

토공장비조합에 따른 공사기간 및 이산화탄소 배출량의 상관성 분석

Correlation Analysis on the Duration and CO₂ Emission Following the Earth-work Equipment Combination

김병수*

Kim, Byungsoo

Abstract

After Kyoto Protocol was adopted for green gas reduction, each nations are stepping up efforts to reduce CO₂ of a typical green gas. Construction industry also is trying CO₂ reduction with the techniques of two types which are software and hardware techniques. The software technique are Passive Design considered green gas emission and the environment impact assessment by LCA. The hardware techniques are adjustment of equipment system and development of eco- friendly material. But, it is nonexistent that a study related to CO₂ emission considered detail process in construction industry. This study analyzed the correlation of equipment combination, CO₂ emission and duration by calculate CO₂ emission follow to equipment combination on earth-work which is the process emitted most CO₂ among railway bedding construction

Keywords : earth-work, equipment combination, green gas, duration, CO₂ emission, correlation

요 지

1997년 온실가스 감축을 위한 교토의정서가 채택된 이후 각 국가들은 대표적인 온실가스인 이산화탄소를 줄이기 위하여 전 산업에 걸쳐 다각적인 노력을 하고 있다. 건설산업에서도 온실가스 배출량을 고려한 Passive Design 이나, LCA기준에 의한 환경영향평가와 같은 소프트웨어적 기술의 개발 그리고 설비시스템의 조정이나 친환경 자재의 개발과 같은 하드웨어적 기술의 개발과 같이 두 가지 형태의 기술이 다양한 방법으로 개발됨으로써 이산화탄소 저감을 시도하고 있다. 그러나 건설 산업에서 세부공정을 고려한 이산화탄소 배출과 관련한 연구는 전무하다. 본 연구에서는 철도노반공사 중에서 이산화탄소 배출량이 가장 많은 공정인 토공사를 대상으로 장비조합에 따른 이산화탄소 배출량을 산출하여 장비조합과 이산화탄소 배출량 그리고 공사기간의 상관성을 분석하였다.

핵심용어 : 토공사, 장비조합, 온실가스, 공사기간, 이산화탄소 배출량, 상관성

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

교토의정서는 1997년에 당사국총회에서 온실가스 감축을 위해 채택되었다. 캐나다, 일본을 포함한 38개국은 일정한 수준까지 온실가스를 감축할 것을 약속하였다. 교토의정서에 의해 억제되어야 하는 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 불화탄소(PFC), 수소화불화탄소(HFC), 불화유황(SF₆)을 포함한다. 교토의정서가 채택된 1997년에 제외되었던 한국은 개발도상국까지 의무대상국의 범위가 확대되는 2013년에는 온실가스 감축목표 제시 및 실행협약에 동참을 요청받을 것으로 예상된다. 한국이 2013년에 교토의정서의 계획에 전향적으로 참가하지 않는다면 회원국들은 더 높은 관세를 부과하게 될 것이다. 평균적으로 27개 EU국가들은 1995년 162.4백만 톤이던 탄소량을 2005

년 157.3백만 톤까지 줄여왔다. 같은 기간 동안 한국은 탄소배출량이 257.7백만 톤에서 523.8백만 톤으로 증가되었다. 한국은 지속가능한 경제성장을 달성하고 지구를 보호하기 위해 친환경성과 에너지효율성으로 성장패러다임을 전환하는 과도기적인 시기에 있다. 본 연구는 '저탄소 녹색성장'이라는 새로운 패러다임을 실현하기 위한 건설산업에서의 구체적인 방안중의 하나를 제시하는 것을 목표로 한다. 그 구체적인 방안으로서 토공사에서 많이 사용되는 장비의 이산화탄소 배출량을 산출함으로써 장비조합과 이산화탄소 배출량 그리고 공사기간의 상관성을 분석하고자 하였다.

1.2 기존연구 고찰

국내연구 조사결과 기존연구는 표 1에서와 같이 크게 이산화탄소(CO₂) 배출량 산정을 위한 연구와 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 환경영향평가와 관련한 연구로 나눌 수 있

*정회원 · 경북대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : bskim65@knu.ac.kr)

다. 연구방법 측면에서 기존연구들은 이산화탄소 배출량을 다양한 방법으로 산출하였는데, 연료사용량을 기준으로 한 경우, LCA(Life Cycle Assessment) 방법론을 사용한 경우(임형석, 2009) 그리고 산업연관표를 활용(김윤경, 2006)하거나 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change : 기후변화 정부간협약체) 가이드라인 및 탄소배출계수(강미연, 2010)를 활용하였다. 또한 이동식 배출가스 측정장비를 이용하여 실제 도로상에서 이산화탄소와 대기 오염물질 배출량을 측정하고 현행 배출계수의 예측결과와 비교한 연구(이태우, 2010)도 있다.

연구의 대상 및 범위 측면에서는 산업부문 전체를 대상으로 한 연구(김윤경, 2006)를 비롯해서 도로건설(황용우, 2000), 건축물(김정용, 2009), 콘크리트 구조물(김기환, 2006) 등의 건설시설물을 대상으로 하고 있으며, 버스, 택시, 트럭 등 자동차를 대상으로 이산화탄소 저감을 위한 연료종류별 탄소배출계수의 산출관련 연구(심무경, 2010)가 있으며, 차량에 공회전 정지기술을 적용할 경우에 연료저감량 및 CO2 저감효과를 추정한 연구(심무경, 2010)도 있다. 또한, 일반콘크리트를 고강도콘크리트로 대체할 경우 이산화탄소 배출량 저감효과를 분석(김기환, 2006)하거나 신제품과 재제조품간의 이산화탄소 발생량을 비교하는 등 공법 또는 제품의 유형에 따른 이산화탄소 발생량을 비교한 연구(임형석, 2009)도 있다. 특히 계획단계에서 친환경적인 계획이 시설물 전체에서의 이산화탄소 배출량을 얼마나 효과적으로 감소시킬 수 있는지를 분석한 연구와 같이 계획단계의 역할을 강조한 연구(현은미, 2010)도 있다.

