

## 지속가능한 건설을 위한 TBL 통합모델의 개발

박광호 · 황용우\* · 남궁은\*\*

CSIRO Sustainable Ecosystem · \*인하대학교 환경토목공학부 · \*\*명지대학교 환경생명공학부

### Development of Triple Bottom Line Integrated Model for Sustainable Construction

Kwang-Ho Park · Yong-Woo Hwang\* · Eun Namkung\*\*

CSIRO Sustainable Ecosystem, Australia · \*School of Environmental and Civil Engineering, Inha University

\*\*Department of Environmental Engineering and Biotechnology, University of Myongji

#### 1. 서론

1992년 6월에 국제회의인 유엔환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)가 브라질 리우에서 개최되어 '환경적으로 건전하고 지속가능한 개발(Environmentally Sound and Sustainable Development, ESSD)'이라는 개념이 대두되었다. 그리고 2002년 8월 남아프리카공화국 요하네스버그에서 지속가능발전세계정상회의(World Summit on Sustainable Development, WSSD)가 열려 '지속가능발전'이라는 개념이 21세기 인류의 보편적인 발전전략을 함축하는 핵심개념으로 자리 잡게 되었다.<sup>1,2)</sup> 지속가능한 발전이란 생태학적 안정성의 유지, 관리된 경제성장, 사회적 형평성의 증대를 통합적으로 고려하는 개념으로서, 건설 분야에서의 지속가능한 발전의 의미 역시 환경적, 경제적, 사회적 여건들을 만족시키면서 개발해가는 것을 의미한다고 할 수 있다.<sup>3~6)</sup>

우선, 환경적인 지속가능성을 위해서는 에너지와 자원의 사용, 대기, 수계, 토양으로의 환경오염물질 배출을 포함한 합리적이고 종합적인 환경관리를 수행하여 총체적으로 환경영향을 감소시킬 필요가 있다. 또한, 이와 더불어 건설사업의 초기 계획단계부터 시공, 유지관리, 해체 및 폐기에 걸친 전 life cycle에서 발생하는 경제적 가치, 즉 건설사업의 전체 수명주기에 대한 경제성 분석이 필요하며, 그리고 건설사업으로 인하여 삶의 질이 향상되었다면 이것이 무엇으로 인해 어떤 편익을 제공했는지에 대한 통합적인 평가가 필요하다. 따라서 지속가능한 건설을 개념을 넘어서 구체적으로 실현하기 위해서는 이러한 사회, 경제적, 환경적 통합 계획과 관리를 과학적으로 지원할 수 있는 통합적 평가모델의 개발이다. 이에 본 연구에서는, 지속가능한 건설사업을 판단할 수 있는 방법론으로 환경적, 경제적, 사회적 평가모델과 이를 통합하는 TBL(Triple Bottom Line) 통합모델을 제안하였다.

본 연구의 목적은 건설사업에 대한 환경적, 경제적, 사회적 평가지수를 개발하고, 이들 각 부문을 통합하는 방법론을 개발하여 건설사업의 지속가능성을 판단할 수 있는 시스템을 구축하는데 있으며, 이는 각종의 대안 선정에 직면하는 대형 개발사업 및 도시개발 정책의 초기 기획단계에서부터 환경적, 경제적, 사회적 의사결정 수단으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 2. 지속가능한 도시 건설을 위한 TBL 통합모델의 개발

##### 2.1. TBL 통합모델

###### 2.1.1. TBL 통합모델의 개요

지속가능한 발전을 위한 모든 지수들(indicators)과 지표들(Indices)은 결국은 사회, 경제, 환경적인 요소로 귀결되는데, 이 세 가지 요소를 TBL(Triple Bottom Line)이라고 하며, 본 연구에서는 이들 요소들을 통합하는 의미로 TBL 통합모델을 사용하였다. 또한, 본 연구에서 제안된 통합모델은 국가적 수준에서 평가되고 있는 지속가능성지수를 건설사업이라는 산업 수준에서 환경적, 사회적, 경제적 평가를 수행했다는 점에서 실용적 의미를 가진다고 할 수 있다.

###### 2.1.2. TBL 통합모델의 구성

TBL 통합모델은 환경영향의 분석모델, 경제성 분석모델, 사회적 편익 분석모델로 구성된다. 본 연구에서는, 환경적 측면에서의 환경영향의 정량화 분석기법으로서는 LCA(Life Cycle Assessment)를, 경제성 효율성의 평가기법으로서는 LCC(Life Cycle Cost)를, 사회적 편익의 분석기법으로서는 BCA(Benefit Cost Analysis)를 TBL 통합모델의 각 구성요소로 사용하였다. 각 요소의 세부 평가인자들을 Table 1에 나타내었다.

