관내 프로판/공기와 메탄/공기 화염의 펄럭임 현상에 대한 연구

곽영태*† · 이대근** · 오광철*** · 신현동*

Study on the flickering behavior of propane/air and methane/air premixed flame confined in a tube

Young Tae Guahk, Dae Keun Lee, Kwang Chul Oh and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

Flickering behaviors of lean premixed flame of propane/air and methane/air flame anchored by a pilot flame in a tube were investigated. Unsteady behaviors of the flame were monitored by a high speed ICCD camera and the flickering frequency was defined as the number of flame curvatures passing a fixed spatial point in a second. Unlike previous studies in which flames are in open condition so that the flickering mechanism is an unstable interaction of hot buoyant products with the ambient air, flames in this study are surrounded by a tube which means they are not open to ambient air, so that there is no interaction between hot buoyant products and ambient air. Despite the fact, there exists flickering phenomena and the flickering frequency ranges from 10 Hz to 50 Hz which is wider compared to previous studies. We relate the flickering mechanism to flame-generated vorticity and analytic solution for locally approximated flow is used. As a result, the relationship between flickering wavelength and dimensionless vorticity is acquired and the cause of higher range of flickering frequency is explained.

Key Words : flickering(펄럭임), Fr number(Fr 수), dimensionless buoyant force(무차원 부력), dimensionless vorticity(무차원 와도)

1. 서 론

확산 화염의 펄럭임에 대한 연구는 우리가 흔히 쓰는 촛불에서 출발하였고 그 이후 여러 형태의 버너에서 실험적 연구가 행해졌다. 그 결과로 버너의 크기, 유량, 연료의 조성에 관계없이 확산 화염에서 10~20 Hz의 펄럭임(flickering)이 발생함이 잘 알려져 있다[1, 2]. Buckmaster[3] 등은 확산 화염의 펄럭임 주파수를 해석적으로 구하였다. 동축류 화염에서 화염이 위치하는 버너 가장자리에서의 유동장이 연료의 모멘텀이 약하여 부력에 의해 지배된다는 가정을 하였다. 그 결과 촛불의 유동장과 같이 부력에 의해서만 유동이 발생하는 간단한 형태의 유동장이 되어 유사해(similarity solution)를 이용하여 기본 유동장을 풀고, 지배 방정식에 섭동을 주어 화염의 안정성을 평가하였다. 섭동의 파장에 따라 섭동의 증가량을 구하여 증가량이 가장 큰 파장을 펄럭임 주파수라고 보았고, 약 17 Hz의 결과를 얻었다. Hamins[4] 등은 프로판, 메탄 화염에 대하여 유량 조건을 바꾸어 가며 펄럭임 주파수를 측정하였고, 그 결과를 연료의 유속 V_f와 버너의 직경 d를 기준으로 하는 Fr 수($=gd/V_f^2$)와 St 수($=fd/V_f$)의 관계로 나타내었다($St \propto Fr^{0.57}$). 또한 연소 가스의 밀도와 비슷하여 동일한 효과를 볼 수 있는 헬륨이 노즐에서 분사되는 실험에서의 펄럭임과도 비교하였다. 지수는 다르지만 비슷한

* 한국과학기술원 기계공학과
† 연락저자, E-mail: guahk@kaist.ac.kr
Tel : 042-869-3057 Fax : 042-869-8820
** 에너지 기술 연구원
*** 자동차 부품 연구원

