

## 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출계수 개발

고재철<sup>1</sup>, 최상현<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>(주)피엠알 청정기술전략연구원  
15073 경기 시흥시 경기과기대로 269  
<sup>2</sup>(주)금강씨엔티  
04788 서울 성동구 왕십리로14길 11

(2018년 12월 19일 접수; 2019년 1월 28일 수정본 접수; 2019년 1월 29일 채택)

## The Development of N<sub>2</sub>O Emission Factor at Municipal Solid Waste Incinerator

Jae Churl Ko<sup>1</sup>, and Sang Hyun Choi<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>PMR-Institute for Clean Technology Strategy  
<sup>1</sup>269 Gyeonggigwagide-a-ro, Siheung City, Gyeonggi 15073, Korea  
<sup>2</sup>Keum Kang CNT  
<sup>2</sup>11 Wangsimni-ro 14-gil, Seongdong-gu, Seoul 04788, Korea

(Received for review December 19, 2018; Revision received January 28, 2019; Accepted January 29, 2019)

### 요 약

본 연구에서는 도시고형폐기물 소각시설을 대상으로 2018년 8월 27일부터 2018년 10월 22일 동안 총 3회에 걸쳐 도시고형폐기물의 소각에 의해 발생하는 N<sub>2</sub>O 농도를 24시간 동안 연속적으로 측정하여 발생량과 배출특성을 조사하였으며, 배출가스 중 N<sub>2</sub>O 농도측정은 비분산 적외선 분석기(NDIR)를 이용하였다. N<sub>2</sub>O 배출특성을 조사한 결과 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생량 및 발생농도는 폐기물의 성상 보다는 소각시설의 소각로 온도와 산소농도 같은 운전조건에 따라 상이하게 발생하는 것으로 판단된다. 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 일일평균 발생농도는 53.6 ~ 59.5 ppm이며, 전체 평균농도는 55.6 ppm으로 측정되었다. 또한 N<sub>2</sub>O 농도를 이용하여 계산된 N<sub>2</sub>O 발생량은 90.41 ~ 108.44 kg day<sup>-1</sup>이며, 평균 발생량은 98.05 kg day<sup>-1</sup>로 조사되었다. 이러한 결과를 바탕으로 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출계수를 산출한 결과 1,066.13 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>로 생활폐기물의 Tier 2 방법으로 산출된 N<sub>2</sub>O 배출계수에 비해 약 20배 정도 높은 결과를 얻었다. 따라서, 폐기물 종류와 소각량을 이용한 폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생량 산출방식은 정확성에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

**주제어** : 폐기물 소각, 아산화질소, 도시고형폐기물, 배출계수

**Abstract** : In this study, nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission concentration was measured 3 times continuously for 24 hours from August 27, 2018 to October 22, 2018 and non-dispersive infrared (NDIR) spectrometer was used to calculate N<sub>2</sub>O concentration of exhaust gas from municipal solid waste (MSW) incinerator. As a result of N<sub>2</sub>O emission characteristics, it is estimated that N<sub>2</sub>O emission concentration is due to the difference of furnace temperature, oxygen concentration rather than the chemical component of waste. The measured N<sub>2</sub>O emission concentration of MSW incinerator was obtained in the range of 53.6 ~ 59.5 ppm and the total average concentration was measured 55.6 ppm. Therefore, the amount of N<sub>2</sub>O emissions calculated from the N<sub>2</sub>O concentration was 98.05 kg day<sup>-1</sup> on average and the amount of N<sub>2</sub>O distribution in the range of 90.41 ~ 108.44 kg day<sup>-1</sup> was obtained. As a result, the N<sub>2</sub>O emission factor of the MSW incinerator was estimated to be 1,066.13 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>. The estimated N<sub>2</sub>O emission factor of the MSW incinerator was 20 times higher than calculated emission factor used in the Tier 2 method. Consequently, it is considered that the method of calculating the amount of N<sub>2</sub>O emission in the MSW incineration facilities using waste type and incineration amount needs to be supplemented to ensure accuracy.

