

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.10.966

헬름홀쯔 공명기의 기하학적 형상과 가진 음압에 따른 감쇠 특성

송재강*, 김기우**, 채병찬**, 고영성***, 김선진****

Damping Characteristic of Helmholtz Resonator according to Its Geometry and Sound Pressure Level

Jae-Kang Song*, Ki-Woo Kim**, Byoung-Chan Chae**, Young-Sung Ko*** and Sun-Jin Kim****

ABSTRACT

Damping characteristics of a Helmholtz resonator to passively control the combustion instability were investigated by linear acoustic analysis and atmospheric acoustic tests. Its orifice length and diameter were selected as the design parameters and supplied SPL(sound pressure level) effect on damping characteristics were investigated. Damping capacity is improved by decreasing the orifice length as well as by increasing the orifice diameter. Also, the results showed that the damping capacity of the resonator decreased nonlinearly about above 110 dB and instabilities in the nonlinear region were more effectively suppressed by increasing the orifice diameter.

초 록

본 연구에서는 연소불안정 현상을 제어하는 수동적 기구의 하나인 음향공을 적용하여, 음향공의 설계 변수(오리피스 길이와 지름)와 가진 음압에 따른 감쇠 효과를 선형음향해석과 상온 음향시험을 통하여 연구하였다. 오리피스의 길이가 짧고, 지름이 클수록 감쇠 효과가 증가하는 것을 확인하였으며 실험과 선형 음향 해석 결과가 서로 동일한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 가진 음압의 크기가 110 dB 이상에서 감쇠 능력이 비선형적으로 감소하는 것을 확인하였으며, 음향공 오리피스의 단면적이 증가할수록 감소량이 감소하는 것으로부터 비선형 구간에서는 오리피스 단면적을 증가시키는 것이 유리함을 확인하였다.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Combustion Instability(연소 불안정), Helmholtz Resonator(음향공), Damping Ratio(감쇠비), Split Width(모드분할폭)

1. 서 론

우주기술(space technology)은 세계적으로 채 1세기도 되지 않은 신생 기술로서 큰 부가가치와

† 2010년 7월 7일 접수 ~ 2010년 9월 29일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

** 정회원, 충남대학교 대학원

*** 정회원, 충남대학교 항공우주공학과
교신저자, E-mail : ysko5@cnu.ac.kr
대전광역시 유성구 궁동 220번지

**** 정회원, 청양대학 소방안전관리학과

더불어 타 산업에의 막대한 파급 효과를 갖고 있는 주요 기술 중 하나이다. 우주기술 확보를 위한 발사체 개발을 위해서는 액체로켓엔진의 국산화가 반드시 이루어져야만 한다. 해외 선진국에서의 액체로켓엔진 개발 과정에서 연소 불안정 현상은 항상 대두되었던 문제이며, 특히 고성능의 액체로켓엔진 개발에 있어서는 무엇보다 연소 불안정 해소가 필수적이다.

연소 불안정 현상은 분사기면과 연소실 벽면으로의 과도한 열전달 및 이로 인한 열적 손상 및 극심한 구조물의 진동과 작동 조건의 예상치

못한 변화를 초래하게 된다⁽¹⁻⁶⁾. 국내 최초의 액체 로켓인 KSR-III의 개발 과정 중에도 어김없이 발생된 연소불안정 현상으로 인하여 시간적/경제적인 손실을 경험한 바 있다. 향후 개발되어야 할 한국형 발사체 엔진의 경우는 더욱 큰 추력이 요구되므로, 엔진 고성능화에 따른 연소불안정을 제어할 수 있는 기술이 반드시 확보되어야 한다. 또한 연소 불안정 현상은 새로운 로켓 엔진을 개발할 때마다 마주치는 문제이므로, 각 상황에 따라 발생하는 연소 불안정을 해결하기 위해서는 선행 연구를 통하여 이를 해결할 수 있는 방법에 관한 기술과 데이터베이스가 확보되어야 한다.

