

고형연료제품 사용시설에서의 SNCR의 운전조건에 따른 NOx 배출특성

서제우^{1,2}, 김영희^{1,*}

¹호서대학교 벤처대학원 융합공학과
06724 서울특별시 서초구 남부순환로 2497

²(주)원일씨앤씨
15477 경기도 안산시 단원구 광덕대로 142, 407호

(2021년 11월 22일 접수; 2021년 12월 9일 수정본 접수; 2021년 12월 13일 채택)

NOx Emission Characteristics with Operating Conditions of SNCR in SRF Usage Facilities

Je-Woo Seo^{1,2}, and Younghee Kim^{1,*}

¹Department of convergence engineering, Graduate school of Venture, Hoseo University
2497, Nambusunhwan-ro, Seocho-gu, Seoul, 06724, Republic of Korea

²WonilC&C Co., Ltd
#407, 142, Gwangdeogdae-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15477, Republic of Korea

(Received for review November 22, 2021; Revision received 12월 9, 2021; Accepted 12월 13, 2021)

요 약

본 연구결과에서 연소로 내 온도가 848.27 ~ 1,026.80 °C 범위로써 평균 976.61 °C으로 나타났으며, 온도증가에 따라 NOx 농도는 증가하는 경향으로 나타났다. 요소 사용량은 291.00 ~ 693.00 kg d⁻¹로 평균 542.34 kg d⁻¹로 나타났으며, 요소 사용량의 증가에 따라 NOx 농도는 감소하는 경향으로 나타났다. 체류시간이 3.38 ~ 9.17 s로 평균 약 5.22 s로써 설계시 고려한 2 s 이내 보다 약 2.61 배 크게 나타났다. 이는 SRF 투입량 허가조건인 1,950 kg h⁻¹ 대비 평균 SRF 투입량이 약 55.71%인 1,086 kg h⁻¹로써 연소실 면적은 일정하나 SRF 연소량의 감소에 따라 배가스량 감소에 따른 체류시간이 증가하는 것으로 판단된다. O₂/CO 비는 847.05 ~ 14,877.34로 평균 3,111.30으로 나타났고, O₂/CO 비 증가에 따라 NOx 농도는 다소 증가하는 경향으로 나타났다. 온도 증가와 O₂/CO 비의 증가에 공기 중 질소 성분과의 연소반응이 증가하여 NOx 농도가 다소 증가하였으며, 요소 투입량 증가와 체류시간이 증가할수록 배가스의 NOx와의 반응량이 증가하여 처리 후의 NOx 농도는 다소 감소하는 경향으로 나타났다. TMS 자료에 의한 굴뚝 출구에서의 NOx 농도는 7.88 ~ 34.02 ppm으로 평균 19.92 ppm으로써 배출허용기준 60 ppm 이내로 배출되었다. NOx 배출계수는 1.058 ~ 1.795 kg ton⁻¹으로써 평균 1.450 kg ton⁻¹으로 나타났다. 본 연구결과 NOx 배출계수는 기타 고체연료인 최대 배출계수 5.830 kg ton⁻¹ 약 24.87%로 나타났으며, 기타 합성수지류와 기타 사업장폐기물의 배출계수인 1.817 kg ton⁻¹, 3.322 kg ton⁻¹ 대비 각각 79.80%, 43.65%로 나타났다. 기 유사 연구결과인 NIER 고시(2005-9)의 RDF 배출계수인 1.400 kg ton⁻¹과 유사하게 나타났으며, 최대로 나타난 SRF의 경우인 배출계수 13.210 kg ton⁻¹에 비해 약 10.98%로 나타났다. 따라서 NOx의 배출계수는 편차가 크게 나타났다.

주제어 : 고형연료제품, 선택적비촉매환원반응장치, 질소산화물, 요소, 배출계수

Abstract : The results of this study shows that the combustor temperature ranged from 848.27 to 1,026.80 °C, averaging about 976.61 °C, and the NOx concentration increased as the temperature increased. The urea usage ranged from 291.00 to 693.00 kg d⁻¹, averaging about 542.34 kg d⁻¹, and the NOx concentration decreased as the urea usage increased. Residence time was about 3.38 to 9.17 s, averaging about 5.22 s, about 2.61 times larger than the 2 s of the design details. This is 1,086 kg h⁻¹, averaging about 55.71%, compared to the 1,950 kg h⁻¹ SRF input permission standard. The combustion chamber area is constant, but the residence time is shown to increase with the decrease of exhaust gas. The O₂/CO ratio was 847.05 to 14,877.34, averaging about 3,111.30, and the NOx concentration slightly increased as the O₂/CO ratio increased. As the combustor temperature and O₂/CO ratio increased, the combustion reaction with nitrogen in the air increased and the NOx concentration slightly increased. As the

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yhkim514@hoseo.edu; Tel: +82-2-2059-2354; Fax: +82-2-2055-1405

doi: 10.7464/ksct.2021.27.4.350 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

urea usage and residence time increased, the NOx concentration decreased slightly with an increase in reactivity with NOx. The NOx concentration at the stack ranged from 7.88 to 34.02 ppm with an average of 19.92 ppm, and was discharged within the 60 ppm emission limit value. The NOx emission factor was 1.058 to 1.795 kg ton⁻¹, averaging about 1.450 kg ton⁻¹. This value was about 24.87% of the maximum emission factor of 5.830 kg ton⁻¹ of other solid fuels. Other synthetic resins and industrial wastes were 79.80% and 43.65% compared to 1.817 kg ton⁻¹ and 3.322 kg ton⁻¹, respectively. This value was similar to 1.400 kg ton⁻¹ of RDF in the NIER notice (2005-9), 10.98% compared to the maximum SRF of 13.210 kg ton⁻¹. Therefore, the NOx emission factor had a large deviation.

