

천연가스 사용 난방 및 산업보일러의 NOx와 CO 배출계수 산정 연구

A Study on Estimation of NOx and CO Emission Factor from Industrial and Commercial LNG Boilers

장영기* · 최상진 · 김 관 · 송기봉 · 김호정 · 정봉진

수원대학교 환경공학과

(2004년 2월 10일 접수, 2004년 9월 23일 채택)

Young-kee Jang*, Sang-jin Choi, Kwan Kim, Ki-pong Song,
Ho-jung Kim and Bong-jin Jung

Department of Environmental Engineering, Suwon University

(Received 10 February 2004, accepted 23 September 2004)

Abstract

This study was conducted for developing the emission factors of nitrogen oxide(NOx) and carbon monoxide(CO) from the combustion boilers burning liquefied natural gas(LNG). These emission factors were compared with those of U.S. EPA and European Environment Agency(EEA). NOx and CO concentration in the flow gas were measured using Kane-May, KM9106 and Thermo Environmental Instruments Inc., 42C-HL. Measurement were conducted at thirty industrial and commercial LNG boilers. Emission factors were calculated on the basis of fuel consumption(kg-pollutant/m³-fuel burned). NOx concentration at industrial boiler was 14~125 ppm and it was measured as 35~125 ppm at commercial boiler.

NOx emission factors of industrial boiler and commercial boiler were 1.84 kg/m³ and 2.09 kg/m³, respectively. NOx emission factor of commercial boiler was higher than that of industrial boiler. The NOx emission factors estimated in this study were lower than those of U.S. EPA and higher than those of EEA.

Average CO emission factor of industrial boiler was 0.65 kg/m³ and at commercial boiler it was 0.70 kg/m³. CO emission factor at industrial boiler was lower than that at commercial boiler.

Key words : LNG, Boiler, Concentration, Emission factor, NOx, CO

1. 서 론

최근 국내에서는 환경개선을 목적으로 기존의 석탄, 석유를 사용하는 시설들이 천연가스 시설로 전환

* Corresponding author
Tel : +82-(0)31-220-2147, E-mail : musim@suwon.ac.kr

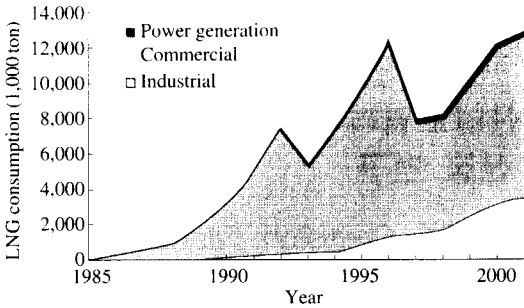


Fig. 1. Trend of LNG consumption.

을 하고 있다. 천연가스는 아황산가스, 분진과 같은 오염물질이 기존의 연료에 비하여 거의 발생하지 않으며, NOx의 경우에도 기존의 연료에 비하여 적게 배출이 되어 천연가스의 사용량이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다(그림 1 참조). 이에 따라 천연가스 연소에 따른 대기오염물질 배출량도 급증하는 추세이다.

현재 국내에서 대기오염 배출량 산출에 이용되는 방법은 연료별 배출계수와 연료 사용량을 이용하여 배출량을 산출하고 있으며, 국내의 기존 배출계수 및 배출량과 관련된 연구로는 중·소형 소각 및 연소시설과 총먼지 및 PM-10 배출계수에 대한 연구(국립환경연구원, 2000) 정도로 많이 미비한 상태이다.

우리나라의 경우 천연가스 사용으로 인한 대기오염물질 배출량 산출시 국내 대기오염 물질 배출원에 대한 배출계수 개발연구가 미진한 상태로 미국, 유럽 등 선진국의 계수와 국내의 배출계수를 같이 사용하고 있기 때문에 국내 실정에 적합하지 않아 국가의 중장기 대기관리 정책수립, 방지기술의 개발, 지역적 대기오염물질 배출량 산출 등에 실질적으로 활용하기에 많은 어려움이 있다.

2. 실험 및 방법

본 연구에서 현장 실측 방법은 일반적인 배출가스 농도 측정과는 달리 배출계수 산정을 위한 실험으로 굴뚝에서의 농도측정과 동시에 연료 소모율을 동시 측정을 하여야 한다. 현장측정을 하기 전에 보일러 종류, 버너 형태, 방지시설 유/무에 대한 조사를 실시하였고, 연료 소모율은 온도, 압력과 함께 1분단위로 측정을 하였다. 측정할 때에는 측정위치의 단면적, 정

Table 1. Specification of instruments and target pollutants.

