

MILD 연소로에서 Coanda 노즐 효과를 이용한 배기가스 재순환에 관한 연구 A Study on the Exhaust Gas Recirculation in a MILD Combustion Furnace by Using the Coanda Nozzle Effect

하지수[†] · 심성훈*

Ji Soo Ha[†] · Sung Hoon Shim*

계명대학교 환경과학과 · *한국기계연구원

Environmental Science Department, Keimyung University

*Korea Institute of Machinery & Materials

(2013년 11월 9일 접수, 2013년 12월 5일 채택)

Abstract : A MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution) combustion, which is effective in the reduction of NO_x, is considerably affected by the recirculation flow rate of hot exhaust gas to the combustion furnace. The present study used the MILD combustor, which has coaxial cylindrical tube. The outside tube of the MILD combustor corresponds to the exhaust gas passage and the inner side tube is the furnace passage. A numerical analysis was accomplished to elucidate the characteristics of exhaust gas entrainment toward the inner furnace with the changes of coanda nozzle geometrical parameters, nozzle passage gap length, nozzle passage length, nozzle angle and expansion length. The optimal configuration of coanda nozzle for the best entrainment flow rate was gap length, 0.5 mm, expansion angle, 40 and expansion length, 146 mm. The nozzle passage length was irrelevant to the exhaust gas entrainment.

Key Words : MILD Combustion, Coanda Nozzle, Nozzle Passage Gap, Nozzle Passage Length, Nozzle Angle, Nozzle Expansion Length, Flow Rate Ratio

요약 : 질소산화물 저감이 큰 효과가 있는 MILD 연소는 고온의 배기가스가 연소로내에 유입되는 양에 따라 질소산화물 저감 특성이 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 동심원관 형태의 MILD 연소로에서 바깥 원통의 배기가스 통로에서부터 안쪽 원통의 연소통로 사이에 연결관을 설치하고 배기가스를 유입하기 위해 coanda 노즐을 사용하였다. 이러한 coanda 노즐의 기하학적 형상 변화에 따라 고압공기 유량, 배기가스 유입량 특성을 수치해석을 통해 살펴봄으로써 최적의 coanda 노즐 형상을 도출하는 것을 본 연구의 목적으로 하였다. 본 연구의 전산 해석의 결과는 conada 노즐의 노즐 통로 간격이 0.5 mm, 노즐 각도 4°, 노즐 확장 길이 146 mm일 때 최적의 유입량비가 되었고 노즐 통로 수직 길이는 유입량비에 무관하였다.

주제어 : MILD 연소, coanda 노즐, 노즐 통로 간격, 노즐 통로 수직 길이, 노즐 각도, 노즐 확장 길이, 유입량비

1. 서론

연료를 연소할 때는 연소를 위해 공기를 산화제로 이용하고 있다. 이 때 공기 중의 질소와 산소가 고온의 화염대에서 반응을 하여 유해한 질소산화물이 발생한다. 이러한 질소산화물을 저감하기 위하여 화력발전소나 자동차는 촉매를 이용한 탈질설비나 장치를 설치하고 있다. 화력발전소의 탈질설비는 초기 설치비용이 상당히 크며 운전비용과 교체 비용 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_x의 발생을 억제하는 방법이다. 그러나 이 방법은 NO_x를 저감하지만 이에 따라 연소효율이 낮아지는 문제점이 있다. 이처럼 대

부분의 연소기술들은 연소효율과 환경문제에 있어서 상반되는 관계를 가지고 있다.

배기가스 재순환에서 단점으로 나타난 에너지효율 저감을 보완하는 연구로서 최근의 연구들[1-7]인 MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution)연소가 에너지 효율 향상과 더불어 NO_x를 저감하는 연소기술로 인식되고 있다. MILD 연소에 관한 연구는 지금까지 연소가스 내부 재순환 방법을 이용한 NO_x 저감 연구가 진행되었는데 최근에 연소로를 2 pass로 동심원관 형태의 이중 통로를 만들어 고온의 배기가스를 재순환하는 방법에 관한 연구[8]도 이루어 졌다. 이 연구에서는 이중 통로 외부와 내부 연소로를 연결하는 통로를 만들어 외부 통로에 벤투리 효과에 의한 배기가스 재순환을 도모하였다. 벤투리 효과에 의한 배기가스 재순환 효과보다 coanda 노즐 효과를 사용할 경우 배기가스 재 유입량이 보다 더 증가한다면 훨씬 더 NO_x 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 동심원관 형태의 MILD 연소로에서 바깥쪽 고온의 배기가스를 안쪽 연소로에 적극적으로 유입시

