



부상화염에서 화염전파속도와 스칼라소산율의 상호 관계에 관한 연구

하지수 · 김태권**

*계명대학교 에너지환경과학과, **계명대학교 기계자동차공학부
(2009년 2월 4일 접수, 2009년 6월 13일 수정, 2009년 6월 13일 채택)

A Study of Correlation between Flame Propagation Velocity and Scalar Dissipation Rate for a Liftoff Flame

Ji Soo Ha, Tae Kwon Kim**

**Energy and Environmental Science, Keimyung University*

***School of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University
(Received 4. Febuary. 2009, Revised 13. June. 2009, Accepted 13. June. 2009)*

요 약

부상화염에 대한 연소반응 유동 수치해석을 수행하여 부상높이에 대한 기존 연구 결과들과 비교를 통하여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하였다. 화염전파속도를 결정하는 유동방향변환점을 기존의 연구에서처럼 연료분출속도에 상관없이 일률적인 위치로 선정할 경우 많은 오차를 유발하기 때문에 본 연구에서는 부상화염에서 이론당량비선을 따라 유동속도와 스칼라소산율 특성을 살펴보고 화염전파속도를 선정하는 유동방향변환점을 타당하게 선정하는 방법을 정립하였다. 이를 토대로 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계식을 도출하여 부상화염에서 화염전파속도 특성을 규명하였다.

Abstract - A numerical analysis of reactive flow in a liftoff flame is accomplished to elucidate the characteristics of liftoff flame. To verify reliance of numerical calculation, the liftoff heights of liftoff flame for various fuel exit velocities are compared between the existing experimental research results and the present calculation results. The flame propagation velocity is conducted at the flow redirection point which is on a stoichiometric line ahead of flame front. This point was selected constant distance from triple point regardless of fuel exit velocity at the previous research. This causes considerable errors for the flame propagation velocity and scalar dissipation rate. The main issue of the present research is to establish the reasonable method to select the redirection point and so that to clarify the relationship between flame propagation velocity and scalar dissipation rate, which is the core properties in a triple flame stability.

Key words : liftoff flame, triple point, flow redirection point, flame propagation velocity, scalar dissipation rate

*주저자:jisooaha@kmu.ac.kr

1. 서론

연료노즐에서 분출된 연료는 공기와 혼합되어 확산화염을 형성한다. 연료속도가 증가하면 연료노즐에 부착된 화염이 노즐에서 분리되어서 부상화염이 형성된다. 부상화염이 형성되면 연료노즐 분출 중심선 부근은 연료가 과농한 연소가 일어나고 중심선에서 떨어진 영역인 공기측은 연료가 희박한 연소가 일어난다. 연료가 과농한 영역에서 연소가 일어나고 난 뒤 남은 연료는 다시 공기와 확산 화염을 형성하게 된다. 이렇게 하여 부상화염은 과농연소 영역, 희박연소 영역, 확산화염 영역의 세 부분으로 이루어지고 이 세 부분이 만나는 곳을 삼지점(triple point)이라고 알려져 있고 이러한 화염을 삼지화염(triple flame)이라고 한다.

이러한 삼지화염은 화염의 점화 및 소화에 관계한 화염안정화를 위해 많은 연구자들에 의해 연구되어져 왔다. Mungal 등[1]에 의해 CH- PLIF와 PIV 가시화를 통하여 난류 부상화염에서 조차 삼지화염이 형성되어 안정화된다는 것이 밝혀진 이래로 부상화염의 안정화 기구가 삼지화염을 규명하는 것이라는 것에 모두 초점을 맞추어 연구하여왔다.

Dold[2]는 삼지화염 전파 속도가 혼합분율 구배에 의존하며, 최대 단일 층류화염 속도에 의해 구속됨을 보였다. 삼지화염의 열방출효과에 대하여 Boulanger[3]가 연구했고, Plessing 등[4]은 실험 및 수치적으로 희석된 연료분사와 주위 연료의 동축류(co-flow) 분사에 따른 선대칭 동축류 버너에서 삼지화염의 전파 및 구조에 대하여 연구하였고, Im과 Chen[5,6]은 부분 예혼합 수소/공기 혼합물 내에서의 삼지화염을 연구하였으며, 수치 모사로 삼지화염 전파 유동 변형(flow strain) 효과와 상세한 화학적 성질을 연구하였다. Lockett 등[7]은 실험적으로 층류 대향류(counterflow)에 따른 삼지화염의 안정성 및 구조를 조사하였고, Frouzakis[8]에 의해 대향제트(opposed jet)로 인해 생성된 삼지화염의 전파가 연구되었으며, Ko와 Chung[9,10] 그리고 Lee[11]는 실험적으로 층류 비예혼합 분사내 삼지화염의 전파 및 부상높이를 연구하였다.

부상화염의 안정화를 연구하기 위해 부상화염의 화염전파속도에 대한 연구도 활발히 되어 왔다. 최근에 Bilger[12]는 삼지화염의 화염전파속도와 스킨라소산율의 관계식을 비 연소반응 수치해석을 통해 도출하였다. 화염전파속도와 스킨라소산율을 정하는 위치를 이론당량비선(stoichiometric line)을 따라 가면서 유동방향 변환점으로 알려진 삼지점 전방 2mm 위치에서 선정하여 서로의 관계

를 고찰하였다. 에지(edge)화염과 유사하게 스킨라소산율이 증가하면 화염전파속도가 감소한다는 사실을 확인 하였다.

