

철도화물과 도로화물수송의 비교분석 연구: 대기오염물질 및 온실가스 배출

김영주¹, 박재현¹, 오용희^{2*}
¹한국철도기술연구원, ²대진대학교 산업경영공학과

Comparative Analysis on the Rail and Road Freight Transportation: Air contaminant and greenhouse gas emission

Young-Joo Kim¹, Jaehyun Park¹, Yong-hui Oh^{2*}

¹Logistics System Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Department of Industrial and Management engineering, Daejin University

요약 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 세계 각국은 도로중심의 운송체계를 철도 등 친환경 교통체계로 전환하고자 하는 움직임이 증가하고 있다. 우리나라도 도로화물수송의 철도전환을 도모하고자 하고 있으나 실질적인 노력은 부족한 상황이다. 화물철도와 같은 친환경 수송수단에 대한 지원정책 마련을 위해 무엇보다 필요한 것이 바로 도로대비 철도의 친환경성에 대한 정량적 자료이나 이에 대한 연구는 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 철도와 도로의 화물수송 시 배출되는 환경오염물질 및 온실가스 배출 원단위를 산정하고 이의 비교검토를 진행함으로써 철도화물의 친환경성을 제시하였다. 특히 디젤기관차와 전기기관차의 대기오염물질 및 온실가스 배출량이 상이하므로 이를 구분하여 산정함으로써 보다 현실적인 친환경성 비교분석을 수행하였다. 분석결과 도로화물의 단위수송 당 대기오염물질 배출량이 SO₂를 제외하고는 철도보다 7~15배 가량 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 온실가스의 경우 도로화물이 철도대비 약 4배 수준의 온실가스를 배출하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract With increasing global concerns for environmental impacts, efforts have been made to encourage a modal shift from road freight to an eco-friendly transport system such as rail freight. In Korea, the government has set master plans for a green transport system but has not taken any substantial action to promote rail freight transport. In developing policies and actions to promote rail freight, quantitative studies on environmental impacts among transportation means are essential. This study examined the air pollutant emissions and greenhouse gas (GHG) emissions per unit freight transported by road and rail, respectively. To improve the accuracy, we analyzed emission data and freight transport mileage of rail freight considering diesel locomotives and electric locomotives separately. The results show that unit air pollutant emissions (except SO₂) from road freight are about 7~15 times more than those from rail freight. In addition, the GHG emission unit of road freight is about 4 times higher than that of rail freight.

Keywords : Air Pollutant, Environmental Advantage, Greenhouse Gas, Rail Freight Transport, Road Freight Transport

1. 서론

전 세계적으로 온실가스 감축에 대한 관심이 높은 가운데 우리 정부도 2015년 6월 <Post-2020 온실가스 감

축목표 설정 추진계획>을 발표하고 2030년 배출전망 (Business As Usual) 대비 약 15~30%를 감축하는 4개의 시나리오를 마련하는 등 온실가스 감축에 대한 적극적인 의지를 보이고 있다.[1]

This research was supported by a grant from the R&D program of the Korea Railroad Research Institute.

*Corresponding Author : Yong-hui Oh (Daejin University)

TEL : +82-31-539-2008 email : oryong@daejin.ac.kr

Received August 17, 2016

Revised (1st September 5, 2016, 2nd September 8, 2016)

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

온실가스에 대한 적극적 행보와 달리 대기오염 규제 정책에 대해서는 OECD국가들에 비해 우리 정부가 유연한 입장을 견지하고 있다는 평가를 받아왔다. 반면 미국이나 유럽 등 다른 국가들은 온실가스와 대기오염물질의 발생 요인에 주목하며 온실가스 뿐 아니라 대기오염물질 배출에도 엄격한 규제를 가하고 있다[2].

하지만 최근 들어 우리나라도 미세먼지가 국민건강을 해치는 위협요인으로 부각됨에 따라 2016년 6월 노후경유차 운행제한제도를 수도권으로 확대하는 방안에 대해 환경부가 3개 지자체와 합의를 하는 등 환경오염물질 감소에 주의를 기울이고 있다.

국립환경과학원[3]에서 제시한 국내 대기오염물질의 배출원별 배출량 통계를 보면 운송부문(도로이동오염원, 비도로이동오염원)에 의한 대기오염물질 배출이 전체 발생량의 38.5%로 높은 비중을 차지하고 있으므로 운송부문의 대기오염물질 절감이 시급한 상황이다.

