

산화제류 및 연료류 희석에 의한 화염특성변화에 대한 연구

한지웅[†] · 금성민^{*} · 이창언^{**}

(2004년 7월 31일 접수, 2004년 11월 1일 심사완료)

Investigation on Flame Characteristics' Variation by Flue Gas Recirculation and Fuel Injection Recirculation

Ji-Woong Han, Sung-Min Kum and Chang-Eon Lee

Key Words : Flue Gas Recirculation(산화제류 희석), Fuel Injection Recirculation(연료류 희석), Quantitative Reaction Path Diagram(반응경로도), Da No.(Damköhler 수), Oxygen Enriched Flame(산소부화화염)

Abstract

Investigation on Flue Gas Recirculation(FGR) flame and Fuel Injection Recirculation(FIR) flame was performed with numerical method. Quantitative Reaction Path Diagram(QRPD) is utilized to compare the different chemistry effects between FGR flame and FIR flame. In order to compare flamelets in various oxygen-enrichment conditions reasonably, the adiabatic flame temperature and Damköhler number were held fixed by modulating the amount of diluents to fuel and oxidizer stream and by varying global strain rate of flame respectively. Basic flame structures were compared and characteristics of CH₄ decomposition and NO formation were analyzed based on QRPD analysis between FGR flame and FIR flame.

기호설명	
Da No.	Damköhler 수
χ_{st}	스칼라 소산율
Z_{st}	양론혼합비
t_{ch}	특성화학반응시간
EI	배출지수
Ω	산소부화율

1. 서론

지구 온난화에 크게 기여하는 CO₂ 배출량을 저

감하기 위한 목적으로 고효율 연소기술중 하나인 산소부화 연소법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 산소부화 연소법은 고온로 등의 극히 한정된 산업분야에서만 이용되고 있는 실정이며, 이를 더욱 보편화하기 위해서는 고온 화염에 의한 내화제 손상 및 미량의 N₂ 침투에 의한 NOx 과다 생성, 그리고 안정성 등에 대한 해결책이 마련되어야 한다.⁽⁴⁾ 이중 고온 화염에 의한 문제점들은 배기가스를 재순환하여 화염온도를 적절히 제어함으로써 가능할 것으로 예상된다. 이러한 희석제를 첨가한 화염을 대상으로 한 기존 연구들은 주로 통상의 메탄-공기 화염을 대상으로 진행되어왔다.

Feese 등⁽⁵⁾은 일반 메탄-공기 분류화염을 대상으로 각각 연료류 및 공기류에 첨가된 희석제가 NO 배출 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였으며 희석제의 첨가방향이 화학반응 및 분자 이송에 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 또한 Hopkins 등⁽⁶⁾은 소형 보일러 실험을 통해 배기가스를 연료류로 재

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소
 처분종합성능평가연구실
 E-mail : jwhan@kaeri.re.kr
 TEL : (042)868-4853 FAX : (042)868-2035

* 회원, 한라대학교 기계자동차공학부

** 회원, 인하대학교 기계항공공학부

순환시키는 방법이 공기류로 재순환시키는 방법에 비해 단위질량의 배기가스당 NO 배출량 저감 효과가 더 우수하다고 보고하였다. Du 등^(7,8)은 동일 온도의 다양한 CH₄-O₂-N₂ 화염을 대상으로 연료류 및 산화제류에 첨가되는 N₂의 양을 적절히 조절하여 혼합분율 변화에 따른 화염특성 변화 및 Soot 생성 특성 등에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 전술한 바와 같이 기존 연구들은 대부분 메탄-공기 화염을 대상으로 수행되었으며 산소부화율이 증가된 고온 화염을 대상으로 회석 방법에 따른 화염특성 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 산소부화화염을 대상으로 한 체계적인 연구를 수행하기 위한 기초단계로서, 우선 산소부화율 및 회석방법을 다양하게 변화시킨 화염들중에서 비교대상을 선정하는 기준이 되는 인자를 소개하고자 한다. 또한, 연소속도 비교를 통해 산소부화화염에 적합하도록 수정 제안된 수정 GRI 3.0 반응기구⁽⁹⁾를 이용하여 회석방법에 따른 화염 특성 변화를 관찰하고자 한다. 또한 반응경로도를 이용하여 회석제 첨가 방법에 따른 CH₄ 산화과정 및 NO 생성특성 변화를 비교, 검토하고자 한다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 노즐간의 거리가 2cm 대향류 확산 화염을 대상으로 하였으며, 연료 및 산화제의 유속은 동일하게 하였다. 계산에 사용된 지배방정식은 원통좌표계의 상미분 방정식 형태로 표현되며, 그에 대한 상세는 참고문헌⁽¹⁰⁾을 참조하기 바란다. 복사열손실에 대한 계산은 열손실에 주로 기여를 하는 것으로 알려진 CO₂, H₂O, CO, CH₄의 4가지 화학종에 대해 계산하였다. 단위 체적당 복사열손실은 다음 식에 의해 계산하였다.⁽¹¹⁾

