

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.399

질소 희석된 프로판 자유제트 층류부상화염에 있어서 화염 자기진동 특성에 관한 연구

윤성환* · 박 정**† · 권오봉** · 배대석**

* 부경대학교 에너지시스템공학과, ** 부경대학교 기계공학과

Study of Characteristics of Self-Excitation in Lifted Laminar Free-Jet Propane Flames Diluted with Nitrogen

Sung Hwan Yoon*, Jeong Park**†, Oh Boong Kwon** and Dae Seok Bae**

* Dept. of Energy System Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received October 10, 2009 ; Revised February 2, 2010 ; Accepted February 2, 2010)

Key Words: Buoyancy-Induced Oscillation(부력에 의한 진동), Flame Front Propagation(화염 선단전파), Flame Stability Map(화염 안정화 선도), Fuel Lewis Number(연료 루이스 수), Heat-Loss-Induced Oscillation(열손실에 의한 진동), Lewis-Number-Induced Oscillation(루이스 수에 의한 진동), Triple Flame Propagation(삼지화염 전파)

초록: 질소 희석된 프로판 층류 부상 화염에서 화염진동 불안정성과 화염 곡률 효과를 살펴보기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 화염 진동은 총 3가지 영역으로 열손실에 의한 진동, 열손실 및 부력이 혼재된 진동, 그리고 열손실 및 루이스 수에 의한 영향이 혼재된 진동으로 구분되었다. 순수 열손실에 의한 진동은 루이스 수에 의한 진동과 부력에 의한 수력학적 불안정성과 관련이 없으며 연료 루이스 수에 관계없이 모든 부상화염 조건에서 관찰되었다. 화염의 시간에 따른 부상높이 변화에 대한 FFT분석을 통해 화염진동 불안정성의 실험적 증거와 특성을 명확히 제시하였고, 부상 화염의 열손실에 의한 자기진동의 메커니즘에 대한 시나리오를 논의한다.

Abstract: The characteristics of lifted laminar propane flames diluted with nitrogen have been investigated experimentally to elucidate self-excitation and the effects of flame curvature. Flame oscillation modes are classified as follows: oscillation induced by heat loss, a combination of oscillations induced by heat loss and buoyancy, and a combination of the oscillations induced by heat loss and diffusive thermal instability. It is shown that the oscillation induced only by heat loss is not relevant to the diffusive thermal instability and hydrodynamic instability caused by buoyancy; this oscillation is observed under all lift-off flame conditions irrespective of the fuel Lewis number. These experimental evidences are displayed through the analysis of the power spectrum for the temporal variation of lift-off height. The possible mechanism of the oscillation induced by heat loss is also discussed.

1. 서론

화염진동은 비예혼합 화염과 부분예혼합화염 구조에서 다양하게 관찰되었고 미소중력에서 소화 직전의 촛불화염,⁽¹⁾ 그리고 희석된 프로판, 메탄의 응축연료^(3,4)에서 그 동안 광범위하게 연구되어 왔다. 이러한 화염 진동의 원인으로 화염 내 열손실과 열 및 물질전달의 차에 의해 나타나

는 현상으로 밝혀진 바 있다.⁽⁵⁻¹¹⁾ 특히 최근에 예지화염 불안정성은 순수 열손실에 의해 기인하며⁽¹⁰⁾ 특히 저신장율 대향류 확산화염에서 버너직경이 유한할 때 과도한 복사 열손실 및 반경방향 전도 열손실로 인해 연료 루이스수가 1보다 작음에도 불구하고 화염진동이 발생된다고 보고되고 있다.⁽¹¹⁾ 다른 한편으로는 과도하게 희석된 프로판의 동축류 부상화염,^(12,13) 그리고 비반응 제트유동에서 선대칭의 부력에 의한 열기둥(thermal plume)⁽¹⁴⁾에서도 실험적으로 연구되었으며, 미소중

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

력실험을 통해 부력이 원인임을 보인 바 있다. 이러한 화염 진동불안정성은 진동주파수가 대략 1-10Hz범위를 가진다. 하지만 본 연구는 과다 질소 희석을 한 프로판 자유제트 층류 부상화염에서 0.25Hz미만의 매우 낮은 저주파수의 진동을 관찰하였고(이하에서는 자기진동, self-excitation이라 명칭함) 이에 대해서는 문헌상에 보고된 예가 없어 논의가 필요한 상황이다.

한편 최근에 Bilger 연구그룹에서 에지화염 소화(edge flame extinction), 삼지화염 전파(triple flame propagation), 화염선단 전파(flame front propagation) 및 화염날림(flame blow-out)에 의해 안정화된 층류부상화염의 성격을 잘 묘사한 바 있다.⁽¹⁶⁾ 삼지화염 전파영역의 화염전파속도는 스킨라소산율에 의존하나 과농예혼합가지가 서로 연결되었을 때의 화염선단 전파영역은 오히려 제트중심부의 혼합분율이 과농한계혼합분율보다 낮게 나타나므로 통합열방출에 의존한다고 보고되고 있다. 이후 부상화염의 선단이 후류로 밀려나면서 약한 부분예혼합화염(weakly partially premixed flame)의 성격이 강해지고 혼합분율의 구배가 0으로 수렴할 때 완전예혼합화염의 가정하에 이론적으로 화염전파속도가 미연가스와 기연가스의 밀도비율의 제곱근에 관련됨을 보인 바 있다.⁽¹⁷⁾ 이후 점차적으로 꼬리 확산화염(trailing diffusion flame)의 성격은 약화되고 강한 부분예혼합화염(strongly partially premixed flame)의 특성이 화염을 지배하게 된다.

