

상업용 소각로 연소실 성능예측을 위한 수치해석 연구

이진욱* · 박병수* · 윤용승* · 서정대** · 허일상***

Numerical Analysis for the Performance Prediction of Combustion Chamber of Commercial Incinerator

Jin Wook Lee, Byung Soo Park, Yongseung Yun, Jung Dae Seo
and Il Sang Huh

Key Words : Incinerator, Combustion chamber, Numerical analysis, Secondary air,
Flow pattern, Recirculation zone

Abstract

Numerical analysis for the combustion flow in the combustion chamber of incineration system has been carried out in order to acquire the basic design capability of incineration system.. Established mathematical model was applied to the performance prediction of the pre-designed combustion chamber of commercial plant. Especially, combustion characteristics and the variation of flow pattern have been deeply discussed in accordance with secondary air injection. Secondary air injection was effective for the turbulent mixing between air and carbon monoxide/volatile matter resulting in considerably reduced CO content at the exit. Secondary air injection was found to be one of the key design parameters because the size of recirculation zone could be changed with the variation of injection characteristics.

1. 서 론

국내의 경우 1일당 생활폐기물 발
생량은 5만톤에 육박하고 있으나, 이중

소각처리 비율은 약 7.1%(1997년 기준)
로서 아주 낮은 수준이며 향후 쓰레기
처리에서 소각이 차지하는 비중은 점차
높아질 전망이다. 국내에서 가동되는 대
형소각로의 경우 대부분이 외국기술에
의존하고 있는 상황인데, 국내 쓰레기는
고수분 및 저발열량의 특성을 지니기 때
문에 외국기술을 직접 적용한 경우 운전
에 비교적 많은 어려움이 있었던 것으로

* 고등기술연구원 재료/공정연구실

** 대우중공업(주) 선박해양기술연구소

*** (주)대우-건설 플랜트본부

알려지고 있다. 이러한 상황을 고려할때, 국내 자체 기술에 의한 소각로 설계능력의 확보는 필수불가결하다고 할 수 있겠다.

도시쓰레기 소각시스템의 연소실내에서는 삼차원유동, 쓰레기의 연소, 대류 및 복사열전달 등의 복잡한 현상이 존재하게 된다. 따라서 소각시스템의 국내기술 자립을 위해서는 이러한 현상에 대한 이해를 통하여 설계에 반영하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 최근 전산유체역학 기법의 진보 및 컴퓨터의 발달로 이러한 현상에 대해서 해석할 수 있는 수학적 모델은 대부분 정립되었다. 그러나 공간에서 연소가 일어나는 대부분의 연소시스템과는 달리, 소각연소실의 경우에는 불균질성의 특성을 갖는 쓰레기 층내에서 매우 복잡한 현상의 존재하게 된다. 이러한 상황은 전산유체역학 해석에 필수적인 경계조건 및 해석영역 내에서 발생하는 제반현상에 대한 불확실성을 야기한다. 이와 같은 어려움으로 인하여 소각시스템의 연소실내 현상에 대한 전산해석 연구는 비교적 적은 편이나 최근에는 영국의 Sheffield 대학에서 전산해석 연구결과들이 발표되고 있고^(1,2), 소각로 제작업체들인 ABB나 ANSALDO 등에서는 연소실내의 가스상 연소에 대한 전산해석연구를 수행하여 설계에 반영하고 있는 것으로 보고되고 있다^(3,4). 또한 국내의 연구진에 의해서도 연소실내의 유동장 및 2차 공기의 분사 특성에 따른 체류시간 분포 등에 대한 다양한 수치해석 연구가 진행되었다^(5,6,7).

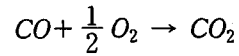
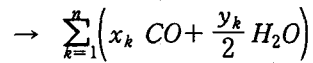
본 연구에서는 화격자위에서의 수분의 건조 및 가연분의 연소 등의 과정을 기체상으로 단순화하여 연소실내의 열유

동장을 해석하고자 시도하였다. 쓰레기의 가연분을 탄소 및 수소 등으로 이루어진 기체상 연료로 가정하고, 이의 연소과정을 다성분/다단반응으로 설정하여 일산화탄소의 생성 및 연이은 이산화탄소로의 반응 등을 모델링에 포함시킴으로써 해석결과의 정확도를 높이고자 시도하였다.

상기에서 언급한 바와 같이 도시쓰레기의 연소과정을 모델링하는 데에는 많은 어려움이 존재한다. 이와 같은 제약을 최대한 해결하기 위하여서는 신뢰할 만한 모델링 기법의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 과일롯 플랜트 측정 결과들과 비교/검토를 통하여 개발되어 비교적 정확한 값을 제시한다고 판단되는 모델링 기법^(8,9)을 이용하여 전산해석을 수행하였다.

