

미세먼지 계절관리제의 환경 편익 추정: 발전부문을 중심으로*

Assessment of Environmental Benefits related to Fine Dust Seasonal Management System in the Electrical Power Generation Sector

전호철**
Hocheol Jeon

요약: 정부는 미세먼지 고농도 시기 피해를 예방하기 위한 단기 대책의 일환으로 2019년 12월부터 2020년 3월까지 미세먼지 계절관리제를 도입·시행하였다. 산업, 수송, 생활 및 발전부문에 걸쳐 총 28개의 이행과제를 실시하였다. 하지만 국내에서 최초로 시행된 미세먼지 계절관리제의 편익에 대한 연구는 전무하였다. 본 논문에서는 미세먼지 계절관리제의 이행과제 중 정량화가 가능한 발전부문을 중심으로 정책의 효과를 평가하였다. 정책 시행에 따른 대기오염물질 배출량 변화는 전력시장 모의모형으로 통해 추정하였다. 배출량 변화에 따른 편익은 영향경로분석(Impact Pathway Analysis)을 통해 분석하였다. 추정결과 NO_x, SO_x 및 PM_{2.5}는 각각 약 6.4톤, 약 2.9톤, 약 0.25톤 감축되었으며 이로 인해 발생한 환경편익은 약 2,306억 원으로 추정되었다. 지역적으로는 석탄발전소가 밀집된 충남, 경남 및 인천 지역의 배출량이 크게 감소된 반면 환경 편익은 인구 밀집 지역인 수도권이 큰 것으로 분석되었다.
핵심주제어: 미세먼지 계절관리제, 영향경로분석, 전력시장 모의모형, 환경편익

Abstract: The government introduced and implemented the fine dust seasonal management system from December 2019 to March 2020 as a short-term measure to prevent damage during periods of high fine dust concentration. A total of 28 implementation tasks were established across the industry, transportation, life, and power generation sectors. In this paper, I focus on quantifiable policies in the power generation sector. First, using the electricity market simulation tool, I estimated the change in the air pollutants emissions due to the fine dust seasonal management system. I found a significant reduction in air pollutant emissions in the power generation sector from December 2019 to March 2020: NO_x, SO_x, and PM_{2.5} were reduced by an estimated 6.4 tons, 2.9 tons, and 0.25 tons, respectively. As a consequence, the environmental benefits are estimated to be about 230.6 billion won through the framework of the impact pathway analysis. I also found that air pollutant emissions are significantly reduced in places where coal power plants are concentrated, like Chungnam, Gyeongnam, and Incheon, and the environmental benefits are immense in such densely populated metropolitan areas.

Key Words: Fine-dust season management system, Impact Pathway Analysis, Electricity Market Simulation Tool, Environmental Benefits

* 본 논문은 한국환경연구원 연구과제(환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구)의 주요 결과를 수정·보완하여 작성하였으며 충남대학교(교육·연구 및 학생지도비)에 의해 지원되었음을 밝힌다.

** 주저자 및 교신저자, 충남대학교 경제학과 조교수

I. 서론

코로나-19가 전 세계의 모든 이슈를 잠식하기 전 우리나라의 가장 큰 사회문제 중의 하나는 미세먼지 해결에 있었다. 2019년 실시된 국민환경 의식조사에 따르면 국민들의 약 75.7%가 국내 대기질에 대해 불만족스럽다고 응답하였다(김현노 등, 2019). 코로나-19 이후 국민들은 ‘쓰레기/폐기물 처리’가 우리 사회가 직면한 가장 큰 환경문제라고 지적하고 있다. 하지만 여전히 다음 순위로 대기오염 및 미세먼지 문제가 우리 사회가 해결해야 한 매우 중요한 문제로 인식되고 있다(안소은 등, 2021). 코로나-19로 중국을 비롯한 인접 국가는 물론 국내 역시 경제활동에 제약이 생겨 일시적으로 대기환경이 개선되는 효과가 있었다.¹⁾ 다만 이러한 현상은 근본적인 개선이라기 보기는 어렵다. 따라서 그간 국내에서 실시되었던 미세먼지 감축 정책의 효과를 검토하여 향후 정책 수립에 있어 효과성을 높일 필요가 있다.

미세먼지는 건강에 대한 영향과 함께 다양한 형태의 사회경제 및 생태적인 부작용을 불러 일으킨다. 특히 초미세먼지는 만성폐쇄성질환, 천식, 기관지염과 같은 호흡기 질환과 함께 폐암, 심혈관 질환 등 심각한 건강상의 영향과 함께 심리적 및 사회적 영향도 함께 불러일으킨다(Manisalidis, Stavropoulou, Stavropoulos, and Bezirtzoglou, 2020; Braithwaite, Zhang, Kirkbride, Osborn, and Hayes, 2019). 또한 초미세먼지는 야외 노동자 뿐만 아니라 실내 노동자의 생산성에도 부정적 영향을 미치며 이는 경제적 손실을 초래하는 결과를 낳게 된다(Chang, Zivin, Gross, and Neidell, 2016). OECD(2016)에 따르면 대기오염은 2060년 기준 연간 세계 GDP의 1% 수준의 손실을 유발할 것으로 전망하였다. 특히 한국은 OECD 회원국 중 최고 수준인 GDP의 0.63% 손실이 있을 것으로 추정하였다.

초미세먼지를 비롯한 대기오염으로 인한 피해를 줄이기 위해서는 장기

1) 코로나-19가 발생하기 이전인 2018년 서울 지역의 연간 평균 초미세먼지(PM2.5)는 $23\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였던 반면 2020년의 경우 $21\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개선되었다(환경부, 「대기환경연보」).

적으로 에너지 및 산업구조 전환, 배출 기준 강화 등을 통해 점진적으로 줄이는 방안과 함께 단기적으로는 미세먼지 고농도 시기에 강화된 정책을 통해 인간의 건강과 생태계의 피해를 최소화하여야 한다 (관계부처 합동, 2019). 정부는 고농도 시기의 피해를 예방하기 위해 단기 대책의 일환으로 2019년 12월부터 2020년 3월까지 미세먼지 계절관리제를 도입·시행하였다. 미세먼지 계절관리제는 대기오염물질 배출량이 많으며 대기 중 정체가 심한 겨울과 봄철의 고농도 현상을 집중적으로 관리하는데 목표가 있다. 주요 정책으로는 석탄화력발전 가동 중단 및 상한제약, 배출가스 5등급 차량 수도권 운행제한, 수도권 및 6개 특광역시 소재 공공기관 차량 2부제 실시 등이 있다.

환경부의 분석에 따르면 제1차 계절관리제 시행으로 초미세먼지 평균 농도가 전년 동기 대비 약 27% 개선되었으며 배출량 측면에서는 약 2만 2천톤 감축된 것으로 추정하였다.²⁾ 하지만 이러한 정부의 분석은 계절관리제가 시행된 시기와 유사한 시기와의 단순 비교의 결과로서 엄밀한 의미의 정책효과로 평가할 수는 없다. 왜냐하면 정책의 순효과를 추정하기 위해서는 정책 이외의 요인에 대한 통제가 필요하기 때문이다.