**Keywords** : Waste incineration, Nitrous oxide, Municipal solid waste, Emission factor

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: lab@kcnt.co.kr; Tel: +82-2-2281-1581; Fax: +82-2-2281-1582

doi: 10.7464/kscet.2019.25.1.040 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.

## 1. 서론

우리나라의 2013년 온실가스 총배출량은 694.5백만톤 CO<sub>2</sub> eq.이며, 1990년도 총배출량 292.3백만톤 CO<sub>2</sub> eq.에 비해 137.6% 증가하였고, 2012년도 배출량과 비교하면 1.5%가 증가하였다. 국내 폐기물 분야 온실가스 배출량도 2013년 15.0백만톤 CO<sub>2</sub> eq.으로 국가 총배출량의 2.2%를 차지하고 있으며, 매년 증가하는 추세이다. 폐기물 소각에 의한 온실가스 배출량은 7.0 백만톤 CO<sub>2</sub> eq.로 폐기물 분야 전체 배출량의 46.7%로 배출비중이 가장 높은 것으로 알려져 있다.

폐기물 분야에서 배출되는 온실가스는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O)이며, 2013년 폐기물 분야의 CO<sub>2</sub> 배출량은 6.7 백만톤 CO<sub>2</sub> eq.으로 폐기물 분야 전체의 44.7%, CH<sub>4</sub> 배출량은 6.6 백만톤 CO<sub>2</sub> eq.으로 44.1%, N<sub>2</sub>O 배출량은 1.7 백만톤 CO<sub>2</sub> eq.으로 11.2%를 차지한 것으로 나타났다.

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[1,2].

도시고형폐기물 처리방법으로 소각처리법은 폐기물의 부피가 현저히 감소한 소량의 소각재만 발생하기 때문에 다량의 폐기물 처리에 용이하며, 공간적인 제약이 없으며, 기존 매립지의 사용연한도 연장할 수 있다. 또한 소각으로 발생하는 열을 통해 전력을 생산하여 수익을 창출하거나 주변지역에 온수 및 난방을 공급하여 경제적으로도 이점을 갖는다. 이에 따라 환경부는 2020년까지 폐기물의 직매립 제로화를 목표로 하는 전략을 수립하여 2011년 기준으로 매립율은 17.2%에서 2.0%로 현저히 떨어지는 반면에 에너지화는 17.0%까지 상승할 예정이다.

이와 같이 폐기물의 소각처리량이 증가함에 따라 소각시 발생하는 악취와 대기오염물질을 배출하는 문제가 발생하고, 최근 들어서는 지구온난화를 유발하는 온실가스인 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O를 배출하는 문제가 대두되고 있다. 특히 N<sub>2</sub>O의 경우는 지구온난화 지수가 CO<sub>2</sub>에 비해 310배나 높은 대표적인 온실가스로 알려져 있으며, 폐기물 소각에 의한 발생하는 온실가스로 N<sub>2</sub>O에 대한 중요도가 점차 증가하고 있다[3].

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 N<sub>2</sub>O는 지구온난화 지수가 높아 분해하여 배출할 경우는 온실가스 배출량 저감효과가 매우 크기 때문에 소각시설에서 발생하는 온실가스의 양을 정확히 산정하고, 모니터링 할 필요성이 높아지고 있다. 따라서 소각부문으로부터의 온실가스 배출량의 정확한 산정이 필수이며, 정밀한 온실가스 배출 통계체계가 요구되고 있다.

우리나라의 경우는 소각분야 온실가스 배출량을 폐기물 분류체계에 따라 생활폐기물, 사업장 폐기물, 건설폐기물, 지정

폐기물로 분류하여 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O의 배출량으로 산정하고 있으며, CH<sub>4</sub>는 소각환경을 고려하였을 때 고온에서 충분한 체류시간으로 소각되고 있으므로 배출량이 미비할 것으로 판단되어 배출량 산정기준에 포함되어 있지 않다. 폐기물 소각부분 발생하는 주요 온실가스 중 CO<sub>2</sub>에 대한 연구는 다수 진행되고 있으나 N<sub>2</sub>O에 대한 연구는 미비한 상황이다[4,5].

