



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

철근 콘크리트 기초 시공 시 단위  
작업량에 대한 건설기계 CO<sub>2</sub> 배출량 산정

Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions of Construction  
Machinery for Unit Work Volume During the  
Construction of Reinforced Concrete Foundations

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

韓 成 準

2018年 8月

# 철근 콘크리트 기초 시공 시 단위 작업량에 대한 건설기계 CO<sub>2</sub> 배출량 산정

指導教授 李 東 昱

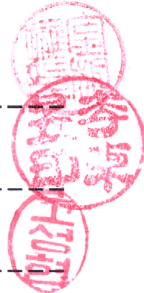
韓 成 準

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2018年 6月

韓成準의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 김 상 진  
委 員 이 동 우  
委 員 고 성 현



濟州大學校 大學院

2018年 6月

Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions of Construction  
Machinery for Unit Work Volume During the  
Construction of Reinforced Concrete Foundations

Seong Jun Han  
(Supervised by Professor Dong Wook Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the  
degree of Master in Civil & Ocean Engineering

2018. 6.

This thesis has been examined and approved by

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil Engineering

Thesis director, Seong-Hyun Ko, Prof. of Civil Engineering

Thesis director, Dong Wook Lee, Prof. of Civil Engineering

*June. 2018*

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## <제목 차례>

LIST OF TABLES .....	iv
LIST OF FIGURES .....	v
ABSTRACT .....	viii
제1장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.1.1 연구의 배경 .....	1
1.1.2 연구의 목적 .....	2
1.2 연구의 내용 및 범위 .....	3
제2장 연구 동향 및 CO <sub>2</sub> 배출량 측정 이론 .....	4
2.1 기존 연구 동향 .....	4
2.2 간접측정 방식 .....	6
2.2.1 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) .....	6
2.2.2 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인 .....	9
2.2.3 화학식 .....	10
2.3 직접측정 방식 .....	11
2.3.1 CVS-75 방법 .....	11
2.3.2 Concentration - Flow Velocity Measurement(C-FVM) 방법 .....	12
제3장 실험장비 및 연구방법 .....	13
3.1 실험장비 .....	13
3.1.1 건설기계 .....	13
3.1.2 측정장비 .....	16
3.2 연구방법 .....	19
3.2.1 RPM 변화에 따른 배기가스 측정 .....	19

3.2.2 건설기계 작업 특성에 따른 RPM 측정 .....	20
3.2.3 단위 작업량에 대한 건설기계 CO <sub>2</sub> 배출량 산정 .....	23
제4장 건설기계의 작업량 및 CO <sub>2</sub> 배출량 .....	26
4.1 엔진부하량(Revolution Per Minute : RPM) 변화 .....	26
4.1.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017) .....	26
4.1.2 콘크리트 믹서트럭 .....	31
4.1.3 트럭탑재형 크레인 .....	33
4.2 작업량 산출 .....	36
4.2.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017) .....	36
4.2.2 콘크리트 믹서트럭 .....	36
4.2.3 트럭탑재형 크레인 .....	37
4.3 배기가스 측정 결과 .....	38
4.3.1 굴삭기의 엔진 부하량(RPM) 변화에 따른 측정 결과(Kim & Lee, 2017) .....	38
4.3.2 콘크리트 믹서트럭의 엔진 부하량(RPM) 변화에 따른 측정 결과 .....	41
4.3.3 트럭탑재형 크레인의 엔진 부하량(RPM) 변화에 따른 측정 결과 .....	53
제5장 건설기계의 CO <sub>2</sub> 배출량 산정 .....	68
5.1 시간당 CO <sub>2</sub> 배출량 .....	68
5.1.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017) .....	68
5.1.2 콘크리트 믹서트럭 .....	74
5.1.3 트럭탑재형 크레인 .....	84
5.2 기초 시설물 공사 시 CO <sub>2</sub> 배출량 .....	99
5.2.1 굴삭기 .....	99
5.2.2 콘크리트 믹서트럭 .....	100
5.2.3 트럭탑재형 크레인 .....	100
5.2.4 기초 시설물 작업량에 대한 CO <sub>2</sub> 배출량 .....	101
5.3 연구결과 비교 및 탄소배출계수 .....	102
5.3.1 간접측정방식들과 비교 .....	102

5.3.2 IPCC Tier 2 건설기계의 탄소배출계수 .....	104
제6장 결론 .....	107
REFERENCES .....	109



## <List of Table>

Table. 2.1 Default emission factors for off-road mobile sources and machinery(IPCC, 2006) .....	7
Table. 3.1 Specifications of Excavator .....	14
Table. 3.2 Specifications of Concrete mixer truck .....	15
Table. 3.3 Specifications of Cargocrane .....	16
Table. 3.4 Specifications of Portable Emission Measurement System(PEMS) Equipments .....	17
Table. 3.5 Specifications of Flow meter Equipments .....	18
Table. 3.6 Experimental conditions .....	24
Table. 5.1 Excavator CO <sub>2</sub> Emission(Kim & Lee, 2017) .....	73
Table. 5.2 Concrete mixer truck CO <sub>2</sub> Emission .....	83
Table. 5.3 Cargocrane CO <sub>2</sub> Emission .....	98
Table. 5.4 Excavator working CO <sub>2</sub> Emission .....	99
Table. 5.5 Concrete mixer truck working CO <sub>2</sub> Emission .....	100
Table. 5.6 Cargocrane working CO <sub>2</sub> Emission .....	101
Table. 5.7 Excavator output result .....	102
Table. 5.8 Concrete mixer truck output result .....	103
Table. 5.9 Cargocrane output result .....	103
Table. 5.10 Comparison of CO <sub>2</sub> emissions from work .....	104
Table. 5.11 Excavator emission factor .....	105
Table. 5.12 Concrete mixer truck emission factor .....	105
Table. 5.13 Cargocrane emission factor .....	106

## <List of Figures>

Fig. 2.1 CVS-75 Mode Travel Cycle(ME, 2017) .....	11
Fig. 3.1 Excavator .....	13
Fig. 3.2 Concrete mixer truck .....	14
Fig. 3.3 Cargocrane .....	15
Fig. 3.4 PEMS Equipments .....	16
Fig. 3.5 Measuring instrument .....	17
Fig. 3.6 Video recording device .....	18
Fig. 3.7 Excavator work to bucket .....	21
Fig. 3.8 Excavator work to breaker .....	21
Fig. 3.9 Concrete mixer truck to work .....	22
Fig. 3.10 Registration quantity by Jeju concrete mixer truck yearly .....	22
Fig. 3.11 Cargocrane to work .....	23
Fig. 3.12 Basic facility sectional view .....	24
Fig. 3.13 Basic facility plane view .....	25
Fig. 4.1 RPM change according to 1 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	28
Fig. 4.2 RPM change according to 2 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	28
Fig. 4.3 RPM change according to 3 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	28
Fig. 4.4 RPM change according to 4 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	28
Fig. 4.5 RPM change according to 1 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	30
Fig. 4.6 RPM change according to 2 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	30
Fig. 4.7 RPM change according to 3 cycle work time(Kim & Lee, 2017) ·	30
Fig. 4.8 RPM change according to 1 cycle work time .....	32
Fig. 4.9 RPM change according to 2 cycle work time .....	32
Fig. 4.10 RPM change according to 3 cycle work time .....	32
Fig. 4.11 RPM change according to 4 cycle work time .....	32
Fig. 4.12 RPM change according to 1 cycle work time .....	35

Fig. 4.13 RPM change according to 2 cycle work time .....	35
Fig. 4.14 RPM change according to 3 cycle work time .....	35
Fig. 4.15 RPM change according to 4 cycle work time .....	35
Fig. 4.16 RPM change according to 5 cycle work time .....	35
Fig. 4.17 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(Kim & Lee, 2017) .....	38
Fig. 4.18 Temperature due to RPM change(Kim & Lee, 2017) .....	39
Fig. 4.19 Flow rate according to RPM change(Kim & Lee, 2017) .....	40
Fig. 4.20 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT.1) .....	41
Fig. 4.21 Temperature due to RPM change(CMT.1) .....	42
Fig. 4.22 Flow rate according to RPM change(CMT.1) .....	43
Fig. 4.23 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT.2) .....	44
Fig. 4.24 Temperature due to RPM change(CMT.2) .....	45
Fig. 4.25 Flow rate according to RPM change(CMT.2) .....	46
Fig. 4.26 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT.3) .....	47
Fig. 4.27 Temperature due to RPM change(CMT.3) .....	48
Fig. 4.28 Flow rate according to RPM change(CMT.3) .....	49
Fig. 4.29 Average CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT) .....	50
Fig. 4.30 Average temperature due to RPM change(CMT) .....	51
Fig. 4.31 Average flow rate according to RPM change(CMT) .....	52
Fig. 4.32 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.1) .....	53
Fig. 4.33 Temperature due to RPM change(CC.1) .....	54
Fig. 4.34 Flow rate according to RPM change(CC.1) .....	55
Fig. 4.35 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.2) .....	56
Fig. 4.36 Temperature due to RPM change(CC.2) .....	57
Fig. 4.37 Flow rate according to RPM change(CC.2) .....	58
Fig. 4.38 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.3) .....	59
Fig. 4.39 Temperature due to RPM change(CC.3) .....	60
Fig. 4.40 Flow rate according to RPM change(CC.3) .....	61
Fig. 4.41 CO <sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.4) .....	62

Fig. 4.42 Temperature due to RPM change(CC.4) .....	63
Fig. 4.43 Flow rate according to RPM change(CC.4) .....	64
Fig. 4.44 Average CO <sub>2</sub> concentration by RPM change .....	65
Fig. 4.45 Average Temperature by RPM change .....	66
Fig. 4.46 Average Flow rate according to RPM change .....	67
Fig. 5.1 CO <sub>2</sub> emissions per unit time of concrete mixer truck by year at non-load .....	82
Fig. 5.2 CO <sub>2</sub> emissions per unit time of concrete mixer truck by year at load .....	82

## ABSTRACT

Greenhouse Gas(GHG) triggering global warming is closely associated with the heavy use of fossil fuels. Tremendous academic and industrial interest has been devoted to resolve the severe environmental crisis caused by abrupt climate changes.

The construction industry is considered as one of the major contributors for global greenhouse gas emissions. Currently, the amount of greenhouse gas emitted from construction source is estimated by an indirect measurement method using carbon emission factors based on a statistically calculated fuel consumption of construction machines.

This research was performed with three kinds of construction machines being used in concrete foundation constructions. After accurately grasping the operation characteristic of each construction machine, we classified operation conditions into no-load and load, according to the status of a power transmittance to chassis dynamometer. The amount of emissions(CO<sub>2</sub> concentration, temperature and flow rate) was measured according to RPM(Revolution Per Minute) changes of each construction machine.

CO<sub>2</sub> emission per unit work was calculated by measuring the productivity and the engine load condition during construction machine operation. In this study, the amount of CO<sub>2</sub> emitted from concrete foundation process of unit volume was estimated to be 3.66kg/m<sup>3</sup> through the direct measurement method. CO<sub>2</sub> emissions measured by the direct measurement method is about 40% of those derived from the indirect measurement method based on the existing fuel consumption standard.

Various kinds of construction machines are being used more in actual construction field than those used in this study. In future study, it is necessary to establish a realistic database through a direct measurement method for measuring CO<sub>2</sub> emitted from various construction machines.

# 제1장 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

### 1.1.1 연구의 배경

지구 온난화 현상으로 인하여 지난 100년(1906~2005) 동안 세계 연평균기온은 0.74°C 상승하였다(Kim, 2014). 이러한 문제로 인해 1997년 채택된 '교토의정서'를 중심으로 전 세계는 온실가스 저감을 위한 대책을 마련하고 추진 중이다.

우리나라는 2009년 온실가스 감축을 위한 국가 중기 온실가스 감축목표를 대내외에 발표하였으며, 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵 수립(2014년 1월), 배출권거래제 시행(2015년), 각국이 결정한 기여(Intended Nationally Determined Contributions : INDC) 제출(2015년, 2030년 예상배출량 대비 37% 감축) 제출 등 온실가스 감축을 위한 기반을 구축하려 한다.

우리나라의 2015년 온실가스 총배출량(Land Use, Land Use Change and Forestry : LULUCF 제외)은 690,200GgCO<sub>2</sub>eq.이며, 1990년도 총배출량 292,900 GgCO<sub>2</sub>eq.에 비해 135.7% 증가하였고 2014년도 총배출량인 689.2GgCO<sub>2</sub>eq.보다는 0.2% 증가하였다(GIR, 2017).

2015년 제조업 및 건설업(고체연료) 부문 온실가스 배출량은 127,598.08GgCO<sub>2</sub>eq.이고 제조업 및 건설업(액체연료) 부문 온실가스 배출량은 42,021.57GgCO<sub>2</sub>eq.으로 제조업 및 건설업 부문의 총배출량은 169,619.59GgCO<sub>2</sub>eq.이며 국가 온실가스 총배출량의 약 24.6%를 차지하고 있다. 따라서, 건설부문의 온실가스 배출량 감축 노력이 필요하다(GIR, 2017).

이에 본 연구에서는 건설업 부문의 정확하고 실제적인 온실가스 산정을 위해 건설기계를 대상으로 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 연구가 진행되었다.

### 1.1.2 연구의 목적

건설 분야의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하는 가장 일반적인 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)의 배출계수에 의한 방법과 화학식에 의한 방법은 연료사용량 기준으로 한 간접산정방식으로 건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량은 연료사용량에 어느 정도 비례하기는 하지만, 건설기계의 노후도, 조종사의 숙련도, 작업난이도, 환경요인, 연료의 불완전연소 등과 같은 복합적인 요인들로 인한 영향을 고려할 수 없는 단점과 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 건설공사의 핵심요소이면서 환경부하량이 기초 콘크리트 공사에 사용되는 건설기계를 선택하여 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 직접측정방식으로 측정하였다. 측정된 결과 값과 IPCC에서 제시한 배출계수를 활용한 Tier 1 방법, 화학식에 의한 방법, 국내 가이드라인에서 제시한 방법 등의 3가지 간접측정방식과 비교하고자 한다.

또한, 건설공사에서 건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량 산출의 기준이 될 수 있도록 단위 부 피(1m<sup>3</sup>)의 기초 콘크리트 제작 시 배출되는 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였으며, 단위 물량 기준 구조물의 배출량을 직접측정방식으로 산출하여 간접측정방식으로 산출한 결과와 비교 분석하였다. 연구 결과를 활용하여 콘크리트 기초의 물량에 따른 건설 부문 CO<sub>2</sub> 배출량 산출에 도움이 되고자 한다.

본 연구를 통하여 기초 시설물 제작 시 사용되는 건설기계 중 3가지 건설기계의 차대동력계로 동력이 전달되어 작업특성이 반영된 직접측정방식을 활용한 부하상태의 건설기계 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 통하여 다양한 건설기계를 대상으로 직접측정방식에 의한 사실적인 CO<sub>2</sub> 배출량 DB 구축 활용되고자 한다.

## 1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 기존 이론식에 의한 간접측정방식이 아닌 직접측정방식을 활용하여 건설기계 운행특성이 반영된 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출 하였다. 직접측정방식 측정방법은 Kim(2014)의 농도-유속측정(Concentration-Flow Velocity Measurement : C-FVM)에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 측정법을 개선하여 측정 후 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였다.

실험대상 건설기계를 차대동력계의 동력전달 여부로 무부하(Non-load) 상태와 부하(Load) 상태로 구분하여 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도, 온도 및 유속의 상관관계를 확인하였다. 그리고 CO<sub>2</sub> 배출량과의 관계를 분석하기 위해 작업 시 부하특성을 보여주는 Revolution Per Minute(RPM) 변화를 영상기록 장치를 이용해 차량 내부와 외부에서 동시 기록하였다.

CO<sub>2</sub> 농도, 온도 및 유속 측정값과 작업 중 RPM 변화를 연계 분석하여 생산성(작업량)을 고려한 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였고, 기초 시설물은 가로 30m, 세로 30m, 높이 1m인 철근콘크리트 구조물로 가정하여 제작 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다. 이를 활용하여 기초 시설물 제작 시 단위 부피당 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

본 연구는 기초 시설물 제작 시 사용되는 굴삭기, 콘크리트 믹서트럭, 트럭탑재형 크레인으로 건설기계 중 3가지 건설기계로 제한된 조건에서 진행되었다. 그러나 건설기계의 연식별 차이, 작업조건 등의 다양한 활동도가 고려되지 못한 한계가 존재한다.



## 제2장 연구 동향 및 CO<sub>2</sub> 배출량 측정 이론

### 2.1 기존 연구 동향

Kim & Lee(2017)는 C-FVM 방법을 활용하여 중규모 굴삭기의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였으며, 건설기계의 작업 형태에 따른 생산성과 부하 특성을 분석하고 실제 운행 특성을 반영한 엔진 부하량인 Revolution Per Minute(RPM) 변화에 따른 배기가스 배출 특성을 이동식 배출가스 측정장비(Portable Emission Measurement System : PEMS)로 직접 측정하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다. 부하 특성을 확인하기 위해 차대동력계의 동력 전달 유무로 건설기계 무부하 상태와 부하 상태를 비교하였다.

Jin et al(2014)은 우리나라의 배출량 산정시스템인 ‘대기정책 지원시스템(Clean Air Policy Support System : CAPSS)’의 문제점인 구형장비 해외 계수 사용 과 배출계수 단순성, 출력구분 등의 문제점을 지적하였다. 현행 건설기계의 연식, 출력 및 기종별 대기오염물질(NO<sub>x</sub>, PM, CO, VOC, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> 등등) 배출량을 산정하여 배출량 산정체계를 개선하고자 하였다. 산정기준은 노후 연식 건설기계부터 출력별로 구분하여 배출량을 산정하였다.

Kang(2010)은 기존문헌 및 선행연구를 통해 기후변화 및 온실가스 저감은 위한 동향을 파악하고 환경영향평가와 관련된 법률을 조사 분석함으로써 온실가스 함목을 적용하는 방법과 절차를 제시하였다. 온실가스 배출량 산출방법은 공사 시와 운영 시로 나누었으며 IPCC에서 제시된 탄소배출계수를 활용하여 도로 공사 및 운영에서의 온실가스 배출량을 산정하여 환경영향평가에 미치는 결과를 제시하였다.

Jeon et al(2018)은 건물부문의 온실가스 감축목표 달성과 관련하여 합리적인 대안 수립에 필요한 기초자료를 제시하는 것이 목적이며, 이를 위하여 건물부문의 정확한 온실가스 배출량을 산정하였으며, 요인·분해·분석을 통하여 온실가스 배출 특

성을 분석하였다. 온실가스 배출량 산정에는 연료별 에너지사용량과 배출계수를 활용하는 IPCC의 방법을 적용하였다. 그리고 연구 범위는 온실가스 배출량의 주요 증감 요인으로 연면적, 단위면적 당 에너지사용량, 에너지원별 사용량 및 배출계수를 고려한 요인분해 분석을 실시하였으며, 관련 데이터를 모두 확보 가능한 2007~2015년을 분석기간으로 설정하였다.

Shin et al(2010)은 국내 건설기계 27종 중 등록 대수가 많은 11종(불도저, 굴삭기, 로우더, 지게차, 덤프 트럭, 기중기, 로울러, 콘크리트 믹서 트럭, 콘크리트 펌프, 공기압축기, 천공기)을 대상으로 Tier 2 방법과 Tier 3 방법으로 산정하였다. 기종별 연료 소비량에 의하여 산정되는 Tier 2 방법과 평균 정격 출력, 가동 시간 등에 의하여 산정되는 Tier 3 방법은 배출량의 산정에 있어서 차이를 확인하여 온실가스 배출량 자료를 개선하고, 방법에 따른 배출량 차이를 비교하였다.

Lee(2010)는 자동차의 배출가스 측정 결과를 이용하여 다양한 교통 환경을 반영할 수 있는 자동차 이산화탄소 및 대기 오염물질 배출계수를 산정하는 것을 목표로 진행되었다. 이동식 배출가스 측정장비를 이용하여 실제 도로상에서의 이산화탄소 및 대기 오염물질 배출량을 측정하고, 이 측정 결과를 현행 배출계수의 예측 결과와 비교함으로써 현행 배출계수가 실제 도로상의 자동차 배출량을 어떻게 예측하고 있는지를 분석하였다. 또한 배출계수의 함수 형태와는 다른, 실제 도로상의 배출가스 측정 결과를 2차원 배출율 맵(emission rate map) 형태로 정리한 후 이를 활동도 자료와 함께 이용하여 배출량을 산정하는 방법도 함께 활용하였다.

## 2.2 간접측정 방식

### 2.2.1 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)는 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. 최근에는 각 국가별로 IPCC의 방법론을 바탕으로 자체적인 시험결과 등을 토대로 자국의 실적에 적합한 배출계수를 산출하는 추세이다(IPCC, 2006).

IPCC(2006)에 의하면, 비도로(off-road) 이동원에서 발생한 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 배출량 산정을 위한 방법으로 Tier 1, Tier 2, Tier 3의 3가지가 있다. CO<sub>2</sub> 배출을 결정하는데 우선시 되는 방법은 국가 특성에 근거한 각 연료종류별 연료소비량을 사용하는 것이다.

#### 2.2.1.1 Tier 1

Tier 1은 Table. 2.1에 나열된 연료지정 기본 배출계수를 사용함으로써 산정하며 단, 각 연료별 모든 연료는 비도로 배출원 카테고리에 의해 소비된다고 가정한다. Tier 1 방법은 에너지 부문의 배출량 산정방법과 동일하며 기초자료가 미비할 때 주로 사용하는 방법이다. 에너지 소비량에 배출계수를 곱하여 산출하는 기본적인 산출방식으로 Top-Down 방식을 사용하여 에너지원별, 모드별, 연료별 IPCC 배출계수를 적용하며 차량 주행거리는 고려되지 않는다.

Table. 2.1 Default emission factors for off-road mobile sources and machinery(IPCC, 2006)

Off-Road Source	CO <sub>2</sub>			CH <sub>4</sub>			N <sub>2</sub> O		
	Default (kg/TJ)	Lower	Upper	Default (kg/TJ)	Lower	Upper	Default (kg/TJ)	Lower	Upper
Diesel									
Agriculture	74,100	72,600	74,800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Forestry	74,100	72,600	74,800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Industry	74,100	72,600	74,800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Household	74,100	72,600	74,800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Motor Gasoline 4-stroke									
Agriculture	69,300	67,500	73,000	80	32	200	2	1	6
Forestry	69,300	67,500	73,000						
Industry	69,300	67,500	73,000	50	20	125	2	1	6
Household	69,300	67,500	73,000	120	48	300	2	1	6
Motor Gasoline 2-Stroke									
Agriculture	69,300	67,500	73,000	140	56	350	0.4	0.2	1.2
Forestry	69,300	67,500	73,000	170	68	425	0.4	0.2	1.2
Industry	69,300	67,500	73,000	130	52	325	0.4	0.2	1.2
Household	69,300	67,500	73,000	180	72	450	0.4	0.2	1.2

Note: CO<sub>2</sub> emission factor values represent full carbon content.

