

하수슬러지 소각장의 온실가스 배출계수 개발

Development of Greenhouse Gas Emission Factors from Sewage Sludge Incinerator

김승진* · 강성민* · 강소영* · 이정우** · 사재환*** · 박성진**** · 전의찬*****,[†]

*세종대학교 기후변화협동과정, **세종대학교 지구환경과학과,

세종대학교 환경에너지연구소, *(주)이노엔스,

*****세종대학교 환경에너지융합학과

Kim, Seungjin*, Kang, Seongmin*, Kang, Soyoung*, Lee, Jeongwoo**,

Sa, Jae-Hwan***, Park, Seong-Jin**** and Jeon, Eui-Chan*****,[†]

*Cooperate Course for Climate Change, Sejong University

**Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University

***Environment & Energy Institute, Sejong University

****Innoens Co., Ltd.

*****Department of Environment and Energy, Sejong University

ABSTRACT

In this study, the researchers have developed the greenhouse gas emission coefficients targeted at sewage sludge incineration plants that treat sewage sludge by incineration. Among the gases emitted from the sewage sludge incineration plants, the greenhouse gases showed concentrations of 6.84% for CO₂, 4.51 ppm for CH₄, and 86.34 ppm for N₂O; calculated into greenhouse gas emission coefficients, these gave 276.06 kg CO₂/ton, 0.0066 kg CH₄/ton, and 0.35 kg N₂O/ton. As the result of calculating the greenhouse gas emission quantity in sewage sludge incineration plants using the greenhouse gas emission coefficients, the gross greenhouse gas emission was 84.63 ton CO₂ eq./day, and the net emission was 23.90 ton CO₂ eq./day; this was 37.52 ton CO₂ eq./day less than the net greenhouse gas emission that was calculated using the standard values of IPCC, which was 61.42 ton CO₂ eq./day. This difference is probably because unlike the standard values of IPCC, the greenhouse gas emission coefficients of this study reflected the special properties of subject facilities. Thus, it is thought that emission coefficient research on the facilities that deviated from the standard values of IPCC should continue to achieve the development of national greenhouse gas coefficient that reflects the special properties of Korea.

Key words : Emission Factor, Sewage Sludge, Greenhouse Gas, Incinerators

[†] Corresponding author : E-mail: ecjeon@sejong.ac.kr

1. 서론

우리나라는 경제성장 및 생활수준 향상에 따라 생활하수 및 공업폐수 등의 발생량이 증가하고, 방류수 수질기준이 강화되면서 하수처리시설이 2012년에 90개소에서 2013년에 114개소로 증가하였다. 하·폐수처리 과정에서 발생하는 하수슬러지의 양은 3,095 천 톤(2011년)에 이르며, 그에 따른 안정적인 처리대책 마련이 시급하다.

하수슬러지 처리방법에는 소각, 매립, 퇴비화, 해양투기 등과 같은 단순처분 방법이 있다. 하수슬러지는 대부분 단순 육상 매립에 의존하여 처리되었으나(Cho *et al.*, 2008), 폐기물관리법('03년 7월)에 의해 직매립이 금지되면서 비용이 저렴한 해양투기 방식으로 하수슬러지를 처리하였다. 해양투기 방식은 소각처리 방식에 비해 처리 비용이 15배 이상 저렴하여 해양투기를 증가시키는 원인이 되었다(Lee *et al.*, 2006). 그러나 최근 해양오염이 전 지구적 환경문제로 인식되면서(Kim *et al.*, 2008) 우리나라는 런던협약 '96의정서에 따라 2012년부터 하수슬러지의 해양투기를 전면 금지하는 정책을 수립하였다. 따라서 기존에 해양투기로 처리하던 하수슬러지는 육상매립 및 소각처리가 불가피한 실정이다. 그러나 육상매립의 경우 매립지 확보가 어렵고, 침출수와 악취 발생, 온실가스인 메탄과 이산화탄소 발생 등 2차 환경오염을 야기시키고 있다. 이에 현실적인 대안으로 슬러지의 감량 효과와 안정성이 우수한 소각처리가 대두되고 있다.

