

## 한국의 부문별 분해 동인 분석 및 OECD국가와의 비교

백승일\* · 세사리데시\*\*† · 김하나\*\*\*††

\*한국과학기술원 녹색성장지속가능대학원 석사과정학생, \*\*한국과학기술원 디지털인문사회학부 박사후 연구원,

\*\*\*한국과학기술원 디지털인문사회학부 부교수

### Sectoral decomposition analysis of driving factors in South Korea and comparative study with OECD countries

Baik, Seung Il\* · Caesary, Desy\*\*† and Kim, Hana\*\*\*††

\*Master Student, Dept. Graduate School of Green Growth and Sustainability,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea

\*\*Postdoctoral Fellow, Dept. School of Digital Humanities and Computational Social Science,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea

\*\*\*Associate Professor, Dept. School of Digital Humanities and Computational Social Science,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea

#### ABSTRACT

This study applies the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method to identify the key drivers influencing carbon emissions, focusing on South Korea's progress in meeting its commitments under the Paris Agreement. Initially, the analysis contextualizes South Korea's performance by comparing it to OECD countries, emphasizing two essential indicators: energy intensity (energy consumption per unit of GDP) and carbon intensity (carbon emissions per unit of energy consumed). The study investigates these indicators during two pivotal periods: the aftermath of the global financial crisis (2010~2014) and the early implementation phase of the Paris Agreement (2015~2019). Furthermore, a comprehensive analysis of South Korea's carbon emission trends from 2005 to 2022 is conducted, highlighting sectoral contributions from power generation, industry, transportation, buildings, agriculture, and waste management sectors. Results indicate that South Korea has demonstrated considerable progress in reducing energy intensity compared to the OECD average; however, improvements in carbon intensity have lagged behind, suggesting room for enhancement in the nation's carbon management strategies. Notably, the power sector exhibited the most significant emission reductions, primarily due to shifts toward renewable energy sources and advancements in power generation efficiency. Contrastingly, sectors such as transportation and industry have shown slower progress, highlighting critical areas for targeted policy interventions. This study offers actionable insights and tailored policy recommendations essential for achieving South Korea's ambitious 2035 Nationally Determined Contributions (NDC) targets. These recommendations underscore the necessity of adopting sector-specific strategies informed by comprehensive international and sectoral comparisons to effectively steer South Korea toward a sustainable and low-carbon future.

*Key words : LMDI, Carbon Emissions, Comparative Analysis, Energy Intensity, Carbon Intensity*

†Corresponding author : [dcaesary10@kaist.ac.kr](mailto:dcaesary10@kaist.ac.kr) (KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Korea. Tel. +82-42-350-4602)

††Co-Corresponding author : [hanakim0729@kaist.ac.kr](mailto:hanakim0729@kaist.ac.kr) (KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Korea. Tel. +82-42-350-4613)

ORCID 백승일 0009-0002-6032-523X

세사리데시 0000-0002-9682-1043

김하나 0000-0003-2782-2859

Received: February 14, 2025 / Revised: March 10, 2025 1st, April 16, 2025 2nd / Accepted: May 12, 2025

## 1. 서론

글로벌 온실가스 배출량은 산업화 이후 급격하게 증가했으며, 특히 1990년부터 2021년까지 41.8%가량 증가했다 (Jones et al., 2024). 한국의 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)은 2021년 기준 676.6백만 톤 CO<sub>2</sub>eq이며, 1990년도 대비 131.6%(292.1백만 톤 CO<sub>2</sub>eq)가 증가하였다(GIR, 2023). 이에 한국은 2018년 배출량 기준 727.6백만 톤 CO<sub>2</sub>eq 대비 40%(291 백만 톤 CO<sub>2</sub>eq)를 감축하는 것을 NDC 목표로 하고 있으며 다음 2035 NDC 수립에 대한 논의에 착수하였다(2050CNC, 2021).

따라서, 2030 배출량 감축목표의 효과적인 달성과 이행 가능한 2035 NDC의 개발을 위해서는 배출량 변화의 원인과 주요 동인을 면밀히 분석하는 작업이 필수적이다. 이에 대부분의 국가가 산업 구조, 에너지 소비, 경제 성장 등 다양한 요인이 온실가스 배출량 변화에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 정책을 설계 및 개선하고 있다 (Ang, 2005, 2015). 이러한 동인을 분석하는 데에, 동인분해분석 방법이 주로 사용된다. 동인분해분석은 국가 간 비교를 통해 데이터 기반의 정책 수립과 감축 전략의 실효성을 검증하며 자원 배분의 효율성을 높이는 데 널리 활용되고 있다(Ang, 2015).

본 연구는 한국과 주요 OECD 국가들의 배출량 변화를 동인 분해분석의 탄소집약도와 에너지 집약도 동인에 초점을 맞추어 파리협정(Paris Agreement) 이전(2010 ~ 2014) 이후(2015 ~ 2019) 기간을 비교함으로써 한국의 배출량 변화의 지연 및 개선 정도를 타 국가와 비교·점검하였다.

추가로 2005년부터 2022년까지 국내 산업 부문, 수송 부문, 전환 부문, 건물 부문, 농축산 부문, 폐기물 부문의 배출량 변화를 장기간에 걸쳐 분해 분석하였다. 한국에서는 매년 2년 단위로 단기간에 대한 동인 분해분석이 정기적으로 시행되고 있으며(GIR, 2020), 선행 연구에서 부문별 장기적 배출량 변화가 부분적으로 분석되었다. 그러나 전 부문을 대상으로 한 장기적이고 포괄적인 배출량 변화 분석은 수행되지 않았다. 또한, 건물 부문의 경우 주요한 영향요소 중 하나인 냉난방도일(C.HDD)이 동인 분해 요인으로 고려되지 않았다. 이러한 분석 요인의 누락은 정책 설계와 감축 목표 수립 과정에서 중요한 기후 요인의 영향을 간과하게 만들 수 있다.

이에 본 연구는 기존 연구에서 다루지 않았던 장기적이고 포괄적인 부문별 분석을 통해 부문별, 동인별 온실가

스배출량 기여의 개선 및 지연 정도를 비교 및 분석한다. 또한, 냉난방도일을 동인 분해분석에 포함하여 건물 부문의 배출량 변화에 기후 요인이 미친 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다.: 2장은 배출량 동인 분해분석에 대한 국내외 선행 연구에 관해 서술한다. 3장은 연구에 사용된 데이터와 방법론을, 4장은 분석 결과를 정리하였다. 5장은 결론과 제언으로 구성된다. 마지막으로 6장은 해당 연구의 시사점 및 한계점을 서술했다.

## 2. 선행연구

1970년대 후반 에너지 사용에 대한 구조적 변화의 영향을 연구하기 위해 지수 분해 분석(Index Decomposition Analysis, IDA)이 도입된 이래, 1980년대에는 산업 에너지 수요와 공급 동인의 분석이 수행되는 등 1990년대 이후에는 교통, 가정 부문의 에너지 수요 및 전기 공급에 대거 연구로 확장되었다(Ang, 2004). 또한, 전환 부문의 이산화탄소 배출량 증감에 대한 연구가 활발하게 진행되었다.

