질소희석된 메탄 동축류 제트에서 화염 부상 메커니즘에 관한 연구

홍기정* · 원상희* · 김준홍* · 정석호†

Mechanism of Lifted Flames in Coflow Jet with Diluted Methane

Ki Jung Hong, Sang Hee Won, JunHong Kim, and Suk Ho Chung

ABSTRACT

Stabilization mechanism of lifted flame in the near field of coflow jets has been investigated experimentally and numerically for methane fuel diluted with nitrogen. Lifted flames were observed only in the near field of coflow jets until blowout occurred in the normal gravity condition. To elucidate the stabilization mechanism for the stationary lifted flames in the near field of coflow jets for the diluted methane having the Schmidt number smaller than unity, the behaviors of the stationary lifted flame in microgravity and unsteady propagation phenomena were investigated numerically at various conditions of jet velocity. It has been founded that the buoyancy plays an important role for flame stabilization of lifted flame in normal gravity and the stabilization mechanism is due to the significant variation of the propagation speed of lifted flame edge compared to the local flow velocity at the edge.

Key Words : Stabilization mechanism(안정화 메커니즘), Diluted methane(희석된 메탄), Coflow(동축류), Buoyancy(부력), Tribrachial flame(삼지화염)

1. 서 론

층류제트에서의 부상화염현상은 화염 안정화 메커니즘과 관련하여 널리 연구되어 왔다[1-4]. 층류부상화염의 선단(edge)은 삼지화염의 구조로서 과농, 희박 예혼합화염 그리고 확산화염이 삼중점에서 공존하고 있다. 삼지화염전파속도에 대한 연구에 따르면[5-9], 연료농도구배와 유동굴절효과가 전파속도에 영향을 미치는 지배적인 요소임이 알려져 있다.

층류부상화염의 안정화 메커니즘은 삼지화염의 전파속도와 축방향 유동속도 간의 균형으로 설명된다[1, 2]. 자유제트에서 형성된 이론당량비선(Φ=1)를 따라 전파속도가 거의 일정하다고 가정하면, 상류방향으로 Φ=1 선을 따라 가는 국부유동속도가 감소(증가)하면 안정(불안정)화 될 수 있다[2]. 이러한 유동이 형성될 수 있는 연료의 Schmidt 수는 Sc>1 (Sc<1)이다.

자유제트의 실험결과에서 프로판과 n-부탄(Sc>1)는 안정화된 부상화염을 가지는 반면 메탄과 에탄(Sc<1)에서는 안정화된 부상화염이 관찰되지 않았다. 이때, 부상화염은 직경이 O(1 mm)인 노즐을 사용한 경우 제트의 완전발달된 구간(far field)에서 안정화되었다.

최근에 상대적으로 큰 노즐 직경인 O(10 mm)를 이용한 경우, 과다 질소희석된 프로판 연료에서 동축류제트의 발달구간(near field)과 완전발달된 구간에서 안정적 부상화염이 관찰된 바 있다. 또한 진동하는 부상화염이 확인되었다[10]. 이때 부력이 부상화염의 안정화에 중요한 역할을

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
† 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : shchung@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7114 FAX : (02)883-0179

한다는 것이 밝혀졌다. 진동하는 부상화염의 메커니즘은 부력에 기인한 불안정이 원인임을 중력장과 무중력장에서의 실험과 수치해석을 통해서 확인되었다[10-12].

최근에, 부분 예혼합 혹은 희석된 메탄 연료에 대해 안정된 부상화염이 동축류제트의 발달구간에서 관찰되었다[13-15]. 메탄의 Sc<1 을 고려해 볼 때, 안정적 부상화염의 존재는 앞서 설명한 안정화 논의[2]로는 설명할 수 없다.

이와 관련하여, 본 연구에서는 질소희석된 메탄 동축류제트에서 부상화염의 안정화 메커니즘에 대해, 부력효과와의 연관성을 고찰하였으며, 안정성에 대하여는 국부유동속도와 삼지화염전파속도를 분석하여 설명하였다.

2. 수치해석과 실험

2.1 수치해석방법

동축류 부상화염을 묘사하기위하여 원통좌표계에서 시간의존적, 축대칭 지배방정식을 운동량, 화학종, 에너지 방정식에 대해서 해석하였다. 지배방정식은 낮은 Mach수 근사법[16]을 적용하였고, 시간적분법, 공간차분법은 4차 정확도의 6-단계 Runge-Kutta[17] 기법과 2차 정확도의 중앙차분기법이 각각 사용되었다. 비균일 격자계로 구성하였고 화염 영역부근에 격자를 집중시켰다. 노즐선단은 실험과 동일하게 모사하기 위해 입구 계산영역 안으로 10 mm 돌출되었다. 계산영역은 노즐의 반경과 수직방향으로 각각 노즐반경의 15배와 45배로 하였다. 그리드수는 128×512 로 최소 그리드 크기는 0.10 mm, 0.165 mm 이었다.

