

산소부화화염의 희석방법에 따른 화염특성 변화

한지웅[†] · 이창언^{*}

Variation of oxygen-enriched flame characteristics with dilution method

Ji-Woong Han and Chang-Eon Lee

Key Words : oxygen-enriched flame(산소부화화염), flue gas recirculation(배기가스재순환), fuel injection recirculation(연료분사재순환)

Abstract

Oxygen-enriched non-premixed flame characteristics was investigated numerically with variation of dilution methods, which are Flue gas recirculation(FGR) and fuel injection recirculation(FIR). In order to compare flamelets in various oxygen-enrichment conditions reasonably, the adiabatic flame temperature and Damkoller number was held fixed by modulating amount of diluents to fuel and oxidizer stream and by varying global strain rate of flame respectively. Also modified GRI 3.0 reaction mechanism was utilized, which was able to predict oxygen-enriched methane flame correctly. Fundamental flame characteristics such as structure, heat release rate and extinction with FGR and FIR were compared in various oxygen enrichment conditions.

기호설명

| | | |
|----------|---|-------------|
| Da | : | Damkoller 수 |
| a | : | 스트레인율 |
| Ω | : | 산소부화율 |

1. 서론

최근 전 세계적으로 기후변화협약 등을 통해 CO₂를 비롯한 온실가스에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 이 규제를 극복하기 위한 한 방편으로 고효율 연소 시스템 개발이 필수적이라 할 수 있다. 이러한 연소 시스템의 하나인 산소부화 연소법은 기존 산화제인 공기를 완전히 산소로 대체하거나 혹은 산소농도가 높은 산화제를 사용하는 방식으로 폐가스량 감소로 인한 폐열 감소, 연소 및 전열 특성 개선을 통하여 시스템 효율을 향상

시키는 새로운 연소기술로서 현재 많은 주목을 받고 있다⁽¹⁾. 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 NO_x 과다 생성, 그리고 안정성 등에 대한 해결책이 마련되어야 한다. 이중 고온 화염에 의한 문제점들은 배기가스를 재순환하여 화염온도를 적절히 제어함으로써 가능할 것으로 예상되지만, 이러한 희석제가 첨가된 산소부화화염에 대한 체계적인 연구는 아직 미비한 실정이다. 기존의 희석제가 첨가된 화염을 대상으로 한 연구는 주로 통상의 메탄-공기 화염을 대상으로 진행되어왔다.

Feese 등⁽²⁾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⁽³⁾은 소형 보일러 실험을 통해 배기가스를 연료류로 재순환시키는 방법이 공기류로 재순환시키는 방법에 비해 단위질량의 배기가스당 NO 배출량 저감 효과가 더 우수하다고 보고하였다. Du 등⁽⁴⁾은 동일

[†] 인하대학교 대학원

E-mail : jwhan0416@hanmail.net

TEL : (032)867-4522 FAX : (032)868-1716

^{*} 인하대학교 기계공학과

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 모두 메탄-공기 화염을 대상으로 수행되었으며 산소부화율이 증가된 고온 화염을 대상으로 희석 방법에 따른 화염특성 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 연소속도 비교를 통해 산소부화 화염에 적합하도록 수정 제안된 수정 GRI 3.0 반응기구⁽⁵⁾를 이용하여 희석방법에 따른 산소부화 화염의 특성 변화를 관찰하고자 한다. 또한 연료희석 화염 및 산화제 희석 화염을 대상으로 희석제 첨가량 감소에 따른 화염특성 변화를 비교 검토하고자 한다. 또한 희석제가 첨가된 고온의 화염을 대상으로 스트레인을 증가에 따른 CO 및 CO₂ 배출 특성을 비교하고, 최종적으로 연료 희석 및 산화제 희석 산소부화 화염의 연소특성을 파악하고자 한다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 노즐간의 거리가 2cm 대향류 확산 화염을 계산 대상으로 하였으며, 연료 및 산화제의 유속은 동일하게 하였다. 계산에 사용된 지배방정식은 원통좌표계의 상미분 방정식 형태로 표현되며, 그에 대한 상세는 참고문헌⁽⁶⁾을 참조하기 바란다. 복사열손실에 대한 계산은 열손실에 주로 기여를 하는 것으로 알려진 CO₂, H₂O, CO, CH₄의 4 가지 화학종에 대해 계산하였다. 단위 체적당 복사열손실은 다음 식에 의해 계산하였다⁽⁷⁾.