	Instruments	Analysis method
NOx	Kane-May 9106	Electrolysis method
	Teco NOx Analyzer (NO, NO ₂ , NOx)	Chemiluminescence method
CO ₂ , CO, O ₂	Kane-May 9106	-
Temperature	Kane-May 9106	-

Table 2. List and details of boilers used in this study.

Site No.	Industrial boiler		Commercial boiler	
	Boiler capacity (Steam ton/hr)	Boiler type	Boiler capacity (Steam ton/hr)	Boiler type
1	1,000,000 kcal/hr	***	1.5	***
2	1,000,000 kcal/hr	***	1.5	*
3	3	*	1.5	*
4	3	*	2	*
5	3	*	2.5	*
6	4	*	3	*
7	5	*	5	*
8	6	*	5	**
9	8	**	5	**
10	8	**	8	**
11	10	**	10	*
12	15	**	15	**
13	15	**	20	**
14	20	**	20	**
15	40	**	8,000,000 kcal	***

* : Smoke Tube Package Boiler
 ** : Water Tube Package Boiler
 *** : Multi Tube Type Boiler

압/동압 측정 등 실시간으로 30~60분간 연속적으로 안정한 상태가 될 때까지 측정을 하였다. 그래서 연료 사용량당 배출 농도를 계산하였다. 현장 측정시 측정 기기의 정확도를 검증하고자 연소가스측정기(Kane-May, KM-9106), NO, NO₂, NOx 측정기(Thermo Environmental Instruments Inc., 42C-HL)을 이용하여 교차 측정을 하였다.

배출시설의 배출가스 중 오염물질 농도측정에 있어서 사용한 기기는 표 1과 같다. 각 오염물질 별로 표준가스는 NOx : 98 ppm, 101.3 ppm, CO : 208 ppm 농도의 표준가스를 사용하여 측정시마다 보정하여 사용하였다.

3. 배출오염물질의 측정

본 연구에서는 LNG 사용시설중 산업 및 건물난방

용 보일러 설비를 대상으로 배출농도와 배출특성을 조사하여 대기오염물질 NOx, CO의 배출계수를 산정하였다. 실측 대상 업체수는 산업용 보일러 15개 시설, 건물난방용 보일러 15개 시설을 선정하였다. 보일러 형식별로는 노통연관식(Smoke Tube Package Boiler)이 14개 시설, 수관식(Water Tube Package Boiler) 13개 시설, 관류형(Multi Tube Type Boiler)이 3개 시설에 대하여 측정을 하였고, 용량별로는 표 2와 같다. 실측 업체의 선정은 보일러 연소가스 성능조사 자료(에너지관리공단, 1999)를 이용하여 용량별로 배분하여 선정을 하였다.

3.1 산업용 보일러

보일러시설에서 유속을 피토포를 이용하여 측정된 결과 배출시설에 따라 편차가 매우 크게 나타났다. 이러한 결과는 LNG설비의 경우 대기오염 배출시설로 관리되지 않기 때문에 대부분 측정공이 규정대로 설치되어 있지 않아 배기가스 관로의 온도계를 떼어 그 자리에서 유속을 측정하였는데 측정위치에 따라 관로가 굵어져 있거나 갑자기 넓어지거나 좁아지는 등 안정된 유속을 측정하는데 문제가 있기 때문이다.

따라서 배기가스 중 산소와 CO농도, 연료의 화학 조성 등을 이용하여 공기비와 이론공기량을 이용하여 건연소가스량(Gd)을 산출하여 배출계수 산정에 적용하여 보았다. 배기가스 측정시 이론적 배기가스량을 계산하기 위하여 산소(O₂) 농도를 실시간으로 측정 하였으며, LNG 가스 조성을 이용하여 연소계산식에 의해 실제 건연소가스량(Gd)을 산출하였다. 계산에 사용되어진 LNG 가스의 조성은 CH₄(89%), C₂H₆(8%), C₃H₈(2%), C₄H₁₀(1%)와 같으며, 실제 습연소가스량(Gw)과 건연소가스량(Gd)의 산출식은 식(1), (2)와 같다.

$$Gw = 1 + mA_0 - 0.5(H_2 + CO) - \Sigma \left(1 - \frac{y}{4}\right) C_xH_y \quad (1)$$

- Gw : 습배기가스량(Sm³-습배가스/Sm³-연료)
- A₀ : 이론공기량
- m : 공기비
- H₂ : H₂의 용적(Sm³)
- CO : CO의 용적(Sm³)
- C_xH_y : C의 갯수가 x, H의 갯수가 y인 물질의 용적(Sm³)

Table 3. Load and FGR status (on/off) of boiler at each operation mode.

