

## 고속철도는 고속도로에 비하여 저탄소 친환경적인가?

### Does High-Speed Rail Have Superiority over Motorway in Terms of CO<sub>2</sub> Emission?

강 태 석 Kang, Taeseok  
장 현 호 Chang, Hyunho

정회원 · 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 박사과정 (E-mail : tslux04@hanmail.net)  
정회원 · 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 연구교수 · 교신저자 (E-mail : nettrek@snu.ac.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** The aim of this article is to compare and identify eco-friendly competitiveness between (regional) motorway and high-speed rail(HSR) from the perspective of CO<sub>2</sub> emission in the Republic of Korea.

**METHODS :** In order for an analysis of low-carbon competitiveness between the two modes, CO<sub>2</sub>e emission, CO<sub>2</sub>eppk (equivalent CO<sub>2</sub> gram per passenger kilometer), is employed as a comparison index. As for HSR, the index is calculated based on the passenger transport data and the gross of CO<sub>2</sub>e produced by Kyungbu high-speed line in 2013. Additionally, the gross of CO<sub>2</sub>e is computed by the greenhouse gas emission factors of domestic electricity generation mix. Regarding the index of motorway, it is directly calculated using both the official CO<sub>2</sub>e emission factor and the passenger-car occupancy of motorway.

**RESULTS :** The results revealed, in the case of inter-regional transport, that the CO<sub>2</sub>e emission of displacement-based cars is 54.9% less than that of HSR, as the domestic electric power systems heavily relies on the thermal power plants over 66%. Note that internal combustion engines commonly used for vehicles are more energy-efficient than steam-driven turbines usually utilized for thermal power generation.

**CONCLUSIONS :** It can be seen, at the very least in our study, that HSR has no superiority over motorway in the case of CO<sub>2</sub>e emission under the situations of domestic electricity generation mix. In addition, advanced eco-friendly vehicles have strong advantages over HSR. Therefore, all-out efforts should be made to develop and harvest renewable energy sources in order to achieve low-carbon HSR, sparing fossil fuels.

#### Keywords

*Global Warming, Low-Carbon Competitiveness, Electricity Generation Mix, High-Speed Rail, Motorway*

Corresponding Author : Chang, Hyunho, Research Professor  
Seoul National Univ., 82 Dong, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu,  
Seoul, 08826, Korea  
Tel : +82.2.880.5666 Fax : +82.2.886.7935  
E-mail : nettrek@snu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Feb. 25, 2016 Revised Jun. 29, 2016 Accepted Sep. 28, 2016

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

전세계적으로 기후변화에 대한 우려가 커지면서 온실 가스 저감에 대한 관심이 많아졌고, 이에 따라 각 산업 부문에서 온실가스를 저감하기 위한 노력이 이뤄지고 있다. 도로부문은 국토교통부의 계획을 기반으로 친환경

경자동차 도입을 적극적으로 도모하고 있는 추세이며, 이는 기존에 설치된 도로를 그대로 이용할 수 있는 능동적인 방안이다. 그러나 철도의 경우 분진이 없는 것으로 알려져 있는 자기부상열차와 같은 친환경열차를 도입하려면 새로운 철도노선을 건설하거나 개조해야 하므로 추가적인 비용이 수반되는 수동적인 방안으로 볼 수 있

다. 따라서 각 수단의 친환경기술 도입 초기에 필요한 에너지와 온실가스 배출 측면에서는 철도보다 도로가 더 효율적일 것으로 예상된다.

열차가 고속으로 운행되기 위해 필요한 에너지는 속도의 증가량보다 더 크게 증가한다. 그럼에도 불구하고 시속 300km의 고속철도가 시속 100km의 고속도로보다 저탄소 친환경적이라는 사회적 인식이 형성되어 있다. 본 연구는 이에 대한 의문을 가지고 고속철도와 고속도로의 저탄소경쟁력을 비교하기 위한 실증적인 연구를 수행하였다.

국내 중·장거리 통행은 고속철도와 고속도로가 동시에 그 역할을 수행하고 있다. 고속철도(KTX)는 2004년 국내에 도입된 이후 운행지역과 차량편성이 증가하고 있다. 철도사업의 장점으로 경제성과 소요통행시간 절감 외에도 전기를 사용한다는 점에서 도로에 비해 친환경적일 것이라는 인식이 있다. 그러나 국내에서 고속철도와 고속도로의 친환경성을 정량적으로 비교한 연구 사례는 극소수에 불과하다(김병관 등, 2014). 철도의 환경적 우위성에 대해서는 대부분 외국의 사례를 인용하였으며 실적자료 기반의 정량적 분석 연구는 부족한 실정이다.

고속철도는 전력을 에너지원으로 이용하기 때문에 전력생산 과정에서 온실가스가 필연적으로 배출된다. 그리고 국내의 경우 화력발전 비율이 66.6%로 친환경 신재생에너지를 이용하는 선진국에 비하여 높은 비중을 차지하고 있다. 따라서 국내 고속철도는 전력소모에 따른 온실가스 배출량이 선진국보다 높을 것으로 예상되며 운영실적을 기반으로 실제 온실가스 배출량을 산정할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구는 국내 발전소 운영현황 하에서 고속철도와 고속도로를 이용할 때 발생하는 CO<sub>2</sub>의 양을 중점적으로 분석하여 어느 수단이 저탄소 친환경적인가를 비교하고자 한다. 그리고 향후 친환경교통체계 구축을 위해 나아가야 할 정책방향을 제시하고자 한다.

## 1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 2013년 운영실적자료를 기반으로 고속철도와 고속도로의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위(gCO<sub>2</sub>ppkm)를 산정하여 수단 간 환경적 우위성을 비교하였다.

고속철도의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위는 한국철도공사가 발행한 「2013년도 철도통계연보」의 경부고속선 연간 수송실적 및 전력사용량을 이용하여 실제 실적자료 기반의 분석을 수행하였다. 그리고 전력거래소의 국내 발전

원별 발전비율과 국제원자력기구(IAEA, 2006)의 발전원별 CO<sub>2</sub> 배출계수를 적용하여 고속철도 운영 시 사용한 전력의 발전에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

고속도로의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위는 국내 자동차 제조사에서 측정하여 제시한 휘발유차량과 경유차량의 CO<sub>2</sub> 배출계수를 적용하였다. 고속도로는 2013년 동안 배출된 CO<sub>2</sub>의 양을 측정한 공식자료가 없으며, 고속도로 주행 시 CO<sub>2</sub> 배출량은 일반적으로 시내부 도로 주행에 비해 20% 이상 낮기 때문에 제조사의 배출계수 적용에 무리가 없다고 판단하였다. 고속도로 이용차량의 재차인원 또한 정확한 자료의 부재로 인해 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)」의 전국 지역 간 승용차 재차인원(1.55인/대)을 적용하였다. 단, CO<sub>2</sub> 배출계수와 재차인원은 실제 현황 자료가 아니므로 고속철도와 비교를 위하여 다양한 값을 적용한 시나리오 분석을 추가적으로 수행하였다.

