

부상화염에서 노즐직경과 연료유량에 따른 화염전파속도와 체적연소반응속도의 변화 특성에 관한 연구

하지수[†] · 김태권¹

(원고접수일 : 2009년 11월 25일, 원고수정일 : 2010년 1월 13일, 심사완료일 : 2010년 1월 13일)

The Characteristics of the Flame Propagation Velocity and Volume Integral of Reaction Rate with the Variation of Nozzle Diameter and Fuel Injection Flow Rate for a Liftoff Flame

Ji-Soo Ha[†] · Tae-Kwon Kim¹

요 약 : 부상화염에서 노즐직경과 연료유량을 변화하면서 화염전파속도와 연료과농영역, 연료희박영역, 확산화염 영역에서의 체적연소반응속도의 변화 특성을 수치해석을 통하여 살펴보았다. 본 연구에서 사용한 3가지 연료노즐 직경($d=0.25, 0.30, 0.35\text{mm}$)에서 연료분출속도를 증가시키면 화염전파속도가 증가하지만 변화폭은 4.3%를 넘지 않는다. 연료분출속도를 증가함에 따른 연료량 증가는 직접적이고 선형적으로 체적연소반응속도에 연관되어 있음을 알 수 있었고, 따라서 부상화염에서 연료량의 증가는 화염전파속도 보다 체적연소반응속도가 연료량 변화에 대응함을 알 수 있었다.

주제어 : 부상높이, 화염전파속도, 노즐직경, 체적연소반응속도, 화염표면적

Abstract: A numerical analysis of reactive flow in a liftoff flame is accomplished to elucidate the characteristics of flame propagation velocity and volume integral of reaction rate with the variation of nozzle diameter and fuel injection flow rate in a liftoff flame consisted with fuel rich region, fuel lean region and diffusion flame region. The increase of fuel injection velocity enhances flame propagation velocity for the selected three nozzle diameter($d=0.25, 0.30, 0.35\text{mm}$), but its effect on the flame propagation velocity is not much greater than 4.3%. The increase of fuel flow rate is directly and linearly related with the volume reaction rate and so the volume reaction rate, not the flame propagation velocity, might be considered to accommodate the variation of fuel flow rate in a liftoff flame.

Key words: Liftoff flame, Flame propagation velocity, Nozzle diameter, Volume integral of reaction rate, Flame surface area

1. 서 론

연료노즐에서 연료를 분출하면 연료 분출속도에 따라 화염이 노즐에 부착하는 부착화염과 화염이 노즐에서 떨어져서 있는 부상화염으로 존재하게 된다. 연료 분출 속도가 어느 한계를 넘어가면 안정

된 화염은 존재하지 않고 화염이 날아가 버린다. 이렇게 노즐에서 분출된 연료의 분출속도에 따라 화염의 존재 형상이 복잡하게 된다.

특히 연료분출속도가 증가되어 연료노즐에 부착된 화염이 노즐에서 분리되어 부상화염이 형성되

[†] 교신저자(계명대학교 에너지환경과학과, E-mail:jisooa@kmu.ac.kr Tel: 053)580-5919)

¹ 계명대학교 기계자동차공학부

면 연료노즐 분출 중심선 부근은 연료가 과농한 연소가 일어나고 중심선에서 떨어진 영역인 공기 측은 연료가 희박한 연소가 일어난다. 연료가 과농한 영역에서 연소가 일어나고 난 뒤 남은 연료는 다시 공기와 확산 화염을 형성하게 된다. 이렇게 하여 부상화염은 과농연소영역, 희박연소 영역, 확산화염 영역의 세 부분으로 이루어지고 이 세 부분이 만나는 곳을 삼지점(triple point)이라고 하고 이러한 화염을 삼지화염(triple flame)이라고 한다.