Mode	Load (%)	FGR On/Off
1-On	100	On
1-Off	100	Off
2-On	75	On
2-Off	75	Off
3-On	50	On
3-Off	50	Off
4-On	30	On
4-Off	30	Off

$$Gd = Gw - \left(H_2 + 2CH_4 + \frac{y}{2} C_xH_y\right) \quad (2)$$

- Gd : 건배기가스량(Sm³-건배가스/Sm³-연료)
- Gw : 습배기가스량(Sm³-습배가스/Sm³-연료)
- H₂ : H₂의 용적(Sm³)
- CH₄ : CH₄의 용적(Sm³)
- C_xH_y : C의 갯수가 x, H의 갯수가 y인 물질의 용적(Sm³)

LNG사용 시설에서 유속 측정에 의한 배기가스 유량과 산소 및 오염물질농도 측정에 의하여 계산한 배기가스 유량을 비교하기 위하여 현장에서 산업용 보일러에 유속을 정확히 측정할 수 있도록 배기가스의 흐름이 안정적인 구간의 관로에 측정공을 설치하여 비교실험을 실시하였다. 사용된 보일러는 4 ton/hr의 노통연관식 보일러를 대상으로 부하율을 100%, 75%, 50%, 30%로 변동하여

배기가스재순환설비(FGR: Flue Gas Recirculation)의 가동유무에 따라 농도와 유속이 달라지는 조건에서 배기가스 농도측정에 의한 공기량과 유속측정에 의한 공기량을 비교하였다(표 3 참조).

실험의 농도 측정은 Kane May사의 KM-9106 Combustion Gas Analyser와 Thermo Environmental Instruments Inc.의 42C-HL (High Level) NOx Analyser 장비를 교차 분석을 하였으며, 송풍량은 Dwyer사의 Pitot Tube와 열선 풍속계를 이용하여 유속과 온도를 정밀 측정하였다. 그리고 관로 내의 기체 흐름은 난류이고 측정 유속은 관로 내부중심점의 최대 유속이므로 이를 보정하기 위하여 0.8(Bird *et al.*, 1960)을 곱하여 평균유속을 구하고 이를 적용하여 유속측정에 의한 공기량을 산출하였다. 두 가지 공기량을 비교한 결과 그림 2와 같이 농도측정에 의하여 계산한 공기량이 유속을 제대로 측정할 수 있

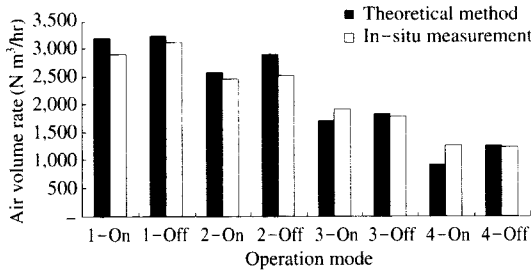


Fig. 2. Comparison of flow rate estimated by insitu measurement and by theoretical method.

Table 4. NOx and CO concentration measured at industrial boilers. (Unit : ppm)

Site No.	Exhaust gas (Sm ³ -Exhaust gas/Sm ³ -LNG)	NO	NO ₂	NOx	CO
1	15.09	-	-	42.08	23.18
2	11.08	89.00	0.00	89.00	444.00
3	51.88	13.60	0.00	13.60	1.60
4	15.97	55.23	0.00	55.23	31.00
5	14.79	78.19	0.00	78.19	4.98
6	14.43	64.93	0.00	64.93	0.86
7	23.45	39.27	0.02	39.29	7.20
8	14.88	56.08	0.00	56.08	1.40
9	16.14	53.67	0.00	53.67	5.08
10	9.69	125.43	0.02	125.45	127.40
11	11.05	59.11	0.43	59.54	5.04
12	11.84	75.53	0.00	75.53	6.35
13	11.32	64.14	0.52	64.66	1.87
14	10.95	99.10	0.00	99.10	12.41
15	12.42	76.50	0.01	76.51	7.68

는 조건에서 측정된 공기량을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 LNG사용설비는 대부분 측정공이 제대로 되어 있지 않아 유속을 제대로 측정할 수 없으므로 배출계수 산정을 위한 배기가스 유량은 배기가스 중 산소와 일산화탄소농도, 연료의 화학조성 등을 이용하여 계산한 실제 건연소가스량(Gd)을 적용하였다.

