

한국에너지공학회(1999년도)  
춘계 학술발표회 논문집 P127~132

## 50톤/일 상업용 소각로 연소실 2차 공기 노즐 설계

박병수, 이진욱, 서정대\*, 허일상\*\*  
고등기술연구원 재료/공정연구실, 대우중공업(주) 선박해양기술연구소\*,  
(주)대우-건설 플랜트본부 환경사업팀\*\*

### Secondary Air Nozzle Design of Combustion Chamber of 50 ton/day Commercial Incinerator

Byung Soo Park , Jin Wook Lee, Jung Dae Seo\*, Il Sang Huh\*\*  
Institute for Advanced Engineering, Daewoo Heavy Industry\*, Daewoo Corporation\*\*

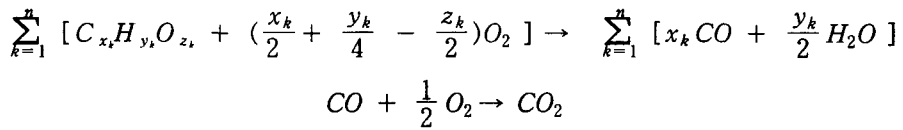
#### 1. 서론

우리나라의 도시폐기물 소각로는 화격자 위에 폐기물을 공급하고 화격자 밑에서 공기를 공급하는 스토키식 소각로를 대부분 채택하고 있다. 이러한 스토키식 소각로 연소실내에서는 매우 복잡한 연소현상이 발생하는데, 연소실로 투입된 쓰레기는 먼저 건조부에서 수분의 건조가 일어나고, 화격자의 구동에 의해 쓰레기가 혼합 및 이송되면서 열분해, 가스화, 가연성분의 탈휘발화 및 연소, 일부 고정탄소의 표면연소 등의 반응이 일어난다. 그리고 1,2차 연소실에서는 휘발분 및 비산된 고체의 연소가 일어나는데, 이때 대류 및 복사열전달 등의 복잡한 현상을 수반하는 유동장이 형성된다. 더욱이 불균질한 특성을 갖는 쓰레기층 내에서의 복잡한 현상으로 인하여 발생하는 경계조건 설정의 불확실성으로 연소실내의 연소 현상을 전산해석하는 데에는 상당한 어려움이 있다.

위에서 언급한 제약점을 최대한 해결하기 위해서는 전산해석의 입력에 해당하는 사항인 도시쓰레기의 특성 파악이 필요하며, 또한 해석 결과를 비교/검토하여 모델링 기법을 보완해 나가기 위해서는 실제 소각로의 운전 결과가 반영되어야 한다. 이를 위하여 50톤/일 파일럿 플랜트 운전시 쓰레기의 성분 분석, 연소실 및 출구에서의 온도, 주요 생성가스 및 공해물질의 측정을 실시하였으며, 측정 결과들을 전산해석 결과와 비교하여 계속적으로 모델을 보완하는데 활용하였다. 보완 완료된 모델에 의한 파일럿 플랜트 해석 결과는 정성적으로 상당히 우수하고 정량적으로도 기본설계에 반영할 수 있는 수준인 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 방법론에 의하여 설정된 모델을 이용하여 예비설계된 50톤/일 상업용 도시폐기물 소각로에 대한 연소해석 및 2차공기 분사에 따른 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 수학적 모델

연소실로 투입된 쓰레기는 화격자의 구동에 의해서 이송되면서 수분의 건조, 가연성분의 탈휘발분화 및 연소, 일부 고정탄소의 표면연소 등의 반응을 겪게 된다. 폐기물을 구성하는 물질 중 고정탄소가 차지하는 비율은 비교적 적은 편이므로, 본 연구에서는 휘발분의 연소에 중심을 맞추어 연구를 수행하였다. 연소실내 화격자상에서의 쓰레기의 연소반응은 쓰레기 성상 중 수분은 건조 및 연소부에서 증발하고, 가연분은 기체상태로 변화된 연료인  $C_xH_yO_z$ 의 형태로서 연료와 연소용 공기의 2단 연소반응(two-step reaction)으로 모델화하였다.



