

## FIR과 FGR 기법이 적용된 메탄-공기 대향류 확산화염에서 화염구조와 NO 배출 연구

박 정\* · 권오봉\*\* · 김세원\*\* · 이창엽\*\* · 길상인\*\*\* · 윤진한\*\*\* · 임인권\*\*\*\*

\*부경대학교 기계공학과 · \*\*한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹  
\*\*\*한국기계연구원 환경에너지기계시스템연구부 · \*\*\*\*명지대학교 기계공학과

## A Study on Flame Structure and NO Emission in FIR- and FGR-applied Methane-air Counterflow Diffusion Flames

Jeong Park\*, Oh Boong Kwon\*\*, Sewon Kim\*\*, Changyeop Lee\*\*  
Sang-In Keel\*\*\*, Jin-Han Yun\*\*\* and In Gweon Lim\*\*\*\*

\*Dep. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l University

\*\*Thermochemical Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology

\*\*\*Environment & Energy Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

\*\*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Myongji University

(Received 4 February 2016, Accepted 25 February 2016)

### ABSTRACT

Flame characteristics and NO emission behavior in CH<sub>4</sub>/air-air premixed counterflow flames with applying FIR and FGR with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O were investigated numerically by varying the ratios of FIR and FGR as well as global strain rate. Chemical effects of added CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O via FIR and FGR were analyzed through comparing flame characteristics and NO behaviors from real species(CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O) with those from their artificial species(XCO<sub>2</sub> and XH<sub>2</sub>O) which have the same thermochemical, radiative, and transport properties to those for the real species. The results showed that flame temperature and NO emission with FIR varied much more sensitively than that with FGR. Those varied little irrespective of adding CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and their artificial species to the fuel stream via FIR. However, Those were varied complicatedly by chemical effects of added CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O via FGR. Detailed analyses for them were made and discussed.

**Key Words** : FIR, FGR, NO emission, Radiation heat loss, Flame extinction

### 1. 서론

기후 변화로 인한 에너지 패러다임의 변화가 쉘 일 가스의 개발을 촉발하였고, 결과로써 천연가스 수요의 급격한 증가와 더불어 가스 터빈 연소기는 이제 한자리 수 NO<sub>x</sub> 배출을 요구하는 시대에 이미 접어든 상황이다. 최근 산업용 보일러 시장에서조차도 가스 연료 사용의 증가에 따라 보일러의 경쟁력은

연료 소모 및 NO<sub>x</sub> 배출 저감에 달려있다 해도 과언이 아닌 양상이다.

NO<sub>x</sub> 저감을 위한 단계 연소법(stage combustion)[1] 등 여러 가지 기법들은 이미 잘 알려져 있고 방법론 들조차도 이제는 거의 완성 단계에 접어든 상태이다. 이중 가장 전통적인 방법의 하나인 배출 가스의 외부 재순환을 공기 측(Flue gas recirculation, FGR)과 연료 측에 적용하는 방식(Fuel injection recirculation, FIR)은 NO<sub>x</sub> 저감에 효과적인 것으로 알려져 왔다 [2,3]. 그러나 10 ppm 이하의 NO<sub>x</sub> 저감을 위해서 배출 가스의 외부 재순환 이외에도 내부 재순환을 시키는 기법 등 다양한 시도가 필요할 수 있다.

화염 구조에 있어서 주요 연소 생성물인 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>의 첨가에 의한 열역학적 및 화학적 효과들에 대해

† Corresponding Author, obkwon@pknu.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.

많은 보고가 있었다[4-6]. FIR과 FGR을 하는 경우에는 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub> 등이 과다하게 첨가되는 경우 화염이 산화제 측으로부터 연료측으로 이동을 할 수가 있어 산화제 측에 화염대가 존재하는 경우와 비교하여 화염 특성이 상이한 거동을 보일 수도 있고 또한 NO<sub>x</sub> 거동 또한 상이한 특성을 보일 수가 있다. 그러나 이러한 특성들은 아주 극단적으로 과다하게 생성물들을 재순환 한 경우에 해당하며 실제 연소기에서는 나타날 가능성은 매우 희박하다[7]. 따라서 실제 연소기에 있어서 이러한 열화학적 효과들이 FIR과 FGR을 통해 10 ppm 이하의 NO<sub>x</sub> 저감을 달성할 수 있는 연소기 설계를 위해서는 FIR과 FGR 기법이 적용된 화염 구조와 NO<sub>x</sub> 거동을 좀 더 상세히 연구하는 것이 필요하다. 특히 실제 연소기들이 NO<sub>x</sub> 저감을 위해 공기 과잉비를 약 1.15 이상은 사용한다는 측면에서 이러한 특성을 고려한 FIR과 FGR에 대한 화염 특성과 NO<sub>x</sub> 거동을 상세히 파악하여 실제 연소기 설계에 활용하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 메탄-공기 대향류 예혼합 화염에서 FIR과 FGR 기법으로 주요 연소생성물인 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>들이 화염대에 도입이 되었을 때 화염 구조와 NO<sub>x</sub> 거동을 파악하는 연구가 수행되었다. 실제 산업용 버너에서 NO<sub>x</sub> 저감을 위해 공기 과잉비를 1.15 이상을 사용한다는 점을 고려하여 공기 과잉비가 1.15 인 조건의 화염을 대상으로 하였다. 주요생성물(H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>)의 재순환율에 따라 화염 구조와 NO<sub>x</sub> 거동에 미치는 영향이 논의하였고, 특히 첨가되는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 화학적 효과가 화염 구조와 NO 거동에 미치는 영향 또한 분석하였다.

