



노즐 직경 변화가 층류부상화염 거동에 미치는 영향

엄현수 · 김경호* · 하지수** · †김태권*** · 박정****

계명대학교 일반대학원, *계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터,
계명대학교 에너지환경과학과, *계명대학교 기계자동차공학부,
****부경대학교 기계공학부

(2008년 4월 17일 접수, 2008년 5월 23일 수정(1차), 2008년 6월 13일 수정(2차), 2008년 6월 13일 채택)

Effects of Fuel Nozzle Diameter in the Behavior of Laminar Lifted Flame

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

Graduate Schools, Keimyung University

*Center for Automotive Parts Technology, Keimyung University

**Environmental Science, Keimyung University

***School of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

****School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received April 17, 2008, Revised(1st) May 23, 2008, Revised(2nd) June 13, 2008, Accepted June 13, 2008)

요 약

제트상사성 이론에 의해 잘 이해되어온 층류부상화염의 부상화염 거동에 대해 연료 노즐 직경 변화 효과를 통한 부력효과의 중요성을 밝히기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 부력 효과를 평가하기 위해 연료노즐 직경을 0.1~6 mm 정도의 크기까지 변화시켰고, 헬륨을 희석제로 프로판과 메탄 화염을 순수 연료로부터 희석하면서 부상 거동을 체계적으로 관찰하였다. 부상화염 거동 설명을 위해 중요 물리 변수인 희석율로 표현되는 연료강도, 화염 스트레치, 화염 곡률 효과로 부상 거동을 체계적으로 설명하기 위해 척도 법칙(scaling law)을 통한 중요 물리 변수를 실험 변수로 유도하였다. 노즐 직경이 큰 경우와 연료 희석율이 큰 경우에 대해서는 부력 효과가 중요하다는 것을 실험 결과로부터 입증하였다. 또한, Chen 등의 결과에 따라 $0.5 < Sc < 1$ 에서 안정된 화염 부상이 존재하였던 점을 연료 노즐에 따라 평가하는 결과들이 제시된다.

Abstract – Experimental study was conducted to clarify the importance of buoyancy effects in laminar lifted flames which have been well understood by cold jet similarity theory. To evaluate buoyancy effects, lifted flame behaviors were systematically observed in methane and propane lifted flames diluted with He as changing the fuel nozzle diameter from 0.1 to 6 mm. Important physical parameters such as fuel strength, flame stretch and flame curvature, which were derived through simple physical scaling laws, were estimated. It is experimentally proven that buoyancy effects are important in relatively large fuel nozzle diameter and large fuel dilution with He. The results of Chen et al., which displayed the existence of stably lifted flames for $0.5 < Sc < 1$, are also reviewed according to fuel nozzle diameter.

Key words : fuel dilution, lifted flame, lift-off height, nozzle diameter, schmidt number

I. 서 론

난류 부상화염의 화염 선단의 화염안정화 메커니즘에 대한 이해를 위해 비예혼합 부상화염에 관한 특성이 폭 넓게 연구되어 왔다. 난류예혼합화염[1], 층류화

염편[2] 개념 등이 부상화염의 안정화 기구를 설명하여 왔으나 Müller 등이 부분예혼합의 경계조건을 허용하는 수식화에 성공하여 층류화염편 개념의 영역을 확장하였고[3], CH-PLIF와 PIV 가시화를 통하여 난류 부상화염에서 조차 삼지화염(blunt body) 혹은 에지화염(edge flame)으로 부상화염이 안정화된다는 것을 밝힌 [4] 이래로 부상화염의 안정화 기구는 삼지화염 혹은

†주저자:tkkim@kmu.ac.kr

에지화염이라는 것에는 의문의 여지가 없는 것으로 인식 되어왔다.

삼지화염 혹은 에지화염은 부분예혼합 혼합 구조에서 나타나며, 혼합 정도를 나타내는 진행 변수 (progressive variable)를 통하여 층류화염편 모델로 묘사될 수 있기 때문에 에지화염은 층류화염편의 확장 영역에 해당된다. 층류화염편은 난류화염의 평균 구조는 층류화염편들의 앙상블로 나타낼 수 있고 순간 구조는 층류로 연소하기 때문에 난류 부상 화염을 이해하기 위한 기초연구로서 층류 부상 화염을 연구하는 것 역시 매우 중요하다는 인식하에 층류부상화염의 화염 안정화 기구를 이해하기 위한 많은 노력이 있었다[5,6]. 층류 및 난류부상화염의 선단부 상류는 부분예혼합 혼합기를 형성하는데 연료측에는 과농 예혼합기, 산화제측에는 희박 예혼합기에 의해 각각 과농 및 희박 예혼합 화염이 존재하고 과농 예혼합화염으로 부터 연료의 확산과 희박 예혼합화염으로부터 산화제의 확산에 의해 삼중점(triple point)을 시점으로 하류로 꼬리형태의 확산화염(trailing diffusion flame)이 나타나게 되는 삼지화염의 구조를 갖게 된다. 이러한 삼지화염의 구조로부터 꼬리 형태의 확산화염은 당량 혼합비를 나타내고 삼중점 역시 당량 혼합비를 나타내게 되므로 화염이 당량 혼합비선을 따라 전파하는 궤적을 그리게 된다.

