

## 부상화염에서 연료유량에 따른 화염전파속도와 체적연소반응속도의 변화 특성에 관한 연구

하지수† · 김태권\* · 박 정\*\*

(원고접수일 : 2009년 2월 19일, 원고수정일 : 2009년 5월 1일, 심사완료일 : 2009년 5월 6일)

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

Ji-Soo Ha† · Tae-Kwon Kim\* and Jeung Park\*\*

**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 fuel injection velocity at the fuel rich region, fuel lean region and diffusion flame region. The increase of fuel injection velocity enhances flame propagation velocity, but its effect on the flame propagation velocity is not much greater under 4%. The increase of fuel injection velocity affects directly and linearly on the flame surface area in the fuel rich region and so enhances volume integral of reaction rate to accommodate the increment of fuel.

**Key words :** liftoff flame(부상높이), flame propagation velocity(화염전파속도), volume integral of reaction rate(체적연소반응속도), flame surface area(화염표면적)

#### 1. 서 론

일반적으로 연료노즐에서 분출된 연료는 공기와 만나서 제트확산화염을 형성한다. 연료분출속도가 증가되어 연료노즐에 부착된 화염이 노즐에서 분리되어 부상화염이 형성되면 연료노즐 분출 중심선 부근은 연료가 과농한 연소가 일어나고 중심선에서 떨어진 영역인 공기층은 연료가 희박한 연소가 일어난다. 연료가 과농한 영역에서 연소가 일어나고 난 뒤 남은 연료는 다시 공기와 확산 화염을 형성

하게 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. Mungal<sup>[1]</sup> 등은 실험을 통해 난류 부상화염에서의 삼지화염에 관하여 연구를 수행하였는데 형성된 삼지화염에 의해 화염이 안정화된다는 것이

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

\* 계명대학교 기계자동차공학부

\*\* 부경대학교 기계공학부

밝혀진 이래로 부상화염의 안정화 기구가 삼지화염을 규명하는 것이라는 것에 모두 초점을 맞추어 연구하여왔다.

Dold<sup>[2]</sup>는 삼지화염의 화염전파가 스칼라소산율에 의존하며, 최대 단일 층류화염 속도에 의해 관련됨을 보였다. Boulanger<sup>[3]</sup>는 삼지화염의 열방출효과에 대하여 연구하였고, Plessing<sup>[4]</sup> 등은 실험 및 수치해석을 통해 희석된 연료 분사와 주위 연료의 동축류(co-flow) 분사에 따른 선대칭 동축류 버너에서 삼지화염의 전파 및 구조에 대하여 연구하였고, Im과 Chen<sup>[5,6]</sup>은 부분 예혼합 수소/공기 혼합물 내에서의 삼지화염을 연구하였으며, 수치 모사로 삼지화염 전파 유동 변형(flow strain) 효과와 상세한 화학적 성질을 연구하였다. Lockett<sup>[7]</sup> 등은 실험적으로 층류 대향류(counterflow)에 따른 삼지화염의 안정성 및 구조를 조사하였고, Frouzakis<sup>[8]</sup>에 의해 대향제트(opposed jet)에 의해 생성된 삼지화염의 전파가 연구되었으며, Ko와 Chung<sup>[9,10]</sup> 그리고 Lee<sup>[11]</sup>는 실험적으로 층류 비예혼합 분사내 삼지화염의 전파 및 부상높이를 연구하였다. 최근에 Bilger<sup>[12]</sup>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.

본 연구에서는 기존의 연구들에서 부상화염의 화염안정화 기구를 규명하기 위해 비연소반응 유동장에서 수행하였던 화염전파속도 특성을 비연소반응이 아닌 실제 연소반응이 있는 유동장에서 살펴보았다. 우선 부상화염에서 화염형상이 어떠한지 그리고 등 혼합분율을 따라서 기체의 흐름이 어떠한지를 살펴보았다. 그리고 기존의 연구들에서 도출한 화염전파속도가 연료분출속도에 따라 어떻게 변하는지를 살펴보고 기존의 연구들에서 주장하고 있는 화염전파속도의 명확한 특성을 규명하였다. 기존의 연구결과와 달리 본 연구의 결

과에서는 연료분출속도 변화에 따라 화염전파속도의 변화가 거의 없음을 밝혔으며 연료분출속도의 증가에 따라 늘어난 연료량은 화염면이 증가하여 체적연소반응속도가 증가되어 대응하고 있음을 밝혀내었다.