국내 온실가스의 경우를 살펴보면 배출량이 2000-2010년간 연평균 2.2% 증가(1970-2000년간은 1.3% 증가)하고 있으며 2011년 기준 온실가스 배출량이 세계 8위에 해당하는 등 온실가스 감축에 대한 필요성이 높아지고 있다[4].

이에 따라 최근 우리 정부는 대기오염물질과 온실가스 배출감소를 위해 「지속가능교통물류발전법」 및 「지속가능 교통물류발전기본계획」, 배출권 거래제도, 대기오염물질 총량규제와 같은 범국가적 차원의 마스터플랜을 발표하며 지속가능한 발전을 위해 적극적인 감축목표를 세우고 있다.

특히 「지속가능 교통물류발전기본계획」에서는 2008년 톤km 기준 8.1%인 철도화물수송 분담율을 2020년까지 18.5%로 증가시키므로써 CO2를 478만톤 감축시켜 총 교통·물류부문 감축목표 중 13.9%를 달성하겠다고 제시하고 있다. 하지만 분담율은 오히려 감소하여 2011년에는 7%대에 머무르고 있는 것이 현실이다.

이는 친환경 수송수단인 철도화물 증대라는 정부의 목표설정과는 달리 실질적인 철도화물 증대방안이 부족한 것이 그 원인 중 하나로 꼽히고 있다. 특히 화물자동차에 지급되고 있는 유가보조금(유류세 보조정책)은 당초 2008년 6월까지 한시적으로 시행하기로 되어 있었으나 화물연대파업 이후 지금까지 계속 지급 중이며 이는 철도화물 비용경쟁력 약화 및 시장 교란의 원인이 되고 있는 상황이다.

Table 1. Rail freight transport volume(RV) and freight transport share of rail (SR)
(RV: million ton-km, SR: %)

Year	'01	'02	'03	'04	'05	'06
RV	10,492	10,784	11,057	10,641	10,108	10,554
SR	7.6	7.64	7.71	7.73	7.09	7.22

Year	'07	'08	'09	'10	'11	
RV	10,927	11,566	9,273	9,431	9,997	
SR	7.57	8.11	6.93	6.95	7.05	

Source : KOTI[12], National Transportation Statistics

한국지방세연구원[5]에 따르면 2011년 기준 화물자동차에 지급된 유가보조금은 1조 5천 300억원 규모이다. 하지만 철도는 유가보조가 전무한 상황이며 전철교통보조금으로 연간 약 30억원 수준만 지원되고 있는 상황이다. 이는 도로 유가보조금의 0.2% 수준으로 철도화물의 수송분담율을 감안 시 매우 작은 수준임을 알 수 있다.

현재 도로에 집중된 화물수송체계에서 친환경 수송수단을 확대할 수 있도록 하는 실천적 정책을 수립하기 위해서 우선적으로 필요한 것은 수송수단 별 친환경성에 대한 정량적 자료이다. 다시 말하면 수송수단 별 온실가스, 대기오염물질 등에 대한 배출 원단위를 도출하는 것이 필요하다.

이는 각 수송수단의 화물수송량 변화에 따른 대기오염물질 및 온실가스 배출량 변화 및 이에 따른 사회적, 경제적 비용 산출로 정책목표 달성을 통한 효과분석의 기본 자료가 되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 육상운송을 책임지고 있는 중요한 두 수송수단인 도로와 철도의 온실가스 및 대기오염물질에 대한 배출원단위를 비교함으로써 수송수단 별 친환경성에 대한 정량적 분석결과를 제시하고자 한다.

2절에서는 기존 연구를 검토하여 본 연구의 차별성을 제시하고 3절에서는 대기오염물질 원단위를, 4절에는 온실가스 배출 원단위를 도출하고 도로, 철도의 친환경성을 비교검토 한다.

2. 기존 연구 검토

철도와 도로의 친환경성에 대해 수행되어 온 연구를 살펴보면 다음과 같다.

양유경 외[6]는 교통수단별 온실가스 배출계수 및 에너지 소비량, 수송실적을 활용하여 온실가스 배출 원단위를 도출하여 수송수단 별 비교를 수행하였다. 하지만 오염물질 원단위에 대한 비교검토는 수행하지 않았다. 또한 2007년 기준 도로 화물자동차의 에너지소비량을 100,176십억kcal로 적용하였으나 2008년 에너지 총조사 보고서에 따르면 2007년 기준 도로화물의 총 연료소비량은 44,192십억kcal로 도로분야의 온실가스 배출 원단위가 두 배 가량 과도하게 산정되었다는 단점이 있다.