2000년도 이후 IDA 접근법에서 파생된 로그 평균 디비아 지수(LMDI, Logarithmic Mean Divisia Index) 방법론이 널리 사용되기 시작했다(Ang, 2015). 이처럼 LMDI 방법론을 통해 각 부문의 에너지소비 혹은 온실가스 배출 동인 분석이 여러 국가에서 진행되고 있다.

최근에는 단일 국가 외에도 여러 국가 간의 비교를 수행한 다양한 연구가 수행되고 있다. Moutinho et al. (2015)은 유럽 동부, 서부, 북부, 남부 국가들의 에너지 관련 CO<sub>2</sub> 배출 변화의 동인을 분석하였다. 또한, Moutinho et al. (2018)은 재생에너지 사용 상위 23개국을 대상으로, CO<sub>2</sub> 배출량 변화를 6가지 동인으로 분해하여 분석했다. 또한, Fernández González et al. (2014)은 유럽연합의 전력 부문에서 2001년부터 2010년까지 CO<sub>2</sub> 배출 변화의 주요 동인들을 분석했다. Tajudeen et al. (2018)은 OECD 국가에서 인터넷 사용과 경제 성장, 금융 발전, 무역 개방성이 CO<sub>2</sub> 배출에 미치는 단기 및 장기적인 영향을 평가했다. Bianco et al. (2024)은 유럽연합(EU)의 탄소 배출 변화의 동인 분해분석 외에도 Tapio decoupling 방법론을 사용하여, 경제 성장과 탄소 배출 간의 탈동조화 상태를 평가했다. 이처럼 최근 발간되는 논문들은 한 국가 또는 지역 내 여러 부문을 동시에 비교·분석하였다.

한국에서도 LMDI 방법론을 활용해 산업부문, 발전부문 등 각 부문에 대해 분해 분석 연구가 진행되었다(Kim,

2018; Park, 2023). 다음으로 특정 광역시나 주요 도시, 또는 특정 부문을 대상으로 동인 분해 분석을 수행한 연구들이 존재한다(Han, 2023; Jung, 2024; Yoo et al., 2023).

한국에서 수행된 대부분의 선행 연구는 산업, 전환, 수송, 건물 등 대부분 특정 부문에 초점을 맞추어 진행되었고 특정 지역만을 고려하여 분석이 진행되었다. 국가의 전 부문을 다룬 연구의 경우(예: GIR, 2020) 분야별 특수성을 고려한 동인을 포함해 분석되지 않거나(예: 가정 등 건물 부문에서 온도는 온실가스 배출량의 주요한 동인), 정기적인 평가가 단기간에 대한 분석만을 제공한다는 한계가 있었다. 즉, 종합적이고 장기적인 분석이 필요하다. 본 연구는 이러한 지점에서 장기적이며 다양한 산업 부문을 포함하는 동인 분해분석을 수행하고 국가 단위의 분해 분석 결과를 다른 OECD 국가의 것과 비교하고자 한다.

### 3. 연구 방법 및 자료

#### 3.1. 연구 방법 및 분석 범위

본 연구에서는 Ang (2015)의 논문을 참고하여, LMDI 방법 중 에너지 소비 분해에 기반을 둔 가법적(additive) 분해 절차를 적용하였다. LMDI은 공식이 간단하고 집계 의 일관성(aggregation consistency)을 제공한다는 장점이 있으며(Ang & Liu, 2001), 하위 부문까지의 분석의 신뢰성과 일관성을 보장할 수 있다. 이러한 장점을 가진 LMDI 방법론은 국제에너지기구(IEA), 세계은행(World Bank) 등에서 에너지 효율성 개선 평가를 위한 수단으로 채택되고 있다(Ang, 2015). 또한 해당 분석에서 오픈소스 기반 PyLMDI 파이썬(Python) 라이브러리(Xiang et al., 2022)를 사용하였다.

##### 3.1.1. OECD 국가별 비교 분석 지표

LMDI의 경우 카야 항등식(Kaya identity)을 기반으로 한다. 국가 전체 배출량 분해분석 시 탄소 집약도, 에너지 집약도, 1인당 GDP, 인구의 네 가지 동인을 고려하였으며 수식은 다음과 같다.

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \tag{1}$$

C는 탄소 배출 변화량(Carbon emissions), E는 에너지 소모량(Energy consumption), GDP는 국내총생산(Gross

Domestic Product), P는 인구(Population)를 의미한다.

해당 식을 기반으로 탄소 배출 변화량을 분해 분석하였으며 OECD 국가를 대상으로 탄소 집약도(CI, C/E)와 에너지 집약도(EI, E/GDP)에 중점을 둔 비교 분석을 수행하였다. 종단적 비교(Longitudinal comparison)를 위해 분석 기간을 파리협정 이전(2010~2014년)과 파리협정 이후(2015~2019년)로 나누어 분석을 진행하였다. 또한, 파리협정 이후 기간 동안 한국을 포함한 OECD 국가들의 탄소 배출 주요 동인(탄소 집약도와 에너지 집약도)을 점검하기 위해 횡단적 비교(Cross-sectional comparison)를 수행하였다. 개별 국가의 변화량을 비교하기 위해 산점도(Scatter plot)를 사용하여 시각화하였으며, 이를 상대적으로 비교 분석하기 위해 분해분석 결과 탄소 집약도와 에너지 집약도 동인의 기여를 최대-최소(Min-Max scaling) 방식으로 정규화(Normalization)하였다.

##### 3.1.2. 국내 부문 분석

본 연구에서는 탄소 배출의 시간적 흐름에 따른 변화와 더불어 동인별 기여를 확인하기 위해 LMDI 기법을 사용하였으며, 부문별 동인 분해식은 Table 1과 같다. 국가의 경우 카야 항등식(Kaya identity)을 기반으로 하며, 앞서 OECD 국가별 비교를 할 때와 동일한 식을 사용하였다. 이밖에 산업, 수송 등 기타 부문의 경우 부문별 특성을 고려해 식을 수립하였다(Table 2).

전환 부문의 배출량 변화는 탄소 집약도( $\frac{C_{ij}}{E_{ij}}$ ), 발전원 구성( $\frac{E_{ij}}{E_i}$ ), 발전효율( $\frac{E_i}{Q_i}$ ), 발전 형태별 발전량 비율( $\frac{Q_i}{Q}$ ), 생산(전력 총발전량, Q)으로 변수를 나누어 분해 분석을 수행했다. 이때 발전 형태(i)는 화력발전, 신재생발전으로, 에너지원(j)의 경우 석탄, 석유, 가스, 신재생(태양광, 풍력 등의 단일 데이터)을 포함한다. 이때 신재생에너지의 경우 국가 온실가스 인벤토리 보고서(GIR, 2023)에 기반하여 배출계수를 0으로 설정하였다.

산업 부문의 LMDI 방정식의 경우 배출량 변화를 탄소 집약도( $\frac{C_i}{E_i}$ ), 에너지 집약도( $\frac{E_i}{Q_i}$ ), 산업구조( $\frac{Q_i}{Q}$ ) 및 생산(부가가치, Q)의 4가지 동인에 대해 분해분석을 수행했다.

