



부상화염에서 화염전파속도에 따른 스칼라소산율과 곡률반경에 대한 수치적 연구

†하지수 · 김태권* · 박 정** · 김경호***

계명대학교 에너지환경과학과, *계명대학교 기계자동차공학부,
부경대학교 기계공학부, *계명대학교 물리학과
(2010년 5월 12일 접수, 2010년 6월 28일 수정 2010년 6월 28일 채택)

A Numerical Study for the Scalar Dissipation Rate and the Flame Curvature with Flame Propagation Velocity in a Lifted Flame

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

Energy and Environmental Science, Keimyung University
**School of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University*
***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University*
****Department of Physics, Keimyung University*
(Received 12. May. 2010, Revised 28. June. 2010, Accepted 28. June. 2010)

요 약

삼지화염의 화염안정화 메커니즘 중 중요한 한 가지는 화염전파속도이다. 화염전파속도의 정량적인 규명을 위해 Bilger는 층류 유동이론에 근거하여 혼합분율 기울기에 비선형적으로 연관된 삼지화염전파속도를 제시하였다. 그러나 지금까지의 연구에서는 화염의 곡률 반경과 스칼라소산율에 따른 삼지화염 전파속도에 관하여 논의된 바가 없으며, 본 논문에서는 수치해석을 통해 화염전파속도에 따른 화염의 곡률반경과 스칼라소산율의 관계를 살펴보았다. 본 논문의 결과로 연료의 노즐 출구속도에 따라 화염전파속도가 거의 선형적으로 변화됨을 알 수 있었다. 또 화염전파속도에 따라 스칼라소산율은 비선형적인 감소를 보였으며, 곡률반경은 거의 선형적인 변화를 보임을 알 수 있었다. 또 스칼라소산율에 따른 곡률 반경의 경우 비선형적인 감소를 보였다. 따라서 화염전파속도와 스칼라소산율 및 화염의 곡률반경 사이에 직접적인 연관성이 있는 것을 확인하였다.

Abstract - Flame propagation velocity is the one of the main mechanism of the stabilization of triple flame. To quantify the triple flame propagation velocity, Bilger presents the triple flame propagation velocity, depending on the mixture fraction gradient, based on the laminar jet flow theory. However, in spite of these many analyses, there has not been any attempt to quantify the triple flame propagation velocity with the flame radius of curvature and scalar dissipation rate. In the present research, there was discussion about the radius of flame curvature and scalar dissipation rate, through the numerical study. As a result, we have known that the flame propagation velocity was linear with the nozzle exit velocity and scalar dissipation rate decreases nonlinearly with the flame propagation velocity and radius of curvature of flame increases linearly. Also radius of curvature of flame decreases non-linearly with the scalar dissipation rate. Therefore, we ascertained that there was correlation among the scalar dissipation rate, radius of flame curvature and flame propagation velocity.

Key words : triple flame, flame propagation velocity, radius of flame curvature

†주저자:jisooaha@kmu.ac.kr

1. 서론

화염 안정화(flame stabilization)는 화염이 노즐에 부착 또는 부상된 상태에서 안정된 상태를 유지할 수 있는나로 판단되며, 특히 액체 로켓 및 항공기 엔진 그리고 산업용 버너 등의 연소기 설계사양을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 그러나 부상된 화염의 경우 불안전 연소 발생, 점화의 어려움, 소음의 원인 및 열전달 불량 등으로 실용버너에서는 바람직하지 않은 것으로 알려져 있으나[1], 앞에서 언급된 연소 상황에서는 화염으로부터 인젝터 면을 보호하기 위해 화염을 부상시키게 된다. 특히 액체 로켓엔진의 경우 예혼합연소와 확산연소 둘 다 로켓 엔진의 연소에 중요한 역할을 하며, 부분 예혼합 연소로 인해 전형적인 삼지화염(triple flame)의 특징을 보이게 된다.

