Printed in the Republic of Korea
ANALYTICAL SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 31, No. 1, 31-38, 2018
https://doi.org/10.5806/AST.2018.31.1.31

A study on the evaluation of lower heating value using heat balance method in industrial waste incineration facilities

Youngjae Ko, Jun-Gu Kang★, Young-Hyun Kwon, Ha-Nyoung Yoo, Jun-Hwa Kwon, Mi-Jeong Jang, Tae-Wan Jeon, and Sun-Kyoung Shin

National Institute of Environmental Research of Environmental Research, Incheon 22689, Korea
(Received September 12, 2017; Revised January 1, 2018; Accepted January 15, 2018)

열정산방법을 이용한 사업장폐기물 소각시설의 저위발열량 분석 · 평가 연구

고영재 · 강준구★ · 권영현 · 유하녕 · 권준화 · 장미정 · 전태완 · 신선경

국립환경과학원 환경자원연구부
(2017. 9. 12. 접수, 2018. 1. 14. 수정, 2018. 1. 15. 승인)

Abstract The energy recovery rate estimation method proposed through the Waste Control Act does not take into account the energy used in practice. In addition, the method for measuring a lower heating value, which is the main factor of the energy recovery rate, was carried out through a small sampling amount, and thus the representative value of the waste was not reflected. With the revised estimation method (Notification No. 2015-215 of the Ministry of Environment), the energy recovery rate should be estimated based on the actual amount of energy used, and a heat balance method was proposed as a way to estimate the lower heating value. In this study, the lower heating value was estimated for seven industrial waste incineration facilities according to the revised estimation method. All data used in the estimations were achieved from measurement instruments applied to each of the incinerators and through direct measurements taken by the operators for the purposes of calculation. As a result, the lower heating value was estimated to be about 3,404.7 kcal/kg for the seven industrial waste incineration facilities.

요 약: 기존 폐기물 저위발열량 측정·분석 방법은 소량의 시료에 대한 발열량계 측정 및 원소분석 결과로 저위발열량 환산식을 적용하여 산정하도록 규정하고 있다. 즉, 기존 저위발열량 산정방법은 폐기물의 불균질성, 지역적 특성, 계절적 특성 등을 충분히 반영하지 못하여 대표성과 객관성 측면에서의 한계를 나타내고 있다. 이러한 문제로 환경부 고시(제2015-251호)에서는 저위발열량의 대표성 확보를 위하여 산정방법을 개정하였으며, 「KS B 6205 육상용 보일러의 열정산방식」을 바탕으로 열정산방법을 적용한 사업장폐기물 소각시설에서의 저위발열량 산정방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 현재 운영 중인 사업장폐기물 소각시설을 대상으로 열정산법에 따라 시설별 투입 폐기물의 저위발열량을 분석·평가하였다.

★ Corresponding author
Phone : +82-(0)32-560-7525 Fax : +82-(0)32-568-1658
E-mail : kang8185@korea.kr

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.

사업장폐기물 소각시설 7 개소 (10 개호기)에 대한 저위발열량 평가 결과 평균 약 3,404.7 kcal/kg로 산정되었으며, 세부 산정 인자에는 실제 시설 운영 데이터를 수집·종합 하여 적용하였다. 본 연구에서 적용한 개정된 저위발열량 산정 방법은 불균질한 성상의 폐기물 특성을 반영할 수 있는 방법으로, 기존 폐기물 발열량 산정방법과 비교하여 보다 객관성을 확보한 방법인 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 추후 세부적인 저위발열량 산정방법 개선 및 산정인자 도출 등을 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

Key words: industrial waste incineration plant, incineration heat, lower heating value, heat balance method

