

연소효율이 우수한 소형 소각로의 개발

한돈희[†] · 하대성*

인제대학교 산업안전시스템공학부
*효원산업

Development of the Small Wastes Incinerator with High Combustion Efficiency

Don Hee Han[†] and Dae Sung Ha*

Department of Industrial Safety and System Engineering, Inje University
*Hyowon Industry

(Received 27 July 2000 ; Accepted 22 September 2000)

ABSTRACT

In order to reduce emission of air pollutants from spot incineration, it is required to develop the combustion chamber of small wastes incinerator having high combustion efficiency. The characteristics of combustion of the incinerator with combustion chamber having tangential angels with surface of 45° of air supply nozzles were studied in accordance with non-grate, fixed-grate and shaking-grate in the combustion chamber. Combustion conditions were evaluated with combustion efficiency, emission of hazardous gases, temperatures, ignition loss of ash and so on. Combustion efficiencies were shown 73.9% for non-grate, 81.1% for fixed-grate and 89.0% for shaking-grate. Emissions of CO were revealed 652 ppm for non-grate, 273 ppm for fixed-grate and 224 for shaking-grate. Comprehensively evaluated, combustion conditions got better in order of shaking-grate, fixed-grate and non-grate. This study suggests that small wastes incinerator should have shaking- or fixed-grate in combustion chamber to get better combustion condition even though at expensive cost of manufacturing.

Keywords : Incineration, Small wastes incinerator, Combustion efficiency, Shaking-grate

I. 서 론

소형 소각로(소각 능력 100 kg/hr 이하)는 학교, 콘도미니엄, 관공서, 백화점 그리고 각종 사업장에서 나오는 포장 관련 폐기물, 공장에서 나오는 특수한 산업폐기물, 병원과 보건소 등에서 나오는 의료폐기물 등, 각 사업장, 공장의 하루 소각량을 처리하는 것으로서 최근 들어 외국을 비롯하여 국내에서도 각광을 받고 있는 산업이다.

소형 소각로는 설치, 이동과 철거가 용이하고 설치비용과 유지관리비가 싸며 사용상 간편한 점이 장점이지만 연소과정에서의 온도, 배출가스의 온도 및 가스량이 쉽게 변하며 연소실이 대형 소각로에 비하여 훨씬 작기 때문에 온도저하와 국부적인 산소부족 등으로 완전

연소가 쉽게 이루어지지 않아 매연이 발생하는 경향이 있다.¹⁾ 또 연소실이 소형이고 제작비 문제로 현재 국내에서 생산되고 있는 대부분의 소형 소각로는 화격자 즉, 불판이 없는 연소실을 그대로 사용하거나 화격자를 설치하더라도 고정식 화격자를 사용하기 때문에 불안정한 연소로 인한 매연 및 유해가스의 발생이 더욱 심각하다고 할 수 있다. 여기에 덧붙여 대부분의 소형 소각로 제조업체는 규모가 영세하여 기술도입이 어렵기 때문에 연소실의 개량이 이루어지지 않아서 소형 소각로는 대기오염을 배출시키는 진원지로 민원까지 발생시키고 있는 실정이다.

따라서 소형 소각로를 단순히 사용, 설치, 이동 및 철거가 용이하다는 단순한 장점만을 살릴 것이 아니라 이제는 이러한 장점 외에도 연소실을 비롯한 여러 가지 연소조건을 개량하여 가능한 한 완전연소를 시켜 연소효율을 높임으로서 대기오염도 줄이고 사용이 간편한 소각로로 개량이 필요한 때이라고 판단된다.

