

이산화탄소 배출량 분해분석:

산업 및 에너지 소비구조를 중심으로

A Decomposition Analysis of Domestic Carbon Dioxide Emissions Related to Industry Structure and Energy Mix in Korea

진태영* · 최가영** · 이은미*** · 이수경****

Taeyoung Jin · Gayoung Choi · Eunmi Lee · Sue Kyoung Lee

요약: 본 연구는 분해분석을 활용하여 한국의 이산화탄소 배출량 변화요인을 조사한 연구이다. 분석을 위해 세 가지 화석연료 에너지원과 14개의 생산 부문으로 구성된 자료를 수집하였고, 기준연도변경 방식과 기준연도고정 방식 두 가지의 로그 평균 디비지아 지수(LMDI) 방법으로 이산화탄소 배출량을 분해하였다. 본 연구에서는 인구 효과, 소득 효과, 구조 효과, 집약도 효과, 믹스 효과, 화석연료전환 효과 및 배출계수 효과의 총 일곱 가지 지수를 포함하도록 분해방정식을 연장하였다. 분석 결과 인구 효과 및 소득 효과, 믹스 효과, 화석연료전환 효과가 한국의 이산화탄소 배출량 증가 요인으로 작용한 반면, 구조 효과 및 집약도 효과, 배출계수 효과는 감축 요인으로서 작용한 것으로 나타났다. 믹스 효과와 화석연료전환 효과는 화석연료 사용 감축과 신재생에너지 육성 정책, 그리고 발전 부문에서의 탄소 효율화 정책의 필요성을 암시하며, 구조 효과 및 원단위 효과는 에너지 효율 정책과 고부가가치 산업 육성 정책의 필요성을 보여준다. 따라서, 산업 정책을 포함하여 에너지 효율 향상과 친환경 에너지 정책이 계속해서 추진되어야 할 것이다.
핵심주제어: 이산화탄소 배출량, 산업구조, 에너지 믹스, LMDI

Abstract: This study aims at investigating the driving factors of Korean carbon dioxide emissions using decomposition analysis. We constructed a dataset of 14 production sectors and three fossil fuel energy sources. Additive log mean Divisia index (LMDI) decomposition analysis is conducted by using both fixed and rolling base year. We extend the decomposition equation to include seven factor effects: population, production, structure, intensity, mix, conversion, and emission. The population, production, mix, and conversion effects are inducing factors of Korean carbon dioxide emission. The structure, intensity, and emission effects are mitigating factors. Each factor effect has policy implications. The mix and conversion factor effects show that the reduction of fossil fuel, promotion of renewable energy, and implementation of a carbon-efficient policy in the generation sector is essential. The structure and intensity factor effects support the necessity of expanding an energy-efficient and high value-added industry. Energy efficiency improvement and clean energy policy must be addressed continuously.

Key Words: CO₂ Emission, Industrial Structure, Energy Mix, LMDI

* 주저자, 녹색기술센터 기후기술협력부 박사후연구원

** 공동저자, 녹색기술센터 기후기술협력부 박사후연구원

*** 공동저자, 녹색기술센터 기후기술협력부 연구원

**** 교신저자, 녹색기술센터 기후기술협력부 선임연구원

I. 서론

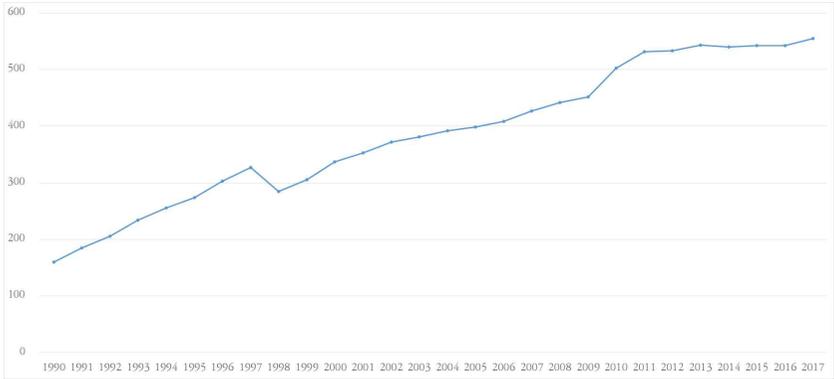
우리나라는 온실가스 다배출 국가로 국제사회에서 온실가스 감축과 기후변화 대응의 책임있는 국가로 거듭나기 위해 2030년까지 BAU 대비 37% 감축이라는 다소 도전적인 목표를 제시하였으며(환경부, 2019), 이를 달성하기 위한 다양한 법적, 제도적 방안을 마련하였다. 구체적으로, 제3차 녹색성장 5개년 계획(2019)과 제2차 기후변화대응 기본계획(2019), 제3차 에너지기본계획(2019) 등의 수립을 통해 온실가스 감축을 실현하고자 노력하고 있으며, 2018년에는 2030 온실가스 감축 수정 로드맵을 발표하였다. 수정된 로드맵은 이전 것과 비교하여 산림흡수원을 통한 탄소 저장 및 에너지 전환부문에 환경급전 강화 등을 고려한 감축방안이 새롭게 제시되었음을 확인할 수 있었으나, 기한 내 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 보다 더 다양한 대안이 제시될 필요가 있다.

〈그림 1〉은 생산부문의 이산화탄소 배출량 추이를 보여 준다(1990~2017년). 생산부문의 이산화탄소 배출량은 1998년의 감소를 제외하고 지속적으로 증가하였다. 이산화탄소 배출량에는 여러 요인이 영향을 미치는데, 생산 및 경제활동이 가장 큰 요인으로 작용할 것이며, 생산부문에서의 구조 변화가 또 다른 요인이 될 수 있다. 또한 에너지 생산 및 사용이 이산화탄소 배출량에 직접적으로 영향을 준다는 점을 고려하면 에너지 소비구조 변화 역시 주된 요인이 될 수 있다(IEA, 2015).

이에 본 연구는 지수분해분석(Index Decomposition Analysis, IDA)을 활용해 산업구조변화, 에너지 효율향상, 화석연료 전환의 세 측면을 살펴봄으로써 국내 산업 및 에너지 소비구조에 따른 이산화탄소 배출량의 변화 요인을 분석하였고, 이를 기반으로 온실가스 감축 목표 달성을 위한 정책적 대안을 추가적으로 제시해 보고자 한다. 본 연구의 기여점은 자료 가용성의 문제로 이산화탄소 배출량의 분해분석에서 거의 시도되지 않던 산업구조 효과와 화석 연료원별 온실가스 배출량 추산을 통한 연료 대체 효과를 함께 고려한다는 데 있다.

〈그림 1〉 생산부문의 이산화탄소 배출량 추이 (1990~2017)

(단위: MtCO₂)



분석 과정에서 IPAT(Impact, Population, Affluence, and Technology) 모형에 기반하여 구조 효과, 믹스 효과, 전력화 효과 및 배출계수 효과를 추가한 Kaya 항등식을 구성하였으며, 화석연료에 초점을 맞추어 분석하기 때문에 전환손실을 고려하기 위해 에너지 소비량을 1차 에너지 소비량 기준으로 추산하여 분해분석을 시도하였다. 온실가스 및 이산화탄소 배출량의 변화요인 분해분석을 수행한 선행연구들에서는 다양한 시계열 및 분석대상, 분해방정식 등을 활용한 각각 기여하는 바가 있으나 동시에 집약도 효과를 효율 지표로 직접 해석한 한계점이 존재한다. 본 연구에서는 선행연구들에서 자주 시도되지 않던 산업별 분석을 활용함과 동시에, 에너지원별 분석 및 화석연료 전환 요소를 추가한다는 차이점을 두었다.

또한, 온실가스 배출량 요인분해 분석에서 에너지 소비 지표가 사용되는 경우가 많은데, 산업별 에너지 소비량의 경우 선행연구에서는 최종에너지를 주로 사용하였다. 최종에너지를 사용할 경우 발전 부문에 대한 고려가 없을 뿐만 아니라, 본 연구와 같이 화석연료 자료만을 사용할 반영할 경우 산업별 전력소비량으로부터 발생하는 이산화탄소 효과를 나타낼 수 없다. 때문에 본 연구에서는 에너지 밸런스 자료를 활용하여 산업부문별 1차 에너지 공급량 자료를 구성하였고 이를 분석에 사용하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 이산화탄소 배출량 분해분

석의 선행연구들을 소개한다. 3장에서는 자료 구성 및 모형을 설명하며, 4장과 5장에서는 각각 실증분석 결과 및 결과해석을 통한 정책 제언으로 마무리 된다.

II. 선행연구

IDA를 활용한 분해분석은 특히 에너지 소비량의 변화요인 분석 측면에서 방법론적 발전이 많이 이루어져 왔다. 처음으로 제시된 요인분해 방정식은 소비량을 생산 효과, 집약도 효과 및 구조 효과의 세 가지 요인분해로 이루어진 구조를 가지고 있다. 이 세 가지 요인을 각 변화량의 가중치 곱으로 분해할 때 중복되는 부분을 처리하는 방식에 따라 방법론이 달라진다. Sun(1998)의 Laspeyres 방법론과 Ang(1994), Ang and Choi(1997), Ang(2005)의 LMDI 분해 방법이 개발되면서, 지수를 변화시키거나 분석기간, 분석대상 그리고 분석 부문을 다르게 하여 분해분석 응용 연구가 다양하게 이루어져 왔다. IDA는 세 가지 장점을 가지는데, 분석기간에 제약이 없고, 적은 자료 및 비율 변화로도 분석이 가능하다(김진수·허은영, 2005).