수송부문의 LMDI 방정식의 경우 배출량 변화를 탄소 집약도( $\frac{C_{ij}}{E_{ij}}$ ), 에너지믹스( $\frac{E_{ij}}{E_i}$ ), 수송 전환( $\frac{E_i}{E}$ ), 에너지

Table 1. List of data (2005 ~ 2022)

| Variable (Domestic)   | Source  | Period  |
|---|---|---|
| Carbon emissions (MtCO <sub>2</sub> e)  | Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (GIR, 2023)                 | 2005 ~ 2022   |
| Energy consumption (Mtoe)   | Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (GIR, 2023)                 | 2005 ~ 2022   |
| GDP per capita (10 million/person)  | Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (GIR, 2023)                 | 2005 ~ 2022   |
| Population (thousand)   | Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (GIR, 2023)                 | 2005 ~ 2022   |
| Value-added (10 billion)  | Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (GIR, 2023)                 | 2005 ~ 2022   |
| Power generation (MWh)  | Korea Electric Power Corporation, 2022 Korea Electric Power Statistics (No. 92) | 2005 ~ 2022   |
| Gross floor space ( $m^2$ )   | SEUMTER   | 2015 ~ 2022 (Residential)<br>2010 ~ 2022 (Commercial)<br>2011 ~ 2022 (Public) |
| Degree days   | Korea Meteorological Administration (KMA)                                       | 2005 ~ 2022   |
| Household   | Korean Statistical Information Service (KOSIS)                                  | 2000 ~ 2022   |
| Variable (International)  | Source  | Period  |
| Carbon emissions (ktonnes of CO <sub>2</sub> )  | World in Data   | 2005 ~ 2022   |
| Energy intensity (E*/GDP*)<br>*E (Primary energy supply consumption):<br>Mtonnes of oil equivalent (toe)<br>GDP: Thousands of USD | OECD (primary energy supply), World in Data (GDP)                               | 2005 ~ 2022   |
| Carbon intensity (C/E)  | World in Data   | 2005 ~ 2022   |
| GDP per capita  | World in Data   | 2005 ~ 2022   |
| Population (in thousands)   | World in Data   | 2005 ~ 2022   |

집약도( $\frac{E}{GDP}$ ), 1인당 GDP( $\frac{GDP}{P}$ ), 인구( $P$ )로 변수를 나누어 분해분석을 수행했다. 이때 수송부문의 총배출량 변화는 항공, 도로, 철도 및 해운의 네 가지 수송 수단  $i$ 의 합이다. 에너지원의 경우, 석탄, 석유, 가스, 재생에너지로 분류하였고 에너지원  $j$ 의 배출량을 모두 합산한 값이다.

다른 부문과 다르게 건물부문은 날씨 보정 에너지 집약도( $\frac{E}{F.D_d}$ ) 및 냉난방도일( $D_d$ )이 포함되었다. 이때, 날씨 보정 에너지 집약도는 단위면적당 에너지 소비량을 냉난방도일로 나눈 값이다. 가정용 건물 부문에는 가구당 연면적( $\frac{F}{H}$ ) 및 가구수( $H$ )가 포함되었으며, 상업용 및 공공용 건물의 경우 부가가치( $G$ ) 및 건물 활용 효율성(부가가치 당 연면적,  $\frac{F}{G}$ )이 LMDI 분석에 포함되었다.

농축산 부문과 폐기물 부문의 배출량 변화는 탄소집약도( $\frac{C}{Q}$ ), 1인당 생산( $\frac{Q}{P}$ ) 및 인구( $P$ )에 해당하는 세 가지

동인에 대해 분해 분석을 수행하였다(이때  $Q$ 는 각 부문의 부가가치를 의미한다). 특히 사항으로, 건물부문은 가정용, 상업 및 공공건물의 분해분석은 가용할 수 있는 자료의 한계로 인해 다른 부문 대비 분석 기간이 짧다(2011 ~ 2022년).

### 3.2. 분석데이터

해외 데이터의 경우, Our World in Data (2024)에서 제공하는 배출량(ktonnes)과 탄소 집약도(CO<sub>2</sub>/energy), 각국의 국내총생산(GDP/P) 데이터를 사용하였다(Table 1). 에너지 집약도(energy/GDP)를 계산하기 위해 OECD (2024)의 1차 에너지 공급(primary energy supply) 데이터를 사용하였다.

부문별 비교 분석 및 국가별 비교 분석을 위해 다음과 같은 데이터를 사용하였다(Table 2). 부문별 탄소 배출 변화량, 에너지 소모량, GDP, 인구, 부가가치에 해당하는 데이터의 경우 온실가스종합정보센터(GIR, 2023)에서 데이터를 제공받았다. 또한, 발전 부문에서 화력발전의 경우에

Table 2. The decomposition analysis equations of sectoral GHG emissions

| Sector           | Period                     | Note   | LMDI equation   |
|------------------|----------------------------|--|---|
| Total (National) | 1990 ~ 2022                | -  | $C = \left(\frac{C}{E}\right) \left(\frac{E}{GDP}\right) \left(\frac{GDP}{P}\right) P$ (Carbon intensity) (Energy intensity) (Value-added)  |
| Power Generation | 2005 ~ 2022                | Power generation type (i): thermal power generation, renewable energy generation<br>Energy source (j): coal, oil, gas, renewable | $C = \sum_j C_j = \sum_j \left(\frac{C_{ij}}{E_{ij}}\right) \left(\frac{C_j}{E_j}\right) \left(\frac{E_{ij}}{Q_j}\right) \left(\frac{Q_j}{Q}\right) Q$ (Carbon intensity) (Power generation structure)<br>(Power generation efficiency)<br>(Power generation structure) (Power generation)            |
| Industrial       | 1990 ~ 2022                | Total: steel, petrochemical, fabricated, metal, non-metallic, others   | $C = \sum_i C_i = \sum_i \left(\frac{C_i}{E_i}\right) \left(\frac{E_i}{Q_i}\right) \left(\frac{Q_i}{Q}\right) Q$ (Carbon intensity) (Energy intensity)<br>(Industry structure) (Value-added)  |
|                  |                            | Category (i): steel, petrochemical, fabricated, metal, non-metallic, others  | $C = \sum_i \left(\frac{C_i}{E_i}\right) \left(\frac{E_i}{Q_i}\right) Q$ (Carbon intensity) (Energy intensity) (Value-added)  |
| Transportation   | 1990 ~ 2022                | Mode: aviation, road, railroad, marine<br>Energy source: coal, oil, gas, renewable   | $C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} \left(\frac{C_{ij}}{E_{ij}}\right) \left(\frac{E_{ij}}{E_i}\right) \left(\frac{E_i}{E}\right) \left(\frac{E}{GDP}\right) \left(\frac{GDP}{P}\right) P$ (Carbon intensity) (Energy-mix)<br>(Transportation mode) (Energy intensity)<br>(GDP per capita) (Population) |
| Building         | 2015 ~ 2022                | Residential  | $C = \frac{C}{E} \frac{E}{F.D_d} \frac{F}{H} H.D_d$ (Carbon intensity) (Weather-calibrated energy intensity)<br>(Area per household) (Households) (Degree-days)   |
|                  | 2010 ~ 2022<br>2011 ~ 2022 | Commercial<br>Public   | $C = \frac{C}{E} \frac{E}{F.D_d} \frac{F}{G} G.D_d$ (Carbon intensity)<br>(Weather-calibrated energy intensity)<br>(Building utilization efficiency)<br>(Value-added) (Degree-days)   |
| Agriculture      | 1990 ~ 2022                | -  | $C = \frac{C}{Q} \frac{Q}{P} P$ (Carbon intensity) (Production per capita) (Population)   |
| Waste            | 2010 ~ 2022                | -  | $C = \frac{C}{Q} \frac{Q}{P} P$ (Carbon intensity) (Production per capita) (Population)   |

도 온실가스종합정보센터(GIR, 2023)에서 제공받은 온실가스 배출계수를 사용하였다.