현재 국내 N<sub>2</sub>O 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[6]. 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 성상과 연소특성이 고려되어 보다 정확한 온실가스 배출량 산정이 가능하다.

최근 하수슬러지 소각시설에서 N<sub>2</sub>O 발생량에 대한 연구결과를 살펴보면 0.042 ~ 1.664 kgN<sub>2</sub>O ton<sub>sewage sludge</sub><sup>-1</sup>로 소각시설별로 큰 차이를 보이고 있어 폐기물 성상과 연소시설의 특성을 고려한 사업장 고유배출계수의 개발과 이를 이용하여 Tier 3 수준의 N<sub>2</sub>O 배출량 산정방식이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출량을 보다 정확하게 산정하기 위해 N<sub>2</sub>O 배출농도를 연속측정을 통하여 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출량을 산출하고, N<sub>2</sub>O 배출계수를 개발하였다. 또한 본 연구를 수행한 도시고형폐기물 소각시설에서 처리하고 있는 폐기물 성상과 소각시설의 운전조건에 따른 N<sub>2</sub>O 배출특성을 조사하였다. 이러한 연구결과를 통해 정확한 온실가스 인벤토리 작성을 위한 산정방식의 개선에 대한 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시료분석방법

폐기물의 채취방법은 폐기물공정시험법의 원추4분법에 따라 시료를 채취하여 분석을 수행하였다.

삼성분 및 유기물 함량은 도시고형폐기물을 일정량 채취하여 열풍건조기(forced convection drying oven, Heraeus Co.)에서 105 ± 5 °C로 24시간 동안 건조한 후 수분의 재흡수가 일어나지 않도록 데시케이터에서 방냉시킨 후 무게를 측정하여 수분의 함량을 측정하였다. 수분측정이 끝난 시료는 폐기물공정시험법에 따라 600 ± 25 °C에서 30분간 강열하고 남은 무게를 측정하여 가연분과 회분의 함량을 측정하였다. 삼성분의 산출방법은 다음의 Equation (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)
- ( $M_d$ )<sub>a</sub> : weight of sample after ignition (g)
- ( $M_d$ )<sub>b</sub> : weight of sample before ignition (g)

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

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

도시고형폐기물의 화학적 원소분석은 자동원소분석기(automatic elemental analyzer, Thermo finnigan Flash EA 1112, Italy)를 이용하여 수행하였으며, 시료를 1,021 °C 이상의 고온에서 연소시켜 석영관의 구리층을 통과하면서 조성 원소별로 분석에 용이한 기체분자(CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>)로 전환시킨 다음 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 연구에서 소각로에서 배출되는 N<sub>2</sub>O의 농도측정은 최종배출구인 굴뚝에 연결하여 비분산 적외선분석방법(non-dispersive infrared, NDIR)의 가스분석기(Model : ZKJ, Fuji Electric Co.)를 사용하여 실시간 측정하였다. 연소가스는 분석기로 유입되기 전에 chiller 내의 수분 trap에서 수분을 제거시킨 후 유입하였다.

N<sub>2</sub>O의 농도측정은 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후 냉각장치를 연결하고, 유량펌프를 연결한 다음 정속으로 시료를 가스분석기로 유입시켜 측정하였다.

