

## 산업부문 온실가스 탈동조화 변화요인 분석

### Decomposing the Decoupling between GHG Emissions and Value Added of Industry Sectors

진태영\* · 김도원\*\*

Taeyoung Jin · Dowon Kim

**요약:** 본 연구에서는 국내 산업별 온실가스 배출량 및 에너지 소비량, 실질 부가가치 자료를 활용하여 1990년부터 2018년까지 산업별 온실가스 배출량과 실질 부가가치 간의 탈동조화 경향을 분석하였다. 또한 온실가스 탈동조화 지수의 변화요인을 에너지원단위 변화요인과 배출계수 변화요인으로 나누는 로그평균 Divisia 지수(LMDI) 분석을 활용하여 산업부문의 온실가스 탈동조화의 변화요인을 살펴보았다. 분석 결과, 우리나라의 온실가스 배출량과 경제성장 간의 탈동조화는 2000년대에 가장 심화되었다. 이러한 경향성은 에너지 다소비 업종과 수송부문에서 가장 두드러졌으며, 탈동조화의 변화요인은 주로 에너지원단위 개선 효과인 것으로 보인다. 마지막으로, 고부가가치 산업인 상업 및 공공서비스 부문의 경우 배출계수 변화 효과로 인해 온실가스 배출량 동조화 경향성이 뚜렷해지고 있는 것으로 나타났다.

**핵심주제어:** 온실가스 탈동조화, 분해분석, 산업별 온실가스 배출량, 에너지원단위

**Abstract:** We analyze the decoupling index between greenhouse gas (GHG) emissions and real value-added, using domestic GHG emissions, energy consumption, and real value-added data by sector from 1990 to 2018. The log mean Divisia Index (LMDI) analysis is applied to decompose the decoupling index into energy intensity and emission change factors. Korea's decoupling of GHG emissions and economic growth intensified in the 2000s, mainly induced by the energy-intensive and transportation sectors. In addition, the main driving force behind the decoupling index was derived from the energy intensity improvement effect. Finally, the emission factor change effect in the commercial and public service of high value-added industry makes GHG emissions and economic growth more deeply intertwined.

**Key Words:** GHG Decoupling, Decomposition Analysis, Ghg Emissions by Industry Sector, Energy Intensity

\* 주저자, 에너지경제연구원 부연구위원

\*\* 교신저자, 에너지경제연구원 부연구위원

## I. 서론

International Energy Agency(IEA)(2020a) 에 따르면 기존 정책 유지 시, 2030년 전 세계 이산화탄소배출량은 36Gt에 달할 것으로 예측된다. 기후변화 심각성에 대한 전 세계의 관심이 날로 높아지면서 전 세계의 주요국들은 기후변화에 대응하기 위해 지속적인 협력체계를 구축해왔다. 2015년 파리협정에서 다시 한 번 기후변화 대응에 대한 공감대를 재확인 하는 계기를 마련했다. 이에 더하여 유럽의 주요국들이 탄소를 완전히 배출하지 않겠다는 '탄소중립'을 법제화하며 기후변화에 적극적으로 대응을 시작하였다(유정민·김정아, 2020).

우리나라도 파리협정에서 2030년까지 BAU(business-as-usual) 대비 온실가스를 37% 감축하겠다는 계획을 설정하였다(환경부, 2016). 최근 수정된 기후변화대응 기본계획에서는 온실가스 감축목표 총량은 유지하되 국내 감축분 목표를 25.7%에서 32.5%로 상향하기도 하였다(관계부처합동, 2019). 아울러 2050년까지 탄소중립을 실현하겠다는 목표를 천명하는 등 전 지구적 기후변화 대응에 발맞추어 나가고 있다(관계부처합동, 2020).

이러한 목표를 달성하기 위해 우리나라 정부는 목표관리제와 배출권거래제와 같은 제도들을 도입하였다. 그뿐만 아니라 한국판 그린뉴딜이라는 비전을 제시함으로써 산업부문의 탈탄소화를 유도하고 있다. 성장을 저해하지 않으면서 탈탄소화를 이뤄내는 것을 핵심 목표로 산업부문을 다양한 정부 정책으로 지원할 것을 약속했다(산업통상자원부, 2020).

핵심 목표에서도 드러나듯 온실가스 감축이 경제성장을 저해한다면 과도한 사회적 비용을 발생시켜 정책의 효과성이 사라질 것이다. 이러한 우려 속에서 탄소 감축과 경제 체질 개선이 동시에 이뤄지는 대표적인 사례로 몇몇 유럽국가들에서 나타난 탄소배출과 경제성장의 탈동조화 경향에 대한 관심이 급부상했다(이상준, 2017). 이에 우리나라도 경제와 탄소배출의 탈동조화 가능성에 대한 다양한 연구들을 수행하며 향후 정책 추진방향 및 과제에 대한 시사점을 모색하고 있다.

또한, 한국의 탄소중립 정책에서 주목할 점은 에너지 공급 측면의 전략을 강조하고 있다는 것이다. 기존 에너지 공급 체계를 재생에너지와 그린 수소 중심으로 전환한다는 내용이며 에너지 소비와 경제성장 간의 탈동조화를 달성하는 전략이라고도 볼 수 있다(관계부처합동, 2020). 이는 경제 성장과 탄소배출의 탈동조화 논의 이전에 있었던 에너지-경제성장 탈동조화에 대한 관심을 다시 환기시키는 것이라 할 수 있다. 에너지 소비는 탄소배출과 직결되는 것으로 탄소중립을 위해서는 현시점 우리나라의 에너지 소비와 경제성장의 탈동조화 단계를 점검해볼 필요가 있다.

위에서 언급한 바와 같이 안정적 경제성장을 바탕으로 탄소중립을 달성하기 위해서는 탈동조화가 필수적이다. 정부가 탄소중립을 달성하겠다고 명언함으로써 탈동조화 현상이 그저 진단하고만 끝낼 대상이 아니라 반드시 달성해야 할 목표가 되었다. 이를 효율적으로 달성하기 위해서는 먼저 탈동조화의 현주소를 자세히 파악하는 것이 우선이다. 산업부문별 탈동조화 정도를 검토하여 해당 부문에 알맞은 정책적 요소를 투입해야 하기 때문이다.

기존의 거시적인 방식을 통해 국가 단위로 탈동조화 현상을 검토하는 연구들은 많이 수행되어왔다. 이러한 결과들을 부문별 정책요소 투입에 활용하기에는 한계가 있다. 국가 단위로 보았을 때 비슷한 수준의 탈동조화 경향을 보인다고 해도 국가별 산업구조는 매우 다른 양상을 보이기 때문이다. 이에 본 연구에서는 우리나라 산업별 탈동조화 정도를 살펴보려 한다. 이를 통해서 우리나라 탈동조화 달성 가능성 및 시사점을 살펴보는 것을 목적으로 한다.

이 연구는 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 선행연구들에 대해 간략히 소개하고 본 논문의 차별점에 대해 언급한다. 제3장에서는 자료와 연구 방법론에 대해 설명하고, 제4장에서는 연구결과에 대해 분석한다. 제5장에서는 연구 내용을 요약하고 시사점을 제시한다.

## II. 선행연구

환경오염과 경제성장 간의 분석은 환경 쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC) 가설을 기반으로 상당히 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 쿠즈네츠 곡선이란 경제가 성장하면서 탄소배출량이 같이 증가하다가 일정 소득수준 이상에서는 탄소배출량이 줄어든다는 가설이다. 대표적으로 정용훈·김수이(2012)에서 한국의 에너지 믹스를 주요 결정요인으로 활용하여 EKC 가설 검정을 시도하였고, 온실가스 배출량과 경제성장 간의 역 U자 형태 곡선의 존재를 확인하였다. 한편, 신범철(2013)은 아시아국가들 전체를 대상으로 경제성장과 온실가스 배출의 관계를 분석했을 때에는 EKC 가설을 지지하지 않는다는 결과를 도출하기도 했다.

김현석(2015)은 NAFTA 지역을 대상으로 하여 경제성장과 자유무역협정이 이산화탄소 배출량에 미치는 영향을 실증분석을 수행하였다. 대부분의 지역에서 경제성장이 이산화탄소 배출량에 영향을 주는 것을 확인하였다. 진세준 등(2016)의 연구는 시계열 분석기법을 활용해 필리핀의 경제성장으로부터 온실가스 배출량에 강한 단방향 인과관계를 가진다는 증거를 제시하였다. 진태영·김진수(2017)도 패널 분석기법을 활용하여 경제성장과 이산화탄소 배출량 간의 상관관계를 분석하였는데, 경제성장이 이산화탄소 배출요인으로 작용한다는 결과를 도출하였다.

