

열분해 용융소각로 연소실의 2차공기 주입 영향에 관한 전산해석 및 실험

전병일* · 박상욱* · 신동훈* · 류태우** · 전금하*** · 황정호* · 이진호*

Effect of Secondary Air on Flow and Combustion Characteristics in a Pyrolysis Melting Incinerator

Byoung-Il Jeon*, Sang-Uk Park*, Dong-Hoon Shin*, Tae-Woo Ryu**, Kum-Ha Jeon***
Jung-Ho Hwang*, Jin-ho Lee*

ABSTRACT

In the present paper we studied experimentally fundamental optimization of oxygen enriched pyrolysis melting incinerator. Characteristics of this system was confirmed dealing with the gas flow and combustion properties for the inside secondary air injection. The experiment setup has a disposal rate of 30kg/hr which was measured by the inside temperature and gas. Along with above experiments, the three-dimensional computation was employed to analyse the combustion fluid dynamics and gas residence time. Equations for turbulence and heat-transmission as well as chemical reactions were solved by using common codes. The experimental combustion chamber was composed of staged combustion types structure for reducing NOx. Finally, it was verified that the control of the secondary air and air ratio of thermo stack were important. In the computational analysis, it showed reasonable agreement with the experimental results regarding the temperature and discharged gas concentration.

Key Words : Pyrolysis melting incinerator, Secondary air injection, Residence time, NOx, Computational analysis

기 호 설 명

CxHy : hydrocarbon

DTRM : discrete transfer radiation
model

NOx : nitrogen oxides

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 NOx와 SOx를 비교적 쉽게 제거 할 수 있는 장점이 있고 이와 더불어 다이옥신, 중금속등의 문제에도

* 연세 대학교

** 한국 생산기술 연구원

*** (주) 신원 E&B

† 연락처자, hwangjh@yonsei.ac.kr

장점을 갖는다. 국내에선 환경보호 측면에서 폐기물 소각 및 에너지 회수를 위한 관련 기술들이 활발히 연구되고 있으며 또한 상용화를 위해 검증단계를 거치고 있는데 다양한 열분해 용융 공정들이 국내에 소개되고 있으며 여러 업체에서 활발한 기술 도입이 추진되고 있다. 그중 R-21과 Evara 공정과 같이 보조열원 없이 폐기물 자체 발열에너지로 열분해 및 비산재 용융을 실현하는 공정들이 적용되고 있다. 그 외에, 제철소에서 사용하는 코크스를 보조열원으로 투입하는 고로형 용융로, 산소주입 및 LNG를 보조열원으로 하는 thermoselect 공정, 유동층 열분해 후 2차연소에서 비산재를 용융시키는 기포 유동층 가스화 용융로 등이 상용화에 성공하거나 근접한 공정으로 알려져 있다.

본 연구는 열분해 용융 소각로의 기초적인 소각 기술 향상 및 기초적인 소각로 설계와 제작 기술의 확보를 위하여 소각로 설계 시 가장 중요한 인자중 하나인 연소로 내부에서의 2차 공기주입에 따른 가스의 유동현상과 연소 특성에 관하여, 열분해 용융소각로 실험과 컴퓨터를 이용한 전산해석을 통해 고찰 하고자 한다. 연소실 내에서는 휘발분의 연소, 삼차원 유동, 대류 및 복사 열전달 등의 복잡한 현상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 현상에 대한 이해를 전산해석을 통해 설계에 반영하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 최근 전산유체역학 기법의 발달로 이러한 현상에 대해서는 비교적 정확하게 해석할 수 있는 수학적 모델이 정립되었다고는 하나 수치적인 처리과정에서 불가피한 오차들을 포함하게 된다.[1] 이런 이유로 소각 시스템의 연소실 현상에 관한 전산해석 연구는 비교적 적은 편이지만 영국의 Sheffield 대학의 Swithenbank 교수 그룹[2,3]이나 독일 Essen 대학[4]과 소각 관련 원본기술을 소유한 ABB[5], SEGHERS[6], Volund[7] 등 관련 회사들의 연구 사례가 있고 일본의 경우[8]도 다양한 연구가 산업계에서 이루어지고 있다. 국내에서도 관련 연구들이 진행되고 있다.[9-12,13,14] 이상의 연구에서는 모두가 복잡한 형상이나 다양한 세부 모델의 필요성으로 인해 FLUENT 등의 상용 코드를 이용하고 있다.