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (1)$$

$$K_p = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} + P_{CH_4} K_{CH_4} \quad (2)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수를, T 와 T_∞ 는 각각 국부 온도와 주위 온도

를 나타내며, K_p 는 혼합가스의 플랭크 평균 흡수계수(이하 흡수계수)를 나타낸다. 또한 P_k 와 K_k 는 화학종 k 의 분압과 각 가스의 흡수계수를 나타내며, 흡수계수는 다음의 근사식으로 계산하였다.

$$K_k = \sum_{j=0}^5 A_{kj} T^j \quad (3)$$

$$k = CO_2, CO, H_2O, CH_4$$

여기서 A_{kj} 는 온도에 따른 각 화학종의 다항식 계수로써 Ju⁽¹¹⁾에 의해 사용된 값을 이용하였다.

2.2 계산 방법

본 연구에서는 OPPDIF Code를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II⁽¹²⁾와 Transport Package⁽¹³⁾를 이용하였다. 반응기구로는 최근 산소부화화염을 정확하게 예측할 수 있도록 수정, 보완된 수정 GRI 3.0 반응기구를 이용하였다. 또한 산소부화율은 다음과 같이 산화제 중 포함된 산소와 회석제의 물분율을 기준으로 정의⁽⁴⁾하였다.

$$\Omega = \frac{X_{O_2}}{X_{O_2} + X_D} \quad (4)$$

3. 계산결과 및 검토

본 연구에서는 산화제류 회석 화염 및 연료류 회석 화염의 체계적인 비교를 위하여 다음과 같은 절차에 의해 각 화염의 조성을 결정하였다. 우선 산화제류 회석 화염은 순수 메탄 및 질소로 회석된 산소를 각각 연료 및 산화제로 이용하는 화염으로, 그 조성은 산소부화율 정의식을 기준으로 결정하였다. 연료류 회석 화염의 경우 질소로 회석된 메탄 및 순수 산소를 각각 연료와 산화제로 이용하는 화염으로, 산화제류 회석 화염과 동일한 단일 화염온도를 갖도록 조성을 결정하였다. 또한 이러한 화염의 이름은 Feese 등⁽⁶⁾의 명명법을 기초로 산화제류 회석 화염 및 연료류 회석 화염을 각각 FGR(Flue Gas Recirculation) 화염 및 FIR(Fuel Injection Recirculation) 화염으로 정하였다. 한편, FIR 화염의 산소부화율은 동일한 단일화염온도를 갖는 FGR 화염의 산소부화율로 표기하였으며, 상세한 조성 및 단일화염온도는 Table 1과 같다.

Fig. 1은 산화제류 및 연료류에 첨가되는 희석제 증가에 따른 화학반응시간 및 소염신장율의 변화를 도시한 것이다. 그림 중 실선은 FGR 화염, 점선은 FIR 화염을 의미하며, X 축은 FGR 화염을 기준으로 한 산소부화율을 나타낸다. Y 축의 소염신장율 a_{ext} 은 연속계산으로부터 산출할 수 있으며, 특성화학반응시간(t_{ch})은 다음과 같은 Peters의 제안식^(14, 15)을 기초로 계산될 수 있다.

$$t_{ch} = \frac{Z_{st}^2(1 - Z_{st})^2}{\chi_{st}} \quad (5)$$

여기서, Z_{st} 는 Bilger⁽¹⁶⁾의 제안에 따라 정의된 식을 이용하였으며 산소부화율 및 희석방법에 따라 각각 변화한다.