지수분해 분석은 전통적인 요인분해식이 산업의 구조효과를 포함하기 때문에 산업별 자료가 필요하다. 이산화탄소 배출량의 경우 세부적인 자료가 주기적으로 작성되지 않기 때문에 현재까지 이루어진 분해분석 연구는 대부분 산업 구조 효과를 제외하고 분석이 이루어졌다. 국가 온실가스 통계에서는 산업별 이산화탄소 배출량 통계를 작성하지 않기 때문에, 산업구조 효과를 지수분해 분석에서 추가하기 위해서는 산업별 에너지 소비량을 기반으로 부문별 배출량을 산정해야 한다.

정해식·이기훈(2001)은 에너지 소비로부터 유발된 1970년부터 1998년까지의 국내 이산화탄소 배출량을 로그평균디비지아 지수(Log Mean Divisia Index, LMDI) 기법으로 분해하였다. 이 연구에서는 이산화탄소 배출량을 인구효과, 생산효과, 집약도 효과, 화석연료 효과 및 탄소 배출계수 효과로

나누어 분석하였으며, 분석 결과 이산화탄소 증가의 원인으로 인구 증가가 가장 크게 영향을 미친 것으로 파악되었다. 황인창(2008)의 연구에서는 정해식·이기훈(2001)와 동일한 분해방정식을 사용하였는데, 기존 연구와의 차이는 화석연료 효과 및 탄소 배출계수 효과에서 각 연료별 자료를 산정하여 연료별 분해분석을 진행하였다는 점이다. 따라서 이 연구에서는 배출계수 효과를 선행연구와 동일 방식으로 계산함과 동시에 연료별 배출계수 효과를 계산하여 제시하였다. 또한 분석 대상 역시 국내에 한정하지 않고 영국, 독일, 미국, 한국 총 4개국의 이산화탄소 배출요인을 분석하였다.

진상현·황인창(2009)은 국내 지역별 자료를 활용하여, 기존 연구들이 국가 전체 GDP 자료로 생산 효과를 계산한 것과 다르게 지역별 GDP 자료 및 에너지 소비량을 활용하여 1997년부터 2006년까지의 이산화탄소 배출요인을 분해하였다. 또한 에너지 소비에 있어 에너지원 비중을 활용하여 분해방정식의 지수분해를 한 차원 추가하였다. 윤소원 등(2010)은 이산화탄소 배출량의 변화요인을 분해분석하지는 않았지만, 가전기기의 용도별 에너지 사용 분석을 통해 1995년부터 2007년까지의 가정부문 에너지 유발 이산화탄소 배출량을 추계함에 따라 가정부문 이산화탄소 배출량 분해분석의 기초자료로 활용될 수 있음을 시사하였다. 이와 비슷한 연구로 박년배·전의찬(2013)은 국내 16개 지역에 따라 온실가스 인벤토리를 산정하여 비교분석하였으며, 진상현·황인창(2009)의 연구와 같이 지역 구조효과를 포함한 온실가스 배출량 분해분석의 자료로 사용될 수 있는 연구를 수행하였다.

김수이·정경화(2011)는 국내 제조업을 대상으로 하여 1991년부터 2007년까지의 국내 자료를 근간으로 온실가스 배출량에 대해 요인분해를 시도하였다. 분해 지수로는 Ang(2005)에서 제안된 다섯 가지 지수인 생산효과, 구조효과, 집약도효과, 에너지믹스 효과 및 배출계수 효과가 사용되었다. 가법적 요인분해와 승법적 요인분해 두 가지 방식을 사용하여 분석한 결과 IMF 전후로 온실가스 배출에 영향을 미치는 요인들이 다른 경향성을 보인다는 함의를 도출하였다. 이 연구는 산업구조를 살펴보았다는 점에서 의의

를 두고 있지만 최근 이슈인 전력화 요소를 담지 못하고 있다는 한계를 가진다.

김광욱·강상목(2012)은 IDA를 활용한 분해분석이 아닌 방향거리함수를 활용하여 이산화탄소 분해분석을 시도하였다. 거리함수의 조합에 따른 효율 변화, 기술 변화, 투입성장변화, 산출구성변화 요인을 구성하였고, 각 요인변화에 따라 이산화탄소 배출량의 변화를 추정하였다. 1980년부터 2007년까지 OECD 27개 국가를 대상으로 분석을 진행하였고, 경제성장 정도에 따라 국가 표본을 나누어 각 요인 효과 차이를 도출하였다. 이 연구와 같이 방향거리함수를 활용할 경우 에너지 소비량, 이산화탄소 배출량 및 GDP와 같은 거시적 지표만을 토대로 분석할 수 있다는 장점이 있지만 국가 내의 산업구조 혹은 지역구조와 같은 미시적 효과를 반영할 수 없다는 한계가 있다. 조향숙(2017)은 OECD 7개국에 대해 1995년부터 2013년까지 이산화탄소 배출량 감소 요인에 대해 분해분석을 시도하였다. 여러 국가를 대상으로 분석할 경우, 산업별 혹은 지역별 자료와 같은 미시적 자료를 활용하기 어렵기 때문에 단차원(single dimension)으로 분해를 진행하게 되는데, 이 연구에서는 연료별 배출계수를 활용하여 연료별 배출량 자료를 구성하였고, 분해방정식을 경제성장 효과, 탄소세 비중, 탄소세 효과, 화석연료 생산성, 에너지 집약도, 비화석연료 보급효과, 화석연료 대체효과, 탄소 배출계수의 8개 지수로 연장시켜 분석을 진행하였다.

국내 철도 산업 역시 탄소배출 측면에서 주목받는 산업 중 하나로, 철도 노선별 온실가스 배출 특성 연구를 진행한 바 있다(이재형 등, 2012). 이 연구에서는 수송부문의 특징에 맞추어 지수분해를 전환효과, 원단위효과, 생산효과 및 거리효과의 네 가지 요인으로 나누었으며, 2000년부터 2007년까지의 국내 철도 수송에 따른 온실가스 배출량 변화요인을 분석한 결과 전환효과 및 원단위효과를 통해 배출량 감소가 이뤄지고 있음을 확인하였다.

진상현·정경화(2013)의 연구에서는 진상현·황인창(2009)과 마찬가지로 지자체별 온실가스 배출량의 변화요인을 LMDI 기법을 사용하여 분해하였다. 이 연구에서는 선행 연구들과는 다르게 지자체 온실가스 배출특성

을 탄소배출량 및 집약도 효과를 통한 효율에 따라 저탄소·고비율 지역 및 고탄소·저비율 지자체를 분류하여 나타내었다. 김문정(2014) 역시 마찬가지로 전국 16개 시도별 이산화탄소 배출량 및 국내 에너지원 소비구조를 활용하여 분해분석을 진행한 결과 대도시 지역에서의 에너지 믹스 변화가 저감에 주요 요인으로 작용할 것으로 제언하였다. 진상현 등(2013)은 온실가스 배출량 변화요인 분석을 에너지 분야, 산업공정 분야, 농업 분야 및 폐기물 분야의 분류체계에 따라 서로 다른 자료를 구성하여 분해분석을 진행하였다. 그 결과 에너지 분야의 온실가스 배출 요인이 상대적으로 크게 도출되어 온실가스 감축에서 에너지 분야의 기여가 시급함을 강조하였다.

조용성(2017)의 연구는 온실가스 배출요인 분석에 있어 전력산업에 초점을 맞추었는데, 본 연구의 분해분석 연구기간과 대부분 일치하는 1990년부터 2016년까지의 자료를 사용하여 분석한다. 이 연구는 전력산업에 초점을 맞추기 때문에 에너지 효율 지표로 집약도를 사용하는 타 연구와는 달리 전력집약도 효과를 사용하였다. 김수이(2018)의 연구도 국내 발전부문의 온실가스 배출에 대한 요인분해분석을 주제로 하고 있는데, 조향숙(2017)의 연구와 동일하게 전력집약도 효과를 사용하지만, 차이점으로 2010년부터 2015년까지의 자료를 분석대상으로 활용하였으며, 발전믹스 효과를 두 가지로 나누어 전력 내의 화석연료 사용비율 및 화석연료간의 믹스에 따른 발전믹스 효과를 추가하여 분석하였다.

한준(2019)은 최근 에너지 분야에서 이슈가 되고 있는 전력화를 모형 내에 투입하여 국내 이산화탄소 배출량의 변화요인을 분해분석하였다. 전력화를 모형에 투입하는 과정에서 이산화탄소 배출량을 발전부문 및 최종 에너지 수요 부문으로 분리하였고, 화력발전 비중 효과, 화력발전 효율 효과 및 전력화 효과를 추가하여 분석한 결과 1980년부터 2015년까지 인구 및 생산량 증가로부터 이산화탄소 배출량이 증가한 반면 효율 개선 및 생산량 대비 에너지 소비량 감소를 통해 이산화탄소 배출량 감축이 이루어졌음을 도출하였다.

