

# 전과정평가(LCA)를 이용한 호안공법 선정시 통합 VE/LCC 방법개발



**박 기 학 |**  
(주)에코아이 IVM팀 팀장  
parkihak@ecoeye.com



**정 재 수 |**  
(주)에코아이 대표이사  
civilenvi@ecoeye.com



**장 완 복 |**  
(주)에코아이 IVM팀 팀장  
archigram@ecoeye.com



**김 국 일 |**  
(주)동부엔지니어링 대표이사  
kookil@dongbueng.co.kr

스(Larry Miles)에 의해 연구분야로 정립되면서 현재 건설 및 인프라 사업에 필수적으로 적용되고 있다. 현재 정부는 1999년 3월 공공건설부문의 고비용-저효율 구조를 개선하고자 「공공건설 사업효율화 종합대책」의 일환으로 기본 및 실시 설계에 대하여 설계 VE제도와 LCC(Life Cycle Cost) 검토를 의무화 방안을 추진하였다. 이에 따라 건설기술관리법 시행령(제38조의 13)에 근거 총 공사비가 100억원 이상(2006년 1월 시행) 건설공사로서 발주청이 경제성 검토가 필요하다고 인정되는 공사에 대하여 시행되고 있다. 그러나 현재 수행중인 VE/LCC는 비용 절감을 위한 경제성 측면에만 국한되어 있고, 환경 및 사회 영향 측면을 고려한 분석/평가는 미비한 것으로 나타났다. 따라서 하천호안형식의 VE/LCC 분석에 있어 전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA)를 적용한 통합적인 VE/LCC 분석방법(이하 통합VE)을 제안하고 현장 사례분석을 통해 분석방법의 적용성 및 도출된 결과의 분석에 목적이 있다.

## 2. 본론

본 방법론에서는 방수로설계분야의 호안형식 선정을 위한 대안 평가로 그 범위를 한정하였으며, 수행방법은 첫째, 계층분석법(Analytic Hierarchy Process ; 이하 AHP)을 통한 가치치 산정. 둘째, LCC 산출. 셋째, 환경성을 정량화 하는 LCA를 수행하였다. 기존의 VE방식은 동일하게 평가하였으며 환경성을 고려하여 대안선정을 유도하였고, 본 방법론을 호안형식 대안선정에 적용하였다.

## 1. 서론

가치의 기초는 고대 그리스 플라톤의 대화 “프로타고라스(Protagoras)”에 의해 최초로 정립되어 기원전 350년경에는 아리스토텔레스가 가치를 7가지로 분류하였다. 7가지 가치(윤리, 법률, 종교, 정치, 사회, 미학, 경제)중 오늘날 VE(Value Engineering) 방법론에는 경제적 가치와 관련하여 비용, 교환, 존중, 사용이라는 유형이 존재한다. VE는 1947년 레리 마일

## 2.1 통합 VE 정의

통합 VE는 기존의 VE에 정성적인 환경성 측면을 정량화 하는 전과정평가(LCA)를 포함한 VE를 말한다. 통합 VE를 평가함으로써

- 1) 지속가능한 개발에 부합하는 차별화된 분석 및 평가
- 2) 경제성과 환경성을 모두 만족시키는 대안 선정
- 3) 공법 선정의 객관적 정량적 근거 제시
- 4) 호안형식 선정과 관계된 다양한 이해관계자 의견 수렴하여 평가함으로써 최적화 공법도출에 객관적 근거를 제시하였다.

기존에 경제성과 기능성 중심의 F/C(기능/비용)로 평가되는 VE 모델과 환경성 측면을 고려하여 대안선정시 친환경적 설계를 유도하였다. 지구환경의 문제는 단순한 제품은 물론 많은 원부자재와 에너지가 투입되는 공공시설 및 Infra 시설에 대해서 매우 중요시 되고 있다. 따라서 정량화된 LCA 결과(E)를 VE와 통합하여 평가하는 기법으로 과학적이고 객관화된 결론을 도출함으로써 원부자재의 선정 단계는 물론 공법의 친환경적 설계를 반영할 수 있다.