[†] Corresponding author E-mail: jisooaha@kmu.ac.kr Tel: 053-580-5919 Fax: 053-580-5385

키는 방법 중에 coanda 노즐을 이용하여 외부 배기가스를 유입시키는 최적의 형상과 유입조건을 열유체 전산해석을 통해 도출함으로써 동심원관 MILD 연소로의 배기가스와 연료 및 공기의 혼합 효과를 최적화하는 것을 목적으로 한다.

2. 수치해석 방법

동심원관 MILD 연소로에서 바깥쪽 배기가스 통로와 안쪽 연소로 사이의 원관 통로에 coanda 노즐 효과를 이용한 원관 통로를 설치하여 안쪽 연소로로 고온의 배기가스를 유입시켜 배기가스와 공기 또는 연료와의 혼합을 증대시키는 최적의 형상과 유동조건을 도출하는 것이 본 연구의 목적이다. Fig. 1에 본 연구에서 사용한 coanda 노즐 형상을 나타

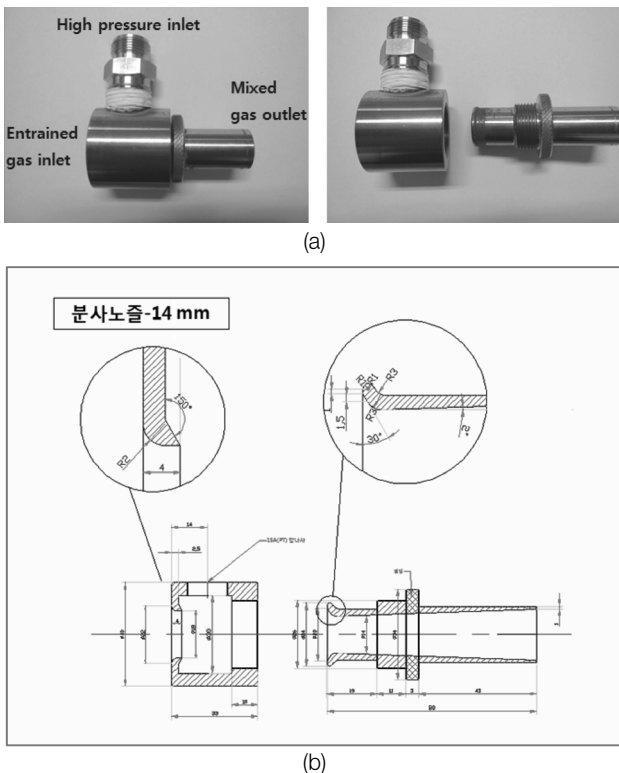


Fig. 1. Configuration of the coanda effect air nozzle used in the MILD combustor for exhaust gas entrainment.

내었다. Fig. 1(a)에서 왼쪽은 조립된 모습이고 오른쪽은 노즐을 분리한 모습 사진이다. 사용한 노즐의 상세 치수 도면을 Fig. 1(b)에 나타내었다. Fig. 1(a)의 왼쪽에 표시한 것과 같이 고압공기 입구(High pressure inlet)에서 고압의 공기를 공급하고 내부에 있는 coanda 노즐 벽면을 지나면서 높은 속도에 따른 압력 감소를 원동력으로 사진의 오른쪽 유입가스 입구(Entrained gas inlet)로부터 배기가스를 유입하여 혼합가스 출구(Mixed gas outlet)로 혼합된 가스가 흐르도록 되어 있다.

