

배출계수 개발 및 배출량 산정 체계 고도화를 통한 건설기계의 연식, 출력 및 기종별 대기오염물질 배출량 산정

An Estimation of Age-, Power-, and Type-Specific Emission Inventories for Construction Equipments Using Improved Methodologies and Emission Factors

진형아 · 이태우^{1,*} · 박하나¹ · 손지환¹ · 김상균 · 홍지형
전상진¹ · 김정수¹ · 최광호²

국립환경과학원 기후대기연구부, ¹국립환경과학원 교통환경연구소, ²남서울대학교 교양과정부
(2014년 9월 24일 접수, 2014년 11월 11일 수정, 2014년 11월 18일 채택)

Hyungah Jin, Taewoo Lee^{1,*}, Hana Park¹, Jihwan Son¹, Sangkyun Kim,
Jihyung Hong, Sangzin Jeon¹, Jeongsoo Kim¹ and Kwangho Choi²
Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research
¹*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*
²*Department of General Education, Nam Seoul University*

(Received 24 September 2014, revised 11 November 2014, accepted 18 November 2014)

Abstract

The construction equipment is one of the major sources for hazardous air pollutants in Korea, and the its management has been of great concern recently. The objective of this study was to estimate each contribution of emission of construction equipments according to their production year, electric power consumption and type. To achieve this goal, we developed pollutant emission factors for the machineries manufactured after 2009, which are excluded from the present framework of Korean air pollutants inventory, CAPSS. More than 800 data obtained from emission investigations were utilized for the estimation. Compared with the previous estimation, the scheme used this study was modified to incorporate new emission factors as well as to include the corresponding activity data. Such improvement allow us to gain more detailed emission informations which are better characterized by specifications of construction equipments. The total amount of pollutants emitted from construction equipments in 2011 were estimated as 126.8, 7.0, 58.3, and 17.0 kton for NO_x, PM, CO, and VOC, respectively. The estimation results indicate that the increase in the emission of equipments is significantly related to their age and power consumption. The emissions of the older ones manufactured from 1992 ~ 1996 were estimated to be the contribution ranged from 23.7% to 26.8%, whereas the newer ones (2009 ~ 2011) showed the attributions of 11.3 ~ 21.5%. In addition, the results show that the emission of each equipment was increased with the increase in the electric power consumption of engine, probably due to their average output power. Among the nine types of machinery compared, excava-

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7609, E-mail : taewoolee@korea.kr

tors and forklifts were investigated to contribute relatively higher emissions in the level of 39.8~44.0% and 32.0~34.2%, respectively.

Key words : Construction equipments, Emission inventory model, Emission factors, Vehicle age, Engine power, Excavator, Forklift

1. 서 론

최근 환경부는 2024년까지 서울특별시 대기 중 이산화질소(NO_2)와 직경 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)의 농도를 각각 21 ppb 및 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 개선할 것임을 밝혔다.^a 이를 위해 제작차 배출허용기준 강화, 운행차 사후관리 강화 및 교통수요 관리 등과 같은 대책을 제안한 바 있다.

이 중 특히 주목을 끄는 대목은 노후 건설기계 5만대의 저공해화를 위한 매연저감장치(Diesel Particulate Filter, DPF) 부착, 엔진교체 또는 조기폐차 계획이다. 건설기계는 국가 총 배출량 중 질소산화물(NO_x) 9.0%, 입자상물질(PM) 3.7% 및 일산화탄소(CO) 6.1%를 배출하는 중요한 대기오염물질 배출원이다(NIER, 2013a). 2013년 기준으로 전국의 건설기계는 414,658대로서, 자동차 등록대수(1.9백만대)의 약 2%에 불과하다(KAMA, 2014; KMLIT, 2014). 하지만 자동차 등 도로이동오염원의 2011년도 배출량이 2001년 대비 NO_x 26%, PM 52% 감소한 반면, 동기간의 건설기계 배출량은 NO_x 58%, PM 64% 증가하였다. 특히 지역적으로 전체의 32%인 134,108대가 수도권에 등록되어 있어, 양적 및 질적 측면 모두에서 건설기계의 관리 중요성이 부각되는 실정이다(KMLIT, 2014).

건설기계 저공해화 사업은 해외에서도 많이 진행되고 있다(Kasprak *et al.*, 2012; Bar-Ilan *et al.*, 2010; Raman, 2007; Schattaneck and Weaver, 2005). Millstein and Harley (2009)는 미국 캘리포니아 주 건설기계 저공해화 사업 효과를 분석하면서 배출량 산정이 저감사업 효과 분석에 중요한 영향을 미침을 지적한 바 있다. 또한 건설기계는 연식 및 출력별로 나뉘는 오염물질 배출특성을 보인다(Frey *et al.*, 2010). 따라서 효과적인 저감사업 추진을 위해서는 연식별, 출력

별 및 기종별로 세분화된 건설기계 배출량 정보를 분석하여 오염물질 배출량이 많은 건설기계를 사업 대상으로 선정할 필요가 있다.

하지만 우리나라 배출량 산정시스템인 ‘대기정책 지원시스템’(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 건설기계 부문은 이런 정책목표에 부응하기에는 다소 단순한 구조에 머무르고 있다. 한 예로서 현행 CAPSS는 건설기계 연식과 관계없이 전 건설기계에 단일 배출계수를 적용하고 있고, 오염물질 배출 특성에 많은 영향을 미치는 건설기계의 출력 역시 동일한 출력을 획일적으로 적용하고 있다(NIER, 2013b). 실질적인 건설기계 저공해화 정책 지원을 위해서는 현행 CAPSS의 단순성을 개선한 고도화 추진이 필요하다라고 할 수 있다.

본 연구의 목표는 건설기계의 대기오염물질 배출량 분석을 통해 건설기계 연식별, 출력별, 기종별 기여율을 파악하는 것이다. 목표 달성을 위해서는 현행 CAPSS 배출량 산정체계에 대한 고찰 및 고도화 개선이 선행되어야 하는 바, 현행 배출량 산정체계 분석 및 개선과 배출계수 개발을 함께 진행하였다.

2. 현행 배출량 산정체계 분석 및 개선방안 검토

2.1 현행 건설기계 배출량 산정체계 개요

건설기계 배출량은 굴삭기, 지게차, 로우더, 불도저, 로올러, 기중기, 공기압축기, 콘크리트 펌프 및 천공기의 9개 기종에 대해 기종별 배출계수와 활동도를 곱하여 식 (1)~(3)과 같이 산정한다(NIER, 2013b). 대상 오염물질은 NO_x , PM, CO, VOC, SO_x , NH_3 이다.

배출계수는 단위 활동도별 오염물질 배출량을 말하며, 건설기계에 대해서는 기본계수(Base Emissions Factor)에 과도기운전 보정계수(Transient Adjustment

^a제2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015~2024년)

Table 1. Korean regulatory standard of emission limits for engines of construction equipments.