Tier 1의 Eq. (2.1)에서 사용되는 배출계수는 IPCC가 제시한 연료별 탄소배출계수를 사용하며, CO<sub>2</sub> 배출량은 소비된 연료와 연료 종류에 따른 배출계수를 이용하여 구하게 된다.

$$Tier1 \tag{2.1}$$

$$Emissions = \sum_j (Fuel_j \times EF_j)$$

여기서, Emissions = 배출량(kg)

Fuel<sub>j</sub> = 소비된 연료(연료판매량 상당)(TJ)

EF<sub>j</sub> = 배출계수(kg/TJ)

j = 연료 종류

IPCC에서 제시하는 Tier 1 방법에 의한 자동차 배출 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O의 배출량 산정

방법은 사용연료의 종류와 해당 온실가스의 배출계수를 고려하여 배출량을 산정 시 배출계수 역시 IPCC에서 제시하고 있으며, 연료사용량을 에너지항으로 환산한 값과 곱으로 계산된다.

### 2.2.1.2 Tier 2

Tier 2를 위한 배출량은 국가 특정 배출계수와 차량이나 기계류의 광범위한 종류에 대해 지정된 연료지정 배출계수를 이용하여 산정한다. Tier 2 방법은 연료소비를 기술 및 표본에 따라 구분하는 방법으로 사용되는 온실가스별, 차종별 배출계수를 제시함으로써 해당국가의 자료가 없을 때 사용한다. Bottom-Up 방식으로 차종별, 배출제어기술에 따른 배출계수를 적용하며 차종별 에너지 소비량 자료가 필요하다.

아래 Eq. (2.2)는 Tier 2의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 식으로 장비의 종류와 배출계수, 소비된 연료를 통하여 배출량을 산출한다.

$$Tier2 \tag{2.2}$$

$$Emissions = \sum (Fuel_{ij} \times EF_{ij})$$

여기서, Emissions = 배출량(kg)

Fuel<sub>ij</sub> = 소비된 연료(연료판매량 상당)(TJ)

EF<sub>ij</sub> = 배출계수(kg/TJ)

i = 차량/장비 종류

j = 연료 종류

### 2.2.1.3 Tier 3

Tier 3 방법은 연료소비 대신 주행거리 등 활동도(activity) 자료를 기준으로 하여 측정된 배출계수와 곱으로 계산하는 방법이다. Tier 2와 Tier 3 방법을 정

확히 구분하는 것은 어려우나, Tier 2 방법을 대표적인 배출계수 적용이 가능하도록 동질적 기술들에 대한 지식과 표본에 기초하여 연료소비를 구분하고 있는 반면, Tier 3 방법은 활동도 결과와 연료 혼합 비율 등의 자료를 기초로 하여 추정된 배출계수를 사용하여 온실가스 배출량을 산정하는 방법으로 Tier 3 방법이 보다 구체적이라고 할 수 있다. Tier 3 방법은 Bottom-Up 방식으로 차종별, 배출제어기술에 따른 배출계수를 적용하며 3가지 방법 중 배출량을 가장 정확히 산정하는 수준이므로 많은 자료를 필요로 한다.

$$\text{Tier3} \tag{2.3}$$

$$Emissions = \sum_{ij} (N_{ij} \times H_{ij} \times P_{ij} \times LF_{ij} \times EF_{ij})$$

여기서, Emissions = 배출량(kg)

$N_{ij}$  = 차량대수(모집단)

$H_{ij}$  = 차량 i의 연간 가용시간(h)

$P_{ij}$  = 차량 i의 평균 정격 출력(kw)

$LF_{ij}$  = 차량 i의 보편적인 부하계수(0 과 1 사이의 소수)

$EF_{ij}$  = 차량 i에 사용한 연료j의 평균 배출계수(kg/kwh)

i = 비도로(off-road) 차량 종류

j = 연료 종류

### 2.2.2 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인

MLTMA(2011)은 건축물에 대하여 계획 및 설계, 시공(이하 자재생산을 포함한다), 운용, 해체 및 재활용의 Life cycle 단계별로 각각 시설물의 특성을 고려하여 탄소배출량을 산정하는 방법을 제공해 탄소배출량을 산정하고 관리하는데 그 목적이 있다.

시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인은 정부가 발표한 것으로 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 방식은 IPCC 가이드라인을 기초로 하여 에너지 사용량, 순발열량, 탄소배출계수,

산화율과 환산계수를 사용하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정 하는 것으로 아래 Eq. (2.4)를 사용한다.

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{에너지사용량} \times \text{순발열량} \times \text{탄소배출계수} \times \text{산화율} \times 44/12$$

$$(t\text{CO}_2) \quad (\text{unit}) \quad (\text{kcal/unit}) \quad (t\text{C/kcal}) \quad (t\text{CO}_2/t\text{C}) \quad (2.4)$$

### 2.2.3 화학식

Kim(2014)에 의하면 일반적인 경유의 비등점이 약 180~380°C이며 평균적으로 약 350°C에서 자기 착화한다. 또한, 경유는 약 300여종의 탄화수소로 구성되어 있으며 일반적인 화학식은 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>이며 C<sub>10</sub>H<sub>20</sub>에서 C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>까지 분포한다.

경유는 산소와 결합하여 연소반응을 하며 완전연소일 경우 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 물(H<sub>2</sub>O) 이 발생하게 되지만, 불완전연소일 경우 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 물(H<sub>2</sub>O)뿐만 아니라 그을음(C)과 일산화탄소(CO) 그리고 탄화수소(CH)가 발생한다.

일반적인 C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> 형태의 탄화수소물 연소반응식은 Eq. (2.5)과 같이 나타낼 수 있는데(Yu et al., 2012), 여기서 일반적인 경유의 화학식은 x=12, y=23 인 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub> 이므로 이를 대입하면 Eq. (2.6)과 같이 정리할 수 있으며, 경유 1L가 이론적으로 완전연소 할 경우 Eq. (2.7)과 같이 2,630.19 g/L의 CO<sub>2</sub>가 배출된다.



$$1L \text{ Diesel} \quad (2.7)$$

$$= \frac{832(g)}{1(L)} \times \frac{1(mol C_{12}H_{23})}{167.4(g)} \times \frac{43(mol CO_2)}{4(mol C_{12}H_{23})} \times \frac{44.1(g)}{43(mol CO_2)}$$

$$= 2,630.19 g/L$$

## 2.3 직접측정 방식

### 2.3.1 CVS-75 방법

CVS-75는 미국의 자동차 배출가스 시가지 주행모드 시험 FTP-75를 국내에 맞게 개량한 것으로 1987년부터 사용하며 4단계의 시험모드로 구분 할 수 있다.

CVS-75의 단계는 첫 번째 Cold Start Phase에서는 505초 동안 과도기 단계로 총 5.78km를 주행하면서 최소 50km/h에서 최대 약 91.2km/h까지 속도를 변화 시켜가며 주행하는 단계이고, 두 번째 Transient Phase는 안정기 단계로 총 주행 거리 6.25km를 865초 동안 최저 38km/h에서 최대 55.2km/h의 속도로 가속 및 감속을 병행하여 주행한 후 세 번째는 10분간 엔진 시동을 끄는 Engine Stop Phase가 이어지며, 네 번째 단계인 Hot Start Phase에서는 첫 번째와 같은 주행 모드인 과도기 단계를 반복하여 운전하며 총 주행거리 17.85km를 평균시속 34km/h로 주행하며, Fig. 2.1은 CVS-75주행 모드의 사이클로서, 각 단계별 시간에 따른 주행속도변화를 나타낸 그래프이다. 이는 국내와 북미에서 적용한 배출가스 규제에 대한 표준모드로서 구간별 CO<sub>2</sub> 및 다른 배기가스의 배출 분포를 비교하고 분석하는 방법으로 이용한다. 본 연구의 비교에서는 제외한다.

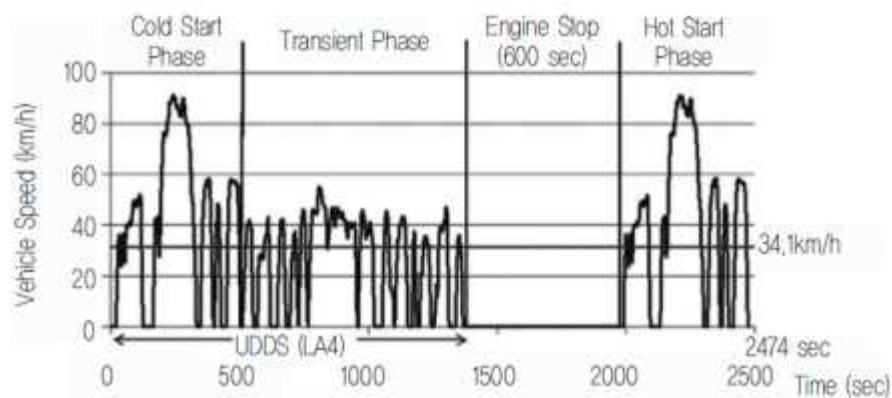


Fig. 2.1 CVS-75 Mode Travel Cycle(ME, 2017)



### 2.3.2 Concentration - Flow Velocity Measurement(C-FVM) 방법

Kim(2014)이 제시한 농도-유속측정(Concentration - Flow Velocity Measurement : C-FVM)을 이용한 차량 CO<sub>2</sub> 배출량 직접측정방법으로 건설기계의 배기구에서 나오는 배기가스를 RPM 변화를 주어 각각 포한 후 일정시간 뒤 배기가스가 안정된 후 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하고, 유속을 측정하여 유량을 산출 후 유량과 연산하여 시간당 배출되는 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 방법으로서, RPM별 배기가스의 양은 다르나 CO<sub>2</sub>의 농도는 유사한 값으로 산출된다는 조건하에 RPM에 따른 배기가스의 배기량을 이용한 건설기계 CO<sub>2</sub> 배출량 측정방법이다.

건설기계별 이산화탄소 배출량의 차이분석은 건설기계의 작업 중과 대기 중에 이산화탄소 배출량이 달라진다는 가정 하에 실시한다. 또한, 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 요소로서 배기구의 유속, 온도, RPM으로 가정하고 이 요소와 CO<sub>2</sub>와의 상관관계를 분석하였다

측정한 CO<sub>2</sub> 농도 값을 Eq. (2.8)을 이용하여 단위부피당 CO<sub>2</sub> 질량값으로 환산하고, 건설기계의 배기구에 유속센서를 설치하고 유속 및 단면적을 측정, 시간당 배출총유량(m<sup>3</sup>/s)을 산정하여 Eq. (2.9)를 이용해 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정한다.

$$CO_2(g/L) \tag{2.8}$$

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

여기서, x = CO<sub>2</sub> 농도(ppm)

y = 연소온도(°C)

z = 대기압(atm)

$$CO_2(g/s) = Flow\ Rate(m^3/s) \times CO_2(g/L) \times 1000 \tag{2.9}$$

## 제3장 실험장비 및 연구방법

### 3.1 실험장비

#### 3.1.1 건설기계

본 연구에서는 배출되는 건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량을 직접측정방식으로 측정하여 건설현장에서 기초 구조물 공사 시 단위 물량 기준 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출 하고자 한다. 기초 구조물 공사 시 지반의 굴착을 위한 굴삭기, 콘크리트 기초에 사용되는 철근 등의 자재 운반을 위한 트럭탑재형 크레인과 콘크리트 타설을 위한 콘크리트 믹서트럭을 실험대상 건설기계로 선정 하였다.

##### 3.1.1.1 굴삭기

본 연구에서 활용된 굴삭기(Excavator)의 운행특성, 작업량, 배기가스 배출 특성 등은 Kim & Lee(2017)의 결과를 사용하였다.

실험대상 건설기계로 현장에서 운행 중인 Fig. 3.1과 같은 굴삭기를 사용하였고, Table. 3.1은 굴삭기 제원이며 엔진은 6기통, 무게는 13,500kg, 버킷용량은 0.59 m<sup>3</sup>, 길이 7,290mm, 너비 2,496mm, 높이 3,480mm, 최저 지상높이 350mm, 출력 134ps/2,000rpm, 선회속도 11.3rpm, 최대 굴삭 반지름 7,605mm, 최대 굴삭 깊이 4,640mm인 타이어식 굴삭기를 이용하였다.



Fig. 3.1 Excavator

Table. 3.1 Specifications of Excavator

	Unit	Dimension
Weight	kg	13,500
Bucket capacity	m <sup>3</sup>	0.59
Length	mm	7,290
Width	mm	2,496
Height	mm	3,480
Cylinder	EA	6
Engine power	ps/rpm	134/2,000
Revolution speed	rpm	11.3
Maximum excavation radius	mm	7,605
Maximum excavation depth	mm	4,640
Travel speed	km/hr	37
Production year	year	2010

### 3.1.1.2 콘크리트 믹서트럭

실험대상 건설기계로 현장에서 운행 중인 Fig. 3.2와 같은 콘크리트 믹서트럭 (Concrete mixer truck ; CMT)을 사용하였다. 콘크리트 믹서트럭의 제원은 Table. 3.2에 제시하였으며 직접측정방식으로 측정 시 연식이 다른 3대를 이용하였다.



Fig. 3.2 Concrete mixer truck

Table. 3.2 Specifications of Concrete mixer truck

Division	Unit	CMT.1 Dimension	CMT.2 Dimension	CMT.3 Dimension
Weight	kg	28,670	36,600	28,900
Length	mm	8,380	9,635	9,340
Width	mm	2,495	2,495	2,490
Height	mm	3,850	3,750	3,700
Cylinder	EA	6	6	6
Engine power	ps/rpm	380/1,900	400/1800	410/1800
Drum capacity	m <sup>3</sup>	11	15.8	11
Specification capacity	m <sup>3</sup>	7	9	7
Production year	year	2003	2012	2015

### 3.1.1.3 트럭탑재형 크레인

실험대상 건설기계로 현장에서 운행 중인 Fig. 3.3과 같은 트럭탑재형 크레인 (Cargocrane : CC)을 사용하였다. 트럭탑재형 크레인의 제원은 Table. 3.3에 제시하였으며 직접측정방식으로 측정 시 연식이 유사한 4대를 이용하였다.



Fig. 3.3 Cargocrane

Table. 3.3 Specifications of Cargocrane

Division	Unit	CC.1 Dimension	CC.2 Dimension	CC.3 Dimension	CC.4 Dimension
Weight	kg	38,990	39,410	39,410	39,410
Length	mm	12,630	12,630	12,630	12,630
Width	mm	2,495	2,495	2,495	2,495
Height	mm	3,900	3,900	3,900	3,930
Cylinder	EA	6	6	6	6
Engine power	ps/rpm	440/1800	440/1800	440/1800	440/1800
Maximum load capacity	kg	10,900	11,000	12,500	11,900
Production year	year	2003	2002	2004	2003

### 3.1.2 측정장비

#### 3.1.2.1 배기가스 측정기

배기가스 측정에 사용한 장비는 Fig. 3.4와 같은 독일의 T사의 기종이며 측정요소로는 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, 온도 등이다. Table. 3.4는 Portable Emission Measurement System(PEMS) 장비의 대표적 측정항목과 성능으로서 O<sub>2</sub>의 측정범위는 0~21vol%이며 정확성은 ±0.2 Vol%이고, CO<sub>2</sub>의 측정범위는 0~100%이며 정확성은 ±0.2%이고, CO의 측정범위는 최소 0~4,000ppm, 온도는 0~400°C이다.



Fig. 3.4 PEMS Equipments

Table. 3.4 Specifications of Portable Emission Measurement System(PEMS) Equipments

List of measurement	Measuring range	accuracy	Resolution
O <sub>2</sub> (Vol%)	0~21	±0.2 Vol%	0.1Vol%
CO <sub>2</sub> (%)	0~3/0~100	±0.2%	0.1%
CO(ppm)	0~4,000	±20 ppm(0 ~ 400 ppm) ±5 Of the measured value%(401~2000ppm) ±10 Of the measured value%(2001~4000ppm)	0.1Vol.%
Temperature(°C)	0~400	±1°C (0 ~ +100 °C) ±1.5 Of the measured value% (>100 °C)	0.1°C

### 3.1.2.2 유속 측정기

배기가스 배출 유속 측정에 사용한 장비는 Fig. 4.5와 같은 프랑스의 K사의 기종이며 측정요소로는 풍속과 압력 등을 측정할 수 있으며, Table. 3.5는 유속 측정기와 피토관의 대표적 측정항목과 성능으로서 압력의 측정범위는 0~±2500Pa이며 정확성은 리딩값의 ±2Pa이고, 풍속은 0~60m/s 이고, 피토관의 사용온도는 0~600°C이다.



Fig. 3.5 Measuring instrument

Table. 3.5 Specifications of Flow meter Equipments

List of measurement		Measuring range	accuracy	Resolution
Pressure		0~±2500(Pa)	± 0.2% of reading value ± 2Pa	1Pa
Workable Temperature	Measuring instrument	0 ~ +50(°C)	-	-
	Pitot tube	0~600(°C)	-	-
velocity measurement	Measuring instrument	2 ~ 5m/s 5.1 ~ 100m/s	±0.3m/s ± 0.5% of reading ± 0.2m / s	0.1m/s
	Pitot tube	0~60(m/s)	Less than 1% when aligned to fluid flow axis at ± 10 ° C	

### 3.1.2.3 영상기록 장치

건설기계의 운행상태에 따른 엔진부하량을 RPM변화량으로 기록하기 위해 건설기계 내부에 소형캠코더를 설치하였고, 장비의 생산성(작업량)을 기록하기 위해 일반 디지털캠코더를 외부에 설치하였다.



Fig. 3.6 Video recording device

## 3.2 연구방법

본 연구에서는 건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량을 직접측정방식으로 산출하여 건설기계의 생산성과 연계한 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 시 건설기계의 운행특성상 CO<sub>2</sub> 배출량을 작업에 따른 부하 상태의 RPM 변화를 부하량으로 고려한 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 방식이 현실적이라 판단하여 Kim(2014)의 C-FVM에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 측정방법을 개선하였다.

### 3.2.1 RPM 변화에 따른 배기가스 측정

실험대상 건설기계를 운행상태를 차대동력계로 동력 전달이 없는 공회전 무부하(Non-load) 상태와 차대동력계로 동력 전달이 있는 부하(Load) 상태로 구분하여 측정하였다. 이때 특정 RPM 변화에 따른 배기가스 배출구에서 배출되는 배기가스의 CO<sub>2</sub> 농도와 유속을 측정하여 RPM 변화 시 CO<sub>2</sub> 농도 및 유속의 상관관계를 확인하였다.

또한, 건설기계의 생산성(작업량)과 CO<sub>2</sub> 배출량과의 관계를 분석하기 위해 건설기계의 작업 시 부하특성을 보여주는 RPM 변화를 영상기록 장치를 이용해 차량 내부와 외부에서 동시기록하고 연계 분석하였다.

#### 3.2.1.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017)

굴삭기의 CO<sub>2</sub> 배출량을 직접측정방식으로 산출하기 위해서는 굴삭기의 운행특성상 CO<sub>2</sub> 배출량을 주행속도별로 측정하는 것보다 작업에 따른 부하상태의 RPM 변화를 부하량으로 고려하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 것이 보다 합리적이다. 무부하 상태와 버킷과 블레이드를 이용해 차체를 들어 바퀴를 회전하는 부하 상태로 구분하였다. CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하기 위해 PEMS 장비로 현장에서 굴삭기의 특정 RPM에 대해 배기구로 배출되는 배기가스의 CO<sub>2</sub> 농도와 온도 그리고 유속 등을 측정하여 RPM 변화와 상관관계를 분석하였다.



### 3.2.1.2 콘크리트 믹서트럭

CO<sub>2</sub> 배출량을 직접측정방식으로 산출하기 위해서는 콘크리트 믹서트럭의 운행특성상 CO<sub>2</sub> 배출량을 주행속도별로 측정하는 것보다 작업에 따른 부하상태의 RPM 변화를 부하량으로 고려하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 것이 보다 합리적이다. 공회전 무부하 상태와 드럼 회전속도 조절을 이용한 부하 상태로 구분하였다. CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하기 위해 PEMS 장비로 현장에서 콘크리트 믹서트럭의 특정 RPM에 대해 배기구로 배출되는 배기가스의 CO<sub>2</sub> 농도와 온도 그리고 유속 등을 측정하여 RPM 변화와 상관관계를 분석하였다.

### 3.2.1.3 트럭탑재형 크레인

CO<sub>2</sub> 배출량을 직접측정방식으로 산출하기 위해서는 트럭탑재형 크레인의 운행특성상 CO<sub>2</sub> 배출량을 주행속도별로 측정하는 것보다 작업에 따른 부하상태의 RPM 변화를 부하량으로 고려하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 것이 보다 합리적이다. 공회전 상태와 아웃트리거를 이용해 차체를 들어 바퀴를 회전하는 부하 상태로 구분하였다. CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하기 위해 PEMS 장비로 현장에서 트럭탑재형 크레인의 특정 RPM에 대해 배기구로 배출되는 배기가스의 CO<sub>2</sub> 농도와 온도 그리고 유속 등을 측정하여 RPM 변화와 상관관계를 분석하였다.

## 3.2.2 건설기계 작업 특성에 따른 RPM 측정

### 3.2.2.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017)

굴삭기 운행상태에 따른 RPM 변화량과 생산성(작업량)을 산정하기 위해 토사지반에 15ton 덤프트럭 한 대분의 자갈 8m<sup>3</sup>를 준비하고 작업을 위한 굴삭기의 회전각을 직각으로 회전하여 운행상태의 일관성을 최대한 유지하도록 조정하였다. 석분의 운반 및 굴삭 작업을 반복 측정하였으며 작업 상태에 따라서 굴삭기가 자리를 잡기 위한 이동, 버킷의 움직임에 따른 석분 담기, 회전, 비우기, 흐트러진 석분 모으기로 5가지의 작업 상태로 구분하여 운행 상태에 따른 RPM변화와 생산성(작업량)을 분석하였다.



Fig. 3.7 Excavator work to bucket

또한, 암파쇄 작업중인 굴삭기 움직임에 따라 파쇄, 모으기, 들기, 회전, 내리기, 이동으로 6가지의 작업 상태로 구분하여 운행 상태에 따른 RPM 변화와 생산성(작업량)을 분석하였다.



Fig. 3.8 Excavator work to breaker

### 3.2.2.2 콘크리트 믹서트럭

콘크리트 믹서트럭 운행 상태에 따른 RPM 변화량과 생산성(작업량)을 산정하기 위해 콘크리트 플랜트 시설에서 콘크리트 믹서트럭 드럼으로 콘크리트 적재 후, 타설 현장까지의 이동, 콘크리트 타설에 따른 3가지 작업 상태로 구분하여 운행 상태에 따른 RPM 변화를 분석하였다.



