

NATM 터널 유지보수를 위한 환경부하 산정모델 개발

김다애¹ · 김상태* · 김경수¹ · 이주현²
¹평화엔지니어링 연구원 · ²한국건설기술연구원

Development of Environmental Load Estimating Model for Maintaining NATM Tunnel

Kim, Daae¹, Kim, Sangtae*, Kim, Kyoungsu¹, Lee, Juhyun²
¹Pyunghwa Engineering Research and Development
²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Abstract : Infrastructure which mandatory in human life causes large environmental loads when they are being installed and maintained. Especially, maintenance is performed over a long period of time. Also, there is a limit to suggest a reliable estimated value because environmental loads are changed according to methods of maintenance and periods. In this study, we developed a Environmental Load Estimating Model to evaluate value and plan as soon as possible in the Early Design Phases while maintaining a tunnel. To estimate environmental loads by using brief design information, we analyze a calculation methodology of environmental loads in maintenance phases. Furthermore, we apply periods of maintenance work and maintenance factors considered a characteristic of long-term maintenance. Finally, a main purpose is that this program makes all users estimate environmental loads in maintenance phases easily and quickly. Accordingly, it is considered that the Environmental Load Estimating Model offer assistance to eco-friendly maintenance of the road and tunnel construction.

Keywords : Environmental Load, NATM Tunnel, LCA, Maintenance

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 환경에 대해 관심이 높아진 만큼, 우리나라에서도 환경을 생각한 '저탄소 녹색성장'을 비전으로 삼고 환경오염을 줄이기 위해 지속적인 노력을 하고 있다. 건설 산업 분야에서는 2011년 국토해양부가 건설 분야의 녹색성장을 위하여 도로, 철도, 건축물 부문의 '시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인'을 마련하여 배포하였다(Min, 2013). 특히, 경제활동의 기반을 형성하는 사회기반시설은 장기간에 걸쳐 지구에 큰 환경부하를 유발한다(Lee & Lee, 1996). 환경부하란 지구환경 부담정도를 정량화한 것으로, 사회기반시설을 설치하고 유지관리 할 때 발생하는 환경오염물질 배출을 의미한다. 이를 평가하고 제어하기 위한 방법으로 전 과정 평가(Life

Cycle Assessment, LCA)를 이용할 수 있다.

건설 구조물의 생애주기는 크게 기획 단계, 시공 단계, 유지관리 단계, 폐기 단계로 나뉜다. 기존에 건설 분야의 환경부하 평가와 관련된 많은 선행연구들이 단일 시설물을 대상으로 시공단계에서 상세히 설계된 정보들을 바탕으로 자재 투입량 및 에너지 사용량을 산출하고 이를 통해 환경부하를 정량화하거나, 자재별 또는 공법별로 발생하는 환경부하를 산출하고 이를 비교분석 하였다. 또한 정량화된 환경부하를 이용하여 의사결정 지원도구를 개발하거나, 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)이나 환경가치평가 방법론을 적용하여 환경부하를 평가하는 연구들이 수행되었다. 이러한 방법들은 환경부하를 고려한 의사결정을 지원하기 위해 다양한 방법론들을 제시하였다는 것에 큰 의미를 둔다. 하지만 시공하기 전 상세한 설계 자료가 없는 상태에서 앞서 서술한 방법론을 진행하기에는 한계가 있다. 특히, 유지보수는 장기적으로 진행되는 사안이므로 보수방법, 보수주기, 보수율에 따라 환경부하가 달라진다. 때문에 신뢰할 수 있는 추정 값을 제시하는데 어려움이 있다. 또한, 선행연구로 시설물을 시공하기 전에 계획단계와 시공단계에서 간략한 설계 자료를 통해 투

* Corresponding author: Kim, Sangtae, Pyunghwa Engineering, Anyang-si, Gyeonggi-do, 14059, Korea
E-mail: stkim99@pec.kr
Received August 8, 2018; revised August 27, 2018
accepted August 31, 2018

