

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.197

예혼합 분젠 화염에서의 화염 표면적 변동이 열발생 변동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구[§]

박장희* · 이대근** · 신현동*†

* 한국과학기술원 기계공학과, ** 한국에너지기술연구원

Experimental Study on the Effect of Flame Surface Area Fluctuation on the Heat Release Fluctuation in a Premixed Bunsen Flame

Jang Hee Park*, Dae Keun Lee** and Hyun Dong Shin*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

** Korea Institute of Energy Research

(Received September 21, 2009 ; Revised December 10, 2009 ; Accepted December 10, 2009)

Key Words : Spontaneous Oscillation(자발 진동), Heat Release Fluctuation(열 발생 변동), Flame Surface Area(화염 표면적)

초록 : 자발 진동하는 층류 예혼합 분젠 화염을 관찰하기 위하여 분기관을 가진 연소기를 제작 하였다. 특히, 조건에 따른 화염 거동을 살펴봤으며, 화염 표면적과 열발생 변동의 관계에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 사용된 당량비는 1.1 이고, 노즐 출구 평균 유속은 1.75 m/sec 이다. 연소 챔버와 분기관의 길이비(L:R)는 연소기 내 압력 변동에 영향을 미치며, 결과적으로 화염 거동 특성이 달라짐을 관찰하였다. 또한, 간섭 필터의 유무에 따른 OH*, CH*, 그리고 화염 자발광은 정성적으로 유사한 거동을 나타냈으며, 자발 진동하는 층류 예혼합 분젠 화염의 화염 표면적 변동과 열발생 변동은 선형적인 관계를 가짐을 확인하였다.

Abstract: A combustion chamber with a branch tube was built to investigate the characteristics of a spontaneous oscillating laminar premixed Bunsen flame. The flame behavior was observed, and the relation between the flame surface area and heat release rate was inspected. The equivalence ratio and mean velocity were fixed at 1.1 and 1.75 m/s, respectively. The amplitude of the pressure fluctuation in the combustion chamber was changed and the flame behavior was affected when the length ratio between the branch tube and combustion chamber (L:R) was varied. The OH*, CH*, and flame chemiluminescence had similar behavior qualitatively. There was linearity between the flame surface area and heat release rate.

1. 서 론

열-음향 불안정성은 연소기 내 압력 변동과 열발생 변동으로 인한 화염의 자발 진동을 말하며, 연소기에 심각한 손상을 줄 뿐만 아니라 소음의 원인이 되기 때문에, 오랫동안 많은 연구자들에게 제어의 대상이 되어왔다. 자발 진동의 발생 기구에 대한 연구 이후, 그 제어를 위해 외부 섭동에 대한 화염의 반응 특성을 살펴보는 연구가 후속 연구로써 이루어 졌다. 즉, 화염의 반응 특성에 관한 연구는 맥동류에 놓인 화염

으로부터 다양한 변수의 진폭과 위상을 살펴보는 것으로서, 열발생 변동이 적절한 변수로써 관찰 되어왔다.⁽¹⁻⁴⁾ 일반적으로 화염의 열발생 변동은 연료 공급 라인이 음향과의 결합을 통한 당량비 변동, 화염 표면적 변동, 그리고 와 구조 등의 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 지금까지의 열발생 변동은 거대 와 구조와 강한 난류화염의 상호작용이 발생하는 연소기에서 관찰되거나,⁽¹⁾ 강제 진동을 통한 유동 변동이 발생하는 곳에서 관찰되었다.⁽²⁻⁴⁾ 특히, 후자의 경우 난류 성분과 와 구조를 배제한 층류 예혼합 화염을 이용하여, 다소 관찰이 용이한 화염 표면적 변동으로 인한 열발생 변동이 주로 연구되어 왔다. T. Schuller⁽³⁾ 등은 강제 진동을 사용했을 경우, 노즐 림에 부착되어 있고 노즐 가장 자리로의 연료 누설을 무시했을

§ 이 논문은 2009 년도 열공학부문 춘계학술대회(2009.

