

헬름홀츠 공진기에 따른 버너내의 음향장에 관한 수치 해석

홍정구* · 조한창** · 신현동***

Numerical Simulation of the Acoustic Field in a Burner with Helmholtz Resonators

Jung Goo Hong, Han Chang Cho and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

A study was performed to understand self-excited pressure fluctuations in the lean premixed flames and to evaluate the effect of Helmholtz resonator on the pressure fluctuations. As low-frequency pressure fluctuations have been reported to cause fatal damage to the combustor and the entire system, Helmholtz-type resonators, which reduce the damage by low-frequency pressure fluctuation in the combustor, are attached to the channel of unburned mixture flow. It is found that the range of low-frequency pressure fluctuations of flame mode 2 is narrowed by the attachment of Helmholtz resonators. From this result, if Helmholtz-type resonators are applied to actual gas turbine combustor, it is confirmed that Helmholtz resonators attached on the fuel discharge hole are also effective for narrowing the range of flame mode 2

Key Words : Combustion Instability, Helmholtz Resonator

기 호 설 명

p' Pressure fluctuation

ϕ' Equivalence ratio fluctuation

1. 서 론

난류회박 예혼합 화염을 이용한 연소방식이 많은 실용 연소기에 사용되고 있지만, 연소 시 발생하는 불안정성 때문에 시스템의 운전조건이 좁고, 전체 시스템을 안정적으로 사용하기 어려운 문제점을 안고 있다. 이와 관련된 많은 연구자들이 불안정한 연소현상을 설명하려고 노력하고 있지만, 명쾌하게 해결하지 못하고 있는 실정이다^[1-3]. 최근 들어 연소불안정성의 발생 메커니즘을 규명하려는 연구 가운데 주목할만한 점은 연소에 의해 발생한 압력변동 가운데 특히 10Hz

수준의 저주파수 대역의 압력변동이 연소실 후단의 터빈이나 부분품에 치명적인 영향을 미친다고 보고되고 있다. 자동차 엔진 후단에 위치한 배기관에도 적용되듯이 고주파수 (200 Hz 이상) 대역의 경우 헬름홀츠 (Helmholtz) 형태의 공진기를 연소실 후단에 장착함으로써 발생한 압력변동을 감쇄시키고 있지만, 저주파수 대역의 압력변동은 헬름홀츠 형태의 공진기를 설계하여 장착할 경우 그 부피 (volume)가 원래 시스템보다 더 크기 때문에 현실적으로 적용이 불가능하다고 알려져 있다.

Hong^[3-5] 등의 연구에서 알 수 있듯이 저주파수 대역의 압력변동을 없애기 위해서는 연료 분사구 (fuel discharge holes)를 초우킹 (choking) 조건으로 만들어야 한다. 하지만, 이럴 경우 시스템의 출력을 가변시킬 수 없게 되고, 연결된 밸브나 펌프 등이 고압용으로 제작되어야 하므로 대부분의 가스터빈 연소기에서는 연초우킹

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

† 연락저자, E-mail: jghong70@kaist.ac.kr

Tel : 042-869-3057 Fax : 042-869-8820

** 포항산업과학연구원

*** 한국과학기술원 기계공학과

(unchoking) 조건으로 제작, 운전되고 있다. 따라서 근원적으로 저주파수의 압력변동을 없애기 보다는 그 발생영역을 좁히려는 노력이 보다 현실적이라고 사료된다.

이에 본 연구는 실험실 스케일의 모델 가스터빈 연소기를 사용하고, 연료 분사구의 형태가 하류의 연소실내의 압력변동에 영향을 받는 언초우크 조건에서 약 10 Hz 주기로 압력이 변동하는 난류희박 예혼합 화염을 구현한 후, 연소실 전단측, 미연혼합기가 유동하는 버너의 채널(channel)과 연료 분사구에 헬름홀츠 공진기를 장착하여 그 영향을 살펴보고자 한다. 또한 상용 프로그램 이용하여 채널 내의 음향장(acoustic field)을 수치 계산하여 적용된 헬름홀츠 공진기의 효과를 확인하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 덤프형태의 모델 연소기와 실험장치에 대한 개략도이다^[4-5]. 열-음향 불안정성을 재현성 있게 발생시킬 수 있는 실험실 스케일의 연소기를 그림과 같이 제작하였고, 그 형상은 후방확대 덤프연소기로 확대면을 기준으로 아래의 버너 부분과 위쪽으로 석영관(내경: 80mm, 높이: 700mm, aspect ratio: 8.75)에 의해 가시화된 연소실 부분으로 나눌 수 있다.