입된 자재와 에너지양을 이용하여 비교적 용이하게 환경부하를 추정할 수 있는 모델을 개발했다. 이에 본 연구에서는 시설물을 유지 관리할 때 발생하는 환경부하를 시공하기 전 간략한 설계정보만으로도 신속하게 평가할 수 있도록 환경부하 추정모델을 개발하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 개발하고자 하는 환경부하 산정모델의 대상 시설물은 NATM 공법을 이용한 터널 구조물로 한정하였다. NATM 터널은 경제성이 우수하고, 국내 고속도로 및 일반도로에서 시공사례가 많기 때문에 연구대상으로 선정하였다. 또한, 일반적으로 환경부하를 평가할 때 고려하는 환경영향의 범위를 환경영향범주라고 하며, 전 과정 평가에 대한 국제규격인 ISO 14040에서 정한 환경영향범주는 '자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성, 생태계 독성, 인체독성'의 8대 영향범주를 제시하고 있다. 본 논문에서도 8대 영향범주를 고려하여 환경부하를 산정하였다. 따라서 본 연구는 터널 유지보수 시 시행하는 대표공종들을 선정하여 공종별 자원을 추출하고, 그에 따른 표준물량을 추정하며, LCI DB와 연계하여 보수율과 보수주기를 적용함으로써 최종 환경부하량을 추정할 수 있다.

2. 이론적 고찰

2.1. 환경부하 평가 방법론

2.1.1. 전과정 평가(Life cycle assessment, LCA)

전 과정 평가(LCA)는 정의된 시스템의 전 과정에서 원료의 채취, 생산품의 가공 및 사용 그리고 처분과 관련된 투입물과 산출물의 목록을 취합하여 처리하고, 이러한 투입물 및 산출물과 관련된 잠재적 환경부하를 평가하여 얻은 결과를 연구의 목적에 맞게 해석함으로써 제품이나 서비스 그리고 공정과 관련된 환경적 영향과 잠재적 영향을 평가하는 기술이다 (ISO 14040, 2006).

건설 분야에서 LCA는 건설 산업 전반에서 요구되는 자재들의 제조공정을 통해서 건설, 운영, 유지보수 등 전 과정에서 발생하는 환경오염물질의 명확한 규명과 배출량에 대해 정량화하고, 이런 문제를 해결하기 위한 의사결정 도구이다. 또한, 건설 산업에서 발생하는 환경물질들 중 지구온난화, 자원고갈, 오존층파괴 등 전 지구적인 규모의 문제로 환경영향을 평가하도록 확대하였다. 이를 통해 기준에 고려하지 못했던 환경오염의 원인을 파악할 수 있고 다양한 환경부하물질에 대해 종합적으로 분석할 수 있도록 용이한 의사결정 지원을 할 수 있게 되었다.

이들을 바탕으로 환경에 미치는 영향 정도를 파악하기 위

해 영향평가를 실시하며, 정량적이고 정성적으로 추산하여 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 것으로 분류화, 특성화, 정규화, 가중화 과정을 거친다. 영향평가의 4가지 단계 중 분류화와 특성화는 필수적으로 수행해야 하지만, 정규화와 가중화는 선택적인 과정이다.

특성화 값은 각 환경영향범주별 정량화된 환경영향을 나타내는 중요한 결과라 할 수 있으나, 상대적인 비교는 불가능하다. 해당 영향범주에서 주어진 목록항목의 기여도를 특성화시켜주는 특성화 계수를 정량화하는 수단으로 사용하여 영향의 정도를 정량화하여 파악하는 과정이다. 특성화과정은 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 목록항목이 영향범주에 미치는 영향의 크기를 정량화하는 단계를 (1)과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$C_{ij} = Load_j \cdot eqv_{ij} \quad (1)$$

둘째, 특정 영향범주에 속하는 모든 항목들의 영향을 합산하는 단계를 (2)와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$C_i = \sum_j C_{ij} = \sum_j (Load_j \cdot eqv_{ij}) \quad (2)$$

여기서, C_{ij} = 목록항목 j가 영향범주 i에 미치는 영향의 크기
 $Load_j$ = 목록항목 j의 환경부하량, g/f,u
 eqv_{ij} = i라는 영향범주에 속한 목록항목 j의 상응인자 값(equivalency factor, g-eq/g)

반면 가중화 단계는 영향범주별로 상대적인 중요도를 부여하는 과정으로, 가중치 부여는 과학적 사실에 근거하기 보다는 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 사회적, 윤리적, 정치적 가치에 따라 결정되는 주관적인 평가라 할 수 있다. 가중화 단계를 통해 계산되는 환경영향은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$WI = \sum WI_i = \sum (CI_i \times W_i) \quad (3)$$

여기서, WI = 제품시스템의 가중치가 부여된 환경영향
 WI_i = i번째 영향범주의 가중치가 부여된 환경영향
 W_i = i번째 영향범주의 가중치
 CI_i = i번째 영향범주의 특성화된 환경영향

영향평가 수행방법 중 명확한 기준이 없어 임의적으로 산출되는 정규화 값과 사회적, 정치적 가치 등에 중요도에 따라 부여되는 가중화 값이 지닌 한계를 극복하기 위해서는

Korean Eco-Indicator를 사용함으로써 해결한다. Korean Eco-Indicator는 세부 영향평가 방법으로써, 산업자원부에서 2003년에 제시한 한국형 환경영향평가지수 방법론이다. 해외에서 개발된 환경성 지표 방법론을 개선하여 정규화 단계의 정규화 기준 값 및 가중화 단계의 가중화 계수 등을 국내 현실에 반영하여 제시하였다. Korean Eco-Indicator의 8가지 영향범주별 단위 및 정규화, 가중화 계수는 다음 <Table 1>과 같다.

