

# 교통부문 탄소배출 탈동조화 현상의 원인분석 및 에너지전환의 효과: OECD 25개국 패널분석<sup>†</sup>

임형우\* · 조하현\*\*

**요약** : 최근 OECD 일부 국가를 중심으로 교통부문 온실가스 배출량의 탈동조화 현상이 강화되고 있다. 본 연구는 1990~2017년 OECD 25개 국가 데이터를 이용하여 교통부문 온실가스 배출의 탈동조화 현황을 살펴보고, 에너지전환이 탈동조화에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 상당수의 국가들이 탈동조화 국면에 도달했으며, 일부 국가는 경제성장에도 불구하고 온실가스 배출량은 감소하는 강한 탈동조화 국면에 도달했다. 에너지 전환이 탈동조화 국면에 미치는 영향을 분석해본 결과, 전기화 현상은 탈동조화 달성에 긍정적인 영향을 미친 반면, 가스화 현상은 유의성이 없었다. 이 외에도 적은 운송량, 높은 도시화율, 강한 환경정책, 높은 무역 개방도가 탈동조화 달성에 유의미한 영향을 미쳤다.

**주제어** : 경제성장, 교통부문 탄소배출량, 탈동조화, 에너지전환, 교통부문 전기화

**JEL 분류** : R40, Q54

접수일(2020년 7월 27일), 수정일(2020년 8월 20일), 게재확정일(2020년 8월 26일)

<sup>†</sup> 이 논문은 연세대학교 학술연구비의 지원으로 이루어진 것임.

\* 연세대학교 일반대학원 경제학과 박사과정, 제1저자(e-mail: hyungwoo.lim0206@gmail.com)

\*\* 연세대학교 경제학부 정교수, 교신저자(e-mail: hahyunjo@hanmail.net)

# Drivers of Carbon Decoupling in Transportation Sector and the Effect of Energy Transition: Panel Analysis of 25 OECD Countries

Hyungwoo Lim\* and Ha-Hyun Jo\*\*

**ABSTRACT** : Some OECD countries are showing signs of decoupling in the transportation sector. In terms of sustainable development, the decoupling of economic activities and greenhouse gas emissions in the transportation sector is very important. This study calculated a decoupling index of greenhouse gas emissions in the transportation sector for 25 OECD countries. Also this study analyzed the impact of energy transition on decoupling regimes. According to the analysis, a considerable number of countries have reached the decoupling phase, and some countries have shown strong decoupling regime in which greenhouse gas emissions are reduced despite economic growth. From ordered panel logit analysis, energy transition had significant impact on achieving decoupling phase. Electrification of transport had a positive effect on the decoupling, while the gasification was not significant. In addition, small traffic, high urbanization rates, strong environmental policies, and high trade opening have had significant effects on achieving decoupling.

**Keywords** : Economic growth, Carbon emissions in the transportation sector, Decoupling index, Energy transition, Electrification in the transportation sector

---

Received: July 27, 2020. Revised: August 20, 2020. Accepted: August 26, 2020.

\* PhD student, Department of Economics, Yonsei University, First author(e-mail: hyungwoo.lim0206@gmail.com)

\*\* Professor, Department of Economics, Yonsei University, Corresponding author(e-mail: hahyunjo@hanmail.net)

## I. 서론

교통부문은 전 세계에서 에너지소비 및 탄소배출량이 가장 빠르게 증가하는 분야이며, 이로 인해 탄소감축이 가장 중요한 분야로 평가받는다(Ma et al., 2015). 최근 교통부문의 이슈 중 하나는 탄소배출량의 탈동조화(decoupling) 현상이다. 탈동조화란 한 방향으로 움직일 것으로 예상되는 두 변수가 특정 조건이 변화함에 따라 관계를 보이지 않거나, 반대 방향으로 움직이는 현상을 의미한다(Jackson, 2013). 전통적으로 교통부문의 온실가스 배출량은 경제활동과 밀접한 관련을 맺고 있는 것으로 알려져 있다. 경제성장은 여행 및 화물교통의 수요를 늘리며, 이로 인해 교통부문의 에너지소비량 및 온실가스 배출량이 늘어나게 된다(Chapman, 2007; Hasan et al., 2019). 하지만 최근 이러한 관계의 변화가 나타나고 있으며 이러한 변화가 탈동조화로 나타나고 있다.

교통부문의 탈동조화 현상은 지속가능한 발전 측면에서 매우 중요하다. 2015년 파리협정 이후 선진국뿐만 아니라 모든 개도국도 온실가스 감축 의무를 부여받았다. 개도국의 경우, 온실가스 감축의무로 인해 경제성장이 제약을 받을까 우려하는 경향이 크다. 이에 따라 경제성장 기조를 유지하며 온실가스 배출을 감축할 수 있는 방안에 대해 많은 연구가 진행되고 있다(임형우·조하현, 2019).

특히 교통부문은 2017년 기준 OECD 국가들의 전체 배출량의 36%, 전체 에너지소비량의 29%를 담당할 만큼 주요 배출부문이다. 특히 교통부문 에너지소비량의 93.6%가 석유제품일 만큼 화석연료에 의존하는 에너지구조를 갖고 있다. 우리나라의 경우 2017년 기준 전체 온실가스 배출량 중 교통부문의 비중은 18%로 OECD 평균에 비해 낮다. 다만, 에너지소비 전체 교통부문 에너지소비량 중 석유제품의 비중은 94.5%로 OECD 보다 더 화석연료 의존적인 구조를 갖고 있다.

일부 선행연구들은 교통부문의 온실가스 잠재감축량에 주목하고 있다(GCEC, 2015; Gota et al., 2015). GCEC(2015)는 도시의 집약 및 대중교통 보급 등을 통해 상당 부분의 온실가스 감축이 가능하다고 밝히고 있다. 특히 교통부문의 경우 대부분의 에너지 소비를 석유제품에 의존하고 있으며, 에너지 전환을 통한 온실가스 감축이 적극적으로 검토되고 있다.

즉, 현재 교통부문의 에너지소비구조를 저탄소·친환경 에너지로 전환한다면, 교통부

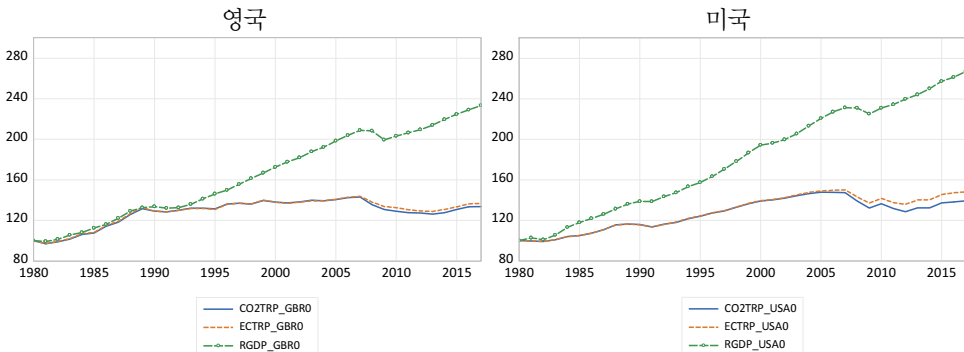
문의 온실가스 배출량을 획기적으로 줄일 수 있다. 실제로 OECD 국가의 경우 바이오연료, 전력, 천연가스 등 저탄소 에너지원의 보급이 활발해지며, 석유제품의 사용 비중은 1990년 97.5%에서 2017년 93.6%로 감소하고 있는 상황이다. 본 연구는 이러한 에너지 전환 현상이 온실가스 감축 및 교통부문 탄소배출의 탈동조화에 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 교통부문의 에너지전환 현황을 살펴본다. III장에서는 탈동조화 지수를 생성하는 방법론 및 교통부문의 탄소배출량에 대한 선행연구를 살펴본다. IV장에서는 본 연구에서 활용하는 패널순서형모형을 설명하고, 활용 데이터를 소개한다. V장에서는 OECD 25개국의 탈동조화 정도 및 탈동조화에 영향을 미치는 요인들에 대해 분석한다. 특히 교통부문의 에너지전환이 교통부문의 탈동조화에 유의적인 영향을 미쳤는지 확인한다. 마지막 VI장에서는 결론 및 시사점을 도출한다.

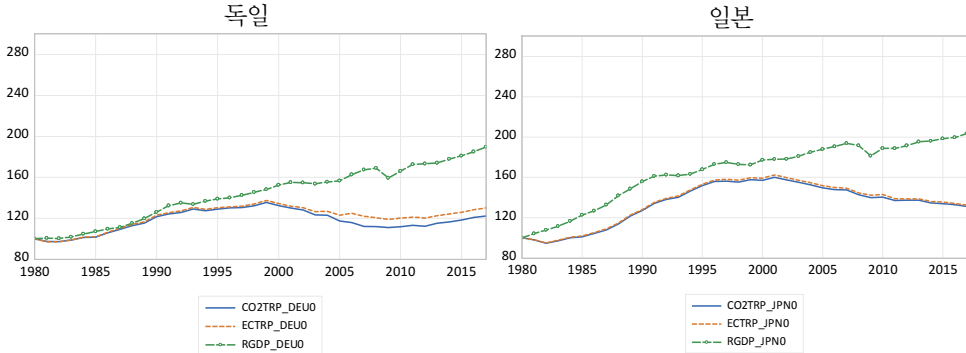
## II. 교통부문의 에너지전환

아래 <그림 1>은 1980년을 기점으로 주요 4개국(영국, 미국, 독일, 일본)의 실질GDP 및 교통부문의 에너지소비량과 온실가스 배출량을 지수화시킨 그림이다. 1980년의 값을 100으로 두고, 변수들의 움직임을 관찰해보았다.