기존 연구들⁽⁷⁾에서는 산소부화율에 따른 화염구조 변화를 비교할 경우 특성유동시간을 의미하는

신장을 혹은 스칼라 소산율이 동일한 화염들을 선정하여 비교하였다. 그러나 Fig. 1에 도시한 바와 같이 산소부화 화염의 경우 산소부화율 및 희석방법에 따라 특성화학반응시간 및 특성유동시간도 각각 다르게 변화한다. 따라서 소염 부근 신장을의 메탄-공기화염($\Omega=0.21$) 및 그와 동일한 신장을의 산소부화화염($\Omega=0.80$)을 서로 비교할 경우 두 화염에 작용하는 신장의의 기여도는 매우 다르며, 두 화염의 특성화학반응시간에도 큰 차이가 있다. 즉 특성유동시간만을 이용하여 특성화학반응시간이 각기 다른 화염을 서로 비교하는 데에는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 특성유동시간을 의미하는 스칼라 소산율(χ_{st}) 대신, 특성화학반응시간에 대한 특성유동시간의 비로 표현된 Da 수를 도입하여 동일 Da 수를 갖는 화염을 비교하였으며 그 정의는 다음과 같다.

$$Da = \frac{1}{t_{ch}\chi_{st}} \quad (6)$$

Table 1 Composition of FGR and FIR flame

Ω (Temp.)	FGR			FIR		
	FUEL		OXIDIZER	FUEL		OXIDIZER
	CH ₄	O ₂	N ₂	CH ₄	N ₂	O ₂
0.21 (2226K)	1.00	0.21	0.79	0.12	0.88	1.00
0.30 (2525K)	1.00	0.30	0.70	0.18	0.82	1.00
0.50 (2812K)	1.00	0.50	0.50	0.33	0.67	1.00
0.80 (2956K)	1.00	0.80	0.20	0.67	0.33	1.00
1.00 (3052K)	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

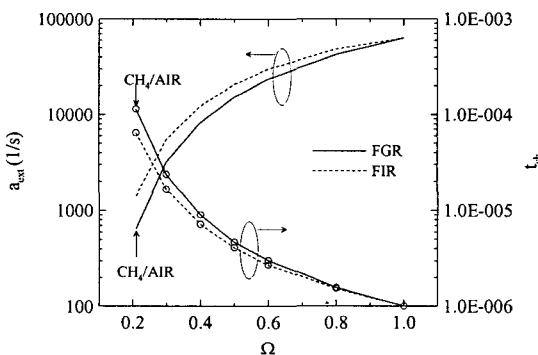


Fig. 1 Variation of extinction global strain rate and characteristic chemical time scale in oxygen-enriched flame

Da 수를 동일하게 할 경우 특성화학반응시간에 대한 특성유동시간의 비를 항상 일정하게 유지할 수 있다. 따라서, 산소부화율 및 희석방법이 각기 다른 화염을 대상으로 화염구조 및 기타 특성을 비교하기 위한 기준 인자로서는 Da 수가 신장에 비해 보다 적합하다고 사료된다.

Fig. 2는 FGR 및 FIR 화염을 대상으로 산소부화율에 따른 가연 범위를 Da 수로 표시한 것이다. 그림 중 상단의 곡선은 복사 열손실 효과에 의한 저신장에서 소염 Da 수를 의미하며, 하단의 곡선은 신장 증가에 의한 고신장에서 소염 Da

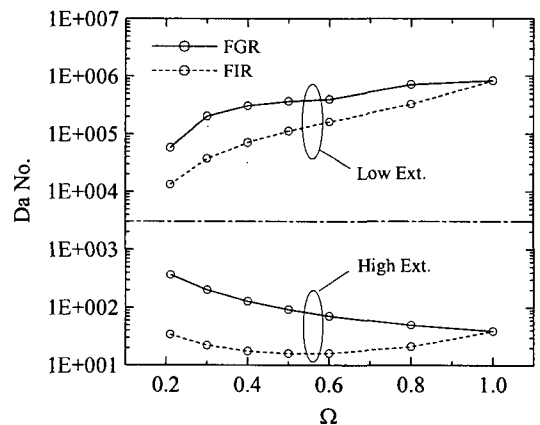


Fig. 2 Damköhler number of oxygen enriched flame at high and low extinction limit