노즐 출구의 속도는 완전발달 조건으로 가정하여 포물선 형태로 설정하였고, 바깥 동축류의 유속은 균일한 분포로 하였다. 중심축과 바깥 벽면의 경계조건은 화학종, 축방향 속도와 온도에 대해서 Neumann 조건을 사용하였다. 출구 경계조건을 모사하기 위해 모든 스칼라 변수와 속도벡터는 대류 경계조건(convective boundary condition)을 만족하도록 하였다[16].

화학반응은 1차 총체반응 $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ 를 적용하였다. 세부적인 화염구조의 설명에는 제한적이나, 열유동과 화염반응의 정성적인 성향은 적절하게 모사할 수 있다. Arrhenius 식의 반응속도 상수값은 중력장의 U_o = 20 cm/s, V_{co} = 9 cm/s 조건에서 실험적인 부상높이 H_L = 12 mm 를 기준으로 정하였다. 전달 및 열역학적 물성치들은 CHEMKIN-II 와 TRANSPORT Package 로부터 계산되었다[18, 19].

2.2 실험장치 및 방법

실험 장치는 동축류 버너, 유량 조절부, 측정부와 가시화 장치로 구성되어 있다. 버너의 연료노즐 내경은 10.5 mm 이고, 노즐 출구에서 완전발달된 속도분포를 얻기 위해 길이 50 cm 로 하였다. 동축류의 내경은 90 mm 이고 균일한 속도분포를 얻기 위해 유리 구슬과 세라믹 하니콤을 설치하였다. 노즐 선단부분은 하니콤 밖으로 10 mm 돌출 되어있고, 또한 외부 유동에 의한 교란을 막고 광학적 접근이 가능하도록 길이 30 cm 인 아크릴 실린더를 이용하였다.

연료는 질소희석된 순도 99% 이상의 메탄을 사용하였고 유량조절은 질량 유량계(MKS)를 사용하였다. 동축류 공기는 습식 가스미터로 보정한 sonic nozzle 을 이용하였다.

가시화 장치는 디지털 캠코더, 고속도 카메라(Kodak, Ekta Pro SR-ULTRA)로 구성되었다. 중력장 실험에서 점화는 노즐로부터 70 mm 하류부분에서 Nd:YAG 레이저(Spectra-Physics, LAB-170-10)를 이용하였고, 안정적으로 점화가 되도록 레이저빔을 제트의 중심축에 집중시켰다. 점화는 파장 532 nm, 최대 450 mJ 의 파워로 7 ns 동안 레이저 펄스를 주사하였다. 직경 7 mm 의 레이저빔을 f 200 mm convex lens로 집속시켰다. 전파하는 동안 화염의 이미지는 고속도 카메라를 이용하여 얻었고, PC에서 분석되었다.

3. 결과 및 검토

3.1 안정적 부상화염

안정적 부상화염은 다양한 질소혼합비로 동축류에서 관측되었다. Fig. 1(a)는 $X_{F,O}$ = 0.290, U_o = 15 cm/s, V_{co} = 9 cm/s 의 조건에서 부상높이 H_L = 10 mm 를 갖는 화염의 직접 사진이다. 화염기저부는 상대적으로 작은 반경의 곡률을 가지는 삼지화염구조가 관측되는데, 이는 기저부가 연료농도구배가 큰 곳인 노즐 근처에 위치해 있기 때문이다. Fig. 1(b-e)는 수치계산의 결과로서, 연료노즐 속도에 따른 반응률분포와 화염기저부를 확대한 그림이다. 부상높이가 높은 (e)의 경우는 기저부가 삼지화염구조를 보이고 있는 반면에, 노즐부착화염은 희박예혼합화염의 날개가 점차 병합되면서 이지화염의 구조를 보이고 있다(b).

Fig. 2는 연료제트의 속도에 따른 부상높이를 $Ri = \Delta\rho g D/\rho_f U_o^2$ 와 함께 나타낸 것이다. 제트속도가 작을 때 부상높이는 상대적으로 급속히 증가하다가 점차 증가비율은 완화되고, 제트속도가 증가하면 다시 급격히 증가하는데 특히 $X_{F,O}$

가 클수록 더욱 급격하다. 수치결과도 이러한 실험적 경향을 재확인해주고 있다. 수치적으로는 $U_o \geq 40$ cm/s 에서 화염날림(blowout) 현상이 관찰되었다. 실험적 관찰에서 화염길이는 제트속도가 증가할수록 길어졌고, 화염후류의 떨림현상(flickering)이 $U_o > 20$ cm/s 조건에서부터 시작되었다. 화염후류의 떨림현상이 일어난다 할지라도 부상높이에 대한 영향은 무시할 만하다. 수치계산 결과도 $U_o \geq 20$ cm/s 조건에서부터 화염후류의 떨림현상이 일어났고, Fig. 1(e)는 화염이 끝단 근처에서 떨어져 나가는 현상을 명확히 보여주고 있다. 이러한 화염후류의 떨림현상은 Kelvin-Helmholtz 불안정성과 관련하여 이전에 연구되어진 바 있다[20].

