

작업 특성을 반영한 중규모 굴삭기의 CO₂ 배출량산정을 위한 실험적 연구

김승현* · 이동욱**

Kim, Seung Hyun* · Lee, Dong Wook**

Experimental Research for CO₂ Emission Estimation of Medium-Scale Excavator Reflecting Work Characteristics

ABSTRACT

Researches on the emissions of greenhouse gases in the construction industry, which accounts for 40% of raw materials, 30% of energy consumption, and 30% of CO₂ emissions in the entire industry, are mainly focused on studies of LCA. However, it is assessed that CO₂ emissions are higher in construction sequence than in operation sequence. Also, it is considered that construction machinery using fossil fuel is a main factor causing environmental load in construction sequence. Therefore, this study analyzes the workload and engine RPM characteristics of the excavator which is the second largest number of registered construction machinery in Korea and the highest utilization rate in actual construction site. The excavator is divided into non-load states and load states where power is transmitted to the excavator. The exhaust gas is analyzed by a direct measurement method using PEMS equipment. CO₂ emissions are estimated by analyzing the relationship between RPM and exhaust emission characteristics according to the actual driving conditions. Additionally, we analyze the difference between CO₂ emissions of construction machine calculated by this study and CO₂ emissions calculated by using carbon emission coefficient.

Key words : CO₂ emission, Excavator, Productivity, Engine load, Correlation

초 록

전체 산업에서 원재료사용의 40%, 에너지소모의 30%, 그리고 CO₂ 배출량의 30% 이상을 차지하는 건설 산업에서의 온실가스 배출에 대한 연구는 LCA를 통한 연구가 주류를 이루고 있다. 하지만 건설 산업의 생애 주기에서 CO₂ 배출량이 많은 단계는 운영단계 보다 시공단계가 더 큰 것으로 평가되며, 시공단계에서 환경부하를 가장 크게 유발하는 요인은 화석연료를 사용하는 건설기계일 것이다. 따라서 본 연구에는 국내 건설기계 등록대수 중 두 번째로 많고 실제 건설 현장에서 활용도가 가장 높은 굴삭기를 대상으로 작업 형태에 따른 생산성과 엔진부하 특성을 분석하였다. 그리고 굴삭기의 운행 특성을 공회전 무부하상태와 동력이 전달되는 부하상태로 구분하여 배기가스를 PEMS 장비를 이용해 직접측정 방식으로 분석하였다. 실제 운행 상태에 따른 엔진 부하량과 배기가스 배출 특성인들과의 상관관계를 분석하여 CO₂ 배출량을 산정하였다. 그리고 본 연구를 통해 산정된 건설기계의 CO₂ 배출량과 탄소배출계수를 이용하는 방법으로 산정된 CO₂ 배출량과의 차이를 분석하였다.

검색어 : CO₂ 배출량, 굴삭기, 생산성, 엔진부하, 상관관계

1. 서론

신 기후변화체제(파리협정, 2016.11월 발효)는 기존 37개 선진국에만 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 감축의무가 발생하던 교토체제와 달리 197개 모든 당사국에 감축 의무가 발생하며 우리 정부는 2030년 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축

* 제주대학교 토목해양공학과 박사과정 (Jeju National University · ksh@jejunu.ac.kr)

** 중신회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Jeju National University · dwlee@jejunu.ac.kr)

Received April 10, 2017/ revised May 22, 2017/ accepted June 5, 2017

목표를 국제사회에 약속하였다.

국가 온실가스 인벤토리에서 건설 산업은 에너지 분야 연료 연소 부문에서 제조업 및 건설업으로 분류된다. IEA (2015)에 의하면 2013년 온실가스 총배출량의 약 90%를 차지하고 있는 연료연소에 의한 국가의 온실가스 배출량은 572 MtCO₂eq.으로 세계 7위이며, 온실가스 배출량 증가율은 1990년 대비 중국 (311%), 인도(250%) 다음 3위(147%)로 매우 높은 수준이다. 그리고 국내의 1인당 온실가스 배출량도 13.9 tCO₂eq.으로 상위권에 해당한다.

국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵(OGPC, 2014)에서 건설업분야는 바이오디젤과 중온 아스팔트 포장 기술 보급으로 2020년까지 온실가스 213 천CO₂eq.(감축률 7.1%)의 감축계획을 수립하였다. 건설 산업은 전체 산업에서 원재료사용의 40%, 에너지 소모의 30%, 그리고 CO₂ 배출량의 30% 이상을 차지하며, 환경저하(Environmental degradation)에 많은 영향을 끼치기 때문에 건설 산업의 온실가스 저감은 중요한 사안이다(Liu et al., 2013). 로드맵에 의한 건설업분야의 대응은 매우 제한적이라 보다 다양한 노력이 필요하다.

건설 산업에서 온실가스 배출에 대한 연구는 전 생애주기평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 통한 연구가 주류를 이룬다. LCA는 건설 사업의 복잡성과 현장마다의 지역 변수를 고려하여 건설 프로젝트의 환경부하를 평가하는 적합한 방법론으로 인식된다(Bilec et al., 2006). 하지만 LCA와 같은 기법은 신뢰성을 담보하기 위해서는 공신력 있는 통계 데이터의 활용과 방대한 양의 자료 수집 정도에 의해 정확도가 달라지는 한계를 가지고 있다.

건설 산업의 생애주기에서 CO₂ 배출량이 많은 단계는 운영단계 외에 시공단계가 있고 환경에 미치는 영향 정도는 시공단계가 운영 및 유지관리단계보다 크다(Kwon, 2008). 시공단계에서 환경부하를 가장 크게 유발하는 요인은 화석연료를 사용하는 건설기계 일 것으로 판단된다. 하지만 건설 산업에서 건설기계를 별도의 카테고리 분류하여 CO₂ 배출량을 조사·분석한 연구는 미미한 가운데 특히, 건설기계에서 발생하는 환경부하 정도를 건설기계의 운행 특성을 고려하여 실측값으로 분석한 연구는 매우 부족하다.

2016년말 기준 국내 건설기계의 총 등록대수(MLIT, 2017)는 46만5,296대('09년 36만2,641대)로 집계되었다. 건설기계의 기종별로는 지게차가 17만2,284대로 가장 많고 이어 굴삭기 13만9,562대, 덤프트럭 5만8,798대, 콘크리트믹서트럭 2만5,442대, 로더 2만2,979대 등의 순으로 나타났다. 이 가운데 등록대수가 가장 많은 지게차는 물류를 포함한 전 산업분야에서 광범위하게 활용되는 장비이며, 실제 건설 산업에서 가장 활용도가 높고 등록대수가 많은 건설기계는 굴삭기이다.