LCA 분석을 통해서 건설사업의 시공단계, 유지보수, 해체 및 폐기단계에 이르는 전체 life cycle에서 발생하는 환경영향을 정량화하고, 환경에 대한 영향이 큰 물질들과 이리

E-mail: hwangyw@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7501

Fax: 032-863-4267

**Table 1.** Description of Each Category of TBL Integration Model

Environmental Category	• Human Health	- caused by Carcinogenic Substances - caused by Respiratory Effects - caused by Climate Change - caused by Ionizing Radiation - caused by Ozone Layer Depletion
	• Ecosystem Quality	- caused by Ecotoxic substances - caused by Acidification and Eutrophication
	• Resources	- caused by Extraction of Mineral - caused by Extraction of Fossil Fuel
Economic Category	• Initial Cost	- Planning and Design Cost - Construction Cost - Supervision Cost
	• Operation and Maintenance Cost	- General Management Cost - Examination/Diagnosis Cost - Maintenance & Repair Cost - User Cost - The third Group cost
	• Demolition and Disposal Cost	- Demolition/Disposal Cost - Salvage value
Social Category	• Benefit of time	- Value of Time
	• Benefit of reduction cost	- Fuel consumption - Engine oil and tire - Maintenance and Depreciation

한 물질들이 어떤 단계에서 발생되고 저감 가능한지가 평가 가능하다. 일반적으로, LCA 결과는 인간 건강과 생태계에 미치는 영향, 그리고 자원의 소비 정도로 표현이 되며, 본 연구에서는 이러한 환경영향을 LCC 분석결과 및 BCA 분석결과와 동일 지표로 평가할 수 있도록 화폐로 환산하여 사용하였다.

LCC 분석은 건설 프로젝트의 내구연한에 따른 초기비용, 유지보수 비용, 해체폐기 비용 등을 산정하기 위하여 할인된 미래비용을 분석함으로써, 건설 프로젝트 전반의 경제적 가치를 평가할 수 있다.

공공사업 또는 정책의 공급으로 인해 발생하는 경제적 이익, 즉 건설사업을 시행함으로써 파생될 수 있는 여러 가지 효과 중 시간이나 비용의 절약과 같은 이익을 BCA 분석모델을 이용하여 평가할 수 있다. 건설사업으로 인하여 파생되는 이익을 건설사업에 대한 사회적 편익으로 간주하고, 이에 대한 분석모델을 이용하였다.

### 2.1.3. TBL 통합모델의 통합

본 연구에서 제안된 평가모델은 경제적 효율성과 환경영향의 저감이라는 경제와 환경의 통합 개념인 생태효율성(Eco-efficiency)과 사회적 편익과 발생비용간의 관계, 즉 사회+경제의 개념인 편익/비용(Benefit-Cost Ration, B/C)의 개념에 기초하여 통합되었다. WBCSD<sup>7)</sup>(World Business Council for Sustainable Development)에서는 보다 효율적인 자원의 이용과 환경오염물질의 배출 저감이라는 생태적 발전요소와 경제성장이라는 경제적 발전요소를 결합시킨 Eco-efficiency의 개념을 발전시키고 있다. Eco-efficiency는 ‘제품이나 서비스

의 가치/환경영향’으로 표시되며, 따라서 Eco-efficiency의 향상은 제품 및 서비스의 가치 상승 또는 환경영향의 저감, 그리고 이 두 가지를 모두 달성할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 개념을 수식화하여 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Eco\text{-}efficiency = \frac{Value}{E} = \frac{\frac{P}{C}}{E} \quad (1)$$

여기서, Value : 사업으로 인하여 얻을 수 있는 가치(Value)  
P : 사업으로 인하여 발생하는 이익(profit)  
C : 사업에 소요되는 비용(Cost)  
E : 사업으로 인하여 발생하는 환경영향(Environmental Impact)

또한, 목표를 달성하기 위한 구체적인 사업이나 정책수단을 선택하기 위하여 각 대안의 비용과 편익을 비교할 때 사용되는 B/C기준은 각 사업이나 정책을 평가할 경우, 편익의 현재가치의 합을 비용의 현재가치의 합으로 나누어 그 비율이 1 이상이면 사업을 시행하고, 반대로 1 이하이면 사업을 시행하지 않는다. 즉, B/C 기준은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (2)$$

여기서,  $B_t$  : 사업시작 후 t년에 발생하는 편익  
 $C_t$  : 사업시작 후 t년에 발생하는 비용  
 $t$  : 사업의 효과가 완전히 종료되는 시점(년)  
 $i$  : 할인율(Discount Rate)

식 (1)에서 이익(profit)부분은 건설사업으로 인한 편익부분, 즉 식 (2)의 편익(B)으로 생각할 수 있으며, 식 (1)과 (2)를 식 그대로 적용하면  $B/(C \times E)$ 로 표현된다. 그러나, 어떤 사업으로 인하여 발생하는 환경영향은 그에 대한 저감비용( $C_E$ )으로 환산되면, 식 (3)과 같이 비용의 한 부분으로 표현될 수 있다.

$$Eco-efficiency + \frac{B}{C} \Rightarrow \frac{B}{C_1 + C_1 + C_1 + \dots + C_E} \quad (3)$$

이러한 eco-efficiency와 B/C의 개념을 본 연구에서의 TBL 통합모델에 적용해보면, 지속가능한 건설의 TBL 통합 평가지수(TBL Integrated Evaluation Index, IEITBL)는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$IEITBL = \frac{B_i}{C_i + E_i} \quad (4)$$

여기서,  $B_i$  = i 건설사업으로 인한 사회적 편익  
 $C_i$  = i 건설사업에 사용되는 모든 비용  
 $E_i$  = i 건설사업으로 인한 환경영향

구축된 TBL 통합모델의 사회적, 환경적, 경제적 의사결정을 통합한 통합평가지수는 건설사업으로 인한 사회적 편익은 증대시키고, 건설사업에 사용되는 비용과 사업으로 인한 환경영향은 감소시키는 방향으로 가야한다는 것을 의미한다. 즉, 통합평가지수를 향상시키는 방향으로 건설사업을 설계 및 기획, 시공, 관리해야 한다는 것을 의미한다. 본 연구에서 제안한 TBL 통합지수는 환경적, 경제적, 사회적 기준값(Reference value)이 설정되지 않는 한 절대적인 의미를 가지지는 않는다. 그러나 건설사업이 A, B, C 등의 대안이 있을 경우 건설사업의 초기 기획단계에서 다양한 대안선정에 환경적, 경제적, 사회적 의사결정 수단으로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 현재 건설되어 있는 A라는 도시 인프라시설에 대한 친환경적이고 지속가능한 대안 A'를 위한 건설정책을 수립하기 위한 평가수단으로 활용될 수 있을 것이다.

