

동축류 버너에서 질소 희석된 연료의 부상 특성

원상희* · 차민석** · 이병준*** · 정석호****

Characteristics of Lifted Flame in Coflow Jets for Highly Diluted Fuel

S. H. Won, M. S. Cha, B. J. Lee and S. H. Chung

Key Words : 삼지화염, 부상화염, 화염부상, 화염날림, 슈미트 수

Abstract

Characteristics of lifted flames for highly diluted propane and methane with nitrogen in coflowing air is experimentally investigated. In case of propane, for various fuel mole fractions and jet velocities, three distinctive types of flames are observed; nozzle attached flames, stationary lifted flames, and oscillating lifted flames. When fuel jet velocity is much smaller than coflow velocity, the base of nozzle attached flame has a tribrachial structure unlike usual coflow diffusion flames. Based on the balance mechanism of the propagation speed of tribrachial flame with flow velocity, jet velocity is scaled with stoichiometric laminar burning velocity. Results show that there exists two distinctive lifted flame stabilization; stabilization in the developing region and in the developed region of jets depending on initial fuel mole fraction. It has been found that lifted flame can be stabilized for fuel velocity even smaller than stoichiometric laminar burning velocity. This can be attributed to the buoyancy effect and flow visualization supports it. Lifted flames are also observed for methane diluted with nitrogen. The lifted flames only exist in the developing region of jet.

1. 서론

부상 화염은 화염의 안정화 특성을 파악하기 위해 그동안 광범위하게 연구

되어 왔다. 특히 부상 화염은 과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염, 그리고 확산 화염이 삼중점에서 공존하는 삼지 화염의 구조를 갖고 있고,^[1-4] 이러한 삼지 화염은 난류 화염의 국소적인 화염 구조 모델로서 최근 인식되고 있다.^[5-7] 삼지 화염의 특성상 화염은 당량비가 1인 지점을 따라 전파하며, 이 경우 유동의 redirection 효과에 의해 층류 화염 전파 속도보다 빠른 전파 속도를 갖게

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
** 한국기계연구원
*** 영남대학교 기계공학부
**** 서울대학교 기계항공공학부

된다.^[6]

화염의 전파 속도와 유동장의 속도가 일치하는 곳에서 화염이 안정화되며 제트의 출구 속도에 따라 부상 높이는 비선형적으로 증가함은 이미 밝혀진 바 있다.^[1,2] 또한 질소 희석과 부분 예혼합 연료의 부상 특성도 밝혀진 바가 있으나, 이들 연구에서 사용한 노즐은 내경이 1 mm 미만이고 출구 속도가 $O(10 \text{ m/s})$ 이어서 부상 화염이 제트가 완전 발달된 영역에서 발견되었다.^[3,4]

본 연구에서는 이후의 수치해석적 연구에 적용 가능하도록, 수치적 접근이 용이한 제한된 동축류 버너 (confined coflow burner) 를 대상으로 하였다. 기존에 관찰되는 층류 부상화염의 크기가 비교적 작기 때문에 계측상의 공간적 분해능을 높이기 위하여 상대적으로 직경이 큰 노즐을 이용하였으며, 질소 희석을 통하여 층류상태의 부상 화염을 형성시켰다.^[4] 이와 같이 고도로 희석된 연료 제트 화염의 안정화 특성에 대하여 고찰하고, 제트의 발달과 부력효과를 고려하여 결과를 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 동축류 버너와 유량 조절부, 그리고 측정부와 가시화 장치로 구성되어 있다. 동축류 버너의 노즐 내경은 11.1 mm 이고, 노즐 출구에서 완전 발달된 속도분포를 얻기 위해 길이는 35 cm 로 하였다. 동축류의 외경은 154 mm 이고 균일한 속도분포를 얻기 위해 유리 구슬과 세라믹 하니콧을 설치하였다. 연료로는 C.P. 등급의 프로판과 메탄을 사용하였고 유량조절은 질량 유량계 (MKS) 를 사용하였다. 동축류의

공기는 습식 가스미터로 보정한 sonic nozzle 을 이용하였다.

외부 유동에 의한 교란을 막기 위해 광학적 접근이 가능한 내경 154 mm, 100 cm 높이인 아크릴 실린더를 이용하여 외부와 차단하였다. 화염의 크기와 부상 높이는 카세트미터와 디지털 카메라를 이용하여 측정하였으며, 화염의 직접사진은 35 mm 카메라를 이용하였다. 부력의 효과를 가시화하기 위해 He-Ne 레이저와 실린더 렌즈를 이용하여 평면 Mie 산란 이미지를 측정하였다.

