

신개념 소각 연소실의 성능향상을 위한 해석연구 사례

고영건* · 류창국** · 최상민***

Numerical Simulation for the Improvement of Complex Incinerator

Young Gun Go, Changkook Ryu, Sangmin Choi

ABSTRACT

Using the CFD method, we investigated the combustion characteristics of grate-rotary kiln incinerator through the residence time, path line of flow and distributions of temperature and CO mass fraction according to the shape of mixing chamber and the existence and nonexistence of baffle at the exit of bypass duct. The results show that the flow mixing and residence time could be variable according to the shape of mixing chamber and baffle, and we could know the temperature in the mixing chamber could increase too high if the combustion process on the grate retarded.

Key Words : Grate-rotary kiln incinerator, residence time, mixing chamber

1. 서 론

폐기물을 소각하는 방식에는 도시폐기물 소각에 주로 사용되는 화격자식(Stoker type) 소각로, 산업폐기물 처리에 주로 사용되는 회전로식(Rotary-kiln type) 그리고 유동상식 소각로로 구분될 수 있다.[1] 이외에도 새로운 개념의 기술의 도입으로 기존의 화격자식 소각로와 회전로식 소각로를 동시에 연결하여 사용하는 화격자-회전로식 방식 또한 검토되고 있다. 이런 두가지 방식이 결합된 소각로는 화격자식 소각로에서 생성되는 재를 고온의 회전로식 소각로를 거쳐게 한으로서 재에 포함된 미연분을 충분히 연소시킬 수 있으므로 강열감량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 화격자식 소각로의 2차 연소실에 방열관을 설치하여 방열관 상단과 후단에서 회류한 연소가스가 다시 혼합되어 연소되는 2회류식 연소실을 갖는 화격자식 소각로가 검토되고 있다.[2]

본 연구는 강열감량을 줄이기 위한 목적으로

설계된 화격자-회전로식 소각로에 추가로 2회류식 형태를 결합한 형태의 소각로의 전산해석을 통해 그 활용 가능성을 검토했다.

2. 해석방식 및 대상

2.1 대상 소각로 형상 및 운전 조건

해석 대상 소각로는 1차적으로 화격자상에서 대부분의 폐기물의 연소가 이루어지게 되며 이때 생성된 연소가스의 일부는 화격자 하단에 연결된 회전로로 빠져나가게 된다. 나머지 연소가스는 1차 연소실의 상부에 연결되어 있는 바이패스 덕트를 통해 혼합실로 빠져나가게 되며 회전로를 흘러나온 연소가스와 혼합실에서 혼합되어 미연성분을 최종적으로 분해된다. 1차 연소실에서 연소되지 못한 미연분은 회전로의 고온 연소가스 분위기에서 열분해 시키게 된다. 회전로를 통과하는 연소가스의 유량은 바이패스 덕트에 있는 밸브를 조절함으로써 조절할 수 있다.

혼합실은 바이패스 덕트와 회전로를 빠져나온 연소가스가 혼합되는 곳이다. 혼합실의 형상에 따라 혼합정도가 결정되며 이를 향상시키기 위해 후연소실 입구부분을 좁게한 노즈(Nose)형태의 형상으로 설계하거나 바이패스와 혼합실의 연결

* 한국과학기술원 기계공학과

† younggun@amigas.kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 한국과학기술원 기계공학과

