

산소부화와 희석제에 따른 비예혼합 화염의 안정성

배정락* · 이병준†

(2002년 4월 26일 접수, 2002년 7월 15일 심사완료)

Effect of Diluents and Oxygen-Enrichness on the Stability of Nonpremixed Flame

Jung-Rak Bae and Byeong-Jun Lee

Key Words: CO₂ Dilution(이산화탄소 희석), Oxygen-Enrichment(산소부화), Non-Premixed Flame(비예혼합 화염), Flame Stability(화염 안정성), Lifted Flame(부상화염)

Abstract

CO₂ is well known greenhouse gas which is the major source of global warming. Reducing CO₂ emission in combustion process can be achieved by increasing combustion efficiency, oxygen enriched combustion and recirculation of the emitted CO₂ gas. Stability of non-premixed flame in oxygen enriched environment will be affected by the amount of oxygen, kind of diluents and fuel exit velocity. The effects of these parameters on flame liftoff and blowout are studied experimentally in oxidizer coflowing burner. Experiments were divided into three cases according as where CO₂ gas was supplied. - 1) to coflowing air, 2) to fuel with O₂-N₂ coflow, 3) to coflowing oxygen. Flame in air coflowing case was lifted in turbulent region. Flame lift and blowout in laminar region with the increase in CO₂ volume fraction in CO₂-Air mixture makes flame lift and blowout in laminar region. Increase in oxygen volume fraction makes flame stable-i.e. flame liftoff and blowout occur at higher fuel flowrates. Liftoff height was non-linear function of nozzle exit velocity and affected by the O₂ volume fraction. It was found that the flame in O₂-N₂ coflow case was more stable than O₂-CO₂ case. Liftoff heights vs (nozzle exit velocity/laminar burning velocity)^{3,8} has a good correlation in O₂-CO₂ oxidizer case.

1. 서론

1997년 12월초 일본 교토에서 열린 기후변화협약에서, CO₂를 비롯한 온실가스 배출권거래제도의 도입을 허용하였으므로, 향후 환경 문제가 경제 문제로 직결되는 상황이 초래될 전망이다. 따라서 CO₂ 배출을 줄일 수 있는 고효율 저공해

연소기를 개발하는 것은 반드시 필요하다. CO₂의 배출을 줄이기 위한 방법의 하나로 산화제 중의 산소 양을 증가시키는 산소부화 연소방법이 제안되고 있다. 산소의 양이 증가하면, 발열량이 공기를 사용하는 경우에 비하여 증가하여 주어진 열부하를 감당하기 위해 필요한 연료의 양이 감소하므로, 연소에 의하여 생성되는 CO₂의 배출을 감소시킬 수 있게된다. 순수 산소를 사용하는 경우 환경문제를 유발하는 NO_x가 생성되지 않으므로 또한 효과적인 방법이 된다. 그러나 산화제중 산소의 양이 증가하면 화염온도가 올라가므로 재료의 문제를 야기할 수 있게된다. 따라서 최근에

* 영남대학교 대학원 기계공학과
** 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학과
E-mail : bjlee@yu.ac.kr
TEL : (053)810-3526 FAX : (053)813-3703

는 CO₂ 저감과 화염온도를 저감시키기 위한 방법으로 기연가스 중의 CO₂를 재순환 시키는 방법이 제안되고 있다. 연료를 희석하는 경우의 화염은 희석하지 않는 경우에 비하여 안정화 특성이 달라지게 된다.⁽¹⁾

화염부상, 화염날림 등의 화염 안정성과 관련된 연구는 연소기의 설계와 관련하여 중요한 위치를 차지하므로 많은 연구가 수행되어왔다. 화염 부상 메커니즘에 관한 연구들은 Pitts⁽²⁾의 review에서와 같이, 예혼합화염적 특성, 층류화 산소화염 (laminar diffusion flamelet)의 소염 혹은 화염의 거대구조와 연관지어 설명하려는 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 그러나, 단 하나의 이론으로는 설명할 수 없으므로 많은 실험에 의하여 그 경향을 설명하고 있다.