본 논문에서는 미세먼지 계절관리제의 일환으로 시행된 28개의 이행과제 중 정량적으로 분석 가능한 발전부문의 석탄화력발전 가동중단 및 상한제약에 집중하여 정책효과를 분석하였다. 총 28개의 과제 대부분은 정보 공개 및 감시·단속의 강화와 같이 독립적인 영향을 정량적 분석은 어렵다. 하지만 발전부문의 계절관리제는 정책의 대상이 명확하며 정량적 분석을 위한 충분한 자료가 존재한다.

본 연구에서는 국내 전력시장의 특징을 활용하였다. 국내 전력시장은 변동비 반영 발전 시장(Cost Based Generation Pool, CBP)으로 시장에 참여한 발전회사들의 발전기들이 발전변동비를 기준으로 비용최소화 원리를 통해 운영되고 있다.³⁾ 따라서 전력시장의 판매자인 발전사의 시장 참여 과

2) 환경부 보도자료 (2020.5.12.)

3) 전력거래소 홈페이지(<https://new.kpx.or.kr/menu.es?mid=a10401010000>)

정에서 입찰 전략을 배제할 수 있어 발전기의 물리적 특성과 비용자료가 있다면 발전기별 발전량을 전력시장과 동일하게 모의할 수 있다. 또한 유럽과 같은 전력시장과 달리 다른 전력계통과 연결되어 있지 않은 독립계통으로 모의에 필요한 자료를 확보하기 유리하다는 장점이 있다. 따라서 전력시장 모의모형을 통해 발전부문의 미세먼지 계절관리제의 세부 시나리오를 제약사항으로 설정하여 정책에 따른 발전량 및 대기오염물질 배출량 변화를 추정하였다. 더불어 대기오염물질이 최종적으로 수용체에 미치는 영향의 변화, 즉 편익을 추정하기 위해 영향경로분석(Impact Pathway Analysis, IPA)를 적용하여 분석하였다. 대기오염물질이 대기 중으로 배출되면 기상 및 풍향 등의 영향을 받아 이동하며 대기 중 화학반응과 함께 누적되는 특성이 있어 배출량 뿐만 아니라 주변의 기상여건 및 인접 지역의 대기오염물질 배출량 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다(문난경·서지현, 2020). 영향경로분석은 대기오염물질이 오염원으로부터 배출되어 이동 및 화학반응, 수용체에 미치는 영향 및 이에 대한 화폐가치를 포함하는 분석방법이다. 그간 국내에서 대기오염물질 배출에 따른 피해 혹은 정책의 편익 산정시 국외 연구 결과를 편익이전(benefit-transfer)하여 적용하는 피해비용접근법을 활용하였다. 피해비용접근법은 간편하다는 장점이 존재하지만 개별 정책의 특징이나 지역적 차이를 고려하지 못하는 한계가 존재한다. 본 논문은 대기오염물질 배출에 대한 영향경로분석 관련 국내에서 연구된 결과를 활용하여 발전 부문의 미세먼지 계절관리제의 편익을 추정하였다는 점에서 그간 국내에서 진행되었던 연구와 차별화된다.

분석결과 2019년 12월~2020년 3월까지의 발전부문의 계절관리제 시행으로 인해 대기오염물질별 감축량은 NO_x, SO_x 및 PM_{2.5}는 각각 약 6.4톤, 약 2.9톤, 약 0.25톤 감축되었으며 이로 인한 편익은 약 2,306억 원으로 추정되었다. 발전부문의 계절관리제 핵심은 석탄발전량 제한하는 것이다. 따라서 발전부문 계절관리제로 인하여 석탄발전소가 밀집된 충남, 경남 및 인천 지역의 대기오염물질 배출량 감소되었다. 석탄발전소 밀집 지역의 배출량 감축에 따른 편익은 인구 밀집지역인 서울 및 경기도가 큰 것으

로 추정되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 연구의 배경과 관련 선행 연구를 살펴보았다. 제3장에서는 분석방법을 소개하였으며, 제4장에서는 분석결과를 제시했다. 마지막으로 제5장에서는 결론 및 시사점을 도출하였다.

II. 연구배경 및 문헌연구

국내에서는 겨울과 봄철에는 난방에너지 수요의 증가로 인한 대기오염 물질 배출 증가와 더불어 서풍계열의 대기정체가 함께 발생하여 고농도 현상이 발생한다 (환경부, 2019). 미세먼지 계절관리제도는 이러한 이유로 고농도 발생 일수가 높은 12월부터 이듬해 3월까지 강화된 미세먼지 저감 및 관리를 하는 것을 말한다. 2019년 12월부터 2020년 3월까지 첫 번째로 시행이 되었으며 산업, 수송, 생활 및 발전부문의 총 28개의 이행과제가 추진되었다.⁴⁾ 산업, 수송 및 생활부문의 주요 대책은 감시 및 관리의 강화로 그 효과를 정량적 분석이 어려움이 있다. 반면 발전부문의 계절관리제 대책은 정책의 대상이 되는 석탄 화력을 비롯한 발전소의 발전량 및 그에 따른 대기오염물질 배출 정보가 상세히 공개되어 있으며 특히 정책의 효과로 나타나는 배출량 감소를 비교적 정확하게 추정할 수 있다. 이에 본 연구에는 계절관리제의 대책은 발전부문을 정책효과를 분석하였다.

발전 부문의 계절관리정책을 자세히 살펴보면 크게 석탄발전기의 가동 중단과 석탄발전의 출력을 80% 수준으로 감소시키는 출력 제한으로 구분할 수 있다. 전력수요가 높은 겨울철(19.12~20.2월)에는 8~15기를, 상대

4) 환경부 보도자료(2020.5.13.), 산업부문은 불법 배출 측정값 조작을 집중감시하고 자발적 협약을 통해 대형 사업의 추가 감축 유도하는데 초점이 있으며 수송 부문의 대책은 배출가스 5등급 차 운행 제한, 공공기관 차량 2부제, 노후 건설 기계 사용제한 및 선박 저속 운항 등이 있다. 생활 부문에서는 도로, 공사장 및 농촌 부문의 배출원 집중관리 등이 주요 대책이다. 생활 부문에서는 도로, 공사장 및 농촌 부문의 배출원 집중관리 등이 주요 대책이다.

적으로 난방용 전력수요가 작은 봄철(20.3)에는 21~28기의 가동을 중단하였다. 또한 출력 제한은 겨울철에는 최대 49기, 봄철에는 최대 37기에 대해 시행하였다.

