

연소 불안정 억제를 위한 반파장 공명기 최적 설계 조건에 대한 실험적 연구

박주현* · 손채훈**

An Experimental Study on Optimum Design of Half-Wave Resonators for Combustion Stabilization

Ju Hyun Park* · Chae Hoon Sohn**

ABSTRACT

Acoustic design parameters of a half-wave resonator are studied experimentally 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. The diameter and the number of a half-wave resonator and the diameter of the tube are selected as design parameters for optimal tuning of the resonator. Optimum acoustic damping capacity is observed at smaller open area ratio as the resonator diameter increases.

초 록

로켓엔진 연소기의 음향 불안정 억제를 위해 고안된 반파장 공명기의 음향학적 최적 설계 조건을 실험적으로 연구하였다. 표준 음향시험 절차에 따라 음향파관에 공명기를 장착하여 음향파 응답 신호를 측정하였다. 측정된 신호를 토대로, 흡음계수를 계산하였고, 이로부터 공명기의 음향감쇠 성능을 파악하였다. 연소실을 모사하는 음향파관의 직경을 변화시켰고, 각 음향파관에 대해 공명기의 최적 면적비를 구하였다. 공명기의 면적비가 최적 값을 초과할 때 과감쇠가 발생하였다. 연소실 직경이 증가함에 따라 최적 면적비가 감소하였고, 공명기 직경이 증가 할수록 더 작은 면적비에서 최적 흡음능이 나타남을 알았다.

Key Words: Half-wave Resonator(반파장 공명기), Optimal Tuning(최적 동조), Absorption Coefficient(흡음률)

1. 서 론

* 세종대학교 대학원 기계공학과

** 세종대학교 기계항공우주공학부

연락처자 E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

액체 로켓엔진 연소기의 개발과정에 있어서 고주파 연소 불안정은 중요한 설계인자이다. 연

소 불안정은 연소실 내부유동장과 음향장과의 상호 작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 연소과정으로부터 공급된 에너지가 유동장의 압력파를 증폭시키고, 연소실의 진동, 연소실 벽면으로의 과도한 열전달을 발생시킨다. 고주파 연소 불안정은 연소실의 연소성능 저하 및 심한 경우 로켓엔진 자체가 파괴되거나 발사체의 작동에 치명적인 손상을 유발하여, 엔진과 발사체 개발에 있어 큰 장애 요인이 된다[1].

이를 제어하기 위하여 수동적 제어기구인 배플(baffle)과 음향 공명기(acoustic resonator)를 장착한다. 배플은 실용적인 단계에서 보편적으로 사용되고, 상대적으로 확실한 음향감쇠성능을 나타낸다. 음향공은 높은 감쇠성능을 나타내지만 감쇠대역이 좁은 단점을 가지고 있고, 최적의 효과를 얻기 위해 음향학적 동조(tuning) 과정이 필요하다. 또 배플과 음향공은 연소실에 추가적으로 장착되어지기 때문에 연소성능을 감쇠시키고, 제작이 복잡해지는 단점이 있다.

한편, 액체추진제 로켓엔진 연소기에는 추진제를 분사하기 위해 분사기가 장착된다. 분사기는, 연료의 형태에 따라 액체-액체형과 기체-액체형 분사기로 나눌 수 있다. 고추력, 고성능을 이루기 위해 가스발생기 등이 채용되면, Fig. 1에 나타난 바와 같은 기체-액체형의 동축형 분사기가 연소기에 장착될 것이다. 이 동축형 분사기의 중심으로는 기체 추진제가, 분사기 출구 근처에서 액체 추진제가 공급된다. 분사기의 본질적인 기능은 분사이지만 내부 체적의 대부분을 기체가 차지하므로 형태상 반파장 공명기의 역할을 할 수 있으며[3], 따라서 적절한 설계를 통해 음향 감쇠 효과를 볼 수 있을 것이다.

본 연구에서는 반파장 공명기의 설계인자 변경에 따른 음향감쇠 성능을 정량화하고, 성능 최적화를 실험적으로 조사하였다.