Fig. 3.9 Concrete mixer truck to work

본 연구에서 사용된 굴삭기의 연식이 2010년 제작되었으며, 콘크리트 믹서트럭의 경우 연식을 굴삭기와 유사하게 산출하려 한다. 그러나 Fig. 3.10에 의하면 연구가 진행된 제주 지역 해당연도의 콘크리트 믹서트럭 등록 대수가 미미하여 연식별 콘크리트 믹서트럭 산출된 CO<sub>2</sub> 배출량 결과를 회귀분석하여 굴삭기와의 연식을 유사하게 하고자 하였다.

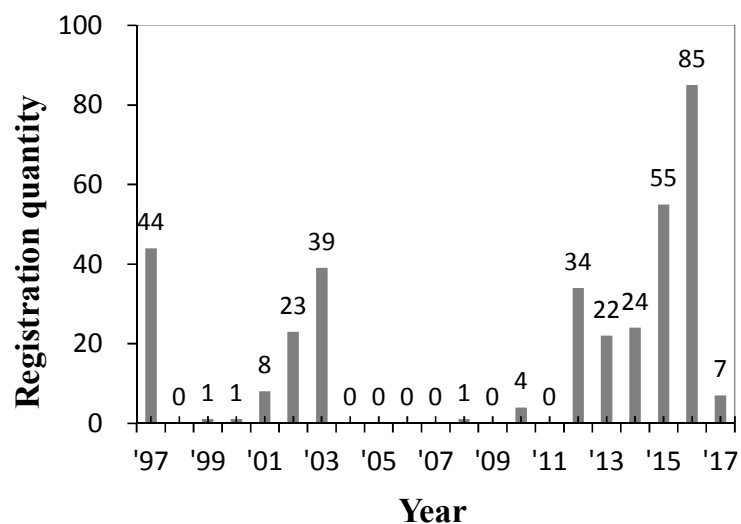


Fig. 3.10 Registration quantity by Jeju concrete mixer truck yearly(Jeju Special Self-Governing Province, 2018)

### 3.2.2.3 트럭탑재형 크레인

트럭탑재형 크레인 운행 상태에 따른 RPM 변화량과 생산성(작업량)을 산정하기 위해 작업 중인 트럭탑재형 크레인 움직임에 따라 대기, 들기, 내리기, 회전, 붐 조정, 이동, 고정·해제 등의 작업 상태로 구분하여 운행 상태에 따른 RPM변화와 생산성(작업량)을 분석하였다.



Fig. 3.11 Cargocrane to work

### 3.2.3 단위 작업량에 대한 건설기계 CO<sub>2</sub> 배출량 산정

Table. 3.6은 작업 특성에 따른 RPM 측정 각 건설장비별 측정횟수와 작업 특성을 나타내었다. 작업 시 콘크리트 믹서트럭과 트럭탑재형 크레인 이동거리는 편도 10km, 왕복 20km로 단위가동시간을 활용해 환산 하였다. 측정 횟수는 굴삭기는 운반 및 굴삭 작업 4회, 암파쇄 3회 측정하였다. 콘크리트 믹서트럭은 플랜트에서 적재, 이동 후 타설하는 것을 4회 측정 하였다. 트럭탑재형 크레인은 화물을 적재, 운반 후 하역하는 작업을 5회 측정하였다.

Table. 3.6 Experimental conditions

		Distance between sites(km)	Number of sounding	Classification of work characteristics
Excavator	Digging and moving	-	4	Put, Rotate, Empty, Collect, Move
	Rock crushing	-	3	Crushing, Collect, pick up, rotating, lowering, moving
Concrete mixer truck		10	4	Loading, moving, pouring
Cargocrane		10	5	stand by, pick up, down, Rotate, Boom Adjust, Move, Lock and Release

측정된 작업 중 엔진 부하 변화와 RPM 변화 시 배기가스 성분을 분석하여 단위시간당 배출량을 산출하여 기존 간접측정방식을 이용한 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교 분석하였다. 그리고 트럭탑재형 크레인의 경우 제작 연식이 유사하여 산출값의 연식별 분석대신 평균을 CO<sub>2</sub> 배출량으로 산정하였다.

본 연구에서 기초 시설물 철근콘크리트를 사용한 가로 30m, 세로 30m, 높이 1m인 구조물로 가정하였다. Fig. 3.12와 Fig. 13은 가정한 시설물의 단면도 및 평면도이다. 그리고 MCT(2007)의 '수량 산출 기준 지침서'를 활용하여 여러 가지 조건 중 일부를 택하여 4가지의 단위 콘크리트 타설량 대비 철근 사용량을 기준으로 산출하였다.



Fig. 3.12 Basic facility sectional view

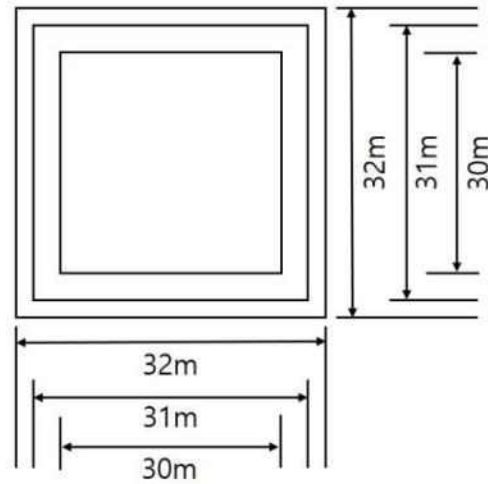


Fig. 3.13 Basic facility plane view

매립깊이는 0.5m이며 굴삭 시 여유 폭은 0.5m 이며 비탈면 경사 비율 1:1로 가정 하였다. 지반의 경우 암 지반 50%, 토사 지반 50%로 가정하여 굴삭기의 암파쇄 작업과 운반 및 굴삭 작업이 혼합된 작업으로 가정하였다. 토량 환산계수 중 팽창율(L)은 1.2로 가정하였다. 굴삭기 CO<sub>2</sub> 배출량은 암파쇄 후 발생한 자갈과 토사가 섞인 지반을 굴삭 한 것으로 가정하여 산출하였다.

콘크리트 믹서트럭은 콘크리트 물량에 따른 작업횟수를 산출하였다. 그리고 작업 횟수에 따른 작업시간을 도출하고, 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 곱하여 기초 시설물 제작 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

트럭탑재형 크레인의 경우 콘크리트 물량에 따른 철근 사용량을 산출하였다. 철근 사용량과 적재량의 관계를 분석하여 트럭탑재형 크레인의 운반횟수를 산출하였다. 그리고 운반횟수에 따른 작업시간을 도출하고, 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 곱하여 기초 시설물 제작 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

## 제4장 건설기계의 작업량 및 CO<sub>2</sub> 배출량

### 4.1 엔진부하량(Revolution Per Minute : RPM) 변화

#### 4.1.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017)

##### 4.1.1.1 굴삭기 운반 및 굴삭 작업

Fig. 4.1은 1번 싸이클 작업이 준비된 상태에서 측정을 시작하여 이동 작업이 없다. 버킷에 석분을 담는 작업 시 최대 RPM은 1136, 최소 RPM은 1052, 평균 RPM은 1102이고, 굴삭기의 회전 시 최대 RPM은 1136, 최소 RPM은 1052, 평균 RPM은 1103이고, 버킷의 내용물을 바닥에 내려놓을 때의 최대 RPM은 1128, 최소 RPM은 1054, 평균 RPM은 1099이며, 바닥의 석분을 모으기 위해 바닥을 긁는 작업 시 최대 RPM은 1122, 최소 RPM은 1054, 평균 RPM은 1094로 나타나고 있다. 또한, 작업 후 공회전으로 건설기계를 조작하면 엔진부하량이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.2는 2번 싸이클 작업 중 RPM 변화를 보여주고 있다. 작업을 위하여 굴삭기가 자리를 잡기 위해 이동하는 작업도 포함하며, 버킷에 석분을 담는 작업 시 최대 RPM은 1124, 최소 RPM은 1052, 평균 RPM은 1097이고, 굴삭기의 회전 시 최대 RPM은 1140, 최소 RPM은 1050, 평균 RPM은 1103이고, 버킷의 내용물을 바닥에 내려놓을 때의 최대 RPM은 1126, 최소 RPM은 1072, 평균 RPM은 1097이며, 바닥의 석분을 모으기 위해 바닥을 긁는 작업 시 최대 RPM은 1122, 최소 RPM은 1066, 평균 RPM은 1101이고, 굴삭기의 이동하는 작업 시 최대 RPM은 1424, 최소 RPM은 1066, 평균 RPM은 1225로 나타나고 있으며 이동 중 순간적인 RPM 상승이 나타나고 있다.

Fig. 4.3은 3번 싸이클 작업 중 RPM 변화를 보여주고 있다. 작업을 위하여 굴삭기가 자리를 잡기 위해 이동하는 작업도 포함하며, 버킷에 석분을 담는 작업 시 최대 RPM은 1130, 최소 RPM은 1044, 평균 RPM은 1095이고, 굴삭기의 회전 시

최대 RPM은 1140, 최소 RPM은 1028, 평균 RPM은 1103이고, 버킷의 내용물을 바닥에 내려놓을 때의 최대 RPM은 1126, 최소 RPM은 1062, 평균 RPM은 1103이며, 바닥의 석분을 모으기 위해 바닥을 긁는 작업 시 최대 RPM은 1128, 최소 RPM은 1082, 평균 RPM은 1104이고, 굴삭기의 이동하는 작업 시 최대 RPM은 1432, 최소 RPM은 1082, 평균 RPM은 1235로 나타나고 있으며 이동 중 순간적인 RPM 상승이 나타나고 있다. 또한, 작업 후 공회전으로 건설기계를 조작하면 엔진 부하량이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.4는 4번 사이클 작업 중 RPM 변화를 보여주고 있다. 작업을 위하여 굴삭기가 자리를 잡기 위해 이동하는 작업도 포함하며, 버킷에 석분을 담는 작업 시 최대 RPM은 1124, 최소 RPM은 1048, 평균 RPM은 1096이고, 굴삭기의 회전 시 최대 RPM은 1134, 최소 RPM은 1046, 평균 RPM은 1103이고, 버킷의 내용물을 바닥에 내려놓을 때의 최대 RPM은 1118, 최소 RPM은 1060, 평균 RPM은 1088이며, 바닥의 석분을 모으기 위해 바닥을 긁는 작업 시 최대 RPM은 1126, 최소 RPM은 1086, 평균 RPM은 1106이고, 굴삭기의 이동하는 작업 시 최대 RPM은 1436, 최소 RPM은 1084, 평균 RPM은 1176로 나타나고 있으며 이동 중 순간적인 RPM 상승이 나타나고 있다. 또한, 작업 후 공회전으로 건설기계를 조작하면 엔진 부하량이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

굴삭기의 운반 및 굴삭 작업 시 작업특성에 따른 RPM 변화 값을 작업별 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 산출하였다. RPM 변화에 따른 배기가스 특성(CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 유속)을 회귀 분석으로 산출된 회귀식에 가중 평균한 RPM을 대입하여 작업 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.



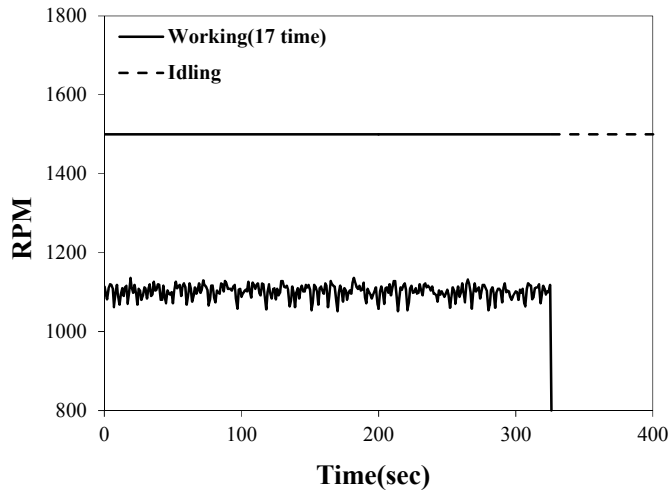


Fig. 4.1 RPM change according to 1 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

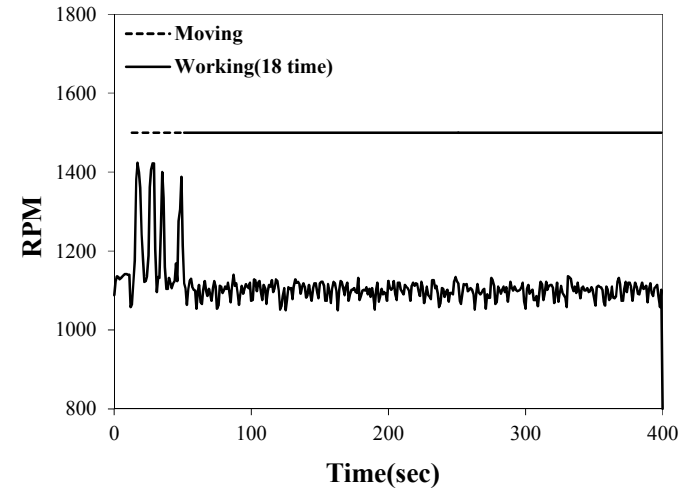


Fig. 4.2 RPM change according to 2 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

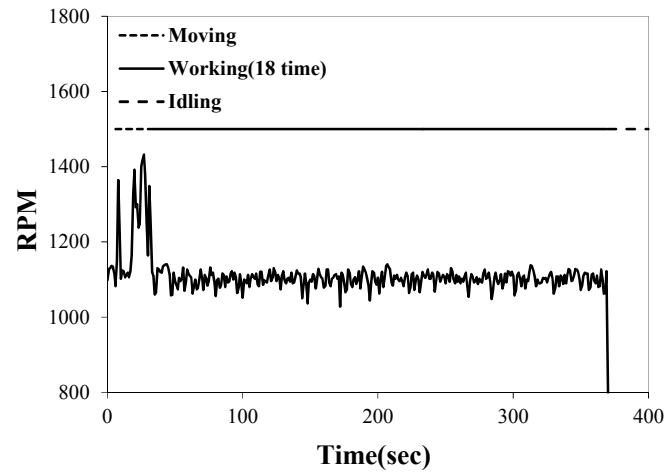


Fig. 4.3 RPM change according to 3 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

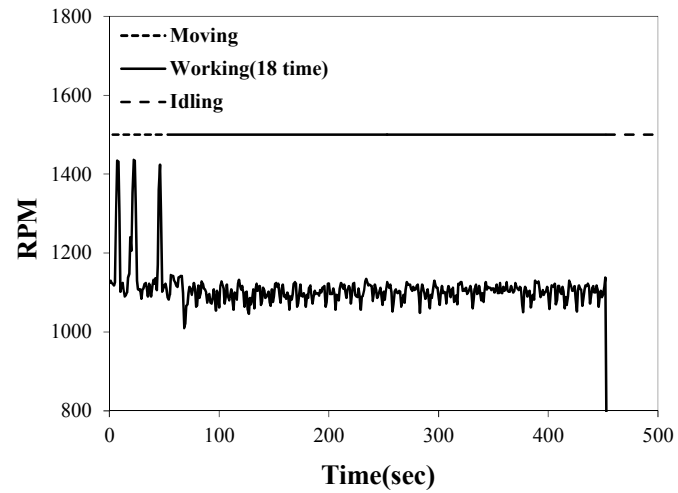


Fig. 4.4 RPM change according to 4 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

#### 4.1.1.2 굴삭기 암파쇄 작업

굴삭기의 암파쇄 실험은 운반 및 굴삭 다른 작업 형태로 시간에 따른 RPM 변화 측정하여 작업 중 굴삭기의 특성을 분석하기 위하여 실험을 실시하였다.

Fig. 4.5는 1번 사이클 작업이 10분간 암파쇄 작업의 시간에 따른 RPM 변화이다. 암파쇄 작업 시 최대 RPM은 1010, 최소 RPM은 970, 평균 RPM은 1000이고, 굴삭기의 이동 시에 최대 RPM은 1260, 최소 RPM은 1000, 평균 RPM은 1096이고, 바닥의 파쇄된 암석을 모으기 위해 바닥을 긁거나 모으는 작업 시 최대 RPM은 1340, 최소 RPM은 980, 평균 RPM은 1008으로 나타나고 있다.

Fig. 4.6은 2번 사이클 작업이 10분간 암파쇄 작업의 시간에 따른 RPM 변화이다. 암파쇄 작업 시 최대 RPM은 1010, 최소 RPM은 970, 평균 RPM은 1000이고, 굴삭기의 이동 시에 최대 RPM은 1300, 최소 RPM은 1000, 평균 RPM은 1172이고, 바닥의 파쇄된 암석을 모으기 위해 바닥을 긁거나 모으는 작업 시 최대 RPM은 1270, 최소 RPM은 970, 평균 RPM은 1005으로 나타나고 있다.

Fig. 4.7은 3번 사이클 작업이 10분간 암파쇄 작업의 시간에 따른 RPM 변화이다. 암파쇄 작업 시 최대 RPM은 1010, 최소 RPM은 970, 평균 RPM은 999이고, 굴삭기의 이동 시에 최대 RPM은 1340, 최소 RPM은 1010, 평균 RPM은 1134이고, 바닥의 파쇄된 암석을 모으기 위해 바닥을 긁거나 모으는 작업 시 최대 RPM은 1190, 최소 RPM은 970, 평균 RPM은 1001으로 나타나고 있다.

굴삭기의 암파쇄 작업 시 작업특성에 따른 RPM 변화 값을 작업별 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004를 산출하였다. RPM 변화에 따른 배기가스 특성(CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 유속)을 회귀 분석으로 산출된 회귀식에 가중 평균한 RPM을 대입하여 작업 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

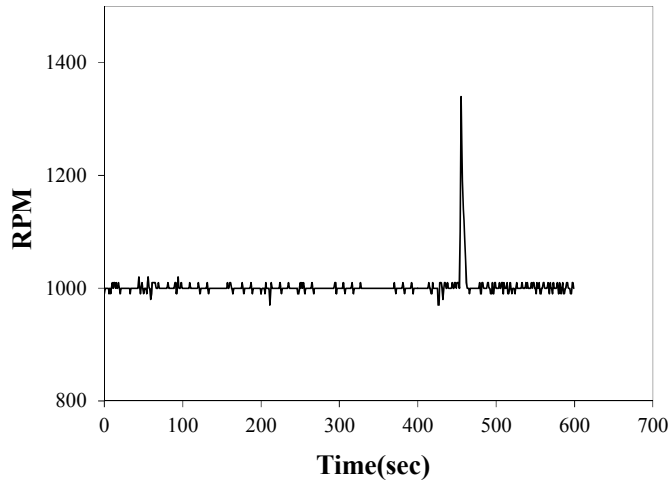


Fig. 4.5 RPM change according to 1 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

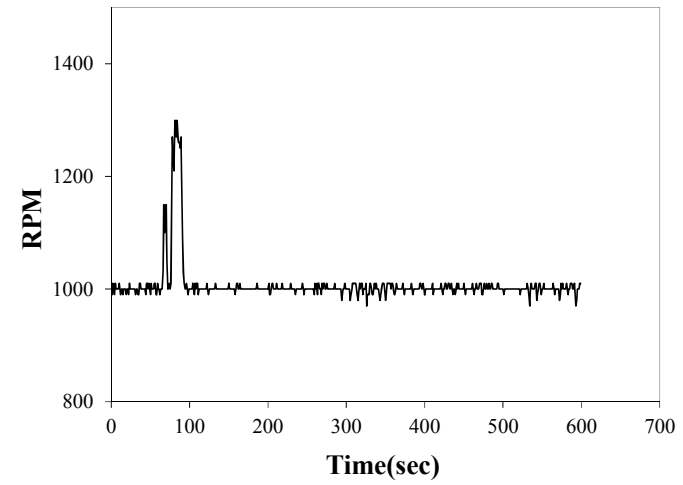


Fig. 4.6 RPM change according to 2 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

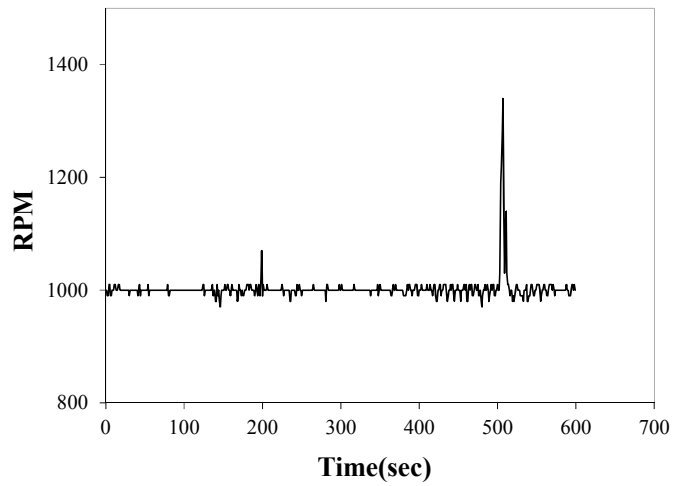


Fig. 4.7 RPM change according to 3 cycle work time  
(Kim & Lee, 2017)

#### 4.1.2 콘크리트 믹서트럭

Fig. 4.8은 콘크리트 믹서트럭 1번 사이클 작업으로 7m<sup>3</sup>의 콘크리트를 6.1km 거리의 현장에 콘크리트 펌프카를 이용하여 타설하기 위하여 작업 시간에 따른 RPM 변화를 확인하였다. 콘크리트 믹서트럭의 적재 작업 시 RPM은 최대 990, 최소 850, 평균 912, 작업 시간은 210초이고, 현장으로 이동 RPM은 시 최대 1700, 최소 550, 평균 896, 작업 시간은 1420초이고, 현장에서 콘크리트 타설 시 RPM은 최대 1360, 최소 630, 평균 716, 작업 시간은 310초로 나타나고 있다.

Fig. 4.9는 콘크리트 믹서트럭 2번 사이클 작업으로 7m<sup>3</sup>의 콘크리트를 5.7km 거리의 현장에 콘크리트 펌프카를 이용하여 타설하기 위하여 작업 시간에 따른 RPM 변화를 확인하였다. 콘크리트 믹서트럭의 적재 작업 시 RPM은 최대 800, 최소 560, 평균 571, 작업 시간은 150초이고, 현장으로 이동 시 RPM은 최대 1770, 최소 560, 평균 932, 작업 시간은 1270초이고, 현장에서 콘크리트 타설 시 RPM은 최대 1780, 820, 평균 831, 작업 시간은 555초로 나타나고 있다.