5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, dshin@kaist.ac.kr

때, 반응물의 소비율은 전체 화염 표면적과 비례하고 화염으로부터의 열발생과 비례하여 결과적으로 화염 표면적과 화염으로부터 발생하는 전체 열발생은 선형적으로 비례한다고 하였다. 이러한 열발생 변동은 일반적으로 반응영역과 열발생의 지표로 사용 되는 OH^* 및 CH^* 자발광을 통해서 알 수 있다.⁽³⁻⁵⁾

이에 본 연구에서는 강제 진동이 아닌 자발 진동의 크기를 제어하며, 그에 따른 층류 예혼합 분체 화염의 거동을 살펴보고, 화염 표면적 변동과 화염 자발광을 측정함으로써 열 발생 변동의 관계를 살펴보고자 한다. 연소 챔버를 모사하기 위해 1 차원 평면과가 주를 이루는 종횡비(Aspect ratio) 26 이상인 관을 이용하였고, 화염의 자발 진동을 발생시키며 압력 변동의 크기를 제어하기 위해 분기관^(6,7)을 설치하였다. 연소 챔버에 대한 분기관의 길이비를 변수로 채택하였으며, 그에 따른 압력 변동, 화염의 직접 사진 및 순간 사진 그리고 화염 자발광을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1 은 본 연구의 실험 장치를 나타낸다. 연료 및 산화제는 액화석유가스(LPG) 및 공기를 각각 사용하였고, 질량 유량계(MFC : Mass flow controller, Brooks 5850E)에 의해 제어 되었다. 제어 된 연료와 공기는 혼합 챔버(mixing chamber)를 거쳐 예 혼합기가 된 후, 노즐로 보내진다. 사용된 당량비와 노즐 평균 유속은 각각 1.1, 1.75 cm/sec 로 고정하였다. 연소 챔버는 스테인리스(STS) 관으로 이루어져 있고, 내경 4.8 cm 인 관을 사용하였다. 연소 챔버는 길이 10 cm 인 관을 진공 플랜지로 체결함으로써 자유롭게 길이 변경이 가능하도록 하였고, 전체 길이는 120 cm 를 사용하였다. 노즐은 내경 7 mm 인 스테인리스 관이며, 화염의 보염 역할 할 수 있는 덤프형 노즐을 사용하였다. 자발 진동의 크기를 제어하기 위해 길이 변경이 가능하고 스테인리스 관으로 되어 있는 분기관을 연소 챔버 측면에 부착하였다. 실험에 사용된 분기관의 직경은 연소 챔버로 사용한 스테인리스 관과 동일하다. 자발광 신호를 측정하기 위해 PMT (Photo multiplier tube, R212, Hamamatsu)를 사용했으며, OH^* 및 CH^* 자발광 신호를 획득하기 위해 각각 307.1±10 nm, 430.0±10 nm 의 간섭 필터(interference filter)를 사용하였다. 화염 표면적 변동을 관찰하기 위해 고속 카메라(Kodak Ektapro, 2000 frames /sec)와 화염 표면적 계산을 위해 상용프로그램인 C++를 사용 하였다. 화염 가시화를 위해 내경 48 mm 인 Quartz tube 를 사용하였다.

