고형연료 소각시설의 N₂O 배출특성 및 배출계수 조사

The Investigation of Emission Characteristics and Emission Factor of N₂O at Solid Refuse Fuel Incinerator

최상현^{*} · 고재철^{*}

Sang Hyun Choi^{*} · Jae Churl Ko^{*}

(주)금강씨엔티 · *(주)피엠알 청정기술전략연구원

Keum Kang CNT Co. Ltd · *PMR-ICTS

(Received January 3, 2019; Revised February 11, 2019; Accepted February 11, 2019)

Abstract : In this study, N₂O emission concentration was measured 3 times continuously for 24 hours from Solid Refuse Fuel (SRF) incinerator. As a result of investigating the influence factors on N₂O emission characteristics, it is estimated that N₂O emission concentration is due to the difference of furnace temperature, oxygen concentration rather than the chemical component of waste and SNCR operating. The measured N₂O emission concentration of SRF incinerator was obtained in the range of 114.8~134.7 ppm and the total average concentration was measured 125.0 ppm. Therefore, the N₂O emission factor of the SRF incinerator was estimated to be 2,345.74 g-N₂O/ton-waste. The estimated N₂O emission factor of SRF was about 4 times higher than that of sewage sludge cake used in tier 2 method.

Key Words : Waste Incineration, Nitrous Oxide, Solid Refuse Fuel, Emission Factor

요약 : 본 연구에서는 고형연료 소각시설을 대상으로 3회에 걸쳐 고형연료의 소각에 의해 발생하는 N₂O 농도를 24시간 동안 연속적으로 측정하여 발생량과 배출특성을 조사하였다. 고형연료 소각시설의 N₂O 배출특성에 대한 영향인자를 조사한 결과 N₂O 발생농도는 폐기물의 성상 또는 선택적 무촉매 환원장치(SNCR) 가동 유무보다는 소각시설의 소각온도와 산소농도 같은 운전조건에 따라 상이하게 발생하는 것으로 판단되었다. 고형연료 소각시설의 N₂O 일일평균 발생농도는 114.8~134.7 ppm이며, 전체 평균농도는 125.0 ppm으로 측정되었다. 또한 고형연료 소각시설의 N₂O 배출계수를 산출한 결과 2,345.74 g-N₂O/ton-waste로 tier 2 방법에서 사용되는 하수슬러지의 N₂O 배출계수와 비교하여도 약 4배 정도 높은 결과를 얻었다.

주제어 : 폐기물 소각, 아산화질소, 고형연료, 배출계수

1. 서론

2018년 산업발전부문 온실가스·에너지 목표관리제 대상 업체는 470여개가 선정되어 온실가스 배출과 에너지 사용에 대한 관리가 진행되고 있다. 또한 국내 온실가스 배출업체에서는 자발적으로 환경오염을 저감하고, 온실가스를 줄이기 위한 노력을 하고 있으며, 현재 지자체, 산업체, 공공기관 등에서 온실가스 인벤토리를 구축 및 감축잠재량에 대한 분석을 수행하고 있다.^{1,2)}

국내 산업분야별 온실가스 배출량을 살펴보면 폐기물 분야의 온실가스 배출량은 2015년 16.4백만 톤 CO₂ eq.으로 국가 총배출량의 2.4%를 차지하고 있으며, 1990년 대비 56.7%, 전년 대비 6.4% 증가하였다. 폐기물 분야의 온실가스 배출량은 소각과 매립 및 하·폐수처리 부문으로 나뉘는데, 폐기물소각 부문은 6.9백만 톤 CO₂ eq.으로 폐기물 분야 전체 배출량의 42.1%로 배출 비중을 차지하고 있다.

