

양쪽 출구가 트인 배기가스 재순환 버너의 연소 유동 특성에 관한 연구

하지수
계명대학교 기계자동차공학과

A Study of the Combustion Flow Characteristics of a Exhaust Gas Recirculation Burner with Both Outlets Opening

Ji-Soo Ha

Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

요약 연소 반응 시 발생하는 질소산화물은 산성비와 미세먼지 발생에 많은 영향을 미치는 물질이다. 이에 대한 저감 방법으로 고비용의 탈질설비 대신 지연연소 등의 방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이러한 연구들 중에 적은 양의 공기로 많은 양의 배기가스를 재순환 할 수 있는 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 연소에 대한 연구가 최근에 이루어지고 있다. 본 연구에서는 배기가스 재순환 배관에 코안다 노즐을 사용하여 배기가스를 재순환하는 재순환 버너의 양쪽 출구가 트인 형상에 대하여 전산유체해석을 통해 연구를 수행하였으며 연소 유동의 압력, 유선, 온도, 연소 반응 속도와 질소산화물의 분포 특성을 살펴보았다. 배기가스를 재순환하여 연소용 공기와 혼합된 기체가 원통의 접선방향으로 유입되어 연료노즐 출구 부근에서 압력이 낮은 영역이 존재하고 이에 따라 원통 버너의 중심부근에는 버너의 가운데 부분으로 역류가 형성되며 가장자리 부분으로 배기가스가 배출되는 것을 확인하였다. 배기가스가 유입되는 부분이 버너의 오른쪽에 있어서 버너의 오른쪽으로 연소반응이 일어나며 상대적으로 온도분포와 NO_x 분포가 높게 나타났다. 연소용 공기비를 1.0에서 1.8까지 변화하여 NO_x 생성을 관찰한 결과, 공기비가 1.0에서 1.5까지는 평균 NO_x 생성이 감소하다가 공기비가 1.8일 때 급격히 증가하는데 이는 NO_x 생성 반응은 온도의 지수승에 비례하게 되는데 공기비가 1.5이상이면 온도 영향이 많이 받아서 NO_x 생성 반응이 오른쪽 영역에서 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

Abstract The nitrogen oxides generated during combustion reactions have a great influence on the generation of acid rain and fine dust. As an NO_x reduction method, exhaust gas recirculation combustion using Coanda nozzles capable of recirculating a large amount of exhaust gas with a small amount of air has recently been utilized. In this study, for the burner outlet with dual end opening, the use of a recirculation burner was investigated for the distribution of the pressure, streamline, temperature, combustion reaction rate and nitrogen oxides using computational fluid analysis. The gas mixed with the combustion air and the recirculated exhaust gas flow in the tangential direction of the circular cylinder burner, so that there is a region with low pressure in the vicinity of the fuel nozzle exit. As a result, a reverse flow is formed in the central portion of the burner near the center of the circular cylinder burner and the exhaust gas is discharged to the outside region of the circular cylinder burner. The combustion reaction occurs on the right side of the burner and the temperature and NO_x distribution are relatively higher than those on the left side of the burner. It was found that the average NO_x production decreased from an air flow ratio of 1.0 to 1.5. When the air flow ratio is 1.8, the NO_x production increases abruptly. It is considered that the NO_x production reaction increases exponentially with temperature when the air ratio is more than 1.5 and the NO_x production reaction rate increases rapidly on the right-hand side of the burner.

Keywords : Coanda nozzle, combustion, exhaust gas recirculation burner, NO_x mass fraction, reverse flow

*Corresponding Author : Ji-Soo Ha (Keimyung Univ.)

Tel: +82-10-9512-1556 email: jisooaha@kmu.ac.kr

Received March 20, 2018

Revised (1st March 27, 2018, 2nd March 29, 2018)

