

## MILD 연소 폐기물 소각로에서 배기가스 재순환 흡입구 위치에 따른 유동 특성 연구

하지수<sup>\*†</sup> · 심성훈<sup>\*\*</sup> · 정응호<sup>\*\*\*</sup>

계명대학교 기계자동차공학과<sup>\*</sup>, 한국기계연구원<sup>\*\*</sup>, 계명대학교 환경계획학과<sup>\*\*\*</sup>  
(2014년 7월 26일 접수, 2014년 9월 11일 수정, 2014년 9월 15일 채택)

### A study on the flow characteristics in a MILD combustion waste incinerator with the change of flue gas recirculation inlet location

Ji Soo Ha<sup>\*†</sup> · Sung Hun Shim<sup>\*\*</sup> · Eung Ho Jung<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University,

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Machinery and Materials, <sup>\*\*\*</sup>Department of Environmental Planning, Keimyung

(Received 26 July 2014, Revised 11 September 2014, Accepted 15 September 2014)

#### 요약

MILD 연소는 고온의 배기가스가 연소로 내에 유입되는 연료와 공기의 혼합물과 고온의 배기가스가 만나는 위치에 따라 질소산화물 저감 특성이 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 폐기물소각로에 적용한 MILD 연소로에서 배기가스 재순환 여부에 따른 유동 특성과 배기가스 재순환 위치에 따른 유동 특성을 살펴보고 최적의 배기가스 재순환 위치를 선정하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구의 전산 해석의 결과는 배기가스 재순환이 없는 경우에는 수직 격벽 상부의 단면에서 속도 분포는 수직 격벽 바로 상부에 큰 속도가 있고 더 상부는 역류가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 배기가스 재순환이 있는 경우는 상부 자유공간에서의 유동 균일도를 수직 격벽 상부 단면에서의 x 방향 속도의 %RMS 값으로 비교하였으며 재순환 흡입구 위치가 자유공간 우측 상단에 위치한 경우가 %RMS 값이 57.4%로 가장 작은 값을 가지며 따라서 가장 효과적임을 알 수 있었다.

주요어 : MILD 연소, coanda 노즐, 배기가스 재순환, 흡입구 위치, 유선분포

Abstract - A MILD(Moderate and Intense Low oxygen Dilution) combustion, which is effective in the reduction of NOx, is considerably affected by the recirculation flow position of hot exhaust gas to the combustion furnace. A numerical analysis was accomplished to elucidate the flow characteristics in the MILD combustion incinerator for several cases with or without exhaust gas recirculation. It could be seen from the result of the present numerical study that the flow recirculation could be observed in the upper region over the vertical dividing wall for the case without exhaust gas recirculation. The optimal position of exhaust gas recirculation position was derived by the comparison of %RMS of x directional velocity for the cases with exhaust gas recirculation. The case with the exhaust gas recirculation position at the upper right of free board was the most effective with the smallest value of 57.4% RMS.

**Key words** : MILD combustion, coanda nozzle, flue gas recirculation, entrainment inlet location, streamline distribution

---

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Mechanical and Automotive Engineering,  
Keimyung University  
Tel : 053-580-5919 E-mail : jisooaha@kmu.ac.kr

## 1. 서 론

화력발전소나 폐기물소각로는 석탄이나 가연 폐기물을 연료로 하고 이를 태우기 위해 연소용 공기를 공급하여 연소로에서 연소 반응을 하도록 되어 있다. 연소 반응이 일어나는 화염대는 1500°C 이상의 고온 상태가 되며 공기 중의 산소와 석탄, 폐기물 중의 탄소, 수소 등의 성분과 반응하게 된다. 이렇게 연소 반응이 일어나면 화염대 부근에서 고온 분위기를 유지하기 때문에 공기 중의 질소와 산소가 반응을 하여 질소산화물을 생성하게 된다. 발생한 질소산화물을 저감하기 위하여 화력발전소나 폐기물 소각로는 촉매를 이용한 탈질설비나 장치를 설치하고 있다. 화력발전소나 폐기물 소각로의 탈질설비는 초기 설치비용이 상당히 크며 운전비용과 교체비용 등이 적지 않게 투입되어야 한다. 화석연료의 연소 시에 발생하는 질소산화물의 양을 탈질설비나 장치에 가기 전에 저감시킬 수 있다면 설치비용과 운전비용을 줄일 수 있다. 연소반응 시에 질소산화물을 줄이는 방법의 연구는 지연연소를 통한 연소반응 분산, 배기가스 재순환 등이 연구되고 있으며 최근에 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나인 배기가스 재순환법은 공기흡입구에 배기가스의 일부를 재순환시켜 연소할 때의 최고 온도를 낮춤으로써 NO<sub>x</sub>의 발생을 억제하는 방법이다.

