LMDI 분해 분석을 이용한 국내 철도 노선별 온실가스 배출 특성 분석

LMDI Decomposition Analysis on Characteristics of Greenhouse Gas Emission from the Line of Railroad in Korea

이재형^{1†} · 임지재¹ · 김용기² · 이재영³

Jae-Hyung Lee · Jee-Jae Lim · Yong-Ki Kim · Jae-Young Lee

Abstract Korean government is enforcing 'Greenhouse gas target management' in order to achieve Greenhouse gas reduction target. To attain Greenhouse gas reduction target, companies in Korea must establish their GHG inventory system and analysis their GHG emissions characteristics for deduction of mitigation measures. LMDI(Log Mean Divisia Index) decomposition analysis is widely used to understand characteristics of GHG emission and energy consumption. In this paper, the characteristics of GHG emission from the line of railroad in Korea is respectively analyzed in terms of conversion effect, intensity effect, production effect and distance effect. Data of railroad GHG emission from 2000 to 2007 are used. As a result, total effect of railroad's GHG emission is 96,813tCO₂eq. Production effect (39,865tCO₂eq) and distance effect (327,923tCO₂eq) affect increase of railroad GHG emissions while Conversion effect (-158,161tCO₂eq) and intensity effect (-112,814tCO₂eq) influence decrease of the emissions.

Keywords : Climate Change, Decomposition Analysis, Log-Mean Divisia Index(LMDI), Railroad

초 록 국가의 온실가스 감축목표를 달성하기 위한 방안으로 온실가스·목표관리제를 시행하고 있다. 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 온실가스 인벤토리가 구축되어야 하며, 효과적인 온실가스 감축 수단을 도출하기 위해서는 온실가스 배출 특성을 분석해야 한다. 국내외에서는 온실가스 배출 및 에너지 사용 특성을 분석하기 위한 방법론으로 로그평균디비지아지수(LMDI: Log Mean Divisia Index) 분석 기법이 자주 사용되고 있다. 본 논문에서는 온실가스 배출특성을 LMDI 분석 방법론을 통해 전환효과, 원단위효과, 생산효과, 거리효과 등의 4가지 요인으로 나누어 분석하였다. 분석 대상은 한국철도공사가 관리하는 광역철도 및 도시철도를 대상으로 하였으며, 자료의 분석 기간은 2000년부터 2007년까지로 설정하였다. 분해분석결과 2000년과 2007년 사이의 철도 수송에 따른 온실가스 배출량의 총효과는 96,813톤CO₂eq으로 나타났다. 철도 수송에 따른 온실가스 배출량 증가에 영향을 미치는 효과는 생산효과와 거리효과로 나타났으며, 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 효과는 전환효과와 원단위효과로 나타났다.

주요어 : 기후변화, 분해분석, 로그평균 디비지아지수(LMDI), 철도

1. 서 론

우리나라는 기후변화협약에 대비하기 위하여 국가 온실가스 감축목표를 2020년 BAU 대비 30% 감축으로 선언하였으며, 이를 뒷받침하기 위한 수단으로서 녹색성장 기본법이 2010년 4월 14일 발효되었다.

국가 및 철도 수송 부문의 온실가스 배출량을 감소하기 위한 방안으로 2010년 9월부터 온실가스에너지 목표관리제(이하 '목표관리제')가 시행되고 있으며, 이에 의해 온실가스를

의무적으로 감축해야만 하는 관리업체로 철도부문에서는 한국철도공사 등 6개 업체가 지정되었다. 2011년 7월 온실가스·에너지 관리업체의 감축목표를 장기적으로 이행하기 위한 방안으로 부문별·업종별 온실가스 감축목표가 설정되었으며, 철도 부문이 포함된 수송분야에서는 2020년 BAU 대비 34.3%를 줄여야만 한다.

일반적으로 온실가스 배출량을 줄이기 위해서는 연도별, 부문별 배출량을 파악할 수 있는 온실가스 인벤토리가 구축되어야 하며, 효과적인 온실가스 감축 수단을 도출하기 위해서는 연도별, 부문별 온실가스 배출 특성을 분석하여야만 한다. 기존의 철도부문의 연구는 철도차량 부문 온실가스 배출량 산정([1]), 지자체별 간선철도 대상 온실가스 배출량 산정([2]), 철도건설단계의 온실가스 배출량 산정([3]), 배출계수 개발 및 모니터링 시스템 개발([4]) 등의 연구가 진행되

[†]교신저자 : 카이트엔지니어링 환경리스크팀
E-mail : for385@hanmail.net

¹카이트엔지니어링 환경리스크팀

²한국철도기술연구원 융복합연구단

³한국철도기술연구원 에코시스템연구실

었다. 하지만, 기존 연구는 온실가스 배출량 산정 및 배출 계수 개발 등의 연구였고 배출 특성에 기반한 연구는 진행되지 않았다.

