건설단계에서의 철도시설물 온실가스저감방안연구

A Research on the Greenhouse Gas Emission Reduction of Railway Structure Construction Stage

이철규[†] · 김종수¹

Cheul-Kyu Lee · Jong-Soo Kim

Abstract Concrete was identified as the significant GHG emission source resulting from a GHG emission analysis of railway infrastructure. An environmental assessment method (life cycle assessment; LCA) and low carbon railway infrastructure design strategy development method (ECODESIGN PILOT) were applied to develop low carbon railway infrastructure design strategies. The railway infrastructure was analyzed as a raw material intensive industry emitting large amount of greenhouse gas (GHG) at its construction stage. Therefore, in this study, it is analyzed that current status of GHG emission at its construction stage, and a method reducing GHG emission of railway infrastructure is proposed. In this study, eco-concrete, concrete aging prevention agent and a low carbon railway route decision method based on a need of low carbon railway infrastructure construction technology application for green railway development were considered.

Keywords : Railway, Greenhouse gas, LCA, Eco-design, Concrete

초 록 철도시설물 유형별 전과정 온실가스 배출량에 관한 연구결과를 분석한 결과 철도건설에 사용된 콘크리트가 주요 발생원임을 확인하였다. 친환경설계전략(ECODESIGN PILOT)을 활용하여 철도시설물의 제품유형을 분석한 결과에서도 철도시설물은 재료집약제품으로 분류되었다. 따라서, 본 연구에서는 건설재료측면에서 철도시설물의 온실가스배출량을 저감하는 방안을 도출하고 이를 철도현장에 시범, 적용함으로써 그 저감효과를 분석하였다. 연구에서 고려한 철도시설물의 온실가스 배출저감기술은 고로슬래그를 이용하여 시멘트 사용량을 저감한 친환경 콘크리트와 콘크리트 구조물의 수명을 보장할 수 있는 콘크리트 열화방지제이다. 그리고 설계단계에서 철도노선에 대한 온실가스배출량을 사전에 평가하고 예측할 수 있는 저탄소 철도노선 평가 및 설계기술이다.

주요어 : 철도, 온실가스, 전과정평가, 친환경설계, 콘크리트

1. 서 론

2005년 세계 수송부문의 온실가스 배출량은 약 7,000Mt CO₂-eq.이며 이는 전세계 총 온실가스 배출량의 38.7%를 차지하는 것으로, 에너지부문에 이어 두 번째로 많은 온실가스를 배출하는 부문(sector)이다[1]. 프랑스의 경우에는 2005년 전체 온실가스 배출량의 26%가 수송부문에서 배출되는 것으로 조사되었다[1]. 국내의 총 온실가스 배출량은 2007년 620.0Mt CO₂-eq.이며 에너지부문은 525.4Mt CO₂-eq. (84.7%)를 배출하였다. 이 중 수송분야는 100.2Mt CO₂-eq.을 배출하여 에너지부문 배출량의 19.4%를 차지하였다[2].

수송분야에서 철도산업의 온실가스 배출 기여도는 그리 높지 않지만[1], 철도산업 자체에서 배출되는 온실가스는 상당부분이 건설에서 배출되기 때문에 저탄소 철도시설물 건설을 위한 노력이 필요하다.

철도산업에서 온실가스 배출은 직·간접적으로 이뤄지는

데 화석연료를 사용하는 동차 또는 기관차에서 배출되는 직접배출과 전기를 공급받는 전기동차 또는 전기기관차와 같이 전기(2차 에너지)를 사용함으로써 온실가스 배출하는 간접배출이 있다[3]. 또한 철도의 기능인 승객 및 화물 운송을 고려하여, 철도산업의 시스템 경계를 전과정(life cycle)으로 확장시켰을 때, 철도차량의 제조, 시험운전, 유지보수, 폐기뿐만 아니라, 도상, 레일, 교량, 터널, 급전설비 등과 같은 철도시설물의 건설, 유지보수, 폐기로 인한 간접 배출 또한 철도산업이 유발하는 온실가스로 볼 수 있다.