<그림 1> 주요 4개국의 GDP, 교통부문 에너지소비량 및 온실가스 배출량 움직임



(그림 1) 주요 4개국의 GDP, 교통부문 에너지소비량 및 온실가스 배출량 움직임 (계속)



- 주1. 실선(파란색) : 교통부문 CO<sub>2</sub> 배출량, 점선(빨간색) : 교통부문 에너지소비량, 동그라미 점선(초록) : 실질GDP.
- 주2. 1980년 교통부문 CO<sub>2</sub> 배출량, 에너지소비량 및 실질GDP를 100으로 설정하였음.
- 주3. 가로축은 연도를 의미.

네 국가에서 공통적으로 GDP와 탄소배출(에너지소비)의 탈동조화 현상이 관찰된다. 영국 및 독일 등 유럽국가의 경우, 1990년을 기점으로 GDP와 탄소배출의 동행성이 약해졌으며, 이후 GDP는 지속적으로 상승하는 반면 탄소배출은 정체 및 감소하는 탈동조화 현상이 나타났다. 미국의 경우 1980년 이후부터 GDP와 탄소배출의 관계가 멀어지는 모습이 발견되었으며, 일본의 경우에는 2000년을 기점으로 탈동조화의 모습이 명시적으로 나타나고 있다.

또 한 가지 주목할 만한 부분은 2000년대 초반까지는 교통부문의 에너지소비량과 온실가스 배출량이 하나의 선처럼 함께 움직였으나, 2000년대 중반 이후부터는 두 움직임의 격차가 발생하고 있다는 점이다. 이러한 차이는 미국 및 독일에서 명확하게 나타나고 있다. 즉, 교통부문 에너지소비구조에 어떤 변화가 발생하였음을 유추할 수 있다.

교통부문의 구조변화와 관련하여 가장 많이 논의되는 부분은 연비개선 정책과 교통부문의 에너지전환 정책이다. 미국의 경우, CAFE(Corporate Average Fuel Efficiency) 및 SAFE(Safer Affordable Fuel Efficient) 기준 등 연비규제 정책들이 실시되었으며, 우리나라의 경우에도 실주행여건을 기준으로 연비표시제도를 변경하고, 에너지소비효율 등급 판정기준 변화 등 연비 관련 다양한 정책을 시행하였다.

이와 더불어 최근 교통부문의 전기화(transport electrification)가 주목받고 있다. 특히

최근 전기차(EV, Electric Vehicle) 보급이 늘어나면서 교통부문의 에너지전환이 주목을 받고 있다(Abdul-Manan, 2015). 전기차에 대한 개념은 20세기 초반부터 존재했으나, 실제로 전기차가 상용화한 것은 1980년대 리튬이온(lithium-ion) 배터리가 개발되면서 부터이다. 이후 1996년 GM의 EV1 등 양산형 전기차가 개발되기도 하였으나, 수익성 측면의 문제로 인해 보급되지는 않았다.

본격적인 전기차의 등장은 2000년대 이후 배기가스 규제가 강화되면서부터 제시되었고 저탄소·친환경 자동차로 전기차가 주목을 받게 되었고, 특히 2003년 테슬라의 등장으로 전기차가 본격적으로 활성화되기 시작하였다. 우리나라에서도 2013년 전기차 민간보급사업을 진행한 이후 2020년 10만 대를 넘어서는 등 매년 100% 이상의 성장을 지속하고 있다.

이러한 교통부문의 전기화 현상은 앞으로도 더욱 강화될 예정이다. EU 등을 중심으로 자동차의 온실가스 배출량 규제를 강화하고 있으며, 노르웨이의 경우 2025년부터 무공해차만 판매할 수 있으며, 덴마크 등 EU 국가들은 2030년을 기점으로 내연기관 자동차 판매를 금지하고 있다. T&E(2020)는 이러한 에너지전환 기조로 인해 2030년까지 유럽에서는 전기차 보급이 현재 대비 30배 더 증가할 것으로 전망했다.

### III. 탈동조화 지수 및 교통부문 온실가스배출 요인과 관련된 선행연구

#### 1. 탈동조화 지수 측정 방법론

경제성장과 탄소배출의 탈동조화 지수를 측정하는 방법론은 여러 종류가 존재한다(OECD, 2002; Tapio, 2005; UNEP, 2011; Ru et al., 2012). 이 중 UNEP(2011)과 Tapio(2005)는 탈동조화 지수를 다음과 같이 측정하였다.

$$DI = \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} \quad (1)$$

위 식의 분자인 환경오염의 변화율은 곧 탄소배출량의 변화율( $\Delta C/C$ )을 의미하며, 분모인 유발요인의 변화율은 실질GDP의 변화율( $\Delta G/G$ )을 의미한다.

Tapio(2005)는 위 탈동조화 지수의 크기뿐 아니라 분자 및 분모의 부호를 바탕으로,

탈동조화 국면을 아래 <표 1>과 같이 총 8가지 사례로 구분하였다. Tapio(2005) 연구와 UNEP(2011) 연구의 차이는 탈동조화 지수의 크기로만 탈동조화 여부를 측정하는 것이 아니라, 탄소배출량 증가율 및 경제성장률의 부호에 따라 사례를 세분화하여 구분했다는 점이다.<sup>1)</sup>

<표 1> 탈동조화 지수의 국면 구분

순서	국면	세부국면	조건			의미
			△C 부호	△G 부호	DI	
1	탈동조화 (Decoupling)	strong	(-)	(+)	DI<0	경기호황에도 불구하고, 탄소배출량은 감소
2		weak	(+)	(+)	0<DI<0.8	경기호황에 따라 탄소배출도 증가하나, 증가속도가 매우 작음
3		recessive	(-)	(-)	1.2<DI	경기둔화에 따라 탄소배출량이 감소하나, 탄소배출량의 감소속도가 매우 큼
4	동조화 (Coupling)	expansive	(+)	(+)	0.8<DI<1.2	경기호황에 따라 탄소배출량도 증가하며, 증가속도가 경제성장률과 유사
5		recessive	(-)	(-)	0.8<DI<1.2	경기둔화에 따라 탄소배출량도 감소하며, 감소속도가 경제성장률과 유사
6	음의 탈동조화 (negative decoupling)	weak	(-)	(-)	0<DI<0.8	경기둔화에 따라 탄소배출량이 감소하나, 감소 정도가 매우 작음
7		expansive	(+)	(+)	1.2<DI	경기호황에 따라 탄소배출량이 급격하게 증가
8		strong	(+)	(-)	DI<0	경기가 둔화됨에도 불구하고, 탄소배출량은 증가

주. Wang and Jiang(2019)을 바탕으로 저자 재구성.

1) Tapio(2005)는 탈동조화 지수를 0.8과 1.2 기준으로 구분하였다. 선행연구에서는 1.0을 기준으로 할 경우, 미세한 차이에도 결과가 바뀔 수 있기 때문에 ±20%를 남겨두었다고 밝히고 있다.

Wang and Jiang(2019)은 위 8개 사례를 탈동조화 강도에 따라 순서를 부여하였다. 탈동조화 지수는 크게 탈동조화(decoupling), 동조화(coupling), 음의 탈동조화(negative decoupling)로 구분되며, <표 1>에서 순서가 낮을수록(1→8) 탈동조화가 약해짐을 의미한다.<sup>2)</sup>

## 2. 교통부문 탄소배출량의 결정요인 관련 선행연구

본 연구에서는 교통부문의 탄소배출량 영향요인을 교통환경, 경제환경, 에너지전환 측면 등 세가지 측면으로 구분하여 살펴보았다.

### 1) 교통환경 측면

교통환경 측면에서 탄소배출량의 탈동조화에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나는 연료 가격이다. 에너지 가격은 대체효과 및 기술효과를 통해 환경을 개선시킨다고 알려져 있다(Adom et al., 2018). 에너지가격의 인상은 타 에너지원으로서의 대체를 유발하며, 에너지효율성을 개선하는 방향으로 작동하기 때문이다. 연료 가격과 온실가스 배출량을 분석한 다양한 연구들에서 연료가격의 인상은 연료소비 및 온실가스 배출량을 저감할 수 있음을 밝히고 있다(Virley, 1993; Yang and Timmermans, 2012). 또한, Abdallah et al.(2013)은 튀니지의 교통부문을 분석한 결과, 연료 가격에서 교통부문 에너지소비량으로의 단방향 인과관계가 장단기 모두 존재하는 것으로 나타났으며, 연료가격은 교통부문 에너지소비량에 음(-)의 방향으로 인과하는 것으로 나타났다.