OH 라디칼의 PLIF 이미지를 얻기 위해 Nd:YAG 레이저 (Continuum, PL8000) 와 색소 레이저 (Continuum, ND6000) 를 사용하였으며, $A^2\Sigma^+ - X_2\Pi_1 (1,0)$ 밴드 $Q_1 (6)$ 라인 (282.95 nm) 을 OH 라디칼의 여기파장으로 선정하였고 OH 라디칼 형광 신호의 국부적인 포화상태를 막기 위하여 7 mJ/p 의 레이저 파워에서 실험을 수행하였다. 100 mm 실린더 렌즈와 1000 mm 볼록 렌즈를 이용하여 폭 50 mm 의 평면광을 만들었으며, 신호의 검출부로는 ICCD 카메라 (Princeton Instrument) 와 광학 필터 (UG-11, WG-305) 를 이용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 화염의 특성

노즐의 출구 속도, U_o 와 질소에 대한 프로판의 부피비, X_{F_o} 에 대한 화염의 부상 특성에 대해 실험하였다. $X_{F_o} = 0.10$ 일때 U_o 의 증가에 따른 화염의 부상 높이의 변화를 Fig. 1 에 나타내었다. 그림에서 보듯 U_o 의 변화에 따라 세가지 유형의 화염을 관찰할 수 있다. U_o 가 3.25 cm/s 보다 작을 경우 부착 화염이 관찰되었고, $3.25 < U_o < 3.32$ 일 경우 진동

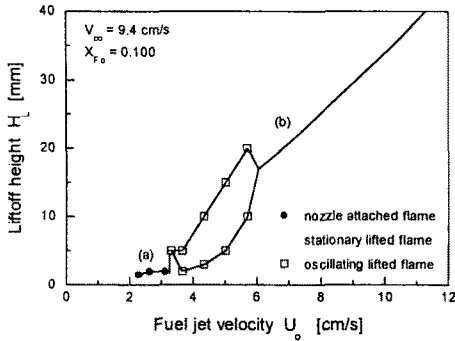


Fig. 1. Typical liftoff height for $X_{F_o} = 0.100$
 ((a) and (b) correspond to pictures in Fig.2).

화염이 존재하며, 이 이후에는 안정적인 부상 화염이 존재한다.

Fig. 2는 부착 화염과 안정적인 부상 화염의 OH 라디칼의 PLIF 이미지와 자발광 이미지를 중첩시킨 이미지이다. 일반적으로 동축류 버너에서 노즐에 부착된 확산 화염은 삼지 화염의 구조를 갖기 어려우나,^[11] 본 실험에서는 U_o 보다 동축류 공기의 속도, V_{co} 가 상대적으로 큰 경우에 대해 삼지 화염의 구조를 갖는 부착 화염을 관찰할 수 있다. 일반적으로 과농 예혼합 화염의 경우 OH 라디칼의 PLIF의 강도는 확산 화염을

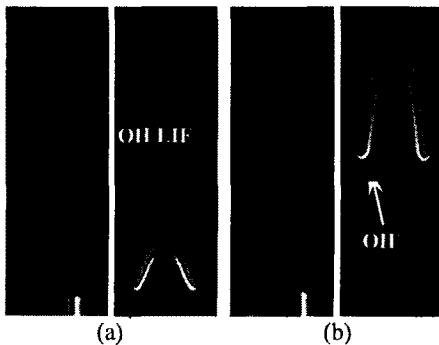


Fig. 2. Direct photographs of flames and superposed images of OH PLIF and chemiluminescence for $X_{F_o} = 0.10$; (a) $U_o = 2.64$ and (b) 7.07 cm/s

따라 강하게 나타나고 자발광의 강도는 화염장 내에 비교적 온도가 높은 예혼합 화염면을 따라 강하게 난다.^[12,13] 이를 근거로 Fig. 2a는 부착 화염임에도 불구하고 Fig. 2b와 같이 삼지 화염의 구조를 갖음을 알 수 있다. 이러한 삼지 화염의 구조를 갖는 부착화염이 존재하는 이유는 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째로 U_o 보다 V_{co} 가 상대적으로 큰 경우 동축류의 공기가 축대칭성에 의해 노즐쪽으로 많은 양이 유입되기 때문이며 둘째로 연료가 많은 양의 질소로 희석이 되어 있기 때문에 순수 연료의 경우보다 당량비가 1인 지점이 노즐 중심으로 치우쳐 있기 때문이다.^[4,8]