경향을 얻었다($St \propto Fr^{0.38}$). Sato[5] 등은 중력을 변화시키면서 펄럭임 주파수를 측정하였고, 중력의 크기를 Fr 수에 포함하여 Fr 수와 St 수의 관계를 나타내었다. 속도의 크기에 따라 펄럭임 주파수가 달랐는데 낮은 속도 영역에서는 상수값($f \propto V_f^0$)을 가지다가 높은 속도 영역에서는 증가함($f \propto V_f^0$)을 보였다. 이 결과를 Fr 수와 St 수의 관계로 나타내 보면 낮은 속도 영역에서는 $St \propto Fr^{0.50}$, 높은 속도 영역에서는 $St \propto Fr^{0.41}$ 이다. 속도에 따라 Fr 수와 St 수의 관계식이 이렇게 다른 이유를 저자는 노즐에서의 유동 분포를 측정하여 설명하고 있는데, 낮은 속도 영역에서는 Buckmaster의 가정과 같이 화염대에서의 유동이 부력에 의해 지배되지만, 높은 속도 영역에서는 부력뿐만 아니라 제트의 모멘텀에 의해 영향받기 때문이라고 하였다. 높은 속도 영역에서의 속도 분포와 비슷한 Hamins의 헬륨 제트에서의 관계 지수가 0.38, 높은 속도 영역에서의 관계 지수가 0.41로 비슷하다는 점으로 미루어 두 현상의 펄럭임에 제트의 모멘텀이 큰 역할을 함을 알 수 있다.

화염펄럭임에 대한 대부분의 연구가 확산 화염에 집중되는 상황에서, Durox[6] 등이 노즐에서 예혼합가스가 분출되어 생성되는 분젠 화염 형태의 원뿔 화염에서 화염 펄럭임이 발생함을 처음으로 보고하였다. 저자는 펄럼임의 원인을 확산 화염에서의 펄럭임의 원인과 동일한 연소가스와 주위 공기 사이의 상호 작용에 의한 와도 생성이라고 보았고 확산 화염의 펄럭임 주파수를 해석적으로 구한 Buckmaster의 결과가 예혼합화염에도 적용이 가능함을 실험적으로 보였다. Kostiuk[7] 등은 분젠 화염 형태의 원뿔 화염에서 부력의 효과를 실험하였는데, 중력이 작용할 때의 펄럭임 주파수를 측정하고 중력이 존재하지 않을 때나 중력이 반대로 작용할 때는 화염 펄럭임이 발생하지 않음을 보였다. 당량비가 증가함에 따라 주파수가 증가하는 효과를 고려하여 주파수를 부피 팽창비로 나눈 값인 감쇄 주파수(reduced frequency)를 도입하여, 감쇄 주파수가 Re수에 따라 증가함을 보였고 $St^{*2}/Ri \propto Re^{2/3}$ 라는 최종 관계식을 얻었다. 이 때 무차원수에 사용한 변수는 예혼합기의 출구 유속, 버너 직경 등이다.

위에서 언급된 선행 연구에서 사용된 버너는 주위공기에 오픈되어 있어 기본적으로 연소가스와 주위공기와의 속도차에 의한 와동 생성을 유발하게 되지만, 본 연구에서 사용된 버너는 유리관에 싸여있어 주위공기와의 간섭에서 자유롭다. 그럼에도 불구하고 화염 펄럭임이 발생함을 관찰할 수 있는데, 이러한 연구는 과거에는 보고되지 않은 것으로서 펄럭임에 대한 새로운 관점을 제시할 수 있을 것이다. 실험 결과 10 ~ 50 Hz의 높은 주파수가 관찰되는데, 보통의 펄럭임 연구에서 관찰되는 10 ~ 20 Hz의 범위에 비해 높은 진동수를 가지는 특징이 있다. 이러한 특성을 분석하기 위해 기본 유동장을 해석하였고 얻어진 무차원 와도를 이용해 펄럭임 주파수를 분석하고자 한다.