이러한 하수슬러지 소각장에서 발생하는 유해 대기오염물질에 대한 연구는 대기환경보전법 등 관련 규정에 의해 많이 진행된 상태지만(Park *et al.*, 2009; National Institute of Environmental Research, 2006), 온실가스 발생에 대한 연구는 미비한 실정이다. 또한, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에서는 하수슬러지 소각에 따른 온실가스 배출량 산정을 위한 기본 배출계수를 제시하고 있지만, 국가 및 연소시설의 특성을 반영한 Tier 2, Tier 3 수준의 배출계수를 개발하여 사용하는 것을 권장하고 있다(IPCC, 2007).

따라서, 본 연구에서는 국내 하수슬러지 소각장에서 배출되고 있는 온실가스를 분석하여 우리나라 특성을 반영한 온실가스 배출계수를 개발하고자 하며, 이를 통해 국내 실정에 맞는 정확한 온실가스 인벤토리 작성에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상시설 선정 및 시료채취 방법

2.1.1 연구대상시설 선정

본 연구에서는 200 ton/day 규모의 하수슬러지 소각시설을 보유하고 있는 경기도 A시의 슬러지처리 시설을 대상시설로 선정하였다. 대상시설에서는 유동상식 소각방식을 사용하여 일부 혐기성 소화를 거치고, 발생한 탈수슬러지를 처리하고 있으며, 방지시설로는 함진가스가 여과재를 통과 시 여과재가 장벽으로 작용하여 함진가스에서 먼지를 제거하는 여과 집진시설, 액적, 액막, 기포 등에 의해 함진배출가스를 세정, 입자 상호간의 응집을 촉진시켜 분리시키는 세정 집진시설 등을 포함하고 있다.

2.1.2 배출가스 시료 채취 방법

하수슬러지 소각장의 배출가스는 하수슬러지에 포함되어 있는 수분과 연소과정에서 발생하는 수분으로 인하여 수분함량이 높으며, 약 70~130℃의 고온으로 배출되고 있다. 따라서 시료 채취 시 수분과 온도를 고려하여 진행해야 한다.

또한, 하수슬러지 소각장은 투입되는 하수슬러지의 성상이 일정하지 않으며, 운전조건의 변동이 발생할 수 있기 때문에 온실가스 발생량의 변화가 클 수 있다. 따라서 본 연구에서는 간헐적 시료채취방법을 사용하지 않고 24시간 연속 시료채취방법을 사용하였으며, 온실가스 포집 모식도를 Fig. 1에 나타내었다(ASTM D 7459, 2008). ASTM D 7459에서는 배출가스 시료채취를 연속으로 24시간, 연 4회 실시하는 것을 명시하고 있어, 본 연구에서도 배출가스를 4회 채취하여 각각의 온실가스별로 분석을 실시하였다.

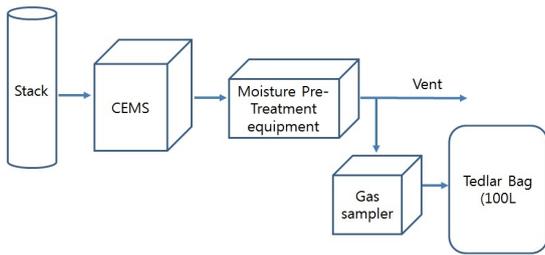


Fig. 1. Schematic drawing of the field setup for incineration gas sampling.

본 연구에서는 배출가스 시료 채취를 위해 배출 가스 시료 채취 장치를 고온의 배출가스를 저온(3℃)으로 냉각하여 수분을 제거할 수 있는 수분제거 장치(ALPHA, KOREA)와 수분 배출용 펌프인 드레인 펌프(ALPHA, KOREA), 배출가스를 일정한 유량으로 채취하기 위한 전자질량 유량계(ALICAT SCIENTIFIC, USA)와 펌프(KNJ, KOREA), 24시간 시료채취 도중 발생할 수 있는 점검 및 퍼지시간을 고려하기 위한 자동 ON/OFF 밸브(SYNTRK, KO-