$U_o = 3.25$ cm/s 이 되면 화염은 부상하게 되고 3.32 cm/s 가 되면 진동을 하게 된다. 화염이 진동하는 동안의 화염 밑면의 부상 높이의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 위에서 언급하였듯이 진동 화염의 전후 조건에서 화염이 삼지 화염의 구조를 갖고 있기 때문에 이러한 진동 화염 또한 삼지 화염의 구조를 갖고 있음을 유추할 수 있다. 따라서 이렇게 화염이 진동하는 이유는 삼지 화염의 전파 특성과 이후에 언급할 화염의 부력의 영향 때문으로 생각할 수 있으나 본 연구에서는 다루지 않았다.

$U_o > 6.05$ cm/s 가 되면 안정적이 부상 화염을 관찰할 수 있고 U_o 가 증가함에 따라 부상 높이가 비선형적으로 증가하다가 $U_o = 68.5$ cm/s 가 되면 44.5 cm의 부상 높이에서 화염 날림이 발생한다. 이 경우 화염의 길이는 10 cm 이상이 되어 확산 화염부의 불안정성으로 인해 화염 날림이 발생한다.

위에서 언급한 부착 화염, 진동 화염, 그리고 안정적인 부상 화염의 존재 영

역을 $V_{co} = 9.4 \text{ cm/s}$ 인 경우에 대해 U_o

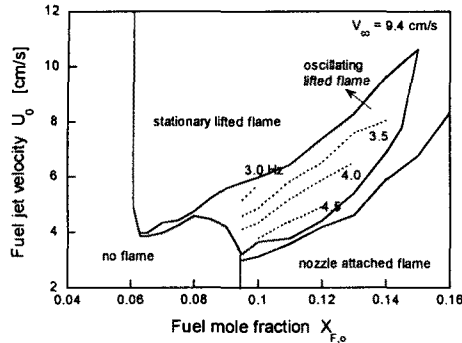


Fig. 3. Regions of different types of flames in coflow jets

와 $X_{F,o}$ 에 대해 Fig. 3 에 나타내었다. $X_{F,o} < 0.06$ 일 경우에는 과다한 질소 희석으로 인해 화염이 존재하지 않고 $0.06 < X_{F,o} < 0.95$ 의 구간에서 U_o 가 약 4 cm/s 보가 작을 경우 진동 화염이 Fig. 3 에서와 같은 진동수를 갖고 진동하며 $X_{F,o} > 0.15$ 이고 U_o, V_{co} 인 영역에서

는 진동 화염이 존재하지 않는다.

3.2 안정적인 부상 화염

다양한 $X_{F,o}$ 에 대해 U_o 에 따른 화염의 부상 높이의 변화를 Fig. 4 에 도시하였다. 전체적으로 U_o 가 증가함에 따라 부상 높이, H_L 는 비선형적으로 증가하며 $H_L \propto U_o^{1.4}$ 의 관계를 갖는다. 이는 순수 연료의 자유 유동장에서의 결과, $H_L \propto U_o^{4.733}$ 와는 차이를 보이고 있다. 이는 본 실험이 동축류의 영향에 의한 비반응 속도장의 차이에 기인한다.^[1,3]

$0.061 < X_{F,o} < 0.070$ 의 경우에 화염은 화염 밑면이 거의 평평하게 되었다가 화염 날림이 발생하고 $X_{F,o} > 0.070$ 일 경우에는 U_o 가 큰 경우 위에서 언급하였듯이 확산 화염의 불안전성으로 인해

화염 밑면이 심하게 흔들리다가 화염

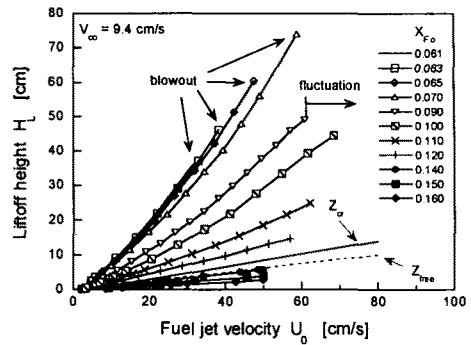


Fig. 4. Liftoff height variation of stationary lifted flames with jet velocity at several values of propane mole fraction.

