

국내 SRF 사용시설의 배출가스 내 바이오매스 함량 분석방법 연구 - 용해선별법과 탄소동위원소 질량분석법 비교

권준화¹ · 권영현¹ · 유하영¹ · 고영재¹ · 전태완¹ · 신선경¹ · 강준구^{1†}

¹국립환경과학원 환경자원연구부

A method for Estimation of Biomass content in the Exhaust Gases of Domestic SRF Facilities: A Comparison of SDM and AMS

Jun-Hwa Kwon¹, Young-Hyun Kwon¹, Ha-Nyoung Yoo¹, Young-Jae Ko¹, Tae-Wan Jeon¹, Sun-Kyoung Shin¹, and Jun-Gu Kang^{1†}

¹Environmental Resources Research Department, National Institute of Environmental Research, Seoul, Korea

Received October 2, 2019 / Revised November 22, 2019 / Accepted November 26, 2019

Carbon dioxide produced from biomass is biogenic. It is considered to be neutral carbon, and is therefore excluded from calculations of greenhouse gas emissions. In Korea, methods for calculating greenhouse gas emissions are categorized into Tiers 1 to 4, according to emission activities. Emissions measured by the methods in Tiers 1 to 3 are partially excluded from total CO₂ emissions according to the proportion of biomass contained in the waste. The Tier 4 method measures CO₂ emissions by measuring the amount and composition of the exhaust gas. However, this method does not consider the biomass content. In Tier 4, as in Tiers 1 to 3, it is necessary to partially exclude CO₂ emissions from the greenhouse gas emissions in the flue gas according to the biomass ratio. In this study, the biomass content of SRF used in domestic facilities was analyzed using SDM. In addition, the biomass content of the exhaust gas from these facilities was analyzed using AMS. It was found that SRF contains 43.6% biomass on average. Furthermore, it was confirmed that the biomass content of the SRF used in facilities measured by SDM and the biomass content of the exhaust gases measured by AMS were similar.

Key words: Waste energy, Biomass, SDM, AMS, Carbon isotopes

1. 서 론

2018년 IEA의 에너지 전망 시나리오에 따르면, 세계의 에너지 수요는 점차 증가하여 2040년까지 25% 이상 증가할 것으로 예상되었다.¹⁾ 이는 기본적으로 모든 에너지원의 소비가 증가한다는 것으로 에너지 수요 및 사용 증가에 따른 이산화탄소 배출량의 증가 또한 예측할 수 있다. 2015년 프랑스 파리에서 이루어진 유엔기후변화협약(UNFCCC)은 2020년 만료 예정인 교토의정서를 대체하는 신 기후체제로 한국은 2030년까지 모든 경제분야에서 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 약 37%

를 감축 목표로 제출하였다.²⁾ 이에 우리나라에서는 「저탄소 녹색성장 기본법」을 통하여 온실가스 감축 목표를 설정하고, 친환경 기술의 개발과 신재생에너지 보급 및 온실가스 배출권 거래제 시행 등 온실가스 배출을 저감하기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다. 산업통상자원부의 「제4차 신·재생에너지 기본계획」에서는 신·재생에너지 공급 목표로 2035년까지 1차 에너지의 11%, 전체 전력량의 13.4%를 계획하고 있다. 국내의 신·재생에너지 지원제도는 폐기물에너지가 아닌 태양광에너지와 풍력 및 조력 등의 에너지에 집중되고 있다. 하지만 2015년기준 신·재생에너지 생산량 중 폐기물에너지

[†]To whom correspondence should be addressed.

지의 순 증가 기여도는 87.2%에 달하며, 폐기물에너지의 잠재량은 이론적, 지리적으로는 약 13,000,000 toe/yr를 초과하고 기술적으로도 약 10,450,000 toe/yr에 달한다.³⁻⁴⁾ 따라서 신·재생에너지 기본계획의 보급 목표를 실현하기 위해서는 폐기물에너지에 대한 지원이 지속적으로 이루어져야 한다고 판단된다.