본 연구에서는 상업용 플랜트로 건설될 예정인 소각로의 예비설계 연소실에 대한 전산해석을 통하여 온도장, 유동장 및 산소 농도의 분포특성 등의 연소실내에서 일어나는 제반 상황을 이해하고자 하였으며, 특히 2차 공기 분사위치에 따른 영향을 중심으로 고찰하였다. 2차 연소실의 재순환영역은 시간평균적으로는 유동의 진행에 관여하지 못하여 연소가스의 실질적인 체류시간을 감소시키며, 결과로서 다이옥신 등의 공해물질의 완전한 파괴에 부정적인 영향을 가져올 수 있다. 이에 본 연구에서는 2차 공기 무분사 조건을 기준으로 하여, 분사방법에 대한 몇가지 설계안에 대하여 문제점을 분석하고, 2차 연소실의 재순환영역 크기 변경에 대한 비교를 통하여 상대적으로 우수한 결과를 나타내는 안을 선정하고자 시도하였다. 이러한 연구는 2차

공기 노즐 설계의 방향을 제시함과 동시에 연소실 형상설계에 대한 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

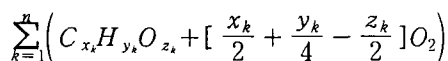


2. 수학적 모델

일반적인 유동장, 난류특성, 에너지 및 화학종 농도 등의 전달현상을 나타내는 지배 방정식을 3차원 좌표계상의 일반형으로서 텐서형식으로 나타내면 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

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

위 식에서 ϕ 는 해석하고자 하는 종속 변수로서 각 방향의 속도성분(u, v, w), 난류운동에너지(k), 난류운동에너지소산율(ϵ), 엔탈피(h) 및 각 화학종의 질량분율(m_i) 등을 각각 나타낸다. 그리고 ρ 와 Γ_ϕ 는 밀도와 확산 계수를 각각 나타낸다. 수치해석을 위하여 범용 열유체해석 코드인 Fluent를 사용하였으며, 난류모델로서 표준 k- ϵ 모델, 복사모델로서 P-1 model 및 연소현상에 대해서 제한속도 반응모델(Finite Rate Reaction Model)을 선택하였다. 본 연구에서는 쓰레기의 연소반응의 해석을 위하여, 쓰레기 성상 중 수분은 건조 및 연소부에서 증발하고, 가연분은 기체상태로 변화된 연료인 $C_xH_yO_z$ 의 형태로서 연료와 연소용 공기가 2단 연소반응(two-step reaction) 과정을 거치는 것으로 가정하여 다음과 같이 모델링하였다.



즉, 실제 쓰레기의 가연분이 건조 및 휘발과정에서 많은 종류의 화학물질로 변환된 후 연소과정을 거치는 것으로 추측되는데, 이들에 대한 상세한 정보는 아주 부족한 실정이다. 따라서 이들을 수개의 대표적인 특성을 가지는 그룹으로 분류하여 연소모델을 설정하는 것이 바람직하다고 판단었다. 본 연구에서는 폐기물의 가연분을 전부 휘발분으로 가정하였으며(이하 가연분을 휘발분으로 표시함.), 휘발분을 각각 다른 연소특성을 지니는 2가지 성분 및 수분을 포함하는 1가지 성분 등 총 3가지 성분으로 분류하여 2단(two-step) 연소반응으로 모델링하였다.

폐기물 속에는 액체상태의 수분이 포함되어 있으며, 수분은 연소실내에서 주변의 에너지를 흡수하며 증발하게 된다. 본 연구에서는 폐기물내 수분의 증발을 반응속도가 아주 빠른 가상의 흡열 반응으로 처리하여 건조부 및 주연소부의 화격자 상단에서 수증기가 발생하게 모델화함으로써, 연소실 설계를 위한 기본사항인 연소실내의 열 및 물질정산을 만족시킴과 동시에 이전에 사용되던 방법들에 비하여 수치해석적 처리를 손쉽게 할 수 있도록 하였다.

이러한 접근 방법은 불규칙한 거동을 하는 폐기물을 포함하는 1차 연소실, 특히 폐기물 층 근처에서의 제반 변수에 대한 정량적 예측에는 한계가 존재할 것으로 판단되나, 2차 연소실의 열유동장

은 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 연소가스의 2차 연소실 체류시간 향상을 위한 2차 공기 기본설계안 제시 또는 기하학적 형상의 문제점 분석을 통하여 최적형상 설계를 위한 도구로서 적절하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 향후 건설예정인 상업용 소각로 연소실의 성능 예측 및 개선점을 찾기 위한 연구를 수행하였다. 특히, 하루 처리용량이 50톤인 상업용 소각로의 연소실에서, 2차 공기 분사 조건의 변화에 따른 연소실내 특성 변화를 중심으로 고찰하였다. 본 연구에 적용된 상업용 소각로의 개략적인 운전 조건과 해석의 경우에 대한 요약을 Table 1 과 Table 2에 각각 나타내었으며, 연소실의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 쓰레기의 성분 및 발열량은 대략적으로 우리나라 쓰레기의 평균값으로 볼 수 있는 수치이다.

Table 1 Typical operating condition of commercial incinerator.