## 2. 이론적 배경

부상화염의 화염전파속도와 체적연소반응속도에 관한 연구를 수행하기 위하여 본 연구에서는 수치해석을 수행하였으며 Fig. 1에 나타난 것과 같이 노즐중심에서 반경방향으로 30mm, 흐름방향으로 200mm 크기의 공간 영역 내에서 수행되었다. 그리고 연료노즐의 직경은 0.25mm이며 프로판을 연료로 사용하였고 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.<sup>[13]</sup>

Continuity:

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

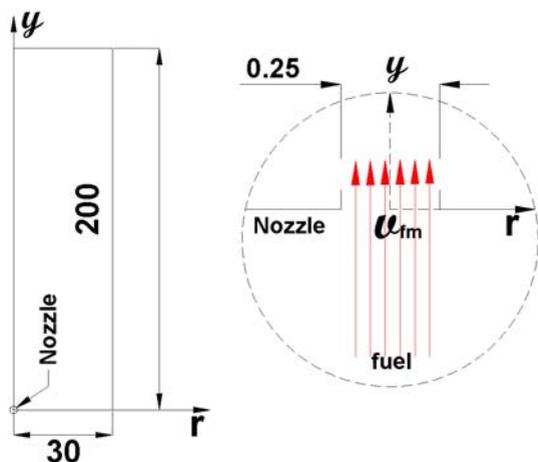


Fig. 1 Schematic of modelling(unit : mm)

Momentum:

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

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

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

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

Energy:

$$\rho C_p \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$= \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] - \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i h_i$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho T \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_i V_{ir} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho T \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_i V_{iz} \right)$$

Chemical species:

$$\rho \left( v_r \frac{\partial Y_i}{\partial r} + v_z \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho Y_i V_{ir}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_i V_{iz}) + \dot{\omega}_i$$

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  $\rho$ , 혼합물 열전도도  $\lambda$ , 일정 압력 아래서 혼합물의 열용량  $C_p$ , 일정 압력 아래서  $i$ -번째 화학종의 열용량  $C_{pi}$ ,  $i$ -번째 화학종의 단위 몰당 질량 생성률  $\dot{\omega}_i$ ,  $h_i$ 는  $i$ -번째 화학종의 엔탈피이다.  $g$ 는 수직 방향  $y$ 에서의 중력가속도이다.  $\mu$ 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 화

학종 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 프로판( $C_3H_8$ )이며 주위공기와 프로판의 온도는 상온( $10^\circ\text{C}$ )으로 하였다. 연료분출 속도는  $8\sim 14\text{m/s}$ 로 균일한 속도분포로 분출한다고 가정하여  $1\text{m/s}$  간격으로 계산을 수행 하였다. 연료분출 노즐에 인접한 공기 ( $x=0.25\sim 30\text{mm}$ ,  $y=0\text{mm}$ )와 왼쪽경계의 공기 ( $x=30\text{mm}$ ,  $y=0\sim 200\text{mm}$ ) 경계조건은 Neumann 조건(속도, 온도, 농도, 압력 모두 경계면에 수직방향으로 구배가 없다.)을 이용하였다. 후류 경계 ( $x=0\sim 30\text{mm}$ ,  $y=200\text{mm}$ )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 등혼합분율 특성

부상화염에서 화염전파속도 특성을 파악하는 것은 부상화염의 구조와 안정성에 매우 중요하다. 화염전파속도 특성을 파악하기 위하여 우선 부상화염에서 삼지화염 부근의 혼합분율 분포와 등혼합분율 특성을 Fig. 2에서 살펴보기로 한다. Fig. 2에서 점으로 나타나 있는 것은 이론당량비선에 해당하는 삼지화염의 화염면을 나타내고 있다.  $x=0$ 에 해당하는 중심선은 화염의 대칭선으로서  $x=0$ 을 중심

으로 같은 모양의 화염이 좌우로 존재하게 된다. 중심선에 가까이 있는 화염면은 연료 농도가 큰 연료과농 영역(fuel rich region)에 해당하고 그림의 가운데에 수직방향으로 있는 화염면은 삼지화염에서 확산화염에 해당한다. 확산화염과 과농화염이 만나는 곳에서 바깥쪽으로 있는 화염이 연료희박영역(fuel lean region)이다. 이 세 영역이 만나는 점이 삼지점(triple point)이다.