Ⅲ. 연구 자료 및 방법론

1. 자료

본 연구에서는 박성준·김진수(2014)의 후속연구로, 동일한 방식으로 구축한 산업별 1차 에너지 공급 자료를 분석에 사용하였다. 에너지원별로 1차 에너지 공급 자료를 구성할 경우 최종에너지 자료를 활용한 분해분석에 비해 원별 전환손실을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 1차 에너지 공급 자료는 산업부문에서 직접적으로 사용된 에너지를 포함함과 동시에, 전환 부문에서 투입된 에너지의 양을 함께 고려함으로써, 산업별 생산을 위해 공급된 에너지의 양을 현실적으로 나타낸다. 예를 들어, 최종에너지 소비량 자료를 활용하여 분해분석을 진행할 경우 전력 다소비 산업의 집약도 효과를 과소평가할 수 있는 가능성이 있다. 또한 본 연구는 화석연료만을 고려하기 때문에 최종에너지 소비량만의 분석을 진행할 경우 전환부문에 대한 고려가 누락될 수 있어 1차 에너지 공급 기준 분석의 중요성은 더욱 강조된다.

한준(2019)의 연구와 같이 이산화탄소 배출량을 최종에너지 부문과 전환 부문으로 나누어 진행함으로써 전환부문을 고려하는 것이 가능하지만, 산업구조 효과 고려를 위해서는 에너지 소비량을 한 가지 지표로 표현하는 것이 불가피하다. 결과적으로, 본 연구에서는 최종에너지가 아닌 1차 에너지 공급 자료를 활용함으로써 전환 부문을 고려한 이산화탄소 배출량 변화요인 분해분석을 하고자 한다.

국내 이산화탄소 배출량 분해분석에 집약도, 믹스 및 화석연료 전환 지수를 1차 에너지 공급 기준으로 계산하기 위해 IEA(2019)의 World Energy Balances로부터 자료를 수집하였다. 실질 GDP 자료는 국가통계포털(<https://www.kosis.kr>)로부터 수집하였는데, IEA의 에너지 밸런스와 국가통계포털의 산업 부문 분류가 상이하므로 두 분류체계를 통합할 필요가 있다. 본 연구에서는 <표 1> 과 같이 14가지 생산부문 분류체계를 통합하여 분해분석에 활용하였다. IEA의 에너지 밸런스로부터 얻는 자료인 산업별/

에너지원별 1차 에너지 공급의 경우 원료 혹은 최종에너지 형태로 사용하는 경우에 전력 및 열로 전환되는 에너지를 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서 산정할 집약도 효과, 화석연료 믹스 효과 및 화석연료 전환 효과는 전환 부문에서의 에너지 투입패턴 변화를 반영한다고 할 수 있다.

1차 에너지 공급 자료는 전환 부문과 최종에너지 소비 부문으로 이루어져 있는데, 최종에너지 소비는 산업별로 나타나 있지만 전환 부문의 소비는 산업별로 나타나 있지 않다. 때문에 본 연구에서는 전력 및 열에너지로 전환된 에너지를 연료별 발전비중¹⁾을 사용하여 1차 에너지 공급 형태로 역산하였다. <표 2>에 본 연구에서 사용된 자료인 2017년 기준의 산업별 1차 에너지 공급과 이산화탄소 배출량 현황이 나와 있다. 이산화탄소 배출량은 에너지경제연구원(<https://www.keei.re.kr>)의 국가온실가스인벤토리 및 IPCC 배출계수 가이드라인을 참고하여 연료연소 이산화탄소 배출량을 부문별로 분배하였다. <그림 3>은 분해 전 각 화석연료의 전환율 추세와 본 연구에서 사용된 14개 생산부문에서의 에너지 집약도(toe/million KRW)를 나타낸다.

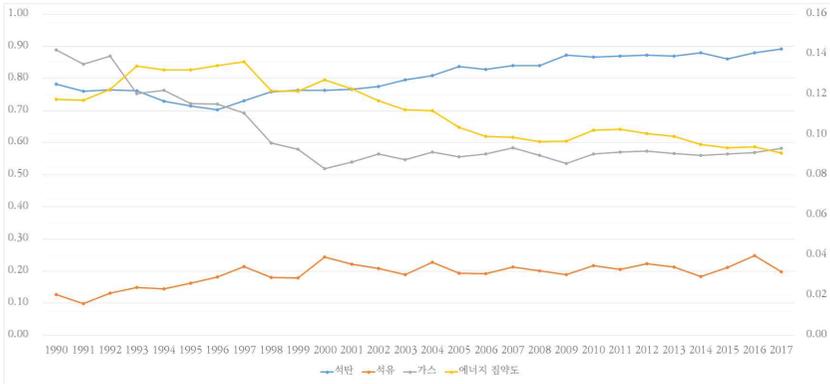
1) 연료별 발전비중은 연료별 1차 에너지 공급과 최종에너지 소비 간의 차이로 계산할 수 있다.

〈표 1〉 분해분석에 사용된 생산부문 분류 체계

국가통계포털	IEA(2019)
1차금속 제조업	Iron and steel/Non-ferrous metals
금속가공제품 제조업	
코크스 및 석유정제품 제조업	Chemical and petrochemical
화학물질 및 화학제품 제조업	
비금속광물제품 제조업	Non-metallic minerals
운송장비 제조업	Transport equipment
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	Machinery
전기장비 제조업	
기계 및 장비 제조업	
광업	Mining and quarrying
음식료품 제조업	Food and tobacco
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	Paper, pulp and printing/Wood and wood products
건설업	Construction
섬유 및 가죽제품 제조업	Textile and leather
기타 제조업 및 산업용 장비 수리업	Non-specified(industry)
운수업	Transport
도소매 및 음식숙박업	Commercial and public services
금융 및 보험업	
부동산업	
정보통신업	
사업서비스업	
공공행정, 국방 및 사회보장	
교육서비스업	
의료, 보건업 및 사회복지서비스업	
문화 및 기타서비스업	
농림어업	

자료: 박성준·김진수(2014)의 분류체계 재정리

〈그림 2〉 화석연료별 전환을 추세와 에너지 집약도 추세 (보조 축)



〈표 2〉 생산부문별 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 (2017)

생산부문	1차 에너지 공급 (ktoe)	이산화탄소 배출량(MtCO ₂)
Iron and steel/Non-ferrous metals	22,930.93	129.65
Chemical and petrochemical	21,048.49	88.46
Non-metallic minerals	7,407.59	18.46
Transport equipment	7,279.91	33.05
Machinery	21,540.82	43.09
Mining and quarrying	488.70	3.38
Food and tobacco	4,173.88	8.31
Paper, pulp and printing/Wood and wood products	4,957.84	8.29
Construction	759.00	2.20
Textile and leather	4,680.58	9.05
Non-specified (industry)	5,527.19	6.61
Transport	36,110.60	95.75
Commercial and public services	49,682.66	96.45
Agriculture/Forestry/Fishing	5,324.82	11.81
Total	191,913.02	554.58

2. 모형 및 방법론

멜더스의 인구론에 따르면, 인구가 집중될수록 자원을 많이 이용하도록

노력하기 때문에 환경 오염을 유발한다. 진상현·정경화(2013)는 신멜더스 주의자(neo-Malthusian)의 의견을 인용하며 인구증가로 인한 환경문제의 확장성을 살펴본 바 있다. 이 같은 맥락에서 이번 연구에서는 경제 및 에너지 소비량 뿐만 아니라 인구 증가 효과를 포함한 이산화탄소 배출량 변화요인 분해를 시도하고자 한다. 즉, Ehrlich and Holdren(1971)이 제시한 모형을 사용하여 인구, 경제활동 및 기술 요인이 환경에 미치는 영향을 모형화한 IPAT을 사용하였다(식 (1)).

$$I = P \cdot A \cdot T \quad (1)$$

모형의 각 변수는 환경적 영향(I , impact), 인구(P , population), 경제활동(A , affluence) 및 기술(T , technology)를 나타내며(진태영·김진수, 2017), 자세히 묘사할 경우 환경적 영향을 분해하기 위한 분해방정식은 다음과 같다(식 (2)).

$$I(\text{환경적 영향}) = P(\text{인구}) \cdot A(\text{1인당 GDP, 경제활동}) \cdot T(\text{에너지원단위, 기술}) \quad (2)$$

이 모형을 기반으로 Kaya 항등식을 구성하면 다음 식 (3)과 같은 Ang(2005)의 다섯 요인 분해방정식이 구성된다.

$$CO_2 = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{FF}{E} \times \frac{CO_2}{FF} \quad (3)$$

좌변의 경우 환경적 영향의 대리변수로 이산화탄소 배출량(CO_2)을 활용하며, 우변에서는 기존 IPAT 모형에서 두 가지 지수가 추가된 것을 알 수 있다. 화석연료의존도($\frac{FF}{E}$)는 에너지 소비량 대비 화석연료 소비량을 나

타내며, 배출계수($\frac{CO_2}{FF}$)는 화석연료소비량 대비 이산화탄소 배출량을 나타낸다. 즉, 새로 추가된 두 가지 지수는 이산화탄소 배출량 분해 시 국가 혹은 지역별 에너지 믹스 및 기술발전에 따라 달라지는 배출계수 효과를 고려할 수 있게 한다. 본 연구에서는 이 분해방정식 형태를 확장하여 산업구조효과, 화석연료 믹스 효과, 화석연료 전환 효과를 고려한 분해방정식을 구성하였다(식 (4)).

