

BIM을 활용한 LCA기반 환경부하평가에 관한 연구

- NATM 터널 사례 중심으로 -

이양규* · 한중근** · 권석현***

Lee, Yang-Kyoo*, Han, Jung-Geun**, Kwon, Suk-Hyun***

A Study on the Evaluation of Environmental Load Based on LCA Using BIM - Focused on the Case of NATM Tunnel -

ABSTRACT

To control manage environmental load during construction work, it is required to ascertain an accurate quantity for materials those are using during the construction. In construction industrial nowadays, especially on design part, there are lots of mistakes occurred on quantity take-off between plan documents and actual work. That mistakes are caused by omission of design items, overcount because of interference each materials or simple calculate error. Besides, in case of a construction project, engineers are impossible to design perfectly due to a lot of invalid variable in a construction site. Thus, design errors and changes occur frequently in the process of construction work or design due to such unclear elements. And in case of LCA assessment based on 2D design, there is difficult for an engineer who is in charge to calculate the volume of materials manually using drawings and relevant specifications. This study is aimed for examining and verifying a high reliable method of evaluating environmental load which is useful in construction process through comparing LCA analysis. In addition, this study provides the method of calculating the volume of materials and LCA assessment in working on the basis of 2D design, using the specifications which is used for LCA evaluation, and possibility of utilizing the LCA assessment by introducing BIM design technic to improve the former problem through comparing and analyzing the previous method with 3D-based evaluation process.

Key words : BIM, LCA, Tunnel, Social overhead capital

초 록

건설공사시 발생하는 환경부하 관리를 위해서는 시공시 실제 투입되는 물량을 면밀히 파악할 필요가 있다. 현재 건설공사에서는 2D도면을 활용한 설계의 경우에는 실제 설계 도서간 물량산출 값의 오차, 설계항목의 누락이 발생하고 있으며 건설 공사의 경우 불확실한 요소들로 인하여 시공 중에도 빈번히 설계변경 및 오류가 발생하고 있다. 또한 2D 설계를 바탕으로 하는 LCA평가의 경우 도면, 내역서 등을 이용하여 작업자가 수기로 작업공종에 투입되는 자재를 산출해야하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 2D 설계를 바탕으로한 물량산출과 BIM기반의 물량산출을 바탕으로 LCA 분석을 비교하여 시공과정에서 활용 할 수 있는 신뢰도 높은 환경부하평가 방법을 검증하고자 한다. 또한 설계도서를 활용한 내역기반의 2D설계의 물량산출 및 LCA 평가 방법을 제시하고, 3D 기반의 평가 프로세스를 비교 분석하여 BIM 설계기법 도입에 따른 LCA 평가 활용 가능성을 제시하고자 한다.

검색어 : BIM, LCA, 터널시설물, SOC 시설물

* 중신회원 · 대림대학교 토목공학과 정교수 (member · Daelim University College · yklee@daelim.ac.kr)

** 중신회원 · 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 정교수 (member · Chung-Ang University · jghan@cau.ac.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 겸임교수 (Corresponding Author · member · Chung-Ang University · ksh6407@chol.com)

Received January 22, 2018/ revised February 28, 2018/ accepted April 4, 2018

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 전 세계적으로 파리기후변화협약, 신기후체제 등을 통해 온실가스 저감을 위한 여러 가지 노력을 기울이고 있다. 파리기후협약은 2050년까지 지구 온도를 산업화 이전과 비교해 2°C보다 낮게 유지하는 것을 목표로 하고 있으며 최근 국내에서도 산업전반에 걸쳐 국가 온실가스 감축을 위한 2020년 로드맵을 마련하고 예상 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 30% 감축을 목표로 설정하였다.

이에 따라 건설부문에서도 능동적인 참여가 불가피한 상황으로 최근에 발표된 2018년 각 부처별 R&D 사업계획에 따르면 온실가스 저감 등 기후변화대응기술 개발에 적극적인 참여를 유도하고 있으며 건설부문에서도 시공단계에서 발생하는 주요 환경물질을 평가하는 세심한 기후변화 대응기술의 필요성이 대두되고 있다.

온실가스 감축을 위해서는 건설사업의 환경에 대한 영향을 최소화하고, 각종 환경부하를 통합적으로 고려하는 개념 도입이 필요하다. 환경적인 지속가능성을 위해서는 전과정 단계(Life Cycle Assessment)에서의 에너지와 자원의 사용, 대기, 수계, 토양으로의 환경오염물질 배출을 포함한 합리적이고 종합적인 환경관리를 수행하여 환경부하를 감소시킬 필요가 있다.

실제 환경부하평가에 투입되는 자재와 에너지원 등이 매우 중요하다. 따라서 신뢰성 있는 환경부하 관리를 위해서는 시공단계 시 실제 투입되는 물량을 면밀히 파악할 필요가 있으며 2D 도면을 활용한 설계의 경우에는 실제 설계 도서간 물량산출 값의 오차, 설계항목의 누락 등의 문제가 발생하고 있다(Lee et al., 2011).

또한 건설 공사의 경우 불확실한 요소들로 인하여 설계기간 중 설계변경이 빈번하게 발생하며 2D 도면을 통한 물량산출시 설계가 변경될때마다 수계산으로 산출작업을 해야하는 번거로움이 있다. 반면 BIM을 활용하여 물량을 산정할 경우 자동으로 물량을 산출할 수 있기 때문에 기존의 2D 도면을 활용한 기존의 방식보다 작업시간 및 생산성이 향상되는 효과가 있다(Lawrence et al., 2014).

