

# 모형 연소실내 음향 감쇠를 위한 반파장 공명기의 설계에 관한 연구

박주현\* · 손채훈\*\*

## On Design of Half-Wave Resonators for Acoustic Damping in a Model Combustion Chamber

Ju Hyun Park\* · Chae Hoon Sohn\*\*

### ABSTRACT

Acoustic design parameters of a half-wave resonator are studied experimentally for acoustic stability in a model combustor. According to standard acoustic-test procedures, acoustic-pressure signals are measured. Quantitative acoustic properties of damping factor and 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, its distribution are selected as design parameters for optimal tuning of the resonator. Acoustic damping capacity increases as the resonators with diameter increases. The optimum number of resonators or the optimum open-area ratio decreases as boundary absorption decreases.

### 초 록

로켓엔진 연소기의 음향 안정성 향상을 위해 고안된 반파장 공명기의 음향학적 설계를 실험적으로 연구하였다. 표준 음향시험 절차에 따라 음향파 응답 신호가 측정되었다. 신호를 토대로, 감쇠인자와 흡음계수가 정량적으로 평가되었고, 이로부터 공명기의 음향감쇠 성능을 파악하였다. 공명기의 직경과 개수, 분포가 공명기의 설계 인자로 채택되었다. 직경이 증가함에 따라 음향감쇠 효과가 증가하였다. 경계흡수 계수가 감소함에 따라 최적 공명기 개수가 감소함을 알았다. 공명기의 open-area 비가 최적 값을 초과할 때 과감쇠가 발생하였고, 이로 인해 음향 감쇠 효과가 저하됨을 관찰하였다.

Key Words: Half-wave resonator(반파장 공명기), Optimal tuning(최적 동조), Boundary Absorption (경계흡수), Absorption Coefficient(흡음률)

### 1. 서 론

\* 세종대학교 대학원 기계공학과

\*\* 세종대학교 기계항공우주공학부

연락처 E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

액체로켓 연소기 개발과정에서 고주파 연소불 안정은 중요한 인자이다. 이는 연소실 내부유동과 음향장의 섭동에 의한 것으로, 연소과정으로부터 공급된 에너지가 내부유동장의 압력 및 속

도를 증폭시켜 발생하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 고주파 연소불안정은 엔진의 안정된 성능을 좌우하며, 연소불안정 발생시 성능 저하 및 엔진의 파괴, 발사시스템 전체의 치명적 손상을 야기하는 등 엔진 및 발사시스템에 큰 장애요인이 된다[1].

이를 억제하기 위한 일반적 방법으로 수동적 제어기구인 배플(baffle)과 음향공(acoustic resonator)이 사용된다. 실용적인 적용단계에서 배플이 보편적으로 사용되며, 상대적으로 확실한 음향 감쇠효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 음향공은 감쇠효과가 탁월하나 감쇠주파수 대역이 좁은 단점을 가지고 있으며, 최적의 감쇠효과를 얻기 위해 음향학적 동조(tuning)가 필요하다.

이러한 제어기구는 연소실에 추가적으로 장착되므로 연소성능을 감쇠시키거나 제작의 복잡성을 유발한다. 한편 액체추진 로켓엔진 연소기는 추진제를 분사하기 위해 분사기가 장착된다. 분사기는 추진제의 형태에 따라 액체-액체형과 기체-액체형 분사기로 나눌 수 있다. 향후 연소기는 고추력, 고성능을 이루기 위해 가스발생기 등을 사용하여 Fig. 1과 같은 동축형 분사기를 사용하게 될 것이다[2]. 동축형 분사기는 분사기 중심으로 기체추진제가, 분사기 출구 근처에서 액체추진제가 공급된다. 분사기의 본질적인 기능은 분사이지만 내부 체적의 대부분을 기체가 차지하므로 형태상 공명기의 역할을 할 수 있다면, 추가적인 수동제어기구의 장착 없이 분사기의 적절한 설계를 통해 음향 감쇠 효과를 볼 수 있을 것이다.

