

코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너의 냉간 유동 특성에 관한 연구

하지수[†] · 박찬혁* · 심성훈** · 정상현**

계명대학교 기계자동차공학과, 계명대학교 기계공학과*, 한국기계연구원**
(2016년 8월 30일 접수, 2016년 10월 21일 수정, 2016년 10월 25일 채택)

A Study of Cold Flow Characteristics of a Flue Gas Recirculation Burner using Coanda Nozzles

Ji Soo Ha[†] · Chan Hyuk Park* · Sung Hun Shim** · Sang Hyun Jung**

Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, Korea
Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University*, Daegu 1000, Korea, Korea Institute of
Machinery and Materials**

(Received 30 August 2016, Revised 21 October 2016, Accepted 25 October 2016)

요 약

연소기에서 연소반응과정이 일어날 때 연소로 내 고온의 온도 분위기에서 공기 중의 산소와 질소가 반응하여 질소산화물이 발생하게 된다. 발생한 질소산화물을 저감하기 위하여 화력발전소나 폐기물 소각로는 촉매를 이용한 탈질설비를 설치하고 있는데 이에 따른 설치와 유지비용이 많이 소요된다. 연소기에서 질소산화물을 저감하기 위한 여러 가지 방법 중에 배기가스 재순환 방법이 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서는 배기가스 재순환 배관에 코안다 노즐을 사용하여 배기가스를 재순환하는 재순환 버너에 대하여 전산유체해석을 통해 연구를 수행하였으며 냉간 유동에서 배기가스 재순환 유동 특성을 살펴보고 코안다 노즐의 공기 측 간격 변화와 공기 유량 변화에 따른 배기가스 재순환 유량 특성을 살펴보았다. 본 연구의 버너 형상은 배기가스 재순환 흡입구와 출구는 원통 버너의 중심을 향하지 않고 접선 방향으로 설치되어 있어서 버너 내부에서 선회 유동이 형성 되었으며 이에 따라 원통 내부의 중심부분에 역류가 일어나는 특성을 관찰하였다. 또한, 코안다 노즐의 공기 측 간격은 0.5mm일 때는 배기가스 재순환 유량이 공기량 보다 약 2.5배 이었고 1.0mm일 때는 약 1.5배로 나타났으며 같은 공기 측 간격에서 공기량을 증가하면 배기가스 재순환 유량은 약간 증가하는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 배기가스 재순환 버너, 코안다 노즐, 냉간 유동, 선회유동, 배기가스 재순환 유량

Abstract - Nitrogen oxide is generated by the chemical reaction of oxygen and nitrogen in higher temperature environment of combustion facilities. The NOx reduction equipment is generally used in the power plant or incineration plant and it causes enormous cost for the construction and maintenance. The flue gas recirculation method is commonly adopted for the reduction of NOx formation in the combustion facilities. In the present study, the computational fluid dynamic analysis was accomplished to elucidated the cold flow characteristics in the flue gas recirculation burner with coanda nozzles in the flue gas recirculation pipe. The inlet and outlet of flue gas recirculation pipes are directed toward the tangential direction of circular burner not toward the center of burner. The swirling flow is formed in the burner and it causes the reverse flow in the burner. The ratio of flue gas recirculation flow rate with the air flow rate was about 2.5 for the case with the coanda nozzle gap, 0.5mm and it was 1.5 for the case with the gap, 1.0mm. With the same coanda nozzle gap, the flue gas recirculation flow rate ratio had

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 053-580-5919 E-mail : jisooaha@kmu.ac.kr

a little increase when the air flow rate changes from 1.1 to 2.2 times of ideal air flow rate.

Key words : Flue gas recirculation burner, Coanda nozzle, Cold flow, Swirl flow, Flue gas recirculation flow rate

1. 서론

화석연료를 이용하여 에너지를 만드는 과정인 연소 반응과정에서 질소는 공기와 활발하게 반응하지 않은 반응성이 낮은 물질이다. 그러나 고온의 온도범위에서는 질소와 산소가 반응을 하여 질소산화물(NOx)이 생성된다. 화력발전소나 자동차에서는 질소산화물을 저감하기 위하여 탈질설비를 설치하는데 탈질설비는 설치비용과 운전비용이 적지 않게 투입되어야 한다. 지금까지 연소반응 과정에서 발생하는 질소산화물을 저감시킴에 대하여 많은 연구가 진행되어 오고 있는데 지연연소를 통한 연소반응 분산, 배기가스 재순환 등이 연구되고 있으며^(1,2), 특히 연소로 전체의 온도를 균일화하면서 연소온도를 낮추어 질소산화물을 저감하는 MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution) 연소가 에너지 효율과 질소산화물을 저감시키는데 효과적이라는 연구들이⁽³⁻⁹⁾ 이루어지고 있다. 최근에는 코안다 노즐을 이용하여 소각로의 배기가스를 재순환하여 질소산화물을 저감하는 연구^(10,11)도 이루어 졌다.