삼지화염 혹은 에지화염(edge flame)은 부분예혼합 연소에서 나타나며 과농예혼합화염과 희박 예혼합 화염이 만나는 삼중점(triple point)에서 확산화염(diffusion flame)이 하류쪽으로 분포하는 구조로 되어있다. 확산화염의 경우 당량혼합비를 따라서 전파하게 된다. 화염전파속도(flame propagation velocity)로 정의되는 삼중점의 화염전파속도는 미연가스(unburned gas) 쪽으로 전파하는 점화파(ignition wave)의 양의 속도와 기연가스(burned gas)쪽으로 전파하는 실패파(failure wave)의 음의 값을 가질 수 있다.

삼지화염은 Phillips[2]에 의해 메탄/공기 혼합층에서 화염전파에 관한 실험을 통해 발견되었으며, Mungal[3] 등에 의해 CH- PLIF와 PIV 가시화를 통하여 난류 부상화염에서 조차 삼지화염이 형성되어 안정화된다는 것이 밝혀진 이래로 부상화염의 안정화 기구가 삼지화염이라는 것에 초점을 맞추어 연구되어 왔다.

Dold[4]는 삼지화염 전파 속도가 혼합분을 구배에 의존하며, 최대 단일 층류화염 속도에 의해 구속됨을 보였다. 삼지화염의 열방출효과에 대하여 Boulanger[5]가 연구하였고, Plessing[6]등은 실험 및 수치적으로 희석된 연료 분사와 주위 연료의 동축류(co-flow) 분사에 따른 선대칭 동축류 버너에서 삼지화염의 전파 및 구조에 대하여 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, Frouzakis[10]에 의해 대향제트(opposed jet)에 의해 생성된 삼지화염의 전파가 연구

되었으며, Ko와 Chung[11,12] 및 Lee[13]는 실험적으로 층류 비예혼합 분사내 삼지화염의 전파 및 부상높이를 연구하였다. 그리고 Bilger[14]는 기존의 연구들을 바탕으로 축대칭 분사 유동에서 층류 부상 프로판 화염의 안정화 메커니즘에 관하여 연구하였으며, 삼지화염 전파속도를 정량화하여 삼지화염 전파 속도에 대한 경험식을 제시하는 등 화염 안정화 및 날림 기준에 관하여 유도하고 난류 분사에서의 화염안정화에 대한 암시도 논의 하였다. Bilger의 경험식은 미연영역과 기연영역의 밀도비와 혼합분율의 기율기로 결정되는 스칼라소산율(scalar dissipation rate)에 관계되어 정의된다. 그러나 실제 부상화염의 안정화 메커니즘과 관련된 삼지화염 전파속도는 밀도비와 스칼라소산율 뿐만 아니라 화염의 혼합강도, 스트레치(stretch), 곡률(curvature), 루이스수(Lewis Number), 열손실 등의 함수이다.

그러나 지금까지의 연구에서는 화염의 곡률 반경과 스칼라소산율에 따른 삼지화염 전파속도에 관하여 제시된 바가 없었으며, 본 논문에서는 수치해석을 통해 화염의 화염전파속도에 따른 화염의 곡률반경과 스칼라소산율의 관계 및 노즐 직경에 따른 화염 전파속도, 곡률반경 및 스칼라소산율의 관계성에 대하여 논의하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 삼지화염

Phillips에 의해 발견된 삼지화염은 메탄/공기의 혼합층에서 화염 전파에 관한 실험을 통해 발견되었다. 연료와 산화제를 구분하여 분사시키고, 점화원을 통해 점화할 때에 화염이 그림과 같이 전파하게 된다. 과농예혼합화염과 희박 예혼합 화염이 만나는 삼중점(triple point)에서 확산화염(diffusion flame)이 하류쪽으로 분포하는 구조를 가진 삼지화염은 이론당량비선(stoichiometric line)을 따라서 화염이 전파하며 삼중점의 전파속도를 화염전파속도로 정의하고 있다. Fig. 1과 2에 삼지화염의 개념도 및 이론당량비선과 삼중점을 표시하였다.

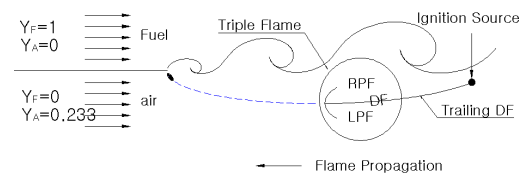


Fig. 1. Concept of triple flame.