표 1. 국내 연구현황

연구자	내용
김정용 (2009)	건축물의 기존바닥 컴포넌트와 몇 가지 형태의 바닥 컴포넌트 간의 이산화탄소 및 에너지소비량을 정량적으로 비교분석
황용우 (2000)	도로건설시 건설장비의 사용에 의해 발생하는 CO2 배출량을 공정별로 정량화
심무경 (2010)	버스, 택시, 트럭 등 운행차량에 공회전 제한장치와 주행기록계 등을 부착하여 공회전과 관련된 여러 운행특성을 분석
현은미 (2010)	건축계획단계에서 친환경적인 건축계획이 이산화탄소 배출량을 보다 효율적으로 저감시키는 것이 가능하다는 것을 증명
김기환 (2006)	콘크리트의 고강도 및 고 내구성화에 대한 이산화탄소 저감효과를 정량적으로 유도
강미연 (2010)	IPCC가이드라인과 탄소배출계수를 활용하여 환경영향평가시 도로사업에서 적용 가능한 온실가스 항목의 평가방법론을 제시
이태우 (2010)	이동식 배출가스 측정장비를 이용하여 실제 도로상에서의 이산화탄소 및 대기 오염물질 배출량을 측정
임형석 (2009)	전과정평가(LCA-분류화, 특성화, 정규화, 가중화)를 통해 신제품과 재제조품간의 이산화탄소(CO2)의 발생량을 비교
김종엽 (2004)	건축물 LCA의 수행방안 고찰 및 각 단계별 원단위 산출방법을 검토하였으며 건설자재 및 시공단계의 에너지 소비량 및 CO2배출량 원단위를 산출하였다.
김윤경 (2006)	우리나라의 2000년 환경산업연관표를 작성하여 부문별 및 산업별로 에너지소비, CO2 배출구조와 그 흐름을 분석

표 2. 국외 연구현황

연구내용	연구자
아스팔트 공사, 철강산업, 도로교통분야 등에서 이산화탄소 배출량의 감축을 목표로 CO2 배출량을 측정 및 추정하는 연구	Andre, M., Jourard, R., Vidon, R., Tassel, P., Perret, P.(2006) Fairbairn, E. M., Ferreira, I. A., Cordeiro, G. C., Silvano, M. M., Toledo Filho, R. D., Ribeiro, F. L.(2010) Gao, Y., Checkel, M. D.(2007) Ikaga, T., Murakami, S., Kato, S., Shiraishi, Y.(2000) Kakudate, K., Yamashita, M., Adachi, Y., Suzuki, T. (2001) Lu, I. J., Lewis, C., Lin, S. J.(2009) Malick, R., Bergendahl, J.(2009)
에너지계획, 오일산업, 건축분야에서 이산화탄소 배출량을 고려한 투자가치를 최적화하는 연구	Chikada, T., Inoue, T., Kuwahara, M.(1999) Ordorica-Garcia, G., Elkamel, A., Douglas, P. L., Croiset, E., Gupta, M.(2008) Sirikitputtisak, T., Mirzaesmeeli, H., Douglas, P. L., Croiset, E., Elkamel, A., Gupta, M. (2009)
계획단계에서 이산화탄소 배출량 감소를 목적으로 한 Design 및 Management 관련 연구	Caetano, M. A., Gherardi, D. F., Yoneyama, T. (2008) Ishikawa, K., Steinberg, M.(1996) Knudstrup, M. A., Ring Hansen, H. T., Brunsgaard, C.(2009)

국외 연구는 표 2에서와 같이 아스팔트 공사, 철강산업, 도로교통분야 등에서 이산화탄소 배출량의 감축을 목표로 CO2 배출량을 측정 및 추정하는 연구와 에너지계획, 오일산업, 건축분야에서 이산화탄소 배출량을 고려한 투자가치를 최적화하는 연구 그리고 계획단계에서 이산화탄소 배출량 감소를 목적으로 한 Design 및 Management 관련 연구가 있다.

2. 연구범위 및 방법

2.1 연구의 범위

본 연구의 범위는 건설공사 중 가장 기반이 되는 토공사를 대상으로 공사규모 및 현장여건에 따른 장비조합 방법론을 고찰하고 장비조합에 따른 공사기간과 이산화탄소 배출량을 고려함으로써 최적의 장비조합을 찾는 방법론을 제시하는 것으로 한다. 입력변수인 공사규모는 대규모인 100,000 m³ 가정하고 현장여건은 토질별로 다양하게 설정할 수 있으나 모든 토질을 가정할 경우 연구의 범위가 너무 넓어져서 연구의 질이 떨어질 우려가 있으므로 토질별 대표토질인 모래사질토와 점성토를 연구범위로 한정하고 작업조건은 양호와 불량으로 한정한다. 운반거리는 현장 내 500m로 하고 환경영향 분석의 범위는 토공장비의 연료사용량에 따른 이산화탄소 배출량을 산출하고 장비조합과의 상관성을 분석한다.

2.2 연구의 방법

연구의 방법은 토공사의 장비조합과 관련하여 토질별, 운반거리별, 작업방법별로 적합한 장비조합을 가정하고 연구에 사용된 장비의 종류 및 규격은 표 7과 같다. 장비조합에 따른 공사기간은 마이크로소프트 프로그램인 Visio 프로그램과 연동되어 사용할 수 있는 EZstrobe program을 이용하여 계산하고 장비의 종류별 에너지 소비량은 표준품셈의 기계경

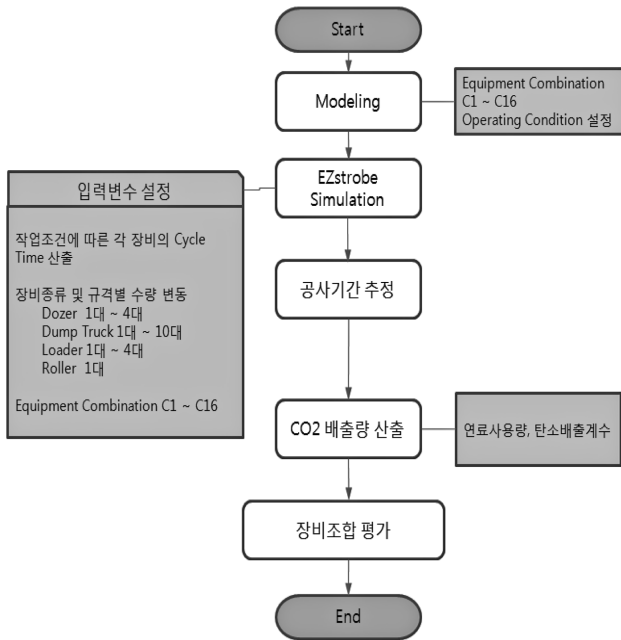


그림 1. 연구절차 및 방법

비산정편에서 제시하는 장비당 주연료 시간당 사용량을 기준으로 산출한다. 또한 연료사용량에 따른 이산화탄소 배출량은 기존 연구에서 제시하고 있는 탄소배출계수를 활용한다. 이와 같은 연구의 흐름 및 방법은 그림 1과 같다.