삼지 화염의 형상은 일반적으로 스칼라소산율(scalar dissipation rate)이 작은 경우는 삼지화염(triple flame)이 잘 관찰되지만 스칼라소산율이 큰 경우에는 희박예혼합 화염부와 과농예혼합 혼합부가 사라지고 삼지화염이 뚝뚝하게 나타나기 때문에 일반적으로 에지화염으로 불린다. Chung의 연구그룹[7,8]에서는 제트상사이론으로, $Sc < 0.5$, $Sc > 1$ 인 영역에서 안정된 부상화염을 보였으며, $0.5 < Sc < 1$ 의 영역에서 안정된 부상화염이 존재하지 않는다는 것을 이론적으로 보였고 실제 실험을 통하여 입증하였다. 그러나, 제트상사성 이론은 예혼합화염 반응대 두께가 수력학적 특성길이에 비해 훨씬 작아 화염이 유동에 미치는 영향이 무시될 수 있다는 전제하에 비반응 유동에 근거한다. 그러나 부상 높이는 실제로 화염 전파 속도에 의존하며, 화염전파속도는 Froude 수가 큰 경우에 있어서는 혼합강도, 화염스트레치율 혹은 스칼라소산율, 화염 곡률, 루이스수(Lewis Number), 열손실율 등의 함수이다. 또한, 에지화염의 거동에 있어서 화염 곡률의 효과는 오히려 스트레이윌의 기여에 비해 클 가능성 역시 배제할 수는 없다. 이러한 측면에서 최근 연구 결과인 Chen[9]의 연구 결과는 $0.5 < Sc < 1$ 에서도 안정된 부상화염이 존재할 수 있음을 보였고 상세한 분석이 이루어지지 않는 않았지만 화

염 존재 효과가 제트상사성 이론에서 벗어난 결과를 줄 수 있다는 측면에서 주목된다. Chen 등의 결과는 아르곤(Ar), 헬륨(He), 질소(N₂) 등 희석된 연료로 Sc를 조절함에 따라 부상 거동을 관찰하였지만, 질소 혹은 아르곤으로 희석된 경우와 달리 헬륨으로 희석된 경우에 있어서는 부력에 의한 효과가 중요할 것으로 판단됨에도 불구하고 부력 효과의 중요성은 간과되었다.

본 연구에서는 Chung의 연구그룹의 결과들은 주로 노즐 직경이 0.1~0.2 mm 정도 크기로 비슷한 크기 (Order)에서 실험이 수행되었지만, 실제로 연료노즐의 크기는 삼지 화염의 화염 곡률의 크기와 관련되므로 Chen의 연구 결과를 확장하여 $0.5 < Sc < 1$ 에서도 안정된 부상화염이 존재할 수 있고 화염 곡률이 화염전파속도에 영향을 미쳐 부상화염 거동에 중요한 역할을 할 것이라는 아이디어를 근간으로 연구를 수행하였다. 그러나 노즐 직경 크기를 증가시켜 부상화염 선단부의 삼지화염의 화염 곡률을 증가시키는 경우 반대 효과로서 부력에 의해 유도되는 화염스트레치 역시 증가하여 화염 전파속도를 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 일반적으로 중력장에서 주로 실험되는 경우 부력에 의한 화염전파속도의 감소 효과와 노즐 직경 크기 증가에 의한 화염 곡률의 증가로 화염전파속도가 증가하는 효과를 명확히 하는 것이 중요함에도 불구하고 이러한 것을 명확히 다룬 연구는 지금까지 문헌상에서 나타나지 않는다.

Chung의 연구그룹에서 사용된 0.1 mm 근처의 노즐로 프로판을 연료로 사용한 경우 부상화염이 발생하는 임계속도가 약 14 m/s 정도 크기로 일반적으로 부력에 의해 유도되는 유동속도가 1 m/s라는 것을 감안하면 모멘텀이 우세한 경우였기 때문에 실제로 제트 상사성에 근거한 부상화염 거동이 잘 일치하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 노즐 직경 크기를 증가하여 삼지화염 선단의 화염 곡률을 증가시키는 효과와 노즐 크기 증가에 의한 부력 효과를 비교함으로써 실제로 제트상사성 이론이 실험 결과와 일치되는 노즐 크기를 평가하고자 한다. 이와 반대로 제트 상사성 이론에서 실험 결과들이 벗어나게 되는 원인을 평가하고자 한다. 또한 Chen 등의 결과에서 $0.5 < Sc < 1$ 에서 안정된 부상화염이 존재할 수 있음을 보였기 때문에 노즐 직경에 따라 안정된 부상화염이 존재하는 임계 Sc_{crit} 를 도출하고 이때의 부력의 영향 등을 평가하고자 한다.