각각 해당 프로젝트에 대해 계층분석법(AHP)에

의한 쌍대비교 결과를 바탕으로 가중치를 산정한다. 이에 도출된 기능항목 중 환경성이 차지하는 중요도를 LCA 값으로 정량화 하였으며, 전과정평가(LCA)를 분석한 통합 VE를 수행함으로써 최적대안 선정시 환경친화적인 공법선정을 유도할 수 있는 특징이 있다(식 (1)~(3) 참조).

최적대안 선정 방법은 대안별 가치점수( $V_1=F/C$ ,  $V_2=F/E$ ) 산정하여 계층분석법(AHP)을 통해 환경성과 경제성을 포함하는 가치점수 산정( $V_3 = F/f(C,E)$ )결과를 최적안에 대한 가치향상유형 선별 및 설계 제안하였다.

$$V_1 = \frac{F}{C} \tag{1}$$

$V_1$  : 비용최소화 가치점수 F : 기능점수, C : LCC 상대비

$$V_2 = \frac{F}{E} \tag{2}$$

$V_2$  : 환경최소화 가치점수 E : LCA 상대비

$$V_3 = \frac{F}{f} \tag{3}$$

$V_3$  : 통합 가치점수 f : [C, E]

표 1. 기존 VE 와 통합 VE 방법의 차이점

구분		기존 VE	통합 VE
목적		· 최저 생애주기비용(LCC)으로 최상의 가치 추구	· 생애주기비용(LCC)과 전과정 환경영향(LCA)을 고려한 최상의 가치 추구
평가기준		· 가능성, 경제성	· 가능성, 경제성, 환경성
평가절차	대상 선정	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">분석 대상 선정</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">대안 도출</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">분석 대상 선정</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">대안 도출</div>
	분석 평가	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">기능성 평가</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">ⓕ</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">사실물 기능 점수</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">경제성 평가</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">ⓐ</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">LCC 경제성 지수</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">비용최소화 가치지수</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">Ⓥ<sub>1</sub></div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">= F/C</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">기능성 평가</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">ⓕ</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">AHP 분석 계층화법 적용 - 사실물 기능 점수</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">환경성 평가</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">ⓔ</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">LCA 환경성 지수</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">환경영향최소화 가치지수</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">Ⓥ<sub>2</sub></div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">= F/E</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">환경경제 통합 가치지수</div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px;">Ⓥ<sub>3</sub></div> <div style="text-align: right; margin-right: 10px; font-size: small;">= F/(C,E)</div>
	선정	경제적 최적안	환경/경제적 최적안

## 2.2 LCA 구조 및 절차

### 2.2.1 LCA 기본구조

LCA는 상호 연관된 네 가지의 요소로 구성되어 있다. 따라서, LCA를 수행하기 위해서는 각각의 과정에서 필요한 자료와 절차, 방법 등을 정립할 필요성이 있다. ISO 14040시리즈에서 규정하고 있는 LCA의 실시 순서는 크게 목록 및 범위 설정, 목록분석, 영향평가, 결과해석의 4단계와 보고 및 검토로 구성된다.

### 2.2.2 LCA 절차

#### 가. 목적 및 범위정의

목적 및 범위정의단계에서는 LCA 수행으로 얻어지는 결과의 사용목적과 어느 정도의 구체성, 전제조건, 범위로 수행하는가 등을 결정하는 단계이다. 구체적으로 목적정의, 기능의 선택, 기능단위, 기준흐름, 초기 시스템 경계설정, 데이터 품질요건, 영향의 종류 및 영향평가 방법론 정의 등이 있다.

#### 나. 전과정 목록분석

선정된 시스템을 대상으로 해당 시스템에 투입되

는 에너지 및 원료 그리고 배출되는 제품, 부산물, 오염물질 등의 종류와 양을 파악하여 정량화하는 과정이다. 공정도 작성(단위공정: 데이터 수집의 최소단위), 데이터 수집 및 처리, Gate to Gate 목록표 구축, 전과정목록표 구축 등의 단계를 거친다.

#### 다. 전과정 영향평가

목록분석에서 얻어진 에너지 및 자원소요량과 배출물이 환경에 미치는 잠재적인 영향을 기술적, 정량적, 그리고 경우에 따라서는 정성적으로 파악하고 평가하는 단계이다. 분류화, 특성화, 정규화, 가중치부여 단계를 거쳐 환경으로의 영향을 평가한다.

