



대향류 화염에서 FGR이 적용된 저공해 연소의 수치적 해석: Part I. 저 NO_x 연소특성

조서희 · †이기만*

순천대학교 우주항공공학과, *순천대학교 기계·우주항공공학부
(2019년 11월 13일 접수, 2019년 12월 23일 수정, 2019년 12월 24일 채택)

Numerical Investigation of Low-pollution Combustion with applying Flue Gas Recirculation in Counterflow Flames: Part I. Combustion Characteristics of Low NO_x

Seo-Hee Cho · †Kee-Man Lee*

Department of Aerospace Engineering, Sunchon National University, Korea

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sunchon National University, Korea

(Received November 13, 2019; Revised December 23, 2019; Accepted December 24, 2019)

요 약

저공해 연소를 위한 방법 중 하나인 배기가스 재순환(flue gas recirculation, 이하 FGR)은 질소산화물 저감에 효과적인 연소 기법이다. 이를 메탄/공기 대향류 예혼합화염에 적용하여 화염의 특성변화와 NO_x 생성 기구를 파악하기 위한 수치해석을 진행하였다. 신장률에 따라 배출되는 생성물들의 몰분율이 달라진다는 점을 고려하여 재순환율은 생성물을 기준으로 정의되었으며, 실제 연소 시스템을 반영하기 위해 주요 생성물인 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂를 희석제로써 재순환하였다. FGR 기법이 적용됨에 따라 특정한 신장률 조건에서 최대화염 온도의 전환점이 발견되었다. 또한, 재순환율이 증가함에 따라 온도와 NO의 경향이 달리 나타났으며, 이를 파악하고자 NO 반응을 열적 NO와 Fenimore NO로 구분하여 분석하였다.

Abstract - One of the methods for low-pollution combustion, flue gas recirculation(FGR) is effective to reduce nitrogen oxides and it was applied in CH₄/air premixed counterflow flames to identify the change of flame characteristics and NO_x mechanisms. Considering that the mole fraction of the products varied depending on the strain rates, the major products: CO₂, H₂O, O₂ and N₂ were recirculated as a diluent to reflect the actual combustion system. With the application of the FGR technique, a turning point of maximum flame temperature under certain strain rate condition was found. Furthermore as the recirculation ratio increased, the tendency of NO was changed before and after the turning point and the analysis on thermal NO and Fenimore NO production was conducted.

Key words : flue gas recirculation(FGR), counterflow flames, nitrogen oxides, low-pollution

I. 서 론

국내 미세먼지 문제의 심각성이 꾸준히 대두되어

온 가운데, 2020년 개정되는 대기환경 보전법에 따르면 환경부는 특정 유해 대기오염물질 배출 허용기준이 평균 30% 강화된다고 공포하였다. 특히 국내 산업용 보일러 공정에서 발생하는 미세먼지 성분 중 하나인 질소산화물(NO_x) 배출량을 NO_x ≤ 40 ppm 이하로 규제하는 등 NO_x 배출 저감의 중요도가 더욱 높아

†Corresponding author: kmlee@sncu.ac.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

지는 추세이다.

국내외적으로 NOx를 저감 시키기 위하여 다양한 연소 기법들이 연구되었으며, 대표적으로 저 과잉 공기 연소(low excess air combustion)[1-2], 단계 연소(stage combustion)[3], MILD(moderate and intense low oxygen dilution) 연소[4-5], FGR(flue gas recirculation) 연소[6-7] 등이 있다. 이 중 FGR 연소는 화염의 온도를 낮춤으로써 NOx를 감소시키는 방식으로[8-10], 실제 산업용 연소기에 적용 시 배기가스 내 NOx 저감에 효과적으로 작용하며 이후 다양한 연소기에 적용되어 연구가 진행되어왔다[11-14].

이러한 FGR 연소는 연료 측에 적용하는 방식(fuel injection recirculation, FIR)과 배기가스를 공기 측에 적용하는 방식(FGR)으로 구분할 수 있으며[15], 이에 배기가스를 공기 측에 적용하는 방법인 FGR 기법을 채택하여 대향류 예혼합화염에서 연구를 진행하였다. Fig. 1에서는 FGR 연소가 적용된 대향류 연소의 개략도를 나타내었다. 이때 재순환 가스는 상부 노즐인 예혼합 혼합기의 공기 측으로 도입되며 하부 노즐에서는 양측 유속을 맞추기 위해 공기가 공급된다. 따라서 고정된 노즐 출구 직경에서 예혼합 혼합기의 연료는 변하지 않으며, 배기가스가 재순환됨에 따라 예혼합 혼합기 내 산화제의 양이 감소하게 된다. 대향류 연소기에 FIR 방식 선정 시 재순환율에 따른 NO 저감 면에서 FGR 보다 더 효과적이지만[15], 전체 신장률을 고려한 대향류 연소기 특성상 유속을 고정된 상태에서 재순환 가스를 상부 노즐에 도입하였기에 FIR 방식은 재순환율에 따라 연소기의 열용량이 달라진다. 이는 실제 연소 시스템을 모사하기에는 무리가 있기에 본 연구에서는 FGR 기법을 선정하였다.