연료가격 이외에 운송량 역시 온실가스 배출량 측면에서 주요한 영향을 미친다. Wang et al.(2012) 연구에서는 중국의 도로수송부문의 탄소배출량 영향요인을 PLSR (Partial Least Squares)기법으로 분석한 결과, GDP 및 도시화율 외에도 운송량이 주요한 영향요인으로 나타났다. Scholl et al.(1996)은 OECD 국가들에 대해 승객 수송 부문 온실가스 배출량의 영향요인을 분석한 결과, 교통 수단, 에너지 집약도 외에도 교통 활동(transportation activity)이 주요한 영향을 미치는 요인으로 분석하였다.

2) 여기서 음의 탈동조화란 동조화 관계가 약해져, 사회적으로 바람직하지 않은 방향으로 탈동조화가 진행되는 국면을 의미한다. 예를 들어, 강한 음의 탈동조화(strong negative decoupling)는 경제활동과 탄소배출이 역으로 작동하지만 사회적으로 적절하지 않은 방향(경기 둔화 & 탄소배출 증가)으로 탈동조화가 발생하는 상황이다.



많은 선행연구에서는 도시화의 영향에 주목하기도 하였다. 선행연구에 따르면, 개발도상국의 경우 도시화됨에 따라 생산처와 소비처가 지리적으로 구분되며, 이로 인해 교통수요가 증가한다고 주장한다(York et al., 2003). 반면, 일부 연구에서는 고소득 국가의 경우 도시화로 인해 공공인프라효율성(대중교통 등)이 향상되며, 이로 인해 탄소배출이 줄어들 것이라 전망한다. Newman and Kenworthy(1989)는 고소득 32개 도시를 대상으로 분석해본 결과, 도시집약도(urban density)와 교통부문 에너지소비량 사이의 역관계를 발견하였다.

하지만 최근 연구들에서는 충분히 도시화(fully urbanized)되었다면, 도시화의 효과가 크지 않을 수 있음을 밝히고 있다(Henderson, 2003; Liddle and Lung, 2010).

## 2) 경제환경 측면

경제환경 역시 교통부문 온실가스 배출에 영향을 미친다. 특히 환경정책 강도는 온실가스 배출량 감축에 영향을 미칠 수 있다. 박광수(2005)에서는 환경규제의 강화는 산업부문에 석유의 소비를 감소하는 대신 도시가스의 소비를 증가시키는 방향으로 작동하며, 이는 장기적으로 온실가스 배출량 감소로 이어짐을 밝혔다. Ponce de Leon Barido and Marshall(2014)은 세계 80개 국가 패널자료를 활용하여 도시화율 및 환경정책 강도 영향을 분석한 결과, 환경정책이 강한 국가의 경우에 도시화율이 온실가스 배출량 감소에 미치는 효과가 더 크게 나타났다. Ürge-Vorsatz et al.(2007) 건물부문과 관련된 20여개의 정책 효과를 비교하였으며, 건물부문의 온실가스 감축에는 제품표준(appliance standard), 수요관리정책 등의 정책을 함께 이용할 때 효과가 개선되는 것으로 나타났다.

일부 연구는 교통관련 정책에도 주목하고 있다. 정도영 외(2011)은 교통부문의 온실가스 감축을 위한 교통수요관리 방안을 제안하고 있으며, 설재훈 외(2011)는 녹색도로 등급체계(Korean Green Road Rating System) 도입을 통한 도로부문 온실가스 감축을 제안하고 있다.

무역량 역시 교통부문 온실가스 배출량에 영향을 미칠 수 있다. Baek et al.(2009)는 EKC(Environmental Kuznets Curve) 이론이 성립하면 소득과 무역량은 일반적으로 정의 관계를 갖기 때문에, 무역량과 환경오염은 역U자 형태로 나타난다고 밝혔다. 전 세계 50개 국가를 대상으로 소득 및 무역이 SO<sub>2</sub> 배출량에 미치는 효과에 대한 장기분석을 진

행한 결과, 선진국에서는 무역의 증가가 환경개선으로 이어졌지만, 개도국에서는 무역의 증가가 환경 악화로 이어짐을 확인하였다.

이러한 무역량과 환경오염의 관계는 다양한 오염원에서 유사하게 나타난다. Le et al.(2016)에서는 98개 국가 패널자료를 이용하여 무역 개방도와 PM10 사이의 관계를 패널공적분모형으로 분석한 결과, 중·저소득 국가에서는 무역개방도가 PM10 배출량을 늘렸으나, 고소득 국가에서는 오히려 PM10 배출량을 낮추는 것으로 나타났다. 또한, Boulatoff and Jenkins(2010)은 21개 국가 대상으로 분석한 결과, 장기적으로는 무역이 석유 기반 탄소 배출량에 음(-)의 영향관계를 미치는 것으로 나타났다. 석유 기반 탄소배출량 중 상당수가 교통부문에서 발생하기 때문에, 무역개방도의 증가는 온실가스 배출량을 감소시키는 요인으로 작동할 것이라고 예상된다.

### 3) 에너지전환

교통부문의 온실가스 중 약 70%가 도로부문에서 배출되기 때문에, 도로교통에서 이용되는 에너지를 전환하는 과정은 탈동조화 측면에서 매우 중요하다. 다만 에너지전환이 실제로 교통부문의 온실가스 배출량을 줄이는지에 대해서는 논란의 여지가 존재한다.

일부 연구는 전기차 보급의 온실가스 감축 효과가 크지 않다고 주장한다. Jochem et al.(2015)는 전기차 운용 전반의 온실가스 배출량을 새롭게 계산하여 2030년까지 독일의 전기차가 충분히 보급되었을 때의 온실가스 배출량을 전망하였다. 분석 결과, 전기차로 인한 온실가스 감축을 위해서는 저탄소 발전원 구조가 구비되는 것이 중요하다고 밝히고 있다. 따라서 통상적인 화력발전 위주의 발전구조로는 전기차 보급에 따른 온실가스 감축 효과가 크지 않을 것으로 주장했다.

Abdul-Manan(2015) 역시 전기차 충전에 이용되는 전원(electricity source), 측정방법(drive cycle), 전기차의 전비, 비교 대상이 되는 기존 내연기관차의 연비 등의 요인에 따라 전기차의 온실가스 배출량 감축 효과가 달라짐을 주장했다. LCA(Life-cycle assessment)를 통해 분석한 결과, 기존 내연기관을 전기차로 대체할 경우 온실가스 감축 효과가 존재하지만, 하이브리드 차량을 전기차로 대체할 경우 약 15%의 온실가스 배출량이 추가로 발생할 수 있다고 분석했다.

하지만 대부분의 연구들에서는 전기화 등의 에너지전환이 온실가스 감축에 효과적이라고 밝히고 있다. 교통부문으로 한정하여 보면, Oshiro and Masui(2015)는 2050년까지의 일본 저공해차 보급률을 전망하였으며, 이를 토대로 온실가스 감축량을 전망하였다. 분석 결과, 2050년까지 저공해차가 60% 이상 더 성장할 것으로 전망되었으며, 이로 인해 2050년 교통부문의 온실가스 배출량은 1990년 대비 81% 감소할 것으로 전망되었다.

Smith(2010)은 아일랜드를 대상으로 전기차로의 전환이 교통부문의 온실가스 배출량을 감소시키는지 살펴보았다. Smith(2010)는 전기차와 기존 차량의 온실가스 배출량을 계산하여, 전기차로 전환되었을 때의 예상 온실가스 감축량을 계산하였다. 분석 결과, 도심 내 운행(urban driving)에 있어서는 전기차 전환으로 인한 온실가스 감축량이 상당하나, 도시 간 운행(inter-city travel)에서는 기존 차량과의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

Dominković et al.(2018)은 현재의 기술수준을 고려하여, 기존 내연기관 중심의 교통수단을 전기화하였을 때의 이익을 분석하였다. 시나리오 분석을 통해 현재 교통부문에서 사용되는 화석연료의 72%가 전기로 대체될 수 있으며, 이는 온실가스 배출량 감축, 에너지 효율성 개선, 대기오염 감소 등의 장점을 불러일으킬 것으로 전망하였다.

T&E(2020)는 자동차의 생산과정(배터리 생산 포함)부터 운행 및 폐기 과정까지의 LCA 분석을 진행하였으며, 가장 최악의 시나리오(중국에서 생산하여 석탄 발전이 많은 폴란드에서 운영하는 경우)를 가정하여 생애주기 온실가스 배출량을 측정한 결과에도 전기차는 경유차에 비해 22% 적은 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 더 나아가 최상의 시나리오(배터리를 재생 비중이 높은 스웨덴에서 생산하고, 스웨덴에서 충전하는 경우)에서는 경유에 비해 80% 더 적은 온실가스를 배출한다고 밝히고 있다.

이상의 결정요인을 요약 정리하면 다음 <표 2>와 같다.

