

PEI를 활용한 건설시설물의 친환경 설계평가모델

김준수* · 김병수**

Kim, Joon-Soo*, Kim, Byung-Soo**

Eco-Friendly Design Evaluation Model Using PEI for Construction Facilities

ABSTRACT

With the signing of the Paris Agreement, which is the new climate change agreement at the end of 2015, it will have a great impact on Korea environmental policy. The construction industry, which accounts for 42% of Korea's total CO₂ emissions, has been implementing various policies to improve the environmental problems. However, it is only applying passively to other projects except eco-friendly building certification. This is because most of the eco-related systems are based on building facilities. Therefore, there is a need for a new eco-friendly design evaluation model that can be widely applied not only to architecture but also to civil engineering facilities. In this study, a new model is developed based on the existing VE model, which adds new factors to evaluate the environmental friendliness, potential environmental pollution concept and environmental risk of facilities. This model is an eco-friendly design evaluation model that enables decision makers to effectively select alternative environmental criteria at the design stage. As a result of the case analysis of the block retaining wall and the alternative retaining wall, the value of the eco-friendly value of the alternative was 1.026 times higher than the original one. If this model is used at the design stage, it is expected to contribute not only to the construction of environmentally friendly facilities but also to the reduction of carbon emissions.

Key words : VE Model, Environment Pollution, Potential Cost, Eco-Friendly Design Evaluation Model

초록

2015년 말 신기후변화협약인 파리협정(Paris Agreement)이 체결됨에 따라 우리나라의 환경정책에도 많은 영향을 미칠 것으로 보인다. 우리나라의 전체 이산화탄소 배출량의 42%를 차지하고 있는 건설업은 그동안 환경문제를 개선하기 위하여 다양한 정책을 펼쳐 왔지만, 친환경건축물 인증에 해당하는 프로젝트 외에는 소극적 적용에 그치고 있다. 이는 대부분의 친환경 관련제도가 건축시설물을 위주로 하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 건축 뿐 아니라 토목시설물에도 광범위하게 적용될 수 있는 새로운 친환경 설계평가모델이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 VE모델을 기반으로 시설물의 친환경성, 잠재적인 환경오염 개념과 환경위험성을 평가할 수 있는 새로운 요소를 추가하여 의사결정자가 설계단계에서 친환경에 효과적인 대안을 선정할 수 있도록 친환경 설계평가 모델을 제시 하였다. 원안인 블록식 옹벽과 대안인 현장타설 옹벽을 대상으로 사례분석을 실시한 결과 대안의 친환경가치값이 원안보다 1.026배 높게 산출되었다. 본 모델이 설계단계에서 활용된다면 환경친화적인 시설물의 건설뿐 아니라 탄소배출량의 감축에도 기여할 것으로 기대된다.

검색어 : VE모델, 환경오염, 잠재적인 비용, 친환경 설계평가모델

* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정 (Kyungpook National University · kimjoonsoo@knu.ac.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · bskim65@knu.ac.kr)

Received April 18, 2017/ revised June 28, 2017/ accepted July 1, 2017

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 공표된 신기후변화협약인 파리협정은 그동안 기후변화대응에 소극적이었던 개발도상국들뿐 아니라 지구상에서 가장 많은 탄소를 배출시키는 미국과 중국도 참여함에 따라 전 세계적으로 지구온난화에 적극적으로 노력하고 있음을 알 수 있었다(Hur, 2016). 결국 우리나라 전체 이산화탄소의 42%를 배출하는 건설업(Nam et al., 2011)의 친환경화는 시급한 당면과제임을 한 번 더 알 수 있었다.

그동안 건설공사의 설계단계에서 탄소배출량을 줄이기 위한 노력으로 에너지 저감대책, 패시브디자인(Passive Design), LCA (Life Cycle Assessment) 분석 등의 친환경설계를 적용하고 있었지만 대부분 건축시설물에 적용되고 있기에 많은 에너지와 자원을 소모하는 토목시설물에 적용하기에는 어려움이 있었다.

시설물의 친환경 요소 개념을 도입하고 유도하기 위해서는 현재 100억 이상의 모든 건설공사의 기본설계 및 실시설계단계에 적용되고 있으며, 매년 정부 예산의 약 3%를 절감하며 시설물의 기능 및 성능을 향상시키는 성과를 거두고 있는 설계 VE (Design Value Engineering) 제도를 활용할 필요가 있다(Kim and Kim, 2016). 하지만 현재 VE Job Plan은 친환경 요소를 일부만 반영하고 있어 효과는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 VE모델을 기반으로 시설물의 친환경성, 잠재적인 환경오염 개념과 환경위험성을 평가 할 수 있는 새로운 요소를 추가하여 의사결정자가 설계단계에서 친환경에 효과적인 대안을 선정할 수 있도록 친환경 설계평가 모델을 제시한다. 이 모델이 설계단계에서 활용된다면 환경 친화적인 시설물의 건설뿐 아니라 탄소배출량의 감축에도 기여할 것으로 기대된다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구의 방법은 선행연구고찰에서 의사결정자에게 시설물 및 건설현장에서 요구되거나 발생하는 친환경 정보를 제공하는 사례들을 조사하였다. 그리고 본 연구의 친환경 요소의 기준이 되는 환경비용의 개념은 37개의 항목으로 이루어져 있는데 VE 전문가 45명을 대상으로 설문조사하여 친환경 설계평가모델(Eco-Friendly Design Evaluation Model; Eco-VE Model) 진행 시 필요한 항목 20개를 도출 후 친환경 설계평가모델에 반영하였다.

