

건설장비 CO₂배출량산출결과 비교연구

김병수* · 장원석**

Kim, Byung-Soo*, Jang, Won-Suk**

A Study on Comparing the CO₂ Emission Estimating Result for Construction Equipment

ABSTRACT

To resolve the Global Warming problem, it have to reduce CO₂ emission. Korea need to do actively more the effort to reduce the emission because CO₂ emission per person is top level in the world. It is performing variously. However, we should recognize the CO₂ emission attribute to decrease CO₂. Analyzing CO₂ emission of the construction equipment is important in this aspect. Present, the most popular CO₂ emission measuring method is the way using fuel consumption and emission factor. But this method have the problem of reliability because can't reflect the factor being out of proportion at fuel consumption. This study analyzed the reason of difference and compared to the emission factor method after calculate CO₂ emission in direct measurement method.

Key words : CO₂ emission, Global warming, Direct measurement method, Construction equipment, Emission factor

초록

지구온난화(Global Warming) 문제를 해결하기 위해서는 이산화탄소 배출량을 줄여야 한다. 우리나라는 1인당 이산화탄소 배출량이 세계 Top 수준이기 때문에 배출량을 줄이기 위한 노력을 더욱 적극적으로 할 필요가 있다. 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 노력은 다방면으로 이루어지고 있다. 그러나 CO₂를 줄이기 위해서는 그것의 배출특성을 알아야 한다. 건설장비의 이산화탄소 배출량을 측정하여 비교분석하는 것은 이러한 측면에서 중요하다. 현재 가장 많이 이용되고 있는 배출량 산정방법은 연료사용량 대비 배출계수를 이용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 연료사용량에 비례하지 않는 요인을 반영하지 못하므로 신뢰성에 문제가 있다. 본 연구에서는 건설장비의 이산화탄소 배출량을 직접측정방식으로 산정하여 배출계수에 의한 방식과 비교분석하고 그 차이에 대한 원인을 분석하였다.

검색어 : 이산화탄소 배출량, 지구온난화, 직접측정방식, 건설장비, 배출계수

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

지구온난화(Global Warming) 문제를 해결하기 위해서는 지구온난화의 가장 큰 원인으로 인식되고 있는 이산화탄소 배출량을 줄여야 한다. 이산화탄소는 메탄, 이산화질소 등에 비하여 지구온난화지수 (Global Warming Potential : GWP)는 낮지만 배출량이 온실가스 중 80%를 차지한다. 세계 각국은 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해서 탄소세, 탄소배출권거래제도 등을 도입하는 등 많은 노력을 기울이고 있다.

우리나라는 1인당 이산화탄소 배출량이 세계 Top 수준이기 때문에 배출량을 줄이기 위한 노력을 더욱 적극적으로 할 필요가 있다.

* 정희원 · 경북대학교 토목공학과 부교수 (bskim65@knu.ac.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 영남대학교 건설시스템공학과 조교수 (Corresponding Author · Yeungnam University · wsjang@ynu.ac.kr)

Received March 9 2013, Revised April 16 2013, Accepted May 2 2013

이산화탄소 배출량은 에너지사용량에 어느 정도 비례하기 때문에 에너지사용량을 줄이기 위한 방법이 주를 이루고 있다. 친환경건축물 인증제도나 패시브디자인(Passive Design)이 대표적인 방법이라고 할 수 있다.

그러나 에너지사용량을 줄임으로서 이산화탄소 배출량을 줄이는 방법은 시설물의 운영단계에서 적용하기에 적합한 방법으로서 전기의 사용이나 화석연료의 사용을 많이 하는 오피스빌딩, 공장 등과 같은 대형시설물의 운영 시 에너지사용량을 최소화 하는데 이용된다.

건설산업의 생애주기에서 이산화탄소 배출량이 많은 단계는 운영단계 외에도 시공단계가 있다. 건설산업에서 환경영향이 미치는 정도는 시공단계가 운영 및 유지관리단계보다 크다(권석현, 2008). 특히 도로건설 프로젝트의 경우 시공단계의 환경영향이 절대적이기 때문에 시공단계의 환경영향을 중요시해야 한다. 시공단계에서는 화석연료를 사용하는 장비에 의해서 이산화탄소가 많이 배출된다. 장비에 의해서 배출되는 이산화탄소는 연료사용량

에 어느 정도 비례하기는 하지만 비례하지 않는 요인이 존재한다. 이를테면 장비의 노후화정도나 대기온도 및 습도 같은 요인으로 인하여 연료사용량과는 별개로 이산화탄소 배출량이 달라질 수 있다.

