

배기가스 재순환이 비예혼합 연소시스템에 미치는 영향

유병훈* · 김진수* · 이창언**

*인하대학교 기계공학과

The Effects of Exhaust Gas Recirculation on Non-premixed Combustion System

Byeonghun Yu*, Jinsu Kim* and Chang-Eon Lee**

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Republic of Korea

(Received 1 July 2014, Received in revised form 26 August 2014, Accepted 27 August 2014)

ABSTRACT

We examined the characteristics of NO_x emission for CH_4/air non-premixed flames using the exhaust gas recirculation(EGR) methods, which are the air-induced EGR(AI-EGR) and fuel-induced EGR(FI-EGR) methods. Our experimental results show that the NO_x emission index(EI_{NO_x}) decreased with increasing EGR ratio. In the range needed to form a stable flame, the reduction rate of EI_{NO_x} for the FI-EGR method was approximately 29% when the EGR ratio was 20%, and the reduction rate for the AI-EGR method was approximately 28% with 25% of the EGR ratio. According to the flame structure based on numerical results, high temperature regions for the FI-EGR method were narrower and lower than those for the AI-EGR method at the same EGR ratio. Furthermore, based on the experimental results for swirl flames, the reduction rate of EI_{NO_x} for the FI-EGR method was approximately 49% with 15% of the EGR ratio, while the maximum reduction rate for AI-EGR method was approximately 45% with 25% of the EGR ratio. Consequently, we verified that the FI-EGR method was more effective than the AI-EGR method in reducing NO_x emission for non-premixed flames with EGR. We expect that the results of this study will provide fundamental information relating to hybrid combustion systems, which can be used in the design of combustion systems in the future.

Key Words : Exhaust gas recirculation(EGR), Air induced EGR(AI-EGR), Fuel induced EGR(FI-EGR), NO_x emission index(EI_{NO_x}), Non-premixed combustion

1. 서론

최근까지 지속되고 있는 산업발전으로 인해 전 세계적으로 화석연료를 사용하는 연소시스템의 사용이 증가하고 있는 추세에 있다. 이러한 연소시스템의 사용량 증가는 산업발전을 위해 반드시 필요한 부분이지만, 다량의 에너지 소비로 인한 에너지 부족 문제와 기기에서 배출되는 배기가스량 증가로 인한 대기오염문제를 일으키고 있어 커다란 사회적

문제로 부각되고 있다. 이 중 대기오염문제는 인체와 환경에 직접적인 영향을 주는 문제로서, 현재 많은 연구자들에 의해 대기오염물질을 저감하는 연구가 진행되어지고 있다. 특히 고온의 산화과정을 통해 발생하여 호흡기 질환을 유발하고, 태양광선과 반응하여 오존을 생성시키는 주요 대기오염물질로 알려진 질소산화물(NO_x)에 대한 저감 연구가 많이 이루어지고 있으며[1-3], 국내뿐만 아니라 국외에서도 NO_x 배출농도와 관련된 지원 및 규제정책을 제정하고, 그 기준농도를 강화하고 있는 상황이다.

NO_x 배출농도와 관련된 정책을 살펴보면, 국내에서는 0.3톤 이상 2톤 미만의 보일러에서 사용하는 연소시스템에 대해 40 ppm(산소농도 4% 기준) 이하의 NO_x 배출성능을 보인다면, 설치 시 보조금을 지원해주는 정책을 시행하고 있으며[4], 2톤 이상의 보

† Corresponding Author, chelee@inha.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일러와 같은 연소시스템은 2015년부터 법적 규제치를 제정하고 관리할 계획에 있다. 그리고 0.3톤 미만의 소용량 보일러는 2015년부터 30 ppm(산소농도 0% 기준) 이하의 NO_x 배출 성능을 보이는 연소시스템에 대해 보조금을 지원해주고, 단계적으로 기준치를 낮춰가면서 지원정책을 시행한 후 규제정책을 시행할 예정이다. 이러한 NO_x 배출농도 관련 지원 및 규제정책은 해외의 여러 나라에서도 시행하고 있으며, 특히 미국과 같은 경우에는 남가주대기관리국(South Coast Air Quality Management District, SC-AQMD)법[5]에 의해 20 ppm(산소농도 3% 기준)의 NO_x 규제치를 제정하여 연소시스템에 대한 관리를 시행하고 있는 상황이다. 이렇듯 점차 강화되고 있는 NO_x 배출규제농도에 대응하기 위해 본 연구진에서는 많은 NO_x 저감기술에 대한 연구를 진행하여 왔으며[6-8], 이 중에서도 배기가스 재순환 방식(Exhaust gas recirculation, EGR)에 대한 체계적인 연구를 진행해왔다. 그 첫 번째 연구[9,10]로, 본 연구진은 예혼합 연소시스템(Premixed combustion)을 대상으로 기초실험과 수치해석 연구를 통해 배기가스 재순환 방식이 적용된 예혼합 연소방식의 NO_x 배출특성과 NO_x 저감원리를 규명하였다. 또한 연구결과를 바탕으로 실용 예혼합 연소기기인 30,000 kcal/h 가정용 소용량 보일러에 배기가스 재순환 방식을 적용하여 시스템의 운전 당량비를 0.85로 하고, 배기가스 재순환율을 15% 적용한다면, 90.4%의 열효율과 22 ppm(산소농도 0% 기준)의 NO_x 배출성능을 얻을 수 있어 기존 보일러에 비해 1.7% 향상된 열효율과 23% 저감된 NO_x 배출성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