친환경 설계평가모델이 다루고 있는 요소는 기존 VE 모델의 기능평가와 환경평가를 동시에 하는 친환경기능(EF), 유지관리를 근거로 산출한 LCC (Life Cycle Cost), LCA (Life Cycle Assessment) 분석으로 산출된 Eco-Point, 시설물의 시공 후 발생할 수 있는 환경비용 개념을 지수로 산정한 잠재적 환경지수(Potential Environmental Index; PEI) 로 구성되었다. 그리고

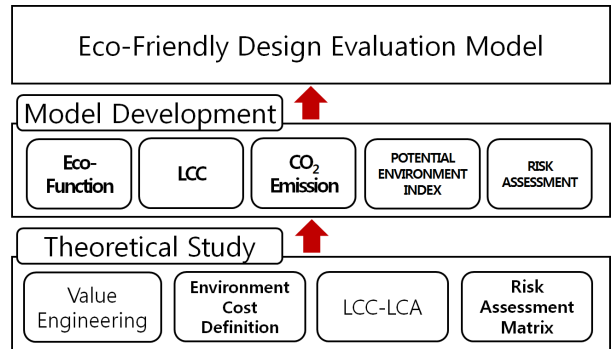


Fig. 1. Study Procedure

친환경 설계평가모델이 효과적으로 시설물의 친환경 여부를 나타냄을 검증하기 위하여 블록식 용벽을 원안으로, 현장타설 콘크리트 용벽을 대안으로 하는 친환경 설계평가를 실시하였다. 연구절차는 Fig. 1과 같다.

연구의 범위는 건설사업의 여러 단계 중 설계단계에서 활용할 수 있는 모델을 개발하고자 하였으며, LCC와 LCA 분석은 건설사업의 전 단계를 대상으로 하였다. 모델의 검증을 위한 대상 시설물은 토목시설물을 대상으로 하였다.

1.3 선행연구동향

본 연구는 친환경 건설물 확대와 시설물의 LCC와 LCA를 동시에 평가하기 위한 모델을 개발을 목표로 한다. 이러한 선행연구는 다음과 같다. Kim and Kim (2015)은 발주자로부터 친환경 VE 의사를 파악 할 수 있는 NIA모델을 개발하여 시설물의 친환경을 유도하는 연구를 진행하였고, Kim and Park (2015)은 의료기관 건축물에서 발생하는 이산화탄소, 발열, 폐기물, 폐에너지 등의 증가로 병원 환자 및 관계자에게 건강에 문제점을 가져다주고 있어 의료기관의 특성을 고려한 저탄소 녹색 친환경 건축설계에 필요한 디자인 기술 개발을 연구하였으며, Kim and Lee (2003)은 건축사업의 LCC 성공사례들을 조사, 분석하여 각각의 프로젝트에서 LCC 활용을 통해 얻어낸 성과와 접근전략을 분석하여 교훈 및 시사점을 제공하였다. Kim and Kang (2013)은 설계초기부터 건축가와 친환경전문가의 협력 작업을 통한 결과의 효율성 검증과 친환경적 전략을 지속적으로 발전시키기 위한 새로운 프로세스를 연구하였으며, Lee et al. (2014)은 국내 고속철도 노선을 대상으로 건설단계에서의 분야별 환경영향 및 주요 영향인자를 정량적으로 파악하여 친환경적인 건설을 위한 기초자료를 제공하였다. Kang et al. (2008)은 상수도 도수관로 공사의 시공 과정에서 발생할 수 있는 환경영향을 LCA기법을 기용하여 친환경적인 공법의 선정 시 의사결정 정보를 제공 할 수 있는 연구를 진행하였다. Kim et al. (2011)은 에너지 저감을 위한 신재생에너지 설비의 적용을

위하여 신재생에너지 적용 시 전생애주기의 비용을 분석 한 후 에너지소비비용의 감소에 따라 발생하는 비용절감 효과를 분석하였다. Jung (2013)은 온실가스 배출량과 LCC분석 기법의 상호관계에 의한 경제적인 온실가스 배출량 저감 판단을 위해 경제적인 온실가스 배출량 저감 비교 지수를 제안하였다. Park (2007)는 환경부하량을 도출하기 위한 데이터베이스를 구축하고 원안과 대안을 비교하여 건설물에서 기계설비 관련공사를 기준으로 환경 및 경제성에 대한 평가를 실시하였으며, Kim (2008)은 LCA를 수행 후 그 자료를 바탕으로 성능평가 및 비용평가를 통한 가치접수가 높은 최적안을 선정하여 환경사업 프로젝트 수행 시 환경부하와 환경비용을 고려한 통합평가 방법을 제시하였다.

하지만 기존 연구들은 의사결정자에게 환경성과 경제성관련 정보를 동시에 제공하거나 따로 제공하는 연구로서 환경성은 LCA를 분석방법으로 사용하고 경제성은 LCC를 사용하였다. 이런 연구들은 본 연구에서 하고자 하는 환경오염의 잠재적인 피해가능성과 위험도를 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 친환경 설계평가모델과는 차별성이 있다.

2. 이론적 고찰 및 적용

2.1 가치공학(Value Engineering : VE)

건설산업에서의 VE를 정의하면 「최저의 생애주기비용(Life Cycle Cost)으로 필요한 기능을 확실히 달성하기 위하여 건설시스템의 기능분석 및 기능설계에 쏟는 조직적인 노력」으로 나타낼 수 있다. VE활동은 준비단계, 분석단계, 실행단계 등의 과정으로 나눌 수 있으며, 구체화 된 수치로 정량적으로 분석하는 특징을 가지고 있다(Kim, 1999).

