

< 논문 >

## 연소실 압력 변동이 버너내부의 당량비 변조에 미치는 영향

홍정구\* · 오광철\*\* · 신현동†

(2006년 11월 14일 접수, 2006년 12월 15일 심사완료)

### An Effect of Pressure Fluctuations of a Combustion Chamber on the Modulation of Equivalence Ratio in the Channel of the Burner

Jung Goo Hong, Kwang Chul Oh and Hyun Dong Shin

**Key Words :** Pressure Fluctuation(압력 변동), Equivalence Ratio Fluctuation(당량비 변동)

#### Abstract

In order to understand the phenomena of combustion instability, an experimental study was conducted at the moderate pressure and ambient temperature conditions. The flame behavior and the pressure fluctuations were measured in a dump combustor. Various types of combustion modes occurred in accordance with the equivalence ratio and the fuel supplying conditions. The fluctuation of pressure, heat release and equivalence ratio were measured by piezoelectric pressure sensor, high speed Intensified Charge Coupled Device (HICCD) camera and gas chromatography respectively. Two representative modes were self-excited pressure oscillations at the resonance of combustion chamber (200Hz) and instabilities related to the modulated fuel flow rate through the fuel holes (10Hz). It is found that, especially in an unchoked fuel flow condition, the modulation of the fuel flow rate affects the characteristics of flame behavior and pressure fluctuations in a lean premixed flame.

#### 기호설명

- $p'$  : 압력변동(pressure fluctuation)
- $\phi'$  : 당량비 변동(equivalence ratio fluctuation)

#### 1. 서론

가스터빈, 보일러 등의 실용 연소기에 사용되는 난류회박 예혼합 화염은 부하성능과 효율면에서 확산화염에 비해 상대적인 장점을 가지고 있고, 연소 배출물 특성 또한 균일한 온도분포를 가진 연소장을 형성하므로 확산화염에 비해 질소 산화물(NOx)이 근원적으로 적게 나타난다. 하지만,

난류회박 예혼합 화염은 연소 시 발생하는 불안정성 때문에 운전조건이 좁고, 전체 시스템을 안정적으로 사용하기 어려운 문제가 있다. 현재까지도 이러한 연소 불안정성은 명쾌하게 해결되지 않은 문제이다. 연소 불안정성의 발생 메커니즘을 규명하는 선행연구로는 연소실 내의 거대 와동 구조(coherent vortex structure)에 따른 주기적인 연소가 연소기에서 발생하는 전체의 압력변동을 지배하고, 재순환영역에 의해 형성된 와동이 열발생률 변동의 주된 원인이라고 주장하였다.<sup>(1,2)</sup> 이에 따른 후속 연구를 통해 이차 공기를 와동이 존재하는 지점에 투입해서 그 구조를 깨뜨린 후, 발생된 압력변동을 감소시킨 결과를 얻은 바 있다. 또 다른 대표적인 선행연구로는 주기적 연소에 의해 발생된 압력변동이 상류로 전파되고, 이에 기인한 연료혼합 위치에서의 당량비 변화, 그리고 이 당량비의 변화가 다시 하류의 열발생률의

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : hdshin@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-8829 FAX : (042)869-8820

\* 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 자동차부품연구원 환경부품연구센터

변화를 일으켜 연소장을 불안정하게 한다는 주장이 있다.<sup>(3)</sup> 즉, 열발생률 변동이 연소기 내의 불안정한 연소장을 지배한다는 생각은 상당히 유사하지만, 열발생률 변동의 원인에 대한 접근은 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 특히 Lieuwen 과 Zimm<sup>(4)</sup>이 주장한 time lag model 에서 연소실의 압력변동에 따른 상류의 연료 분사구 근처의 당량비 변동에 대한 이론적 분석이 수행되었지만, 정량적인 결과가 없는 정성적인 설명으로 이를 뒷받침할 만한 실험적인 결과가 필요하다고 생각되었다.