2.2.1 토공장비조합 구성

토공 작업종류별 장비는 대체적으로 굴착, 적재, 운반, 다짐, 정지장비로 구분할 수 있는데 해당공사가 요구하는 시공법, 능률, 작업조건 등을 파악하여 가장 효과적인 장비를 선정해야 한다. 장비의 선정에는 그 공종의 물량과 공정상의 공기 및 범용성이 동시에 검토되어 전체 공사의 균형을 갖도록 해야 한다. 토공장비 중 특히 많이 사용되는 장비는 도저(dozer)와 굴삭기(shovel, back hoe)로서 벌개, 제근, 굴착, 적재, 운반 등 여러 작업종류에 사용할 수 있다. 이렇게 다양한 장비를 효과적으로 이용하기 위해서는 장비조합이 무엇보다도 중요한데, 장비조합을 위해서는 공사의 규모별로 장비의 규격을 효과적으로 조합하여야 한다. 표 3은 작업규모별 건설기계의 표준규격을 나타낸 것이다.

또한 장비의 종류에 따라 시간당 작업량이 달라지는데 대

표 3. 작업규모별 건설기계의 표준규격¹⁾

건설기계	작업종류	작업규모	표준규격
dozer	벌개, 제근, 굴착, 운반, 부설, 정지	대규모	32ton 급
		중규모 이하	19ton 급
shovel, back hoe	굴착, 적재	대규모	1.0m ³ 이상
		중규모	0.7m ³
scraper	굴착, 운반	대규모	18.0m ³ 이상
		중규모	11.0~18.0m ³
dump truck	운반	대규모	15ton 이상
		중규모	8~15ton

1) 대규모 : 100,000m³ 이상, 중규모 : 100,000m³ 미만

표적인 시간당 작업량 계산식은 식 (1)과 같으며 장비의 종류에 따라 작업사이클 수, 1회 작업사이클당 표준작업량 등이 달라지게 된다.

$$Q = n \cdot q \cdot f \cdot E \quad (1)$$

여기서, Q : 건설장비의 시간당 작업량(m³/hr, m²/hr, m/hr 또는 ton/hr)

n : 시간당 작업사이클 수

q : 1회 작업사이클당 표준 작업량(m³, m², m 또는 ton)

f : 토량환산계수

E : 작업효율

식 (1)은 장비의 시간당 작업량을 계산하는 표준식이며 장비의 종류에 따라 달라진다. 본 연구에 사용한 장비는 Dozer, Back hoe, Dump Truck, 진동Roller 이며 각 장비별 시간당 작업량 및 각종 계수는 표준품셈을 참조하였다. 이렇게 산출된 시간당 작업량과 Cycle Time 등은 공사기간을 추정하고 장비를 조합하는데 사용하였다.

2.2.2 공사기간 추정방법

공사기간의 추정은 투입되는 장비의 종류 및 규격 그리고 장비조합에 따라 달라진다. 공사기간의 추정은 일반적으로 CPM(Critical Path Method)기법을 활용하지만 본 연구에서는 장비조합과 각 장비간의 간섭 및 대기시간 등을 종합적으로 시뮬레이션할 수 있는 EZstrobe program을 사용한다. 이 프로그램은 마이크로소프트의 Visio 시스템에서 구현되며 주석달린 Activity Cycle Diagram을 바탕으로 하는 그래픽 시뮬레이션 시스템으로서 3단계 액티비티 탐사를 사용한다. 또한 EZstrobe 는 프로그래밍을 필요로 하지 않기 때문에 복잡한 작업을 모델링하는데 유용한 목적 시뮬레이션 도구이다. 그림 2는 EZstrobe program의 실행화면을 캡처한 것이다.

2.2.3 이산화탄소 배출량 산출

장비사용에 따른 이산화탄소 배출량 산정은 표준품셈에서 제시하고 있는 장비사용 시간당 연료사용량에 탄소배출계수를 곱하여 산출한다. 연료소모량 대비 이산화탄소 배출량(tCO₂/L)은 에너지관리공단에서 제공되고 있는 방법을 사용하여 다음과 같이 계산한다.

연료소모량 대비 이산화탄소 배출량(tCO₂/L)

$$= \text{산화율} \times \text{순발열량(kcal/L)} \times \text{경유의 CO}_2 \text{ 배출계수 (tCO}_2\text{/TJ)} \times \text{단위환산계수(TJ/kcal)}$$

$$= 0.99 \times 8,450(\text{kcal/L}) \times 74.1(\text{tCO}_2\text{/TJ}) \times 4.1868 \times 10^{-9}(\text{TJ/kcal})$$

$$= 0.0026 \text{ tCO}_2\text{/L}$$

순발열량은 에너지기본법 시행규칙 별표(2010)에 따른 것이고, 산화율과 이산화탄소 배출계수는 IPCC 가이드라인(2006)을 따른 것이다.

장비종류별 시간당 연료사용량은 표 5와 같으며 장비의 크기가 클수록 시간당 연료사용량이 증가한다.