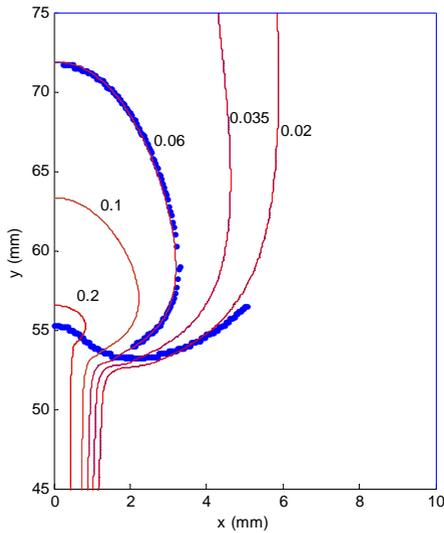


Fig. 2 Several iso lines of mixture fraction for the case of  $v_{fm}=12m/s$ .

이론당량비에 해당하는 혼합분율은 프로판 연료의 경우 0.06의 값이다. 그림에서 이론당량비 보다 큰 혼합분율, 즉 연료농도가 큰 혼합분율인 0.2, 0.1 값에 대한 것과 이론당량비인 0.06, 그 보다 낮은 값인 0.035, 0.02의 경우 5가지에 대한 등혼합분율선을 나타내었다. 이론당량비선을 따라서 화염 전방에서 화염면을 접근하다가 삼지점을 지나 확산화염에 해당하는 화염면을 지나게 된다. 혼합분율이 이론당량비 값 보다 작은 0.035와 0.02에서는 삼지점 바깥 영역을 지나게 되는데 화염대 전방에서 등혼합분율 곡선이 화염의 존재에 의해 많이 변곡되는 것을 관찰할 수 있다. 그림에서 살펴 보았듯이 부상화염은 과농화염, 희박화염, 확산화염의 세 가지 화염으로 구성되어 있으며 과농화염과 희박화염의 전방에서 화염의 존재에 의해 유동

과 농도장이 많이 변곡되는 것을 알 수 있다. 이러한 부상화염에 관해 기존의 연구에서 부상화염의 화염전파속도를 이론당량비선상 화염 전방 2mm 정도에서의 유동속도를 화염전파속도로 간주하였는데 본 연구에서는 이론당량비선상에서 뿐 만 아니라 과농영역과 희박영역, 확산영역의 화염 특성을 모두 검토하여 부상화염의 화염전파속도 특성을 재검토하기로 한다.

### 3.2 부상화염의 화염전파속도 특성

부상화염의 특징을 가장 잘 나타내는 것이 삼지화염이고 세 가지 화염이 한 곳에서 만나는 곳이 삼지점이다. 이 삼지점을 이론당량비선이 지나게 되는데 기존의 연구들<sup>[12]</sup>에서 이론 당량비선을 따라 삼지점 전방에서 부상화염의 화염전파속도로 정하였다. 그러나 부상화염은 과농화염, 희박화염, 확산화염으로 구성된 복잡한 화염으로서 단지 이론당량비선을 따라 선정한 한 점에서의 유동속도로 화염전파속도로 단정하기에는 부상화염 전체의 특성을 규정하기에는 부족하다고 판단된다. 따라서 과농영역, 희박영역, 확산영역의 유동속도 특성을 살펴봄으로써 부상화염의 화염전파속도 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 3에 혼합분율이 0.1, 0.06, 0.035인 경우 각각에 대한 등 혼합분율선을 따라서의 유동속도 분포를 나타내었다.

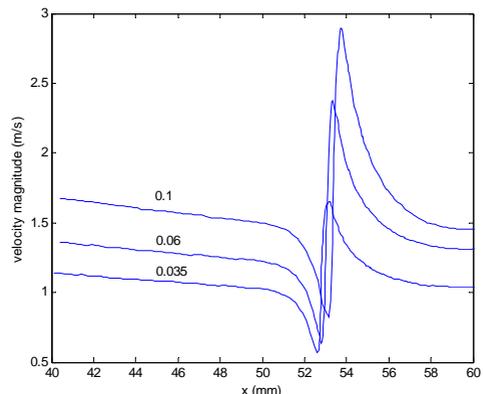


Fig. 3 The velocity magnitude along the constant mixture fractions,  $\xi=0.1, 0.06, 0.035$  for the case of  $v_{fm}=12m/s$ .