삼지화염은 화염의 점화 및 소화에 관계한 화염 안정화를 위해 많은 연구자들에 의해 연구되어져 왔다[1-12]. Bilger[13]는 삼지화염의 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계식을 비 연소반응 수치해석을 통해 도출하였다. 화염전파속도와 스칼라소산율을 정하는 위치를 이론당량비선(stoichiometric line)을 따라가면서 유동방향 변환점으로 알려진 삼지점 전방 2mm 위치에서 선정하여 서로의 관계를 고찰하였다. 예지화염과 유사하게 스칼라소산율이 증가하면 화염전파속도가 감소한다는 사실을 확인 하였다. 최근에 Ha[14]는 기존의 다른 연구들에서 부상화염의 화염안정화 기구를 규명하기 위해 비연소반응 유동장에서 수행하였던 화염전파속도 특성을 비 연소반응이 아닌 실제 연소반응이 있는 유동장에서 살펴보고 노즐직경의 크기를 고정하고 노즐에서 연료분출속도를 변화시키면서 화염전파속도와 체적연소반응률의 특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 연료유량과 노즐 직경 크기를 변화시키면서 화염전파속도와 체적연소반응률 특성을 분석함으로써 부상화염에서 연료량의 증가를 화염전파속도의 변화로 분석하는 것 보다 체적연소반응률로써 분석하는 것이 타당함을 밝히고자 한다.

2. 수치해석 방법

부상화염의 화염전파속도와 체적연소반응속도에 관한 연구를 수행하기 위하여 본 연구에서는 수치해석을 수행하였으며 Figure 1에 나타난 것과 같이 노즐중심에서 반경방향으로 30mm, 흐름방향

으로 200mm 크기의 공간 영역 내에서 수행되었다. 그리고 연료노즐의 직경은 0.25, 0.30 그리고 0.35mm이며 프로판을 연료로 사용하였고 연료 분출속도를 v_{fm} 로 표현되어 있다. 주위 공기는 강제적인 흐름이 없는 것으로 하여 계산을 수행하였다.

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:

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

Momentum:

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

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

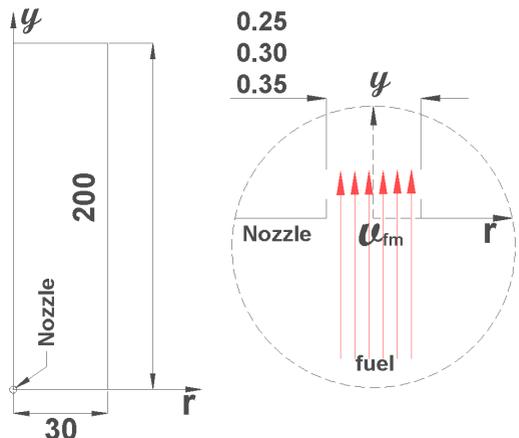


Figure 1: Schematic of modelling(unit:mm)

Energy:

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

Chemical species:

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

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

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

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

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 볼륨당 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.

2.2 경계조건 및 물성치 계산

본 연구에서 사용한 연료는 프로판(C_3H_8)이며 주위공기와 프로판의 온도는 상온(10°C)으로 하였다. 연료분출 속도는 $11\sim 14\text{m/s}$ 로 균일한 속도분포로 분출한다고 가정하여 1m/s 간격으로 계산을 수행 하였다. 연료분출 노즐에 인접한 공기 ($r=0.25(0.30, 0.35)\sim 30\text{mm}$, $y=0$)와 상단경계의 공기 ($r=30\text{mm}$, $y=0\sim 200\text{mm}$)의 경계조건은 Neumann 조건(속도, 온도, 농도, 압력 모두 경계면에 수직방향으로 구배가 없다.)을 이용하였다. 후류 경계($r=30\text{mm}$, $y=0\sim 200\text{mm}$)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.