건설사업을 수행함으로써 달성하고자 하는 가치는 비용, 성능, 시간의 요소로서 구성이 되며, 이러한 요소들의 적절한 균형을 유지하여 최적의 가치를 달성하는 것이 중요하다. Table 1은 VE에서의 기능과 비용과의 관계를 설명한다. 가치를 향상시키는 형태는 Table 2와 같이 4가지로 분류할 수 있다.

Table 1. Relationship of Function and Cost

Division	Contents
Value criteria	V = F/C (Function/LCC) V : Value index

Table 2. Types of VE

Division	①	②	③	④
Function	Keep	Upgrade	Upgrade	Upgrade
Cost	Reduce	Keep	Reduce	Upgrade
	VE	Value & design		

VE는 설계대안을 선정할 때 건설사업의 생애주기비용관점에서 경제성을 검토하고 기능 및 성능을 제고할 수 있기 때문에 가장 효과적인 도구로 인식되어지고 있으며 본 연구에서는 친환경 설계대안 평가모델의 근간이 된다.

2.2 환경비용의 정의

환경비용은 사회적 비용에서 유래되었으며, 자연환경에 대한 파괴, 오염, 보전을 위한 비용으로 정의되며 직접비용과 간접비용으로 나눌 수 있다. 직접비용은 환경오염비와 같이 환경자체의 피해비용을 의미하며, 간접비용은 환경보전비와 같이 방지비, 보상비, 제도적비용 등으로 정의 할 수 있다(LEE, 1999).

Table 3에서와 같이 직접비용과 간접비용의 산정은 대기오염에

Table 3. Classification of Environment Cost (Kim and Kim, 2016)

Main	Middle	Sub category
Environment Pollution cost	Environment Damage cost	Air, radiation, land, pesticide, toxicology
		Water, thermal cracking, odor emissions
	Environment destruction	Noise, vibration, industrial waste
		Subsidence of land, Sunlight infringements
Adding harmful food, water shortages		
Environment Conservation cost	Environment pollution prevention costs	Destruction of natural landscapes
		Environmental pollution prevention equipment, operation maintenance of environmental equipment
		Factory planting, Environmental remediation
		Raw material conversion and pollution avoidance, non-pollution public relation
		Environmental pollution prevention training
	Waste treatment cost	Environmental pollution measure
	Environment pollution Compensation cost	Waste incineration, waste burial, treatment effective
		Compensation, Animals and plants compensation
	Environment pollution Test research cost	Improvement of the manufacturing method
		Reduction of pollution control
Legal and institution cost		Development of by products and joint products, etc.
		Contractor charges
		Environmental pollution fine
		Environmental pollution charges
		Other institutional relation costs

의한 피해비용, 생태계피해에 대한 목적세 형태의 비용, 배출에 의한 배출권거래비용 등을 통해 정량화하는 방안을 도입하고 있다. 그러나 직접비용은 대기, 수질, 토양피해비용 등 사례가 드물고 측정이 어려운 광범위한 범위에 있다. 간접비용은 환경오염방지비, 환경오염보상비 법률적 비용 등 자료조사를 통한 범위에서 측정이 가능하다.

환경비용은 친환경 요소를 정량적으로 반영하기 위한 것으로 고려되어야 하지만 실제 계산기준이 없기 때문에 본 연구에서는 환경비용의 개념만 반영하였다.

2.3 LCA

LCA는 제품 전과정에 걸쳐 제품 시스템에 관련된 투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고, 연관된 잠재적인 환경영향을 평가하는 절차로 ISO14040 에 국제표준으로 채택되어 있다. LCA의 첫 단계는 사용목적을 설정하여 자료수집, 분석방법을 결정하는 단계이다. 두 번째 단계로는 투입되는 자재의 목록분석으로 LCI DB (Life Cycle Inventory Database)을 활용하여 연구범위에 해당되는 자재를 정량화하기 위한 데이터 수집 및 계산 과정이다.

세 번째 단계인 영향평가는 목록분석의 결과를 이용하여 잠재적인 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 환경에 미치는 영향정도를 정량적 또는 정상적으로 추산하여 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 과정이다.

마지막으로 해석단계는 목록분석과 영향평가로부터 얻은 결과를 함께 고찰하는 LCA의 마지막 단계로 정의된 목적 및 범위에 일관되는 결과를 이끄는 결과를 도출해야 하고, 한계를 설명하고 권고사항을 제공하여야 한다(Choi et al., 2012). LCA 진행절차는 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 시설물에 투입된 자재의 목록분석을 위하여 한국 환경산업기술원, 지식경제부에서 제공되는 국가 LCI DB와 스위스에서 제작한 Ecoinvent의 해외 DB를 적용하였다.

2.4 위험평가(Risk Evaluation)

위험의 평가는 위해성의 발생가능성과 심각도를 고려 한 후 위험의 값을 결정함으로써, 다양한 위험의 크기를 살펴보는 과정으로써, 위험의 우선순위를 알 수 있고, 그에 따른 적절한 관리대책을 결정 할 수 있는 방법이다(Cho, 2004).

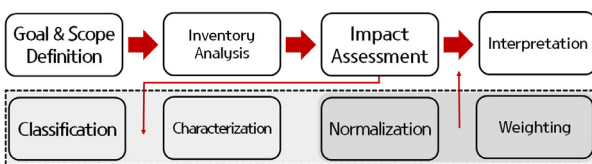


Fig. 2. LCA Process (Cho et al., 2016)

위험이란 위해성이 근로자에게 사망, 사고, 질병등과 같은 악영향이 발생 할 수 있는 가능성이다. 따라서 위험은 위해성의 발생가능성(Probability)과 위해성의 심각도(Consequence)의 조합으로 이루어진다(US Department of Defence, 1993). 위험평가절차는 Fig. 3과 같이 이루어진다.

