

제트확산화염과 예혼합화염의 다양한 속도 섭동에 대한 응답 특성

안명근* · 김태성* · 김희동** · 윤영빈*^{****}

*서울대학교 기계항공공학부 · **안동대학교 기계공학부

***서울대학교 기계항공공학부 및 항공우주신기술연구소

A Study on Response Characteristics of Jet-diffusion Flame and Premixed Flame with Various Velocity Perturbations

Myunggeun Ahn*, Taesung Kim*, Heuydong Kim** and Youngbin Yoon*^{****}

*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

**School of Mechanical Engineering, Andong National University, Korea

***Department of Mechanical and Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

(Received 31 January 2017, Received in revised form 31 March 2017, Accepted 25 April 2017)

ABSTRACT

An experimental study investigates the flame response characteristics of jet-diffusion flame and premixed flame. The experiment was conducted while varying the amplitude. Flame lengths were quantified for OH chemiluminescence measurement and compared with the result of the flame transfer function. Flame length and flame velocity perturbation were normalized and compared with the result of the flame transfer function. The comparison results appear that velocity perturbation and flame length oscillation of premixed flame show linear behaviors on the other hand jet-diffusion flame, amplitudes are more than 0.20, shows nonlinear behaviors of flame velocity perturbation and flame length oscillation.

Key Words : Flame Transfer Function (FTF), Flame response characteristics, Jet-diffusion flame, Premixed flame, Flame length

1. 서론

연소장치 개발 초기에는 출력을 더 중요시 여기며 작동유무와 기계적 완성에 초점을 맞추었다. 대부분의 연소형태는 확산화염의 연소형태였으며 화염형태에 따른 부작용으로 그을음(soot)이 발생하였다. 이후에 에너지 절약의 중요성이 강조됨에 따라서 연소의 형태가 확산화염에서 예혼합화염으로 변화되었다. 그러나 예혼합화염의 이론공연비(theoretical air-fuel ratio)부근에서 질소산화물(NOx)의 배출증가현상이 나타났다. 최근 환경오염문제가 대두되면서 배기가스 규제가 강화되고 이에 대한 대처방안으로 여러

연소방법을 고안하였다. 이전에 많이 쓰였던 농후연소방식(rich-burn)에 비하여 출력은 낮지만 최고 온도가 상대적으로 높지 않기 때문에 질소산화물 발생이 적은 희박연소방식(lean-burn)으로 대체되었지만 희박연소 시 불안정현상이 나타나는 단점이 존재했다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 연소불안정 연구가 진행되고 있다. 연소불안정 연구는 연소불안정의 예측과 제어로 나뉘는데 연소불안정의 예측을 위해서는 연소불안정이 발생하는 인자에 대해 연구를 해야 할 필요가 있다. 연소불안정이 발생하는 인자는 음향학적 섭동, 열 방출량 섭동, 속도 섭동이 있는데 이 세 가지 요인 중 한 가지 요인이 발생하였을 때 그 요인이 다른 요인에 영향을 미치고 다시 처음으로 되돌아오는 양성피드백연동(positive feedback coupling)을 통하여 세기가 증폭이 되어 주기적인 진동이 발생하면 연소불안정이 발생한다고 알려져 있다. 이러한 문제는 연소시스템 작동에 치

† Corresponding Author, ybyoon@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

명적인 영향을 주게 되며 궁극적으로는 연소기의 손상을 야기할 수 있다.

연소불안정의 기초연구로 제트화산화염과 예혼합 화염에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. You 등[1]은 단일 와류의 상호작용이 화산화염에서 어떠한 영향을 미치는지 실험적 연구를 수행하였다. Lakshminarasimhan 등[2,3]은 강한 진폭으로 가진 시 화산화염의 화염길이와 발광성 그리고 강한 진폭이 연료와 산화제의 혼합도에 미치는 영향을 실험적으로 수행하였다. 주 등[4]은 $H_2/CO/CH_4$ 의 혼합가스를 이용하여 부분에 혼합 모델 가스터빈 연소기에서 화염길이와 EINOx 그리고 ANN(Artificial Neural Network)의 실험적 연구를 하였다. 윤 등[5]은 H_2/CH_4 의 혼합가스를 이용하여 부분에 혼합 연소기에서 연소불안정의 모드 전이현상의 실험적 연구를 하였다. 황 등[6,7]은 H_2/CO 를 연료로 사용한 난류 제트화산화염의 화염안정화와 화염길이에 대한 EINOx의 실험적 연구를 하였다. 김 등[8]은 화산화염 연소기에서 벽-슈만화염 (Burke-Schumann flame)의 수치적 연구와 실험적 연구의 비교를 통하여 수치적연구와 실험적연구가 부분적으로 유사한 경향성이 나타나는 것을 확인하였다. Cho 등[9]은 예혼합화염에서 당량비 섭동에 따른 화염 응답특성에 대한 수치적 연구를 수행하였다. Wang 등[10]은 속도 섭동에 따른 예혼합화염의 화염응답특성을 수치적으로 연구하였다. Durox 등[11]은 여러 가지 형상을 가지는 예혼합화염 전달함수의 특징을 실험적으로 확인을 하였다. Schuller 등[12]은 가진 시 G-equation이 기반이 되는 비선형적 처리를 통해 예혼합화염의 화염응답특성을 실험적으로 연구하였다. Cuquel 등[13,14]은 공기유입을 차단하는 석영 관의 지름을 다양하게 하여 예혼합화염에서 화염응답특성 실험적 연구를 진행하였다.

