



## 코안다 노즐에서 중심 축소관 유무에 따른 유입량 특성

†하지수 · 심성훈\*

계명대학교 환경과학과, \*한국기계연구원  
(2014년 1월 23일 접수, 2014년 4월 14일 수정, 2014년 4월 14일 채택)

## Characteristics of Entrainment Flow Rate in a Coanda Nozzle with or without Coaxial Contractor

† Ji Soo Ha · Sung Hoon Shim\*

*Environmental Science, Keimyung University, Daegu 1000, Korea*  
*\*Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea*  
(Received January 23, 2014; Revised April 14, 2014; Accepted April 14, 2014)

### 요 약

MILD 연소는 고온의 배기가스를 연소로 내에 재유입 되는 양에 따라 질소산화물 저감 특성에 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 MILD 연소로에서 고온의 배기가스를 연소로 내에 재순환하기 위해 코안다 노즐을 사용하였는데, 코안다 노즐의 중심에 중심 축소관을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 고압공기 유량, 배기가스 유입량 특성을 수치해석을 통해 살펴봄으로써 최적의 코안다 노즐 형상을 도출하는 것을 연구의 목적으로 하였다. 본 연구의 전산 해석의 결과는 혼합가스 출구의 압력이 대기압일 때는 중심축소관이 없을 때가 배기가스 유입량이 약 18% 크게 나타나고 혼합가스 출구 압력이 증가하면 중심축소관이 있을 때가 유입량이 더 큼일 알 수 있었다. 이에 대한 분석은 노즐 목에서의 압력, 유입가스 입구와 혼합가스 출구 압력 그리고 유동 단면적으로 구성된 유입 구동력으로 해석 가능하였다.

**Abstract** - A MILD(Moderate and Intense Low oxygen Dilution) combustion, which is effective in the reduction of NO<sub>x</sub>, is considerably affected by the recirculation flow rate of hot exhaust gas to the combustion furnace. The present study used a coanda nozzle for the exhaust gas recirculation in a MILD combustor. A numerical analysis was accomplished to elucidate the effect of exhaust gas entrainment toward the furnace with or without a coaxial contractor. The result of the present CFD analysis showed that the entrainment mass flow rate without a coaxial contractor had 18% larger than that with a coaxial contractor when the mixed gas outlet pressure was ambient pressure. On the other hand, if the outlet pressure increased, the mass flow rate with a contractor was larger than that without a contractor. It could be analysed by the entrainment driving force composed with the nozzle throat pressure, inlet and outlet pressures and flow cross sectional area.

**Key words** : MILD combustion, coanda nozzle, coaxial contractor, entrainment mass flow rate, entrainment driving force, mixed gas outlet pressure

†Corresponding author:jisooaha@kmu.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

화력발전소의 연소로, 폐기물소각로 연소로 등에서 연소할 때는 연료와 공기 중의 산소가 화학 반응을 하여 고온의 배기가스가 발생하게 된다. 공기 중의 질소는 일반적으로 산소와 반응이 활발하지 않으나 고온의 화염대에서는 질소와 산소가 반응을 하여 유해한 질소산화물이 발생한다. 이러한 질소산화물을 저감하기 위하여 대규모 설비인 화력발전소나 폐기물소각로 등에는 촉매를 이용한 탈질설비를 설치하고 있다. 이러한 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 자연연소를 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 NOx의 발생을 억제하는 방법이다. 그러나 이 방법은 NOx를 저감하지만 이에 따라 연소효율이 낮아지는 문제점이 있다. 이처럼 대부분의 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 NOx를 저감하는 연소기술로 인식되고 있다. MILD 연소에 관한 연구는 지금까지 연소가스 내부 재순환 방법을 이용한 NOx 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 효과와 함께 코안다 노즐 효과를 사용할 경우 배기가스 재 유입량이 보다 더 증가한다면 훨씬 더 NOx 저감에 효과적일 것으로 판단된다. 코안다 노즐은 좁은 곡관을 따라 고속으로 기체를 흐르게 하면 주변의 배기가스를 유입하는 효과가 있다.