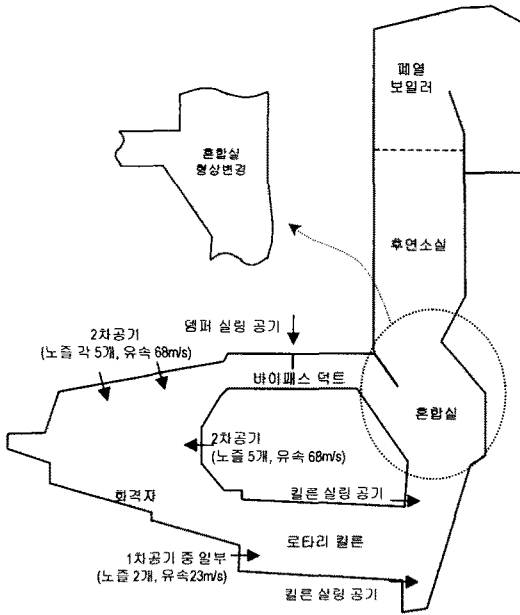


Fig 1. Schematic diagram of incinerator

부분에 배플(Baffle)을 설치하게 된다. 이런 혼합실의 형상은 후연소실로 빠져나가는 연소가스의 전체적인 유동형태를 결정하기 때문에 혼합실의 형상을 Fig 1 에서와 같이 노즐부분을 없애거나 혹은 배플의 유무에 따른 유동형태 변화를 해석하였다.

화격자의 크기는 길이 10m, 폭 3m 이고, 회전로의 크기는 길이 8m이고 내경은 3.5m 이며 지면과 3° 기울어져 있으며 전체 연소로의 높이는 28.5m 이다. 1차 공기는 전체 연소공기의 60%를 주입하고 20%의 공기는 1차 연소실 상부와 방열판에서 주입되는 2차 연소공기로 주입된다. 나머지 공기는 1차 연소실의 측벽 냉각용 공기 및 회전로와 덤퍼의 누설방지용 공기로 주입된다. 폐기물의 투입량은 200ton/day이고, 수분, 가연분(C₁H_{1.51}O_{0.64}), 회분의 비율은 각각 3:6:1 이며 폐기물의 발열량은 2200kcal/kg인 경우에 한해 해석을 수행하였다. 류[3] 등은 화격자와 1차 연소실 사이의 열 및 물질 전달을 고려한 해석 방식을 제시하였으나 여기서는 단순히 화격자와 로타리 킬른에서의 연소율을 Fig 2. 와 같이 가정하였으며 화격자에서 90%의 가연분이 연소되고 나머지는 회전로에서 연소된다고 가정하였다. 폐기물층의 연소는 류 및 신[3, 4]이 제시한 폐기물층 연소모델을 사용하였다. 이 모델에서는 가연분은 휘발분과 최는 각기 다른 조성의 탄화수소로 고려되었으며 휘발분(C_xH_yO_z) 및 CO, H₂의 가스반응은 탄화수소의 반응모델을 이용했다.[5]

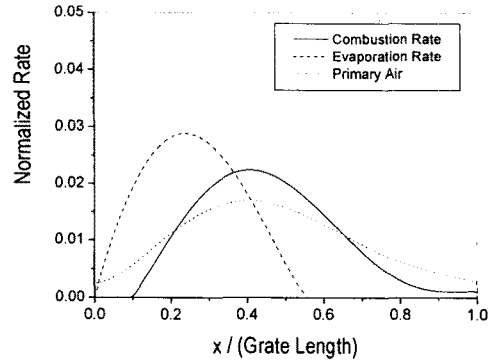


Fig 2. Combustion rate on the grate

2.2 주요 해석 방법 및 해석 사례

2.2.1 해석 방법

유동장 해석에는 상용코드인 Fluent v5.4를 사용했다. 소각로가 깊이방향으로 대칭인 형태이므로 대칭면(Symmetric plane) 조건을 사용했으며 격자수는 소각로 형상에 따라 약 16만개 내외의 셀로 구성하였다. 난류모델로는 RNG $\kappa - \epsilon$ 모델을 사용하였으며 복사모델은 구분종좌법(Discrete ordinate method)을 사용하고 흡수계수는 CO₂와 H₂의 참여를 WSGGM(Weighted sum of gray gases model) 방식을 이용해 고려하였다. 난류반응은 Magnussen-Hjertager 모델을 사용했다.