에너지 소비나 온실가스 배출특성을 분석하기 위한 방안으로 에너지 소비 변화에 영향을 주는 개별 요소들의 효과를 분해분석하는 방법론으로 로그평균디비지아지수(LMDI: Log Mean Divisia Index) 분석 기법이 자주 사용되고 있다. LMDI 분석 방법론은 온실가스 배출량 및 에너지 소비 특성을 분석하는 방법론으로써 분해 과정에서 디비지아 지수와 로그평균가중치를 사용하고, 다른 분해 분석 방법론에 비해서 이론적인 기초와 적용 가능성 및 편리성 등의 뛰어난 특징을 가진 것으로 여겨진다[5].

최근 LMDI 분해분석 방법론을 이용하여 에너지 소비나 온실가스 배출특성에 대한 연구가 활발히 진행(Kaivo-oja와 Luukkanen[6], Ang[7], Oh[8], Liu[9])되고 있다. 특히 Kwon[10]는 영국의 차량(car travel), Papagiannaki[11]는 그리스와 덴마크의 승용차(passenger cars), Mendiluce[12]는 스페인의 승용 및 화물 수송(passenger transport and freight)에 대해 분해분석을 하였다.

Jin와 Hwang[13]의 연구에서는 LMDI 요인분해 분석을 통해 국내 광역지자체의 온실가스 배출특성을 분석하였다. 분석대상으로는 우리나라 16개 광역지자체를 대상으로 하여 1997년부터 2006년까지 지자체 온실가스 배출량에 영향을 미치는 요인을 배출계수효과, 연료전환효과, 원단위효과, 생산효과, 인구효과로 분해하여 분석하였다.

Kim와 Kim[14]인 연구에서는 Ang[2]에서 제시하고 있는 주요 에너지 요인분해 분석을 검토한 후 국내 제조업에 대한 LMDI 요인분해 분석을 하였다. 분석대상으로는 국내 제조업으로 한정하여 1991년부터 2007년까지 제조업 에너지 소비에 영향을 미치는 요인을 생산효과, 구조효과, 집약도효과로 분해하여 분석하였다.

Lee와 Han[15]의 연구에서는 운수부문에 대하여 에너지 소비와 집약도 변화에 대해서 요인분해 분석을 하였다. 분석대상으로는 육상운송업, 철도운송업, 수상운송업, 항공운송업, 운수관련 서비스업을 대상으로 하여 2001, 2004년 그리고 2007년 자료를 바탕으로 운수부문 에너지 소비에 영향을 미치는 요인을 구조효과(structural effect), 생산기술효과(production technological effect), 에너지 기술효과(energy technological effect)로 분해하여 분석하였다.

본 연구에서는 국내 철도산업을 대상으로 LMDI 분해분석 방법론을 통해 국내 철도 부문의 온실가스 배출특성을 도출하였다. 이는 LMDI 분해분석 방법론을 적용하여 국내 철도 부문 온실가스 감축 정책을 개발하는 데 시사점을 줄 수 있다는데 그 의미가 있다. 본 논문에서는 철도부문의 온실가스 배출량 변동 특성을 LMDI 분석 방법론을 통해 전환효과, 원단위효과, 생산효과, 거리효과 등의 4가지 요인으로 나누어 분석하였다. 분석 대상은 자료 구축 용이성과 철도 부문 온실가스 배출기여도를 감안하여 한국철도공사가 관리하는 간선철도 및 광역철도를 대상으로 2000년부터 2007년까지를 분석기간으로 설정하여 분해분석을 하였다.