0.06인 경우에 이론당량비에 해당하고 0.1은 과농 영역, 0.035는 희박 영역에 해당한다. 이론당량비보다 큰 과농영역의 유동속도 분포를 보면 속도가 가장 작은 곳이 화염이 있는 곳으로 이곳의 속도가 층류 예혼합화염의 화염전파속도( $S_L$ )와 유사한 크기가 된다. 이곳의 전방에서 유동속도는 서서히 감소하다가 화염면 직전에서 화염의 존재에 의해 급격히 감소하다가 화염을 통과하고 난 뒤 곧 바로 급격히 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 이론당량비에 해당하는 혼합분율선이나 희박영역 혼합분율선에서의 유동속도 분포에서 모두 같은 경향을 가지고 있다. 세 부분에서 차이점은 과농영역의 속도가 전체적으로 가장 크고 희박영역의 유동속도가 가장 작게 나타나고 있다. 이는 원형제트 유동에서 중심선에서의 유동속도가 중심선에서 벗어난 곳 보다 큰 것과 같은 경향이다.

기존의 연구들에서 이론당량비선을 따라 화염면 직전에서 화염이 급격히 변하는 지점을 화염전파속도로 정하였는데 본 연구에서도 이와 유사하게 화염전파속도를 정하기로 한다. 그러나 다른 연구에서는 이론당량비선에서만 화염전파속도를 취하였

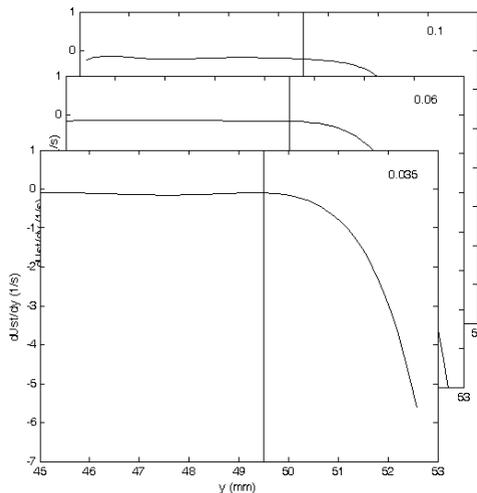


Fig. 4 The velocity gradient profiles along the iso mixture fraction lines,  $\xi=0.1, 0.06, 0.035$  for the case of  $v_{fm}=12\text{m/s}$ . The solid straight lines indicate the positions of flame propagation velocity.

으나 본 연구에서는 과농 영역, 확산영역, 희박영역 각각의 화염전파속도를 구하고 이것의 특성을 고찰하기로 한다.

Fig. 4에서 과농영역, 확산영역, 희박영역에서의 화염전파속도를 선정하는 방법을 보여 주고 있다.

수평축은 유동흐름 방향을 나타내고 수직축은 각 혼합분율에서의 유동속도 구배를 나타낸다. 화염전파속도는 화염면 전방에서 유동이 급격히 변하는 곳으로 선정하였는데 이렇게 선정하기 위하여 유동속도 구배를 구하여 이 값이 급격히 변하기 시작하는 곳을 화염전파속도를 구하는 곳으로 하였다. 이러한 방법으로 구한 화염전파속도를 연료유속의 변화에 따라 어떻게 변하는 가를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에는 연료유속 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14m/s에 대하여, 그리고 혼합분율 0.1, 0.06, 0.035에 대하여 구하여 비교하였다.

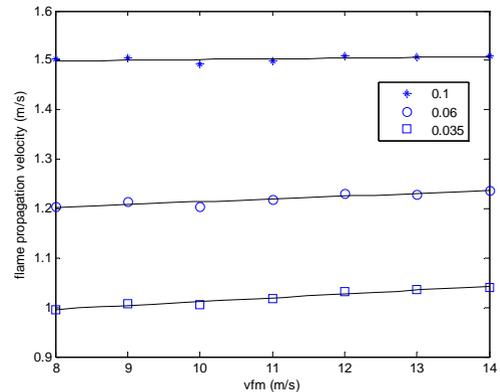


Fig. 5 The flame propagation velocity profiles with the variation of fuel injection velocity for  $\xi=0.1, 0.06$  and  $0.035$ .