특이 사항으로 국토부에서 관리하는 연면적 데이터는 2011년부터 제공하고 있어(SEUMTER, 2024) 상대적으로 짧은 기간에 대해 분석을 수행하였다. 냉난방도일을 계산하기 위해 기상청(KMA, 2024)에서 제공하는 오픈 데이터를 사용하였으며 가구 수의 경우 국가통계포털(KOSIS, 2024a)에서 제공하는 데이터를 사용하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1. OECD 국가별 동인 변화량 비교

OECD 평균 대비 각 국가의 온실가스 배출량 변화(ΔC, MtCO<sub>2</sub>)에 대해 CI 및 EI 동인이 증가 혹은 감소 동인으로 작용하였는지 분석하였다.

파리협정 체결 이전(Fig. 1(a))과 이후 기간(Fig. 1(b))에

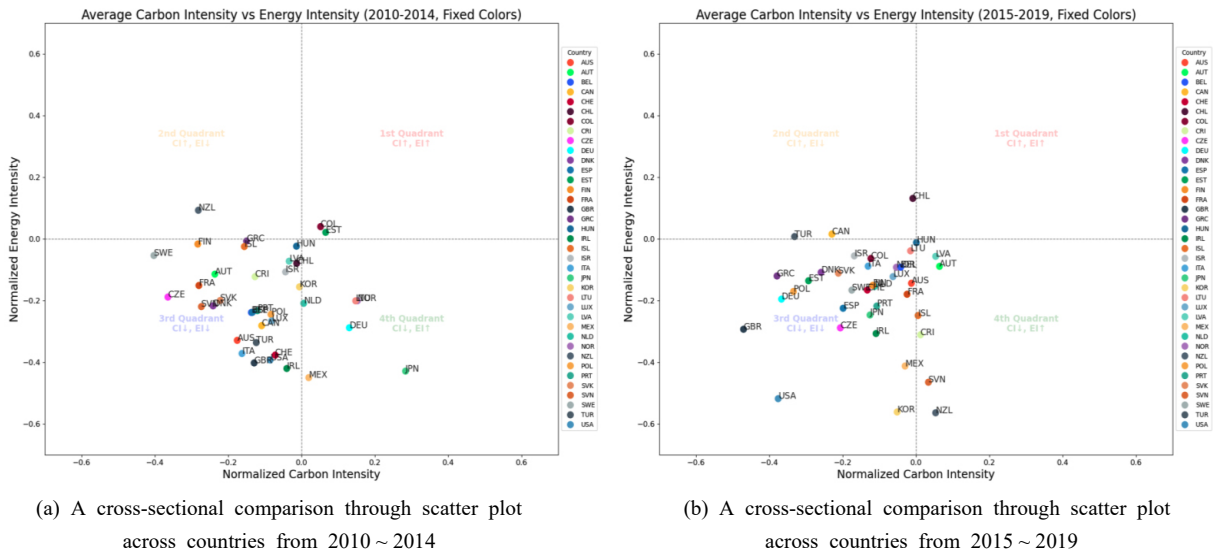


Fig. 1. Classification based on increases and decreases in normalized Carbon Intensity (CI) and Energy Intensity (EI) from 2010 ~ 2014(a) to 2015 ~ 2019(b)

Table 3. Trajectories categorization by Carbon Intensity (CI) and Energy Intensity (EI) from 2010 ~ 2014 to 2015 ~ 2019

| Change   | Direction | Representative countries list                                   |
|--|-----------|---|
| CI increase, EI increase<br>(CI, EI deterioration)             |           | AUS, AUT, BEL, CHL, HUN, ITA, LUX, LVA, PRT, SVK,               |
| CI decrease, EI increase<br>(CI improvement, EI deterioration) |           | CAN, CHE, DEU, GBR, IRL, ISR, LTU, NLD, NOR, POL, TUR, JPN, MEX |
| CI decrease, EI decrease<br>(CI, EI improvement)               |           | COL, DNK, ESP, EST, KOR, USA                                    |
| CI increase, EI decrease<br>(CI deterioration, EI improvement) |           | CRI, CZE, FIN, FRA, ISL, NZL, SVN, SWE                          |

대해 CI 및 EI 동인의 변화 추세 근거로 4가지 유형으로 분류하였다(Table 3).

파리협정 이전 대부분 국가에서 CI와 EI의 변화량이 전반기 및 후반기 대부분 3 사분면에 위치하며, CI와 EI는 모두 탄소 배출 감소 동인으로 작용하는 경향을 보였다. 이는 OECD 국가 대부분이 유럽 국가이며, 유럽은 교토의 정서의 감축의무를 가지고 있어, 파리협정 이전부터 지속적인 탄소 배출 감소 노력을 지속하고 있기 때문으로 판단된다.

콜롬비아(COL), 덴마크(DNK), 스페인(ESP), 에스토니아(EST), 한국(KOR), 미국(USA)은 파리협정 체결 이후 CI 및 EI 배출량 감소 기여가 더 증가하였다(Fig. 2(a), green arrow). 해당 국가들의 공통점은 재생에너지 보급과

청정에너지 전환으로의 전환이 전반적으로 이루어졌다.

덴마크의 경우 산업 공정의 효율의 향상과 건물 및 가정 부분의 에너지 소비 개선에 따라 EI 개선이 뚜렷하게 관찰되었다(IEA, 2023a; OECD, 2023). 또한 풍력 발전 비중의 큰 증가 및 석탄 발전소 폐지 및 바이오매스 추진 등의 정책이 덴마크의 CI 및 EI 개선 동인으로 작용하였다(Barker et al., 2022).

에스토니아(EST)의 경우 2015년 이후로 석유 셰일(oil shale) 발전의 축소에 따라 1차 에너지 CO<sub>2</sub> 배출량이 42% 감소하였다. 이는 에스토니아 전력 생산의 절반 이상을 차지하며 CI 개선의 동인으로 작용하였다(IMF, 2024).

한국의 경우 CI 변화량이 소폭, EI 변화량이 큰 폭으로 개선이 되었다. 2020년 기준, 한국의 GDP 대비 제조업 비

증은 27%로, OECD 평균인 14%를 크게 상회한다. 이에 따라 에너지 집약도 변화량이 한국의 산업 부문에 큰 개선이 있던 것으로 추정된다(BOK, 2024).

파리협정 이후 오스트레일리아(AUS), 오스트리아(AUT), 벨기에(BEL), 칠레(CHL) 등에서는 CI와 EI의 기여도가 감소하였으며, 일부 국가에서는 탄소 배출량 증가의 동인으로 작동하기도 하였다(Fig. 2(a), red arrow).

