

과다 희석된 프로판제트의 상향분사시 부력에 의한 유동특성

천강우*·김준홍*·원상희*·정석호*

Characteristics of Vertically Injected Buoyant Jet of Highly Diluted Propane

Kang Woo Chun*, Junhong Kim*, Sang Hee Won* and Suk Ho Chung*

Key Words : Jet(제트), Buoyancy(부력), Acetone PLIF(아세톤 PLIF), Stagnation height(정체 높이)

Abstract

In coflow jets with relatively large size nozzle and low fuel jet velocity, the buoyancy effect arises from the density difference between fuel and air streams. The present study investigated the behavior of such a buoyant cold jet both numerically and experimentally, especially when the fuel stream has higher density than air. It has been demonstrated that the cold jet has a circular cone shape since upwardly injected fuel jet decelerates and forms a stagnation region, when the fuel jet was composed of propane highly diluted with nitrogen. When the fuel was moderately diluted, numerical results showed the Kelvin-Helmholtz type instability along the mixing layer of the jet. The stagnation height increases nonlinearly with fuel jet velocity with the power of approximately 1.64.

기호설명

c_p : normalized constant pressure specific heat
 D_i : normalized diffusion coefficient of i -species
 Fr : Froude number
 g : normalized gravity acceleration
 L : inner radius of coflow burner, mm
 N : total number of species
 p : normalized pressure
 Pr : Prandtl number
 r : horizontal coordinate
 R_{tip} : radius of nozzle, mm
 Re : Reynolds number
 Sc : Schumidt number
 t : normalized time
 T : normalized temperature
 u : normalized r -directional velocity
 v : normalized y -directional velocity
 \vec{v} : normalized velocity vector
 V_{co} : mean coflow velocity, cm/s
 $U_{F,o}$: mean jet velocity at nozzle exit, cm/s

W_i : normalized molecular weight of i -species
 X_i : i -species mole fraction
 y : vertical coordinate
 Y_i : i -species mass fraction
 μ : normalized viscosity of mixture
 λ : normalized thermal conductivity of mixture
 θ : momentum thickness, mm

Subscripts

F : fuel
 i : i -species index
 o : nozzle exit
 ref : reference state

1. 서론

화염 안정화 메커니즘을 규명하기 위해, 층류 부상화염에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다. 탄화수소계 연료와 공기를 연료/산화제로 쓰는 동축류 제트 버너의 경우, 분자량이 큰 연료는 제트 주위의 공기보다 무겁기 때문에 제트 유동은 부력효과에 의해 영향을 받는다. 따라서 동종 유체를 분사하는 제트 유동과는 다른 특성을 나타낸다. 층류 제트에서, 제트 노즐의 직경이

* 서울대학교 기계항공공학부, shchung@snu.ac.kr

$O(0.1 \text{ cm})$ 로 매우 작고 연료와 공기의 밀도 차이가 크지 않은 유동에서는 상대적으로 부력효과가 작아 무시할 수 있으므로 상사해를 이용하여 농도장 및 유동장 해석이 가능하며, 이를 이용하여 부상화염의 제반특성에 대한 해석이 수행되었다.^[1,2] 노즐의 직경이 $O(1 \text{ cm})$ 로 크고 제트의 속도가 상대적으로 느리며 $O(10 \text{ cm/s})$, 분자량이 큰 탄화수소계 연료를 쓰는 경우는 균일한 온도분포를 가지고 있더라도 연료와 공기의 밀도차이에 의한 부력효과 때문에 유동특성이 크게 달라진다. 이런 관점에서, 부상화염에서의 부력효과를 규명하기 위해 부력의 영향을 받는 과다 질소 희석된 동축류 제트 버너에서 화염특성이 실험적으로 연구되었다.^[3]

본 연구에서는 프로판 제트주위로 공기를 불어주는 동축류 제트를 상향분사 시킬 때, 부력효과에 의한 제트 유동 특성을 고찰해보았다. 비반응 제트에서 상대적으로 무거운 프로판으로 인해 부력의 영향을 받는 유동의 특성을 수치해석과 실험을 통해 고찰하였다.

