

양쪽 출구가 트인 배기가스 재순환 버너의 냉간 유동 특성에 관한 연구

†하지수

계명대학교 기계자동차공학과
(2018년 1월 29일 접수, 2018년 6월 7일 수정, 2018년 6월 8일 채택)

A Study on the Cold Flow Characteristics of a Flue Gas Recirculation Burner with Both Outlets Opening

† Ji Soo Ha

Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, Korea
(Received January 29, 2018; Revised June 7, 2018; Accepted June 8, 2018)

요약

화석연료를 연소할 때 연소로 내의 고온의 온도 분위기에서 열적 질소산화물이 발생하게 된다. 연소기에서 질소산화물을 저감하기 위한 여러 가지 방법 중에 배기가스 재순환 방법이 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서는 배기가스 재순환 배관에 코안다 노즐을 사용하고 양쪽 출구가 트인 재순환하는 버너에 대하여 냉간 유동 특성을 전산유체해석을 통해 살펴보았다. 재순환 배관이 원통 버너의 접선방향으로 설치되어 있어서 버너 내부에서 선회유동이 형성되어 원통 버너 중심 부분에 역류가 생기는 현상을 관찰하였으며 이는 한쪽이 막힌 재순환 버너와 유사한 경향임을 확인 하였다. 본 연구로부터 양쪽 출구가 트인 재순환 버너에서 재순환 유입량은 한쪽이 막힌 버너보다 약 5% 증가하는 것을 확인하였고 양쪽 트인 버너에서 배기가스 재순환 배관의 유입구 위치의 출구에서는 전체 영역에서 유입 유동이 형성되고 반대편의 출구에서는 총 유량은 배출되지만 원통의 가운데 부분은 역류가 일어나는 것을 확인하였다. 배출되는 출구에서 배출되는 유량은 유입되는 출구에서의 유입량보다 3~5배 유량이 크게 나타났다.

Abstract - Thermal NO_x is generated in a high temperature environment in a combustion facilities. Exhaust gas recirculation method is widely used among various methods for reducing nitrogen oxides in combustion devices. In the present study, the computational fluid dynamic analysis was accomplished to elucidate the cold flow characteristics in the flue gas recirculation burner with both outlets opening. Because the recirculation pipes is installed toward the tangential direction, the swirling flow is formulated in the burner and the phenomenon of the reverse flow creation is detected at the center area of circular burner. We are confirmed that this is the similar trend with the burner with one side outlet closed. From the present study, it was seen that the recirculated inflow from both recirculated burner outlets increased by about 5% compared to the burner with one side outlet opening. At the outlet located at the exhaust gas recirculation pipe inlet(gas exit 1), the inlet flow was formed in the entire region. At the opposite outlet(gas exit 2), the total flow was discharged, but the center part of the burner was observed to have a reverse flow. The flow rate at the gas exit 2 was 3 ~ 5 times larger than the flow rate at the gas exit 1.

Key words : Coanda nozzle, Cold flow, Flue gas recirculation burner, Recirculation flow rate, Swirl flow, both outlet opening

†Corresponding author:jisooaha@kmu.ac.kr
Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

배기가스 재순환을 이용해서 화석연료를 연소할 때 질소산화물을 저감하는 연구는 내연기관을 비롯하여 연소기에서 지금까지 많은 연구[1,2,3,4]가 이루어지고 있다. 연소기에서 연소반응이 일어나면 연소열에 의해 화염대에서 고온이 형성된다. 이러한 분위기에서 일반적으로 잘 반응하지 않는 질소가 공기 중의 산소와 결합하여 질소산화물을 생성하게 된다. 이러한 질소산화물을 열적 질소산화물이라고 한다. 열적 질소산화물은 화염대에서 온도가 상승하면 생성이 더욱 활발히 일어난다. 배기가스 재순환은 화염대에서 온도를 낮추어 질소산화물의 생성을 감소시키는 효과가 있다. 특히 연소로 전체의 온도를 균일화하면서 연소온도를 낮추어 질소산화물을 저감하는 MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution) 연소가 에너지 효율과 질소산화물 저감에 효과적이라는 연구들이[5,6] 이루어지고 있다. 또한 코안다노즐을 이용하여 소각로의 배기가스를 재순환하여 질소산화물을 저감하는 연구[6]도 이루어 졌다. 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 연구에서 배기가스를 재순환하는 방법으로 코안다 노즐이 좋은 효과가 있음을 알 수 있었다. 최근에 코안다 노즐을 이용하여 배기가스 재순환 버너 냉간 유동 특성 연구[7]이 이루어 졌는데 이 연구에서는 버너의 한쪽 벽이 막혀 있고 연소가스가 나가는 쪽은 열려있는 원통 버너의 냉간 유동 특성을 살펴보았다.

