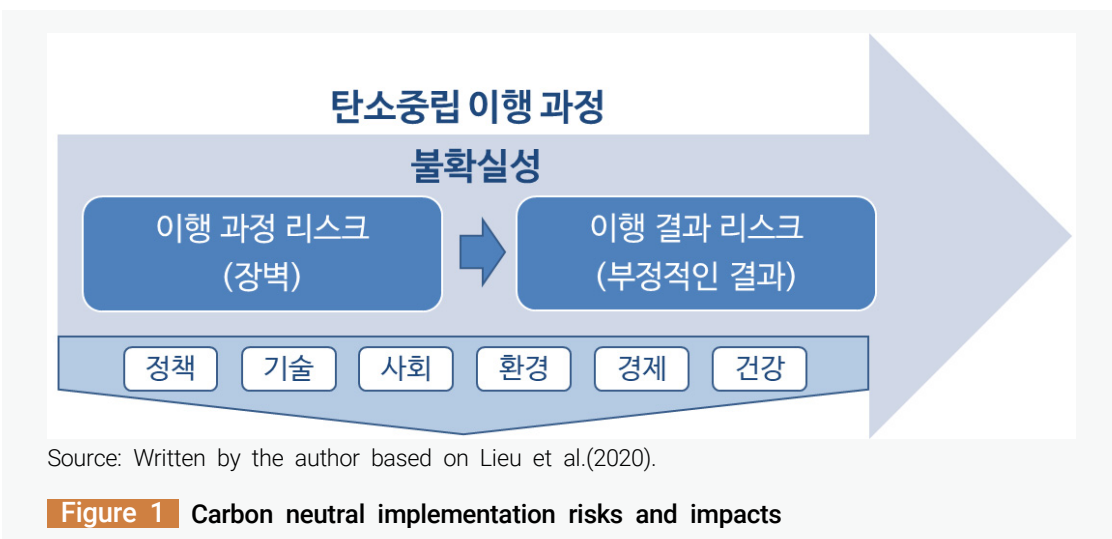
Analysis of Carbon Neutral Transition Risk Propagation Paths

Chae, Yeora et al.

1. Carbon neutral policy and implementation risk

1.1 Definition and classification of carbon neutral implementation risks

In this study, carbon neutral implementation risk is defined as the potential impact that may arise from implementing carbon neutral policies, such as climate change mitigation and adaptation. In particular, in this study, based on previous research, carbon neutrality implementation risk was broadly divided into 'implementation process risk (IR)' and 'implementation result risk (CR)' in terms of stages. Process risks are risks that arise in the process of carbon neutrality implementation and include uncertainties in the implementation and goal achievement of carbon neutral policy, technology development, and system conversion. Resultant risk refers to the negative impacts on the ecosystem, humans, health, economy, society, and environment that may arise from the implementation of carbon neutral policies in terms of the results of realizing carbon neutrality.



1.2 Carbon neutral policy status

As a representative carbon neutral policy, mid- to long-term greenhouse gas reduction measures by sector in the 1st Carbon Neutral Green Growth Basic Plan were mainly identified. In order to match the detailed policies of the basic plan with specific strategies and goals for each sector, the 'Electricity Supply and Demand Basic Plan' was established in the transition sector, the '2050 Agri-food Carbon Neutral Promotion Strategy' was implemented in the agricultural sector, and the 'Achieve 2050 Carbon Neutrality' in the forestry sector. In the water resources sector, the 'Water Management Field, Public-led Bold 2050 Carbon Neutral Strategy' and the 'K-water 2050 Carbon Neutral Roadmap' are being implemented. Reviewed.