### 3. TBL 통합모델의 적용

본 연구에서는 TBL 통합모델을 대표적인 도시 인프라시설인 도로 건설사업에 적용하여 사례분석을 수행하고 모델의 타당성을 검증하였다. 분석 대상으로 2003년 말에 실제 준공된 A 국도를 설정하였다. 분석 구간은 총 연장 1.97 km, 4차로(20 m)로 전 구간이 아스팔트 포장으로 이루어져 있고,

구간 내 용지제한과 지형 등의 제약에 의해 비탈면으로는 안정성을 유지 할 수 없기 때문에 옹벽이 설치되어 있다. 도로에 대한 기능단위는 도로연장 1 km로 설정하였고, LCC 분석을 위하여 할인율은 평균 실질할인율 4.2%를, 분석기간은 도로의 설계 목표연도인 20년을 적용하였다. 분석에 있어 국내외 LCI DB, 각 구조물의 설계자료, 운영관리 실적자료, 폐기 실적자료 등의 자료조사 및 분석과 건설 설계용 적산 프로그램 EBS(v.4.3)(Event Breakdown System for Construction), LCA 연산 프로그램 등을 사용하였다.

#### 3.1. 도로에 대한 LCA 분석

##### 3.1.1. 목적 및 범위설정

LCA의 수행 목적은 도로를 대상으로 life cycle, 즉 건설단계, 유지보수단계, 해체 및 폐기단계에서 발생하는 환경영향을 평가하는 것이다. 도로의 건설단계는 토공, 비탈면 안전공, 배수공, 포장공 등으로 구분하였고, 유지관리의 경우 포장의 유지보수공사, 폐기 및 해체단계에서는 도로의 해체공사와 해체폐기물의 수송을 고려하였다.

##### 3.1.2. 목록분석

대상 도로의 life cycle에서 투입되는 물질과 에너지를 정량화하고, 이로 인하여 발생하는 각 환경오염물질들에 대하여 목록분석을 수행하였다. 도로의 각 단계별로 투입되는 건설자재 및 건설장비의 사용량을 조사하였으며, 각 건설자재 및 건설장비의 에너지 소비량에 목록분석을 위하여 국내외에서 개발된 LCI DB<sup>8-11)</sup>를 이용하였다.

건설단계의 각 공정별로 투입되는 자재와 수량 수집을 위하여 건설 적산 프로그램인 EBS 프로그램을 이용하였으며, 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 또한, 각 단위공정별 건설시 사용되는 건설장비별 에너지소비량은 각 건설공정별 투입장비의 작업능력(Q)과 실제 작업한 수량(Q<sub>R</sub>), 그리고 각 건설장비별 연료사용량을 이용하여 산정하였다. Q<sub>R</sub>과 Q는 기본설계보고서를, 장비별 연료 사용량은 사례구간의 일위대가<sup>12)</sup>와 건설 표준품셈<sup>13)</sup>을 이용하였으며, 결과를 Table 3에 나타내었다.

도로의 유지관리에서도 사용되는 건설자재 및 장비에 대하여 고려하였다. 건설자재의 경우 아스콘 덧씌우기 작업이 대부분으로, 일반도로의 내구수명을 20년, 아스콘의 교체 주기를 12년으로 설정하였을 때, 도로의 내구수명 동안 1번의 덧씌우기 작업을 하게 된다. 이때 사용한 아스콘의 수량을 Table 4에 나타내었으며 건설장비 사용에 따른 에너지 사용량을 Table 5에 나타내었다.

해체 및 폐기단계에서는 도로의 해체 폐기물의 양과 해체시 사용되는 장비 등을 조사하여 해체 및 폐기시 사용되는 건설장비와 에너지 사용량을 산정하였으며, 이를 Table 6에 나타내었다. 또한 폐기물 처분은 수송을 고려하였는데, 폐기되는 아스콘의 양을 덤프트럭 15 ton으로 재활용센터 또는 매립지까지 수송할 때 사용되는 에너지를 산정하였으며, 이를 Table 7에 나타내었다.

**Table 2.** Construction Materials Requirement in Construction Stage

Process	Construction Materials	Quantity	LCI DB
Earth work	Wood	482.6 kg	Sima-Pro
	Nail	3.9 kg	Sima-Pro
	Cone index	2.6 m <sup>3</sup>	MOCIE*
Slope safety work	Coupling	1,513.0 kg	Sima-Pro
	FRP pipe	39,731.4 kg	Sima-Pro
	High strength cement	3,370.0 kg	MOE*
Drainage	Plywood form	166,625.3 kg	Sima-Pro
	Steel	11,000.0 kg	Sima-Pro
	Ready mixed concrete	9,915.0 m <sup>3</sup>	MOCIE
	Sand	604.5 ton	Sima-Pro
	Gravel	28,758.0 ton	Sima-Pro
	Cement	1,920.0 kg	MOCIE
	Asphalt	20,310.0 ton	Sima-Pro
	Reinforcement	714,568.0 kg	MOCIE
	Cement pipe	901,060.0 kg	MOE
	PVC	2,801.0 kg	MOCIE
	Paving work	Plywood form	5,126.4 kg
Steel		4,127.0 kg	Sima-Pro
Paint		2,258.4 kg	Sima-Pro
Ready mixed concrete		4,211.0 m <sup>3</sup>	MOCIE
Ascon(Asphalt Concrete)		55,240.0 ton	Sima-Pro
Reinforcement		78,000.0 kg	MOCIE
Asphalt emulsion		25,641.0 kg	Sima-Pro