본 연구는 코안다 노즐을 이용하여 질소산화물을 저감하는 배기가스 재순환 버너의 최적 설계를 위해 우선 코안다 노즐을 통한 배기가스 재순환 유동 특성을 규명하는 것을 목적으로 하고 있으며 본 연구에서는 연소과정이 없는 냉간 유동에서 재순환 유동 특성을 살펴보았다. 이를 위하여 연소용 공기의 유량과 코안다 노즐의 간격을 매개변수로 하여 배기가스 재순환 유량 특성을 파악하고자 한다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서 사용한 배기가스 재순환 버너의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 원통형이며 원통 가운데에 연료 공급용 배관이 놓여있다. 원통 버너의 외부에 두 개의 배관을 연결하여 배기가스를 재순환하도록 하였다. 배기가스를 재순환하는 원동력은 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 두 개의 외부 배관 가운데에 코안다 노즐을 설치하여 작은 간격을 통해 연소용 공기를 고속으로 분사함으로써 작은 간격 출구에서 낮

은 압력을 생성시켜 원통 버너의 후류에 있는 배기가스를 흡입하도록 되어 있다. 또한 외부의 배관은 흡입구와 배출구는 같은 평면상에 있도록 한 것이 아니며 Fig. 2(c)에서 보논바와 같이 혼합가스의 배출은 선회유동이 만들어 질 수 있도록 원통 버너의 접선방향으로 각도 22.5°로 위치해 있다. 원통의 직경은 160mm 이고 길이는 1,180mm이다. 연료노즐의 직경은 5.15mm 이다. Fig. 2에는 전산유체해석에 필요한 격자를 나타내었는데 본 연구에서는 격자수가 약 800만개로 구현하였다.

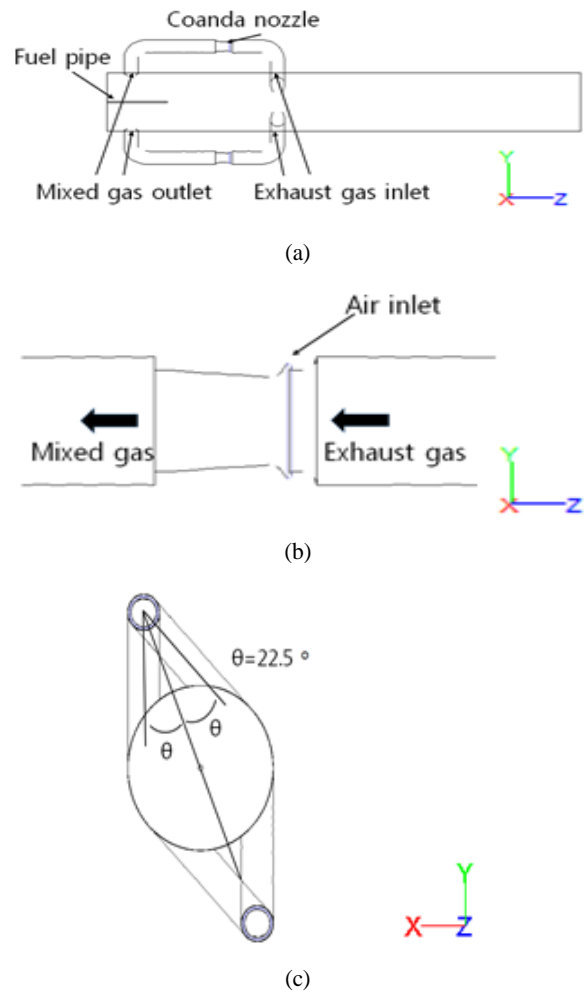
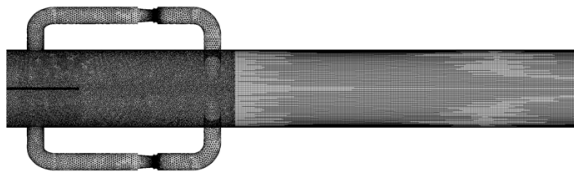
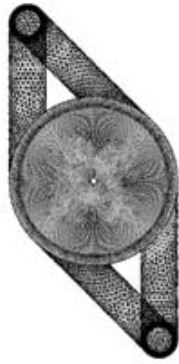


Fig. 1. Geometry configuration of flue gas recirculation burner with coanda nozzle.