바이오매스로부터 생산된 바이오에너지는 연소 시 발생하는 이산화탄소가 화석연료로부터 기인하지 않으므로 대기 중 이산화탄소의 농도를 증가시키지 않고, 이를 중립탄소라 칭하며 온실가스 배출량에서 제외시킨다. 국내에서는 배출활동별 온실가스 배출량 세부산정방법과 기준을 Tier 1~4로 마련하여 관리하고 있으며, Tier 1~3에서는 폐기물에 포함된 바이오매스의 비율만큼 총 CO₂ 배출량에서 제외한다. 하지만 굴뚝에서 배출되는 배출가스량과 농도를 측정하여 CO₂ 배출량을 구하는 방법인 Tier 4의 연속측정법에서는 바이오매스 함량을 고려하지 않고 있다.⁵⁾ Tier 1~3의 기준과 동일하게 Tier 4에도 굴뚝 배출가스 내의 온실가스 배출량에서 바이오매스 비율만큼 CO₂ 배출량에서 제외하는 것이 필요하다. 국외에서는 이미 폐기물에너지 중 바이오매스 함량을 측정 평가하기 위하여 배출가스 내 CO₂의 탄소 동위원소(¹²C, ¹³C, ¹⁴C)를 이용한 바이오매스 기원 탄소 측정 연구가 이루어지고 있다.⁶⁻¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 현재 국내 환경부고시 ‘고형연료제품 품질 시험분석방법’에 따른 바이오매스 함량 분석법인 용해선별법을 이용하여 고형연료제품 사용시설에 투입되는 고형연료제품의 바이오매스 함량 측정을 분석하고, CNE/TR 15591에 따른 탄소동위원소 질량분석법을 이용하여 사용시설의 배출가스 내 바이오매스 함량 분석 수행하였다.¹¹⁾ 연구를 위해 사용하는 고형연료 제품의 종류에 따라서 5개 고형연료제품 사용시설을 대상시설로 선정하였다. 연구 대상시설의 굴뚝에서 배출되는 CO₂ 가스를 포집하여 탄소동위원소 질량분석법으로 바이오매스 함량 분석을 의뢰하였다. 또한 탄소동위원소 질량분석법을 이용한 바이오매스 함량 분석

결과 비교를 위하여 배출가스 시료채취 당일 고형연료 사용시설에 투입된 연료(SRF 또는 BIO-SRF)를 채취하여 용해선별법을 3회 반복 실험하여 바이오매스 함량 측정 분석을 수행하였다. 두 분석법의 바이오매스 함량 결과를 비교하여 투입 원료 대비 배출가스 내 바이오매스 함량을 확인할 수 있으며, 연구 결과를 바탕으로 투입원료 성상이 불규칙한 폐기물 소각시설 및 에너지회수시설 등의 온실가스 배출량 산정에 탄소동위원소 질량분석법의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 대상시설 선정

국내의 폐기물 소각시설은 크게 생활폐기물 소각시설과 사업장폐기물 소각시설로 나누어진다. 폐기물은 일반 생활폐기물이라 할지라도 계절별, 지역별 특성에 따라 수분, 회분 등 삼성분의 차이가 있으며 성상이 불균일하여 소각시설에 투입되는 폐기물의 정확한 바이오매스 함량을 측정하기 어렵다. 따라서 비교적 성상이 균일하도록 법적 품질기준에 따라 폐기물을 재활용하여 생산된 고형연료제품(SRF, Solid refuse fuel)을 사용하여 에너지를 생산하는 고형연료제품 사용시설을 대상시설로 선정하여 연구를 수행하였다. 성형 및 비성형 고형연료제품 사용시설 각 1개소, 고형연료제품과 바이오 고형연료제품 혼소 시설 1개소, 바이오 고형연료제품 사용시설 1개소, 바이오 고형연료제품을 혼소하는 석탄 화력발전소 1개소를 선정하여 총 5개소를 대상시설로 선정하였다.