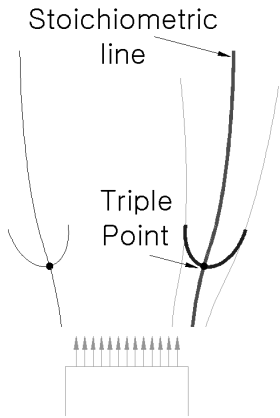


Fig. 2. Stoichiometric line and triple point.

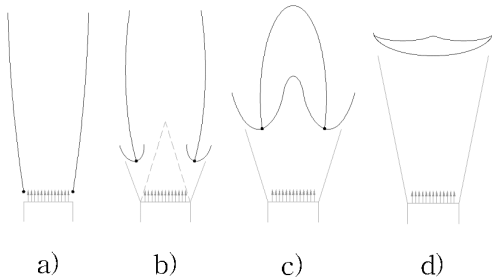


Fig. 3. Schematic diagram of classification of flame contour.

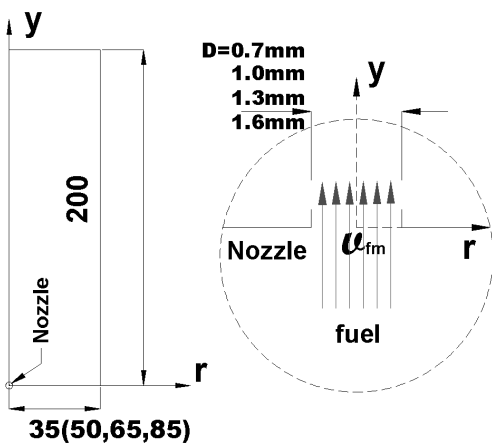


Fig. 4. Schematic diagram of modelling (unit : mm)

2. Bilger의 화염 구분

Bilger에 의해 제안된 축대칭 층류부상화염의 안정화 메커니즘은 ‘에지화염 소화(edge flame extinction)’, ‘삼지화염 전파(triple flame propagation)’, ‘화염면 전파(flame front propagation)’, ‘날림한계(blow-out criterion)’로 구분되어진다. Fig. 3에 Bilger에 의해 제안된 화염구분을 나타내었다. 에지화염 및 화염의 날림의 경우에는 많은 연구자(참고문헌)들에 의해 연구되었으며, 특별히 화염이 안정되면 삼지화염 구조가 나타나며, Bilger는 삼지화염에 있어서 삼지화염 전파 및 화염면 전파로 세분화하여 구분하고 있다. Bilger는 삼지화염 전파 메커니즘은 중심에서의 연료의 혼합분율(ξ_{CL})이 과농한 영역의 혼합분율(ξ_{rich})보다 큰 경우로 정의한다. 삼지화염 전파의 경우 화염 안정화는 삼지화염 전파속도 U_p 가 상류 쪽 이론당량비 유동속도 U_{st} 보다 작아야 하며, 양의 화염속력(positive flame speed)가 이 영역에서 안정된 부상화염에 영향을 준다. 화염면 전파 메커니즘의 경우 화염의 하류쪽 영역에서 중심에서의 연료의 혼합분율이 과농 영역의 혼합분율보다 작은 경우에 나타난다. 이때의 화염전파속도 U_p 는 $\xi_{CL} = \xi_{rich}$ 인 곳에서의 값으로 추정될 수 있으며, 이 한계를 넘어서서는 삼지화염의 열 방출이 예혼합 화염면을 따라 전체 혼합분율분포에 의존하게 된다. 그리고 화염날림한계는 삼지화염구조가 깨어질 때 나타나며, 삼지화염전파속도가 층류화염전파속도 보다 크게 되는 곳에서 나타난다.

III. 수치해석

수치해석을 위해 사용된 노즐 직경은 0.7, 1.0, 1.3, 1.6mm이며, 각 노즐에 따른 계산 영역은 세로 길이 200mm에 가로길이 35, 50, 65, 85mm에서 각각 계산되었다. 수치해석에 사용된 계산영역을 Fig. 4에 나타내었다.

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.¹⁵⁾

Continuity:

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

Momentum:

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

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

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 $i=1,2,\dots,\dots,\dot{i}$

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

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

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_{π} , 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 \dot{i} 는 전체 화학종 수이다.