#### 라. 전과정 해석

전과정 목록분석과 전과정 영향평가 단계의 결과를 기초로 한 주요 이슈의 규명하는 단계로 완전성, 민감도, 일관성 검사들을 고려하는 평가와 연구의 목적 및 범위에 부합하도록 결과를 제시한다.

### 2.2.3 전과정 영향평가 방법론

전과정영향평가 방법론은 산업자원부에서 개발한 한국형 환경영향평가지수 방법론(표 2)을 사용하였으

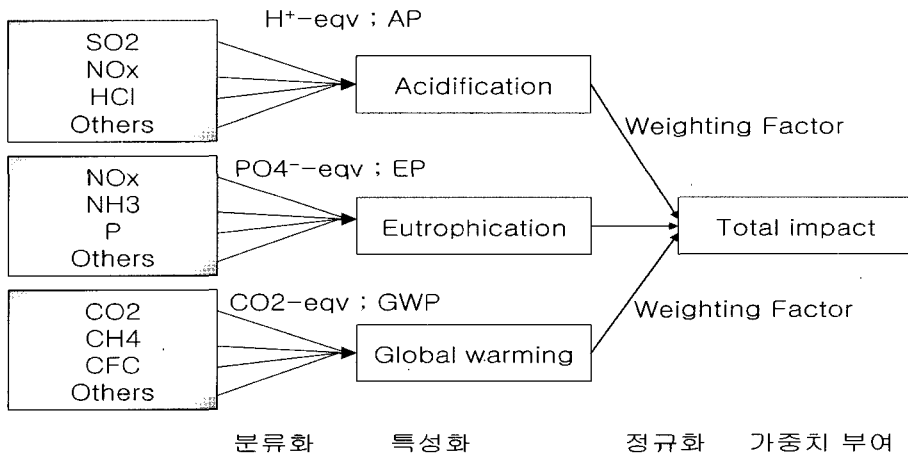


그림 1. 전과정영향평가 절차

표 2. 환경지수 산출식

$$E \cdot I = \sum (LCI\ result \times C_i \times I_i / N_i \times W_i)$$

$W_i = N_i / T_i \times f_i$

$C_i$  : 특성화 인자  
 $N_i$  : 정규화 인자  
 $N_i / T_i$  : 저감계수  
 $f_i$  : Relative Significance Factor  
 $W_i$  : 가중치 인자

며, 고려한 영향범주는 자원고갈, 지구온난화, 오존층 파괴, 산성화, 부영양화, 광화학산화물 형성, 인간독성, 생태독성 등 모두 8개 영향범주를 고려하였다.

### 3. 통합VE 적용사례(호안 공법)

하천호안 형식은 표 3에서 검토한 바와 같다. 하천

표 3. 호안형식 선정을 위한 대안

구 분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
개요도				
특 징	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 굴요성 충분, 안정성 높음</li> <li>· 유지관리용이</li> <li>· 일정한 두께로의 사석 포설 필요</li> <li>· 내구성 양호하지만, 사석 파손 우려</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 세굴방지</li> <li>· 안정성 확보</li> <li>· 중량이 크므로, 장비와 인력 병행하여 시공하므로 공기 단축효과 미비함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 자연스러운 경관연출 가능</li> <li>· 급경사지 시공공간</li> <li>· 유지관리 불량</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 자연스런 경관연출 및 다공질공간형성</li> <li>· 안정성 높고</li> <li>· 중량이 크므로, 장비와 인력 병행하여 시공하므로 공기 단축효과 미비함</li> </ul>
공사비	60,000원/m <sup>2</sup>	80,132원/m <sup>2</sup>	62,374원/m <sup>2</sup>	5,500원/m <sup>2</sup>