배기가스를 재순환하여 질소산화물을 줄이는 연구 중에 에너지 효율도 함께 향상시키는 MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution) 연소에 관한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다.(1-7) MILD 연소에 관한 연구는 지금까지 연소가스 내부 재순환 방법을 이용한 NO<sub>x</sub> 저감 연구가 진행되었는데 최근에 연소로를 2 pass로 동심원관 형태의 이중 통로를 만들어 고온의 배기가스를 재순환하는 방법에 관한 연구(8,9)도 이루어 졌다. 이 연구에서는 이중 통로 외부와 내부 연소로를 연결하는 통로를 만들어 외부 통로에 벤츄리 효과에 의한 배기가스 재순환을 도모하였다. 벤츄리 효과에 의한 배기가스 재순환 효과 보다 coanda 노즐 효과를 사용할 경우 배기가스 재 유입량이 보다 더 증가하기 때문에 coanda 노즐을 이용한 배기가스 유입량 최적화에 대한 연구도 이루어지고 있다.

본 연구는 폐기물 소각로에서 배기가스를 coanda 노즐을 이용하여 재순환하는 연구를 수행하였는데 배기가스의 재순환을 위해 coanda 노즐을 어느 곳에 설

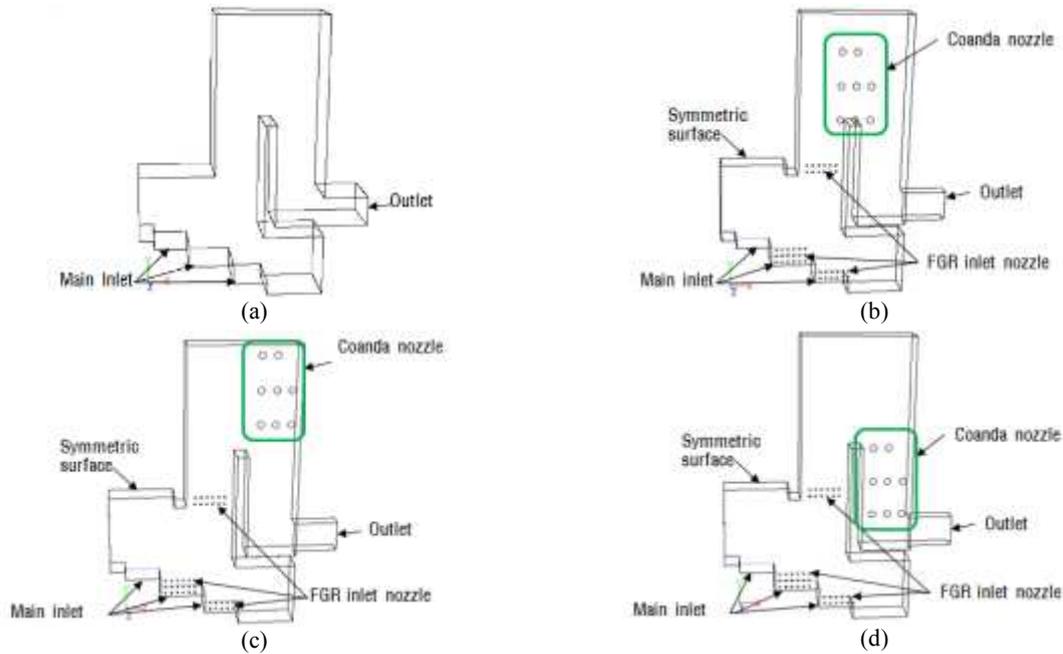
치하는 것이 소각로의 연소 유동에 적합한지를 살펴 보았다. 이를 위해서 실제 설치할 스토커형 폐기물 소각로의 후류측에 coanda 노즐을 설치하고 배기가스를 재투입하는 노즐을 폐기물 소각 연소가 일어나는 곳에 설치하는 형상에 대하여 전산유체 해석을 통해 유동 특성을 살펴봄으로써 coanda 노즐의 최적 위치를 선정하는 것을 본 연구의 목적으로 하였다.

