

환경성 경제성 통합 VE를 이용한 하·폐수처리시설 최적화 모델

박기학*, 송문곤*, 장완복*, 정재수*, 양명환**

(* (주)에코아이, ** GS건설)

Integrated Environmental and Economic VE Approach For Optimum Model of Sewage · Wastewater Treatment System

Kihak Park*, Munkon Song*, Wanbok Jang*, Jaesoo Jung*, MyungHwoan Yang**

(* Ecoeye. co., ltd, ** GS Engineering & Construction)

ABSTRACT

In this study, Integrated VE/LCC Approach based on LCA is applied to selection of sewage·wastewater treatment(system) alternatives as a decision-making process. The analysis period is 30 years and standard interest rate is 4.0%. Also present worth is used for analysis of life cycle cost.

This paper presented the existing key methodologies and processes that can support Integrated VE/LCC Approach and look at integrating the thinking further with VE/LCC and LCA for economic and environmental sustainability.

Key words : VE(Value Engineering), LCC(Life Cycle Cost), LCA(Life Cycle Assessment), Sewage · Wastewater Treatment

요 약 문

본 연구는 하·폐수 처리시설 공정분야(고도처리공법)에 대해 LCA를 고려한 최적대안 선정으로 VE/LCC를 평가하였다. 분석기간은 30년을 기준으로 하였고, 기준할인율은 4.0% 이며 대안의 수명주기비용의 분석 및 비용은 현재가치화법으로 분석하였다.

본 연구에서는 기존의 대안선정 평가방법인 VE를 수행함에 있어 정량적으로 얻어지는 전과정평가를 결합하여 평가하였고 또한 설계전문가의 의견을 반영한 가중치 산정 기법으로는 AHP를 적용하였다. 환경기초시설의 주요 공정분야에 대한 전과정평가를 분석함으로써 건설단계, 운영단계, 해체·폐기단계의 환경영향을 평가함으로써 친환경적인 환경기초시설 설계 및 시공에 유도·기여 하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

주제어 : 가치공학, 전과정비용평가, 전과정평가, 하폐수 처리

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재 환경기초시설 및 하수관거의 개보수 및 증축, 정비에 대한 계획이 활발히 진행됨에 따라 환경관리공

단은 총 공사비 8,652억원 규모의 시설공사를 계획하고, 정부는 하수관거 정비 사업으로 3개 광역시 26개 군에 대해 총 3,511km 23,070억원을 계획하고 있다 (2006년 발주계획).

이러한 공공건설부문의 고비용·저효율 구조를 개선하고자 정부는 1999년 3월 「공공건설 사업효율화 중

합대책」의 일환으로 기본 및 실시 설계에 대하여 설계 VE제도와 LCC(Life Cycle Cost) 검토를 의무화 방안을 추진하였다. 이에 따라 건설기술관리법 시행령(제 38조의 13)에 근거 총 공사비가 100억원 이상(2006년 1월 시행) 건설공사로서 발주청이 경제성 검토가 필요하다고 인정되는 공사에 대하여 시행되고 있다.

환경부에서 공표된 '기존 하수처리장 고도처리시설 설치사업 업무처리 일반지침(2002.4)'(환경부 하수 67714-350호)에 따르면 『다른 고도처리 시설로는 처리효율 및 성능보장이 곤란하여 기존 처리장과 호환성이 떨어지는 고도처리시설 도입이 불가피할 경우에는 LCA(Life Cycle Assessment)에 의하여 고도처리시설 도입의 타당성에 대한 검증을 실시하고 그 결과를 설계보고서에 구체적으로 제시하여 설계자문을 받아야 한다.』라고 명시하고 있다.

이처럼 공공시설에 대한 건설 인프라 사업에 있어서 경제성 및 환경성의 분석은 필수적인 요소이며 본 연구에서는 하·폐수 처리 공정분야에 대한 최적대안 선정에 있어 정량적 환경영향 분석인 LCA를 적용시켰다.