2.2.2 해석 사례(Case)

본 연구에서는 소각로에 대한 성능을 정량적 값으로 해석하기 보다는 온도분포, 가스성분 분포 및 유동형태 관찰을 통해 화격자-회전로-2회류식 소각로의 기본적인 연소상황을 알아보고자 한다. 소각로의 연소특성에 미치는 인자들은 크게 폐기물의 성분 및 발열량 같은 연료 조건, 연소실 형상 및 체적, 2차 연소공기 주입 위치 배열과 같은 설계조건, 폐기물 투입량, 연소공기 분배와 같은 운전 조건으로 구분할 수 있다.[6] 본 연구에서는 연료조건 및 운전조건은 일정하게 유지하였으며 회전로와 바이패스 덕트 출구에서 각각 빠져나온 연소가스가 혼합실의 형태에 따라 유동형태 및 체류시간이 변화하는가를 알아왔다. 또한 바이패스 덕트내의 덤퍼를 통해 바이패스와 회전로를 통과하는 유량비를 조정했을 때 혼합실의 유동형태 및 체류시간 변화를 알아왔다.

우선 Case 1은 Fig.1과 같이 노즐이 있는 혼합

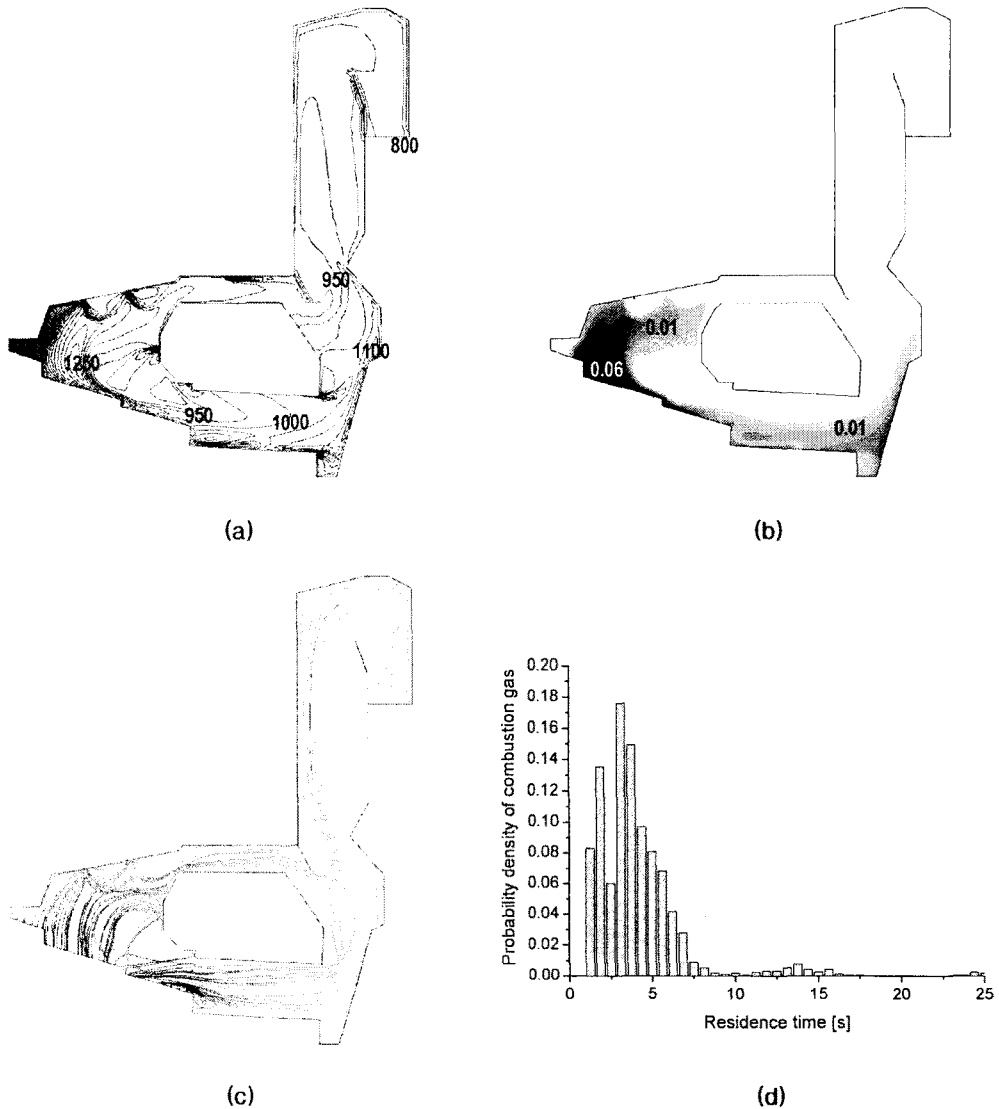


Fig. 3 Results of Case 1 on the symmetry plane; (a) Temperature distribution[°C], (b) CO mass fraction, (c) Path line, (d) Residence time[s] from mixing chamber to the exit

실 형상에서 바이패스 덕트 내에 있는 댐퍼가 100% 개방되어 있고 출구에 배플이 존재하는 경우이다. Case 2는 Case 1에서 댐퍼를 50%만 개방하고 출구의 배플을 없앤 경우이다. Case 4는 노즈가 없는 혼합실 형상에 바이패스 덕트 내 댐퍼가 50%만 개방됐으며 출구에 배플이 존재하지 않는 경우이다. 마지막으로 Case 4는 Case 3에서 바이패스 덕트 출구의 배플을 설치한 경우이다.

3. 해석 결과

3.1 Case 1

화격자에서 발생한 CO를 포함한 미연분의 대부분은 화격자 위의 1차 연소실에서 2차 공기에 의해 산화되며 일부는 고온의 연소가스와 함께 회전로로 유입된다. 회전로에서 발생하는 미연분은 혼합실로 유입되어 혼합되며 최종적으로 연소되게 된다. Fig. 3의 (a)는 대칭면에서의 소각로