이들 국가는 최종 에너지 공급에서 화석연료의 비중이 상대적으로 높은 국가들이다. 오스트레일리아(AUS)는 파리협정 이전 분석 기간 동안 화석에너지 소비가 크게 감소했으나, 2015년 이후 다시 증가하여 전체 에너지 소비가 늘어났다(IEA, 2024a). 이에 따른 탄소 집약도 동인의 기여 정도가 악화하여 탄소 배출 증가의 주요 요인으로 작용한 것으로 분석된다. 한편, 칠레는 빠른 경제성장으로 에너지 소비가 증가했으며, 화석에너지 사용도 지속적으로 늘어났다. 이러한 요인들이 EI 변화량을 통해 탄소 배출량 증가에 영향을 미친 주요 원인으로 보인다(KOTRA, 2011; IEA, 2024c).

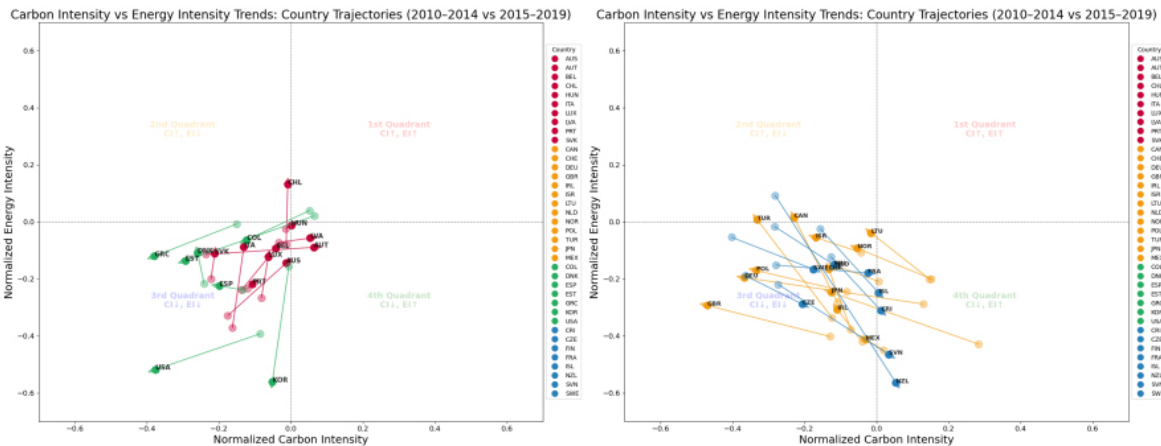
캐나다(CAN), 스위스(CHE), 독일(DEU), 영국(GBR) 등은 CI 동인의 배출량 감소 기여가 개선됐지만, 반대로 EI 동인은 파리협정 체결 이후 배출량 감소 기여가 악화하였다(Fig. 2(b), orange arrow). 한편, 튀르키예(TUR)는 2022년 기준 전환 부문에서 재생에너지가 전체의 40.5%를 차지했으나, 전력 소비량이 117% 증가하면서 EI가 탄

소 배출 증가의 주요 요인으로 작용하였다(IEA, 2024b). 반대로, CI가 탄소 배출 증가 동인으로 작용했지만, EI는 탄소 배출 감소 동인으로 작용한 대표적인 국가로는 코스타리카(CRI), 체코(CZE), 핀란드(FIN), 슬로베니아(SVN), 스웨덴(SWE) 등이 관찰되었다(Fig. 2(b), blue arrow). 해당 국가들의 공통점은 이미 낮은 탄소 집약도의 마지노선을 가지고 있다는 점이다. 해당 국가들은 이미 OECD 내에서도 1차 에너지에 대한 탄소집약도가 최저 수준이다. 특히 코스타리카의 경우 대부분의 전력을 무탄소 전원에서부터 조달한다(IEA, 2023b).

체코(CZE)의 경우 2015년 이후 석탄 감축을 위한 광산 폐쇄 및 배출부과금 강화가 이루어졌으나(KOTRA, 2024), 원전 건설 지연으로 인해 석탄 발전 폐쇄가 제대로 이루어지지 않았다. 이러한 요인으로 인해 CI 개선이 미미했다.

프랑스(FRA)의 경우 G20에서 CI는 최저 수준이자만 2015년을 기점으로 개선 속도가 상대적으로 둔화되었다(Climate Transparency, 2019).

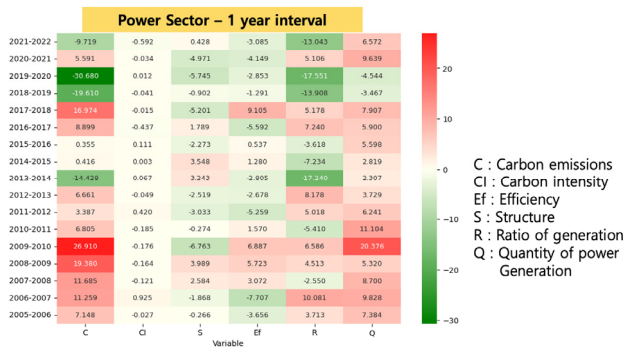
스웨덴(SWE)의 경우 전력의 약 80%가 수력, 원자력 그리고 바이오매스가 담당하였으나 2015년 일부 원전의 폐쇄로 전력의 무탄소 비중이 소폭 줄고, 수송 부문의 석유 소비가 크게 줄지 않아 탄소집약도가 소폭 상승한 것으로 추정된다(Xinhua, 2023).



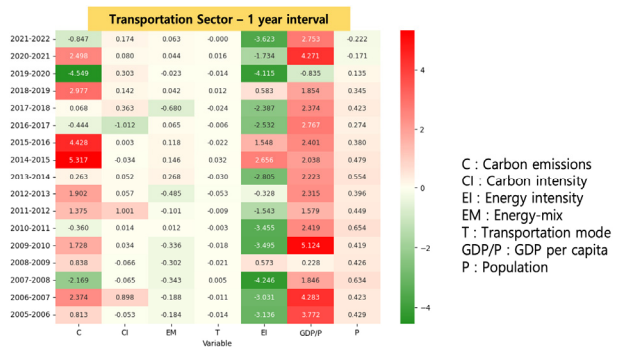
(a) A Cross-Sectional comparison through scatter plot across countries from 2010 ~ 2014

(b) A Cross-Sectional comparison through scatter plot across countries from 2015 ~ 2019

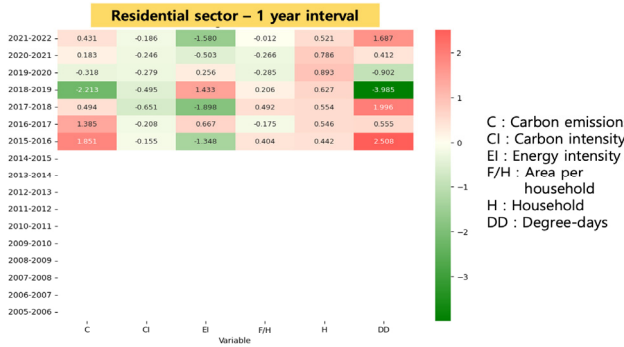
Fig. 2. Trajectories classification based on increases and decreases in normalized Carbon Intensity (CI) and Energy Intensity (EI) from 2010 ~ 2014 to 2015 ~ 2019 (The color represents direction of change in CI and EI which is referred to Table 3)