위의 선행연구들은 환경오염의 대리변수인 이산화탄소 혹은 온실가스 배출량을 가설에 기반해 실증분석을 하거나, 환경적 영향 평가를 위한 모형(e.g. IPAT)에 기반해 경제성장과 환경오염 간의 상관관계 유무를 분석했다. EKC가설의 지지여부 혹은 경제성장이 온실가스 배출량에 미치는 영향도 등에 대한 의견은 연구마다 조금씩 차이가 있다. 그러나 위와 같은 환경오염과 경제성장 관련 연구들이 공통적으로 경제성장이 온실가스 배출의 주요인임을 밝히고 있다는 점을 주목해볼 필요가 있다.

온실가스 탈동조화란 온실가스 배출량과 경제성장의 경로가 분리되는 현상을 뜻한다. 온실가스 배출량과 경제성장 간의 탈동조화 연구는 경제

성장이 온실가스 배출량을 이끈다는 전제하에 두 변수의 거동이 달라지는 정도를 주로 논의한다.

조용성(2017)은 전력산업에 한정해 온실가스의 배출요인을 분석하였다. 특히 발전부문에서 온실가스 배출량과 발전량 간의 탈동조화 현상이 발생하고 있다는 것을 밝혀내었고, 에너지 전환이 효율적으로 이루어지고 있음을 보였다.

김대수·이상엽(2019)은 온실가스 배출량과 경제성장 간의 탈동조화를 장·단기로 나누어 분석하였으며, 탈동조화 지수를 활용해 오차수정모형을 구성한 결과, 국가별로 탈동조화 정도와 경제성장 상황에 따라 총 여섯 가지로 분류하였다. 이를 통해 탈동조화 진입 단계에 대한 정책 제언을 했다. 하지만, 탈동조화 지수 자체에 대한 정량적인 분석을 하지 못했다는 한계가 있었다.

임형우·조하현(2019)은 동태적 패널분석법을 활용하여 세계 주요국들의 탈동조화 지수를 계산한 후, 탈동조화 정도의 결정요인에 대해 분석하였다. 개별 국들에 대한 거시적인 접근을 시도했다는 점에서 의의가 있다. 임형우·조하현(2020)은 또한 동일한 방법론을 활용하여 주요국의 교통부문에 대해 탈동조화 지수 결정요인을 분석하였다. 이를 통해 에너지 전환이 탈동조화 국면 달성에 미치는 효과를 알아보았으며, 우리나라의 경우 탈동조화가 진행되고는 있지만 선진국에 비해 수송 부문의 탈동조화 정도가 약하며, 수송부문의 에너지 전환을 더욱 적극적으로 추진할 필요가 있다는 결론을 내리기도 했다.

이상준(2017)의 연구에서도 주요국의 온실가스 배출량과 경제성장의 탈동조화를 거시적으로 분석하였다. 특히, 제조업 위주 산업구조인 국내와 비슷한 독일의 사례로부터 산업구조의 변화보다는 고부가가치화 및 에너지 효율 개선이 필요할 것이라 제언했다.

본 연구에서는 좀 더 세부적인 관점에서 탈동조화에 대한 논의를 진행하고자 하며, 특히 국내 산업부문에 초점을 맞춰 분석했다는 점에서 위 선행 연구들과 차별점을 가진다.

국외에서도 탈동조화에 대한 연구는 활발히 진행 중이다. De Freitas and Kaneko(2011)은 브라질의 경제에 대해 온실가스 배출량 변화요인을 분석하고, 온실가스 배출량과 경제성장 간의 탈동조화 지수를 계산하였다. Xie et al.(2019)도 중국의 전력 부문에서 탈동조화 지수를 계산하여 분석하였다. 1985년부터 2016년까지의 기간에 탈동조화 경향성이 약했다가 점차 강해졌다는 것을 발견했다. 그리고 에너지원단위와 에너지 소비 간의 탈동조화가 점차 진행되었고 경제 규모와 전력화 수준은 탈동조화를 억제하는 요인이었다는 것을 밝혀냈다. Engo(2018)의 연구에서도 De Freitas and Kaneko(2011)와 유사한 연구 방법론이 적용되었다. 카메룬의 이산화탄소 배출량과 경제성장 간의 탈동조화 현상을 분해분석 하였는데, 일반적으로 사용되고 있는 가법적 이산화탄소 배출량 변화요인 분해분석에 경제 전반의 탈동조화 지수를 곱해준 형태로 산업구조 효과나 에너지 소비구조 효과를 고려했다. 하지만 경제 전반의 탈동조화 지표가 오히려 구조 효과 관련 요소를 상쇄시킬 수 있다는 한계점이 있다. 본 연구에서는 이 부분을 개선하기 위해 경제 전반의 분해분석보다는 산업별 변화요인 연구에 초점을 맞추었다.

부문별 연구가 없었던 것은 아니다. Wang and Wang(2019)에서는 상업, 주거, 수송, 산업의 4개의 부문으로 나눠 탈동조화 정도를 검토했다. 산업부문이 탈동조화의 주요인이며 수송부문이 탄소감축을 저해하는 요소임을 밝혔다. 또한 R&D 원단위 및 효율성이 탈동조화에 기여한다는 것을 보였다. 서론에서 밝힌 바와 같이 이 논문에서는 정책요소 투입을 염두에 둔 탈동조화 진단에 초점을 맞췄다. 그래서 Wang and Wang(2019)에서 밝혀진 바대로 탈동조화에 가장 많은 기여를 하는 산업 부문을 선택하였으며 더 세분화하여 탈동조화의 정도를 파악하였다.

### Ⅲ. 자료 및 방법론

#### 1. 분석 자료

본 연구에서는 기존의 온실가스과 경제성장 간의 탈동조화 지수 분석과 다르게 산업별로 탈동조화 효과를 살펴보고자 하였으며, 간단한 연쇄법칙(chain rule)을 활용해 경제성장과 에너지 소비량 간의 탈동조화 효과를 함께 고려하였다. 산업별 분석을 위해서는 부문을 통일하여 산업별/연도별 온실가스 배출량과 에너지 소비량, 부가가치 자료를 작성할 필요가 있다.

온실가스 배출량 자료는 에너지 부문과 산업공정, 탈루가스 등을 상세히 기록하고 있는 온실가스종합정보센터(<https://www.gir.or.kr>)의 온실가스인벤토리 보고서를 참고하였다(온실가스종합정보센터, 2019). 국내 에너지 소비량의 경우 진태영 등(2020)과 마찬가지로 1차 에너지 공급 자료를 활용하고자 IEA(2020b)의 World Energy Balances로부터 에너지 공급(Total Energy Supply, TES)<sup>1)</sup> 및 산업부문별 최종에너지 소비(Total Final energy Consumption) 자료를 활용하여 전환 부문에서 손실된 에너지 투입량을 역산, 산업부문별 에너지 공급량 자료를 작성하였다.

온실가스과 경제성장 간의 탈동조화 지수를 산업별로 살펴보기 위해 산업부문별 실질 부가가치 자료가 필요한데, 실질 부가가치 자료는 국가통계포털(<https://www.kosis.kr>)에서 수집하였다. 국가 온실가스 인벤토리와 IEA의 에너지 밸런스, 실질 부가가치 자료는 서로 다른 산업부문 분류체계를 가지고 있기 때문에 상기 언급한 대로 부문을 통일할 필요가 있다. 에너지 밸런스와 실질 부가가치의 부문 분류체계 동일은 이미 선행 연구에서 많이 이루어져 온 바 있으며(박성준·김진수, 2014; 진태영·김진수, 2020; 진태영 등, 2020), 본 연구에서는 선행연구의 부문 분류체계를 사용하여 국가 온실가스 인벤토리의 부문을 통일한다.

〈표 1〉에 본 연구에서 사용한 자료의 산업부문 분류 체계가 나와 있다.

1) World Energy Balances 2020년 버전부터 1차 에너지 총공급(Total Primary Energy Supply, TPES)의 용어를 에너지 총공급(TES)으로 바꾸어 표현하고 있다.

선행 연구에서는 총 14가지의 생산부문 분류를 사용하였지만, 온실가스 인벤토리와 분류체계가 상이하여 통합하기 어렵거나 분석에 오류를 유발할 수 있다고 판단되는 부문인 광업은 제외하였다. <표 1>의 IEA(2020b) 13가지 생산부문 분류를 사용하며, 제외된 부문은 표의 아래쪽에 따로 표기하였다. 본 연구의 범위 내에 포함된 에너지 소비량과 실질 부가가치, 온실가스 배출량은 모든 부문을 포함하고 있지 않으므로 국가 전체의 통계와는 상이할 것이다.