2.2. 시료채취방법

2.2.1. 고형연료제품 시료채취

대상시설에서 고형연료제품을 연소한 후 배출되는 가스를 포집하였으며, 동시에 배출가스 포집 당시 소각로에 투입되는 고형연료제품의 시료를 채취하여 바이오매스 함량을 분석하였다. 소각로로 투입되는 고형연료

Table 1. Status of facilities using SRF

SRF type		Facility	Energy production	Incinerator type	Capacity (tons/hr)
SRF	Pelletized	A	Electricity	CFBC	10.7
	Fluff	B	Electricity	FBC	20.8
SRF(pelletized) + Bio-SRF(fluff)		C	Steam	FBC	6.0
Bio-SRF	Fluff	D	Electricity	FBC	24.5
Bio-SRF (석탄화력발전)	Pelletized	E	Electricity	Pulverized Coal Combustion	208.3

제품은 투입 라인의 컨베이어벨트에서 채취 하였으며, 공정 설계상 컨베이어벨트에서 시료채취가 불가능한 경우, 사일로에서 시료를 채취하여 분석을 수행하였다.

2.2.2. 배출가스 시료채취

고형연료제품 사용시설의 굴뚝에서 배출가스를 포집하기 위하여 가스시료 채취 장치를 이용하였다. 가스시료 채취 장치는 선행연구로 수행된 ‘고체·기체상태의 바이오매스함량 분석방법에 관한 연구’에서 사용된 가스시료 채취 장치를 개량한 것으로 장치 구성은 Fig. 1 과 같다.¹²⁾ 굴뚝으로 배출되는 고온의 배출가스는 굴뚝의 측정공에 설치된 채취관을 통해 수분 흡수병을 통과하며, 응축수와 분진이 제거된 후 테들러 백에 포집된다. 동일한 측정공에 가스성분 분석 장치를 연결하여 가스성분의 함량을 모니터링 하였고, 소각로의 정상가동 여부를 확인하였다.

Table 2는 미국, 영국, ISO의 탄소동위원소분석법을 이용한 바이오매스 함량 측정법 표준을 비교한 것이다.

ASTM D 6866-12는 시료 분석에 대한 표준이고, ASTM D 7459-08은 시료채취방법을 나타낸 미국 표준이다. BS EN 15440-11은 고체 시료의 시료분석 영국표준이며, ISO 13833-13은 기체시료 중 CO₂를 고상 또는 액상 흡수제를 이용하여 포집하는 방법을 나타낸 표준이다. 본 연구에서는 24시간 연속 포집으로 시료채취가 수행되었으며, 시료는 65 ml/min의 유량으로 포집되었다. 테들러백은 100 L 크기를 사용하였다.

2.3. 바이오매스 함량 분석

2.3.1. 용해선별법(SDM, Selective Dissolution Method)

용해선별법은 기존에 퇴비의 생분해성 물질 함량을 측정하기 위한 방법으로 사용되었으며, CEN/TS 15440 에 따라 바이오매스는 생분해성이라는 가정으로 고형연료제품의 바이오매스함량을 결정하기 위해 사용되고 있다. 바이오매스 물질은 황산과 과산화수소에 용해되며 비바이오매스 물질은 용해되지 않고 고체 상태로 남아 있는 원리를 이용한 시험방법이다. 하지만, 나일론 또는

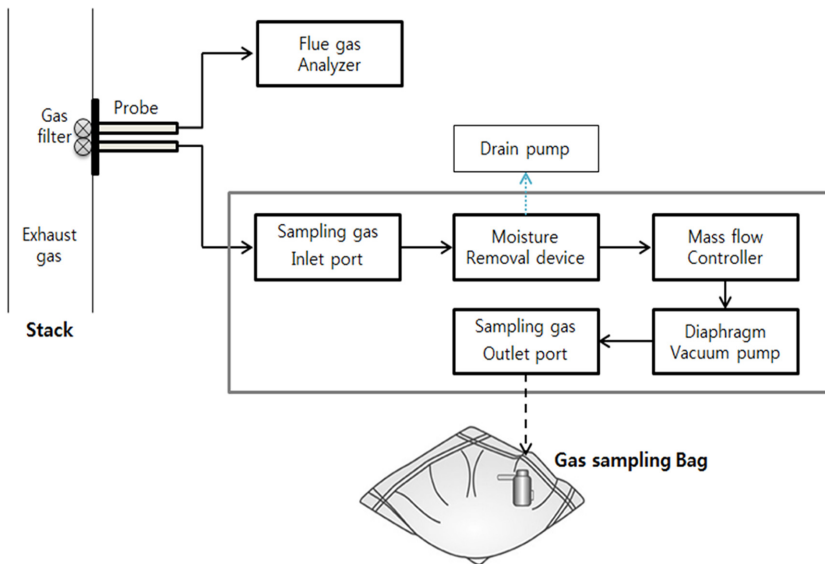


Fig. 1. Schematic drawing of the gas sampling system.