2.2 경계조건 및 물성치 계산

본 연구에서 사용한 연료는 프로판(C_3H_8)에 헬륨을 50% 희석하였으며, 주위공기와 프로판의 온도는 상온(20°C)으로 하였다. 연료분출 속도는 노

즐 직경 0.7mm의 경우 5~8m/s, 1.0mm의 경우 4~8m/s, 1.3mm의 경우 3~6m/s로 균일한 속도분포로 분출시켰으며, 1m/s 간격으로 계산을 수행하였다. 그리고 1.6mm의 경우 3.0~4.5m/s로 0.5m/s의 간격으로 계산을 수행하였다. 연료분출 노즐에 인접한 공기($y=0$, $r=0.25\sim35, 50, 65, 80$ mm)와 상단경계의 공기($y=0\sim200$ mm, $r=35, 50, 65, 85$ mm)의 경계 조건은 Neumann 조건(속도, 온도, 농도, 압력 모두 경계면에 수직방향으로 구배가 없다.)을 이용하였다. 후류 경계($y=200$ mm, $r=0\sim35, 50, 65, 85$ 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 1단계 화학반응의 한계 반응 속도이론(Finite reaction rate theory)을 적용하였다.

IV. 결과 및 고찰

상용 Fluent를 이용하여 수치해석 한 본 연구에서는 기존 연구에서 층류부상화염의 부상높이를 통하여 검증¹⁶⁾ 되었던 Fluent의 타당성에 근거하여 수치해석 연구를 수행 하였다. 또 앞에서 언급되었던 Bilger의 화염 구분에 있어서 삼지화염 전파는 Fig. 3 b)의 경우로 한정하며, 삼지화염에 대한 결과 역시 Fig. 3 b)의 경우로 한정한다.

4.1 화염전파속도와 스칼라소산율

이론당량비선을 따른 화염전파속도와 스칼라소산율을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 이론당량비선을 따라서 화염전파속도와 스칼라소산율이 변화를 보이다가 화염대의 삼지점을 지나면서 급격한 변화를 보인다. 특별히 이 삼지점에서의 화염전파속도와 스칼라소산율을 구하고 그때의 값을 화염의 화염전파속도 및 스칼라소산율로 정의한다.

4.2 곡률반경 측정

Bilger의 경우 화염안정화에 따른 안정도를 표현하기 위해 화염 전파속도를 언급하였으며, 그에 따라 혼합장과 관련된 스칼라소산율(χ)로 화염안정화 메커니즘을 표현하고자 하였다.[14]

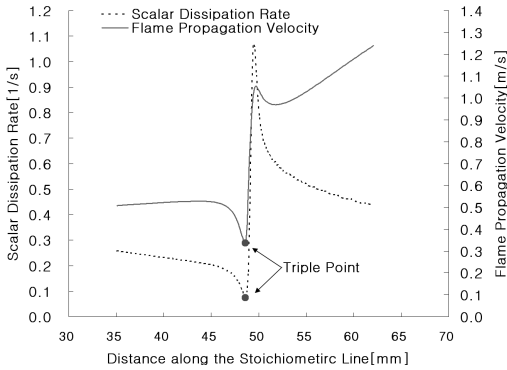


Fig. 5. Flame propagation velocity and scalar dissipation rate along the stoichiometric line.

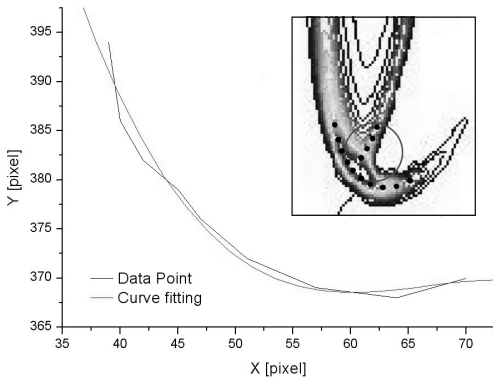


Fig. 6. Data point along the curvature of flame (right top) and curve fitting of data point.