Table 1. Comparison of concentration in input and output t

No.	CO ₂ (20%)		CH ₄ (100 ppm)		N ₂ O (100 ppm)		
	Input concentration	Output concentration	Input concentration	Output concentration	Input concentration	Output concentration	
1 Day	1	20.04	19.45	99.98	100.01	100.23	100.52
	2	19.98	19.62	101.21	100.92	100.21	100.12
	3	20.06	20.28	100.05	100.51	100.55	100.91
	Mean	20.03	19.78	100.41	100.48	100.33	100.52
	SD	0.04	0.44	0.69	0.46	0.19	0.40
	RSD	0.21	2.22	0.69	0.45	0.19	0.39
2 Day	1	19.99	20.31	101.51	100.21	100.31	100.19
	2	20.13	20.21	100.21	101.27	100.01	100.31
	3	20.22	20.32	100.15	99.65	100.28	99.98
	Mean	20.11	20.28	100.62	100.38	100.20	100.16
	SD	0.12	0.06	0.77	0.82	0.17	0.17
	RSD	0.58	0.30	0.76	0.82	0.16	0.17
3 Day	1	20.05	19.97	99.89	100.02	100.92	100.77
	2	20.07	20.2	100.02	101.08	100.58	100.55
	3	19.92	19.97	100.03	99.54	100.33	100.04
	Mean	20.01	20.05	99.98	100.21	100.61	100.45
	SD	0.08	0.13	0.08	0.79	0.30	0.37
	RSD	0.41	0.66	0.08	0.79	0.29	0.37
4 Day	1	20.05	20.21	101.04	100.98	100.78	100.21
	2	19.95	20.07	100.52	101.28	101.04	100.77
	3	19.97	19.95	100.34	99.74	100.57	100.74
	Mean	19.99	20.08	100.63	100.67	100.80	100.57
	SD	0.05	0.13	0.36	0.82	0.24	0.32
	RSD	0.26	0.65	0.36	0.81	0.23	0.31

REA)와 타이머(HERABELL, KOREA)로 구성되어 시료를 채취하였다.

2.1.3 시료 채취 장치 QA/QC

배출가스 시료 채취 장치는 전자질량 유량계(ALI-CAT SCIENTIFIC, USA)와 펌프(KNJ, KOREA) 등 시료 유실이 발생할 수 있는 장치를 포함하고 있어, 장치내에서의 시료유실 여부를 파악하기 위하여 시료유실과 관련한 QA/QC를 실시하였다. CO₂의 경우, 20.1% 농도의 표준가스(KRISS, KOREA), CH₄ 및 N₂O의 경우 각각 100.2, ppm, 100.1 ppm 농도의 표준가스(KRISS, KOREA)를 사용하여 시료 채취 장치 유입구 농도와 유출구 농도를 동시에 비교하였다. 시료 채취 장치의 QA/QC는 4번의 시료 채취 전에 각각 3번씩 실시하였으며, CO₂의 경우 유입구와 유출구의 평균 농도 차이는 약 0.03~0.24%, CH₄의 경우 0.03~0.25 ppm, N₂O의 경우 0.04~0.22 ppm로 나타났으며, 이는 분석기의 오차 범위에 들어오는 값으로 시료 채취 장치에서의 시료유실은 없는 것으로 평가되었다.

2.2 배출가스 분석 방법

2.2.1 온실가스 농도 분석 방법

배출가스 중 CO₂ 농도는 가스크로마토그래피(DS-6200, Donam)를 이용하여 분석하였다. 본 연구에서는 CO₂에 대한 검출 감도가 없는 FID를 보완하기 위해 CO₂를 CH₄으로 전환시킬 수 있는 메타나이지저(methanizer)를 장착하여 분석을 실시하였으며, 컬럼으로는 Porapak Q 80/100을 사용하였다. 수소와 운반기체는 각각 30 mL/min의 유량으로 설정하였으며, 공기는 300 mL/min로 설정하였다. 시료 주입부, 오븐, 검출부, 메타나이지저의 온도는 각각 100 °C, 80 °C, 250 °C, 350 °C로 설정하였으며, 운반 가스는 초고순도 질소(N₂ 99.9999%, Deokyang)를 사용하였다.

