

30kg/hr급 열분해 용융소각로용 연소실에서 RDF의 연소 특성

전병일* · 박상욱* · 신동훈** · 류태우*** · 황정호*

Combustion Characteristics of RDF in a 30kg/hr Scale Pyrolysis Melting Incinerator

Byoung-Il Jeon*, Sang-Uk Park*, Dong-Hun Shin**, Tae-Woo Ryu***, Jung-Ho Hwang*

ABSTRACT

In this study, we investigated characteristics of a gas flow and a combustion property during the combustion of a RDF in a pyrolysis melting incinerator with disposal rate of 30 kg/hr. The RDF was pyrolyzed through the pyrolysis chamber at 600°C of the chamber surface without oxygen condition. The pyrolysis gas was injected in the combustion chamber. It was burned by means of the staged combustion that was injecting secondary and tertiary air in the combustor. We measured the temperatures and the gas components in the combustion chamber while maintaining the air-fuel ratio of 1.3. Finally, we confirm that additional air injection, secondary and tertiary air ratio, was the most important factor to reduce NOx.

Key Words : Pyrolysis melting incinerator, Secondary air injection, NOx

기 호 설 명

RDF : refuse derived fuel
 HHV : high heating value
 Φ : equivalence ratio

NOx : nitrogen oxides
 LHV : low heating value
 ppm : part per million

1. 서 론

최근 폐기물 소각 처리는 폐기물의 부피와 질량을 최소화 하고 폐열을 회수할 수 있어 점차 증가되는 추세이다. 하지만 소각과정에서 배출되는 불완전 연소 가스와 2차 오염 물질의 발생, 그리고 유가자원 회수가 불가능한 점 등 이에 대한 적절한 대책이 필요한 실정이다. 최근 국내에서는 이러한 문제에 대한 해결책으로 열분해 용융 소각로가 기존 폐기물 소각로의 대체기술로 부각되고 있다. 열분해 용융 소각로는 NO_x와

SO_x를 비교적 쉽게 제거 할 수 있는 장점이 있고 이와 더불어 다이옥신, 중금속 등의 문제에도 장점을 갖는다. 따라서 이와 관련된 기술들이 활발히 연구되고 있으며, 상용화를 위해 검증단계를 거치고 있다. 또한 다양한 열분해 용융 공정들이 국내에 소개되고 있고, 여러 업체에서 활발한 기술 도입이 추진되고 있다. 그 중 R-21[1]과 Evara[2]의 공정은 보조열원 없이 폐기물 자체 발열에너지로 열분해 및 비산재 용융을 실현하는 공정을 적용하고 있다. 그 외에 제철소에서 사용하는 코크스를 보조열원으로 투입하는 고로형 용융로(blast furnace)[3], 산소주입 및 LNG를 보조열원으로 하는 Thermostelect 공정[4], 유동층 열분해 후 2차 연소로에서 비산재를 용융시키는 기포 유동층 가스화 용융로 등이 상용화에 성공하거나 근접한 공정으로 알려져 있다.

* 연세대학교 기계공학부
 ** 국민대학교 기계·자동차 공학부
 *** 한국 생산기술 연구원
 † 연락처자, hwangjh@yonsei.ac.kr

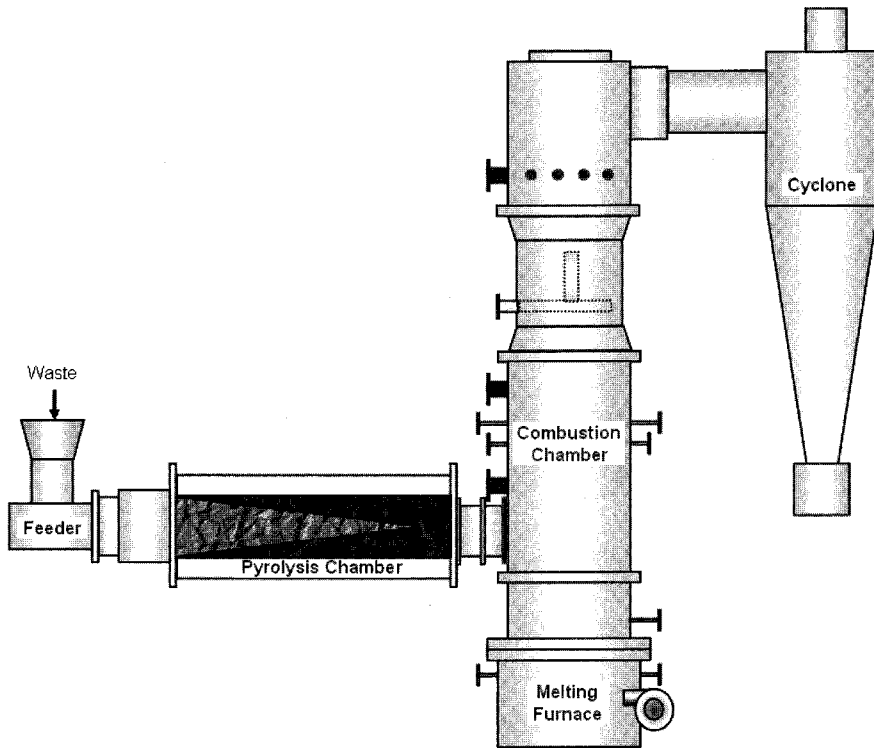


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

열분해 용융 소각로의 핵심 기술은 열분해 기술, 용융기술, 연소로기술로 구분된다. 본 연구에 사용된 실험장치는 이 중 연소로기술과 용융기술을 동시에 수행하는 공정을 사용하였으며 이는 R-21과 Evara, Thermoselect 방식과 유사하다. 하지만 본 장치는 공정이 단순하고 열효율이 높을 뿐 아니라 에너지 비용 측면에서 경제적이라는 차별성을 지니고 있다.