이번 연구는 배기가스 재순환 방식을 적용한 연소시스템에 대한 두 번째 연구로, 주로 대용량의 산업용 연소시스템에서 사용되고 있는 비예혼합 연소 방식(Non-premixed combustion)에 배기가스 재순환 방식을 적용하고, 이에 따른 NO_x 배출농도의 저감량과 저감원인에 대한 검토를 수행하였다. 이를 위해 본 연구에서는 동축 노즐형 연소기(Co-axial type burner)와 실용 비예혼합 연소기에서 많이 사용하고 있는 선회 연소기(Swirl burner)를 대상으로 연료측(Fuel induced EGR, FI-EGR)과 공기측(Air induced EGR, AI-EGR)에 각각 배기가스 재순환 방식을 적용해 보고, 배기가스 재순환율(Exhaust gas recirculation ratio, Ω_{EGR}) 변화에 따른 NO_x 배출농도 변화를 측정하였다. 또한, 2차원 수치해석 연구를 통해 각각의 배기가스 재순환 방식과 재순환율 변화에 따른 온도분포, NO_x 농도분포를 검토하여 비예혼합 화염에서 배기가스 재순환 방식의 적용에 따른 NO_x 저감원인을 검토하였다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1. 실험장치의 구성 및 실험 방법

Fig. 1은 동축 노즐형 연소기와 선회 연소기를 사용한 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 그림에서 보듯이 이번 실험을 위한 실험 장치는 연료를 공급하기 위한 연료 제어 시스템, 연소용 공기를 공급하기 위한 공기 제어 시스템, 재순환용배기가스를 공급하기 위한 배기가스 제어 시스템으로 구성되어 있다. 실험에서 사용한 연료는 순도 99.95%의 메탄(CH₄)을 사용하였으며, 압력용기에 저장된 연료는 감압기와 질량 유량 제어기(TN-280SAV, SMTEK)를 통해 원하는 압력과 유량으로 제어되어 비예혼합 연소기인 동축 노즐형 연소기와 선회 연소기에 공급된다. 실험에서 사용한 공기는 압축공기를 사용하였으며, 스크류 형식의 압축기를 통해 공급되는 공기는 저장용기에 저장되었다가 드라이어와 필터를 통해 수분이 제거된 후 감압기와 질량 유량 제어기(TN-2901V, SMTEK)를 통해 각 연소기에 공급된다. 재순환용 배기가스는 실험대상 연소기(동축 노즐형 및 선회연소기)에서 배출되는 배기가스를 그대로 이용하였다. 또한, 재순환용 배기가스는 배기가스 재순환 장치에 설치된 펌프와 유량계에 의해 재순환율별로 연소실에서 일정한 유량으로 흡입되어, 연료 또는 공기 측에 설치된 믹서로 공급된다. 만약 재순환용 배기가스가 공기 측에 설치된 믹서로 공급된다면, 배기가스가 공기와 혼합되어 연소기에 공급되는 AI-EGR 방식이 된다. 반면에 FI-EGR 방식은 연료 측에 설치된 믹서에 재순환용 배기가스가 공급되어 연료와 함께 연소기에 공급되는 방식이다. 이 때 재순환되는 배기가스의 온도는 배기가스 재순환 장치에 설치된 공랭식 열교환기에 의해 연료 및 공기 공급온도와 동일한 상온으로 공급된다. C_xH_y 형태의 연료가 사

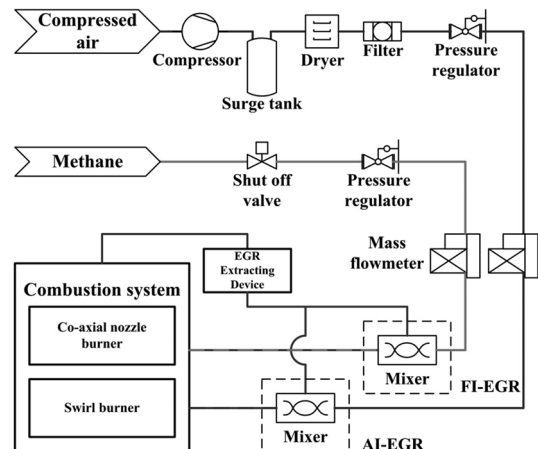


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

용된 경우, 흡입된 재순환용 배기가스의 유량은 식 (1)과 같이 정의된 배기가스 재순환율에 의해 결정된다.

$$\Omega_{EGR}(\%) = \frac{Q_{EGR}}{Q_{Fuel} \times \{1 + a \times (1 + \alpha) \times 4.76\}} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$\text{where } a = x + \frac{y}{4}$$

식에서 Ω_{EGR} 은 배기가스 재순환율을 나타내고, Q_{EGR} 과 Q_{Fuel} 은 각각 재순환된 배기가스와 연료의 유량, a 는 산화제 중 산소의 몰수, α 는 과잉공기율, x 와 y 는 연료의 단위 몰당 탄소와 수소원자의 개수를 나타낸다.