<표 1>에 따르면 운송장비 제조업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, 전기장비 제조업, 기계 및 장비 제조업의 경우 Transport equipment와 Machinery로 통합되어 있다. 온실가스 인벤토리에서는 이 두 가지 부문을 에너지 부문의 연료연소에서 기타제조 부문으로 통합하고 있다. 때문에 해당 산업부문에서 직접 사용한 에너지의 사용량(전력 및 열 사용량 제외)의 비중을 활용하여 온실가스 배출량을 분배하였다.

광업의 경우 온실가스종합정보센터(2019)에 따르면 고체연료 및 기타 에너지 산업에 포함되는 것으로 나타나지만, 해당 부문이 광업보다 범위가 크다는 점을 고려하여 분석에서 제외하였다. 이외에 온실가스 인벤토리 상에 나타나지만 제외된 부문은 폐기물과 토지이용, 토지이용변화 및 산림 활동(LULUCF), 산업공정의 할로카본과 탈루가스는 불명확한 점이 있어 분석에서 제외하였다. 마지막으로, 국가 온실가스 인벤토리에서 큰 부분을 차지하는 1A1a. 공공전기 및 열 생산 부문에서의 배출량은 산업별 전력 및 열에너지 소비량 비중을 사용하여 각 산업부문으로 분배되어 있다.

〈표 1〉 생산부문 분류 체계

국가통계포털	IEA(2020b)	온실가스 인벤토리
1차금속 제조업	Iron and steel/Non-ferrous metals	1A2a. 철강
금속가공제품 제조업		1A2b. 비철금속
		1A2f2. 조립금속
코크스 및 석유정제품 제조업	Chemical and petrochemical	2C. 금속산업
화학물질 및 화학제품 제조업		1A1b. 석유정제
		1A2c. 화학
비금속광물제품 제조업	Non-metallic minerals	2B. 화학산업
		1A2f1. 비금속
운송장비 제조업	Transport equipment	1A2f6. 기타제조
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	Machinery	
전기장비 제조업		
기계 및 장비 제조업		
음식료품 제조업	Food and tobacco	1A2e. 식음료품 가공 및 담배 제조
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	Paper, pulp and printing/Wood and wood products	1A2d. 펄프, 제지 및 인쇄
		1A2f3. 나무 및 목재
건설업	Construction	1A2f4. 건설
섬유 및 가죽제품 제조업	Textile and leather	1A2f5. 섬유 및 가죽
기타 제조업 및 산업용 장비 수리업	Non-specified(industry)	1A5. 미분류
운수업	Transport	1A3. 수송
도소매 및 음식숙박업	Commercial and public services	1A4a. 상업/공공
금융 및 보험업		
부동산업		
정보통신업		
사업서비스업		
공공행정, 국방 및 사회보장		
교육서비스업		
의료, 보건업 및 사회복지서비스업		
문화 및 기타서비스업		
농림어업	Agriculture/Forestry/Fishing	1A4c. 농업/임업/어업
		3. 농업
제외된 부문		
광업	Mining and quarrying	1A1c. 고체연료 및 기타 에너지 산업

자료: 진태영 등(2020)을 바탕으로 재정리

〈표 2〉에 산업별 실질 부가가치, 에너지 소비량 및 온실가스 배출량에 대해 2018년 기준의 관측치가 제시되어 있다. 현재까지 발표된 에너지 소비량 및 온실가스 배출량은 2020년에 발표된 자료가 최신이므로, 본 연구에서는 1990년부터 2018년까지의 자료를 활용하여 분석을 진행한다.

〈표 2〉 부문별 실질 부가가치, 에너지 소비량 및 온실가스 배출량 (2018)

산업부문	실질 부가가치 (10억원)	에너지 소비량 (ktoe)	온실가스 배출량 (GgCO <sub>2</sub> eq)
Iron and steel/Non-ferrous metals	62,579	23,813	138,034
Chemical and petrochemical	90,233	21,822	103,899
Non-metallic minerals	14,190	7,383	52,982
Transport equipment	49,528	7,363	26,666
Machinery	204,590	21,576	51,271
Food and tobacco	21,679	4,203	8,879
Paper, pulp and printing/Wood and wood products	13,891	5,121	9,132
Construction	91,741	750	2,170
Textile and leather	14,503	4,746	9,581
Non-specified(industry)	10,970	5,092	6,869
Transport	62,522	35,645	99,696
Commercial and public services	948,011	49,841	105,462
Agriculture/Forestry/Fishing	32,109	5,437	33,706
합계	1,616,544	192,793	648,347

## 2. 온실가스 탈동조화 지수

〈그림 1〉은 선택된 부문에 대해 국내 실질 부가가치 및 에너지 소비량, 온실가스 배출량 추이를 보여준다. 계열 간의 추세 비교가 쉽도록 에너지 소비량은 보조 축을 사용하여 표기하였다. 변화 추이를 살펴보면 세 가지 변수는 분석 기간 내 경제충격(금융위기 등)을 제외하고는 시간에 따라 증가하는 것으로 나타난다. 하지만 그 기울기가 각 변수별로 다르게 나타난다. 각 변수별 변화율(기울기)의 역전이 일어난다면 이는 온실가스 배출량과 경제성장 간의, 혹은 에너지 소비량과 경제성장 간의 탈동조화 현상이

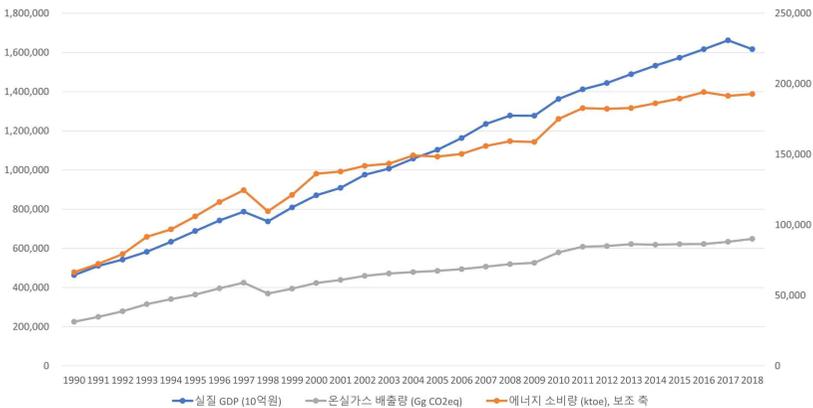
일어나고 있다는 것을 암시한다.

OECD(2002)에서는 탈동조화 지수를 아래 식과 같이 제안하고 있다.

$$DI = \frac{(EP/DF)_t}{(EP/DF)_{t_0}} \quad (1)$$

위 식에서  $DI$ 는 탈동조화 지수(Decoupling Index),  $EP$ 와  $DF$ 는 각각 환경적 압력(Environmental Pressure)과 유발요인(Driving Force)을 나타낸다(임형우·조하현, 2019). 원래 OECD(2002)에서 제시된 형태는  $(DI = 1 - (EP/DF)_t / (EP/DF)_{t_0})$ 이지만, 본 연구에서는 탈동조화 지수의 변화요인을 분석하기 위해 변형된 지수를 사용한다. 식 (1)과 같이 변형하여도 지수의 크기 해석만 달라질 뿐 지수 자체가 의미하는 바가 달라지지는 않는다.

〈그림 1〉 생산부문 실질 부가가치 및 에너지 소비량, 온실가스 배출량 추이(1990~2018)



즉, 위 식에서  $EP$ 와  $DF$ 는 본 연구에서는 온실가스 배출량과 실질 부가가치가 되며, 관측시점( $t$ ) 대비 기준시점( $t_0$ )의 탄소원단위 비율로 탈동조화 지수를 측정한다. 탈동조화 지수의 값에 따라 탈동조화의 진행을 분

류할 수 있는데,  $DI < 1$ 이면, 기준시점으로부터 관측시점의 탄소집약도가 감소한 것이기 때문에 탈동조화가 진행 중이라 할 수 있으며, 반대로  $DI \geq 1$ 로 나타나면 동조화가 진행되는 상태라 할 수 있다.