Fig. 4.10은 콘크리트 믹서트럭 3번 사이클 작업으로 7m<sup>3</sup>의 콘크리트를 1.2km 거리의 현장에 콘크리트 펌프카를 이용하여 타설하기 위하여 작업 시간에 따른 RPM 변화를 확인하였다. 콘크리트 믹서트럭의 적재 작업 시 RPM은 최대 580, 최소 560, 평균 567, 작업 시간은 130초이고, 현장으로 이동 시 RPM은 최대 1770, 최소 560, 평균 897, 작업 시간은 1040초이고, 현장에서 콘크리트 타설 시 RPM은 최대 1560, 최소 630, 평균 680, 작업 시간은 495초로 나타나고 있다.

Fig. 4.11은 콘크리트 믹서트럭 4번 사이클 7m<sup>3</sup>의 콘크리트를 9.9km 거리의 현장에 인공어초 제작으로 인하여 타설을 느리게 하는 작업 시간에 따른 RPM 변화를 확인하였다. 콘크리트 믹서트럭의 적재 작업 시 RPM은 최대 680, 최소 635, 평균 560, 작업 시간은 55초이고, 현장으로 이동 시 RPM은 최대 1600, 최소 560, 평균 1142, 작업 시간은 1535초이고, 현장에서 콘크리트 타설 시 RPM은 최대 1700, 최소 630, 평균 954, 작업 시간은 225초로 나타나고 있다.

콘크리트 믹서트럭의 작업 시 작업특성에 따른 RPM 변화 값을 작업별 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 산출하였다. RPM 변화에 따른 배기가스 특성(CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 유속)을 회귀 분석으로 산출된 회귀식에 가중 평균한 RPM을 대입하여 작업 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

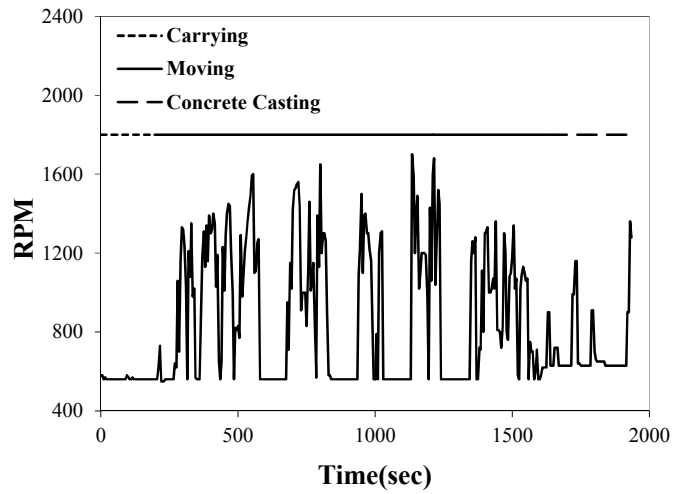


Fig. 4.8 RPM change according to 1 cycle work time

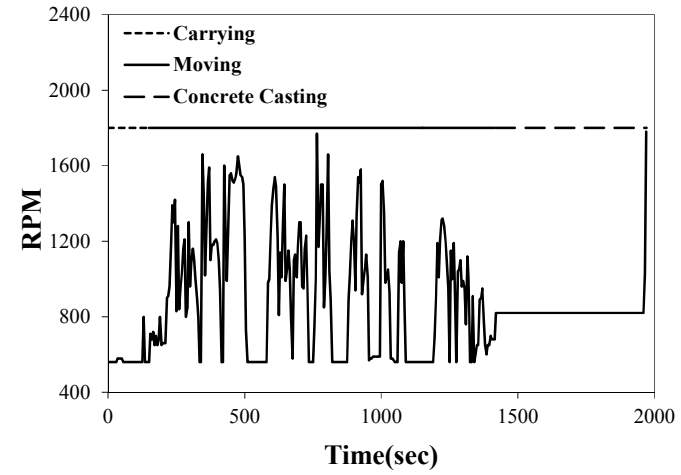


Fig. 4.9 RPM change according to 2 cycle work time

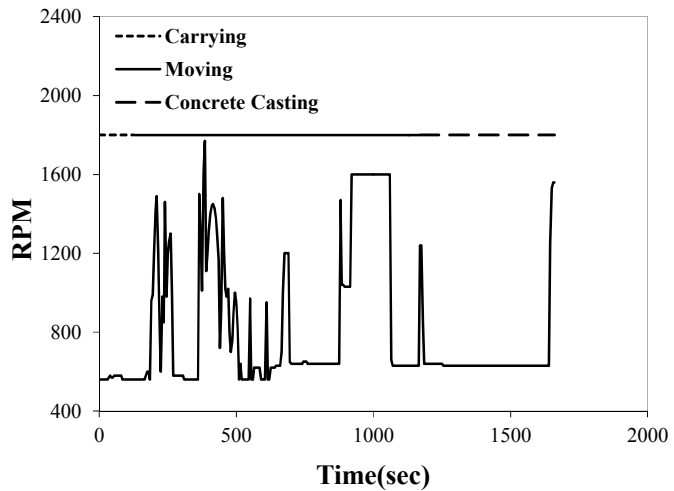


Fig. 4.10 RPM change according to 3 cycle work time

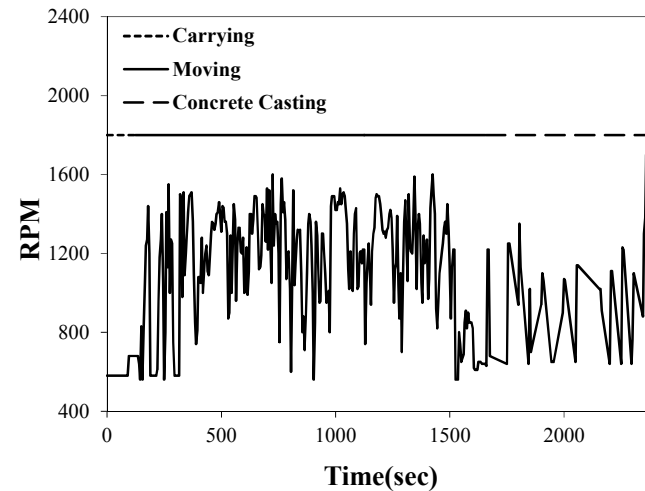


Fig. 4.11 RPM change according to 4 cycle work time

### 4.1.3 트럭탑재형 크레인

Fig. 4.12는 트럭탑재형 크레인 1번 사이클 작업으로 약 3.5ton의 화물을 약 9.3km 거리의 현장 운반 작업이다. 트럭탑재형 크레인의 대기 시 RPM은 최소 500, 최대 860, 평균 524이고, 들기 시 RPM은 최소 500, 최대 600, 평균 537이고, 내리기 시 RPM은 최소 510, 최대 980, 평균 743이고, 회전 시 RPM은 최소 510, 최대 1010, 평균 885이고, 붐 조정 시 RPM은 최소 520, 최대 990, 평균 749이고, 이동 시 RPM은 최소 490, 최대 2220, 평균 1407이고, 고정·해제 시 RPM은 최소 510, 최대 550, 평균 522로 나타나고 있다. 작업시간은 295초이며 이동시간은 1260초 소요되었다.

Fig. 4.13은 트럭탑재형 크레인 2번 사이클 작업으로 약 3.5ton의 화물을 약 5.3km 거리의 현장 운반 작업이다. 트럭탑재형 크레인의 대기 시 RPM은 최소 510, 최대 920, 평균 571이고, 들기 시 RPM은 최소 620, 최대 1180, 평균 850이고, 내리기 시 RPM은 최소 710, 최대 890, 평균 800이고, 회전 시 RPM은 최소 550, 최대 1120, 평균 867이고, 붐 조정 시 RPM은 최소 520, 최대 990, 평균 816이고, 이동 시 RPM은 최소 510, 최대 2050, 평균 1254이고, 고정·해제 시 RPM은 최소 510, 최대 580, 평균 523로 나타나고 있다. 작업시간은 285초이며 이동시간은 1190초 소요되었다.

Fig. 4.14는 트럭탑재형 크레인 3번 사이클 작업으로 약 3.5ton의 화물을 약 5.3km 거리의 현장 운반 작업이다. 트럭탑재형 크레인의 대기 시 RPM은 최소 510, 최대 600, 평균 519이고, 들기 시 RPM은 최소 800, 최대 870, 평균 840이고, 내리기 시 RPM은 최소 520, 최대 810, 평균 665이고, 회전 시 RPM은 최소 710, 최대 1070, 평균 963이고, 붐 조정 시 RPM은 최소 800, 최대 1020, 평균 927이고, 이동 시 RPM은 최소 510, 최대 1990, 평균 1149이고, 고정·해제 시 RPM은 최소 500, 최대 590, 평균 522로 나타나고 있다. 작업시간은 365초이며 이동시간은 760초 소요되었다.

Fig. 4.15는 트럭탑재형 크레인 4번 사이클 작업으로 약 3.5ton의 화물을 약 16.8km 거리의 현장 운반 작업이다. 트럭탑재형 크레인의 대기 시 RPM은 최소 550, 최대 600, 평균 598이고, 들기 시 RPM은 최소 600, 최대 880, 평균 753이고, 내리기 시 RPM은 최소 780, 최대 1150, 평균 903이고, 회전 시 RPM은 최소 600, 최대 1700, 평균 1008이고, 붐 조정 시 RPM은 최소 600, 최대 1700, 평균 1231이고, 이동 시 RPM은 최소 600, 최대 2150, 평균 1394이고, 고정·해제 시 RPM은 최소 550, 최대 600, 평균 598로 나타나고 있다. 작업시간은 410초이며 이동시간은 1495초 소요되었다.

Fig. 4.16은 트럭탑재형 크레인 5번 사이클 작업으로 약 3.5ton의 화물을 약 16.8km 거리의 현장 운반 작업이다. 트럭탑재형 크레인의 대기 시 RPM은 최소 580, 최대 880, 평균 604이고, 들기 시 RPM은 최소 750, 최대 1100, 평균 925이고, 내리기 시 RPM은 1280이고, 회전 시 RPM은 최소 600, 최대 1720, 평균 1063이고, 붐 조정 시 RPM은 최소 600, 최대 1700, 평균 1150이고, 이동 시 RPM은 최소 600, 최대 2100, 평균 1357이고, 고정·해제 시 RPM은 최소 580, 최대 650, 평균 601로 나타나고 있다. 작업시간은 395초이며 이동시간은 1615초 소요되었다.

트럭탑재형 크레인의 작업 시 작업특성에 따른 RPM 변화 값을 작업별 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 산출하였다. RPM 변화에 따른 배기가스 특성(CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 유속)을 회귀 분석으로 산출된 회귀식에 가중 평균한 RPM을 대입하여 작업 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

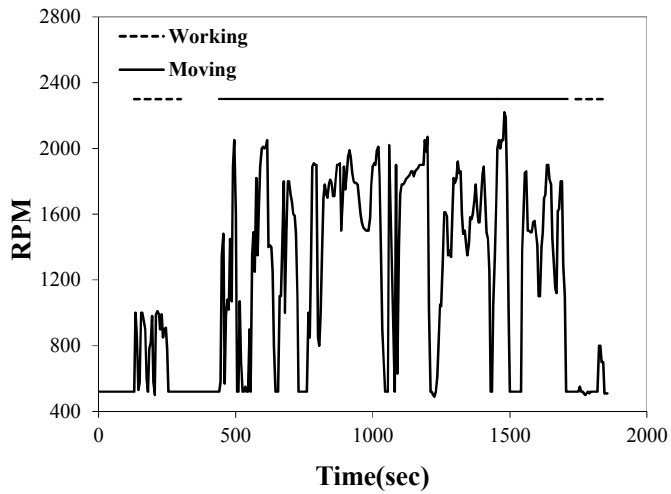


Fig. 4.12 RPM change according to 1 cycle work time

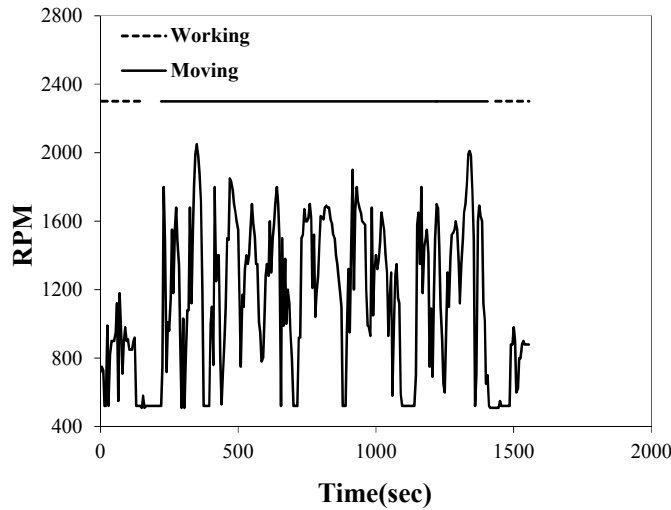


Fig. 4.13 RPM change according to 2 cycle work time

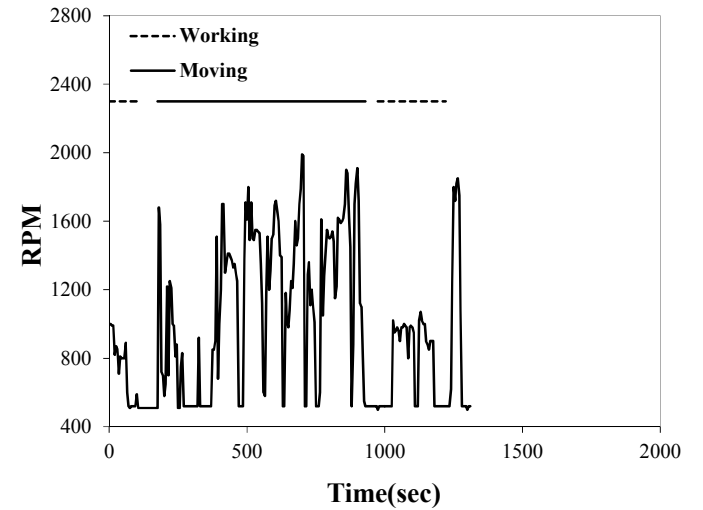


Fig. 4.14 RPM change according to 3 cycle work time

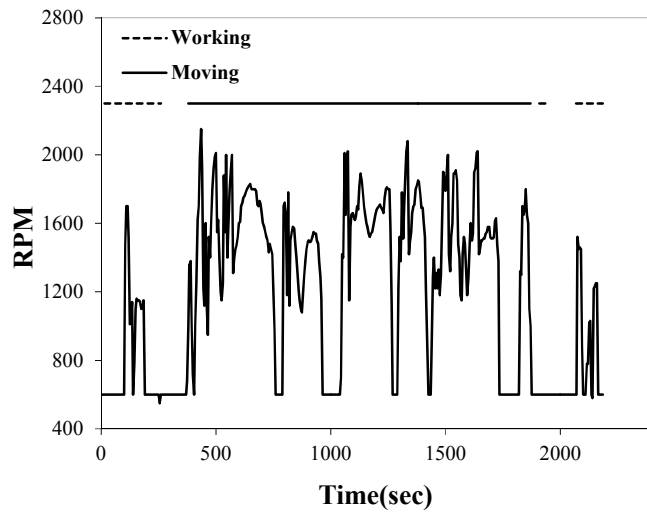


Fig. 4.15 RPM change according to 4 cycle work time

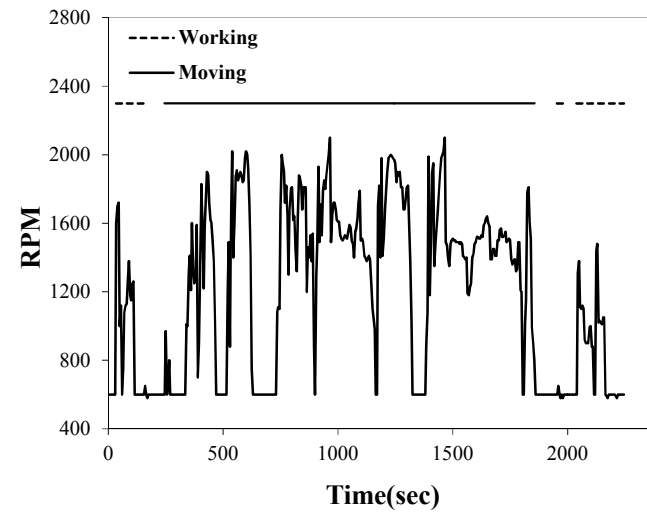


Fig. 4.16 RPM change according to 5 cycle work time



## 4.2 작업량 산출

### 4.2.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017)

굴삭기의 암파쇄 실험은 배수로 공사가 이루어진 실험 장소에서 실시되었다. 기존 농로로 활용되던 곳이며 실제 실험을 통해 한 시간씩 3회 측정된 시간당 작업량은 약 6.4m<sup>3</sup>, 약 5.2m<sup>3</sup>, 약 6.2m<sup>3</sup>이며 평균 약 5.9m<sup>3</sup>/hr로 산출되었다. 1일 작업량은 8시간 기준 47.4m<sup>3</sup>/day로 산출되었다.

굴삭기의 토사의 굴삭 실험은 15t 덤프트럭 한 대분의 자갈 약 8 m<sup>3</sup>를 굴삭기가 직각으로 4회 옮기는 작업을 운반 및 굴삭 작업으로 가정하여 분석하였다. 평균 운반횟수는 소수점 자리 이하 올림으로 18회이고, 1회 운반량의 평균은 약 0.44 m<sup>3</sup>이다.

한 대분의 석분의 운반 소요시간은 평균 약 380초이며, 1회 평균 운반 총 작업시간 1517초를 총 작업횟수인 69회를 나누어 1회 운반 시간은 약 22초이다. 1시간 동안 약 163회 운반하고, 1회 운반량의 평균 0.44 m<sup>3</sup>를 곱하면 1시간 동안의 작업량은 Eq. (4.1)과 같이 약 72.7 m<sup>3</sup>/hr로 산출되었다.

$$(8m^3 \times 4Cycle) \div 1585sec \times 3600sec = 72.7m^3/hr \quad (4.1)$$

### 4.2.2 콘크리트 믹서트럭

콘크리트 믹서트럭의 작업량은 4회의 작업을 측정하여 1회 타설시 소요시간을 단위환산하여 단위시간에 따른 작업량으로 산출하였다. 총 이동거리는 45.8km이고 4회의 작업 측정 결과 적재의 경우 136초 평균이동 왕복거리 약 11.5km에 따른 이동시간은 2633초, 7m<sup>3</sup> 콘크리트 평균 타설 시간은 396초로 산출되었다. 단위거리 1km의 이동시간은 평균 약 230초 소요된다.

본 연구에서 가정한 플랜트와 현장의 거리는 10km로 가정하고자 한다. 적재 시간 136초, 타설 시간 396초, 왕복 이동거리 20km 시간 약 4596초로 나타났다. 단위시간당 작업량은 Eq. (4.2)에 대입하여 4.9m<sup>3</sup>/hr로 산출되었으며, 일일 작업량 8시간 작업시간 기준 39.3m<sup>3</sup>/day로 산출되었다.

$$Q(m^3/hr) = \frac{3600 \cdot q \cdot E}{cm} \quad (4.2)$$

여기서, q : 콘크리트 믹서트럭 1회 적재량

E : 작업효율

cm : t<sub>1</sub>(적재)+t<sub>2</sub>(이동)+t<sub>3</sub>(타설)

#### 4.2.3 트럭탑재형 크레인

트럭탑재형 크레인의 경우 단순 운반 시 작업준비를 위한 고정 및 해제, 적재 및 하역, 이동으로 구분할 수 있으며, 총 5회 3125초 동안 53.5km를 콘크리트 구조물을 운반하며 건설기계의 고정 및 해제, 이동, 적재 및 하역 작업으로 구분하여 측정하였다. 단위거리 1km의 이동시간은 평균 약 119초, 건설기계의 고정 및 해제 시간 평균 85초, 적재 및 하역 작업 시간 평균 468초로 산출되었다.

본 연구에서는 트럭탑재형 크레인의 운반 장소 간 거리를 10km로 가정하여 산출하고자 한다. 왕복 이동하여 1회 운반 시 약 49분이 소요되며 시간당 작업량은 약 1.2회/hr로 산출되었다. 일일 작업량 8시간 작업시간 기준하여 작업량을 산출할 경우 약 9.8회/day운반 할 수 있는 것으로 산출되었다.

### 4.3 배기가스 측정 결과

#### 4.3.1 굴삭기의 엔진 부하량(RPM) 변화에 따른 측정 결과(Kim & Lee, 2017)

Fig. 4.17은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 800부터 RPM 1700까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 800에서의 농도 2.58%, RPM 1700에서는 2.77%로 1.07배 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 800에서의 농도 2.58%, RPM 2050에서는 5.44%로 2.11배 증가하였다.

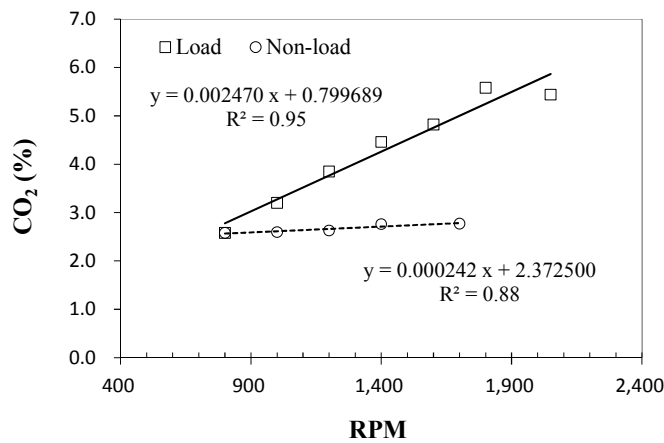


Fig. 4.17 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change  
(Kim & Lee, 2017)

Eq. (4.3)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.4)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.000242 \times RPM + 2.372500 \quad (4.3)$$

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.002470 \times RPM + 0.799689 \quad (4.4)$$

Fig. 4.18은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 800부터 RPM 1700까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 800에서의 온도 120.7°C, RPM 1700에서는 165.1°C로 1.37배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 최소 RPM 800부터 RPM 2050까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. RPM 800에서의 온도 120.7°C, RPM 2050에서는 298.2°C로 2.47배 증가하였다.