폐기물 분야에서 배출되는 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)이다. 2015년 폐기물 분야의 CO₂ 배출량은 6.6백만 톤 CO₂ eq.으로 폐기물 분야 전체의 40.1%, CH₄ 배출량은 8.2백만 톤 CO₂ eq.으로 50.0%, N₂O 배출량

은 1.6백만 톤 CO₂ eq.으로 9.9%를 차지한 것으로 나타났다.³⁾

국내 폐기물 부문의 배출원별 온실가스 배출량은 폐기물을 매립하는 대신에 소각하는 방향으로 폐기물 정책을 전환함에 따라 소각 부문에서 발생하는 온실가스 배출량은 2005년부터 2020년까지 연평균 4.8%씩 증가할 것으로 전망된다.^{4,5)} 지구온난화 방지를 위한 기후변화협약에 의해 2015년 우리나라는 국내 온실가스 감축목표를 2030년 배출전망치(BAU, 8억 5060만 톤) 대비 37%로 확정하고, 폐기물 분야도 3.6백만 톤의 감축목표가 수립되었다.

최근 폐기물 에너지화 정책은 매립 처분되고 있는 폐기물을 에너지화하여 대체연료로 사용하는데 주된 목표를 두고 가연성 폐기물을 고형연료로 활용하는 소각시설이 증가하는 추세에 있다. 고형연료(Solid Refuse Fuel, SRF)는 생활폐기물 또는 산업폐기물 중 가연소성 물질을 선별 및 가공하여 발열량, 수분 및 회분과 염소, 중금속 등 품질기준을 만족하도록 연료화한 것으로 일상생활이나 산업 활동으로 인해 발생한 폐기물을 에너지화한 대체연료이다. 국내 고형연료제품은 제지회사, 시멘트회사, 화력발전소, 염색산업 보일러 등 다양한 산업분야에서 사용되고 있으며, 2015년 6월을 기준으로 127개소가 가동 중에 있는 것으로 보고

^{*} Corresponding author E-mail: lab@kcnet.co.kr Tel: 02-2281-1581 Fax: 02-2281-1582

되고 있다. 이러한 폐기물에너지는 2014년 기준으로 국내 신·재생에너지 공급량의 약 59.8%, 발전량 비중으로는 53.3%를 차지하고 있어 향후 국내의 중요한 신·재생에너지원으로 활용될 것으로 예상된다.

폐기물의 소각처리량이 증가함에 따라 소각시 발생하는 악취와 대기오염물질을 배출하는 문제가 발생하고, 최근 들어서는 지구온난화를 유발하는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)를 배출하는 문제가 대두되고 있다. 특히 N₂O의 경우는 지구온난화 지수가 CO₂에 비해 310배나 높은 대표적인 온실가스로 알려져 있으며, 폐기물 소각에 의한 발생하는 온실가스로 N₂O에 대한 중요도가 점차 증가하고 있다.⁶⁾

이와 같이 폐기물분야에서 소각에 의한 온실가스 배출량의 증가와 온실가스 배출량을 감소하기 위한 정부정책 감축목표를 만족하기 위해 폐기물 소각에 의해 발생하는 온실가스의 처리방안에 대한 다각적인 연구가 필요하다. 또한 N₂O는 지구온난화 지수가 높아 분해하여 배출할 경우는 온실가스 배출량 저감효과가 매우 크기 때문에 소각시설에서 발생하는 온실가스의 양을 정확히 산정하고, 모니터링할 필요성이 높아지고 있다. 따라서 소각부문으로부터의 온실가스 배출량의 정확한 산정이 필수이며, 정밀한 온실가스 배출 통계체제가 요구되고 있다. 폐기물 소각부분 발생하는 주요 온실가스 중 CO₂에 대한 연구는 다수 진행되고 있으나 N₂O에 대한 연구는 미비한 상황이다.^{7,8)}

현재 국내 N₂O 배출량 산정방법은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에서 제시하는 기본 배출계수를 활용한 Tier 1 방식이 사용되고 있으나 국가 및 연소시설의 특성을 반영한 Tier 2, Tier 3 수준의 배출계수를 개발하여 사용하는 것을 권장하고 있다.⁹⁾ Tier 1 방식은 온실가스종합정보센터가 제시한 기본 배출계수를 이용한 온실가스 배출량 산정방식이고, Tier 2방식은 온실가스 종합정보센터에서 검증·공표한 국가 고유 배출계수를 활용한 온실가스 배출량 산정방식으로 사업장 적용범위 및 적용기간 등이 명시되어 있다. Tier 3방식은 사업장에서 실험·분석을 통해 개발한 배출계수로서 사업장별 폐기물 성

상과 연소특성이 고려되어 보다 정확한 온실가스 배출량 산정이 가능하다.