또한 2D 설계를 바탕으로 하는 LCA평가의 경우 수량산출서, 내역서, 도면 등을 이용하여 작업자가 수기로 작업공중에 투입되는 자재를 산출해야하는 어려움이 있으나 BIM을 활용하여 LCA평가를 수행하면 수량산출에 소요되는 시간을 줄여줄 수 있어 업무의 효율성이 증대되는 장점이 있다.

실제로 물량을 기반으로 하는 환경부하평가의 경우 설계도서를 활용하여 대상 범위를 설정하게 되는데 이때 평가자에 따라 분석시 입력값으로 사용되는 자재 및 에너지 목록과 적용 가능한 LCI DB를 선정하게 된다. 이로 인해 동일한 프로젝트의 경우라도 투입

물질의 범위설정 및 LCI DB 적용에 따라 결과해석이 달라지는 경우가 빈번히 발생하고 있다.

본 연구에서는 LCA평가의 효율성을 높이기 위하여 2D 설계를 바탕으로 한 물량산출과 BIM을 활용한 3D 기반의 물량산출을 바탕으로 LCA 분석 결과를 비교해 보았으며 설계방식에 따른 물량변화로 인한 실제 환경부하 저감 효과와 3D 모델링을 통하여 분석에 필요한 투입물질의 정량화 및 적용 가능한 LCI DB 표준화를 검토하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 토목공사 중 터널시설물을 대상으로 2D 도면을 기준으로 산출한 수량과 3D BIM을 이용한 수량을 비교하였으며 수량비교의 결과를 바탕으로 LCA기반의 환경부하평가를 실시하였다. 이를 통해 2D 설계와 3D 설계를 비교함으로써 설계단계에서 보다 정확하고 적합한 환경부하평가방법을 도출하고자 한다.

토목공사에서 주로 사용되고 있는 설계도서를 활용한 2D 기반의 물량산출 방법과 3D BIM 설계기반의 평가 방법을 제시하고, 물량산출에서부터 분석에 이르기까지 전반적인 프로세스 분석하여 기존 2D 방식을 활용한 평가 방법과 3D 설계기법 도입에 따른 평가를 비교하여 3D 설계를 통한 환경부하평가 프로세스 연계 및 평가 활용 가능성을 제공하고자 한다.

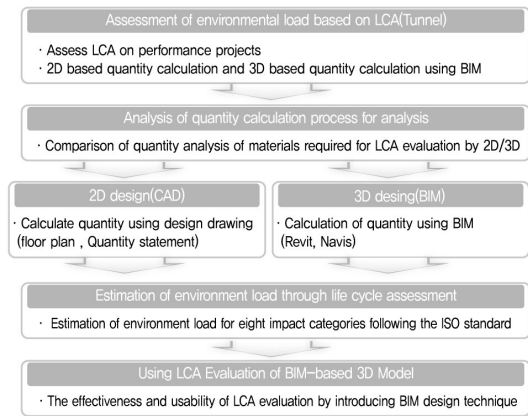


Fig. 1. Research Flow Chart

1.3 기존 문헌 고찰

최근 건설공사에서는 건축공사를 중심으로 3D BIM 설계가 발전해 왔으며 물량산출의 정확성 향상을 위한 연구들이 지속적으로 수행되어왔다. 주요 연구내용으로는 건적 산출을 위한 BIM 데이터 구축 및 연계방안(Lee et al., 2017)과 물량 산출 생산성 향상을 위한 마감 모델링 자동화 시스템 개발(Kim et al., 2009)과 같은 물량 산출의 정확성 검토 및 자동화 산출에 대한 연구가

진행되어 왔다.

이는 3D BIM 설계시 현업에 발생하는 실무위주의 오류사항 및 문제점을 개선하기 연구로 수행되었으며 설계단계시 발생하는 물량 오차 최소화 등의 정확성을 보장하는 위주로 연구로 진행되어 왔다.

기존 문헌을 통한 고찰 결과, 물량산출의 정확성 및 자동화 산출과 더불어 실제 3D BIM 설계 활성화를 위한 유지관리, 안전관리, 환경성 등의 다각적 측면에서의 활용 가치에 대한 연구가 필요한 것으로 파악되었다.

2. LCA 평가 프로세스 및 정의

2.1 2D 기반의 물량산출 및 평가 프로세스

현재 건축/토목을 포함한 건설공사의 환경부하평가는 설계도면 및 수량산출서, 내역서 등을 기반으로 실시하고 있으며 매우 복잡하고 번거로운 산출과정을 거치게 된다.

실제로 LCA 평가시, LCI DB 매칭, 단위변환, 수량집계등의 산출과정이 필요하며 분석 대상자 따라 적용 기준이 서로 상이하므로 평가결과에 대한 신뢰성이 결여되는 문제점이 발생하고 있다.

터널구조물 시공에서는 다양한 자재 및 에너지원이 공사에 투입되며 LCA 수행을 위해서는 자재별 LCI DB가 구축되어 있어야 평가가 가능하다. 그러나 국내에 구축되어 있는 LCI DB중 투입되는 자재 및 장비에 적용 가능한 DB는 한계가 있으므로 본 연구에서는 유사DB 및 해외DB를 적용하였다. LCA 수행시 영향평가의 신뢰도 확보를 위해서는 Cut -Off level을 완제품의 총 중량 대비 90% 이상에 해당하는 투입물질까지 분석하도록 되어 있으나 사업 특성을 고려하여 조정하였다(Cho et al., 2017).

총 중량에 대비해서 일정 수준의 중량을 차지하는 투입물질까지 고려해야 하지만 시공이 완료 후 시설물의 총 중량을 측정하는 것은 사실상 불가능하여 대상 시설물의 건설비용 기준으로 평가를 수행하였다. 또한 터널구조물 건설시 투입되는 자재, 장비에 따른 에너지 소비량을 정량화하여 분석을 실시하였다.