2. 수치해석과 실험

2.1 수치해법과 지배 방정식

부력이 존재하는 유동장의 상세한 거동을 묘사하기 위하여, 수치해법은 직접 수치 모사(DNS) 코드에 기반을 둔 축대칭 유동장을 사용하였다. 전달 및 열역학적 물성치들은 CHEMKIN-II와 TRANSPORT package의 library로부터 계산되었다.^[4,5] 유동 속도는 층류 영역이므로 낮은 마하수 근사법 (low Mach number approximation)을 적용하며, 따라서 음향과 효과는 무시된다. 다음은 모든 변수들을 기준 값들로 규준화하여 무차원화시킨 지배방정식들이다.^[6]

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

$$\nabla p^{(0)} = 0 \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla Y_i = \frac{1}{\text{Re Sc}} \frac{\nabla \cdot (\rho D_{iN} \nabla Y_i)}{\rho} \quad (4)$$

$$p^{(0)} = \rho T \sum_{i=1}^N (Y_i / W_i) \quad (5)$$

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

위의 식에서, $p^{(0)}$ 와 $p^{(1)}$ 는 낮은 마하수 근사법을 적용하여 유도되는 0차, 1차 항을 의미한다. 개방시스템의 경우는 $p^{(0)}$ 가 시간에 대해서 일정하므로 $p^{(0)} = \text{constant}$ 로 표현된다. 표시 안된 나머지 변수들은 모두 0차 항들이다. 점성 소산항 Φ 와 무차원 수들은 다음과 같다.

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

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

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

지배 방정식의 차분화에 있어서 공간차분은 2차 정확도의 중앙차분법과 staggered grid 기법을 사용하였고, 시간차분은 급격한 밀도 변화를 모사하기 위해 전체적으로 2차 정확도의 predictor-corrector 시간차분법을 적용하였다. 이 방법에서 predictor 단계에서는 온도 T , 화학종 Y_k , 속도 u, v 를 계산하기 위해 2차 정확도의 Adams-Bashforth법을 적용하였으며, corrector 단계에서는 2차 정확도의 quasi-Crank-Nicolson 방법을 사용하였다. 각 단계에서 속도 u, v 가 연속방정식을 만족하기 위해 projection 방법을 이용하였는데,^[7] 이는 압력항을 운동량방정식에서 분리하고 중간단계속도를 도입하여 연속방정식을 만족하도록 속도와 압력을 별도로 푸는 방법이다.

계산 영역은 2차원 원통좌표계로 설정하였다. 중심축과 바깥벽면의 경계조건은 화학종, 축방향 속도와 온도에 대해서 Neumann 조건을 사용하였다. 동축유동의 입구조건에서 노즐측과 바깥 동축유동측의 조건이 화학종의 질량 분율이 다르거나 온도차가 있는 경우는 원활한 수치 모사를 위해서 다음과 같은 hypertangent 형태를 가정하였다.^[8]

$$\begin{aligned} \phi(r)_{\text{in}} &= \frac{1}{2} (\phi_{\text{in, co}} + \phi_{\text{in, jet}}) \\ &+ \frac{1}{2} (\phi_{\text{in, co}} - \phi_{\text{in, jet}}) \\ &\times \tanh \left[\frac{2R_{\text{tip}}}{4\theta} \left(\frac{r}{R_{\text{tip}}} - \frac{R_{\text{tip}}}{r} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 ϕ 는 각각 Y_k, T 를 나타내며 θ 는 운동량두께, R_{tip} 은 노즐의 반지름이다. 노즐 출구의 속도는 완전발달 조건으로 가정하여 parabolic 형태로 설정하였다. 바깥 동축류의 유속은 균일한 분포로 하였지만, 노즐 끝단에서부터 반경방향 바깥쪽으로 운동량두께 θ 만큼은 속도가 0부터 동축류 속도까지 원활하게 변화하도록 식(9)와 같은 hypertangent 형태를 설정하였다. 출구 경계조건을 모사하기 위해 대류 경계조건(convective boundary condition)을 사용하였다. 출구 경계조건에서 축방향 속도는 대류 경계조건으로 계산한 뒤, 전체 계산영역에 대하여 연속, 상태, 에너지와 화학종 방정식들이 모두 만족하는 식을 이용하여 출구의 평균속도를 보정하는 방법을 사용하였다.^[8]