Keywords : Solid Refuse Fuel (SRF), Selective Non-Catalytic Reactor (SNCR), NOx, Urea, Emission factor (EF)

1. 서 론

전 세계의 에너지 수요는 지난 수년간 대부분 화석연료 사용의 편재화와 고갈로 인해 경제·사회·환경 등의 분야에서 많은 문제를 야기하고 있다[1]. 화석연료의 고갈과 유가상승으로 인해 산업에 필요한 열원을 생산하기 위한 에너지원의 다양화와 신재생에너지 개발의 중요성은 날로 증대되고 있다[2,3]. 에너지 자원이 부족한 우리나라는 안정적인 에너지 확보를 위해 시급히 신재생에너지의 개발과 생산[4] 및 폐기물 등을 활용한 폐자원에너지로써의 재활용 방안 등을 해결해야 한다.

최근 화석연료의 연소 및 탈원전 시대를 극복할 수 있는 주요 대안으로 신재생에너지에 대한 관심이 집중되고 있다. 화석연료의 연소에 따라 주로 배출되는 일산화탄소(CO), 메탄(CH₄), 황산화물(SO_x)과 미세먼지 전구물질중 하나이며, 발전소 소각시설에서 배출되는 대표적인 대기오염물질인 질소산화물(NO_x)[5], 지구온난화 유발물질로 배출저감이 요구되는 아산화질소인 N₂O[5] 등 가스상물질과 입자상물질인 먼지(total suspended particles, TSP), PM₁₀, PM_{2.5}, 크롬(Cr), 니켈(Ni) 등 중금속류 등을 포함하는 배가스는 지구온난화(Global warming) 및 환경오염 문제를 야기하고 있다[1,6]. 이러한 환경·경제·사회적 측면에서의 해결책의 대안으로써 폐자원의 재활용 증대를 위하여 제조공정을 거쳐 고형연료화한 고형연료제품인 SRF와 Bio-SRF 등 연료개발이 각광을 받았었다[6,7].

그러나 최근 국내에서 발생하는 가연성 폐기물을 전처리하여 제조하는 SRF는 생산과정에서 발생하는 악취, 분진 등의 환경문제로 사회적 문제가 발생하고 있다[4,8]. SRF는 중금속 등 상당한 유해물질이 포함된 경우가 많아 고형연료의 품질에 대하여 이용자로부터 처리에 불만이 높고, 대기오염물질 배출이 문제로 대두되고 있다. SRF 사용시설의 입지 선정문제, 환경 위해요소, 악취 민원 등의 사회적 갈등이 심화되고 있으며, 폐기물을 원료로 이용하는 것에 대한 환경위해로 우려하는 목소리가 커지고 있어서 관련 제도, 운영관리 및 기술개발 등의 개선방안이 요구된다.

지난 수년간 국내외적으로 폐기물소각시설 및 SRF 사용시설에서 대기오염물질의 발생특성, 처리방법 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내 총 45개의 고형연료 사용시설에 대해 현장 측정을 실시하여 대기오염물질 배출량 산정을 위한 NOx 배출계수를 개발하였으며[4], SRF의 질소산화물(NO_x) 배출계수는 13.210 g kg⁻¹으로써 국내의 선행연구에서 제시한 배출계수에 비해 높게 나타났다[4]. 5 ton d⁻¹ 규모 SRF 전용 연소

보일러에서의 NOx의 생성과 저감에 대하여 연구하였으며[9], SNCR 공정에서 첨가제 주입에 따른 NOx 반응특성을 연구하였다[10]. 고체연료를 사용하는 화력발전시설 3기를 선정하여 먼지 등 10개 항목을 분석하여 방지시설 후단에서 대기오염물질을 실측하여 NOx의 uncontrolled (미처리된) 배출계수를 도출하였는데[11], NOx 배출 평균농도는 19.34 ~ 68.89 ppm, NOx 배출계수는 0.75 ~ 8.54 g kg⁻¹으로 나타났다[11]. 파일럿 규모의 흐름반응기에서 유무기 첨가제가 NOx의 선택적무촉매환원반응에 미치는 영향을 연구하였는데[12], NOx 저감효율은 반응기의 체류시간과 초기 NOx 농도 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 연소공정 내에서 질소산화물 배출을 저감하는 SNCR 내부의 화학반응 및 저감효율에 대한 수치해석을 수행하였다[13].

NOx 제거를 위해 주로 사용하는 SNCR은 1975년 미국의 EXXON사에 의해 개발된 Thermal DeNOX 공정 이후에 암모니아(NH₃) 및 요소(urea)와 같은 질소계열의 환원제를 연소로 내부의 850 ~ 1,100 °C에서 분사하여 환원을 유도하는 공정이다. 환원제 저장 및 분사를 위한 공정만이 필요하여 설치비용이 저렴하고 경제적이며, 공정 구성이 단순하여 유지관리가 용이한 장점이 있다[5]. 따라서 기존 설비에 적용이 용이하며, 운영비가 적은 장점으로 인해 여러 곳에서 기술적용이 이루어지고 있다. 반면에 적절한 탈질효율을 달성하기 위해서는 로내의 여러 가지 운전인자로서 환원제의 종류와 화학양론비(normalized stoichiometric ratio, NSR), 배가스의 적절한 혼합, 적정 온도영역, 체류시간, 환원제 분사위치, 첨가제, 산소함량, 수분 등을 고려하여 최적 조건으로 유지시켜야 하는 단점이 있다[10]. 이러한 운전조건들은 폐기물이나 SRF의 성상, 보일러나 소각로의 형태와 운영상황에 따라 변화가 크며, NOx의 제거효율에 영향을 받게 된다. 따라서 SNCR을 적용할 경우에는 현장에 따라 최적 효율을 얻을 수 있는 반응영역을 선정하여 이 영역에 환원제를 분무하여 주는 것이 중요하며, NOx 제거효율을 향상시키기 위한 다양한 연구가 지난 수년간 계속되고 있다.

