도시고형폐기물 소각시설에서 발생하는 N₂O 발생량 조사 및 저감효과에 관한 연구 Investigation of N₂O Emission and Reduction Effect from MSW Incineration Plant

송현옥 · 고재철* · 최상현** · 김덕현***,†

Hyun-Ok Song · Jae-Churl Ko* · Sang-Hyun Choi** · Duk-Hyun Kim***,†

시흥시청 청소행정과 · *㈜피엠티알 청정기술전략연구원

** (주)금강씨엔티 · ***한국산업기술대학교 생명화학공학과

Cleaning Administration Division Siheung City · *PMR-ICTS · **KeumKang CNT,

*** Department of Environmental Engineering & Biotechnology, Korea Polytechnic University

(Received November 27, 2017; Revised December 4, 2017; Accepted December 8, 2017)

Abstract : In this study, municipal solid waste (MSW) has collected 3 times and physico-chemical analysis has done. Nitrous oxide emissions from MSW incineration plant were measured continuously by EPA Method 18 and it was compared with the emission by calculation using the emission factor. The N₂O emission of MSW incineration plant was more than twice as large as the emission by calculation. It was found that the installation of abatement facilities in MSW incineration plant is effective in achieving the greenhouse reduction targets and it can be ensure economical efficiency through emission trading system.

Key Words : Nitrous Oxide, Greenhouse Gas, Incineration, Municipal Solid Waste

요약 : 본 연구에서는 도시고형폐기물 소각시설을 대상으로 3회에 걸쳐 도시고형폐기물을 수거하여 폐기물의 성상 및 물리 화학적 조성을 조사하였다. 또한 소각시설에서 배출되는 N₂O를 연속적으로 측정하여 발생량을 조사하였으며, IPCC에서 제시한 폐기물의 온실가스 배출량 산정방법으로 산출된 발생량과 비교하였다. 도시고형폐기물 소각시설에서 발생하는 N₂O 발생량은 IPCC 산출방법에 의한 발생량보다 2배 이상 크게 조사되었다. 도시고형폐기물 소각시설에서 N₂O 저감설비가 도입될 경우 온실가스 저감목표를 만족하기 용이하고, 탄소배출권 거래제도를 활용하여 경제적인 효과도 발생할 수 있는 것으로 조사되었다.

주제어 : 아산화질소, 온실가스, 소각, 도시고형폐기물

1. 서론

최근 기후변화로 인한 가뭄, 사이클론, 홍수, 산불 등과 같은 기상이변 사례가 속출하고 있으며, 이러한 기후 변화의 주요 원인으로 지구 온난화 문제가 거론되고 있다. 지구 온난화 문제는 대기 중에 온실가스의 농도가 증가함에 따라 가속화되고 있어 이에 국제적인 온실가스 저감을 위한 기후변화협약(UNFCCC)이 1992년 브라질 리우에서 개최된 유엔환경개발회의에서 채택되었으며, 1994년 3월에 발효되었다. 이후 제21차 유엔기후변화협약 당사국 총회(Conference of the parties, COP)가 파리에서 2015년 말에 개최됨에 따라 선진국과 개도국 모두가 온실가스 감축 의무를 부담하는 신 기후체제(Post 2020)가 도래하였다.

이에 따라 우리나라는 국내 온실가스 감축목표를 2030년 배출전망치(BAU, 8억5060 만톤) 대비 37%로 확정하고 유엔에 이 계획안을 제출하였다. 국내 각 부문별 온실가스 배출전망치 대비 감축률로 보면 수송 부문이 24.6%로 가장 높고, 폐기물 부문 23%, 전환(발전) 부문 19.4%, 건물 부문 18.1%, 공공 · 기타 부문 17.3% 순이었다. 가장 낮은 감축률을 배정받은 곳은 농축산 부분으로 4.8%였고, 산업 부문은 11.7%로 뒤를 이었다.¹⁾ 이 가운데 폐기물 부문은 감량화,

재활용, 에너지화 등으로 3.6 백만톤을 감축할 계획이다.

