

토공사 환경오염물질 부하량 및 공사비를 이용한 장비조합방법 연구

강민호* · 박형근**

Kang, Min-Ho*, Park, Hyung-Keun**

A Study of the Combination Method for Earthwork Equipments Using the Environmental Loads and Costs

ABSTRACT

Great efforts have been made worldwide to reduce the Green House Gas (GHG) emission following the "Kyoto Protocol" declared during the United Nations Framework Convention on Climate Change in 1997. Many industries have restructured to meet the standard set by the Protocol. However, no clear guidance has been established for the purpose of reducing the GHG emission in construction industry. In addition, no significant effort has been made to conserve the energy during construction activities. For more effective energy saving in construction industry, it is essential to collect data about energy consumption, quantity of environmental emissions and costs. However, most studies on sustainable construction have been concentrated on the use of equipment, maintenance and repair works during construction due to the difficulties of collecting such data. This study suggests a method to select the most environmentally friendly equipment combination for earthwork with comparing environmental loads and costs using the database of Life Cycle Inventory in the Ministry of Knowledge Economy and Ministry of Environment of Korea.

Key words : LCA, Earthwork, Environmental Load, Green House Gas

초 록

1997년 "기후 변화에 관한 국제연합 규약의 교토의정서"가 채택된 이후 우리나라를 비롯한 세계의 여러 나라에서 이산화탄소를 포함한 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력을 진행해 왔다. 각 산업별로 온실가스 배출을 저감시키는 산업 구조로 개편 및 녹색 기업으로 체질 개선에 힘쓰고 있으나 타 산업에 비하여 건설 산업은 온실가스 배출의 효율적인 관리를 위한 정확한 배출량 저감을 위한 논의가 미흡한 상황이며 오히려 환경을 파괴시키는 산업이라는 오명을 가지고 있는 실정이다. 우리나라는 경제규모에 비해 환경오염물질 배출량이 많으며 이는 에너지 다소비 업종의 비중 증가에 따른 것이다. 이에 따라 에너지 다소비업종 중 하나인 건설관련 공사에 대한 효율적인 에너지 절약이 이루어지지 않은 문제점이 대두되고 있다. 뿐만 아니라 근래에는 대규모 건설이 많으므로 에너지 절감효과를 갖기 위해서는 건설공사의 전과정(Life Cycle) 중 시공단계에서 발생하는 에너지소비량, 환경오염물질 배출량, 환경비용 등 기본적인 데이터베이스 및 활용방안 개발이 필요하다. 그러나 건설현장 특성상 정량화가 어렵다는 이유 등으로 친환경 건설에 관한 연구는 대부분 구조물 사용 및 유지·보수 단계에 집중되어 있다. 이에 본 연구에서는 지식경제부와 환경부에서 제시하는 LCI DB를 활용하여 굴착작업 시 발생하는 환경오염물질 배출량을 산출하고 환경오염물질별 환경비용을 환산하여 토공사에 대한 환경경제성을 평가하고자 한다.

검색어 : 환경부하량, LCA, 토공사, 굴착작업

* 대림산업(주) (kmh@daelim.co.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 충북대학교 교수 (Corresponding Author · Chungbuk National Univ. · parkhk@chungbuk.ac.kr)

Received March 25 2013, Revised March 29 2013, Accepted April 2 2013

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라는 경제규모에 비하여 환경오염물질 배출량이 많으며 이는 에너지 다소비업종의 비중증가에 따른 것이다. 그 중 건설업은 다소비업종의 한 분야이며 건설공사에 대한 효율적인 에너지 절약이 이루어지지 않는다는 문제점이 대두되고 있다. 특히 시공단계는 토목공사가 대형화되면서 기계화시공으로 이루어지는 부분이 많아 에너지소비량 및 환경오염물질 배출량이 전체 공정 중 큰 부분을 차지한다. 또한 시공단계에서 LCA(Life Cycle Assessment)를 산정할 경우 한 가지 장비로 통일하여 산정하고 있다. 그러나 실제로 많은 장비와 건설기계 크기 및 현장여건에 따라 다양한 장비가 투입되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 건설분야 에너지 절약효과를 갖기 위해서는 전과정(Life Cycle) 중 시공단계에서 발생하는 에너지소비량, 환경오염물질 배출량, 환경비용 등에 관한 기본적인 DB구축 및 활용방안 개발이 필요하다. 또한 일본 표준보패의 경우 장비 별 대기오염물질 기준이 제시되어 있지만 국내 표준품셈의 경우에는 그렇지 못한 실정이다. 향후에는 환경의 영향이 커지므로 표준보패나 표준품셈에서는 대기오염물질 기준이 아닌 환경부하량 기준이 제시되어야 할 것이다.