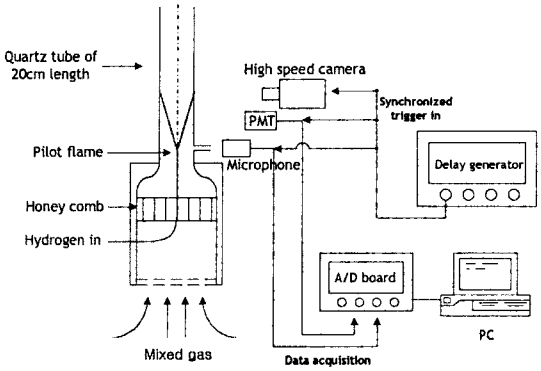

Fig. 1 Experimental setup

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 연소기와 측정장치의 개략도이다. 연료로는 프로판과 메탄을 사용하였고 산화제로는 공기를 사용하였다. 예혼합기의 평균 유속 범위는 10 cm/s에서 140 cm/s 이고, 당량비 범위는 0.45에서 0.8이었다. 이때 유리관 내경 50 mm를 기준으로 하면 Re 수는 360에서 5050이다. 유동의 축방향 속도를 균일하게 맞추기 위해 예혼합기가 허니콤(honeycomb)과 수축 노즐(contraction nozzle)을 차례로 통과하도록 하였다. 수소 파일롯 화염을 사용하여 뒤집어진 원뿔 형태의 화염(inverted conical flame)을 노즐 출구에 고정하였다. 이때 사용된 수소의 양은 20 cc/min 으로 발열량으로는 232 J/min 이다. 이는 평균 유속 30 cm/s , 당량비 1인 프로판/공기 혼합기의 발열량 130 kJ/min의 0.2% 정도의 값으로 파일롯 화염이 원뿔 형태의 화염에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 또한 파일롯 노즐의 직경이 0.7 mm로 유동의 교란을 최소화하였다. 직경 50 mm, 길이 220 mm의 석영관(quartz tube)을 사용하여 주위 공기의 유입을 막았는데, 이는 음향 에너지가 보존되게 하는 역할을 하여 열-음향 불안정성을 야기하게 된다.