연구의 수행과정은 첫째, 연구의 배경을 서술하고 목적을 제시한다. 둘째, 철도 및 도로의 온실가스 배출량을 산정한 선행 연구 고찰을 통해 시사점을 도출한다. 셋째, 본 연구의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위 산정 방법을 제시한다. 넷째, 국내 운영실적을 기반으로 수단별 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 산정하고 비교한다. 마지막으로 연구의 결론 및 향후 연구과제를 제시한다.

## 2. 선행 연구 고찰

교통부문에서 철도나 도로, 항공 등의 수단별로 온실가스를 산정하는 연구가 다양한 국가에서 진행되고 있으며, 특히 철도의 온실가스 배출량을 산정할 때에는 초기건설 및 운영과정에서의 배출량을 포함한 전과정평가(life cycle assessment)를 수행하고 있다(김병관 등, 2014; 이재영 등, 2012; Akerman, 2011; Chang and Kendall, 2011; Janic, 2003; Miyoshi and Givoni, 2013; Todorovich and Burgess, 2013).

고속철도와 고속도로가 동시에 중·장거리 통행을 처리하는 역할을 수행하기 때문에 두 수단의 친환경경쟁력을 비교하는 것은 지속가능한 교통체계를 구축하기 위한 중요한 쟁점사항이다. 다수의 국내외 연구들이 고속철도가 고속도로보다 저탄소 친환경적이라는 연구결과를 제시하고 있는데 이에 대한 반론을 제기하는 연구도 존재한다. 이에 본 연구는 두 수단의 친환경경쟁력을 검토한 연구를 두 집단으로 구분하여 고찰하

고, 공정한 비교연구를 수행하기 위한 시사점을 도출하였다.

## 2.1. 고속철도의 친환경성 관련 연구

고속철도를 운영하고 있는 여러 국가들에서는 고속철도와 승용차의 온실가스 배출량을 산정하고 비교하여 고속철도의 친환경성을 밝힌 연구가 수행되었다. 특히 화력발전의 비중이 10% 미만으로 낮은 스웨덴의 경우 건설단계에서 운영단계까지의 전과정평가 결과 화물과 승객수송 부문 모두에서 고속철도의 온실가스 배출량이 승용차에 비해 낮은 것으로 연구되었다(Akerman, 2011). 신재생에너지 발전비율이 높은 캘리포니아의 경우에도 고속철도가 도로나 항공에 비해 온실가스 배출량이 낮은 것으로 연구되었으며(Todorovich and Burgess, 2013), 영국의 고속철도 또한 타수단에 비해 저탄소 친환경적이라는 연구가 수행되었다(Miyoshi and Givoni, 2013). 그러나 선행 연구의 결과처럼 고속철도가 친환경경쟁력을 갖기 위해서는 첫째, 신재생에너지 발전비율이 매우 중요한 역할을 하며 둘째, 재차율이 높아야 하고 마지막으로 최대속도가 너무 높지 않아야 한다(Todorovich and Burgess, 2013).

고속철도와 승용차의 친환경성을 비교한 국내 연구 동향을 살펴보면 한국철도공사가 발간한 「2014년도 환경경영보고서」와 김병관 등(2014)의 연구 외에는 찾아보기 어렵다. 「2014년도 환경경영보고서」는 고속철도와 소나타를 대상으로 온실가스 배출 원단위를 비교하였으며, 고속철도는 20g/인·km, 소나타는 125g/인·km로 고속철도가 소나타보다 온실가스 배출량이 6배 이상 적은 것으로 제시하였다. 김병관 등(2014)의 연구에서도 철도와 도로의 환경적 우위성을 비교하기 위하여 2006 IPCC 가이드라인의 Tier 1 수준에서 각 수단별 온실가스 배출량을 산정하였다. 승용차 대비 철도의 온실가스 배출량을 산정한 결과, 승객용 철도(일반 및 고속 전체)는 1/4, 화물용 철도는 1/10, 고속철도는 1/6 수준의 온실가스 배출량 저감효과가 있는 것으로 제시하였다.

## 2.2. 고속철도의 친환경성에 대한 반대연구

국외에서는 고속철도가 저탄소 친환경적이라는 연구 결과에 대해 비판적인 시각을 제시하는 연구가 존재한다(O' toole, 2008; Randall, 2009). 이들 논문은 고속철도가 타수단에 비해 친환경경쟁력을 갖기 위해서는 모든 운영구간에서 높은 재차율로 운영되어야 하지만

실제 수송실적은 그에 미치지 못하는 실정임을 지적하고 있다. 또한 운영 중의 온실가스 배출 외에도 기반시설 건설과 유지보수를 위한 에너지 소비 및 온실가스 배출량이 크기 때문에 고속철도가 승용차에 비해 친환경적이라고 단언할 수는 없다고 언급하고 있다. Chang and Kendall(2011)은 고속철도 건설단계에서 대량의 온실가스가 배출되며 재차율이 낮은 경우에는 건설 시 배출된 온실가스의 양을 만회하는데 20년 이상의 시간이 걸린다는 연구결과를 제시하였다.

또한 고속철도의 에너지원인 전력을 생산하기 위한 발전원의 비율이 국가 또는 지역마다 다르기 때문에 화력발전의 비중이 높은 지역에서는 고속철도의 온실가스 배출량이 높아지게 된다. Janic(2003)은 프랑스와 독일을 사례로 발전원의 비율에 따른 CO<sub>2</sub> 발생 원단위를 산정하였다. 프랑스는 화석연료의 비율이 5.5%인데 반해 독일은 화석연료 비율이 50%를 상회하였다. 두 국가의 온실가스 배출 원단위는 각각 4.011g/인·km, 27.515g/인·km로 나타나 독일이 6배 이상 높은 것으로 분석되었다.