Figure 1은 열분해 용융 소각로 실험장치의 전체 장치도이다. 본 장치는 크게 세 부분으로 나누어지는데, 먼저 첫 번째로 폐기물을 압축하여 무 산소 분위기에서 가열하는 이동층식 열분해로(pyrolysis chamber)가 있다. 두 번째로 재(ash) 성분을 용융하여 슬래그로 변환하기 위한 slag melting 방식 용융로가 있으며, 마지막으로 불완전 연소물질이 2, 3차 공기와 만나 완전연소를 목적으로 하는 연소실로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용된 연료는 차세대 재활용 에너지로 대두되고 있는 폐기물 고형 연료인 RDF(refuse derived fuel)를 사용하였다. RDF는 도시 폐기물을 수분과 불연물을 제거한 다음 고형연료화 한 것으로 고분자 산업 폐기물의 경우 6000 kcal/kg, 도시쓰레기 RDF의 경우 5000 kcal/kg 이상의 발열량을 보여, 일반적으로 이용

하는 무연탄의 발열량인 4500 kcal/kg 보다 높은 발열량을 보이고 있다. 이러한 점에서 RDF는 미래의 대표적인 대체 에너지원으로 주목받고 있다. 이미 미국과 일본 등 외국의 경우 RDF를 연료로 발전을 하고 있으며, 우리나라도 RDF를 연료로 하는 화력발전사업에 대한 타당성 및 RDF 제조와 RDF 연소장치에 대한 연구가 진행 중이다[5]. 또한, RDF의 연료화를 하기 위한 국내 RDF의 기초 성분 및 연소 특성에 대한 연구가 진행되었다[6].

본 연구는 열분해 용융 소각로의 소각 기술 향상 및 기초적인 소각로 설계와 제작 기술의 확보를 위한 일환으로 소각로 연소실의 성능향상을 위해 진행되었다. 소각로 연소실의 성능 향상을 위한 연구로는 연소실의 형상에 따른 연구와 연소 공기 주입 방식에 따른 연구로 구분 지을 수 있다. 본 연구는 연소공기 주입 방식에 따른 연구로서, 연소에 필요한 연소용 공기의 유량 비, 주입 위치, 주입 각도 등에 의한 연구인데 이에 따른 기초 연구가 선행되어 졌다[7-9]. 연소실 내부로 주입되는 2차 공기의 주입 각도는 연소실 내 연소가스의 체류시간 증가와 연소실에 발생하는 재순환 영역의 감소 등에 영향을 미친다[10]. 그리고 주입되는 2, 3차 공기 주입 비의 조절은

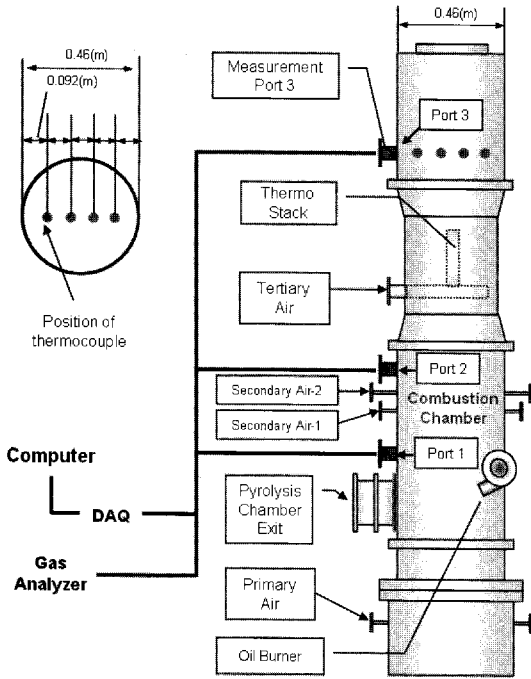


Fig. 2 Position of measurement ports

다만 연소 방식으로서 초기 연소에서 공기량을 줄여서 공기비를 이론 공기비 이하로 유지하여 고온의 화염 영역에서는 환원 분위기를 만들어 NO_x 발생을 억제한 후 필요한 추가의 공기를 상부로 내로 주입해 연소함으로써 상대적으로 저온 부위에서 완전 연소가 되도록 하는 것이다 [11].

실험의 측정은 연소로 내 유입되는 2, 3차공기량의 주입 비에 따라 연소로 내 gas가 2차공기와 만나기 전과, 2차공기와 만나서 혼합이 된 후, 그리고 3차공기와 만난 후 위치한 출구 쪽 이렇게 세 곳에서 이루어졌다.

2. 실험

연료인 RDF는 투입장치(feeder)를 사용하여 투입되며, 열분해로에서 무산소 분위기로 열분해되어 가스 상으로 주입된다. 열분해로는 압축 이동층식(moving bed)이며 가로 200 mm, 세로 200 mm, 길이 1200 mm이다. 열분해로 단면은 정 사각형이며 중심에서 먼 곳부터 열분해 된다. 열분해로 외부는 3 kW급 전열판 16장을 사용하여 온도를 높였으며 열분해로 온도는 K-type thermocouple을 이용하여 측정하였다. 전열판에 근접한 열분해로의 표면온도는 600 °C로 정해 주었다. 용융로는 산소과잉 용융로로서 bubbling을

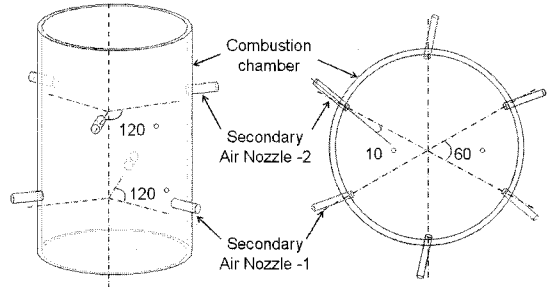


Fig. 3 Position of secondary air nozzle

위한 공기주입부가 있다. 본 연구에서는 용융로를 가동하지 않았다. 다음에는 열분해된 RDF가스의 연소 실험에 대해 알아본다.