본 연구는 MILD 연소로에서 고온의 배기가스를 안쪽 연소로에 적극적으로 유입시키는 방법인 코안다 노즐을 이용할 경우, 중심축에 동심원 형태의 축소관을 설치하여 이에 따른 외부 배기가스의 유입량

변화 특성을 열유체 전산해석을 통해 살펴봄으로써 MILD 연소로의 배기가스와 연료 및 공기의 혼합 효과를 최적화하는 것을 목적으로 한다.

## II. 수치해석방법

MILD 연소로에서 바깥쪽 배기가스 통로와 안쪽 연소로 사이의 원관 통로에 중심 축소관이 있는 코안다 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 중심 축소관이 있는 코안다 노즐 형상을 전산해석을 위한 격자 모양과 함께 나타내었다. Fig. 1의 왼쪽에 표시한 것과 같이 유입가스 입구(Entrained gas inlet)에서는 고온의 배기가스가 유입되는 영역이고 고압입구는 코안다 노즐의 역할을 하게 하는 고압공기를 투입하는 입구이다. 혼합가스 출구는 연소가 일어나고 있는 내부 연소로로 들어가는 출구이다. 고압공기 입구(High pressure inlet)에서 고압의 공기를 공급하고 내부에 있는 코안다 노즐 벽면을 지나면서 높은 속도에 따른 압력 감소를 원동력으로 왼쪽 유입가스 입구로부터 배기가스를 유입하여 혼합가스 출구(Mixed gas outlet)으로 혼합된 가스가 흐르도록 되어 있다. 중심축에는 노즐 목 부분 면적을 축소시키기 위해 동심원관 형태의 중심 축소관을 설치하였다. 본 연구에서는 이러한 중심 축소관의 유무에 따른 유입량 변화를 살펴봄으로써 중심 축소관의 효용성을 진단하기로 한다.

본 연구에 사용한 코안다 노즐에 대한 유동해석 유동장 영역은 Fig. 1에 표현한 것과 같이 단순화한 축대칭 형상이며 코안다 노즐의 중심축을 대칭축으로 하여 원통좌표계를 이용하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 지배방정식은 2차원 원통좌표계의 연속방정식, 축방향과 반경방향 운

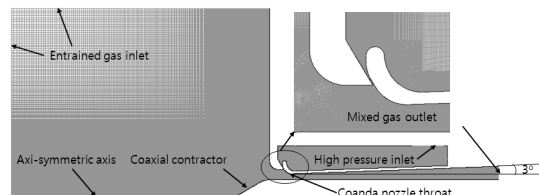


Fig. 1. Schematic configuration of the coanda nozzle with the coaxial contractor for computational fluid analysis.

동량방정식 그리고 표준 k-ε 난류모델을 이용하였으며 아래에 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}) - \overline{\rho u'_i u'_j}] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_k + C_{3\epsilon}G_b) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

본 연구의 수치해석에서 형상 변수는 중심 축소관이 있는 경우와 없는 경우이며 중심 축소관의 직경은 72mm로 하였다. 고정된 형상은 고압공기와 노즐 통과 사이의 간격이 1mm, 노즐 각도 3°, 노즐 목 직경 96mm로 하였다. 고압공기 입구의 압력 경계조건은 상대압력으로 3000mmH<sub>2</sub>O이며 유입공기 입구는 -10mmH<sub>2</sub>O로 하였다. 본 연구에서는 중심 축소관 유무에 따른 유입량 변화를 관찰하는 것과 함께 혼합가스 출구에서의 압력 변화가 유입량 변화에 어떻게 미치는 지도 살펴보았다. 이렇게 하는 이유는 코안다노즐을 통과한 혼합가스가 연소로 내에 투입될 때 연결 배관을 통하여 흐를 때 곡관과 배관 길이에 따른 압력손실이 유입량에 영향을 미치기 때문에 이곳에서의 압력을 변화시켜 그 영향을 살펴보

기로 한다. 출구에서의 압력은 0, 10, 30, 50, 70mm H<sub>2</sub>O로 변화시켰다.