본 연구는 이전의 연구[7]에 이어서 코안다 노즐을 이용하여 양쪽 출구가 트인 배기가스 재순환 원통 버너에서 냉간 유동 특성을 살펴보았다. 이렇게 하기 위해 이전의 원통 버너 형상에서 냉간 유동 특성과 비교하여 양쪽 출구가 트인 경우의 유동 특성이 연소용 공기의 유량 변화에 따라 어떠한지 파악하고자 한다.

II. 수치해석 방법

본 연구에서 사용한 배기가스 재순환 버너의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 원통형이며 원통 가운데에 연료 공급용 배관이 놓여져 있다. 원통 버너의 외부에 두 개의 배관을 연결하여 배기가스를 재순환하도록 하였다. Fig. 1(a)에 본 연구에 사용한 버너 형상을 나타내었다. 원통 버너의 양쪽 끝이 트인 형상이다. Fig. 1(b)는 이전의 연구[7]에서 사용한 원통형 버너 형상이다. 이 버너는 원통의 왼쪽 끝이 막혀 있고 오른쪽 끝이 열려 있는 형상이다. 배기가스를 재순환하는 원동력은 두 개의 외부 배관 가운데

데에 코안다 노즐을 설치하여 작은 간격을 통해 연소용 공기를 고속으로 분사함으로써 작은 간격 출구에서 낮은 압력을 생성시켜 원통 버너의 후류에 있는 배기가스를 흡입하도록 되어 있다[7]. 또한 외부의 배관은 흡입구와 배출구는 같은 평면상에 있도록 한 것이 아니며 Fig. 1(c)에서 보는 바와 같이 혼합가스의 배출은 선회유동이 만들어 질 수 있도록 원통 버너의 접선방향으로 각도 22.5°로 위치해 있다. 원통의 직경은 160mm이고 양쪽 트인 버너의 길이는 1,888mm이고 이전의 연구에 사용한 버너의 길이는 1,180mm이다. 연료노즐의 직경은 5.15mm이다. Fig. 2에는 전산유체해석에 필요한 격자를 나타내었는데 Fig. 2 위의 것이 본 연구에 사용한 양쪽 출구가 트인 형상에 대한 것이고 아래 것이 이전 연구에 대한 것이다. 격자를 자세히 나타내기 위하여 재순환 배관의 출구 부근만 나타내었다. 격자수는 이전 연구에서는 약 800만개이고 현재의 연구는 약 1,000만개로 구현하였다.

본 연구는 ANSYS WORKBENCH 모델링 프로그램을 이용하여 모델링 및 격자를 생성하였으며, 전산 열 유체 사용해석 프로그램인 FLUENT 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

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

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

운동량방정식

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

농도장방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho D_k \frac{\partial}{\partial x_j} Y_k) \tag{3}$$

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

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{4}$$

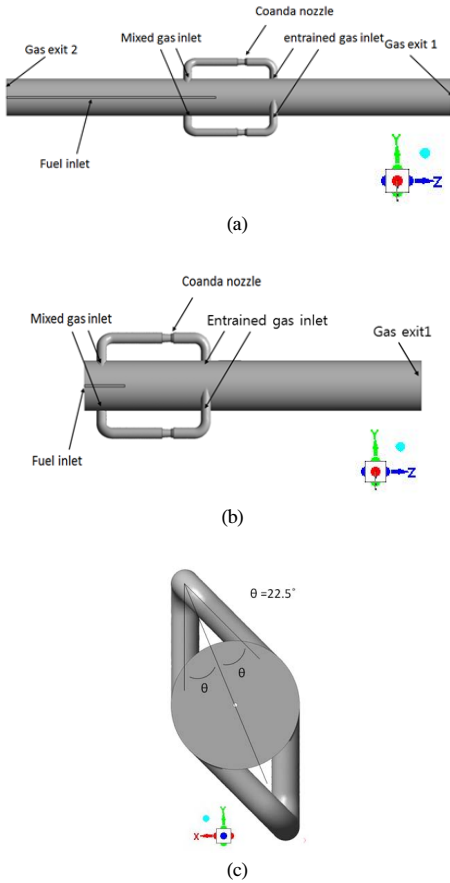


Fig. 1. Geometry configuration of flue gas recirculation burner with coanda nozzle.

