



## 철도수송부문 온실가스 배출 요인 분해분석

이재형<sup>†</sup>

IBK기업은행 기업고객그룹 과장

## Decomposition Analysis on Greenhouse Gas Emission of Railway Transportation Sector

Lee, Jaehyung<sup>†</sup>

Manager, Corporate Customer Group, Industrial Bank of Korea, Seoul, Korea

### ABSTRACT

In this paper, I analyze the GHG (greenhouse gas) emission factor of the domestic railway transportation sector using the LMDI (Log Mean Divisia Index) methodology. These GHG factors are the emission factor effect, energy intensity effect, transportation intensity effect, and economic activity effect. The analysis period was from 2011 to 2016, and the analysis objects were an intercity railway, wide area railway, and urban railway. The results show that the GHG emission of railway transportation sector decreased during these 6 years. The factors decreasing the GHG emission are the emission factor effect, energy intensity effect, and transportation intensity effect, while the factor increasing the GHG emission is the economic activity effect.

*Key words:* Railway Transportation, Greenhouse Gas Emission, Decomposition Analysis, Log-Mean Divisia Index (LMDI)

### 1. 서 론

우리나라는 기후변화협약에 대비하기 위하여 2010년 4월 「녹색성장기본법」을 수립하였으며, 국제사회에는 2016년 12월 국가의 온실가스 감축목표를 2030년 배출전망 (BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축으로 선언하였다. 이 중 수송부문의 2030년 BAU는 105.2백만톤이며, 감축 후 배출량 74.4백만톤으로 BAU 대비 감축목표는 29.3%로 설정하였다.

철도수송부문의 온실가스를 감축하기 위해 정부는 5년 단위로 「녹색성장 5개년 계획」을 수립하는데, 「제1차 녹색성장 5개년 계획」에 따르면 철도 여객수송 분담률 목표를 2009년 18%, 2020년 26%, 2050년 30%로 설정하였다. 또한, 국토교통부는 「대중교통기본계획」 및 「국가철도망구축계획」을 수립하여 대중교통 수단의 수송분담률 향상을 통한 온실가스 감축을 유도하려 한다. 하지만 철도의 여객 수송실적은 증가함에도 철도의 여객수송분담률은 최근 들어 오히려 낮아지는 추세이다 (Fig. 1).

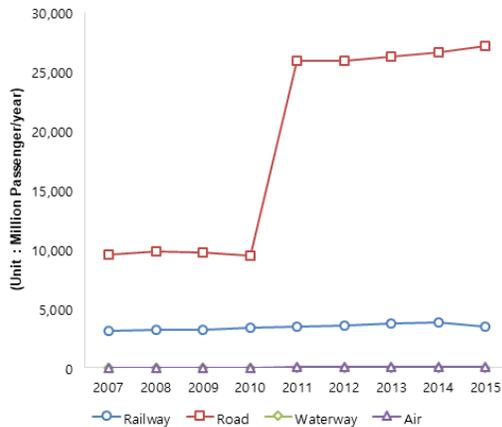
철도 운영기관의 온실가스를 관리하기 위한 정책으로는

2010년 9월부터 목표관리제를, 2015년 1월부터 배출권거래제를 시행하였다. 2015년 1월 배출권거래제 시행시 기존 목표관리제에 포함된 관리업체는 배출권거래제 할당대상업체로 자동으로 편입되어 배출권거래제 하나의 규제만 받는다. 하지만, 철도수송부문은 민감업종으로 분류되어 배출권거래제로 편입되지 않고, 목표관리제에 잔류하게 되었다. 국토교통부를 관장기관으로 하는 철도수송부문의 관리업체로는 한국철도공사, 서울교통공사, 부산교통공사, 대구도시철도공사, 공항철도(주), 인천교통공사, 서울메트로9호선(주), 광주도시철도공사, 대전도시철도공사, 신분당선(주) 등 11개 운영기관이 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015).

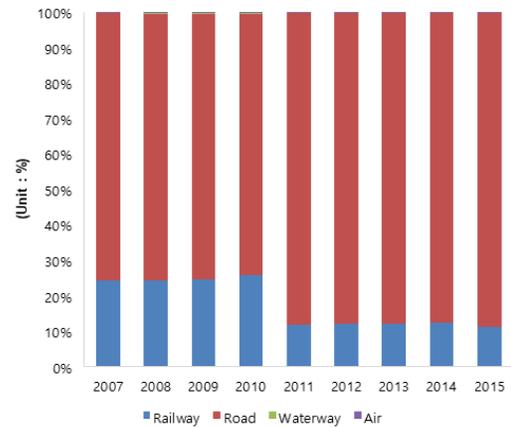
에너지 및 온실가스를 효율적으로 감축하기 위해서는 우선적으로 에너지 소비특성 및 온실가스 배출특성을 파악할 필요가 있다. 에너지 소비특성 및 온실가스 배출특성 파악하기 위해서는 로그평균 디비지아 지수 (LMDI, Log Mean Divisia Index) 지수분해분석 방법론이 자주 사용된다. LMDI 지수분해분석 방법론은 분해 과정에서 디비지아 지수와 로그 평균가중치를 사용하며, 결과에 잔차 (residuals)가 남지 않는

<sup>†</sup> Corresponding author: for385@hanmail.net (82, Eulji-ro, Jung-gu, Seoul, 04538, Korea. T. 02-6322-5274)

Received November 8, 2018 / Revised November 19, 2018 1st, December 5, 2018 2nd / Accepted December 11, 2018



(a) Passenger transportation traffic activity



(b) Share of passenger transportation traffic activity

Fig. 1. Passenger transportation traffic activity in transportation sector.

† Source : Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network (2017)

\* Road means bus (high speed, urban, suburbs, rental) and taxi. Since 2011, passenger cars are included, which statistics means the sum of passenger cars, bus and taxis.

특징을 가진다. 그리고 다른 분해분석 방법론에 비해서 이론적 기초, 적용가능성 및 사용편리성 등의 특징을 가지고 있다 (Lee *et al.*, 2012; Kim and Kim, 2016; Kim, 2018).

우리나라에서는 LMDI 지수분해분석 방법론을 이용한 제조업 및 산업부문, 발전부문 및 지역단위 (국가, 지자체)의 에너지 소비특성 및 온실가스 배출특성에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Park and Jeon, 2013; Kim, 2015).

반면 해외에서는 LMDI 지수분해분석 방법론을 수송부문에 적용한 연구도 점차 확대되고 있는 추세이다. 특히나 수송부문에 대한 연구는 주제 (에너지, 온실가스), 세부분야 (도로, 철도, 수상, 항공) 및 수송대상 (화물, 여객, 전체)에 따라 활발하게 연구가 되고 있다.

수송부문의 에너지 소비특성에 관한 국외의 연구는 Zhang and Wang (2011), Wu and Xu (2014), Achour and Belloumi (2016) 및 Dai and Gao (2016)의 연구가 있으며, 수송부문의 온실가스 배출특성에 관한 국외의 연구는 Kwon (2005a, 2005b), Steenhof *et al.* (2006), Papagiannaki and Diakoulaki (2009), Timilsina and Shrestha (2009a, 2009b), Mendiluce and Schipper (2011) 및 Wang *et al.* (2011)의 연구가 있다. 특히나 Wang *et al.* (2011) 및 Achour and Mounir (2016)는 수송대상을 화물 및 여객으로 나누어 분석하였으며, 화물수송실적 (톤-km) 및 여객수송실적 (인-km)의 단위를 통일하기 위해 전환계수 (conversion coefficient)를 이용하여 여객수송실적을 화물수송실적으로 전환한 후 분해분석 하였다. 또한,

Steenhof *et al.* (2006), Timilsina and Shrestha (2009a, 2009b), Zhang and Wang (2011), Mendiluce and Schipper (2011), Wang *et al.* (2011) 및 Dai and Gao (2016)의 연구에서는 전체 및 수송부문의 에너지 소비량 및 온실가스 배출량을 하향식 (Top-down)으로 수송분담률 (modal share)로 분배하여 세부분야별 에너지 소비 및 온실가스 배출특성을 분석하였다.

반면, 국내에서는 아직까지 수송부문에 대한 연구는 미미한 실정이다. 수송부문에 LMDI 지수분해분석을 적용한 국내의 연구로는 Lee and Han (2011), Lee *et al.* (2012) 및 Kim and Kang (2017) 정도가 있으며, 국내의 연구는 아니나 대한민국을 대상으로 한 연구로는 Timilsina and Shrestha (2009b)가 있다.

본 논문의 목적은 수송부문의 LMDI 지수분해분석 방법론인 Timilsina and Shrestha (2009a, 2009b)을 국내 철도수송부문에 적용하여, 2011년부터 2016년까지 철도수송에 따른 온실가스 배출 요인 분해분석을 하는 것이다.

