

산소부화공기를 이용한 동축 제트화염의 부상과 연소 안정성

곽지현* · 전충환** · 장영준†

Lift-off and Flame Stability of a Coaxial Non-Premixed Jet Using Oxygen Enriched Air

Ji-Hyun Kwark, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

Key Words: Oxygen Enriched(산소부화), Coaxial Non-Premixed Jet(동축 비예혼합 제트), Turbulent Diffusion(난류확산)

Abstract

Combustion using oxygen enriched air is known as a technology which can increase flame stability as well as thermal efficiency due to improvement of the burning rate. Lift-off, blowout limit and flame length were examined as a function of jet velocity, coflow velocity and OEC(Oxygen Enriched Concentration). Blowout limit of the flame below OEC 25% decreased with coflow velocity, but the limit above OEC 25% increased inversely. Lift-off height decreased with increase of OEC. Especially lift-off hardly occurred in the condition above OEC 40%. Flame length of the flames above OEC 40% was increased until the blowout occurred. Flame stability became improved since lift-off and blowout limit increased much with increase of OEC.

기호설명

d	: 연료노즐 내경[mm]
H	: 부상높이[mm]
H/d	: 무차원 부상높이
L	: 화염길이[mm]
OEC	: 산소부화농도[%]
S_L	: 층류화염속도[m/s]
U_0	: 연료제트유속[m/s]
U_0/S_L	: 무차원 제트유속
V_0	: 동축류유속[m/s]

1. 서론

최근 산소부화공기를 이용한 연소기술이 주목 받고 있는데 연소공기에 산소를 첨가하여 산화제의 산소농도를 높여서 연소시키는 산소부화연소는 연소속도의 향상과 화염온도의 상승으로 열전달이 증대하여 열효율을 높여줄 수 있는 에너지 절약형 연소기술로^(1~2), 높은 화염온도를 얻을 수 있어 최근 산업현장에서 주물용 회전용해로에 이용되는 등 생산원가를 절감하고 있다.⁽³⁾ 그런데 산소부화공기를 이용한 연소는 연소속도의 증가에 의한 화염안정성 증대에 큰 영향을 미칠 수 있어⁽⁴⁾, 이러한 분위기에서의 화염안정화에 관한 연구는 더욱 중요해지고 있다.

공업로에 사용되는 연소기는 대부분 비예혼합 화염으로, 연료와 산화제가 초기에 분리된 상태에서부터 확산과 대류에 의하여 화염지역으로 전

† 책임저자, 회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : changyj@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)582-9818