### 3. 탈동조화 지수 분해

본 연구에서는 분해분석 기법을 활용해 탈동조화 지수의 변화요인으로 에너지 소비량 요인을 추가하고자 한다. 상기 기술한 탈동조화 지수( $DI$ )는 변수 형태를 변경하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$DI_g = \frac{(GHG/Y)_t}{(GHG/Y)_{t_0}} \quad (2)$$

$$DI_e = \frac{(TES/Y)_t}{(TES/Y)_{t_0}} \quad (3)$$

$GHG$ 는 온실가스 배출량을 나타내며,  $Y$ 와  $TES$ 는 각각 실질 부가가치와 에너지 소비량(총에너지공급)을 가리킨다.  $DI_g$ 와  $DI_e$ 는 경제성장에 있어 각각 온실가스, 에너지 소비량의 탈동조화 지수를 나타낸다. 기준연도의 경우 본 연구의 실증자료 기간이 1990년부터 2018년을 포함하기 때문에, 탈동조화 지수 분석을 위한 기준연도는 1990년도로 고정하였다.

탈동조화 지수가 배출원단위 형태를 가지고 있기 때문에, 기존의 온실가스 배출량 분해분석 연구를 참고하면 간단한 형태의 Kaya 항등식을 구성할 수 있다. 전 세계 온실가스 배출량의 2/3는 에너지 생산과 사용에 기인하는 만큼 온실가스와 에너지 부문은 연관이 깊다(IEA, 2015). 하지만 온실가스 탈동조화 지수가 단순히 탄소원단위의 변화로 측정되기 때문에, 온실가스 배출량과 경제성장 간의 탈동조화 현상이 나타난다고 할 때 에너지 부문을 고려할 수 있는 변화요인을 분해해서 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 온실가스 탈동조화 지수의 변화요인을 아래 식과 같이 배출계수(Emission Factor, EF) 변화효과와 에너지원단위(Energy Intensity,

EI) 변화효과로 구분하는 분해방정식을 구성하였다. 배출계수의 경우 에너지 한 단위 소비당 온실가스 배출량을 의미하며( $EF = GHG/ TES$ ), 에너지원단위는 부가가치 한 단위 생산을 위해 투입된 에너지 총량을 의미한다( $EI = TES/ Y$ ).

$$DI_{g,t} = \frac{(GHG/Y)_t}{(GHG/Y)_{t_0}} = \frac{(GHG/ TES)_t}{(GHG/ TES)_{t_0}} \times \frac{(TES/ Y)_t}{(TES/ Y)_{t_0}} \quad (4)$$

온실가스의 탈동조화 지수는 항상 0보다 큰 값을 가지게 되므로, 온실가스 탈동조화 지수의 변화량( $\Delta DI_g$ )이 음수일 경우 시간에 따라 탈동조화가 심화되고 있음을 나타내며, 양수일 경우 동조화 과정으로 수렴하는 증임을 나타낸다. 식 (4)의 우변에서 첫 번째 지수인 배출계수 변화지수( $\frac{EF_t}{EF_{t_0}}$ )는 산업별 배출계수 변화가 탈동조화 지수에 미치는 영향을 나타내며, 두 번째 지수인 에너지원단위 변화지수( $\frac{EI}{EI_{t_0}}$ )는 산업별 에너지원단위 변화가 탈동조화 지수에 미치는 영향을 측정한다.

온실가스 탈동조화 지수의 변화요인 분석에는 로그평균 Divisia 지수(Log Mean Divisia Index, LMDI)를 사용한다. LMDI는 Divisia 지수를 바탕으로 한 가중치로 변화량을 분해하는데, 잔차를 남기지 않고 분해되는 특징이 있다(Ang et al., 1998). 또한 완결성 및 시간 가역성, 요소 가역성 및 영 값(zero)에 대한 강건성을 모두 만족시킬 수 있는 장점이 있다(김진수, 2015). 로그를 사용하기 때문에 자료에 영(0) 값이 생길 경우 문제가 될 수 있지만, 산업부문별 구조효과 등을 포함시키지 않고 부문별로 단차원(single-dimension) 분해분석을 진행하기 때문에 분해분석 시 흔히 나타나는 영 값의 문제는 본 연구에서 발생하지 않는다. 변화요인의 시계열 방식 LMDI를 활용하였으며, 가법적 요인분해를 사용함과 동시에, 기준연도고정(fixed base year)과 기준연도변경(rolling base year) 두 가지 방식 모두를 활용하여 장기적 추세와 단기적 변화를 모두 살펴보고자 한다. 분

해방정식은 아래 식 (5)~(7)과 같이 정리된다.

$$\Delta DI_g = \Delta DI_{g,EF} + \Delta DI_{g,EI} \quad (5)$$

$$\Delta DI_{g,EF} = \frac{DI_{g,t} - DI_{g,t-1}}{\ln(DI_{g,t}/DI_{g,t-1})} \times \ln\left(\frac{EF_t/EF_{t_0}}{EF_{t-1}/EF_{t_0}}\right) \quad (6)$$

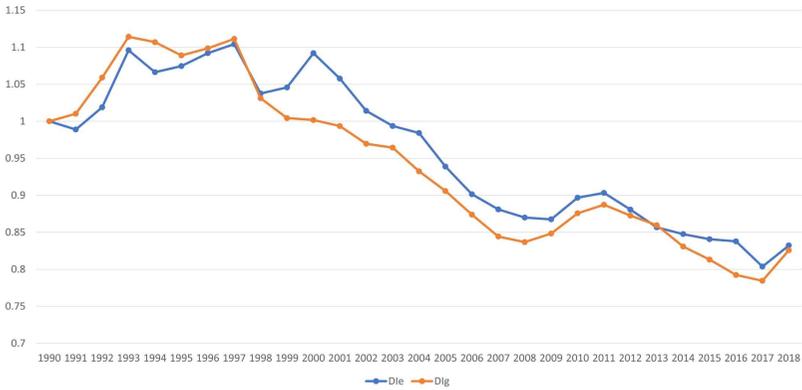
$$\Delta DI_{g,EI} = \frac{DI_{g,t} - DI_{g,t-1}}{\ln(DI_{g,t}/DI_{g,t-1})} \times \ln\left(\frac{EI_t/EI_{t_0}}{EI_{t-1}/EI_{t_0}}\right) \quad (7)$$

#### IV. 분석 결과

본 연구에서는 탈동조화의 변화요인 분석을 위해 우리나라 13개 생산부문에 대해 실질 부가가치 및 에너지 소비량, 온실가스 배출량 자료를 구축하였다. 특히 온실가스 배출량 자료는 에너지 부문과 연료연소로부터의 배출량뿐만 아니라 금속, 광물산업의 산업공정으로부터의 배출량도 함께 포함하고 있다. 분석에 앞서 본 연구의 배경이 될 수 있는 탈동조화 지수의 동향을 살펴보고자 한다. <그림 2>에 식 (2)와 (3)으로부터 계산한 우리나라 생산부문의 온실가스와 에너지 탈동조화 지수 추이가 나와 있다.

1990년을 기준연도로 둔 분석 기간 내에서 1990년대의 온실가스 및 에너지 탈동조화 지수는 1 이상인 것으로 나타나, 동조화가 꾸준히 진행된 것으로 나타난다. 특히 에너지 탈동조화 지수의 경우 이 흐름이 연장되어 2003년이 되어서야 탈동조화 지수가 1 미만으로 감소한다. 전반적으로 2000년대 이후에는 탈동조화가 지속적으로 진행되는 것으로 나타나며, 두 탈동조화 지수가 동일한 양상을 보인다. <그림 2>를 통해 알 수 있는 점은 1990년에 비해 탈동조화가 심화되어 온실가스는 경제성장과 거동을 달리 하며, 에너지 소비량과 경제성장 역시 거동을 달리하고 있다는 점이다.

〈그림 2〉 온실가스 및 에너지 탈동조화 지수 추이(1990-2018)



### 1. 탈동조화 지수 분해: 전체 부문

먼저 전체 부문에서 온실가스 탈동조화의 지수를 배출계수 변화효과와 에너지원단위 변화효과로 분해한다. 기준연도고정 및 기준연도변경 효과가 아래 〈표 3〉에 나와 있으며, 변화 추이가 〈그림 3〉과 〈그림 4〉에 나타나 있다. 탈동조화 지수 자체가 기준연도 대비로 계산되는 지수이며, 해당 지수의 변화요인을 분석한 것이므로 분해분석 결과는 기준연도보다 2개 년도 후의 결과를 얻게 된다.