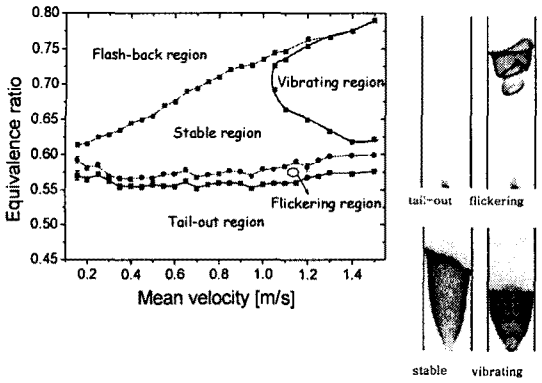

Fig. 2 Stability map of propane flame

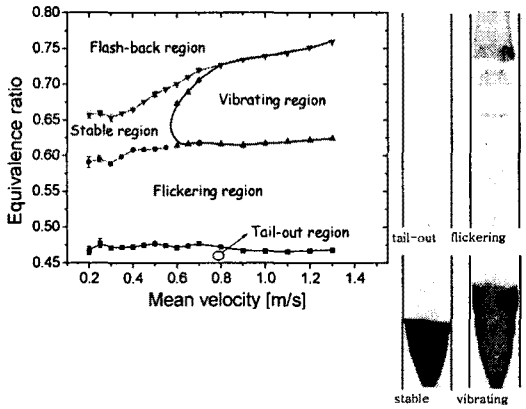

Fig. 3 Stability map of methane flame

2.2 화염 펄럭임 주파수 계측

화염 펄럭임 주파수의 측정을 위해서 세가지 방법의 사용이 가능하다. 첫번째는 PMT를 사용하여 화염의 자발광을 측정하는 방법이다. 프로판 화염의 경우 자발광이 강하여 FFT분석을 하면 최고 주파수(peak frequency) 값이 명확히 구분되는데 반해, 메탄 화염의 경우 자발광이 약하여 최고 주파수의 구별이 힘들다. 두번째는 He-Ne 레이저를 화염 펄럭임이 발생하는 부분에 통과시켜 PMT로 측정하는데, 연소 가스를 통과할 때와 미연소 가스를 통과할 때의 공기 밀도가 달라 레이저 빔의 강도가 달라짐을 이용하는 방법이다. 이 방법 또한 FFT분석 결과 최고 주파수의 구별이 힘들다. 세번째 방법은 고속 카메라를 이용하여 화염 펄럭임을 저장한 후 직접 화염 펄럭임의 횟수를 재는 방법이다. 세가지 방법을 비교해 보면 PMT나 He-Ne laser를 이용한 방법이 빠른 측정과 FFT분석이 가능하다는 장점이 있고, 고속 카메라를 이용한 방법은 약한 자발광도 잡아낼 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 고속 카메라를 이용하였지만, 나머지 두 방법을 더 향상시킬 수 있다면 더 효율적인 계측이 가능할 것이다.

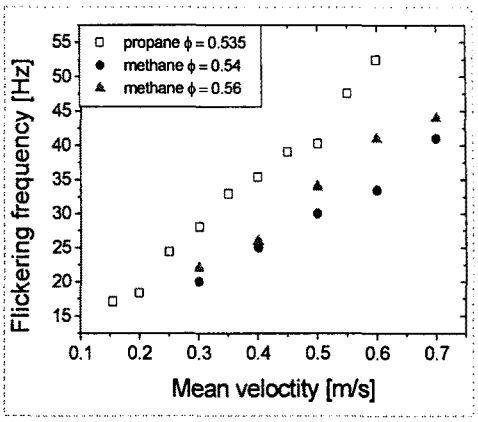

Fig. 4 Flickering frequency of propane and methane flame w.r.t. mean velocity and equivalence ratio

3. 결과 및 고찰

3.1 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도

Fig. 2와 Fig. 3는 각각 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도를 나타낸다[8]. 화염의 거동은 안정 영역(stable region), 역화 영역(flash-back region), tail-out 영역, 펄럭임 영역(flickering region), 진동 영역(vibrating region)의 5가지 영역으로 나뉜다. Tail-out 영역은 가연 한계에 가까운 당량비 조건으로 평균 유속이 연소속도에 비해 아주 크기 때문에 수소 파일롯 화염에 영향받는 영역에서 부분적으로만 화염이 존재하여 긴 원통형 화염으로 존재한다. 안정 영역에서는 프로판 화염과 메탄 화염 모두 뒤집어진 원뿔 모양으로 안정하게 유지된다. 역화 영역에서는 화염이 뜨거워진 파일롯 노즐 표면을 따라 역화한다. 화염에 의해 노즐이 달궈져 화염이 점점 아래로 내려가게 되고, 화염의 위치가 수축 노즐보다 낮아지면 유속이 연소속도보다 낮아져 역화하게 된다. 펄럭임 영역은 가연한계 근처로서 주위 유동의 교란에 의해 쉽게 영향을 받는 영역이다. 화염이 10 ~ 50 Hz로 펄럭이는데 이때 압력 변동을 측정한 결과 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있었다. 화염과 주 유동의 각도가 작아질수록 와도가 증가하여 화염이 더욱 불안정해진다.