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

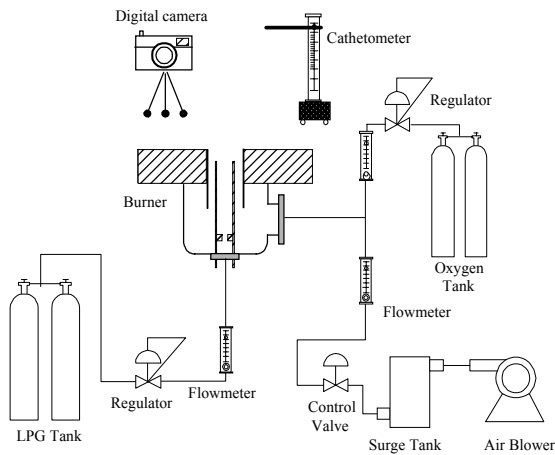


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

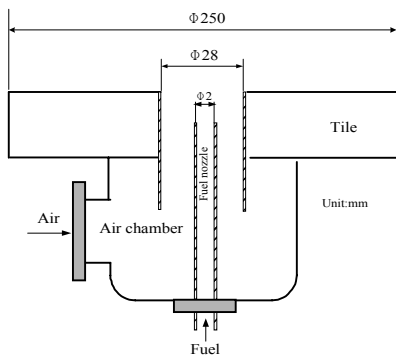


Fig. 2 Specification of the burner

달되고 분자적 혼합이 일어나 화학반응이 발생하고, 생성된 열과 물질은 전달 현상에 의하여 화염 바깥쪽으로 이동된다.⁽⁵⁾ 연료 분사 시 노즐에 부착돼 있던 화염은 유속의 증가에 따라 노즐로부터 떨어져 존재하는 부상화염으로 변환되거나 화염꺼짐이 발생할 수 있는데,⁽⁶⁾ 부상화염에서 노즐로부터 화염 밑면까지의 거리를 부상높이라고 한다. 화염이 부상한 후 유량을 어느 한계 이상 계속 증가시키면 화염날림이나 불어꺼짐 현상이 발생한다. 이론적인 연소를 위해서는 이론혼합비에 맞는 공기와 연료가 요구되어 지지만, 완전 연소를 위해 이론 공기량보다 더 많은 공기를 공급하거나, 또는 연료유량을 지나치게 증가시키면 화염꺼짐 현상을 초래할 수 있다. 따라서 난류화산화염의 연소에 있어서 연소안정성은 오랫동안 연구자들의 관심의 대상이 되어왔는데, 이러한 연구들은 화염 안정화에 영향을 미치는 물리적 메커니즘을 밝혀내고, 이러한 현상에 대한 예측 가능한 기술을 개발하는 방향으로 이루어져 왔

다.⁽⁷⁻⁸⁾ 또한 Vanquickenborne과 Tiggelen⁽⁹⁾, Kalghatgi⁽¹⁰⁾, Peters와 Williams⁽¹¹⁾ 등의 많은 학자들에 의해 난류화염 안정성에 대한 여러 가지 다른 모델들에 기초한 다양한 기구들이 연구되어졌다. 이러한 연구들은 주로 일반공기를 이용한 연소 시 유속이나 선회강도에 따른 화염의 불안정 특성과 메커니즘에 중점을 두고 있다. 최근 질소 희석이나 공기 부분 예혼합 등의 효과를 고려한 연구⁽¹²⁻¹³⁾도 있으나, 산소부화공기를 이용한 연소안정성에 관한 연구는 아직 많지 않다. 따라서 동축류의 산소농도 증가가 화염의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

본 연구는 동축 비예혼합 제트에서 연료와 동축류의 유속 및 산소부화농도에 따른 화염의 부상과 가연한계를 살펴보고 연소안정성을 조사해보고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 크게 연소기, 연료 공급장치, 공기 및 산소 공급장치, 부상높이 및 화염길이 측정장치로 구성되어 있다. 연소기는 Fig. 2와 같이 동축 비예혼합 버너로 가운데에 내경 2 mm의 연료노즐이 있고, 공기 노즐의 직경은 28 mm이다. 연료는 저위발열량 93.6 MJ/Nm^3 , 이론공기량 $23.8 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$ 의 프로판이며, 공기는 출력 0.75 kW의 송풍기로부터 서지 탱크를 거쳐 연소기로 공급되는데, 산소부화를 위해 관 중간에 산소 탱크와 연결한 뒤 10 m 가량 진행하게 하여 충분히 혼합되도록 하였다. 연료와 공기의 유속, 산소부화농도에 따른 부상높이 및 화염길이의 측정은 카세트미터와 디지털 카메라를 이용하여 촬영한 뒤 측정하였다. 이 때 측정 기준은 사진으로 관찰되는 가시적 화염길이를 기준으로 하였고, 각 조건에서 30회 반복 측정한 뒤 평균하여 구하였다. 실험은 연료제트의 유속, 산화제인 동축류의 유속과 산소농도를 바꾸어가며 가연한계, 부상높이, 화염길이 등을 측정하였다. Table 1에 자세한 실험조건을 나타낸다.

실험에서 적용한 산소부화농도의 산출방법은

Table 1 Experimental condition

Item		Blowout	Lift-off height Flame length
Fuel jet velocity(m/s)		0~120	0~100
Coflow velocity(m/s)		0~2.5	0.66
Re	Fuel	0~53933	0~44944
	Coflow	0~3871	1022
OEC(%)		21~65	21~50

Table 2 Flow rates of air and oxygen

OEC(%)	A(l/min)	O _{2,add} (l/min)
21	23.8	0
25	22.6	1.2
30	21.1	2.7
35	19.6	4.2

다음과 같다. 산화제의 산소농도를 높여주기 위해 공기의 일부를 털어내고 순산소(99.9%)를 첨가해 준다. 이 때 유속의 변동이 연소반응에 미치는 영향을 배제하기 위해 공기량과 첨가되는 순산소의 유량의 합은 항상 일정하도록 하였다. 연료유량 1 l/min에 해당하는 이론공기량 23.8 l/min를 기준으로 할 때, 공기유량을 A, 첨가시키는 순산소의 유량을 O_{2,add}으로 표기하면, 산소부화농도(OEC)에 따른 순산소의 첨가량과 공기량은