1. 서 론

환경부 통계자료[1]에 따르면 국내 폐기물 발생량은 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 폐기물 감량 및 재활용 등에 관한 정책의 추진으로 발생량 감축 및 재활용을 유도하였으나, 여전히 재활용 불가능 폐기물과 기타 처리 후의 부산물 등은 소각과 매립을 통하여 처리되고 있는 상황이다. 특히 매립 제로화 및 에너지 회수 증진과 같은 국가 정책 변화에 따라 상대적으로 소각 처리량은 더욱 증가될 것으로 예상된다.[2-3] 국내 폐기물 관련 정책은 안정적 처리 목적에서 자원순환으로의 변화를 추구하고 있으며,「자원순환기본법」에서는 폐자원의 순환이용 및 적정 처분을 통한 천연자원과 에너지 소비 감축 등을 목적으로 두고 있다.[4-6] 이에 따라 폐기물 발생억제(Reduce), 재이용(Reuse), 재활용(Recycle)의 3R 정책과 더불어 에너지 회수(Recovery)를 포함한 4R 체제가 안정적으로 정착되어야 하는 실정이다.[7] EU에서는 2008년 폐기물기본지침(Waste Framework Directive)의 개정을 통하여 폐기물 소각시설에서의 에너지회수율(R1)을 규정함으로써 에너지 회수효율 증진 및 소각처리 시장의 확대를 유도하고 있다.[8-9] 아울러 국내에서는 폐기물 처분부담금(소각처분부담금) 제도를 통하여 소각열 에너지 순환이용에 따른 처분부담금 감면을 규정함으로써 에너지 회수효율 증진 및 회수방안 확대를 위한 유인정책을 마련하였다.[10-11] 이처럼 폐기물 관리정책은 처분 목적에서 벗어나 폐기물에 대하여 온실가스 감축 및 재생에너지원으로써 그 기능을 부가시키고 있으며, 폐기물을 통한 에너지 회수율 증진 및 에너지원으로서의 다양한 활용 방안 마련이 필요한 시점이다.[12]

폐기물 저위발열량은 완전연소 될 때의 단위질량당 발생하는 열량으로 소각로에서의 연소성능 및 특성 파악 측면에서 핵심적 요소로 작용하는 인자이다.[13] 그러나 기존 저위발열량 측정·분석 방법은 발열량계 측정 및 원소분석 결과로 저위발열량 환산식을 적용하여 산정하도록 규정하고 있으며, 공정시험기준에 따라 채취된 소량의 시료에 기반하고 있다. 즉, 기존 저위발열량 산정방법은 폐기물의 불균질성, 지역적 특성, 계절적 특성 등을 충분히 반영하지 못하여 대표성과 객관성 측면에서의 한계를 나타내고 있다.[14-15] 이러한 문제로 환경부 고시[16](제2015-251호)에서는 저위발열량의 대표성 확보를 위하여 에너지보존법칙 기반의「KS B 6205 육상용 보일러의 열정산방식」[17]을 바탕으로 폐기물 소각설비에서의 주요 입·출열 항목에 대한 열정산방법을 저위발열량 산정방법으로 제시하고 있다.

본 연구에서는 현재 운영 중인 사업장폐기물 소각시설을 대상으로 열정산법에 따라 시설별 투입 폐기물의 저위발열량을 분석·평가하였다. 특히 환경부 고시[16]의 산정방법에서는 소각시설에서의 연간 계측 데이터 및 현장 측정 데이터를 산정인자로 적용하도록 규정하고 있다. 여기서 계측 데이터는 계측장비로 자동 측정되는 자료로써 열정산 항목별 입·출열량 산정을 위한 중량, 유량, 온도, 압력 등이 해당되며, 현장 측정 데이터는 계측장비 측정이 불가하여 공정시험기준에 준하여 소각설비 현장에서 측정한 자료를 말한다. 이와 같이 본 연구에서는 현재 소각시설에서의 실측 운영 자료를 바탕으로 저위발열량을 산정하여 보다 객관성이 확보된 결과를 도출 할 수 있었다. 본 연구의 결과는 추후 세부적인 저위발열량 산정방법 개선 및 산정인자 도출 등을 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 조사 대상시설 및 조사 항목

2.1.1. 조사 대상 시설 선정

본 연구에서는 현재 운영 중인 사업장폐기물 소각

Table 1. Status of industrial waste incineration facilities surveyed in this study

No.	Facility (Unit)	Incinerator type	Capacity (ton/hr)	WHB* type
1	A (1)	Stoker	3.8	Integral type
2	B (2)	Stoker	4.0	Integral type
3	C (2)	Stoker	3.0	Integral type
4	D (3)	Stoker + R/K	2.0	Integral type
5	E (1)	FBC	2.1	Separated type
6	F (1)	Stoker	4.0	Separated type
7	F (2)	Stoker	4.0	Separated type
8	F (3)	R/K	3.5	Separated type
9	G (1)	FBC	2.1	Separated type
10	G (2)	R/k	2.0	Separated type