2.3 실험 장치 및 방법

실험 장치는 동축류 버너와 유량 조절부, 그리고 측정부와 가시화 장치로 구성되어 있다. 수치계산과 동일하게 동축류 버너의 노즐 내경은 11.1 mm 이고, 노즐 출구에서 완전 발달된 속도분포를 얻기 위해 길이는 350 mm 로 하였다. 동축류의 내경은 150 mm 이고 균일한 속도분포를 얻기 위해 유리 구슬과 세라믹 하니콧을 설치하였다. 연료로는 C.P. 등급의 프로판을 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, 높이 1000 mm 인 아크릴 실린더를 이용하여 외부 유동에 의한 교란을 차단하였다. 부력의 효과를 가시화하기 위해 아세톤 평면 레이저 유도 형광법(planar laser-induced fluorescence; PLIF)을 사용하였다. PLIF 시스템은 Nd:YAG 레이저 (Continuum, PL8000) 와 dye 레이저 (Continuum, ND

6000)로 구성되어있다. 아세톤 PLIF 이미지를 얻기 위하여, ICCD 카메라 (Princeton Instrument, ICCD-MAX) 와 35 mm 카메라가 사용되었다.

3. 결과 및 검토

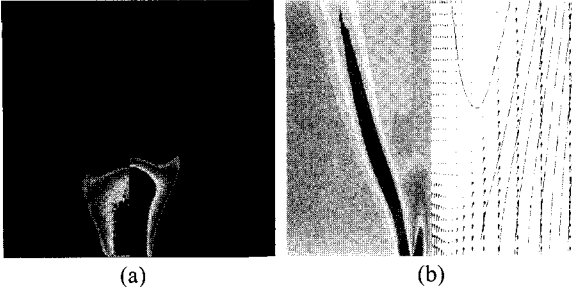


Fig. 1 Acetone PLIF and numerical result for (a) concentration and (b) vorticity and streamline. ($X_{F,o} = 0.10$, $U_{F,o} = 7.07$ cm/s, $V_{co} = 9.4$ cm/s).

Figure 1a는 $X_{F,o} = 0.10$, $U_{F,o} = 7.07$ cm/s 일 때, 프로판 농도의 변화를 보여주는 아세톤 PLIF 이미지와 수치해석 결과이다. 아세톤 PLIF 실험에서 농도장을 가시화 하기 위해 대략 0.1% 정도의 아세톤이 연료와 함께 노즐로부터 분사되었는데, 수치계산의 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 와도 (vorticity)와 유선(streamline)의 분포에 대한 수치계산 결과는 연료가 공기에 비해 상대적으로 무겁기 때문에 일어나는 부력효과에 의해 영향을 받아 프로판 제트의 수직방향 속도가 점차 느려져 결과적으로, 정체점이 형성되었다. 정체점 부근에서 프로판이 반경방향으로 흐르게 되고 동축류의 모멘텀에 의해 후류로 빨리 올라간다. 프로판 제트와 동축류 공기의 전단층 영역에서도 동축류 공기와 연료제트의 속도차에 의해 높은 와도를 가지는 전단층이 형성되었다.