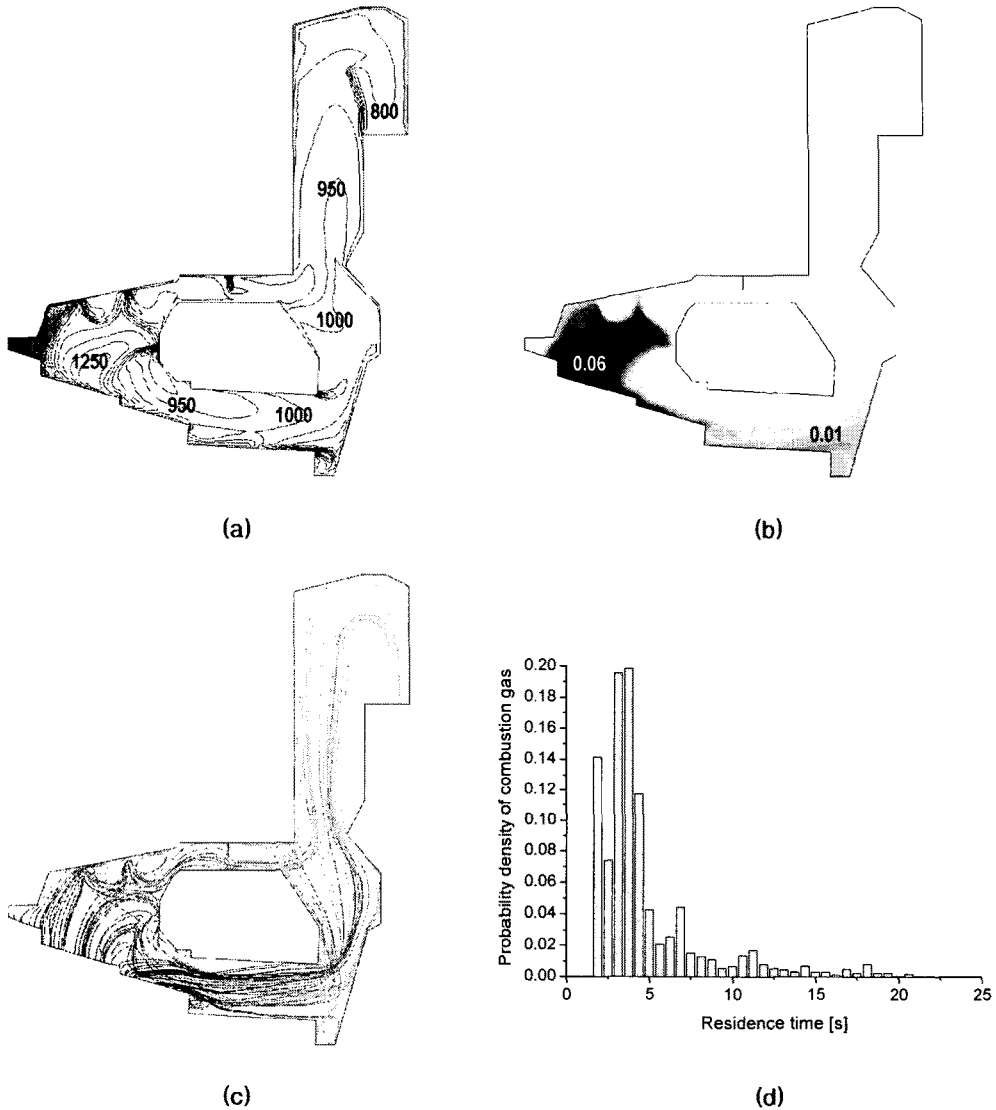


Fig. 4 Results of Case 2 on the symmetry plane; (a) Temperature distribution[°C], (b) CO mass fraction, (c) Path line, (d) Residence time[s] from mixing chamber to the exit

의 온도분포를 나타낸 것이다. 폐기물 연소가 가장 많이 이루어지는 화격자 주연소단 부분은 온도가 1250°C 내외로 가장 높으며 바이패스 덕트를 지날때는 1000~900°C로 낮아진다. 회전로의 입구에서는 1차 연소로의 방열판에서 주입되는 2차 연소공기에 의해 900°C까지 낮아진다. 연소가스가 회전로를 지나면서 자체에 포함하고 있던 미연분과 회전로에서 발생하는 미연분이 서서히 반응하면서 1000°C 내외로 온도가 유지된다. 그러나 폐기물층이 연소되는 회전로 밑부분에서는 국부적으로 이보다 높은 온도를 보인다. Fig.

3의 (b)는 대칭면에서의 CO 질량분율을 나타낸 것이다. 화격자의 주연소단에서 발생된 CO는 대부분 1차 연소실에서 분해가 되며 바이패스 덕트로 흘러들어가는 CO는 거의 없다. 바이패스 덕트에서는 가스 유출 차단용으로 공기가 추가로 주입되기 때문에 비교적 산소농도가 충분하며 이는 혼합실에서 회전로를 빠져나온 연소가스와 혼합되어 미연분을 연소하는데 필요한 산소를 제공하게 된다. 화격자의 후연소단에서 발생하는 CO는 대부분 회전로로 유입된다. 회전로에서는 유동의 혼합이 활발하지 않기 때문에 CO를 포함한