## 2. 수치해석 방법

폐기물 소각로에서 질소 산화물을 저감하기 위해 고온의 배기가스를 재순환하여 연소가 활발히 일어나는 곳에 투입할 때 어느 곳에서 배기가스를 투입할 것인지를 전산유체 유동 해석을 통해 최적화 하는 것이 본 연구의 목적이라고 서론에서 언급하였다. Fig. 1에 본 연구에서 전산 유체 유동해석에 사용한 스토커형 소각로 형상과 배기가스 유입구와 투입구 위치에 대한 형상을 나타내었다.

Fig. 1(a)는 배기가스 재순환이 없는 일반적인 스토커형 소각로 형상을 나타내고 있다. 그림에서 주입구(main inlet)은 스토커형 소각로에서 폐기물을 연소하기 위한 연소용 공기가 투입되는 주된 입구인데 3단으로 구성되어 있다. 연소된 배기가스는 상부로 흘러 자유공간에 체류하면서 미연분이 연소되도록 되어 있다. 이 이후에 중간에 있는 격벽을 지나 하부로 흐르면서 소각로 외부로 배출되게 된다. Fig. 1(b)는 배기가스 재순환을 위해 배기가스를 유입하는 coanda 노즐 위치가 중간 격벽 상부의 소각로 벽면에 8개에서 유입구로 설치되어 있는 형상을 보여주고 있다. 소각로 형상이 대칭면(Symmetric surface)의 중심으로 양쪽에 같은 형상이 존재하기 때문에 coanda 노즐은 실제적으로 총 16개가 설치되게 된다. 이렇게 유입된 배기가스는 소각로 외부로 연결된 배관을 통해 그림에서 배기가스 재순환 입구(FGR inlet nozzle)로 표기된 세 곳에 있는 다공 원형 노즐들로 소각로 내부로 투입된다. Fig. 1(c)는 Fig. 1(b) 형상에서 coanda 노즐이 연소로 자유공간 상부 오른쪽에 위치한 경우이다. Fig. 1(d)는 coanda 노즐이 연소로의 후류 쪽에 위치한 경우이다. 소각로의 z방향 폭은 1.1m이며 y방향 높이는 5.8m, x 방향 길이는 4.8m이다.

본 연구에서는 coanda 노즐 위치에 따라 coanda 노즐을 통해 유입된 배기가스가 재순환 투입되어 주입구(Main inlet)에서 공급된 공기와 잘 혼합되는가와



**Fig. 1.** Configuration of MILD combustion incinerators. (a) Typical stoker type incinerator without coanda nozzle, (b) MILD incinerator with coanda nozzle located at the center of freeboard, (c) MILD incinerator with coanda nozzle located at upper corner of freeboard and (d) MILD incinerator with coanda nozzle located at down stream passage.

연소로 자유공간에서 연소된 배기가스가 효과적으로 체류하는지에 대한 비교 검토를 목적으로 하여 폐기물 소각에 따른 연소반응을 제외한 유동해석을 수행하였으며 이에 따라 본 연구의 유동 수치해석에 사용한 지배방정식은 3차원 연속방정식, 운동량방정식, realizable  $k-\epsilon$  난류 모델 방정식과 온도 분포 해석을 위해 에너지방정식을 이용하였다.

Fig. 1에서 (a) 형상의 경우를 Case 1, (b)는 Case 2, (c)는 Case 3 그리고 (d)는 Case 4로 표기하기로 한다. 4 가지 경우에 대하여 주입구(Main inlet), coanda 노즐의 유입, 배기가스 재순환 입구(FGR inlet nozzle)에서의 경계조건은 Table 1에 나타내었다. coanda 노즐에서 속도가 음의 값을 가지는 것은 이곳에서 흡입되기 때문이다. 또한 이곳에서 온도 경계조건이 주어지지 않는 것은 연소로 내의 배기가스가 흡입되기 때문에 연소로 내부의 온도 변화에 영향을 주지 않기 때문이다.