이전 연구사례를 보았을 때 화산화염에 대한 화염응답특성에 대한 사례가 많지 않았으며 예혼합화염과 제트화산화염의 화염응답특성을 비교한 사례 또한 많지 않았다. 따라서 본 연구에서는 예혼합화염과 화산화염의 화염특성을 비교하였으며 실험 변수로 CH_4/H_2 가 50/50%인 혼합연료를 이용하여 다양한 속도 섭동에 대한 화염응답특성을 연구하였다. OH 자발광 계측을 통하여 화염길이를 수치화하였으며 이를 정규화(normalize)하여 정량적으로 비교를 하였다. 또한 화염전달함수를 구하여 화염길이 정규화와 비교하여 제트화산화염과 예혼합화염의 화염응답특성 연구를 수행하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 연소기의 단면도이다. Fig. 1의 (a)는 예혼합화염 연소기 단면도로서 연료는 연소기 하단의 연료주입구를 통해 공급되며 산화제는 양쪽에서 공급된다. 연료와 산화제는 공급 즉시 mixing

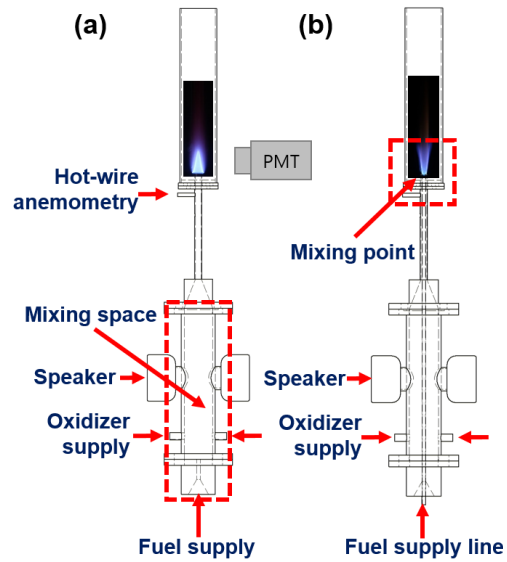


Fig. 1. Schematic diagram of the burner; (a) premixed flame burner (b) jet-diffusion flame burner.

space에서 혼합이 되며 혼합된 연료와 산화제는 노즐 끝에서 예혼합화염을 형성한다. Fig. 1의 (b)는 화산화염 연소기 단면도로서 연소기 하단의 연료공급 라인에서 연료가 공급되고 양쪽에서 산화제가 공급이 되어 각각 공급된 연료와 산화제는 노즐 끝에서 화산화염을 형성하게 된다. 연료공급라인과 동축으로 정렬된 산화제 공급라인의 외경은 각각 6.35 mm와 12.7 mm이며, 지름이 35 mm인 원형 석영 관(Quartz tube)을 이용하여 연소 시 외부 공기의 유입을 차단하여 연소기의 산화제 관에서 공급되는 산화제로 화염을 유지하는 환경을 조성하였다. 화염 섭동 관찰을 위해 스피커를 이용하였으며 스피커는 연소기 양쪽에 각각 장착하였다. 예혼합화염 버너의 경우 공급되는 가진주파수의 이동 경로가 단일노즐이지만 화산화염 버너의 경우에는 연료와 산화제가 따로 공급되는 연소기의 특징 때문에 가진주파수를 연료 또는 산화제공급 관에 주어야 한다. 연료의 공급 유량은 0.98 slpm인 반면에 산화제의 공급 유량은 11.40 slpm으로 상대적유량이 크다. 따라서 본 연구에서는 유량이 상대적으로 큰 산화제 공급라인에 가진주파수를 공급하여 화염섭동을 관찰하였다. 속도측정을 위한 열선유속계(Hot-wire anemometer)는 화염이 형성되는 노즐과 가능한 가까이 배치하여 속도측정 및 스피커의 주기성에 용이하도록 구성하였다. 가진주파수에 따른 화염의 거동을 관찰하기 위하여 OH 자발광(OH chemiluminescence)계측을 하였다. OH 자발광 계측은 최대 해상도 1024×1024 에서 초당 7000 Hz로 촬영이 가능한 초고속 카메라와 빛의 증폭을 위한 intensifire를 사용하였으며 렌즈는 f/2.8, 100

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Change
Fuel & Oxidizer	CH ₄ /H ₂ & Air
Fuel compositions	CH ₄ /H ₂ (50/50 %)
Supply rate of fuels	0.98 slpm (respectively)
Supply rate of air	11.40 slpm
Forcing frequency	40 - 300 Hz (20 Hz steps)
Magnitudes of amplitude	
Premixed flame	0.15, 0.30, 0.45
Jet-diffusion flame	0.12, 0.15, 0.25, 0.35

*slpm : standard liter per minute (L/min)

mm의 UV 렌즈를 사용하였다. 필터는 OH 라디칼을 80%투과시키는 band-pass filter를 사용하였다. 화염 가시화를 위해 DSLR 카메라를 이용하였으며 노출 시간 10초로 설정하여 화염이미지를 획득하였다. 열 방출량 계측을 위해서 노즐 부근에 PMT(Photo Multiplier Tube)를 장착하였다.