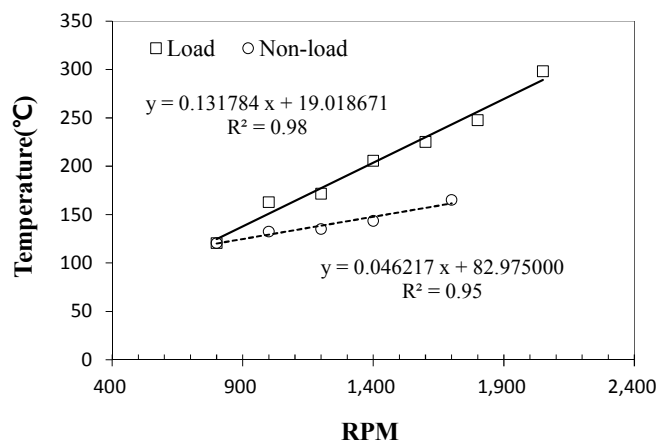


Fig. 4.18 Temperature due to RPM change  
(Kim & Lee, 2017)

Eq. (4.5)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.6)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.046217 \times \text{RPM} + 82.975000 \quad (4.5)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.131784 \times \text{RPM} + 19.018671 \quad (4.6)$$

Fig. 4.19는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태에서 풍속은 RPM 800부터 RPM 1700까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 800에서의 풍속 5.8m/s, RPM 1700에서는 11.2m/s로 1.93배 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 최소 RPM 800부터 RPM 2050까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. RPM 800에서의 풍속 5.8m/s, RPM 2050에서는 25.3m/s로 4.36배 증가하였다.

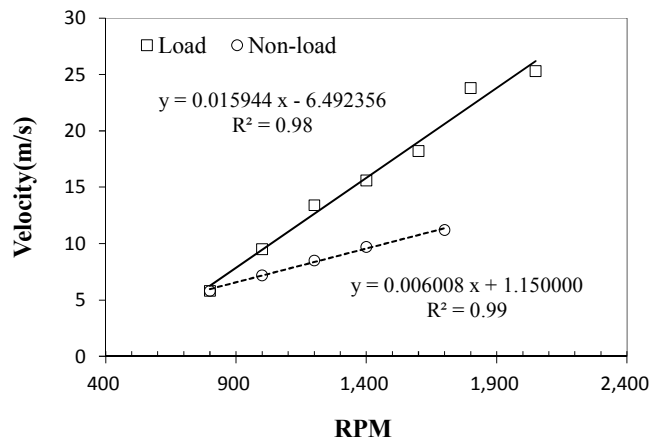


Fig. 4.19 Flow rate according to RPM change  
(Kim & Lee, 2017)

Eq. (4.7)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.8)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.006008 \times RPM + 1.150000 \quad (4.7)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.015944 \times RPM - 6.492356 \quad (4.8)$$

### 4.3.2 콘크리트 믹서트럭의 엔진 부하량(RPM) 변화에 따른 측정 결과

#### 4.3.2.1 콘크리트 믹서트럭(CMT.1)

Fig. 4.20은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 700부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 700에서의 농도 1.55%, RPM 2000에서는 2.60%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 700에서의 농도 1.55%, RPM 2000에서는 2.96%로 증가하였다.

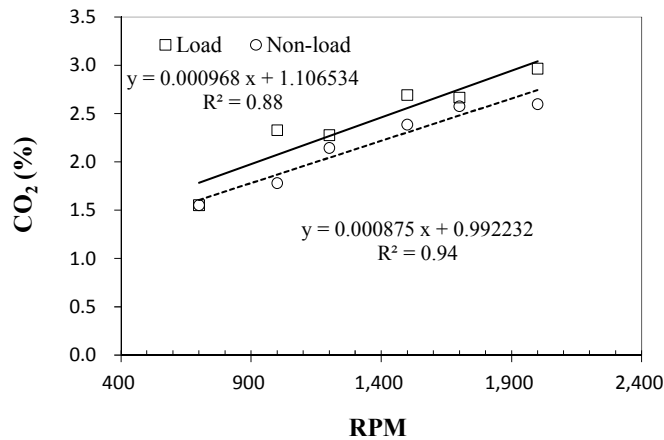


Fig. 4.20 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT.1)

Eq. (4.9)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.10)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{농도}(\%) = 0.000875 \times RPM + 0.992232 \quad (4.9)$$

$$CO_2 \text{농도}(\%) = 0.00968 \times RPM + 1.106534 \quad (4.10)$$

Fig. 4.21은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 700부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 700에서의 온도 94.1°C, RPM 2000에서는 188.0°C로 2.00배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 최소 RPM 700부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. RPM 800에서의 온도 94.1°C, RPM 2000에서는 184.6°C로 1.96배 증가하였다.

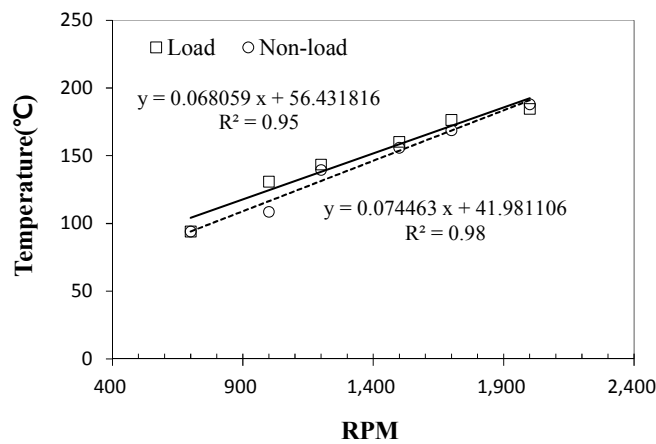


Fig. 4.21 Temperature due to RPM change(CMT.1)

Eq. (4.11)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.12)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.074463 \times \text{RPM} + 41.981106 \quad (4.11)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.068059 \times \text{RPM} + 56.431816 \quad (4.12)$$

Fig. 4.22는 RPM 700부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기 가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 700에서의 풍속 10.4m/s, RPM 2000에서는 31.9m/s로 3.07배 증가하였다. RPM 700에서의 풍속 10.4m/s, RPM 2000에서는 33.4m/s로 3.22배 증가하였다.

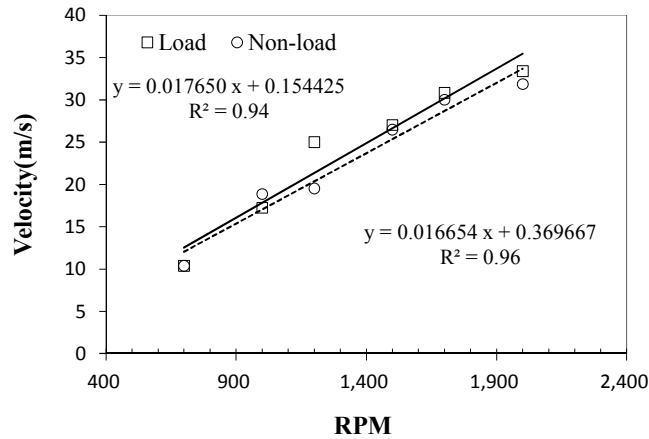


Fig. 4.22 Flow rate according to RPM change(CMT.1)

Eq. (4.13)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.14)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.016654 \times RPM + 0.369667 \quad (4.13)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.017650 \times RPM + 0.154425 \quad (4.14)$$



#### 4.3.2.2 콘크리트 믹서트럭(CMT.2)

Fig. 4.23은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 1.45%, RPM 2000에서는 2.97%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.55%, RPM 2000에서는 3.64%로 증가하였다.

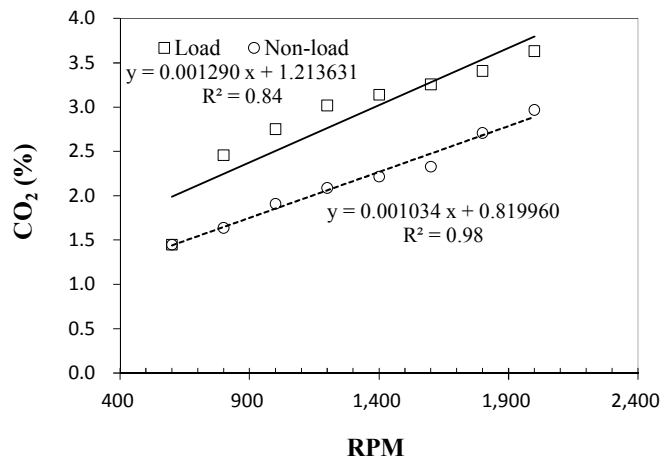


Fig. 4.23 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT.2)

Eq. (4.15)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.16)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{농도}(\%) = 0.001034 \times RPM + 0.819960 \quad (4.15)$$

$$CO_2 \text{농도}(\%) = 0.001290 \times RPM + 1.213631 \quad (4.16)$$

Fig. 4.24는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 83.1°C, RPM 2000에서는 144.3°C로 1.74배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 83.1°C, RPM 2000에서는 146.7°C로 1.77배 증가하였다.

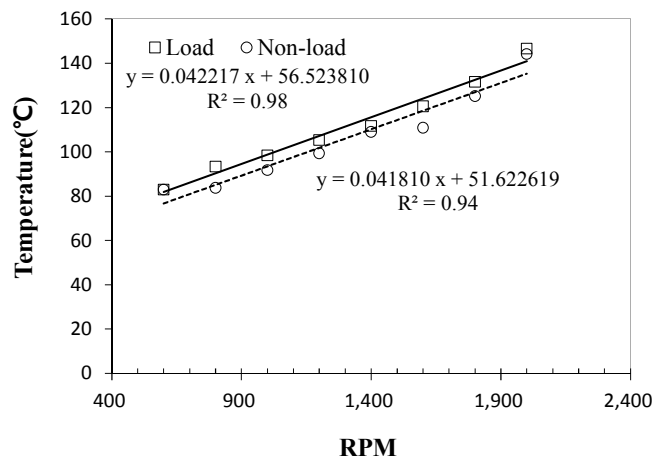


Fig. 4.24 Temperature due to RPM change(CMT.2)

Eq. (4.17)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.18)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.041810 \times \text{RPM} + 56.523810 \quad (4.17)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.042217 \times \text{RPM} + 56.523810 \quad (4.18)$$

Fig. 4.25는 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 4.3m/s, RPM 2000에서는 22.0m/s로 5.16배 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 4.3m/s, RPM 2000에서는 22.7m/s로 5.32배 증가하였다.

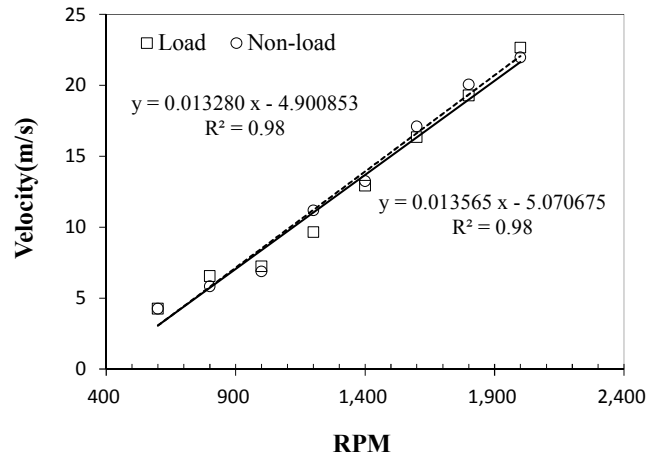


Fig. 4.25 Flow rate according to RPM change(CMT.2)

Eq. (4.19)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.20)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.013565 \times RPM - 5.070675 \quad (4.19)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.013280 \times RPM - 4.900853 \quad (4.20)$$

#### 4.3.2.3 콘크리트 믹서트럭(CMT.3)

Fig. 4.26은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 1.60%, RPM 2000에서는 3.54%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.60%, RPM 2000에서는 4.86%로 증가하였다.

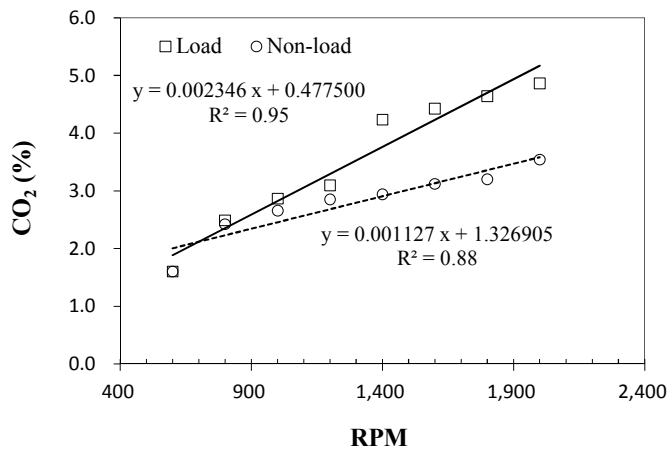


Fig. 4.26 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT.3)

Eq. (4.21)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.22)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2\text{농도}(\%) = 0.001127 \times RPM + 1.326905 \quad (4.21)$$

$$CO_2\text{농도}(\%) = 0.002346 \times RPM + 0.477500 \quad (4.22)$$

Fig. 4.27은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 73.2°C, RPM 2000에서는 152.4°C로 2.08배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 73.2°C, RPM 2000에서는 159.7°C로 2.18배 증가하였다.

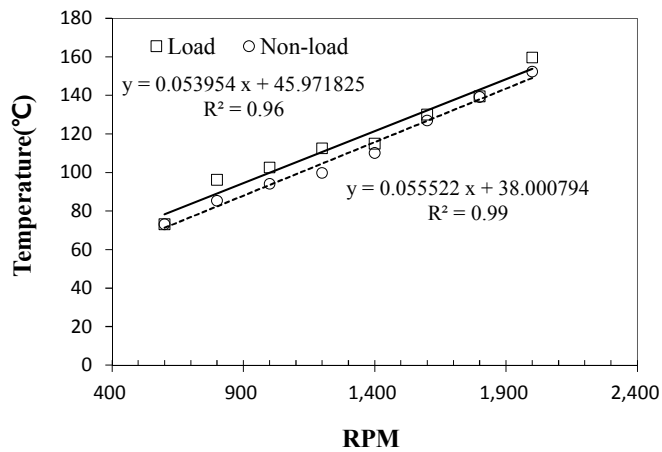


Fig. 4.27 Temperature due to RPM change(CMT.3)

Eq. (4.23)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.24)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.055522 \times \text{RPM} + 38.000794 \quad (4.23)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.053954 \times \text{RPM} + 45.971825 \quad (4.24)$$

Fig. 4.28은 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 4.8m/s, RPM 2000에서는 14.6m/s로 3.02배 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 4.8m/s, RPM 2000에서는 15.4m/s로 3.18배 증가하였다.

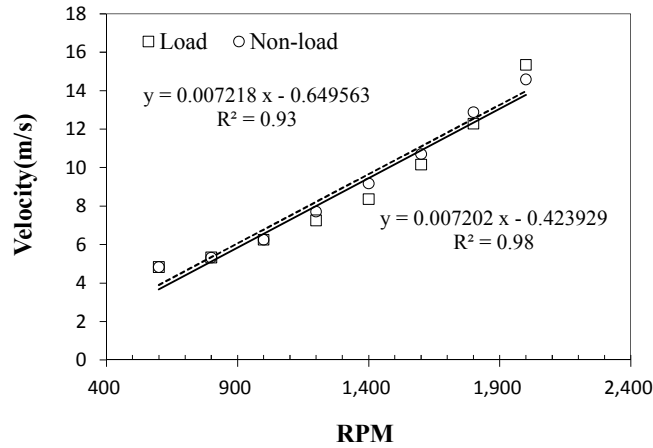


Fig. 4.28 Flow rate according to RPM change(CMT.3)

Eq. (4.25)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.26)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.007202 \times RPM - 0.423929 \quad (4.25)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.007218 \times RPM - 0.649563 \quad (4.26)$$

#### 4.3.2.4 콘크리트 믹서트럭의 측정값 평균

콘크리트 믹서트럭 A, B, C의 산출된 측정값의 회귀식에 RPM 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000을 대입하여 산출된 값을 산술 평균한 값을 회귀분석하여 콘크리트 믹서트럭의 평균 배기가스 성분을 분석하였다.

Fig. 4.29는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 평균 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.65%, RPM 2000에서는 3.05%로 1.85배 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.85%, RPM 2000에서는 4.00%로 2.16배 증가하였다.

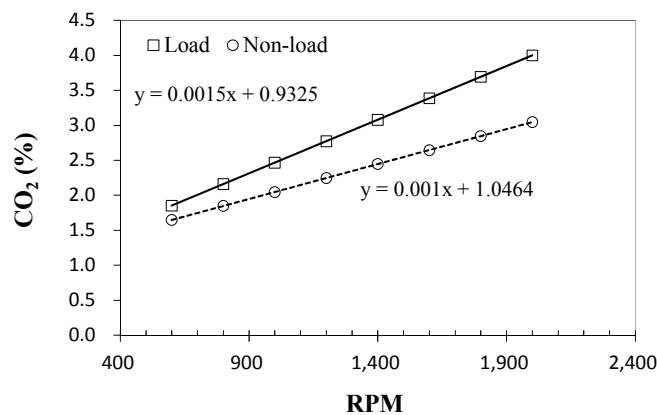


Fig. 4.29 Average CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CMT)

Eq. (4.27)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.28)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2\text{농도}(\%) = 0.001 \times RPM + 1.0646 \quad (4.27)$$

$$CO_2\text{농도}(\%) = 0.0015 \times RPM + 0.9325 \quad (4.28)$$

Fig. 4.30은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 평균 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 89.7°C, RPM 2000에서는 158.4°C로 2.02배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 85.8°C, RPM 2000에서는 162.5°C로 1.89배 증가하였다.

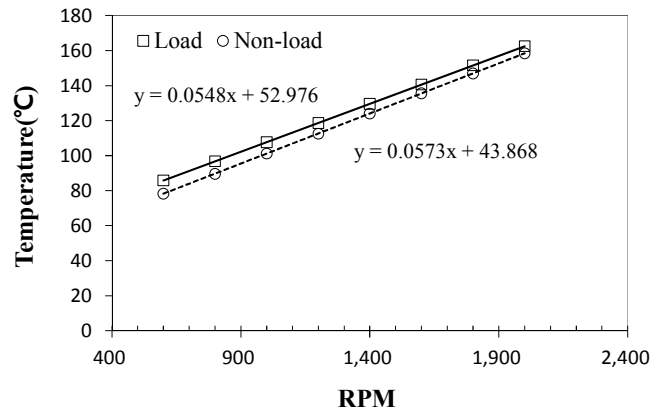


Fig. 4.30 Average temperature due to RPM change(CMT)

Eq. (4.29)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.30)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.0573 \times \text{RPM} + 43.868 \quad (4.29)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.0548 \times \text{RPM} + 52.976 \quad (4.30)$$



Fig. 4.31은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 평균 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 5.79m/s, RPM 2000에서는 23.29m/s로 4.02배 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 5.84m/s, RPM 2000에서는 23.67m/s로 4.05배 증가하였다.

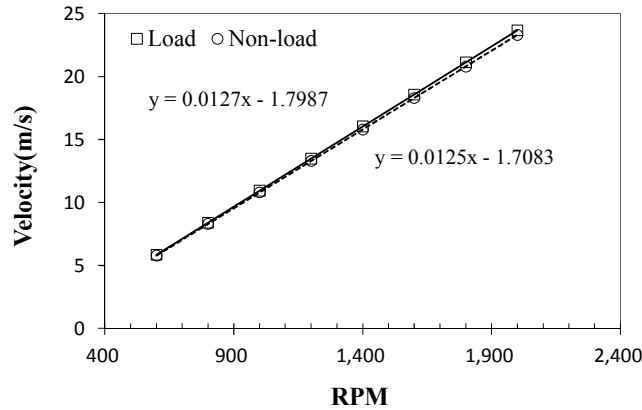


Fig. 4.31 Average flow rate according to RPM change(CMT)

Eq. (4.31)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 평균 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.32)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 평균 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.0125 \times RPM - 1.7083 \quad (4.31)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.0127 \times RPM - 1.7987 \quad (4.32)$$

콘크리트 믹서트럭 최소 RPM에서 무부하 상태와 부하 상태의 측정값이 같은 이유는 최소 RPM상태는 건설기계의 작업 상태에 상관없이 전원이 켜져 콘크리트가 굳지 않게 드럼만이 회전하는 상태이기 때문에 같은 값으로 고려하였다. 콘크리트 믹서트럭의 경우 무부하와 부하 상태의 차이는 굴삭기에 비해 미미한 수준이며 회귀분석 결과에서도 증가율이 유사하게 나타났다. 그 이유로는 엔진에서 배기구로 배기가스가 이동 중 대기 오염물질 저감 장치를 통하여 온실가스도 같이 저감되는 효과를 보이는 것으로 사료된다.

### 4.3.3 트럭탑재형 크레인의 엔진 부하량(RPM) 변화에 따른 측정 결과

#### 4.3.3.1 트럭탑재형 크레인(CC.1)

Fig. 4.32는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 1.80%, RPM 2000에서는 2.42%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.80%, RPM 2000에서는 2.88%로 증가하였다.

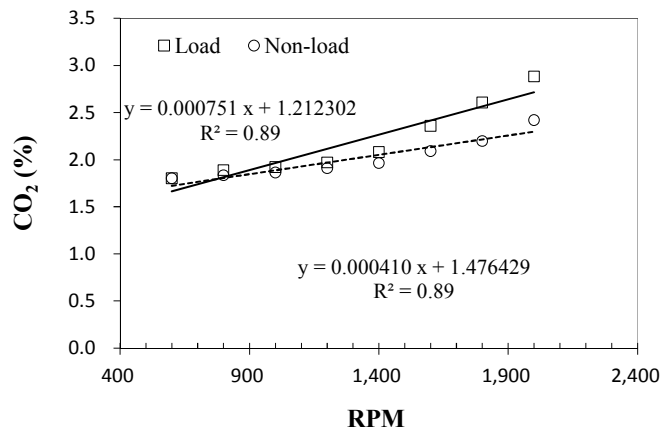


Fig. 4.32 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.1)

Eq. (4.33)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.34)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2\text{농도}(\%) = 0.000410 \times RPM + 1.476429 \quad (4.33)$$

$$CO_2\text{농도}(\%) = 0.000751 \times RPM + 1.212302 \quad (4.34)$$

Fig. 4.33은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 53.4°C, RPM 2000에서는 167.5°C로 3.14배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 73.2°C, RPM 2000에서는 170.8°C로 3.20배 증가하였다.

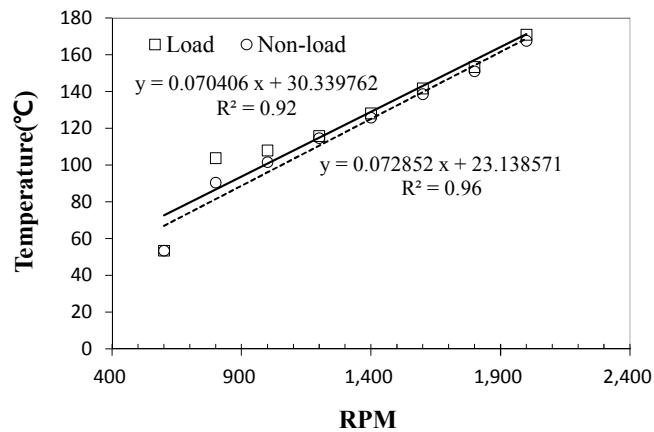


Fig. 4.33 Temperature due to RPM change(CC.1)

Eq. (4.35)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.36)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.072852 \times \text{RPM} + 23.138571 \quad (4.35)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.070406 \times \text{RPM} + 30.339762 \quad (4.36)$$

Fig. 4.34는 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 4.8m/s, RPM 2000에서는 21.0m/s로 4.41배 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 4.8m/s, RPM 2000에서는 21.69m/s로 4.55배 증가하였다.