석탄발전은 상대적으로 낮은 연료비용으로 안정적으로 전력을 공급할 수 있다는 장점으로 인해 국내는 물론 국외에서도 주요 발전원으로 역할을 하고 있다.⁵⁾ 하지만 타 에너지원에 비해 온실가스 및 대기오염물질 배출량 많아 높은 외부비용을 발생시킨다. 석탄발전 등 화석연료 사용에 따른 대기오염물질이 발생시키는 외부효과에 대해 다양한 연구들이 진행되었다. Muller and Mendelsohn(2007)은 통합평가모형을 활용하여 대기오염물질로 인한 인간의 건강 및 조기사망, 농업, 숲, 건물 부식, 가시거리 및 여가 활동에 미치는 영향으로 인한 편익 감소를 추정하였다. Amster(2019)는 문헌연구를 통해 석탄발전으로 인해 아동의 호흡기 환(천식, 만성 호흡계 질환), 심혈관계 질환, 폐암과 방광암 등 암질환, PAH 노출로 인한 DNA의 변이 및 이에 따른 뇌발달 문제, 사망률 변화, 치아 불소증, 조산율 및 저체중 출산 등에 영향을 있음을 보였다. Wu et al.(2019)는 2005년부터 2020년까지 중국의 석탄발전소 데이터를 활용하여 배출량을 제한하는 정책의 효과를 배출량 및 대기질 변화와 이에 따른 건강영향을 분석한 결과 18만 6,800명의 조기사망이 줄었다고 추정하였다. Yang and Chou(2018)는 미국 뉴저지주의 석탄발전소 폐지로 인하여 저체중아 출산 및 조산 가능성이 각각 15% 및 28% 감소하였음을 보였다. 국외 선행연구들은 정책의 효과를 단순히 배출량 감축 분석을 넘어 수용체의 영향을 함께 살펴보았다는 특징이 있다.

석탄발전량 감축 정책효과에 대한 국내 연구로 이동규·성재훈(2018)은 노후 석탄발전소의 가동 중단 효과를 이중차분법(Difference-in-Difference)을 활용해 분석하였다. 계절관리제에 관한 국내 연구로는 김부권·원두환(2021)이 계절관리제 효과로 인한 발전사별 석탄발전량 변화를 합성대조

5) 석탄발전은 국내 발전원 중 비중이 가장 높고 총 미세먼지의 9.2%, 온실가스의 29.9%를 차지하고 있다(국가기후환경회의, 2020).

법(synthetic control method)으로 분석하였다. 계량경제학 방법론으로 정책효과를 분석하는 방법은 비교적 적은 정보의 양으로 시행할 수 있다는 장점이 있는 반면 설명변수에 대한 적절한 통제가 없다면 편의(bias) 발생의 우려가 있다. 특히 충분한 표본수가 확보되지 않거나 통제군(control group)과 처치군(treatment group)이 적절히 설정되지 않는 경우 정책효과 분석에 오류가 발생할 가능성이 있다 (Abadie and Cattaneo, 2018). 반면 김윤하 외(2021)은 수송부문의 계절관리제 효과를 대기질 모형을 통해 분석하였다. 다만 대기오염물질 정책효과 분석에 있어 가장 중요한 배출량 변화는 자료의 한계 등으로 인해 단순한 시나리오 형태로 가정하였다.

정책효과 분석에 있어서 중요한 점은 정책 이외의 변수가 미치는 영향을 통제하여야 한다는 것이다. 예를 들어 계절관리기간(19.12~20.3)에는 코로나19의 영향, 온화한 기온 등으로 인해 전년 혹은 평년 대비 전력 및 도시가스 등 난방용 에너지 사용량이 감소하였다. 전력의 경우 계절관리기간에 전년 동기 대비 약 1.84%, 도시가스의 경우 약 5.22% 감소하였다.⁶⁾ 이는 기상여건과 함께 코로나19로 인한 에너지 수요량 감소 등 복합적인 영향의 결과로 볼 수 있다. <표 1>은 계절관리제 기간의 총 발전량과 발전원별 발전량을 나타내고 있다. 2020년 2월을 제외한 기간은 전년 동월 대비 발전량이 감소하였다.⁷⁾ 계절관리제의 대책인 석탄발전기의 가동 중단이나 출력제한 없이도 전년 동기에 비해 대기오염물질 배출량이 감소하게 된 것이다. 이에 대한 통제 없이 단순히 전년 동기 대비 감소된 대기오염물질 배출량을 정책효과로 추정한다면 정책 효과를 과대 추정될 우려가 있다. 계절관리제의 효과로 줄어든 석탄발전량은 다른 발전원으로 대체되는데 발전시장 특성상 주로 LNG 복합발전이 이를 담당하게 된다. 계절관리제가 시작된 2019년 12월의 총 발전량은 전년 동월 대비 약 3.0%

6) 한국전력공사의 전력통계속보(2019.4, 2020.4) 및 국가에너지통계종합정보시스템(KESIS)의 에너지통계월보(2020.11) 자료를 활용하여 저자 계산.

7) 2020년은 윤년(leap year)으로 2월 29일이 있어 전년 동월대비 총 전력 수요량이 증가한 것으로 파악된다.

줄어든 가운데, 석탄발전이 약 11.1% 감소한 반면 LNG 발전은 약 14.7% 증가하였으며, 2020년 1~3월 모두 2019년 1~3월에 비해 LNG 발전량이 증가했음을 볼 수 있다. 이에 반해 석탄발전량은 감소된 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 총 전력수요량이 감소한 효과와 정책 효과가 혼재된 결과라고 할 수 있다.

〈표 1〉 계절관리제 기간('19.12~'20.3)의 발전원별 발전량 변화(전년동월대비)

단위: %

날짜	총 발전량	석탄	원자력	LNG
2019.12	-3.0	-11.1	-11.0	14.7
2020.1	-5.7	-8.5	-2.9	8.6
2020.2	4.4	-12.8	15.0	19.2
2020.3	-2.2	-17.6	3.1	11.1

자료: 한국전력공사 월별 전력통계속보('19.12~'20.3)

정책효과를 산정하기 위해서는 가동 중단과 출력 제한으로 인해 변화된 발전원 구성의 차이에 따른 대기오염물질 배출량 차이를 산정하여야 한다. 국내 전력시장은 변동비 반영(CBP: Cost-Based Pool) 시장으로, 시장에 참여한 발전기들의 발전변동비를 기준으로 경쟁한다.⁸⁾ 따라서 국내 전력시장은 발전변동비를 구할 수 있는 자료, 즉 발전기의 물리적 특성과 비용 자료가 있으면 발전사의 시장 참여과정을 현행 전력시장과 동일하게 모의할 수 있다. 1차적인 정책의 효과, 즉 정책에 따라 발전기별 발전량의 변화는 전력시장 모의모형에 제약조건을 추가함으로써 추정할 수 있다. 변화된 발전량에 발전소별 배출계수를 활용하여 대기오염물질 배출량을 산정할 수 있다.

대기오염물질 배출량의 변화는 대기 중 미세먼지 농도를 변화시키며 이는 결국 인간과 생태계에 영향을 미친다. 이와 같이 정책에 따른 대기오염

8) 해외의 전력시장은 대체로 가격입찰제도(PBP: Price-Based Pool)의 성격을 가지고 있다. 이러한 발전시장에서는 다양한 입찰전략이 존재하여 전력시장을 단순한 모형으로 모의하기가 매우 어렵다. 이러한 복잡성의 이유로 해외 전력시장을 모의하는 모형으로 최근에는 머신러닝이나 행위자기반모형(Agent-Based Modeling)이 활용되기도 한다 (Tsefatson, 2018; Jarvis, Deschenes, and Jha, 2022).