본 연구에서는 연소로내 연소현상에 대해 적절한 가정을 통하여 수분의 건조와 탈휘발분화 과정을 모델링 하였으며 휘발된 기체상 연료가 혼합 및 연소되는 과정을 해석하고자 하였다. 폐기물의 가연분은 탄소와 수소로 이루어진 걸로 가정하여 연료의 연소과정을 다성분/다단반응으로 설정하여 일산화탄소의 생성 및 연이은 이산화탄소로의 반응 등을 모델링에 포함시킴으로서 해석 결과의 정확도를 높이고자 하였다. 또한 연소의 결과로서 연소실은 고온 환경이 되며, 이러한

상황 하에서 난류유동과 함께 수반되는 대류 및 복사 열전달을 해석함으로써 국부온도 및 출구온도를 최대한 현실적으로 예측하였다. 연소실내의 유동장은 2차, 3차공기의 분사위치 및 특성에 따라 영향을 받는데 본 연구에서는 2차공기와 3차 공기량의 주입 비를 통해 그에 따른 영향을 분석하였다. 2차, 3차공기 주입비의 조절은 다단연소 방식의 일환으로 초기 연소에서 공기량을 줄여서 공기비를 이론공기비 이하로 유지하여 고온의 화염 영역에서는 환원성 분위기를 만들어 NOx 발생을 억제한 후 필요한 추가의 공기를 상부 로내로 주입 연소함으로써 상대적으로 저온 부위에서 완전 연소가 되도록 하는 것이다.[15]

실험 장치는 전산해석과 마찬가지로 연소로내 유입되는 2차, 3차공기량의 주입 비에 따라 실험을 하였으며 Gas 측정은 연소로내 Gas가 2차공기와 만나기 전과, 2차공기와 만나서 혼합이 된 후 그리고 3차공기와 만난 후 이렇게 세 곳에서 이루어졌다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 열분해로(pyrolysis chamber)와 용융로(melting furnace), 연소로(combustion chamber) 그리고, 후처리 장치인 cyclone으로 나누어진다. 열분해로는 아직 제작이 안 된 상태로 열분해로 대신 열분해로 입구에 연료로서 프로판가스를 주입 하였으며 용융로는 산소과잉 용융로로서 bubbling을 위한 공기주입부가 있다. 연소로는 열분해로에서 발생된 가스를 주입하는 부분과 2단으로 이루어진 2차공기제트와 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, 200mm 이다. 전체 높이는 4480mm이고 이중 용융로의 높이는 1430mm이고 연소로의 높이는 3050mm이다. 연소로의 2차공기제트의 내경은 10mm이고 2단으로 구성되어있으며, 스월(swirl) 효과를 이용해 가스의 혼합 및 연소효과의 향상을 위해 원의중심 방향에서 시계방향으로 10° 기울여 설계하였다. 2차공기 제트는 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 30°가 틀어져 있다. 3차공기가 주입되는 thermo stack은 2차공기제트 상단으로부터 800mm 위에 위치하며 연소로 내부 중심선 방향

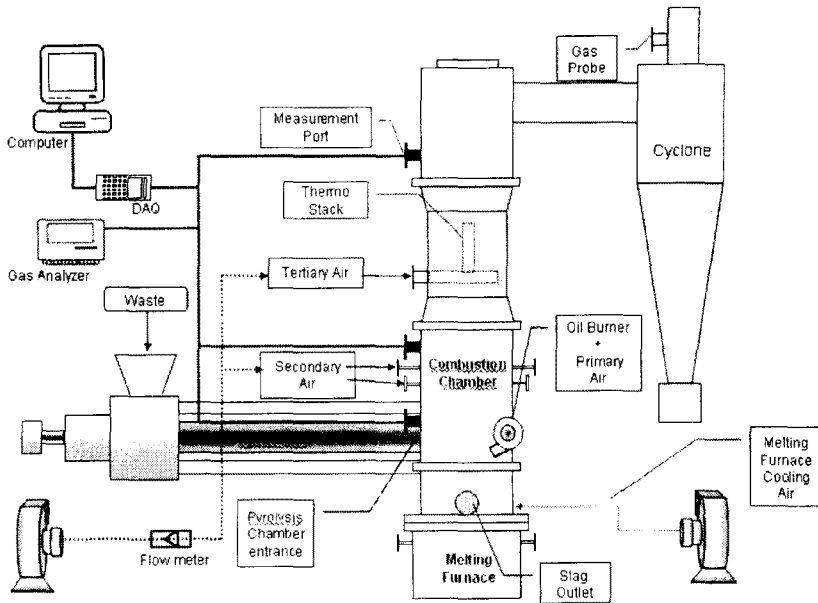


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

으로 세워져 있다. 길이는 약400mm 이고 내경은 80mm이다. 관측 포트는 총 3개로 Fig. 1에서 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 한 군데씩 있다. 온도는 데이터 인식 프로그램 DAQ-100을 통해 컴퓨터로 출력되어 저장되었고, 가스성분 측정은 gas analyzer를 통해 측정하였다.