(a) frontal view



(b) backward view

Fig. 2. Generated mesh for CFD analysis at the sections of frontal view and backward view.

본 연구는 ANSYS WORKBENCH 모델링 프로그램을 이용하여 모델링 및 격자를 생성하였으며, 전산 열 유체 사용 해석 프로그램인 FLEUNT 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 지배방정식은 3차원 정상상태 연속방정식, 운동량방정식 그리고 $k-\varepsilon$ 난류 방정식으로 이루어 졌으며 아래에 나타내었다.

연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

앞선 두 방정식의 종결은 난류 모델을 통해서 이루어지는, 난류모델은 $k-\varepsilon$ 난류모델을 사용하였으며 아래에 관련 식을 정리하였다.

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서 난류 eddy 점성은 다음과 같이 정의 된다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

난류 에너지에 대한 보존 방정식과 소산율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (6)$$

유효 난류 점성은 다음과 같이 정의 된다

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (7)$$

난류 에너지의 생성율은 다음과 같이 주어진다.

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

본 연구에 사용한 연료는 메탄이며 공기와 메탄의 냉간 유동 특성을 살펴보는 것을 목적으로 한다고 서론에서 언급하였다. 메탄 유량을 $5.15 \times 10^{-4} \text{kg/s}$ 로 고정하였는데 이 유량에서 이론 공기량(Q_{aidel})은 $8.61 \times 10^{-3} \text{kg/s}$ 이다. 실제 공기량(Q_{areal})은 이론 공기량의 1.1배, 1.5배, 1.8배, 2.2배로 변화하였다. 코안다 노즐의 공기 출입구 간격은 0.5mm인 것과 1mm인 것, 두 가지에 대하여 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 배기가스 재순환 버너의 냉간 유동 특성

코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너는 Fig. 1에서와 같이 연소기 후류에서 배기가스를 흡입하고 상부에서 연소용 공기와 혼합된 가스를 분출한다. 이 때

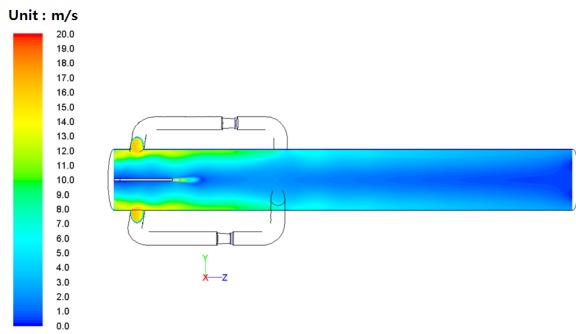


Fig. 3. Contour of velocity magnitude at the section of $x=0\text{mm}$. Air flow ratio : 1.1 and coanda nozzle gap : 0.5mm.

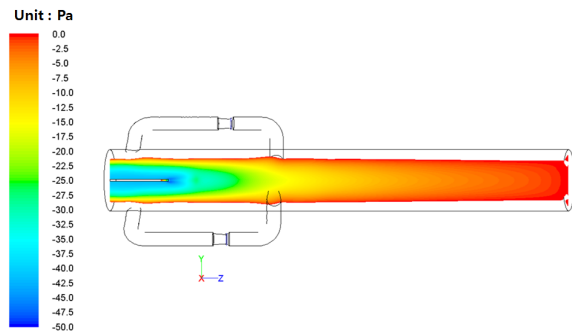


Fig. 4. Contour of static pressure at the section $x=0\text{mm}$. pressure range : -50~0 Pa.