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.^{2,3)}

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 소각시 발생하는 열을 통해 전력을 생산하여 수익을 창출하거나 주변 지역에 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%까지 상승할 예정이다. 도시고형 폐기물의 에너지 회수는 지 자체 단위로 폐기물 소각설비를 연속적으로 가동하여 발전 및 열교환 같이 에너지를 생산하는 방식이 적용되고 있다. 하지만 폐기물의 소각처리량이 증가함에 따라 소각시 발생하는 악취와 대기오염물질을 배출하는 문제가 발생하고, 최근 들어서는 지구온난화를 유발하는 이산화

† Corresponding author E-mail: dhkim@kpu.ac.kr Tel: 031-8041-0611 Fax: 031-8041-0629

화탄소(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.

온실가스 배출량을 저감하기 위한 정부정책으로 환경부는 온실가스를 다량 배출하고 에너지를 많이 쓰는 업체를 선정하여 정해진 절감 목표를 달성하도록 2011년부터 온실가스·에너지 목표 관리제를 시행하고 있다. 이에 따라 환경부에서는 관리업체를 지정하여 온실가스 및 에너지 절감목표를 설정하여 이행하도록 하고 있다. 탄소배출권 할당제도는 할당받은 만큼의 탄소만 배출할 수 있도록 제한되어 있기 때문에 온실가스 감축목표를 초과한 배출량에 대하여 온실가스 배출권 거래시장이 새롭게 형성되었으며, 이로 인해 온실가스 감축목표를 초과달성할 경우는 CDM (Clean Development Mechanism)사업과 온실가스 배출권 거래제도를 통해 경제적인 이익도 발생하게 된다.

국내 탄소배출권 거래제도는 효율적 운영을 위해 배출권 거래제 기본계획에 따라 525개 기업을 대상으로 배출권을 할당해 시행 중에 있으며, 탄소배출권거래시장은 2015년 139억원, 2016년 906억원, 2017년 8월말 기준으로 2,342억원으로 꾸준히 증가하고 있다.

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, 모니터링 할 필요성이 높아지고 있다. 따라서 소각부문으로부터의 온실가스 배출량의 정확한 산정이 필수이며, 정밀한 온실가스 배출 통계체제가 요구되고 있다.

따라서, 도시고형 폐기물의 소각시설의 온실가스 배출량을 정확히 산정하기 위해서는 소각되는 폐기물의 양뿐만 아니라 성상을 정확히 파악하고 성상별 활동도 자료의 신뢰성이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 C시의 도시고형폐기물 처리시설로 200 ton/day 규모의 소각시설에서 발생하는 온실가스를 연속으로 측정하여 발생량을 조사하였다. 본 소각시설의 소각로는 로타리 킬른(Rotary Kiln)으로 생활폐기물, 사업장폐기물을 주로 소각처리하고 있으며, 도시고형폐기물 이외에 일부 하수처리장 공정에서 발생하는 하수 탈수슬러지를 건조한 후 혼합소각을 하고 있다. 대상 폐기물은 본 시설에서 처리하고 있는 폐기물 중에서 종량제봉투, 선별가연성 폐기물, 건조하수슬러지에 대하여 폐기물의 성상에 대한 분석을 수행하였다. 폐기물의 성상분석은 각각의 폐기물별로 물리적 조성, 겉보기 밀도, 삼성분, 원소분석을 수행하였다. 또한 폐기물 소각처리시 발생하는 연소가스와 N₂O의 배출특성을

조사하기 위해 N₂O 실측 데이터를 활용하여 연소가스의 배출특성과 온실가스 배출량을 산정하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료채취방법

채취시료는 도시고형폐기물, 산업폐기물, 건조하수슬러지를 주로 소각처리하고 있는 C시의 소각시설에 유입되는 폐기물을 이용하였으며, 시료의 채취방법은 1일 동안 수거되어 소각장으로 반입되는 폐기물 수거차량에서 배출된 폐기물을 무작위로 취하여 원추 4분법에 따라 분취하여 시료를 채취하였다.

2.2. 시료분석방법

폐기물의 물리적 조성 조사는 폐기물공정시험법의 원추4분법에 따라 시료를 채취하고 수거된 시료에 대해서 가연분과 불연분으로 대별하여 조성별로 구분하여 각 성상의 무게를 측정하고 함량을 구하였다.