즉, 쓰레기의 휘발분은 많은 종류의 화학물질로 이루어져 있는데, 이를 n개의 대표적인 특성을 가지는 그룹으로 분류하여 연소모델을 설정하는 것이 바람직하다고 판단되어 다성분 물질에 대한 2단( two-step) 연소반응으로 모델링하였다. 본 연구에서는 파일럿 플랜트 실험 결과와의 비교/분석을 통하여 휘발분을 2성분으로 분류하였으며, 이를 전산해석에 적용하여 타당성 있는 결과를 도출할 수 있었다.

Table 1 폐기물 조성 및 운전 조건

|                         |   |
|-------------------------|---|
| 폐기물 조성<br>(wt. %)       | C : 19.87, H : 3.01, O : 14.09, N : 0.72, Moisture : 47.00,<br>S : 0.05, Cl : 0.23, Ash : 15.03 |
| 폐기물 발열량                 | 1600 Kcal/kg (LHV)  |
| 쓰레기 투입량                 | 2083 kg/hr (50 ton/day)   |
| 연소용 공기량                 | 8044 Nm <sup>3</sup> /hr  |
| Hopper별 1차<br>연소용공기 분배율 | Hopper 1 : 16.8%, Hopper 2 : 33.7%, Hopper 3 : 43.8%,<br>Hopper 4 : 5.0%, Hopper 5 : 0.7%       |
| 과잉공기비                   | 1.84  |
| 공기 예열온도                 | 1차 공기 : 105°C, 2차공기 : 상온(25°C)  |
| 공기 주입                   | Case 1 : 1차 공기만 분사<br>Case 21-4, 31-4 : 1, 2차공기 모두 분사<br>1차 : 2차 = 80% : 20%                    |

### 3. 결과

본 연구는 상용 열유체 해석 코드인 FLUENT를 사용하였으며, 2차공기 분사 노즐 배열 및 2차연소실 전벽과 후벽의 2차공기 분배 변화가 연소실내 속도장 및 온도장에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 2차공기 노즐의 배열구조는 엇물린 노즐(staggered nozzle)로 전벽에 3개, 후벽에 4개의 2차공기 노즐 구조를 중심으로 전벽에 4개, 후벽에 3개로 바꾸어 해석을 수행하였으며, 2차공기 전벽과 후벽의 유량비는 50:50, 40:60, 30:70, 45:65 등으로 나누어 해석하였다. 모든 경우에 대한 폐기물의 조성 및 발열량, 총 연소용 공기량, 과잉공기비 등 상업용 플랜트의 개략적인 운전조건을 Table 1에 나타내었으며, 계산에 사용된 연소실의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

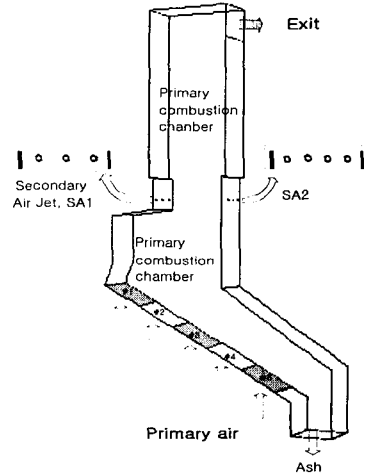


Fig. 1 연소실 개략도

Fig. 2는 1차 공기만을 분사한 경우(Case 1)에 대한 해석결과로서, 연소실의 속도벡터 및 온도장을 나타내고 있다. 연소실 내에서의 유동 특성을 관찰할 수 있는 속도 벡터의 경우 2차연소실 전벽을 따라서 재순환 영역이 형성되었으며, 전벽 출구부분으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 온도장은 화격자 상부에서 연소의 시작으로 1차연소실 상부로 진행해 감에 따라 온도가 증가하여 2차연소실 입구 부분에서 최고 고온 영역을 나타내었으며, 다시 출구로 갈수록 온도가 하강하고, 재순환 영역에서의 온도는 주된 유동의 흐름방향보다 30도 정도 낮은 것을 볼 수 있다. 물론 상업용 플랜트의 경우 파일롯 플랜트에 비하여 재순환 영역이 많이 줄어들었지만-2차연소실의 중심부에서 출구쪽으로 수직으로 급격하게 꺾이는 형상을 배제하고 상방향으로 길게 하였으며, 1차 연소실 건조부 상벽에서 2차연소실 전벽으로 이어지는 부분의 기하학적 형상이 거의 수직으로 되어있어 재순환 영역의 형성이 불가피한데 1차연소실 상벽의 길이를 줄임으로써 재순환 영역의 형성을 감소시킴-어느 정도 재순환 영역의 형성은 불가피한 것으로 판단된다.

