

모형연소실내에서 헬름홀츠 공명기의 기하학적 형상 인자에 따른 음향 감쇠 특성

최효현* · 박이선* · 손채훈*

Characteristics of Acoustic Damping Induced by Helmholtz Resonators with Various Geometric Factors in a Model Chamber

Hyohyun Choi* · I-Sun 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. Acoustic damping is quantified by the amplitude of the fluid velocity in mass-spring-damper system. The length of an orifice, the volume of a cavity, and the diameters of an orifice and a cavity in the resonator are selected as design parameters for tuning of the resonator. It is found that acoustic damping capacity is increased by shorter orifice and longer cavity in the resonator. As the ratio of the orifice diameter to the cavity diameter increases in the resonator, the damping capacity decreases.

초 록

본 연구에서는 로켓엔진 연소기의 음향 불안정 억제를 위해 헬름홀츠 공명기의 음향학적 최적 설계 조건을 해석/실험적으로 연구하였다. 질량-스프링-댐퍼 시스템과의 유사성을 이용한 모델 식의 풀이를 통해 감쇠 성능을 정량화하였다. 헬름홀츠 공명기의 기하학적 형상 인자로 목의 길이와 공동의 크기, 목 및 공동의 직경을 선택하였다. 목의 길이가 짧아지고, 공동의 길이가 길어짐에 따라 흡음 성능이 증가하고, 목과 공동의 직경비가 증가함에 따라 흡음 성능은 감소하였다.

Key Words: Helmholtz Resonator(헬름홀츠공명기), Integral Absorption Coefficient(총 흡음률), Mass-Spring-Damper System(질량-스프링-댐퍼 시스템)

1. 서 론

액체 로켓엔진 연소기의 개발과정에 있어서

매우 중요한 인자 중 하나는 고주파 연소 불안정(high frequency combustion instability)이다. 이는 연소 과정에서 연소실 내부 반응 유동장과 음향장과의 상호 작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있는데 연소 과정으로부터 공급된 에너지가 연소실 내부 유동장의 압력 및 속도를 증폭시키는 현상으로 연소실 내부의 진동과 연소

* 세종대학교 대학원 기계공학과

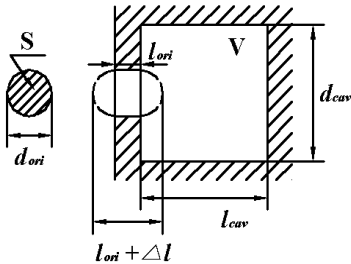
** 세종대학교 기계항공우주공학부

연락처, E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

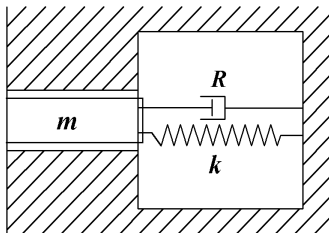
실 벽면으로의 과도한 열전달을 수반한다. 고주파 연소불안정은 엔진과 발사체 개발에 있어 큰 장애 요인이 되고 있다[1,2].

이를 제어하기 위해 수동적인 제어기구로 베플과 음향 공명기가 있다. 베플은 높은 음향감쇠 성능을 나타내지만 분사기면에 장착되므로 연소실 체적을 차지하여 연소실의 성능을 감소시킨다. 또한 횡방향 모드에 초점을 맞추고 있어, 종방향과 관련된 모드는 억제할 수 없다. 음향공명기 역시 높은 감쇠 성능을 나타내지만 감쇠대역이 좁고, 최적의 효과를 얻기 위해 음향학적 동조 과정이 필요하다. 따라서 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다[1,2].

본 연구에서는 헬름홀츠 공명기를 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 상사시켜 헬름홀츠 공명기의 기하학적 설계인자 변경에 따른 질량-스프링-댐퍼 시스템과 비교하여 음향감쇠 성능을 정량화하고, 성능 최적화 연구를 실험적, 해석적으로 수행하였다. Fig. 1에 헬름홀츠 공명기의 형상과 질량-스프링-댐퍼 시스템과의 유사성(analogy)을 나타내었다.



(a) Type resonator of a Helmholtz resonator



(b) mass-spring-damper system

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

2. 실험 및 해석방법

2.1 실험방법

본 연구에서 흡음성능 측정에 사용된 시스템을 설계하였다. 제작된 원통의 끝단에 한 개의 헬름홀츠 공명기를 장착하여 음향 흡음률(absorption coefficient)을 측정한다[3]. 공명기는 공동의 부피를 조절할 수 있도록 피스톤 형태이며, 목 길이 역시 조절이 가능하다. 기준이 되는 헬름홀츠 공명기의 목의 직경은 7 mm이고, 공동의 직경은 21 mm이다.