희석된 프로판 연료의 경우, 동축류제트가 완전발전된 영역(developed region)과 발전하는 영역(developing region)에서 각각 다른 안정화 형태가 존재함이 밝혀졌다[10]. Sc<1인 희석된 메탄에 대해서도 이러한 현상을 시험해보기 위하여, 제트의 발달길이 Z_{free} 를[10] 자유제트로 가정하여 점선으로 Fig. 2에 도식하였다. 그 결과, 희석된 메탄의 안정적 부상화염은 화염날림이 일어날 때까지 오직 발전하는 영역에서 관찰되었다. 이러한 현상은 자유제트에서 메탄 화염이 제트의 완전발달된 구간에서는 안정적 부상화염으로 존재하지 않는 것과 대비된다[2].

이러한 견지에서, Richarson 수를 고려함으로써 부력의 영향을 먼저 확인하였다. Fig. 2에서 $X_{F,O}$ = 0.300 에 대한 Ri 수를 도식하였는데 U_o = 5 - 100 cm/s 범위에서 0.09 - 35 의 값을 가졌다. 이러한 결과는 제트의 모텐텀($\rho_f U_o^2$)에 비해 기연가스로 인한 부력효과($\Delta\rho gD$)의 영향이 더 클 수 있다는 것이다.

이전의 연구에서, 희석된 프로판 동축류제트에서 부상화염의 안정화에 대한 부력효과는 무중력실험을 통해서 확인되었다. 안정적 부상화염과 진동하는 부상화염은, 중력장에서 무중력으로 변화시켜서 부력효과를 소거하면 노즐부착화염으로 되었다[11]. 본 연구에서는, 희석된 메탄 동축류제트에서 부상화염의 안정화에 대한 부력효과를 규명하기 위해서 수치해석을 이용하여 중력장의 경우와 무중력장의 경우를 비교하여 보았다. Fig. 3은 U_o = 20 cm/s, $X_{F,O}$ = 0.290 의 조건에서 반응율과 유선을 중력장과 무중력장에서 각각 나타낸 것이다. 중력장에서 안정적이었던 부상화염이 무중력장에서는 노즐부착화염으로 변화되었다. 중력장에서의 유선은(a) 부력에 의한 공기유입으로 중심선 방향으로 굴절된 반면에, 무중력장에서의 유선은(b) 열팽창에 의하여 바깥쪽으로 벗어나 있다. 이러한 결과는 중력장에서 희석된 메탄 화염이 동축류제트의 발달구간에서 부력의 영향으로 부상할 수 있다는 것을 의미한다. 무중력장에서의 수치계산은 U_o = 80 cm/s 까지 수행되었는데 노즐부착화염이 계속해서 지속되었다.

직경이 O(1 mm)인 노즐을 사용한 자유제트에서[1-4] 부상화염의 안정화 메커니즘은 국부유동속도와 삼지화염전파속도 사이의 균형 메커니즘을 기반으로 설명되었다. 위 연구에서는 부상화염의 기저부와 노즐 사이의 구간은 냉간제트(cold jet)로 취급되어 부력효과가 무시되었고, 삼지화염전파속도는 일정하거나 그 변화를 최소로 가정하였다. 안정성에 대한 분석으로부터 Sc<1 경우의 부상화염은 불안정하다는 결론을 얻었다.

직경이 O(1 mm)인 노즐의 자유제트는 O(10 mm) 노즐에 비해 Ri 가 1/1000정도로 작아 부력의 효과가 무시될 수 있어 위의 화염 안정화 메커니즘을 적용할 수 있었다. 그러나 본 연구의 희석된 메탄 동축류제트의 경우에는 냉간제트(cold jet)이론을 적용할 수 없는데, 이는 상대적으로 큰 부력효과의 영향으로 인하여 노즐과 부상화염기저부 사이가 냉간제트 유동분포와는 크

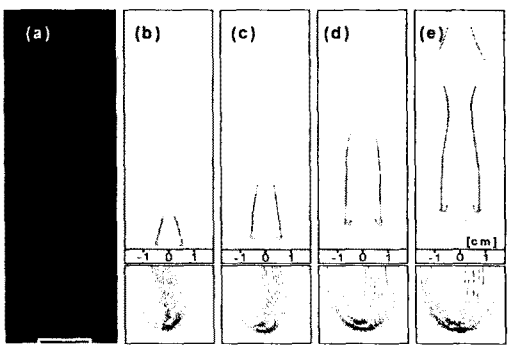

Fig. 1 Direct photographs (a) and numerical reaction rate contours (b-e) for stationary lifted flames with $X_{F,O}$ = 0.290; (a) U_o = 15, (b) 5, (c) 10, (d) 20, and (e) 30 cm/s.