국내에서도 연소불안정 현상을 수동적으로 억제하는 대표적인 음향 기구인 음향공(resonator)에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 본 연구팀에서도 기본적인 음향공의 형상 변화에 따른 감쇠 특성에 대한 연구를 수행하여 왔다⁽⁷⁻⁹⁾. 기존의 연구에서는 음향공의 기본적인 형상 변화와 음향공 개수에 따른 감쇠 특성을 연구해 왔으며, 본 논문에서는 추가적으로 음향공의 주요 설계 변수인 오리피스 길이 변화와 가진 음압의 변화에 따른 감쇠 특성을 수치해석과 실험적으로 살펴보고자 하였다. 이를 통하여 향후 개발될 액체로켓엔진의 연소불안정 현상 제어를 위한 기본 데이터베이스를 구축하고자 한다.

II. 연구 수행 방법

2.1 이론적 접근

Figure 1은 대표적인 음향공인 헬름홀츠 음향공(Helmholtz resonator)으로서, 오리피스를 통하여 연소실 외벽에 설치되며 그에 따른 동조 주파수는 다음 식 (1)과 같다⁽³⁾.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l+\Delta l)}} \quad (1)$$

여기서 S 는 오리피스 단면적, l 은 오리피스 길이, V 는 음향공의 부피, Δl 은 오리피스에서의 유체의 진동에 의한 질량 보정인자이며 약 $0.85d$ 로 알려져 있다^(3,8).

연소불안정 제어를 위한 음향공의 작동 원리는 연소실 내부의 공진 주파수에 대한 에너지를 흡수하여 열방출로 인한 교란과의 간섭을 최소화하는 것이다. 이러한 음향공에 관한 일반적으로 알려진 고전적인 설계 방법은 Fig. 1에서 보는바와 같이, 감쇠할 대상체와 오리피스를 통하여 연

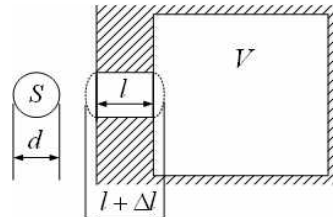


Fig. 1. Schematic of Helmholtz Resonator

결된 음향공을 mass-spring-dashpot 시스템으로 모사하여 1차원적으로 해석하는 방법이다^(3,10). 이렇게 모사된 음향공의 감쇠 메커니즘은 연소실에서의 압력 섭동에 의해 음향공과 연결된 오리피스 내부의 기체가 음향공의 체적을 가지면서 진동을 함으로서 발생하는 다음과 같은 효과에 의해서이다. 첫째는 오리피스 내부 기체의 진동에 의한 벽면 점성소산이 감쇠효과를 가져오고, 둘째는 오리피스 출구에서 주위매질로 소리가 방사할 때 음향에너지가 소모한다.

위의 가정 하에 mass-spring-dashpot 시스템을 적용하여 음향공의 감쇠효과를 식으로 나타내면 다음 식 (2)와 같으며, 속도에 관한 식으로 나타내면 다음 식 (3)과 같다. 이 때 공진점에서는 $i(\omega M + K/\omega)$ 가 사라지게 되므로, 속도는 다음 식 (4)와 같이 나타내어진다⁽¹⁰⁾. 식 (2)~(4)에서 M 은 질량, R 은 저항(resistance), K 는 강성(stiffness), ξ 는 변위(displacement), P_e 는 가진 동압, ω 은 시스템 주파수, r 은 오리피스 반경, ζ 는 감쇠비, ω_n 은 고유 주파수를 의미한다.

$$M\ddot{\xi} + R\dot{\xi} + K\xi = P_e S \quad (2)$$

$$u = \frac{P_e S}{R + i(\omega M + K/\omega)} \quad (3)$$

$$u = \frac{P_e S}{R} = \frac{P_e \pi r^2}{2M\zeta\omega_n} = \frac{P_e \pi r^2}{2\rho_0 \pi r^2 (l + \Delta l)\zeta\omega_n} \quad (4)$$

$$= \frac{P_e}{2\rho_0(l + \Delta l)\zeta\omega_n} = \frac{P_e}{2\rho_0 l_{eff}\zeta\omega_n}$$

위 식(4)에서 l_{eff} 는 오리피스 유효길이($l + \Delta l$)을 의미하며, l_{eff} 가 짧아질수록 오리피스 내부를 이동하는 유체의 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, l_{eff} 가 짧아짐으로서 생기는 이동하는 유체의 속도 증가는 음향공의 감쇠 능력을 상승시키게 된다. 이 때 l_{eff} 은 일반적으로 오리피스의 직경과 길이에 대한 식으로 표현되는데, 이는 오리피스의 길이와 직경이 음향공의 감쇠 능력에 있어서 중요한 설계 인자라는 것을 의미한다.

