

온실가스 배출량 산정 방법에 따른 N₂O 배출량 비교

강소영* · 조창상* · 김승진* · 강성민* · 윤현기* · 전의찬**

*세종대학교 기후변화협동과정, **세종대학교 환경에너지융합학과

Comparison of N₂O Emissions by Greenhouse Gas Emission Estimation Method

Kang, Soyoung*, Cho, Chang-Sang*, Kim, Seungjin*, Kang, Seongmin*, Yoon, Hyeongi*
and Jeon, Eui-Chan**†

*Cooperate Course for Climate Change, Sejong University, Seoul, Korea

**Dept. of Environment and Energy, Sejong University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In this study GC and PAS were used to calculate N₂O concentration of exhaust gas from Wood Chip combustion system. Fuel supplied to the incinerator was collected and analyzed and then the analysis result was used to calculate N₂O emissions. Tier 3 and Tier 4 Method were used to calculate the N₂O emissions. Plant's Specific emission factor of N₂O by Tier 3 Method was 0.35 kg/TJ, while default emission factor of Wood · Wood Waste proposed by 2006 IPCC G/L was 4 kg/TJ. So the N₂O emission factor of this study was 3.65 kg/TJ lower compared to the IPCC G/L. The total emissions calculated by Plant's specific emission factor was 4.22 kg during the measuring period, but by Tier 4 Method it was 7.88 kg. This difference in emissions was caused by the difference of continuous measuring and intermittent sampling. It would be necessary to apply continuous measuring to calculate emissions of Non-CO₂ gas whose the density distribution is relatively high. However currently, according to the target management guideline of greenhouse gas and energy, the continuous measuring method to calculate greenhouse gas emission is applied only to CO₂. Therefore for reliable greenhouse gas emission calculation it would be necessary to apply continuous measuring to calculate Non-CO₂ gas emission.

Key Words : Greenhouse Gas Emissions, N₂O, Biomass, Wood Chip

1. 서 론

우리나라는 2030년까지 온실가스 배출전망(BAU) 대비 37% 감축목표를 달성하기 위한 노력의 일환으로 '신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)'를 도입하였다. RPS는 설비 규모 500 MW 이상의 발전사업자에게 총 발전량에서 일정비율을 신재생에너지로 공급하도록 의무화하는 제도이며, 의무비율은 2012년 2%를 시작으로 2022년 10%까지 올리는 것을 목표로 하고 있다. 이 제도의 목표 달성을 위해 국내 사업장 중 일부는 화석연료 대신 고형연료(Solid Refuse Fuel, SRF)를 대체 에너지원으로 사용하고 있다(Kong *et al.*, 2011). 이 중 폐목재를 파쇄하여 만드는 Wood Chip은 상

대적으로 가격이 저렴하고 공급인증서(REC) 가중치가 1.5로 높은 편이어서 발전소 연료로 주목받고 있으며, 향후에도 발전업계의 안정적인 Wood Chip 확보는 RPS 목표 달성을 위해 불가피할 것으로 예상된다.

이러한 바이오매스 기반 연료 연소 시 발생하는 CO₂는 생물의 성장과정에서 광합성에 의해 대기 중에서 흡수한 CO₂이기 때문에, 국가 온실가스 배출량 산정 시 배출량에 포함하지 않는다(Dan Gavrilescu, 2008). 하지만 Non-CO₂의 경우에는 국가 온실가스 배출량 산정 시 보고하게 되어 있다. IPCC G/L에서는 온실가스 배출량을 산정할 때, Non-CO₂의 경우는 연소 조건 및 기술적 요소 등 여러 요인에 따라 배출특성이 변하게 되므로, 고유배출계수를 개발하여 배출량을 산정할 것을 권장

† Corresponding author : ecjeon@sejong.ac.kr

Received June 30, 2015 / Revised August 4, 2015(1st), September 2, 2015(2nd) / Accepted September 18, 2015

하고 있다(IPCC, 2006).

‘온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침’에 따르면 온실가스 배출량 산정 방법은 배출계수와 활동자료를 이용한 간접 배출량 산정과 굴뚝에서 연속 측정에 의한 실측 자료의 직접 배출량 산정 방법으로 구분할 수 있다(Jang *et al.*, 2009). 간접 배출량 산정 방법의 경우, 연소 조건 변화에 유연하지 못하고, IPCC에서 제시하고 있는 기본배출계수를 적용함에 따른 배출량의 신뢰성 및 정확성에 대한 오차 발생 가능성을 내포하고 있다. 반면, 직접 배출량 산정 방법은 운전 조건 변화에 유연하게 대응할 수 있고, 개별 사업장마다 연속적인 실측값의 확보가 가능하여 국가배출통계의 신뢰도를 향상시킬 수 있다(Gwon *et al.*, 2007).

Non-CO₂ 배출량 산정은 현재까지 IPCC 기본배출계수를 이용한 Tier 1 Method를 적용하고 있지만, 상대적으로 배출 농도 분포가 큰 Non-CO₂는 온실가스 배출량 산정 방법에 따라 배출량의 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 간헐적인 시료 채취에 의한 N₂O 배출량(Tier 3 Method)과 24시간 이상 연속으로 측정된 N₂O의 배출량(Tier 4 Method)을 산정하여 상호 비교하고자 하였다.