본 연구에서는 기존의 연구들에서 부상화염의 화염안정화 기구를 규명하기 위해 비연소반응 유동장에서 수행하였던 화염전파속도와 스킨라소산율의 관계를 비 연소반응이 아닌 실제 연소반응이 있는 유동장에서 살펴보았다. 우선 수치해석의 신뢰성을 검증하기 위해 기존의 연구들에서 구한 부상화염 높이에 대한 결과들과 본 연구의 결과가 잘 일치하는지 검증하였다. 이를 토대로 기존의 연구에서 부상화염의 유동방향 변환점에서 화염전파속도와 스킨라소산율의 관계가 타당한지 검증하였고 삼지화염을 가장 잘 나타내고 있는 삼지점에서의 부상화염의 특성을 살펴봄으로써 부상화염의 화염전파속도와 스킨라소산율의 관계를 재정립하였다.

II. 이론적 배경

수치해석은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 크기 200mm×30mm의 사각 영역 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.¹³⁾

Continuity:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) = 0 \quad (1)$$

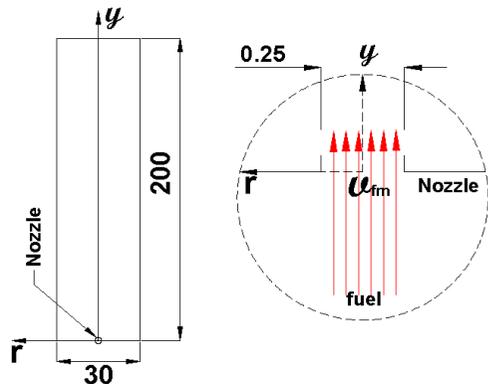


Fig. 1. Schematic of modelling(unit : mm)

Momentum:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} - \rho g + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_y}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

Energy:

$$\rho C_p \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] - \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i h_i - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho T \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_i V_{ir} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho T \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_i V_{iy} \right) \quad (4)$$

Chemical species:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial Y_i}{\partial r} + v_y \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho Y_i V_{ir}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_i V_{iy}) + \dot{\omega}_i \quad (5)$$

where $i = 1, 2, \dots, ii$

$$V_{ir} = -\frac{D}{Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \quad (6)$$

$$V_{iy} = -\frac{D}{Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \quad (7)$$

여기에서 v_r 과 v_y 는 각각 r 과 y 방향 속도이다. 혼합물 온도 T , 혼합물 밀도 ρ , 혼합물 열전도도 λ , 일정 압력 아래서 혼합물의 열용량 C_p , 일정 압력 아래서 i -번째 화학종의 열용량 C_{pi} , i -번째 화학종의 단위 몰당 몰생성률 $\dot{\omega}_i$, h_i 는 i -번째 화학종의 엔탈피이다. g 는 수직 방향 y 에서의 중력가속도이다. μ 는 혼합물의 점도, Y_i 는 i -번째 화학종의 질량 분율, V_{ir} 과 V_{iy} 는 i -번째 화학종의 r 과 y 방향에 대한 확산 속도이다. 그리고 ii 는 전체 화학종 수이다. 본 연구에서 사용한 좌표계에서 r 방향의 좌표는 편의상 이후에는 x 로 표현하여 경계조건과 결과에서의 좌표로 이용하기로 한다.

2.2 경계조건 및 물성치 계산

본 연구에서 사용한 연료는 99.5% 순수 프로판 (C_3H_8)이며 연료분출 속도는 11~14m/s로 균일한

속도분포로 분출한다고 가정하여 1m/s 간격으로 계산을 수행 하였다. 연료분출 노즐에 인접한 공기 ($x = 0, y = 0.25 \sim 30\text{mm}$)와 상단경계의 공기($x = 0 \sim 20\text{mm}, y = 30\text{mm}$)의 경계조건은 Neumann 조건(속도, 온도, 농도, 압력 모두 경계면에 수직방향으로 구배가 없다.)을 이용하였다. 후류 경계($x = 200\text{mm}, y = 0 \sim 30\text{mm}$)에서도 Neumann 경계조건을 사용하였고 연속방정식이 만족되도록 하였다.

본 연구에서 사용한 수치해석 소프트웨어는 상용으로 개발되어 사용되고 있는 유동해석 소프트웨어인 Fluent를 사용하였다. 점성계수, 열전도율, 물질확산계수는 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 1단계 화학반응의 한계 반응 속도이론(Finite reaction rate theory)을 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과의 타당성 검증

원형 노즐 출구에서 균일한 연료출구속도의 경우와 원관 내에서 완전 발달한 연료출구속도의 경우 두 가지 조건에 대한 화염 부상 높이에 대하여 기존 Chung[10]의 실험 연구에서 구한 값들과 수치해석을 통하여 구한 값들을 비교한 본 저자의 이전 연구 [15]에서 실험결과와 수치해석 결과에서 무시 못할 오차가 있었다. 즉 Chung의 실험결과와 수치해석 결과에서의 부상높이가 적게는 10%에서 많게는 50%의 오차가 있었다. 이러한 오차를 부상화염이 있는 연소유동장을 해석할 때 점성계수, 열전도율, 물질전달계수를 분자운동론에 기초한 다성분 물질을 고려한 값을 적용하여 정확도를 향상하였다. 이렇게 계산한 부상 높이에 결과와 이전의 기존 실험 결과를 비교한 것을 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 직선은 Chung의 실험결과로부터 도출된 부상높이에 관한 결과 그래프이고 o표시는 실험과 같이 균일한 출구속도에서의 부상화염 높이의 수치해석 결과이고 *는 포와젤 유속분포의 결과이다. Fig. 2에서 살펴 볼 수 있듯이 균일 연료출구속도의 경우 부상화염 높이에 관한 오차의 범위가 3%에서 28%사이로 이전의 결과에 비하여 정확도가 상당히 향상되었음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 수치해석 결과는 기존의 실험 연구 결과들의 부상높이에 관한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있고 이로서 본 수치해석 결과의 신뢰성을 입증할 수 있다고 판단한다. Fig. 2에는