현재 지경부, 환경부에 의하여 에너지 소비에 대한 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory, LCI) DB 작업이 많이 진행되었지만, 이를 활용하여 환경성을 평가하는 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 LCI DB를 활용한 토공사의 환경성 평가와 환경오염에 의한 경제적 손실을 분석하여 현재 건설초기단계인 기획단계에서 환경성 분석을 통한 장비조합의 객관적인 의사결정 기초자료로 활용하는데 연구목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

일반적으로 모든 토목공사의 기초는 토공사이며 총 공사비의 25~50%를 차지하는데 이는 대부분 기계화시공으로 이루어져 환경부하량이 많을 것으로 예상된다. 지금까지의 건설공사에서의 LCA 산정 연구는 자재의 환경부하량 산출방법에 대한 연구가 대부분 수행되었다. 그리고 일부 연구에서는 시공단계에서의 환경부하량이 산정된 자료가 있다. 그러나 산정 방법이 이미 시공된 자료의 경우사용량이나 대한건설진흥회의 건설장비 작업량 데이터로 일괄적으로 환경부하량을 산정하였고 토공사에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 연구범위를 표준품셈을 바탕으로 토공사의 불도저와 굴삭기의 환경부하량 산정을 연구범위로 제한하였다. 그리고 설계 토공량 4,000m³ 작업 시 환경부하량을 산정하여 최적의 장비조합을 제시하고자 한다. 연구방법은 굴삭작업 시 사용되는 경우에 대한 환경부하량을 산출하기 위하여 LCA기법을

활용하였다. 따라서 본 연구에서는 토공사 환경부하량산정 방법을 제시하고 토공사에서의 환경부하량을 기존의 연구보다 정확히 산정할 수 있는 방안을 마련하고자 한다.

1.3 연구동향

국내·외에서는 건설분야 LCA관련하여 많은 연구는 진행되지 않는 실정이다. 일부 해체 및 폐기 단계에서의 환경부하량 산정 연구 또는 자재에 대한 환경부하량 산정 연구가 수행되어져 왔지만 아직 건설관련 LCA분석이 초기단계에 머물러 있어 더욱 많은 연구가 필요한 실정이다. 박광호(2000)는 고속도로 시공단계에서 투입되는 건설자재의 생산단계, 시공단계, 유지보수단계, 해체 및 재활용단계에서 발생하는 환경부하량을 평가하였다. 각 단계에서의 환경부하량은 단계별 에너지 소비량에 에너지원별 환경오염물질 배출계수를 적용하여 산정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 LCA의 개념

LCA란 어떤 제품, 공정, 활동과 관련된 환경적 부담을 사용된 물질, 에너지 그리고 환경에 배출된 폐기물을 규명하여 정량화하고 이러한 에너지의 사용과 환경배출의 영향을 평가하여 환경개선을 위한 기회를 찾아 평가하는 일련의 과정을 의미한다.

건설부문 LCA는 건설사업에 요구되는 자재들의 제조공정과 이들을 조합하여 공공시설물의 전 과정동안 발생하는 환경부하 즉, 오염, 폐수, 비산먼지 등을 정량화하여 환경성능을 평가하고 개선방안을 모색하는 의사결정도구로서 건설환경에 대한 사후처리 개념이 아닌 사전예방을 통하여 오염발생을 저감시킬 수 있는 적극적이고 체계적인 평가방법이며, 앞으로 ‘환경과 조화로운 지속 가능한 개발’의 이념을 실현시킬 수 있는 환경성 평가도구이다.

2.2 LCA 방법론

LCA는 ISO 14001의 환경관리 시스템을 구현하기 위한 하나의 도구로서 사용될 수 있으며, LCA의 순서는 목적 및 범위설정(Goal and Scope Definition), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가(Impact Assessment), 결과해석(Interpretation) 등 4단계로 구성된다.

2.2.1 목적 및 범위설정

목적 및 범위설정은 LCA의 첫 번째 단계로 연구 목적이 무엇이며 결과를 어디에 적용할 것인가를 설정하는 과정이다. LCA는 사용목적에 따라 수집하는 자료의 분석방법, 결과 등이 달라지기 때문에 먼저 LCA를 어떤 목적으로 사용할 것인지를 명확히

해야 한다.

연구의 범위에는 시스템 경계, 기능단위, 영향평가 방법, 데이터의 요구조건, 연구의 가정 및 제한요인 등이 포함된다. 여기서, 기능단위란 제품시스템에 의해 발생하는 중요한 기능을 나타내는 단위를 말하며, 이 기능단위는 목록분석을 수행할 때 기준이 된다.

2.2.2 목록분석

목록분석은 연구범위에서 설정한 시스템을 대상으로, 시스템으로 들어오고 나가는 모든 에너지, 원료, 제품, 부산물 및 환경오염물 등의 종류와 양을 기록하여 목록화 하는 과정으로 환경부하를 계산하는 과정이다. 즉, 전과정목록분석은 시스템으로 투입되는 입력항목과 배출되는 출력항목을 정량화하는 과정이다.

목록분석 과정은 반복적이라는 속성을 지니고 있다. 즉, 목표 및 범위 정의에 규정된 연구목적, 시스템 경계, 데이터 질 관련 제반 요건 등을 염두에 두고 목록분석이 이들 규정사항과 일치하는지의 여부를 지속적으로 검토하여야 한다. 목록분석 단계는 일반적으로 공정도 작성, 데이터 수집, 각 공정별 환경부하 계산 및 합산과정으로 이루어진다.