따라서 건설장비의 이산화탄소 배출량을 연료사용량에 의한 산정이 아닌 직접측정방식으로 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 건설장비의 이산화탄소 배출량을 직접측정방식으로 산정하고 결과를 다른 방식으로 산정한 결과와 비교해 보고 차이에 대한 원인분석을 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 건설공사의 기반이 되는 토공사에 사용되는 토공장비 중 백호를 대상으로 이산화탄소 배출량을 직접측정방식으로 측정하고 측정된 값을 화학식에 의한 방법 및 배출계수에 의한 방법과 비교하고 차이가 나는 원인을 분석하는 것으로 한다.

또한 건설장비의 이산화탄소 배출량 산정과 관련한 연구현황을 분석하고 건설장비의 가동에 따른 이산화탄소 배출량을 측정할 수 있는 방법론의 고찰 그리고 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 요소 분석을 연구의 범위로 한정한다.

연구의 방법은 건설장비의 이산화탄소 배출량과 관련한 국내외 기존연구를 고찰하였다. 건설장비의 이산화탄소배출량 산출방법은 유속 및 CO₂농도를 이용하여 건설장비의 작업 및 운행형태에 따라 배출되는 CO₂량을 실시간으로 측정할 수 있는 방법(장원석 외, 2013)을 이용한다. 이 방법은 배기가스의 유속을 측정하여 배기구에서 배출되는 단위시간당 유량을 산정하고, 실험을 통해 측정된 배기가스 CO₂ 농도를 유량과 연산하여 단위 시간당 혹은 주행거리당 배출되는 CO₂의 질량을 산정한다.

기존의 차량 배기가스 및 CO₂를 측정하는 방법은 대부분 차대동력계에서 정지된 상태로 포집을 실시함으로써 일별 또는 km단위별

Table 1. Global Warming Potential (GWP)

Green House Gas	Chemical Equation	GWP 1990	GWP 1995	GWP 2001
Carbon Dioxide	CO ₂	1	1	1
Methane	CH ₄	22	21	23
Nitrogen Dioxide	N ₂ O	270	310	296
Hydrofluorocarbons	HFCs	150~10,000	150~11,700	120~12,000
Perfluorocompounds	PFCs	N/A	6,500~9,200	5,700~11,900
Sulphur hexafluoride	SF ₆	N/A	23,900	22,200

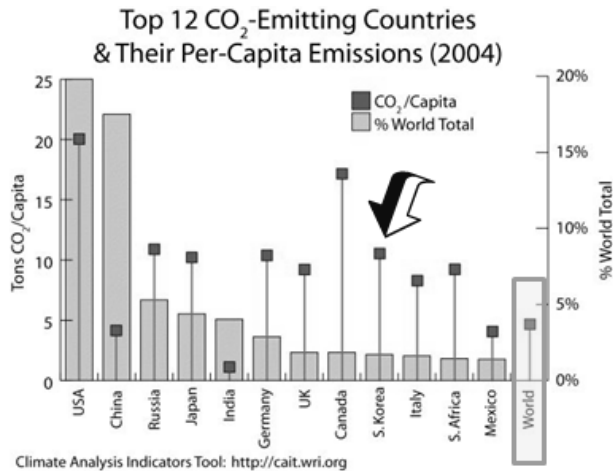


Fig. 1. Top 12 Country CO₂ Emission

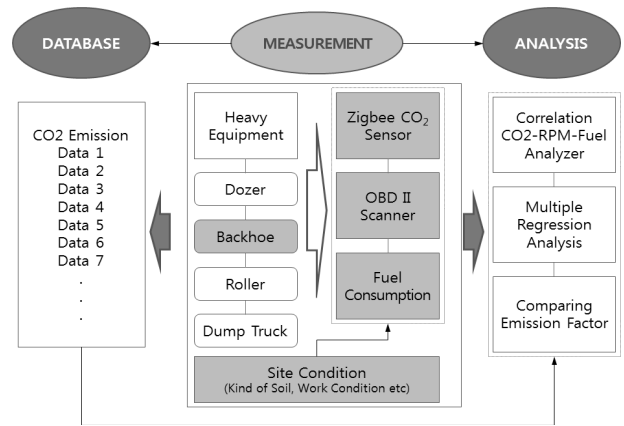


Fig. 2. Measuring Diagram for CO₂ Emission

CO₂량을 실험적으로 측정하고 있다. 일반적으로, 건설장비의 운행 특성상 장비의 CO₂량을 주행속도별로 측정하는 것 보다는 작업의 난이도에 따른 RPM변화를 장비 부하량으로 고려하여 CO₂배출량을 산정하는 방식이 보다 현실적이다.