Bilger연구그룹의 연구결과를 토대로 본 연구는 0.25Hz미만의 저주파수 진동과 기존의 알려진

부력 및 소염조건 근처에서 루이스수 변화에 의한 화염진동은 삼지화염 전파 및 화염선단 전파에 있어서는 그 거동 특성이 상이함에 주목하고 있다. 이러한 화염진동 구조의 특성을 명확히 하기 위해 본 연구에서는 노즐직경 0.3, 1.0mm에서 부상화염 실험을 수행하였으며 화염진동은 부상화염 높이에 따른 FFT분석을 통해 특성화 작업을 수행하였다. 자유제트 부상화염에서 관찰된 모든 화염진동불안정성의 메커니즘 또한 정량적 실험을 통해 논의하고자 한다. 또한 층류 부상화염거동특성을 성공적으로 설명해 온 비반응제트 상사성(non-reacting jet similarity)^(18,19)과 현재 실험결과와의 상이성에 대한 비교를 통해 화염준재효과의 중요성에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험방법

실험 장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험에서 사용할 노즐은 슈퍼드릴(SD-1M)로 가공된 내경이 0.3mm의 스테인리스 강관과 노즐직경에 따른 화염곡률 및 부력효과를 부각시키기 위해 직경 1.0mm로 된 황동관을 각각 사용한다. 노즐 출구에서 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 노즐 길이를 직경기준 레이놀즈수(Re_D)에 의존한 층류 입구길이보다 충분히 긴 120, 360 mm로 하였다. 연료의 유동이 층류상태를 유지하기 위하여 Schlieren가시화를 통해 실험영역을 $32 < Re_D < 1288$ 로 제한하였다. 순도 99.99 % 프로판과 99.95 %의 질소는 압력 조절기로 조절되고 유량 조절은 버블미터로 검증된 20, 30, 50, 200, 500, 1000 ml/min의 규격의 MFC를 통해 노즐로 분사된다. 노즐부를 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 150\text{cm}$ 의 아크릴 칸막이실 안에 위치시키고 유입되는 공기에 의한 교란을 막기 위해 노즐 하부에 메쉬를 설치하였다. 화염의 부상높이는 카세토미터와 디지털 VCR 카메라 (SONY, HDR-SR11)를 2차원 이송장치 위에 부착하여 이송시키며 측정하였고 화염의 선단과 노즐의 끝단을 측정하였다. FFT의 분석을 위해 주파수 분해 능력을 고려한 충분한 샘플링시간(약 547sec) 및 샘플주파수 범위를 0.00183-15Hz를 확보하여 얻어진 이미지들로부터 Matlab 기반의 프로그램을 이용하여 부상 높이에 대한 정보를 획득하게 된다.

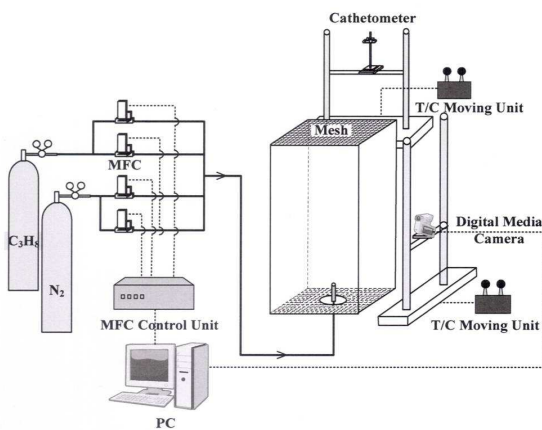


Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup and flow system

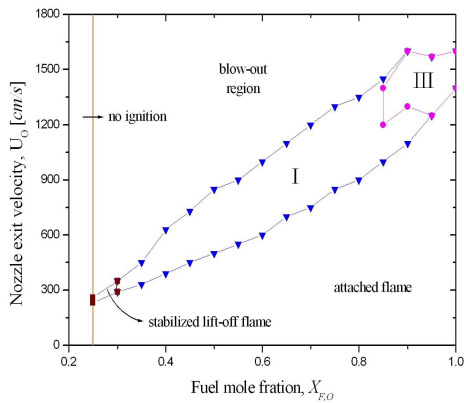
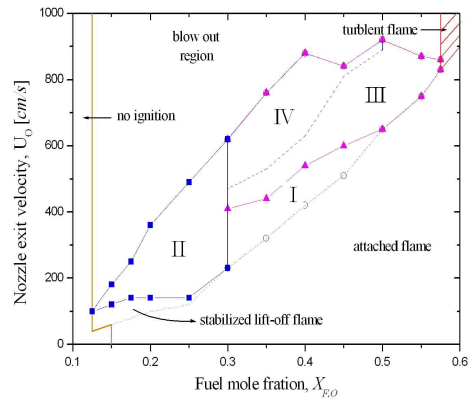


Fig. 2 Flame stability map as a function of fuel jet exit velocity and initial fuel mole fraction in laminar free-jet lift-off propane flames diluted with nitrogen; D=0.3mm

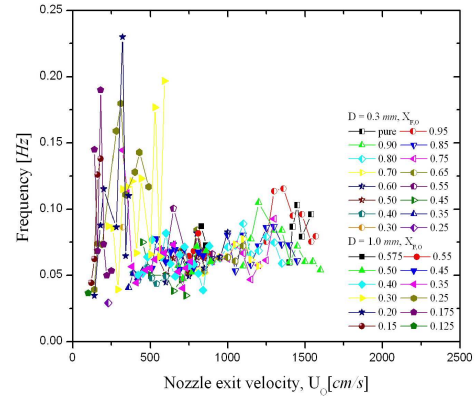
3. 결과 및 논의

3.1 화염안정화 선도와 화염진동의 거시적특성

부상화염의 진동 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 제트의 노즐출구 속도, U_0 및 질소 희석에 따른 프로판 연료몰분율, $X_{F,O}$ 에 따라 실험을 수행하였다. Figs. 2, 3a에 나타낸 영역은 FFT분석을 통해 도출된 메인주파수를 기준으로 구분하였다. Fig. 2는 노즐직경 0.3mm에서의 층류 부상화염 거동을 나타내고 있다. 그림에서 보듯 연료몰분율 $X_{F,O} < 0.25$ 에서는 과도한 질소희석으로 인해 부착화염조차 발생하지 않은 조건이며, $0.25 \leq X_{F,O} \leq 0.3$ 에서는 제한적으로 안정된 부상화염이 관찰되었고 이후 화염날림현상이 나타났다. 또한 연료몰분율이 $X_{F,O} \geq 0.3$ 인 지역에서 0.125Hz미만의 저주파수 화염진동이 나타났다(영역 I). 이러한 진동 불안정성(영역 I)의 원인으로 후에 논의되겠지만 열손실에 기인하는 것으로 초기 연료 몰분율(initial fuel mole fraction)이 증가할수록 확장되어지는 경향이 나타났다. 이것은 연료몰분율이 증가함에 따라 화염전파속도 및 단열 화염온도가 증가함에 따른 것으로 판단된다. 연료몰분율 $0.85 \leq X_{F,O} \leq 1$ 은 앞서 언급한 열손실에 의한 저주파수의 진동과 12.5-15Hz의 고주파수의 진동이 혼재되어 나타났다(영역 III). 마찬가지로 후에 논의되겠지만 Chung연구그룹의 동축류 부상화염에서 나타났던 출구속도에 따른 진동불안정성^(12,13)의 경향과 매우 유사하며 본 실험에서 나