폐기물공정시험법상 겉보기밀도는 일정부피의 용기에 시료를 넣고 3회 낙하시킨 후 부피가 감소하면 감소된 분량만큼 시료를 추가한다. 이 작업을 눈금이 감소하지 않을 때까지 반복한 다음 시료의 총무게를 용기부피로 나누어 측정하였다.

$$\text{Apparent density} = \frac{\text{Mass (kg)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

삼성분 및 유기물 함량은 도시고형폐기물을 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 폐기물공정시험법⁴⁾에 따라 600 ± 25℃에서 30분간 강열하고 남은 무게를 측정하여 가연분과 회분의 함량을 측정하였다. 삼성분의 산출방법은 다음의 식 (2)와 같다.

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

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

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

(M)_b, (M)_a : weight of sample before drying (g), weight of sample after drying (g)

(M_d)_b, (M_d)_a : weight of sample before ignition(g), weight of sample after ignition (g)

도시고형폐기물의 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 다음 가스크로마토그래피 분석기의 열전도도 검출기(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.

2.3. 소각시설 운전조건

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℃이며, 회전 rpm 1.2로 약 50분의 체류시간을 유지하도록 운전되고 있다. 또한 산화포화도는 12%이며, 공기과잉비는 $\lambda = 1.6$ 으로 설정되어있다. 이러한 로터리 킬른 소각로의 기본 운전조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1. Conditions for co-incineration using rotary kiln incinerator

Item	Conditions
O ₂ (vol. %)	12.0
Excess air ratio	1.6
Temperature (°C)	950
Retention time (min)	50

2.4. 연소가스 N₂O 측정방법

본 연구에서 소각로에서 배출되는 N₂O의 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.

N₂O의 농도측정은 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후 냉각 장치를 연결하고, 유량펌프를 연결한 다음 정속으로 시료를 가스분석기로 유입시켜 측정하였다.

소각시설에서 발생하는 온실가스의 발생량은 소각로로 투입되는 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 N₂O 농도를 측정하여 발생량을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도시고형폐기물 물성분석

본 연구에서 도시고형폐기물의 물성분석은 종량제 봉투

Table 2. Physical composition and apparent density of the municipal solid wastes

Items	Municipal solid waste					Drying sewage sludge		
	Standard plastic garbage bag		Selection combustibility					
	#1	#2	#1	#2	#3	#1	#2	
Apparent density (kg/m³)	235,0	189,4	95,0	77,0	96,0	901,3	866,9	
Com- bustibility (%)	Food	15,23	12,34	0,42	1,47	1,39		
	Paper	25,86	24,44	43,66	44,83	47,22		
	Wood	1,29	2,32	0,94	0,33	0,33		
	Leather	0,40	1,16	2,03	0,09	0,36		
	Plastics	20,18	21,00	23,94	18,97	18,06		
	Textiles	26,98	18,39	7,46	2,53	5,04		
	other	7,52	14,71	21,15	31,53	27,18	-	-
Subtotal	97,46	94,35	99,62	99,74	99,58			
Incom- bustibility (%)	Glass	1,34	3,62	-	-	-		
	Metal	1,20	2,03	0,38	0,26	0,42		
	other	0,00	0,00	-	-	-		
	Subtotal	2,54	5,65	0,38	0,26	0,42		
Total	100	100	100	100	100			

와 선별 가연성 물질과 건조슬러지를 가연분과 불연분으로 분류하여 수행하였다.

도시고형폐기물의 물리적 조성은 Table 2에 나타난 바와 같이 가연성분의 비율이 3종류 모두 90% 이상 높은 비율로 조사되었으며, 가연물질 중에서는 종이류가 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 조사되었다. 생활폐기물에 대한 물리적 조성분석 결과는 종량제 봉투의 경우 전체 평균으로 음식물류 13.79%, 종이류 24.44%, 플라스틱류 20.59%, 섬유류 22.69% 등 가연성 물질이 전체의 95.91%를 차지하고 있으며, 유리 및 금속류와 같은 불연성 물질은 전체의 4.10%를 차지하는 것으로 분석되었다. 또한 선별 가연성의 경우 전체 평균으로 음식물류 1.09%, 종이류 45.24%, 플라스틱류 20.32%, 기타 가연성분 26.62% 등 가연성 물질이 전체의 99.65%를 차지하고 있으며, 유리 및 금속류와 같은 불연성 물질은 전체의 0.35%를 차지하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석결과는 폐기물 잠재가스발생량 조사 보고서⁵⁾에 나타난 생활폐기물의 가연성물질 91.9%와 불연성 물질 8.1%와 비교하였을 때 비교적 가연성 물질의 함량이 높은 것으로 조사되었다.