II. 이론 및 실험

2.1. 화염부상 거동에 대한 제트 상사성 이론

부상화염의 안정화 기구는 비반응제트상사이론[7,8]

에 따라 삼지화염의 삼중점이 이론 당량비선을 따르고 따라서 이론 당량비선을 따라 화염이 전파된다고 가정함으로써 유량과 노즐 직경에 따른 부상높이는 다음과 같이 주어진다.

$$x^* = H_L = cQ^{(2Sc-1)/(Sc-1)} d^{-2Sc/(Sc-1)} \quad (1)$$

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

$$c = \left[\frac{(2Sc+1)}{8\pi v} \cdot \left(\frac{2\pi^2 v u^*}{3} \right)^{Sc} \right]^{\frac{1}{(1-Sc)}} \left[\frac{1}{Y_F^*} \right]^{\frac{1}{(1-Sc)}}$$

$$Y_F^* = \frac{(2Sc+1)I_F(8\pi v x^* \rho u^*)^{Sc}}{8\pi v x^* \rho \left(\frac{8\pi v x^* \rho u^*}{3J} \right)^{Sc}}$$

$$u^* = \frac{3J}{8\pi v x^* \rho (1 + \eta^*/8)}$$

여기서, x^* , u^* , Y_F^* 와 η^* 는 각각 삼지점에서의 축방향 좌표, 축방향 속도, 연료의 질량분율 및 상사변수를 나타낸다.

2.2. 실험장치 및 방법

실험에서 사용된 유로시스템은 Fig. 1과 같다. 연료 공급부는 연료, 희석제, 압력조절기 및 질량유량계로 구성되어 있고, 연료는 순도 99.99%의 프로판과 메탄, 희석제는 순도 99.999%의 헬륨을 사용하였다.

실험을 할 때 노즐에서 분사된 연료가 주위에 영향을 최소화 혹은 제거하기 위해 아크릴 칸막이실 (compartment, 530 mm×530 mm×930 mm)을 구성하였으며, 각 연료와 희석제는 압력 조절기로 조절하고 버블미터로 검증된 1, 5, 20, 500 ml/min의 유량에 대해

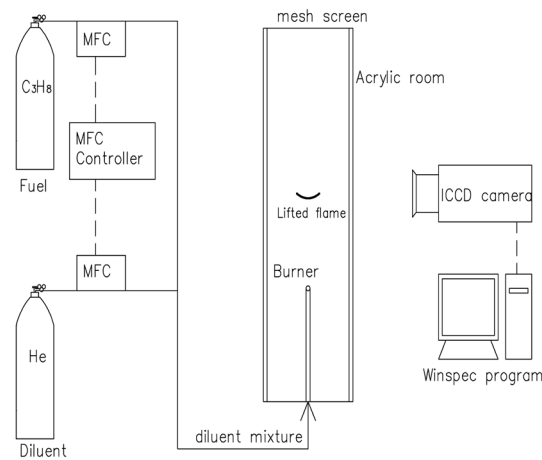


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

MFC(mass flow controller)를 통해 노즐로 분사된다. 삼지화염의 화염 곡률과 부력 효과를 조절하기 위해 실험에 사용된 노즐의 직경은 각각 0.12, 0.25, 0.5, 1, 4.2, 6.09 mm이며, 화염의 부상높이는 ICCD 카메라(USA Princeton Instruments, PI-Max, Marconi CCD47-10)를 사용하여 측정하였고, 각 데이터에 대해 120회의 촬영을 통해 얻어진 부상 높이를 앙상블 평균(ensemble average)을 통해 얻었다. 현재의 실험영역을 층류화염만으로 한정하기 위해 연료 내부 구조를 쉘리엔(Schlieren) 장치로 가시화 하였으며, 할로겐 램프에 CCD camera(Kodak KAi- 1010M)를 이용하였다. 화염 부상높이는 Fig. 2와 같이 화염의 선단과 노즐의 끝단을 기준으로 측정하였다. Table 1에 프로판과 메탄의 희석률에 따른 Sc 를 나타내었다. Sc 를 계산하기 위해

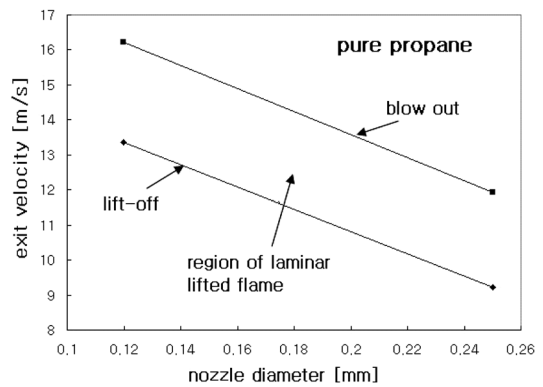


Fig. 2. Stabilization region of laminar lifted flame according to nozzle diameter for pure propane.

Table 1. Schmidt number according to dilution ratio on propane and methane.

희석률[%]	Schmidt number	
	C ₃ H ₈ -He	CH ₄ -He
0	1.363	0.704
10	1.369	0.712
20	1.376	0.719
30	1.384	0.727
40	1.393	0.735
50	1.403	0.744
60	1.415	0.755
70	1.429	0.767
80	1.447	0.780
90	1.468	0.796

사용된 확산 계수(diffusivity)는 참고문헌[10]으로부터 계산하였다.