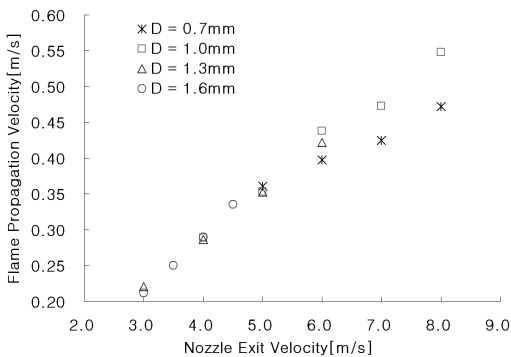


Fig. 7. Flame propagation velocity with nozzle exit velocity.

그러나 실제 화염 스트레치를 분석하면 삼지점의 화염전파속도와 변위속도로 표현되고 또 화염의 곡률반경과 밀접한 관련을 가지고 있음을 알 수 있다. 곡률반경을 측정하기 위해 Fluent에서 수치해석된 화염의 반응율(reaction rate)의 이미지를 얻을 수 있었다. 그래픽 프로그램을 이용하여 삼지점을 기준으로 픽셀의 좌표값(x, y)을 얻고, 측정된 좌표값을 이용하여 커브피팅(curve fitting) 하였으며 Fig.6에 나타내었다.

Fig. 6의 우측 상단에는 커브피팅한 그래프와 함께 그래픽 프로그램에서 삼지점을 기준으로 측정된 측정포인트에 의해 계산된 원의 이미지도 나타내었다. 곡률반경은 식(8)을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{1}{R_{cur}} = \frac{\nabla \cdot (\nabla f)}{|\nabla f|} \quad (8)$$

오차를 줄이기 위해 3차함수를 이용하였으며, 곡률반경 식에 따라 도함수를 구한 후 곡률반경을 계산하여 단위 픽셀당 길이를 곱하면 실제 곡률반경의 반지름을 얻을 수 있다. f는 삼지화염의 예혼합가스에 대한 3차 함수이다.

4.3 화염전파속도 및 스칼라소산율과 곡률반경의 관계

노즐 출구속도에 따른 화염전파속도에 관하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 화염전파속도가 연료의 노즐 출구속도에 비례하여 변화됨을 알 수 있다. 이는 출구속도가 커지면 연료의 유동속도가 커지게 되며, 안정된 상태에서(steady state) 정지화염으로 가정할 경우 연료의 유동속도가 화염전파속도에 상응하기에 화염전파속도가 연료의 출구속도에 비례하여 변화되는 것으로 판단된다.

화염전파속도에 따른 삼지점에서의 곡률반경과 스칼라소산율을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 8과 9에서 알 수 있는 것은 스칼라소산율의 경우 대부분의 노즐에서 화염전파속도에 반비례하는 경향을 보임을 알 수 있다. 또 곡률반경의 경우 전반적으로 화염전파속도에 비례하여 나타남을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10에 유사한 화염전파속도(0.336~0.361m/s)에서 노즐 직경에 따른 스칼라소산율과 화염의 곡률반경을 나타내었다. Fig. 10에서 알 수 있는 것은 화염전파속도가 유사할 경우 노즐 직경에 따라서 곡률반경은 증가하고 스칼라소산율은 감소하는 경향을 보인다는 것이다.

스칼라소산율에 따른 화염전파속도와 화염의 곡률반경을 Fig. 11과 12에 나타내었다.

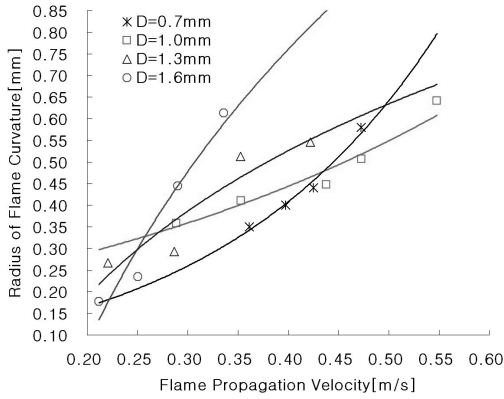


Fig. 8. Radius of flame curvature with the flame propagation velocity.