최근 하수슬러지 소각시설에서 N₂O 발생량에 대한 연구결과를 살펴보면 0.042~1.664 kg-N₂O/ton-sewage sludge로 소각시설별로 큰 차이를 보이고 있어 폐기물 성상과 연소시설의 특성을 고려한 사업장 고유배출계수의 개발과 이를 이용하여 Tier 3 수준의 N₂O 배출량 산정방식이 필요하다고 할 수 있다.¹⁰⁾

본 연구에서는 C시의 고형연료 소각시설로 150 ton/day 규모의 소각시설에서 발생하는 온실가스를 연속으로 측정하여 발생량을 조사하였다. 본 소각시설의 소각로는 유동상소각로(Fluidized Bed Incinerator)로 폐합성 섬유류의 고형연료(SRF)와 폐목재류의 유기성 고형연료(Bio-SRF)를 50 : 50으로 혼합하여 소각처리하고 있다. 본 시설에서 처리하고 있는 폐기물의 성상분석을 위하여 삼성분과 원소분석을 수행하였으며, 폐기물의 성상과 선택적 무촉매 환원장치의 가동 유무에 따른 N₂O의 배출특성을 조사하였다. 또한 고형연료 소각시설의 N₂O 발생량을 보다 정확하게 산정하기 위해 배출계수를 개발하고, 이를 통해 정확한 온실가스 인벤토리 작성을 위한 산정방식의 개선에 대한 기반을 마련하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 소각시설 운전조건 및 현황

본 연구를 수행한 소각시설은 C시의 고형연료 소각시설로 144 ton/day의 폐합성 섬유류 고형연료와 폐목재류의 유기성 고형연료를 연소하여 증기를 생산하고 있는 소각시설이며, 유동층 연소방식의 소각로를 이용하고 있다. 본 대상시설의 대기오염물질 저감을 위한 환경설비는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 소각로-폐열보일러(Waste Heat Boiler, WHB), 원심력집진기(Cyclone separator), 반건식 반응탑(Semi Dry Reactor, SDR), 여과집진기(Bag Filter, BF), 촉매 환원반응탑(Selective Catalytic Reduction, SCR), 굴뚝으로

Fig. 1. Schematic diagram of SRF incinerator.

Table 1. Equipment specification of SRF incinerator

Waste type	SRF & Bio-SRF	
Incinerator	Fluidized Bed Incinerator	
Capacity	144 ton/day	
Flow rate	89,981 Sm ³ /hr	
Incineration process	Incinerator - Boiler - Selective non-catalytic reduction (SNCR) - Cyclone separator - Semi-dry reactor (SDR) - Bag filter - Selective catalytic reduction (SCR) - Stack	
Post-combustion treatment facility	SNCR	408,600 m ³ /hr
	Cyclone separator	140,040 m ³ /hr
	Semi-dry reactor	136,920 m ³ /hr
	Bag filter	126,180 m ³ /hr
	Selective catalytic reduction	123,900 m ³ /hr

구성되어 있으며, 자동측정기기 및 굴뚝원격 감시시스템이 설치되어 있다. 소각설비의 소각로는 유동층 소각방식으로 운전온도는 1,000℃이며, 산화포화도는 6.5%이며, 공기와 잉비는 $\lambda = 1.6$ 으로 설정되어있다. 이러한 고형연료의 유동층 소각설비에 대한 기본 현황자료를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.2. 시료분석 및 방법 및 N₂O 측정방법

성분에 대한 측정은 고형연료를 일정량 채취하여 열풍건조기(Forced Convection Drying Oven, Heraeus Co.)에서 105 ± 5℃로 24시간 동안 건조한 후 수분의 재흡수가 일어나지 않도록 데시케이터에서 방냉시킨 후 무게를 측정하여 수분의 함량을 측정하였다. 수분측정이 끝난 시료는 폐기물공정시험법에 따라 600 ± 25℃에서 30분간 강열하고 남은 무게를 측정하여 가연분과 회분의 함량을 측정하였다. 삼성분의 산출방법은 다음의 식 (2)와 같다.

