

## 질소희석된 프로판 동축류 버너에서 부상화염에 대한 부력효과

김준홍\* · 신무경\* · 정석호\*\*

### Buoyancy Effect on Stable and Oscillating Lifted Flames in Coflow Jets for Highly Diluted Propane

Junhong Kim, Moo Kyung Shin and Suk Ho Chung

Key Words: lifted flame, tribrachial structure, oscillating flame, buoyancy

#### Abstract

When large size nozzle with low jet velocity is used, the buoyancy effect arises from the density difference among propane, air, and burnt gas. Flame characteristics in such buoyant jets have been investigated numerically to elucidate the effect of buoyancy on lifted flames. It has been demonstrated that the cold jet has circular cone shape since upwardly injected propane jet decelerates and forms stagnation region. In contrast to the cold flow, the reacting flow with a lifted flame has no stagnation region by the buoyancy force induced from the burnt gas. To further illustrate the buoyancy effect on lifted flames, the reacting flow with buoyancy is compared with non-buoyant reacting flow. Non-buoyant flame is stabilized at much lower height than the buoyant flame. At a certain range of fuel jet velocities and fuel dilutions, an oscillating flame is demonstrated numerically showing that the height of flame base and tip vary during one cycle of oscillation. Under the same condition, non-buoyant flame exhibits only steady lifted flames. This confirms the buoyancy effect on the mechanism of lifted flame oscillation.

#### 1. 서 론

화염 안정화 메커니즘을 규명하기 위해서, 층류 부상화염에 대해 많은 연구

가 수행되고 있다. 그 이유로는 일반적으로 연료/산화제의 혼합층과 같은 부분예혼합 상태에서의 화염 전파특성이 삼지화염의 형태로 전파된다고 알려져 있으며, 층류 부상화염의 선단이 주로 삼지화염의 구조로 관측되기 때문이다. 삼지화염은 연료/산화제의 농도장에서 이론당량비선에 수직한 방향으로 연료의 농도구배가 존재할 때 생성될 수 있으

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

며, 화염 선단을 기준으로 과농 예혼합 화염, 희박 예혼합화염 그리고 확산화염이 하나의 위치로부터 뻗어나오는 형태를 띄고 있다<sup>(1)</sup>.

최근에는 동축류 제트에서의 부상화염 거동에 대해 많은 연구들이 진행되고 있다. 동축류 제트를 이용하는 연구에서의 장점은 수치해석적으로 자유 제트를 모사하는 것보다 유리할 뿐만 아니라, 특히 실험적으로 노즐의 직경이 큰 경우와 노즐 유속이 작은 경우에는 비교적 크기가 크고 안정적인 부상화염을 관측할 수 있어서 레이저 진단계측에 유용하다는 것이다<sup>(2,3)</sup>. Won 등<sup>(3)</sup>은 질소희석한 프로판과 공기의 동축류 제트에서의 부상화염 특성에 대한 연구를 실험적으로 수행하였는데, 노즐의 직경이 크며 유속이 낮은 경우에는 프로판과 공기, 그리고 기연가스들 간의 밀도차이에 의한 부력 효과에 의해서 화염이 없는 냉간제트의 경우와 부상화염이 존재하는 경우의 화염선단 주위의 유동장 특성이 크게 달라짐을 관찰할 수 있었다. 또한, 연료속도와 연료희석의 특정한 조건 영역에서는 수직으로 상하 진동하는 부상화염을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 부력효과에 영향을 받는 제트에서의 화염특성을 수치해석적으로 고찰하여 부상화염에 대한 부력효과를 알아보고자 한다.

## 2. 지배 방정식과 해석 방법

### 2.1. 지배 방정식

유동 속도는 층류 영역이므로 낮은 마하수 근사법 (low Mach number approximation)을 적용하며, 따라서 음향파 효과는 무시된다. 모든 변수들을 기준 값들로 표준화하여 지배방정식들을

무차원화 시키면 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}) = 0 \quad (1)$$

$$p^{(0)} = \rho T \sum_{i=1}^N (Y_i / W_i) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla T = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\nabla \cdot (\lambda \nabla T)}{\rho c_p} + \text{Da} \frac{\omega_T}{\rho c_p} \quad (3)$$

