



폐기물소각로의 고온 연소에 따른 문제와 연소실 전열면 변경에 대한 연구

김성중[†]

인천대학교, 안전공학과

(2010년 8월 17일 접수, 2010년 9월 24일 수정, 2010년 9월 27일 채택)

A Study on the Facility for Domestic Waste Problems of high Temperature Combustion and the Alteration of heating surface

Seong-Jung Kim[†]

Dept. of Safety Engineering, University of Incheon

ABSTRACT

Korea's large-scale incinerating facilities of domestic waste were built in the late 1980's. It was found that most of the incinerators were designed during the period and even the ones constructed afterwards have been built without any changes or modifications¹). However, the nature of waste fed into incinerators is undergoing a radical change due to government policies on waste collection, which is upheld by a research into changes in the heating value of domestic wastes. As a result, refractories and stokers are being damaged in many of the facilities due to overheating. On the other hand, the formation of clinkers on boilers' heating surface, which curbs heat transfer, results in problems such as a fall in used heating value and a rise in the temperature of combustion chambers. Methods are being deployed to resolve the problems—such as spraying water on piles of waste, incinerating food waste by mixing together what has been separately collected, spraying water on combustion chambers, etc. Such actions are not a fundamental solution, nor redesigning and rebuilding incineration facilities is cost-effective. This research seeks to develop a fundamental solution to address the situation.

Keywords : Domestic waste, Caloric value, Heating surface

[†]Corresponding author : seongkim@incheon.ac.kr

초 록

우리나라의 대형 생활폐기물소각시설의 건설시기를 보면 상당수가 1980년대 후반인 것을 알 수 있다. 대부분의 시설들은 이 시기에 설계되었으며 그 후에 건설된 소각로 역시 변경이나 조정 없이 시설해온 것으로 조사되고 있다⁹⁾. 그러나 소각로에 반입되는 폐기물의 성상은 정부의 폐기물수거 정책에 의해 급격히 변화하고 있다. 이는 생활폐기물의 발열량 변화를 조사해 봄으로도 쉽게 알 수 있다. 그 결과 많은 소각시설에서 과열에 의해 내화물과 화격자가 손상되고 있다. 한편 보일러 전열면에 클링커가 생성되어 열전달에 방해를 줌으로 이용열량이 줄어들 뿐만 아니라 연소실의 온도가 상승되는 등 원하지 않는 현상이 연속되고 있다. 이를 개선하기 위해 폐기물저장고에 물을 뿌리거나, 분리수거해 온 음식물류 폐기물을 다시금 혼합하여 혼소하거나 연소실에 물을 분사하는 방법을 동원하고 있다. 이러한 방법은 근본적인 해결책이 되지 않으며, 설계부터 다시 하여 새로 시설하는 것 또한 비용적인 측면에서 효과적이지 못하다. 따라서 본 연구를 통해 위와 같은 문제를 원천적으로 해결 하기위한 방법을 도출해 보았다.

핵심용어 : 생활폐기물, 발열량, 전열면

1. 서론

현재 배출되고 있는 생활폐기물은 과거 대규모 소각로를 다수 설치할 때와는 큰 차이를 보여 주고 있다. 당시 우리나라의 소각시설은 1986년 3월 의정부시에서의 롯데기계공업과 한영사의 시공으로 처음 운전이 됨으로 시작되나, 이때의 시설은 중형이라 할만한 50 t/Day 이었다. 1993년 12월에는 평촌에 200 t/Day가 운전하기 시작하였고, 2년 후인 1995년도에는 창원, 중동, 일산과 부산에서도 건설이 끝나 운전개시가 되었다. 이때부터 소각로는 기당 200 t/Day 이상의 대형 소각시설이 건설되었고 폐기물이 보여주던 발열량은 설계를 위한 기준으로 고작 1,400 kcal/kg 정도 이었다⁹⁾. 2005년부터 음식물류 폐기물 직 매립 금지제도가 시행됨에 따라 배출원으로 부터 철저하게 생활계 일반폐기물과 음식물류 폐기물을 분리수거하게 되었고, 이로 인해 소각용 폐기물의 성상변화를 초래하게 된다. 즉 폐기물 중 함유율이 낮아짐에 따라 3성분 중 가연분이 증가되고, 결과적으로 발열량이 2 배 이상인 3,000 kcal/kg에 이르게 된다. 갑자기 상승되는 연소실의 온도에 의해 로 내의 여러 곳에서 문제가 발생되게 된 것인데, 특히 과열에 의해 내화물과 화격자의 손상은 물론 클링커(clinker) 생성으로 연소열 전달이