Table 1은 분석에 적용된 LCI DB 단계별 수준을 나타낸 것으로 LCA 분석에 필요한 LCI DB의 결핍에 따른 신뢰성 저하의 문제점을 해결하고자 LCI DB 우선순위 적용 기준을 설정하였다. 국가 DB를 우선으로 적용하였으며, 자재명과 규격에 부합하지 않는 DB의 경우 대상 물질의 재질 및 공정을 파악하여 가장 유사한 DB를 적용하였다.

현재 한국환경산업기술원에서 제공하고 있는 물질 및 부품제조 단계의 건축자재의 경우 약 26여 개의 물질로 구축되어 있으며 건설 전반에 걸쳐 적용하기에는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에 미 구축되어있는 주요 자재 DB는 해외

Table 1. LCI DB Application Standard

Classification		Application level
1	National DB	Applying national LCI DB provided from the Korea Environmental Industry and Technology Institute
2	Similar DB	Applying national LCI DB by examining material information although it is not 100% consistent with the material name
4	Foreign DB	Applying foreign LCI DB for materials that have not been established in Korea
3	Building DB	Applying LCI DB process creation DB provided by the country for research purpose

Table 2. List of LCI DBs Applicable to Tunnels

Classification	Unit	Material name	Remark	
Material	Cement	kg	Portland Cement_type 1	MOTIE
	Remicon	m ³	Remicon 25-240-15	MOTIE
	Shape steel	kg	Electric steel sections	MOTIE
	Wire rod	ton	Wire rod	MOE
	Rockbolt	set	Rockbolt D25	building
	Sodium silicate	kg	Sodium silicate <rar>	ecoinvent
	Steel reinforcement	kg	Electric steel deformed bars	MOTIE
	Thick plate	ton	Steel plates	MOE
Energy source	Electricity	kWh	Electricity	MOTIE
	Diesel	kg	Light fuel oil	MOTIE

DB를 추가로 적용하였다.

락볼트의 경우 현재 국내의 적용 가능한 LCI DB가 없어 ISO 기준에 근거하여 구축 되어진 DB를 적용하여 평가하였다. DB 구축의 전반적인 절차는 ISO 14040/14041 시리즈에 의해서 수행하였으며 세부항목별로 구체적인 기술적 사항은 국가 LCI 데이터 베이스 표준지침서에 기술된 내용을 기준으로 구축하였다.

주요 공정의 수량산출 내역 검토를 통해 터널구조물에 적용 가능한 LCI DB를 적용 기준에 따라 순위를 정하고 평가 프로세스에 따라 총 11개의 자재 및 자원 DB를 도출하였다. 터널 공사 시 투입되는 장비의 금액 비중은 약 30% 수준으로 나타났고, 장비에 투입되는 에너지원은 경유 및 전력 DB를 활용하였다.

LCA 환경부하평가를 수행하기 위해서는 설계 혹은 시공시 산출된 물량이 무엇보다 필요하다. 본 연구는 2D도면을 기반으로 산출된 물량과 3D BIM 기반으로 산출된 물량을 바탕으로 환경부하량을 비교하여 각 방식의 환경부하평가 효율성을 평가하고자 한다. 연구를 수행하기 위해서는 동일한 자재와 동일한 조건으로 2D 설계 기반의 수량과 3D BIM 기반의 수량을 비교 평가하여 오차를

파악한다. 이때 2D 설계의 수량산출서를 참고하여 수량을 산정하였으며 3D 모델은 Autodesk사의 Revit을 이용하여 물량을 산출하였다.

토목시설물의 물량산출 방법은 시설물에 따라 다르다. 대표적인 토목구조물인 교량의 경우에는 경간장 기준으로 물량을 산출하며 터널의 경우에는 지보패턴 등의 기준으로 물량을 산출한다. 본 연구에서는 터널의 지보패턴을 기준으로 물량을 산출하였으며 동일한 기준의 수량을 2D와 3D BIM 기반으로 비교하고 3D 모델에 의한 수량산출이 2D 대비하여 효과가 있는 주요 공정을 고려하였다.

터널구조물의 타입별 단면에서 파악할 수 있는 주요공종별 단위 수량을 활용하여 수량 산출을 2D/3D로 각각 집계하고 투입되는 주요 소요자원을 파악하여 비교 검토를 실시하였다. 총 9가지의 주요공종을 대상으로 선정하였으며 주요공종 및 단위 수량은 Table

Table 3. Calculating the Quantity of Tunnels (2D Design)

Work type		Unit	Quantity
Excavation	Top	m ³ /m	94.771
	Bottom	m ³ /m	43.362
Design excavation	Top	m ³ /m	89.440
	Bottom	m ³ /m	40.200
Shotcrete	Top	m ³ /m	8.274
	Bottom	m ³ /m	1.717
Steel fiber reinforcement	Top	ton/m	0.306
	Bottom	ton/m	0.064
Rockbolt	Top	EA/m	5.000
	Bottom	EA/m	4.000
Tunnel supports		EA/m	1.000
Conduit concrete		m ³ /m	3.342
Concrete lining		m ³ /m	13.025
Pavement	Concrete	m ³ /m	2.938
	Cement stabilization filter	m ³ /m	1.695

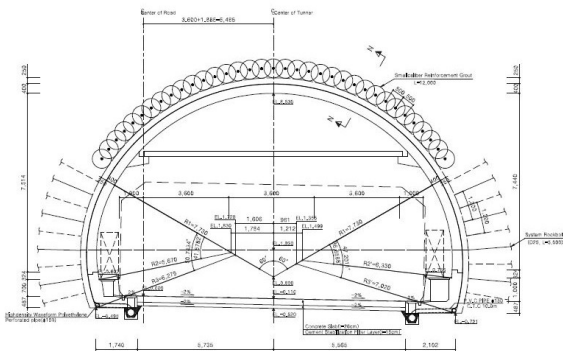


Fig. 2. 2D Design Drawings

3과 같으며 Fig. 2는 본 연구에 사용된 2D 도면의 지보패턴 중 하나이다.

