

## 서울지역 대형연소시설에서의 질소산화물 제거효율과 배출계수 산정

신진호 · 오석률 · 김정영 · 전재식 · 신정식  
서울특별시보건환경연구원 대기화학팀

## Evaluation of NO<sub>x</sub> Reduction Efficiency and Emission Factor from Large Combustion Facilities in Seoul

Jin-Ho Shin · Seok-Ryul Oh · Jeong-Young Kim · Jae-Sik Jeon · Jung-Sik Shin  
*Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment,  
Atmospheric Chemistry Team*

### Abstract

This survey was performed to investigate the NO<sub>x</sub> emission factors at 3 Municipal Solid Waste Incinerators(MSWI) and 5 Power generation boilers in Seoul. The NO<sub>x</sub> concentrations were measured before and after control systems. The results were as follows.

1) The NO<sub>x</sub> reduction efficiencies of Selective Catalytic Reduction (SCR) using ammonia as reducing agent ranged from 53.7% to 89.9%. The NO<sub>x</sub> reduction efficiencies of SCR using methanol as reducing agent, Non- Selective Catalytic Reduction (NSCR) using ethanol as reducing agent and low-NO<sub>x</sub> burner were 20.8%, 29.1% and 24.7%, respectively.

2) The NO<sub>x</sub> emission factors at A-1, A-2 and A-3 facilities of MSWI were 0.786, 0.127 and 0.594 kg NO<sub>x</sub>/ton fuel, respectively. The factors of A-1 and A-3 facilities were higher than the average value of Korea.

3) The NO<sub>x</sub> emission factors at B-1, B-2, B-3, B-4 and B-5 facilities of Power generation boiler were 2.109, 0.726, 4.106, 8.378 and 5.168 kg NO<sub>x</sub>/ton fuel, respectively. The factors of B-4 and B-5 facilities were higher than the average value of Korea.

Key words : NO<sub>x</sub> Reduction Efficiency, NO<sub>x</sub> Emission Factor

### I. 서 론

질소산화물(NO<sub>x</sub>)이란 연소시설 및 내연기관에서 생성되는 NO, NO<sub>2</sub>등을 지칭하는 오염물질로 식물보다 인체에 급·만성적으로 영향을 끼치고 심할 경우 폐수종, 혈압상승 등이 발생할 수 있으

며<sup>1)</sup> 휘발성유기화합물(VOCs)과 더불어 오존발생의 주요원인이 되는 물질이다.<sup>2)</sup>

그 생성기전으로는 연료에 함유된 질소성분이 연소시 산화하여 발생하는 Fuel NO<sub>x</sub>와 연소공기 중의 질소(N<sub>2</sub>)가 고온 연소시 산소(O<sub>2</sub>)와 반응하여 생성하는 Thermal NO<sub>x</sub>가 있으며, 연료중의 탄화

수소(HC)가 공기 중 질소(N<sub>2</sub>)와 반응하여 HCN Route를 통해 생성하는 Prompt NO<sub>x</sub>로 구별된다.<sup>3)</sup>

한편 전국적으로 저황유와 액화천연가스(LNG) 등 청정연료의 보급 확대로 지난 10년간 아황산가스와 총먼지의 오염도는 개선되고 있으나 이산화질소와 오존의 오염도는 계속 증가하고 있어 오염저감대책이 시급히 요구되고 있다.<sup>4)</sup>

최근 갈수록 심화되고 있는 서울을 비롯한 수도권 대기오염 상태를 10년내 경제협력기구(OECD) 평균수준으로 개선하기 위해 2004년부터 지역별 배출허용총량제가 단계적으로 실시될 예정이며 그 대상이 되는 대기오염물질은 질소산화물과 미세먼지(PM10)로 정하였다.<sup>5)</sup>

이에 따라 앞으로는 중·소형 소각로나 보일러에도 NO<sub>x</sub> 제거설비를 갖추어야 하며 또한 저감대책에 있어서도 질소산화물 발생원인이 연료에 함유된 질소성분보다는 고온연소시 공기중의 질소에 의한 Thermal NO<sub>x</sub>가 대부분이므로 연료의 개선만으로 질소산화물을 저감하기는 어려운 실정이다.<sup>6)</sup>