본 논문은 기존 선행연구와 다음과 같은 차이점이 있다. 첫째, 본 논문은 Lee *et al.* (2012)와 달리 분석 대상을 지역간 철도 (간선철도) 뿐 아니라, 광역철도 및 도시철도로 확대하였으며, 해당 논문에서 고려하지 않았던 수송실적 (traffic activity)을 요소로 추가하여 분석하였다. 둘째, 본 논문은 Wang *et al.* (2011) 방법론을 적용하여 여객수송 (passenger activity) 및 화물수송 (freight activity)의 수송실적 단위를 톤

Table 1. Literature of LMDI decomposition analysis in transportation sector

Subject	Literature	Country	Period	Subsector	Target
Energy	Lee and Han (2011)	South Korea	2001~2007	Road, Rail, Water, Air	passenger
	Zhang and Wang (2011)	China	2006~2030	Transportation	all
	Wu and Xu (2014)	China	2000~2012	Road, Rail, Water, Air	freight
	Achour and Belloumi (2016)	Tunisia	1985~2014	Road, Rail, Water, Air	passenger
	Dai and Gao (2016)	China	1980~2010	Transportation	freight
	King and Kang (2017)	South Korea	2001~2015	Transportation	all
GHG	Kwon (2005a)	United Kingdom	1970~2000	Road	passenger
	Kwon (2005b)	United Kingdom	2000~2030	Road	passenger
	Steenhof et al. (2006)	Canada	2008~2012	Road, Rail	freight
	Papagiannaki and Diakoulaki (2009)	Greece, Denmark	1990~2015	Road	passenger
	Timilsina and Shrestha (2009a)	Latin American and Caribbean countries	1980~2005	Transportation	all
	Timilsina and Shrestha (2009b)	Asia 10 countries	1990~2004	Road, Rail, Water, Air	all
	Mendiluce and Schipper (2011)	Spain	1990~2008	Road, Rail, Air	all
	Wang et al. (2011)	China	1985~2009	Road, Rail, Water, Air	all
	Lee et al. (2012)	South Korea	2000~2007	Rail	all

-km로 환산하였다. 셋째, 본 논문은 기존 Timilsina and Shrestha (2009a, 2009b)와 달리 대상 온실가스를 CO<sub>2</sub> 뿐 아니라, CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O로 확장하였다. 이는 국내 규정인 ‘목표관리제 지침’에서는 모든 배출활동에 대하여 완전성 (completeness) 원칙에 따라 온실가스 배출량을 산정하도록 요구하고 있기 때문이다. 넷째, 본 논문에서는 분석대상의 수준이 국가 전체가 아닌 개별 철도운영기관 수준이기에 선행 연구와 달리 GDP (Gross domestic product) 대신 ‘운영기관별 운수수입’을 변수로 활용하여 분석하였다.

본 연구는 모두 4개의 장으로 구성되어 있다. 제II장에서는 국내 철도수송부문 에너지 소비현황 및 온실가스 배출현황, 수송실적 및 운수수입 등을 살펴보고, 철도수송에 따른 온실가스 배출 요인 분해분석 방법론을 제시한다. 제III장에서는 철도수송에 따른 온실가스 배출 요인 분해분석 결과를 제시한다. 마지막으로 제IV장은 결론으로 본 연구의 결과를 종합하고 정책방향을 제시한 후, 한계점과 향후 보완되어야 할 내용 등에 대해 제시하였다.

## 2. 철도수송부문 온실가스 배출 현황 및 분석 방법

### 2.1 국내 철도 운영 현황

국토교통부, 한국철도공사 및 한국철도시설공단은 매년 공동으로 국내 철도운영기관별 운영현황을 담은 통계연보를 발간하고 있다. 해당 통계연보는 철도구분을 지역간철도<sup>1)</sup> 및 ‘도시광역철도<sup>2)</sup>’로 분류하여 통계를 공표하고 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network, 2017)

국내 철도수송부문의 운영기관 및 노선은 Table 2와 같이 복잡한 구조를 가지고 있다. 일반적으로 1개의 운영기관이 1개의 노선을 운영하거나, 해당 광역시의 노선 전체를 운영하는 구조이다. 하지만, 1개의 운영기관이 8개의 노선을 운영 (서울교통공사)하거나, 1개의 노선을 2개의 운영기관 (신분당선<sup>3)</sup>, 경기철도<sup>4)</sup>)이 운영 (신분당선)하는 경우도 존재한다.

1) 지역간철도 (intercity railway)란 대도시, 경제중심지, 관광지역 등을 연결하기 위한 철도를 의미하며, 국내의 지역간철도 운영기관은 경부선 및 33개 노선을 총괄운영하고 있는 한국철도공사와 2016년부터 수서발 경부고속선 및 호남고속선을 운영하고 있는 (주)SR이 있다.

2) 광역철도 (wide area Railway)란 “둘 이상의 시·도에 걸쳐 운행되는 도시철도 또는 철도” (『대도시권 광역교통 관리에 관한 특별법』)를 의미하며, 도시철도 (urban rail)란 “도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통권역에서 건설·운영하는 철도·모노레일·노면전차·선형유도전동기·자기부상열차 등 궤도에 의한 교통시설 및 교통수단” (『도시철도법』)을 의미한다.

Table 2. Operator and line by railway transportation (end of 2016)

Railway	Operator	Line	Station	Rail Prolongation (km)
Intercity Railway	Korea Railroad	Gyeongbu Line and 33 other Line	683	9,364.1
	SR Co.	Gyeongbu High Speed Line, Honam High Line	3	61.1
Wide Area Railway	Korea Railroad	SMESRS	260	615.4*
	Shinbundang Co., Gyeonggi Railroad Co.	Shinbundang Line	30	31.5
	Airport Railroad Co.	Incheon International Airport Line	12	58.0
	Seoul Metro	Seoul Line No.1~8	277	200.1
	Seoul Metro Line 9	Seoul Line No.9	30	31.5
	Busan Transportation Co.	Busan Line No.1~4	114	107.8
	Daegu Metropolitan Transit Co.	Daegu Line No.1~3	91	82.9
Urban Railway	Incheon Transit Co.	Incheon Line No.1~2	56	58.5
	Gwangju Metropolitan Rapid Transit Co.	Gwangju Line No.1	20	20.5
	Daejeon Express Transit Co.	Daejeon Line No.1	22	20.5
	Busan-Gimhae Light Rail Transit Co.	Busan-Gimhae Line	1	23.2
	Uijeongbu LRT Co.	Uijeongbu Line	15	10.6
	Yongin Everline Co.	Everline	15	18.1

† Source : Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network (2017)

\* Excluding 98km of Kyungchun Line

그렇기에 본 논문에서는 분석단위의 기준을 철도운영기관으로 설정하였다. 그러나 한국철도공사와 같이 1개의 운영기관이 지역간철도 및 광역철도를 모두 운영하는 경우에는 독자의 이해를 위해 ‘한국철도공사 (지역)’ 및 ‘한국철도공사 (광역)’으로 분리하여 표현하였다. 또한, 신분당선과 같이 2개의 운영기관이 1개의 노선을 구간별로 운영하는 신분당선의 경우는 ‘신분당선’으로 표현하였다.

## 2.2 철도수송에 따른 에너지 소비량

철도수송시 소비하는 에너지원은 크게 유류 (디젤)와 전력으로 크게 구분된다. 디젤은 ‘한국철도공사 (지역)’에서 운영중인 지역간철도의 여객수송용 디젤기관차 (Diesel Loco) 및 화물수송용 디젤동차 (Diesel Rail Car)에서 사용하고 있다. 2016년 기준으로 한국철도공사 (지역)만이 디젤을 사용하고 있으며, 동 기관에서 사용하는 디젤 중 디젤기관차는 39,457,136 L (50.8%), 디젤동차는 38,239,545 L (49.2%)를 사용하였다.

또한, 전력은 모든 운영기관에서 사용하고 있는데, 2016년 기준으로 철도수송에 따른 전력소비량은 3,762,067 Mwh이

며, 한국철도공사 (지역)가 1,312,929 Mwh (34.9%)로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그 다음으로 한국철도공사 (광역)가 1,054,132 (28.0%)를 차지하였다. 그 외 서울교통공사 819,681 Mwh (21.8%), 부산교통공사 187,723 Mwh (5.0%), 대구도시철도공사 94,911 Mwh (2.5%) 순이다 (Fig. 2).

다음 단계는 철도수송에 따른 에너지 소비량을 도출하는 것이다. 디젤과 전력은 사용단위가 달라 에너지 사용량의 비교를 위해서는 단위를 통일할 필요가 있다. 일반적으로 에너지 사용량의 비교를 위해서는 단위를 열량 기준 (MJ, kcal, TOE)으로 나타낸다. 본 논문에서는 「에너지법 시행규칙」 별표에서 제시하고 있는 ‘에너지열량 환산기준’에 따라 철도수송에 따른 디젤 및 전력 소비량을 석유환산톤 (TOE)으로 환산하였다. 디젤 환산계수는  $0.841 \times 10^{-3}$  TOE/L를 적용하였으며, 전력 환산계수는  $0.229 \times 10^{-3}$  TOE/kwh를 적용하였다.