Table 1. The coefficient of Korean Eco-Indicator

Category	Unit	Coefficient of normalization	Coefficient of weighting	Unit
Resource depletion	1/yr	24.9	0.231	Eco-point
Acidification	kg SO ₂ -eq	39.8	0.036	
Eutrophication	kg PO ₄ 3-eq	13.1	0.038	
Global warming	kg CO ₂ -eq	5530	0.288	
Ozone depletion	kg CFC11-eq	0.0407	0.292	
Photochemical Oxidant Creation	kg C ₂ H ₄ -eq	10.3	0.065	
Eco toxicity	kg 1,4 DCB eq	1.63	0.216	
Human toxicity	kg 1,4 DCB eq	1480	0.105	

* Material : Ministry of Commerce, Industry and Energy (2003), A Study on the Standardization of Environmental Management for Environmentally Friendly Industry, Refer to normalization coefficient in p.92 and weighted coefficient in p.200

본 연구는 환경부하량을 산정할 때 Korean Eco-Indicator의 정규화 계수와 가중화 계수를 적용하여 Eco-point 단위로 환산된 가중화 값으로 산정하였다. 특성화 값은 각 환경영향범주별 정량화된 환경영향을 나타내는 중요한 결과라 할 수 있으나, 상대적인 비교는 불가능하다. 반면 가중화 값은 영향범주별 상대적인 비교 및 각 영향범주별 합계를 산출할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정량적인 평가는 특성화 값으로, 환경부하의 총량 개념으로는 가중화 값으로 산출하였다.

2.1.2. 전과정 목록(Life cycle Inventory, LCI)

전과정 목록(LCI)은 제품1단위의 생산에 필요한 원자재의 채취 및 소재/부품가공, 수송, 제품사용, 폐기까지의 제품 시스템으로 투입되는 자원의 양과 제품 시스템에서 환경으로 버려지는 배출물과 폐기물의 발생량을 목록화한 데이터이다 (Lee, 2017). LCA를 수행하기 위해서는 제품의 전 과정에 대한 데이터 수집이 필요하지만 현실적으로 모든 자료 수집이 불가능하기 때문에 정확성과 신뢰성을 보장하는 LCI DB를 활용한다. 국외에서는 이미 국가 인프라 구축에 많은 투자를 하고 있으며, 이미 구축된 DB에 대해서도 지속적인 업데이트를 하고 있다(MCT, 2008).

LCI DB 구축 방법은 개별적산법과 산업연관분석법, 또는 이 두 가지 방법을 혼용한 조합법으로 구분된다. 개별적산법이란 제품과 시스템을 설계도서와 견적서 등으로부터 제조 공정·소재 등으로 구분하여 각각의 제품이 어떻게 제조되어 폐기되는지를 제품마다 구체적으로 조사해 나가는 방법이다 (MCT, 2004). 산업연관분석법은 산업연관표를 이용하여 시설물의 전 과정에서 사용되는 자재 및 에너지 등의 산업부문에 대해서 통화량을 기준으로 에너지 및 자원의 흐름에 따라 직접, 간접적인 연관관계를 통해 분석하는 방법이다. 산업연관표는 국가의 생산시스템이 모두 직·간접적으로 연관되어 있다는 가정을 기반으로 각 산업부문별 영향정도를 정량적으로 제시한다(The bank of Korea, 2007).

두 가지 이점을 살린 조합방법은 개별적산법을 기초로 둔 방법과 산업연관표를 기초로 둔 방법으로 나눌 수 있다. 개별적산법을 기초로 한 조합방법은 전통적인 LCA 방법과 비슷하며, 각각 제품의 데이터를 수집한 후 산업연관표의 자료를 이용하여 환경 자료를 평가하는 방법이다. 산업연관법에 기초한 조합방법은 데이터 수집의 시간에 전략적으로 목적을 두고 있으며, 전 과정 목록 평가에 대한 조합법의 접근과 산업연관표와 개별적산법을 통합하는 조합방법 등 다양한 연구가 시도되고 있다(MCT, 2004).