이에 본 연구는 덤프형태의 모델 연소기를 사용하고, 연료 분사구의 형태가 하류의 연소실 내의 압력변동에 영향을 받는 언초우크(unchoked fuel flow) 조건에서 약 10 Hz 주기로 압력이 변동하는 난류회박 예혼합 화염을 구현한 후, 연소기 내의 압력변동과 이에 따른 상류의 연료 분사구에서 당량비 변동을 정량적으로 계측하여 불안정한 연소 모드에 대한 발생 메커니즘을 밝히고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 모델 연소기와 실험 장치에 대한 개략도이다. 열-음향 불안정성을 재현성있게 발생시킬 수 있는 실험실 스케일의 연소기를 그림과 같이 제작하였고, 그 형상은 후방확대 덤프연소기로 확대면을 기준으로 아래의 버너 부분과 위쪽으로 연소실로 나눌 수 있다. 연소실(내경: 80mm, 높이: 700mm, aspect ratio: 8.75)은 화염의 가시화를 위해 석영관(quartz tube)을 사용하였고, 연소실 내의 압력변동 측정을 위해 스테인레스 스틸관(stainless steel tube)을 사용하였다. 대부분의 가스터빈에서 사용되는 연소기 형태를 모사하여 Fig. 1의 확대 그림에서 보듯이 공기유동에 대해 수직방향으로 연료를 분사하는 방식으로 설계 하였고, 연료 분사구의 직경을 언초우크 조건에 맞게 0.7mm로 하여 90° 간격으로 4개를 사용하여 실험하였다. 분사구의 개수는 각각 2개, 4개, 8개를 사용하여 얻은 화염형태를 관찰해 본 결과, 2개의 경우 화염의 좌우 대칭이 되지 않았고, 4개와 8개를 사용한 경우는 좌우 대칭이 되었다. 분사구가 4개 이상일 경우 화염의 형태는 개수에 따라 변화가 없음을

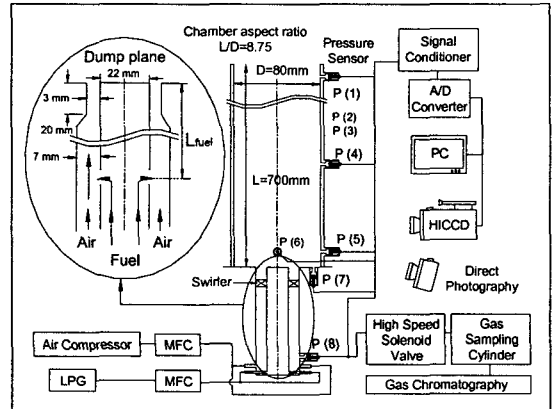


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

확인하였다.

질량유량 조절기(Mass Flow Controller)에 의해 공기, 연료가 각각 조절되어 삼중관으로 구성된 버너로 공급되고, 연료는 연료 분사구(main fuel injection holes)에서 분사되며, 공기와 혼합되는 혼합거리( $L_{fuel}$ )를 거친 후, 축방향에 대한 반경 방향의 모멘텀(momentum)을 주는 스월러(swirler)를 통해 연소실내로 투입된다. 여기서 사용된 스월각도(swirl angle)는 45°이다. 덤프면에서 상용프로판(LPG)/공기 혼합기체의 입구유속을 21 m/s로 고정한 상태에서 당량비를 줄여가면서 화염의 형태를 디지털 카메라와 고속카메라(HICCD)로 촬영하고, 그 때의 음압(acoustic pressure) 신호를 측정하였다. 연소실 내의 동압력 변동(dynamic pressure fluctuation)은 압력 센서(piezoelectric pressure sensor, PCB Model 106B)를 통해 덤프면[P(7)]에서 측정하였다.