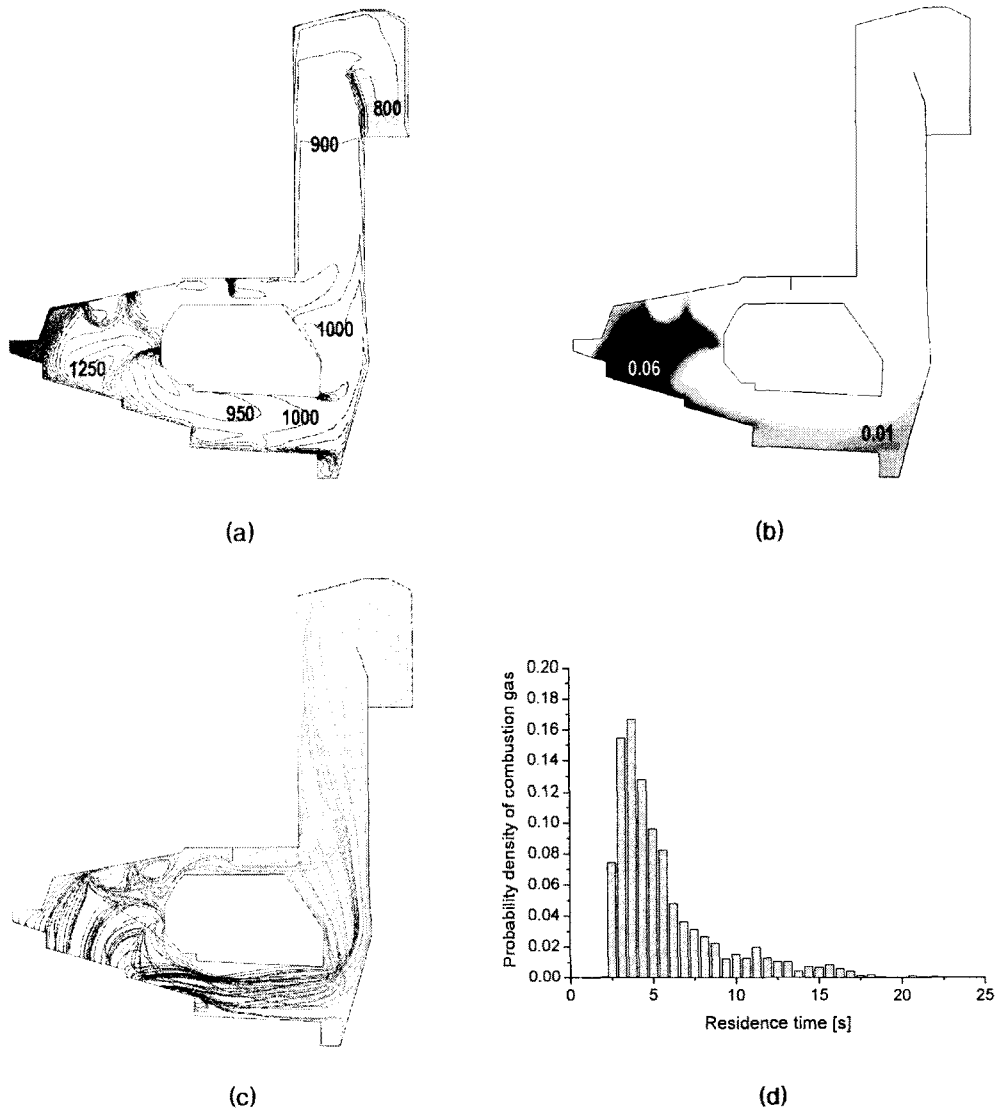


Fig. 5 Results of Case 3 on the symmetry plane; (a) Temperature distribution[°C], (b) CO mass fraction, (c) Path line, (d) Residence time[s] from mixing chamber to the exit

미연분은 산소와 혼합이 거의 되지 않고 회전로의 바닥부분을 따라 혼합실까지 유입이 된다. Fig. 3의 (c)는 화격자에서 출구까지의 유선분포를 나타낸 것이다. 회전로내에서는 유동의 혼합이 거의 없는 것을 확인할 수 있으며, 혼합실의 혼합효과를 증진시키기 위해 설치한 배플과 노즈형상 위쪽에는 재순환 영역이 크게 존재하게 된다. 이로 인해 후연소실의 유로가 좁아지게 되어 연소가스의 체류시간이 줄어들게 되며 이부분의 온도분포도 좌우로 균일하지 않게 된다. Fig. 3.

(d)는 혼합실에서 후연소실에서의 연소가스의 체류시간 분포를 나타낸 것이다. 평균 체류시간은 4.57초이나 바이패스 덕트를 빠져나온 일부의 연소가스는 체류시간이 2초 이하로 빠져나가므로 후연소실의 재순환영역을 줄여 후연소실에서의 실질적인 유로를 넓힐 필요가 있다.