본 연구는 1990년부터 2017년까지 OECD 25개 국가를 대상으로 교통부문 온실가스 배출의 탈동조화 진행상황을 살펴보았다. 또한, OECD 국가들의 탈동조화에 영향을 미치는 요인들에 대해 패널순서형로짓 분석을 시행하여, 어떤 정책적 수단이 탈동조화 달성에 유리한 영향을 미치는지 분석하였다.

본 연구의 차별점은 다음 세 가지이다. 첫째, HP 필터링 기법을 적용하여 온실가스 배출량 및 실질 GDP의 장기성분을 추출하여, 장기 탈동조화 지수를 계산하였다. 기존 탈동조화 지수는 연도에 따라 탈동조화 지수의 변동성이 심해 장기적인 전반적인 탈동조

〈표 2〉 교통부문 탄소배출량의 결정요인 선행연구 요약

구분	요인	영향 경로	관련 연구
교통환경 측면	연료 가격	연료가격의 인상은 ① 연료원으로의 대체 유발 ② 에너지효율성 개선을 통해 온실가스 배출량 감축	Adom et al.(2018) Virley(1993) Yang and Timmermans (2012) Abdallah et al.(2013)
	운송량	운송량의 증가는 교통 활동의 증가를 의미하며, 이는 온실가스 배출량을 늘림	Wang et al.(2012) Scholl et al.(1996)
	도시화	도시화는 공공인프라 효율성을 높여 온실가스 배출량을 줄임 *충분히 도시화가 진행된 국가에서는 효과가 미미	York et al.(2003) Newman and Kenworthy(1989) Henderson(2003) Liddle and Lung(2010)
경제환경 측면	환경정책 강도	강력한 환경규제는 ① 친환경 에너지로의 전환 유발 ② 에너지 효율성을 높여 온실가스 배출량 감축	박광수(2005) P&M(2014) Ürge-Vorsatz et al.(2007)
	무역량 (무역개방도)	선진국에서 무역량의 증가는 환경 개선으로 이어짐(EKC 이론) 석유 기반 온실가스 배출량을 줄임	Baek et al.(2009) Le et al.(2016) Boulatoff and Jenkins (2010)
에너지 전환	전기차 보급	EV의 생산, 운행 및 폐기 과정에 대한 종합적 검토 시, EV는 경유 및 휘발유에 비해 온실가스 배출량이 적음 *일부 연구는 감축 효과가 크지 않을 것이라 지적	Oshiro and Masui(2015) Smith(2010) Dominković et al.(2018) T&E(2020) Jochem et al.(2015) Abdul-Manan(2015)

화 추세를 확인하기 어려웠다. 본 연구는 장기성분만을 추출하여 탈동조화 지수를 계산했기 때문에, 장기적인 탈동조화 추세를 관찰할 수 있다.

둘째, OECD 국가들의 1990~2017년 교통부문의 탈동조화 추이를 살펴보았다. 이를 바탕으로 국가들의 탈동조화 변화 추세를 비교하였다. 셋째, 교통부문의 에너지전환이 탈동조화에 미치는 효과를 살펴보았다. 특히 최근 전기자동차 등의 보급으로 인해 교통부문에서의 에너지전환이 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구는 이러한 에너지전환이 탈동조화에 직접적인 영향을 미쳤는지에 대해 확인하였으며, 분석 결과 전기화 현상은 교통부문의 탈동조화 달성에 상당한 효과를 미치는 것으로 나타났다.

## IV. 탈동조화 지수 측정 및 결정요인 분석

### 1. 데이터

본 연구는 OECD 25개 국가의 1990~2017년 연간 데이터를 이용하여 분석을 진행하였다. 본 연구에서 활용한 데이터의 종류와 출처는 다음 <표 3>과 같다. 특히 본 연구에서는 에너지전환을 설명하는 변수로 교통부문 에너지소비 중 전력 및 가스의 비중을 활용하였다. 다만 이 변수는 사후적인 에너지소비의 결과라는 한계점이 존재한다. 또한, 세부 활용처(도로, 철도 등)에 따른 에너지원별 소비량 자료를 확보할 수 없었기 때문에, 에너지전환이 어떤 세부 부문에서 발생했는지를 반영하기 어렵다.

본 연구에서 활용한 변수들의 기초통계량 및 변수들 간의 상관계수는 <표 4>에 요약되어있다. 먼저 기초통계량을 살펴보면, 온실가스 배출량의 변동성이 큼을 확인할 수 있다. 교통부문의 온실가스 배출량이 가장 많은 국가는 미국으로 최대 약 1,800Mt CO<sub>2</sub>eq

<표 3> 데이터 목록

변수명		변수설명	단위	출처
탈동조화 지수	교통부문 온실가스 배출량	교통부문 온실가스 배출량	Mt CO <sub>2</sub> eq	Enerdata
	소득	실질 GDP	2010 십억US\$	World Bank
에너지 전환	전기화 정도	교통부문 전체 에너지소비 중 전력의 비중	%	IEA
	가스화 정도	교통부문 전체 에너지소비 중 천연가스의 비중	%	IEA
교통환경 측면	연료 가격	휘발유 실질소매가격 (세금 포함)	2015 US\$/toe	Enerdata
	운송량	총 국내 운송량	톤/km	OECD
	도시화	도시화율 (전체 인구 중 도시 거주 인구의 비중)	%	World Bank
경제환경 측면	환경정책 강도	환경정책 강도 지수 (Environmental Policy Stringency index)	index (0~6)	OECD
	무역 개방도	GDP 중 수출, 수입 비중	%	World Bank

를 배출하였다. 이에 비해 온실가스 배출량이 가장 적은 국가는 슬로베키아로 약 4Mt CO<sub>2</sub>eq를 배출하는 등 격차가 상당히 크게 나타났다.

상관계수 분석을 통해 교통부문의 온실가스 배출량은 소득 및 운송량과 매우 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다. 온실가스 배출량과 소득의 상관계수는 0.95로 매우 높았으며, 운송량과도 0.99의 높은 상관계수를 보이고 있다. 이는 소득 및 운송량 변수가 전 반적인 교통 수요(transport demand)를 대변하며, 교통활동 과정에서 온실가스가 배출 되기 때문에 상관계수가 높은 것으로 보인다.

〈표 4〉 기초통계량 및 상관계수

	평균	최대	최소	표준편차	관측치
온실가스 배출량	124.0	1798.8	3.5	313.4	700
실질소득	1,530	17,300	41	2,740	697
전기화 정도	1.9	10.5	0.1	1.6	700
가스화 정도	1.3	27.8	0.0	5.2	700
실질 휘발유가격	1,740	2,741	541	406	692
운송량	413,884	7,882,850	10,320	1,318,987	665
도시화율	75.3	98.0	47.9	10.2	700
환경정책 강도	1.8	4.1	0.2	0.9	605
무역개방도	74.5	188.0	16.0	35.7	694

	배출량	실질 소득	전기화 정도	가스화 정도	휘발유 가격	운송량	도시화 율	환경 정책 강도	무역 개방도
배출량	1								
실질소득	0.95	1							
전기화 정도	-0.28	-0.26	1						
가스화 정도	0.09	0.04	-0.01	1					
실질 휘발유가격	-0.51	-0.46	0.19	-0.04	1				
운송량	0.99	0.90	-0.28	0.11	-0.49	1			
도시화율	0.13	0.20	-0.30	-0.25	-0.11	0.11	1		
환경정책 강도	-0.03	0.06	-0.08	0.01	0.36	-0.03	0.21	1	
무역개방도	-0.39	-0.46	0.32	0.26	0.49	-0.34	-0.04	0.23	1

## 2. 탈동조화 지수 측정

본 연구는 Tapio(2005)에서 제안한 방식을 활용하여 교통부문의 탈동조화 지수를 측정하였다. 다만, 원자료를 이용하여 탈동조화 지수를 측정할 경우, 해당 연도의 온실가스 및 GDP 충격에 의해 탈동조화 달성 여부가 급변하는 한계가 존재한다(임형우·조하현, 2019).

이에 따라 본 연구에서는 잠재 온실가스 배출량 및 잠재 GDP를 추출하고, 이를 바탕으로 장기 탈동조화 지수를 계산하였다. Adom et al.(2018)은 필터링을 통해 추출한 잠재 온실가스 배출량은 단기적인 성분이 제거된 온실가스 배출량으로 정의하였다. 이에 따라 본 연구에서는 온실가스 배출량 및 GDP의 장기성분 추출을 위해 HP 필터(Hodrick-Prescott filter) 적용 후 추세 부분을 추출하여 활용하였다.

본 연구에서는 필터링을 통해 도출한 잠재 GDP 및 잠재 온실가스 배출량을 활용하여, 25개 OECD 국가에 대해 1990~2017년에 대해 식(1)의 방식을 적용하여 교통부문의 탈동조화 지수를 측정하였다.<sup>3)</sup>

## 3. 교통부문 에너지전환이 탈동조화에 미친 영향 분석

탈동조화 지수는 탈동조화 정도에 따라 크게 3개 국면으로 구분할 수 있다. 첫 번째 국면은 탈동조화(decoupling) 국면으로 경기 호황에도 불구하고 온실가스 배출량이 감소하거나(strong), 상당히 낮은 속도로 온실가스 배출량이 증가하거나(weak) 또는 경기 둔화에 따라 빠른 속도로 온실가스 배출량이 감소하는 경우(recessive)로 구분된다.