고속열차가 주행하는데 필요한 에너지는 가속을 위한 운동에너지와 속도를 유지하기 위해 저항을 극복해내는 에너지의 합과 같다(Davies and Thompson, 2009; John, 2009). 또한 공기의 저항과 마찰에너지는 주행 속도 증가에 따라 우상향의 그래프를 그리며 커지게 된다(Todorovich and Burgess, 2013). 에너지의 증가는 곧 온실가스 배출량의 증가를 의미하므로, 고속철도의 에너지 소비량과 온실가스 배출량은 우상향의 곡선형 그래프를 그리며 증가한다. 따라서 고속철도의 고속주행구간에서는 일반주행구간보다 전력소비량 및 온실가스 배출량이 더욱 높아지게 되므로 이를 고려하여 분석할 필요가 있지만, 선행 연구들은 고속구간만을 대상으로 분석하려는 시도를 하지 않았다.

이외에도 고속철도의 친환경성을 주장하는 연구들의 공통적인 한계는 다음과 같이 지적되고 있다(O' toole, 2008). 첫째, 도로와 항공 부문의 연료효율성 개선을 고려하지 않고 있다. 둘째, 도로 부문에서 적극적으로 검토하고 있는 친환경차량의 보급을 무시하고 있다. 셋째, 고속도로 혼잡을 완화할 수 있는 신기술 도입을 배제하고 있다. 마지막으로 사람들의 출발지와 목적지가 고속철도역이라고 가정하고 있다. 이러한 한계점들은 주로 고속철도 외 수단의 친환경기술 발전을 고려해야 한다는 내용이며 승용차의 장점인 Door-to-Door 서비스가 함께 고려되어야 한다는 것이다.

### 2.3. 시사점

지금까지 국내외에서 수행된 연구를 살펴보면 고속철도가 승용차보다 저탄소 친환경적이라는 결론을 제시하는 연구가 대다수이며, 이 중에는 전과정평가를 통해 비교적 공정한 평가를 한 연구도 있다. 이에 따라 전세계적으로 고속철도가 친환경경쟁력을 가진 교통수단이라는 인식이 일반화되는 것으로 보인다. 그러나 각각의 연구결과는 특정 국가의 고속철도를 대상으로 분석한 것이며, 여러 연구들에서 언급한 바와 같이 발전 에너지원의 비율에 따라 결과가 달라질 수 있다는 점을 고려할 때 모든 국가에서 고속철도가 친환경적이라는 결론을 내리는 것은 성급한 것이다.

앞서 고찰한 국내 연구들은 국내 현황에 따른 분석을 수행하기 위하여 국내 발전소의 발전현황을 반영하여 온실가스 배출량을 산정하였으며, 고속철도가 친환경경쟁력을 가지는 것으로 결과를 제시하고 있다. 그러나 이들은 고속주행 구간과 일반주행 구간을 분리하지 않고 전체 구간에서 사용한 전력량과 수송실적을 기반으로 분석하였기 때문에 실질적인 국내 고속철도의 운영현황을 반영하지 못하였다. 국내의 고속철도는 고속구간뿐만 아니라 기존에 설치된 일반구간도 함께 교차하며 운행되고 있다. 특히 재차율이 가장 높은 구간인 서울 인근 지역은 일반구간을 이용하고 있기 때문에 이를 포함하여 분석할 경우에는 결과에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 고속주행 시에는 필요한 에너지의 양이 커진다는 점을 고려할 때 고속구간의 운행실적 자료만을 이용하여 분석해야만 고속철도의 친환경경쟁력을 올바르게 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 선행연구 고찰을 통해 도출한 시사점을 반영하여 국내 고속철도의 고속본선 운영실적 및 발전원에 따른 CO<sub>2</sub> 배출계수 등을 분석에 이용하였으며, 이를 배기량 등급별 승용차의 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교하였다.

## 3. 수단별 저탄소 친환경경쟁력 분석 방법

### 3.1. 고속철도 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 방법

고속철도와 같이 전력을 에너지원으로 사용하는 교통수단은 운행 중 CO<sub>2</sub> 배출은 없지만 전기생산 과정에서 CO<sub>2</sub>가 배출된다. 따라서 본 연구에서는 국내 발전소의 발전 현황 및 고속철도 운영 현황을 반영하여 국내 고속철도의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하도록 한다. 그리고 수송실적을 이용하여 인·km당 CO<sub>2</sub> 배출량을 계산하고

이를 수단 간 비교를 위한 CO<sub>2</sub> 배출 원단위 지표로 사용한다.

철도의 노선은 고속선(high speed tracks)과 일반선(conventional tracks)이 있으며, Fig. 1과 같이 고속열차(high speed trains)와 일반열차(conventional trains)가 고속선과 일반선을 교차하여 운영될 수 있다. 국내 고속철도인 KTX는 Fig. 1의 Model 2와 같이 고속선을 주로 이용하며 일부 시내구간에서는 기존의 일반선을 이용하는 교차운영 방식을 적용하고 있다. KTX는 고속주행구간에서는 최대 305km/h의 속도로 주행할 수 있으며, 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 16량이 하나의 편성으로 구성되어 공차 기준으로 총중량이 701.1톤에 이른다. KTX의 좌석수는 총 935석으로 특실 127석과 일반실 808석이며, 입석을 포함하면 만차 시 약 1천 명이 이용할 수 있다. 본 연구는 경부고속철도를 분석대상으로 하며, 일반선인 경부본선을 이용하는 구간의 수송실적을 제외한 경부고속본선(광명역-부산역) 수송실적 자료를 이용하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정한다.

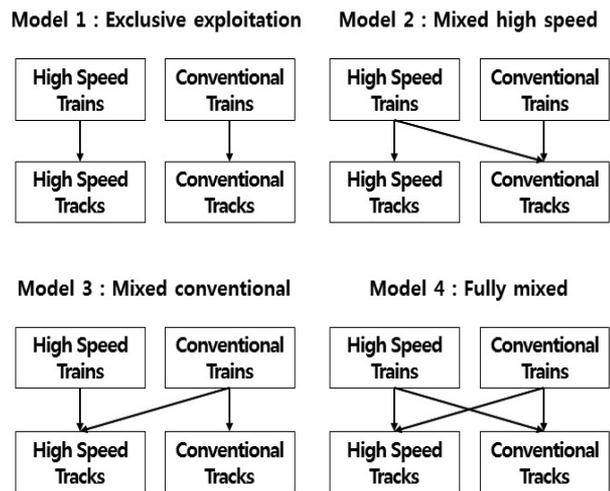


Fig. 1 Rail Operation Types (Campos and de Rus, 2009)

고속철도의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 기본식은 IPCC 가이드라인에서 제시한 Tier 2 방법을 이용하며, 그 수식은 다음과 같다.

$$E = \sum_a [Fuel_a \cdot EF_a] \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 CO<sub>2</sub> 배출량(kg),  $Fuel_a$ 는 연료소비량(TJ),  $EF_a$ 는 배출계수(kg/TJ),  $a$ 는 연료 종류(휘발유, 경유, 천연가스 등)이다. Tier 2 방법은 국가 고유의 배출계수를 적용해야 하며, 고속철도는 전력을 에너지원

으로 사용하기 때문에 Eq.(1)을 전력 기반 산식으로 수정하여 Eq.(2)와 같은 식을 도출하였다.

$$E = EPU \cdot EF_p \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 CO<sub>2</sub> 배출량(gCO<sub>2</sub>e),  $EPU$ 는 전력사용량(kWh),  $EF_p$ 는 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수(gCO<sub>2</sub>e/kWh)이다. 발전원에 따른 CO<sub>2</sub> 배출계수는 국제원자력기구(IAEA, 2006)의 계수를 사용하였으며, 이는 Table 1과 같다.