둔화하여, 반복적으로 연소실의 온도는 더욱 더 올라가게 됨으로 보일러까지 과부하로 인한 어려움을 초래하게 된다. 소각율이 저하되고, 유해물질의 생성은 많아지게 된다.

이러한 문제점을 줄이기 위해 많은 현장에서는 폐기물 저장조에 물을 뿌리거나, 연소실에 물을 분사하여 인위적으로 연소실의 온도를 낮추고 있다. 어떤 경우는 열심히 분리 수거해온 음식물류 폐기물을 혼합하여 혼소하고 있다. 이와 같은 방법은 임시방편일 뿐이며 불과 에너지 자원만 낭비할 뿐 근본 대책이 될 수 없다.

따라서 본 연구에 의해 위와 같은 문제를 원천적으로 해결 하기위한 방법을 전열면의 단열정도를 조정하는 방법으로 도출해 보았다.

2. 소각용 생활폐기물의 성상 조사 및 분석 방법

현재의 소각용 생활폐기물성상분석을 위해 시료채취는 소각장에 반입되고 있는 현장, 즉 인천의 C-소각장과 S-소각장에서 실시하였다([Fig. 1]참조). 이때 이루어진 조사는 겉보기 비중, 물리적 조성, 삼성분 분석, 원소조성 분석과 발열량 산정이었다. 일반적으로



[Fig. 1] Collecting the site sample of waste for incineratio.

겉보기 비중은 폐기물의 물리적 조성에 따라 달라지며 수분 함량이 높거나 비가연성 물질의 함량이 많을수록 높은 값을 나타낸다.

생활폐기물의 물리적 조성 분석은 채취한 시료가 대표성을 갖도록 하기 위하여 소각시설에 반입된 폐기물을 혼합, 교반하였으며 시료 채취 시 수분함량의 변화를 최소화 하기 위하여 가능한 신속히 시료를 채취 후 분석을 실시하였다. 삼성분 분석방법은 폐기물공정시험법에 근거하여 가연분, 회분과 수분함량을 분석하는 것이다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{가연분함량\%} &= \{100 - \text{수분함량\%}\} / 100 \times (\text{회화 전 질량} - \text{회화 후 질량}) / \text{회화 전 질량} \times 100 \\ \text{수분 함량\%} &= (\text{건조전 질량} - \text{건조 후 질량}) / \text{건조 전 질량} \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{회 분 함 량\%} = 100 - \text{수분함량\%} - \text{가연분함량\%}$$

물리적 조성 성분에서 가연성으로 분류된 시료를 건

조시켜 세절 후 분쇄하여 분말상의 시료를 제조하였다. 조제된 시료를 다시 건조하여 원소 분석을 실시하였으며, 측정된 원소는 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N) 과 황(S) 이다. 이들을 통해 소각로 운전시 소요공기량 계산과 연소에 의해 발생될 수 있는 가스량과 대기오염 물질의 발생량을 예측하기도 하며, 발열량 추정에도 사용된다. 발열량 분석 방법에는 삼성분 조성에 인용하는 추정식, 단일열량계(Bomb)에 의한 분석치, 원소분석치를 이용하는 방법이 있으며, 본 성분분석에서는 건조 및 파쇄된 시료를 단일열량계(Bomb Calorimeter, Parr Instrument Company, 6100)에서 연소시켜 건기준 고위발열량(Hh)을 측정하였다. 습기준 저위발열량은 습기준 고위발열량에 수분의 증발열을 고려하여 산정하였고, 습기준 고위발열량은 건기준 고위발열량에 수분함량을 고려하여 산정하였다[Fig. 2].



