

배기가스 재순환 버너에서 연소가스 출구 위치에 따른 연소 유동 특성에 관한 연구

하지수
계명대학교 기계자동차공학과

A Study on the Combustion Flow Characteristics of a Exhaust Gas Recirculation Burner with the Change of Outlet Opening Position

Ji-Soo Ha

Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

요약 질소산화물은 최근에 초미세먼지 발생에 많은 영향을 주고 있어서 대기환경 개선 측면에서 사회적으로도 크게 관심이 되고 있다. 질소산화물은 주로 화력발전 등의 연소기에서 고온의 연소가스 분위기에서 공기 중의 질소와 산소가 반응하여 발생한다. 이에 대한 저감 방법으로 원통형 버너에 코안다 노즐을 이용한 배관으로 배기가스를 재순환하는 연소에 대한 연구가 최근에 이루어지고 있다. 본 연구에서는 코안다 노즐을 사용하여 배기가스를 재순환하는 원통형 버너의 연소가스 출구의 위치를 오른쪽으로 하는 버너(Case 1 버너), 양쪽을 출구로 하는 버너(Case 2 버너), 왼쪽을 출구로 하는 버너(Case 3 버너) 형상에 대하여 전산유체해석을 통해 연구를 수행하였으며 연소 유동의 압력, 유선, 온도, 연소 반응 속도와 질소산화물의 분포 특성을 비교 분석하였다. 연소반응은 Case 1과 Case 2버너는 연소가스 재순환 유입구가 있는 오른쪽 방향으로 일어나고 Case 3 버너는 혼합가스 유입구 부근에서 일어나고 있었다. 출구에서의 온도는 Case 2버너가 양쪽으로 배출되면서 다른 버너 보다 약 100℃ 정도 온도가 낮게 나타났으며 출구에서의 NOx 농도는 Case 1버너가 다른 형상 버너 보다 약 20배 크게 나타났다. 이로부터 NOx 저감을 위해서는 배기가스 재순환 버너의 출구는 양쪽으로 배출되게 하거나 연소가스 재순환 유입구 반대 방향으로 배출 되도록 하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

Abstract Nitrogen oxides (NOx) have recently been very influential in the generation of ultrafine dust, which is of great social interest in terms of improving the atmospheric environment. Nitrogen oxides are generated mainly by the reaction of nitrogen and oxygen in air in a combustion gas atmosphere of high temperature in a combustion apparatus such as thermal power generation. Recently, research has been conducted on the combustion that recirculates the exhaust gas to the cylindrical burner by using a piping using a Coanda nozzle. In this study, three types of burners were carried out through computational fluid analysis. Case 1 burner with the outlet of the combustion gas to the right, Case 2 burner with both sides as gas exit, Case 3 burner with left side gas exit. The pressure, flow, temperature, combustion reaction rate and distribution characteristics of nitrogen oxides were compared and analyzed. The combustion reaction occurred in Case 1 and Case 2 burner in the right direction with combustion gas recirculation inlet and Case 3 burner in the vicinity of mixed gas inlet. The temperature at the outlet was about 100℃ lower than that of the other burners as the Case 2 burner was exhausted to both sides. The NOx concentration of Case 1 burner at the exit was about 20 times larger than that of the other burners. From the present study, it could be seen that it is effective for the NOx reduction to exhaust the exhaust gas to both side gas exits or to exhaust the exhaust gas to the opposite direction of inlet of recirculation gas.

