

도로시설물 운영 및 유지관리단계의 탄소배출원단위 구축

곽인호¹ · 김건호¹ · 위대형² · 박광호² · 황용우^{3*}

¹인하대학교 대학원 환경안전융합전공, ²(주)에스오알지 지속가능전략연구소, ³인하대학교 환경공학과

Calculation of Basic Unit of Carbon Emissions in Operation and Maintenance Stage of Road Infrastructure

KWAK, In Ho¹, KIM, Kun Ho¹, WIE, Dae Hyung² ·
PARK, Kwang Ho² · HWANG, Young Woo^{3*}

¹Environmental Technology & Safety Technology, Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²Research Center of Sustainable Strategy, YESSorg Co., Ltd, Seoul 143-802, Korea

³Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract

Operation and Maintenance in road infrastructure is repetitive carbon emissions activities to preserve the road in its originally constructed condition. In the view of road planning and construction, operation, and maintenance of life cycle, operation and maintenance stage quantification of carbon emissions is very important because it is easily accessible activities to reduce carbon emissions in road infrastructure that existing and new road. However, carbon emissions estimation in operation and maintenance stage is yet to do, because data collection is so hard and carbon emissions estimation methodology is very complicated. In this study, a basic unit of carbon emission in the operation and maintenance stage of the road infrastructure was developed in order to get the quantitative determination of carbon that occurring. Carbon emissions of the Expressway and Common state road was calculated by using the basic unit of carbon emission and application plan of basic unit of carbon emission are presented.

도로시설물의 운영 및 유지관리는 기능을 유지하기 위해 반복적으로 이루어지는 온실가스 배출 활동이며, 도로를 계획 및 시공, 운영, 유지보수의 전과정 측면에서 봤을 때 이미 건설된 도로시설물과 신규로 건설하고자 하는 도로시설물에 대해 탄소배출을 줄이기 위한 접근이 용이한 활동이기 때문에 운영 및 유지관리 단계에서 탄소배출량의 정량화는 매우 중요하다. 하지만 도로시설물의 운영 및 유지관리 단계에서의 정량적인 탄소배출량 산정은 분산되어 있는 활동 자료의 수집의 어려움과 탄소배출량 산정 과정의 복잡성을 이유로 정량적인 탄소배출량 산정은 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 도로시설물의 운영 및 유지보수 단계에서 탄소배출원단위를 산정하였고, 이를 활용해 2012년 기준으로 국내에 건설되어 운영 중인 고속국도 및 일반국도에 대해 탄소배출량을 산정하였다.

Keywords

basic unit of carbon emissions, carbon emissions, carbon emissions estimation methodology, CO₂, road operation, road maintenance
탄소배출원단위, 탄소배출량, 탄소배출량 산정방법, CO₂, 도로 운영, 도로 유지관리

* : Corresponding Author
hwangyw@inha.ac.kr, Phone: +82-32-860-7501, Fax: +82-32-863-4267

Received 24 July 2014, Accepted 20 April 2015

서론

온실가스감축을 위해 전 세계적으로 적극적인 노력을 기울이고 있으며, 우리나라도 2010년 이후 저탄소 녹색 성장 기본법 발효에 따른 온실가스 배출관리 및 의무감축을 추진 중에 있다. 이에 따라, 건설부문에서도 온실가스 배출량의 정량적 관리 및 감축 목표 설정 등을 위한 노력을 기울이고 있으며, 탄소중립형 도로기술 연구단에서는 도로의 전과정에서 온실가스 배출량을 산정하고 저감하기 위한 방안을 연구하고 있다. 도로시설물의 탄소배출량 산정 방법은 MOLIT(2011)의 시설물별 탄소배출량 산정 연구를 통해 개발되었다.

Kwak et al.(2012)의 연구 결과, 도로 시설물은 전 생애주기 중 대량의 자재와 건설장비가 투입되는 시공단계에서 온실가스 배출량이 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 Park et al.(2003)의 연구 결과, 시공단계 다음으로 운영 및 유지관리 단계에서 에너지 소비와 탄소배출이 높은 것으로 나타났다. 따라서, 도로 시공단계 뿐만 아니라 도로 시설물의 운영 및 유지보수 단계에서의 온실가스 배출량 산정 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 그러나 정확한 운영 및 유지보수 단계에서 탄소배출량을 산정하기 위해서는 여러 곳으로 분산되어 있는 관리주체별로 자료수집하고, 이를 가공하여 탄소배출량을 산정하는 일련의 복잡한 과정을 반복적으로 수행해야하기 때문에 이러한 과정을 단축시키기 위한 탄소배출원단위(DB)의 구축이 요구된다. 또한, 탄소배출원단위 구축을 통해 향후 배출량의 예측과 저감량 산정의 기초가 되는 baseline 및 배출전망치(BAU, Business As Usual) 산정 시 활용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 도로시설물의 운영 및 유지보수 단계에서 발생하는 탄소의 정량적 산정을 간략화 할 수 있도록 고속국도와 일반국도를 대상으로 탄소배출 원단위를 구간별(토공부, 교량부, 터널부), 유지관리활동별(표면처리, 소파보수, 덧씌우기, 재포장)로 구축하였고, 구축된 탄소배출원단위를 활용하여 2012년 기준 우리나라 고속국도와 일반국도에서의 탄소배출량을 예측하였다.