철도수송에 따른 전체 에너지소비량 2016년 기준 926,856 TOE며, 2011~2016년 동안 연평균 0.3%씩 감소하였다 (Fig. 3).<sup>3)</sup> 연평균 증가율 (CAGR, Compound Annual Growth Rate)을 운영기관별로 살펴보면, 신분당선이 12.8%로 가장 높은 증가율을 보이고 있으며, 그 다음으로 서울시메트로9호

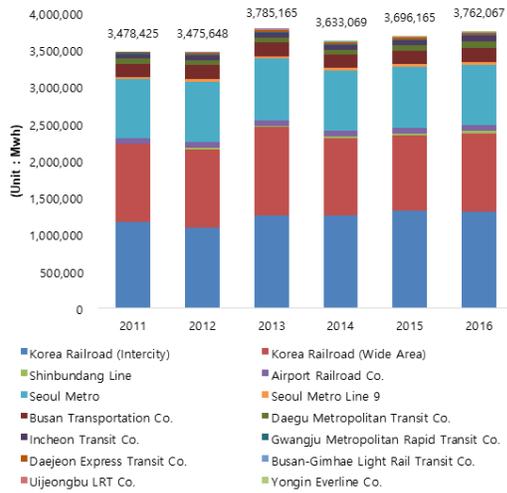


Fig. 2. Electricity consumption in railway transportation.

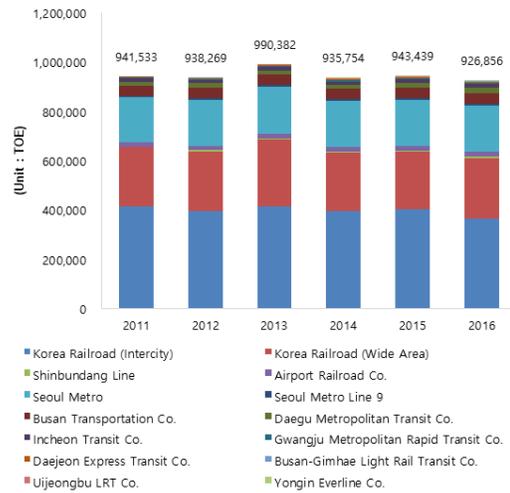


Fig. 3. Energy consumption in railway transportation.

선(주)는 6.5% 증가하였다. 그 외 대구도시철도공사 5.6%, 인천교통공사 3.7% 증가하였다.

분석기간 동안 에너지 소비량의 총변화율은 운영기관별로 다음과 같다. 신분당선의 경우에는 2016년에 2012년 대비 61.6% 증가하였다. 이는 2016년 1월 신분당선 2단계 (정자~광교)가 개통 후 신분당선의 영업키로가 17.3 km에서 31.1 km로 증가함에 따라 에너지 소비가 증가한 결과이다. 다음으로 서울시메트로9호선(주)는 36.7%, 대구도시철도공사는 31.3% 증가하였다. 그러나 용인경량전철(주), 의정부경전철(주), 한국철도공사 (지역), 한국철도공사 (광역), 대전광역시도시철도공사의 경우에는 에너지 소비량이 감소하였다.

### 2.3 철도수송에 따른 온실가스 배출량

본 절에서 LMDI 지수분해 분석을 위해 철도수송에 따른 온실가스 배출량을 도출하였다. 온실가스 배출량은 철도수송 시 사용하는 에너지 소비량을 활동자료로 산정한다. 일반적으로 지역간철도의 에너지원은 디젤 및 전력을 사용하며, 광역철도 및 도시철도의 에너지원은 전력만 존재한다.

철도수송에 따른 온실가스 배출량은 ‘목표관리제 지침 [별표 14]’에서 규정하고 있는 방법론에 따라 산정하였다.

우선 디젤 사용에 따른 온실가스 배출량은 ‘배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정 방법 및 기준’의 철도부문 이동

연소 온실가스 배출량 산정방법인 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$G_{i,j} = \sum (Q_i \times EC_i \times EF_{ij} \times F_{eq,j} \times 10^{-9}) \dots\dots\dots (1)$$

- $G_{i,j}$  : 연료 종류 ( $i$ )의 사용에 따른 온실가스 ( $j$ )의 배출량 (CO<sub>2</sub>-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)
- $F_{eq,j}$  : 지구온난화지수 (GWP)
- $i$  : 연료 종류

그리고 온실가스 배출량 산정을 위한 순발열량은 동 지침에서 제시하고 있는 ‘연료별 국가 고유 발열량’인 37.9 MJ/L를 적용하였으며, 배출계수도 동 지침에서 제시하고 있는 ‘철도부문 기본 배출계수’인 74,000 kgCO<sub>2</sub>/TJ, 4.15 kgCH<sub>4</sub>/TJ 및 28.6 kgN<sub>2</sub>O/TJ를 적용하였다.

전력 사용에 따른 온실가스 배출량은 ‘목표관리제 지침 [별표 14]’에서 규정하고 있는 ‘외부에서 공급된 전기 사용’

3) 신분당선은 신분당선 1단계 (강남~정자)가 2011년 10월 개통하였으며, 부산-김해경전철(주)는 2011년 9월 개통하여 두 운영기관은 2012년부터 분석하였다. 또한, 의정부경전철(주) 의정부선은 2012년 7월 개통하여 2013년부터 분석하였으며, 용인경량전철(주) 에버라인은 2013년 4월 개통하여 2014년부터 분석하였다. 그리고 (주)SR은 2016년 9월 개통하여 분석 범위에서 제외하였다.

에 따른 온실가스 배출량 산정방법인 식 (2)를 이용하여 산정하였다. 그리고 전력배출계수는 동 지침에서 규정하고 있는 전력배출계수인 0.4653 tCO<sub>2</sub>/MWh, 0.0054 kgCH<sub>4</sub>/MWh 및 0.0027 kgN<sub>2</sub>O/MWh을 적용하였다.

$$G_i = \sum_j (Q_i \times EF_j \times F_{eq,j}) \dots\dots\dots (2)$$

- G<sub>i</sub> : 전력사용에 따른 온실가스 배출량 (tCO<sub>2</sub>eq)
- Q : 외부에서 공급받은 전력 사용량 (MWh)
- EF<sub>j</sub> : 전력 간접배출계수 (tGHG/MWh)
- F<sub>eq,j</sub> : 지구온난화지수 (GWP)
- j : 온실가스 종류

지구온난화지수 (GWP, Global Warming Potential)의 경우 목표관리제 지침에서 정의하고 있는 GWP 값인 21 tCO<sub>2</sub>/tCH<sub>4</sub> 및 310 tCO<sub>2</sub>/tN<sub>2</sub>O을 적용하였다.

목표관리제 지침에 따라 산정한 철도수송에 따른 온실가스 배출량은 Table 3 및 Fig. 4와 같다. 철도수송부문의 온실

가스 배출량은 2013년 2,196,340 tCO<sub>2</sub>eq로 최고점에 도달한 후 2016년 1,982,225 tCO<sub>2</sub>eq로 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 2011~2016년 동안 온실가스 배출량은 연평균 1.4%씩 감소하였으며, 총변화율은 -6.9%이다.

2016년 기준 온실가스 배출량 비율은 한국철도공사 (지역)가 42.4%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그 다음으로 한국철도공사 (광역)가 24.8%를 차지하였다. 그 외 서울교통공사 19.3%, 부산교통공사 4.4%, 대구도시철도공사 2.2% 순이었다. 특이한 점은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 2011~2016년 동안 한국철도공사 (지역)의 수송실적이 연평균 0.5%씩 증가함에도 동일기간 온실가스 배출량은 연평균 4.4%씩 감소한 것이다. 이는 한국철도공사 (지역)의 전철화 확대 및 노후디젤동차 폐차 정책의 시행으로 철도수송의 주요 에너지원이 디젤에서 전력으로 이동함에 따라 발생한 결과로 해석된다 (Table 4).