수를 의미한다. 가연 Da 수 범위는 특성화학반응 시간과 특성유동시간의 상호경쟁에 의해 결정된다. 즉, 저신장율에서의 소염 Da 수의 경우 회석방법에 관계없이 산소부화율의 증가에 따른 특성유동시간의 증가율이 특성화학반응시간의 감소율에 비해 모두 미소하기 때문에 소염 Da 수가 증가한다. 그렇지만, 고신장율에서의 소염 Da 수의 경우 회석 방법에 따라 다른 결과를 나타낸다. FGR 화염은 산소부화율 전 영역에서 특성유동시간의 증가율이 지배적인 역할을 하기 때문에 소염 Da 수는 단순 감소한다. 그렇지만, FIR 화염에서는 저부화율에서는 FGR 화염과 마찬가지로 단순 감소하지만, 고부화율로 갈수록 특성 화학반응시간과 특성유동시간의 상대적인 기여도가 변환되어 소염 Da 수가 증가하는 것으로 사료된다. 결과적으로 산소부화율이 증가함에 따라 가연 Da 수 범위도 증가한다. 본 연구에서는 일점쇄선으로 표시된 Da=3000 인 화염들을 기준으로 산소부화율 및 회석방법에 따른 화염구조 차이를 비교하였다.

Fig. 3은 회석방법 변화에 따른 화염구조 변화를 비교하기 위하여 각각 회석제가 전혀 첨가되지 않은 $\Omega=1.00$ 인 메탄순산소화염 및 $\Omega=0.21$ 인 FGR 화염과 FIR 화염의 구조를 혼합분율에 대해 도시하였다. Fig. 3(a)의 $\Omega=1.00$ 인 경우, Fig. 1에서 확인한 바와 같이 특성화학반응시간이 매우 짧기 때문에 FGR 화염 및 FIR 화염과 동일한 Da 수를 유지하기 위하여 특성유동시간도 매우 짧은 조건이 된다. 이로 인하여 CH_4 및 O_2 의 농도구배도 급격해져서 반응대로 유입되는 연료와 산화제의 양이 증가한다. 또한 CO/CO_2 의 최대농도 비율은 2.14로서 CO 생성량이 매우 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 3(b)의 FGR 화염은 1800K 이상의 고온 영역대에 CO , CO_2 및 H_2O 의 최고점이 존재하며, 양론 혼합분율($Z_{st}=0.055$) 근처에서 연료측으로 O_2 누설이 일어나고 있다. 또한 CO/CO_2 의 최대농도 비율은 약 0.67 정도이다. Fig. 3 (c)의 FIR 화염은 고온 영역내에 다량의 연료가 존재하는 FGR 화염과는 다르게 고온 영역내에 연료가 연소하기에 충분한 산화제가 존재한다. 또한 양론혼합분율($Z_{st}=0.78$) 근처에서 FGR 화염과 마찬가지로 연료측으로 O_2 누설이 발생하고 있으며 산화제측으로의 CH_4 의 누설은 발생하고 있지 않다. 이것으로부터 회석방법의 차이에 관계없이 O_2 누설은 공통된 현상임을 알 수 있다. 또한 CO/CO_2 의 최대농도 비율은 약 0.27 정도로 FGR 화염에 비해 작으며, 이로부터 FGR 화염에 비해 FIR 화염에서 보다 완전연소가 용이한 환경이 조성되는 것을 알 수 있다. 또한 회석 방법에 따라 연료 산화과정도 다소 차이가 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 $\Omega=0.21$ 인 FGR 화염과 FIR 화염의 반응대내에서 주요 화학종의 생성을 및 온도분포를 도시한 것이다. 그림 중 x 축은 최고온도점으로 부터의 상대거리로 표시하였으며 반응대 영역을 확대 도시하였다. 우선 FGR 화염에서 주요화학종의 생성을 분포를 보면 최고온도점을 중심으로 연료측으로부터 나온 CH_4 가 산화되는 연료소모영역과 이로부터 연쇄적으로 발생된 H_2 와 CO 의 반응이 일어나는 H_2 - CO 소모영역을 형성하고 있다. 그렇지만, FIR 화염의 경우 주요화학종 생성을 분포가 최고온도점을 기준으로 연료측으로 이동하면서 그 크기가 급격히 감소하지만, CO 의 소멸 영역은 급격히 증가한다.