Table 1. CO<sub>2</sub> Emission Factors for Electricity Generators (IAEA, 2006)

Energy source	CO <sub>2</sub> e emission factor (gCO <sub>2</sub> e/kWh)	CO <sub>2</sub> e emission factor (tCO <sub>2</sub> e/MWh)
Coal	991	0.991
Petroleum	782	0.782
LPG	549	0.549
Biomass	70	0.070
Solar energy	57	0.057
Wind force	14	0.014
Nuclear	10	0.010
Hydroelectric	8	0.008

국내 발전소는 기력·내연·복합·비중양·수력·원자력·집단에너지발전 등의 7개 방식으로 구성되어 있으며, 전력거래소에서 각 발전소별 발전량 통계를 제시하고 있다. 국내 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수는 에너지원별로 단위 전력을 생산할 때 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 계산하여 적용한다. 이를 산정하기 위한 기초자료는 국내 발전소의 발전원별 발전량 자료(2013년)를 이용하였다. 국내 발전소 전체에서 발전원별로 생산한 전력량은 Fig. 2와 같다. 각 발전원별로 보면 화석연료를 사용하는 기력발

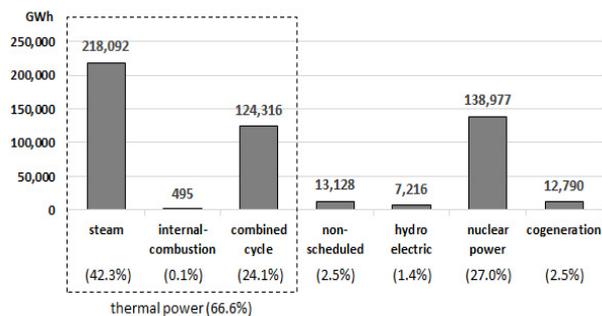


Fig. 2 Power Generation by Types of Power Plants in Korea (2014)

전과 내연발전, 복합발전의 비율이 66.6%로 나타나 아직까지 화석연료 의존도가 높다.

국내 발전소의 시간대별 발전량과 고속철도의 시간대별 열차 운행비율은 Fig. 3과 같다. 발전량은 오전시간대(10시~12시)에 가장 높고, 새벽시간대(2시~5시)에 가장 낮다. 고속철도의 시간대별 운행현황은 발전량 그래프와 유사한 형태를 보이며, 발전량이 낮은 새벽시간대에는 고속철도가 운행되지 않는 것으로 나타났다. 즉, 고속철도가 운행되는 시간대는 5시부터 익일 2시까지이며, 이 시간대에 생산된 전력이 고속철도에 공급된다. 따라서 본 연구에서는 5시부터 익일 2시까지의 발전소 CO<sub>2</sub> 배출량을 이용하여 고속철도의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정한다.

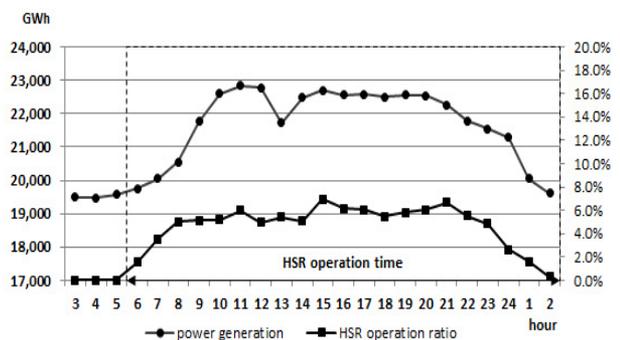


Fig. 3 Power Generation and HSR Operation Ratio

발전소에서 전력을 생산할 때 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 발전소 유형별로 사용되는 주요 에너지원의 CO<sub>2</sub> 배출계수에 따른다고 가정하였다. 또한 본 연구에서는 고속철도가 운행되는 시간대에 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였으며, 이를 위하여 5시에서 익일 2시까지의 발전소별 발전량과 CO<sub>2</sub> 배출계수를 Table 2와 같이 구하

Table 2. Power Generations and CO<sub>2</sub> Emissions for Electricity Generators at HSR Operation Time

Type of power plants	Power generation (MWh)	CO <sub>2</sub> emission factor (tCO <sub>2</sub> e/MWh)	CO <sub>2</sub> emission (tCO <sub>2</sub> e)
Total	456,480,488	0.555	253,434,856(100.0%)
Steam	191,777,479	0.983	188,525,590(74.4%)
Internal-combustion	453,174	0.782	354,382(0.1%)
Combined cycle	112,603,615	0.549	61,819,385(24.4%)
Non-scheduled	11,541,544	0.057	657,868(0.3%)
Hydro electric	7,013,042	0.008	56,104(0.0%)
Nuclear power	121,581,446	0.010	1,215,814(0.5%)
Cogeneration	11,510,188	0.070	805,713(0.3%)

Note: Values are calculated during HSR operation time (5pm-2am)

었다. 화석연료를 사용하는 기력·내력·복합발전은 CO<sub>2</sub> 배출계수가 높고 발전량 또한 큰 비중을 차지하기 때문에 전체 CO<sub>2</sub> 배출량의 98.8%가 화력발전에서 배출되고 있다. 원자력 및 신재생에너지 발전은 CO<sub>2</sub>가 매우 적게 배출되지만 발전량이 적다. 전체 발전소의 평균적인 CO<sub>2</sub> 배출계수는 0.555tCO<sub>2</sub>e/MWh로 산정되었으며, 고속철도의 전력사용량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출계수는 이 값을 적용하였다.