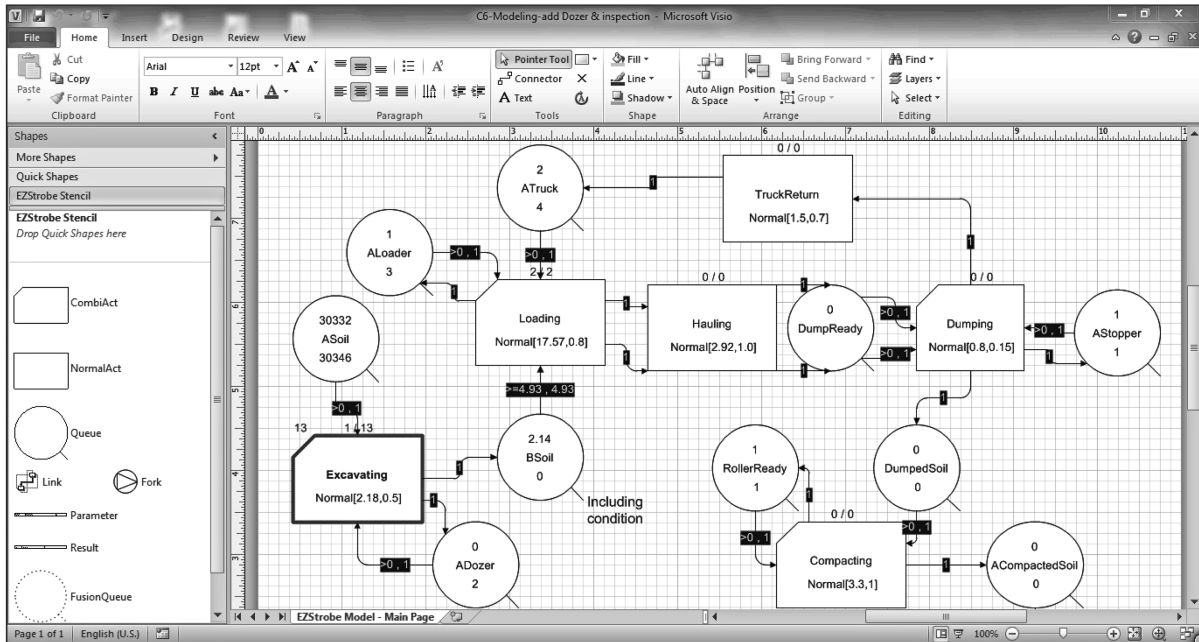


그림 2. EZstrobe Simulation program

표 4. 에너지기본법 시행규칙 별표

제품	단위	순발열량		석유환산계수
		kcal	MJ환산	
원유	kg	10,100	42.3	1.010
경유	l	8,450	35.4	0.845
휘발유	l	7,400	31.0	0.740
살내등유	l	8,200	34.3	0.820

표 5. 장비종류별 시간당 연료사용량²⁾

장비종류	규격	연료사용량(l/hr)
Dozer	32ton	41.6
	19ton	25.0
Back-hoe	1.0m ³	19.5
	0.8m ³	15.3
	0.7m ³	11.6
	0.6m ³	10.2
Dump Truck	24ton	23.0
	15ton	15.9
	대기	1.48
진동 Roller	10ton	14.4

3. 토공장비조합과 이산화탄소 배출량

토공작업을 위한 장비조합은 공사기간을 결정하고 장비의 연료사용량은 환경에 영향을 미치는 오염물질의 배출량에 관여한다. 토공장비조합과 이산화탄소 배출량을 평가하기 위해서는 공사기간, 연료사용량 그리고 이산화탄소 배출량을 산정하고 최종적으로 장비조합 평가 및 선정의 절차를 거친다. 공사기간 산정은 장비조합 모델링 및 EZstrobe Simulation을 통해 이루어지고 연료사용량과 이산화탄소 배출량의 산정은 표준품셈과 이산화탄소 배출계수를 이용한다.

2) 시간당 연료소비량은 경유를 기준으로 하며, 엔진부하율 70~80%, 실작업 시간은 50/60을 각각 기준으로 산정한 것임.

3.1 장비조합 모델링 및 입력변수 설정

장비조합 모델링 단계에서는 토공작업내용과 장비조합을 설정하는 단계로서 표 6과 같이 토질명과 현장조건, 운반거리 그리고 작업 총 수량을 규정한다. 토공작업에 사용되는 장비는 다양하지만 본 연구에서는 토공작업에 대표적으로 많이 사용되는 도저, 백호, 덤프트럭, 로울러와 같은 장비를 중심으로 장비의 종류별, 규격별 조합을 표 7과 같이 구성하였으며 조합의 수는 16개이다.

표 6. 입력변수 설정

조건	토질명	현장조건	운반거리 (m)	총물량 (m ³)	조합
A	모래, 사질토	자연상태 (양호)	500	100,000	16개

표 7. 장비종류 및 규격별 조합

조합명	굴착	적재	운반	다짐
조합1	도저 (32T)	백호(1.0m ³)	덤프트럭(15T)	진동 로울러 (10T)
조합2			덤프트럭(24T)	
조합3		백호(0.8m ³)	덤프트럭(15T)	
조합4			덤프트럭(24T)	
조합5		백호(0.7m ³)	덤프트럭(15T)	
조합6			덤프트럭(24T)	
조합7	도저 (19T)	백호(0.6m ³)	덤프트럭(15T)	진동 로울러 (10T)
조합8			덤프트럭(24T)	
조합9		백호(1.0m ³)	덤프트럭(15T)	
조합10			덤프트럭(24T)	
조합11		백호(0.8m ³)	덤프트럭(15T)	
조합12			덤프트럭(24T)	
조합13	백호(0.7m ³)	덤프트럭(15T)		
조합14		덤프트럭(24T)		
조합15	백호(0.6m ³)	덤프트럭(15T)		
조합16		덤프트럭(24T)		

장비조합 모델링에 따른 시뮬레이션을 위해서는 우선 입력 변수를 설정해야한다. 입력변수는 작업조건에 따른 각 장비의 Cycle Time, 장비종류 및 규격별 수량변동 경우의 수 그리고 16가지의 장비조합을 말한다. 장비의 시간당 작업량 및 Cycle Time은 2010 건설공사 표준품셈을 이용하였다. 또한 운반거리계수 및 작업효율과 같은 계수도 표준품셈을 참조하였다. 보통의 경우 표준품셈에서 각 장비의 규격에 해당하는 계수 값을 적용하였으며 표준품셈에서 제시된 계수 값 중에서 현장조건 및 운전조건에 따라 선택이 필요한 부분은 본 연구의 목적에 맞게 선택하여 적용하였다. 연료사용량은 장비의 가동시간에 비례하며, 표준품셈에서 제시하는 값을 사용하였다. 본 연구에 사용된 장비의 시간당 작업량 계산 및 각종 계수 값의 적용은 다음과 같다.