에너지경제연구원[7]에서는 수송부문에 대한 에너지 소비량을 조사하여 철도와 도로에 대해 단위수송 당 에너지 소비량을 비교하고 있으나 온실가스 및 오염물질에 대한 검토는 하고 있지 않다.

한국교통연구원[8]은 국가교통 수요조사 및 DB 구축사업의 일환으로 교통비용 및 온실가스 DB를 구축하였다. 여기서 교통비용의 일환으로 대기오염비용을 도출하기 위해 대기오염물질 배출량을 제시하였으나 육상수송수단에 대한 원단위 산정 및 비교가 없었으며 김병관 외[9]에서도 지적하였듯이 온실가스배출의 경우 전기에너지에 의한 간접배출량은 제외하였다는 한계점이 존재한다.

김병관 외[9]는 철도와 도로부분의 에너지 소비 및 온실가스 배출 원단위에 대해 비교분석을 하였다. 하지만 원단위 산출을 위해 적용한 도로의 톤키로 수송실적 수치, 도로화물의 에너지 소비량 자료에 오류가 존재하여 철도화물의 온실가스 배출량이 도로대비 과도하게 추정되었다는 단점이 있으며 오염물질 배출 원단위에 대한 고려는 되어있지 않다는 한계점이 존재한다.

이에 본 연구에서는 육상 화물수송에 있어 철도와 도로의 친환경성에 대한 비교를 종합적으로 수행하고자 한다. 이를 위해 수송수단 별 온실가스 배출량 및 대기오염물질 배출량 원단위를 도출하고 이를 비교분석 하고자 한다. 특히 철도화물분야에 있어서 전기기관차와 디젤기관차로 구분하여 대기오염물질 배출량, 에너지 소비량, 온실가스 배출량, 톤km 수송실적 등을 분리하여 산출함으로써 정밀도를 높이고자 한다.

또한 2010년을 기준연도로 하여 연구를 진행함으로써 가장 최근 연구인 김병관 외[9]에서 도출된 온실가스 원단위 산정결과와 비교를 수행하고자 한다.

3. 대기오염물질

3.1 대기오염물질 배출 원단위 산정 방식

대기오염물질은 대기오염의 원인이 되는 가스·입자상물질로 대기환경보전법에 61가지가 지정되어 있다.

철도청[10]에서는 화물트럭 및 화물기관차에서 사용되는 디젤기관에서 배출되는 화학물질 중 대기환경보전법으로 규제되고 있는 물질로 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 탄화수소(HC), 입자상물질(PM) 및 매연 등을 제시하고 있다. 한국교통연구원[8]에서는 대기오염물질 중 CO, HC, NOx, PM, SO₂ 등의 주요 대기오염물질에 대한 비용을 계량화 하고 있으므로 본 연구에서는 상기 5가지 대기오염물질에 대해 철도 및 도로 각각에 대한 배출원단위 및 사회적 비용을 계산하고 비교하도록 한다.

수송수단 별 대기오염물질 배출 원단위는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{오염물질 배출원단위} = \frac{\text{오염물질배출량}}{\text{수송실적(톤km)}}$$

위 식에서 오염물질 배출 원단위를 산정하기 위해서는 도로 및 철도를 이용한 화물의 연간 수송실적과 연간 오염물질 배출량이 필요하다는 것을 알 수 있으며 이 두 가지는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

연간 수송실적의 경우 국토해양부[11]의 국토해양통계연보에서는 2010년 기준 철도화물의 톤km 단위의 수송실적을 얻을 수 있으며 한국교통연구원[12] 국가교통통계에서는 톤km 단위의 도로화물 수송 실적을 얻을 수 있다. 철도의 경우 전기기관차 및 디젤기관차로 수송한 실적을 구분해야하기 때문에 철도공사 외[13]의 철도통계연보를 참고하였다.

오염물질 배출량 자료는 국립환경과학원의 대기오염물질 배출량 자료 및 한국교통연구원[8]의 국가교통DB 구축사업 보고서에서 얻을 수 있는데, 국립환경과학원의 자료는 철도의 경우 여객 및 화물이 합쳐진 총 오염물질 배출량을 제공하고 있다. 본 연구에서는 화물 분야만을 대상으로 한 비교검토 자료가 필요하므로 철도화물 및 도로화물에 대한 자료를 구분하여 제공하고 있는 한국교통연구원의 자료를 사용하였다.