2. 실험장치 구성 및 방법

본 연구에 사용된 시스템의 개략도는 Fig. 2와 같다. 모형 연소실의 역할을 하는 원통

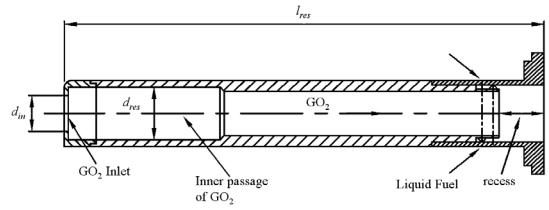


Fig. 1 Schematic diagram of a coaxial gas-liquid scheme injector

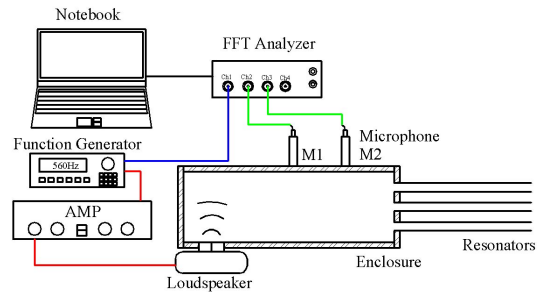


Fig. 2 Schematic diagram of acoustic-test apparatus ($D_{en} = 70 \sim 150$ mm, $L_{en} = 300 \sim 500$ mm)

(enclosure)과 음향가진부(horn speaker), 음향센서, FFT 분석기 등으로 구성하였다. 제작된 원통의 끝단에 한 개 혹은 다수개의 반파장 공명기를 장착하여 음향 흡음률(absorption coefficient)을 측정한다[2]. 원통은, 공명기 입구와 연소실 단면의 면적비에 따른 음향감쇠성능을 확인할 수 있도록 세 가지 크기로 제작하였다. 첫 번째 원통의 내경(D_{en})은 70 mm, 길이(L_{en})는 300 mm이고, 두 번째 원통은 내경 100 mm, 길이 300 mm, 세 번째 공명기는 내경 150 mm, 길이 500 mm이다. 실험에 사용한 반파장 공명기는 기체-액체형 분사기를 형상화 한 것으로, 양단이 open되어있고, 동조주파수(f_0)는 공명기의 길이(l_{res})를 조절하여 동조시켰다. 원통과 공명기는 아크릴로 제작되었고, 실험은 상온에서 진행하였다.

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

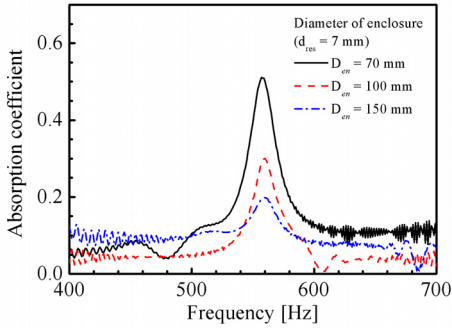


Fig. 3 Absorption coefficients as a function of frequency in the enclosures with $D_{en} = 70$, 100 and 150 mm ($d_{res} = 7$ mm)

측정한다. 음향센서(ROGA RG-50)를 원통 벽면에 장착하여 내부의 신호를 수집하고 FFT분석을 수행한다. 반파장 공명기는 길이를 조절하여 공명기의 길이(l_{res})는 300 mm로, 원통의 1L모드 공진주파수에 동조되도록 설정하였다.

반파장 공명기의 동조주파수는 다음 식으로 구할 수 있다[3, 4].

$$f_0 = \frac{c_{res}}{2(l_{res} + \Delta l)} \quad (1)$$

여기서 c_{res} 는 공명기내의 음속이고 Δl 은 질량 또는 길이 보정인자(correction factor)이다.

3. 실험결과 및 논의

3.1 흡음성능 정량화

연소실을 형상화한 원통(enclosure)에 공명기를 장착하지 않았을 때 $f_{1L} = 572$ Hz의 공진모드가 발생하였다. 공명기를 장착하였을 때 원통의 공진모드는 분할되었고, 공진크기는 감쇠되었다. 감쇠인자(Damping factor)로 분할된 모드를 정량화하기 어려우므로, 흡음률(absorption coefficient, α)로 성능을 정량화하였다. 흡음률은 ISO-10534-2에 따라 측정하였다[2].