생활폐기물의 겉보기 밀도는 시료를 균일하게 혼합한 후 재현성을 확보하기 위해 3회 이상 측정하였으며, 측정된 결과를 물리적 조성과 함께 Table 2에 나타내었다.

생활폐기물 중에서 종량제 봉투 내 폐기물의 겉보기 밀도는 212.20 kg/m³, 선별 가연성은 89.33 kg/m³, 건조슬러지는 884.1 kg/m³으로 각각 측정되었다. 선별 가연성의 겉보기 밀도가 종량제 봉투에 비해 낮은 이유는 밀도가 높은 음식물의 비율이 낮은 반면에 기타 가연성분이 상대적으로 높

Table 3. Components of the municipal solid wastes

	Standard plastic garbage bag	Selection combustibility	Drying sewage sludge
Moisture (%)	39.32	28.65	8.72
Combustible (%)	54.00	61.75	64.88
Ash (%)	6.68	9.60	26.40

기 때문인 것으로 판단된다. Kim 등⁶⁾의 연구결과에 의하면 Y군의 평균 겉보기 밀도가 아파트의 경우 135 kg/m³, 단독주택의 경우 148 kg/m³, A시의 경우는 193 kg/m³, 단독주택은 237 kg/m³으로 조사되었고, Song 등⁷⁾의 연구결과에서 춘천시 단독주택의 생활폐기물의 겉보기 밀도가 220.1 ± 121.61 kg/m³으로 조사된바 있으며, 이러한 연구결과와 비교할 경우 본 소각시설의 도시고형폐기물의 겉보기 밀도도 타 지역의 겉보기 밀도와 거의 유사한 결과를 얻은 것으로 판단된다.

본 연구에서 측정된 생활폐기물 시료의 3성분 측정결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 종량제봉투의 시료는 수분 39.32%, 회분 6.68%, 가연분 54.00%이며, 선별된 가연성 시료는 수분 28.65%, 회분 9.60%, 가연분 61.75%이고, 건조슬러지는 수분 8.72%, 회분 26.40%, 가연분 64.88%로 측정되었다. 국내 생활폐기물의 삼성분 측정결과는 수분 25~50%, 가연분 30~80%, 회분 5~20%의 범위에 있는 것으로 보고되고 있으며, 수도권매립지로 반입되는 생활폐기물의 삼성분은 수분 22.7%, 가연분 70.9%, 회분 6.5%로 본 연구결과와 비교할 경우 수분함량이 높은 반면에 가연분은 낮게 조사되었다.⁸⁻¹²⁾ 생활폐기물의 수분함량은 지역별로 15~30%의 편차가 발생하기 때문에 측정된 삼성분 결과는 국내 생활폐기물의 측정범위 내의 지역별 편차로 판단된다.

생활폐기물의 원소분석을 위하여 폐기물을 구성하는 주요 원소인 탄소, 산소, 질소, 수소, 황, 염소 등을 산화-환원과 같은 화학반응을 이용하여 정량적으로 산출하여 분석을 수

Table 4. Chemical & energy of the municipal solid wastes

Component (%)	Municipal solid waste	Separated combustible materials	Sewage sludge cake
Chemical (dry)	C	50.06	50.14
	H	7.13	6.54
	O	29.95	28.53
	N	1.06	0.58
	S	0.08	0.20
	Cl	0.74	0.55
	Ash	11.00	13.47
Chemical (Wet)	C	30.38	35.79
	H	4.33	4.67
	O	18.17	20.35
	N	0.64	0.42
	S	0.05	0.14
	Cl	0.45	0.40
	Ash	54.00	61.75