본 연구에 사용한 coanda 노즐에 대한 유동해석을 위해 유동장 영역은 Fig. 2와 같이 단순화 하여 진행 하였다. 고압의 공기가 유입되는 곳은 유동속도가 크지 않기 때문에 이곳에서의 형상은 coanda 노즐을 통과하여 유입 배기가스와 혼합되는 유동장 영역에 영향을 주지 않는다고 판단하여 Fig. 2와 같이 고압 공기가 공급되는 영역을 축대칭 형상으로 단순화 하였고 공기노즐의 중심축을 대칭축으로 하여 원통좌표계를 이용하였다. 또한 노즐에서 분출되는 고속의 공기 속도에 비교하여 왼쪽의 배기가스 속도와 오른쪽의 연소용 공기 또는 연료의 속도는 상대적으로 작다고 판단하여 강제적인 유동 흐름을 무시하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 지배방정식은 2차원 원통좌표계의 연속방정식, 축방향과 반경방향 운동량방정식을 이용하였으며 아래에 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} - \rho g + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} \right] \quad (3)$$

본 연구의 수치해석에서 Fig. 2에 나타난 형상 변경 변수는 노즐 통로 간격(Lg, gap length), 노즐 통로 수직 길이(Lp, path length), 노즐 각도(θ, nozzle angle), 확장 길이(Le, expansion nozzle length)이며 이에 대한 변화 값은 Table 1에 나타내었다. 기준 형상은 노즐 통로 간격이 0.5 mm, 노즐

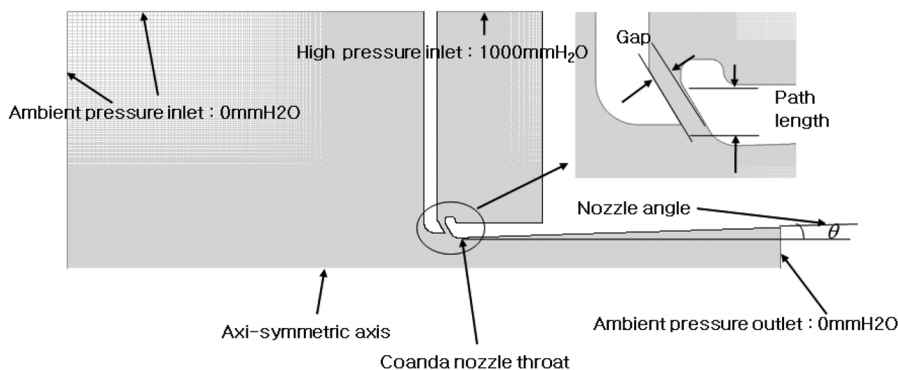


Fig. 2. Simplified configuration of the coanda effect air nozzle for computational fluid analysis.

Table 1. Variable parameters of for the present analysis

Parameter	Cases
Lg, Gap length (mm)	0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5
Lp, Path length (mm)	1.5, 2, 2.4
θ , Nozzle angle ($^{\circ}$)	2, 3, 4
Le, Expansion nozzle length (mm)	80, 100, 120, 146

통로 수직 길이 1.5 mm, 노즐 각도 2°, 확관 길이 80 mm로 하였고 각 형상 변수 변화는 이 경우의 값을 기준으로 하여 변화 시켰다. 고압공기 입구의 압력 경계조건은 상대압력으로 1000 mmH₂O이며 유입공기 입구와 혼합가스 출구의 압력조건은 대기압으로 하였다.

본 연구에서 Table 1에 나타난 형상 변수를 변화시켜 유입되는 유입량의 변화를 관찰하려고 하여 최적의 유동 조건이나 형상을 도출하려고 하는데 다음과 같이 무차원 유입량인 유입량비를 각 경우에 대하여 산출하여 비교하기로 한다. 아래 식에서 \dot{m}_{high} 는 고압공기 입구에서 흐르는 공기 질량 유량률이고 \dot{m}_{total} 은 혼합가스 출구에서의 질량유량률인데 \dot{m}_{total} 과 \dot{m}_{high} 의 차이가 유입가스 입구에서의 유입 질량유량률, $\dot{m}_{entrainment}$ 가 된다. \dot{m}_{high} 와 $\dot{m}_{entrainment}$ 의 비를 무차원 유입량비, \dot{m}_r 로 정의하였다.

