

모형연소실에 장착한 헬름홀츠 공명기의 흡음특성에 관한 연구

박주현* · 손채훈**

A Study on the Acoustic Absorption Character of a Helmholtz Resonator in Model Chamber

Ju Hyun Park* · Chae Hoon Sohn**

ABSTRACT

Acoustic design parameters of a Helmholtz resonator are studied experimentally and numerically for acoustic stability in a model acoustic tube. According to standard acoustic-test procedures, acoustic-pressure signals are measured. Quantitative acoustic properties of sound absorption coefficient are evaluated and thereby, the acoustic damping capacity of the resonator is characterized. Helmholtz resonator on spring-damper system use were understanding for acoustic damping. The length of orifice and the volume of cavity of resonator are selected as design parameters for tuning of the resonator. Acoustic- damping capacity of the resonator increases with its cavity volume. And orifice length as increases with acoustic damping capacity was decreased.

초 록

로켓엔진 연소기의 음향 불안정 억제를 위해 헬름홀츠 공명기의 음향학적 최적 설계 설계조건을 실험적, 해석적으로 연구하였다. 표준 음향시험 절차에 따라 음향과관에 공명기를 장착하여 음향과 응답 신호를 측정하였다. 측정된 신호를 토대로, 흡음계수를 계산하였고, 이로부터 공명기의 음향감쇠 성능을 파악하였다. 헬름홀츠 공명기를 스프링-댐퍼 시스템으로 상사하여, 음향학적 감쇠성능을 이해하였다. 헬름홀츠 공명기의 설계변수로 목의 길이와 공동의 크기 등을 선택하였다. 공동의 크기가 커질수록 흡음성능이 증가하였고, 목 길이가 길어질수록 흡음성능이 감소하였다.

Key Words: Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Absorption Coefficient(흡음률), Acoustic Tuning(음향 동조)

1. 서 론

* 현대로템 추진연구팀

** 세종대학교 기계항공우주공학부

연락처, E-mail: jhpark81@hyundai-rotem.co.kr

고주파 연소불안정은 액체로켓엔진 연소기의 개발과정에 있어서 중요한 설계인자이다. 연소

불안정이란 연소과정 중 발생한 에너지가 유동장의 압력파를 증폭시켜, 연소실의 진동, 벽면으로의 과도한 열전달을 발생시킨다. 이는 연소실 내부유동장과 음향장과의 상호작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 고주파 연소불안정 발생 시 엔진성능 저하 및 심한 경우 연소실 자체가 파괴되거나 발사체의 작동에 치명적인 손상을 유발하여, 엔진과 발사체 개발에 있어 큰 장애 요인이 된다[1,2].

이를 제어하기 위하여 수동적 제어기구로 베플(baffle)과 음향 공명기(acoustic resonator)가 있다. 베플은 높은 음향감쇠성능을 나타내지만 연소실 체적을 차지하여 연소실의 성능을 감소시킨다. 음향공 역시 높은 감쇠성능을 나타내지만 감쇠대역이 좁고, 최적의 효과를 얻기 위해 음향학적 동조(tuning) 과정이 필요하다. 이러한 수동제어기구는 연소실에 추가적으로 장착하기 때문에 연소실 제작이 복잡해지는 단점이 있다.

음향공명기 중 헬름홀츠 공명기는 수학적 도구를 이용한 해석이나, 성능에 대한 실험적 연구, 소음저감장치로의 적용에 대한 연구가 많이 이루어 졌다[1,2]. 헬름홀츠 공명기는 큰 부피를 갖는 공동과 목으로 이루어져 있으며 fig. 1과 같이 스프링-댐퍼 시스템으로 상사시킬 수 있다.

본 연구에서는 헬름홀츠 공명기의 설계인자 변경에 따른 음향감쇠 성능을 정량화하고, 성능 최적화를 실험적, 해석적으로 조사하였다.

2. 실험 및 해석방법

2.1 실험방법

본 연구에서 흡음성능 측정에 사용된 시스템의 개략도는 fig. 2와 같다. 모형 연소실의 역할을 하는 원통(enclosure)과 음향가진부(horn speaker), 음향센서, FFT 분석기 등으로 구성하였다. 제작된 원통의 끝단에 한 개의 헬름홀츠 공명기를 장착하여 음향 흡음률(absorption coefficient)을 측정한다[4]. 공명기는 공동의 부피를 조절할 수 있도록 피스톤 형태로 제작하였으며, 목 길이 역시 조절이 가능하도록 제작하였다. 목의 직경은 7 mm이고, 공동의 직경은 21