각 경우의 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘(13)을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 240만개의 격자로 구성하였다.

**Table 1.** Boundary conditions for the present analysis

Boundary name	Velocity (m/s)	Temperature (°C)
Main inlet	1.5	917
coanda nozzle	-21.6	-
FGR inlet nozzle	49.5	600

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 배기가스 재순환이 없는 경우와 재순환이 있는 경우의 소각로 유동 특성 비교

본 연구는 스토커형 폐기물 소각로의 후류 측에 coanda 노즐을 설치하고 배기가스를 재투입하는 노즐을 폐기물 소각 연소가 일어나는 곳에 설치하는 형상에 대하여 전산유체 해석을 통해 유동 특성을 살펴봄으로써 coanda 노즐의 최적 위치를 선정하는 것을 목적으로 하였다. 이렇게 하기 위하여 우선적으로 배기가스 재순환이 없는 기존의 스토커 소각로(Case 1) 내부 유동 특성을 살펴보고 배기가스 재순환이 있을 경우의 기준인 Case 2의 형상에서 유동 특성을 비교하기로 한다.

Fig. 2에 배기가스 재순환이 없는 경우에 속도분포

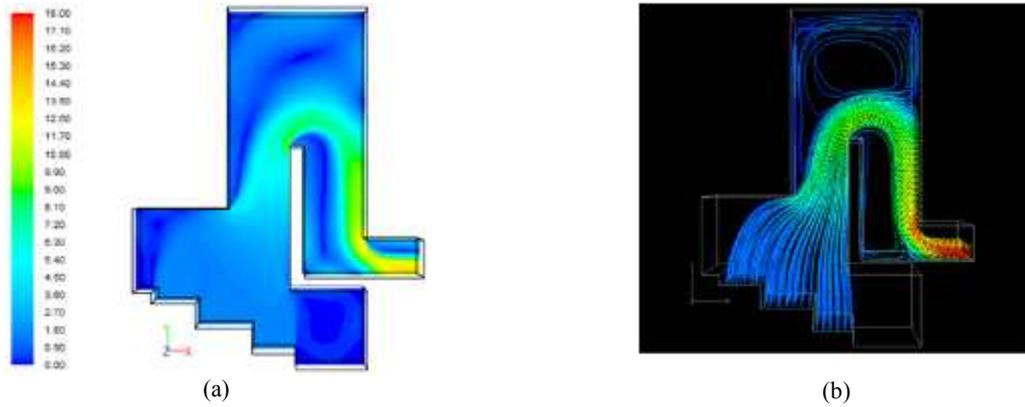


Fig. 2. Velocity magnitude contour and streamline for Case 1.

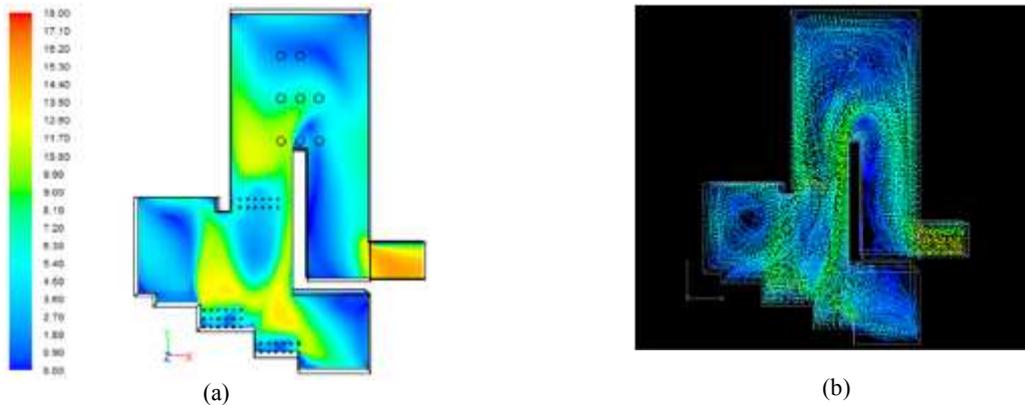


Fig. 3. Velocity magnitude contour and streamline for Case 2.