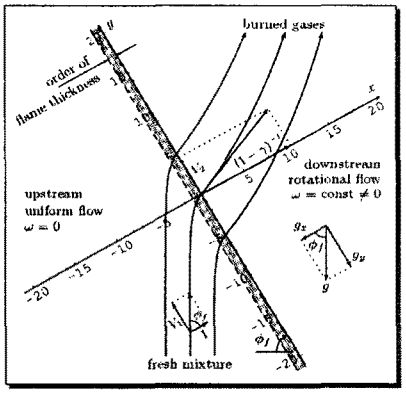

Fig. 5 Local approximation of an inclined flame in a gravitational field

3.2 펄럭임 주파수

프로판, 메탄 화염의 펄럭임 영역에서 펄럭임 주파수를 고속 카메라를 이용하여 측정하였다. 공간의 한 점을 지나는 화염 굴곡의 시간당 개수를 펄럭임 주파수로 정의하였고, 측정점의 위치에 관계없이 일정한 값을 나타냄을 확인하였다. 프로판 화염에서는 펄럭임 영역이 좁아 당량비 0.535의 한 조건에 대하여 실험하였고, 메탄 화염에 대해서는 당량비 0.54, 0.56에 대하여 실험하였다. 각 조건에서 단열 화염 온도는 1576 K, 1554.5 K, 1591.7 K이다. Fig. 4는 유속에 따른 펄럭임 주파수를 측정한 그래프이다. 프로판화염의 경우 같은 유속, 비슷한 당량비의 메탄 화염에 비해 펄럭임 주파수가 크게 나타남을 볼 수 있다.

3.3 펄럭임 주파수의 해석

3.3.1 화염대 상하류의 기본 유동장 해석

펄럭임 주파수 결과를 분석하기 위해 화염대 상하류에서의 유동해를 Lee의 분석 방법을 사용하여 얻었다. Lee[9, 10]는 반응을 위해 필요한 활성화 에너지가 매우 크다는 사실로부터 활성화 에너지 점근법(activation energy asymptotics)을 사용하여 중력장 하에서 기울어진 정상 상태의 1차원 평면화염 주위의 기본 유동장을 해석하여 안정성을 해석하였는데, 본 연구에서는 기본 유동장의 분석 방법을 참고하여 사용한다. 중력장 하에서 기울어져 있는 정상 상태의 1차원 평면 화염이 Fig. 5와 같이 반중력 방향으로 흐르는 밀도 ρ_u의 균일한 유동장 내에서 수평방향에 대해 ϕ_f의 각도를 가지고 기울어져 있는 경우를 생각하면., x^*방향으로의 모멘텀 방정식은 다음과 같다.

$$Pr\frac{d^2v^*}{dx^{*2}}-\frac{dv^*}{dx^*}=-\frac{g_y d}{u_L^{\,2}}\gamma \qquad (1)$$

여기서 Pr, x^*, v^*, g_y, γ은 각각 Prandtl 수 Pr = μ / D_{th}(μ : 동점성 계수, D_{th} : 열확산 계수), 화염 두께 d = D_{th} / $\rho_u u_L$ 로 무차원화된 x좌표, 연소 속도 u_L로 무차원화된 접선 방향 속도 v^*, 접선 방향 중력 가속도 g_y = gsin ϕ_f, 열팽창 계수 γ = 1-T_u/T_f 이다. (1)식에 경계조건($x^*\to-\infty$일 때 $v^*=V_1$, $x^*\to\infty$일 때 $v^*=V_2$)과 화염면에서 연속임을 이용하면 다음의 속도와 와도 결과를 얻을 수 있다.

$$v^*=\begin{cases} V_1+\dfrac{g_y d}{u_L^{\,2}}\gamma\left[Pr+\displaystyle\int_{-\infty}^{x^*}\left(\frac{e^{(1-1/Pr)z}}{1-\gamma+\gamma e^z}dz\right)\right]e^{x^*/Pr} \\ \qquad +\dfrac{1}{\gamma}\left(1+\dfrac{\gamma}{1-\gamma}e^{x^*}\right) & (x^*<0) \\ V_2+\dfrac{g_y d}{u_L^{\,2}}\gamma x^* & (x^*>0) \end{cases} \qquad (2)$$

$$\omega=\frac{dv^*}{dx^*}=\begin{cases} \dfrac{g_y d}{u_L^{\,2}}\gamma\left[1+\dfrac{1}{Pr}\displaystyle\int_{-\infty}^{x^*}\frac{e^{(1-1/Pr)z}}{1-\gamma+\gamma e^z}dz\right]e^{x^*/Pr} & (x^*<0) \\ \dfrac{g_y d}{u_L^{\,2}}\gamma & (x^*>0) \end{cases} \qquad (3)$$

$$\text{where}\quad V_2=V_1+\frac{g_y d}{u_L^{\,2}}\gamma\left(\frac{\mu}{\rho D_{th}}+\frac{1}{\gamma}\ln\frac{1}{1-\gamma}\right) \qquad (4)$$