산업구조 효과($\frac{Y_{it}}{Y_t}$)의 경우 식 (3)의 소득 효과를 생산부문별 GDP 자료를 활용해 분해한 것으로, 분해방정식에 14개 생산부문의 차원이 추가되며, 산업 내 부가가치 비중 변화가 이산화탄소 배출량에 미치는 영향을 측정한다. 화석연료 믹스 효과($\frac{E_{ijt}}{E_{it}}$) 및 화석연료 전환 효과($\frac{E_{ijt}}{E_{it}}$)는 각각 산업 내 화석연료원의 소비비중 변화의 영향과 화석연료가 전력으로 전환된 비율이 이산화탄소 배출량에 미치는 영향을 보여주는 지표이다. 각 효과의 첨자인 i, j, t 는 각각 산업부문, 화석연료원과 시계열을 나타낸다.

Ang et al.(1998)에 따르면, LMDI는 Divisia 적분을 바탕으로 로그 평균가중치를 활용하기 때문에 분해분석 시 잔차가 남지 않는다. 이 방법론은 분해분석의 네 가지 조건인 완결성, 시간 가역성, 요소 가역성, 영 값(zero)에 대한 강건성을 모두 만족한다(김진수, 2015). 물론 로그를 사용하기 때문에 자료에 영 값이 존재할 경우 문제가 생길 수 있다. 하지만 Ang and Liu(2007a, b)에 따르면, 약 10^{-20} 의 아주 작은 값을 대입한 후 계산하며, 가중치 계산 시 분모가 0이 되는 오류가 발생할 경우 해당 효과를 영으로 처리하면 잔차의 발생 없이 분해된다.

본 연구에서는 변화요인의 시간에 따른 변화를 살펴보는 시계열 방식(time-series manner)의 LMDI 분해를 사용한다. 시계열 방식은 기준연도 고정(fixed base year) 및 기준연도변경(rolling base year) 방식의 두 가지로 나눌 수 있다. 박정욱·김수이(2013)에 따르면, 기준연도변경 방식은 에너지 소비요인 변화의 단기적인 흐름을 보다 자세히 추정할 수 있다. 본

연구에서는 변화요인의 장기적 추세에 집중하고자 기준연도고정 방식을 사용하여 분석한다. 가법적 및 승법적 요인분해의 경우 두 방법 사이에 우열이 존재하지 않기 때문에(김진수, 2015), 본 연구에서는 절대량 차이를 살펴보고자 가법적 요인분해 기법을 사용하였다. 상기 기술한 대로 본 연구에서 사용된 분해방정식은 산업구조효과, 화석연료믹스효과, 화석연료전환 효과를 고려하였으며, 이를 적용한 LMDI 분해법은 아래 식 (4)~(12)와 같이 정리할 수 있다.

$$CO_{2,t} = \sum_j \sum_i \left(P_t \times \frac{Y_t}{P_t} \times \frac{Y_{it}}{Y_t} \times \frac{E_{it}}{Y_{it}} \times \frac{E_{ijt}}{E_{it}} \times \frac{E_{ijt}}{E_{ijt}} \times \frac{CO_{2,ijt}}{E_{ijt}} \right) \quad (4)$$

$$\Delta CO_2 = \Delta CO_{2,P} + \Delta CO_{2,Y} + \Delta CO_{2,S} + \Delta CO_{2,I} + \Delta CO_{2,M} + \Delta CO_{2,FF} + \Delta CO_{2,Ef} \quad (5)$$

$$\Delta CO_{2,P} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{P_t}{P_{t-1}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta CO_{2,Y} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{(Y_t/P_t)}{(Y_{t-1}/P_{t-1})} \right) \quad (7)$$

$$\Delta CO_{2,S} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{(Y_{it}/Y_t)}{(Y_{it-1}/Y_{t-1})} \right) \quad (8)$$

$$\Delta CO_{2,I} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{(E_{it}/Y_{it})}{(E_{it-1}/Y_{it-1})} \right) \quad (9)$$

$$\Delta CO_{2,M} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{(E_{ijt}/E_{it})}{(E_{ijt-1}/E_{it-1})} \right) \quad (10)$$

$$\Delta CO_{2,FF} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{(E_{ijt}/E_{ijt})}{(E_{ijt-1}/E_{ijt-1})} \right) \quad (11)$$

$$\Delta CO_{2,Ef} = \sum_j \sum_i \left(\frac{CO_{2,ijt} - CO_{2,ijt-1}}{\ln(CO_{2,ijt}/CO_{2,ijt-1})} \right) \times \ln \left(\frac{(CO_{2,ijt}/E_{ijt})}{(CO_{2,ijt-1}/E_{ijt-1})} \right) \quad (12)$$

식 (5)의 일곱 가지 지수인 $CO_{2,P}$, $CO_{2,Y}$, $CO_{2,S}$, $CO_{2,I}$, $CO_{2,M}$, $CO_{2,FF}$, $CO_{2,EF}$ 는 각각 인구 효과, 소득 효과, 구조 효과, 집약도 효과, 화석연료 믹스 효과, 화석연료 전환 효과 및 배출계수 효과를 나타낸다. 각 첨자 i 와 j 는 산업부문과 에너지원을 나타내는 지표이다. 에너지원의 경우 이산화탄소 배출량이 원자력, 수력 및 신재생에너지로부터 배출되는 양은 없는 것으로 가정하기 때문에, 본 연구에서 사용된 에너지원은 화석연료인 석탄, 석유 및 천연가스만을 포함한다. E 는 1차 에너지 공급 기준의 에너지 소비량을 나타낸다.

본 연구에서 지수로 사용된 화석연료전환 효과의 경우 타 연구에서 사용된 원래 의미의 전력화 효과와 혼동하기 쉽다. 한준(2019)에서 사용된 전력화 효과는 총 에너지 대비 전력 소비비중을 사용하기 때문에, 전력화 지표가 증가한다는 것은 원자력/수력/신재생에너지 소비 증가로부터 영향을 받지만 반드시 화석연료의 발전 감소를 뜻하지는 않는다. 하지만 본 연구에서 사용된 화석연료전환 지표란 조용성(2017)에서 사용한 화석연료의 집중도(fossil fuel intensity) 지수의 역수 형태로, 산업별 화석연료 사용 대비 화석연료로부터 생성된 전력 사용량이므로 해당 지수는 화석연료 발전량의 척도가 된다.

IV. 연구 결과

1. 기준연도고정 분해분석 결과

〈그림 2〉은 본 연구의 목적인 일곱 가지 지수(인구효과, 소득 효과, 구조 효과, 집약도 효과, 믹스 효과, 화석연료전환 효과, 배출계수 효과)로 분해한 이산화탄소 배출량 변화요인 결과를 보여준다. 전체적인 경향성을 나타내기 위해 그래프로 나타내었으며, 이에 해당하는 자료는 〈표 2〉에 제시 하였다. 본 연구에서는 3장에서 기술한 대로 기준연도 고정/변경 방식의 가법적 요인분해를 활용해 연도별 이산화탄소 배출량 변화요인을 분

석하였다.

본 연구에서 사용된 우리나라의 산업 부문 이산화탄소 배출량은 1990년에 비해 2017년에 약 394.82 MtCO₂ 증가하였다. 이 배출량은 연료 연소 및 산업공정의 배출량을 포함하는 것으로, 본 연구에서 사용된 산업부문은 생산부문만을 포함하여 주거부문을 제외하므로 연료 연소에서 주거 부문에 해당하는 이산화탄소 배출량은 제외하였다. 1990년 대비 2017년의 국내 에너지 소비 변화요인을 총 일곱 가지 요인으로 분해한 결과 인구, 생산, 믹스 및 화석연료전환 효과가 이산화탄소 배출량 증가요인으로 작용하였으며, 구조, 집약도 및 배출계수 효과가 감소요인으로 작용한 것으로 도출되었다. 연구 결과, 온실가스 배출량의 가장 큰 증가요인은 국가 발전지표로 사용되는 1인당 GDP로부터의 소득 효과에서 발생하는데, 1990년부터 2017년까지 전체 배출증가량의 약 83%에 해당한다.