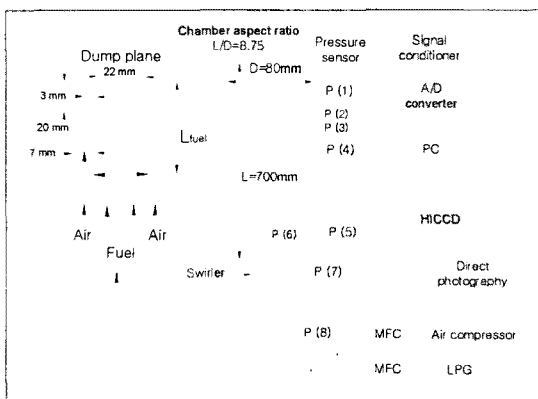


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus Ref. [4-5]

2.2 실험 및 계산방법

질량유량 조절기(MFC)에 의해 공기, 연료가 버너로 공급되고, 연료는 연료 분사구에서 분사

되며, 공기와 혼합되는 혼합거리 (L_{fuel})를 거친 후, 축방향에 대한 반경방향의 모멘텀을 주는 스윌러(swirler)를 통해 미연 혼합기가 연소실내로 투입된다. 여기서 사용된 스윌각도(swirl angle)는 45°이다. 상용 프로판(LPG)/공기의 당량비를 줄여가면서 화염의 형태를 디지털 카메라와 고속 카메라로 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(Fig. 1의 P(7))에서 측정하였다^[4-5]. Fig. 2는 실험에 사용된 헬름홀츠 형태의 공진기를 나타낸 것으로 본 연구에 사용된 연소기의 공명주파수인 200 Hz를 기준으로 설계한 결과^[6], 공진기의 내부 체적은 7.8 cm³이고, 목(neck)의 길이는 30 mm, 직경은 2 mm이다.

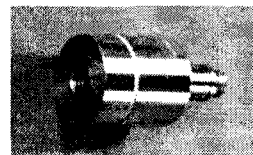


Fig. 2 Helmholtz resonator for mixture flow

수치 계산에 사용한 프로그램은 Boundary Element Method (BEM)을 기반으로 하는 "SYSNOISE" 라는 상용 프로그램을 사용하였고, 그리드(Grid)는 1104개, 메쉬(Mesh)는 600개로 하였다. 계산의 단순화를 위해 작동유체(working fluid)를 공기로 하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 화염의 형태 및 연소실 압력변동

언초우크 연료 분사조건에서 당량비를 1.0에서부터 0.45까지 감소시키면서 화염형태를 관찰한 결과, 서로 다른 특성을 나타내는 모드(mode)로 구분할 수 있었다^[3, 4]. 모드 1일 때의 화염의 형태는 덤프면으로부터 100mm이내에 대부분 존재하고, 난류 전단층(turbulent shear layer)을 중심으로 외부 와동(outer vortex)과 내부 와동(inner vortex)으로 구분되어 화염대가 존재함을 볼 수 있다. 모드 2의 경우, 200 Hz로 변동하면서 덤프면에 가까운 위치에서 존재하다가 부상(lift off) 과정을 겪으면서 화염의 밝기가 매우 어두워지는 주기적인 형태를 가지게 된다. 모드 3의 경우는 외부 와동이 존재하지 않고 덤프면으로부터 약 30~100 mm 영역에서 대부분의 연소 반응이 일어남을 볼 수 있었다. 모드 4의 경우,

화염이 부상되었고, 당량비가 0.42보다 낮을 때 화염의 날림이 발생함을 확인하였다.