도로시설물 운영 및 유지관리단계 탄소배출량 산정 방법

본 연구에서는 국토교통부(2011)의 도로시설물 탄소배출량 산정 방법을 이용하여 Figure 1과 같이 평가범

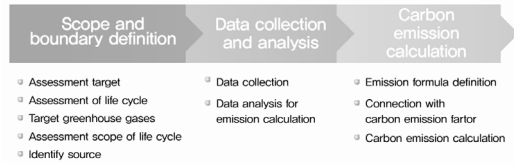


Figure 1. Framework of carbon emissions estimation in the operation & maintenance stage

위 및 경계설정, 데이터 수집 및 분석, 탄소배출량 산정의 3가지 단계로 진행하였다. 탄소배출량 산정 시 기후변화 협약에서 제시한 온실가스에 IPCC(2007)에서 제시한 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential) 값을 적용하여 CO₂-equivalent (CO₂-eq.)로 산정하였다.

1. 운영단계 탄소배출량 산정 방법

1) 평가 범위 및 경계설정

도로의 운영단계는 시설물이 준공되어 시설물이 사용되는 단계이며, 해당 시설물이 기능을 유지하고 해체, 철거되기 전까지로 정의하며, 운영단계에서 도로의 시설물은 도로, 터널, 교량으로 구분한다. 도로의 운영단계 탄소배출량 산정 범위를 Figure 2에 나타내었다. 토공구간에서는 Figure 2(a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이 틀게이트 영업소 및 관리동, 가로등, CCTV, 도로안내표지판 등의 배출원을 포함한다. 교량구간에서는 Figure 2(c)에 나타낸 바와 같이 가로등 및 도로안내표지판 등을 포함하며, 터널구간에서는 Figure 2(d)에 나타낸 바와 같이 가로등 및 환기팬 등의 배출원을 포함한다. 또한, 전 구간에서 도로의 기능 유지를 위한 관리, 정비 차량은 포함하나, 도로를 이용하는 차량에서의 배출 즉, 승승부문 배출은 제외한다.

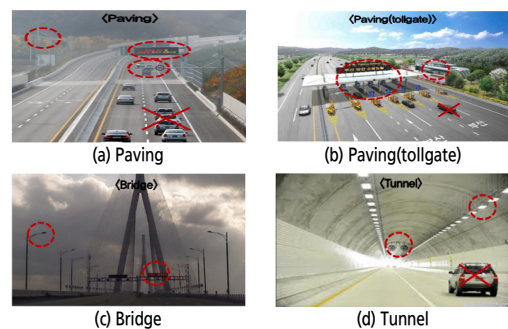


Figure 2. System boundary of operation stage

2) 데이터 수집 및 분석

운영단계에서 수집해야 하는 데이터를 Table 1에 나타내었다. 도로시설의 운영 시 에너지 소비량은 에너지원(경유, LPG, 전력 등) 별로 데이터를 수집하며, 데이터의 신뢰도를 위해 한국전력, 도시가스공사, 관계부처 등에서 최소 1년 이상의 자료를 확보해야한다.

3) 탄소배출량 산정

도로시설물의 운영단계 탄소배출량은 IPCC Guideline (2006)에 따라 사용 에너지원의 소비량과 탄소배출계수의 곱으로 산정하며 산정식은 식(1)과 같다.

$$\text{식(1) 에너지사용에 따른 탄소 배출량(tCO}_2\text{-eq.)} \\ = \sum(\text{에너지 사용량(kWh, m}^3\text{ 등)} \times \text{순발열량(MJ/kWh, m}^3\text{ 등)} \times \text{배출계수(kgGHG(CO}_2\text{/CH}_4\text{/N}_2\text{O)/TJ)} \times 10^{-9} \times \text{지구온난화지수})$$

2. 유지관리단계 탄소배출량 산정 방법

유지관리 단계 탄소배출량은 MOLIT(2011)의 도로 시설물 탄소배출량 산정 방법을 적용하여 산정한다.

1) 평가 범위 및 경계설정

유지관리 단계는 도로의 기능을 유지하기 위해 수행되는 유지보수공사를 의미하며, 도로포장 유지보수는 Table 2에 나타난 것과 같이 표면처리, 덧씌우기, 소파보수, 재포장을 포함한다.

2) 데이터 수집 및 분석

유지보수단계에서 수집해야 하는 데이터를 Table 3에 나타내었고 해당 데이터를 이용해 유지보수공사 시 투입된 자재투입량과 에너지소비량을 산정한다.

