



부상화염에서 화염 곡률반경 특성에 관한 연구

†하지수 · 김태권* · 박 정** · 김경호***

계명대학교 에너지환경과학과, *계명대학교 기계자동차공학부

부경대학교 기계공학부, *계명대학교 물리학과

(2009년 11월 30일 접수, 2010년 4월 29일 수정, 2010년 4월 29일 채택)

A Study on the Flame Curvature Characteristics 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 30. November. 2009, Revised 29. April. 2010, Accepted 29. April. 2010)

요 약

삼지화염의 화염안정화 메커니즘 중 중요한 한 가지는 화염전파속도이다. 화염전파속도의 정량적인 규명을 위해 Bilger는 층류 유동이론에 근거하여 혼합분율 기울기에 비선형적으로 연관된 삼지화염 전파속도를 실험으로 제시하였다. 그러나 지금까지의 연구에서는 화염의 곡률에 따른 삼지화염 전파속도에 관하여 논의된 바가 없기에, 본 논문에서 화염의 곡률에 따른 화염전파속도의 연관성을 제시하고자 하였다. 본 논문의 결과로 층류부상화염의 부상높이가 연료의 출구속도와 노즐의 직경에 따라서 결정됨을 알 수 있었다. 그리고 정지된 부상화염의 유동속도에 비례하는 연료의 출구속도에 곡률의 크기가 비례함을 보였고, 또 층류부상화염의 부상높이가 높아질수록 곡률반경의 크기가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 곡률효과의 중요성이 인식되어야 하며 화염안정화 메커니즘을 표현하기 위해 제안된 Bilger의 제안식이 곡률효과를 고려하여 수정되어야 한다.

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 through the experiment, 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 radius of flame curvature. In the present research, a relation of the flame propagation velocity is proposed with the radius of flame curvature for the flame stabilization mechanism. As a result, we have shown that the height of lifted flame is determined with the nozzle diameter and exit velocity of fuel and presented that the radius of flame curvature is proportion to the nozzle exit velocity of fuel and height of lifted flame. Therefore, the importance of the radius of flame curvature has to be recognized. To describe the flame stabilization mechanism, Bilger's formula has to be modified with flame curvature effect.

Key words : triple flame, propagation velocity, radius of flame curvature, stretch rate, displacement velocity, mixture fraction, laminar burning velocity

†주저자:jisooaha@kmu.ac.kr

I. 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 불완전 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 부분예혼합연소에서 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 부상화염에서도 삼지화염이 형성되어 안정화된다는 것이 밝혀진 이래로 부상화염의 안정화 기구가 삼지화염 이라는 것에 초점을 맞추어 연구 되어 왔다.

Dold[4]는 삼지화염 전파 속도가 혼합분율 구배에 의존하며, 최대 단열 층류화염 속도에 의해 구속됨을 보였다. 삼지화염의 열방출효과에 대하여 Boulangier[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]는 대향제트(oppo-

sed jet)에 의해 생성된 삼지화염의 전파를 연구하였으며, Ko와 Chung[11,12] 및 Lee[13]는 실험적으로 층류 비예혼합 분사내 삼지화염의 전파 및 부상 높이를 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 스칼라 소산율(scalar dissipation)에 관계되어 정의된다. 그러나 실제 부상화염의 안정화 메커니즘과 관련된 삼지화염 전파속도는 밀도비와 스칼라소산을 뿐만 아니라 화염의 혼합강도, 스트레치(stretch), 곡률(curvature), 루이스수(Lewis Number), 열손실 등의 함수이다.

그러나 지금까지의 연구에서는 화염의 곡률에 따른 삼지화염 전파속도에 관하여 실험적 결과로 제시된 바가 없었으며, 본 논문에서는 노즐의 직경 변화에 따른 화염 곡률반경의 변화로 인하여 층류 부상화염의 화염전파속도 및 화염의 부상높이가 어떻게 바뀌어 가는지 그 연관성에 관하여 논하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1. 상사성 이론

층류 부상화염의 경우 화염의 상류지역에서는 화염의 영향을 받지 않기 때문에 화염이 없는 경우의 유동으로 볼 수 있으며, 층류제트이론을 적용할 수 있다. 축대칭이고, 화학반응이 없으며, 정상상태에서 축방향으로의 확산을 무시할 수 있을 때, 균일한 속도로 분출되는 순수한 연료 제트의 속도와 농도 상사해 및 부상높이는 다음과 같이 주어진다[12].