Table 2. References of data for the calculation of air pollutant per unit freight transport

Data	Field	Source
Transport performance	Road	National Transportation Statistics
	Rail	Statistical Yearbook of MLTM Statistical Yearbook of Railroad
Air pollutant emission	Road	National Traffic Survey and DB
	Rail	Construction project

도로부문의 오염물질 배출량 산정은 건설교통부[14]에 따르면 다음과 같이 차종별 연간 주행거리와 배출계수를 토대로 산정하도록 하고 있다.

배출량 산정식 (도로)	$\text{배출량(톤/년)} = \text{자동차등록대수(대/년)} \times \text{차종별 연 주행거리(km/대 \cdot \text{년})} \times \text{배출계수(g/km)} \times 10^{-6} \text{(톤/kg)}$
--------------	---

철도부문의 오염물질 배출량은 철도청[10]에서 열차의 수송거리가 아닌 연간 연료소비량을 근거로 배출계수를 곱하여 산정하고 있음을 확인할 수 있다.

배출량 산정식 (철도)	$\text{배출량(톤/년)} = \text{배출계수(kg/kl)} \times \text{연간 연료소비량(kl/년)} \times 10^{-3} \text{(톤/kg)}$
--------------	--

3.2 대기오염물질 배출 원단위 산정 결과

한국교통연구원[8]에 따르면 2010년 기준 도로부문 및 철도부문 대기오염물질 배출량 중 화물에 관계된 부분은 다음과 같다.

Table 3. Air pollutant emission of freight transport (ton/year)

	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
Truck	301,504	91,201	811,984	33,153	599
Train	1,967	795	4,803	310	122

국토해양부[11] 및 한국교통연구원[12]에서 다음과 같이 2010년 기준 도로 및 철도를 이용한 화물 수송실적을 확인할 수 있다.

Table 4. Transport performance of Road and Rail freight

	Transport volume (million ton-km)
Road freight	102,808
Rail freight	9,452

상기자료를 활용하여 원단위를 산정하면 다음과 같이 SO₂를 제외한 나머지 오염물질 배출량은 톤키로당 도로가 철도에 비해 약 10~15배 정도 많은 것을 알 수 있다.

Table 5. Air pollutant emission per unit freight (g/ton-km)

	Total	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
Road	12.046	2.933	0.887	7.898	0.322	0.006
Rail	0.846	0.208	0.084	0.508	0.033	0.013
Road/Rail	14.24	14.09	10.55	15.54	9.83	0.45

하지만 상기결과를 바로 받아들이는 것은 적절하지 않다. 3.1에서 언급한 바와 같이 철도의 경우 오염물질 배출량은 소비된 경유량에만 비례하도록 되어 있지만 철도의 경우 디젤기관차 뿐 아니라 전기기관차도 화물수송의 많은 부분을 담당하고 있는 상황이다. 따라서 전기 및 디젤기관차의 실적과 오염물질 배출량을 구분하여 오염물질 배출 원단위를 산정하는 것이 필요하다. 하지만 국내에는 전기에 대한 오염물질 배출계수가 없는 상황이므로 본 연구에서는 디젤기관차만의 실적을 활용하여 원단위를 비교해 보기로 한다.

아쉽게도 기존 철도화물통계에서는 디젤기관차 및 전기기관차 각각에 대한 톤km 화물수송실적 자료가 없다. 하지만 기관차종 별 화차 수송실적은 제공이 되고 있으므로 화차의 환산차량키로의 비율을 사용하여 기관차종 별 화물수송실적을 다음과 같이 유추할 수 있다.

철도화물수송실적(디젤 차량) =

$$\text{화물총수송실적(톤km)} \left(\frac{\text{환산차량km(디젤)}}{\text{총 환산차량km(디젤+전기)}} \right)$$

2010년 기준 환산차량키로를 기준으로 전체 화물 수송량 중 디젤기관차를 이용하여 수송한 비율을 계산해보면 약 75.2%임을 알 수 있다.