본 연구의 목적은 환경기초시설 및 건설인프라에 대한 경제성과 환경성을 통합하여 최종 의사결정에 목적이 있다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구는 질소·인 제거가 가능한 고도처리방식으로 각각 공법의 LCC, LCA, VE 를 평가하였다. 폐수처리시설 토목구조물은 30,000m³/일 이다. LCC, LCA 분석기간은 30년을 적용하였고, 기준할인율은 4.0%를 적용하였다. 또한 LCA 분석은 건설단계, 운영 유지보수단계, 해체처리 단계 및 폐기물 수송부분을 고려하였다.

본 연구의 수행방법은 첫째, VE/LCC의 이론적 고찰을 통해 정의, 분석 방법을 고찰하고 둘째, 도출된 시사점을 바탕으로 전과정평가(LCA)를 적용한 통합적인 VE/LCC 분석 및 평가 방법을 도출하였다. 마지막으로 사례분석을 통해 제안한 통합적 적용방법론의 타당성을 입증하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 VE의 개요

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 래리 마일스(Larry Miles)에 의해 연구분야로 정립되면서 현재 건설 및 인프라 사업에 필수적으로 적용되고 있다.

현재 VE는 여러 분야에 사용되고 있으며, Value Engineering의 약자로서 건설산업 및 산업설계 분야에 적용되었을 때 사용되며, VA(Value Analysis:가치분석)는 기본계획이나 프로세스 분야를 위해 사용된다. 그리고, VM(Value Management:가치관리)는 행정 또는 관리분야의 적용을 위해 사용되어왔다.

VE기법은 “여러 분야에 걸친 체계적인 검토를 통해 동등 이상이 품질과 기능을 유지하면서 시설물의 설계과정에서 발생할 수 있는 고비용 요소를 찾아내 제거하거나, 최소의 추가비용을 투입함으로써 기능을 향상시키는 활동”이라고 정의할 수 있다.

2.2 미국의 VE

현재 미국 연방법에 VE 방법론이 의무화 되어 있으며, 1) 국방시행령(공법 104-106)에는 각 행정지자체가 비용 면에서 효과적인 VE 절차 및 과정을 구축하여 유지하도록 규정, 2) 미도로체계시행령(1995)은 총사업비가 2,500만 달러 이상으로 추정되는 모든 연방도로 사업에는 VE 검토, 3) 수자원개발시행령(1986, 공법99-662)은 총 사업비 1,000만 달러를 초과하는 연방정부에 관련된 모든 수자원 및 하수처리사업에 대해서는 비용의 재검토 즉, VE검토를 수행하도록 규정, 4) 관리예산청(A-131)규정에서는 연방정부기관은 프로그램 운영 비용 및 소요비용을 절감하기 위한 관리도루로써 VE 방법론 활용하도록 하고 있다.

또한 SAVE(Society of American Value Engineers) International은 1959년 미국 가치공학자 협회로서 창설되어 VE방법론의 개선과 촉진에 기여하는 최초의 국제협회이다.

2.3 LCC 분석의 정식화 및 할인율

본 LCC 분석을 위한 모델은 NIST Bridge LCC 프로그램 개발을 위한 모델(Ehlen & Marshall,1996)이며, LCC 분석방법은 도로투자기법에 가장 일반적으로 사용하는 현재가치화법을 사용하였다.

<Table 1> LCC 분석의 정식화

적용 모델
※ NIST 모델(Ehlen/Marshall, 1996) $PVLCC = IC + PVOMR + PVD$ 여기서 $PVLCC =$ 현재가치의 총기대비용 $IC =$ 초기비용 $PVOMR =$ 유지보수비용의 현재가치 $PVD =$ 철거 및 폐기비용의 현재가치
미래비용의 현재가치화
$PV(LCC) = \sum_{n=1}^k \frac{C_n}{(1+i)^n} = \frac{C_1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{C_k}{(1+i)^k}$ 여기서, $PV =$ 미래에 발생하는 현재가치 $C_n = n$ 년 후에 발생하는 비용 $I =$ 할인율 $k =$ Life Cycle 고려시 설계수명

LCC 분석결과는 할인율의 변화함에 따라 큰 영향을 미친다. 할인율은 보통 명목할인율(Nominal Discount Rate)와 실질할인율(Real Discount Rate)로 구별된다. 명목할인율과 실질할인율의 상관관계는 식(1)과 같다.

