

생산이론 기반 분해 및 로그평균 디비지아 지수를 이용한 국내 탄소원단위 변화요인 분석

진태영* · 김도원**

요 약

본 연구는 1990년부터 2018년까지 국내 온실가스 배출량 및 에너지 소비량, 실질 GDP 자료의 산업부문별 통일을 통해 탄소원단위 변화요인을 분해분석한 연구이다. 아울러, 전통적 분해분석법인 로그평균 디비지아 지수(LMDI)에 생산이론 분해분석(PDA) 기법을 결합하여 환경 기술요인을 고려할 수 있는 통합 분해분석 모형을 활용하였다. 그 결과, 에너지 소비 효율과 선호재화 산출물 효율을 통해 탄소원단위를 개선시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 에너지 소비 기술변화 및 선호재화 산출기술 변화 속도가 둔화되어 탄소원단위 개선에 도움을 주지 못하고 있는 것으로 나타났다. 특히 에너지 소비 기술변화 요인은 산업부문의 온실가스와 동조화 현상을 보여 2010년 이후 에너지 소비효율 향상이 급격히 둔화되었다. 더불어 배출계수 효과가 탄소원단위를 개선시키지 못하고 있다. 이러한 결과들에 따르면 경제성장과 온실가스 감축의 탈동조화를 달성하기 위해서는 에너지전환정책을 통한 배출계수 완화와 동시에, 환경 신산업 발굴을 통한 부가가치 증대가 급선무임을 알 수 있었다.

주요 단어 : 생산이론 분해분석, 거리함수, 산업별 탄소배출량, 탈동조화
경제학문헌목록 주제분류 : Q43, Q54

* 에너지경제연구원 부연구위원(주저자). tyjin@keei.re.kr

** 에너지경제연구원 부연구위원(교신저자). dwkim@keei.re.kr

I. 서 론

우리나라는 세계 8위의 에너지 다소비 국가로 에너지효율 지표인 에너지원 단위도 2017년 기준 33위로 OECD 최하위 수준에 머물러 있다(이성인, 2019). 에너지원단위란 국내총생산(GDP) 한 단위당 에너지투입량을 지표화한 것이다. 통상 에너지 사용량의 많고 적음을 나타낼 때 사용하는 지표로 활용한다. 부가가치 정도, 산업구조형태, 에너지 소비 효율 등에 크게 좌우되기도 한다. 우리나라의 에너지원단위가 상대적으로 높은 이유 중 하나로 우리나라의 산업구조가 제조업 중심이라는 점을 꼽을 수 있다. 2018년 기준 GDP 생산의 약 36%를 차지하는 산업부분에서 최종에너지 소비가 전체의 61.4%에 다다른다(에너지경제연구원, 2018). 이 중에서도 석유화학과 1차 금속산업이 최종 에너지소비의 대부분을 차지한다. 특히, 석유화학과 1차 금속산업은 다른 산업들에 비해 직간접적인 온실가스 배출량이 많은 산업군에 속한다. 단기간에 기존 산업구조를 개편하는 것은 거의 불가능한 일이므로 현 산업구조 상 많은 양의 온실가스 배출은 불가피한 실정이다.

한편, 탈탄소라는 세계적인 흐름에 발맞춰, 2015년 개최된 파리협정에서 우리나라는 2030년까지 2017년 배출량 대비 24.4% 감축하겠다는 목표를 세웠다(관계부처합동, 2020). 최근 들어서는 중장기 목표로 ‘탄소중립국가로의 도약’을 공표하는 등 전 세계의 기후변화 대응에 적극적으로 협력하고 있다(관계부처합동, 2020). 이를 위해 우리나라 정부는 목표관리제, 배출권거래제, 신재생에너지 의무할당제와 같은 제도들을 도입하였다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 우리나라의 산업은 에너지 다소비-비효율 구조로, 탈탄소 제도 이행에 매우 취약한 환경이다. 탄소배출감소 정책으로 인해 경제성장이 저해된다면 감축으로 인한 편익보다 더 큰 사회적 비용을 야기시킬 수 있다. 탄소배출감

축과 경제 성장을 동시에 달성한 사례로 몇몇 선진국에서 나타난 경제성장과 탄소배출의 ‘탈동조화’ 경향을 주목하고 있다(이상준, 2017). 미국과 독일 등 선진국의 에너지소비는 탈동조화 경향을 보이고 있다. 그에 반해 우리나라의 에너지소비는 여전히 경제와 탄소배출의 ‘동조화’를 보인다고 평가받는다(이성인, 2019). 우리나라의 탈동조화 둔화 원인을 밝혀 기후 정책의 방향성을 재정립하기 위해서는 현시점 국내 산업부문별 탈동조화 정도에 대한 진단이 선행되어야 한다.

이러한 상황에서 기후변화 대응을 위한 제 1의 연료로 에너지효율을 주목하고 있다(IEA, 2019). 유럽연합에서는 2012년 에너지효율지침을 통해 에너지 효율 우선 정책을 추진하고 있다. 이처럼 에너지 효율 관련 정책이 에너지 수요관리를 위한 가장 효과적인 정책으로 평가받고 있다. 에너지 효율을 높이면 효용은 그대로인 상태에서 에너지 소비량은 줄어드는 것과 같은 효과가 있기 때문이다. 에너지 소비 감소는 온실가스 배출 감축과 이어지므로, 에너지 효율 향상은 기후변화 대응에 있어 필수적이라 할 수 있다. 특히 우리나라와 같이 다소비-저효율 에너지 소비구조를 개선하려는 국가에겐 최선의 방안이다. 이에 우리나라도 에너지효율에 대한 중요성을 인식하고 2019년 8월 에너지효율 혁신전략을 발표했다(관계부처 합동, 2019).

본 연구에서는 우리나라의 온실가스 변화량 분해분석 연구의 일환으로, 에너지 및 부가가치 효율의 측면에서 살펴보고자 한다. 분해분석 방법론에서도 본 연구에서는 지수분해분석(Index Decomposition Analysis, IDA)을 활용하였다. IDA는 분석기간을 자유롭게 설정할 수 있으며 비교적 적은 데이터만을 필요로 하기 때문이다. 또한 승법분해(multiplicative decomposition)가 가능하다는 장점이 있으며 집약도, 탄력성 등에 대한 분해가 가능하다.

우리나라 산업 부문별 데이터 가용성의 한계가 있었고 이번 연구에서 승법분해를 하고자 하였다. 그러므로 이런 연구 목적에 적합한 IDA 기반 방식을 활용한다. IDA 중에서도 Ang(1994)이 제안한 로그평균 디비지아 지수(Log Mean Divisia Index, LMDI)를 활용하기로 한다. 아울러 본 연구에서는 생산

이론 기반 분해(Production-theoretical Decomposition Analysis, PDA) 방법론을 차용한다. Zhou and Ang(2008)은 처음으로 생산이론 관점에서 CO₂ 변화량을 분해하는 방법을 제안했다. 패널 데이터를 활용하여 생산변경(production frontier)을 구한 다음 실제 생산과의 괴리를 수치화하여 활용한다. 이를 통해서 국가별 에너지 소비, 탄소배출, GDP 등의 자료만으로 배출량 분석이 가능하도록 하였다. 이번 연구에서 LMDI와 PDA를 결합하여 우리나라의 탄소배출량 변화를 종합적으로 분석하려 한다. 이는 LMDI가 강력한 분석 도구임에도 불구하고 생산기술 요소를 반영하지 못한다는 약점을 해결할 수 있었다. LMDI-PDA 통합 방식을 통해서 국내 탄소원단위 분해 및 탈동조화 지수 분석을 시도하였다.

이 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 LMDI와 관련된 국내외 문헌과 PDA 관련 해외 문헌을 정리한다. 3장에서는 자료, 즉 1차 에너지 총공급 자료를 계산한 방법과 본 연구에서 사용된 분해분석 방법론에 대해 설명한다. 4장과 5장에서는 분석 결과를 기술하고 연구를 결론짓는다.

II. 선행연구

탄소배출 관련 요소를 식별하고 정량화하기 위한 방법으로 지수이론 기반의 IDA가 많이 활용되고 있다. 특히, Ang(1994)이 처음으로 제안한 LMDI 기반의 분해기법이 주류를 이루고 있다. LMDI를 활용한 IDA가 Ang and Choi(1997) 및 Ang(2005), Ang and Liu(2007a, b)의 연구에 의해 영값(zero)의 처리법이 제시되고 나서 IDA의 조건인 완결성, 시간가역성, 요소가역성, 영값에 대한 강건성을 모두 만족하는 방법론이라는 것이 증명되었기 때문이다.

본 연구에서 시도하는 탄소원단위(carbon intensity)에 대한 분해분석은 온실가스 배출량 분해분석 연구와 같은 체계를 가진다. 분해분석 시 구성하게

되는 Kaya 항등식¹⁾에서 인구 혹은 생산효과를 양변에 나누어 줄 경우 동일한 의미를 가지게 되기 때문이다. Kaya 항등식은 1차원적 분해방정식 형태를 가지지만, 산업이나 지역, 에너지원별 자료를 활용하면 각 산업별, 지역별, 에너지원별 에너지 소비 혹은 부가가치 생산, 배출량 구조가 총 배출량 변화에 미치는 영향인 구조 효과를 분석에 추가할 수 있다. 온실가스 배출량 분해의 경우 산업별 배출량 산정이 어려워 에너지 소비량 분해분석에 비해 활발히 이루어지지 않았지만, 지역별 구조효과 및 에너지 소비구조 효과를 활용한 연구는 꾸준히 있어 왔다(진태영 등, 2020).