폐기물 조성 (wt. %)	C : 19.87, H : 3.01, O : 14.09, N : 0.72, Moisture : 47.00, S : 0.05, Cl : 0.23, Ash : 15.03
발열량	1600 Kcal/kg (LHV)
투입량	2083 kg/hr (50 ton/day)
연소용 공기량	과잉공기비 1.84 (1,2차 공기 합) 1차 : 2차 = 80% : 20%
Hopper별 1차 공기 분배	# 1 : 16.8%, # 2 : 33.7%, # 3 : 43.8%, # 4 : 5.0%, # 5 : 0.7%
공기 예열온도	1차 공기 : 105°C 2차 공기 : 상온(25°C)

Table 2 Summary for the different three cases in accordance with secondary air injection.

	2차 공기 분사 조건	노즐 숫자 및 분사위치
case 1	무분사	-
case 2	수평분사	전벽 3, 후벽 4 (Fig. 1의 A 위치)
case 3	1차 연소실 방향 분사	전벽 3, 후벽 4 (Fig. 1의 B 위치)

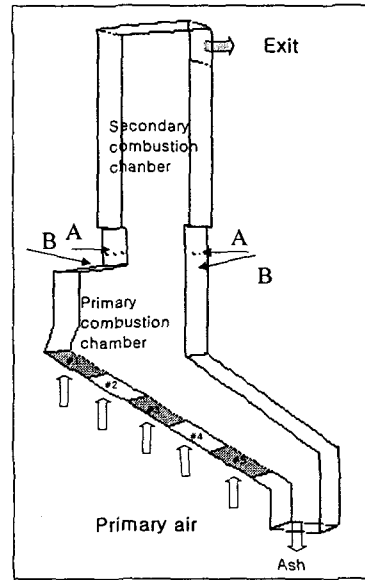


Fig. 1 Schematic diagram of combustion chamber of incinerator applied to the numerical analysis.

우선 2차 공기를 분사하지 않는 경우에 대한 전산해석 결과를 고찰하고자 하며, 이 경우는 1차 공기만에 의한 운전시에 대한 예측의 역할과 함께, 2차 공기의 영향을 상대적으로 판단하는 기준으로 활용될 수 있다. Fig. 2는 case 1에 대한 해석결과로서 온도장 및 속도백

터를 나타내고 있다. 폐기물 연소의 시작으로 인하여 화격자 위치에서 1차 연소실의 상부로 진행함에 따라 온도가 급격히 증가하여 2차 연소실 입구 근처에서 최대 온도값을 나타내게 되고, 2차 연소실에서 대류 및 복사 열손실에 의하여 온도가 약간 하강한 후 출구로 빠져나가게 된다. 이 경우 출구온도는 약 920°C로서 약 9%의 열손실에 해당되는 온도이다. 따라서 적절한 수준의 내화재 시공이 이루어 진다면, 수치해석의 오차 및 수%의 열작감량 등을 고려하여도 출구온도는 900°C 이상이 될 것으로 판단되었다. 연소실내의 속도 벡터인 Fig. 2(b)에서는, 1차 연소실의 경우 건조부 및 주연소부에서 유동이 활발하며 후연소부에서는 미약한 유동형상을 나타내고 있다. 이와 같이 건조부와 주연소부에서 상승하는 많은 양의 연소가스가 우측 상단에 위치한 출구로 방향을 변경하는 기하학적 형상의 특성상 2차 연소실 좌측 상단에 재순환영역이 형성되고 있다. 소각로 2차 연소실에서의 재순환영역은 연소특성 향상에는 긍정적인 효과가 없을 것으로 판단되는 반면에 유동의 진행 측면에서는 연소가스의 실질적인 체류시간을 감소시키는 부정적인 효과를 가져온다. 따라서 적절한 2차 공기 분사방법의 선정 또는 연소실 형상변경을 통하여 최소화를 도모하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 2차 연소실 입구 근처 단면에서의 속도 벡터 및 산소의 물분율(wet basis)을 보여 주고 있다. 속도 벡터에서 전벽(좌측)에서 후벽(우측)으로 향하는 유동장이 비교적 뚜렷하게 관찰되고 있다. 연소실의 건조부와 주연소부에서 발생한 상대적으로 많은 양의 연소

가스가 지나는 우측으로 향하는 속도성분은 Fig. 2(b)에서 관찰된 2차 연소실 전벽 상단부의 재순환영역의 형성 원인이 되고 있다. 산소의 물분율 분포도에서는 후벽 근처에 비하여 전벽 근처에서의 산소 물분율이 상당히 낮음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 경향은 일부 미연분이 포함될 가능성이 있음을 시사하므로, 플랜트 운전시에는 건조부 및 주연소부로 Table 1의 분배량보다 많은 양의 공기를 공급하는 방안이 검토되어야 할 것으로 판단되었다.

연소실내 또는 출구의 일산화탄소는 다이옥신 생성의 직접적인 지표는 될 수 없으나, 완전연소로 접근할 경우 다이옥신 전구체의 생성을 억제하여, 저감을 위한 필요조건지 지표로서 활용될 수 있는 것으로 알려져 있다⁽¹¹⁾. 따라서 일산화탄소의 생성 및 소멸에 관한 고찰은 공해물질 감소를 위한 설계에 중요한 정보를 제공할 것이다. Fig. 4는 일산화탄소 및 휘발분의 물분율을 나타내고 있는데, 예측할 수 있는 바와 같이 화격자 상부에서 아주 높은 값을 보여주고 있으며, 상부로 진행함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 경우 출구에서의 일산화탄소 농도는 약 140 ppmv로서, 2차 공기를 분사하는 경우와의 비교를 위하여 일산화탄소의 연소반응 모델상수를 인위적으로 조정하여 얻은 결과이다. 휘발분의 분포도는 일산화탄소의 분포도와 거의 유사한 경향을 보이고 있으며 소멸위치가 조금 빠른 경향을 보이고 있는데, 이는 일산화탄소는 휘발분의 1차 연소에서 발생하고 연이어 이산화탄소로 전환된다는 모델링의 가정에서 발생하는 자연스런 결과이다.