$$I_r = \frac{(1+I_n)}{(1+F)} - 1 \dots\dots\dots [1]$$

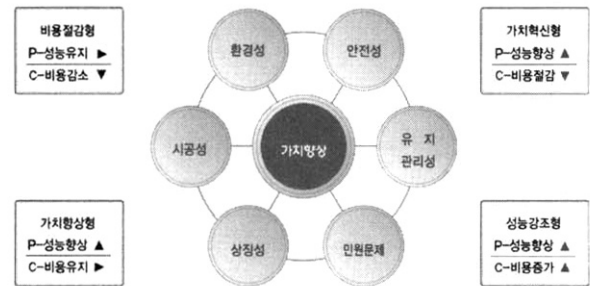
(여기서, : I_r 실질할인율, I_n : 명목할인율, F : 물가상승율)

2.4 가치향상의 유형

래리 마일스(Larry Miles)는 “모든 비용은 기능을 위한 것이다”라고 말하고 있다. 이처럼 고객의 가치는 가격과 성능사이의 관계로부터 시작되며, 가격대 성능

의 영향도는 산업분야나 생산품 등의 측정대상에 따라 크게 달라진다.

일반적으로 가치향상의 유형은 비용절감형, 가치혁신형, 가치향상형, 성능강조형 등으로 분류된다.



(Fig. 3) 가치향상의 유형

데이빗 드 말레(David De Marle)의 가치정의는 식(2)과 같이 정의된다.

$$\text{고객가치} = \frac{\text{성능}}{\text{가격}} \dots\dots\dots [2]$$

<Table 2> 기능과 비용과의 관계

가치척도	$V = \frac{P}{C}$ V : 가치 P : 필요한 성능 C : 생애주기비용
성능 (Performance)	<ul style="list-style-type: none"> 프로젝트 대상의 기능에 대한 분석을 통한 대체(안) 도출 일반적인 원가 절감사고 방식에서 벗어나 기능중심의 사고중시
가치 (Value)	프로젝트의 필요한 성능에 대한 비용의 상대적 비율로서 가치주수(P/C)를 높이는 것이 바람직한 설계방향임
생애주기비용 (LCC)	프로젝트의 투자비용을 초기투자비용뿐만 아니라 시설물 생애주기(Life Cycle) 동안의 총 비용을 감안하여야 함

3. 연구 결과

3.1 연구 수행 절차

본 연구 하·폐수의 고도처리가 가능한 공법(환경 기준치를 만족하는 공법)에 대해 각각 특징을 분석하였고, 성능분석은 설계 전문가의 의견을 수렴하여 가중치(AHP) 기법)를 분석하였다.

비용평가는 분석기간 30년을 기준으로 하여 할인

율²⁾ 4%를 적용하여 LCC를 분석하였다. 또한 각 공정을 포함하는 토목구조물 및 운영, 폐기 단계에서 발생하는 환경영향을 정량화하는 방법으로 LCA분석을 시행하였다. 이후 고도처리 공정이 개선되었을 경우 하천수계에 영향을 미치는 정도를 분석하였다.

일반적인 가치분석은 식(3)과 같으나, 본 연구에서 적용된 최종 가치분석 모델은 비교 대상의 상대적 LCA비를 상대적 LCC비와 결합하여 식(5)와 같은 방식을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 LCA비의 중요도는 해당프로젝트에서의 환경 중요도에 따라 각각 분석하였다.

$$V_1 = \frac{P}{C} \dots\dots\dots [3]$$

V_1 : 비용최소화 가치점수
 P : 성능점수, C : LCC 상대비

$$V_2 = \frac{P}{E} \dots\dots\dots [4]$$

V_2 : 환경최소화 가치점수
 E : LCA 상대비

$$V_3 = \frac{P}{f} \dots\dots\dots [5]$$

V_3 : 통합 가치점수
 f : C, E

3.2 고도처리 공법별 비교

본 연구에서 비교·검토된 공법에 관한 개요는 표 3에서 보는 바와 같다.