연소효율을 높이기 위해서는 연소조건을 적절하게 조

[†]Corresponding author : Department of Industrial Safety and System Engineering, Inje University
Tel: 055-320-3285, Fax: 055-325-2471
E-mail: dooshhhd@dme.inje.ac.kr

절해 주어야 하는데 여기에 관여하는 인자들은 충분한 연소온도(850°C 이상), 연소가스의 충분한 연소실내 체류시간(2초 이상) 그리고 연소가스와 공기와의 충분한 혼합정도 등이며 이들 인자들을 흔히 3T 즉, 온도(Temperature), 시간(Time) 그리고 난류(Turbulence)라고 하여 세계 각국의 소각로 관련 지침사항에 공통적으로 포함시키는 사항들이다.²⁾

소각로 시설에서 적절한 연소조건을 만들어 주기 위해서 가장 먼저 개량이 필요한 부분은 역시 연소실이다. 최근 연구에 의하면 연소실을 사이클론식으로 만들었을 때 원심력에 의해 만들어진 와류가 폐기물과 공기와의 접촉율을 증가시키므로 연소조건이 개선되었다고 하였다.³⁾ 대형 소각로의 경우 움직이는 요동식 화격자를 사용하여 연소효율을 높여주지만 소형 소각로의 경우 아예 화격자를 사용하지 않거나 고정식 화격자를 사용하는 경우가 대부분이기 때문에 움직이는 요동식 화격자를 연소실에 설치하면 연소효율이 우수할 것으로 기대된다.

공기공급방식을 개선하고 요동식 화격자를 연소실에 설치한 소형 소각로의 연소특성을 연구함으로써 연소효율을 높이고 대기오염물질의 배출을 줄일 수 있는 소형 소각로를 개발하고자 본 연구를 실시하였다.

II. 실험방법

1. 연소실 내 공기공급방식

기존의 연소실 내 공기공급방식은 연소실 내벽 접선과 수직방향 즉, 폐기물에 대해 수직방향으로 공기가 공급되는 것이 일반적인 방법이다. 최근 연소실 내에서 원심력에 의해 발생한 소용돌이 즉, 와류가 폐기물과 공기공급의 접촉을 증가시킴으로 연소효율이 높아지기 때문에 연소실의 형태를 사이클론식으로 하는 연구가 발표되었다.^{3,4)} 따라서 본 연구에서는 연소실 내에서 와류를 형성하도록 하기 위해서 연소실의 형태를 사이클론식이 아닌 드럼통식으로 하되 공기공급노즐을 연소실 내벽에 대해 수직방향이 아닌 사각(斜角)을 유지하도록 설계하였다. 따라서 본 실험에서는 연소실 내 모든 공기공급 노즐의 각도를 동일방향으로 연소실 내벽 접선방향에 대해 약 45°를 유지하도록 설치하였다. Fig. 1은 연소실 내벽과 공기공급 노즐의 각도를 나타낸 것이다.

2. 요동식 화격자

Fig. 2와 같이 내열강(재질 SUS 304)을 이용하여 연소도중 수동식으로 요동시킬 수 있는 화격자를 제작하

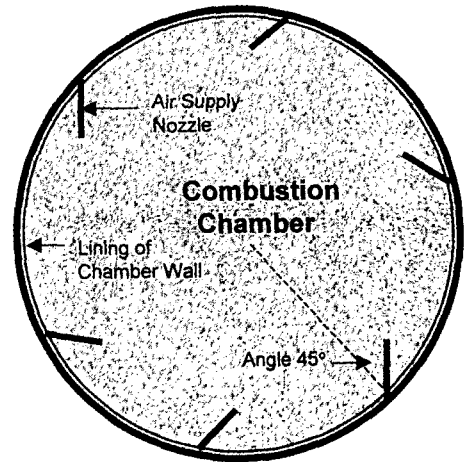


Fig. 1. Schematic diagram of air supply nozzles in chamber.

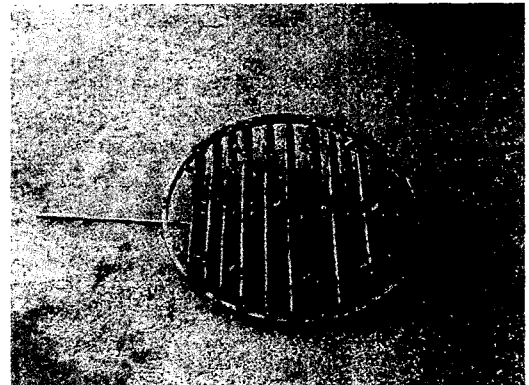


Fig. 2. Picture of shaking-grate.