2. 실험장치 및 방법

Table 1은 본 연구의 실험 조건이다. 실험에 쓰인 연료는 CH₄/H₂의 혼합연료이며 혼합비는 50/50 %이다. 산화제는 공기를 사용하였다. 연료와 산화제의 공급은 MFC(Mass Flow Controller)제어를 통하여 공급하였으며 연료혼합조성비는 CH₄/H₂ 각각 50/50 %이다. 연료 공급유량은 CH₄/H₂가 각각 0.98 slpm으로 공급되며, 공기의 공급유량은 11.40 slpm으로 공급하였다. 본 연구의 연료와 공기의 공급유량은 예혼합화염의 당량비(equivalence ratio) 1 기준이다. 예혼합화염과 확산화염의 정량적인 비교를 위하여 예혼합화염의 당량비 1 기준의 연료와 공기 공급유량을 확산화염에도 동일하게 공급하였다. 화염섭동을 위한 가진주파수는 40 - 300 Hz 까지 20 Hz씩 증가시키며 공급을 하였으며 화염섭동 크기를 다양하게 관찰하기 위해서 스피커 전압을 증가시키며 다양한 진폭을 생성하였다. 진폭(amplitude)은 평균속도 대비 속도 섭동 크기로 예혼합화염의 진폭은 0.15, 0.30, 0.45 확산화염의 진폭은 0.12, 0.15, 0.25, 0.35로 공급하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 예혼합화염과 확산화염의 화염형상 화염형상 및 노즐 끝단

Fig. 2는 본 연구에서 응용한 예혼합화염과 확산화염을 DSLR 카메라와 OH 자발광 계측을 통해 가시화한 결과이다. Fig. 2의 (a), (c)는 DSLR 카메라의

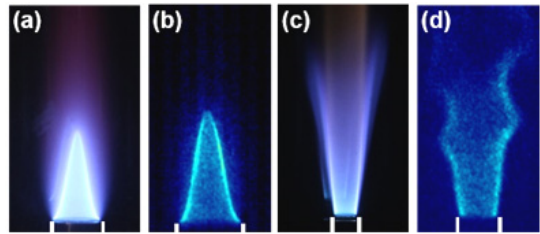


Fig. 2. Premixed flame & jet-diffusion flame visualization results; captured by (a), (c) DSLR camera, (b), (d) OH chemiluminescence in 120 Hz, Amplitude of 0.15.

노출시간을 10초로 설정하여 획득한 사진이며 (b)와 (d)는 가진주파수 120 Hz, 평균속도 대비 속도 섭동 크기가 0.15일 때 OH 자발광 계측을 통해 획득한 가시화사진이다.

Fig. 2의 (a)와 (b)는 예혼합화염을 가시화한 사진이며 화염섭동을 위한 가진주파수는 단일 노즐을 통해 공급되며 MFC 제어를 통해 공급되는 연료와 공기는 공급즉시 연소기의 mixing space에서 혼합이 되어 노즐 끝에서 화염을 형성한다. 본 연구의 예혼합화염은 코니칼 화염(conical flame) 형상인데 이는 연료와 산화제가 섞인 후 공급되는 일반적인 예혼합화염의 형상이다.

Fig. 2의 (c)와 (d)는 확산화염의 가시화사진이다. 본 연구에서 사용한 확산화염의 연소기는 연료공급 라인에서 연료가 공급이 되며 동축으로 정렬된 공기공급라인에서 공기가 공급이 되어 노즐 끝에서 확산화염을 형성한다. 주파수에 따른 화염섭동을 더 잘 관찰할 수 있도록 가진주파수는 연료공급라인보다 유량이 큰 공기공급라인에 주파수를 공급하였다. 본 연구의 확산화염 형상은 제트화염(jet flame)의 형상으로 관찰되지만 화염의 끝이 닫힌 일반적인 제트화염의 형상은 아니다. 화염의 끝이 닫히지 않는 현상은 두 가지 이유에 의하여 설명할 수 있다. 첫 번째 이유는 실험조건이다. 본 연구에서는 연료와 공기의 유량이 예혼합화염의 당량비 1의 연료와 공기 공급유량을 기준으로 실험하였다. 예혼합화염에는 당량비라는 개념이 존재하지만 확산화염에는 그렇지 않기 때문에 두 화염의 정량적인 비교를 위하여 예혼합화염의 당량비 1인 연료와 공기공급유량을 기준으로 확산화염에 똑같이 적용하여 실험을 진행하였다. 예혼합화염의 당량비 1의 실험조건을 확산화염에 적용하여 실험을 진행할 때 제트화염의 끝이 닫히기에는 충분히 많은 공기의 유량이 공급되지 않아 끝이 열린 제트화염이 형성된다. 만약 충분히 많은 공기가 공급되면 화염의 끝이 닫히며 화염 길이가 신장되는 제트화염을 형성한다. 두 번째 이유는 연소 시 외부공기유입을 차단하는 석영 관 때

문이다. 석영관을 장착하지 않았을 때에는 화염의 끝이 닫히는 일반적인 확산화염의 모양이 형성되지만 석영관을 장착하면 화염의 끝이 닫히기 위한 외부공기 유입이 차단되며 화염을 유지하기 위해서 동축으로 정렬된 공기공급라인에서 공급되는 공기만을 의지해야 하기 때문에 Fig. 3과 같이 끝이 닫히지 않은 제트확산화염이 형성하게 된다.