각 경우의 유입량과 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘[9]을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 Fig. 1에 나타냈듯이 약 364000개의 격자로 구성하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 중심 축소관이 없는 코안다 노즐에서의 유동 특성

본 연구는 코안다 노즐에서 중심 축소관 유무에 따른 유입량 특성을 살펴보는 것이 목적인데, 우선 기준 형상인 중심 축소관이 없을 때의 유동 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 2에 중심 축소관이 없을 때의 속도 분포와 정압분포를 나타내었는데 각 분포도에서 오른쪽 위에 있는 그림은 노즐 목 부근에서의 분포도를 상세히 나타낸 것이다. 속도 분포(Fig. 2(a))를 살펴보면 코안다 노즐 목 부근에서 속도 크기가 약 220m/s로 가장 크게 나타난다. 고압공기 입구에서 코안다 노즐까지의 속도는 상대적으로 매우 작게 나타났다. 또한 유입공기 입구에서 코안다 노즐 영역까지도 코안다 노즐에서 멀어질수록 속도크기는 작게 나타났다. 코안다 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. 2(b)에 압력 분포를 나타내었는데 고압공기 입구에서 코안다 노즐 입구까지는 고압을 유지하다가 노즐을 통과하면서 대기압에 노출되어 압력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며 특히 속도가 높은 영역에서 음압으로 되고 최소 압력이 약 -350mm H<sub>2</sub>O가 됨을 확인 할 수 있다. 이렇게 음압으로 되는

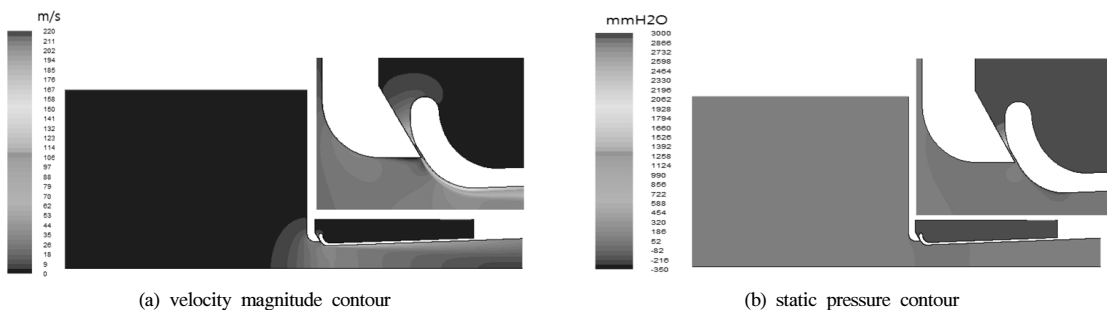


Fig. 2. Velocity magnitude and static pressure contour for the case without the coaxial contractor.

영역의 압력이 유입가스 입구에서부터의 외부 가스를 유입하는 구동력이 되는 것을 다시 확인할 수 있다.

다음 절에서 중심축소관 유무에 따른 유입량 특성을 살펴보기로 한다.

### 3.2. 중심 축소관 유무에 따른 유입량 특성

앞 절에서 중심 축소관이 없는 코안다 노즐에서의 유동 특성을 속도와 압력분포를 통해 살펴보았다. 이절에서는 중심 축소관의 직경이 72mm인 경우의 코안다 노즐에서 유동 특성을 살펴보고 중심 축소관의 유무에 따른 유입량 변화를 관찰하기로 한다.

Fig. 3에 중심 축소관 직경이 72mm일 때의 속도 분포와 정압분포를 나타내었는데 각 분포도에서 오른쪽 위에 있는 그림은 노즐 목 부근에서의 분포도를 상세히 나타낸 것이다. 속도 분포(Fig. 3(a))를 살펴보면 코안다 노즐 목 부근에서 속도 크기가 약 220m/s로 가장 크게 나타났는데 이는 중심 축소관이 없는 경우와 거의 같은 결과이다. Fig. 3(b)에 압력 분포를 나타내었는데 최고속도 영역에서 최소 압력이 약 -600mmH<sub>2</sub>O로서 중심 축소관이 없을 때 보다 더 낮게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4에 코안다 노즐에서 고압공기가 유입공기와 만나는 곳을 기점으로 노즐 벽면의 정압분포를 중심