본 연구에서는 굴삭기를 대상으로 현장에서 건설장비의 작업 형태에 따른 생산성과 부하 특성을 분석하고 실제 운행 특성을 반영한 엔진 부하량인 RPM (Revolution Per Minute) 변화에 따른 배기가스 배출 특성을 이동식 배출가스 측정장비(PEMS, Portable Emission Measurement System)로 직접 측정하여 CO₂ 배출량을 산정하였다. 그리고 연구 결과를 탄소배출계수를 이용하는 방법들에 의한 CO₂ 배출량과 비교하여 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존 연구 고찰

EPA (2004)에는 비도로용 건설 및 농업 장비 등에 사용되는 엔진들에 대하여 배기가스 기준등급을 Tier 1에서 Tier4까지로 나누고 엔진의 대기오염물질 배출계수를 제시하였다. Lim et al. (2009)은 국내 비도로용 건설기계의 배출가스를 규제시험모드(KC1-8)로 시험하여 취득된 대기오염물질 측정 결과로 배출계수를 산정하고 EPA (2004)에서 제시한 배출계수와 비교하였다. Jin et al. (2014)은 국내 건설기계의 배기가스에 대해 ISO 8178 C1-8 인증시험모드로 취득된 시험 결과를 활용하여 국내 실정에 맞는 배출계수 개발 및 배출량 산정 체계 개선을 제시하였다. 위의 연구들은 건설기계의 인증시험을 통해 축적된 비교적 많은 데이터를 활용하였지만 분석 대상이 온실가스가 아닌 대기오염물질의 배출계수 산정에 관한 연구들이다.

Frey et al. (2008)은 비도로 용 건설장비(백호 5대, 로더 4대, 그레이더 6대)를 대상으로 실제 작업 상태에서 PEMS 장비를 이용해 석유 디젤과 B20 바이오 디젤을 연료로 활용해 연료사용량과 배기가스 특성을 측정하고 비교하였다. Kim and Jang (2013)은 무한케도 굴삭기(1.27m³)에서 배출되는 CO₂ 배출량을 측정하기 위해 배기가스를 포집 후 안정화시켜 CO₂ 센서를 이용해 CO₂ 농도를 측정하고, 측정된 CO₂ 농도는 엔진 RPM의 변동에 따른 배기가스 유속 변화와 무관하게 유사한 값을 나타낸다고 하였다. Kim (2014)은 토공장비들의 CO₂ 배출량을 측정하기 위해 장비들이 정지된 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스를 포집 후 CO₂ 센서로 각 장비들의 평균 CO₂ 농도를 산정하고 배기구 유속으로 배출량을 계산해 CO₂ 배출량을 산정하는 농도-유속측정(C-FVM, Concentration-Flow Velocity Measurement)을 이용한 직접측정 방식을 제안하였다. Kim et al. (2015)은 토공장비들의 CO₂ 배출량을 측정하기 위해 배기구에서 배출되는 CO₂ 농도를 CO₂ 센서로 연속 측정하고 RPM 변화와 상관관계를 회귀분석 하였다. 기연구된 결과들에서는 차대동력계로 동력전달이 이루어져 장비가 움직이는 운행 상태가 아닌 정지된 상태에서 RPM 변화를 주어 공회전 무부하상태에서 측정된 결과를 활용하고 있어 실제 운행 상태를

반영한 결과는 아닌 것으로 확인된다.

2.2 CO₂ 배출량 산정 방법

2.2.1 배출계수를 이용한 산정 방법

1) 2006 IPCC 가이드라인

국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 IPCC (2006)에서는 인간 활동에 따른 온실가스의 배출원에 의한 배출량 및 흡수원에 의한 흡수량에 대한 방법론을 제공하고 있다. 배출원은 에너지, 산업공정 및 제품사용, 농업·임업·기타토지이용, 폐기물, 기타 등으로 분류되어 있으며 정확성(Accuracy) 및 정밀도(Precision)의 측면에서 Tier 1 (기본방법)에서 Tier 3 (가장 상세한 방법)까지 산정방법에 대한 권고사항이 제시되어 있다(Kang, 2010). 그리고 각 국가별로 IPCC의 방법론을 바탕으로 객관적이고 신뢰할 수 있는 수준의 활동도 자료(Activity Data)를 활용해 자국 실정에 적합한 국가 고유의 배출계수를 산출하고 배출계수에 대한 QA/QC시스템을 검증한 후 사용할 것을 권고하고 있다. 건설기계는 에너지 분야 이동연소원 중 비도로(off-road)수송 부문에 해당하며, 온실가스 배출량 산정을 위한 일반적인 방법은 Eqs. (1) and (2)와 같다.

$$Tier 1 : Emissions = \sum (Fuel_j \times EF_j) \quad (1)$$

$$Tier 2 : Emissions = \sum (Fuel_{ij} \times EF_{ij}) \quad (2)$$

여기서, Emissions : 배출량(kg), Fuel_j : 소비된 연료(연료판매량 상당)(TJ), EF_j : 배출계수(kg/TJ) I : 차량/장비 종류, j : 연료 종류이다. Tier 1은 Top-Down방식으로 연료 종류에 따른 연료소비량과 탄소배출계수를 이용하여 온실가스배출량을 구하는 가장 기본적인 방법이며, Tier 2는 Bottom-Up방식으로 연료 종류에 따른 국가 고유 배출계수를 이용하여 차량이나 장비 종류에 대한 개별 배출계수를 적용하는 방법이다. 방법을 생략한 Tier 3은 Bottom-Up으로 차량이나 장비의 등록대수, 가동시간, 평균출력, 평균부하율 및 연소방식, 차량제어방식, 차량연식 등의 다양한 활동도(Activity)를 국가 통계와 같은 객관적인 자료를 이용해 산정한 배출계수를 적용하는 방법이다.

Tier 1과 Tier 2의 온실가스 배출량 산정방법은 연료 종류별 소비량을 조합한 평균 배출계수를 사용한다. 온실가스 산정의 정확성은 Tier 3으로 갈수록 높으며, Tier 2이상의 산정방법은 국가 고유의 배출계수를 이용한 온실가스 산정 방법으로 간주된다(Kim and Park, 2014).

2) 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인

시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인(MLTMA, 2011)은 시설물에 대하여 계획 및 설계, 자체 생산을 포함한 시공, 운용, 해체

및 재활용의 life cycle 단계별로 각각 시설물의 특성을 고려하여 탄소배출량을 산정하는 방법을 제공해 탄소배출량을 산정하고 관리하기 위한 목적으로 제시되었다. 탄소배출량 산정 시 CO₂ 외의 온실가스도 함께 고려하고 온실가스 배출량 산정 시에는 기후변화 협약에서 제시한 지구온난화잠재력(GWP, Global Warming Potential) 지수 값을 온실가스에 적용하여 CO₂-e (CO₂당량)로 산정하는 것을 원칙으로 하고 있으며, CO₂ 배출량 산정 방식은 IPCC (2006)을 기초로 하여 Eq. (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$CO_2 \text{ 배출량}(tCO_2) = \text{에너지사용량}(unit) \times \text{순발열량}(kcal/unit) \times \text{탄소배출계수}(tC/kcal) \times \text{산화율} \times 44/12(tCO_2/tC) \quad (3)$$

그리고, 제시된 가이드라인의 불완전성으로 인해 가이드라인에서 규정하지 않은 사항에 대해서는 평가를 요구하는 자가 별도의 탄소배출량 산정 방법 및 기준을 적용할 수 있으나 가이드라인에 따라 산정된 결과와 구분하여 별도 표기하도록 하고 있어 방법론적인 개선 여지를 가지고 있다.