$$A + O_{2,add} = 23.8 \quad (1)$$

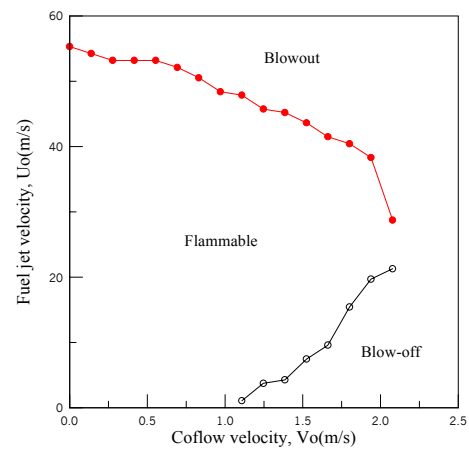
$$OEC(\%) = \frac{0.21A + O_{2,add}}{23.8} \times 100 \quad (2)$$

식으로 결정된다. 위 식들로부터 결정된 공기와 산소의 유량은 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가연 한계

Fig. 3은 동축류로 일반공기를 사용했을 때 공기의 유속에 따른 화염의 가연한계를 나타낸 그림이다. 동축류의 유속이 일정할 때 연료 제트의 유속이 너무 빨라지면 화염은 소멸되며, 동축류의 속도가 증가할수록 화염날림이 되는 연료제트의 가연한계는 감소하게 된다. 동축류의 운동량

**Fig. 3** Stability limit as a function of coflow velocity(OEC=21%)

이 증가함에 따라 더 낮은 연료유속에서도 화염이 떠밀려 올라가 불안정해지기 때문이다. 특히 공기유속이 1.1 m/s 미만에서는 연료제트의 유속이 아무리 낮아도 화염이 꺼지지 않지만, 그 이상의 영역에서는 동축류의 속도가 증가할수록 연료제트의 유속이 일정한 속도에 미치지 못하면 화염이 blow-off 된다. 동축류의 운동량이 상대적으로 커 화염이 밀려 올라가 붙어꺼지기 때문이다. 그리고 공기유속이 증가할수록 blow-off 되는 연료의 유속도 증가하게 되어 가연영역은 줄어들게 된다. 동축류의 운동량 증가에도 화염이 붙어꺼지지 않으려면 충분한 유량의 연료제트가 필요하기 때문이다. 공기유속 증가에 따라 가연한계 영역은 점점 줄어든다. 특히 동축류 유속 2.1 m/s 이상에서는 어떠한 연료제트의 유속에서도 화염이 존재하지 못하게 된다.

Fig. 4는 동축류의 산소부화농도에 따른 화염날림 한계를 나타낸 그림이다. Fig. 3의 결과와 같이 산소농도 21%의 화염은 동축류의 유속증가와 함께 화염날림 한계가 줄어들지만, 산소농도 25%의 화염은 동축류 유속 1.7 m/s까지 일정한 한계를 유지하다 그 이상의 유속에서 줄어들게 된다. 그러나 산소농도 30% 이상의 화염은 동축류의 유속 증가 시 가연한계도 증가하는 특성을 나타내는데, 이는 동축류의 운동량 증가에 의해 화염이 부상되는 효과보다 화염 내부로 유입되는 주변 공기의 산소량 증가로 연소반응률이 촉진되는 효과가 더 우세해지기 때문으로 생각된다.

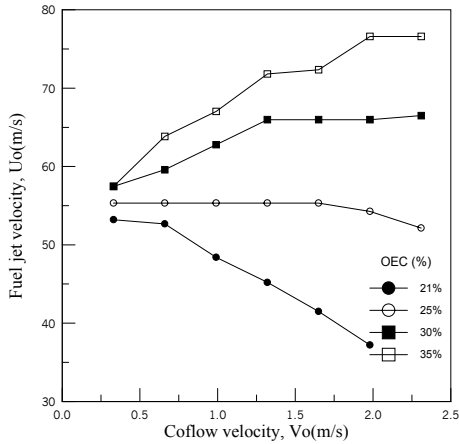


Fig. 4 Blowout limit with coflow velocity for various OECs

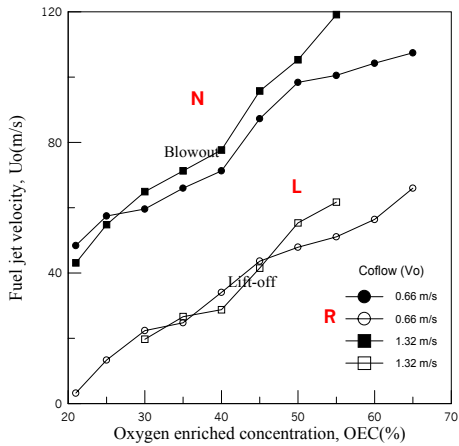


Fig. 5 Stability limit with OEC for two coflow velocity(N:no flame, L:lifted, R:rim attached)