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

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

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수, T 와 T_∞ 는 각각 국부 온도와 주위 온도를 나타내며, K_p 는 혼합가스의 플랑크 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⁽⁷⁾에 의해 사용된 값을 이용하였다.

2.2 계산 방법

본 연구에서는 OPPDIF Code를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II와 Transport Package를 사용하였다. 저자들이 사용한 OPPDIF Code에서는 임의 스트레인에 대한 화염구조를 계산하기 위해 그에 해당하는 노즐 유속을 초기조건으로 입력해야 하는데, 이 유속을 계산하기 위하여 대향류 확산 화염을 대상으로 F. A. Williams⁽⁸⁾가 유도한 다음 식을 이용하였다.

$$a = \frac{2(-u_o)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{(-u_o)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}} \right] \quad (4)$$

여기서, 첨자 F 는 연료노즐, O 는 산화제 노즐을 나타낸다.

반응기구는 최근 산소부화 화염을 정확하게 예측할 수 있도록 수정, 보완된 수정 GRI 3.0 반응기구를 이용하였다.

3. 계산결과 및 검토

Fig. 1은 산화제 및 연료노즐에 첨가되는 희석제 증가에 따른 화학반응시간 및 소염신장율의 변

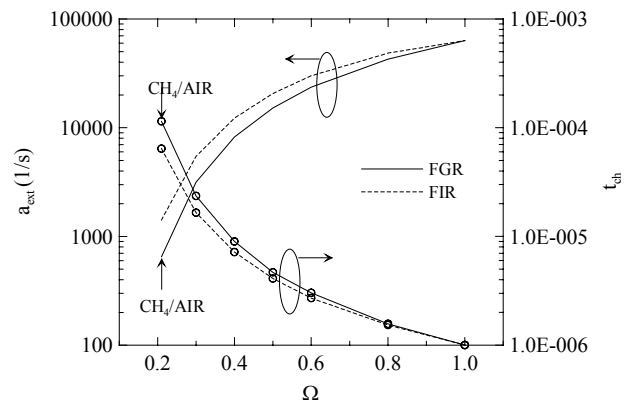


Fig. 1 Extinction global strain rate and characteristic chemical time in various oxygen-enriched flame

화를 도시한 것이다. 그림 중 실선은 산화제 희석(이하 FGR)화염, 점선은 연료류 희석(FIR)화염을 의미한다. 그림 중 X 축은 FGR 화염을 기준으로 한 산소부화율을 나타내며, FIR 화염의 경우 해당 산소부화율의 FGR 화염과 동일한 단열화염온도를 갖도록 O₂ 100%의 산화제와 희석제가 첨가된 연료류로 형성된 화염을 의미한다. 기존 연구들에서는 산소부화율에 따른 화염구조변화를 비교할 경우 동일 신장율을 갖는 화염들을 선정하고 비교하였다. 그러나 Fig. 1에 도시한 바와 같이 산소부화 화염은 부화율 및 희석방법에 따라 화학반응속도 및 소염신장율도 각각 다르게 변화한다. 따라서 그림에 표기된 소염점 근방의 메탄-공기화염과 동일한 신장율을 갖는 산소부화화염을 선택할 경우, 소염점보다 매우 낮은 신장율을 갖는 산소부화화염에 해당된다. 또한 동일신장율의 연료희석화염의 경우에도 소염점보다 낮은 신장율을 갖는 화염에 해당되며, 이들 화염의 특성화학반응시간은 각각 다르게 된다. 즉 특성유동시간을 의미하는 신장율만을 이용하여 특성화학반응시간이 각기 다른 화염을 서로 비교하는 데에는 문제점이 있다. 본 연구에서는 단순히 특성유동시간만을 의미하는 신장율 대신, 특성 화학반응시간(t_c)에 대한 특성유동시간의 비로 표현된 Da 수를 도입하여 동일 Da 수를 갖는 화염을 비교하였다.