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

1. 서론

연소반응 시 발생하는 질소산화물은 산성비와 미세먼지에 많은 영향을 미치는 물질이다. 연소기기에서 질소산화물을 저감하는 방법은 여러 가지가 있는데 대형 발전설비에서는 탈질설비와 같이 설치비용과 운전비용이 큰 후처리 장치를 설치하여 저감하고 있다. 자동차의 엔진에서 연료를 연소 후 배기가스에 있는 질소산화물도 촉매를 이용한 탈질설비를 사용하고 있다. 질소산화물을 저감하는 탈질설비는 질소산화물을 저감하는 효과는 크지만 설치비용과 운전비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 고비용의 탈질설비 대신 연소과정에서 질소산화물을 저감하는 연구가 많이 이루어지고 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 질소산화물 저감에 효과적이라는 연구들이[3~6] 이루어지고 있다. 배기가스를 재순환하는 방법으로 코안다 노즐을 이용하는 방법을 채택하여 소각로의 배기가스를 재순환하여 질소산화물을 저감하는 연구[7,8]도 이루어 졌고 이 연구로부터 코안다 노즐은 적은 양의 공기로 많은 양의 배기가스를 재순환 할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다. 또한 최근에는 가스버너에 코안다 노즐을 이용하여 배기가스 재순환을 이용하여 질소산화물 저감에 관한 연구[9]도 이루어 졌다.

본 연구는 최근의 연구[9]에서 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너 형상이 한쪽은 막혀 있고 다른 한쪽이 출구인 원통형상의 버너에서 연소 및 질소산화물 생성 특성을 규명한 것을 토대로 하여 양쪽 출구가 트인 버너에서 연소 및 질소산화물 생성 특성을 규명하는 것을 목적으로 하였다. 이 연구를 통해 질소산화물 저감을 위한 재순환 버너의 최적설계에 활용하기로 한다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서 사용한 배기가스 재순환 버너의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 원통형이며 원통 가운데에 연료 공급용 배관이 놓여져 있다. 원통 버너 양쪽 끝은 열려져 있어서 외부 공기가 유입될 수 있도록 되어 있다.

원통 버너의 외부에 두 개의 배관을 연결하여 배기가스를 재순환하도록 하였다. 배기가스를 재순환하는 원동력은 두 개의 외부 배관 가운데에 코안다 노즐을 설치하여 작은 간격을 통해 연소용 공기를 고속으로 분사함으로써 작은 간격 출구에서 낮은 압력을 생성시켜 원통 버너의 후류에 있는 배기가스를 흡입하도록 되어 있다. 또한 외부의 배관은 흡입구와 배출구는 같은 평면상에 있도록 한 것이 아니며 Fig. 1(b)에서 보는바와 같이 혼합가스의 배출은 선회유동이 만들어 질 수 있도록 원통 버너의 접선방향으로 각도 22.5°로 위치해 있다. 원통의 직경은 160mm이고 길이는 1888mm이다. 연료노즐의 직경은 5.15mm이다. Fig. 2에는 전산유체해석에 필요한 격자를 나타내었는데 본 연구에서는 격자수가 약 1000만개로 구현하였다.

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

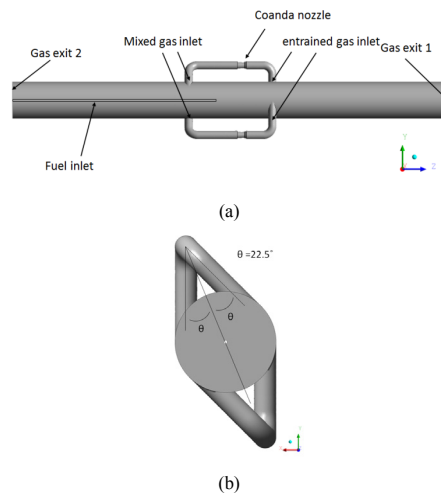


Fig. 1. Geometry configuration of exhaust gas recirculation burner with coanda nozzle

본 연구의 수치해석에 사용한 지배방정식은 3차원 정상상태 연속방정식, 운동량방정식 그리고 realizable $k-\epsilon$ 난류방정식, 에너지방정식, 농도장 방정식으로 이루어 졌으며 연소모델은 Finite-rate 및 Eddy-Dissipation 모델을 사용하였으며 이에 관한 자세한 식은 이전의 연구인 한쪽 끝이 열려있는 버너에서의 연구[9]에 기술되어 있다.