2. 방법론 및 분석자료

2.1 지수분해분석 방법론

본 논문에서는 철도부문의 노선별 온실가스 배출량 변화 요인을 분석하기 위하여 LMDI 방법론을 사용하여 전환효과(conversion effect), 원단위효과(intensity effect), 생산효과(production effect), 거리효과(distance effect)로 분류하였다. 전환효과(V_{eff})는 전철화 확대에 따라 전기로의 연료 전환이 배출계수 변동에 미치는 영향을 의미하며[12], 원단위효과(I_{eff})는 단위 수입을 얻기 위한 에너지 집약도 변화가 미치는 효과로서 효율적인 에너지 소비의 척도를 의미한다. 생산효과(E_{eff})는 단위 수송거리에 따른 수입효율성 효과로써 노선별 수익률 개선 및 변경에 따른 온실가스 배출량 변화를 의미하며, 거리효과(C_{eff})는 항공 및 도로 수송에서 철도 수송으로의 모달시프트(modal-shift)가 철도부문의 온실가스 배출량에 영향을 미치는 효과를 의미한다.

본 논문에서 사용된 노선별 온실가스 배출특성을 분석하기 위한 분해방정식은 식 (1)과 같다. 이는 노선별 온실가스 배출량을 온실가스 배출계수(V , 톤 CO_2eq/TOE), 에너지 집약도(I , $TOE/원$), 수입집약도(E , $원/km$)와 차량운행거리(C , km)의 곱으로 나타낸 것이다. 이때 방정식에 사용한 기호의 의미는 Table 1과 같다.

$$GHG = \frac{GHG}{FEC} \times \frac{FEC}{REV} \times \frac{REV}{CAR} \times CAR = V \times I \times E \times C \quad (1)$$

Table 1 Definition of terms

기호	의미	단위
GHG	온실가스 배출량 (Greenhouse-gas Emission)	톤 CO_2eq
FEC	최종에너지소비 (Final Energy Consumption)	TOE
REV	선별운수수입 (Traffic Revenue by Line)	원
CAR, C	선별 차량키로 (Car-km by Line)	km
V	전환효과 : 에너지원 전환에 따른 온실가스 배출계수 변동	톤 CO_2eq/TOE
I	원단위효과 : 단위 수입에 따른 에너지 집약도	TOE/원
E	생산효과 : 단위 수송 거리에 따른 수입 효율성	원/km

식 (1)을 구성하는 요소들이 시간에 따라 변하는 함수라 가정하고 각 요소들을 시간에 대해 미분하면, 시간에 따른 노선별 온실가스 배출량 변화율은 배출계수 변화(V), 에너지 집약도(I), 수입집약도(E), 운행거리(C)의 변화율의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{GHG} \frac{dGHG}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

또한, 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \ln GHG = \frac{dV}{dt} \ln V + \frac{dI}{dt} \ln I + \frac{dE}{dt} \ln E + \frac{dC}{dt} \ln C \quad (3)$$

식 (3)를 기준연도(0, 2000년)와 종료연도(t, 2007년) 사이의 시간으로 적분하면, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 지수 분해분석의 LMDI 분해분석에서는 로그평균을 가중치로 사용하여 적분하게 된다. 로그평균을 가중치로 이용한 분해공식 결과는 다음 식 (4)와 같다.

$$\ln \frac{GHG(t)}{GHG(0)} = \ln \frac{V(t)}{V(0)} + \ln \frac{I(t)}{I(0)} + \ln \frac{E(t)}{E(0)} + \ln \frac{C(t)}{C(0)} \quad (4)$$

식 (4)의 양변에 $\frac{GHG(t)/GHG(0)}{\ln(GHG(t)/GHG(0))}$ 를

곱하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} GHG(t) - GHG(0) &= \frac{GHG(t)/GHG(0)}{\ln[GHG(t)/GHG(0)]} \times \ln \frac{V(t)}{V(0)} \\ &\quad + \frac{GHG(t)/GHG(0)}{\ln[GHG(t)/GHG(0)]} \times \ln \frac{I(t)}{I(0)} \\ &\quad + \frac{GHG(t)/GHG(0)}{\ln[GHG(t)/GHG(0)]} \times \ln \frac{E(t)}{E(0)} \\ &\quad + \frac{GHG(t)/GHG(0)}{\ln[GHG(t)/GHG(0)]} \times \ln \frac{C(t)}{C(0)} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 구성하는 각 요소들이 노선별 온실가스 배출량 변화에 미치는 효과는 식 (6)와 같은 방식으로 계산된다. 식 (6)에서 (t)와 (0)은 노선별 온실가스 배출량을 분석하기 위한 종료 년과 기준 년을 나타내는 것이며, X는 식 (6)에서의 V, I, E, C를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta GHG &= GHG(t) - GHG(0) = V_{eff} + I_{eff} + E_{eff} + C_{eff} \\ X_{eff} &= \sum_j \frac{GHG(t) - GHG(0)}{\ln[GHG_j(t)/GHG_j(0)]} \times \ln \frac{X(t)}{X(0)} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 통하여 도출된 각 요소별 X_{eff} 값은 노선별 종료 년과 기준 년 사이에 온실가스 배출량 변화에 영향을 미친 전환효과(V_{eff}), 원단위효과(I_{eff}), 생산효과(E_{eff}), 거리효과(C_{eff})의 크기를 나타낸다. X_{eff} 값이 양의 값이 나오면 각 요소가 노선별 온실가스 배출량을 증가시키는 방향으로 영향을 주었음을 나타내고, X_{eff} 의 값이 음의 값이 나오면 각 요소가 노선별 온실가스 배출량을 감소시키는 방향으로 영향을 주었음을 나타내고 있다.