따라서 본 조사·연구에서는 서울지역의 도시고형폐기물소각장과 열병합발전시설을 대상으로 질소산화물 방지시설 진단과 후단의 농도를 측정하여 질소산화물 배출특성을 파악하고 질소산화물 배출계수를 산정함으로써 질소산화물 배출원에 대한 오염저감계획을 수립하고 효과적인 방지시설을 선정하는데 기초자료로 활용 하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사대상시설

본 연구에서 조사대상으로 한 시설은 서울시내에 소재한 고정배출원 중 도시고형폐기물 소각장 3개시설과 열병합발전시설 5개시설을 선정하였으며, 시설별 특징은 Table 1과 같다. 소각장 3개시설은 각 자치구에서 발생하는 생활폐기물을 LNG를 이용하여 소각하는 시설로서 탈질설비로 암모니아를 환원제로 사용하는 선택적촉매환원설비(SCR)가 설치되어 있고, 열병합발전시설은 산업에 필요한 증기나 가정용 난방, 온수공급 등을 위한 시설로서 사용연료로 B-1, B-2, B-3, B-4시설에서 LNG를, B-5시설에서는 LSWR(Lower Sulfur Waxy Residue)을 사용하고 있다. 또한 탈질설비로 B-1, B-2와 B-3시설은 2002년도에 SCR설비를 설치하였으며 환원제는 B-1, B-2시설에서 암모니아를, B-3시설에서는 메탄올을 사용한다. B-4시설은 2001년말에 비선택적촉매환원설비(NSCR)을 설치하여 환원제로는 에탄올을 사용하고 있으며, B-5시설은 보일러에 저NO<sub>x</sub> 버너가 있고 탈질을 위한 다른 방지시설은 설치되어 있지 않았다. 본 조사·연구는 질소산화물 방지시설에 주안점을 두어 방지시설 진단과 후단의 NO<sub>x</sub>농도를 비교하여 질소산화물 배출특성 및 배출계수를 산정하였으며, 각 조사대상별 시설공정도는 Fig. 1, 2와 같다.

Table 1. The present status of large combustion facilities in Seoul

	facility	capacity	fuel type	NO <sub>x</sub> control system
A-1	Incinerator	400ton/day×2기	LNG, municipal solid waste	SCR-ammonia
A-2	"	200ton/day×2기	"	"
A-3	"	300ton/day×3기	"	"
B-1	Boiler	150ton/day	LNG	"
B-2	"	104ton/day	"	"
B-3	"	40ton/hr	"	SCR-methanol
B-4	"	41ton/hr	"	NSCR-ethanol
B-5	"	100ton/hr 200ton/hr	LSWR	Low-NO <sub>x</sub> Burner

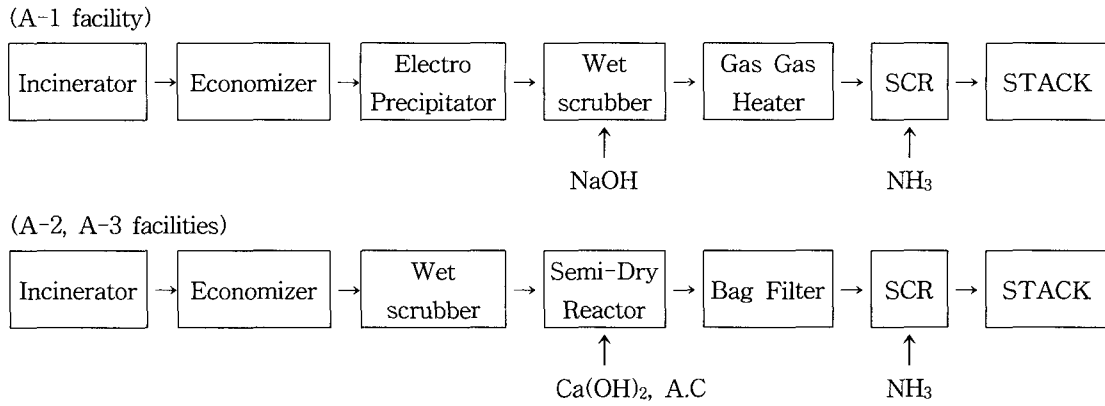


Fig. 1. Schematic of NOx emission at Incinerators.