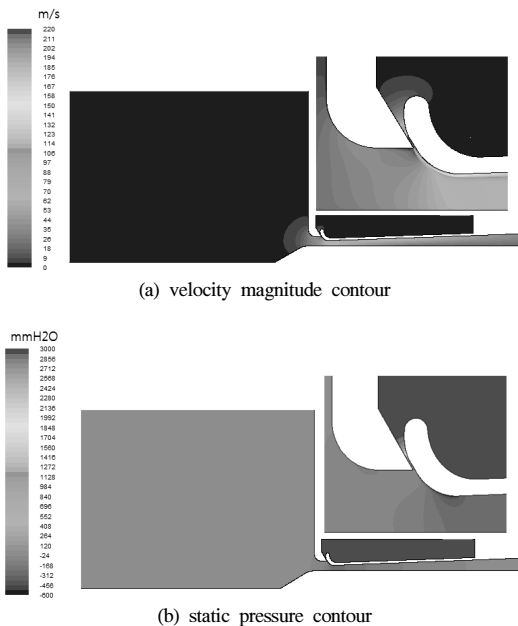


Fig. 3. Velocity magnitude and static pressure contour for the case with the coaxial contractor.

축소관이 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 나타내었다. Fig.3의 압력분포에서 관찰하였듯이 중심축소관이 없는 경우에는 최소압력이 약 -350mmH<sub>2</sub>O에 근접하고 중심축소관이 있는 경우는 약 -600mmH<sub>2</sub>O로 나타남을 다시 확인할 수 있다. 두 경우 모두 최저 압력이 나타나는 곳은 노즐 목 부근으로 이곳을 지나면서 압력이 급격하게 다시 회복하여 노즐 출구에서 대기압으로 됨을 확인할 수 있다.

코안다 노즐을 이용하여 유입공기를 유입하는 원동력이 노즐 목에서의 낮은 압력이며 이러한 낮은 압력 분포로 인해 주위에 상대적으로 높은 압력의 가스를 유입하게 된다. 유입공기 입구의 압력이 -10mmH<sub>2</sub>O, 혼합가스 출구의 압력이 0mmH<sub>2</sub>O일 때, 중심 축소관이 없을 때와 있을 때의 유량 비교한 것을 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 결과를 살펴보면 두 가지 경우 모두 고압공기 유량은 거의 같음을 알 수 있다. 중심 축소관이 없는 경우의 유입량은 고압공기 유량의 약 6배에 해당하는 유량이다. 혼합된 가스의 양은 고압공기 유량의 약 7배가 흐르게 된다. 중심 축소관이 있는 경우는 유입량은 5배이며 혼합 가스량은 약 6배로 나타났다. 이 결과에서 알 수 있듯이 중심축소관이 없는 경우가 있는 경우보다 유입량이 중심축소관이 없는 경우를 기준량으로 하여 약 18% 많음을 알 수 있다.

Fig. 4에서 관찰하였듯이 노즐 목에서 최저 압력은 중심축소관이 있는 경우가 중심축소관이 없는 경우보다 더 낮게 나타나서 유입 구동력이 커서 유입량이 상대적으로 많을 것으로 예측되었지만 Table 1의 결과는 반대로 나타났다. 이러한 이유는 중심축

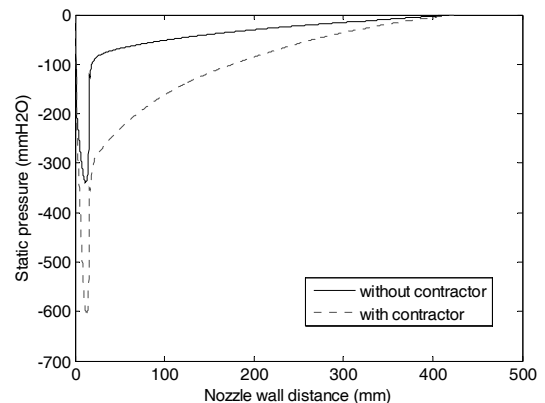


Fig. 4. Static pressure distribution on the nozzle walls for the cases with and without contractor.