주요 변수조건으로는 대향류 화염의 속도구배를 나타내는 신장률을 택하였다. 대향류 화염은 x-방향으로만 변화하는 1차원 화염의 특징을 나타내며 속도구배는 dv_x/dx 로 이해할 수 있다[16]. 여기서 신장률에 따라 화염 정체 면의 위치, 소화 거동, 연료와 산화제의 혼합률, 연소 안정성 등 화염의 주요 특성이 변화하게 된다. 또한, Cho 등에 따르면 FIR 과 FGR 연소에서 유속은 NO 저감에 중요한 역할을 한다고 보고하였다[17]. 저 NOx 연소특성에 중점을 둔 연구 목적에 따라 대향류 화염에서 FGR을 도입할 시 신장률을 주요 변수로 설정하였다.

이에 본 논문에서는 FGR 기법을 도입한 메탄/공기 대향류 예혼합화염의 특성을 파악하고, 배출되는 NOx의 저감 효과 및 NO 거동을 신장률 130 s^{-1} 조건까지 수치해석을 통해 확인하였다. 이때 실제 산업용 연소기의 구동 조건을 고려하여 당량비 0.9인 조건의 화

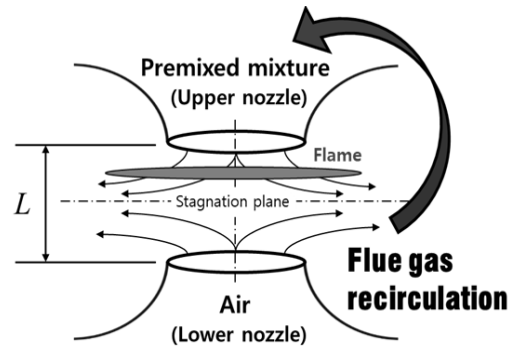


Fig. 1. Schematic diagram of counter flow which is applied FGR combustion.

염에서 연구가 진행되었으며, 주요 생성물들의 재순환율에 따른 화염대의 온도와 NOx 배출 영향을 분석하였다.

II. 수치해석 및 FGR 정의

2.1. 수치해석 방법

메탄/공기 대향류 예혼합화염에서 FGR의 수치해석 진행은 정체점을 기준으로 화염대의 1차원적 가정인 ANSYS CHEMKIN PRO의 OPPDIF-code로 진행되었다[18-19]. 이때, 실제 화염을 모사하기 위하여 복사 열손실을 고려한 광학 박 모델을 사용하였다[20]. 상세 화학반응 기구는 UC San Diego의 연구팀에서 제안한 63개의 화학종과 300개의 반응식으로 이루어진 UC San Diego mechanism(UCSD)을 이용하였다[21]. 분위기 조건은 1 bar, 298 K이고, 격자점은 1200 ~ 1400 사이로 설정하였다. 전체 신장률(global strain rate, 이하 a_g)은 상부와 하부 노즐 출구의 축방향 속도와 두 노즐 사이의 면적 비를 의미하며, 이를 다음과 같이 정의하였다.

$$a_g = \frac{(U_L + U_U)}{2L} \quad (1)$$

여기서 U_L 와 U_U 는 각 상부와 하부의 노즐에서의 출구 속도를 나타내고, L 은 두 노즐 간의 거리를 나타낸다. 계산 시 설정한 두 노즐 간의 거리는 15 mm로 고정하였다. 각 노즐은 연료와 산화제가 공급된다.

2.2. 재순환 가스 선정

FGR 연소에서는 각기 다른 목적을 가지고 배기가스를 모사한 희석제(diluent)를 선정하게 되는데, 실제

로 단일 화학종을 도입함으로써 화염대에서의 화학적 효과를 분석하거나[17, 22-23], 연소 후 배기가스를 모사하여 희석제를 첨가하는 보고[24] 등이 있다. 후자의 경우 생성물의 60 % 이상이 N₂이며 N₂를 단일 희석제로 선정할 시 CO₂ 및 H₂O를 재순환한 결과와 정성적으로 일치하는 거동을 보이므로 N₂를 재순환 가스로 모사하였다고 언급하였다. 그러나 본 논문에서는 NO_x의 배출 저감 측면에 중점을 두었으며, 실제 연소 시스템에 적용 시 정량적인 효과에 의한 배출 정도를 고려하였기에 주요 생성물인 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂ 모두 채택하였다. 또한, N₂를 희석제로 선정할 경우[24], 배기가스와 비교하여 열용량이 다소 낮아지기 때문에 메탄/공기 대향류 예혼합화염의 주요 생성물을 혼합하여 재순환하였다.

2.3. 재순환을 정의

화염대에 미치는 FGR의 효과를 평가하기 위하여 재순환되는 희석제의 재순환율(recirculation ratio, RR)을 명확히 정의할 필요가 있다. 위에 언급한 바와 같이 재순환되는 화학종은 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂이다. 기존에 정의되어왔던 RR(또는 FGR율)에 따르면 [17, 25], 연료와 산화제의 유량이나 몰분율을 기준으로 희석제의 양을 결정하였다. 그러나 a_g가 증가할 경우 연소가 완전하게 이루어지지 않으며, 연소조건이 변화하여 실제 배출되는 생성물의 몰분율 또한 달라진다. 따라서 본 논문에서는 당량비 0.9 조건에서 a_g에 따라 배출되는 생성물들의 몰분율을 각기 계산하여 RR을 정의하였다.

$$RR(\%) = \frac{1 - (X_F + (X_O - 0.01 \times RR \times X_D))}{X_D} \times 100 \quad (2)$$

여기서 X_i는 화학종의 몰분율을 나타내며, F는 연료, O는 산화제를 의미한다. D는 희석제로 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂를 포함한다.