3.3 분석 결과

3.3.1. 평가항목 가중치 분석

가중치 설문은 전문가집단 15명을 대상으로 시행하였으며, 설계 전문가의 가중치 분석결과 고도처리 공정의 선정에 있어서 효율성과 운전성이 가장 중요한

1) AHP(Analytic Hierarchy Process)의 기법은 Saaty(1980)가 제안한 것으로 다수의 평가기준을 토대로 몇 개의 선택대안 중에서 최선의 대안을 선택하는 다기준 의사결정분석 기법 가운데 대표적인 방법임.
 2) 미국의 경우, 아주 오랜 기간에 걸친 과거 이력에 대한 실질 활용율은 평균 4%로 최근 LCC 분석시 대략 3~5%의 실질 활용율을 사용함.

요소였으며, 경제성과 유지관리성 순으로 분석되었다.

<Table. 3> 공법의 특징

구 분	공정개요	특 징
A공법	Bacillus균에 의한 유기물 및 질소·인 제거공법	시설물의 구조가 간단하고 시공성이 양호
B공법	A2/O 공정을 기본으로 호기조에 유동성 폴리우레탄 담체를 충전한 하수고도처리공법	고농도의 미생물을 유지함으로써 기존의 활성슬러지 공정에 비해 안정되고 간편하여 경제적임
C공법	A2/O공정을 기본으로 호기조에 섬모상 고정 담체를 설치한 하수고도처리공법	-낮은 C/N비에서 질소 고도처리가 가능 -다중다량의 먹이사슬에 의해 슬러지 발생량이 20~30%감소

<Table. 4> 평가항목 가중치 결과

평가항목	B	C	D	E	F	G	계	가중치
A	B1	C1	A/D2	A2/E1	A/F1	G2	4	11.1
B		B/C1	B1	B/E1	F2	B1	5	13.9
C			C1	C2	C/F1	C/G2	7	19.4
D				D/E1	F1	D1	4	11.1
E					E1	G1	4	11.1
F						F2	7	19.4
G							5	13.9
합계							36	100

A(시공성), B(경제성), C(효율성), D(연계성)
 E(안정성), F(운전성), G(유지관리)

3.3.2. 성능평가 분석결과

<Table. 5> 성능평가 분석

구 분	가중치	A 공법		B 공법		C 공법	
		등급	점수	등급	점수	등급	점수
시 공 성	11.1	8	88.8	8	88.8	8	88.8
경 제 성	13.9	8	111.2	9	125.1	7	97.3
효 율 성	19.4	6	116.4	8	155.2	8	155.2
연 계 성	11.1	8	88.8	8	88.8	8	88.8
안 정 성	11.1	7	77.7	9	99.1	8	88.8
운 전 성	19.4	8	155.2	8	155.2	9	174.6
유 지 관 리	13.9	8	111.2	8	111.2	9	125.1
합 계	100	53	749.3	58	824.2	57	818.6
성능평가	-		74.93		82.42		81.86

공법의 성능을 각각 등급을 비교하여 가중치를 적용시킨 결과 B공법의 성능이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

3.3.4. LCC 분석결과

LCC 비용산정은 분석기간 30년, 실질할인율 4%, 보수비는 토목 0.1%, 기계 0.5%를 적용하였으며, 교체비 내구연한은 15년을 적용하였다. 또한 콘크리트 폐기비용을 적용하여 산정한 결과 B공법이 경제적인 것으로 분석되었다.

<Table 6> LCC 분석 결과(단위: 백만원)

구분		A 공법	B 공법	C 공법
초기 투자비	토목비	420.0	321.0	321.0
	설비비	1,542.0	1,402.0	1,822.0
유지관리비	전력비	179.7	163.4	212.4
	담체비	35.0	14.2	12.5
	보수비	8.1	7.3	9.4
해체·폐기비		1,152.0	1,139.0	1,140.0
총 LCC		8,595.0	7,540.0	8,830.0
상대비율		114%	100%	117%

3.3.5. LCA 분석결과

전과정평가를 위한 기능은 하·폐수를 처리하여 환경기준 이내로 방류하는 것이며, 운영기간은 30년을 적용하여 분석하였다.