LMDI를 활용한 분해분석은 각각 LMDI 내의 구조 효과를 활용했는지에 따라 분류할 수 있다. 앞서 언급한 대로 온실가스 배출량의 산업구조 효과를 반영하기는 쉽지 않다. 그래서 국내 연구들에서는 구조 효과를 포함하지 않은 단차원(single dimension) 분해분석을 진행하거나, 지역별 구조효과 및 에너지 소비구조 효과를 반영하는 것이 대부분이었다. 최근 들어서 산업별 구조효과와 활용이 늘어나는 연구들이 진행되기도 한다.

지역별 구조효과와 경우, 진상현·황인창(2009)의 연구에서 국내 지역별 자료를 사용하여 지역별 생산구조 효과를 반영하고 있다. 지역별 에너지 소비비중 자료를 통해 분해분석의 차원을 늘려 분석하였다. 진상현·정경화(2013)의 연구에서는 진상현·황인창(2009)의 연구자료를 최신화하여 지자체별 온실가스 배출량 변화요인을 분석하였다. 추가적인 논의로 탄소집약도 효과에 따라 지자체를 분류 및 평가하기도 하였다. 이후 이루어진 김문정(2014)의 연구에서는 지자체별 이산화탄소 배출량과 에너지원별 소비량을 활용해 구조 효과 및 에너지 믹스 효과를 함께 고려한 분해분석을 시도한 바 있다. 정해식·이기훈(2001) 및 황인창(2008)의 연구는 동일한 분해방정식을 사용하여 국내 이산화탄소 배출량의 변화요인을 분석하였다.

1) Kaya 항등식은 온실가스 혹은 이산화탄소 배출량을 설명하기 위한 분해방정식을 뜻하며, 좌변의 온실가스 배출량을 인구, 1인당 GDP, 에너지원단위, 배출계수(혹은 탄소원단위)로 설명하는 항등식 형태를 가진다. 이 방정식은 변수의 추가 혹은 방정식의 변형이 자유로워 온실가스 관련 연구에서 기본 수식으로 주로 사용된다.

정해식·이기훈(2001)의 연구는 구조 효과가 들어가지 않은 가장 기본 형태의 Kaya 항등식인 인구 및 생산, 집약도, 화석연료와 탄소 배출계수 효과를 활용하여 분해하였다. 반면, 황인창(2008)의 경우 화석연료 효과에서 원별 세분화를 통해 연료원별 구조 효과를 추가하여 분석하였다. 조향숙(2017)의 연구에서는 OECD 7개국에 대해 산업이나 지자체별 구조 효과를 고려하지는 않지만, 분해방정식 내에 탄소세나 화석연료 사용효과 등을 반영하여 분석했다.

산업 단일 부문에 대한 분석도 이루어지기도 했다. 이재형 등(2012)의 연구에서는 철도수송부문에 초점을 맞추어, 철도 노선별 온실가스 배출 특성에 대해 분석하였다. 이후 후속연구로 이재형(2018)에서는 철도수송부문의 온실가스 배출량을 수송집약도 및 에너지 집약도 효과 요인을 추가하여 분해하였다. 조용성(2017)과 김수이(2018)의 연구는 각각 국내 전력산업과 발전부문의 온실가스 배출량에 대해 분해분석을 시도하였다. 조용성(2017)의 연구는 전력집약도 효과를 사용하여 연구를 수행하였다. 동시에 분석 결과를 온실가스 탈동조화 지수(Decoupling Index, DI)의 시기별 계산결과와 비교하여 전력산업의 탈동조화 효과에 대해 분석하였다. 반면 김수이(2018)의 연구는 전력집약도 효과를 분해요인으로 활용하였다. 화석연료 사용비율 및 화석연료 구조 효과를 추가하여 분석한 점이 차이점이라 할 수 있다.

한준(2019)의 연구는 온실가스 배출량을 에너지 관점에서 바라볼 때 가장 통합적인 연구라 할 수 있다. 모형 내 전력화 부분을 고려함과 동시에 이산화탄소 배출량을 발전부문 및 최종에너지 수요 부문으로 나누었다. 이를 통해 분해방정식의 형태를 위의 두 부문으로 분리한 온실가스 변화요인 분해분석을 시도하였다.

김수이·정경화(2011)는 국내 연구에서는 처음으로 산업별 온실가스 배출량 자료를 활용하여 산업구조 효과를 온실가스 배출량 분해분석에 활용하였다. 김태현 등(2015)에서는 김수이·정경화(2011)의 연구를 확장하여, 기간별 분해분석에 따라 달라지는 변화요인 효과를 살펴보았다. 본 연구도 위와 같이 온실가스 배출량 자료를 활용하여 산업구조 효과를 활용한다.

박년배·심성희(2015)의 연구에서는 산업구조 효과를 고려했다. 아울러 산업구조의 세분화를 위해 감축목표 업종 분류체계에 따라 18개 세부 업종을 분류한 후 온실가스 배출량을 분해하였다. 김문정·허은녕(2020)은 타 연구들과는 달리 산업부문에 대한 분석이 아닌 국내 배출권거래제 참여업종에 초점을 맞추어 배출량 변화요인을 밝혀내었다.

진상현 등(2013)의 연구에서는 국가 온실가스 인벤토리의 분류체계에 맞추어 에너지 분야 및 산업공정 분야, 농업 분야, 폐기물 분야 분류체계에 따라 배출량 변화요인을 분해분석하였다. 진태영 등(2020)의 연구에서는 지자체별 온실가스 배출량을 고려하지는 않았지만, 산업별 온실가스 배출량 및 에너지 소비량, 부가가치 자료를 활용해 산업구조 및 화석연료 믹스 효과를 함께 고려한 분해방정식을 구성하여 국내 온실가스 배출량 변화요인을 분석하였다.

해외 사례를 살펴보면, Zhao et al.(2010)의 중국 산업부문을 대상으로 한 탄소배출량 분해분석이 대표적이다. 국내에서는 드물게 적용되던 Kaya 항등식에 산업 구조효과를 추가한 분해분석을 통해 산업부문의 탄소배출량 변화요인을 분석하였고, 산업군을 경공업과 중공업으로 나누어 그 차이를 살펴보았다. Jiang et al.(2019)는 미국의 이산화탄소 배출량을 LMDI 기법을 적용해 분해분석하였는데, 경제학적 요소가 부재하다는 약점을 해소하기 위해 Cobb-Douglas 생산함수를 분해방정식 내에 투입하여 자본 및 노동력 요인이 온실가스 배출량에 미치는 요인을 분석하였다.

위 연구들과 같이 IDA 방식을 활용한 연구가 활발한 가운데, Zhou and Ang(2008)은 생산이론을 기반으로 CO₂ 변화량을 분해하려는 시도를 했다. PDA를 통해서 국가별 에너지 소비, 탄소배출, GDP 등의 적은 자료만으로 배출량 분석이 가능하도록 하였다. 하지만 PDA 방법론은 산업 구조나 에너지 구성 등의 변화를 정량화하기 어렵다는 점을 지적받아왔다.

이후 Lin and Du(2014)에서는 이러한 PDA의 약점을 해소하기 위해서 IDA와 PDA를 결합한 연구를 진행하였다. 또한 이 결합 방식은 완결성, 시간가역성, 요소가역성을 만족하기도 한다. 이를 통해서 2005년부터 2010년의 데이터

를 활용해 중국 내 지역들의 에너지 집약도의 변화를 정량화 하였다. 그 결과, 기술의 변화와 자본-에너지 대체성이 에너지 집약도의 감소에 주요인이라는 것을 밝혔다. Wang et al.(2015)에서는 PDA를 위해 필요한 최적화 문제에서 해가 존재하지 않는 몇 가지 경우의 해결방안을 제시하기도 하였다.

Zhou et al.(2017)과 Wang et al.(2018)에서는 부문별로 더 세분화하여 IDA-PDA 활용 연구를 진행하였다. 이는 부문별 탄소감축 정책에 대한 평가를 가능케하기에 탄소감축에 대한 세계적 공감대가 형성된 현 시점에서 매우 중요한 연구라 할 수 있다.

위와 같이 해외 사례의 경우 PDA를 LMDI와 조합하여 생산이론 기반의 LMDI 기법을 온실가스 배출량 분해분석에 활용하고 있지만, 중국을 대상으로 한 문헌이 주류를 이룬다. 이러한 이유로 구조 효과는 산업구조보다는 중국의 지역별 생산구조(regional structure)에 초점을 맞추고 있다. 또한 온실가스 배출량 분해분석이 꾸준히 이루어져 왔음에도 불구하고 생산이론을 기반으로 한 온실가스 배출량 변화요인 분석 연구가 미진한 실정이다. 본 연구에서는 PDA와 LMDI를 결합한 통합 분해분석 모형을 활용해 국내 산업의 탄소원단위 변화요인을 파악하고 시사점을 도출하고자 한다.