효과적인 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 온실가스 배출량을 정확히 산정할 필요가 있으며, 본 연구를 통해 온실가스 배출량 산정·보고의 정확성 및 신뢰성을 향상하는데 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상시설 선정

본 연구에서는 270 ton/day의 Wood Chip을 연소하여 65 ton/hr(32.5 ton/hr, 2기)의 증기를 생산하는 집단에너지시설을 대상시설로 선정하였다. 대상시설에서는 계단식 화격자 방식을 사용하고 있으며, 대기오염물질 저감을 위한 반건식 반응탑, 여과집진기(Bag filter), 선택적 촉매 환원탑(SCR), 비선택적 촉매 환원탑(SNCR) 등의 대기오염방지시설과 CEMS(자동 측정기기 및 굴뚝원격 감시시스템)가 설치되어 있다.

2.2 연료(Wood Chip) 채취 및 분석 방법

본 연구에서는 폐기물공정시험방법에서 규정하고 있는 시료 채취 방법에 따라 Wood Chip 연료를 채취하였고, 시료의 조성을 균일화하기 위하여 원추4분법에 따라 축분하였다. 축분된 분석 시료는 ‘KS F 2199 목재의 함수율 측정방법’에 따라 105~110℃의 건조기에서 Wood Chip의 무게 변화가 0.01%

이하가 될 때까지 4시간 이상 건조하였다. Wood Chip의 건조 전·후 무게를 측정하여 아래의 식 (1)에 의해 전수분량을 산정하였다.

$$\text{전수분(\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

여기서, m_1 : Wood Chip의 건조 전 무게(g)

m_2 : Wood Chip의 건조 후 무게(g)

건식상태(Dry basis)의 Wood Chip을 이용하여 발열량과 원소분석을 실시하였다. 발열량은 총발열량(Gross Calorific Value, GCV)과 순발열량(Net Calorific Value, NCV)으로 구분되며, 일반적으로 발열량분석기를 통해 분석되는 발열량은 총발열량으로 나타난다. 본 연구에서는 IKA사의 자동열량분석기(IKA-C2000, Germany)를 사용하였으며, 측정된 건식 총발열량은 원소분석을 통한 수소 함량과 전수분량을 이용하여 IPCC G/L에서 사용하는 인수식 순발열량으로 환산하였다.

원소분석은 동적 플래시 연소 방식으로 화합물을 산화시켜 칼럼으로 분리시킨 후 TCD 검출기를 이용하여 정량해 내는 방법이며, 본 연구에서는 자동원소분석기(Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하였다. 연료의 주성분인 탄소와 탄소 다음으로 많이 함유된 수소는 온실가스 배출계수를 산정하는데 중요한 요인이 된다(Lee *et al.*, 2012).

2.3 배출가스 시료 채취 및 분석 방법

2.3.1 배출가스 시료 채취 방법

Wood Chip 연소시설에서 배출되는 배출가스는 EPA Method 18(US EPA, 2001)에 따라 간헐적인 시료 채취(Tier 3 Method)와 연속적인 시료 채취(Tier 4 Method)를 2일과 3일 동안(8월 20~21일, 9월 16~18일) 실시하였다(Fig. 1).

Tier 3 Method에 따른 온실가스 배출량 산정을 위해서는 시료채취관을 굴뚝에 장착한 후 진공형 Lung sampler(ACEN, KOREA)와 10 l의 Tedlar bag(SK, US)을 사용하여 시료를 채취하였다. 이때 배출가스에 포함된 수분을 제거하기 위하여 가스 포집 장치 앞에 무수염화칼슘을 담은 흡수병을 설치하여 수분을 제거하였다. 대표성 있는 농도 측정을 위해 1시간 간격(11~18시)으로 총 32개의 시료를 채취하였고, 차광에 따른 유실률을 최소화하기 위해 채취된 시료는 검은색 봉투에 담아 간헐적 측정이 끝나는 18시까지 CEMS실에 보관한 후 24시간 이내에 분석하였다.

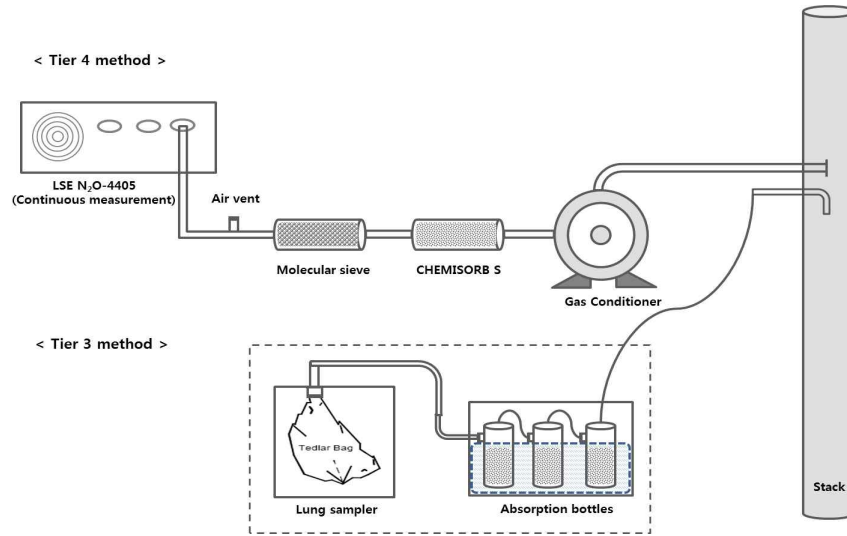


Fig. 1. Diagram of the greenhouse gas sampling system.