III. 결과 및 토의

3.1. 프로판 층류 부상화염 거동

일반적으로 좌표에 관계없이 변하지 않는 형태인 화염 스트레치는 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa = \nabla \cdot \vec{v}_t + (\vec{V}_f \cdot \hat{n})(\nabla \cdot \hat{n}) \quad (3)$$

여기서 \vec{v}_t 는 화염면에서 접선 방향의 유동속도 벡터, \vec{V}_f 는 화염의 변위 속도(displacement velocity), \hat{n} 는 화염 면에 대한 법선 벡터를 나타낸다. 화염 부상이 발생하는 임계 조건에서는 화염이 부착된 경우를 고려한다면 식 (3)의 변위 속도가 0이 되어 둘째 항은 사라진다. 또한 화염 부상의 노즐 임계 속도에서 화염이 소화된 것으로 이해할 수 있으며 연료가 고정된다면 화염소화 한계의 스트레치 값은 고정되므로 좌측은 일정한 값을 갖게 된다. 따라서 식 (3)은 화염 부상의 임계조건은 첫째항으로 묘사되는 스트레인에 의해 표현될 수 있게 된다. 이때 스트레인은 유동의 체제시간과 관련되므로 식 (4)와 같이 화염 부상의 임계 노즐출구 속도와 노즐 직경으로 근사할 수 있다.

$$\kappa_{ext.} \sim \frac{U_{crit.}}{D} \quad (4)$$

한편, Froude 수는 모멘텀 효과와 부력 효과의 비로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Fr = \frac{U^2}{gL} \quad (5)$$

여기서 U 는 특성 속도, L 은 특성 길이를 나타낸다. 따라서 화염 부상의 임계 조건에서 Froude 수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Fr_{crit.} = \frac{U_{crit.}^2}{gD} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 물리적으로 노즐 직경이 증가할수록 부력 효과는 우세해져 부력에 의해 유도되는 유동 속도는 증가하므로 결과로서 부력으로부터 유도되는 화염 스트레치는 증가하게 됨을 의미한다. 이러한 물리적 해석을 근간으로 화염의 안정화 선도를 관찰하고자 하였다. Fig. 2는 순수 프로판의 노즐과 출구 속도에 따른 안정된 부상화염 영역을 나타낸다.

Fig. 2에 나타난 것과 같이 순수 프로판의 경우 노즐

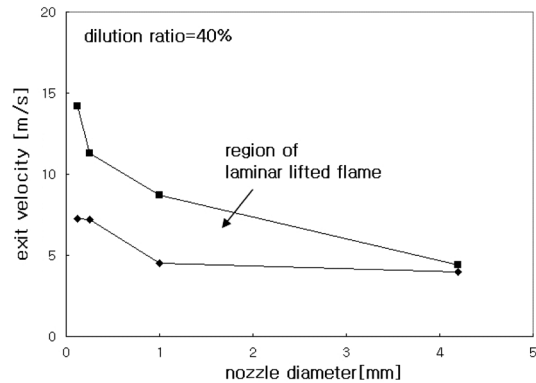


Fig. 3. Stabilization region of laminar lifted flame according to nozzle diameter for the propane diluted with He.

직경이 약 2배 정도 증가함에 따라 화염 부상의 임계 노즐 출구 속도와 화염 날림이 발생하는 노즐 출구 속도는 감소한다. 부력효과가 무시된다면 식 (4)로부터 화염부상의 임계 출구속도가 노즐 직경에 비례할 것이라는 물리적 해석과는 상반된 결과임을 알 수 있다. 즉, 식 (6)에 따라 노즐 직경이 증가함에 따라 부력의 효과가 증가하여 부력에 의해 유도되는 유동 속도의 증가로 화염 스트레치가 증가하고 이것이 식 (4)에 의해 나타난 바와 같이 화염 부상을 유발하는 임계 스트레치에 첨가하여 작용함에 따라 화염 부상을 일으키는 임계 노즐 출구 속도가 작아졌음을 의미한다.

이러한 효과는 헬륨으로 프로판을 희석한 경우 역시 부력 효과가 우세하게 나타나야 한다. Fig. 3은 헬륨 희석율이 40%인 경우에 노즐 직경에 따른 층류 부상 화염의 안정화 영역을 나타낸다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 40% 헬륨으로 희석한 경우에도 역시 화염 부상 및 화염 날림을 위한 노즐 출구 속도는 감소한다는 것을 알 수 있다.

40% 희석 조건의 경우 반응에 참여하는 반응물의 농도 감소로 반응율이 감소하므로 순수 프로판의 경우에 비해 화염 부상과 화염 날림을 위한 노즐 출구 속도는 작다는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 3에서 공기에 비해 밀도가 아주 낮은 헬륨을 사용하고 있기 때문에 부력에 의한 영향이 노즐 직경 증가에 따라 우세할 것으로 예상되었지만 오히려 노즐 직경이 1 mm 이상에서 화염 부상의 임계 노즐 출구 속도가 완만하게 감소한다. 이것은 다음의 물리적 해석으로부터 설명될 수 있다. 부력에 의해 유도되는 모멘텀은 $-\rho g(T - T_\infty)$ 로 나타나므로 화염 온도에 민감하게 작용한다. 대향류화염에서

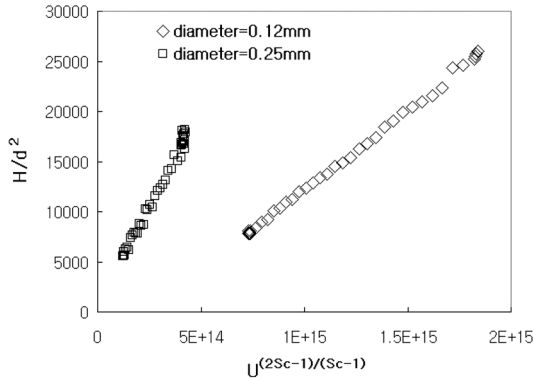


Fig. 4. Variation of lift-off height with nozzle exit velocity according to nozzle diameters for pure propane.