동축 노즐형 연소기를 사용한 기초실험에서는 연료유량을 0.3 L/min, 과잉공기율 25%로 고정한 상태에서 각 배기가스 재순환 방식에 따라 재순환율을 0%부터 5%씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 또한 실용 연소기인 선회 연소기를 이용한 실험에서는 연소기의 용량을 고려하여 연료유량을 0.6 L/min으로 하고, 나머지 조건은 모두 기초 실험과 동일하게 수행하였다. 실험에 사용한 선회 연소기는 4 mm의 연료노즐과 21 mm의 공기노즐로 구성되어 있으며, 선회 발생을 위한 블록이 10도로 설치되어 약 0.5의 선회도를 갖는다. 각 실험 조건에서 NO_x 의 배출농도와 화염의 안정성을 판단하기 위한 CO의 배출농도는 연소가스 분석기(Testo 340, TESTO)로 측정하였으며, 측정된 농도의 정량적인 비교를 위해 배출지수(Emission Index, EI)를 이용하여 결과를 도시하였다. 각 화학종에 대한 배출지수의 계산은 식 (2)를 이용하였으며, 대부분의 NO는 화염 하류 및 대기 중에서 NO_2 로 변환되는 점을 감안하여 식 (3)에 따라 최종 EI_{NOx} 를 계산하였다[11].

$$EI_i(g/kg) = \left(\frac{\chi_i}{\chi_{CO} + \chi_{CO_2}} \right) \left(\frac{x MW_i}{MW_F} \right) \times 1000 \quad (2)$$

$$EI_{NO_x}(g/kg) = EI_{NO} \frac{MW_{NO_2}}{MW_{NO}} + EI_{NO_2} \quad (3)$$

여기서 x_i 는 i 화학종(NO , NO_2 , CO)의 몰분율이고, MW_i 와 MW_F 는 각각 i 화학종과 연료인 메탄의 분자량을 나타낸다. 또한, x 는 연료의 단위 몰당 탄소 원자의 개수를 나타낸다.

2.2. 수치해석 방법

배기가스 재순환 방식이 적용된 비예혼합 화염의 NO_x 저감 원인을 검토하기 위하여 2차원 수치해석 연구가 수행되었다. 2차원 수치해석 연구는 상세 반응기구의 적용이 가능하고, 연소현상에 대한 해석이 용이한 상용프로그램인 Fluent 14.5.7[12]을 사용하였다. 계산의 수행은 메탄/공기 동축류 비예혼합 화염을 대상으로 하였으며, 적용된 상세 반응기구는 연료가 메탄인 점을 감안하여 49개의 화학종과 277개의 소반응(Elementary reaction)으로 구성된 GRI-v2.11[13]을 사용하였다. 2차원 정상상태에서 적용된 운동량, 화학종, 에너지 등 각 방정식은 2차 정확도의 Upwind 기법에 의해 차분되었으며, 압력 및 속도 교정은 SIMPLE 기법을 적용하였다. 또한, 노즐에서 공급되는 유체의 유속을 감안하여 유동모델은 기본적인 층류 모델을 사용하였다. 그리고 벽면의 경계 조건은 대류조건을 부여하였다. 계산에 적용된 격자수는 약 42,000개이며, 연료와 공기의 반응이 급격하게 일어날 것으로 예측되는 노즐 주변은 조밀하게 하고, 반경 방향과 축 방향으로 점차 크기가 확장되는 비균일 격자계를 구성하였다. 마지막으로 결과값의 수렴여부를 판단하기 위해 적용된 Residual 값은 에너지 방정식만 10^{-8} 을 적용하고, 나머지 방정식은 10^{-5} 이하를 적용하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 계산영역을 도시한 그림이다. 계산영역은 노즐형 연소기에서 형성되는 비예혼합 층류화염이 축대칭 형태임을 고려하여 전체 연소장의 1/2에 해당하는 영역으로 하였다. 수치

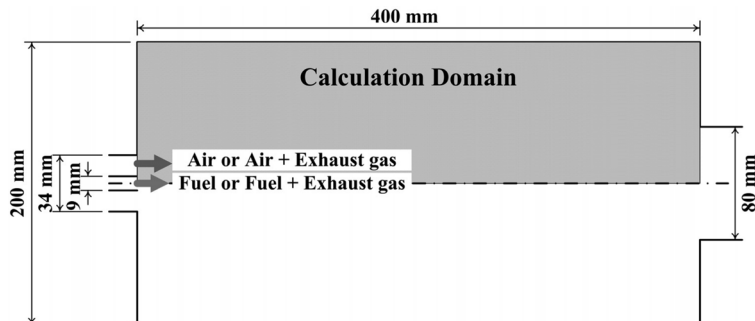


Fig. 2. Schematic of the calculation domain.