여기서 난류 에디 점성은 다음과 같이 정의 된다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

난류 에너지에 대한 보존 방정식과 소산을 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \rho \quad (7)$$

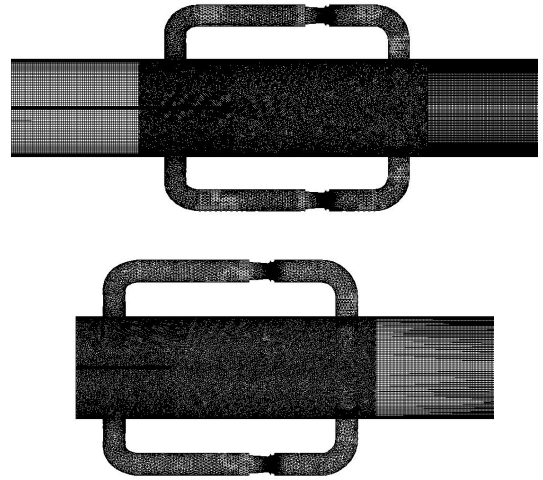


Fig. 2. Generated mesh for CFD analysis at the sections of frontal view.

본 연구에 사용한 연료는 메탄이며 공기와 메탄의 냉간유동 특성을 살펴보는 것을 목적으로 하였다. 메탄 유량을 $5.15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 로 고정하였는데 이 유량에서 이론 공기량(Q_{a_ideal})은 $8.61 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 이다. 실제 공기량(Q_{a_real})은 이론 공기량의 1.1배, 1.5배, 1.8배로 변화하였다. 코안다 노즐의 공기 출구 간격은 0.5mm로 하여 해석을 수행하였다[7]. 노즐의 공기 출구 간격에 따라 재순환 유입량이 변화하며 노즐의 출구 간격이 감소하면 출구 속도가 증가하여 재순환 유량이 증가하게 된다.

III. 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 배기가스 재순환 배관의 출구는 원통 버너의 중심을 향하는 것이 아니라 선회 유동을 유발하도록 접선 방향으로 분출하도록 되어 있다. Fig. 3에 공기비 1.1인 경우에 원통 버너 중간 단면인 $x=0\text{mm}$ 에서 속도 분포를 나타내었다. Fig. 3에서의 결과는 양쪽 트인 버너의 결과이고 아래의 것은 이전의 연구[7]의 결과이다. Fig. 3 이후의 그림에서도 같은 형태의 버너에 대한 결과를 나타내었다. 속도 분포를 보면 두 가지 경우 모두 혼합가스 배출구에서 접선 방향으로 분출된 유동이 버너의 중간으로 흘러가는 것 보다 원통 버너의 가장자리로 많은 부분이 흘러가는 것을 관찰할 수 있다. 원통의

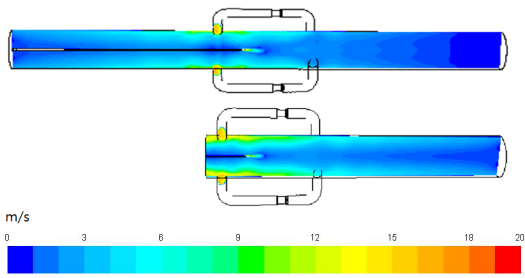


Fig. 3. Contour of velocity magnitude at the section of $x=0\text{mm}$. Air flow ratio : 1.1. The upper result for FGR burner with both outlets opening and the lower result for FGR burner with one outlet opening.

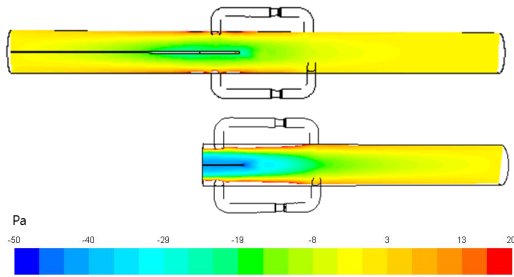
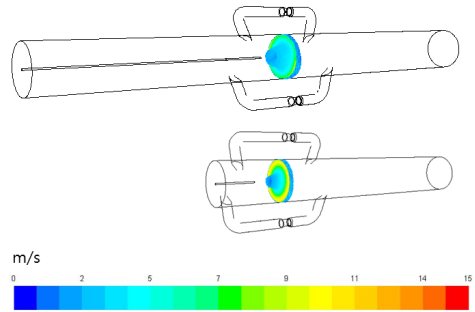


Fig. 4. Contour of static pressure at the section $x=0\text{mm}$. pressure range : $-50\sim 20\text{ Pa}$.