Table 1 Proportion of air

	Primary Air	Secondary Air-1	Secondary Air-2	Tertiary Air
Case 1	1.18	0.06	0.06	0.00
Case 2	1.06	0.12	0.12	0.00
Case 3	1.02	0.12	0.12	0.04
Case 4	1.14	0.12	0.00	0.04

2.2 실험조건 및 방법

본 실험은 전체 4가지 조건을 가지고 실험 하였으며 그중 첫 번째 조건의 경우 위치별로 8곳에서 측정 하였다. 전체 공기비 1.3근처(산소농도 4~5%)를 유지하였다. 연소로 내부에 1차, 2차, 3차 공기 주입량의 비를 조절하여 실험 하였으며 2차공기의 경우 두 단으로 구분지어 2-1차와 2-2차로 나누었다. 그 비는 Table. 1과 같다. 또한 연소로내 버너는 경우 8kg/hr(Table. 2)를 유지 하였으며 열분해로 입구에서는 프로판 가스의 유량을 Table. 2와 같이 주입 했다. Table. 2에서 보면 1차 공기의 유량이 동일 한데 그 이유는 공기비 1.3을 유지 하기위해 1차 공기의 양을 고정시킨 후 2차, 3차공기와 프로판의 양으로 조절을 하였기 때문이다. 따라서 조건별 전체 유량은 각각 다르게 된다.

각 관측 포트는 2,3차 공기 주입효과를 알아보기 위해 2차 공기와 만나기 전, 2차공기와 만난 후 그리고 thermo stack 상부에 위치하게 했다.(Fig. 1) 온도는 k-type 열전대(thermocouple)

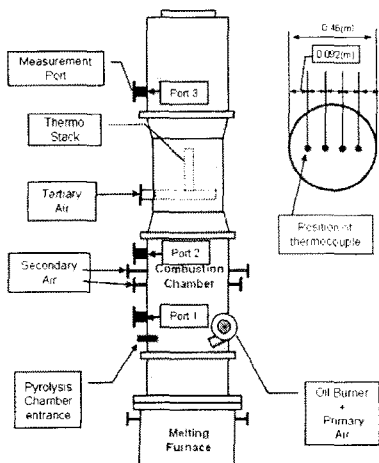


Fig. 2 Position of measurement ports

Table 2 Flow rate of air and fuel

	Total Air (m ³ /sec)	Primary Air (m ³ /sec)	Secondary Air-1 (m ³ /sec)	Secondary Air-2 (m ³ /sec)	Tertiary Air (m ³ /sec)	Propane (m ³ /sec)	Light oil (m ³ /sec)
Case1	0.0596	0.0539	0.00285	0.00285	0	0.00082	0.00113
Case2	0.0653	0.0539	0.0057	0.0057	0	0.00088	0.00113
Case3	0.0672	0.0539	0.0057	0.0057	0.0019	0.00075	0.00113
Case4	0.0615	0.0539	0.0057	0	0.0019	0.0006	0.00113

를 사용하였으며 각 포트마다 깊이별로 설치를 함으로써 각 부분의 온도를 실시간으로 모니터링 할 수 있었으며 또한 2차 공기 주입 후 가스의 유동 및 혼합정도를 알 수 있었다. 가스측정은 gas analyzer를 사용하였으며 O₂, CO, CxHy, NOx를 측정 했다. 앞에서 언급했듯이 O₂의 농도는 4~5%로 유지한 상태에서 CO, CxHy와 NOx의 농도를 측정했다. Gas analyzer로 측정하기 위해 측정 가스의 수분은 실리카겔(SiO₂·nH₂)을 통해 제거했고 높은 온도의 측정가스의 냉각을 위해 수냉식 가스프로브(water cooling-type gas probe)를 사용했다.

3. 수치해석 모델

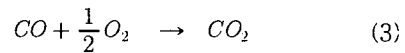
실험적 연구와 더불어 본 연구에서 사용된 전산해석 방법은 상용 CFD 코드인 FLUENT6.1.22를 이용한 3차원 해석이다. 3차원 CFD 해석을 위한 격자(mesh)생성에는 Gambit을 이용하였으며, 약 4만1천개의 volume mesh가 사용되었다. 일반적인 유동장, 난류특성, 에너지 및 화학종 농도 등의 전달현상을 나타내는 지배 방정식을 3차원 좌표계상의 일반형으로서 텐서 형식으로 나타내면 다음과 같다.[16]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S_{\phi} \quad (1)$$