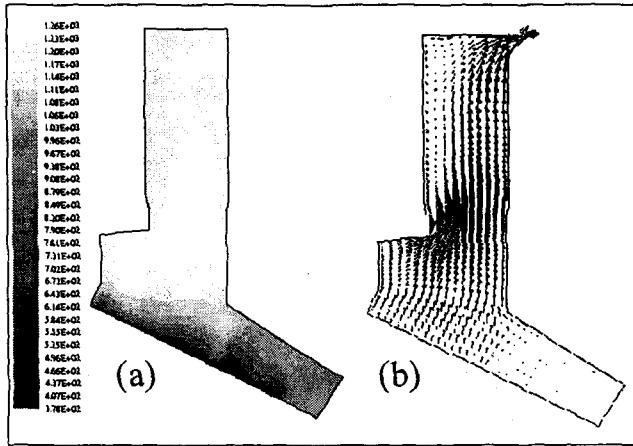


Fig. 2 (a) Temperature contour and (b) velocity vector plots at the symmetry plane for case 1.

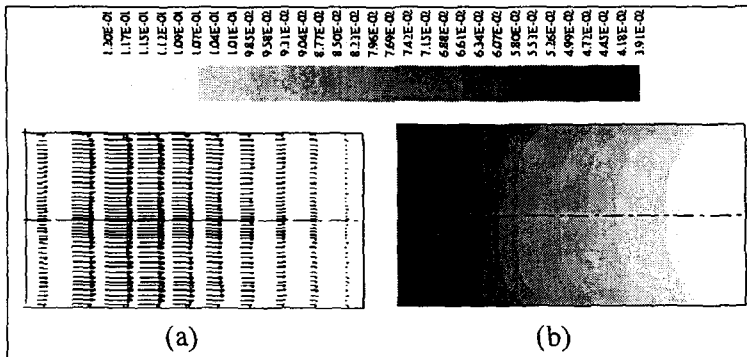


Fig. 3 (a) Velocity vector and (b) O₂ mole fraction contour plots at the entrance of secondary chamber.

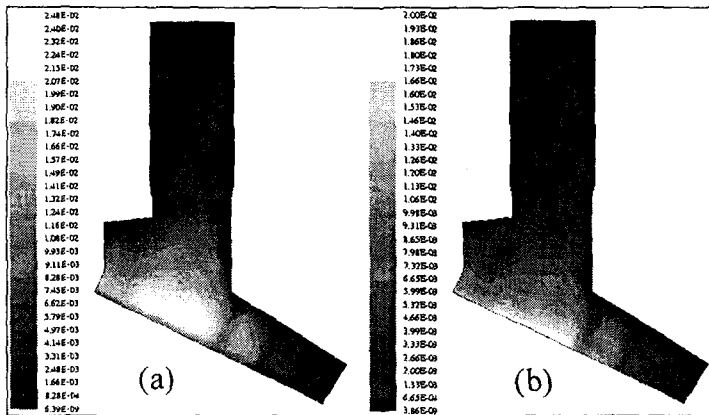


Fig. 4 Contour plots of (a) CO and (b) volatile matter mole fraction at the symmetry plane.

다음은 case 2의 해석결과로서, 각 벽에서 2차 공기의 50%씩이 같은 속도(약 60m/sec)로 수평 방향으로 분사되는 경우이다(Table 2 참조). Fig. 5는 연소실내의 온도장 및 속도 벡터를 나타내고 있다. 1차 연소용 공기만에 의해서도 대부분의 휘발분이 연소된 반면에 1차 연소실에서는 연소가스의 총량이 줄어 들어 case 1에 비하여 최대온도값 및 평균온도가 증가한 경향을 보이고 있다(Fig. 5(a)). 그러나 2차 연소실 입구에서 저온의 연소용 공기가 주입되어 혼합되므로 온도는 비교적 급하게 감소하게 된다. 연소실 출구온도는 약 895°C로서 case 1에 비하여 약 25°C 낮은 결과를 보여주고 있는데, 이는 전체 공기중 20%에 해당하는 2차 공기가 가열되지 않은 상태로 주입되는 영향과, 1차 연소실에서 상대적으로 고온이 형성되어 복사 열손실이 조금 증가한 결과로 판단된다. 속도 벡터(Fig. 5(b))는 전반적으로 전벽 상단부의 재순환 영역 등의 특성에서 case 1과 유사한 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 재순환영역은 출구가 후벽에 존재하는 특성상 완전히 제거하기 어려운 상황으로 보인다. 완전한 제거를 위해서는 2차 공기 분사 노즐의 보다 적절한 설계, 연소실 형상 변경 또는 연소실 내부에 배플(baffle) 설치⁽¹¹⁾ 등의 방안이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 2차 공기 분사 위치의 수평 단면에서의 속도 벡터 및 산소 물분율 분포도를 나타내고 있다. 아주 빠른 속도로 분사된 공기가 마주보는 벽까지 미약하나마 침투하는 모습을 Fig. 6(a)에서 관찰할 수 있다. 그러나 바깥 쪽에 설치된 노즐이 서로 거의 마주보는 형상이기