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Flame stability map as a function of fuel jet exit velocity and initial fuel mole fraction in laminar free-jet lift-off propane flames diluted with nitrogen; D=1.0mm ; (b) Variations of heat-loss-induced oscillation frequency with nozzle exit velocity at various initial fuel mole fractions for the nozzle diameters of 0.3 and 1.0 mm

타났던 현상 또한 부력에 의한 것으로 밝혀졌다. 한편 버너직경과 연관된 삼지화염의 화염곡률 효과를 알아보기 위하여 노즐 직경 1.0mm에서도 같은 실험을 수행하여 안정화선도를 Fig. 3a에 도시하였다. 그림에서 보듯 노즐직경 0.3mm와 유사하게 연료몰분율 $X_{F,O} < 0.125$ 에서는 부착화염조차 발생하지 않았고 연료몰분율 $0.125 \leq X_{F,O} \leq 0.15$ 에서는 화염이 부착하지 않고 바로 부상하였다가 화염날림이 발생하였다. 또한 $0.125 \leq X_{F,O} < 0.3$ 의 실선과 점선 사이의 좁은 영역은 화염진동 없이 안정된 부상화염이 존재하였다. Figs. 2와 3a를 비교하면 부상화염이 발생하는 영역이 확장되었고 진동불안정성이 발생하는 영역 역시 희박연료조건으로 확장된 것을 알 수 있다. 이것은 노즐 직

경 증가에 따라 화염곡률반경이 증가하여 화염전파속도가 증가하였기 때문이다. 또한 0.3mm 노즐과 비교하여 부력에 의한 진동불안정성이 나타나는 영역이 확장된 것을 알 수 있다. 이것은 노즐 크기 증가에 기인하는 것으로 Froude 수 ($Fr=U_0^2/gL$)의 정의에서 알 수 있듯이 특성길이 L을 노즐직경으로 본다면 모멘텀 효과의 감소로 인해 부력효과가 우세해지고, 삼지화염의 곡률반경 증가에 의한 화염 전파속도 증가를 유발하는 두 가지 측면을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그리고 노즐직경 1.0mm에서는 열손실에 의한 진동불안정성이 노즐직경 0.3mm와 달리 영역 I 과 영역 II의 두 가지 양상을 보였다. 두 진동의 특성을 명확히 하기 위하여 노즐출구속도에 따라 진동주파수를 조사하여 Fig. 3b에 나타내었다. 그림에서 보듯 전반적인 진동범위는 영역 I에서 0.02-0.125Hz의 주파수를 보이고 영역 II에서는 0.02-0.25Hz의 주파수 범위를 보인다. 그리고 영역 I은 노즐출구속도에 따라 진동주파수가 일정한 반면 영역 II는 상대적으로 불규칙한 양상을 보인다. 이것에 대한 자세한 논의는 3.2장에서 하겠다.

연료물분율 $0.3 \leq X_{F,O} \leq 0.5$ 에서 나타난 영역 IV영역은 열손실에 의한 진동과 부력에 의한 고주파수의 진동 및 2-4.5Hz범위의 주파수를 가진 진동이 동시에 나타나고 있다. 2-4.5Hz범위의 주파수 진동은 루이스수에 의한 것으로 판단되며 선행연구⁽⁹⁾와 마찬가지로 소염근처에서 화염진동이 발생하였다. 또한 Matalon연구그룹에서 제시한 화염의 격리된 거리(standoff distance)가 증가함에 따라 화염불안정성이 증가한다고 보고되고 있는 점을⁽¹⁰⁾ 감안하여 이후 루이스수와 자유제트에서 화염의 격리된 거리를 의미하는 부상높이를 이용하여 특성화하였다. 자세한 설명은 3.2절에서 개개의 영역의 특성화를 통하여 논의할 것이다.

3.2 논의

이제 열손실에 의한 진동메커니즘을 논의하고자 한다. 층류부상화염은 유동속도와 삼지화염 전파속도가 균형을 이루는 지점에서 화염이 머무르게 된다. 화염은 비반응제트상사성이론^(18,19)에 따르면 속도선과 농도선이 교차하는 지점에서 머무르게 되는데 화염표면의 전도열손실은 질량확산 유동과의 균형을 통해 화염 안정화에 기여하게 된다. 이러한 상황은 화염이 루이스수가 1보

다 클 때⁽⁹⁾ 축 방향으로 진동을 유발하고 심지어 루이스수가 1보다 작을 때에도^(10,11) 과도한 열손실에 의해 진동을 한다고 보고되고 있다. 이것은 루이스수에 의한 진동메커니즘으로 진동 주파수는 $O(1\text{Hz})$ 로 알려져 있다. 하지만 현재의 자기진동의 주파수는 0.25Hz 미만이다. 더욱이 부력에 의한 진동은 동축류 부상화염의 선행연구에서^(12,13) 약 2-6Hz의 범위를 가진 점을 감안한다면 현재의 자기진동 주파수는 부력보다는 열손실에 기인한다고 볼 수 있다. 프로판 연료의 특성상 모든 실험조건은 루이스수가 1이상인 점을 감안한다면 루이스수에 의한 영향을 재차 고려하지 않을 수 없다. 그러나 본 연구그룹의 회색된 메탄부상화염 예비실험에서 루이스수가 약 0.9인 지점에서도 자기진동을 관찰하였다. 이러한 점을 총괄하여 볼 때 현재의 0.25Hz 미만의 진동은 열손실에 의한 진동으로 볼 수 있다.