〈그림 3〉의 기준연도고정 분해분석 결과를 살펴보면, 온실가스 탈동조화 지수는 1998년까지 동조화 방향으로 작용하며 정확히 1999년부터 탈동조화 경향이 시작된다. 요인분해 결과에서 배출계수 변화효과는 1995년부터 이미 탈동조화 방향으로 작용하고 있었으나, 에너지원단위 변화효과와의 동조화 경향이 강해 상쇄된 것으로 나타난다. 〈그림 2〉와 마찬가지로 2000년 이후부터 1990년 대비 온실가스 탈동조화는 시작되었으나, 에너지원단위 변화효과는 2004년 이후부터 탈동조화 요인으로 작용하는 것으로 보인다. 기준연도고정 분해결과는 전반적인 경향성을 살펴볼 수 있는데(박정욱·김수이, 2013), 2006년부터 에너지원단위 변화효과의 탈동조화 기여도가 배출계수 변화효과를 초과하여 점점 증가한다. 특히 분해

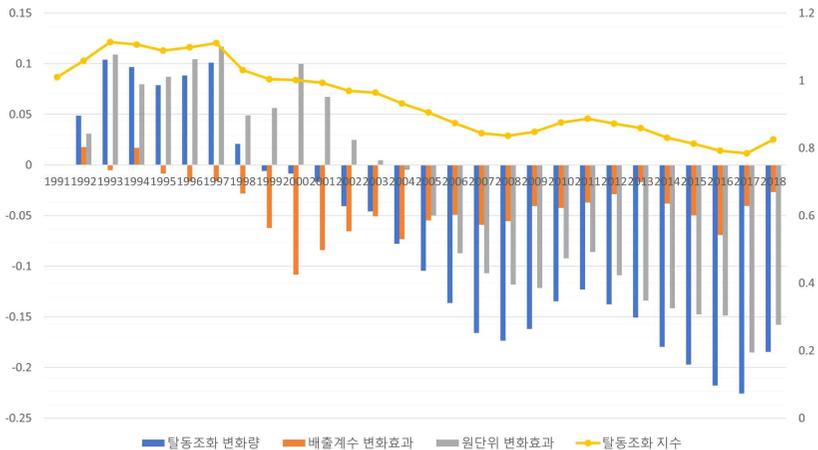
연도의 마지막인 2018년에는 에너지원단위 변화효과가 탈동조화 지수의 약 86%를 차지한다.

〈표 3〉 탈동조화 지수 분해분석 결과

연도	기준연도고정			기준연도변경		
	배출계수 변화효과	원단위 변화효과	총변화	배출계수 변화효과	원단위 변화효과	총변화
1992	0.0178	0.0310	0.0488	0.0178	0.0310	0.0488
1993	-0.0051	0.1091	0.1040	-0.0239	0.0791	0.0552
1994	0.0171	0.0797	0.0967	0.0233	-0.0305	-0.0073
1995	-0.0083	0.0872	0.0789	-0.0264	0.0085	-0.0179
1996	-0.0161	0.1045	0.0884	-0.0080	0.0176	0.0096
1997	-0.0158	0.1169	0.1011	0.0004	0.0123	0.0127
1998	-0.0281	0.0491	0.0209	-0.0135	-0.0666	-0.0802
1999	-0.0622	0.0563	-0.0059	-0.0348	0.0080	-0.0268
2000	-0.1083	0.0998	-0.0085	-0.0460	0.0434	-0.0026
2001	-0.0840	0.0674	-0.0166	0.0237	-0.0318	-0.0081
2002	-0.0655	0.0249	-0.0406	0.0174	-0.0413	-0.0240
2003	-0.0505	0.0047	-0.0458	0.0145	-0.0197	-0.0052
2004	-0.0731	-0.0047	-0.0778	-0.0229	-0.0091	-0.0320
2005	-0.0546	-0.0498	-0.1044	0.0168	-0.0434	-0.0266
2006	-0.0492	-0.0871	-0.1363	0.0042	-0.0361	-0.0319
2007	-0.0590	-0.1069	-0.1659	-0.0099	-0.0197	-0.0296
2008	-0.0554	-0.1180	-0.1735	0.0030	-0.0106	-0.0076
2009	-0.0405	-0.1214	-0.1619	0.0139	-0.0024	0.0116
2010	-0.0424	-0.0921	-0.1345	-0.0012	0.0285	0.0274
2011	-0.0371	-0.0858	-0.1229	0.0052	0.0064	0.0116
2012	-0.0287	-0.1089	-0.1376	0.0076	-0.0222	-0.0147
2013	-0.0167	-0.1339	-0.1506	0.0109	-0.0240	-0.0130
2014	-0.0380	-0.1415	-0.1795	-0.0199	-0.0090	-0.0289
2015	-0.0496	-0.1475	-0.1970	-0.0108	-0.0067	-0.0175
2016	-0.0691	-0.1487	-0.2178	-0.0180	-0.0027	-0.0208
2017	-0.0404	-0.1852	-0.2256	0.0250	-0.0329	-0.0078
2018	-0.0267	-0.1578	-0.1845	0.0130	0.0281	0.0411

이 결과는 온실가스와 경제성장 간의 탈동조화를 초기 에너지 전환정책을 통해 에너지 소비량 대비 탄소배출량 감소라는 소기의 성과를 이루었으나, 최근 들어 1990년에 비해 산업 부문에서 에너지 소비량 대비 온실가스 배출량인 배출계수 감소 효과를 이루어내지 못하고 있음을 뜻한다. 더욱이, 1990년대 중반부터 꾸준히 탈동조화 요인으로서 작용을 하고 있음에도 불구하고 그 효과는 점점 작아지는 것으로 보인다. 에너지원단위 변화효과는 산업부문에서 부가가치 생산량 대비 에너지 소비량이 작아지고 있음을 뜻한다. 특히 2010년 이후부터 고부가가치 산업 육성을 통해 산업 전체의 에너지원단위 개선효과가 일어났고, 산업부문의 온실가스과 경제성장 탈동조화에 앞장서고 있다.

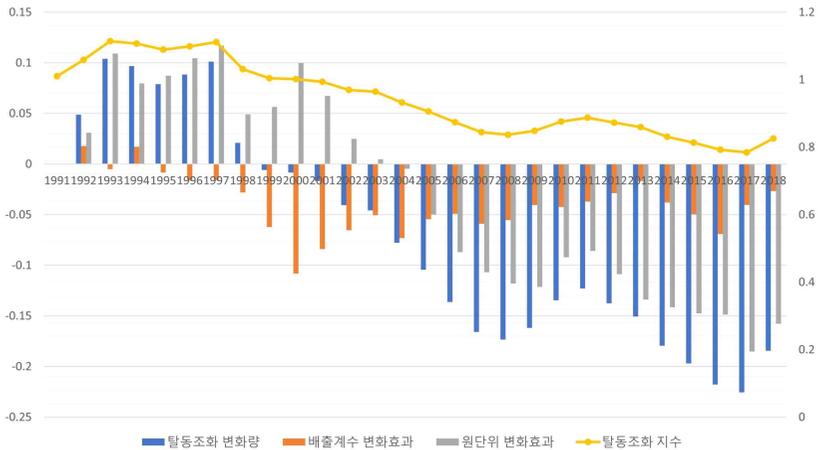
〈그림 3〉 탈동조화 지수 분해분석 결과(기준연도고정)



기준연도변경 방식을 활용해서 연별 탈동조화 지수의 변화요인을 분해하면 단기적인 변화에 집중할 수 있다. 기준연도변경 분해분석 결과인 〈그림 4〉를 살펴보면 1997년의 IMF와, 2008년의 세계 금융위기 부근에서 탈동조화 지수가 동조화 방향으로 작용하는 결과가 보인다. 이는 1990년의 온실가스 원단위에 비해 경제충격이 가해진 해 부근의 온실가스 원단위가 크게 나타나기 때문이다. 이러한 효과는 온실가스 배출량의 증가보

다는 부가가치 감소에 기인한다. 기준연도에 비해 기술의 발전 혹은 산업 구조의 성장으로 에너지를 적게 사용하고, 고부가가치를 생산하리라 기대 하는 연도에서 충격이 발생해 부가가치가 감소하므로 동조화 경향이 증가 하는 것이다.

〈그림 4〉 탈동조화 지수 분해분석 결과(기준연도변경)



탈동조화 지수가 기준연도에 따라 영향을 많이 받기 때문에, 기준연도를 바꾸어 분석해 볼 필요가 있다. 때문에 본 연구에서는 분석기간을 세 가지로 나누어 분석하였다. 분석 기간(1990~2018) 내에 존재하는 경제충격인 IMF 사태와 세계 금융위기 시점으로 나누어, 기준연도에 따라 탈동조화 지수 변화요인을 분석하면 〈표 4〉와 같이 나타난다.