1.3 기존연구 고찰

건설장비의 이산화탄소 배출량을 측정과 관련한 연구는 많지 않으며 국내의 연구 대부분 에너지 사용량을 기준으로 CO₂ 배출량을 산정하였으며 실제측정방법으로 산정한 연구는 유속과 CO₂ 센서를 이용하여 실시간으로 자동차의 CO₂배출량을 측정 및 검증한 연구(장원석 외 2013)가 유일하다.

국내연구 조사결과 실제 도로상에서 차량에 이동식 측정장비를 부착하여 이산화탄소와 대기 오염물질 배출량을 측정하고 현행 배출계수의 예측결과와 비교한 연구(이태우 2010, 길지훈 2010)가 있으나 이 연구는 공사현장과 같은 비도로(Nonroad)에서 다양한 작업조건에 사용되는 건설장비에 적용하기에는 부적합하다. 특히 측정방법에 있어서 이산화탄소 배출량을 차량으로부터 포집한 다음 실험실에서 농도를 측정하는 방법을 취함으로써 실시간으로 이산화탄소 배출량을 측정하지 못하는 한계가 있다.

이와 유사한 방법으로 건설기계의 대기오염물질을 측정하여 배출계수를 산정 제시한 연구(임재현 외 2009)가 있으나 CO₂는 제외되어 있다.

국외연구 조사결과 15종류의 공사장비(백호 5종류, 로더 4종류, 그레이더 6종류)에 대하여 Portable Emission Measurement System(PEMS)를 사용하여 연료사용량과 가스배출량을 측정한 연구(Frey, H.C et al. 2008), 건설 및 농업 장비 등에 사용되는 엔진들에 대하여 배기가스기준 등급을 등급 1에서 등급 4로 나눈 연구(EPA 2004) 등이 있다.

기존연구 고찰결과 실시간으로 건설장비의 이산화탄소 배출량 측정된 연구는 찾기 어려웠다. 따라서 건설과정에서 빈번하게 사용되는 건설장비의 이산화탄소 배출량을 실시간으로 측정하여 기존의 산정방법에 따라 산정한 결과와 비교할 필요가 있다.

2. 이론적 배경

이산화탄소의 배출량을 산정하는 방법에는 배출원의 배출구에서 측정기를 이용하여 농도, 유량 등을 직접 측정하여 이를 근거로 산정하는 직접적 방법과 연소되는 연료의 종류와 양, 연소효율 및 배출계수 등을 고려하여 배출량을 이론적으로 추정하는 간접적 방법이 있다. 직접적 방법에서는 연료연소과정이 반영되므로 최종 배출량에 대한 정확한 정보를 구할 수 있다는 장점이 있는 반면, 장비의 설치와 운영에 많은 시간과 비용이 소요되는 점과 측정의

제한성 등의 단점이 있다. 간접적 방법에서는 산정이 용이하다는 장점이 있으나 계수를 통한 방법으로 자료의 정확성, 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다(김태현, 2007).

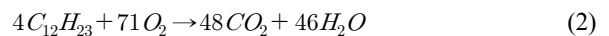
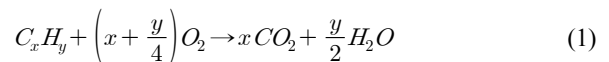
2.1 화학식에 의한 산정

일반적인 경유의 경우 비등점이 약 180~380℃이며 평균적으로 약 350℃에서 자기 착화한다. 또한, 경유는 약 300여종의 탄화수소로 구성되어 있으며, 일반적인 화학식은 C₁₂H₂₃이며 C₁₀H₂₀에서 C₁₅H₂₈까지 분포한다. 경유연료의 최소 필요조건을 정리하면 Table 2와 같다. 경유는 산소와 결합하여 연소반응을 하며, 산소의 공급이 원활한 경우 완전연소가 되어 이산화탄소(CO₂)와 물(H₂O)이 발생하게 되지만, 산소가 불충분한 경우 불완전연소가 되어 이산화탄소(CO₂)와 물(H₂O)뿐만 아니라 그을음(C)과 일산화탄소(CO) 그리고 탄화수소(CH)가 발생한다.