2.2 분석자료

분해분석에 사용된 자료는 Table 2와 같으며, 분석대상은 전국에 있는 철도 노선이다. 철도통계연보에서 획득할 수 있는 자료의 특성상 에너지 소비, 선별운수수입실적, 선별 차량 수송 거리 데이터가 모두 존재하는 노선을 ‘개별노선’으로 분류하였으며, 그렇지 아니한 경우에는 ‘기타노선’으로 분류하였다[16]. 분해분석에 사용된 시간적 범위는 2000년에

Table 2 Data and data sources

자료 목록	자료원	비고
에너지 소비 (디젤, 전력)	철도통계연보 (2000~2007)	석유환산톤(TOE)
선별운수수입실적	철도통계연보 (2000~2007)	2000년 기준 불변가격
선별 차량 수송 거리	철도통계연보 (2000~2007)	

서 2007년 자료를 이용하였다. 하지만 경부고속선은 2004년부터 개통하여 통계연보의 통계가 2004년부터 존재하기에 2004년부터 2007년 값을 이용하여 분석하였다. 광주선은 통계연보의 통계가 2001년부터 통계가 존재하기에 2001년부터 2007년 값을 이용하여 분석하였다[16].

철도 수송에 따른 디젤 소비량은 2000년 3억 2719천L에서 2007년 2억 2343천L로 31.7% 감소하였으며, 전력 소비량은 2000년 950,605Mwh에서 2007년 1,761,992Mwh로 85.4% 증가한 것으로 나타났다. 이는 기존 노선의 전철화에 따라 디젤 소비량이 감소하지만 반대로 전력 소비량이 증가함에 따른 결과이다.

선별운수수입실적은 ‘철도통계연보’에서 제시하고 있는 여객 및 화물 수송을 포함한 수입을 기준으로 이용하였으며, 통계청의 소비자 물가 상승율을 고려하여 선별운수수입실적을 2000년 불변가격 기준으로 다시 작성하였다. 소비자 물가 상승율을 고려한 선별운수수입실적은 2000년 기준 선별

Fig. 1 Trend of diesel uses

Fig. 2 Trend of electricity uses

Fig. 3 Trend of traffic revenue

Fig. 4 Trend of car-km

운수수입실적은 1조 4575억원 규모에서 2007년 1조 8872억원으로 29.5% 증가하였다.

선별차량운행키로는 ‘철도통계연보’에서 제시하고 있는 선별방향별차량키로를 이용하였다. 선별차량운행키로는 2004년 경부고속선 개통에 따라 급격히 늘어난 이후 안정적인 추세를 보이고 있다. 2000년 기준 선별차량운행키로는 9억 5065만km에서 2007년 11억 9694km로 25.9% 증가하였다[16].

2.3 온실가스 배출량 산정방법

본 논문에서 LMDI 분해분석을 시행하는 온실가스 배출원은 화물 수송 및 여객 수송시 디젤 및 전력을 이용하는 이동연소 시설인 열차(디젤기관차, 디젤동차, 특수차량, 고속차량, 전기기관차, 전기동차 등)에 국한되며 철도 운영 시설 같은 배출원은 제외하였다. 활동자료는 철도 수송시에 열차에서 사용하는 노선별 디젤사용량 및 전력사용량을 이용하였다.