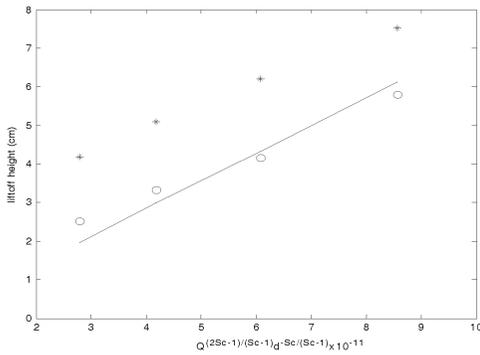


Fig. 2. Comparison of liftoff height for propane with the experimental result and numerical calculations. (d in mm, Q in ml/min) solid line : experimental results for the uniform exit velocity, o : uniform exit velocity, * : Poiseuille exit velocity. $Sc = 1.376$.

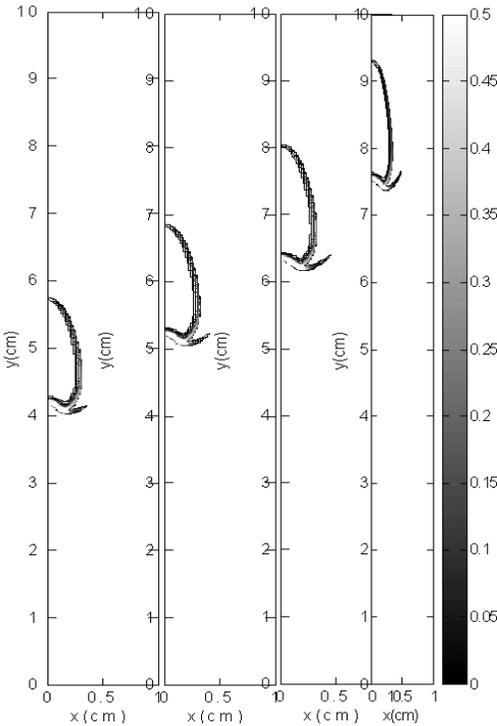


Fig. 3. Comparison of reaction rate contours with the variation of fuel exit velocities from $v_{fm} = 11m/s$ to $v_{fm} = 14m/s$.

균일한 출구속도와 함께 포와젤 분포 출구속도의 부상높이를 함께 나타내었다. Fig. 2의 그래프에서 x 축을 Chung¹⁰과 Chen¹⁴의 논문에서와 같이 부피유량률(Q), 노즐직경(d), Sc 의 함수로 하고 y 축을 부상높이로 나타내었다. 본 저자의 이전의 연구에서와 같이 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.

본 연구에서 밝히고자하는 화염전파속도와 스칼라 소산율의 관계에 관한 수치해석 연구는 포와젤 분포 연료출구속도의 경우에 대하여 고찰하고자 한다.

3.2 연료분출 속도에 따른 화염형상 특성

연료분출 속도에 따른 화염 형상을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 연소반응 속도 크기의 등고선으로 화염형상을 대신하여 나타내었는데 연료분출 속도의 범위는 11m/s에서 14m/s이다. 그림에서 x 축과 y 축은 실제 x, y 방향 좌표를 나타낸다. $x=0$ 인 y 축이 연료노즐의 중심선으로 화염의 대칭축으로서 실제 화염의 반쪽만 나타내었다. 오른쪽은 연소반응속도 등고선의 크기를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 4가지 연료 분출속도 모두에서 부상화염에서 나타나는 삼지화염의 전형적인 형태를 관찰할 수 있다. 즉 중심선 부근에서는 연료농도가 큰 과농화염이 형성 되어 있고 중심선에서 벗어나면 연료농도가 낮은 희박화염이 형성 되어 있다. 그 사이에 y 방향으로 화염이 형성 되어 있는데 과농화염에서 연소되고 남은 연료와 공기가 확산하여 형성되는 확산화염이다. 이 세가지 화염이 만나는 곳이 삼지점이다. 연료분출속도에 따른 부상화염의 높이 변화를 잘 관찰할 수 있는데 이것으로부터 Fig.2의 연료유량과 부상높이에 관한 관계 그래프를 도출하였다. $v_{fm} = 11m/s$ 에서 삼지점의 x 방향 폭은 0.15cm이고 $v_{fm} = 14m/s$ 일 때는 0.27cm로서 연료분출속도가 증가함에 따라 삼지점의 x 방향 폭이 증가함을 알 수 있다. 또한 중심선에서 측정된 화염길이를 살펴보면 $v_{fm} = 11m/s$ 에서 1.58cm이고 $v_{fm} = 14m/s$ 에서는 1.83cm로서 이것

또한 증가함을 알 수 있다.