Ⅲ. 자료 및 분석 방법

1. 분석 자료

우리나라의 탄소원단위 분해분석에 필요한 자료는 산업별 온실가스 배출량 및 에너지 소비량, 실질 GDP이다. 분해분석을 위해 1990년부터 2018년까지의 자료를 수집하였다. 산업부문별 실질 GDP 자료의 경우 국가통계포털(<https://www.kosis.kr>)로부터 수집하였으며, 산업부문별 에너지 소비량 자료

는 IEA(2020)의 World Energy Balances 자료를 사용하였다. 에너지 소비량은 발전 부문으로부터의 전환손실을 함께 고려하기 위해 진태영·김진수(2020)의 산업부문별 1차 에너지 공급 산정방식을 활용해 자료를 구축하였다. 마지막으로 산업부문별 온실가스 배출량의 경우 환경부 온실가스종합정보센터(<https://www.gir.go.kr>)에서 발간하는 국가 온실가스 인벤토리 자료로부터 얻었다.

본 연구에서 사용한 온실가스 배출량 및 에너지 소비량, 실질 GDP 자료는 출처가 상이하여 서로 다른 부문 분류체계를 가지고 있다. 본 연구에서는 박성준·김진수(2014)의 국민계정과 IEA의 에너지 밸런스 통계 기법을 활용함과 동시에 국가 온실가스 인벤토리의 부문과도 통합과정을 거쳐야 한다. 박성준·김진수(2014)의 연구에서는 총 14개의 생산부문을 활용하고 있는데, 본 연구에서는 14개 부문 중 건설업 및 기타제조업, 농림어업을 제외한 총 11가지 산업부문 분류체계를 활용한다. 아래 <표 1>에 세 가지 자료 출처의 부문 통합체계가 나와 있다.

국가 온실가스 인벤토리의 경우 IEA(2020)의 부문인 Transport equipment와 Machinery가 기타제조 부문으로 통합되어 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 이 두 가지 부문의 에너지 직접소비량(전력 및 열 사용량 제외)의 비중을 활용하여 온실가스 배출량을 분배하였다. 온실가스 인벤토리의 경우 <표 1>에 나타난 부문 분류보다 더 많은 양을 차지하는데, 본 연구의 범위에 포함되지 않는 폐기물 및 토지이용, 토지이용변화 및 산림 활동(LULUCF)의 배출흡수량, 그리고 인벤토리의 산업공정 내 존재하는 할로카본 및 탈루가스는 분석에서 제외하였다. 마지막으로 국가 온실가스 인벤토리의 큰 부분이라 할 수 있는 연료연소 부문의 에너지 산업은 산업별 전력 및 열에너지 소비량 비중을 활용하여 각 산업부문으로 분배하였다. 본 연구에서는 비선호 재화인 온실가스 배출량을 고려한 효율을 추정하여 분해분석에 사용하고 있기 때문에, 수송 부문의 경우 다음과 같은 점을 감안해야 한다. 운수업의 부가가치와, Transport 부문의 에너지 소비량은 산업 내의 수송부문만을 포함하고 있는

반면, 온실가스 배출량은 개인의 소비 및 민간 운수업체의 배출량이 포함되어 있다. 따라서 타 부문에 비해 에너지 소비량, 부가가치 대비 온실가스 배출량이 과대평가되어있다는 한계를 가질 수 있다.

〈표 1〉 분해분석에 사용된 산업 분류 체계

국가통계포털	IEA(2020)	국가 온실가스 인벤토리
1차금속 제조업	Iron and steel/Non-ferrous metals	1A2a. 철강
금속가공제품 제조업		1A2b. 비철금속
		1A2f2. 조립금속
		2C. 금속산업
코크스 및 석유정제품 제조업	Chemical and petrochemical	1A1b. 석유정제
화학물질 및 화학제품 제조업		1A2c. 화학
		2B. 화학산업
		1A2f1. 비금속
비금속광물제품 제조업	Non-metallic minerals	2A. 광물산업
운송장비 제조업	Transport equipment	1A2f6. 기타제조
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	Machinery	
전기장비 제조업		
기계 및 장비 제조업		
광업	Mining and quarrying	
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
섬유 및 가죽제품 제조업		1A2f3. 나무 및 목재
운수업	Textile and leather	1A2f5. 섬유 및 가죽
도소매 및 음식숙박업	Transport	1A3. 수송
금융 및 보험업	Commercial and public services	1A4a. 상업/공공
부동산업		
정보통신업		
사업서비스업		
공공행정, 국방 및 사회보장		
교육서비스업		
의료, 보건업 및 사회복지서비스업		
문화 및 기타서비스업		

자료: 박성준·김진수(2014)를 바탕으로 산업부문 재통합

2. 셰퍼드(Shephard) 거리함수와 PDA

본격적인 PDA 분해분석 논의에 앞서, 분해식에 들어가는 요소와 배경에 대해서 간략히 설명하고자 한다. 본 연구에서는 기본적으로 산업 전체가 총 I 개의 부문으로 나누어져 있다고 가정한다. 그리고 부문 i 에 대하여 에너지소비(E_{it})를 투입물(input)로, 국내총생산(Y_{it})과 탄소배출량(C_{it})을 각각 선호(desirable), 비선호(undesirable) 산출물(output)로 둔다. 그러면 부문 i 의 t 시점 환경 생산 기술은 아래와 같이 수식화할 수 있다(Zhou et al., 2017).

$$S_{it} = \{(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) : E_{it} \text{ can produce } (Y_{it}, C_{it})\} \quad (1)$$

여기서 에너지 투입량과 선호 산출물의 처분에 비용이 전혀 들지 않는다고 가정한다(strong disposability). 즉, 이러한 강한 처분가능성이라는 가정은 만약 $(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \in S_{it}$ 이고 $E'_{it} > E_{it}$ (혹은 $Y'_{it} < Y_{it}$) 일 때, $(E'_{it}, Y_{it}, C_{it}) \in S_{it}$ (혹은 $(E_{it}, Y'_{it}, C_{it}) \in S_{it}$)을 만족한다는 뜻이다. 그리고 약한 처분가능성(weak disposability)의 가정도 있는데 이것은 만약 $(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \in S_{it}$ 이고 $0 \leq \theta \leq 1$ 이면 $(E_{it}, \theta Y_{it}, \theta C_{it}) \in S_{it}$ 을 만족한다는 뜻이다.

Zhou and Ang(2008)에 따르면 위와 같은 환경 생산 기술 S_{it} 를 규모수확 불변(Constant Returns to Scale, CRS) 가정 하에서 자료포락분석법(Data Envelopment Analysis, DEA)을 활용하여 아래와 같은 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$S_{it} = \{(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) : \sum_i z_i E_{it} \leq E_{it}, \sum_i z_i Y_{it} \leq Y_{it}, \sum_i z_i C_{it} = C_{it}, z_i \geq 0, \forall i\} \quad (2)$$

여기서 z_i 는 i 부문의 가중치를 의미한다. 첫 번째와 두 번째 제약식은 에너지 투입과 선회 산출물의 강한 처분가능성을 의미한다. 세 번째 제약식은 비선회 산출물의 약한 처분 가능성을 뜻한다.

다음으로 셰퍼드 거리 함수(Shephard distance function)에 대해서 알아본다. 부문 i 의 t 시점 에너지 투입과 선회 산출물에 대한 셰퍼드 거리 함수는 아래와 같이 정의할 수 있다(Zhou and Ang, 2008).

$$D_{it}^E(E, Y, C) = \sup \{ \phi_i : (E/\phi_i, Y, C) \in S \} \quad (3a)$$

$$D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) = \inf \{ \eta_i : (E_{it}, Y_{it}/\eta_i, C_{it}) \in S_{it} \} \quad (3b)$$

식 (3a)는 주어진 (E_{it}, Y_{it}, C_{it}) 에서 에너지 투입량의 비율을 최소화한다. $D_{it}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \geq 1$ 가 $(E_{it}/\phi_i, Y_{it}, C_{it}) \in S_{it}$ 이기 위한 필요조건이다. 만약 $D_{it}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) > 1$ 이라면 해당 생산 기술은 비효율적이라는 의미이다. 반대로, $D_{it}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) = 1$ 이면 효율적이라는 의미이다. 식 (3b)는 주어진 (E_{it}, Y_{it}, C_{it}) 에서 선회산출물을 최대화한다. 앞선 설명과 유사하게 $D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \leq 1$ 가 $(E_{it}, Y_{it}/\eta_i, C_{it}) \in S_{it}$ 이기 위한 충분조건이다. 만약 $D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) < 1$ 이라면 해당 생산 기술은 비효율적이라는 의미이며 $D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) = 1$ 이면 효율적이라는 의미이다.

위에서 언급한 바와 같이 PDA 분해 모형을 구축하기 위해서는 $D_{ip}^E(E_{iq}, Y_{iq}, C_{iq})$, $D_{ip}^Y(E_{iq}, Y_{iq}, C_{iq})$ (여기서 $p, q \in \{t, t+1\}$)의 값이 필요하다. 이러한 p, q 는 시점을 뜻하며 만약 p 와 q 가 다른 때에는 (3a)와 (3b)의 해가 존재하지 않는 경우가 있다(Zhou and Ang, 2008). 이를 위해 Wang et al.(2015)이 제시한 방법을 통해 수정된 식으로 PDA에 필요한 요소들을 구한다(Zhou et al, 2017). 임의의 기간 T 에 대하여, 다음과 같은 최적화 문제를 풀게 된다.