Fig. 5에 동축류의 유속을 각각 0.66과 1.32 m/s로 달리했을 때 산소부화농도에 따른 화염의 가연한계를 나타낸다. 동축류 유속이 0.66 m/s일 때 산소농도 21%의 일반공기 연소 시, 제트유속 3.2 m/s에서 부상이 일어나고 점점 부상높이가 증가하여 12.1 m/s에서 한여나리이 바새치게 된다. 그러나 동축류의 산소농도가 증가할수록 부상한계와 화염날림 한계도 현저히 증가하게 된다. 산소부화농도가 40%만 되어도 부상한계는 34 m/s, 화염날림 한계는 71.3 m/s가 되어 안정 연소영역이 크게 증가하게 된다. 이에 따라 연소 효율도 증가하게 되며, 연소공기의 산소농도를 조금만 증가시켜도 얻을 수 있는 안정성의 이점은 크다고 할 수 있다.

두 가지 동축류의 유속에 대해 부상한계와 화

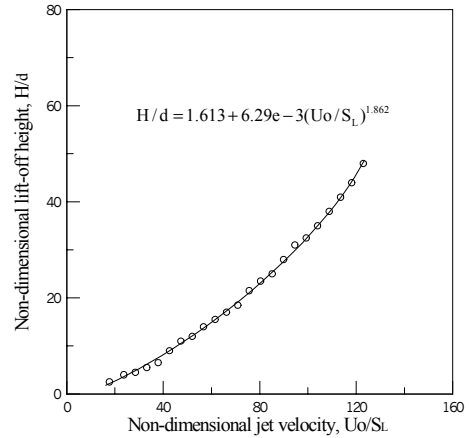


Fig. 6 Relation of non-dimensional lift-off height with non-dimensional jet velocity($V_o=0m/s$)

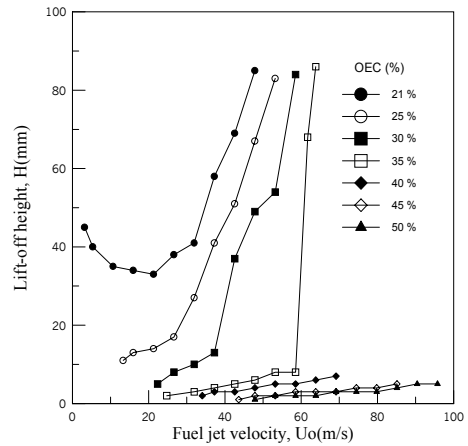


Fig. 7 Lift-off height with jet velocity for various OECs($V_o=0.66m/s$)

염날림 한계를 비교해보면, 산소농도 25% 이하의 화염은 동축류의 유속이 낮을 때 가연한계가 더 크지만, 산소농도가 30% 이상이 되면 동축류의 유속이 빠를 때의 가연한계가 더 커진다. 이는 Fig. 4에서처럼 화염에 유입되는 공기의 산소량 증가로 인한 효과로 생각되어진다. 반면 부상이 일어나는 부상한계는 산소농도 45% 이하에선 크게 차이가 없으며, 산소농도 50% 이상에서 동축류 유속 1.32 m/s의 화염이 좀 더 큰 것으로 나타났다. 한편 동축류 유속 1.32 m/s일 때 산소농도 25% 이하의 화염은 항상 부상화염으로 존재하였다.