물질 배출에서 최종적으로 수용체에 미치는 영향을 화폐적가치로 추정하는 방법론을 영향경로분석(Impact Pathway Analysis)라고 한다. 그간 국내에서는 대기오염물질 배출에 따른 피해비용산정은 ExternE 프로젝트(Bickel and Friedrich, 2005), Parry, Heine, Lis, and Li (2014) 등 해외 연구의 결과를 편익 이전(benefit-transfer)하는 방법을 활용하였다.⁹⁾ 하지만 대기오염물질이 배출되어 수용체 미치는 영향은 지리적 영향 및 기상여건에 따른 대기질 농도의 변화 뿐만 아니라 인구분포 등 사회경제적 특성에 의해 결정된다. 따라서 편익이전 방법으로 추정된 피해비용은 이러한 개별 사회 및 국가의 특성을 반영하지 못하는 한계점이 존재한다. 본 연구에서는 그간 국내에서 진행되었던 영향경로분석방법에 관한 연구 결과를 종합하여 미세먼지 계절관리제의 정책효과 추정에 적용하였다.¹⁰⁾

III. 분석방법

정책효과 분석에 있어 중요한 점은 정책 이외의 변수가 미치는 영향을 통제하여야 한다는 것이다. 대기환경은 대기오염물질 배출 뿐만 아니라 기상여건에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 에너지 사용량에 따라 결정되는 배출량 정책효과 외에 역시 기온이나 경제 변수에 영향을 받게 된다. 따라서 정책 이외의 효과를 구분하는 것이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 전력시장 모의모형을 통해 계절관리제 시행을 전력 시장에 주어진

9) 편익이전은 크게 가치이전(value transfer)와 함수이전(function transfer)로 구분된다. 해외 연구의 피해비용을 국내에 적용하는 대부분의 연구는 가치이전 방법을 활용하였다.

10) 안소은 등(2019)는 정책분석에 활용할 수 있는 대기오염물질별 단위 피해비용을 도출하였다. 대기확산을 엄밀한 대기질 모형(CMAQ: Community Multi-scale Air Quality Model)을 통해 도출한 결과를 활용하였다는 점과 대기오염물질로 인한 피해의 화폐가치화 단계에서 다양한 연구에서 비롯된 사망위험 감소가치를 제시한 최초의 연구로 평가할 수 있다. 다만 안소은 등(2019)는 전국을 대상으로 평균적인 미세먼지 전환율을 이용하여 피해비용을 도출하여 국내의 화력발전소에 대한 지역적 특성을 고려할 수 없다는 한계가 있다.

제약 조건으로 설정하여 배출량을 추정하였다. 또한 정책으로 인한 대기 오염물질 배출량 차이의 효과를 고려하기 위해 대기질모델의 결과를 활용하여 영향경로분석을 실시하였다.

1. 전력시장 모의모형 (Electricity Market Simulation Tool)

계절관리제효과를 산정하기 위해서는 정책으로 인해 감축되는 배출량을 추정하여야 한다. 감축된 배출량은 김부권·원두환 (2021)와 같이 계량경제학적 방법론적인 접근방법을 통해 정책으로 인한 석탄발전량의 감소를 추정할 수 있다. 하지만 국내 전력시장은 변동비 반영(CBP: Cost-Based Pool)을 원칙으로 한다. 즉, 가동 가능한 발전기 중 변동비가 낮은 순으로 발전 우선 순위를 정해 전력 수요량에 대응하는 방식이다. 총 전력수요량과 기술 및 정책적 제약하에서 비용최소화를 달성하는 방식이다. 더불어 국내 전력시장은 한국전력이 유일한 판매업자이며 독립계통의 특성을 가져 발전기의 특성 및 비용 자료를 활용해 실제와 동일한 수준으로 모의할 수 있다. 다시 말해 전력시장 모의모형에서 계절관리제와 같은 정책을 제약사항으로 두고 비용최소화에 따른 개별 발전기의 발전량을 산정할 수 있다. 이렇게 도출된 발전량과 정책제약이 없는 상태에서 도출된 발전량의 차이를 정책효과로 정의할 수 있다. 전력시장 모의 모형의 개요는 다음과 같다.¹¹⁾

$$\min \sum_{g \in G} \sum_{t \in T} [(NLPC_g u_{gt} + LPC_g p_{gt} + QPLC_g p_{gt}^2) + SUC_g v_{gt}] \quad \text{식 (1)}$$

식(1)은 연료비용과 기동비용 최소화를 나타내고 있다. 위 식에서 g, t 는 각각 발전기와 시간을 의미한다. $NLPC_g$ 는 발전기 g 의 가격상수, LPC_g 와 $QLPC_g$ 는 발전기 g 의 증분가격의 1차와 2차 계수, SUC_g 는 발전기 g 의 기동비용을, u_{gt}, p_{gt} 및 v_{gt} 는 발전기 g 의 시간 t 에 대한 기동상태 더미변수,

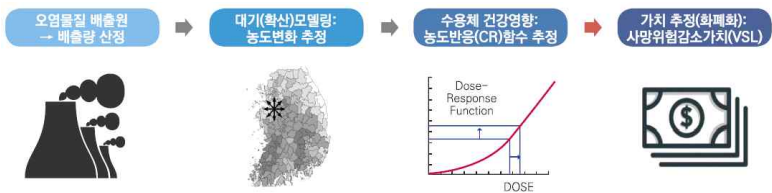
11) 본 논문에서 활용된 전력시장 모의모형에 대한 자세한 사항은 Song, Kim, Kim, Jin, and Yoon(2018)을 참고하기 바란다.

최소출력을 초과한 발전량, 운전 시작여부 더미변수를 나타낸다. 주요 제약조건으로는 계통 제약, 발전기 운전 제약이 있다.¹²⁾ 계절관리제는 석탄 발전량은 운전제약에서 추가적인 제약조건을 두는 방식으로 모의하였다.

2. 영향경로분석(Impact Pathway Analysis)

대기오염물질 배출량 변화는 대기 중 미세먼지 농도의 변화를 가져오고 이러한 변화는 인간의 생명에 영향을 주게 된다. 최종적으로는 조기사망 자 수의 변화를 화폐적 가치로 산정하여 편익을 추정하게 된다. <그림 1>은 영향경로분석(Impact Pathway Analysis)의 접근방법의 개요를 나타내고 있다.

<그림 1> 대기오염물질의 영향경로분석 개요



자료: 안소은·문난경·김진옥·조윤랑(2019), p.3.