날림이 발생한다. 노즐의 직경이 11.1 mm 이고 화염의 부상 높이가 75 cm 에 이름을 고려하면 제트의 유동장이 완전 발달된 영역과 발달 영역에 존재하는 두 가지의 부상 화염이 존재함을 유추할 수 있다.

동축류가 존재할 경우 유동장의 상사해를 구할 수 없기 때문에 참고 자료로 동축류를 무시한 제트의 발달 길이, Z_{free} 를 Fig. 4 에 점선으로 도시하였다. Z_{free} 는 $Z_{free} = 0.165 \times Re_d$ 의 관계식에서 구하였으며^[14], Re_d 는 레이놀즈 수를, ν 는 동점성계수를 뜻하며 편의상 질소의 동점성계수를 사용하였다. 그 결과 $X_{F,o} > 0.14$ 의 경우에 화염의 부상 높이가 Z_{free} 보다 작음을 알 수 있다.

3.3 부상화염의 안정화 특성

부상화염의 안정화는 당량비가 1 인 지점을 따라 삼지 화염의 전파속도와 유동장내의 속도가 일치하는 지점에서 이루어지며 삼지 화염의 전파 속도는 층류 화염 전파 속도, $S_L^*|_{st}$ 와 상관 관계를 갖고 있다.^[1-8] 이러한 점에 착안하여 상세 반응 메커니즘을 적용하여 $X_{F,o}$

에 따른 $S_{L,sv}^{\circ}$ 을 계산하였다.^[15-16]

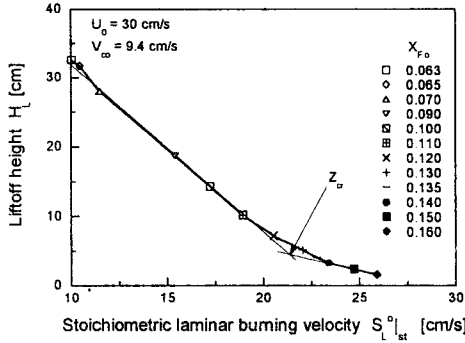


Fig. 5. Liftoff heights with stoichiometric laminar burning velocity at various $X_{F,o}$ for $U_o = 30$ cm/s.

$U_o = 30$ cm/s 일때 각각의 $X_{F,o}$ 에 대응하는 $S_{L,sv}^{\circ}$ 에 따른 부상 높이의 변화를 Fig. 5 에 나타내었다. 그림에서 보듯 $S_{L,sv}^{\circ}$ 의 증가에 따라 선형적으로 부상 높이가 감소하는 구간이 $X_{F,o}$ 가 상대적으로 작을 때와 클 때의 두 가지 영역으로 나뉠 수 있음을 알 수 있다. 각각의 출구 속도에 대해서 두 개의 직선이 만나는 지점의 높이를 Z_{cr} 라 정의하고 이를 Fig. 4 에 도시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 자유유동장에서 제트의 발달 구간인 Z_{free} 와 위의 Z_{cr} 가 서로 유사한 물리적 의미를 갖고 있음을 알 수 있다.

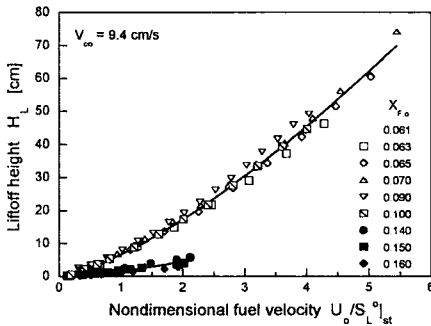


Fig. 6. Liftoff height variation with $U_o/S_{L,sv}^{\circ}$ showing two distinct stabilization mechanism in developed and developing regions of jets.

따라서 부상 화염이 동축류에서 제트가 발달되는 구간과 발달된 두가지의 영역에 존재함을 알 수 있다.

