

수송부문의 연료 간 대체와 이산화탄소 배출: 바이오디젤 혼소 효과를 중심으로[†]

강효녕* · 서동희**

요약 : 본 연구는 차분연료배분모형을 이용하여 수송부문에서의 연료 간 대체성을 추정하고, 연료 간 대체에 따른 이산화탄소 배출효과를 살펴본다. 분석결과를 정리하면, 첫째, 수송부문은 경유에 대한 의존도가 매우 높아 디비지아 탄력성이 가장 큰 것으로 나타났다. 둘째, 연료별 자기가격탄력성은 모두 음(-)의 값을 보였으며, 경유의 자체가격탄력성이 휘발유와 LPG에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 셋째, 휘발유와 경유, 휘발유와 전기, 경유와 LPG는 대체관계를 보였으며, 경유와 전기는 보완관계를 갖는 것으로 나타났다. 넷째, 연료별 대체성과 배출계수를 이용한 결과, 바이오디젤을 경유에 혼합하는 경우 이산화탄소 감축 효과가 있으나, 주로 연료별 가격 변화에 따른 연료 간 대체가 이산화탄소 배출을 결정짓는 것으로 나타났다.

주제어 : 휘발유, 경유, 바이오디젤, LPG, 전기, 연료 간 대체성, 이산화탄소, 차분연료배분모형

JEL 분류 : Q2, Q4, R4

접수일(2022년 11월 7일), 수정일(2022년 12월 12일), 게재확정일(2023년 2월 8일)

[†] 본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

* 한국해양수산개발원 전문연구원, 제1저자(e-mail: young@kmi.re.kr)

** 고려대학교 식품자원경제학과 부교수, 교신저자(e-mail: dhsuh@korea.ac.kr)

Interfuel Substitution and Carbon Dioxide Emission in the Transportation Sector: Roles of Biodiesel Blended Fuels[†]

Hyonyong Kang* and Dong Hee Suh**

ABSTRACT : This paper investigates how interfuel substitution affects carbon dioxide (CO₂) emissions with a focus on the use of biodiesel blended fuels. The results show that the Divisia elasticity of diesel demand is the greatest because the transportation sector relies heavily on diesel. Also, while the own-price elasticity of each fuel demand is negative, the results reveal that diesel demand is more inelastic than the demand for gasoline and LPG. Moreover, gasoline is a substitute for diesel and electricity, and diesel is a substitute for LPG and a complement for electricity. Regarding the effects on carbon dioxide emissions, this paper computes the potential CO₂ emissions associated with interfuel substitution using the coefficients of CO₂ emissions. The results show that using biodiesel blended fuels contributes to reducing CO₂ emissions, but it appears that the price-induced interfuel substitution is a main factor affecting CO₂ emissions.

Keywords : Gasoline, Diesel, Biodiesel, Liquefied petroleum gas, Electricity, Interfuel substitution, Carbon dioxide emission, Differential fuel allocation model

Received: November 7, 2022, Revised: December 12, 2022, Accepted: February 8, 2023.

[†]This research was supported by a Korea University Grant.

* Senior Researcher, Korea Maritime Institute, First author (e-mail: young@kmi.re.kr)

** Associate Professor, Department of Food and Resource Economics, Korea University, Corresponding author (e-mail: dhsuh@korea.ac.kr)

1. 서론

수송부문은 경제활동 전 분야에 걸쳐 직·간접적으로 연관되어 있으며, 국내 에너지 소비와 탄소 배출에 영향을 미치는 중요한 부문으로 인식되고 있다. 경제성장과 생활 수준 향상으로 차량 이용이 꾸준히 증가하고 있으며, 그 결과 한국에서 수송부문의 에너지 소비량은 1990년 1,417만 toe에서 2019년 4,300만 toe로 세 배 이상 증가했다(에너지경제연구원, 2021). 특히 수송부문은 연료 소비의 90% 이상을 화석연료에 의존한다는 점에서 발전 및 기타 산업부문에 비해 대체연료 사용의 기회가 매우 제한적인 편이다. 이에 따라 수송부문의 연료 사용 증가는 필연적으로 온실가스 배출량을 증가시키는 결과를 초래하였다. 실제로 한국에서 수송부문의 이산화탄소(CO₂) 배출량은 1990년 3,549만 톤 CO₂eq에서 2019년 1억 99만 톤 CO₂eq로 지난 30년간 세 배 가까이 증가했으며, 2019년 기준 총 CO₂ 배출량의 14.4%를 차지했다(온실가스종합정보센터, 2022).

정부는 수송부문의 온실가스 배출을 줄이기 위해 2015년 7월 신재생에너지 연료 혼합의무화제도(Renewable Fuel Standard, RFS)를 시행하였다. 본 제도는 수송용 연료 부문에 대한 신재생에너지원의 공급 비중을 확대하기 위한 정책으로써, 석유정제업자에게 차량용 경유에 일정 비율 이상의 바이오디젤(biodiesel fuel)을 혼합하여 공급하도록 하고 있다. 이는 2013년 개정된 「신·재생에너지법」 제23조의2에 근거하여 시행되었으며, 의무혼합비율은 제도 도입 준비 기간에 2%로 시작하여, 제도 시행 초기부터 2017년까지 2.5%, 2018년 1월부터 2021년 6월까지 3.0%, 이후 현재까지는 3.5%가 적용되고 있다. 또한 「2030 국가 온실가스 감축목표 상향안」에서는 2050년 탄소중립을 달성하고자 2030년 수송부문의 CO₂ 감축목표를 37.8%로 상향 조정하고, 2030년까지 바이오디젤 의무혼합비율을 8%로 확대하기로 결정하였다.