본 논문에서는 RR = 0 % 조건에서 생성되는 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂의 몰분율을 a_g = 10 s⁻¹부터 130 s⁻¹까지 각 10 s⁻¹ 단위씩 계산하였다. 일례로 N₂ 몰분율의 계산식으로는 다음과 같다.

$$X_{N_2} = \frac{\int_0^L \text{mole fraction of } N_2 \, dx}{\int_0^L \text{mole fraction of emission} \, dx} \quad (3)$$

따라서 식 (2)에서의 X_D는 식 (3)의 과정을 거친 네 가지 화학종의 계산된 몰분율의 합이다.

이처럼 a_g에 따른 생성물을 기준으로 정의된 RR은 조건별 배기가스의 조성 변화를 정성적으로 모사하였기에 FGR의 화학적 효과에 따른 화염의 특성에 관하여 더욱 타당하다 볼 수 있다. 더욱이 실제 연소기의 운전 조건을 고려한 당량비 0.9에서 재순환하였기에 적절한 선행연구로 활용될 수 있다. 따라서 식 (2)와 (3)을 이용하여 연료, 산화제, 재순환되는 희석제의 몰분율 경계 조건으로 사용하였다.

III. 결과 및 논의

3.1. FGR에 따른 화염특성

메탄/공기 대향류 예혼합화염에서 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂를 희석제로 재순환을 한 경우 a_g에 따른 최대화염 온도를 Fig. 2에 나타내었다. 실선으로 나타낸 RR = 0 %는 당량비 0.9 조건에서의 예혼합화염으로 FGR을 적용하지 않은 경우이며, 그래프 상 기준선으로써 FGR 효과를 비교할 수 있다. RR은 5 % 간격으로 20 %까지 나타내었으며, 수치해석은 a_g = 130 s⁻¹까지 수행되었는데, 130 s⁻¹은 RR = 0 %에서 계산을 수행하였을 때 예혼합화염이 소화하는 조건이다. a_g에 따른 최대화염 온도를 나타낸 결과, a_g = 20 s⁻¹에서 2,091 K의 가장 높은 최대화염 온도를 나타내었으며, 이때 20 s⁻¹을 기점으로 전환점 이전에서는 최대화염 온도가 증가하다 전환점 이후로는 온도가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 대부분의 높은 a_g에서는 RR이 증가함에 따라 최대화염 온도가 감소하였지만, 전환점 이전의 a_g의 경우 RR의 증가에도 불구하고 온도가 증가하는 현상이

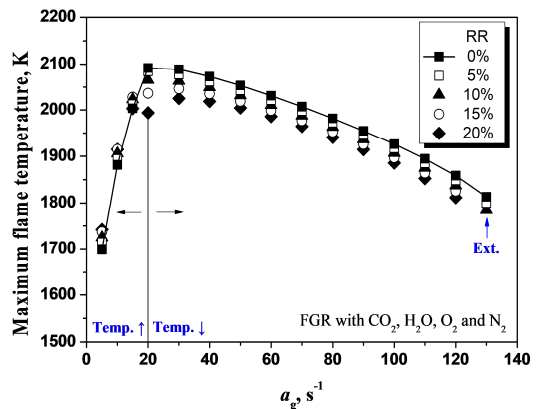


Fig. 2. Maximum flame temperature with global strain rate in methane/air counterflow flame at recirculation ratio from 0 % to 20 %.

발생하였다.

먼저 a_g 의 증가에 따라 최대화염 온도가 증감하는 요인으로는 화염이 복사 열손실의 영향을 받기 때문이다. 낮은 a_g 의 경우 화염의 면적이 비교적 넓기에 화염 표면에서 복사에너지가 크게 방사되어 최대화염 온도가 감소한다. 반면 전환점 이후의 높은 a_g 에서는 빠른 유속으로 인하여 화염의 면적이 감소하고, 복사 열손실의 효과보다 스트레치가 크게 작용하여 최대화염온도가 감소하게 된다[26]. 두 번째로 RR에 따라 전환점인 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 이전의 구역에서 최대화염 온도가 증가하는 이유는 공기 측으로 재순환되는 희석제의 영향으로 인하여 예혼합연소 시 O_2 의 몰분율이 감소하기 때문이다. 따라서 기존의 당량비 0.9의 조건에서 당량비 1에 가까워지고 화염의 온도가 증가하게 된다. 이후 특정 RR 이상이 되면 온도가 감소하게 되는 데 이에 관해서는 Fig. 3에서 상세히 설명할 예정이다. 반면, $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 이후로는 RR가 증가함에 따라 CO_2 와 H_2O 의 몰분율이 빠르게 증가하는 반면, O_2 몰분율의 값은 거의 일정하게 유지된다. 따라서 높은 a_g 에서는 당량비 값이 0.9에서 크게 벗어나지 않으며, 온도가 감소하는 주요 원인으로는 재순환하는 CO_2 와 H_2O 의 큰 열용량으로 인한 물리적 현상이다. 따라서 RR에 따른 화염의 최대 온도가 감소하게 된다.