2.2.3 영향평가

영향평가는 목록분석 단계에서 얻어진 데이터를 근거로 각 환경부하 항목에 대한 결과를 각 환경영향 범주로 분류하여 각 공정별, 카테고리별 에너지 및 자원소비량 그리고 환경오염 부하량 등을 평가하는 기술적, 정량적, 정성적 과정이다. 이러한 영향평가는 분류화, 특성화 및 가중화의 3단계로 구성된다.

2.2.4 결과해석

결과해석은 전 과정평가를 통해 도출된 목록분석과 영향평가의 결과를 단독, 종합하여 평가, 해석하는 단계이다.

3. 굴착작업 환경부하량 산출

3.1 굴착작업 토공량 및 에너지소비량 산출

토공사는 규모의 대형화로 대형 기계식 장비가 투입되고 있으며 이로 인해 직접적인 에너지 소비가 발생되어진다. 장비 사용으로 인한 에너지 소비는 장비의 연료소비에 의한 것으로 한정하며 토공사시 이용되는 장비의 에너지 소비량은 각 현장마다 이용되는 장비의 노후정도, 운전자의 숙련도 등에 따라 상이할 수 있다.

다음은 표준품셈을 바탕으로 변수 값을 제시하였다. 각각의 변수에 대해 모두 고려하기는 불가능하므로 가장 일반적인 값을 적용하였다.

3.1.1 불도저 변수

불도저 변수는 장비의 크기별로 Q값이 달라지므로 각 장비에 대한 Q값을 산정하기 위해 표준품셈을 바탕으로 변수를 제시하였다.

$$\text{산출식} : Q = \frac{60 \cdot q \cdot f \cdot E}{C_m} \quad q = q^0 \times e$$

Q : 1시간당 작업량(m^3/h) q : 1회굴착압토탈량(m^3)

f : 토랑환산계수 E : 작업효율

C_m : 사이클타임(min) q^0 : 배토탈의 용량(m^3)

e : 구배계수

3.1.2 불도저 에너지 소비량

LCA 수행을 위하여 불도저의 작업량에 대한 에너지 소비량을 산출하여야 하며 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\text{산출식} : Q_k = \frac{C_k}{E_k}$$

여기서, E_k : 장비별 작업량 당 에너지 소비량

C_k : k 장비의 연료소비량

Q_k : k 장비의 작업량

Table 1. q^0 of Different Bulldozer Standard (Standard Estimate, 2009)

Ton	4	7	10	12	13	19	32
Type							
Crawler Bulldozer	0.5	1.1	1.5	2.0	1.5	3.2	5.5

Table 2. E Value of Different Transportation Distance (Standard Estimate, 2009)

Distance (m)	10	20	30	40	50	60	70	80
E Value	1.00	0.96	0.92	0.88	0.84	0.80	0.76	0.72

Table 3. E Value of Different State of Soil (Standard Estimate, 2009)

Field Condition	Natural State			Disheveled State		
	Good	Normal	Bad	Good	Normal	Bad
Soil Name						
Sand·Sandy Soil	0.80	0.65	0.50	0.85	0.70	0.55
Soil with Gravel·Cohesive Soil	0.70	0.55	0.40	0.75	0.60	0.45
Cataclastic Rock					0.35	0.25

Table 4. V_1, V_2 Value of Caterpillar Type (Standard Estimate, 2009)

Division Standard (ton)	Advance Speed (m/min)				Reverse Speed (m/min)		
	1 st shift	2 nd shift	3 rd shift	4 th shift	1 st shift	2 nd shift	3 rd shift
4 (Ultra Wetlands)	40	57	100	-	63	85	-
7	43	67	92	116	53	78	107
10	42	64	88	116	50	75	105
12	40	55	75	107	48	70	100
13 (Wetlands)	40	55	75	-	48	70	-
19	40	55	75	103	46	70	98
32	40	52	70	91	43	58	79

Table 5. Main Fuel Mileage of Different Bulldozer Standard (Standard Estimate, 2009)

Name	Division	Standard (ton)	Main Fuel (L/hr)
Crawler Bulldozer		7	9.0
		10	12.5
		12	14.6
		19	25
		32	41.6
Wetland Bulldozer		4	5.4
		13	14.6

Table 6. Energy Consumption of Bulldozer

Division	Amount of Earthwork Design : 4,000m ³ (Assumption)						
	3 ton	7 ton	10 ton	12 ton	13 ton	19 ton	33 ton
Variable							
q_0	0.5	1.1	1.5	2.0	1.5	3.2	5.7
e	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
E	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
V_1	40	43	42	40	40	40	92
V_2	63	53	50	48	48	46	110
Earth Volume (m ³ /day)	112.24	241.27	319.15	410.77	308.08	647.18	2103.81
Number of Bulldozer	36	17	13	10	13	7	2
Energy Consumption (ton/day)	43.20	72	100.	116.8	116.8	200	339.2