2.1 실험 장치

실험 장치는 Fig. 2에 나타나 있다. 연소로는 열분해로에서 발생된 가스를 주입하는 부분과 2단으로 이루어진 2차 공기제트와 3차공기가 들어가는 thermo stack 그리고 연소로 온도 상승을 위한 경유버너가 장착되어 있고 맨 위 상단에는 후처리장치인 cyclone으로 배출되는 출구가 있다. 이 장치 중 연소로와 용융로부분은 원기둥 형태이며 내경 및 외경 그리고 내화재의 두께는 각각 460, 870, 200 mm 이다. 전체 높이는 4480 mm이고 이 중 용융로의 높이는 1430 mm이고 연소로의 높이는 3050 mm이다. 연소로의 2차 공기제트의 내경은 10 mm이고 2단으로 구성되어 있으며, 스웰(swirl) 효과를 이용해 가스의 혼합 및 연소효과의 향상을 위해 원의 중심 방향에서 시계방향으로 10 ° 기울여 설계하였다. 2차 공기제트는 하단 세 개 상단 세 개로 총 여섯 개의 제트가 있으며, 각 단의 3개의 제트는 중심각 기준으로 120 °의 간격으로 떨어져 있다. 상단과 하단은 서로 중심각 기준으로 60 °가 떨어져 있다(Fig. 3). 3차공기가 주입되는 thermo stack은 2차 공기제트 상단으로부터 800 mm 위에 위치하며 연소로 내부 중심선 방향으로 세워져 있다. 길이는 약 400 mm 이고 내경은 80 mm이다. 관측포트는 총 3개로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 설치되어 있다. 관측포트에는 온도를 측정할 수 있는 K-type 열전대(thermocouple)가 각 포트마다 깊이별로 4개씩 설치되어 있으며 가스를 측정할 수 있는 곳이 한군데씩 있다.

2.2 연료 특성

RDF의 종류는 가연성 폐기물을 바탕으로

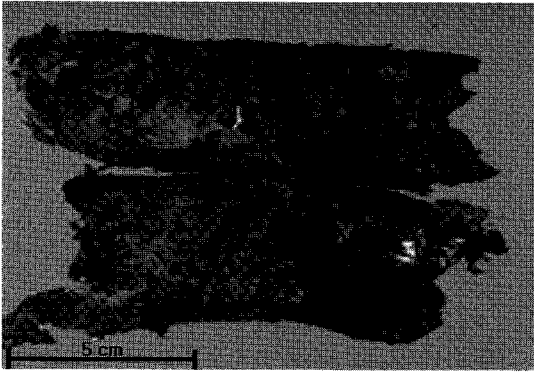


Fig. 4 Picture of RDF

waste paper를 40 wt%를 함유한 RDF-A, cotton을 40 wt% 첨가시킨 RDF-B, 도시고형 폐기물을 원료로 한 RDF-C 그리고 음식물을 포함한 일반 쓰레기로 성형된 RDF-D가 있다.

본 연구에서 사용된 RDF는 (주)씨엔테크로부터 제공받은 RDF-A를 사용하였으며 형상은 직육면체로 되어있고, 길이 12 cm 너비 4 cm 두께 3.5 cm 정도이다. 본 RDF는 대부분이 종이류로 구성되어 있고, 발열량 조절을 위해 플라스틱을 첨가한다. Fig. 4는 공장에서 제조된 RDF의 사진이다.

RDF는 Table 1에 나타나 있듯이 공업 분석과 원소 분석을 하였으며, 발열량은 Dulong식(1)을 이용하여 고위발열량(kcal/kg)을 계산하고, 식(2)를 이용하여 저위발열량(kcal/kg)을 구하였다. 계산식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

<Dulong 식>

$$HHV = 8100C + 34000\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500S \quad (1)$$

여기서 C, H, O, S는 Table 1의 각원소의 중량 퍼센트(wt, %)를 의미한다.

$$LHV = HHV \times F - 600(9H + W) \quad (2)$$

여기서 F, H, W은 각각 연료 내 가연분율, 수소의 분율, 연료 내 수분 함유율을 나타내며, Table 1의 공업 분석치와 원소 분석치에 나와 있는 값을 이용하였다.

공업 분석은 수분, 휘발분, 고정탄소, 회분의 양을 측정하는 것을 말한다. 수분은 개폐된 상태의 도가니에서 104 °C-110 °C, 휘발분은 밀폐된 상태의 도가니에서 950 °C, 고정탄소는 개폐된 상태의 도가니에서 725 °C에서 질량의 변화율로부터 계산했다. 원소분석은 ICP-MS(Perkin Elmer Elan 6100)장비를 이용하였고, 시료의 균일성을

Table 1 Characteristics of RDF

Proximate analysis	RDF(wt, %)
Moisture	3.6
Volatile matter	76.4
Fixed carbon	11
Ash	9
Ultimate analysis	RDF(wt, %)
C	54.9
H	7.13
O	18.18
N	0.06
S	0
Calorific value	RDF(kcal/kg)
LHV	5691.83

Table 2 Proportion of air

	Primary Air	Secondary Air-1	Secondary Air-2	Tertiary Air
Case 1	0.684	0.308	0.308	0.00
Case 2	0.753	0.2735	0.2735	0.00
Case 3	0.753	0.1685	0.1685	0.21

위해 시료를 분말로 만들고 저 농도의 약산에 잘 섞어주어 C, H, O, N, S의 함량을 측정하였다.