첫 번째 단계는 계절관리제에 따른 대기오염물질의 배출량의 변화는 전력시장 모의모형을 통해 도출된 발전기별 발전량 변화에 배출계수를 적용하여 추정된다. 두 번째 단계의 배출된 대기오염물질의 확산 및 화학반응을 고려하기 위해 문난경·서지현(2018)에서 도출한 배출원-수용지 행렬(Source-Receptor Matrix, SR)을 적용하였다.¹³⁾ 문난경·서지현(2018)는

12) 입력 자료는 크게 발전기의 물리적 특성, 연료비용, 수요예측, 예비력 운영기준, 신재생에너지 발전량, 정책 설정 등이 있다. 비용최소화에 원리에 입각한 전력시장모의모형에 대한 자세한 사항은 안영환(2017), Song et al. (2018), 김용건(2019) 등에서 확인할 수 있다. 개별모형별 세부 사항은 다소 차이가 있으나 제약하의 비용최소화 원리를 실현한다는 점은 동일하다.

13) 문난경·서지현(2018)은 널리 사용되는 광화학 모델인 CMAQ(Community Multi-Scale Air Quality)을 바탕으로 BFM(Brute Force Method)을 적용하였다.

전국 17개 지자체별 오염원 및 대기오염물질별 PM_{2.5} 농도 전환율 제시하였다. 본 연구의 주요 분석 대상이 되는 석탄발전소의 위치는 충남에 50%, 경남에 23%로 지역적 편중이 심해 지역별 특성을 고려하는 것이 매우 중요하다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 배출원의 위치의 차이는 대기오염물질이 배출되어 대기 중 화학반응 및 이동에 따라 노출되는 인구의 차이로 인해 피해의 양상이 매우 달라지며 이는 결국 최종적인 화폐적 편익에 있어서도 상당한 차이를 유발하는 원인이 된다 (전호철, 2017). 다만 SR 행렬을 이용한 대기오염물질 배출이 대기농도에 미치는 영향의 분석은 분석기간의 기상 및 다른 요인의 배출량 등을 평균적인 수준에서만 반영이 가능하다는 한계가 존재한다. 하지만 개별 정책별 대기질 모델링을 통한 결과 도출에는 많은 시간과 전문적 지식이 필요하다. 이러한 점에서 S-R 행렬 혹은 단순화된 방식의 대기질 모델링을 통한 간소화된 복잡성 모형(Reduced-Complexity Model) 접근방법이 다양한 정책의 사전 혹은 사후 평가를 위해 널리 이용되고 있다 (Gilmore et al., 2019). 예를 들어 Muller and Mendelsohn(2013)은 가우시안 플럼모델을 통해 도출된 S-R 행렬을 적용한 경우와 대표적인 대기화학수송모형인 CMAQ 모형의 대기질 예측력을 비교한 결과 큰 차이나 체계적인 오차가 발생하지 않았음을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용한 영향경로분석 역시 S-R 행렬을 이용하는 간소화된 복잡성 접근법으로 구분될 수 있다.

영향경로분석의 세 번째 단계는 대기중 PM_{2.5} 변화가 인한 수용체에 미치는 영향을 추정하는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 인간의 조기사망만을 대상으로 하였다. 미세먼지로 인한 조기사망과의 관계, 즉 농도반응(CR: Concentration-Response)함수는 국내외 연구에서 널리 이용되었던 Hoek et al.(2013)의 연구결과를 적용하였다. 마지막으로 대기오염으로 인한 피해를 화폐가치화하는 단계이다. 조기사망에 대한 화폐가치의 개념은 사망위험 감소가치(VSL: Value of a Statistical Life)이다.¹⁴⁾ 사

14) 사망위험 감소가치는 '통계적 생명가치'라는 용어로도 잘 알려져 있다. 다만 통계적 생명가치는 용어가 가지는 의미에 대해 잘 이해하지 못하는 비전문가들이 생명에 대한 가격으로 해석하는 문제가 발생하였다. 하지만 사망위험감소가치는 1단위 조기

망위험감소가치는 추정 방법론 및 대상에 따라 큰 편차를 보이는 것이 일반적이다. 따라서 대부분의 영향경로분석에서는 선행연구들을 종합해 메타분석을 통해 도출된 값을 이용한다. 국내의 메타연구는 신영철·김정수·고도현·이정우·이규명(2017) 및 안소은 등(2018) 등이 있다. 다만 사망위험감소 가치를 추정한 국내 선행연구가 많지 않아 해외 연구를 편익이전한 값과는 큰 차이를 보인다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 OECD (2012)의 메타분석 결과값을 편익이전한 약 38.9억원을 적용하였다.

3. 분석시나리오

본 논문의 분석 대상 기간은 최초로 계절관리제가 시행되었던 2019년 12월부터 2020년 3월까지이다. 앞서 언급한 바와 같이 발전부문 계절관리제는 석탄화력발전소의 가동 중단 및 그 외 석탄화력발전소의 출력을 80% 수준으로 가동하는 것으로 나누어진다.¹⁵⁾ 발전부문의 계절관리제 수단은 앞서 설명한 전력시장 모의모형의 제약조건으로 주어지게 되는데, 본 연구에서는 개별 대책별 효과를 검토하기 위해 계절관리제를 노후 석탄화력 가동 중단과 출력제한(80%)으로 구분하여 효과를 추정하였다. 실제 발전량, 즉 계절관리제의 두 가지의 대책이 모두 시행된 경우를 기준 시나리오(BAU)로 하여 다음과 같이 시나리오를 설정하였다.

- 실적치(BAU): 계절관리제 정책(노후 석탄화력발전소의 가동 중단 + 출력 제한)
- 시나리오 A: 출력 제한만 적용

사망을 회피하기 위해 지불하고자 하는 금액으로 정의될 수 있다. 이러한 정의를 고려하여 Freeman III, Herriges and Kling(2014), Cameron(2010) 및 EPA에서는 “willingness to swap(WTS)”, “value of mortality risk(VMR)” 등을 제안하였으며, 김현노 등(2019)은 영문명은 그대로 사용하되 한글해석을 사망위험 감소가치로 제시하였다(전호철, 2020).

15) 다만 계절관리제 역시 전력수급안전을 전제로 하여 전력수급상황에 어려움이 있는 경우는 계절관리제의 원칙과 다르게 운용될 수 있다.

- 시나리오 B: 노후 석탄화력 발전기의 가동 중단만 적용
- 시나리오 C: 미세먼지 계절관리제 정책이 없는 경우

발전부문 계절관리제의 효과를 추정하기 위해서는 총 수요량을 고정하는 것 뿐만 아니라 계절관리제 이외의 정책효과 역시 통제되어야 한다. 대표적으로 계절관리제 시행 이전 이미 겨울철과 봄철에 고농도 미세먼지가 발생하는 경우 석탄발전이 제한되었고 봄철에는 노후 석탄발전이 가동 중단되었다. 따라서 계절관리제 이외의 정책효과를 통제하기 위해 모든 시나리오에서 봄철 노후 석탄 4기의 가동 중단을 실시하는 것으로 설정하였다. 또한 예방정비 역시 계절관리제 시행과 관계없이 실시되는 것이므로 정책효과에서 제외하였다.

IV. 분석결과

총 4가지의 시나리오 중 BAU 시나리오, 즉 실적치는 각 발전소별 대기 오염물질 배출량 실적치를 사용하였다.¹⁶⁾ 다른 정책 시나리오는 전력모의 모형을 통해 도출된 발전량과 각 발전소별 배출계수를 활용하여 산정하였다.¹⁷⁾ <표 2>는 시나리오에 따른 대기오염물질 배출량 추정 결과를 보여준다.