Da 수는 식 (5)과 같이 정의되었으며, 이 식에 이용되는 특성 화학반응시간(t_c)는 Peters⁽⁹⁾의 제안

$$Da = \frac{1}{t_c \chi_{sq}} \quad (5)$$

$$t_c = \frac{Z_{st}^2 (1 - Z_{st})^2}{\chi_{sq}} \quad (6)$$

Table. 1 Composition of FGR and FIR flame

| Ω | FGR | | | FIR | | |
|----------|------|------|----------|------|------|-----------|
| | FUEL | | OXIDIZER | FUEL | | OXI-DIZER |
| | CH4 | O2 | N2 | CH4 | N2 | O2 |
| 0.21 | 1.00 | 0.21 | 0.79 | 0.12 | 0.88 | 1.00 |
| 0.30 | 1.00 | 0.30 | 0.70 | 0.18 | 0.82 | 1.00 |
| 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.50 | 0.33 | 0.67 | 1.00 |
| 0.80 | 1.00 | 0.80 | 0.20 | 0.67 | 0.33 | 1.00 |
| 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

에 따라 계산되었다. t_c 의 정의는 식 (6)와 같다.

여기서, Z_{st} 는 Bilger⁽¹⁰⁾의 제안에 따라 정의된 식을 이용하였으며 산소부화율 및 희석방법에 따라 각각 변화한다. 각 산소부화화염의 t_c 는 소염점에서의 스칼라 소산율 χ_{sq} 을 계산으로부터 산출하면 결정되며, 식 (5)로부터 Da_{sq} 를 계산한다. Da 수를 도입할 경우 특성화학반응시간에 대한 특성유동시간의 비를 동일하게 유지할 수 있으므로 산소부화율 및 희석방법이 각기 다른 화염들의 객관적인 비교가 가능하다.

Fig. 2는 각 산소부화화염에서 복사 열손실 효과에 의한 저 스트레인을 소염점과 화염 신장율 증가에 의한 고 스트레인을 소염점을 각각 Da 수로 나타낸 것이다. 가연 Da 수는 산소부화율 및 희석방법에 따라 차이가 있으며, 본 연구에서는 Da=3000인 화염을 선정하여 산소부화율 및 희석방법에 따른 화염구조 차이를 비교하였다.

Fig. 3은 희석방법 및 산소부화율에 따른 열발생율 차이를 비교하기 위하여 각각 (a)통상화염 ($\Omega=0.21$, FGR), 동일한 단열화염온도를 갖는 연료 희석화염($\Omega=0.21$, FIR) 및 (c)산소부화화염 ($\Omega=1.00$)의 총 열발생율 분포 및 주요화학종과 관련된 열발생율 분포를 각각 도시하였다. 그림중 X 축은 화염 최고 온도점으로 부터의 상대거리로 표시하였다. FGR 화염의 경우 총 열발생율 분포의 최고점이 최고 온도점 부근에 위치하고, 2번째 극대점이 산화제측에 형성된다. 또한 연료측에 C₂H₂와 관련된 반응에 의해 흡열 영역이 존재한다. FIR 화염의 경우 총 열발생율 분포의 최고값이 최고온도점으로부터 연료측으로 이동하면서 급격