철도 수송시 디젤 사용에 따른 직접 온실가스 배출량 산정방법은 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침(이하 ‘목표관리제 지침’)에서 [별표 14]에서 규정하고 있는 ‘배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정 방법 및 기준’의 철도부문 이동연소 온실가스 배출량 산정방법인 식 (7)을 이용하였다[17].

$$E_{i,j} = \sum (Q_i \times EC_i \times EF_{ij} \times E_{eq,j} \times 10^{-9}) \quad (7)$$

$E_{i,j}$: 연료 종류 (i)의 사용에 따른 온실가스(j)의 배출량($\text{CO}_2\text{-eq ton}$)

Q_i : 연료 종류 (i)의 연료소비량(L)

EC_i : 연료 종류 (i)의 순발열량(MJ/L-연료)

EF_{ij} : 연료 종류 (i)에 대한 온실가스(j)의 배출계수(kg/TJ)

$E_{eq,i}$: 온실가스 (i)의 CO_2 등가계수(GWP)($\text{CO}_2 = 1, \text{CH}_4 = 21, \text{N}_2\text{O} = 310$)

i : 연료 종류

디젤사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 연료사용량은 열량(TJ) 단위로 변환하여야 한다. 이동연소부문에서 연료사용량을 열량(TJ) 단위로 전환하기 위해 사용한 순발열량은 목표관리제 지침 [별표 19]에서 적용하고 있는 ‘연료별 국가 고유 발열량’을 사용하였으며, 온실가스 배출계수(Emission Factor)는 목표관리제 지침 [별표 14]에서 규정하고 있는 ‘철도부문 기본 배출계수’를 2000~2007년까지 동일하게 적용하였다[17].

철도 수송시 전력 사용에 따른 간접 온실가스 배출량 산정방법은 목표관리제 지침 [별표 14]에서 규정하고 있는 ‘외부에서 공급된 전기 사용’에 따른 온실가스 배출량 산정방법인 식 (8)을 이용하였다.

노선별 전력 소비량은 철도통계연보의 노선별 전력 소비량 자료를 사용하였으며, 전력 배출계수는 목표관리제 지침에서 규정하고 있는 전력 배출계수를 적용하였다. 하지만 목표관리제 특성상 2005년부터 2008년까지만 배출계수가 규정되었기에 2000년부터 2004년까지는 2005년과 동일한 값을 적용하였다[17,18].

$$E_{i,j} = \sum_i (Q_i \times EF \times F_{eq,j}) \quad (8)$$

$E_{i,j}$: 전력사용에 따른 온실가스 배출량($\text{CO}_2\text{-eq ton}$)

Q : 외부에서 공급받은 전력 사용량(MWh)

EF_j : 전력 간접배출계수(tGHG/MWh)

$F_{eq,j}$: 온실가스 (i)의 CO_2 등가계수(GWP)($\text{CO}_2 = 1, \text{CH}_4 = 21, \text{N}_2\text{O} = 310$)

j : 배출 온실가스 종류

지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)의 경우 목표관리제 지침에서 정의하고 있는 현재 우리나라 국가 인벤토리에 적용된 지구온난화지수를 반영하기 위하여 목표관리제 지침에서 제시하고 있는 지구온난화지수를 적용하였다[17].

에너지 소비량은 디젤 소비량과 전력 사용량으로 구성되어 있다. 에너지 소비량과 디젤 소비량과 전력 사용량을 에너지 단위(TOE)로 통일하기 위해서 IPCC에서 제시하고 있는 탄소 배출 계수(CEF, Carbon Emission Factor)를 사용하여 전환하였다[19].

3. 분해분석결과

3.1 노선별 분해분석 결과

Fig. 5와 Fig. 6은 2000년부터 2007년 사이의 온실가스 배출량 변화요인 분해분석 결과이다. 2000년과 2007년 사이의 철도 수송에 따른 온실가스 배출량의 총효과는 96,813톤 CO₂eq으로 나타났다. 온실가스 배출량 증가에 영향을 미치는 효과는 생산효과(39,865톤 CO₂eq)와 거리 효과(327,923톤 CO₂eq)로 나타났으며, 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 효과는 전환효과(-158,161톤 CO₂eq), 원단위효과(-112,814톤 CO₂eq)였다(Fig 5-6).

철도 수송 부문에서 배출하는 전체 온실가스 배출량은 96,813톤 CO₂eq은 늘어났지만, 이는 화물 및 여객 수송 증가에 따른 수송분담률 증가에 따른 결과이다. 2004년 이후 철도 수송의 온실가스 배출량이 증가하였는데, 이는 여객수송이 2000년 814,472천명에서 2004년 989,294천명으로 21.5% 증가하였기 때문이다. 전환효과도 2004년부터 철도 수송의 온실가스 감소에 영향을 미치기 시작했으며, 원단위효과가 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 에너지 집약도가 2000년 0.3198TOE/백만원에서 2007년 0.2954TOE/백만원으로 7.6% 감소된 결과이다.