소각시설에서 발생하는 온실가스의 발생량은 소각로로 투

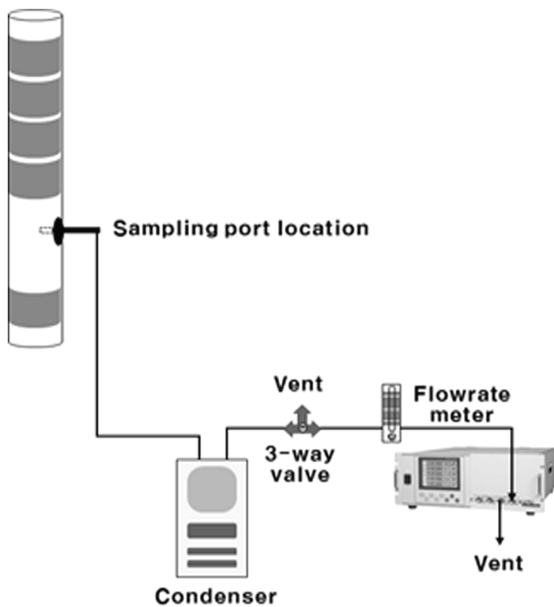


Figure 1. N<sub>2</sub>O sampling schematic diagram of the municipal solid waste incinerator.

입되는 폐기물의 성상이 일정하지 않기 때문에 발생량의 변화가 클 수 있어 본 연구에서는 2 ~ 3회에 걸쳐 시료를 채취하여 폐기물의 성분분석을 시행하였고, 온실가스 발생량의 경우도 3회에 걸쳐 배출가스 중에 N<sub>2</sub>O 농도를 측정하여 발생량을 조사하였다.

### 2.2. 소각시설 운전조건 및 현황

본 연구를 수행한 소각시설은 C시의 도시고형폐기물 소각 시설로 소각설비는 소각로-폐열보일러(waste heat boiler, WHB), 반건식 반응탑(semi dry reactor, SDR), 백필터(Bag Filter, BF), 촉매반응탑(selective catalytic reduction, SCR), 굴뚝으로 구성되어있다. 소각설비의 소각로는 로터리 킬른 방식으로 운전온도는 950 °C이며, 회전 rpm 1.2로 약 50분의 체류시간을 유지하도록 운전되고 있다. 또한 산화포화도는 12%이며, 공기과잉비는 λ = 1.6으로 설정되어 있다. 이러한 로터리 킬른 소각로의 기본 운전조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

### 2.3. N<sub>2</sub>O 측정방법

본 연구에서 소각로에서 배출되는 N<sub>2</sub>O의 농도측정은 NDIR 방식의 실시간 가스측정기(Fuji Electric, Model ZKJ)를 이용하였으며, N<sub>2</sub>O를 정량 분석하기 위하여 가스분석기의 측정 범위에 맞는 표준가스를 이용하여 검교정을 수행한 후 측정을 수행하였다. 이 때 분석기로 유입되는 시료의 유량은 1 L min<sup>-1</sup>으로 조절하여 연속적으로 분석하였다.

NDIR 방식의 분석기기로 N<sub>2</sub>O를 측정할 경우 시료의 수분 제거는 가장 중요한 요인으로 작용하기 때문에 전처리 장비를 이용하여 수분을 먼저 제거한 후 가스측정을 수행하였다. 수분제거용 전처리 장비로는 수분트랩과 저온동결크랩을 활용하였으며, 연속측정기 전단에 수분트랩을 설치하여 연소가스에서 응축된 수분을 먼저 제거한 후 저온동결트랩을 설치하여 연소가스 온도를 -40 °C 이하로 냉각하여 수분을 완전히 제거하였다. 또한 연속측정기에 유입되는 유량을 조절하기 위해서 진공펌프를 이용하여 가스측정을 수행하였다.

Table 1. Equipment specification of municipal solid waste incinerator

Waste type	Municipal solid waste Sewage sludge cake	
Incinerator	Rotary kiln incinerator	
Capacity	100 ton day <sup>-1</sup>	
Flow rate	33,794 Sm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>	
Incineration Process	waste storage pit - waste handle crane - R/K incinerator - boiler - semi-dry reactor (SDR) - dry scrubber - bag filter - selective catalytic reduction (SCR) - stack	
Post-combustion treatment facility	Semi-dry reactor	95,220 m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
	Dry scrubber	97,200 m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
	Bag filter	99,600 m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
	Selective catalytic reduction	93,420 m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>

2.4. N<sub>2</sub>O 배출계수 개발 방법

본 연구에서는 N<sub>2</sub>O 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. N<sub>2</sub>O 측정은 실시간으로 장시간 측정이 가능한 비분산 적외선분석장치를 이용하여 측정하였으며, N<sub>2</sub>O 측정기기로 NDIR 분석기는 글로벌 시험인증기관인 독일 TÜV에서 승인되어 신뢰성이 확보된 분석기이라 할 수 있다.