$$\text{Moisture (W)} = \frac{(M)_b - (M)_a}{(M)_b} \times 100 \quad (1)$$

(M)_a : weight of sample after drying (g)

(M)_b : weight of sample before drying (g)

(M)_d)_a : weight of sample after ignition (g)

(M)_d)_b : weight of sample before ignition (g)

$$\text{Combustible (C)} = \left(1 - \frac{W}{100}\right) \times \left(1 - \frac{(M_d)_a}{(M_d)_b}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Ash (A)} = (100 - W - C) \quad (3)$$

고형연료의 화학적 원소분석은 자동원소분석기(Automatic elemental analyzer, Thermo finnigan Flash EA 1112, Italy)를 이용하여 수행하였으며, 시료를 1,021℃ 이상의 고온에서 연소시켜 석영관의 구리층을 통과하면서 조성 원소별로 분석에 용이한 기체분자(CO₂, N₂, H₂O, SO₂)로 전환시킨 다

Fig. 2. N₂O sampling schematic diagram of the SRF incinerator.

음 가스크로마토그래피 분석기의 열전도도검출기(Thermal conductivity detector, TCD)를 이용하여 원소분석을 수행하였다. 원소분석은 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N), 황(S), 염소(Cl)의 6개 항목을 실시하였다.

본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 최종배출구인 굴뚝에 비분산 적외선분석방법(Non-dispersive Infrared, NDIR)의 가스분석기(Model : ZKJ, Fuji Electric Co.)를 설치하여 고형연료 소각로에서 배출되는 N₂O의 농도를 실시간으로 연속 측정을 수행하였다. 이 때 시료의 유량을 1 L/min으로 분석기기에 공급하도록 조절하였으며, 연소가스는 분석기로 유입되기 전에 응축기와 -40℃ 이하의 냉각기(chiller)를 설치하여 수분을 완전히 제거시킨 후 가스측정을 수행하였다. N₂O 가스분석은 1회당 24시간 동안 연속으로 측정을 하였으며, 총 3회에 걸쳐 측정된 N₂O 농도를 이용하여 발생량과 배출계수를 조사하였다.

2.3. N₂O 배출계수 개발 방법

본 연구에서는 N₂O 분석은 EPA Method 18(US EPA, 2001)에 연속적인 시료 채취방법(Tier 4 Method)에 따른 온실가스 배출량 산정을 위해 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후 연속측정기를 연결하여 배출가스를 연속적으로 측정하였다.

N₂O 배출량의 산정방법은 ‘온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침’에서 제시하고 있는 연속 측정에 따른 배출량 산정식을 이용하여 아래 식 (4)에 의해 산정하였다. N₂O 배출량의 산정은 연속으로 측정된 N₂O의 일일평균농도를 이용하여 N₂O 배출량을 먼저 산출한 다음 SRF 소각량으로 나누어 배출계수를 산정하였다. 식 (4)의 44/22.4 kg/m³은 N₂O의 분자량 44 kg과 표준상태 기체의 1 mol당 부피 22.4 m³을 의미하며, 배기가스의 유량은 굴뚝 자동측정기기(TMS)의 측정자료를 활용하였다.

$$E_{N_2O} = K \times N_{N_2O} \times Q \times 10^{-3} \quad (4)$$

E_{N_2O} : N₂O 배출량(gN₂O/day)
 N_{N_2O} : N₂O 평균농도(ppm)
 Q : 배기가스 유량(Sm³)
 K : 변환계수(44/22.4 (kg/m³))

3. 결과 및 고찰

3.1. N₂O 농도 측정결과

본 연구에서 소각로에서 배출되는 N₂O 농도 실측은 2018년 8월 30일부터 2018년 10월 25일까지 고형연료 소각로를 대상으로 비분산적외선분석기(Non-Dispersive Infrared Analyzer, NDIR)를 이용하여 각각 총 3회에 걸쳐 회당 24시간 동안 연속측정방법으로 시행하였으며, 폐기물 소각시설의 연돌에서 1분 간격으로 N₂O 농도를 측정하였다.