배기가스 재순환 배관의 출구는 원통 버너의 중심을 향하는 것이 아니라 선회 유동을 유발하도록 접선 방향으로 분출하도록 되어 있다. Fig. 3에 공기비 1.1이고 코안다 노즐 간격이 0.5mm인 경우에 원통 버너 중간인 $x=0\text{mm}$ 에서 속도 분포를 나타내었다. Fig. 3에서 보면 혼합가스 배출구에서 접선 방향으로 분출된 유동이 버너의 중간으로 흘러가는 것 보다 원통 버너의 가장자리로 많은 부분이 흘러가는 것을 관찰할 수 있다. 원통의 가운데 부분의 속도는 상대적으로 작음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 Fig. 3에서의 유동 조건에서 $x=0\text{mm}$ 단면의 압력분포를 나타내었는데 압력분포의 범위는 -50Pa에서 0Pa이다. 연료노즐을 포함한 영역이 압력이 낮은 영역임을 알 수 있고 원통의 가장 자리 외에는 대부분의 영역이 대기압보다 낮은 압력을 가지고 있음을 알 수 있다. 이로부터 연료노즐을 포함한 영역에서 축 방향 속도가 음의 값을 가질 수 있음을 예측할 수 있다. 즉, 이 영역에서 역류가 일어남을 예측할 수 있다.

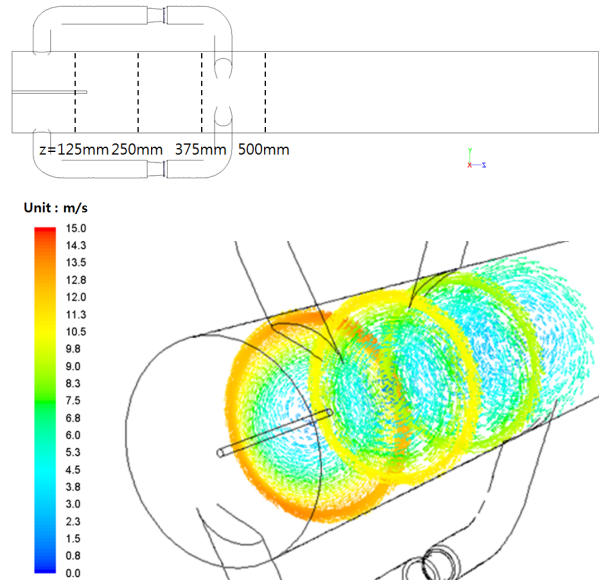


Fig. 5. Several velocity vector plots at $z=125\text{mm}$, 250mm, 375mm and 500mm.

Fig. 5에는 원통 버너 내부에서 몇 개의 단면에서 속도벡터 분포를 나타내었다. 축 방향으로 $z=125\text{mm}$, 250mm, 375mm, 500mm에서 속도벡터 분포인데 Fig. 3에서 관찰한 것과 같이 원통 가장자리에서 속도의 크기가 크다. 또한 혼합가스의 배출 방향이 원통의 접선방향이므로 원통 내부의 속도벡터는 선회유동을 이루고 있음을 잘 관찰할 수 있다.

Fig. 6에는 원통 내부의 유동 흐름을 관찰하기 위해 $z=250\text{mm}$ 위치의 단면에서 시작한 시간에 따른 유선 변화를 나타내었다. Fig. 6(a)에서 살펴보면 0.1초 후의 유선 변화는 버너 원통 가장 자리에서는 축 방향(z 방향)으로 흘러가고 원통의 가운데는 역방향으로 흐름을 알 수 있다. 특히 원통의 가운데에서 가장 큰 역류 속도임을 알 수 있다. 0.2초에서 0.5초까지의 유선 변화에서도(Fig. 6(b), (c)) 유사한 경향을 관찰할 수 있다. 1초 후인 Fig. 6(d)에서는 배기가스 재순환 배관으로 흐름을 관찰할 수 있고 1.5초에서 2.0초(Fig. 6(e), (f))에서는 코안다 노즐을 지나 혼합가스가 원통 버너의 출구에서 선회 유동이 되어 흐르는 것을 관찰할 수 있다.