이러한 바이오디젤의 혼소는 수송부문에서의 연료 간 대체에 영향을 미칠 것으로 예상되는데, 과거 연료 간 대체에 관한 연구는 주로 산업부문을 중심으로 석탄, 석유, 천연가스 등과 같은 화석연료 간의 대체에 초점을 맞추어 분석되었다(Fuss, 1977; Pindyck, 1979a; Pindyck, 1979b). 이후 화석연료가 기후변화에 미치는 위험성이 높아짐에 따라 비화석 연료와의 대체에 관한 연구가 많아졌으며, 다수의 연구에서는 화석연료와 전기 사이에 대체성이 존재하는 것을 확인하였다(Halvorsen, 1977; Jones, 1995; Jones, 2014;

Bjørner and Jensen, 2002; Stern, 2012; Hossain and Serletis, 2020). 특히 화석연료와 전기 사이의 대체성은 시간이 지날수록 높아지며(Xie and Hawkes, 2015; Hochman and Timilsina, 2017), 고소득 국가일수록 상대적으로 높은 대체성을 갖는 것으로 추정되었다(Serletis et al., 2010). 한편 화석연료와 바이오연료 사이의 대체성에 관한 연구도 다수 진행되었는데, 화석연료와 바이오연료 사이의 낮은 대체성을 확인한 연구(Alves and Silveira Bueno, 2003; Anderson, 2012; Suh, 2016; Suh, 2019)와 강한 대체성을 확인한 연구(Santos, 2013; Cardoso et al., 2019; Solarin and Bello, 2019)가 존재한다. 또한 시간이 지날수록 대체성이 증가하는 특징을 보이기도 하였으며(Macedo et al., 2008; De Freitas and Kaneko, 2011), 일부 연구에서는 휘발유와 바이오연료 간의 보완관계(Szklo et al., 2007), 천연가스와 바이오매스 간의 대체관계(Suh, 2016)를 확인하기도 하였다.

그러나 국내 연구의 경우 바이오디젤의 사용이 수송부문에서의 연료 간 대체에 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 이에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 이는 수송부문의 소비자가 바이오디젤이 혼합되어 공급되는 경우를 최종적으로 소비한다는 점에서 일반 경유와 바이오디젤에 대한 수요를 분리하기 어려운 한계가 있기 때문이다. 또한 바이오디젤의 사용에 따른 CO₂ 감축 효과는 의무혼합비율에 따라 추정할 수 있지만, 실제 소비자의 연료 수요와 대체에 따른 CO₂ 감축 변화에 관한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 수송부문에 투입되는 연료별 수요체계를 중심으로 연료 간 대체에 따른 CO₂ 배출 효과를 분석하고자 한다. 먼저 차분연료배분모형을 이용하여 연료별 수요의 가격탄력성을 추정하여 수송부문에서의 연료 간 대체성을 분석한다. 또한 연료별 수요의 대체성과 연료별 배출계수를 이용하여 가격 변화에 따른 연료별 CO₂ 배출량을 추정하고, 바이오디젤 혼소에 따른 CO₂ 감축 효과에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서 연료 간 대체성을 분석하기 위한 차분연료 배분모형에 대해 검토하고 실증분석을 위한 자료를 제시한다. 제Ⅲ장에서는 연료 간 대체성과 CO₂ 배출 효과에 대한 실증분석 결과를 제시하고, 마지막으로 제Ⅳ장에서는 연구 결과를 요약·정리하고 시사점을 도출한다.

II. 방법론 및 분석자료

1. 차분연료배분모형(Differential fuel allocation model)

본 연구는 Clements and Gao(2015)의 로테르담 모형(Rotterdam model)을 수송부문의 연료 수요에 적용하고자 한다. 수송부문에서 n 개 연료로 구성된 연료 가격 및 연료 소비량 벡터가 각각 $P = (p_1, \dots, p_n)'$ 와 $Q = (q_1, \dots, q_n)'$ 일 때, 소비자는 연료 소비에 대한 총지출($M = P'Q$)을 개별 연료에 배분하여, 효용($u(q_1, \dots, q_n)$)을 극대화하는 것으로 가정한다. 이때 수송부문의 연료 수요함수는 $q_i = q_i(M, p_1, \dots, p_n)$ 이며, 수요함수의 양변을 전미분하여 정리하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dq_i = \frac{\partial q_i}{\partial M} dM + \sum_{j=1}^n \frac{\partial q_i}{\partial p_j} dp_j \quad (1)$$

식 (1)에서 연료 j 의 가격 변화에 따른 연료 i 의 수요 변화는 슬러츠키 방정식(Slutsky equation)에 따라 소득효과와 대체효과로 분해할 수 있고($\partial q_i / \partial p_j = s_{ij} - q_j \partial q_i / \partial M$), 이때 s_{ij} 는 슬러츠키 계수(Slutsky coefficient)로써 연료에 대한 총지출이 일정할 때 연료 i 와 j 의 대체효과를 나타낸다. 식 (1)을 슬러츠키 방정식을 이용하여 정리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dq_i = \frac{\partial q_i}{\partial M} (dM - \sum_{j=1}^n q_j dp_j) + \sum_{j=1}^n s_{ij} dp_j \quad (2)$$

식 (2)의 양변에 $1/q_i$ 를 곱하고, $d(\ln x) = dx/x$ 을 이용하여 정리하면, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(\ln q_i) = \frac{M}{q_i} \frac{\partial q_i}{\partial M} \left[d(\ln M) - \sum_{j=1}^n \frac{p_j q_j}{M} d(\ln p_j) \right] + \sum_{j=1}^n s_{ij} \frac{p_j}{q_i} d(\ln p_j) \quad (3)$$

여기서 수송부문의 총지출에서 연료 i 가 차지하는 비중(expenditure share)을 $w_i = (p_i q_i)/M$ 로 정의하고, 전체 연료에 대한 소비와 가격을 각각 디비지아 볼륨지수(Divisia volume index)인 $d(\ln Q) = \sum_{i=1}^n w_i d(\ln q_i)$ 와 디비지아 가격지수(Divisia price index)인 $d(\ln P) = \sum_{i=1}^n w_i d(\ln p_i)$ 로 정의할 수 있다. 이를 식(3)에 적용하고 $d \ln M = d \ln P + d \ln Q$ 의 관계를 이용하여 정리하면, 식(4)와 같이 최적연료배분모형을 도출할 수 있다(자세한 내용은 Barten(1964), Theil(1965), Clements and Gao(2015)의 연구 참고).

$$w_i d(\ln q_i) = \theta_i d(\ln Q) + \sum_{j=1}^n \pi_{ij} d(\ln p_j) \quad (4)$$