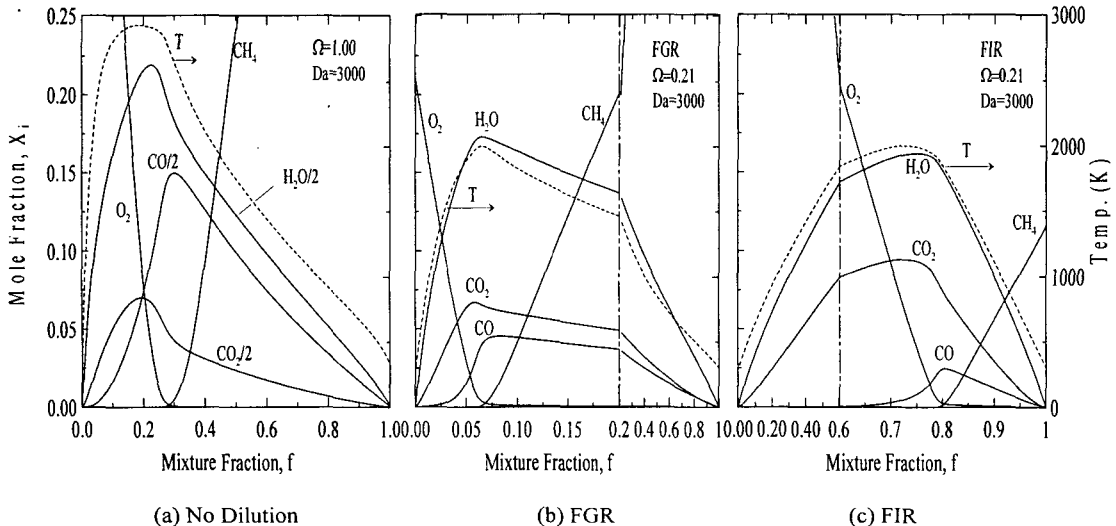
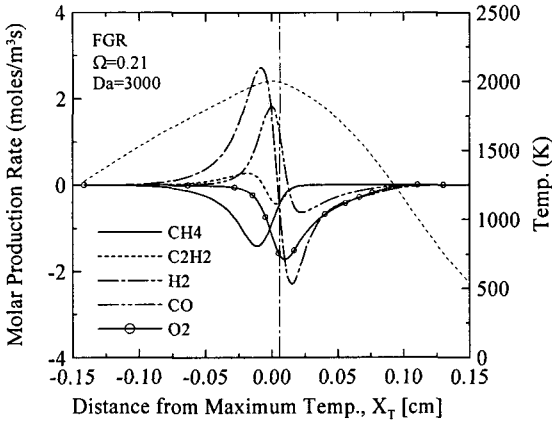
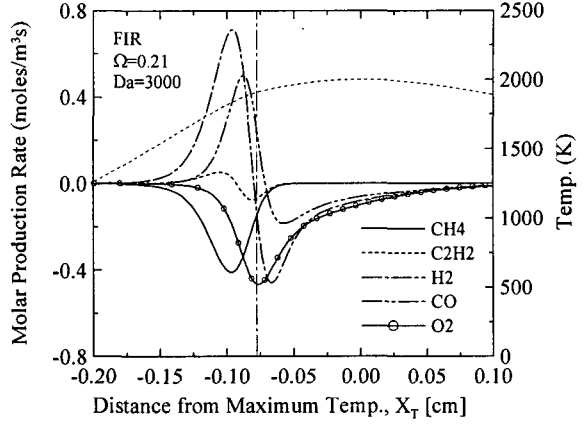