생산이론 기반 분해 및 로그평균 디비지아 지수를 이용한 국내 탄소원단위 변화요인 분석

$$\begin{aligned}
 [D_{ip}^E(E_{iq}, Y_{iq}, C_{iq})]^{-1} &= \min \phi_i & (4a) \\
 \text{subject to } \sum_i^I z_i E_{ip} &\leq \phi_i E_{iq}, \\
 \sum_i^I z_i Y_{ip} &\geq Y_{iq}, \\
 \sum_i^I z_i C_{ip} &= C_{iq} + \chi_i, \\
 z_i &\geq 0, \chi_i \geq 0, \forall i \\
 p, q &\in \{t, t+1\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [D_{ip}^Y(E_{iq}, Y_{iq}, C_{iq})]^{-1} &= \max \eta_i & (4b) \\
 \text{subject to } \sum_i^I z_i E_{ip} &\leq E_{iq} + \lambda_i, \\
 \sum_i^I z_i Y_{ip} &\geq \eta_i Y_{iq}, \\
 \sum_i^I z_i C_{ip} &= C_{iq}, \\
 z_i &\geq 0, \lambda_i \geq 0, \forall i \\
 p, q &\in \{t, t+1\}
 \end{aligned}$$

여기서 χ_i 와 λ_i 는 해가 없는 경우를 대비한 슬랙변수(slack variable)이며 각각 잠재 탄소배출의 부족량, 잠재 에너지소비 부족분을 뜻한다.

식 (4a)와 (4b)의 의미는 식을 변형해보면 조금 더 분명하게 드러난다. (4a')는 에너지투입량의 셰퍼드 거리를 구하는 식이다. p 시점의 i 부문 잠재적 탄소배출량($\sum_i^I z_i C_{ip}$)과 잠재적 생산량($\sum_i^I z_i Y_{ip}$)이 q 시점의 해당 부문 탄소배출

과 생산량 수준을 유지하면서 잠재적 에너지투입량($\sum_i^I z_i E_{ip}$)을 최소화 하는

최적 가중치 z^* 들을 구하는 문제이다. 여기서 나온 최적가중치와 각 부문 에너지소비를 곱한 값이 최적 잠재적 에너지 투입량이라 한다. (4a')의 목적함수는 주어진 에너지소비 투입량과 최적 잠재적 에너지 투입량의 괴리율이라고

볼 수 있다. 만약 현재 에너지소비 투입량(E_{iq})이 효율적이라면 최적 잠재적 에너지 투입량($\sum_i z_i^* E_{ip}$)과 같아지며 셰퍼드 거리 함수의 값은 1이 산출된다. (4b') 또한 유사한 방식으로 해석이 가능하며 결국 최적 잠재적 선호 산출물과 현재 선호 산출물 간의 거리를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 D_{ip}^E(E_{iq}, Y_{iq}, C_{iq}) = & \max_{z_i} \frac{E_{iq}}{\sum_i z_i E_{ip}} & (4a') \\
 \text{subject to } & \sum_i z_i Y_{ip} \geq Y_{iq}, \\
 & \sum_i z_i C_{ip} = C_{iq} + \chi_i, \\
 & z_i \geq 0, \chi_i \geq 0, \forall i \\
 & p, q \in \{t, t+1\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{ip}^Y(E_{iq}, Y_{iq}, C_{iq}) = & \min_{z_i} \frac{Y_{iq}}{\sum_i z_i Y_{ip}} & (4b') \\
 \text{subject to } & \sum_i z_i E_{ip} \leq E_{iq} + \lambda_i, \\
 & \sum_i z_i C_{ip} = C_{iq}, \\
 & z_i \geq 0, \lambda_i \geq 0, \forall i \\
 & p, q \in \{t, t+1\}
 \end{aligned}$$

3. 통합 분해분석 모형: PDA-LMDI

본 연구에서는 시계열 방식(time-series manner)을 활용한 LMDI 분해를 활용해 장기적 변화요인과 단기적 변화요인을 모두 분석하고자 한다. 기준연

도고정(fixed base year) 방식은 장기적 추세를 확인할 수 있으며, 기준연도변경(rolling base year) 방식은 단기적 흐름을 잡아낼 수 있다(박정욱·김수이, 2013). 본 연구의 궁극적인 목표 중 하나가 우리나라 산업 부문별 탈동조화 지수에 대해 장기적 추세를 분석하는 것이므로, 기준연도고정 분석이 필수적이다. 먼저 OECD(2002)에서 제안한 탈동조화 지수(DI)에 대해 살펴보면 다음과 같다.

$$DI = \frac{(EP/DF)_t}{(EP/DF)_{t_0}} \quad (5)$$

위 식의 DI 는 탈동조화 지수, EP 와 DF 는 각각 환경적 압력(Environmental Pressure)과 그 유발요인(Driving Force)이다. 탈동조화 지수의 값에 따라 탈동조화 진행 상태를 분류할 수 있다. $DI < 1$ 일 경우 기준연도 대비 탄소원단위가 감소한 것을 나타내므로 탈동조화가 진행 중인 상황이라 할 수 있다. $DI \geq 1$ 일 경우 탄소원단위가 증가세이므로 온실가스 배출량과 부가가치의 동조화 상태라고 할 수 있다.

식 (5)에서 EP 와 DF 를 각각 온실가스 배출량과 부가가치로 치환할 경우, 탈동조화 지수는 기준연도의 탄소원단위 대비 현재 탄소원단위가 된다. 따라서 탄소원단위에 대해 기준연도고정 및 승법적 요인분해를 시도하면 자연스럽게 탈동조화 지수 분해가 된다. 본 연구에서 사용된 기본적인 LMDI 분해 분석 수식은 식 (6)와 같으며, LMDI 분해분석 방법론에 앞 절에서 설명한 PDA를 적용하면 식 (7)과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$CI_t = \sum_i \left(\frac{Y_{it}}{Y_t} \times \frac{E_{it}}{Y_{it}} \times \frac{C_{it}}{E_{it}} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
CI_t = \sum_i & \frac{\sum_i Y_{it} [D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \cdot D_{it+1}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})]^{1/2}}{Y_t} \\
& \times \frac{Y_{it} [D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \cdot D_{it+1}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})]^{1/2}}{\sum_i Y_{it} [D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \cdot D_{it+1}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})]^{1/2}} \\
& \times \frac{E_{it}/Y_{it}}{[D_{it}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \cdot D_{it+1}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it})]^{1/2}} \\
& \times D_{it}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it}) \times \left[\frac{D_{it+1}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it})}{D_{it}^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it})} \right]^{1/2} \\
& \times \frac{1}{D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})} \times \left[\frac{D_{it}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})}{D_{it+1}^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})} \right]^{1/2} \times \frac{C_{it}}{E_{it}}
\end{aligned} \tag{7}$$

$$CI_t = CI_{YG} \times CI_{PS} \times CI_{PEI} \times CI_{EP} \times CI_{ETC} \times CI_{YP} \times CI_{YTC} \times CI_{EF} \tag{8}$$

식 (7)을 이루는 여덟 가지 지수는 식 (8)로 간단하게 표현할 수 있다(순서 동일). 식 (8)의 지수인 CI_{YG} , CI_{PS} , CI_{PEI} , CI_{EP} , CI_{ETC} , CI_{YP} , CI_{YTC} , CI_{EF} 는 각각 생산차이 효과(output gap), 잠재구조 효과(potential structure), 잠재집약도 효과(potential energy intensity), 에너지 소비 생산성 효과(energy use productivity), 에너지 소비 기술변화 효과(energy use technological change), 선호재화 생산성 효과(desirable output productivity), 선호재화 생산 기술변화 효과(desirable output technological change), 배출계수 효과(emission factor)를 나타낸다.

생산차이 효과는 실제 부가가치 산출량 대비 선호재화 생산 효율을 고려한 잠재 산출량의 변화를 나타내는 효과로, 해당 값이 높을수록 선호재화 생산 비효율이 효율적인 방향으로 수정되고 있음을 나타낸다. 잠재구조 효과는 선호재화 생산 효율을 고려하였을 때 나타낼 수 있는 구조효과로, 각 산업부문에서 선호재화의 생산이 비효율성을 보일 때의 산업구조가 온실가스 원단위에 미치는 영향을 뜻한다. 잠재 집약도 효과는 에너지 집약도에 효율을 곱한

형태이므로, 집약도 향상(하락)에 비해 에너지 투입 효율이 향상되는 속도가 빠르면 탄소원단위의 증가요인으로 작용한다. Sorrell et al.(2009)의 표현을 빌리면 에너지 서비스²⁾의 집약도인 셈이다.

에너지 소비 생산성 효과는 $D_t^E(E_{it}, Y_{it}, C_{it})$ 로 표현되므로, 당해연도의 경제산출물 및 비선택 산출물 생산에 있어 에너지 투입의 비효율 정도를 나타내는 지표라 할 수 있다. 에너지 소비 기술변화는 차년도 대비 금년도의 에너지 투입 거리함수로 표현되고 있다. 차년도 대비 금년도의 에너지 소비 기술의 변화로 인한 투입량의 비효율 정도를 나타낸다. 선택재화 생산성은 $1/D_t^Y(E_{it}, Y_{it}, C_{it})$ 로 표현되며, 선택재화의 생산성이 효율적인 정도를 나타낸다. 선택재화 생산 기술변화 효과는 비선택재화 생산을 고정하였을 때 에너지 투입 대비 생산량 효율 변화를 의미하는 것으로, 해당 값이 작아질수록 선택재화 생산을 위한 기술이 효율적으로 변화하여 온실가스 원단위 감소에 기여하고 있음을 나타낸다. 배출계수효과는 선택재화 생산 효율을 고려하였을 때 나타낼 수 있는 구조효과로, 각 산업부문에서 선택재화의 생산이 비효율성을 보일 때의 산업구조가 온실가스 원단위에 미치는 영향을 뜻한다.