삼지점의 폭이 증가하는 이유는 연료유량이 커짐에 따라 부상화염 높이가 증가하고 이에 따라 연료분출 유동의 자유경계면이 증가하여 경계층이 증가하기 때문에 삼지화염의 삼지점도 경계층 증가와 함께 증가하여 나타나는 현상이다. 화염길이 증가하는 이유는 연료유량의 증가로 과농화염대에서 반응하지 못한 연료의 양이 연료분출속도가 큰 경우에 크기 때문에 화염의 길이가 증가하는 것으로 판단된다.

3.3 이론당량비선(Stoichiometric line)에서의 유동속도와 스칼라소산율 특성

부상화염에서 전형적으로 나타나는 삼지화염에서 화염 전파 속도의 연구는 기존에 많은 연구자들에 의해 수행 되어 왔다. 화염 전파 속도는 화염이 지속되는가 아니면 꺼지는가의 판단 기준 중에 하나가 되기 때문이다. 일반적으로 부상 화염의 화염전파속도는 반응 전 기체의 밀도와 반응 후 기체의 밀도의 비로서 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다[16].

$$\frac{U_p}{S_L} \sim \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_b}} \quad (8)$$

여기서 U_p 는 화염전파속도, S_L 은 층류에혼합 화염속도이고 ρ_u 는 반응 전 기체 밀도, ρ_b 는 반응 후 기체밀도이다. 부상화염의 경우 화염전파속도는 위의 식과 같이 기체밀도의 함수로 나타낼 수 있는데 이와 함께 스칼라소산율(scalar dissipation rate)과 화염곡률, 열방출률(heat release rate) 등의 함수로 알려져 있다. 특히 Bilger[12]는 화염전파속도를 기체의 밀도와 스칼라소산율(scalar dissipation rate)의 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{U_p}{S_L} = \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_b} \left[1 - \left(\frac{\chi_{st}}{\chi_a} \right)^m \right]} \quad (9)$$

위의 식에서 χ_a 는 기준스칼라소산율이고 m 은 U_p 와 χ_{st} 의 지수승이며, χ 는 스칼라소산율로서 다음과 같이 정의된다.

$$\chi \equiv 2D_F(\nabla\xi)^2 \quad (10)$$

그리고 ξ 는 기체의 혼합분율이고 D_F 는 연료의 물질확산계수이다. 하첨자 st 는 이론당량비(stoi-

chiometric)를 의미한다. 삼지화염에서 화염전파속도와 이와 관련한 스칼라소산율은 이론당량비선을 따라 정의된다. 따라서 이론당량비선을 따라 유동속도와 스칼라소산율의 특성을 우선 파악하기로 한다.

Fig. 4에 $v_{fm} = 12m/s$ 인 경우에 화염형상과 이론당량비선을 나타내었다. 전방흐름에서부터 이어지는 이론당량비선은 삼지점(triple point)을 지나게 되고 삼지화염 형상에서 확산화염 부분과 일치하게 된다. 그림에서 살펴보면 이론당량비선은 화염면에서 멀리 떨어져 있는 반응전 영역에서는 냉간제트유동(cold jet flow)에서 경계층이 발달되는 형태와 유사한 양상을 보여준다. 화염면 부근에 오면서 이론당량비선은 급격히 변형이 되어서 삼지점을 지나게 된다. 이는 과농연료 영역에서 연소반응이 일어날 때 상대적으로 높은 압력이 형성되어 마치 장애물처럼 작용하기 때문에 이론당량비선이 바깥쪽으로 변곡이 일어난다.

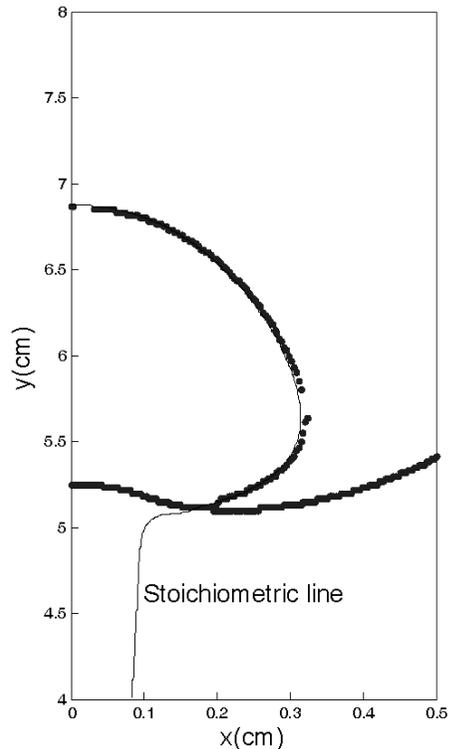
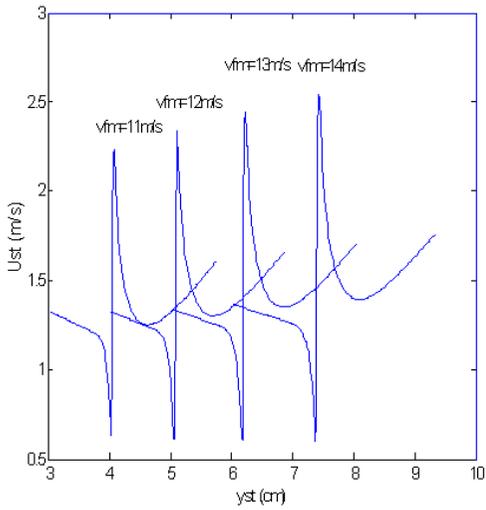
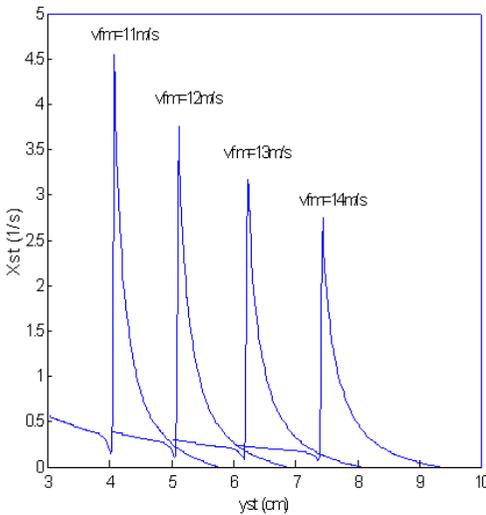