현재 철도건설사업의 환경성평가는 교통체계 효율화법[4]에 따라, “환경정책기본법”[5]에 의한 사전환경성검토와 “환경영향평가법”[6]에 의한 환경영향평가로 구분되는데, 최근 환경부는 ‘환경영향평가법 시행령’[7] 개정을 통하여 환경영향평가 항목에 온실가스 배출량을 평가하도록 수정하였다. 이에 따라, 2011년 1월 환경부는 ‘온실가스 항목 환경평가 가이드라인’[8]을 개정 및 시행하였다. 이 ‘가이드라인’ 개정 전까지는 철도시설물에 대한 온실가스 배출량 저감은 물론 온실가스 배출량 산정에 대한 직접적인 기준이 없었으나, 이 ‘가이드라인’ 제정을 계기로 2012년부터 철도시설물 건설 시 사전환경성 검토 또는 환경영향평가 수행 시 스코핑(scoping)

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 녹색교통물류연구본부
E-mail : cheul@krii.re.kr

¹한국철도시설공단 KR연구원

을 통하여, 온실가스 항목의 환경평가를 수행하도록 하고 있다. 따라서, 앞으로 철도시설물의 온실가스 배출량 산정 및 저감을 위한 설계 및 기술개발이 요구 될 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구에서는 전과정을 고려한 철도시설물 온실가스 배출량 저감방안을 연구하였다. 철도시설물에 대한 체계적인 전략수립을 위하여 국외에서 수행한 철도 시설물 주요 구성품별 전과정 온실가스 배출량 연구결과를 분석하고 친환경설계 전략을 철도시설물에 적용하여 이를 개선하는 방안을 제안하였다. 마지막으로 제안된 저탄소 철도시설물 건설방안에 대한 개선효과를 정량적으로 도출하였다.

2. 본 론

2.1 전과정평가[9,10]

전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 제품 및 서비스에 대하여 설계, 원료취득, 제조, 운송, 사용 및 폐기의 전 과정에서 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법이다. 전과정평가는 Fig. 1에 도시한 것과 같이 목적 및 범주 정의(Goal and scope definition)와 전과정목록분석(Life cycle inventory analysis; LCI), 전과정영향평가(Life cycle impact assessment; LCIA), 전과정해석(Life cycle interpretation)으로 구성되어 있으며 전과정평가를 구성하는 각 단계들은 전과정평가의 완전성과 신뢰성을 제고하기 위해서 반복적으로 피드백 할 수 있도록 구성되어 있다.

전과정평가는 제품 및 서비스가 전과정에서 환경에 미치는 영향을 지구 온난화(Global warming), 오존층 파괴(Ozone layer depletion), 무생물 자원 고갈(Abiotic resource depletion) 등 여러 환경영향범주들(Environmental impact categories)에 미치는 영향으로 정량화 할 수 있다.

이러한 특성으로 인하여 전과정평가는 조직(Organization)에서 배출하는 온실가스를 정량화 하는 국제표준[11-13]의 제정과 제품의 탄소 발자국(Carbon footprint for product; CFP)을 산정하는 국제표준[14]의 기초가 되었다.

Fig. 1 Relationships between elements within the interpretation phase with the other phases of LCA [9]

2.2 철도시설물과 친환경설계

2.2.1 철도시설물별 온실가스배출량 분석결과

Tuchschnid[15]는 철도차량제작, 열차운행, 철도시설물 건설 및 유지보수를 포함한 철도시설물(railway infrastructure)의 전과정 온실가스 배출량 및 에너지 소비량 등의 6개 항목에 대한 환경성 평가 연구를 수행하였다.

Tuchschnid[15]의 연구대상은 2007년에 완공된 프랑스 파리 근교 Vaires-sur-Marnes에서 Baudrecourt까지 이르는 LGV Est 노선 300km 구간이며, 이 노선에는 4.09km의 교량/고가교와 2.305km의 터널 구간이 포함되어 있으며 기준 수명은 100년을 사용하였다.

LGV Est 구간의 철도시설물에 대한 주요구성품별 온실가스 배출량 현황분석을 Fig. 2에 나타내었다. 철도시설물의 주요구성품별 비교기준을 1km, 1년(단위노선길이, 단위수명)으로 비교할 때, 교량의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있으며 교량을 구성하는 재질을 대상으로 온실가스 배출량에 대한 기여도 분석을 수행한 결과 Table 1과 같이 구조용 강과 콘크리트의 기여도가 높은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2 Carbon footprint of railway infrastructure modules of Tuchschnid[15]'s study, modified by authors

Table 1 Carbon footprint of railway bridges of Tuchschnid [15]'s study, modified by authors

Material	unit	CO ₂		Total CO ₂	
		(kg)	(%)	(kg)	(kg/m,yr)
Concrete, at plant	m ³	26,491,050	34.8	76,110,321	186.09
Low alloy steel	kg	19,181,926	25.2		
Structure, steel	kg	30,216,095	39.7		
Alkyd paint	kg	221,250	0.3		

2.2.2 친환경설계전략의 철도시설물 적용

친환경설계에 대한 국제 표준은 ISO/TR 14062 표준[16]이며, IEC 62430[17]을 따르는 전기전자제품을 제외한 모든 제품은 ISO/TR 14062 표준의 적용대상이 된다. 이미 여러 가지 친환경제품 설계 방법이 개발되어 제시되어 있으며, 친환경제품설계의 대상제품과 목적 등에 따라 연구자가 선택

하거나 독자개발 또는 적합하게 변형해서 사용하고 있다[18-21].