16) 대기환경보전법 제32조에 따라 석탄 및 유류발전소는 NO_x, SO_x 및 TSP, LNG 발전은 NO_x에 대해 굴뚝원격감시체계(TMS)를 통해 측정하고 있다. 굴뚝원격감시체계에서 측정되는 세가지의 대기오염물질 이외 CO, VOC, NH₃ 및 BC 등은 대상에서 제외하였다. 이는 본 연구의 대상이 되는 석탄발전의 경우 VOC 및 NH₃의 배출량이 상대적으로 적을뿐더러 최종적으로 도출하고자 하는 인간의 조기사망에 따른 화폐적 가치에 미치는 영향이 매우 미미하기 때문이다.

17) 개별 발전기의 배출계수는 2018년 한국전력통계의 발전량 자료와 굴뚝원격감시체계(CAPSS 2018)의 대기오염물질 배출량 자료를 활용하여 도출하였다.

〈표 2〉 시나리오별 대기오염물질 배출량 분석결과(2019년 12월~2020년 3월)

시나리오	NO _x (kg)	SO _x (kg)	PM _{2.5} (kg)
BAU (계절관리제 시행)	11,539	19,115	565
시나리오 A (출력 제한)	14,680	20,419	672
시나리오 B (가동 중단)	14,130	20,335	687
시나리오 C	17,977	22,070	815
(정책효과) 시나리오 C - BAU	6,438	2,955	250

계절관리제의 정책효과로 인해 감축된 대기오염물질, NO_x, SO_x 및 PM_{2.5}는 각각 약 6.4톤, 2.9톤, 0.25톤 으로 추정되었다. 개별적인 정책효과
의 경우 노후 석탄발전기의 가동중단 보다 출력 제한의 효과가 큰 것으로
분석되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 이미 봄철 노후 발전기 4기
및 예방정비로 13~16기가 가동 중단되었고 계절관리제로 추가 가동 중단
된 석탄발전기는 2~8기로 제한적이었기 때문이다.

〈표 4〉은 발전 부문의 계절관리제 시나리오에 따른 최종 환경피해 비용을
영향경로분석에 근거하여 추정한 결과를 나타낸다.¹⁸⁾ 최종 정책효과로
볼 수 있는 시나리오 C에서 BAU를 차감한 최종 환경편익은 약 2,306억
원으로 추정되었다.¹⁹⁾ 대기오염오염물질별로는 SO_x 배출량의 감축으로
인한 환경편익이 가장 컸는데, 이는 계절관리제로 인해 감소되는 석탄발
전량의 대부분을 LNG 발전이 대체하게 되는데 LNG 발전의 NO_x 배출량
이 상대적으로 크기 때문이다.²⁰⁾

18) 본 논문의 환경피해비용 산정에 적용된 단위 피해비용은 각 배출지역별(광역시도
별) 차이가 있다. 이는 영향경로분석이 가지는 특징이다. 다만 전국 평균에 해당하는
단위 피해비용은 안소은 등 (2018)에서 확인할 수 있다.

19) 본 연구는 대기오염물질 배출 감소로 인한 환경편익만을 대상으로 하였다. 다만 온
실가스 배출량 감소로 인한 편익 증가는 IWG(2016)의 결과를 활용하여 산정하면 약
5,419억 원으로 추정되었다. 이는 대기오염물질 감축에 따른 환경편익에 비해 상당
히 큰 것을 확인할 수 있다.

20) 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 TMS를 통해 측정 가능한 대기오염물질만을 대
상으로 환경피해비용을 추정하였다. 따라서 석탄발전을 대체하는 LNG 발전의 SO_x
는 없는 것으로 산정하였다. 다만 LNG 발전의 경우 국가 배출계수를 이용하더라도
SO_x 배출량이 석탄발전에 비해 매우 적어 큰 영향이 없다.

〈표 3〉 시나리오에 따른 환경피해비용 산정결과

(단위: 억원)

시나 리오	SOX			NOX			PM2.5			합계		
	Lower	Mean	Upper	Lower	Mean	Upper	Lower	Mean	Upper	Lower	Mean	Upper
BAU	1,447	2,181	2,916	1,059	1,597	2,134	957	1,442	1,928	3,463	5,220	6,977
시나 리오 A	1,780	2,683	3,585	1,238	1,866	2,494	1,123	1,692	2,261	4,140	6,240	8,341
시나 리오 B	1,780	2,683	3,586	1,227	1,849	2,471	1,169	1,761	2,354	4,175	6,293	8,411
시나 리오 C	2,187	3,297	4,406	1,438	2,167	2,897	1,368	2,063	2,757	4,993	7,527	10,060
시나 리오 C - BAU	740	1,116	1,491	379	571	763	411	620	829	1,530	2,306	3,082

앞서 살펴본 바와 같이 영향경로분석은 크게 네 단계로 구분되며, 각 단계별 불확실성 존재한다. 예를 들어 배출량 산정시 측정 및 배출계수의 불확실성, 대기확산은 대기질 모델링이 가지는 불확실성이 존재한다. 더 불어 대기오염으로 인한 인간의 조기 사망을 설명하는 농도반응함수 역시 높은 불확실성을 가지며 화폐가치화 수단인 사망위험감소가치 역시 매우 높은 수준의 불확실성이 존재한다. 따라서 영향경로분석이 가지는 단계별 불확실성을 모두 반영하는 것은 현실적으로 불가능하며 환경피해비용을 추정하는 의미가 없어진다. 본 연구에서는 농도반응함수가 가진 불확실성만을 반영하여 최종 결과를 도출하였다.²¹⁾ 그럼에도 불구하고 최종 환경편익의 범위는 1,530~3,082억 원으로 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 대기오염물질의 배출 후 지역 간 이동을 반영하였다. 다시 말해 충남, 경남 및 인천 등 석탄발전소가 위치한 지역에서의 배출량 감소가 다른 지역으로 이동 및 화학반응을 통한 PM2.5 농도 변화를 반영하며 이에 따른 건강영향 및 화폐가치화된 편익을 추정하였다. 〈그림 2〉는 계절관리제 기간 발전부문에서 유발하는 환경피해비용과 계절관리제로 인한 편익을 나타내고 있다. 발전부문의 대기오염물질 배출로

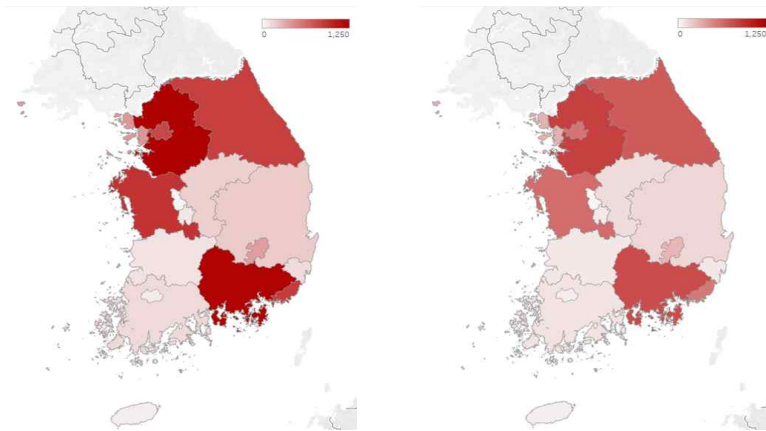
21) 〈표 4〉에 제시된 Lower, Mean, Upper 값은 본 논문에서 적용된 Hoek et al.(2013)의 농도반응함수의 계수 추정치의 95% 신뢰구간의 하한값과 상한값을 적용하여 도출되었다.