우선 이론당량비선에서의 화염전파속도 결과를 살펴 보기로 한다. Fig. 5에서 원형 모양(o)으로 나타나 있는 결과이다. 연료분출 속도 8m/s인 경우 화염전파속도가 1.20m/s이고 연료분출속도가 9, 10, 11, 12, 13, 14m/s일 경우에는 각각 1.21, 1.21, 1.22, 1.23, 1.23, 1.24m/s로 나타났다. 연료분출속도가 8m/s일 때와 75% 증가한 14m/s일 때의 화염전파속도의 크기 변화는 약 3%정도 증가한 결과를 보여 주고 있다. 즉 연료분

출량을 변화시켜도 화염전파속도의 변화는 연료량에 민감하게 변하지 않고 약간의 증가만 나타남을 알 수 있다. 연료과농영역의 경우에서 살펴보면 연료분출 속도가 8에서 14m/s로 변할 때 화염전파속도는 1.50에서 1.51m/s로 변한다. 화염전파속도 변화율은 0.7%로서 이론당량비선에서의 결과보다 작게 나타나며 이러한 결과 또한 연료분출속도의 변화가 화염전파속도에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 연료희박영역의 경우를 살펴보면 연료분출속도 8m/s에서 14m/s로 변할 때 화염전파속도의 크기는 1.00m/s에서 1.04m/s로 약 4%의 증가를 보여 주고 있다.

위의 결과로부터 부상화염의 화염전파속도는 연료유량 또는 연료유속의 증가에 따라 민감하게 증가하지 않고 약간의 영향만 받는다는 것을 알 수 있다. 연료유량의 증가에 따라 증가한 만큼의 연료를 소화하기 위해서 부상화염의 어떠한 부분이 가장 지배적으로 변하는 것인지 다음에서 고찰하기로 한다.

### 3.3 부상화염의 체적연소반응속도 특성

부상화염에서 연료유량의 증가에 따라 화염전파속도는 민감하게 변하지 않는다는 것을 알아보았다. 연료유량이 증가하면 화염전파속도가 증가하지

않다면 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.

부상화염에서 연소반응 특성을 살펴보기 위하여 연료분출속도 8, 11, 14m/s인 경우를 대표적으로 하여 Fig. 6에 연소반응속도 분포를 나타내었다. (실험의 경우에도 동일한 노즐 조건 및 실험조건을 사용함.) 또한 동일한 조건에서 부상화염의 직접촬영 사진에서 밝기에 대한 역상사진을 함께 나타내었다.

그림에서 수평, 수직축은 각각 실제 x, y축을 나타낸다. 연소반응속도 분포는 부상화염에서 삼지점 부근을 자세히 나타낸 것인데  $x=0$ 에 근접한 영역이 연료과농영역이다. 삼지점을 벗어난 바깥 부분이 연료희박영역이고 삼지점에서 위쪽으로 이어진 영역이 확산화염영역이다. 계산 결과의 연소반응속도 분포에서 과농영역에서 밝게 흰색으로 나타나는 곳이 연소반응속도가 가장 큰 곳이고 사진에서도 진하게 나타난 곳이 밝기가 가장 큰 곳인데 계산한 결과에서 연소반응속도가 가장 큰 곳과 사진에서 가장 밝은 곳이 정성적으로 잘 일치하고 있음을 보여준다.

연료분출속도  $v_{fm}=8\text{m/s}$ 의 결과를 먼저 살펴보면 삼지점 부근에서 화학반응속도가 가장 크게 나타나며 화염의 중심 부분에서는 상대적으로 화학반응속도가 낮게 나타난다. 이는 사진에서도 가운데 부분에서 휘도가 낮게 나타나는 것으로 확인할 수 있다. 이것으로부터  $v_{fm}=8\text{m/s}$ 에서 나타나는 부상화염은 Bilger<sup>[12]</sup>의 논문에서 언급한 삼지화염 전파영역 (triple flame propagation)으로 간주할 수 있다. 이 영역에서는 Bilger에 의하면 화염전파속도는 스칼라소산율의 함수로서 스칼라소산율이 증가하면 화염전파속도가 감소한다고 되어 있다. 연료분출속도가 증가하면 화염전파속도를 선정하는 곳에서 스칼라소산율은 감소하게 되는데 본 연구에서는 스칼라소산율의 증감에 관계없이 부상화염의 화염전파속도는 거의 변화가 없음을 확인하였다. 연료분출속도 11m/s에서는 중심선에서 화학