3.1.3 굴삭기 변수

굴삭기 변수는 장비의 크기별로 Q값이 달라지므로 각 장비에 대한 Q값을 산정하기 위해 표준품셈을 바탕으로 변수를 제시하였다.

$$\text{산출식} : Q = \frac{3600 \cdot q \cdot k \cdot f \cdot E}{C_m}$$

Table 7. Bucket Coefficient (Standard Estimate, 2009)

Field Condition	K
Easy to excavate soft soil, The sand frequently full in the bucket, Normal soil	1.10

Table 8. E value of Different State of Soil (Standard Estimate, 2009)

Soil Name	Natural State			Disheveled State		
	Good	Normal	Bad	Good	Normal	Bad
Sandy Soil	0.85	0.70	0.55	0.90	0.75	0.60
Soil with Gravel· Cohesive Soil	0.75	0.60	0.45	0.80	0.65	0.50
Cataclastic Rock					0.45	0.35

Table 9. 1 Cycle Time of Different Standard (Standard Estimate, 2009)

Standard (m ³)	Cycle Time(sec)			
	45°	90°	135°	180°
0.12	13	15	18	20
0.2	13	15	18	20
0.4	13	15	18	20
0.7	16	18	20	22
1.0	17	19	21	23
2.0	22	25	27	30

Q : 1시간당 작업량(m³/h) q : 버킷의 산적용적(m³)
 k : 버킷계수 f : 토랑환산계수
 E : 작업효율 C_m : 사이클타임(sec)

3.1.4 굴삭기 에너지소비량

LCA 수행을 위하여 굴삭기의 작업량에 대한 에너지 소비량을 산출하여야 하며 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\text{산출식} : Q_k = \frac{C_k}{E_k}$$

여기서, E_k : 장비별 작업량 당 에너지 소비량
 C_k : k 장비의 연료소비량
 Q_k : k 장비의 작업량

3.2 토공작업 시 소요되는 경유에 대한 전과정 목록분석

비점이 약 200~370 범위에 속하는 선박, 기관차, 자동차 등의 각종 기계 및 디젤엔진에 이용되는 연료유 또는 기타 가공유 원료를 경유라고 정의하고 본 연구에서는 경유 생산에 대한 표준 전과정을

Table 10. Main Fuel Mileage of Different Shovel Standard (Standard Estimate, 2009)

Standard (m^3)	Main Fuel (L/hr)
0.12	3.2
0.2	5.0
0.4	9.9
0.7	11.6
1.0	19.5
2.0	32.8

Table 11. Energy Consumption of Shovel

Variable	Amount of Earthwork Design : 4,000 m^3 (Assumption)					
	Standard					
	0.12 (m^3)	0.20 (m^3)	0.40 (m^3)	0.70 (m^3)	1.00 (m^3)	2.00 (m^3)
q	0.12	0.20	0.40	0.70	1.00	2.00
K	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
f	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
E	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Cm	15.	15	15	18	19	25
Earth Volume (m^3/day)	141.93	236.54	473.09	689.92	933.73	1419.26
Number of Bulldozer	29	17	9	6	5	3
Energy Consumption (ton/day)	25.6	40	79.2	92.8	156	262.4

Table 12. Environmental Impact of Diesel

Division	Unit	Characterization Environmental Impact	Environmental Cost (won)
Resource Depletion	kg Sb-eq/kg	2.80E+01	5,140
Global Warming	kg CO2-eq/kg	3.83E+02	15.13
Ozone Destruction	kg CFC11-eq/kg	1.28E-03	85,025
Oxide Generation Photochemical	kg Ethene-eq/kg	1.90E-04	7,449
Acidification	kg SO2-eq/kg	2.96E+00	11,571
Eutrophication	kg PO43-eq/kg	1.27E-02	35,599

Table 13. Result of Normalization and Weighting of Diesel

(unit:kg-eq/kg)

Division	Characterization Result	Normalization Factor	Normalization Result	Weighting Factor	Weighting Result
Resource Depletion	2.80E+01	2.49E+01	1.12E+00	0.250	2.81E-01
Global Warming	3.83E+02	5.12E+03	7.48E-02	0.248	1.86E-02
Ozone Destruction	1.28E-03	4.07E+01	3.14E-05	0.161	5.06E-06
Oxide Generation Photochemical	1.90E-04	1.03E+01	1.84E-05	0.024	4.43E-07
Acidification	2.96E+00	3.98E+01	7.44E-02	0.058	4.31E-03
Eutrophication	1.27E-02	1.31E+01	9.69E-04	0.035	3.39E-05

목록분석 데이터를 활용하고자 한다.

Crude Oil, Naphtha, NaOH, Hydrogen을 원료로 하는 경우는, 원유를 정제하여 나온 물질들을 원하는 품질을 가지는 비율로 섞어서 제품을 생산하며 각 공정에서 발생하는 환경부하량은 문헌자료를 토대로 계산하였으며 그 데이터는 지식경제부 및 환경부에서 기 구축된 LCI DB를 활용하여 본 연구에 적용한다.