Fig. 3에서는 최대화염 온도의 경향을 $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$, 20 s^{-1} 그리고 60 s^{-1} 에서 CO_2 , H_2O , O_2 그리고 N_2 의 RR에 따라 화염의 소화 조건까지 표기하였다. 전환점 이전인 $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$ 의 경우 RR에 따라 당량비 1에 가까워지게 되어 최대화염 온도가 증가하는 경향을 보이고, 이

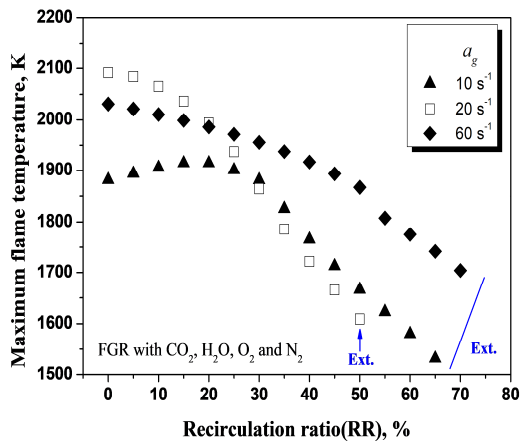


Fig. 3. Maximum flame temperature versus recirculation ratio at $a_g = 10, 20$ and 60 s^{-1} in FGR with CO_2 , H_2O , O_2 and N_2

후 $\text{RR} = 15\%$ 에서 연료가 과농해짐에 따라 온도가 감소하게 된다. 이는 희석제 내 CO_2 와 H_2O 의 몰분율이 점차 증가하고, O_2 와 N_2 의 몰분율이 감소하기 때문이다. 이후 높은 RR 구간에서 화염은 O_2 의 몰분율이 현저히 감소하였고, 당량비 1.5의 과농가연한계에 도달하게 되어 화염 소화가 이루어진 것으로 판단된다. 한편, 대부분의 산업용 연소기의 경우 노즐의 출구 속도가 굉장히 빠르기에 전환점 이후의 a_g 에 초점을 맞추는 것이 적절하다. 또한, 일반적인 연소 시스템 내 화염 거동을 상세히 모사할 수 있기에 대략적으로 $a_g = 60 \text{ s}^{-1}$ 을 고정하여 FGR의 효과를 평가하였다. 60 s^{-1} 에서는 RR에 따라 최대화염 온도가 선형적으로 감소하며, 20 s^{-1} 보다 비교적 완만한 감소 폭을 보인다. 화염의 소화 조건 또한, $\text{RR} = 70\%$ 로 세 조건 중 가장 넓은 가연한계를 보였다.

결과적으로 전환점 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 을 기점으로 희석제가 예혼합 혼합기의 산화제에 도입됨에 따라 전체적으로 당량비가 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 이에 이해를 돕기 위하여 Fig. 4에서는 $a_g = 10\sim 40, 60 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 RR 별 당량비의 변화를 나타내었다.

3.2. FGR 도입 시 NOx 저감 효과

일반적인 NOx 거동 특성에 따르면, 열적 NOx의 형성은 확장된 Zeldovich 메커니즘으로 알려진 바와 같이 온도에 굉장히 의존적인 화학반응식들에 의해 결정된다[27]. FGR 기법을 대항류 화염에 도입할 시 앞 절의 결과와 같이 화염 온도를 줄이는 효과를 보이며, 이를 통해 전체 NOx 저감에 긍정적인 영향을 미칠 것

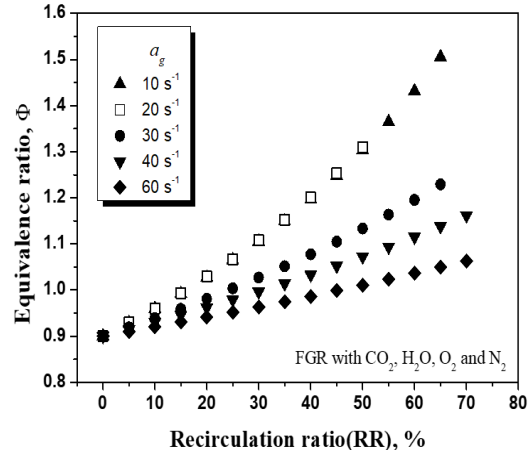


Fig. 4. Equivalence ratio with recirculation ratio at the various global strain rates in FGR with CO_2 , H_2O , O_2 and N_2

으로 예상할 수 있다. 이러한 결과를 수치해석을 통하여 상세히 논하고자 한다. 먼저 NO 생성은 Takeno와 Nishioka에 의해 제안된 NO 배출지수(emission index of NO, 이하 EINO)로 나타낼 수 있으며[28], 그 정의는 다음과 같다.

$$EINO = \frac{\int_0^L W_{NO} \dot{w}_{NO} dx}{-\int_0^L W_F \dot{w}_F dx} \quad (4)$$

여기서 W 는 분자량, \dot{w}_i 는 i -화합종의 생성률을 나타내며, 참고로 F 는 연료로서 메탄을 의미한다.