2.4 분석방법론

본 논문에서는 철도수송에 따른 온실가스 배출 요인 분해 분석을 위해서 LMDI 방법론을 사용하여 배출계수효과

Table 3. Greenhouse Gas Emission in railway transportation, 2011~2016 (Unit : tCO<sub>2</sub>eq)

Railway	Operator	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Intercity Railway	Korea Railroad	1,053,300	1,010,145	1,021,416	953,067	958,357	840,313
	SR Co.	-	-	-	-	-	N/E*
Wide Area Railway	Korea Railroad	492,234	493,524	554,131	484,622	474,132	491,490
	Shinbundang Line	N/E*	10,974	11,080	9,985	10,679	17,739
	Airport Railroad Co.	35,359	35,624	35,638	35,474	36,736	36,712
	Seoul Metro	372,581	381,172	387,087	382,366	382,887	382,177
	Seoul Metro Line 9	12,983	16,883	16,866	16,778	18,316	17,751
	Busan Transportation Co.	83,678	85,309	84,138	81,770	82,514	87,526
	Daegu Metropolitan Transit Co.	33,702	33,854	33,836	33,162	39,612	44,252
Urban Railway	Incheon Transit Co.	27,505	27,894	27,620	27,738	27,876	33,014
	Gwangju Metropolitan Rapid Transit Co.	8,464	8,529	8,585	8,632	8,672	8,734
	Daejeon Express Transit Co.	8,219	8,273	8,271	8,302	7,837	7,999
	Busan-Gimhae Light Rail Transit Co.	N/E*	5,373	4,652	4,805	4,790	4,871
	Uijeongbu LRT Co.	-	N/E*	3,020	2,804	2,791	2,722
	Yongin Everline Co.	-	-	N/E*	6,790	6,897	6,926
Total		2,128,026	2,117,555	2,196,340	2,056,294	2,062,096	1,982,225

\* N/E : Not Estimated

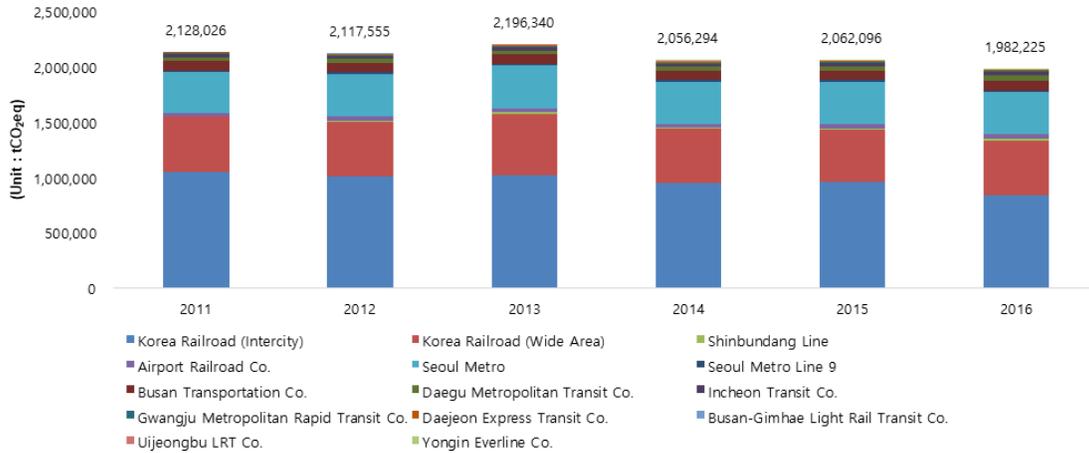


Fig. 4. Greenhouse Gas Emission in railway transportation.

Table 4. Track Electrified and Number of Rolling Stock of Korea Railroad (Intercity Railway)

Classification		Unit	2011	2012	2013	2014	2015	2016	CAGR
Track Electrified		km	2,357.7	2,445.3	2,453.8	2,456.7	2,727.3	2,873.2	4.0%
Number of Rolling Stock	Diesel Loco	Cars	321	315	286	309	292	288	-2.1%
	Diesel Rail Car	Cars	444	397	303	204	201	178	-16.7%

† Source : Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network (2017)

Table 5. Data for LMDI decomposition analysis

Sign	Data	Statistic Name	Unit
<i>G</i>	Greenhouse Gas Emission	- Calculated	tCO <sub>2</sub> eq
<i>E</i>	Energy Consumption	- Fuel Consumption of Locos & Cars	L/year, kwh/year
		- Power Consumption of Electric Locos & Cars	(converted to TOE)
<i>V</i>	Traffic Activity	- Passenger Traffic by Year	passenger-km/year, ton-km/year
		- Freight Traffic by Year	
<i>R (EA)</i>	Traffic Revenue	- Traffic Revenue by Year	won/year

† Source : Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network (2017)

( $\Delta EF$ ), 에너지집약도효과 ( $\Delta EI$ ), 수송집약도효과 ( $\Delta TI$ ) 및 경제활동효과 ( $\Delta EA$ )<sup>4)</sup> 등 네 가지 요인으로 분해하였다. 이에 대한 카야 (Kaya) 방정식은 식 (3)과 같은 항등식으로 표현된다.

$$G_i^t = \frac{G_i^t}{E_i^t} \times \frac{E_i^t}{V_i^t} \times \frac{V_i^t}{R_i^t} \times R_i^t = EF_i^t \times EI_i^t \times TI_i^t \times EA_i^t \quad (3)$$

위 식 (3)에서  $t$ 는 분석연도를 의미하고,  $i$ 는 각 철도운영기관을 의미한다.  $G_i^t$ 는  $t$ 년도  $i$  철도운영기관의 온실가스 배출량,  $E_i^t$ 는  $t$ 년도  $i$  철도운영기관의 에너지 사용량,  $V_i^t$ 는  $t$ 년도  $i$  철도운영기관의 전환수송실적 (converted traffic activity),  $R_i^t$ 은  $t$ 년도  $i$  철도운영기관의 운수수입 (traffic revenue)을 나타낸다 (Table 5).

다음으로,  $G$ 는 온실가스 배출량이므로,  $EF = G/E$ 는 배

4) Timilsina and Shrestha (2009a, 2009b) 및 Wang *et al.* (2011)에서는 GDP를 활용하여 분석하였으며, GDP 성장에 따른 온실가스 배출 변동을 경제활동효과 (economic activity effect)로 명명하였다. 본 논문의 운수수입은 GDP와 다른 개념이나, 용어의 혼재를 막기 위해 본 논문에서도 경제활동효과 (EA)로 명명하였다.

출계수 (emission factor)를 나타낸다.  $E$ 는 에너지소비량이고,  $V$ 는 수송실적이므로  $EI = E/V$ 은 에너지집약도 (energy intensity)를 나타낸다. 그리고  $R$ 은 운수수입이므로  $TI = V/R$ 는 수송집약도 (transportation intensity)를 나타낸다.

일반적으로 철도수송부문의 여객수송실적은 인-km 단위 및 화물수송실적은 톤-km 단위로 집계되며, 수송실적을 하나의 기준으로 분석하기 위해서는 여객수송실적을 화물수송실적으로 전환하는 전환계수 (conversion coefficient)가 필요하다 (Wang *et al.*, 2011).

$V_i^t$ 는 아래 식 (4)와 같이 구할 수 있는데,  $t$ 년도의 여객수송실적 ( $V_{i,1}^t$ )을 전환계수 ( $C_i$ )로 나눈 값에 화물수송실적 ( $V_{i,2}^t$ )을 합하여 하나의 전환값 ( $V_i^t$ )으로 나타낼 수 있다. 아래 식에서 하첨자 1은 여객을 의미하며, 하첨자 2는 화물을 의미한다.

$$V_i^t = \frac{V_{i,1}^t}{C_i} + V_{i,2}^t \dots\dots\dots (4)$$

그리고 전환계수 ( $C_i$ )는 다음 Table 6과 같다.

Table 6. Conversion coefficient between passenger and freight tonne.  
(Unit : passenger/ freight tonne)

	Railways	Highways	Water	Air
Coefficient	1	5	3.03	13.88

† Source : Wang *et al.* (2011)

식 (5)를 구성하는 각 요인들이 노선별 온실가스 배출량 변화에 미치는 효과는 식 (6)~식 (9)와 같은 방식으로 계산된다. 식 (5)~식 (9)에서  $t$ 와 0은 노선별 온실가스 배출량을 분석하기 위한 분석연도와 기준연도를 의미한다.

$$\Delta G_i = G_i^t - G_i^0 = \Delta EF_i + \Delta EI_i + \Delta TI_i + \Delta EA_i \dots (5)$$

$$\Delta EF_i = \frac{G_i^t - G_i^0}{\ln G_i^t - \ln G_i^0} \times \ln \left( \frac{EF_i^t}{EF_i^0} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta EI_i = \frac{G_i^t - G_i^0}{\ln G_i^t - \ln G_i^0} \times \ln \left( \frac{EI_i^t}{EI_i^0} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta TI_i = \frac{G_i^t - G_i^0}{\ln G_i^t - \ln G_i^0} \times \ln \left( \frac{TI_i^t}{TI_i^0} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta EA_i = \frac{G_i^t - G_i^0}{\ln G_i^t - \ln G_i^0} \times \ln \left( \frac{EA_i^t}{EA_i^0} \right) \dots\dots\dots (9)$$

식 (6)~식 (9)를 통하여 도출된 각 값은 운영기관별 분석연도와 기준연도 사이에 온실가스 배출량 변화에 영향을 미친 배출계수효과 ( $\Delta EF$ ), 에너지집약도효과 ( $\Delta EI$ ), 수송집약도효과 ( $\Delta TI$ ) 및 경제활동효과 ( $\Delta EA$ )를 의미한다. 해당 값이 양 (+)이면 각 요인이 온실가스 배출량 증가에 영향을 주었음을 의미하고, 해당 값이 음 (-)이면 각 요인이 온실가스 배출량 감소에 영향을 주었음을 의미한다.