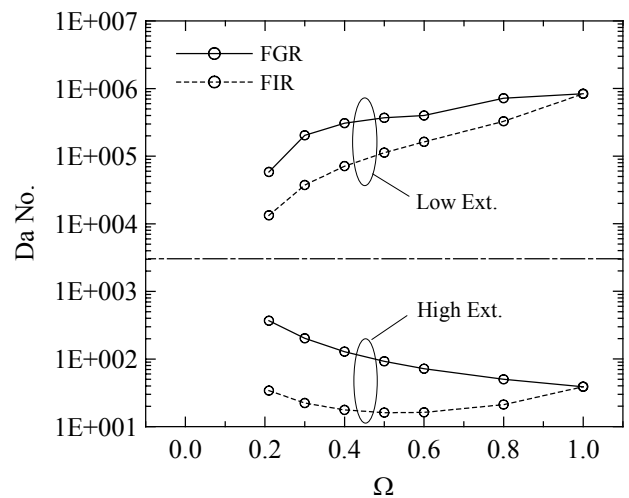
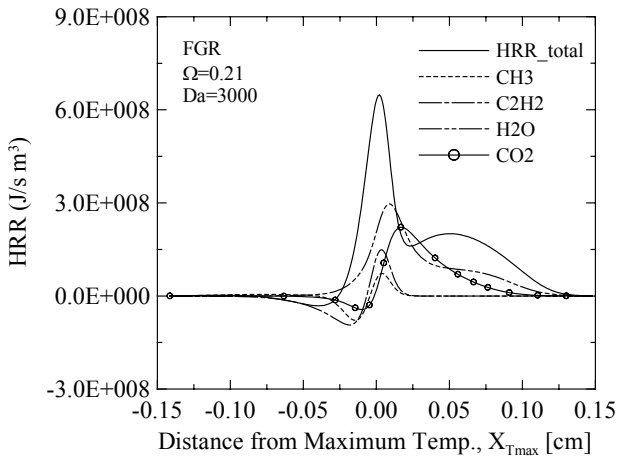
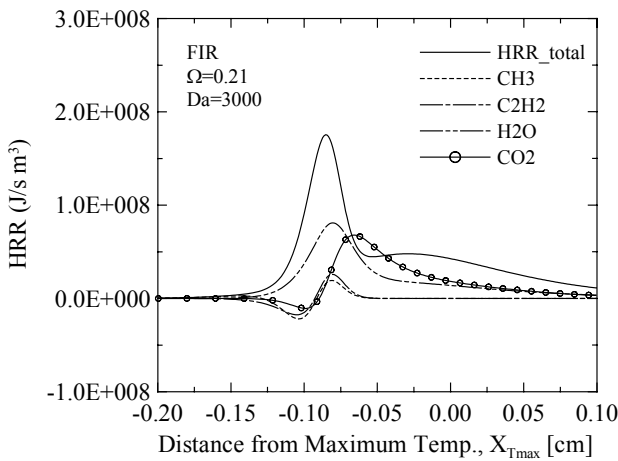


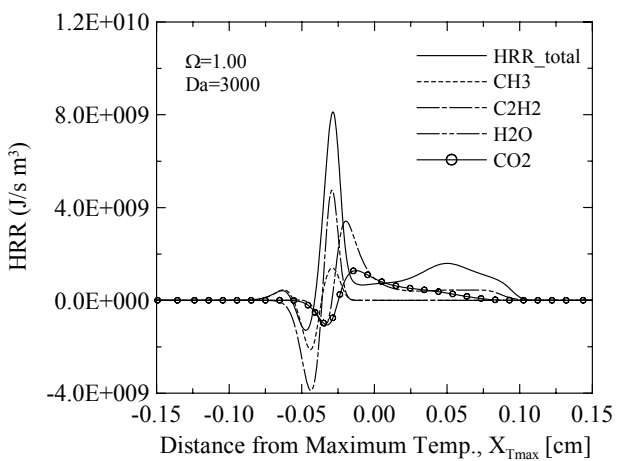
Fig. 2 Damköhler number of oxygen enriched flame at high and low extinction limit