Kalghatgi⁽³⁾는 대기중으로 연료를 분사하는 경우의 난류부상높이는 직경에 무관하게 노즐출구 유속에 비례함을 보였다. Lee 등⁽¹⁾은 질소로 희석하는 경우 노즐직경과 희석정도에 따라 화염은 난류부상- 난류화염날림, 층류부상-난류날림, 층류부상, 층류 날림이 일어날 수 있고, 난류 부상 높이(H_L)를 노즐직경(d)으로 무차원화한 값은 노즐에서의 유속(U₀)을 노즐에서 연료의 질량분율(Y_{F,0})로 나눈 값에 비례함을 보였다. Miake-Lye 등⁽⁴⁾의 공기로 희석된 C₂H₄ 연료의 실험도 동일한 경향이다. Rokke 등⁽⁵⁾은 부분예혼합된 프로판 화염의 부상높이는 U₀×d^{0.3}/Y_{F,0}^{0.5}에 비례함을 보였다. Won 등⁽⁶⁾은 질소로 많이 희석된 프로판 화염의 층류 부상높이는 발달된 영역에서는 (U₀/S_{L,st})^{1.39}에, 발달영역에서는 (U₀/S_{L,st})^{1.43}에 비례함을 보였다.

CO₂를 재순환 시키는 경우의 화염은, CO₂의 열용량 차이로 N₂가 혼합된 경우의 일반적인 화염에 비하여 다른 특성을 나타낼 것을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산화제의 산소분율 변화, CO₂ 및 N₂ 등의 희석제가 화염의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치

산소농도에 따른 화염의 안정성에 관한 연구를 수행하기 위하여, 외경 94mm인 버너 중앙에 내경 0.58mm인 스테인리스관을 삽입한 동축류 버너를 제작하였다. 동축류 버너는 출구의 속도를

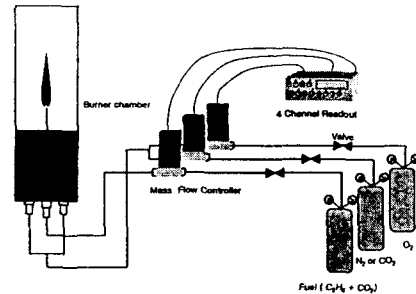


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table Experimental conditions

		case I	case II	case III
Center nozzle		C ₃ H ₈	C ₃ H ₈ , CO ₂	C ₃ H ₈
Coflow		Air, CO ₂	O ₂ , N ₂	O ₂ , CO ₂
Variable	Fuel side	Q _F	Q _F , X _{CO2} =0.0~0.7	Q _F
	Fuel side	X _{CO2} = 0.0 ~0.27	X _{O2} = 0.21 ~ 0.8	X _{O2} = 0.2 ~ 0.8

균일하게 하기 위하여, 셀의 크기가 1mm*1mm인 50mm두께의 허니컴, 직경 2mm의 유리 구슬층 35mm, 철망으로 구성하였다. 중앙의 연료공급관인 스테인레스관 으로는 99.9%의 프로판 혹은 프로판과 CO₂혼합물을, 동축류로는 산화제인 질소와 산소의 혼합기 혹은 이산화탄소와 산소의 혼합물을 공급하였다. 허니컴 셀의 영향을 줄이기 위하여 연료 공급관의 출구는 버너면 에서 25mm 높게 설치하였다. 버너로 공급되는 연료 와 산화제의 유량은 질량유량계(MKS제)를 사용하여 조절하였다. 외부공기의 유입 차단과 특성길이의 측정을 위하여 동축류 버너 외부에 길이 40cm의 석영관을 설치하였다(Fig. 1참조).