Tier 4 Method에 따른 온실가스 배출량 산정을 위해 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후, 연속측정기를 연결하여 배출가스를 24시간 연속으로 측정하였다. N₂O의 배출량은 연소 특성 및 조건, 기술적 요소, 그 이외에도 여러 요인에 영향을 받는다고 알려져 있으며, 이러한 요인에 따라 N₂O 농도의 변화를 파악하기 위해 본 연구에서는 24시간 연속으로 2일, 3일씩 배출가스를 측정하였다. 또한 이렇게 측정된 배출가스 중 N₂O 농도를 바탕으로 N₂O 배출량을 산정하였으며, 이를 Tier 3 Method에 따라 산정된 N₂O 배출량과 비교하였다.

배출가스 중 N₂O의 경우, 시료의 수분 제거는 가장 중요한 요인으로 작용하며, 이를 제거하기 위한 장치들은 필수적이다 (Han, 2005). 따라서 연속측정기 전단에 Gas Conditioner(JTC, Austria)를 연결하고, Conditioner는 내부에 있는 냉각시스템을 통해 배출가스를 3℃ 이하로 냉각하여 수분을 제거하였다. 또한 Gas Conditioner 자체에 내장된 진공펌프를 이용하여 배출가스 유량을 조절하였다.

2.3.2 배출가스 농도 분석 방법

배출가스의 N₂O 농도는 가스크로마토그래피법(GC)과 광음향분광법(PAS)을 이용하여 분석하였다. GC는 간헐적으로 채취한 배출가스를 실험실에서 GC-ECD(CP-3800, Varian, USA)를 이용하여 N₂O 농도 분석하였다. 칼럼은 Porapak Q 80/100를 사용하였고, 운반가스 및 H₂의 유량은 각각 30 ml/min, Air는 300 ml/min로 설정하였다. 시료 주입부, 오븐, 검출기의 온도는 각각 70℃, 120℃, 320℃로 설정하였으며, 운반가스는 고순도 N₂(99.999%)를 사용하였다. 이때 분석된 N₂O 농도는 Tier

3 Method에 따른 N₂O 배출량을 산정할 때 적용된다.

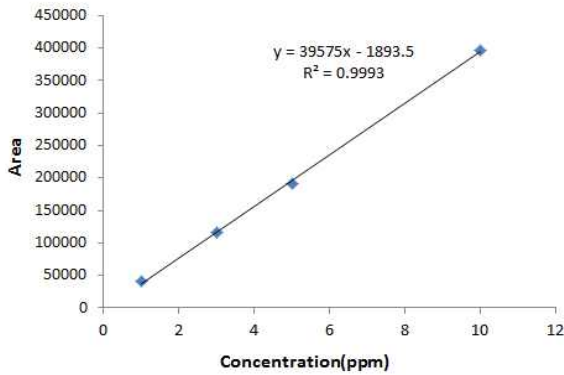
PAS는 Tier 4 Method에 따른 N₂O 배출량을 산정하기 위해 N₂O-4405(LSE Monitors, Netherlands)를 이용하여 Wood Chip 연소시설에서 배출되는 N₂O 농도를 연속적으로 분석하였다. 시료 유입 유량은 80 ml/min으로 설정하였고, 측정 셀과 시료의 온도는 각각 35℃, 5~25℃, Scan range는 1,277.847~1,279.548 cm⁻¹로 설정하였다. LSE N₂O-4405은 H₂O와 CO₂, SO₂ 등 간섭물질에 영향을 받으므로 이를 제거하기 위해 Molecular sieve(SIMGMA-ALDRICH, USA) trap과 Chemisorb S (BETE, BELGIUM) trap을 시료 주입부 전단에 연결하여 간섭물질에 의한 영향을 최소화하였다.

2.3.3 분석기기의 정도관리

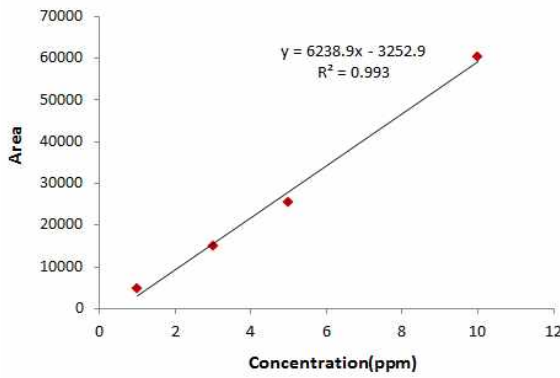
N₂O를 정량 분석하기 위하여 1, 3, 5, 10 ppm의 표준가스(RIGAS, KOREA)를 이용하여 검량선(Calibration Curve)을 작성하였다. 검량선의 신뢰성을 위해서는 적어도 5 point 이상을 사용하여 작성해야 하지만, 본 연구에서는 일부 표준가스의 확보에 어려움이 있어 4 point로 검량선을 작성하였으며, 이는 결과 값의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있어, 신뢰도가 다소 감소할 수 있다. 하지만 배출되는 N₂O 농도 범위를 검량선 안에 포함시켜 결과 값의 신뢰도에 미치는 영향을 최소화 하였다.

검량선 작성결과, PAS와 GC 모두 R²=0.99 이상의 직선성을 확인할 수 있었다(Fig. 2).

2.3.4 분석기기의 반복성 평가



(a) Calibration curve of N₂O by GC-ECD



(b) Calibration curve of N₂O by PAS

Fig. 2. Calibration curve of N₂O.