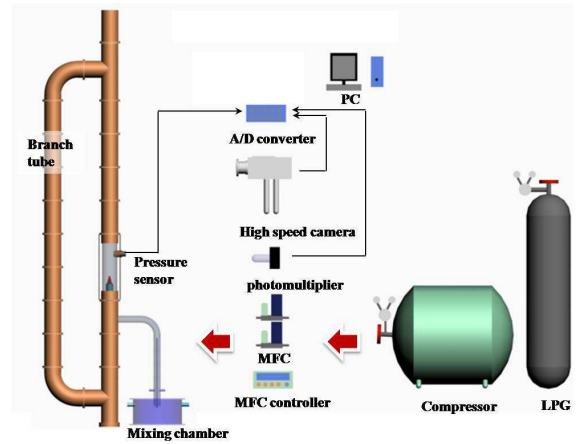


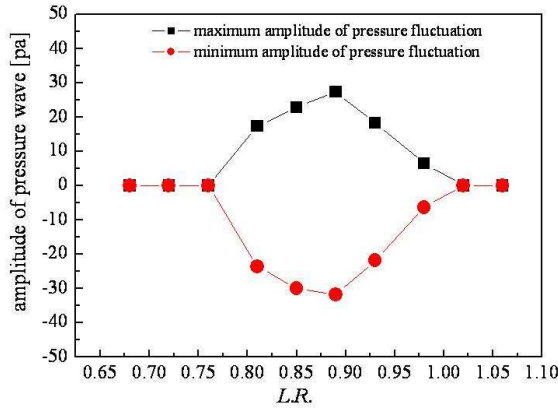
Fig. 1 Experimental Setup

2.2 실험 방법

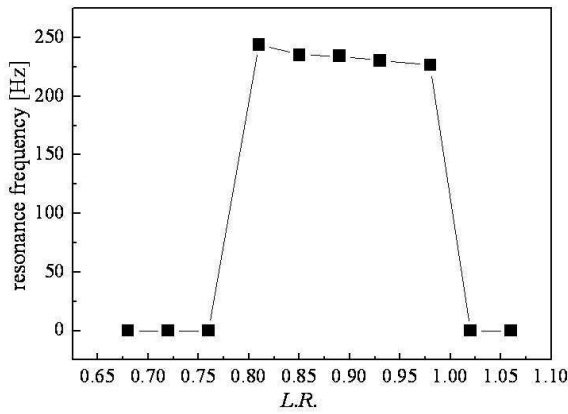
분기관을 통해 전체 연소기에서의 압력 분포 특성을 바꾸기 위해, 연소기 전체 길이에 대한 분기관의 길이비(식 (1))를 실험 변수로 사용하였다.

$$L.R. = \frac{\text{length of branch tube}}{\text{length of combustion chamber}} \quad (1)$$

먼저, 연소 챔버의 입구에서 축 방향으로 1/3 지점에 화염을 위치시킴으로 안정한 화염을 얻었으며, $L.R.$ 을 점차적으로 변화시키며 발생하는 자발 진동 화염을 관찰하였다. 본 실험에서의 층류 예혼합 화염은 축대칭 원뿔형 구조를 가지고 있기 때문에 화염의 순간 이미지와 간단한 프로세스를 통해 화염 표면적 변동을 쉽게 계산하였다. 화염의 순간 이미지는 본 연구에서의 화염 자발 진동이 약 220 Hz 이기 때문에 화염의 정현파 형태를 잘 관찰할 수 있었고, 한 주기의 특성을 충분히 관찰하기 위해서 초당 2,000 장의 이미지를 고속 카메라를 이용하여 획득하였다. 획득한 이미지에서 화염면적을 구하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 화염면의 가장 자리는 축을 기준으로 가장 밝은 부분이므로, 각각의 이미지에서 가장 밝은 부분을 그대로 놓아두고 나머지는 제거한다. 둘째, 이미지에서 각 픽셀 당 화염 자발광 인텐시티 정보를 추출한다. 각각의 이미지에 (x, y) 좌표축을 설정하고, 각 위치 별 최대 인텐시티의 좌표 값을 구한다. 여기서, 고속 카메라로 획득한 이미지의 픽셀당 거리는 0.026 mm 이다. 이 픽셀당 거리는 화염면의 변화를 표현하기에 적절하다고 사료된다. 마지막으로 각



(b) Amplitude of pressure wave



(b) Resonance frequency of pressure wave

Fig. 1 Characteristics of pressure fluctuation with respect to L.R.