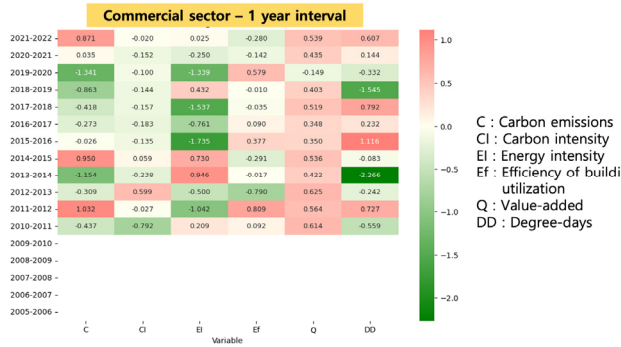
(a) LMDI decomposition results for the power sector



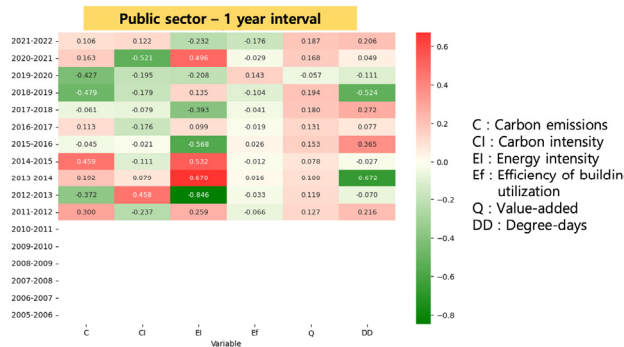
(b) LMDI decomposition results for the transportation sector



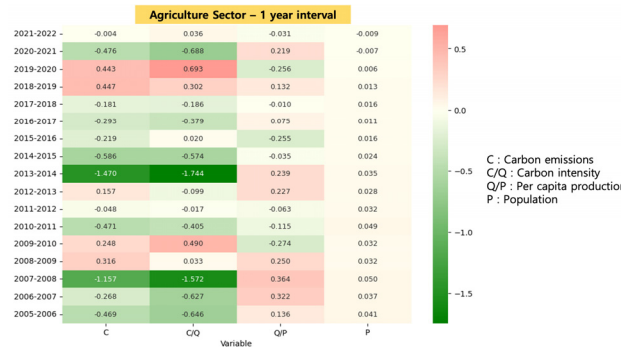
(c) LMDI decomposition results for the residential sector



(d) LMDI decomposition results for the commercial sector



(e) LMDI decomposition results for the public sector



(f) LMDI decomposition results for the agriculture sector



(g) LMDI decomposition results for the waste sector

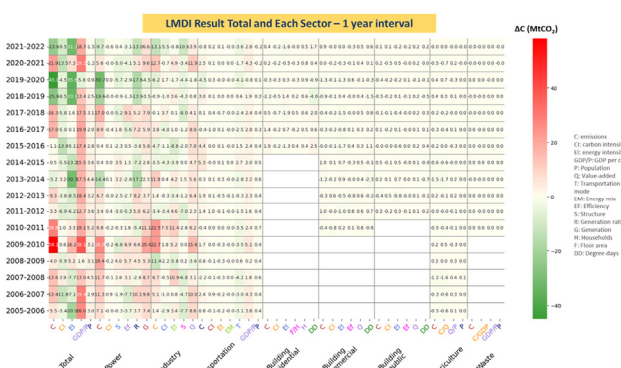


Fig. 3. LMDI decomposition results for the total and each sector

#### 4.2. 국내 부문별 동인 분해분석 결과

한국의 부문별 분석(Fig. 3)은 탄소 변화량( $\Delta C$ , MtCO<sub>2</sub>)을 기준으로 분석하였다. 총계(Total), 전환(Power), 산업(Industry), 수송(Transportation), 건물-가정용, 상업용, 공공용(Building-residential, commercial, public), 농업(Agriculture), 폐기물(Waste)로 나누어 분석하였다.

국가 전체 배출량 변화에 전환, 산업, 수송 부문의 순서로 그 기여가 가장 컸다(Fig. 3). 2012년 이후 전반적으로 배출 변화량이 감소하는 추세를 보였으며, 이는 상당 부분 탄소 집약도와 에너지 집약도의 감소에 기인한다.

국내 부문 중에 전환 부문에서 가장 큰 탄소 배출 변화량(C) 감소가 확인되었다(Fig. 3(a)). 이는 2012~2013 기간을 기점으로 신재생에너지 발전의 비중이 석유를 초과하는 등 발전원 구성에 큰 변화가 발생한 것이 주요 동인으로 작용하였기 때문이다(KEPCO, 2023). 2017년 이후 탄소 배출량 변화 폭이 지속해 감소하였고, 2020년에는 국가 탄소 배출 변화량의 50% 이상이 전환 부문의 영향을 받은 것으로 나타났다. 발전량 증가(Q)에 따른 배출량 증가는 여전히 탄소 배출 증가의 주요 동인으로 작용했으나, 발전원 구성(S), 발전 효율(Ef) 변화가 이를 상쇄하면서, 전환 부문에서 배출량은 감소하는 결과를 보였다. 한편, 탄소 집약도(CI) 변화는 배출량 변화에 미치는 영향이 미미한 수준으로 나타났다.

수송부문은 일부 연도를 제외하고는 배출량이 점진적으로 증가하는 것으로 나타났으며 이는 주로 1인당 국민총생산 증가에 기인하였다(Fig. 3(b)). 탄소 집약도(CI), 에너지믹스 변화(EM), 수단 전환(T)은 변화량에 미미한 영향을 미쳤다.

가정 부문의 배출량 변화는 점진적으로 증가하는 것으로 나타났으며 이는 총가구 수와 가구당 면적의 지속적인 증가에 기인하는 것으로 나타났다. 특히 냉난방 도일에 큰 영향을 받음을 확인할 수 있었다(Fig. 3(c)). 특히 2019년의 배출 변화량 감소는 전년 대비 냉난방 도일(C.HDD)이 큰 폭으로 감소함에 따라 발생한 것으로, 이는 2018년이 평년보다 평균 온도가 더 높았기 때문이다(KMA, 2024).

농축산 부문의 배출 변화량은 2005년 이후 2009, 2019, 2020년을 제외하고 지속적인 감소 추세를 보였다(Fig. 3(f)). 이는 벼농사의 경작지 감소, 질소비료(이산화질소) 사용 감소 등이 반영된 결과이다(Lee et al., 2024). 다음으로 생산량(Q)이 탄소 배출 감소 동인으로 작용하는

경향을 보였다. 특히 축산업의 경우 사육두수가 지속적으로 증가하는 경향을 보였다(KOSIS, 2024b).

폐기물 부문의 배출 변화량은 등락을 반복하였으며, 2014, 2015, 2019년에 상대적으로 큰 폭으로 변화하였다(Fig. 3(g)). 이는 생활폐기물과 사업장폐기물의 발생량 증가로 인한 것으로 추정되며, 예를 들어, 2019년 이후에는 폐기물 재활용률이 86.6%로 개선되어, 폐기물 배출량이 감소한 것으로 추정할 수 있다(ME, 2023).