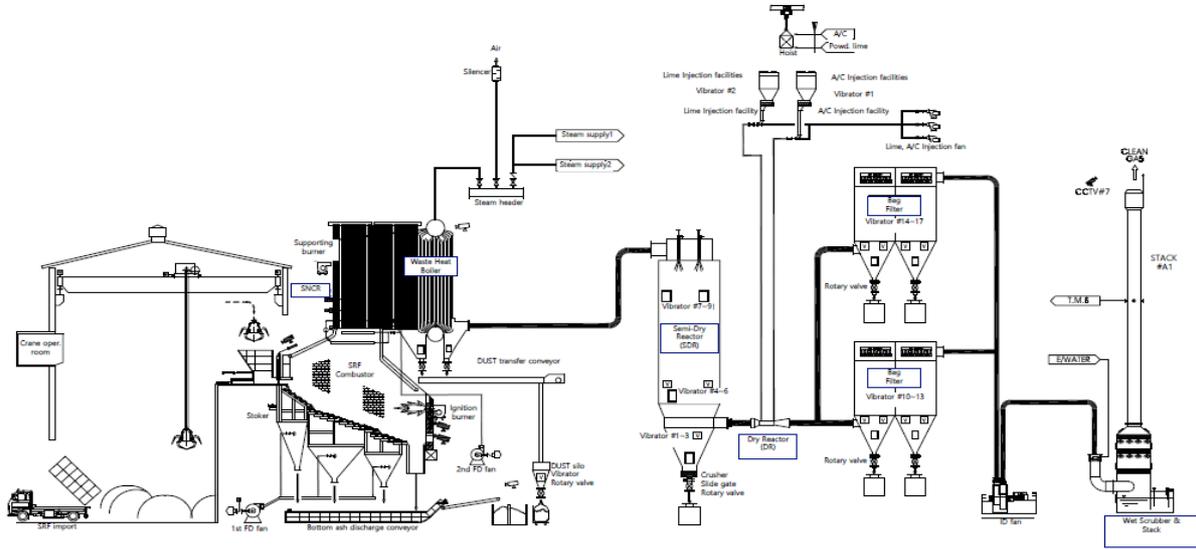
본 연구의 목적은 실제 운영된 A사업장에서의 TMS 데이터와 운전자료 및 이론적인 설계내역서 자료를 고려하여 SNCR 공정에서 SRF의 투입 특성, 연소로내의 온도, 요소 사용량, 체류시간, O₂/CO 비 등의 운전조건 변화에 따른 NOx의 배출특성을 비교분석하고, 이에 따른 NOx 배출계수를 산정하여 기 연구결과와 비교분석하였다. 향후 SRF 사용시설 및 폐기물 소각시설에서 SNCR 공정의 운전조건에 따른 NOx의 배출특성 및 배출계수의 기초 연구자료로 활용하고자 수행하였다.

Table 1. Main Characteristics of SRF

Item	Form	Three ingredients (%)							Heating value (kcal kg ⁻¹)			Remark		
		Combustible							Ash	Water	Higher heating value (Hh)		Lower heating value (Hl)	HI/Hh (%)
		C	H	O	N	S	Cl	Sub-tot	A	W				
CASE1	Non-forming	53.26 (3)	6.58 (4)	15.94 (3)	0.83 (2)	0.24 (1)	0.25 (4)	77.10 (4)	11.08 (1)	11.82 (2)	5,879.81 (3)	5,453.57 (3)	92.75 (2)	Rank
CASE2		58.12 (1)	7.19 (2)	15.53 (4)	0.15 (4)	0.07 (4)	0.32 (3)	81.38 (2)	7.65 (4)	10.97 (3)	6,494.05 (2)	6,039.97 (2)	93.01 (1)	Rank
CASE3		54.34 (2)	9.89 (1)	18.82 (2)	1.35 (1)	0.21 (2)	0.84 (2)	85.45 (1)	8.41 (3)	6.14 (4)	6,969.54 (1)	6,398.64 (1)	91.81 (4)	Rank
CASE4		49.93 (4)	6.99 (3)	19.14 (1)	0.76 (3)	0.12 (3)	0.88 (1)	77.82 (3)	8.67 (2)	13.51 (1)	5,610.48 (4)	5,151.96 (4)	91.83 (3)	Rank
Min		49.93	6.58	15.53	0.15	0.07	0.25	77.10	7.65	6.14	5,610.48	5,151.96	91.81	
Max		58.12	9.89	19.14	1.35	0.24	0.88	85.45	11.08	13.51	6,969.54	6,398.64	93.01	
Average		53.91	7.66	17.36	0.77	0.16	0.57	80.44	8.95	10.61	6,238.47	5,761.03	92.35	

Table 2. Specification and operating condition

Item		Unit	Value	Remark		
Fuel and Oper condition	Admission condition	SRF type	-	SRF (Waste synthetic resin, Soft vinyls)	Max.	
		SRF usage	kg d ⁻¹	46,800	Max.	
		Oper. cond.	-	24 h d ⁻¹ , 300 d yr ⁻¹	Max.	
		Flow	Sm ³ h ⁻¹	25,736.03	Max.	
		Combustion method	-	Stoker type		
		EAR (m)	-	1.80		
	This study	SRF type	4 type	-	SRF (Waste synthetic resin, Soft vinyls (CASE1 ~ CASE4))	
		SRF usage	kg d ⁻¹ %	19,450 ~ 36,950 (avg. 26,073.52) 41.56 ~ 78.95% (55.71%) by admis. cond.		
		Oper. cond.	-	24 h d ⁻¹ , 300 d yr ⁻¹		
		Flow	Sm ³ h ⁻¹	4,154.12 ~ 10,982.61 (avg. 7,845.53)		
		Urea usage	kg d ⁻¹	291.00 ~ 693.00 (avg. 542.34)		
		EAR (m)	-	1.80		
SNCR	Comb. area	m ²	101.4 (1 st : 55.2, 2 nd : 46.2)			
	Temp.	°C	848.27 ~ 1,026.80 (avg. 976.61)			
	Resi. time	s	3.38 ~ 9.17 (avg. 5.22)	over 2 s		
	O ₂ /CO	-	847.05 ~ 14,87734 (avg. 3,111.30)			
TMS system	Temp.	-	R-type (DS2850, Dongyang, Korea)			
	NOx	-	NDIR (ZKJ-4, FUJI, Japan)			
	O ₂	-	Electrochemical (DIAS-33000Z, Dasan, Korea)			
	CO	-	NDIR (ZKJ-4, FUJI, Japan)			
	Flow	-	NDIR (Pitot tube, VOT-03D, Duil, Korea)			
	Data Log.	-	EMS-365D (Duil, Korea)			