### 3.2. 고속도로 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 방법

본 연구는 승객용 고속철도를 분석대상으로 하므로 대체가능한 수단과 비교하기 위하여 고속도로를 주행하는 비사업용 승용차를 분석대상으로 선정하였다. 고속철도는 운영사인 한국철도공사에서 수송실적 자료와 총 소비전력 등의 통계자료를 수집하고 있어 총량적인 관점에서 분석이 가능하다. 그러나 고속도로의 경우 한국도로공사의 TCS(Toll Collection System) 자료를 이용하면 승용차의 경부고속도로 이용실적 자료는 구할 수 있지만 실제 주행 시 소비한 연료의 양을 수집한 자료는 존재하지 않는다. 또한 승용차의 차종마다 연비나 CO<sub>2</sub> 배출량이 크게 다르기 때문에 고속철도와 비교하기 위해서는 통계적인 방법을 적용하여 단일값을 사용할 필요가 있다.

고속도로를 주행하는 승용차의 CO<sub>2</sub> 배출량은 국내 자동차제조사에서 제시하는 CO<sub>2</sub>e 배출계수를 적용하여 계산한다. 제조사는 차량을 시험실의 차대 동력계상에서 배기 분석계 및 시료 채취관을 연결하고 공인연비

주행모드로 모의주행을 실시하여 차량의 CO<sub>2</sub>e 배출계수를 결정한다. 이러한 CO<sub>2</sub>e 배출계수는 시내부도로 및 고속도로 주행을 고려하여 산출되므로 감가속과 회전횟수가 적은 고속도로의 경우 제조사의 배출계수보다 적은 CO<sub>2</sub>가 배출될 것으로 판단되지만, 본 연구는 제조사의 배출계수를 기본으로 적용하며 배출계수 증감에 따른 시나리오 분석을 통해 보수적인 관점에서 분석을 수행한다.

국내 자동차제조사 모든 모델을 4가지 배기량 등급(경형 1,000CC 미만, 소형 1,500CC 미만, 중형 2,000CC 미만, 대형 2,000CC 이상)으로 구분하여 휘발유 차량과 경유 차량의 배기량 등급별 평균 연비와 평균 CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정하였다. 그리고 2013년 자동차등록대수 통계의 전국 단위 배기량별 비사업용 승용차 등록대수를 이용하여 배기량 등급별로 등록된 차량수를 기준으로 가중평균하여 전체 비사업용 승용차의 평균 연비와 평균 CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정하였다. 이 때 휘발유 차량과 경유 차량의 등록대수 비율은 51%와 49%로 비슷한 비중을 가지는 것으로 나타났으며 이를 이용하여 연료별 가중치를 적용하였다.

최종적인 결과는 Table 3과 같으며, 배기량 등급별 CO<sub>2</sub> 배출계수(gCO<sub>2</sub>e/km)는 경형 121.2, 소형 140.5, 중형 160.4, 대형 239.9로 등급이 낮을수록 CO<sub>2</sub> 배출계수가 낮은 것으로 나타났다. 비사업용 승용차 등록대수는 중형이 약 530만대로 가장 많고 대형이 약 183만대, 경형과 소형이 각각 143만대, 153만대로 나타나 등록대수로 가중평균을 하면 전체 비사업용 승용차의 평균

Table 3. The Gas Mileages and CO<sub>2</sub> Emission Factors of Non-Commercial Cars in Korea (2013)

Grade of displacement	Number of non-commercial cars registered(vehicle)	Gasoline		Diesel		Total	
		Gas mileage (km/l)	CO <sub>2</sub> e(g/km)	Gas mileage (km/l)	CO <sub>2</sub> e(g/km)	Gas mileage (km/l)	CO <sub>2</sub> e(g/km)
Total	10,090,826	-	-	-	-	15.6	166.1
Light cars (less than 1,000CC)	1,431,903	19.4	121.2	-	-	19.4	121.2
Compact cars (1,000CC - 1,500CC)	1,531,703	16.7	140.5	-	-	16.7	140.5
Medium cars (1,500CC - 2,000CC)	5,296,304	15.1	158.6	17.0	162.4	16.0	160.4
Heavy cars (more than 2,000CC)	1,830,685	9.7	247.8	17.0	231.8	10.7	239.9

Note: All models of cars produced by automobile manufacturers in Korea are classified into four groups based on engine displacement, and for each group average gas mileage and CO<sub>2</sub> emissions are calculated. 48 low-speed electric vehicles and 183 electric vehicles are not included in the number of registered non-commercial vehicles.

CO<sub>2</sub> 배출계수는 166.1g/km로 분석되었다. 본 연구에서 고속도로의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정할 때 이 값을 적용한다.

### 3.3. 수단별 CO<sub>2</sub> 배출 원단위 산정 방법

본 연구는 고속철도와 고속도로의 친환경경쟁력을 검토하는 것을 목적으로 하므로 두 수단 간 비교를 위해서 동일한 조건의 지표를 산정해야 한다. 비교를 위한 지표는 승객수송 인·m당 CO<sub>2</sub> 배출량으로 설정하였으며 단위는 gCO<sub>2</sub>e/인·m이다.

고속철도 부문은 국내 발전소의 발전에 따른 CO<sub>2</sub> 배출계수와 고속철도 운영전력 및 수송실적을 결합하여 Eq. (3)과 같은 방법으로 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 구할 수 있다.

$$UE_{HSR} = UE_{EPG} \cdot \frac{AEPC}{APDS} \quad (3)$$

여기서,  $UE_{HSR}$ 은 고속철도의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위(gCO<sub>2</sub>e/인·km)이며,  $UE_{EPG}$ 는 국내 발전소의 발전시 CO<sub>2</sub> 배출계수(gCO<sub>2</sub>e/kWh),  $AEPC$ 는 고속철도의 연간 전력 소비량(kWh),  $APDS$ 는 고속철도의 연간 수송 실적(인·km)이다.

국내 발전소의 발전시 CO<sub>2</sub> 배출계수는 Table 2에서 제시한 고속철도 운행시간대의 CO<sub>2</sub> 배출계수를 이용한다. 이때 전력을 생산하는 발전소 유형별 비율은 2013년 연평균 비율이 유지된다고 가정하여 전력 1kWh를 생산할 때 0.555g의 CO<sub>2</sub>가 발생하는 것으로 적용한다. 그리고 고속철도의 연간 전력 소비량과 고속철도의 연간 수송실적은 2013년도 철도 통계연보에서 제시한 경부고속선의 연간 전력 소비량 및 연간 인·거리 수송실적 자료를 적용한다.