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Regulatory standard of emission limits [g/kWh]				
			NO _x	PM	CO	NMHC	NO _x +NMHC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	-	0.8	5.5	-	9.5
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	9.2	0.6	5.5	1.3	-
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	9.2	0.6	5.0	1.3	-
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	9.2	0.54	5.0	1.3	-
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	-	0.6	5.5	-	7.5
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	-	0.4	5.0	-	7.5
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	-	0.3	5.0	-	6.6
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	-	0.2	3.5	-	6.6
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	-	0.3	5.5	-	7.5
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	-	0.4	5.0	-	4.7
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	-	0.3	5.0	-	4.0
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	-	0.2	3.5	-	4.0

Table 2. Transient adjustment factors (TAF) based on the regulation stage and the type of construction equipments.

Pollutants	NO _x		PM		CO	HC
	1-2	3	1-2	3	1-3	1-3
Excavator; Folklift; Loader; Roller; Dozer	0.95	1.04	1.23	1.47	1.53	1.05
Crane; Compressor; Con-pump; Drill	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Factor)를 곱한 값을 사용한다. 기본계수는 건설기계 환경인증 시험 결과이다. 건설기계 배출량은 대기환경보전법의 ‘건설기계 배출허용기준’(표 1) 이하이어야 하며,^b 이는 인증시험을 통해 확인되어야 한다.^c 인증시험 방법은 ISO 8178 C1-8모드로서, 이 방법은 건설기계 엔진 배출량을 8개의 대표적인 운전조건에서의 배출량으로 조합해서 표현하는 방법이다. 운전조건은 엔진 공회전, 최고 출력 및 토크점 등을 포함하고 있으며, 각 운전점에서 엔진의 출력과 회전수는 정상상태(Steady-State)로 일정하게 유지된다.

실제 작업 중에는 엔진 회전수가 변하기 때문에, 표 2의 과도기운전 보정계수로 그 영향을 보정한다(U.S. EPA, 2010; NIER, 2007). 보정계수는 정상상태와 과도기(Transient) 운전 배출량의 비율로서, 작업 패턴이 유사한 장비는 서로 같은 값을 가지게 된다. 건설기계 차령(Age)의 영향은 열화계수를 이용하여 보정하는데, 이는 차령 증가에 따른 오염물질 저감성능 저하 경향을 최초 배출량의 비율로 계수화한 것이다.

등록대수, 평균출력, 평균부하율 및 평균사용시간 등의 활동도 자료는 국토교통부 및 건설기계 관련 유관기관의 통계를 활용한다. 평균출력은 등록된 장비의 ‘제원표에 표시된’ 출력이 어느 정도인지를 나타내는 사양상의 지표인 한편, 평균부하율은 실제 작업 중 어느 정도의 평균출력을 사용하는지를 나타내는 장비활용도의 지표라 할 수 있다. 배출량의 지역 할당은 전국 총배출량을 지역별 건축착공면적에 따라 배분하는 방식을 사용한다.

$$E_{k,MY} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^9 E_{ijk,MY} \tag{1}$$

$$E_{ijk,MY} = EF_{ijk,MY} \times DF_{k,MY,Age} \times N_{ij} \times HP_{ij} \times LF_{ij} \times HRS_{ij} \tag{2}$$

$$EF_{ijk,MY} = BEF_{ijk,MY} \times TAF_{jk,MY} \tag{3}$$

Where,

E =Emission inventory [g/year]

EF =Emissions factor [g/kWh]

BEF =Base emissions factor [g/kWh]

^b대기환경보전법 제46조(제작차의 배출허용기준 등)

^c대기환경보전법 제48조(제작차에 대한 인증)

- TAF =Transient adjustment factor [-]
- DF =Emissions deterioration factor [-]
- N =The number of registered construction equipments [-]
- HP =Average rated power of construction equipments [kW]
- LF =Average load factor of construction equipments in representative working operation [%]
- HRS =Hours of operation [h/year]
- Subscript *i*=Engine power class:
 - 19 ≤ P < 37; 37 ≤ P < 75; 75 ≤ P < 130; and 130 ≤ P < 560
 - (P is engine rated power in [kWh])
- j*=Types of construction equipments:
 - Excavator; Forklift; Loader; Crane; Compressor; Concrete pump; Roller; Dozer; and Drill
- k*=Pollutants:
 - CO; NO_x; SO_x; PM; VOC; and NH₃
- MY=Model year of construction equipments
- Age=Age of construction equipments (Base year minus MY)

2. 2 현행 CAPSS 건설기계 부문의 문제점 및 개선방안

2. 2. 1 배출계수

건설기계 배출계수의 문제점으로는 배출계수 누락 및 구형장비 배출계수의 단순성을 지적할 수 있다. 국내 최초의 건설기계 배출계수는 1997년에 8대의 엔진 실험결과를 이용하여 산정된 바 있다(Chung *et al.*, 1999; NIER, 1997). 당시는 건설기계 인증제도가

도입되기 이전이었으나, 해외 수출용 건설기계를 중심으로 Tier-1 기준 대응이 이루어지고 있던 시기였다. Tier-2급 건설기계에 대한 배출계수는 2007년에 445대의 인증 시험결과를 이용하여 산정되었다(Lim *et al.*, 2009; NIER, 2007).

그러나 2009년부터 단계적으로 보급되기 시작한 Tier-3 허용기준 대응 건설기계의 배출계수는 아직 마련되어 있지 않다. 이전 허용기준과 비교할 때, Tier-3는 NO_x+NMHC가 39%, PM은 50%까지 강화된 기준이다. 허용기준은 엔진 출력에 따라 4단계로 구분되고, 굴삭기, 지게차 등 장비별로는 구분되어 있지 않다. 인증 역시 엔진을 기준으로 이루어진다. 인증 신청 시에 엔진이 어떤 기종에 탑재될 것인지를 명기하나, 그것이 허용기준이나 시험방법에 영향을 미치지 않는다. 한편 환경인증 대상이 아닌 콘크리트 펌프, 공기압축기, 천공기 등 3개 기종은 인증시험 결과를 확보할 수 없어, 해외계수를 도입하여 적용하고 있다.

두 번째 문제는 구형장비 배출계수의 단순성이다. 표 3과 같이, 기존의 배출계수는 출력구분이 되어 있지 않거나(Tier-1), 2단계로만 구분(Tier-2)되어 있다. 배출허용기준 대응기술에 의해 최신 연식일수록 적은 배출량을 보인다(Dou, 2012; Yin *et al.*, 2011; Xinqun *et al.*, 2010). 또한 각 저감기술은 출력별로 차등 적용되고 있기 때문에, 출력 구분이 없는 현행 배출계수는 허용기준 강화에 의한 기술개발 및 배출특성 변화를 적절히 반영하고 있다고 보기 어렵다.