위 식에서 ϕ 는 해석하고자 하는 종속변수로서 각 방향의 속도성분(u, v, w), 난류운동에너지(k), 난류운동에너지소산율(ϵ), 엔탈피(h) 및 각 화학종의 질량분율(m_i) 등을 각각 나타낸다. 그리고 ρ 는 밀도 Γ_{ϕ} 는 확산계수를 나타낸다. 난류모델로서 표준 k- ϵ 모델을 사용했으며, 복사모델은 DTRM모델 및 연소현상에 대해서는 난류의 영향과 반응을 고려할 수 있는 유한 반응율 모델(finite-rate/eddy-dissipation)을 선택하였다. 본 연구에서 쓰레기의 연소반응은 쓰레기 성상 중 수분은 건조 및 연소부에서 증발 하고, 가연분은 기체 상태로 변화된 연료인 C₃H₈의 형태로서 연료와 연소용 공기의 2단연소 반응(methane-air 2 step reaction)으로 다음과 같이 모델링 하였다.

이는, 실제쓰레기의 휘발분은 많은 종류의 화

$$\sum_{k=1}^n (C_k H_{y_k} O_{z_k} + [\frac{x_k}{2} + \frac{y_k}{4} + \frac{z_k}{2}] O_2) \rightarrow \sum_{k=1}^n (x_k CO + \frac{y_k}{2} H_2O) \quad (2)$$



학물질로 이루어져 있는데 이에 대한 정보는 부족한 실정이어서 이들을 수개의 대표적인 특성을 가지는 그룹으로 분류하여 연소모델을 설정하고 다성분 물질에 대한 2단(two-step)연소반응으로 모델링 하였다. 연소가스의 밀도는 혼합기체에 대한 상태방정식으로부터 구하였으며 물성치중 국부적인 온도 분포에 비교적 중요한 영향을 미치는 연소가스의 비열은 각 화학종별로 온도의 2차 함수를 이용하여 처리하였다. 연소가스의 점도 및 열전도도는 평균온도에서의 혼합기체에 대한 평균값을 이용하였고, 휘발분의 비열은 공학적으로 크게 어긋나지 않는 범위내에서 가정한 값을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 결과

Fig. 3~6은 연소로의 각 포트별 네 곳의 위치에서 측정된 온도분포를 나타내며 각 그림은 case별로 측정된 것이다. 각 포트는 연소로 내부에 2차 공기 및 3차 공기를 주입하기 전과 후의 위치별 온도이기 때문에 각각은 온도차가 있게 된다. 포트(port)는 연소로 높이별로 위치하는데 포트1은 2차 공기 주입 전, 포트2는 2차 공기 주입 후, 포트3은 3차 공기 주입 후의 부분에 위치한다. (Fig. 2) 포트 3에서 온도를 상대적으로 낮춘 이유는 thermal NOx의 저감효과를 위함이다. 각 포트별 네 곳의 온도가 균일한 이유는 2차공기의 주입에 따른 swirl 효과로서 가스의 혼합이 비교적 잘 이루어짐을 보여준다. Fig.7은 산소농도를 나타낸다. 산소농도는 공기비 1.3일때 약 4.55%인데 포트 1에서 측정된 결과 아직 2차 공기 주입 전이기 때문에 농도가 낮다. 포트 2에서는 2차 공기 주입 후 산소농도가 높게 나타나