알 수 있는 것과 같이 순수 연료와 비교하여 희석을 하는 경우 화염소화 한계에서 화염 온도는 감소하므로[9] 노즐 직경이 증가하더라도 부력에 의해 유도되는 모멘텀은 더 이상 커지지는 않을 것으로 판단된다. 따라서 식 (4)에 나타난 것과 같이 1 mm 이상의 노즐 직경에 대해서는 노즐 직경 증가에 따른 화염 부상을 위한 임계 노즐 출구 속도는 증가하려는 효과에 의해 영향을 받는 것으로 이해된다.

또한, 부력 효과가 우세하게 작용한다면 이러한 효과들은 부상 높이에서도 우세하게 나타나야 한다. 이것을 명확히 보이기 위해 Fig. 4는 순수 프로판에 대해 노즐 직경이 0.12 mm와 0.25 mm에서 부상 높이를 비교하였다. 식 (2)에 나타난 것과 같이 부상 높이를 노즐 직경의 제곱으로 나누어 나타내었음에도 불구하고 노즐 직경이 큰 0.25 mm인 경우에 부상 높이가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 제트상사성 이론에 근간으로 본다면 노즐 직경에 관계없이 일치하여야 함에도 불구하고 다르게 나타났다는 점에서 화염의 존재에 의해 노즐 직경 효과가 나타났음을 의미한다.

한편 이것이 부력의 효과가 아니라면 연료가 순수 프로판으로 고정되어 있으므로 부상 높이는 화염 전파 속도에 의존하여 나타나게 되며 화염 전파속도는 화염 스트레치에 의존하여 나타나야 한다. 식 (3)의 화염 스트레치를 부상 화염이 공간상에서 평균적으로 고정된 위치에 존재한다고 가정하면 식 (3)의 두 번째항은 변위 속도가 0이 되므로 사라지고 원통좌표계에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다[11].

$$\kappa = -\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{|u^*| + s_d}{r_{curv}^*} \quad (7)$$

여기서 v_r 은 반경방향 유동 속도, u^* 는 삼지점에서 축방향 속도 성분, s_d 는 변위 속도, r_{curv}^* 는 삼지점에서 화염 곡률반경을 의미한다. 즉, 식 (3)에서 정지화염에 대해 곡률효과가 사라졌음에도 불구하고 첫 번째항으로부터 곡률효과가 다시 나타남을 알 수 있다. 식 (7)의 두 번째항의 첫 번째는 정상 곡률항을 나타낸다. 현재와 같이 $Le > 1$ 보다 커서 화염 진동 불안정성이 나타나지 않는 조건이라면 부상화염의 평균 부상 높이는 공간적으로 정지하므로 두 번째항은 비정상 곡률항을 의미하며 정지화염에 대해서는 사라진다. 따라서 식 (7)은 다시 정지화염에 대해 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa = -\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{|u^*|}{r_{curv}^*} \quad (8)$$

식 (8)에서 화염 곡률 반경이 증가하면 화염 스트레치는 감소함을 알 수 있다. 따라서 삼지화염의 곡률 반경과 관련되는 현재의 실험에서 노즐 직경이 증가하면 화염 스트레치가 감소함을 의미한다. 결국 화염 스트레치의 감소로 화염 전파속도는 증가하여 부력에 의한 효과가 없다면 오히려 노즐 직경이 큰 경우에 부상 높이가 감소하여야 한다. 그러나 Fig. 4는 반대로 노즐 직경이 큰 경우 부상 높이가 증가하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 이것은 노즐 직경이 증가함에 따라 부력에 의한 효과가 실제 부상 높이와 같은 부상 화염 거동에 우세하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 노즐직경이 0.25 mm 일 때 각 희석률과 출구 유속에 따른 부상높이(120회 촬영을 통해 측정된 부상 높이의 횟수에 따라 평균이 수렴하는 높이)를 나타낸 것이다. 출구 유속의 증가는 스킨라 소산을 혹은 화염 스트레치의 증가를 의미한다. 따라서 노즐에 부착되어 있던

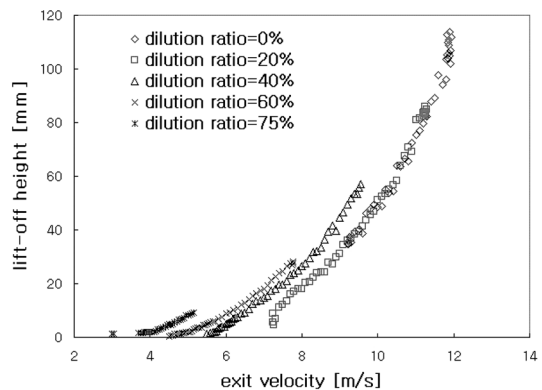


Fig. 5. Lift-off height with nozzle exit velocity according to fuel dilution for propane flame ($d = 0.25$ mm).