CH₄ 및 N₂O 농도는 가스크로마토그래피(CP-3800, Varian)를 이용하여 분석하였다. CH₄ 분석에 FID, N₂O 분석에 ECD를 Detector로 이용하였으며, CH₄

는 Stainless steel 길이 1 m, 외경 3.175 mm의 Porapak Q 80/100 mesh 컬럼(Restek)을 사용하였으며, N₂O는 Stainless steel 길이 3 m, 외경 3.175 mm의 Porapak Q 80/100 mesh 컬럼을 사용하여 분석하였다. FID, ECD의 온도는 각각 250, 320 °C로 유지하였고, Oven, Injector는 각각 70, 120 °C로 설정하였다. 운반가스는 초고순도 질소(N₂ 99.9999%, Deokyang)를 사용하였다.

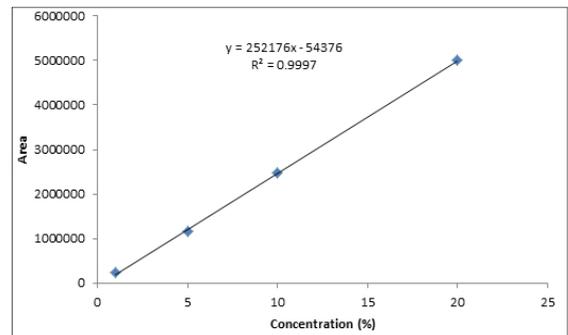


Fig. 2. Calibration curve of CO₂.

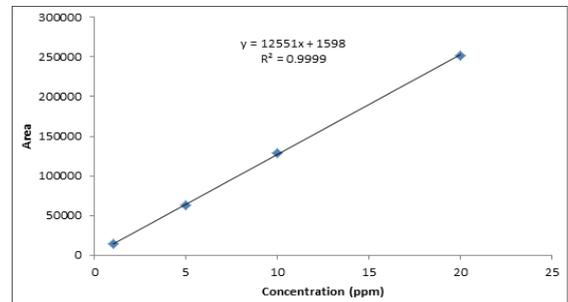


Fig. 3. Calibration curve of CH₄.

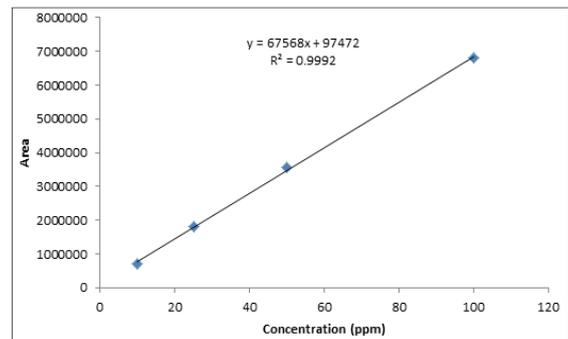


Fig. 4. Calibration curve of N₂O.

온실가스의 정량 분석을 위해 CO₂는 1~20%, CH₄는 1~20 ppm의 농도 범위, N₂O는 10~100 ppm 농도 범위에서 총 4개의 다른 농도 시료를 제조하여 검량선을 작성하였으며, CO₂, CH₄, N₂O 검량선을 Fig. 2~4에 나타내었다. 검량선을 작성한 결과, R²값은 각각 0.9997, 0.9999, 0.9992으로 나타나 우수한 상관성을 보였다.

2.2.2 분석기기의 재현성 평가

배출가스 분석의 재현성을 확인하기 위하여 CO₂는 농도 20.1%의 표준가스(KRISS, KOREA), CH₄와 N₂O는 각각 농도 10.1 ppm, 50.3 ppm(RIGAS, KOREA)의 표준가스를 10회 분석하였다. 재현성 분석에 대한 결과값은 Table 2에 제시하였으며, CO₂, CH₄, N₂O 표준가스 농도의 상대표준편차는 각각 0.54, 0.55, 0.35%로 우수한 재현성을 나타내었다.