Keywords : Coanda nozzle, Combustion, Exhaust gas recirculation burner, NOx mass fraction, Reverse flow

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

Tel: +82-53-580-5919 email: jisooa@kmu.ac.kr

Received May 8, 2018

Revised (1st June 29, 2018, 2nd July 20, 2018)

Accepted August 3, 2018

Published August 31, 2018

1. 서론

질소산화물은 최근에 초미세먼지 발생에 많은 영향을 주고 있어서 대기환경 개선 측면에서 사회적으로도 크게 관심이 되고 있다. 질소산화물은 주로 화력발전 등의 연소기에서 고온의 연소가스 분위기에서 공기 중의 질소와 산소가 반응하여 발생한다. 질소산화물을 저감하는 방법은 여러 가지가 있는데 대형 발전설비에서는 탈질설비와 같이 설치비용과 운전비용이 큰 후처리 장치를 설치하여 저감 하고 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 방법이 에너지 효율과 질소산화물 저감에 효과적이라는 연구들이[3~6] 이루어지고 있다. 최근에는 원통형 가스버너에 코안다 노즐을 장착한 배관을 이용하여 배기가스를 재순환 하여 질소산화물을 저감 하는 연구[7]도 이루어 졌다.

본 연구는 최근의 연구[7]에서 코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너 형상이 한쪽은 막혀 있고 다른 한쪽이 출구인 원통 형상의 버너에서 연소 및 질소산화물 생성 특성을 규명한 것을 토대로 하여 양쪽 출구가 트인 원통형상 버너와 반대쪽이 막혀 있는 원통형 버너 형상에서 연소 및 질소산화물 생성 특성을 규명하고 세 가지 형상의 버너에서 연소 특성과 질소산화물 생성 특성을 비교함으로써 질소산화물 저감을 위한 배기가스 재순환 버너의 최적설계에 활용하기로 한다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서 사용한 배기가스 재순환 버너는 세 가지 형상이다. 이 세 가지 형상의 버너를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 연료 입구(Fuel inlet)측 원통 버너 벽면은 막혀 있으며 가스출구(Gas exit1)으로 되어 있는 부분으로 연소된 가스가 빠져 나간다. 앞으로 이 형상의 버너를 Case 1 버너로 표기하기로 한다. 원통 가운데에 연

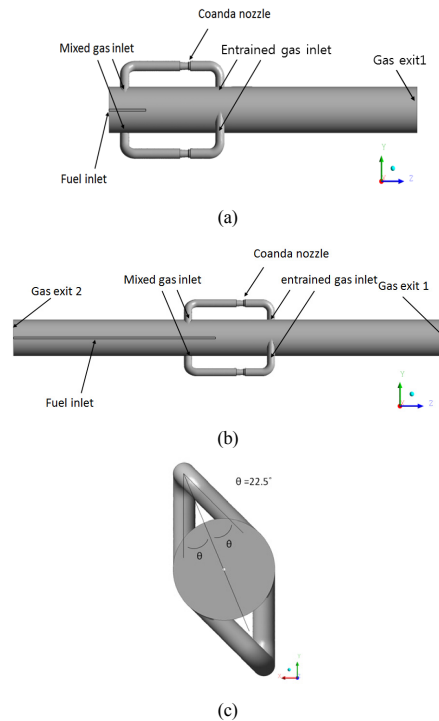


Fig. 1. Geometry configuration of exhaust gas recirculation burner with coanda nozzle

료 공급용 배관이 놓여 저 있다. 원통 버너의 외부에 두 개의 배관을 연결하여 배기가스를 재순환하도록 하였다. 배기가스를 재순환하는 원동력은 두 개의 외부 배관 가운데 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(c)에서 보는바와 같이 혼합가스의 배출은 선회유동이 만들어 질 수 있도록 원통 버너의 접선방향으로 각도 22.5°로 위치해 있다. Fig. 1(b)에는 Fig. 1(a)의 원통 버너에서 연료 입구 측 벽면을 열어서 확장하여 가스출구 2(Gas exit2)에 또 다른 연소가스 출구를 만들어서 원통의 양쪽이 열려 있는 버너이다. 이 두 번째 형상의 버너를 Case 2 버너라고 표기하기로 한다. 세 번째 버너 형상은 Fig. 1(b)에서 오른쪽 연소가스 출구(Gas exit1)이 막혀 있는 원통 버너 형상이다. 이 세 번째 버너를 Case 3 버너라고 표기하기로 한다. 원통의 직경은 160mm이고 길이는 1888mm이다. 연료노즐의 직경은 5.15mm이다. Fig. 2에는 전산유체해석에 필요한 격자를 나타내었