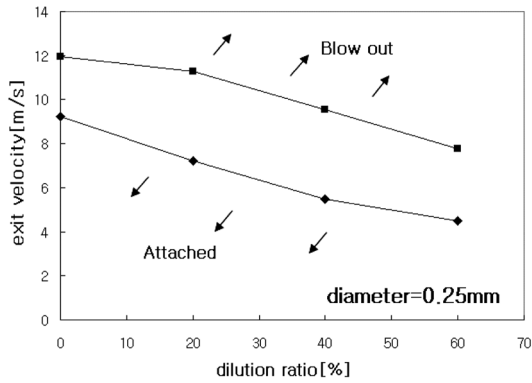


Fig. 6. Flame stability curve of laminar lifted flame according to fuel dilution for propane flame ($d = 0.25$ mm).

화염은 임계 노즐 출구속도에서 화염소화 한계를 넘어서게 되면 화염은 부상하고 화염 소화 한계를 넘어서는 영역이 확장됨에 따라 화염 부상 높이는 증가하게 된다.

Fig 5에 나타낸 것과 같이 모든 희석률에서 연료 노즐 출구 속도를 증가시키기에 따라 부상 높이는 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 연료의 희석은 연소 반응에 참여하는 반응물의 감소를 의미하므로 화학반응율이 감소하게 되어 화염 강도 또한 감소하게 된다. 따라서 희석률이 증가함에 따라 화염 부상과 화염 날림이 나타나는 연료 출구 속도는 감소하여야 함을 의미한다. 따라서 Fig 5에 나타낸 것과 같이 연료 희석율이 증가함에 따라 동일한 화염 부상 높이를 나타내는 연료 노즐 출구 속도가 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 것을 명확히 나타내기 위해 연료 노즐 직경이 0.25 mm인 경우에 희석율에 따른 화염 안정화 선도를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 것과 같이 순수 프로판의 연료 노즐이 0.25 mm의 경우 화염 부상이 일어나는 유속이 9.21 m/s이고 연료 희석율이 증가함에 따라 화염 부상과 화염 날림이 나타나는 연료 노즐 출구 속도는 감소하는 것을 알 수 있다. 희석율 75% 이상에서는 부착된 경우에서도 화염은 존재하지 않게 된다.

이상의 결과들로부터 순수 프로판 및 헬륨으로 희석된 프로판 부상화염들에 있어서 노즐 직경이 증가하면 부력이 우세하게 작용한다는 것을 알 수 있었고, 그렇다면 메탄 화염에 대해서도 이러한 현상은 명확히 할 필요가 있다.

3.2. Methane 종류 부상화염 거동

Fig. 7은 헬륨으로 희석된 메탄 화염에 있어서 노즐

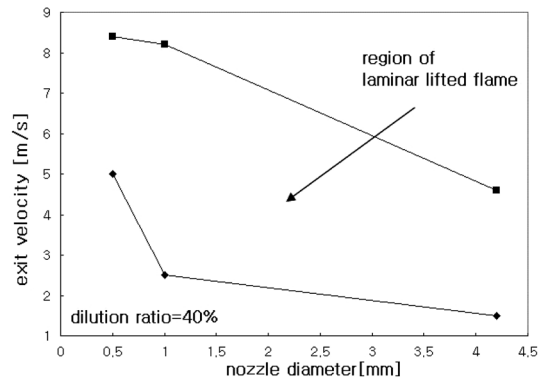


Fig. 7. Stabilization region of laminar lifted flame according to nozzle diameter for the methane diluted with He.

직경에 따른 안정화 선도를 나타낸다. 프로판의 경우에서와 마찬가지로 연료노즐직경이 증가함에 따라 화염 부상 및 화염 날림을 위한 임계 연료노즐 출구 속도는 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉, 식 (4)와 (8)에 나타낸 것과 같이 연료 노즐 직경 증가에 따라 화염 스트레치 감소에 의한 화염 전파속도의 증가효과보다는 연료 노즐 직경에 따른 부력에 의해 유도되는 속도 증가로 화염 스트레치가 증가하여 화염 전파속도가 감소하는 효과가 훨씬 우세하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 노즐 직경이 1 mm 일 때 희석율에 따른 화염 안정화 선도를 나타낸다. 희석률과 유속에 따른 순수 프로판과 헬륨 희석 프로판 화염의 경우와 마찬가지로 연료 희석율이 증가함에 따라 화염 부상이 나타나는 연료 노즐 출구속도는 감소하는 것을 알 수 있다.