2.5 분석자료

분해분석에 사용된 자료는 Table 5와 같으며, 분석대상은 전국의 지역간철도, 광역철도 및 도시철도이다. 통계자료는 철도통계연보를 통해 에너지 (디젤, 전력) 소비량, 운수수입 및 수송실적 자료를 확보하였다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network, 2017). 그리고 시간적 범위는 통계자료의 한계로 인해 2011년부터 2016년으로 설정하였다. 이는 철도통계연보에서 도시철도의 통계자료는 지역간철도 및 광역철도와 달리 2011년부터 생성되었기 때문이다.

식 (4)를 바탕으로 환산한 수송실적 ( $V$ )은 2016년 기준 79,600백만톤-km며, 2011년부터 2016년까지 연평균 1.6%씩 증가하였다. 수송실적을 운영기관별로 살펴보면 한국철도공사 (지역)가 32,404백만톤-km (40.7%)로 가장 크나, 연평균 증가율은 0.5% 밖에 되지 않았다. 그 다음으로 서울교통공사가 21,310백만톤-km (26.8%), 한국철도공사 (광역)가 16,605백만톤-km (21.7%), 부산도시철도 2,951백만톤-km (3.7%)의 전환 화물수송실적을 기록하였다 (Fig. 5).

운수수입 ( $R$ )은 2016년 기준 6,786,763백만원이며, 2011년부터 2016년까지 연평균 6.3%씩 증가하였다. 운수수입을 운영기관별로 살펴보면 한국철도공사 (지역)가 3,150,885백만원 (50.9%)로 가장 크고, 그 다음으로 서울교통공사가 1,684,756백만원 (24.8%)이었다. 그 외 한국철도공사 (광역)가 884,926백만원 (12.7%), 부산교통공사가 252,272백만원 (3.7%)을 기록하였다 (Fig. 6).

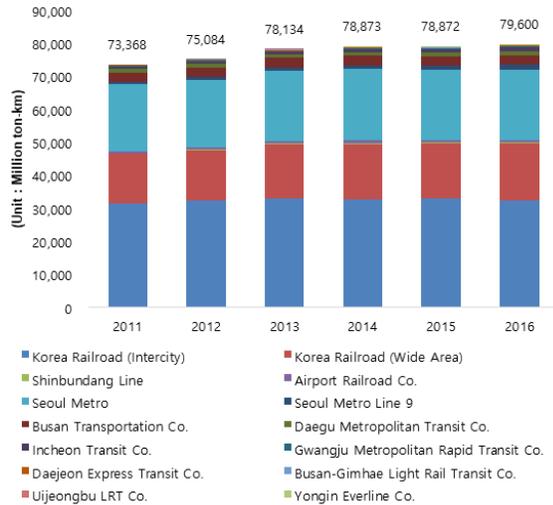


Fig. 5. Converted traffic activity\* in railway transportation.

\* The value is the conversion value according to Eq. (4)

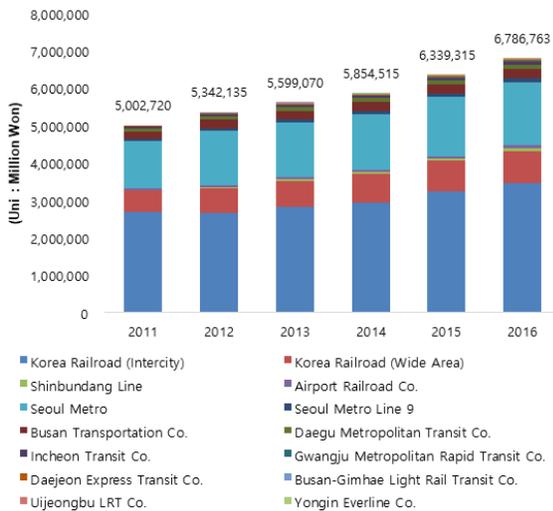


Fig. 6. Greenhouse Gas Emission in railway transportation.

### 3. 분해분석결과

#### 3.1 운영기관별 분해분석 결과

2011~2016년 동안 철도수송에 따른 온실가스 배출 요인 분해분석 결과는 Fig. 7과 같다. 우리나라의 철도수송에 따른 온실가스 배출량은 2013년을 제외하고 지속적으로 감소하고 있으며, 총효과 ( $\Delta G$ )는 -175,355 tCO<sub>2</sub>eq으로 나타났다.

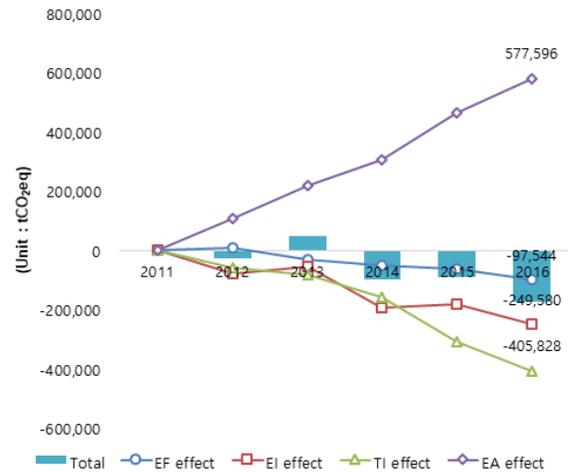


Fig. 7. Trend of decomposition of railway transportation, 2011 - 2016.

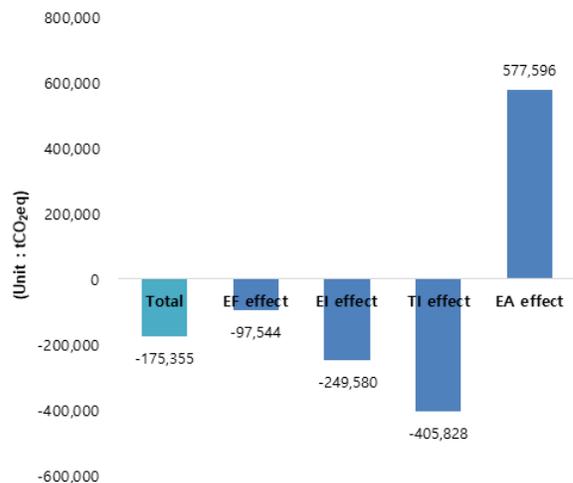


Fig. 8. Result of decomposition analysis of railway transportation as of 2011.

온실가스 배출량 변화에 영향을 미치는 요인 중 배출계수 효과 ( $\Delta EF$ ), 에너지집약도효과 ( $\Delta EI$ ) 및 수송집약도효과 ( $\Delta TI$ )는 분석기간 전체에 걸쳐 지속적으로 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 반면, 경제활동효과 ( $\Delta EA$ )는 분석기간 전체에 걸쳐 지속적으로 온실가스 배출량을 증가시키는 것으로 나타났다.

이러한 결과가 도출된 이유를 살펴보기 위해 2011년을 기준연도로 배출계수 ( $EF$ ), 에너지집약도 ( $EI$ ) 및 수송집약도 ( $TI$ )의 평균값, 그리고 철도수송에 따른 전체 운수수입 ( $R$ )의 변화를 살펴보았다.

Fig. 9에서 보듯이 배출계수, 에너지집약도 및 수송집약도의 평균값은 각각 연평균 1.1%, 1.9% 및 4.4%씩 감소하였고, 반면 운수수입은 연평균 6.3%씩 증가하였다. 특히나 Fig. 9에서 보듯 수송집약도가 연평균 4.4% 개선되었는데, 이는 *TI*를 구성하는 요소인 평균운임 (average fare, Fig. 10)이 수송량보다 상대적으로 크게 증가<sup>5)</sup>하여 결과적으로 *TI*가 개선되었다. 결론적으로 *EF*, *EI* 및 *TI*의 개선은 철도수송부문의 온실가스 배출을 감소시켰으며, 수송실적의 증가에 따른 운수수입의 증가는 반대급부로 철도수송부문의 온실가스 배출량을 증가시킨 것으로 해석된다.

3.2 요인별 분해분석 결과

본 절에서는 앞 절의 연장선상에서 온실가스 배출 변화에 영향을 미치는 요인별 분해분석 결과를 살펴보겠다. 우선 배출계수 ( $EF = G/E$ )는 철도수송에 따른 온실가스 배출량

(*G*)을 에너지소비량 (*E*)으로 나눈 값으로, *G/E* 값이 작아질수록 *EF*는 개선되고 있는 것이다. 철도 수송시에 한국철도공사 (지역)를 제외한 타 운영기관은 에너지원으로 전력만을 사용하기에 에너지원 전환의 결과가 반영된 타 운영기관의 배출계수효과 ( $\Delta EF$ )는 0 tCO<sub>2</sub>eq으로 나타났다. 반면 온실가스 배출계수가 높은 디젤 사용을 줄이고, 온실가스 배출계수가 낮은 전력 사용을 늘리고 있는 한국철도공사 (지역)의  $\Delta EF$ 는 -97,544 tCO<sub>2</sub>eq로 나타났다 (Table 7).