<Table 7> 목록분석 결과

구분	단위	A공법	B공법	C공법	
건설단계	레미콘	m ³	710	625	625
	철근	ton	142	125	125
	에폭시 방수	m ²	10,133	10,133	10,133
	기기류	ton	98.09	97.12	101.98
	배관류	ton	110.26	108.10	112.42
운영단계	전력사용	kW/d	9,499	9,134	9,317
	미생물 활성제	kg/d	102	-	-
	담체(Bio Cube)	m ³ /5년	-	172	-
	담체	m ³ /년	-	-	15
	폴리머	kg/d	95.98	87.20	105.48
	슬러지발생	kg/d	7,802	8,574	9,603
폐기	해체장비	L	32,580	32,215	32,215
	폐기물 수송	L	59,852	59,182	59,182

각 공법별 목록분석은 설계시 적용되는 개략 물량에 의해 산출하였으며 표7에서 보는 바와 같다. 또한 건설 단계의 레미콘 타설시 사용되는 펌프카(80m³/hr), 레미콘 트럭(6.03m³), 진동장치(45 D(3.5HP))는 별도 작업효율을 계산하여 에너지 사용을 추가하였다. 폐기물 수송은 각각 동일한 것으로 가정하였다(설계팀).

전과정평가 특성화 결과는 표 8에서 보는 바와 같고, 가중치 결과 B공법이 1.00 일 때 A공법이 1.04의 상대비를 나타냈고, C공법의 경우는 1.02에 해당 되는 것으로 분석되었다.

전과정평가 결과 처리공정에 대한 단계별 환경영향은 운영단계의 환경부하가 대부분을 차지하는 것으로 분석되었다.

가) 특성화 결과

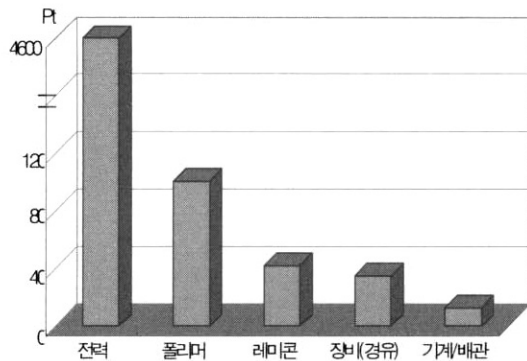
<Table 8> 특성화 결과

영향범주	Unit	A 공법	B 공법	C 공법
자원고갈	1/yr	1.87E+08	1.80E+08	1.84E+08
지구온난화	gCO ₂ -eq	5.31E+10	5.10E+10	5.22E+10
오존층 파괴	gCFC-11eq	4.99E+01	4.50E+01	4.81E+01
광화학물질 생성	gethylene	1.24E+06	1.13E+06	1.18E+06
산성화	gSO ₂ eq	9.48E+07	9.09E+07	9.37E+07
부영양화	g PO ₄ -3eq	1.68E+07	1.61E+07	1.65E+07
생태독성	g 1,4DCBeq	3.15E+08	3.02E+08	3.10E+08
인간독성	g 1,4DCBeq	8.85E+07	8.45E+07	8.63E+07

나) 가중치 결과

<Table 9> 가중치 결과

영향범주	A 공법	B 공법	C 공법
자원고갈	1740	1670	1710
지구온난화	2770	2660	2720
오존층파괴	0.359	0.323	0.345
광화학물질 생성	7.81	7.12	7.43
산성화	85.7	82.1	84.7
부영양화	48.6	46.7	47.7
생태독성	125	120	124
인간독성	294	281	287
TOTAL	5070	4870	4980
운영단계	4960	4770	4880
상대비	1.04	1.00	1.02



(Fig. 4) 선정공법 주요자재별 환경부하

최종 선정된 공법의 자재별 환경부하는 운영단계에서 사용되는 전력의 환경부하가 가장 큰 것으로 분석되었고, 이후 폴리머, 레미콘 순으로 분석되었다. 기계배관류의 자재 이외에 철근 순으로 나타났다. 즉 운영단계의 효율화가 친환경적 설계의 주요인자 될 것으로 판단된다.

<Table 10> 처리수질 개선 효과

	단위	BOD	COD	TN	TP
개선전	mg/ℓ	20.6	43	31.5	1.9
개선후		8	30	18	1.5

처리수질에 개선에 대해 부영양지수를 분석한 결과 수질개선 전 1.09E10 g PO4-3eq, 수질개선 후 7.01E9 g PO4-3eq으로 방류수질의 개선효과가 큰 것으로 분석되었다.