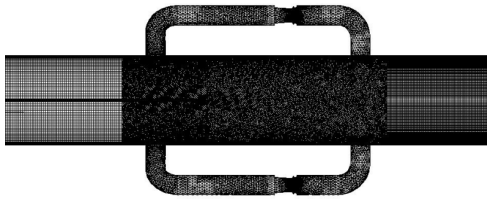


Fig. 2. Generated mesh for CFD analysis at the sections of frontal view

본 연구에 사용한 연료는 메탄이며 메탄 유량을 $5.15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 로 고정하였는데 이 유량에서 이론 공기량은 $8.61 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 이다. 실제 공기량은 이론 공기량의 1.0배, 1.1배, 1.3배, 1.5배, 1.8배로 변화하였다. 코안다 노즐의 공기층 간격은 0.5mm으로 하여 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 양쪽 끝이 트인 배기가스 재순환 버너의 연소 유동 특성

코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너는 Fig. 1에서와 같이 연소기 후류에서 배기가스를 흡입하고 연료 노즐 출구 부근에서 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 압력 분포를 나타내었다. 압력분포의 범위는 -20Pa 에서 10Pa 이다. 연료노즐의 출구 부근 또는 혼합가스 유입구 부근에서 배기가스 재순환 유체와 연소용 공기가 혼합한 것이 분사되는 곳이라서 이 부근에서 낮은 압력 영역이 형성됨을 알 수 있는데 이로부터 버너의 양쪽 끝에 트인 출구에서부터 혼합가스 유입구 영역부근으로 역류가 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

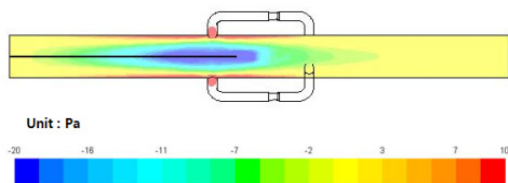


Fig. 3. Contour of static pressure at the section $x=0\text{mm}$. pressure range : $-20 \sim 10 \text{ Pa}$

Fig. 4에는 원통 버너 내부에서 혼합가스 유입구 전후의 단면인 $z=0$ (유입구 왼쪽 단면)과 250mm(유입구 오른쪽 단면)에서 유선이 출발하여 발달해 가는 것을 나타내었다. 혼합가스 유입구는 접선 방향으로 유입이 되고 이에 따라 선회 유동이 발생한다. 두 단면에서 유선이 발달해 가는 초기 그림에서는 혼합가스 유입구 부근의 원통 가장자리에서는 양쪽 출구쪽으로 유동이 발달해 가고 원통의 가운데 부분에서는 Fig. 3에서 관찰한 압력이 낮은 영역인 연료노즐 출구 부근으로 유동이 모이는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 4의 세 번째 그림에서는 배기가스가 재순환 되어 코안다 노즐이 있는 배관으로 유입되는 것을 관찰할 수 있다. 유선이 완전히 발달했을 때인 Fig. 4의 가장 아래쪽 그림을 보면 원통 버너의 양쪽 출구로 유동이 배출되며 선회 유동의 영향으로 배출될 때에도 원통 버너의 가장자리로 배출되며 가운데에서는 역류가 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

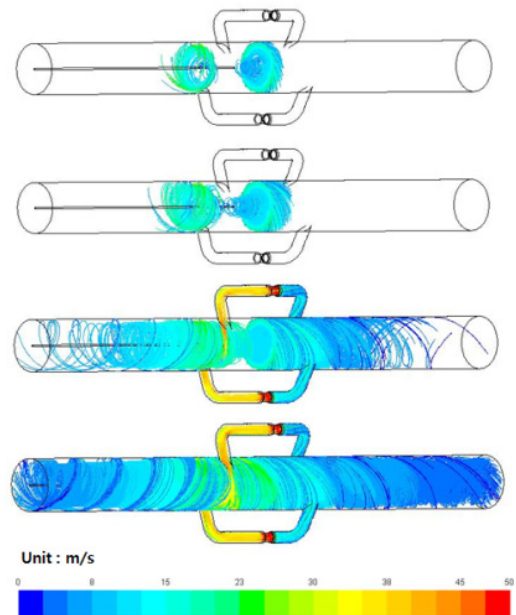


Fig. 4. Flow visualization in the burner started at the section $z=0$ and 250mm

Fig. 5에는 $x=0\text{mm}$ 단면에서 온도, 반응속도와 NO_x 분포를 나타내었다. 온도분포(Fig. 5(a))를 보면 원통 버너의 오른쪽 부분의 온도가 높고 왼쪽 출구 방향의 영역은 상대적으로 온도가 낮게 나타났다. 이는 코안다 노즐이 설치 되어 있어서 연소된 고온의 가스가 유입이 되는