2.2.2 직접 측정에 의한 산정 방법

국내 건설기계의 배출가스에 대해서는 대기환경보전법에 의해 배출허용기준이 규정되어 있어 제작차에 대한 인증시험(ISO 8178 CI-8 모드)을 통해 확인하도록 하고 있다. 시험방법은 Fig. 1에서와 같이 실험실에서 분리한 엔진을 시험 장비에 연결시켜 차량의 운전 조건을 실험에 맞게 안정된 상태에서 모사한 것으로 특정 상태에서 연료의 연소과정이 반영된 정확한 정보를 취득할 수 있다. 하지만 설치 및 운영에 많은 시간과 비용이 소요되고 제한된 엔진 상태로 운전 조건을 판단해야하므로 실제 현장의 다양한 운행 특성에 따른 영향을 반영하기에는 제한성을 가지고 있다.

Kim (2014)은 농도-유속측정(C-FVM)을 이용한 건설장비의

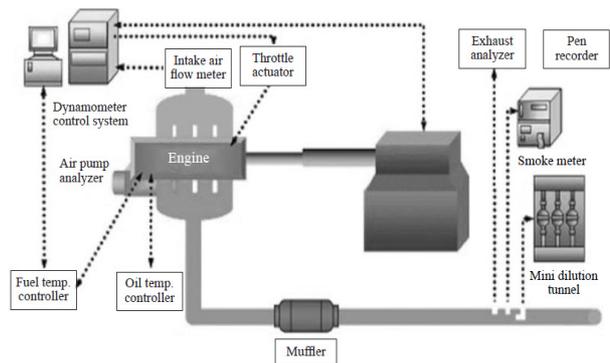


Fig. 1. Schematic Diagram for Exhaust Emission Test System (Lim et al., 2009)

CO₂ 배출량 직접측정방법을 제안하였다. 이 방법은 배기가스의 유속을 측정하여 배기구에서 배출되는 단위시간당 유량을 산정하고, 실험을 통해 측정된 배기가스 CO₂ 농도를 유량과 연산하여 시간당 배출되는 CO₂ 질량을 산정한다. 보다 자세한 CO₂ 농도를 측정하기 위해 차량에서 배출되는 가스를 일정한 크기의 포집용기에 포집한 후 CO₂ 센서를 이용하여 포집된 배기가스의 RPM별 CO₂ 농도(ppm)를 측정하고 측정된 농도 값을 Eq. (4)를 이용하여 단위부피당 CO₂ 질량값(g/l)로 환산한다. 그리고 배기구에 유속센서를 설치하여 RPM별 배출되는 유속을 측정하여 시간당 배출총유량(m³/s)을 산정한 후 Eq. (5)에 단위부피당 CO₂ 질량값 및 시간당 유량을 대입하여 단위시간당 CO₂ 배출량을 산정한다.

$$CO_2(g/L) = x(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left(\frac{273}{273+y} \times \frac{z(atm)}{1(atm)} \right) \quad (4)$$

여기서, x : CO₂ 농도(ppm), y : 연소온도(°C), z : 대기압(atm)

$$CO_2(g/s) = Flow\ Rate(m^3/s) \times CO_2(g/L) \times 1000 \quad (5)$$

3. 실험장비 및 연구방법

3.1 실험장비

실험대상 건설 장비는 현장에서 운행 중인 타이어 굴삭기(DX 140WA)로 엔진은 6기통, 무게는 13.5ton, 버킷용량은 0.59m³, 정격출력 134ps/2,000rpm이며 상세 제원은 Table 1과 같다.

REMS 방식의 배기가스 측정기 2기를 사용하였으며 주 측정기는 Fig. 2(a)의 프랑스 KIMO 사의 MGA5K 기종이고 CO₂ 농도의 측정범위는 0~100%이고 NDIR 센서, 배기가스 유속의 측정범위는 1~100m/s, 배기가스 온도의 측정범위는 최대 0~1700°C까지이고 반응 응답시간은 T90까지 약 20초이다. 보조 측정기는 Fig.

2(b)와 같은 독일의 TESTO사의 Testo310 기종이며 CO₂ 농도는 0~CO_{max}까지 측정된 계산 값을 보여주고 온도의 측정범위는 0~400°C이며 반응 응답시간 T90까지 약 60초이다. Table 2는 장비들의 연구와 관련된 측정 항목 및 성능이다.

3.2 연구방법

굴삭기의 CO₂ 배출량을 직접측정방식으로 산출하기 위해서는 굴삭기의 운행특성상 CO₂ 배출량을 주행속도별로 측정하는 것 보다 작업에 따른 부하상태의 RPM 변화를 장비 부하량으로 고려하여 CO₂ 배출량을 산정하는 것이 보다 합리적이라 판단된다. 운행 상태를 차대동력계로 동력 전달이 없는 공회전 무부하(Non-load) 상태(Fig. 3)와 버킷과 블레이드를 이용해 차체를 들어 올려 차대동력계로 동력을 주어 바퀴를 회전시키는 부하(Load) 상태(Fig. 4)로 구분하였다. CO₂ 배출량을 산정하기 위해 PEMS 장비로 현장에서 굴삭기의 특정 RPM에 대해 배기구로 배출되는 배기가스의 CO₂

Table 1. Specifications of Excavator (DX 140WA)

Division	Unit	Dimension
Operating weight	ton	13.5
Bucket capacity	m ³	0.59
Cylinder	EA	6
Engine power	ps/rpm	134/2,000
Travel speed	km/hr	37
Production year	year	2010



(a) MGA5K



(b) Testo310

Fig. 2. PEMS Equipments

Table 2. List and Performance of PEMS Equipments

Measured components	Measuring range		Accuracy		Resolution		Sensors	
	MGA5K	Testo310	MGA5K	Testo310	MGA5K	Testo310	MGA5K	Testo310
Oxygen (O ₂)	0~25Vol.%	0~21Vol.%	±0.2Vol.%	±0.2Vol.%	0.01Vol.%	0.1Vol.%	E.C	-
Carbon monoxide (CO)	0~100%	0~4000ppm	±0.2%	±20ppm	1ppm	1ppm	NDIR	-
Carbon dioxide (CO ₂)	0~100%	0~CO _{max}	±0.2%	0.2Vol.%	0.01%	0.1Vol.%	NDIR	Calculation
Gas flow velocity	1~100m/s	-	±1m/s	-	-	-	-	-
Temperature	0~650°C	0~400°C	±2°C	±1.5%	1°C	0.1°C	-	-
Response time T90	app.20s	app.60s	-	-	-	-	-	-

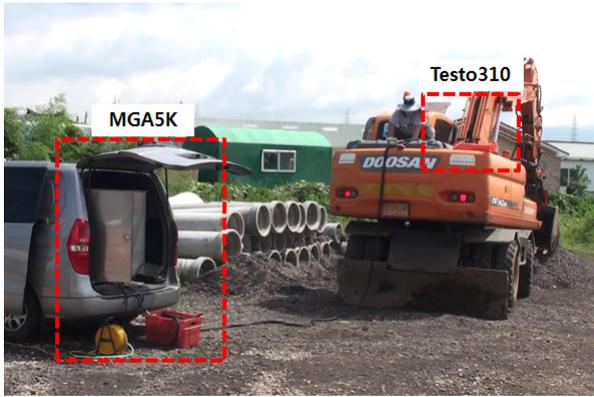


Fig. 3. Exhaust Gas Measuring (Non-load)



Fig. 4. Exhaust Gas Measuring (Load)



(a) Filling



(b) Rotating

Fig. 5. RPM Load During Bucket Operation

농도와 온도 그리고 유속 등을 측정하여 RPM 변화와 상관관계를 분석하였다.