에너지집약도 (*EI*)는 철도수송에 따른 에너지소비량 (*E*)을 수송실적 (*V*)으로 나눈 값으로, *E/V* 값이 작아질수록 *EI*는 개선되고 있는 것이다. 이에 따른 에너지집약도효과 ( $\Delta EI$ )는 *E/V* 변화에 따른 온실가스 배출량의 변화를 의미한다. 2011~2016년 동안 대부분의 운영기관에서  $\Delta EI$ 는 음(-)의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 지역간철도의 전철화 (Table 4), 목표관리제 시행에 따른 에너지 소비감축, 전력원가 상승에 따른 효율개선 등의 복합적인 에너지 감축활동 노

Table 7. Result of decomposition analysis of railway transportation emissions as of 2011.

(Unit : tCO<sub>2</sub>eq)

Railway	Operator	$\Delta G$	$\Delta EF$	$\Delta EI$	$\Delta TI$	$\Delta EA$
Intercity Railway	Korea Railroad	-212,987	-97,544	-139,118	-154,919	178,593
	SR Co.	N/E*	-	N/E*	N/E*	N/E*
Wide Area Railway	Korea Railroad	-745	-	-63,670	-127,002	189,928
	Shinbundang Line**	3,367	-	1,183	-4,776	6,960
	Airport Railroad Co.	1,353	-	-19,779	-8,566	29,697
Urban Railway	Seoul Metro	9,595	-	-7,095	-88,661	105,351
	Seoul Metro Line 9	4,769	-	-2,971	-3,443	11,183
	Busan Transportation Co.	3,847	-	-1,200	-12,725	17,772
	Daegu Metropolitan Transit Co.	10,550	-	-1,506	-1,740	13,797
	Incheon Transit Co.	5,509	-	-7,226	-3,410	16,145
	Gwangju Metropolitan Rapid Transit Co.	270	-	-328	-986	1,584
	Daejeon Express Transit Co.	-220	-	-628	-1,026	1,433
	Busan-Gimhae Light Rail Transit Co.**	-503	-	-1,803	-588	1,888
	Uijeongbu LRT Co.***	-298	-	-1,703	496	909
	Yongin Everline Co.****	136	-	-3,735	1,516	2,356
Total		-175,355	-97,544	-249,580	-405,828	577,596

\* N/E : Not Estimated

\*\* decomposition analysis period : 2012 ~ 2016

\*\*\* decomposition analysis period : 2013 ~ 2016

\*\*\*\* decomposition analysis period : 2014 ~ 2016

5) 수송집약도는  $TI = V/R = V/(F \times P)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 여객수송의 경우 운수수입 (*R*)은 평균운임 (*F*)과 승차인원 (*P*)의 곱으로 나타낼 수 있다. 또한, 2011~2016년 동안 광역철도 및 도시철도의 수송실적은 연평균 2.5% 증가하였고, 평균운임은 연평균 4.6%씩 증가하였다.

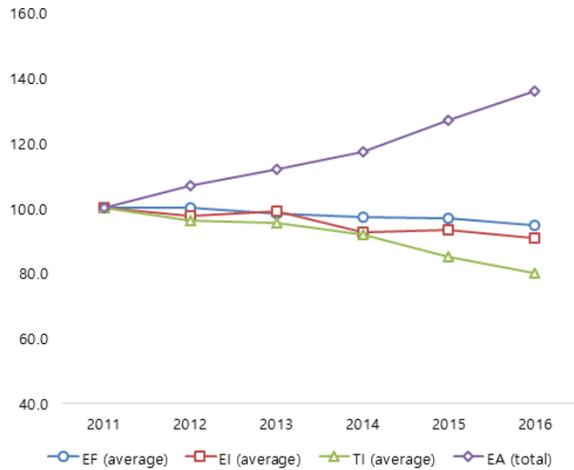


Fig. 9. Trend of change by factor (2011=100).

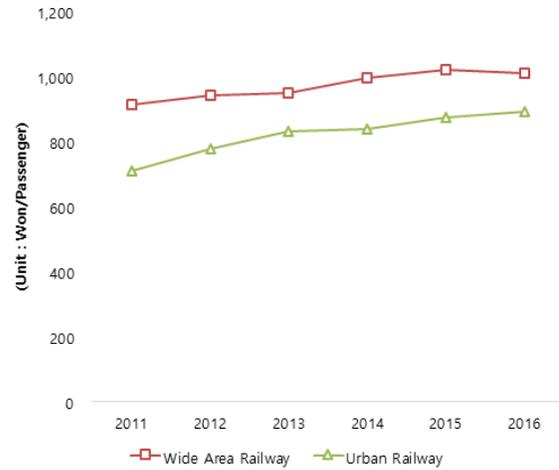


Fig. 10. Trend of change of average fare by Railway Classification (2011=100).

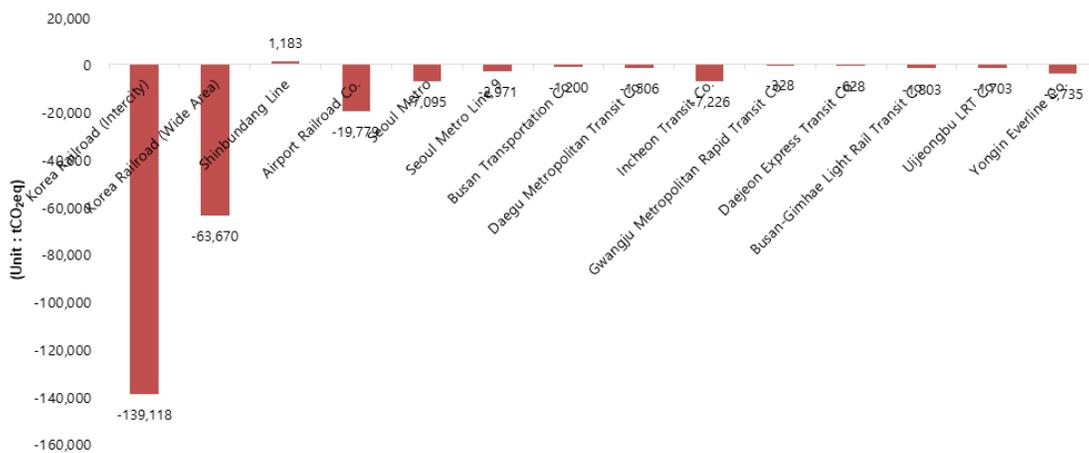


Fig. 11. Energy intensity effect, 2011~2016.

력이 반영된 결과라 판단된다. 운영기관별로는 한국철도공사 (지역)가 -139,118 tCO<sub>2</sub>eq로 가장 감소효과가 큰 것으로 나타났으며, 그 다음으로 한국철도공사 (광역)가 -63,670 tCO<sub>2</sub>eq 감소하였다. 그 외 공항철도(주) -19,779 tCO<sub>2</sub>eq, 인천교통공사 -7,226 tCO<sub>2</sub>eq 순으로 감소하였다 (Fig. 11).

온실가스 배출총량 측면에서 한국철도공사 (지역) 및 한국철도공사 (광역)의 절대량이 많기에  $\Delta EI$ 의 절대량도 많을 수 밖에 없다. 하지만, 배출총량 대비  $\Delta EI$ 의 상대적 비율을 살펴보면, 의정부경전철(주)이 -62.5%로 상대적 온실가스 감축효과가 큰 것으로 나타났으며, 공항철도(주) 및 용인경량

전철(주)이 -53.9%로 나타났다. 이는 다른 운영기관보다 해당 운영기관의 에너지집약도가 상대적으로 많이 개선되었기 때문이다.

수송집약도 ( $TI$ )는 수송실적 ( $V$ )을 운수수입 ( $R$ )을 으로 나눈 값으로,  $V/R$  값이 작아질수록  $TI$ 는 개선되고 있는 것이다. 이에 따른 수송집약도효과 ( $\Delta TI$ )는  $V/R$  변화에 따른 온실가스 배출량의 변화를 의미한다. 2011~2016년 동안 대부분의 노선에서  $\Delta TI$ 는 음 (-)의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 수송실적이 연평균 1.6%씩 증가 (Fig. 5)한 반면, 운수수입은 연평균 6.3%씩 증가 (Fig. 6)한 것에 기인한다. 운수수입

6) 동 값은 Table 3에서의 의정부경전철(주)의 2016년 온실가스 배출량 (2,722tCO<sub>2</sub>eq)과 에너지집약도효과의 비율 ( $\Delta EI/G_{2016}$ )을 의미한다. 다음부터 살펴볼 효과에 따른 상대적 비율 역시 같은 산식으로 도출하였다.

이 수송실적보다 상대적으로 많이 증가함으로서 수송집약도를 개선하여 온실가스 배출 감소 요인으로 작용한 것이다. 운영기관별로는 한국철도공사 (지역)가 -154,919 tCO<sub>2</sub>eq로 가장 크게 감소하였으며, 그 다음으로 한국철도공사 (광역)가 -127,002 tCO<sub>2</sub>eq 감소하였다. 그 외 서울교통공사 -88,661 tCO<sub>2</sub>eq, 부산교통공사 -12,725 tCO<sub>2</sub>eq 순으로 감소하였다. 반면, 의정부경전철(주) 및 용인경량전철(주)은 수송집약도가 악화되어 온실가스가 각각 496 tCO<sub>2</sub>eq, 1,516 tCO<sub>2</sub>eq 증가하였다 (Fig. 12).