위치별 최대값을 가지고, 아래의 식 (2) 를 이용하여 화염 표면적을 구한다.

$$S_{flame} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{x=0}^n 2\pi x \cdot \Delta y \quad (2)$$

또한, 화염으로부터 발생하는 열발생 변동을 관찰하기 위해 OH*, CH* 그리고 화염 자발광 신호를 계속하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 조건에 따른 자발 진동과 압력 변동

Fig. 1(a)는 L.R.에 따른 연소 챔버 내 압력 변동의 크기를 나타내며, Fig. 1(b)는 압력 변동의 기본 모드(fundamental mode)의 공진 주파수를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, L.R.=0.81 에서 자발진동이 시작되며, L.R.이 커질수록 자발 진동의 크기가 점점 커진다. L.R.=0.89 에서 가장 큰 자발 진동이 발생하며, L.R.이 더욱 커질수록 자발 진동의 크기가

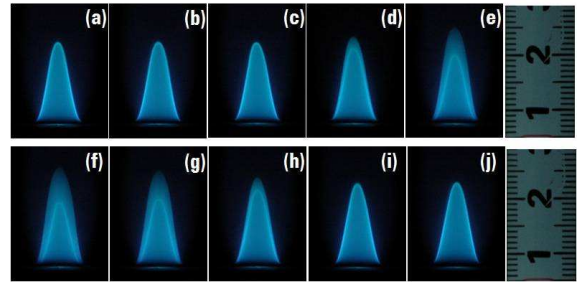


Fig. 2 Direct flame image with respect to L.R. ; ((a) L.R.= 0.68 (b) 0.72 (c) 0.76 (d) 0.81 (e) 0.85 (f) 0.89 (g) 0.93 (h) 0.98 (i) 1.02 (j) 1.06)

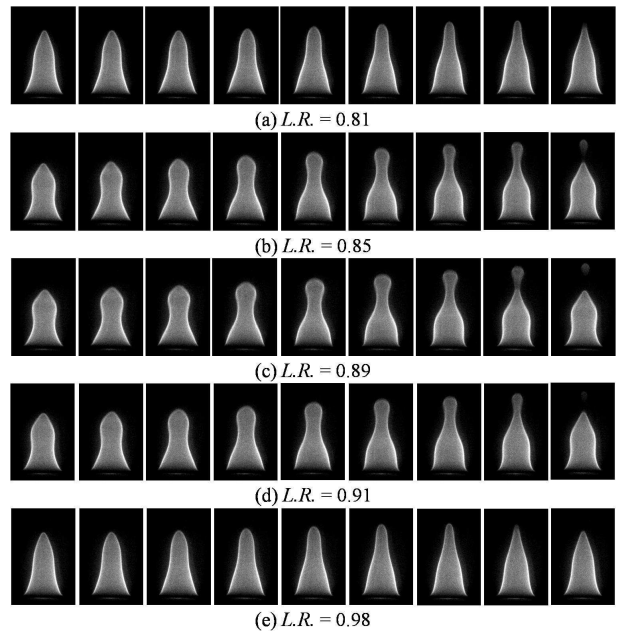


Fig. 3 Instantaneous flame image with respect to L.R

점점 작아진다. 발생하는 압력 변동의 공진 주파수는 244.11 에서 226.47 Hz 이며, L.R.이 커질수록 공진 주파수가 점점 작아짐을 알 수 있다. 이는 분기관 길이가 길어짐에 따라 발생하는 압력파의 이동 거리가 점점 길어지기 때문이라 사료된다. Fig. 2 는 L.R.에 따른 화염의 직접 사진을 나타 낸다. 연소기 내 화염 자발 진동이 발생할 경우, 화염 모양이 명확하지 못하고 뿌옇게 나타남을 이용하여 자발 진동 화염을 판단할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, L.R.=0.81~0.98 에서 자발 진동하는 화염이 발생함을 알 수 있고, L.R.=0.89 에서는 화염의 흐릿한 정도가 가장 크게 나타남으로 자발 진동이 가장 큼을 예상 할 수 있다. Fig. 3 은 자발 진동이 발생할 경우, L.R. 따른 화염의 순간 이미지를 나타낸다. 각 이미지의 간격은 0.5 msec 이고, 자발 진동의 한 주기는 4.27 msec 이다. 먼저, Fig. 3(a) 에서 자발 진동이 발생