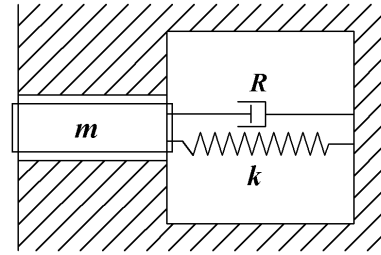


Fig. 1. Mechanical analogy of a Helmholtz resonator to a mass-spring-damper system

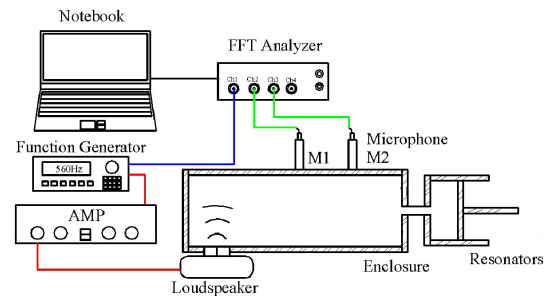


Fig. 2. Schematic diagram of acoustic-test apparatus

mm이다. 모형연소실에 해당하는 원통(enclosure)은 내경 100 mm, 길이 300 mm이다. 원통과 공명기는 아크릴로 제작되었고, 실험은 상온에서 진행하였다.

ISO-10534-2의 규정을 토대로 장치를 제작, 구성하였다[4]. 함수발생기(Agilent 33220A)로 랜덤노이즈 또는 정현파(sine wave)를 발생시키고 음향앰프(InterM QD-4960)를 통해 스피커로 가진해, 원통의 끝단에 장착한 공명기의 흡음률을 측정한다. 음향센서(ROGA RG-50)를 원통 벽면에 장착하여 내부의 신호를 수집하고 FFT분석을 수행한다. 공명기는 목 길이와 공동의 부피를 조절하여 공진주파수를 조절하였다.

헬름홀츠 공명기의 동조주파수는 다음 식으로 구할 수 있다[3].

$$f_0 = \frac{c_{cav}}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{ori}}{V(l_{ori} + \Delta l)}} \quad (1)$$

여기서 c_{cav} 는 공명기 공동내의 음속이고, S_{ori} 는 목의 단면적, V 는 공동의 부피, l_{ori} 는 목의

길이, Δl 은 질량 또는 길이 보정인자(correction factor)이다.

2.2 해석방법

헬름홀츠 공명기를 fig. 1과 같이 스프링-댐퍼 감쇠시스템으로 상사시키면 지배방정식은 다음과 같다[3].

$$my'' + Ry' + ky = F_0 \cos \omega t \quad (2)$$

m 은 질량으로 $\rho l_{ori} S_{ori}$ 로 계산되고, 스프링상수 k 는 $\rho c_{cav}^2 S_{cav}^2 / V$, R 은 저항계수이다. ρ 는 밀도, l_{ori} 는 목의 길이, S_{ori} 는 목의 단면적, c_{cav} 는 공동내의 음속, V 는 공동의 부피이다. 시스템이 감쇠계일 경우 R 은 0에서 $2\sqrt{mk}$ 의 값을 가진다. 스프링-댐퍼시스템에서 최적의 감쇠는 y' 의 값이 최대일 때 발생한다[3]. 지배방정식 (2)를 y' 에 대해 정리하면 다음과 같다.

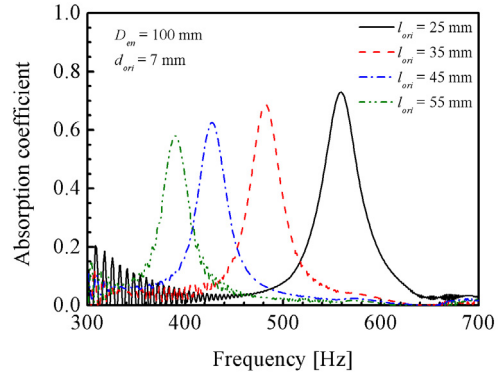
$$y'(t) = -\frac{\omega F_0}{\sqrt{m^2(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 c^2}} \sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

식에서 ω 는 각주파수, ω_n 은 고유주파수이다. 본 연구에서는 위의 식(2)를 MATLAB을 이용하여 풀이하였고, 공명기의 목의 설계인자인 l_{ori} 와 공동의 설계인자인 V_{cav} 의 변화에 따른 감쇠경향에 대해 연구하였다.