Table 2. The number of LCI DB in Korea

Phase of life cycle	Category	Number
Resource and manufacturing components	Construction material	26
	Rubber	8
	Metal	51
	Basic component	24
	Basic chemicals	90
	Water resources	11
	Energy	23
	Pulp · paper	11
	Plastics	35
	The others	21
Processing Process	Metal	12
	Component	4
	Plastics	23
	The others	0
Transport	By land	19
	By air	1
	By sea	22
	The others	0
Disuse	Reclamation	3
	Incineration	10
	Recycling	19
	The others	2
SUM		415

* Material : Korea Environmental Industry Technology Institute, Information network of LCI DB in Korea)

본 연구에서는 결과의 정확성과 우수성을 고려하여 각 공종별로 분석이 가능한 개별자산법을 기초로 하였다. 기존 터널들의 사례들에 대해서 적용하고자 하는 LCI DB에 대한 통일된 기준이 필요하기 때문에 소요자원별 LCI DB의 연결기준이 명확해야 한다. 따라서 국가 LCI DB와 국내 연구기관에서 개발한 LCI DB 등을 이용하여 시설물의 환경부하량을 산정하고 한다. <Table 2>는 국내 LCI DB의 구축 현황이다.

2.2. 건설분야 환경부하 평가 기존연구

권석현(2008)은 LCA를 이용한 환경부하 평가모델에 환경영향범주별 환경가치를 산정하여 환경비용을 추정하는 환경경제성 평가모델을 개발하였다.

진남희 외(2008)은 철도 시설물의 유지관리와 관련된 경제적, 환경적 측면을 정량화하는 방법으로써 LCC 및 LCA의 적용 방안을 고찰하고, LCC 및 LCA 결과로부터 시설물 유지관리 최적방안을 결정하기 위한 의사결정 기법을 제안하였다.

Junnilla at al. (2003)는 고급 사무용 건물을 대상으로 환경영향범주를 기후변화, 산성화, 여름 스모그, 부영양화, 중금속으로 분류하여 환경부하를 정량화하였다.

Hammervold et al. (2011)은 노르웨이 서부의 이미 지어진 세 가지 형식의 교량에 대한 환경부하를 상세 비교 분석했으며, 100년 생애주기 동안의 환경부하를 산정하였다.

이러한 전과정 평가를 이용한 연구는 지속적으로 수행되고 있으며, 구조물의 전 생애주기에 대한 대부분의 연구결과에서 건설 자재 및 장비에 의한 환경부하가 가장 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한, 수명주기가 긴 SOC 시설물의 특성상 유지관리 단계에서도 큰 환경부하가 발생하는 것으로 분석되었으나, 연구결과 도출을 위해 사용된 데이터가 대부분 추정 값을 이용한 데이터를 사용하기 때문에 그 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 방법에 대한 개발이 필요하다.

3. 환경부하 추정 모델

3.1. 추정 모델 개요

건설구조물의 생애주기 중에서 기획단계와 설계 단계의 환경부하 평가는 선행연구로 수행된 사례가 있지만, 이에 본 연구에서는 앞서 밝혔듯이 유지관리 단계의 환경부하 평가를 실시하고자 한다.

터널 구조물의 환경부하는 투입되는 자원에 기초하여 산출되기 때문에 공사 물량에 따라서 결정된다. 따라서 환경부하 추정 모델은 설계초기 단계의 정보로 개략적인 물량을 추정하여 환경부하량을 산정한다. 다만 설계초기 단계의 정보만으로 모든 공종의 물량을 추정하는 것은 불가능하기 때문에 공종별로 환경부하를 분석하여, 환경부하가 가장 큰 대표공종만을 선정하여 물량을 추정한다.

터널 같은 경우 유지보수 시 터널내부 포장이나 터널내부 표면을 주로 보수하기 때문에 포장형태나 터널 내부 균열의 크기가 유지관리 단계에서 중요한 영향요인이다. 따라서 이와 같은 정보들을 얻기 위해서는 어떤 입력변수를 활용하는지 그것 또한 중요하다. 이에 본 연구에서는 설계 초기단계의 매우 간략한 정보만인 차로수, 연장, 포장형태, 포장두께만으로도 유지보수 시 공사 수량 및 소요자원들을 추정할 수 있다. 이후 해당 공종들의 단위물량 및 소요자원들의 산정값과 LCI DB, 유지관리 공종별 보수율을 곱하여 환경부하량을 추정할 수 있는 방법을 사용하였다. (Fig. 1)은 환경부하 추정 모델의 프로세스를 나타냈다.