한편 제트상사성 이론에서도 잘 예측되듯이 $0.5 < Sc < 1$ 인 경우에 해당하는 순수 메탄 화염과 헬륨으로

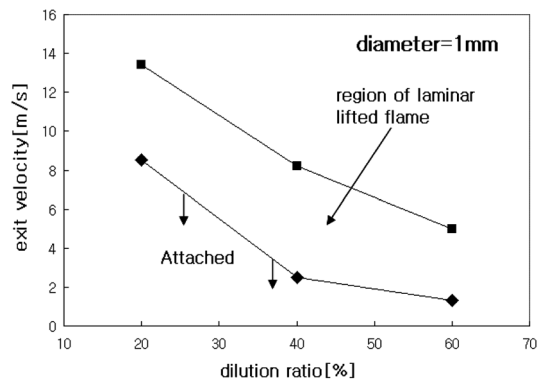


Fig. 8. Stabilization region of laminar lifted flame according to fuel dilution for methane flame ($d = 1$ mm).

Table 2에 나타내겠지만 6% 이하로 희석하였을 때는 안정된 부상 화염이 존재하지 않고 부착화염은 어느 속도 이상에서는 화염 부상과 동시에 화염 날림이 발생하였다. 그러나 희석율이 6% 이상인 경우에는 Table 2에 나타내듯이 안정된 부상 화염이 존재하는 것을 알 수 있다. 노즐 직경은 삼지화염의 곡률의 크기에 관련되므로 Chung의 연구 그룹의 결과들은 노즐 직경이 0.1mm 근처에서 얻어져 실제로 삼지 화염의 화염 곡률 반경이 매우 작아 식 (3)의 두 번째 항에 해당하는 곡률항에 따라 화염 스트레치가 매우 큰 경우에 해당하며, 본 연구에서 제시한 Fig. 8의 결과는 노즐 직경이 1mm로 Chung의 연구그룹에 비해 노즐 직경의 크기가 한 Order가 더 큰 경우에 해당하므로 화염 스트레치가 상대적으로 매우 작은 경우에 해당한다는 점을 주목하여야 한다. 결국 Chung의 연구그룹에서는 작은 연료 노즐을 사용함으로 인해 유동에 의한 화염 스트레치가 크고, 노즐 크기가 작아서 화염 곡률 반경 역시 작아 화염곡률 효과에 의한 화염스트레치 역시 크고, 부력에 의해 유도되는 화염 스트레치가 더해져서 화염이 쉽게 안정화되기 힘든 상황을 의미한다. 그러나 본 연구에서는 유동에 의한 화염스트레치는 노즐출구 속도 감소로 상대적으로 감소하고, 부력에 의한 화염 스트레치는 증가하지만, 노즐 직경 증가로 화염 곡률반경 증가에 따른 화염 스트레치는 감소하기 때문에 안정된 화염 부상이 존재한 것으로 이해될 수 있다.

Table 1에 나타난 것과 같이 메탄에 헬륨을 희석할 때 Sc 는 순수 메탄의 경우 $Sc = 0.704$ 부터 증가하여 90% 헬륨으로 희석한 경우 $Sc = 0.796$ 되는 것을 알 수 있다. 이것은 체트 상사성 이론에서 제시한 $0.5 < Sc < 1$ 에서는 안정된 부상화염이 존재하지 않는 사실과 맞지 않는다는 것으로 $0.5 < Sc < 1$ 범위 안에서 안정된 부상화염이 존재하는 임계값이 존재한다는 것을 내포하고 있다. 즉, 안정된 부상화염이 존재하는 연료 희석의 임계값 이하에서는 부착화염이 속도 증가에 따라 부상이 발생하자마자 화염 날림이 되는 반면 임계값 이상에서는 안정된 부상화염이 존재한다는 것을 의미한다. 이것은 앞서 설명한 것과 같이 노즐 직경 1mm인 경우 6% 이상의 희석률 각각에 해당하는 Sc 에서는 이론적으로도 안정된 부상화염이 프로판에서와 마찬가지로 부상화염의 거동이 유사하게 나타난다는 것을 의미하며, 이것은 6%의 헬륨 희석 조건에 해당하는 Sc 가 1mm 노즐 직경에 대해서는 안정된 부상 화염이 존재하는 임계 Sc 임을 알 수 있다. 따라서 연료 노즐 크기가 증가함에 따라 화염 곡률 반경이 증가하여 화염 스트레치는 감소하기 때문에 화염 전파 속도는 증가하게 되므

Table 2. Minimum dilution ratio for a stable lifted flame in methane flames diluted with helium.

노즐직경[mm]	희석률[%]	Critical Sc
0.5	4	0.708
1	6	0.709
4.2	22	0.720
6.09	27	0.724

로 이것은 안정된 화염 부상이 존재하는 임계 Sc 역시 달라져야 함을 의미한다. Table 2는 각 노즐에서 층류 화염이 부상하기 시작하는 희석률과 그때의 Sc 를 나타낸다.

