

액체 램제트 엔진에서 Actively Tuned Passive Control 가능성의 실험적 연구

송재천* · 송진관* · 황정재* · 윤영빈**

An Experimental Study on Feasibility of Actively Tuned Passive Control in a Liquid Ramjet Engine

Jaechon Song* · Jinkwan Song* · Jeongjae Hwang* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

Combustion oscillations are caused by a coupling between acoustic waves and unsteady heat release. They can be eliminated using passive controller such as a helmholtz resonator. But, helmholtz resonator is normally only effective over a narrow frequency range. In this work, helmholtz resonator is applied for reducing the combustion oscillations and we vary the helmholtz resonator volume using piston in order to tune in the wide range of operating conditions. As the result, it is found that the dominant combustion oscillations can be reduced by optimizing the size of resonator volume. Also, from these results, we investigate feasibility of actively tuned passive control.

초 록

연소불안정현상은 주로 음향파와 열방출률 섭동간의 상호작용에 의해 발생한다고 알려져 있다. 이러한 현상은 헬름홀츠 공진기와 같은 수동제어기를 사용하여 감소시킬 수 있다. 그러나 헬름홀츠 공진기는 일반적으로 좁은 주파수대역에 대해서만 효과가 있는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 다양한 작동 범위에서 효과를 가질 수 있도록 피스톤을 사용하여 헬름홀츠 공진기의 부피를 변화시켜가며 연소불안정현상에 적용하였다. 그 결과 피스톤을 최적위치에 동조시킴으로써 연소 불안정 모드의 진폭을 감소시킬 수 있었다. 또한 이러한 결과를 바탕으로 능동적으로 동조되는 수동제어방식의 가능성에 대해서 알아보려고 한다.

Key Words: Combustion Oscillations(연소불안정), Helmholtz resonator(헬름홀츠 공진기), Actively tuned passive control(능동적으로 동조되는 수동제어)

1. 서 론

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

Actively tuned passive control은 주로 내연기
관과 항공기 엔진의 배기 덕트나 구조물 등에서

발생하는 소음이나 진동을 제어하는 방법으로 이전에 많은 연구가 있어 왔다.[1] 이는 거의 고정적인 음향모드에 의해 외란이 발생하고, 환경적인 변화에 의해서 발생하는 주파수범위가 넓지 않으므로 수동이나 능동제어 방식보다 훨씬 효율성이 높다고 판단되었기 때문이다.

최근에는 항공용 추진기관 엔진이나 산업용 가스터빈에서 발생할 수 있는 연소 불안정 제어에도 적용되고 있다.[2,3]

일반적으로, 연소불안정 현상을 제어하는 방식으로 크게 능동제어와 수동제어 방식으로 나뉜다. 능동제어방식은 스피커 또는 이차적인 연료 공급 등을 이용하는 것으로, 실시간으로 측정된 값으로부터 연소시스템의 상태를 인위적으로 조절한다. 그러나 부적절한 제어가 되면 시스템을 더욱 더 불안정하게 할 수 있다.[3]

이에 반해 이미 많은 검증과 연구가 진행되어 온 수동제어방식은 일반적으로 연소시스템에 음향학적 모드를 억제하는 댐퍼를 장착하는 방식을 의미한다.[4] 그러나 이 방식은 좁은 주파수 대역에서만 효과가 있고, 작동영역의 변화가 생기면 이에 따라 효과가 불분명한 단점을 가지게 된다.

위의 두 방식과는 달리 actively tuned passive control은 작동영역의 변화에 따라 수동 제어 기구를 연소불안정 모드에 동조시켜 연소불안정을 제어하는 방식이다. 동조라는 특징적인 방법으로 전형적인 수동제어방식의 단점을 극복할 수 있다. 더욱이 일반적으로 연소불안정이 발생하는 시간보다 훨씬 느린 작동환경 변화의 시간만큼의 actuation이 필요하게 됨에 따라 요구되는 actuator의 양은 작게 되고, 이는 능동제어방식보다 나은 장점이라 말할 수 있다. 결국 actively tuned passive control은 능동제어와 수동제어의 많은 장점을 결합한 접근방법이라 할 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

실험부는 크게 음향실험부와 연소실험부로 나뉘어져 있다. 음향 실험부는 40mm X 40mm의

단면적을 가지고 길이방향은 1.05m의 덕트 형상으로 제작되었다. 이는 현 연구실에서 사용하고 있는 모델 램제트 기관의 길이(2.05m)를 제외하고는 거의 동일하게 이루어져 있다. Fig. 1과 같이 실험 장치는 덕트에 서브우퍼 스피커와 마이크로폰, 헬름홀츠 공진기가 장착되었다.