일반적인 C_xH_y 형태의 탄화수소물 연소반응식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데(Yu, 2012), 여기서 일반적인 경유의 화학식은 x=12, y=23 인 C₁₂H₂₃ 이므로 이를 대입하면 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

Table 2. Characteristics of Diesel Fuel (Automobile Diesel Engine, 2011)

Characteristic	Need Condition	Unit
Density	820 - 845	kg/m ³
Boiling Point	210 - 320	℃
Flash Point	over 55	℃
Viscosity	2.00 - 4.50	mm ² /s



2.2 배출계수에 의한 산정

탄소배출계수는 IPCC에서 제시하고 있는 이산화탄소 배출량 산정방법 중 하나이다. 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인은 인간활동에 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 및 정밀도의 측면에서 Tier1(기본방법)에서 Tier3(가장 상세한 방법)까지 산정방법에 대한 권고사항이 제시되어 있다. 최근에는 각 국가별로 IPCC의 방법론을 바탕으로 자체적인 시험결과 등을 토대로 자국의 실정에 적합한 배출계수를 산출하는 추세이다.

Table 3. Compare to method to measure Green House Gas for road

Division	Tier1	Tier2	Tier3
Principle	Application IPCC emission factor each fuel at consumption each energy resource, mode	Application emission factor according to exhaust control technique each kind of vehicle	Application emission factor according to kilometer traveled each kind of vehicle
Method	Top-Down	Bottom-Up	Bottom-Up
Advantage	Basic method		Possible to calculate exactly emission
Defect	No considering the vehicle kilometer traveled	Need consumption data each the kind of vehicle	Need many data

IPCC 가이드라인의 온실가스(Green House Gas : GHG) 배출량 산정방법 중 Tier1은 가장 기본적인 방식으로 연료종류별 에너지 소비량과 탄소배출계수를 이용하는 방식이며, Tier2는 연료종류뿐만 아니라 차종별, 배출제어기술에 따른 배출계수를 추가로 적용하는 방식이며, Tier3는 연료소비 대신 주행거리 등 활동도(Activity) 자료를 기준으로 하여 측정된 배출계수와 차량주행거리와의 곱으로 계산하는 방법이다. 여기에 도로의 종류 및 상태 등의 운전조건이 반영된다.

다음은 IPCC에서 권고하고 있는 배출량 산정방법인 Tier1 이다. 본 연구에서 비교하고자 하는 것이 Tier1이기 때문에 Tier2와 Tier3는 제외한다.

$$\text{이산화탄소 배출량} = \text{연료소비량} \times \text{탄소배출계수} \times \text{산화율} \times \text{전환계수}(44/12)$$

위의 식에서 사용되는 배출계수는 IPCC가 제시한 연료별 탄소 배출계수를 사용하며 CO₂ 배출량의 경우 산화율과 CO₂와 C의 질량비(44/12)를 보정하여 최종배출량을 산정하게 된다. 산화율은 연소시 연료가 완전 연소되지 않고 일부는 불완전 연소되어 CO₂로 전환되지 않기 때문에 고려한다.

Table 4. Carbon Emission Factor Each Fuel (IPCC 2006)

Div.	Caloric Value	Carbon Emission Factor [TC/TOE]	Burning Rate	Note
Diesel	9,200kcal/l	0.837	0.990	TC : Ton Carbon (103 Carbon) TOE : Ton of Oil Equivalent (107kcal)
Crude	10,000kcal/kg	0.829	0.990	
Gasoline	8,300kcal/l	0.783	0.990	
Lamp Oil	8,700kcal/l	0.812	0.990	

2.3 직접측정에 의한 산정

직접측정에 의한 CO₂배출량 산정방법은 두가지가 있다. 첫 번째는 고정식 배출가스 측정 장비를 이용하는 것으로서, 이것은 시험실 내에서 시험차량의 배출가스를 측정하기 위한 장비로서, 제작자동차 배출가스 인증시험에 사용되는 장비를 말한다. 고정식 배출가스 측정 장비는 차대동력계, 정용량 배출가스 시료 채취 장비(Constant Volume Sampler, CVS), 배출가스 분석 장비 및 측정결과 처리 장비로 구성된다.

시험 차량이 차대동력계 상에서 시험용 주행패턴을 주행할 때 배출하는 배출가스를 희석용 공기로 희석한 후 배출가스 시료 채취 장비를 통해 채취하여 배출가스 분석 장비로 분석한다. 이렇게 분석된 배출가스 시료의 농도결과를 배출가스 시료 채취 장비에서 측정된 배출가스 부피 유량을 이용하여 질량 결과로 최종 환산한다. 연료소비량은 배출가스 중 탄소 성분의 물질수지를 이용하여 계산한다.

고정식으로 차량 배기가스 및 CO₂를 측정하는 방법은 대부분 차대동력계에서 정지된 상태로 포집을 실시함으로써 일별 또는 km단위별 CO₂량을 실험적으로 측정하고 있다(임재현 외, 2009).