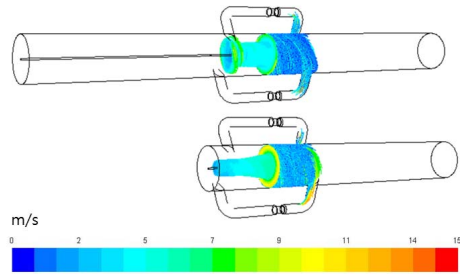
가운데 부분의 속도는 상대적으로 작음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 Fig. 3에서의 유동 조건에서 $x=0\text{mm}$ 단면의 압력분포를 나타내었는데 압력분포의 범위는 -50Pa 에서 20Pa 이다. 연료노즐 출구 부근을 포함한 영역이 압력이 낮은 영역임을 알 수 있고 원통의 가장 자리 외에는 대부분의 영역이 대기압 보다 낮은 압력을 가지고 있음을 알 수 있다. 이로부터 연료노즐을 포함한 영역에서 축방향으로 역류가 일어남을 예측할 수 있다.

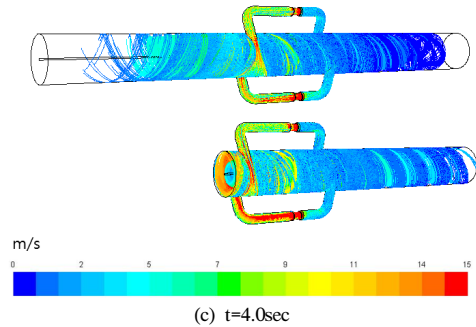
Fig. 5에는 원통 내부의 유동 흐름을 관찰하기 위해 $z=0.250\text{mm}$ 위치의 단면에서 시작한 시간에 따른 유선 변화를 나타내었다. Fig. 5(a)에서 살펴보면 0.1초 후의 유선 변화는 버너 원통 가장 자리에서는 축방향(z 방향)으로 흘러가고 원통의 가운데는 역방향으로 흐름을 알 수 있다. 특히 원통의 가운데에서 가장 큰 역류 속도임을 알 수 있다. 1초 후인 Fig. 5(b)에서는 원통의 가운데에서 역류가 발달해 가고 있고 가장 자리에서는 코안다 노즐의 존재로 유동을 흡입하여 배기가스 재순환 배관으로 흐름을 관찰할 수 있다. 4.0초 후(Fig. 5(c))에서는 코안다 노즐을



(a) $t=0.1\text{sec}$



(b) $t=1.0\text{sec}$



(c) $t=4.0\text{sec}$

Fig. 5. Flow visualization in the burner started at the section $z=0.250\text{m}$.

지나 혼합가스가 원통 버너의 출구에서 선회 유동이 되어 흐르는 것을 관찰할 수 있으며 양쪽 트인 버너의 경우에는 왼쪽에 트인 출구 쪽으로도 선회 하여 유동이 흐르는 것을 관찰할 수 있다. 왼쪽에 트인 출구 쪽의 속도 크기는 오른쪽 출구의 크기보다 큰 것을 관찰할 수 있는데 이로부터 양쪽 트인 버너는 왼쪽 트인 출구 쪽으로 대부분의 유동이 흐를 것으로 예상할 수 있다. 이러한 이유는 양쪽이 트인 출구인 경우 코안다 노즐에서 흡인하는 배관의 입구가 오른쪽 출구 쪽에 있기 때문에 이곳에서 오른쪽 출

구로 나가는 유동을 역류시켜 못가게 막는 역할을 하기 때문에 판단된다.

3.2. 공기 유량에 따른 배기가스 유입량 특성

앞 절에서는 공기비가 1.1이고 코안다 노즐의 공기 출구 간격이 0.5mm인 경우에 대하여 원통 버너 내부의 속도 분포 압력분포 그리고 유선의 변화를 관찰하여 코안다 노즐을 이용한 재순환 버너 내부의 유동 특성을 살펴보았다. 양쪽 출구가 트인 버너이거나 한쪽이 막힌 버너이거나 원통의 가운데에는 연료노즐 부근에서 낮은 압력이 형성되어 연료노즐을 중심으로 역류가 형성되는 것을 관찰하였고 원통의 가장자리 부분으로 유동이 배출되는 것을 알 수 있었다. 이절에서는 코안다 노즐에서의 공기비를 1.1에서 1.8로 변화할 때 코안다 노즐 배관으로의 유입량 변화를 살펴 보고 양쪽 트인 버너의 경우 왼쪽과 오른쪽의 배출 유량을 살펴보기로 한다.