모든 실험 조건에 대하여 산화제의 유속은 8.7cm/s로 하였다. 연료 유량을 3000ml/min까지 변화시키면서 실험을 수행하였다.

실험은 산화제의 조성에 따라 공기와 CO₂의 혼합기인 경우를 case I, O₂와 N₂의 혼합기인 경우를 case II, O₂와 CO₂의 혼합기인 경우를 case III로 하여 수행하였다. case II인 경우에는 연료

측에도 CO_2 를 혼합하였다. case II, III의 경우 산화제중의 산소 농도를 0.21~0.8까지 변화시키며 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

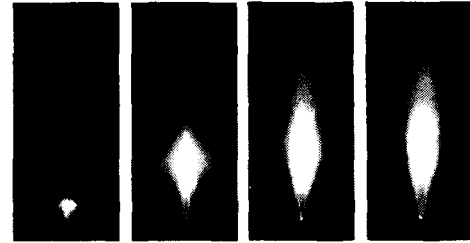
3.1 화염 형상

동축류의 산소 농도가 증가할수록 화염의 휘도는 증가하였으며, $X_{O_2} > 0.3$ 인 경우에는 매연이 있는 내부 화염을 둘러싼 보라빛의 외부화염이 형성되었다. 내부화염의 끝인 매연선단부의 높이는 유량 증가에 따라 증가하다가, 화염부상으로 인한 산소 유입으로 경계가 불분명해지면서 감소하였다.

Figure 2와 3은 순수 프로판을 연료로 하고, 산화제중의 산소 몰분율(X_{O_2})을 0.5로 한 경우의 희석제와 유량변화에 따른 동일 노출시간의 화염 사진을 나타낸다. 공기를 산화제로 사용하는 경우 화염은 유량 250ml/min에서 난류로의 천이가 일어나고(Fig 4. 참조) 화염면이 불규칙하게 변동되는 것이 관찰되나, 산화제중의 산소 몰분율이 증가한 Figure 2와 3에서는 1500ml/min인 경우에도 층류화염과 같이 화염면이 규칙적임을 볼 수 있다. 이러한 현상은 화염전파속도가 높은 수소화염의 경우에도 일어나는 것으로 미루어 높은 화염전파 속도로 인하여 화염부상이 높은 유량에서 일어나며 화염의 온도 증가로 인하여 화염면 이후의 동점성 계수의 증가에 의한 층류화(laminarization)와 관련 있는 것으로 사료된다. 유량이 동일한 경우 case II가 case III에 비하여 외부화염길이는 약 40%, 내부화염은 약 15% 더 길고, 화염폭도 증가하였다. Figure 3(d)의 경우 화염 부상으로 인하여 주위 산화제의 유입이 증가하여 내부화염의 휘도가 감소한 것으로 사료된다.

3.2 화염부상 및 화염날림

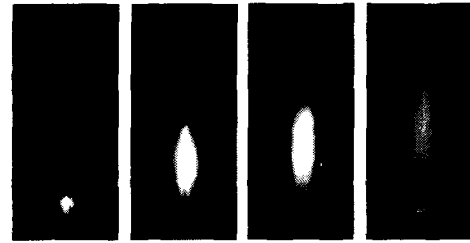
Figure 4는 Case I의 경우에 대한 화염선단부의 길이와 부상높이 및 화염날림 유량을 나타낸다. 산화제중 CO_2 몰분율(X_{CO_2})이 0.0~0.1인 경우의 화염은, 유량증가에 따라 화염 길이가 선형적으로 증가하다가 천이 영역에서 감소한 후 일정해지며, 난류부상-난류 화염날림이 발생하는



(a) (b) (c) (d)

Fig. 2 Flames at $X_{O_2}=0.5$, $X_{C_3H_8}=1.0$ (case II)

(a) $Q=100$ ml/min, (b) 500, (c) 1000, (d) 1500



(a) (b) (c) (d)