유지보수공사에 투입되는 자재량은 수집된 데이터와 식(2)를 이용해 산정한다.

$$\text{식(2) 유지보수공사 투입 자재량} \\ = \text{작업량(unit)} \times \text{일위대가 당 자재투입량(ton, m}^3, \text{ m}^2\text{ 등/unit)}$$

유지보수공사 시 투입되는 장비사용에 따른 에너지소

Table 1. Data collection of operation stage

Category	Collection data
Utility*	<ul style="list-style-type: none"> Annual operation cost bill <ul style="list-style-type: none"> The amount of communal water The amount of communal electricity Heating cost etc. Vehicle for management of road <ul style="list-style-type: none"> Operating records and total energy consumption of patrol car Total energy consumption of water sprinkler Operating records and total energy consumption of other vehicles

*: Collection period: at least 1 year

Table 2. Definition of Pavement in Maintenance stage

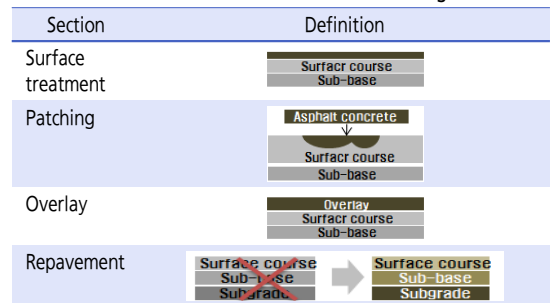


Table 3. Data collection of maintenance stage

Category	Collection data
Maintenance (Repair and Replacement)	<ul style="list-style-type: none"> Quantity of construction material and equipment which are used repair and replacement Detailed work statement

비량은 각 장비에서 사용되는 에너지원별(경유, 휘발유, 전력 등) 소비량 기준으로 산정되며, 데이터 수집형태에 따라 식(3)과 식(4)를 이용해 산정된다.

$$\text{식(3) 작업별 에너지 소비량} \\ = \text{작업량(unit)} \times 1/\text{시간당 작업량(unit/hr)} \times \text{연비(L/hr)}$$

$$\text{식(4) 작업별 에너지 소비량} \\ = \text{작업량(unit)} \times \text{단위작업량당 장비 사용시간(hr/unit)} \times \text{연비(L/hr)}$$

3) 탄소배출량 산정

유지보수 단계에서 사용되는 자재 및 장비는 국토교통부 포장도 보수 항목 구분(표면처리, 소파보수, 덧씌우기, 재포장)에 따라 도로설계 편람 및 건설공사 표준

품셈 자료를 통해 파악하며, 세부적인 탄소배출량 산정 방법은 식(5), 식(6)과 같다.

식(5) : 자재투입에 따른 탄소배출량(tCO₂-eq.)
 = ∑[자재투입량(kg, m³ 등) × 배출계수(tGHG(CO₂/CH₄/N₂O)/kg, m³ 등) × 지구온난화지수]

식(6) : 장비 사용에 따른 탄소배출량(tCO₂-eq.)
 = ∑[에너지 사용량(kWh, m³ 등) × 순발열량(MJ/kWh, m³ 등) × 배출계수(kgGHG(CO₂/CH₄/N₂O)/TJ) × 10⁻⁹ × 지구온난화지수]

도로시설물 운영 및 유지관리 단계 탄소배출원단위 구축

1. 운영단계

1) 운영단계 원단위 구축방법

본 연구에서는 2006 IPCC 국가 인벤토리구축방법에 따라 산정된 특정구간 고속국도의 온실가스 인벤토리 자료를 바탕으로 식(7)을 개발하였고, 이를 이용하여 운영단계 탄소배출 원단위를 산정하였다. 또한 탄소배출량 산정시 온실가스 배출원은 WRI/WBCSD GHG Protocol (2004)에 의거 운영경계를 직접배출, 간접배출, 그 밖의 간접배출의 3가지로 구분하였다.

식(7) : 운영단계에서의 원단위(tCO₂-eq./km · yr)

$$= \frac{\sum(EC_i \times CEF_i)}{L_{(Section\ of\ road)}}$$

여기서,

EC_i : Energy Consumption i의 년간 소비량(ℓ, kg 등)

CEF_i : Carbon Emissions Factor i의 탄소배출계수(tCO₂-eq./unit)

i : 에너지원(전기, 디젤, 휘발유, 등유, LPG 등)

L(Section of road) : 도로(고속국도, 일반국도)의 구간(토공, 터널, 교량) 당 도로연장(km)

2) 원단위 구축 결과

한국도로공사에서는 온실가스에너지목표관리제 대응을 위해 실제 운영 데이터를 기반으로 2008-2009년까지 2개년에 걸쳐 관리 지사별 온실가스 인벤토리를 구축하였다. 본 연구에서는 한국도로공사에서 구축한 온실가스 인벤토리 데이터 중 토공, 교량, 터널이 모두 포함된 'A' 지역(L=80.6km) 고속국도 온실가스 인벤토리 데이터를 수집하였고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4 및 식(7)을 이용하여 운영단계의 탄소배출 원단위를 구축하였고, 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