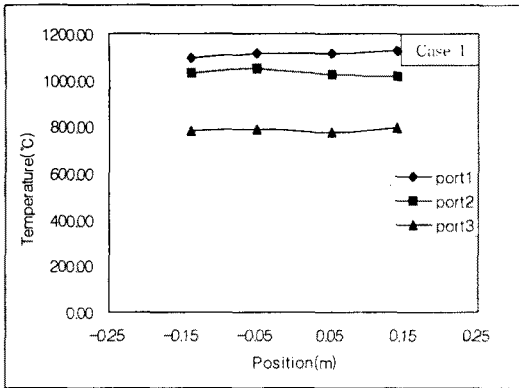


Fig. 3 Temperature distribution in the combustion chamber

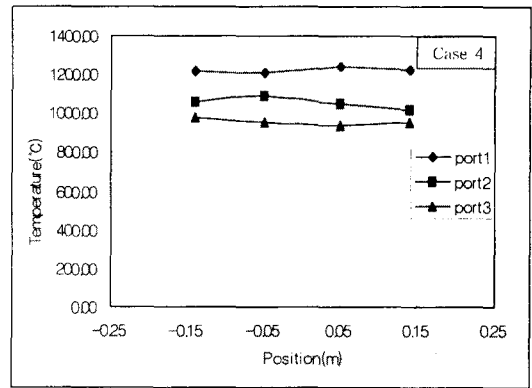


Fig. 6 Temperature distribution in the combustion chamber

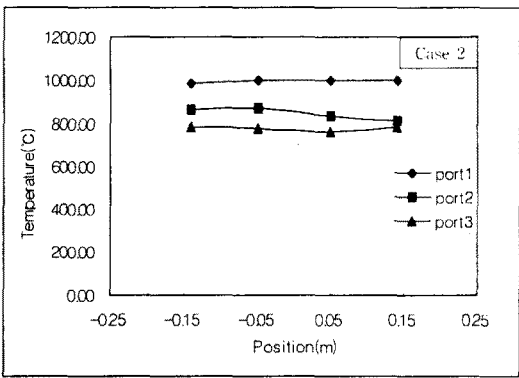


Fig. 4 Temperature distribution in the combustion chamber

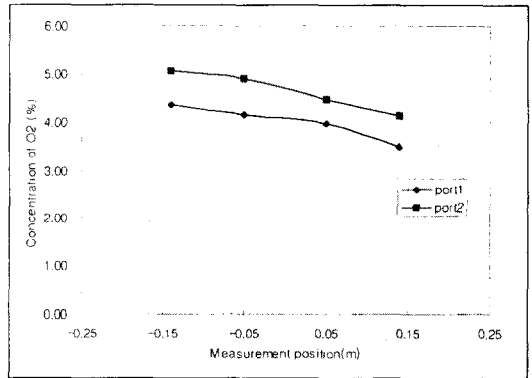


Fig. 7 O₂ concentration of measurement position

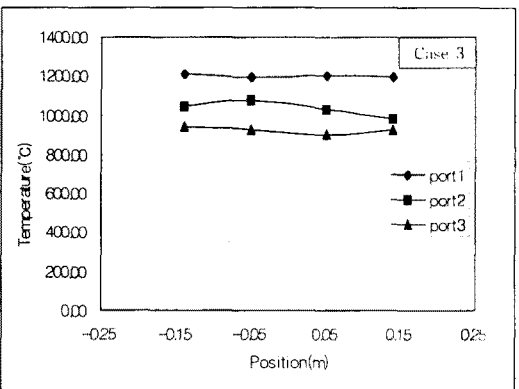


Fig. 5 Temperature distribution in the combustion chamber

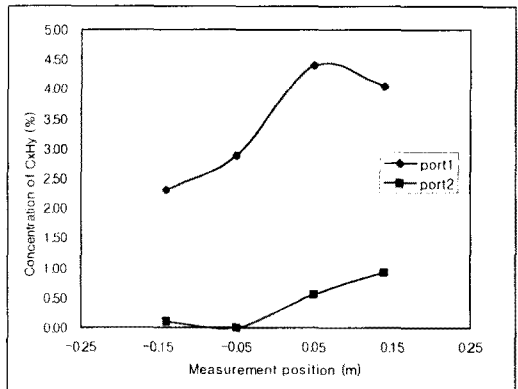


Fig. 8 C_xH_y concentration of measurement position

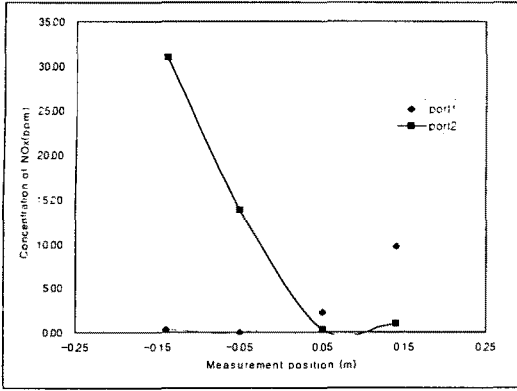


Fig. 9 NOx concentration of measurement position

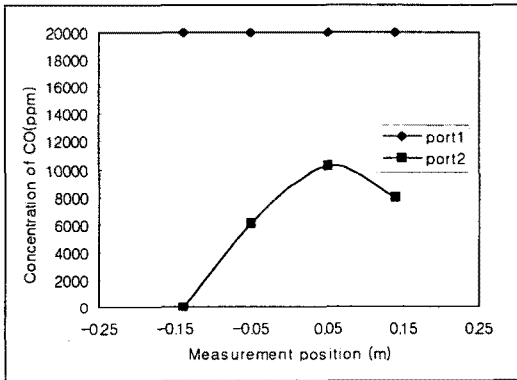


Fig. 10 CO concentration of measurement position

는걸 알 수 있다. Fig. 8은 탄화수소류(CxHy)의 농도를 나타낸다. 탄화수소류는 포트1에서 농도가 높게 나타나지만 2차 공기 주입 이후인 포트2에서는 1%이하로 적게 나타난다. 이는 2차공기의 혼합에 의한 연소효과가 나타났다고 할 수 있다. Fig. 9는 위치에 따른 NOx의 농도변화를 나타낸다. 포트 1은 전반적으로 산소부족 분위기이므로 NOx 생성이 적은 반면, 연소 투입이 완결된 중단포트에서는 비교적 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 10은 CO의 농도분포를 보여주는데 CO는 불완전 연소 분위기 때문에 매우 높게 나타나는데 이 값들은 출구에 가까이 가면 연소가 진행되어 급격히 줄어든다. Fig. 10의 포트 1에서의 농도가 전부 20000(ppm)으로 나타나는 이유는 가스분석기의 CO측정 범위가 20000을 넘지 못함에 의한 것이다.