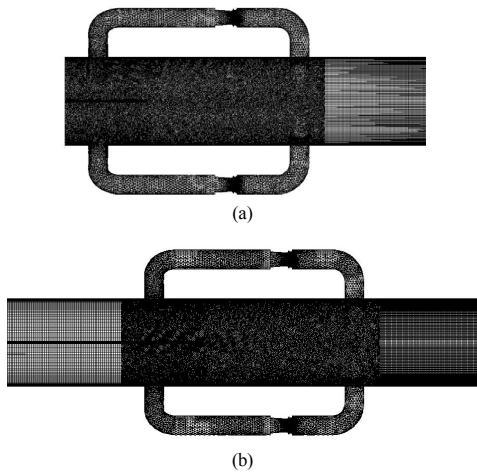


Fig. 2. Generated mesh for CFD analysis at the sections of frontal view : (a) for Case 1 burner, (b) for Case2 and Case 3 burner

는데 본 연구에서는 격자수가 약 Fig. 1(a) 버너의 경우 약 800만개 Fig. 2(b) 형상의 버너는 약 1000만개로 구현하였다. 유동과 연소가 상대적으로 많이 변화하는 연료노즐 부근과 재순환 가스 흡입구와 배출구가 있는 곳에 상대적으로 많은 격자가 되도록 하였고 충분한 격자수 시험을 통해 적절한 격자수의 선정은 하지 않았으나 600만개의 격자수 결과와 비교하여 800만개의 격자수 결과가 유사하게 나타나서 현재의 격자수를 사용하였다.

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

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[7]에 기술되어 있다.

본 연구에 사용한 연료는 메탄이며 메탄 유량을 5.15×10^{-4} kg/s로 고정하였는데 이 유량에서 이론 공기량은 8.61×10^{-3} kg/s이다. 연료와 공기의 입구 온도는 상온인 25°C를 사용하였다. 이전의 연구[7]에서 공기비를 1.1에서 1.5까지 변화하여 연구하였는데 공기비 1.1이 NOx 발생량이 가장 크게 나타나서 이 공기비에서 NOx 저감 특성을 고찰하기 위해 실제 공기량은 이론 공기량

의 1.1배인 9.473 kg/s의 유량을 이용하였다. 실제공기량을 코안다 노즐의 공기축 간격은 0.5mm으로 하여 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 출구 위치 변화에 따른 유동 및 연소 특성

코안다 노즐을 이용한 배기가스 재순환 버너는 Fig. 1에서와 같이 연소기 후류에서 배기가스를 흡입하고 연료노즐 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 세 가지 버너 형상에 대하여 원통 버너 중간 단면인 $x=0$ mm에서 압력 분포를 나타내었다. Fig. 3(a)는 Case 1 버너의 결과이고 Fig. 3(b)는 Case 2 버너의 압력분포 결과이다. Fig. 3(c)는 Case 3 버너에서의 압력 분포 결과이다. 압력분포의 범위는 -20Pa에서 10Pa이다. 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 열려 있는 출구에서부터 혼합가스 유입구 영역부근으로 역류가 발생할 수 있음을 예측할 수 있다. 압력 분포를 비교해 보면 Case 1 버너의 경우가 혼합가스 출구 영역에서 가장 넓게 낮은 압력을 형성하고 있어서 연료노즐 출구 부근으로의 역류가 가장 강하게 발생할 것으로 판단된다.