(a) CH4-O2/N2 flame



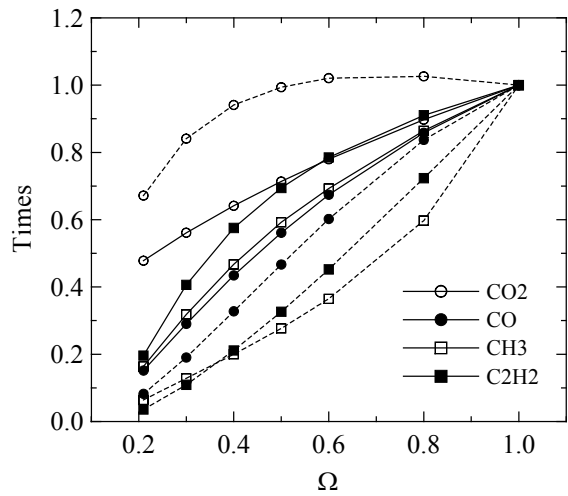
(b) CH4/N2-O2 flame



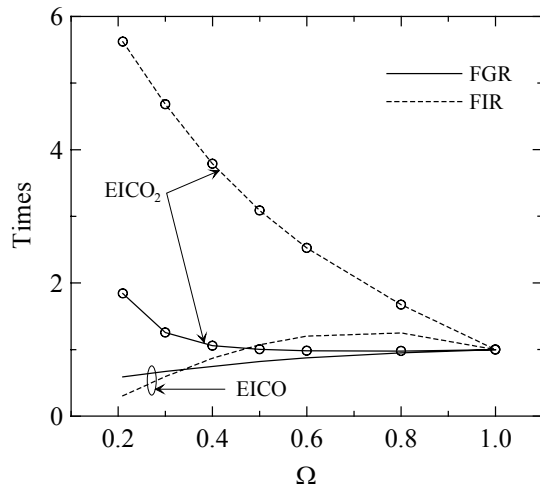
(c) CH4/N2-O2 flame

Fig. 3 Comparison of total heat release rate and species' related heat release rate

히 감소하고, 극대점을 중심으로 한 구배 및 산화



(a) Normalized maximum species' mole fraction



(b) Normalized emission index

Fig. 4 Comparison of species' mole fraction and emission index

제 측에 위치한 2 번째 극대값이 낮아지면서 상대적으로 넓어진다. 또한 연료측의 C2H2 와 관련된 흡열반응도 약화되면서 총 열발생율 분포의 흡열영역도 사라진다. 산소부화화염의 경우 총 열발생율 분포의 최고점이 약간 연료측에 위치하며, 2 번째 극대점이 최고점에 비해 상대적으로 약화되면서 그 분포영역이 넓어진다. 또한 산소부화율이 증가하면서 연료측에 흡열반응분만 아니라 CH3 관련 반응에 의해 3 번째 극대점이 형성되며 C2H2 관련한 흡열반응 및 발열반응들의 기여도가 상대적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4는 희석방법에 따른 산소부화화염의 CO 및 CO2 배출 특성의 차이를 비교하기 위하여, Ω=1.00 인 산소부화화염의 산화제 및 연료류에 첨가된 희석제 증가에 따른 화학종의 최대농도값

의 변화 및 배출지수를 도시하였다. 그림에 표시된 농도 및 배출지수는 각각 $\Omega=1.00$ 에서의 값을 기준으로 무차원화한 값이다. 우선 연료산화과정과 관련된 CH₃ 및 C₂H₂ 화학종의 최대농도값은 희석제첨가량이 증가할수록 FIR 화염에서의 CH₄ 물농도의 감소로 인하여 FGR 화염이 FIR 화염에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 그렇지만, CO의 경우 FIR 화염과 FGR 화염에서 거의 비슷한 수준으로 감소하며, CO₂의 경우엔 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 오히려 증가한다. 즉 CO 및 CO₂의 농도가 다른 연료중간생성물의 농도에 비해 상대적으로 높은 것로부터 FIR 화염의 경우 FGR 화염에 비해 연료의 완전연소율이 증가하는 것으로 사료된다. CO 및 CO₂의 배출지수도 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 증가하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 배출된 CO₂를 재활용하는 측면에서는 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 유리함을 알 수 있다.