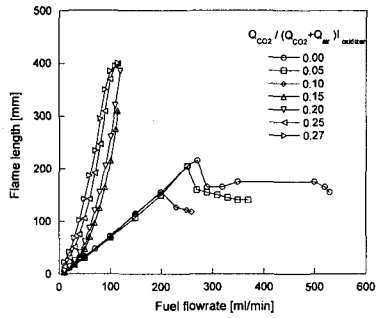
Fig. 3 Flames at $X_{O_2}=0.5$, $X_{C_3H_8}=1.0$ (case III)

(a) $Q=100$ ml/min, (b) 500, (c) 1000, (d) 1500

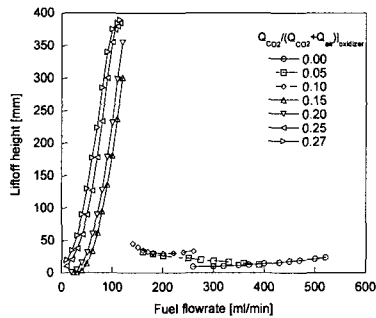
전형적인 공기-프로판 화염의 특성을 나타낸다. $0.15 < X_{CO_2} \leq 0.27$ 사이에서는 층류 부상-층류 화염 날림이 일어났다. 이러한 CO_2 희석률 증가에 따른 화염안정화 특성의 변화는, 연료를 질소로 희석하는 경우 질소 희석률 증가에 따라 난류 부상이 층류부상으로, 난류 화염날림이 층류화염날림으로 변하는 현상과 유사하다. 두 경우 모두 희석률 증가에 따른 화염전파속도의 감소가 원인인 것으로 사료된다.

$X_{CO_2} > 0.29$ 의 경우에는 착화가 되지 않았다. X_{CO_2} 증가에 따라 화염날림, 부상이 시작되는 유량이 선형적으로 감소하였다.

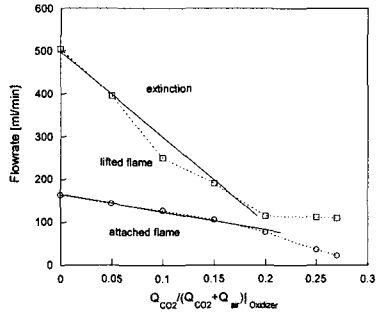
Figure 5는 case II경우의 화염 특성으로 $X_{O_2} = 0.65$ 인 경우의 부상높이변화, 화염부상이 시작하는 유량 및 화염 날림유량을 나타낸다. 연료중 CO_2 의 몰분율이 0.6 이상에서는 노즐부착화염에서 화염날림이 발생하였으며 $X_{CO_2} > 0.7$ 에서는 화염의 착화가 불가능하였다. Figure 5(c)의 점선은 연료층 유량이 3000ml/min에서도 화염날림이 발생하지 않음을 나타낸다. 유량이 3000ml/min 이



(a)



(b)

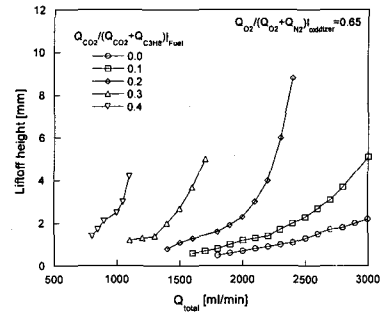


(c)

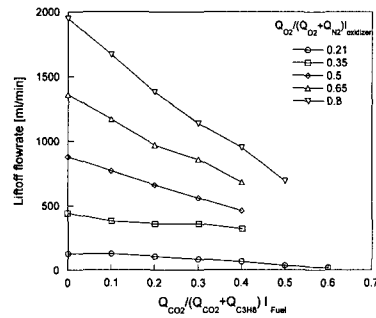
Fig. 4 (a) Flame Length, (b) Liftoff Height, (c) Flame Zones for case 1

상에서는 부상화염이 불안정하여 부상높이의 측정이 불가능하였다.