삼지화염은 본질적으로 곡선형태를 띄는데 이는 예혼합 층류 화염의 전파속도가 당량비 1인 지점에서 최대값이고 당량비가 증가하거나 감소하면 화염 전파속도는 감소하기 때문이다. 또한 화염의 최고온도는 삼중점에서 나타나고 부상화염의 희박 예혼합 화염의 길이는 유한하고 대기온도에 노출된다. 이러한 조건에서 삼지화염의 본질적인 상태량은 희박 예혼합화염의 반경반향 전도열손실 및 복사열손실에 민감하게 반응한다. 이후 삼지화염은 화염 전파속도의 감소를 유발하고 이로 인해 화염은 후류로 밀려나게 된다. 삼지화염이 후류로 가는 동안 스칼라소산을 또한 감소하고 이는 화염전파속도의 증가를 유발하므로 화염은 다시 상류로 복귀한다. 이러한 자기진동의 메커니즘으로 현재의 저주파수의 진동을 열손실과 결부시키려면 진동 특성이 열손실 인자와 잘 부합되어야만 한다.

한편 시간에 따른 부상화염 높이변화를 조사하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯 영역 I과 II는 큰 차이를 보이고 있지는 않으나 각각의 FFT결과를 비교한 Fig. 5를 살펴보면 영역 I은 Fig. 3b의 결과대로 0.125Hz미만이나 영역 II는 0.25Hz미만을 나타내고 있다. 이것은 영역 I 과 II를 나뉘는 연료물분율 0.3을 기점으로 과다희석된 0.3이하인 지역은 0.3이상인 지역보다 상대적으로 화학반응시간이 길고 이로 인해 화염 진동 불안정성을 더욱 야기하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6에 직경 1mm에서 연료물분율에 따라 노즐

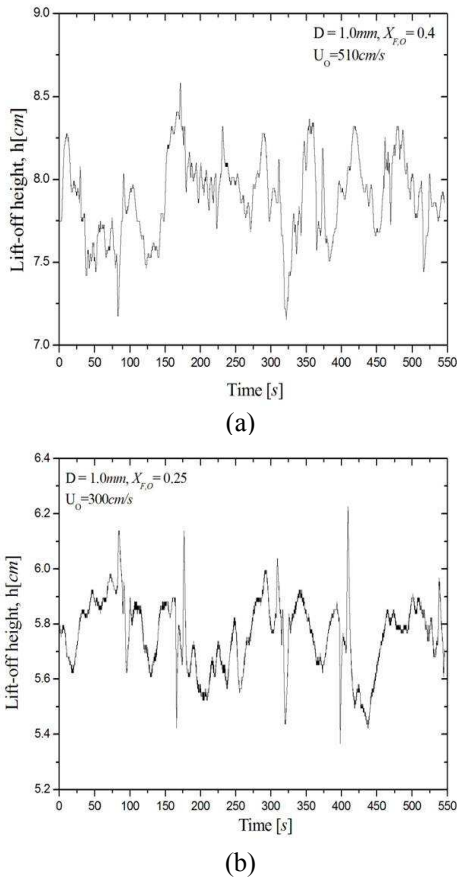


Fig. 4 Temporal variations of lift-off height at (a) $X_{F,O}=0.4$, $U_0=510\text{cm/s}$ in the regime I and (b) $X_{F,O}=0.25$, $U_0=300\text{cm/s}$ in the regime II for the nozzle diameter of 1.0mm

출구속도에 따른 평균 부상화염 높이변화를 살펴보면 그림에서 보듯 동일한 노즐출구속도에서 희석이 많이 되는 경우 화염이 후류로 가는 경향을 띄고 있고 이는 화염진동불안정성을 더욱 가중시키는 것으로 판단된다. 결국 노즐직경 1mm에서 열손실에 의한 진동이 영역 I 과 II로 구하는 것은 질소 과다 희석으로 인한 화학반응시간의 증가와 동일 노즐출구속도에서의 화염전파속도의 감소로 인한 영향으로 판단된다. 하지만 이러한 판단은 현재의 실험결과로는 무리가 따르고 향후 연구과제로 보충연구가 필요할 것으로 판단된다. Fig. 7는 열손실 인자와 화염전파속도에 상응되는 노즐출구속도로 이루어진 Re 수가 St 수와 잘 일치함을 보이고 있다. 그림에서 T_a 와 T_∞ 는 이론화염조건에서 각각 단열화염온도와 외부온도를 나타낸다. 영역 I 과 II의 상관식은 다음과 같다.

Regime I: $St = 7.79 \times 10^{-5} \gamma - 3.77 \times 10^{-4}$ (R=0.952)

Regime II: $St = 2.676 \times 10^{-4} \gamma + 5.27 \times 10^{-4}$ (R=0.967)

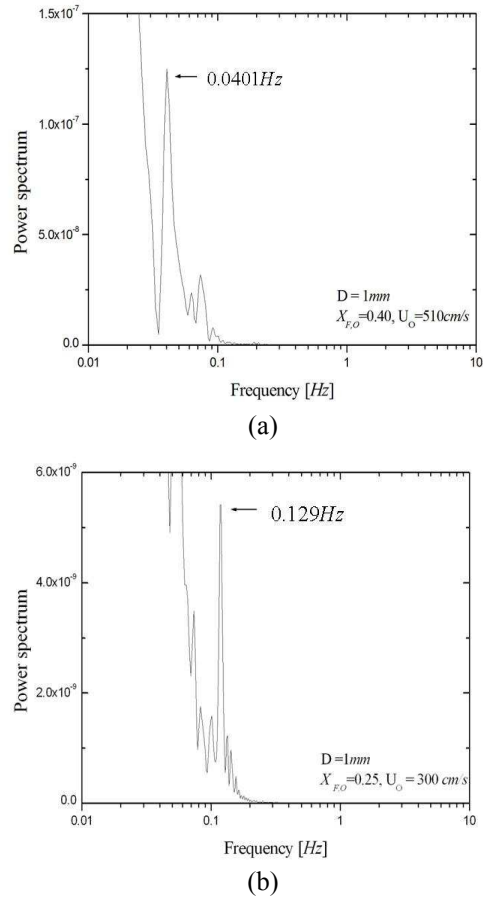


Fig. 5 Power spectra of lift-off heights (a) at $X_{F,O}=0.4$, $U_0=510\text{cm/s}$ in the regime I and (b) at $X_{F,O}=0.25$, $U_0=300\text{cm/s}$ in the regime II for the nozzle diameter of 1.0mm