Fig. 4. Typical stoichiometric line of the triple flame for the case of $v_{fm} = 12m/s$.



(a)



(b)

Fig. 5. The profiles of velocities and scalar dissipation rates along stoichiometric lines for the cases of several fuel injection velocities. (a) : velocities along stoichiometric lines. (b) : scalar dissipation rates along stoichiometric lines.

이론당량비선 상에서 화염이 변곡되기 시작하는 부분에서의 유동속도가 부상화염에서 화염전파속도로 간주할 수 있는데 부상화염의 화염전파

속도 특성을 파악하기 위하여 이론당량비선 상에서의 유동속도와 스칼라소산율 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 5(a)는 몇 가지 연료분출속도의 경우에 이론당량비선을 따른 유동속도를 나타낸다. 수평축은 이론당량비선 좌표를 나타내고 수직축은 유동속도이다. 연료분출속도 $v_{fm} = 11m/s$ 의 경우를 살펴보면 비반응 영역에서 이론당량비선을 따라서 유동속도는 선형적으로 감소해 가는데 이는 냉간 제트유동(cold jet flow)에서의 자유 경계층 유동특성을 따르고 있음을 보여주고 있다. 비반응 영역에서 선형적인 유동속도 감소 후에 급격히 감소하는 영역이 나타나는데 이 영역이 Fig. 4에서 살펴본 것 과 같이 이론당량비선을 따라 가다가 삼지점 직전에서 화염면에 형성된 높은 압력 때문이다. 삼지점에서 가장 낮은 속도를 보이고 있는데 이곳에서의 속도는 층류예혼합화염속도 S_L 에 근접한다. 삼지점을 지나면 화염면을 지나기 때문에 유동은 가속되어 속도가 급격히 증가한다. 연소반응영역을 지나면서 유동속도는 감소하다가 다시 증가하기 시작한다. 이러한 경향은 연료분출속도가 다르더라도 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

연료분출속도가 11m/s에서 14m/s로 증가함에 따라 삼지점의 위치가 증가하는 것은 Fig. 2와 Fig. 3에서 이미 부상화염 높이 특성에서 관찰하였다. 이 그림에서 연료분출속도가 증가함에 따라 변곡되는 위치와 삼지점까지의 거리가 증가하는 것을 관찰할 수 있고 또한 변곡되는 지점에서의 유동속도가 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 이에 대한 특성은 다음 절에서 자세히 고찰하기로 한다.

Fig. 5(b)는 이론당량비선을 따라 스칼라소산율을 나타낸 것이다. 먼저 $v_{fm} = 11m/s$ 의 경우에 대하여 살펴보면 삼지점에서 다소 급격히 감소하는 경향은 Fig. 5(a)의 유동속도 특성과 유사하다. 삼지점 전의 변곡지점에서 연료분출속도가 증가함에 따라 스칼라소산율은 연료분출속도가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이에 관한 것도 다음절에서 자세히 검토하기로 한다.

3.4 화염전파속도 선정 방법

Bilger는 화염전파속도와 이론당량비에서의 스칼라소산율을 화염의 존재에 따른 유동방향 변향점(redirection point)에서 선정하였다. 이 점은 앞에서 언급한 바와 같이 이론당량비선(stoichiometric line)을 따라가다가 삼지화염의 화염면에서 화염의 존재에 따라 유동이 변형되기 시작하는 지점인데

Bilger는 프로판 연료의 경우 연료분출속도에 관계 없이 화염면 전방 2mm의 위치로 정하였다. 본 연구의 3.3절의 Fig. 5(a)에서 관찰 하였듯이 연료분출속도가 증가하면 삼지점과 유동방향 변환점의 폭은 증가하기 때문에 일률적으로 유동방향 변환점을 2mm로 정하는 것은 화염전파속도와 스칼라소산율을 정하는데 많은 오차를 유발할 수가 있다.