Fig. 5(a), (b)는 a_g 에 따른 EINO를 희석제에 따라 비교하였다. Fig. 5는 앞 절에서 Fig. 2의 최대화염 온도

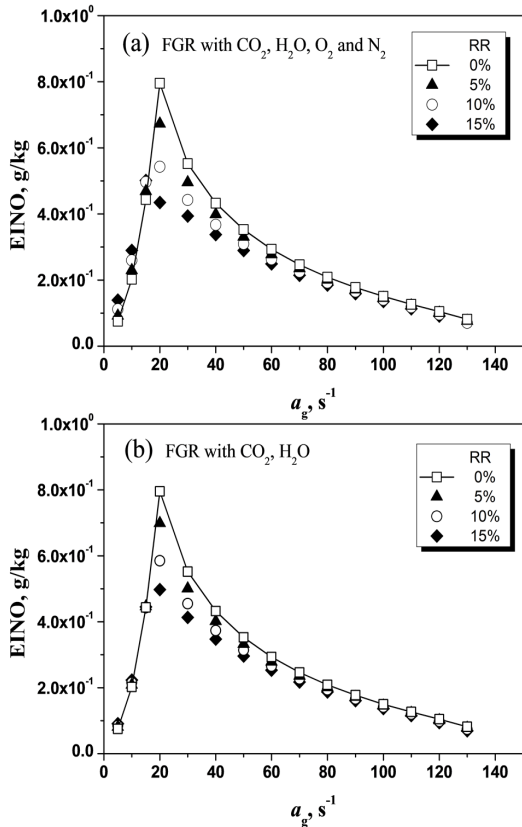


Fig. 5. NO Emission index with global strain rate in methane/air counterflow flame in (a) FGR with CO₂, H₂O, O₂ and N₂ and (b) FGR with CO₂ and H₂O.

와 유사한 경향을 나타내었으며, 전환점 또한 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 으로 일치하였다. Fig. 5(a), (b) 모두 오른쪽 마지막 심볼은 화염의 소화 조건을 나타낸다. 화염이 소화 한계에 다다름에 따라(특히 80 s^{-1} 이후) RR에 따른 EINO 차이가 대략 $3.0 \times 10^{-3} \text{ g/kg}$ 이하로 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한, 낮은 a_g 에서 RR이 증가함에 따라 NO 배출이 증가하였다. 따라서 실제 연소 시스템에 FGR을 도입할 경우 역전현상이 발생하는 a_g 전환점을 파악한 후 그에 따른 적절한 a_g 의 범위를 선정하는 것이 연소기의 NO_x 저감에 더욱 효과적일 것으로 사료 된다.

전환점 이전 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 에서 RR가 증가함에 따라 EINO가 증가하는 역전현상의 원인을 규명하기 위하여 재순환시키는 희석제를 오직 CO₂와 H₂O로 재구성하였고, FGR 도입 시 a_g 에 따른 EINO를 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(a)와 비교하였을 때 전환점 이전에서 EINO의 역전현상이 나타났지만, RR의 증가에 따른 그 차이가 현저히 작은 것을 알 수 있다. 직관적으로 해석해 볼 때, 역전현상의 원인은 O₂와 N₂의 희석제 내 첨가에 따라 나타나는 현상으로 판단할 수 있다. N₂는 불활성 기체로서 메탄 연소시 배기가스 내 70% 이상 포함되어 있다. 이때, O₂와 N₂를 첨가할 경우 재순환 가스의 대부분을 N₂가 차지하게 되며, RR이 증가할수록 O₂의 몰분율은 감소하고, N₂의 몰분율은 비교적 일정하게 유지된다. 따라서 동일 RR임에도 불구하고 N₂를 재순환할 경우 연료가 더 과농한 조건이 형성되어 최대화염 온도와 EINO 값이 더욱 큰 폭으로 상승하게 된다.

Fig. 6에서는 $a_g = 10, 20$ 그리고 60 s^{-1} 에서의 RR에

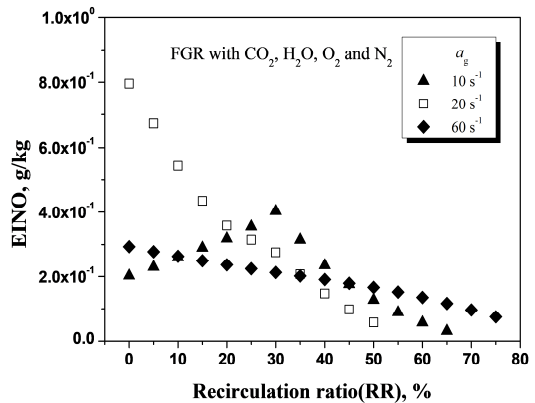


Fig. 6. NO Emission index versus recirculation ratio at $a_g = 10, 20$ and 60 s^{-1} in FGR with CO₂, H₂O, O₂ and N₂

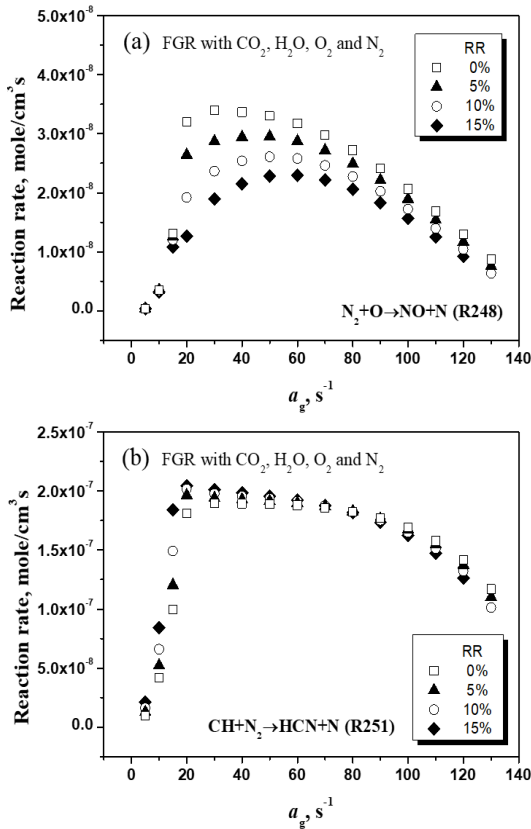


Fig. 7. Reaction rate of (a) thermal NO and (b) Fenimore NO as an indicator with global strain rate in FGR with CO₂, H₂O, O₂ and N₂.