### 5. 결론 및 시사점

본 연구는 한국의 온실가스 배출량 변화에 대한 장기간의 요인 분해분석을 통해 주요 동인별 기여를 평가하고 OECD 주요 국가들과 비교하여 파리협정 이행에 따른 개선 상황을 분석하였다.

OECD 국가들은 분석 기간 전반적으로 탄소 집약도(CI)와 에너지 집약도(EI)가 개선되는 경향을 보였다. 특히 2010-2019년도 기간 동안 OECD 국가들의 EI는 연평균 -2.1%가 감소했으며 EU 국가들의 경우 EI는 연평균 4% 감소했다. 이는 탈탄소 정책에 따른 재생에너지 발전량의 증가 및 산업 활동 약화 등의 요인에 따른 것이다(Enerdata, 2024). 반면 비유럽 국가들에서는 화석연료 의존도로 인해 개선 속도가 지연되거나 악화한 사례가 나타났다. 한국은 EI에서 긍정적 성과를 보였으나, CI 개선 속도는 OECD 평균에 미치지 못했다. 이는 한국의 전반적인 부문의 탈탄소화 및 재생에너지 확대가 시급함을 시사한다.

다음으로 한국의 부문별 온실가스 배출량의 분해분석 결과, 주요 탄소 배출원인 전환 부문에서 신재생에너지 확대와 에너지 효율 개선이 배출량 감소에 기여했으나, 발전량 증가는 여전히 주요 배출 요인으로 작용했다. 산업 부문에서는 2018년을 기점으로 배출량 감소 동인으로 작용하였다. 특히 철강 산업이 온실가스 배출 개선을 보였다. 하지만 내부적인 요인으로 인한 개선이 아닌 외부적인 요인(글로벌 금융위기, 고로 완공 및 철강의 공급 부족 문제 등)으로 인한 개선이 온실가스 배출 감소를 유발하였다(KIS, 2024; Lee, 2020).

수송 부문의 경우 EI가 가장 큰 탄소 배출량 감소 동인으로 작용하였다. 특히 EI 감소 동인 작용은 전기차와 같은 친환경 차 보급을 확대의 효과가 있던 것으로 추정된다. 반면, 1인당 국민총생산 증가는 탄소 배출 변화량의 증가에 기인하였다(Kim et al., 2017).

본 연구는 몇 가지 주요한 시사점을 제시한다. 첫째, OECD 주요 국가들과의 비교를 통해 한국의 감축 성과를 상대적으로 평가하고, 성공적인 감축 사례를 참고한 장기적이고 포괄적인 정책 설계의 필요성을 확인하였다. 둘째, 한국은 에너지 집약도(EI) 개선에서는 긍정적인 성과를 보였으나, 탄소 집약도(CI) 개선 속도는 상대적으로 뒤쳐져 있어 탈탄소화와 재생에너지 확대를 위한 정책적 노력이 시급하다.

셋째, 국내 부문의 경우 각 부문의 온실가스 배출 특성을 고려한 차별화되고 현실성 있는 감축 정책이 필요하다. 특히 산업 부문은 전반적인 에너지 집약도 개선이 중요한 과제로 나타났다(GIR, 2013; KEEL, 2015).

이밖에 수송 부문의 경우 EI가 가장 큰 탄소 배출량 감소 동인으로 작용하였다. 하지만 전체 탄소 배출량은 여전히 증가하는 추세를 보였다. 이에, 전기차와 같은 친환경 차 보급을 확대해야 하며, 저탄소 전원 비중을 높이는 노력이 병행되어야 한다(Kim et al., 2017).

농축산 부문에서는 탄소집약도가 가 탄소 배출량 감소에 주요한 기여 요인으로 작용하였다. 향후 농축산 부문에서 탄소 배출 저감을 위해서는 저메탄 사료와 적정 단백질 사료의 보급을 통해 축산업에서 발생하는 온실가스를 효과적으로 감축할 필요가 있다(Lee et al., 2023; MAFRA, 2024).

건물 부문의 경우, 기후변화로 인한 냉방도일이 지속적으로 증가가 예상되며 이에 적절한 대응이 필요한 상황이다. 현재 한국은 '그린리모델링' 정책을 통해 공공 및 민간 건축물의 에너지 성능을 개선하고 있으며, 에너지 소비가 많은 건축물에 대한 적극적인 투자가 필요한 시점이다(Son and Kim, 2022)

본 연구는 기존 연구와 다르게 한국과 OECD 국가와의 비교 그리고 한국의 부문별 동인별 온실가스배출량 기여의 개선 및 지연 정도를 비교 분석하였다. 하지만 다음과 같은 한계도 존재한다. 파리협정을 전후로 OECD 국가 간 비교를 위해 분석 기간을 파리협정 이전(2010~2014년)과 파리협정 이후(2015~2019년)로 설정하였다. 보다 더 정확한 분석을 위해 파리협정 발효 시기인 2020년을 기준으로 구분하는 것이 바람직하나 2019년을 기점으로 발생한 COVID-19 기간과의 중복 및 파리협정 이후 분석 기간이 다소 짧아 해당 분석에 제외되었다.

수송 부문의 경우 친환경 차량, 버스 등 도로교통 내에서의 다양한 모드를 포함하지 않아, 실질적으로 도로수송 부문에서의 수송수단전환의 효과를 분석하지 못하였다는

한계가 존재하며, 이러한 연구의 한계는 후속연구를 통해 보완이 필요하다.

## 사사

본 연구는 온실가스종합정보센터(GIR)의 「온실가스 감축목표 추진실적 분석을 통한 향후 NDC 수립 전략 마련」 연구[N06230134] 및 2024년도 과학기술정보통신부 재원으로 한국과학기술원 G-CORE 연구사업(N10240007)의 용역의 지원을 받아 수행되었습니다.

## Reference

- 2050CNC (Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth). 2021. Enhanced update of the first nationally determined contribution (NDC) under the Paris Agreement. Office for Government Policy Coordination, Prime Minister's Secretariat.
- Ang BW. 2004. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? *Energy Policy* 32(9): 1131-1139. doi: 10.1016/S0301-4215(03)00076-4
- Ang BW. 2005. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy* 33(7): 867-871. doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.010
- Ang BW. 2015. LMDI decomposition approach: A guide for implementation. *Energy Policy* 86: 233-238. doi: 10.1016/j.enpol.2015.07.007
- Ang BW, Liu FL. 2001. A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy* 26(6): 537-548. doi: 10.1016/S0360-5442(01)00022-6
- Barker A, Blake H, D'Arcangelo FM, Lenain P. 2022. Towards net zero emissions in Denmark. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD); Economics Department Working Papers No. 1705. doi: 10.1787/5b40df8f-en
- Bianco V, Cascetta F, Nardini S. 2024. Analysis of the carbon emissions trend in the European Union: A decomposition and decoupling approach. *Sci Total Environ* 909: 168528. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168528

