



연료노즐 출구에서의 속도 형상에 따른 부상화염 높이 및 화염구조에 관한 수치해석 연구

†하지수* · 김태권** · 박정***

*계명대학교 에너지환경과학과, **계명대학교 기계자동차공학부,
***부경대학교 기계공학부

(2008년 8월 19일 접수, 2008년 12월 8일 수정, 2008년 12월 8일 채택)

A Numerical Analysis of Flame Liftoff Height and Structure with the Variation of Velocity Profiles at the Nozzle Exit

†Ji Soo Ha* · Tae Kwon Kim** · Jeong Park***

*Energy and Environmental Science, Keimyung University

**School of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received 19. August. 2008, Revised 8. December. 2008, Accepted 8. December. 2008)

요 약

삼지화염과 포와젤(Poiseuille) 및 균일분포 연료출구 속도에 따른 부상화염의 부상거동 그리고 화염면 부근에서의 연소 유동 특성에 대하여 수치적 해석을 수행하였다. 부상화염에 대한 수치해석으로 기존 연구 결과를 검증하고 화염대 부근에서 구조적 특성을 살펴보면 포와젤 및 균일분포 연료출구속도 조건에서 운동량 유속으로 부상높이를 일반화하여 비교하였다. 또한 화염면 부근에서 속도, 압력, 온도, 화학반응속도 등으로 연소 유동 특성을 분석하고 규명하였다. 특히 중심선을 따른 속도 변화의 경우 노즐에서 화염대 부근까지는 전형적인 비반응제트 유동에 따른 속도 분포를 형성하지만 화염대 직전에서 속도가 급격히 감소하다가 화염대를 지나면서 급격히 증가한 후에 다시 감소하는 현상을 규명하였다. 화염대 전의 유동영역에서는 화염대가 장애물역할을 하다가 화염대를 지나고 나면 유동을 가속시켜주는 역할을 하고 있기 때문이다. 이러한 현상은 기존의 비반응 제트 유동으로 규명하지 못하였던 것이다.

Abstract – A numerical analysis is achieved to elucidate the behavior of lifted flames and characteristics of flow near flame zone according to the exit velocity of triple flame, Poiseuille and uniform distribution. For the cases of Poiseuille and uniform nozzle exit velocity, we reviewed previous results with the present numerical results and investigated characteristics of the flame structure near the flame zone comparing with liftoff height generalized by momentum flux. In addition, a close inquiry into the combustion flow characteristics near flame zone was made with the characteristics of velocity, pressure, temperature and chemical reaction. From nozzle to flame zone, center line velocity profile traced well with the velocity profile of typical cold jet flow, but very near the flame zone, this study examined phenomenon that flow velocity decreases very quickly before the flame zone and then increases very quickly after the flame zone. Because flame zone acts as a barrier at the flow region which is before the flame zone and accelerate the flow velocity when it pass through the flame zone. This phenomenon was not clarified previous cold jet flow.

Key words : liftoff height, triple flame, lifted flame, numerical analysis, flame zone, Poiseuille flow

I. 서 론

일반적으로 삼지화염(triple flame) 혹은 예지화염은

부분예혼합 혼합 구조에서 나타난다. Mungal[1] 등에 의해 CH-PLIF와 PIV 가시화를 통하여 난류 부상화염에서 조차 삼지화염 혹은 예지화염으로 부상화염이 안정화된다는 것이 밝혀진 이래로 부상화염의 안정화 기구가 삼지화염임에는 의문의 여지 없이 인식된다.

†주저자:jisooaha@kmu.ac.kr

층류 및 난류부상화염의 선단부 상류는 부분예혼합 혼합기를 형성하는데 연료측에는 과농 예혼합기, 산화제측에는 희박 예혼합기에 의해 각각 과농 및 희박 예혼합화염이 존재하고 과농 예혼합화염으로 부터 연료의 확산과 희박 예혼합화염으로 부터 산화제의 확산에 의해 삼중점(triple point)을 시점으로 하류로 꼬리형태의 확산화염(trailing diffusion flame)이 나타나게 되는 삼지화염의 구조를 갖게 된다. 이러한 삼지화염의 구조로부터 꼬리 형태의 확산화염은 당량 혼합비를 나타내고 삼중점 역시 당량 혼합비를 나타내게 되므로 화염이 당량 혼합비선을 따라 전파하는 궤적을 그리게 된다.