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla Y_i = \frac{1}{\text{Re Sc}} \frac{\nabla \cdot (\rho D_{iN} \nabla Y_i)}{\rho} + \frac{\text{Da} \omega_i}{\rho} \quad (i=1, \dots, N-1) \quad (4)$$

$$\nabla p^{(0)} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{\mathbf{v}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}) = \frac{1}{\text{Re}} \nabla \cdot \bar{\Phi} - \nabla p^{(1)} + \frac{1}{\text{Fr}} \rho \bar{\mathbf{g}} \quad (6)$$

여기서,  $p^{(0)}$ 와  $p^{(1)}$ 은 낮은 마하수 근사법을 적용하여 유도되는 0차, 1차 계수를 뜻한다. 이 때 개방시스템의 경우는  $p^{(0)}$ 가 시간에 대해서도 일정하므로  $p^{(0)} = \text{constant}$  로 표현된다. 표시가 되지 않은 나머지 변수들은 모두 0차 계수이다. 점성 소산항  $\bar{\Phi}$ , Reynolds 수, Prandtl 수, Schmidt 수 그리고 Froude 수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\Phi} = \mu \left( \nabla \bar{\mathbf{v}} + (\nabla \bar{\mathbf{v}})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) \bar{\mathbf{U}} \quad (7)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{ref}} U_{\text{ref}} L_{\text{ref}}}{\mu_{\text{ref}}}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu_{\text{ref}} c_{p \text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}}$$

$$\text{Sc} = \frac{\mu_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}} D_{\text{ref}}}, \quad \text{Fr} = \frac{U_{\text{ref}}^2}{g_{\text{ref}} L_{\text{ref}}} \quad (8)$$

본 연구에서는 부상화염에 미치는 인자중에서 부력과 같은 수력학적 효과를 부각시키기 위해서 화학 반응은 일차 총체화학반응으로 단순화 하였으며, 각 화학종의 화학반응률  $\omega_i$ 와 열방출  $\omega_T$ 는

다음과 같다.

$$\omega_i = W_i(v_i'' - v_i') A e^{-E_a/R^0 T} \left[ \frac{\rho Y_F}{W_F} \right] \left[ \frac{\rho Y_O}{W_O} \right] \quad (9)$$

$$\omega_T = - \sum_{i=1}^N h_i \omega_i, \quad h_i = h_i^0 + \int_{T_0}^T c_{p,i} dT \quad (10)$$

신뢰성있는 결과에 접근하기 위해 Arrhenius 충돌 계수  $A$ 와 반응 활성화 에너지  $E_a$ 는 총체 반응 메카니즘과 Peters 반응 메카니즘<sup>(5)</sup>을 이용하여 각각 프로판/공기에 대한 평면화염 전파속도<sup>(6)</sup>를 계산한 결과를 비교하여 결정하였다. 사용된 값은 각각  $A = 4 \times 10^{15}$  ( $\text{gmol/cm}^3$ )<sup>-1</sup>/s,  $E_a = 40.2$  kcal/mol 이다.

전달 및 열역학적 물성치들의 모델링을 위해 CHEMKIN-II<sup>(7)</sup>와 TRANSPORT Package<sup>(8)</sup>의 library 값들을 이용하였다. 효율적인 계산 수행을 위해서 각 화학종들의 물성치들은 온도에 대해 3차 다항식으로 계수를 맞춘 식을 사용하였으며, 이들 혼합물의 물성치들은 다음과 같이 모델링하였다<sup>(7,8)</sup>.

$$\mu = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^N X_i \mu_i + 1 / \left( \sum_{i=1}^N X_i \mu_i \right) \right] \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^N X_i \lambda_i + 1 / \left( \sum_{i=1}^N X_i \lambda_i \right) \right] \quad (12)$$

$$D_i = \left( \sum_{j=1}^N X_j W_j \right) / \left( \bar{W} \sum_{j=1}^N X_j / D_{ij} \right) \cong D_{iW} \quad (13)$$

여기서,  $N$ -번째의 화학종이 그 혼합물에서 대부분을 차지한다면, 혼합기체로의  $i$ -번째 확산계수는  $N$ -번째 화학종으로의  $i$ -번째 화학종의 확산계수로 근사화시킬 수 있다<sup>(4)</sup>. 본 연구에서는 공기에서 질소의 물분율이나 질소희석 연료의 질소 물분율이 프로판과 산소의 것에 비해

크므로 이 가정을 적용하여 계산 시간을 절감하였다.

## 2.2. 수치 해법

부상화염 주위의 세부적인 유동장을 모사하기 위해, 수치 해법은 직접 수치 모사법(DNS)에 바탕을 두고 있다.