* WHB : Waste Heat Boiler

시설에서의 실측 자료를 바탕으로 열정산법을 적용하여 폐기물 저위발열량을 분석하였다. 이에, 국내 사업장폐기물 소각시설 중 저위발열량 산정을 위한 필수 계측항목의 계측장비가 기 설치되어 있는 시설을 대상 시설로 선정하였다. 또한 지역적 분포 특성과 소각로 유형(Stoker, Rotary kiln, FBC 등) 및 폐열보일러 구성(보일러 일체형, 보일러 분리형)을 고려하여 국내 사업장폐기물 소각시설 유형의 대표성을 확보하고자 하였다. 이에 따라 소각 처리용량 2 ton/hr 이상의 스토커소각로 5 기, 로터리킬른-스토커 병합식 소각로 1 기, 로터리킬른 소각로 2 기, 유동층 소각로 2 기로 총 7 개소-10 개호기를 대상 시설로 선정하였으며, 시설별 소각유형 및 주요 현황을 *Table* 1에 제시하였다.

2.1.2. 조사 항목 및 자료 수집 방법

열정산법을 통한 폐기물 저위발열량 산정을 위해서는 세부 산정 인자에 대한 정확한 측정 자료가 요구된다. 데이터 신뢰도 확보를 위하여 실제 설비에 부착된 계측장비의 자동 계측 자료를 수집하였으며, 자동계측 불가능 항목은 직접적인 현장 측정·분석을 통하여 자료를 확보하였다. 여기서 계측장비 자동 계측 항목에는 열정산 항목별 입열량과 출열량 산정을 위한 각각의 중량, 유량, 온도, 압력, 농도 계측값이 포함된

Table 2. Data survey items and measurement methods

Category	Details category	Data measurement method*
Waste input	Waste type	-
	Waste feed rate	A.M.
Auxiliary fuel supply	Auxiliary fuel type used in incinerator	-
	Auxiliary fuel feed rate used in incinerator	A.M.
Air supply	Air flow rate	A.M.
	Air temperature	A.M.
WHB water	WHB water feed rate	A.M.
	WHB water temperature	A.M.
Stack flue gas	Flow rate	A.M.
	O_2 concentration	A.M.
WHB flue gas	Flow rate	A.M.
	Temperature	A.M.
	O_2 concentration	F.M.
	H_2O content	F.M.
Steam production	Flow rate of produced steam	A.M.
	Temperature and pressure	A.M.
Bottom ash	Emissions rate	A.M.
	Temperature	F.M.
	Ignition loss ratio, H_2O content	F.M.
Heat loss	Surface area of incinerator and WHB	F.M.
	Surface temperature of incinerator and WHB	F.M.

*A.M. : Automatically measured data through measuring instrument
F.M. : Field measurement data

다. 아울러 현장 측정·분석이 요구되는 항목에는 폐열보일러 후단 배출가스의 산소농도 및 수분함량, 소각잔재물의 온도, 강열감량 및 수분함량, 소각로 및 폐열보일러 표면의 방열손실이 포함된다.

폐열보일러 후단 배출가스 조성은 폐열보일러 최종 가열기 출구에서 측정·기록하였으며, 수분함량의 경우 대기오염 공정시험기준 ES 01301.1a[18]에 따라 측정·분석하였다. 또한 가스상 물질(O_2, CO, CO_2, NO_X 등) 농도는 휴대용 가스분석기(BACARACHI, ECA-450)를 이용하여 1분 간격으로 측정·기록 하였다. 소각 잔재물 수분 및 강열감량의 경우 외부 반출 직전 저장조의 바닥재를 시료로 하여 각각 폐기물 공정시험기준 ES 06301.1b, ES 06303.1[19-20]에 따라 분석을 수행하였다. 소각 잔재물 배출온도는 소각로 후단에서 수욕조로 배출되기 직전 완전 연소된 잔재물의 온도를 열화상카메라(FLIR社, T650sc)를 이용하여 측정하였다. 소각로 및 폐열보일러 표면 방열손실 측정의 경우 소각잔재물 온도 측정용과 동일한 열화상카메라를 이용하여 표면온도를 측정하였으며, 설비 표면적을 적용하여 시간당 방열손실 에너지량을 산정하였다. 세부적인 자료 조사 항목과 각각의 수집 방법은 *Table* 2에 제시하였다.