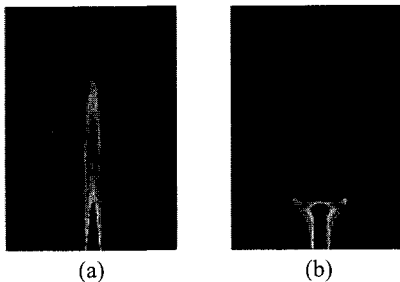


Fig. 2 Concentration profiles of propane for (a) $X_{F,o} = 0.05$ and (b) 0.10 ($U_{F,o} = 10.62$ cm/s, $V_{co} = 9.4$ cm/s).

희석비가 각각 $X_{F,o} = 0.05$ 와 0.10 일 때의 수치계산 결과를 Fig. 2에 나타내었는데, 유동장의 현격한 차이를 보여주고 있다. 희석비가 $X_{F,o} = 0.05$ 인 경우에는 프로판과 질소의 혼합 분자량이 $M_{0.05} = 28.814$ g/mol 로써 공기의 분자량보다 가볍다. 그러므로 부력이 상방향으로 작용하여 자유제트와 유사한 거동을 보인다. 반면에 희석비가 $X_{F,o} = 0.10$ 인 경우에는, 프로판과 질소의 혼합분자량이 $M_{0.10} = 29.610$ g/mol 로써 공기의 분자량보다 무겁다. 따라서 부력은 하방향으로 작용하여 상방향으로 분사되는 연료제트와 상호 작용을 하므로 유동장은 자유제트의 거동과는 상이한 구조를 갖게 된다.

$X_{F,o} = 0.20$ 이고 $U_{F,o} = 16.0$ cm/s 일 때의 프로판의 농도장을 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우에, 정체점의 높이는 3 Hz 의

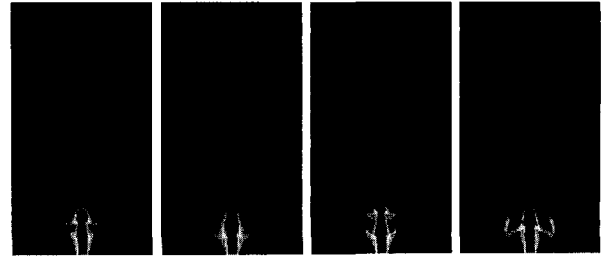


Fig. 3 Concentration profiles of propane for $X_{F,o} = 0.20$, $U_{F,o} = 16.0$ cm/s, $V_{co} = 9.4$ cm/s.

주파수를 가지고 진동하는데 이는 전단층 영역에서 Kelvin-Helmholtz 형의 불안정성에 기인하여 불연속적인 와환(vortex)들이 발생하기 때문이다.

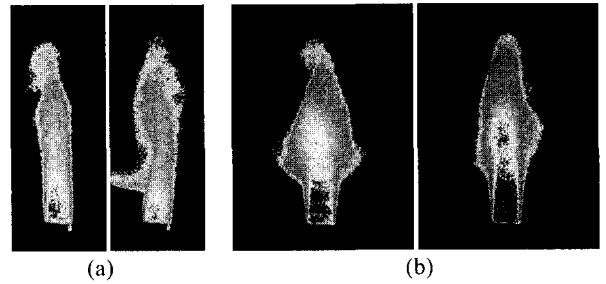


Fig. 4 Acetone PLIF images for (a) confined jet (b) unconfined jet ($X_{F,o} = 0.20$, $U_{F,o} = 16.0$ cm/s, $V_{co} = 9.4$ cm/s).

동일한 조건에서 아세톤 PLIF 이미지를 Fig. 4에 나타내었다. 외부에 아크릴 실린더를 설치한 경우(a)와 실린더가 없는 경우(b)의 이미지에서, 전단층을 따라서 불연속적인 와환이 3차원 비대칭적으로 형성된다. 축대칭의 수치계산의 2차원적 한계성을 고려하면, 전단층 영역에서 와환들의 불연속적인 생성은 타당한 결과이라고 할 수 있다.