Fig. 3은 OH 자발광 계측을 통해 획득한 위상별 화염사진이다. Fig. 3 (a)는 예혼합화염, (b)는 확산화염의 위상별 사진이다. (a)와 (b)는 동일한 실험조건인 100 Hz의 가진주파수, 0.30의 진폭에서 계측을 하였다.

3.2. 확산화염과 예혼합화염의 화염 길이

3.2.1. 예혼합화염의 화염 길이

Fig. 4는 평균속도 대비 속도 섭동의 크기를 0.15와 0.30으로 공급하였으며 가진주파수에 따른 화염의 최대-최소길이를 도시한 예혼합화염의 화염길이 그래프이다. 화염거동특성을 수치화시키기 위하여 OH 자발광 계측을 통해 획득한 3000장의 화염이미지 최대강도를 35%로 제한하여 에러데이터를 제거

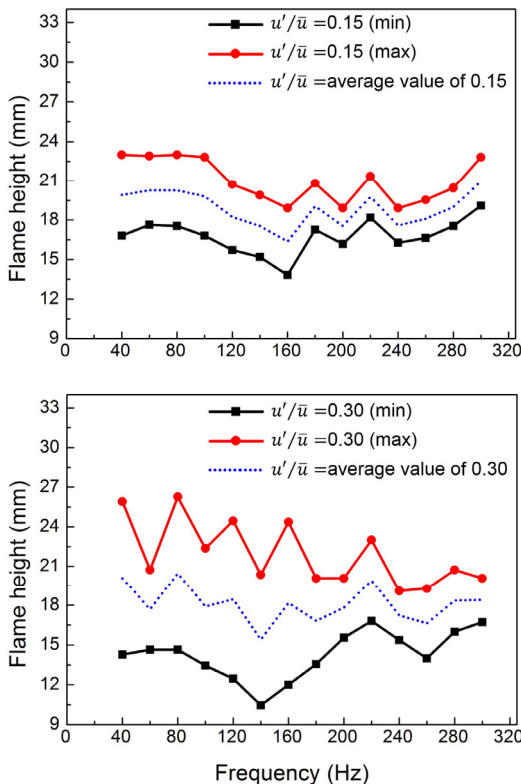


Fig. 4. Flame height of premixed flame with amplitudes of 0.15, 0.30.

한 픽셀정보를 획득하였다. 최대강도가 35% 미만에 해당하는 픽셀을 제거하였을 때 화염 형상에는 거의 영향이 없었으며 노이즈만 제거되는 것을 확인하였다. 그래프의 검정색 선은 가진에 따른 화염의 최소 길이를 나타는 것이며 빨간색 선은 가진 시 최대 길이이고 파란색 점선은 둘의 평균길이를 도시한 것이다. 진폭이 0.15인 경우에는 화염의 최대-최소길이 변동이 160 Hz를 기점으로 감소 후 증가하는 경향성을 나타내며 180 Hz와 220 Hz에서 화염의 길이가 급작스럽게 신장되는 현상을 관찰할 수 있다. 또한 화염의 최대-최소길이의 변동폭이 160 Hz 이전보다 160 Hz 이후가 더 좁아지는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 가진주파수가 증가할수록 파장(wavelength)이 짧아지는 현상과 관련이 있는 것으로 파장의 길이가 긴 저주파에서는 화염의 신장율이 크지만 주파수가 증가하면서 파장의 길이가 짧아지기 때문에 화염의 최대-최소 길이의 차이가 작아지는 것으로 생각이 된다. 반면에 진폭이 0.30인 경우에는 화염의 최대-최소 길이의 차이가 일정하지 않는 것을 관찰할 수 있다. 진폭이 0.15인 경우에는 화염이 늘었다 줄어드는 신장율이 일정한 비율로 나타나는 것을 관찰할 수 있지만 진폭이 0.30인 경우의 신장율이 일정하지 않은 것 볼 수 있으며 최대길이에 해당하는 빨간색 선이 가진주파수에 따라 급격하게 변동되는 것을 볼 수 있다. 그러나 두 진폭 모두 최대-최소 길이의 평균길이를 도시한 파란색 점선을 통하여 관찰해본 결과 화염의 평균길이는 비슷하다는 것을 알 수 있다.

3.2.2. 확산화염의 화염 길이

Fig. 5는 OH자발광 계측을 통해 이미지를 획득하여 후처리과정을 통해 확산화염의 화염 길이를 수치화하였다. 본 연구의 확산화염은 끝이 닫히는 일반적인 확산화염이 아니기 때문에 예혼합화염과 조금 다른 후처리과정을 통해 화염길이를 측정하였다. 획득한 이미지 픽셀정보의 에러데이터를 화염형상에 영향을 미치지 않도록 효과적으로 제거하기 위하여 예혼합화염과 마찬가지로 최대강도를 35%로 제한하였다. 노이즈를 제거한 후 화염길이 측정오차를 줄이기 위하여 한 주파수 당 3000장의 이미지를 분석하여 최대높이를 측정하였다. 진폭이 0.12인 경우에는 화염의 최대-최소길이 변동폭이 주파수가 증가함에도 일정하게 유지되는 현상을 관찰할 수 있으며 100 Hz를 기점으로 감소하던 화염 길이가 100 Hz 이후에 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 진폭이 0.25과 0.35인 경우에는 화염의 최대길이에 해당하는 빨간색 선이 몇몇 주파수에서 튀는 현상이 발견되지만 대부분의 구간에서 변동폭이 일정하게 유