때문에 중앙에서 충돌하여 침투효과를 상쇄시키는 경향을 보여주고 있으며, 이에 노즐 간격에 대한 수정이 필요함을 알 수 있었다. 산소 농도 물분율 분포도를 나타내고 있는 Fig. 6(b)에서는 case 1의 경우와 마찬가지로 전벽 근처에서 상당히 낮은 산소 물분율을 보여주고 있으며, 절대값에서는 case 1에서 관찰된 값에 비하여 더욱 작은 값(최소값 약 1.8%)을 보여주고 있다. 이와 같이 전벽 부근에서 낮은 산소 농도를 보이는 이유는 1차 공기의 양이 감소하였음에도 불구하고 각 호퍼로의 공기 분배율을 일정하게 하였기 때문으로 판단된다. 즉, 2차 공기를 분사하는 경우에는 공기 분배율에 대한 수정이 검토되어야 할 것으로 판단되었다.

Fig. 7은 연소실내 일산화탄소 및 휘발분의 물분율 분포도를 나타내고 있다. 1차 연소실에서의 분포 경향은 정성적으로는 2차 공기를 분사하지 않은 case 1과 유사하나, 상대적으로 1차 연소실의 공기량이 부족하였으므로 일산화탄소 및 휘발분의 농도가 증가한 경향을 보이고 있다. 그러나 2차 공기가 분사되는 영역에서 부터는 잔존 일산화탄소 및 휘발분이 급격히 감소하는 모습을 보여주고 있다. 결과로서 출구에서는 일산화탄소의 농도가 수 ppmv 수준의 결과를 나타내었는데, 절대값의 신뢰성 여부에 대해서는 검토의 여지가 있겠지만, 이와 같은 경향은 2차 공기의 분사가 완전연소란 목표에 기여하는 바가 상당히 커다는 점을 시사한다고 볼 수 있다.

2차 공기의 분사가 온도장, 속도장 및 각 화학종들의 분포에 미치는 영향에 대한 보다 상세한 고찰을 위하여 1차 연

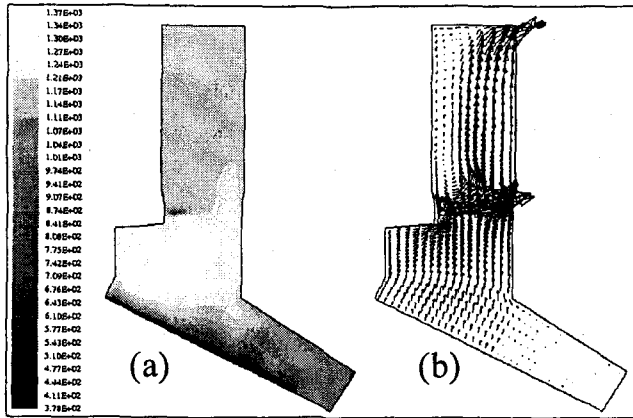


Fig. 5 (a) Temperature contour and (b) velocity vector plots at the symmetry plane for case 2.

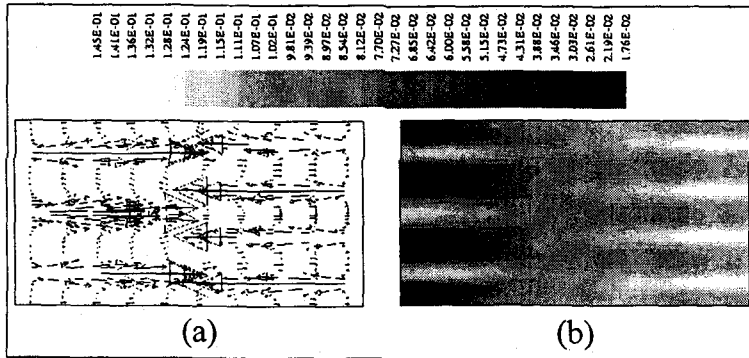


Fig. 6 (a) Velocity vector and (b) O₂ mole fraction contour plots at the entrance of secondary chamber.

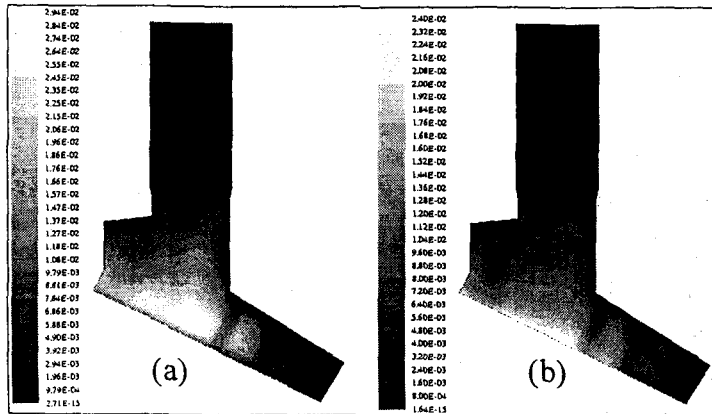


Fig. 7 Contour plots of (a) CO and (b) volatile matter mole fraction at the symmetry plane.