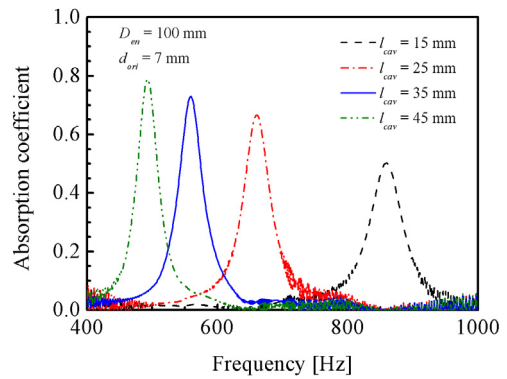
3. 결과 및 논의

3.1 실험결과

모형연소실에 제작한 헬름홀츠 공명기를 장착하고, 목 길이와 공동의 길이를 변화시키며 실험을 진행하였다. Figure 3은 그 결과로, 흡음률의 변화 및 동조주파수의 변화를 확인할 수 있다. Figure 3의 (a)는 공명기 목 직경과 공동의 길이를 고정하고, 목 길이를 변화시키며 흡음률을 측정하였다. 목 길이가 증가할수록 흡음률은 점차 감소하였고, 동조주파수는 저주파로 이동하였다. 주파수의 이동은 헬름홀츠 공명기 설계식과 잘 일치한다. 또 fig. 3의 (b)는 공명기 목 직경과



(a)



(b)

Fig. 3. Absorption coefficient of helmholtz resonator with $d_{ori} = 7$ mm for the orifice (a) and cavity (b) length

목 길이를 고정하고, 공동의 길이를 변화시키며 흡음률을 측정하였다. 공동의 길이가 증가할수록 흡음률이 점차 증가하였고, 공진주파수가 저주파로 이동하며, 흡음대역이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 해석결과

해석에서 사용한 설계변수는 목의 길이, 공동의 길이로, 입력 값 역시 모두 실험과 동일하게 설정하였다. 목 길이와 공동의 길이를 변화시키며 y' 값을 계산하여 그 변화를 fig. 4에 나타내었다.

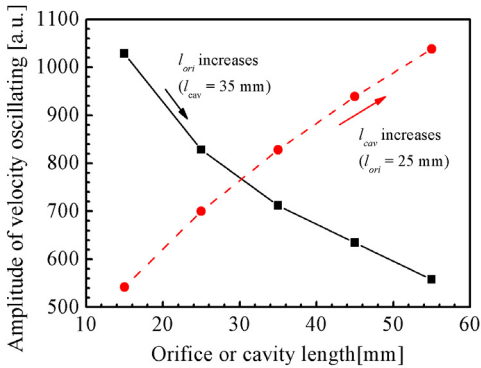


Fig. 4. Amplitudes of fluid-velocity oscillations as a function of an orifice or a cavity length in a Helmholtz resonator.

Figure 4에서 공명기 공동의 크기를 고정하고, 목의 길이를 증가시켰을 때 y' 값은 점차 감소하였다. 또 공동의 크기를 증가시킬수록 그 크기가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 실험에서 측정된 흡음능의 변화 경향과 잘 일치하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형연소실에 장착한 헬름홀츠 공명기의 흡음성에 관한 연구를 실험적, 해석적으로 진행하였다. 공명기의 설계인자로 목의 길이와 공동의 길이를 선정하였고, 인자의 변화에 대한 흡음능을 흡음률로 정량화하였다. 또 헬름홀츠 공명기를 스프링-댐퍼 감쇠시스템으로 상사하였고, 실험에서와 같은 설계인자에 대한 변화를 MATLAB를 사용하여 계산하였다.

공명기의 목 길이가 증가할수록 흡음능은 점차 감소하고, 공진주파수가 저주파로 이동하였

다. 또 공동의 부피가 증가할수록 흡음능이 증가하고, 흡음대역이 감소하며, 공진주파수가 저주파로 이동하였다. 이러한 경향은 이론적으로 계산한 감쇠시스템의 속도변화와 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 일부 지원(저자 중 손채훈)을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0071941).

참 고 문 헌

1. Harrje, D. J. and Reardon, F. H., "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", NASA SP-194, 1972
2. F. E. C. Culick, V. Yang, "Overview of combustion instabilities in liquid-propellant rocket engines", Liquid Rocket Engine Combustion Instability, edited by V. Yang and W. E. Anderson, Vol. 169, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington DC, pp. 3 - 37, 1995
3. R. M. Hatch, "Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS", Chapman & Hall/CRC, USA, Chap. 2, 2001
4. ISO 10534-2, Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes, Part 2: Transfer-function method, 1998