2.2 BIM기반 물량산출 및 평가프로세스

BIM을 통한 물량산출은 2D 도면을 기반으로 3D 모델링작업을 수행하고 작성된 3D 모델의 물량정보로부터 물량을 산출한다. BIM 기반 물량산출의 경우 2D 도면에서 볼 수 없었던 설계오류(부재간 간섭, 중복 등)를 3D 모델링을 통해 발견할 수 있으며 간섭이나 중복같은 설계오류로 인한 수량 중복 혹은 누락이 발생할 수 있다. 이로 인해 2D 도면과 3D 모델링의 물량 오차가 발생할 가능성이 존재한다. 다음 Fig. 3은 동일 프로젝트에서 모델링을 통해 발견된 간섭사항 및 설계오류이며 Fig. 4는 해당 오류사항에 대한 도면이다.

Figs. 3 and 4와 같이 터널 시점부 갭분 구조물 끝부분과 터널구조물을 덮고 있는 캐노피간의 간섭이 발견되었는데 이는 2D 도면에서 캐노피의 곡률반영을 쉽게 확인할 수 없어 오류발견이 어려웠던 케이스였으며 결국 캐노피의 길이를 설계변경해서 해결되었다. 위와 같이 2D도면으로 물량산출을 수행할 경우에는 구조물간 간섭 및 설계오류를 놓치기 쉽기 때문에 수량산출 또한 오류를 범할 여지가 있으며 이는 곧 2D 도면과 3D 모델기반의 수량차이를 야기시킨다.

또한 2D 도면을 기반으로 수량을 산정했을 경우, 부재의 누락 혹은 계산상의 실수가 발생할 가능성이 있으나 3D 모델기반의 물량산출은 프로그램 내의 알고리즘을 통해 계산되므로 실제 공사

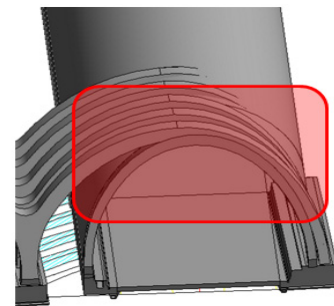


Fig. 3. Interference Occurred Between Structures

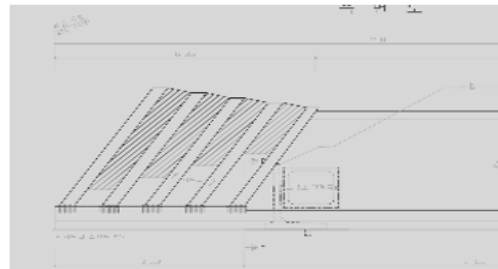


Fig. 4. Elevation Drawing for Error Occurred

에서 사용되는 물량의 오차를 줄 일 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 2D 기반으로 산출된 물량을 검토하기 위해서는 물량산출의 모든 프로세스를 수작업으로 계산정 해야하므로 검토 하는 과정에서도 차이가 발생할 가능성이 높다. 하지만 3D 기반은 부재의 크기, 위치 등만 체크하므로 검토과정 또한 기존의 2D 보다 간단하다. 또한 2D 도면 기반으로 수계산을 통해 물량을 산출 할 경우, 비선형, 터널의 구배, 회전 반경 등의 계산은 수식이 복잡하여 정확하게 계산하기 어렵지만 3D 모델링 기반의 물량산출 은 보다 정확하고 간단하게 계산을 할 수 있다.

그리고 빈번히 발생하는 설계변경의 경우, 2D도면 기반의 물량 산출 방식은 변경된 부분을 재계산 해야 하는 번거로움이 발생하지만 3D 모델링의 경우 부재치수를 변경된 부분을 입력하면 자동적으로 물량이 산출된다.

앞에서 나열한 바와 같이 2D 설계보다 3D모델링 설계의 작업효 율성이 높아 설계단계에서 여러개의 대안평가가 가능하다. 무엇보다 설계 변경에 따른 자동물량 산출프로세스는 LCA평가와 같이 물량기반을 기초로 하는 환경성 평가에는 매우 유용하게 활용이 가능하다는 점은 궁극적으로 4차 산업혁명이 추구하고 있는 보다 넓은 범위와 함께 빠른속도로 영향을 미칠 수 있는 ICT 기반의 지능정보기술로의 연계발전이 가능하다.

BIM 모델링을 수행하기 위해 사용되는 프로그램은 Autodesk사의 Revit, Bentley사의 Bentley Systems, Dassault Systemes사의 CATIA 등이 대표적이다. 본 연구에서는 Autodesk사의 Revit 2018을 사용하였으며 환경부하평가 수행을 위한 터널시설물 프로젝트 개요는 Table 4와 같다.