산업용 보일러의 배출가스의 측정은 30~60분 가량 연속적으로 이루어 졌으며, 배출계수 산정시에는 측정 시간 중 안정한 상태에서의 평균 농도를 이용하였다. 산업용 보일러 시설의 배출농도는 표 4와 같다.

NOx의 배출 형태는 99% 이상이 NO의 형태로 배출되는 것을 알 수 있으며, 농도는 13.60~125.43

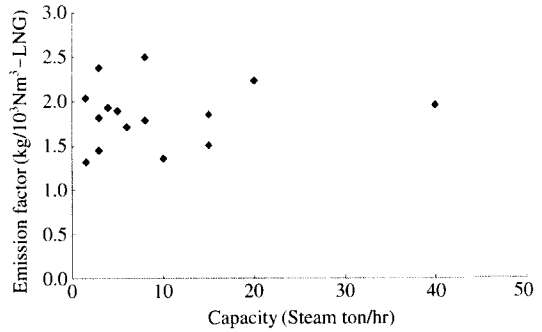


Fig. 3. Distribution of NOx emission factors for industrial boiler.

Table 5. NOx and CO emission factors estimated at each capacity class of industrial boilers.

Capacity (Steam ton/hr)	NOx (kg/10 ³ m ³)	CO (kg/10 ³ m ³)
Small (1~3)	1.82	1.24
Middle (4~10)	1.85	0.39
Large (11~)	1.88	0.10
Average	1.84	0.65

ppm 범위에서 나타나는 것을 알 수 있다. 배출계수의 산정은 측정을 통한 오염물질의 농도와 연료조성을 가지고 계산한 배출가스량, 실측당시 소비된 연료 소비량을 이용하여 식 (3)을 통하여 산출한다. 산정된 배출계수를 용량별로 NOx 배출계수의 분포를 살펴보면 그림 3과 같다.

$$\text{배출계수 (g/m}^3\text{-LNG)} = \text{측정농도 (ppm)} \times \frac{\text{분자량}}{22.4} \times \frac{\text{배출가스량}}{\text{연료사용량}} \quad (3)$$

용량별로 NOx 배출계수의 분포를 살펴보면 용량과는 상관없이 대부분의 보일러가 1.0~2.5 kg/10³ m³-LNG 사이에 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

배출계수를 용량별로 정리하여 보면 표 5와 같다. NOx의 경우에는 11~ Steam ton/hr의 범위에서 1.88 kg/10³m³로 가장 높은 배출계수를 나타냈으나, 전체적으로는 모든 용량에서 비슷한 수준을 나타내었다. CO는 1~3 Steam ton/hr에서 1.24 kg/10³m³로 가장 높게 나타났고, 11 Steam ton/hr 이상에서는 0.10 kg/10³m³로 가장 낮게 나타났는데 이 차이는 용량별로 운전상태의 차이에 의해 용량이 작은 경우가 큰 경우보다 불완전연소가 일어나고 있는 것을 알 수 있다.

Table 6. NOx and CO concentrations measured at commercial boilers.
(Unit : ppm)

Site No.	Exhaust gas (Sm ³ -Exhaust gas/Sm ³ -LNG)	NO	NO ₂	NOx	CO
1	12.65	35.00	0.00	35.00	357.00
2	13.77	61.00	0.00	61.00	10.58
3	13.93	86.09	0.00	86.09	6.09
4	14.26	45.64	0.00	45.64	8.32
5	13.58	62.50	0.00	62.50	5.44
6	11.73	74.47	0.02	74.49	26.99
7	9.94	112.32	0.00	112.32	198.55
8	12.24	92.39	0.00	92.39	27.00
9	13.27	88.86	0.00	88.86	9.83
10	11.62	82.65	0.00	82.65	6.85
11	11.76	95.93	0.00	95.93	16.38
12	10.82	95.60	0.00	95.60	4.96
13	14.16	124.85	0.00	124.85	11.18
14	11.63	80.88	0.00	80.88	16.56
15	16.30	36.08	0.00	36.08	4.17

Table 7. NOx and CO emission factors estimated at each capacity class of commercial boilers.

Capacity (Steam ton/hr)	NOx (kg/10 ³ m ³)	CO (kg/10 ³ m ³)
Small (1~3)	1.81	0.19
Middle (4~10)	2.25	0.68
Large (11~)	2.24	0.15
Average	2.09	0.35

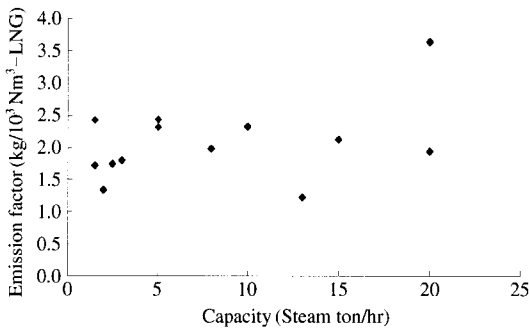


Fig. 4. Distribution of NOx emission factors for commercial boiler.