2.2 선형 음향 해석 방법

본 연구에서는 이미 상온에서의 음향 실험 결과와 비교하여 검증된 선형 음향해석 기법을 사용하여^(8,9,11), 선형 음향해석을 수행하여 실험에 앞서 음향공의 감쇠 특성을 살펴보고, 이를 바탕으로 음향 실험을 위하여 식 (1)을 이용하여 음향공 오리피스 단면적(S), 오리피스 길이(l)를 변수로 한 음향공 설계를 수행하였다. 수치해석을 위해서 모델연소실($L=364\text{mm}$, $c=100\text{mm}$)과 음향공의 격자는 Gambit를 이용하여 약 7만개로 형성하였으며, 경계조건은 연소실의 양쪽이 막힌 two - closed ends, 가진 압력은 10Pa , 가진 위치는 실험 시의 가진 위치와 동일하게 하여 계산을 수행하였다^(8,9).

먼저 음향공의 부피($V=49,470\text{mm}^3$)가 동일한 상태에서 오리피스 직경과 길이의 효과를 살펴보기 위하여, Table 1과 같은 조건에서 선형 음향 해석을 수행하였다. 음향공의 부피를 동일하게 할 경우, Table 1과 같이 오리피스 직경이 감소하면 오리피스의 길이 또한 감소하게 된다.

Table 1. Design parameters of Helmholtz resonators with the same volume for linear analysis

	오리피스 직경(d)	오리피스 길이(l)
Case A	12mm	15.0mm
Case B	14mm	21.5mm
Case C	18mm	37.5mm

2.3 음향공의 설계 및 실험 방법

상온 음향 실험 기법을 이용하여 사용된 모델 연소실의 약 530 Hz (항우연 30ton급 연소기의 1T mode에 해당하며, 본 모델연소실에서는 1L mode에 해당함)대역의 유해 공진주파수와 음향공의 비감쇠 공진 주파수 f_0 를 동조시키기 위하여⁽⁸⁾, 음향공의 감쇠 특성을 결정하는 음향공의 기하학적 형상의 주요 변수인 오리피스 직경과 길이(d, l)의 영향을 살펴보기 위하여 Table 2와 같은 다양한 조합의 음향공을 설계/제작하였다. 음향공 오리피스의 직경을 12, 14, 18mm로 제작하고, 각각의 직경에 대해서 두께가 2mm의 결합부와 두께 5, 10mm 등의 판을 조합하여 오리피스 길이를 조절할 수 있도록 설계/제작하였다. 음향공의 부피는 직경 40mm, 길이 160mm의 원통형 실린더에서 피스톤을 상하로 이동시켜, 음향공의 부피를 조절하여 유해 공진 주파수에 동조시킬 수 있도록 설계하였다.

Table 2. Design parameters of Helmholtz resonators for experiments

Case	오리피스 직경(d)	오리피스 길이(l)
12D2L	12mm	2mm
12D7L		7mm
12D17L		17mm
12D37L		37mm
14D2L	14mm	2mm
14D7L		7mm
14D17L		17mm
14D37L		37mm
18D2L	18mm	2mm
18D7L		7mm
18D17L		17mm
18D37L		37mm

Figure 2는 상온 음향 실험 장치 개략도를 나타낸 것으로서 크게 신호 발생(가진)/처리부, 모델연소기와 음향공으로 구성된 실험부로 구성되어 있으며, 랜덤 노이즈(random noise)의 발생과 측정된 신호의 분석에는 PULSE 3650D(B&K)가 사용되었다. 연소실의 공진 주파수 형성을 위한 연소실 가진 시에는 Pulse 3650D에서 발생한 랜덤 노이즈를 앰프(inter M model R300)를 통해 신호를 증폭하여 스피커(NSU-75B,75W)를 통해 연소실 내부를 가진한다. 연소실 내부의 음압을 측정하기 위해 마이크로폰(B&K 4192)을 연소실 축방향의 1/4지점에 위치시켰으며, 마이크로폰을 통해 측정된 음향신호와 공급된 랜덤신호는 B&K signal conditioner를 통해 FFT, FRF 등으로 분석되었다.