공기비에 따른 유입량 변화에 대한 정량적인 비교는 Table 1에 나타내었다. Table 1에는 양쪽 출구가 트인 버너(Burner 1)와 오른쪽 출구만 트인 버너(Burner 2)의 경우에 공기비에 따른 유입공기량을 유입공기량비(배기가스유입량/공기량)로 비교하였다. 공기비가 1.1일 때 Burner 2의 경우 공기량이 0.0047kg/s인데 배기가스 유입량은 0.0118kg/s로 공기량 보다 2.51배 많은 양이 유입된다. 공기비가 1.5, 1.8배로 증가할 때 유입량비는 약간 더 증가한다. 양쪽 출구가 트인 버너(Burner 1)의 경우에는 유입량비는 2.638이며 이 경우에도 공기비가 증가하면 유입량비도 증가하는 경향을 가지고 있다. 같은 공기비에서 양쪽 트인 버너의 경우에는 한쪽 트인 버너의 유입량 보다 약 5% 정도 유입량이 큼을 알 수 있다. 이러한 이유는 양쪽이 트인 경우 한쪽이 트인 경우보다 유입될 수 있는 방향이 두 방향으로 같은 동력으로 유입 가능한 유량이 증가할 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 6에는 두 가지 버너의 출구의 가운데 수직선(x=0mm)에서 속도 벡터를 나타내었다. 양쪽 출구가 트인 버너의 경우 왼쪽 출구에서 가장 자리 부분에서는 선회하면서 외부로 배출되지만 원통의 가운데 부분에서는 상당한 속도로 역류가 일어나서 이렇게 역류된 것이 코안다 노즐이 설치된 배관으로 유입될 것으로 판단된다. 오른쪽 출구 부분에서는 원통 버너 내부로 흡입되지만 왼쪽만큼 큰 속도로 유입되지는 않는 것을 확인할 수 있다. 코안다 노즐 배관의 유입구 위치가 오른쪽에 위치하여 왼쪽 트인 출구에서 보다 오른쪽 출구에서 역류가 많을 것으로 예상되지만 실제로는 그 반대로 나타나는

Table 1. Entrained flow rate ratio for burner 1 and burner 2

Air flow ratio	1.1	1.3	1.5	1.8
burner 1	2.638	2.661	2.671	2.675
burner 2	2.511	2.523	2.538	2.568

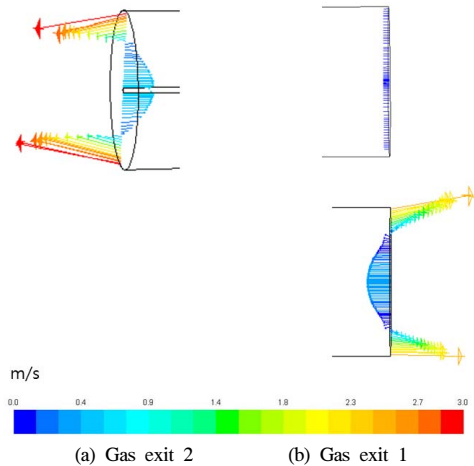


Fig. 6. Velocity vector plots at the outlet sections of FGR burner.

Table 2. Mass flow rate ratio at gas exit 1 and gas exit 2 for burner 1

Air flow ratio	1.1	1.3	1.5	1.8
Gas exit 1	0.288	0.402	0.454	0.520
Gas exit 2	1.351	1.456	1.485	1.559

것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 아래쪽 그림에서 관찰 할 듯이 한쪽 출구만 트인 경우에는 출구에서 속도 벡터는 양쪽 트인 버너의 왼쪽 출구와 유사하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

Table 2에 양쪽 트인 버너의 경우 두 방향의 출구에서 공기비에 따라 배출되는 유량의 비(배출유량/공기유량)를 나타내었다. Gas exit 1의 유량은 오른쪽 출구에서 원통 버너로 흡입되는 유량이고 Gas exit 2는 왼쪽 출구에서 외부로 배출되는 유량이다. 공기비가 증가하면 배출되거나 유입되는 유량이 증가하는 것을 알 수 있고 왼쪽으로 배출되는 유량이

오른쪽에서 유입되는 유량 보다 약 3~5배 정도 크
을 알 수 있다.