고형연료 소각로에서 발생하는 N₂O의 배출농도에 대한 연속측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 고형연료 소각시설에서 배출되는 N₂O 평균농도는 1차 114.8 ppm, 2차 125.4 ppm, 3차 134.7 ppm으로 측정되었으며, 13차까지 측정한 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 고형연료 소각시설에서 발생하는 N₂O의 평균농도는 125.0 ppm, 표준편차는 3.13, 상대표준편차는 2.54%로 분석되었다. 이러한 고형연료 소각시설의 N₂O 배출농도는 N₂O 배출계수가 가장 높은 하수슬

Fig. 3. Trend of actual measured N₂O concentration in the object incineration.

Table 2. N₂O concentration of solid refuse fuel incinerator

	1 st survey (2018.08.30.)	2 nd survey (2018.10.03.)	3 rd survey (2018.10.25.)
Max conc. (ppm)	127.8	133.8	142.3
Min conc. (ppm)	106.0	118.2	118.9
Mean conc. (ppm)	114.8	125.4	134.7
S.D.	3.90	2.69	2.79
RSD (%)	3.40	2.14	2.07

리지 연소시설의 예상 발생농도가 30 ppm 수준인 것을 고려하면 실제 고형연료의 발생농도가 상당히 높은 수준임을 알 수 있다.

3.2. 고형연료 소각시설의 N₂O 배출특성

본 연구의 고형연료 소각시설에서 이용하고 있는 폐합성 섬유류의 고형연료와 폐목재류의 유기성 고형연료에 대한 원소분석 결과를 Table 3에 나타내었다. 원소분석결과 고형연료와 유기성 고형연료의 질소함량은 각각 0.4%와 2.7%로 조사되었으며, 이와 같은 수치는 일반적인 고형연료의 질소함량과 차이가 없는 것으로 판단되었다.¹¹⁾

폐기물의 화학성분 중 질소는 소각공정에서 HCN으로 전환되어 N₂O를 발생할 수 있는 성분으로 작용하며, 소각로 운전조건에 따라 N₂O 또는 NO_x로 전환되어 배출되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 고형연료에 대한 화학성분을 분석을 시행하여 N₂O 발생량과 상관성을 조사하였다.¹²⁾

본 연구시설에서 배출되는 N₂O의 발생농도와 일일 소각량을 이용하여 N₂O 배출량을 산출한 결과를 Table 4에 나타내었다. 고형연료의 성상은 거의 일정하므로 고형연료의 소각량의 증가할 경우는 N₂O 발생량도 증가할 수 있으나 Table 4에서 보는 바와 같이 소각량이 가장 많은 3차 측정일은 1차 측정일에 비해 발생량이 적었다. 일반적으로 하수슬러지의 질소함량은 5.87% 수준이며, N₂O 발생농도가 수십~수백 ppm으로 알려져 있어 폐기물의 질소함량과 N₂O 발생농도는 상관관계가 낮은 것으로 판단되었다.¹³⁻¹⁵⁾

본 소각시설의 운전온도와 산소농도조건도 N₂O 발생특성에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있어 굴뚝 자동측정

Table 3. Elemental compositions and three components of solid refuse fuels

Component	Unit	SRF	Bio-SRF
Chemical (dry basis)	C	%	67.0
	H	%	10.3
	O	%	11.1
	N	%	0.4
	S	%	0.04
	Cl	%	1.57
Three components	Moisture	%	5.2
	Combustible	%	85.8
	Ash	%	9.0

Table 4. N₂O emission characteristics for waste incineration

Classification	N ₂ O concentration (ppm)	Incineration (ton-waste/day)	N ₂ O emission amount (kg/day)
1 st survey (2018.08.30.)	114.8	137.2	318.98
2 nd survey (2018.10.03.)	125.4	111.0	283.72
3 rd survey (2018.10.25.)	134.7	147.4	317.85

Fig. 4. The effect of oxygen and temperature on the N₂O emission in SRF incinerator.