$$u = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{J}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^{2Sc}} \quad (1)$$

$$Y_F = \frac{(2Sc+1)}{8\pi\nu x} \frac{I_F}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^{2Sc}} \quad (2)$$

$$H_L = cQ^{(2Sc-1)/(Sc-1)} d^{-2Sc/(Sc-1)} \\ = c'd^{\beta} u_0^{(2Sc-1)/(Sc-1)} \quad (3)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{3}{32}} \frac{4Qr}{\nu x \pi d}$$

$$J = \pi \rho \frac{4Q^2}{\pi^2 d^{\beta}}$$

$$I_F = \pi \rho \frac{Q}{\pi}$$

$$Q = \pi d^2 \frac{u_0}{4}$$

여기서 u 는 축방향 속도, Y_F 는 연료의 질량분율, x 는 축방향 거리, r 는 반경방향 거리, d 는 노즐 출구 직경, ν 는 동점성 계수이고, ρ 는 밀도, S_c 는 Schmidt수로 ν/D_F 로 정의된다. D_F 는 연료가 공기로 확산될 때의 질량 확산계수를 나타내고, Q 는 노즐 출구 유량이며 u_0 는 노즐출구 속도를 나타낸다. 부상높이 내의 c 와 c' 은 연료의 초기 조건에 따라 결정되는 상수이다.

2.2. Bilger의 실험식

삼지화염 전파속도 U_p 는 화염 안정화에 있어서 가장 중요한 양이라 할 수 있다. 경계층 이론[15]에 근거하여 유도된 식에 따라 실험된 Bilger의 분석에 따르면 삼지화염 전파속도 U_p 와 층류 유동속도 S_L^o 의 속도비 U_p/S_L^o 는 점근 거동의 관점에서 다음과 같이 제안 되었다[14].

$$\frac{U_p}{S_L^o} = \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_b}} \left[1 - \left(\frac{\chi_{st}}{\chi_a} \right)^m \right] \quad (4)$$

여기서 ρ_u 는 미연영역의 밀도이며, ρ_b 는 기연영역의 밀도이다. $\chi_{st} \equiv 2D_F(\nabla \xi_{st})^2$ 는 Bilger의 식에 기초한 혼합분율 ξ 에 따른 이론당량혼합비에서의 스칼라 소산율이다. χ_a 는 선형회귀분석으로 결정되어 χ_{st} 를 규격화하기 위한 기준값이다. Bilger의 식에서 화염전파속도는 스칼라 소산율에 비선형적으로 의존함은 알 수 있다.

2.3. 화염 스트레치(κ)

유동속도 \vec{v} 인 유동이 화염전파속도 \vec{U}_p 를 가질 때 화염스트레치를 κ 는 다음과 같다[16].

$$\kappa = \nabla_t \cdot \vec{v}_t + (\vec{U}_p \cdot \hat{n})(\nabla \cdot \hat{n}) \quad (5)$$

여기서 \vec{v}_t 는 유동속도 \vec{v} 의 접선방향 속도이고 \hat{n} 은 연소영역쪽으로는 표면에 대한 법선(normal) 벡터이다.

III. 실험 및 방법

3.1. 실험장치

실험장치는 노즐부, 연료공급부 및 측정부로 구

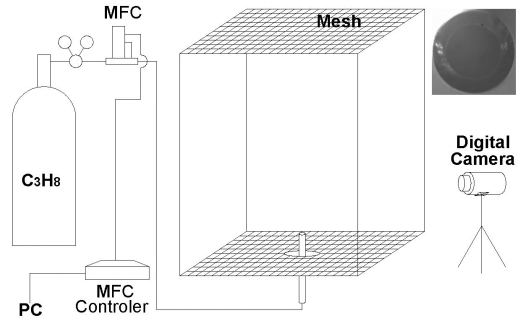


Fig. 1. Schematic of experimental setup. (a cross-section of cutting nozzle at right-top)

성하였으며, 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

사용된 노즐은 내경이 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35mm (외경은 0.26, 0.36, 0.46, 0.51, 0.56mm)인 스테인레스 강관을 준비하였다. 또 노즐 출구에서 완전발달된 유동장을 얻기 위하여 노즐 길이를 200mm 이상으로 직경보다 충분히 길게 제작하였다. 또 노즐 제작에서 노즐 절단에 따른 노즐 출구부분의 부수적인 손상(collateral damage)이나 구겨짐 등을 방지하기 위하여 극초단레이저를 이용하여 커팅하였으며 절단면은 아래 Fig. 1우측상단의 절단면과 같이 깨끗하게 제작되었다.