3.2. 추정 모델 개발

본 연구에서는 도로건설공사의 전체 공종에 투입되는 자재 및 건설장비 등 세부내역을 산출하기 위해서 한국도로공사와 서울시 터널의 유지관리보수 단가집과 터널 설계내역서 및 소요자원 집계표 등을 통해서 데이터를 수집하였다. 이들을 바탕으로 터널의 유지관리보수 일위대가 목록을 작성하

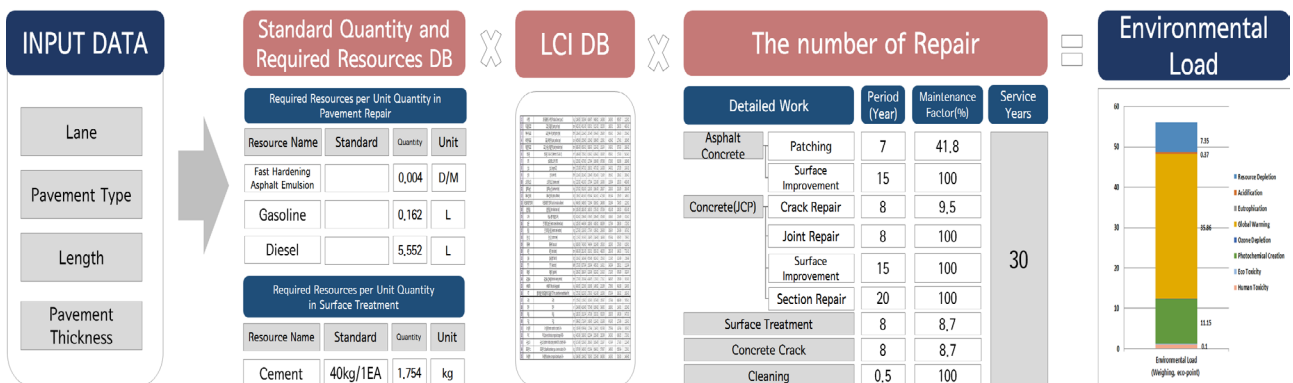


Fig. 1. Process of environmental load estimating model

고, 그 목록에서 터널 시설물의 유지관리 및 우선순위를 선정하여 환경부하량을 추정하도록 하였다. 터널의 유지관리 항목으로는 크게 구조물, 환기시설, 방재시설, 조명시설, 터널 운용비용으로 나뉜다. 하지만 현실적인 조건상 모든 유지관리 분야를 포함하는 것이 불가능하므로 본 연구에서는 가장 유지관리가 많이 진행되는 라이닝부와 바닥부를 대상으로 분석을 수행한다. <Table 3>은 터널의 유지관리보수 목록이다.

Table 3. Maintenance category of tunnel

Component	Maintenance Category
Structure	Lining, Pavement, The others, Potal
Ventilation	Ventilator, Measuring instruments
Preventing Disaster	Fire extinguishing system, Protective signaling system, Escaping, The others
Lighting	Lighting
Operation	Personal expenses, Operating expenses

대표공종은 터널의 유지보수 시 가장 결함이 많고 환경부하가 큰 공종으로 선정하였다. 그 중에서 라이닝부에서는 균열, 누수 공종이 해당되며, 바닥부는 포장의 균열 및 보수에 대해 해당된다. 이를 바탕으로 유지관리보수 일위대가 목록에서 추출한 콘크리트 균열보수, 터널내부 포장보수, 터널 누수표면처리, 정기적인 터널 청소를 대표공종으로 선정하였다. 또한, 각 보수 공종이 끝난 후 청소 공종을 추가하여 그에 따른 환경부하를 추정하도록 했다. 터널내부 포장보수 같은 경우 아스팔트와 콘크리트로 구분되는데, 아스팔트 포장의 보수는 주로 패칭과 노면개량을 실시하며 콘크리트 포장은 노면개량 및 균열, 줄눈, 부분보수를 한다. 터널 라이닝부 단면보수와 열화단면제거에 대한 공종은 보수율을 산정하기 어렵기 때문에 제외를 했다. <Fig. 2>는 터널 유지관리 단계의 대표공종이다.