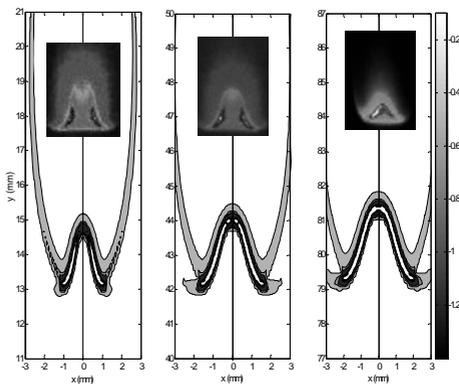


Fig. 6 The contour of reaction rate near triple point for the cases of  $v_{fm} = 8$ (a), 11(b) and 14m/s(c). The direct photographs of lift-off flame are displayed simultaneously with the same experimental condition.

반응속도가 8m/s일 때 보다 증가하여 양쪽이 연결 되려고 하고 있다. 실험을 통한 사진에서도 같은 현상을 관찰할 수 있다. 연료분출속도를 증가하여 14m/s에서는 양쪽의 삼지화염이 연결되어 있는 모습을 관찰할 수 있다. 이 영역을 화염면 전파영역(flame front propagation)이라고 볼 수 있는데 이 영역에서 연료분출속도가 증가하면 부상화염이 날라 가서 없어지게 된다. 따라서 본 연구에서 계산하거나 실험한 영역은 삼지화염 전파영역(triple flame propagation)과 화염면 전파영역(flame front propagation)에 걸쳐 있다고 판단할 수 있다.

삼지화염의 화염전파속도는 연료분출속도에 관계없이 거의 일정하게 나타나기 때문에 기존의 연구자들에서 언급하였던 화염전파속도와 스칼라소산율의 관계식은 부상화염에서 확연히 나타나지 않는다고 볼 수 있고 부상화염에서 화염전파속도의 변화특성 보다 연료분출속도 증가에 따라 연료량을 소화하기 위한 연소반응체적의 증감이 부상화염의 특징을 잘 나타낼 것으로 판단된다. 특히 삼지화염에서 연소반응속도가 큰 영역은 대부분 연료과농영역이다. 특히 삼지점 부근에서 가장 크고 삼지점까지 연소반응속도가 크게 나타나다가 연료희박영역에서는 그다지 크게 나타나지 않는다. 확산화염영역에서도 연소반응속도가 과농영역 만큼 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 연료과농영역, 희박영역,

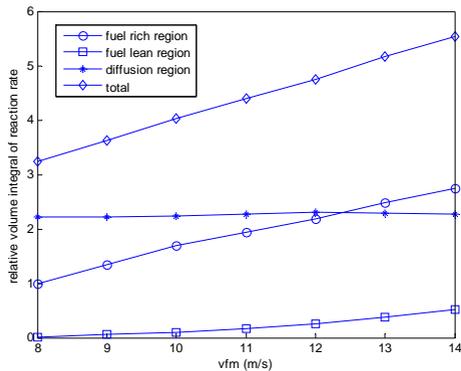


Fig. 7 The relative integral of reaction rates with the variation of fuel injection rate. The profile is divided into four parts, fuel rich, fuel lean, diffusion regions and total of them.

확산화염영역에서 각각 어느 정도 연소반응이 일어나는가를 Fig. 7에 나타내었다.

그림에서 수평축은 연료분출속도를 나타내고 수직축은 연료분출속도가 8m/s인 경우에 연료과농영역의 체적 연소반응속도 값을 기준으로 하여 각 경우의 체적연소반응속도를 이것으로 나눈 상대값을 나타내고 있다.