고속도로 부문은 배기량 등급별 휘발유 및 경유차량의 CO<sub>2</sub> 배출계수(gCO<sub>2</sub>e/km)와 차량당 승용차 재차인원(인/대)을 이용하여 Eq. (4)와 같은 방법으로 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 구할 수 있다.

$$UE_{car} = \frac{EPD}{PCO} \quad (4)$$

여기서,  $UE_{car}$ 는 승용차의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위(gCO<sub>2</sub>e/인·km)이며,  $EPD$ 는 1km 주행당 CO<sub>2</sub> 배출량(gCO<sub>2</sub>e/km),  $PCO$ 는 차량당 승용차 재차인원(인/대)이다.

승용차가 1km를 주행하는데 배출되는 CO<sub>2</sub>의 양은 앞

에서 2013년 비사업용 승용차 등록대수를 기준으로 구한 배기량 등급별 CO<sub>2</sub> 배출계수를 적용한다. 그리고 차량당 승용차 재차인원은 2013년에 경부고속도로를 대상으로 조사한 자료가 없기 때문에 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)」에서 제시한 승용차의 전국 지역 간 재차인원과 동일한 것으로 가정하여 이 값을 적용하며, 보수적인 분석을 위하여 CO<sub>2</sub> 배출계수 및 재차인원 변동에 따른 시나리오 분석을 추가적으로 수행한다.

## 4. 수단별 CO<sub>2</sub> 배출 원단위 산정 및 비교

### 4.1. 수단별 CO<sub>2</sub> 배출 원단위 산정

2013년 KTX 경부고속선의 여객수송실적과 전력사용량은 Table 4와 같다. 총 수송인원은 11,550천 명이고, 수송인거리는 2,641,492천 명·km로 나타나 평균 이용거리가 228.7km로 계산된다. 이 중 정기이용자들의 평균 이용거리는 87.6km로 비교적 짧은 거리를 이용하는 것으로 나타났다. 경부고속선의 총연장이 346.4km인 것을 감안하면 승객은 평균적으로 총연장의 66%를 이용하는 것으로 분석된다. 그리고 KTX 경부고속선의 2013년 전력사용량은 총 789,405MWh이다.

Table 4. Passenger Traffic and Electricity Usage of Kyungbu High Speed Line in 2013

Type	Passenger (thousand)	Passenger-km (million)	Average travelled (km)	Electricity usage (MWh)
Total	11,550 (100.0%)	2,641 (100.0%)	228.7	789,405
Special	984 (8.5%)	275 (10.4%)	279.8	-
Ordinary	9,333 (80.8%)	2,245 (85.0%)	240.6	-
Other	72 (0.6%)	19 (0.7%)	266.8	-
Season	1,162 (10.1%)	102 (3.9%)	87.6	-

Source : Statistical yearbook of railroad(2013)

KTX 경부고속선의 연간 여객수송실적과 전력사용량을 이용하여 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 산정한 결과는 Table 5와 같다. 최종 산정결과, 경부고속선을 운영할 때 발생하는 인·km당 CO<sub>2</sub> 배출량은 165.9gCO<sub>2</sub>e로 분석되었다.

Table 5. CO<sub>2</sub> Emission of Kyungbu High Speed Line

Classification	Value
Annual electricity usage(MWh)	789,405
CO <sub>2</sub> emission factor(tCO <sub>2</sub> e/MWh)	0.555
CO <sub>2</sub> emission(gCO <sub>2</sub> e)	438,272,425,596
Annual passenger traffic(passenger·km)	2,641,492,051
CO <sub>2</sub> emission unit(gCO <sub>2</sub> e/passenger·km)	165.9

고속도로의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위는 국산 승용차의 배기량 등급별 평균 CO<sub>2</sub> 배출계수와 전국 지역 간 승용차 재차인원(1.55인/대)을 이용하여 계산하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. CO<sub>2</sub> 배출 원단위(gCO<sub>2</sub>e/인·km)가 가장 낮은 경형은 78.2, 소형은 90.6, 중형은 103.5로 나타났으며, CO<sub>2</sub> 배출계수가 가장 큰 대형 승용차의 경우에도 154.8로 분석되었다. 그리고 전체 평균 원단위는 107.2로 산정되었다.

Table 6. CO<sub>2</sub> Emission of Motorway

Classification	CO <sub>2</sub> emission factor (gCO <sub>2</sub> e/km)	Passenger car occupancy <sup>1)</sup> (passenger/vehicle)	CO <sub>2</sub> emission unit (gCO <sub>2</sub> e/passenger·km)
Total	166.1	1.55	107.2
Light cars <sup>2)</sup>	121.2		78.2
Compact cars <sup>3)</sup>	140.5		90.6
Medium cars	160.4		103.5
Heavy cars	239.9		154.8

note 1: Study on Modification and Supplementation of Standard Guideline for Preliminary Feasibility Studies for Roadway and Railway Projects. 5th ed.

2: The engine displacement is less than 1,000CC.

3: The engine displacement is between 1,000CC and 1,500CC

본 연구는 고속도로의 실제 CO<sub>2</sub> 배출계수와 재차인원 자료의 부재로 고속도로 부문의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 정확하게 분석하지 못하는 한계가 있다. 따라서 CO<sub>2</sub> 배출계수와 재차인원의 증감에 따른 시나리오를 Table 7과 같이 구성하여 분석하였다. 시나리오 A-C는 CO<sub>2</sub> 배출계수의 증가(A: 기준, B: 10% 증가, C: 20% 증가), 시나리오 1-3은 재차인원의 감소(1: 기준, 2: 10% 감소, 3: 20% 감소)를 의미하며, 두 그룹을 교차하여 A-1부터 C-3까지 총 9개의 시나리오를 분석하였다. 시나리오 A-1은 본 연구에서 적용한 CO<sub>2</sub> 배출계수와 재차인원이며, 타 시나리오들은 이 값을 기준으로 배출계수가 증가하거나 재차인원이 감소한 상황을 나타낸다. 그리고 시나리오 C-3은 승용차의 CO<sub>2</sub> 배출계수가 기준 대비 20% 증가(199.3gCO<sub>2</sub>e/km)하고 재차인원

은 20% 감소(1.24인/대)한 가장 열악한 조건을 가정하는 것이다.