동일한 농도(10 ppm)의 표준가스를 10회 반복 분석함으로써 반복성(Repeatability)을 평가하였다. Table 1에서 보는 바와 같이, PAS를 이용하여 N₂O 농도를 측정한 평균값은 10.02 ppm으로 표준편차는 0.05, 상대표준편차는 0.46%를 보였고, GC의 경우 평균값은 10.00 ppm이며, 표준편차 0.02, 상대표준편차 0.23%로 나타났다.

두 방법 모두 ISO 1564에서 제시한 재현성 3.0%보다 낮게 측정되어 우수한 반복성을 보였다.

2.4 온실가스 배출량 산정 방법

2.4.1 Tier 3 Method에 따른 배출계수 및 배출량 산정 방법

Wood Chip의 발열량 및 원소분석 결과와 Wood Chip 연소 시설의 배출가스 농도 분석 결과를 이용하여 사업장고유배출 계수를 개발하고, 그 배출계수를 이용하여 배출량을 산정하였다. N₂O 배출계수 산정 방법은 Table 2에 제시하였으며, 다음과 같은 4단계를 거쳐 최종적으로 배출량을 산정하게 된다.

Table 1. Reproducibility of PAS and GC (unit : ppm)

Number of analysis	Photoacoustic spectroscopy (PAS)	Gas chromatography (GC)
1	9.97	10.03
2	9.96	10.01
3	10.08	10.01
4	10.02	9.98
5	9.97	9.99
6	10.04	10.01
7	10.06	10.04
8	10.06	10.00
9	10.07	10.00
10	9.99	9.96
Mean	10.02	10.00
S.D.	0.05	0.02
RSD (%)	0.46	0.23

1단계는 Wood Chip의 전수분량과 원소분석을 통해 분석된 탄소(C)와 수소(H) 함량을 조사한다. 2단계에서는 연료의 총발열량을 측정하고, 1단계에서 분석한 수소 함량 및 전수분량을 이용하여 건식 총발열량을 인수식 순발열량으로 전환한다. 또한 대상시설의 연료 소비량을 조사한다. 이때 연료 소비량은 배출가스 채취와 동일한 시간에 소각로에 투입되는 연료의 양이다. 3단계에서는 Wood Chip 연소시설의 배출가스를 채취하여 N₂O 농도를 분석하고, CEMS data를 이용하여 굴뚝에서 배출되는 배출가스의 건식 유량 값을 조사한다. 4단계에서는 N₂O의 배출량을 산정하고, 연료 소비량을 이용하여 배출계수를 산정하게 된다. 이때 산정된 배출계수와 2단계에서 조사한 연료 소비량 가중평균값을 사용하여 N₂O의 일 배출량을 산정한다.

2.4.2 Tier 4 Method에 따른 배출량 산정 방법

연속 측정에 따른 온실가스 배출량 산정 방법은 CO₂의 경우만 적용되고 있으나, 본 연구에서는 ‘온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침’에서 제시하고 있는 연속 측정에 따른 배출량 산정식을 이용하여 N₂O 배출량을 산정하였다. 먼저 Wood Chip 연소시설에서 배출되는 배출가스의 N₂O 농도를 연속 측정하고, CEMS data를 이용하여 배출가스의 건식 유량 값을 조사한 후, 아래 식 (2)에 의해 실시간 배출량을 산정

Table 2. Estimating work-sheet of GHG emission factors

Step 1					
Item	Carbon of fuel (Dry basis)	Hydrogen of fuel (Dry basis)	Hydrogen of fuel (As received basis)	Total moisture	
Sub-item	①	②	③	④	
Unit	%	%	%	%	
Calculation	②×((100-④)/100)				
Step 2					
Item	Gross calorific value (Dry basis)	Gross calorific value (As received basis)	Net calorific value (As received basis)	Fuel consumption rate	Heating output
Sub-item	A	B	C	D	E
Unit	kcal/kg	kcal/kg	TJ/ton	ton/hr	TJ/hr
Calculation	-	(A - {(100-④)/100})	(B - {6×(9×③+④)}) ×4.1868×10 ⁻⁶	-	C×D
Step 3					
Item	Volume concentration		Mass concentration	Flow rate	
Sub-item	F		G	H	
Unit	ppm		mg/m ³	m ³ /hr	
Calculation	-		F×(44/22.4)	-	
Step 4					
Item	N ₂ O emission		N ₂ O emission factor		
Sub-item	I		J		
Unit	g/hr		g/TJ		
Calculation	G×H/10 ³		H/E		

한다. 이때 CEMS data는 4시간 단위로 CEMS 교정이 진행되므로 교정하는 20분 동안의 측정자료는 배출량 산정 시 제외하고, 나머지 91.7%의 CEMS data를 활용하여 배출량을 산정하였다.

$$E_{N_2O} = K \times N_{N_2O_d} \times Q_{sd} \times 10^{-3} \quad (2)$$

E_{N_2O} : N₂O 배출량(g N₂O/day)

$N_{N_2O_d}$: N₂O의 30분 평균농도(ppm, 건연소가스 기준)

Q_{sd} : 30분 적산 유량(Sm³) (건연소가스 기준)

K : 변환계수 (44/22.4 (kg/m³))

3. 연구 결과

3.1 Wood Chip 연료 분석 결과

본 연구에서는 5일 동안 채취한 Wood Chip의 총발열량을 발열량분석기를 이용하여 분석하였다. 분석된 총발열량을 순발열량으로 환산하기 위해서는 Wood Chip의 수소 함량이 필요하며, 원소분석을 통해 탄소와 수소 함량을 측정하였다. 총 32개의 시료를 각각 3회 반복 분석하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