2.2. 저위발열량 산정 방법

2.2.1. 저위발열량 산정 적용 범위

사업장폐기물 소각시설의 투입 폐기물 저위발열량은 적용 범위 내 입·출열 항목을 도출하여 에너지 보존법칙 바탕의 열정산법을 적용하여 분석하였다. 열정산법이란 열을 사용하는 설비 등에 투입되는 물질이 얼마만큼의 열을 보유하고 있으며 또한 어떠한 매체로 얼마만큼의 열이 배출되는지를 계산하는 것으로 열수지(Heat balance)라고도 한다. 열정산을 위해서는 대상 설비에 따른 적용범위(System boundary)를 설정하여야 하며, 본 연구의 저위발열량 산정을 위한 열정산방법 적용 범위는 소각로와 폐열보일러 구성 형태에 따라 구분하여 설정하였다. 폐열보일러 구성 형태는 보일러가 소각로 상부를 덮도록 설계된 일체형 구조와 소각로 2 차 연소실 출구와 폐열보일러 입구가 가스 관로를 통하여 연결된 분리형 구조로 구분하였다. 이에 따라 일체형 보일러의 경우 소각로에서 보일러까지를 하나의 설비로 적용 범위를 설정하였으며, 분리형 보일러의 경우 관로 손실 등을 고려하여 보다 정확한 저위발열량 산정을 위해 소각로만을 적용 범위로 설정하였다. 일체형 및 분리형 보일러의 모식도와 적용 범위를 *Fig.* 1에 나타냈다.

2.2.2. 열정산 항목별 입·출열량 분석 방법

폐열보일러 유형별 적용 범위에 따라 *Table* 3과 같이 입·출열 항목을 도출하였으며, 각 항목별 에너지량을 산정하였다. 일체형 보일러의 경우 입열 항목에는 ① 폐기물 공급 열량, ② 소각로 보조연료 공급열량, ③ 연소용 공기 공급열량이 포함되어 있으며, 출열 항목에는 ① 증기 흡수열, ② 배출가스 보유열, ③ 소각로 방열손실, ④ 폐열보일러 방열손실, ⑤ 소각 잔재물 배출열, ⑥ 소각 잔재물 미연탄소분 열량, ⑦ 브로우다운 배출열이 포함된다. 분리형 보일러의 경우 입열 항목은 일체형 보일러의 입열 항목과 동일하며, 출열 항목은 폐열보일러에 해당되는 출열 항목을 제외한 ① 배출가스 보유열, ② 소각로 방열손실, ③ 소각 잔재물 배출열, ④ 소각 잔재물 미연탄소분 열량이 포함된다. 모든 입·출열 항목에 대한 산정 방법은 식 (2) ~ 식 (10)에 제시하였으며, 열정산법을 통한 최종 저위발열량 산정 방

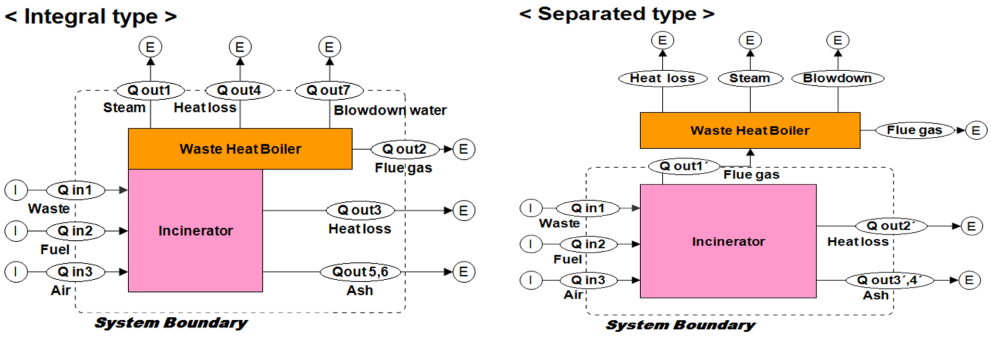

Fig. 1. System boundary for estimating lower heating value.