※ APCD: Air Pollution Control Device, SNCR: Selective Non-Catalytic Reactor, SDR: Semi-Dry Reactor, DR: Dry-Reactor, B/F: Bag-filter, Scrubber: Wet Scrubber, etc.

Figure 1. Main process of the SRF usage facilities.

2. 실험방법

2.1. 실험재료 및 대상

경기도 소재 A사업장에서 운영했던 2019년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 동안의 TMS 측정자료, 실제 설비운전에 사용된 연료(SRF) 및 원료사용량 등의 자료를 확보하여 비교분석하고, 다소 부족한 자료(연소로 O₂, CO 농도, NO_x 제거효율 적용치(약 60%) 등)를 이론적인 설계내역 자료를 활용하였다.

연료 및 원료 사용특성에 따른 결과와 이론적 설계내역서 자료, NO_x 농도, 온도, O₂, CO 등의 농도 측정은 굴뚝에서 설치되어 2019년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 30분 간격으로 전송된 TMS 자료를 한국환경공단의 Cleansys (<https://cleansys.or.kr/index.do>)에서 다운로드한 후, 적절한 자료 도출을 위하여 Equation (1)과 측정자료의 구간추정으로 많이 활용하는 신뢰구간(confidence interval, CI)을 적용하였다. 본 연구에서는 99% 신뢰구간을 적용하였으며, Equation (1)과 같다[4].

$$\text{모평균의 99\% 신뢰구간} = \bar{X} \pm 2.58 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

(X: 표본평균, s: 표본표준편차, n: 표본의 크기)

Equation (1)을 적용하여 99% 신뢰구간에 포함되지 않는 측정 최솟값과 최댓값 등의 측정 확률이 낮은 값은 제외하였다. 적절하게 도출된 통계자료를 이용하여 일자별로 1일 단위의 평균농도 등을 산정하여 비교분석하였다.

본 연구에서 사용한 SRF의 종류에 따른 원소 조성을 고려한 삼성분, Dulong 식에 의해 산정된 발열량과 각 조건별 순위를 Table 1에 나타내었고, SRF의 종류, 환경인허가 조건상의 기준, TMS data 자료 및 운전조건 등을 Table 2에 나타내었다.

본 연구에 사용된 SNCR 설비는 SRF 연소시설 약 25,736

Sm³ h⁻¹급으로써 연소로 후단에 설치되어 있으며, 적용된 SRF 사용시설에 대한 주요 대기방지시설의 개요도를 Figure 1에 나타내었다.

고형연료제품 사용시설(연소로) → 폐열보일러(Waste Heat Boiler) → 산화환원에 의한 시설(SNCR) → 흡수에 의한 시설(Semi-Dry Reactor, SDR) → 흡착에 의한 시설(Dry Reactor, DR) → 여과집진시설(Bag Filter, B/F) → 흡수에 의한 시설(Wet Scrubber, W/S) → ID FAN → STACK 등의 순으로 구성되어 있다. SRF 사용시설의 연소부하율은 허가조건 대비 약 40 ~ 95%, 연소방식은 화격자연소방법, 연소실 온도는 약 840 ± 250 °C 등으로 운전된 자료를 활용하였다. SRF 연소시설에서 SRF 연소후 SNCR 공정을 거쳐 폐열보일러에 의해 증기를 생산하며, 이 과정에서 배가스의 온도는 약 200 °C로 감소된 후, SDR 반응기에 유입된다. 운전조건이 반영될 수 있도록 주요 설비들이 구성되어 있고, 반응기 내의 요소 분사를 위해 노즐이 설치되어 있다. 주요 가스분석 및 데이터 획득을 위하여 TMS와 이론적 설계내역을 참고하여 NO_x의 농도분포를 실시간 감시할 수 있도록 하였으며, 그 외의 O₂, CO, TEMP 등의 자료를 확보하여 활용하였다. 또한 가스성분 뿐만 아니라 온도 및 압력 데이터도 모니터링하여 SRF 연소시설의 실시간 운전 자료 획득 및 부하변동에 따른 실험오차를 최소화하였으며, 유량조절 및 요소 주입량 조절을 위해 자동제어시스템이 구축되어 있다.

2.2. 연구방법

A사업장에서 발생하는 주요 대기오염물질은 TSP, SO_x, NO_x, HCl 등이 있는데, 이 중에서 NO_x 제거를 위해서는 선택적 촉매환원(selective catalytic reduction, SCR) 설비가 없는 SNCR 설비만 있는데, 점차 배출허용기준이 강화되고 있어

NOx 배출특성을 비교분석하기 위하여 SNCR 공정에서의 운전 조건인 연소로 내 온도, 체류시간, 환원제 종류, 요소 사용량, 체류시간, NSR 첨가제, 노즐위치 등 다양한 영향인자를 고려할 수 있다.