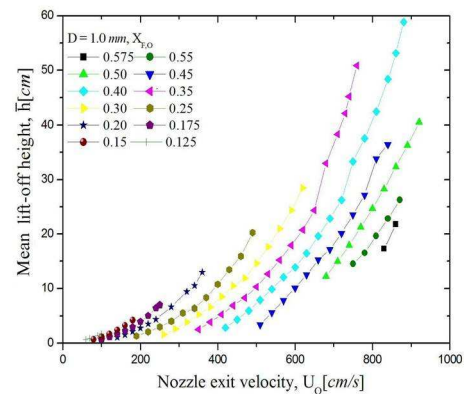


Fig. 6 Variation of mean lift-off height according to nozzle exit velocity at various initial fuel mole fractions for the nozzle diameter of 1.0 mm

여기서 $\gamma = \frac{T_a - T_\infty}{T_a} Re$, Re 수는 노즐출구속도와 부상높이로 정의되었고 ($Re = \frac{U_0 \bar{h}}{\nu}$) R 은 베스트

피팅과 각 데이터간의 상관계수(correlation coefficient)이다. 그 결과 층류 부상화염에서 열손실 인자가 진동주파수에 지배적으로 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(a)는 영역 III에서의 FFT결과를 나타내었고 Fig. 8(b)는 부력에 의한 고주파수 진동이 Ri수와 St수로 잘 표현됨을 나타내었다. 영역 III의 부력에 의한 진동 주파수 범위는 12.5-15Hz이다. 이러한 주파수는 명멸화염(flickering flame)과 양초화염에서 부력에 의해 켈빈-헬름홀츠 불안정성을 야기시키는 진동 주파수와 유사하다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 8(b)에서 보듯 잘 알려진 비반응 유동장⁽³⁾에서 부력을 유발하는 상관식 $St=0.8Ri^{0.38}$ 와는 일치하진 않으나 매우 유사한 결과를 획득하였고 상관식은 다음과 같다.

$$\text{Regime III: } St=0.549Ri^{0.657} \quad (R=0.987)$$

이제 열손실에 의한 진동과 부력 및 루이스수에 의한 진동, 총 세 가지 유형의 진동이 혼재된 영역 IV영역에 대해 논의하고자 한다. Fig. 9는 영역 IV에서 노즐직경 1.0mm일 때 $X_{F,O}=0.25$, $U_0=300\text{cm/s}$ 에서의 FFT결과를 나타내었다. 그림에서 1Hz미만은 생략하여 나타내었다. Fig. 9에서 보듯 3.46과 13.31Hz의 두가지 주파수가 혼재되어 있는 것을 볼 수 있다. 13.31Hz의 주파수 진동은 Fig. 8(b)에서 나타낸 St수와 Ri수와 잘 일치하였고 이를 미루어 볼 때 이는 부력의 영향으로 판단된다. 그리고 노즐출구속도에 따라 $O(1\text{Hz})$ 의 진동주파수 변화를 조사하여 Fig. 10(a)에 나타내

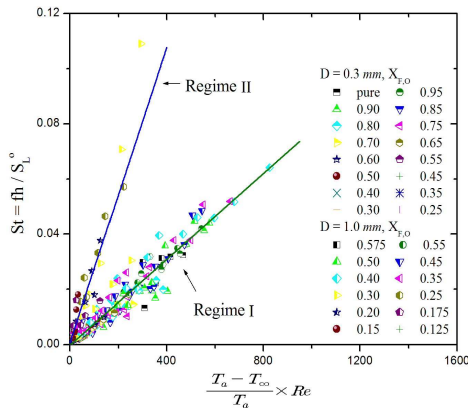
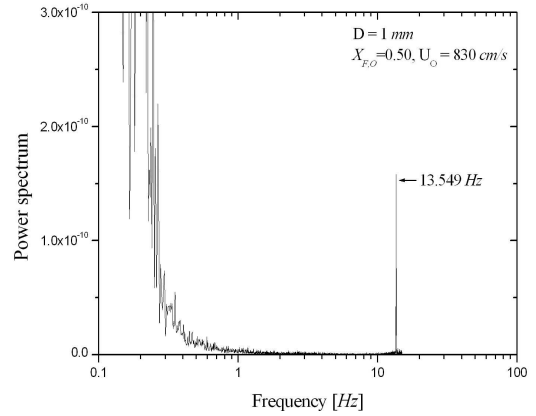
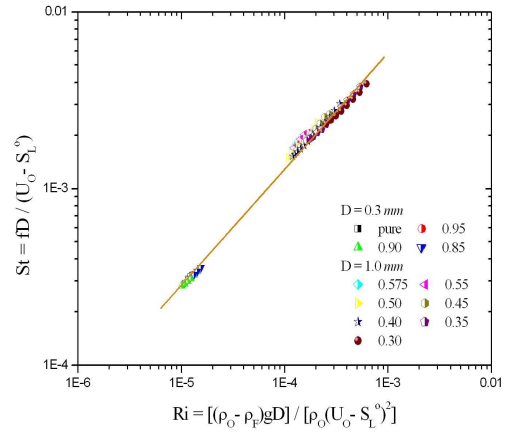


Fig. 7 The dependency of heat-loss-induced Strouhal number as a function of heat loss factor and Reynolds number at various initial mole fractions for the nozzle diameter of 0.3 and 1.0 mm

었다. 그림에서 보듯 진동주파수는 연료몰분율 0.4보다 클 때 노즐출구속도가 증가함에 따라 증가하는 반면 연료몰분율이 0.4 이하일 때는 노즐출구속도가 증가함에 따라 증가하다가 특정 지점에서 감소하는 것을 볼 수 있다. 화염진동주파수 범위는 층류 동축류 부상화염에서 관찰된 것과 매우 유사하다.^(3,12,13) 하지만 현재의 연구에서 노즐출구속도가 증가함에 따라 진동주파수의 변화가 선행연구^(12,13)와는 정반대의 결과가 얻어지므로 화염진동은 매우 유사한 진동범위를 보일지라도 부력에 의한 영향으로는 보기 힘들다. 이전 연구 또한 동축류 부상화염에서 산화제 농도를 조절하여 챔버 내 산화제를 모두 소비하였을 때