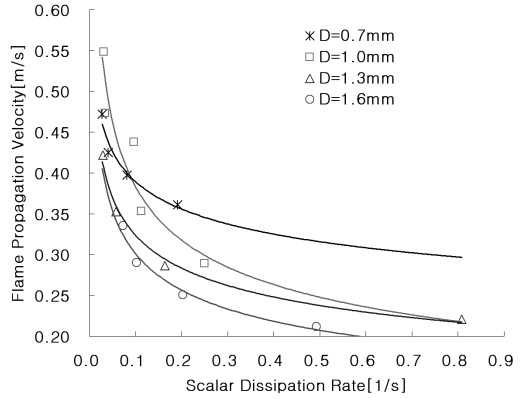


Fig. 11. Flame propagation velocity with scalar dissipation rate

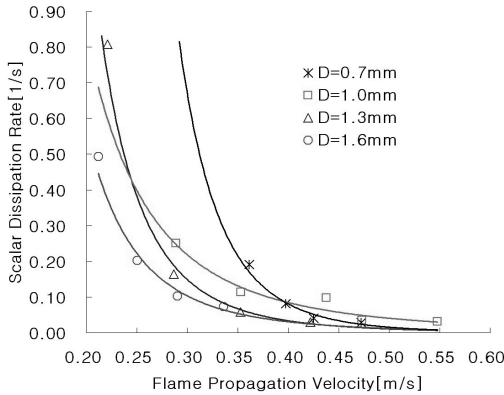


Fig. 9. Scalar dissipation rate with the flame propagation velocity.

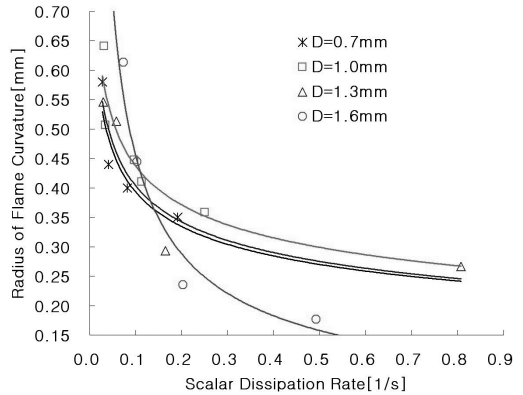


Fig. 12. Radius of flame curvature with scalar dissipation rate.

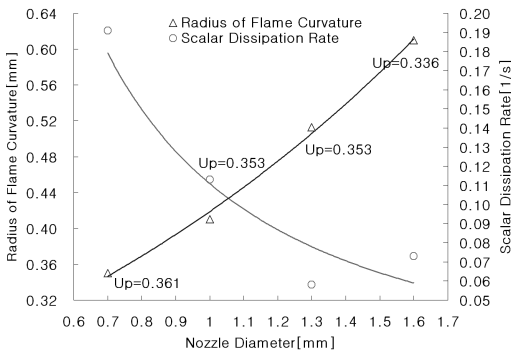


Fig. 10. Radius of flame curvature and scalar dissipation rate with nozzle diameter at similar flame propagation velocity.

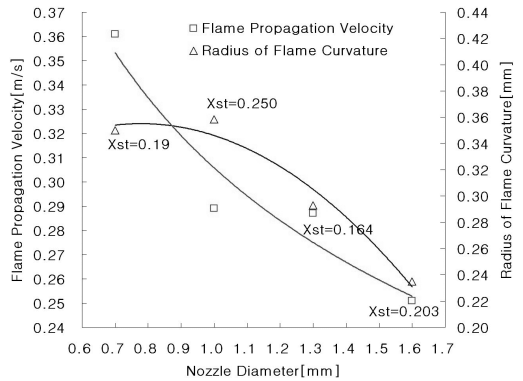


Fig. 13. Flame propagation velocity and Radius of flame curvature with nozzle diameter at similar scalar dissipation rate.