3.2 Case 2

Case 1의 혼합실 출구부분에서 생기는 재순환

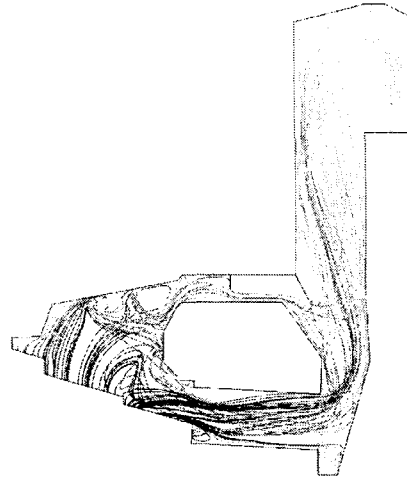
영역을 없애기 위해 댐퍼를 50%만 개방함으로써 바이패스 덕트의 유량을 줄이고 출구쪽의 배플을 없앤 형상을 하고 있다. Fig. 4의 (a)를 보면 Case 1에 비해 1차 연소실의 고온부위가 넓게 분포하고 있다. 이것은 댐퍼를 개방을 줄였기 때문에 바이패스 덕트로 빠져나가는 유량이 줄어들고 이로 인해 연소가스가 1차 연소실에서 체류하는 시간이 늘어나기 때문이다. 후연소실에서의 좌우 온도분포는 Case 1에 비해 균일한 형태를 띄고 있으며 이는 배플을 없애고 바이패스 덕트에서 나오는 유량이 줄어들었기 때문에 후연소실에서의 재순환 영역이 감소하기 때문이다. 그러나 Fig 4. (c)에서 보듯이 바이패스 덕트를 빠져나오는 연소가스가 혼합실로 침투가 되지 않기 때문에 혼합성능은 떨어지며 노즈 부분에서 여전히 큰 재순환 영역이 존재한다. 혼합실에서 후연소실 출구까지 연소가스가 체류하는 평균시간은 4.84초로 Case 1에 비해 늘어났으며 2초 이하로 빠져나가는 연소가스의 비율도 줄어들었다.

3.3 Case 3

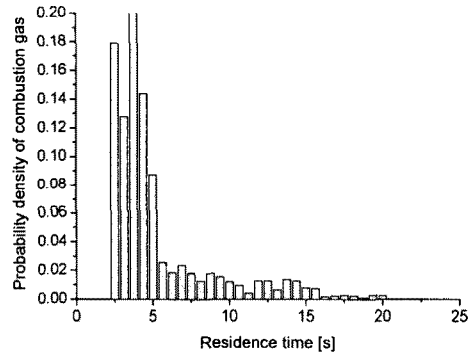
Case 3은 노즈 형태에 의해 생기는 재순환 영역 역시 없애기 위해 노즈 부분을 평평하게 재설계 했으며 바이패스 덕트 출구의 배플도 없는 경우이다. Fig. 5를 보면 소각로의 1차 연소실과 회전로에서의 온도 분포 및 CO 분포는 Case 2와 비슷하다. 그러나 후연소실에서의 온도분포는 Case 1이나 Case 2에 비해 좌우로 충분히 균일한 것을 확인할 수 있다. 이는 바이패스 덕트를 빠져나오는 연소가스가 충분히 주유동으로 침투하고 있고 이로 인해 혼합실에서 빠져나오는 연소가스와 교차되어 혼합성능이 훨씬 나아지기 때문이다. 또한 노즈 형태나 배플에 의해 생기는 재순환 영역이 없기 때문에 후연소실 단면 전체에 균일한 유동이 생겨 실질적인 유로가 넓어졌기 때문이다. 여기서 바이패스 덕트를 빠져나온 연소가스는 회전로를 빠져나오는 연소가스와 혼합실에서 혼합되기 보다는 후연소실에서 혼합이 되기 때문에 체류시간이 충분하지 못할 경우 미연분이 그대로 빠져나갈 가능성은 높아진다. Fig. 5 (d)를 보면 혼합실과 후연소실에서의 연소가스의 평균 체류시간은 5.7초로 Case 1 과 Case 2에 비해 약 1초 이상 늘었으며 최저 체류시간도 2초 이상이기 때문에 체류시간 측면에도 유리하게 나타났다.