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Typical power spectrum of a buoyancy-induced oscillation in addition to a heat-loss-induced oscillation at $X_{F,O}=0.5$, $U_0=830\text{cm/s}$ for the nozzle diameter of 1.0mm ; (b) Buoyancy-induced non-dimensional oscillation frequency in terms of Strouhal number with Richardson number at various initial fuel mole fraction for the nozzle diameter of 0.3 and 1.0 mm

자발적인 화염진동이 관찰되었다.⁽³⁾ 이것은 산화제 영역에서 열방출에 의해 대기 산화제가 부족하기 때문이다.⁽¹⁵⁾ 그러나 현재의 화염진동은 층류 자유제트화염에서 대기 산화제가 충분히 공급된다. 그러므로 현재의 화염진동은 소화이전의 자발적인 화염진동으로 보기 어렵다.^(1-3,15)

한편, 최근 연료분사기 근처의 소생하는 에지 화염(edge-flame in the near-wake of a fuel injector)에서 루이스수에 의한 화염안정화가 논의되었다.⁽¹⁰⁾ 이 연구에서 루이스수에 의한 진동은 루이스수와 열손실 강도가 좌우하고 이 둘의 상관관계는 화염의 격리된 거리에 의존한다고 밝혀졌다. 그 결과 화염의 격리된 거리가 증가하였을 때 화염은 불안정하고 화염의 격리된 거리가 감소한다면 루이스수가 적절히 큰 상황에도 불구하고 화염이 안정된다고 보고되어진다. Fig. 10(a)에는 진동주파수가 화염의 격리된 거리를 나타내는 노즐출구속도가 증가함에 따라 전환점까지는 증가하고 화염은 불안정하다. 이것은 이전 연구와 물리적으로 부합된다.⁽¹⁰⁾ 그러나 전환점을 넘어선 이후에는 노즐출구속도에 따라 진동주파수가 감소한다. 그럼에도 불구하고 우리는 Fig. 10(b)에 선행연구⁽¹⁰⁾를 배경으로 고려하여 무차원 부상높이와 루이스 넘버를 조합하여 현재의 루이스수에 의한 진동모두를 특성화 하였다. Fig. 10(b)에 A는 전환점 이전의 데이터를 나타내고 B는 전환점 이후의 데이터를 나타내고 있다. 전환점 이전의 데이터는 루이스수와 무차원 부상높이를 조합한 변수가

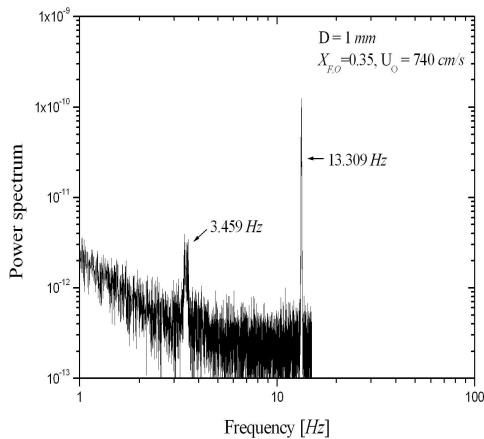
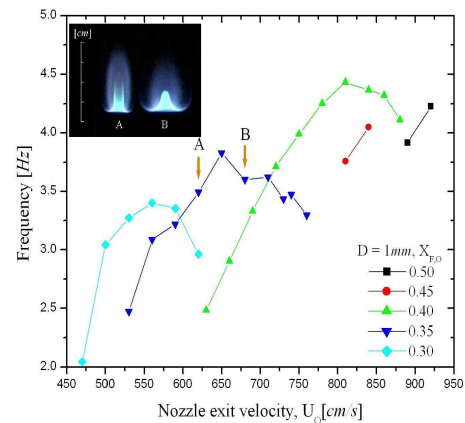


Fig. 9 Typical power spectrum for a couple form with a buoyancy-induced oscillation and a Lewis-number-induced oscillation in addition to a heat-loss-induced oscillation at $X_{F,O}=0.35$, $U_o=740\text{cm/s}$ for the nozzle diameter of 1.0mm

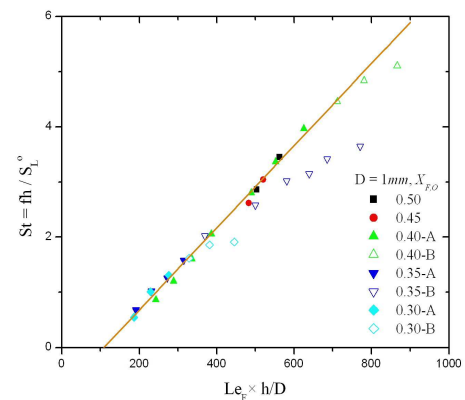
St수와 잘 일치하고 상관식은 다음과 같다.

$$St = 0.00745Le_F \frac{h}{D} - 0.811 \quad (R=0.996)$$

그러나 Fig. 10(b)에 보듯 전환점 이후의 데이터는 부합되지 않는다. 이 점을 명확히 하기 위하여 전환점 전후의 화염 형태를 조사하여 Fig. 10(a)에 나타내었다. A는 전환점 이전의 화염이고 B는 전환점 이후의 화염이다. A는 서론에서 언급하였듯이 Bilger 연구그룹의 연구결과⁽¹⁶⁾에서 묘사한 예혼합가지가 연결되지 않은 전형적인 삼지 화염 전파를 나타내고 B는 예혼합가지가 연결된 화염선단 전파를 나타낸다. 그 결과 A의 삼지화염전파속도는 스칼라소산율⁽¹⁶⁾에 의존하고 화염진동은



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Variations of Lewis-number-induced oscillation frequency with nozzle exit velocity at various initial mole fractions for the nozzle diameter of 1.0mm ; (b) The dependency of Lewis-number-induced St-number as a function of fuel Le-number and non-dimensional lift-off height in triple flame propagation at various initial mole fractions for the nozzle diameter of 1.0 mm