승법적 분해법을 활용하여 탄소원단위를 분해하려면 차년도 탄소원단위 대비 금년도 탄소원단위 비율로 나타내야 한다. 즉, 탄소원단위 변화율을 각 지수의 변화율로 분해하는 것으로, 각 지수를 도출하는 식이 아래 (9)부터 (11)까지 나와 있다. 승법적 분해분석법을 활용할 경우, 각 지수별 분해 결과가 1보다 클 경우 탄소원단위 상승에 기여하는 요인이라고 할 수 있으며, 분해 결과가 1보다 작을 경우 탄소원단위 하락에 기여한다. 분해 결과가 정확히 1로 도출되면 해당 요인은 탄소원단위와는 무관한 요인이라고 보여진다. 아래 식에서 w_i^{S-V} 는 산업부문 i 에 대한 디비지아 가중치를 나타내며, 식 (14)의 디비지아 가중치를 계산하기 위한 $L(a, b) = (a - b)/\ln(a/b)$ 는 로그평균 함수를 나타낸다.

2) 에너지 서비스는 에너지 소비량과 효율의 곱으로, 효과적인 에너지 소비량을 의미한다.

$$\frac{CI_{t+1}}{CI_t} = D_{YG}^{t,t+1} \times D_{PS}^{t,t+1} \times D_{PEI}^{t,t+1} \times D_{EP}^{t,t+1} \quad (9)$$

$$\times D_{ETC}^{t,t+1} \times D_{YP}^{t,t+1} \times D_{YTC}^{t,t+1} \times D_{EF}^{t,t+1}$$

$$D_{YG}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{YG,i}^{t+1}}{CI_{YG,i}^t}\right)\right) \quad (10a)$$

$$D_{PS}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{PS,i}^{t+1}}{CI_{PS,i}^t}\right)\right) \quad (10b)$$

$$D_{PEI}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{PEI,i}^{t+1}}{CI_{PEI,i}^t}\right)\right) \quad (10c)$$

$$D_{EP}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{EP,i}^{t+1}}{CI_{EP,i}^t}\right)\right) \quad (10d)$$

$$D_{ETC}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{ETC,i}^{t+1}}{CI_{ETC,i}^t}\right)\right) \quad (10e)$$

$$D_{YP}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{YP,i}^{t+1}}{CI_{YP,i}^t}\right)\right) \quad (10f)$$

$$D_{YTC}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{YTC,i}^{t+1}}{CI_{YTC,i}^t}\right)\right) \quad (10g)$$

$$D_{EF}^{t,t+1} = \exp\left(\sum_i w_i^{S-V} \ln\left(\frac{CI_{EF,i}^{t+1}}{CI_{EF,i}^t}\right)\right) \quad (10h)$$

$$w_i^{S-V} = \frac{L(CI_{it}/CI_t, CI_{it+1}/CI_{t+1})}{\sum_i L(CI_{it}/CI_t, CI_{it+1}/CI_{t+1})} \quad (11)$$

IV. 실증분석 결과

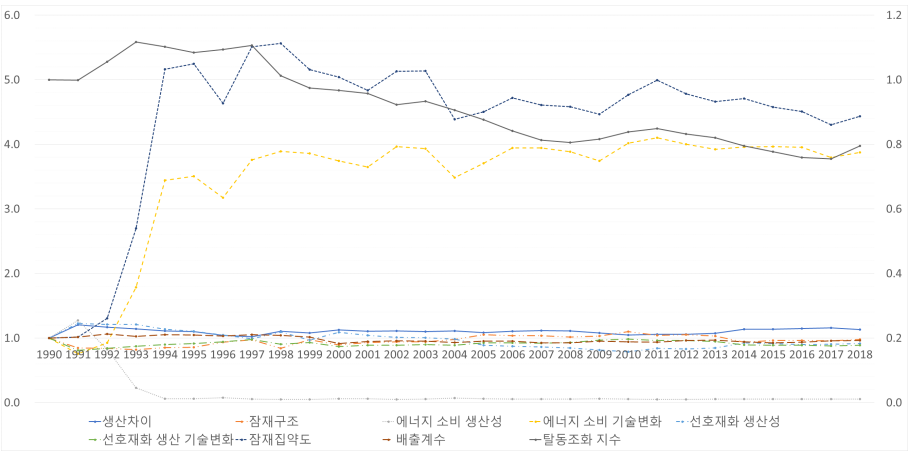
1. 온실가스 탈동조화 지수(DI) 분해분석 결과

상기 기술한 대로 탄소원단위를 승법적 요인분해 할 경우 1990년을 기준연도로 한 탈동조화 지수가 된다. 즉, 각 연도별 분해된 요인을 전부 곱할 경우 탈동조화 지수가 도출된다. 아래 [그림 1]과 <표 2>에 기준연도고정 방식을 활용한 1990년부터 2018년의 국내 온실가스 탈동조화 지수 변화요인이 정리되어 있다. [그림 1-1]에서 여덟 가지 지수에 대해 분석결과를 보여주고 있으나, 선호재화 생산성 및 에너지 소비 기술변화, 에너지 소비 생산성 지수로 인해 타 효과가 식별되지 않아 [그림 1-2]에 따로 표기한다.

[그림 1-1]의 탈동조화 지수를 먼저 살펴보면(우측 축), 1990년을 기준연도로 한 산업부문의 탈동조화 지수는 1997년까지 동조화 경향성을 가지고 있으며($DI \geq 1$), 이후 점점 탈동조화 경향을 가지는 것으로 나타난다. 1990년 대비 2018년의 탈동조화 지수는 약 0.74로, 이는 부가가치 증가율 대비 온실가스 배출량 증가율이 74%로 둔화되었다는 것을 의미한다. [그림 1-1]에서 식별되는 지수는 에너지 소비 생산성 및 에너지 소비 기술변화 효과, 잠재집약도 효과가 있다. 에너지 소비 기술변화 효과와 잠재집약도 효과가 동조화 방향으로 작용하는 반면 에너지 소비 생산성 효과가 탈동조화 지수의 하락에 기여하는 것으로 나타난다.

에너지 투입 효율 지표가 꾸준히 탈동조화 지표와 같은 방향으로 움직인다는 것은 에너지 투입 효율이 지속적으로 증가하여 거리함수의 값이 작아진다는 것을 뜻한다. 즉, 산업별로 투입된 에너지의 양은 효과적으로 온실가스 생산 대비 GDP 생산 증가에 기여하고 있었다는 것이다.

[그림 1-1] 탈동조화 지수 분해분석 결과



[그림 1-2] 탈동조화 지수 분해분석 결과(다섯 개 지수)



이 지수는 국내 자료의 경우 시간이 지남에 따라 값이 증가한다. 즉, 산업별 에너지 투입 기술 발전이 과거에 비해 더더지고 있다는 뜻이다. 이는 원자료에서 1990-1993년도의 Transport equipment 부문 에너지 소비량이 타 연도에 비해 지나치게 낮기 때문이라 할 수 있다³⁾. 해당 부문으로 인해 타 산

업의 에너지 효율 향상이 떨어지는 것처럼 평가된다. 따라서 해당 부문을 제하고 분석하거나, 기준연도변경 분석을 통해 1994년 이후의 효과를 살펴볼 필요가 있다.

잠재집약도 효과가 동조화 방향으로 작용한다는 것은 실제 부가가치 생산 대비 에너지 서비스가 상승하고 있다는 뜻이다. 탄소배출량 관련 선행연구들에서 집약도 효과가 음의 방향으로 작용한 것을 보면 환경 생산기술에서 에너지 투입 효율을 고려할 때 에너지 투입 효율 향상 속도가 원단위 완화 효과보다 빨라 집약도 효과의 방향이 변화할 수 있음을 알 수 있다.

[그림 1-2]에 나머지 다섯 가지 지수가 구체적으로 나타나 있다. 선호재화와 관련된 생산성 및 기술변화 지수의 경우 온실가스 및 부가가치 간의 탈동조화 지수와 같은 방향으로 작용하고 있다. 선호재화 기술변화 지수는 꾸준히 탈동조화 방향으로 작용한 것으로 보인다. 반면 선호재화 생산성의 경우 분석 기간 초기에는 동조화에 기여하였으나 최근 탈동조화 경향성을 이끌고 있는 것으로 나타난다.

배출계수도 선호재화 생산성과 같은 경향성을 가져 우리나라 산업의 온실가스 탈동조화에 점진적으로 기여하고 있다. 이는 에너지 소비량 대비 배출량이 줄어들고 있다는 뜻으로, 산업별 에너지 소비량이 탄소 효율적으로 이루어지고 있다고 해석할 수 있다. 이외에 부가가치 증가 대비 온실가스 배출량을 증가시켜 온실가스 동조화 요인으로 작용하는 지수는 생산차이 지수로서, 이 지수는 선호재화 생산 비효율을 나타낸다. 환경적 생산기술 추정 결과 선호재화 생산에 발생한 비효율이 동조화 효과를 유발한다.