위해성의 확인과정은 위험의 평가를 실시하기 전에 잠재되어있는 다양한 위해성을 확인하는 과정이다. 위해성을 확인하기 위해서는 사고기록, 공정의 특성 등 직접 조사와 관련 자료의 검토를 통하여 위험 물질의 존재여부, 발생빈도, 기간, 환경상의 피해를 확인 후 빈도와 심각성을 확인한다. 위험의 확인과정을 통하여 얻어진 위해성과 위험성의 발생가능과 심각도의 크기는 Table 4의 척도를 따라서 크기와 우선순위를 매긴다(Kim, 2005).

위험평가 방법으로써는 정량적 위험평가와 정성적 위험평가 방법이 있다. 정량적 위험평가는 안전성과 관련된 특성 사건에 대한 중요 요소는 발생 확률을 계산하는 것이다. 이는 오랫동안 관측되고 누적된 데이터를 필요로 한다(Yi et al., 2006).

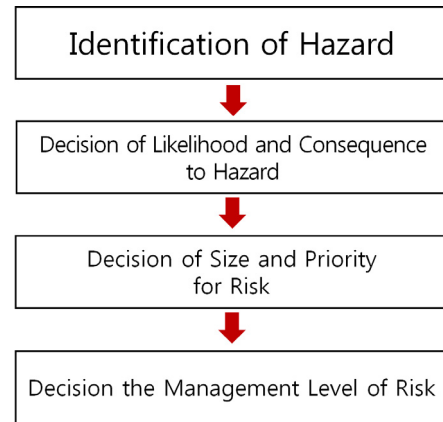


Fig. 3. Risk Assessment Process

Table 4. Likelihood and Consequence Scale of Hazard (US Department of Defence, 1993)

Division	Frequency	Mean
Likelihood	Frequent	Very frequent accidents
	Probable	An accident occurred multiple times
	Occasional	Sometimes an accident occurs.
	Remote	Little possibility of an accident, but possibility exists.
	Improbable	Very little possibility, No accidents occurred
Consequence	Catastrophic	Death or fatal system loss
	Critical	Serious injury, illness, system loss, danger
	Marginal	Slight injury, illness, system loss, danger
	Negligible	Minor injury, disease, system loss, danger

Table 5. Qualitative Risk Assessment Matrix (U.S Department of Defence, 1993)

Probability	Consequence			
	Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
Frequent	1	3	7	13
Probable	2	5	9	16
Occasional	4	6	11	18
Remote	8	10	14	19
Improbable	12	15	17	20

Table 5를 통하여 결정되어진 위험성의 크기는 다음 기준에 의하여 관리 수준을 결정한다. 1~5는 최고위험이며 위험의 수용이 불가능하며, 반드시 즉각적인 위험의 감소가 요구된다. 6~9는 높은 위험이며, 위험 관리의 의사결정 및 바람직한 위험관리의 실행이 요구된다. 10~17는 중간위험이며 위험 관리계획의 검토 및 문서화된 실행계획이 요구된다. 18~20은 낮은 위험이며 수용 가능함 위험이기 때문에 현재 상태 유지가 가능하다.

3. 친환경 설계평가 모델

설계단계에서 친환경적인 대안을 선정하기 위해서는 건설시설물의 시공 중 또는 운영과정에서 발생할 수 있는 환경오염에 따른 비용과 위험성을 평가 할 수 있는 새로운 요소의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 설계대안을 평가할 때 설계의 친환경성을 수치로 나타낼 수 있는 친환경가치 공식을 활용한다. Eq. (1)은 VE 수식을 기반으로 개발한 것으로서 친환경VE 모델 정립연구에서 제시한바 있다(Kim and Kim, 2016).

$$EV = \frac{EF}{LCC \times CO_2Emission \times PEI} \quad (1)$$

- EV = Eco-friendly Value
- EF = Eco-Function
- LCC = Life Cycle Cost
- PEI = Potential Environmental Index

Eq. (1)을 활용하여 친환경가치를 계산하는 절차는 Fig. 4에서와 같이 EF, LCC, LCA를 차례대로 산정하고 PEI는 잠재적인 발생가능성과 심각성을 위험분석기법(Risk Analysis)으로 평가한다.