Table 3. Input heat and out heat items according to heat balance method

WHB type	Input heat(Q in)		Out heat (Q out)	
Integral type	Q in1	Waste energy	Q out1	Steam energy
	Q in2	Auxiliary fuel energy	Q out2	Flue gas energy
	Q in3	Combustion air energy	Q out3	Incinerator heat loss
			Q out4	Waste heat boiler heat loss
			Q out5	Bottom ash exhaust heat
			Q out6	Botton ash loss on ignition
			Q out7	Blowdown heat loss
Separated type	Q in1	Waste energy	Q out1′	Flue gas energy
	Q in2	Auxiliary fuel energy	Q out2′	Incinerator heat loss
	Q in3	Combustion air energy	Q out3′	Bottom ash exhaust heat
			Q out4′	Bottom ash loss on ignition

법은 식 (1)에 제시하였다.

$$LHV_w(kcal/kg) = (\sum Q_{out} - \sum Q_{in}) \div m_w \times 1,000 \quad (1)$$

LHV_w : 폐기물 저위발열량(kcal/kg)
$\sum Q_{out}$: 모든 출열 항목의 총 출열량(Gcal/yr)
$\sum Q_{in}$: 폐기물 보유 열량을 제외한 모든 입열 항목의 총 입열량(Gcal/yr)
m_w : 투입된 폐기물의 총 투입량(ton/yr)

$$Q_{in2} = m_f \times LHV_f \times \frac{1}{1,000} \quad (2)$$

Q_{in2} : 소각로 보조연료 공급 열량(Gcal/yr)
m_f : 소각로 보조연료 총 투입량(ton/yr)
LHV_f : 보조연료 저위발열량(kcal/kg)

$$Q_{in3} = A \times c_a \times (t_a - t_0) \times \frac{1}{1,000} \quad (3)$$

Q_{in3} : 연소용 공기의 공급 열량(Gcal/yr)
A : 연소용 공급 공기 총 공급량(kNm^3/yr)
c_a : 공기의 비열($kcal/Nm^3 \cdot ^oC$)
t_a : 연소용 공급 공기의 평균 온도(^oC)
t_0 : 기준온도(^oC)

$$Q_{out1} = m_{st} \times h_{st} \times \frac{1}{1,000} \quad (4)$$

Q_{out1} : 생산 증기 흡수 열량(Gcal/yr)
m_{st} : 생산된 증기의 총량(ton/yr)
h_{st} : 생산된 증기의 순 엔탈피(kcal/kg)

$$Q_{out2} = G \times c_g \times (t_g - t_0) \times \frac{1}{1,000} \quad (5)$$

Q_{out2} : 배출가스 보유 열량(Gcal/yr)
G : WHB 후단 배출가스 총 유량(kNm^3/yr)
c_g : WHB 후단 배출가스 비열($kcal/Nm^3 \cdot ^oC$)
t_g : WHB 후단 배출가스 평균 온도(^oC) (분리형의 경우 2차 연소실 후단 온도)

$$Q_{out3} = \sum LR_i \quad (6)$$

Q_{out3} : 소각로 방열손실 열량(Gcal/yr)
$\sum LR_i$: 부분별 소각로 방열손실 열량의 총계(Gcal/yr)

$$Q_{out4} = \sum LR_{gb} \quad (7)$$

Q_{out4} : 폐열보일러 방열손실 열량(Gcal/yr)
$\sum LR_{gb}$: 부분별 폐열보일러 방열손실 열량의 총계(Gcal/yr)

$$Q_{out5} = m_{ba} \times c_{ba} \times (t_{ba} - t_0) \times \frac{1}{1,000} \quad (8)$$

Q_{out5} : 소각 잔재물 배출 열량(Gcal/yr)
m_{ba} : 소각 잔재물의 총 발생량(건기준)(ton/yr)
c_{ba} : 소각 잔재물의 비열($kcal/kg \cdot ^oC$)
t_{ba} : 소각 잔재물의 평균 온도(^oC)

$$Q_{out6} = m_{ba} \times \frac{Li}{100} \times C \times \frac{1}{1,000} \quad (9)$$

Q_{out6} : 소각 잔재물 미연탄소분 열량(Gcal/yr)
Li : 소각 잔재물 강열감량(%)
C : 탄소열량(kcal/kg), 8,100 kcal/kg 적용

$$Q_{out7} = (W - m_{st}) \times h_d \times \frac{1}{1,000} \quad (10)$$

Q_{out7} : 브로우다운 수 배출 열량(Gcal/yr)
W : 폐열보일러 드럼 급수 총량(ton/yr)
m_{st} : 총 증기 생산량(ton/yr)
h_d : 브로우다운 수 엔탈피(kcal/kg)