소실 상부에서 1차 연소실 방향으로 분사하는 경우에 대한 전산해석을 수행하였다. 이 경우 전벽 상부의 노즐을 통하여 2차 공기의 50%가 약 82m/sec로 분사되고, 나머지 50%가 후벽에 설치된 노즐을 통하여 약 72m/sec로 분사되게 하였다(Table 2의 case 3 참조).

Fig. 8은 case 3의 온도장 및 속도 벡터를 보여주고 있다. Case 2와 마찬가지로 1차 연소실의 온도는 2차 공기를 분사하지 않은 case 1에 비하여 높은 경향을 나타내었으며, 2차 공기 분사 위치 직전에서 최대 온도를 나타내고 2차 공기와 혼합되어 온도가 낮아진 이후 출구로 진행함에 따라 온도가 서서히 떨어지는 경향을 보이고 있다(Fig. 8(a)). 출구 온도는 약 900°C로서 case 2와 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 즉, 2차 공기 분사방법이 출구온도에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었는데, 이는 2차 연소실에서 충분한 혼합이 이루어지기 때문인 것으로 판단할 수 있다. Fig. 8(b)는 속도 벡터로서 2차 공기를 분사하지 않은 경우인 case 1에 비하여 뚜렷하게 발달한 재순환영역을 관찰할 수 있다. 이와 같이 재순환영역이 커지는 이유는 전벽에서 우측 하방향으로 분사된 2차 공기가 2차 연소실의 좌측 벽 방향으로 향하는 연소가스의 진행을 방해하여 유동이 오른쪽으로 치우치는 결과를 초래하였기 때문이다. 재순환영역 크기의 증가는 실질적인 연소실 부피의 감소를 의미하여 직접적으로는 연소가스의 평균 체류시간을 감소시키는 결과를 초래한다. 또한 재순환영역의 존재는 국부적인 연소가스의 속도를 증가시키므로 비산재의 양을 증가시킬 가능성을 내포

하고 있는데, 비산재는 연소실 출구 이후에서 다이옥신 생성의 촉매 역할을 하는 것으로 알려져 있으므로 재순환영역의 존재는 공해물질의 측면에서도 바람직하지 않다고 판단된다. Fig. 8(b)에서 관찰되는 재순환영역은 체류시간이라는 측면만으로도 무시할 수 없는 정도의 크기로 판단된다.

Fig. 9는 일산화탄소 및 휘발분의 물분을 분포도를 보여주고 있는데 case 2와 마찬가지로 2차 공기 분사위치에서부터 급속히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 일산화탄소의 최대치는 case 2에 비하여 약간 낮은 경향을 보여 주고 있는데, 1차 공기와 2차 공기가 1차 연소실에서 합쳐지면서 난류혼합효과가 상대적으로 우세하였기 때문으로 추측된다. 이와 같은 경향을 종합하여 보면 case 3의 경우는 case 2의 경우에 비교하여, 1차 연소실의 연소상태를 좋게 만드는 점에 대해서는 비슷하거나 약간 좋은 경향을 보이는 반면에, 재순환영역의 증가로 인하여 체류시간을 상당히 감소시키는 경향이 있음을 알 수 있었다.

도시 폐기물 소각로에서 발생하는 기체상 공해물질로서 다이옥신, SO_x 및 NO_x 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이중 NO_x의 발생에 대한 실험 및 해석결과를 고찰함으로써 소각로에서의 NO_x의 생성기작(mechanism)을 이해하고 전산해석 방법에 의한 정성적 및 정량적 예측 가능성을 타진해 보고자 하였다.

Fig. 10은 파일롯 플랜트의 출구에서 측정된 온도 및 NO 발생량을 나타내고 있다. 연소실 출구온도가 900°C를 넘는 경우 NO의 발생량도 약간 높은 경향을 보이고 있다. 그러나 온도와 직접적

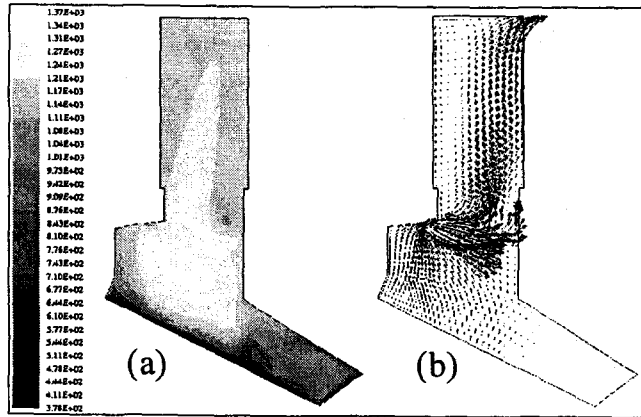


Fig. 8 (a) Temperature contour and (b) velocity vector plots at the symmetry plane for case 3.