소각시설에서 채취된 배출가스의 N<sub>2</sub>O의 농도를 연속측정 분석기기를 이용하여 분석하였다. N<sub>2</sub>O 농도는 24시간 동안 연속으로 측정하였으며, 분당 1회 측정된 N<sub>2</sub>O 농도 값을 이용하여 그 결과를 나타내었다.

N<sub>2</sub>O 배출량의 산정방법은 ‘온실가스-에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침’에서 제시하고 있는 연속 측정에 따른 배출량 산정식을 이용하여 아래 Equation (4)에 의해 산정하였다.

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

- $E_{N_2O}$  : N<sub>2</sub>O배출량(gN<sub>2</sub>O day<sup>-1</sup>)
- $N_{N_2O}$  : N<sub>2</sub>O평균농도(ppm)
- $Q$  : 배기가스 유량(Sm<sup>3</sup>)
- $K$  : 변환계수(44/22.4(kg m<sup>-3</sup>))

3. 결과 및 고찰

3.1. N<sub>2</sub>O 농도 측정결과

소각로에서 배출되는 N<sub>2</sub>O 발생농도의 현장측정은 2018년 8월 27일부터 2018년 10월 22일까지 도시고형폐기물 소각로를 대상으로 비분산적외선분석기(non-dispersive infrared analyzer, NDIR)를 이용하여 각각 총 3회에 걸쳐 회당 24시간 동안 연속측정방법으로 시행하였으며, 폐기물 소각시설의 연돌에서 1분 간격으로 N<sub>2</sub>O 농도를 측정하였다.

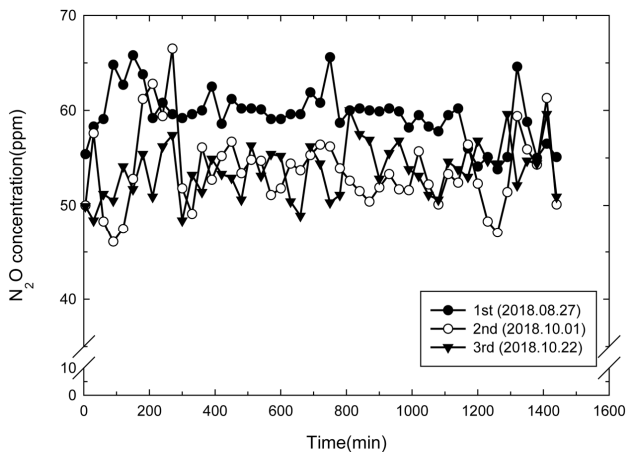


Figure 2. Trend of actual measured N<sub>2</sub>O concentration in the object incineration.

Table 2. N<sub>2</sub>O concentration of municipal solid waste incineration plant

	1 <sup>st</sup> survey (2018.08.27.)	2 <sup>nd</sup> survey (2018.10.01.)	3 <sup>rd</sup> survey (2018.10.22.)
Max conc. (ppm)	52.0	24.4	48.4
Min conc. (ppm)	70.4	71.9	63.9
Mean conc. (ppm)	59.5	53.8	53.6
S.D.	2.75	4.51	3.16
RSD (%)	4.62	8.39	5.89

도시고형폐기물 소각로에 대한 연속측정결과를 Figure 2에 나타내었다. 도시고형 폐기물의 경우 N<sub>2</sub>O 평균농도는 1차 59.5 ppm, 2차 53.8 ppm, 3차 53.6 ppm으로 측정되었으며, 1 ~ 3차 까지 측정된 N<sub>2</sub>O 발생농도를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 도시고형폐기물에서 발생하는 N<sub>2</sub>O의 평균농도는 55.6 ppm, 표준편차는 3.47%, 상대표준편차는 6.30%로 분석되었다.