본 연구에서는 음향공의 형상뿐만 아니라 음압에 따른 음향공의 감쇠 특성을 살펴보고자 하였으며, 실험은 오리피스 교체시마다 음향공 부피의 정밀한 튜닝 작업이 필요하기 때문에 실험 결과 값의 신뢰도 향상과 실험의 편의를 위해 다음과 같은 순서로 진행하였다. 공진점의 음압이

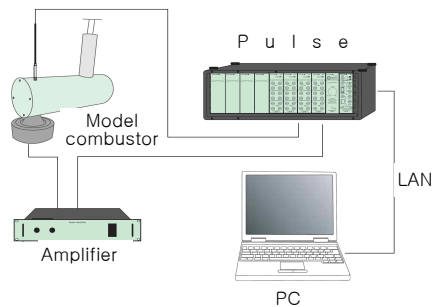


Fig. 2. Schematic of the experimental setup

80dB이 되도록 전압을 공급하고 오리피스와 음향공을 장착, 음향공의 부피 조절을 통해 유해 공진 주파수에서 감쇠 성능이 최고가 되도록 설정한 뒤 단계적으로 음압을 130dB까지 증가시켜 감쇠비(damping ratio) 및 모드 분할폭(split width)을 측정하였다.

III. 해석 및 시험 결과

3.1 선형 음향 해석 결과

상온 음향 실험에서의 기하학적 형상 변화의 한계를 고려하여, 먼저 선형 음향 해석을 통하여 기하학적 형상에 따른 효과를 예측하였다.

이전의 연구 결과에 의하면 음향공 오리피스의 길이가 일정한 상태에서 음향공 오리피스의 직경이 증가하면 감쇠 효과가 증가하며, 음향공 오리피스의 직경을 일정하게 한 상태에서 음향공의 길이가 감소하면 감쇠 효과가 다소 증가하는 것으로 나타났다⁽⁶⁾. 하지만 이 때 음향공의 오리피스 길이나 직경이 변화하면, 음향공의 동조 주파수를 일정하게 하기 위하여 음향공의 부피까지 변화할 수밖에 없다. 따라서 오리피스 형상 변화에 따른 효과와 음향공 부피 변화 효과가 동시에 나타나게 된다.

따라서 본 연구에서는 앞서 제시한 Table 1과 같이 음향공 부피의 효과를 배제하기 위하여 음향공의 부피를 일정하게 한 상태에서, 음향공 오리피스의 형상을 변경하면서 선형 음향 해석을 수행하였다. Fig. 3은 이때의 해석 결과를 나타낸 것으로서, Case C의 음향공 오리피스 단면적이 Case A의 단면적보다 2.25배임에도 불구하고 감쇠비나 모드 분할폭의 변화는 거의 없는 것을 볼

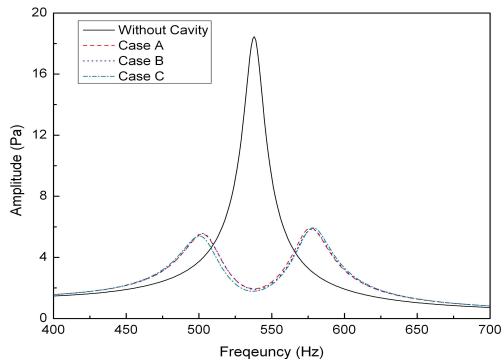


Fig. 3. Acoustic damping in model chamber with various resonators with the same volume

수 있다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 음향공 오리피스 단면적이 클 경우 감쇠효과가 크다는 것과는 달리, 이는 식 (4)와 같이 오리피스 길이가 감소하면 오리피스 내부의 유체 속도가 증가하여 감쇠 성능이 향상되면서 단면적 감소에 따른 감쇠 성능 저하와 상쇄되어 나타난 현상으로 판단된다. 즉, 오리피스 길이가 어느 이상 감소할 경우 오리피스의 단면적과 마찬가지로 감쇠 성능에 매우 큰 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다. 따라서 본 음향 실험에서는 주로 오리피스 길이 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 비교적 짧은 오리피스 길이를 포함하여 Table 2와 같이 음향공을 설계하였다.