Fig. 3 Dilution effect on flame structure

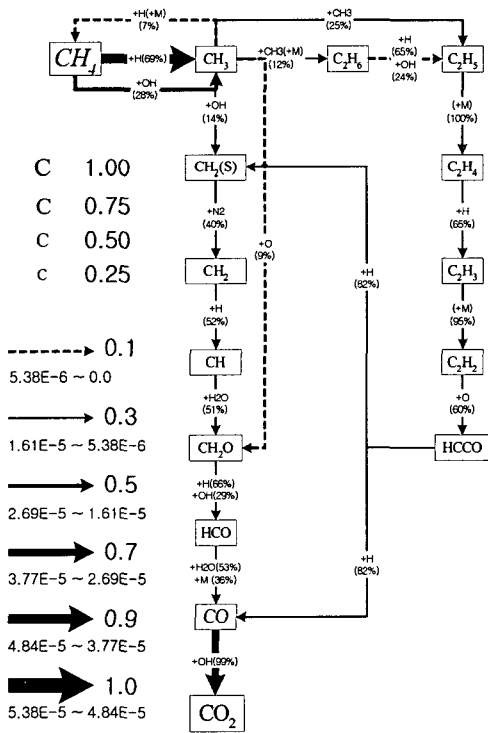


(a) FGR flame

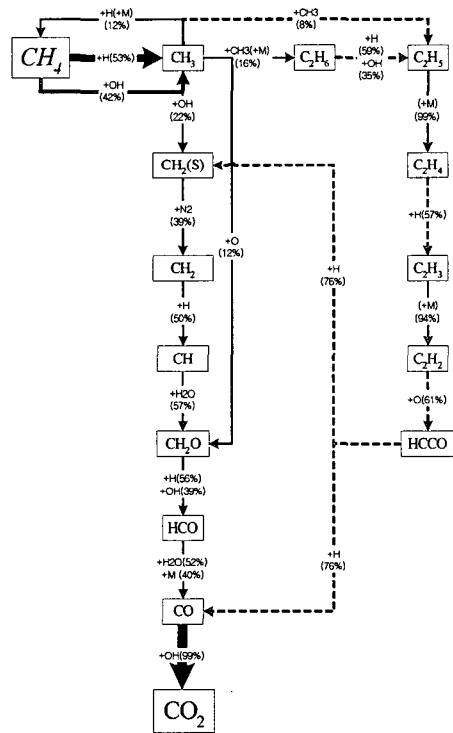


(b) FIR flame

Fig. 4 Molar production rate of species



(a) FGR



(b) FIR

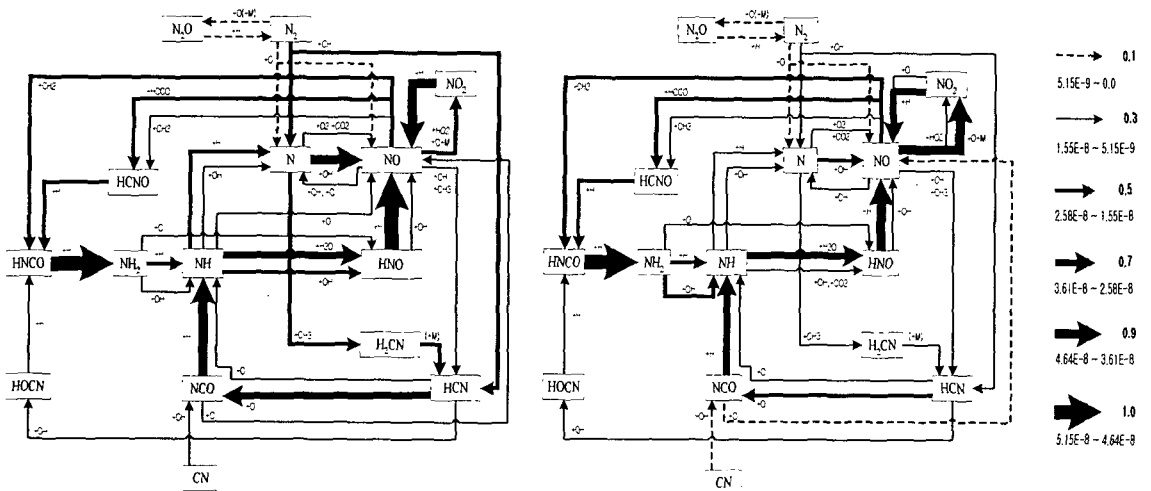
Fig. 5 Quantitative reaction path diagram(QRPD) of CH₄

Fig. 5 의 (a), (b)는 희석방법에 따른 연료산화과정변화를 비교하기 위하여 Ω=0.21 인 FGR 화염과 FIR 화염을 대상으로 CH₄의 반응경로도를 비교, 도시하였다. 반응경로도는 관심 화학종의 주요 전이 과정을 순차적으로 표현한 것으로 각 화학종의