Table 6. Train-km, locomotive-km and car-km for rail freight transportation

	Train-km	Locomotive-km	Car-km
Total	24,313,653	24,313,653	429,084,907
Diesel locomotive	18,689,074	18,689,074	322,524,593
Electric locomotive	5,624,579	5,624,579	106,560,314

Source : KORAIL et al.[13] statistical Yearbook of Railroad

다음은 철도 화물운송에서 전기기관차의 운송실적을 제외하고 순수 디젤기관차의 운송실적만을 고려하여 철도와 도로의 화물 운송 시 대기오염물질 배출량을 비교한 것이다.

Table 7. Unit air pollutant emission (considering diesel locomotive only for rail freight, g/ton-km)

Contents	Total	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
Road	12.046	2.933	0.887	7.898	0.322	0.006
Rail	1.126	0.277	0.112	0.676	0.044	0.017
Road/Rail	10.70	10.59	7.93	11.68	7.39	0.34

디젤기관차 실적만 고려하여 산정한 경우 철도의 대기오염물질 배출 원단위는 기존대비 약 30% 수준 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 디젤기관차만으로 비교하는 경우도 SO₂를 제외한 오염물질에 대해서는 철도가 도로대비 배출원단위가 약 1/7 ~ 1/11 수준에 불과한 것을 확인할 수 있다.

3.3 대기오염물질 사회적 비용 비교

한국교통연구원[8]에 따르면 2010년 기준 오염물질별 단위 사회적 비용은 다음과 같다.

Table 8. Social cost of unit air pollutant emission (1000won/ton)

Contents	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
Cost	6,517.0	7,573.9	7,840.7	25,599.0	8,806.6

이를 토대로 도로와 철도의 톤km당 사회적 비용을 배출가스별로 산정하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

Table 9. Social cost of air pollutant per unit freight transport (won/ton-km)

	Total	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
Road freight	78.50	19.11	5.78	51.47	2.10	0.04
Rail freight	7.34	1.80	0.73	4.41	0.28	0.11

주 : 철도는 디젤기관차 수송실적만 적용

즉 1톤km를 수송하는데 있어 도로화물이 철도화물에 비해 대기오염물질 배출로 인한 사회적 비용을 약 10배 이상 야기 시키고 있음을 알 수 있다.

사회적 비용을 발생시키는 양 및 비율은 도로와 철도 모두 NOx, CO, HC, PM, SO₂ 순서이며 SO₂의 경우 철도화물에서 발생하는 양이 도로화물에 비해 3배정도이지만 다른 오염물질에 비해 적은 사회적 비용이 발생함을 알 수 있다.

화물 운송 수단별 2010년 기준 사회적 비용의 총량을 계산하면 다음과 같다.

Table 10. Total social cost of freight transportation (unit : 1000won)

Contents	Total	CO	HC
Road	8,070,919,997	1,964,901,568	594,356,917
Rail	52,116,449	12,818,939	5,181,015
Contents	NOx	PM	SO ₂
Road	5,291,699,728	216,058,101	3,903,683
Rail	31,301,151	2,020,270	795,074

도로가 철도에 비해 단위수송 당 약 10.7배의 사회적 비용을 발생시키므로 2010년 기준 도로화물의 10%를 철도로 운송한다면 대기오염물질 배출량의 감소로 인한 사회적 비용 절감액은 약 7,317억원 정도가 되며 전기기관차를 이용하는 실적까지 감안하는 경우 비용 절감액은 더욱 커지게 된다.

4. 온실가스

4.1 단위 에너지 소비 및 온실가스 배출 원단위 산정 방식

온실가스는 지구온난화에 영향을 미치는 기체로 교토 의정서에서 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 과불화탄소(PFCs), 수불화탄소(HFCs), 육불화황(SF₆)의 6종으로 규정하고 있다. 이중 수송 및 에너지산업에서 배출되는 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O이므로 본 연구에서는 이 세가지 온실가스에 대해 배출원단위를 산정하였으며 다음과 같이 단위 수송 실적 당 온실가스 배출량으로 정의하였다.

$$\text{온실가스 배출원단위} = \frac{\text{온실가스배출량}(gCO_2e)}{\text{수송실적}(\text{톤km})}$$

온실가스 배출량은 산정 수준에 따라 tier1, tier2, tier3로 구분한다. Tier1은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate

Change) 에서 제시하는 공통적인 배출계수를 사용하여 산정하는 것이고, tier2는 연료별 국가 고유의 특성 및 차종이 반영된 배출계수를 사용하는 것이고, tier3는 차종이나 운행조건 등 세부적인 특성을 반영한 배출계수를 사용하는 것이다.