Table 7. Variable Adjustments for Scenario Analysis

(Unit : gCO<sub>2</sub>e/km, passenger/vehicle)

Scenario	Variable adjustment	Value
A	Standard CO <sub>2</sub> emission factor	166.1
B	10% increased in CO <sub>2</sub> emission factor	182.7
C	20% increased in CO <sub>2</sub> emission factor	199.3
1	Standard Passenger car occupancy	1.55
2	10% decreased in passenger car occupancy	1.40
3	20% decreased in passenger car occupancy	1.24

시나리오 분석은 제조사의 배출계수보다 실제 고속도로의 배출계수가 높고, 재차인원은 감소할 것으로 가정하는 것으로서 보수적인 관점에서 고속철도와 비교분석하기 위한 과정이다. 그러나 가장 열악한 상황을 가정하는 시나리오 C-3의 경우에도 최종적인 CO<sub>2</sub> 배출 원단위는 160.7gCO<sub>2</sub>e/인·km으로 분석되었으며, 이 또한 고속철도보다 낮은 것으로 분석되었다.

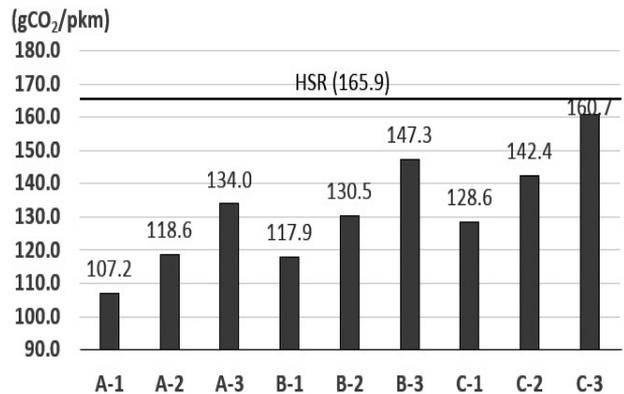


Fig. 4 Results of the Scenario Analysis

#### 4.2. 결과 평가 및 시사점

정부고속선의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위와 고속도로의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 비교하여 정리한 결과는 Table 8과 같다. 본 연구에서 수단별로 CO<sub>2</sub> 배출 원단위(gCO<sub>2</sub>e/인·km)를 산정한 결과 고속철도는 165.9로 산정되어 승용차 전체 평균인 107.2보다 약 1.5배 이상 높은 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 배출량이 적은 경형이나 소형 승용차에 비해서는 1.8배에서 2배 이상 높게 나타났으며, 승용차 중 CO<sub>2</sub> 배출량이 가장 큰 대형차보다도 약 7% 높은 것으로 분석되었다.

Table 8. Comparison of the CO<sub>2</sub> Emission Units between HSR and Motorway

Classification		CO <sub>2</sub> emission unit (gCO <sub>2</sub> e/passenger·km)	CO <sub>2</sub> emission ratio of HSR to motorway
HSR		165.9	-
Motorway	Total	107.2	154.9%
	Light cars	78.2	212.2%
	Compact cars	90.6	183.0%
	Medium cars	103.5	160.3%
	Heavy cars	154.8	107.2%

고속도로의 보수적인 분석을 수행한 시나리오 분석 결과, 승용차의 CO<sub>2</sub> 배출계수를 기준 대비 20% 증가시키고, 재차인원은 고속도로 주행임에도 불구하고 나홀로 차량이 증가한다고 가정하여 기준 대비 20% 감소시킨 시나리오(C-3)의 경우에도 CO<sub>2</sub> 배출 원단위가 160.7로 산정되어 고속철도보다 낮은 것으로 나타났다.

본 연구의 분석 결과, 고속철도는 고속도로보다 반드시 저탄소 친환경적인 수단은 아닐 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 이와 같은 결론은 고속철도가 승용차보다 친환경적이라는 국외 연구와 상반되지만 다수의 논문에서 제시한 바와 같이 고속철도의 친환경성은 발전 에너지원의 종류에 크게 의존하기 때문에 국가나 지역마다 다른 결과가 도출될 수 있음이 명백하다. 실제로 스웨덴이나 캘리포니아 등 화력발전 비율이 낮은 국가들에서 고속철도가 저탄소 친환경적인 수단이라는 연구결과가 발표되고 있으며, 한국의 경우 화력발전의 비율이 66.6%로 매우 높은 수준이므로 선행 연구와 상반된 결과가 나타난 것이 자연스러운 것으로 판단된다. 또한 선행된 국내 연구는 고속철도의 온실가스 배출량을 분석할 때 고속선과 일반선을 구분하지 않았기 때문에 저속으로 운행되는 시내구간을 고속철도로 산입하여 계산하였다. 이는 고속철도의 중요한 특징인 고속운행을 고려하지 못한 연구의 한계로 판단되며 연구결과가 본 연구와 상이하게 나타났다.

본 연구에서 고속철도가 친환경경쟁력이 낮다는 결론이 도출된 근거는 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 앞서 언급한 바와 같이 국내는 화력발전의 비중이 높기 때문이다. 전력기반 수단의 친환경경쟁력을 높이기 위해서는 화력발전을 대체할 수 있는 신재생에너지발전의 비중을 높여야 한다. 둘째, 고속철도의 재차율이 높지 않기 때문이다.

서울과 부산을 연결하는 국내 고속철도는 광역시를 거치면서 하차하는 승객이 많아 높은 재차율을 기대하기 어렵다. 또한 재차율이 높은 서울시 및 광역시 인근 구간의 경우 일반선을 이용하기 때문에 고속선을 대상으로 한 본 연구에서는 이 구간을 분석에서 제외하였다. 마지막으로, 운동에너지와 저항에너지는 주행속도의 증가에 따라 우상향의 그래프를 그리며 커지기 때문에 주행속도가 승용차보다 2배 이상 빠른 고속철도는 주행속도 차이 이상의 에너지를 필요로 한다.

## 5. 결론 및 향후연구

본 연구는 고속철도가 고속도로에 비해 친환경적이라는 인식이 사실에 부합하는지 여부를 확인하기 위하여 실제 고속철도 운영실적을 바탕으로 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 산정하여 고속철도와 고속도로의 친환경경쟁력을 검토하였다.

고속철도는 2013년 경부고속선의 수송실적과 전력소비량 자료를 기반으로 국내 발전소의 발전원별 CO<sub>2</sub> 배출계수를 이용하여 인·km당 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였으며, 그 결과는 165.9gCO<sub>2</sub>e/인·km로 분석되었다. 고속도로는 국내 자동차 제조사에서 측정한 CO<sub>2</sub> 배출계수와 전국 지역간 승용차 재차인원을 이용하여 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 산정하였으며, 전체 평균 107.2gCO<sub>2</sub>/인·km로 분석되어 고속철도가 54.9% 높은 것으로 나타났다. 배기량등급별 결과는 경형 78.2gCO<sub>2</sub>e/인·km에서 대형 154.8gCO<sub>2</sub>e/인·km으로 CO<sub>2</sub> 배출량이 가장 큰 대형승용차도 고속철도보다 낮은 것으로 나타났다.

