

## 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치의 형상에 따른 재순환 유동 특성에 관한 연구

†하지수\* · 심성훈\*\* · 김대연\*\*\*

\*계명대학교 기계자동차공학과, \*\*한국기계연구원,\*\*\*(주)지엔텍  
(2019년 1월 30일 접수, 2019년 5월 24일 수정, 2019년 5월 25일 채택)

## A Study on the Recirculation Flow Characteristics with the Change of Shape in a Flue Gas Recirculation Device using Coanda Nozzle

†Ji Soo Ha\* · Sung Hun Shim\*\* · Dae Yeon Kim\*\*\*

\*Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

\*\*Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

\*\*\*G&Tech, Anyang, Korea

(Received January 30, 2019; Revised May 24, 2019; Accepted May 25, 2019)

### 요약

본 연구는 폐기물 소각로에서 질소산화물 저감을 위해 고온의 배기가스를 연소로에서 재순환하여 연소용 공기와 혼합하여 배기가스 재순환을 이용한 방법에서 고온의 배기가스를 별도의 동력 팬이 없이 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치에 관한 연구이다. 코안다 노즐에서 공기 공급 노즐 간극의 변화와 공기 공급 노즐의 위치에 따른 배기가스 재순환 유량 특성과 혼합 가스의 출구에서 평균온도 변화를 살펴보았다. 공기 공급 노즐의 간극이 3.22, 4.03, 4.84 mm로 변할 때 가장 좁은 3.22 mm일 때가 배기가스 재순환 유량과 공기 공급 유량의 비인 배기가스 재순환 유량비가 2.227로 가장 재순환 유량이 크게 나타났고 혼합가스 평균 온도는 594.8 °C로 나타났다. 공기 공급 노즐의 위치가 코안다 노즐 목의 전방 위치, 목 위치, 확관 위치로 변할 때를 살펴보았으며 전방 위치와 목 위치일 때는 재순환 유량비가 1.843으로 거의 같은 값이고 확관 위치에서는 1.696으로 나타났으며 평균 온도는 559.8 °C와 544.3 °C로 나타났다.

**Abstract** - The purpose of the present study is to elucidate flue gas recirculation device for reduction of nitrogen oxides using coanda nozzle without adopting additional power driving fan in a waste incinerator. The characteristics of the exhaust gas recirculation flow rate and the average temperature change at the outlet of the mixed gas were investigated according to the change of air supply nozzle gap and the position of air supply nozzle. When the gap of the air supply nozzle was changed to 3.22, 4.03, and 4.84 mm, the largest recirculation flow ratio, which is the ratio of exhaust gas recirculation flow rate and air supply flow rate, was 2.227 for the case with 3.22 mm and its mean temperature at outlet was 594.8 °C. When the position of the air supply nozzle changes to the front position, neck position, and expansion position of the coanda nozzle neck, the recirculation flow ratios at the forward position and the neck position were nearly almost the same value, 1.843, and 1.696 at the expansion position, their mean temperatures were 559.8 °C and 544.3 °C, respectively.

**Key words** : coanda nozzle, NOx reduction, air nozzle gap, air nozzle position, recirculation flow ratio, exit mean temperature

†Corresponding author:jisooaha@kmu.ac.kr

## I. 서론

석탄 화력발전소나 폐기물 소각로의 연소로에서 질소산화물을 저감하기 위하여 여러 가지 방법을 사용하고 있다. 대형의 석탄 화력발전소에서는 선택적 촉매환원 탈질설비(selective catalytic reduction, SCR)를 이용하고 있다. 폐기물 소각로에서도 탈질설비를 이용하여 질소산화물을 저감 하고 있다. 이러한 탈질설비는 초기 설치비용과 운전 시 소요되는 암모니아 등의 재료비, 주기적으로 교체해야 하는 촉매 층 교환 비용등 유지 보수비용이 많이 들게 된다.

화석연료의 연소 시에 발생하는 질소산화물의 양을 탈질설비나 장치에 가기 전에 저감시킬 수 있다면 설치비용과 운전비용을 줄일 수 있다. 연소반응 시에 질소산화물을 줄이는 방법의 연구는 지연 연소를 통한 연소반응 분산, 배기가스 재순환 등이 연구[1,2,3]되고 있다. 고온의 배기가스를 재순환하기 위하여 별도의 배기가스 흡입 팬을 사용하면 고온에 견디는 고가의 유인 팬이 필요하다. 별도의 유인 팬이 필요 없이 고온의 배기가스를 재순환하는 방법으로 코안다 노즐을 사용하는 연구[4,5,6]가 최근에 많이 이루어지고 있다.