다른 EINO를 나타내었다. $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$ 에서는 EINO가 선형적으로 증가하였고, RR = 30 %를 기점으로 감소하였다. 이때 10 s^{-1} 에서 EINO 값은 약 $4.0 \times 10^{-1} \text{ g/kg}$ 으로 최댓값을 가지는데, 이는 Fig. 2에서 10 s^{-1} 조건의 최대화염 온도의 최댓값은 RR = 15 %로 결과가 상이하다. 이는 열적 NOx 거동뿐만 아니라 Prompt NOx에 대한 상세한 분석이 요구되며, 이는 다음 절에서 논의하도록 한다.

3.3. NOx 생성기구 해석

NOx의 형성에 있어 화염 온도에 의존적인 열적 NO와 더불어 Prompt NO로 알려진 Fenimore NO[29]의 영향을 평가하고자 한다. 본 논문에서 사용한 화학 반응모델인 UCSD 모델에서 사용된 열적 NOx 형성을 지배하는 주요 반응으로는 다음과 같다[30].

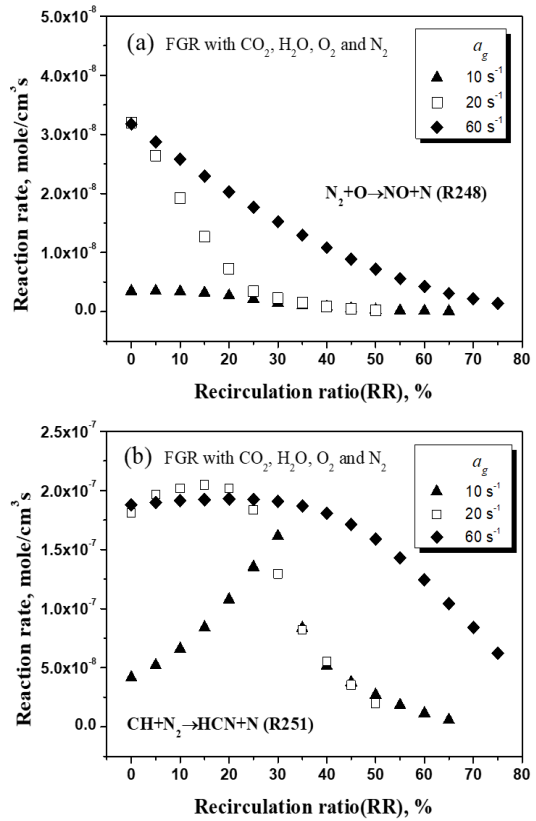
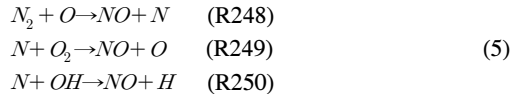
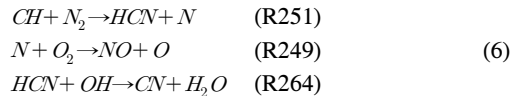


Fig. 8. Reaction rate of (a) thermal NO and (b) Fenimore NO as an indicator with recirculation ratio in FGR with CO₂, H₂O, O₂ and N₂.



이 중에서 (R248)은 열적 NO 생성의 지시자(indicator) 반응으로서[15] 이 반응을 통해 열적 NO의 거동을 예측할 것이다. 한편, Fenimore NOx 형성을 지배하는 주요 반응으로는 다음과 같다.



여기서 (R251)은 Fenimore NO 생성에 대한 지시자이다. 따라서 두 지시자 반응을 통해 NO 생성기구의

거동을 해석하였으며, Fig. 7은 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂의 재순환 시 a_g에 따른 열적 NO와 Fenimore NO 지시자 반응의 반응률(reaction rate)을 나타내었다. 이때 반응률이란 어떠한 화학종(k)을 포함하는 모든 반응에 대한 진행속도 변수들의 합으로 나타낼 수 있으며 전체 반응률의 정의는 다음과 같다.

$$\dot{w}_k = \sum_{i=1}^I v_{ki} q_i \quad (k=1, \dots, K) \quad (7)$$

where, $v_{ki} = v''_{ki} - v'_{ki}$

여기서 v'_{ki}와 v''_{ki}은 각각 i번째 반응식에서 k성분 화학종을 포함하는 반응물과 생성물의 이론반응계수(stoichiometric coefficients)이다. q_i는 i번째 반응에 대한 진행속도변수(rate-of-progress variable)이다.