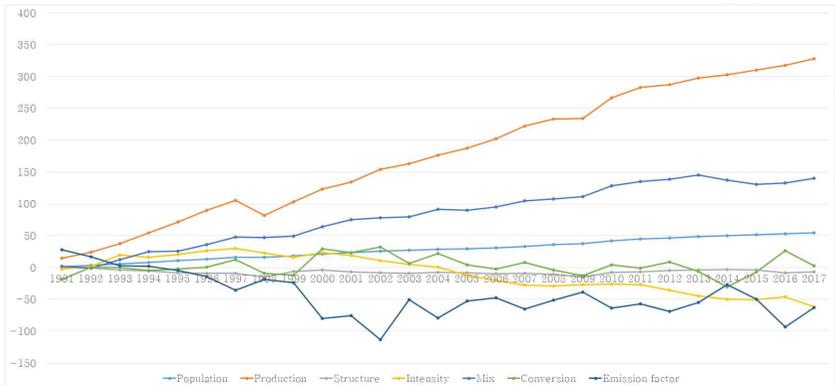
전통적인 에너지 소비량 분해분석 시에는 1인당 GDP가 사용되지 않고, 해당 국가의 총 GDP를 생산 효과로 사용하지만 이 연구에서는 이산화탄소 배출량이라는 환경적 영향을 멜더스 이론에 기반하여 분석하였기 때문에 생산 효과를 인구 효과 및 소득 효과로 나누어 분석하였다. 소득 효과 다음으로 온실가스 배출량 증가에 영향을 미친 요인은 인구 효과로 1990년 대비 2017년에 54.51 MtCO₂ 증가에 기여하였다. 에너지 소비량 분해 분석 시 사용되는 총 GDP로부터의 생산 효과가 본 연구에서는 인구 효과 및 소득 효과로 분리되어 있는데, 이 두 요인은 계속해서 이산화탄소 배출량의 증가 요인으로서 차지하는 비중이 높은 것으로 도출된다.

소득 효과만큼은 아니지만 분석기간 내 지속적으로 이산화탄소 배출량 증가요인으로 작용하는 지표는 믹스 효과 및 화석연료전환 효과가 있다. 믹스 효과의 경우 구조 효과가 총 부가가치 대비 산업별 부가가치를 측정하는 것과 마찬가지로 총 에너지 소비량 대비 각 화석연료 에너지원별 소비량을 측정하는 요소이다. 에너지 소비량의 경우 1990년부터 2017년까지 석유 소비량의 소비 비중이 줄어드는 반면 석탄 및 천연가스 소비량은 증가하고 있다. 본 연구에서 사용된 믹스 효과는 화석연료 내의 대체효과

를 보여주는 것으로, 석탄 소비량이 증가하였다는 점에서 단위 에너지 소비량 대비 이산화탄소 배출량이 높은 에너지원으로의 전환이 다량 일어났고, 이것이 지속적인 이산화탄소 배출량 증가 요인으로 작용하였다. 천연가스로의 대체는 이산화탄소 배출량의 감소요인으로서 작용하는 것이 명확하지만, 석탄 소비량으로부터의 증가 요인이 크게 작용하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 에너지 소비 자료가 화석 연료만을 포함하므로, 믹스 요인이 원자력, 수력 및 신재생에너지에 대한 효과를 볼 수 없기 때문이다. 따라서 화석연료만을 고려할 경우 연료 간의 대체로 인해 이산화탄소 배출량이 증가한 것은 사실이나, 실제 현실을 반영하고자 할 경우 비화석연료인 타 에너지원 비중 증가로 인한 감축효과를 고려해야 할 필요가 있을 것이다. 화석연료전환 효과는 석탄 화력발전량이 지속적으로 증가함에 따라 화석연료의 원료 및 최종에너지 형태의 자체소비량 대비 전력 전환비중이 높아져 생긴 효과라 할 수 있다.

〈그림 3〉 이산화탄소 배출량 분해분석 결과 (기준연도고정)

(단위: MtCO₂)



구조 효과의 경우 분석기간 내 꾸준히 이산화탄소 배출량의 감소요인으로서 작용하지만 총 이산화탄소 배출량 대비 그 규모가 작은 것으로 나타난다. 부가가치가 증가하는 부문들의 이산화탄소 배출량이 감소하였지만, 이산화탄소 배출량 변동 대비 국내 산업의 부가가치 비중 변화가 작기 때

문에 생기는 현상이다. 산업별 부가가치 비중의 변화 정도를 합하여 산업 구조 변화를 나타내는 방법인 연평균 산업구조변화지수를 참고하면, 1970년대에는 1.48을 기록하였지만 1980년대는 0.90, 1990년대에는 0.73을 기록하였으며, 2000년대에는 0.48, 2015년에는 0.40까지 하락한 것으로 나타난다(이한득, 2016). 즉, 산업구조가 해를 거듭할수록 고착화되고 있다. IMF 사태 및 세계 금융위기가 일어났던 다음 해인 1998년과 2009년에 구조 효과의 규모가 상대적으로 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 산업 구조의 변동으로 인해 감축된 효과라기보다는 생산 부문으로부터 당 해의 총 이산화탄소 배출량 자체가 감소한 것을 반영하기 때문이다.

구조 효과를 제외하면 집약도 효과 및 배출계수 효과가 감소 추세를 보인다. 집약도 효과는 2002년까지는 증가 요인으로 나타나지만 그 이후로 꾸준히 배출량 감축에 기여하는 것으로 나타난다. 집약도 효과로부터의 감소 요인은 에너지 소비량 대비 고부가가치 산업이 성장할 경우 발생하는데, 실제 자료에서도 대표적 고부가가치산업인 서비스 산업의 부가가치가 분석 기간 내 가파르게 상승하는 것을 목격할 수 있다.

배출계수 효과의 경우 해석에 유의해야 하는데, 본 연구에서 제시한 지수인 배출계수는 IPCC(1996) 등에서 발표하는 배출계수와는 다른 지표로, 화석연료로부터 전환된 전력 소비량 대비 이산화탄소 배출량을 가리킨다. 따라서 본 연구에서 제시한 배출계수 효과가 이산화탄소 배출량의 감소 요인으로 작용한다는 것은 1차 에너지를 전력으로 전환하는 과정에서 기존 화석연료 발전으로부터 비(非)화석연료로의 전환(transition)이 일어남에 따라 화석연료 기반의 전력 소비량 대비 이산화탄소 배출량이 감소한 것을 의미한다. <표 2>의 결과로 1995년 이후로 배출계수 효과가 감소 요인으로 작용한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 1995년 이후 화석연료 소비량이 축소되고 원자력 및 신재생에너지 확대가 이루어져 왔음을 암시한다. 실제 통계를 살펴보면 1990년 중반 이후 석유 소비량이 급감하며 화석연료 소비량 자체가 위축되었으며, 수력, 원자력 및 신재생에너지와 같은 비화석연료로부터의 전력 소비가 증가하였다.

전환부문의 석탄발전소 신증설과 천연가스 발전 증가로 인해 발전의 믹스가 악화됨에 따라 믹스 효과는 증가 요인으로 작용하고 있다. 하지만 배출계수 효과가 감소 요인으로 작용한 점은 본 연구에서 사용한 배출계수가 화석연료 발전량 대비 이산화탄소 배출량을 나타내는 것이므로, 연료별 발전량 대비 산업부문의 이산화탄소 배출량이 감소하였음을 나타낸다. 다르게 말하면 전력 소비량과 이산화탄소 배출량은 모두 증가하였는데, 전력 생산을 위해 사용된 화석연료 비중이 감소한 것이므로, 에너지원의 전환을 나타내는 지표라 할 수 있다.

이산화탄소 배출량의 변화요인을 분석기간을 나누어 살펴보기 위해 기준연도와 분석연도를 <표 3>과 같이 변경하여 분석해 보았다. 분석기간을 나누는 기준은 경제충격이 가해졌던 시점인 1997년과 2008년으로, 분해 분석에서는 경제충격의 당 해가 아닌 다음 해에 그 충격이 기록되는 경향이 있기 때문에 1998년과 2009년을 분석연도로 정하였다. 1990년 대비 1998년의 경우 총 125.30 MtCO₂ 증가하였는데, 이 중 대부분은 인구, 소득 및 집약도 효과에 의해 증가한 것을 알 수 있다.

1999년 대비 2009년은 그 이전과 확연히 다른 결과를 보여준다. 총 변화량의 경우 146.12 MtCO₂로 증가량이 크게 차이나지 않지만 개별 지수 효과는 상당히 크게 차이난다. 인구효과 및 소득효과는 꾸준히 증가 요인으로 작용한 점을 감안하면 분석기간의 시차가 더 크기 때문에 절대치가 크게 나타났다고 할 수 있다. 하지만 집약도 효과가 음의 요인으로 작용하였으며, 본격적으로 배출계수 효과가 감소 요인으로 작용한 데 반해 믹스 효과 및 화석연료전환 효과가 증가 요인으로 작용한다. 이는 2000년대 초반 전환 부문에서의 화석연료 사용량 증가 및 전반적인 전력 산업의 성장으로 인해 에너지 소비량이 증가하며, 전력 다소비 산업이 성장함에 따라 나타난 현상이다.