3. 2 건물난방용 보일러

건물난방용 보일러의 배출계수는 산업용 보일러와 같은 방법으로 실험을 수행하였으며, 난방용 보일러 시설의 배출농도는 표 6과 같다.

NOx의 배출형태는 산업용 보일러와 마찬가지로 NO의 형태로 배출되는 것을 알 수 있으며, 농도는 35.0~124.9 ppm 범위에서 나타나는 것을 알 수 있다.

배출가스량(Gd)과 배기가스 중 NOx, CO 실측농도를 이용하여 배출계수를 산정하였는데, 배출계수 산정에 사용된 식은 산업용 보일러에서 사용된 식과 동일하며 계산된 배출계수를 용량별로 NOx 배출계수의 분포를 살펴보면 그림 4와 같다.

재확인 결과 1번 보일러의 경우 단속적으로 운전되어 CO농도가 비정상적으로 높아 배출계수 산정시에는 제외하였고 14개 자료를 배출계수 산정에 이용하였다. 용량별로 NOx 배출계수의 분포를 살펴보면 용량과는 상관없이 대부분의 보일러가 1.0~2.5 kg/10³m³-LNG 사이에 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

배출계수를 용량별로 정리하면 표 7과 같다. NOx의 경우에는 중, 대형 (4 Steam ton/hr 이상) 범위에서는 2.25 kg/10³m³로 유사한 배출계수가 나타났고 소형 (3 Steam ton/hr 이하)에서는 1.81 kg/10³m³로 이보다 낮은 배출계수가 나타났다. 그러나 전체적으로는 모든 용량에서 비슷한 수준을 나타내어 평균 2.09 kg/10³m³를 나타내어 산업용 보일러 보다 약간 높은 값을 보였다. CO는 보일러 용량이 커질수록 배출계수가 작아지고 있었으며 평균 0.70 kg/10³m³를 나타내고 있었다.

4. 배출계수 및 배출량 산정

4. 1 배출계수의 산정

각각의 시설에서 산정된 배출계수는 객관적인 자료로 사용하기 위해서는 배출계수에 대한 신뢰성 검토가 필요하다. 그래서 미국 EPA에서는 배출계수의 산정 지침을 마련하고 측정 데이터에 대하여 등급을 부여하고 그 데이터로 비롯된 배출계수에 또한 등급 표시를 하고 있다.

측정 데이터에 대한 등급은 A, B, C, D 등급으로 모두 4단계로 구분되어 있으며, 각 단계에 대한 기준은 다음 표 8과 같다.

배출 데이터에 대한 등급부여가 수행되면 배출계수 산정작업이 이루어지며, 다음의 과정을 통하여 최종적인 배출계수가 산정 된다.

- ① Averaging of Data : 배출계수는 대표성을 나타낼 수 있어야 하기 때문에 Emission Source Tes-

Table 8. Rating criteria of test data quality.

Test data quality	Criteria
A	Test are performed by a sound methodology and are reported in enough detail for adequate validation
B	Tests are performed by a generally sound methodology, but lacking enough detail for adequate validation
C	Tests are based on an unproven or new methodology, or are lacking a significant amount of background information
D	Tests are based on a generally unacceptable method, but the method may provide an order-of-magnitude value for the source

ting 및 Material Balance, Engineering Analysis 등을 통해 구한 배출자료의 평균값을 구하여야 하는데 산술평균값은 배출계수 개발에 있어서 가장 널리 사용되는 방법이다.

② Combing Tests of Different Quality Rating : 한 Source Category에 대한 배출계수 산정에 있어서 “A”~“D”까지의 등급이 다른 배출자료를 사용할 수 있다. 가장 이상적인 경우는 가장 신뢰성 있는 데이터로부터 가장 신뢰성 있는 배출계수를 개발하는 것이다. 즉 충분히 많은 A 등급의 데이터로부터 배출계수를 산정하는 경우이다.

③ Controlled Emission Factor/Uncontrolled Emission Factor : 배출계수는 방지시설의 유/무에 따라 구분되어질 수 있다. 즉 어떤 특정한 오염물질이 방지시설로 인하여 그 배출에 영향을 받는 경우에는 배출계수의 산정에 있어서 방지시설의 전, 후단의 배출계수를 따로따로 산정하여야 한다.