3. 결과 및 고찰

3.1 부상화염의 화염구조 및 이론당량비 등혼합분율 특성

부상화염은 삼지점을 중심으로 해서 과농연소, 희박연소, 확산연소 부분으로 구분할 수 있음을 이미 살펴 보았다. 부상화염의 연소특성을 파악하기 위해서는 우선 삼지점 부근의 화염구조가 어떠한 특징을 가지고 있는지를 알아보고 이를 위하여 부상화염의 이론당량비의 등혼합분율 특성을 **Figure 2**에서 살펴보기로 한다. **Figure 2**는 대표적으로 $d=0.25\text{mm}$ 와 $v_{fm}=11\text{m/s}$ 에 대하여 나타내었다. (a)는 화학반응률 분포에 대한 등고선을 나타내었는데 중심축에서 오목하게 들어간 부분이 연료과농영역이고 날개 모양으로 양쪽으로 펼쳐진 영역이 연료희박 영역이다. 연료과농영역과 희박영역의 위 부분에 길게 타원형으로 펼쳐져 있는 폐곡선 영역이 확산화염 영역이다. 연료과농영역과 연료희박영역 그리고 확산화염 영역이 만나는 곳이 삼지점이라고 한다. 이러한 화염 형상이 부상화염의 특징적인 형상이다. **Figure 2** (b)에서 점으로 나타나 있는 것은 이론당량비선에 해당하는 삼지화염의 화염면을 나타내고 있다. 프로판연료에서 이론당량비는 0.06인데 이 값을 가지는 부분은 **Figure 2** (b)에 나타나 있듯이 점으로 나타나 있는 화염면과 함께 상류에서 흘러오는 연료와 공기의 혼합 영역에서 부터 삼지점을 통과하는 선으로 구성되어 있다. 상류에서부터 삼지점을 통과하는 이론당량비선은 삼지점 부근에서 화염의 존재에 의해 바깥 방향으로 많이 왜곡됨을 알 수 있다.

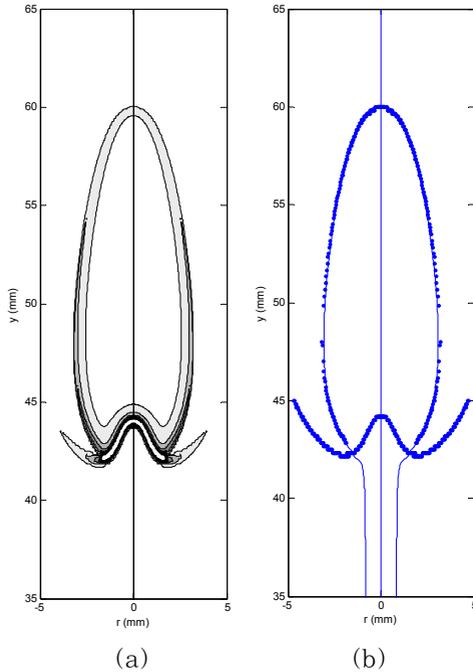


Figure 2: Typical flame shape for the case with $d=0.25\text{mm}$ and $v_{fm}=11\text{m/s}$. (a) Reaction rate contour, (b) Stoichiometric iso lines.

이러한 부상화염에 관해 기존의 다른 연구[12]에서 부상화염의 화염전파속도를 이론당량비선상 화염 전방 2mm 정도에서의 유동속도를 화염전파속도로 간주하였는데 이렇게 선정하는 것 보다 Ha[14] 등에 의해 제시한 방법으로 화염전파속도를 선정하여 부상화염의 화염전파 속도 특성을 살펴보기로 한다. 우선 이론당량비선을 따라 유동속도가 어떠한 특징이 있는지를 **Figure 3**에 나타내었다. **Figure 3(a)**는 연료노즐 직경 $d=0.25\text{mm}$ 에 대하여 연료분출속도를 11, 12, 13, 14m/s로 변화시키면서 이론당량비선을 따른 유동속도를 나타낸 것이다. 연료분출속도 11m/s를 대표적으로 살펴보면, $y=4.2\text{mm}$ 부근에서 속도의 크기가 약 0.6m/s로 가장 작게 나타나는데 이 부분이 삼지점에서의 유동속도에 해당한다. 삼지점 보다 상류에서의 유동속도를 살펴보면 점진적으로 유동속도가 감소해 오다가 삼지점 부근에서 화염의 존재로 인해 급격히 감소하게 된다. 삼지점 상류에서 점진적으로 유동속도가 감소하다가 갑자기 급격히 감소하

는 지점에서의 유동속도를 화염전파속도로 선정하였는데 Ha[14] 등의 논문에 자세한 방법이 제시되어 있다.