## 2. 수치해석 방법

메탄/공기-공기 대향류 예혼합 화염에 주요 생성물인 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>가 FIR 혹은 FGR로 첨가되는 효과를 파악하기 위한 수치해석은 Oppdif 코드를 사용하여 수행되었다. 수치해석을 위한 해법과 지배 방정식은 타 연구[8,9]에 잘 나와 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 전체 신장율  $a_g$ 은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 U와 L은 노즐 출구 속도와 노즐간의 거리를 나타내고, 하첨자 U와 L는 상부 및 하부 노즐을 의미한다. 하부 노즐에서는 과잉공기비가 1.15인 당량 혼합비로 예혼합 혼합기가 공급되고 상부 노즐에서는 공기가 공급된다. 여기서 버너간 거리는 20 mm로 고정하였다. 복사열손실은 광학 박 모델[10]을 사

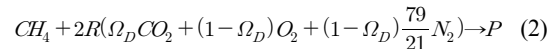
용하였다. 지배 방정식은 Chemkin 코드[11]와 Tranfit 코드[12]를 사용하여 해를 구하게 된다. 주위 압력은 1기압이고, 플러그 유동 경계 조건을 사용하였고, 적용 격자가 채택되어 격자점은 300-500 사이였다. 상세 화학반응 기구는 메탄화염에 가장 잘 맞추어진 GRI v-3.0을 사용하였다.

또한 FIR과 FGR로 첨가되는 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>는 화학반응에 참여하므로, 이러한 화학적 효과가 화염 구조와 NO<sub>x</sub> 거동에 미치는 효과를 분석하기 위해 가상의 화학종 XH<sub>2</sub>O와 XCO<sub>2</sub>를 도입하여 수치해석을 한번 씩 더 수행하였다. 이러한 가상의 화학종 XH<sub>2</sub>O와 XCO<sub>2</sub>는 열역학적 및 전달 물성치와 복사 열전달의 물성치가 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>와 동일하나 화학 반응에는 참여하지 않고, 삼체 반응(thirdbody reaction)에는 참여하도록 정의하였다. 따라서 두 계산 사이의 차이는 화학 반응 차이의 효과로 나타나게 된다.

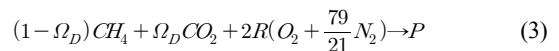
## 3. 결과 및 논의

### 3.1 화염 특성에 대한 FIR과 FGR의 효과

본 연구의 주요한 관심은 메탄-공기 대향류 예혼합 화염에서 FIR과 FGR에 따른 화염 특성 변화를 명확히 하는 것이다. 따라서 FIR과 FGR을 명확히 할 필요가 있다. 예를 들어 CO<sub>2</sub>에 의한 FGR인 경우 화학 반응 식은 다음과 같다.

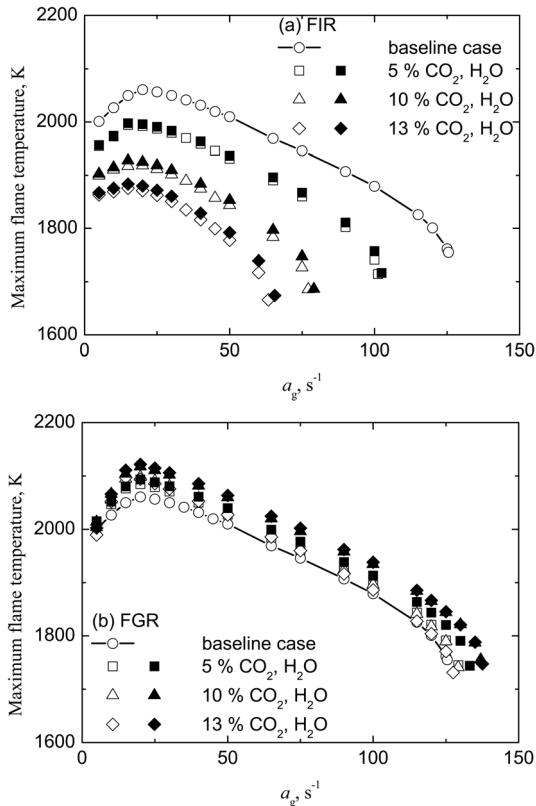


여기서 R은 공기연료비(여기서 1.15로 고정),  $\Omega_D$ 는 FGR 율(백분율로 표시하고, FIR인 경우는 FIR 율), 그리고 P는 생성물들을 의미한다. 마찬가지로 CO<sub>2</sub>에 의한 FIR인 경우 화학 반응 식은 다음과 같다.



따라서 (2)와 (3)식을 이용하여  $\Omega_D$ 에 따라 연료, 산소, 재순환되는 희석제 그리고 질소의 물분율의 경계 조건으로 사용하였다.