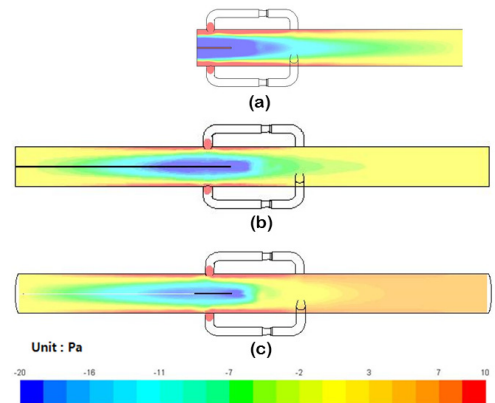


Fig. 3. Contours of static pressure at the section $x=0$ mm. pressure range : (a) for Case 1 burner, (b) for case 2 burner, (c) for Case 3 burner

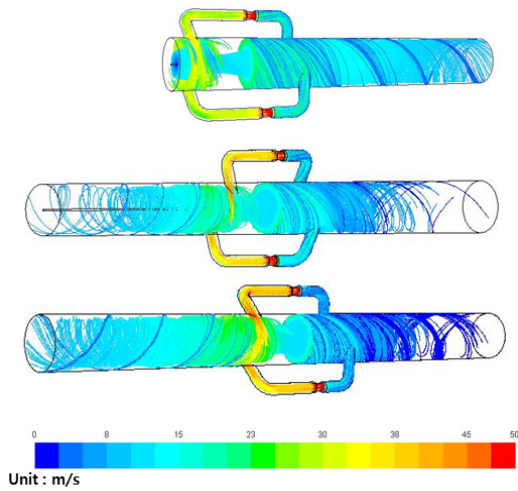


Fig. 4. Flow visualization in the burner started at the section $z=0$ and 250mm

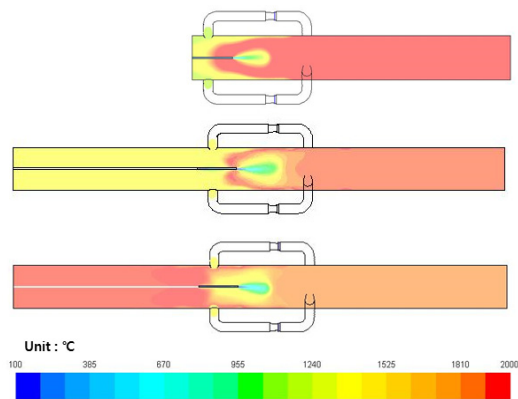


Fig. 5. Contours of temperature distribution at the section of $x=0$ mm

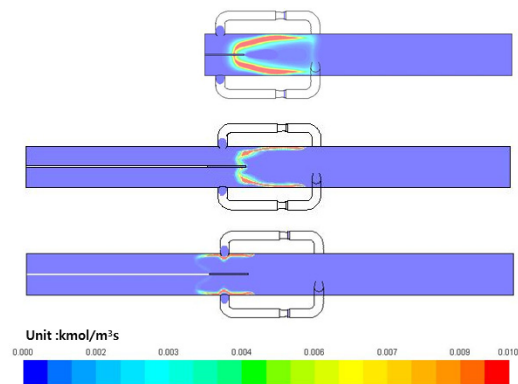


Fig. 6. Contours of reaction rate distribution at the section of $x=0$ mm

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. Fig. 4의 제일 위 그림인 Case 1 버너의 유선을 보면 원통의 가장자리 부분으로 유동이 회전하면서 출구로 빠져 나가고 원통의 가운데 부분은 연료노즐 출구 부근으로 역류가 일어나는 것을 관찰할 수 있다. Case 2 버너에서도 원통의 가장자리 부분으로 연소 가스가 양쪽의 출구로 빠져나가고 연료노즐 출구 부근으로 유동이 역류가 일어나는 것을 관찰할 수 있다. Case 3 버너 형상의 경우는 Case 2 버너의 유선과 유사하지만 오른쪽 부분의 출구(Gas exit1)가 막혀 있어서 이 부분의 속도 크기는 줄어서 연소 가스는 왼쪽 출구(Gas exit2)만으로 배출됨을 알 수 있다. 세 가지 형상 버너 모두 공통적으로 선회 유동으로 말미암아 연료노즐 출구 부근으로 원통의 가운데 부분으로 역류가 관찰되고 원통의 가장자리로 연소 가스가 배출되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에는 $x=0$ mm 단면에서 온도 분포를 나타내었다. Case 1 버너의 온도분포를 보면 연료 노즐 출구 보다 더 왼쪽으로까지 역류에 의한 연소 반응이 일어나서 높은 온도 영역이 있음을 관찰할 수 있다. 