다른 연료분출속도의 이론당량비선을 따른 유동속도는 연료분출속도 11m/s와 유사한 형태를 보이고 있다. 연료분출속도 12m/s를 살펴보면 삼지점 화염의 위치, 즉 부상화염 높이는 5.3mm로 11m/s일 때 보다 약 1mm 증가하게 나타나고 있으며 삼지점 보다 상류에서의 유동속도는 점진적으로 감소하다가 삼지점 부근에서 급격히 감소하는 형태는 연료분출속도 11m/s일 때와 유사하다. 본 그래프에서 명확히 구분이 어렵지만 연료분출속도가 증가함에 따라 화염전파속도가 약간 증가하는 경향을 관찰할 수 있는데 이것은 **Figure 4**에서 구체적으로 살펴보기로 한다. 연료노즐 직경 $d=0.3\text{mm}$ 의 경우는 **Figure 3(b)**에 나타나 있는데 유동속도 형태는 직경 $d=0.25\text{mm}$ 와 흡사하다. 직경이 커지면서 같은 연료분출속도에서 부상화염의 높이는 직경 $d=0.25\text{mm}$ 보다 직경 $d=0.30\text{mm}$ 인 경우가 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 직경이 $d=0.35\text{mm}$ 인 경우(**Figure 3(c)**)에서도 같은 결과를 확인할 수 있다.

3.2 연료분출속도와 노즐 직경변화에 따른 부상화염의 화염전파속도 특성

3.1절에서 살펴보았듯이 연료분출속도를 증가시키면 화염전파속도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. Ha[14] 등에 의해 제시한 방법으로 이론당량비선상의 삼지점 전에서 유동속도가 급격히 감소하기 직전의 유동속도를 화염전파속도로 정하여 그래프로 나타낸 것을 **Figure 4**에 나타내었다. **Figure 4**에서 수평축은 연료노즐 직경 $d=0.25\text{mm}$ 일 때 연료분출속도 $v_{fm}=11\text{m/s}$ 에서의 연료분출유량을 기준으로 연료분출속도와 연료분출노즐직경을 변화 시켰을 때의 연료분출 유량의 비(normalized fuel flow rate)를 나타낸다. 연료노즐 직경 $d=0.25\text{mm}$ 의 경우(* 표시)를 먼저 살펴보면 연료분출속도 11m/s인 경우(수평축에서 1의 값) 화염전파속도가 1.220m/s로 나타났으며 연료분출속도가 14m/s인 경우는 1.237m/s로 나

타났다. 연료노즐직경이 $d=0.30\text{mm}$ 인 경우(\circ 표시)를 살펴보면 연료직경 $d=0.25\text{mm}$ 인 경우에 비해 전체적으로 증가한 결과를 보여 주고 있다. 같은 연료분출속도이더라도 직경의 증가에 따라 연료유량이 증가했기 때문이다. $d=0.35\text{mm}$ 일 때에도 이와 유사한 증가 경향을 보여 주고 있다.

Figure 4에서 살펴 볼 수 있듯이 세 가지 직경과 네 가지 연료분출속도에 대하여 연료분출 유량의 비로 나타내면 이것과 화염전파속도와의 관계를 하나의 직선으로 표현할 수 있다. 즉 연료분출 유량의 증가에 따라 화염전파속도는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 연료분출유량비가 1에서 2.5로 2.5배 증가해도 화염전파속도는 1.220m/s 에서 1.272m/s 로 4.3% 증가하는 결과가 나왔다. 즉 연료유량이 250% 변해도 화염전파속도는 4.3%로 밖에 변하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