Fig. 7(a)에서는 분기점 a_g = 20 s⁻¹ 이전에서 나타나는 온도 역전현상이 거의 나타나지 않으며, 수치상으로도 열적 NO의 반응률은 굉장히 미미한 차이를 보인다. 전환점 이후로는 RR에 따라 열적 NO의 생성이 억제되었으며 특히 RR에 따른 온도의 격차가 가장 크게 나타났던 RR = 20 %에서 열적 NO의 반응률이 RR = 0 %일 때의 반응률과 비교할 때 가장 많이 감소하였다. 이로써 FGR에 의한 열적 NO의 저감은 특정 a_g 이상에서 이루어짐을 확인하였다. 반면에 Fig. 7(b)에서는 낮은 a_g 조건에서 RR에 의한 Fenimore NO의 반응률이 증가하며 기존의 전환점과는 다른 a_g = 80 s⁻¹을 기점으로 반응률이 감소하였다. 이는 Fenimore NO 특성상 연소 환경의 온도가 낮고 연료가 과농한 조건에서 크게 발생함에 따라 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 Fig. 4에서 전환점 이전 조건의 a_g에서 나타나는 EINO 역전현상은 Fenimore NO 형성에 의한 것으로 확인되며, 이에 관하여 추가적인 연구가 요구된다. 다음으로 a_g = 10, 20 그리고 60 s⁻¹에서 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂의 RR에 따른 열적 NO와 Fenimore NO 지시자 반응의 반응률을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에서의 a_g = 10 s⁻¹ 조건에서는 열적 NO의 반응률이 굉장히 낮고 RR에 따른 변화에도 거의 일정하다. 따라서 첨가된 희석제는 열적 NO에 크게 영향을 주지 않는다. 반면, a_g = 20 s⁻¹에서는 초기 RR에 따른 열적 NO의 반응률이 크게 억제되었으며, RR = 30 % 이후 반응률의 감소 폭이 점차 완만해짐을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서는 RR = 30 %를 기준으로 a_g = 10 s⁻¹에서는 Fenimore NO의 반응률이 증가하고 감소하였다. 이는 RR이 증가하고 당량비 1에 가까워짐에 따라 CH 라디칼이 왕성하게 생성되어 Fenimore NO의 지시자 반응률에 기여한 것을 알 수 있다[31]. 이후 RR = 30 %에서는 당량비 1.1에 도달하며, RR이 증가함에 따라 화염

은 더욱 과농해진다. 결국, 반응률이 빠르게 감소하고 화염은 과농가연한계에 도달하여 소화하게 된다. a_g = 60 s⁻¹에서는 당량비 0.9에서 크게 변화하지 않으며, RR에 따라 Fenimore NO의 지시자 반응률이 완만하게 감소함을 확인할 수 있다.

V. 결론

메탄/공기 대항류 예혼합화염에서 FGR 연소에 따른 화염의 특성 및 NO_x 저감 결과로는 다음과 같다.

(1) a_g에 따라 달라지는 연소조건을 고려하여 당량비 0.9 조건에서 RR = 0 %을 기준으로 CO₂, H₂O, O₂ 그리고 N₂의 물분율을 각기 계산하였다. 계산된 물분율을 기준으로 RR을 정의하였으며, 이로써 실제 연소 시스템을 고려한 FGR에서의 화염특성을 확인하였다.

(2) 상하부 노즐 속도에 의한 화염의 a_g에 따라 최대 화염 온도는 a_g = 20 s⁻¹을 기점으로 경향이 달리 나타났다. 이전의 낮은 a_g 조건(a_g = 10 s⁻¹)에서는 온도의 역전현상이 발생하는데, 이는 RR의 증가로 당량비 1에 가까워짐에 따라 최대화염 온도가 증가하는 현상임을 알 수 있다. 이후 화염은 과농가연한계에 도달하여 소화하게 된다.

(3) a_g의 변화에 따른 EINO의 경향은 최대화염 온도와 유사하게 나타났다. 그러나 RR이 증가함에 따라 낮은 a_g 조건에서는 NO 배출에 있어 온도의 경향과 상이한 결과를 보임에 따라 NO_x 생성기구를 상세히 파악하는 것이 요구되었다.

(4) 온도 및 EINO 역전현상은 열적 NO 반응이 아닌 Fenimore NO의 반응률이 우세하였다. 또한, RR이 증가함에 따라 열적 NO의 경우 모든 a_g 조건에서 감소하였지만, Fenimore NO는 과농한 연소환경에서 NO 반응이 촉진되어 특정 RR 전후로 증감하는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2019년 한국산업기술평가관리원 산업소계 핵심기술개발사업(20005788)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] A, F., Sarofim, R. C., Flagan, "NO_x Control for Stationary Combustion Sources", *Prog. Energy. Combust. Sci.*, 2, 1-25, (1976)
 [2] W., Li, Z., Liu, Z., Wang, Y., Xu, J., Wang,