Table 2. International test methods for determination of biomass content¹¹⁾

Standards	ASTM	EN	ISO
Standards of biomass content measurement	ASTM D6866-12 ASTM D7459-08	EN 15440-11	ISO 13833-13
Sample description	Gas, Liquid, Solid	Solid(SRF)	Gas
Method of sampling	Gas	Solid	Gas
Period of sampling	1h-24 h / at a constant rate	-	1 h-1 month
Biomass content analysis method	AMS, LSC, IRMS	SDM, MS, AMS, LSC	AMS, LSC, BI

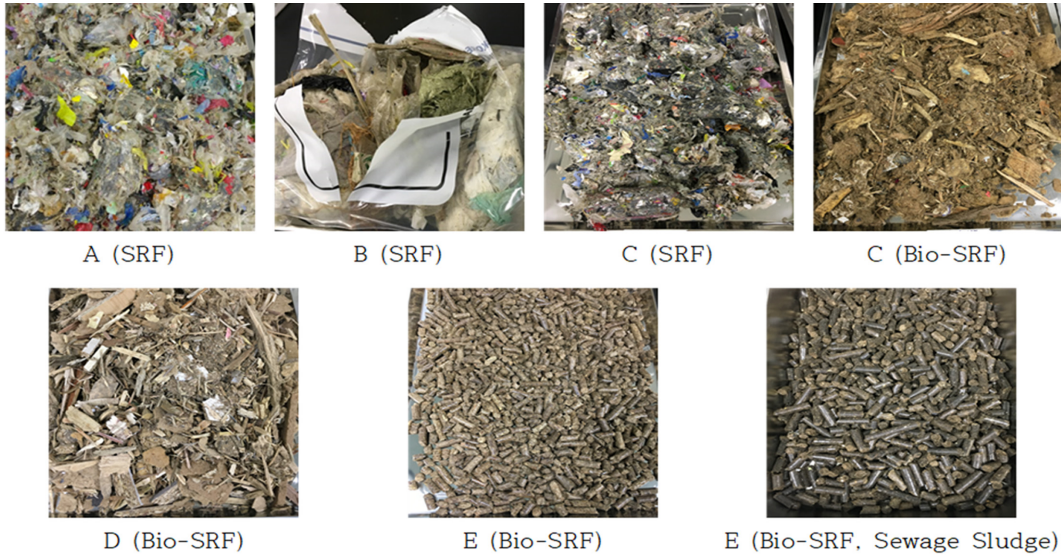


Fig. 2. Photographs of samples used in this study.

경질우레탄과 같은 비바이오매스 물질이 용해선별법에 의해 분해되거나 바이오매스 물질인 양모, 튀김 지방, 목탄 등이 분해되지 않는 등 분석 결과의 불확실성이 발생할 수 있다.¹¹⁾ BS EN 15440 그리고 국내 환경부 고시 제2014-135 「고형연료제품 품질시험·분석방법」을 참고하였으며 바이오매스 함량의 계산은 식 (1)에 따른다.

바이오매스 함량(%) =

$$\left[1 - \left(\frac{m_{residue} - m_{residue-ash}}{m_{SRF}} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

여기서,

$m_{residue}$ = 시료가 용해된 후 잔여물의 건조 무게 (g)

$m_{residue-ash}$ = 용해 잔여물의 재 무게 (g)

m_{SRF} = 용해선별법 시험 시 사용되는 SRF 양 (g)

실험에 사용된 시료는 「고형연료제품 품질시험·분석 방법」에 따라 건조 및 1 mm 이하 분쇄 전처리 과정을 통하여 준비하였다.