고정식 측정 방법은 운행 중인 건설장비에서 배출되는 CO₂량을 실시간으로 측정하기가 어려울 뿐만 아니라 건설장비의 부하량 대비 CO₂량을 현실감 있게 산정하는 데는 한계가 있다.

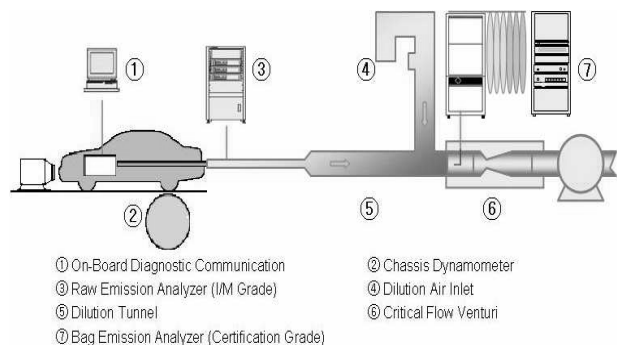


Fig. 3. Chassis dynamometer experimental setup

두 번째는 건설장비의 작업 및 운행형태에 따라 배출되는 CO₂ 량을 실시간으로 측정할 수 있는 방법론이다. 이 방법은 배기가스의 유속을 측정하여 배기구에서 배출되는 단위시간당 유량을 산정하고, 실험을 통해 측정된 배기가스 CO₂ 농도를 유량과 연산하여 단위 주행거리당 배출되는 CO₂의 질량을 산정한다.

일반적으로, 건설장비의 운행특성상 장비의 CO₂량을 주행속도 별로 측정하는 것 보다는, 작업의 난이도에 따른 RPM변화를 장비 부하량으로 고려하여 CO₂ 배출량을 산정하는 방식이 보다 현실적이다.

$$CO_2 \text{ (g/l)} \tag{3}$$

$$= x \text{ (ppm)} \times \frac{10^{-6}}{\text{(ppm)}} \times \frac{44 \text{ (g)}}{1 \text{ (mol)}} \times \frac{273}{273+y \text{ (}^\circ\text{C)}} \times \frac{z \text{ (atm)}}{1 \text{ (atm)}}$$

x : CO₂ concentration(ppm)

y : temperature(°C)

z : atmosphere(atm)

$$CO_2 \text{ emission(g/s)} \tag{4}$$

$$= \text{Flow Rate (m}^3\text{/s)} \times CO_2 \text{ (g/l)} \times 1,000$$

CO₂농도를 측정하기 위하여 차량에서 배출되는 가스를 일정한 크기의 포집용기에 포집한 후 CO₂ 센서를 이용하여 포집된 배기가스의 RPM별 CO₂ 농도(ppm)를 측정하며, 측정된 농도 값을 식(3)을 이용하여 단위부피당 CO₂ 질량값(g)으로 환산한다. 또한 차량의 배기구에 유속센서를 설치하고 유속 및 단면적을 측정한 후 시간당 배출총유량(m³/s)을 산정하며, 엔진부하 대비 유량의 관계를 산정하기 위하여 RPM별 배출되는 유속을 측정한다. 그 후 최종적으로 식(4)에 단위부피당 CO₂질량값 및 시간당 유량을 대입하여 엔진부하량이 고려된 단위시간당 CO₂ 배출량을 산정한다.

3. 건설장비의 CO₂ 측정

3.1 유속측정을 통한 CO₂량 산출방법

기존의 CO₂ 측정방법은 차량배기가스 시험소와 같이 측정설비가 갖춰진 특정한 장소에서 배기가스를 포집한 후 배기가스의 각 성분비율을 측정하는 방법을 주로 사용하고 있다. 이러한 방법은 CO₂와 같은 다양한 배기가스 성분의 농도를 비교적 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있는 반면, 건설장비의 운행형태, 작업종류, 작업환경 등과 같은 가변적 상황에서의 CO₂ 배출량을 실시간으로 산출하기 어려운 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 공사현장의

여러 가지 다양한 작업종류 및 작업환경에 따른 건설장비의 실시간 CO₂ 배출량을 산출할 수 있는 방법론을 사용한다.