원소분석 결과, Wood Chip의 건식 탄소 함량은 42.57~45.67%의 범위로 분석되어 평균 44%로 나타났고, 건식 수소 함량은 5.57~5.94%의 범위를 나타내며, 평균 5.68%로 분석되었다. 이러한 결과는 국립환경과학원(NIER) 보고서(2007)에서 폐목재를 건조기준으로 분석한 결과(탄소 함량은 44~46%, 수소 함량은 5~7%)와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

Table 3. Fuel analysis of Wood Chip

Measurement date	Moisture (%)	Elementary analysis (%)		Calorific value (kcal/kg)	
		Carbon	Hydrogen	GCV (Dry basis)	NCV (As received basis)
1st (8/20), n=6	4.56	44.23	5.62	4,067	3,564
2nd (8/21), n=4	4.18	43.00	5.62	3,987	3,505
3rd (9/16), n=9	4.40	44.55	5.67	4,041	3,507
4th (9/17), n=9	3.31	45.67	5.94	4,075	3,589
5th (9/18), n=4	3.62	42.57	5.57	3,982	3,527
Mean	4.01	44.00	5.68	4,030	3,538
S.D.	0.53	1.24	0.15	43.78	36.90
RSD(%)	13.22	2.83	2.59	1.09	1.04

Wood Chip의 건식 총발열량은 3,982~4,075 kcal/kg(평균 4,030 kcal/kg)으로 분석되었고, 분석된 건식 총발열량을 IPCC G/L에서 사용하는 순발열량으로 환산한 결과, 인수식 순발열량은 3,505~3,589 kcal/kg(평균 3,538 kcal/kg)로 나타났다.

본 연구에서 산정된 인수식 순발열량과 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 Wood·Wood Waste의 인수식 순발열량을 비교한 결과, 본 연구에서 산정한 인수식 순발열량은 3,538 kcal/kg으로 2006 IPCC G/L에서 제시한 인수식 순발열량(3,726 kcal/kg)보다 188 kcal/kg 낮게 산정되었다. 이러한 인수식 순발열량의 차이는 국가별 나무의 종류가 다르기 때문인 것으로 판단된다(Baker *et al.*, 2012; Telmo *et al.*, 2011).

3.2 배출가스의 N₂O 농도 분석 결과

3.2.1 GC에 의한 N₂O 농도 분석(Tier 3 Method)

Wood Chip 연소시설에서 채취된 배출가스의 N₂O는 실험실에서 GC-ECD를 이용하여 분석하였다. N₂O 농도는 각각 5회 분석한 평균값을 사용하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타났다.

N₂O 농도는 3.08~3.89 ppm(평균 3.57 ppm)으로 나타났으며, 표준편차는 0.33, 상대표준편차는 9.27%로 분석되었다.

3.2.2 PAS를 이용한 N₂O 연속 측정(Tier 4 Method)

N₂O-4405(LSE Monitors, Netherlands)를 이용하여 2일과 3일 동안 연속적으로 측정한 Wood Chip 연소시설의 N₂O 농도는 Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

N₂O 농도는 1.44~15.46 ppm의 범위로 평균 4.45 ppm으로

Table 4. Concentration of N₂O using GC-ECD (unit : ppm)

Measurement date	Concentration
1st (8/20), n=6	3.85 (±0.52)
2nd (8/21), n=4	3.44 (±0.10)
3rd (9/16), n=9	3.89 (±0.92)
4th (9/17), n=9	3.60 (±1.29)
5th (9/18), n=4	3.08 (±0.64)
Mean	3.57
S.D.	0.33
RSD(%)	9.27

*** Correlation is significant at the 0.001 level (2-tailed).

나타났다. 연속 측정된 N₂O 농도는 밤과 새벽 시간에 농도가 높게 나타나는 경향을 보이며, 4차(9/17, 22:35) 실험에서 14.17 ppm, 5차(9/18, 04:20) 실험에서 최대 15.46 ppm으로 N₂O 농도가 높게 측정되었다.

보통 낮 시간(9~18시)에 로내 온도는 평균 900℃이상으로 운전되고 그때 배출되는 CO 농도는 평균 3 ppm 이하로 배출되는데, N₂O 농도가 최대로 증가된 시점의 로내 온도는 750℃까지 감소하고 CO 농도는 10 ppm까지 증가된 것을 알 수 있었다. 이는 투입된 Wood Chip이 연소할 때 O₂가 부족하거나 로내 온도가 낮아지면서 불완전 연소로 인해 N₂O 농도는 높게 측정된 것으로 판단되며, 선행연구를 통해 950℃ 이상의 온도에서는 N₂O의 생성이 억제되는 것으로 알려진바 있다(에