1.3 Implementation risks of carbon neutral policy

Risk factors related to carbon neutrality implementation are very diverse, including greenhouse gas emissions, energy demand, energy prices, power generation mix, food demand, GDP, investment, agricultural demand, agricultural production, land cover, policy (administrative) costs, and trade. To encompass this, the implementation risk of the carbon neutral policy was previously divided into two risks (process and result), and the impact sector was divided into social, economic, environmental, policy, technology, and health aspects. For example, from an economic aspect, there is an increase in electricity rates, from a social aspect, there is conflict between coal-fired power plant workers and local residents, from an environmental aspect, there is a reduction in air pollutant emissions, and from a technical aspect, grid output instability due to intermittency of renewable energy, policy issues, etc. On the aspect, regulatory environmental risks such as environmental impact assessment can be reviewed, and on the health aspect, impacts such as reduced ability of low-income groups to respond to extreme climate events and increased risk exposure can be reviewed.

1.4 Policy scenarios for implementation risk analysis

In order to derive a policy scenario that analyzes the distribution path of carbon neutral implementation risks, we first drew the impact path for each sector according to carbon neutral policy implementation. Representative policies for each sector directly affect that sector and indirectly affect other sectors. Among various reduction implementation strategies, one policy that shows the impact path across all sectors is the expansion of renewable energy, and this was derived as a common policy scenario.

2. Analysis of carbon neutrality implementation risk impact by sector

2.1 Energy

The expansion of renewable energy is essential for the transition to carbon neutrality in the power sector, but it may have the effect of increasing the instability of power supply and demand due to intermittency, making it difficult to predict power production. If the supply of new and renewable energy increases excessively compared to the demand for electricity, output restrictions must be implemented to prevent power produced through new and renewable energy from entering the power grid to maintain the stability of the power grid, which leads to an increase in the cost of operating the power system. In addition, there is a risk that the instability of power frequency and voltage may increase if the proportion of renewable energy increases in the future carbon neutral transition process. Considering this aspect, there is a need to secure flexible resources to compensate for the intermittency of renewable energy. In addition, the current cost of domestic renewable energy generation is relatively high compared to other countries and other power sources, and supply growth is still limited. On the other hand, the rapid increase in companies' demand for renewable energy power due to recent RE100 may lead to an increase in companies' renewable energy purchase costs.

From a policy perspective, new and renewable energy support policies such as subsidies and technology development support can also have the effect of lowering future power generation costs by accelerating the development of new and renewable energy technology, thereby lowering electricity prices. Although this may have a positive effect, inconsistent renewable energy support policies may also hinder the expansion of renewable energy. Investment in renewable energy has a high initial investment cost and is structured to be recovered over a long period of time, so continuous investment in renewable energy will be possible only when a long-term stable and consistent renewable energy support policy is presented. In addition, the current complex licensing procedures and resident conflicts are factors that impede the expansion of renewable energy and need to be resolved to achieve carbon neutrality.

2.2 Water resources

As a policy implication to reduce the 'implementation risk' that occurs at the present time, we would like to first suggest ways to strengthen social acceptance by utilizing the co-creation approach. The participation of various stakeholders is necessary to reduce distrust in technological innovation and to realize it effectively. For an example of such active participation and joint discussion, refer to the Austrian Steel and Power Sector Transformation Project, which designed policy and technology development simultaneously. (Bachner et al., 2020). In addition, by connecting renewable energy microgrids and energy storage systems, power system stability can be secured, and local power generation sources can be diversified, such as small hydro

power generation and floating solar power grid connection. In addition, an approach is needed to implement regionally tailored energy independence policies.

Measures to reduce 'consequential risk' that occurs in the future should consider providing financial incentives, price stabilization policies, and improving the post-environmental impact assessment system. By utilizing an economic model in which local residents participate, carbon-neutral energy conversion can be used as a means to revitalize the local economy, creating synergy. In the case of Imha Dam floating solar power, a plan was prepared to increase acceptance by providing economic benefits to the local community through a resident participation-based profit sharing model. In addition, standardized evaluation standards for each renewable energy source must be established through improvement of the post-environmental impact assessment system. In order to revise policies and prepare alternatives based on post-monitoring and evaluation results, it is essential to improve legal authority and institutional procedures to respond to unexpected environmental changes.