또한, 건설 장비의 생산성(작업량)과 CO₂ 배출량과의 관계를 분석하기 위해 건설장비의 작업 시 부하특성을 보여주는 RPM 변화를 소형 영상기록 장치(고프로)를 이용해 차량 내부에서 기록하고 동시에 외부에서 건설장비의 생산성을 영상기록 장치(캠코더)로 기록하여 동 시간으로 연계 분석하였다.

4. 굴삭기의 작업 특성

4.1 버킷을 이용한 운반 작업

버킷(Bucket)을 이용한 작업에서 RPM 변화량과 생산성을 파악하기 위해 덤프트럭(15ton) 한 대분의 자갈 8m³를 준비하고 작업을 위한 굴삭기의 회전각이 90도가 되도록 하여 작업 상태의 일관성을 최대한 유지한 상태에서 자갈 운반 작업을 4사이클 반복 측정하였다. 그리고 굴삭기의 작업 형태를 관찰하여 굴삭기가 자리를 잡기 위한 이동(Moving)과 버킷에 담기(Filling) (Fig. 5(a)), 붐 회전(Rotating) (Fig. 5(b)), 버킷 비우기(Emptying), 흐트러진 자갈 모으기(Gathering)의 5가지 동작으로 세분화하였다. 엔진부하량인 RPM 변화와 작업 동작이 동 시간으로 기록된 영상자료를 실험실에

서 Fig. 6과 같이 작업시간에 따른 RPM 변화를 1초 단위로 시계열 자료화하여 분석하였다.

1사이클의 자갈 운반 작업은 장비가 준비된 상태에서 측정이 시작되어 이동 동작이 없고 버킷(0.6m³)으로 325초간 17회의 담기→회전→비우기→회전을 반복하여 자갈 8m³ 운반 후 대기상태(RPM 800)로 전환하여 마무리 하였다. 작업 시 RPM 변화는 버킷에 자갈을 담기 동작에서 최대 1136~최소 1052이고 붐 회전은 1136~1052, 비우기는 1128~1054, 바닥에서 자갈 모으기는 1122~1054이다. 2사이클 작업부터는 굴삭기가 자리를 잡기 위한 이동 동작이 있으며 399초간 18회의 작업을 반복했다. 굴삭기의 이동 동작에서 RPM은 최대 1424~1066로 나타났으며, 이는 굴삭기의 이동 특성상 버킷을 바닥에 지지하고 차체를 비틀어 이동하는 과정에서 출력이 높아져 다른 동작에 비해 상대적으로 큰 RPM 변화를 보였다. 다른 세부 동작에서는 1사이클과 유사한 RPM 변화를 보였다. 그리고 3사이클 작업은 369초간 17회의 작업을 반복했으며 작업 동작에 따른 RPM 변화는 2사이클과 유사하다. 마지막 4사이클 작업에서는 452초간 17회의 작업을 반복하였고 자갈이 흐트러져 있어 담기와 모으기에 작업 시간이 더 소모되었다.

Table 3은 총 4사이클의 자갈 운반 작업에서 세부 동작별 최대, 최소, 평균 RPM 및 작업시간을 보여주고 있다. 세부 동작인 담기,

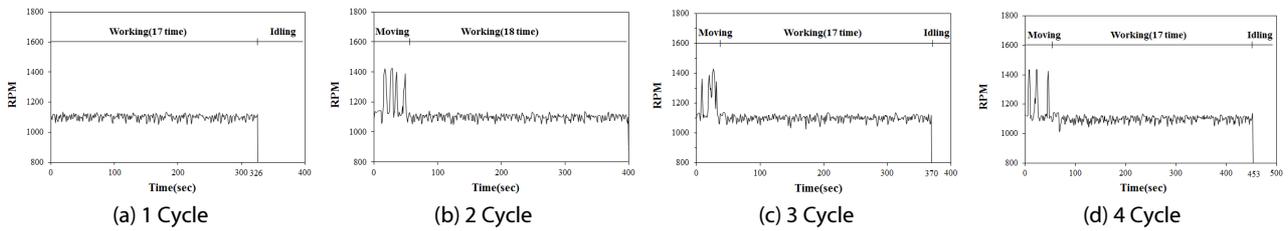


Fig. 6. RPM Load According to Work Type in Bucket Operation

Table 3. RPM Load and Work Time Composition Ratio by Work Types in Bucket Operation

Work Types	RPM Load			Working Time (sec)			Remark
	Max	Min	Mean	Max-Min	Time (sec)	Composition (%)	
Moving	1436	1066	1206	370	161	10.2	Add 40s
Filling	1136	1044	1097	92	467	29.5	-
Rotating	1140	1028	1103	112	583	36.8	-
Emptying	1128	1054	1097	74	181	11.4	-
Gathering	1128	1054	1101	74	192	12.1	-
Total	-	-	1110	-	1585	100.0	-