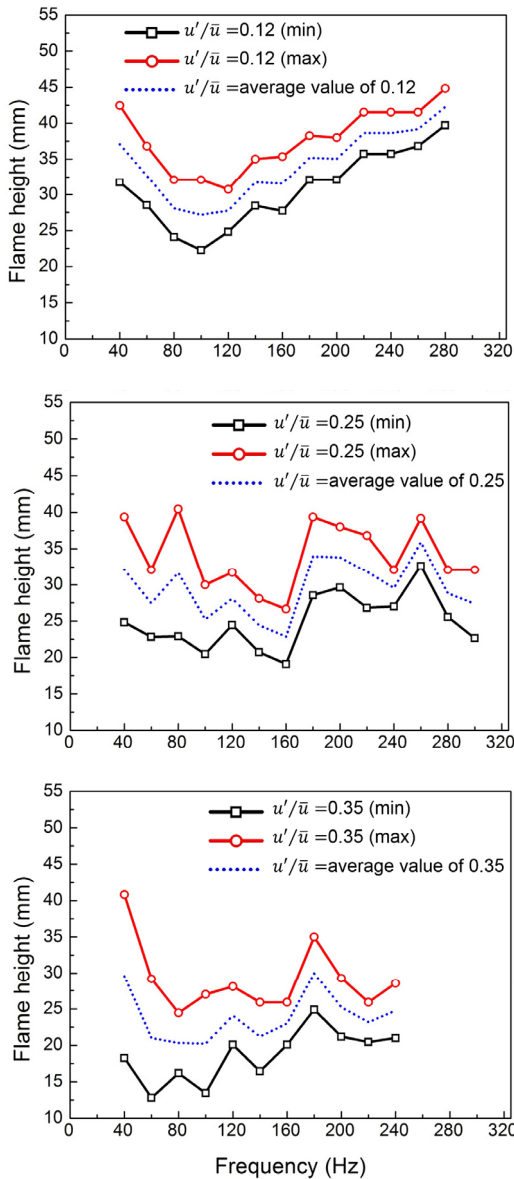


Fig. 5. Flame height of jet-diffusion flame with amplitudes of 0.12, 0.25, 0.35.

지되는 것을 관찰할 수 있다. 진폭이 0.12에서 0.35으로 증가할수록 화염의 최소길이가 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 확산 화염의 연료혼합 특성으로 인한 것으로 중앙에 위치한 연료공급라인과 동축으로 정렬된 공기공급라인에서 가진주파수에 의해 발생하는 혼합도가 진폭이 증가함에 따라서 함께 증가하기 때문이다.

3.2.3. 예혼합 화염의 진폭에 따른 화염 길이 정규화

Fig. 6은 속도 섭동의 진폭 크기에 따라 화염 길이

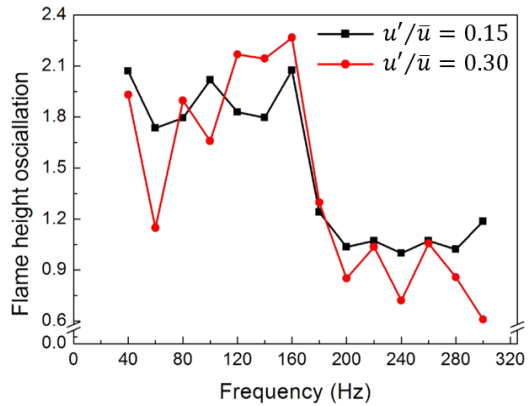


Fig. 6. Normalized premixed flame height with amplitudes of 0.15, 0.30.

의 특성이 다르게 나타나는 현상을 정량적으로 관찰해보기 위하여 속도 섭동의 진폭을 하나의 함수로 보아 화염 길이를 정규화한 그래프이다. 화염 길이와 진폭의 관계식은 다음과 같이 정의하였다.

Flame height oscillation =

$$\frac{\text{Flame height (max - min)}}{\text{Flame height (average)}} \times \frac{1}{u'/\bar{u}} \quad (1)$$

화염의 최대-최소길이의 차를 화염의 평균 길이로 나누는 결과를 다시 진폭으로 나누어 정의하였다. 예혼합 화염의 화염 길이 정규화 결과에 따르면 0.15, 0.30의 진폭 모두 160 Hz 이전에는 평균적으로 높은 값을 유지하며 완만한 기울기를 가지는 것을 관찰할 수 있지만 160 Hz에서 기울기가 급격히 떨어지며 160 Hz 이후에는 상대적으로 낮은 평균값을 가지며 완만한 기울기를 나타낸다. 따라서 화염 길이의 섭동 정도는 속도 섭동 크기와 선형적인 관계가 있음이 관찰된다.