- BOK (Bank of Korea). 2024. Structural changes in the Korean economy and policy responses through the lens of global supply chains. Issue No. 2024-28. Seoul: Bank of Korea, Economic Research Department.
- Climate Transparency. 2019. France country profile 2019: Brown to Green - The G20 transition towards a net-zero emissions economy. [accessed 2024 Sep 22]. <https://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance/g20report2019>
- Enerdata. 2024. Global energy trends: 2030 Targets - Renewables & energy efficiency [Internet]. Grenoble (FR): Enerdata; [accessed 2025 Apr 14]. <https://www.enerdata.net>
- Fernández González P, Landajo M, Presno MJ. 2014. Tracking European Union CO2 emissions through LMDI (logarithmic-mean Divisia index) decomposition: The activity revaluation approach. *Energy* 73: 741-750. doi: 10.1016/j.energy.2014.06.078.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2013. Heat waves, cold waves, and increase in steel production cause a 9.8% (60 million tons) increase in national greenhouse gas emissions in 2010. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2020. 2018-2019 National Greenhouse Gas Reduction Performance and Evaluation Report. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2023. 2023 national greenhouse gas inventory report. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea.
- Han J. 2023. LMDI decomposition analysis for electricity consumption of Incheon. *Environ Policy* 31(1): 75-95. doi: 10.1501/jepa.2023.31.1.75
- IEA (International Energy Agency). 2023a. Denmark 2023: Energy policy review. Paris, France: IEA. [accessed 2025 Apr 14]. <https://www.iea.org/reports/denmark-2023>
- IEA (International Energy Agency). 2023b. Costa Rica 2023: Energy profile. Paris, France: IEA. [accessed 2025 Apr 14]. <https://www.iea.org/reports/costa-rica-energy-profile>
- IEA (International Energy Agency). 2024a. [accessed 2024 Sep 22]. <https://www.iea.org/countries/australia>
- IEA (International Energy Agency). 2024b. [accessed 2024 Sep 22]. <https://www.iea.org/countries/turkiye>
- IEA (International Energy Agency). 2024c. [accessed 2024 Sep 22]. <https://www.iea.org/countries/chile>
- IMF (International Monetary Fund). 2024. Policies to tackle climate change in Estonia. IMF Staff Country Reports 2024(178). <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/002/2024/178/article-A006-en.xml>
- Jones A, Smith B, Taylor C. 2024. Annual greenhouse gas emissions including land use [dataset]. Our World in Data, editor. National contributions to climate change 2024.2 [original data].
- Jung S. 2024 Mar 11. How can hydrogen power achieve economic viability? Challenges in scaling up and system integration. *Electimes*. <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=333829>
- Lee D. 2020. Domestic steel industry: Current status and future challenges. *KDB Monthly Research Bulletin* 777: 52-69. Seoul, Korea: Korea Development Bank, Future Strategy Research Institute.
- KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2015. World Energy Market Insight. No. 15-10. International Energy Cooperation Division.
- Kim S. 2018. Decomposition analysis on GHG emissions of domestic electricity generation sector: Using the LMDI method. *Korean Energy Econ Rev* 17(1): 241-264.
- Kim S, Lee S, Lee J. 2017. Analyzing the effect of electric vehicle supply on greenhouse gas emissions in 2030. *Environ Policy* 25(4): 39-61. doi: 10.15301/jepa.2017.25.4.39
- KIS (Korea Investors Service). 2024. Performance review and credit outlook of the steel industry. 2024 KIS Credit Issue Seminar. Corporate Evaluation Department, Korea Investors Service.
- KMA (Korea Meteorological Administration Weather Data Service). Conditional statistics; [accessed 2024 Mar 22]. <https://www.weather.go.kr/w/index.do>

- KOSIS (Korea Statistical Information Service). 2024a. Total number of households; [accessed 2024 Feb 26]. <https://kosis.kr/index/index.do>.
- KOSIS (Korea Statistical Information Service). 2024b. Total number of livestock; [accessed 2024 Sep 01]. <https://kosis.kr/index/index.do>
- KOTRA (Korea Trade-Investment Promotion Agency). 2011. Chile, the country with the world's leading waste-to-energy technology [Report]. KOTRA. [https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE\\_NO=3&MENU\\_ID=180&CONTENTS\\_NO=1&bbsGbn=243&bbsSn=243&pNttSn=109659](https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=180&CONTENTS_NO=1&bbsGbn=243&bbsSn=243&pNttSn=109659)
- KOTRA (Korea Trade-Investment Promotion Agency). 2024. Global Market Report 24-059: Czech Power (Nuclear) Equipment Market and Business Guide. Seoul: Korea Trade-Investment Promotion Agency (KOTRA).
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2024. 2030 Greenhouse Gas Reduction and Green Growth Strategy for the Livestock Sector Towards Carbon Neutrality by 2050. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- ME (Ministry of Environment). 2023. Status of waste treatment; [accessed 2024 Mar 22]. [https://stat.me.go.kr/portal/stat/easyStatPage/DT\\_106N\\_29\\_2020005.do](https://stat.me.go.kr/portal/stat/easyStatPage/DT_106N_29_2020005.do)
- Moutinho V, Madaleno M, Inglesi-Lotz R, Dogan E. 2018. Factors affecting CO2 emissions in top countries on renewable energies: A LMDI decomposition application. *Renew Sustain Energy Rev* 90: 605-622. doi: 10.1016/j.rser.2018.02.009
- Moutinho V, Moreira AC, Silva PM. 2015. The driving forces of change in energy-related CO2 emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: The LMDI approach to decomposition analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 50: 1485-1499. doi: 10.1016/j.rser.2015.05.072
- OECD. 2024. Primary energy supply Data set; [accessed 2024 Mar 22]. <https://stats.oecd.org>
- Our World in Data. 2024. Kaya identity: Drivers of CO2 emissions, world; [accessed 2024 Mar 22]. <https://ourworldindata.org/grapher/kaya-identity-co2>
- Park NB. 2023. Decomposition analysis on GHG emissions of domestic electricity generation sector. *J Energy Eng* 32(2): 23-37. doi: 10.5855/ENERGY.2023.32.2.023
- SEUMTER. 2024. Provides information on the issuance of building registers; [accessed 2024 Mar 22]. <https://www.eais.go.kr/moect/awp/aec02/AWPAEC02L01>
- Son I, Kim D. 2022. Policies and prospects for green remodeling in Korea: Focused on greenhouse gas reduction and energy efficiency improvement. *Korean Energy Econ Rev* 21(2): 123-145. [https://www.keei.re.kr/keei/download/keer/KEER22\\_21-2\\_05.pdf](https://www.keei.re.kr/keei/download/keer/KEER22_21-2_05.pdf)
- Tajudeen IA, Wossink A, Banerjee P. 2018. How significant is energy efficiency to mitigate CO2 emissions? Evidence from OECD countries. *Energy Econ* 72: 200-221. doi: 10.1016/j.eneco.2018.04.010
- Xiang X, Ma X, Ma Z, Ma M, Cai W. 2022. Python-LMDI: A tool for index decomposition analysis of building carbon emissions. *Buildings* 12(1): 83. doi: 10.3390/buildings12010083
- Xinhua. 2023 Sep 13. Sweden to expand nuclear power to boost energy security. XinhuaNet [accessed 2024 Sep 22]. <https://english.news.cn/20230913/fd388935ecf84b8783e39cf8b8cb4d28/c.html>
- Yoo JH, Lee SH, Lee J, Jeon EC. 2023. Decomposition analysis of regional electricity usage characteristics: Focusing on metropolitan cities. *J Energy Eng* 32(2): 60-71. doi: 10.5855/ENERGY.2023.32.2.060