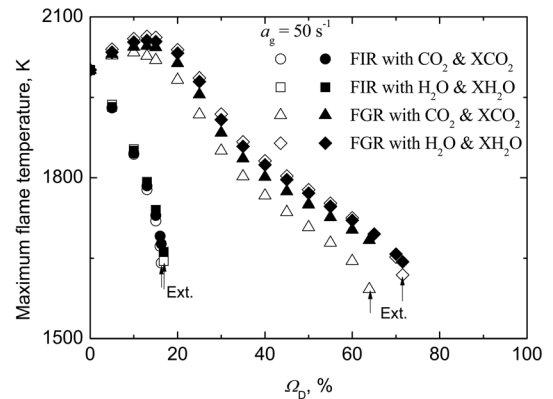
Fig. 1은 메탄/공기-공기 대향류 예혼합 화염에서 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 FIR과 FGR한 경우에 있어서  $\Omega_D = 5, 10, 13\%$ 인 경우  $a_g$ 에 따른 최대 화염온도( $T_{max}$ )를 나타내었다. Fig. 1에서 실선으로 나타낸 경우는 FIR이나 FGR을 하지 않은 당량 혼합비로 예혼합한 경우(이후로 기준 경우(baseline case)라 함)를 나타낸다. 또한 속이 빈 심볼과 찬 심볼은 각각 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O를 재순환한 경우를 나타낸다. 또한 오른쪽 마지막 심볼들은 화염 소화 조건들을 나타낸다.  $a_g$ 에 따라  $T_{max}$



**Fig. 1.** Maximum flame temperature versus strain rate in methane-air counterflow premixed flame at various  $\Omega_D$  for the cases of (a) FIR and (b) FGR.

는 C-곡선을 나타낸다. 이것은 대향류 확산화염에서  $a_g$ 에 따른 화염 응답 거동[13]과 유사하게 전환점 (turning point) 이전에는 화염 거동이 복사 열손실에 의해 영향을 받고 전환점 이후에는  $a_g$ 에 영향을 받기 때문이다. 또한 FIR인 경우는 기준 경우에 비해  $\Omega_D$ 가 증가할수록  $T_{max}$ 는 급격히 감소하지만 FGR인 경우는 오히려  $\Omega_D = 13\%$ 까지  $\Omega_D$ 가 증가할수록  $T_{max}$ 는 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 후자의 경우는 Fig. 2에서 다시 설명할 것이다. 또한 FIR인 경우  $\text{CO}_2$ 에 비해  $\text{H}_2\text{O}$ 를 재순환 경우가  $T_{max}$ 가 경미하게 높고, FGR인 경우는 두드러지게 높은 것을 알 수 있다. 일반적인 산업용 버너의 경우 노즐 분사 속도는 매우 크기 때문에 Fig. 1의 전환점 이후가 산업용 버너의 일반적인 화염 거동과 더 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 향후 주요한 관심은 전환점 이후의  $a_g$ 를 주목할 것이며  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 인 경우를 고정하여 화염 특성을 고려할 것이다.

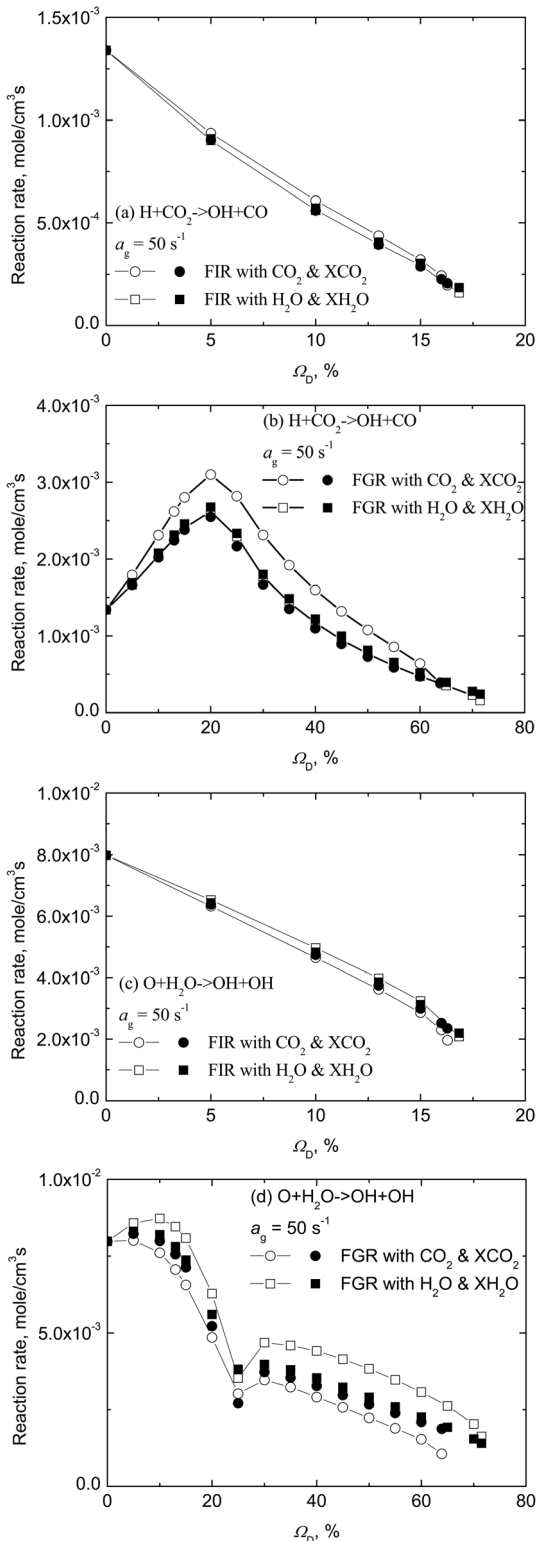
Fig. 2는  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에  $\Omega_D$ 에 따른  $T_{max}$ 를 나타낸다. 여기서 속이 빈 심볼들은  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 를 재순환 경우이고 속이 찬 심볼들은  $\text{XCO}_2$ 와  $\text{XH}_2\text{O}$ 를 재순환 경우이다. 따라서 속이 찬 심볼과 속이 빈 심볼



**Fig. 2.** Variation of maximum flame temperature with FIR and FGR ratios with  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  at  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ .

은 재순환 되는  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 가 화학 반응에 참여하여 나타나는 화학적 효과에 기인한다. 또한 Fig. 2의 오른쪽 마지막 심볼들은 화염 소화 조건들을 나타낸다. FIR인 경우는  $\Omega_D$  증가에 따라  $T_{max}$ 는 급격히 감소하고  $\text{CO}_2$ 에 비해  $\text{H}_2\text{O}$ 를 FIR한 경우가  $T_{max}$ 가 약간 높으나 거의 차이가 없다.  $\text{CO}_2$ 로 FGR인 경우를 살펴보면  $\Omega_D$ 가 10%까지 그리고  $\text{H}_2\text{O}$ 인 경우는 15%까지  $\Omega_D$ 를 증가시키면 따라  $T_{max}$ 가 증가하고  $\Omega_D$ 를 더 증가시키면  $T_{max}$ 가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 일반적인 산업용 버너의 운전 조건을 모사하기 위해 공기연료비를 1.15로 하였기 때문에 FGR의 경우  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 의 몰분율이 증가함에 따라 산화제 측에 공급되는 공기의 몰분율이 감소하기 때문에 공기 과잉으로부터 전체 당량비가 1이 될 때까지는 화염 온도가 증가하기 때문이다.

한편,  $\text{CO}_2$ 에 비해  $\text{H}_2\text{O}$ 을 FGR한 경우  $T_{max}$ 는 눈에 띄게 높다는 것을 알 수 있다. 이것은  $\text{CO}_2$ 가  $\text{H}_2\text{O}$ 에 비해 열용량이 커서 나타나는 물리적 현상이 일차적 원인이 된다. 그러나  $\text{XCO}_2$ 와  $\text{XH}_2\text{O}$ 을 FIR 및 FGR한 경우(속이 찬 심볼들)를 비교하면 두 경우의  $T_{max}$ 는  $\text{XH}_2\text{O}$ 인 경우가 약간 더 클 뿐 크게 차이가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 따라서  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 의 열용량의 차이에 기인한  $T_{max}$ 의 차이는 크게 영향을 받지 않으며 오히려 다른 원인이 화염 특성을 크게 지배하고 있다는 것을 알 수 있다. 이를 명확히 하기 위해,  $T_{max}$  거동에 대한 첨가되는  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 의 화학적 효과를 Fig. 2에 비교하였다.  $\text{CO}_2$ 와  $\text{XCO}_2$ 의 FGR인 경우를 비교하면  $\text{CO}_2$ 인 경우가  $\text{XCO}_2$ 인 경우에 비해  $T_{max}$ 가 현저하게 작다. 즉,  $\text{CO}_2$ 를 FGR한 경우  $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$  반응이 활성화되어 H에 비해 전체 반응물의 지시자인  $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{O}$  반응과 H-원자에 대해 서로 경쟁을 하여 전체 반응물을 감소시키기 때문에 나타나는 현상[14]이며 이는 뒤에 다시 설명한다. 또한  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{XH}_2\text{O}$ 를



**Fig. 3.** Variation of reaction rates of  $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$  and  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$  with FIR and FRG ratios at  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ ; (a,c) FIR and (b,d) FGR.

FGR한 경우를 비교하면  $\text{H}_2\text{O}$ 인 경우가 약간  $T_{\max}$ 가 높게 나타난다. 이것은  $\text{H}_2\text{O}$ 를 첨가하면  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$  반응을 통하여 OH 농도를 증가시키고[15], OH는 열발생율과 깊은 관련을 갖고 있기 때문에[16] 이것이 전체 반응율을 증가시키기 때문이다.

이러한 기존 연구 결과들에 근거[14-16]한 결과들의 명확함을 위해  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 에서  $\Omega_D$ 에 따른  $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$ 와  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$ 의 반응율을 FIR과 FGR인 경우들에 대해 Fig. 3에 비교하였다. Fig. 3에서 오른쪽 마지막 심볼들은 화염소화 조건들을 나타낸다. 먼저 FIR인 경우의  $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$  반응율은  $\Omega_D$ 가 증가함에 따라 단조 감소하고,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ 를 FIR한 경우들 사이에 거의 차이가 없는데 이것은 Fig. 2의 결과와 유사하다. 즉, FIR한 경우는  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{CO}_2$  첨가 사이의 차이가 크지 않고  $\text{CO}_2$  첨가의 화학적 효과도 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나 FGR인 경우의  $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$  반응율은  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ 인 경우에 비해  $\text{CO}_2$  첨가의 경우가 반응율이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 첨가되는  $\text{CO}_2$ 로 인한 화학적 효과로 Fig. 2에서  $\text{CO}_2$  첨가의 경우가  $T_{\max}$ 가 가장 작았던 원인이 되고 있음을 알 수 있다.