국가 경제가 결국 탈동조화 과정에 있다고 가정하면 분석기간이 길어질수록 탈동조화 지수는 작게 관찰된다. 따라서 2018년의 탈동조화 지수를 1990년을 기준으로 측정하였을 때 가장 작게 측정되는 것은 자연스러운 현상이라 할 수 있다. 본 연구에서 경제충격이 있던 해를 참고하여 세 가지로 분석기간을 나누어 분석한 결과(1990~1998, 1999~2009, 2010~2018) 1990년부터 1998년까지는 탈동조화 지수가 감소하지 않고 오히려 증가한 것으로 나타나며, 2010년부터 2018년의 최근 기간 탈동조화 지수 감소량

대비, 1999년부터 2009년까지의 탈동조화가 더 빠르게 진행된 것으로 나타난다.

2010년 대비 2018년의 경우 배출계수 변화효과는 미미하지만 동조화 요인으로 작용하고 있으며, 에너지원단위 변화효과 역시 1999년 대비 2009년의 효과에 비해 탈동조화 요인이 작은 것으로 나타난다. 반면 1999년 대비 2009년은 경제지표 상으로 온실가스와 경제성장 간의 탈동조화가 상당히 많이 진행된 것으로 나타나는데, 배출계수의 변화가 동조화 방향으로 작용하는 반면 산업부문의 에너지 소비량 대비 부가가치 상승효과가 탈동조화 지수의 감소 요인으로 작용하였다. 2009년 산업부문에서 1999년 대비 에너지 소비량 증감 대비 부가가치 생산량 증가가 상당했던 것으로 해석할 수 있다. 또한 2000년대 초반 전환 부문에서는 전환 부문에서 전력 산업의 성장이 돋보였는데, 화석연료 사용량 증가로 인해 배출계수가 악화되고, 에너지 소비량 대비 고부가가치 산업의 증가로 인해 나타난 현상이라 할 수 있다.

〈표 4〉 기준연도에 따른 탈동조화 지수 분해결과(기준연도고정)

분석연도	탈동조화 지수 (종료연도 기준)	배출계수 변화효과	원단위 변화효과	총변화
1990-2018	0.8257	-0.0267	-0.1578	-0.1845
1990-1998	1.0311	-0.0281	0.0491	0.0209
1999-2009	0.8447	0.0588	-0.2115	-0.1527
2010-2018	0.9429	0.0098	-0.0801	-0.0703

## 2. 탈동조화 지수 분해: 산업부문별 분석

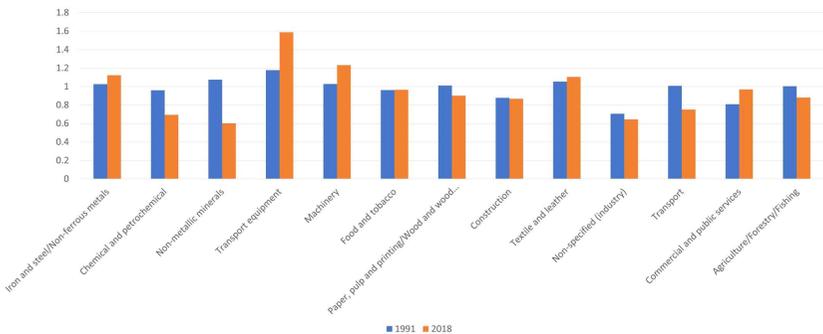
산업부문별 분석을 통해 업종에 따른 탈동조화 지수 추이와, 변화요인을 살펴볼 수 있다. 〈그림 5〉에 본 연구에서 포함하고 있는 산업부문의 탈동조화 지수의 기준연도 대비 변화량이 나와 있다. 상기 기술한 대로,  $DI_g \geq 1$ 일 경우, 해당 산업은 동조화가 일어나고 있는 상태이며,  $DI_g < 1$ 이면 해당 산업이 탈동조화 상태에 있다고 할 수 있다. 대표적 예

너지 집약적 산업인 철강/비철금속 산업과 석유화학 산업, 비금속 산업에서 철강/비철금속 산업의 경우 동조화가 진행된 것으로 보이며, 석유화학 산업과 비금속 산업은 산업의 온실가스 배출과 부가가치 생산 간의 탈동조화가 상당히 많이 진행된 것으로 나타났다.

담배 및 식음료 산업과 건설 부문은 탈동조화 지수가 크게 변화하지 않았으며, 운송장비와 기계장비 산업은 온실가스와 경제성장의 동조화가 두드러지게 나타나는 부문이다. 이외에 탈동조화가 나타난 부문은 수송부문과 농림어업 부문에서 크게 나타났다. 부가가치 생산 증가 대비 온실가스 배출량 증가량이 적게 나타났다는 것을 보여준다. 상업 및 공공서비스 부문은 대표적인 고부가가치 산업부문에 속하는데, 온실가스 탈동조화 지표가 증가했다는 것은 상업 및 공공서비스 부문에서 부가가치의 한계효용에 다다른 반면 온실가스 배출량이 상승률이 유지된다는 것을 의미한다.

〈그림 5〉에서 미분류 산업부문의 경우에는 기준연도를 1991년으로 하여 1992년과 2018년의 탈동조화 지수를 표기하였는데, 국가 온실가스 인벤토리 상에서 미분류 산업부문의 온실가스 배출량이 1991~2018의 자료 대비 상당히 작게 나타나기 때문에 전체적인 경향성을 해친다고 판단하여 1990년의 자료를 누락시켰다.

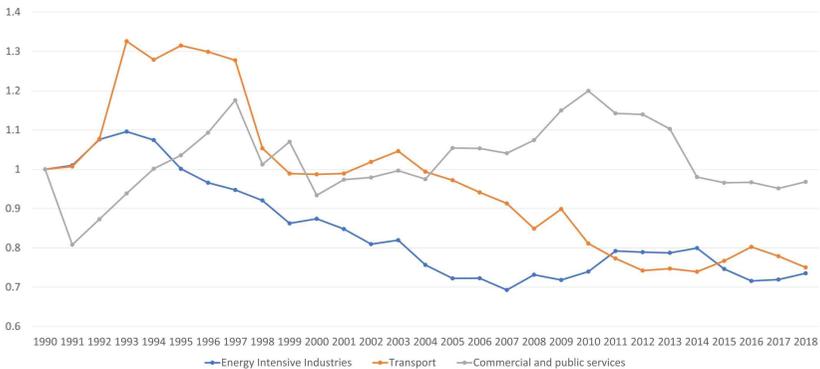
〈그림 5〉 1990년 대비 산업부문별 탈동조화 지수(1991, 2018)



본 연구에서는 산업부문별 탈동조화 지수 변화요인을 세 가지 부문으로 나누어 분석하였다. 첫 번째는 철강/비철금속 산업과 석유화학 산업, 비금속 산업으로 이루어진 에너지 집약적 산업에 대한 탈동조화 지수 분석을 보인다. 두 번째는 수송부문에서 온실가스 탈동조화가 어떻게 일어났는지 살펴본다. 마지막으로 상업 및 공공서비스 부문에서의 탈동조화 지수 추이와 변화요인에 대해 살펴본다.

〈그림 6〉은 세 개 부문의 탈동조화 지수 추이를 보여준다. 에너지 집약적 산업은 1990년대 초반 온실가스 배출량이 경제성장과 동조화 경향을 가지고 있었으나 1995년을 기점으로 탈동조화 경향을 강하게 보이고 있다. 기준연도를 2000년도 이후로 설정하여도 같은 경향이 나타난다. 즉, 국내 산업 부가가치 생산의 기반이라 할 수 있는 철강 및 금속, 석유화학 산업의 경우 부가가치 생산 증가에 비해 온실가스 감축이 일어나고 있는 부문이라 할 수 있다. 〈표 5〉의 지수분해 결과를 참고하면 탈동조화 경향성의 다수가 에너지원단위 감소율에 기인하므로 에너지 집약적 산업에서 부가가치 한 단위 생산을 위한 에너지 투입량을 감소시키고 있음을 알 수 있다. 이는 에너지 집약적 산업에 대한 에너지 소비량 분해분석 결과와도 일치한다(Jin and Choi, 2020).