연료 분사구에서의 당량비 변동은 고속 솔레노이드 밸브(solenoid valve, Parker series, S/N 78), 가스 포집기(gas sampling cylinder) 및 진공펌프를 이용하여 원하는 시간 동안의 연료와 공기의 미연 혼합기를 연료 분사구에서 샘플링한 후, 가스 분석기(Gas Chromatography, Agilent 6890N)를 사용하여 상용 LPG의 대부분을 차지하고 있는 프로판(propane)의 농도를 정량 분석하였다. 가스 분석기에 사용된 센서의 종류는 불꽃 이온화 검출기(Flame ionization detector, FID)이고, 컬럼(colume)으로는 모세관 형태 컬럼(capillary type column, HP-PLOT AL2O3)을 사용하였다. 가스

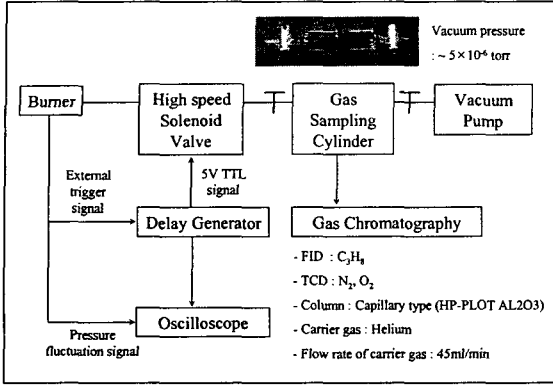


Fig. 2 Schematic of the gas sampling method

분석기에 사용된 캐리어 가스(carrier gas)의 종류와 유량은 헬륨(Helium)과 45ml/min으로 각각 사용되었다. 가스 포집기를 진공으로 만들기 위해 진공펌프의 진공압을 약  $5 \times 10^{-6}$  torr로 설정한 후, 반응시간(response time)이 2msec인 고속 솔레노이드 밸브에 5V의 TTL신호를 줌으로써 20 msec동안 미연 혼합기를 샘플링하였다. 압력 센서를 통해 얻은 각 모드에 해당하는 압력신호에 따라 버너 내의 미연 혼합기 샘플링 방법은 Fig. 2의 개략도에 자세히 도시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 형태

Fig. 3은  $L_{fuel}$ 를 285 mm로 고정하고, 당량비를 1.0에서부터 0.45까지 감소시키면서 화염형태를 관찰한 것으로 서로 다른 특성이 나타나는 모드(mode)에 관한 대표적인 결과를 나타내었다.

모드 1일 때의 화염 형태는 Fig. 4와 같이 난류 전단층(turbulent shear layer)을 중심으로 바깥쪽 와동(outer vortex, I)과 둔체 위쪽에서 형성되는 안쪽 와동(inner vortex, II)으로 구분되어 화염대가 존재함을 볼 수 있다. 투입되는 평균 당량비가 충분히 크면, Fig. 3 mode 1의 화염형태와 같이 연소속도가 빨라져 안쪽 와동 (II)뿐만 아니라 덤프면에 가까운 바깥쪽 와동 (I)에 화염이 발생되어 그 와동을 타고 형성되는 화염과 상호간섭(flame-vortex interaction)하여 열발생률의 변동을 일으키게 된다. 따라서 화염대에서의 와동은 열발생률을 변화시키는 중요한 인자임을

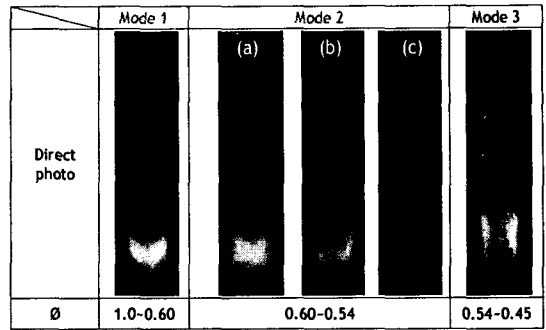


Fig. 3 Flame behavior

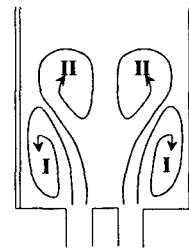


Fig. 4 Coherent vortex structures of mode 1

확인할 수 있다.