BIM모델링은 LOD (Level of Detail, 상세수준, 이하 LOD로

Table 4. 3D Modeling Summary

	Contents
Project	00-00 Expressway 00-00 Construction
Location	Hanam-si, Gyeonggi-do ~ Gangdong-gu, Seoul
Summary	Total length : 3.99km / tunnel : 3.32km
Program	Autodesk Revit 2018
LOD level	LOD 300

Table 5. LOD Information Level

LOD level	Information level
LOD 100	Conceptual model level
LOD 200	Rough shape model level
LOD 300	Precision Shape model level
LOD 350	Precision shape and linkage information model level
LOD 400	Production model level
LOD 500	Completion model

지침)에 따라 수행과업이 달라지므로 발주자와의 협의를 통해 LOD를 정해야한다. 미국의 AIA (The American Institute of Architects)에서 제시한 가이드 라인에 따르면 100에서 500까지 5단계로 구분하고 있다.

국내에는 AIA의 기준을 바탕으로 한국도로공사에서 ‘EX-BIM 가이드라인’를 제시하고 있으며 현재 토목BIM의 경우 한국도로공사 기준으로 프로젝트를 수행하고 있다. Table 5는 한국도로공사에서 제시하는 LOD 단계별 BIM 정보 수준을 나타낸 것이다.

일반적으로 LOD 100은 간단한 그래픽 표현을 하게 되며 LOD 200단계부터는 크기나 형상, 위치 정보를 보다 구체적으로 나타낸다. LOD 300 수준에서는 모든 위치정보와 형상정보가 구체화되며 그 외에 물량과 같은 그래픽 외적인 정보도 추가된다.

LOD 350은 그래픽 정보 외에 구조 및 물량정보 등이 구체적으로 표현되며 그 다음 단계인 LOD 400에서는 형상정보뿐만 아니라 철근이나 철물 같은 상세 시공 시 들어가는 비용이나 공정정보와 연동이 가능하도록 모델링을 수행한다. Fig. 5는 LOD 수준에 따른 모델링을 도식화하여 나타낸 것이다.

본 연구의 경우 LOD 300 수준으로 터널을 모델링하였으며 BIM모델을 통해서 토공량과 숏크리트, 콘크리트 라이닝, 록볼트, 포장 등의 수량을 산정하였다. Figs. 6 and 7은 Autodesk Revit

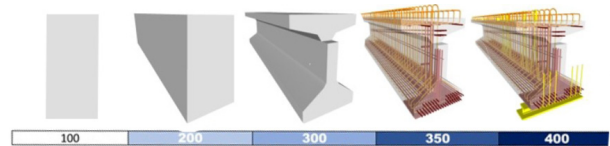


Fig. 5. Modeling According to LOD Level (Source : 2016 LOD Specification (BIM Form))



Fig. 6. 3D Design Drawings

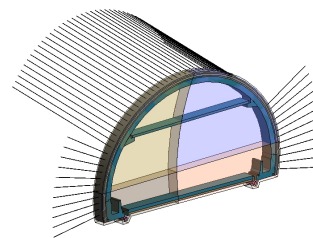


Fig. 7. 3D Design Drawings for Pattern

Table 6. Calculating the Quantity of Tunnels (3D Design)

Work type		Unit	Quantity
Excavation	Top	m ³ /m	94.766
	Bottom	m ³ /m	44.643
Design excavation	Top	m ³ /m	89.935
	Bottom	m ³ /m	40.202
Shotcrete	Top	m ³ /m	7.104
	Bottom	m ³ /m	1.546
Steel fiber reinforcement	Top	ton/m	0.297
	Bottom	ton/m	0.063
Rockbolt	Top	EA/m	5.000
	Bottom	EA/m	4.000
Tunnel supports		EA/m	1.000
Conduit concrete		m ³ /m	3.444
Concrete lining		m ³ /m	13.022
Pavement	Concrete	m ³ /m	2.938
	Cement stabilization filter	m ³ /m	1.695

2018로 작성한 모델링 예시와 수량산출을 위한 전체 모델링의 일부이며 Fig. 7은 Fig. 6의 모델링을 세분화하여 수량산출을 위한 패턴별 모델링 중 일부를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 터널구조물을 보면 음영이 나뉘져 있는데 이것은 단계별 토공량을 계산하기 위해서 표현한 것이며 이러한 모델링을 통해 패턴별로 1m당 굴착량, 샷크리트 수량, 라이닝 수량, 락볼트 수량 등 주요 자재의 수량을 파악할 수 있다. Table 6은 3D모델링의 일부패턴 중 하나를 대상으로 산정된 터널의 수량으로 프로그램 내에서 모델링을 통해 자동으로 산정된 수량을 정리한 것이다.

3. 터널시설물 환경부하평가 방법

3.1 목적 및 범위 정의

연구수행 목적과 방향, 연구의 내용적 깊이 등의 기본적 요건들이 결정되는 단계로써 터널구조물 건설시 자재투입 및 에너지사용량을 분석을 통한 환경부하량을 산출하였다. 국가에서 제공하는 LCI DB를 활용하여 사례대상의 영향범주별 특성화 및 가중화 값을 도출하고 결과치를 2D/3D 설계에 각각 반영하여 환경부하 예측모델에 적용하고자 한다.

3.2 목록분석

전과정 평가를 위해서는 대상시설물의 전과정과 관련된 투입물과 산출물을 규명하여 정량화하여야 하는데 이를 목록분석이라 한다.

환경부하평가를 위해서는 시설물 생산을 위해 투입되는 자재들

에 대한 목록분석이 필요하다. 그리고 목록분석을 위해서는 각 자재의 생산과정을 추적하여 분석한 LCI DB가 요구된다.