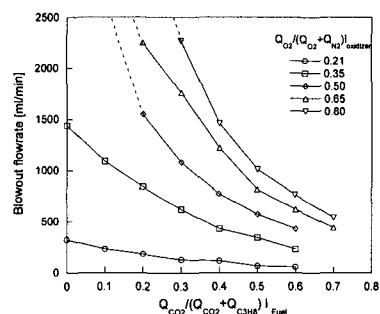
Kalghatgi 등의 실험과는 달리 부상높이가 유량에 따라 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다 (Fig. 5(a)). Kalghatgi의 실험과 비교할 때 이러한 비선형성의 이유는, 본 실험이 동축류의 실험이라는 것, 연료에 CO₂를 희석한 것, 산화제 중의 산소 농도가 공기에 비해 높은 것 등의 세 가지 요인으로 유추할 수 있다. 그러나 Montgomery



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 characteristic lengths and flowrates for case II. (a) liftoff heights for X_{O2}=0.65, (b) blowout flowrates, (c) liftoff flowrates

등⁽⁷⁾은 coflow가 있는 경우에 부상높이가 출구유속과 평행류 유속의 선형결합으로 표현된 유효속도에 선형적으로 비례하는 것을 보였으므로 coflow의 영향은 아닌 것으로 판단된다. 또한 Lee 등⁽¹⁾은 연료에 희석제를 혼합 경우 H/d 는 $U_o/Y_{F,o}$ 에 비례함을 보였으므로 희석제의 영향도 아닌 것으로 판단된다. 따라서 부상 높이가 출구 유속에 대하여 비선형적으로 변화하는 것은 산화제

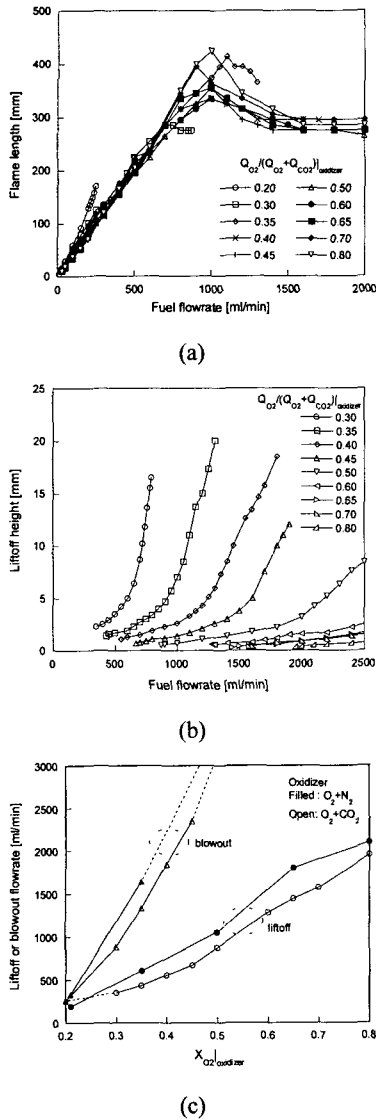


Fig. 6 Characteristics for case III ; (a) flame length, (b) liftoff height, (c) flame zone

중의 산소농도 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 연료중의 CO_2 물분을 증가는 화염을 불안정하게 하는 효과를 초래하여, 적은 유량에서 부상하여 적은 유량에서 화염날림이 발생하였다. 산화제 중의 O_2 물분을 증가는, 화염을 안정화시켰다. Figure 6은 case III에 대한 외부화염길이, 부상높이 및 화염 영역을 나타낸다. case II에 비하여 외부 화염길이는 감소하였으나, 유량 증가에 따라 선형적으로 증가하다가 감소한 후 일정해지는

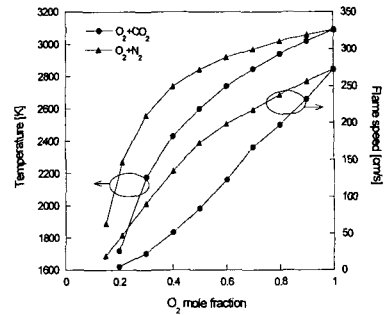


Fig. 7 Calculated results of $C_3H_8-N_2-O_2$, $C_3H_8-CO_2-O_2$ flame on flame temperature and laminar flame speed

경향을 나타내었다. 2000ml/min 이상에서는 화염의 선단부의 경계가 모호하여 측정이 불가능하였다.