2.3 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출계수 산정 방법

Table 2. Reproducibility of GC

No.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	Concentration(%)	Concentration(ppm)	
1	20.19	10.10	50.31
2	19.83	10.22	50.09
3	20.12	10.11	50.67
4	20.16	10.14	50.57
5	20.02	10.25	50.31
6	19.99	10.12	50.32
7	19.96	10.12	50.32
8	20.05	10.09	50.56
9	20.08	10.10	50.32
10	20.14	10.10	50.24
Mean	20.05	10.13	50.37
SD	0.11	0.06	0.17
RSD(%)	0.54	0.55	0.35

본 연구에서는 하수슬러지 소각장에서 배출되는 온실가스 농도를 분석하여 온실가스 배출계수를 산정하였으며, 필요한 유량 및 하수슬러지 투입량 등은 배출가스 시료채취 시 TMS(Tele Monitoring System) 자료를 활용하였다.

하수슬러지 소각장의 온실가스 배출량 산정을 위해 만든 work-sheet를 Table 3에 제시하였으며, 이 work-sheet는 온실가스의 종류에 따라 각각 2단계로 구성되어 있다. 1단계는 배기가스 분석에 의한 온실가스 농도와 유량 등의 기초자료를 입력하고, 2단계는 1단계의 기초자료 및 하수슬러지 사용량을 이용하여 온실가스 종류별 배출계수를 산정한다.

2.4 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출량 산정 방법

온실가스 배출량은 일반적으로 식 (1)을 이용하여 산정할 수 있으며, 하수슬러지의 경우, Fuel consumption에는 하수슬러지 사용량(ton)을 사용하며, Emission Factor는 CO₂, CH₄, N₂O의 각각의 배출계수에 지구온난화지수를 적용하여 산정한다. 지구온난화지수는 CO₂를 1로 볼 때 CH₄가 21, N₂O가 310이며, 이를 이용하여 CH₄, N₂O의 배출계수를 CO₂로 환산하여 온실가스 배출량을 CO₂ eq.로 산정한다.

$$\text{GHG Emissions} = \text{Fuel consumption} \times \text{Emission factor} \quad (1)$$

그러나 하수슬러지는 바이오매스에 포함되기 때문에, 연소 과정에서 발생하는 CO₂는 국가온실가스 배출량 산정 시 순배출량에서는 제외할 수 있다(IPCC, 2006; IPCC, 1996). 따라서 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출량을 산정할 경우, CO₂ 배출량을 포함한 총배출량과 CO₂ 배출량을 제외한 순배출량을 구분하여 산정하여야 한다.

3. 연구 결과

3.1. 하수슬러지 소각장의 온실가스 농도 분석 결과

Table 3. Estimating work-sheet of GHG emission factors

CO ₂	Step 1				
	Item	Concentration of CO ₂	Real dried gas flux	Molecular weight of CO ₂	Volume of ideal gas
	Sub-item	A	B	C	D
	Unit	%	m ³ /day	kg CO ₂	m ³
	Calculation			44	22.4
	Step 2				
	Item	Emissions of CO ₂	Amount of sewage sludge	CO ₂ emission factor	
	Sub-item	E	F	G	
	Unit	kg CO ₂ /day	ton/day	kg CO ₂ /ton	
	Calculation	{A*B*(C/D)/10 ² }		E/F	
CH ₄	Step 1				
	Item	Concentration of CH ₄	Real dried gas flux	Molecular weight of CH ₄	Volume of ideal gas
	Sub-item	A	B	C	D
	Unit	ppm	m ³ /day	kg CH ₄	m ³
	Calculation			16	22.4
	Step 2				
	Item	Emissions of CH ₄	Amount of sewage sludge	CH ₄ emission factor	
	Sub-item	E	F	G	
	Unit	kg CH ₄ /day	ton/day	kg CH ₄ /ton	
	Calculation	{A*B*(C/D)/10 ⁶ }		E/F	
N ₂ O	Step 1				
	Item	Concentration of N ₂ O	Real dried gas flux	Molecular weight of N ₂ O	Volume of ideal gas
	Sub-item	A	B	C	D
	Unit	ppm	m ³ /day	kg N ₂ O	m ³
	Calculation			44	22.4
	Step 2				
	Item	Emissions of N ₂ O	Amount of sewage sludge	N ₂ O emission factor	
	Sub-item	E	F	G	
	Unit	kg N ₂ O/day	ton/day	kg N ₂ O/ton	
	Calculation	{A*B*(C/D)/10 ⁶ }		E/F	