3.2 음향공 형상 변화에 따른 감쇠 효과

앞서 음향해석 결과에서 살펴본 바와 같이 음향공 오리피스의 길이 변화에 따른 감쇠 특성의 변화가 큰 점을 감안하여, Table 2에 제시한 바와 같이 음향공 오리피스 길이 변화의 폭을 넓게 하여 음향학적 감쇠 효과를 살펴보기 위한 상온 음향 실험을 수행하였다.

Figure 4는 모사 연소실의 가진 음압을 100dB로 일정하게 유지한 상태에서 Table 2의 모든 조건에서 공진 주파수 부근의 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로서, 음향공의 형상에 따라 감쇠비와 모드 분할폭의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 음향공의 오리피스 길이에 따른 감쇠비를 나타낸 것으로서, 모든 오리피스 직경에서 음향공 오리피스 길이가 감소할수록 감쇠비가 증가하는 경향을 보이고 있다. 오리피스의 직경이 큰 18mm인 경우에는 단면적이 크기 때문에 오리피스 길이가 상대적으로 길어져도 감쇠비의 감소량은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 오리피스 직경이 작은 경우에는 오리피스 길

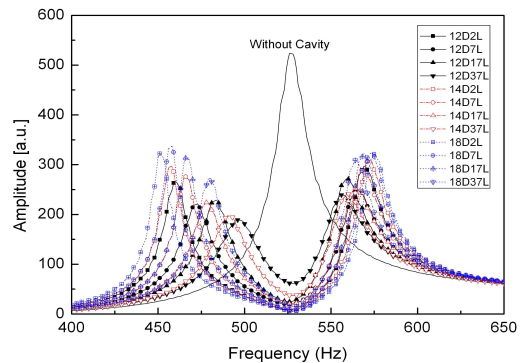


Fig. 4. Feature of acoustic damping in model chamber at 100 dB

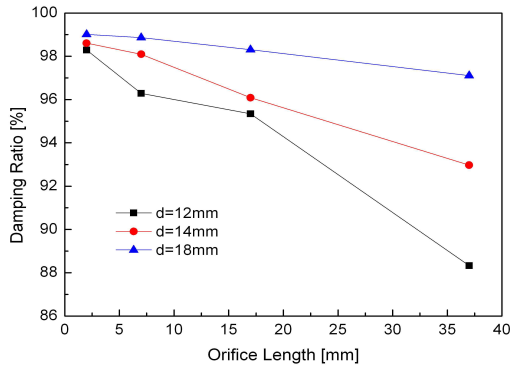


Fig. 5. Damping ratio according to orifice length

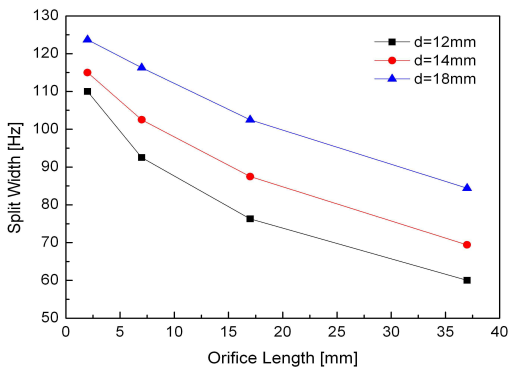


Fig. 6. Split width according to orifice length

이가 감소할수록 감쇠비는 상당히 개선되는 것을 볼 수 있다. 즉 오리피스 단면적뿐만 아니라 길이 또한 매우 중요한 설계 변수임을 확인할 수 있다. Fig. 6은 음향공 오리피스 길이에 따른 모드 분할폭을 나타낸 것으로 음향공 오리피스 단면적이 클수록 모드 분할폭이 크며, 오리피스 길이가 작아질수록 모드 분할폭이 커지는 것을 볼 수 있다. 즉, 전반적으로 점성 소산과 관련된 오리피스 단면적과 길이의 경향성을 볼 때, 오리피스 단면적이 크고 길이는 짧은 것이 유리한 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 경우는 음향공의 부피도 같이 증가하기 때문에 적절한 선택이 필요하다 하다고 할 수 있다.