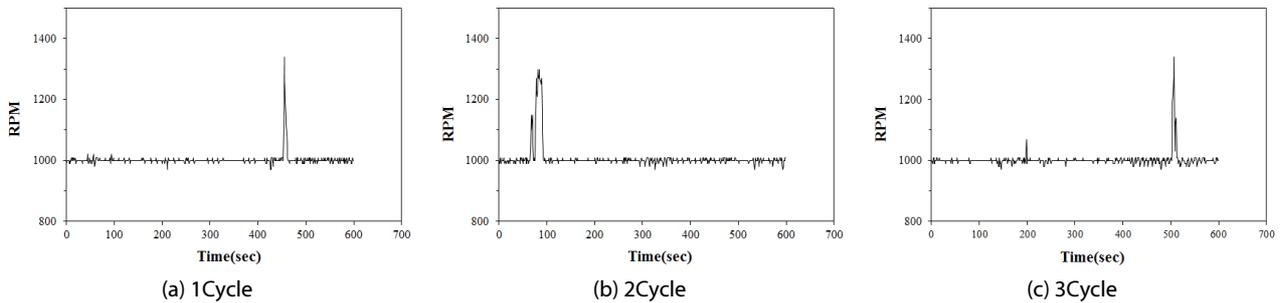


Fig. 7. RPM Load According to Work Type in Breaker Operation

회전, 비우기, 모으기의 RPM 변화는 유사하며 최대 RPM과 최소 RPM의 차이가 약 90정도로 변화 폭이 작고 평균 RPM은 1100이다. RPM 변화가 가장 큰 이동은 최대와 최소의 차가 약 370이고 평균 RPM은 1206으로 다른 세부 동작에 비해 RPM이 100정도 높다. 그리고 4사이클의 총 작업시간은 1,545초이나 1사이클 운반 작업 시 이동 동작이 없어 나머지 3사이클에서 평균한 이동 시간 40초를 추가하여 1,585초이다. 운반 작업에서 세부 동작의 작업시간 구성비가 가장 평균한 평균 RPM은 약 1110으로 산출되었다. 버킷 작업 시 이동 동작을 제외하고는 비교적 엔진부하 폭이 작은 정적인 작업 특성을 갖는 것으로 나타났다.

4.2 브레이커를 이용한 암 파쇄 작업

배수로 정비(폭 5m × 높이 2m)를 위한 암 파쇄 작업 중인 굴삭기를 대상으로 브레이커를 이용한 작업에서의 RPM 변화량과 생산성을 파악하였다. 작업 동작은 브레이커를 이용한 암 파쇄

(Crushing), 파쇄한 암을 모으는 모으기(Gathering), 장비의 이동(Moving)으로 3가지로 구분하였다. 영상기록 장치를 이용한 굴삭기 내외부의 기록방법은 버킷작업 시와 동일하고 약 40분간 연속기록 후 작업과 무관한 시간을 배제하고 RPM 변화가 큰 굴삭기의 이동 동작이 포함되게 10분(600초) 단위로 분할하여 Fig. 7과 같이 3사이클에 대해 작업에 따른 RPM 변화를 1초 단위로 시계열 자료화하여 분석하였다.

1사이클의 작업에서 RPM 변화는 암 파쇄 동작에서 최대 1010~최소 970이고 파쇄된 암을 약 $\phi 500\text{mm}$ 이하로 소할하기 위해 모으는 모으기는 1100~970이며 진행 방향 또는 후방으로 이동 동작에서는 1340~1000이다. 그리고 2사이클과 3사이클에도 작업 동작에 따라 유사한 RPM 변화를 보인다. 이동 동작에서 운반 작업 시와 같이 상대적으로 큰 RPM 변화를 보였다.

총 3사이클의 브레이커 작업에 대한 세부 동작의 최대, 최소, 평균 RPM 및 작업시간을 Table 4에서 보여주고 있다. 작업시간

Table 4. RPM Load and Work Time Composition Ratio by Work Type in Breaker Operation

Work Types	RPM Load				Working Time (sec)		Remark
	Max	Min	Mean	Max-Min	Time (sec)	Composition (%)	
Crushing	1010	970	1000	40	1219	67.7	-
Gathering	1100	970	1001	130	540	30.0	-
Moving	1340	1000	1169	340	41	2.3	-
Total	-	-	1004	-	1800	100.0	-

Table 5. Non-load States Measured Results of Exhaust Gas According to RPM Load

RPM	CO ₂ Concentration (%)		Temperature (°C)		Velocity (m/s)		Flow rate (m ³ /s)	
	Measured Values	Normalized	Measured Values	Normalized	Measured Values	Normalized	Measured Values	Normalized
800	2.58	1.00	120.7	1.00	5.8	1.00	0.06	1.00
1000	2.60	1.01	132.4	1.10	7.2	1.24	0.07	1.17
1200	2.63	1.02	135.1	1.12	8.5	1.47	0.08	1.33
1400	2.76	1.07	143.5	1.19	9.7	1.67	0.09	1.50
1700	2.77	1.07	165.1	1.37	11.2	1.93	0.11	1.83

구성비(67.7%)가 가장 큰 압 파쇄 동작의 RPM 변화는 최대와 최소의 차가 약 40정도로 변화 폭이 미미하고 평균 RPM이 1000으로 브레이커 작업 특성도 매우 정적인 것으로 확인된다. 그리고 각 세부 동작시간 구성비로 가장 평균한 RPM은 1004이다.

브레이커 작업 대상인 암반은 설계내역서 상 연암이며 실험장소 주변에서 연구(Kim, 2007)된 암반의 압축강도는 약 55MPa이하로 연암에 해당하고, 육안 조사결과도 암질이 치밀하지 못하고 가공을 불규칙하게 가지고 있어 연암으로 판단된다. 그리고 굴삭기의 압 파쇄 작업 생산성은 압 파쇄 전 배수로 상단에 1m씩 등간격으로 횡단라인을 그리고 1시간 작업 후 작업 물량을 산출하는 방식으로 3시간 동안 확인한 결과 매시 6.4m³, 5.2m³, 6.2m³의 암을 파쇄한 것으로 산출되어 단위시간 생산성은 5.9m³/hr로 산정되었다.

5. CO₂ 배출량 산정

실험에 사용한 PEMS 장비들의 특성상 T90까지의 응답시간이 약 20초~60초로 확인되어 RPM 변화에 따른 CO₂ 농도를 실시간으로 연속 측정하게 되면 측정치에 기계적 오류를 범할 수 있는 것으로 판단하였다. 따라서 굴삭기의 배기구에 알루미늄 관을 연결하여 외부 영향요인을 최소화한 상태에서 배출되는 배기가스의 CO₂ 농도(%)와 온도(°C) 그리고 유속(m/s)을 특정된 RPM에서 60초 이상으로 5회 이상 측정된 값을 평균하여 측정 결과로 활용하였다. 그리고 배기가스의 시간당 배출량은 배기구에서 측정된 유속으로 배출량을 환산하였다.

실험에 사용된 굴삭기는 엔진부하량을 디지털방식으로 제어하

고 있어 무부하상태와 부하상태에서의 RPM 변화 최대치가 서로 달라 각 상태의 RPM 변화를 최대치까지 확인한 후 측정구간을 일정하게 나누었다.

첫 번째 공회전 무부하상태에서 최대 RPM은 1700까지이며 이를 5구간으로 나누었다. 측정결과는 Table 5에서와 같이 기준치인 공회전 대기상태 최소 RPM 800에서 CO₂ 농도는 2.58%, 온도 120.7°C, 유속 5.8m/s이고 유속으로 산정한 배출량은 0.06m³/s이다. RPM 변화에 따른 굴삭기의 배기가스 배출 특성을 살펴보면, CO₂ 농도 변화는 아주 미미한 수준으로 RPM 1700에서 7%정도 증가하고 온도 변화는 37% 증가하였으며 유속은 93%까지 증가하였다.