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{m}_{total} - \dot{m}_{high}}{\dot{m}_{high}} = \frac{\dot{m}_{entrainment}}{\dot{m}_{high}} \quad (4)$$

각 경우의 유입량비와 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘[12]을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 Fig. 2에 나타냈듯이 약 152000 개의 격자로 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기준 형상 coanda 노즐에서 유동 특성

본 연구는 노즐 통로 간격, 노즐 통로 수직 길이, 노즐 각

도, 확관 길이 등을 변화시켜서 유입량 특성을 살펴보는 것이 주목적인데, 우선 기준 형상인 노즐 통로 간격 0.5 mm, 노즐 통로 수직 길이 1.5 mm, 노즐 각도 2°, 확관 길이 80 mm에서 유동 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 3에 기준 형상 노즐에서 속도 분포와 정압분포를 나타내었는데 각 분포도에서 아래에 있는 그림은 노즐 목 부근에서의 분포도를 상세히 나타낸 것이다. 속도 분포(Fig. 3(a))를 살펴보면 coanda 노즐 목 부근에서 속도 크기가 약 150 m/s로 가장 크게 나타난다. 고압공기 입구에서 coanda 노즐까지의 속도는 상대적으로 매우 작게 나타났다. 또한 유입공기 입구에서 coanda 노즐 영역까지도 coanda 노즐에서 멀어질수록 속도크기는 작게 나타났다. coanda 노즐 효과는 이처럼 노즐 목 부근에서 고속 분사로 인해 속도가 높은 영역에서 베르누이 정리에 의해 압력이 낮아지는 것을 이용해 유입공기를 유입하는 구동력을 발생시키게 된다.

Fig. 3(b)에 압력 분포를 나타내었는데 고압공기 입구에서 coanda 노즐 입구까지는 고압을 유지하다가 노즐을 통과하면서 대기압에 노출되어 압력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며 특히 속도가 높은 영역에서 음압으로 되는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 음압으로 되는 영역의 압력이 유입가스 입구에서 부터의 외부 가스를 유입하는 구동력이 되는 것을 다시 확인할 수 있다.

다음 절에서 본 연구의 목적인 노즐 형상 변화에 따른 유입량 특성을 살펴보기로 한다.

3.2. 노즐 통로 형상 변화에 따른 유입 가스량 변화 특성

본 연구는 노즐 통로 간격, 노즐 통로 수직 길이, 노즐 각도, 확관 길이 등을 변화시켜서 유입량 특성을 살펴보는 것이 주목적인데, 이 절에서는 노즐 통로 형상인 노즐 통로 간격과 수직 길이 변화에 따른 유입 가스량 변화를 살펴보기로 한다.

Fig. 4에 노즐 통로 간격 길이를 0.5 mm에서 1.5 mm로 변화했을 때 고압공기 유량, 유입가스 유량 그리고 혼합가스 유량의 변화와 식 (4)에 정의한 무차원 유입량비 변화를 나타내었다. Fig. 4(a)를 살펴보면 노즐 통로 간격 길이를 증가하면 고압공기 유입량이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수