여 연소실 내에 장착하였다. 직경 60 cm의 원판에 동일 방향으로 너비 6 cm의 움직일 수 있는 격자를 11개 설치하고 격자의 상단부분에 요동시킬 때마다 폐기물을 이동시키는데 용이하도록 철(凸) 부분을 높이 6 cm로 만들어 각 격자마다 1~2개씩 Fig. 2와 같이 부착하였다. 화격자의 설치 위치는 연소실내 소각 후 재를 제거하기 위한 재 제거문 바로 상단에 설치하였다.

3. 소각로의 제작

공기공급방식을 사각으로 하고 요동식 화격자를 장착한 연소실을 제작한 다음 효원산업에서 현재 제작 판매하고 있는 기존의 소각로 설계도에 맞추어 실험용 소각로를 제작하였다. 실험용 소각로의 주요 제원은 Table 1과 같다. 용량은 45 kg/hr이고 연소실의 냉각방식은 수냉식이며 대기오염을 줄이기 위한 집진장치로는 소형

Table 1. Specification of the test incinerator & air pollution control equipments

| | | Classification |
|-------------|--------------------------------|---|
| Incinerator | Grate type | Non, fixed and shaking |
| | Grate material | SUS 304 |
| | Capacity | 45 kg/hr |
| | First combustion chamber vol. | 0.45 m ³ ($\phi 600 \times 1600$ mm) |
| | Second combustion chamber vol. | 0.12 m ³ (400×400×800 mm) |
| | Burner | Light-oil burner(4 l/hr) |
| | Retention time | 1.05 sec |
| | Blower | F.D Fan (15 m ³ /min× 250 mmAq×2HP) |
| | Cooling type | Water cooling |
| Cyclone | Capacity | 66.6 m ³ /min(at 820°C) |
| | Size | $\phi 600 \times 1520$ mm |

소각로에서 가장 많이 채용하는 사이클론 집진장치를 채택하였다.^{5,6)} 실험용 소각로는 일차적으로 제품을 출하할 때 반드시 통과해야하는 소각로 제품에 대한 규격점수를 모두 통과하였다.⁷⁾ 예를 들어, 연소가스의 연소실 내 체류시간은 기준치가 0.5초 이상이지만 본 제품은 1.05초를 유지하였고 종이, 목재 소각시 연소실의 출구온도는 기준치가 450°C 이상이지만 본 제품은 평균온도 550°C로 우수하였다.

4. 연소특성 실험

1) 화격자 설치조건

연소특성 실험은 화격자의 설치유무 및 요동조건에 따라 세 가지 조건으로 나누어 실시하였다. 1) 화격자를 설치하지 않았을 경우(non-grate), 2) 화격자를 고정식으로 설치하였을 경우 즉, 실험용 소각로에 제작한 화격자를 설치하는 하였으며 연소과정에서 요동을 시키지 않은 경우(fixed-grate), 3) 화격자를 설치하고 연소도중 인력에 의해 요동시켜주는 경우(shaking-grate)로 나누어 각각에 대한 연소특성을 비교하였다.

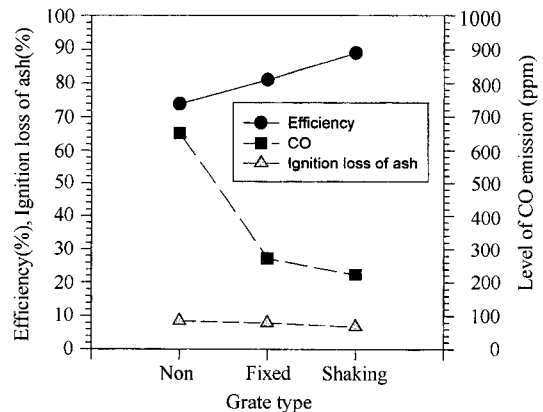
2) 실험방법

실험에 사용된 폐기물은 여러 가지 폐기물을 섞었을 경우 성분이 달라질 수 있고 이들 연소시 성분비를 알기란 쉽지 않기 때문에 본 연구의 목적에 비추어 단일 성분인 폐목재만 사용하였다. 가구제작 후 버려진 폐목재 4kg씩 포대에 담아 2개 포대를 소각로에 투입하고 불이 붙은 후 약 5분이 지난 다음부터 연소특성을 분석하였다. 가스분석 장치는 ENERAC Model 2000E (ENERAC Co., USA)을 개인용 PC에 연결하여 사용하였다. 프로브를 소각로의 배출구(stack)에 설치되어 있