**Table 1.** Comparison of mass flow rates between the case without the coaxial contractor (Case 1) and the case with the coaxial contractor(Case 2)

mass flow rate (kg/s)	Case 1	Case 2
$\dot{m}_{high}$	0.05022	0.05037
$\dot{m}_{entrainment}$	0.31270	0.25692
$\dot{m}_{total}$	0.36292	0.30729

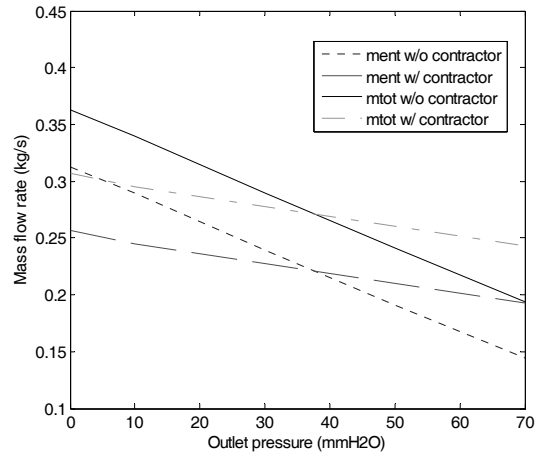
**Table 2.** Comparison of entrainment driving forces between the case without the coaxial contractor(Case 1) and the case with the coaxial contractor(Case 2)

	Case 1	Case 2
$A_{throat}$ (m <sup>2</sup> )	$1.782 \times 10^{-3}$	$7.642 \times 10^{-4}$
$P_{entrainment}$ (mmH <sub>2</sub> O)	-10	-10
$P_{outlet}$ (mmH <sub>2</sub> O)	0	0
$P_{throat}$ (mmH <sub>2</sub> O)	-339	-609
$F_{entrainment}$ (N)	5.863	4.578

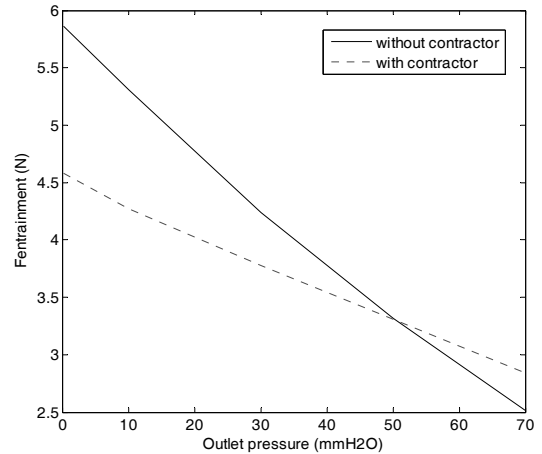
소관이 있는 경우에 노즐 목에서의 압력은 낮지만 그곳에서의 압력과 단면적의 곱이 구동력이 되기 때문에 중심축소관이 있는 경우의 단면적이 중심축소관이 없는 경우 보다 작다. 노즐 목에서의 단면적과 노즐 목에서의 압력과 유입가스 경계와 혼합가스 출구 경계의 압력의 차이를 곱한 것을 정성적인 구동력으로 하여 아래의 식으로 표현하였다.

$$F_{entrainment} = A_{throat} |(P_{entrainment} - P_{outlet}) - P_{throat}| \quad (5)$$

두 가지 경우의 식 (5)에 해당하는 값을 Table 2에 비교하여 나타내었다. Table 2를 살펴보면 중심축소관이 없는 경우의 유입구동력이 중심축소관이 있는



(a) mass flow rate



(b) entrainment driving force

**Fig. 5.** Comparison of mass flow rates and entrainment driving forces between the cases with and without contractor.

경우보다 약 22% 크음을 알 수 있다. 이러한 분석으로 Table 1에서 살펴본 것과 같이 중심축소관이 없는 경우가 유입량이 약 18% 크게 나타난 이유를 정성적으로 설명할 수 있다.

혼합가스 출구에서의 압력 조건이 지금까지는 대기압인 0mmH<sub>2</sub>O인 경우에 대하여 살펴보았다. MILD 연소로에서 연소가스를 재순환할 때 이중 원통 연소로를 이용할 때도 있지만 단일 원통 연소로에서 코안다 노즐을 이용하여 고온의 배기가스를 유입하여 배관을 통해 다시 연소로로 혼합가스를 투입하는 경우도 있다. 이 경우에는 코안다 노즐 출구에

연결된 배관에서의 압력 손실 부하에 의해 노즐 출구에서 압력이 대기압 보다 높은 경우가 발생하게 된다. 이처럼 노즐 출구에서 압력이 대기압에서 변화할 때의 유입량 변화를 살펴보기로 한다.