앞서 언급한 각각의 화염 모드에 대한 연소실 내의 압력변동은 모드 1의 경우, 실험조건이 연료 분사구에서 연료유동 변조에 의해 당량비 변동이 발생하지만, 연소실로 투입되는 평균 당량비의 수준이 충분히 농후하기 때문에 연소실 내의 압력변동은 관 공명 주파수인 200 Hz에 지배되고, 압력신호가 한계 사이클(limit cycle)에 도달됨을 관찰할 수 있다. 모드 2의 경우는 연소실의 압력변동에 따라 연료 분사구에서 연료유량 변조에 의해 당량비 변동이 발생하게 되고, 연소실내의 연소현상은 변조되어 감소된 당량비만큼 평균 당량비가 낮아져서 외부 와동에 화염이 형성되지 않고 반응대가 후류로 밀리는 상태를 겪게 되고, 내부 와동에도 화염이 형성되지 않는 상황을 거치게 된다. 이렇게 연료유량이 평균 당량비보다 감소함에 따라 압력변동이 매우 작은 구간을 가지게 되고, 다시 평균 당량비가 원래의 입력 당량비 조건으로 회복되면 높은 압력변동 구간을 가지게 된다. 모드 3과 4의 경우 압력변동은 모드 1, 2에 비해 상대적으로 미약한 수준이었다^{13, 4)}.

3.2 헬름홀츠 공진기의 적용

Fig. 3은 전체 운전영역(예를 들면 연료와 공기의 혼합기의 유량)에 대한 당량비의 관계에 따른 안정화 선도를 나타낸 개략도이다.

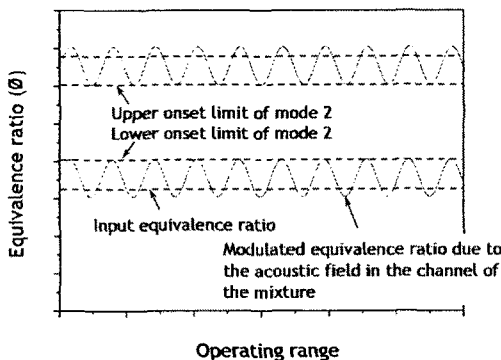


Fig. 3 The effect of resonant frequency on onset limit of mode 2

모든 연소실은 형상(geometry)에 기인한 고유의 관공명 주파수(본 연구에서는 200 Hz)가 존재하게 되는데 연소실 상류의 버너 채널에서도 압력변동이 전달되기 때문에 공명주파수가 존재

하게 되고, 연료와 공기의 미연혼합기에도 공명에 따른 당량비의 변동이 존재하게 된다. 따라서 모드 2의 발생영역이 당량비 변동만큼 넓게 존재했을 가능성이 있다. 즉 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 모드 2의 과농/희박 한계(upper/lower onset limit)보다 공명에 따른 당량비 변동만큼 입력 당량비가 변조되어 모드 2의 발생영역이 넓게 나타났다고 볼 수 있다. 그러므로 공명 주파수에 해당되는 헬름홀츠 공진기를 연소기 전단 즉, 미연혼합기가 유동하는 채널에 부착함으로써 혼합기가 연소실에 들어가기 전에 공명에 의해 변조되는 당량비 변동만큼 감쇄시킨 다음, 연소실로 투입되면, 모드 2에 해당되는 운전영역이 좁아질 것으로 예상된다.

3.3 헬름홀츠 공진기의 효과

3.3.1 실험

Fig. 4는 헬름홀츠 공진기를 부착하지 않고 모드 1, 2, 3에 대한 안정화 선도를 구한 것이다. 가로축은 혼합기의 유속으로 전체 유량 변화로 볼 수 있고, 실제 시스템에서 출력을 바꿀 수 있는 운전범위라고 볼 수 있다. 전 운전범위에 대해 모드 2가 넓게 존재하고 있음을 알 수 있다.

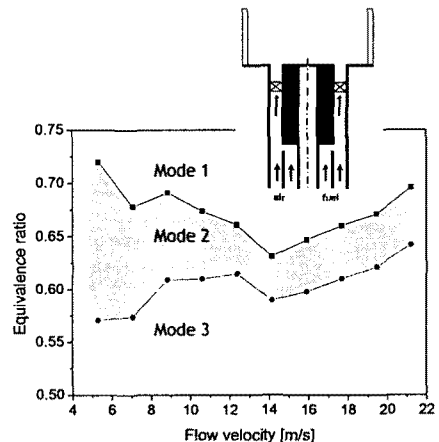


Fig. 4 Stability map without helmholtz resonators in the mixture of fuel and air

Fig. 5는 헬름홀츠 공진기를 덤프면으로부터 상류 방향으로 85mm 떨어진 곳에 4개를 부착하여 모드 1, 2, 3에 대한 안정화 선도를 구한 것이다. Fig. 4와 비교하면, 모드 2의 영역이 전체적으로 비교적 좁게 존재함을 볼 수 있다. 이는 앞

서 예상한 공명주파수가 미연혼합기의 당량비 변동의 효과를 잘 입증하는 결과로 볼 수 있다.