원단위 구축 결과 구간별로 토공구간 27.6 tCO₂-eq./km, 터널구간 555.9 tCO₂-eq./km, 교량구간 5.5 tCO₂-

Table 4. Inventory data of carbon emissions in 'A'area (2008-2009)

Section	Scope	Energy source	Energy Consumption ¹⁾ (Unit/yr)			Emission source
			2008	2009	Average	
Paving	1 Stationary combustion	Kerosene(L)	93,524	61,920	77,722	• Business office, Tollgate - Heating and cooling
		LPG(kg)	2,418	674	1,546	
	Mobile combustion	Diesel(L)	100,056	115,357	107,707	• Vehicle - Traffic vehicle, Sprinkler truck, Facilities management car, Patrol vehicle, Chloride sprinkler vehicle, Dump truck (15 ton), Loader, Lifter, Medium size bus etc.
		Gasoline(L)	3,017	3,345	3,181	
	2	Electricity(kWh)	2,133,582	2,663,015	2,398,299	• expressway lighting, CCTV, AVC ²⁾ , VDS ³⁾ , VMS ⁴⁾ , Storage house, other electricity consumption facilities.
	1 Mobile combustion	Diesel(L)	11,688	13,476	12,582	• Same as Paving Mobile combustion
Gasoline(L)		352	391	372		
Electricity(kWh)		7,352,105	8,741,665	8,046,885		
Bridge	1 Mobile combustion	Diesel(L)	25,746	29,683	27,715	• Same as Paving Mobile combustion
		Gasoline(L)	776	861	819	
	2	Electricity(kWh)	19,807	16,299	18,053	• expressway lighting, Road guide sign, VMS etc.

1) source: Korea Expressway Corporation(2010), Inventory data of carbon emissions in 'A'area(modify by Yessorg)

2) AVC: Automatic Vehicle Classification, 3) VDS: Vehicle Detection System, 4) VMS: Variable Message Sign

Table 5. Basic unit of carbon emissions operational stage

Section	Scope	Energy source	Energy Consumption ¹⁾ (Unit/yr)	Carbon emissions (tCO ₂ -eq./yr)	Length (km)	Basic unit of carbon emissions (tCO ₂ -eq./km · yr)
Paving	1 Stationary combustion	Kerosene(L)	77,722	196	58.7	3.3
		LPG(kg)	1,546	5		0.1
	Mobile combustion	Diesel(L)	107,707	287		4.9
		Gasoline(L)	3,181	7		0.1
	Subtotal		-	495		8.4
	2	Electricity(kWh)	2,398,299	1,126		19.2
Total		-	1,621	27.6		
Tunnel	1 Mobile combustion	Diesel(L)	12,582	34	6.9	4.9
		Gasoline(L)	372	1		0.1
	Subtotal		12,954	34		5.0
	2	Electricity(kWh)	8,046,885	3,775		550.9
Total		-	3,809	555.9		
Bridge	1 Mobile combustion	Diesel(L)	27,715	74	15.1	4.9
		Gasoline(L)	819	2		0.1
	Subtotal		28,533	76		5.0
	2	Electricity(kWh)	18,053	8		0.5
Total		-	84	5.5		
Total			-	5,514	80.6	-

1) Refer to table 4

eq./km으로 터널구간의 원단위가 가장 높게 나타났고, 항목별로 전력사용량에 따른 배출이 가장 높게 나타났다.

2. 유지관리단계

1) 유지보수 단계 원단위 구축 방법

본 연구에서는 Figure 3에 나타난 도로의 유지보수 공사 중 표면처리, 덧씌우기, 소파보수, 재포장에 대한 각각의 단위 연장당 탄소배출량(tCO₂-eq./km)을 도로 유지관리 단계의 탄소배출원단위로 구축하고자 한다. Kwak et al.(2013)의 연구 결과, 유지관리단계 원단위 구축방법에는 실제 유지보수 공사 내역서를 수집, 여러 사례를 바탕으로 도로 유지관리단계 탄소배출량을 산정하여 원단위를 구축하는 bottom-up 방식의 구축 방법과 국내 전체 유지보수 실적 자료와 공사별 표준 물량 산출 정보를 담은 건설공사 표준 품셈 자료를 활용하는 top-down 방식의 구축 방법이 존재한다.

Bottom-up 방식의 원단위 구축방법은 실제 유지보수 공사 내역을 기반으로 탄소배출 원단위가 구축되므로 정확한 탄소배출 원단위를 산정할 수 있는 반면, 표본으로 사용되는 사례분석 대상 공사의 대표성 확보가 어려우며, 많은 수의 사례분석을 통해 원단위를 구축해야 하기 때문에 자료 수집과 계산에 많은 어려움이 따른다.