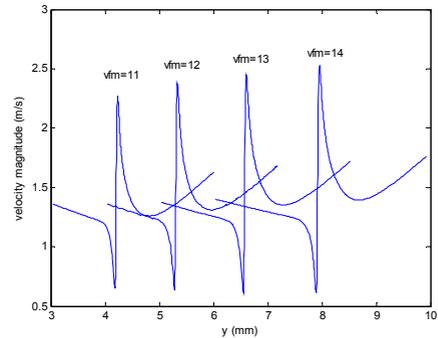
이로부터 분석해 보면 연료분출속도 증가는 연료량 증가인데 연료유량이 증가한 만큼 화염전파속도가 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 부상화염에서 연료유량 증가에 따라 화염전파속도가 충분히 증가하여 증가한 연료유량을 감당하지는 못하고 미소한 증가만 있는 것을 확인할 수 있다. 연료유량의 증가에 따라 증가한 연료유량은 다른 부분이 감당할 것으로 예측할 수 있으며 다음 절에서 부상화염에서 연료유량 증가에 따라 연소반응 특성에 대하여 살펴보기로 한다.

3.3 연료유량과 체적연소반응률의 상관관계

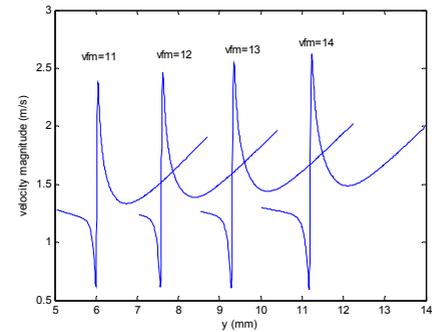
부상화염에서 연료유량의 증가에 따라 화염전파속도는 민감하게 변하지 않는다는 것을 알아보았다. 연료유량이 증가하면 화염전파속도가 증가하지 않는다면 증가한 만큼의 연료를 소화하기 위해서는 연소반응속도가 증가하거나 연소반응 영역이 증가하여야 한다. 연소반응속도가 증가하게 되면 화염전파속도가 증가하여야 하기 때문에 연소반응영역이 증가할 것이라는 것을 미리 추측할 수 있다.

3.1절에서 부상화염의 세 가지 연소영역을 구분하였는데 전방에서 흘러오는 연료가 연소하는 중심축 부근의 연소영역인 과농연소 영역과 삼지점에서 반경방향으로 바깥쪽 영역인 희박연소 영역 그리고

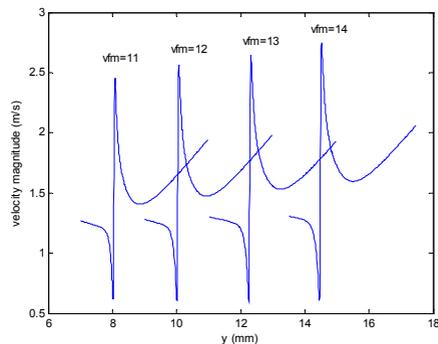
삼지점 윗부분인 확산연소 영역으로 구분할 수 있었다.



(a) $d=0.25\text{mm}$



(b) $d=0.3\text{mm}$



(c) $d=0.35\text{mm}$

Figure 3: Comparison of velocity profiles for the cases with the variation of fuel nozzle diameter and fuel injection velocity along the stoichiometric line. (a) $d=0.25\text{mm}$, (b) $d=0.30\text{mm}$, (c) $d=0.35\text{mm}$. The selected fuel injection velocities are 11, 12, 13, 14 m/s.

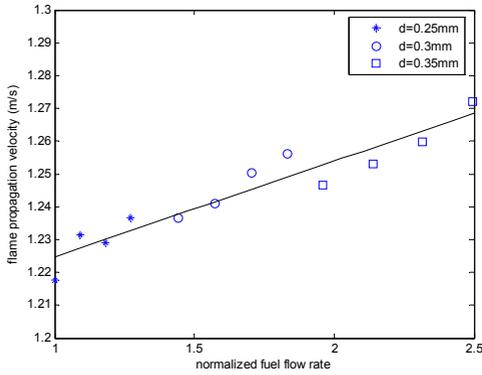


Figure 4: Flame propagation velocities with the variation of fuel injection velocity and fuel nozzle diameter.