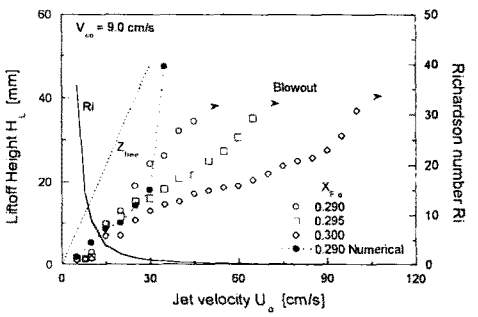

Fig. 2 Liftoff heights and Richardson number with jet velocity for various fuel mole fractions.

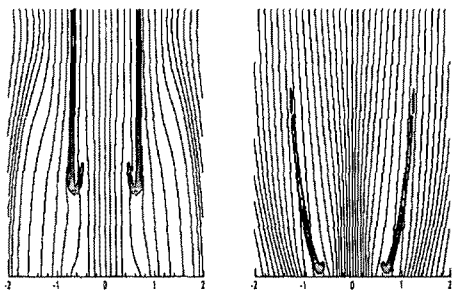

Fig. 3 Stationary lifted flame in normal gravity (a) and nozzle attached flame (b) in microgravity for U_o = 20 cm/s , $X_{F,O}$ = 0.290.

게 달라지기 때문이다.

이러한 견지에서, Fig. 4는 U_o = 20 cm/s 에서 동축류의 비반응 유동특성을 도식하였다. 무중력장에서 중심선 속도 u_{CL} 는 축방향 거리 X를 따라서 제트의 모멘텀 확산에 의하여 감소하는 반면, 중력장에서 u_{CL} 는 동축류 공기보다 가벼운 희석된 메탄의 부력 영향으로 노즐 근처의 발달구간에부터 증가하는 것을 볼 수 있다. 삼지화염은 삼중점에서 화염들의 공존으로 인하여 이론당량비선을 따라서 전파한다. 이론당량비선을 따르는 유동속도 u_{st} 를 Fig. 4에 함께 도식하였는데, u_{st} 는 노즐 근처 영역에서 뚜렷하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이전의 안정화 연구에서 적용된 삼지화염전파속도 S_{tri} 는 이론 당량비선을 따라 축방향거리 X에 대하여 일정하거나 최소한의 변화만을 가진다는 가정을 적용하면, u^*_{st} 와 S_{tri} 는 $X=X^*$ 지점에서 교차하고 $X > X^*$ 인 경우는 $S_{tri} < u_{st}$ 이고 $X < X^*$ 인 경우는 $S_{tri} > u_{st}$ 가 된다. 이러한 상황에서, X^* 지점에서 삼지화염이 교란을 받으면, 교란은 점차 증가하기 때문에 화염은 불안정하게 될 것이다. 이것은 화염화염날림 또는 노즐부착화염으로 변할 수 있음을 의미한다. 결론적으로, 이전의 안정화 논의로는 부상화염이 안정화될 수 없다.

앞서 보았듯이 노즐근처영역에서의 유동은 화염으로 야기되는 부력에 의해 영향을 받기 때문에, 안정된 부상화염의 존재는 비반응유동(cold flow)의 특성을 기반으로 한 설명은 불가능하다. 따라서, 희석된 메탄 동축류제트의 발달구간에서 안정화 메커니즘을 규명하기 위해서는 비정상 전파 거동에 대한 연구가 필요하다.

3.2 희석된 메탄제트에서 비정상 전파

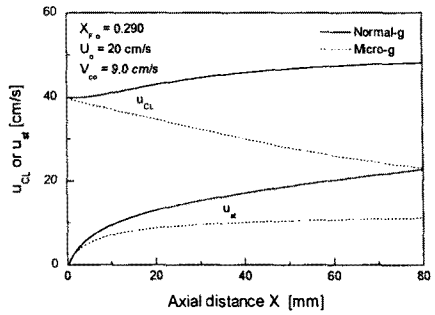

Fig. 4 Cold flow characteristics of axial velocity along stoichiometric contour and centerline velocity for U_o = 20 cm/s and $X_{F,O}$ = 0.290.