본 연구는 연소로의 질소 산화물을 저감하기 위해 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치에서 코안다 노즐의 공기 공급 노즐 형상과 위치에 따라 배기가스 재순환 유동 특성을 살펴보고 배기가스 재순환에 적합한 노즐 형상과 위치를 최적화 하는 것을 목적으로 한다.

## II. 수치해석 방법

코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 연소용 상온 공기는 공기 입구(Air inlet)으로 공급된다. Fig. 1(a)의 밑 부분에 자세히 나타낸 것과 같이 상온의 공기는 좁은 간극(gap)을 가지는 통로를 지나 고속으로 분출된다. 이렇게 분출된 고속의 공기 유동에 따라 베르누이 원리에 의해 이 부분에서 압력이 낮아져서 배기가스 입구(Flue gas inlet) 부분으로부터 고온의 배기가스가 재순환하여 유입되게 된다. 이렇게 유입된 고온의 배기가스와 상온의 공기가 혼합되어 출구(Outlet) 부분으로 배출되어 연소로에 연소용 공기로 사용되게 된다. Fig. 1(a)는 좁은 간극의 공기 공급 노즐의 위치가 목(Throat)의 전방에 설치되어 있는 경우이다. Fig. 1(b)는 공기 공급 노즐의 위치가 목(Throat) 위치에

있는 경우이다. Fig. 1(c)는 공기 공급 노즐 위치가 목(Throat)를 지나서 확장 배관의 중간에 위치한 경우이다. 장치의 중간 노란 선은 장치의 중심선이며 이를 중심으로 축대칭 원형 배관 형상이다.

본 연구에서 사용한 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치는 폐기물 소각로의 질소산화물 저감에 사용할 예정인 장치이다. 배기가스 입구의 직경은 0.508 m이고 출구의 직경은 0.332 m, 목의 직경은 0.244 m이고 배기가스 입구에서 출구까지 길이는 2.902 m이다. 상온의 공기 입구에서 유동 경계 조건은 질량유량은 0.287 kg/s이고 온도는 25 °C이다. 배기가스 입구에서 압력은 부압으로 -5 mmH<sub>2</sub>O이고 온도는 850 °C이다. 출구에서는 압력은 0 mmH<sub>2</sub>O로 설정하였다.

본 연구에서는 코안다 노즐 형상에 따른 배기가스 재순환 유량 특성을 고찰하는 것을 목적으로 하였다. 코안다 노즐 형상은 공기 공급 노즐간극 크기를 변화하는 것과 공기 공급 노즐의 위치를 변화하여 재순환 유량 특성을 비교하여 최적의 코안다 노즐 형상을 도출하려고 한다. 공기 공급 노즐의 간극은 3.22 mm(Case 1), 4.03 mm(Case 2), 4.84 mm(Case 3)인 세 가지 공기 공급 노즐 간극 형상을 변화하였다. 또한, 공기 공급 노즐 간극을 4.03 mm로 고정하고 공기 공급 노즐 출구의 위치가 Fig. 1(a)와 같이 코안다 노즐 목의 전방에 있는 경우(Case 2), 공기 공급 노즐의 출구가 목의 위치에 있는 경우 Fig. 1(b)와 같이 공기 공급 노즐의 출구가 목의 위치에 있는 경우(Case 4), Fig. 1(c)와 같이 공기 공급 노즐의 출구가 목을 지나 확장 배관의 중간 위치에 있는 경우(Case 5)와 같이 세 가지로 변화 하였다.