## 2. 조사방법

### 2. 1. 질소산화물 측정방법

질소산화물의 측정은 전기화학적 방법으로 배출가스중의 NO와 NO<sub>2</sub>를 모두 NO<sub>2</sub>로 전환하여 NOx로서 표출되는 Bacharach 측정기를 이용하여 8개 조사대상시설에서 탈질설비 전·후 질소산화물의 농도를 각각 5분 간격으로 6회 측정하여 평균치를 구하였고, 배출가스 유량은 Perflow 유량계

를 이용하여 10분 간격으로 3회 측정하여 그 평균치를 질소산화물 배출계수 산정을 위한 자료로 사용하였다.

### 2. 2. 질소산화물 배출계수 산정

조사대상시설에 대한 질소산화물 배출량을 조사하기 위해 공정, 사용연료의 양, 방지시설 등에 대한 현황조사와 배출원에 대한 실측조사를 실시하였다. 질소산화물 배출계수는 단위연료 사용량에 대한 질소산화물 배출량의 비와 단위에너지량에

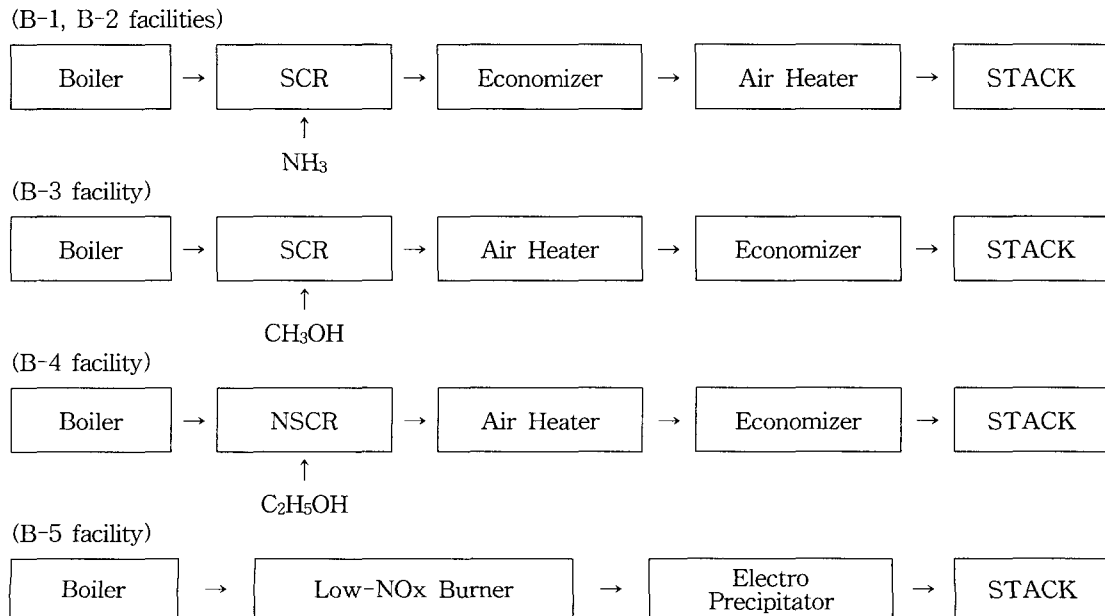


Fig. 2. Schematic of NOx emission at Power generation boilers.

대한 질소산화물 배출량 비의 두가지 경우로 산정하였으며 그에 따른 산출식은 다음과 같다.<sup>7)8)</sup>

2. 2. 1. 단위연료당 질소산화물 배출량  
(kg NOx/연료 ton)

$$= \frac{\text{질소산화물농도}(\text{mg}/\text{m}^3) \times \text{배출가스유량}(\text{m}^3/\text{hr}) \times 10^{-6}}{\text{연료사용량}(\text{ton}/\text{hr})}$$

2. 2. 2. 단위에너지당 질소산화물 배출량  
(kg NOx/Gcal)

$$= \frac{\text{질소산화물농도}(\text{mg}/\text{m}^3) \times \text{배출가스유량}(\text{m}^3/\text{hr}) \times 10^{-6}}{\text{연료의평균발열량}(\text{Kcal}/\text{Nm}^3) \times \text{연료사용량}(\text{Nm}^3/\text{hr}) \times 10^{-6}}$$