Fig. 5는 U_o = 5, 20 cm/s 의 노즐 하류 30 mm 지점에서 점화한 후, 화염선단과 노즐과의 거리 X_e 의 궤적을 중력장과 무중력장의 조건 하에서의 수치계산 결과를 각각 도식한 것이다. 무중력장에서는 화염이 노즐 쪽으로 전파되어 각각의 노즐 속도에서 둘 다 노즐 부착화염이 되었다. 중력장에서는 화염이 초기에는 노즐을 향해 전파하다가 노즐부착화염이(U_o = 5 cm/s) 되거나 안정된 부상화염이(U_o = 20 cm/s) 되었다. 주목할 점은 중력장에서의 화염전파시간이 무중력장에서보다 훨씬 긴 것인데, 이는 기연가스의 부력에 의한 영향으로 주위 공기의 흡입이 강화되었기 때문이다.

일반적으로, 삼지화염선단은 확산의 차이, 유동장, 반응율 모델링 등으로 인하여 비대칭적 구조를 가진다. 본 연구에서도 비정상 전파하는 화염의 선단부분이 비대칭적 속성을 나타냄을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 희박 예혼합화염의 날개가 과농 예혼합화염의 것보다 훨씬 작은 것을 볼 수 있다. 특히, 화염기저부가 노즐에 근접했을 때 삼지화염구조는 불명확하고 이지화염으로 천이하는 것처럼 보이는데, 이는 희박 예혼합화염의 날개가 확산화염으로 병합되는 것이다.

부상화염기저부의 국부적인 특성 분석에 있어서, 삼중점과 최대열방출지점이 일치하지 않으므로 선단(leadig edge) 위치는 신중하게 정의해야 한다. 화염기저부에서 삼중점은 이론 당량비선(ϕ =1)과 화염선단부분을 대표할 수 있는 적절한 스칼라 등고선과의 교차점으로 주로 정의하였다 [21]. 본 연구에서 화염선단형상은 순간적으로 변화하고 삼지화염은 전파하는 동안 비대칭적 거동을 보인다. H_2O 질량분율 Y_{H_2O} = 0.0727 의 등고선은 과농·희박 예혼합 화염날개에서 최대 열방출 지점을 만족하면서 따라간다. 이론당량비선 Z_{st} 는 $Z_{st} = 1/(1+\sigma)$로부터 계산되었고, 여기서

$\sigma = (\nu_o W_o Y_{F,1} L_{e_{O,2}}) / (\nu_F W_F Y_{O,2} L_{e_{F,1}})$ 이다.

Fig. 6에서 같이 이론당량비선과 H_2O 등고선의 교차점은 최대열방출지점과 정확하게 일치하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 화염선단(leading edge)의 위치를 축방향에서 H_2O 등고선을 따르는 국부 화염 전파 속도 S_f 가 최대가 되는 지점으로 정의하였다. 화염선단의 전파속도 S_f^e 는 Jacobi-Hamilton 방정식 $-[\nabla \cdot (\rho D_{H_2O} \nabla Y_{H_2O}) + \omega_{H_2O}] / (\rho |\nabla Y_{H_2O}|)$ 의 수직 성분으로부터 결정된다[21]. S_f^e 의 위치는 최대열방출율지점과 매우 근접한 곳이며 H_2O 등고선에서 노즐로부터 최저높이가 되는 지점이다.

Fig. 7는 S_f^e 와 화염선단과 노즐과의 거리 X_e 를 도식한 것이다. S_f^e 는 X_e 가 클 때 중력장과 무중력장에서 모두 일정한 값을 가진다. 하지만, 노즐과 가까워질수록 S_f^e 가 급격히 감소되는 것을 알 수 있다.

이와 같은 S_f^e 의 거동은 예혼합화염 영역에서 곡률에 의한 유동굴절효과[8] 로부터 기인한 것이다. 삼지화염의 전파속도는 반경방향의 연료농도구배 혹은 예혼합 화염날개의 곡률과 매우 깊은 연관관계를 가지고 있으며, 곡률이 증가할수록 전파속도는 감소한다는 사실은 이미 연구되어진 바 있다[5-7].

Fig. 8에서는 S_f^e 와 곡률의 관계를 도식하였다. 여기서 곡률은 H_2O 등고선로부터 결정하였고, 전파속도는 점선에서처럼 곡률과 선형적인 반비례관계를 갖는 것처럼 보인다. 그런데 만약 화염기저부가 삼지화염구조로 계속해서 유지된다면, 이전의 연구되어진 S_f^e 와 곡률은 비선형적 반비례 관계를(실선) 갖는다는 결과[5-7]와 상이하다. 하지만 U_o = 5 cm/s 인 경우 중력장(무중력장)에서 $1/r_{cur} < 0.75(0.85)$ mm^{-1} 인 경우에, 과농 예혼합화염이 제트의 중심선에서 연결되면 기연가스 팽창의 상호작용으로 인해 삼지화염전파속도가 감소될 것으로 예상된다[22]. 또한 중력장에서 U_o = 5 cm/s 인 경우 $1/r_{cur} \geq 1.2$ mm^{-1} 일 때, 화염은 삼지화염에서 이지화염으로 천이된다.