3.2.4. 확산 화염의 진폭에 따른 화염 길이 정규화

Fig. 7은 예혼합 화염과 마찬가지로 제트 확산 화염의 진폭에 따른 화염 특성을 정량적으로 관찰해보기 위하여 가진주파수에 진폭을 변수로 추가하여 진폭을 하나의 함수로 보아 Fig. 7과의 그래프로 나타내었다. 진폭이 0.12인 경우와 0.25, 0.35인 두 경우 모두 감소하는 기울기는 비슷하지만 정규화 값의 크기 차이가 구별되는 것을 관찰할 수 있다. 진폭이 0.12인 경우에는 다른 진폭에 비하여 더 높은 값을 가지며 감소하는 경향을 나타내지만 진폭이 0.25와 0.35인 경우에는 두 진폭이 비슷한 값을 가지며 가진주파수가 증가함에 따라 진폭은 감소하는 경향을 나타낸다.

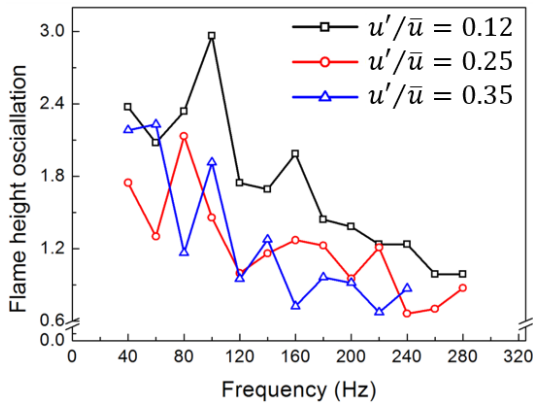


Fig. 7. Normalized jet-diffusion flame height with amplitudes of 0.12, 0.25, 0.35.

3.3. 확산화염과 예혼합화염의 화염전달함수

3.3.1. 예혼합화염의 응답과 위상차

본 연구에서는 유동 섭동과 열 발생량 섭동의 관계를 파악하기 위하여 제어의 전달함수개념을 화염에 대해 적용하여 섭동주파수의 함수로 나타낼 수 있는 화염전달함수(Flame Transfer Function)를 사용하였다. 화염전달함수는 다음과 같이 표현한다.

$$F(\omega) = \frac{\dot{q}'/\dot{Q}_0}{u'/U_0} = G(\omega)e^{i\phi(\omega)} \quad (2)$$

위 식에서 $G(\omega)$ 는 화염전달함수의 게인(gain)이라 하며 응답세기를 나타내고 $\phi(\omega)$ 는 위상차로 실수부는 시스템의 고유주파수, 허수부는 초기 불안정인자의 성장률로 허수부가 음수일 때 불안정이 증폭한다.

Fig. 8은 예혼합화염의 가진주파수에 따른 화염전달함수의 응답과 위상차이다. 예혼합화염의 응답 값은 180 Hz 이전에는 감소하던 응답 값이 180 Hz 이후에 기울기가 완만해지며 응답 값이 크게 변동되지 않는 것을 관찰할 수 있다. 또한 0.15와 0.30의 진폭 모두 가진주파수가 증가하면 응답 값은 감소하는 경향성을 보이며 두 진폭에 다른 응답 값의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 진폭이 다름에도 같은 값을 가지는 결과는 위상차에서도 나타난다. 위상차의 결과에서 응답 값과 마찬가지로 두 진폭이 같은 값을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 진폭크기가 다름에도 불구하고 응답 값과 위상차의 값이 동일한 이유는 화염전달함수의 가정인 속도 섭동에 대한 열 방출량이 비례한다는 의미에서 예혼합화염은 화염전달함수 가정에 잘 부합한다고 판단할 수 있다. 이를 통해 이전연구[14]에서 진폭이 0.20 이상에 대해 속도 섭동 값의 변화가 열 방출량에 큰 영

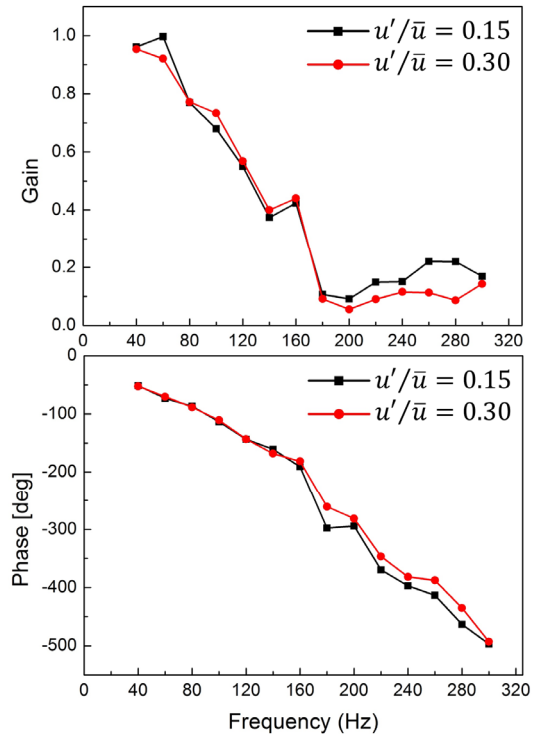


Fig. 8. The result of premixed flame response characteristics with gain and phase.