3.2.1 경유의 특성화 환경영향 분석

경유에 대한 전과정 목록분석 결과를 토대로 특성화된 환경영향을 분석한다. 특성화 환경영향을 도출하기 위해 사용된 환경영향범주는 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화 등이며 2009년 저탄소 녹색성장을 위한 과학기술 정책 자료에 의한 그 분석결과는 Table 12와 같다.

3.3 경유의 정규화 및 가중화

경유에 대한 영향범주별 정규화 및 가중화 결과는 Table 13과 같다.

정규화값의 산출은 아래의 식과 같은 과정을 통해 이루어진다. 즉, 특성화를 통해 얻어낸 특성화결과를 산출된 정규화인자로 나누어줌으로써 특성 상황에 기준한 영향의 상대적 중요성을 보여지게 된다.

여기서, 정규화인자와 특성화인자는 지식경제부에서 제시한 값을 이용하였다. 정규화값 = (C_i / N_i)

Table 14. Environmental Load of Different Bulldozer Standard at Amount of Earthwork 4000m³

(unit: kg-eq/kg)

	4ton	7ton	10ton	12ton	13ton	19ton	32ton
Resource Depletion	3.72E+02	2.92E+02	3.11E+02	2.79E+02	3.63E+02	3.35E+02	3.18E+02
Global Warming	2.45E+01	1.93E+01	2.05E+01	1.84E+01	2.39E+01	2.21E+01	2.10E+01
Ozone Destruction	6.69E-03	5.27E-03	5.60E-03	5.03E-03	6.54E-03	6.03E-03	5.73E-03
Oxide Generation Photochemical	5.85E-04	4.61E-04	4.89E-04	4.40E-04	5.71E-04	5.27E-04	5.01E-04
Acidification	5.70E+00	4.49E+00	4.77E+00	4.28E+00	5.57E+00	5.13E+00	4.88E+00
Eutrophication	4.49E-02	3.53E-02	3.75E-02	3.37E-02	4.38E-02	4.04E-02	3.84E-02

Table 15. Environmental Load of Different Shovel Standard at Amount of Earthwork 4000m³

(unit: g-eq/kg)

	0.12m ³	0.2m ³	0.4m ³	0.7m ³	1m ³	2m ³
Resource Depletion	1.77E+02	1.62E+02	1.70E+02	1.33E+02	1.86E+02	1.88E+02
Global Warming	1.17E+01	1.07E+01	1.12E+01	8.78E+00	1.23E+01	1.24E+01
Ozone Destruction	3.20E-03	2.93E-03	3.07E-03	2.40E-03	3.36E-03	3.39E-03
Oxide Generation Photochemical	2.79E-04	2.56E-04	2.68E-04	2.10E-04	2.94E-04	2.96E-04
Acidification	2.72E+00	2.49E+00	2.61E+00	2.04E+00	2.86E+00	2.89E+00
Eutrophication	2.14E-02	1.96E-02	2.06E-02	1.61E-02	2.25E-02	2.27E-02

Table 16. The Equipment Combination of a High Environmental Load at Amount of Earthwork 4000m³

(unit: kg-eq/kg)

	Bulldozer 4ton	Shovel 2m ³	Total
Resource Depletion	3.72E+02	1.88E+02	5.60E+02
Global Warming	2.45E+01	1.24E+01	3.69E+01
Ozone Destruction	6.69E-03	3.39E-03	1.01E-02
Oxide Generation Photochemical	5.85E-04	2.96E-04	8.81E-04
Acidification	5.70E+00	2.89E+00	8.59E+00
Eutrophication	4.49E-02	2.27E-02	6.76E-02

Table 17. The Equipment Combination of a Low Environmental Load at Amount of Earthwork 4000m³

(unit: kg-eq/kg)

	Bulldozer 12ton	Shovel 0.7m ³	Total
Resource Depletion	2.79E+02	1.33E+02	4.12E+02
Global Warming	1.84E+01	8.78E+00	2.72E+01
Ozone Destruction	5.03E-03	2.40E-03	7.42E-03
Oxide Generation Photochemical	4.40E-04	2.10E-04	6.49E-04
Acidification	4.28E+00	2.04E+00	6.32E+00
Eutrophication	3.37E-02	1.61E-02	4.97E-02

3.4 굴착작업 LCA분석 및 결과

토공사의 굴착작업은 불도저와 굴삭기의 조합으로 이루어져 있으므로 이 두 장비의 조합에 따른 환경부하량의 합을 산정하였다. 환경부하량이 높은 조합과 낮은 조합을 비교함으로써 환경부하량 크기의 상대적인 크기를 알 수 있다. 본 논문에서는 설계토공량 4000m³시의 환경부하량을 계산함으로써 각 장비 크기 별 부하량 크기를 알 수 있었다.

3.4.1 설계토공량 4000m³시 각 장비 별 환경부하량 분석

각 장비별 환경부하량을 분석한 결과는 Table 14, 15 와 같다. 이는 각 인자 별 환경부하량을 모두 표현된 것이 며 이를 바탕으로 Table 16, 17과 같은 결과 값이 도출 되었다. 분석 결과 불도저 4톤이 가장 환경부하량이 높았고 불도저 12톤이 가장 환경부하량

이 낮은 것을 알 수 있었다. 또한 굴삭기에서는 2m³이 가장 높은 환경부하량을 나타내었고 0.7m³이 가장 환경부하량이 낮은 것을 알 수 있었다.