하수슬러지 소각장에서 채취한 배출가스의 온실 가스 종류별 농도값은 24시간 이상 채취한 배출가스를 각각 5회 분석한 값의 평균을 사용하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 배출가스를 분석

한 결과, CO₂ 농도 범위는 5.76~8.01%, 평균 농도는 6.84%로 나타났으며, 상대표준편차는 16.70%로 산정되었다. Non-CO₂인 CH₄와 N₂O의 농도 범위는 각각 3.73~5.31 ppm, 75.29~94.42 ppm, 평균

Table 4. Concentration of GHG using GC

Sample collecting term	Sludge	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	Weight(ton)	Concentration(%)	Concentration(ppm)	
1 Day	106.72	5.76±0.03	3.73±0.01	89.45±0.27
2 Day	121.73	8.01±0.08	5.11±0.01	94.42±0.22
3 Day	109.98	7.63±0.07	5.31±0.02	75.29±0.18
4 Day	109.57	5.97±0.04	3.90±0.01	86.19±0.11
Mean	112.00	6.84	4.51	86.34
SD	5.76	1.14	0.81	8.11
RSD(%)	5.14	16.70	18.01	9.39

농도는 4.51 ppm, 86.34 ppm으로 나타났으며, 상대 표준편차는 18.01%, 9.39%로 산정되었다. 하수슬러지의 주요 소각방식인 유동상식 소각방식은 N₂O의 배출비율이 높은 것으로 알려져 있다(KEMCO, 2008; Shimizu *et al.*, 2000; Wojtowicz *et al.*, 1993). 본 연구에서도 분말석탄연소법(pulverized coal combustion)을 사용하는 화력발전소에서 발생하는 5 ppm 이하의 N₂O 농도보다 수배 이상 높게 산정되었다 (Kim, 2013).

3.2 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출계수 산정 및 비교

하수슬러지 소각장의 온실가스 배출계수를 산정할 결과를 Table 5에 나타내었다. 배출계수 산정결

과, CO₂ 배출계수의 경우 범위는 217.08~336.08 kg CO₂/ton, 평균 배출계수는 276.06 kg CO₂/ton으로 나타났으며, 상대표준편차는 17.75%로 산정되었다. Non-CO₂인 CH₄와 N₂O의 배출계수의 범위는 각각 0.0052~0.0078 kg CH₄/ton, 0.28~0.42 kg N₂O/ton, 평균 배출계수는 각각 0.0066 kg CH₄/ton, 0.35 kg N₂O/ton으로 나타났으며, 상대표준편차는 17.31, 18.58%로 산정되었다.

본 연구에서 산정한 온실가스 배출계수를 2006 IPCC Guidelines에서 제시하고 있는 기본값과 비교하였다. CO₂ 배출계수는 하수슬러지 소각으로 발생한 CO₂의 경우, 생물 기원으로 탄소 저장량 변화로써 보고하거나 산정할 필요가 없어서 따로 배출계수를 제시하지 않고 있으며, CH₄와 N₂O의 배출계수는 일본의 연구 결과를 제시하고 있다(IPCC,

Table 5. Estimated results of GHG emission factors

Sample collecting term	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	Emission factors(kg/ton)		
1 Day	267.82	0.0063	0.42
2 Day	336.08	0.0078	0.40
3 Day	283.26	0.0072	0.28
4 Day	217.08	0.0052	0.31
Mean	276.06	0.0066	0.35
SD	48.99	0.0011	0.07
RSD(%)	17.75	17.31	18.58

Table 6. Comparison of non-CO₂ emission factors

Category	CH ₄	N ₂ O
	Emission factors(kg/ton)	
This study	0.0066	0.35
2006 IPCC Guidelines	0.0097	0.90

2006; GIO, 2005).