배기가스를 재순환하는 원동력은 재순환 배관에 설치되어 있는 코안다 노즐에서 분출하는 고속 공기 유동이다. Fig. 7에 Fig. 3의 유동 조건에서 $x=0\text{mm}$ 단면에서 코안다 노즐 부근의 속도벡터를 나타내었다. 코안다 노즐에서 연소용 공기가 분출하는 곳의 공기의

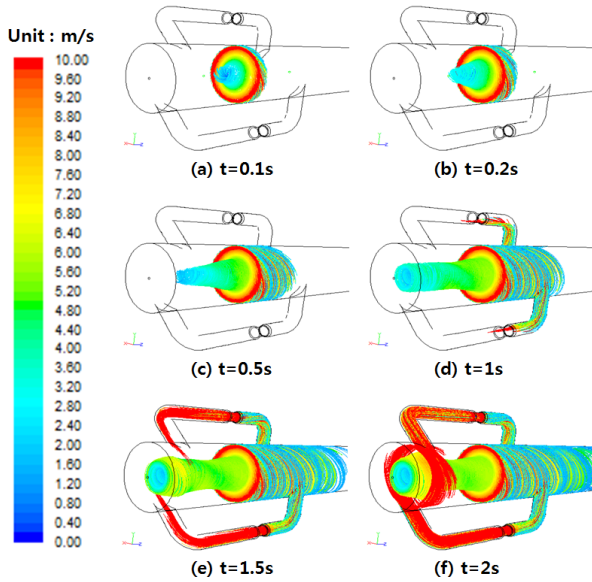


Fig. 6. Flow visualization in the burner started at the section $z=250\text{mm}$.

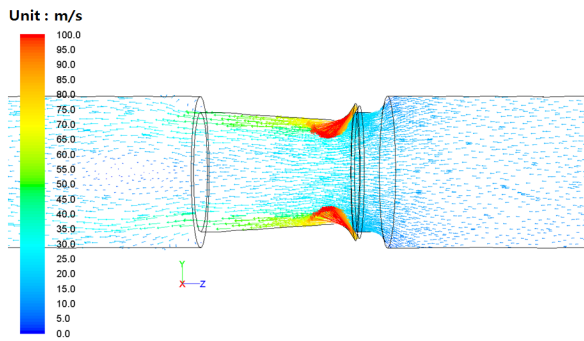
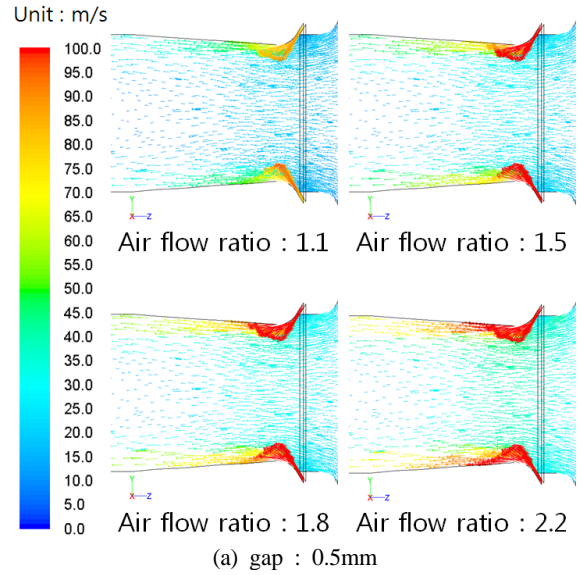


Fig. 7. Velocity vector plot at the center section of coanda nozzle.

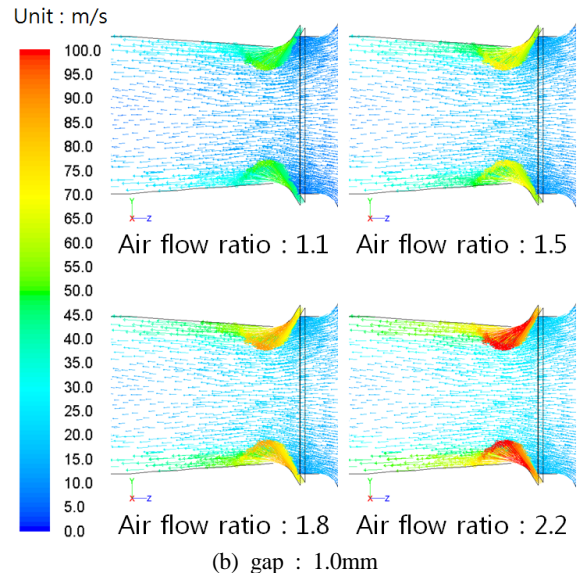
최대속도는 약 100m/s 이며 이렇게 고속으로 분출하면 베르누이 방정식으로 알 수 있듯이 고속으로 분출된 곳의 압력이 낮아지고 이것이 배기가스를 재순환하는 원동력으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너에서 유동 조건과 형상 변화에 따른 재순환 유동 특성을 파악하는 것이 목적이다. 다음절에서 코안다 노즐에서의 유량과 코안다 노즐의 공기 분출 간격 변화에 따른 재순환 유량 특성을 살펴보기로 한다.