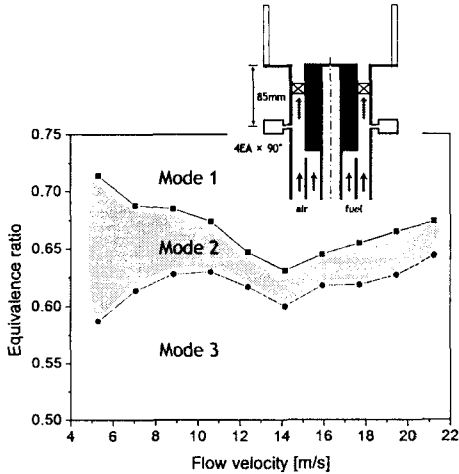


Fig. 5 Stability diagram with Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air

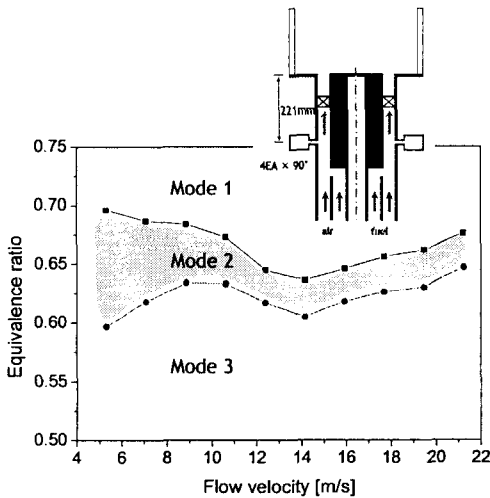


Fig. 6 Stability diagram with changing the position of Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air (position from the dump plane = 221 mm)

Fig. 6은 헬름홀츠 공진기를 덤프면으로부터 상류 방향으로 221 mm 떨어진 곳에 4개를 부착하여 안정화 선도를 구한 것이다. Fig. 4와 비교하면, 모드 2의 영역이 전체적으로 비교적 좁게

존재함을 볼 수 있다. 하지만 헬름홀츠 공진기의 위치가 85 mm인 Fig. 5의 결과와 비교하면, 그다지 큰 차이를 얻을 수 없었다. 이를 통해 헬름홀츠 공진기의 위치에 따른 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 Fig. 5과 Fig. 6과는 달리 헬름홀츠 공진기를 연료 분사구에 부착하여 얻은 결과로서 덤프면으로부터 상류 방향으로 221 mm 떨어진 곳에 4개를 부착하여 모드 1, 2, 3에 대한 안정화 선도를 구한 것이다. 헬름홀츠 공진기가 없는 Fig. 4와 비교하면, 모드 2의 영역이 전체적으로 훨씬 더 좁게 존재함을 볼 수 있고, 헬름홀츠 공진기를 미연 혼합기의 채널에 부착한 Fig. 5와 Fig. 6의 결과보다도 더 좁은 영역의 모드 2를 확인할 수 있었다. 이는 연료유량이 조금만 변조 되어도 당량비 측면에서 더 많은 변조의 효과를 준다는 측면에서 타당한 결과라고 판단되고, Fig. 7의 결과를 통해서 실제 가스터빈 연소기에 헬름홀츠 공진기를 적용한다면 연료 분사구에 부착하는 것이 가장 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이라고 생각된다.

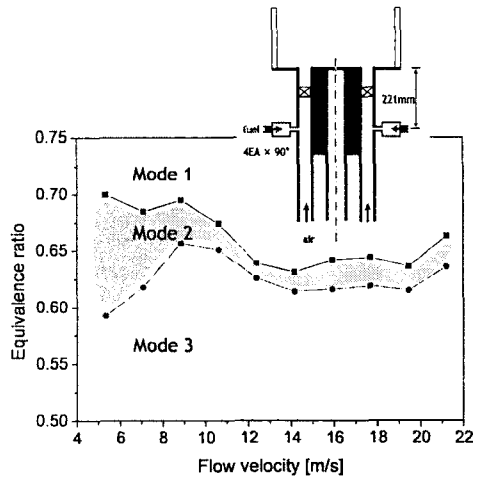


Fig. 7 Stability diagram with Helmholtz resonators in the fuel flow

3.3.2 수치해석

앞서 실험한 헬름홀츠 공진기의 효과를 수치계산을 통해서 그 차이를 알아보기 위해 채널에서 음향장을 해석해 보았다. Fig. 8은 음향장을 버너 채널의 길이방향에 대한 압력변동으로 나타낸 결과이다. 헬름홀츠 공진기를 부착한 경우와 부착하지 않은 경우를 비교할 수 있고, 부착한 경