해석 연구의 계산조건은 동축 노즐형 연소기 실험과 동일하게 적용하여, 9 mm의 직경을 갖는 중심노즐에서 연료인 메탄이 0.3 L/min의 유량으로 분사되고, 34 mm의 직경을 갖는 공기노즐에서 과잉공기율 25%에 해당하는 공기가 분사되도록 하였다. 또한, 배기가스 재순환율은 0, 10, 20%로 변경하면서 계산을 수행하였다. 이 때 재순환되는 배기가스의 조성은 과잉공기율 25%를 적용한 경우에 생성되는 대표적인 배기가스 조성을 적용하였으며, 재순환되는 배기가스는 배기가스 재순환 방식에 따라 각각 연료 측과 공기 측에 혼합하여 공급하였다.

3. 결과 및 검토

3.1. 배기가스 재순환 방식이 적용된 동축 노즐형 연소기의 NO_x 배출지수 검토

Fig. 3은 동축 노즐형 연소기를 이용한 실험 결과로, 각 배기가스 재순환 방식 별로 배기가스 재순환율 변화에 따른 화학종의 배출지수 변화를 도시한 그래프이다. 그래프에서 x-축은 배기가스 재순환율 변화를 나타내며, y-축은 NO_x와 CO의 배출지수 변화를 나타낸다. Fig. 3(a)를 살펴보면, AI-EGR 방식과 FI-EGR 방식 모두, 배기가스 재순환율이 증가할수록 화염의 고온 영역 감소로 인하여 배출되는 EI_{NO_x} 값이 감소하는 경향을 보였다. 또한, 배기가스 재순환율이 일정한 경우, 연료 측에 배기가스를 재순환시키는 FI-EGR 방식의 EI_{NO_x} 값이 공기 측에 배기가스를 재순환시키는 AI-EGR 방식에 비해 낮은 값을 보였다. 이는 동축 비예혼합 화염의 구조를 살펴보았을 때, 연료 측에 공급되는 재순환용 배기가스는 화염면에 모두 영향을 미치는 반면, 공기 측에 공급

되는 배기가스는 일부만이 화염면에 영향을 미치기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)와 같은 조건에서 CO의 배출지수 변화를 도시한 것이다. EI_{CO} 경향도 EI_{NO_x}와 마찬가지로 배기가스 재순환율이 증가할수록 화염의 고온지역 감소로 인해 점차 감소하는 경향을 보인다. 하지만 배기가스 재순환율이 증가하면 할수록 계속해서 감소하는 EI_{NO_x} 값과 달리 EI_{CO} 값은 AI-EGR의 경우 30% 이상, FI-EGR의 경우 25% 이상의 배기가스 재순환율이 적용되었을 때, 급증하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하였을 때 연소실에 설치된 가시창을 통한 화염의 거동을 살펴보면, 화염이 전체적으로 불안정하게 떨리면서, 화염의 일부분이 노즐 림에서 붙었다 떨어졌다를 반복하게 된다. 즉, 계속해서 증가하는 재순환용 배기가스의 유량으로 인해 혼합기의 유속이 증가하게 되고, 결국에는 화염의 거동을 불안정하게 만들어 CO의 배출농도가 급증하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 화염의 안정성을 확보할 수 있는 범위에서 AI-EGR 방식은 최대 25%까지 적용이 가능하며, 이 때 EI_{NO_x} 값은 1.53 g/kg으로 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 경우에 비해 약 28% 저감이 가능하였다. 그리고 FI-EGR 방식은 최대 20%까지 적용이 가능하였으며, 1.51 g/kg의 EI_{NO_x} 값을 가지게 되어 약 29%의 저감률을 확인할 수 있었다.

3.2. 배기가스 재순환 방식의 적용에 따른 NO_x 저감 원인 검토

Fig. 4~6은 메탄/공기 동축 비예혼합 화염을 대상으로 배기가스 재순환 방식과 재순환율 변화에 따른 NO 저감 원인을 확인하기 위해 수행한 2차원 수