본 연구에서의 실험조건은 SRF 사용량 19,450.00 ~ 36,950.00 kg d⁻¹, 요소 사용량 291.00 ~ 693.00 kg d⁻¹, 연소로 내의 온도 약 848.27 ~ 1,028.80 °C, 체류시간 3.38 ~ 9.17 s, O₂/CO 비 847.05 ~ 14,877.34 등으로 변경시켜 NOx 배출특성을 비교·검토하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 운영중인 A사업장의 운전조건, TMS 자료 및 이론적 설계내역 자료를 검토하고, 주요 대기오염물질인 TSP, SOx, NOx 중 NOx를 선정하여 연소로 내 온도, 요소 사용량, 체류시간, O₂/CO 비 등에 따른 NOx 배출특성을 비교분석하였다. 또한 TMS 자료의 NOx 농도로부터 NOx 제거효율 60%를 고려하여 발생농도를 산출하고, 배가스량, SRF 사용량 등의 운전조건에 따른 NOx 농도를 배출량으로 환산하기 위해 NOx의 대기오염물질 배출계수를 Equation (1)을 적용하여 산출하였다.

$$EF = \frac{C \times Q_{dry} \times 10^{-3}}{U} \quad (2)$$

여기서,

EF : 대기오염물질 배출계수(g kg⁻¹ 또는 kg ton⁻¹)

C : 대기오염물질 농도(mg Sm⁻³)

Q_{dry} : 건배가스 유량(Sm³ h⁻¹)

U : 연료사용량(kg h⁻¹)

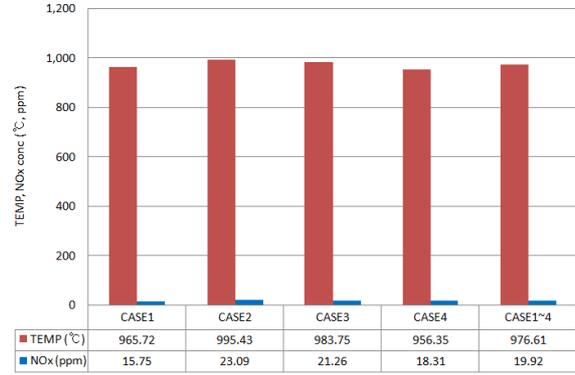
국립환경과학원에서 고시하고[14] 있는 대기오염물질 배출계수와 동일한 조건을 적용하기 위해 방지시설을 통과하지 않은(uncontrolled, 미처리된) 값으로 환산이 필요하다. 따라서, 시료채취 시 대상 시설과 연계된 방지시설의 실제 방지효율을 사업장에서 입수하여 각각의 방지시설을 통과하지 않은 농도로 환산하였다. 대기오염물질 농도(C)는 방지시설 후단에서 측정된(controlled, 처리 후 배출된) 값으로부터 NOx 제거효율 60%를 고려하여 역산출한 후 활용하였다. 도출된 NOx 배출계수를 유사한 기 연구결과와 비교분석하였다.

3. 결과 및 고찰

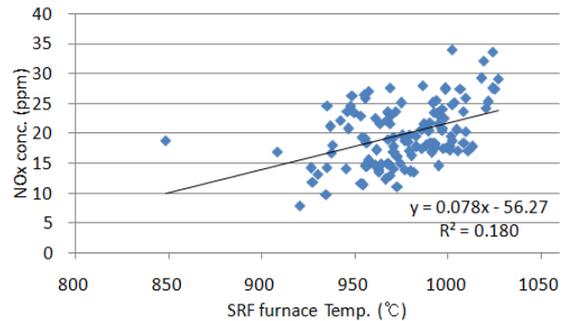
3.1. 연소로 내의 온도에 따른 NOx 배출특성

SRF 연소로 내부에서부터 굴뚝 출구까지 이론적 설계내역에 의한 결과와 TMS 자료를 활용하여 도출된 주요 SNCR 방지시설 설비에서의 온도 변화에 따른 NOx 농도변화를 Figure 2에 나타내었다.

TMS 자료에서의 온도는 SRF 연소로와 굴뚝 출구에서만 전송되고 있으며, 다른 방지시설에서의 출구온도는 전송되지 않는다. SRF의 종류별 사례1 ~ 사례4까지 이론적으로 도출된 SRF 연소로 내에서의 온도는 1,004.94 ~ 1,054.19 °C로써 평균 온도는 약 1,029.88 °C로 나타났으며, TMS 자료에서 도출된 연소로 내에서의 온도는 848.27 ~ 1,026.80 °C로써 평균온도는 약 976.61 °C로 나타났다. TMS 출구온도는 이론적 설계내역에서



(a) SRF type



(b) Temperature

Figure 2. Comparison of NOx concentration with temperature in SNCR process.

도출된 온도 대비 약 94.83%로 나타났다.

사례1은 연소로 온도가 920.41 ~ 1,001.48 °C 범위로써 평균 965.72 °C로 나타났다. NOx 농도는 7.83 ~ 23.47 ppm 범위로써 평균 15.75 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.270으로 나타났으며, 배출허용기준인 60 ppm 대비 약 26.25% 수준으로 나타났다. 사례2는 연소로 온도가 970.64 ~ 1,026.80 °C 범위로써 평균 995.43 °C로 나타났다. NOx 농도는 11.13 ~ 34.02 ppm로 평균 23.09 ppm으로 나타났으며, 결정계수(R²) 0.370으로 나타났으며, 배출허용기준 대비하여 약 38.48% 정도로 나타났다. 사례3은 연소로 온도가 947.80 ~ 1,025.25 °C 범위로써 평균 983.75 °C로 나타났다. NOx는 12.32 ~ 33.67 ppm 범위로써 평균 21.26 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.065로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 35.43% 수준으로 나타났다. 사례4는 연소로 내 온도가 848.27 ~ 1,008.37 °C 범위로써 평균 956.35 °C로 나타났다. NOx 농도는 11.37 ~ 26.29 ppm 범위로써 평균 18.31 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.001로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 30.52% 수준으로 나타났다.