Dold[2]는 삼지화염 전파 속도가 혼합분율 기울기에 의존하며, 시스템의 최대 단열 층류화염 속도에 의해 구속됨을 보였다. 이후 많은 연구자들이 다양한 관점에서 삼지화염에 관한 문제를 연구하였다. Boulanger[3]는 삼지화염의 열방출효과를 연구하였고, 2D 혼합층 내에서 메탄/공기의 전파 및 구조가 수치적으로 Echehki와 Chen[4] 그리고 Kioni[5] 등에 의해 연구되었다. Plessing[6] 등은 실험 및 수치적으로 삼지화염의 전파 및 구조가 희석된 연료 분사 와 주위 연료의 동축류(co-flow) 분사에 따른 선대칭 동축류 버너에 의해 생성됨을 연구하였고, Im과 Chen[7,8]은 부분 예혼합 수소/공기 혼합물 내에서의 삼지화염을 연구하였으며, 수치 모사로 삼지화염 전파 유동 변형(flow strain) 효과와 상세한 화학적 성질을 연구하였다. Lockett[9] 등은 실험적으로 층류 대향류(counterflow)에 따른 삼지화염의 안정성 및 구조를 조사하였고, 대향제트(opposed jet)에 의해 생성된 삼지화염의 전파는 실험 및 수치적으로 Frouzakis[13]에 의해 연구되었으며, Ko와 Chung [10,11] 그리고 Lee[12]는 실험적으로 층류 비예혼합 분사내 삼지화염의 전파 및 부상높이를 연구하였다.

위에서 기존 연구들을 살펴 보았듯이 기존의 연구들에서는 삼지화염과 부상높이에 대하여 대부분 실험적으로 규명하여 삼지화염 및 부상높이에 대한 특성을 도출하였다. 본 연구에서는 부상화염에 대한 수치해석을 통하여 기존의 연구결과인 부상높이 특성을 검증하고 수치해석의 타당성을 입증하였다. 이를 토대로 하여 부상화염의 화염대 부근에서 구체적인 구조적 특성을 살펴보기로 한다. 특히 기존 연구에서 부상높이에 대하여 일반화 하지 못했던 균일연료출구속도와 포와셀(Poiseuille) 연료출구속도의 조건에서 운동량 유속으로 표현하여 부상높이를 일반화 하였다. 또한 화염면 부근에서 연소 유동 특성(속도, 압력 등)을 분석하여 부상화염의 화염대 부근에서 특성을 규명하기로 한다.

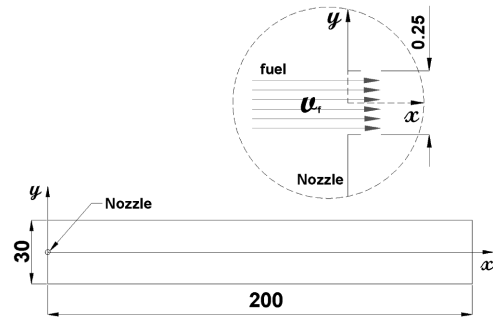


Fig. 1. Schematic of modelling (unit: mm).

II. 이론적 배경

수치해석은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 크기의 사각영역 내에서 수행되었다.

2.1. 부상화염 해석을 위한 지배방정식

수치적 모델은 질량, 운동량, 에너지 보존 및 화학종 보존의 지배 방정식에 대한 수치해로 얻을 수 있으며, 지배방정식은 다음과 같다[14,15].

Continuity:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

Momentum:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \rho g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Energy:

$$\begin{aligned} c_p \left(\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & - \sum_{k=1}^{KK} \left[\rho c_{pk} Y_k \left(V_{kx} \frac{\partial T}{\partial x} + V_{ky} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \end{aligned}$$

$$- \sum_{k=1}^{KK} h_k W_k \omega_k \quad (4)$$

Chemical species:

$$\rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_k}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial x} (\rho Y_k V_{kx}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_k V_{ky}) + W_k \omega_k \quad (5)$$

where $k = 1, 2, \dots, KK$

$$V_{kx} = -D \frac{\partial Y_k}{\partial x} \quad (6)$$

$$V_{ky} = -D \frac{\partial Y_k}{\partial y} \quad (7)$$

여기에서 u 와 v 는 각각 x 와 y 방향 속도이다. 혼합물 온도 T , 혼합물 밀도 ρ , k -번째 종의 분자질량 W_k , 혼합물 열전도도 λ , 일정 압력 아래서 혼합물의 열용량 c_p , 일정 압력 아래서 k -번째 화학종의 열용량 c_{pk} , k -번째 화학종의 단위 몰당량 물생성률 ω_k , h_k 는 k -번째 화학종의 엔탈피이다. g 는 수직 방향 x 에서의 중력가속도이다. μ 는 혼합물의 점도, Y_k 는 k -번째 화학종의 질량 분율, V_{kx} 와 V_{ky} 는 k -번째 화학종의 x 와 y 방향에 대한 확산 속도이다. 그리고 KK 는 전체 화학종 수이다.

2.2. 경계조건 및 물성치 계산

본 연구에서 사용한 연료는 프로판(C_3H_8)이며 주위 공기와 프로판의 온도는 상온($10^\circ C$)으로 하였다. 연료 분출 속도는 11~14 m/s로 균일한 속도분포로 분출한다고 가정하여 1 m/s 간격으로 계산을 수행 하였다. 연료 분출 노즐에 인접한 공기($x = 0, y = 0.25\sim 30$ mm)와 상단경계의 공기($x = 20$ cm, $y = 30$ mm)의 경계조건은 Neumann 조건(속도, 온도, 농도, 압력 모두 경계면에 수직방향으로 구배가 없다.)을 이용하였다. 후류 경계($x = 200$ mm, $y = 0\sim 30$ mm)에서도 Neumann 경계조건을 사용하였고 연속방정식이 만족되도록 하였다.