2.3 Agriculture

Agricultural solar power, unlike existing farmland-dedicated solar power, is a means of achieving energy production and farmland conservation at the same time, and policy interest in this is increasing. In addition, considering the structural rice surplus problem in the country, the reduction in rice production due to agricultural solar installation is expected to have a minimal impact on actual food security, rice prices, and consumer welfare. Accordingly, in this study, based on literature research, the risks of expanding agricultural solar power were summarized as shown in the figure below, excluding the impact on the overall economy such as food security and prices. Specifically, in this study, based on literature research, factors that may present risks in the current expansion of agricultural solar power include conflict with agricultural land use regulations, reduction of support policies such as the Korean FIT system, increased production costs due to installation of agricultural solar power, It was identified as a decrease in agricultural productivity/quality, deepening regional concentration, increase in agricultural equipment qualifications, and damage to agricultural environmental resources.

In addition, a decrease in farm household income was selected as a ripple effect of the risk of expansion of agricultural solar energy mentioned above. This is due to insufficient agricultural solar power operation period due to farmland use regulations, fluctuations in electricity sales prices, and increased production costs due to changes in macro variables such as increased separation distance and interest rates due to regional concentration, which have a negative impact on the income of farms installing agricultural solar power. Because it is certain that it will have an impact. Lastly, the damage to agricultural environmental resources and the increase in farmland prices due to the expansion of agricultural solar power are expected to increase negative perceptions of agricultural solar power and act as an obstacle to policy expansion.

2.4 Forest

Renewable energy is an important alternative for carbon neutrality and environmental protection, but the expansion of wind power generation in forested areas entails various environmental, social, and economic risks. Problems such as forest damage, ecosystem disturbance, noise, and landscape damage that occur in the process of building wind power farms in mountainous areas show the conflict between the expansion of renewable energy and forest protection. These issues may conflict with the policy goal of protecting forests while expanding renewable energy, and more careful planning and coordination are needed for sustainable development.

Measures are needed to minimize forest damage and ecosystem disturbance that occur during the installation of wind power plants in mountainous areas. To this end, the location of the wind power generation complex must be carefully selected and technological alternatives that can mitigate environmental damage caused by wind power generation must be actively introduced. Communication and cooperation with residents must be strengthened to solve problems such as noise and landscape damage caused by wind power generation facilities to local residents. It is important to establish a compensation policy for residents in affected areas and increase the social acceptability of renewable energy projects through their participation. In particular, in the case of Korea, there are no specific regulations regarding the appropriate distance between private houses and wind power generation complexes and it remains at the recommendation level, so establishing a firm legal standard for this should be a priority.

Ecosystem protection measures must be strengthened to reduce the negative impacts of wind power generation on wildlife habitats. It is necessary to introduce a monitoring system to reduce damage to migratory animals and avoid installing power plants in areas where damage is likely to occur.

2.5 Health

The health impacts of renewable energy expansion may have somewhat different results at the universal and local levels. Generally, renewable energy is expected to reduce climate disasters such as heat waves and droughts by mitigating climate change and reduce the incidence of respiratory and cardiovascular diseases by improving air quality. These changes contribute to reducing excess mortality overall and can have a positive impact on disease prevention and health promotion. For example, research has shown that reducing the concentration of fine dust (PM_{2.5}, PM₁₀) can suppress the occurrence of major diseases such as asthma and cardiovascular disease.

On the other hand, negative impacts exist at the general level as well. Volatility in electricity prices and water costs due to the expansion of renewable energy can have a negative impact

on economically vulnerable groups. In particular, energy-poor people are at risk of worsening health as they are unable to maintain proper cooling and heating during heat waves and cold weather due to rising electricity costs.