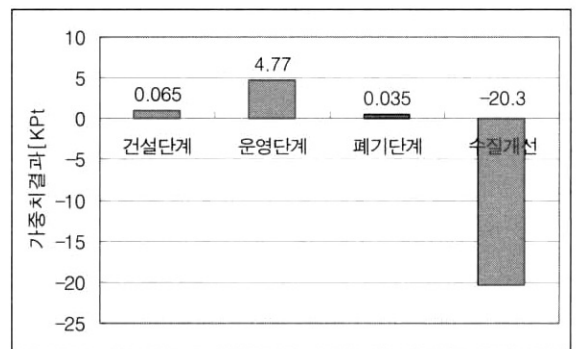
3.3.6. 종합 결과

처리공정에 대한 최적 선정안은 B공법이 성능이 우수하고, 경제성이 우수하여 가치향상 유형으로 볼 때

<Table 11> 종합 결과

구분	A 공법	B 공법	C 공법	
성능평가(P)	74.93	82.42	81.86	
LCC(C) 비	1.14	1.00	1.17	
LCA(E) 비	1.04	1.00	1.02	
P/(C+E)	E=15%	58.09	72.30	62.02
	E=30%	52.03	63.89	56.07
	E=50%	45.69	55.69	49.31

가치혁신형으로 선정 가능한 것으로 분석되었다. 가치란 앞서 언급한 바와 같이 고객중심(발주처)의 성향에 따라 달라질 수 있다. 그러나 비용적인 측면과 환경적인 측면은 정량적으로 평가되어야 하고 객관성을 지녀야 한다. 표 11에서 나타난 바와 같이 환경적인 요인을 각각 15%~50%의 중요도를 추가하였을 때 가치 점수의 변화를 살펴 볼 수 있다. 프로젝트의 관점에 따라 환경성이 경제성 보다 우선시 되어야 하는 것도 있을 것이며, 해당 프로젝트 및 제품의 성격에 따라 환경성의 중요도는 변화되어야 할 것이다.



(Fig. 5) 수질개선 효과

본 연구에서 환경성(LCA)의 중요도가 15%의 가중치가 적용될 경우 B공법이 72.30으로 A,C 공법보다 우수한 가치결과를 얻었다. B공법으로 선정하였을 경우 각 단계별로 보면 운영단계의 환경부하가 크게 나타났다. 이로 인하여 발생하는 수질개선효과는 20.3KPt로 분석되었다. 이는 30년간 운영시 발생하는 것으로 건설 인프라 및 환경기초시설과 같이 사용연수가 길고 Life Cycle이 길수록 LCA의 도입은 효과적이라 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서 LCA를 적용하여 하·폐수 공법최적 선정에 관해 분석하였다. 가중치 선정은 설계전문가로부터 얻었다. LCC 와 LCA 평가 기간은 30년으로 설정하였다.

현재 대부분 공공시설물 및 환경기초시설에 대해 VE 분석을 시행하고 있으나, LCA 분석은 활발히 진

행되어 지고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 LCA 분석을 통하여 보다 친환경적인 대안선정에 도움을 주고자 시행하였다. 건설 인프라에 대한 보다 많은 데이터의 확보로 LCC 및 LCA의 신뢰도를 더욱 높여야 할 것이다. 따라서 지속적인 모니터링 및 기존의 수행된 해당공법의 자세한 수량·단가산출서의 분석과 실제 운영되어지고 있는 유지관리 데이터의 축적이 중요한 과제일 것이다.

또한 해당프로젝트에 대해 정확한 이해와 사업시행자 및 이해당사자들의 LCA 이해가 요구되며, 환경성의 중요도를 현실에 맞게 적용 시켜야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 전과정평가를 이용한 교량안 선정시 통합 LCC/VE 방법론. 2005. 한국전과정평가학회
- 2) 가치공학의 원리. 2006. 임종권의 2인 공역. ROBERT B. STEWART 저. 구미서관
- 3) 건설기술관리법 시행령(제38조의 13)
- 4) 하수관거 BTL사업 착공으로 민간자본 본격 투자 전망. 환경부 보도자료 2006.1
- 5) Fundamentals of Value Methodology. 사단법인 한국건설관리학회 VE 위원회