3.2 부상 높이

연료제트의 유속에 따른 제트화염의 거동을 살

펴보기 위하여 Fig. 6에 연료의 분출속도에 따른 화염의 부상높이를, 제트유속을 프로판 연료의 층류화염속도로 나눈 무차원속도비(U_0/S_L)와 부상높이를 연료직경으로 나눈 무차원부상높이(H/d)로 나타내었다. 부상높이는 제트유속에 따라 비선형적인 증가를 하며, 이러한 특징은 자유제트에서의 거동과 일치한다.⁽¹³⁻¹⁴⁾ 곡선맞춤 하여 얻은 이들의 관계는 식 (3)과 같이 나타난다.

$$H/d = 1.613 + 6.29 \times 10^{-3} (U_0/S_L)^{1.862} \quad (3)$$

동축류의 유속을 일정하게 하고 산소부화농도를 달리하였을 때 부상높이의 변화를 관찰하였다. Fig. 7에서 산소농도 21%의 일반공기를 공급시 화염의 부상높이의 변화는 Fig. 6의 동축류의 유속이 0일 때와는 다른 특징을 보인다. 즉, 제트유속 0.6 m/s에서 부상하기 시작한 뒤 제트유속 증가와 함께 부상높이가 감소하다가, 제트유속 21 m/s에서 최소가 되고 이후 다시 증가하는 특성을 가진다. 어느 정도의 제트유량까지는 연료와 동축류의 혼합작용이 개선되어 연소반응률이 높아져 부상높이가 감소하지만, 제트유속이 더욱 증가하게 되면 이러한 효과보다 운동량 증가에 의한 화염부상이 더 우세해지기 때문으로 사료된다. 산소농도 30%까지는 부상높이가 제트유속 30~50 m/s에서 급격히 증가하는 특징이 있으며, 산소농도 35%의 경우에는 제트유속 60 m/s 부근에서 급격히 부상하게 되지만, 산소농도 40% 이상의 화염은 제트유속이 아무리 증가하여도 10 mm 이내의 부상높이를 가지다 곧바로 화염날림이 일어나는 특성을 나타내었다. 이것은 식 (3)의 형태를 벗어나는 산소부화연소의 특성으로 보이며, 화염날림이 일어나는 한계까지 거의 부상 없이 안정된 연소를 하게된다.

동축류의 산소농도가 증가할수록 부상높이의 감소정도를 살펴보기 위해 일반공기(OEC 21%) 연소시 부상높이를 1로 했을 때, 각 산소부화농도에 따른 부상높이의 크기를 노멀라이징 한 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 이 때 제트유속은 비교 가능한 50 m/s 이하로 하였다. 산소농도 30% 이하의 화염은 낮은 제트유속에서 부상높이의 감소 효과가 크고, 제트유속이 증가할수록 높이는 줄어든다. 제트유속 27 m/s에서 산소농도

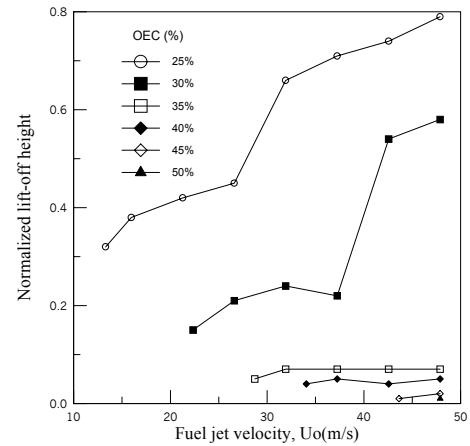


Fig. 8 Normalized lift-off heights for the flame using the general air($V_0=0.66$ m/s)

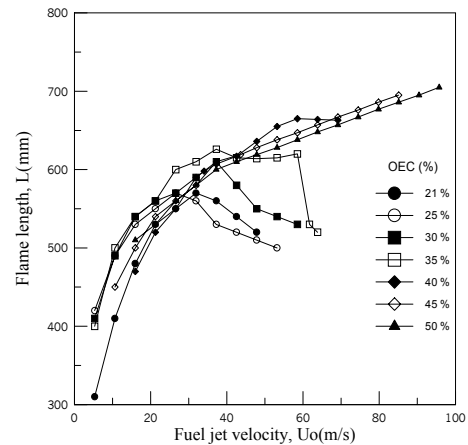


Fig. 9 Flame length with jet velocity for various OEC($V_0=0.66$ m/s)

25%와 30%의 화염은 일반공기 화염에 비해 각각 45%, 21%의 부상높이를 가져 훨씬 안정된 화염이 된다. 또한 산소농도 35% 이상의 화염은 10% 미만의 부상높이를 나타내어 산소부화공기가 화염안정성에 미치는 영향은 크다고 할 수 있다.