본 연구에서 사용한 수치해석 소프트웨어는 상용으로 개발되어 사용되고 있는 유동해석 소프트웨어인 Fluent를 사용하였다. 점성계수, 열전도율, 물질 확산계수는 연소반응에 따라 온도변화가 큰 영역이기 때문에 온도의 함수로 주어지는 분자운동론에서 유도한 식을 이용하였고 각 경우의 필요한 상수 값들은 Fluent S/W에 있는 값들을 사용하였으며 화학반응은 층류에서 1 단계 화학반응의 한계 반응 속도이론(Finite reaction rate theory)을 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 수치해석 결과의 타당성 검증

본 연구에서 연료노즐 출구에서 균일한 출구속도인 경우와 같은 유량에서 원관내 완전 발달한 출구속도인 포와젤 유속 분포인 경우 두 가지에 대하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구의 수치해석 타당성은 노즐 외경이 3.0 mm이고 내경이 1.9 mm이며 출구 지경이 0.164, 0.195, 0.247인 끝이 오목한 노즐에 대하여 균일한 출구속도를 갖게 한 기존의 연구인 Chung[11]의 실험결과와 비교하여 검증하기로 한다. Fig. 2는 부상높이에 관하여 Chung의 실험결과와 본 연구의 계산결과를 비교한 것이다. 직선은 Chung의 실험결과로부터 도출된 부상높이에 관한 결과 그래프이고 o표시는 실험과 같이 균일한 출구속도에서의 부상화염 높이의 수치해석 결과이고 +는 포와젤 유속분포의 결과이다.

Fig. 2에서 살펴보면 연료출구속도가 균일한 경우에 수치해석 결과가 실험결과 보다 부상높이가 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 유량이 적은 경우에 차이가 두드러진다. 유량이 증가하면 실험결과와 수치해석 결과의 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다. 오차의 크기는 해석에 이용한 유량이 가장 작은 곳에서 최대 약 50%이고 유량이 가장 큰 곳에서 최소 약 10%이다. 부상높이에 관한 수치해석 결과는 실험결과와 정확히 일치하지는 않으나 유량증가에 따른 부상높이의 경향과 오차범위로 판단할 때 본 연구에 대한 수치해석의 정성적인 타당성은 검증되었다고 할 수 있고 정량적인 타당성은 어느 정도 오차가 있지만 부상화염의 특성을 파

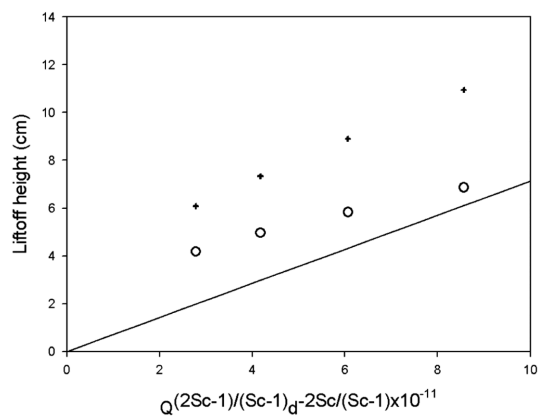


Fig. 2. Comparison of lift-off height for propane with the experimental result and numerical calculations (d in mm, Q in ml/min) solid line: experimental results, o: uniform exit velocity, +: poiseuille exit velocity.

악하는데 활용 가능하다고 판단된다.

Fig. 2에는 균일한 출구속도와 함께 포와젤 분포 출구속도의 부상높이를 함께 나타내었다. Fig. 2의 그래프에서 x 축을 Chung[11]과 Chen[16]의 논문에서와 같이 체적유동률(Q), 노즐직경(d), Sc 의 함수로 하고 y 축을 부상높이로 나타내었다. 이렇게 표현한 경우에는 포와젤 연료출구속도의 경우가 균일한 출구속도에 비하여 같은 유량 조건에서 부상높이가 높게 나타난다. 이는 포와젤 분포 출구속도의 경우에 노즐 중심에서 속도가 평균속도보다 2배의 크기를 가지고 있어서 중심선에서만 부상높이를 판단한다면 출구속도가 크게 되기 때문에 화염의 부상이 후류로 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 즉 같은 부피유량률(volume flow rate)이라 하더라도 포와젤 연료속도의 경우가 균일연료출구속도에 비하여 운동량유속(momentum flux)이 크기 때문에 부상화염이 후류에 위치함을 알 수 있다.