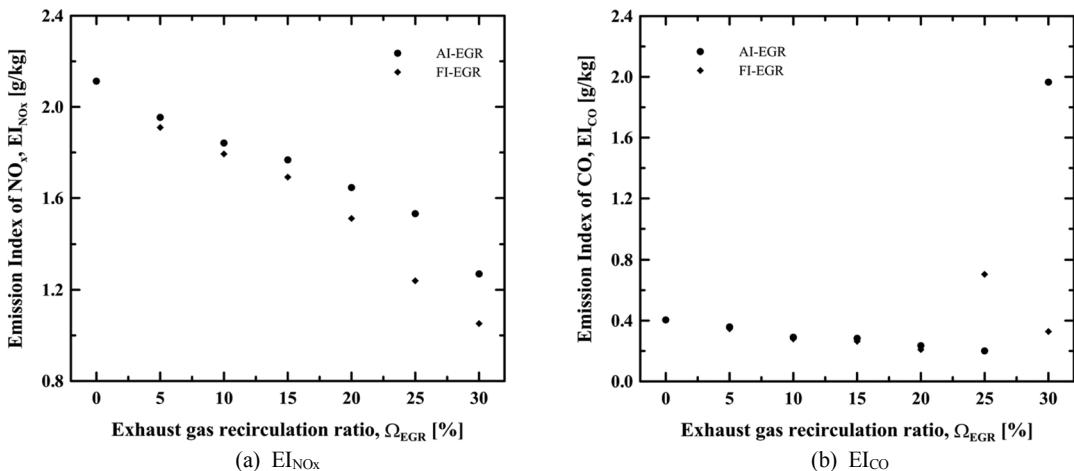


Fig. 3. NO_x and CO emission index of CH₄/air co-axial non-premixed flames as functions of EGR ratios and EGR methods.

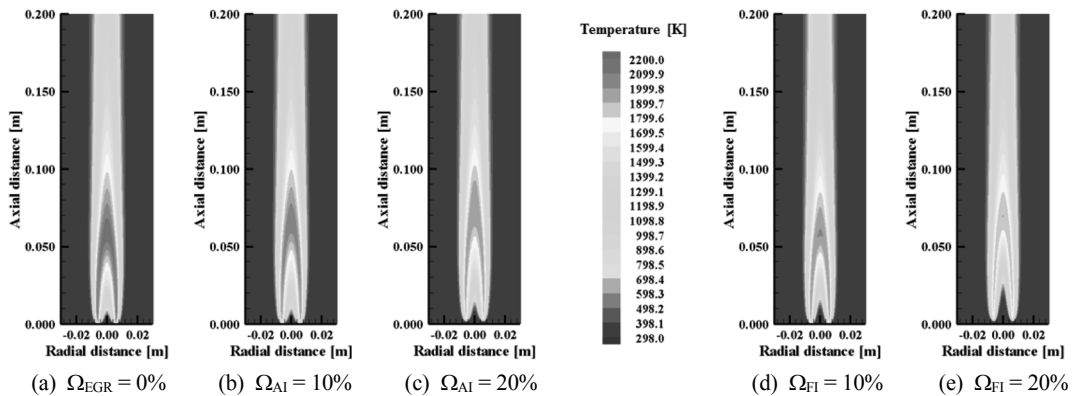


Fig. 4. Predicted temperature profiles of CH₄/air co-axial non-premixed flames as functions of EGR ratios and EGR methods using 2-D FLUENT simulation.

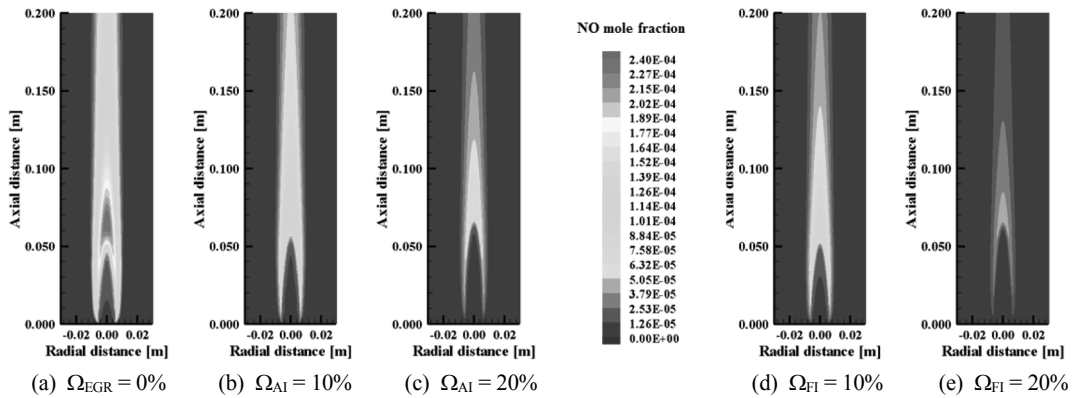


Fig. 5. Predicted NO concentration profiles of CH₄/air co-axial non-premixed flames as functions of EGR ratios and EGR methods using 2-D FLUENT simulation.