〈그림 6〉 부문별 탈동조화 지수 추이(1990-2018)



수송 부문의 경우 에너지 집약적 산업보다는 늦게 탈동조화 경향성을 보인다. 1990년대에는 탄소 원단위가 지속적으로 증가한 반면 2000년대 중반부터 온실가스 배출량과 경제성장 간의 탈동조화가 관찰된다. 최근 수송부문의 경향성으로 볼 때 부가가치와 온실가스 배출량의 탈동조화가 친환경차 보급의 성과로 보여질 수 있지만 분해분석 결과를 살펴보면 이는 사실과 다르다. 수송 부문에서의 에너지 소비량 대비 탄소배출량 변화율은 오히려 동조화 원인인 것으로 나타나며, 에너지원단위 변화가 상대적으로 큰 탈동조화 원인으로 작용해 수송 부문의 탈동조화를 이끌고 있다.

〈표 5〉 산업별 탈동조화 지수 분해분석 결과(기준연도고정)

연도	에너지 집약적 산업			수송			상업 및 공공서비스		
	배출 계수	원단위	총변화	배출 계수	원단위	총변화	배출 계수	원단위	총변화
1992	0.0821	-0.0161	0.0661	0.0271	0.0433	0.0705	-0.0188	0.0837	0.0648
1993	0.0382	0.0479	0.0861	0.1595	0.1594	0.3189	-0.0777	0.2082	0.1305
1994	0.0768	-0.0124	0.0645	0.1386	0.1331	0.2717	-0.0176	0.2110	0.1934
1995	0.0804	-0.0892	-0.0088	0.1422	0.1656	0.3078	-0.0115	0.2391	0.2276
1996	0.0283	-0.0724	-0.0441	0.1493	0.1426	0.2919	-0.0067	0.2918	0.2851
1997	0.0539	-0.1163	-0.0624	0.2062	0.0640	0.2702	0.0223	0.3455	0.3678
1998	0.0747	-0.1639	-0.0892	0.1066	-0.0604	0.0462	-0.0042	0.2085	0.2043
1999	0.0319	-0.1793	-0.1474	0.0899	-0.1079	-0.0180	0.0183	0.2439	0.2621
2000	-0.1498	0.0140	-0.1359	0.1195	-0.1393	-0.0198	-0.0047	0.1305	0.1258
2001	-0.1083	-0.0535	-0.1619	0.1230	-0.1408	-0.0178	0.0384	0.1272	0.1656
2002	-0.1028	-0.0975	-0.2003	0.1274	-0.1157	0.0117	0.0757	0.0955	0.1712
2003	-0.1213	-0.0690	-0.1903	0.1433	-0.1042	0.0391	0.0833	0.1052	0.1885
2004	-0.1467	-0.1066	-0.2532	0.1332	-0.1465	-0.0133	0.0567	0.1102	0.1669
2005	-0.1296	-0.1579	-0.2874	0.1715	-0.2064	-0.0349	0.1180	0.1282	0.2462
2006	-0.1342	-0.1528	-0.2870	0.1774	-0.2433	-0.0658	0.1727	0.0723	0.2450
2007	-0.1628	-0.1543	-0.3171	0.1704	-0.2644	-0.0939	0.1732	0.0597	0.2328
2008	-0.1525	-0.1258	-0.2782	0.1829	-0.3410	-0.1581	0.1875	0.0788	0.2663
2009	-0.1421	-0.1493	-0.2914	0.1845	-0.2929	-0.1084	0.2462	0.0955	0.3417
2010	-0.1488	-0.1214	-0.2702	0.1741	-0.3700	-0.1960	0.2474	0.1440	0.3914
2011	-0.1484	-0.0695	-0.2178	0.1806	-0.4146	-0.2340	0.2144	0.1199	0.3343
2012	-0.1133	-0.1075	-0.2208	0.1676	-0.4325	-0.2649	0.2457	0.0859	0.3316
2013	-0.1051	-0.1174	-0.2226	0.1568	-0.4166	-0.2599	0.2605	0.0342	0.2946
2014	-0.0943	-0.1160	-0.2103	0.1445	-0.4122	-0.2677	0.1667	0.0055	0.1721
2015	-0.1141	-0.1495	-0.2636	0.1464	-0.3865	-0.2401	0.1608	-0.0031	0.1576
2016	-0.0897	-0.2043	-0.2940	0.1642	-0.3689	-0.2047	0.1406	0.0182	0.1588
2017	-0.0743	-0.2161	-0.2905	0.1413	-0.3695	-0.2282	0.1856	-0.0422	0.1434
2018	-0.0864	-0.1881	-0.2746	0.1492	-0.4060	-0.2568	0.2246	-0.0647	0.1599

상업 및 공공서비스 부문은 앞서 보였듯 1990년에 비해 온실가스 배출량과 부가가치 생산의 동조화가 심화되고 있다. 2010년까지 동조화 경향성이 심화되다가 2014년 이후로 완화되는 모습을 보인다. 배출계수변화와 에너지원단위 변화가 지속적으로 동조화 방향으로 작용하였으나 최근 들어 에너지원단위 변화율이 탈동조화 요인으로 자리잡고 있다. 상업 및 공공서비스 부문은 대표적인 고부가가치 산업이기 때문에 에너지원단위 개선을 통한 탈동조화 경향은 바람직하다고 할 수 있지만, 여전히 에너지 소비 변화 대비 온실가스 배출량의 증가는 과거에 비해 높아지고 있기 때문에 해당 부문에서는 배출계수 완화에 대한 대비가 필요할 것으로 보인다.

## V. 결론

본 연구의 목적은 우리나라의 온실가스 배출량과 경제성장 탈동조화 현상을 산업별로 살펴보고, 탈동조화의 추이 및 변화요인을 분석하는 것이다. 온실가스와 경제성장의 탈동조화 이론이 제시된 후, 국가 전체 관점에서 탈동조화 현상을 검토 연구들은 존재해왔으나 산업부문별 탈동조화 현상을 세부적으로 살펴보는 연구가 부족한 실정이었다. 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 산업부문별 온실가스 배출량 및 에너지 소비량, 실질 부가가치 자료를 구성한 후 탈동조화 지수를 계산하였다. 아울러, 탈동조화 지수가 온실가스 배출량과 경제성장 간의 관계에 한정되어 있다는 점에 착안하여 탈동조화 지수를 배출계수 변화와 에너지원단위 변화 효과로 분해할 수 있는 분해방정식을 구성하였다.

본 연구에서 수집한 전체 산업에 대한 탈동조화 분석 결과는 온실가스 배출량과 실질 부가가치간의 심화된 탈동조화 현상을 보여준다. 이 중 탈동조화에 영향을 크게 미친 효과는 에너지원단위 변화 효과로, 배출계수 변화 효과는 탈동조화에 단조적인 영향을 미쳤다. 반면, 2000년대 이후로 에너지원단위의 변화율이 상당히 크게 향상되어 탈동조화 현상을 이끌고

있는 것으로 파악되었다. 기간별 분석 결과에서는 다른 시사점을 제시하는데, 온실가스 탈동조화 현상은 2000년대에 가장 극적으로 일어났으며 2010년대에는 탈동조화가 둔화되고 있다는 결과가 도출되었다. 그럼에도 불구하고 2010년 이후의 탈동조화 현상은 지속되고 있기 때문에 기후변화 대응 측면에서 산업 부문의 온실가스 감축이 성공적인 것으로 사료된다.

산업부문별 탈동조화 지수를 살펴보면, 상업 및 공공서비스 부문에서의 온실가스 배출량 동조화 효과가 두드러지게 나타난다. 상업 및 공공서비스 부문은 대표적 고부가가치 산업으로 분석기간 내 실질 부가가치의 성장이 두드러진다. 부가가치 성장 대비 온실가스 배출량 증가가 더욱 늘었다는 것으로 해석된다. 그 변화요인의 대부분은 에너지 소비로 인한 온실가스 배출량 증가에 기인한다. 이외 주요 부문인 에너지 집약적 산업이나 수송 부문에서는 탈동조화 경향이 심화된다. 그러나 전반적으로 배출계수 완화보다는 에너지원단위 개선 효과로부터 경제의 온실가스 배출 탈동조화 효과를 누리고 있다.

산업 부문에서의 배출계수는 에너지 소비량 대비 온실가스 배출량을 가리킨다. 본 연구에서의 온실가스 배출량은 연료 연소와 간접배출량, 산업 공정에서의 배출량을 모두 포함하고 있다. 배출 계수의 완화가 일어나지 않아 산업의 온실가스 동조화 현상이 일어나는 것은 해당 산업 내에 직접 연료사용 시 탄소가 많이 배출되고 있다고 해석할 수 있다. 이는 향후 전환 부문에서의 배출계수 개선뿐만 아니라 산업 부문에서도 향후 직접적인 배출계수 개선 노력이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

우리나라는 높은 제조업 비중과 에너지 집약적 산업의 비중이 높아 산업 성장 초기에 탈동조화를 달성하기 어려운 산업구조적 특성을 가지고 있다. 그럼에도 지속가능한 성장을 위해 탈동조화의 추진은 필요할 것이다. 특히 서비스 산업에 대한 바람직한 육성 방안을 통해 에너지 소비량 대비 배출량 감축을 일궈내는 것이 필요할 것으로 보인다. 아울러 수송 부문에서의 배출계수 요인 감소를 위해 친환경차의 및 고효율 운송장비의 보급을 확대해야 할 것이다.