두 번째 차대 동력계로 동력전달을 주어 바퀴를 회전시키면서 측정된 부하상태에서의 RPM은 기준치인 대기상태 최소 800에서 최대 2050까지이며 이를 7구간으로 나누어 측정된 결과는 Table 6과 같다. RPM 변화에 따른 배기가스 배출 특성으로 CO₂ 농도 변화는 RPM 1800에서 5.58%로 216% 증가하였고 RPM 최대치인 2050에서는 소폭 감소하여 5.44%이나, 이는 실제상황에서 보기 어려운 출력 한계 상태에서의 불완전 연소(Incomplete combustion)로 인한 결과로 판단된다. 그리고 RPM 2050에서 온도 변화는 247% 증가하였고 유속은 변화 폭이 가장 크게 나타나 436% 증가하였다.

굴삭기의 무부하상태와 부하상태에서 RPM 변화와 CO₂ 농도, 온도, 유속들과의 상관관계를 Fig. 8에서 비교하고, 그 결과를 Table 7에 정리하였다.

RPM 변화와 CO₂ 농도와의 관계(Fig. 8(a))를 살펴보면 공회전

Table 6. Load States Measured Results of Exhaust Gas According to RPM Load

RPM	CO ₂ Concentration (%)		Temperature (°C)		Velocity (m/s)		Flow rate (m ³ /s)	
	Measured Values	Normalized	Measured Values	Normalized	Measured Values	Normalized	Measured Values	Normalized
800	2.58	1.00	120.7	1.00	5.8	1.00	0.06	1.00
1000	3.20	1.24	162.7	1.35	9.5	1.64	0.09	1.50
1200	3.85	1.49	171.6	1.42	13.4	2.31	0.13	2.17
1400	4.46	1.73	205.5	1.70	15.6	2.69	0.15	2.50
1600	4.82	1.87	225.0	1.86	18.2	3.14	0.17	2.83
1800	5.58	2.16	247.5	2.05	23.8	4.10	0.23	3.83
2050	5.44	2.11	298.2	2.47	25.3	4.36	0.24	4.00

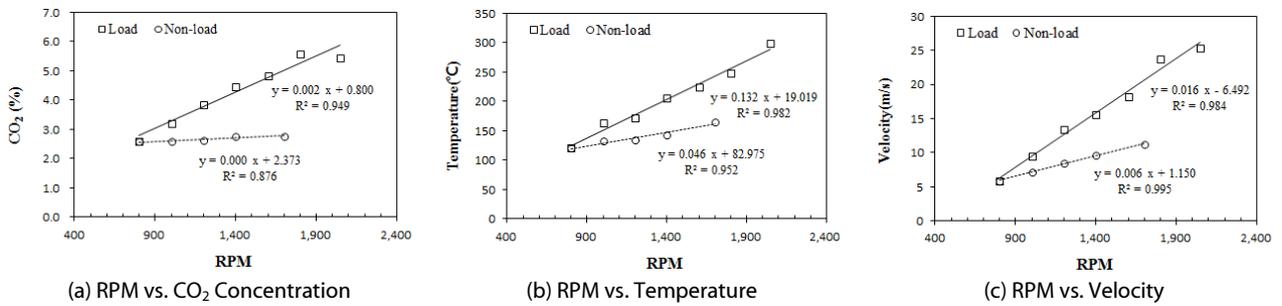


Fig. 8. Emission Characteristics According to RPM Load in Non-Load and Load States

Table 7. Comparison of Analysis Results of Non-Load and Load States

Division	States	Regression Equations	R ²
CO ₂ concentration	Non-load	$y = 0.000x + 2.373$	0.876
	Load	$y = 0.002x + 0.800$	0.949
Temperature	Non-load	$y = 0.046x + 82.975$	0.952
	Load	$y = 0.132x + 19.019$	0.982
Velocity	Non-load	$y = 0.006x + 1.150$	0.995
	Load	$y = 0.016x + 6.492$	0.984

무부하상태에서는 CO₂ 농도 변화의 기울기가 0에 가깝고 설명력 R²이 0.876인 선형 회귀식으로 추정되었으며 RPM 1700인 최대치 까지 변화가 미미하다. 이러한 결과는 Kim and Jang (2013); Kim (2014)의 연구에서 제시한 것처럼 건설장비들을 정지된 상태 (무부하상태)에서 RPM 변동을 주어 배기가스를 포집 후 안정화시켜 CO₂ 농도를 반복 측정한 결과, 유사한 농도로 수렴한다는 결과와 동일하다. 그리고 동력전달에 의해 차체의 움직임을 동반한 부하상태에서 RPM 변화에 따른 CO₂ 농도는 RPM이 커질수록 선형적으로 증가하여 RPM 변화에 대한 CO₂ 농도변화는 R²=0.949인 선형 회귀식으로 추정되었다.

RPM 변화 구간의 중간 정도인 RPM 1400에서 무부하상태의 CO₂ 농도는 2.76%이나 부하상태에서는 4.46%으로 무부하상태 보다 약 60% 크고 RPM값이 커질수록 그 차이가 더 크게 벌어지는

것을 확인할 수 있다. 이처럼 동일한 RPM조건에서 부하상태의 CO₂ 농도가 큰 이유는 동력계로 전달된 굴삭기의 움직임(바퀴 회전)으로 인해 연료의 소비량 즉, 연소량이 많아졌기 때문으로 판단된다.

RPM 변화와 온도와의 관계(Fig. 8(b))에서는 무부하상태와 부하상태 둘 다 RPM이 커질수록 증가폭의 차이를 보이며 선형적으로 증가하고 있다. 측정된 데이터를 회귀분석 해보면 무부하상태에서 R²=0.952이고 부하상태에서 R²=0.982인 선형회귀식으로 추정되었다. 그리고 배기가스 온도는 RPM값이 커질수록 그 차이가 더 크게 벌어져 기울기가 큰 부하상태의 온도 변화가 더 크다. RPM 변화와 유속과의 관계(Fig. 8(c))는 무부하와 부하상태 모두 RPM이 증가할수록 선형적으로 증가하는 양상을 보이고 기울기가 큰 부하상태에서 유속 변화가 크다. 회귀분석 결과 무부하상태에서

Table 8. Comparison of Excavator Productivity

Condition	Workload (m ³ /hr)			
	Estimate (a)	Actual (b)	Difference (b-a)	Ratio (%) ((b-a)/b)
Bucket	70.2	72.7	2.5	3.4
Breaker	5.0	5.9	0.9	15.7

R²=0.995이고 부하 상태에서 R²=0.984인 선형회귀식으로 추정되었다.