2006 IPCC Guidelines의 배출계수와 비교 결과, CH₄의 경우 본 연구와 IPCC 각각 0.0066, 0.0097 kg CH₄/ton으로 0.0031 kg CH₄/ton의 차이를 보이며, N₂O의 경우 본 연구와 IPCC 각각 0.35, 0.90 kg N₂O/ton으로 0.55 kg N₂O/ton의 차이를 보였다. 이러한 차이는 방지기술, 연소조건 등의 영향을 받는 N₂O의 발생 특성으로 생각되며(KEMCO, 2008; Shimizu *et al.*, 2000; Wojtowicz *et al.*, 1993), IPCC에서도 IPCC 기본값보다는 국가 및 연소시설의 특성을 반영한 Tier 2, Tier 3 수준의 온실가스 배출계수를 개발하여 사용하는 것을 권장하고 있다(IPCC, 2007).

3.3 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출량 산정

본 연구에서 산정된 하수슬러지 소각장의 온실가스 총배출량은 84.63 ton CO₂ eq./day로 산정되었으며, 이 중 생물성 연소로 발생하는 CO₂의 배출량은 60.73 ton CO₂ eq./day로 나타났다. 또한, 하수슬러지 소각장의 실질적인 온실가스 배출량인 순배출량은 23.90 ton CO₂ eq./day로 산정되었으며, 이는 Table 6의 IPCC 기본값을 이용하여 산정한 온실가스 순배출량인 61.42 ton CO₂ eq./day와 37.52 ton CO₂ eq./day의 차이를 보인다. 이는 본 연구에서 산정한 온실가스 배출계수는 대상 한국에서 주로 사용하는 유동층 방식의 하수슬러지 소각장의 특성이 반영되어 있으나, IPCC에서 제시하고 있는 기본값은 세계평균값으로 건조 공정을 거친 후 쓰레기와 혼합하여 소각하는 단단로 방식이나 감량화율을 높이기 위해 소각회를 용융처리할 수 있는 용융소각 시스템 기술도 포함되어 있어 배출계수의 차이가

있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 Tier 3 배출계수를 적용하면 실제 배출량보다 과대평가되어 있는 국가 온실가스 배출량을 실제에 가까운 값으로 수정보완할 수 있다는데 본 연구 수행의 의의가 있을 것이다.

본 연구의 배출계수를 2011년 국내 하수슬러지 소각량인 687,868 톤/년에 적용하면(Ministry of Environment, 2012), 총배출량은 264,622 ton CO₂ eq./yr로, 이는 우리나라 2011년 폐기물소각 부문의 온실가스 총배출량인 6.2 백만톤 CO₂ eq./yr의 4.27%를 차지하는 양이다(GIR, 2014).

4. 결론

본 연구에서는 소각을 통해 하수슬러지를 처리하는 하수슬러지 소각장을 대상으로 온실가스 배출계수를 개발하였다. 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출계수를 산정하기 위해서 배출가스 시료 채취 및 온실가스별 농도 분석을 실시하고, 분석결과를 이용하여 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출계수 및 배출량을 산정하였다. 본 연구에서는 시료 채취 시 하수슬러지의 성상 및 운전조건 변화에 영향을 크게 받는 간헐적 시료채취방법이 아닌 24시간 연속 시료채취방법을 사용하였으므로, 상대적으로 신뢰도가 높을 것으로 판단된다.

하수슬러지 소각장의 배출가스를 분석한 결과, CO₂ 평균 농도는 6.84% (±1.14%), CH₄ 평균 농도는 4.51 ppm (±0.81 ppm), N₂O 평균 농도는 86.34 ppm (±8.11 ppm)로 측정되었다.

측정된 농도값을 통해 온실가스별 배출계수를 산정한 결과, CO₂ 평균 배출계수는 276.06 kg CO₂/ton, 상대표준편차는 17.75%, CH₄ 평균 배출계수는 0.0066 kg CH₄/ton, 상대표준편차는 17.31%, N₂O 평균 배출계수는 0.35 kg N₂O/ton, 상대표준편차는 18.58%로 산정되었다. 이 중 Non-CO₂인 CH₄, N₂O의 경우 2006 IPCC Guidelines의 배출계수와 각각 0.0031 kg CH₄/ton, 0.55 kg N₂O/ton의 차이를 보였으며, 이러한 차이는 방지기술, 연소조건 등의 영향

을 받는 Non-CO₂의 발생특성으로 판단된다.