이러한 두 경우를 제외하고, 삼지화염일 때 S_f^e 는 곡률과 비 선형적인 반비례 관계를 가지고 있다. 실선은 이전의 실험적 연구결과[5,7]로부터 삼지화염전파속도와 곡률과의 연관관계를 나타낸 것이다.

$1/r_{cur}$ 가 큰 경우 S_f^e 는 삼지화염에서는 다소 완만해지다가, 화염선단이 이지화염으로 천이 후에는 선형적인 감소를 유지한다. 이러한 이지화염의 전파속도에 대한 체계적인 연구는 추후에 필요한 부분이다.

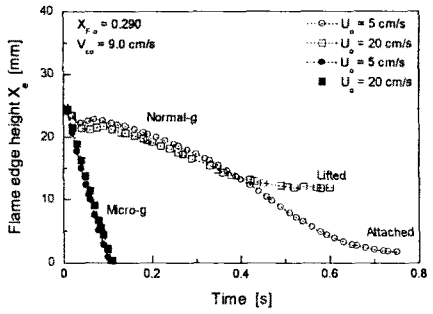

Fig. 5 Traces of flame edge height X_e for U_o = 5 and 20 cm/s in normal and micro gravity conditions.

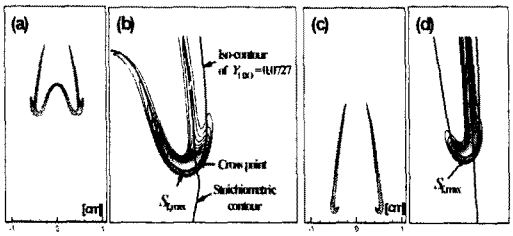

Fig. 6 Reaction rate plots and detailed edge structures during propagation in normal gravity for U_o = 5 cm/s and $X_{F,O}$ = 0.290; (a, b) t = 0.3 s and (c, d) t = 0.65 s.

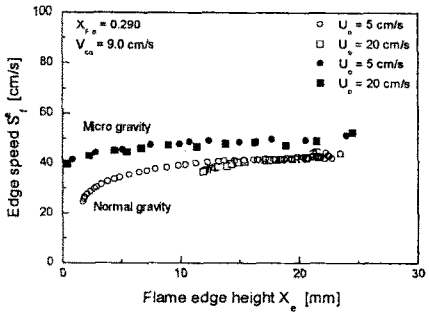

Fig. 7 Edge propagation speeds S_f^e with edge height X_e.

3.3 안정화 메커니즘

앞에서 언급한대로, 제트의 발달구간에서 부상화염의 안정화 메커니즘은 비반응 유동특성을 기반으로 설명할 수 없다[1-4]. 부상화염이 동축류 제트의 발달구간에 있기 때문에, 기연가스로 인한 부력효과가 국부유동장에 지배적인 영향을 끼칠 수 있다. 안정화 메커니즘을 규명하기 위하여, 점화후 비정상 전파하는 동안에 화염전파속도

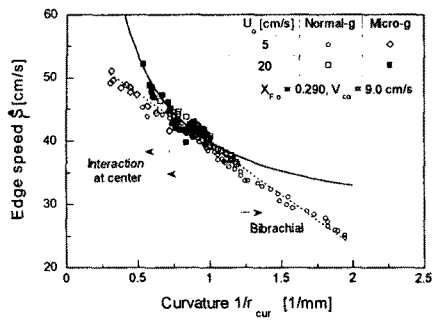

Fig. 8 Edge propagation speed variation with the curvature of premixed flame wing.

S_f^e 와 국부유동속도 u_{st}^e 의 궤적을 살펴보았다.

S_f^e , u_{st}^e 그리고 화염이동속도 $S_d = S_f^e - u_{st}^e$ 를 U_o = 5, 20 cm/s 를 Fig. 9와 Fig. 10에서 각각 도식하였다. Fig. 9에서 U_o = 5 cm/s 인 경우 화염기저부는 노즐 근처까지 전파된 후 노즐부착화염으로 안정화되었다. S_f^e 는 노즐근처에서 명확한 감소를 보이고. u_{st}^e 도 역시 감소한다. 노즐로 전파되는 동안 S_f^e 는 항상 u_{st}^e 보다 큰 값을 가지기 때문에, 화염은 노즐까지 계속해서 전파되어 노즐부착화염이 되는 것이다. 이때 화염이동속도 S_d 는 급격하게 변화되고 있다. 실선은 노즐로부터의 화염선단위치 X_e 로부터 계산된 이동속도 $\Delta X_e/\Delta t$ 를 나타낸다. S_d 와 $\Delta X_e/\Delta t$ 가 같은 경향을 보임으로써 수치계산에서 S_f^e 의 정의가 타당함을 확인하였다. X_e = 20 - 25 mm 에서 현저한 변화는 초기 점화로부터 발생되는 화염커널형성에 의한 것이다.