본 연구에서는 Wimmer et al.[20] 등이 제시한 방법을 철도시설물에 적합하도록 변형하여 건설단계에서 철도시설물의 온실가스 저감기술 (Fig. 3)을 도출하였다.

Fig. 3 Simplified low carbon railway infrastructure design process, Wimmer et al.[20], modified by authors

구체적으로 Wimmer et al.[20]의 방법에서는 환경성 분석 결과와 이해관계자 요구사항 분석 결과를 바탕으로 친환경 설계 전략을 도출하는 방법을 제안하고 있다. 이를 위하여 대상제품의 환경영향분석은 전과정평가(Life cycle assessment; LCA)[9,10], ECODESIGN PILOT assistant[22]와 같은 도구들을 사용할 것을 제안하고 있으며 제품에 대한 이해관계자의 요구사항을 반영하는 방안으로는 환경기능품질전개(Environmental function quality deployment; EQFD)나 환경성 벤치마킹(Environmental benchmarking; EBM)을 마지막으로 친환경설계 전략을 도출하는 방법으로는 ECODESIGN PILOT[23]을 사용하도록 제안하였다.

본 연구는 철도시설물의 온실가스 배출량을 저감하기 위한 연구로 친환경 설계방법에 따라 다양한 환경영향범주 중 온실가스 배출에 대한 환경영향만을 고려하였다.

2.2.3 ECODESIGN PILOT[23]

ECODESIGN PILOT(Fig. 4)은 체크리스트를 기반으로 하는 친환경 설계전략, 설계 방안, 설계 과업을 도출하는 도

구이다. ECODESIGN PILOT은 제품 유형을 제품의 환경영향이 집약된 전과정(Life Cycle) 단계에 따라 각각 원료물질 집약형(A형), 제조 집약형(B형), 수송 집약형(C형), 사용 집약형(D형), 폐기 집약형(E형)으로 구분하고 각 제품의 유형에 따라 물질 사용 저감, 에너지 사용저감, 폐기물 발생 저감을 위한 설계 방안 및 과업 도출을 위한 체크리스트와 의사결정을 위한 점수화 체계를 조합한 친환경 설계방안 도출 도구이다.

철도시설물의 온실가스 배출저감에 대한 구체적인 국내의 연구사례는 없기 때문에 본 연구에서는 저 탄소 철도시설물 설계 방법의 적용가능성을 확인하기 위하여 국외 문헌자료를 활용하여 기초분석연구를 진행하였다. 환경성 분석을 위해 철도시설물을 대상으로 LCA를 수행한 Tuchschnid[15]의 연구결과를 바탕으로 사례연구에 적용할 기준 데이터를 도출하였다. 그리고 ECODESIGN PILOT에 기준자료를 적용하여 철도시설물 온실가스 배출량 저감전략을 도출하였다.

2.2.4 저 탄소 철도시설물 건설방안 도출

Tuchschnid[15]의 연구결과에 따르면 주요 환경 이슈가 원료인 콘크리트와 구조용 철강제품인 것으로 나타난다. 따라서, 철도시설물은 ECODESIGN PILOT이 분류하는 제품 유형 중에서 원료물질 집약형(A형)으로 분류할 수 있다. ECODESIGN PILOT이 철도시설물에 대해서 제안하는 저 탄소 설계 목표, 전략 및 방안을 Table 2에 정리하였다.

제안된 저 탄소 설계 방안들은 전체 도상 시스템에 적용하도록 제안된 것으로, LCA 결과에서 도출된 바와 같이, 교량과 터널에 사용된 구조용 철강제품과 콘크리트의 온실가스 배출량 저감을 위해서 적용할 수 있는 방안은

- 재생된 원료 물질(2차 물질) 사용
- 강도 최적화 설계에 의한 원료 투입량 저감
- 콘크리트구조물의 열화방지 등이 있다.

2.3 저탄소 철도시설물 건설방안과 개선효과

본 연구에서 도출된 철도시설물 저탄소설계 방안 중에서 재생된 원료물질(2차 물질) 사용방안, 콘크리트구조물 열화방지에 대한 설계 전략(design task)에 대한 온실가스 배출량 저감효과를 산정하였다.