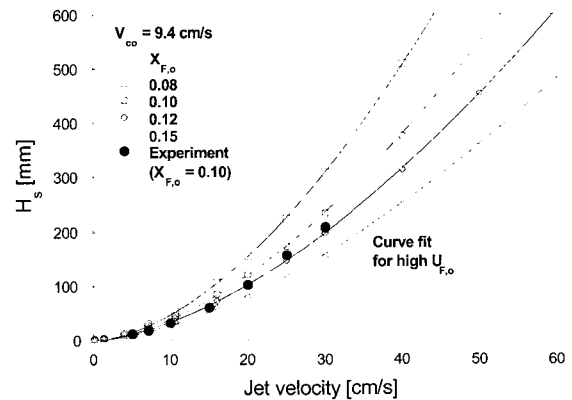


Fig. 5 Stagnation height variation with jet velocity ($X_{F,o} = 0.08-0.15$).

다양한 제트속도에서 수치해석 결과로부터의 정체 높이 H_s 는 축 방향 속도가 완전히 소멸되는 지점으로 정의하였으며 또한, 실험에서는 아세톤 PLIF 이미지로부터 측정되었다. 실험에서의 정체높이는 중심축을 따라 농도장의 변화가 가장 큰 높이 즉, 변곡점으로 정의하였다. 동축류의 속도가 9.4 cm/s 이고 질소에 의한 프로판의 희석비가 $X_{F,o} = 0.08 \sim 0.15$ 일 때, 정체높이는 제트의 속도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 Fig. 5에서 보이고있다. 정체 높이와 제트 속도의 함수 관계는 $H_s \propto$

$U_{F,o}^n$ 의 경향을 보이며, 지수 n 은 1.64 정도로서 희석비가 $0.08 \leq X_{F,o} \leq 0.15$ 의 범위에서 지수 n 은 $1.61 \leq n \leq 1.67$ 의 범위에 있다.

4. 결론

질소로 희석된 프로판 제트의 특성을 아세톤 PLIF을 이용한 실험과 수치해석을 통하여 연구하였다. 부력효과는 프로판의 농도장을 결정하는데 중요한 인자임을 알 수 있었다. 질소 희석된 연료의 혼합 분자량이 공기의 분자량보다 크면, 유동장은 정체 영역을 형성함을 알 수 있었다. 그리고 질소 희석된 연료는 전단층 영역에서 동축류의 공기에 의해 후류쪽으로 끌려 올라감을 알 수 있었다. 이러한 일련의 거동으로 인해 원추 모양의 농도 분포가 형성된다. 질소에 대한 연료의 비율이 커지게 되면, 정체 높이가 진동하게 되고, 전단층 영역에서의 Kelvin-Helmholtz 형의 불안정성에 기인한 불연속적인 와환들이 관찰되었다. 정체 높이는 제트의 증가에 따라 비선형적으로 증가하며, 제트와 정체 높이의 함수 관계는 $U_{F,o}^{1.64}$ 이었다.

후 기

본 논문의 연구는 Combustion Engineering Research Center의 지원 아래에 수행되었다. 천강우, 김준홍, 원상희는 서울대학교 기계항공공학부의 BK-21 사업단으로부터 연구수행을 위한 지원을 받았다.

참고문헌

[1] Schlichting, H., "Boundary Layer Theory," 7th ed., McGraw-Hill, (1979).

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

[3] Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S. and Lee, B. J., "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," *Proceedings of the Combustion institute*, Vol.28, (2000), pp. 2093-2099.

[4] 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," Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009, (1989).

[5] 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," Sandia National Laboratories Report, SAND83-8209, (1983).

[6] Najm, H. N., Wyckoff, P. S., and Knio, O. M., "A Semi-implicit Numerical Scheme for Reacting Flow (I. Stiff Chemistry)," *Journal of Computational Physics*, Vol.143, (1998), pp.381-402.

[7] Kim, J., and Moin, P., "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *Journal of Computational Physics*, Vol.59, (1985), pp.308-323.

[8] 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 TF-43, Thermosciences Division, Stanford University, Stanford, CA, (1989).