이러한 과정을 통하여 산정된 배출계수에도 역시 등급을 부여한다. 미국 EPA에서 배출계수에 대한 등급은 A~E단계로 총 5단계로 구분되어져 있으며, 이러한 미국에서의 배출계수를 개발하는 과정을 그림 5로 정리하면 다음 그림 5와 같다.

본 연구에서도 배출계수 평가를 위해서 그림 6과 같은 절차를 통해 객관적인 배출계수를 산정하고자 하였다.

오염물의 배출 상황 및 연료 사용 상황이 안정적인 상태가 아니거나 특이한 상황으로 판단된 측정자료를 제외하였다. 그 다음 대상 시설의 특성, 조사된

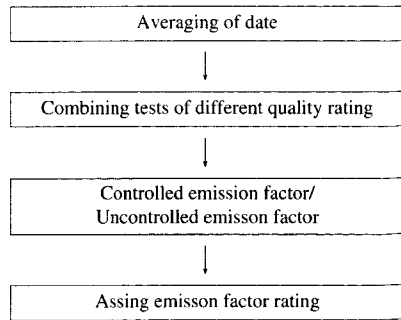


Fig. 5. Flow chart of emission factor evaluation in U.S. EPA.

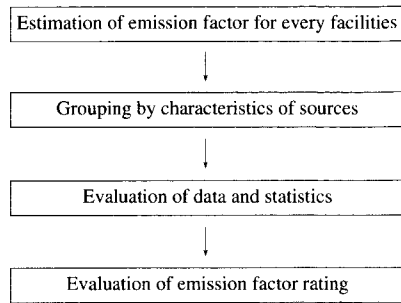


Fig. 6. Flow chart of emission factor evaluation.

배출계수의 분포, 오염물질 배출량 산출에 적용할 수 있는 배출원 분류체계, 필요한 활동도(연료사용량) 통계자료 활용의 용이성 등을 고려하여 배출원 구분을 적절하게 그룹화 하였다. 그리고 산업용 및 난방용 보일러의 측정치는 용량에 따라 큰 차이를 보이지 않고, 연료 사용량 통계가 용량별로 세분되지 않기 때문에 이를 그룹화 하였다.

그룹화된 측정 자료에 의하여 해당 배출원 부분의 배출계수를 정리하면 표 9와 같다. 배출계수 산정 자료에는 고려된 대상시설의 개수, 평균치, 범위, 표준편차, 변동계수도 함께 제시하였다.

집단간의 산포성을 비교할 때에 단순히 표준편차로 비교하지 않고 다음과 같이 변동계수(變動係數, coefficient of variation)를 계산하여 산포성을 비교하기도 한다. 변동계수란 평균치로서 나는 양으로 보통 백분율로 표시한다. 변동계수는 산포를 상대적으로 나타내는 것으로서 보통 변량이 음의 값으로 되는 일이 없을 경우에 쓴다. 변동계수 산출식은 식(4)와 같다.

$$\text{변동계수}(cv) = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \times 100 = \frac{\sigma}{x} \times 100 \quad (4)$$

즉 변동계수는 표준편차가 평균의 몇 %인가를 나타내는 계수이다. 이를 이용하여 배출계수의 대표성에 대한 판정을 할 수 있다.

산업용과 난방용 보일러의 NOx 배출계수는 조사 대상 시설 개수는 각각 15, 14개로 측정자료 개수가 많고 변동계수가 작아 배출계수의 산포성이 작아 대표성이 큰 것으로 평가된다. CO의 배출농도는 연소 시설의 운전 특성에 따라 배출농도의 차이를 보여 한 두 개 시설에서 CO농도가 높은 영향으로 변동계수가 커져서 NOx의 배출계수에 비하여 대표성이 낮

은 것으로 판단된다.

4.2 기존의 배출계수와 비교

현재 배출량 산출에 가장 널리 이용되는 손쉬운 방법은 배출계수를 이용하는 것이다. 현재 국내에서 사용되는 천연가스의 배출계수는 표 10과 같다. 배출계수 부문이 난방, 수송, 산업, 발전 등 큰 부문으로만 구분되어 있어 천연 가스 사용 연소 시설의 특성별 배출계수가 고려되지 못하고 있다.

한편 미국 EPA에서 제시하는 산업용, 상업용, 가정용 사용되는 보일러 시설에 대한 배출계수는 표 11과 같다.