3.2. 균일 연료분출 속도와 포와젤분포 연료분출 속도에서의 부상화염 특성 비교

Fig. 2에서 살펴보았듯이 균일연료분출속도와 포와젤 연료분출속도에서의 부상 높이는 차이가 있다. 포와젤 연료분출속도인 경우의 노즐 출구에서 속도분포는 $v_r = 2v_{fm}[1 - (r/r_0)^2]$ 로 나타나므로 노즐 중심선에서 최대의 속도가 난다. 노즐 출구에서 그 크기는 평균유속의 2배가 된다. 노즐출구에서의 유동의 운동학적 운동량(kinematic momentum)[17] 유속은 균일속도인 경우와 포와젤 분포일 경우에 $K' = (\pi v_{fm}^2 r_0^2) / (3 + n)(n = 0: \text{포와젤}, n = 1: \text{균일유속})$ 로 나타난다. 따라서 포와젤 분포 연료분출속도의 경우가 중심선에서 평균유속의 2배가 되고 전체 유동의 운동량이 크기 때문에 부상화염

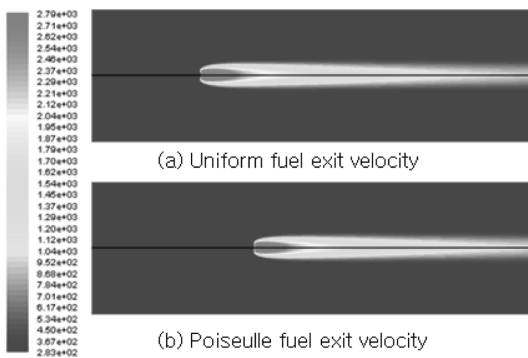
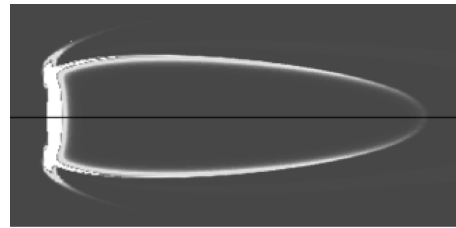
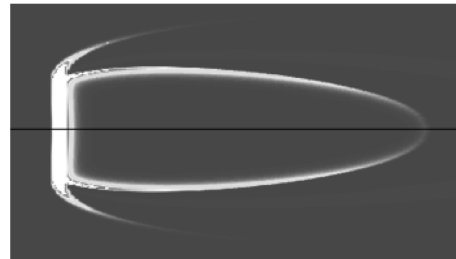


Fig. 3. Comparison of temperature contour between the cases of uniform fuel exit velocity and poiseuille fuel exit velocity with $v_{fm} = 12$ m/s.



(a) Uniform fuel exit velocity



(b) poiseuille fuel exit velocity

Fig. 4. Comparison of reaction rate contour between the cases of uniform fuel exit velocity and poiseuille fuel exit velocity with $v_{fm} = 12$ m/s.

의 화염면이 균일 연료분출속도의 경우 보다 후류 측에 위치하고 있다.

연료분출 평균 유속이 12 m/s일 때 위의 두 경우의 화염 형상을 온도분포를 이용하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 포와젤 연료분출 속도의 경우에 화염면이 더 후류에 위치함을 확인 할 수 있다. 두 경우의 화염대 부근에서의 부상화염 구조적 특성을 연소반응 속도 분포로 Fig. 4에 나타내었다.

화학반응속도 분포를 살펴보면 균일 연료분출 속도의 경우에 중심선 부근에서 화염면이 평면이 아니라 후류쪽으로 왜곡되어 있음을 관찰할 수 있지만 포와젤 연료분출속도의 경우에는 중심선 부근에서 화염면이 상대적으로 평면 형태임을 알 수 있다. 두 경우 모두 화염면 전면의 끝쪽에서 삼지화염이 관찰되고 있다. 이것은 여러 기존의 연구에서 언급되고 있는 현상으로서 중심선 부근에서는 연료과농도 예혼합화염이 형성되고 삼중점 바깥 영역에서는 연료농도가 낮은 예혼합화염이 형성된 것이라고 기존의 연구들에서 밝힌 바 있다. 또한 중심선 부근의 화염대와 연료농도가 낮은 영역의 화염대 사이에 있는 화염대는 확산영역의 화염대임도 기존의 연구들에서 밝혀져 있다. 본 논문의 수치해석적 연구에서도 기존의 실험적 연구에서 보여준 부상화염에서 삼지화염 특성을 잘 구현하고 있음을 연소반응 분

포의 결과가 잘 보여주고 있다.