전과정 평가 목록분석은 전과정평가에서 가장 많은 시간과 비용을 요구하는 과정으로 목록분석을 통해 산출된 결과를 환경부하로 변환하여 제시한다. 이를 통해 환경에 미치는 영향 정도를 정량적으로 평가하고, 도출된 환경부하는 그 자체로도 의미를 가질 수 있지만 특성화 인자들의 정량적인 값을 도출하기 위해 전과정 영향평가 단계에서 사용한다.

터널구조물의 단계별 투입되는 자재 및 에너지를 정량화 하고, 발생하는 환경오염물질에 대한 목록분석을 수행하여 국내의 LCI DB를 활용한 분석을 실시하였다.

3.3 영향평가

영향평가는 목록분석 단계에서 정량적으로 계산된 환경부하물질에의 환경영향을 분석하고 평가하여 잠재적인 환경부하를 찾아내는 단계이다. 작성된 투입 및 배출 항목들을 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화, 생태독성, 인간독성과 같은 환경영향범주에 미치는 잠재적 영향과 연계시키는 과정이다.

전과정평가를 통한 전과정 목록 연산 이후 영향평가 단계를 거치게 되면 터널 시설물 주요 공정의 환경 부하에 대한 상대평가가 가능하다. 평가를 통하여 어느 일부 공정이 어떤 영향 범주에 따른 환경부하가 높은지, 또는 어떤 자재가 전체 공정에서 가장 큰 영향을 미치는지 객관적으로 파악할 수 있다.

전과정 영향평가의 절차는 분류화, 특성화, 정규화로 진행되고, 세부 영향평가 방법론은 산업통상자원부에서 제시하는 총 8가지의 국가 LCI DB구축 영향평가 방법론을 활용하였다. 특성화 인자는

Table 7. Impact Assessment Methodology for Each Impact Category

Impact category	Characterization factor	Characterization model
Resource depletion	1/yr	World resource (1992), Crowson (1992)
Acidification	gSO ₂ -eq/g	EDIP, Guinee et al. (1992)
Eutrophication	gPO ₄ -3-eq/g	Guinee et al. (1992)
Global warming	gCO ₂ -eq/g	IPCC (1995)
Ozone layer destruction	gCFC-11-eq/g	UNEP (1997)
Photochemical oxidant	gethane-eq/g	EDIP. Geijungs et al. (1992)
Ecological toxicity	gbody wt/g	Guinee et al. (1992)
Human toxicity	m ³ water/g	Guinee et al. (1992), Eco-indicator

자원, 대기, 수계, 토양에 영향을 미치는 주요물질을 8가지 주요 영향범주로 구분하여 당량으로 제시한 값으로 특성화 분석을 통해 객관적인 환경부하를 파악할 수 있으며 이는 LCA 분석시 가장 기본적인 평가기준이 된다. 주로 국내에서 사용되고 특성화 제시 모델은 Table 7과 같다.

평가 결과를 바탕으로 터널시설물을 구성하는 특정 자재나 공종의 환경부하가 높을 경우, 대체할 수 있는 친환경 자재 또는 공정을 고려할 수 있는 기초자료 및 근거로 활용이 가능하다.

4. 기존 사례의 환경부하량 산정

환경부하량 산정을 위한 2D 터널단면과 수량산출을 통하여 적용 가능한 8가지 공종을 선정하여 국내 DB 및 유사 DB를 매칭시켜 자재 DB를 적용하였다. 에너지원 DB의 경우는 굴착에 필요한 점보드릴, 슛크리트 타설시 투입되는 타설기, 공기압축기, 로더,

운반트럭 등의 시간당 작업량을 국토설계기준에 따라 가정하여 투입되는 자원을 산출하였다.

분석에 앞서 공중에 투입되는 주요 자원은 자재 및 에너지 DB로 구분하였으며 굴착 공종은 장비사용에 따른 전력량을 에너지원으로 선정하고 슛크리트 공종의 경우 투입되는 시멘트, 콘크리트 혼화제 등의 자재와 타설기, 믹서트럭 등의 장비의 경유량을 고려하였다(Kwon, 2008).

총 8가지 주요 공종에서 레미콘, 전기, 경유, 규산소다, 철근형강, 락볼트, 후판, 철근, 선재를 매칭 가능한 LCI DB로 선정하여 ISO 14040 표준기준에 따라 영향평가를 실시하였다.

분석에 필요한 평가 Tool은 환경부에서 제공하고 있는 TOTAL 활용하였으며 대상 작업 공종을 2D와 3D로 구분하여 생성하고 LCI DB와 매칭 가능한 자재를 선택하여 각각 공종별 산출된 주요물질 물량의 자재를 연결하여 분석하였다.

전과정영향평가를 수행하기 위해 LCI 목록을 이용하여 영향범주별로 분류하고 영향평가의 특성화 등의 기타 절차를 수행하였다. ISO 가이드라인에서는 영향평가 수행 시 분류와 특성화는 필수 요소로 규정하고 있으며 정규화 및 가중화는 연구목적에 따라 선택할 수 있도록 권고하고 있다.

특성화 결과는 같은 영향범주 내의 물질간의 비교만 가능하지만 정규화와 가중화를 수행한 후에는 영향범주간의 비교가 가능하며 본 연구에서는 산업부에서 제공하고 있는 8대 영향범주별 상대적인 평가가 가능하도록 2D 설계와 3D 설계를 가중화한 결과를 추가로 비교 분석하였다.

8가지 주요 공종에 투입되는 주요 자재 및 에너지 DB는 시멘트, 선재, 락볼트, 레미콘, 전기, 경유, 후판, 형강, 철근, 규산소다로 선정하였으며 ISO 14040 표준기준에 따라 8대 영향범주별 가중화 평가를 실시하였다.