본 연구에서는 화염전파속도가 정의되는 유동방향 변환점을 Fig. 6과 같이 선정하였다. 즉 이론당량비선을 따라 유동속도를 구하고(Fig. 6(a)) 이 유동속도를 이론당량비선에 대한 구배를 구한다(Fig. 6(b)). 이론당량비선에 대한 구배 그래프를

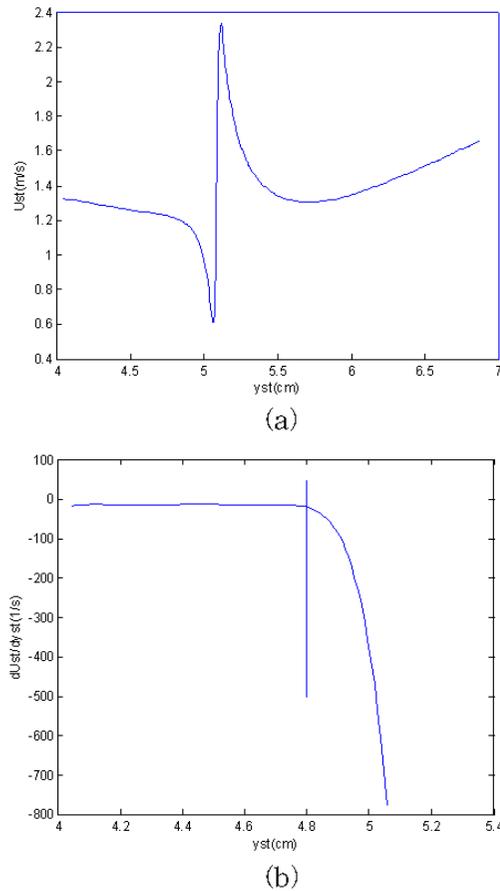


Fig. 6. The selection of redirection point along the stoichiometric line for the case of $v_{fm} = 12m/s$. (a) flow velocity along the stoichiometric line, (b) : gradient of flow velocity along the stoichiometric line.

살펴보면 화염면에서 멀리 떨어져 있는 냉간제트 유동(cold jet flow) 영역에서는 유동이 자유제트 경계층 유동 특성을 가지고 있어서 속도구배가 거의 일정한 값을 가지고 있다. 화염면에 가까워지면 화염의 영향으로 유동속도가 급격히 감소하는데 이렇게 유동속도가 급격히 감소하기 시작하면 속도 구배도 급격히 변하게 된다. 이렇게 속도구배가 일정한 값으로 되다가 급격히 변하는 지점을 유동방향 변환점(redirection point)로 선정하였다. 이 지점에서의 유동속도를 화염전파속도로 정하기로 한다.

3.5 유동방향 변환점에서 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계 특성

화염전파속도는 유동방향 변환점에서의 스칼라소산율의 증가에 따라 감소하는 경향이 밝혀져 있다. 이러한 관계를 Bilger는 식 (9)로 나타내었다. 화염전파속도를 선정하는 위치를 정할 때 Bilger는 프로판 연료에 대하여 연료분출속도에 관계 없이 일률적으로 삼지점 전방 2mm로 정하였다. 이러한 경우에는 연료분출속도에 따라 유동방향 변환점이 변하기 때문에 화염전파속도를 도출할 때 많은 오차를 유발할 수 있다는 것을 3.3절에서 살펴보았다.

연료분출속도에 따라 삼지점과 유동방향변환점 사이의 거리를 Fig. 7에 나타내었는데 이 그래프에 유동방향 변환점에서의 스칼라소산율을 함께 나타내었다. 이미 Fig. 5에서 연료분출속도 증가에 따라 삼지점과 유동방향 변환점과의 거리가 증가하는 것을 관찰하였는데 이것이 정량적으로 어떻게 되는가를 그래프로 잘 보여주고 있다.

유동방향변환점 거리는 연료분출속도의 제곱

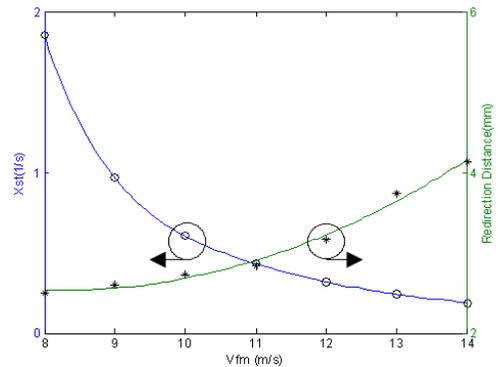


Fig. 7. The redirection distances and scalar dissipation rates at the redirection point with the variation of fuel exit velocity.

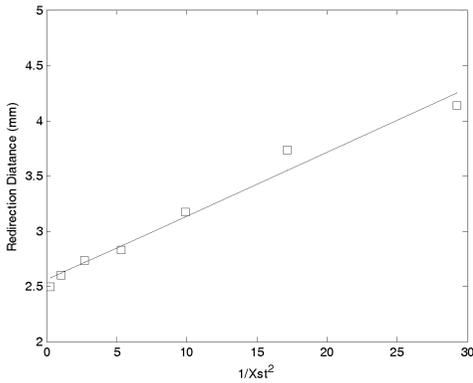


Fig. 8. The correlation behavior between the scalar dissipation rate and redirection distance.

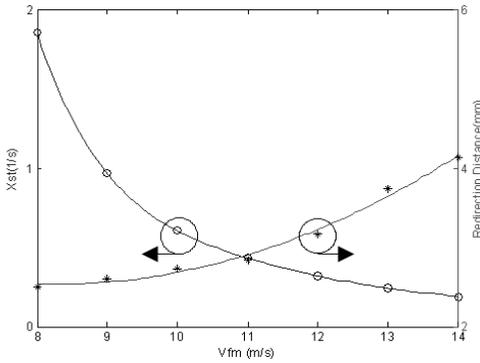


Fig. 9. The characteristics of flame propagation velocity and scalar dissipation rate with the variation of fuel exit velocity.