2절의 수치해석 방법에서 언급하였듯이 혼합가스 출구에서의 압력을 0, 10, 30, 50, 70 mmH<sub>2</sub>O로 변화하여 유입량 변화를 해석하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 중심축소관 유무에 따라 유입량 변화를 나타내었는데 중심축소관이 없을 때를 먼저 살펴보면 유입 가스유량(그림에서 *ment*)과 혼합 가스 유량(그림에서 *mtot*)은 혼합가스 출구의 압력이 증가하면서 흐름에 저항으로 작용하여 유입유량과 혼합가스 유량이 선형적으로 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 중심 축소관이 있는 경우에도 같은 경향을 관찰할 수 있는데 감소하는 기울기가 중심축소관이 없는 경우와 비교하여 상대적으로 완만하다. Table 1에서 관찰하였듯이 혼합가스 출구의 압력이 대기압 일 경우에는 중심축소관이 없는 경우가 중심축소관이 있는 경우보다 유입량이 약 18% 크게 나타났었는데 혼합가스 출구 압력이 40mmH<sub>2</sub>O 부근 이후에서 부터는 중심축소관이 있는 경우가 유입량과 혼합가스량이 중심축소관이 없는 경우보다 큼을 알 수 있다. 이러한 이유는 식 (6)에 해당하는 구동력을 혼합가스 압력을 변화시킨 결과인 Fig. 5(b)로 설명할 수 있다. 유입 구동력은 두 경우 모두 혼합가스 출구 압력이 증가함에 따라 감소하는데 중심축소관이 없는 경우가 혼합가스 출구에서의 면적이 넓기 때문에 감소하는 기울기가 상대적으로 크다. Fig. 5(b)에서는 유입구동력의 역전이 혼합가스 압력이 약 50mmH<sub>2</sub>O일 때에 나타나지만 정성적으로 보면 혼합가스 압력이 증가함에 따라 유입량이 역전되는 것을 이 그래프로 잘 설명될 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

지금까지 MILD 연소로에서 고온의 배기가스를 연소로에 적극적으로 유입시키는 최적의 코안다 노즐 형상을 도출하기 위해 중심축에 동심원관 형태의 축소관을 설치하여 이에 따른 외부 배기가스의 유입량 변화 특성을 열유체 전산해석을 통해 살펴보았으며 이에 대한 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 중심 축소관이 없는 코안다 노즐에서의 유동 특성

중심 축소관이 없는 코안다 노즐에서는 코안다 노즐 목 부근에서 속도 크기가 약 220m/s로 가장

크게 나타났고 유입공기 입구에서 코안다 노즐 영역과 코안다 노즐에서 멀어질수록 속도크기는 작게 나타났다. 코안다 노즐 효과는 이처럼 노즐 목 부근에서 고속 분사로 인해 속도가 높은 영역에서 베르누이 정리에 의해 압력이 낮아지는 것을 이용해 유입공기를 유입하는 구동력을 발생시키게 됨을 알았다.

- 2) 혼합가스 출구 압력이 대기압일 때 중심 축소관 유무에 따른 유입량 특성

혼합가스 출구 압력이 대기압일 때의 노즐 목에서 압력은 중심축소관이 있을 때가 더 낮게 나타났지만 유입량은 중심 축소관이 없을 때가 있는 경우보다 약 18% 더 많게 나타났다. 이는 중심축소관의 존재로 인한 단면적 축소로 구동력이 중심 축소관이 있는 경우가 작게 되기 때문으로 분석되었다.

- 3) 혼합가스 출구 압력 변화가 중심 축소관 유무의 유입량 특성에 미치는 영향

혼합가스 출구 압력이 대기압(0mmH<sub>2</sub>O)에서부터 70mmH<sub>2</sub>O까지 변화한 경우 혼합가스 출구 압력이 낮은 경우는 중심 축소관이 없는 경우가 유입량이 크게 나타났지만 혼합가스 출구 압력이 큰 경우에는 중심 축소관이 있는 경우가 유입량이 크게 나타났다. 이러한 이유는 단면적을 고려한 유입 구동력을 분석함으로써 해석 가능하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 연구 결과이며 지원에 감사를 드립니다.

#### 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 exhaust 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 Pow-

- der River Basin Coal to Achieve SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> 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] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill Book, New York, (1980)