At the local level, the expansion of renewable energy has various consequences. In some rural areas, the construction of solar power plants is causing conflict among local residents, which has the potential to weaken community solidarity and reduce disaster response capabilities. In the case of wind power generation, research exists that environmental factors such as low-frequency noise can cause health problems such as sleep disturbance and increased stress in nearby residents. In addition, soil erosion and water pollution that may occur during the installation of wind power plants can have a negative impact on the ecosystem and human health, which is likely to lead to long-term reductions in agricultural productivity and food security issues.

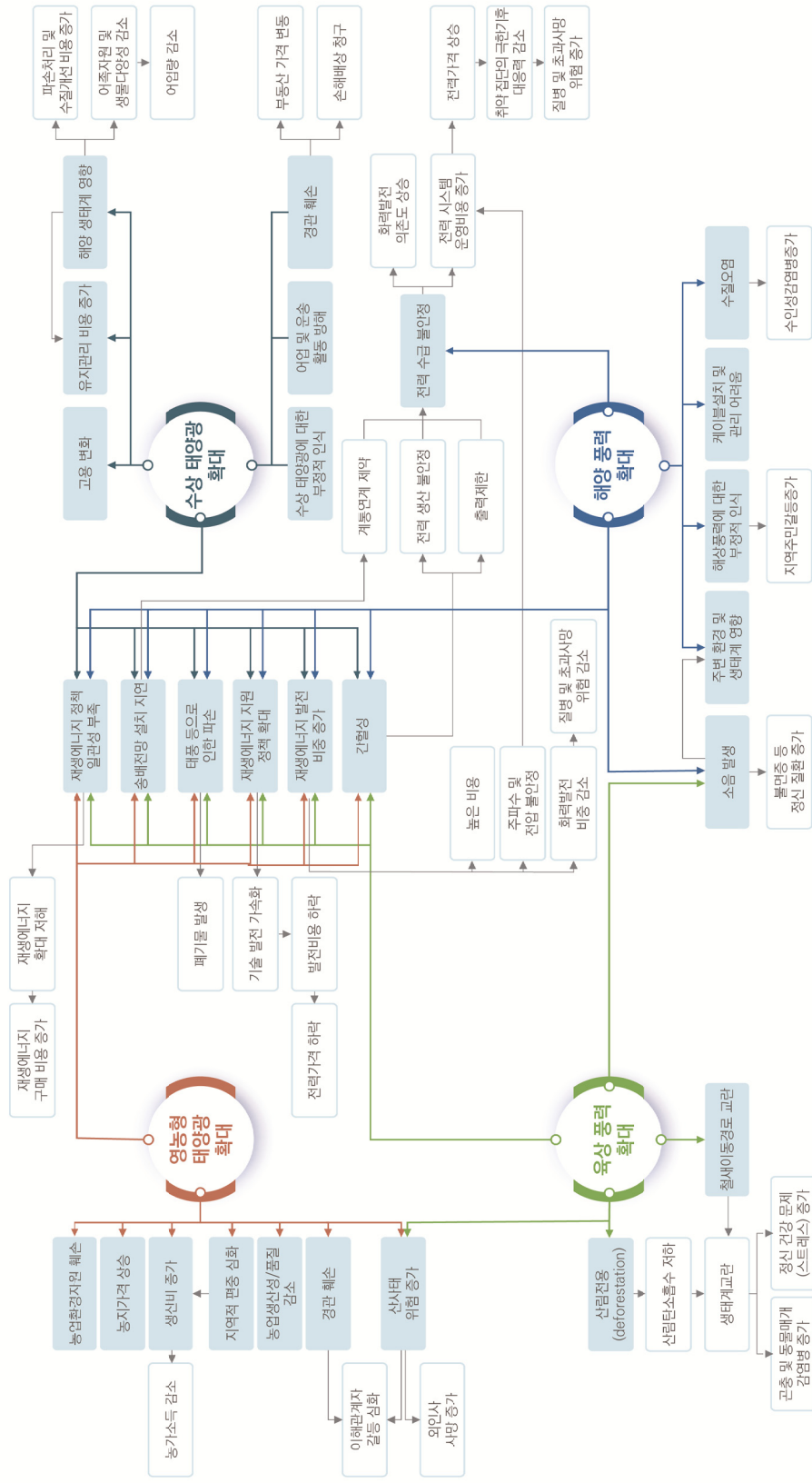
3. Analysis of transmission route and policy acceptability considering carbon neutrality implementation risk