마찬가지로 배출총량 대비 상대적  $\Delta TT$ 의 비율을 살펴보면, 신분당선이 -26.9%로 상대적 온실가스 감축효과가 가장 큰 것으로 나타났으며 다음으로 한국철도공사 (지역)이 -25.8%, 공항철도(주)가 -23.3%로 나타났다. 반면, 용인경량전철(주) 배출총량 대비  $\Delta TT$ 가 21.9%나 증가했으며, 의정부경전철(주)도

18.2%나 증가한 것으로 나타났다.

운수수입 ( $R$ )은 여객수송 및 화물수송을 모두 고려한 값으로, 경제활동효과 ( $\Delta EA$ )는  $R$  변화에 따른 온실가스 배출량의 변화를 의미한다. 2011~2016년 동안 모든 노선에서  $\Delta EA$ 는 양 (+)의 값을 갖는 것으로 나타났다. 운영기관별로는 한국철도공사 (광역)가 189,928 tCO<sub>2</sub>eq로 가장 크게 증가하였으며, 그 다음으로 한국철도공사 (지역)가 178,593 tCO<sub>2</sub>eq 증가하였다. 그 외 서울교통공사 105,351 tCO<sub>2</sub>eq, 공항철도(주) 29,697 tCO<sub>2</sub>eq 순으로 증가하였다 (Fig. 13).

앞서 살펴본 바와 같이  $\Delta EA$ 는 다른 세 가지 효과와는 달리 온실가스 배출량을 증가시키는 것으로 나타났다. 배출총량 대비 상대적  $\Delta EA$ 의 비율을 살펴보면, 공항철도(주)가 80.9%로 상대적 온실가스 증가효과가 가장 큰 것으로 나타났으며 다음으로 서울메트로9호선(주)가 63.0%, 인천교통공사가

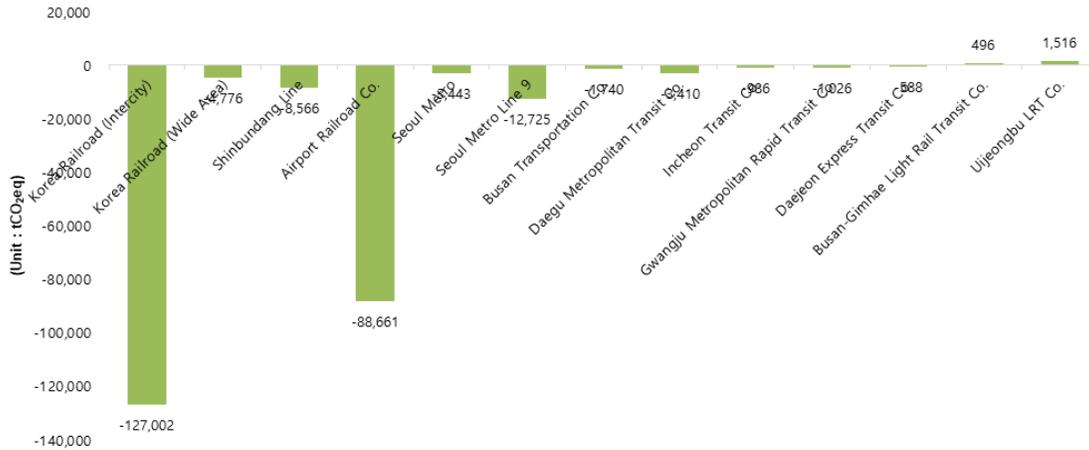


Fig. 12. Transportation intensity effect, 2011~2016.

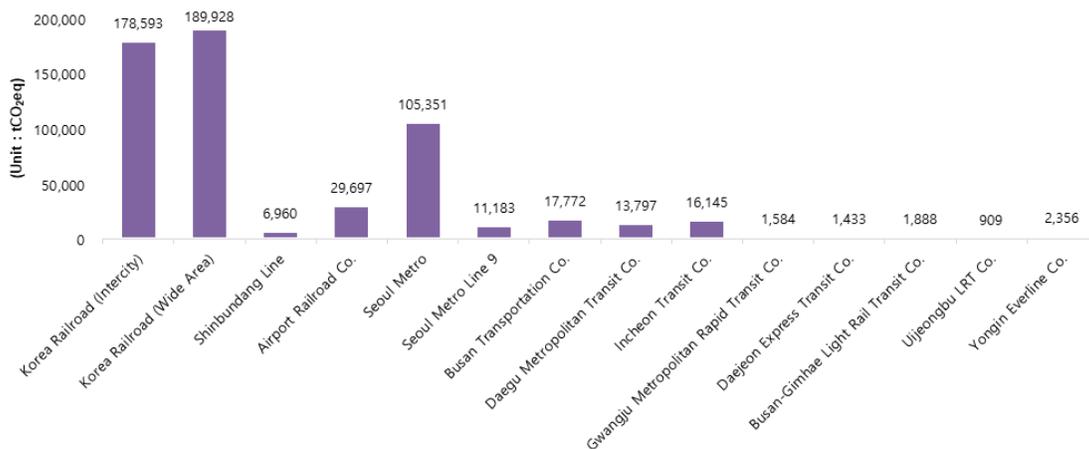


Fig. 13. Economic activity effect, 2011~2016.

48.9%로 나타났다. 특히나 경제활동효과는 다른 효과와 달리 ‘절대적 효과’가 큰 운영기관과 ‘상대적 효과’가 큰 운영기관이 상이한 것으로 나타났기에, 절대적 지표 뿐 아니라 상대적 지표도 주의해서 볼 필요가 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 LMDI 지수분해분석 방법론을 이용하여 2011~2016년까지 국내 철도수송부문의 온실가스 배출량 변화에 영향을 미치는 요인을 배출계수효과 ( $\Delta EF$ ), 에너지집약도효과 ( $\Delta EI$ ), 수송집약도효과 ( $\Delta TI$ ) 및 경제활동효과 ( $\Delta EA$ ) 등 4가지 요인으로 분해하였다.

2011~2016년까지 온실가스 배출 요인 분해분석 결과 철도수송에 따른 온실가스 배출량은 감소한 것으로 나타났다. 그리고 온실가스 배출량 증가에 영향을 미치는 요인은 경제활동효과로 분석되었으며, 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 요인은 배출계수효과, 에너지집약도효과 및 수송집약도효과로 분석되었다. 한국철도공사 (지역)의 철도수송용 에너지전환은 배출계수 ( $EF$ )를 감소시켰으며, 에너지집약도 ( $EI$ ) 및 수송집약도 ( $TI$ )의 개선은 철도수송부문의 온실가스 배출량을 감소시켰다. 또한, 수송실적의 증가에 따른 운수수입 ( $R$ )의 증가는 반대급부로 철도수송부문의 온실가스 배출량을 증가시켰다.

결론적으로 본 논문은 LMDI 지수분해분석 방법론을 통해 철도수송에 따른 온실가스 배출량에 영향을 미치는 요인을 도출하여 해당 운영기관의 온실가스 배출량 감축과 관련하여 다음과 같은 정책적 함의를 제공한다.

첫째, 한국철도공사 (지역)의 전철화 확대 및 노후디젤동차 폐차에 따라 배출계수효과를 감소시켰으며, 동 결과는 기존 선행연구 (Lee *et al.*, 2012; Kim and Kang, 2017)의 결과와 동일하다. 일반적으로 전기기관차는 디젤기관차에 비해 44% 적게 이산화탄소를 배출하는 것 (Lee *et al.*, 2007)으로 알려져 있으며, 수송부문의 에너지 및 온실가스 감축을 위해 「제3차 국가철도망구축계획 (2016~2025)」에서는 전철화율을 2014년 70%에서 2026년 82%까지 끌어올리려 한다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 동 계획이 완료되면 향후 배출계수효과는 더욱 강화될 것이며, 이는 온실가스 배출 감소의 중요한 요인이 될 것이다.

둘째, 운영기관별로 절대적 효과와 상대적 효과가 상이하게 나타났다. 이는 일반적으로 온실가스 배출 증가 및 감소에 영향을 미치는 효과가 뚜렷하게 나타나지만 효율성 측면에서는 다른 영향이 발생할 수 있음을 의미한다. 서울메트로9호

선(주)가 63.0%, 인천교통공사의 상대적인 경제활동효과가 크게 나타났는데, 이는 다른 운영기관과 달리 서울메트로9호선(주)은 ‘15년 3월, 인천교통공사 2호선은 ‘16년 7월 개통한 것과 무관하지 않다. 신규노선의 추가와 같은 변화가 발생하는 경우 운영기관의 특성을 고려한 정책접근도 필요할 것이다.