본 논문에서는 양유경 외[6] 및 김병관 외[9]에서와 같이 IPCC에서 제시한 tier1 수준으로 온실가스 배출 원단위를 산정하였다.

수송실적자료의 경우 앞서 기술한 바와 같이 국가교통통계, 국토해양통계연보 등으로부터 도출할 수 있다. 에너지 사용량 및 온실가스 배출량은 에너지총조사보고서의 수송수단별 에너지원별 사용량에 에너지원별 온실가스 배출계수를 사용하여 산정하였다. 경유, 부탄 등 화석연료의 배출계수는 온실가스종합정보센터[15]의 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 전력의 배출계수는 한국전력거래소의 자료를 사용하였다.

상기 자료를 사용하면 온실가스 배출량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{온실가스}_j \text{ 배출량} = \sum_i (\text{연료}_i \times \text{배출계수}_{ij})$$

여기서 연료_i 는 연료종류별 사용량이며 경유, 부탄, 전기 등이다. 온실가스_j 는 앞서 이야기한 CO₂, CH₄, N₂O 3가지이다.

온실가스들은 CO₂로 환산한 측정단위인 CO₂e(CO₂ equivalent)로 다음과 같이 환산 가능하다.

$$\text{온실가스배출량 (CO}_2\text{e)} = \sum_j (\text{온실가스}_j \times \text{지구온난화지수}_j)$$

온실가스별 지구온난화지수는 IPCC 제2차 평가보고서에서 제시한 값인 CH₄의 경우 21, N₂O는 310을 적용하였다.

Table 11. References of data for the calculation of unit energy consumption and GHG emission

Data	Field	References
Transport performance	Road	National Transportation Statistics
	Rail	Statistical Year Book of MLTM
Energy Consumption, GHG emission	Road	Energy Consumption Survey
	Rail	
Emission factor of GHG	Electricity	Korea Power Exchange
	Fossil fuel	National Greenhouse Gas Inventory Report

4.2 온실가스 배출량 산정 결과

에너지경제연구원[7]의 에너지총조사보고서에서 제시하고 있는 2010년 기준 도로와 철도화물수송을 위해 사용한 에너지 사용량은 다음과 같다.

Table 12. Energy consumed by road freight transport and rail freight transport

	Road freight	Rail freight
Diesel (10 ⁹ kcal)	48,662.8	693
Butane (10 ⁹ kcal)	562.7	0
Electric (MWh)	0	266,348

4.1의 배출량 식을 적용하여 철도화물과 도로화물 수송에 대한 온실가스 배출량을 산정한 결과는 다음과 같다.

Table 13. Energy consumption and GHG emission

Energy consumption (10 ⁹ Kcal)		Greenhouse gas emission (Ton CO ₂ e)	
Road	Rail	Road	Rail
49,225	922.1*	14,016,838	323,093

* 에너지총조사보고서 426p에는 철도화물 연료소비량 합계가 1,067 10⁹kcal로 합계가 되어 있으나 422p 연료종별 연료소비량의 합은 922.1 10⁹kcal임. 본 연구에서는 연료종별 소모량 자료를 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였으므로 922.1 10⁹kcal을 사용함

상기 자료 및 Table 4를 이용하여 2010년 기준 에너지 소비 원단위 및 온실가스 배출 원단위를 산정하면 다음과 같다.

Table 14. Energy consumption and GHG emission per unit freight transport

Unit energy consumption (kcal/ton-km)			Unit GHG emission (gCO ₂ e/ton-km)		
Road(A)	Rail(B)	B/A	Road(E)	Rail(F)	F/E
478.81	97.56	0.20 (1/4.91)	136.34	34.18	0.25 (1/3.99)

위 결과로부터 철도 화물 운송은 도로 화물 운송에 비해 단위수송 당 에너지 소비량이 약 1/5수준이며 전체 온실가스 배출 원단위는1/4 수준에 불과한 것을 알 수 있다.

기존 연구인 김병관 외[9]에서는 우리나라 철도화물의 도로대비 에너지 소비 원단위는 1/12, 온실가스배출은 1/10 수준으로 제시한 것과 비교하면 철도화물의 에너지 효율 및 온실가스 배출 효율이 다소 낮아진 결과임을 알 수 있다.