Figure 2의 왼쪽그림인 연소반응률 분포의 등고선에서 살펴 볼 수 있듯이 과농영역에서 흰 부분은 연소반응률이 가장 크게 나타나는 영역이고 회박연소 영역에서는 연소반응률 크기가 작게 나타나며 그 영역도 다른 영역보다 작다. 또한 확산연소 영역을 살펴보면 과농영역 만큼의 연소반응률 크기는 나타나지 않지만 다른 영역에 비하여 넓은 영역을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 전방의 연료 노즐에서 나오는 연료는 과농 영역과 확산 영역에서 소화할 것이라고 예측할 수 있다. 이 절에서는 연료유량에 따른 각 영역에서 연소반응률을 체적으로 적분한 체적연소반응률의 상관관계를 살펴보기로 한다.

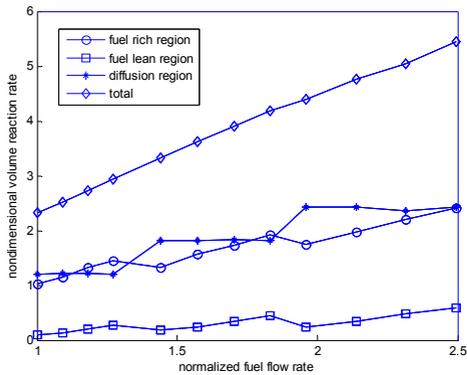


Figure 5: Nondimensional volume reaction rate with the variation of fuel injection velocity and fuel nozzle diameter.

부상화염이 중심선을 대칭축으로 하여 축대칭 형태로 되어 있기 때문에 체적연소반응속도는 Figure 2(a)에서 나타난 연소반응률에서 면적을 곱하고 난 뒤 그곳에서의 반경(x값)을 이용하여 원주길이 만큼 곱해서 구한다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Omega = \int_V 2\pi r \dot{\omega}_f dr dy \quad (8)$$

윗 식에서 Ω 는 체적연소반응률, $\dot{\omega}_f$ 은 연료의 연소반응률, r는 반경 방향 좌표, y는 흐름방향 좌표를 나타낸다. 이러한 체적연소반응률과 연료유량의 관계를 Figure 5에 나타내었다. 각 위치에서 체적연소반응률을 구한 후 세 가지 영역 각각의 전체 체적연소반응률을 적분하여 나타낸 것이다. 원형기호(o)는 연료과농영역의 체적연소반응률이고 사각기호(□)는 회박영역, 별기호(*)는 확산영역의 값을 나타낸다. 그리고 마름모(◇)는 세 가지 영역을 모두 합한 체적연소반응속도를 나타낸다. Figure 5에서 수평축은 Figure 4에서와 같이 직경 d=0.25mm, 연료분출속도 11m/s의 연료유량을 기준으로 다른 직경과 다른 연료분출속도에서의 연료유량의 비를 나타낸 것이다. 수직축은 식(8)로 정의된 체적연소반응률을 직경 d=0.25mm, 연료분출속도 11m/s 에서의 연료유량률($\rho \frac{\pi d^2}{4} v_{fm}$)로 나눈 값이다.

연료과농영역을 먼저 살펴보면, 왼쪽에서 4개의 결과 값은 d=0.25mm의 값이고 그 다음 4개의 값은 d=0.30mm, 오른쪽 4개의 값은 d=0.35mm에 해당하는 값이다. 각각의 직경에서 왼쪽으로부터 차례로 연료분출 속도가 11, 12, 13, 14 m/s의 경우이다. 연료과농영역의 무차원화한 체적연소반응률은 같은 연료노즐 직경인 경우 연료유량의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 연료노즐 직경이 변하면 다소 선형성이 변하지만 전체적으로 연료 유량이 증가하면 연료노즐 직경에 무관하게 과농영역의 체적연소반응률이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 노즐 직경 d=0.25mm인 경우 연료분출속도 11m/s일 때 무차원화한 체적연소반응률이