국내의 2013년 발전원별 발전비율에서 화석연료가 차지하는 비중이 66.6%로 높기 때문에 전력을 에너지원으로 사용하는 고속철도의 CO<sub>2</sub> 배출량이 높게 산정되었다. 이는 여러 선행 연구들에서 고속철도가 친환경적이기 위해서는 화석연료 발전비율이 중요한 영향을 미친다는 주장과 일치하는 것이다.

본 연구의 결과를 기반으로 고속철도의 고속운영구간(경부고속선)은 CO<sub>2</sub> 배출 측면에서 고속도로에 비해 최소한 우위에 있지 않을 수 있다는 사실이 확인되었다. 이는 국내에서 선행된 연구에서 고속철도가 승용차보다 CO<sub>2</sub> 배출량이 적다는 결론과 상반되는 결과이며, 분석방법론과 이용한 자료가 서로 다르고 분석대상이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 기존 연구는 고속선과 일반선을 구분하지 않고 전체 고속철도의 온실가스 배출량

을 산정한 반면에 본 연구는 고속철도가 고속으로 주행하는 구간인 경부고속선만을 대상으로 분석하였다. 고속주행을 유지하기 위해 필요한 에너지가 속도의 증가량보다 더 크게 증가하기 때문에 일반 구간을 모두 포함하여 분석한 기존 연구의 결과보다 CO<sub>2</sub> 배출 원단위가 크게 나타난 것이다.

본 연구의 한계는 고속도로의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 산정하는 방법에서 자료의 부재로 인해 실제 승용차로 고속도로를 주행할 때 배출한 CO<sub>2</sub>와 재차인원을 기반으로 산정하지 않고 국내 자동차제조사에서 제시한 CO<sub>2</sub> 배출계수와 지침에서 제시한 재차인원을 이용했다는 점이다. 이와 같은 한계를 보완하기 위하여 시나리오 분석을 통해 고속도로 부문의 배출계수 증가 및 재차인원 감소를 가정한 보수적인 관점의 분석을 추가적으로 수행하였다. 향후 고속도로 주행 시 발생한 CO<sub>2</sub>의 양과 재차인원을 정확히 제시하는 통계자료가 제공된다면 더욱 객관적인 수단별 비교를 할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 기후변화로 인한 CO<sub>2</sub> 저감에 대한 관심의 증대로 친환경차량의 개발이 가속화되면서 정부 차원에서 하이브리드차량과 전기차량을 보급하기 위한 노력을 하고 있다. 선행연구에서도 지적한 바와 같이 고속철도의 친환경성을 논하기 위해서는 도로부문에서 적극적으로 검토하고 있는 친환경연료를 이용한 차량을 고려해야 할 필요가 있다. 따라서 향후 연구를 통해 하이브리드차량과 전기차량의 CO<sub>2</sub> 배출 원단위를 산정하고 이를 고속철도와 비교하여 교통수단의 개발방향을 설정해야 할 것이다.

본 연구의 분석결과를 통해 전력을 에너지원으로 사용하는 고속철도의 친환경성을 높이기 위해서는 화석연료의 발전비용을 낮추고 신재생에너지 등의 발전비용을 높여야 한다는 정책적인 시사점을 도출할 수 있다. 향후 연구를 통해 고속철도가 고속도로보다 환경적인 우위를 갖기 위한 발전원별 발전비용을 산정한다면 보다 명확한 정책방향을 설계하는데 도움이 될 것이다. 또한 고속철도가 승용차보다 친환경적으로 운영되기 위해서는 수단담당률이 현재의 수준보다 현저히 높아져야 할 것으로 판단되는데, 이는 이용자의 선호에 의한 것이기 때문에 현실적인 대안을 마련하기는 쉽지 않다.

따라서 친환경교통을 중시하는 패러다임에서 중점적으로 개발해야 할 수단에 대한 보다 심층적인 연구가 필요하다.

## REFERENCES

- Akerman J., 2011. The role of high-speed rail in mitigating climate change - The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective, *Transportation Research Part D*, 16, 208-217.
- Campos J. and G. de Rus, 2009. Some stylized facts about high speed rail: A review of HSR experiences around the world, *Transport Policy*, 16(1), 19-28.
- Chang B. and A. Kendall, 2011. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system, *Transportation Research Part D*, 16, 429-434.
- Davies R. and L. Thompson, 2009. Energy consumption and CO<sub>2</sub> impacts of high speed rail: ATOC analysis for Greengauge 21. April.
- IAEA, 2006. A Guide of life-cycle GHG emissions from electric supply technologies.
- Janic M., 2003. High-speed rail and air passenger transport: a comparison of the operational environmental performance, *Journal of Rail and Rapid Transit Part F*, 217(4), 259-269.
- John P., 2009. The case for high speed rail: A review of recent evidence, Royal Automobile Club Foundation for Motoring.
- Kim, Byungkwan, J. Lee, H. Kim, J. Lee, 2014. An analysis of energy consumption and GHG emission per unit of rail and road transportation, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(3), 216-222.
- (김병관, 이진선, 김현구, 이재영, 2014. 철도와 도로 수송부문의 에너지 소비 및 온실가스 배출 원단위 분석, 한국철도학회 논문집, 17(3), 216-222)
- Korea Development Institute, 2008. Study on Modification and Supplementation of Standard Guideline for Preliminary Feasibility Studies for Roadway and Railway Projects. 5th ed., 278.
- (한국개발연구원, 2008. 도로·철도부문 사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판), 278)
- Lee, Jaeyoung, Y. Kim, C. Lee, Y. Rhee, 2012. A study on the calculation of GHG emission for domestic railroad transport based on IPCC guideline, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(4), 408-412.
- (이재영, 김용기, 이철규, 이영호, 2014. IPCC 가이드라인을 이용한 국내 철도수송에 따른 온실가스 배출량 산정에 관한 연구, 한국철도학회 논문집, 15(4), 408-412)
- Miyoshi C. and M. Givoni, 2014. The environmental case for the high-speed train in the UK: Examining the London-Manchester route, *International Journal of Sustainable Transportation*, 8, 107-126.
- O' Toole R., 2008. High-speed rail: The wrong road for America, Policy Analysis No.625, The CATO Institute, Washington,

D.C., October 31, 2008.

Randall P. D., F. John, J. M. William, 2009. High speed rail(HSR) in the United States, CRC Report for Congress.

The Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol.2.

Todorovich P. and E. Burgess, 2013. High-speed rail and reducing oil dependence, Transport Beyond Oil, Island Press/Center for Resource Economics, 141-160.