모드 2의 경우, 화염 형태는 Fig. 3(a)와 같이 200Hz로 변동하면서 덤프면에 가까운 위치에서 존재하다가 부상(lift off) 과정을 겪으면서 화염의 밝기가 매우 어두워지는 (c)와 같은 구간을 가지게 된다. (a)에서 (c)의 화염형태를 약 10Hz 주기로 반복됨을 관찰하였다. 모드 3은 바깥쪽 와동 (I)에 화염이 존재하지 않고, 안쪽 와동 (II)에서 일정하게 존재하였다.<sup>(5,6)</sup>

3.2 연소실내의 압력변동

Fig. 5는 Fig. 3에서 보여준 각각의 화염 모드에 대한 연소실 내의 압력변동을 나타낸 결과이다.<sup>(7)</sup>

모드1의 경우, 실험조건이 연료 분사구에서 연료유동 변조에 의해 당량비 변동이 발생하지만, 연소실로 투입되는 평균 당량비의 수준이 충분히 연료 과농(fuel rich)하기 때문에 연소실 내의 압력변동은 관 공명 주파수인 200Hz에 지배되고, 압력신호가 극한주기(limit cycle)에 도달됨을 관찰할 수 있다.

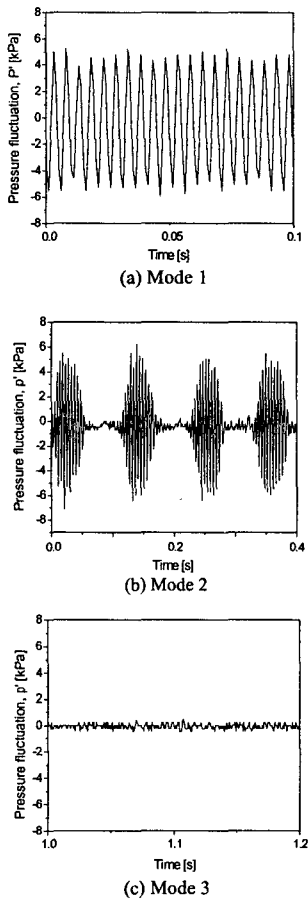


Fig. 5 Pressure fluctuations

모드 2의 경우는 연소실의 압력변동에 따라 연료 분사구에서 연료유량 변조에 의해 당량비 변동이 발생하게 되고, 연소실내의 연소현상은 변조되어 감소된 당량비만큼 평균 당량비가 낮아져서 바깥쪽 와동에 화염이 형성되지 않고 반응대가 후류로 밀리는 상태[Fig. 3(b)]를 겪게 되고, 안쪽 와동에도 화염이 형성되지 않는 상황 [Fig. 3(c)]을 거치게 된다. 이렇게 Fig. 3(b)와 (c) 사이의 시간동안 연소실 내의 압력변동이 매우 작았기 때문에 연료 분사구에서 연료 분사량은 다시 바깥쪽 와동에 화염이 형성될 정도까지 당량비 수준이 높아지게 되고, Fig. 3(a)와 같은 화염을 형성하게 된다.