3-2. 공기 유량과 간극 변화에 따른 배기가스 유입량 특성

앞 절에서는 공기비 1.1이고 코안다 노즐의 공기 출구



(a) gap : 0.5mm



(b) gap : 1.0mm

Fig. 8. Comparison of velocity vector plots at the center section of coanda nozzle with the change of air flow ratio and coanda nozzle gap.

간격이 0.5mm 인 경우에 대하여 원통 버너 내부의 속도 분포, 압력분포 그리고 유선의 변화를 관찰하여 코안다 노즐을 이용한 재순환 버너 내부의 유동 특성을 살펴보았다. 또한 배기가스가 재순환하는 원동력은 배기가스 배관에 설치되어 있는 코안다 노즐의 고속 분사 공기에서 발생하는 낮은 압력이라는 것 또한 관찰할 수 있었다.

Fig. 8에 공기 유량과 코안다 노즐의 공기 출구 간격 변화에 따른 코안다 노즐 부근에서의 속도벡터를

Table 1. Entrained flow rate with coanda nozzle gap 0.5mm

Air flow ratio	1.1	1.5	1.8	2.2
Air flow rate (<i>kg/s</i>)	0.0047	0.0065	0.0078	0.0095
Entrained flow rate (<i>kg/s</i>)	0.0118	0.0164	0.0198	0.0244
Mixed flow rate (<i>kg/s</i>)	0.0165	0.0229	0.0276	0.0339

Table 2. Entrained flow rate with coanda nozzle gap 1.0mm

Air flow ratio	1.1	1.5	1.8	2.2
Air flow rate (<i>kg/s</i>)	0.0047	0.0065	0.0078	0.0095
Entrained flow rate (<i>kg/s</i>)	0.0071	0.0098	0.0119	0.0137
Mixed flow rate (<i>kg/s</i>)	0.0118	0.0163	0.0197	0.0232

나타내었다. Fig. 8(a)는 노즐 간격이 0.5mm일 때 공기비를 1.1, 1.5, 1.8, 2.2로 변화한 경우의 속도벡터인데 공기비가 증가할수록 공기노즐에서 속도 크기가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 노즐 간격이 1.0mm인 Fig. 8(b)를 살펴보면 공기비가 증가하면 공기노즐에서 속도가 증가하는 것은 노즐 간격 0.5mm에서와 같은 경향을 보여주고 있으며 같은 공기비에서는 노즐 간격이 0.5mm일 때 보다는 공기 분출 속도가 작아짐을 관찰할 수 있다. 이는 간격이 크면 유동이 통과하는 단면적이 증가하여 속도가 감소하는 것이다. 이로써 노즐 간격이 0.5mm일 때가 같은 공기 유량에서 속도 크기가 크기 때문에 이 영역에서 압력이 상대적으로 낮아져서 배기가스를 재순환하는 유량이 커질 것으로 예측할 수 있다.

공기유량과 노즐 간격 변화에 따른 재순환 유량의 변화에 대한 정량적인 비교는 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 1에는 코안다 노즐간격이 0.5mm인 경우에 공기비에 따른 유입공기량과 혼합공기량을 비교하였다. 공기비가 1.1일 때 공기량이 0.0047kg/s인데 배기가스 유입량은 0.0118kg/s로 공기량 보다 2.51배 많은 양이 유입된다. 공기비가 1.5, 1.8, 2.2배로 증가할 때 유입량 비는 약간 더 증가한다. Table 2에는 코안다 노즐간격이 1.0mm일 때의 결과를 나타내었는데 공기량이 0.0047kg/s일 때 유입량은 0.0071kg/s로 공기량보다 1.51배 많게 유입된다. 이는 노즐간격이 0.5mm일 때보다 작은 양이다. 공기비가 증가할 때 Table 2에서의 결과와 유사하게 약간의 유입량비가