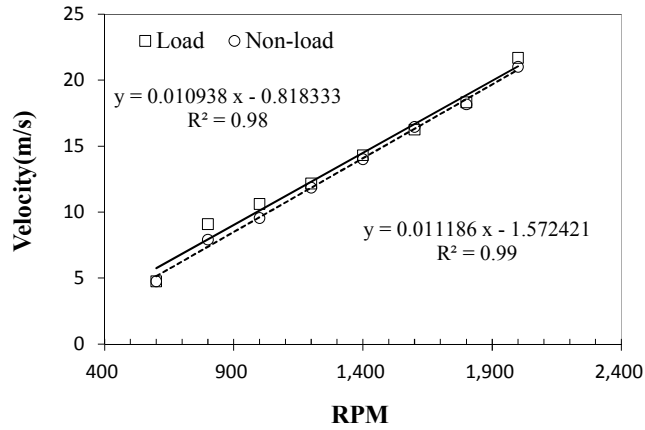


Fig. 4.34 Flow rate according to RPM change(CC.1)

Eq. (4.37)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.38)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.010938 \times RPM - 0.818333 \quad (4.37)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.011186 \times RPM - 1.572421 \quad (4.38)$$

#### 4.3.3.2 트럭탑재형 크레인(CC.2)

Fig. 4.35는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 2.09%, RPM 2000에서는 3.49%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 2.09%, RPM 2000에서는 3.72%로 증가하였다.

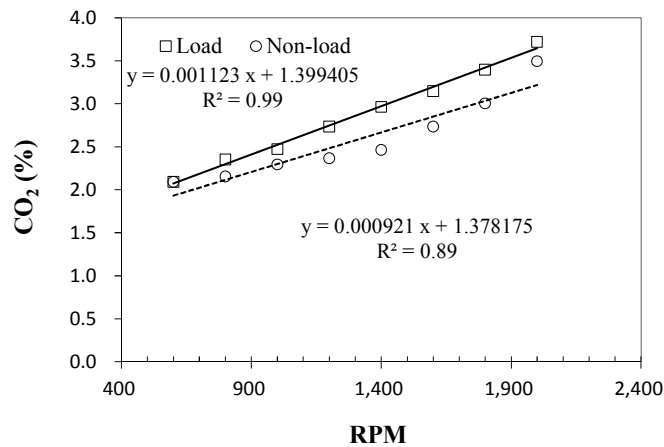


Fig. 4.35 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.2)

Eq. (4.39)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.40)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{농도}(\%) = 0.000921 \times RPM + 1.378175 \quad (4.39)$$

$$CO_2 \text{농도}(\%) = 0.001123 \times RPM + 1.399405 \quad (4.40)$$

Fig. 4.36은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 77.3°C, RPM 2000에서는 177.0°C로 2.29배 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 77.3°C, RPM 2000에서는 182.1°C로 2.36배 증가하였다.

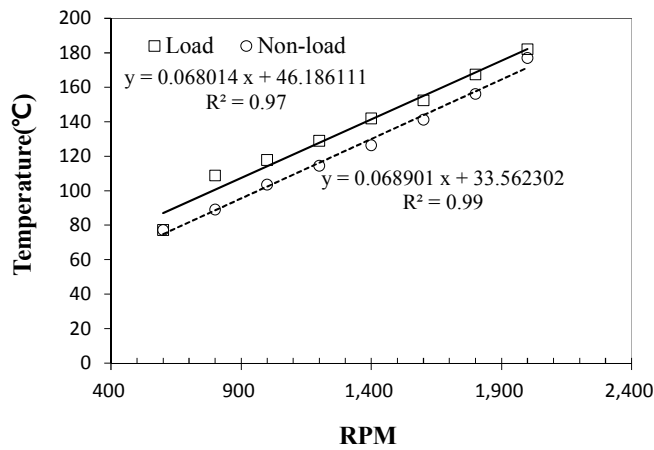


Fig. 4.36 Temperature due to RPM change(CC.2)

Eq. (4.41)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.42)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.068901 \times \text{RPM} + 33.562302 \quad (4.41)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.068014 \times \text{RPM} + 46.186111 \quad (4.42)$$

Fig. 4.37은 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 6.84m/s, RPM 2000에서는 31.57m/s로 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 6.84m/s, RPM 2000에서는 31.27m/s로 증가하였다.

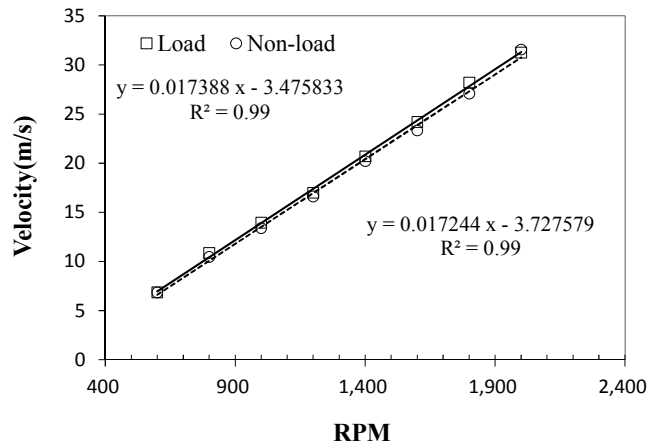


Fig. 4.37 Flow rate according to RPM change(CC.2)

Eq. (4.43)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.44)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.017244 \times RPM - 3.727579 \quad (4.43)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.017388 \times RPM - 3.475833 \quad (4.44)$$

#### 4.3.3.3 트럭탑재형 크레인(CC.3)

Fig. 4.38은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 1.58%, RPM 2000에서는 2.54%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.58%, RPM 2000에서는 2.63%로 증가하였다.

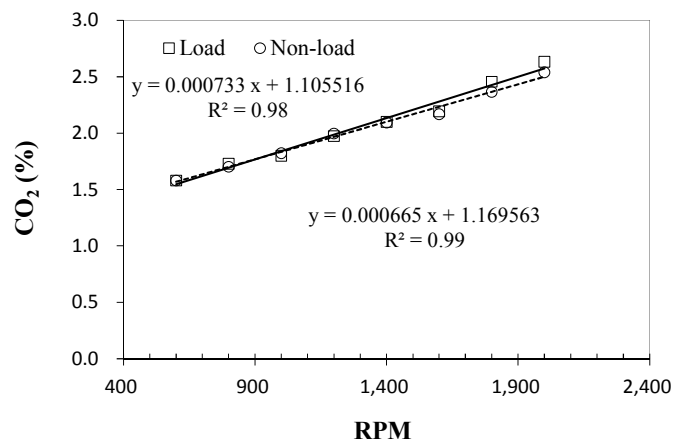


Fig. 4.38 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.3)

Eq. (4.45)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.46)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.0007 \times RPM + 1.1696 \quad (4.45)$$

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.0007 \times RPM + 1.1055 \quad (4.46)$$



Fig. 4.39는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 72.3°C, RPM 2000에서는 147.9°C로 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 72.3°C, RPM 2000에서는 148.1°C로 증가하였다.

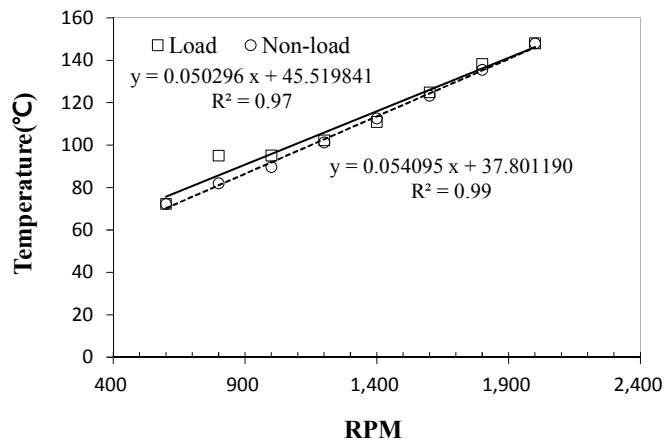


Fig. 4.39 Temperature due to RPM change(CC.3)

Eq. (4.47)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.48)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.054095 \times \text{RPM} + 37.801190 \quad (4.47)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.050296 \times \text{RPM} + 45.519841 \quad (4.48)$$

Fig. 4.40은 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 8.04m/s, RPM 2000에서는 29.0m/s로 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 8.0m/s, RPM 2000에서는 29.7m/s로 증가하였다.

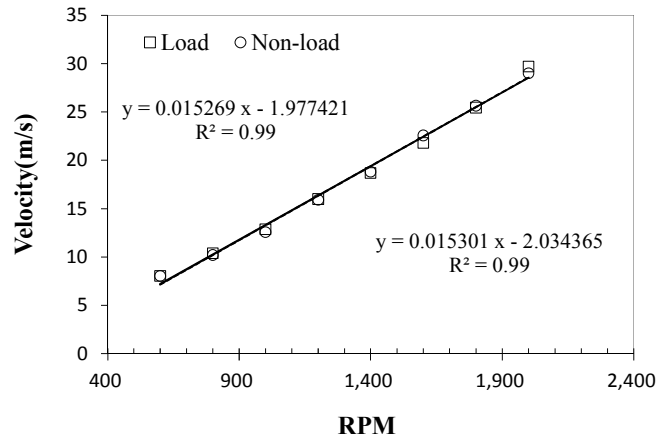


Fig. 4.40 Flow rate according to RPM change(CC.3)

Eq. (4.49)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.50)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.015301 \times RPM - 2.034365 \quad (4.49)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.015269 \times RPM - 1.977421 \quad (4.50)$$

#### 4.3.3.4 트럭탑재형 크레인(CC.4)

Fig. 4.41은 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 1.40%, RPM 2000에서는 2.54%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.40%, RPM 2000에서는 2.61%로 증가하였다.

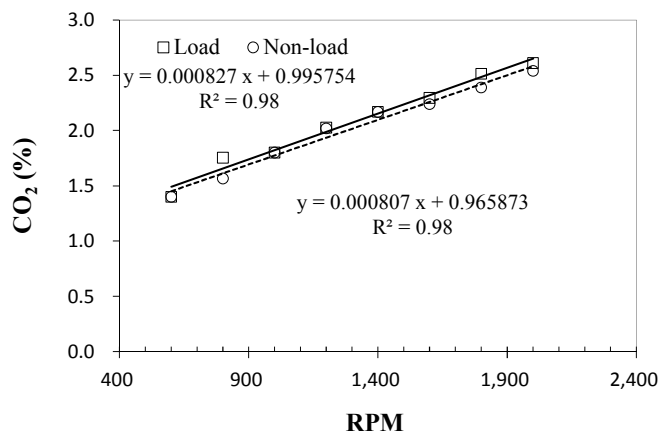


Fig. 4.41 CO<sub>2</sub> concentration due to RPM change(CC.4)

Eq. (4.51)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.52)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.000807 \times RPM + 0.965873 \quad (4.51)$$

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.000827 \times RPM + 0.995754 \quad (4.52)$$

Fig. 4.42는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 83.2°C, RPM 2000에서는 137.8°C로 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 83.2°C, RPM 2000에서는 139.1°C로 증가하였다.

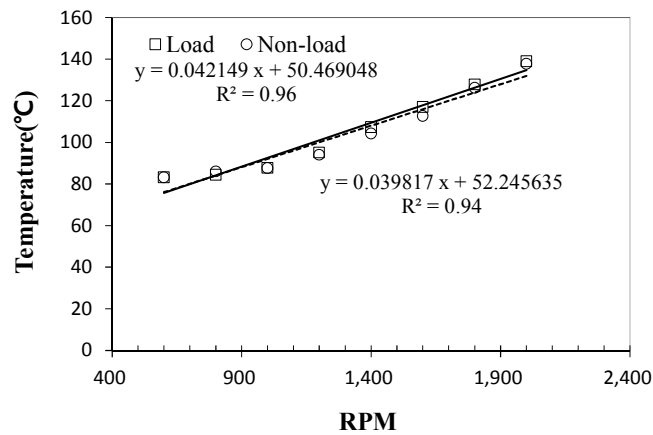


Fig. 4.42 Temperature due to RPM change(CC.4)

Eq. (4.53)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.54)는 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.039817 \times \text{RPM} + 52.245635 \quad (4.53)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.042148 \times \text{RPM} + 50.469048 \quad (4.54)$$

Fig. 4.43은 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 6.5m/s, RPM 2000에서는 27.0m/s로 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 6.5m/s, RPM 2000에서는 27.5m/s로 증가하였다.

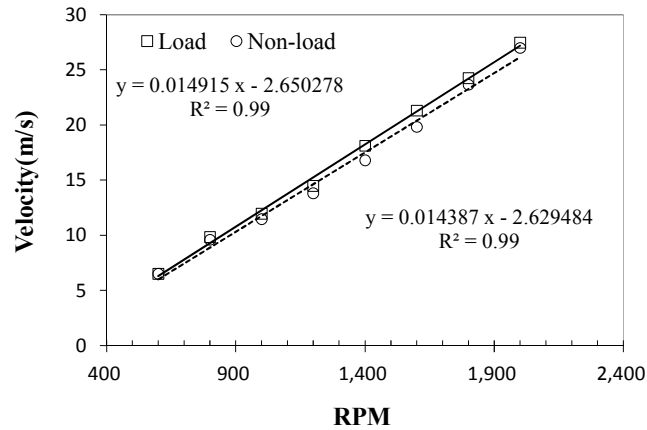


Fig. 4.43 Flow rate according to RPM change(CC.4)

Eq. (4.55)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.56)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.014387 \times RPM - 2.629484 \quad (4.55)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.014915 \times RPM - 2.650278 \quad (4.56)$$

#### 4.3.3.5 트럭탑재형 크레인 측정값 평균

Fig. 4.44는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 CO<sub>2</sub> 농도 변화이다. 무부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 3번 이상 측정하여 각 RPM의 측정값을 평균하여 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 농도 1.72%, RPM 2000에서는 2.75%로 증가하였다. 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 농도는 RPM 600에서의 농도 1.72%, RPM 2000에서는 2.96%로 증가하였다.

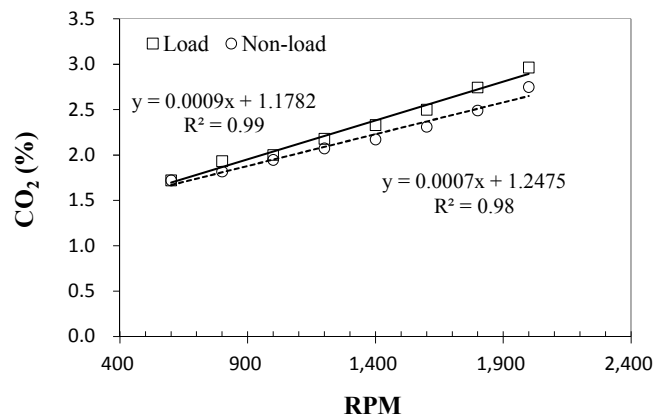


Fig. 4.44 Average CO<sub>2</sub> concentration by RPM change

Eq. (4.57)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.58)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.0007 \times RPM + 1.2475 \quad (4.57)$$

$$CO_2 \text{ 농도}(\%) = 0.0009 \times RPM + 1.1782 \quad (4.58)$$

Fig. 4.45는 RPM 변화에 따른 무부하와 부하의 배기가스 온도 변화이다. 무부하 상태에서 온도는 최소 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석을 하였다. 무부하 상태 RPM 600에서의 온도 71.6°C, RPM 2000에서는 157.6°C로 증가하였다. 부하 상태에서 온도는 RPM 600에서의 온도 71.6°C, RPM 2000에서는 160.03°C로 증가하였다.

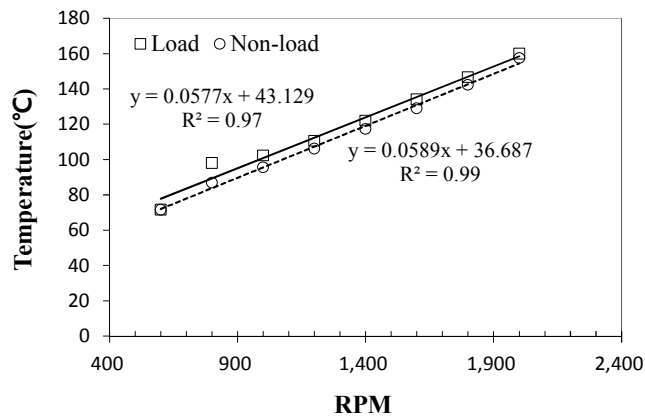


Fig. 4.45 Average Temperature by RPM change

Eq. (4.59)는 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.60)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 평균 온도를 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.0589 \times \text{RPM} + 36.687 \quad (4.59)$$

$$\text{연소온도}(^{\circ}\text{C}) = 0.0577 \times \text{RPM} + 43.129 \quad (4.60)$$

Fig. 4.46은 RPM 600부터 RPM 2000까지 회귀분석 따른 무부하와 부하의 배기가스 배출 풍속 변화이다. 무부하 상태의 RPM 600에서의 풍속 6.5m/s, RPM 2000에서는 27.2m/s로 증가하였다. 부하 상태에서 풍속은 RPM 600에서의 풍속 6.5m/s, RPM 2000에서는 27.5m/s로 증가하였다.

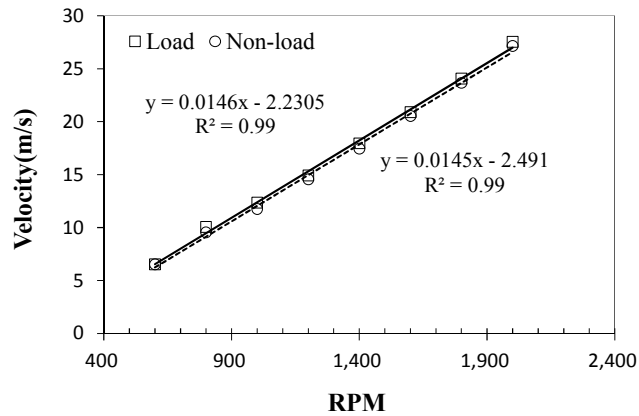


Fig. 4.46 Average Flow rate according to RPM change

Eq. (4.61)은 무부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이며, Eq. (4.62)은 부하 상태에서 RPM 변화에 따른 배기가스 유속을 회귀 분석한 결과로 산출된 회귀식이다.

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.0145 \times RPM - 2.491 \quad (4.61)$$

$$\text{배기가스 유속}(m/s) = 0.0146 \times RPM - 2.2305 \quad (4.62)$$



## 제5장 건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량 산정

### 5.1 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량

#### 5.1.1 굴삭기(Kim & Lee, 2017)

##### 5.1.1.2 굴삭기 운반 및 굴삭 작업

###### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.5)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 대입하여 Eq. (5.1)과 같이 134.3°C로 산출되었다.

$$134.3(^{\circ}\text{C}) = 0.046217 \times 1110 + 82.975000 \quad (5.1)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.3)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 대입하여 Eq. (5.2)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.64%로 산출되었다.

$$2.64(\%) = 0.002470 \times 1110 + 0.799689 \quad (5.2)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.3)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.035g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} & 26400(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273 + 134.3} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \quad (5.3) \\ & = 0.035\text{g/L} \end{aligned}$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.7)을 이용해 작업

시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 대입하여 Eq. (5.4)와 같이 배기가스 유속은 7.82m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.5)와 같이 배기가스 유량은 0.074m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$7.82(m/s) = 0.006008 \times 1110 + 1.150000 \quad (5.4)$$

$$0.074(m^3/sec) = 7.82(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.5)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 환산한 결과 Eq. (5.6)과 같이 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 9.31kg/hr로 산출되었다.

$$0.074(m^3/s) \times 0.043(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 9.31kg/hr \quad (5.6)$$

## 2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.6)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 대입하여 Eq. (5.7)과 같이 배기가스 온도는 165.3°C로 산출되었다.

$$165.3^\circ\text{C} = 0.1317847 \times 1110 + 19.018671 \quad (5.7)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.4)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 대입하여 Eq. (5.8)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 3.54%로 산출되었다.

$$3.54(\%) = 0.002470 \times 1110 + 0.799689 \quad (5.8)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.9)와 같이 단위 유

량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.043g/L로 산출되었다.

$$35400(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+165.3} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.9)$$

$$= 0.043g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.8)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1110을 대입하여 Eq. (5.10)과 같이 배기가스 유속은 11.21m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.11)과 같이 배기가스 유량은 0.107m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$11.21(m/s) = 0.015944 \times 1110 - 6.492356 \quad (5.10)$$

$$0.107(m^3/sec) = 11.21(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.11)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 환산한 결과 Eq. (5.12)와 같이 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 16.64kg/hr로 산출되었다.

$$0.107(m^3/s) \times 0.043(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 16.64kg/hr \quad (5.12)$$

#### 5.1.1.2 굴삭기 암파쇄 작업

##### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.5)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004를 대입하여 Eq. (5.13)과 같이 배기가스 온도는 165.4°C로 산출되었다.

$$129.4(^{\circ}\text{C}) = 0.046217 \times 1004 + 82.975000 \quad (5.13)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.3)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004를 대입하여 Eq. (5.14)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.62%로 산출되었다.

$$2.62(\%) = 0.002470 \times 1110 + 0.799689 \quad (5.14)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.15)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.035g/L로 산출되었다

$$\begin{aligned} & 26200(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273 + 129.4} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \quad (5.15) \\ & = 0.035\text{g/L} \end{aligned}$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.7)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004를 대입하여 Eq. (5.16)과 같이 배기가스 유속은 11.21m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.17)과 같이 배기가스 유량은 0.068m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$7.18(\text{m/s}) = 0.006008 \times 1004 + 1.150000 \quad (5.16)$$

$$0.068(\text{m}^3/\text{sec}) = 7.18(\text{m/sec}) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(\text{m}^2) \quad (5.17)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.18)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 8.56kg/hr로 산출되었다.

$$0.068(\text{m}^3/\text{s}) \times 0.035(\text{g/L}) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 8.56\text{kg/hr} \quad (5.18)$$

2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.6)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004를 대입하여 Eq. (5.19)와 같이 배기가스 온도는 151.3°C로 산출되었다.

$$151.3^{\circ}\text{C} = 0.1317847 \times 1004 + 19.018671 \quad (5.19)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.4)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004을 대입하여 Eq. (5.20)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 3.28%로 산출되었다.

$$3.28(\%) = 0.002470 \times 1004 + 0.799689 \quad (5.20)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.21)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.041g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 32800(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273 + 151.3} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \\ = 0.041g/L \end{aligned} \quad (5.21)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.8)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1004를 대입하여 Eq. (5.22)와 같이 배기가스 유속은 9.52m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.23)과 같이 유량은 0.090 m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$9.52(m/s) = 0.015944 \times 1004 - 6.492356 \quad (5.22)$$

$$0.090(m^3/sec) = 9.52(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.23)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.24)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 13.49kg/hr로 산출되었다.

$$0.090(m^3/s) \times 0.041(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 13.49kg/hr \quad (5.24)$$

### 5.1.1.3 굴삭기 CO<sub>2</sub> 배출량

5.1.1에서 산출된 값을 정리하면 굴삭기의 운반 및 굴삭 작업 시 무부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 9.31kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 16.64kg/hr로 산출된다.