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 질소산화물 방지시설별 배출특성

본 조사·연구대상 시설의 질소산화물 방지시설비 전단과 후단의 질소산화물 농도를 각각 5분 간격으로 6회 측정하여 평균농도를 구한 다음, 제거효율을 산출한 결과는 Table 2와 같으며 A-1, A-2, A-3와 B-1, B-2시설에 설치된 가장 보편화된 탈질방식인 암모니아를 환원제로 사용하는 선택적촉매환원법(SCR, Selective Catalytic Reduction)이 53.7~89.9%의 높은 제거효율을 나타내었고, 같은 SCR방식이면서 환원제로 메탄올을 사용하는 B-3 시설에서는 상대적으로 낮은 20.8%의 제거효율을 나타내었다.

또한 B-4시설의 비선택적촉매환원법(NSCR, Non-Selective Catalytic Reduction) 및 B-5시설의

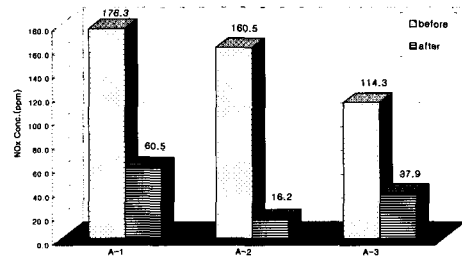


Fig. 3. Comparison of NOx concentrations before and after control systems at Municipal solid waste incinerators.

저NOx 버너설비도 질소산화물 제거효율이 29.1%와 24.7%로 낮게 나타났다.

그러나 촉매환원법에서는 환원제의 사용량이나 분사시스템 등에 의해서 제거율은 많은 차이를 보이고, 대기오염물질 배출업소에서는 대기환경보전법에 의한 배출허용기준 이하로 유지하기 위한 방편으로 방지시설을 운영하고 있어 단순히 SCR/NSCR 방지시설 자체에 대한 효능비교는 어려운 문제점이 있다.

각 대상시설별로 질소산화물 방지시설 전·후에서 측정된 질소산화물 농도의 평균치를 다음의 Fig. 3, 4에 나타내었다.

#### 2. 질소산화물 배출계수 산정결과

대상시설의 배출구에서 질소산화물 농도를 각각 5분 간격으로 6회 측정하여 평균 배출농도를 구하

Table 2. NOx removal efficiencies at large combustion facilities in Seoul.

	NOx con. before control system (ppm)	NOx con. after control system (ppm)	The average efficiency of NOx reduction (%)	NOx control system
A-1	176.3	60.5	65.7	SCR(ammonia)
A-2	160.5	16.2	89.9	"
A-3	114.3	37.9	66.8	"
B-1	115.0	53.2	53.7	"
B-2	110.7	20.4	81.6	"
B-3	99.4	78.7	20.8	SCR(methanol)
B-4	147.4	104.5	29.1	NSCR(ethanol)
B-5	298.2	224.5	24.7	Low-NOx burner

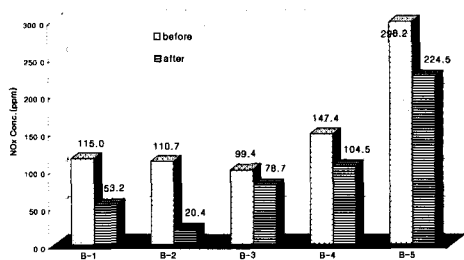


Fig. 4. Comparison of NOx concentrations before and after control systems at Power generation boilers

고, Perflow 유량계를 사용하여 10분 간격으로 3회 측정하여 평균 배출가스유량을 구한 값은 Table 3과 같으며, 이것을 이용하여 연료의 사용량과 발열량별로 산정된 질소산화물의 배출계수는 Table 4와 같다.