두 번째 국면은 동조화(coupling) 국면으로, 경제 성장률과 온실가스 배출량 증가율의 속도가 경기 호황 및 불황에서 유사한 경우를 의미한다(expansive, recessive). 마지막 국면은 음의 탈동조화(negative decoupling) 국면으로, 경기 둔화에도 불구하고 온실가스 배출량 감소폭은 매우 작거나(weak), 경기 호황에 따라 온실가스 배출량이 급속도로 증가하거나(expansive), 경기 둔화에도 불구하고 온실가스 배출량은 오히려 증가하는 경우(strong)로 구분된다.

본 연구의 주 목적은 교통부문에서 에너지 전환이 진행됨에 따라 탈동조화 강도가 강

3) 각 국가별로 계산된 탈동조화 지수의 움직임은 제5장 1절을 참고하십시오.

해졌는지를 검증해보는 것이다. 앞서 설명한 탈동조화 국면은 탈동조화 강도에 따라 크게 3단계로 구분될 수 있으며, 일종의 순서형 데이터(ordered data)로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전기화 현상과 탈동조화 정도의 관계를 분석하기 위해 패널순서형로짓(panel ordered logit) 모형을 분석하였다.<sup>4)</sup>

탈동조화 강도는 연속형(continuous) 자료이지만, 탈동조화 지수의 크기와 경제성장률 및 온실가스 배출량의 부호에 따라 순서형(ordered) 자료로 표현된다. 따라서, 탈동조화 정도는 다음 식 (2)와 같이 모형화할 수 있다.

$$DC_{i,t}^* = X_{i,t}\beta + \eta_i + \epsilon_{i,t} \quad (2)$$

여기서,  $DC_{i,t}^*$  는  $i$  국가  $t$  시점의 탈동조화 강도,  $X$ 는 탈동조화 강도를 설명하는 요인

탈동조화 강도는 탈동조화 지수 이외에도 경제성장률과 탄소배출량 증가율 부호를 토대로 결정되기 때문에, 단일 수치로 탈동조화 강도를 표현하기 어려우며, 탈동조화 수준에 따른 국면만 관측가능하다. 탈동조화 국면을  $DCR_{i,t}$ 로 정의하면, 탈동조화 정도에 따라 다음과 같이 총 3개의 국면을 갖게 된다.<sup>5)</sup>

$$\begin{aligned} DCR_{i,t} &= 1 && \text{if } DC_{i,t}^* < \kappa_{i,1} \\ DCR_{i,t} &= 2 && \text{if } \kappa_{i,1} \leq DC_{i,t}^* < \kappa_{i,2} \\ DCR_{i,t} &= 3 && \text{if } \kappa_{i,2} \leq DC_{i,t}^* \end{aligned}$$

이를 모형 형태로 나타내면 다음 식 (3)과 같다. 여기서  $k$ 는 탈동조화 국면의 개수(총 3개)를 의미한다.

4) 기존 임형우·조하현(2019) 연구에서는 OECD(2002) 방식으로 탈동조화 지수를 측정했기 때문에, 탈동조화 지수 자체를 종속변수로 활용할 수 있었다. 하지만 Tapio(2005) 방식을 적용할 경우, 탈동조화 지수의 값뿐만 아니라 경제성장률 및 탄소배출 증가율의 부호를 함께 고려해야 하기 때문에, 탈동조화 지수 자체를 이용하기 어렵다.  
5) 본 연구에서는 음의 탈동조화 국면을 1, 동조화 국면을 2, 탈동조화 국면을 3으로 설정하였다. 8개 국면을 가정하는 경우, 국면 사이의 선호도 구분이 어렵다는 한계가 존재하여 3개 국면만을 분석하였다.



$$\begin{aligned}
 \Pr(DCR_{i,t} = k | X_{i,t}, \eta_i, \kappa) &= \Pr(\kappa_{i,k-1} \leq X_{i,t}\beta + \eta_i + \epsilon_{i,t} < \kappa_{i,k}) \\
 &= \Lambda(\kappa_{i,k-1} - X_{i,t}\beta - \eta_i \leq \epsilon_{i,t} < \kappa_{i,k} - X_{i,t}\beta - \eta_i) \\
 &= \Lambda(\kappa_{i,k} - X_{i,t}\beta - \eta_i) - \Lambda(\kappa_{i,k-1} - X_{i,t}\beta - \eta_i)
 \end{aligned} \tag{3}$$

이를 추정하는 방법론으로는 일반적으로 확률효과(random effect)를 가정하여 이용하며, 본 연구에서도 확률효과에 따른 분석을 진행하였다.<sup>6)</sup> 최종적으로 본 연구에서는 다음과 같은 형태의 모형을 추정하였다.

$$\begin{aligned}
 DC_{i,t}^* &= \alpha_1 ET_{i,t}^e + \alpha_2 ET_{i,t}^{ng} + \beta_1 P_{i,t} + \beta_2 F_{i,t} + \beta_3 URB_{i,t} + \gamma_1 EP_{i,t} \\
 &\quad + \gamma_2 OPEN_{i,t} + \eta_i + \epsilon_{i,t}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서,  $ET$ 는 에너지전환을 의미하며, 이때 상첨자  $e$ 는 전기화,  $ng$ 는 가스화를 의미한다. 또한,  $P$ 는 연료가격,  $F$ 는 운송량,  $URB$ 는 도시화율,  $EP$ 는 환경정책 강도,  $OPEN$ 은 무역량을 의미한다.

## V. 분석 결과

### 1. OECD 25개 국가들의 교통부문 탈동조화 지수의 추세

다음 <그림 2>는 일부 국가의 탈동조화 추세를 정리한 그래프로, 음영이 없는 부분은 음의 탈동조화(negative decoupling), 옅은 음영은 동조화(coupling), 짙은 음영은 탈동조화(decoupling) 구간을 의미한다.<sup>7)</sup> 또한, x축은 연도, y축은 탈동조화의 강도로, y축의 값이 커질수록 탈동조화가 강화됨을 의미한다.

다음 그림을 보면, 일부 국가(헝가리, 터키 등)를 제외하고는 대부분 OECD 국가들에서 탈동조화가 강화되는 형태를 확인할 수 있다. 특히 2015년도에 이르면, 그리스, 폴란

6) 추정 결과의 강건성 확보를 위해 고정효과(fixed effect)를 가정하여 식 (4)를 재추정하였으며, 그 결과는 제5장 2절을 참고하십시오.

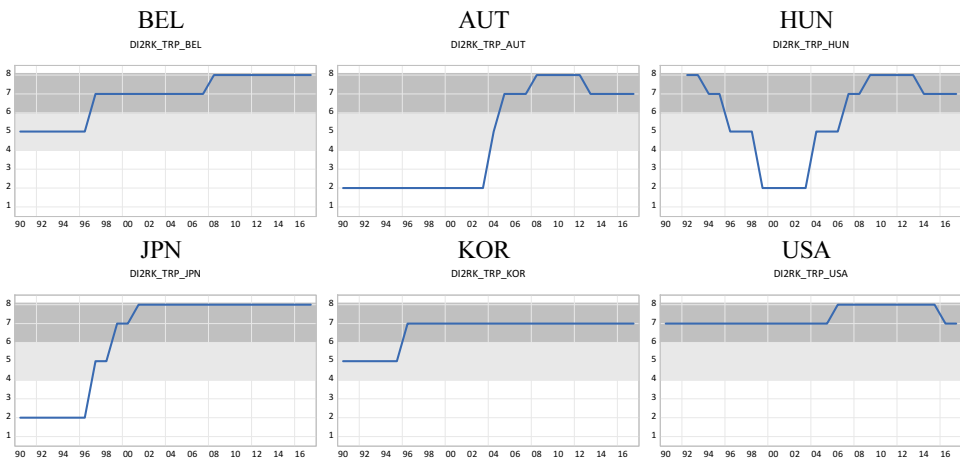
7) OECD 25개 국가의 전체 그래프는 <부록 그림 1>을 참고하라

드, 슬로바키아, 터키 등 4개 국가를 제외한 모든 국가들이 탈동조화(decoupling) 구간에 위치하고 있다.

하지만 탈동조화 국면이라고 하더라도 국가에 따라 그 강도가 상이하게 나타난다. 우리나라의 경우 1990년대 중후반까지 동조화(coupling) 국면에 위치했지만, 1990년대 후반 이후 약한 탈동조화(weak decoupling) 국면으로 개선되었다. 하지만 우리나라는 아직까지 강한 탈동조화(strong decoupling) 국면으로 개선되지 못하였기 때문에, 경제성장률 속도보다는 느리나 온실가스 배출량은 여전히 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 이에 비해 벨기에, 스위스, 덴마크, 스페인, 핀란드, 프랑스 등 EU 중심의 선진국은 2000년대 후반부터 강한 탈동조화의 모습을 보여, 경제성장에도 불구하고 온실가스 배출량은 지속적으로 낮아지는 모습을 확인할 수 있다.