이 버너의 후류 측 온도 분포를 보면 다른 형상의 버너 보다 온도가 높게 형성 됨을 관찰할 수 있다. Case 2 버너의 온도 분포(Fig. 5의 두 번째 온도 분포)를 보면 오른쪽 출구 방향(Gas exit1 방향)의 온도가 왼쪽 출구 방향(Gas exit2 방향)의 온도 보다 상대적으로 높게 나타났다. Case 3 버너의 온도분포(Fig. 5의 세 번째 온도 분포)를 보면 Case 2 버너의 온도 분포와 반대로 나타났다. 즉 오른쪽 영역 보다 왼쪽 영역에서 상대적으로 온도가 높게 나타났다.

Fig. 6에 반응속도 분포를 비교하여 나타내었다. Case 1 버너의 경우를 보면 원통의 가운데 부분에서 역류에 의해 연소반응대가 연료노즐 출구에서 왼쪽 영역까지 연소가 일어나는 것을 확인할 수 있고 연소 반응대는 원통의 가장자리로 가면서 연소가스 재순환 흡입구까지 형성하고 있음을 알 수 있다. Case 2 버너의 경우도 Case 1 버너의 반응속도 분포와 유사하게 형성 되어 있는데 연소가스가 양방향으로 흐르면서 연소 반응이 분산되어 Fig. 5에서 관찰하였듯이 연소 반응대에서 온도가 상대

적으로 낮게 형성되기 때문에 연소반응 영역이 Case 1 버너 보다 다소 좁게 형성하고 있음을 알 수 있다. 같은 크기의 연소 반응 속도 영역에서 연소 반응 영역이 좁다는 것은 연소 반응이 국부적으로 집중되지 않고 분산되는 것으로 간주할 수 있다. Case 3 버너의 경우는 연소 가스 출구가 Gas exit2로만 흐르기 때문에 Case 1, Case 2 버너의 반응 속도 분포와 다르게 혼합가스 유입구 부근에서 연소반응이 일어나고 있는 것을 확인할 수 있다. 연소 반응속도 분포와 강도는 온도 분포에 영향을 미치며 이에 따라 NOx 배출에 영향을 준다. 이에 관한 고찰은 3.2절에서 하기로 한다.

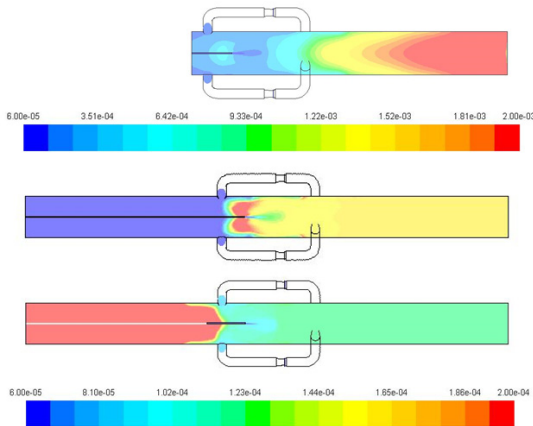


Fig. 7. Contours of NOx concentration distribution at the section of x=0mm

Fig. 7에는 세 가지 버너의 NOx 농도 분포를 비교하였다. Case 1 버너의 NOx 농도가 다른 버너 보다 높아서 농도 범위 스케일을 다르게 나타내었다. Case 1 버너의 경우를 보면 NOx 농도는 연소가스 출구 측으로 가면서 높아지는 것을 알 수 있다. Case 2 버너의 경우를 보면 온도 분포와 연소반응 속도 분포에서 관찰하였듯이 버너의 오른쪽 부분으로 연소반응이 일어나고 온도도 이 부분이 높기 때문에 NOx 농도 분포도 이 영역이 왼쪽 보다 높게 나타났다. Case 3 버너의 경우에서도 온도와 연소반응 속도 분포에서 관찰하였듯이 NOx 농도는 원통 버너의 왼쪽이 높게 나타났다.