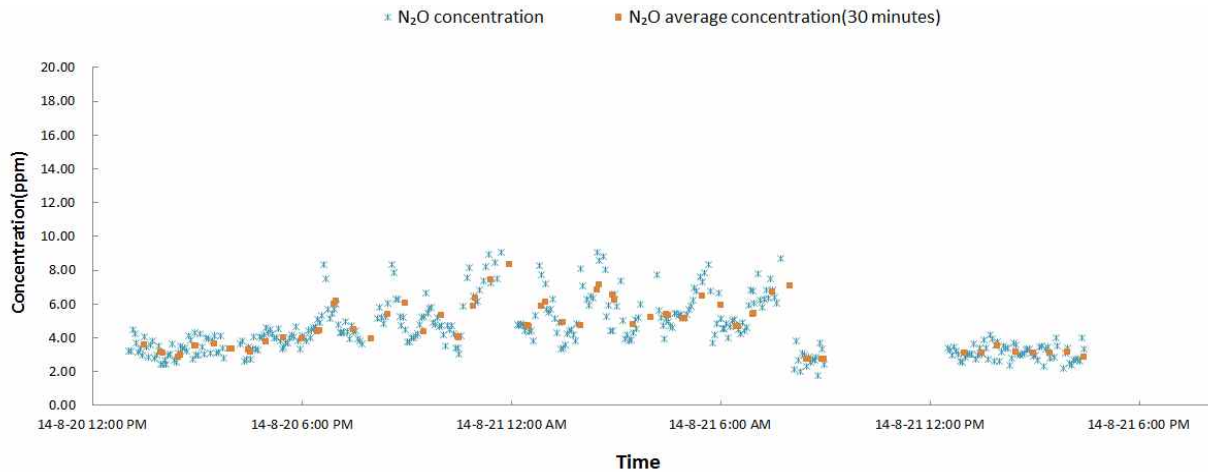


Fig. 3. Concentration of N₂O using PAS(8/20~21)*.

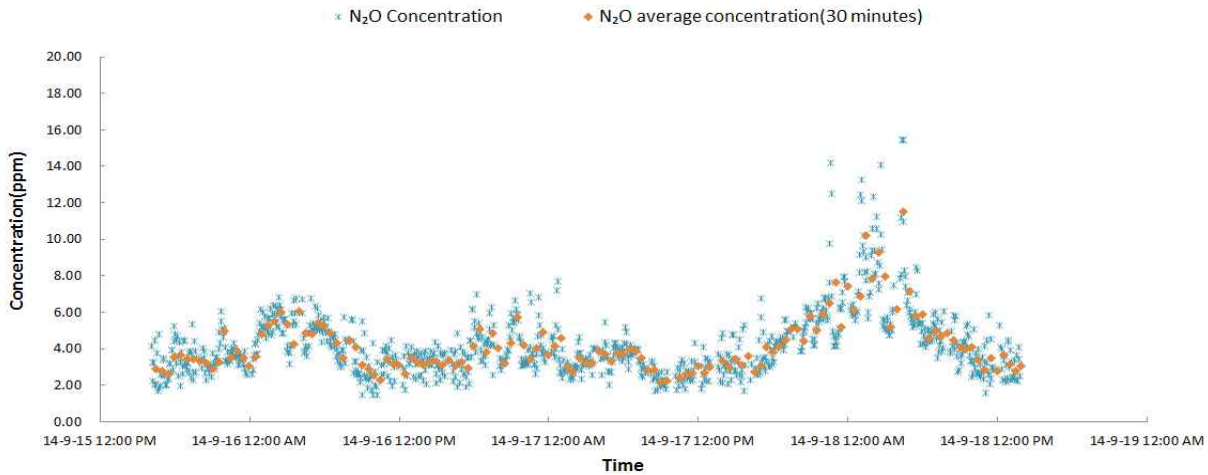


Fig. 4. Concentration of N₂O using PAS(9/16~18).

너지관리공단, 2008; K. Svoboda *et al.*, 2005).

3.3 Wood Chip 연소시설의 N₂O 배출계수 및 배출량 산정 결과

3.3.1 N₂O 배출계수 산정

N₂O 배출계수는 Wood Chip의 발열량 및 원소분석 결과, 연료소비량, GC에 의해 측정된 N₂O 농도와 PAS에 의해 도출된 N₂O 배출량을 이용하여 산정방법(Tier 3, Tier 4 Method)에 따른 N₂O의 배출계수를 각각 산정하여 Table 5에 나타냈다.

Tier 3 Method에 따른 일평균 배출계수는 0.30~0.38 kg/TJ로 산정되었으며, 측정기간 동안 배출계수는 0.38 kg/TJ로 산

정되었다. 이러한 결과는 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 Wood·Wood Waste의 N₂O 기본배출계수 4 kg/TJ보다 약 91%, 스웨덴 환경보호국에서 제시하고 있는 Wood Waste의 N₂O 배출계수 5 kg/TJ보다 92%, JPA에서 제시하고 있는 N₂O 배출계수 2.9 kg/TJ보다 87%의 높은 차이율을 나타냈다.

반면, Tier 4 Method에 따른 일평균 배출계수는 0.69~0.96 kg/TJ로 산정되어, 측정기간 동안 배출계수는 0.96 kg/TJ로 산정되었다. Table 5에 나타난 Category별 N₂O의 배출계수와 비교한 결과, 각각 76%, 81%, 67%의 높은 차이율을 나타내고 있지만, Tier 3 Method로 산정된 N₂O의 배출계수(0.38 kg/TJ)보다는 비교적 낮은 차이율을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

이러한 배출계수의 차이는 2006 IPCC G/L에서 key cate-

* 8월 21일 오전 농도 자료는 장비의 오작동으로 인해 장비가 정상적으로 재가동되기까지(9시~12시)의 농도는 제외함.

gory별로 세계 평균값인 기본배출계수를 제시하고 있지만, 다양한 연소기술이나 공정 등 국내 실정이 반영된 온실가스 배출계수와는 큰 차이가 있을 수 있다고 알려져 있다(KEMCO, 2008; Lee *et al.*, 2012).