3. 결과 및 고찰

3.1. 소각설비의 에너지 입·출열 특성

Table 4에 대상시설의 현장 측정·분석 결과를 제시하였다. 폐열보일러 후단 배출가스의 수분함량 및 산소농도 분석결과 각각 평균 약 17.2 %, 10.3 %로 분석되었으며, 소각 잔재물의 강열감량 및 수분함량의 경우 각각 약 6.2 %, 24.8 %로 나타났다. 여기서 소각 잔재물 강열감량 및 수분함량의 평균값은 유동층 소각로(E시설 1 호기, G시설 1 호기)의 측정·분석 결과는 제외된 값이다. 폐열보일러 후단 배출가스의 수분함량 및 산소농도는 굴뚝 배출가스의 습기준 유량을 바탕으로 폐열보일러 후단에서의 건기준 유량으로 환산하는 과정에 적용하였으며, 소각 잔재물의 수분함량은 냉각 수욕조를 통과하는 잔재물의 수분량을 제외하는 과정에 적용하였다. 소각로 및 폐열보일러의 방열손실은 열화상카메라를 이용하여 시간당 방열손실량을 산정하였으며 소각로 방열손실량은 평균 약 365,796.9 kcal/hr, 폐열보일러 방열손실량은 평균 약 152,271.3 kcal/hr로 분석되었다.

3.2. 소각설비의 에너지 입·출열 특성

본 연구에서는 사업장폐기물 소각시설의 폐기물 저위발열량을 산정하기 위하여 열정산방법을 적용하였으며 열정산 항목별 입·출열량을 분석하여 그 분포를 파악하였다. 대상시설 7 개소 총 10 개호기의 소각설비에 대한 입·출열량을 각각 산정하였으며 항목별 산정결과를 산술평균하여 폐열보일러 유형별 입·출열 흐름을 *Fig.* 2에 제시하였다. 일체형 보일러 소각설비의 경우 출열량 중 증기흡수열(Q_{out1})이 약 65.7 %로 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 파악되었으며, 배출가스 보유열(Q_{out2})이 약 25.2 %로 두 번째로 출열량이 많은 것으로 나타났다. 또한 증기흡수열과 배출가스 보유열을 제외한 기타 출열량은 약 9.1 %의 비율을 차지하

Table 4. Data measurement results of Facilities

WHB type	Facility (Unit)	Flu gas of WHB		Bottom ash		Radiant heat loss	
		H_2O (%)	O_2 (%)	Loss on ignition (%)	H_2O (%)	Incinerator (kcal/hr)	WHB (kcal/hr)
Integral type	A (1)	20.7	8.9	6.9	21.8	166,439.5	266,141.3
	B (2)	17.9	10.0	2.4	8.8	190,588.8	98,705.5
	C (2)	16.8	7.8	1.8	24.1	139,222.4	151,866.5
	D (3)	14.1	11.2	9.6	23.5	614,692.1	92,371.9
Separated type	E (1)	21.7	10.1	0.2	0.1	270,746.9	-
	F (1)	12.9	12.2	6.86	28.1	447,872.5	-
	F (2)	11.7	12.2	6.86	28.1	407,279.4	-
	F (3)	20.5	10.3	6.86	28.1	847,721.9	-
	G (1)	19.9	9.5	0.02	0.01	256,016.4	-
	G (2)	15.6	10.6	8.22	35.7	317,388.6	-
Average		17.2	10.3	6.2	24.8	365,796.9	152,271.3

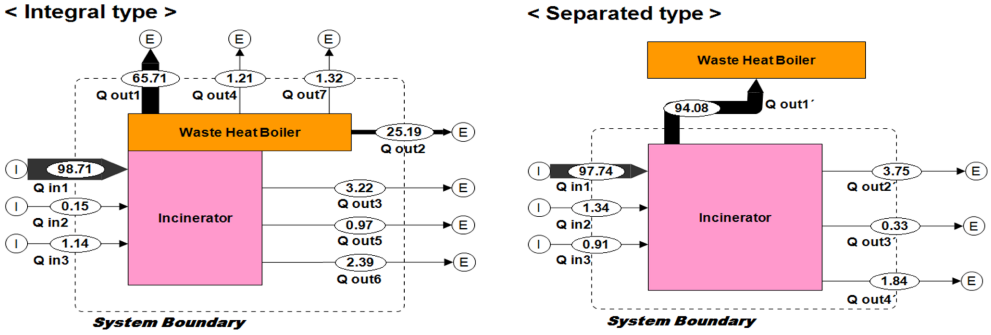

Fig. 2. Input and out heat distribution of industrial waste incineration facilities (Unit : %)