지배 방정식의 차분화에 있어서 공간 차분은 2차 정확도의 중앙차분법과 staggered 그리드 기법을 사용하였고, 시간차분은 급격한 밀도 변화에 적합한 예측/복수교정(predictor-corrector)법을 사용하였다<sup>(4)</sup>. 예측단계에서는  $T$ ,  $\rho Y_F$ ,  $\rho Y_O$  들을 계산하기 위해서 식(3), (4)에 대한 시간적분법으로 Adams-Bashforth 방법을 사용하였고, 식(2)로부터  $\rho$ 를 계산하였다. 연속 방정식을 만족하기 위해서 식(1)과 (3)으로부터 유도된 식은  $p$ <sup>(1)</sup>에 대한 Poisson 식으로 표현된다. 계산 시간 단축을 위해서, Fig. 1과 같이 화염이 존재할 수 있는 노즐 근처의 반경위치에 그리드를 편중시켰다. 따라서, Poisson 식의 해법은 효율적인 반복법 중에 하나인 다중그리드법(multi-grid method)을 적용하여  $p$ <sup>(1)</sup>을 계산할 수 있으며, 예측단계의 속도 성분은 밀도  $\rho$ 와 압력  $p$ <sup>(1)</sup>으로부터 대수적으로 계산된다. 교정단계에서는 quasi-Crank-Nicolson 방법을 적용하여 예측단계에서와 같은 절차를 통해 다음 시간단계의 값들을 구하였다.

계산영역은 Fig. 2와 같은 2차원 원통 좌표계로 설정하였다. 여기서 중심축과 바깥 벽면의 경계조건은 화학종, 축방향 속도와 온도에 대해서 Neumann 조건을 사용하였다. 동축유동의 입구조건에서 노즐축과 바깥 동축유동축의 조건에 화학종의 질량 분율이 다르거나 온도차가 있는 경우는 원활한 수치 모사를 위해서

다음과 같은 *hypertangent* 형태로 가정하였다<sup>(9)</sup>.

$$\begin{aligned} \phi(r)_{in} = & \frac{1}{2}(\phi_{in,co} + \phi_{in,jet}) \\ & + \frac{1}{2}(\phi_{in,co} - \phi_{in,jet}) \\ & \times \tanh \left[ \frac{2R_{tip}}{4\theta} \left( \frac{r}{R_{tip}} - \frac{R_{tip}}{r} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $\phi$ 는 각각  $Y_k$ ,  $T$ 를 나타내며  $\theta$ 는 운동량두께,  $R_{tip}$ 은 노즐의 반지름이다. 노즐 출구의 속도는 완전발달 조건으로 가정하여 *parabolic* 형태로 설정하였다. 바깥 동축류의 유속은 균일한 분포로 설정하였지만, 노즐 끝단에서부터 반경방향 바깥쪽 방향으로 운동량 두께  $\theta$  만큼은 속도가 0부터 동축류 속도까지 원활하게 변화하도록 식(14)와 같은 *hypertangent* 형태로 설정하였다. 출구 경계조건은 대류 경계조건(*convective boundary condition*)을 사용하였다. 출구 경계조건에서 축방향속도는 대류경계조건으로 계산한 뒤, 전체 계산영역에 대하여 연속, 상태, 에너지와 화학종 보존식들이 모두 만족하는 식을 이용하여 출구경계에서의 평균속도를 보정하는 방법을 사용하였다<sup>(9)</sup>.



Fig. 1 Schematic of grid system (black line) and flame reaction rate (white line)

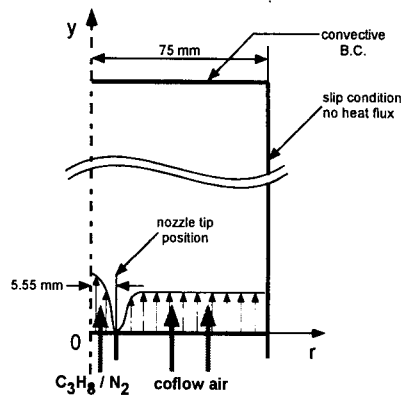


Fig. 2 Schematic Computational domain.