확산화염에 기반을 둔 Matalon 연구그룹⁽¹⁰⁾의 물리적인 해석과 잘 일치하게 된다. 그러나 화염선단 전파인 B는 꼬리확산화염의 성격이 저조함에 따라 삼지화염의 과농예혼합 화염가지의 에지부분이 과농가연한계와 밀접하고 삼지화염선단의 부분예혼합부로 공기가 유입됨으로서 중심축의 연료 물분율은 과농가연한계의 연료물분율보다적게 나타난다. 이후 부합되지 않은 데이터는 과농가연한계의 연료물분율에 크게 의존하게 된다. 그 결과 Fig. 11에서 보듯 St수는 루이스수와 무차원 부상높이 그리고 과농가연한계에서의 연료물분율을 조합한 변수와 잘 일치하고 상관식은 다음과 같다.

$$St = 0.00301Le_F \frac{h}{D} \frac{X_{F,rich}}{X_{F,O}} + 0.014 \quad (R=0.989)$$

반면 노즐 직경 0.3mm에서는 루이스수가 1보다 컸음에도 불구하고 루이스수에 의한 진동은 나타나지 않았다. 또한 모든 부상화염의 화염형태는 화염선단 전파 ("B")의 형태가 나타났다. 현재의 현상은 명백히 입증할 순 없지만 화염선단 전파("B")영역은 루이스수에 의한 진동불안정성을 오히려 억제하고 부상화염의 안정성에 기여하는 것으로 판단된다.

3.3 비반응제트상사성 이론 해와의 비교

부상화염의 안정화 기구는 비반응 제트상사성 이론^(18,19)에 따라 삼지화염의 삼중점(triple point)이 이

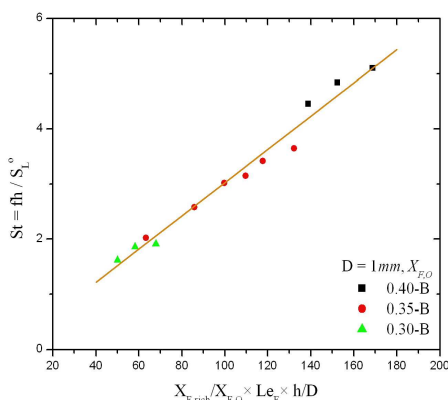


Fig. 11 The dependency of Lewis-number-induced Strouhal number as a function of fuel Lewis number, non-dimensional lift-off height, and normalized initial fuel mole fraction at fuel-rich flammable limit in flame front propagation at various initial mole fractions for the nozzle diameter of 1.0 mm

론 당량비선을 따르고 이론 당량비선을 따라 화염이 전파한다고 가정함으로써 유량과 노즐 직경에 따른 부상높이는 다음과 같이 주어진다.

$$u = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{J}{\rho} \frac{1}{(1 + \eta^2/8)^2}$$

$$Y_F = \frac{(2Sc + 1)}{8\pi\nu x} \frac{I_F}{\rho} \frac{1}{(1 + \eta^2/8)^{2Sc}}$$

$$H_L/d^2 \propto (Y_F^*/Y_{P,o})^{1/(Sc-1)} u_o^{(2Sc-1)/(Sc-1)} \quad (2)$$

$$u_{CL} = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{J}{\rho} = \frac{1}{8\nu} \frac{u_o^2 d^2}{x} \quad (3)$$

여기서 u 는 축방향 속도, Y_F 는 연료의 질량분율을 나타내고 x 는 축방향 거리, d 는 노즐 직경, ρ 는 밀도, ν 는 동점성 계수를 나타낸다. 위와 같은 비반응 제트상사성^(18,19)으로 Chung의 연구그룹을 포함하는 대부분의 연구들이 층류 부상화염의 메커니즘을 잘 설명하여 왔다. 이는 전반적인 층류화염 거동을 냉각 제트유동(cold jet flow)에 의거하여 보다 단순하게 부상화염의 거동을 예측할 수 있지만, 본 연구와 같은 화염 존재효과(heat release effect)가 극명히 나타난 자기진동과 같은 부상거동을 예측 가능 한지를 규명할 필요가 있다. Fig. 12은 식 (2)을 이용하여 층류 부상화염의 부상 높이 H_L , 노즐 직경 d , 노즐 출구 속도 U_O 및 연료의 물분율 $X_{F,O}$ 의 관계를 나타낸 결과이다. 여기서 Sc수는 순수 프로판이 공기중으로 확산될 때의 값인 1.376을 사용하였다. 제트상사성 이론이 유효하기 위해서는 이들 실험 자료의 값의 기울기가 1이 되어야 하나 $X_{F,O}$ 가 서로 다른 경우에는 기울기가 동일하지 않고 최대 부상높이와 최소부상높이의 데이터가 각각 존재함으로 인해 기울기 값이 2개가 존재하므로 식 (2)을 유도하기 위한 가정한 연료가 공기와 혼합하여도 성분비를 유지한다는 가정을 적용할 수 없게 된다. 한편 $X_{F,O}=0.45, 0.65$ 일 때 속도가 작은 경우 기울기가 변화한 것은 본 실험에서 분출되는 속도분포가 충분히 발달된 유동(이므로 포아쥘레(Poiseuille) 유동으로 가정하면 노즐 출구 최고 속도는 $2U_O$ 이므로 식(3)에서 유도한 u_{CL} 값이 노즐 출구 최고 속도 $2U_O$ 보다 작아야 한다. 하지만 위의 영역에서는 앞의 조건을 만족하지 못하고 이는 제트상사성 이론이 원거리(Far-field)에서

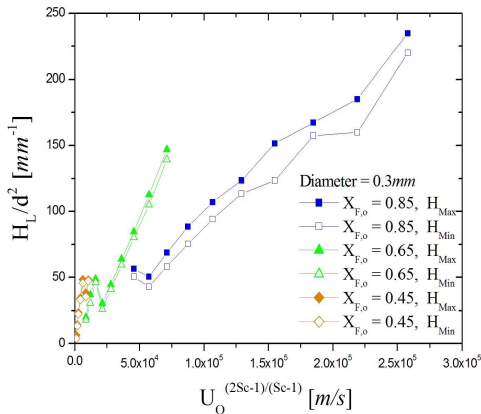


Fig. 12 Liftoff height characteristics for laminar lifted flames (U_0 in m/s) for $Sc=Sc_p$ in horizontal axis; $D=0.3mm$