유럽연합의 EEA 배출계수는 점오염원(Point Source) 계수와 면오염원(Area Source) 계수로 구분이 되어있다. 점오염원에 적용할 수 있는 시설로 300 MW 이하

Table 9. NOx and CO emission factors of industrial and commercial boiler burning LNG.

		Emission factor (kg/10 ³ m ³)			Standard deviation	Coefficient of variation
		Average	Max	Min		
NOx	Industrial boiler (15)	1.843	3.055	1.304	0.456	±24%
	Commercial boiler (14)	2.091	3.630	1.208	0.567	±27%
CO	Industrial boiler (15)	0.662	6.149	0.026	1.513	±228%
	Commercial boiler (14)	0.350	2.466	0.067	0.596	±170%

Table 10. Emission factors of combustion facilities burning LNG. (Unit: kg/10³m³)

	TSP	SO ₂	CO	HC	NOx
Commercial	0.003	0.01	0.64	0.18	2.62
Industry	0.1	0.01	0.56	0.09	2.00
Mobile	-	-	-	-	-
Electric Power	0.05	0.01	0.64	0.028	1.43

Source : 대기오염물질배출량(2000), 환경부, 국립환경연구원-환산계수: (kg = 1.97, L = 0.529 m³)

Table 11. Emission factor for NOx and CO from natural gas combustion.

Combustor type (MMBtu/hr heat input)	NOx		CO	
	Emission factor (lb/10 ⁶ scf)	Emission factor rating	Emission factor (lb/10 ⁶ scf)	Emission factor rating
Large wall-fired boilers (> 100)				
Uncontrolled (Pre-NSPS)	280	A	84	B
Uncontrolled (Post-NSPS)	190	A	84	B
Controlled-low NOx burners	140	A	84	B
Controlled-flue gas recirculation	100	D	84	B
Small Boilers (< 100)				
Uncontrolled	100	B	84	B
Controlled-low NOx burners	50	D	84	B
Controlled-low NOx burners /Flue gas recirculation	32	C	84	B
Tangential-fired boilers (All Size)				
Uncontrolled	170	A	24	C
Controlled-flue gas recirculation	76	D	98	D
Residential furnaces (< 0.3)				
Uncontrolled	94	B	40	B

Source : Air Chief Version 6.0, Table 1.4.-1., U.S. EPA

의 설비로 가스 터빈, 엔진, 보일러 시설을 적용할 수 있고, 면오염원에 적용할 수 있는 시설은 보일러, 로, 가스터빈, 엔진을 적용할 수 있다. 각 시설에 대한 배출계수는 표 12~표 13과 같다.

기존의 NOx 배출계수와 본 연구에서 산정된 배출

Table 12. NOx emission factors [g/GJ] for combustion plants (Point source).

Type of fuel	Thermal boiler capacity (MW)			Gas turbine		Stationary engine	
	>=300	>=50 and <300	<50	SC ^b	CC ^c	CI ^d	SI ^e
	DBB ^a boiler	DBB ^a boiler	DBB ^a boiler				
Natural gas	170	125	100	150-360	600	1,000	
	48-333	150	48-333	188	187	1,200	1,800

Source: Atmospheric Emission Inventory Guideline, September 1999, EEA

^a: Dry bottom boiler (DBB)

^b: Simple cycle

^c: Combined cycle

^d: Compression ignition

^e: Spark ignition

계수를 그림 7과같이 비교하여 보면 대체적으로 기존의 계수와 비슷한 수준에서 계수들이 산정되었다. 난방용 보일러 중에서 용량이 중형(4~10 Steam ton/hr)에서 2.25 kg/10³m³로 가장 높은 배출계수를 나타냈으며, 용량이 소형(1~3 Steam ton/hr)에서 1.81 kg/10³m³로 가장 낮은 배출계수가 나타났다. 난방용 보일러의 배출계수 평균치는 2.09 kg/10³m³로 산업용 보일러의 평균치 1.84 kg/10³m³보다 약간 높았다. 이들 평균 배출계수는 EU의 배출계수보다는 낮고, 미국 EPA의 배출계수 보다는 높은 중간값을 나타내고 있었다.

CO의 경우 산업용 보일러의 경우 EPA와 EU 배출계수의 중간정도 나타났고, 난방용 보일러의 경우에는 EPA, EU 배출계수 보다 낮게 산정되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 천연가스를 사용하는 30개의 산업

Table 13. Emission factor for area source.