3.1 Dissemination route considering carbon neutral implementation risk

The expansion of renewable energy generation facilities involves uncertainty in the implementation phase. Examples include lack of consistency in renewable energy policies, delays in transmission and distribution network installation, and intermittency issues. Agricultural solar power, floating solar power, onshore wind power, and offshore wind power are all vulnerable to uncertainties related to renewable energy policies and physical external influences such as typhoons, so these factors commonly served as major nodes. The problem of renewable energy intermittency leads to instability in power supply and demand, which leads to rising prices and negative health impacts on vulnerable groups. Meanwhile, expansion into renewable energy increases support for it and increases the proportion of renewable energy generation, which relatively reduces the proportion of thermal power generation and ultimately causes positive health effects. At the same time, there may be a positive effect of accelerating technological development and lowering electricity prices.

When looking only at the expansion of agricultural solar power, it is understood that negative impacts such as increased product costs and increased farmland prices are concentrated in the agricultural sector. It was found that the expansion of onshore wind power leads to ecosystem disturbance due to deforestation and disruption of migratory bird migration routes, leading to forestry and ecosystem issues being identified as major problems. The expansion of floating solar power has had a noticeable impact on the marine ecosystem, and it appears that negative impacts on fisheries may also occur. Water pollution and the impact on the surrounding ecosystem related to the expansion of offshore wind power were identified as major nodes.

All renewable energy power generation facilities ultimately led to worsening health and conflict issues for community members. The expansion of agricultural solar power and floating solar power commonly cause damage to the environment, which ultimately leads to community conflict issues, while the expansion of onshore and offshore wind power appears to commonly generate noise and cause mental illness problems. In addition, as power generation facilities expand, certain industries or sectors may take a hit, leading to a decrease in income. This phenomenon is very similar to the results obtained when Park Joo-young et al. (2023) analyzed the propagation path of climate risk. In other words, carbon neutral policies are being established and implemented to cope with the negative impacts of climate risks, but negative results inevitably occur due to these policies. This appears to require a balanced approach to solve the complex economic, social, and environmental problems caused by carbon neutral policy.



Source: Written by author

Figure 1 Carbon neutral implementation risk propagation route

3.2. Carbon neutral policy acceptability analysis

We conducted a perception survey targeting 500 people who have heard of carbon neutrality to determine the general public's understanding, trustworthiness, degree of impact, and possibility of carbon neutrality policies, and through this, we conducted a survey on climate change risk adaptation considering policy acceptability. We aim to provide basic data to suggest capacity building measures.

Regarding the possibility of achieving '2050 carbon neutrality', 30.2% of respondents responded 'high' and 61.2% responded 'low', indicating that they evaluated the possibility of achieving it as low. The achievability evaluation was analyzed as 2.23 points on average out of 4 points. Women (2.30 points) rated the possibility of achievement somewhat higher than men (2.16 points), and by age, those over 60 (2.37 points) rated it highest, followed by those in their 30s (2.30 points) and those in their 20s (2.20 points). It appeared. When looking at the area of residence, respondents living in the Chungcheong/Gangwon area rated the possibility of achievement highly, while respondents in the metropolitan area rated it the lowest.