3.1.1 Dozer

Dozer의 1회 시간당 작업량 및 Cycle Time은 작업특성에 따라 달라지는데 표준품셈에서는 아래 식 (2)와 같이 Dozer의 1회 Cycle Time을 규정하고 있다.

$$Q = \frac{60 \cdot q \cdot f \cdot E}{cm} \quad q = q^0 \cdot e \quad (2)$$

여기서, Q : 시간당 작업량(m³/hr)

q : 삽날의 용량(m³)

q^0 : 거리를 고려하지 않은 삽날의 용량(m³)

e : 운반거리계수

f : 체적환산계수

E : 작업효율

cm : 1회 사이클시간

$$cm = \frac{L}{V_1} + \frac{L}{V_2} + t \quad (3)$$

여기서 cm : 1회 사이클시간(분)

L : 운반거리(m)

V_1 : 전진속도(m/분)

V_2 : 후진속도(m/분)

t : 기어변속시간(0.25분)

표 8은 Dozer의 시간당 작업량을 구하기 위해 적용한 입력변수 값을 나타낸 것으로서 운반거리계수(e) 값은 Dozer로 한번 전진 또는 후진하는 거리를 말하며 운반거리가 커

표 8. Dozer 입력변수 값

장비명(규격)	토질조건		q	q ⁰	e
도저(32T)	모래사질토 (양호)		4.84	5.5	0.88
도저(19T)			2.82	3.2	0.88
도저(32T)	자갈섞인흙· 점성토(불량)		4.84	5.5	0.88
도저(19T)			2.82	3.2	0.88
장비명(규격)	f	E	cm	V1	V2
도저(32T)	0.85	0.8	2.18	40	43
도저(19T)	0.85	0.8	2.12	40	46
도저(32T)	0.75	0.4	2.18	40	43
도저(19T)	0.75	0.4	2.12	40	46

표 9. 작업조건 내용

작업조건	내용
양호	작업현장이 넓고 지반의 요철 드에 의한 미끄럼이 없고 하향구배 등으로서 작업속도가 충분히 기대되는 조건인 경우
불량	작업현장이 좁고 지반상태를 고려한 미끄럼이 많고 상향구배 등으로서 작업속도를 저해하는 조건인 경우

질수록 계수 값은 작아진다. 본 연구에서는 40m를 기준으로 하였다. 체적환산계수(f) 값은 토질조건에 따라 토량변화율을 나타낸 것이며 작업효율(E)은 모래사질토(양호)는 0.8, 자갈섞인흙·점성토(불량)은 0.4로 하였으며 모두 자연상태를 기준으로 하였다.

여기서 작업조건을 나타내는 양호, 불량은 표 9와 같은 조건을 말한다. Cycle Time을 결정하는 전진속도(V1)과 후진속도(V2)는 굴착 또는 굴착운반, 발근 등의 작업기준인 1단 기어를 기준으로 하였다.

3.1.2 Back hoe

백호의 시간당 작업량과 Cycle Time은 다음 식 (4)과 같다.

$$Q = \frac{3,600 \cdot q \cdot k \cdot f \cdot E}{cm} \quad (4)$$

여기서, Q : 시간당 작업량(m³/hr)

q : 버킷의 용량(m³)

k : 버킷계수

f : 체적환산계수

E : 작업효율

cm : 1회 사이클시간(초)

표 10은 Back hoe의 입력변수값을 나타낸 것으로서 버킷계수(k)는 용이하게 굴착할 수 있는 연한토질로서 버킷에 산적으로 가득 찰 때가 많은 조건이 좋은 모래사질토인 경우 1.1, 약간 단단한 토질로서 버킷에 거의 가득 찰 수 있는 점토인 경우 0.9를 적용하였다. 체적환산계수(f)는 자연상태의 체적으로서 모래질흙인 경우 L=1.2~1.3을 적용할 수 있으므로 중간 값인 1.25를 적용하여 f=1/1.25 이므로 0.8을 적용하였고, 점질토인 경우 L=1.25~1.35의 중간 값인 1.3을 적용하여 f=1/1.3 이므로 0.77을 적용하였다. 작업효율(E)은 현장조건이 양호인 경우 0.75를 적용하여야 하나 토질이 단단하지 않으며 장애물이 없이 작업이 순조롭게 진

표 10. Back hoe 입력변수 값

장비명(규격)	토질조건	q	k	f	E	cm
백호(1.0m ³)	모래사질토 (양호)	1.0	1.1	0.80	0.60	30
백호(0.8m ³)		0.8	1.1	0.80	0.60	30
백호(0.7m ³)		0.7	1.1	0.80	0.60	30
백호(0.6m ³)		0.6	1.1	0.80	0.60	30
백호(1.0m ³)	자갈섞인흙· 점성토(불량)	1.0	0.9	0.77	0.45	30
백호(0.8m ³)		0.8	0.9	0.77	0.45	30
백호(0.7m ³)		0.7	0.9	0.77	0.45	30
백호(0.6m ³)		0.6	0.9	0.77	0.45	30

행될 경우가 드물기 때문에 양호한 조건과 불량한 조건의 중간으로 판단되는 상태인 보통(0.6)을 적용하였으며, 굴착 깊이가 너무 깊거나 얇고 토질이 단단하며 장애물 등이 있어서 작업에 곤란을 느끼는 상태인 불량량의 경우 0.45를 적용하였다. Cycle Time은 버킷의 선회각도에 따라 달라지는데 본 연구에서는 90°를 기준으로 하였으며 값은 30으로 적용하였다.