식(4)에서 θ_i 는 총 연료 소비량 변화에 따른 연료 i 의 수요 변화를 나타내며, π_{ij} 는 연료 j 의 가격 변화에 따른 연료 i 의 수요 변화를 나타낸다. 실증분석을 위해 극소변화(infinitesimal changes)를 시점 간 차분형태로 바꾸고 오차항(ϵ_{it})을 더하면 식(5)와 같은 모형이 도출된다(Clements and Gao, 2015).

$$\bar{w}_{it} Dq_{it} = \theta_i DQ_t + \sum_{j=1}^n \pi_{ij} Dp_{jt} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

식(5)에서 \bar{w}_{it} 는 수송부문의 총 연료 지출에 대한 연료 i 의 평균 지출 비중으로 $\bar{w}_{it} = (w_{it} + w_{it-1})/2$ 이며, 차분 형태의 변수는 각각 $Dq_{it} = \ln q_{it} - \ln q_{it-1}$ 와 $Dp_{it} = \ln p_{it} - \ln p_{it-1}$ 로 나타낼 수 있다. 또한 디비지아 볼륨지수의 차분 형태는 $DQ_{it} = \sum_{i=1}^n \bar{w}_{it} Dq_{it}$ 로 나타낸다. 이때, 식(5)는 대칭성(symmetry, $\pi_{ij} = \pi_{ji}$), 동차성(homogeneity, $\sum_j \pi_{ij} = 0$), 가합성(adding up, $\sum_i \theta_i = 1$) 조건을 충족하며, π_{ij} 행렬은 음의 반정부호(negative semi-definite)를 만족한다.

한편 식 (5)의 양변을 \bar{w}_{it} 로 나누면 식 (6)과 (7)과 같이 수요의 디비지아 탄력성 (Divisia elasticity of demand)과 수요의 가격탄력성(price elasticity of demand)을 도출할 수 있다.

$$\zeta_i = \frac{\theta_i}{w_{it}} \quad (6)$$

$$\eta_{ij} = \frac{\pi_{ij}}{w_{it}} \quad (7)$$

식 (6)의 디비지아 탄력성은 디비지아 볼륨 지수(Divisia volume index)가 1% 변할 때 연료 i 의 수요 변화율로써, 총 연료 수요 변화에 따른 연료별 수요 탄력성을 의미한다. 또한 식 (7)은 연료 j 의 가격 변화에 대한 연료 i 의 수요 변화를 의미하는 데, 자체가격탄력성(η_{ii} , own-price elasticity)은 연료 i 의 가격이 1% 변할 때 연료 i 의 수요 변화를 나타내고, 이론적으로 음(-)의 값이 도출된다. 또한 교차가격탄력성(η_{ij} , cross-price elasticity)은 연료 j 의 가격 변화에 따른 연료 i 에 대한 수요 변화를 의미하며, 교차가격탄력성이 음(-)의 값이 도출되면 보완관계, 양(+)의 값이 도출되면 대체관계가 성립함을 의미한다.

2. 분석자료

본 연구는 2010년 1월부터 2021년 12월까지 수송부문의 월별 연료 소비량 및 가격 자료를 이용하였다. 수송부문의 연료 소비량은 에너지경제연구원의 에너지통계월보 자료를 이용하였으며, 연료 가격 중 휘발유, 경유, LPG 가격은 한국석유공사의 오피넷(<https://www.opinet.co.kr>), 전기 가격은 환경부의 공공급속충전요금 자료를 사용하였다. 또한 연료 가격은 에너지열량 환산기준에 따라 MJ당 가격으로 환산하고, 이를 통계청의 소비자 물가지수를 이용하여 실질가격으로 변환하여 분석하였다. 분석자료에 대한 기초통계량은 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 기초통계량

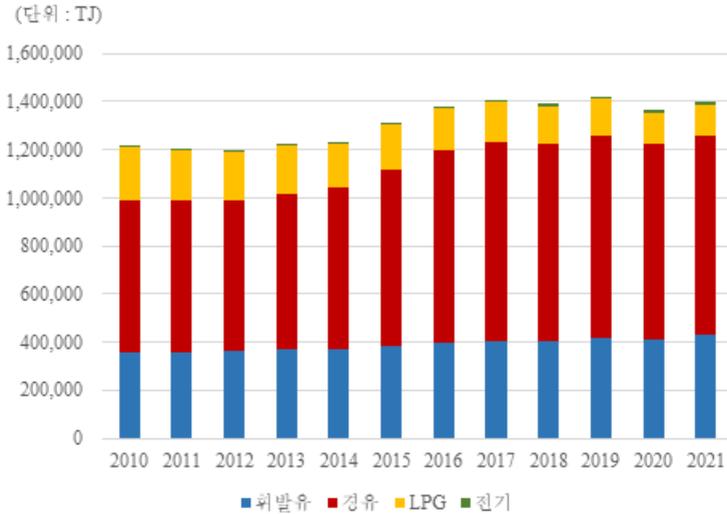
변수	평균	표준편차	최솟값	최댓값
연료 소비량 (TJ)				
휘발유	32,425	3,140	26,293	43,961
경유	61,629	8,664	42,119	83,275
LPG	14,651	2,621	9,169	20,432
전기	786	158	544	1,214
연료 가격 (원/MJ)				
휘발유	53.1	8.5	38.6	68.9
경유	40.7	7.5	28.4	54.0
LPG	33.8	5.8	25.1	44.5
전기	29.8	8.1	18.1	40.8
지출 비중 (%)				
휘발유	36.3	1.2	33.6	39.8
경유	52.6	2.6	46.6	57.8
LPG	10.6	2.5	6.4	16.1
전기	0.5	0.1	0.3	0.8

주: 연료 소비량 및 가격의 단위인 MJ 및 TJ는 연료발열량을 나타내는 단위로 연료사용량(고유단위) × 연료별 발열량(MJ/고유단위)으로 계산되며, 1TJ=10⁶MJ 임.