3.2 면적비에 따른 흡음성능

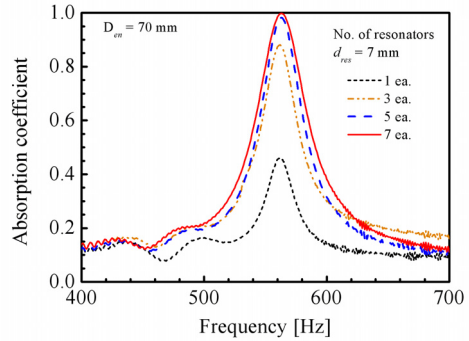


Fig. 4 Absorption coefficients of the resonators with $d_{res} = 7$ mm and $D_{en} = 70$ mm for the various numbers of resonators

연소실의 직경과 공명기의 직경에 따라 흡음 성능이 달라지므로, 연소실과 공명기의 면적비에 따른 흡음성능을 알아보기 위해 직경(D_{en})이 70 mm인 원통 100 mm, 150 mm인 원통에서 실험을 진행하였다. 직경(d_{res})이 7 mm인 반파장 공명기를 직경이 서로 다른 원통에 장착하여 실험을 진행하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. $D_{en} = 70$ mm인 원통에서 공명기의 면적비는 1%로 다른 원통에 비해 흡음률이 높게 측정되었다. 이는 원통(연소실) 크기에 따라 최적의 흡음성능을 나타내는 공명기의 직경과 개수가 달라짐을 의미한다.

직경이 70 mm인 $d_{res} = 7$ mm인 공명기의 개수를 1개에서 7개까지 증가시키며 흡음률을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 공명기의 개수가 증가할수록 흡음성능이 증가하였고, 흡음영역도 증가하였다. 공명기가 7개에서 최적의 흡음성능을 나타내었고, 이때의 원통과 공명기의 면적은 7%이다.

직경이 70 mm인 원통과 100 mm, 150 mm인 원통에서 위와 같은 방법으로 공명기의 직경과 개수를 변화시켜가며 실험을 수행하여, 그 결과를 table 1에 정리하였다. 원통의 직경과는 상관없이 공명기의 직경이 클수록 더 작은 면적비에서 최적의 흡음성능을 나타내었다. 또 원통의 크기가 클수록 한 개의 공명기로 최적의 흡음률을 나타내는 면적비가 작아지는 것을 알 수 있다.

Table 1. The numbers and the open-area ratios of half-wave resonators for optimal damping

Resonator Enclosure	∅5		∅7		∅14		∅16		∅21	
	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)
∅70 ($A_{en} = 3848 \text{ mm}^2$)	17	333.8	7	269.4	1	154.0	-	-	-	-
		8.7 %		7.0 %		4.0 %	-	-	-	-
∅100 ($A_{en} = 7854 \text{ mm}^2$)	31	608.7	14	538.8	-	-	1	201.1	-	-
		7.8 %		6.9 %	-	-		2.6 %	-	-
∅150 ($A_{en} = 17671 \text{ mm}^2$)	-	-	33	1267.0	-	-	-	-	1	346.4
	-	-		7.2 %	-	-	-	-		2.0 %

이는 공명기의 직경이 클수록 낮은 면적비에서 최적의 흡음성능을 낼 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 반파장 공명기의 설계 인자 변화에 따른 음향감쇠 성능의 변화와 감쇠 최적화에 대하여 실험적으로 연구하였다.

반파장 공명기의 개수와 직경이 증가할수록 흡음성능과 흡음영역이 증가하였고, 특정 개수 또는 직경에서 최적 감쇠를 이루었다. 연소실의 직경과 공명기의 직경에 따라 흡음 성능이 달라지므로, 면적비(연소실의 단면적에 대한 공명기의 면적비)를 이용하여 최적 감쇠조건을 나타내었다. 반파장 공명기의 직경이 작을수록 더 높은 면적비에서 최적의 성능을 나타내고, 직경이 크고 개수가 적을수록 흡음성능이 높았다. 이는 단일 공명기의 입구면적이 작을수록 더 큰 면적비를 가져야 최적감쇠성능을 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

향후에는 반파장 공명기와 Quarter-wave, Helmholtz 공명기와의 성능비교와 각 공명기의 최적 음향감쇠를 위한 설계조건에 상관관계를 도출하는 연구가 수행될 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-511-D00044).

참 고 문 헌

- Harrje, D. J. and Reardon, F. H., Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, NASA SP-194, 1972
- ISO 10534-2, Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes, Part 2: Transfer-function method, 1998
- 손채훈, 박이선, "로켓엔진 연소기내 공명기에 의한 비선형 음향감쇠에 관한 수치해석적 연구", 한국추진공학회지, 제11권, 제2호, 2007, pp. 1-8
- Sohn, C. H., Park, I.-S., Kim, S.-K., and Kim, H. J., "Acoustic Tuning of Gas-Liquid Scheme Injectors for Acoustic Damping in a Combustion Chamber of a Liquid Rocket Engine," Journal of Sound and Vibration, Vol. 304, 2007, pp. 793-810