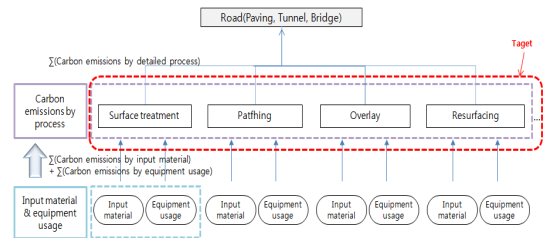


Figure 3. Target of calculation of basic unit of carbon emissions in maintenance stage

Top-down 방식의 원단위 구축방법은 국가 통계자료와 평균 데이터를 이용하기 때문에 이용하는 통계자료의 신뢰도가 확보되면 비교적 정확한 원단위가 산출이 가능하나 통계를 구축하고 있는 데이터의 수준에서만 원단위 구축이 가능하다.

2) 원단위 구축 결과

본 연구에서는 top-down 방식의 원단위 구축 방법을 적용하여 원단위를 구축하였다. 국토교통부 도로보수현황 통계(1977-2012)를 이용하여 고속국도, 일반국도의 포장도보수 각 항목에 따른 유지보수 물량 및 연간 도로 유지보수 연장 자료를 수집하였고, 실제 탄소배출원인 장비사용에 따른 에너지소비량과 유지보수 시 투입되는 자재의 양을 산정하기 위해 도로설계편람(2012)과 건설

Table 6. Basic Unit of Carbon emissions in Expressway

Section	Estimation standard	Equipment and Materials	Standard	Maintenance Area(2012) (m ²) ¹⁾	Amount of work per day (m ² /day) ²⁾	Fuel efficiency ³⁾ (l /hour)	Material Input (ton)	Carbon emissions (tCO ₂ -eq./yr)	Basic Unit of Carbon emissions (tCO ₂ -eq./kmyr) ⁴⁾
Surface treatment	Slurry Seal	Slurry seal machine	3-3.8 m	1,002,700	5,000	23.4	-	97.42	0.3463
		Excavator	0.8 m ³		5,000	15.3	-	63.70	
		Asphalt ⁵⁾	AP-3(85-100)		-	-	14,138	0.00	
	Surfacing	Grinding machine (W=1.25m)	W=1.25 m		1,100	52.7	-	997.27	
		Loader(Tire)	0.57 m ³		1,100	3.5	-	66.23	
		Sprinkler truck	5500 l		1,100	9.3	-	175.99	
Patching	Repair pavement in small area	Plate compactor	1.5 ton	541,601	720	1.0	-	15.62	2.9102
		Vibrating roller (Hand guide)	0.7 ton		50	2.2	-	494.71	
		Excavator(Tire)	0.18 m ³		50	11.6	-	2,608.50	
		Truck	2.5 ton		50	2.9	-	652.12	
	Repair pavement in small area (emergency)	Plate compactor	1.5 ton		30	1.0	-	15.62	
		Vibrating roller (motor)	2,5 ton		30	2.3	-	862.00	
		Excavator (Giant breaker)	0.18 m ³ (0.2 mc)		30	11.6	-	4,347.49	
		Truck	2.5 ton		30	2.9	-	1,086.87	
		Cutter	320-400		30	5.6	-	1,685.83	
		Overlay	asphalt Overlay		Asphalt finisher	3.0 m	1,317,000	2,000	
Macadam roller	10-12 ton			2,000	9.3	-		127.13	
Tire type roller	8-15 ton			2,000	8.0	-		109.36	
Tandem roller	5-8 ton			2,000	11.2	-		153.11	
Sprinkler truck	16,000 l			-	8.0	-		109.36	
Asphalt ⁵⁾	AP-3(85-100)			-	-	216,647		0.02	
Repave-ment	Cutting and asphalt Overlay	Crusher	2 m	377,800	5,000	52.7	-	82.67	0.0413
		Loader(Tire)	0.57 m ³		5,000	3.5	-	5.49	
		Asphalt finisher	3.0 m		5,000	13.9	-	21.80	
		Macadam roller	10-12 ton		5,000	9.3	-	14.59	
		Tire type roller	8-15 ton		5,000	8.0	-	12.55	
		Tandem roller	5-8 ton		5,000	11.2	-	17.57	
		Sprinkler truck	16,000 l		5,000	8.0	-	12.55	
		Asphalt ⁵⁾	AP-3(85-100)		-	-	62,148	0.00	

1) source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2012), Road pavement Statistics

2) Korea Society for the Construction Advancement(2013), Standard of construction estimate

3) Fuel: diesel

4) Carbon emissions(tCO₂-eq./yr) / Road Length (4,044 km)

5) Thickness of asphalt in pavement: Slurry Seal(0.006m), asphalt Overlay(0.070m), Cutting and asphalt Overlay(0.070m)

공사 표준품셈 자료(2013)을 수집하였다.

포장도보수는 포장재료에 따라 유지보수 내역이 달라지기 때문에 아스팔트 포장도로에 대한 유지보수와 콘크리트 포장도로에 대한 유지보수를 모두 고려해야 하나 본 연구에서는 아스팔트 포장도로에 대한 유지보수 공사에 대한 탄소배출 원단위를 구축하였으며, 고속국도, 일반국도 각각에 대한 원단위 구축 결과를 Table 6 및 Table 7에 나타내었다.