3.2. 도시고형폐기물 소각로의 N<sub>2</sub>O 배출특성

본 연구를 수행한 도시고형 폐기물 소각로는 도시고형 폐기물 이외에 N<sub>2</sub>O 발생계수가 가장 높은 것으로 알려져 있는 하수슬러지를 함께 혼합하여 소각하고 있어 하수슬러지의 소각량과 소각비율에 따른 N<sub>2</sub>O 발생특성을 조사하였다[7].

Table 3은 도시고형폐기물 소각로의 N<sub>2</sub>O 측정일에 소각처리된 도시고형 폐기물과 하수슬러지의 처리량과 N<sub>2</sub>O의 일일 배출량에 대하여 산정한 결과이다. 도시고형물 폐기물 소각로의 3차 측정일은 전체 폐기물 소각량 중 하수슬러지의 소각비율이 14.2%로 가장 높았으나 N<sub>2</sub>O 발생농도는 53.6 ppm으로 거의 유사하였으며, N<sub>2</sub>O 발생량도 폐기물 1톤당 900.08 g으로 1차와 2차의 발생량 보다 낮아 하수슬러지의 소각량과 소각비율이 N<sub>2</sub>O 발생농도와 발생량과의 상관관계를 찾을 수 없었다. 또한 N<sub>2</sub>O의 일일 배출량은 1차 108.44 kg day<sup>-1</sup>, 2차 95.29 kg day<sup>-1</sup>, 3차 90.41 kg day<sup>-1</sup>로 산출되었으며, 평균적으로 N<sub>2</sub>O 일일 배출량은 98.15 kg day<sup>-1</sup>로 조사되었다.

소각로의 N<sub>2</sub>O 발생량의 차이가 발생하는 이유는 폐기물의 화학성분 중 질소함량과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.

Table 3. N<sub>2</sub>O emission characteristics for waste incineration

Classification	N <sub>2</sub> O concentration (ppm)	Incineration (ton-waste/day)		N <sub>2</sub> O emission amount (kg day <sup>-1</sup> )
		municipal solid waste	sewage sludge cake	
1 <sup>st</sup> survey (2018.08.27.)	59.5	98.6		108.44
		85.1	13.5	
2 <sup>nd</sup> survey (2018.10.01.)	53.8	79.5		95.29
		73.8	5.7	
3 <sup>rd</sup> survey (2018.10.22.)	53.6	92.9		90.41
		79.7	13.2	

**Table 4.** Elemental compositions of municipal solid waste and sewage sludge cake

Component		Unit	Municipal solid waste	Sewage sludge cake
Chemical (dry basis)	C	%	56.2	56.4
	H	%	8.0	8.9
	O	%	33.6	25.2
	N	%	1.2	8.3
	S	%	0.1	1.1
	Cl	%	0.8	0.2
	Ash	%	12.4	40.7

폐기물 내의 질소성분은 소각공정에서 HCN으로 전환되어 N<sub>2</sub>O를 발생할 수 있으며, 소각로 운전조건에 따라 N<sub>2</sub>O 또는 NO<sub>x</sub>로 전환되어 배출되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 도시고형폐기물과 하수슬러지에 대한 화학성분을 분석을 시행하여 Table 4에 나타내었으며, 화학성분 분석결과와 N<sub>2</sub>O 발생량의 상관성을 조사하였다.