다음절에서 세 가지 버너에 대하여 NOx 발생에 관하여 정량적 비교를 하기로 한다.

3.2 출구 위치 변화에 따른 NOx 발생의 정량적 비교

앞 절에서는 세 가지 버너 형상에 대하여 원통 버너 내부의 압력, 온도, 반응속도, NOx 분포 그리고 유선의 변화를 관찰하여 버너 내부의 연소 유동 특성을 비교하여 살펴보았다.

세 가지 버너 형상에 대하여 연소가스 재순환 유입구 (Entrained gas inlet)로 유입되는 유량과 출구에서의 평균 온도 그리고 연소가스 출구에서의 NOx 발생량을 Table 1에 비교하였다.

Table 1에서 연소가스 재순환 유량의 괄호안의 숫자는 연소가스 재순환 유량을 연소용 공기 유량으로 나눈 값이다. Case 1 버너의 경우 0.73으로 재순환 유입구로 유입되는 연소 가스가 연소용 공기 유량의 0.73배 유입된다. 재순환 유량은 Case 1 버너가 가장 크고 Case 2 버너가 0.64, Case 3 버너가 0.57으로 가장 작게 유입된다. Case 1 버너가 가장 크게 유입되는 것은 혼합된 가스는 모두 재순환 유입구 쪽으로 흐르기 때문이다. Case 3 버너가 가장 작게 유입되는 것은 재순환 유입구 쪽의 출구(Gas exit2)가 막혀 있어서 유입구 쪽으로 유동이 많이 흐르지 않기 때문이다.

출구 측 온도를 살펴보면 Case 1 버너의 경우는 1949°C, Case 2 버너는 1840°C, Case 3 버너는 1943°C이다. Case 2 버너의 출구는 양쪽 두 개가 있는데 양쪽의 출구의 유량평균온도로 계산한 것이다. Case 2 버너는 양쪽으로 배기되기 때문에 다른 버너 보다 출구 온도가 약 100°C 정도 낮게 배출된다. NOx 발생은 온도가 높을수록 NOx 반응이 활발해 지므로 이로부터 NOx 발생도 Case 2 버너가 가장 낮을 것으로 예측할 수 있다.

Table 1. Entrained flow rate with air flow ratio change

Air flow ratio	Case 1	Case 2	Case 3
Entrained flow rate(kg/s)	0.0069 (0.73)	0.0060 (0.64)	0.0054 (0.57)
Exit temp. (°C)	1949	1840	1943
Exit NOx concentration	0.00230	0.00011	0.00016

출구에서의 NOx 농도(질량분율)를 살펴보면 Fig. 7에서 관찰하였듯이 Case 1 버너가 0.00230으로 가장 높고 Case 3 버너가 0.00016, Case 2 버너가 0.00011로 가

장 낮게 나타났다. Case 1 버너의 NOx 농도는 Case 2의 약 20배 정도이다. 위에서 살펴본 것과 같이 Case 1 버너의 경우에 재순환 유량이 다른 형상의 버너 보다 크에도 NOx 배출량이 크게 나타나는 것은 Case 2 버너의 경우는 연소가스의 출구가 양쪽으로 트여져 있어서 연소 반응이 분산되어 고온의 영역이 줄어들었고 Case 3의 버너는 Case 1 버너 보다 고온 영역이 줄어들어서 NOx 배출량이 Case 1 버너가 가장 높게 나타나는 것으로 판단된다. 이로부터 NOx 발생량은 양쪽 출구를 트인 형상의 버너이거나 재순환 유입구 반대편으로 연소가스를 배출하는 버너 형상일 때가 NOx 발생이 줄어들 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