우선 본 연구에서는 CO₂ 농도를 측정하기 위한 다양한 선행연구를 수행하였다. 첫 번째는 반응속도가 매우 빠른 COZIR CO₂센서(20 sample/second)를 차량 배기구에 직접 위치시켜 측정을 시도하였으나 배기가스의 빠른 유속에 의해 오버플로우(Overflow)가 발생되어 측정이 불가능했다. 두 번째 방법은 차량 배기가스를 100L 가량 포집 후 안정화가 이루어진 후 CO₂의 농도를 측정하는 방법을 이용하였으며, 동일한 조건에서 15회 이상 측정된 결과 유사한 농도로 수렴되었다. 또한, 측정된 CO₂ 농도는 엔진 rpm의 변동에 따른 배기가스 유속변화와 무관하게 유사한 값을 나타내었다. 이와 같은 선행연구를 통해, 본 연구에서 채택한 CO₂ 측정방법은 먼저 차종별 배기가스의 CO₂ 농도를 산출 후, 실시간 유속측정을 통해 단위시간당 유량을 산출하고 유량을 앞서 측정된 CO₂ 농도와 연산하여 단위시간당 배출되는 CO₂량(g/sec)을 도출할 수 있는 방법을 식(3) 및 식(4)와 같이 나타내었다.

3.2 CO₂측정을 위한 실험 구성 및 방법

본 연구에서는 건설현장에서 지반의 굴착 및 상차 작업을 수행하는 굴삭기를 대상장비로 선정하였다. Figure 4와 같이 도로공사 현장에서 운행 중인 두산중공업 무한계도식 LCV-300 장비(버킷 용량 1.27m³, 엔진기통수 6 EA, 정격 출력 200 ps/1900 rpm)를 이용하여 유속측정을 통한 실시간 CO₂ 배출량을 산출하였다. 본 장비의 제원은 Table 5에 나타내었다.

작업중인 굴삭기의 배기가스 유속에 따른 CO₂량을 측정하기 위하여 먼저, 굴삭기의 엔진 상태(Cold Engine Cold & Hot Engine)에 따른 CO₂ 농도를 각각 측정하였다. CO₂ 농도를 측정하기 위하여 일정한 용기에 배기가스를 포집 후 COZIR사의 CO₂



Fig. 4. LCV 300 Backhoe

Table 5. Specification of LCV 300 Backhoe (Doosan Infracore, 2013)

Division	Unit	Dimension
Weight	ton	29.3
Bucket Capacity	m ³	1.27
Length	mm	10620
Width	mm	3200
Height	mm	3365
Cylinder	EA	6
Output power	ps/rpm	200/1900



Fig. 5. Experiment Setup

센서를 이용하여 CO₂ 농도를 측정 한 결과 굴삭기의 CO₂ 농도는 평균 2.48% 정도로 나타났다. 다음으로 굴삭기 작업형태에 따라 배출되는 배기가스의 유속을 측정하기 위하여 Figure 5와 같이 굴삭기의 배기구에서 KURZ사의 유속센서를 설치하였으며, 유속센서를 알루미늄 관을 통과시켜 작업 시 주변공기유입과 같은 외부요인으로 인한 배기가스 유속변화를 최소화하였다. 또한 굴삭기 작업형태에 따른 엔진회전수 변화를 측정하기 위하여 굴삭기의 계기판에 나타나는 rpm 값을 영상기기를 이용하여 촬영을 실시하였으며, 굴착 및 상하차 작업을 진행하는 동안 유속 및 rpm 그리고 온도의 변화 값을 측정하였다. 또한 측정 데이터를 크게 굴착 및 상차 작업과 공회전으로 구분하여 분석을 실시하였다.

3.3 측정실험 결과

굴삭기의 작업형태에 따른 유속(m/s) 및 CO₂ 량(g), 엔진회전수 변화값을 약 20분 동안 측정하였으며, 측정 결과 Figure 6의 그래프와 같이 나타났다. 실험 결과 굴착 및 상차 작업의 경우 엔진회전수의 범위가 1,700~1,800rpm으로 평균 1,749rpm으로 나타났으며, 공회전의 경우 900~1,500rpm으로 평균 1,011rpm으로 나타났다.