과거 계수에 출력구분을 두지 못했던 것은 측정결과가 충분치 않았기 때문이다. 측정결과가 극히 제한적이었던 최초 계수 개발 시에 출력구분 대신 기종별 구분을 선택하여 추진하였고(NIER, 1997), 그 이후 현행 체계를 유지하게 된 것이다. 인증시험 결과가 확보된 Tier-2 계수 개발 시에도 굴삭기와 지게차를 제외하면 결과가 적었으나, 기존 체계를 유지하는

Table 3. Comparison of the engine power ranges between original (Tier-1 and Tier-2) and newly classified Tier-3 emission factors.

Engine power range in Korean regulatory emission limits [kW]	Engine power range in Korean emission factors [kW]		
	Tier-1 (NIER, 1997)	Tier-2 (NIER, 2007)	Tier-3 (This study)
19 ≤ P < 37	19 ≤ P < 560	19 ≤ P < 130	19 ≤ P < 37
37 ≤ P < 75			37 ≤ P < 75
75 ≤ P < 130	130 ≤ P < 560	130 ≤ P < 560	75 ≤ P < 130
130 ≤ P < 560			130 ≤ P < 560

범위 내에서 개발이 진행되었다(NIER, 2007).

결과적으로, 시험결과가 적은 기종에서 기종별 계수가 큰 편차를 보이는 사례가 확인되었다. 예를 들어, Tier-2 로울러와 불도저의 CO, PM 계수는 다른 기종의 70% 수준으로 과소평가되었음이 보고된 바 있고, 이 원인으로서 부족한 시험결과(각각 10대 및 19대)가 지적된 바 있다(NIER, 2007). 또한 Tier-1 로우더의 PM 계수는 타 기종 대비 절반 수준이다. 이는 개발 당시 시험한 기종별 대표엔진 8대에 적용된 기술의 격차 때문인데, 당시 로우더 대표엔진은 터보차저, 인터쿨러 등 저공해 기술을 적용한 엔진이 선정된 반면, 기타 기종은 상대적으로 낙후된 엔진이 선정된 바 있다(NIER, 1997).

국내와는 달리, 미국과 유럽은 기종별 통합 배출계수를 산정한다. 여러 건설기계 기종이 엔진을 공유하여 개발되고, 환경인증 또한 엔진 위주로 진행됨을 감안한다면 기종별 통합 배출계수 도입을 고려해야 할 것으로 보인다. 당분간은 현행 기종별 계수의 체계를 유지하되, 지급부터라도 기종별 통합과정을 추진할 필요가 있을 것으로 판단된다.

2.2.2 배출량 산정체계

CAPSS는 건설기계 연식과 관계없이 전 건설기계에 단일 배출계수를 적용하고 있다. 현재는 Tier-2 배출계수만을 반영하고 있어, 국내의 모든 건설기계가 2007년식 수준의 배출특성을 갖는다고 간주하는 현실이다. 이는 과거 연식 기종의 오염물질 배출량을 과소평가하고, 반대로 최근 연식의 영향은 과대평가할 수 있는 산정방법이라 할 수 있다. 따라서 CAPSS를 건설기계 저공해화 정책 대상 선정에 효과적으로 활용하기 위해서는 이 부분의 개선이 요구된다 할 수 있다.

또한 현재 CAPSS의 열화계수는 모든 연식과 오염물질에 대해 1.0로서, 엔진 노화에 따른 오염물질 증가를 반영하지 않고 있다. 유럽은 매년 1.5~3%의 배출량 증가를 적용하고, 미국도 나름의 열화계수를 적용하고 있다(EEA, 2013; U.S. EPA, 2010). CAPSS 역시 자동차 배출량 산정 시에는 열화계수를 반영하고 있다(NIER, 2013b).

출력 측면에서 본다면, 현행 CAPSS는 기종별 출력 분포를 감안하지 않고 국가 평균값을 일괄 적용하고 있다. 예를 들어, 2011년의 국내 모든 굴삭기를

85 kW급 단일기종으로 가정하는 실정으로서, 장비 규모에 따른 배출량 분석이 불가능한 구조이다. 따라서 등록 건설기계 출력별 활동도 자료 구축 및 배출계수 연계를 통해 출력별 허용기준 강화의 배출량 저감효과 분석을 가능케 할 필요가 있다.

3. 연구내용 및 방법

3.1 건설기계 배출계수 개발, 수정 및 보완

3.1.1 미산정 배출계수 신규 개발

현재 누락되어 있는 Tier-3급 건설기계의 배출계수를 새롭게 산정하였다. 국립환경과학원 교통환경연구소에 구축되어 있는 건설기계 인증시험 데이터베이스 중 Tier-3 기준 엔진 시험결과 874건을 활용하였다. 대상 오염물질은 NO_x, PM, CO 및 VOC이고, VOC 계수는 비메탄탄화수소(NMHC)의 인증시험 결과를 사용하였다. 인증항목이 아닌 SO_x와 NH₃는 제외하였다. 대상 건설기계 기종은 CAPSS 관리기종 9종으로 선정하였다.

시험대상 중 대수가 가장 많은 지게차(251대, 28.7%), 굴삭기(190대, 21.7%) 및 기중기(174대, 19.9%)는 기종별 배출계수를 각각 산출하였다. 로우더(172대, 19.7%), 불도저(47대, 5.4%) 및 로울러(40대, 4.6%)는 운전특성 및 장비구조가 유사하고 엔진 공용화 비율도 높기 때문에, 계수를 통합하여 개발하였다. 해외계수를 적용하던 콘크리트 펌프, 공기압축기, 천공기 등 3개 기종에 대해 엔진 공유현황과 작업특성 등을 고려하여 국내계수를 선정하였다. 먼저 공기압축기와 천공기는 대부분 굴삭기 엔진을 공유하고 있어, 굴삭기 계수를 적용하였다. 콘크리트 펌프 트럭은 트럭 구동용 엔진에서 동력을 뽑아내어 펌프를 가동하는 동력인출장치(Power Take-Off, PTO)를 이용하기 때문에, 생산시점의 차량용 엔진 배출허용기준을 적용하였다. 즉, Tier-1, -2, 및 -3에 대해 각각 2002년 7월 이후, 2006년 1월 이후 및 2009년 9월 이후의 대형차량용 배출허용기준을 배출계수로 적용하였다.

3.1.2 현행 배출계수 수정 및 보완

Tier-1, -2급 건설기계 계수의 수정 목적은 출력구간 구분 및 기종별 편차 과다 해소이다. 출력구분이 필요한 Tier-2 계수의 130 kW 미만 구간과 Tier-1 계

Table 4. Comparison of estimation components between CAPSS and this study.