곳이 원통 버너의 오른쪽에 위치해 있어서 연료 노즐에서 나온 연료와 연소용 공기가 반응하는 곳이 이 영역으로 흐르면서 일어나기 때문이고 이러한 것을 Fig. 5(b)의 반응속도 분포에서 관찰할 수 있다. 연소반응이 일어나는 곳이 연료 노즐에서 배기가스 유입구 방향으로 원통 버너의 가장자리 영역에서 활발하게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 연소 반응이 활발히 일어나는 곳에서 상대적으로 온도가 고온의 영역이 되는데 이 부근에서 NOx의 농도도 높게 나타나는 것을 Fig. 5(c)에서 관찰할 수 있다.

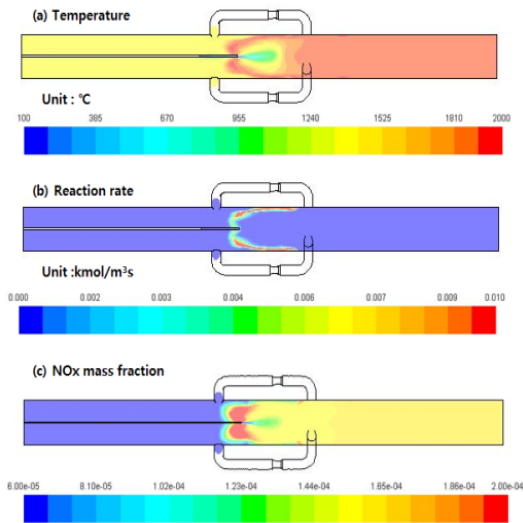


Fig. 5. Contours of temperature, reaction rate and NOx concentration at the section of $x=0\text{mm}$

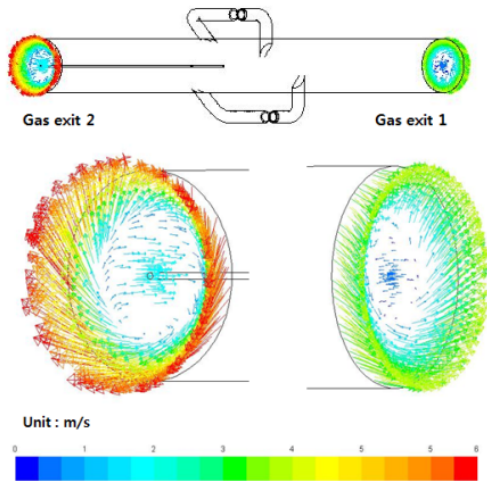


Fig. 6. Velocity vector plot at the both outlet sections

양쪽 끝이 트인 버너에서 양쪽으로 배기가스가 배출되는 특성을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에는 양쪽 끝에서 속도 벡터를 나타내었는데 Fig. 6의 왼쪽 끝 단면에서 배출 속도가 exit1으로 배출되는 속도 보다 큼을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 3과 Fig. 4에서 관찰하였듯이 원통의 가운데 부분에서는 양쪽 끝 단면 모두에서 버너 내부로 역류가 일어남을 관찰할 수 있다. 오른쪽 보다 왼쪽 끝 단면으로 배출이 더 많이 되는 것은 오른쪽 영역에 배기가스가 재순환 되는 입구가 있어서 오른쪽 끝 단면으로 배출되려고 하는 것을 막기 때문으로 판단된다.

3.2 공기 유량 변화에 따른 배기가스 유입량 및 질소산화물 생성 특성

앞 절에서는 공기비 1.1인 경우에 원통 버너 내부의 압력, 온도, 반응속도, NOx 분포 그리고 유선의 변화를 관찰하여 양쪽 트인 코안다 노즐을 이용한 재순환 버너 내부의 연소 유동 특성을 살펴보았다.