여기서 V_1, V_2는 각각 상, 하류에서의 무차원 접선 방향 속도를 나타내는 상수값이고, ω는 x 에 따른 무차원 와도값을 나타낸다. 식 (1)의 오른쪽 편에 있는 무차원 부력항과 식 (3)의 화염대 하류의 무차원 와도항이 일치함을 볼 수 있어, 부력 효과가 화염면 상하류의 유동에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 또한 무차원 와도항이 펄럭임에 대한 연구들에 나오는 Fr 수와 구성 변수는 다르지만 형태는 같아 무차원 와도항이 펄럭임과 밀접한 연관이 있음을 예상할 수 있다.

3.3.2 펄럭임 파장과 무차원 와도의 관계

펄럭임에 의해 생성된 화염 굴곡이 단순히 화염대 접선 방향의 속도로 대류된다면 펄럭임 파장은 펄럭임 주파수와 화염대 접선 방향 속도에서 구할 수 있다.

$$\lambda=V_2 u_L/f \qquad (5)$$

화염이 기울어질수록 부력항의 효과가 커지므로 평균 유속과 당량비 변수를 화염각 ϕ_f 나타내 보았다. 이 때, 화염각 ϕ_f 평균 유속과 당량비로부터 구할 수 있다. 펄럭임 파장을 화염각으로 나타낸 것이 Fig. 6 인데, 각 실험(당량비는 고정한 상태에서 유속 증가한 실험)에 대해 하나의 파장으로 대표됨을 알 수 있다. 그런데 화염 펄럭임이 발생하는 낮은 당량비 영역에서는 화염각이 80도 정도로 이미 큰 값이므로 유속이 달라져도

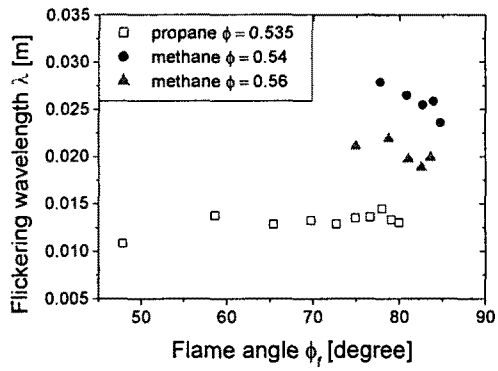

Fig. 6 Flickering wavelength w.r.t. flame angle

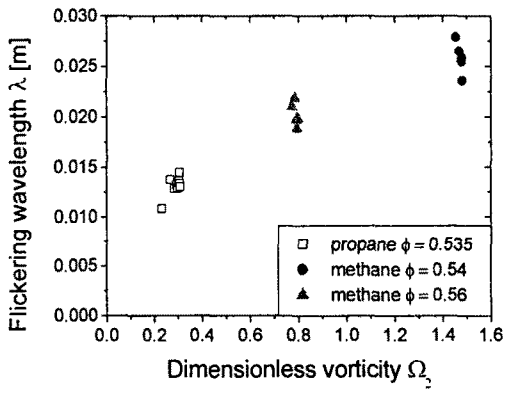

Fig. 7 Flickering wavelength w.r.t. dimensionless vorticity

g_y 값에는 큰 변화가 없게 된다. 결과적으로 무차원 와도를 식 (6)을 사용하여 계산하여 보면 유속 변화에 민감하지 않음을 볼 수 있다.

$$\Omega_2 = \frac{g_y d}{u_L^2}\gamma \qquad (6)$$

이를 이용하면 Fig. 7 와 같이 하나의 무차원 와도값에 대해 하나의 파장을 대응시킬 수 있게 된다. 이러한 관계를 이용하면 역으로 펄럭임 주파수를 얻을 수 있게 된다. 펄럭임 화염에서 생성되는 화염 굴곡의 파장은 무차원 와도에 의해 결정되고, 펄럭임 주파수는 무차원 와도와 화염대 접선 속도에 의해 결정된다.