- “Experimental and theoretical analysis of effects of N_2 , O_2 and Ar in excess air on combustion and NOx emissions of a turbocharged NG engine”, *Energy Conversion and Management.*, 97, 253-264, (2015)
- [3] S. C., Li, and F. A., Williams, “NOx Formation in Two-Stage Methane-Air Flames”, *Combustion and Flame*, 118, 399-414, (1999)
- [4] Y., He, C., Zou, Y., Song, Y., Liu, C., Zheng, “Numerical study of characteristics on NO formation in methane MILD combustion with simultaneously hot and diluted oxidant and fuel (HDO/HDF)”, *Energy*, 112, 1024-1035, (2016)
- [5] S. J., Zhu, Q. G., Lyu, J. G., Zhu, J. R., Li, “NO emissions under pulverized char MILD combustion in O_2/CO_2 preheated by a circulating fluidized bed: Effect of oxygen-staging gas distribution”, *Fuel Processing Technology*, 182, 104-112, (2018)
- [6] H. K., Kim, Y. M., Kim, S. M., Lee, K.Y., Ahn, “NO reduction in 0.03-0.2 MW oxy-fuel combustor using flue gas recirculation technology”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 3377-3384, (2007)
- [7] Y., Tu, A., Zhou, M., Xu, W., Yang, K. B., Siah, P., Subbaiah, “NOx reduction in a 40 t/h biomass fired grate boiler using internal flue gas recirculation technology”, *Applied Energy*, 220, 962-973, (2018)
- [8] Moorman, R. J., and Long, C. H., “Design, Development and testing of a Swirl Type Gas Burner With Fuel Gas Recirculation for NOx Control,” ASME 73-PWR-21, 1-9, (1973)
- [9] J. A., Wüning, J. G., Wüning, “Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-formation”, *Prog. Energy. Combust. Sci.*, 23, 81-94, (1997)
- [10] J., Baltasar, M. G., Carvalho, P., Coelho, M., Costa, “Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling”, *Fuel*, 76(10), 919-929, (1997)
- [11] J. M., Beér, “Low NOx Burners for Boilers, Furnaces and Gas Turbines; Drive Towards the Lower Bounds of NOx Emissions”, *Combust. Sci. and Tech.*, 2, 169-191, (1996)
- [12] B., Shi, J., Hu, H., Peng, S., Ishizuka, “Effects of internal flue gas recirculation rate on the NOx emission in a methane/air premixed flame”, *Combustion and Flame*, 188, 199-211, (2018)
- [13] A. C. A., Lipardi, P., Versailles, G. M. G., Watson, G., Bourque, J. M., Bergthorson, “Experimental and numerical study on NOx formation in CH_4 -air mixtures diluted with exhaust gas components”, *Combustion and Flame*, 179, 325-337, (2017)
- [14] J. J., Feese, S. R., Turns, “A Study of NOx Reduction by Fuel Injection Recirculation”. Master. Dissertation, The Pennsylvania State University, (1996)
- [15] J., Park, O. B., Kwon, S. W., Kim, C. Y., Lee, S. I., Keel, J. H., Yun, I. G., Lim, “A Study on Flame Structure and NO Emission in FIR- and FGR-applied Methane-air Counterflow Diffusion Flames”, *J. Korean Soc. Combust.*, 21(1), 38-45, (2016)
- [16] Stephen R. Turns, “An Introduction to Combustion Concepts and Applications”, McGraw-Hill, third edition, 363-370, (2012)
- [17] E. S., Cho, S. H., Chung, “Numerical Study on NO Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides”, *Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, 19(6), 1358-1365, (2005)
- [18] R. J., Kee, J. A., Miller, G. H., Evans, “A Computational Model of The Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flames”, *Proc Combust Inst*, 22, 1479-1494, (1988)
- [19] A. E., Lutz, R. J., Kee, J. F., Grcar, F. M., Rupley, “A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames”, *Sandia National Laboratories Report*, SAND 96-8243, (1997)
- [20] Y., Ju, H., Guo, K., Maruta, F., Liu, “On the extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames”, *J. Fluid Mech.*, 342, 315-334, (1997)
- [21] “Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications”, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego, [http:// combustion.ucsd.edu/](http://combustion.ucsd.edu/), (2014)
- [22] J., Park, J. S., Kim, J. O., Chung, J. H., Yun, S. I., Keel, “Chemical effects of added CO_2 on the extinction characteristics of $H_2/CO/CO_2$ syngas diffusion flames”, *International Journal*

- of Hydrogen Energy*, 34, 8756-8762, (2009)
- [23] S. W., Jung, J., Park, O. B., Kwon, Y. J., Kim, S. I., Keel, J. H., Yun, I. G., Lim, "Effects of CO₂ addition on flame extinction in interacting H₂-air and CO-air premixed flames", *Fuel*, 136, 69-78, (2014)
- [24] J. J., Feese, S. R., Turns, "Nitric Oxide Emissions from Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition", *Combustion and Flame*, 113(1-2), 66-78, (1998)
- [25] E. S., Cho, S. H., Chung, "Characteristics of NO_x Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides", *KSME International Journal*, 18(12), 2303-2309, (2004)
- [26] Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y., and Niioka, T., "A Computational Study of Flame Radiation in PMMA Diffusion Flames Including Fuel Vapor Participation", *Combust. Flam.*, 112, 181-187, (1998)
- [27] G. A., Lavoie, J. B., Heywood, J. C., Keck, "Experimental and Thoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines", *Combustion Science and Technology*, 1, 313-326, (1970)
- [28] M. Nishioka, S., Nakagawa, Y., Ishikawa, T., Takeno, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame", *Combustion and Flame*, 98, 127-138, (1994)
- [29] C. P., Fenimore, "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", *Symposium (International) on Combustion*, 13(1), 373-380, (1971)
- [30] C. K., Westbrook, F L., Dryer "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion", *Prog. Energy Combustion. Sci*, 10, 1-57, (1984)
- [31] J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, "Spatially resolved measurement of OH*, CH*, and C2* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, 1757-1764, (2000)