2.3.1 재활용재료(2차 물질) 사용방안

2.3.1.1 친환경 콘크리트

Tuchschnid[15]의 연구결과에서 온실가스 배출량이 높은 철도시설물로는 철도교량과 터널임을 확인하였고 철도교량과 터널을 구성하는 주요원료인 구조용 철강과 콘크리트가 주요 원인으로 조사되었다. 따라서, 본 연구에서는 저 탄소 철도 노선 건설방안의 하나로, 고태훈 등[24]이 연구한 친환경 콘크리트를 철도시설물에 적용할 경우의 온실가스 저감효과를 분석하였다.

친환경콘크리트는 타 공정의 부산물로 생산된 고로슬래그와 급냉 전기로 슬래그를 대체물질로 사용함으로써 시멘트와 천연사(sand)의 사용을 저감한 것이다.

Fig. 4 ECODESIGN PILOT [23]

Table 2 Low carbon design objective, strategies and measure for railway infrastructure

Low carbon design objective	Low carbon design strategies	Low carbon design measure for railway infrastructure
Use alternative materials	Selecting the right materials	· Use of materials with a view to their environmental performance ...
Use less of a given type of material	Reducing material input	· Prefer the use of recycled materials (secondary materials) · Preferably use single material components and/or reduce number of different types of material · Reduce material input by design aiming at optimum strength · Reduce material input by integration of functions
Make intensive use of resources	Optimizing product use	· Realize user-oriented product aiming at a high frequency of use ...
	Optimizing product functionality	· Ensure high reliability of product ...
	Improving maintenance	· Design product for easy cleaning and/or minimize susceptibility to soiling ...
Use resources as long as possible	Increasing product durability	· Realize a timeless product design · Ensure high appreciation of the product · Design product for long service life · Ensure surfaces are user friendly · Ensure corrosion resistance · Harmonize service life of individual components
	Improving reparability	· Ensure self-explanatory structure or provide for instruction for repair on product ...
Reuse materials contained in the product	Improving disassembly	· Ensure easy access to connecting parts ...
	Reuse of product parts	· Ensure simple assembly through hierarchical structure of product ...
	Recycling of materials	· Ensure labeling of materials conforming to standards ...

*Note - Colored measures were selected for low carbon railway infrastructure design measures

2.3.1.2 친환경 콘크리트의 적용효과

기존의 콘크리트 침목재료에 친환경 콘크리트를 적용할 경우, 침목 1개 당 온실가스 배출량은 14kg CO₂-eq.이 저감되어 기존 대비 26.26%의 개선효과가 있는 것으로 분석되었다[25]. 철도시설공단 시설업무현황[26]에 따르면 국내 철도 침목은 매년 70,000개가 콘크리트 침목으로 교체되고 있는 것을 알 수 있으며 여기에 친환경 콘크리트 침목을 사용할 경우 연간 약 980ton CO₂-eq.의 개선효과가 기대할 수 있다

Table 3 GHG emission reduction effect results from cement use reduction

	Annual replacement (ea/yr)	Unit GHG emission reduction effect of eco-concrete sleeper (kg CO ₂ -eq./ea)	Annual GHG emission reduction effect (ton CO ₂ -eq./yr)
Concrete sleeper	70,000	14	980

(Table 3). 침목뿐만 아니라 철도교량에 투입되는 콘크리트를 친환경 콘크리트로 대체할 경우 그 효과는 상당히 높을 것으로 예상할 수 있다.

2.3.2 콘크리트구조물 열화방지

2.3.2.1 콘크리트 열화방지

콘크리트 구조물의 열화는 구조물이 가지는 내구성과 관련되어 있는 개념이며 외부적, 내부적 영향과 물리, 화학적 요인 등에 의하여 재료의 품질, 기능 등 구조물의 성능이 시간경과에 따라 저하되는 현상이다. 이에 대해 한국철도기술연구원[27]이 콘크리트 열화 메카니즘 및 열화방지에 대한 연구를 진행하였다. 대부분이 콘크리트구조물인 철도시설물은 철도차량운행 등의 외적 요인으로 인하여 균열이 발생하며 이로 인한 콘크리트 열화는 가속화 된다. 콘크리트의 열화는 구조물의 수명단축과 직결되며 시설물의 수명단축은 신규 건설로 연결된다. 따라서 대량운송수단으로서의 철도는 초기 건설단계에서부터 철도시설물을 위한 예방적 보호대책이 강구되어야 한다.