하지만 압력 변동이 작은 경우, 화염면 변동은 단순 신장과 수축만을 반복하게 된다. 하지만, *L.R.*이 커질수록 압력 변동이 커지며 화염면 변동 또한 점점 커진다. Fig. 3(c)는 최대 자발 진동의 화염으로, 화염의 목 부분이 잘록하게 되면서 더 이상 화염 신장이 일어나지 않고 화염 끝단에서 소염이 발생한다. 여기서 *L.R.*이 더욱 커질수록 압력 변동은 다시 작아지며 화염면 변동은 Fig. 3(a)와 마찬가지로 단순 신장과 수축을 반복한다. 일반적으로 자발 진동에서의 압력 변동과 열발생 변동의 위상에 영향을 미칠 수 있는 열원의 위치는 매우 중요하다.⁽⁸⁾ 본 연구에서의 연소 챔버 측면에 설치한 분기관은 전체 시스템에서 열원의 상대적인 위치를 바꿀 수 있는 부착물이며, 그로 인해 압력 변동과 열발생 변동의 위상이 바뀌며 자발 진동의 진폭이 바뀐다고 유추할 수 있다. 또한, 덤프면을 가진 부분 예혼합 연소기에서 연소실 내의 압력 변동은 연료 유동 변조를 일으켜 당량비 변동을 발생시키는 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾ 하지만, 본 연구에서는 완전 예혼합된 혼합기를 사용했기 때문에 압력 변동에 의한 당량비 변동이 발생하지 않는다. 또한, 일정한 혼합기의 노즐 직경을 고려했을 때 연소 챔버에 발생한 압력 변동은 반응물의 유량 변동에 영향을 미치게 된다. 따라서, 앞서 서론부에서 언급했듯이 화염 표면적이 반응물의 소비율과 비례하므로 반응물의 유량 변동에 의한 화염면 변동이 발생한다고 판단할 수 있다.

3.2 조건에 따른 열발생 및 화염 표면적 변동

화염으로부터 발생하는 열발생 변동을 관찰하기 위해, 열발생 변동의 지표로 사용되는 OH* 및 CH* 자발광을 측정하였다. 하지만, 본 연구에서 사용된 간섭필터의 투과율 한계로 인해 다량의 잡음(noise) 성분을 포함한 결과를 보여줬다. 따라서, OH*와 CH*의 자발광과 순수한 화염 자발광과 비교함으로써 그 타당성을 살펴 본 후 열발생 변동의 정성적인 거동을 관찰하고자 했다. Fig. 4는 그 결과를 나타낸 것으로 OH*(Fig. 4 (b)), CH*(Fig. 4 (c)) 그리고 화염 자발광(Fig. 4 (d)) 신호를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, OH* 및 CH* 자발광은 화염 자발광 신호와 비교하여 다량의 노이즈 성분을 포함하며 신호 강도가 매우 미약하다. 하지만, 화염 자발광 신호는 상대적으로 신호 강도가 크며 OH* 및 CH* 자발광 신호와 정성적인 경향 일치하므로, 열발생 변동의 거동을 유추할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 화염 자발광 신호를 이용하여 열발생 변동의 정성