<표 1>과 같이 2010년 1월부터 2021년 12월까지 월평균 연료별 소비량은 경유가 61,629 TJ로 가장 많았고, 다음으로 휘발유(32,425 TJ), LPG(14,651 TJ), 전기(786 TJ) 순이었다. 연료별 지출 비중도 경유가 52.6%로 가장 높았고, 다음으로 휘발유(36.3%), LPG(10.6%) 순이었으며, 전기는 0.5%로 매우 낮은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 한편 연료별 가격은 휘발유가 MJ당 53원으로 가장 높았고, 다음으로 경유(41원), LPG(34원), 전기(30원) 순이었다.

한편 <그림 1>과 같이 연도별 연료 소비량 추세를 살펴보면, 휘발유는 2010년 35만 5,836 TJ에서 2021년 43만 3,292 TJ로 21.8% 증가했으며, 경유는 2010년 63만 2,081 TJ에서 2021년 82만 7,186 TJ로 30.9% 증가했다. 한편 LPG는 2010년 22만 1,691 TJ에서 2021년 12만 6,986 TJ로 42.7% 감소했으며, 전기는 2010년 7,871 TJ에서 2021년 1만 2,225 TJ로 55.3% 증가했다.

〈그림 1〉 연도별 연료 소비량



자료: 에너지통계월보.

III. 실증분석 결과

1. 연료 간 대체성 추정

본 연구는 차분연료배분모형을 추정하기 위해 반복적 표면상무관회귀(iterative seemingly unrelated regression, ISUR) 방법을 사용하였으며, BCa 부트스트랩(Bias-Corrected and Accelerated Method Bootstrap) 방법으로 회귀분석을 1만 회 실시하여 표준오차를 계산하였다. 실증분석을 위해 식 (5)를 구조방정식으로 정리하면, 휘발유(g), 경유(d), LPG(l), 전기(e)에 대한 연료 수요체계는 식 (8-1)부터 식 (8-4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{휘발유: } \bar{w}_{gt} D \ln q_{gt} = \theta_g D \ln Q_t + \pi_{gj} \sum_{j=1}^n D \ln p_{jt} + \epsilon_{gt} \quad (8-1)$$

$$\text{경유: } \bar{w}_{dt} D \ln q_{dt} = \theta_d D \ln Q_t + \pi_{dj} \sum_{j=1}^n D \ln p_{jt} + \epsilon_{dt} \quad (8-2)$$

$$\text{LPG: } \bar{w}_{lt} D \ln q_{lt} = \theta_l D \ln Q_t + \pi_{lj} \sum_{j=1}^n D \ln p_{jt} + \epsilon_{lt} \quad (8-3)$$

$$\text{전기: } \bar{w}_{et} D \ln q_{et} = \theta_e D \ln Q_t + \pi_{ej} \sum_{j=1}^n D \ln p_{jt} + \epsilon_{et} \quad (8-4)$$

〈표 2〉 차분연료배분모형의 ISUR 추정결과

모수	추정 계수
θ_g	0.335*** (0.012)
θ_d	0.640*** (0.014)
θ_l	0.025*** (0.008)
θ_e	0.001 (0.001)
π_{gg}	-0.066** (0.027)
π_{gd}	0.047* (0.025)
π_{gl}	0.015 (0.012)
π_{ge}	0.003* (0.002)
π_{dd}	-0.091*** (0.029)
π_{dl}	0.047*** (0.012)
π_{de}	-0.003* (0.002)
π_{ll}	-0.062*** (0.009)
π_{le}	-0.000 (0.001)
π_{ee}	-0.000 (0.000)

- 주: 1) g 는 휘발유, d 는 경유, l 은 LPG, e 는 전기를 의미함.
 2) 식 (8-1)부터 식 (8-3)의 R^2 는 각각 0.882, 0.945, 0.932로 추정됨.
 3) ()는 부트스트랩 표준오차를 나타냄.
 4) *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미함.

추정 시, 식 (8-1)부터 식 (8-4)의 모든 식을 ISUR로 추정할 경우, 잔차의 공분산행렬이 비특이성(non-singularity) 조건을 만족하지 못하므로, 전기에 대한 식을 제외하고 추정하였다. ISUR로 추정한 결과는 <표 2>와 같으며, 분석 결과에 대한 해석은 <표 3>에서 추정된 디비지아 탄력성과 가격탄력성을 중심으로 정리하였다.

식 (6)과 식 (7)의 디비지아 탄력성과 수요의 가격탄력성을 추정한 결과는 <표 3>과 같다. 전기를 제외한 수송용 연료의 대부분은 양(+)의 디비지아 탄력성을 갖는 것으로 나타났다. 수송부문의 총 연료 변화에 따라 휘발유(0.921)와 LPG(0.234)에 대한 수요는 비탄력적인 반면, 경유(1.215)에 대한 수요는 탄력적인 것으로 나타났다. 이는 경유 자동차의 경우 휘발유 및 LPG 자동차에 비해 사업용 비중이 상대적으로 높아 경기변동 및 소득 변화에 따른 수송부문의 총 연료 변화에 민감하게 반응하며, 수송부문에서 경유에 대한 의존도가 매우 높음을 보여준다(조철근·정준환, 2017). 한편 전기 자동차는 2004년 제정된 「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」 시행 이후 본격적으로 공급되었다. 그러나 전기자동차 등록 대수는 하이브리드 자동차를 제외하고 2021년 말 기준 23만 대로 전체 자동차의 0.93%를 차지해 매우 낮은 수준을 보였으며, 이에 따라 전기에 대한 수요는 수송부문의 총 연료 변화에 대해 유의한 반응을 보이지 않았다.

<표 3>의 수요의 가격탄력성에서 대각선에 위치한 값은 자체가격탄력성(own-price elasticity)을 나타내며, 나머지는 연료 간 수요의 교차가격탄력성(cross-price elasticity)을 나타낸다. 휘발유, 경유, LPG 등 대부분 연료의 자체가격탄력성은 음(-)의 값으로 추정되어 수요이론에 부합한 결과를 보였으며, 이는 자체가격의 상승(또는 하락)이 자체 연료의 수요를 감소(또는 증가)시키는 것을 의미한다. 또한 모든 연료 수요에 대해 자체 가격탄력성의 절댓값이 1보다 작아 수요가 비탄력적인 것으로 추정되었으며, 이 중 경유에 대한 수요는 경유 가격이 1% 상승 시 0.173%만큼 감소하는 것으로 나타나, 가장 비탄력적인 결과를 보였다. 한편 탄력도는 경유(-0.173), 휘발유(-0.180), LPG(-0.586) 순으로 크게 나타났으며, 전기에 대한 수요는 전기 가격 변화에 유의하게 반응하지 않았다.