Fig. 10에서 U_o = 20 cm/s 인 경우 화염이 노즐로 전파해 오다가 정지부상화염으로 안정화되는 것을 볼 수 있다. 여기서 S_d 는 대략 10 Hz의 주파수를 갖는 요동현상(fluctuation) 을 보이는데, 이는 화염후류의 떨림현상으로부터 기인된 것이다. 부상높이 H_L 에서 화염전파속도 S_f^e 와 국부유동속도 u_{st}^e 는 평형을 이룬다. 안정화된 지점에서 전체적인 경향은 X_e 가 감소함에 따라 S_f^e 는 u_{st}^e 보다 더 빠르게 변한다. 따라서 추정된 $X_e < H_L$ 까지 u_{st}^e 의 성질은 S_f^e 보다 덜 민감하기 때문에, 부상높이 H_L 에서 화염은 안정화가 될 수 있다. 이러한 방법으로, 화염끝자락이 $X_e < H_L$ ($X_e > H_L$)에서 교란을 받으면 화염끝자락에서 $S_f^e > u_{st}^e$ ($S_f^e < u_{st}^e$)이기 때문에 다시 $X_e = H_L$ 까지 전파하여 안정화 될 것이다. 결

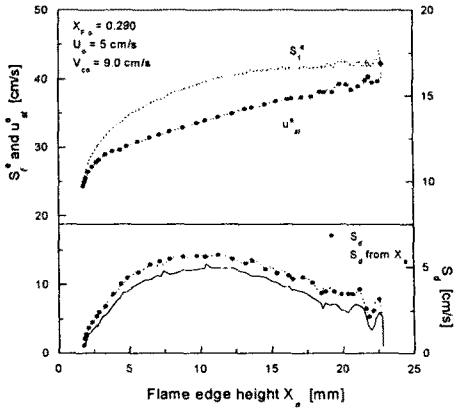

Fig. 9 Numerical results of the propagation speed S_f^e, local flow velocity u_{st}^e, and the displacement speed S_d for U_o = 5 cm/s in normal gravity.

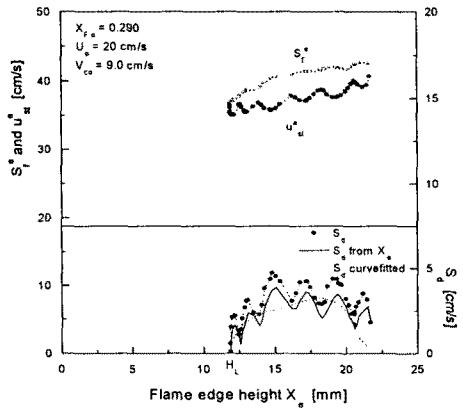

Fig. 10 Numerical results of the propagation speed S_f^e , local flow velocity u_{st}^e, and the displacement speed S_d for U_o = 20 cm/s in normal gravity.

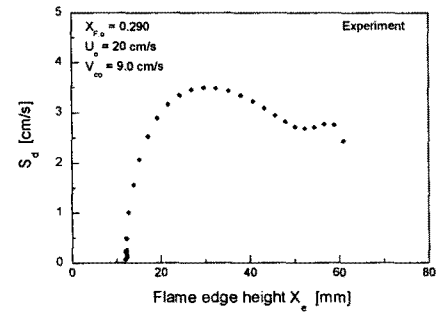

Fig. 11 Experimental results of the displacement speed S_d for U_o = 20 cm/s in normal gravity.

론적으로, 어떠한 교란도 상쇄되어 안정된 부상화염의 결과를 갖는다. 이러한 결과는 u_{st}^e 가 축방향을 따라 증가한다 하더라도 만약 S_f^e 의 변

화가 더 크다면 안정된 부상화염이 존재할 수 있다는 것을 보여준다.

이런한 수치계산 결과를 입증하기 위해서, Fig. 11에서는 U_o = 20 cm/s 의 실험을 통해 노즐로부터 70 mm 후류 지점에서 점화시킨 후 비정상 전파동안의 화염이동속도 S_d 를 나타내었다. 여기서, S_d 는 시간에 따른 화염선단과 노즐과의 거리 X_e 변화로부터 구한 것이다.

4. 결 론

Sc<1인 질소희석된 메탄 동축류제트의 발달구간에서 부상화염의 안정화 메커니즘 대해서 수치 및 실험적으로 연구를 수행하였다.