Fig. 7~10을 보면 2차 공기 주입 후의 위치인 포트 2에서도 각 측정위치별로 농도가 균일하지

Table 3 Concentration of exhaust gas

	NOx(ppm)	CO(ppm)	CxHy(%)
Case 1	58(64~56)	43(23~54)	0.18(0.17~0.19)
Case 2	31(40~26)	17(12~22)	0.18(0.12~0.27)
Case 3	26(24~33)	9(6~10)	0.12(0.11~0.14)
Case 4	27(25~29)	7(3~9)	0.11(0.11~0.12)

* () 안은 최대값과 최소값을 의미함

못함을 볼 수 있다. 이는 2차공기의 주입 속도에 비해 하부에 위치한 버너의 유속이 상대적으로 너무 강해 swirl 효과가 제대로 일어나지 못함으로서, 혼합이 제대로 이루어지지 못함을 알 수 있다.

Table 3는 연소실 출구에서 배출되는 가스의 일정 시간동안의 평균 농도를 조건별로 나타낸 것이다. 각각의 조건은 1, 2, 3차 공기비의 변화에 따른다.(Table 2) 주요 공해물질인 NOx와 일산화탄소 그리고 탄화수소계열은 연소조건을 파악하는데 중요한 인자이다. 조건 1에서는 Table 2에서 보듯이 2차공기의 유량이 적고 3차공기가 주입되지 않는 조건에서 운전되었다. 따라서 NOx와 CO의 농도가 가장 높아 2차 공기 주입부에서의 가스 혼합 및 연소가 제대로 이루어지지 않음을 알 수 있다. 조건 2에서는 2차 공기의 유량이 많아짐으로서 2차 공기 주입부에서 어느 정도 가스의 혼합이 이루어져 오염물질이 줄어들었다. 조건 3에서는 2차 공기 주입량을 줄여 공기를 이론공기비 이하로 유지함으로써 고온의 화염영역에서 환원성 분위기를 만들어 NOx발생을 억제한 후 실제 공기량에 맞추기 위해 필요한 추가의 공기(3차 공기)를 상부의 thermo stack을 통해 주입해 상대적으로 저온부위에서 완전 연소가 되도록 해 NOx와 CO의 농도가 낮아졌다.[15] 조건 4는 조건 3에서 2차 공기주입부의 한 단을 막음으로서 2차 공기 유량이 조건 1과 같아졌으나 오염물질 배출은 가장 적음을 알 수 있다. 이는 2차 공기 주입부를 2단으로 함은 별 의미가 없음을 알 수 있고, 3차 공기 주입의 중요성을 알 수 있다.

4.2 수치해석 결과

본 연구는 향후 건설 예정인 상업용 소각로 연소실의 성능 실험 및 예측을 하고자 하였다. 시간당 처리 용량이 30kg인 소각로의 연소실에서 2차, 3차 공기의 분사 조건의 변화에 따른 혼합 및 연소성능을 중점적으로 고찰 하였다. 폐기물 연소와 같이 불확실성을 지니고, 참고할만한 선행 연구가 부족한 상황에서 실험을 통한 연구만으로는 한계가 있음으로 수학적 모델링의 검증이 선행되어야 한다고 판단하였다. 이를 위해 본 해석은 실험을 통한 자료를 활용하여 수치해석 결