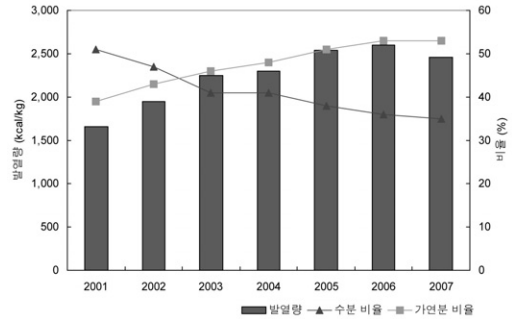
[Fig. 2] Elemental analyzer and bomb calorimeter.

인천시 C-소각시설에 반입되고 있는 생활폐기물의 성분분석 결과를 [Table 1]에 2002년도부터 2007년도를 수록한다. 2002년도 평균 수분함량이 49.64%였던 것이 2005년도에는 40.18%로 낮아진 것을 볼 수 있다. 이는 음식물류 폐기물량이 분리수거 정책에 의해 급격히 줄어들었기 때문이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소각용 폐기물의 발열량 변화

현재 전국 대형생활폐기물 소각시설의 소각시설 반입폐기물 발열량은 2007년도 35개소를 대상으로 하여 조사한 결과는 [Table 3]에 나타낸 바와 같다. 연평균 발열량이 2002년의 경우 2001년 대비 약 15% 증가하였으며, 2005년의 경우 2004년 대비 약 10%의 지속적인 증가를 보여주고 있다^{3),4)}.



[Fig. 3] The annual heat value and ratios of water or combustible content of collected waste.

[Fig. 3]는 년도별 발열량 변화의 정도를 삼성분 비율의 관계를 보여주고 있다. 2003년을 기준 반입 폐기물의 성분 중 가연분 비율의 증가와 수분 비율의 감소에 따른 원인으로 발열량이 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다^{3),4)}.

[Table 1] The Annual Changes in the Property of Incheon C-incineration Facility

년도	발열량 [kcal/kg]	겉보기 비중 [t/m ³]	로내 온도 [°C]	삼 성분[%]			습량기준 물리적 조성[%]					
				가연분	회분	수분	종이	섬유	나무/짚류	비닐류	음식물류	불연물
2002	1,862	0.33	908	39.56	10.80	49.64	23.11	4.81	4.52	20.11	41.52	5.93
2003	2,220	0.28	905	44.33	13.00	42.67	24.29	5.61	2.63	21.88	28.51	7.11
2004	2,303	0.28	905	43.85	11.96	44.20	27.18	5.10	4.10	22.19	11.96	5.59
2005	2,310	0.28	915	45.41	14.40	40.18	25.27	5.48	5.76	21.55	8.91	6.7
2006	2,237	0.27	936	42.53	15.20	42.23	25.34	5.61	3.38	19.98	7.50	5.52
2007	2,210	0.26	946	40.57	13.92	45.52	32.07	5.26	1.62	19.40	11.64	5.12

[Table 2] Result of Elemental Analysis

구 분	1차분석[%]	2차분석[%]	3차분석[%]	평균[%]
C	48.75	46.28	47.02	47.35
H	7.32	6.91	7.03	7.09
O	43.18	46.03	45.02	44.74
N	0.65	0.62	0.82	0.70
S	0.10	0.16	0.11	0.12
합 계	100.00	100.00	100.00	100.00

[Table 3] The Heat Value of Collected Waste at Incineration Facilities in Domestic

년 도	발열량[kcal/kg]	시 설 수	삼 성 분 [%]		
			가연분	수 분	회 분
2001	1,660	16	39	51	10
2002	1,94	29	43	47	10
2003	2,243	32	46	41	11
2004	2,302	32	48	41	9
2005	2,541	33	51	38	9
2006	2,596	33	53	36	10
2007	2,456	35	53	35	10