3.1.3 Dump Truck

백호의 시간당 작업량과 Cycle Time은 다음 식 (5)와 같으며 각 계수는 표준품셈에서 제시된 값들을 사용하였다.

$$Q = \frac{60 \cdot q \cdot f \cdot E}{cm} \quad q = \frac{T}{r_r} \quad (5)$$

- 여기서, Q : 시간당 작업량(m^3/hr)
 q : 흐트러진 상태의 덤프트럭 1회 적재량(m^3)
 r_r : 자연상태에서의 토석의 단위중량(습윤밀도)(t/m^3)
 T : 덤프트럭의 적재용량(ton)
 k : 버킷계수
 L : 체적환산계수에서의 체적변화율
 f : 체적환산계수
 E : 작업효율
 cm : 1회 사이클시간(초)
 $cm = t1 + t2 + t3 + t4 + t5$
 $t1$: 적재시간(적재기계에 의한 시간)
 $t2$: 왕복시간
 $t3$: 적하시간
 $t4$: 적재대기시간
 $t5$: 덮개 여닫는 시간

$$t1 = cms \cdot n/60 \cdot Es \quad (6)$$

여기서 $t1$: 적재기계에 의해 소요되는 시간

cms : 적재기계의 1회 사이클시간(초)

Es : 적재기계의 작업효율

n : 덤프트럭 1대의 토량을 적재하는데 소요되는 적재기계의 사이클 횟수

$$n = Qt/q \cdot k \quad (7)$$

여기서, Qt : 덤프트럭 1대의 적재토량(m^3)

q : 적재기계의 버킷용량(m^3)

k : 버킷계수

표 11은 Dump Truck의 입력변수값을 나타낸 것으로서 왕복시간($t2$)은 적재시 및 공차시 평균주행속도와 운반거리에 의해 결정되며 적재시 평균주행속도는 미포장도로를 기준으로 15km/hr, 공차시 평균주행속도는 20km/hr를 적용하였다. 적하시간($t4$)은 적재장소가 넓지는 않으나 목적장소에 불편없이 진입할 수 있을 때를 기준으로 0.42분을 적용하였다. 적재함 덮개 여닫는 시간($t5$)은 자동덮개시설의 경우를 적용하였다.

3.1.4 Roller

Roller의 시간당 작업량과 Cycle Time은 다음 식 (8)과 같으며 표준품셈에서 진동로울러 10ton 규격에 해당하는 계수 값을 적용하였다. 표 12는 Roller의 입력변수값을 나타낸 것으로서 유효다짐폭(W)과 다짐속도(V)는 진동로울러 10ton의 경우 각각 1.9m, 4.0km/hr이며 작업효율(E)은 현장조건 보통의 경우를 적용하여 0.6으로 정하였다. 또한 펴는 흙의 두께(D)와 소요다짐횟수(N)는 노체를 기준으로 각각 0.3m와 6회로 정하였다.

$$Q = 1,000 \cdot V \cdot W \cdot E \cdot D \cdot \frac{f}{N} \quad (8)$$

여기서, Q : 시간당 다짐토량(m^3/hr)

표 11. Dump Truck 입력변수 값

백호	장비명	토질 조건	트럭 용량	q	r _r	E	f	cm	t1	t2	t3	t4	t5	
1.0m ³	DT(15T)	모래사 질토 (양호)	15	10.15	1.7	0.9	0.87	12.91	7.69	3.5	0.8	0.42	0.5	
	DT(24T)		24	16.24	1.7	0.9	0.87	17.52	12.30	3.5	0.8	0.42	0.5	
0.8m ³	DT(15T)		15	10.15	1.7	0.9	0.87	14.83	9.61	3.5	0.8	0.42	0.5	
	DT(24T)		24	16.24	1.7	0.9	0.87	20.59	15.37	3.5	0.8	0.42	0.5	
0.7m ³	DT(15T)		15	10.15	1.7	0.9	0.87	16.20	10.98	3.5	0.8	0.42	0.5	
	DT(24T)		24	16.24	1.7	0.9	0.87	22.79	17.57	3.5	0.8	0.42	0.5	
0.6m ³	DT(15T)		15	10.15	1.7	0.9	0.87	18.03	12.81	3.5	0.8	0.42	0.5	
	DT(24T)		24	16.24	1.7	0.9	0.87	25.72	20.50	3.5	0.8	0.42	0.5	
1.0m ³	DT(15T)		자갈섞인 흙점성토 (불량)	15	11.36	1.75	0.9	0.75	19.94	14.02	3.5	1.5	0.42	0.5
	DT(24T)			24	18.17	1.75	0.9	0.75	28.35	22.43	3.5	1.5	0.42	0.5
0.8m ³	DT(15T)			15	11.36	1.75	0.9	0.75	23.45	17.53	3.5	1.5	0.42	0.5
	DT(24T)			24	18.17	1.75	0.9	0.75	33.96	28.04	3.5	1.5	0.42	0.5
0.7m ³	DT(15T)			15	11.36	1.75	0.9	0.75	25.95	20.03	3.5	1.5	0.42	0.5
	DT(24T)			24	18.17	1.75	0.9	0.75	37.97	32.05	3.5	1.5	0.42	0.5
0.6m ³	DT(15T)	15		11.36	1.75	0.9	0.75	29.29	23.37	3.5	1.5	0.42	0.5	
	DT(24T)	24		18.17	1.75	0.9	0.75	43.31	37.39	3.5	1.5	0.42	0.5	

표 12. 진동 Roller 입력변수 값

장비명	토질조건	V	W	E	D	f	N
진동로울러 (10T)	모래사질토 (양호)	4	1.9	0.6	0.3	0.808	6
진동로울러 (10T)	자갈섞인흙 점성토(불량)	4	1.9	0.4	0.3	0.782	6

- V: 다짐속도(km/hr)
- W: 롤러의 유효폭(m)
- E: 작업효율
- D: 퍼는 흙의 두께(m)
- f: 체적환산계수
- N: 소오다짐횟수

3.2 EZstrobe Simulation을 통한 공사시간 산정

EZstrobe Simulation을 이용하여 장비조합에 따른 공사시간을 산정하였다. 굴착, 적재, 운반, 다짐 및 검사의 5가지 작업을 장비의 수량을 변경해 가면서 소요되는 공사시간을 산정한다. 표 13은 장비조합 1의 공사시간 산정 예를 나타낸 것으로서 장비의 대수 및 조합에 따라 소요공사 시간이 달라진다는 것을 알 수 있다. 표 11에서 Dozer의 대수에 따라 공사시간이 크게 변동하며 세부조합 M 이 공사시간 면에서 가장 유리한 조합인 것으로 나타났다. 이것은 장비의 대수가 증가 하더라도 장비간의 간섭, 대기시간의 증가 등으로 효과적이지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 세부조합 E는 현장여건상 Dozer가 한 대밖에 투입될 수 없는 경우 공사시간이 가장 적은 조합을 나타낸 것으로서 세부조합 M에 비하여 공사시간이 2배 이상 필요한 것으로