Fig. 5은 여러 산소부화화염을 대상으로 스트레인율 증가에 따른 FGR 및 FIR 화염의 최고 온도 변화를 비교, 도시한 것이다. 산소부화율이 증가할수록 소염스트레인율도 급격히 증가하기 때문에 본 연구에서는 각 화염의 스트레인율을 소염스트레인율로 나눈 무차원스트레인율을 도입하였다. 그림 중 선은 FGR 화염을 도형은 FIR 화염을 의미한다. FGR 화염 및 FIR 화염 모두 최고온도는 스트레인율 증가에 따라 서서히 감소한다. 그러나 스트레인율에 따른 온도변화율은 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 크며 이러한 이유로는 앞에서 설명한 바와 같이 FIR 화염의 경우 FGR 화염보다 연료의 완전연소율이 증가하면서 소염점이 FGR 화염에

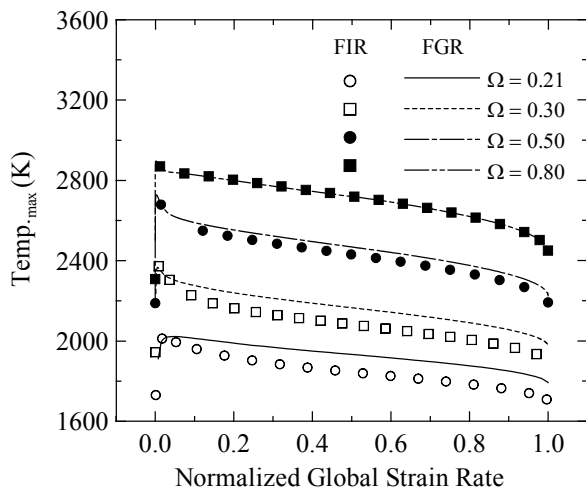


Fig. 5 Maximum flame temperature of oxygen-enriched flame in various global strain rates

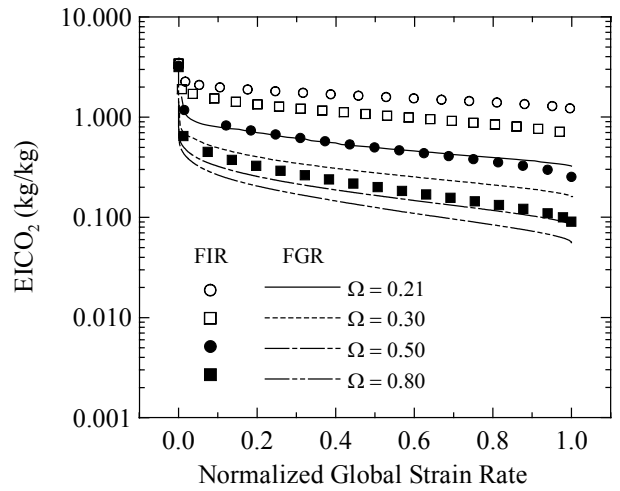


Fig. 6 Emission index of CO₂ of oxygen-enriched flame in various global strain rates

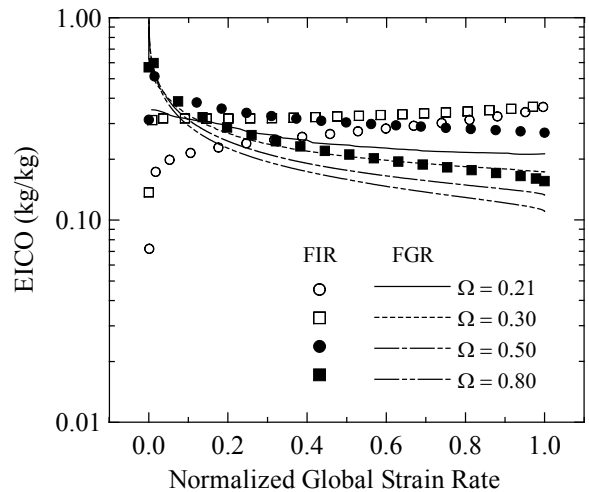


Fig. 7 Emission index of CO of oxygen-enriched flame in various global strain rates

비해 증가하고 소염 온도도 더 낮아지는 것으로 사료된다.