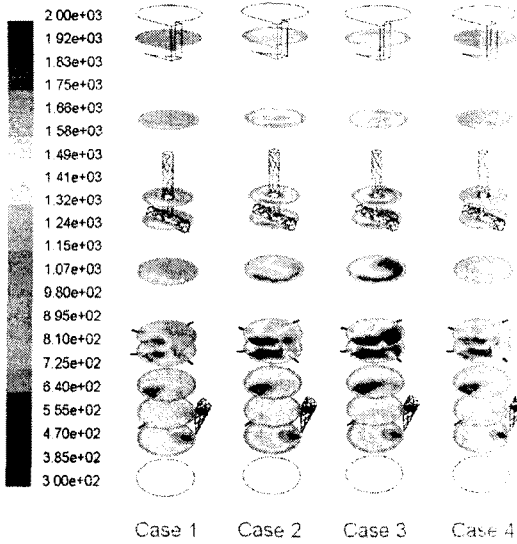


Fig. 11 Computational results of temperature

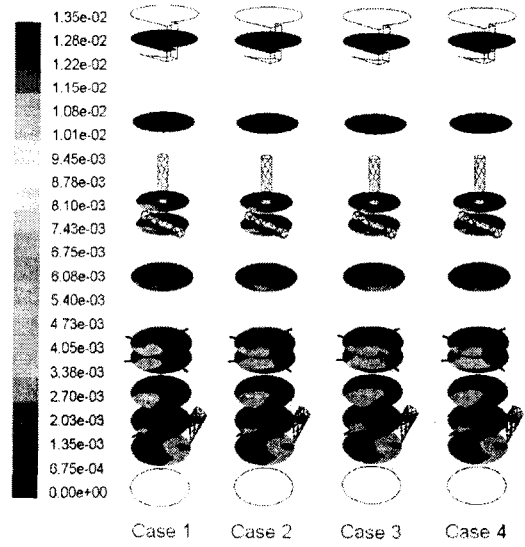


Fig. 13 Computational results of CO

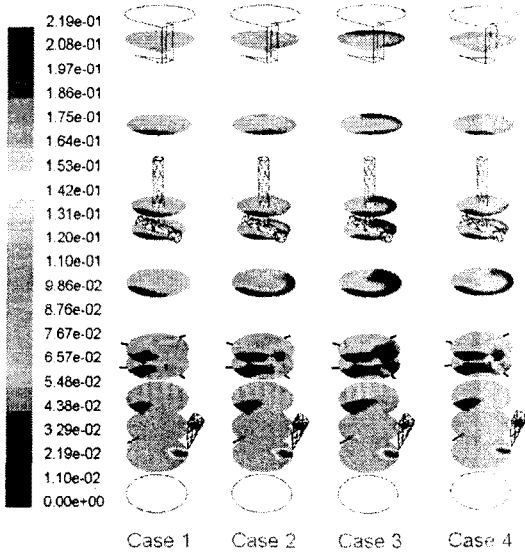


Fig. 12 Computational results of O₂

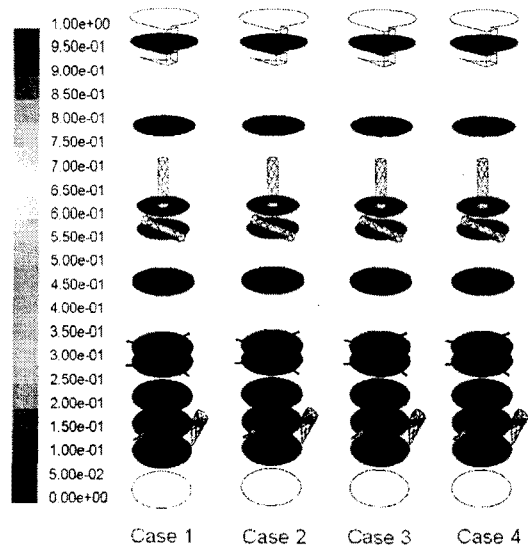


Fig. 14 Computational results of C_xH_y

과와 비교 검토 하였다.

본 해석은 실험조건과 같은 조건으로 전체주입 mass flow rate(kg/s)와 출구에서의 mass flow rate를 맞춰주었고 출구에서의 산소 농도 5%를 맞춰주었다. Fig. 11를 보면 조건별 온도 분포를 보여주는데 2차 공기 주입부에서의 혼합 효과를 볼 수 있다. 연소로 하부에서 버너와 열분해 가스가 만나 온도가 점점 상승한 후 2차 공기주입 부근에서 최대 온도값을 나타나게 되고, 2차 연

소실에서 대류 및 복사 열손실로 인하여 온도가 하강한 후 출구로 빠져 나가게 된다. Fig. 12는 산소농도를 보여주는데, 산소농도는 출구에서 4~5%로 맞춰주었다. Fig. 13과 Fig. 14는 CO와 탄화수소류의 농도분포이다. CO와 탄화수소류는 실제 실험과는 달리 완전연소 된 결과 나와 실험값과의 약간의 차이를 나타냈다.

수치해석 결과 기대했던 것과는 달리 2차 공기 주입에 의한 혼합효과가 적게 나타나는데 이는

버너의 유량이 너무 많아 2차공기의 유동을 방해하는 현상 때문으로 보여지며, 또한 2차 공기의 유량은 상대적으로 너무 적어 유속이 느려져 제대로 된 혼합효과를 기대하기 어렵다. 이에 따라 2차공기의 유량을 늘이고, 버너의 위치를 바꾸고 유량을 조절하는 등 2차공기의 유동을 방해하지 않도록 해야 하겠다.