표 13. 장비조합1의 공사시간 산정 예

세부 조합	Dozer (32ton)	Back hoe (1.0m ³)	Dump Truck (15ton)	Roller (10ton)	Hour
A	1	1	1	1	2,125.7
B	1	1	2	1	1,265.0
C	1	1	3	1	1,263.4
D	1	2	2	1	1,102.9
E	1	2	3	1	1,103.1
F	1	2	4	1	1,103.1
G	1	3	3	1	1,103.1
H	1	3	6	1	1,103.1
I	2	2	2	1	1,062.0
J	2	2	3	1	733.6
K	2	2	4	1	632.2
L	2	2	6	1	631.7
M	2	3	4	1	553.2
N	2	3	5	1	553.3
O	2	3	6	1	552.5
P	2	4	8	1	552.5
Q	2	6	10	1	552.5
R	3	6	12	1	543.5
S	4	8	16	1	544.3

나타났다.

3.3 장비조합과 이산화탄소 배출량 평가

장비조합에 따른 이산화탄소 배출량과 공사시간을 비교해 본 결과 조건 A의 경우 표 14와 같이 나타났다. 공사시간이 가장 작은 조합은 조합 4이며, 이산화탄소 배출량이 가장 적은 조합은 조합 8이다. 조합 4와 조합 8의 공사시간 차이는 불과 0.7시간이므로 실질적으로 공사시간과 이산화탄소 배출량 측면에서 가장 유리한 장비조합은 조합 8이라고 할 수 있다. 장비조합 8은 Dozer(32ton) 2대, Back-hoe (0.6m³) 4대, Dump Truck(24ton) 5대, Roller(10ton) 1대로 구성된다.

여기서, 조합 8이 연료소비량이 가장 적게 발생한다고 하고 있으나 오히려 장비의 숫자는 조합 1보다 증가하였다. 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 조합 1은 Dozer 32ton, Back hoe 1m³, Dump Truck 15ton, Roller 10ton 이며, 조합 8은 Dozer 32ton, Back hoe 0.6m³, Dump Truck 24ton, Roller 10ton 이다. 두 장비조합의 다른 부분은 Back hoe가 1m³에서 0.6m³으로 Dump Truck 이 15ton에서 24ton 으로 달라진 것이다. 이 결과 작업시간은 비슷하지만(조합 1은 553.2시간, 조합 8은 552.4시간) 장비의 규격에 따른 연료사용량이 달라진다. 즉, 용량이 큰 장비 3대 보다는 용량이 작은 장비 4대가 작업시간은 비슷하지만 연료소비량이 적다는 것이다.

그러나 조합 9~조합 16까지의 장비조합은 Dozer 19ton 규격에 타 장비를 조합한 것으로 32ton Dozer 조합에 비해 전반적으로 공사시간과 이산화탄소 배출량이 많은 것으로 나타났다.

조건 B의 경우 표 15와 같이 나타났다. 공사시간이 가장 작은 조합은 조합 1이며, 이산화탄소 배출량이 가장 적은 조합은 조합 8이다. 조합 1과 조합 8의 공사시간 차이는 62.2시간이며, 이산화탄소 배출량 차이는 13.5ton 으로 프로

표 14. 장비조합에 따른 연료소비량 및 CO₂ 배출량(조건 A)

조합	D	B/h	D/T	R	Hour	연료소비량 (l)	CO ₂ 배출량(ton)
1	2	3	4	1	553.2	47,077.32	122.4
2	2	2	4	1	631.5	49,257.00	128.1
3	2	3	5	1	551.8	44,640.62	116.1
4	2	3	5	1	551.7	40,715.46	105.9
5	2	5	6	1	551.7	42,591.24	110.7
6	2	5	6	1	551.8	38,681.18	100.6
7	2	4	6	1	552.6	41,887.08	108.9
8	2	4	5	1	552.4	37,949.88	98.7
9	2	2	3	1	922.0	63,157.00	164.2
10	2	2	2	1	922.0	56,610.80	147.2
11	2	2	3	1	922.0	59,284.60	154.1
12	2	2	3	1	921.1	52,686.92	137.0
13	2	2	4	1	922.0	55,873.20	145.3
14	2	2	3	1	922.0	49,327.00	128.3
15	2	4	4	1	923.0	54,641.60	142.1
16	2	3	3	1	922.4	48,057.04	124.9

표 15. 장비조합에 따른 연료소비량 및 CO₂ 배출량(조건 B)

조합	D	B/h	D/T	R	Hour	연료소비량 (l)	CO ₂ 배출량(ton)
1	2	2	3	1	1,243.4	105,813.34	275.1
2	2	2	2	1	1,269.0	98,982.00	257.4
3	2	2	3	1	1,324.9	107,184.41	278.7
4	2	2	3	1	1,287.7	95,032.26	247.1
5	2	3	3	1	1,245.8	96,175.76	250.1
6	2	2	3	1	1,484.4	104,056.44	270.5
7	2	3	4	1	1,244.6	94,340.68	245.3
8	2	3	3	1	1,305.6	89,694.72	233.2
9	2	1	2	1	2,078.8	142,397.80	370.2
10	2	1	2	1	2,079.0	127,650.60	331.9
11	2	2	2	1	2,077.5	133,583.25	347.3
12	2	2	2	1	2,078.4	118,884.48	309.1
13	2	2	2	1	2,078.0	125,926.80	327.4
14	2	2	2	1	2,078.5	111,199.75	289.1
15	2	2	2	1	2,099.2	124,272.64	323.1
16	2	2	2	1	2,078.1	108,269.01	281.5

젝트 특성에 따라 장비조합을 선택할 수 있을 것으로 판단된다. 장비조합 1은 Dozer(32ton) 2대, Back-hoe(0.6m³) 2대, Dump Truck(24ton) 3대, Roller(10ton) 1대로 구성되며, 장비조합 8은 Dozer(32ton) 2대, Back-hoe(0.6m³) 3대, Dump Truck(24ton) 3대, Roller(10ton) 1대로 구성된다. 그러나 조합 9-조합 16까지의 장비조합은 Dozer 19ton 규격에 타 장비를 조합한 것으로 32ton Dozer 조합에 비해 전반적으로 공사시간과 이산화탄소 배출량이 많은 것으로 나타났다.