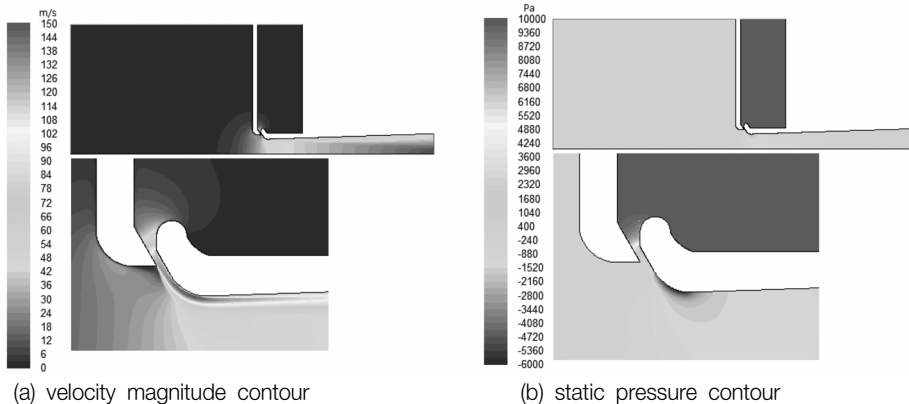
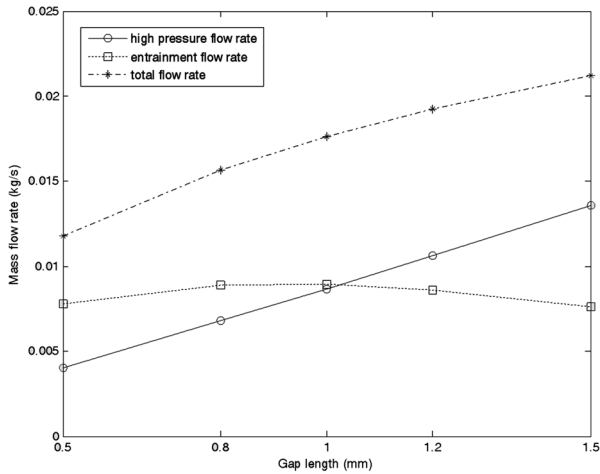
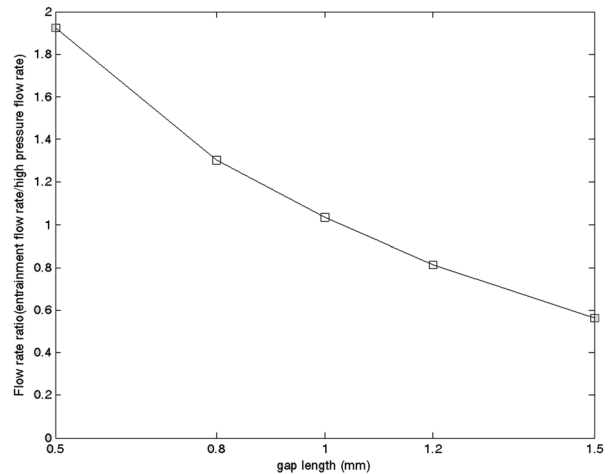


Fig. 3. Velocity magnitude and static pressure contour for the case with the reference coanda nozzle.



(a) mass flow rate



(b) flow rate ratio

Fig. 4. Flow rates characteristics with the change of nozzle gap length.

있는데 이는 노즐 통로 간격 길이를 변화할 때 노즐 통로를 통과하는 면적이 늘어나고 유체 저항이 줄어드는 이유로 판단된다. 유입 가스량은 1.0 mm일 때가 가장 최대로 나타났으며 노즐 통로 간격이 증가하면 고압공기 유량이 증가하기 때문에 혼합가스 유량은 노즐 통로 간격이 증가하면서 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 4(b)에 나타난 무차원 유량비를 보면 노즐 통로 간격이 증가하면서 감소하는 것을 관찰할 수 있으며 0.5 mm일 때 가장 최대값을 보여 주고 있다. 본 연구에서는 MILD 연소로에서 coanda 노즐 효과를 이용하여 고온의 배기가스를 연소로내로 재순환하는 유입량비를 증가시키는 최적의 노즐 형상을 도출하는데 목적이 있으며 Fig. 4의 결과로부터 최적의 노즐 통로 간격은 0.5 mm로 판단할 수 있다.

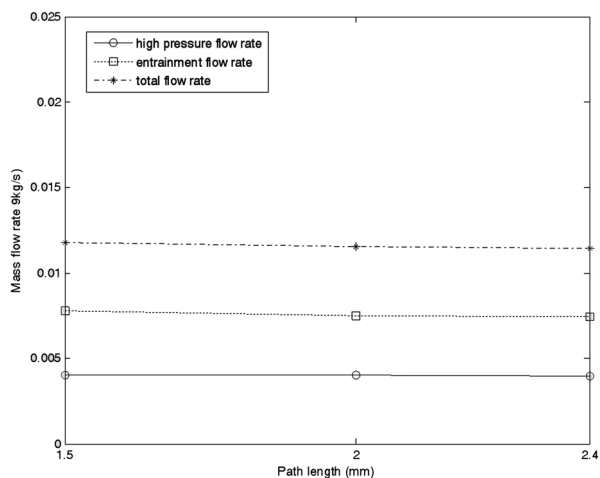
Fig. 5에 노즐 통로 수직 길이를 1.5 mm에서 2.4 mm로 변화했을 때 유량과 유입량 비 변화를 나타내었다. Fig. 5(a)를 살펴보면 노즐 통로 수직 길이를 증가하더라도 고압공기 유량은 거의 변하지 않으며 이에 따라 배기가스 유량과