Table 2. Combustion characteristics with non-grate, fixed grate and shaking grate

| | non-grate | fixed-grate | shaking-grate |
|------------------------------------|-----------|-------------|---------------|
| Efficiency(%) | 73.9 | 81.1 | 89.0 |
| Ambient temperature(°C) | 25.0 | 26.0 | 25.1 |
| Stack temperature(°C) | 113 | 150 | 137 |
| Combustion chamber temperature(°C) | 560-780 | 600-810 | 550-840 |
| O ₂ (%) | 1.1 | 0.8 | 0.9 |
| CO(ppm) | 652 | 273 | 224 |
| CO ₂ (%) | 5.83 | 7.95 | 7.26 |
| NOx(ppm) | 40.7 | 48.0 | 45.0 |
| SO ₂ (ppm) | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Turbidity | 0-1 | 0 | 0 |
| Ignition loss of ash(%) | 8.5 | 8.0 | 6.8 |

*All values are average calculated for five samples.

**Fig. 3.** Differences in efficiency, ignition loss of ash and level of CO emission with grate type.

는 검사구에 삽입하여 배출가스에 대한 정량분석을 실시하였으며 분석은 5분 간격으로 5회에 걸쳐 실시하였고 산술평균을 구하여 비교하였다. 연소실 내 온도측정은 연소실 관찰구에 디지털 온도계(SHINKO Model DFT-600-E, 일본)를 삽입하여 측정하였다. 관찰구를 통한 측정이었기 때문에 외기 온도에 영향을 받아 정확한 값을 산출하기가 어려웠으며 수시 측정하여 개략적인 온도범위만 산출하였다. 소각잔재물의 강열감량과 매연 농도는 폐기물공정시험법과 링겔만 매연농도법에 의해 측정하였다.⁸⁾

III. 결과 및 고찰

연소특성 실험결과는 Table 2와 같다. Fig. 3은 연소

효율, 일산화탄소(CO)의 배출 농도 그리고 소각잔재물의 강열감량 비율을 그래프화한 것이다.

1. 연소효율

기체연료나 연료증기가 적당량의 공기와 미리 혼합되어 있는 경우 완전연소에 가까운 연소를 하게되며 따라서 배출가스는 거의 CO₂만 발생하고 CO는 잘 발생하지 않는다. 그러나 실재는 항상 완전 연소가 일어나는 것이 아니고 미연분(未燃粉)의 일부는 미연성분으로 배출되게 된다. 어느 정도가 완전 연소되었는지를 평가하는 지표가 연소효율(combustion efficiency) η_c 이며 아래와 같이 표현할 수 있다.

실제 연소에 의한 발연량

$$\eta_c = \frac{\text{실제 연소에 의한 발연량}}{\text{완전연소를 했을 때의 발연량}}$$

본 실험에서 연소효율의 계산은 발연량 계산에 필요한 자료를 가스분석장치에 입력하여 컴퓨터에 의해 자동적으로 계산되었다. 위 식에서 보는 바와 같이 실제 연소에 의한 발연량이 많을수록 100%에 가깝게 되며 훌륭한 연소조건을 갖추었다고 할 수 있다. 가스연소로 인 경우에는 95~99%에 이르지만 화격자가 없는 고체 연소로인 경우에는 80%이하로 떨어질 수 있다.⁹⁾ 본 실험에서 연소효율은 화격자 미설치시 73.9%, 고정식 화격자 설치시 81.1% 그리고 요동식 화격자 설치시 89.0%로 나타나 요동식 화격자를 채용한 경우 연소효율이 우수한 것으로 나타났다.