기에서 측정된 소각로 운전온도와 산소농도조건과 N₂O 발생농도를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 소각로 운전온도는 1차 952.5℃, 2차 1045.1℃, 3차 1032.2℃이었으며, 산소농도는 1차 5.7%, 2차 7.4%, 3차 7.0%로 조사되었다. 이러한 결과를 N₂O 발생농도와 비교해 보면 소각로 운전온도가 1030℃까지는 N₂O 발생농도가 증가하는 경향을 보이고, 그 이상에서는 감소하는 경향을 보였다. 또한 산소농도가 높을 경우가 대체적으로 N₂O 발생농도도 높은 경향을 보였다. 일반적으로 폐기물의 소각시설의 N₂O 배출농도는 소각온도가 990~1,030℃에서 최대로 생성되며, 그 이상의 온도에서는 감소하는 것으로 보고되고 있다. 또한 폐기물 소각시설의 운전조건 중 산소농도가 낮을수록 NO_x 발생량은 증가하는 반면 N₂O 생성물은 감소한다는 연구결과가 보고되고 있다. 따라서, 본 소각시설의 N₂O 발생농도 및 발생량도 이러한 영향이 가장 크게 작용한 것으로 추정된다.^{16,17)}

본 연구시설은 연소로 후단설비로 요소수((NH₂)₂CO)를 환원제로 사용하는 선택적 무촉매 환원장치를 가동 중에 있는데, 고온의 SNCR 반응조건에서 요소수의 중간반응물질인 시아누릭산(HNCO)과 NO가 반응하여 N₂O가 발생할 수 있어 SNCR 가동 유무에 따른 N₂O 배출농도의 영향성을 조사하였다. 고형연료 소각시설의 N₂O 발생농도를 SNCR 설비를 가동 유무에 따라 각각 1시간 동안 N₂O 발생농도변화를 Fig. 5에 나타내었다. SNCR 설비의 가동 유무에 따른 N₂O 발생농도변화를 조사한 결과 SNCR 설비운전 여부에 따른 N₂O 발생농도에 대한 영향은 거의 없는 것으로 조사되었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 SNCR 설비운전 중 N₂O 평균발생농도는 127.8 ppm이며, SNCR 설비운전을 멈춘 후 N₂O 평균발생농도는 129.2 ppm으로 측정되었다. 본 연소설비의 경우는 SNCR 가동에 따른 N₂O 발생농도에 대한 영향은 미비한 것으로 판단되었다.

Fig. 5. Trend of actual measured N₂O concentration with SNCR operating.

3.3. N₂O 배출계수 개발

본 연구에서는 고형연료 소각시설의 N₂O 배출량은 Tier 4 Method에 의해 N₂O 분석장치를 이용하여 24시간 동안 연속 측정된 N₂O 농도와 TMS 데이터의 건식 유량을 이용하여 식 (4)를 통해 산정하였으며, 일일 폐기물 소각량을 이용하여 N₂O 배출계수를 산출하였다.

고형연료 소각시설에서 배출되는 N₂O의 일일 배출량과 배출계수에 대하여 산정한 결과는 Table 4에 정리하여 나타내었다. N₂O의 일일 배출량은 1차 318.98 kg/day, 2차 283.72 kg/day, 3차 317.85 kg/day로 조사되었으며, 평균 306.85 kg/day의 N₂O를 배출하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 폐기물 소각량을 이용하여 산출된 N₂O 배출계수는 1차 2,324.73 g-N₂O/ton-waste, 2차 2,555.65 g-N₂O/ton-waste, 3차 2,156.84 g-N₂O/ton-waste으로 산출되었다(Table 5). 따라서, 본 고형연료 소각시설의 N₂O배출계수는 평균값을 적용하여 2,345.74 g-N₂O/ton-waste로 산출되었다. 이와 같이 산출된 고형연료의 N₂O 배출계수는 현재 활용되고 있는 고형폐기물의 N₂O 배출계수 중 하수슬러지의 배출계수인 595.0 g-N₂O/ton-waste보다 상당히 높은 수치임을 알 수 있다.¹⁸⁾

이와 같이 소각시설의 N₂O 실측에 의한 배출량 및 배출계수에 대한 연구결과를 살펴보면 하수 슬러지를 유동상식 연소로를 이용하여 처리하고 있는 소각시설의 경우는 N₂O