Table 15. Previous research result (Kim. et al.[9])

Unit energy consumption (kcal/ton-km)			Unit GHG emission (gCO ₂ e/ton-km)		
Road(A)	Rail(B)	B/A	Road(E)	Rail(F)	F/E
1100.30	90.92	0.082 (1/12.1)	345.1	34.46	0.1 (1/10.01)

이러한 차이는 기존연구와 본 연구에서 사용한 도로 화물수송 실적 및 도로, 철도화물의 에너지 소비량이 다르기 때문이다. 기존연구와 본 연구, 에너지 총조사보고서, 국가교통통계 등에서 제시된 값을 비교해 보면 기존 연구에서는 도로화물의 에너지 소비량을 과대 적용하였고 도로 수송실적을 다소 적게 적용하였으며 철도화물의 에너지 소비량도 다소 작게 추정된 것을 알 수 있다.

Table 16. Comparison between studies

Contents	Transport result (million ton-km)		Energy consumption (10 ⁹ Kcal)	
	Road	Rail	Road	Rail
Kim [9]	99,089	9,452	109,027	859.4
This study	102,808	9,452	49,225	922.1
Energy Consumption Survey	-	9,452	49,225	922.1* (1,067)
Korea Transport Database	102,808	9,452	-	-

* Table 13 참조

김병관 외[9]에 따르면 도로화물 대비 철도화물의 온실가스 배출 원단위의 비율은 유럽 평균의 경우 1/12.8, 독일의 철도화물회사인 DB의 경우 1/15.2 수준으로 우리나라에 비해 철도화물의 온실가스 배출량이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

상기 연구에서는 이의 요인으로 유럽의 전력생산에 있어 신재생에너지 비율이 높아 온실가스 배출계수가 국내 대비 낮다는 점을 제시하고 있다. 또 다른 요인으로 생각해 볼 수 있는 것은 김영주 외[16]가 지적하였던 것처럼 우리나라 화물열차가 외국과 달리 1편성 당 수송하는 화물량이 작다는(27위/31개국) 것이다. 철도화물수송의 장점이 대량수송을 통한 단위수송비용 및 단위수송에너지 절감임을 감안해 보면 우리나라 화물열차는 대량수송을 통한 수송에너지 효율성이라는 장점을 충분히 활용하고 있지 못하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 철도화물과 도로화물수송의 친환경성에 대한 정량적 비교를 통해 향후 친환경적 화물수송체계 구축을 위한 정책수립에 있어 정확한 근거를 제공하고자 하였다.

이를 위해 각 수송수단별 대기오염물질 배출 원단위, 온실가스 배출 원단위를 산출하였다. 특히 철도 대기오염물질 배출 원단위 계산에 있어 전기기관차와 디젤기관차의 수송실적을 구분하여 보다 정확한 원단위를 도출하였으며 수송수단별 오염물질 배출로 인한 사회적 비용을 비교하였다. 온실가스 배출 원단위 산출에 있어서는 기존 연구의 오류를 바로잡았다.

연구의 결과를 살펴보면 단위수송 당 철도의 오염물질 배출량이 도로에 비해 약 1/10 이하 수준으로 친환경적 수송수단임을 확인할 수 있다. 현재 도로화물에서 배출되는 대기오염물질로 인해 발생하는 연간 약 8조원 이상의 사회적 비용을 감축시키기 위해 철도 등 친환경 교통수단으로의 전환을 위한 정책 마련이 요구된다.

우리나라 철도화물수송 시 배출되는 온실가스가 도로 대비 1/4 수준이지만 유럽의 도로화물대비 철도 온실가스 배출 비율은 1/12.8, DB의 경우 1/15.2 수준으로 우리나라에 비해 유럽의 철도화물의 에너지 효율 및 온실가스 배출량이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

따라서 철도수송의 장대화 및 이층열차 등의 도입을 통한 대량수송체계를 구축할 필요가 있을 것으로 보이며 전력생산에 있어서도 신재생에너지 등을 적극적으로 도입하여 전기분야의 온실가스 배출계수를 감축하려는 노력이 필요할 것이다.

본 논문에서 사용된 화물 수송용 디젤기관차의 대기오염물질 배출계수는 1997년 철도청에서 산정된 것으로 거의 20년 가까이 자료의 업데이트가 되지 않고 있는 상황이다. 현재 철도공사에서 신형디젤기관차, 신형전기기관차를 도입하고 있는 상황이므로 시험을 통해 배출계수를 업데이트 할 필요성이 있다.