공기 유량에 따라 배기가스가 재순환되는 유량이 변하고 이에 따라 연소 유동과 NOx 생성 특성의 변화가 많은 영향을 미칠 것으로 판단되어 연소용 공기 유량을 변수로 선정하였으며 공기유량을 변화하였을 때 재순환 유량과 배기가스 배출 특성의 변화에 대한 정량적인 비교는 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 1에는 공기비에 따른 유입공기량을 비교하였다. 공기비가 1.0일 때 공기량이 0.0086kg/s인데 배기가스 유입량은 0.0051kg/s로 공기량 보다 0.56배(Table 1에서 괄호안의 숫자)의 양이 유입된다. 공기비가 1.1, 1.3, 1.5, 1.8배로 증가할 때 유입량비는 이에 거의 비례하게 증가한다. 즉 공기비가 1.8배이면 유입량비는 0.91배로서 공기비 1.0일 때의 유입량비에 비하여 1.6배 증가한다. Table 2에는 양쪽 끝 단면으로 배출되는 배기가스의 유량을 비교하였다. 공기비가 1.0일 때는 exit1으로 배출되는 유량이 약간 더 크지만 양쪽으로 배출되는 유량은 거의 같게 나타났다. 공기비가 1.1 이상이 되면 exit2로 배출되는 배기가스 유량이 exit1으로 배출되는 것 보다 크게 됨을 알 수 있다. 또한 공기비가 증가하면 exit1으로 배출되는 유량은 감소하게 되고 exit2로 배출되는 유량은 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

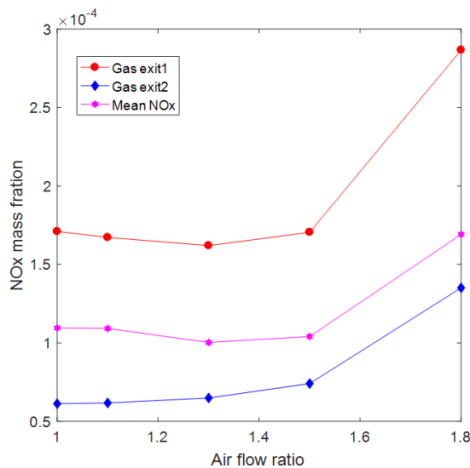
Table 1. Entrained flow rate with air flow ratio change

Air flow ratio	1.0	1.1	1.3	1.5	1.8
Air flow rate (kg/s)	0.0086	0.0094	0.0112	0.0130	0.0154
Entrained flow rate (kg/s)	0.0051 (0.59)	0.0060 (0.64)	0.0077 (0.69)	0.0096 (0.74)	0.014 (0.91)

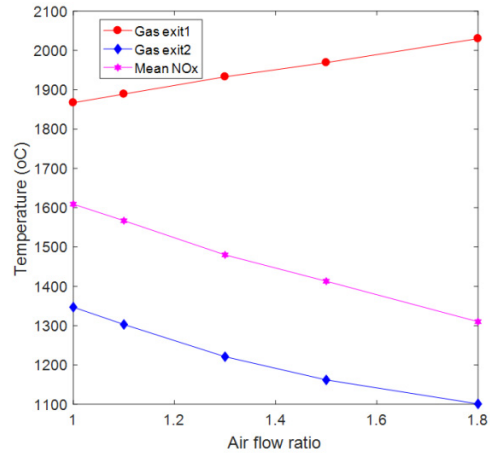
Table 2. Exhaust flow rates with air flow rate change

Air flow ratio	1.0	1.1	1.3	1.5	1.8
Gas exit1 (kg/s)	0.0046 (0.53)	0.0045 (0.48)	0.0043 (0.38)	0.0042 (0.32)	0.0037 (0.24)
Gas exit2 (kg/s)	0.0045 (0.52)	0.0055 (0.59)	0.0075 (0.67)	0.0093 (0.72)	0.0123 (0.80)

Fig. 7에는 공기비를 변화했을 때 양쪽 출구에서 NOx 농도와 배출 유량으로 평균한 평균 NOx 농도(Fig. 7(a)), 양쪽 출구에서 온도, 배출유량으로 평균한 배출 평균온도(fig. 7(b))를 나타내었다. 공기비가 증가하면 오른쪽 출구에서는 NOx농도가 공기비 1.5까지는 약간 감소하다가 1.8에서 급격히 증가한다. exit2에서는 공기비 1.5까지는 약간 증가하다가 1.8일 때 급격히 증가한다. NOx 평균배출 농도는 exit1에서의 NOx 변화 특성과 유사하게 변한다.