배출계수를 시설별로 살펴보면, 소각시설은 국립환경연구원<sup>10)</sup>에서 조사한 생활폐기물 소각시설의 전국평균 배출계수중 단위연료당 질소산화물 배출량 0.341 kg NOx/ton fuel보다 A-1시설에서 0.786 kg NOx/ton fuel, A-3시설에서 0.594 kg NOx/ton fuel로 높게 나타났으며, A-2시설에서는 0.127 kg NOx/ton fuel로 낮게 나타났다. 단위에너지당 질소산화물 배출량은 A-1, A-2, A-3시설에서 0.598, 0.076, 0.207 kg NOx/Gcal으로 생활폐기물 소각시

Table 3. Results of NOx measurement at large combustion facilities in Seoul

Facility	Parameter	NOx concentration (ppm)	Emission Flow Rate (Sm <sup>3</sup> /hr)
Incinerators	A-1	60.5	55569.7
	A-2	16.2	37498.6
	A-3	37.9	52780.7
Boilers	B-1	53.2	166616.0
	B-2	20.4	83605.8
	B-3	78.7	44587.8
	B-4	104.5	53289.7
	B-5	224.4	98132.0

설 전국평균값 1.251 kg NOx/Gcal보다 모두 낮게 나타났으며, 다른지역의 소각시설에서는 0.086~1.6 kg NOx/Gcal로 소각시설별로 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

열병합발전시설은 배출계수가 B-1시설에서 2.109 kg NOx/ton fuel, 0.176 kg NOx/Gcal이고 B-2시설에서 0.726 kg NOx/ton fuel, 0.055 kg NOx/Gcal으로 발전시설의 전국평균 배출계수 5.039 kg NOx/ton fuel, 0.373 kg NOx/Gcal보다 상당히 낮은 수치를 보이는데 이는 2002년에 새로이 설치된 SCR설비로 인해 배출되는 질소산화물의 농도가 상당히 저감된 효과가 있는 것으로 생

Table 4. NOx emission factors at large combustion facilities in Seoul.

Facility	Parameter	NOx Conc. (mg/m <sup>3</sup> )	Amount of fuel(ton/hr)	heating value (kcal/kg)	emission factor	
					kgNOx/ton	kgNOx/Gcal
Incinerators	A-1	124.2	8.778	1,314	0.786	0.598
	A-2	33.3	9.824	1,675	0.127	0.076
	A-3	77.8	6.914	2,866	0.594	0.207
Boilers	B-1	109.3	8.635	10,550 (kcal/Nm <sup>3</sup> )	2.109	0.176
	B-2	41.9	4.826	10,693 (kcal/Nm <sup>3</sup> )	0.726	0.055
	B-3	161.6	1.755	10,550 (kcal/Nm <sup>3</sup> )	4.106	0.248
	B-4	214.6	1.365	9,530 (kcal/Nm <sup>3</sup> )	8.378	0.484
	B-5	460.8	8.750	10,828	5.168	0.477

각되며, 같은 SCR설비이면서 환원제로 메탄올을 사용하는 B-3시설에서는 4.106 kg NOx/ton fuel, 0.248 kg NOx/Gcal으로 배출계수가 산정되었고, NSCR-ethanol 탈질설비인 B-4시설에서는 배출계수가 8.378 kg NOx/ton fuel, 0.484 kg NOx/Gcal으로, 저NOx버너를 사용하는 B-5시설에서는 5.168 kg NOx/ton fuel, 0.477 kg NOx/Gcal으로 비교적 높은 배출계수가 산정되었다. 다른지역 발전시설의 NOx 배출특성 조사결과를 LNG를 사용하는 시설과 다른 연료를 사용하는 시설로 나누어 살펴보면,

LNG를 사용하는 발전시설 중 한화에너지의 1.423~1.556 kg NOx/Gcal을 제외하면 대부분 0.038~0.359 kg NOx/Gcal로 한화에너지발전소의 배출계수가 다른시설에 비해 크게 나타나고 있으며, 이는 한화발전소의 연소방식이 내연기관 방식이기 때문이며, LSWR을 사용하는 사이즈 이전열병합발전소는 0.35 kg NOx/Gcal으로 나타났다.

#### IV. 결 론

대형연소시설인 생활폐기물 소각장 3개시설과 열병합발전 5개시설에 대한 시설별 질소산화물 배출특성을 알아보기 위하여 질소산화물 방지시설 진단과 후단의 농도를 측정하고 그 배출계수를 산정한 결과는 다음과 같았다.