FIR인 경우의  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$ 의 반응율을 살펴보면 마찬가지로  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ 를 첨가한 경우는 거의 차이가 나지 않고,  $\text{H}_2\text{O}$ 를 첨가한 경우가 약간 크고  $\text{CO}_2$ 를 첨가한 경우는 약간 작지만 큰 차이는 나지 않는다. 즉, FIR인 경우 Fig. 2와 3(a)와 (c)로부터 희석제들의 화학적 효과는 크게 작용하지 않고  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$  첨가에 거의 차이를 보이지 않으나, Fig. 2에 보이는 바와 같이  $T_{\max}$ 는  $\Omega_D$ 의 증가에 따라 매우 민감하게 감소한다는 것을 알 수 있다. FGR의  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$ 의 반응율은  $\text{XH}_2\text{O}$ 와  $\text{XCO}_2$ 의 경우  $\text{XH}_2\text{O}$ 가 약간 크나 거의 차이를 나타내지 않는 반면에  $\text{CO}_2$  첨가의 경우는 작고  $\text{H}_2\text{O}$  첨가가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 즉, FGR로  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$  첨가되는 경우 첨가되는 희석제의 화학적 효과가  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$ 의 반응율에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 특히  $\text{H}_2\text{O}$  첨가하는 경우  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$  반응에서 OH 라디칼을 왕성하게 생성하여 이것이 열발생율을 증가시켜[16] Fig. 2에서와 같이  $T_{\max}$ 의 증가에 기여한다는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 3(d)에서  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$ 의 반응율이  $\Omega_D$ 가 15-25%까지 급격히 감소하다가 30%에서 급격히 증가한 후  $\Omega_D$ 가 그 이상으로 증가하면 완만히 감소하는 것을 알 수 있다. 전체 당량비가 1.15인 상황에서 희석제의 산화제측 첨가에 의해 당량혼합비로 접근하면서 15% 이하까지는 증가하다가 희석제 첨가 효과가 15-25%에서 나타나는 것으로 이해된다. 그러나 30%에서 갑자기 점프가 발생

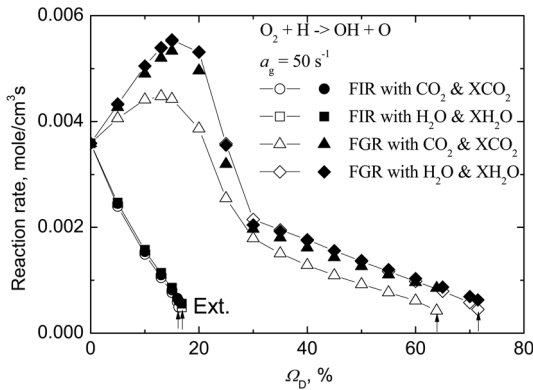


Fig. 4. Variation of reaction rates of  $O_2 + H \rightarrow OH + O$  with FIR and FRG ratios at  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ .

하는 현상은 현재의 상황에서는 명확히 이해되지 않으며 향후 좀더 연구가 필요한 상황이다. 그러나 이러한 효과들은 전체 반응율의 지시자 반응 단계인  $O_2 + H \rightarrow OH + O$ 의 반응율에 영향을 미치게 되며 이를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이  $\Omega_D$ 가 30% 근처에서 변곡점이 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉,  $O + H_2O \rightarrow OH + OH$ 의 반응율이  $\Omega_D$ 가 30%에서 급격한 점프가 나타나는 현상에 의해 Fig. 3(d)에서 전체 반응율의 지시자인  $O_2 + H \rightarrow OH + O$ 의 반응율이 30% 전후에서 변화 기울기가 급격한 상태로부터 완만한 상태로 바뀌는 것을 볼 수 있고 Fig. 2의  $T_{max}$  역시 유사한 경향을 나타내게 된 것임을 알 수 있다.

### 3.2. NO 배출에 있어서 FIR과 FGR 효과

앞 절에서 FIR과 FGR에 대한 화염 특성으로부터 FGR이 훨씬 화염 온도를 줄이는 효과가 있다는 것을 보였다. 이러한 효과들은  $NO_x$  배출에 직접적으로 영향을 미치게 된다. Fig. 5는 몇가지  $CO_2$ 와  $H_2O$ 의 FIR과 FGR 율에 대해서 전체 신장율에 따른 NO 배출 지수를 나타낸다. Fig. 6에서 오른쪽 마지막 심불은 화염 소화 조건을 나타낸다. NO 배출 지수  $EI_{NO}$ 는 다음과 같이 정의하였다[17].

$$EI_{NO} = \frac{\int_0^L W_{NO} \dot{w}_{NO} dx}{-\int_0^L W_{CH_4} \dot{w}_{CH_4} dx} \quad (4)$$

여기서  $W$ 는 분자량 그리고  $\dot{w}_i$ 는  $i$ -화합종의 생성율을 나타낸다. Fig. 5에 보인 바와 같이 3.1 절에서 나타난 경향과 유사하게  $\Omega_D$ 가 13%까지는 FIR인 경우는 기준 경우에 비해  $CO_2$ 와  $H_2O$  첨가에 따라  $EI_{NO}$ 는 유사한 값들을 가지며  $\Omega_D$  증가에 따라 급격히