향이 없다는 설명이 진폭이 0.30인 경우까지도 유효함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

3.3.2. 예혼합화염의 응답과 진폭에 따른 화염 길이 정규화와 비교

다음은 Fig. 6의 예혼합화염의 화염길이 정규화 값과 Fig. 8의 예혼합화염의 화염전달함수 응답 값의 비교이다. 화염전달함수 응답 값은 두 진폭 모두 같은 값을 가지는 선형적인 경향을 보이며 응답 값의 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향이지만 160 Hz 이후에는 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 화염 길이 정규화 역시 화염전달함수의 응답 값과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 화염길이 정규화에서 두 진폭이 비슷한 값을 가지며 160 Hz를 기점으로 급격하게 감소하던 값이 완만해지는 것 또한 확인을 하였다. 이는 화염 섭동 크기가 커지면 응답 값도 커지며 화염섭동 크기가 작아지면 응답 값도 그만큼 작아지는 현상이라고 말할 수 있는데 이러한 결과는 화염전달함수의 가정에 부합하는 것을 알 수 있다. 따라서 예혼합화염에서 가진주파수에 따른 화염 길이 섭동은 화염전달함수의 응답과 어느정도 연관이 있다고 판단할 수 있다. 즉, 화염의 거동특성은 열방출량 섭동과 관련이 있다는 것을 확인하였다.

3.3.3. 확산화염의 응답과 위상차

Fig. 9는 확산화염의 가진주파수에 따른 응답 값과 위상차의 화염전달함수 결과이다. 응답 값은 40 Hz에서 모든 진폭이 같은 응답 값을 가진다. 60 Hz에서는 0.12와 0.15는 유사한 경향으로 증가하지만 0.25와 0.35는 전혀 다른 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 80 Hz 이후에는 응답 값의 경향이 뚜렷하게 나타난다. 0.15, 0.25, 0.35의 세 진폭은 비슷한 응답 값으로 감소하는 경향이 나타나는 것을 볼 수 있지만 0.12의 진폭은 다른 진폭들보다 큰 응답 값을 가지며 감소하는 현상이 나타난다. 0.12의 진폭이 다른 세 진폭과 응답 값의 차이가 발생하는 이유는 주어진 속도 섭동에 대한 열 방출량의 크기가 다르기 때문이다. 즉, 확산화염의 응답 값은 비선형적인 거동을 한다고 판단할 수 있다. 위상차의 결과에서는 0.12와 0.15가 비슷한 값을, 0.25와 0.35가 비슷한 값을 가진다. 응답 값의 결과로 미루어보아 확산화염에서는 속도 섭동과 열방출량 섭동이 비례하는 화염전달함수보다 속도 섭동을 변수로 가지는 화염 묘사함수(Flame describing Function)를 사용해야 화염 응답특성을 자세히 관찰할 수 있을 것이라 판단된다.

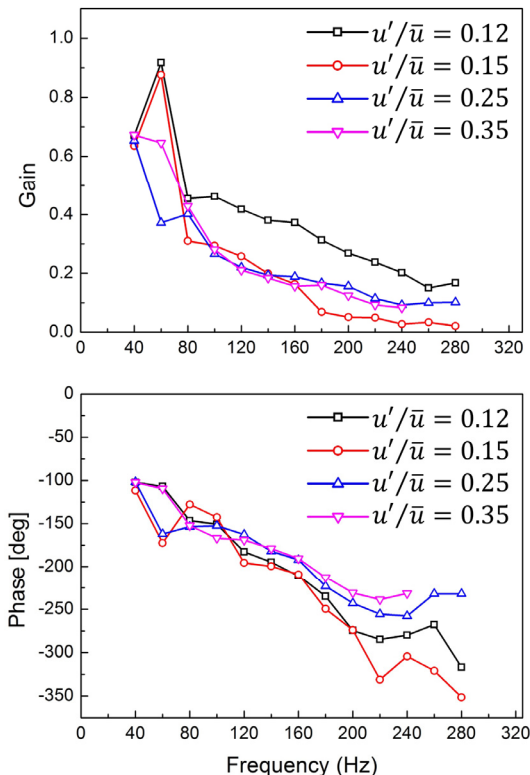


Fig. 9. The result of jet-diffusion flame response characteristics with gain and phase.

3.3.4. 확산화염의 응답과 진폭에 따른 화염 길이 정규화와 비교

다음은 Fig. 7의 화염 길이 정규화 값과 Fig. 9의 화염전달함수의 응답의 비교이다. Fig. 9에서는 0.15에 해당하는 진폭이 존재하지만 Fig. 7에서는 0.15에 해당하는 진폭이 존재하지 않음을 알 수 있다. 이는 화염길이를 수치화하기 위한 OH 자발광 계측 시 0.15의 진폭은 계측하지 않았지만 0.15의 열 방출량을 계측함으로써 0.12와 0.25 사이의 열 방출량을 계측함으로써 화염거동 특성을 파악해 보았다. 계측결과 Fig. 9의 응답 값에서 나타나듯이 0.12의 진폭과 나머지 세 진폭인 0.15, 0.25, 0.35은 다른 거동을 하는 것을 확인하였다. Fig. 7의 화염 길이 정규화도 Fig. 9의 응답과 비슷한 경향성을 보인다. Fig. 7의 정규화그래프에서 0.12의 진폭과 0.25, 0.35의 진폭인 두 경우의 기울기 감소 경향성과 화염전달함수의 응답 값 기울기 감소경향성이 유사한 것으로 관찰된다. 화염전달함수의 계인과 화염 길이 정규화의 결과를 통해 확산화염은 예혼합화염과 다르게 진폭이 0.20 이상에서 속도 섭동과 화염길이 섭동의 비선형적인 영역이 존재함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 예혼합화염과 제트확산화염의 화염특성을 연구하였다. 실험 변수로 CH₄/H₂의 혼합연료를 사용하였으며 혼합비는 50/50 %이다. 가진주파수와 평균속도 대비 속도 섭동 크기인 진폭을 다양하게 변경하며 실험을 하였으며 OH 자발광(OH Chemiluminescence) 계측으로 화염 길이를 수치화하였고 PMT(Photo Multiplier Tube)를 이용하여 화염전달함수를 구하였다. 화염길이의 정규화(Normalized) 결과를 통해 화염길이에 대한 화염응답특성을 비교하였다.