2.3 실험조건 및 방법

본 실험은 전체 세 가지 조건을 가지고 실험하였으며 위치별로 온도는 12곳, 가스는 15곳에서 측정 하였다. 전체 공기비는 과잉공기비 1.3(산소 농도 4.55 %)을 유지하였다. 연소로 내부에 1차, 2차, 3차 공기 주입량의 비를 조절하여 실험 하였고, 2차공기의 경우 두 단으로 구분지어 2-1차와 2-2차로 나누었으며(Fig. 2), 그 비는 Table 2와 같다. 연료는 폐종이와 폐플라스틱으로 만들어진 RDF를 사용하였으며 시간당 25 kg을 주입 하였다. 열분해는 열분해로 성능의 문제로 인해 압축하지 않고 열분해 시켰다. 연소로 내 버너는(경유 8 kg/hr) 점화 및 초기 온도를 높이기 위해 설치 되었으며 로 내 온도가 1000 °C 정도로 올라가면 버너를 제거 하였다. Table 2에서 보면 전체 공기비는 1.3을 맞춰주었기 때문에 전체 공기 유량은 일정하게 된다. Case 1은 1차 공기와 2차 공기의 비가 거의 균일하게 주입되었고, case 2는 1차 공기를 최대로 넣어주고 2차 공기는 전체 공기량에서 1차 공기를 뺀 나머지를 주입하였다. Case 1과 case 2는 3차 공기를 주입하지 않고 1,2차 공기비로 변화를 주었다. Case 3는 1차 공기를 최대로 하고 2차 공기와 3차 공기를 나누어 주입하여 case 1,2 와 비교했다. % 과잉 공기(%

excess air)는 완전연소 된다고 가정하고 아래 식(3)을 이용하여 이론 공기량을 구한 뒤, 식(4)를 이용하여 당량비(equivalence ratio)를 구한다. 당량비가 결정되면, % 과잉공기는 식(5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$C_a H_b O_c N_d + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)(O_2 + 3.76 N_2) \\ \rightarrow a CO_2 + \frac{b}{2} H_2 O + \frac{d}{2} N_2 \\ + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)(3.76 N_2) \quad (3)$$

여기서 a, b, c, d는 각각 연료 중 포함하고 있는 C, H, O, N의 중량퍼센트(wt %)값을 각 원소의 원자량으로 나누어 나타낸 값이다. RDF의 경우 a, b, c, d의 값은 각각 4.575, 7.13, 1.136, 0.004가 된다.

Equivalence ratio (Φ)

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)(4.76 \times 29)}{\rho_{air} \dot{V}_{air} (a M_C + b M_H + c M_O + d M_N)} \quad (4)$$

$$\% \text{ Excess air} = \frac{1 - \Phi}{\Phi} \times 100\% \quad (5)$$

여기서 ρ_a 는 상온에서의 공기의 밀도이며, \dot{V}_{air} 는 총 공기유량이다. M_i 는 C, H, O, N 각 원소의 원자량이며, \dot{m}_f 는 연료의 시간당 투입량이다.

각 관측 포트는 2,3차 공기 주입효과를 알아보기 위해 2차 공기와 만나기 전, 2차공기와 만난 후 그리고 thermo stack 상부에 위치하게 했다(Fig. 3).

온도는 K-type 열전대(thermocouple)를 사용하였으며 각 포트마다 깊이별로 설치하고 데이터 인식 프로그램(Yokogawa DAQ-100)을 통해 각 부분의 온도를 실시간으로 모니터링하고 저장할 수 있었다. 열전대를 사용하여 측정된 온도는 아래 식(6)을 이용하여 복사 열손실을 보정할 수 있다.

$$T_g - T_t = \frac{\epsilon \sigma d (T_t^4 - T_s^4)}{2k_g} \quad (6)$$

여기서 T_g 는 실제 연소실내부 가스의 온도이고 T_t 는 열전대 비드의 온도이며 T_s 는 로 내 벽면 온도를 의미한다. 또한, ϵ 은 방사율 이고 값은 0.71이다. σ 는 슈테판-볼츠만 상수이며, d는 열전대 비드의 직경을 의미하고 k_g 는 가스의 열전도

계수이다.

가스측정은 각 단별 연소실 내부의 원심방향으로 깊이에 따라 5군데에서 측정하였다. 측정 방법은 출구 쪽에 설치된 gas analyzer(Testo 350 XL)를 통해 산소농도 4~5 %가 맞춰 졌을 때 별도의 gas analyzer(Testo 350 M)를 이용해 연소로 내부의 위치별 가스농도를 측정 하였다. 측정가스의 종류는 O_2 , CO, NOx를 측정 했다. Gas analyzer로 측정하기 위해 측정 가스의 입자상 물질은 분진필터를 통해서 제거하고 수분은 실리카겔($SiO_2 \cdot nH_2O$)을 통해 제거했다. 높은 온도의 측정가스의 냉각을 위해 수냉식 가스프로브(water cooling-type gas probe)를 사용했다. 또한, 가스농도의 균일성을 알아보기 위해 각 지점에서 피토투브를 이용해 가스의 유량을 측정하고자 하였으나, 포트의 형상 및 연소실 내부의 수트(soot), 재(ash)등에 의한 막힘의 영향으로 가스 유량의 측정에 어려움이 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포

Fig. 5~7는 연소로의 각 포트(port)별 네 곳의 위치에서의 열전대 비드의 온도분포를 나타내며 각 그림은 case별로 측정된 것이다(Table 2). 각 포트는 연소로 내부에 2차 공기 및 3차 공기를 주입하기 전과 후의 위치별 온도이기 때문에 각각은 온도차가 있게 된다. 포트는 연소로 높이별로 위치하는데 포트 1은 2차 공기 주입 전, 포트 2는 2차 공기 주입 후, 포트 3은 3차 공기 주입 후의 부분에 위치한다(Fig. 3). 실제 연소 가스의 온도는 식(6)을 통해 보정할 수 있는데, 800 °C ~ 1200 °C사이에서 열전대 비드온도와 43~90 °C정도의 오차가 있다.