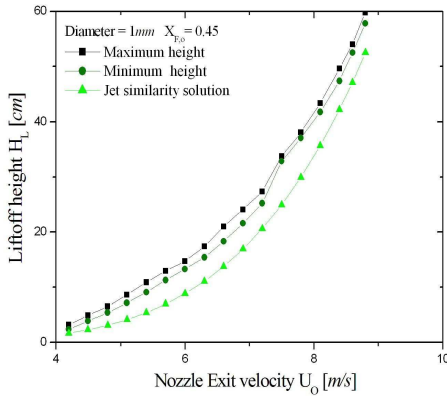


Fig. 13 Variation of experiment data and jet similarity solution at $X_{F,O}=0.45$, $D=1.0mm$

적용될 수 있고 포텐셜 코어 영역에서는 전단 유동이론으로 설명해야 한다는 단점을 내포한 셈이다. Fig. 13은 실제 실험데이터와 제트상사성 이론에 근거한 출구속도에 따른 부상 높이를 나타내었는데 그림에서 보듯 각각의 조건에서 화염의 존재효과로 인해 실제 층류 부상화염 거동을 정확히 예측하지 못하고 있다. 이는 제트상사성 이론은 비반응 유동의 제트 상사성에 근간을 두기 때문에 실제 화염의 존재 효과로 인해 상이한 거동을 나타낸 것으로 판단된다. 또한 화염의 곡률 효과, 부력 및 열손실 등에 의거한 화염 존재효과 등에 대해서도 미래의 연구로 남아있다.

4. 결론

질소 희석된 프로판에서 층류 자유제트 부상화염실험을 노즐 직경 0.3, 1mm에서 실험을 수행하여 화염진동을 기초로 화염안정화 선도를 제시

하였다. 열손실에 의한 진동(영역 I)과 부력에 의한 진동이 regime I에 첨부된 영역(영역 III)은 노즐직경 0.3mm에 나타났고 반면 노즐직경 1mm에서는 열손실에 의한 진동(영역 I 과 II)이 두 가지 형태로 나타났고 열손실에 의한 진동에 부력이 첨부된 영역(영역 III)과 루이스수와 부력, 열손실에 의한 진동이 모두 혼재된 영역(영역 IV)이 존재하였다. 노즐직경 1mm에서 부력에 의한 진동 영역은 0.3mm와 비교하였을 때 노즐직경 증가로 말미암아 연료물분율이 비교적 낮은 영역까지 확장한 것을 확인 할 수 있었다. 부력에 의한 진동 영역은 St수와 Ri수로 특성화하였다. 루이스수에 의한 진동은 삼지화염 전파에서는 무차원 부상높이와 연료 루이스수에 의존하는 경향이 나타났다. 그러나 화염선단 전파에서는 과농가연한계에서의 연료 물분율과 실험 연료물분율와의 비, 무차원 부상높이 그리고 연료 루이스수에 의해 특성화되었다. 마지막으로 제트 상사성 이론으로부터 얻어진 해와의 비교를 통하여 자기 진동 현상과 같이 화염 존재 효과가 명확한 현상들은 비반응 제트의 상사성에 근거한 해와는 상이한 거동을 보인다는 것을 알 수 있다.

후기

본 연구는 2008년-2009년 한국학술진흥재단 기초연구지원사업(KRF-2008-314-D00040)및 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역인력양성사업에 의해 지원받았고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ross, H. D., Sotos, R. G., T'ien, J. S., 1991, "Observation of Candle Flames Under Various Atmospheres in Microgravity," *Combust. Sci. Tech.* Vol. 75, PP. 155~160.
- (2) Chan, W. Y., T'ien, J. S., 1978, "An Experiment on Spontaneous Flame Oscillation Prior to Extinction," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 18, PP. 139~143.
- (3) Furi, M., Papas, O., Monkewitz, P. A., 2000, "Non-premixed Jet Flame Pulsations Near Extinction," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 831~838.
- (4) Plessing, T., Terhoeven, P., N. Peters, Mansour, M.S., 1998, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combust.Flame* Vol.

- 115, pp. 335~353.
- (5) Buckmaster, J., Hegab, A., Jackson, T.L., 2000, "More Results on Oscillating Edge-Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 12, pp. 1592.
- (6) Buckmaster, J., 2001, "Large-Lewis-Number Instabilities of Model Edge-Flames," *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223~2233.
- (7) Cheamtham, S., Matalon, M., 1996, "Heat Loss and Lewis Number Effects on the Onset of Oscillation in Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 26, pp. 1063~1070.
- (8) Kirkby, L.L., Schmitz, R.A., 1996, "An Analytical Study of the Stability of a Laminar Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 26, pp. 205~220.
- (9) Kurdyumov, V.N., Matalon, M., 2002, "Radiation Losses as a Driving Mechanism for Flame Oscillations," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 45~52.
- (10) Kurdyumov, V.N., Matalon, M., 2007, "Stabilization and Onset of Oscillation of an Edgeflame in the Near-Wake of a Fuel Injector," *Prod. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 909~917.
- (11) Park, J.S., Hwang, D. J., J. Park, Kim, J.S., Kim, S., Keel, S.I., Kim, T.K., Noh, S.S., 2006, Edge Flame Instability in Low-Strain-Rate Counterflow Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 146, pp. 612-619.
- (12) Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., Lee, B. J., 2000, "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 2093~2099.
- (13) Won, S.H., Kim, J., Shin, M.K., Chung, S.H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J.H., Ito, K., 2002, "Normal and Microgravity Experiment of Oscillating Lifted Flames on Coflow," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 37~44.
- (14) Cetegen, B.M., Kasper, K.D., 1996, "Experiments on the Oscillatory Behavior of Buoyant Plumes of Helium and Helium-Air Mixture," *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2974~2984.
- (15) Papas, P., Monkewitz, P. A., 1999, "New Instability Modes in a Diffusion Flame Near Extinction," *Phys. Fluids*, Vol. 11, pp. 2818~2820.
- (16) Chen, Y.C., Bilger, R.W., 2000, "Stabilization Mechanisms of Lifter Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows," *Combust. Flame*, Vol. 122, pp. 377-399.
- (17) Reutsch, G.R., Vervisch, L., Liñán, A., 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 7, pp. 1447~1454.
- (18) Lee, B. J., Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163~172.
- (19) Chung, S. H. and Lee, B. J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, pp. 62~72.