이러한 연구 결과는 기존의 화염 펄럭임에 대한 연구와는 구별되는 것으로서 기존 연구들의 결과가 화염대 외부 변수인 버너 직경이 포함된 Fr 수와 St 수의 관계를 이끌어낸 데 비해, 본 연구에서는 화염대 내부 변수인 연소 속도, 화염 두께, 부피 팽창비, 화염대 접선 방향으로의 중력 가속도로 이루어진, Fr 수와 형태가 같은, 화염대에서의 무차원 와도값과 펄럭임 파장의 관계를 이끌어 내었다. 무차원 와도값과 펄럭임 파장과의 관계를 이용하면 기존 연구의 펄럭임 주파수 범위가 10 ~ 20 Hz임에 비해, 본 연구에서는 10 ~ 50 Hz의 범위임에 대한 설명이 가능하게 된다. 무차원 와도값이 펄럭임 파장을 결정하게 되고 해당 파장을 가지는 굴곡은 화염대 접선 방향의 속도로 대류되므로 평균 유속이 빠르고 화염각이 클수록 화염대 접선 방향 속도가 빨라져 큰 펄럭임 주파수를 가질 수 있게 되는 것이다. 이는 Fig. 4에서 평균 유속이 커짐에 따라 펄럭임 주파수가 커지는 것에서 확인할 수 있다.

이상의 연구에서는 몇 가지 가정을 사용하였다. 첫째, 펄럭임에 의한 굴곡이 화염대 접선 방향으로의 속도로 대류된다. 즉, 화염대 접선 방향 속도와 화염 굴곡의 대류 속도가 일치한다. 둘째, 화염면과 상류 유동의 수직 방향 속도가 이루는 각도를 평균 유속과 연소속도에 의해 구하였다. 하지만 Lee[9, 10]의 연구에 따르면, 화염대 접선 방향 속도와 화염 굴곡의 대류 속도가 Le수에 따라 달라지는 경향을 보인다. 또한, 화염에 의한 유동 재편에 의하여 관 가장자리로 갈수록 화염각이 커짐을 화염으로부터 확인할 수 있다. 본 연구가 이러한 한계를 가지지만 무차원 와도와 펄럭임 파장의 관계성을 파악하였다는데 의의가 있다고 생각된다. 향후 연구에서는 펄럭임 파장의 실제 크기와 대류 속도를 얻어, 무차원 와도와 펄럭임 파장 사이의 관계식을 이끌어내려고 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 파일롯 화염에 의해 고정된 관내 희박 예혼합 프로판/공기와 메탄/공기 화염의 펄럭임 현상에 대해 연구하였다.

펄럭임에 대한 선행 연구에서 사용된 버너는 주위공기에 오픈되어 있어 기본적으로 연소가스와 주위공기와의 속도차에 의한 와동 생성에 의해 펄럭임이 발생하지만, 본 연구에서 사용된 버너는 유리관에 싸여있어 주위공기와의 간섭에서 자유로워 외부 효과에 의한 와동 생성은 존재하지 않는다. 그럼에도 불구하고 화염 펄럭임이 발생함을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 화염에 의해 생성된 와도 생성이 원인이라고 보고 기본 유동장을 해석하여 얻어진 무차원 와도를 이용해 펄럭임 주파수를 분석하였다.