이러한 LCA 평가를 통해 토공사 단계에서 설계토공량이 4000 m³시 환경부하량이 높은 조합과 낮은 조합의 부하량의 차이가 약 1.36배 나타나는 것을 알 수 있었다. 가정은 장비가 큰 것일수록 환경부하량이 클 것이라 예상했지만 각 장비의 연비 차이가 환경 부하량에 가장 영향을 크게 주는 것을 알 수 있었다. 이러한 토공 장비의 조합에 따라 환경부하량을 감소시킬 수 있을 것이다.

3.4.5 굴착작업 환경비용환산

1) 설계토공량 4000m³ 시 환경비용 산출

LCA를 통한 환경비용을 환산하기 위해 Table 12를 이용하여

Table 18. Environmental Cost Calculation of Bulldozer

(unit: won)

	4ton	7ton	10ton	12ton	13ton	19ton	32ton
Resource Depletion	1,910,148	1,503,357	1,596,703	1,434,576	1,864,949	1,719,526	1,635,024
Global Warming	371	292	310	279	362	334	318
Ozone Destruction	569	448	476	427	556	512	487
Oxide Generation Photochemical	4	3	4	3	4	4	4
Acidification	65,98	51,92	55,15	49,55	64,41	59,39	56,47
Eutrophication	1,597	1,257	1,335	1,199	1,559	1,437	1,367
Total	1,978,669	1,557,286	1,653,980	1,486,038	1,931,849	1,781,209	1,693,676

Table 19. Environmental Cost Calculation of Shovel

(unit: won)

	0.12m ³	0.2m ³	0.4m ³	0.7m ³	1m ³	2m ³
Resource Depletion	911,84	835,19	875,48	683,88	958,02	966,86
Global Warming	177	162	170	133	186	188
Ozone Destruction	272	249	261	204	285	288
Oxide Generation Photochemical	2	2	2	2	2	2
Acidification	31,497	28,849	30,241	23,622	33,092	33,397
Eutrophication	762	698	732	572	801	808
Total	944,550	865,159	906,890	708,412	992,388	1,001,549

Table 20. Ownership Cost Coefficient of Bulldozer

Standard	Hourly Coefficient (10 ⁻⁷)	Redemption Cost Coefficient	Servicing Cost Coefficient	Maintenance Coefficient	Total
Bulldozer 4, 7, 10, 12, 13, 19, 32ton Common		750	583	430	1,763

Table 21. Ownership Cost Coefficient of Shovel

Standard	Hourly Coefficient (10 ⁻⁷)	Redemption Cost Coefficient	Servicing Cost Coefficient	Maintenance Coefficient	Total
Shovel 0.12, 0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 2.0 Common		900	700	288	1,888

계산하였다. 환경비용분석 결과 Table18에서와 같이 불도저 4톤이 1,978,669원으로서 가장 환경비용이 높았고 12톤이 1,486,038원으로서 환경비용이 가장 낮았다. 또한 Table19에서 굴삭기는 2m³이 1,001,549원으로서 가장 환경비용이 높았고 0.7m³이 708,412원으로서 가장 환경비용이 낮았다.

광화학산화물생성 영향범주의 환경비용이 작은 이유는 특성화단계에서 특성화 결과값이 낮을 뿐 아니라 가중치 또한 낮아 금액으로 환산 시 작은 금액으로 환산되었기 때문에 이와 같은 결과가 도출 되었다.

4. 굴착작업 공사비 산출

4.1 불도저, 굴삭기 공사비 산출 방법

불도저 공사비 산출 시 고려해야할 요소는 건설기계 가격(원), 상각비계수, 정비비계수, 관리비계수 등이 있으며 시간당 손로 계

수는 각 계수의 합으로 이루어져 있다. 경우는 리터당 1,600원을 기준으로 산정하였다.

4.1.1 불도저 공사비 산출

불도저 공사비 산출결과는 Table22와 같으며 설계토공량이 4000m³ 시 불도저의 공사비 산출결과 불도저 4톤의 장비가 가장 큰 공사비를 나타내었고 19톤 장비가 가장 낮은 공사비를 나타내었다.

4.1.2 굴삭기 공사비 산출

굴삭기 공사비 산출결과는 Table23과 같으며 설계토공량이 4000m³ 시 굴삭기의 공사비 산출결과 굴삭기 0.12m³의 장비가 가장 큰 공사비를 나타내었고 0.7m³ 장비가 가장 낮은 공사비를 나타내었다. 이는 공사기간에 가장 큰 영향을 받기 때문에 분석 되었다.