(a) railway bridge

(b) concrete track

Fig. 5 Pilot construction of railway structure for concrete protection

구조물의 수명을 연장시키는 것은 유지보수단계에서 신규 콘크리트 수요를 저감하는 것과 직결되며 이는 콘크리트 재료로부터 배출되는 온실가스를 저감하는 효과가 있다. 콘크리트 수명을 연장시키는 방안으로는 보강재 사용, 내구성 강화 설계 등이 있으며 본 연구에서는 콘크리트 열화방지 시공을 통한 콘크리트 수명연장을 고려하였다.

일본의 경우에는 신칸센 구간의 철도교량에 열화방지제를 시공한 사례가 있으며[28] 본 연구에서도 Fig. 5와 같이 부산지역의 철도교량의 교각 일부와 콘크리트 도상에 시험 시공하였다 [29].

2.3.2.2 대상, 기능, 기능단위 및 시스템경계

Table 4의 기능과 기능단위를 가지는 콘크리트 도상을 대상으로 콘크리트 열화방지제를 적용 하고 전과정평가를 수행하여 온실가스 배출량 저감효과를 분석하였다.

Table 4 Function and functional unit of a Deterioration Preventing Agent

Function	Preventing Deterioration of concrete and its surface
Functional unit	A kilometer of Deterioration Preventing Agent

적용한 열화방지제는 폴리에스테르수지 계열의 고분자수지이며 (Table 5 참조) 시스템경계는 콘크리트도상의 원료물질의 취득에서 폐기까지(Cradle to Grave; CtG)로 하였다. 본 연구는 철도시설물 중에서 콘크리트 도상에 열화방지제를 적용하고 이에 따른 온실가스 저감효과만을 분석하였다. 연구대상으로는 한 콘크리트 도상의 규격은 0.35m(t)×4.2m(w)×1000m(l)이다.

분석에 사용한 LCA software는 SimaPro 7.2[31]이며 LCI DB는 국내 환경부[32]와 지경부[33] 및 ASME[34] database를 활용하였으며 국내 DB에 없는 천연모래의 경우, ecoinvent DB [35]를 사용하였다. 또한 굵은 골재 DB와 콘크리트 도상의 현장데이터는 국내 콘크리트 도상 생산업체를 방문하여 수집하였고, 폐기단계 시나리오는 환경부의 전국 폐기물 발생 및 처리현황[36]에 따라 매립 0.1%, 재활용 99.9%로

적용하였다.

LCIA 방법론으로는 환경부에서 제정한 환경성적표지 방법론[37,38]을 사용하였다. 환경영향범주(Environmental impact category)는 연구 목표인 온실가스 배출량 추정에 맞추어 지구 온난화(Global warming; GW) 영향범주 하나만을 선택하였고, 분류화(classification), 특성화(Characterization)를 수행하여 잠재적 환경영향 값을 산출하였다.

2.3.2.3 콘크리트 열화방지제 적용에 따른 온실가스 저감 효과

Table 5의 조성을 가진 콘크리트 열화방지제를 SimaPro S/W를 활용하여 온실가스 배출량을 산정한 결과 Table 6과 Fig. 6에서와 같이 열화방지제 1kg당 약 2.08kg CO₂-eq.가

Table 5 Composition of the deterioration prevention agent

Composition	Unit	Weight
Polyester resin	Kg	0.23
Gasoline	Kg	0.77

Table 6 Life Cycle Impact Assessment Result

Impact category	Unit	Polyester resin	Gasoline	Total
Greenhouse	kg CO ₂	1.59.E+00	4.90.E-01	2.08.E+00
Ozone layer	kg CFC11	2.30.E-07	7.65.E-09	2.37.E-07
Acidification	kg SO ₂	4.22.E-03	2.94.E-03	7.16.E-03
Eutrophication	kg PO ₄	1.81.E-03	1.86.E-04	2.00.E-03
Heavy metals	kg Pb	4.13.E-05	1.18.E-06	4.25.E-05
Carcinogens	kg B(a)P	8.77.E-08	2.99.E-09	9.07.E-08
Pesticides	kg act.subst	0.00.E+00	0.00.E+0	0.00.E+0
Summer smog	kg C ₂ H ₄	7.69.E-04	3.82.E-04	1.15.E-03
Winter smog	kg SPM	3.11.E-03	2.32.E-03	5.43.E-03
Energy resources	MJ LHV	2.82.E+01	4.01.E+01	6.83.E+01
Solid waste	kg	0.00.E+00	1.23.E-01	1.23.E-01

Fig. 6 Greenhouse gas emission result of concrete deterioration prevention product

1liter당 약 0.51kg CO₂-eq.가 배출됨을 알 수 있었다.

0.35(t)×4.2m(w)×1000m(l) 규격의 콘크리트 도상에 열화방지제를 시공할 경우 단면적은 약 4,200m²/km이며 콘크리트 도상 1km당 열화방지제는 약 1,260liter가 필요하다[27].