이처럼 배기구에서 배출되는 CO₂ 농도, 온도, 유속은 굴삭기의 작업 시 배출 특성을 구분한 무부하상태와 부하상태에서 큰 차이를 보이고 있다. 실제 건설장비들은 공회전 무부하상태가 아니라 차대 동력계로 전달된 동력을 운행 시 차체의 크고 작은 움직임으로 전달하여 작업이 이루어지게 되며 이를 본 연구에서는 부하상태로 모사하였다. 디젤엔진 등 내연기관을 사용하는 건설 장비들의 운행 특성을 반영한 CO₂ 배출량은 부하상태에서 측정된 결과를 반영하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

6. 연구결과

6.1 굴삭기의 생산성 산정 결과 비교

버킷을 이용한 운반 작업과 브레이커를 이용한 암 파쇄 작업의 시간당 작업량을 현장에서 실제 작업량과 ‘16 표준품셈에 의한 작업량을 비교하여 분석결과의 객관적 수준을 확인해 보았다. 표준 품셈에 의한 굴삭기의 버킷을 이용한 시간당 작업량(Q)을 구하기 위해 실험 조건과 유사하게 가정해 보면, 각 계수들은 버킷용량 q : 0.6m³, 버킷계수 K : 0.90, 체적환산계수 f : 1, 작업효율 E : 0.65, 1회 싸이클 시간은 회전각 90도의 cm : 18을 적용하면 Q = 70.2m³/hr으로 산출된다. 그리고 실제 실험을 통해 측정된 시간당 작업량은 72.7m³/hr로 표준품셈에 의해 산출된 결과와 약 3.4%수준의 차이를 보인다. 이는 현장에서 작업량(8m³)과 붐 회전(90°)을 일정하게 제어한 상태에서 측정된 비교적 양호한 결과가 도출된 것으로 판단된다.

$$Q = \frac{3600 \cdot q \cdot k \cdot f \cdot E}{cm} = 70.2m^3/hr$$

$$(8m^3 \times 4 Cycle) \div 1585s \times 3600s = 72.7m^3/hr$$

그리고 표준품셈에 의한 암 파쇄 작업은 대형브레이커와 굴삭기 0.6~0.8m³를 조합한 시공형태로 연암에 대한 암 파쇄 작업은 작업 난이도에 따라 4.5~5.5m³/hr를 제시하고 있다. 배수로 공사가 이루어진 실험 장소는 기존 농로로 활용되던 곳이라 현장이 협소하고 보안물건이 인접해 있어 평균치인 5.0m³/hr로 산정하였다. 실제

실험을 통해 한 시간씩 3회 측정된 시간당 작업량은 6.4m³, 5.2m³, 6.2m³이며 평균 5.9m³/hr로 산출되어 표준품셈에 의한 결과와 비교해보면 약 15.7%의 차이를 보인다. 하지만 표준품셈에서는 최대치가 5.5m³/hr이고 암질 및 작업 환경에 따른 효율 등을 반영하지 못하고 있어 현장여건이 반영된 실제 측정값을 활용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. Table 8은 굴삭기의 작업별 생산성 비교 결과이다.

6.2 CO₂ 배출량 산정 결과 비교

굴삭기의 무부하상태와 부하상태의 CO₂ 배출량은 Table 7의 회귀식들을 이용해 각 인자 값을 구하고 Eqs. (4) and (5)에 대입하여 산정하였다. CO₂ 배출량은 Table 9에서와 같이 버킷 작업의 평균 RPM 1110에서 무부하상태에서는 6.57kg/hr이고 부하상태에서는 16.60kg/hr로 약 2.5배의 차이가 발생하였고 버킷 작업 시 RPM 변화의 최대치인 RPM 1400에서는 부하상태가 약 3.0배 더 크다. 건설장비의 CO₂ 배출량 산정 시 무부하상태에서 측정된 결과를 사용하게 되면 과소평가될 우려가 있다.

본 연구에서 직접측정방식으로 운행 특성을 반영하여 산정된 굴삭기의 CO₂ 배출량과 탄소배출계수를 활용하는 IPCC Tier 1 및 국내 가이드라인에 의한 CO₂ 배출량을 Table 10에서 비교하였다. 굴삭기의 시간당 주 연료소비량은 경유 11.6 l/hr (‘16 표준품셈)이다.

IPCC Tier 2이상은 국가 고유배출계수를 활용해야 하는데 현재 국내에서는 개별 건설기계에 대한 고유배출계수를 가지고 있지 않아 Tier1으로 산정하였다. CO₂ 배출량은 Eq. (1)을 이용하여 IPCC에서 제시한 탄소배출계수 74,100kg/Tj와 소비된 연료량(Tj)의 곱으로 산정된다. 소비된 연료량(Tj)을 구하기 위해서 경유의 순발열량 43Tj/Gg (IPCC)과 국내 4개 정유사의 경유를 조사하여 산정한 경유의 밀도 828.6g/l (Yu et al., 2012)로부터 단위 부피당 경유의 발열량이 3.563 × 10⁻⁵Tj/l 로 산출되고, 여기에 시간당 경유의 연료 소비량 11.6 l/hr을 곱한다. 이 과정을 통해 굴삭기의 시간당 CO₂ 배출량은 30.63kg/hr로 산정되었다.

그리고 국내 가이드라인에서 제시된 경유의 순발열량은 8450 kcal/l 이고 온실가스 배출계수(tCO₂/kcal), 산화율, 전환계수를 환산한 탄소배출계수는 0.00031kgCO₂/kcal이다. 따라서, 탄소배출계수와 경유의 순발열량을 곱하면 단위 연료량에 따른 CO₂

Table 9. CO₂ Emissions According to RPM Load in Non-Load and Load States

RPM	States	CO ₂ Concentration (%)	Temperature (°C)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /s)	CO ₂ Emission (kg/hr)	Load/Non-load
1004	Non-load	2.62	129.4	4.9	0.046	5.82	2.3
	Load	3.28	151.5	9.5	0.090	13.49	
1110	Non-load	2.64	134.3	5.5	0.052	6.57	2.5
	Load	3.54	165.5	11.2	0.106	16.60	
1400	Non-load	2.71	147.7	7.3	0.069	8.59	3.4
	Load	4.26	203.8	15.8	0.150	25.93	

Table 10. Comparison of CO₂ Emission Estimation Results

Division	Fuel Consumption/ Workload	Unit of CO ₂ Emission	CO ₂ Emission (kg/hr)	IPCC Ratio (%)	Remark	
IPCC Tier1	11.6 L/hr	2.64 kg/L	30.63	100.0	-	
National Guideline	11.6 L/hr	2.62 kg/L	30.41	99.3	-	
Study	Bucket	72.7 m ³ /hr	0.23 kg/m ³	16.60	54.2	Load States
	Breaker	5.9 m ³ /hr	2.29 kg/m ³	13.49	44.0	

배출량이 2.62kg/l 로 산정되고 에너지사용량 11.6 l/hr로부터 굴삭기의 시간당 CO₂ 배출량은 30.41kg/hr로 산정된다.