우가 공진 효과를 보이고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 수치계산을 통해 헬름홀츠 공진기의 효과가 분명히 버너의 채널 내부에 유동하는 미연 혼합기에 영향을 미친다는 점을 확인 할 수 있다.

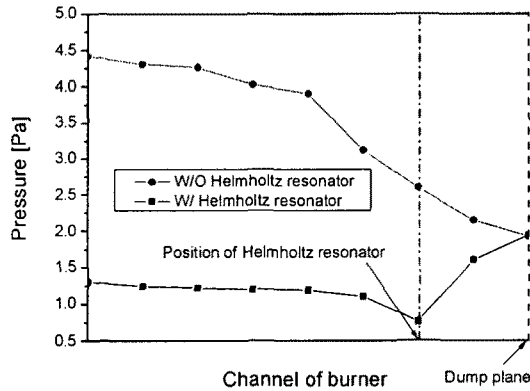


Fig. 8 Acoustic field in the channel of the burner

Fig. 9는 헬름홀츠 공진기를 부착하지 않은 경우이고, Fig. 10은 덤프면으로부터 50 mm 떨어진 곳에 헬름홀츠 공진기를 부착하여 음향장을 해석한 결과이다. 헬름홀츠 공진기의 체적 (V)을 2차원적 영역에서 수치계산하기 위해 그 표면적을 같게 할 필요가 있으므로 Fig. 10의 2차원 헬름홀츠 공진기의 치수로 바꾸어서 계산에 적용하였다. Fig. 9는 덤프면에 2 Pa, 200 Hz의 압력변동에 따라 아래쪽으로 갈수록 음향장의 압력분포가 성장함을 볼 수 있고, Fig. 10은 같은 압력변동에 따라 아래쪽으로 갈수록 음향장의 압력분포가 헬름홀츠 공진기의 영향을 받아 감소됨을 볼 수 있다. 감쇄된 크기는 초기값에 비해 약 10%로 나타났다.

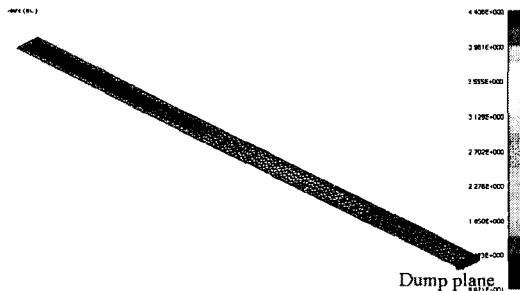


Fig. 9 Acoustic field without Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air

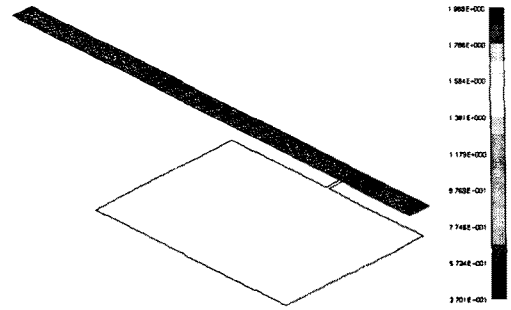


Fig. 10 Acoustic field with Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air (position from the dump plane = 50 mm)

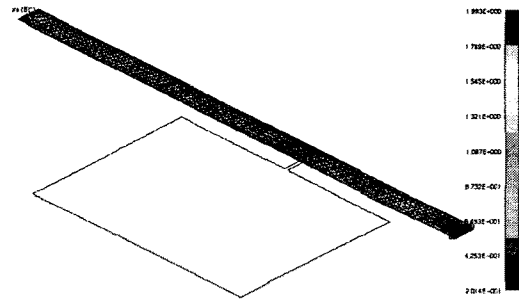


Fig. 11 Acoustic field with Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air (position from the dump plane = 100 mm)

Fig. 11은 헬름홀츠 공진기를 덤프면에서 100 mm 떨어진 곳에 부착한 후 같은 압력변동에 따라 아래쪽으로 갈수록 음향장의 압력분포가 헬름홀츠 공진기의 영향을 받아 감소됨을 볼 수 있다.