3.3. 중심선 화염대 부근에서 화염 구조 특성 비교

지금까지 균일 연료출구의 경우보다 포와젤 연료출구의 경우에 부상화염 높이가 높게 나타나는 현상과 그 이유에 대한 것을 살펴보았다. 본 절에서는 두 경우의 중심선 부근 화염면에서 화염의 구조적 특성을 살펴봄으로써 부상화염의 높이에서 차이가 나는 이유에 대하여 구체적으로 분석해 보기로 한다. 이렇게 하기 위하여 중심선에서의 속도분포의 변화 특성을 살펴보고 화염면 전후에서 압력과 화학반응의 변화를 분석하여 연료분출속도의 크기가 변해갈 때 이러한 유동 특성이 어

떻게 변하는 지 알아보기로 한다. 중심선을 따라 축방향 속도 분포가 어떻게 변해가는 지를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에는 균일출구속도의 경우이고 Fig. 5(b)는 포와젤 출구속도의 경우이다. 균일연료출구속도의 경우인 Fig. 5(a)에서 중심선에서의 속도 특성을 살펴보면 노즐에서 나오는 유체와 주변 유체가 모두 프로판일 때, 유동해석을 통한 중심선 속도(propane only & nonreaction)는 잘 알려진 경계층 이론으로부터 계산한 그래프(B.L. similarity)와 잘 일치함을 알 수 있다.

경계층 이론에서부터 도출한 중심선에서의 속도는 Arulraja[18] 등과 Chung, S.H. 등[19]이 사용한 가상원점개념을 도입하여 계산하였는데 균일출구속도의 경우 $X > X_f$ 일 때

$$\frac{v_{CL}}{v_{fm}} = \frac{1}{32(X + X_v)} \quad (8)$$

$$Re = (v_{fm}d)/\nu_\infty$$

$$X = (xRe^{-1})/d$$

$$X_v = 0.02767$$

의 가상원점위치이다. 또 $0 \leq X \leq X_f$ 일 때

$$\frac{v}{v_{fm}} = 1 - 17.72X \quad (9)$$

$$X_f = 0.0165$$

를 사용하였다. 포와젤출구속도의 경우, $X > X_f$ 일 때

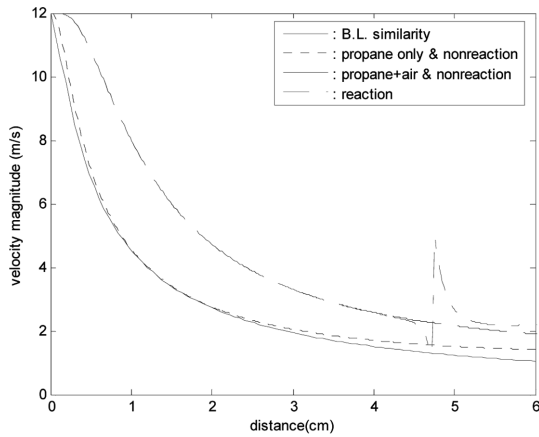
$$\frac{v_{CL}}{v_{fm}} = \frac{1}{24(X + X_v)} \quad (10)$$

이며, $0 \leq X \leq X_f$ 일 때

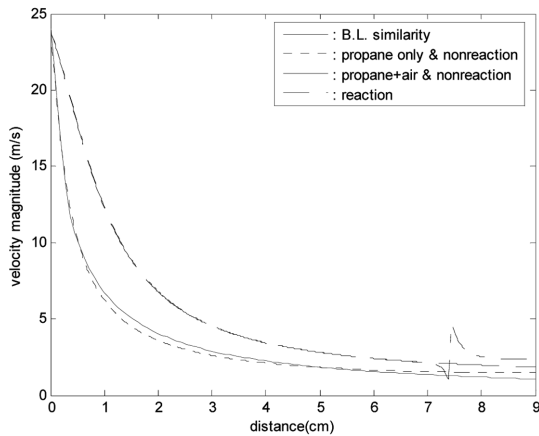
$$\frac{v}{v_{fm}} = 2(1 - 29.103X) \quad (11)$$

를 사용하였다. 그러나 화학반응을 하지 않은 경우에도 노즐로부터 연료인 프로판을 분출하고 주위는 공기인 경우(propane + air nonreaction)에는 공기와 프로판의 혼합과 다른 종류의 기체끼리의 상호작용으로 일반적인 경계층 이론에서의 속도 분포를 따르지 않고 그 값들이 경계층 이론의 속도보다 다소 큰 값을 유지하고 있다. 연소반응이 있는 경우에는 화염대 부근에서 속도분포가 급격히 감소하다가 다시 증가한 후에 감소해 가는 데 이 경우에는 약 4.8 cm에서 화염이 존재한다. 연소반응이 있는 경우의 속도 분포나 연소반응이 없는 경우의 속도 분포는 화염대 전까지는 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 화염대 전방 흐름은 화염의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 포와젤 출구속도 경우인 Fig. 5(b)에서도 Fig. 5(a)와 같은 경향을 관찰할 수 있다.