제트의 발달이 천이 상태인 곳에 부상 화염이 존재하는 $0.11 < X_{F,o} < 0.13$ 사이의 결과를 제외하고 각각의 혼합비에 대한 출구 속도와 층류 화염전파속도의 비, $U_o/S_{L,sv}^{\circ}$ 에 대해서 부상 높이의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. 그림에서 보듯 삼지 화염의 안정화되는 지점이 제트의 발달 영역과 완전 발달된 영역에 존재하는 두 가지의 안정화 특성이 존재함을 알 수 있다. 이를 부상 높이, H_L 와 $U_o/S_{L,sv}^{\circ}$ 에 대해서 상관 관계식을 구하면 완전 발달된 영역에서는 다음과 같은 식으로,

$$H_L = 6.58(U_o/S_{L,sv}^{\circ})^{1.39}$$

발달 영역에서는

$$H_L = 1.68(U_o/S_{L,sv}^{\circ})^{1.43}$$

로 표현이 되며 각각의 상관 계수는 0.99 와 0.92 로 매우 정확하다. 여기서 H_L 은 단위가 cm 이다. 위의 결과는 부상 화염의 부상 높이가 삼지 화염의 전파속도에 따라 결정됨을 의미한다.

Fig. 6 의 결과를 보면 $U_o < S_{L,sv}^{\circ}$ 인 경우에도 부상 화염이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 유동장내의 속도와 삼지 화염의 전파속도와 균형을 이루는 곳에 부상 화염이 위치하게 된다는 설명과는 모순된다. 그러나 이는 Fig. 7 에서 볼 수 있는 바와 같이 부력의 효과에 의한 것으로 유추할 수 있다. Fig. 7 은 하니콤에 쌓여 있던 미세한 입자들의 Mie 산란을 He-Ne 레이저를 이용하여 직접사진으로 찍은 것이다. 그림에서 보듯, 비반응 유동장에서는 프로판의 분자량이 공기에 비해 상대적으로

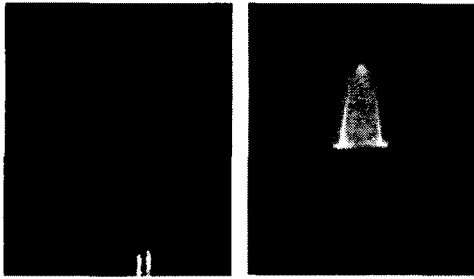


Fig. 7. Scattering images for $U_0 = 7.07$ cm/s and $X_{F,O} = 0.100$ (a) cold flow, and (b) reacting flow.

무겁기 때문에 동축류의 영향을 받아 양쪽으로 심하게 퍼지는 것을 알 수 있다. 그러나 화염이 존재할 경우 화염면 이후의 급격한 밀도차이에 의해 동축류 쪽의 공기가 노즐 안쪽으로 강하게 흡입되는 것을 알 수 있다.

3.4 메탄의 부상 화염

순수 메탄의 경우 Sc 가 1보다 작기 때문에 층류영역에서는 부상 화염을 관찰할 수 없다.^{11,2} 그러나 본 연구에서는 동축류 버너에서 질소 희석을 통하여 층류에서 안정적인 부상 화염을 관찰하였다. 동축류와 질소 희석은 부상 화염의 안정화의 중요 요인으로 속도장과 농도장에 변화를 주게 된다. 더구나 이

러한 질소의 희석은 화염의 단열 화염 온도를 낮추게 되어 화염의 강도가 약해지게 된다. 이로 인해 삼지 화염의 전파 속도는 감소하게 된다.

Fig. 8은 $U_0 = 20$ cm/s 일 경우 여러 가지 부피비에 대한 화염의 부상 높이의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 질소 희석이 많아질수록 화염 전파 속도는 낮아지고 이로 인해 부상 높이는 증가함을 알 수 있다. 그러나 프로판 연료에서와 같이 제트의 발달 영역과 완전 발달 영역에 각각 존재하는 부상 화염을 구별할 수는 없다.

Fig. 9는 메탄 연료의 여러 가지 부피비에 대한 화염의 부상 높이를 측정된 결과이다. 위의 프로판의 경우와 마찬가지로 동축류를 무시한 제트의 발달 길이, Z_{free} 를 실선으로 도시하였다. 그림에서 보듯 대부분의 부상 화염의 부상 높이가 Z_{free} 보다 낮음을 알 수 있다. 또한 일반적으로 동축류가 존재할 경우의 제트의 발달길이가 Z_{free} 보다 길어진다는 것을 고려하면, 질소 희석이 많을수록 부상 높이는 출구 속도에 따라 급격히 증가하며 제트의 발달 길이를 벗어나면 화염 날림이 발생함을 유추할

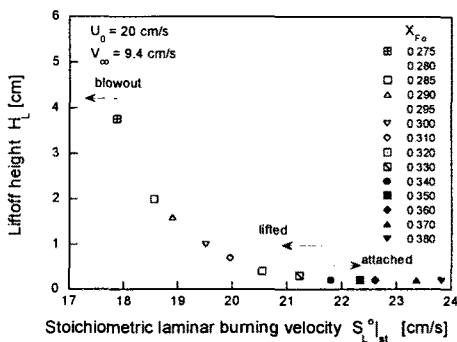


Fig. 8. Lift-off heights of methane with stoichiometric laminar burning velocity a various $X_{F,O}$ for $U_0 = 20$ cm/s.