연료공급부는 연료, 압력조절기 및 질량유량계로 구성되어있고 연료는 99.99%의 프로판을 사용하였다. 유량조절은 버블미터로 검증된 1, 5, 20, 100, 500, 1500ml/min의 MFC를 사용하였으며, 노즐은 1m×1m×1.5m 크기의 아크릴 연소챔버 내에 설치되었다. 또 외부에서 유입되는 공기에 의한 교란을 막기 위해 노즐 하부에 메쉬(mesh)를 설치하였으며, 측정장치로 디지털 비디오 카메라(삼성 VM-HMX20C)를 사용하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 화염의 부상높이

촬영된 부상화염의 부상높이는 노즐 입구에서부터 부상된 화염의 하단까지 측정하였다. 그래픽 프로그램을 이용하여 눈금자의 픽셀 간격을 결정하고 그 길이를 계산하여 단위 픽셀당 길이를 얻는다. 계산을 통해 구해진 단위 픽셀당 길이로 실제 화염 선단에서 노즐 출구까지의 픽셀수를 구하여 단위 픽셀당의 길이를 곱하면 실제 부상화염의 부상높이를 얻을 수 있다. Fig. 2에 실제 촬영된 부상

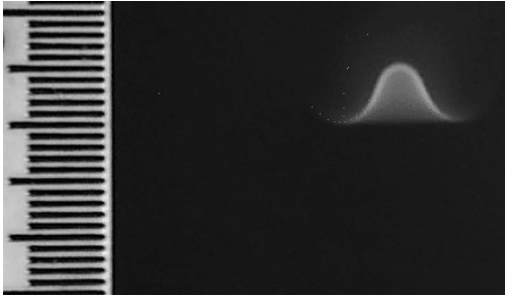


Fig. 2. Real image of lifted flame and measurement ruler.

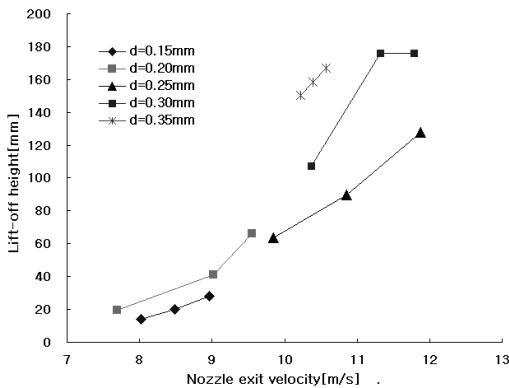


Fig. 3. Height of the lifted flame with exit velocity of fuel at the several nozzle diameter.

화염의 이미지를 나타내었다. 또 각 직경별 출구속도에 따른 화염의 부상높이를 아래 Fig. 3에 나타내었다. 기존에 연구되었던[17] 내용에 따르면 순수 프로판 연료에 대하여 출구속도가 증가함에 따라서 부상높이가 높아지며, 직경이 클수록 부상높이가 높아짐을 알 수 있었다. 또 앞에서 보았던 상사성이론에서도 부상높이가 직경의 제곱에 비례하여 나타나기에 노즐의 직경이 클수록 부상높이가 훨씬 더 빨리 높아짐을 예측할 수 있었다. 실험에서는 노즐의 직경에 따라서 부상되는 시점의 출구속도의 차이가 크기에 같은 유속에서 비교할 수는 없었으나, 기존의 연구 및 상사성이론에서 예견되었던 것과 흡사한 결과를 얻을 수 있었다.