이렇게 연료유량이 평균 당량비보다 감소함에 따라 Fig. 3(b)에서 (c)까지의 화염거동과 일치하는 압력변동이 매우 작은 구간(silent period)을 가지게 되고, 다시 평균 당량비가 원래의 입력 당량비

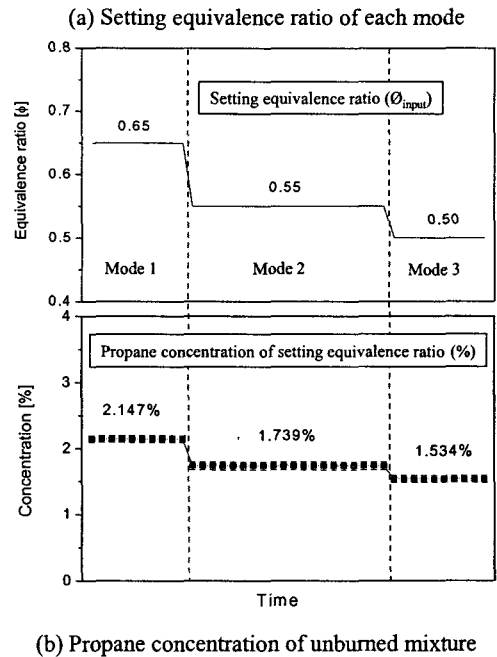


Fig. 6 Propane concentration of unburned mixture with input equivalence ratio

조건으로 회복되면 Fig. 3(a)와 같은 화염과 일치하는 압력변동이 매우 큰 구간(noisy period)을 가지게 된다. 모드 2일 때 silent period의 매우 작은 압력은 noisy period의 연료 분사구의 압력경계 조건이 되고, noisy period의 시끄러운 압력은 silent period의 연료 분사구의 압력경계 조건이 된다. 따라서 이전 영역의 압력조건이 다음 영역의 미연 혼합기에 영향이 미치고, 이런 관계가 주기적으로 반복된다는 점이 주목할 만하다. 모드 3의 경우 압력변동은 모드 1, 2에 비해 상대적으로 미약한 수준이었다.

### 3.3 연료 분사구에서의 당량비 변동

Fig. 6은 각 모드의 대표적인 입력 당량비 (setting equivalence ratio: 0.65, 0.55, 0.50)에 해당하는 미연 혼합기의 프로판( $C_3H_8$ ) 농도를 측정 한 결과이다.

버너의 연료 분사구를 통해 나온 혼합기를 대기압 하에서 가스 포집기를 이용하여 샘플링한 후, 가스 분석기를 이용하여 그 정량적인 값을 몰 퍼센트(mole percent)로 나타내었다. Fig. 6(b)의 결과에서 보듯이 상대적으로 연료 과농한 모드

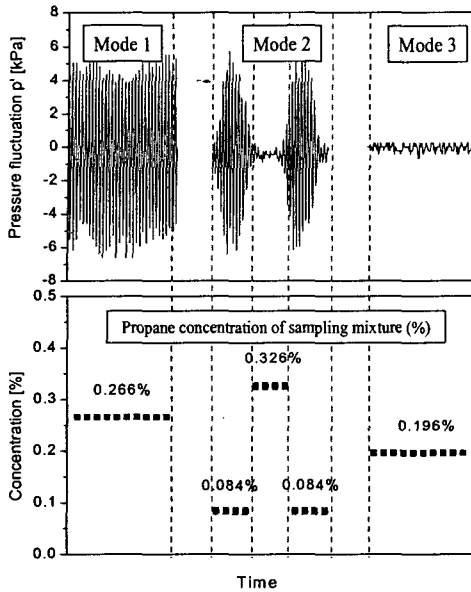
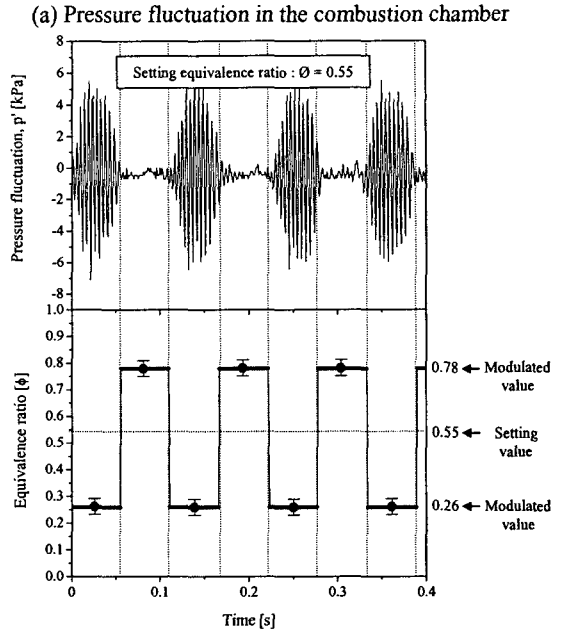