2. CO 발생량

CO의 발생량이 적다는 것은 연소조건이 개선되었다는 것을 의미하기 때문에 CO의 발생량을 비교하여 보았다. 화격자 미설치시 652 ppm으로 기준치인 600 ppm⁶⁾ 초과하였으나 고정식 화격자인 경우에는 273 ppm으로 급격히 낮아졌으며 요동식 화격자인 경우에는 더욱 낮아져 224 ppm으로 나타났다. 따라서 본 연구결과 소형 소각로일지라도 형태가 고정식이든 요동식이든 반드시 화격자가 필요하다는 것을 알게 되었다.

성 등¹⁰⁾의 연구에 의한 고정식 화격자를 설치한 소형 소각로에 폐 고무류·가죽류·합성수지류를 혼합하여 소각하였을 때 CO 배출량이 대략 540 ppm으로 나타난 것에 비하면 본 연구의 273 ppm은 아주 낮게 나타났는데 이는 본 연구에 사용된 폐목재류의 탄소성분이 혼합 폐기물보다 적었기 때문으로 판단된다. 실험의 목적상 본 연구에서는 목재만 소각하여 CO의 양이 적게 나타났으나 탄소함량이 큰 고무류나 플라스틱류 소각

시에는 불완전 연소로 인한 CO의 배출량이 더 많이 발생할 것이므로 소형 소각로에 화격자의 필요성은 더욱 절실하다고 할 수 있다.

3. 소각 잔재물의 강열감량

소각잔재물의 강열감량은 소각재를 800~900°C로 약 2시간 정도 가열하였을 때의 감량을 중량 퍼센트로 나타낸 것이기 때문에 강열감량의 값이 적을수록 완전연소에 가깝다고 할 수 있다. Table 2와 Fig. 3에서 나타난 것처럼 화격자 미설치시, 고정식 화격자 그리고 요동식 화격자 설치시 소각잔재물의 강열감량이 각각 8.5, 8.0 그리고 6.8%로 역시 요동식 화격자를 설치하였을 경우 강열감량이 훨씬 적게 나타났다. 따라서 소형 소각로에도 요동식 화격자가 필요하다는 것이 증명되었다.

4. 연소온도

연소온도가 너무 낮으면 인체에 유해한 대기오염물질 쉽게 생성되는 것으로 알려져 있다. 특히, 보일러 연소실의 고온의 연소가스를 200°C 근처에서 냉각시키는 과정에서 다이옥신류의 생성에 적합한 온도영역인 200~450°C를 거치면서 다이옥신류가 다량 생성되는 것으로 알려져 있다.^{11,12)} 따라서 이 같은 다이옥신류의 생성을 억제하기 위해서는 고온의 연소처리가 불가피하기 때문에 현행 소각로의 연소온도 기준치도 1997년부터 850°C로 상향조정하였다.⁷⁾

배기구의 온도는 측정구에 프로브를 삽입하고 가스분석장치가 자동으로 분석하였고 연소실의 온도는 연소실 관찰구에 디지털 온도계를 삽입하여 온도를 측정하였기 때문에 바람에 의한 외기 온도에 영향을 받았을 것으로 판단된다. 그러므로 연소실의 온도는 개략적인 온도범위만 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 화격자가 없는 경우가 화격자가 있는 경우보다 낮은 온도에서 연소되었으며 화격자가 있는 경우에는 고정식과 요동식의 경우 큰 온도 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 화격자를 설치하는 경우가 설치하지 않은 경우보다 다이옥신류의 생성 정도가 낮을 것으로 추측되지만 정확한 결론을 내리기 위해서는 보다 정밀한 연구가 진행되어야 할 것이다.