이러한 관점에서 수동 제어기구로 사용되는 여러 음향 공명기중 반파장 공명기의 설계인자 변경에 따른 음향감쇠 특성을 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 2는 본 연구에 사용된 시스템의 개략도이다. 모형 연소실의 역할을 하는 원통(enclosure)과 음향가진부(horn speaker), 음향센서, FFT 분석기 등으로 구성되어있다. 원통의 내

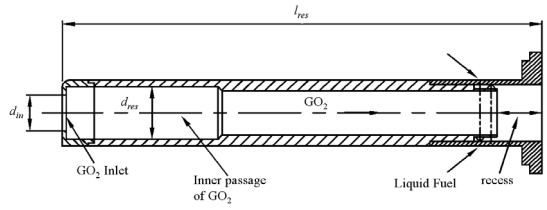


Fig. 1 Schematic diagram of the coaxial gas-liquid scheme injector

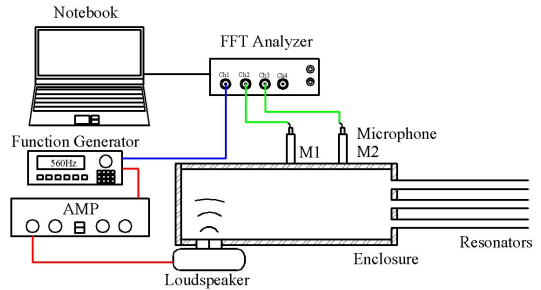


Fig. 2 Schematic diagram of acoustic-test apparatus ( $D_{en} = 100$  mm and  $L_{en} = 300$  mm)

경( $D_{en}$ )은 100 mm이고, 길이( $L_{en}$ )는 300 mm이다. 아크릴로 제작된 원통의 끝단에 한개 혹은 다수개의 반파장 공명기를 설치하여 음향 흡음률을 측정한다. 반파장 공명기는 기체-액체형 분사기를 형상화한 것으로 양단이 open 되어있다. 동조주파수( $f_0$ )는 공명기의 길이( $l_{res}$ )를 조절하여 동조시켰다. 원통과 공명기는 아크릴로 제작하였고, 실험은 상온에서 진행하였다.

원통은 ISO-10534-2의 규정을 토대로 제작되었다[3]. 함수발생기(Agilent 33220A)를 통해 랜덤 노이즈 또는 정현파(sine wave)를 발생시키고 음향앰프(InterM QD-4960)를 통해 스피커로 가진하여, 원통의 스피커 반대쪽에 장착한 공명기의 흡음률을 측정한다. 원통(enclosure) 벽면에 장착한 음향센서를 통해 내부의 신호를 수집하고 FFT분석을 수행한다. 이 연구에서 공명기의  $l_{res}$ 는 300 mm로 원통의 1L모드 공진주파수에 동조되도록 설정하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 흡음성능 정량화

연소실을 형상화 한 원통(enclosure)에 장착하는 공명기의 직경( $d_{res}$ )을 7 mm에서 20 mm까지 변화시켰다. 공명기를 장착하지 않은 원통 내부에서  $f_{1L}=572$  Hz의 공진모드가 발생하였다. 공명기를 장착했을 때 원통 내의 공진신호는 분할되었고, 공진크기는 감소되었다. 공명기의 직경을 증가시킬수록 분할이 심화되었다. 공진된 음향신호가 분할되어 감쇠인자(damping factor)로 음향감쇠 정도를 정량화하기 곤란하므로 본 연구에서는 흡음률(absorption coefficient,  $\alpha$ )로 정량화를 시도하였다. 흡음률은 ISO-10534-2에 따라 측정하였다[3].

### 3.2 공명기 설계에 따른 흡음성능

반파장 공명기의 동조주파수는 다음 식으로 구할 수 있다[4].

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

여기서  $c_{res}$ 는 공명기내의 음속이고  $\Delta l$ 은 질량 또는 길이 보정인자(correction factor)이다.

공명기의 직경과 개수, 분포 등의 조건을 바꿔가며 실험을 진행하였다. Fig. 3은  $d_{res}$ 를 7 mm에서 20 mm까지 변화시켜 얻은 흡음률 그래프이다. 공명기의 직경을 증가시킬수록  $\alpha$ 가 증가하고 흡음대역이 넓어지며 동조주파수가 낮아지는 것을 확인 할 수 있다.

직경,  $d_{res}=20$  mm일 때 흡음률은 94%로 100%에 가깝고 14 mm는 이보다 작아 직경이 20 mm인 공명기를 최적이라 할 수 있다. 20 mm보다 직경이 큰 공명기의 경우 over-damping되어 20 mm보다 작은 흡음률을 나타낸다.