1. 암모니아를 환원제로 사용하는 SCR설비의 질소산화물 제거효율은 53.7~89.9%의 범위를 보인 반면, 메탄올을 환원제로 쓰는 SCR설비와 에탄

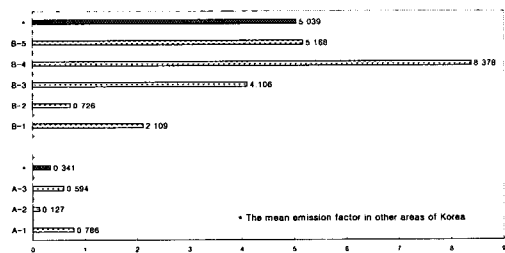


Fig. 5. Comparison of NOx emission factors. (kg NOx/ton fuel)

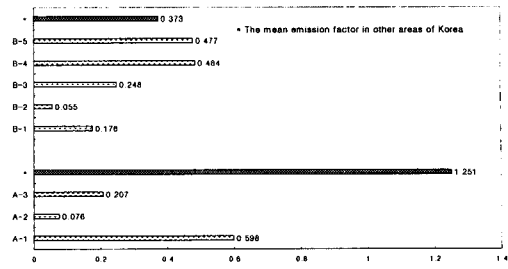


Fig. 6. Comparison of NOx emission factors. (kg NOx/Gcal)

올을 환원제로 쓰는 NSCR, 저NOx버너의 질소산화물 제거효율은 각각 20.8%, 29.1%, 24.7%로 낮게 나타났다.

2. 생활폐기물소각장인 A-1, A-2, A-3시설에서의 질소산화물 배출계수는 단위연료당 질소산화물 배출량이 각각 0.786, 0.127, 0.594 kg NOx/ton fuel로서 국립환경연구원에서 조사한 전국 평균 배출계수 0.341kg NOx/ton fuel보다 A-1, A-3의 2개 시설에서 높게 나타났으나, 단위에너지당 질소산화물 배출량은 0.598, 0.076, 0.207 kg NOx/Gcal로 전국 평균배출계수 1.251 kg NOx/Gcal보다 모두 낮게 나타났다.
3. 열병합발전시설중 SCR설비인 B-1, B-2, B-3시설에서의 질소산화물 배출계수는 단위연료당 질소산화물 배출량이 각각 2.109, 0.726, 4.106 kg NOx/ton fuel로서 발전시설 전국평균 배출계수 5.039 kg NOx/ton fuel보다 낮게 나타났으나, NSCR설비 및 저NOx 버너를 사용하는 B-4, B-5시설에서는 각각 8.378, 5.168 kg NOx/ton fuel로 높은 배출계수가 산정되었으며, 단위에너지당 질소산화물 배출량은 B-1, B-2, B-3시설에서 각각 0.176, 0.055, 0.248 kg NOx/Gcal으로 전국평균 배출계수 0.373 kg NOx/Gcal보다 낮게 산정되었으나 B-4, B-5시설에서는 각각 0.484, 0.477 kg NOx/Gcal으로 높게 산정되었다.

## V. 참고 문헌

1. Haggren-Smith, A.J. : Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog, Industrial and Engineering Chemistry, p 44, 1952.
2. U.S. EPA : AP-42, Fifth Edition, Vol. 1. 1996.
3. Castaldini, C. : Environmental Assessment of NO<sub>x</sub> Control on a Compression Ignition Large Bore Reciprocating Internal Combustion Engine, EPA-600/7-86/011, U.S. EPA, 1984.
4. 5. 서울특별시 : 서울의 환경, pp 71, 88, 2001.
6. 홍성수, 박종원, 정덕영, 박대원, 조경목, 오광중 : 질소산화물의 촉매반응에 의한 저감기술에 관한 연구, 한국대기보전학회지 제14권 1호, p 26, 1998.
7. 김성미 : 가정용 난방연료 연소시 가스상 물질의 배출계수 추정에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위 논문, p 29, 1993.
8. 박덕신 : 수원지역에 적합한 분산모델의 상대적인 평가 및 배출계수에 관한 연구, 경희대학교 석사학위 논문, p 20, 1995.
9. U.S. EPA : National Air Pollution Emission Estimates, 1970~1981, EPA-450, 1982.
10. 국립환경연구원 : 대형연소시설의 NO<sub>x</sub> 배출계수 산정을 위한 공동조사, p 49, 2000.