5. 기타 오염물질

대기오염물질 중 아황산가스(SO₂)의 생성은 연료 속에 함유되었던 황이 연소 도중 산소와 결합한 것이기 때문에 본 연구에 사용된 폐목재에는 황 성분이 전혀 없었으므로 아황산가스는 전혀 배출되지 않았다. 질소

산화물(NOx)은 연소도중 공기중의 질소와 산소가 결합하는 것이기 때문에 연소과정에서는 필연적으로 발생하며 연소온도가 높을수록 당연히 질소산화물의 발생은 증가하게 된다. 따라서 질소산화물을 줄이기 위해서는 소각로를 저온에서 운전하든지 공기량을 감소시켜서 저산소 상태에서 운전하는 것이 바람직하지만 이는 CO의 증가와 매연의 발생을 증가시켜서 연소효율을 떨어뜨리게 된다. 본 실험에서도 연소조건이 좋아 연소온도가 높아지면 질소산화물의 발생량이 증가하는 것으로 나타났으나 화격자를 설치하지 않은 경우 40.7 ppm, 고정식 및 요동식 화격자를 설치한 경우 각각 48.0, 45.0 ppm으로 질소산화물의 발생량 차이는 그다지 크게 나타나지 않았다.

IV. 결 론

소형 소각로의 연소조건을 개선하기 위하여 모든 공기공급 노즐을 연소실 내벽 접선방향에 45°로 유지하여 공기공급시 와류가 형성되도록 연소실을 개량한 다음 화격자를 미설치한 경우, 고정식 화격자를 설치한 경우 그리고 요동식 화격자를 설치한 경우 이 세 가지 조건으로 연소실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연소효율은 요동식 화격자 설치시 89.0%, 고정식 화격자 설치시 81.1% 그리고 화격자를 설치하지 않은 경우 73.9% 순이었다.
2. CO의 배출량, 소각 잔재물의 강열감량 그리고 연소과정 및 배기구에서 온도를 종합적으로 분석해 볼때 연소조건은 요동식 화격자 설치시 가장 우수하였고 다음은 고정식 화격자 설치시 그리고 그 다음은 화격자를 설치하지 않은 경우 순이었다.
3. 질소산화물의 배출량은 화격자를 설치하지 않은 경우 가장 낮게 나타났으나 나머지 두 조건과 큰 차이는 없었다.

4. 본 연구 결과 대기오염물질을 줄이기 위해서는 소형 소각로일지라도 반드시 요동식 화격자 내지는 고정식 화격자를 설치해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 중소기업청 · 경상남도 · 김해시의 공동 연구비 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- 1) 김향원 : 중 · 소형 소각로, 겸지사, 10-12, 1997.
- 2) Kilgroe, J. D., W. S. Lanier, T. R. V. Alten: Development of good combustion practice for municipalwaste combustors, Proceeding Michigan, ASME, 145-156, May 17-20, 1992.
- 3) 서용철, 심상걸 : 소형 사이클론식 소각로의 연소특성 - 체류시간과 연소속도 -, 한국폐기물학회지, 13(4), 495-503, 1996.
- 4) Sam, S. F., M. K. Larry: The mound laboratory cyclone incinerator for radioactive waste, US Energy Research and Development Administration, EY-76-C-04-0053, 4-23, 1979.
- 5) Brunner, C. R.: Handbook of incineration systems, McGraw-Hill, New York, 22.1-22.41, 1991.
- 6) Brunner, C. R.: Handbook of hazardous waste incineration, Tab books, PA, 237-265, 1988.
- 7) 환경부 : 폐기물관리법시행규칙, 제24조 1항, 환경부령 제27호('97.7.19), 1997.
- 8) 환경부 : 폐기물공정시험법, 환경부 고시 91-97호, 1991.
- 9) 김광렬, 노수영, 김영주 : 최신 연소공학, 동화기술, 57-59, 1997.
- 10) 성동모, 갈대성, 윤태일 : 소형 화격자식 산업폐기물 소각로의 연소특성에 대한 연구, 한국폐기물학회지, 14(6), 579-587, 1997.
- 11) 도갑수 : 생활폐기물 소각로에 의한 다이옥신의 영향과 제어방안, 한국폐기물학회지, 14(6), 501-506, 1997.
- 12) 신동훈, 최진환, 양 원, 최상민 : 다이옥신류 배출저감을 위한 도시 폐기물 소각로 설계와 운전, 한국폐기물학회지, 15(7), 705-715, 1998.