마찬가지로 Fig. 12와 13은 덤프면으로부터 150 mm, 200 mm 각각 떨어진 곳에 헬름홀츠 공진기를 부착한 후 같은 압력변동에 따라 아래쪽으로 갈수록 음향장의 압력분포가 헬름홀츠 공진기의 영향을 받아 거리에 따라 비례해서 감소됨을 볼 수 있다. 앞서 실험을 통해 알아본 Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서는 공진기의 위치에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있었지만, 수치해석을 통해 알아본 헬름홀츠 공진기의 부착위치에 따른 버너 내의 음압 분포는 그 위치에 따라 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 수치해

석이 실험을 그대로 모사하지 못한 시도 자체에서 시작된 차이라고 생각되며, 이러한 측면에서 향후 수치해석에 대한 보완이 필요하다고 사료된다.

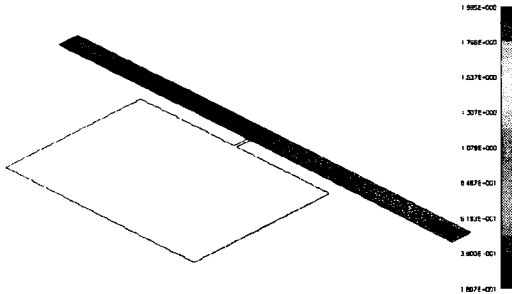


Fig. 12 Acoustic field with Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air (position from the dump plane = 150 mm)

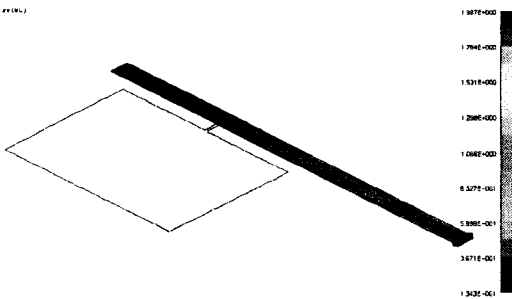


Fig. 13 Acoustic field with Helmholtz resonators in the mixture of fuel and air (position from the dump plane = 200 mm)

결론

본 연구를 통해 연소실 전단에 미연혼합기가 유동하는 채널에 헬름홀츠 공진기를 장착하여 그 영향을 살펴보고, 언초우크 조건에서의 화염 특성을 관찰하였다. 4개의 화염모드를 관찰할 수 있었는데, 이는 high frequency 모드(모드 1), low frequency 불안정 모드(모드 2), 안정모드(모드 3) 부상화염 및 소멸 모드(모드 4) 등이었다. 여기서는 현실적으로 제거하기 어려운 저주파수

대역의 불안정 모드인 모드 2를 헬름홀츠 공진기를 이용하여 저감하기 위한 시도를 하였다. 헬름홀츠 공진기를 연료/공기 혼합 채널 또는 연료분사구에 부착하여도 감쇄효과가 충분함을 알 수 있었으며, 특히 연료분사구에 부착할 경우에 더욱 유효한 결과를 얻었다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 미쓰비시 중공업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] T. Lieuwen, H. Torres, C. Johnson and, B. T. Zinn, 2001, "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors," ASME, vol. 123, pp. 182-189.
- [2] T. Lieuwen and B. T. Zinn, 1998, "The Role of Equivalence Ratio Oscillations in Driving Combustion Instabilities in Low NOx Gas Turbines," 27th Symp. on Comb., pp. 1809-1816.
- [3] J. G. Hong, U. D. Lee, K. C. Oh, H. D. Shin, K. Tanaka, S. Tanimura and K. Fujii, 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.
- [4] 홍정구, 이민철, 이은도, 오광철, 신현동, 2005, "혼합기 공급방식에 따른 덤프연소기의 연소 불안정성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제29권, 제8호, pp. 963-970.
- [5] 홍정구, 오광철, 신현동, 2007, "연소실 압력 변동이 버너 내부의 당량비 변동에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 B권, 제31권, 제2호, pp. 202-207.
- [6] Lawrence E. Kinsler, "Fundamentals of acoustics" John wiley & Sons, Inc., Fourth Edition, pp. 284-286.