Components for inventory estimation		CAPSS	This study
Emission factors	Construction equipments for Tier-3 emission standard	Not available	Available
	Construction equipments for Tier-1 and -2 emission standard	Available	Available
Engine power classification	Tier-3 emission factors	Not available (No emission factors)	Applicable
	Tier-2 emission factors	Not applicable	Applicable
	Tier-1 emission factors	Not applicable	Applicable
	Activities	Not applicable	Applicable
Age and power distribution for construction equipments		Not applicable	Applicable
Deterioration factors for emission control performance		Not applicable	Applicable

수 전체에 대해 배출허용기준의 출력구간별 상대비율을 활용하여 구간별 계수를 산출하였다. 건설기계의 배출특성이 배출허용기준에 맞춰 개발되었음과 해외 유사사례를 감안할 때, 이는 타당한 대안으로 판단된다. 저평가되어 큰 편차를 보이는 Tier-2 로울러와 불도저의 계수는 로우더 수준으로 조정하였다. Tier-1 계수는 개발 당시 8대의 측정결과를 모두 평균하여 기종별 편차를 해소한 후, 출력별 배출허용기준 비율을 적용하여 세분화하였다.

3.2 배출량 산정 체계 개선

연식별 및 출력별로 세분화된 배출계수 데이터베이스 시스템을 구축하고, 이들이 해당 활동도와 연계되어 배출량 산정에 반영될 수 있도록 시스템을 정비하였다. 기종별, 출력구간별 평균 출력은 국토교통부의 협조를 얻어 확보한 건설기계 등록대장을 참고하였으며, 등록대수, 평균부하율 및 평균사용시간은 현행 CAPSS 입력자료를 활용하였다 (NIER, 2013b). 열화계수는 배출가스 보증기간^d을 초과하는 1년째부터 20년간 매년 1.5% (CO, VOC) 또는 3% (PM)씩 배출량이 증가되도록 설정하였으며, NO_x에는 적용하지 않았다. 이는 유럽 방법을 준용한 것으로 (EEA, 2013), 현재 CAPSS 자동차 부문 및 국내 대형엔진 환경인증시의 열화계수 적용 체계와 같은 방법이다. 현행 CAPSS와 본 연구의 주요 산정방법을 표 4에 요약하여 비교하였다.

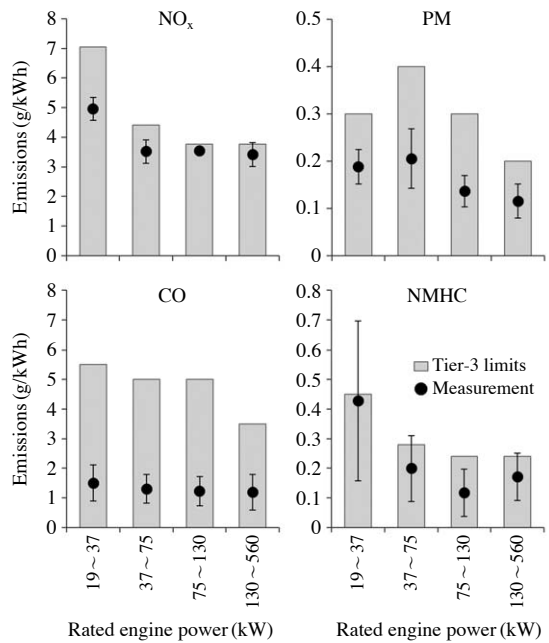


Fig. 1. Comparison of certified emission data and Korean regulatory emission limits for Tier-3 construction equipments. Error bars denote standard deviations.

4. 결과 및 고찰

4.1 배출계수

그림 1에 Tier-3 인증시험 결과와 배출허용기준을

^d건설기계 보증기간 (대기환경보전법 시행규칙 제63조(배출가스 보증기간))

1) 2012년 12월 31일까지의 제작 건설기계: 1년 또는 2,000시간

2) 2013년 1월 1일 이후 제작 건설기계: 10년 또는 8,000시간 (37≤P); 7년 또는 5,000시간 (19≤P<37)

Table 5. The emission factors improved for Korean Tier-1 and -2 and newly developed for Tier-3 construction equipments.

a. Excavator

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Emission factors [g/kWh]			
			NO _x	PM	CO	VOC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	9.70	0.48	4.10	1.23
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	9.70	0.36	4.10	1.23
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	9.70	0.36	3.73	1.23
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	9.70	0.32	3.73	1.23
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	5.31	0.57	3.11	0.50
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	5.31	0.38	2.83	0.50
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	4.68	0.28	2.83	0.44
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	4.11	0.14	1.41	0.25
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	5.23	0.28	2.81	0.59
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	3.35	0.28	2.56	0.25
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	3.54	0.19	1.50	0.13
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	3.55	0.16	1.78	0.18

b. Folklift

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Emission factors [g/kWh]			
			NO _x	PM	CO	VOC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	9.70	0.48	4.10	1.23
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	9.70	0.36	4.10	1.23
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	9.70	0.36	3.73	1.23
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	9.70	0.32	3.73	1.23
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	6.27	0.50	2.33	0.81
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	6.27	0.33	2.12	0.81
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	5.52	0.25	2.12	0.72
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	5.55	0.25	1.84	0.70
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	5.13	0.26	1.50	0.18
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	3.69	0.28	1.79	0.17
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	3.66	0.15	1.36	0.20
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	3.58	0.18	1.61	0.19

c. Loader, Roller, and Dozer

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Emission factors [g/kWh]			
			NO _x	PM	CO	VOC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	9.70	0.48	4.10	1.23
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	9.70	0.36	4.10	1.23
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	9.70	0.36	3.73	1.23
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	9.70	0.32	3.73	1.23
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	5.23	0.37	1.81	0.40
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	5.23	0.25	1.65	0.40
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	4.60	0.19	1.65	0.35
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	4.06	0.17	1.49	0.29
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	5.04	0.29	2.29	0.48
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	3.80	0.34	1.91	0.22
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	3.67	0.22	2.01	0.11
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	3.43	0.16	2.14	0.16

Table 5. Continued.

d. Crane

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Emission factors [g/kWh]			
			NO _x	PM	CO	VOC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	10.2	0.39	2.68	1.00
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	10.2	0.29	2.68	1.00
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	10.2	0.29	2.44	1.00
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	10.2	0.26	2.44	1.00
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	6.14	0.25	1.18	0.33
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	6.14	0.17	1.08	0.33
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	5.40	0.12	1.08	0.29
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	4.78	0.12	0.97	0.29
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	5.20	0.19	1.50	0.46
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	3.82	0.17	1.25	0.21
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	3.73	0.12	1.32	0.11
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	3.45	0.12	1.40	0.16

e. Compressor and Drill

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Emission factors [g/kWh]			
			NO _x	PM	CO	VOC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	10.2	0.39	2.67	1.17
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	10.2	0.29	2.67	1.17
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	10.2	0.29	2.43	1.17
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	10.2	0.26	2.43	1.17
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	5.58	0.46	2.03	0.47
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	5.58	0.30	1.84	0.47
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	4.92	0.22	1.84	0.41
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	4.32	0.11	0.92	0.23
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	5.02	0.19	1.83	0.56
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	3.22	0.19	1.67	0.23
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	3.40	0.12	0.98	0.12
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	3.41	0.10	1.16	0.17