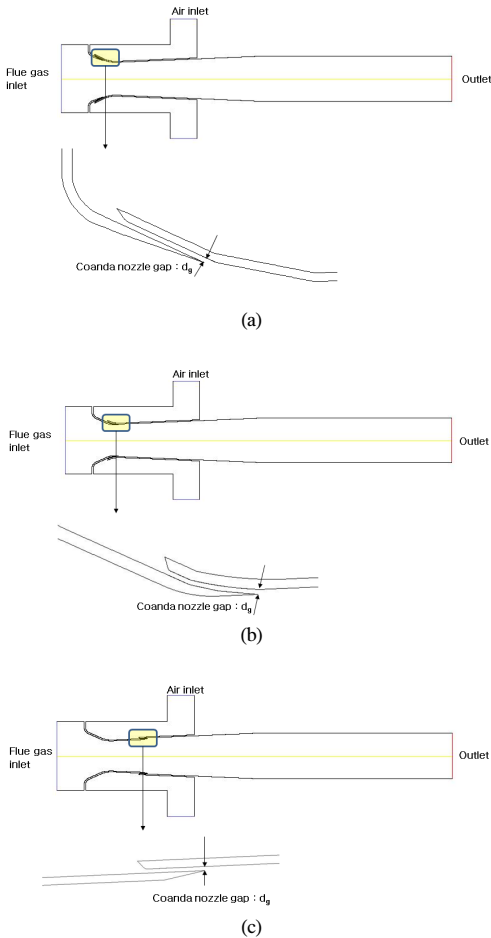
본 연구의 전산유동 해석에 사용한 격자수는 약 10만개 이며 ANSYS WORKBENCH 모델링 프로그램을 이용하여 모델링 및 격자를 생성하였으며, 전산 열유체 상용 해석 프로그램인 FLUENT 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 지배방정식은 2차원 정상상태 연속방정식, 운동량방정식 그리고  $k-\epsilon$  난류방정식, 에너지방정식으로 이루어졌으며 아래에 나타내었다.

연속방정식

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

코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치의 형상에 따른 재순환 유동 특성에 관한 연구



**Fig. 1.** Geometry configurations of flue gas recirculation device using coanda nozzle. (a) air nozzle exit position : before throat, (b) air nozzle exit position : at throat, (c) air nozzle exit position : after throat.

운동량방정식

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

에너지방정식

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j}(k \frac{\partial T}{\partial x_j}) \quad (3)$$

난류모델은  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였으며 아래에 관련 식을 정리하였다.

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

여기서 난류 에디 점성은 다음과 같이 정의 된다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \mu_{eff} = \mu_t + \mu_{lam} \quad (5)$$

난류 에너지에 대한 보존 방정식과 소산율 방정식은 다음과 같다.

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

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

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 공기 공급 노즐 간극 크기 변화에 따른 재순환 유동 특성

본 절에서는 Fig. 1(a)에 도식화 되어 있는 공기 공급 노즐 출구 위치에서 공기 공급 노즐 간극을 3.22 mm, 4.03 mm, 4.84 mm로 변화 했을 때의 재순환 유동 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 2에 위의 세 가지 경우에 대한 속도 분포를 나타내었다. 간극이 3.22 mm인 Case1(Fig. 1(a))의 속도 분포를 살펴보면 Fig. 1(b)의 속도 분포 우측 위 부분에 나타난 공기 공급 노즐 출구에서의 속도 분포를 자세히 나타내었는데 좁은 간극을 통해 나오는 공기의 속도는 최대 약 80 m/s이다. 그림에서 속도 분포 범위는 낮은 속도 범위도 자세히 관찰하기 위해 최대 40 m/s로 나타내었다. 이 부분에서 고속으로 분출되는 공기는 노즐의 벽면을 타고 고속의 속도 크기를 유지하면서 후류로 흐르고 있다. 베르누이 원리에 의해 속도가 크면 압력이 낮아지는데 이렇게 압력이 낮아지는 효과로 Fig 1에 나타난 배기가스 입구(Flue gas inlet)로부터 고온의 배기가스가 유입되고 있는 것을 알 수 있다. 유입되는 배기가스 속도는 코안다 노즐 목에서 목의 면적이 좁기 때문에 가장 속도가 크게 나타났다. 목을 지나서는 노즐이 확관 되면서 확관 끝 부분의 원관 중심 부근에서 속도가 낮은 영역을 관찰할 수 있다. 그 이후에는 고속의 공기와 낮은 속도의 배기가스가 혼합되어 원관 부근의 중심에서 속

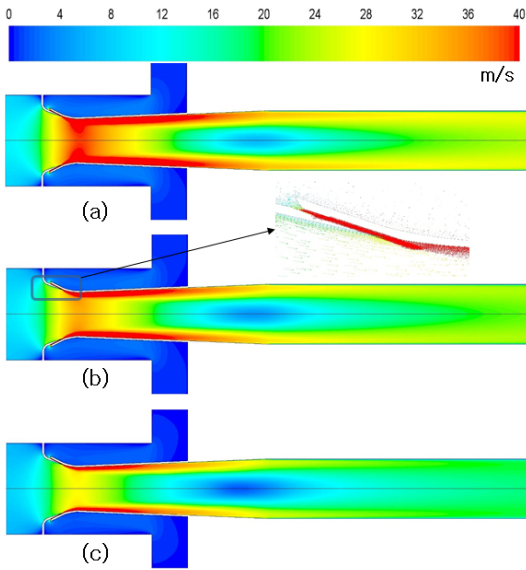


Fig. 2. Velocity distributions for Case 1(a), Case 2(b) and Case 3(c).