IPCC Tier 1을 기준으로 연구결과들을 비교해 보면, IPCC를 기초로 만들어진 국내 가이드라인에 의한 CO₂ 배출량은 30.41kg/hr 이고 99.3% 수준으로 약간의 차이는 순발열량을 산출할 때 사용된 경유의 밀도 차이에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에 의한 부하상태에서 굴삭기의 CO₂ 배출량은 버킷을 이용한 운반 작업 시 16.60kg/hr으로 54.2%이고 브레이커를 이용한 암 파쇄 작업은 13.49kg/hr으로 44.0% 수준이다. 그리고 굴삭기의 단위 작업에 대한 CO₂ 배출량은 버킷 작업 시 0.23kg/m³이고 브레이커 작업 시 2.29kg/m³로 산정되어, 작업의 계획 단계에서 총 CO₂ 배출량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

Bottom-Up방식으로 중규모 굴삭기의 운행 특성이 반영된 CO₂ 배출량을 직접측정방식으로 산정한 결과는 Top-Down방식으로 연료소비량과 탄소배출계수를 활용해 CO₂ 배출량을 산정한 간접 방식의 CO₂ 배출량 보다 약 50% 작은 결과를 보이고 있다. 이는 Tier 2 수준 이상의 개별 장비에 대한 국가 고유 배출계수 산정 시 고려되어야할 CO₂ 배출량 특성을 보여주고 있다. 또한 건설 분야에서 건설 장비의 온실가스 배출량 산정 시 실질적인 연구방법론으로 활용 가능할 것으로 예상된다.

7. 결론

본 연구에서는 국내 건설기계 중 등록대수가 두 번째로 많고 실제 건설 현장에서 활용도가 가장 높은 굴삭기를 대상으로 작업

형태를 버킷 작업과 브레이커 작업으로 분류하여 작업 형태에 따른 생산성과 엔진부하 특성을 분석하였다. 그리고 굴삭기의 운행 특성을 무부하상태와 부하상태로 구분하여 PEMS 장비를 이용해 RPM 변화에 따른 배기가스 배출 특성(CO₂ 농도, 온도, 유속)을 분석하여 직접측정방식에 의한 CO₂ 배출량을 산정하고 탄소배출 계수를 활용하는 방법들과 비교하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 굴삭기의 작업 특성과 생산성은 버킷 작업 시 세부동작별 시간가중 평균 RPM 1110이고 시간당 작업량은 72.7m³/hr이고, 브레이커 작업에서는 시간가중 평균 RPM 1004이며 시간당 작업량은 5.9m³/hr이다. 그리고 작업 시 이동 동작을 제외하면 RPM 변화가 비교적 작은 정적인 작업 부하 특성을 보인다.

둘째, RPM 변화와 배기가스 배출 특성들과의 상관관계를 선형 회귀 분석한 결과 R²=0.876~0.995로 추정되었다. RPM 800 대비 무부하상태 최대 RPM 1700에서 CO₂ 농도 7%, 온도 37%, 유속 93%가 증가하였고, 부하상태 최대 RPM 2050에서는 CO₂ 농도 211%, 온도 247%, 유속은 436% 증가하였다. 부하상태에서는 선형적인 증가 양상이 뚜렷하고 기울기가 커 RPM 변화가 커질수록 무부하상태와 차이가 커진다.

셋째, CO₂ 배출량 산정결과 IPCC Tier 1은 30.63kg/hr이고 국내 가이드라인에서는 30.41kg/hr로 비슷한 수준으로 산정되었다. 버킷 작업에서 무부하상태는 6.57kg/hr, 부하상태는 16.60kg/hr로 2.5배의 차이를 보이고 브레이커 작업의 평균 RPM 1004에서 무부하상태는 5.82kg/hr, 부하상태는 13.49kg/hr로 산정되어 2.3 배의 차이를 보인다. 본 연구를 통해 직접 측정된 굴삭기의 부하상태 CO₂ 배출량은 IPCC Tier 1 대비 약 50% 수준이다.

운행 중인 건설기계의 CO₂ 배출량은 차대동력계로 동력전달이 이루어지는 부하상태에서 측정된 결과를 활용해야할 것으로 판단되며, 향후 본 연구결과를 바탕으로 다양한 건설기계들의 활동도를 반영한 CO₂ 배출량 산정방법과 실제 작업 상태에서 엔진부하 특성 및 장비운행 특성을 보다 효과적으로 측정하기 위한 방법론에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 제주녹색환경지원센터의 2016년도 연구개발 사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bilec, M., Ries, R., Matthews, H. S. and Sharrard, A. L. (2006). "Example of a hybrid life-cycle assessment of construction process." *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 207-215.
- Frey, H. C., Rasdorf, W., Kim, K. W., Pang, S. H. and Lewis, P. (2008). "Comparison of real world emissions of backhoes, front-end loaders, and motor graders for B20 bio diesel vs. petroleum diesel and for selected engine Tiers." *Transportation Research Record*, Vol. 2058, pp.33-42.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, National Greenhouse Gas Programme, IGES.
- International Energy Agency (IEA). (2015). *CO₂ Emissions from fuel combustion 2015*.
- Jin, H. G., Lee, T.W., Park, H.N., Son, J. H., Kim, S. K., Hong, J. H., Jeon, S. Z., Kim, J. S. and Choi, K.H. (2014). "An estimation of age-, power-, and type-specific emission inventories for construction equipments using improved methodologies and emission factors." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, KOSAE*, Vol. 30, No. 6, pp.555-568 (in Korean).
- Kang, M. Y. (2010). *A study on methodology of environment impact assessment for greenhouse gases : the case of highway construction*, Master Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea. pp. 18-19 (in Korean).
- Kim, B. S. (2014). "A study on CO₂ emission factor for earth-work equipment using C-FVM." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp.999-1006 (in Korean).
- Kim, B. S. and Jang, W. S. (2013). "A study on comparing the CO₂ emission estimating result for construction equipment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp.1675-1682 (in Korean).
- Kim, B. S., Jang W. S. and Lee, D. W. (2015). "Analysis of the CO₂ emission characteristics of earthwork equipment." *Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.1-9.
- Kim, J. H. (2007). *A study on the mechanical characteristics and the strength in pyoseonri basalt*, Master Thesis, Jeju National University, Jeju, Korea, pp.37-39 (in Korean).
- Kwon, S. H. (2008). *Development of assessment model for environmental economics of construction projects*, Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University, Seoul, Korea (in Korean).
- Lim, J. H., Jung, S. W., Lee, T. W., Kim, J. C., Seo, C. Y., Ryu, J. H., Hwang, J. W., Kim, S. M. and Eom, D. S. (2009). "A study on calculation of air pollutants emission factors for construction equipment." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.25, No.3, pp.188-195 (in Korean).
- Liu, S., Tao, R. and Tam C. M. (2013). "Optimizing cost and CO₂ emission for construction projects using particle swarm optimization." *Habitat International*, Vol. 37, pp.155-162.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2011). *Carbon emission estimating guideline each facilities*, Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2017). *Status report of construction equipments in Korea*. Korea (in Korean).
- Office for Government Policy Coordination (OGPC). (2014). *Roadmap for achieving national GHG reduction targets*, Korea (in Korean).
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2004). *Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling compression-ignition*.
- Yu, S. A., Jeong, A. R., Jung, H., Lee, H. W., Gwon, H. B. and Park, Y. S. (2012). "A study on property and CO₂ emission factor of domestic fuel." *Proceeding of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 2012, No. 5, pp.400-405 (in Korean).