표본 중 오스트리아, 체코, 스페인, 일본, 포르투갈은 가장 극적인 변화를 보인다. 이들 국가는 2000년대 초반까지 음의 탈동조화(negative decoupling) 모습을 보였으나, 이후 몇 년 사이 급격하게 탈동조화 현상이 이루어졌다. 반대로 터키의 경우 급격하게 탈동조화 정도가 약화됨을 확인할 수 있다.

<그림 2> OECD 25개 국가의 탈동조화 움직임



주. 국가명은 World Bank의 국가코드 기준이며, 세부적인 국가 이름은 <부록 표 1>를 참고 하시오.

## 2. 교통부문 탈동조화 지수의 결정요인 분석

### 1) 단위근 검정

본 연구에서 활용하는 25개 국가 데이터는 불균등패널(unbalanced panel)이기 때문에, IPS, ADF 및 PP 형태의 단위근 검정을 진행하여 정상성 여부를 검정하였다. 단위근 검정 결과는 다음 <표 5>와 같다.<sup>8)</sup>

검정 결과, 환경정책의 강도를 제외한 모든 변수들은 단위근을 갖는 것으로 나타났다. 이에 따라 향후 결정요인 분석에서는 단위근을 갖는 변수를 모두 1차 차분하여 활용하였다.

<표 5> 단위근 검정 결과

	IPS	ADF	PP	단위근 여부
전기화 정도	-0.916	-0.585	0.677	단위근 존재
가스화 정도	1.862	1.762	4.508	단위근 존재
연료가격	-1.992**	3.476	3.933	단위근 존재
운송량	1.326	1.330	1.273	단위근 존재
도시화	0.176	2.604	5.863	단위근 존재
환경정책 강도	-2.563***	-2.331**	-1.770**	정상 시계열
무역 개방도	1.855	2.108	3.218	단위근 존재

주. \*\*\*: p-value<0.01, \*\*: p-value<0.05, \*: p-value<0.10

### 2) 탈동조화 지수의 결정요인 분석

교통부문의 에너지전환이 교통부문 탈동조화 국면에 영향을 미치는지 확인하기 위해 확률효과 패널순서형로짓 분석을 진행하였다.<sup>9)</sup> 다음 <표 6>의 RE(1)~RE(4)는 모형의 설명변수를 변경하며 탈동조화 지수 영향요인의 효과를 확인한 결과이다.<sup>10)</sup> RE(1)은 기본이 되는 벤치마크 모형으로, 모든 변수를 모형 내에 반영하였다. RE(2)와 RE(3)은

8) 단위근 검정 시 최적 시차는 AIC 기준으로 진행하였다.

9) OECD에서 제공하는 환경정책 강도 데이터가 2015년까지만 존재하므로, 본 연구의 결정요인분석은 1990~2015년에 대해 진행하였다.

10) 고정효과 모형과 확률효과모형 선택을 위해 Hausman 검정을 진행한 결과, Chi-square 통계치가 0.11(p-value>0.1)로 통계적 유의성이 없었다. 이를 토대로 확률효과모형을 기본모형으로 설정하였다. 또한, 고정효과 추정방법들은 비교적 최근에 개발된 방식으로 순서형 자료를 이항변수로 변환하여 고정효과를 반영하는 방식을 취한다. 따라서 순서형로짓 모형 추정을 위해서는 확률효과 분석 결과를 벤치마크로 활용하는 것이 적절한 것으로 판단하였다.

〈표 6〉 탈동조화 국면 결정요인 분석 결과

		RE(1)	RE(2)	RE(3)	RE(4)
에너지전환	전기화 정도	1.673**	1.599**	-	1.382**
	가스화 정도	0.165	-	0.093	0.114
교통부문 환경	연료 가격	1.676	1.628	1.964	2.627*
	운송량	-2.603**	-2.634**	-2.843**	-1.750
	도시화	3.145***	3.163***	3.359***	3.387***
경제환경	환경정책 강도	1.685***	1.693***	1.722***	-
	무역 개방도	0.059**	0.061**	0.057*	-
관측치 수		568	568	568	657

주. \*\*\*: p-value<0.01, \*\*: p-value<0.05, \*: p-value<0.10

에너지전환 변수를 하나씩 제거하며 에너지전환이 탈동조화 국면에 유의적인 효과를 주었는지 검증하였다. 마지막 RE(4)는 경제환경 측면 변수는 제외하고, 교통부문 환경 관련 변수만 반영하여 추정한 결과이다.

분석 결과, 모형의 구조와 관계없이 변수의 유의성 및 방향성은 전반적으로 유사하게 나타났다. 벤치마크인 RE(1) 모형을 기준으로 보면, 본 연구의 핵심 변수인 교통부문의 전기화 현상은 탈동조화 달성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 통계적으로 유의했다. 반면 가스화 현상의 경우 통계적 유의성이 없었다.

이와 함께 도시화율, 환경정책의 강도 및 무역개방도가 탈동조화에 양(+)의 영향을 미쳤다. 이러한 결과는 앞서 살펴본 선행연구와 일치한다. 연료가격 역시 탈동조화에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으나 통계적 유의성은 부족하였다. 다만, 경제환경 관련 변수를 일부 제외한 RE(3)에서만 10% 유의수준에서 통계적으로 유의했다.<sup>11)</sup>

반면 수송량의 경우 탈동조화에 달성에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 수송량이 많을수록 교통부문의 에너지사용량이 증가하기 때문에 탈동조화를 저해할 수 있다. 무역개방도의 경우 탈동조화 국면 결정에 긍정적인 영향을 미쳤으나, 통계적 유의성은 높지 않았다.

11) 연료가격의 경우, 환경정책 및 무역개방도 등의 변수와 상관관계가 높아 일부 추정결과에서는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타나 보인다. 다만, RE(4)와 같이 상관관계가 존재하는 일부 설명변수를 제거하거나, 강건성 분석(고정효과 추정) 결과 등에서는 통계적으로 유의한 결과를 보여주고 있다.

탈동조화 국면에 실제 영향을 미치는 한계효과(marginal effect)를 측정하기 위해 벤치마크 모형인 RE(1)을 기준으로 계산한 결과를 <표 7>에 정리하였다. 탈동조화 국면 달성에 가장 큰 영향요인은 도시화율 및 환경정책의 강도로 나타났다. 선행연구에서 밝히고 있듯이, 도시화가 진행될수록 대중교통 인프라가 확충되고, 전반적인 에너지 효율성이 개선되기 때문에, 탈동조화 국면으로 이행될 확률이 더 높아짐을 확인할 수 있다. 이에 따라 도시화율의 평균 기준 1%p 증가는 탈동조화 국면에 도달할 확률을 22% 늘리는 것으로 나타났다. 마찬가지로 국가의 전반적인 환경정책이 강화될수록 교통부문 역시 저배출화될 가능성이 높으며, 이는 곧 탈동조화 국면으로의 이행을 야기한다.

교통부문의 전기화 현상 역시 앞선 두 요인과 함께 탈동조화 국면 결정에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 교통부문 에너지소비 중 전력소비 비중이 평균에서 1%p 증가하면, 음의 탈동조화 및 동조화 국면에 포함될 확률은 각각 7%, 4% 감소하는 반면 탈동조화 국면에 포함될 확률은 약 12% 증가한다. 특히 도시화율이 포화 상태에 다다른 점을 고려할 때, 교통부문의 전기화 현상은 탈동조화로의 이행에 큰 도움이 될 수 있다. 반면 가스화 현상의 경우 통계적으로 유의한 영향을 미치지 못했다.

전기화 현상의 효과는 발전시 사용되는 에너지원의 종류에 따라 달라질 수 있다. 다만, T&E(2020)에서 밝히고 있듯이 석탄화력발전을 중심으로 전원이 구성된 국가에서도 전기차는 휘발유 및 경유 등 내연기관 자동차에 비해 온실가스 배출량이 상대적으로 적었다. 즉, 전기화 현상의 효과는 전원구성과 무관하게 탈동조화 달성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

<표 7> 한계효과 : RE(1) 기준

산업부문	국면		
	음의 탈동조화	동조화	탈동조화
전기화 정도	-0.069**	-0.046**	0.115**
가스화 정도	-0.007	-0.005	0.011
연료 가격	-0.069	-0.047	0.116
운송량	0.107**	0.072**	-0.179**
도시화	-0.130***	-0.087***	0.217***
환경정책 강도	-0.069***	-0.047***	0.116***
무역 개방도	-0.002**	-0.002**	0.004**

주. \*\*\*: p-value<0.01, \*\*: p-value<0.05, \*: p-value<0.10

### 3) 강건성 분석

본 절에서는 추가적으로 고정효과(fixed effect) 패널순서형로짓 모형을 추정하여 모형의 강건성 검증을 진행하였다. 만약 식 (4)를 추가적인 조정 없이 고정효과로 추정한다면, 따름모수 문제(incidental parameter problem)가 발생하며,  $\kappa_{i,k}$ 와  $\eta_i$ 를 구분하기 어렵다는 식별문제(identification problem)가 발생한다.