f. Concrete pump

Regulation stage	Engine power range	Applicable model year	Emission factors [g/kWh]			
			NO _x	PM	CO	VOC
Tier-1	19 ≤ P < 37	~ Dec.2006	5.00	0.10	2.10	0.66
	37 ≤ P < 75	~ Dec.2006	5.00	0.10	2.10	0.66
	75 ≤ P < 130	~ Dec.2005	5.00	0.10	2.10	0.66
	130 ≤ P < 560	~ Dec.2004	5.00	0.10	2.10	0.66
Tier-2	19 ≤ P < 37	Jan.2007 ~	3.50	0.02	1.50	0.46
	37 ≤ P < 75	Jan.2007 ~	3.50	0.02	1.50	0.46
	75 ≤ P < 130	Jan.2006 ~	3.50	0.02	1.50	0.46
	130 ≤ P < 560	Jan.2005 ~	3.50	0.02	1.50	0.46
Tier-3	19 ≤ P < 37	Jan.2010 ~	2.00	0.02	1.50	0.46
	37 ≤ P < 75	Jan.2010 ~	2.00	0.02	1.50	0.46
	75 ≤ P < 130	Jan.2009 ~	2.00	0.02	1.50	0.46
	130 ≤ P < 560	Jan.2009 ~	2.00	0.02	1.50	0.46

출력구간별로 비교하였다. 사전 분석을 통해 NO_x+NMHC의 98.3%를 NO_x가, 나머지 1.7%는 NMHC가 차지함을 확인하고 이를 그림의 허용기준으로 표시하였다. 경유엔진의 두 중요 오염물질 중 NO_x가 허용기준에 거의 근접한 반면, PM은 기준 대비 45~63%인, 다소 여유있는 수준을 보인다. 이는 건설기계 엔진 개발 시 PM 관리에 중점을 둔 결과로 사료된다. 경유엔진의 NO_x-PM tradeoff 특성에 의해 PM 감소는 NO_x 증가를 초래하게 된다(Lee *et al.*, 2009). PM 저감은 연비 개선 효과를 동반하여 건설기계 소유주의 만족도를 높일 수 있으므로, 제작사는 NO_x가 다소 많이 배출되더라도 PM을 저감하는 쪽으로 엔진 개발을 진행하는 경우가 많다. CO 배출량은 기준 대비 70% 가량 낮은 수준을 꾸준히 유지하고 있다. NMHC는 기준을 초과한 것처럼 보이지만 NO_x와 더해진 결과로 관리되고 있음을 감안해야 한다.

수정 보완된 Tier-2급 로울러와 불도저의 PM 계수는 19~37kW 구간에서 기존 계수 대비 95~106% 높은 값으로 재산정되었으며, 나머지 출력구간에서는 6~39% 하향 조정되었다. CO 계수는 로울러 63~94% 상향, 불도저 1~14% 하향 조정되었다. NO_x와 VOC(NMHC) 계수는 재산정 변화폭이 ±10% 이내였다. 재산정된 Tier-1급 장비중, 굴삭기의 NO_x 및 PM 계수는 ±10% 이내로 유지되었고, 지게차의 NO_x, PM 계수는 2%, 16% 각각 하향 조정되어 변화폭이 크지 않았다. 반면 저평가되어있던 로우더 PM 계수는 2배 이상 대폭 상향 조정되었으며, 기중기 NO_x 계수(+87%), 불도저 CO 계수(+56%) 등도 다소 큰 폭으로 조정되었다.

개발된 Tier-3 계수와 수정 보완된 Tier-1, -2 계수를 정리하고(표 5), 이 중 주요 기종인 37~75kW급 굴삭기 배출계수를 해외계수 결과와 비교하였다(그림 2). NO_x 계수는 허용기준 강화 효과를 잘 반영하며, 국가별 경향도 유사하게 나타났다. CO 계수는 해외 대비 낮은 결과를 보이며, NMHC 계수는 유럽(Tier-1) 및 미국(Tier-2, -3) 계수와 각각 유사한 수준을 보인다.

PM은 Tier-1 계수에서 국가별로 큰 차이를 보이고, 나머지 결과는 유사한 경향이다. 국내 Tier-1 PM 계수는 Tier-2 계수보다 오히려 약간 낮아, 배출허용기준 강화 효과와 무관한 것처럼 보인다. 이는 NO_x 기준 강화와 NO_x-PM tradeoff 특성이 동시에 영향을

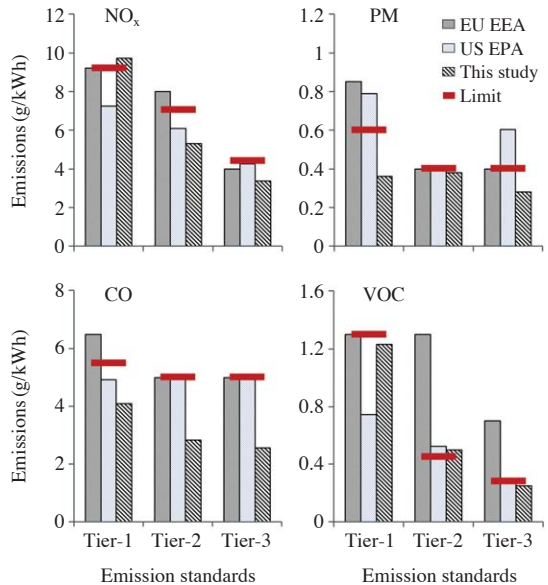


Fig. 2. Comparison of base emission factors for 37~75 kW excavators between Europe, United States and Korea. Korean regulatory emission limits are remarked by red bars.

미쳤기 때문인 것으로 분석되었다. 규제 도입 이전인 1997년에는 대부분의 건설기계 엔진이 PM과 연비 위주로 개발되었을 것이며, 이 때 산정된 Tier-1 계수는 이 영향을 반영하고 있다고 할 수 있다. 실제로 개발 당시의 보고서는 시험엔진들의 NO_x 배출량이 많은 반면, PM 배출량은 적다고 보고한 바 있다(NIER, 1997). 반면 Tier-2 계수는 규제 도입 이후에 개발된 것인 바, 배출허용기준의 영향을 반영하고 있다. 결과적으로 NO_x 계수는 Tier-2 강화단계에서 Tier-1의 54.7%로 크게 저감되고, 이로 인해 PM이 증가하여 PM 계수는 이전 대비 약간 증가한 값을 갖게 된 것으로 판단된다. 한편 미국 Tier-3 계수는 두드러지게 높은 값을 갖는데, 이는 허용기준을 그대로 계수로 설정한 후 여기에 이전 대비 다소 큰 PM 과도기운전 보정계수(1.47)를 곱했기 때문이다.