사례1~사례4까지 전체 평균을 고려 시 연소로 온도가 848.27 ~ 1,026.80 °C 범위로써 평균 976.61 °C으로 나타났다. NOx 농도는 평균 7.88 ~ 34.02 ppm 범위로써 평균 19.92 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.180으로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 33.20% 수준으로 나타났다. 대체로 결정계수(R²)가 0.001 ~ 0.370으로 다소 낮게 나타났으나, 평균적인 연소로 내의 온도가 995.43 °C로 다소 높은 사례2의 NOx 농도가 평균

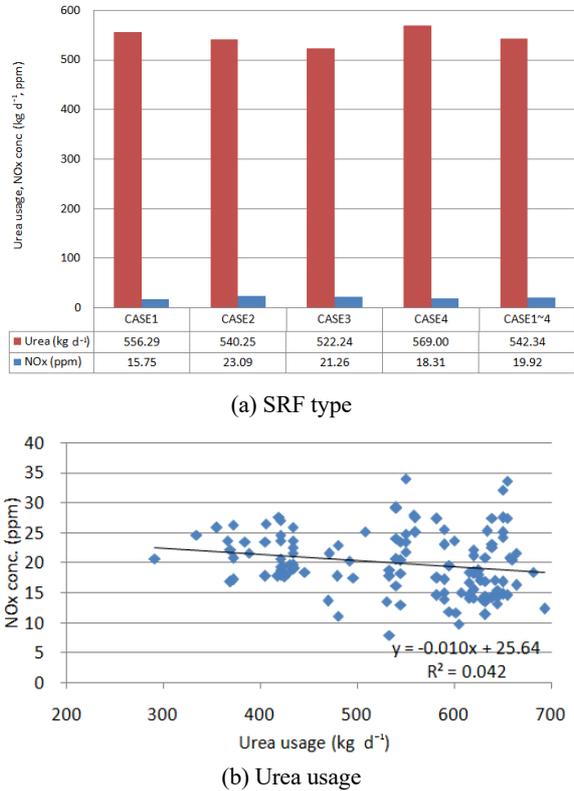


Figure 3. Comparison of NOx concentration with urea usage in SNCR process.

23.09 ppm으로써 가장 높게 나타났다. 온도가 증가할수록 공기 중에 포함되어 있는 질소성분이 좀 더 높은 온도에서 O₂와 의 연소반응량이 증가하여 NOx 농도가 다소 증가되는 것으로 판단된다.

3.2. 요소 사용량에 따른 NOx 배출특성

연소로 내부에 투입되는 요소 사용량과 굴뚝 출구에서의 농도를 고려하여 SRF 연료별(사례1 ~ 사례4), 요소 사용량과 이에 따른 NOx 농도를 변화를 Figure 3에 나타내었다.

사례1은 요소 사용량이 291.00 ~ 639.00 kg d⁻¹ 범위으로써 평균 556.29 kg d⁻¹로 나타났다. NOx는 7.88 ~ 23.47 ppm 범위으로써 평균 15.75 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.364로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 26.25% 수준으로 나타났다. 사례2는 요소 사용량이 434.00 ~ 650.00 kg d⁻¹ 범위으로써 평균 540.25 kg d⁻¹로 나타났다. NOx는 11.13 ~ 34.02 ppm 범위으로써 평균 23.09 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.079로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 38.48% 수준으로 나타났다. 사례3은 요소 사용량이 355.00 ~ 693.00 kg d⁻¹ 범위으로써 평균 522.24 kg d⁻¹로 나타났다. NOx는 12.32 ~ 33.67 ppm 범위으로써 평균 21.26 ppm으로 나타났고, 배출허용기준 대비 약 35.43% 수준으로 나타났다. 사례4는 요소 사용량이 334.00 ~ 657.00 kg d⁻¹ 범위으로써 평균 569.00 kg d⁻¹로 나타났다, NOx는 11.37 ~ 26.29 ppm 범위으로써 평균 18.31 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.354로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 30.52% 수

준으로 나타났다.

사례1 ~ 사례4까지 전체를 고려할 때에는 요소 사용량이 291.00 ~ 693.00 kg d⁻¹ 범위으로써 평균 542.34 kg d⁻¹로 나타났다. NOx는 7.88 ~ 34.02 ppm 범위으로써 평균 19.92 ppm으로 나타났으며, 결정계수(R²) 0.042로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 33.20% 수준으로 나타났다. 대체로 결정계수(R²)이 0.000 ~ 0.364로 낮게 나타났으며, 요소 사용량이 증가함에 따라 NOx 농도가 감소하는 경향으로 나타났다. 가장 많이 투입된 사례4의 NOx 평균농도가 18.31 ppm으로써 요소 사용량이 제일 적은 사례3의 21.26 ppm에 비해 약 86.12% 수준으로 작게 나타났다. 요소 사용량이 증가할수록 NOx와의 반응이 증가함에 따른 NOx 제거량이 증가하여 미처리 후 배출되는 농도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 체류시간에 따른 NOx 배출특성

연소로 내부에 투입되어 반응되는 체류시간과 굴뚝 출구에서의 농도를 고려하여 SRF 연료별(사례1 ~ 사례4), 체류시간과 이에 따른 NOx 농도를 비교분석하였으며, 이에 대한 결과를 Figure 4에 나타내었다.