노즐의 직경에 따라서 화염이 부상하기 시작하는 희석률과 Sc 가 다르며, 직경이 작아질수록 부상이 시작되는 Sc 도 낮았다. Chen 등[9]의 결과에서는 $Sc = 0.715$ 이상에서 화염이 부상하였으나, 앞서 설명한 것과 같이 부상이 일어나는 Sc 가 달라질 수 있음을 예측할 수 있다. Table 2에 나타난 것과 같이 노즐 직경이 증가함에 따라 화염부상이 발생하는 임계 Sc 는 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 부력이 없다면 노즐직경 증가에 의한 화염 스트레치 감소로 화염 전파속도가 증가하므로 안정된 부상화염이 존재하는 임계 Sc 는 감소하여야 한다. 그러나 Table 2에서 알 수 있는 것과 같이 안정된 부상화염이 존재하는 노즐 직경에 따른 연료 희석률 증가에 의해서도 부력의 효과가 지배적으로 변하기 때문에 임계 Sc 는 증가하게 된다.

층류 부상화염에 있어서 부상화염 거동은 연료 강도, 화염 스트레치 혹은 스탈라소산율, 화염곡률 효과, 열 방출 효과 등에 의해 지배를 받는 것으로 이해되지만 중력 조건에서 부력에 의한 효과는 실제로 부상 화염 거동에 있어서 지배적으로 작용할 수 있다는 점을 밝혔다. 따라서 미소중력에서 부상화염 거동은 현재와 상이한 결과를 줄 것으로 예측되며 본 연구진의 미래 연구로 남아 있다.

VI. 결 론

층류 부상화염 거동에 있어 120회 촬영하여 얻어진 상으로부터 양상블 평균된 부상 높이의 측정 노즐 직경의 변화와 헬륨을 희석제로 프로판과 메탄 화염에 대해 희석율을 변화시키면서 부력 효과의 중요성에 관한 실험적 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 프로판 화염에 대해 노즐 직경과 헬륨으로 희석

한 실험으로부터, Chung의 연구 그룹에서 주로 사용된 0.1 mm 정도 크기의 노즐 직경이 작은 경우에는 순수 프로판의 경우 화염 부상을 위한 임계출구 속도가 10 m/s 이상이므로 상대적으로 부력 효과는 작아 제트 상사성 이론에 근거한 부상화염거동의 전체적인 특성은 만족된 것으로 판단된다. 그러나 노즐 직경이 증가함에 따라 부력 효과는 우세해져 화염부상 및 화염 날림을 위한 임계출구 속도는 오히려 감소해 유동에 의한 화염 스트레치와 화염 곡률에 의한 화염 스트레치에 의한 화염 전파속도와 부상 높이의 상관성에 의해 설명이 되지 않는 점으로부터 부력 효과의 중요성을 알 수 있다.

(2) 프로판 화염에 대해 노즐 직경과 헬륨으로 희석한 실험으로부터, Chen 등의 연구 결과와 유사하게 $0.5 < Sc < 1$ 의 영역 안에서 안정된 부상화염이 존재한다는 것을 입증하였다. Chen의 결과를 기반으로 노즐 직경에 따라 화염 부상이 존재하는 임계 Sc 는 변한다는 것을 실험적으로 입증하였다. 그러나, 노즐 직경에 따라 화염 부상이 존재하는 임계 Sc 가 증가하고 연료 희석율이 증가하는 점, 그리고 노즐 직경 증가에 따라 화염부상의 임계출구 속도가 감소한다는 점으로부터 부력 효과가 노즐 직경이 증가하는 경우에는 우세하다는 것을 입증하였다.

감사의 글

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

사용기호

d : nozzle diameter
 D_F : mass diffusivity of fuel
 H_L : lift-off height
 I_F : fuel mass flow rate, $\pi\rho u_0 d^2/4$
 J : momentum flux, $\pi\rho u_0^2 d^2/4$

Q : fuel volume flow rate, $\pi u_0 d^2/4$
 r : radial coordinate
 Sc : Schmidt number, v/D_F
 u : axial velocity
 u_0 : exit velocity
 x : axial coordinate
 Y_F : fuel mass fraction
 η : similarity variable, $\sqrt{3/32} (u_0 d/v)r/x$
 ν : kinematic viscosity
 ρ : density

Superscripts

* : conditions at tribrachial point

참고문헌

- [1] Kalghatgi, G. T. *Combust. Sci. Tech.*, **41**, 17-29, (1981)
- [2] Peters, N. and F.A. Williams, *AIAA J.* **21**, 423-429, (1983)
- [3] Müller, C.M., H. Breibach and N. Peters, *Proc. Combust. Inst.*, **25**, 1447-1454, (1994)
- [4] Muniz, L. and M.G. Mungal, *Combust. Flame*, **111**, 6-31, (1997)
- [5] Buckmaster, J. and M. Matalon, *Proc. Combust. Inst.*, **22**, 1527-1535, (1988)
- [6] Dold, J.W. *Combust. Flame*, **76**, 71-88, (1989)
- [7] Chung, S.H. and B.J. Lee, *Combust. Flame*, **86**, 62-72, (1991)
- [8] Lee, B.J. and S.H. Chung, *Combust. Flame*, **107**, 163-172, (1997)
- [9] Chen, R.H., A. Kothawala, M. Chaos and L.P. Chew, *Combust. Flame*, **141**, 469-472, (2005)
- [10] Colorado State University, Software Tools & Spreadsheets, Transport Properties. <http://navier.engr.colostate.edu/tools/>
- [11] Ko, Y.S. and S.H. Chung, *Combust. Flame*, **118**, 151-163, (1999)