탄소배출원단위 이용 국내 도로시설물 운영 및 유지관리단계 탄소배출량 산정

1. 운영단계

본 연구를 통해 도출된 탄소배출 원단위와 MOLIT (2013)에서 발간한 도로시설 현황 통계의 국내 고속국도 총 연장 정보를 활용하여 2012년 기준 국내 고속도

Table 7. Basic Unit of Carbon emissions in Common state road

Section	Estimation standard	Equipment and Materials	Standard	Maintenance Area (2012) (m ²) ¹⁾	Amount of work per day (m ² /day) ²⁾	Fuel efficiency ³⁾ (l/hour)	Material Input (ton)	Carbon emissions (tCO ₂ -eq./yr)	Basic Unit of Carbon emissions (tCO ₂ -eq./km-yr) ⁴⁾
Surface treatment	Slurry Seal	Slurry seal machine	3-3.8 m	8,713	5,000	23.4	-	84.65	0.0120
		Excavator	0.8 m ³		5,000	15.3	-	55.35	
		Asphalt ⁵⁾	AP-3(85-100)		-	-	12,285	0.00	
	Surfacing	Grinding machine (W=1.25m)	W=1.25 m		1,100	52.7	-	866.58	
		Loader(Tire)	0.57 m ³		1,100	3.5	-	57.55	
Patching	Repair pavement in small area	Sprinkler truck	5500 l	1,100	9.3	-	152.93	0.5079	
		Plate compactor	1.5 ton	23,763	720	1.0	-		68.52
		Vibrating roller (Hand guide)	0.7 ton	50	2.2	-	2,170.58		
		Excavator(Tire)	0.18 m ³	50	11.6	-	11,444.90		
	Repair pavement in small area (emergency)	Truck	2.5 ton	50	2.9	-	2,861.22		
		Plate compactor	1.5 ton	30	1	-	68.52		
		Vibrating roller(motor)	2.5 ton	30	2.3	-	3,782.08		
		Excavator (Giant breaker)	0.18 m ³ (0.2 mc)	30	11.6	-	9,074.83		
		Truck	2.5 ton	30	2.9	-	4,768.71		
		Cutter	320-400	30	5.6	-	7,396.64		
Overlay	asphalt Overlay	Asphalt finisher	3.0 m	102,692	2,000	13.9	-	1,481.64	0.0528
		Macadam roller	10-12 ton	2,000	9.3	-	991.32		
		Tire type roller	8-15 ton	2,000	8.0	-	852.75		
		Tandem roller	5-8 ton	2,000	11.2	-	1,193.84		
		Sprinkler truck	16,000 l	-	8.0	-	852.75		
		Asphalt ⁵⁾	AP-3(85-100)	-	-	1,689,283	0.13		
Repave-ment	Cutting and asphalt	Crusher	2 m	58,637	5,000	52.7	-	3,207.53	0.0638
		Loader(Tire)	0.57 m ³	5,000	3.5	-	213.02		
	Overlay	Asphalt finisher	3.0 m	5,000	13.9	-	846.01		
		Macadam roller	10-12 ton	5,000	9.3	-	566.04		
		Tire type roller	8-15 ton	5,000	8.0	-	486.91		
		Tandem roller	5-8 ton	5,000	11.2	-	681.68		
		Sprinkler truck	16,000 l	5,000	8.0	-	486.91		
		Asphalt ⁵⁾	AP-3(85-100)	-	-	964,570	0.07		

1) Source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2012), Road pavement Statistics
 2) Korea Society for the Construction Advancement(2013), Standard of construction estimate
 3) Fuel: diesel
 4) Carbon emissions(tCO₂-eq./yr) / Road Length (101,659 km)
 5) Thickness of asphalt in pavement: Slurry Seal(0.006m), asphalt Overlay(0.070m), Cutting and asphalt Overlay(0.070m)

로 운영시 연간 탄소배출량을 산정하였고, 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 분석결과, 터널에서의 전력사용에서 온실가스 배출량이 가장 크게 나타났으며, 그 중에서도 Scope 2인 전력사용에 따른 연간 온실가스 배출이 333,856 tCO₂-eq.로 나타났다.

2. 유지관리단계

구축된 유지관리단계 탄소배출 원단위(아스팔트 포장 기준)를 이용하여 2012년 기준 도로(고속국도, 일반국

도)를 1년동안 유지관리 시 탄소배출량 산정결과를 Table 9 및 Figure 4에 나타내었다. 분석 결과, 여러 유지보수 활동 중 고속도로와 일반국도 모두 소파보수에서 온실가스 배출량이 가장 높게 나타났다.