사례1은 체류시간이 4.13 ~ 9.17 s 범위으로써 평균 6.28 s로 나타났다. NOx는 7.88 ~ 23.47 ppm 범위으로써 평균 15.75 ppm으로 나타났고, 결정계수(R²) 0.001로 나타났으며, 배출허용기준 대비 약 26.25% 수준으로 나타났다. 사례2는 체류시간이 3.83 ~ 5.43 s 범위으로써 평균 4.35 s로 나타났다. NOx는 11.13 ~ 34.02 ppm 범위

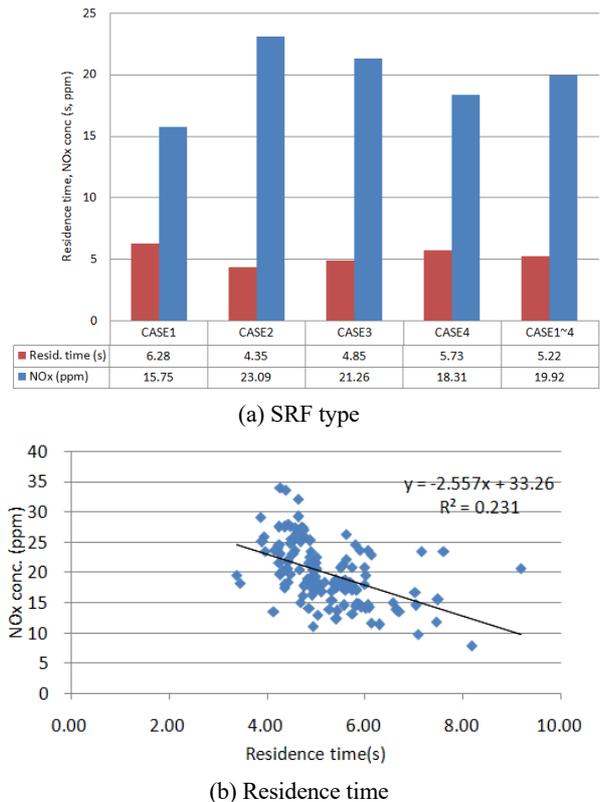


Figure 4. Comparison of NOx concentration with residence time in SNCR process.

Table 3. Comparison of NO_x emission factors with previous studies

Item	NIER_study [4]							This study				
	EPA AP-42	NIER (2005-9)			NIER (2010)	NIER_study [4]						
	RDF	RDF	WCF	RPF	RDF	SRF	Bio-SRF	SRF-CASE1	SRF-CASE2	SRF-CASE3	SRF-CASE4	SRF-CASE1~4
NO _x	2.600	1.400	5.300	1.800	4.100	13.210	4.430	1.058	1.455	1.795	1.139	1.450
Oper. Type*	1)	2)	2)	2)	3)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)

* Oper. Type : 1) Combustor, 2) Incinerator, 3) Boiler

** RDF (Refuse Derived Fuel), WCF (Wood Chip Fuel), RPF (Refuse Plastic Fuel)

립환경과학원 고시와 선행 연구결과와 비교하였다[4]. 한편, 고형연료는 연료형태가 RDF (Refuse Derived Fuel), RPF (Refuse Plastic Fuel), TDF (Tire Derived Fuel) 등으로 다양하게 구분되었으나, 2013년부터 일반 고형연료인 SRF로 분류체계를 단순화하였으며, WCF (Wood Chip Fuel)와 같은 폐목질계 연료를 Bio-SRF로 재설정하였다[4]. 본 연구에서 개발된 배출계수는 선행 연구결과의 배출계수와 연료 형태가 동일하지 않으나, 폐기물을 재활용한 고형연료라는 공통점이 있다.

SRF, Bio-SRF를 사용하는 SRF 사용시설이나 폐기물을 사용하는 폐기물 소각시설의 경우, NO_x의 배출계수는 연료의 특성에 따라 폐합성수지류일 때 1.817 kg ton⁻¹, 기타 사업장폐기물일 때 3.322 kg ton⁻¹, 기타 고체연료일 때 5.830 kg ton⁻¹ 등을 고려할 수 있으나, 최대치인 5.830 kg ton⁻¹으로 우선적으로 적용하도록 되어 있다[14]. A사업장의 경우 폐합성수지류가 약 95% 정도이지만, 환경인허가 시 최대 배출계수는 기타 고체연료의 경우인 5.830 kg ton⁻¹으로 적용하도록 되어 있다. 본 연구결과 사례1 ~ 사례4까지의 평균적 배출계수는 각각 1.058 kg ton⁻¹, 1.455 kg ton⁻¹, 1.795 kg ton⁻¹, 1.139 kg ton⁻¹으로써 평균 1.450 kg ton⁻¹으로 나타났다. 따라서 폐합성수지류인 경우의 1.817 kg ton⁻¹ 대비 약 79.80%로 나타났다.

4. 결론

SRF 사용시설의 운영중 A사업장을 선정하여 사업장의 운전 조건, TMS 자료 및 이론적 설계내역 자료를 분석하여, 주요 대기오염물질인 먼지, SO_x, NO_x 중 NO_x를 선정하여 연소로 내 온도, 요소 사용량, 체류시간, O₂/CO 비 등에 따른 NO_x 배출특성을 비교분석하고, 평균적인 NO_x의 배출계수를 도출하고 기 연구결과와 비교분석한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

연소로 내 온도가 848.27 ~ 1,026.80 °C 범위으로써 평균 976.61 °C으로 나타났으며, 온도의 증가에 따라 NO_x 농도는 증가하는 경향으로 나타났다. 요소 사용량이 291.00 ~ 693.00 kg d⁻¹ 범위으로써 평균 542.34 kg d⁻¹로 나타났으며, 요소 사용량의 증가에 따라 NO_x 농도는 감소하는 경향으로 나타났다. 체류시간 3.38 ~ 9.17 s로 평균적인 체류시간 약 5.22 s로써 설계 시 고려한 약 2 s이내보다 약 2.61 배 정도 크며, 요소 투입 후 NO_x와의

반응시간이 충분한 시간으로 나타났다. SRF 투입량 허가조건인 1,950 kg h⁻¹ 대비 평균적인 SRF 투입량이 약 55.71%인 1,086 kg h⁻¹로써 배가스량 감소에 따라 체류시간이 증가할 수 있는 것으로 판단된다. O₂/CO 비는 847.05 ~ 14,877.34 범위로 평균 3,111.30으로써 최저치 대비 최고치의 범위편차가 17.86 배 크게 나타났고, O₂/CO 비 증가에 따라 NO_x 농도는 다소 증가하는 경향으로 나타났다.