치해석의 결과들을 나타낸다. 우선 Fig. 4는 메탄/공기 동축 화염에 AI-EGR 방식과 FI-EGR 방식을 적용하고, 배기가스 재순환율을 각각 10%와 20%씩 적용한 경우에 예측된 2차원 온도분포를 나타낸다. Fig. 4(a)와 같이 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 경우, 축방향 온도는 연료노즐로부터 멀어질수록 점차 증가하다가 약 0.05~0.07 m 사이에서 2,200 K 이상의 최고온도를 보이게 되며, 하류로 갈수록 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 4(b)에서 Fig. 4(e)와 같이 배기가스 재순환 방식을 적용하고 재순환율을 증가시킨 경우, 화염의 최고온도는 점차 낮아지게 되고, 전체적으로 고온 영역이 줄어들면서 하류 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 화염의 온도는 점차 감소하고, 증가하는 혼합기(연료와 배기가스 또는 공기와 배기가스) 유량으로 인해 화염이 신장되면서 나타나는 결과이다. 또한 적용된 배기가스 재순환율이 동일한 경우, FI-EGR 방식을 적용한 화염의 온도가 AI-EGR 방식을 적용한 화염의 온도보다

더 낮은 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 NO_x의 생성에 큰 영향을 미치는 화염의 온도를 효과적으로 낮추기 위해서는 공기 측에 배기가스를 재순환시키는 것보다 연료 측에 배기가스를 재순환시키는 것이 더 적합한 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 계산조건에서 NO의 2차원 몰농도 분포를 도시한 그래프이다. 그래프에서 보듯이 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 일반 메탄/공기 동축 화염에서 높은 NO 몰농도를 갖는 영역이 배기가스 재순환 방식을 적용한 화염에 비해 넓게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 화염에 동일한 배기가스 재순환율을 적용한 경우, FI-EGR 방식의 NO 몰농도가 AI-EGR 방식에서 발생하는 NO 몰농도보다 더 좁은 영역과 적은 값을 가지고 있다. 이러한 결과는 배기가스 재순환 방식과 재순환율의 변화에 따라 변화하는 화염온도 경향과 일치하는 것으로, NO 발생이 화염온도와 밀접한 관련이 있음을 재확인할 수 있다.

Fig. 6은 일반 메탄/공기 동축 화염과 AI-EGR 및

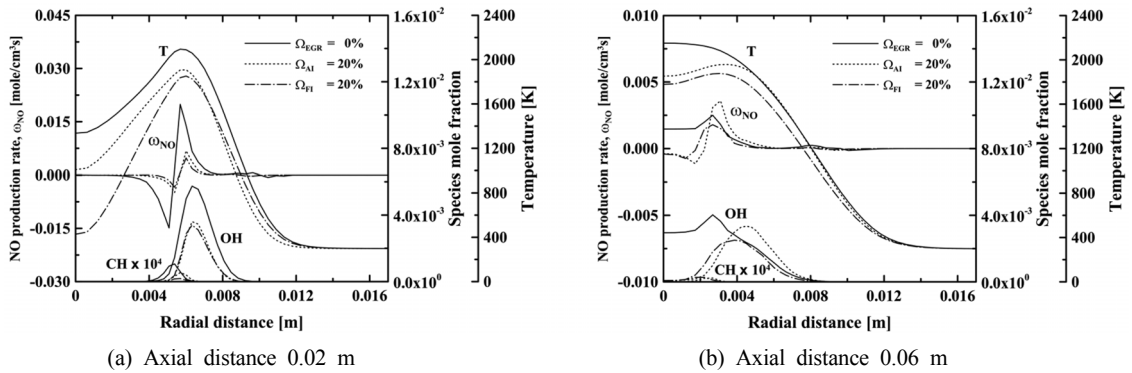


Fig. 6. Radial profiles for flame temperature, NO production rate, and mole fractions of OH and CH radicals as functions of EGR ratios and EGR methods.

FI-EGR 방식을 각 20%씩 적용한 화염에 대해 축방향 거리가 각각 0.02 m, 0.06 m 지점에서의 반경방향에 따른 온도와 NO 생성율, 그리고 NO의 생성에 영향을 미치는 OH 및 CH 라디칼의 몰분율의 변화를 도시한 그래프이다. 각 그래프에서 x-축은 반경방향 거리를 나타내며, y-축은 화염온도, NO 생성율, 그리고 OH 및 CH 라디칼의 몰분율을 나타내고 있다. Fig. 6(a)와 같이 화염 상류지역에서의 화염 온도는 연료노즐의 중심축에서 멀어질수록 점차 증가하는 경향을 보이다가 화염이 형성되는 연료노즐과 공기노즐 사이에서 최고값을 보이고 다시 감소하는 경향을 보인다. 이러한 화염 상류지역에서의 반경방향 온도 변화는 배기가스 재순환 방식의 적용 여부와 상관없이 비슷한 경향을 보였으며, 화염의 최고온도는 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 경우 2,094 K으로 가장 높았고, 20%의 재순환율을 적용한 FI-EGR 방식이 1,852 K으로 가장 낮은 값을 보였다. 그리고 NO 생성율 변화를 살펴보면, NO 생성율이 (+)가 되는 영역은 고온의 화염 영역이면서 OH 라디칼이 존재하는 지역이었으며, NO 생성율은 화염의 온도가 높고, OH 라디칼의 몰농도가 높을수록 증가하는 경향을 보였다. 또한, NO 생성율은 CH 라디칼의 최고점을 기준으로 화염 안쪽으로 소멸(-) 영역, 화염 바깥쪽으로 생성(+) 영역으로 구분되고, CH 라디칼의 몰분율이 높을수록 소멸율도 증가함을 확인할 수 있었다. 다음으로 화염 하류지역을 나타내는 Fig. 6(b)를 살펴보면, 화염의 온도는 상류지역의 결과와 마찬가지로 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 일반 메탄/공기 동축 화염이 전체적으로 높게 나타났으며, FI-EGR 방식을 적용한 화염이 가장 낮은 것으로 나타났다. 일반 메탄/공기 동축 화염의 NO 생성율은 소멸없이 생성만 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 NO의 소멸과 관련이 있는 CH 라디칼은 거의 존재하지 않고, OH 라디칼이 화염의 중심