4.2. 곡률반경의 분석과 측정

화염 스트레치인 식(5)를 분석하면 화염스트레치는 접선(θ)방향의 속도에 대한 발산항 $\nabla_t \cdot \vec{v}_t$ 과

화염전파속도와 법선 벡터의 내적 $\vec{V}_f \cdot \hat{n}$ 과 기울기 연산자와 법선 벡터의 내적 $\nabla \cdot \hat{n}$ 의 곱과의 합으로 주어진다. 접선방향의 속도는 화염 표면을 따른 유동속도를 나타낸다. 따라서 접선속도에 대한 발산은 화염면을 따른 비균일한 접선방향 흐름효과를 나타내며, 이는 화염 변형(flame strain)에 따른 찌그러짐의 정도를 나타낸다. 그리고 화염전파속도와 법선 벡터의 내적은 법선방향 즉 반경방향으로 움직여가는 화염의 속도, 즉 변위속도를 의미한다. 또 기울기 연산자와 법선 벡터의 내적은 법선방향과 법선방향의 기울기에 대한 내적의 크기로 주어지며, 이는 반경방향에 대하여 반경이 r_{curv} 인 곡률의 크기 $1/r_{curv}$ 로 표현된다. 그러나 안정된 부상화염의 경우 정지상태로 가정할 수 있기에 변위속도는 '0'이 되어, 변위속도항과 비정상상태 곡률항을 포함하는 화염스트레치의 두 번째 항은 사라진다. 원통좌표계에서 밀도 변화가 없을 때의 연속방정식을 이용해서 스트레치의 첫 번째 항을 정리하면 화염스트레치 내의 변형(strain)항은 다음과 같이 표현되어 정지상태에서도 화염전파속도에 의존하는 스트레치가 곡률에 의존함을 알 수 있다.

$$\kappa = -\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r_{curv}} \quad (6)$$

여기서 v_r 은 반경방향의 속도이므로 삼지화염의 경우 삼지화염의 전파속도로 표현될 수 있다. 차원으로 분석하면 스트레치는 속도와 곡률의 비율로 나타나며 근사적으로 ' $r_{curv} \propto -v_r$ '로 추측할 수 있다. 곡률반경이 커지면 화염전파속도의 크기는 커지나, 화염이 반대방향('·')으로 밀려남을 예상할 수 있다.

Bilger의 경우 화염안정화에 따른 안정도를 표현하기 위해 화염 전파속도를 언급하였으며, 그에 따라 혼합장과 관련된 스칼라 소산율(χ)로 화염안정화 메커니즘을 표현하고자 하였다. 그러나 실제 화염 스트레치를 분석하면 화염스트레치의 경우 삼지화염의 화염전파속도와 변위속도로 표현되고 또 화염의 곡률반경과 밀접한 관련을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 곡률효과의 중요성이 인식되어야 하며 화염전파속도에 따른 화염안정화 메커니즘을 재정립할 필요성이 있다. 특히 화염 곡률의 경우 스트레치에서 표현된 변형(strain)항과 곡률항 두 곳에서 모두 나타나며 선형으로 결합되어 있다. 심지어 화염이 정지하여 변위 속도가 '0'이 되어도 화염의 곡률은 스트레치의 변형항에 포함되어 화염전파속도와 밀접한 관계를 가지고 있기에 화염전파속도와 직접적인 관련이 있는 화염 스트레치는

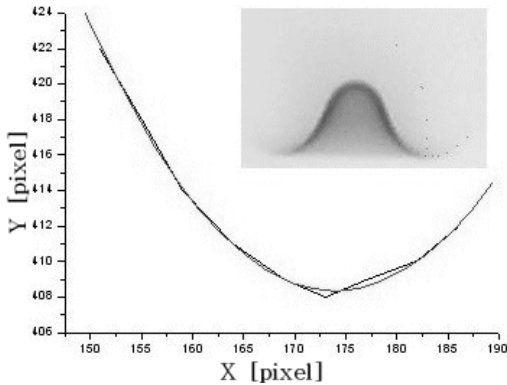


Fig. 4. Measuring point to measure the radius of curvature of the lifted flame (right-top) and curve fitting of data.

곡률항의 영향에서 자유로울 수가 없다.

곡률반경을 측정하기 위해 촬영된 이미지를 그래픽 프로그램을 이용하여 삼지점을 기준으로 픽셀의 좌표값(x, y)을 얻고, 각 점을 이용하여 커브피팅(curve fitting) 하였다. 아래 Fig. 4 는 커브피팅한 그래프와 그래픽 프로그램에서 삼지점을 기준으로 측정한 측정포인트를 나타내었다.