IV. 결 론

코안다 노즐을 이용하여 배기가스를 재순환하는
양쪽 출구가 트인 배기가스 재순환 버너의 냉간 유
동을 전산해석을 통해 살펴보았으며 이를 통해 양쪽
출구가 트인 버너와 한쪽 출구가 트인 버너를 비교
하여 재순환 유량의 변화를 관찰하여 연소 유동 해
석을 수행하기 전에 재순환 유동 특성을 사전 검토
하였으며 이에 관한 결과는 아래와 같이 정리할 수
있다.

한쪽이 막힌 재순환 버너와 양쪽 출구가 트인 재
순환 버너의 유속과 압력 분포를 살펴보았으며 두
버너 모두 연료 노즐 부근에서 재순환 가스의 선회
유동이 시작되어 원통의 가장 자리로 선회 유동이
형성되었으며 이 부근에서 압력이 낮아져서 원통의
중심 부근으로 역류가 발생하는 것을 관찰하였다.
이것은 유선의 시간에 따른 변화에서도 원통의 가
장자리로 선회 유동이 일어나고 원통의 중심으로
역류가 발생하는 것을 동일하게 관찰할 수 있었다.

코안다 노즐에서의 공기비가 증가할수록 코안다
노즐이 연결관 배관으로 유입되는 유입량 비는 두
가지 버너 모두 증가하는 것을 알 수 있었고 양쪽
트인 버너의 경우가 한쪽이 막힌 버너 보다 약 5%
유입량비가 크을 알 수 있었다. 이는 양쪽 트인 경
우에 유입되는 곳이 양쪽 출구이므로 유입될 수 있
는 면적이 커지기 때문에 판단되었다.

양쪽 출구가 트인 버너에서 코안다 노즐이 연결
된 배관의 유입구가 있는 오른쪽 출구는 항상 역류
가 일어나고 그 반대편인 왼쪽 출구에서 대부분의
가스가 배출됨을 관찰하였다. 왼쪽으로 배출되는
유량은 오른쪽으로 유입되는 유량의 약 3~5배의 유
량임을 알 수 있었다.

이러한 냉간 유동 해석의 결과를 연소유동 해석

사용기호

p	: pressure [Pa]
u_j	: velocity for j axis [m/s]
x_j	: coordinate for j axis [m]
k	: turbulent kinetic energy [m ² /s ²]
Q_{a_ideal}	: ideal air mass flow rate [kg/s]
Q_{a_real}	: real air mass flow rate [kg/s]

그리스 문자

ρ	: density [kg/m ³]
μ	: viscosity [kg/ms]
μ_{eff}	: effective viscosity [kg/ms]
ϵ	: turbulent dissipation rate [m ² /s ³]

REFERENCES

- [1] Kim, K. L., Kim, H. J., Park, B. S., and Kim, J. J., "NOx Emission Characteristics of 100kW Gas Burner by FGR", The Korean Society of Combustion, 1-7,(2010)
- [2] Chae, T. Y., Lee, J. W., Jo, G. R., Ryu, C. K., Kang, K. S., and Yang, W., "Reburning Characteristics of Syngas in a 60kW Combustion System", The 47th KOSCO Symposium, 155-158, (2013)
- [3] Kim, H. Y., Baek, S. W., Son, H., and Kim, S. W., "Experimental and Numerical Investigation for NOx Reduction with Fuel Lean Reburning System", J. Korean Soc. Combust., 14(2), 18-25, (2009)
- [4] Yu, B. H., Kim, J. M., Lee, S. R., Kum, S. M., Lee, C. E. and Son, S. K., "A Basic Study of Combustion System Applying Exhaust Gas Recirculation", The 43th KOSCO Symposium, 437-442, (2011)
- [5] Ha, J. S., Shim, S. H., and Jung, S. H., "A Study on the Flow Characteristics in a MILD Combustion Waste Incinerator with the Change of Flue Gas Recirculation", J. of Energy Engineering, 23(2), 51-57, (2014)
- [6] Ha, J.S., Shim, S. H., "A Study on the Exhaust Gas Recirculation in a MILD Combustion Furnace by Using the Coanda Nozzle Effect", J. of Kor, Soc. Environ. Eng., 35(12), 967-972, (2013)
- [7] Ha, J.S., Park, C.H., Shim, S. H., Jung, S.H., "A Study of Cold Flow Characteristics of a Flue Gas Recirculation Burner using Coanda Nozzles", J. of Energy Eng., 25(4), 152-158, (2016)