PM 및 CO 계수에서 특히 두드러지듯이, 해외의 계수가 배출허용기준 자체 또는 이전 기준 대비 강화비율을 준용하고 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 국내 계수가 시험결과에 기초한 것이고, 또한 인증제도 도입 초기의 국내 여건을 감안한다면 이 정도의

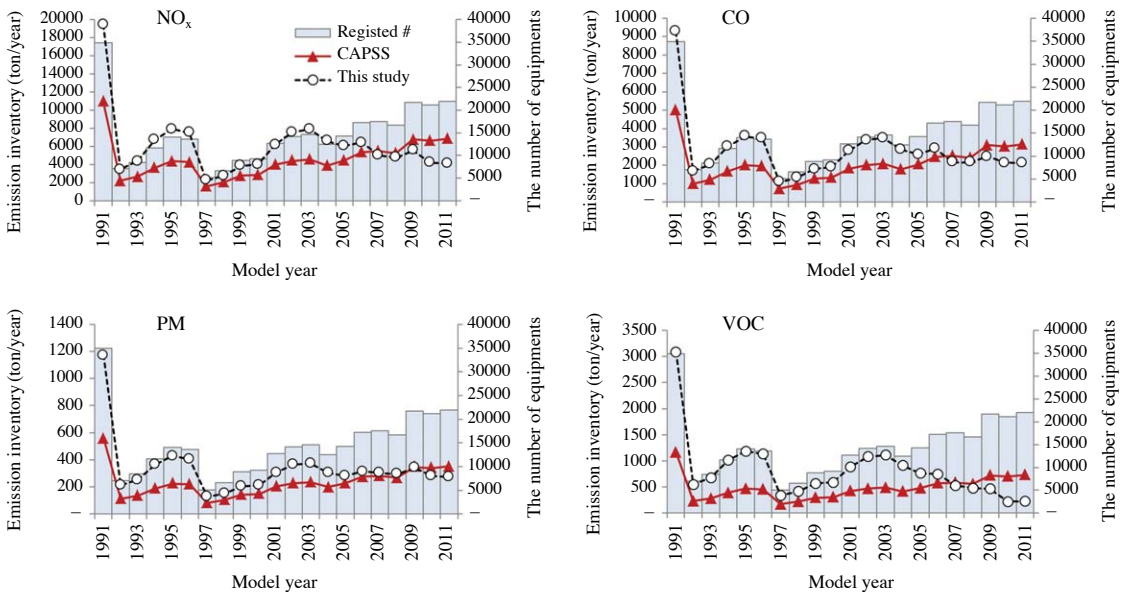


Fig. 3. Variations in the emission inventory and the number of registered construction equipments in terms of equipment's model year.

Table 6. Comparison of estimation inventories and contributions of each construction equipment between CAPSS and this study (Base year 2011).

Model year	NO _x [ton/year]		PM [ton/year]		CO [ton/year]		VOC [ton/year]	
	CAPSS	This study	CAPSS	This study	CAPSS	This study	CAPSS	This study
'11 ~ '07	30,970 (32.6%)	23,698 (18.7%)	1,588 (32.6%)	1,495 (21.5%)	14,191 (32.6%)	11,093 (19.0%)	3,308 (32.6%)	1,924 (11.3%)
'06 ~ '02	22,754 (23.9%)	34,559 (27.2%)	1,167 (23.9%)	1,632 (23.5%)	10,427 (23.9%)	15,232 (26.1%)	2,431 (23.9%)	4,623 (27.2%)
'01 ~ '97	13,269 (14.0%)	19,139 (15.1%)	680 (14.0%)	997 (14.3%)	6,080 (14.0%)	8,913 (15.3%)	1,417 (14.0%)	2,808 (16.5%)
'96 ~ '92	17,153 (18.0%)	30,000 (23.7%)	879 (18.0%)	1,663 (23.9%)	7,860 (18.0%)	13,790 (23.7%)	1,832 (18.0%)	4,563 (26.8%)
Before '92	10,915 (11.5%)	19,414 (15.3%)	560 (11.5%)	1,173 (16.8%)	5,002 (11.5%)	9,279 (15.9%)	1,166 (11.5%)	3,092 (18.2%)
Total	95,060 (100%)	126,809 (100%)	4,873 (100%)	6,960 (100%)	43,560 (100%)	58,307 (100%)	10,155 (100%)	17,010 (100%)

국가별 계수 차이는 설명 가능한 정도라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 국내 계수는 타당한 수준으로 개발된 것으로 판단된다.

4.2 배출량

2011년 기준 건설기계 배출량을 그림 3과 표 6에

정리하였다. 현행 CAPSS의 배출량 산정결과는 등록 대수에 정확히 연동되는 거동을 보인다. 연식별로 배출계수의 차이가 없고, 열화계수 역시 적용되지 않기 때문에 초래된 결과라 할 수 있다. 결국 배출량이 적은 신형 건설기계가 대부분인 2009~2011년식에서 가장 많은 오염물질을 배출하는 것으로 산정하고 있

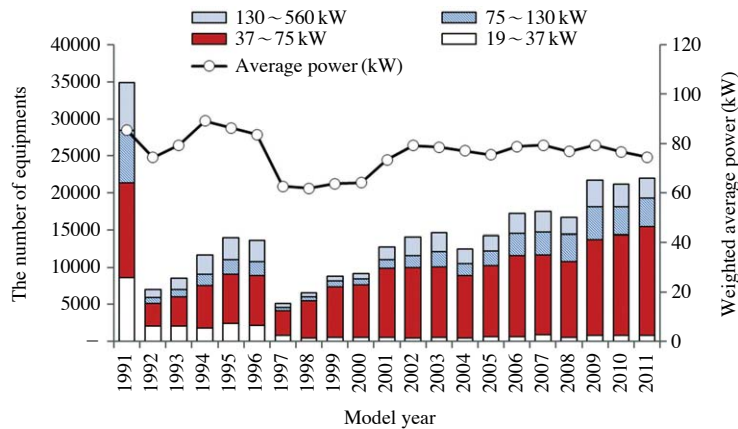


Fig. 4. Variations in the number, engine power range, and weighted average power of registered construction equipments in terms of equipment's model year.

으며, 이 경향은 다른 오염물질 결과에서도 동일하게 나타나고 있다. 반면 산정체계를 고도화한 본 연구는 2006년까지 등록대수와 연계된 배출량을 보이나, 2007년식부터는 등록대수가 증가함에도 불구하고 배출량이 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 2005년부터 단계적으로 적용되기 시작한 Tier-2, -3 배출계수가 배출허용기준 강화 효과를 반영하기 때문으로 판단할 수 있다. 결과적으로, 건설기계 배출량 중 최근 5년간 보급된 신형 건설기계의 배출량 기여율을 CAPSS가 32.6%로 과대평가한 반면, 본 연구는 11.3~21.5%로 예측하고 있다. 그림 3에서 1992년식 배출량이 1991년식에 비해 급격히 감소한 것은 건설기계 등록대수가 1991년 34,911 대에서 1992년 7,023 대로 줄어든 영향이라 할 수 있다. 90년대 초반 국내 건설경기 활황으로 도입된 건설기계 중 다수가 아직도 건설 현장에서 사용되고 있는 것으로 추정된다.