생성율을 노즐간 거리에 대해 적분한 값을 기초로 작성된다. 그림중 괄호안의 숫자는 해당 라디칼의 반응물 소멸에 대한 기여도, 화살표의 두께는 적분된 생성율값을 의미한다. 또한 화학종의 글자크기는 해당 화학종의 생성율의 크기에 비례하며,

이탈릭체는 음의 생성율을 의미한다. 우선 Fig. 5 (a)의 FGR 화염의 경우 CH_4 는 CH_3 으로 분해된 후 각각 $CH_2 \rightarrow CH \rightarrow HCO \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ 의 C1 산화반응과 $C_2H_2 \rightarrow C_2H_4 \rightarrow C_2H_2 \rightarrow HCCO$ 의 C2 산화반응으로 진행되는데 그 비는 약 1:1.6 정도로 C2 산화반응이 다소 활발하다. 이러한 C2 산화반응을 거쳐 생성된 HCCO는 다시 C1 산화반응을 거쳐 최종적으로는 CO 생성에 기여한다. 또한 CH_4 로부터 생성된 CH_3 의 일부는 $+H+(M)$ 에 의해 다시 CH_4 로 환원되고, 일부분은 $+O$ 에 의해 CH_2O 를 생성하는 등 FGR 화염은 저온산화반응의 특징을 많이 나타낸다. Fig. 5(b)의 FIR 화염에서의 화살표는 FGR 화염의 0.3 배 생성율을 의미한다. FIR 화염에서는 C1 산화반응과 C2 산화반응의 비가 1.4:1 정도로 C1 산화반응이 오히려 활발해지며, C2 산화반응을 거쳐 생성된 HCCO가 C1 산화반응으로 다시 전환되는 반응은 상대적으로 약화된다. 그러나 전술한 저온산화반응의 특징은 FIR 화염에서 상대적으로 우세한 것을 알 수 있다. 또한 FGR 화염에 비해 CO의 생성율은 약화되고, CO_2 의 생성율은 강화된다. 이것은 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 FIR 화염에서 CO의 소멸영역이 급격히 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 이들 결과로부터 회석방법에 따라 연료의 산화과정이 각각 다른 특징을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이러한 변화로 인하여 연소특성 및 오염물질 생성 특성도 다소간의 영향을 받을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 회석 방법 변화가 NO 생성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 $\Omega=0.21$ 인 FGR 화염 및 FIR 화염을 대상으로 NO 반응경로도를 비교, 도시한 것으로 글자크기와 관련된 사항을 제외한 기타 표현 방법은 Fig. 5와 동일하다. 그림 중 EI F.M., EI T.M., EI P.M.은 각각 Full Mechanism, Thermal Mechanism, Prompt Mechanism에 의한 배출지수(Emission Index)를 의미하며, Nishioka 등이 제안한 방법⁽¹⁷⁾에 의해 계산하였다. 우선 FGR 화염을 보면, T.M.의 개시반응($N_2+O \leftrightarrow N+NO$)이 P.M.의 개시반응($N_2+CH \leftrightarrow HCN+N$)에 비해 매우 미약하게 진행됨을 알 수 있다. 그렇지만 P.M.의 개시반응은 CH 라디칼에 의해 상당량의 N_2 가 HCN으로 전환되면서 활발하게 진행된다. 결과적으로 FGR 화염에서의 NO 배출은 P.M.이 지배적으로 기여하고 있는 것을 알 수 있다.^(17,18) FIR 화염의 경우 화살표는 FGR 화염의 0.5 배 생성율을 의미한다. FIR 화염에서의 전체적인 반응기여도는 FGR 화염에 비해 감소하지만, P.M.에 의한 개시반응이 FGR 화염에 비해 약화되고, HCCO 및 CH_2 에 의한 NO Reburning 반응의 기여도는 상대적으로 강화되어 결과적으로 P.M.에 의한 NO 소멸이 강화된다. 이러한 이유는 CH_4 의 반응경로도에서 확인한 바와 같이, FIR 화염의 경우 C1 산화반응이 C2 산화반응에 비해 활발해지면서 C1 산화반응의 중간생성물에 의해 NO Reburning 반응도 활발해지는 것에 기인한다고 사료된다. 결과적으로 FIR 화염에