Table 5. Estimation result of lower heating value through to heat balance method

WHB type	Facility (Unit)	Incinerator type	$\sum Q_{out}$ (kcal/kg-waste)	$\sum Q_{in}$ (kcal/kg-waste)	LHV_W (kcal/kg-waste)
Integral type	A (1)	Stoker	3,898.7	32.1	3,866.6
	B (2)	Stoker	3,014.5	47.2	2,967.3
	C (2)	Stoker	3,992.1	45.6	3,946.5
	D (3)	Stoker + R/K	2,867.7	46.1	2,821.6
Separated type	E (1)	FBC	3,324.7	146.6	3,178.1
	F (1)	Stoker	3,474.7	31.9	3,442.8
	F (2)	Stoker	3,269.7	34.1	3,235.6
	F (3)	R/K	6,075.2	47.9	6,207.3
	G (1)	FBC	2,034.7	95.5	1,939.1
	G (2)	R/k	2,667.0	44.9	2,662.1
Average		Integral type			3,400.5
		Separated type			3,407.5
		Total			3,404.7

는 것으로 분석되었다.

분리형 보일러 소각설비의 경우 2.1절의 내용과 같이 소각로만을 적용 범위로 설정하여 열정산법을 적용하였다. 이에 따라 소각로에서 폐열보일러로 유입되는 배출가스 보유열(Q_{out1}')이 약 94.1 %로 출열량의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 반면, 배출가스 보유열을 제외한 소각로 방열손실, 바닥재 배출열, 미연탄소분 열량은 약 5.9 %의 비율을 차지하는 것으로 분석되었다.

3.3. 폐기물 저위발열량 분석 결과

사업장폐기물 소각시설 7개소(10개호기)의 저위발열량 산정 결과를 *Table* 5에 제시하였다. 폐열보일러 구성 형태에 따라 구분하여 산정 결과를 제시하였으며, 보일러 일체형 소각시설은 평균 약 3,400.5 kcal/kg, 보일러 분리형 소각시설은 평균 약 3,407.5 kcal/kg의 저위발열량을 나타냈다. F시설 3 호기의 경우 6,207.3 kcal/kg의 높은 저위발열량을 나타냈으며, 해당 호기는 지정폐기물 전용 소각로로써 폐유, 폐유기용제 등과 같은 높은 열량의 폐기물이 투입됨에 따른 영향인 것으로 판단된다. 반면, K시설 1 호기의 경우 함수율이 높은 슬러지류가 폐기물 총 투입량의 50% 이상 혼합 투입됨에 따라 1,939.1 kcal/kg의 비교적 낮은 저위발열량 산정결과를 나타낸 것으로 파악되었다.

Kwon (2016) 연구[21]에서는 사업장폐기물 소각시설 57개소를 대상으로 설문조사 및 현장조사 결과를 바탕으로 저위발열량을 산정하였다. Kwon (2016) 연구에서는 일체형 보일러와 분리형 보일러 소각시설의 저위발열량 산정 결과를 각각 평균 3,777 kcal/kg, 3,787 kcal/kg로 제시하고 있다. 이러한 결과는 본 연구의 저위발열량 산정 결과와 약 340 kcal/kg 수준의 차이를 보이고 있다. Kwon (2016) 연구에서는 출열항목 중 증기흡수열 산정 인자로 2 차 연소실 출구와 폐열보일러 출구 가스온도의 차이를 적용였으며, 이는 폐열보일러 전·후단 배출가스 보유열의 변화량이 증기흡수열로 전환된 것으로 가정한 산정방법인 것으로 판단된다. 반면 본 연구에서는 생산된 스팀의 온도와 압력에 해당하는 과열증기의 엔탈피를 적용함에 따라 생산된 증기가 보유하고 있는 실제 에너지량을 산정하였다.

현행 저위발열량 산정방법(삼성분 분석법, 원소분석법, 열량계 분석법 등)은 일정량의 시료를 채취하여 분석함으로써 폐기물의 불균질성, 계절적 영향에 따른 폐기물 성상변화 등을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.[21] 하지만 본 연구에서는 일정 기간의 일일 운영데이터를 종합하여 열정산법의 산정인자로 적용함으로써 일정량의 시료가 아닌 해당 기간에 처리된 모든 폐기물에 대한 발열량을 도출하였으며 따라서 보다 객관적이고 대표성을 확보한 결과를 도출한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 운영 중인 사업장폐기물 소각시설을 대상으로 개정된 에너지 회수효율 산정방법에서 제시하는 저위발열량 산정방법에 따라 시설별 투