산화제 중의 O_2 물분을 감소에 따라 유량에 대한 부상높이는 비선형적으로 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이러한 비선형적 경향은 산화제중에 질소를 희석한 case II와 유사함을 볼 수 있다.

X_{O_2} 증가에 따라 화염이 부상하는 유량과 화염날림 유량이 선형적으로 증가함을 볼 수 있으며, 질소를 희석제로 쓰는 경우가 이산화탄소를 희석제로 쓰는 경우보다 더 높은 유량에서 화염부상이 시작되고, 더 높은 유량에서 화염날림이 발생할 수 있다.

난류 부상화염의 밑면이 층류화염전파속도(S_L)의 2.3배 영역에 위치한다는 Han 등의 연구⁽⁸⁾나 난류화염을 층류소화염의 집합으로 설명하는 laminar flamelet 모델 등은 층류화염으로 난류화염의 특성을 설명할 수 있음을 보여준다. 따라서 희석제에 따른 화염부상 특성을 설명하고자 GRI 3.0 메카니즘⁽⁹⁾을 사용하여 층류화염 전파속도를 계산하였다. 화염이 안정화되는 지점에서, 산소와 질소(혹은 CO_2)의 물 비는 공급되는 산화제에서의 비와 동일하고, 산화제와 연료는 이론당량비 라는 가정을 하였다. 단위 몰당 열용량이 적은 질소를 희석하는 경우가 열용량이 큰 이산화탄소를 희석하는 경우에 비하여 화염온도가 높으며 이에 따라 화염전파 속도가 높음을 볼 수 있다(Fig. 7 참조). 이러한 화염전파 속도의 차이에 기인하여 Figure 6(c)의 화염안정성 차이가

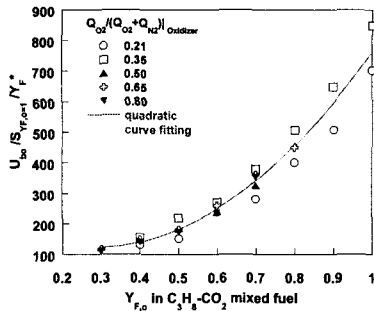


Fig. 8 scaling of the blowout velocities for case II

난 것으로 사료된다.

일반적으로 화염날림 유속을 화염전과 속도로 무차원하고, 연료를 산화제로 부분예혼합 하는 경우는 이를 다시 $Y_{F,O}$ 로 무차원화 하므로, case II의 경우에 대하여 Figure 8과 같이 무차원화 하였다. 화염날림유량을 $S_{Y_{F,O=1}}$ (연료측에 프로판만을 사용한 경우의 화염전과속도)와 Y_F^* (주어진 연료와 산화제가 이룬 당량비 일때의 연료질량분율)로 무차원화 시킨 값은 $Y_{F,O}$ 의 제곱에 비례함을 볼 수 있다. 즉, 연료측의 CO_2 양을 증가시키면, $Y_{F,O}$ 와 Y_F^* 이 감소하므로 화염날림 유속 U_{bo} 는 더욱 비선형적으로 감소한다.