### 2.3. 계산 조건

격자수는  $128 \times 384$  이고, 화염이 존재하는 영역에 대해서는 더 조밀한 격자를 적용하였으므로, 반경 방향으로 최소 격자간격은  $0.18 \text{ mm}$ 이며, 최대 격자간격은 바깥쪽 벽에  $2.0 \text{ mm}$ 를 유지하도록 하였다. 축방향으로는 부상화염 높이 부근에서  $0.2 \text{ mm}$ 의 최소 격자간격을, 계산 영역의 출구영역 부근에서  $2.0 \text{ mm}$ 의 최대 격자간격을 설정하였다. 노즐로부터는 물분을  $X_{F,o} = 0.1$ 의 질소희석된 프로판이 공급되며, 동축류로는 평균유속  $U_{\infty} = 9.40 \text{ cm/s}$  인 공기가 공급된다. 본 연구에서는 노즐쪽의 유속이 각각  $2.64, 5.03, 7.07 \text{ cm/s}$  인 경우에 대해서 비교함으로써 부력효과와 화학반응의 유무에 의한 유동장 특성을 살펴보았다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1. 비반응장과 반응장의 유동

운동량 방정식에서 부력항이 없는 즉, 부력효과가 없는 경우의 비반응장 유동장에서, 부분 예혼합의 혼합층에 점화원으로서 고온을 형성시키면 화염이 생성된다. 그 결과로 Fig. 3과 같이 화염은

초기에서는 구형형상을 보이다가 점차 화염선단이 삼지화염 형상으로 바뀌어가는 것을 볼 수 있으며, 결국은 화염은 정상상태의 화염으로 형성되게 된다. 여기서, 삼지화염은 이관당량비선을 따라 진화한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 비정상 기동은 부력이 있는 유동장에서도 관찰된다.

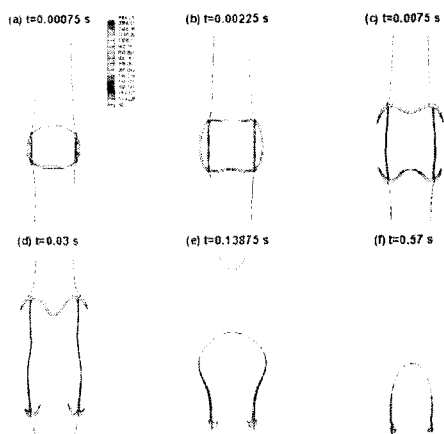


Fig. 3 Reaction rate (contours) and stoichiometric mixture fraction (lines) after ignition without buoyancy.

질소희석시킨 프로판-공기 동축류의 상향분사시 증류제트는 단일 요소 동축류제트나 부력효과가 없는 동축류제트와는 다른 특성을 가진다. 이러한 프로판제트는 상향분사가 되면 주위공기보다 무겁기 때문에 프로판의 속도가 점차 감소되며, 제트로부터 어느 거리에서는 결국 정체점이 형성되기 때문에 프로판제트가 원추형태의 모양을 띠는 것을 실험적으로 관찰하였다<sup>(3)</sup>. 또한, 정체점으로부터 빠져나오는 프로판유동은 동축류공기의 유동에 의해 그릇모양으로 끌려올라간다. 본 수치해석 결과 역시 이러한 기동을 Fig. 4a 처럼 잘 예측하고 있다.

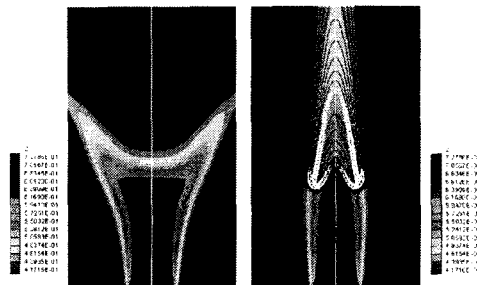


Fig. 4 Numerical results of mixture fraction (contour) and temperature (lines) for  $U_{fuel}=7.07$  cm/s and  $U_{coflow}=9.40$  cm/s; (a) cold and (b) reacting flows.

이러한 비반응장 유동과는 달리, 부상화염이 존재하는 유동장인 경우에는 기연가스에 의해 상향으로 끌어올리려는 부력에 의해서 더 이상 정체점은 관측되지 않는다. 오히려 Fig. 4b와 같이 기연가스에 의한 강한 유동유입(entrainment)으로 인해 부상화염 선단의 유동장이 화염중앙으로 모이게되는 현상을 보인다.