3.1 환경기능과 이산화탄소 배출량

기존 VE에서 부분적으로 친환경 요소를 고려하였지만 시설물의 전체적인 친환경적 요소를 평가하지는 못하였다. 본 연구에서는

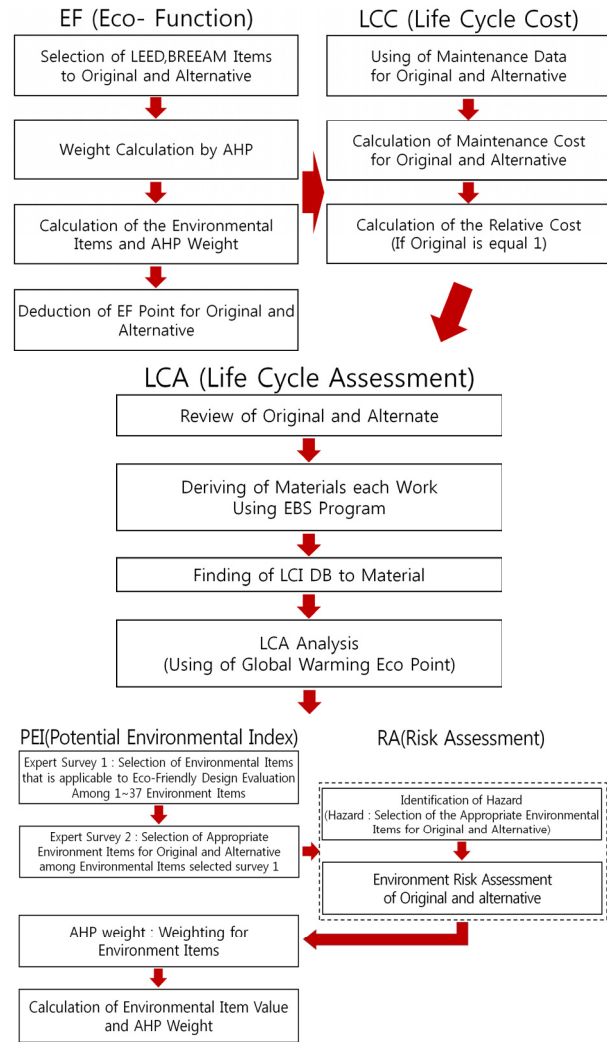


Fig. 4. Process of Environment Design Evaluation

기존 기능평가 요소에 친환경 개념을 도입하였다. 친환경 개념의 공인력을 높이기 위해 보편적으로 많이 사용하면서도 검증이 되어 있는 프로세스를 활용하였다.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)은 전 세계적으로 많이 활용 중이며 동시에 그 효과를 검증받은 제도이다. Table 6에서 각 항목을 보여준다.

그리고 각 프로세스는 매년 평가항목이 개선되고 업데이트(Kim and Kim, 2010) 되는데 본 연구에서는 건설현장에서 많이 사용되는 항목을 추출하여 활용하였다. 환경기능 EF (Eco-Function)를 산출하기 위해서 VE전문가의 의견을 반영하여 시설물의 원인파 대안에 알맞은 평가 항목을 선정한다. 그리고 기존 기능평가 항목에 VE 전문가가 선정한 친환경 평가 항목을 추가하여 AHP (Analytic Hierarchy Process) 평가를 실시한다. 마지막으로 평가된 가중치와

Table 6. Eco-Function Assessment Contents

DIV.	Contents			
LEED	Sustainable land	Water efficiency	Energy and atmosphere	Materials and resources
	Indoor environmental quality	Connect with local area	Awareness and education	Operating and Management facility
BREEAM	Sites efficiency	Water resources	Energy	Health & wellbeing
	Management	Waste	Traffic	Pollution

Table 7. Top and Upper Middle Environmental Contents

Rank		Contents	Rank		Contents
Top	1	Water	Upper middle	11	Environmental remediation
	2	Waste burial treatment		12	Destruction of natural landscapes
	3	Land		13	Odor emissions
	4	Industrial waste		14	Subsidence of land
	5	Noise		15	Environmental pollution charges
	6	Environmental pollution prevention equipment		16	Contractor charges
	7	Air		17	Thermal cracking
	8	Waste incineration		18	Environmental pollution measure
	9	Vibration		19	Environmental pollution fine
	10	Operation maintenance of environmental equipment		20	Radiation

등급을 연산하여 대안과 원안의 EF 값을 구한다.

시설물의 원안과 대안에서 배출되는 환경영향물질의 산정은 LCA 기법을 활용하며 그 중 본 연구에서 활용하고자 하는 CO₂ 배출량은 8대 영향범주 중 CO₂ 가 대표물질로 나타나는 지구온난화 범주를 활용한다.

시설물에 투입되는 자재 및 시공 시 사용되는 연료의 계산은 내역서 작성 프로그램인 EBS (Event Break Down System for Construction)를 활용하였으며 LCA분석에 필요한 LCI DB는 국가 DB와 해외 DB를 활용한다.

3.2 잠재적 환경지수(PEI)

2장에서 정의한 환경오염비와 환경보전비의 개념은 아직 발생하지 않은 비용을 대상으로 하고 있으므로 설계단계에서 추정하기에는 불확실성이 너무 크다. 따라서 잠재적인 환경오염에 대비하기 위한 비용으로 인식하고 이를 잠재적인 환경비용이라 정의하는 것이 타당하다. 이러한 잠재적 환경비용을 지수화 한 것이 잠재적 환경지수(Potential Environmental Index; PEI)이다.

잠재적 환경지수(PEI)에 활용되는 항목은 VE 전문가를 대상으로 환경비용 개념정의 Table 3에서 언급한 37개의 환경오염항목 중 친환경 설계평가 진행 시 필요한 항목 선정을 위한 타당성 조사를 진행하였다. 타당성조사 내용은 각 항목이 친환경성에 대한 설명력, 중요성, 친환경 기능적용성, 발생가능성의 4가지 질문에 대한 5점 척도로 점수를 부여하였다.

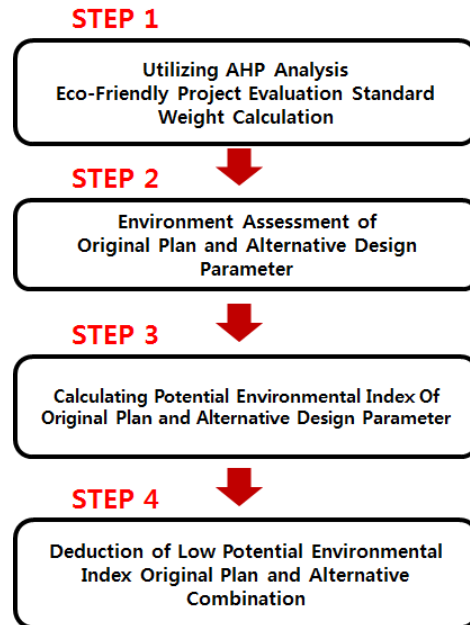


Fig. 5. PEI Calculation Process (Kim and Kim, 2016)

타당성조사 결과 가장 높은 점수를 받은 순으로 상위, 중상위, 중하위, 하위권의 4개의 그룹으로 분류하였다. 본 연구에서는 Table 7에서와 같이 상위, 중상위 20개의 항목을 잠재적 환경지수 항목으로 결정하였다.