표 4. 호안공법 선정을 위한 평가항목

주기능	부기능	기 호	평가 기준
F1. 경제성	경제성	F11	자재 및 시공비가 저렴하다
F2. 기술성	시공성	F21	지형여건의 제약이 적으며, 시공이 용이하다
	유지관리성	F22	공용 중 유지관리가 용이하다
	내구성	F23	하상 세굴현상이 방지 및 호안의 내구성 양호
F3. 이용자편익	경관성	F31	식생도입 등으로 자연스러운 경관연출이 용이
F4. 환경성	친환경성	F41	공사로 인해 발생하는 자연환경피해를 최소화

특성에 맞고 설치 가능한 비교대안에 대해 각각의 특징을 비교하였고, 시공시 발생하는 공사비를 검토하였다. 공사비는 단위면적당 제품생산업체의 일위대가 (경비, 자재비, 노임단가 등)를 기준으로 산정하였으며, 견적 자료를 반영하였다.

### 3.1 VE 분석

#### 3.1.1 설문 집단별 가중치 평가

각 호안공법의 대안별 기능평가 항목으로 경제성, 기술성, 이용자편익, 환경성에 대한 항목(표 4)으로 주기능과 부기능을 정의하였으며, 설문을 통해 AHP 기법을 활용하여 가중치를 산정하였다. 설문 집단은 수자원과 관련된 학계전문가와 하천호안 설계 엔지니어를 대상으로 각각 10명을 선정하여 종합적인 가중치(표 5)를 산정하였다.

표 5. 설문 집단별 가중치

주기능	부기능	학계전문가	기술자	총 합	
				가중치	순위
경제성	경제성	0.35	0.44	0.39	1
기술성	시공성	0.25	0.18	0.22	2
	유지관리성	0.06	0.06	0.06	6
	내구성	0.12	0.10	0.11	4
이용자편익	경관성	0.11	0.12	0.12	3
환경성	친환경성	0.11	0.10	0.11	4
합 계		1	1	1	-

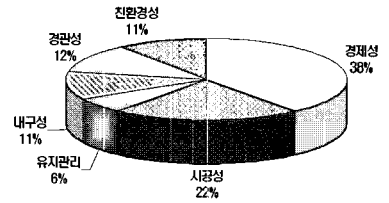


표 6. 대안별 기능분석

주기능	부기능	가중치	대 안 1		대 안 2		대 안 3		대 안 4	
			점 수	가중점수	점 수	가중점수	점 수	가중점수	점 수	가중점수
경제성	경제성	0.39	8.00	31.44	7.00	27.51	7.75	30.45	8.13	31.93
기술성	시공성	0.22	8.00	17.26	8.25	17.80	3.00	6.47	1.50	3.24
	유지관리성	0.06	8.50	5.20	9.75	5.9	71.50	0.92	3.50	2.14
	내구성	0.11	9.50	10.42	9.75	10.69	2.50	2.74	5.00	5.48
이용자편익	경관성	0.12	8.75	10.08	8.00	9.21	7.00	8.06	8.00	9.21
환경성	친환경성	0.11	7.75	8.15	7.75	8.15	6.00	6.31	2.50	2.63
설계기능점수 (F)			82.55		79.34		54.96		54.63	

3.1.2 대안별 기능분석

호안 형식별 점수에 가중치를 적용하여 가중점수를 평가한 결과(표 6) 대안 1이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 대안 2, 대안 3 순서로 평가되었다. 하천 호안형식 선정에 있어 가중치는 경제성, 시공성, 경관성 순서로 분석되었다(표 5 및 표 6).

3.1.3 LCC 비용분석

LCC 비용을 분석하기 위해 초기투자비, 유지관리비를 구분하여 분석한 후 총 LCC 비용으로 산정하였다. 적용된 할인율은 1995~2004년 까지 시주는 행정기예금리, 소비자 물가지수 통계자료로부터 산출한

평균 실질할인율 3.54%를 적용하였고, 분석기간은 50년을 적용하였다.

3.1.4 대안별 LCA평가

대안별 전과정평가의 시스템 경계는 하천정비구간 전구간이며, 기능은 호안, 기능단위는 호안 폭 13.4 × 길이 6.4km이다.

호안공법에 각 공법별 국내 업체로부터 수집한 2004년 일위대가 및 수량산출서를 근거로 전과정 목록분석 하였다.