TMS 자료에 의한 굴뚝 출구에서의 NO_x의 배출농도는 7.88 ~ 34.02 ppm 범위으로써 평균 19.92 ppm으로 배출허용기준 이내로 배출되는 것으로 나타났다. 대체적으로 연소로 내 온도, 요소 사용량, 체류시간, O₂/CO 비 등을 고려한 운전조건별 NO_x 배출농도에 대한 결정계수(R²)는 각각 0.180, 0.042, 0.231, 0.040 등으로 다소 낮게 나타났다. 좀 더 다양한 세부조건을 고려한 추가연구가 필요하며, 실제 사업장에서의 실증운전 결과를 활용한 보다 세부적인 최적 조건을 도출하는 추가 연구도 필요할 것으로 판단된다. 따라서 보다 정확한 운전조건에 따른 배출특성을 파악하기 위해서는 주요 설비에서 운전조건을 고려한 데이터 축적 및 자료 확보가 필요하다.

환경인허가 시 최대 배출계수는 기타 고체연료의 경우인 5.830 kg ton⁻¹으로 적용하도록 되어 있다. 그러나 본 연구결과의 사례1 ~ 사례4까지의 평균적 배출계수는 각각 1.058 kg ton⁻¹, 1.455 kg ton⁻¹, 1.795 kg ton⁻¹, 1.139 kg ton⁻¹으로 1.058 ~ 1.795 kg ton⁻¹으로써 평균 1.450 kg ton⁻¹으로 나타났다. 산출된 NO_x 배출계수 1.450 kg ton⁻¹은 국립환경과학원 배출계수 고시[14]에서 기타 고체연료인 최대 배출계수 5.830 kg ton⁻¹ 대비 약 24.87% 정도인 것으로 나타났으며, 기타 합성수지류와 기타 사업장폐기물의 1.817 kg ton⁻¹, 3.322 kg ton⁻¹ 대비 각각 79.80%와 43.65% 정도로 나타났다. 유사 기 연구결과[4]에서의 NIER 고시(2005-9)의 1.400 kg ton⁻¹과 유사하게 나타났으며, 최대치로 나타난 SRF의 경우인 13.210 kg ton⁻¹ 대비 10.98%로 나타났다. 따라서 산출된 NO_x 배출계수 1.450 kg ton⁻¹ 대비하여 최고치 배출계수 5.830 kg ton⁻¹, 기 연구결과의 배출계수 13.210 kg ton⁻¹은 약 4.02 배, 약 9.11 배 크게 산정되어 편차가 크게 나타났다. 향후 SRF의 종류/특성별, 주요 영향인자를 고려한 운전조건별로 다양한 NO_x 배출특성, 배출계수 산정기준 검토, 대기오염물질 발생량, 농도 산출을 위한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

References

1. Lee, C. J., "Application of Estimating Model for Air Pollutant Emissions in SRF Combustion," Ph. D. Dissertation, Hoseo University, Korea, 1-29 (2020).
2. Shim, S. H., "Combustion Characteristics in a Commercial Scale SRF Incinerator with High Temperature Exhaust Gas Recirculation," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **32**(6), 608-614 (2015).
3. Son, J. I., Kim, K. H., and Hong, Y. H., "A Study on the Characteristics of Combustion in Plant using SRF (Solid Refused Fuel) by Waste Plastics," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **31**(5), 480-486 (2014).
4. Jang, K. W., Heo, S. H., Lim, S. Y., Kim, D. G., Jung, Y. W., and Kang, D. I., "A Study on the Characteristics of Solid-Fuel Combustion," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **33**(4), 351-360 (2017).
5. Noh, S., "Semi Dry Reactor," <https://blog.naver.com/kingstun1/221207287429>, Logged on 22 Sep 2021.
6. Kim, Y. M., and Jo, J. H., "Study on Improvement of Air Pollution Management of Facilities Used Solid Refuse Fuel," KEI, 1-25 (2018).
7. Kang, D. I., Jang, K. W., Kang, K. H., Lee, S. B., Lim, S. Y., Heo, S. H., Kim, H. C., Kim, J. H., Kim, H. J., and Choi, S. M., "Development of Air Pollutants Emission Factors for the Other Fuels(I)," NIER-RP2015-211, 1-15 (2015).
8. Noh, H. J., Yang, S. J., Jeong, Y. T., Chae, J. S., and Uhm, T. I., "A Study on the Design Parameters of an Fluff-SRF Combustor with Low Emissions," http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=1a0202e37d52c72d&control_no=7fce05badbb72d77d18150b21a227875, Logged on 22 Sep 2021.
9. Yoon, Y. S., Park, D. K., Gu, J. H., Park, Y. S., and Seo, Y. C., "A Study on the Formation and Reduction of NOx in 5TPD SRF Boiler," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **35**(7), 647-652 (2018).
10. Kim, J. H., Kim, B. H., Park, J. W., and Lee, S. M., "Reaction Characteristic by Injection of Promoters in Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **21**(6), 523-533 (2004).
11. Lee, D. A., Yang, J. G., Park, B. Y., Kim, H. B., Ha, H., and Yang, S. I., "Emission Characteristics of Solid Fuel using Facilities," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **18**(2), 123-133 (2017).
12. Park, S. Y., Yoo, K. S., Lee, J. k., and Park, Y. K., "Effects of Organic and Inorganic Additives on Selective Non Catalytic Reduction Reaction of NOx in a Pilot Scale Flow Reactor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(5), 540-546 (2006).
13. Kim, J. I., Chang, I. G., and Seon, C. Y., "Process Design and Performance Test of the SCR Pilot Plant," *Clean Technol.*, **9**(2), 71-79 (2003).
14. National Law Information Center, "Notification of Air Pollutant Emission Factor of Discharge Facility," <https://www.law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41&tabMenuId=183&query>, Logged on 1 Aug 2020.