도가 다시 회복 되는 것을 알 수 있다. 간극의 크기가 4.03 mm인 경우(Fig. 2(b))의 유동 특성은 Fig. 1(a)와 유사하지만 목 부근에서 최대 속도 크기가 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 같은 공기 질량유량에서 공기 공급 노즐의 간극이 크면 출구에서 속도가 낮아지기 때문에 베르누이 원리로 압력이 낮아지는 효과가 상대적으로 낮아진다. 이에 따라 배기가스가 유입되는 효과가 상대적으로 낮아지기 때문이다. 환관이 끝나는 부근에서 속도가 낮아지는 영역의 존재와 그 후류에서 속도가 회복되는 것은 유사하게 관찰된다. 공기 공급 간극이 가장 큰 경우인 Fig. 2(c)도 Fig. 2(b)에서 설명한 경향과 같이 관찰 할 수 있다.

Fig. 3에는 Case 1, Case 2와 Case 3의 온도 분포를 비교하였다. Case 1(Fig. 2(a))의 경우를 보면 공급 공기의 온도가 상온인 25 °C이므로 공급 공기 영역은 낮은 온도 영역임을 알 수 있고 배기가스 입구의 온도는 850 °C이므로 상대적으로 높은 온도로 유입되는 것을 알 수 있다.

배기가스 재순환 유량비와 코안다 노즐의 혼합가스 출구 온도에 대한 정량적 비교는 Table 1에 비교하였다. Table 1에는 공기 공급 유량( $Q_1$ )과 배기가스 유입 유량( $Q_2$ ) 그리고 재순환 유량비( $Q_2/Q_1$ )를 비교하였다. 공기 공급 유량은 0.287 kg/s로 모두 일정하게 하였다. 이에 따른 배기가스 유입량은

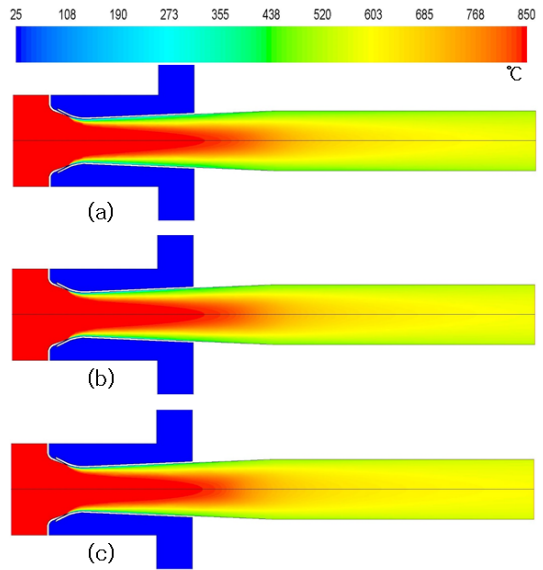


Fig. 3. Temperature distributions for Case 1(a), Case 2(b) and Case 3(c).

Table 1. Recirculation flow ratio and outlet mean temperature for Case 1, Case 2 and Case 3

Case	Case 1	Case 2	Case 3
$Q_1$ (kg/s)	0.287	0.287	0.287
$Q_2$ (kg/s)	0.640	0.529	0.448
$Q_2/Q_1$	2.227	1.843	1.561
$T_{\text{mean}}$ (°C) at outlet	594.8	559.8	528.0

각각 0.640, 0.529, 0.448 kg/s로 변화하였는데 이는 Case 1, Case 2, Case 3의 순으로 공기 공급 노즐 간극이 좁아서 Case 1의 노즐 출구 속도가 가장 크기 때문에 베르누이 효과에 의해 배기가스 유입량이 가장 크게 나타는 것이다. 이와 같은 결과로부터 재순환 유량비는 각각 2.227, 1.843, 1.561로 나타났다. 혼합가스 출구의 온도는 각각 594.8, 559.8 528.0 °C로 나타났다.