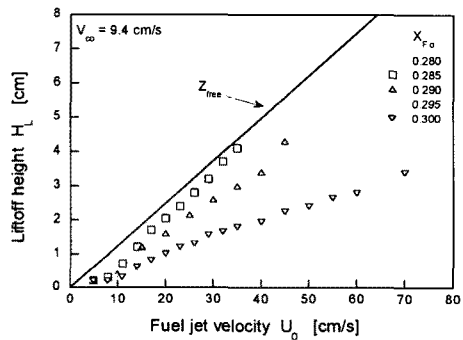


Fig. 9. Lift-off heights of stable lifted flames as a function of jet velocity at several values of methane mole fraction.

수 있다. 따라서 메탄의 부상 화염이 제트가 완전 발달된 영역에는 존재하지 않는다고 할 수 있다.

4. 결론

동축류 버너에서 프로판과 메탄에 대해서 질소 회석을 통해 부상 화염의 특성에 대해 실험적인 방법으로 관찰하였다. 프로판의 경우 삼지 화염의 구조를 갖는 부착 화염과 진동화염, 그리고 안정적인 부상 화염을 발견하였으며, 안정적인 부상 화염의 경우 질소 회석의 차이에 따라 제트의 발달 영역과 완전 발달된 영역에 존재하는 두 가지의 부상 특성을 규명하였다. 또한 유동의 속도가 삼지 화염의 전파속도보다 낮을 경우에도 화염의 부력의 효과에 의해 부상 화염이 존재할 수 있음을 실험적인 방법으로 규명하였다. 메탄의 경우 부상 화염이 제트의 발달 영역에만 존재함을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 교육부 과학기술기초중점 연구지원(1998-018-E00045) 에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chung, S. H., and Lee, B. J., *Combust. Flame* 86:62-72 (1991).
- (2) Lee, B. J., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 109:163-172 (1997).
- (3) Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., *Combust. Sci. Technol.* 127:55-70 (1997).
- (4) Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., *Proc. Combust. Inst.* 25:1175-1181 (1994).
- (5) Dold, J. W., *Combust. Flame* 76:71-88 (1989).
- (6) Reutch, G. R., Vervisch, L., and Liñán, A., *Phys. Fluids* 7:1447-1454 (1995).
- (7) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, N. C., Liñán, A., *Combust. Flame* 95:276-290 (1993).
- (8) Ko, Y. S., and Chung S. H., *Combust. Flame* 118:151-163 (1999).
- (9) Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N., and Mansour, M. S., *Combust. Flame* 115:335-353 (1998).
- (10) Smooke, M. D., Ern, A., Tanoff, M. A., Valdati, B. A., Mohammed, R. K., Marran, D. F., and Long, M. B., *Proc. Combust. Inst.* 26:2161-2170 (1996).
- (11) Takahashi, F., Schmoll, W. J., and Katta, V. R., *Proc. Combust. Inst.* 27:675-684 (1998).
- (12) Cha, M. S., Lee, W., Song, Y., Chung, S. H., *CLEO/Pacific Rim '99*, WE1, Seoul, Aug. 30- Sep. 3, 1999, pp. 157-158.
- (13) Marchese, A. J., Dryer, F. L., Nayagam, V., Colantonio, R. O., *Proc. Combust. Inst.* 26:1219-1226 (1994).
- (14) Lee, D. S., Kihm, K. D., Chung, S. H., *J. Fluids Eng./Trans. ASME* 119:716-718 (1997).
- (15) Smooke, M. D., *J. Computat. Phys.* 48:72-105 (1982).
- (16) Peters, N., in *Reduced Kinetic Mechanisms for Application in Combustion Systems* (N. Peters and B. Rogg, Eds.), Lecture Notes in Physics Series m15, Springer-Verlag, Berlin, 1993, pp. 3-14.