연료 간 교차가격탄력성을 살펴보면, 휘발유와 전기는 대체관계를 보였는데, 전기 가격 변화에 따른 휘발유 수요의 대체탄력성은 0.009로 매우 낮은 수준을 보인 반면, 휘발유 가격 변화에 따른 전기 수요의 변화는 0.714로 상대적으로 높게 나타났다. 이는 전기 자동차의 구매 결정에 휘발유 가격의 변화가 상당한 영향을 미치고 있음을 보여준다.

LPG와 경유도 대체 관계를 보였으며, LPG 가격 변화에 따른 경유 수요의 변화(0.089)가 경유 가격 변화에 따른 LPG 수요의 변화(0.445)보다 작은 것으로 나타났다. 한편 휘발유와 경유는 10% 유의수준에서 대체 관계를 확인할 수 있었다. 이는 수송부문에서 휘발유 및 경유 자동차가 대부분을 차지하고 있고, 실제 차량 간의 구매행태에서도 관측할 수 있는 결과이다. 또한 경유와 전기는 보완관계를 형성하였으며, 이는 경유가 전기와 함께 휘발유 수요를 대체하는 것으로 보인다.

2. 연료 간 대체에 따른 CO₂ 배출량

본 장에서는 IPCC(2006)의 Tier 1 방법(\sum_a 연료소비량_a × 배출계수_a)을 이용하여 연료 간 대체에 따른 CO₂ 배출량을 추정하고자 한다. 연료별 탄소배출계수는 IPCC(2006) 및 「에너지법 시행규칙」 제5조[별표]의 에너지열량환산기준에 따른 연료별 배출계수를 기준으로 하였으며, 휘발유, 경유, 바이오디젤, LPG의 탄소배출계수는 TJ당 각각 18.9, 20.2, 19.3, 17.2톤 CO₂eq를 사용하였으며, 전기(소비기준)는 MWh당 0.4594톤 CO₂eq를 적용하였다. <그림 2>는 2010년 1월부터 2021년 12월까지 한국의 수송부문에서 소비되는 연료별로 발생된 CO₂ 배출량을 추정한 결과이다. 2010년부터 2021년까지 총 CO₂ 배출량은 약 16.4% 증가하였으며, 특히 경유의 경우 CO₂ 배출계수가 높고 소비량 증가세가 두드러짐에 따라 CO₂ 배출량이 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.

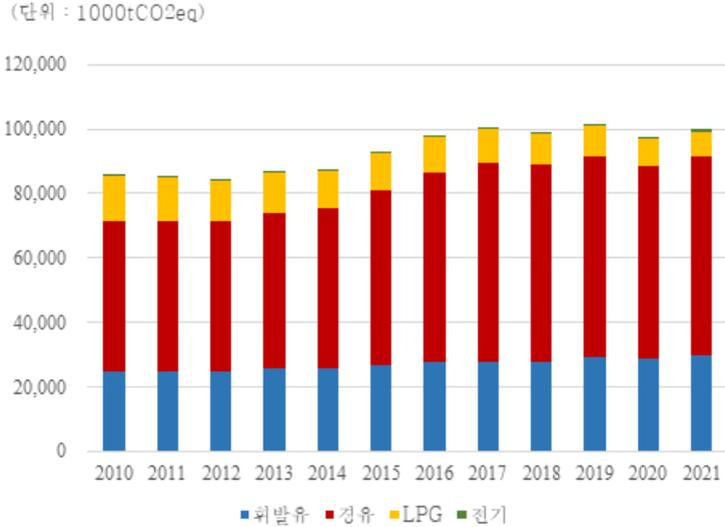
〈표 3〉 디비지아 탄력성 및 수요의 가격탄력성

	디비지아 탄력성	수요의 가격 탄력성			
		휘발유 가격	경유 가격	LPG 가격	전기 가격
휘발유 수요	0.921*** (0.034)	-0.180** (0.073)	0.129* (0.069)	0.042 (0.032)	0.009** (0.005)
경유 수요	1.215*** (0.027)	0.089* (0.048)	-0.173*** (0.055)	0.089*** (0.024)	-0.006* (0.003)
LPG 수요	0.234*** (0.078)	0.144 (0.112)	0.445*** (0.118)	-0.586*** (0.083)	-0.003 (0.007)
전기 수요	0.160 (0.125)	0.714** (0.358)	-0.629* (0.369)	-0.063 (0.152)	-0.021 (0.040)

주: 1) ()는 부트스트랩 표준오차를 나타냄.

2) *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미함.

<그림 2> 연료별 CO₂ 배출량 추이



주: 휘발유, 경유, LPG는 IPCC(2006), 전기는 「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침」(2017.1.1.)의 연료별 배출계수를 기준으로 추정함.

한편 경유를 중심으로 바이오디젤 혼합 여부에 따른 CO₂ 배출량을 연도별로 추정한 결과는 <표 4>와 같다. 이때 바이오디젤을 혼합하지 않고 경유만을 소비하는 경우와 일정 비율 이상의 바이오디젤이 혼합된 경유를 소비하는 경우로 구분하여 추정하였으며, 바이오디젤 혼소 여부에 따른 CO₂ 배출량의 차이는 2010년 약 42천 톤CO₂eq에서 2021년 약 89천 톤CO₂eq로 추정되었다. 즉, 바이오디젤이 혼합된 경유를 소비하는 경우 바이오디젤이 혼합되지 않은 경유를 소비하는 경우에 비해 CO₂ 배출량이 두 배 이상 감소하는 것으로 나타났다.