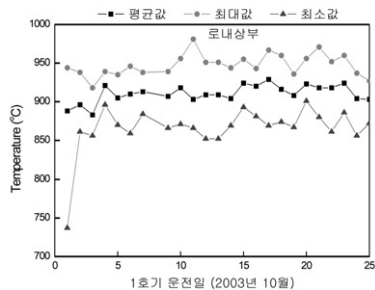
32 발열량 증가로 인한 문제점 확증

소각시설의 반입 폐기물의 발열량 증가로 소각시설의 내구성 및 수명을 단축시키고 열부하로 인한 운전조건의 변화로 적정 운전의 어려움을 주고 있다. 소각로의 가동율이 떨어질 뿐 아니라 다음과 같은 심각한 문제가 발생

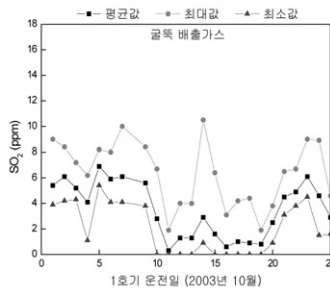
하고 있다. 먼저 과열에 의한 화격자의 손상 및 고온부식에 의해 소각로의 수명이 단축된다[Fig. 4]. 또한 보일러 전열면에 클링커가 생성 열전달량을 저하함으로 열 이용효율이 떨어진다. 로내의 온도조절이 어려우며[Fig. 5], 유해물질 배출증가[Fig. 6]한다. 마지막으로 잦은 보수 등으로



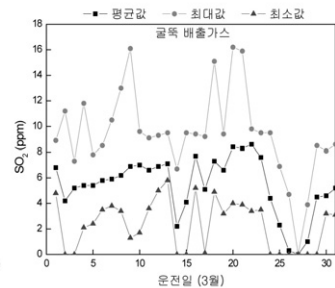
[Fig. 4] Damage to the grate and the refractories of incineration facilities.



[Fig. 5] Temperature variation in the upside of incinerator.



[Fig. 6] Increase of released harmful materials.



[Table 4] Operation Rate of Incineration Facilities in Domestic

(단위 : %)

구 분	2001	2002	2003	2004	2005	2006
평균가동율	85.5	78.0	72.8	73.0	75.0	72.0
시설 수	27	30	32	32	33	33

가동율이 떨어지는 문제가 발생하고 있다[Table 4].

3.3 소각시 발열량증가의 원인 분석

인천과 경기도에서 운전 중인 소각시설의 발열량증가의 원인을 조사하면 음식물류 폐기물의 반입이 금지되었고 재활용잔재물, 폐목재류폐비닐, 폐플라스틱과 폐비닐등고발열량 물질반입증가 등으로 요약할 수 있었다.

3.4 각 소각시설의 발열량 증가에 대한 대책

현재 전국 대형 폐기물소각시설에서는 반입폐기물의 발열량증가에 의한 문제점을 인지하고 이를 해결하기 위하여 음식물류 폐기물이나 하수슬러지와 같은 저발열량 폐기물을 혼소하고 있거나 고발열량화를 부추기는 폐기물인 비닐과 플라스틱류의 폐기물 반입을 억제하기도 하며, 침출수와 수분을 로내에 분사하여 연소열을 낮추거나, 연소용 공기의 예열온도와 주입량을 조절하는 수단을 동원하고 있다. 다음 [Table 5]은 인천시와 경기도의 소각시설에서 실시하고 있는 고발열량 대책들이다.