2006년 이전 연식에 대해서는 상이한 경향이 관찰된다. CAPSS는 1992~1996년식 건설기계의 배출량 기여율을 18%로, 본 연구는 23.7~26.8%로 산정하고 있다. 이는 CAPSS가 Tier-1 연식에도 Tier-2 배출계수를 적용함으로써 오염물질 배출량을 과소평가하고 있었기 때문이다. 두 결과의 편차는 2000~1997 연식에서 가장 적게 나타나는데, 이는 당시의 건설기계 활동도가 낮아 배출계수의 차이에도 불구하고 배출량 차이가 크게 벌어지지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 그림 4에서 알 수 있듯이, IMF 외환위기의

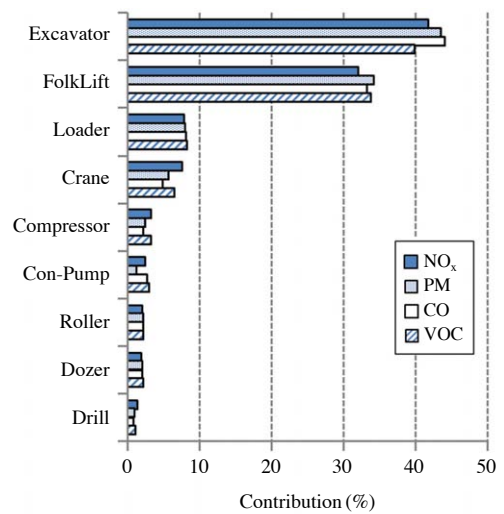


Fig. 5. Emission contributions of each type of construction equipments.

영향 등으로 해당 4개 연식의 차량 등록대수는 상대적으로 적은 수준이다. 장비도 대부분 중소형 사양인 37~75 kW급으로서, 해당 평균출력(63.1 kW)이 다른 연식의 평균출력(79.2 kW) 대비 20% 이상 낮다. 결과적으로 본 연구의 건설기계 NO_x, PM 배출량 산정결과는 CAPSS 대비 각각 31,750톤(33.4%), 2,087톤(42.8%) 많다. 이는 CAPSS가 그동안 파악하지 못하고 있던 누락 배출량으로 간주할 수 있을 것으로

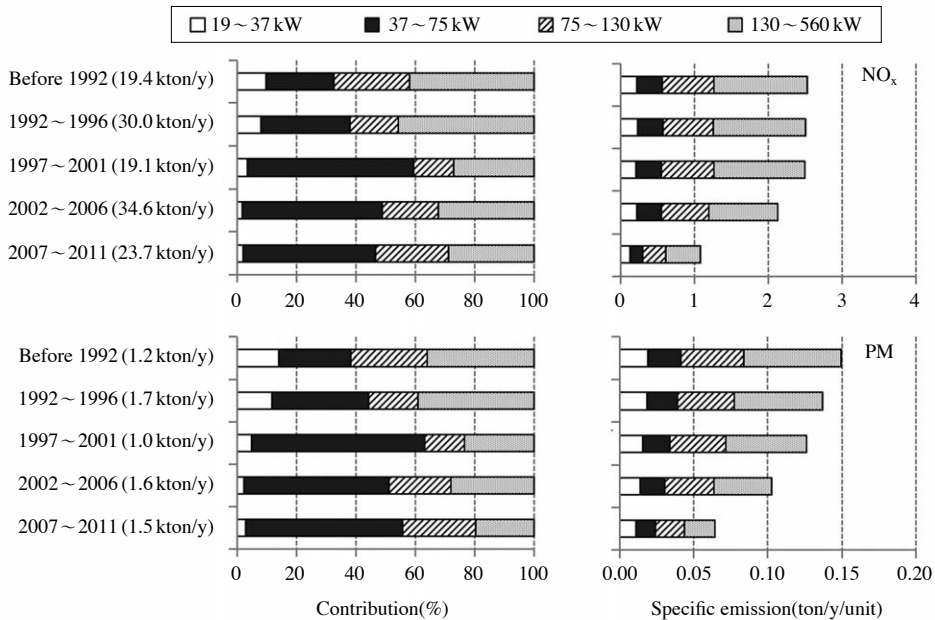


Fig. 6. Total contribution (left) and equipment-specific contribution (right) for emission of NO_x and PM classified by five categories. The values given in parentheses are the emission inventories of each category.

판단된다.

기종별 배출량 기여율은 굴삭기와 지게차가 각각 39.8~44.0%, 32.0~34.2%로 가장 높다(그림 5). 기종별로 계수를 통합한 로우더, 볼도저 및 로울러 3종의 기여율 합계는 전체의 11.7~12.6%이며, 이 중 60% 이상을 로우더가 점유하고 있다. 배출량 기여율은 전체적으로 등록대수 기여율과 같은 경향을 보인다. 하지만 대당 평균 출력 차이로 기여율이 역전된 사례도 확인되었다. 예를 들어 굴삭기는 등록대수 기여율이 40.1%로서 지게차의 43.7% 대비 낮으나, 대당 평균출력(77.8 kW)이 지게차(55.0 kW)보다 40% 이상 높아 최종적인 배출량 기여율은 더 높게 나타났다. 이는 앞의 2000~1997년식 배출량 사례와 함께, 배출량 산정 시 출력 활동도의 영향이 중요함을 시사하는 결과라 할 수 있으며, 건설기계의 작업 효율성 개선을 통한 배출량 저감 방안 도출 등에 활용 가능할 것으로 판단된다(Ahn and Lee, 2012; Lewis et al., 2011; Strum et al., 2007).

그림 6은 건설기계 연식별, 출력별 장비군(Fleet)의 NO_x와 PM 배출량 기여율을 대당 배출량과 함께 표시한 것으로서, 본 연구결과가 건설기계 저공해화

사업 대상선정에 정책적으로 활용될 수 있도록 구성한 자료이다. 연식은 5년 단위로 구분하였다. 1996년 이전에는 130 kW 이상의 고출력 장비군이, 1997년 이후에는 37~75 kW 범위의 중소형 장비군이 가장 높은 기여율을 보이고 있다. 하지만 대당 배출량은 2001년 이전 연식의 고출력 장비가 가장 높은 값을 보이는 것으로 분석되었다. 고출력 장비의 배출계수는 저출력 장비 대비 낮으나, 사용 출력이 높기 때문에 배출량 측면에서는 더 시급히 조치되어야 할 장비군이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 건설기계 대기오염물질의 연식별, 출력별, 기종별 기여율을 파악하는 것이며, 이를 위해 현행 CAPSS 배출량 산정체계에 대한 고도화 개선을 함께 진행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 874건의 건설기계 엔진 배출가스 시험결과를 바탕으로 Tier-3급 건설기계의 대기오염물질 배출계

수를 개발하였다. 아울러, 기존 Tier-1, -2 계수의 출력 구간을 세분화하고, 과도한 기종별 편차를 해소하였다. 허용기준 및 해외 계수와 비교해 볼 때, 본 배출계수는 타당하게 제시된 것으로 판단된다.