또한 굴착 및 상차의 평균유속은 19.94m/s로 공회전의 10.90m/s

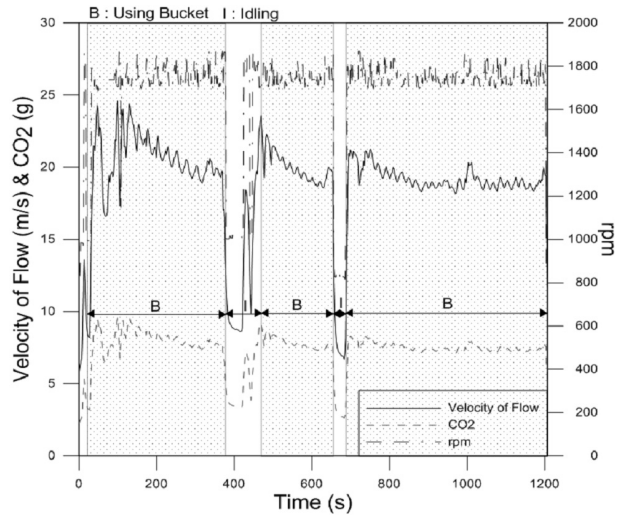


Fig. 6. Measurement of CO₂, flow velocity and rpm

Table 6. Measurements according to equipment work type

Div.	Velocity (m/s)	Volume (m ³)	Temperature (°C)	CO ₂ (g/s)	rpm
Work	19.94	0.31	266.98	7.80	1,748
Idle	10.90	0.17	230.33	4.27	1,010

보다 9.04m/s 빠른 것으로 나타났으며, 유량도 굴착 및 상차의 경우 0.31m³로 공회전의 0.17m³보다 많은 것으로 나타났다. 온도의 경우 굴착 및 상차의 경우 평균 266.98°C로 공회전의 230.33°C보다 36.65°C 정도 높은 것으로 나타났으며, 초당 CO₂량은 굴착 및 상차의 경우 7.8g/sec, 공회전의 경우 4.27g/sec으로 3.53g/sec 정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

4. CO₂ 산출방법에 따른 비교·분석

본 연구에서 제안하고 있는 실시간 CO₂ 측정방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 기존의 CO₂ 측정방법인 IPCC Tier1을 통한 측정방법과 화학반응식을 통한 측정방법을 비교·분석하였다. IPCC의 Tier1 방법에 따른 CO₂ 배출량은 식 (5)와 같이 경유 1L당 2,558 g의 CO₂가 발생하는 것으로 산출된다. 또한 시간당 CO₂ 발생량을 산출하기 위하여 <2012년 건설공사 표준품셈>의 굴삭기 운전경비 산정에서 제시하고 있는 굴삭기의 시간당 연료사용량 20.2L/hr를 고려하여 CO₂ 배출량을 산출한 결과 시간당 총 51,672g/hr의 CO₂가 발생하는 것으로 나타났다(Lee, 2011).

$$CO_2(g/hr) = 2,558(g/L) \times 20.2(L/hr) = 51,672(g/hr) \quad (5)$$

Table 7. Comparison of CO₂ measurement methods

Division	Unit CO ₂ Quantity	Fuel Consumption (l/hr)	CO ₂ Emission (g/hr)
IPCC Tier1	2,558g/L	20.2	51,672
Chemical Equation	2,630.2g/L	20.2	53,129
Direct Measurement	7.31g/s		26,316

한편, 완전연소인 경우의 이론적 화학 반응식을 이용한 CO₂ 배출량은 식 (2)를 이용할 수 있으며, 경유 1L가 완전연소 시 발생하는 총 CO₂량은 식 (6)과 같이 2,630.194g으로 나타났다. 이를 시간당 CO₂ 배출량으로 환산하기 위하여 IPCC Tier 1과 동일한 방법으로 건설공사 표준품셈에서 제시한 굴삭기의 시간당 연료사용량 20.2L/hr을 고려하여 CO₂ 배출량을 산출한 결과 식 (7)과 같이 총 53,129g/hr의 CO₂가 발생하는 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned}
 & 1L \text{ Diesel} && (6) \\
 & = \frac{832(g)}{1(L)} \times \frac{1(mol C_{12}H_{23})}{167.4(g)} \times \\
 & \quad \frac{48(mol CO_2)}{4(mol C_{12}H_{23})} \times \frac{44.1(g)}{1(mol CO_2)} = 2,630.19 g/L
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & CO_2(g/hr) \\
 & = 2,630.19(g/L) \times 20.2(L/hr) = 53,129(g/hr) && (7)
 \end{aligned}$$

마지막으로 본 연구에서 제시하고 있는 실시간 유속측정을 통한 CO₂ 배출량 산정 방법을 이용하여 CO₂ 량을 계산한 결과 초당 7.31g의 CO₂량이 굴삭기로부터 배출되는 것으로 나타났으며, 1시간당 26,316g의 CO₂가 배출되는 것으로 나타났다. 따라서, IPCC Tier 1을 통한 CO₂ 배출량 51,672 g/hr, 화학반응식을 통한 CO₂ 배출량 53,129g/hr와 비교해 보았을 때, 유속측정을 통한 CO₂ 배출량 26,316g/hr보다 약 2배 정도 높게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 건설현장에서 건설장비의 작업 형태에 따른 실시간 CO₂배출량을 산정하기 위하여 건설현장에서 작업 중인 굴삭기를 대상으로 작업 형태에 따른 실시간 유속을 측정하였으며, 측정된 유속을 이용한 CO₂배출량을 실험적인 방법론을 통해 제시하였다. 먼저, IPCC 및 이론적 화학반응식으로부터 유도된 CO₂ 산출기법과 본 연구에서 제시하고 있는 유속측정을 통한 CO₂ 산출기법을 소개하였다. 또한, 실제 장비를 대상으로 현장실험을 통해 굴삭기에서 배출되는 실시간 CO₂ 양을 측정하였으며, IPCC 및 이론식으로