균일 연료출구속도의 경우나 포와젤 연료출구속도의

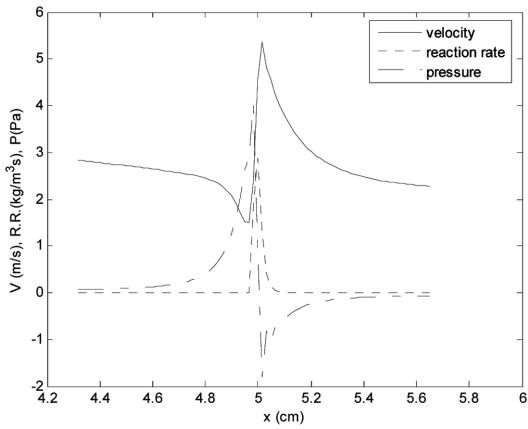


(a) uniform fuel exit velocity

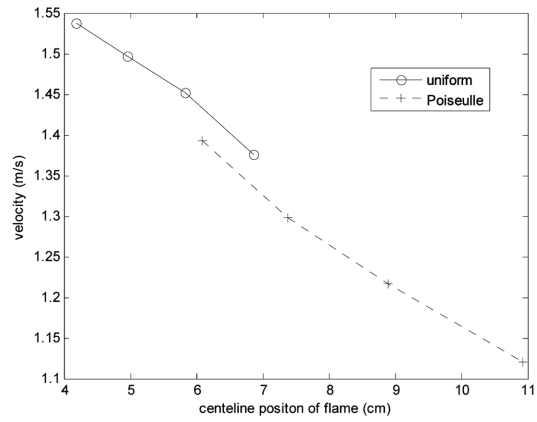


(b) poiseuille fuel exit velocity

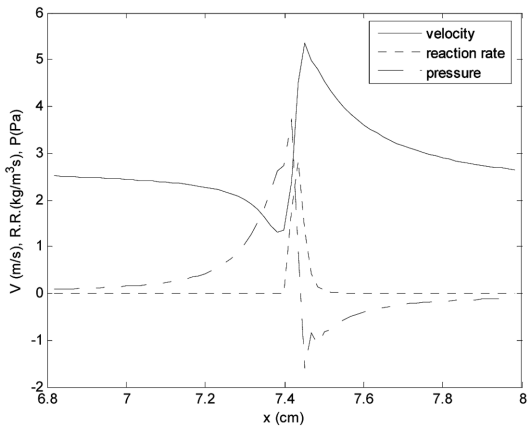
Fig. 5. Comparison of Velocity Profiles along center line for the cases of uniform fuel exit velocity and poiseuille fuel exit velocity with $v_{fm} = 12$ m/s.



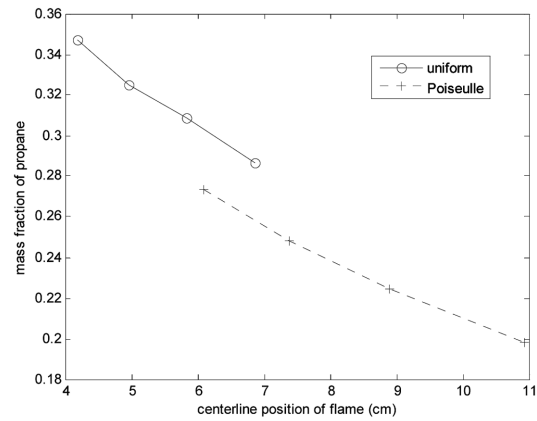
(a) uniform fuel exit velocity



(a) velocity at centerline flame position



(b) poiseuille fuel exit velocity



(b) fuel mass fraction at centerline flame position

Fig. 6. Velocity, pressure, reactin rate and temperature profiles near flame zone along centerline with $v_{fm} = 12$ m/s.

Fig. 7. Comparison of velocity and fuel mass fraction at centerline flame position between the cases of uniform fuel exit velocity and poiseuille fuel exit velocity.

경우 모두 화염면 전방의 중심선에서 속도 분포는 기존의 연구들에서 밝힌 바대로 속도의 크기가 x 에 따라 반비례하여 감소하는 경향을 잘 보여 주고 있다. 화염면에서 떨어진 전방에 까지는 화염의 영향을 많이 받지 않고 연료와 공기의 유동이 흘러오다가 화염면 부근에서 화염의 영향으로 급격히 변하기 시작한다. 화염면 부근에서 자세한 유동 특성을 Fig. 6에서 살펴보기로 한다. Fig. 6에 나타난 속도분포(실선)와 화학반응속도(점선)를 함께 비교해 보면 화학 반응이 시작되는 지점까지 속도는 감소한다. 특히 화염대 부근에서 속도는 급격히 감소하다가 증가하고 난 뒤에 다시 완만히 감소하고 있다. 이것은 균일 연료분출속도의 경우나 포와겔 연료분출속도의 경우 모두 같은 경향을 보이고 있

다. 압력의 변화(일점쇄선)를 살펴보면 화염대 전방에서부터 이미 압력은 상승해 오고 있다가 화염대 시작점에서 다소 급격히 상승후에 다시 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다.