(2) 연식별 및 출력별로 세분화된 배출계수 데이터 베이스 시스템을 구축하였다. 또한, 이들이 각각의 열화계수 및 활동도와 연계되어 배출량 산정에 반영될 수 있도록 시스템을 정비하였다. 이와 같은 개선을 통해 현행 CAPSS 배출량 대비 33.4~67.5%의 누락 배출량을 추가로 파악할 수 있었다.

(3) 누락 배출량의 상당 부분은 CAPSS가 2006년 이전 연식의 구형 건설기계 배출량을 과소평가하기 때문에 발생하는 것으로 조사되었다. 이는 전체 연식에 대해 단일 배출계수를 적용함으로써 초래된 결과이며, 결국 최근 연식의 건설기계 배출량을 과대평가하는 효과도 가져오는 것으로 확인되었다.

(4) 1996년 이전에는 130 kW 이상의 고출력 장비군(Fleet)이, 1997년 이후에는 37~75 kW 범위의 중소형 장비군이 가장 높은 배출량 기여율을 보이고 있다. 저감사업 대상 선정의 중요 지표인 대당 배출량은 2001년 이전 연식의 고출력 장비가 가장 높은 값을 보이는 것으로 분석되었다. 고출력 장비의 배출계수는 저출력 장비 대비 낮으나, 사용 출력이 높아 배출량이 많기 때문에 건설기계 저감사업을 통해 집중 관리할 필요가 있을 것으로 판단된다. 기종별로는 굴삭기와 지게차를 우선적으로 대상에 포함시켜야 할 것으로 분석되었다.

(5) 향후 건설기계의 시공간 특성을 반영한 평균부하율과 가동시간에 대한 추가 조사가 이루어진다면 건설기계 배출량 정확도는 더욱 높아질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 연구 과제로서 수행되었습니다.

References

Ahn, C.R. and S. Lee (2012) Importance of operational effici-

ency to achieve energy efficiency and exhaust emission reduction of construction operations, *J. Constr. Eng. M. ASCE.*, 139(4), 404-413.

Bar-Ilan, A., J.R. Johnson, A. DenBleyker, L.M. Chan, G. Yarwood, D. Hitchcock, and J.P. Pinto (2010) Potential ozone impacts of excess NO₂ emissions from diesel particulate filters for on-and off-road diesel engines, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 60(8), 977-992.

Chung, I., M. Eom, J. Yoo, and C. Lim (1999) A study on the estimation of exhaust emission by nonroad construction equipments, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 15(3), 317-325. (in Korean with English abstract)

Dou, D. (2012) Application of diesel oxidation catalyst and diesel particulate filter for diesel engine powered nonroad machines, *Platinum Metals Review*, 56(3), 144-154.

EEA (European Environment Agency) (2013) EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.

Frey, H.C., W. Rasdorf, and P. Lewis (2010) Comprehensive field study of fuel use and emissions of nonroad diesel construction equipment, *Transp. Res. Rec.*, 2158(1), 69-76.

KAMA (Korean Automobile Manufacturer's Association) (2014) Monthly report for vehicle registration of January 2014. (in Korean)

Kasprak, A., G. Schattaneck, and J. Kenny (2012) Massachusetts Department of Transportation diesel retrofit program for nonroad construction equipment, Transportation Research Board 91st Annual Meeting (No. 12-1734), Washington D.C. United States, January 2012.

KMLIT (Korean Minister of Land, Infrastructure and Transport) (2014) Status report of construction equipments in Korea, Available at <http://stat.mltn.go.kr/portal/cate/statView.do> 건설기계현황통계 (2013.12.31 기준).hwp. (in Korean)

Lee, D.W., J. Zietsman, M. Farzaneh, J. Johnson, T. Ramani, A. Protopapas, and J. Overman (2009) Characterization of in-use emissions from TxDOT's nonroad equipment fleet: Phase 1 report (No. FHWA/TX-09/0-5955-1), Report prepared for Texas Department of Transportation, by Texas Transportation Institute.

Lewis, P., M. Leming, H.C. Frey, and W. Rasdorf (2011) Assessing effects of operational efficiency on pollutant emissions of nonroad diesel construction equipment, *Transp. Res. Rec.*, 2233(1), 11-18.

Lim, J., S. Jung, T. Lee, J. Kim, C. Seo, J. Ryu, J. Hwang, S.

- Kim, and M. Eom (2009) A study on calculation of air pollutants emission factors for construction equipment, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(3), 188-195. (in Korean with English abstract)
- Millstein, D.E. and R.A. Harley (2009) Revised estimates of construction activity and emissions: effects on ozone and elemental carbon concentrations in southern California, *Atmos. Environ.*, 43(40), 6328-6335.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2007) A study on the calculation of pollutant emission factors for vehicles (V), NIER No. 2007-39-895, Publication No. 11-1480523-000251-01. (in Korean with English abstract)
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2013a) National Air Pollutants Emission 2011, NIER-GP-2013-362, Publication No. 11-1480523-001770-01. (in Korean)
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2013b) Methodology for Korean national emission inventories (III), NIER-GP2013-097, Publication No. 11-1480523-001501-01. (in Korean)
- Raman, R. (2007) Results of implementing aggressive PM reduction on nonroad construction equipment at two lower Manhattan project sites, *Transportation Land Use, Planning, and Air Quality Congress 2007* (pp. 319-327), Orlando, FL. United States, July 2007.
- Schattanek, G. and D. Weaver (2005) Implementation of retrofit program for diesel equipment during the construction phase the I-95 New Haven Harbor Crossing improvement program in Southern Connecticut, *Air & Waste Management Association's 98th Annual Conference and Exhibition* (No. 999), Minneapolis, MN. United States, June 2005.
- Strum, M., D. Mintz, L. Driver, C. Harvey, H. Michaels, and R. Mason (2007) Estimating the monthly variation in California's nonroad equipment emissions for the 2002 emissions and air quality modeling platform, *International Emission Inventory Conference*, Raleigh, NC. United States, May 2007.
- U.S. EPA (2010) Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling - compression ignition, EPA report 420-R-10-018.
- Xinqun, G., D. Dou, and R. Winsor (2010) Non-road diesel engine emissions and technology options for meeting them, *2010 Agricultural Equipment Technology Conference*, Orlando, FL. United States, January 2010.
- Yin, B., T. Guan, J. He, and Y. Xu (2011) Design of mechanical and combustion system for small nonroad diesel engine to meet the EPA IV emission regulations, *Appl. Mech. Mater.*, 43, 476-479.