예혼합화염의 화염특성결과는 다음과 같다.

- 1) 가진주파수에 따른 화염길이는 진폭이 커질수록 화염 섭동이 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 화염전달함수 결과 진폭에 따른 계인 값의 선형적인 거동 특성을 확인하였다. 이 결과로 속도섭동과 열 방출량이 선형적인 관계가 있음을 파악하였다.

확산화염의 화염특성 결과는 다음과 같다.

- 1) 가진주파수에 따른 화염길이는 진폭이 커질수록 연료와 공기의 혼합도가 증가하여 화염길이가 짧아지는 것을 확인하였다.
- 2) 화염전달함수 결과 진폭에 따른 계인 값이 진폭이 0.20 이상인 경우에는 선형적인 거동특성을 보였지만 0.20 이하의 경우 비선형적인 거동 특성을 확인하였다.

본 연구는 제트확산화염과 예혼합화염의 화염특성을 실험적으로 확인해 보았으며 향후 연구에서는 다양한 연료조성비와 다양한 진폭에 따른 예혼합화염과 제트확산화염의 화염특성을 실험할 예정이다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 핵심연구지원사업(No. 2015R1A2A2A010043)과 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

References

- [1] Y.H. You, D.K. Lee, H.D. Shin, Visual Investigation of a Vertex Ring Interacting with a Nonpremixed Flame, *Combust. Sci. and Tech.*, 139 (1998) 365-393.
- [2] K. Lakshminarasimhan, N. T. Clemens, O. A. Ezekoye, Characteristics of Strongly-forced Turbulent Jets and Non-premixed Jet Flames, *Exp. Fluids*, 41 (2006) 523-542.
- [3] K. Lakshminarasimhan, M.D. Ryan, N.T. Clemens, O.A. Ezekoye, Mixing Characteristics in Strongly Forced Non-premixed Methane Jet Flames, *Proc. Combust. Inst.*, 31 (2007) 1617-1624.
- [4] S. Joo, J. Yoon, J. Kim, M.C. Lee, Y. Yoon, NOx Emissions Characteristics of the Partially Premixed Combustion of H₂/CO/CH₄ Syngas using Artificial Neural Networks, *Appl. Therm. Eng.*, 80 (2015) 436-444.
- [5] J. Yoon, S. Joo, J. Kim, M.C. Lee, J. Lee, Y. Yoon, Effects of Convection Time on the High Harmonic Combustion Instability in a Partially Premixed Combustor, *Proc. Combust. Inst.*, 36 (2017) 3753-3761.
- [6] J. Hwang, N. Bouvet, K. Sohn, Y. Yoon, Stability of Attached Flame in H₂/CO Syngas Non-premixed Turbulent Jet Flame, *J. Korean Soc. Combust.*, 17 (2012) 22-29.
- [7] J. Hwang, K. Sohn, N. Bouvet, Y. Yoon, Flame Length and EINO_x Scaling of Syngas H₂/CO Turbulent Non-premixed Jet Flames, *J. Korean Soc. Combust.*, 17 (2012) 30-37.
- [8] T. Kim, M. Ahn, J. Hwang, S. Kim, Y. Yoon, The Experimental Investigation on The Response of The Burke - Schumann Flame to Acoustic Excitation, *Proc. Combust. Inst.*, Article in press.
- [9] J.H. Cho, T. Lieuwen, Laminar Premixed Flame Response to Equivalence Ratio Oscillations, *Combust. Flame*, 140 (2005) 116-129.
- [10] H.Y. Wang, C.K. Law, T. Lieuwen, Linear Response of Stretch-affected Premixed Flames to Flow Oscillations, *Combust. Flame*, 156 (2009) 889-895.
- [11] D. Durox, T. Schuller, N. Noiray, S. Candel, Experimental Analysis of Nonlinear Flame Transfer Functions for Different Flame Geometries, *Proc. Combust. Inst.*, 32 (2009) 1391-1398.
- [12] T. Schuller, S. Ducruix, D. Durox, S. Candel, Modeling Tools for The Prediction of Premixed Flame Transfer Functions, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2002) 107-113.
- [13] A. Cuquel, D. Durox, T. Schuller, Impact of Flame Base Dynamics on The Non-linear Frequency Response of Conical Flames, *Comptes Rendus Mécanique*, 314 (2013) 171-180.
- [14] A. Cuquel, D. Durox, T. Schuller, Scaling The Flame Transfer Function of Confined Premixed Conical Flames, *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2013) 1007-1014.