5.1.2에서 산출된 값을 정리하면 굴삭기의 암파쇄 작업 시 무부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 8.56kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 13.49kg/hr로 산출된다.

굴삭기의 무부하 상태와 부하 상태를 비교하면 CO<sub>2</sub> 배출량은 무부하 상태보다 부하 상태에서 확연히 많아 유의미한 결과를 도출하였다(Table. 5.1).

Table. 5.1 Excavator CO<sub>2</sub> Emission(Kim & Lee, 2017)

Work	Condition	CO <sub>2</sub> emissions per unit volume(g/L)	CO <sub>2</sub> Emission(kg/hr)
Digging and moving	Non-load	0.035	9.31
	Load	0.043	16.64
Rock crushing	Non-load	0.035	8.56
	Load	0.41	13.49

## 5.1.2 콘크리트 믹서트럭

### 5.1.2.1 콘크리트 믹서트럭(CMT.1)

#### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.11)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.25)와 같이 배기가스 온도는 112.8°C로 산출되었다.

$$112.8(^{\circ}\text{C}) = 0.074463 \times 951 + 41.981106 \quad (5.25)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.9)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.26)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 1.85%로 산출되었다.

$$1.85(\%) = 0.000875 \times 951 + 0.992232 \quad (5.26)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.27)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.026g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} & 18500(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273+112.8} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \quad (5.27) \\ & = 0.026\text{g/L} \end{aligned}$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.13)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.28)과 같이 배기가스 유속은 16.25m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.29)와 같이 배기가스 유량은 0.154m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$16.25(m/s) = 0.016654 \times 951 + 0.369667 \quad (5.28)$$

$$0.154(m^3/sec) = 16.25(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.29)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.30)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 14.28kg/hr로 산출되었다.

$$0.154(m^3/s) \times 0.026(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 14.28kg/hr \quad (5.30)$$

## 2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.12)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.31)과 같이 배기가스 온도는 121.2°C로 산출되었다.

$$121.2^\circ\text{C} = 0.068059 \times 951 + 56.431816 \quad (5.31)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.10)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.32)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.06%로 산출되었다.

$$2.06(\%) = 0.00968 \times 951 + 1.106534 \quad (5.32)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.33)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.028g/L로 산출되었다.



$$20600(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+121.2} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.33)$$

$$= 0.028g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.14)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.34)와 같이 배기가스 유속은 16.99m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.35)와 같이 유량은 0.161m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$16.99(m/s) = 0.017650 \times 951 + 0.154425 \quad (5.34)$$

$$0.161(m^3/sec) = 16.99(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.35)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.36)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 16.27kg/hr로 산출되었다.

$$0.161(m^3/s) \times 0.028(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 16.27kg/hr \quad (5.36)$$

#### 5.1.2.2 콘크리트 믹서트럭(CMT.2)

##### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.17)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.37)과 같이 배기가스 온도는 91.4°C로 산출되었다.

$$91.4(^{\circ}C) = 0.041810 \times 951 + 56.523810 \quad (5.37)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.15)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.38)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 1.77%로 산출되었다.

$$1.77(\%) = 0.001034 \times 951 + 0.819960 \quad (5.38)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.39)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.026g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 17700(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+91.4} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \\ = 0.026g/L \end{aligned} \quad (5.39)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.19)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.40)과 같이 배기가스 유속은 7.86m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.41)과 같이 배기가스 유량은 0.096m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$7.86(m/s) = 0.013565 \times 951 - 5.070675 \quad (5.40)$$

$$0.096(m^3/sec) = 7.86(m/sec) \times \frac{0.125^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.41)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.42)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 14.28kg/hr로 산출되었다.

$$0.096(m^3/s) \times 0.026(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 9.05kg/hr \quad (5.42)$$

2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.18)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.43)과 같이 배기가스 온도는 96.7°C로 산출되었다.

$$96.7(^{\circ}\text{C}) = 0.042217 \times 951 + 56.523810 \quad (5.43)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.16)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.44)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.45%로 산출되었다.

$$2.45(\%) = 0.001290 \times 951 + 1.213631 \quad (5.44)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.45)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.036g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} & 24500(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+96.7} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.45) \\ & = 0.036g/L \end{aligned}$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.20)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.46)과 같이 배기가스 유속은 7.75m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.47)과 같이 유량은 0.095m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$7.75(m/s) = 0.013280 \times 951 - 4.900853 \quad (5.46)$$

$$0.095(m^3/sec) = 7.75(m/sec) \times \frac{0.125^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.47)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.48)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 12.16kg/hr로 산출되었다.

$$0.095(m^3/s) \times 0.036(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 12.16kg/hr \quad (5.48)$$

### 5.1.2.3 콘크리트 믹서트럭(CMT.3)

#### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.23)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.49)와 같이 배기가스 온도는 90.8°C로 산출되었다.

$$90.8(^{\circ}C) = 0.055522 \times 951 + 38.000794 \quad (5.49)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.21)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.50)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.37%로 산출되었다.

$$2.37(\%) = 0.001127 \times 951 + 1.326905 \quad (5.50)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.51)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.035g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 23700(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+90.8} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \\ = 0.035g/L \end{aligned} \quad (5.51)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.25)를 이용해 작

업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.52)와 같이 배기가스 유속은 6.42m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.53)과 같이 배기가스 유량은 0.084m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$6.42(m/s) = 0.007202 \times 951 - 0.423929 \quad (5.52)$$

$$0.084(m^3/sec) = 6.42(m/sec) \times \left( \frac{0.082^2}{4} \pi + 0.082 \times 0.096 \right) (m^2) \quad (5.53)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.54)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 10.64kg/hr로 산출되었다.

$$0.084(m^3/s) \times 0.035(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 10.64kg/hr \quad (5.54)$$

## 2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.24)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.55)와 같이 배기가스 온도는 97.3°C로 산출되었다.

$$97.3(^{\circ}C) = 0.053954 \times 951 + 45.971825 \quad (5.55)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.22)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.56)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.66%로 산출되었다.

$$2.66(\%) = 0.002346 \times 951 + 0.477500 \quad (5.56)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.57)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.039g/L로 산출되었다.

$$26600(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+97.3} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.57)$$

$$= 0.039g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.26)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 951을 대입하여 Eq. (5.58)과 같이 배기가스 유속은 6.20m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.59)와 같이 유량은 0.082m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$6.20(m/s) = 0.007218 \times 951 - 0.649563 \quad (5.58)$$

$$0.082(m^3/sec) = 6.20(m/sec) \times \left( \frac{0.125^2}{4} \pi + 0.082 \times 0.096 \right) (m^2) \quad (5.59)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.60)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 11.32kg/hr로 산출되었다.

$$0.082(m^3/s) \times 0.039(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 11.32kg/hr \quad (5.60)$$

#### 5.1.2.4 콘크리트 믹서트럭 CO<sub>2</sub> 배출량 분석

##### 1) 콘크리트 믹서트럭 연도별 CO<sub>2</sub> 배출량

앞서 실험 장비에서 서술한바 있는 콘크리트 믹서트럭 산출된 CO<sub>2</sub> 배출량 결과를 회귀 분석하여 굴삭기와의 연식을 유사하게 하고자 하였다.

무부하 상태의 콘크리트 믹서트럭 연식별 배출량을 회귀 분석한 결과 Fig. 5.1과 같으며, 회귀식을 도출하였다. 결정계수 R<sup>2</sup>이 0.73으로 도출된 회귀식을 이용하여 Eq. (5.61)과 같이 무부하 상태의 2010년식의 콘크리트 믹서트럭의 CO<sub>2</sub> 배출량을 11.32kg/hr로 산출하였다.

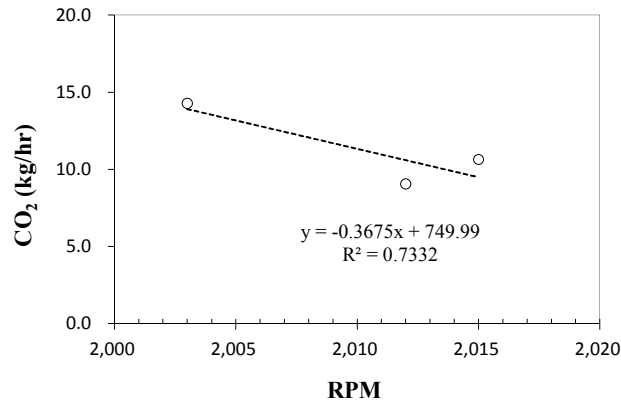


Fig. 5.1 CO<sub>2</sub> emissions per unit time of concrete mixer truck by year at non-load

$$11.32(\text{kg/hr}) = -0.3675 \times 2010 + 749.99 \quad (5.61)$$

부하 상태의 콘크리트 믹서트럭 연식별 배출량을 회귀 분석한 결과 Fig. 5.2와 같으며, 회귀식을 도출하였다. 결정계수  $R^2$ 이 0.99인 도출된 회귀식을 이용하여 Eq. (5.62)와 같이 부하 상태의 2010년식의 콘크리트 믹서트럭의 CO<sub>2</sub> 배출량을 13.27kg/hr로 산출하였다. 무부하 상태와 다르게 결정계수가 1에 근접한 의미 있는 결과가 도출되었다.

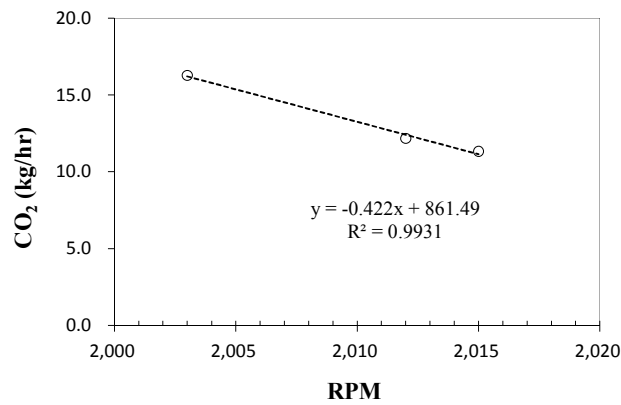


Fig. 5.2 CO<sub>2</sub> emissions per unit time of concrete mixer truck by year at load

$$13.27(\text{kg/hr}) = -0.4220 \times 2010 + 861.49 \quad (5.62)$$

2) 콘크리트 믹서트럭 CO<sub>2</sub> 배출량 분석

5.1.2.1을 정리하면 콘크리트 믹서트럭(CMT.1)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 14.28kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 16.27kg/hr로 산출된다.

5.1.2.2를 정리하면 콘크리트 믹서트럭(CMT.2)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 9.05kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 12.16kg/hr로 산출된다.

5.1.2.3을 정리하면 콘크리트 믹서트럭(CMT.3)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 10.64kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 13.27kg/hr로 산출된다.

2010년식 콘크리트 믹서트럭의 작업 시 무부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 11.32kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 13.27kg/hr로 산출된다.

콘크리트 믹서트럭의 무부하 상태와 부하 상태를 비교하면 CO<sub>2</sub> 배출량은 무부하 상태 보다 확연히 부하 상태에서 많아 유의미 한 결과를 도출하였다(Table. 5.2).

Table. 5.2 Concrete mixer truck CO<sub>2</sub> Emission

Construction Equipment	Condition	CO <sub>2</sub> Emission(kg/hr)
CMT.1	Non-load	14.28
	Load	16.27
CMT.2	Non-load	9.05
	Load	12.16
CMT.3	Non-load	10.64
	Load	11.32
2010	Non-load	11.32
	Load	13.27



### 5.1.3 트럭탑재형 크레인

#### 5.1.3.1 트럭탑재형 크레인(CC.1)

##### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.35)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.63)과 같이 배기가스 온도는 111.3°C로 산출되었다.

$$111.3(^{\circ}\text{C}) = 0.072852 \times 1210 + 23.138571 \quad (5.63)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.33)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.64)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 1.97%로 산출되었다.

$$1.97(\%) = 0.000410 \times 1210 + 1.476429 \quad (5.64)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.65)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.028g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} & 19700(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273+111.3} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \quad (5.65) \\ & = 0.028\text{g/L} \end{aligned}$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.37)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.66)과 같이 배기가스 유속은 11.96m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.67)과 같이 배기가스 유량은 0.114m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$11.96(m/s) = 0.010938 \times 1210 - 0.818333 \quad (5.66)$$

$$0.114(m^3/sec) = 11.96(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.67)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.68)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 11.27kg/hr로 산출되었다.

$$0.114(m^3/s) \times 0.028(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 11.27kg/hr \quad (5.68)$$

## 2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.36)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.69)와 같이 배기가스 온도는 115.5°C로 산출되었다.

$$115.5(^{\circ}C) = 0.070406 \times 1210 + 30.339762 \quad (5.69)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.34)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.70)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.12%로 산출되었다.

$$2.12(\%) = 0.000751 \times 1210 + 1.212302 \quad (5.70)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.71)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.029g/L로 산출되었다.

$$21200(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+115.5} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.71)$$

$$= 0.029g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.38)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.72)와 같이 배기가스 유속은 12.42m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.73)과 같이 유량은 0.118m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$12.42(m/s) = 0.011186 \times 1210 - 1.572421 \quad (5.72)$$

$$0.118(m^3/sec) = 12.42(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.73)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.74)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 11.32kg/hr로 산출되었다.

$$0.118(m^3/s) \times 0.029(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 12.14kg/hr \quad (5.74)$$

### 5.1.3.2 트럭탑재형 크레인(CC.2)

#### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.41)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.75)와 같이 배기가스 온도는 116.9°C로 산출되었다.

$$116.9(^{\circ}C) = 0.068901 \times 1210 + 33.562302 \quad (5.75)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.39)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.76)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.49%로 산출되었다.

$$2.49(\%) = 0.000921 \times 1210 + 1.378175 \quad (5.76)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.77)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.034g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 24900(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+116.9} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \\ = 0.034g/L \end{aligned} \quad (5.77)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.43)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.78)과 같이 배기가스 유속은 17.14m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.79)와 같이 배기가스 유량은 0.163m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$17.14(m/s) = 0.017244 \times 1210 - 3.727579 \quad (5.78)$$

$$0.163(m^3/sec) = 17.14(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.79)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.80)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 20.10kg/hr로 산출되었다.

$$0.163(m^3/s) \times 0.034(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 20.10kg/hr \quad (5.80)$$

2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.42)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.81)과 같이 배기가스 온도는 128.5°C로 산출되었다.

$$128.5(^{\circ}\text{C}) = 0.068014 \times 1210 + 46.186111 \quad (5.81)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.40)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.82)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.76%로 산출되었다.

$$2.76(\%) = 0.001123 \times 1210 + 1.399405 \quad (5.82)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.83)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.037g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 27600(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273+128.5} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \\ = 0.037\text{g/L} \end{aligned} \quad (5.83)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.44)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.84)와 같이 배기가스 유속은 17.56m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.85)와 같이 배기가스 유량은 0.167m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$17.56(\text{m/s}) = 0.017388 \times 1210 - 3.475833 \quad (5.84)$$

$$0.167(m^3/sec) = 17.56(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.85)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.86)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 22.14kg/hr로 산출되었다.

$$0.167(m^3/s) \times 0.037(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 22.14kg/hr \quad (5.86)$$

### 5.1.3.3 트럭탑재형 크레인(CC.3)

#### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.47)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.87)과 같이 배기가스 온도는 103.3°C로 산출되었다.

$$103.3(^{\circ}C) = 0.054095 \times 1210 + 37.801190 \quad (5.87)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.45)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.88)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 1.97%로 산출되었다.

$$1.97(\%) = 0.0007 \times 1210 + 1.1696 \quad (5.88)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.89)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.028g/L로 산출되었다.

$$19700(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273+103.3} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.89)$$

$$= 0.028g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.49)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.90)과 같이 배기가스 유속은 16.48m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.91)과 같이 배기가스 유량은 0.163m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$16.48(m/s) = 0.015301 \times 1210 - 2.034365 \quad (5.90)$$

$$0.157(m^3/sec) = 16.48(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.91)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.92)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.86kg/hr로 산출되었다.

$$0.157(m^3/s) \times 0.028(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 15.86kg/hr \quad (5.92)$$

## 2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.48)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.93)과 같이 배기가스 온도는 106.4°C로 산출되었다.

$$106.4(^{\circ}C) = 0.050296 \times 1210 + 45.519841 \quad (5.93)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.46)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.94)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 1.99%로

산출되었다.

$$1.99(\%) = 0.0007 \times 1210 + 1.1055 \quad (5.94)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.95)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.028g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 19900(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273 + 106.4} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \\ = 0.028g/L \end{aligned} \quad (5.95)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.50)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.96)과 같이 배기가스 유속은 16.50m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.97)과 같이 유량은 0.157m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$16.50(m/s) = 0.015269 \times 1210 - 1.977421 \quad (5.96)$$

$$0.157(m^3/sec) = 16.50(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.97)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.98)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.90kg/hr로 산출되었다.

$$0.157(m^3/s) \times 0.028(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 15.90kg/hr \quad (5.98)$$



#### 5.1.3.4 트럭탑재형 크레인(CC.4)

##### 1) 무부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.53)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.99)와 같이 배기가스 온도는 100.4°C로 산출되었다.

$$100.4(^{\circ}\text{C}) = 0.039817 \times 1210 + 52.245635 \quad (5.99)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.51)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.100)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 1.94%로 산출되었다.

$$1.94(\%) = 0.000807 \times 1210 + 0.965873 \quad (5.100)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.101)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.028g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 19400(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273+100.4} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \\ = 0.028\text{g/L} \end{aligned} \quad (5.101)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.55)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.102)와 같이 배기가스 유속은 14.78m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.103)과 같이 배기가스 유량은 0.140m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$14.78(\text{m/s}) = 0.014387 \times 1210 - 2.629484 \quad (5.102)$$

$$0.140(m^3/sec) = 14.78(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.103)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.104)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 14.10kg/hr로 산출되었다.

$$0.140(m^3/s) \times 0.028(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 14.10kg/hr \quad (5.104)$$

## 2) 부하상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.54)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.105)와 같이 배기가스 온도는 101.5°C로 산출되었다.

$$101.5(^{\circ}C) = 0.042148 \times 1210 + 50.469048 \quad (5.105)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.52)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.106)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.00%로 산출되었다.

$$2.00(\%) = 0.000827 \times 1210 + 0.995754 \quad (5.106)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.107)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.029g/L로 산출되었다.

$$20000(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273 + 101.5} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.107)$$

$$= 0.029g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.56)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.108)과 같이 배기가스 유속은 15.40m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.109)와 같이 유량은 0.146m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$15.40(m/s) = 0.014915 \times 1210 - 2.650278 \quad (5.108)$$

$$0.146(m^3/sec) = 15.40(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.109)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.110)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.06kg/hr로 산출되었다.

$$0.146(m^3/s) \times 0.029(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 15.06kg/hr \quad (5.110)$$

#### 5.1.3.5 트럭탑재형 크레인 CO<sub>2</sub> 배출량 분석

##### 1) 트럭탑재형 크레인 평균

측정 대상이 된 4대의 트럭탑재형 크레인 연식이 유사하며 연식의 차이가 미미한 수준이다. 트럭탑재형 크레인의 측정결과를 산술평균하기 위하여 측정 대상 4대의 측정을 한 엔진 부하를 가한 RPM 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 측정값을 산술평균하여 산출된 값으로 회귀분석을 하였다.

##### 가) 무부하 상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.59)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.111)과 같이 배기가스 온도는

108.0°C로 산출되었다.

$$108.0(^{\circ}\text{C}) = 0.0589 \times 1210 + 36.687 \quad (5.111)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.57)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.112)와 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.09%로 산출되었다.

$$2.09(\%) = 0.0007 \times 1210 + 1.2475 \quad (5.112)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.113)과 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.029g/L로 산출되었다.

$$\begin{aligned} 20900(\text{ppm}) \times \frac{10^{-6}}{(\text{ppm})} \times \frac{44(\text{g})}{1(\text{mol})} \times \frac{1(\text{mol})}{22.4(\text{L})} \times \left( \frac{273}{273+108.0} \times \frac{1(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \\ = 0.029\text{g/L} \end{aligned} \quad (5.113)$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.61)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.114)와 같이 배기가스 유속은 15.05m/sec로 산출되었다. 배기가스 유속 값에 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.115)와 같이 배기가스 유량은 0.143m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$15.05(\text{m/s}) = 0.0145 \times 1210 - 2.491 \quad (5.114)$$

$$0.143(\text{m}^3/\text{sec}) = 15.05(\text{m/sec}) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(\text{m}^2) \quad (5.115)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.116)과 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.18kg/hr로 산출되었다.

$$0.143(m^3/s) \times 0.029(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 15.18kg/hr \quad (5.116)$$

나) 부하 상태

RPM 변화와 배기가스 온도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.60)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.117)과 같이 배기가스 온도는 112.9°C로 산출되었다.

$$112.9(^{\circ}C) = 0.0577 \times 1210 + 43.129 \quad (5.117)$$

RPM 변화와 CO<sub>2</sub> 농도 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.58)을 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.118)과 같이 CO<sub>2</sub> 농도는 2.27%로 산출되었다.

$$2.27(\%) = 0.0009 \times 1210 + 1.1782 \quad (5.118)$$

산출된 연소온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 Eq. (2.8)에 대입하여 Eq. (5.119)와 같이 단위 유량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 0.032g/L로 산출되었다.

$$22700(ppm) \times \frac{10^{-6}}{(ppm)} \times \frac{44(g)}{1(mol)} \times \frac{1(mol)}{22.4(L)} \times \left( \frac{273}{273 + 112.9} \times \frac{1(atm)}{1(atm)} \right) \quad (5.119)$$

$$= 0.032g/L$$

RPM 변화와 배기가스 유속과 관계로부터 구한 회귀식 Eq. (4.62)를 이용해 작업 시간에 대한 가중평균 RPM 1210을 대입하여 Eq. (5.120)과 같이 배기가스 유속은 15.44m/sec로 산출되었다. 배기구 면적을 곱하여 Eq. (5.121)과 같이 유량은 0.147m<sup>3</sup>/sec로 산출되었다.

$$15.44(m/s) = 0.0146 \times 1210 - 2.2305 \quad (5.120)$$

$$0.147(m^3/sec) = 15.44(m/sec) \times \frac{0.11^2}{4} \pi(m^2) \quad (5.121)$$

산출된 시간당 배기가스 유량과 단위부피당 CO<sub>2</sub> 농도를 곱한 후 Eq. (5.122)와 같이 환산한 결과 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 16.64kg/hr로 산출되었다.

$$0.147(m^3/s) \times 0.032(g/L) \times \frac{1000}{1000} \times 3600 = 16.64kg/hr \quad (5.122)$$

## 2) 트럭탑재형 크레인 CO<sub>2</sub> 배출량

5.1.3.1을 정리하면 트럭탑재형 크레인(CC.1)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 11.27kg/hr로 산출된다. 그리고 부하 상태에서는 단위시간 당 CO<sub>2</sub> 배출량은 12.44kg/hr로 산출되었다.