이 연구는 산업부문별로 탈동조화 지수를 도출하고, 변화요인을 분석했다. 의의를 가지지만, 세분화된 산업부문별 분석이 미진하다는 점에서 한계를 가진다. 또한 산업별 탈동조화 지수의 정책적 함의를 위해서는 해외 주요국들과의 비교분석이 선행되어야 하므로, 향후 이러한 관점에서 후속 연구가 필요할 것으로 보인다.

## ■ 참고문헌 ■

- 관계부처합동, 2019, 『제2차 기후변화대응 기본계획』, 세종: 관계부처합동.
- \_\_\_\_\_, 2020, 『탄소중립 추진전략』, 세종: 관계부처합동.
- 김대수·이상엽, 2019, “국내 온실가스 배출량과 경제성장 간 장단기 비동조화 분석,” 『자원·환경경제연구』, 28(4), pp.583-615, DOI: 10.15266/KEREA.2019.28.4.583.
- 김진수, 2015, “우리나라 에너지소비 분해분석 연구에 대한 고찰,” 『에너지경제연구』, 14(3), pp.265-291, DOI: 10.22794/keer.2015.14.3.009.
- 김현석, 2015, “경제성장과 자유무역협정이 CO<sub>2</sub> 배출에 미치는 영향: NAFTA 지역에 대한 시계열분석,” 『에너지경제연구』, 14(1), pp.87-110, DOI: 10.22794/keer.2015.14.1.004.
- 박성준·김진수, 2014, “우리나라 1차 에너지와 최종 에너지 소비 변화요인 분해 비교분석,” 『자원·환경경제연구』, 23(2), pp.305-330, DOI: 10.15266/KEREA.2014.23.2.305.
- 박정옥·김수이, 2013, “한국과 일본의 산업부문 에너지 소비에 대한 LMDI 요인분해 분석,” 『에너지경제연구』, 12(1), pp.67-103, DOI: 10.22794/keer.2013.12.1.004.
- 산업통상자원부, 2020.7.16., “탄소중립 사회를 향한 그린뉴딜 첫걸음,” 보도자료.
- 신범철, 2013, “동태적 MG패널기법에 의한 아시아국가의 경제성장과 환경오염에 대한 실증분석,” 『국제경제연구』, 19(4), pp.89-112, DOI: 10.17298/kky.2013.19.4.004.
- 온실가스종합정보센터, 2019, 『국가 온실가스 인벤토리 보고서』, 서울: 온실가스종합정보센터.
- 유정민·김정아, 2020, 『2050 서울시 탄소배출 제로를 위한 비전과 추진전략』, (서울연구원 정책리포트: 제302호), 서울: 서울연구원.
- 이상준, 2017, 『주요국의 온실가스 배출과 경제성장의 탈동조화 경향과 시사점』, (KERI Insight 17-6), 서울: 한국경제연구원.
- 임형우·조하현, 2019, “경제성장과 탄소배출량의 탈동조화 현상 분석: 63개국 동태패널분석(1980~2014년),” 『자원·환경경제연구』, 28(4), pp.497-526, DOI: 10.15266/KEREA.

- 2019.28.4.497.
- \_\_\_\_\_, 2020, “교통부문 탄소배출 탈동조화 현상의 원인분석 및 에너지전환의 효과: OECD 25개국 패널분석,” 『자원·환경경제연구』, 29(3), pp.389-418, DOI: 10.15266/KEREA.2020.29.3.389.
- 정용훈·김수이, 2012, “한국의 CO<sub>2</sub> 배출, 경제성장 및 에너지믹스와의 관계 분석,” 『자원·환경경제연구』, 21(2), pp.271-299.
- 조용성, 2017, “전력산업의 온실가스 배출요인 분석 및 감축 방안 연구,” 『기후변화학회지』, 8(4), pp.357-367, DOI: 10.15531/KSCCR.2017.8.4.357.
- 진세준·안소연·유승훈, 2016, “필리핀에서의 에너지 소비, 온실가스 배출, 경제성장 간의 인과성 분석,” 『아시아연구』, 19(3), pp.39-67, DOI: 10.21740/jas.2016.08.19.3.39.
- 진태영·김진수, 2017, “화석연료 사용량을 고려한 탄소배출량과 도시화율의 관계에 관한 연구,” 『환경정책』, 25(3), pp.47-70, DOI: 10.15301/jepe.2017.25.3.47.
- \_\_\_\_\_, 2020, “에너지원별 1차 에너지 공급과 최종에너지 소비 변화요인 분해 분석,” 『에너지경제연구』, 19(2), pp.65-97.
- 진태영·최가영·이은미·이수경, 2020, “이산화탄소 배출량 분해분석: 산업 및 에너지 소비구조를 중심으로,” 『환경정책』, 28(2), pp.153-182, DOI: 10.15301/jepa.2020.28.2.153.
- 환경부, 2016, 『교토의정서 이후 신 기후체제 파리협정 길라잡이』, 세종: 환경부.
- Ang, B. W., F. Q. Zhang, and K. H. Choi, 1998, “Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition,” *Energy*, 23(6), pp.489-495, DOI: 10.1016/S0360-5442(98)00016-4.
- Engo, J., 2018, “Decomposing the decoupling of CO<sub>2</sub> emissions from economic growth in Cameroon,” *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35), pp.35451-35463, DOI: 10.1007/s11356-018-3511-z.
- De Freitas, L. C. and S. Kaneko, 2011, “Decomposing the decoupling of CO<sub>2</sub> emissions and economic growth in Brazil,” *Ecological Economics*, 70(8), pp.1459-1469, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2011.02.011.
- IEA, 2015, *Energy and climate change*, Paris, France: IEA.
- \_\_\_\_\_, 2020a, *World energy outlook 2020*, Paris, France: IEA.
- \_\_\_\_\_, 2020b, *World energy balances 2020*, Paris, France: IEA.
- Jin, T. and B. Choi, 2020, “Sectoral decomposition of Korea’s energy consumption by global value chain dimensions,” *Sustainability*, 12(20), 8483, DOI: 10.3390/su12208483.
- OECD, 2002, *Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth*, (Sustainable development SG/SD(2002)1/FINAL), Paris:

OECD.

Wang, Q. and S. Wang, 2019, “Decoupling economic growth from carbon emissions growth in the United States: The role of research and development,” *Journal of Cleaner Production*, 234, pp.702-713, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.174.

Xie, P., S. Gao, and F. Sun, 2019, “An analysis of the decoupling relationship between CO<sub>2</sub> emission in power industry and GDP in China based on LMDI method,” *Journal of Cleaner Production*, 211, pp.598-606, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.212.

국가통계포털, 2020, “경제활동별 GDP 및 GNI,” <http://www.kosis.kr>, [2020.12.10]

온실가스종합정보센터, 2020, “국가 온실가스 인벤토리(1990-2018),” <http://www.gir.go.kr>, [2021.1.10]

---

**진태영:** 한양대학교에서 자원경제 및 정책 박사학위를 취득하였으며, 현재 에너지경제연구원 부연구위원으로 재직 중이다. 주요 연구 실적으로는 “What is better for mitigating carbon emissions? Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis”, “A new approach for assessing the macroeconomic growth energy rebound effect” 등이 있다. 계량경제학적 기법과 경제분석 모형을 활용해 에너지 수요와 효율, 기후변화에 관련된 연구를 수행하고 있다(tyjin@keei.re.kr).

**김도원:** KAIST에서 산업및시스템공학 박사학위를 취득하였으며, 현재 에너지경제연구원 부연구위원으로 재직 중이다. 주요 연구 실적으로는 “Balancing risk: generation expansion planning under climate mitigation scenarios”, “Term structures and scenario-based social discount rates under smooth ambiguity” 등이 있다. 최적화 및 시뮬레이션 기법을 활용해 전력정책, 기후변화 위험 등에 관련된 연구를 수행하고 있다(dwkim@keei.re.kr)

투 고 일: 2021년 01월 20일

심 사 일: 2021년 01월 25일

게재확정일: 2021년 02월 07일