따라서 열화방지제를 콘크리트 도상 1km에 시공할 경우 예상되는 온실가스 배출량은 약 642.6kg CO₂-eq.이다.

콘크리트도상 1km 부설 시 30년간 배출되는 온실가스량은 238ton CO₂-eq.이며[39] 년간으로는 약 8ton CO₂-eq.를 배출한다고 볼 수 있다. 따라서, 열화방지제를 콘크리트 도상에 적용함으로써 콘크리트 도상의 수명을 1년 연장하더라도 예상되는 온실가스 저감량은 7.3ton CO₂-eq.에 달한다. 이를 경부고속선 서울-부산 구간 417.5km에 열화방지제를 적용하여 콘크리트 수명을 1년간 연장할 경우, 약 3,000ton CO₂-eq.의 온실가스 배출량을 저감할 수 있다.

2.4 저 탄소 철도노선 설계 및 저감효과

앞서 제시한 친환경 콘크리트 개발이나 콘크리트 열화방지제와 같은 온실가스 저감 설계 과업(design tasks)들은 철도 노선에 사용되는 재질을 변경 또는 추가함으로써 철도 노선에서 발생하는 온실가스 배출량을 저감하는 방법이다. 이와 같은 방법들은 노선이 선정된 이후에 적용할 수 있는 기술이지만, 철도 노선을 선정하는 과정에서 온실가스 배출의 주요인으로 규명된 터널과 교량을 최소화 하는 설계를 하게 되면, 앞에서 제시한 친환경 콘크리트 적용이나 콘크리트 열화방지제 적용에 따른 저감효과 보다 상당히 높은 온실가스 저감 효과를 기대할 수 있다.

앞에서 도출된 바와 같이 철도시설물 중에서 철도교량과 터널에서 배출되는 온실가스 배출량은 상당하다. 따라서, 지금까지 경제성과 환경영향평가에 의한 철도노선 설계에서 온실가스 배출을 고려한 철도노선설계가 필요하다.

예를 들어 경부 고속 철도(1단계)의 주요 철도시설물을 분석한 결과, 터널과 교량의 비율은 각 21.5%와 23.7%이다. 경부 고속철도 2단계 노선 신설이 진행되면서, 터널과 교량의 비율은 각각 42.7%와 28.5%로 증가하였다. 터널, 교량, 콘크리트도상 구간만 고려할 경우 경부고속철도 2단계 구간 공사(122.8km)로 인해 콘크리트 사용량은 1단계 사용량의 150%에 이른다(Table 7 참조).

이 때, 경부고속철도 2단계 노선의 1%에 해당하는 구간(4.12km)에서 철도교량 및 터널연장을 단축(대안1)하거나, 전체 노선의 단축 없이 교량 및 터널구간만을 콘크리트 도상으로 변경할 경우(대안 2), 경부 고속철도 2단계 노선에서

Table 7 Composition of Seoul-Busan KTX route

	1 st stage			2 nd stage		
	Distance (km)	Proportion (%)	Concrete consumption (kg/100yr)	Distance (km)	Proportion (%)	Concrete consumption (kg/100yr)
Tunnels	87.6	21.5	1.78E+06	175.8	42.7	3.57E+06
Bridges	96.6	23.7	1.96E+06	117.5	28.5	2.39E+06
Concrete track	53.8	13.2	7.91E+04	85.7	20.8	1.26E+05
Others	170.4	41.7	N/A	33.1	8.0	N/A
Total	408.5	100	3.82E+06	412.0	100	6.08E+06

*Note – N/A implies that data was not available

Table 8 Alternatives of composition of 2nd stage Seoul-Busan KTX route

	1 st alternative			2 nd alternative		
	Distance (km)	Proportion (%)	Concrete consumption (kg/100yr)	Distance (km)	Proportion (%)	Concrete consumption (kg/100yr)
Tunnels	171.7	42.5	3.49E+06	171.7	41.7	3.49E+06
Bridges	113.4	28.1	2.30E+06	113.4	27.5	2.30E+06
Concrete track	85.7	21.2	1.26E+05	93.9	22.8	1.38E+05
Others	33.1	8.2	N/A	33.1	8.0	N/A
Total	403.9	100	5.92E+06	412.0	100	5.93E+06

*Note – N/A implies that data was not available

기존의 노선에 비해 약 2.5%의 콘크리트 사용량을 저감할 수 있으며 이에 따른 온실가스 배출 저감량은 교량의 경우 연간 766.7ton CO₂-eq. 이며, 터널의 경우 324.6ton CO₂-eq. 이다. 교량과 터널구간 건설을 회피하여 일반 콘크리트 도상으로 건설하는 경우(대안 2)에 콘크리트 도상으로 인한 콘크리트 사용량 증가분 및 온실가스 배출량 증가분을 고려하더라도 콘크리트 사용량 및 그로 인한 온실가스 배출량 저감에는 큰 차이가 없다(Table 8).