인한 피해는 석탄발전소가 집중적으로 위치한 충남지역과 더불어 인구 밀집 지역인 수도권의 피해가 크게 나타났다.²²⁾ <그림 2>의 아래 패널은 계절관리제(노후석탄 가동중지 및 출력제한)로 발생한 환경편익을 나타내고 있다. 발전 부문 미세먼지 계절관리제로 인한 환경적인 편익 역시 석탄발전소가 위치한 지역과 더불어 수도권에서 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

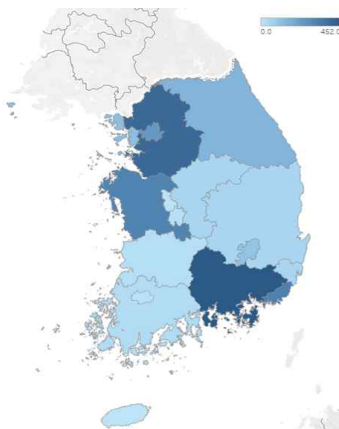
〈그림 2〉 발전 부문 미세먼지 계절관리제에 따른 환경피해 및 편익 변화

〈시나리오 C: 계절관리제 시행되지 않았을 경우 환경피해 비용〉

〈BAU: 계절관리제 시행 시 환경피해 비용〉



〈발전 부문 계절관리제로 인한 편익 (시나리오 C-BAU)〉



22) 총 환경피해의 크기는 수용체, 즉 인구가 많이 거주하는 지역에서 높게 나타난다.

V. 결론 및 시사점

본 논문에서는 미세먼지 고농도 대책의 일환으로 2019년 12월~2020년 3월에 국내에서는 최초로 시행된 미세먼지 계절관리제의 대책 중 정량화 가능한 발전부문의 정책효과를 검토하였다. 정책효과 분석에 있어 가장 유의해야 할 점은 정책 이외의 효과를 통제해야 한다는 점이다. 정책효과 분석에 흔히 사용되는 계량경제학 기법으로는 이중차분(DID: difference-in-difference), 성향점수매칭(PSM: propensity score matching), 합성대조법(synthetic control method) 등의 방법을 통해 정책 이외의 효과를 제거한다(Jha and Muller, 2018; Yang and Chou, 2018; 이동규·성재훈, 2018; 김부권·원두환, 2021). 하지만 본 연구의 대상인 국내 발전 부문은 각 발전기의 변동비용에 근거하여 비용최소화 원리에 의해 작동하는 시장이다. 따라서 전력시장 모의 모형을 통해 정책의 효과에 미치는 영향을 계량경제학적 방법과 비교해 보다 정확하게 통제할 수 있다. 예를 들어 코로나19로 인한 총 전력수요량 변동 및 기온효과 등이 이에 해당한다고 할 수 있다. 미세먼지 계절관리제의 1차적인 목적은 대기오염물질 배출량 감축에 있다. 하지만 정책의 효용성을 검토하기 위해서는 비용 및 편익의 관점에서 평가되어야 한다. 이에 본 논문에서는 대기환경정책을 평가하는 도구인 영향경로분석방법으로 미세먼지 계절관리제의 편익을 추정하였다. 특히 발전소의 위치적 특성을 고려하기 위해 지역별 대기오염물질의 이동 및 화학반응을 S-R 행렬을 적용하여 분석하였다.

분석결과 2019년 12월~2020년 3월까지 최초로 시행된 발전 부문의 미세먼지 관리제의 효과로 대기오염물질별 감축량은 NO_x, SO_x 및 PM_{2.5}는 각각 약 6.4톤, 약 2.9톤, 약 0.25톤 감축되는 것으로 분석되었다. 지역별로는 석탄발전소가 위치한 충남, 경남 및 인천 지역의 배출량이 감소되었고 이를 통해 환경피해의 감소, 즉 정책편익은 약 2,306억 원으로 추정되었다. 대기오염물질의 배출 및 정책으로 인한 감소는 석탄발전소가 위치한 지역에서 두드러졌지만 환경피해의 감소는 서울 및 경기 지역에서 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 수도권에 많은 인구가 대기오염 감축

으로 인한 수해를 받기 때문이다.

본 연구는 미세먼지 감축 정책의 효과를 추정하기 위해 영향경로접근법에 기초하여 분석하였다는 의의가 있다. 그간 대기오염물질 감축 정책에 대한 효과 분석이 다양한 형태로 진행되었으나 단순히 배출량 변화 등을 파악하는 수준이었다. 혹은 국외에서 연구된 단위 오염물질당 피해비용을 편익이전하여 국내에 적용한 피해비용접근법이 대부분이었다. 모든 공공 정책은 비용 집행의 합리성, 즉 비용-편익의 관점에서 파악되어야 한다. 이러한 점에서 본 연구는 미세먼지 관리 정책의 비용-편익을 위한 방법론적 틀을 제공하고 있다. 다만 본 연구의 미세먼지 정책의 수혜자, 다시 말해 미세먼지로 인해 피해가 발생하는 수용체를 인간의 조기 사망만을 대상으로 하였다는 한계가 존재한다. 이로 인해 미세먼지 계절관리제의 편익이 과소 추정된 측면이 있다. 이를 보완하기 위해서는 미세먼지 농도에 따른 건강 영향을 분석할 수 있는 농도반응함수 등의 연구가 필요하다. 더불어 수용체를 확대하여 여가수요, 농작물, 산림 및 건물 등에 대한 정책의 편익을 산정하기 위한 별도의 연구나 국내외 선행연구의 결과를 편익이전을 통해 시장적 및 비시장적 가치에 대한 추정치 도출하는 향후 연구가 필요하다.