Fig. 7 Propane concentration of sampling mixture with pressure fluctuations of the combustion chamber

1에서 프로판 농도가 가장 높고, 연료 희박(fuel lean)한 모드 3에서 낮게 나타났다. 프로판의 정량적인 값을 살펴보면, 이론적으로 예측된 값보다 상대적으로 작게 나타나는데 이는 상용 LPG내에 대부분 프로판이 존재하지만, 부탄(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 에탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), 질소(N<sub>2</sub>) 등이 일정량 섞여있기 때문에 프로판 농도가 적게 검출된 것으로 생각된다. 이는 가스 분석기를 통해 얻은 결과에서 프로판이 아닌 다른 물질 즉 부탄, 메탄, 에탄 등의 최대값이 뜨는 것을 통해 확인 할 수 있었다.

Fig. 7은 연소실 내의 압력변동에 따라 버너 내부에 유동하는 미연 혼합기 중의 프로판 농도를 나타낸 것이다.

가스 포집기를 약 5×10<sup>6</sup> torr의 진공으로 설정한 후, 연소실 내의 압력변동 신호와 고속 솔레노이드 밸브의 개폐에 필요한 스파이크(spike) 신호를 동기하여, 압력변동에 따른 연료 분사구에서의 당량비 변동과의 위상을 동일하게 맞출 수 있었다. 각각의 모드에 따른 프로판 농도의 상대적인 값은 Fig. 6과 같이 연료 과농한 모드 1의 경우는 높게, 상대적으로 희박한 모드 3의 경우는 낮게 나타남을 볼 수 있고, 모드 2의 경우, 압력변동이 큰 noisy period에서는 프로판 농도가 0.084%로 낮게 나타났고, silent period에서는 모드 1보다 오히려 높



(b) Modulated equivalence ratio of mode 2 at the fuel supplying holes

Fig. 8 Modulated equivalence ratio with respect to pressure fluctuation of mode 2

게 나타났다. 이는 압력변동이 큰 noisy period에서 분사되지 못한 연료가 압력변동이 작은 silent period에서 연료가 분사될 수 있는 환경이 만들어졌기 때문에 이 때의 실제 분사되는 연료량은 입력하려는 연료량보다 많게 된다. 프로판 농도의 절대값은 20 ms의 짧은 시간 동안 샘플링 했기 때문에 가스 포집기의 내부는 여전히 대기압보다 훨씬 낮은 진공상태에 있기 때문에 대기압 상태의 프로판 농도보다 상대적으로 낮게 나타난다고 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 얻은 프로판 농도를 이용하여 실제 버너 내의 변조된 당량비를 나타낸 결과이다.

앞서 설명한 바와 같이 가스 포집기의 내부 압력이 대기압보다 훨씬 낮은 진공압이기 때문에 프로판 농도의 절대값이 낮고, 이 값을 통해 직접적인 당량비를 알 수 없기 때문에 대기압일 때 모드 1, 모드 3의 당량비(Fig. 6)와 Fig. 7에서 얻은 모드 1, 모드 3의 프로판 농도와의 관계를 이용하였다. 모드 2에 대한 변조된 당량비를 구하기 위해 noisy period의 프로판 농도 0.084%와 silent period의 0.326% 값을 외삽법(extrapolation)을 사용하여