Fig. 3은 용해선별법의 실험과정을 나타낸 것이다. 전처리된 시료를 80% 황산에 16 ± 2 h 동안 용해시킨 후 35% 과산화수소 30 ml를 첨가하여 반응시킨다. 과산화수소는 적은 양을 수회 투입하여 시료가 끓어 넘치는 것을 방지하였다. 5시간 이상 충분히 용해시킨 시료는 감압여과를 이용하여 유리섬유여과지에 거른 후 건조시켜 잔여물의 무게를 측정하였고, 건조된 잔여물을 회

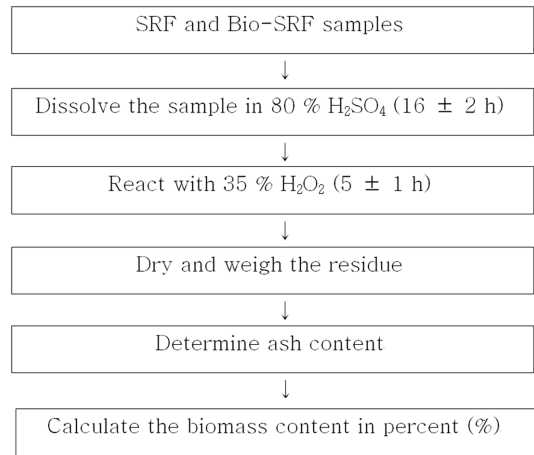


Fig. 3. Procedure for SDM measurement of biomass content.

화 하여 무게를 측정하였다.

2.3.2. 탄소동위원소 질량분석법(AMS, Accelerator Mass Spectrometry)

고형연료제품 사용시설에서 포집한 배출가스를 탄소동위원소 질량분석법을 이용하여 바이오매스 함량을 측정하였다. AMS분석 장치를 구비하고 있는 한국지질자원연구원(KIGAM)에 의뢰하여 ASTM D6866-11¹³⁾에 따른 시험방법에 따라 분석을 수행하였다. 배출가스 시료는 가스 내 성분의 승화점에 따라 액화질소에 의해 분리되며, CO₂를 분리하여 포집할 수 있다. 가스에서 분리하여 포집된 CO₂는 환원장치를 통해 CO₂의 탄소

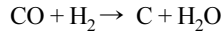
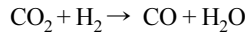
Table 3. Fuel inputs to facilities

SRF type	Facility	Amount of fuel (tons/yr)		Total (tons/yr)	Notes
		SRF	Bio-SRF		
SRF	Pelletized	A	25,663.68	-	25,663.68
	Fluff	B	155,997.63	-	155,997.63
SRF(pelletized) + Bio-SRF(fluff)		C	25,536.765	21,731.47	47,268.235
Bio-SRF	Fluff	D	-	144,698	144,698
Bio-SRF	Pelletized	E	-	44,684	1,603,361 Coal

Table 4. Input fuel quantities for Facility E during exhaust gas sampling

Fuel type	Day 1	Day 2	Total amount of fuel
Flaming coal (tons/day)	4632	4778	9410
Bio-SRF (tons/day)	200	234	434
Total amount of fuel (tons/day)	4832	5012	9844
Ratio of Bio-SRF (%)	4.14	4.67	4.41

를 흑연에 고정하여 표적시료로 제작된다. CO₂의 환원 은 다음과 같은 반응으로 이루어진다.



C + Fe 촉매제 → 흑연형태의 고체로 환원

배출가스로부터 정제 분리되고 철촉매에 환원되어 표 적시료에 고정된 탄소는 가속기 질량분석기에 의해 분 석이 이루어진다. 본 연구에 사용된 가속기 질량분석기 는 세슘을 이용한 스퍼터링(sputtering)에 의해 표적시료 의 탄소 동위원소를 가속하여 분석한다. 가속기를 통과 하여 양이온이 된 탄소가 자기장을 통과하며 동위원소 질량차이에 따라 궤도가 분리된다. 궤도 구분과 에너지 손실 차이를 통해 동위원소의 분석이 이루어지며, ¹²C+ 와 ¹³C+는 전류로 측정하여 이온수로 계산하고 ¹⁴C+는 직접계수를 통해 ¹⁴C/¹²C 및 ¹³C/¹²C 비율을 계산한다.¹⁴⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상시설 원료투입