3.3 화염 길이

연료제트의 유속 증가에 따라 유량도 증가하여 화염의 길이는 Fig. 9에서처럼 신장된다. 그러나 화염이 부상하게 되면 화염은 길고 가느다란 형태에서 밀면이 둥글고 직경이 큰 형태로 바뀌게 되므로 화염길이는 감소하게되며, 산소부화농도에 따른 화염길이의 감소지점은 Fig. 7에서 부상높이가 급격히 증가하게되는 제트유속과 잘 일치

한다. 그러나 화염이 거의 부상하지 않는 산소농도 40% 이상의 화염은 제트유속 증가에 따라 화염이 소멸될 때까지 화염길이가 계속 증가한다. 제트유속 30~60 m/s 사이에서 산소부화농도가 높을수록 오히려 화염길이가 긴 이유는 노즐로부터 화염선단까지의 길이는 감소하지만 부상높이도 크게 줄어들어 화염의 길이가 상대적으로 길어지기 때문이다.

4. 결 론

동축 비예혼합 제트화염에서 연소공기의 산소부화농도에 따른 화염의 부상과 안정성을 조사해 보고 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 산소농도 25% 이하의 화염은 동축류의 유속 증가에 따라 가연한계가 감소하지만, 산소농도 30% 이상의 화염은 오히려 증가한다.
- (2) 동축류의 산소부화농도가 증가할수록 화염의 부상한계와 화염날림 한계는 크게 증가하며, 동일한 산소농도에서도 동축류의 유속에 따라 증가하거나 감소한다.
- (3) 제트유속이 증가함에 따라 화염의 부상높이도 증가한다. 그러나 산소부화농도의 증가와 함께 부상높이는 크게 감소하며, 특히 산소농도 40% 이상의 분위기에서는 거의 부상이 일어나지 않는다.
- (4) 제트유속 증가 시 화염의 길이는 길어지며, 동일한 제트유속에서 산소부화농도가 높을수록 노즐에서 화염선단까지의 길이는 감소하지만, 부상높이도 줄어들기 때문에 화염의 길이는 크게 차이가 없다. 그러나 산소농도 40% 이상의 화염은 화염날림이 될 때까지 계속 증가한다.
- (5) 산소부화공기를 동축류로 한 제트화염은 불어꺼짐이나 화염날림에 대한 가연한계 영역의 증가가 현저하고, 부상도 거의 일어나지 않아 안정된 연소가 가능하다.

참고문헌

(1) Sautet, J. C., 2001, "Large Scale Turbulent Structures in Non-Premixed, Oxygen Enriched Flames," *International Conference of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, pp. 277~287.

- (2) Lambert, J. and Sorin, M., 1997, "Analysis of Oxygen-Enriched Combustion for SMR," *Energy*, Vol. 22, No. 8, pp. 817~825.
- (3) Han, J. S. and Lee, Y. H., 1994, "New Melting Technology of Oxy-Combustion Rotary Furnace for Cast Iron," *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 489~494.
- (4) Bae, J. R. and Lee, B. J., 2002, "Effect of Diluents and Oxygen-Enrichment on The Stability of Nonpremixed Flame," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1458~1464.
- (5) Turns, S. R., 2000, *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*, 2nd-ed., McGRAW-HILL, Singapore.
- (6) Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A., and Mungal, M. G., 1984, *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, p. 303.
- (7) Dahm, W. J. A. and Dibble, R. W., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, p. 801.
- (8) Eickhoff, H., Lnze, B., and Leuckel, W., 1984, *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, p. 311.
- (9) Vanquickenborne, L. and Tiggelen, V. A., 1966, *Combustion and Flame*, Vol. 10, p. 59.
- (10) Kalghatgi, G. T., 1984, *Combustion Science and Technology*, Vol. 41, p. 17.
- (11) Peters, N. and Williams, F. A., 1983, *AIAA Journal*, Vol. 21, p. 423.
- (12) Lee, J., Kim, J. S. and Chung, S. H., 1994, "Effect of Dilution on the Lift-off of Non-Premixed Jet Flames," *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, Vol. 25, pp. 1175~1181.
- (13) Lee, B. J., Cha, M. S. and Chung, S. H., 1997, "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," *Combustion Science and Technology*, Vol. 127, pp. 55~70.
- (14) Kim, K. N., Won, S. H., Cha, M. S. and Chung, S. H., 2002, "Characteristics of Laminar Lifted Flame in High Temperature Coflow," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 7, No. 2, pp. 1~6.