하수슬러지는 유기성 폐기물인 관계로 질소성분 함량이 8.3%로 도시고형폐기물에 비해 높게 측정되었다. 일반적으로 질소함량이 높은 폐기물을 연소할 경우 N<sub>2</sub>O 발생량도 증가할 수 있지만 본 연구결과에서는 질소성분 함량이 높은 폐기물의 소각량의 증가에 따른 N<sub>2</sub>O의 발생농도 및 발생량의 증가를 확인할 수 없었다[8]. 따라서, 본 연구의 소각시설에서 배출되는 N<sub>2</sub>O의 발생농도 및 발생량의 차이는 소각시설의 운전조건에 따른 가장 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

폐기물의 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생농도는 소각온도가 990 ~ 1,030 °C 범위에서 최대로 생성되며, 그 이상의 온도에서는 감소하는 것으로 보고되고 있다. 산소농도의 경우는 낮을수록 NO<sub>x</sub> 발생량은 증가하는 반면 N<sub>2</sub>O 생성률은 감소한다는 연구결과를 바탕으로 본 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생농도 및 발생량도 이러한 영향이 가장 크게 작용한 것으로 추정된다[9,10].

### 3.3. N<sub>2</sub>O 배출계수 개발

본 연구에서 N<sub>2</sub>O 배출계수 개발을 위한 배출량의 산정방법은 Tier 4 Method에 따라 N<sub>2</sub>O 분석장치로 24시간 동안 연속 측정된 N<sub>2</sub>O 농도와 TMS 데이터의 건식 유량을 이용하여 Equation (2)에 적용하여 산정하였으며, 일일 폐기물 소각량을 이용하여 N<sub>2</sub>O 배출계수를 산출하여 Table 5에 나타내었다.

도시고형폐기물 소각로의 N<sub>2</sub>O 일일 배출량과 폐기물 소각량을 이용하여 산출된 N<sub>2</sub>O 배출계수는 1차 1,100.11 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>, 2차 1,198.20 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>, 3차 900.08 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>로 산출되며, 이러한 결과를 바탕으로 본 연구의 대상시설인 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출계수는 이를 평균하여 1,066.13 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>로 산출되었다[11].

최근 폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생량을 조사한 연구결과를 보면 유동상식 연소로를 이용한 하수 슬러지 소각시설의 경우는 N<sub>2</sub>O의 발생농도가 대략 200 ~ 300 ppm 수준이며, 배출

**Table 5.** N<sub>2</sub>O emission factor of municipal solid waste incineration plant

Classification	Flow rate (Sm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> )	Average of furnace temp. (°C)	Incineration (ton-waste/day)	N <sub>2</sub> O emission factor (g <sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton <sub>waste</sub> <sup>-1</sup> )
1 <sup>st</sup> survey (2018.08.27.)	38,660	916.8	98.6	1,100.11
2 <sup>nd</sup> survey (2018.10.01.)	37,572	921.3	79.5	1,198.20
3 <sup>rd</sup> survey (2018.10.22.)	35,779	936.7	100.4	900.08
Mean	37,337	919.1	92.9	1,066.13

계수는 0.042 ~ 1.664 kg<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>sewage sludge</sub><sup>-1</sup>로 tier 1과 tier 2 산정방법의 배출계수에 비해 발생농도와 배출계수가 차이가 있는 것으로 보고되고 있다[8-10]. 본 연구결과에서도 연속측정 방법에 의해 산출된 N<sub>2</sub>O 배출계수가 tier 1과 tier 2 산정방법의 생활폐기물 N<sub>2</sub>O 배출배수에 비해 약 20배 정도 높은 것으로 조사되었으며, 이러한 연구결과를 통해 도시고형폐기물 소각시설의 실제 N<sub>2</sub>O 발생량을 산정하기 위해서는 연속측정 방식을 도입하는 것이 유용하다고 판단된다[12-14].