따라서, 철도 노선 선정 시에 교량과 터널을 최소화할 수 있는 노선선정이 필요함을 확인할 수 있다.

3. 결 론

건설재료, 건설, 운영 및 폐기의 전과정을 고려한 철도시설물 온실가스 배출량 저감기술개발 전략을 도출한 결과 본 연구에서는 다음의 3가지 기술방안을 제안하였다.

- 재생된 원료물질(2차 물질) 사용 - 친환경 콘크리트 사용
- 콘크리트구조물 열화방지
- 저탄소 철도노선 설계방안(철도교량 및 터널연장 최소화)

친환경 콘크리트를 적용 할 경우의 온실가스 배출량 저감 효과는 기존의 콘크리트 침묵을 전과정평가하고 이를 친환경 콘크리트 침묵으로 대체할 경우와 비교한 결과 연간 980ton CO₂-eq.이 저감 가능함을 확인하였다.

콘크리트 열화방지제는 콘크리트 구조물의 중성화를 방지함으로써 그 수명을 보장하고 이러한 효과로 신규 콘크리트의 사용량을 저감할 수 있다. 이로 인한 건설재료측면의 온실가스 배출 저감량은 연간 184.9ton CO₂-eq. 임을 확인할 수 있었다.

본 연구는 건설재료를 포함하여 철도시설물 전과정에서의 온실가스 배출량 현황을 분석하고 개선할 수 있는 방안을 구체적으로 제안했다는 점에서 큰 의미를 부여할 수 있다. 설계단계에서 기존의 환경영향평가방법만이 아닌 온실가스 배출량을 동시에 고려한다는 측면에서 향후 철도시설물 건설시 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 신규 철도노선을 설계 하거나 노선변경 시 온실가스 배출량 측면에서 철도노선을 평가함으로써 철도산업의 온실가스 에너지 목표관리가 가능하다. 이러한 저탄소 철도노선설계방안의 확대적용을 위해서는 범용적으로 적용 가능한 설계방법의 개발이 요구된다.

또한 본 연구에서 활용한 철도시설물 주요구성품별 전과정 온실가스 배출량 정보는 국제철도연합(UIC)이 수행한 문헌자료를 이용하였으나, 유럽과는 전력과 같은 주요 DB들의 온실가스 배출계수가 국내와 다르기 때문에 보다 정확한 온실가스 배출량 산정을 위해서는 국내 철도관련 주요 탄소 인벤토리 DB 및 LCI DB 구축과 함께 철도차량, 철도시설물, 철도차량 운행 등에 관련된 온실가스 배출량 분석연구 및 LCI DB 구축 연구가 요구된다.

후 기

This study was conducted with the support of Ministry of Knowledge Economy (MKE) and Korea Rail Network Authority (KR network). The authors acknowledge the financial support.

참고문헌

- [1] S. Vinot, P. Coussy (2008) Panorama 2009: Greenhouse gas emissions and the transport sector, Innovation Energy Environment, Rueil-Malmaison Cedex, France.
- [2] H.-G. Yeo, S.-H. Park (2009) Press kit: Net GHG emission of Korea at 2007 is 2.9% larger than that of 2006, Ministry of Knowledge Economy, Kwacheon, Korea (Korean).
- [3] Korea Energy Management Corporation (KEMCO) (2009) Good Practice guideline of greenhouse gas emission estimation for railway industry, KEMCO, Yongin, Korea (Korean).
- [4] Korea National Assembly (KNA) (2010) Traffic System Efficiency Act, KNA, Seoul, Korea (Korean).
- [5] KNA (2011) Framework Act on Environmental Policy, KNA, Seoul, Korea (Korean).
- [6] KNA (2011) Environmental Impact Assessment Act, KNA, Seoul, Korea (Korean).
- [7] President of the Republic of Korea (ROK) (2011) Enforcement decree of the Environmental Impact Assessment Act, President of the ROK, Seoul, Korea (Korean).
- [8] Ministry of Environment (MEV) (2011) Environmental assessment guideline of greenhouse gas, MEV, Kwacheon, Korea (Korean).
- [9] ISO (2006) ISO 14040 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, ISO, Geneva, Switzerland.
- [10] ISO (2006) ISO 14044 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, ISO, Geneva, Switzerland.
- [11] ISO (2006) ISO 14064-1 Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, ISO, Geneva, Switzerland.
- [12] ISO (2006) ISO 14064-2 Greenhouse gases – Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification and reporting of greenhouse gas emission reductions and removal enhancements, ISO, Geneva, Switzerland.
- [13] ISO (2006) ISO 14064-3 Greenhouse gases – Part 3: Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions, ISO, Geneva, Switzerland.
- [14] ISO (2011) ISO/CD 14067 Carbon footprint of products – quantification and communication, ISO, Geneva, Switzerland.
- [15] M. Tuchschnid (2009) Carbon footprint of high-speed railway infrastructure (Pre-study), The International Union of Railways (UIC), Paris, France.
- [16] International Organisation for Standardization (ISO) (2002) ISO/TR 14062 Environment management – Integrating envi-