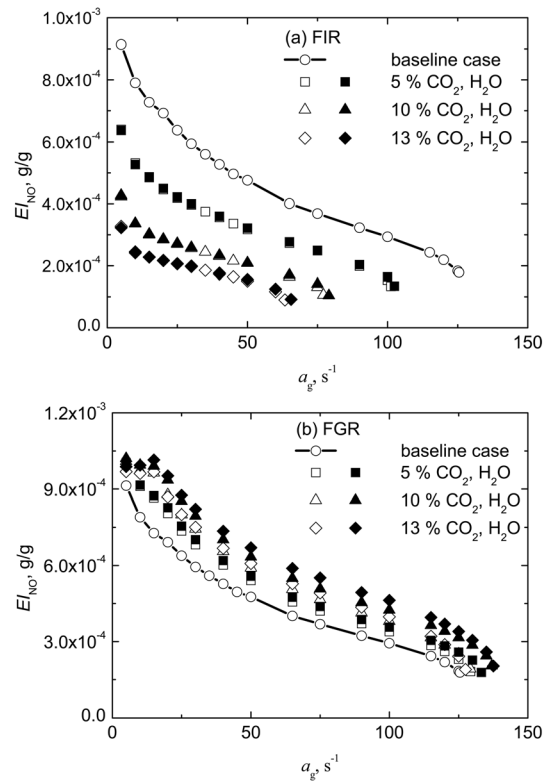


Fig. 5. NO Emission index versus global strain rate for various ratios of FIR and FGR with  $CO_2$  and  $H_2O$ .

감소한다. 또한  $CO_2$ 와  $H_2O$  첨가에 의한 화학적 효과도 매우 작으나, 전체 신장율에 따라 단조 감소한다. FGR인 경우는  $\Omega_D$ 가 13%까지는  $\Omega_D$  증가에 따라 NO 배출 지수가 오히려 증가하며 이것은 Fig. 2의 경향과 같은 것으로 전체 당량비가 1.15로 산화제 측을 희석제하는 경우  $\Omega_D$ 가 13%는 전체 당량비가 1로 접근함에 따라 나타나는 현상이다. 또한,  $CO_2$  첨가의 경우에  $CO_2 + H \rightarrow CO + OH$  반응을 증가로 전체 반응의 지시자인  $O_2 + H \rightarrow OH + O$  반응을 감소시키는 화학적 효과로  $CO_2$  첨가의 경우가  $XCO_2$  첨가에 비해  $EI_{NO}$ 가 낮다는 것을 알 수 있다. 그러나  $H_2O$  첨가의 경우  $XH_2O$  첨가에 비해  $EI_{NO}$ 가 낮는데 이것은 Fig. 2의  $T_{max}$ 의 경향과는 반대에 해당하며 이것은 열적 NO(thermal NO)의 온도에 대한 경향을 따르는 것이 아님을 의미하고 결국 페니모어 NO에 대한 기여에 의한 것으로 이해되며 상세한 것은 뒤에서 논의하겠다.

Fig. 6은  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에  $CO_2$ 와  $H_2O$ 를 FIR과 FGR로 한 경우  $\Omega_D$ 에 따른 NO 배출 지수를 나타낸다. 마찬가지로 Fig. 6에서 오른쪽 마지막 심불은 화염 소화 조건을 나타낸다.  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에 FIR과 FGR로  $\Omega_D$ 에 따른  $EI_{NO}$  변화를 살펴보면 FIR인 경

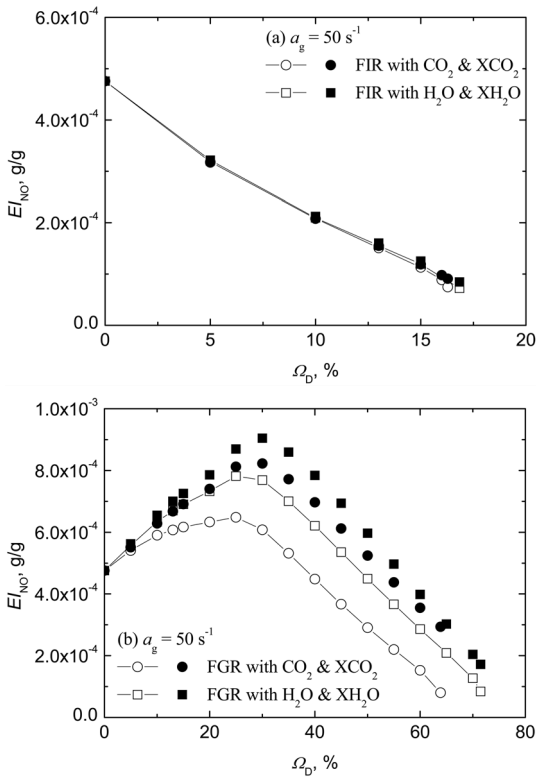


Fig. 6. NO Emission index versus  $\Omega_D$  with FIR and FGR with  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  at  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ .

우 (Fig. 6(a))  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ 를 FIR한 경우들 사이에 거의 차이가 없는데 이것은 Fig. 2의  $T_{\max}$ 에 대한 경향과 같다. 또한  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{CO}_2$  첨가에 따른 화학적 효과도 없고 둘 사이의 열용량의 차이에 의한 효과도 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 FGR인 경우 (Fig. 6(b))  $\text{H}_2\text{O}$ 에 비해  $\text{CO}_2$  첨가의 경우가 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 마찬가지로  $\text{CO}_2$  첨가의 화학적 효과가  $EI_{NO}$ 를 낮추는 것은 이미 상술된 바와 같이 이해가 되나  $\text{H}_2\text{O}$  첨가의 화학적 효과가  $EI_{NO}$ 를 낮추는 것은 FIR인 경우와 마찬가지로 Fig. 2와는 반대되는 경향이므로 열적 NO와 페니모어 NO에 대한 상세한 분석이 요구된다.

열적 NO의 기구에 의한 NO 생성은 아래와 같은 반응들에 관련되고 이중 (R178)은 열적 NO 생성에 대한 지시자(indicator)이고, 페니모어 NO 생성에 대한 지시자는  $\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}$ 으로 알려져 있다[14].

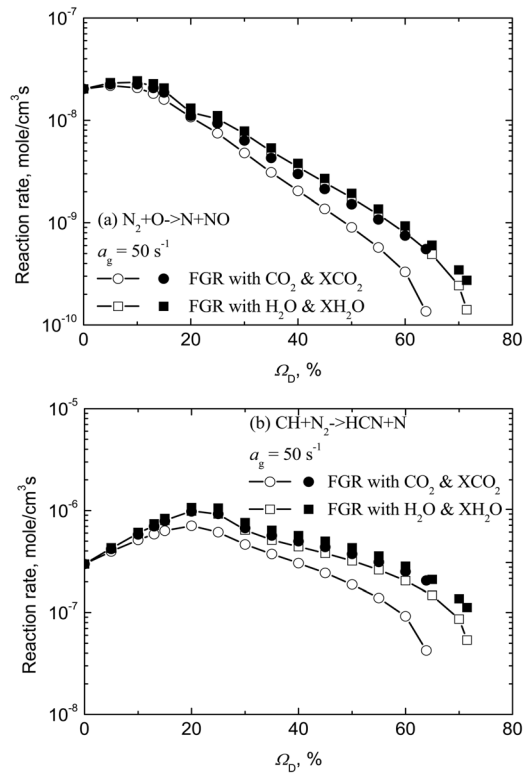
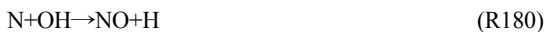


Fig. 7. Reaction rate versus  $\Omega_D$  with FIR and FGR with  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  at  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ ; indicator reaction steps of (a) thermal NO and (b) Fenimore NO.

따라서 Fig. 7에  $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 을 FGR로 한 경우  $\Omega_D$ 에 따른 열적 NO와 페니모어 NO의 지시자 반응의 반응율을 나타내었다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이  $\text{H}_2\text{O}$ 를 FGR한 경우는  $\text{XH}_2\text{O}$ 를 FGR한 경우와 비교하여 열적 NO 지시자인 (R178)의 반응율이 크게 차이가 없는 점으로부터 첨가된  $\text{H}_2\text{O}$ 의 화학적 효과에 의해 열적 NO를 크게 변화시키지 못한다. 또한  $\text{XCO}_2$ 가  $\text{XH}_2\text{O}$ 를 FGR한 경우에 비해 (R178) 반응율이 약간 작게 나타나는 것으로부터  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{CO}_2$ 의 열용량의 차이에 의해  $\text{CO}_2$  첨가가 열적 NO를 더 줄이는 효과를 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러나  $\text{CO}_2$ 를 FGR한 경우 열적 NO가 급격히 줄어드는 것으로부터 첨가된  $\text{CO}_2$ 의 화학적 효과가 열적 NO 저감에 중대한 역할을 하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)을 살펴보면  $\text{XH}_2\text{O}$ 와  $\text{XCO}_2$ 를 FGR한 경우는 페니모어 NO 지시자 반응율이 거의 차이가 나지 않는 점으로부터 열용량 차이에 의한 페니모어 NO의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 그러나  $\text{CO}_2$ 와  $\text{XCO}_2$ 를 FGR한 경우를 살펴보면  $\text{CO}_2$ 인 경우가 훨씬 작은 것으로부터 첨가되는  $\text{CO}_2$ 의 화학적 효과가 페니모어 NO를 상당히 저감하는 효과를 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러나  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{XH}_2\text{O}$ 를 FGR

한 경우를 비교하면 H<sub>2</sub>O를 FGR한 경우가  $\Omega_D$ 가 20% 이상에서  $\Omega_D$  증가에 따라 페니모어 NO 저감자 반응율이 점점 더 작아지는 것을 볼 수 있어 첨가되는 H<sub>2</sub>O의 화학적 효과 역시도 페니모어 NO 저감에 기여를 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 그 기여는 CO<sub>2</sub> 첨가의 경우가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

FIR과 FGR로 연소 주성생물인 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O를 재순환하는 메탄/공기-공기 대향류 예혼합화염에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전체신장율에 따라 최대화염온도는 전형적인 C-곡선을 나타낸다. 전체 신장율이 50 s<sup>-1</sup>로 고정된 경우 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O을 FIR한 경우는 최대화염온도 차이가 없고 각각의 화학적 효과도 크지 않으나 FIR율이 증가함에 따라 급격히 최대화염온도는 작아진다. 그러나 FGR한 경우는 FGR 율이 15%까지는 과잉공기로 인해 산화제측의 산소 농도가 이론당량비로 작아짐에 따라 최대화염온도가 증가한 후 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 첨가되는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 화학적 효과에 의해 CO<sub>2</sub>는 최대화염온도를 감소시키지만 H<sub>2</sub>O는 증가시킨다.