잠재적 환경지수의 산정은 Fig. 5의 절차에 따라 항목별 가중치

를 AHP기법을 활용하여 결정하고, 원안 및 대안의 설계항목별 환경성 평가를 실시 한 후 잠재적 환경지수를 계산한다. 마지막으로 원안 및 대안의 잠재적환경지수를 결정한다.

4. 친환경 설계평가 사례분석

4.1 대상사례

본 모델의 효과를 검증하기 위하여 흙막이 구조물인 옹벽을 대상으로 사례분석 하였다. 원안은 벽체 형태를 다양하게 조성할 수 있는 장점이 있는 블록식 옹벽(Segmental Retaining Walls)이며 대안은 콘크리트 벽체가 보강재에 의해 연속적으로 지지되는 빔 효과로 구조적으로 안전한 현장타설 RC (Reinforced Concrete) 옹벽이다. 그리고 본 사례분석에는 VE 수행경험이 있는 6명의 VE전문가를 친환경 설계평가팀으로 선정하였다. 이들은 모두 10년 이상의 설계경험이 있으며 친환경 건축물 인증업무 경험도 보유하고 있다.

4.2 친환경 설계평가

친환경 설계평가 모델의 첫 번째 요소이며 시설물의 기능성과 친환경성을 동시에 고려해야 하는 EF를 산출하기 위해서는 LEED와 BREEAM 프로세스 중 원안과 대안에 적절한 항목을 선정해야 하므로 설계평가팀을 대상으로 설문조사를 실시 하였다.

설문결과 Table 8과 같이 LEED와 BREEAM의 중복항목인 ‘지속가능한 토지의 이용’, ‘자재와 자원’ 항목이 선정되었다. 그 이유는 옹벽 구조물이 시공되는 토지는 환경파괴에 직접적인 공간이며 투입되는 자재는 지속적으로 주변 환경에 영향을 미치기 때문에 친환경성을 고려해야 할 필수 항목이기 때문인 것으로 판단된다.

친환경기능(Environment Function; EF) 값을 도출하기 위해서는 AHP분석을 실시한다. AHP분석은 기존 VE진행 시 기능평가로 부터 구할 수 있는데 기존 항목들은 ‘유지관리성’, ‘내구성’, ‘경관성’, ‘친환경성’, ‘효율성’, ‘안전성’ 으로 구성되어 있지만 친환경기능(EF) 평가에서는 Table 9에서의 같이 친환경성 항목을 강조하기 위하여 기존의 ‘친환경성’, ‘효율성’항목을 LEED와 BREEAM의 항목인 ‘지속가능한 토지의 이용’, ‘자재와 자원’ 으로 대체하였다.

Table 8. Expert Survey Results for Estimating EF Items

DIV.	Duplicate items of LEED and BREEAM				LEED items					BREEAM items				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Expert 1	5	1	1	5	1	1	2	3	2	1	2	3	3	2
Expert 2	4	2	1	5	1	1	2	3	3	2	2	2	3	2
Expert 3	5	1	1	4	1	2	2	2	2	2	2	4	3	1
Expert 4	4	1	2	4	1	1	1	1	2	1	1	2	3	4
Expert 5	5	1	2	4	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1
Expert 6	4	2	2	4	1	1	1	4	2	1	1	1	2	2
Average	4.50	1.33	1.50	4.33	1.17	1.17	1.50	2.50	2.00	1.50	1.50	2.33	2.67	2.00

A:Sustainable use of the land, B:Water efficiency, C:Energy use and atmospheric environment, D:Materials and resources, E:Indoor environment, F:Connect with local area, G:Awareness and education, H:Creative design, I:Operations management, J:Health and comfort, K:Traffic, L:Waste, M:Condition, N:Pollution

Table 9. EF Evaluation

Division		Alternative		Original	
Evaluation items	Weight	Rating	Point	Rating	Point
Maintainability	2.95	9	26.55	8	23.63
Durability	3.27	9	29.43	9	29.43
Scenery	0.60	9	5.40	8	4.80
Sustainable use of the land	1.48	9	13.32	9	13.31
Materials and resources	1.32	9	11.88	8	10.54
Safety	0.37	10	3.70	9	3.36
EF (Eco-function)			90.28		85.07

Table 10. LCC Analysis of Alternatives Alternative (Unit : ₩1,000)

Years	Repair Cost (A)	Replacement Cost (B)	Sub Total (C)	Discount factor (D)	NPV (A)*(B)
1	30,500	0	30,500	0.9784	29,843
2	30,500	0	30,500	0.9574	29,201
3	30,500	0	30,500	0.9368	28,572
4	30,500	0	30,500	0.9166	27,957
5	30,500	0	30,500	0.8969	27,356
6	30,500	0	30,500	0.8775	26,767
7	30,500	0	30,500	0.8587	26,190
8	30,500	0	30,500	0.8402	25,627
9	30,500	0	30,500	0.8221	25,075
10	30,500	0	30,500	0.8044	24,535
.....					
50	30,500	0	30,500	0.3368	10,274
SUM				1,214,519	

Table 11. LCC Analysis of Original Original (Unit : ₩1,000)