그러나 <표 4>는 경유의 일정 비율을 바이오디젤로 혼합함으로써 발생할 수 있는 CO₂ 배출량의 일반적인 추정치를 나타낸다. 실제 수송부문에서 소비자가 구매하는 최종 재화는 경유라는 점에서 경유에 대한 수요가 바이오디젤에 대한 수요를 결정하고, 그에 따른 CO₂ 배출량이 결정된다. 즉 경유 가격 변화에 대한 수요 반응이 경유와 바이오디젤이 발생시키는 CO₂ 배출량을 결정하는 것이다. 따라서 연료 간 대체에 따른 CO₂ 배출량은 <표 4>에서 추정한 연료별 수요의 가격탄력성과 연료별 배출계수를 이용하여

〈표 4〉 경유 소비에 따른 CO₂ 배출량

(단위: 천 톤CO₂eq)

연도	경유 (A)	경유 + 바이오디젤 (B)	차이 (A-B)
2010	46,816	46,774	42
2011	46,661	46,620	42
2012	46,376	46,334	41
2013	48,227	48,184	43
2014	49,793	49,749	44
2015	54,473	54,419	54
2016	59,006	58,941	66
2017	61,503	61,434	69
2018	60,917	60,835	81
2019	62,231	62,148	83
2020	60,036	59,956	80
2021	61,267	61,178	89

주: 바이오디젤 의무혼합비율은 2010.01.~2015.07.까지 2%, 2015.08.~2017.12.까지 2.5%, 2018.01.~2021.06.까지 3.0%, 2021.07.~2021.12. 3.5%를 적용함.

추정할 수 있으며, 식 (9)와 같이 계산된다(Suh, 2016).

$$\Delta e_{ij} = \frac{\eta_{ij}}{100} c_i \bar{q}_i \quad (9)$$

식 (9)에서 Δe_{ij} 는 연료 j 의 가격 변화에 따른 연료 i 의 CO₂ 배출량 변화이며, c_i 는 연료 i 의 CO₂ 배출계수, \bar{q}_i 는 연료 i 의 평균 소비량을 나타낸다.

〈표 5〉는 연료 가격 변화가 연료 수요를 변화시킴으로써 유발되는 CO₂ 배출량 변화를 추정된 결과이다. 경유 수요는 경유만으로 이루어진 경우와 경유에 바이오디젤을 혼소한 경우를 구분하여 CO₂ 배출량 변화를 추정하였다. 먼저 연료별로 살펴보면 휘발유, 경유, LPG 가격이 1% 상승(혹은 하락)하면, 자체 수요가 감소함에 따라 CO₂ 배출량은 각각 4,055톤, 7,886톤, 5,414톤 감소(혹은 증가)하는 것으로 나타났다. 배출계수가 높은 경유의 CO₂ 배출량 변화가 가장 크게 나타났는데, 경유 가격 1% 상승 시 바이오디젤을

〈표 5〉 연료별 CO₂ 배출량 변화(단위: 천 톤CO₂eq)

		휘발유 가격	경유 가격	LPG 가격	전기 가격
휘발유 수요		-4.055** (1.655)	2.907* (1.570)	0.937 (0.718)	0.211** (0.106)
경유 수요	경유	4.073* (2.199)	-7.886*** (2.514)	4.074*** (1.082)	-0.261* (0.150)
	경유 + 바이오디젤	4.010* (2.165)	-7.763*** (2.502)	4.010*** (1.065)	-0.257* (0.148)
LPG 수요		1.326 (1.033)	4.114*** (1.088)	-5.414*** (0.765)	-0.026 (0.063)
전기 수요		0.269** (0.139)	-0.237* (0.139)	-0.024 (0.057)	-0.008 (0.015)
총 CO ₂ 배출량 변화	휘발유 + 경유 + LPG + 전기	0.287	-1.102	-1.340	-0.050
	휘발유 + 경유 + 바이오디젤 + LPG + 전기	0.224	-0.979	-1.404	-0.046

주: 1) ()는 부트스트랩 표준오차를 나타냄.

2) *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미함.

3) 바이오디젤 혼합비율은 최신 의무혼합비율인 3.5%를 적용함.

혼합한 경우의 CO₂ 배출량은 바이오디젤을 혼합하지 않은 경우에 비해 약 120톤의 CO₂ 감축 효과를 보였다.

한편 휘발유 가격의 1% 상승은 휘발유 수요 감소로 CO₂ 배출량이 4,055톤 감소하는 반면, 경유 수요가 증가함에 따라 CO₂ 배출량이 4,073톤 증가하는 것으로 나타났다. 또한 전기 수요가 증가함에 따라 269톤 증가하여, 총 CO₂ 배출량은 약 287톤 증가하는 것으로 추정되었다. 경유에 바이오디젤을 혼합할 경우 약 63톤의 CO₂를 줄일 수 있으며, 이를 고려하더라도 경유 수요 변화에 따른 CO₂ 배출량은 약 224톤 증가하는 것으로 추정되었다. 반면 경유 가격이 1% 상승하면, 경유 수요가 줄면서 CO₂ 배출량이 7,886톤 감소하나, 경유와 대체관계를 보이는 휘발유와 LPG에 대한 수요가 증가함에 따라 CO₂ 배출량이 각각 2,907톤과 4,114톤씩 증가하며, 보완관계를 형성하는 전기 수요 감소로 CO₂ 배출량(237톤)이 줄면서 총 CO₂ 배출량은 1,102톤 감소하는 것으로 나타났다. 바이오디젤을 혼합한 경우를 고려하면 총 CO₂ 배출량은 979톤 감소하는 것으로 추정되었다.

LPG 가격의 1% 상승은 LPG 수요 감소에 따라 CO₂ 배출량이 5,414톤 감소하고, 경유 수요 증가로 4,074톤 늘면서 총 CO₂ 배출량은 1,340톤 감소하는 것으로 나타났다. 또한 전기 가격 상승은 경유 수요가 줄면서 약 261톤의 CO₂가 감소하는 반면, 휘발유 수요 증가로 CO₂ 배출량이 늘면서 약 50톤 수준의 CO₂ 배출량 감소를 가져오는 것으로 추정되었다. 이때 바이오디젤의 혼합을 고려할 경우 LPG 가격 상승 시 CO₂ 배출량은 바이오디젤을 혼합하지 않는 경우에 비해 64톤 감소하며, 전기 가격 상승 시에는 약 4톤 증가하는 것으로 나타났다.