Table 3 Net calorific value of diesel

연료	단위	순발열량
디젤	MJ/L	37.9

Table 4 Emission factor of diesel

연료	온실가스	단위	배출계수
디젤	CO ₂	kgCO ₂ /TJ	74,000
	CH ₄	kgCH ₄ /TJ	4.15
	N ₂ O	kgN ₂ O/TJ	28.6

Table 5 Emission factor of electricity generation

온실가스	단위	2005	2006	2007
CO ₂	tCO ₂ /MWh	0.4354	0.4411	0.4623
CH ₄	kgCH ₄ /MWh	0.0054	0.0054	0.0056
N ₂ O	kgN ₂ O/MWh	0.0027	0.0027	0.0028

주 1. 2000~2004년 값은 2005년과 동일하게 적용함

Table 6 Global Warming Potential

온실가스	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
GWP	1	21	310

Table 7 IPCC Carbon emission factor

연료	탄소배출계수	
디젤	20.20 kg C/GJ	0.837 tC/TOE
전력	0.215 TOE/MWh

Fig. 5 Result of decomposition analysis

Fig. 6 Trend of decomposition analysis result

3.2 요소별 분해분석 결과

앞서 살펴본 것과 같이 철도부문의 온실가스 배출량 변화요인의 분해분석 결과 수송분담률 증가 및 운송 횟수 증가에 따른 거리효과가 철도부문 온실가스 배출량 증가에 지대한 영향을 끼친 것으로 나타났다. 이는 철도 부문 전체에 해당되는 값으로 본 절에서는 요소별 분해분석 결과 노선별로 살펴보았다.

전환효과(conversion effect)는 단위 에너지 소비에 따른 온실가스 배출량 변화를 반영하는 것으로, 전철화 길이 확대에 따라 디젤동차가 전기동차로 전환되는 것에 기인한다. 전철화 길이를 보면 2000년 전철화 노선의 길이는 668.7km였으나, 2007년 1,817.8km로 전철화 구간이 2.72배 증가하였다[16]. 결과적으로 전철화 길이 확대에 따라 전환효과 발생하여 경부선과 호남선의 온실가스 배출량 감소에 영향을 미쳤다(Fig. 7).

2004년부터 경부선과 호남선은 노선의 전철화가 확대되어 디젤소비량이 감소되고 전력소비량이 증가되는 경향을 보였다. 이는 전철화의 효과를 반영한 것으로서 향후 다른 노선도 전철화를 확대하면 한국철도공사의 온실가스 감축을 효과적으로 유도할 것이라 판단된다. 또한, 2004년 이후 개통된 경부고속선은 전력을 에너지원으로 사용하는 노선이지만, Table 5에서 보는 바와 같이 전력배출계수가 2005년 436gCO₂/kwh에서 2007년 463gCO₂/kwh로 7%정도 변동됨에 따라 전환효과가 온실가스 배출량에 영향을 주는 것으로 나타났다

Fig. 7 Result of conversion effect(V)

Fig. 8 Track electrified by year

(Fig. 8).

원단위효과(intensity effect)는 노선별 운수수입과 최종에너지 소비의 관계로서 단위 수입을 얻기 위해서 최종에너지가 얼마나 효율적으로 사용되고 있는지를 나타낸다. 다른 노선과 달리 경부선은 원단위효과의 의해 온실가스 배출량이 2004년부터 급격하게 늘어났다. 경부선의 단위 수입당 에너지 소비량이 증가하였기 때문으로, 운행키로는 유사함에도 수송율이 낮아져 운수수입이 감소되기 때문이다. 이는 에너지 소비량이 많고 수입의 많은 부분을 차지하는 경부선의 운영이 효과적으로 되지 못함을 의미한다(Fig. 9-10).

생산효과(production effect)는 단위 운행거리 운행에 수입의 변화를 반영하는 것으로서 2004년 KTX의 개통 이후 경부선의 수입이 급격히 감소되었다. KTX의 운행거리당수입이 2004년 2,546원/km에서 2007년 2,879원/km로 13.1% 증가되었음에 반하여 경부선은 2004년 1,195원/km에서 2007년 800원/km로 33.1% 악화되었다. 이는 철도의 특성상 수송율이 100%가 아니라 하더라도 배차시간에 맞춰 운행해야 하기에 평균 수송율이 감소될 경우 운행거리당수입 악화에 영향을 미칠것으로 판단한다(Fig. 11-12).