셋째, 철도노선의 확대 및 모달시프트 (modal-shift) 전환정책을 시행하였음에도 철도수송분담률은 최근 들어 다시 낮아졌다 (Fig. 1). 반면, 절대적인 수송실적 ( $V$ ) 및 운수수입 ( $R$ )은 각각 연평균 1.6%, 6.3%씩 증가하여 철도수송에 따른 온실가스 배출을 증가시켰다 (Fig.5 and Fig. 6). 현재 추진중인 「제3차 국가철도망구축계획 (2016~2025)」 및 「제3차 대중교통기본계획 (2017~2021)」이 성공적으로 완료되면 철도 수송실적은 더욱 증가될 것으로 예상되는 바, 이는 철도수송부문의 온실가스 배출 증가 요인으로 중요하게 부각될 것이다. 반면, 이러한 정책 이행에 따라 도로수송, 항만수송 및 항공수송의 수요가 철도수송으로 전환된다면 국가 전체의 수송부문 온실가스 배출량은 감소할 것으로 판단된다 (Kim *et al.*, 2010; Park and Woo, 2013).

넷째, 전력배출계수는 목표관리제 지침에 따라 본 논문에서는 2011~2016년 기간에 동일한 값을 적용 (Ministry of Environment Public Notice No.2016-225, 2016)하였으며, 이에 따라 디젤을 사용하지 않는 운영기관의 배출계수효과는 0으로 나타났다. 배출계수와 관련하여 현 정부의 신재생에너지발전 증가 및 석탄발전 감소는 전력배출계수를 낮출 요인으로 작용할 것이며, 원자력발전 감소 및 가스발전 증가는 전력 배출계수를 높일 요인으로 작용할 것이다 (National Planning and Advisory Committee, 2017). 이에 따라 온실가스 배출량 산정 시 ‘2011년도 값’으로 매년 동일하게 적용하는 전력배출계수에 대한 현실화 논의 역시 증가할 것이다. 전력배출계수가 현실화되고, 만약 그 값이 증가된다면 배출계수효과는 철도수송부문 온실가스 배출 증가의 중요한 요인이 될 것이다. 그렇기에 목표관리제 지침에서 외생적으로 결정되는 전력배출계수 보다는 디젤하이브리드전동차 (Chung, 2009), 틸팅기술차량 (Kim *et al.*, 2011), 에너지저장장치 (Lee *et al.*, 2009) 및 회생제동장치 (Lee *et al.*, 2015)와 같이 에너지의 절대 사용량을 줄이는 기술개발에 대한 지속적 투자가 필요하다.

본 논문은 자료의 한계로 인하여 2011~2016년 동안만 분석하였다. 이는 철도통계연보의 통계작성기준 변경에 따라 도시철도의 통계는 해당 기간만을 제공하고 있으며, 가장 최근 통계인 2017년 통계연보에서는 일부 운영기관 (신분당선 및 대전광역시도시철도공사)의 전력사용량 통계는 누락된 상

태로 공표되었기 때문이다. 하지만, 본 논문은 LMDI 지수분해분석 방법론을 활용한 선행연구를 검토하였으며, 국내에서 활용 가능한 통계자료를 활용하여 철도수송부문에 실증적용하였다는데 의의가 있다. 또한, 이를 통한 결과는 실제 철도 운영기관 및 철도관리기관의 정책을 수립해 가는 데 있어 중요한 시사점을 제공할 수 있다.

## REFERENCES

- Achour H, Mounir B. 2016. Decomposing the influencing factors of energy consumption in Tunisian transportation sector using the LMDI method. *Transport Policy* 52: 64-71.
- Chung BH. 2009. Development trend of railway technology for energy saving in electricity part of Japan. *Journal of the Korean Society for Railway* 12 (2): 30-34. (in Korean with English abstract)
- Dai Y, Gao HO. 2016. Energy consumption in China's logistics industry: A decomposition analysis using the LMDI approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 46: 69-80.
- Enforcement Rule of the Energy Act No.14079. 2017. (in Korean)
- Kim CY, Lee CK, Kim YK, Pruittichaiwiboon P. 2010. Prediction about potential reduction of CO<sub>2</sub> through modal shift of car travelers to train. 2010 Spring Conference of the Korean Society for Railway 2292-2296. (in Korean with English abstract)
- Kim DS, Son KS, Kim HS, Kim JW, Kim JK. 2011. A study on the energy saving through the tilting technology of rolling stock. 2011 Fall Conference of the Korean Society for Railway 3027-3031. (in Korean with English abstract)
- Kim JS. 2015. A review on energy decomposition analysis in Korea. *Korea Energy Economic Review* 13 (3): 265-291. (in Korean with English abstract)
- Kim KW, Kang BW. 2017. Analysis on the determinants of energy consumption changes in Korea. Korea Energy Economics Institute. Ulsan. (in Korean with English abstract)
- Kim SY, Kim SK. 2016. Decomposition analysis of the greenhouse gas emissions in Korea's electricity generation sector. *Carbon Management* 7 (5-6): 249-260.
- Kim SY. 2018. Decomposition analysis on GHG emissions of domestic electricity generation sector. *Korea Energy Economic Review* 17 (1): 241-264. (in Korean with English abstract)
- Kwon TH. 2005a. Decomposition of factors determining the trend of CO<sub>2</sub> emissions from car travel in Great Britain, 1970 - 2000. *Ecological Economics* 53 (2): 261-275.
- Kwon TH. 2005b. A scenario analysis of CO<sub>2</sub> emission trends from car travel: Great Britain 2000 - 2030. *Transport Policy* 12 (2): 175-184.
- Lee CM, Lee HM, Kim GD. 2009. Review about peak power reduction utilizing energy storage system at AC electric railway. 2009 Fall Conference of the Korean Society for Railway 1150-1155. (in Korean with English abstract)
- Lee HS, Kim JH, Kim H. 2015. Electric power loss comparison study for regenerative utilization technologies in DC electric railway systems. The 2015 Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers 1597-1598. (in Korean with English abstract)
- Lee JH, Lim JJ, Kim YK, Lee JY. 2012. LMDI Decomposition analysis on characteristics of greenhouse gas emission from the line of railroad in Korea. *Journal of The Korean Society for Railway* 15 (3): 286-293. (in Korean with English abstract)
- Lee JY, Jeong HS, Jeong WS, Kwan SB. 2007. A Study on the Effect of Railroad Electrification in the Emission of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>). The 2007 Environmental Societies Joint Conference 1641-1642. (in Korean)
- Lee JM, Han SY. 2011. Factor decomposition analysis on energy consumption and intensity changes in transportation industry. *Journal of Korean Economy Studies* 29 (2): 213-241. (in Korean with English abstract)
- Mendiluce M, Lee S. 2011. Trends in passenger transport and freight energy use in Spain. *Energy Policy* 39 (10): 6466-6475.
- Ministry of Environment Public Notice No.2016-225. 2016. Guidelines for greenhouse gas and energy target management and management, Ministry of Environment, Sejong. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport Public Notice No.2015-401. 2015. 2015 building, transportation and construction greenhouse gas and energy target management entity, Ministry of Land, Infrastructure and

- Transport, Sejong.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network. 2017. The 54<sup>th</sup> statistical yearbook of railroad, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea Rail Network, Sejong.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2016. The 3rd national rail network construction plan (2016~2025), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2017. The 3rd public transportation basic plan (2017~2021), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong. (in Korean)
- National Planning and Advisory Committee. 2017. Moon Jae-in Government 5-year plan, National Planning and Advisory Committee, Seoul. (in Korean)
- Papagiannaki K, Diakoulaki D. 2009. Decomposition analysis of CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars: The cases of Greece and Denmark. *Energy Policy* 37 (8): 3259-3267.
- Park NB, Jeon EC. 2013. Decomposition analysis for energy and GHG emissions of Korea's industry sector in the past and for the mid-term target. *Journal of Environmental Policy and Administration* 21 (3): 103-126. (in Korean with English abstract)
- Park SJ, Woo SK. 2012. Kim KW, Kang BW. 2017. Analysis on the determinants of energy consumption changes in Korea. The Korea Transport Institute. Sejong (in Korean with English abstract)
- Steenhof P, Woudsma C, Sparling E. 2006. Greenhouse gas emissions and the surface transport of freight in Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11 (5): 369-376.
- Timilsina GR, Shrestha A. 2009a. Factors affecting transport sector CO<sub>2</sub> emissions growth in Latin American and Caribbean countries: an LMDI decomposition analysis. *International Journal of Energy Research* 33 (4) 396-414.
- Timilsina GR, Shrestha A. 2009b. Transport sector CO<sub>2</sub> emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options. *Energy policy* 37 (11): 4523-4539.
- Wang, WW, Zhang M, Zhou M. 2011. Using LMDI method to analyze transport sector CO<sub>2</sub> emissions in China. *Energy* 36 (10) 5909-5915.
- Wu HM, Xu W. 2014. Cargo transport energy consumption factors analysis: Based on LMDI decomposition technique. *IERI Procedia* 9: 168-175.
- Zhang M, Wang W. 2011. Using LMDI method to analyze transportation sector energy consumption in China between 2006 and 2030. 2011 2nd International Conference on IEEE, 6488-6491.