연소로 하부에서 1차 공기와 열분해 가스가 만나 온도가 점점 상승한 후 2차 공기주입부에서 온도가 최대가 되고 연소로 상부에서는 대류 및 복사 열손실과 3차 과잉공기의 주입으로 인해 온도가 낮아지게 된다. 때문에 포트 3에서 온도가 상대적으로 낮게 나타난다. Fig. 5~7은 각 포트별 네 곳의 온도가 비교적 균일한 이유는 유동에 의한 영향보다는 화염의 복사열전달 등에 의한 영향이 더 큰 것으로 생각되어진다. 온도는 측정 시간대의 평균 온도를 나타내고 오차율은 3.22 %이다.

3.2 배가스 농도

Table 3는 각 단의 연소실 내부의 위치별 가스농도를 보여주고 Table 4는 각 포트의 측정위치별 가스 농도를 바탕으로 계산된 각 포트별 면

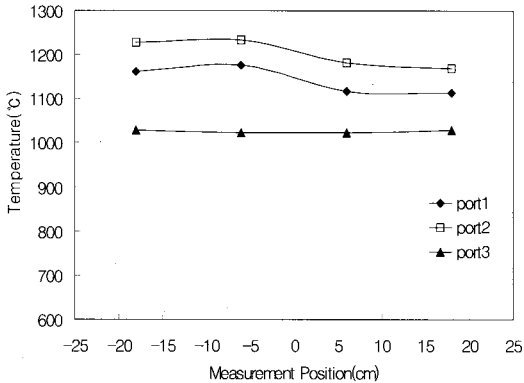


Fig. 5 Temperature distribution in the combustion chamber for case 1

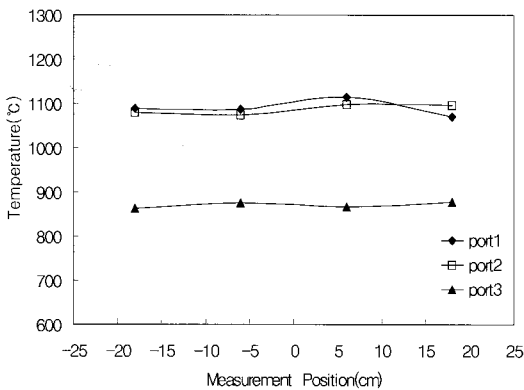


Fig. 6 Temperature distribution in the combustion chamber for case 2

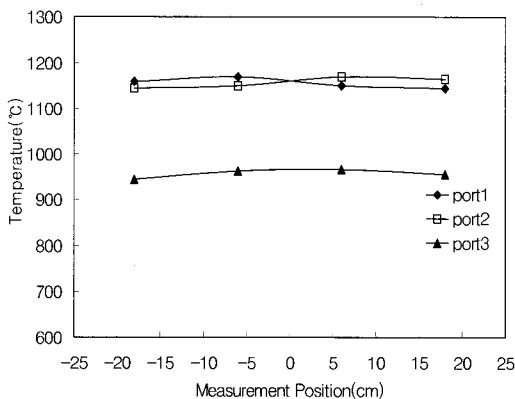


Fig. 7 Temperature distribution in the combustion chamber for case 3

적 평균 가스농도를 나타낸다. 각 각의 조건은 1, 2, 3차 공기비의 변화에 따른다(Table 2). 주요 공해물질인 NOx와 CO는 연소조건을 파악하는데 중요한 인자이다. Case 1에서는 Table 2에서보듯이 1차공기와 2차 공기의 유량이 비슷하고 3차 공기가 주입되지 않는 조건에서 운전되었다. 따라서 2차 공기의 유량이 너무 많아 연소로 내부의 유동에 영향을 크게 줄 것으로 생각된다. 먼저 O₂의 농도를 보면 2차 공기가 주입된 부분인 port 2에서 가장 높은걸 볼 수 있다. 하지만 2차 공기에 의한 유동의 영향으로 균일한 분포를 보이지 않는다. CO의 경우 2차 공기가 주입된 직후인 port 2에서 일부 0으로 나타났으나 유동이 한쪽으로 쏠리면서 대부분 연소가 제대로 일어나지 못해 gas analyzer의 측정 범위를 벗어났다. 끝으로 NOx의 경우 연소가 제대로 이루어 지지 않아 적은양이 배출되었다. Case 2에서는 case 1과 비교할 때 2차공기의 양을 줄이고 1차 공기의 양을 늘려서 어느 정도 유동이 안정화 되고 연소가 잘 이루어졌다. CO의 경우 2차 공기를 만나면서 양이 줄어들음을 알 수 있고 NOx의 경우 고온부에서 많이 발생 되나 저온부로 갈수록 줄어드는 걸 알 수 있다. Case 3에서는 2차 공기 주입량을 줄여 공기비를 이론공기비 이하로 유지함으로써 고온의 화염영역에서 환원성 분위기를 만들어 NOx 발생을 억제한 후 공기비 1.3을 맞추기 위해 필요한 추가의 공기(3차 공기)를 상부의 thermo stack을 통해 주입해 상대적으로 저온부위에서 완전연소가 이루어지도록 하는 다단연소 방식을 이용하였다. 따라서 2차 공기의 유량이 줄어들어 유동의 안정화가 이루어지고 연소 성능이 향상되어 CO의 양이 상당히 줄었으며, 다단연소의 효과로 인해 NOx의 양이 매우 적게 배출되었다.