에 비례하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 반면에 스칼라소산율은 연료분출속도에 반비례하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 유동변환점 거리는 스칼라소산율의 제곱에 반비례함을 유추할 수 있다. 이러한 관계를 그래프로 Fig. 8에 나타내었다.

그래프에서 볼 수 있듯이 유동방향변환점 거리 (L_r)는 스칼라소산율 제곱의 역수에 선형적임을 알 수 있는데 이러한 관계식을 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$L_r = 0.058 \frac{1}{\chi_{st}^2} + 2.57 \quad (11)$$

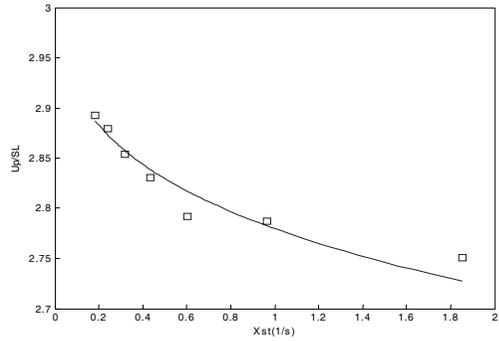


Fig. 10. The characteristics of flame propagation velocity and scalar dissipation rate at the redirection point. Square symbol : computational results for the cases with $v_{fm} = 8m/s$ to $14m/s$. Solid line : curve fitted line given by equation (12).

이 그래프로부터 유동방향변환점에서 스칼라소산율이 작을수록 유동방향 변환점 거리는 증가함을 알 수 있다. 냉간제트유동(cold jet flow) 영역에서 하류로 갈수록 연료와 산화제의 농도가 확산이 진행되어 스칼라소산율이 감소해 가는데 이에 따라 유동뿐만 아니라 농도 경계층의 두께도 증가하기 때문에 연료분출속도 증가에 따라 삼지점 위치가 더욱 하류로 옮겨가게 되고 유동변환점 거리도 증가하게 되는 것으로 설명할 수 있다.

연료분출속도의 증가에 따라 삼지점이 하류로 옮겨가면서 스칼라소산율이 감소하는 것을 살펴 보았다. 또한 연료분출속도 증가에 따라 유동방향 변환점에서의 유동속도인 화염전파속도도 증가함을 이미 Fig. 5(a)에서 관찰하였다. 이러한 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9를 살펴보면 연료출구속도 증가에 따라 스칼라소산율은 연료출구속도의 역수에 비례하여 감소하는 것은 Fig. 7에 나타난 것과 동일하다. 연료분출속도가 증가하면 화염전파속도는 거의 선형적으로 증가한다. 이러한 사실로부터 화염전파속도는 스칼라소산율의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있고 이러한 관계를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10을 살펴보면 스칼라소산율의 증가에 따라 화염전파속도가 완만히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 관련한 관계식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 프로판의 경우에 삼지점에서 멀리 떨어진 비반응영역의 이론당량비선에서 $\sqrt{\rho_u/\rho_b}$ 값은 3.08로 나타났고 연료분출속도의 변화에 따라 계산한

화염전파속도와 스칼라소산율의 값(사각모양)을 이용하여 이 둘의 관계식을 도출하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{U_P}{S_L} = 3.08 \left[1 - \left(\frac{\chi_{st}}{7332} \right)^{0.2616} \right] \quad (12)$$

Fig. 10에 있는 실선이 위의 식 (12)를 나타낸 그래프이다. 유동방향 변환점을 연료분출속도에 무관하게 일률적인 위치에서 선정하였던 기존의 연구에서 화염전파속도와 스칼라소산율을 선정하면 많은 오차를 유발하기 때문에 본 연구에서는 위의 식에서 나타난 화염전파속도와 스칼라소산율을 구하는데 있어서 반드시 연료분출속도에 따라 변하는 유동방향변환점을 정확히 찾아서 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계를 도출해야 보다 정확한 관계를 규명할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

부상화염에서 화염전파속도와 스칼라소산율은 화염안정화에 중요한 인자이다. 따라서 화염전파속도와 스칼라소산율을 정하는 방법이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 유동방향변환점을 정하는 방법과 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계식에 관하여 살펴보았고 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.1 수치해석 결과의 타당성 검증

본 연구에서는 부상화염에 대한 수치해석을 통하여 부상화염에서의 유동 특성을 규명하였다. 따라서 수치해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 기존 연구들에서 실험을 통하여 도출한 부상화염 높이에 관한 결과와 본 연구의 연소유동 수치해석 결과를 비교하였다. 그 결과 기존의 균일연료분출속도의 경우와 본 연구의 균일연료분출속도의 부상높이 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서의 부상화염 유동수치해석의 신뢰성이 확보되었다고 판단할 수 있었다. 본 연구에서의 화염전파속도와 스칼라소산율 관련 연구에서는 연료분출속도가 포와젤 분포 연료분출구속도의 경우에 대하여 수행하였다.