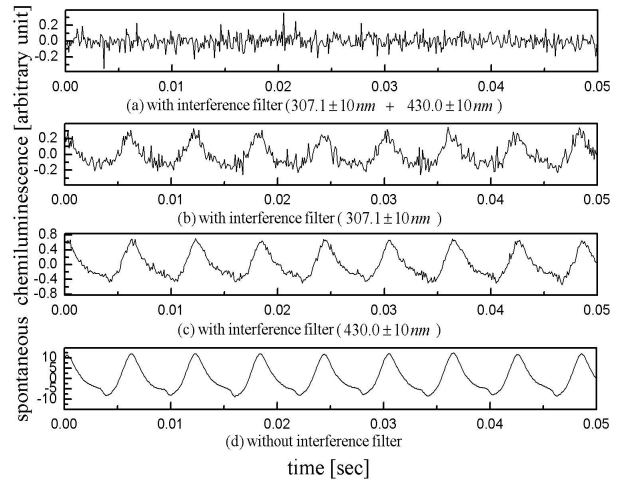


Fig. 4 OH*, CH* and flame chemiluminescence

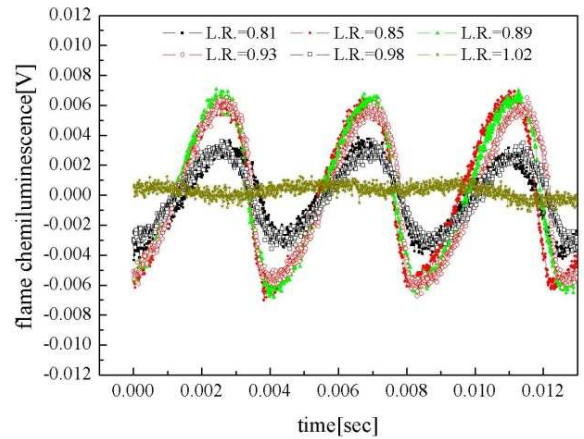


Fig. 5 Flame chemiluminescence fluctuation with respect to time

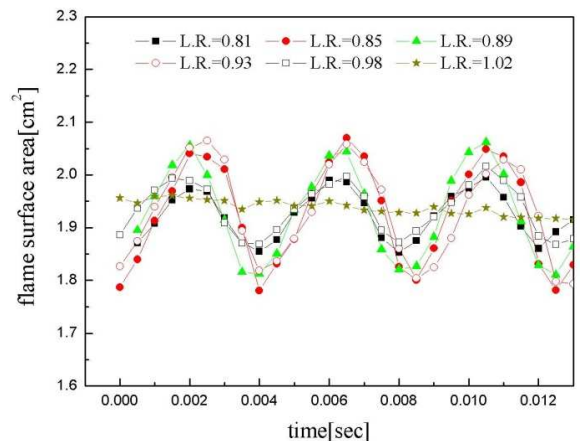


Fig. 6 Flame surface area fluctuation with respect to time

적인 거동을 측정하였다. PMT 를 통해 얻어진 화염 자발광 신호는 최초 매우 약한 신호가 측정되므로 신호를 증폭하여 분석해야 한다. 매우 약한

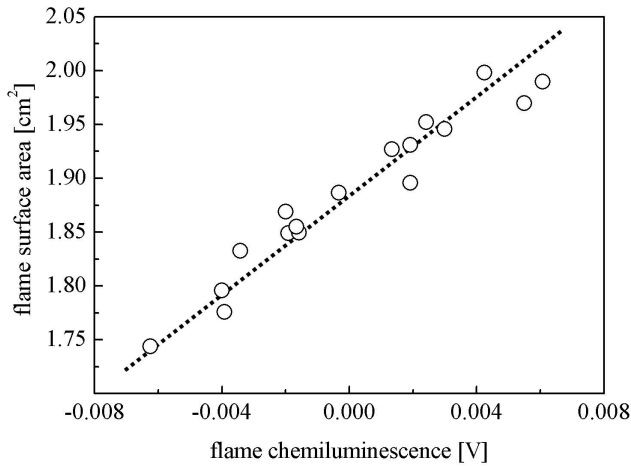


Fig. 7 Flame surface area with respect to flame chemiluminescence

신호를 증폭을 할 때 잡음에 해당되는 직류성분이 같이 증폭되므로 교류 성분을 오프셋(DC offset)을 해야 한다. 또한, PMT 신호는 화염으로부터의 광 입자의 밝고 어두운 정보만을 제공하기 때문에 그 정량적인 값보다는 정성적인 거동을 더 표현한다고 할 수 있다. 따라서, 직류 신호로 표현하기 보다는 교류신호로 표현하므로 그래프에서 보듯이 0을 기준으로 -와 +의 변동성분만을 표시 하였다. Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 $L.R.$ 에 따른 화염 자발광 변동 및 화염 표면적 변동을 나타낸다. 압력 변동이 가장 큰 $L.R.=0.89$ 에서 열발생 변동은 가장 큰 정현파의 형태를 띠는 것을 알 수 있고, 압력 변동이 발생하지 않는 $L.R.=1.02$ 에서 열발생 변동이 발생하지 않음을 알 수 있다. Fig. 7 은 화염 자발광 변동이 발생할 경우, 화염의 자발광 신호와 화염 표면적이 선형적으로 비례함을 보여 주고 있다. 이는 Fig. 5 와 Fig. 6 의 결과를 정리한 것으로, 앞서 선행 연구에서 언급했듯이 화염 자발광과 열발생의 관계를 기반으로 화염면 변동과 열발생 변동이 선형적으로 비례함을 예측할 수 있다. 또한, 강제 진동의 경우와 마찬가지로 자발 진동의 경우에서도 같은 경향을 보이며, 화염으로부터의 열발생은 화염 자발광을 계측함으로써 그 정성적인 거동을 관찰할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 분기관을 가진 연소기를 제작하여 화염 자발 진동의 크기를 제어하였으며, 층류 예혼합 분체 화염의 화염 표면적 변동과 열발생 변동의 관계를 관찰하였다. 그 결과를 정리하면 다음

과 같다.

(1) 연소기 길이에 대한 분기관의 길이비($L.R.$)에 따라 층류 예혼합 분체 화염의 자발 진동의 크기가 제어됨을 관찰하였고, $L.R.$ 이 약 0.9 일 때 가장 큰 자발 진동이 발생함을 확인하였다.

(2) 화염 자발광은 OH^* 및 CH^* 자발광과 유사한 거동을 함을 관찰하였고, 화염 자발광 신호로부터 열발생 변동의 정성적인 거동을 관찰할 수 있음을 확인하였다. 또한, 자발 진동하의 화염표면적 변동은 화염의 순간 이미지와 간단한 프로세스를 통해 구할 수 있었다.

(3) 자발 진동하는 모든 조건에서 층류 예혼합 분체 화염의 화염 표면적 변동은 화염으로부터의 열발생 변동과 같은 거동을 보임을 관찰하였고, 선형적으로 비례함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원 (CF3-101-1-0-1)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, J. G., Kim, K. W. and Santavicca, D. A., 2000, "Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System Using Secondary Fuel Injection," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 739~746.