이러한 결과로부터 공기 공급 노즐의 간극이 좁은 경우가 재순환 유량비가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

### 3.2. 공기 공급 노즐 출구 위치 변화에 따른 재순환 유동 특성

본 절에서는 Fig. 1(a), (b), (c)에 도식화 되어 있듯이 공기 공급 노즐 출구 위치에서 공기 공급 노즐 간극을 4.03 mm으로 고정하고 출구 위치를 코안다 노즐의 목 전방(Case 2), 목 위치(Case 4) 그리고 목의 후류에 위치(Case 5) 했을 때 재순환 유동 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 4에 공기 공급 노즐 위치 변화에 따른 속도 분포를 비교하여 나타내었다. 공기 공급 노즐 위치가 목의 전방일 때의 경우(Fig. 4(a))는 Fig. 2(b)와 같은 속도 분포이다. 공기 공급 노즐의 출구 위치가 목인 경우(Case 4, Fig. 4(b))의 속도 분포를 살펴보면 Fig. 4(a)에 나타난 Case 2보다 목 부근에서 배기가스 유입구에서 유입된 배기가스의 속도가 다소 크게 보이지만 배기가스의 입구 온도가 850°C로 고온이며 이에 따라 배기가스의 밀도가 낮아서 이 부분에서 속도가 높지만 배기가스의 유입 질량 유량의 정량적 증가 여부는 Table 2에서 검토하기로 한다. 공기 공급 노즐 출구의 위치가 확관의 경우(Case 5, Fig. 4(c))에서도 코안다 노즐 목 부근에서 Case 2와 Case 4 보다 목 부근에서 속도가 다소 높은 것으로 보이지만 정량적인 질량유량은 Table 2에서 검토하기로 한다. 특징적인 것은 Case 2에 비하여 Case 4와 Case 5에서 확관이 끝나는 부분의 중심에서 낮은 속도를 보이고 있다. 특히 Case

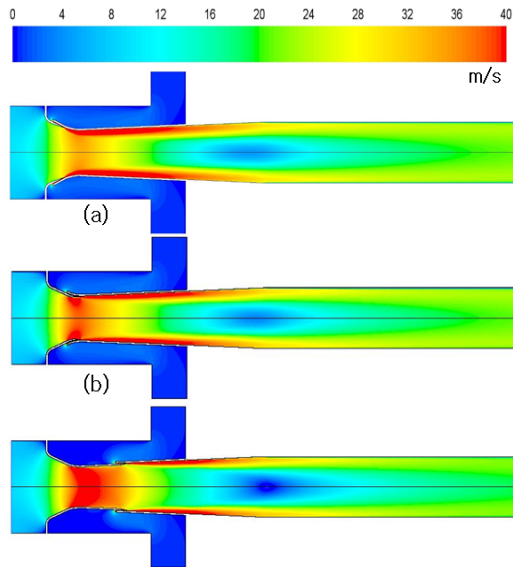
5의 경우에 가장 낮은 속도 분포를 보이고 있다.

Fig. 5에는 Case 2, Case 4와 Case 5의 온도 분포를 비교하였다. 공기 공급 노즐의 위치가 후류로 감에 따라 고온의 배기가스 온도인 850°C 온도 영역이 후류로 변해 가는 것을 관찰할 수 있다. 상온의 공기와 혼합하여 혼합 가스 출구의 혼합 온도의 정량적 비교는 Table 2에서 검토하기로 한다.

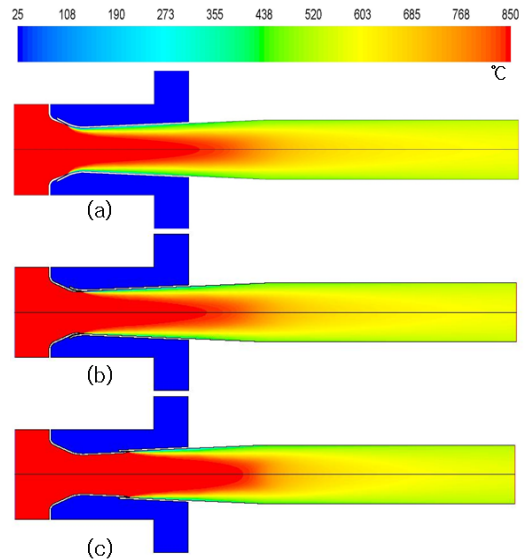
Table 2에서 Table 1과 유사하게 배기가스 유입 유량과 재순환 유량비, 출구에서의 온도를 비교하였다. 공기 공급 노즐 출구의 위치가 목 전방, 목, 확관 위치로 변하면서 배기가스 재순환 유량은 0.529, 0.526, 0.487 kg/s로 변한다. 이에 따라 재순환 유량