5. 결 론

시간당 30 kg의 폐기물을 처리할 수 있는 소각로 실험장치를 연소로의 성능 시험을 위해 실험하였다. 실험은 폐기물을 직접 연소하지 않고 열분해로를 통해 프로판 가스를 주입하여 연소로 실험을 하였기 때문에 오염물질이 많이 배출되는 않았지만 다단연소의 특성 및 2차 공기주입의 영향에 대해 알 수 있었다. 또한 수치 해석을 통해 실험값의 신뢰성을 높이고자 하였으나 정확하게 일치하는 값을 얻지는 못하였다.

1) 공기비에 따른 조건별로 실험한 결과 2차공기의 주입량에 따라 연소로내의 혼합 및 연소 효과에 영향을 미침을 알 수 있었다. 하지만 2차 공기 주입부의 단을 2단으로 하는 방식은 큰 효과가 없음을 확인하였다.

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

3) CFD 해석결과 실험과 크게 일치하지는 않았으나 실험 데이터와 마찬가지로 버너에 의한 2차 공기 주입부 유동의 영향을 알 수 있었고, 이에 혼합이 제대로 이루어지지 못함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 주관 및 연세대학교, 포항산업과학기술연구원, (주)신원이엔비가 연구기관으로 참여하고 있는 차세대 핵심 환경기술개발사업의 '축열식 고온용융 소각로 개발'과제의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

[1] 이진욱, 박병수, 서정대, 허일상, "2차 공기 분사특성에 따른 소각로 연소실 유동장 변화 고찰," 제18회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 1999, pp. 125-135.
[2] V. Nasserzadeh, J. Swithenbank and B. Jones, "Effect of High Speed Secondary Air

Jets on the Overall Performance of a Large MSW Incinerator with a Vertical Shaft," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 92, 1993, pp. 389-422.

[3] V. Nasserzadeh, J. Swithenbank, C. Schofield, D.W. Scott and A. Loader, "Effects of High Speed Secondary Air Jets and Internal Baffles on the Gas Residence Times in Large Municipal Incinerators," *Environmental progress*, Vol. 13, No. 2, 1994, pp. 124-133.

[4] T. Klasen and K. Gøner, "Numerical Simulation and Optimisation of a Large Municipal Solid Waste Incinerator Plant," *The 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 4-6 July, Sheffield, UK, 1999.

[5] O.Riccius, A. Walther and B. Stoffel, "Design of Waste Incinerators Utilising CFD," *The 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 4-6 July, Sheffield, UK, 1999.

[6] M. Périlleux, G. Creten, K. Peeters, J. Kümel, K. Görner, "Optimisation of Boiler Design for the Largest MSW Incineration Unit in Belgium and Experience with the "SEGHERS-IBB PRISM" as Improvement for Boiler Performance," *The 3rd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 2-4 July, Brussels, Belgium, 2001.

[7] O.H. Madsen, S.binner and K. Jorgensen, "Modern Design Technologies for Thermal Optimisation and Pollutant Control in MSW Incinerator Plants," *The 1st Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 7-8 July, Sheffield, UK, 1997.

[8] Y. Kori and R. Takeya, "Cross Jet Mixing and Its Effects on Combustion Performance in MSW Incinerators with Natural Gas Reburning," *The 3rd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 2-4 July, Brussels, Belgium, 2001.

[9] S. Kim, D. Shin and S. Choi, "Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Designs by Flow Simulation," *Combust. and Flame*, Vol. 106, 1996, pp. 241-251.

[10] D.Shin. C. Ryu and S. Choi, "Computational Fluid Dynamics Evaluation of Good Combustion Performance in Waste

- Incinerator," *J. of the Air and Waste Management Association*, Vol. 48, 1998, pp. 345-351.
- [11] C. Ryu and S. Choi, "Design Consideration for the Cross Jet Air Mixing in the MSW Incinerators," *Int. Journer of Energy Research*, Vol. 21, 1997, pp. 695-706.
- [12] C. Ryu and S. Choi, "3D Simulation on Jet Air Mixing in the Municipal Solid Waste Incinerators," *Combust. Sci. and Tech*, vol. 119, 1996, pp. 155-170.
- [13] 박병수, 이진욱, 서정대, 강승관, "도시 폐기물 소각로 파일럿 플랜트 실험을 통한 연소신 해석 모델 설정 및 결과 고찰," *한국폐기물학회 춘계 학술대회*, 대전, 1999, pp. 131-136.
- [14] 권순우, 이종협, " 화학반응을 고려한 스토커식 소각로의 3차원 모사연구," *HWAHAK KONG-HAK*, Vol. 36, No. 3, 1998, pp. 353-363.
- [15] Turns, S. R., "An Introduction to Combustion," *McGRAW-HILL*, 1stEd, 1996, pp. 499.
- [16] Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow," *Hemisphere publishing*, Washington, 1980.