행하여 Table 4에 나타내었다. 생활폐기물의 원소분석을 수행한 결과 탄소의 함량은 선별 가연성, 종량제 봉투, 건조슬러지 순으로 50.14%, 50.06%, 40.11%로 조사되었다. 폐기물의 발열량에 영향이 큰 수소함량의 경우는 종량제 봉투가 7.13%로 가장 높으며, 선별 가연성과 건조 슬러지의 함량은 6.54%, 6.31%로 나타났다. 폐기물 성상별 수소함량은 비닐/플라스틱류와 고무/피혁류가 높은 것으로 알려져 있는데, 본 측정결과에서도 비닐/플라스틱류의 비율이 다소 높게 측정된 종량제 봉투의 수소 함량이 가장 높게 측정되었다. 또한 염소성분의 경우도 종량제 봉투가 0.74%로 가장 높았으며, 이와 같은 결과도 비닐/플라스틱류에 포함되어 있는 염소성분에 의한 영향으로 나타난 결과로 예상되어진다. 질소함량은 건조슬러지, 종량제 봉투, 선별 가연성 순으로 함량은 각각 5.87%, 1.06%, 0.58%로 건조슬러지의 경우 거의 대부분이 유기물이기 때문에 슬러지 성분에 존재하는 질소성분에 의해서 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 폐기물 중의 질소성분은 연소시 N₂O를 발생시키는 발생인자로 연소용 공기 또는 폐기물 중 질소(N) 성분과 연소용 공기 중 산소(O)가 결합하여 질소산화물을 생성하는데, 이때 온도 및 운전조건에 따라 N₂O가 발생한다. 따라서 폐기물 성상별 질소 함량은 중요한 N₂O 발생인자가 된다. 폐기물 성상별 질소 함량은 목재나 섬유류가 높은 것으로 알려져 있다.¹³⁾

3.2. N₂O 발생농도

본 소각시설에서 배출되는 N₂O 농도 측정은 폐기물 소각시설의 연돌에서 5분 간격으로 N₂O 농도와 유량을 측정하였으며, 측정결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 3회에 걸쳐 연속측정을 수행하였다. 이와 더불어 소각시설에서 배출되는 NOx 농도도 함께 측정하여 소각시설에서 배출되는 N₂O와 NOx의 농도를 비교하였다.

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 측정은 실시간으로 장시간 측정이 가능한 비분산 적외선분석장치를 이용하여 측정하였으며, NDIR 분석기를 이용한 N₂O 측정은 신뢰성이 확보되어 글로벌 시험인증기관인 독일 TÜV에서 승인되어 활용하고 있어 N₂O 측정기기로 활용하였다.

Fig. 1은 소각시설의 연돌에서 연속적으로 측정된 N₂O와 NOx의 배출농도를 나타낸 것이며, Fig. 2는 3회에 걸쳐 연속적으로 측정된 N₂O 배출농도를 나타낸 것이다.

소각시설에서 배출되는 N₂O의 농도를 측정한 결과 소각조건의 변화가 거의 없는 경우 일정한 농도범위를 유지하면서 배출되는 것으로 조사되었다. 이 때 N₂O의 실측농도는 60~100 ppm의 범위로 발생하는 것으로 측정되었으며, 최소 농도는 52.0 ppm이며, 최대 농도는 104.0 ppm으로 조사되었다. 측정일 별로 N₂O 발생 평균 농도를 비교한 결과는 2차 측정일이 가장 높은 농도인 90.08 ppm으로 측정되

Fig. 1. Comparison of actual measured N_2O and NOx concentration in the object incineration.

Fig. 2. Trend of actual measured N_2O concentration in the object incineration.

었으며, 3차 측정일에 측정된 농도가 가장 낮은 62.28 ppm을 나타내었다.

폐기물 소각에 의한 N_2O 발생량에 대한 연구결과를 보면 슬러지의 소각의 경우 600 ppm의 N_2O 가 배출되며, 이때 발생하는 Fuel-N의 N_2O 전환율은 약 0.5% 정도인 것으로 보고되고 있다. 또한 생활 폐기물의 소각에 의한 N_2O 의 발생량은 하수 슬러지의 소각에 의해 발생하는 양의 1/4 수준으로 보고된 바 있으며, 본 소각시설에서 배출되는 N_2O 의 실제 측정농도도 이와 유사한 것으로 판단된다.¹³⁾

또한 소각시설에서 배출되는 NOx 의 평균농도를 살펴보면 최소농도는 22.38 ppm이고, 최대농도는 33.03 ppm으로 측정되었으며, 이러한 측정결과와 N_2O 측정농도와 비교하면 소각시설에서 배출농도 N_2O 농도가 NOx 농도에 비해 2배 이상 높은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 대상소각장이 하수슬러지를 혼합소각하고 있기 때문에 하수슬러지에 의한 SOx , NOx 및 N_2O 의 발생영향 따른 것으로 사료된다. 대규모 소각로에서는 대기오염방지시설을 도입하고 굴뚝원격감시체계(TMS)로부터 황산화물(SOx), 질소산화물