2차공기는 공기와 연료의 혼합을 증가시켜 연소 효율을 높이고, 화염 높이를 적정하게 유지하며, 노내 유동형태를 적절하게 형성하여 효율적인 유동패턴을 만드는 역할을 하여야 한다. 따라서 재순환 영역을 최소화 시킬 수 있는 방안이 모색되어야 하며, 효율적인 유동패턴을 찾기 위하여 본 연구에서는 2차공기의 엇물린 노즐 배열 구조에 전벽과 후벽의 유량비를 달리해가면서 해석을 시도하였다.

Fig. 3은 2차공기 노즐이 전벽에 3개, 후벽에 4개가 위치한 경우의 속도장을 나타낸 것으로, 전벽:후벽=50:50인 경우(Fig. 3의 (a)) 전벽의 재순환영역은 Case 1에 비해 조금 작아졌지만, 전벽과 후벽에 약한 속도 영역이 확대되었으며, 2차연소실 중심부에 형성된 주흐름의 속도가 Case 1에 비하여 증가하였다. 이는 2차공기 노즐에서 고속으로 분사된 제트가 맞은편 벽까지 침투되지 못하고 중간에서 연소가스에 운동량을 빼앗겨 연소가스 흐름방향으로 속도가 증가하였기 때문이다. 이와 같은 형태는 Case 1에 비하여 연소가스의 혼합 측면에서는 효율적이나 체류시간의 측면에서는 오히려 체류시간을 감소시킬 것으로 판단된다.

전벽:후벽=40:60인 경우(Fig. 3의 (b))는 후벽의 제트가 전벽까지 영향을 미치며 2차연소실 왼쪽 상부에 재순환영역이 존재하지 않았지만, 반대로 후벽의 2차공기 분사 노즐 상부에 재순환영역이 형성된 것을 볼 수 있다. 주 흐름의 속도는 Case 21과 유사하게 나타났다. 전벽:후벽=30:70인 경우(Fig. 3의 (c))는 Case 22에 비하여 후벽에 재순환영역이 더욱 커진 것을 볼 수 있으며, 유동은 전벽쪽으로만 치우쳐서 흐름은 양상을 나타내고 있는데 유동장이 후벽의 2차공기 제트에 의해서 지배되고 있음을 알 수 있다. 이는 2차공기가 후벽에 집중되어 있기 때문이며 이와 같은 형태는 연소가스의 체류시간을 크게 줄이므로 매우 부적절하다.

앞에서 언급한 세 가지 형태는 모두 재순환영역의 형성 측면에서 효율적인 유동 형태는 아닌 것으로 판단되며 따라서 전벽과 후벽의 노즐의 위치를 바꾸어서 계산을 수행하여 보았다.

Fig. 4는 2차공기 노즐이 전벽에 4개, 후벽에 3개가 위치한 경우의 속도장을 나타낸 것으로, 전벽:후벽=50:50인 경우(Fig. 4의 (a)), Case 21과 비교하여 전벽의 재순환영역이 조금 커졌으며, 후벽에서의 유동은 증가하였다. 이는 전벽의 공기노즐이 4개이고 분사 속도는 후벽과 유사하므로 전벽의 제트가 후벽쪽으로 침투거리가 증가한 반면 후벽의 제트는 Case 21에 비하여 전벽 방향으로의 침투거리가 감소하였기 때문이다. 이 결과에서 전벽과 후벽에서 같은 유량이 주입되더라도 분사 노즐 수 및 위치에 따라서 유동형태가 바뀔을 알 수 있다. Case 32의 경우(Fig. 4의 (b)), 2차연소실 전 영역에서 재순환영역은 발생하지 않았으나, 후벽쪽에 유동이 미약한 영역이 발생하였다. Case 33의 경우(Fig. 4의 (c))는 후벽의 유량 증가로 인하여 후벽의 제트가 전벽에 충돌하여 대부분의 유동이 전벽으로 쏠리는 현상이 발생하고 후벽 2차공기 노즐 상부에 재순환 영역이 형성되었다.