대상시설에 실제 투입되는 연료의 계측 값을 조사하 여 연간 사용된 고형연료제품의 종류 및 투입량을 확인 하였다. C시설의 고형연료제품과 바이오 고형연료제품 의 혼소 비율은 약 50:50로 조사 되었으나, 계측장치에 의해 정확히 측정되지는 않았다. 석탄 화력발전소인 E 시설은 국내의 신재생에너지 기술개발 지원 제도 중 하 나인 공급의무화제도(RPS)에 의해 유연탄과 역청탄에 바 이오 고형연료제품과 하수슬러지연료탄을 혼소하는 시 설이며, 대상 호기에 투입되는 바이오 고형연료제품의

비율은 5% 미만으로 계량되었다.

본 연구를 위하여 석탄 화력발전소인 E 시설은 굴뚝 배출가스 시료포집 기간 동안은 하수슬러지연료탄을 제 외한 유연탄과 바이오 고형연료제품을 혼소하였다. 측 정 당일 사용 연료량은 Table 4와 같다. 배출가스 시료 포집 기간 동안 투입된 바이오 고형연료제품의 투입량 은 중량대비 4.41%로 계측되었다.

3.2. 바이오매스 함량 분석결과

3.2.1. 용해선별법과 탄소동위원소 질량분석법 분석결 과 비교

용해선별법을 이용한 대상시설 투입 연료의 바이오 매스 함량 분석결과는 Table 5와 같다. A~C 시설의 연 료로 투입되는 3개 종류의 고형연료제품의 바이오매스 함량 분석 결과, 평균 43.6%의 바이오매스 함량을 확 인하였다. 이를 통해 사용되는 고형연료제품의 원료에 따라 생물기원의 중립탄소가 다량 포함되어 있을 수 있

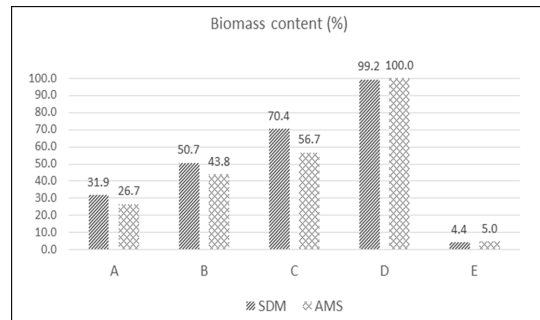


Fig. 4. Comparison of the biomass contents (%) calculated by SDM and AMS.

Table 5. Determination of the Biomass content (%) using SDM

SRF type	Facility	Amount of fuel (%)			Biomass content (%)			
		SRF	Bio-SRF	Coal	SRF	Bio-SRF	Total	
SRF	Pelletized	A	100.0	-	-	31.9	-	31.9
	Fluff	B	100.0	-	-	50.7	-	50.7
SRF(pelletized) + Bio-SRF(fluff)		C	54.0	46.0	-	48.1	96.7	70.4
Bio-SRF	Fluff	D	-	100.0	-	-	99.2	99.2
	Pelletized	E	-	4.4	95.6	-	99.8	4.4

Table 6. List of components giving false results when determining biomass by SDM¹⁵⁾

Components
Solid fossil fuels such as hard coal, coke, brown coal, lignite and peat
Charcoal
Biodegradable plastics of fossil origin
Non-biodegradable plastics of biogenic origin
Oil or fat present as a constituent of biomass
Natural and/or synthetic rubber residues
Wool
Viscose
Nylon, polyurethane or other polymers containing molecular amino groups
Silicon rubber

음을 나타낸다. C~E 시설에 사용된 바이오 고형연료제품의 바이오매스 함량 분석결과는 평균 98.6 %로 분석되었다.