와 입자 궤적으로 나타낸 유선분포를 나타내었다. 속도 분포에서 속도 크기는 m/s이다. 속도분포와 유선 분포를 보면 연소용 공기 주입구에서 나온 공기가 소각로 상부로 흘러가지만 유동의 대부분이 가운데 격벽을 지나고 난 뒤 곧 바로 출구로 흘러가서 상부의 자유공간으로 유동이 흐르는 것을 관찰할 수 없음을 알 수 있다. 이렇게 되면 상부의 자유공간은 활용이 되지 않아 연소과정 중의 배기가스가 연소로 내에서 충분한 체류시간을 가지지 못하고 불완전한 연소가 일어날 가능성이 크다. 이것을 방지하기 위해서는 소각로의 크기를 더 크게 하여 체류시간을 늘려야한다. 이렇게 되면 소각로 건설시의 재료비 상승의 원인이 되어 효율적인 소각로 설계가 되지 못하게 된다.

Fig. 3에 배기가스를 유입하는 coanda 노즐 위치가 중앙 격벽 상단에 있는 경우인 Case 2의 속도분포와 유선분포를 나타내었다. 속도분포는 z방향으로 연소로의 중앙 단면에서 나타낸 것인데 배기가스 재순환 위치가 양 측면에 대칭적으로 설치되어 있어서 재투입 노즐들의 상단 부근 위치에서 양측에서 나온

재순환 배기가스 흐름이 충돌하면서 상대적으로 큰 속도분포를 보여주고 있다. 이러한 유동 현상은 유선 분포에서도 관찰할 수 있는데 특히 배기가스 재유입이 없는 Case 1의 유선분포에서 관찰되었던 상부의 자유공간에도 연소가스의 흐름이 상대적으로 잘 흘러가서 자유공간의 활용이 되고 있음을 알 수 있다. 따라서 Case 1에 비하여 충분한 체류시간을 가지고 보다 더 완전 연소를 기할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. 배기가스 재순환 흡입구 위치에 따른 유동 특성 비교

coanda 노즐을 이용한 배기가스 재순환은 연소반응이 활발한 연소 반응대에 배기가스를 투입하여 질소산화물( $NO_x$ )를 저감하는 효과가 우수하다. 그러기 위해서 유입한 배기가스의 재순환 위치는 연소반응이 활발한 주 입구 영역으로 배치하였었다. coanda 노즐로 유입하는 배기가스의 위치는 상단의 자유공간에서

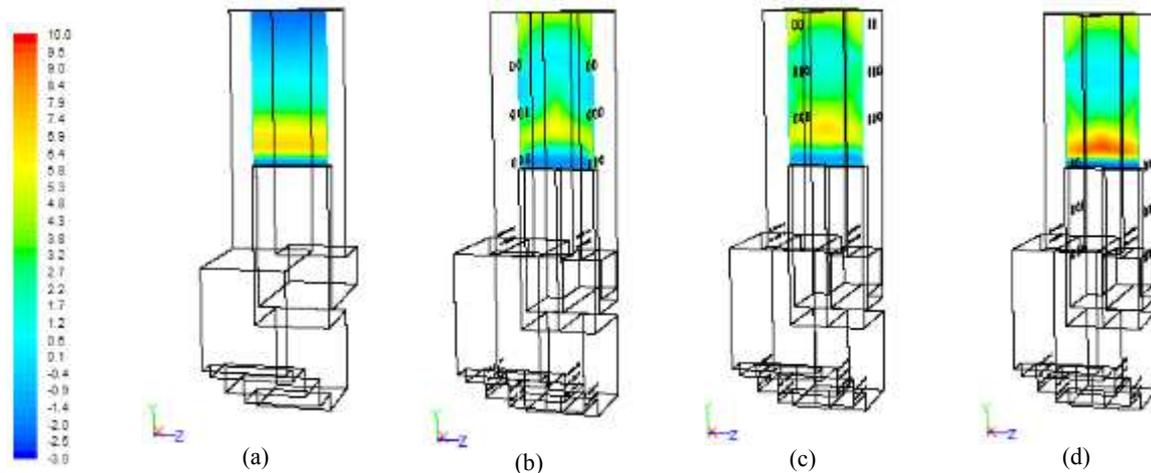


Fig. 4. Contours of x direction velocity at the plane over the vertical wall in the furnace.