3. 도로시설물 운영 및 유지보수 시 탄소배출량 예측

본 연구를 통해 도출된 탄소배출 원단위와 2012년 기준 국내 고속국도 및 일반국도의 유지관리 단계 및 운영 단계 탄소배출량 산정 자료, Table 10에 나타난 포장도

Table 8. Results of carbon emissions on operation stage of expressway in Korea (2012) (unit: tCO₂-eq./yr)

Section	Scope	Emission source	Carbon emissions ¹⁾	Rate (%)
Paving (L= 2,331 km) ²⁾	1 Stationary combustion	Kerosene	7,798	12.1
		LPG	180	0.3
	Mobile combustion	Diesel	11,416	17.7
		Gasoline	283	0.4
	2	Electricity	44,729	69.4
Subtotal			64,406	100.0
Tunnel (L=606 km) ²⁾	1 Mobile combustion	Diesel	2,969	0.9
		Gasoline	74	<0.1
	2	Electricity	333,856	99.1
Subtotal			336,899	100.0
Bridge (L=1,107 km) ²⁾	1 Mobile combustion	Diesel	5,423	88.5
		Gasoline	135	2.2
	2	Electricity	569	9.3
		Subtotal	6,127	100.0
Total			407,432	-

1) Length × Basic unit of carbon emissions in operation stage(refer to Table 5.)
 2) source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), Yearbook of Road Statistics

Table 9. Results of carbon emissions on maintenance stage of road in Korea (2012) (unit: tCO₂-eq./yr)

Section	Length(km) ¹⁾	Pavement	Carbon emissions
expressway	4,044	Surface treatment	434
		Patching	1,968
		Overlay	280
		Repavement	20
		Total	2,701
Common state road	101,659	Surface treatment	55
		Patching	6,331
		Overlay	2,847
		Repavement	1,963
		Total	11,196

1) source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), Yearbook of Road Statistics

보수방법별 유지보수 주기자료를 이용해 추가적인 도로 건설 없이 30년간 고속국도와 일반국도를 운영했을 시 탄소배출량을 산정하였으며, 그 결과를 Table 11에 나타내었다. 운영단계 탄소배출량은 탄소배출원단위와 도로연장, 그리고 운영기간의 곱으로 산정하였고, 일반국도의 경우 고속국도와 동일한 원단위를 적용하였다. 유지보수 단계 탄소배출량은 포장도 유지보수 항목별 탄소배출 원단위와 도로 연장 그리고 각각의 30년간 유지보수 횟수의 곱으로 산정하였다. 동일한 구간에 도로를 건설하여 30년간 운영시 시공단계를 제외하고 운영단계

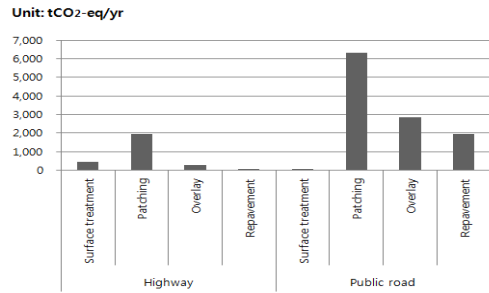


Figure 4. Results of carbon emissions on maintenance stage of road in Korea (2012)

Table 10. Maintenance Construction period

Section	Surface treatment	Patching	Overlay	Repavement
Period (year)	4	4	4	6

source: Korea Expressway Corporation(2008), Analysis of Life Cycle Cost on Pavement, Tunnel, Slope

Table 11. Results of carbon emissions on operation and maintenance of road during 30 years in Korea

Section	Expressway		Common state road	
	Carbon emissions (tCO ₂ -eq./30yr)	Rate (%)	Carbon emissions (tCO ₂ -eq./30yr)	Rate (%)
Operation	12,222,960	99.85	12,222,960	99.37
Maintenance	18,868	0.15	77,405	0.63
Total	12,241,828	100.00	12,300,410	100.00

탄소배출량이 유지보수 단계에 비해 고속국도 및 일반국도에서 월등히 높게 나타나 운영단계에서 탄소배출을 줄이기 위한 기술개발이 요구된다.

결론

도로시설물의 탄소배출량 감축을 위해서는 도로시설물의 계획 및 시공단계에서부터 운영 및 유지보수까지 전과정에 대해 현재 상태 배출량의 산정과 함께 향후 배출량의 예측이 동반되어야 한다. 또한, 지속적인 탄소배출량 관리와 감축을 위해 기준배출량 산정을 위한 전과정 단계별 탄소배출원단위가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 도로시설물의 운영 및 유지관리시 탄소배출량 산정에 활용가능하고, 이미 운영 중인 도로시설물의 운영 및 유지관리시 탄소배출량 예측에 활용가능한 탄소배출원단위를 개발 및 제안하였다.

운영 단계 탄소배출 원단위는 실제 운영 중인 고속국

도를 대상으로 온실가스 인벤토리를 수집하여 포장도로 구간, 터널구간, 교량구간으로 구분해 구축하였다. 원단위 구축 결과 연장당 탄소배출원단위는 전체 구간에 대해 589.0 tCO₂-eq./km로 나타났으며, 구간별로 토공 구간 27.6 tCO₂-eq./km, 터널구간 555.9 tCO₂-eq./km, 교량구간 5.5 tCO₂-eq./km으로 나타났다.