Fig. 7은 각 시설에 사용한 연료의 중량 비율에 따라 용해선별법을 이용하여 산출한 바이오매스 함량을 환산한 결과와 탄소동위원소 질량분석법을 이용한 대상 시설의 굴뚝 배출가스 내 바이오매스 함량 분석결과를 비교한 것이다. 고형연료제품을 전소하는 A, B 시설의 바이오매스 함량은 용해선별법과 탄소동위원소 질량분석법의 차이가 6.1%로 나타났다. 이는 사용하는 고형연료제품의 균질성을 감안하였을 때 이해할만한 오차로 고려된다. 고형연료제품과 바이오 고형연료제품을 혼소하는 C 시설은 두 실험법에 따른 차이가 13.7%에 이른다. 이는 투입되는 고형연료제품과 바이오 고형연료제품의 중량 비율이 정확히 계측되지 않은 것을 고려할 수 있다. 바이오 고형연료제품을 전소하는 D 시설에서의 두 실험법에 따른 바이오매스 함량 결과 차이가 1% 이하로 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 특히, 석탄 화력 발전소인 E 시설은 가스시료 샘플링 당시의 정확한 바

이오고형연료제품 투입량을 확인 할 수 있었으며, 두 실험법에 따른 바이오매스 환산결과 0.6%의 미미한 오차가 발생하였다.

용해선별법을 이용한 투입 고형연료제품의 바이오매스 함량 분석 결과와 탄소동위원소 질량분석법을 이용한 고형연료제품 사용시설의 배출가스 내 바이오매스 함량 분석 결과가 약간의 차이가 있으나, 이는 다양한 오차의 원인을 고려해야할 필요가 있다. 먼저, 용해선별법에 따라 용해된 물질 중 회분형성물질 일부가 필터를 통해 침투 되거나 잔류물에 남아 있을 수 있다. 또한 앞서 논의된 실험의 오차를 유발할 수 있는 물질에 의한 용해선별법의 불확실성이 고려된다. Table 6은 BS EN 15440에 규정되어 있는 오차의 원인이 될 수 있는 물질이다. 고형연료제품의 회분에 의한 영향도 용해선별법을 이용한 바이오매스 함량 분석 결과에 오차가 될 수 있다. 그 외에 고형연료제품 사용시설의 운영 방식에 따라 소각로의 안정적 연소를 위해 LNG나 경질유와 같은 보조연료를 투입하거나, 연소공기 비율을 조정하여 대기 중 이산화탄소의 농도에 따른 영향 등이 고려된다.

4. 결 론

국내의 환경문제에 대한 노력은 국제적인 변화에 맞추어 정책적, 기술적으로 다양하게 이루어지고 있다. 유엔기후변화협약에 따른 온실가스 감축 목표를 이루기 위하여 화석연료가 아닌 신·재생에너지의 사용이 더욱 필요하다. 폐기물에너지는 성상이 불균일하여 재생에너지로서 평가가 어려우며 폐기물이라는 편견에 의해 가치가 저평가 되는 경향이 있다. 또한 국내의 배출활동별 온실가스 배출량 세부산정방법 중 굴뚝 배출가스 내 온실가스 배출은 바이오매스 함량이 고려되지 않으므로 폐기물 성상에 따른 온실가스 배출량 세부산정방법과 비교하였을 때 불합리하게 판단된다. 따라서 배출가스 내 CO₂의 탄소 동위원소를 이용한 바이오매스 기원

탄소를 측정하여 바이오매스 함량을 측정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

폐기물을 법적 품질기준에 따라 재활용하여 생산한 고행연료제품을 용해선별법을 이용하여 바이오매스 함량을 측정하였으며, 실제로 국내에 운영되고 있는 고행연료제품 사용시설의 굴뚝 배출가스 내 바이오매스 함량을 탄소동위원소 질량분석법을 이용하여 측정하고 비교하였다.

대상시설에 사용된 고행연료제품 3개 제품을 용해선별법을 이용하여 분석한 결과, 평균적으로 43.6%에 이르는 바이오매스를 포함하고 있음을 확인하였다. 또한 바이오 고행연료제품은 96.7% 이상의 바이오매스로 이루어져 있음을 확인하였다.