## 4. 결론

본 연구는 도시고형폐기물 소각설비에서 발생하는 N<sub>2</sub>O 농도를 24시간 동안 연속적으로 측정하고, 해당 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출계수를 개발하였다. 본 소각시설은 소각용량은 100 ton day<sup>-1</sup> 규모이며, 도시고형폐기물 이외의 일부 하수슬러지를 같이 소각하는 처리시설이다. N<sub>2</sub>O 발생농도의 연속측정은 2018년 8월 27일부터 10월 22일까지 3회에 걸쳐 NDIR 방식의 분석기를 이용하여 수행하였다. 본 연구에서 측정된 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출농도를 연속측정한 결과 일일평균농도는 53.6 ~ 59.5 ppm의 범위의 농도분포를 갖고, 전체 평균배출농도는 55.6 ppm으로 측정되었다. N<sub>2</sub>O 발생계수가 높은 하수슬러지의 혼합비율에 따른 N<sub>2</sub>O 발생농도에 대한 영향을 조사한 결과 하수슬러지의 소각비율이 14.2%로 가장 많았던 3차 측정일의 N<sub>2</sub>O 발생농도는 53.6 ppm으로 다른 측정일의 N<sub>2</sub>O 농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생량 및 발생농도는 폐기물의 성상 보다는 소각시설의 소각로 온도와 산소농도 같은 운전조건에 따라 상이하게 발생하는 것으로 판단된다. 본 소각시설에서 연속측정한 N<sub>2</sub>O 발생농도를 바탕으로 도시고형폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 배출계수는 1,066.13 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>로 산정되었다. 이는 국가온실가스 통계관리위원회의 도시고형폐기물의 N<sub>2</sub>O 배출계수인 52.1 g<sub>N<sub>2</sub>O</sub> ton<sub>waste</sub><sup>-1</sup>에 비해 약 20배 정도 높은 결과이다. 이와 같이 폐기물 소각시설의 N<sub>2</sub>O 발생량은 폐기물의 종류와 소각량을 이용한 산출방식으로는 정확하게 산정하기 어렵고, 실제 발생량과 큰 차이를 보이므로 보다 정확한 산정방식을 위해서는 소각시설별 배출계수를 개발

하여 활용하는 방법이 필요한 것으로 판단된다.

## 감사

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

## References

1. Korea Environment Institute, "A Study on Waste Management for Reducing Greenhouse Gas Emissions," (2010).
2. Ministry of Environment, "The 2nd Comprehensive Plan for National Waste Management," (2002).
3. 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).
4. Oh, S. H., Kang, L. S., and Jung, D. H., "A Study on the Effectiveness of Continuous CO<sub>2</sub> Emission Monitoring in a Waste Incinerator," *J. Climate Change Res.*, **9**(3), 273-281 (2018).
5. 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).
6. IPCC, "Climate Change 2007 - The Physical Science Basis," (2007).
7. 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).
8. 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. KSWM*, **11**(2), 161-168 (1994).
9. Crisanto, M.-C., Carlos, E. R., Fernando, H.-R., and Hans, A., "N<sub>2</sub>O Formation in Selective Non-Catalytic NO<sub>x</sub> Reduction Processes," *J. Environ. Prot.*, **2**, 1095-1100 (2011).
10. Lee, J. W., Kang, S. M., Kim, S. J., Kang, S. Y., Lee, S. H., and Jeon, E. C., "Development of non-CO<sub>2</sub> Emission Factors from MSW Pyrolysis Melting Treatment in Korea," *Environ. Earth Sci.*, **74**(5), 4157-4162 (2015).
11. 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 N<sub>2</sub>O Production in Fluidized Bed Incineration of Sewage Sludge," *Clean Technol.*, **20**(4), 390-397 (2014).
12. Park, S. W., Choi, J. H., and Park, J. W., "The Estimation of N<sub>2</sub>O Emissions from Municipal Solid Waste Incineration Facilities," *Waste Manage.*, **31**(8), 1765-1771 (2011).
13. 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 Manag.*, **35**, 135-140 (2015).
14. Kang, S. C., Cho, C. S., Kim, S. J., Kang, S. M., Yoon, H. G., and Jeon, E. C., "Comparison of N<sub>2</sub>O Emissions by Greenhouse Gas Emission Estimation Method," *J. Climate Change Res.*, **6**(3), 175-184 (2015).