실증분석 결과, 개별 연료의 가격 변화에 따른 연료 간 대체성은 CO₂ 배출량을 결정하는 주요 요인임을 확인하였다. 추정 결과, 바이오디젤의 혼합이 CO₂ 배출량 변화에 미치는 영향은 경유 수요의 변화에 따라 차이가 있을 수 있음을 의미하며, 바이오디젤을 경유에 혼합하더라도 경유 수요 변화에 따라 CO₂ 감축효과에 차이를 보일 수 있음을 확인하였다. 이는 바이오디젤 혼소 정책 시행 시에 연료별 가격 변화와 연료 대체성을 고려해야 함을 시사하며, 경유 수요 변화에 따라 CO₂ 배출량에 차이가 나타날 수 있음을 의미한다.

IV. 결론 및 시사점

온실가스 감축에 대한 국제사회의 요구가 높아짐에 따라, 세계 주요국은 신재생에너지 개발 및 이용을 통해 기후 위기를 해결하고 신재생에너지 산업의 육성 및 유치를 통한 경제성장을 도모하고자 적극적인 정책을 시행하고 있다. 특히 바이오연료는 한국의 수송부문에서 CO₂ 배출량을 줄이고, 에너지 및 환경 정책의 목표를 달성하는 데 중요한 연료로 인식되고 있으며, 2030년까지 바이오디젤의 의무혼합비율을 8%로 높이는 방안을 추진하는 등 정책 목표를 구체화하고 있다. 그러나 바이오디젤의 의무혼합이 온실가스 배출을 감소시킬 수 있더라도, 연료의 수요와 대체를 고려할 경우 실제 온실가스 배출량은 기대치와 차이를 보일 수 있다. 이에 본 연구는 차분연료배분모형을 이용하여 수송부문의 주요 연료인 휘발유, 경유, LPG, 전기의 가격 변화가 연료 간 대체에 기여하는 정도를 살펴보고, 연료의 수요와 대체에 따른 CO₂ 배출량 변화를 추정하였다.

분석 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 수송부문의 역할 확대를 통해 총 연료 소비량이 증가할 경우 경유 수요를 탄력적으로 변화시키는데, 이는 수송부문이 경유에 대한

의존도가 매우 높음을 보여준다. 둘째, 전기를 제외한 연료별 자체가격탄력성은 모두 음(-)의 값을 보였으며, 경유의 자체가격탄력성은 휘발유와 LPG에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 셋째, 휘발유와 경유, 휘발유와 전기, 경유와 LPG는 대체관계를 보였으며, 경유와 전기는 보완관계를 보였다. 넷째, 연료 간 대체로 인해 경유와 LPG 가격 상승(혹은 하락)은 CO₂ 배출량을 감소(혹은 증가)시키지만, 휘발유와 전기가격 상승(혹은 하락)은 CO₂ 배출량을 증가(혹은 감소)시키는 것으로 나타났다.

본 연구는 연료별 가격 변화에 따른 연료 간 대체성이 CO₂ 배출량을 결정하는 데 중요한 요인임을 확인했다. 즉 연료별 가격 변화에 따라 연료의 수요와 대체에 차이가 발생하기 때문에 CO₂ 배출량이 기대와 다를 수 있다. 이는 바이오디젤의 혼소가 CO₂ 배출량 변화에 미치는 영향을 추정할 때, 바이오디젤 수요의 변화뿐만 아니라, 그 외 연료 간의 대체를 고려해야 함을 의미한다. 특히 바이오디젤의 경우 최종 재화인 경유에 대한 수요가 변함에 따라 CO₂ 감축에 상이한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구는 연료 수요를 결정하는 요인 중 연료별 가격 변화만을 고려하여 CO₂ 배출량을 추정했다는 점에서 한계가 있으나, 에너지 및 환경 정책 수립 시에 부문별 연료 수요 반응 및 대체성을 고려해야 한다는 점에서 시사점을 찾을 수 있다.

[References]

- 에너지경제연구원, 「에너지통계연보」, 국가에너지통계종합정보시스템, 2021.
「에너지법 시행규칙」 제5조[별표], 국가법령정보센터, 2013.03.23.
온실가스종합정보센터, 「2021년 국가온실가스 인벤토리」, 온실가스종합정보센터, 2022.
조철근·정준환, 「국내 수송용 연료 수요의 가격 및 교차탄력성 추정에 관한 연구」, 에너지경제연구원, 2017.
Alves, D. C., and R. D. L. da Silveira Bueno, “Short-run, long-run and cross elasticities of gasoline demand in Brazil,” *Energy Economics*, Vol. 25, No. 2, 2003, pp. 191~199.
Anderson, S. T., “The Demand for Ethanol as a Gasoline Substitute,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp. 151~168.

- Barten, A. P., “Consumer demand functions under conditions of almost additive preferences,” *Econometrica*, Vol. 32, 1964, pp. 1~38.
- Bjørner, T. B., and H. H. Jensen, “Interfuel substitution within industrial companies: an analysis based on panel data at company level,” *The Energy Journal*, Vol. 23, 2002, pp. 27~50.
- Cardoso, L. C., M. V. Bittencourt, W. H. Litt, and E. G. Irwin, “Biofuels policies and fuel demand elasticities in Brazil,” *Energy Policy*, Vol. 128, 2019, pp. 296~305.
- Clements, K. W., and G. Gao, “The Rotterdam demand model half a century on,” *Economic Modelling*, Vol. 49, 2015, pp. 91~103.
- De Freitas, L. C., and S. Kaneko, “Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil,” *Energy Economics*, Vol. 33, No. 6, 2011, pp. 1146~1154.
- Fuss, M. A., “The demand for energy in Canadian manufacturing: An example of the estimation of production structures with many inputs,” *Journal of Econometrics*, Vol. 5, No. 1, 1977, pp. 89~116.
- Halvorsen, R., “Energy substitution in U.S. manufacturing,” *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 59, 1977, pp. 381~388.
- Hochman, G., and G. R. Timilsina, “Fuel efficiency versus fuel substitution in the transport sector,” *Policy Research Working Paper*, 2017, p. 8070.
- Hossain, A. N., and A. Serletis, “Biofuel substitution in the US transportation sector,” *The Journal of Economic Asymmetries*, Vol. 22, 2020, e00161.
- IPCC, 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006.
- Jones, C. T., “A dynamic analysis of interfuel substitution in U.S. industrial energy demand,” *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol. 13, 1995, pp. 459~465.
- Jones, C. T., “The role of biomass in US industrial interfuel substitution,” *Energy Policy*, Vol. 69, 2014, pp. 122~126.
- Macedo, I. C., J. E. Seabra, and J. E. Silva, “Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020,” *Biomass and Bioenergy*, Vol. 32, No. 7, 2008, pp. 582~595.
- Pindyck, R. S., “Interfuel substitution and the industrial demand for energy: an international comparison,” *The Review of Economics and Statistics*, 1979a, pp. 169~179.