연소된 가스가 체류하면서 충분한 반응 공간을 확보할 수 있는지 여부를 결정하기 때문에 배기가스 재순환 투입구의 위치는 배기가스가 완전 연소할 수 있는지 여부를 결정하는 중요한 변수이다.

Fig. 4에 배기가스 재순환 투입구 위치에 따른 중앙 수직 격벽 상부 면에서 x 방향 속도 분포를 나타내었다. 상부 면에서 x 방향 속도를 비교한 이유는 이 면을 통과하는 x 방향 속도가 이 단면에서 균일하면 상부의 자유공간으로 배기가스가 충분히 체류한다고 볼 수 있고 반면에 수직 격벽에 인접한 부분의 x 방향 속도가 편중되어 있으면 상부의 자유공간에 충분히 체류하지 못하여 상부의 자유 공간 활용이 원활하지 않아 완전 연소가 되지 않을 가능성이 크다고 볼 수 있다. Fig. 4(a)를 보면 x 방향 속도는 수직 격벽 바로 인접한 상부에 크게 나타나고 더 상부에는 속도가 낮게 나타나거나 음의 값, 즉 역류가 일어나고 있는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 대부분의 유동은 상부의 자유공간을 흐르지 않고 수직 격벽을 타고 넘어 흐르는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)에 나타낸 Case 2의 속도 분포를 보면 Case 1에 비하여 상부 자유 공간으로 연소된 가스가 잘 흐르는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)에 나타낸 Case 3의 경우도 Case 2와 유사하게 상부 자유공간의 속도 분포가 Case 1 보다 더 균일한 것을 알 수 있다. Fig. 4(d)에 나타낸 Case 4는 배기가스 재순환 흡입구가 수직 격벽 후류 측에 배치되어 있어서 Case 2와 Case 3에 비하여 수직 격벽 인접한 상부에 유동이 편중되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에서 살펴본 수직 격벽 상부의 단면에서 x

Table 2.  $\overline{V}_x$  and % RMS at the plane over the vertical wall in the furnace.

Case	$\overline{V}_x$ (m/s)	%RMS (%)
Case 1	1.557	236.4
Case 2	2.252	84.9
Case 3	3.184	57.4
Case 4	3.189	78.3

방향 속도분포의 균일도에 대한 정량적 평가는 이 면에서의 평균 속도에 대한 다음과 같은 %RMS 값으로 평가할 수 있다.  $\overline{V}_x$ 는 단면에서의 x 방향 속도 평균이다.

$$\%RMS = \frac{\int \sqrt{(V_x - \overline{V}_x)^2} dA}{\overline{V}_x A} \quad (1)$$

위 식을 이용하여 4 가지 Case에 대한 값을 Table 2에 정리하였다. Case 1의 x 방향 평균 속도는 다른 경우에 비하여 작는데 이는 배기가스 재순환으로 투입 되는 것이 없기 때문이다. Case 1의 % RMS값이 다른 경우에 비하여 큰 이유도 x 방향 평균 속도가 작기 때문이다. %RMS의 크기 순서는 Case 1>Case 2>Case 4>Case 3으로 나타났는데 이 크기 순서가 상부 자유공간에서의 유동 균일도 측도가 되며 이 값이 작을수록 상부 자유공간에서 유동이 균일하며 연소된 가스가 상부의 자유공간으로 원활히 잘 흐르기 때문에 보다 더 완전 연소를 기할 수 있을 것으로 판

단된다. 이러한 결과로부터 4가지 Case 중에 Case 3, 즉 배기가스 재순환 흡입구가 상부 자유공간 후류 측에 설치하는 것이 4가지 Case 중에 가장 효과적임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