Table 22. Calculation of Bulldozer Construction Costs

	4T	7T	10T	12T	13T	19T	32T
Hourly Rental fee (won)	5,311.91	9,740.57	21,525.48	25,392.66	21,305.62	25,040.77	33,257.23
8 Hours Rental fee (won)	42,495	77,925	172,204	203,141	170,445	200,326	266,058
Driver Unit Wage (won)	100,237	100,237	100,237	100,237	100,237	100,237	100,237
Rental fee +Driver Unit Wage (won)	142,732	178,162	272,441	303,378	270,682	300,563	366,295
Construction Period (day)	36	17	13	10	13	7	4
Diesel Consumption (L)	1555	1224	1300	1168	1518	614	1400
Diesel Price (won)	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
Diesel Cost (won)	2,488,320	1,958,400	2,080,000	1,868,800	2,429,440	983,040	2,240,000
Total Cost (won)	7,626,685	4,987,147	5,621,731	4,902,583	5,948,306	3,086,982	3,705,179

Table 23. Calculation of Shovel Construction Costs

	0.12m ³	0.2m ³	0.4m ³	0.7m ³	1m ³	2m ³
Hourly Rental fee (won)	7,141.15	10,597.6	12,453.4	18,961.95	23,233.2	53,395.6
8 Hours Rental fee (won)	57,129	84,781	99,627	151,696	185,866	427,165
Driver Unit Wage (won)	100,237	100,237	100,237	100,237	100,237	100,237
Rental fee +Driver Unit Wage (won)	157,366	185,018	199,864	251,933	286,103	527,402
Construction Period (day)	29	17	9	6	5	3
Diesel Consumption (L)	742.4	680	712.8	556.8	780	787.2
Diesel Price (won)	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
Diesel Cost (won)	1,187,840	1,088,000	1,140,480	890,880	1,248,000	1,259,520
Total Cost (won)	5,751,460	4,233,303	2,939,258	2,402,476	2,678,513	2,841,725

5. 공사비와 환경비용을 고려한 장비선정

5.1 최적 장비조합 선정 방법

Table 18, Table 19에서 산정된 환경비용과 Table 22, Table 23에서 산정된 공사비의 합으로서 최적장비 조합을 선정하였다.

5.2 최적 장비조합 선정 결과

공사비와 환경비용의 합계로서 경제성측면과 환경성측면이 고루 갖춰진 장비를 도출하였다. Table 24는 불도저 최적장비 선정결과 불도저 19톤이 공사비 측면과 환경성 측면에서 유리한 것을 알 수 있었다.

그리고 Table 25는 굴삭기 규격별로 공사비와 환경비용의 합계로서 경제성측면과 환경성측면이 고루 갖춰진 장비를 보여주고 있다. 분석결과 굴삭기 0.7m³이 공사비 측면과 환경성 측면에서 유리한 것을 알 수 있었다.

이를 통하여 최적 장비조합은 불도저 19톤과 굴삭기 0.7m³의 장비조합이 친환경적이면서 경제적인 조합인 것을 알 수 있었다.

Table 24. Sum of The Construction Costs and The Environmental Costs of Bulldozer (unit: won)

Division	Construction Cost (Ranking)	Environmental Cost (Ranking)	Total	Ranking
4t	7,626,685 (1)	1,978,669 (1)	9,605,354	1
7t	4,987,147 (4)	1,557,286 (6)	6,544,433	4
10t	5,621,731 (3)	1,653,980 (5)	7,275,712	3
12t	4,902,583 (5)	1,486,038 (7)	6,388,621	5
13t	5,948,306 (2)	1,931,849 (2)	7,880,155	2
19t	3,086,982 (7)	1,781,209 (3)	4,868,192	7
32t	3,705,179 (6)	1,693,676 (4)	5,398,855	6

공사비가 환경비용과 비교 했을 때 상대적으로 금액이 높아 순위가 공사비를 따라가는 양상을 보이는 한계를 보였다. 하지만 대규모 공사 시 환경적 측면을 고려하지 않을 수 없기 때문에 환경비용에 대한 가중치를 적용 한다고 하면 경제성 및 환경성에 최적화 된 장비조합 선정을 할 수 있을 것이다.

Table 25. Sum of The Construction Costs and The Environmental Costs of Shovel (unit: won)

Division	Construction Cost	Environmental Cost	Total	Ranking
0.12m ³	5,751,460	944,550	6,696,010	1
0.2m ³	4,233,303	865,159	5,098,461	2
0.4m ³	2,939,258	906,890	3,846,148	3
0.7m ³	2,402,476	708,412	3,110,888	6
1.0m ³	2,678,513	992,388	3,670,901	5
2.0m ³	2,841,725	1,001,549	3,843,274	4