앞서 분석한 결과와 같이 2D 설계와 3D 모델링을 통한 물량오차는 시멘트, 선재, 경유에서 14.6~15.5%의 오차를 보였으며 기타 나머지 투입물질의 경우 오차가 미미한 것으로 분석되었다.

물량오차에 따른 환경부하평가는 기존 2D 방식이 2.45E+02, BIM기반의 3D 모델링을 통하여 추정한 환경부하량 2.12E+02로 평가되어 2D 설계 대비 3.27E+01 저감으로 설계방식에 따른 환경부하량은 약 13.4% 저감효과가 있는 것으로 분석되어 시멘트, 선재, 경유의 물량 절감으로 인한 환경부하가 저감된 것으로 파악되었다.

또한 터널 공사시 환경부하에 큰 영향을 미치는 영향범주로는 지구온난화가 약 70% 이상 차지하는 것으로 나타나 향후 작업 공종의 효율화, 친환경 자재 개발 등의 연구가 지속적으로 이루어진다면 CO₂ 절감에 따른 온실가스 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8. A Workable LCI DB Application

Work type	Applicable LCI DB		Remark
	Material	Energy	
Excavation	-	Electricity	National DB
Shotcrete	Cement, sodium silicate, wire rod	Diesel	Similar /Foreign DB
Rockbolt	rockbolt	Electricity	Building DB
Tunnel supports	Steel reinforcement, steel sections	Diesel	National DB
Conduit Concrete	Remicon	Diesel	
Concrete lining	Remicon	Diesel	
Concrete pavement	Remicon	Diesel	
Cement stabilization filter	Remicon	Diesel	

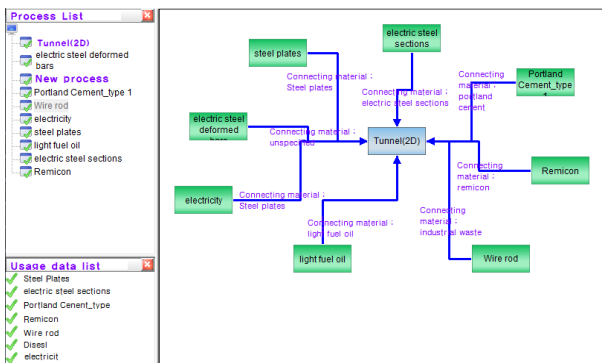


Fig. 8. Process Creation and Material Connection (Total)

Table 9. Environmental Load Evaluation by Material (Characterization)

Applied LCI DB		Resource depletion	Acidification	Eutrophication	Global warming	Ozone layer destruction	Photochemical oxidant	Ecological toxicity	Human toxicity
		1/yr	kg SO2-eq	kg PO43-eq	kg CO2-eq	kg CFC11-eq	kg CFC11-eq	kg 1,4 DCB eq	kg 1,4 DCB eq
Cement	2D	2.18E+01	1.19E+01	1.27E-02	1.99E+04	3.00E-04	5.11E+01	2.09E-02	4.46E+02
	3D	1.89E+01	1.03E+01	1.10E-02	1.72E+04	2.59E-04	4.42E+01	1.81E-02	3.86E+02
Wire rod	2D	4.84E+03	6.68E+03	4.40E+02	3.52E+06	2.64E-02	1.35E+02	4.01E+00	6.93E+04
	3D	4.19E+03	5.79E+03	3.81E+02	3.04E+06	2.28E-02	1.17E+02	3.47E+00	6.00E+04
Electricity	2D	2.41E+00	1.17E+00	2.17E-01	6.91E+02	1.59E-08	4.78E-01	2.79E-08	1.54E-01
	3D	2.42E+00	1.17E+00	2.19E-01	6.94E+02	1.60E-08	4.81E-01	2.81E-08	1.55E-01
Diesel	2D	3.28E+00	1.74E-02	1.19E-03	8.51E+00	1.31E-08	1.39E-03	4.14E-07	2.69E-02
	3D	2.87E+00	1.52E-02	1.04E-03	7.43E+00	1.14E-08	1.21E-03	3.62E-07	2.35E-02
Remicon	2D	3.07E+01	1.48E+01	1.72E+00	9.01E+03	8.03E-04	2.01E+01	3.29E-02	1.14E+03
	3D	3.08E+01	1.49E+01	1.73E+00	9.05E+03	8.07E-04	2.02E+01	3.31E-02	1.14E+03
Sodium silicate	2D	1.84E-05	1.53E+00	8.66E-01	4.70E+02	2.99E-05	1.22E-01	8.14E-01	3.57E+02
	3D	1.59E-05	1.32E+00	7.50E-01	4.07E+02	2.59E-05	1.06E-01	7.04E-01	3.09E+02
⋮									
Total	2D	4.90E+03	6.71E+03	4.43E+02	3.55E+06	2.75E-02	2.07E+02	4.88E+00	7.13E+04
	3D	4.25E+03	5.81E+03	3.84E+02	3.07E+06	2.39E-02	1.82E+02	4.23E+00	6.19E+04
Savings		6.53E+02	8.99E+02	5.92E+01	4.75E+05	3.58E-03	2.49E+01	6.50E-01	9.41E+03
Reduction rate(%)		13.32%	13.39%	13.36%	13.38%	13.01%	12.03%	13.32%	13.20%

Table 10. Impact of Case Assessment of Environmental Load by Category (Weighting)