4.2 연료분출 속도에 따른 화염형상 특성

부상화염에서 연료분출속도가 증가함에 따라 삼지점의 x방향 폭과 화염길이가 증가한다. 이에 대한 이유는 연료분출 속도가 증가함에 따라 부상

높이가 증가하기 때문에 연료분출 유동의 자유경계면 두께가 증가하여 삼지점이 함께 증가하기 때문에 삼지점 폭이 증가하는 것으로 나타났고 또한 연료분출속도가 증가하면 연료분출 유량이 증가하여 부상화염 전방 화염면에서의 연소반응에서 남은 연료의 양이 많기 때문에 화염길어도 증가하게 되는 것으로 나타났다.

4.3 이론당량비선(Stoichimetric line)에서의 유동속도와 스칼라소산율 특성

부상화염은 이론당량비선을 따라 화염이 안정화 되며 이론당량비 선상에 삼지점이 존재한다. 화염면에서 멀리 떨어진 비반응영역에서 이론당량비선은 냉간제트유동(cold jet flow) 특성을 보여주고 있었으며 삼지점 부근에서 유동이 급격히 변곡되는 것을 관찰할 수 있었다. 몇 가지 연료분출속도에 대하여 이론당량비선을 따라 유동특성을 살펴보았는데 삼지점 직전에서 유동속도가 급격히 감소하다가 화염면을 지나면서 급격히 증가하는 것을 관찰하였다. 스칼라소산율도 유동속도와 유사하게 삼지점 전방에서 급격히 감소하는 특성을 관찰할 수 있었다.

4.4 화염전파속도 선정 방법

삼지점 전방에서 유동속도가 급격히 감소하면서 유동방향이 변환되는데 이렇게 급격히 유동방향이 변환되는 점을 유동방향변환점으로 하고 이점에서의 유동속도를 화염전파속도로 정하였다. 유동방향변환점을 정하는 방법은 이론당량비선을 따라 유동속도를 구하고 이것의 구배를 구해서 급격히 변하기 직전의 점을 유동방향변환점으로 선정하였다.

4.5 유동방향 변환점에서 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계 특성

유동방향변환점과 삼지점사이의 거리는 연료분출속도 증가에 따라 제곱에 비례하게 증가하였는데 기존의 다른 연구에서는 연료분출속도에 관계없이 일률적인 거리로 정하였다. 이렇게 일률적으로 정하면 화염전파속도 선정에 많은 오차를 유발하기 때문에 유동방향변환점을 정확히 선정해야 화염전파속도를 정확히 산출할 수 있다. 본 연구에서는 유동방향변환점과 삼지점간의 거리와 스칼라소산율의 관계식을 도출하였고 이를 토대로 한 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계식도 정립하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부-한국산업기술평가원 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] L. Muñiz, M. G. Mungal, "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames", *Combust. Flame.*, 111, 16-31, (1997)
- [2] J.W. Dold, "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame", *Combust. Flame.*, 76, 71-88, (1989)
- [3] J. Boulanger, L. Vervisch, J. Reveillon, S. Ghosal, "Effects of heat release in laminar diffusion flames lifted on round jets", *Combust. Flame.*, 134, 355-68, (2003)
- [4] T. Plessing, P. Terhoeven, N. Peters, M.S. Mansour, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame", *Combust. Flame.*, 115, 335-53, (1998)
- [5] H.G. Im, J.H. Chen, "Structure and Propagation of Triple Flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures", *Combust. Flame.*, 119, 436-54, (1999)
- [6] H.G. Im, J.H. Chen, "Effects of Flow Strain on Triple Flame Propagation", *Combust. Flame* 126, 1384-392, (2001)
- [7] R.D. Lockett, B. Boulanger, S.C. Harding, D.A. Greenhalgh, "The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame", *Combust. Flame.*, 119, 109-20, (1999)
- [8] C.E. Frouzakis, A.G. Tomboulides, J. Lee, K. Boulouchos, "From Diffusion to Premixed Flames in an H₂/Air Opposed-Jet Burner: The Role of Edge Flames", *Combust. Flame.*, 130, 171-84, (2002)
- [9] Y.S. Ko, S.H. Chung, "Propagation of Unsteady Tribraichial Flames in Laminar Non-premixed Jets", *Combust. Flame.*, 118, 151-63, (1999)
- [10] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet", *Combust. Flame.*, 86, 62-72, (1991)
- [11] J. Lee, S.H. Won, S.H. Jin, S.H. Chung, O. Fujita, K. Ito, "Propagation speed of tribraichial (triple) flame of propane in laminar jets under normal and micro gravity conditions", *Combust. Flame.*, 134, 411-20, (2003)
- [12] R.W. Bilger, Y.C. Chen, "Stabilization Mechanism of lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows", *Combust. Flame*, 122, 377-399, (2000)
- [13] K.K. Kuo, *Principles of Combustion*, 2nd John Wiley & Sons, New York, (1993)
- [14] R.H. Chen, A. Kothawala, M. Chaos, L.P. Chew, "Schmidt number effects on laminar jet diffusion flame liftoff", *Combust. Flame.*, 141, 469 - 472, (2005)
- [15] 하지수, 김태권, 박정, "연료노즐 출구에서의 속도형상에 따른 부상화염 높이 및 화염 구조에 관한 수치해석 연구", *KIGAS*, 12, 22-28, (2008)
- [16] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, A. Liñán, "Effects of heat release on triple flames" *Phys. Fluids.*, 7, 1447-1454 (1995)