지금까지 폐기물 소각로에서 배기가스를 coanda 노즐을 이용하여 재순환하는 연구를 수행하였는데 배기가스의 재순환을 위해 coanda 노즐을 어느 곳에 설치하여 연소된 배기가스를 흡입하는 것이 효과적인지를 전산유체 유동해석을 통해 살펴보았으며 이에 대한 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 배기가스 재순환이 없는 경우와 재순환이 있는 경우의 소각로 유동 특성 비교  
배기가스 재순환이 없는 경우는 연소용 공기 주입구에서 나온 공기가 소각로 상부로 흘러가지만 유동의 대부분이 가운데 격벽을 지나고 난 뒤 곧 바로 출구로 흘러가서 상부의 자유공간 활용이 거의 이루어 지지 않았다. 배기가스 재순환이 있는 경우는 상부의 자유공간에도 연소 가스의 흐름이 상대적으로 잘 흘러가서 자유공간의 활용이 되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 배기가스 재순환이 없는 경우에 비하여 충분한 체류시간을 가지고 보다 더 완전 연소를 기할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 2) 배기가스 재순환 흡입구 위치에 따른 유동 특성 비교  
배기가스 재순환이 없는 경우는 수직 격벽 상부의 단면에서 속도 분포는 수직 격벽 바로 상부에 큰 속도가 있고 더 상부는 역류가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 배기가스 재순환이 있는 경우는 재순환 흡입구 위치에 따라 유속 분포가 약간씩 다르지만 상부 자유공간에도 역류가 일어나지 않고 상대적으로 큰 속도 분포가 있는 것을 확인할 수 있었다. 상부 자유공간에서의 유동 균일도를 수직 격벽 상부 단면에서의 x 방향 속도의 %RMS 값으로 비교하였으며 재순환 흡입구 위치가 자유공간 우측 상단에 위치한 Case 3이 %RMS 값이 57.4%로 가장 작은 값을 가지며 따라서 가장 효과적임을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국기계연구원 주요사업의 지원과 대구녹색환경지원센터의 지원에 의한 연구 결과입니다.

#### References

1. J.A. Wuuning and J.G. Wunning: "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation", Prog. Energy Combust.Sci., vol.23, 81-97, (1997)
2. M. Katsuki, T.Hasegawa: "The science of technology of combustion in highly preheated air", 27 Symp (Int) Combustion, 3135-3146, (1998)
3. A. Cavaliere, M. De Joannon, R. Ragucci, "Mild combustion of high temperature reactants", 2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion (1999)
4. T. plessing, N. Peters, J.G. Wunning: "Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exxxhaust gas recirculation", 27 Symp (Int) Combustion, 3197-3204, (1998)
5. Frazan, H., Maringo, G. J., Riggs, J. D., Yagiela, A. S. and Newell, R. J.: "Reburning with Powder River Basin Coal to Achieve SO an NO Compliance", Proc. of the Power - Gen Sixth International Conference, Dallas, 175-187, (1993)
6. Ji Soo Ha, Tae Kwon Kim and Sung Hoon Shim: "A numerical study of the air fuel ratio effect on the combustion characteristics in a MILD combustor", Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 32, No. 6, 587-592, (2010)
7. Tae Kwon Kim, Sung Hoon Shim, Hyuk Sang Chang and Ji Soo Ha: "A numerical study of the combustion characteristics in a MILD combustor with the change of the fuel and air nozzle position and air mass flow rate", Korean Society of Environmental Engineers,

- Vol. 33, No. 5, 325-331 (2011)
8. Sung Hoon Shim and Ji Soo Ha: "A study on the flow entrainment characteristics of a coaxial nozzle used in a MILD combustor with the change of nozzle position and flow condition", Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 34, No. 2, 103-108, (2012)
  9. Ji Soo Ha, Sung Hoon Shim: "A study on the exhaust gas recirculation in a MILD combustion furnace by using a Venturi nozzle", Journal of Energy Engineering, Vol. 22, No. 2, 413-419, (2013)
  10. B.E. Launder and D.B. Spalding: "The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer methods in Applied Mechanics and Engineering", 269-289, (1974)
  11. B.F. Magnussen and B.H. Hjertager: "On mathematical model of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", In 16th Symp. on Combustion, (1976)
  12. F. Liu, H.A. Becker and Y. Bindar: "A comparative modeling in gas-fired furnaces using the Simple Grey Gas and the Weighted-Sum-of-Grey-Gases Models", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, 3357-3371, (1998)
  13. S.V. Patankar: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 126-131, (1980)