1.03인데 연료분출속도 14m/s인 경우에는 1.45로 된다. 연료유량이 27% 증가할 때 체적연소반응률은 47% 증가한 결과를 가져 온다. 직경이 가장 큰 $d=0.35\text{mm}$ 와 연료분출속도 14m/s일 때는 연료유량이 2.5배 증가하는데 이 때의 과농영역에서 체적연소반응률은 2.42배 증가하는 결과를 보여 주고 있다. 이러한 결과로부터 늘어난 연료량을 화염대에서 발생하는 체적 연소반응률이 잘 대응하고 있음을 보여주고 있다.

회박연소 영역에서의 체적반응률 특성을 살펴보면(□ 표시), 다른 영역에 비하여 체적연소반응률 크기가 작게 나타난다. 과농영역의 체적연소반응률 크기에 비하여 10%~20% 정도의 크기이다. 회박영역에서의 체적연소반응률의 연료유량에 대한 특성은 과농영역과 마찬가지로 선형적으로 증가하는 경향을 보여 주고 있다.

확산연소 영역의 경우(* 표시)는 연료노즐 직경이 같으면 연료분출속도가 증가하여도 체적 연소반응률은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 그러나 연료노즐 직경이 증가하면 체적연소반응률이 계단 형태로 증가하는 결과를 보여 주고 있다.

과농영역, 회박영역, 확산영역에서의 체적연소반응률을 합하면 전체 체적연소반응률이 되는데(◇ 표시) 이것의 특성을 살펴 보면, 세 가지 영역에서의 체적연소반응률 특성 보다 더욱 연료유량과의 관계가 선형적임을 보여 주고 있다. 즉 노즐 직경 $d=0.25\text{mm}$, 연료분출속도 11m/s(정규화한 연료유량 값 1)에서 무차원화한 전체 체적연소반응률이 2.33인데 노즐직경 0.35mm, 연료분출속도 14m/s(정규화한 연료유량 값 2.5)에서는 5.44의 값을 보영 주고 있다. 이는 연료유량이 2.5배 증가하면 체적연소반응률은 2.3배 증가하여 체적연소반응률은 연료유량에 선형적으로 직접적인 관계가 있음을 보여 주고 있다.

위의 결과로부터 체적연소반응률과 연료유량의 관계를 정리해 보면, 첫째로 과농영역의 체적연소반응률과 확산영역의 체적연소반응률이 전체 체적연소반응률에 거의 반 정도로 차지하고 있고 회박영역의 체적 연소반응률은 크기가 작아서 영향력이 작다. 둘째로 전체 체적연소반응률은 연료유량에

거의 선형적인 관계가 있고 과농 영역 또한 같은 양상을 보여 주고 있다. 확산영역의 경우는 다소 차이가 있는 경향을 보여 주고 있다. 셋째로 연료유량의 증가는 현격한 화염전파속도 증가를 유발하지 못하고 늘어난 연료유량은 체적연소반응률 증가가 대응한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

부상화염에서 연료유량과 연료노즐 직경의 변화에 따른 화염전파속도 변화특성과 체적연소반응속도 특성을 살펴보았으며 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.1 부상화염의 화염구조 및 이론당량비 등혼합분율 특성

부상화염의 경우 연료중심축에 가까운 곳인 연료과농 영역, 바깥 쪽은 연료 회박영역 그리고 위쪽의 확산영역으로 구성됨을 관찰 하였고 이 세 영역이 만나는 점이 삼지점이다. 화염면 전방에서 등혼합분율선을 따라 가면 삼지점과 만나게 된다. 등혼합분율선을 따라 유동속도 분포를 관찰하면 모든 연료분출속도와 노즐 직경에 대하여 삼지점 직전에서 급격히 유동속도가 감소하는 양상을 보여준다. 화염전파속도는 삼지점 직전에서 유동속도가 급격히 감소하기 전의 유동속도로 정하였다.