화염대를 지나서는 다시 압력이 상승하여 회복하고 있다. 이러한 화염대 부근에서의 분석으로 부터 부상화염의 화염대는 화염대 전방 흐름에 대하여 유동의 흐름을 감소시키는 장애물 역할을 하고 있는 것을 알 수 있고 층류제트 유동에서 중심선 유동이 감소하는 경향과 별도로 화염대 부근에서 중심선 속도가 급격히 감소하는 것을 관찰하였던 Fig. 5의 결과를 잘 설명해 주고 있다.

Fig. 5에서 살펴본 대로 화염대의 시작점인 부상화염

의 위치는 중심선에서의 속도가 최저인 곳을 찾으면 그곳이 부상화염의 위치가 되는 것을 알 수 있다. 이러한 방법으로 연료출구속도를 변화시켜 부상화염의 위치를 구하여 결과 및 고찰의 첫 번째 결과인 Fig. 2의 결과를 도출하였다.

Fig. 6에서 살펴본 바로는 연료분출속도가 증가하면 부상화염의 위치도 증가하였는데 부상화염의 위치가 증가함에 따라 화염대 시작점에서의 속도가 어떻게 변하는지를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에서 살펴보면 부상화염의 위치가 증가할 때 화염대 시작점에서의 속도는 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 균일 연료분출속도의 경우와 포와젤 연료분출속도 모두 같은 경향을 보이고 있다. 이렇게 감소하는 경향의 이유는 비반응제트 유동이론에서 축방향의 속도는 축방향으로 가면서 감소하기 때문에 화염대의 위치가 증가하면 화염대에서의 속도는 감소하는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 그러나 화염대 바로 직전에서의 속도는 기존의 연구에서 언급했던 비반응 제트 이론의 유동속도와 일치하지는 않는다. 이는 Fig. 6에서 살펴보았듯이 화염대 직전에서 속도가 급격히 감소하여 화염대 직전에서 최저값을 가지는데 이 값은 기존의 연구들에서 비반응제트 유동에서 화염대에서의 속도라고 구한 값보다 작은 값이다. 균일 연료출구속도의 경우와 포와젤 연료출구속도의 경우를 비교해 보면 같은 화염대 위치의 경우라고 생각되는 곳인 약 7cm 부근에서 균일 연료분출속도의 화염대에서 속도가 포와젤 연료출구속도의 경우보다 화염대에서의 속도가 큼을 알 수 있다. 화염대 위치 7cm 부근에서 균일 연료출구속도의 경우는 평균연료출구속도가 약 14 m/s인 반면에 포와젤 연료출구속도의 평균연료출구속도는 약 12 m/s이기 때문에 연료분출량이 균일연료출구속도의 경우가 많아서 화염대까지 도달할 때까지의 운동량이 균일연료출구속도의 경우가 크기 때문에 화염대에서의 속도도 상대적으로 크게 유지할 수 있다.

이러한 결과는 농도장에서도 관찰할 수 있다. 즉 같은 화염대 위치(예를 들어 7cm 부근)에서 균일연료출구속도의 경우가 포와젤 연료출구속도의 경우 보다 연료의 농도가 높게 나온다. 이렇게 농도가 높게 나오는 이유도 같은 화염대 위치라고 하지만 균일연료출구속도의 경우가 포와젤 연료출구속도의 경우에 비하여 많은 양의 연료가 분출되었기 때문이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 균일한 연료출구속도의 경우와 포와

젤 연료출구속도 두 가지 경우에서 연료출구 속도 변화에 따라 부상화염의 높이에 관한 특성과 화염대 부근에서의 화염 특성을 수치해석을 통해 고찰하였다. 대부분의 기존 연구결과들에서는 균일한 연료출구속도의 경우에 대하여 실험을 수행하여 부상화염 높이, 화염대 특성을 규명하였다. 이러한 기존 연구 결과와 본 연구에서의 해석 결과를 비교함으로써 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 도출한 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.1. 수치해석 결과의 타당성 검증

기존 연구들에서 실험을 통하여 도출한 부상화염 높이에 관한 결과와 본 연구의 연소유동 수치해석 결과를 비교한 결과 연료분출속도가 낮은 경우에는 기존 실험결과들과 오차가 있으나 연료분출속도가 다소 큰 영역에서는 기존 실험결과에 잘 근접하고 있음을 관찰할 수 있었다.

4.2. 균일 연료분출 속도와 포와젤분포 연료분출 속도에서의 부상화염 특성 비교

노즐 출구에서 같은 평균연료분출 속도의 경우에 균일 연료분출속도의 경우와 포와젤분포 연료분출속도의 경우를 비교해 보면 중심선에서 최대속도가 포와젤분포 연료분출속도의 경우가 2배 크고 운동량도 4/3배 크기 때문에 부상화염의 위치는 같은 평균속도이더라도 포와젤분포 연료분출속도의 경우가 더 후류에 위치하였다. 기존의 실험적 연구들에서 관찰하였던 삼지화염이 본 연구의 연소수치해석 결과에서도 잘 구현하고 있음을 관찰하였다. 즉 중심선 부근에서는 연료농도 예혼합 화염이, 중심선에서 벗어난 곳에 형성되는 가지형태의 화염은 연료농도가 낮은 혼합 화염이 형성되고 그 가운데에는 확산화염대가 형성되고 있음을 관찰할 수 있었다.