Table 5. Actual measured NOx & N_2O concentration

Concentration (ppm)		1st	2nd	3rd
NOx	Min.	8,10	14,00	2,10
	Max.	56,00	54,60	57,30
	Ave.	33,03	29,69	22,38
N ₂ O	Min.	60,73	76,78	52,00
	Max.	90,82	104,00	73,00
	Ave.	74,54	90,08	62,28

(NOx)에 대한 안정적인 관리를 유지하고 있으나, N_2O 에 대한 관리기준의 미비로 대기오염방지설비가 설치되어 있지 않기 때문에 대부분의 소각로에서 N_2O 배출농도가 높게 나타날 것으로 예상되어진다.^{14,15)}

3.3. 도시고형폐기물 소각시설의 N_2O 배출량 산정

소각에 의해 발생하는 온실가스 배출량을 산정하기 위해 IPCC 지침서에서 제시한 산정방법을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였으며, N_2O 의 배출량 산정식은 식 (3)과 같다.¹⁶⁾

$$N_2O = \sum (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad (3)$$

IW_i = 폐기물 종류 i 의 소각된 양(Gg/yr)

EF_i = N_2O 의 배출계수

아산화질소의 배출량을 배출 계수를 이용하여 산정하는 방법에 대한 연구들이 수행되어 폐기물 종류에 따른 배출 계수에 대한 자료들이 제시되고 있으나 폐기물의 성상이 다른 관계로 동일한 폐기물에 대한 배출계수 값에 차이를 보이고 있다.

Table 6은 환경부에서 발표한 폐기물 성상별 N_2O 배출계수로 본 연구에서는 환경부가 발표한 배출계수인 도시고형 폐기물 39.8 g/ton, 건조슬러지 408.41 g/ton을 활용하여 N_2O 배출량을 산정하였다.¹⁷⁾

본 연구대상의 소각시설은 도시고형폐기물(MSW)과 건조슬러지를 70 : 30 비율로 혼합하여 소각하고 있으며, 각각 소각되는 양은 도시고형폐기물은 5.83 ton/hr이며, 건조슬러지는 2.5 ton/hr이다. 이와 같이 각각의 소각량과 온실

Table 6. Emission factors of N_2O from waste incinerator for various waste type¹⁶⁾

Composition	(unit : g/ton)
Municipal solid waste	39.8
Industrial waste (except for sludge)	109.57
Sludge in industrial waste	408.41
Construction waste	109.57
Specified waste (except for sludge)	109.57
Sludge in specified waste	408.41

Table 7. Comparison between calculated N₂O concentration and actual measured N₂O concentration

Flow rate (Q) (m ³ /hr)	Waste (ton/hr)	Emission factor (g/ton)	N ₂ O Emission (ppm)	N ₂ O measured concentration (ppm)
60,000	MSW	5.83	39.8	1.97
	Sludge	2.50	408.41	8.66
				1st-74.54 2nd-90.08 3rd-62.28

가스 배출계수¹⁶⁾ 및 소각시설 설계유량(Q_d)을 이용하여 N₂O 배출농도를 산정하였으며, 구체적인 N₂O 발생농도 산출식은 식 (4)와 같다. N₂O 배출계수를 이용하여 산출된 N₂O 발생농도와 소각설비에서 직접 연속으로 측정된 N₂O 측정농도와 비교한 결과를 Table 7에 나타내었다.

$$C_{N_2O} = \frac{W_i \times EF_i \times K \times 10^{-6}}{Q_d} \quad (4)$$

C_{N_2O} = N₂O 산출농도(ppm)

W_i = 폐기물 종류 i의 소각된 양(ton/hr)

EF_i = N₂O의 배출계수(g/ton)

K = 환산계수(44/22.4 (kg/m³))

Q_d = 소각시설 설계유량(60,000 m³/hr)

N₂O 배출량 산정식을 이용하여 계산된 N₂O 배출농도는 10.63 ppm으로 현장에서 연속측정한 N₂O 농도와 차이가 있음을 알 수 있다. Park 등¹⁸⁾이 연구한 결과에 따르면 도시고형폐기물의 N₂O 발생계수는 71~153 g/ton으로 조사되었고, Eliza 등¹⁹⁾은 소각로에서 NO_x를 제어하기 위한 SNCR로부터 발생하는 N₂O 배출량을 51.5 ± 10.6 g/ton으로 보고한바 있다. 이처럼 폐기물의 성상과 소각조건 또는 방지시설의 운전특성에 따라 N₂O의 배출량이 차이를 보이기 때문에 향후 본 소각시설의 폐기물에 대한 성상을 세밀히 분석하여 N₂O 배출계수에 대한 보정이 필요하다고 판단된다.²⁰⁾