부상화염이 중심선을 대칭축으로 하여 확대칭 형태로 되어 있기 때문에 체적연소반응속도는 Fig. 6에서 나타난 연소반응속도에서 면적을 곱하고 난 뒤 그곳에서의 반경(x값)을 이용하여 원주길이 만큼 곱해서 구한다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Omega = \int_V 2\pi x \dot{\omega}_j dx dy \quad (8)$$

윗 식에서  $\Omega$ 는 체적연소반응속도,  $\dot{\omega}_j$ 은 연료의 연소반응속도,  $x$ 는 반경방향 좌표계에서 반경,  $y$ 는 흐름방향 좌표를 나타낸다. 각 위치에서 체적연소반응속도를 구한 후 세 가지 영역 각각의 전체 체적연소반응속도를 적분하여 나타낸 것이다. 원형기호( $\circ$ )는 연료과농영역의 체적연소반응속도이고 사각기호( $\square$ )는 희박영역, 별기호( $*$ )는 확산영역의 값을 나타낸다. 그리고 마름모( $\diamond$ )는 세 가지 영역을 모두 합한 체적연소반응속도를 나타낸다.

연료과농영역을 먼저 살펴보면 연료분출속도의 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 즉 연료분출속도가 8m/s에서 14m/s로 75% 증가하면 이 영역의 체적연소반응속도는 약 175% 증가하는 것으로 나타나는데 이는 체적연소반응속도가 연료량 또는 연료분출속도 증가에 가장 민감하게 연관되어 있음을 보여주고 있다.

희박영역의 경우에는 연료분출 속도가 8m/s 일 때 상대적인 체적연소반응속도는 0.02이며 연료분출속도가 14m/s일 때는 0.52로 나타났다. 이는 연료분출속도가 75% 증가할 때 2500% 증가한 값으로 연료분출속도 증가에 매우 민감하게 관계있음을 보여 주고 있다. 그러나 희박 연소 영역의 체적연소반응속도는 전체 체적연소반응속도의 0.5에서 10% 정도로 작은 값이기 때문에 전체에 미치는

영향을 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 확산영역의 결과를 살펴보면 연료분출속도의 변화에 따라 거의 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다.

이것으로부터 연료분출량이 증가하면 과농영역에서 증가한 만큼의 연료를 소화하는 것을 알 수 있고 나머지 희박영역이나 확산영역은 연료분출량의 변화에 민감하지 않거나 기여하는 정도가 적음을 알 수 있다. 따라서 부상화염에서 연소반응속도는 과농영역의 연소반응속도가 가장 지배적이기 때문에 이 영역의 체적 연소반응속도의 특성을 구체적으로 살펴보기로 한다.

연료분출량에 증가하면 연료가 증가한 만큼 연소반응속도가 증가하는 것이 아니라 연소가 일어나는 영역의 체적이 증가하여 증가한 연료량을 소화할 것이라고 미리 추측하였었다. 체적이 증가하려면 화염대의 두께가 증가하거나 화염면이 증가하여야 한다. 부상화염에서는 화염대의 두께가 증가하기보다 화염면이 증가하여 체적연소반응속도가 증가할 것으로 가정하여 체적연소반응속도와 화염면 면적의 관계를 비교하여 보기로 한다.

과농영역에서 화염면의 면적은 다음과 같이 구하였다. Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 삼지점전까지의 과농영역의 이론당량비선을 따라 각 지점에서 미소 길이와 그 지점에서 반경을 이용한 원주길이를 곱한 후 적분한 값을 구하여 화염면을 구하였다. 즉, 과농영역의 화염면을  $y=f(x)$ 로 표현하면 과농영역의 화염면 면적( $A_f$ )은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_f = \int_0^{x_{fp}} 2\pi x \sqrt{1+f'(x)^2} dx \quad (9)$$

Fig. 8에서 연료분출속도에 따라 연료과농영역에서 체적연소반응속도와 화염면 면적과의 관계를 나타내었다. 원형기호(o)는 화염면 면적을 나타내고 사각기호(□)는 체적연소반응속도를 나타낸다. 두 가지 값들은 연료분출속도 8m/s에서의 값으로 나눈 상대적 값을 그림에 표현하였다. 그래서 연료분출속도가 8m/s인 경우의 값이 1이 되게 하였다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 연료분출속도에 따라 체적연소반응속도는 화염면 면적에 거의 선형적

으로 비례함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 체적연소반응속도는 화염면 면적에 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Omega \sim A_f \quad (10)$$

따라서 부상화염에서 연료유량의 증가는 화염전파속도의 증가를 유발하지만 화염전파속도 증가에 미치는 영향은 그다지 크지 않고 과농영역의 화염면이 선형적으로 증가되어 체적연소반응속도를 증가시킨다는 사실을 알 수 있다.