\* MOCIE: Ministry of Commerce, Industry and Energy,  
MOE: Ministry of Environment

**Table 4.** Construction Materials Requirement in Maintenance Stage

Material	Area	Quantity per area	Quantity
Asphalt Concrete	0.1 m <sup>2</sup>	15,800 ton/m <sup>2</sup>	1,479 ton

**Table 5.** Construction Machinery and Energy Consumption in Maintenance Stage

Construction Machinery	QR	Q	Energy (L/hr)	Energy Consumption (L)
Asphalt finisher(3.0 m)	1,479 ton	48.52 ton/hr	8.0	243.8
Water tank(5500 L)	1,479 ton	48.52 ton/hr	10.2	310.9
Tire roller(8-15 ton)	15,800 ton	324 ton/hr	11.7	570.6
Tandem roller(10-14 ton)	15,800 m <sup>2</sup>	405 m <sup>2</sup> /hr	8.4	327.7
Makadam roller(10-12 ton)	15,800 m <sup>2</sup>	660 m <sup>2</sup> /hr	9.2	220.2

**Table 6.** Construction Machinery and Energy Consumption in Demolition/Disposal Stage

Construction Machinery	QR	Q	Energy*	Energy Consumption
Backhoe + Breaker	3,010 m <sup>3</sup>	4.60 m <sup>3</sup> /hr	10.5 L/hr	6,871 L

\* Energy source: Diesel

**Table 3.** Construction Machinery and Energy Consumption in Construction Stage

Process	Construction Machinery	QR	Q	Energy*(L/hr)	Energy Consumption(L)
Earth work	Grader(3.6 m)	764,451 m <sup>3</sup>	144.2 m <sup>3</sup> /hr	15.4	81,617.8
	Dump truck(15 ton)	1,220,333 ton	15.0 ton/hr	21.1	1,716,601.8
	Water tank(5,500 L)	714,565 m <sup>3</sup>	87.4 m <sup>3</sup> /hr	10.2	83,402.7
	Backhoe	47,088 m <sup>3</sup>	56.9 m <sup>3</sup> /hr	10.5	8,695.5
	Dozer(19 ton)	377,479 m <sup>3</sup>	142.0 m <sup>3</sup> /hr	23.8	63,272.1
	Dozer(32 ton)	867,634 m <sup>3</sup>	222.6 m <sup>3</sup> /hr	39.6	154,370.8
	Backhoe	45,061 m <sup>2</sup>	77.7 m <sup>2</sup> /hr	10.5	6,089.3
	Tire payloader(2.87 m <sup>3</sup> )	377,479 m <sup>3</sup>	93.4 m <sup>3</sup> /hr	20.2	81,682.7
Slope safety work	Air compressor	16,083 m <sup>2</sup>	7.1 m <sup>2</sup> /hr	6.1	13,734.9
	Backhoe	613 m <sup>2</sup>	56.9 m <sup>3</sup> /hr	10.5	113.2
Drainage	Dump truck(10.5 ton)	373 ton	10.5 ton/hr	18.8	667.7
	Dump truck(15 ton)	9,991 ton	15.0 ton/hr	21.1	14,053.9
	Rammer(80 kg)	1,454 m <sup>3</sup>	4.4 m <sup>3</sup> /hr	0.7	232.4
	Rotor(1.72 m <sup>3</sup> )	403 m <sup>3</sup>	14.7 m <sup>3</sup> /hr	18.0	492.7
	Backhoe	29,130 m <sup>3</sup>	56.9 m <sup>3</sup> /hr	10.5	5,379.3
	Concrete vibrator(3.5HP)	641 m <sup>3</sup>	5.4 m <sup>3</sup> /hr	1.0	118.7
	Tire payloader(1.72 m <sup>3</sup> )	9,586 m <sup>3</sup>	78.37 m <sup>3</sup> /hr	18.0	2,201.7
	Pump car	2,472 m <sup>3</sup>	27.1 m <sup>3</sup> /hr	18.0	1,641.9
Paving work	Grader(3.6 m)	29,119.0 m <sup>3</sup>	144.2 m <sup>3</sup> /hr	15.4	3,108.9
	Dump truck(10.5 ton)	132.3 ton	10.5 ton/hr	18.8	236.9
	Dump truck(15 ton)	29,189.0 ton	15.0 ton/hr	21.1	41,059.2
	Distributor(3,800 L)	194,600.0 m <sup>2</sup>	4,204.92 m <sup>2</sup> /hr	12.0	555.3
	Water tank(5,500 L)	41,854.0 ton	87.4 ton/hr	10.2	4,885.1
	Asphalt finisher(3.0 m)	25,886.0 ton	84.91 ton/hr	8.0	2,438.9
	Dynamic compaction roller	29,119.0 m <sup>2</sup>	114 m <sup>2</sup> /hr	11.7	2,988.5
	Line sprayer	7,528.0 m <sup>2</sup>	1050 m <sup>2</sup> /hr	22.8	163.5
	Concrete vibrator(3.5HP)	89.0 m <sup>3</sup>	5.4 m <sup>3</sup> /hr	1.0	16.5
	Crusher(150 ton)	29,119.0 m <sup>3</sup>	73.4 m <sup>3</sup> /hr	10.0	3,967.2
	Tire roller(8-15 ton)	29,119.0 m <sup>3</sup>	216 m <sup>3</sup> /hr	11.7	1,577.3