- ronmental aspects into product design and development, ISO, Geneva, Switzerland.
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC) (2009) IEC 62430 ed. 1.0 Environmentally conscious design for electrical and electronic products, IEC, Geneva, Switzerland.
- [18] H. Wenzel, M. Haushild, L. Alting (1997) Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development, Chapman & Hall, London, UK.
- [19] U. Tischner, E. Schmincke, F. Rubik, M. Prösler (2000) How to do EcoDesign?: A Guide for environmentally and economically sound Design, Verlag form GmbH, Main, Germany.
- [20] W. Wimmer, R. Züst, K. Lee (2004) ECODESIGN IMPLEMENTATION: A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- [21] J. Fiksel (2009) Design for Environment: A Guide to Sustainable Product Development (2nd ed.), McGraw Hill, New York, USA.
- [22] Vienna University of Technology (Vienna TU), ECODSIGN PILOT assistant, <http://www.ecodesign.at/assist/assistent?lang=en>, 2011.04.25.
- [23] Vienna TU, ECODSIGN PILOT, <http://www.ecodesign.at/pilot/ONLINE/ENGLISH/INDEX.HTM>, 2011.04.25.
- [24] T.H. Koh, S.H. Han, M. Sagong (2011), "Development of eco-friendly PC sleeper using slag", 9th World Congress on Railway Research.
- [25] C. Kim, C. Lee, Y. Kim, T. Koh, K. Lee (2010), Life cycle assessment of concrete sleeper and study on environmental improvement, proceedings of the Korean society for railway conference Autumn 2010, pp. 152.
- [26] Korail, Railway infrastructure statics, 2010.
- [27] Korea Railroad Research Institute (KRRI) (2010) Concrete protection technology development of railway structure from carbonation and corrosion using super polymer resin, KRRI, Uiwang, Korea (Korean).
- [28] Herz chemical, Perma shield technical manual, 2009.
- [29] KRRI report, Concrete protection technology development of railway structure from carbonation and corrosion using super polymer resin, 2010.
- [30] Korean Society of Transportation (2003) Railroad investment analysis and evaluation handbook, Korail, Seoul, Korea (Korean).
- [31] PreConsultant, SimaPro Installation, <http://www.pre.nl/content/sima-pro-installation-registered-users>, 2011.04.25.
- [32] Korea Environmental Industry Technology Institute, Korea LCI Database Information Network, <http://www.edp.or.kr/lcidb/english/main/main.asp>, 2011.04.25.
- [33] KNCPC, Korea National LCI Information System, http://www.kncpc.re.kr/lci/LCIDB/introduction_DB.asp, 2011.04.25 (Korean).
- [34] Association of Plastics Manufacturers in Europe, PlasticEurope's Eco-profile Programme, <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles.aspx>, 2011.04.25.
- [35] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, ecoinvent centre, <http://www.ecoinvent.org/database/>, 2011.04.25.
- [36] National Institute of Environmental Research (2007) 2006 Korea national status of waste generation and treatment, MEV, Kwacheon, Korea (Korean).
- [37] J.T. Houghton, L.G. M. Filho, J. Bruce, H. Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris, K. Maskell (eds) (1994) Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1993 emission scenarios, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [38] J.T. Houghton, L. G. M. Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell (eds.) (1996) Climate Change 1995: Science of Climate Change: Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the IPCC, IPCC, Cambridge Univ. Press, New York.
- [39] KRRI (2007) Management technology of track system based on the LCC, KRRI, Uiwang, Korea (Korean).
- [40] J.Y. Lee, W.S. Jung, I.H. Hwang, Y.K. Kim (2011) The Evaluation of GHG Emissions in Railroad Construction Sector, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(3), pp. 271-275.

접수일(2011년 6월 7일), 수정일(2011년 9월 6일),
게재확정일(2011년 9월 15일)