2010년 대비 2017년의 지수분해 결과를 살펴보면, 집약도 효과를 제외 한 다른 지수로부터의 효과는 1990년 대비 1998년의 결과와 크게 다르지 않게 나타난다. 하지만 가장 큰 차이점을 집약도 효과에서 찾아볼 수 있는

〈표 3〉 기준연도고정 이산화탄소 배출량 분해분석 결과

(단위: MtCO₂)

연도	인구 효과	소득 효과	구조 효과	집약도 효과	믹스 효과	화석연료 전환효과	배출계수 효과	총변화
1991	1.70	14.84	-0.49	-1.29	1.14	-18.32	27.74	25.33
1992	3.69	24.61	-0.69	5.93	-4.54	0.38	16.96	46.35
1993	5.88	37.74	-3.86	28.74	3.47	-0.20	2.68	74.46
1994	8.19	54.56	-5.32	27.75	12.79	-4.26	1.91	95.62
1995	10.60	71.66	-8.61	30.78	16.04	-2.19	-4.51	113.76
1996	13.30	90.15	-8.68	37.31	25.08	0.71	-14.43	143.45
1997	16.02	105.25	-8.78	43.17	35.16	12.43	-35.80	167.45
1998	16.34	81.64	-14.67	22.29	47.26	-9.05	-18.52	125.30
1999	18.53	103.56	-5.88	13.49	51.77	-11.87	-24.00	145.60
2000	21.25	122.99	-4.01	23.05	64.45	29.33	-79.80	177.25
2001	23.60	134.46	-7.07	16.65	77.62	23.62	-75.87	193.01
2002	25.75	154.49	-8.57	6.20	83.22	64.24	-113.39	211.94
2003	27.41	163.23	-8.97	-4.83	89.06	6.43	-50.65	221.70
2004	28.76	176.67	-7.51	-6.42	98.09	22.07	-79.50	232.17
2005	29.49	187.83	-8.11	-26.58	105.15	4.00	-52.91	238.88
2006	31.20	202.31	-10.01	-36.07	111.27	-2.69	-47.59	248.42
2007	33.40	222.31	-9.01	-38.02	115.60	8.22	-65.52	266.98
2008	36.08	233.66	-10.68	-41.08	119.63	-4.06	-51.14	282.40
2009	37.83	234.42	-14.67	-37.85	122.80	-12.55	-38.27	291.72
2010	41.69	266.52	-7.38	-29.79	132.07	4.04	-63.99	343.15
2011	45.21	282.64	-6.61	-30.13	138.55	-0.95	-56.76	371.95
2012	46.74	287.60	-4.90	-38.25	141.58	9.05	-68.61	373.22
2013	48.53	298.12	-3.90	-44.01	145.08	-5.91	-54.72	383.18
2014	50.08	302.86	-3.05	-57.55	145.26	-30.41	-26.81	380.38
2015	51.88	310.36	-3.83	-62.47	143.45	-6.74	-49.90	382.75
2016	53.19	318.09	-8.58	-56.40	143.04	26.64	-93.11	382.86
2017	54.51	328.39	-6.48	-69.67	148.62	2.59	-63.14	394.82

데, 2010년 대비 2017년의 경우 집약도 효과에 의해 이산화탄소 배출량이 감소한 것을 볼 수 있다. 총 변화량 자체도 상당량 감소한 것으로 미루어 볼 때, 2010년 이후의 에너지 소비는 고부가가치 산업의 육성으로 인해 상대적으로 에너지를 효율적으로 사용하게 되었고, 세계 금융위기 이후 철강산업 위주의 경기회복 전략이 이산화탄소 배출량 증가에 이끌 것이라

는 우려와 달리 신재생에너지 및 서비스 산업의 성장으로 이산화탄소 배출량 증가량이 둔화된 것으로 사료된다.

〈표 4〉 기준연도에 따른 분해분석 결과

(단위: MtCO₂)

분석기간	인구 효과	소득 효과	구조 효과	집약도 효과	믹스 효과	화석연료 전환효과	배출계수 효과	총변화
1990-2017	54.51	328.39	-6.48	-69.67	148.62	2.59	-63.14	394.82
1990-1998	16.34	81.64	-14.67	22.29	47.26	-9.05	-18.52	125.30
1999-2009	20.53	145.84	-17.46	-63.96	71.23	322.19	-332.25	146.12
2010-2017	18.87	85.54	-10.90	-50.89	1.43	11.61	-3.98	51.67

2. 기준연도변경 분해분석 결과

기준연도변경 방식을 사용한 가법적 요인분해 결과가 〈표 4〉에 나와 있다. 이산화탄소 배출량의 연도별 변화를 집중적으로 살펴보기 위해서는 기준연도변경 방식의 분석이 필수적이다. 우선 생산부문에서의 총 이산화탄소 배출량이 IMF 사태 직후인 1998년을 제외하고는 감소한 사례가 없는 것으로 나타난다. 예외적으로 2013년 대비 2014년에 2.80 MtCO₂가 감소한 것으로 나타나지만, 이는 2014년 에너지 부문에서 원자력 에너지와 집단에너지 발전이 증가하고 화력발전이 감소하였기 때문이다. 김수이(2018)에 따르면, 인구 효과의 크기는 출산율, 사망률 및 인구 유·출입률 등에 의해 좌우된다. 본 연구에서 인구는 이산화탄소 배출량에 대한 상대적 기여도 측면에서는 연별로 변화하고 있지만 꾸준히 증가 요인으로 작용하고 있다. 기준연도고정 분석 결과와 마찬가지로 소득 효과는 IMF 및 세계 금융위기의 경우를 제외하고는 이산화탄소 배출량에 꾸준히 증가 요인으로서 작용한다. 하지만 이산화탄소 배출량의 총 변화량은 점점 줄어드는 데 반해 소득 효과의 크기는 일정 수준을 유지하고 있는 점을 고려하면, 경제 성장으로부터의 배출량 증가는 유지되고 있지만, 산업구조 및 에너지원의 전환 등을 통해 배출량을 감소시키고 있음을 파악할 수 있다.

구조 효과도 기준연도고정 결과와 마찬가지로 꾸준히 이산화탄소 배출

〈표 5〉 기준연도변경 이산화탄소 배출량 분해분석 결과

(단위: MtCO₂)

연도	인구 효과	소득 효과	구조 효과	집약도 효과	믹스 효과	화석연료 전환효과	배출계수 효과	총변화
1991	1.70	14.84	-0.49	-1.29	1.14	-18.32	27.74	25.33
1992	2.03	9.59	-0.17	7.87	-6.22	21.28	-13.35	21.02
1993	2.22	13.10	-3.92	25.30	9.55	-0.11	-18.03	28.11
1994	2.46	18.20	-0.90	-1.57	9.09	-4.88	-1.24	21.16
1995	2.66	19.07	-3.34	2.04	3.21	2.80	-8.30	18.14
1996	2.74	18.81	0.17	6.41	10.56	3.70	-12.70	29.69
1997	2.95	15.50	-0.24	7.06	11.51	15.76	-28.54	24.00
1998	2.20	-22.38	-8.39	-25.23	20.26	-27.27	18.66	-42.15
1999	2.10	25.16	11.89	-12.33	3.36	-3.59	-6.28	20.30
2000	2.66	20.67	5.62	12.63	8.86	411.59	-430.37	31.65
2001	2.64	12.20	-4.72	-9.45	16.05	-4.69	3.72	15.76
2002	2.09	23.43	-3.53	-15.88	5.79	80.35	-73.31	18.93
2003	1.95	9.86	-4.79	-12.71	6.88	-91.46	100.03	9.76
2004	1.53	17.47	1.22	-0.07	10.46	25.33	-45.47	10.47
2005	0.84	15.56	-2.64	-28.71	8.32	-19.92	33.26	6.71
2006	2.12	19.20	-2.84	-14.49	6.63	-5.72	4.65	9.54
2007	2.11	22.73	-1.24	0.09	2.50	13.92	-21.54	18.56
2008	3.30	11.48	-3.68	-3.89	2.73	-20.97	26.46	15.42
2009	2.30	-2.61	-8.66	9.64	0.34	-10.18	18.49	9.32
2010	2.37	28.31	9.74	17.98	3.47	19.70	-30.14	51.43
2011	3.98	14.26	-0.32	3.15	0.85	-10.12	17.01	28.80
2012	2.80	9.15	1.03	-12.38	2.65	13.80	-15.77	1.27
2013	2.45	14.16	-3.27	-4.07	0.51	-17.35	17.54	9.96
2014	3.40	12.16	-1.12	-20.62	-3.19	-35.11	41.67	-2.80
2015	2.85	11.12	0.25	-10.04	-2.36	37.47	-36.92	2.37
2016	2.15	12.70	-7.20	10.44	0.35	50.72	-69.05	0.11
2017	1.54	13.63	-1.43	-16.73	1.08	-27.41	41.27	11.96

량의 감소요인으로 남아 있지만 그 효과는 미미하다. 반면에 집약도 효과의 경우 구조 효과에 비해 이산화탄소 배출량 증감에 미치는 영향은 크지만 해마다 그 영향이 달라지는 것으로 나타난다. 2006년부터 2011년까지 증가한 점을 살펴보면 에너지가 생산 부가가치 대비 다량 투입되었으나, 2011년 이후부터 최근까지의 경향을 살펴보면 에너지 투입량 대비 부가

가치가 높아 에너지를 효율적으로 사용하고 있음을 살펴볼 수 있다. 2017년은 총 에너지 소비량이 감소한 해로, 감소 대비 부가가치가 증가하였기 때문에 집약도 효과로부터 큰 감소효과를 목격할 수 있다. 이러한 관점과 마찬가지로 배출계수 효과가 증가 요인으로서 작용한 점을 설명할 수 있다. 이산화탄소 배출량의 총량이 증가한 데 반해 전력 소비량은 크게 감소하였기 때문이다. 2017년의 1차 에너지 공급은 감소하였지만 최종에너지 소비는 증가하는 믹스 효과, 화석연료전환 효과 및 배출계수 효과는 연별로 그 효과가 다르다. 화석연료 간의 가격 변화로 인한 대체효과로 설명이 가능한데, 특히 석유의 경우 연별 가격에 따라 해마다 원별 소비량이 달라진다. 석유 소비량은 2015~2016년 2년 연속으로 유가가 하락하여 석유 소비량이 증가하여 총 에너지 소비량에 일조하였다(에너지경제연구원, 2016, 2017).