\* Energy source: Diesel

**Table 7.** Transportation Machinery and Energy Consumption in Demolition/Disposal Stage

Transportation Machinery	Asphalt concrete Quantity	Distance (round)	Energy*	Energy Consumption
Dump truck(15 ton)	7,074 ton	40 km	8 km/L	2,360 L

\* Energy source: Diesel

**3.1.3. 영향평가**

목록분석 결과를 바탕으로 건설단계, 유지관리단계, 해체 및 폐기단계에 대한 영향평가를 수행하였다. 영향평가는 Endpoint 영향평가방법론<sup>14-16</sup>을 이용하여, 인간건강, 생태계영향, 자원에 대한 범주를 고려하였으며, 건설단계의 영향평가 결과를 Table 8에 나타내었다. 건설단계에서 토공이 61.5%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 다음으로 배수공이 19.9% 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 보호대상(safeguard)별로는 자원에 대한 비중이 99.1%로 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

도로에 대한 life cycle별 영향평가 결과를 Table 9에 나타내었다. 평가결과 대부분의 영향은 99.5%로 건설단계에서 발생하는 것으로 나타났으며, 보호대상별로는 자원 99.1%로 가장 큰 비중을 나타내었다. 이와 같은 환경영향은 TBL 평가에서 LCC 분석결과, BCA 분석결과와 통합적으로 평가할 수 있도록 화폐로 환산되어야 한다. 본 연구에서는 보호대상 중 인간건강에 대해서는 피해단위당 지불의사금액(Willingness to Pay, WTP)<sup>17</sup>을, 생태계에 대해서는 목적세 형태의 보존가치 WTP<sup>18</sup>를 적용하였고, 자원에 대해서는 화석자원, 광물자원을 채취하는데 필요한 에너지이므로 이를 금액으로 환산하여 적용하였다.

**3.1.4. 결과해석**

결과해석은 목적과 범위에 맞게 목록분석 결과 또는 영향평가 결과를 통하여 주요 환경영향을 규명하고 평가하는 단

**Table 8.** Results of Impact Assessment for Construction Stage

Safeguard	Earth Work	Slope Safety Work	Drainage	Paving Work	Total
Human Health (DALY/km)	4.02E-01	3.25E-02	1.45E+00	7.65E-01	2.65E+00
Ecosystem Quality (PDF · m <sup>2</sup> · yr/km)	1.42E+04	1.74E+03	4.44E+04	2.65E+04	8.68E+04
Resources (MJ/km)	5.98E+06	4.37E+04	1.90E+06	1.74E+06	9.66E+06

**Table 9.** Results of Impact Assessment for Life Cycle of Road

Safeguard	Construction Stage	Maintenance Stage	Demolition and Disposal Stage	Total
Human Health (DALY/km)	2.65E+00	1.10E-02	3.18E-02	2.69E+00
Ecosystem Quality (PDF · m <sup>2</sup> · yr/km)	8.68E+04	4.83E+02	8.32E+02	8.81E+04
Resources (MJ/km)	9.66E+06	1.15E+04	3.19E+04	9.70E+06

**Table 10.** Environmental Key Issue and Process in Life Cycle of Road

Stage and process		Key Issue
Construction Stage	Earth work(61.87%)	· Machinery(61.9%)
	Slope safety work(0.47%)	· Machinery(0.4%) · FRP pipe(0.07%)
	Drainage(18.61%)	· Ready mixed concrete(14.4%) · Gravel(1.5%)
	Paving work(19.06%)	· Asphalt emulsion(6.9%) · Ready mixed concrete(6.1%)
Maintenance Stage		· Asphalt Concrete(62.0%) · Machinery(38.0%)
Demolition and Disposal Stage		· Machinery(80.3%) · Transportation(19.7%)

계이다. 도로의 각 단계별 환경영향을 미치는 원인물질이 무엇인지에 대하여 파악하여, Table 10에 나타내었다.

**3.2. 도로에 대한 LCC 분석**

**3.2.1. 초기투자비용에 대한 분석**

본 연구에서는 도로의 LCC 분석에 있어서 초기투자비용으로 기획 설계비, 시공비, 감리 및 감독비를 고려하였다. Table 11은 도로의 초기투자비용을 정리한 것으로 기획 설계비에서 기본 설계비와 실시 설계비는 시공비에 기본설계 업무 요율 1.16%, 실시설계 업무 요율 2.23%를 적용하여 산정하였다. 또한, 시공비에서 직접 공사비는 설계 견적비를 이용하여 산정하였고, 간접 공사비와 일반관리비 및 이윤은 직접 공사비에 각각 33%, 17%를 적용하여 산정하였다. 감리 및 감독비에서 공사감리비는 시공비에 공사감리 업무요율 1.28%를 적용하여 산정하였고, 감독비는 현장 상주 감독 인건비(C급 2명, D급 3명, 공사기간 5년)를 적용하여 산정하였다.