Table 5. N₂O emission factor of municipal solid waste incineration plant

Classification	Flow rate (Sm ³ /hr)	Average of furnace temp. (°C)	Incineration (ton-waste/day)	N ₂ O emission factor (g-N ₂ O/ton-waste)
1 st survey (2018.08.30.)	58,949	952.5	137.2	2,324.73
2 nd survey (2018.10.03.)	47,973	1045.1	111.0	2,555.65
3 rd survey (2018.10.25.)	50,054	1,032.2	147.4	2,156.84
Mean	52,325	1,009.9	131.9	2,345.74

의 발생농도가 대략 200~300 ppm 수준이며, 배출계수는 0.042~1.664 kg-N₂O/ton-waste 수준으로 보고된 바 있어 현재 사용 중인 하수슬러지 N₂O 배출계수와 큰 차이가 있음을 알 수 있다.¹⁹⁻²¹⁾ 본 연구결과에서도 연속측정방법에 의해 산출된 고형연료의 N₂O 배출계수도 일반적인 폐기물의 N₂O 발생량을 조사한 결과도 폐기물 소각분야에서 N₂O 배출계수에 의해 산출된 N₂O 발생량에 비해 상당히 높은 것으로 조사되었다. 따라서, 폐기물 소각에 의해 발생하는 N₂O 산정방식은 현장실측을 통한 Tier4 방식이나 현장실측을 통해 산출된 사업장별 배출계수를 활용하는 것이 향후 폐기물 소각분야의 온실가스 인벤토리 신뢰도 향상에 중요한 요소로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 고형연료 소각설비에서 발생하는 N₂O 농도를 24시간 동안 연속적으로 측정하고, 해당 소각시설의 N₂O 배출계수를 개발하였다. 고형연료 소각시설의 N₂O 배출농도를 연속으로 측정한 결과 일일평균농도는 114.8~134.7 ppm의 범위의 농도분포를 갖고, 전체 평균배출농도는 125.0 ppm으로 측정되었다.

고형연료의 원소분석을 수행한 결과 고형연료와 유기성 고형연료의 질소함량은 각각 0.4%와 2.7%로 일반적인 고형 폐기물의 질소함량에 비해 높지 않으나 N₂O의 발생농도는 하수슬러지 소각시설의 배출농도와 유사하여 폐기물의 질소함량과 N₂O 발생농도는 상관관계가 낮은 것으로 판단되었다. 또한 고형연료 소각시설의 SNCR의 가동 유무도 N₂O 발생농도에는 별다른 영향성이 없는 것으로 조사되었다. 결과적으로 고형연료의 N₂O 발생량은 고형연료의 소각량, 원소성분, 소각온도, 산소농도 등이 복합적인 요인에 의해 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다.

본 소각시설에서 연속측정한 N₂O 발생농도를 바탕으로 고형연료 소각시설의 N₂O 배출계수는 2,345.74 g-N₂O/ton-waste로 산정되었다. 이는 고형폐기물 중에서 N₂O 배출계수가 가장 높은 하수슬러지에 비해서 약 4배 정도 높은 결과이다. 따라서, 본 연구를 통해 개발된 고형연료의 N₂O 배출계수를 통해 보다 정확한 온실가스 배출량의 산정이 요구된다. 또한 폐기물 소각시설의 N₂O 발생량은 폐기물의 종류와 소각량을 이용한 산출방식으로는 정확하게 산정하기 어렵고, 실제 발생량과 큰 차이를 보이므로 보다 정확한 산정방식을 위해서는 소각시설별 배출계수를 개발하여 활용하는 방법이 필요한 것으로 판단되었다.

Acknowledgement

본 연구는 2018년 시흥녹색환경지원센터의 연구개발사업으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