거리효과(distance effect)는 여객 및 화물 수송 거리의 증가가 온실가스 배출량 변화에 미치는 영향으로 철도키로가 2000년 3,123천km에서 2007년 3,399천km로 증가되었기 때문이다. 여객수송이 2000년 814,472천명에서 2004년 989,294천명으로 21.5% 증가하였으며, 화물수송이 45,240천톤에서

Fig. 9 Result of intensity effect(I)

Fig. 10 Revenue intensity trend by year

Fig. 11 Result of production effect(E)

2007년 44,530천톤으로 1.6% 감소됨에 따라 도로 및 항공 수송량이 철도로 전환되고 있음을 증명한다. 경부고속선은 2004년 개통으로 수송 거리가 2004년 1억 4896만km에서 2억 3231만km로 55.9% 정도, 호남선은 2000년 7090만km로 약 85.3% 정도 증가한 것에 기인한다. 이에 반하여 경부선은 2007년 기준 2000년 대비 0.8% 증가하는데 그쳤으며, 중앙선은 청량리에서 경주간의 총 운행거리가 2007년 기준 2000년 대비 22.2% 감소함에 따라 거리효과가 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 요소로 분석되었다(Fig. 13-14).

Fig. 12 Distance intensity trend by year

Fig. 13 Result of distance effect

Fig. 14 Growth of traffic by year

4. 결 론

노선별 분해분석결과 철도 수송에 따른 온실가스 배출량은 증가하는 것으로 나타났으며, 철도부문의 온실가스 배출량 증가에 영향을 미치는 요소는 거리효과와 생산효과로 분석되었으며, 철도부문 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 요소는 전환효과와 원단위효과로 분석되었다.

본 논문은 LMDI 분석 방법론을 통해 철도부문의 온실가스 배출량에 영향을 미치는 인자를 도출하여 온실가스·에

너지 목표관리제 관리업체인 한국철도공사의 온실 가스 배출량 감축 방향에 정책적 함의를 제공해 줄 수 있다. 전환 효과 분석 결과 전철화에 따른 온실가스 감축 효과를 판단할 수 있었으며, 향후 한국철도공사는 계획중인 신규 노선 및 기존 노선의 전철화를 확대하여 국가 철도전철망 골격 형성을 위한 전기철도 Network 구축, 고속철도와 기존철도 통합 연계운영, 디젤동차의 전기동차로의 전환을 적극적으로 추진해야 한다.

원단위효과 분석을 통해 에너지 집약도가 낮은 노선의 효율화가 필요함을 보였다. 노후화된 동차의 운영 조정, 전기동차 이용증대, 운임의 탄력적 조정 등의 에너지 소비 감소를 위한 정책이 필요하다. 또한, 한국철도공사에서 직선화를 통해 생긴 폐선 및 역사 등의 유휴부지를 활용하여 신재생 에너지를 생산을 통해 원단위 개선을 할 수 있다. 신재생 에너지 확대설치는 원단위효과와 개선 뿐 아니라, 발전소의 RPS 정책과 연계하여 한국철도공사의 수익 증대에 영향을 미칠것이다.

생산효과 분석을 통해 KTX의 수익률 증가와 경부선의 수익률 감소 효과를 보였으며, 한국철도공사의 수익률 제고 측면에서 고속열차가 필수적인 수단임을 증명하였다. 이를 개선하기 위해서는 경부선과 같은 대체 노선의 수송율 제고를 위해 편성수 조정, 배차시간의 탄력적 운영, 선로연장과 객차수의 조절을 통해 효율성을 높여야 한다.

거리효과 분석을 통해 수송량 증가가 온실가스 배출량 증가에 영향을 미치는 주요한 인자로 도출되었다. 이는 한국 철도공사의 비효율적인 운영 때문에 발생한 결과가 아니라, 철도기로 및 여객수송의 증가에 따라 발생한 결과로 도로 및 항공수송의 철도수송으로 모달시프트가 되고 있음을 증명한다. 한국철도공사는 목표관리제 관리업체로서 수송부문의 국가 온실가스 감축목표(2020년 BAU 대비 34.3%) 달성을 위해 감축목표를 할당받았다. 한국철도공사는 목표관리제 이행과 2015년부터 시행되는 배출권거래제에 효과적으로 대응하기 위해 정부와 협상시 모달시프트 효과를 고려한 협상 전략을 수립해야 한다.