분석 결과 하나의 무차원 와도값에 대해 하나

의 파장을 대응시킬 수 있었다. 이러한 관계를 이용하면 역으로 펄럭임 주파수를 얻을 수 있게 된다. 펄럭임 화염에서 생성되는 화염 굴곡의 파장은 무차원 와도에 의해 결정되고, 펄럭임 주파수는 무차원 와도와 화염대 접선 속도에 의해 결정된다. 이러한 연구 결과는 기존의 화염 펄럭임에 대한 연구와는 구별되는 것으로서 기존 연구들의 결과가 화염대 외부 변수인 버너 직경이 포함된 Fr 수와 St 수의 관계를 이끌어낸 데 비해, 본 연구에서는 화염대 내부 변수인 연소 속도, 화염 두께, 부피 팽창비, 화염대 접선 방향으로의 중력 가속도로 이루어진, Fr 수와 형태가 같은, 화염대에서의 무차원 와도값과 펄럭임 파장의 관계를 이끌어 내었다. 무차원 와도값과 펄럭임 파장과의 관계를 이용하면 기존 연구의 펄럭임 주파수 범위가 10 ~ 20 Hz임에 비해, 본 연구에서는 10 ~ 50 Hz의 범위임에 대한 설명이 가능하게 된다. 무차원 와도값이 펄럭임 파장을 결정하게 되고 해당 파장을 가지는 굴곡은 화염대 접선 방향의 속도로 대류되므로 평균 유속이 빠르고 화염각이 클수록 화염대 접선 방향 속도가 빨라져 큰 펄럭임 주파수를 가질 수 있게 되는 것이다. 본 연구에서는 펄럭임에 의한 화염 굴곡의 전파 속도와 화염대 접선 방향으로의 유속이 같다는 가정을 하였으나 향후 연구에서는 펄럭임 파장의 실제 크기와 대류 속도를 얻어, 무차원 와도와 펄럭임 파장 사이의 관계식을 이끌어내어 이러한 관계를 확인할 계획이다.

후 기

이 연구는 과학재단 지정 우수연구 센터인 연소기술연구센터(CERC)의 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Kimura, I. "Stability of Laminar-Jet Flame", 10th Symposium on Combustion, p.1295, 1965.

[2] Toong *et al.*, "Mechanisms of Combustion Instability", 10th Symposium on Combustion, p.1301, 1965

[3] Buckmaster, J., Peters, N., "The Infinite Candle and Its Stability A Paradigm for Flickering Diffusion Flames", 21st Symposium on Combustion, pp.1829-1836, 1986

[4] Hamins, A., Yang, J. C., Kashiwagi, T., "An Experimental Investigation of the Pulsating Frequency of Flames, 24th Symposium on Combustion, pp.1695-1702, 1992

[5] Sato, H., Amagai, K., Arai, M., "Diffusion Flames and Their Flickering Motions Related with Froude Numbers under Vaious Gravity Levels", Combustion and Flame, Vol.123, pp. 107-118, 2000

[6] Durox, D., Baillot, F., Scouflaire, P., Prud'homme, R., "Some Effects of Gravity on the Behavior of Premixed Flames, Combustion and Flame, Vol.82, pp. 66-74, 1990

[7] Kostiuk, L. W., Cheng, R. K, "The Coupling of Conical Wrinkled Laminar Flames with Gravity", Combustion and Flame, Vol.103, pp. 27-40, 1995

[8] 곽영태, 오광철, 신현동, "관내 희박 예혼합 프로판/공기와 메탄/공기 화염의 거동에 관한 실험적 연구", 한국연소학회지, 10권, 2호, pp. 35-41, 2005

[9] Lee, D. K., "Local Stability analysis of laminar premixed curved flames", Ph.D. Thesis, KAIST, 2004

[10] Lee, D. K., Kim, M. U., Shin, H. D., "Stability of inclined planar flames as a local approximation of weakly curved flames", Combustion theory and modeling, Vol. 9, No. 4, pp.587-615, 2005