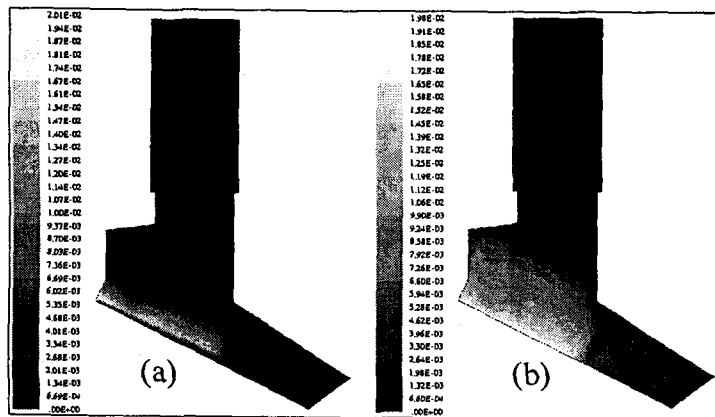


Fig. 9 Contour plots of (a) CO and (b) volatile matter mole fraction.

인 비례관계는 형성되지 않는 경향을 보이며, 특히 그림에 화살표로 표시한 최고온도 및 최저온도에서의 발생량은 출구온도와 완전히 역비례하는 결과를 나타내었다. 즉, 파일롯 플랜트 실험에서는 NO 발생량과 온도와의 상관관계가 상당히 약한 경향을 보여 주었다. 이와 같은 경향은, 파일롯 플랜트에서 폐기물의 충분한 교반이 어려웠다는 점을 고려할 때, 폐기물내 질소 함유량의 불균일성이 기인한 것으로 추측된다. 기존의 보고에서는 1400-1500°C 이상의 온도영역에서

Thermal NO_x의 발생이 활발해지기 시작하는 것으로 보고되고 있고⁽¹³⁾, 소각로에서는 연소온도가 비교적 낮은 관계로 Fuel NO_x가 우세한 것으로 보고되고 있다⁽¹⁴⁾. 이런 점을 고려하여 본 연구에서는 Fuel NO_x 발생에 대한 수치해석 연구를 수행하였다.

Fig. 11은 2차 공기 분사 유무에 따른 연소실내 NO의 분포도를 나타내고 있다. Fig. 11(a)는 case 1의 결과로서, 재순환영역내에서의 NO 값이 주변에 비하여 상당히 높은 모습을 보여주고 있는

며, 이는 재순환영역내에서 순환하는 일부 연소가스의 체류시간이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 2차 공기를 분사한 case 2의 경우(Fig. 11(b))에는 NO 발생량이 증가한 결과를 보여주고 있는데, 1차 연소실 온도 상승으로 인하여 HCN의 산화반응이 활발해졌기 때문으로 판단된다. 저온영역인 2차 공기 분사부에서 아주 낮은 NO 농도를 보이는 점은 Fuel NO_x의 온도 의존성^(15,16)에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실험결과와의 비교를 통하여 NO_x 발생에

대한 모델링 기법을 결정하려고 시도하였으나, 파일럿 플랜트 출구에서 NO_x 발생량의 시간 변동이 심하여 적절한 모델 선정 및 모델상수의 결정에는 한계가 있었으며, 따라서 배출량에 대한 절대값의 정확한 예측에는 한계가 존재하게 된다. 이와 같은 한계성은 폐기물 성상이 비교적 균질하고 시간변동이 심하지 않는 플랜트 결과와의 비교·검토를 통하여 모델링 기법을 보완하는 과정을 거치면 어느 정도 극복될 수 있을 것으로 판단된다.

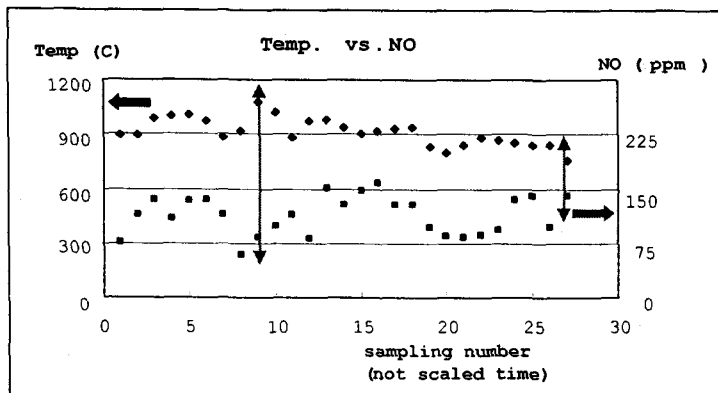


Fig. 10 Experimental result for temperature and NO concentration at the exit of combustion chamber.