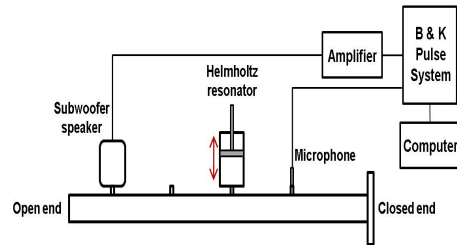


Fig. 1 Experimental Apparatus for Cold Test

음향 측정 장비는 B&K Pulse system(Bruel and Kjar)을 사용하였고, 이에 의해 생성된 신호는 앰프(RA 150)를 통하여 증폭이 되어, 우퍼 스피커를 통해 덕트에 가진하도록 되어있다. 스피커에서 나온 신호의 값은 마이크로폰(4190type Bruel and Kjar)으로 측정되어 최종적으로 음압의 변화를 관찰 할 수 있게 된다.

실험은 정현파와 같은 단일주파수를 사용하여 25Hz~200Hz 주파수의 음압 값을 계측하였다. 이러한 음향실험을 토대로 하여 기본적인 공진기의 특성 및 최적동조 위치를 구하고, 실제 연소 실험 장치에 장착하고 연소 실험을 수행하면서 실제 감쇠가 가능한지 확인하였다.



Fig. 2 Experimental Apparatus for Hot Test

연소 실험부는 동일한 단면적을 가진, 랩 스케일 액체연료 연소실험 장치(Fig. 2)에서 시행되었다. 축열식 전기 히터를 사용하고, 연소기 챔버

및 연장 덕트, 배기 시스템으로 구성되어 있다.

연료로는 등유가 사용되었고, 정삼각형 보염기를 통하여 화염이 안정화된다. 계측장비로는 동압센서, 온도센서 등이 장착되어 있고, 점화를 위해 토치형 점화기를 이용하였다. 연소 후의 가스는 배출관을 통하여 배출되게 된다. 헬름홀츠 공진기는 Anti-node라고 예상되는 위치에 장착되었고, 공진기 내부에는 동압과 온도센서가 장착되어 있다. 실험조건과 헬름홀츠 공진기의 형상은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Experimental Condition

Inlet Air Massflow Rate	28.65 g/s
Inlet Air Temperature	500±5 K
Equivalence Ratio(ϕ)	0.55

Table 2. Geometry of Helmholtz Resonator

Throat diameter	10 mm
Throat length	80 mm
Resonator diameter	125.4 mm
Resonator length	from 0 to 140 mm

3. 실험결과

Figure 3은 상온에서 공진기의 부피를 변화시켜 가며 음압이 최소가 되는 피스톤 위치를 찾아본 결과이다. 공진주파수는 86Hz(Longitudinal mode)로 측정되었고, 그에 따라 피스톤이 19mm에서 최소 음압이 발생함을 알 수 있다. 즉 최적의 동조위치라 볼 수 있다. 또한 헬름홀츠 공진기 위치에 따라 모드분할현상이 나타남을 알 수 있다. 이는 에너지의 비대칭성에서 비롯되어 일반적으로 acoustic damper를 사용할 경우 흔히 나타나는 결과라고 알려져 있다.[5]

Figure 4는 피스톤 위치를 변화시켜가며 동조 주파수인 86Hz의 지점에서 헬름홀츠 공진기의 유무에 따른 진폭의 감쇠비를 정량화한 값이다. 동조위치인 19mm에서 86Hz의 진폭이 96%가 감소함을 알 수 있다. 중요한 사실은 대략적으로 동조 주파수 근처로 피스톤이 위치하기만 하면

60%이상의 감쇠효과가 있음을 알 수 있다.

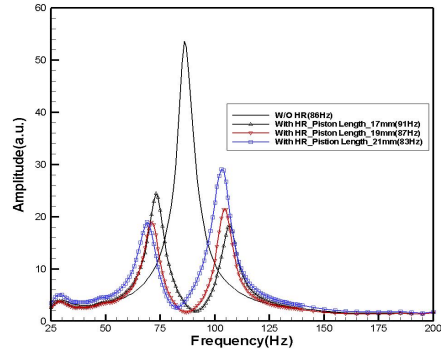


Fig. 3 Amplitude of 1L Mode according to Piston Position

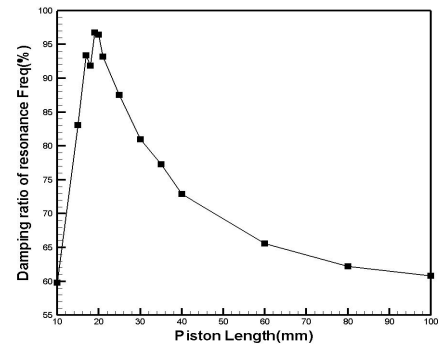


Fig. 4 Damping Ratio according to Piston Position at Resonance Frequency

이 결과는 헬름홀츠 공진기를 장착 한다면 능동제어와는 달리 연소장을 안정한 상태로 유지시켜줄 수 있다는 증거가 될 수 있다.