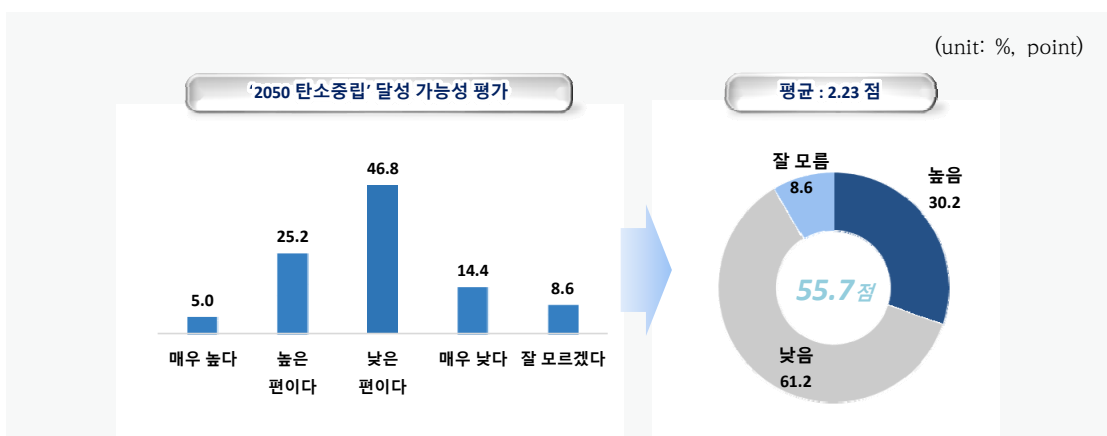
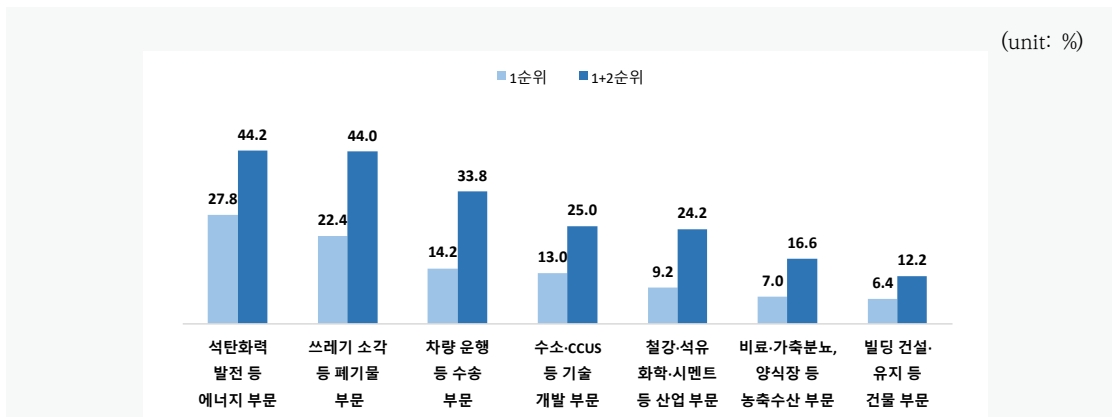


Figure 3 Assessing the possibility of achieving '2050 carbon neutrality'