부터 산출된 시간당 CO₂ 배출량과 비교·분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, LCV-300 굴삭기의 Engine Cold 상태와 Engine Hot 상태에서의 CO₂ 농도를 측정된 결과 1.27~4.39%로 평균 2.48%로 나타났다. 또한, 작업형태에 따른 유속 및 엔진회전수를 비교해 보았을 때 굴착 및 상차의 경우 19.94m/s, 1,748.85rpm으로 공회전 상태에서의 10.90m/s, 1,010.64rpm 보다 약 1.7~1.8 배 높은 것으로 나타났다.

둘째, 2012년 건설공사 표준품셈에 따른 시간 당 연료소비량 20.2L를 적용한 결과 IPCC Tier 1을 통한 CO₂ 배출량은 51,672g/hr, 화학반응식을 통한 CO₂배출량은 53,129g/hr로 나타났다. 또한, 제안하고 있는 유속측정을 통한 CO₂ 배출량 산정방법의 경우 CO₂ 배출량은 26,316g/hr로 나타났다. 이는 IPCC Tier 1과 화학반응식을 통한 CO₂ 배출량에 비해 제안하는 유속측정을 통한 CO₂ 측정방법이 절반정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

본 연구결과를 바탕으로 향후 건설기계의 연식 및 건설환경에 따른 건설기계의 실제 연료 소모량 측정을 통하여 제안하고 있는 유속측정을 통한 CO₂ 량 측정 방법을 보완한다면, 건설현장의 장비종류에 따른 CO₂ 량을 실시간으로 측정함으로써 작업종류 및 장비조합에 따른 CO₂ 배출량을 고려한 친환경 공정관리 기법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. : 2011-0015361) 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. : 2010-0022641).

References

- Doosan Infracore Construction Equipment (2013). *Data of the DX 300LCA* (in Korean).
- EPA (2004). *NONROAD2005 Model*, U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/otaq/models/nonrdmdl/nr-arch.htm>.
- Frey, H. C., Rasdorf, W., Kim, K., Pang, S. H. and Lewis, P. (2008). "CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop." March 31 to April 2, 2008.
- Ghil, J. H. (2010). *A study on estimation of automobile emissions by the portable emission measurement system*, MSc Dissertation, Inha University, Incheon (in Korean).
- IPCC (2008). *2006 Guideline to make inventories of nation greenhouse gas*.
- Jang, W. S. and Kim, B. S. (2013). "The application of CO₂ and hydrometer sensor for development of real time measuring

- method on CO₂ emission of construction equipment.” *Korea Institute Construction Engineering Management*, Vol. 14, No. 2, pp. 78-86 (in Korean).
- Kim, J. H. (2011). *Automobile diesel engine*, 1st ed. Goldenbell, Seoul (in Korean).
- Kim, T. H. (2007). *Estimation of emissions of carbon dioxide (CO₂) in the metropolitan area and the necessity of developing the learning materials for its reduction*, MSc Dissertation, Korea National University of Education, Chung- Buk, p. 19 (in Korean).
- Kwon, S. H. (2008). *Development of assessment model for environmental economics of construction projects*, Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University, Seoul (in Korean).
- Lee, J.-Y., Jung, W.-S. and Hwang, I.-H. (2011). “The evaluation of GHG emission in railroad construction sector.” *Journal of KSR*, KSR, Vol. 14, No. 3, pp. 271-275 (in Korean).
- Lee, M. G., Park, Y. G., Yoo, J. J., Sung, H. G. and Jung, K. K. (2010). “An analysis of the relationship between engine RPM and fuel construction on a real vehicle.” *Proceeding of the ITFE Conference*, pp. 3-6 (in Korean).
- Lee, T. W. (2010). *Study on methodology of emission factors development for vehicles based on on-road measurements*, Ph. D. Dissertation, Inha University, Incheon (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).
- 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.” *The Korean Society of Automotive Engineers*, KSAE, in Korean, Vol. 2012, No. 5, pp. 400-405.
- Standard RSMMeans (2012). *Korea institute of construction technology* (in Korean).