모드 2에 대한 변조된 당량비를 구한 결과, 압력 변동이 큰 경우 변조된 당량비는 0.26, 압력변동이 작은 경우 0.78로 나타났다. 압력변동이 큰 noisy period 동안 변조된 당량비는 투입하려는 당량비의 약 50% 정도로 작게 형성되고, 이렇게 변조된 당량비가 연소실 내로 들어가 화염은 후류로 밀리게 되고 압력변동은 거의 없는 silent period를 형성하게 된다. silent period 동안 연료 분사구에서는 압력 변동에 의해 영향을 받지 않으므로 앞선 noisy period 동안 분사되지 못한 연료량만큼 더해진 상태로 변조되기 때문에 투입 당량비보다 더 큰 값을 가지게 된다.

Fig. 8과 같이 얻은 변조된 당량비의 정량적인 결과는 Fig. 3과 Fig. 5에서 보았던 모드 2에 대한 화염 거동과 압력변동 특성을 설명하는데 뒷받침 할만한 중요한 자료라고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 실험실 스케일의 모델 연소기를 제작하여 상용프로판/공기의 난류회박 예혼합 연소를 통해 연소진동 모드를 구현하였다.

연소실 내 압력변동에 따른 미연 혼합기의 당량비 변화를 알아보기 위해 충분히 짧은 시간 분해능을 가진 고속 솔레노이드 밸브와 가스 포집기를 사용하여 압력변동 신호와 가스 샘플링을 동기시킨 후, 그 정량적인 값을 얻었다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 모드 2 일 때, 연소실 내 압력변동이 큰 noisy period 동안의 변조된 당량비는 투입하려는 당량비에 비해 절반 정도의 낮은 값으로 나타났고, 압력변동이 작은 silent period 동안의 변조된 당량비는 앞선 기간동안에 분사되지 못한 양이 더해졌기 때문에 투입하려는 당량비보다 크게 나타남을 확인하였다.

(2) 연소실 내에 발생한 압력변동에 따라 상류에 위치한 연료 분사구에서의 당량비 변동에 대한 정량적인 결과는 화염의 거동과 불안정한 연소 모드에 대한 발생 메커니즘을 설명하는데 중요한 자료라고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 BK21 그리고 미쓰비시 중공업(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Kulsheimer, C. and Büchner, H., 2002, "Combustion Dynamics of Turbulent Swirling Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 131, pp. 70~84.
- (2) Schadow, K. C., Gutmark, E., Parr, T. P., Parr, D. M., Wilson, K. J. and Crump, J. E., 1989, "Large-Scale Coherent Structures as Drivers of Combustion Instability," *Comb. Science and Tech.*, Vol. 64, pp. 167~186.
- (3) Lieuwen, T., Torres, H., Johnson, C. and Zinn, B. T., 2001, "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors," *ASME*, Vol. 123, pp. 182~189.
- (4) Lieuwen, T. and Zinn, B. T., 1998, "The Role of Equivalence Ratio Oscillations in Driving Combustion Instabilities in Low NOx Gas Turbines," *27th Symp. on Comb.*, pp. 1809~1816.
- (5) Hong, J. G., Lee, M. C., Lee, U. D., Oh, K. C., Shin, H. D., Tanaka, K., Tanimura, S. and Fujii, K., 2005, "An Effect of Fuel Flow Modulation on the Combustion Instability in a Model Gas Turbine Combustor," *5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 79~82.
- (6) Hong, J. G., Lee, M. C., Lee, U. D., Oh, K. C., Shin, H. D., Maekawa, A., Tanaka, K. and Fujii, K., 2005, "An Experimental Study on the Causes of the Combustion Instability in a Dump Combustor," *2005 Asian Congress on Gas Turbines*, ACGT 2005-007.
- (7) Hong, J. G., Lee, M. C., Lee, U. D., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2005, "An Experimental Study on the Instability of Combustion in a Dump Combustor with respect to Fuel and Air Mixing and Flow Conditions," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 963~970.