현재 전기를 동력원으로 사용하는 운송에 경우 대기오염물질에 대한 배출계수가 없어 본 연구에서는 고려하지 않았다. 온실가스의 경우 전기에 대한 배출계수가 있는 것처럼 전기의 경우에도 이에대한 검증 및 데이터 구축이 필요할 것으로 보인다.

뿐만 아니라 철도의 경우 문전배송이 어려운 한계점

이 있어 도로운송과의 연계가 필수적인 경우가 많기 때문에 양 끝단의 서틀 수송을 포함한 Door-to-Door 수송 전체에 대한 대기오염물질 및 온실가스배출량 산정이 이루어져야 할 것이다.

References

- [1] Ministries concerned, "Post-2020 greenhouse gas reduction goal," Press Release, 2015. [Internet]available at : http://www.mofa.go.kr/webmodule/htsboard/template/read/korboardread.jsp?typeID=6&boardid=235&seqno=355261&c=&t=&pagenum=1&tableName=TYPE_DATABOARD&pc=&dc=&wc=&lu=&vu=&iu=&du=
- [2] Jo, K. D. and Jang, H., "Integrated environment strategy for air pollutants and greenhouse gases in Incheon," Incheon Development Institute, 2010
- [3] National Institute of Environmental Research, "National air pollutants emission 2010," 2012.
- [4] Ministry of Environment, "GSG emission during next 30 years will decide Climate Change," Press Release, 2014,[Internet]available at : <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=445100&menuId=286>
- [5] Korea Institute of Local Finance, "A study on improvements of automobile tax," 2014.
- [6] Yang, Y. K., Lee, K. T., Kim, E. H. and Kim, S. T., "Railway's effects on greenhouse gas emissions reduction in transport sector," 2009 Autumn conference of Korean Society for Railway, pp. 2447-2456, 2009.
- [7] Korea Energy Economics Institute, "2011 Energy Consumption Survey," 2012.
- [8] Korea Transport Institute, "2011 National Traffic Survey and DB Construction projet," 2012.
- [9] Kim, B. K., Lee, J. S., Kim, H. G. and Lee, J. Y., "An Analysis on Energy Consumption and GHG emission Unit of Rail and Road Transportation," Journal of the Korean Society for Railway, 17(3), pp. 216-222, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.216>
- [10] Korean National Railroad Agency, "A study on the emission factors and reducing methods of air pollutants on the diesel rolling stocks," 1997.
- [11] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "2011 Statistical Yearbook of MLTM," 2011.
- [12] Korea Transport Institute, "National Transportation Statistics 2014," 2015.
- [13] KORAIL, Airport Railroad Co., Ltd. and Korea Rail Network Authority, "Statistical Yearbook of Railroad 2010," 2011.
- [14] Ministry of Construction and Transportation, "Analysis on macroeconomic impacts of transport related policies," 2001.
- [15] Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, "National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea 2013," 2014.

- [16] Kim, Y. J., Kwon, Y. J., Hur, J. and Jung, S. B., "International Comparison of Railway Freight Performance," Journal of Korean Society of Transportation, 35(5), pp.431-440, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.7470/jkst.2015.33.5.431>

김 영 주(Young-Joo Kim)

[정회원]



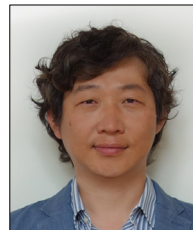
- 1999년 2월 : KAIST 기계공학과 학사
- 2002년 8월 : KAIST 산업공학과 석사
- 2008년 2월 : KAIST 산업공학과 박사
- 2007년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도물류, 물류센터, 물류장비 및 효율화 기술개발

박 재 현(Jaehyun Park)

[정회원]



- 1997년 2월 : 인하대학교 토목공학과 학사
- 2000년 12월 : University of Louisiana at Lafayette 토목공학과 석사
- 2003년 12월 : University of South Florida 토목환경공학과 박사
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

교통공학, 물류, 교통계획, 기술개발 기획

오 용 희(Yonghui Oh)

[정회원]



- 1996년 2월 : KAIST 산업공학과 학사
- 1998년 8월 : KAIST 산업공학과 석사
- 2006년 8월 : KAIST 산업공학과 박사
- 2007년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 산업경영공학과 교수

<관심분야>

생산관리, 재고관리, 일정관리, OR응용