(Unit : g/GJ)

	No technical-specification	Industrial combustion			Non-industrial combustion		
		No-specification	GT ^a	Stat. E ^b	No-specification	Small consumers	Residential combustion
NOx	32-307	62	81-360 165	75-1, 200 165	50 46	38	30
CO	2.4-500	10	8-123, 10	2.4-335, 136	25	41	25-250

Source : Atmospheric Emission Inventory Guideline, September 1999, EEA

^a: Gas turbines

^b: Stationary engines

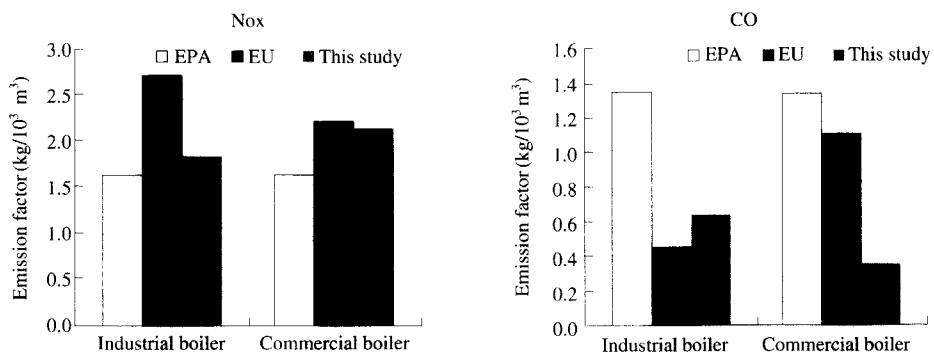


Fig. 7. Comparison of NOx and CO emission factors for boiler between this study and other researches (U.S. EPA and EU).

및 건물난방보일러에서 배출되는 대기오염물질의 배출특성을 조사하고 이를 활용하여 NOx와 CO의 배출계수를 산정하였다.

NOx 배출농도를 측정한 결과 산업용, 건물난방용 보일러 모두 NOx의 배출은 99% 이상이 NO의 형태로 배출되는 것으로 나타났다. 배출농도는 산업용 보일러의 경우 14~125 ppm 범위에서 측정이 되었으며, 건물난방용 보일러는 35~125 ppm 수준으로 산업용 보일러와 비슷한 수준에서 나타났다. CO의 농도는 대부분의 산업용, 건물난방용가 1~31 ppm으로 나타났으나 1~2개 시설에서 100 ppm 이상 높게 나타났다.

산업용 LNG보일러의 NOx 배출계수는 평균 1.84 kg/10³m³, 난방용 LNG보일러의 NOx 배출계수는 평균 2.09 kg/10³m³로 난방용이 산업용보다 약간 높은 값이 나왔다. 본 연구에서 산정된 배출계수를 선진국의 NOx 배출계수와 비교하여 보면 미국 EPA와 EU의 배출계수의 중간 값으로 평가되었다. CO 배출계수는 산업용 보일러의 경우 평균 0.65 kg/10³m³로 난방용 보일러의 평균 0.35 kg/10³m³보다 높게 나타났다.

산업용 및 난방용 보일러의 배출계수를 EPA, EU의 배출계수와 약간의 차이를 나타내는데 이는 측정 대상시설의 차이와 측정당시의 운전 조건등의 영향으로 인하여 차이가 나는 것으로 생각된다.

최근의 연료 사용량 변화를 살펴보면 천연가스의 경우 사용량이 크게 증가하고 있다. 앞으로 대기오염

물질 배출량을 줄이기 위해서는 천연가스의 사용량이 더욱 증가할 것으로 예상된다. 정확한 대기오염물질의 배출량을 산정하기 위해서는 연료별 사용 용도를 현재보다 세분하고, LNG 뿐만 아니라 타 연료에 대해서도 우리 실정에 맞는 배출계수를 지속적으로 개발하여 나가는 노력이 필요하다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (2000) 먼 오염배출원의 총먼지 및 PM-10 배출계수 개발.
- 국립환경연구원 (2000) 중·소형 연소시설의 질소산화물 배출계수 개발.
- 에너지관리공단 (1999) 가정용 가스보일러 효율향상방안 연구.
- 환경부, 국립환경연구원 (2001) 대기오염물질배출량.
- EPA (1995) AP-42 5th.
- EPA (1998) Air CHIEF version 6.0.
- EPA (1999) Handbook for Criteria Pollutant Inventory Development.
- EEA (1999) Atmospheric emission inventory guidebook 2nd edition.
- EU (1999) CORINAIR guide book.
- EIIP (1996) Preferred and Alternative Method for Estimation Air Emission.
- IPCC (1996) IPCC guideline for national greenhouse gas inventories.
- R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot (1960) Transport Phenomenon.