- (2) Docquier, N., Belhafaoui, S., Lacas, F., Darabiha, N. and Rolon, C., 2000, "Experimental and Numerical Study of Chemiluminescence in Methane/Air High-Pressure Flames for Active Control Applications", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1765~1774.
- (3) Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., 2002, "Dynamics of and Noise Radiated by a Perturbed Impinging Premixed Jet Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 128, pp. 88~110.
- (4) Haber, L., Vandsberger, U., Saunders, W. and Khanna, V., 2000, "An Examination of the Relationship Between Chemiluminescence Light Emissions and Heat Release Rate Under Non-Adiabatic Conditions", *ASME paper 2000-GT-0121*.
- (5) Jeong, Y. K., Oh, J. S., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2005, "Detailed Local Chemiluminescence Measurement (OH^* , CH^* and C_2^*) and Nitrogen Oxides Emissions in Laminar Partially Premixed CH_4 /Air Flames," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 263~270.

- (6) Stewart, G. W., 1926, "The Tube as a Branch of an acoustic conduit : The Special case of The Quincke Tube," *Physical Review*, Vol. 27, pp. 494~498.
- (7) Stewart, G. W., 1928, "The Theory of the Herschel-Quincke Tube," *Physical Review*, Vol. 31, pp. 696~698.
- (8) Carvalho, J. A., Ferreira, M. A., Bressan, C and Ferreira, J. L. G., 1989, "Definition of Heater Location to Drive Maximum Amplitude Acoustic Oscillation in a Rijke Tube," *Combustion and Flame*, Vol. 76, pp. 17~27.
- (9) Hong, J. G., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2007, "An Effect of Pressure Fluctuations of Combustion Chamber on the Modulation of Equivalence Ratio in the Channel of the Burner," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 31, No. 2, pp. 202~207.