혼합가스 유량도 거의 변하지 않는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 5(b)에 나타난 무차원 유량비를 살펴보면 Fig. 5(a)에서 관찰한 것과 같이 무차원 유량의 변화도 상대적으로 거의 없지만 기준 형상 노즐 수직 길이인 1.5 mm에서 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

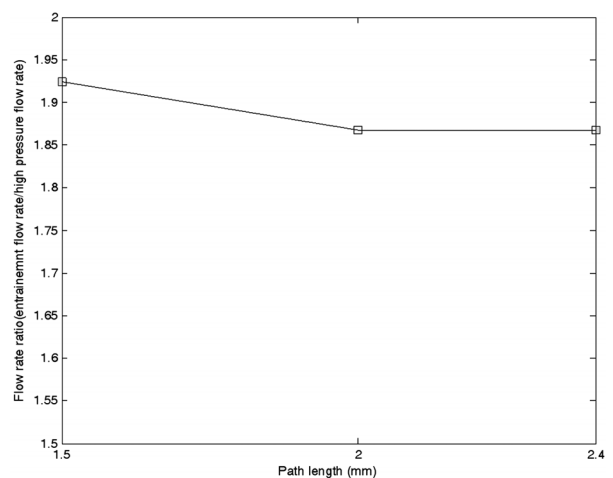
3.3. 노즐 확산 형상 변화에 따른 유입 가스량 변화 특성

앞 절에서 노즐 통로 형상 변화에 대한 유량 특성을 살펴 보았는데 이 절에서는 노즐 확산 형상인 노즐 각도와 노즐 확산 길이 변화에 따른 유량 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 6에 노즐 확산의 각도를 2, 3, 4°로 변화하면서 고압 공기 유량, 유입가스 유량 그리고 혼합가스 유량의 변화와 무차원 유입량비 변화를 나타내었다. Fig. 6(a)를 살펴보면 노즐 확산 각도를 증가하면 고압공기 유입량은 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이는 고압공기 유량은 노즐 통로를 지난 확산 영역의 형상과 거의 무관함을 알 수 있다. 배기가스 유입량은 노즐 확산 각도가 증가하면서 선형적으로

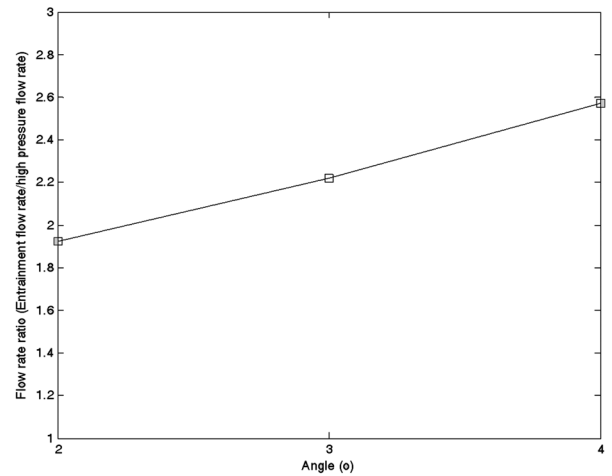
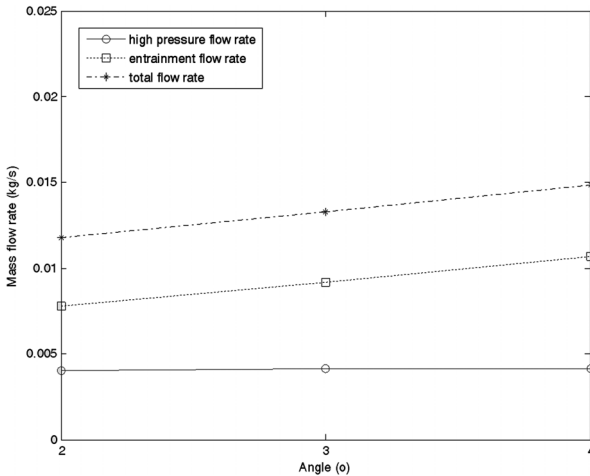


(a) mass flow rate



(b) flow rate ratio

Fig. 5. Flow rates characteristics with the change of nozzle path length.