Figure 8~16을 보면 case 1~3일 때 각 port의 측정 위치별 가스농도를 나타낸 것이다. Fig. 8~10은 case 1에서의 각 port의 위치별 가스농도를 보여주는데 Fig. 8은 위치별 O₂ 농도를 보여준다. 2차 공기가 주입된 부분인 port 2가 O₂ 농도가 높게 나타나고 연료가 주입된 직후인 port 1은 상대적으로 O₂ 농도가 적게 나타난다. 하지만 1차 공기와 2차 공기량이 거의 1:1로 들어가는 조건인 case 1에서는 2차 공기의 유량이 너무 많아 이에 따른 불규칙한 유동 때문에 각 위치별 농도의 변화가 심하고 어느 한쪽으로부터만 쏠리는 현상이 생김을 알 수 있다. Fig. 9는 측정 위치별 CO의 농도를 나타내는 것인데 불완전 연소 시 발생하는 CO양은 연소의 효율을 알 수 있는 중요한 인자이다. Fig. 9를 보면 각 port의 -18 cm 위치에서는 CO의 양이 매우 적음을 알 수 있고 나머지 단은 10000 ppm 이상으로서 기기의 측정

Table 3 Concentrations of combustion gas with measurement positions

Position		Case1			Case2			Case3		
Port	Radial Direction(cm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)
1	-18	7.19	1588	166	2.1	>10000	253	1.3	0	4
	-9	0.74	>10000	24	5	>10000	314	1	1229	4
	0	0.86	>10000	27.2	3.1	954	296	0.4	550	6
	9	1.24	>10000	18	0.3	1351	255	0.6	273	13
	18	1.02	>10000	22.4	1.2	806	432	4.8	183	12
2	-18	3.67	0	22.1	3.9	400	195	1.8	506	8
	-9	2.47	0	21.8	5.1	378	188	2.5	356	21
	0	5.78	0	11.2	3.5	544	186	7.3	216	86
	9	1.94	>10000	18	2.26	685	172	0	453	53
	18	6.36	>10000	6.4	1.44	656	182	0.2	376	163
3	-18	4.4	881	59	0.9	519	129	2.2	301	8
	-9	1.65	>10000	28.4	4.9	415	167	7.8	247	15
	0	3.03	>10000	18	0.3	509	17	2.4	325	8
	9	3.02	>10000	12	0.6	586	117	3.8	331	26
	18	2.4	>10000	11	4	539	155	2.6	313	8

Table 4 Surface area averaged concentrations of combustion gas

Port	Case 1			Case 2			Case 3		
	O ₂ (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)
1	2.94	7352.30	51.64	2.04	5280.82	321.55	2.20	326.34	8.07
2	4.14	4763.70	15.93	3.04	529.89	185.63	1.38	418.57	69.85
3	3.04	7129.77	29.41	2.45	518.84	136.09	3.50	302.03	12.04

범위를 벗어남을 알 수 있다. port 2의 경우를 보면 2차 공기가 들어감에 따라 불완전 연소되었던 가스가 연소되어 -18 cm, -9 cm, 0 cm 위치에서 CO의 농도가 0이 됨을 알 수 있다. 하지만 유동의 영향에 의해 나머지 위치에서의 농도는 역시 기기의 측정 범위를 벗어남을 알 수 있다. Fig. 10은 측정 위치별 NOx의 농도를 나타낸다. 전체적으로 NOx의 발생량이 적음을 알 수 있다. 하지만 이는 연소가 제대로 이루어지지 않아 일어난 현상임을 앞의 O₂ 농도와 CO 농도를 통해 짐작할 수 있다.

Figure 11~13은 case 2에서의 위치별 가스 농도를 보여준다. Fig. 11은 O₂ 농도를 나타내는데 case 1에 비해서는 2차 공기의 유량이 적지만 아직도 유량이 큰 이유로 전체적으로 균일한 유동을 보이지는 않는다. 하지만 2차 공기 노출 바로 상단에서 산소의 농도가 가장 높음을 알 수 있

고, 출구 쪽에서 산소 농도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. Fig. 12는 CO의 농도를 나타내는데 열분해로에서 나온 열분해 가스의 영향으로 port 1에서 CO가 높게 측정되었다. 하지만 2차 공기가 주입된 port 2에서 CO의 농도가 낮아짐을 알 수 있으며, 출구 쪽 단인 port 3에서 CO의 농도가 가장 낮게 측정됨으로 case 1보다 연소 성능이 향상됨을 알 수 있다. Port 1에서 첫 번째와 두 번째 측정위치의 데이터나 나오지 않는 이유는 CO의 농도가 기기의 측정 범위를 벗어났음을 나타낸다. Fig. 13은 위치에 따른 NOx의 농도 변화를 나타낸다. Case 1에 비해 어느 정도 연소가 이루어짐에 따라 NOx가 많이 발생했으며, 2차 공기의 양이 많아 상대적으로 저온 분위기에서 연소가 이루어져 출구 쪽 단인 port 3에서 NOx의 양이 많이 줄어든 것을 알 수 있다.