부상화염에 대한 부력효과를 더 알아보기 위해, 부력이 있는 반응장과 부력이 없는 무중력장에서의 반응장을 비교하였다. Fig. 5는 부력이 없는 화염이 같은 조건에서의 부력이 있는 화염에 비해 훨씬 낮은 높이에서 안정화되어 있는 것을 보여주고 있다. Fig. 5a처럼 부력이 없는 화염은 노즐에 가까이 부착되어 확산화염 형태를 띄고 있는데, 부력이 있는 화염에 비해 폭이 넓고 높이도 높으며, 화염에 의한 고온의 가스에 의한 팽창때문에 화염선단 후로는 유선이 확장됨을 볼 수 있다. 그러나, Fig. 5b처럼 부력이 있는 화염은 유선의 분포에서 알 수 있듯이 화염에 의한 고온의 가스가 부력의 영향때문에 상향으로 급격히 가속되어, 질량보존 원리에 의해 부상화염 폭이 줄어들게 된다.

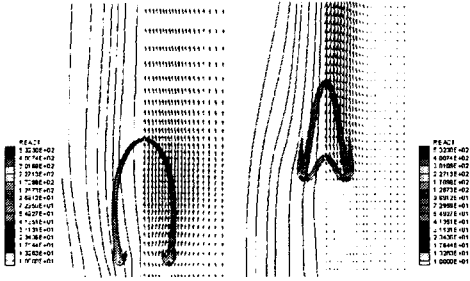


Fig. 5 Reaction rate(contours), streamline (lines) and velocity vectors for  $U_{fuel} = 10.49$  cm/s; (a) without buoyancy and (b) with buoyancy.

### 3.2. 진동하는 부상화염

프로판 동축류제트의 특정한 조건의 영역에서는, 상하로 진동하는 부상화염을 실험적으로 관찰할 수 있었다<sup>(3)</sup>.  $X_{F,o} = 0.1$  와  $U_{fuel} = 5.03$  cm/s의 실험적 조건에 대해서, 진동화염 거동의 수치해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서처럼 화염 밑단과 윗단의 길이가 한 사이클을 주기로 변화하며 3.3 Hz의 주파수로 진동하는데, 이는 실험적 결과와도 잘 일치한다. 또한 주지할 것은, 한 사이클 진동하는 동안 부상화염의 선단은 계속적으로 삼지화염의 구조를 유지한다는 것이다.

따라서, 이러한 진동화염의 메커니즘은 부력효과에 의해 설명될 수 있다<sup>(3)</sup>. 아래쪽으로 떨어지는 구간에서는 부상화염의 전파속도가 삼지화염 부분의 유동속도보다 빨라서 상류쪽으로 전파가 된다. 화염이 상류로 전파됨에 따라서, Fig. 6의 유선의 분포에서 볼 수 있듯이 화염으로의 연료유입량이 증가될 것이다. 결과적으로 연료유입량이 증가되면 부상화염의 길이와 연소율이 증가되므로, 부력의 영향이 더욱 증대된다. 따라서, 증대

된 부력의 영향으로 후류로의 유동속도가 점차 증가하게 된다. 삼지화염 근처의 유동속도가 점차 증가하다가 삼지화염 전파속도보다 커지게 되면, 화염선단은 후류로 밀리게 된다. 이러한 일련의 반응물과 부력사이의 반복적인 현상에 의해 화염이 상하로 진동하게 됨을 설명할 수 있다.

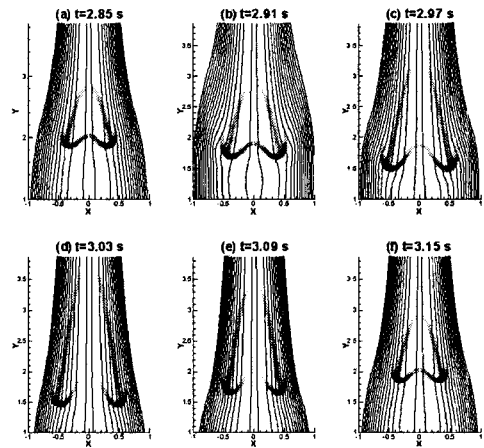


Fig. 6 Numerical results for oscillating flame for  $U_{fuel} = 5.03$  cm/s with buoyancy; streamline(contours) and reaction rate(lines)

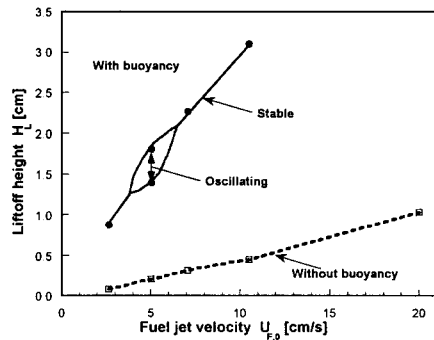


Fig. 7 Liftoff height with jet velocities without buoyancy(dotted line) and with buoyancy(solid line).