아래 식(7)을 이용하여 곡률반경을 계산하였다.

$$\frac{1}{R_{cur}} = \frac{\nabla \cdot (\nabla f)}{|\nabla f|} \quad (7)$$

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. 출구속도 및 부상높이에 따른 곡률반경

삼지화염의 전파속도는 삼지점에서의 변위속도와 연료의 유동속도의 합으로 주어지며, 층류 부상화염의 경우 정상상태로 볼 수 있기에 변위속도가 없다면 삼지화염 전파속도는 삼지점에서의 연료의 유동속도로 볼 수 있다. 연료의 유동속도는 연료의 출구속도에 비례하기에 연료의 유동속도와 곡률반경의 관계를 연료의 출구속도와 곡률반경의 관계로 나타낼 수 있으며, 따라서 연료의 출구속도에 따른 곡률반경을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 출구속도가 커질수록 곡률반경이 커짐을 알 수 있다. 또 다른 사실은 같은

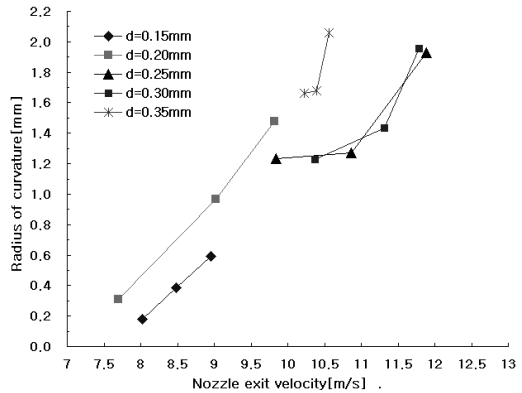


Fig. 5. Radius of curvature at the triple point with nozzle exit velocity of fuel at the several nozzle diameter.

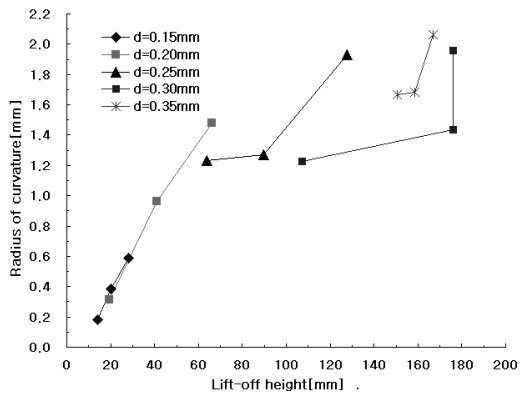


Fig. 6. Radius of curvature at the triple point with height of lifted flame at the several nozzle diameter.

속도의 경우 노즐 직경이 클수록 곡률반경의 크기가 크다는 것이다.

화염의 부상높이에 따른 곡률반경의 크기를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 부상높이가 높아짐에 따라 모든 노즐에서 곡률반경의 크기가 커짐을 알 수 있었다. 이는 부상높이가 출구속도에 비례하여 나타나며, 출구속도는 곡률반경에 비례하여 나타난 결과라 할 수 있다.

V. 결 론

부상된 층류화염의 안정화에 영향을 미치는 곡

률반경의 연구를 통하여 다음을 얻을 수 있었다.

(1) 층류부상화염의 부상높이가 연료의 출구속도와 노즐의 직경에 따라서 결정됨을 알 수 있었다. 이는 기존 연구 등과 동일한 결과이며 상사성이론에서도 예측가능한 부분이었다.

(2) 연료의 출구속도에 따라서 결정된 곡률반경의 크기는 연료의 출구속도에 비례하여 나타남을 알 수 있었다.

(3) 층류부상화염의 부상높이가 높아질수록 곡률반경의 크기가 커짐을 알 수 있었다. 이는 기존에 연구되었던 층류화염속도가 연료의 혼합분율로 결정되었던 것과는 달리 화염전파속도가 화염의 곡률반경에 충분히 영향 받고 있음을 알 수 나타내고 있다.

이와 같은 결론을 통하여 화염안정화 메커니즘을 표현하기 위해 제안된 Bilger의 제안식에 곡률항 등이 추가되어 화염전파속도에 따른 화염안정화 메커니즘을 재정립할 필요가 있다.

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] Schlichting, H., Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, New York, 1979
 [16] C.K. Law, Combustion Physics, Cambridge University, 2006.
 [17] T.K. Kim, J.S. Ha, P.Jeong, H.S. Um, K.H. Kim, KIGAS, 12, 77-84, (2008)