본 연구에서 진행한 분해분석의 경우 이산화탄소 배출량 변화요인을 분석함에 있어 지표를 추가함과 동시에 산업구조 효과를 살펴본 점에서 의의를 가진다. 예를 들어, 진상현·황인창(2009) 및 진상현·정경화(2013)의 연구는 지역별, 에너지원별 분해분석을 시도한 반면 본 연구는 산업구조별, 에너지원별 분석을 활용하였기 때문에 산업구조 및 에너지 소비구조에 따른 정책제언이 가능하다. 또한 에너지 소비량을 1차 에너지 공급 기준으로 분석하였기 때문에 에너지 소비구조를 보다 현실적으로 반영하는 것이 가능하다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 우리나라 산업 부문의 이산화탄소 배출량 변화요인을 1990년부터 2017년의 자료를 활용하여 분석하였다. 이를 위해 주요 산업인 광업 및 제조업을 비롯하여, 고부가가치 산업인 서비스업 및 에너지 다소비 부문인 교통부문을 모두 포함한 생산부문의 이산화탄소 배출량을 분해분석 하였다. 본 연구를 위하여 IEA의 에너지 밸런스 통계 산업분류

와 국내 산업분류체계를 통합하여 분석하였다. 산업분류체계 통합의 경우 에너지 소비량을 1차 에너지 공급 기준으로 나타내기 위해 시도되었다.

분해분석 과정에서 LMDI 기법을 사용하였고, 온실가스 배출량의 전통적 분해방정식을 연장하여 총 일곱 개의 지수로 이루어진 분해방정식을 구성하였다. 본 연구의 분해분석 지수는 인구 효과, 소득 효과, 구조 효과, 집약도 효과, 믹스 효과, 화석연료전환 효과 및 배출계수 효과를 포함하고 있다. 화석연료전환 효과는 화석연료의 사용량 대비 발전량 증가에 따른 효과이며, 배출계수 효과는 전력 소비량 대비 이산화탄소 배출량에 대한 효과를 나타낸다. 1990년 배출량을 기준으로 2017년까지 이산화탄소 배출량 변화요인에 대해 기준연도고정 및 기준연도변경 방식을 모두 적용하였다. 전체적인 경향을 살펴보는 기준연도고정방식의 경우 경제충격이 구조변화를 불러올 수 있기 때문에 IMF 사태 및 세계 금융위기 시점으로 총 분석기간을 세 시점으로 나눈 분석도 함께 실시하였다.

이산화탄소 배출량 증가에 지속적인 영향을 미치는 요인으로는 인구 효과 및 소득 효과로, 인구 효과와 소득 효과를 합할 경우 전통적인 에너지 소비 분해분석에서 사용하는 생산 효과와 같은 효과를 가지며, 이는 경제활동이 국가 경제성장으로 이어질 경우 성장요인으로 꾸준히 작용하게 된다. 기준연도고정 방식의 결과를 살펴보면 인구 효과는 감소요인으로 작용한 적이 없는 반면 소득 효과는 경제충격이 가해진 연도에는 감소요인 혹은 성장둔화요인으로 작용하였다. 또 다른 증가 요인으로 분석된 믹스 효과를 살펴보면 분석기간 동안 석유 소비량이 감소한 반면, 석탄과 천연가스 소비량이 증가하였는데, 천연가스로의 대체는 이산화탄소 배출량을 감소시켰음에도 불구하고 석탄으로의 대체로 인한 이산화탄소 배출량 증가가 크게 작용한 것으로 나타났다. 즉, 국내 에너지 소비 구조에서 화석연료 간의 대체효과는 전력 소비가 증가하는 환경에서 이산화탄소 배출량을 지속적으로 증가시키는 방향으로 작용할 수 밖에 없다. 발전 부문에서 연료대체를 통한 이산화탄소 배출량 감축은 비화석연료 사용을 통해 이끌어내야 할 것으로 사료된다. 우리나라의 경우 석유 소비량은 수송 부문에

집중되어 있기 때문에, 이산화탄소 배출량 감축을 위해서는 수송 부문에서 석유 소비량 감소를 위한 대체로 천연가스 차량 및 전기차의 사용 또는 정책적으로 활성화하고자 하는 수소차량의 도입이 해결책이 될 수 있다.

화석연료 전환 효과도 꾸준히 이산화탄소 배출량 증가 요인으로 작용한다. 이는 화석연료 사용량 대비 발전량이 이산화탄소 배출량과 양의 상관관계를 가지고 있음을 뜻하며, 화석연료 전환 효과가 발전 부문에서의 화석연료 전환 비효율을 대표한다고 할 수 있다. 발전 부문에서의 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위해서는 전력 소비량 감소가 근본적인 해결책이 될 수 있으나, 전력은 부가가치 생산을 위해 사용되는 필수 생산요소로서 GDP 성장과 함께 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

이와 같은 이유로 전력화 과정에서 전력 생산 믹스 변화를 통해 온실가스 저감 정책을 추진할 필요가 있다. 다만, 우리나라의 경우 신재생에너지의 효율이 타 국가에 비해 낮은 실정이다. 이 때문에 신재생에너지의 효율과 화석연료 연소로부터의 온실가스를 고려하여 발전 부문에서의 석탄, 석유 사용량을 최소화하고 천연가스 발전량을 늘리면서 전력화를 높이는 한국형 전력화 사업을 지속적으로 추진할 필요가 있다.

때문에 전력 소비량 감소로부터 이산화탄소 배출량 감축을 피하기보다, 발전 부문의 이산화탄소 집약도를 낮추기 위한 노력이 필요하다. 발전 부문의 이산화탄소 배출량은 전력 생산을 위해 투입된 화석연료의 양으로부터 계산되는데, 발전 부문에서 배출계수가 가장 높은 석탄의 투입량은 분석 기간 내 세 가지 화석연료원 중 약 70%를 차지하고 있다. 중장기적으로 발전 부문에서 사용되는 석탄사용의 비중을 줄일 필요가 있으며, 타 화력발전의 효율을 향상시키는 것이 중요하다. 화력발전의 효율 향상에는 노후 화력발전소의 유지보수가 중요하게 작용할 수 있지만, 생성된 2차 에너지를 효율적으로 사용하는 것 역시 중요하다. 송전손실 및 열손실을 최소화할 수 있는 집단에너지발전소 활용이나, 중소규모의 화력발전소 인근 스마트시티 형성을 통한 에너지 소비효율 향상도 좋은 해결책이 될 수 있다. 물론 발전 부문에서 효율 향상을 통해 이산화탄소 배출량 감축을

피하는 것은 단기적인 해결책으로, 중장기적 관점에서는 신재생에너지 확대가 필수적이다.

구조 및 집약도, 배출계수 효과가 이산화탄소 배출량의 감소 요인으로 도출되었다. 구조 효과의 경우는 감소 요인이기는 하나 그 규모가 작음으로 분석되었다. 서론에서 기술한 바 국내 에너지 집약적 산업인 제조업은 철강 산업에 치중해 있어 이산화탄소 배출량 감소가 어렵다. 따라서 향후 구조 효과를 통한 이산화탄소 감축을 이뤄내기 위해 국내 산업구조의 포트폴리오를 변환할 필요가 있을 것으로 사료된다. 집약도 효과는 국내 고부가가치 산업의 육성으로 인해 에너지 투입 대비 고부가가치 창출이 배출량 감축에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 4차 산업혁명과 함께 이슈화된 ICT 산업은 부가가치 창출효과가 크고 타 산업과의 융·복합이 용이하다. 단기적인 관점에서 에너지 소비를 증가시킬 수 있지만 ICT 기술을 에너지 부문에 적용한다면 수요관리 모니터링, 화력발전 최적화 등을 통해 에너지 소비 및 온실가스를 배출을 감소시키는 것이 가능하다. 또한 ICT 산업은 우리나라가 대표적으로 타국 대비 비교우위에 있는 산업으로 투자대비 성장 효과가 크다. ICT 산업 성장과 에너지원 전환 효과가 결합될 경우 온실가스 저감 효과가 크기 때문에 정부의 체계적인 ICT 산업에 대한 지원이 지속되어야 할 것이다.

배출 계수의 경우 1998년 이래로 꾸준히 감소요인으로 작용하고 있는데, 이는 화석연료로부터 생성되는 전력 소비량 대비 배출되는 이산화탄소의 양이 감소하고 있음을 암시한다. 전환 부문에서 비화석연료로의 대체가 일어남에 따라 전력 소비량 대비 이산화탄소 배출량이 감소한 것이다.