3.4. 도시고형폐기물 소각시설의 N₂O 저감효과

C시에서 현재 운영하고 있는 소각시설은 처리용량 200톤 규모이며, 폐기물 연소가스는 각 100톤 씩 2개의 연돌로 배출되도록 구성되었으며, 최대 유속은 16.23 m/sec, 연돌 내경은 1.1 m, 평균 온도는 187℃로 설계되어 운전되고 있다.

본 소각시설에서 발생하는 N₂O의 배출량을 조사하기 위해 소각시설에서 측정된 N₂O의 농도데이터와 유량을 이용하여 현재 가동 중인 소각시설에서 배출되고 있는 N₂O의 평균 농도와 최고 농도를 반영한 배출량 산정결과를 정리하여 Table 8에 나타내었다. 소각시설에서 측정된 N₂O의 농도를 이용하여 분석된 평균 배출량은 9.43 g/sec이며, 최대 배출량은 11.46 g/sec로 조사되었다. 이러한 계산결과를 바탕으로 연간 배출량을 산정해 보면 연간 297.3 ton의 N₂O가 소각시설에서 발생되어 배출되고 있음을 알 수 있으며,

Table 8. Amount of N₂O emission from waste incinerator

	Flowrate (CMM)	N ₂ O Conc. (ppm)	N ₂ O Emission (g/sec)	N ₂ O Emission (ton/yr)
1st	3,963	74.54	9.67	304.98
2nd	3,887	90.08	11.46	361.50
3rd	3,501	62.28	7.14	225.11
Ave.	3,784	75.63	9.37	295.45

Table 9. Greenhouse emission trading price for N₂O removal on waste incinerator

	N ₂ O Emission (ton/yr)	CO ₂ Emission (ton/yr)	ETS* (KRW/yr)
1st	305.05	94,565.50	1,985,875,500
2nd	361.57	112,089.70	2,353,820,700
3rd	225.16	69,799.60	1,465,791,600
Ave.	297.26	92,150.60	1,935,162,600

* ETS : Emission Trading Scheme

N₂O의 지구지난화 지수가 CO₂ 대비 310배에 달하기 때문에 CO₂로 환산할 경우 연간 92,152 tCO₂eq.를 배출하고 있는 것으로 볼 수 있다.

현재 폐기물 소각설비의 대기오염물질 저감설비에는 N₂O 저감설비가 도입되어 있지 않으며, 탄소배출권 할당 기업 및 지자체 운영 소각설비에서 N₂O의 배출량을 저감할 경우 감축한 만큼의 탄소배출권을 판매하여 경제적 수익을 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구를 수행한 소각시설은 탄소배출권 할당기관으로 탄소배출권을 할당받아 온실가스 감축사업을 시행 중에 있으며, 현재까지는 2차 연소 부생연료 사용량 감소, LNG 사용 확대 등으로 온실가스 배출량을 감축하였다. 향후 본 소각설비에 N₂O 저감설비를 도입할 경우 탄소배출량을 크게 감축할 수 있으며, 탄소배출 할당량을 초과하는 감축량에 대해서는 배출권 거래제도를 통해 경제적인 수익도 얻을 수 있는 것으로 판단된다. N₂O 저감설비를 도입할 경우 CO₂ 저감효과에 의해 발생하는 경제성 평가를 시행하여 Table 9에 나타내었다.

탄소배출권 거래단가는 21,000원/ton으로 하여 N₂O 저감에 따라 발생하는 이익을 산정한 결과 본 소각시설에서 N₂O를 저감할 경우 탄소배출저감에 따라 연간 약 20억원의 부가 수익이 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서, 소각시설에서 발생하는 N₂O를 저감하는 설비를 도입하여 운영할 경우 초기 투자비와 운영비를 CO₂ 저감사업에 의해서 확보가 가능할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 C시의 200 ton/day 규모의 소각설비로 유입되는 도시고형폐기물에 대하여 폐기물의 조성 및 물리·화학

적 특성을 분석하고, 소각시설에 배출되는 N_2O 의 배출량을 산정하여 소각시설에서 배출되는 N_2O 를 저감할 경우의 경제적 효과를 온실가스 거래제도를 활용하여 조사하였다.