Fig. 7은 제트속도와 부상화염의 부상 높이의와의 상관관계를 나타낸 것인데, 부력효과가 있는 화염의 경우는 특정 영역에서 진동하는 특성을 가지고 있는 반면, 부력효과가 없는 화염의 경우는 그러한 진동 특성이 존재하지 않는다. 따라서, 이러한 사실과 일차 총체화학반응식을 이용한 수치해석으로도 상하진동의 부상화염을 확인할 수 있는 사실로 미루어, 부력이 부상화염이 진동하게 되는 주요한 메커니즘임을 입증할 수 있다.

#### 4. 결론

부력효과에 영향을 받는 프로판제트에서의 화염특성을 수치해석적으로 고찰하여 부상화염에 대한 부력효과를 알아보았다. 먼저 비반응 유동장에 대해서 살펴보았는데, 부력효과가 무시된 일반적인 냉간제트의 형태와는 달리 프로판 동축류제트에서는 공기보다 무거운 프로판 제트가 부력의 영향을 받아서 아래로 가라앉는 고깔모양의 제트가 형성됨을 볼 수 있었다. 하지만, 화염이 존재하는 경우에는 화염후류로의 고온가스의 부력으로 인하여 화염 앞단의 유동이 냉간제트와는 달리 안쪽으로 몰려들게 된다.

이처럼, 부력효과로 인해 화염이 없는 경우와 존재하는 경우의 제트상류의 모양이 크게 달라지는 프로판 제트에서는 부상화염 자체의 특성 역시 부력에 많은 영향을 받는다. 이는 부력이 있는 화염의 경우는 같은 조건에서의 부력이 없는 화염에 비해 훨씬 높은 부상높이를 보여주고 있음으로부터 알 수 있다. 모양 역시 부력이 없는 경우의 화염은 화염의 폭과 높이가 큰 반면에 부력이 있는 경우의 화염은 뜨거운 기연가스의 상향의 부력영향으로 인해 화염이 위로 당겨지

게 되며 화염폭과 크기도 작아지게 된다.

또한, 특정 조건의 영역에서는 상하로 진동하는 부상화염을 일차총체화학 반응을 적용한 수치해석으로도 확인할 수 있었으며, 부력이 없는 화염의 경우는 진동하는 부상화염이 확인되지 않는 것으로 보아, 이는 반응률과 부력사이의 평형관계로 설명될 수 있으며, 부력이 상하진동하는 부상화염의 주요 메커니즘임을 알 수 있다.

#### 후기

본 연구는 기계분야 BK-21 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) B. J. Lee, and S. H. Chung, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol.109, pp.163-172, 1997.
- (2) T. Plessing, P. Terhoeven, N. Peters, and M. S. Mansour, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combust. Flame*, Vol. 115, pp. 335-353, 1994.
- (3) S. H. Won, S. H. Chung, M. S. Cha and B. J. Lee, "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.28, pp. 2093-2099, 2000
- (4) H. N. Najm, P. S. Wyckoff, and O. M. Knio, "A Semi-implicit Numerical Scheme for Reacting Flow (I. Stiff

- Chemistry)," *Journal of Computational Physics*, Vol.143, pp.381-402, 1998.
- (5) N. Peters, and B. Rogg, "Reduced Kinetic Mechanisms for Application in Combustion Systems," Lecture Notes in Physics Series m15, Springer-Verlag, Berlin, pp.3-14, 1993.
  - (6) R. J. Kee, J. F. Grcar, M. D. Smooke and J. A. Miller, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames," Sandia National Laboratories Report, SAND85-8240, 1990.
  - (7) R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, "CHEMKIN-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009, 1989.
  - (8) R. J. Kee, J. Warnatz, and J. A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities, and Diffusion Coefficients," Sandia National Laboratories Report, SAND 83-8209, 1983.
  - (9) S. Mahalingam, B. J. Cantwell, and J. H. Ferziger, "Non-premixed Combustion : Full Numerical Simulation of A Coflowing Axisymmetric Jet, Inviscid and Viscous Stability Analysis," Report TF-43, Thermosciences Division, Stanford University, Stanford, CA, 1989.