**3.2.2. 유지관리비에 대한 분석**

도로의 유지비용에 대한 분석은 일반관리비, 점검 및 진단비용, 유지보수비, 사용자 비용에 대하여 고려하였고 Table 12에 그 결과를 나타내었다. 도로에서의 점검 및 진단비용 중

**Table 11.** Initial Cost Analysis

LCC Elements		Cost(Million Won)
Planning and Design Cost	Basic Design Cost	126.87
	Detailed Design Cost	253.73
	Total	380.60
Construction Cost	Direct Construction Cost	7,291.20
	Indirect Construction Cost	2,406.10
	General Management Cost and Profit	1,239.50
	Total	10,936.80
Supervision Cost	Construction Supervision Cost	139.99
	Supervision Cost	24.75
	Total	164.74
Total		11,482.14

**Table 12. Maintenance and Repair Cost Analysis**

LCC Elements		Cost(Million Won)
General Management Cost	Labor Cost	-
	Ordinary Checkup Cost	-
	Etc.	-
Examination/Diagnosis Cost	Regular Inspection Cost	253.27
	Accuracy Inspection Cost	-
	Accuracy Safety Inspection Cost	253.27
Maintenance & Repair Cost	Repair Cost	612.57
	Shift Cost	675.90
	Reinforce Cost	-
	Total	1,288.47
User Cost	Vehicle Operation Cost	8,206.15
	Time Delay Cost	31,297.45
	Total	39,503.60
Total		41,045.34

**Table 13. Demolition and Disposal Cost Analysis**

LCC Elements		Cost(Million Won)
Demolition and Disposal Cost	Destruction Cost	172.08
	Disposal Cost	74.31
	Total	246.39
Salvage Cost	Waste Recycling Cost	1.64
	Total	1.64
Total		244.75

정밀 점검비는 안전점검 및 정밀안전진단 대가(비용산정) 기준에 준하여 산정하였다. 도로에 대한 예상 유지비용은 아스팔트 콘크리트포장에 대한 표준 유지관리비 산정 회귀곡선식<sup>19)</sup>을 이용하여 산정하고 국토 적용 시 고속도로 기준의 25%를 적용하여 산정하였다. 또한, 덧씌우기, 표면처리, 소파보수와 같은 도로의 보수비는 아스팔트포장도로에 대한 국토유지보수 통계자료<sup>20~22)</sup>를 이용하여 산정하였다.

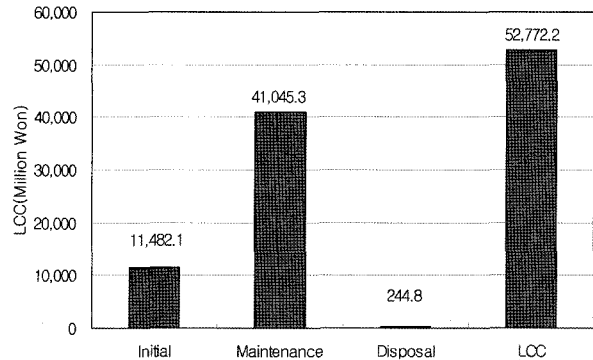
**3.2.3. 해체 및 폐기비에 대한 분석**

도로의 해체 및 폐기비에 대한 분석은 해체 및 폐기 비용과 잔존가치(수익) 비용에 대하여 고려하였고 Table 13에 그 결과를 나타내었다.

도로에서의 해체 및 폐기비용은 왕복 4차로 폭원 20 m에 대하여 아스팔트 표층과 기층을 제거하는 비용을 산정하였다. 여기서, 문헌자료<sup>23,24)</sup>에 근거하여 포장 해체 비용은 6,782 원/m<sup>2</sup>, 폐기 비용(해체장비 포함)은 58,576원/m<sup>3</sup>에 대하여 할인율 4.2%를 적용하여 비용을 산정하였다. 또한, 잔존가치에서는 분석기간이 끝나는 년차의 잔존가치는 남은 내구수명의 50%로 가정하고 도로공사 유지보수 공종별 단가인 잔존가치비 115원/m<sup>2</sup>에 대하여 할인율 4.2%를 적용하여 비용을 산정하였다.

**3.2.4. 도로에 대한 LCC 분석**

전술한 초기투자비용, 유지보수비용, 해체 및 폐기비용에



**Fig. 1. Life Cycle Cost Analysis for Road.**

대한 단계별 비용을 종합하여 LCC 결과를 산정하였으며, 이를 Fig. 1에 나타내었다. 전체 LCC 분석 결과 중 초기투자비용은 114.82억원(21.8%), 유지보수비용은 410.45억원(77.8%), 해체 및 폐기처분비용은 2.45억원(0.5%)으로 유지보수비용이 가장 큰 비중을 차지함을 알 수 있었다.

**3.3. 도로에 대한 편익 분석**

도로에 대한 편익으로 통행시간의 가치와 차량운행 비용의 감소로 인한 편익에 고려하였다. 통행시간 감소에 대한 편익은 사업시행으로 인한 통행시간 감소량을 평가기간 동안 만큼 산출하여 통행시간 가치를 곱해서 얻게 된다. 통행시간 가치는 차량통행 시간을 생산 활동에 투입했을 때 얻게 되는 생산품 또는 다른 용역의 가치를 따져서 얻는 방식을 통해 산정된다. 또한, 차량운행 비용 감소로 인한 편익은 사업시행으로 인하여 주행조건이 달라지는 것을 반영시켜서 연료, 엔진오일, 감가상각비 등을 고려하여 산정된다.