이에 따라 본 연구에서는 Chamberlain(1982)을 기반으로 Das and van Soest(1999)가 제안한 DvS 추정방식과 Mukherjee et al.(2008) 및 Baetschmann et al.(2014)가 제안한 고정효과 BUC(Blow-Up and Cluster) 추정방식을 추가로 진행하여 모형의 강건성을 확인하였다. 두 추정방법 모두 Chamberlain(1980)에서 제안한 CML(conditional maximum likelihood) 추정량을 기반으로 한다. CML 추정방식의 특징적인 부분은 순서형 자료를 임계점을 기준으로 하는 이항 자료(binary data)로 전환하여 추정에 활용한다는 점이다. 즉, 다음과 같은 이항 변수를 생성하여 추정량을 생성한다.

$$d_{i,t}^k = I(DC_{i,t}^* \geq k) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (5)$$

$$\Pr(d_{i,t}^k = 0) = \Pr(DC_{i,t}^* < k) = \Lambda(\kappa_{i,k} - X_{i,t}\beta - \eta_i)$$

$$\Pr(d_{i,t}^k = 1) = \Pr(DC_{i,t}^* \geq k) = 1 - \Lambda(\kappa_{i,k} - X_{i,t}\beta - \eta_i)$$

이를 바탕으로 모수를 추정할 경우,  $\eta_i$ 의 식별이 가능해지며, Chamberlain(1980)은 위 식 (5)를 기반으로 우도함수를 극대화하는 추정량이 일치성을 확보할 수 있음을 증명하였다. 다만 Chamberlain(1980) 추정량은 한 국면만을 대상으로 추정량을 도출한 후 합하는 방식이기에 효율성을 만족하기 어렵다. 따라서 이후에 제안된 DvS 추정량은 이러한 Chamberlain(1980) 추정량을 MD(minimum distance) 기준으로 가중평균하여 효율성을 개선하였다. BUC 추정량은 모든 국가 표본을 2개의 복제로 만들어(blow-up), 모든 표본을 함께 이용하여 Chamberlain(1980) 추정치를 개선하는 방식이다.

DvS 및 BUC 추정량을 이용한 결과는 <표 8>에 정리하였다. DvS(1) 및 DvS(2)는 DvS 추정량을 이용하되, 에너지전환 변수를 제외하며 모형의 안정성을 살펴보았다. 마찬가지로 BUC(1)과 BUC(2) 역시 BUC 추정량을 이용하되, 에너지전환 변수를 포함 및 제외하며 모형의 안정성을 살펴보았다.

〈표 8〉 강건성 분석 결과(고정효과 추정)

		DvS (1)	DvS (2)	BUC(1)	BUC(2)
에너지전환	전기화 정도	2.031***		1.528***	
	가스화 정도	0.672***		0.344	
교통부문 환경	연료 가격	4.588**	5.140***	1.663	1.933
	운송량	-0.510	0.144	-3.101	-3.196
	도시화	2.591**	3.535***	2.230	2.269
경제환경	환경정책 강도	1.471**	0.987	2.164**	2.192**
	무역 개방도	0.007	0.018	0.040*	0.042*
관측치 수		568	568	568	568

주. \*\*\*: p-value<0.01, \*\*: p-value<0.05, \*: p-value<0.10

추정 결과, 변수의 유의성 및 부호는 기존 확률효과모형과 유사한 것으로 나타났다. 특히 DvS 및 BUC 추정량 모두에서 전기화 현상 변수가 탈동조화 강도에 양(+)의 영향을 미치며 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 다만 가스화 현상은 DvS 추정량에서만 통계적 유의성을 확보할 수 있었으며, 영향 정도 역시 전기화 현상에 비해 매우 작았다.

## VI. 결론

2015년 파리협정 이후 온실가스 감축 의무가 부여되며 지속가능한 성장을 위해 온실가스 배출량의 탈동조화 현상이 주목을 받고 있다. 교통부문의 경우 전체 온실가스 배출량의 28%를 차지하며, 잠재 감축량이 높기 때문에, 탈동조화 달성이 특히 중요하다.

본 연구의 목적은 OECD 25개 국가 자료를 이용하여 교통부문 온실가스 배출의 탈동조화 현황을 살펴보고, 에너지전환이 탈동조화 국면 달성에 미치는 효과를 살펴보는 것이다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다. 첫째, 우리나라의 경우 1990년대 이후 탈동조화 국면에 도달했으나 여전히 강한 탈동조화(strong decoupling) 국면으로는 개선되지 못하는 모습이 나타났다. 반면 벨기에, 스위스, 핀란드, 프랑스 등의 EU 중심의 선진국은 2000년대 이후 강한 탈동조화 국면에 도달한 것을 확인할 수 있었다. 둘째, 교통부문

의 에너지전환이 탈동조화 강도에 미치는 효과를 분석한 결과, 에너지전환 중 전기화 현상은 탈동조화 국면 도달에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면 가스화 현상은 탈동조화 국면에 유의미한 영향을 미치지 못했다. 셋째, 에너지 전환 이외에도 운송량의 감소, 도시화율 개선, 환경정책 강화, 무역개방도의 증가 등이 탈동조화 국면 도달을 유발하는 요인으로 나타났다. 또한 이러한 요인들의 효과는 선행연구의 결과와 유사했다.

다만 본 연구의 한계는 전기화 및 가스화의 정도를 에너지비중으로 반영했다는 점이다. 교통부문의 전기화가 대부분 전기차를 통해 이루어지는 만큼 전기차 보급률 자료를 사용하는 것이 분석의 정확도를 높일 수 있으나, 데이터 수집상의 한계로 인해 본 연구에서는 전기 사용 비중을 이용하였다. 또한, 본 연구에서는 데이터상의 한계로 하위 교통 부문(도로, 철도, 항공 등)에 대한 분석은 이루어지지 못했다. OECD 국가 기준으로 볼 때 도로부문의 에너지소비 비중이 70%에 이를 정도로 크긴 하지만, 최근 항공운송 등이 확대되고, 해상운송 등은 중질유의 사용으로 온실가스 배출량이 많을 수 있는 만큼, 하위 교통부문에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

파리협정 이행을 목전에 둔 상황에서 교통부문의 탈동조화는 지속가능한 발전을 위해 반드시 필요하다. EU의 경우 2030~40년 이후부터는 기존 내연기관 자동차의 판매를 금지하는 등 적극적으로 교통부문의 에너지전환을 위해 정책을 펼치고 있다. 우리나라 역시 3020 온실가스 감축 로드맵 및 NDC 목표 달성을 위해서는 교통부문의 온실가스 감축이 시급한 상황이다. 현재 시행 중인 전기차 보조금 제도를 확대하고, 충전 인프라를 확충하여 에너지전환이 더 빠르게 이루어질 수 있도록 유도하는 것이 향후 우리나라의 지속가능한 발전을 위해 반드시 필요하다.

## [References]

- 박광수, “환경규제에 따른 산업부문의 에너지원간 대체관계 및 온실가스 배출저감 효과 분석”, 에너지경제연구원 기본연구보고서, 제13권, 2005, p. 2005.
- 설재훈·이동민·임재경·김태형, “도로부문 온실가스 저감을 위한 녹색도로 등급체계 도



- 입방안 연구”, 한국교통연구원 기본연구보고서, 2011, pp. 1~188.
- 임형우·조하현, “경제성장과 탄소배출량의 탈동조화 현상 분석: 63 개국 동태패널분석 (1980~ 2014년)”, 「자원·환경경제연구」, 제28권 제4호, 2019, pp. 497~526.
- 정도영·윤장호·박상우·김주영, “교통부문 온실가스 배출량 저감을 위한 교통수요관리 방안 전략 연구”, 「대한교통학회지」, 제29권 제1호, 2011.
- Abdallah, K. B., M. Belloumi, and D. D. Wolf. “Indicators for Sustainable Energy Development: A Multivariate Cointegration and Causality Analysis from Tunisian Road Transport Sector,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, 2013, pp. 34~43.
- Abdul-Manan, A. F. N. “Uncertainty and Differences in GHG Emissions between Electric and Conventional Gasoline Vehicles with Implications for Transport Policy Making,” *Energy Policy*, Vol. 87, 2015, pp. 1~7.
- Adom, P. K., P. A. Kwakwa, and A. Amankwaa, “The Long-run Effects of Economic, Demographic, and Political Indices on Actual and Potential CO<sub>2</sub> Emissions,” *Journal of Environmental Management*, Vol. 218, 2018, pp. 516~526.
- Baek, J. H., Y. S. Cho, and W. W. Koo, “The Environmental Consequences of Globalization: A Country-specific Time-series Analysis,” *Ecological Economics*, Vol. 68, No. 8-9, 2009, pp. 2255~2264.
- Baetschmann, G., K. E. Staub, and R. Winkelmann, “Consistent Estimation of the Fixed Effects Ordered Logit Model,” *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (Statistics in Society)*, Vol. 178, 2015, pp. 685~703.
- Boulatoff, C. and M. Jenkins, “Long-term Nexus between Openness, Income, and Environmental Quality,” *International Advances in Economic Research*, Vol. 16, No. 4, 2010, pp. 410~418.
- Chamberlain, G., “Analysis of Covariance with Qualitative Data,” *Review of Economic Studies*, Vol. 47, No. 1, 1980, pp. 225~238.
- Chamberlain, G., “Multivariate Regression Models for Panel Data,” *Journal of Econometrics*, Vol. 18, No. 1, 1982, pp. 5~46.
- Change, IPCC Climate. “Mitigation of climate change,” Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 1454, 2014.
- Chapman, L., “Transport and Climate Change: A Review,” *Journal of Transport Geography*, Vol. 15, No. 5, 2007, pp. 354~367.