이러한 온실가스 배출계수를 이용하여 하수슬러지 소각장의 온실가스 배출량을 산정한 결과, 온실가스 총배출량은 84.63 ton CO₂ eq./day, 순배출량은 23.90 ton CO₂ eq./day로 산정되었다. 본 연구에서 산정한 하수슬러지 소각장의 실질적인 온실가스 배출량인 순배출량은 IPCC 기본값을 이용하여 산정한 온실가스 순배출량인 61.42 ton CO₂ eq./day와 37.52 ton CO₂ eq./day의 차이를 보였으며, 이는 IPCC에서 제시하고 있는 기본값은 세계평균값으로 대상 하수슬러지 소각장의 특성을 반영하지 못하는 반면에, 본 연구에서 산정한 온실가스 배출계수는 대상시설의 특성이 반영되었기 때문으로 판단된다.

본 연구의 배출계수를 적용한 2011년 국내 하수슬러지 소각장의 온실가스 총배출량은 264,622 ton CO₂ eq./yr로, 이는 우리나라 2011년 폐기물소각 부문의 온실가스 총배출량의 4.27%를 차지하는 양이며, 이러한 배출량을 국가의 특성을 반영하여 정확하게 산정하는 것은 국가 온실가스 인벤토리 신뢰도 확보에 중요한 요인 중 하나이다.

따라서 추후 IPCC 기본값과 차이를 보이는 시설들에 대한 배출계수 연구가 지속적으로 진행되어 우리나라 특성이 반영된 국가 온실가스 배출계수 개발이 이루어져야 할 것이며, 본 연구는 그러한 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 이는 국가 온실가스 인벤토리 품질 향상에도 도움이 될 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발 사업”으로 지원받은 과제입니다.

References

ASTM D 7459. 2008. Standard Practice for Collection of Integrated Samples for the Speciation of Biomass (Biogenic) and Fossil-Derived Carbon Dioxide Emitted from Stationary Emissions Sources.

Cho JK, Kim HJ, Park YJ. 2008. The status and task of sewage sludge treatment(Korean with English abstract). J. Korea Society of Environmental Administration 14:73-82.

GIO. 2005. National greenhouse gas inventory report of Japan.

GIR, 2014, 2013 National greenhouse gas inventory report of Korea.

IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC. 2007. Climate change 2007 - The Physical Science Basis.

KEMCO. 2008. Development of country specified green house gases emission factor(1 phase).

Kim KS, Lee SM. 2008. Management strategy for the prohibition of ocean dumping of sewage sludge in 2011. The Seoul Institute 9:3-21.

Kim MH. 2013. Formation of N₂O in NH₃-SCR DeNOxing reaction with V₂O₅/TiO₂-based catalysts for fossil fuels-fired power stations(Korean with English abstract). Korean Chem Eng Res 51:163-170.

Lee HN. 2007. A study on improvement of the maritime pollution waste dumping system - Focused on the sewage sludges -. Dissertation, Korea University.

Ministry of Environment. 2012. 2011 Statistics of Sewerage.

National Institute of Environmental Reearch. 2006. Hazardous air pollutants emission from sewage sludge incineration.

Park JM, Lee SB, Kim MJ, Kim JP, Kim JC, Lee SJ, Lee SH. 2009. Study on the emission characteristics of heavy metals in sewage sludge incinerator(Korean with English abstract). J of ESE 24:28-36.

Shimizu T, Hasegawa M, Inagaki M. 2000. Effect

of water vapor on reaction rates of limestone-catalyzed NH_3 oxidation and reduction of N_2O under fluidized bed combustion conditions. *Energy Fuels* 14:104-111.

Wojtowicz MA, Pels JR, Moulijn JA. 1993. Combustion of coal as a source of N_2O emission. *Fuel Processing Technology* 34:1-71.