Fig. 6는 스트레인율 증가에 따른 CO₂ 배출 특성을 비교하기 위하여 도시한 것으로서, 그림 중의 기호는 Fig. 5와 동일하며 Y 축은 LOG 스케일로 표시하였다. EICO₂의 값은 스트레인율이 증가할수록 감소하며, 화염온도가 동일한 화염에서는 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 EICO₂가 증가함을 알 수 있다. 이로부터 Fig. 4에서 언급한 바와 같이 CO₂를 재활용하는 관점에서는 전스트레인율 영역에서 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 유리하다.

Fig. 7은 스트레인율 증가에 따른 CO 배출 특성을 비교하기 위하여 도시한 것으로, FGR 화염의 경우 스트레인율 증가에 따라 EICO는 서서히 감

소하는 것을 알 수 있다. 그러나, FIR 화염의 스트레인에 따른 EICO 는 희석제첨가량이 적은 경우엔 FGR 화염과 그 경향이 비슷하지만, 희석제첨가량이 증가함에 따라 그 경향이 반대가 되어 스트레인을 증가에 따라 EICO 도 증가하는 경향을 나타낸다. 이것으로부터 희석제가 다량 첨가된 산소부화화염의 경우 희석방법에 따라 CO 배출특성이 현저하게 변화하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 산소부화화염의 희석방법 및 희석제 첨가량에 따른 화염구조 및 배출특성 변화를 관찰하고, 동일 특성을 대상으로 스트레인을 증가의 영향을 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 산소부화화염의 희석방법 및 희석제 첨가량에 따라 특성화학반응시간 및 특성유동시간이 급변하기때문에, 객관적인 비교를 위해서는 다양한 변화를 종합적으로 고려할 수 있는 Da 수를 도입하여 비교하는 것이 타당하다.
2. FGR 화염의 총열발생을 분포에는 FIR 화염에는 존재하지 않는 연료층의 흡열반응영역이 존재하며, 이 흡열반응은 산소부화율 증가에 따라 급격히 증가한다.
3. FIR 화염의 경우 대부분의 영역에서 CO 및 CO₂ 의 배출지수가 FGR 화염에 비해 높게 나타나며, 이것으로부터 배기가스중의 CO₂ 를 재활용하는 측면에서는 FIR 화염이 FGR 화염에 비해 유리함을 알 수 있다.
4. FGR 화염은 스트레인을 증가에 따른 EICO₂ 및 EICO 가 희석제첨가량에 관계없이 단순감소하지만, FIR 화염의 경우 스트레인을 증가에 따라 EICO₂ 는 단순감소하며 EICO 는 희석제첨가량에 따라 배출특성이 현저하게 변화한다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(Combustion Engineering Research Center)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Charles E. Baukal, Jr., 1998, *Oxygen-Enhanced*

Combustion, CRC.

- (2) James J. Feese and Stephen R. Turns, 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.
- (3) Kevin C. Hopkins, David O. Czerniak, Cherif Youssef, Les Radak, and James Nylander, 1991, "NOx reduction on natural gas-fired boilers using fuel injection recirculation(FIR)-laboratory demonstration," *ASME Joint International Power Generation Conference*, pp.1-11.
- (4) J. Du and R. L. Axelbaum, 1996, "The effect of flame structure on extinction of CH₄-O₂-N₂ diffusion flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 1137-1142.
- (5) J. W. Han and C. E. Lee, 2003, "Examination of Optimal Reaction Mechanism in Oxygen Enriched Condition," *Proceedings of the Korean Society of Combustion*, Vol. 26, pp.261-268.
- (6) Robert J. Kee, James A. Miller, Gregory H. Evans, Graham Dixon-Lewis, 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane Air Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 22, pp. 1479 ~ 1494.
- (7) Yiguang Ju, Hongsheng Guo, Kaoru Maruta, Fengshan Liu, 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *J. Fluid Mech.*, Vol. 342, pp. 315 ~ 334.
- (8) H. K. Chellian, C. K. Law, T. Ueda, M. D. Smooke, F. A. Williams, 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp.503 ~ 511
- (9) N. Peters, 1992, "Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion," *Ercofac Summer School Lecture Note*, September, pp. 14 ~ 28.
- (10) R. W. Bilger, 1988, "The Structure of Turbulent Nonpremixed Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 22, pp. 475 ~ 488.