도시고형폐기물의 물리적 조성은 종이류가 24.4%로 가장 높은 비율로 존재하며, 그 다음으로는 플라스틱류와 섬유류가 비율이 높게 차지하는 것으로 조사되었다.

삼성분에 대한 측정결과는 생활폐기물의 수분함량이 39.3%로 다른 지역의 수분함량에 비해 다소 높게 분석되었으며, 원소분석 결과에서는 수소의 함량이 7.13%로 평가되었다.

본 소각시설에서 배출되는 N_2O 의 배출량은 연간 297.3톤으로 CO_2 로 환산할 경우 연간 약 92,152 t CO_2 eq.이 배출되고 있는 것으로 조사되었다. 현재 도시고형폐기물 소각시설에서는 N_2O 저감설비가 설치되어 있지 않으나 온실가스인 N_2O 저감설비를 도입함으로써 온실가스 저감효과가 상당히 높은 것으로 조사되었다. 또한 탄소배출권 할당기업의 소각시설에서 N_2O 를 저감할 경우의 경제적 효과를 온실가스 거래제의 거래금액으로 환산한 결과 연간 약 20억원의 경제적 효과가 발생하는 것으로 조사되었다.

KSEE

References

- Greenhouse Gas Inventory and Research Center, "2016 Annual Report for National Greenhouse Gas Inventory," (2017).
- Korea Environment Institute, "A Study on Waste Management for Reducing Greenhouse Gas Emissions,"(2010).
- Ministry of Environment, "The 2nd Comprehensive Plan for National Waste Management,"(2002).
- Ministry of Environment, "Test Method of Waste," 106-107 (2004).
- Sudokwon Landfill Site Management Corp., "Investigation Report for Potential Gas Production in Waste,"(2004).
- Kim, J. K., Kim, S. K. and Park, N. B., "A Study on the Chemical Characteristics of Waste and Leachate on Landfill Site," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **21**(6), 607~617(2004).
- Song, D. K., Kim, S. D., Jang, E. S., Park, J. H., Jung, J. S. and Kong, S. H., "Physico-Chemical Characteristics of Municipal solid Wastes Generated in the City of Chuncheon," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **20**(8), 807~817(2003).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. A., "Integrated solid waste management," McGraw-Hill, Third Edition (1993).
- Lee, S. H. and Min, D. K., "Study on the Physico-Chemical Characteristics of MSWs in West-Seoul Region," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **17**(5), 537~542(2000).
- Lee, J. H., Moon, D. H. and Kim, J. W., "The Composition and Physicochemical Characteristics of MSW Treated in Sudokwon Landfill," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **17**(3), 363~369(2000).
- 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).
- Lee, S. J., Lee, K. J., Shim, B. B. and Seo, Y. C., "Characteristics of Municipal Wastes for the Installation of an Incinerator and Landfill," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **15**(5), 548~556(1998).
- Lee, S. J. and Jeon, S. G., "Reduction Technology of N_2O Greenhouse Gas in Fluidized Bed Incineration of Sewage Sludge," *News & Information for Chemical Engineers*, **33**, 679~684(2015).
- Sänger, M., Werther J. and Ogada, T., "NO_x and N₂O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge," *Fuel*, **80**, 167~177(2001).
- Yang, D. J., Ko, J. C., Kim, J. K., Park, H. J. and Park, J. S., "Co-incineration Characteristics of Sewage Sludge and Industrial Waste Using the Rotary Kiln Incinerator," *J. Korea Organic Resources Recycl. Assoc.*, **17**(3), 91-99(2009).
- IPCC, "2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,"(2006).
- Ministry of Environment, "The First National Allocation Plan of Emission Trade scheme for Greenhouse Gas,"(2014).
- 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).
- Harris, E., Zeyer, K., Kegel, R., Müller, B., Emmenegger, L. and Mohn, J., "Nitrous oxide and methane emissions and nitrous oxide isotopic composition from waste incineration in Switzerland," *Waste Manage.*, **35**, 135~140(2015).
- 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).