6. 결론

본 연구에서는 토공사시 환경오염물질을 적게 배출 가능한 방안을 제시하고, 토공사시 환경영향평가에 대응하기 위한 기초 자료로서 유용하게 활용하도록 하였다. 불도저, 굴삭기의 사례를 근거로 정량적인 환경부하량을 전과정평가에 적합한 프로세스를 통하여 산출하였고 이를 통한 장비선택 개선방안을 제시하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 설계토공량이 같을 경우 장비의 조합에 따라 환경부하량이 달라지는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 LCA분석을 통하여 최소화된 환경부하량 장비조합을 선정할 수 있다.
- (2) 환경부하량과 공사비를 고려한 굴착작업 최적 장비 조합 선정결과 불도저 19톤과 굴삭기 0.7m³의 장비조합이 가장 친환경적이며 경제적인 장비 조합이라는 것을 알 수 있었다.
- (3) 지금까지의 건설사업 진행 시 사업비절감 방안만 고려하였다. 앞으로 환경 친화적인 건설문화 정착을 위해서는 환경적인 요인을 배제할 수 없을 것이다. 따라서 향후 사업계획 시 엔지니어들은 타당성분석과 경제성 분석 뿐 아니라 LCA분석을 통하여 친환경적이고 경제성도 좋은 최적의 공사수행을 해야 할 것이다.

감사의글

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

Ahn, J.-P., Park, K.-H., Seo, J.-W. (2005). "A case study on the value engineering & life cycle cost for the life cycle assess-

ment." *KSCE Conference & Civil Expo, KSCE*, pp. 2217-2220 (in Korean).

Beom, S.-W., Kim, M.-H., Park, T.-G. (2003). "A study on the case study LCA analysis for the education and research building of S university." *Proceedings of KICEM Annual Conference, KICEM*, pp. 465-468 (in Korean).

Cha, C., Kwon, S.-H., Kwon, S.-Y., Lim, B.-S., Park, H.-C. (2005). "Environmental impact assessment using LCA (life cycle assessment) methodology." *KSCE Journal of Civil Engineering, KSCE* Vol. 53, No. 6, pp. 62-69 (in Korean).

Choi, Y.-K. (2007). *A study on the GIS based environmental impact evaluation for route alignment*, MSc Thesis, Ajou University, Korea (in Korean).

Hwang, Y.-W., Park, K.-H., Seo, S.-W. (2000). "Assessment of CO₂ emissions from road construction activities." *KSCE Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 20, No. 1B, pp. 113-121 (in Korean).

Jeon, M.-H., Lee, H.-S., Park, M.-S., Shin, J.-H. (2009). "Analysis of greenhouse gas (GHG) emission factors during the construction phase." *Proceedings of KICEM Annual Conference, KICEM*, pp. 260-265 (in Korean).

Jo, K.-H., Kim, Y.-S., Park, B.-Y. (2005). "Evaluation of the environmental load of external wall system by using the full scale life cycle assessment." *KSCE Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 53, No. 6, pp. 62-69 (in Korean).

Jung, Y.-S., Choi, K.-S., Kang, J.-S., Lee, S.-E. (2008). "Development of life cycle assessment program(K-LCA) for estimating environmental load of buildings." *Architectural Institute of Korea magazine, AIK*, Vol. 24, No. 5, pp. 259-266 (in Korean).

Kang, M.-H. (2011). *The selection method for excavation equipments using the environmental loads and costs*, MSc Thesis, Chungbuk National University (in Korean).

Kim, C.-Y., Kim, H.-K. (2009). "BIM-based green house gas emission accounting for cable-stayed bridge construction processes." *Proceedings of KICEM Annual Conference, KICEM*, pp. 751-756 (in Korean).

Korea Institute of Construction Technology. (2009). *Construction standard estimate*, Korea Institute of Construction Technology (in Korean).

Kwon, S.-H., Jung, W.-J., Kim, S.-G., Kim, S.-B. (2006). "The life cycle assessment of infrastructure considering environmental load." *Proceedings of KICEM Annual Conference, KICEM*, pp. 519-522 (in Korean).

Kwon, S.-H., Kim, K.-J., Kim, B.-S., Kim, S.-B. (2008). "Evaluation of environmental economics on dismantling projects using LCI DB." *Proceedings of KICEM Annual Conference, KICEM*, pp. 207-212 (in Korean).

Lee, S.-Y., Byun, S.-J., Jo, G.-H., Park, S.-G. (2008). "Environmental assessment at public facilities using the LCA", *KSCE magazine, KSCE*, Vol. 56, No. 5, pp. 47-53 (in Korean).

Ministry of Land Infrastructure and Transport. (2003). *The study*

- of LCA application schemes on construction industry areas, No. 000863, KICT (in Korean).
- Moon, J. -S. (2009). *LCA analysis and case study of environment factors for highway construct project*, MSc Thesis, Gyeongsang National University (in Korean).
- Park, K.-H., Hwang, Y.-W., Park, J.-H., Seo, S.-W. (2000). "Environmental load evaluation through the life cycle of highway." *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 20, No. 3, pp. 311-321 (in Korean).
- Pascal S. (2004). "LCA for site remediation." *Soil and Sediment Contamination, Soil & Contamination*, Vol. 13, No. 4, pp. 415-425.
- Seo, S.-W., Ji, J.-S. (2000). "LCA methodology applied in the construction industry." *KSCE magazine*, KSCE, Vol. 48, No. 1, pp. 19-26 (in Korean).
- Yue H. (2008). "Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements." *Journal of Cleaner Production*, Cleaner Production, UK, Vol. 17, pp. 283-296.