Figure 9는 case III경우의 부상높이를 U_o/S_L 로 나타낸 것이다. 부상높이는 출구 유량, 혹은 유속에 대하여 비선형적으로 증가하며, X_{O_2} 와 무관하게 한 직선위로 올라올 수 있다. 산화제로 공기를 사용할 때 부상높이는 출구 유속에 선형적으로 변화하나, 산화제중의 산소몰분율이 증가한 경우에는 그림과 같이 강한 비선형성이 있으므로 본 실험 결과를 곡선맞춤 하여 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$H_L/d = 1.0 + 3.44 \times 10^{-8} (U_o/S_L)^{3.83} \quad (R=0.98).$$

산화제중의 산소 몰분율이 증가할수록, Figure 7과 같이 화염 전과속도(S_L)이 증가하여 U_o/S_L 가 감소하고 이에 따라 부상높이가 감소함을 알 수 있다.

화염온도 저감과 CO_2 배출 저감을 위하여 산소부화 화염에 CO_2 를 재순환 시키는 경우에는, 순수 산소만을 사용할 때에 비하여 화염날림 유

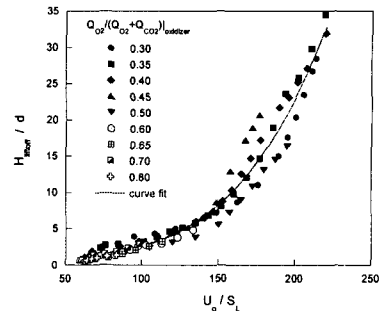


Fig. 9 scaling of the characteristic flame values for case III on liftoff height

량이 감소하고 부상화염 높이가 증가하므로 재순환되는 CO_2 의 양을 결정하는데 세심한 주의가 요구된다.

4. 결론

화석제 종류, 화석량에 따른 산소부화 화염의 안정성에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 질소 화석에 비하여 CO_2 화석의 경우가 화석량 증가에 따라 화염이 더 불안정하였다.
- (2) 산소 부화의 증가에 따라, 화염 전과속도의 증가로 화염은 안정화하여 화염 부상과 화염날림이 일어나는 유량이 증가하였다.
- (3) 질소화석 산화제를 사용하는 경우, 무차원화된 화염날림 유속($U_{bo}/S_{Y_{F,O=1}}/Y_F^*$)는 연료 질량분율의 제곱에 비례하였다.
- (4) CO_2 화석 산소 부화화염의 부상높이는 연료 유속을 화염전과속도로 나눈 값의 3.83승에 비례하였다.

후 기

본 논문은 연소기술 연구센터 지원에 의하여 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, B. J., Kim, J. S. and Chung, S. H.,

- 1994, Twenty-fifth Symposium (International) on Combustion, *The Combustion Institute*, pp. 1175~1181.
- (2) Pitts, W. M., 1988, Twenty Second Symposium (International) on Combustion, *The Combustion Institute*, pp. 809~816.
- (3) Kalghatgi, G. T., 1984, *Combust. Sci. Tech.*, 41, pp. 17~29.
- (4) Miake-Lye, R. C., and Hammer, J. A., 1988, Twenty Second Symposium (International) on combustion, p. 817, *The Combustion Institute*.
- (5) Nils A. Rokke, Johan E. Hustad, and Otto K. Sonju, 1994, *Combustion and Flame* 97:88~106.
- (6) Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M., S. and Lee, B. J., 2000, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 28, pp. 2093~2099.
- (7) Christopher J. Montgomery., Carolyn R. Kaplan., and Elaine S. Oran., 1998, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, *The Combustion Institute*, pp. 1175~1182.
- (8) Donghee Han, and M. G. Mungal., 2000, "Observation On The Transition From Flame Liftoff To Flame Blowout," *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 28, pp. 537~543.
- (9) Gregory P. Smith, David M. Golden, Michael Frenklach, Nigel W. Moriarty, Boris Eiteneer, Mikhail Goldenberg, C. Thomas Bowman, Ronald K. Hanson, Soonho Song, William C. Gardiner, Jr., Vitali V. Lissianski, and Zhiwei Qin http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/