Figure 4는  $d_{res} = 7$  mm 공명기 개수에 따른 흡음성능을 측정한 그래프이다. 길이가 동일한 공명기를 1개에서 21개까지 개수를 증가시켜가며 실험을 진행하였다. 원통의 직경이 100 mm일 때 공명기의 개수가 14개에서 최적의 흡음성능을 나타내었다.

Figure 5는 원통의 단면적에 대해서 공명기가

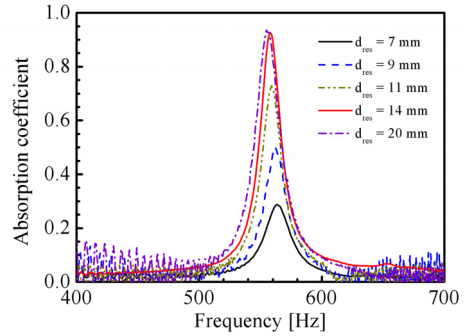


Fig. 3 Absorption coefficients of a single resonator as a function of frequency for several diameters

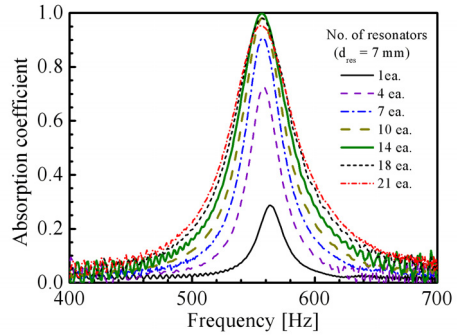


Fig. 4 Acoustic-damping capacity of the resonators with  $d_{res} = 7$  mm for the various numbers of resonators

차지하는 면적비( $\sigma_A$ )가 0.04일 때 공명기의 직경을 달리하며 실험한 그래프이다.  $d_{res}$ 가 7 mm, 14 mm, 20 mm 인 공명기는 각각 8개, 2개, 1개일 때  $\sigma_A = 0.04$ 이다. 동일한  $\sigma_A$ 를 가진 공명기의 경우 공명기 직경이 크고 개수가 적은 공명기가 흡음 성능이 우수하게 측정되었다. 이는 입구면적이 작은 공명기로 최적의 흡음 성능을 얻기 위해서는 한 개로 최적을 이룬 공명기의 면적비보다 더 큰 면적비가 필요함을 의미한다.

## 4. 결 론

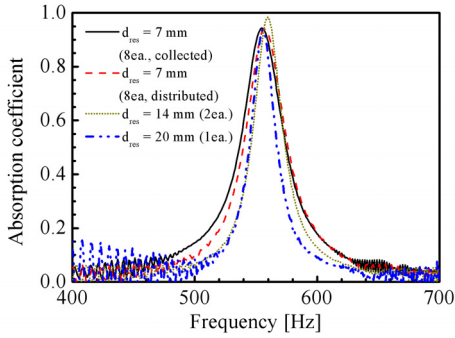


Fig. 5 Absorption coefficients of the resonators for various diameters with the identical open-area ratio.

본 연구에서는, 반파장 공명기의 설계 인자 변화에 따른 음향감쇠 성능의 변화를 실험적으로 연구하였다. 음향감쇠 성능은 흡음률로 정량화하였다.

공명기의 개수와 직경이 증가할수록 흡음 성능, 즉 흡음률이 증가하였다. 동일한 면적비를 가졌을 때 공명기의 개수가 적을수록 흡음 성능이 높았다. 또, 단일 공명기의 면적이 작을수록

더 넓은 면적비를 가져야 함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Harrje, D. J., Reardon, F. H. (eds.), "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", SP-194, NASA, 1974.
2. Huzel, D. K., Huang D. H., "Modern Engineering for design of Liquid-Propellant Rocket Engines", Progress in Astronautics and aeronautics, Vol. 147, AIAA, Washington, DC, pp.113, 1992
3. ISO 10534-2, Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes, Part2: Transfer-function method, 1998.
4. C. H. Sohn, I-S. Park, S-K. Kim, and H. J. Kim, "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, pp. 793-810, 2008.