원통형 배기가스 재순환 버너 세 가지 형상인 오른쪽 출구만 열려있는 버너(Case 1 버너), 양쪽 출구가 열려있는 버너(Case 2 버너), 왼쪽 출구가 열려 있는 버너(Case 3 버너)에 대하여 연소유동을 전산해석을 통해 살펴보고 이에 관한 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

세 가지 형상 버너 모두 선회 유동으로 말미암아 연료 노즐 출구 부근의 압력이 낮아지면서 이곳으로 역류가 관찰되고 원통의 가장자리로 연소 가스가 배출되는 것을 확인할 수 있었다. 온도 분포는 Case 1와 Case 2 버너는 오른쪽 출구 측으로 온도가 상대적으로 높게 나타나고 Case 3은 왼쪽 출구 측으로 온도가 높게 나타났다. 연소 반응은 Case 1 버너와 Case 2 버너는 연소가스 유입구 방향으로 연소반응 속도가 높게 나타났고 Case 3 버너는 혼합가스 출구 측 부근에서 연소반응이 활발히 일어났다. NOx 농도는 Case 1 버너는 출구 방향으로 가면서 높게 나타나고 Case 2 버너는 연소가스 유입구 측 영역인 오른쪽에 NOx 농도가 높고 반대쪽은 낮게 나타났다. Case 3 버너는 오른쪽 출구가 막혀 있어서 왼쪽 출구 영역에 NOx가 높게 나타났다.

연소가스 재순환 유량은 세 가지 버너가 비슷하지만 Case 1 버너가 가장 크고 Case 2, Case 3 버너 순으로 나타났다. 출구에서의 온도는 Case 1 버너가 가장 높고 Case 2 버너는 양쪽으로 출구가 있어서 다른 버너에 비해 약 100℃ 정도 낮게 나타났다. 출구에서 NOx 농도는 Case 1 버너가 다른 버너에 비해서 약 20배 정도 높게 나타났다. 따라서 연소가스 배출구는 양쪽이 열리게 하

든지 연소가스 재순환 유입구 반대 측으로 연소가스가 배출되도록 하는 것이 NOx 발생을 저감할 수 있다고 판단되었다.

References

- [1] K. L. Kim, H. J. Kim, B. S. Park, and J. J. Kim, "NOx Emission Characteristics of 100kW Gas Burner by FGR", *Proceedings of The Korean Society of Combustion 2001 23th KOSCO SYMPOSIUM*, pp.1-7, 2001. UCI: <http://uci.or.kr/I410-ECN-0102-2009-550-005200218>
- [2] M. W. Bae, K. H. Jung, Y. S. Cho, and Y. S. Kim, "Effect of Recirculated Exhaust Gas on Boiler Efficiency with FGR System", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.3206-3211, 2005.
- [3] J. A. Wüning, J. G. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation", *Progress in Energy Combustion Science*, Vol.23, No.1, pp.81-94, 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", *Symposium (International) on Combustion*, Vol.27, No.2, pp.3135-3146, 1998. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0082-0784\(98\)80176-8](https://dx.doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80176-8)
- [5] A. Cavaliere, M. De Joannon, R. Ragucci, "Mild combustion of high temperature reactants", *2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion*, 1999.
- [6] D. S. Baek, "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, pp.784-787, 2006. UCI: <http://uci.or.kr/G704-001653.2006.7.5.025>
- [7] J. S. Ha, "A Study on the Combustion Flow Characteristic and NOx Reduction of the Exhaust Gas Recirculation Burner using Coanda Nozzles", *The Korean Institute of Gas*, Vol.21, No.3, pp.53-60, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.7842/kigas.2017.21.3.53>

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