5.1.3.2를 정리하면 트럭탑재형 크레인(CC.2)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 20.10kg/hr로 산출된다. 그리고 부하 상태에서는 단위시간 당 CO<sub>2</sub> 배출량은 22.14kg/hr로 산출되었다.

5.1.3.3을 정리하면 트럭탑재형 크레인(CC.3)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.86kg/hr로 산출된다. 그리고 부하 상태에서는 단위시간 당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.90kg/hr로 산출되었다.

5.1.3.4를 정리하면 트럭탑재형 크레인(CC.4)의 작업 시 무부하 상태에서는 단위 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 14.10kg/hr로 산출된다. 그리고 부하 상태에서는 단위시간 당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.06kg/hr로 산출되었다.

5.1.3.5를 정리하면 트럭탑재형 크레인의 평균 작업 시 무부하 상태에서는 단위 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 15.18kg/hr로 산출된다. 부하 상태에서는 단위시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 16.64kg/hr로 산출되었다.

트럭탑재형 크레인의 무부하 상태와 부하 상태를 비교하면 CO<sub>2</sub> 배출량은 무부하 상태 보다 부하 상태에서 CO<sub>2</sub> 배출량이 많아 유의미 한 결과를 도출하였다(Table. 5.3).

Table. 5.3 Cargocrane CO<sub>2</sub> Emission

Construction Equipment	Condition	CO <sub>2</sub> Emission(kg/hr)
CC.1	Non-load	11.27
	Load	12.44
CC.2	Non-load	20.10
	Load	22.14
CC.3	Non-load	15.86
	Load	15.90
CC.4	Non-load	14.10
	Load	15.06
Average	Non-load	15.18
	Load	16.64

## 5.2 기초 시설물 공사 시 CO<sub>2</sub> 배출량

### 5.2.1 굴삭기

굴삭기의 작업량은 자연상태 지반 기준 496.25m<sup>3</sup>로 기초 시설물 크기에 따른 절토 면적과 깊이, 지반 상태에 따라서 영향을 받는다. 지반의 상태에 따라 작업시간이 바뀔 수 있으나 철근 물량과 콘크리트 물량에 영향이 없고 기초 시설물의 크기에 따른 굴삭 부피의 변동 시 영향을 받는다.

본 연구에서는 900m<sup>3</sup>의 철근 콘크리트 시설물 제작을 가정하여 굴삭기 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다. 자연 상태의 지반 굴삭 부피는 496.25m<sup>3</sup>로 산출되었다.

암파쇄 작업 물량은 자연상태 굴삭 부피의 50%인 248.13m<sup>3</sup>로 작업시간은 42.06 시간 정도 수준이며, CO<sub>2</sub> 발생량은 567.32kg으로 산출되었다. 운반 및 굴삭 작업의 경우 굴삭기 버킷에 토사 및 암파쇄에 따른 자갈이 담기는 순간 자갈과 토사는 자연상태가 아닌 흐트러진 상태가 되므로 가정된 지반 앞서 가정한 팽창률(L) 1.2를 곱하여 작업 물량은 595.50m<sup>3</sup>로 산출되었다. 작업 물량에 따른 작업시간은 567.32시간이며, CO<sub>2</sub> 배출량은 130.30kg으로 산출되었다. 가정한 조건의 작업 시 굴삭기 총 CO<sub>2</sub> 배출량은 703.62kg으로 산정되었다(Table. 5.4).

Table. 5.4 Excavator working CO<sub>2</sub> Emission

	Output result
Natural condition quantity (m <sup>3</sup> )	496.25
Amount of rock crushing (m <sup>3</sup> )	248.13
rock crushing time (hr)	42.06
Disturbed state Quantity(m <sup>3</sup> )	595.50
Digging and moving work time(hr)	8.19
rock crushing CO <sub>2</sub> Emission(kg)	567.32
Digging and moving CO <sub>2</sub> Emission(kg)	136.30
Excavator CO <sub>2</sub> Emission(kg)	703.62



### 5.2.2 콘크리트 믹서트럭

콘크리트 믹서트럭의 작업량은 본 연구의 조건에 따라 가로 30m, 세로 30m, 높이 1m의 콘크리트 기초를 제작하는 것을 가정하면 콘크리트 타설량은 900m<sup>3</sup>로 산정하였다.

타설량 900m<sup>3</sup>의 콘크리트를 타설할 경우 콘크리트 믹서트럭의 작업시간은 약 183.67시간이고, CO<sub>2</sub> 배출량은 2437.35kg으로 산정되었다(Table. 5.5).

Table. 5.5 Concrete mixer truck working CO<sub>2</sub> Emission

	Output result
Amount of concrete pouring(m <sup>3</sup> )	900.00
Concrete mixer truck working hours(hr)	183.67
Concrete mixer truck CO <sub>2</sub> Emission(kg)	2,437.35

### 5.2.3 트럭탑재형 크레인

트럭탑재형 크레인의 작업량은 단위 면적당 철근량에 따라 달라지며 운반횟수가 달라진다. MCT(2007)의 '수량 산출 기준 지침서'를 활용하여 4가지 조건을 선정 후 단위 콘크리트 타설량에 대한 철근 사용량을 산정하였다. 단위 콘크리트 타설량 대비 철근 사용량을 A, B, C, D로 가정하였으며, 각각의 철근량은 114.86kg/m<sup>3</sup>, 151.40kg/m<sup>3</sup>, 135.65kg/m<sup>3</sup>, 132.06kg/m<sup>3</sup>로 하여 계산되었다.

900m<sup>3</sup>의 콘크리트 구조물의 평균 철근 사용량은 120.14ton이며 본 연구에서 사용된 트럭탑재형 크레인 평균 적재량 11.58ton을 기준으로 운반횟수를 산출하여 10.75회로 산출되었다. 운반횟수에 따른 작업 시간 평균은 8.96hr이며 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 곱하여 트럭탑재형 크레인 작업에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 149.07kg으로 산정되었다(Table. 5.6).

Table. 5.6 Cargocrane working CO<sub>2</sub> Emission

	A	B	C	D	Average
Amount of reinforcing bar per unit volume(kg)	114.86	151.40	135.65	132.06	133.49
Amount of rebar (ton)	103.37	136.26	122.08	118.85	120.14
Number of rebar transports	9.00	12.00	11.00	11.00	10.75
Cargocrane transportation time(hr)	7.50	10.00	9.17	9.17	8.96
Cargocrane CO <sub>2</sub> Emission(kg)	124.80	166.40	152.53	152.53	149.07

#### 5.2.4 기초 시설물 작업량에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량

가로 30m, 세로 30m, 높이 1m의 철근 콘크리트 시설물 제작 시 CO<sub>2</sub> 배출량은 굴삭기 약 703.62kg, 콘크리트 믹서트럭은 약 2437.35kg이고 트럭탑재형 크레인 은 149.07kg으로 산정되었다. 따라서, 철근 콘크리트 기초 900m<sup>3</sup>를 제작 시 Eq. (5.123)과 같이 CO<sub>2</sub> 총배출량은 3290.04kg이고, Eq. (5.124)와 같이 단위 부피당 CO<sub>2</sub> 배출량은 3.66kg/m<sup>3</sup>로 산정되었다.

$$\begin{aligned}
 CO_2 \text{ Emission}(kg) &= 703.62 + 2437.35 + 149.07 & (5.123) \\
 &= 3290.04(kg)
 \end{aligned}$$

$$3290.04kg \div 900m^3 = 3.66kg/m^3 \quad (5.124)$$

### 5.3 연구결과 비교 및 탄소배출계수

#### 5.3.1 간접측정방식들과 비교

##### 5.3.1.1 굴삭기

굴삭기의 화학식, IPCC와 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인(MLTMA, 2011)에 따른 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 암파쇄 시 각각 30.68, 30.51, 30.08kg/hr로 산출되었다. Table. 5.7에서와 같이 간접측정방식에 의한 결과들과 본 연구의 직접측정 방식에 의한 건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량(Kim & Lee, 2017)은 및 부하 상태 시 산출 값과 비교한 결과 이론식들에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 보다 직접측정방식에 의하여 산출된 CO<sub>2</sub> 배출량이 IPCC 기준 0.44, 0.55수준으로 적게 나타났다.

Table. 5.7 Excavator output result

Calculation method		Hourly emissions (kg/hr)	Normalized
IPCC	Rock crushing	30.68	1.00
	Digging and moving	30.68	1.00
Chemical formula	Rock crushing	30.51	0.99
	Digging and moving	30.51	0.99
Guideline	Rock crushing	30.08	0.98
	Digging and moving	30.08	0.98
This study	Rock crushing	13.49	0.44
	Digging and moving	16.64	0.55

##### 5.3.1.2 콘크리트 믹서트럭

콘크리트 믹서트럭의 화학식, IPCC와 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인(MLTMA, 2011)에 따른 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 34.30, 34.10, 34.10kg/hr로 산출되었다. Table. 5.8에서와 같이 간접측정방식에 의한 결과들과 본 연구의 직접

측정방식에 의한 건설기계의 CO2 배출량은 및 부하 상태 시 산출값과 비교한 결과 이론식들에 의한 CO2 배출량 보다 직접측정방식에 의하여 산출된 CO2 배출량 대비 0.39로 적게 나타났다.

Table. 5.8 Concrete mixer truck output result

Calculation method	Hourly emissions (kg/hr)	Normalized
IPCC	34.30	1.00
Chemical formula	34.10	0.99
Guideline	34.10	0.99
This study	13.27	0.39

### 5.3.1.3 트럭탑재형 크레인

트럭탑재형 크레인의 화학식, IPCC와 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인 (MLTMA, 2011)에 따른 시간당 CO2 배출량은 각각 34.60, 34.30, 34.30kg/hr로 산출되었다. Table. 5.9에서와 같이 간접측정방식에 의한 결과들과 본 연구의 직접 측정방식에 의한 건설기계의 CO2 배출량은 및 부하 상태 시 산출값과 비교한 결과 이론식들에 의한 CO2 배출량 보다 직접측정방식에 의하여 산출된 CO2 배출량 대비 0.48로 적게 나타났다.

Table. 5.9 Cargocrane output result

Calculation method	Hourly emissions (kg/hr)	Normalized
IPCC	34.60	1.00
Chemical formula	34.30	0.99
Guideline	34.30	0.99
This study	16.64	0.48

#### 5.3.1.4 기초 시설물 제작 시 단위 부피당 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

본 연구에서 가정한 조건으로 각 건설기계별 작업시간과 간접측정방식의 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 곱하여 IPCC, 화학식, 가이드라인 기준 기초 시설물 제작 시 단위 부피당 CO<sub>2</sub> 발생량을 비교하였다.

Table. 5.10은 기초 시설물 제작 시 CO<sub>2</sub> 총 발생량과 단위 부피당 CO<sub>2</sub> 발생량을 나타낸다. 기초 시설물 제작 시 CO<sub>2</sub> 배출량은 IPCC 기준 8151.51kg, 화학식 기준 8103.55kg, 국내 가이드라인 기준 8081.94kg이며, 직접 측정 방식에 의한 산출량은 3290.04kg으로 산출되었다.

단위 물량(1m<sup>3</sup>) 기준 CO<sub>2</sub> 배출량은 기초 콘크리트 구조물의 부피 900m<sup>3</sup>을 나누어 산출하였다. 산출결과 1m<sup>3</sup>의 기초 콘크리트 제작 시 IPCC 기준 9.06kg/m<sup>3</sup>, 화학식 기준 9.00kg/m<sup>3</sup>, 국내 가이드라인 기준 8.98kg/m<sup>3</sup>이며 직접 측정 방식에 의한 산출량은 3.66kg/m<sup>3</sup>로 IPCC 기준 0.40배 수준인 것으로 나타났다.

Table. 5.10 Comparison of CO<sub>2</sub> emissions from work

	Total CO <sub>2</sub> emissions from work(kg)	CO <sub>2</sub> emissions per unit workload(kg/m <sup>3</sup> )	Normalized
IPCC	8151.51	9.06	1.00
Chemical formula	8103.55	9.00	0.99
Guideline	8081.94	8.98	0.99
This study	3290.04	3.66	0.40

#### 5.3.2 IPCC Tier 2 건설기계의 탄소배출계수

Tier 2의 식을 사용하여 굴삭기의 건설기계 탄소배출계수를 산출하였다(Table. 5.11). 부하 상태에서 탄소배출계수는 IPCC 대비 0.29이고, 무부하 상태에서 탄소배출계수는 IPCC 대비 0.49로 산출되었다.

Table. 5.11 Excavator emission factor

		Emission factor(kg/TJ)	Normalized
IPCC		74100	1.00
Digging and moving	Non-load	22526	0.30
	Load	40261	0.54
Rock crushing	Non-load	20711	0.28
	Load	32639	0.44
Average	Non-load	21618	0.29
	Load	36450	0.49

Tier 2의 식을 사용하여 콘크리트 믹서트럭의 건설기계 탄소배출계수를 산출하였다(Table. 5.12). 부하 상태에서 탄소배출계수는 IPCC 대비 각각 0.47, 0.35, 0.33이고, 무부하 상태에서 탄소배출계수는 IPCC 대비 각각 0.47, 0.26, 0.31로 산출되었다. IPCC 대비 평균 부하 상태에서 0.39, 무부하 상태에서 0.33으로 작게 산출되었다.

Table. 5.12 Concrete mixer truck emission factor

		Emission factor(kg/TJ)	Normalized
IPCC		74100	1.00
CMT.1	Non-load	34551	0.47
	Load	35126	0.47
CMT.2	Non-load	19539	0.26
	Load	26253	0.35
CMT.3	Non-load	22971	0.31
	Load	24439	0.33
2010	Non-load	24439	0.33
	Load	28649	0.39

Tier 2의 식을 사용하여 트럭탑재형 크레인의 건설기계 탄소배출계수를 산출하였다(Table. 5.13). 부하 상태에서 탄소배출계수는 IPCC 대비 각각 0.36, 0.64, 0.46, 0.44이고, 무부하 상태에서 탄소배출계수는 IPCC 대비 각각 0.33, 0.58, 0.46, 0.41로 산출되었다. IPCC 대비 평균 부하 상태에서 0.48, 무부하 상태에서 0.44로 작게 산출되었다.

Table. 5.13 Cargocrane emission factor

		Emission factor(kg/TJ)	Normalized
IPCC		74100	1.00
CC.1	Non-load	24146	0.33
	Load	26652	0.36
CC.2	Non-load	43064	0.58
	Load	47434	0.64
CC.3	Non-load	33980	0.46
	Load	34065	0.46
CC.4	Non-load	30209	0.41
	Load	32266	0.44
Average	Non-load	32523	0.44
	Load	35651	0.48

## 제6장 결론

산업혁명 이후 현대사회의 온실가스로 인한 기후변화가 세계적 문제로 대두됨에 따라 온실가스 총량제를 실시하게 되었다. 현재 온실가스 총량제 도입으로 인해 간접측정방식으로 온실가스 배출량출하고 있으나 건설 부문의 사실적인 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하기 위하여 본 연구를 진행하였다.

현재 건설현장에서 단위 부피 기초 제작 시 연료소모량 기준으로 탄소배출계수를 이용한 CO<sub>2</sub> 배출량 산출방식은 간접측정방식이 사용되고 있다. 그러나 본 연구는 실제 운행 특성을 반영한 엔진 부하량인 RPM 변화에 따른 배기가스 배출 특성을 이동식 배출가스 측정 장비로 직접 측정하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였다.

또한 건설기계별 작업 형태에 따른 생산성과 엔진 부하 특성을 분석하고 건설기계의 운행 특성을 무부하 상태와 부하 상태로 구분하여 PEMS 장비를 이용해 RPM 변화에 따른 배기가스(CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 유속)를 분석하였고, 건설기계의 작업에 따른 생산성과 엔진 부하 특성을 측정하여 단위 작업에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

부하 상태 굴삭기의 단위 시간 CO<sub>2</sub> 배출량은 표준품셈 연료소모량 기준 11.6L/hr 소모 시 IPCC 방식으로는 30.68kg/hr, 가이드라인 방식은 30.08kg/hr, 화학식 방식은 30.51kg/hr로 산출되었으나 직접측정방식으로 산출 할 경우 굴삭 및 운반 작업과 암파쇄 작업에서 각각 16.64kg/hr, 13.49kg/hr로 산출되어 IPCC 대비 약 50% 정도의 배출량이 산출되었다.

부하 상태 콘크리트 믹서트럭의 단위 시간 CO<sub>2</sub> 배출량은 표준품셈 연료소모량 기준 13.0L/hr 소모 시 IPCC 방식으로는 34.30kg/hr, 가이드라인 방식은 34.10kg/hr, 화학식 방식은 34.10kg/hr로 산출되었다. 왕복 이동거리가 20km를



기준, 직접측정방식으로 산출할 경우 13.27kg/hr로 산출되어 IPCC 대비 약 39% 정도의 배출량이 산출되었다.

부하 상태 트럭탑재형 크레인의 단위 시간 CO<sub>2</sub> 배출량은 표준폼셈 연료소모량 기준 13.1L/hr 소모 시 IPCC 방식으로는 34.60kg/hr, 가이드라인 방식은 34.30kg/hr, 화학식 방식은 34.30kg/hr로 산출되었다. 이동 거리가 10km를 기준, 직접측정방식으로 산출 할 경우 16.64kg/hr로 산출되어 IPCC 대비 약 48% 정도의 배출량이 산출되었다.

기초 콘크리트 구조물 단위 부피(1m<sup>3</sup>) 제작 시 간접측정방식을 이용하여 산출할 경우 IPCC 방식으로는 9.06kg/m<sup>3</sup>, 가이드라인 방식은 8.98kg/m<sup>3</sup>, 화학식 방식은 9.00kg/m<sup>3</sup>로 산출되었다. 본 연구의 직접측정방식의 경우 3.66kg/m<sup>3</sup>로 산정되었다.

또한, 현재 IPCC의 장비별 탄소 배출계수 중 경유의 경우 74100kg/TJ을 사용하나 실측값과 IPCC Tier 2를 이용하여 산출할 경우 부하 상태 기준으로 굴삭기는 36450kg/TJ, 콘크리트 믹서트럭은 28649kg/TJ, 트럭탑재형 크레인은 35651kg/TJ로 IPCC에서 제시된 배출계수보다 의미 있는 결과를 도출하였다.

건설기계의 CO<sub>2</sub> 배출량은 이론적인 간접측정방식보다 차대동력계로 동력이 전달되어 작업특성이 반영된 직접측정방식을 활용해서 부하상태의 건설기계 CO<sub>2</sub> 배출량 산정이 옳다고 판단된다.

본 연구는 콘크리트 기초 시공 시 사용되는 건설기계 중 3가지 건설기계로 제한된 조건에서 진행되어 한계가 존재한다. 그러나, 향후 본 연구결과를 활용하여 다양한 건설기계를 대상으로 직접측정방식에 의한 사실적인 CO<sub>2</sub> 배출량 DB 구축 연구가 필요하다.

## REFERENCES

- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR), (2017). *2017 National Greenhouse Gas inventory Report of Korea*, pp. 27, 37-157 (in Korean).
- Jeju Special Self-Governing Province, (2018). Status of construction machinery registration by year (in Korean).
- Jeon, E. D., Jeong, Y. S. and Yoon, S. H., (2018). "Index Decomposition Analysis for the Characteristics of Greenhouse Gas Emissions in Building Sector" *Journal of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, KIEAE, Vol. 18, No. 1, pp. 91-96 (in Korean).
- Jin, H. a., Lee, T. W., Park, H. N., Son, J. W., 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*, KSAE, Vol. 30, No. 6, pp. 555~568 (in Korean).
- Kang, M. H. (2010). *A study on the methodology of the environment impact assessment for greenhouse gases : The case of highway construction*, Master Thesis, Yonsei University Graduate School Department of Environmental Engineering, pp. 19 (in Korean).
- Kim, B. S., (2014). "A study on CO<sub>2</sub> emission factor for earth-work equipment using C-FVM." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 3, pp.999-1006 (in Korean).
- Kim, S. H. and Lee, D. W., (2017). "Experimental Research for CO<sub>2</sub> Emission Estimation of Medium-Scale Excavator Reflecting Work Characteristics", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 37, No. 4, pp. 717-727 (in Korean).
- Kim, Y. G., Kim, I. J., Han, S. U., Bae, M. R. Lee, S. C., Park, H. J., Ahn, B. O. and Park, S. W., (2012). *Recently Efforts to Reduce Greenhouse Gas in Major Countries and Implications*, Korea Institute for International Economic Policy (KIEP)
- Lee, T. W., (2010). *Study on Methodology of Emission Factors Development for*

*Vehicles based on On-Road Measurements*, Doctor Dissertation, Inha University Graduate School Department of Mechanical Engineering (in Korean).

Ministry of Environment(ME). (2017), Notices on Test Methods for Energy Efficiency of Automobiles, Greenhouse Gas Emissions and Fuel Consumption Rate, 2017-216 (in Korean).

Ministry of Construction & Transportation(MCT), (2007). *Quantity Calculation Guideline*, Korea (in Korean).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2011). *Carbon Emission Estimating Guideline Each Facilities*, Korea (in Korean).

Shin, Y. I., Kim, J., Kim, P. S., Chung, C. K. and Jang, Y. K., (2010). "Comparison of Greenhouse Gas Emission from Construction Equipment by Tier 2 and Tier 3 Methodologies", *Journal of Climate Change Research*, The Korean Society of Climate Change Research, Vol. 1, No. 1, pp. 13-20 (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 CO<sub>2</sub> Emission Factor of Domestic Fuel", *The Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference*, KSAE, Vol.2012, No.5, pp. 400-405 (in Korean).