3.3 가진 음압에 따른 감쇠 효과

일반적으로는 음압이 어느 이상(약 100dB)일 경우에는 비선형적인 특성이 나타나는 것으로 알려져 있으나, 국내에서 현재까지 수행된 대부분의 음향공 감쇠 특성에 대한 연구는 선형해석이 나 선형적인 특성이 나타나는 구간에서의 음향공 감쇠 특성에 대한 연구가 거의 대부분이었으며,

비선형 영역에서의 연구는 수치해석적 연구에 한정되었다(7-9,11-13). 따라서 본 연구에서는 모델 연소실에 가진되는 음압에 따른 감쇠 효과를 살펴보기 위하여, 80~130dB까지 가진 음압을 변경하면서 감쇠 특성을 살펴보았다. Fig. 7은 음압의 변화에 따른 감쇠비를 나타낸 것으로서, 약 100dB까지는 감쇠비의 변화가 없으나 약 110dB부터는 감쇠비가 비선형적으로 감소하는 특성을 나타내고 있다. 이는 음압이 증가함에 따라 오리피스 내부에서의 유속이 증가하면서 난류 유동이 발생하여 나타나는 현상으로 예측된다(13). 여기서 특이한 점은 동일한 오리피스 단면적의 경우, 비선형 구간에서의 음향공 오리피스의 길이 변화에 따른 감쇠비의 차이가 상당히 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한 선형 구간에서는 음향공의 부피가 큰 경우(오리피스 길이가 작고 오리피스 직경이 큰 경우) 거의 예외 없이 감쇠비가 컸으나, 비선형 구간에서는 음향공의 부피가 작더라도 오리피스 단면적이 큰 경우가 오히려 감쇠비가 크게 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 8은 음압의 변화에 따른 모드 분할폭을 나타낸 것으로서, 감쇠비보

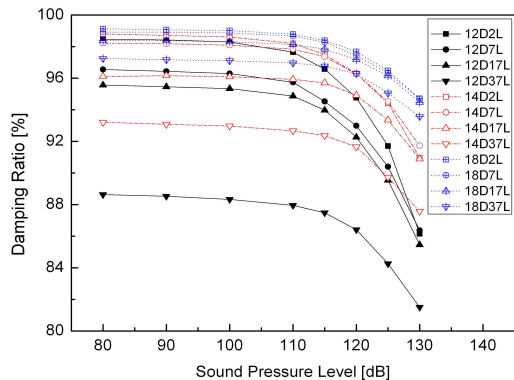


Fig. 7. Damping ratio according to SPL

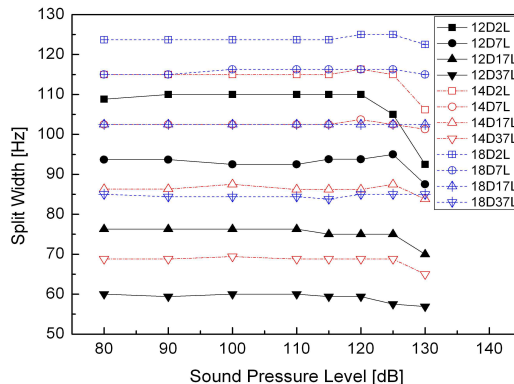


Fig. 8. Split width according to SPL

다는 좀 더 큰 음압에서 비선형적인 특성이 나타나고 있으며 음향공의 단면적이 비교적 큰 경우에는 비선형적인 특성이 거의 나타나지 않고 있다. 음향공 오리피스 직경이 작은 경우는 오리피스 길이가 작을 때 비선형적인 특성이 다소 크게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 오리피스 길이가 감소함에 따라 나타나는 오리피스 내부의 유동 속도의 증가에 따른 벽면에서의 난류 현상이 비선형적인 특성을 증가시키는 것으로 예상된다. 하지만 음향공 오리피스의 단면적이 큰 경우에는 마찰 면적이 증가하여 이러한 현상을 다소 억제함으로써 비선형적인 특성이 거의 나타나지 않는 것으로 예상된다.