유지보수 단계 탄소배출 원단위는 국내 도로보수현황 통계와 건설공사 표준품셈 등의 자료를 이용해 아스팔트 포장에 대해 고속국도와 일반국도를 대상으로 표면처리, 덧씌우기, 소파보수 그리고 재포장에 대해 구축하였다. 원단위 구축 결과 연장당 탄소배출 원단위는 고속국도의 경우, 표면처리 0.3463 tCO₂-eq./km, 소파보수 2.9102 tCO₂-eq./km, 덧씌우기 0.1704 tCO₂-eq./km, 및 재포장 0.0413 tCO₂-eq./km, 일반국도의 경우, 표면처리 0.0120 tCO₂-eq./km, 소파보수 0.5079 tCO₂-eq./km, 덧씌우기 0.0528 tCO₂-eq./km, 재포장 0.0638 tCO₂-eq./km로 나타났다.

또한, 개발된 원단위를 적용해 2012년 기준으로 국내 운영 중인 고속국도 및 일반국도에 대해 신규 건설 없이 30년간 고속국도와 일반국도를 운영할 경우 탄소배출량은 각각 12,241 ktCO₂-eq., 12,300 ktCO₂-eq.가 배출될 것으로 예상되었다.

본 연구는 인프라 시설 중 하나인 도로시설물의 탄소배출량 산정을 위해 끊임없이 요구되고 있는 탄소배출원단위를 정량적으로 구축했다는 점에서 의미를 가진다고 할 수 있다. 하지만, 운영 단계는 일부 구간의 사례분석 결과를 활용해 탄소배출 원단위를 구축하였고, 유지보수 단계는 국내 통계 자료를 활용해 탄소배출 원단위를 구축하였으며, 별도의 신뢰성 검토를 위한 제3자 검증 등의 과정을 거치지 않았기에 이를 적용해 탄소배출량 산정 시 정확성과 신뢰성 확보에 대한 한계가 있다. 이를 보완하기 위해서는 많은 사례 분석을 통해 원단위 값이 국가 평균값에 근접하도록 하는 작업이 필요하며, 탄소배출량 산정 전문가, 도로기술 전문가(시공 전문가, 운영 및 유지관리 전문가 등) 등으로 구성된 제3자 검증위원회를 통한 탄소배출 원단위의 검증이 요구된다. 특히, 유지보수 단계 내에서 이루어지는 온실가스 배출활동은 주기적인 배출활동 외 니즈에 의한 비주기적인 배출활동이 주를 이루기 때문에 이를 명확히 규명하기 위한 연구가 필요하다. 또한, 신규로 건설되는 도로의 전과정에서 탄소배출량을 예측하기 위해서는 시공단계 원단위 구축이 요

구되며, 해당 원단위를 이용해 탄소배출량을 산정하고 관리할 수 있는 탄소관리시스템의 구축이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper is based on the work done under the Carbon Neutral Road Technologies Development project of 2011 Construction Technology Innovation Program. The authors thank the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) and the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) for the research support.

REFERENCES

- Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. dan Tanabe K.(eds) (2006), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan.
- Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (2013), 2013 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- IPCC (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 33.
- Korea Expressway Corporation (2008), Analysis of Life Cycle Cost on Pavement, Tunnel, Slope, 105-107.
- Korea Expressway Corporation (2010), GHG Inventory Data.
- Korea Society for the Construction Advancement (2013), Standard of Construction Estimate, 568-591.
- Kwak I. H., Park K. H., Hwang Y. W., LEE Y. H. (2013), Calculation of Basic Unit of Carbon Emissions for the Life Cycle of Road Infrastructure, Conference of Korean Soc. of Road Eng. 2013, 55.
- Kwak I. H., Park K. H., Hwang Y. W., Park J. H. (2012), Development and Application of Carbon Emissions

- Estimation Methodology During the Life Cycle of Road, J. of KSEE, 34(6), 382-390.
- Ministry of Environment(2014), National Greenhouse Gas Emissions Reduction Roadmap 2020, 6.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011), A Study on the Calculation of Carbon Emissions in Each Facilities-final Report, 288-319.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011), Guideline for Calculation of Carbon Emissions in Each Facilities, 7-26.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2012), Road Design Manual.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2012), Yearbook of Road Statistics.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2013), Road Maintenance Construction Statistics.
- Park K. H., Hwang Y. W., Seo S. W., Seo H. J. (2003), Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Expressways, Journal of construction Engineering and Management, ASCE, 129(1), 25-31.
- WRI/WBCSD (2004), The Greenhouse Gas Protocol, Revised Edition.

✉ 주 작성자 : 곽인호

✉ 교신저자 : 황용우

✉ 논문투고일 : 2014. 7. 24

✉ 논문심사일 : 2014. 9. 9 (1차)

2015. 4. 3 (2차)

2015. 4. 20 (3차)

✉ 심사판정일 : 2015. 4. 20

✉ 반론접수기한 : 2015. 10. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필