■ 참고문헌 ■

- 김부권·원두환, 2021, “미세먼지 계절관리제로 인한 발전사별 전력생산량 변화 분석”, 『자원·환경경제연구』, 30(4), pp.627-648.
- 김용건·구윤모·김동우·이원종·양유경, 2019, 「혼합정수계획법을 이용한 발전부문 온실가스 감축 잠재력 평가」, 1-67, 세종: 한국환경연구원.
- 김윤하·김은혜·강윤희·유승희·배민아·손규원·김순태, 2021, “계절관리제 기간 수도권 경유차 배출에 의한 PM2.5 농도 영향”, 『Journal of Korean Society for Atmospheric Environment』, 37(1), pp169-190.
- 김현노·안소은·김충기·전호철·정다은·이홍림·홍현정·한선영·최병웅·최새미, 2019, 「환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구」, 1-191, 세종: 한국환경연구원.
- 문난경·서지현, 2018, 「환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영:

- 지자체별 오염원별물질별 미세먼지 기여도 및 전환율 산정», 1-117, 세종: 한국환경연구원.
- 신영철·김정수·고도현·이정우·이규명, 2017, 「화학물질 관리를 위한 사회경제성 분석 기반 구축(I)」, 1-223, 국립환경과학원.
- 안소은·김현노·김충기·서양원·정다운·전호철·이승준·김진옥·이홍림·홍현정·윤태경·박윤선·엄영숙·강완모·송용식·최새미, 2018, 「환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구», 1-196, 세종: 한국환경연구원.
- 안소은·문난경·김진옥·조윤량, 2019, 「PM2.5 조기사망의 대기오염물질·오염원별 피해 비용 산정», KEI 포커스, 7(6), pp 1-16.
- 안소은·이홍림·박윤선·오치옥·이재혁·권영한·김현노·최새미, 2021, 「환경·경제 통합 분석을 위한 환경가치 종합연구», 1-170, 세종: 한국환경연구원.
- 안영환, 2017, 「석탄발전소의 좌초자산 조건 연구», 1-84, 에너지경제연구원.
- 이동규, 성재훈, “노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 발전소 주변지역의 초미세먼지 농도 감소효과 분석”, 「자원·환경경제연구», 제27권 제2호, 2018, pp. 315~337.
- 전호철(2020), “선택실험법을 활용한 통계적 생명가치의 추정”, 자원·환경경제연구, 29(2), pp.247-270.
- Abadie, A. and Cattaneo, M. D., 2018, “Econometric Methods for Program Evaluation”, *Annual Review of Economics*, 10(1), pp.465-503. DOI: 10.1146/annurev-economics-080217-053402.
- Amster, E., 2019, “Public health impact of coal-fired power plants: a critical systematic review of the epidemiological literature”, *International Journal of Environmental Health Research*, 16(11) pp.1-11. DOI: 10.3390/ijerph16112008
- Amster, E., and Levy, C. L., 2019, “Impact of coal-fired power plant emissions on children’s health: A systematic review of the epidemiological literature”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(11), 1-11. DOI: 10.3390/ijerph16112008
- Braithwaite, I., Zhang, S., Kirkbride, J. B., Osborn, D. P. J., and Hayes, J. F., 2019, “Air pollution (Particulate matter) exposure and associations with depression, anxiety, bipolar, psychosis and suicide risk: A systematic review and meta-analysis”, *Environmental Health Perspectives*, 127(12), DOI: 10.1289/EHP4595.
- Bickel P., and Friedrich R., 2005, ExternE. Externalities of energy. Methodology 2005 update. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

- Cameron, T. A., 2010, "Euthanizing the value of a statistical life", *Review of Environmental Economics and Policy*, 4(2), pp.161-178.
- Chang, T., Zivin, J. G., Gross, T., and Neidell, M., 2016, "Particulate pollution and the productivity of pear packers", *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3), 141-169. DOI: 10.1257/pol.20150085.
- Freeman III, A.M., Herriges and J.A., Kling, C.L., 2014, *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*, Third. ed. Resources for the Future.
- Gilmore, E. A., Heo, J., Muller, N. Z., Tessim, C. W., Hill, J. D., Marshall, J. D., and Adams, P. J., 2019, "An inter-comparison of the social costs of air quality from reduced-complexity models", *Environmental Research Letters*, 14(7), 074016, pp.1-13, DOI: 1748-9326/ab1ab5..
- Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., and Kaufman, J. D., 2013, "Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: A review", *Environmental Health*, 12(1). DOI: /10.1186/1476-069X-12-43
- IWG: Interagency Working Group, 2016, *Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866*, Office of Management and Budget, Washington, DC.
- Jarvis, S., Deschenes, O., and Jha, A., 2022, "The private and external costs of Germany's nuclear phase-out", *Journal of the European Economic Association*, 20(3), 1311-1346, DOI: 10.3386/w26598
- Jha, A. and N. Z. Muller, 2018, "The local air pollution cost of coal storage and handling: Evidence from US power plants", *Journal of Environmental Economics and Management*, 92, pp.360-396, DOI: 10.1016/j.jeem.2018.09.005
- Leigh Tesfatsion, "Electric Power Markets in Transition: Agent-Based Modeling Tools for Transactive Energy Support" [(Preprint), (ScienceDirect)], Chapter 13 (pp. 715-766) in Cars Hommes and Blake LeBaron (Eds.), *Handbook of Computational Economics 4: Heterogeneous Agent Models*, Handbooks in Economics Series, North Holland (Elsevier), Amsterdam, the Netherlands, 2018, DOI: 10.1016/bd.hescom.2018.02.004
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., and Bezirtzoglou, E. (2020), "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review", *Frontiers in Public Health*, 8(February), 1-13. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- Muller, N. Z. and Mendelsohn, R., 2007, "Measuring the damages of air pollution in

- the United States", *Journal of Environmental Economics and Management*, 54(1), pp.1-14, DOI: 10.1016/j.jeem.2016.12.002.
- Muller, N. Z. and Mendelsohn, R., 2012, *Using marginal damages in environmental policy: a study of air pollution in the United States*, AEI Press, Washington, D.C.
- OECD, 2016, *The economic consequences of outdoor air pollution*. OECD Publishing.
- Parry, I., Heine, D., Lis, E., and Li, S., 2014, *Getting Energy Prices Rights: from Principle to Practice*, Washington, D.C.
- Song, Y. H., Kim, H. J., Kim, S. W., Jin, Y. G., and Yoon, Y. T., 2018, "How to find a reasonable energy transition strategy in Korea?: Quantitative analysis based on power market simulation", *Energy Policy*, 119(December 2017), 396-409, DOI: 10.1016/j.enpol.2018.05.002
- Wu, R., Liu, F., Tong, D., Zheng, Y., Lei, Y., Hong, C., Li, M., Liu, J., Zheng, B., Bo, Y., Chen, X., Li, X., and Zhang, Q., 2019, "Air quality and health benefits of China's emission control policies on coal-fired power plants during 2005-2020", *Environmental Research Letters*, 14(9), 094016, pp.1-11, DOI: 1748-9326/ab3bae
- Yang, M. and S. Y. Chou, 2018, "The impact of environmental regulation on fetal health: evidence from the shutdown of a coal-fired power plant located upwind of New Jersey", *Journal of Environmental Economics and Management*, 90, pp.269-293, DOI: 10.1016/j.jeem.2018.05.005

전호철: 미국 Iowa State University에서 경제학 박사학위를 취득하였으며 현재 충남대학교 조교수로 재직 중이다. 관심 연구 분야는 환경재화에 대한 가치평가, 기후변화, 대기오염 등 에너지 및 환경경제 등이다(hcjeon@cnu.ac.kr).

투 고 일: 2022년 07월 20일
심 사 일: 2022년 08월 10일
게재확정일: 2022년 08월 24일