본 연구가 시사하는 바는 다음 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 본 연구에 사용된 지수 중 에너지 소비량을 포함하는 지표를 기존 연구에 비해 현실화했다는 장점이 있다. 이는 전환부문의 손실을 고려하는 에너지원별·생산부문별 1차 에너지 공급 자료를 작성하였기 때문이다. 둘째, 국가통계포털의 이산화탄소 배출량 자료를 활용하여 생산 부문의 배출량을 산업별로 나누어 추계하였다는 점이다. 셋째, 본 연구에서 독자적으로 사용

한 화석연료전환 효과 및 배출계수 효과를 사용한 분석은 향후 다양한 연구의 가능성을 제시한다.

그러나 본 연구에서는 산업별 이산화탄소 배출량 자료를 구축하여 분석하는 과정에서 에너지원을 석탄, 석유 및 가스로 이루어진 화석연료만으로 한정하는 것이 한계점으로 작용한다. 믹스 효과가 실제 이산화탄소 배출량 증가에 기여하는 바가 과대평가 되어있을 것으로 사료되기 때문이다. 따라서, 후속연구에서는 타 에너지원 비중을 고려하여 비화석연료로 인한 감축효과를 모형 내에 반영할 필요가 있다.

최근 국내 에너지 부문의 정책동향은 탈원전 및 신재생에너지 확대를 통한 이산화탄소 배출량 감축이라 할 수 있다.²⁾ 그러나 본 연구에서 사용된 자료는 2017년까지의 과거 자료로, 최근 정부의 이러한 정책 동향을 반영하였다고 볼 수 없다. 정책 효과 분석을 위해서 앞으로 지속적인 온실가스 및 이산화탄소 배출량에 대한 변화요인 분석이 이루어질 필요가 있다. 특히 에너지 정책의 경우 온실가스 배출량에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 신재생에너지 확대와 화석연료, 원자력 발전 축소로 인해 발생할 전환효율 변화를 이해하기 위해서는 1차 에너지 공급 기준의 분해분석의 중요성이 확대될 것으로 보인다.

결론적으로, 기후변화 대응을 위한 이산화탄소 감축을 위해서는 집약도 효과 차원에서 고부가가치 산업의 육성을 추진함과 동시에 현 정부가 강조하는 에너지 효율향상 정책효과가 현실화 되어야 할 것이다. 또한 장기적 관점에서 전력화 및 신재생에너지 확대 정책을 지속적으로 추진 할 필요가 있다.

■ 참고문헌 ■

김광욱·강상목, 2012, "OECD 국가의 이산화탄소 배출량 분해분석," 『자원·환경경제연구』, 21(2), pp.211-235.

2) <https://news.v.daum.net/v/20200407114408385>.

- 김문정, 2014, “국내 지역별 이산화탄소 배출량 현황 및 요인 분석,” 『한국신재생에너지학회 추계학술대회논문집』, 여수 엠블호텔, p.36.
- 김수이, 2018, “국내 발전부문의 온실가스 배출 요인 분해 분석,” 『에너지경제연구』, 17(1), pp.241-264, DOI: 10.22794/keer.2018.17.1.009.
- 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, DOI: 10.22794/keer.2015.14.3.009.
- 김진수·허은녕, 2005, “구조분해분석을 통한 국내 산업별 에너지 소비 변화요인 연구,” 『자원·환경경제연구』, 14(2), pp.257-290.
- 박년배·전의찬, 2013, “국내 16개 광역시·도의 온실가스 인벤토리 및 감축목표 비교 연구,” 『한국기후변화학회지』, 4(2), pp.159-175.
- 박성준·김진수, 2014, “우리나라 1차 에너지와 최종 에너지 소비 변화요인 분해 비교분석,” 『자원·환경경제연구』, 23(2), pp.305-330.
- 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.
- 에너지경제연구원, 2016, 『에너지수급브리프 3-3』, 울산: 에너지경제연구원.
- _____, 2017, 『에너지수급브리프 4-4』, 울산: 에너지경제연구원.
- 윤소원·임은혁·이경미·홍유덕, 2010, “가정 부문 이산화탄소 배출량 추이 분석,” 『한국기후변화학회지』, 1(3), pp.189-203.
- 이데일리, 2020.4.7., ““한국형 그린뉴딜정책 추진”..민주·시민당 기후환경 공약,” <https://news.v.daum.net/v/20200407114408385>.
- 이재형·임지재·김용기·이재영, 2012, “LMDI 분해 분석을 이용한 국내 철도 노선별 온실가스 배출 특성 분석,” 『한국철도학회 논문집』, 15(3), pp.286-293.
- 이한득, 2016, “한국의 산업구조: 변화 속도 줄고 집중도는 증가,” 『LG 경제연구소 Business Insight』, 1407, pp.2-17.
- 조향숙, 2017, “OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 감소요인 분해 분석,” 『자원·환경경제연구』, 26(1), pp.1-35, DOI: 10.15266/KEREA.2017.26.1.001.
- 조용성, 2017, “전력산업의 온실가스 배출요인 분석 및 감축 방안 연구,” 『한국기후변화학회지』, 8(4), pp.357-367, DOI: 10.15531/KSCCR.2017.8.4.357.
- 정해식·이기훈, 2001, “로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해,” 『자원·환경경제연구』, 10(4), pp.569-589.
- 진상현·김수이·황인창·김동형, 2013, 『국가 온실가스 배출구조 변화요인 분석』, 서울: 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, 2017, “화석연료 사용량을 고려한 탄소배출량과 도시화율의 관계에 관한 연구,” 『환경정책』, 25(3), pp.47-70, DOI: 10.15301/jepa.2017.25.3.47.
- 한준, 2019, “우리나라 전력화(Electrification)의 CO₂ 배출 영향 연구,” 『환경정책』, 27(1), pp.107-129, DOI: 10.15301/jepa.2019.27.1.107.
- 환경부, 2019.10.7., “2017년 온실가스 배출량 7억 9백만 톤, 전년 대비 2.4% 증가,” 보도 자료.
- 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, DOI: 10.1016/0140-9883(94)90030-2.
- _____, 2005, “The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide,” *Energy Policy*, 33, pp.867-871, DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.010.
- Ang, B. W. and K. H. Choi, 1997, “Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method,” *The Energy Journal*, 18(3), pp.59-73.
- Ang, B. W. and N. Liu, 2007a, “Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach,” *Energy Policy*, 35(1), pp.238-246, DOI: 10.1016/j.enpol.2005.11.001.
- _____, 2007b, “Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach,” *Energy Policy*, 35(1), pp.739-742, DOI: 10.1016/j.enpol.2005.12.004.
- 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.
- Ehrlich, P. R. and J. P. Holdren, 1971, “Impact of population growth,” *Science*, 171 (3977), pp.1212-1217.
- IEA, 2015, *Energy and climate change*, Paris, France: IEA.
- _____, 2019, *World energy balances 2019*, Paris, France: IEA.
- IPCC, 1996, *Revised 1996 IPCC guideline for national greenhouse gas inventories*, (IPCC Report), Paris: IPCC/OECD/IEA.
- Sun, J. W., 1998, “Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model,” *Energy Economics*, 20(1), pp.85-100, DOI: 10.1016/S140-9883(97)00012-1.

국가통계포털, “경제활동별 GDP 및 GNI,” <https://www.kosis.kr>, [2020.5.1]
에너지경제연구원, “국가온실가스인벤토리 및 IPCC 배출계수 가이드라인,” http://www.kesis.net/sub/sub_0001.jsp, [2020.5.1]

진태영: 한양대학교에서 자원경제 및 정책 박사학위를 취득하였으며, 현재 녹색기술센터 박사후연구원으로 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 에너지와 기후변화에 관련된 연구를 수행하고 있다(jinow123@gtck.re.kr).

최가영: 서울대학교에서 산림환경학으로 박사학위를 취득하였으며, 현재는 녹색기술센터 박사후연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 실적으로 “Ecotourism market segmentation: Opportunities for implementing REDD+”, “Success factors of national scale forest restoration in South Korea, Vietnam, and China” 등이 있다(choigayoung@gtck.re.kr).

이은미: 연세대학교에서 국제학으로 석사학위를 취득하였으며, 현재는 녹색기술센터 연구원으로 재직 중이다. 주요 연구로 “해외 선진기관과의 기후기술협력 체계구축 기획연구”, “글로벌 협력플랫폼을 활용한 기술선도 신시장 메커니즘 대응방안 연구”가 있다(emlee@gtck.re.kr).

이수경: 고려대학교에서 환경복원 및 생태공학으로 박사학위를 취득하였으며, 현재는 녹색기술센터 선임연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 실적으로 “Sustainable financing for forest and landscape restoration: Opportunities, challenges and the way forward”, “신기후체제 대응 CTCN과 CDM의 사업 연계 성공요인 분석: 방글라데시 실증연구를 중심으로”, “온실가스·에너지 목표관리제 및 배출권거래제 대상 기업의 명세서를 이용한 온실가스 감축 실적 분석” 등이 있다(sklee@gtck.re.kr).

투 고 일: 2020년 05월 21일
심 사 일: 2020년 05월 30일
게재확정일: 2020년 06월 19일