4.2 연료분출속도와 노즐 직경변화에 따른 부상화염의 화염전파속도 특성

연료분출속도와 연료직경의 변화를 연료유량으로 환산하여 연료유량의 변화에 따라 화염전파속도 변화를 분석하였다. 이 결과 연료유량이 250% 변해도 화염전파속도는 증가하기는 하지만 4.3% 밖에 변하지 않는 것을 알 수 있었다. 이로부터 연료량의 증가는 화염전파속도의 현격한 증가를 초래하지 않고 증가한 연료량은 다른 형태로 소화함을 알 수 있다.

4.3 연료유량과 체적연소반응률의 상관관계

부상화염에서 증가한 연료유량은 화염전파속도가 대응하지 않고 체적연소반응률이 감당함을 알았

다. 또한 전체 체적연소반응률은 연료유량에 거의 선형적인 관계가 있고 과농 영역 또한 같은 양상을 보임을 알 수 있었다.

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.*, vol. 111, pp. 16-31, 1997.
- [2] J.W. Dold, "Flame propagation in a nonuniform mixture: Analysis of a slowly varying triple flame", *Combust. Flame.*, vol. 76, pp. 71-88, 1989.
- [3] J. Boulanger, L. Vervisch, J. Reveillon, and S. Ghosal, "Effects of heat release in laminar diffusion flames lifted on round jets", *Combust. Flame.*, vol. 134, pp. 355 - 68, 2003.
- [4] 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 - 53, 1998.
- [5] H.G. Im, and J.H. Chen, "Structure and Propagation of Triple Flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures", *Combust. Flame.*, vol. 119, pp. 436 - 54, 1999.
- [6] H.G. Im, J.H. Chen, "Effects of flow strain on triple flame propagation", *Combust. Flame.*, vol. 126, pp. 1384 - 392, 2001.
- [7] R.D. Lockett, 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.*, vol. 119, pp. 109 - 20, 1999.
- [8] C.E. Frouzakis, A.G. Tomboulides, J. Lee, and K. Boulouchos, "From diffusion to premixed flames in an H_2/Air opposed-jet burner: The role of edge flames", *Combust. Flame.*, vol. 130, pp. 171 - 84, 2002.
- [9] Y.S. Ko, and S.H. Chung, "Propagation of Unsteady tribrachial flames in laminar non-premixed jets", *Combust. Flame.*, vol. 118, pp. 151 - 63, 1999.
- [10] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet", *Combust. Flame.*, vol. 86, pp. 62-72, 1991.
- [11] J. Lee, S.H. Won, S.H. Jin, S.H. Chung, O. Fujita, and K. Ito, "Propagation speed of tribrachial (triple) flame of propane in laminar jets under normal and micro gravity conditions", *Combust. Flame.*, vol. 134, pp. 411 - 20, 2003.
- [12] K.K. Kuo, *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [13] R.W. Bilger, Y.C. Chen, "Stabilization mechanism of lifted laminar flames in axisymmetric jet flows", *Combust. Flame.*, vol. 122, pp. 377-399, 2000.
- [14] J. S. Ha, T. K. Kim, and J. Park, "The characteristics of the flame propagation velocity and volume integral of reaction rate with the variation of fuel injection velocity for a liftoff flame", *J. of the Society of Marine Eng.*, vol. 33, no. 4, pp. 466-475, 2009.

저 자 소 개



하지수(河芝洙)

1960년 6월생 1983년 서울대학교 항공공학과졸업 학사. 1985년 한국과학기술원 항공공학과졸업 석사. 1991년 한국과학기술원 항공공학과졸업 박사. 1991년~2007년 현대중공업 엔진연구실 근무 2007~현재 계명대학교 에너지환경공학과 재직중



김태권(金兌權)

1957년8월생 1979년 경북대학교 기계공학과졸업 학사. 1981년 경북대학교 기계공학과졸업석사. 1992년 한국과학기술원 기계공학과졸업 박사 1995년~현재 계명대학교 기계자동차공학부 재직중.