**3.3.1. 통행시간가치**

통행시간의 가치(Value of Time, VOT)는 통행시간 가치<sup>25)</sup>와 미래 교통량 조사 결과(Table 14 참조)를 바탕으로 도로의 수명 20년간의 총 통행시간의 가치를 산정하였다. 또한, 할인율은 4.2%, 평균속도는 설계 속도인 60 km/hr를 적용하였다. 현재 교통량 대비 미래의 예측 교통량의 차이에서 발생하는 통행시간의 가치를 금액으로 환산하여 Table 15에 나타내었다.

**3.3.2. 차량운행 비용 가치**

차량운행비(Vehicle Operating Cost, VOC)의 절감으로 인한 편익을 산출하기 위해서는 기존 운행비용과 사업 시행시 운행비용 차이를 원단위를 통해 산정하게 된다. 차량별 연료 소비량 및 차량운행비용<sup>23)</sup> 등을 이용하고, 미래 교통량 조사 결과(Table 14 참조)를 바탕으로 현재 교통량 대비 미래의 예측 교통량의 차이에서 발생하는 유류소비량, 엔진오일비, 타이어비, 유지 정비비, 감가상각비 등 차량운행비용의 절감으로 인한 가치를 금액으로 환산하여 Table 16에 나타내었다. 여기서도 역시 분석기간 20년, 할인율 4.2%를 적용하였다.

**Table 14.** Results of Traffic Census in Target Area

(Unit: EA/day)

Year	Car	Bus	Truck	Total
2005	19,037	598	8,822	28,457
2006	19,699	619	9,129	29,446
2007	20,361	639	9,435	30,435
2008	21,022	660	9,742	31,424
2009	21,684	681	10,049	32,413
2010	22,346	702	10,355	33,402
2011	23,087	725	10,698	34,510
2012	23,689	743	10,979	35,411
2013	24,308	763	11,265	36,336
2014	24,944	783	11,560	37,287
2015	25,597	803	11,862	38,262
2016	26,266	824	12,173	39,263
2017	26,953	846	12,491	40,290
2018	27,658	868	12,817	41,343
2019	28,382	890	13,153	42,425
2020	28,966	909	13,424	43,299
2021	29,563	927	13,701	44,191
2022	30,172	947	13,983	45,102
2023	30,793	966	14,271	46,030
2024	31,428	986	14,565	46,979

**Table 15.** VOT of Each Vehicle Type for Road

(Unit: Million Won)

	Car	Bus	Truck	Total
VOT	12,363	1,156	6,194	19,715

**Table 16.** VOC of Each Vehicle Type for Road

(Unit: Million Won)

VOC	Car	Bus	Truck	Total
Fuel consumption	112	8	72	194
Maintenance*	93	4	81	179
Total	206	12	155	373

\* Including the Cost for Engine oil, Tire, Maintenance and Depreciation

### 3.4. 도로에 대한 통합 평가

본 연구에서는 도로건설로 인한 환경적, 경제적, 사회적 영향을 산정하는데 있어, LCA 분석모델을 이용하여 도로 건설사업의 전체 life cycle에 대한 환경적 영향을 인간건강, 생태계, 자원 등에 미치는 영향으로 정량화하였고, LCC 분석모델을 이용하여 도로 건설사업의 전체 life cycle에 대한 발생비용을, BCA 분석모델을 이용하여 도로 건설사업으로 인하여 발생하는 통행시간의 감소와 차량운행비용의 감소 등에 대한 사회적 편익을 분석하였다. 이들 각각의 분석 결과를 종합하여 Table 17에 나타내었다.

도로의 life cycle에서 발생하는 환경영향은 LCC 분석결과, BCA 분석결과와 동일 지표로 평가할 수 있도록 화폐가치로 환산하였다. 결과는 총 141.80억원으로 인간건강, 생태계, 자원에 대한 영향이 각각 22.0%, 76.3%, 1.7%를 차지하는 것으로 나타났다. 도로 건설을 위하여 사용되는 초기투자

**Table 17.** Integrated Evaluation Result of Road

(Unit: million won)

Environmental Impact(ERoad)	Human Health	3,119
	Ecosystem Quality	10,817
	Resources	244
	Total	14,180
Life Cycle Cost (CRoad)	Initial Cost	11,482
	Maintenance and Repair Cost	41,045
	Demolition and Disposal Cost	245
	Total	52,772
Social Benefit (BRoad)	Value of Time	19,715
	Vehicle Operation Cost	373
	Total	20,088
TBL Integrated Evaluation Index (IEITBL_Road)	BRoad / (CRoad+ERoad)	0.30

비용은 114.82억원(21.8%), 유지보수비용은 410.45억원(77.8%), 해체 및 폐기처분비용은 2.45억원(0.5%)으로 유지보수비용이 가장 큰 비중을 차지함을 알 수 있었다. 도로에 대한 편익은 통행시간 감소로 인한 가치와 차량운행 비용의 감소로 인한 편익을 고려하였으며 총 200.88억원으로 나타났다.