부분부터 크게 존재하기 때문에 나타나는 결과이다. 하지만, 배기가스 재순환 방식을 적용한 화염의 NO 생성율은 OH 라디칼이 존재하고, 화염의 온도가 비교적 높은 지역에서만 (+) 생성율을 보였으며, OH 라디칼이 거의 존재하지 않고, CH 라디칼만 일부 존재하는 화염의 중심 부근에서는 소멸 반응이 일어나는 것을 확인하였다. 결과적으로 배기가스 재순환율을 20% 적용한 화염은 고온 영역과 OH 라디칼의 분포 영역이 일반 메탄/공기 동축 화염에 비해 좁아 NO의 생성도 적어지게 되며, 특히 FI-EGR 방식을 적용한 화염이 AI-EGR 방식을 적용한 화염에 비해 화염의 고온영역과 OH 라디칼 분포 영역이 좁아 NO 저감에 더 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 배기가스 재순환 방식이 적용된 선회 연소기의 NO_x 배출지수 검토

Fig. 7은 비예혼합 방식을 이용하는 대표적인 산업용 실용연소기인 선회 연소기에 배기가스 재순환 방식을 적용한 실험 결과로, 각 배기가스 재순환 방식 별로 배기가스 재순환율 변화에 따른 화학종의 배출지수 변화를 도시한 그래프이다. Fig. 7(a)를 살펴보면, AI-EGR 방식과 FI-EGR 방식을 적용한 화염은 모두 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 EI_{NOx} 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 동축 노즐형 버너를 이용한 기초실험 및 2차원 수치해석 결과와도 일치하는 것으로 배기가스 재순환율이 증가할수록 화염의 온도 감소로 인해 나타나는 결과이다. 또한 배기가스 재순환율이 동일한 경우, 화염의 온도가 더 낮은 FI-EGR 방식의 EI_{NOx} 값이 AI-EGR 방식보다 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 다음으로 Fig. 7(b)와 같이 배기가스 재순환율 변화에 따른 CO의 배출지수 변화를 살펴보면, EI_{CO} 경향도 EI_{NOx}의 변화와 마찬가지로 배기가스 재순환율이 증가할수록 점차 감소하는 경향을 보인다. 하지만, AI-EGR 방식은

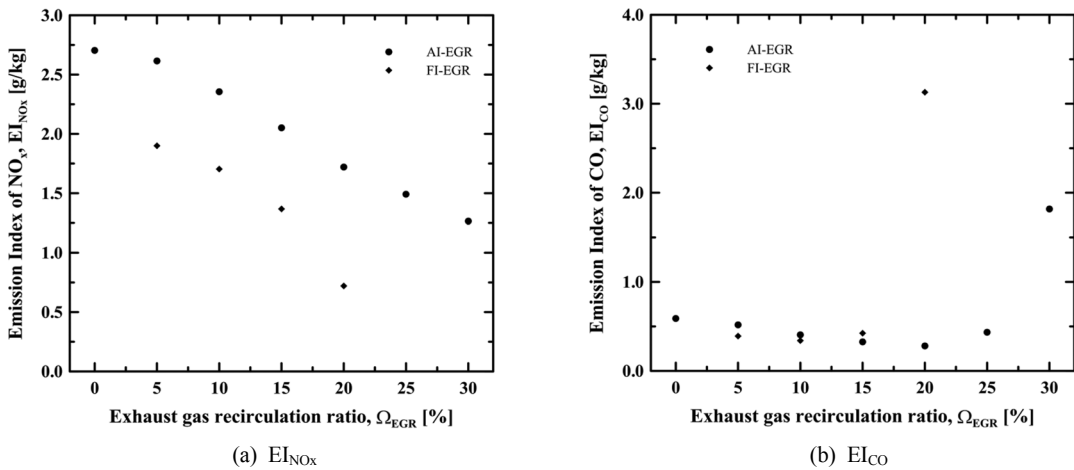


Fig. 7. NO_x and CO emission index of CH₄/air swirl non-premixed flames as functions of EGR ratios and EGR methods.