[Table 5] Mange to High Caloric Value by Each Incineration

소각시설	대 책
인 천 시	<ul style="list-style-type: none"> • 침출수 및 탈리액 분사 • 음식물류 폐기물 잔재물 혼소 • 농산물센타 채소 반입 후 혼소
성 남 시	<ul style="list-style-type: none"> • 폐기물저장조에 침출수 분사
부 천 시	<ul style="list-style-type: none"> • 고발열량 산정에 의한 적정 소각량 조절
안 양 시	<ul style="list-style-type: none"> • 저발열량 생활폐기물 반입 증가
안 산 시	<ul style="list-style-type: none"> • 목재류 등 고발열 원인물질 과다 투입 방지 • 고발열량 산정에 의한 적정 소각량 조절
용 인 시	<ul style="list-style-type: none"> • 음식물류 폐기물 및 슬러지 혼소 • 고발열량 물질 폐플라스틱 등 반입 최소화 • 오수, 침출수를 로내 분사
광 명 시	<ul style="list-style-type: none"> • 연소용공기 비율조절로 운전법 개선 • 고발열량 산정에 의한 적정 소각량 조절
군 포 시	<ul style="list-style-type: none"> • 음식물류 폐기물 혼소 계획
과 천 시	<ul style="list-style-type: none"> • 물분사 • 소각량 조절
고 양 시	<ul style="list-style-type: none"> • 용수분무계획 • 운전모드 개선 및 목표소각량 수정
의정부시	<ul style="list-style-type: none"> • 소각부하율 조정으로 설계부하 범위에서 운전 • 고발열량 산정에 의한 적정 소각량 조절
구 리 시	<ul style="list-style-type: none"> • 연소용 공기의 온도(설계치 100~190℃) 하향 조절 • 고발열량 산정에 의한 적정 소각량 조절
파 주 시	<ul style="list-style-type: none"> • 침출수 분무 • 보일러 배관내의 스케일 제거로 냉각 효과 향상 • 고발열량 산정에 의한 적정 소각량 조절

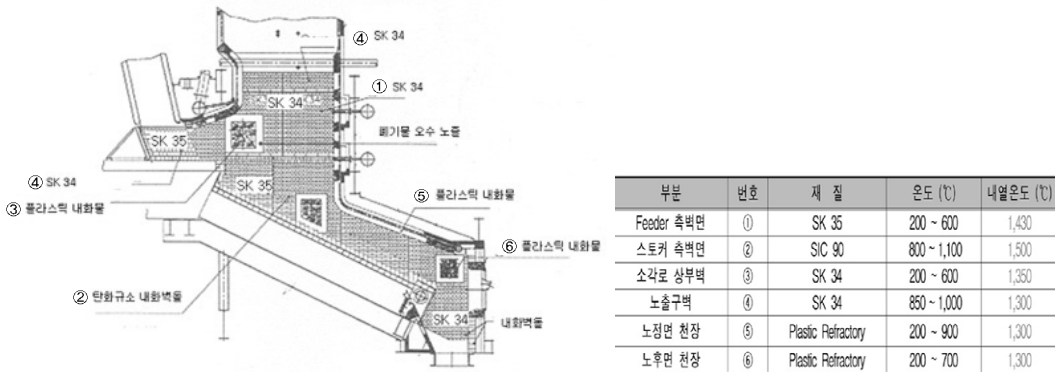
3.5 연소실 부위별 내화물 구조 및 재질

인천시 C-소각시설의 내화물의 설계기준을 살펴보면 설계당시에는 생활폐기물의 종량제가 정착되어 있지 않은 상태로 음식물류 폐기물을 혼소하도록 [Fig. 7] 과 같이 소각로내의 복사열을 효과적으로 폐기물에 전달하고자 고축열 내화재가 사용되었다. [Table 6]에서는 소각시설에서 주로 사용하고 있는 내화물의 재질과 그가 갖고 있는 장단점을 비교하여 나타낸 것이다.

3.6 연소실 전열면 단열재 변경

소각시설에서 가장 중요한것은 무엇보다도 폐기물의 완전 연소이다. 완전연소를 위해 3T가 필요한데, 이는 온도(Temperatur), 체류시간(Time)과 잘되고 있는 혼합(Tubulance) 이다. 특히 연소실의 모든 부

위에서 평균온도 850℃를 유지하는 것은 연소가스에 유해물질 저감에도 매우 중요하다⁹⁾. 온도가 이보다 너무 높거나 낮아도 안전하고 완전한 연소는 기대하기 어렵다. 이를 잘 맞추고 일정하게 유지하기 위해 전열면에 단열을 하게 되는 것이다. 생활폐기물의 성상이 소각시설 설치할 당시보다 많은 변화를 보이게 됨으로, 특히 발열량이 상승하게 됨으로 연소실의 온도가 상승하게 되었다. 이때 나타나고 있는 문제점을 해결하기위해 앞서 조사한 물 공급, 음식폐기물 혼합등의 대책으로 근본적 해결책이라 할 수 없고, 전열면의 단열정도를 줄이어 맞추어 나가야 하는 것이다. 단열을 하지 않을 경우 재질의 열전달 계수는 46 - 50[W/m * m²] 정도로 높으나 단열재를 사용하게 될 경우 0.041 - 1.4 [W/m * m²] 정도로 낮아 보일러등에 전달되는 열효수가 되지 않으므로 자연적으로 연소실 가스의 온도는 상승하게 된다⁸⁾.