Table 5에 나타난 외국의 N₂O 배출계수는 유동층 소각로에서 측정된 결과이다. N₂O는 연소조건의 영향이 커서 500℃ 이하, 950℃ 이상에서는 생성이 억제되고, 700℃부근에서 최대로 생성된다. 스토커와 같은 일반 연소설비에서는 연소온도가 1,200℃ 이상으로 운전되고 있으므로, N₂O 농도가 높은 농도로 측정되지 않으나, 유동층 연소는 주로 900℃ 이하에서 연소가 진행되며, 유입공기량이 많은 연소조건으로 인해 N₂O 발생농도가 다른 연소방식보다 높은 것으로 알려져 있다(Eemeli *et al.*, 2007). 본 연구의 배출계수 산정결과는 이러한 차이로 인해 낮게 산정된 것으로 판단된다.

3.3.2 N₂O 배출량 산정

Tier 3 Method에 따른 N₂O 배출량은 앞서 산정한 사업장 고유배출계수를 사용하여 산정하였다. Table 6(a)에서 보는 바와 같이, N₂O의 일일 배출량은 0.79~0.92 kg/day로 산정되었으며, 측정기간 동안 총 4.22 kg의 N₂O가 배출되었다.

Tier 4 Method에 따른 N₂O 배출량은 PAS에 의해 24시간 이상 연속 측정된 N₂O 농도와 CEMS data의 건식 유량을 식(3)에 적용하여 산정한 결과, N₂O의 일일 배출량은 1.43~1.95 kg/day로 산정되었으며, 측정기간 동안 총 7.88 kg의 N₂O가 배출되었다.

Tier 3 Method에 따른 N₂O 배출량은 Tier 4 Method의 N₂O 배출량에 비해 3.66 kg(약 46.4%) 적게 배출되는 것으로 산정되었는데, 이러한 N₂O 배출량의 차이를 나타내는 것은 Tier 3 Method의 경우, 측정방법에 따른 제약조건으로 인하여 간헐

Table 6. The Comparison of N₂O emissions

(a) Comparison of Tier 3 and Tier 4 (continuous measurement, 24hr) (unit : kg N₂O/day)

Measurement date	N ₂ O emissions (kg)		Comparison ¹⁾ (%)
	Tier 3 Method	Tier 4 Method	
1st (8/20)	0.82	1.56	47.4
2nd (8/21)	0.82	1.50	45.3
3rd (9/16)	0.92	1.43	35.7
4th (9/17)	0.87	1.44	39.6
5th (9/18)	0.79	1.95	59.5
Total emissions	4.22	7.88	46.4

(b) Comparison of Tier 3 and Tier 4 Method (intermittent measurement, 11~18hr) (unit : kg N₂O/day)

Measurement date	N ₂ O emissions (kg)		Comparison ²⁾ (%)
	Tier 3 Method	Tier 4 Method	
1st (8/20)	0.82	0.82	0.0
2nd (8/21)	0.82	0.79	-3.8
3rd (9/16)	0.92	0.90	-2.2
4th (9/17)	0.87	0.88	1.1
5th (9/18)	0.79	0.83	4.8
Total emissions	4.22	4.22	0.0

¹⁾ Comparison of N₂O emissions by Estimation Method (Tier 3 and Tier 4 Method).

²⁾ Comparison of N₂O emissions by Estimation Method (Tier 3 and Tier 4 Method).

Table 5. Comparison of N₂O emission factors

(unit : kg N₂O/TJ)

Category		N ₂ O emission factors	Combustion utility
IPCC ¹⁾ G/L(2006)	Wood · wood waste	4 (1.5~15)	Fluidised bed combustion (FBC)
Swedish EPA ²⁾ (2004)	Wood waste	5	
JPA ³⁾ (2002)	Wood fired boiler	2.90*	
This study	Wood chip	Tier 3 method	Stoker-type incinerator
		Tier 4 method	

¹⁾ IPCC G/L: Intergovernmental Panel on Climate Change (2006).

²⁾ EPA : Environmental Protection Agency (Swedish, 2004).

³⁾ JPA : Japan Paper Association (2002).

* Based on heat content of 20 GJ/t dry solids.

적인(11~18시) 시료 채취가 이루어졌고, Tier 4 Method의 경우는 24시간 이상 연속 측정된 N₂O 농도를 사용하여 배출량을 산정하였으므로 이와 같은 N₂O 배출량의 차이를 보인 것으로 판단된다.

그러나 Tier 3 Method와 Tier 4 Method에 따른 N₂O 배출량을 산정할 때 동일 시간에 간헐적으로 채취한 배기가스의 N₂O 농도를 사용하여 배출량을 산정한 결과는 Table 6(a)와 다른 결과를 나타냈다. Table 6(b)에서 보는 바와 같이, 1~5차 실험의 N₂O 배출량이 유사하게 산정되었고, 측정기간 동안 N₂O 배출량은 총 4.22 kg 배출되었다.

이러한 결과는 온실가스 배출량 산정방법에 따른 N₂O 배출량의 차이를 나타내고 있으며, Non-CO₂ 또한 연속 측정에 의한 온실가스 배출량을 산정해야 할 필요성에 대해 나타나고 있다. 향후 Non-CO₂ 배출량 산정에 있어 Tier 4 Method를 적용한다면 온실가스 배출량 산정·보고의 정확성 및 신뢰성이 향상할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 온실가스 배출량 산정 방법에 따른 Wood Chip 연소시설의 N₂O 배출량을 비교하기 위해, 배출가스의 N₂O를 간헐적으로 측정하여 산정한 배출량과 24시간 이상 연속 측정하여 산정한 N₂O 배출량을 상호 비교하였다.