- Pindyck, R. S., *The structure of world energy demand*. MIT Press Books, 1979b.
- Santos, G. F., “Fuel demand in Brazil in a dynamic panel data approach,” *Energy Economics*, Vol. 36, 2013, pp. 229~240.
- Serletis, A., G. R. Timilsina, and O. Vasetsky, “International evidence on sectoral interfuel substitution,” *The Energy Journal*, Vol. 31, No. 4, 2010, pp. 1~29.
- Solarin, S. A., and M. O. Bello, “Interfuel substitution, biomass consumption, economic growth, and sustainable development: evidence from Brazil,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 211, 2019, pp. 1357~1366.
- Stern, D. I., “Interfuel substitution: a meta-analysis,” *Journal of Economic Surveys*, 2012, Vol. 26, pp. 307~331.
- Suh, D. H., “Interfuel substitution and biomass use in the US industrial sector: a differential approach,” *Energy*, Vol. 102, 2016, pp. 24~30.
- Suh, D. H., “Interfuel substitution effects of biofuel use on carbon dioxide emissions: evidence from the transportation sector,” *Applied Economics*, Vol. 51, No. 31, 2019, pp. 3413~3422.
- Szklo, A., R. Schaeffer, and F. Delgado, “Can one say ethanol is a real threat to gasoline?” *Energy Policy*, Vol. 35, No. 11, 2007, pp. 5411~5421.
- Theil, H., “The information approach to demand analysis,” *Econometrica*, Vol. 33, 1965, pp. 67~87.
- Xie, C., and A. D. Hawkes, “Estimation of inter-fuel substitution possibilities in China's transport industry using ridge regression,” *Energy*, Vol. 88, 2015, pp. 260~267.

[부록]

〈부록 표 1〉 추정결과와 선행연구 비교

연구	국가/부문/기간	분석자료	탄력성 추정결과
Fuss (1977)	캐나다/ 제조업/ 1961-1971	노동, 자본, 원료, 에너지(석탄, LPG, 연료유, 천연가스, 전기, 휘발유)	자체가격탄력성: LPG(-2.39)/전기(-0.52) 교차가격탄력성: 휘발유-석탄(-0.05)/ 휘발유-연료유(-0.05)/천연가스-석탄(0.85)/전기- 휘발유(0.96)
Halvorsen (1977)	미국/ 산업부문/ 1971	전기, 석유, 천연가스, 석탄	자체가격탄력성: 전기(-0.66)/석유(-2.75)/ 천연가스(-1.32)/석탄(-1.46) 교차가격탄력성: 전기-석탄(0.09)~석탄-석유(0.74)
Pindyck (1979a)	10개 선진국/ 산업부문/ 1959-1973	노동, 자본, 원료, 에너지(석탄, 천연가스, 전기, 석유)	자체가격탄력성: 석탄(-2.17)/석유(-1.10)/ 천연가스(-0.52)/전기(-0.08) 교차가격탄력성: 전기-석탄(-0.06)/전기-석유(0.11)/ 전기-천연가스(-0.03)
Jones (1995)	미국/ 산업부문/ 1960-1992	석유제품, 천연가스, 석탄, 전기	장기 자체가격탄력성: 석탄(-0.803)/전기(-0.201)/ 천연가스(-0.326) 장기교차가격탄력성: 석탄-전기(0.675)/전기-석탄 (0.077)/전기-가스(0.163)/가스-전기(0.277)
Serletis et al. (2010)	15개국/ 주거, 산업, 발전, 수송부문/ 1980-2006	석유(원유, 휘발유, 경유), 천연가스, 석탄, 전기	자체가격탄력성: 원유(-2.014)/전기(-0.115)/경유 (-0.005)/휘발유(-0.005) 교차가격탄력성: 원유-전기(7.090)/원유-경유 (14.517)/원유-휘발유(-23.523)/휘발유-경유(0.0 08)/경유-휘발유(0.012)
Santos (2013)	브라질/ 수송부문/ 2001-2010	휘발유, 에탄올, CNG	장기 자체가격탄력성: 휘발유(-1.186), 에탄올(-8.465), CNG(-1.034) 장기 교차가격탄력성: 에탄올-휘발유(7.991)/ 에탄올-CNG(0.664)/휘발유-에탄올(0.293)
Suh (2016)	미국/ 산업부문/ 1970-2010	석탄, 천연가스, 석유제품, 전기, 바이오매스	자체가격탄력성: 석탄(-0.352)/천연가스(-0.195)/ 석유(-0.102)/전기(-0.111)/바이오매스(-0.068) 교차가격탄력성: 바이오매스-석탄(0.126)/ 바이오매스-천연가스(0.124)/바이오매스-전기(- 0.156)
Suh (2019)	미국/ 수송부문/ 1993-2015	석유, 천연가스, 에탄올, 휘발유	장기 자체가격탄력성: 석유(-0.102)/에탄올(-0.872) 장기 교차가격탄력성: 석유-에탄올(0.102)/ 에탄올-석유(0.872)
Bjørner and Jensen (2002)	덴마크/ 산업부문/ 1983-1997	전기, 연료(난방유, 천연가스, 석탄, LPG)	자체가격탄력성: -0.04~0.13 대체가격탄력성: 전기-연료(-0.44~0.50)