부상화염은 오직 동축류제트의 발달구간에서만 관찰되었기 때문에, Sc<1인 경우 제트의 완전발달된구간에서는 부상화염이 존재하지 않음을 확인하였다. 중력장에서 안정적 부상화염에 대한 부력효과를 입증하기 위해서 무중력장으로 수치계산을 수행한 결과 노즐부착화염이 되었음을 보였다. 동축류제트의 발달구간에서 안정적 부상화염의 메커니즘을 분석하기 위해 노즐로 향하는 비정상 전파거동을 해석하였고, 유동장은 부력에 의한 비반응 유동조건으로부터 매우 다양하게 변하였다. 또한 화염전파속도 S_f^e 와 국부유동속도 u_{st}^e 를 분석하였다. 전파속도와 화염기저부곡률과의 연관관계를 밝혔고, 전파속도의 변화는 축방향 국부유동속도보다 매우 민감하였다. 이러한 방법으로 부상화염이 안정화될 수 있음을 설명하였다.

후 기

이 연구는 연소기술센터(CERC)와 서울대 기계항공공학부 BK-21에 의하여 지원되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

[1]. Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, 1991, pp. 62-72.

[2]. Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 163-172.

[3]. Lee, B. J., Cha, M. S. and Chung, S. H., "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 127, 1997, pp. 55-70.

[4]. Lee, B. J., Kim, J. S. and Chung, S. H., "Effect of Dilution on the Liftoff of Nonpremixed Jet Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 25, 1994, pp. 1175-1181.

[5]. Ko, Y. S. and Chung, S. H., "Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Nonpremixed Jets," *Combust. Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 151-163.

[6]. Ko, Y. S., Chung, S. H., Kim, G. S., and Kim, S. W., "Stoichiometry at the Leading Edge of a Tribrachial Flame in Laminar Jets from Raman Scattering Technique," *Combust. Flame*, Vol. 123, 2000, pp. 430-433.

[7]. Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H., Chung, S. H., Fujita, O., and Ito, K., "Propagation speed of tribrachial (triple) flame of propane in laminar jets under normal and micro gravity conditions," *Combust. Flame*, Vol. 134, 2003, pp. 411-420.

[8]. Ruetsch, G. R., Vervisch, L., and Linan, A., *Phys. Fluids*, Vol. 7, 1995, pp. 1447-1454.

[9]. Chen, J. Y. and Echekki, T., *Combust. Theory Modelling*, Vol. 5, 2001, pp. 499-515.

[10]. Won, S. H., Cha, M. S., Chung, S. H., and Lee, B. J., "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 2093-2099.

[11]. Won, S. H., Kim, J., Shin, M. K., and Chung, S. H., Fujita, O., Mori,T., Choi, J. H., and Ito, K., "Normal and Micro Gravity Experiment of Oscillating Lifted Flames in Coflow." *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 37-44.

[12]. Kim, J., Won, S. H., Shin, M. K., and Chung, S. H., "Numerical Simulation of Oscillating Lifted Flames in Coflow Jets with Highly Diluted Propane," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 1589-1595.

[13]. Smooke, M. D., Ern, A., Tanoff, M. A., Valdati, B. A., Mohammed, R. K., Marran, D. F., and Long, M. B., *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, 1996, pp. 2161-2170.

[14]. Qin, X., Puri, I. K., and Aggarwal, S. K., *Proc. Combust. Ins..*, Vol. 29, 2002, pp. 1565-1572.

[15]. Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N., and Mansour, M. S., "An experimental and

numerical study of a laminar triple flame," *Combust. Flame*, Vol. 115, 1995, pp. 335-353.
[16]. Mahalingam, S., Cantwell, B. J., and Ferziger, J. H., *Non-premixed Combustion: Full Numerical Simulation of A Coflowing Axisymmetric Jet, Inviscid And Viscous Stability Analysis*, Report No. TF-43, Thermoscience Division, Stanford University, 1989.
[17]. Kennedy, C.A, Carpenter, M.H., and Lewis, R.M., App. Num. Math., Vol. 35, 2000. pp. 177-219.
[18]. Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., "CHEMKIN-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Report No. SAND89-8009, Sandia National Laboratories, 1989.
[19]. Kee, R. J., Warnatz, J., and Miller, J. A., "A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients," Report No. SAND83-8209, Sandia National Laboratories, 1983.
[20]. Buckmaster, J., and Peters, N., *Proc. Combust. Inst*, Vol. 21, 1986, pp. 1829-1836.
[21]. Im, H. G. and Chen, J. H.," Structure nad Propagation of Triple Flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures," *Combust. Flame*, Vol. 119, 1999, pp. 436-454.
[22]. Chen, Y. C. and Bilger, R. W., "Stabilization mechanisms of lifted laminar flames in axisymmetric jet flows," *Combust. Flame*, Vol. 123, 2000, pp. 23-45.