KSEE

References

1. Jeong, Y. J., Li, K. C., Kim, T. O. and Hwang, I. J., "Estimation of Greenhouse Gas Emissions (GHG) Inventory and Reduction Plans for Low Carbon Green Campus in Daegu University," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(7), 506~513 (2014).
2. Yoo, J.-H., Lee, N. J. and Han, J.-H., "Greenhouse Gas Inventory and Its Potential Reduction Evaluation for Green Campus Development: Focusing on Global Campus of Gachon University," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(5), 185~192 (2018).
3. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, "National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea"(2017).
4. Korea Environment Institute, "A Study on Waste Management for Reducing Greenhouse Gas Emissions"(2010).
5. Ministry of Environment, "The 2nd Comprehensive Plan for National Waste Management"(2002).
6. Dalton, M., O'Neill, B., Prskawetz, A., Jiang, L. and Pitkin, J., "Population aging and future carbon emission in the United States," *Energy Economics*, **30**, 642~675(2008).
7. Oh, S. H., Kang, L. S. and Jung, D. H., "A Study on the Effectiveness of Continuous CO₂ Emission Monitoring in a Waste Incinerator," *J. Climate Change Res.*, **9**(3), 273~281 (2018).
8. Kim, S. G., Im, G. Y., Yi, C.-Y., Lee, S. Y., Sa, J.-H. and Jeon, E.-C., "Development of Carbon Dioxide Emission Factor from Resource Recovery Facility," *J. Climate Change Res.*, **4**(1), 51~61(2013).
9. IPCC, Climate Change 2007 - The Physical Science Basis (2007).
10. Lee, J. G., Song, L. S., Na, G. H., Yoo, G. I., Hong, S. M., Lim, C. G., Lee, J. S. and Lee, J. B., "A Study on Greenhouse Gases Emissions from Sewage Sludge Incinerators in Gyeonggi Province," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **5**, 305~305(2011).
11. Song, H.-O., Ko, J.-C., Choi, S.-H. and Kim, D.-H., "Investigation of N₂O Emission and Reduction effect from MSW Incineration Plant," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(12), 672~678(2017).
12. Kim, S. G., Kang, S. M., Kang, S. Y., Lee, J. W., Sa, J.-H., Park, S.-J. and Jeon, E.-C., "Development of Greenhouse Gas Emission Factors from Sewage Sludge Incinerator," *J. Climate Change Res.*, **5**(3), 209~218(2014).
13. Lim, J.-W., Dong J.-I., Yoon, K.-D. and Shim, J.-Y., "A Study on Combustion Characteristics due to Changes in Solid Refuse Fuel Properties," *Appl. Chem. Eng.*, **26**(6), 686~691 (2015).
14. Choi, Y. S., Choi, S. K., Kim, S. J., Jeong, Y. W. and Han, S. Y., "Bio-SRF Production from Organic Wastes and Combustion of bio-SRF with Pulverized-coal," *New & Renewable Energy*, **14**(3), 37~43(2018).
15. Kang, H., Lee, J. H., Hong, S. S., Kim, M. R. and Jang, M. S., "A Study on the Physico-Chemical Characteristics of Municipal Solid Wastes Generated from Different Sources," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **11**(2), 161~168(1994).

16. Crisanto, M.-C., Carlos, E. R., Fernando, H.-R. and Hans, A., "N₂O Formation in selective Non-Catalytic NO_x Reduction Processes," *J. Environ. Prot.*, **2**, 1095~1100(2011).
17. Lee, J. W., Kang, S. M., Kim, S. J., Kang, S. Y., Lee, S. H. and Jeon, E. C., "Development of non-CO₂ emission factors from MSW pyrolysis melting treatment in Korea," *Environ. Earth Sci.*, **74**(5), 4157~4162(2015).
18. Park, J.-J., Lee, S.-J., Ryu, I.-S., Jeon, S. G., Park, Y.-S., and Moon, S.-H., "A Study on the Effect of Fluidizing Media on the N₂O Production in Fluidized Bed Incineration of Sewage Sludge," *Clean Technol.*, **20**(4), 390~397(2014).
19. Park, S. W., Choi, J. H. and Park, J. W., "The estimation of N₂O emissions from municipal solid waste incineration facilities," *Waste Manage.*, **31**(8), 1765~1771(2011).
20. Eliza, H., Kerstin, Z., Rainer, K., Beat, M., Lukas, E. and Joachim, M., "Nitrous oxide and methane emissions and nitrous oxide isotopic composition from waste incineration in Switzerland," *Waste Manage.*, **35**, 135~140(2015).
21. Kang, S. C., Cho, C. S., Kim, S. J., Kang, S. M., Yoon, H. G., and Jeon, E. C., "Comparison of N₂O Emissions by Greenhouse Gas Emission Estimation Method," *J. Climate Change Res.*, **6**(3), 175~184(2015).