따라서 공사시간과 이산화탄소 배출량 측면에서 유리한 장비조합은 Dozer와 Dump Truck의 경우는 대형장비가 Back-hoe의 경우는 소형장비가 유리한 것으로 판단된다.

4. 결 론

장비조합에 따른 이산화탄소 배출량과 공사시간을 평가해 본 결과 동일한 공사기간이라도 장비의 조합에 따라 이산화탄소 배출량이 달라진다는 것을 알 수 있었다. 따라서 대표적인 온실가스인 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위해서 토공장비의 조합을 최적화할 필요성이 있다. 본 연구에서는 이산화탄소 배출량을 연료사용량에 대하여 탄소배출계수를 곱하여 산출하였는데 실제 장비의 이산화탄소 배출량은 작업 조건, 장비의 작업부하량 및 대기시간 등에 따라 달라진다. 향후 이산화탄소 배출량을 보다 정밀하게 산출할 수 있는 기준개발이 요구된다.

참고문헌

강미연(2010) 온실가스 환경영향평가 방법연구, 석사학위논문, 연세대학교.
 국토해양부(2009) 건설공사 표준품셈.

김기환(2006) 이산화탄소배출저감을 고려한 콘크리트 구조물의 환경설계에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
 김병수(2011) 이산화탄소 배출량을 고려한 토공장비조합 선정, 한국철도학회 학술대회논문, 한국철도학회.
 김윤경(2006) 환경산업연관표 2000을 이용한 산업부문의 이산화탄소(CO₂) 발생분석, 자원환경경제연구, 제15권 제3호, pp. 425-450.
 김정용(2009) 에너지소비량 및 이산화탄소 배출량분석을 위한 건축바닥컴포넌트의 친환경성능 평가에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.
 김종엽, 이승언, 손장열(2004) 건축물 건설단계에서의 에너지소비량 및 CO₂배출량 원단위 산출, 대한건축학회논문집(계획계), 대한건축학회, 제20권 제10호, pp. 319-326.
 심무경(2010) 자동차의 공회전제하에 따른 환경개선 및 CO₂ 저감 효과연구, 박사학위논문, 강원대학교.
 이태우(2010) 실제도로의 배출가스 측정을 이용한 자동차의 이산화탄소 및 대기 오염물질 배출계수 산정방법 연구, 박사학위논문, 인하대학교.
 임형석(2009) LCA기법을 이용한 철도차량 재제조 부품에 대한 환경성평가, 석사학위논문, 한양대학교.
 현은미(2010) 친환경건물의 운영단계에서의 이산화탄소 배출저감에 관한 연구, 석사학위논문, 건국대학교.
 황용우, 박광호, 서성원(2000) 도로건설에 따른 CO₂배출량 평가, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제1B호, pp. 113-121.
 Andre, M., Joumard, R., Vidon, R., Tassel, P., Perret, P. (2006) Real World European Driving Cycles, for Measuring Pollutant Emissions from High-and low-Powered Cars, *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp. 5944-5953.
 Caetano, M. A., Gherardi, D. F., Yoneyama, T. (2008) Optimal Resource Management Control for CO₂ Emission and Reduction of the Greenhouse Effect, *Ecological Modeling*, Vol. 213, No. 1, pp. 119-126.
 Chikada, T., Inoue, T., Kuwahara, M. (1999) Life Cycle CO₂ Emission Concerning Housing and Daily Life, *Building Simulation Conference*, Vol. 6. No. 2, pp. PB-08.
 Fairbairn, E. M., Ferreira, I. A., Cordeiro, G. C., Silvano, M. M., Toledo Filho, R. D., Ribeiro, F. L. (2010) Numerical simulation of dam construction using low-CO₂-emission concrete, *Materials and Structures*, Vol. 43, No. 8, pp. 1061-1074.
 Gao, Y., Checkel, M. D. (2007) Experimental Measurement of on-Road CO₂ Emission and Fuel Consumption Functions, *SAE Technical Papers*, Vol. 200, pp. 1610-1612.
 IPCC (2006) Guideline for National GHG Inventories.
 Ikaga, T., Murakami, S., Kato, S., Shiraiishi, Y. (2000) Estimation of CO₂ emission associated with building construction and operation till 2050 in japan -Study on social life cycle assessment of buildings and cities-, *Journal of Architecture Planning and Environmental Engineering*, No. 535, pp. 53-58.
 Ishikawa, K., Steinberg, M. (1996) An Analysis of MHD Power Systems for Reduction of CO₂ Emission, *MHD International Conference*, Vol. 1, pp. 282-291.
 Kakudate, K., Yamashita, M., Adachi, Y., Suzuki, T. (2001) Calculation Model of CO₂ Emission by using a Population Balance Model, *Journal of Advanced Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 207-210.
 Knudstrup, M. A., Ring Hansen, H. T., Brunsgaard, C. (2009) Approaches to the Design of Sustainable Housing with Low CO₂ Emission in Denmark, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 9, pp. 2007-2015.
 Lu, I. J., Lewis, C., Lin, S. J. (2009) The Forecast of Motor Vehicle Energy Demand and CO₂ Emission from Taiwans Road Transportation Sector, *Energy Policy*, Vol. 37, No. 8, pp. 2952-2961.
 Malick, R., Bergendahl, J. (2009) A Laboratory Study on CO₂

Emission from Asphalt Binder and its Reduction with the Use of Warm Mix Asphalt, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 275-283.

Ordorica-Garcia, G., Elkamel, A., Douglas, P. L., Croiset, E., Gupta, M. (2008) Energy Optimization Model with CO2 Emission Constraints for the Canadian Oil Sands Industry, *Energy and Fuels*, Vol. 22, No. 4, pp. 2660-2670.

Sirikitputtisak, T., Mirzaesmeeli, H., Douglas, P. L., Croiset, E., Elkamel, A., Gupta, M. (2009) A Multi-Period Optimization Model for Energy with CO2 Emission Considerations, *Energy Procedia*, Vol. 1, No. 1, pp. 4339-4346.

(접수일: 2011.5.19/심사일: 2011.6.9/심사완료일: 2011.6.9)