- Das, M. and A. V. Soest, "A Panel Data Model for Subjective Information on Household Income Growth," *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 40, No. 4, 1999, pp. 409~426.
- Global Commission on the Economy and Climate (GCEC). "New Climate Economy Technical Note: Abatement Reduction Potential," January 2015.
- Hasan, M. A., Frame, D. J., Chapman, R., and Archie, K. M.. "Emissions from the Road Transport Sector of New Zealand: Key Drivers and Challenges," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, No. 23, 2019, pp. 23937~23957.
- Henderson, V., "The Urbanization Process and Economic Growth: The So-what Question," *Journal of Economic Growth*, Vol. 8, No. 1, 2003, pp. 47~71.
- Jackson, Tim, "Sustainable Consumption," *Handbook of Sustainable Development*, Edward Elgar Publishing, 2014.
- Jochem, P., S. Babrowski, and W. Fichtner, "Assessing CO<sub>2</sub> Emissions of Electric Vehicles in Germany in 2030," *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 78, 2015, pp. 68~83.
- Le, Thai-Ha, Y. H. Chang, and D. H. Park, "Trade Openness and Environmental Quality: International Evidence," *Energy Policy*, Vol. 92, 2016, pp. 45~55.
- Liddle, B. and S. Lung, "Age-structure, Urbanization, and Climate Change in Developed Countries: Revisiting STIRPAT for Disaggregated Population and Consumption-related Environmental Impacts," *Population and Environment*, Vol. 31, No. 5, 2010, pp. 317~343.
- Ma, H., F. Balthasar, N. Tait, X. Riera-Palou, and A. Harrison, "A New Comparison between the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Battery Electric Vehicles and Internal Combustion Vehicles," *Energy Policy*, Vol. 44, 2012, pp. 160~173.
- Mukherjee, B., J. Ahn, I. Liu, P. J. Rathouz, and B. N. M. Sánchez, "Fitting Stratified Proportional Odds Models by Amalgamating Conditional Likelihoods," *Statistics in Medicine*, Vol. 27, No. 24, 2008, pp. 4950~4971.
- Newman, P. W. G. and J. R. Kenworthy, "Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of US Cities with a Global Survey," *Journal of the American Planning Association*, Vol. 55, No. 1, 1989, pp. 24~37.
- OECD, "Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth," *Sustainable Development SG/SD*, 2002.

- Oshiro, K. and T. Masui, “Diffusion of Low Emission Vehicles and Their Impact on CO<sub>2</sub> Emission Reduction in Japan,” *Energy Policy*, Vol. 81, 2015, pp. 215~225.
- Ponce de Leon Barido, D. and J. D. Marshall, “Relationship between Urbanization and CO<sub>2</sub> Emissions Depends on Income Level And Policy,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 48, No. 7, 2014, pp. 3632~3639.
- Ru, X., S. Chen, and H. Dong, “An Empirical Study on Relationship between Economic Growth and Carbon Emissions Based on Decoupling Theory,” *Journal of Sustainable Development*, Vol. 5, No. 8, 2012, p. 43.
- Scholl, L., L. Schipper, and N. Kiang, “CO<sub>2</sub> Emissions from Passenger Transport: A Comparison of International Trends from 1973 to 1992,” *Energy Policy*, Vol. 24, No. 1, 1996, pp. 17~30.
- Smith, W. J., “Can EV (Electric Vehicles) Address Ireland’s CO<sub>2</sub> Emissions from Transport?,” *Energy*, Vol. 35, No. 12, 2010, pp. 4514~4521.
- Tapio, P., “Towards a Theory of Decoupling: Degrees of Decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland between 1970 and 2001,” *Transport policy*, Vol. 12, No. 2, 2005, pp. 137~151.
- Timilsina, G. R., and A. Shrestha, “Transport Sector CO<sub>2</sub> Emissions Growth in Asia: Underlying Factors and Policy Options,” *Energy policy*, Vol. 37, No. 11, 2009, pp. 4523~4539.
- Transport & Environment. “How Clean Are Electric Cars: T&E’s Analysis of Electric Car Lifecycle CO<sub>2</sub> Emissions,” 2020.
- United Nations Environment Programme. Sustainable Consumption, and Production Branch. “Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth,” UNEP/Earthprint, 2011.
- Ürge-Vorsatz, D., S. Koepfel, and S. Mirasgedis, “Appraisal of Policy Instruments for Reducing Buildings’ CO<sub>2</sub> Emissions,” *Building Research & Information*, Vol. 35, No. 4, 2007, pp. 458~477.
- Virley, S., “The Effect of Fuel Price Increases on Road Transport CO<sub>2</sub> Emissions,” *Transport Policy*, Vol. 1, No. 1, 1993, pp. 43~48.
- Wang, Q. and R. Jiang, “Is China’s Economic Growth Decoupled from Carbon Emissions?,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 225, 2019, pp. 1194~1208.
- Wanga, T., H. Lia, J. Zhang, and Y Lu, “Influencing Factors of Carbon Emission in

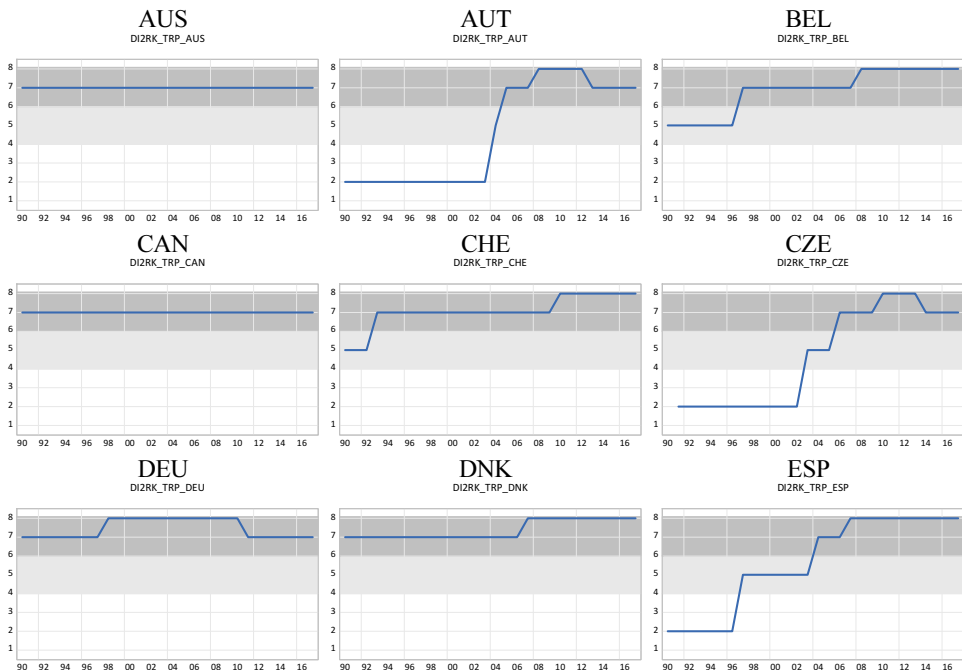
- China's Road Freight Transport," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 43, 2012, pp. 54~64.
- Yang, D. and H. Timmermans, "Effects of Fuel Price Fluctuation on Individual CO<sub>2</sub> Traffic Emissions: Empirical Findings from Pseudo Panel Data," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, 2012, pp. 493~502.
- Yang, L., Y. Yang, X. Zhang, and K. Y. Tang, "Whether China's Industrial Sectors Make Efforts to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions from Production?-A Decomposed Decoupling Analysis," *Energy*, Vol. 160, 2018, pp. 796~809.
- York, R., E. A. Rosa, and T. Dietz, "STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts," *Ecological economics*, Vol. 46, No. 3, 2003, pp. 351~365.

## 부 록

〈부록 표 1〉 분석에 사용된 국가명 및 국가코드

국가코드	국가명	국가코드	국가명	국가코드	국가명
AUS	Australia	FRA	France	PRT	Portugal
AUT	Austria	GBR	United Kingdom	SVK	Slovak Republic
BEL	Belgium	GRC	Greece	SWE	Sweden
CAN	Canada	HUN	Hungary	TUR	Turkey
CHE	Switzerland	ITA	Italy	USA	United States
CZE	Czech Republic	JPN	Japan		
DEU	Germany	KOR	Korea, Rep.		
DNK	Denmark	NLD	Netherlands		
ESP	Spain	NOR	Norway		
FIN	Finland	POL	Poland		

〈부록 그림 1〉 OECD 25개 국가의 탈동조화 움직임(전체)



〈부록 그림 1〉 OECD 25개 국가의 탈동조화 움직임(전체) (계속)