입 폐기물의 저위발열량을 분석·평가하였다. 또한 산정 인자에는 현재 소각시설에서의 계측기 데이터 및 현장 측정·분석 결과를 적용하여 보다 객관성이 확보된 결과를 도출하였다. 본 연구의 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 열정산을 통한 사업장폐기물 소각시설 에너지 출열 특성 분석 결과 증기 흡수열과 배출가스 보유열이 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 파악되었다. 증기 흡수열과 배출가스 보유열은 폐열보일러에서 에너지로 생산되는 열량을 포함하고 있다. 따라서 폐열보일러 효율 증진 및 에너지 유효 사용량 확대를 위해서는 시설 개선 등을 통하여 설비 방열손실, 소각잔재물 열손실, 브로우다운 열손실 등을 최소화해야 할 것으로 판단된다.

2. 사업장폐기물 소각시설 7 개소(10 개호기)에 대한 저위발열량 분석 결과 평균 약 3,404.7 kcal/kg로 나타났다. 본 연구에서는 실제 시설 운영 데이터를 바탕으로 육상용 보일러의 열정산방식을 적용하여 저위발열량을 산정하였다. 이러한 산정 방법은 불균질한 성상의 폐기물 특성을 반영할 수 있는 방법으로, 기존 폐기물 발열량 산정방법과 비교하여 보다 객관성을 확보한 방법인 것으로 판단된다. 아울러 2018년 시행 예정인 에너지 회수효율 산정방법 중 생활폐기물 저위발열량 산정식에서는 국내 소각시설의 출열량 분포를 바탕으로 상수를 보정하여 제시하고 있다. 따라서 본 연구의 결과는 추후 저위발열량 산정식의 산정계수 결정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Ministry of Environment, ‘National statistics of waste generation and treatment’, Republic of Korea, 2016.
2. S. Y. Park, ‘Incineration technology trends for municipal waste energy’, Chungnam National University, Republic of Korea, 2015.
3. Y. H. Kwon, J. I. Son, and K. H. Kim, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **33**(4), 357-365 (2016).
4. Ministry of Government Legislation No. 14229 (2016. 05. 29.), ‘Fundamental law of resource circulation’, Republic of Korea.
5. S. W. Park, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **34**(3), 215-223 (2017).
6. S. W. Park, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **34**(2), 107-116 (2017).
7. S. W. Park, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **34**(1), 1-12 (2017).
8. Ministry of Environment, ‘Restructuring method prepared study of waste management systems’, Republic of Korea, 2013.
9. Korea Environmental Industry Technology Institute, ‘EU of waste incineration management systems’, Republic of Korea, 2015.
10. S. Y. Han, ‘A new legal system for establishing a resource circulating society’, Korea Environment Institute, 2014.
11. B. J. Kang, *J. Space & Environ. Res.*, **25**(3), 86-124 (2015).
12. S. W. Park, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **31**(2), 125-133 (2014).
13. Korea Energy Agency, ‘A study on the energy source calorie conversion and carbon emission Factor’, Republic of Korea, 2015.
14. Y. H. Kwon, J. I. Son, K. H. Kim, and S. K. Shin, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **34**(3), 259-266 (2017).
15. J. G. Kang, J. I. Son, Y. H. Kwon, H. N. Yoo, Y. J. Ko, J. H. Kwon, M. J. Jang, S. Y. Cho, T. W. Jeon, and S. K. Shin, ‘A study on standard of incineration heat energy recover for introducing advanced system’, National Institute of Environmental Resarch, 2016.
16. Ministry of Environment Notification No. 2017-205 (2017.11.06.), ‘Notification on calculation method and procedure of energy recovery rate’, Republic of Korea.
17. Korean Standards Service Network, KS B 6205 (2014), ‘Land boilers heat balancing’, Republic of Korea.
18. Ministry of Environment Notification No. 2017-51 ES 01313.1a (2017.11.17.), ‘Korean standard method for air pollution’, Republic of Korea.
19. Ministry of Environment Notification No. 2017-54 ES 06301.1b (2017.12.12.), ‘Korean standard method for waste’, Republic of Korea.
20. Ministry of Environment Notification No. 2017-54 ES 06303.1 (2017.12.12.), ‘Korean standard method for waste’, Republic of Korea.
21. Y. H. Kwon, J. I. Son, and K. H. Kim, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **33**(5), 505-512 (2016).