2) 전체 신장율이 50 s<sup>-1</sup>로 고정된 경우 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O을 FIR한 경우는 NO 배출지수는 둘 사이에 거의 차이가 없고 FIR 율을 증가시키면 따라 NO 배출지수는 급격히 감소한다. CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O을 FGR한 경우에는 CO<sub>2</sub>가 훨씬 효과적으로 NO 배출지수를 감소시키며 두 경우 모두 FGR율이 30%까지는 NO 배출 지수가 증가한 후 그 이상으로 FGR율을 증가시키면 감소하게 된다.

3) CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O을 FGR한 경우에 있어서 열적 NO는 FGR 율이 10%까지 증가하다가 그 이후 감소하고, 화학적 효과의 열적 NO 저감에 대한 기여는 H<sub>2</sub>O는 거의 없고 CO<sub>2</sub>는 매우 크다. 페니모어 NO는 FGR 율이 20%까지는 증가하다가 그 이상으로 증가하면 감소한다. CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O을 FGR한 경우에 CO<sub>2</sub> 첨가가 훨씬 효과적 페니모어 NO를 감소시키지만 H<sub>2</sub>O의 화학적 효과 역시 페니모어 NO를 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 2015년 한국에너지기술평가원 에너지 기술개발과제 (20152010103050)에 의해 지원을 받았고 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] S. C. Li, F. A. Williams. NO<sub>x</sub> formation in two-stage methane-air flames. *Combust Flame* 118 (1999) pp.399-414.
- [2] J. Park, K. T. Kim, J. S. Park, J. S. Kim, S. C. Kim, T. K. Kim. A Study on H<sub>2</sub>-Air counterflow flames in highly preheated air diluted with CO<sub>2</sub>. *Energy & Fuel* 19 (2005) pp.2254-2260.
- [3] J. Park, S. I. Keel, J. H. Yun, T. K. Kim. Effects of addition of electrolysis products in methane-air diffusion flames. *Int. J. Hydrogen Energy* 32 (2007) pp.4059-4070.
- [4] J. Park, J. S. Kim, J. O. Chung, J. H. Yun, S. I. Keel. Chemical effects on added CO<sub>2</sub> on the extinction characteristics of H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> syngas diffusion flames. *Int. J. Hydrogen Energy* 34 (2009) pp.8756-8762.
- [5] T. M. Vu, J. Park, O. B. Kwon, Bae DS, J. H. Yun, S. I. Keel. Effects of Diluents on Cellular Instabilities in Outwardly Propagating Spherical Syngas-Air Premixed Flames. *Int. J. Hydrogen Energy* 35 (2010) pp.3868-3880.
- [6] S. W. Jung, J. Park, O. B. Kwon, Y. J. Kim, S. I. Keel, J. H. Yun, I. G. Lim. Effects of CO<sub>2</sub> addition on flame extinction in interacting H<sub>2</sub>-air and CO-air premixed flames. *Fuel* 136 (2014) pp.69-78.
- [7] J. Park, D. J. Hwang, K. T. Kim, S. B. Lee, S. I. Keel. Evaluation of chemical effects of added CO<sub>2</sub> according to flame location. *Int. J. Energy Res.* 28 (2004) pp.551-565.
- [8] R. J. Kee, J. A. Miller, G. H. Evans, G. Dixon-Lewis. A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flame, *Proc Combust Inst* 22 (1988), pp.1479 -1494.
- [9] 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).
- [10] 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 (1997), p.315.
- [11] R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, Chemkin II: a fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics, Sandia National Laboratories Report. SAND 89-8009B (1989).
- [12] R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin, J. A. Miller, A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multi-com-

- ponent transport. Sandia National Laboratories Report. SAND86-8246 (1994).
- [13] Y.H. Chung, D.G. Park, J.H. Yun, J. Park, O.B. Kwon, S.I. Keel. Role of outer edge flame on flame extinction in nitrogen-diluted nonpremixed counterflow flames with finite burner diameters. *Fuel*, 205 (2013) 540-550.
- [14] C.K. Westbrook, F.L. Dryer. Chemical kinetics modeling of hydrocarbon combustion. *Prog Energy Combust Sci*, 10 (1984), p.1
- [15] S.G. Kim, J. Park, and S.I. Keel. Thermal and chemical contribution of added H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> to major flame structures and NO emission characteristics in H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> laminar diffusion flame. *Int. J. Energy Res.* 26 (2002) 1073-1086.
- [16] W.J. Lee, J. Park, O.B. Kwon, J.H. Yun, S.I. Keel (2015). Heat-loss-induced Self-excitation in Laminar Lifted Coflow-jet Flames. *Proc. Combust. Inst.* 35 (2015) 1007-1014.
- [17] M. Nishioka, S. Nakagawa, T. Takeno. NO emission characteristics of methane-air double flame. *Combust Flame*, 98 (1994), 127-138.