Years	Repair Cost (A)	Replacement Cost (B)	Sub Total (C)	Discount factor (D)	NPV (A)*(B)
1	36,500	0	36,500	0.9784	35,714
2	36,500	0	36,500	0.9574	34,945
3	36,500	0	36,500	0.9368	34,193
4	36,500	0	36,500	0.9166	33,457
5	36,500	0	36,500	0.8969	32,737
6	36,500	0	36,500	0.8775	32,032
7	36,500	0	36,500	0.8587	31,343
8	36,500	0	36,500	0.8402	30,668
9	36,500	0	36,500	0.8221	30,008
10	36,500	0	36,500	0.8044	29,362
.....					
50	36,500	0	36,500	0.3368	12,296
SUM				1,453,441	

새롭게 구성된 항목들로 하여금 쌍대비교를 실시하여 가중치 값을 얻은 후 원안과 대안의 각 항목의 등급을 매긴 후 이를 연산하면 EF 값을 얻을 수 있다. 연산결과 Table 9에서와 같이 원안과 대안의 EF값은 85.07, 90.28로 산출되었다. 대안이 원안보다 기능과 친환경 경적으로 유리한 것으로 나타났다.

친환경 설계평가 모델의 두 번째 요소인 LCC는 설계비, 감리비, 시공비 등의 초기투자비와 50년간의 유지관리비를 약 3%의 실질할 인율로 가정하여 산정하였다. LCC 분석결과 Table 10, Table

Table 12. CO₂ Emission Analysis of Alternative Alternative Eco - Point (Unit : kg CO₂-eq)

Work Type 1	Work Type 2	Standard	Quantity	Unit	Material	Eco-Point
RC Retaining wall	Steel Pipe	Φ508 (t=12)	1355	M	Welding Steel Pipe	1.73E-02
					Welding Deformed Bar	1.10E-02
					Wire	5.58E-01
	Plywood mould	3rd	1510	m ²	Bolt	1.00E-01
					Scantling	6.90E-02
						1.36E-02
.....						
Alternative Eco - Point Sum						1.45E+06

Table 13. CO₂ Emission Analysis of Original Original Eco - Point (Unit : kg CO₂-eq)

Work Type 1	Work Type 2	Standard	Quantity	Unit	Material	Eco-Point
Segmental retaining wall	Concrete pouring	Rebar pumpcar	740	m ³	Gasoline	1.77E-04
					Diesel	1.45E-03
	Plywood mould	3rd	1091	m ²	Wire	7.22E-02
					Bolt	4.98E-02
					Scantling	7.53E-02
					Plywood	1.07E-01
.....						
Original eco - point sum						1.21E+06

11과 같이 대안이 원안보다 238,922,000원 적게 투입되는 것으로 나타났다.

세 번째 요소인 CO₂ Emission은 LCA 의 8대 영향범주 중 하나이며 단위 값이 이산화탄소로 표현되는 지구온난화 값을 산출 하여 구조물이 전생애주기 동안 지구환경에 영향을 미치는 정도를 Table 12와 13에서와 같이 파악하였다. 시공 시 투입되는 자재와 장비 사용 시 사용되는 연료량의 내역 분석은 공사비 산출과 소요자 원 명세서 작성 시 사용되는 EBS 프로그램을 사용하였다.

LCA분석 결과값이 타당성을 보장받기 위해서는 Cut-off 수준이 80%이상(Cho et al., 2016)되어야 하는데 본 연구에서는 82% 수준을 확보하였다. 그리고 원안과 대안의 지구온난화 값은 1.21E+06, 1.45E+06로 산출되어 원안이 대안보다 환경적으로 유리한 것으로 나타났다.

친환경 설계평가 모델의 네 번째 요소인 잠재적 환경지수(PEI)를 산출하기 위해서 전문가 타당성 조사를 통하여 선정된 20개의 잠재적 환경지수 항목 중 Table 14와 같이 해당 프로젝트의 특성에 적합한 설명력과 대표성을 지니는 항목 5가지를 선정하였다. 그리

Table 14. Selection of Environment Index Items for Original and Alternative

Rank	Contents	Explanation	Representation
1	Soil pollution	5.00	4.00
2	Noise pollution	3.33	3.16
3	Vibration pollution	4.50	5.00
4	Operation maintenance of environmental equipment	4.67	4.33
5	Subsidence of land	4.33	4.67
.	Another contents	.	.

Table 15. Risk Assessment of Alternative and Original

Evaluation Items	Alternative	Original
	Level	Level
Soil pollution	9	11
Noise pollution	11	6
Vibration pollution	11	11
Operation maintenance of environmental equipment	19	19
Subsidence of land	14	11
Sum	64	58

Table 16. PEI Analysis of Alternative and Original

Evaluation Items	Weight	Alternative		Original	
		Rating	Point	Rating	Point
Soil pollution	5.52	9	49.68	11	60.72
Noise pollution	2.41	11	26.51	6	14.46
Vibration pollution	1.91	11	21.01	11	21.01
Operation maintenance of environmental equipment	1.10	19	20.9	19	20.9
Subsidence of land	1.05	14	14.7	11	11.55
Potential environmental index		132.80		128.64	

고 AHP 분석을 실시하여 가중치 값을 구한 다음 Table 5의 Risk Matrix를 활용하여 Table 15와 같이 원안과 대안의 5가지 항목의 Risk Level을 매긴 다음 Table 16의 Rating란에 기입을 한 후 가중치와 연산하여 잠재적 환경지수(PEI)를 산정하였다.