(a) mass flow rate

(b) flow rate ratio

Fig. 6. Flow rates characteristics with the change of nozzle angle.

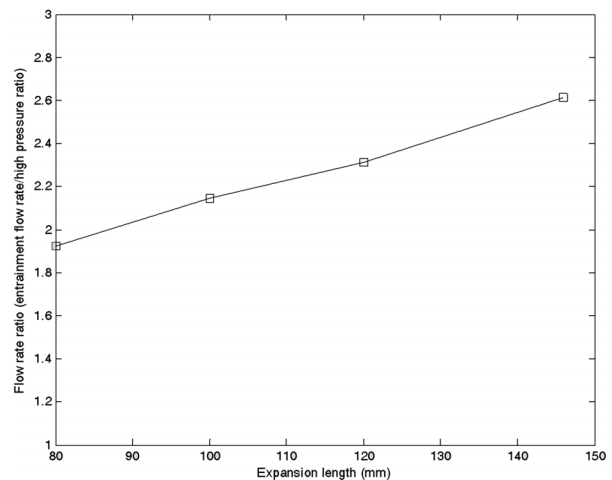
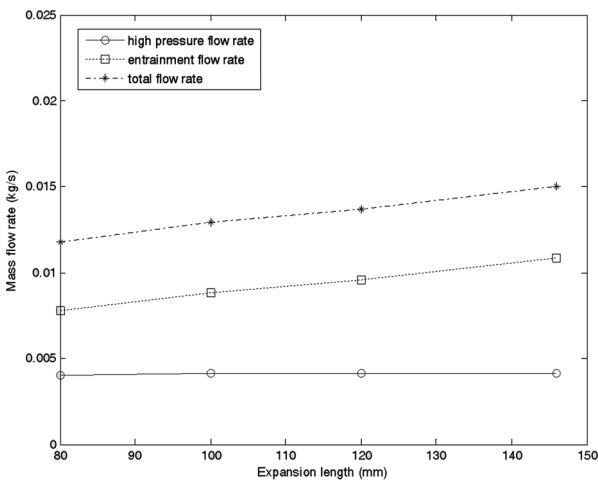
증가하는데 이는 확관 각도가 증가하면 노즐 목에서부터 유동 단면적이 증가하여 확관 통로에서 유체 저항이 감소하기 때문으로 판단된다. 이렇게 유입량이 증가하기 때문에 혼합가스 유량도 노즐 확관 각도가 증가하면서 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)를 살펴보면 노즐 확관 각도가 증가하면 무차원 유입량비는 선형적으로 증가한다. 이는 Fig. 6(a)에서 관찰하였듯이 노즐 각도 증가에 따라 고압공기 유량은 일정하지만 혼합가스 유입량은 증가하기 때문에 무차원 유입량비는 증가하는 양상을 관찰할 수 있다. 이러한 결과로부터 노즐 각도는 기준 각도인 2°보다 노즐 목 이후에서 유동 박리가 일어나지 않는 범위에서 현재의 계산 결과 경우 내에서 가장 큰 경우인 4°가 가장 효과적인 형상으로 나타났다.