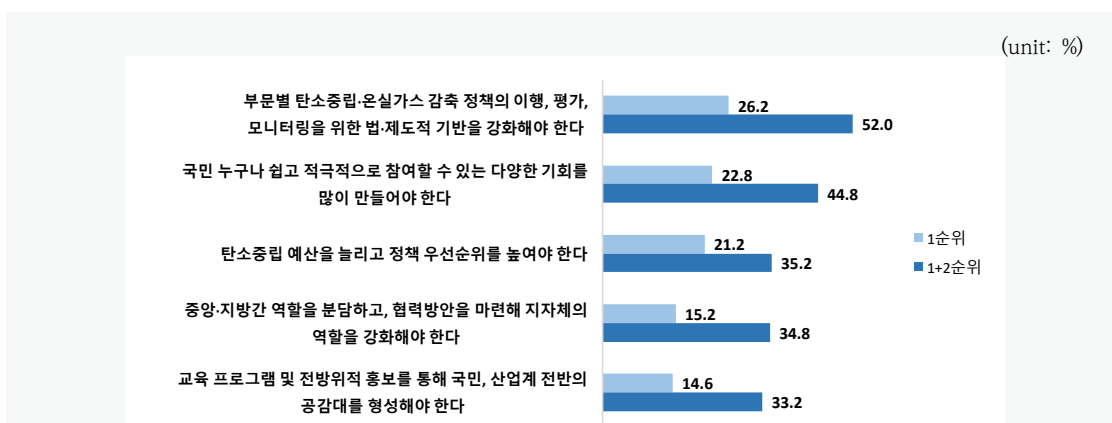
In order to achieve '2050 carbon neutrality', most people said that the 'energy sector such as coal-fired power generation' is important, followed by 'waste sector such as garbage incineration', 'transportation sector such as vehicle operation', and technological innovation such as 'hydrogen and CCUS'. Appeared in the order of sector, etc. It was found that men considered the 'energy sector, such as coal-fired power generation,' as the most important, while women considered the 'waste sector, such as waste incineration,' to be the most important. By age, most people considered the role of the energy sector to be the most important, while those in their 20s considered the waste sector to be relatively more important, and those in their 30s considered technology development such as hydrogen and CCUS to be relatively more important. Additionally, as age increases, opinions that the role of the energy sector is important tend to increase.



Source: Written by author

Figure 4 Important sectors to achieve '2050 carbon neutrality' – 1st and 2nd rankings

In order to achieve '2050 carbon neutrality', the most important government role at the moment was that 'the legal and institutional basis for implementation, evaluation, and monitoring of carbon neutrality and greenhouse gas reduction policies must be strengthened', followed by 'We must create many diverse opportunities where all citizens can easily and actively participate', and 'We must increase the carbon neutral budget and raise policy priorities', etc. Based on the first priority, men were most likely to say that 'the carbon neutral budget should be increased and policy priorities should be increased' as the most important government role at this point in order to achieve '2050 carbon neutrality', while women were most likely to say 'carbon neutrality and greenhouse gases by sector'. The most common opinion was that the legal and institutional foundation for implementing, evaluating, and monitoring gas reduction policies should be strengthened. By age, those in their 20s and 60s said, 'We need to create many diverse opportunities where all citizens can easily and actively participate,' those in their 30s and 50s said, 'Strengthen the legal and institutional base,' and those in their 40s said, 'Increase budget and raise policy priorities.' appeared to have the most responses.



Source: Written by author.

Figure 4 The most important government role in achieving '2050 carbon neutrality' – rankings 1 and 2

Keywords carbon neutrality, transition risk, renewable energy, climate change

저자약력

채여라

영국 University of Cambridge 경영학 박사
한국환경연구원 선임연구위원(현)
yrchae@kei.re.kr

주요 연구실적

- 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축 평가(2022)
- 기후변화에 따른 부문별 사회·경제적 피해비용 분석 연구(2022)
- 폭염·한파 분야 재해영향모델 고도화(2022)

박주영

한국환경연구원 연구위원(현)
jypark@kei.re.kr

문종우

한국환경연구원 부연구위원(현)
jwmoon@kei.re.kr

이정은

한국환경연구원 부연구위원(현)
jelee@kei.re.kr

최영웅

한국환경연구원 책임연구위원(현)
ywchoi@kei.re.kr

공현숙

한국환경연구원 전문연구위원(현)
hskong@kei.re.kr

박종철

공주대학교 지리학과 부교수(현)
jcp@kongju.ac.kr

서승범

서울시립대학교 국제도시과학대학원 조교수(현)
sbseo7@uos.ac.kr

성재훈

한국농촌경제연구원 연구위원(현)
jsung@krei.re.kr

안현진

한국농촌경제연구원 부연구위원(현)
hjan713@krei.re.kr