3) IEA의 에너지 밸런스 상 Transport equipment 부문의 1차 에너지 공급은 1990년부터 1992년까지 각각 26, 26, 39ktoe를 기록하다가 1993년부터 140ktoe, 1994년은 498ktoe로 급등한다.

〈표 2〉 탈동조화 지수 승법적 분해분석 결과

연도	생산 차이	잠재 구조	에너지 소비 생산성	에너지 소비 기술 변화	선호 재화 생산성	선호재화 생산기술 변화	잠재 집약도	배출 계수	탈 동조화 지수
1991	1.2040	0.8433	1.2752	0.7557	1.2273	0.8082	1.0167	1.0124	0.9989
1992	1.1686	0.8425	0.8219	0.9238	1.2093	0.8400	1.3072	1.0637	1.0557
1993	1.1413	0.8175	0.2305	1.7841	1.2101	0.8710	2.6987	1.0236	1.1170
1994	1.1103	0.8504	0.0609	3.4389	1.1383	0.8997	5.1626	1.0536	1.1023
1995	1.0965	0.8575	0.0593	3.5039	1.1029	0.9149	5.2459	1.0486	1.0838
1996	1.0432	0.9329	0.0754	3.1737	1.0460	0.9400	4.6357	1.0300	1.0940
1997	1.0186	0.9730	0.0532	3.7554	0.9872	0.9748	5.5114	1.0534	1.1066
1998	1.1020	0.8411	0.0491	3.8920	1.0922	0.9048	5.5626	1.0411	1.0126
1999	1.0750	0.9711	0.0513	3.8564	0.9686	0.9302	5.1576	1.0161	0.9746
2000	1.1230	0.8942	0.0591	3.7403	1.0888	0.8691	5.0401	0.9130	0.9666
2001	1.1058	0.9281	0.0606	3.6459	1.0391	0.8874	4.8370	0.9471	0.9575
2002	1.1078	0.9402	0.0507	3.9638	1.0083	0.8900	5.1322	0.9566	0.9229
2003	1.0994	0.9424	0.0520	3.9330	1.0035	0.8979	5.1365	0.9523	0.9336
2004	1.1073	0.9771	0.0675	3.4828	0.9831	0.8882	4.3847	0.9294	0.9056
2005	1.0814	1.0517	0.0590	3.7051	0.8897	0.9236	4.5003	0.9530	0.8760
2006	1.1023	1.0379	0.0519	3.9410	0.8702	0.9231	4.7169	0.9499	0.8418
2007	1.1148	1.0341	0.0533	3.9416	0.8592	0.9178	4.6068	0.9233	0.8127
2008	1.1111	1.0131	0.0552	3.8833	0.8457	0.9323	4.5830	0.9240	0.8058
2009	1.0780	1.0276	0.0589	3.7400	0.8160	0.9642	4.4672	0.9515	0.8164
2010	1.0472	1.1009	0.0522	4.0158	0.7855	0.9847	4.7670	0.9414	0.8382
2011	1.0545	1.0408	0.0499	4.1023	0.8401	0.9613	4.9949	0.9359	0.8489
2012	1.0556	1.0515	0.0513	3.9997	0.8285	0.9603	4.7809	0.9603	0.8321
2013	1.0714	1.0286	0.0527	3.9223	0.8459	0.9449	4.6620	0.9656	0.8203
2014	1.1339	0.9349	0.0519	3.9570	0.9258	0.8916	4.7084	0.9383	0.7944
2015	1.1368	0.9615	0.0524	3.9627	0.9119	0.8851	4.5784	0.9264	0.7774
2016	1.1439	0.9608	0.0520	3.9546	0.8979	0.8856	4.5071	0.9368	0.7590
2017	1.1571	0.9548	0.0550	3.7964	0.9035	0.8787	4.3032	0.9575	0.7546
2018	1.1298	0.9791	0.0535	3.8748	0.9147	0.8863	4.4359	0.9628	0.7945

잠재구조 효과의 경우 선호재화 생산 비효율이 발생한 경우의 산업 생산구조를 나타내는 지수인데, 탈동조화 지수 변화요인으로서 중립적인 성격을 보인다. 1990년대부터 2000년대 초반까지는 탈동조화 요인으로 작용하다가, 2000년대 중반 이후부터 동조화 경향성을 보이며 최근 들어 다시 탈동조화 경향을 띤다. 2000년대 들어 국내 주요 산업인 철강 수요가 둔화되고 판매가격이 하락하여 부가가치 생산이 둔화되었다. 실제로 거리함수를 도출하였을 경우에도 철강 부문에서의 부가가치 생산 비효율이 높은 것으로 나타난다. 이 때문에 선호재화 생산 비효율 구조가 탄소원단위를 증가시켰으나 최근 완화되고 있는 것으로 나타난다.

에너지 소비 효율에 연관되어 있는 두 지수인 에너지 소비 생산성 및 에너지 소비 기술변화 효과의 경우 반대의 움직임을 보이고 있다. 이는 환경적 생산기술 측면에서 효율과 기술의 균형이 맞지 않게 나타나고 있음을 암시한다(Wang et al., 2018). 반면 선호재화 생산 효율에 관련되어 있는 두 지수(선호재화 생산성 및 선호재화 생산기술 변화효과)는 같은 방향의 움직임을 보인다. 환경적 생산기술 측면에서 부가가치 생산 효율이 꾸준히 증가했으며, 부가가치 생산을 위한 기술도 지속적으로 발전하고 있음을 뜻한다.

2. 탄소원단위 분해분석 결과: 기준연도변경

<표 3>에 탄소원단위의 기준연도변경 분해분석 결과가 나와 있다. 탄소원단위의 장기적인 흐름을 파악하여 탈동조화 지수를 살펴보는 것도 중요하지만, 연간 차이를 통해 단기 특성을 파악하는 기준연도변경 분석을 시도할 필요가 있다. 특히 자료의 특징 때문에 분석기간 초기에 해당 지수의 등락이 심한 경우(에너지 소비 생산성, 에너지 소비 기술변화, 잠재 집약도 효과가 해당) 기준연도고정 분석 시 그 경향을 유지하여 보이기 때문에 기준연도변경 분석을 함께 시도한 후에 해석할 필요가 있다.

기준연도변경 분석 결과도 기준연도 고정 분석 결과와 비슷한 양상을 보인다. 에너지 소비 기술 변화효과와 잠재집약도 변화가 1993-1995년에 탈동조화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 효과는 앞서 설명한 대로 Transport equipment의 1990-1993년 자료의 매우 적은 에너지 소비량 때문에 발생한다. 해당 기간에서 에너지 투입 효율이 매우 높게 나타나기 때문이다. 해당 지수들도 그 기간을 지난 후에는 1 부근에서 등락을 반복하고 있다.

생산차이 효과 또한 앞선 탈동조화 지수 분석과 크게 다른 결과를 보이지 않으며, 전반적으로 증가 요인으로 작용하고 있다. 한편, 에너지 소비 및 선회재화 생산 효율과 관련된 지표들은 2000년대 이후 탄소원단위에 큰 영향을 주지 않고 있다. 이는 2000년대 이후부터 환경생산 기술 관점에서 에너지 소비 효율 및 생산 효율이 안정궤도에 올라선 것을 가리킨다.

잠재 집약도의 경우에도 분석기간 초기에는 동조화 방향으로 작용하는 경우가 많았으나, 분석기간 후기인 2010년대 이후부터는 탈동조화 방향으로 작용하고 있다. 에너지 소비효율이 급증하면서 잠재에너지 원단위의 감소 폭이 늘어났으나, 그 경향성이 점점 약해진 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 여전히 전년도 대비 집약도 감소 효과가 늘어나는 것으로 보아 환경적 기술 측면에서 에너지 소비효율이 꾸준히 증가하고 있는 것으로 해석된다.

기간에 따라 탄소원단위의 변화요인을 분해해보면 그 경향성을 더 뚜렷하게 살펴볼 수 있다. 본 연구에서는 승법적 변화요인을 사용하였으므로, 기하평균을 사용하면 해당 기간 동안 각 지수가 평균적으로 탄소원단위의 변화에 얼마나 기여하고 있는지 살펴볼 수 있다. <표 4>에는 전체 분석기간인 1990-2018을 세 개의 기간으로 나누어(1990-1998, 1998-2009, 2009-2018) 각 기간별 변화요인을 보여준다. 분석 기간을 나누는 기준은 국내 경제충격이 발생한 대표적인 해인 1997년(경제위기)과 2008년(금융위기)을 기점으로 기준연도를 다르게 하여 분석할 수 있도록 구성하였다(진태영 외, 2020).