본 논문은 자료의 한계로 인하여 철도부문의 온실가스 배출량을 분석하는데 화물수송과 여객수송을 분리하지 못한 한계가 있다. 이는 전력 및 에너지 소비량이 노선별로 화물수송과 여객수송으로 분리되지 않기 때문이다. 향후에 노선별/용도별로 전력 및 에너지 소비량을 관리하는 시스템 구축 시에는 화물수송(톤CO₂eq/톤km)과 여객수송(톤CO₂eq/인km)을 분리하여 분석할 수 있을 것이라 판단된다. 또한, 일률적으로 전환효과, 원단위효과, 생산효과, 거리효과 개선을 위한 노선별 정책을 제시하는 것이 아니라 노선별 공공성 및 수익성을 고려한 정책 의사 결정 체계를 만드는 연구도 필요할 것이다.

후 기

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 ‘철도부문 온실가스 통합관리 기술개발’과제의 연구용역인 ‘철도부문 온실가스

감축잠재량 평가 방법론 연구'의 연구비 지원으로 수행되었음에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J.Y. Lee, W.S. Jung, Y.M. Cho, H.M. Kim (2006) Emission of carbon dioxide from railway in Korea, *The Korean Society For Railway*, 2006 Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2006.5, pp. 1-4.
- [2] J.H. Lee, S.M. Park, J.Y. Lee (2011) Greenhouse gas emission of rail transportation at a local government level, *The Korean Society For Railway*, 2011 Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2011.5, pp. 536-543.
- [3] J.Y. Lee, W.S. Jung, I.H. Hwang, Y.K. Kim (2011) The evaluation of GHG emission in railroad construction sector, *Journal of the Korean Society For Railway*, 14(3), pp. 271-275.
- [4] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) Transport GHG Reduction and Emission Management Technology Development.
- [5] B. Ang (2004) Decomposition analysis for policy making in energy: which is the preferred method?, *Energy Policy*, 32(9), pp. 1131-1139.
- [6] J. Kaivo-oja, J. Luukkanen (2004) The European Union balancing between CO₂ reduction commitments and growth policies: decomposition analyses, *Energy Policy*, 32(16), pp. 1511-1530.
- [7] B. Ang (2005) The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide, *Energy Policy*, 33(7), pp. 867-871.
- [8] I. Oh, W. Wehrmeyer, Y. Mulugetta (2010) Decomposition analysis and mitigation strategies of CO₂ emissions from energy consumption in South Korea, *Energy Policy*, 38(1), pp. 364-377.
- [9] L. Liu, Y. Fan, G. Wang, Y. Wei (2007) Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: An empirical analysis, *Energy Policy*, 35(11), pp. 5892-5900.
- [10] T. Kwon (2005) Decomposition of factors determining the trend of CO₂ emissions from car travel in Great Britain, *Eco-logical Economics*, 53(2), pp. 261-275.
- [11] K. Papagiannaki, D. Diakoulaki (2009) Decomposition analysis of CO₂ emissions from passenger cars: The cases of Greece and Denmark, *Energy Policy*, 37(8), pp. 3259-3267.
- [12] M. Mendiluce, L. Schipper (2011) Trends in passenger transport and freight energy use in Spain, *Energy Policy*, 39(10), pp. 6466-6475.
- [13] S.H. Jin, I.C. Hwang (2009) An index decomposition of local greenhouse gas emission characteristics : Focusing on energy sector, *Environmental Policy*, 17(3), pp. 101-128.
- [14] S.Y. Kim, H.S. Kim (2011) LMDI decomposition analysis for energy consumption of Korea's manufacturing industry, *Korean Energy Economic Review*, 10(1), pp. 49-76.
- [15] J.M. Lee, S.Y. Han (2011) Factor Decomposition Analysis on Energy Consumption and Intensity Changes in Transportation Industry, *Hanguk-gyeongjae-yeongu*, 29(2), pp. 213-241.
- [16] Korea Railroad, Korea Rail Network Authority (2008) Statistical Yearbook of Railroad.
- [17] Ministry of Environment (2011) Greenhouse gas Target Management Guideline.
- [18] Ministry of Environment (2011) Public Institution Greenhouse gas Target Management Guideline.
- [19] Korea Energy Management Corporation New & Renewable Energy Center (2011) New & Renewable Energy Supply Statistics.

접수일(2012년 5월 4일), 수정일(2012년 5월 29일),
게재확정일(2012년 6월 13일)