대상시설의 배출가스를 탄소동위원소 질량분석법으로 분석한 결과, 투입된 고행연료제품의 바이오매스 함량 측정 결과와 유사하게 나타났다. 두 시험법에 의한 바이오매스 함량 차이는 전소시설에서 평균 4.3%로 나타났으며, 혼소시설에서는 13.7%로 나타났다. 이는 투입된 고행연료제품의 혼소비율이 정확히 계측되지 않아 발생한 오차로 예상된다. 특히 주목할 만한 결과로서 석탄화력 발전시설인 E 시설의 배출가스 분석결과, 배출가스 포집 기간 동안의 바이오 고행연료제품 사용 비율에 따른 바이오매스 함량 환산 수치와 배출가스에 포함된 바이오매스의 함량이 거의 유사한 값인 4.4%와 5.0%로 나타났다.

용해선별법을 이용한 고행연료제품의 분석 결과와 탄소동위원소 질량분석법을 이용한 배출가스의 분석결과 간에 나타나는 오차는 용해선별법의 불확실성 및 고행연료제품 사용시설의 운영 등 다양한 원인을 고려할 수 있다. 하지만 성상이 불균일하며 시료의 대표성 확보가 어려운 폐기물의 가치를 평가하기 위해 배출가스 내 바이오매스 함량을 측정하여 온실가스 배출량 산정에 적용하는 것이 타당하다고 판단되며, 분석 결과의 정확성을 높이기 위해 배출가스 포집 기간을 24시간 이상으로 설정하는 것이 고려된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. (NIER-2017-01-01-089)

참고문헌

1. "World Energy outlook", **2018**, IEA.
2. UNFCCC, "Submission by the republic of Korea intended nationally determined contribution", www.unfccc.int, 2018년 9월.
3. "제4차 신·재생에너지 기본계획", **2014**, 산업통상자원부.
4. "2016년 신재생에너지백서", **2016**, 한국에너지공단 신재생에너지센터.
5. "Enforcement decree of the framework act on low carbon, green growth, Presidential Decree No. 24474", **2013**, Ministry of Government Legislation.
6. "Determination of the fossil carbon content in combustible municipal solid waste in Sweden", **2012**, Avfall Sverige.
7. G. K. P. Muir, S. Hayward, B. G. Tripney, G. T. Cook, P. Naysmith, B. M. J. Herbert, M. H. Garnett, and M. Wilkinson, "Determining the biomass fraction of mixed waste fuels: A comparison of existing industry and 14C-based methodologies", *Waste Management*, **2015**, 35, 293-300.
8. J. Mohn, S. Szidat, K. Zeyer, and L. Emmenegger, "Fossil and biogenic CO₂ from waste incineration based on a yearlong radiocarbon study", *Waste Management*, **2012**, 32, 1516-1520.
9. F. Arevalo, I. Martines, L. Garcia, M. Maldonado, and M. Leon, "14C determination in different bio-based products", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **2015**, 361, 354-357.
10. J. Mohn, S. Szidat, J. Fellner, H. Rechberger, R. Quartier, B. Buchmann, L. Emmenegger, "Determination of biogenic and fossil CO₂ emitted by waste incineration based on 14CO₂ and mass balances" *Biores. Technol.*, **2018**, 99, 6471-6479.
11. CEN/TR 15591, "Solid recovered fuels – Determination of the biomass content based on the 14C method", **2007**.
12. 강준구, 손준익, 민지수, 장미정, 권영현, 유하녕, 고영재, 권준화, 전태완, 신선경, "고체·기체상태의 바이오매스함량 분석방법에 관한 연구", *한국폐기물자원순환학회지*, **2016**, 33, 810-818.
13. ASTM D6866-11, "Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis", **2012**.
14. 유재홍, "방사성 동위원소 분석을 위한 AMS(Accelerator Mass Spectrometry) 기술분석과 신약개발 효용성 및 바이오매스 검증 사례", 석사학위논문, *Korea university*, **2016**.
15. British Standard Institute BS EN 15440, "Solid recovered fuels - Method for the determination of biomass content", **2011**.