연소시에도 피스톤 위치를 변화시켜가며 동압 센서로 최저 진폭이 나타나는 동조 위치를 구하였다. Figure 5와 같이 피스톤 60~80mm 사이에서 1/3이상 진폭이 감쇠됨을 알 수 있다.

Figure 6(a), 6(b)는 연소시 헬름홀츠 공진기의 유무에 따른 FFT 결과이다. Fig. 6(a)를 통해서 약 75Hz근방에서 주 주파수가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 음향학적으로 Longitudinal mode($n=1$)로 보인다. Fig. 6(b)에서는 가장 감쇠폭이 큰 피스톤 위치(75mm일 때)의 FFT의 결과로, 주 주파수가 뚜렷하게 감쇠됨을 볼 수 있다. 그러나 연소시에 분할모드는 관찰되지 않았다.

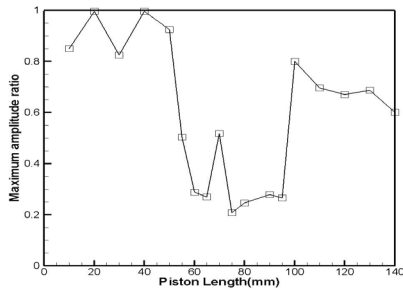
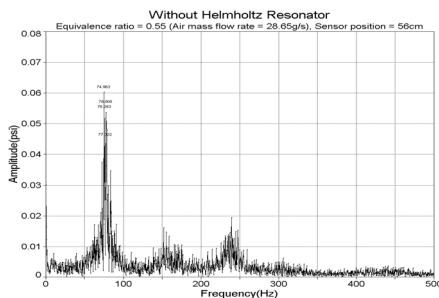
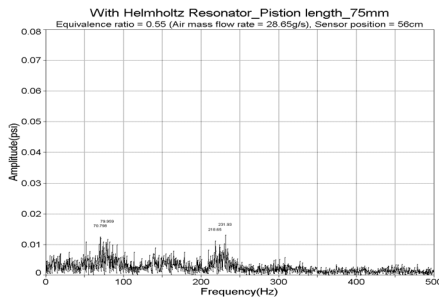


Fig. 5 Maximum Amplitude Ratio according to Piston Position when Combustion



(a) Without Helmholtz Resonator



(b) With Helmholtz Resonator

Fig. 6 FFT Spectrum on Dynamic Pressure Sensor

4. 결 론

음향실험과 연소실험결과 장치내의 공진주파수와 공진기의 동조주파수가 일치할 때 가장 최적의 성능을 보이며, 근접한 주파수대역에 동조되더라도 어느 정도 이상의 효과가 있다는 것을 확인하였다. 또한 연소시에는 음향실험에 비해 감쇠

효과가 줄어들음을 확인하였다. 이는 헬름홀츠 공진기의 sealing과 음속측정의 어려움 등이 문제라고 생각된다. 또한 차후 actively tuned passive control을 위한 기반을 마련할 수 있었다.

5. 후 기

본 연구는 서인천 발전본부 중장기 기술과제 “가스터빈(GE7FA DLN-2.6) 연소기의 연소 불안정성 제어기법 개발”의 일환으로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. M. De Bedout, M. A. Franchek, R. J. Bernhard & L. Mongeau, “Adaptive-Passive Noise Control with Self-Tuning Helmholtz Resonators”, *Journal of Sound and Vibration* (1997) 202(1), 109-123.
2. S. Yamanaka, K. Shioda, “Application of the Helmholtz Resonator for Reducing the Combustion Oscillation in Gas turbines”, *Proceedings of the International Gas turbine Congress (IGTC-TS-146)*, 2003.
3. D. Zhao, A. S. Morgans, “Tuned passive control of combustion instabilities using multiple Helmholtz resonators”, *Journal of Sound and Vibration* 320 (2009) 744-757.
4. G. A. Richards, D. L. Straub, E. H. Robey, “Passive control of combustion dynamics in stationary gas turbines”, *Journal of Propulsion and Power* 19 (2003) 795-810.
5. Campreale, S. M., Forte, A., Fortunato, B., Mastrovito, M., 2004, “Numerical Simulation of the Acoustic Pressure Field in an Annular Combustion Chamber with Helmholtz Resonator”, *ASME paper GT2004-54139*.