호안 공사에 사용되는 장비의 연료 소비량은 2004년 건설표준품셈을 적용하여 산출하였다. 장비의 시

표 7. 대안별 생애주기 비용 분석

(단위 : 원)

구 분	초기투자비	유지관리비	총LCC비용
대 안 1	60,000.00	1,397.24	61,397.24
대 안 2	80,132.00	1,866.06	81,998.06
대 안 3	62,374.00	1,452.53	63,826.53
대 안 4	55,500.00	1,292.45	56,792.45

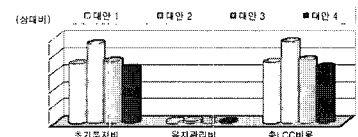


표 8. 대안별 전과정평가

특성화 결과						정규화 결과
영향범주	단 위	대 안 1	대 안 2	대 안 3	대 안 4	
자원고갈	1/yr	1.63E+03	1.73E+03	1.80E+03	1.03E+00	
지구온난화	g CO2-eq	3.02E+05	1.34E+05	3.56E+05	5.83E+00	
오존층파괴	g CFC-11eq	2.56E-02	6.09E-04	2.58E-02	4.32E-02	
광화학물질생성	g ethylene	6.08E+02	2.88E+01	5.77E+02	2.61E-01	
산성화	g SO2 eq	4.16E+02	2.53E+02	1.19E+03	5.85E-01	
부영양화	g PO4-3 eq	7.21E+01	3.44E+01	1.78E+02	3.16E-02	
생태독성	g 14 DCB eq	1.21E+01	5.64E+06	2.50E+07	3.20E-02	
인간독성	g 14 DCB eq	4.12E+04	1.17E+03	4.86E+04	2.57E-03	

표 9. 대안별 VE 평가

구 분	대 안 1	대 안 2	대 안 3	대 안 4
기능점수(F)	82.50	79.34	54.96	54.63
상대적LCC(C)	1.08	1.44	1.12	1.00
가치지수(V1=F/C)	76.39	55.10	49.07	54.63
상대적LCA(E)	1.00	0.20	0.35	0.92
가치지수(V2=F/E)	82.50	157.85	47.07	27.95
f(C,E)	1.19	1.46	1.16	1.10
가치지수(V3=F/f)	69.33	54.34	47.38	49.66

간당 연료소비량과, 장비의 시간당 작업능력을 고려하여 에너지 사용량을 산출하였다. 이에 산출된 에너지는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 기후변화에 관한 정부간 패널)배출계수를 이용하여 배출량을 구하였다.

각 대안별 전과정평가 결과를 분석한 결과(표 8) 대안 1 공법이 환경부하 발생량이 많았으며, 대안 2 이 가장 친환경적인 공법으로 분석되었다. 대안별 상대비는 표 8에 나타난 바와 같다.

### 3.1.5 대안의 종합결과

본 연구에서 호안 형식에 대해 4가지 대안을 비교하여 통합평가 하였다. 각 대안별 상대적 LCC 지수와 상대적 LCA 지수의 결과를 분석하여 통합 VE 방법론으로 분석한 결과 대안1, 대안 2, 대안 4 순서로 분석되었다. LCC 상대비와 환경성 중요도(AHP 가중치) 11%를 적용하여 분석하였다(표 9).

## 4. 결론

수자원 시설물의 최적공법 선정에 있어 기존의 VE/LCC 방법과 다르게 LCA를 결합한 통합 VE분석을 실시하였다. 기존의 VE/LCC는 환경적인 부분을 정성적으로 평가하여 겉보기 환경, 경관적인 요소로써 평가되었다. 그러나 사례에서는 LCA를 통하여 환경성을 정량화하여 평가 수행한 결과 경제성 부분에서는 대안 4가 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 환경성분석 LCA 결과는 대안 2가 가장 우수한 것으로 분석되었다. 그러나 이를 종합하여 분석한 결과 대안 1이 적용사례 결과 가장 적절한 공법으로 선택되었다.

하천의 호안공법 선정에 있어서 하천의 본래 기능 및 특성에 맞는 특수성을 고려하여 LCA 분석을 기반으로 한 통합VE 기법이 경제적·환경적인 측면에서 최적공법선정에 도움이 될 것으로 판단된다. (C)