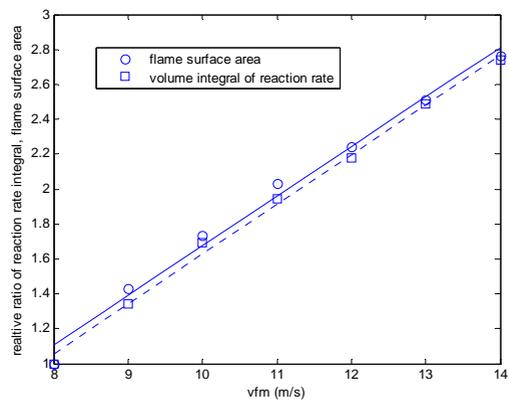


Fig. 8 The relation of the relative volume integral of reaction rate and flame surface area for the fuel rich region.

## 4. 결 론

부상화염에서 연료유량의 변화에 따른 화염전파속도 변화특성과 체적연소반응속도 특성을 살펴보았으며 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

### 4.1 부상화염의 등혼합분율 특성

프로판의 경우 이론당량비에 해당하는 혼합분율은 0.06이다. 이론 당량비 혼합분율을 따른 등 혼합분율선은 삼지점을 지나 확산화염과 일치하는 선을 따르게 된다. 혼합분율이 0.06 보다 큰 값은 연료노즐에서 나와서 연료과농영역의 화염면을 지나 중심선과 마주치게 된다. 0.06보다 작은 값은 연료희박영역 화염면을 지나는 것을 관찰할 수 있었다.

또한 등혼합분율선은 화염면 직전에 화염의 존재에 의해 급격히 변곡되는 것을 관찰할 수 있었다.

#### 4.2 부상화염의 화염전파속도 특성

부상화염에서 연료분출속도 증가에 따라 화염전파속도의 변화를 살펴 본 결과 연료과농영역에서는 연료분출속도가 75% 증가해도 화염전파속도가 3% 증가하고 확산화염영역과 희박화염 영역에서는 4% 정도 증가하였다. 따라서 연료분출속도의 증가는 화염전파속도 증가에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

#### 4.3 부상화염의 체적연소반응속도 특성

부상화염에서 연료분출속도가 증가하면 연료분출량이 증가하는데 이에 따라 화염전파속도가 증가하는 것은 그다지 크지 않았다. 연료분출량이 증가하면 연료과농영역에서의 화염면 면적이 증가하여 체적연소반응속도가 커져서 늘어난 연료량을 소화하는 것을 알았다. 확산화염 영역의 체적연소반응속도는 연료분출속도 증가에 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 가지는 것을 관찰하였다. 연료희박영역은 연료분출속도 증가에 따라 크게 증가하지만 그곳에서의 체적연소반응속도 크기는 다른 영역에 비하여 작다. 따라서 연료분출속도 증가에 따라 부상화염은 연료과농영역의 화염면 면적이 증가되어 체적연소반응속도를 크게 함으로써 늘어난 연료량을 소화한다는 것을 알았다.

### 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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] R.W. Bilger, Y.C. Chen, "Stabilization mechanism of lifted laminar flames in axisymmetric jet flows", Combust. Flame., Vol. 122, pp. 377-399, 2000.
- [13] K.K. Kuo, Principles of Combustion, John Wiley & Sons, New York, 1993.



#### 박 정(朴廷)

1964년10월생 1987년 서울대학교 기계공학과졸업 학사. 1990년 한국과학기술원 기계공학과졸업 석사. 1995년 한국과학기술원 기계공학과졸업 박사. 2000년~2006년 순천대학교 교수. 2007년~현재 부경대학교 기계공학부 재직중

### 저 자 소 개



#### 하지수(河芝洙)

1960년6월생 1983년 서울대학교 항공공학과졸업 학사. 1985년 한국과학기술원 항공공학과졸업 석사. 1991년 한국과학기술원 항공공학과졸업 박사. 1991년~2006 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.