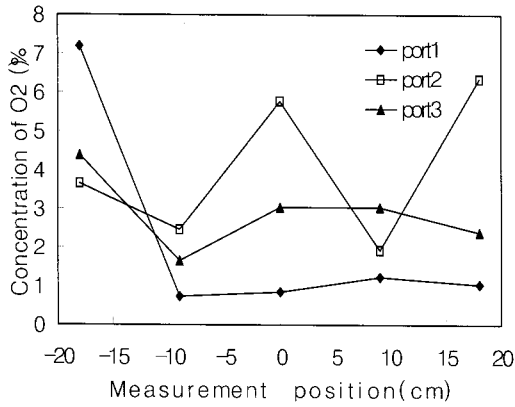


Fig. 8 O₂ concentration of measurement position (case 1)

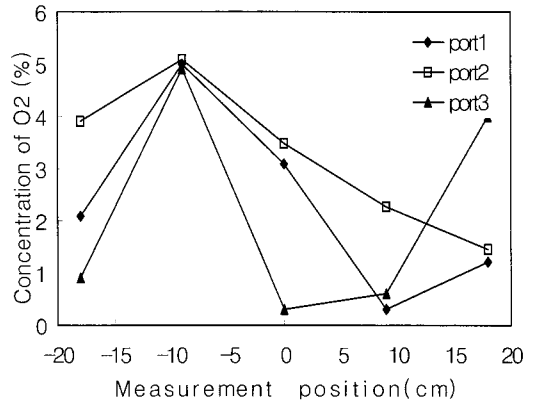


Fig. 11 O₂ concentration of measurement position (case 2)

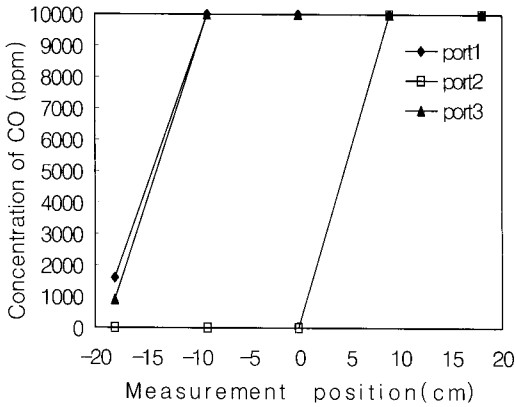


Fig. 9 CO concentration of measurement position (case 1)

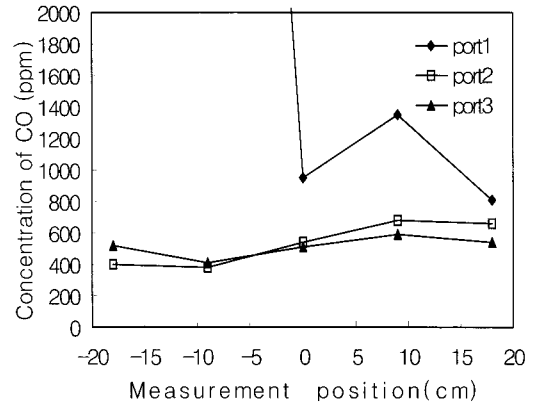


Fig. 12 CO concentration of measurement position (case 2)

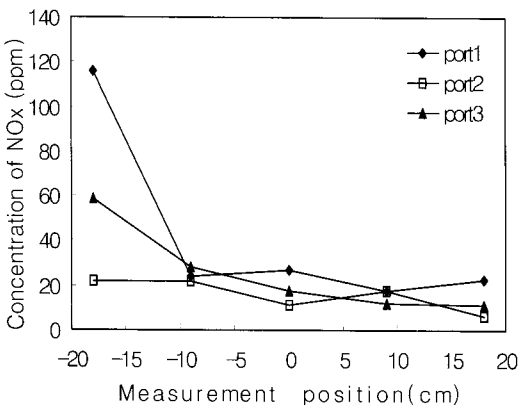


Fig. 10 NO_x concentration of measurement position (case 1)

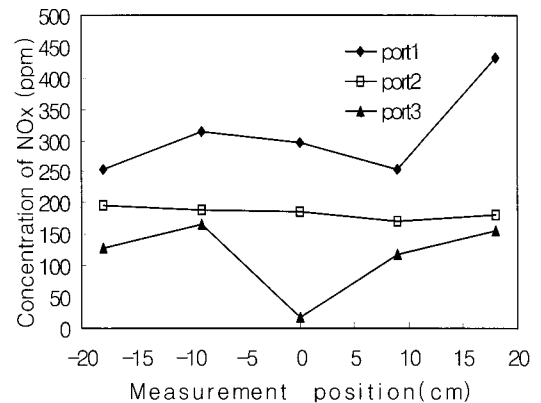


Fig. 13 NO_x concentration of measurement position (case 2)

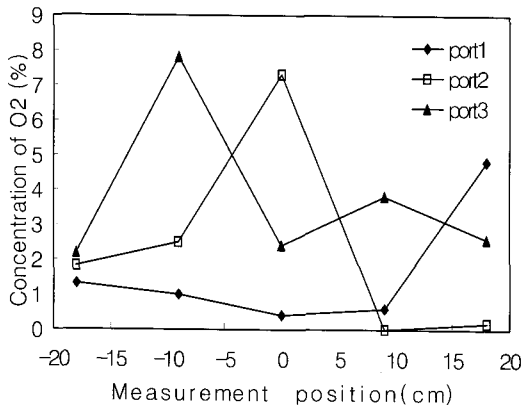


Fig. 14 O₂ concentration of measurement position (case 3)

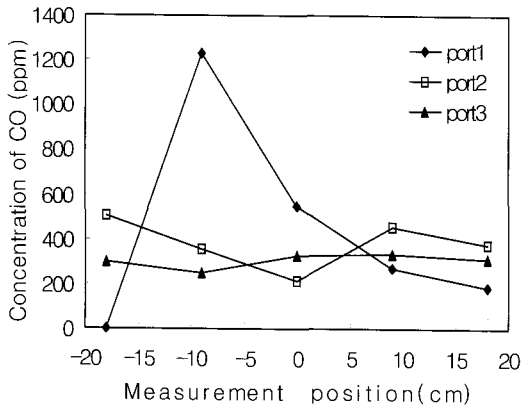


Fig. 15 CO concentration of measurement position (case 3)