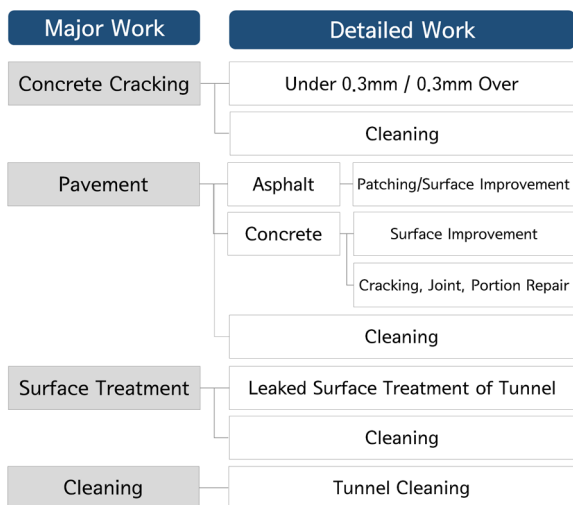


Fig. 2. Major works

이후 터널별 투입되는 총 자재 및 장비사용에 따른 연료사용량을 집계하고, 실적공사비가 적용된 공종은 표준품셈을 참고하여 품셈 값으로 변환함으로써 소요자원을 산출한다. 다음 <Table 4>는 유지관리 단계에서 필요한 소요자원 DB의 일부이다.

Table 4. The part of required resources

The name of works	Standard	Quantity	Unit
Patching	Below T=7.5cm	1	M ²
Disel		5.552	L
Gasoline		0.16154	L
Asphalt concrete		1	Ton
Fast hardening asphalt emulsion		0.00357	D/M
Crack Repair	B=3mm	1	M
Epoxy grouting		1.1124	Kg
Epoxy sealant		0.78795	Kg

유지관리 단계의 특성에 맞는 환경부하를 추정하기 위해서는 보수율을 산정하는 것이 가장 중요하다. 실제 유지보수 이력에 근거한 보수주기 및 보수물량의 추정방법을 적용하여 보다 객관적이고 신뢰성 있는 결과 값을 얻을 수 있다. 유지관리 단계의 환경부하는 향후 유지보수 방법 및 물량에 따라 달라지는 추정치이기 때문에 신뢰할 수 있는 수준의 실제 유지보수 자료에 근거하여야 한다. 보수주기 및 보수율은 한국도로공사 기술심사처에서 제공한 ‘포장, 터널, 사면 생애주기비용(LCC) 분석 연구 최종보고서(2008)’를 기준으로 실제 한국도로공사 하이포탈에서 사용하는 보수주기 및 보수율을 추출하여 사용하였다. 이를 이용하여 보수횟수를 산정할 수 있으며, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{보수횟수} = \text{공용년수} / \text{보수주기} \quad (4)$$

공용년수는 기본적으로 30년을 주기로 잡았으며, 사용자가 수정이 가능하다. <Table 5>는 터널 유지관리보수 공종의 보수율이다.

Table 5. The coefficient of repair

Category		Period (Year)	Maintenance Factor(%)	Service Year
Asphalt Concrete	Patching	7	41.8	30
	Surface Improvement	10	100.0	
Cement Concrete	Crack Repair	8	9.5	
	Joint Repair	8	100.0	
	Surface Improvement	15	100.0	
	Section Repair	20	100.0	
Leaked Surface Treatment		8	8.7	
Cleaning		0.5	100.0	

다음단계로, 환경부하량을 추정하기 위해 LCI DB를 적용한다. 각 자원들과 알맞은 LCI DB를 연결한 후, 각 DB의 변환단위와 변환계수를 적용한다. 예를 들면, 휘발유 같은 경우 'L'단위를 사용하지만 환경부하를 추정할 때 Kg 단위로 변경해야 하므로, 단위를 변경할 때 적용할 변환계수를 산정하여 계산을 해야 한다. <Table 6>은 터널 유지관리 단계에서 필요한 소요자원에 따른 LCI DB와 변환단위 및 변환계수이다.

Table 6. Required LCI DB in maintenance phase

Required resources	LCI DB	Conversion Unit	Conversion Factor
Fast hardening asphalt emulsion	Fast hardening asphalt emulsion	L	208
Gasoline	Gasoline	Kg	0.75
Disel	Disel	Kg	0.83
Asphalt concrete	Asphalt concrete	Ton	0.001
Epoxy grouting	Epoxy bonding	Kg	1
Epoxy sealant	Epoxy paint	Kg	1
Primer for Concrete	Asphalt	Kg	1
Admixture for concrete	Curing compound	Kg	1
Concrete	Ready mixed Concrete	M3	1
Rapid hardening cement	Rapid hardening cement	Kg	1
Crushed rock	Gravel	Kg	2,000
AE water reducing agent	Silicate of soda	Kg	1
Cement	Cement	Kg	40

이들을 이용하여 환경부하를 추정하기 위한 간단한 설계 정보로는 차로수, 연장, 포장종류, 포장두께가 필요하다. 차로수는 2차로, 3차로, 4차로로 이루어지며 사용자가 선택할 수 있다. 터널 내부 포장은 콘크리트나 아스팔트로 이루어지며, 콘크리트 포장 두께는 10cm나 15cm, 아스팔트 포장 두께는 5cm나 7cm이며 사용자가 선택할 수 있다.