이상과 같이 사회적, 환경적, 경제적 가치를 통합한 TBL 통합평가지수는 0.3으로 나타나 도로 건설사업으로 인한 사회적 편익보다는 도로건설로 야기되는 환경영향과 도로건설을 위하여 사용되는 비용이 큰 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 사회적 편익 부분에서 건설사업으로 인한 지역 개발 효과, 지역산업구조 변화와 같은 비교적 정량화되기 어려운 뿐만 아니라 정량화된 결과라 할지라도 신뢰도가 낮은 간접적인 편익항목이 고려되지 않았고, 또한 기존에 비용과 편익만을 고려하는 BCA와 달리 본 연구의 통합 모델에서는 환경에 대한 영향을 고려하였으며, 비용항목도 건설사업의 초기건설비만이 아닌 전체 life cycle을 고려하였기 때문에 통합평가지수는 1을 넘지 못하는 결과를 가져왔다고 해석할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 건설사업에 대한 환경적, 경제적, 사회적 평가모델을 개발하고, 이들 각 부문을 통합하는 방법론을 개발하여 건설사업의 지속가능성을 판단할 수 있는 시스템을 구축하기 위한 유용한 방법론으로 TBL 통합모델(Triple Bottom Line Integrated Model)을 제안하였다. 이를 바탕으로 도로건설에 대하여 국내외 환경 데이터베이스, 각 구조물의 설계관련 자료, 운영관리 실적, 폐기 실적 등의 자료조사와 본 연구에서 개발된 각 분석모델의 방법론에 따라 사례분석을 수행하였다. 통합 평가를 통하여 환경영향의 저감요소, 비용절감이 가능한 요소 및 사회적 편익의 증대요소 등 각 부분별 대안선택 및 개선의 여지를 파악할 수 있으며, 이러한 모델의 사례분석을 통해, 환경적으로 건전하고, 사회, 경제적으로 지속가능한 건설의 계획과 관리를 과학적으로 뒷받침할

수 있는 유용한 방법임을 입증하였다. 그러나 방법론의 실용성에 대해서는 정성적이며 불확실성을 내포한 사회적 요인들의 정량화가 뒷받침되어야 할 것이다.

본 연구에서 제안된 통합모델은 국가적 수준에서 평가되고 있는 지속가능성지수를 건설사업이라는 산업 수준에서 환경적, 사회적, 경제적 평가를 수행하고, 각 부문을 통합한 평가 모델을 제시하였다는 점에서 의미를 가진다고 할 수 있다. 현재까지 LCA기법을 이용하여 건설사업의 life cycle을 고려한 환경영향을 평가한 사례는 아직 많이 보고되지 않은 연구이기 때문에, 향후 본 연구에서 제안된 TBL 통합모델과 각 항목별 평가모델은 건설분야 뿐만 아니라 다른 산업에서도 충분히 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- Korby, J., O'keefe, P., and Timberlake, L., *The Earthscan Reader in Sustainable Development*, Earthscan Publication(1995).
- Munasinghe, M., *Environmental Economics and Sustainable Development*, The World Bank(1993).
- Graham, P., *Building Ecology: First Principles for a Sustainable Built Environment*, Blackwell Science(2003).
- Portney, Kent E., *Taking Sustainable Cities seriously: Economic Development, the Environment, and Quality of Life in American Cities*, MIT(2003).
- Craig A. Langston and Grace K. C. Ding, *Sustainable Practices in the Built Environment - Second edition*, Butterworth Heinemann(2001).
- European Commission, *Competitiveness of the Construction Industry : An Agenda for Sustainable Construction in Europe*, EC Working Group Report(2001).
- World Business Council for Sustainable Development, *Eco-efficiency: Creating More Value with Less Impact* (2000).
- Pre-Consulting Website: [http://www.pre.nl/simapro/inventory\\_databases.htm](http://www.pre.nl/simapro/inventory_databases.htm).
- Ecobilan Website: [http://www.ecobilan.com/uk\\_team.php](http://www.ecobilan.com/uk_team.php).
- Internet website: [http://www.koeco.or.kr/intro/record04\\_01.asp?search=2\\_4](http://www.koeco.or.kr/intro/record04_01.asp?search=2_4).
- Internet website: <http://www.kncpc.re.kr/lci/index.asp>.
- 적산연구회, 토목공사 일위대가표, 대전사(2004).
- 건설연구원, 건설공사 표준품셈(2004).
- Mark Goedkoop and Renilde Sprinisma, *The Eco-indicator 99 - A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report Third Edition*, PRe Consultants B.V.(2001).
- 産業技術綜合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター, 第一回日本版被害算定型影響評価ワークショップ - 人間の健康影響, 講演集(2002).
- 産業技術綜合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター, 第二回日本版被害算定型影響評価ワークショップ - 生物多様性の影響影響, 講演集(2002).
- 社団法人産業環境管理協會, 平成13年度 エネルギー・産業技術綜合開発機構委託, 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発 成果報告書, pp. 329~343(2002).
- 이민아, CVM을 통한 생태자원의 WTP 도출 비교, 강원대학교 석사학위논문, pp. 69~75(2000).
- EPA, *Costs and Benefits of Reducing Lead in Gasoline: Final Regulatory Impact Analysis*(1985).
- 시설안전기술공단, 도로교의 공용수명 연장방안 연구(2000).
- 서울특별시, 시설물 유지보수공사 설계지침(2001).
- 건설교통부, LCC 개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구(2001).
- 한국도로공사, 고속도로 LCC 분석기법 잠정 지침(안), (2001).
- 전국폐기물처리공제조합, 건설폐기물 성상별 TON당 처리단가(2003).
- 한국도로공사, 도로사업 투자분석기법 정립 연구(1999).