(a) NOx mass fraction



(b) Gas exit temperature

Fig. 7. NOx mass fraction and temperature at both outlet sections

온도 변화를 살펴보면(Fig. 7(b)) exit2로 배출되는 배기가스의 온도는 공기비가 증가하면 비례하여 증가하는데 이는 배기가스 유입량은 증가하지만 exit1으로 배출되는 유량은 감소하여 오른쪽 영역은 공기비가 증가하면 유동이 정체되는 영향으로 온도가 증가하는 것으로 판단된다. exit2으로는 공기비가 증가하면 배출 유량이 증가하고 이에 따라 공기비가 증가하면 온도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 양쪽으로 배출되는 유량으로 평균한 온도도 왼쪽의 온도 경향과 유사하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 공기비가 1.8일 때 NOx 농도가 급격히 증가하는 것은 화학반응 속도가 아레니우스 반응속도 공식인 $k=A\exp(-E/RT)$ (A: 빈도인자, E: 활성화 에너지, R:기체상수, T:절대온도)으로 설명할 수 있다. Fig. 7(b)에서 관찰한 바와 같이 공기비가 증가함에 따라 오른쪽 영역의 온도가 선형적으로 증가하는데 이에 따라 NOx 생성 반응은 온도의 지수승에 비례하게 되는데 공기비가 1.5이상이 되면서 온도의 영향을 많이 받아서 NOx 생성 반응이 오른쪽 영역에서 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

양쪽 출구가 트인 배기가스 재순환 버너에 대하여 연소유동을 전산해석을 통해 살펴보았으며 이에 관한 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

양쪽 트인 원통 버너의 가운데 부분에 코안다 노즐을 이용하여 배기가스를 재순환하여 연료노즐 출구 부근에 선회유동을 유발하면서 혼합가스를 유입하면 혼합가스 유입구 부근의 원통 중심에서 낮은 압력이 형성되고 이에 따라 원통 가장자리로 배기가스가 배출되지만 가운데 부분으로는 역류가 발생하였다. 또한 온도, 연소반응속도, NOx 분포는 주로 배기가스가 유입되는 쪽인 오른쪽 영역에서 높은 값을 가졌다.

배출 유량은 혼합가스 유입구가 있는 쪽은 배출되는 것을 방해하여 상대적으로 왼쪽이 큰 값으로 나타났다. 이러한 현상은 공기비를 1.1에서 1.8로 변화하여도 같은 경향으로 나타났다.

공기비를 1.0에서 1.8로 변화 하면 NOx 발생은 1.5까지는 평균 NOx 농도가 거의 변화가 없거나 약간 감소하다가 1.8에서는 급격히 증가하였다. 이는 NOx 생성 반응은 온도의 지수승에 비례하게 되는데 공기비가 1.5이상 이 되면서 온도의 영향을 많이 받아서 NOx 생성 반응이 오른쪽 영역에서 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

- [8] Ha, J. S., Shim, S. H., "Characteristics of Entrainment Flow Rate in a Coanda Nozzle with or without Coaxial Contractor", *The Korean Institute of Gas*, vol. 18, No.2, pp.21-27, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7842/kigas.2014.18.2.21>
- [9] Ha, J. S., "A study on the combustion flow characteristic and NOreduction of the exhaust gas recirculation burner using coanda nozzles", *The Korean Institute of Gas*, vol. 21, No. 3, pp.53-60, 2017.

하 지 수(Ji-Soo Ha)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2007년 2월 : 현대중공업(주) 산업기술연구소 수석연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

연소공학, 열유체전산해석

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*, pp.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*, pp.3206-3211, 2005.
- [3] J.A. Wuuning and J.G. Wunning., "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 23, pp.81-97, 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00006-3)
- [4] M. Katsuki, T.Hasegawa, "The science of technology of combustion in highly preheated air", *27 Symp (Int.) Combustion*, pp.3135-3146, 1998.
- [5] A. Cavaliere, M. De Joannon, R. Ragucci, "Mild combustion of high temperature reactants", *2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion*, 1999.
- [6] Baek, D. S., "A Study on Combustion Flow Characteristics in Heavy-Duty Diesel Engine Equipped with EGR", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 7, No. 5, pp784-787, 2006.
- [7] Ha, J. S., Shim, S. H. and Eung Ho Jung, "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*, vol. 23, No. 2, pp.51-57, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.3.051>