최종적으로 간단한 설계 정보를 입력하여, 대표공종에 따른 소요자원 DB와 유지관리 단계의 보수횟수와 보수율, LCI DB를 곱하여 환경부하를 추정할 수 있다. 결과 값은 8대 영향범주의 중요도를 포함한 가중화 값을 최종 결과 값으로 표현하며, 그래프로 전체적인 환경부하를 확인할 수 있다.

모델 개발 테스트를 위해, 연장이 1,580m인 2차로 콘크리트 포장이며, 포장 두께는 10cm인 터널을 대상으로 환경부하를 추정했다. <Table 7>은 특성화 값, <Table 8>은 가중화 값이다.

Table 7. Characterization value

Category	Unit	Characterization
Resource depletion	1/yr	792.76
Acidification	kg SO ₂ -eq	410.44
Eutrophication	kg PO ₄ 3-eq	0.45
Global warming	kg CO ₂ -eq	688,660.90
Ozone depletion	kg CFC11-eq	0.01
Photochemical Oxidant Creation	kg C ₂ H ₄ -eq	1,767.13
Eco toxicity	kg 1,4 DCB eq	0.72
Human toxicity	kg 1,4 DCB eq	15,420.95

Table 8. Weighted value and total

Category	Unit	Weighting
Resource depletion	Eco-point	7.35
Acidification	Eco-point	0.37
Eutrophication	Eco-point	0.00
Global warming	Eco-point	35.86
Ozone depletion	Eco-point	0.07
Photochemical Oxidant Creation	Eco-point	11.15
Eco toxicity	Eco-point	0.10
Human toxicity	Eco-point	1.09
TOTAL		55.99

3.3 추정모델 검증

추정모델 검증을 위해 실제 터널의 유지보수 공사 사례와 비교하여 오차율을 확인했다. 실제 사례의 공종들과 본 모델의 공종들의 차이가 있었기 때문에, 동일한 공종에서만 환경부하량을 비교하였다. 또한, 실제 사례는 내역서를 바탕으로 물량과 일위대기만 알 수 있었기 때문에 보수횟수를 추정할 수 없어, 사례와 본 모델의 보수횟수를 1회로 동일하게 적용하여 계산하였다. 특히, 터널청소 공종은 정기적인 터널청소를 제외한 보수 후 청소만을 고려한 내역이므로, 비교·분석을 시행할 때도 보수 후 청소만을 고려하여 비교·분석을 실시했다. <Table 9>는 실제 사례와 개발 모델의 환경부하량을 비교한 후, 분석결과와 오차율을 제시하였다.

Table 9. Error rate of 'H' tunnel

	'H' Tunnel	Model	Error rate
Cracking(Eco-point)	0.047	0.048	2.13%
Cleaning(Eco-point)	0.297	0.299	0.67%
Total(Eco-piont)	0.343	0.347	1.15%

실제 사례와 본 모델을 비교한 결과, 균열보수 환경부하량은 2.13%, 터널청소 환경부하량은 0.67%의 오차율을 보였으며, 총 환경부하량은 1.15% 정도 차이가 났다. 따라서 본 모델은 간략한 설계정보만으로도 유지보수 시 환경부하량을 추정하는 것이 가능한 수준으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 터널의 유지관리 단계에서 발생하는 환경부하량을 터널 계획단계에서 간략한 설계 정보만으로도 추정 값을 제시할 수 있고, 모든 사용자들이 편리하게 이용할 수 있도록 하는 것이 목적이다. 이를 위해서 환경부하를 추정할 수 있는 방법론을 제시하고, 환경부하량 추정 모델을 개발하였다.

이 모델은 설계초기단계의 설계 정보에서 추출된 차로수, 연장, 터널내부 포장종류, 포장두께를 입력변수로 설정하였다. 이를 이용하여 유지관리 단계의 대표공종에 들어가는 표준물량 DB와 소요자원 DB를 통해 투입 자재량 및 에너지량을 산출하고, LCI DB와 연결하여 환경부하를 산출하였다. 또한, 장기적인 유지관리보수 특성에 맞게 각 공종들의 보수주기와 보수율을 적용함으로써 공종년수에 따른 보수횟수를 고려하여 유지관리 시 환경부하량을 추정할 수 있는 모델을 개발하였다.