Case 34(Fig. 4의 (d))의 경우 유량을 전벽:후벽=45:55로 변경하였으며, 변경한 결과는 앞의 결과보다 개선된 유동 형태를 나타내었다. 이 경우 Case 32에 비하여 후벽에서 분사된 제트가 전벽에 부딪히지 않는 양상을 보이며, 2차연소실에서의 유속의 분포가 대체적으로 균일하게 형성되었다. 따라서 Case 34가 다른 경우에 비해서 체류시간이 길고 연소제어 가 용이할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

과일롯 플랜트에서의 해석 과정을 통하여 확보한 최적 모델 및 최적 모델상수 등을 이용하여 50톤/일 상업용 도시폐기물 소각로에 대한 전산해석 연구를 수행하였다. 특히 2차공기 분사 여부 및 분사 노즐의 위치, 2차연소실 전벽과 후벽에서의 2차공기 주입량에 대한 영향을 고찰하여 보았다. 2차연소실에 생성되는 재순환 영역은 2차공기 분사 노즐의 위치 및 주입량에 민감한 영향을 나타내었다. 즉, 전벽:후벽의 2차공기 유량비가 같은 경우 2차연소실 전벽에 재순환영역이 크게 형성되었으며, 후벽의 2차공기 주입량이 많아질수록 유동이 전벽쪽으로 치우치면서 후벽의 2차공기 노즐 상부에 재순환영역이 형성되는 것을 알 수 있었다. 지금까지 수행한 결과를 볼 때 2차공기 노즐 위치는 전벽에 4개, 후벽에 3개가 위치하고, 2차공기 유량비는 전벽:후벽=45:55로 주입하는 것이 가장 효율적인 유동장을 형성하였으며, 2차공기 노즐 위치 및 분배량은 연소실 설계에 중요한 설계인자임을 알 수 있었다.

## 후기

본 연구는 환경부에서 지원하고 국립환경연구원 총괄주관 및 대우중공업(주)과 (주)대우가 주관기관으로 참여하고 있는 G-7 “도시쓰레기 상용화 소각시스템 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Madsen, O. H., Binner, S., and Jorgensen, K., “Morden Design Technologies for Thermal Optimisation and Pollutant Control in MSW incinerator Plants”, 1st Int. symposium of Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Sheffield, UK, 1997.
2. 저공해 소각기술 도시폐기물 소각로 화격자 개발, 2차년도 보고서, 환경부, 1998.
3. 도시형 저공해 소각로의 종합 시스템 설계에 관한 연구, 3차년도 보고서, 환경부, 1995.
4. 저공해 소각기술 도시폐기물 소각로 화격자 개발, 1차년도 보고서, 환경부, 1997.
5. Patankar, S.V., “Numerical heat transfer and fluid flow”, Hemisphere publishing, Washington, 1980.
6. 박병수, 이진욱, 서정대, 허일상, “50톤/일 스토커소각로 연소특성에 관한 실험 및 수치해석”, 한국에너지공학회 추계학술발표회 논문집, pp.138-143, 1998.
7. 박병수, 이진욱, 서정대, 강승근, “도시폐기물소각로 파일럿 플랜트 실험을 통한 연소실 해석 모델 설정 및 결과 고찰”, 한국폐기물학회 춘계학술발표회 논문집, pp.131-136, 1999.