Impact category	2D	3D	savings	Reduction rate(%)
Resource depletion	4.54E+01	3.94E+01	6.05E+00	13.32%
Acidification	6.07E+00	5.26E+00	8.13E-01	13.39%
Eutrophication	1.29E+00	1.11E+00	1.72E-01	13.36%
Global warming	1.85E+02	1.60E+02	2.47E+01	13.38%
Ozone layer destruction	1.97E-01	1.72E-01	2.57E-02	13.01%
Photochemical oxidant	1.30E+00	1.15E+00	1.57E-01	12.03%
Ecological toxicity	6.46E-01	5.60E-01	8.61E-02	13.32%
Human toxicity	5.06E+00	4.39E+00	6.68E-01	13.20%
Total	2.45E+02	2.12E+02	3.27E+01	13.36%

5. 결론

본 연구에서는 터널시설물의 2D 설계내역 분석 및 3D 모델링 통한 투입되는 자재 및 에너지를 분석하여 ISO 14040 시리즈에

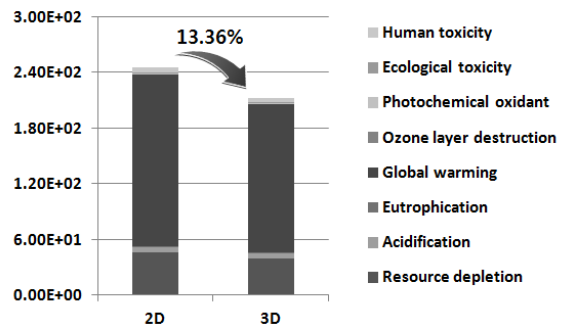


Fig. 9. Cumulative Graph by Impact Category

제시하는 기준에 따라 터널구조물의 영향범부별 환경부하 평가를 비교 평가하였다. 실제 2D 설계시 환경부하량과 3D 모델링을 통한 환경부하량의 차이를 검증하였으며 3D 기반 BIM 설계의 환경부하평가의 효율성과 활용 가능성을 확인하였다.

기존 2D 설계의 물량산출시 작업자 오류, 중복물량검토 미흡, 물량산출의 편의성 등의 어려움을 3D 기반의 자동물량 산출을 통해 일부 해소할 수 있으며 이는 LCA 분석 결과의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 대상 투입물질의 정량화 및 LCI DB 표준화에 큰 기여를 하는 것으로 파악되었다.

3D 모델링을 통한 자동물량 산정방식을 대안설계시 친환경성

평가로 활용 가능하며 물량을 기반으로 하는 환경부하평가와 BIM 설계의 확장 및 자동연계를 통하여 4차 산업에서 요구하는 네트워크의 융합개념에 부합되는 지능정보 기술로 발전 가능성이 충분하다고 사료된다.

또한 사회 인프라 구조물은 4차 산업혁명이 목표로 두고 있는 첨단 스마트 SOC 시설물 구축에 필요한 핵심 요소로 3D 정보 모델을 통한 토목 BIM 표준화가 국내외 공공기관을 중심으로 활발히 추진된다면 기획단계에서부터 통합관리가 가능한 3D 정보 모델로 발전 가능하고 기술자간의 협업, 오류로 인한 손실 최소화, 공사 및 유지관리 비용 절감뿐만 아니라 환경부하를 고려한 친환경 설계 등에 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(Grant No. 17SCIP-C085707-04)

References

BIM Forum, 2016 LOD Specification (2016), AIA.
 Cho, H. T., Kwon, S. H. and Han, J. G. (2017). "Estimation of environmental load of geotechnical structure using multiple regression analysis." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 1581-1586.
 ISO 14040 (1997). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
 ISO 14040 Series (2004). Life Cycle Assessment : Best Practices of ISO 14040 Series), APEC.
 ISO 14041 (1998). Environmental Management - Life Cycle Assessment Goal and Scope Definition and Inventory Analysis.
 ISO 14042 (2000). Environmental Management - Life Cycle Assess-

ment - Life Cycle impact Assessment.
 ISO 14043 (2000). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Interpretation.
 ISO 14049 (2000). Illustrative Examples on how to Apply ISO 14041 - Life Cycle Assessment - Goal and Scope Definition and Inventory Analysis.
 Kim, S. A. Yoon, S. W., Chin, S. Y. and Kim, T. Y (2009). "Development of Automated Modeling System for Apartment Interior to Improve Productivity of BIM- based Quantity Take-Off." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 25, No. 9, pp. 133-143 (in Korean).
 Kwon, S. H. (2008). *Development of assessment model for environmental economics of construction projects*. Ph.D. Thesis, Chung-Ang University.
 Kwon, S. H., Kim, S. G., Jeong, W. J. and Kim, S. B. (2006). "The life cycle assessment of infrastructure considering environmental load." *Korea Institute of Construction Engineering and Management, Proceedings of the KICEM Annual Conference*.
 Lawrence, M., Pottinger, R., Satub-French, S. and Nepal, M. P. (2014). "Creating flexible mappings between building information models and cost information." *Automation in Construction*, Vol. 45, pp. 107-118.
 Lee, C. H., Kim, S. A. and Chin, S. Y. (2011) "An index for measuring the degree of completeness of BIM-based quantity take-off." *Journal of Korea Institute of Construction Engineering and Management*, Vol. 12, No. 6, pp. 80-92 (in Korean).
 Lee, H. C., Kim, J. M., Choi, C. H. and Song, S. H. (2017). "BIM-based cost estimation by integration with BIM model data and cost information - Case Study on Economy Evaluation of Apartment in Sejong Special Self-Governing city -." *Journal of KIBIM*, Vol. 7, No. 3, pp. 11-20 (in Korean).
 Ministry of Environment, Available at: <http://www.me.go.kr/>.
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). Guideline for the estimation of carbon emission from each facility
 Ministry of Trade, Industry and Energy, Available at: <http://www.motie.go.kr>.