[Fig. 7] Structure and quality of refractory material by each part in the combustor.

[Table 6] Characteristics of Refractory Materials in Combustor

구분	고알루미나질	탄화규소질	플라스틱내화물
장점	<ul style="list-style-type: none"> 고온상태에서 24시간 운전이 가능 연재 가장 널리 사용되는 재질 Al₂O₃ 함량에 따라 고온에서 내화도가 높다 	<ul style="list-style-type: none"> 내마모성, 압축강도, 균일강도, 하중연화점등이 고알루미나 재질에 비해 우수 클링커의 융착성이 작아 최근 많이 사용하고 있음. 	<ul style="list-style-type: none"> 고온에서 기계적 강도가 높고 스펙링 저항이 크다. 내화도 및 하중연화온도가 높다
단점	<ul style="list-style-type: none"> 열간선 팽창률이 높은 경우 수축과 이완작용이 부족해 스펙링 현상이 발생 Fe₂O₃ 축매작용으로 로벽 침식 작용 우려가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 수분에 대한 약한 특성으로인해 수분함량이 높은 경우에는 사용을 제고하여야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 승온에 따라 가온면만이 경화되는데 저온부에서 연질로 경도가 약하다.

4. 결론

우리나라의 대형 생활폐기물 소각시설의 운전 중 당초의 설계 자료에 맞지 않은 폐기물을 소각하게 됨으로 각 소각장에서는 어려운 문제가 돌출하게 되었다. 이를 해결하기 위하여 고발열량을 함유하고 있는 폐기물을 억제하거나 저발열량을 함유한 음식물류 폐기물이나 하수 슬러지를 혼소하기도 하며, 설계치보다 소각량을 줄이어 소각하는 경우, 폐기물 저장조에 물을 뿌리기, 연소실에 침출수는 물론 일반 용수까지 분사하여 연소실의 평균온도를 줄여왔다. 하지만 현재 진행 중인 이런 방안은 일시적일 뿐 근본적인 해결책이 될 수 없다. 근본적으로 해결하기 위하여 현재의 생활폐기물의 성상에 잘 맞게 설계하고, 새로운 설계도면에 의해 새롭게 건설하여 운전하는 방법이 있겠으나, 많은 비용이 들며 현실적으로 실현 불가능한 일이다. 이에 따라 연소실의 평균 온도를 낮추기 위해 쉽게 실현 방안으로 주기적으로 교체하여야 하는 연소실의 전열면의 단열면적을 줄인다면, 더 많은 열이 보일러에 흡수하게 된다. 이로 인하여 연소실의 온도는 자동적으로 낮출 수 있게 되며, 고발열량에 의해 얻어진 에너지를 모두 이용하게 됨으로 보일러적 효율향상의 효과도 주면서 고온에 의해 발생하는 많은 문제점들도 해결하게 되는 셈이다.

사사

본 연구는 2007년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김성중, 폐기물성상 변화에 따른 소각시설의 발열량 관리방안, 연구보고서, 인천지역환경기술센터, (2009).
2. 김성중, 소각로 운전조건과 설계인자의 비교평가, 연구보고서, 한국과학기술원, (1995)
3. 환경부, 전국 생활폐기물소각시설 운영현황, (2003~2007).
4. 환경부, 전국 폐기물발생 및 처리현황, (2003~2007).
5. 이정임외 1인, 생활폐기물 대형소각시설 발열량 관리방안, 경기개발연구원, (2007).
6. VDI-Waermeatlas, Berechnungsblaetter fuer den Waermeuebergang, Germany, (1984). 