4.3. 중심선 화염대 부근에서 화염 구조 특성 비교

연료출구노즐에서부터 화염대 부근까지 중심선을 따라 속도 변화를 살펴본 결과, 화염대 부근까지는 전형적인 비반응제트 유동에 따른 속도 분포를 형성하고 있지만 화염대 직전에서는 비반응 제트 유동으로 해석이 어려운 분포를 보여주고 있었다. 즉, 화염대 직전에서 속도가 급격히 감소하다가 화염대를 지나면서 급격히 증가한 후에 다시 감소하였다. 이러한 이유는 화염대 직전에서 화염대는 유동에 대하여 장애물 역할을 함을 알 수 있었다. 또한 화염대 시작점에서 유동속도는 최소가 됨을 알 수 있었다. 화염대 시작점에서의 유동속

도는 부상화염 높이가 증가하면 감소해 가는 것을 확인할 수 있었다. 이는 비반응제트 유동 이론에서도 후류로 가면서 중심선의 유동속도가 감소하고 있음으로부터 쉽게 알 수 있다.

같은 부상화염 위치에서 화염대 시작점에서 유동속도와 연료농도는 균일 연료분출속도의 경우가 포와젤 연료분출속도의 경우보다 크기를 관찰하였다. 이는 같은 부상화염 높이에서 연료의 분출유량이 균일 연료분출속도의 경우가 많기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 저공해자동차부품기술개발센터의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Muiz, L. and M. G. Mungal, "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames", *Combust. Flame.*, **111**, 16-31, (1997)
- [2] Dold, J.W., "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame", *Combust. Flame.*, **76**, 71-88, (1989)
- [3] Boulanger, J., L. Vervisch, J. Reveillon and S. Ghosal, "Effects of Heat Release in Laminar Diffusion Flames Lifted on Round Jets", *Combust. Flame.*, **134**, 355-368, (2003)
- [4] Echekki, T. and J.H. Chen, "Structure and Propagation of Methanol-Air Triple Flames", *Combust. Flame.*, **114**, 231-245, (1998)
- [5] Kioni, P.N., K.N.C. Bray and Greenhalgh, B. Rogg, "Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame", *Combust. Flame.*, **116**, 192-206, (1999)
- [6] Plessing, T., P. Terhoeven, N. Peters and M.S. Mansour, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame", *Combust. Flame.*, **115**, 335-353, (1998)
- [7] Im, H.G. and J.H. Chen, "Structure and Propagation of Triple Flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures", *Combust. Flame.*, **119**, 436-454, (1999)
- [8] Im, H.G. and J.H. Chen, "Effects of Flow Strain on Triple Flame Propagation", *Combust. Flame.*, **126**, 1384-1392, (2001)
- [9] Lockett, R.D., B. Boulanger, S.C. Harding and D.A. Greenhalgh, "The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame", *Combust. Flame.*, **119**, 109-120, (1999)
- [10] Ko, Y.S. and S.H. Chung, "Propagation of Unsteady Tribachial Flames in Laminar Non-premixed Jets", *Combust. Flame.*, **118**, 151-163, (1999)
- [11] Chung, S.H. and B.J. Lee, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet", *Combust. Flame.*, **86**, 62-72, (1991)
- [12] Lee, J., S.H. Won, S.H. Jin, S.H. Chung, O. Fujita and K. Ito, "Propagation Speed of Tribachial (Triple) Flame of Propane in Laminar Jets Under Normal and Micro Gravity Conditions", *Combust. Flame.*, **134**, 411-420, (2003)
- [13] Frouzakis, C.E., A.G. Tomboulides, J. Lee and K. Boulouchos, "From Diffusion to Premixed Flames in an H₂/Air Opposed-Jet Burner: The Role of Edge Flames", *Combust. Flame.*, **130**, 171-184, (2002)
- [14] Kuo, K.K. Principles of Combustion, 2nd John Wiley & Sons, New York, (1993)
- [15] Law, C.K. Combustion Physics, Cambridge University Press, New York, (2006)
- [16] Chen, R.H., A. Kothawala, M. Chaos and L.P. Chew, "Schmidt Number Effects on Laminar Jet Diffusion Flame Liftoff", *Combust. Flame.*, **141**, 469-472, (2005)
- [17] Schlichting, D.H. Boundary-Layer Theory, 2nd, McGraw-Hill, New York, (1979)
- [18] Arulraja, M., G.W. Rankin and K. Sridhar, "Maximum Velocity Decay in a Submerged Laminar Jet Issuing from a 'Long Tube'", *Trans. Can. Soc. Mech. Engng.*, **7**, 41-43, (1983)
- [19] Lee, D.S., S.H. Chung and K.D. Kim, *J. Fluid Engin./ASME Trans.*, **119**, 716-718, (1997)