재순환율 30% 이상, FI-EGR 방식은 재순환율 20% 이상으로 적용할 경우, EICO 값이 급증하는 결과를 보이는데, 이는 재순환율 증가에 따라 유입되는 배기가스량의 증가로 화염이 불안정해지면서 나타나는 결과이다. 따라서 화염의 안정성을 확보할 수 있는 범위에서 각 배기가스 재순환 방식에 따른 최대 EI_{NO_x} 저감률을 확인해보면, AI-EGR 방식의 EI_{NO_x} 값은 배기가스 재순환율을 25% 적용하였을 경우 1.50 g/kg으로 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 일반 화염에서 측정된 2.70 g/kg보다 약 45% 저감이 가능하였다. 그리고 FI-EGR 방식의 EI_{NO_x} 값은 15%의 재순환율에서 1.37 g/kg을 확인할 수 있어 약 49%의 저감률이 확인되었다.

4. 결론

이번 연구는 가정 및 상업용과 산업용으로 널리 사용되고 있는 기존 연소시스템의 저공해 성능 확보를 위한 체계적인 연구 중의 하나로, 비예혼합 연소 방식에 AI-EGR 방식과 FI-EGR 방식을 적용하여, 배기가스 재순환율 변화에 따른 NO_x의 최대 저감률을 실험으로 확인해보고, 2차원 수치해석을 통해 NO_x 저감원인을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동축 노즐형 연소기를 사용한 기초 실험 결과, 배기가스 재순환율이 증가할수록 화염의 온도감소로 인해 EI_{NO_x} 값은 감소하였으며, 동일한 배기가스 재순환율을 적용할 경우, 재순환된 배기가스가 생성된 화염면에 더 많은 영향을 미치는 FI-EGR 방식이 AI-EGR 방식에 비해 높은 EI_{NO_x} 저감률을 보였다.

2) 2차원 수치해석을 통해 NO 저감원인을 검토한 결과, NO의 생성지역은 화염이 고온이면서 OH 라디칼이 존재하는 지역이었으며, 화염의 온도가 높

고, OH 라디칼의 농도가 높을수록 NO 생성율도 증가함을 확인하였다. 또한, 배기가스 재순환 방식을 적용한 경우, FI-EGR 방식을 적용한 화염이 AI-EGR 방식을 적용한 화염에 비해 화염의 고온 영역과 OH 라디칼 분포 영역이 좁아 NO 저감에 유리하다는 것을 확인하였다.

3) 비예혼합 연소방식의 대표적인 실용연소기인 선회연소기에 배기가스 재순환 방식을 적용하여 실험한 결과, 25%의 배기가스 재순환율을 적용한 AI-EGR 방식의 EI_{NO_x} 값은 1.50 g/kg으로 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 일반화염에 비해 약 45%의 저감률을 보였으며, 15%의 재순환율을 적용한 FI-EGR 방식의 EI_{NO_x} 값은 1.37 g/kg으로 약 49%의 저감률을 보였다.

4) 이번 배기가스 재순환 방식이 적용된 비예혼합 연소방식의 연구결과는 지난 연구를 통해 얻어진 배기가스 재순환 방식이 적용된 예혼합 연소방식의 결과와 함께, 안정된 화염을 형성하면서 초저 NO_x 성능확보가 가능한 하이브리드 연소방식(Hybrid combustion system)의 기초 연구 자료로 활용될 예정이다.

후기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2012R1A2A2 A010-13884)과 인하대학교의 지원에 의해 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] M.N. Navi, Theoretical investigation of engine thermal efficiency, adiabatic flame temperature, NO_x emission and combustion-related parameters for different oxygenated fuels, Appl. Therm. Eng., 30

- (2010) 839-844.
- [2] A. Franco, A.R. Diaz, The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control, *Energy*, 34 (2009) 348-354.
- [3] J.A. Wünnig, J.G. Wünnig, Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 23(1) (1997) 81-94.
- [4] Korea Environment Corporation, Low NO_x burner approval test and performance verification test, available from: http://www.keco.or.kr/en/core/prevention_vapor/contentsid/2020/index.do.
- [5] SCAQMD, Rule 1146.2, Emissions of oxides of nitrogen from large water heaters and small boilers and process heaters.
- [6] B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee, S. Lee, Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners, *Energy*, 53 (2013) 343-350.
- [7] B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee, S. Lee, An experimental study of heat transfer and pollutant emission characteristics at varying distances between the burner and the heat exchanger in a compact combustion system, *Energy*, 42 (2012) 350-357.
- [8] J. Lee, J.M. Kim, S. Lee, C.E. Lee, A study on the effects of CO-tubes insertion on the emission characteristics of a compact heat exchanger, *Energy*, 36 (2011) 1652-1658.
- [9] B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee, S. Lee, Study on the combustion characteristics of a premixed combustion system with exhaust gas recirculation, *Energy*, 61 (2013) 345-353.
- [10] B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee, S. Lee, Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system, *Energy*, 49 (2013) 375-383.
- [11] S.R. Turns, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill, Singapore, 2000, 553-555.
- [12] ANSYS Inc., *Ansys fluent theory guide*, Cononshurg, PA U.S.A., 2012.
- [13] C.T. Bowman, R.K. Hanson, D.F. Davidson, W.C. Gardiner, Jr., V. Lissianski, G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, M. Goldenberg, available from: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.