ISO-10534-2의 규정을 토대로 장치를 제작, 구성하였다[3]. 함수발생기(Agilent 33220A)로 랜덤 노이즈 또는 정현파(sine wave)를 발생시키고 음향앰프(InterM QD-4960)를 통해 스피커로 가진 해, 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.

2.2 해석방법

일반적인 헬름홀츠 공명기의 동조주파수는 다음 식으로 구할 수 있다[4].

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

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 보정인자이다.

헬름홀츠 공명기를 스프링-댐퍼 감쇠 시스템으로 상사시키면 지배방정식은 다음과 같다[4].

$$m y'' + R y' + k y = F_0 \cos \omega t \quad (2)$$

여기서 m 은 질량으로 $\rho l_{ori} S_{ori}$ 로 계산되고, 스프링상수 k 는 $\rho c_{cav}^2 S_{ori}^2 / V$, 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 감쇠계열 경우 R 은 0에서 $2\sqrt{mk}$ 의

값을 가진다. 스프링 댐퍼 시스템에서 최적의 감쇠는 y' 값이 최대일 때 발생한다[4]. 지배방정식을 y' 에 대해 정리하면 다음과 같다.

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

위 식에서 ω 는 각주파수 이고, ω_n 은 고유주파수이다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = c_{cav} \sqrt{\frac{d_{ori}^2}{d_{cav}^2 l_{cav} l_{ori}}} \quad (4)$$

본 연구에서는 위의 식(2)를 MATLAB을 이용하여 분석하였고, 공명기의 설계인자인 l_{ori} 와 l_{cav} 변화에 따른 흡음률의 변화와 d_{ori} , d_{cav} 변화 및 스프링 댐퍼 시스템에서 저항계수에 따른 최적의 감쇠 y' 값의 경향을 연구하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 실험 결과

모형 연소실에 제작한 헬름홀츠 공명기를 장착하고, 목 길이와 공동의 길이를 변화시키며 실험을 선행 연구에서 진행하였다[5]. 목 길이가 길어질수록 흡음률은 감소하였고, 동조주파수는 저주파로 이동하였다. 이는 헬름홀츠 공명기 설계식인 식(1)을 통해 목 길이와 동조주파수가 반비례관계를 알 수 있고 그 경향성이 잘 일치하였다. 또한 공동의 길이가 증가 할수록 동조주파수는 저주파로 이동하며, 흡음률이 점차 증가하였고, 흡음대역이 점차 감소하는 것을 확인하였다. 이는 기존의 헬름홀츠 공명기의 감쇠원리의 특성에서 공동 부분의 크기가 증가함에 따라 음의 소산이 커지고 흡음률에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

주파수에 따른 흡음률의 최대값은 확인할 수 있으나 목의 길이와 공동의 길이 변화에 따른 주파수의 변화로 인한 흡음대역의 변화도 동시에 발생하므로 헬름홀츠 공명기의 최적 흡음률은 알 수 없다. 따라서 총체적인 감쇠용량 확인이 필요하다. 이는 총 흡음률 혹은 적분 흡음률

α_I 로 부른다. α_I 는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\alpha_I = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \alpha df \quad (5)$$

위 식에서 f_{min} 과 f_{max} 관심영역 주파수 범위 안에서 최소 주파수와 최대 주파수를 나타낸다.

Fig. 2는 목 길이의 변화와 공동길이의 변화를 통한 총 흡음률 값을 알기 위하여 헬름홀츠 공명기를 동일한 주파수 560Hz로 동조시킨 결과이다. 목의 길이가 짧아짐으로 인해 질량이 감소하여 속도 진폭이 커지고, 동시에 공동의 길이가 길어짐으로 인해 체적이 증가하여 헬름홀츠 공명기의 특성상 음의 소산 효과가 커져 흡음률이 커짐을 확인하였다. Fig. 3은 동일 주파수에서 식(5)를 적용하여 총흡음률을 구한 그래프이다. 총 흡음률은 목의 길이가 40mm, 공동길이가 22mm일 때 최대임을 알 수 있다.