최종적으로 개발한 모델의 신뢰성을 검토하기 위해 실제 사례와 비교하여 오차율을 검토하였다. 그러나 유지관리 사례가 많지 않을뿐더러, 유지관리 공종별로 보수율에 대한 정확한 산정 값이 없기 때문에 검증에 대한 한계가 있다. 또한, 모델에 사용된 보수주기와 보수율 값은 최초 보수주기와 보수율에 대해 산정된 값이므로 여러 번 보수를 진행한 사례에서 적용하기에는 문제가 따를 것으로 보인다. 따라서 정확한 보수율과 보수주기를 산정은 향후 과제로 추진되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구를 통해 개발한 유지관리단계 추정모델이 도로 및 터널사업의 친환경적인 관리를 하도록 도움을 줄 수 있다고 판단되며, 향후 국토 건설공사 터널의 유지관리 보수 시 환경부하량 예측 모델 구축을 위한 기초로 활용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업인 “SOC시설물의 환경부하 저감을 위한 LCA (Life Cycle Assessment) 기반 의사결정 시스템 개발”의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Hammervold, J., Reenaas, M., and Brattebø, H. (2011). “Environmental life cycle assessment of bridges, *Journal of Bridge Engineering*.” *American Society of Civil Engineers*, 18(2), pp. 153–161.

ISO 14040 (2006). Environmental management – Life cycle assessment– Principles and framework, International Organization for Standardization.

Jin, N. H., Park, J. H., and Park, M. Y. (2008). “A Study on the Necessity of Maintenance of Railway Structures based on the Integration of LCC and LCA.” *Korean Society for Railway*, Nov. 13. pp. 37–44.

Junnilla, S., and Horvath, A. (2003). “Life-cycle environmental effects of an office building.” *Journal of Infrastructure Systems*, 9(4), pp. 157–166.

Korea Environmental Industry Technology Institute, Information network of LCI DB in Korea, <<http://www.edp.or.kr>> (February 13, 2018).

Korea Highway Corporation Engineering & Construction Office (2008). Final Report on Life Cycle Cost Analysis of Pavement, Tunnel, and Slope.

Kwon, S. H. (2008). Development of Assessment Model for Environmental Economics of Construction Projects, Ph.D Dissertation, University of Chungang.

Lee, J. H. (2017). Simplified environmental load estimating model based on detail level of design information(focused on the NATM tunnel), Ph.D Dissertation, University of Chungang.

Lee, K. H., and Lee, K. H. (1996). “Estimation of energy consumption and CO2 emission from building activities.” *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 12(7), pp. 197–204.

Ministry of Construction & Transportation (2004). The environmental load unit composition and program development for LCA of building(in Korean).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). National D/B for environmental information of building products (in Korean).

Min, S. G. (2013). A study on the establishment of an environmental-load reduction plan for airport pavement, Master Dissertation, Seoul national university of science and technology.

Ministry of Commerce, Industry and Energy (2003).
A Study on the Standardization of Environmental
Management for Environmentally Friendly Industry.
The bank of Korea (2007). The explanation of inter
industry analysis (in Korean).

요약 : 인간이 절대적으로 필요한 사회기반시설은 설치 및 유지관리 시 큰 환경부하를 발생한다. 특히, 유지관리는 장기간에 걸쳐 수
행되며 보수방법 및 주기에 따라 환경부하가 달라지기 때문에 신뢰할 수 있는 추정 값을 제시하는데 한계가 있다. 이에 본 연구에
서는 터널을 유지관리 할 때 발생하는 환경부하를 기획 또는 설계초기단계에서 신속하게 평가할 수 있도록 환경부하 추정모델을
개발하였다. 간략한 설계 자료만으로도 환경부하를 추정할 수 있는 모델개발을 위하여, 유지관리 단계에서의 환경부하 산정 방법
론을 분석하고, 장기적인 유지관리의 특성을 고려한 보수주기와 보수율을 적용하였다. 최종적으로 모든 사용자들이 유지관리단계
의 환경부하량을 편리하고 신속하게 추정할 수 있는 평가모델을 개발하는 것이 본 연구의 목표이며, 이를 통해서 도로 및 터널사
업의 친환경적인 유지관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 환경부하량, NATM 터널, LCA, 유지관리