생산이론 기반 분해 및 로그평균 디비지아 지수를 이용한 국내 탄소원단위 변화요인 분석

〈표 3〉 국내 산업 탄소 원단위 분해분석 결과

연도	생산 차이	잠재 구조	에너지 소비 생산성	에너지 소비 기술 변화	선호 재화 생산성	선호재화 생산기술 변화	잠재 집약도	배출 계수	탄소원 단위 변화
1991	1.2040	0.8433	1.2752	0.7557	1.2273	0.8082	1.0167	1.0124	0.9989
1992	0.8725	0.9981	0.6415	1.4078	0.9857	1.1562	1.1200	1.0528	1.0568
1993	1.0151	0.9720	0.2792	1.5832	0.9999	0.9976	2.5254	0.9629	1.0580
1994	1.0087	1.0407	0.2631	0.9995	0.9405	0.9962	3.7126	1.0278	0.9869
1995	1.0202	1.0094	0.9684	0.5278	0.9684	0.9845	1.9653	0.9969	0.9832
1996	0.9675	1.0771	1.2539	0.8825	0.9531	1.0103	0.9134	0.9953	1.0094
1997	1.0031	1.0460	0.7052	1.3166	0.9423	1.0095	1.0753	1.0152	1.0115
1998	1.1223	0.8628	0.9191	0.8769	1.1076	0.8947	1.2036	0.9830	0.9151
1999	0.9051	1.1527	1.0436	0.9508	0.8874	1.1081	0.9664	0.9783	0.9625
2000	1.0742	0.9197	1.1239	0.9833	1.1251	0.9086	0.9682	0.9176	0.9917
2001	0.9198	1.0354	1.0255	1.0006	0.9554	1.0931	0.9342	1.0391	0.9906
2002	1.0230	1.0107	0.8387	1.1159	0.9715	0.9821	1.0341	1.0095	0.9639
2003	0.9953	0.9976	1.0238	0.9153	0.9975	1.0060	1.0886	0.9952	1.0115
2004	1.0162	1.0389	1.2824	0.8940	0.9788	0.9804	0.8518	0.9805	0.9700
2005	0.9660	1.0691	0.8724	1.1914	0.9077	1.0513	0.9167	1.0302	0.9673
2006	1.0602	0.9876	0.8802	1.0021	0.9777	0.9612	1.1092	0.9983	0.9609
2007	1.0109	1.0031	1.0132	0.9428	0.9841	0.9947	1.0322	0.9865	0.9655
2008	0.9909	0.9796	1.0272	0.9861	0.9841	1.0219	0.9954	1.0074	0.9914
2009	0.9855	1.0052	1.0680	0.9802	0.9688	1.0182	0.9641	1.0273	1.0132
2010	1.0047	1.0638	0.8781	1.1108	0.9657	0.9874	1.0371	0.9959	1.0267
2011	1.0287	0.9424	0.9552	0.9535	1.0715	0.9554	1.1266	0.9944	1.0127
2012	0.9770	1.0031	1.0279	0.9517	0.9897	1.0235	0.9867	1.0228	0.9801
2013	1.0140	0.9691	1.0242	1.0059	1.0260	0.9848	0.9538	1.0102	0.9859
2014	1.0419	0.9170	0.9830	1.0295	1.0907	0.9585	0.9879	0.9698	0.9684
2015	0.9453	1.0248	1.0067	0.9902	0.9869	1.0528	0.9851	0.9902	0.9786
2016	0.9987	1.0000	0.9954	0.9982	0.9842	1.0081	0.9845	1.0074	0.9764
2017	1.0126	0.9857	1.0526	0.9633	1.0105	0.9914	0.9562	1.0255	0.9941
2018	0.9683	0.9997	0.9776	1.0607	1.0254	1.0168	0.9977	1.0084	1.0529

생산차이의 경우 1990년대에는 선호재화 생산에서 발생한 비효율이 동조화 효과를 보이는 반면, 생산 비효율이 완화되어 최근 탈동조화 효과를 보이고 있다. 배출계수의 효과는 탄소원단위 변화에 있어서 동조화 영향으로 작용하지만 그 효과가 상당히 작다. 배출계수 효과는 본 연구에서 유일하게 환경적 생산기술의 영향을 받지 않는 지수이다. 기술의 고려가 없을 경우 에너지 소비량 대비 탄소배출량이 분석 대상이 되는 산업부문에서 크게 달라지지 않았다는 것을 의미하여 에너지 전환정책이 산업부문으로만 한정할 경우 큰 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

〈표 4〉 기간에 따른 탄소원단위 변화요인 분해 기하평균

기간	생산 차이	잠재 구조	에너지 소비 생산성	에너지 소비 기술 변화	선호 재화 생산성	선호재화 생산기술 변화	잠재 집약도	배출 계수	탄소원 단위 변화
1990-2018	1.0035	0.9964	0.8971	0.9957	0.9982	0.9965	1.1150	1.0011	0.9918
1990-1998	1.0225	0.9778	0.6829	0.9876	1.0115	0.9776	1.4939	1.0054	1.0016
1998-2009	0.9939	1.0166	1.0112	0.9934	0.9746	1.0099	0.9847	0.9967	0.9806
2009-2018	0.9986	0.9887	0.9878	1.0059	1.0160	0.9972	1.0006	1.0026	0.9970

에너지 소비 생산성과 선호 재화 생산성은 서로 반대의 경향을 보이고 있다. 에너지 소비 생산성이 탄소원단위를 증가시키는 경우 재화 생산성은 탄소원단위 감소 방향으로 작용한다. 산출 기준의 효율성 추정과 투입 기준의 효율성 추정이 반대로 작용하기 때문이라고 해석할 수 있으나, 본 연구에서는 단순히 투입과 산출의 대비를 통한 효율성 추정을 사용하지 않고 있다. 효율 추정 시 환경적 요소인 온실가스에 대해 고려하고 있기 때문이다. 따라서 규모의 차이를 볼 때 에너지 소비 생산성이 선호재화 생산성에 비해 더 큰 규모를 가진다는 것은 에너지 소비효율에 대한 변화가 선호재화 생산효율 변화에 비해 빠르게 이루어지고 있다는 것을 암시한다.

1990년부터 1998년을 제외하고, 1998년부터 2018년까지의 자료를 살펴보면, 두 기간은 생산차이를 제외한 나머지 요소들에서 기준점을 사이에 두고 정반

대의 경향성을 보인다. 배출계수의 경우 오히려 2010년대에는 동조화 방향으로 작용한 것을 보면 산업부문 온실가스 저감정책의 시급성을 나타내는 것이라 할 수 있다. 기술변화 요인을 살펴보면, 환경적 관점에서 에너지 소비 기술 및 선호재화 생산 기술의 발전이 탄소원단위 감소에 크게 기여하지 못하고 있다. 오히려 에너지소비기술 변화의 경우 최근 들어 탄소원단위를 증가시키는 방향으로 작용한다.

위와 같이 환경적 생산기술을 고려한 분해분석을 통해 국내 산업의 탄소원단위 변화요인을 살펴보았다. 에너지 투입에 대한 생산성 요인이 탄소원단위를 감소시키는 것으로 작용하고 있지만, 기술의 발전요인은 그렇지 못하고 있는 것으로 보인다. 산업의 기술 이외에도, 에너지 소비 대비 온실가스 배출량 변화를 측정하는 요인인 배출계수 효과 역시 탄소원단위를 완화시키지 못하고 있다는 점이 주목할 만하다.

V. 결론

본 연구는 우리나라의 1990년부터 2018년까지 29년간의 자료를 활용하여, 국내 산업부문의 탄소원단위에 대한 분석을 진행하였다. 먼저 자료 측면에서는 전환부문에 대한 고려라는 과거 에너지 소비 분해분석 논의를 포함하기 위해 에너지 소비량의 경우 산업별 1차 에너지 공급 자료를 확보하였다. 또한 국가 온실가스 인벤토리의 자료를 활용하기 위해 에너지 밸런스의 부문분류와 국민계정의 산업부문 분류, 국가 온실가스 인벤토리의 부문분류를 맞추어 통합하였다.

이외 방법론적 측면에서의 기여로 환경적 기술요인에 대한 고려를 분해분석에서 시도하기 위해, 국내에서 시도되지 않았던 PDA 기법을 활용하였다. 거리함수를 추정하여 PDA-LMDI 결합기법을 통해 탄소원단위의 변화요인에

대해 분석하였다. 이를 통해 에너지 소비량 및 부가가치 생산량 요인 이외에도 환경을 고려한 산업부문의 기술적인 요인을 함께 고려할 수 있게 되었다.

탈동조화 지수의 분석 결과 기술적 요인의 경우 에너지 소비 생산성 및 선호재화 생산성, 선호재화 생산기술 변화, 에너지 투입기술에 대한 변화가 탈동조화 요인이라는 것을 밝혀냈다. 이 중에서도 에너지 투입기술에 대한 변화가 동조화 주원인임을 알 수 있었다. 이는 온실가스 배출량을 고려했을 때, 에너지 투입기술이 과거에 비해 향상되지 않고 있다는 뜻이다. 즉, 에너지를 각 시점별로 효율적으로 투입하고는 있으나 기술의 향상이 정체되어 있음을 의미한다.

기준연도를 변경한 분석 결과에서도 같은 경향성이 나타난다. 또한 한 부분의 영향이 크게 나타나는 1990년대를 제외할 경우 탄소원단위에 대해 각 요인의 영향이 크게 나타나지 않는다. 여기서 주목해야 할 점은 최근 선호재화 생산성이 타 요인에 비해 탄소원단위 상승요인으로 작용하고 있다는 점이다. 이는 온실가스 배출량을 고려할 때 에너지 투입 대비 산출량이 떨어지고 있다는 뜻이다. 이와 마찬가지로 에너지 소비 기술변화 요인도 최근 변화율이 둔화되어 탄소 원단위를 상승시키고 있다. 따라서 저탄소기술에 대한 투자를 통해 에너지 투입량 기준으로 비선호 생산재 생산 대비 부가가치 생산을 늘릴 필요가 있다.