4.3 사례분석 결과

원안인 블록식 옹벽과 대안인 현장타설 콘크리트 옹벽의 친환경 설계평가 사례분석 결과 Table 17에서와 같이 대안이 원안보다 CO₂ Emission 값과 잠재적환경지수(PEI) 값이 불리하게 나왔지만

Table 17. Result of Case Study

Division	EF	LCC (Unit :₩1,000)	CO ₂ emission	PEI
Alternative	90.3	1,214,519	1,45E+06	132.80
Original	85	1,453,441	1,21E+06	128.64
Relative rate				
Alternative	1.06	0.836	1.20	1.03
Original	1	1	1	1
Alternative EV	1.026			
Original EV	1			

시설물의 환경기능(EF) 값과 LCC 값이 유리하게 산출되었으며 종합적인 친환경가치값(EV)이 1.026으로 산출되었다. 이것은 대안이 원안보다 1.026배 가치가 높음을 나타낸다.

5. 결론

기후변화 대응에 대한 노력은 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 많은 노력을 요구하고 있다. 이산화탄소 배출량이 많은 건설업에서도 효과적인 친환경 대책이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 기존 VE 모델에 경제성과 친환경성 정보를 통합적으로 제공하여 시설물의 설계 단계에서 효과적으로 활용 할 수 있는 친환경 설계평가 모델을 개발하였다.

VE 경험이 있는 엔지니어 6명과 함께 원안인 블록식 옹벽과 대안인 현장타설 콘크리트 옹벽으로 사례 분석한 결과 대안의 CO₂ Emission 값과 잠재적환경지수(PEI)이 원안보다 불리하게 산출되었지만 환경기능(EF)값과 LCC값이 원안보다 유리하게 산출되어 결론적으로 대안의 친환경가치값(EV) 대안이 원안보다 1.026배 가치가 높게 산출되었다.

본 연구의 결과를 바탕으로 설계자가 시설물의 설계단계에서 환경친화적인 시설물의 건설뿐 아니라 탄소배출량의 감축에도 기여할 수 있는 대안을 선정하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다. 추후 많은 사례검증 및 보안을 거친다면 신뢰도 높은 친환경 설계평가 모델을 구축 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2014R1A2A1A11051065).

References

- Cho, N. H., Yun, W. G., Lee, W. R. and Kim, K. J. (2016). "An analysis of the characteristics of environmental impact for PSC beam bridges using Life Cycle Assessment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.36, No.2, pp.297-305 (in Korean).
- Cho, J. H. (2004). *The design of risk assessment matrices for ranking occupational health and safety risks and their application in manufacturing workplace*, Master Thesis, Korea university (in Korean).
- Choi, D. S., Lee, M. E., and Cho, G. H. (2012). "A study on environmental impact assessment in domestic construction industry using Life Cycle Assessment." *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 6, No. 1, pp.46-56 (in Korean).
- Hur, S. S. (2016). "Climate change and concerted actions by mankind." *Journal of Korean Social Trend and Perspective*, Vol. 2016, No. 2, pp. 214-220 (in Korean).
- Jung, S. S. (2013). "A study on the method to reduce economical greenhouse gas emissions of existing building for expansion in green building." *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 7, No.2, pp.105-112 (in Korean).
- Kang, I. S., Kim, C. H., Choi, H. L. and Moon, H. S. (2008). "A case study on the application of the life cycle assessment in the water supply pipes." *Proceeding of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2008, No. 10, pp. 1891-1894 (in Korean).
- Kim, H. K. (2008). *Design VE/LCC, LCA decision making method on construction industry*, Master Thesis, Incheon university (in Korean).
- Kim, H. K., An, K. H. and Choi, Y. S. (2011). "LCC analysis for optimized application of renewable energy of eco-friendly school." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 11, pp. 83-90
- Kim, H. S. and Lee, J. E., (2003) "Critical success factors & best practice in LCC : empirical findings." *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 19, No. 2, pp. 115-122 (in Korean).
- Kim, J. G. and Park, J. M., (2015) "A study on design method depending upon low carbon green architecture of big medical center." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 4, pp. 987-996 (in Korean).
- Kim, J. S. and Kim, B. S. (2015). "A proposal of nia model for eco ve decision of construction facilities." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No.6, pp.1377-1385 (in Korean).
- Kim, M. G. and Kang, H. S. (2013). "A study on design application of eco-friendly integrated design process." *Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture And Environment*, Vol. 13, No.4, pp. 87-94 (in Korean).
- Kim, M. H. (1999). *Construction management engineering*, Ki-moondang, p. 602
- Kim, M. J. and Kim, B. S. (2016). "Definition of environmental cost and Eco-VE model for Eco-VE of construction facility." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 5, pp. 903-913 (in Korean).
- Kim, S. U. and Kim, H. B. (2010). "A study on the improvement of korea green building certification system by the comparison with BREEAM and LEED." *Journal of The Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 26, No.12, pp. 271-278 (in Korean).
- Kim, H. M. (2005). *A design of hazard risk assessment matrices for ranking musculoskeletal disorder risks in automobile processing*, Master Thesis, Korea university (in Korean).
- Lee, C., Lee, J. Y., Jung, W. S. and Hwang, Y. W. (2014). "A study on the characteristics of environmental impact in construction sector of high-speed railway using LCA." *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 17, No.3, pp.178-185 (in Korean).
- Lee, J. D. (1999). *A study on the environmental accounting*, Master Thesis, Kyonggi university (in Korean).
- Nam, H. J., Moon, J. H., Kim, K. G. and Kim, G. H. (2011). "An analysis of environmental factors and efficiency in the apartment housing projects - Focused on energy and environmental load reduction factors." *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 11, pp. 203-210 (in Korean).
- Park, K. T. (2007). *Case study of total cost analysis of the heat source system in building*, Master Thesis, Hanyang university (in Korean).
- US Department of Defense (1993). MIL-STD-882C system safety program requirements. Military Standard System of Defence in US.
- Yi, B. J., Yoo, S. W. and Jin, Y. K. (2006) "Qualitative and quantitative risk assessment of aircraft system." *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 223-232 (in Korean).