EI F.M.: 0.9027 EI T.M.: 0.0233 EI P.M.: 0.8794 EI F.M.: 2.8241 EI T.M.: 0.5573 EI P.M.: 2.2668
 (a) FGR (b) FIR

Fig. 6 Quantitative reaction path diagram(QRPD) of NO

서의 NO 배출지수 중 P.M.에 의한 기여도는 FGR 화염에 비해 다소 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

(1) 산소부화화염은 회석방법 및 회석제 첨가량에 따라 특성화학반응시간 및 특성유동시간이 급격히 변화한다. 따라서 이러한 효과를 종합적으로 고려할 수 있는 Da 수는 신장율에 비해 보다 적합한 비교 기준 인자로 이용될 수 있다.

(2) 반응대 내에서의 O₂ 누설 현상은 회석방법의 차이에 관계없이 공통적으로 발생한다.

(3) CH₄ 산화반응의 경우 FGR 화염에서는 C2 산화반응이, FIR 화염에서는 C1 산화반응이 우세하게 작용하며, 이로 인해 오염물질 생성 특성도 영향을 받는다.

(4) NO 생성특성의 경우 FIR 화염에서는 FGR 화염에 비해 각각 NO 개시 반응은 약화되고, NO Reburning 반응이 활발해져서 전체 NO 배출지수 중 Prompt NO의 기여도는 감소한다.

후 기

본 연구는 2003년도 현대 연구비(INHA-30767)지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Lee, K. Y., Nam, T. H., You, H. S. and Choi, D. S., 2002b, "The Flame Structure of Freely Propagating CH₄/O₂/N₂ Premixed Flames on the O₂ Enrichment," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 32, No. 4, pp. 555-560.

(2) Pourkashanian, M., Yapp, L. and Williams, A., 1990, "The Use of Oxygen Enrichment in Combustion Technology," *Proceedings of Institute of Energy*, pp. 301-314.

(3) Sautet, J. C., Salentey, L. and Ditaranto, M., 2001a, "Large-Scale Turbulent Structures in Non-Premixed, Oxygen Enriched Flames," *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, pp. 277-287.

(4) Baukal, C. E. Jr., 1998, *Oxygen-Enhanced Combustion*, CRC.

(5) Feese, J. J. and Turns, S. R., 1998, "Nitric Oxide

Emissions from Laminar Diffusion Flames : Effects of Air-Side Versus Fuel-Side Diluent Addition," *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp. 66-78.

(6) Hopkins, K. C., Czerniak, D. O., Youssef, C., Radak, L. and Nylander, J., 1991, "NO_x Reduction on Natural Gas-fired Boilers Using Fuel Injection Recirculation (FIR)-Laboratory Demonstration," *ASME Joint International Power Generation Conference*, pp. 1-11.

(7) Du, J. and Axelbaum, R. L., 1996, "The Effect of Flame Structure on Extinction of CH₄-O₂-N₂ Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 1137-1142.

(8) Du, J. and Axelbaum, R. L., 1995, "The Effect of Flame Structure on Soot-Particle Inception in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 100, pp. 367-375.

(9) Han, J. W. and Lee, C. E., 2004, "Experimental and Numerical Investigations on Detailed Methane Reaction Mechanisms in Oxygen Enriched Conditions," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 28, No. 2, pp. 207-214.

(10) Lutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," *SAND96-8243*.

(11) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K. and Liu, F., 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-Adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315-334.

(12) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *SAND89-8009B*.

(13) Kee, R. J., Dixon-Lewis, Warnatz, G. J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi-Component Transport," *SAND86-8246*.

(14) Peters, N., 1992, *Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion*, Ercoftac Summer School Lecture Note, September, pp. 14-28.

(15) Peters, N., 2000, *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press.

(16) Bilger, R. W., 1988, "The Structure of Turbulent Nonpremixed Flames," *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 22, pp. 475-488.

(17) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp. 127-138.

(18) Sung, C. J. and Law, C. K. 1998, "Dominant Chemistry and Physical Factors Affecting NO Formation and Control in Oxy-Fuel Burning," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 1411-1418.