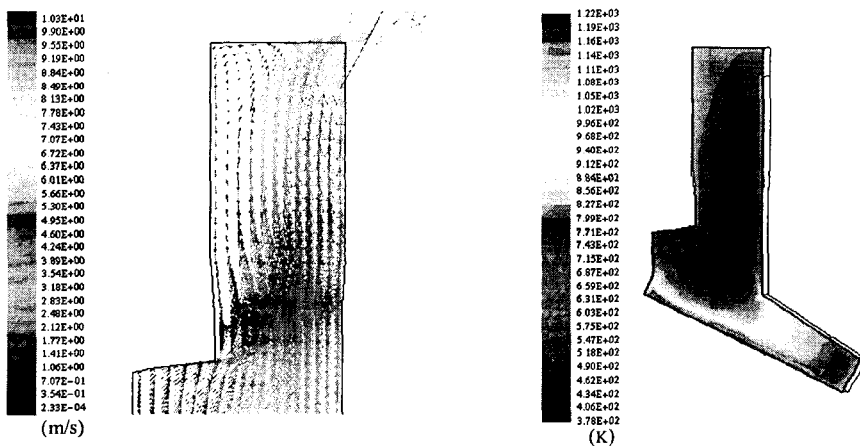


Fig. 2 Case 1에 대한 속도장 및 온도장

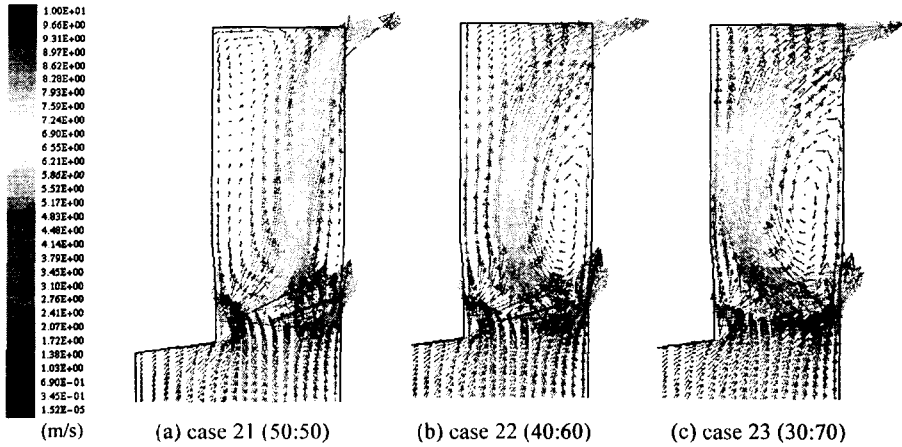


Fig. 3 2차공기 노즐이 전벽에 3개, 후벽에 4개인 경우에 대한 속도장

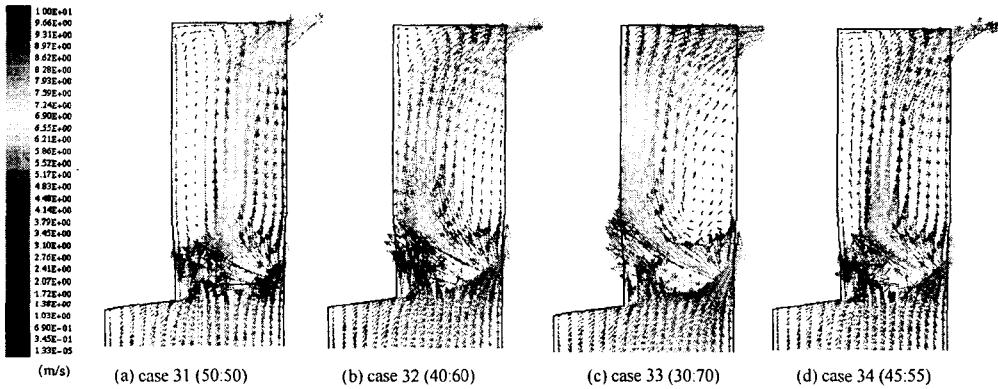


Fig. 4 2차공기 노즐이 전벽에 4개, 후벽에 3개인 경우에 대한 속도장