증가하는 것을 알 수 있다. 노즐 간격이 큰 경우는 노즐 출구에서 공기의 최대 속도가 작아지기 때문에 이에 따라 배기가스를 유입하는 압력차 힘이 줄어들기 때문이다. 노즐 간격이 1.0mm일 때 유입량이 노즐간격 0.5mm의 공기비 1.1의 유입량과 유사한 경우는 공기비가 1.8배일 때인데 이렇게 한 경우가 노즐 출구에서 속도가 거의 유사하게 된다. 즉, 노즐 출구에서 공기의 속도가 유사하면 배기가스 유입량은 유사한 결과를 가져온다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

코안다 노즐을 이용하여 배기가스를 재순환하는 배기가스 재순환 버너의 최적설계를 위해 재순환 버너의 냉간 유동을 전산해석을 통해 살펴보았으며 이에 관한 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

재순환 버너의 냉간 유동 특성으로 코안다 노즐에서 고속으로 분출한 공기가 배기가스를 재순환하는 원동력으로 작용하였다. 배기가스 재순환 버너의 입출구가 버너 원통의 중심을 향하는 것이 아니라 접선방향으로 설치되어 있어서 버너 내부에 선회유동을 유발하도록 되어 있어서 버너 내부의 중심 부근에 낮은 압력 영역을 형성하고 이에 따라 버너 가장자리 부근에는 순방향 선회 유동이 일어나고 중심부근에는 선회 역류가 형성되었다.

코안다 노즐에서 분출한 고속의 공기가 버너의 후류에 위치한 배기가스 재순환 흡입구에서 배기가스를

흡입하여 버너로 재투입되는데 코안다 노즐의 간격이 0.5mm이고 공기비가 1.1일 때 투입 공기량에 비해 재순환 흡입한 유량이 약 2.5배 더 많이 유입되었다. 공기비를 증가하면 유입량 비는 약간 증가한다. 또한 코안다 노즐 간격이 1.0mm일 때도 간격이 0.5mm일 때와 유사한 결과를 보여 주었으며 간격이 크면 공기의 분출속도가 낮아져서 유입량비가 약 1.5로 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 유입량 비를 증가하기 위해서는 코안다 노즐 간격을 작게 하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 연구 결과입니다.

References

1. Kim, K. L., Kim, H. J., Park, B. S. and Kim, J. J., "NO_x Emission Characteristics of 100kW Gas Burner by FGR", The Korean Society of Combustion, 1-7, (2001)
2. Bae, M. W., Jung, K. H., Cho, Y. S. and Kim, Y. S., "Effect of Recirculated Exhaust Gas on Boiler Efficiency with FGR System", The Korean Society of Mechanical Engineers, 3206-3211, (2005)
3. Wuening, J. A., Wunning, J. G., "Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation", Progress in Energy and Combustion Science, 23, 81-97, (1997)
4. Katsuki, M., and Hasegawa, T., "The Science of Technology of Combustion in Highly Preheated Air", 27 Symposium International Combustion, 3135-3146, (1998)
5. Cavaliere, A., De Joannon, M. and Ragucci, R., "Mild Combustion of High Temperature Reactants", International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 20-22, (1999)
6. Plessing, T., Peters, N. and Wunning, J. G., "Laseroptical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation", 27 Symposium International on Combustion, 3197-3204, (1998)
7. Frazan, H., Maringo, G. J., Riggs, J. D., Yagiela, A. S. and Newell, R. J., "Reburning with Powder River Basin Coal to Achieve SO₂ and NO_x Compliance", Proceeding of the Power - Gen 6th International Conference, 175-187, (1993)
8. Ha, J. S., Kim, T. K. and Shim, S. H., "A Numerical Study of the Air Fuel Ratio Effect on the Combustion Characteristics in a MILD Combustor", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 32(6), 587-592, (2010)
9. Kim, T. K., Shim, S. H., Chang, H. S. and Ha, J. S., "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", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 33(5), 325-331, (2011)
10. Ha, J. S., Shim, S. H. and Jung, E. H., "A Study on the Flow Characteristics in a MILD Combustion Waste Incinerator with the Change of Flue Gas Recirculation Inlet Location", Journal of Energy Engineering, 23(3), 51-57, (2014)
11. Ha, J. S., Shim, S. H., "Characteristics of Entrainment Flow Rate in a Coanda Nozzle with or without Coaxial Contractor", Journal of the Korean Institute of Gas, 18(2), 21-27, (2014)