**Table 2.** Recirculation flow ratio and outlet temperature for Case 2, Case 4 and Case 5

Case	Case 2	Case 4	Case 5
$Q_1$ (kg/s)	0.287	0.287	0.287
$Q_2$ (kg/s)	0.529	0.526	0.487
$Q_2/Q_1$	1.843	1.831	1.696
$T^{\text{mean}}$ (°C) at outlet	559.8	558.7	544.3



**Fig. 4.** Velocity distributions for Case 2(a), Case 4(b) and Case 5(c).



**Fig. 5.** Temperature distributions for Case 2(a), Case 4(b) and Case 5(c).

비는 1.843, 1.831, 1.696으로 변화였다. 이를 보면 공기 공급 노즐 출구 위치가 목 전방이나 목의 위치이나 배기가스 재순환 유량비의 변화는 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 혼합가스 출구에서의 온도도 559.8, 558.7, 544.3 °C로 변하는데 화관 위치에서 가장 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 배기가스 재순환에 관하여 효과적인 공기 공급 노즐 출구의 위치는 목의 전방에서부터 목의 위치 사이에 어디에 위치하여도 같은 배기가스 재순환 유량 효과를 가져다주는 것을 확인하였다.

#### IV. 결론

본 연구에서 연소로의 질소 산화물을 저감하기 위해 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 장치에서 코안다 노즐의 공기 공급 노즐 형상과 위치에 따라 배기가스 재순환 유동 특성을 CFD 해석을 통해 살펴보았는데 이에 관한 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

코안다 노즐에서 공기 공급 노즐의 간극이 3.22 mm(Case 1), 4.03 mm(Case 2), 4.84 mm(Case 3)로 변할 때 간극이 클수록 출구에서의 속도가 낮아져서 배기가스 재순환 유량이 작아지는 것을 알 수 있었다. 공급 공기 유량과 배기가스 재순환 유량의 비는 각각 2.227, 1.843, 1.561로 나타났으며 공기 공급 노즐의 간극이 3.22 mm일 때 배기가스 재순환 효과가 가장 크게 나타났다. 이에 따라 혼합 가스 출구에서 평균 온도는 각각 594.8 °C, 559.8 °C, 528.0 °C로 나타났다.

공기 공급 노즐 간극을 4.03 mm로 고정하고 공기 공급 노즐의 위치를 코안다 노즐 목 전방(Case 2), 목(Case 4), 화관 위치(Case 5)로 한 경우의 재순환 유동 특성을 살펴보면 공기 공급 노즐 출구 위치가 코안다 노즐 목 전방에서 목 위치까지는 재순환 유량비는 1.843과 1.841로 거의 변하지 않지만 화관 위치에서는 재순환 유량비가 1.696으로 낮아졌다. 이에 따라 혼합가스 출구 평균 온도는 각각 559.8 °C, 558.7 °C, 544.3 °C으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 2019년도 환경산업선진화 기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

#### 사용기호

$p$	: pressure [Pa]
$u_j$	: velocity for j axis [m/s]
$x_j$	: coordinate for j axis [m]
$k$	: turbulent kinetic energy [ $m^2/s^2$ ]
$d_g$	: coanda nozzle gap [mm]
$Q_1$	: air mass flow rate [kg/s]
$Q_2$	: flue gas recirculation mass flow rate [kg/s]
$T$	: temperature [°C]

#### 그리스 문자

$\rho$	: density [ $kg/m^3$ ]
$\mu$	: viscosity [kg/ms]
$\mu_{eff}$	: effective viscosity [kg/ms]
$\epsilon$	: turbulent dissipation rate [ $m^2/s^3$ ]

#### 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] Sung Hoon Shim and Ji Soo Ha, "A study on the exhaust gas recirculation in a MILD combustion furnace by using the coanda nozzle effect", *Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 35, No. 12, 967-972, (2013)
- [5] Sung Hoon Shim and Ji Soo Ha, "Characteristics of entrainment flow rate in a Coanda nozzle with or without coaxial contractor", *KIGAS*, 18(2), 21-27, (2014)
- [6] Ji Soo Ha, "A study on the cold flow characteristics of a flue gas recirculation burner with both outlets opening", *KIGAS*, 22(3), 7-12, (2018)