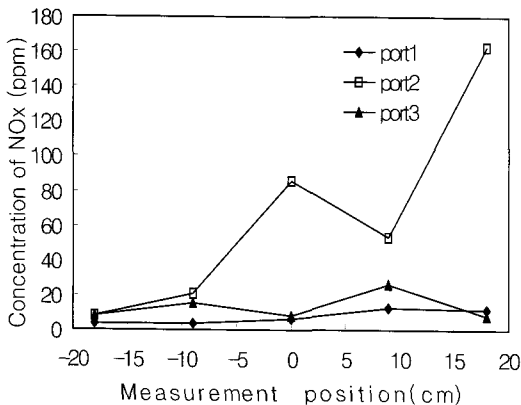


Fig. 16 NO_x concentration of measurement position (case 3)

Figure 14~16은 case 3에서의 위치별 가스농도를 보여준다. Fig. 14는 위치별 O₂농도를 나타내는데 port 1을 보면 당량비 이하로 주입된 공기에 의한 영향으로 O₂농도가 낮게 나타나지만 2차 공기에 의한 영향으로 port 2와 port 3에서 O₂농도가 올라감을 알 수 있다. Case 3는 case 1, 2에 비해 상대적으로 2차 공기의 양이 적고 3차 공기를 주입하였다. Fig. 15는 연소 효율을 보기위해 각 위치별 CO 농도를 나타낸다. 불완전 연소 영역인 port 1에서 CO의 농도가 높게 나타나지만 불규칙한 유동에 의해 뚜렷한 현상을 보이지 않고 한쪽으로 쏠리는 현상을 보인다. 하지만 출구 쪽으로 갈수록 CO의 농도가 낮아지는 것으로 보아 연소가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig. 16은 각 위치별 NO_x의 농도를 나타내는데 case 3에서는 2차 공기 주입량을 줄여 공기를 이룬 공기비 이하로 유지한 후 실제 공기량에 맞추기 위해 필요한 추가의 공기(3차 공기)를 상부의thermo stack을 통해 주입하는 다단 연소방식을 사용함에 따라 port 3에서 매우 낮은 NO_x가 배출되었음을 알 수 있다.

따라서 본 실험에서는 2차 공기에 의한 연소실 내부 유동에 따른 연소 성능이 중요함을 알 수 있었고, 다단연소에 의한 NO_x 저감효과를 입증할 수 있었다.

본 실험에서 측정된 O₂, CO, NO_x의 평균 오차는 각각 4.0 %, 16.3 %, 5.4 %이다.

4. 결론

시간당 30 kg의 폐기물을 처리할 수 있는 열분해 용융소각로 실험장치의 연소실 성능 시험을 위해 실험하였다. 연소실 실험은 2차, 3차 공기의 주입조건의 변화로 이루어지게 되는데 본 연구에서는 이에 따른 연소 특성 및 영향에 대해 알 수 있었다.

1) 2차, 3차 공기비에 따른 조건별로 실험한 결과 2차 공기의 주입량이 연소실내부 유동에 큰 영향을 줄 수 있었다. 따라서 연소실내의 혼합 및 연소효과에 2차 공기량을 조절함으로써 연소실 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

2) 3차 공기 주입에 의한 다단 연소방식은 NO_x 저감에 뛰어난 효과를 보였으며 연소성능의 향상으로 CO도 저감되었다.

후기

이 논문은 2004년도 에너지관리공단 에너지기술혁신사업(2004 - 2 - 0345)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] 최상심, 김석환, 김경래, “생활폐기물 열분해 용융시설 동부 R21,” *KOSCO SYMPOSIUM* 논문집, Vol. 28, pp. 314-328, 2004
- [2] (주) 효성에바라, “HYOSUNG-EBARA 가스화 용융시스템,” *KOSCO SYMPOSIUM* 논문집, Vol. 28, pp. 350-358, 2004
- [3] 정복석, 이동석, “직접용융자원화 시스템의 슬래그 재활용 방안,” *KOSCO SYMPOSIUM* 논문집, Vol. 28, pp. 329-349, 2004
- [4] 허일상, 김우봉, “세계의 폐기물처리기술 동향과 DAEWOO-TS 열분해 가스화 용융기술,” 한국환경독성학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 103-114, 2001
- [5] 최연석, 김석준, 최갑석, 권영배, 김부웅, “폐기물 고형연료(RDF)를 활용한 화력발전사업 타당성연구,” 한국폐기물학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 69-79, 2001
- [6] 이동규, 이종석, 곽현, 배성렬, “폐기물 고형연료(RDF)의 연소 특성,” 한국폐기물학회지, Vol. 22, No. 1, pp. 101-112, 2005
- [7] Wiinikka, H., Gebart, R., “Experimental Investigations of the Influence from Different Operating Conditions on the Particle Emissions from a Small-Scale Pellets Combustor,” *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, pp. 645-652, 2004
- [8] 김성중, 김승기, 유영돈, 최상민, “폐기물 소각로의 연소실 설계 고찰,” 한국폐기물학회지, Vol. 11, No. 4, pp. 619-629, 1994
- [9] Kim, S., Shin, D. H., and Choi, S. M., “Comparative Evaluation of Municipal Solid Incinerator Design by Flow Simulation,” *Combustion and Flame*, Vol. 106, pp. 241-251, 1996
- [10] 엄태인, 이금배, “스토커형 소각로의 2차공기가 연소실의 유도에 미치는 영향에 대한 실험 및 수치해석적 연구,” 대한환경공학학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 73-88, 1997
- [11] Turns, S. R., “An Introduction to Combustion,” *McGRAW-HILL*, 1st Ed, 1996, pp. 499.
- [12] 환경연구회편, “고체 폐기물 소각로 - 계획과 설계,” 문지사, 1993