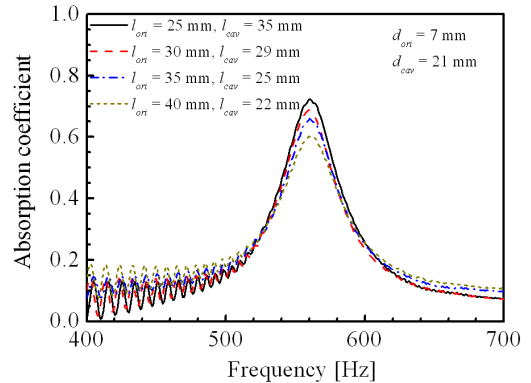


Fig. 2 Absorption coefficients of single Helmholtz resonator tuned to $f_0 = 560$ Hz

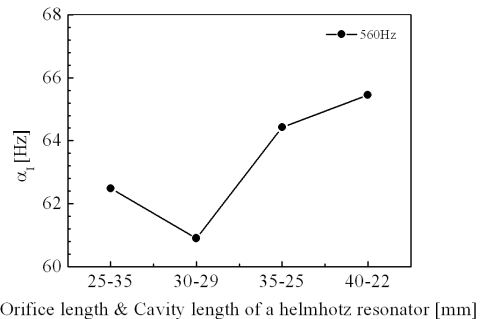


Fig. 3 Integral Absorption coefficients of single Helmholtz resonator tuned to $f_0 = 560$ Hz

3.2 해석결과

설계변수인 목의 길이와 공동의 길이 변화를 통한 y' 의 값을 확인하였고, 또한 목의 길이와 공동의 길이 변화에 따른 목의 직경과 공동의 직경의 비율을 변화 시켜가며 y' 값을 계산하였다. 목의 길이가 길어질수록 고유주파수가 저주파로 이동하며 y' 값 역시 감소하였다. 이는 스프링-댐퍼 시스템과 헬름홀츠 공명기식을 통한 목의 길이와 공동의 부피의 반비례관계의 경향과 일치 하였다. 또한 목의 직경과 공동의 직경의 비율이 증가함에 따라 y' 값이 감소하였다. 즉 목의 직경과 비교하여 공동의 직경이 점차 감소할수록 스프링-댐퍼 시스템에서의 강성, k 값이 증가하므로 고유주파수가 고주파로 이동하며, y' 이 감소하였다.

목의 길이를 고정한 후 공동의 길이가 길어질수록 y' 값이 증가함을 알 수 있고, 고유주파수는 저주파로 이동하였다. 또한 목의 길이와 공동의 길이에 따른 목의 직경과 공동의 직경의 비율이 증가 즉 공동의 직경의 감소할수록 강성, k 값이 증가하게 되고, 고유주파수가 고주파로 이동함에 따라 y' 값이 감소하는 경향을 볼 수 있다.

저항계수 R 값은 $0 \sim 2\sqrt{mk}$ 사이의 값을 가지며 이 범위 내에서 저항계수 값이 증가 할수록 y' 값은 감소하여 스프링-댐퍼 시스템 식에서 R 값의 반비례관계를 가지며 R 값이 증가 할수록 저주파로 이동한다. 이러한 경향은 이론적으로 계산한 감쇠시스템의 속도변화와 잘 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형연소실에 장착한 헬름홀츠 공명기의 흡음성능에 관한 연구를 실험적, 해석적으로 수행하였다. 공명기의 설계인자로 목의 길이와 공동의 길이, 목의 직경으로 선정하였고, 인자의 변화에 대한 흡음성능을 흡음률로 정량화하였다. 이때 목의 직경과 공동의 직경의 비율 및 저항계수에 대한 속도(y') 변화도 함께 계산

하였다. 목의 직경과 공동의 직경 비율이 커질수록 즉 공동의 직경이 작아질수록 고주파로 이동하며, y' 값이 작아짐을 확인하였다. 실험과 수치계산의 결과 흡음률과 y' 값의 경향성이 일치함을 알 수 있었다. 또한 저항계수의 값의 증가에 따라 y' 값이 감소함을 알 수 있는데 이는 저항계수 값이 y' 값과 반비례관계를 갖으며 수치계산 결과와 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0015979).

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. ISO 10534-2, Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes, Part 2: Transfer-function method, 1998
4. R. M. Hatch, "Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS", Chapman & Hall/CRC, USA, Chap. 2, 2001
5. 박주현, 손채훈 "모형 연소실에서 장착한 헬름홀츠 공명기의 흡음특성에 관한연구", pp. 399 ~ 402