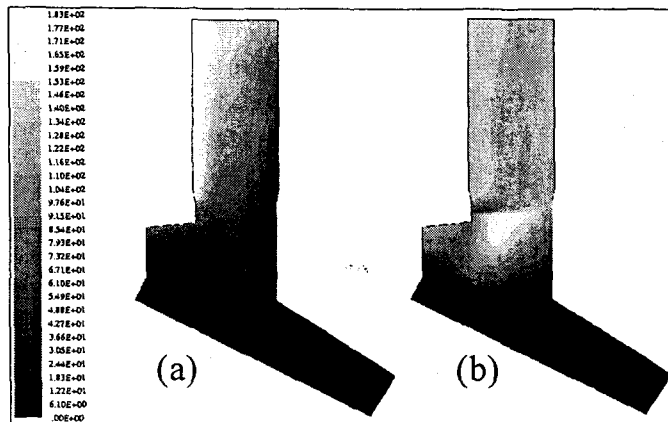


Fig. 11 Comparison of NO mole fraction at the symmetry plane for (a) case 1 and (b) case 2.

결 론

상업용 도시 폐기물 소각 플랜트 건설 이전에 연소실의 성능을 예측해 보기 위한 방안으로서 1일 처리량이 50톤인 소각로 연소실의 형상 및 운전조건을 반영한 수치해석 연구를 수행하였다. 특히 2차 공기 분사 여부 및 분사 노즐의 위치에 따른 영향을 고찰하였다. 예비설계 연소실의 2차 연소실 전벽 상단부에 형성되는 재순환영역은 2차 공기의 분사 위치에 민감한 영향을 받음을 알 수 있었다. 즉, 2차 공기를 분사하지 않는 경우를 기준으로, 수평분사의 경우 재순환 영역 특성에 변화가 적은 반면에 1차 연소실 방향으로 분사하는 경우에는 재순환 영역의 크기가 뚜렷히 증가함을 알 수 있었다. 또한 2차 공기를 분사할 경우에는 일산화탄소 및 휘발분이 완전연소되는 경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

향후에는 노즐의 위치 및 숫자 변경에 따른 재순환영역 형성 특성과 이에 따른 연소가스의 2차 연소실내 체류시간 변화에 대한 정량적 고찰, 연소실 형상변경에 따른 유동장 특성 변화 등에 대한 다양한 case study를 통하여 최종적으로는 보다 성능이 우수한 연소실 기본설계를 위하여 활용할 예정이다.

후기

본 연구는 국립환경연구원 총괄주관 및 대우중공업(주)와 (주)대우가 연구기관으로 참여한 '도시폐기물 소각로 화력자 개발' 과제의 일환으로 진행되었습니다. 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. V. Nasserzadeh, J. Swithenbank, D. Scoot, and B. Jones, "Design Optimization of a Large Municipal Solid Wastes Incinerator", *J. Waste Manag.*, vol. 11, pp.249-261, 1991.
2. V. Nasserzadeh & J. Swithenbank, "Effects 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, pp.389-422, 1993
3. O. Riccius & P. J. Chapman, "Application of CFD in Waste Incinerators", *Fluent User Group Meeting, Frankfurt, Germany, 1997*
4. O. H. Madsen, S. Binner, K. Jorgensen, "Modern Design Technologies for Thermal Optimisation and Pollutant Control in MSW Incinerator Plants", *1st Int. Conf. on Incineration and Flue Gas Treatment Tech.*, Sheffield Univ., U.K., 1997
5. C. K. Ryu & S. M. Choi, "3-Dimensional simulation on jet air mixing in the MSW incinerators", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 119, pp.155-170, 1996
6. C. K. Ryu, & S. M. Choi, "Design consideration for cross jet air mixing in municipal solid waste incinerators", *Int. J. Energy Research*, Vol. 21, pp.695- 706, 1997
7. D. H. Shin, C. K. Ryu & S. M. Choi, "Computational fluid dynamics

- evaluation of good combustion performance in waste incinerators", J. Air and Waste Management Association, Vol. 48, pp.345-351, 1998
8. "저공해 소각기술 : 도시폐기물 소각로 화격자 개발", 환경부 G-7 보고서, 제 2차년도 년차 보고서, 1999년 1월
9. 박병수, 이진욱, 서정대, 허일상, "도시폐기물 소각로 파일럿 플랜트 실험을 통한 연소실 해석 모델 설정 및 결과 고찰", 한국폐기물학회 춘계학술발표회 요약집, pp. 131-136, 1999
10. Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere publishing, Washington, 1980.
11. V. Nasserzadeh et al., "Effects of High Speed Jets and Internal Baffles on the Gas Residence Time in Large Municipal Incinerators", Environmental Progress, Vol. 13, pp.124-133, 1994
12. 옥곤, "다이옥신 문제해결을 위한 기술적 대응과 전망", 첨단환경기술 2월호, pp.2-13, 1998
13. A. H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Hemisphere Publishing Corp., 1983
14. W. R. Seeker, W. S. Lanier & M. P. Heap, "Municipal waste combustion study : Combustion control of MSW combustor to minimize emission of trace organics, EPA Contract 68-02-4247, 1987
15. S. Øyvind, G. Peter, J. Anker & D. Kim, "Kinetic NO_x modeling and experimental results from single wood particle combustion", Fuel, Vol. 76, pp.671-682, 1997
16. L. D. Smoot & P. J. Smith, "Coal Combustion and Gasification", Plenum Publishing Corp, p.378, 1985