Fig. 7에 노즐 확관 길이를 80, 100, 120, 146 mm로 변화하면서 유량과 무차원 유입량비 변화를 나타내었다. Fig. 7(a)를 살펴보면 노즐 확관 길이를 증가하면 고압공기 유입량은 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이는 확관 각도

변화와 마찬가지로 고압공기 유량은 노즐 통로를 지난 확관 영역의 형상과 거의 무관함을 알 수 있다. 배기가스 유입량은 노즐 확관 길이가 증가하면서 선형적으로 증가한다. 이렇게 유입량이 증가하기 때문에 혼합가스 유량도 노즐 확관 각도가 증가하면서 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)를 살펴보면 노즐 확관 각도가 증가하면 무차원 유입량비는 선형적으로 증가한다. 이러한 결과로부터 노즐 확관 길이는 기준 길이인 80 mm보다 본 연구에서 coanda 노즐을 설치할 수 있는 최대길이인 146 mm가 가장 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결론

지금까지 동심원관 형태의 MILD 연소로에서 바깥쪽 고온의 배기가스를 안쪽 연소로에 적극적으로 유입시키는 최적의 coanda 노즐 형상을 열유체 전산해석을 통해 도출하기



(a) mass flow rate

(b) flow rate ratio

Fig. 7. Flow rates characteristics with the change of nozzle expansion length.

위해 노즐 통로 간격, 노즐 통로 수직 길이, 노즐 각도, 확산 길이 등을 변화하면서 이에 따른 유량과 유입량 특성을 살펴 보았으며 이에 대한 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 기준 형상 coanda 노즐에서 유동 특성

기준 형상 노즐에서 coanda 노즐 목 부근에서 속도 크기가 약 150 m/s로 가장 크게 나타났으며 고압공기 입구에서 coanda 노즐까지의 영역과 coanda 노즐 목을 제외한 영역에서의 속도는 작게 나타났다. coanda 노즐 효과는 이처럼 노즐 목 부근에서 고속 분사로 인해 속도가 높은 영역에서 베르누이 정리에 의해 압력이 낮아지는 것을 이용해 유입공기를 유입하는 구동력을 발생시키게 됨을 확인하였다.

2) 노즐 통로 형상 변화에 따른 유입 가스량 변화 특성

노즐 통로 간격을 0.5 mm에서 1.5 mm로 증가하면 고압 공기 유입량은 선형적으로 증가하지만 유입가스량은 통로 간격이 1.0 mm일 때 최대 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 무차원 유량비는 보면 노즐 통로 간격이 증가하면서 감소하는 것을 관찰할 수 있었으며 0.5 mm일 때 가장 최대 값을 알 수 있었다. 노즐 통로 수직 길이를 0.5 mm에서 1.5 mm로 증가하여도 고압공기 유량은 거의 변하지 않으며 이에 따라 배기가스 유량과 혼합가스 유량도 거의 변하지 않는 것을 관찰할 수 있었다.

3) 노즐 확산 각도 변화에 따른 유입 가스량 변화 특성

노즐 확산 각도를 2, 3, 4°로 증가하면서 관찰하면 고압공기 유입량의 변화는 거의 무관하고 배기가스 유입량은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었고 이에 따라 무차원 유량비는 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 노즐 확산 길이를 증가하면 고압공기 유입량은 변화가 거의 없고 배기가스 유입량은 선형적으로 증가하였고 무차원 유량비는 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

사 사

본 논문은 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 연구 결과입니다.

KSEE

참고문헌

1. Wuening, J. A. and Wunning, J. G., "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**, 81~97(1997).
2. Katsuki, M. and Hasegawa, T., "The science of technology of combustion in highly preheated air," *27 Symp (Int) Combustion*, pp. 3135~3146(1998).
3. Cavaliere, A., Joannon, De M. and Ragucci, R. "Mild combustion of high temperature reactants," *2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion*, 1999.
4. Plessing, T., Peters, N. and Wunning, J. G., "Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation," *27 Symp (Int) Combustion*, pp. 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 SO₂ and NO_x Compliance," *Proc. of the Power-Gen Sixth International Conference, Dallas*, pp. 175~187, 1993.
6. 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," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **32**(6), 587~592(2010).
7. 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," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(5), 325~331(2011).
8. Shim S. H. and Ha, J. S., "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," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **34**(2), 103~108(2012).
9. Launder, B. E. and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer methods in Applied Mechanics and Engineering," pp. 269~289(1974).
10. Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., "On mathematical model of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion," In *16th Symp. on Combustion*, 1976.
11. Liu, F., Becker, H. A. and Bindar, Y. "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*, **41**, 3357~3371(1998).
12. Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," pp. 126~131(1980).