국내 온실가스 배출량 저감을 위한 노력으로 산업부문에서 온실가스 저감 및 회피기술을 개발하고, 실증화하여 적용하려는 노력이 이루어지고 있으며 에너지 산업 측면에서는 에너지 수요관리 정책을 통해 에너지 효율을 증가시켜 온실가스를 저감시키려는 시도를 하고 있지만 에너지 효율 및 탄소효율 기술에 대한 투자와 부가가치를 생산할 수 있는 시장에 대한 고려가 부족한 것으로 보인다. 산업부문에 대해 배출계수 요인이 탄소원단위에 크게 영향을 미치지 않는다는 결과는 에너지 소비량 대비 온실가스 배출량의 변화율이 크지 않았음을 의미하기도 한다. 또한 온실가스 배출량을 크게 줄였음에도 부가가치 생산이 줄어 탄소원단위가 제자리일 가능성도 배제할 수는 없다. 따라서

생산이론 기반 분해 및 로그평균 디비지아 지수를 이용한 국내 탄소원단위 변화요인 분석

향후 에너지 전환정책을 통해 배출계수를 완화시킴과 동시에 환경측면의 신기술에 대한 투자 증대로 신산업을 구축하여 부가가치를 활성화할 수 있는 방안을 모색해야 할 것이다.

접수일(2021년 1월 29일), 수정일(2021년 3월 15일), 게재확정일(2021년 3월 26일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 국가통계포털, <http://www.kosis.kr>, 통계청, 2020.
- 관계부처합동, 2020, “탄소중립 추진전략”, pp.6.
- 관계부처합동, 2020, “대한민국 2050 탄소중립 전략”, pp.32.
- 김문정. 2014. “국내 지역별 이산화탄소 배출량 현황 및 요인 분석”, 한국신재생에너지 학회 추계학술대회논문집, 여수 엠블호텔, p. 36.
- 김문정, 허은녕. 2020. “LMDI 방법론을 이용한 국내 배출권거래제 참여기업의 배출량 변화요인 분해분석”, 한국혁신학회지 15(2), pp. 349-367.
- 김수이. 2018. “국내 발전부문의 온실가스 배출 요인 분해 분석”, 에너지경제연구 17(1), pp. 241-264.
- 김수이, 정경화. 2011. “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분해 분석”, 자원 · 환경경제연구 20(2), pp. 229-254.
- 김진수. 2015. “우리나라 에너지소비 분해분석 연구에 대한 고찰”, 에너지경제연구 14(3), pp. 265-291.
- 김태현, 임덕오, 김윤경. 2015. “2018-2011년 산업부문의 에너지소비 및 온실가스 배출 급증에 대한 요인분해연구”, 에너지경제연구 14(3), pp. 203-227.
- 박년배, 심성희. 2015. “감축목표 업종 분류체계에 따른 산업부문의 에너지 소비 및 온실가스 배출 요인 분해 분석”, 자원 · 환경경제연구 24(1), pp. 189-224.
- 박성준, 김진수. 2014. “우리나라 1차 에너지와 최종 에너지 소비 변화요인 분해 비교 분석”, 자원 · 환경경제연구 23(2), pp. 305-330.
- 박정욱, 김수이. 2013. “한국과 일본의 산업부문 에너지 소비에 대한 LMDI 요인분해 분석”, 에너지경제연구 12(1), pp. 67-103.
- 온실가스종합정보센터, <https://www.gir.go.kr>, 환경부, 2020.
- 이상준. 2015, “에너지 효율 리바운드 효과와 온실가스 감축”, 에너지경제연구원 기본 보고서 15(11).

- 이상준, 2017, “주요국의 온실가스 배출과 경제성장의 탈동조화 경향과 시사점,” 『KERI Insight』, KERI 정책제언 17-6.
- 이성인, 2018, “(이슈와 시선)에너지전환, 국가 에너지효율 혁신이 핵심이다”, 에너지포커스 16(3), pp. 6-10.
- 이재형, 임지재, 김용기, 이재영, 2012, “LMDI 분해 분석을 이용한 국내 철도 노선별 온실가스 배출 특성 분석”, 한국철도학회 논문집 15(3), pp. 286-293.
- 이재형, 2018, “철도수송부문 온실가스 배출 요인 분해분석”, 한국기후변화학회지 9(4), pp. 407-421.
- 에너지경제연구원, 2018, “에너지통계연보”, 울산 : 에너지경제연구원.
- 정해식, 이기훈, 2001, “로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해”, 자원 · 환경경제연구 10(4), pp. 569-589.
- 조용성, 2017, “전력산업의 온실가스 배출요인 분석 및 감축 방안 연구”, 한국기후변화학회지 8(4), pp. 357-367.
- 조향숙, 2017, “OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 감소요인 분해 분석”, 자원 · 환경경제연구 26(1), pp. 1-35.
- 진상현, 김수이, 황인창, 김동형, 2013, “국가 온실가스 배출구조 변화요인 분석”, 온실가스종합정보센터
- 진상현, 정경화, 2013, “지역별 온실가스 배출특성에 관한 연구: 지수분해분석을 중심으로”, 한국정책과학학회보 17(2), pp. 1-26.
- 진상현, 황인창, 2009, “지자체의 온실가스 배출특성에 관한 지수분해분석: 에너지부문을 중심으로”, 환경정책 17(3), pp. 101-128.
- 진태영, 김진수, 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.
- 한준, 2019, “우리나라 전력화(Electrification)의 CO₂ 배출 영향 연구”, 환경정책 27(1), pp. 107-129.
- 황인창, 2008, “기후변화 대응전략에 따른 이산화탄소 배출량 변화요인 분석: 생태적

- 근대화 전략을 중심으로”, 환경사회학연구 12(2), pp. 153-184.
- Ang, B. W. 1994. “Decomposition of industrial energy consumption: the energy intensity approach,” *Energy Economics* 16(3), pp. 163-174.
- Ang, B. W. 2005. “The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide,” *Energy Policy* 33, pp. 867-871.
- Ang, B. W., Choi, K. H. 1997. “Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method,” *Energy Journal* 18(3), pp. 59-73.
- Ang, B. W., Liu, N. 2007a. “Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach,” *Energy Policy* 35(1), pp. 238-246.
- Ang, B. W., Liu, N. 2007b. “Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach,” *Energy Policy* 35(1), pp. 739-742.
- IEA, 2019. “Energy efficiency is the first fuel, and demand for it needs to grow,” Paris, France.
- IEA. 2020. “World Energy Balances 2020,” Paris, France.
- Jiang, R., Li, R., Wu, Q. 2019. “Investigation for the Decomposition of Carbon Emissions in the USA with C-D Function and LMDI methods,” *Sustainability* 11(2), 334.
- Lin, B., Du, K. 2014. “Decomposing energy intensity change: A combination of index decomposition analysis and production-theoretical decomposition analysis,” *Applied Energy* 129, pp. 158-165.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., Sommerville, M. 2009. “Empirical estimates of the direct rebound effect: A review,” *Energy Policy* 37, pp. 1356-1371.
- Wang, Q., Chiu, Y. H., Chiu, C. R. 2015. “Driving factors behind carbon dioxide emissions in China: a modified production-theoretical decomposition analysis,” *Energy Economics* 51, pp. 252-260.
- Wang, Q., Hang, Y., Su, B. and Zhou, P. 2018. “Contributions to sector-level carbon intensity change: an integrated decomposition analysis,” *Energy Economics* 70, pp. 12-25.

생산이론 기반 분해 및 로그평균 디비지아 지수를 이용한 국내 탄소원단위 변화요인 분석

- Zhao, M., Tan, L., Zhang, W., Ji, M., Liu, Y., Yu, L. 2010. "Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method," *Energy* 35, pp.2505-2510.
- Zhou, P., Ang, B. W. 2008. "Decomposition of aggregate CO₂ emissions: A production-theoretical approach," *Energy Economics* 30(3), pp.1054-1067.
- Zhou, D., Liu, X., Zhou, P., Wang, Q. 2017. "Decomposition Analysis of Aggregate Energy Consumption in China: An Exploration Using a New Generalized PDA Method," *Sustainability* 9(5), 685.

ABSTRACT

Korean carbon intensity change:
Production-theoretical Decomposition Analysis
(PDA) and Log Mean Divisia Index (LMDI)

Taeyoung Jin* and Dowon Kim**

The purpose of this study is to decompose carbon intensity change with Korea's industrial greenhouse gas (GHG) emission, energy consumption, and real GDP dataset from 1990 to 2018. We adopt integrated approach of Traditional decomposition analysis, log mean Divisia index (LMDI) and production-theoretical decomposition analysis (PDA) based on Shephard distance function, which can consider environmental technology factor. The empirical results show that while energy use and desirable output productivity can improve carbon intensity, slowed technological change in energy use and desirable output cannot decrease it. Especially, energy use technological change has made GHG emissions and economic activity coupled, which indicates that energy use technological change has rapidly slowed down. In addition, considered emission factor has not improved carbon intensity, A increase in investment on environmental new technology to construct new industry that can vitalize value-added will be needed along with energy transition policy for mitigate emission factor.

Key Words : PDA, Distance function, Industrial carbon emissions,
Decoupling index

* Associate Research Fellow, Korea Energy Economics Institute. tyjin@keei.re.kr

** Associate Research Fellow, Korea Energy Economics Institute. dwkim@keei.re.kr