Wood Chip의 연료 분석 결과, 건식 총발열량의 평균은 4,030 kcal/kg이며, 탄소 및 수소 함량은 각각 44%, 5.68%로 분석되었다. 이때 건식 총발열량은 수소 함량과 전수분량을 이용하여 IPCC G/L에서 사용하고 있는 인수식 순발열량으로 환산하였으며, 그 결과 인수식 순발열량의 평균은 3,538 kcal/kg으로 나타났다.

배출가스의 N₂O 농도 분석 결과, GC를 이용한 N₂O 농도는 2.09~6.28 ppm(평균 3.64 ppm)으로 측정되었다. PAS를 이용하여 연속 측정된 N₂O 농도는 최소 1.44 ppm(9:16, 9:03)에서 최대 15.46 ppm(9:18, 4:20)까지 측정되었으며, 평균 4.45 ppm으로 나타났다.

본 연구에서는 N₂O 배출량 산정을 위해 Tier 3과 Tier 4 Method를 적용하였으며, 각각 GC와 PAS 분석 방법을 사용하였다. Tier 3 Method에 따른 N₂O의 사업장 고유배출계수는 0.38 kg/TJ로 산정되었고, 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 Wood·Wood Waste의 N₂O 기본배출계수(4 kg/TJ)와 비교한 결과, 약 91%의 높은 차이율을 나타냈다. 사업장 고유배출계수를 이용하여 산정한 N₂O 배출량은 측정기간 동안 총 4.22 kg, Tier 4 Method에 따른 N₂O 배출량은 7.88 kg의 N₂O가 배출되었다.

각각 산정한 배출량을 비교해 본 결과, Tier 3 Method의 N₂O 배출량은 Tier 4 Method의 N₂O 배출량에 비해 3.66 kg(약 46.4%) 적게 배출되었다.

이러한 결과는 연속 측정과 간헐적인 시료 채취에 의해 발생하는 차이이며, 상대적으로 배출 농도 분포가 큰 Non-CO₂ 배출량 산정을 위해서는 연속 측정을 통한 온실가스 배출량 산정 방법의 적용이 필요하다. 그러나 현재 온실가스·에너지 목표관리 지침 상에 연속 측정 방법에 의한 온실가스 배출량 산정 방법은 CO₂에만 적용하고 있다. 그러므로 신뢰성 있는 온실가스 배출량 산정을 위해서는 Non-CO₂ 배출량 산정 시 연속 측정 방법이 적용될 필요성이 있다.

본 연구에서는 온실가스 배출량 산정 방법에 따른 N₂O 배출량을 비교하였으며, 이를 통해 온실가스 배출량 산정·보고의 정확성 및 신뢰성을 향상하는데 일조할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 Wood Chip 연소시설에서 배출되는 배출가스의 N₂O가 연료 연소과정에서 생성된 것인지, NO_x 제거를 위한 SCR 촉매공정에 의해 생성된 것인지에 대한 고려는 향후 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 대기오염방지시설의 전단과 후단의 N₂O 농도 분석을 통해 방지시설에 따른 N₂O 농도의 영향이 고려된다면 대기오염물질 및 연소 조건에 따른 N₂O 배출 특성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 N₂O 농도의 회귀식을 산정할 수 있을 것이라 판단된다.

REFERENCES

Baker SA, Greene WD, Wilson A. 2012. Fuels characteristics of woods-run whole tree southern pine chips. *Biomass and Bioenergy* 37:67-72.

Gavrilescu D. 2008. Energy from biomass in pulp and paper mills. *Environmental Engineering and Management Journal* 7(5):537-546.

Han TH. 2005. Calibration methods and uncertainty in an ambient N₂O measurement. Ph. D. Dissertation, Chungnam National University.

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

Japan Paper Association(JPA). 2002. Various personal communications between JPA and Reid Miner of NCASI.

Jang KW, Lee JH, Jung SW, Kang KH, Hong JH. 2009. A study on the comparison of emission factor method and CEMS (Continuous Emission Monitoring System). *J Korean Soc Atmos Environ* 25(5):L410-419. (in Korean with

English abstract)

- Korea Energy Management Corporation. 2008. Development of Country Specified Green House Gases Emission Factor (I).
- KS F 2199. 2001. Determination of Moisture Content of Wood.
- Lee SK, Kim SJ, Cho CS, Jeon EC. 2012. Development of CO₂ emission factor for wood chip fuel and reduction effects. *Climate Change Research*, 3(3):211-224. (in Korean with English abstract)
- Kong SD, Park SH, Kim JS, Park KK, Shin MS, Park MJ. 2011. Quality characteristics of refuse derived fuels in Korea by investigation analysis. *Journal of Korea Society of Waste Management* 28(1):110-119.
- Svoboda K, Baxier D, Martine J. 2005. Nitrous oxide emissions waste incineration. Institute of Chemistry Slovak Academy of Sciences 7(3):78-90.
- Swedish Environmental Protection Agency(Swedish EPA). 2004. Sweden's National Inventory Report 2004 - Submitted under the United National Convention on Climate Change.
- Telmo C, Lousada J. 2011. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy* 35(7):2634-2639.
- US EPA. 2001. Promulgated Method 18. Available online: <http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-18.pdf>
- Gwon YS, Lee JG, Chin BB, Son YR. 2007. Development of emission factor of greenhouse gas(CO₂) in stationary combustion facilities using continuous emission monitoring system. The 2007 Environmental Societies Joint Conference, pp 99-101.