Fig. 11의 경우 화염전파속도가 스칼라소산율에 비선형적으로 반비례하는 경향을 보임을 알 수 있다. 또 Fig. 12에 나타난 스칼라소산율에 따른 곡률반경의 경우 역시 비선형적으로 반비례하는 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나 분명한 것은 스칼라소산율이 화염의 곡률반경과 화염전파속도에 대하여 비선형적인 반비례경향을 보인다는 것이다. 그리고 유사한 스칼라소산율(0.164~0.203)에서 노즐 직경에 따른 화염전파속도와 곡률반경을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 스칼라소산율이 비슷한 경우 노즐 직경에 따라서 화염전파속도와 곡률반경이 거의 선형적으로 감소한다는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 13을 통하여 곡률반경과 화염전파속도가 거의 비슷한 경향을 보이면서 비례관계 있음을 유추해 볼 수 있다. 따라서 화염전파속도와 직접적인 관계를 가지고 있었던 스칼라소산율에 대하여 뿐만 아니라 곡률반경 역시 직접적인 관계가 있으며, 스칼라소산율과 곡률반경 역시 직접적인 관계가 있는 것을 확인하였다.

V. 결 론

층류 부상화염에서 화염전파속도에 따른 스칼라소산율과 곡률반경에 대한 수치적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 정지상태(steady state) 부상화염의 경우 삼지 화염의 전파속도와 연료의 유동속도가 같으며, 따라서 유동속도는 연료의 출구속도에 비례하기에 연료의 노즐 출구속도에 따른 화염전파속도가 거의 선형적으로 변화됨을 알 수 있었다.

(2) 삼지점에서의 화염전파속도 및 스칼라소산율을 이용하여 화염전파속도에 따른 스칼라소산율과 곡률반경의 관계를 규명할 수 있었다. 스칼라소산율의 경우 화염전파속도에 비선형적인 감소를 보임을 알 수 있었으며, 곡률반경의 경우 거의 선형적인 변화를 보임을 알 수 있었다. 그리고 화염전파속도가 유사한 경우 노즐 직경에 따라서 곡률반경은 증가하고 스칼라소산율은 감소함을 알 수 있었다.

(3) 스칼라소산율에 따른 곡률 반경의 변화는 비선형적인 감소를 보임을 알 수 있었다. 그리고 유사한 스칼라소산율일 때에 노즐 직경에 따른 화염전파속도와 곡률반경의 경우 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있었다.

이상과 같은 결론을 통하여 화염안정화 메커니즘에 직접적인 연관을 가지는 화염전파속도와 스칼라소산율 및 화염의 곡률반경이 서로가 직접적인 연관성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부-한국산업기술평가원 지정 계명대학교 저공해 자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] Stephen R. Turns, An Introduction to Combustion 2nd, McGraw-Hill, (2000)
- [2] H. Phillips. Combust. Inst. 10, 1277-1283, (1965)
- [3] L. Muñiz, M. G. Mungal, Combust. Flame., 111, 16-31, (1997)
- [4] J.W. Dold, Combust. Flame., 76, 71-88, (1989)
- [5] J. Boulanger, L. Vervisch, J. Reveillon, S. Ghosal, Combust. Flame., 134, 355-68, (2003)
- [6] T. Plessing, P. Terhoeven, N. Peters, M.S. Mansour, Combust. Flame., 115, 335-53, (1998)
- [7] H.G. Im, J.H. Chen, Combust. Flame., 119, 436-54, (1999)
- [8] H.G. Im, J.H. Chen, Combust. Flame 126, 1384-392, (2001)
- [9] R.D. Lockett, B. Boulanger, S.C. Harding, D.A. Greenhalgh, Combust. Flame., 119, 109-20, (1999)
- [10] C.E. Frouzakis, A.G. Tomboulides, J. Lee, K. Boulouchos, Combust. Flame., 130, 171-84, (2002)
- [11] Y.S. Ko, S.H. Chung, Combust. Flame., 118, 151-63, (1999)
- [12] Chung, S. H. and Lee, B. J., Combust. Flame., 86, 62-72, (1991)
- [13] J. Lee, S.H. Won, S.H. Jin, S.H. Chung, O. Fujita, K. Ito, Combust. Flame., 134, 411-20, (2003)
- [14] R.W. Bilger, Y.C. Chen, Combust. Flame, 122, 377-399. (2000)
- [15] K.K. Kuo, Principles of Combustion, John Wiley & Sons, New York, (1993)
- [16] J.S. Ha, T.K. Kim, J. Park, KIGAS, 12, 1-8, (2008)