3.3 Case 4

Case 3에서 바이패스 덕트를 빠져나오는 연소가스가 혼합실에서 혼합이 되도록 하기 위해 Case 4에서는 배플을 설치하였다. Fig 6. (a)의



(a)



(b)

Fig. 6 Results of Case 4 on the symmetry plane; (a) Path line, (b) Residence time from the mixing chamber to the exit

패스라인을 보면 혼합실에서의 혼합효과가 Case 3에 비해서 많이 증가됐으나 이로 인해 배플 뒤의 재순환 영역에 의해 유로가 좁아지게 되고 온도분포도 불균일 해진다. 또한 혼합실과 후연소실의 연소가스 체류시간도 5.0초로 Case 3에 비해 줄어들게 된다.

4. 결론

화격자-회전로-2회류식 소각로의 기본적인 연소

특성을 혼합실의 형상과 배플의 유무, 바이패스 덕트의 유량을 변화시켜 다음과 같이 알아봤다.

전체적으로 온도의 분포차가 심하지 않으며 후연소실 출구 온도는 950℃이고 계산 영역에의 최종 출구 온도는 800℃ 전후로 충분한 온도가 유지된다. 화격자의 건조단-주연소단 영역에서 발생한 가스는 1차 연소실에서 충분한 연소를 거치고 혼합실로 들어가기 때문에 충분한 로내 체류시간을 갖는다. 그러나 화격자 후연소단과 회전로에서 발생하는 미연가스는 혼합실에서 주로 연소가 이루어지기 때문에 충분한 체류시간이 필요한데 이는 Case 3에서와 같은 형상변경을 통해 충분히 체류시간을 증가 시킬 수 있다.

혼합실에서는 바이패스 덕트로 빠져나오는 가스 와 회전로를 빠져나오는 두 유동이 혼합되며, 노즈와 배플의 유무에 따라 유동특성이 변한다. 노즈와 배플이 있을 경우에는 혼합은 증대되는 유로감소로 인한 배가스의 체류시간이 감소하며, 노즈와 배플이 없을 경우에는 혼합강도는 약해지나 유동이 유로 전체를 균일하게 이용하므로 배가스의 체류시간이 증가한다. 회전로의 내부의 온도는 950~1050℃이지만 하부와 상부의 유동이 혼합이 안되기 때문에 국부적으로 온도가 높은 지점이 발생한다. 또한 회전로 바닥에서 발생한 미연분은 회전로 하부와 혼합실의 오른쪽 벽면을 따라 반응이 서서히 일어난다. 만약 운전시 폐기물층 연소가 늦어져 후연소단 이후에서 많은 연소가 이루어지게 되면 회전로로 유입되는 미연성분도 늘어나게 되며 회전로에서는 유동의 혼합성능이 좋지 않기 때문에 많은 미연분이 혼합실로 빠져나가 혼합실의 온도가 너무 높아질 수 있으므로 주의해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한라산업개발의 연구비 지원으로 진행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 최상민, 저공해 폐기물 소각, 한국과학기술원 기계공학과 열공학 연구실, 2000, pp. 2-9
- [2] The CFD reports of Houthalen Belgium plant, 2001,
- [3] C. Ryu, D. Shin and S. Choi, Combined Bed Combustion and Gas Flow Simulation for a Grate Type Incinerator, *Journal of Air and Waste Management Association*, Vol. 52, no. 2, 2002, pp.189-197
- [4] C. Ryu, D. Shin and S. Choi, Bed

Combustion and Gas Flow Model for MSW Incinerator, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, Vol. 1, 2001, pp.141-148

[5] Jones, W.P. and Lindstedt, Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion, *Combustion and Flame*, Vol. 73, 1988, pp.233-249

[6] 류창국, 신동훈, 최상민, 폐기물 층 연소와 노내 유동 해석, KOSCO Symposium 논문집, 2000