실제 액체로켓 연소실에서 발생할 수 있는 연소불안정의 동압 크기는 매우 클 것이므로 동압의 변화에 따라 음향공의 감쇠 특성이 크게 바뀌지 않는 것이 음향공 설계에 매우 유리하다. 따라서 비선형적인 특성이 상대적으로 적은 경우가 유리하게 되는데, 음압의 변화에 따라 비선형성이 비교적 적은 경우는 오리피스 길이의 변화보다는 오리피스 단면적이 큰 경우에 해당한다. 따라서 실제 연소실에 장착될 음향공의 경우는 동일한 부피일지라도 오리피스 길이를 줄이는 것보다는 가급적이면 음향공 오리피스 단면적이 큰 것이 유리하다는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 액체 로켓의 연소실에서의 고주파 연소불안정 제어를 위한 수동 안정화 제어 기구인 음향공의 감쇠 특성을 살펴보았다. 음향공의 주요 설계 변수를 변화시켜 선형 음향 해석 및 상온 음향시험을 통하여 그에 따른 감쇠 효과를 분석하였으며, 상온 음향 실험을 통해 가진 음압에 따른 감쇠 효과의 비선형성을 파악하였다.

먼저 음향공 오리피스의 길이가 감소할수록 감쇠 능력이 향상되는 것을 확인하였으며, 단면적이 작은 경우 오리피스 길이가 증가하면 감쇠 성능이 많이 저하되는 것을 확인하였다. 반면 오리피스 면적이 큰 경우는 오리피스 길이 변화에 따른 감쇠 성능의 변화가 작음을 확인하였다. 또한 가진 음압이 약 110 dB 이상에서는 비선형적인 특성이 나타나며, 모든 음향공 형상에서 감쇠 성능이 감소되는 것을 확인하였다. 그러나 음향공 오리피스의 직경이 클수록 감소량이 줄어들음을 확인하였으며, 비선형 구간에서는 오리피스 길이

의 효과는 거의 없는 것을 확인하였다. 따라서 연소불안정 동압이 매우 큰 실제 로켓엔진에서의 음향공 설계에 있어서는 음향공 오리피스 길이를 줄이는 것보다는 오리피스 단면적을 키우는 게 유리함을 확인하였다. 이상의 결과와 같이 음압 가진의 한계가 있는 상온 음향 시험만으로는 음향공의 감쇠효과를 살펴보는 데는 한계가 있으며, 향후 보다 실제 연소실 환경과 유사한 상황에서의 음향공 감쇠 특성을 검증해야 함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)의 지원을 받았으며, 지원에 감사드립니다(2008-03216).

참고 문헌

- 1) Harrje, D. J. and Reardon, F. H., *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, SP-194, NASA, 1972.
- 2) Natanzon, M. S. and Culick, F. E. C., *Combustion Instability*, 1996.
- 3) Laudien, E., Pongratz, R., and Preclik, D., "Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities," Vol. 169, AIAA, 1995.
- 4) Howard, W. D., *Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices*, NASA SP-8113, 1974.
- 5) Oberg, C. L., "Combustion Stabilization with Acoustic Cavities," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 8, No. 12, 1971, pp. 1220~1225.
- 6) 길태욱, 임지혁, 윤영빈, "액체로켓엔진의 연소불안정 현상," 한국추진공학회지, 제11권, 제1호, 2007, pp. 71~84.
- 7) 손채훈, 박주현, "반파장 공명기를 장착한 모형연소실의 흡음특성에 대한 실험적 연구," 한국추진공학회지, 제12권, 제3호, 2008, pp. 34~40.
- 8) 차정필, 고영성, "연소불안정 제어를 위한 음향공의 감쇠에 대한 형상 효과," 한국항공우주학회지, 제34권, 제6호, 2006, pp. 59~66.
- 9) 차정필, 송재강, 고영성, 김홍집, "흡음계수를 이용한 연소불안정 제어용 음향공의 감쇠 정량화," 한국항공우주학회지, 제35권, 제5호, 2007, pp. 438~445.

10) Laweren E. K., Austin R. F., Alan B. C. and James V. S., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons Inc., 2000.

11) 김성구, 김홍집, 손채훈, "로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발," 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp. 110~116.

12) 손채훈, 박이선, "로켓엔진 연소기내 공명

기에 의한 비선형 음향감쇠에 관한 수치해석적 연구," 한국추진공학회지, 제11권 제2호, 2007, pp. 1~8.

13) Park, I. S. and Sohn, C. H., "Nonlinear acoustic damping induced by a half-wave resonator in an acoustic chamber," *Aerospace science and technology*, Vol. 14, No. 6, 2010, pp. 442~450.