

음향공 오리피스 길이 변화에 따른 감쇠 효과

송재강* · 고영성**

Effects of Orifice Length on Helmholtz Resonator

Jae-Gang Song* · Young-Sung Ko**

ABSTRACT

Combustion instability is one of the most difficult problems in the development of liquid rocket engines. One of the damping devices for combustion instability is helmholtz resonator. Orifice length is one of factors for designing it. In this study, effects of orifice length are investigated by an experimental tests and a linear acoustic analysis. Damping capacity was improved by the increase of the length of resonator. And the results of an experimental tests and a linear acoustic analysis are showed similar tendency. Also, effects of supplied SPL(sound pressure level) are investigated and the results show that nonlinear effects are increase by the increase of supplied SPL.

초 록

연소 불안정 현상은 액체로켓엔진 개발과정에 있어서 반드시 해결해야 하는 문제이다. 이것을 억제하기 위한 도구 중의 하나인 음향공의 오리피스 길이 변화에 의한 감쇠 효과를 선형 음향 해석과 실험을 통하여 연구하였다. 오리피스의 길이가 짧아질수록 감쇠효과가 증가하는 것을 확인하였으며 실험과 선형 음향 해석 결과가 서로 동일한 경향을 보이는 것을 확인 하였다. 또한, 가진 음원의 크기에 따른 실험을 수행하였는데 그 결과 오리피스 길이와 단면적이 작아질수록 가진 음원의 크기 증가의 따른 비선형성이 증가하는 것을 확인하였다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Helmholtz Resonator(음향공), Orifice Length(오리피스 길이), 감쇠비(damping ratio)

1. 서 론

연소 불안정이란 연소실 내부에 형성되는 음

향파와 연소에 의한 압력 섭동의 상이 일치함으로써 공진을 일으키게 되어 발생한다. 이것은 인젝트 헤드면의 급격한 열손상 및 엔진의 진동, 더 나아가서는 엔진의 파괴를 유발한다.[1] 이러한 연소 불안정 현상은 오래전부터 액체로켓엔진 개발에 있어서 가장 해결하기 어려운 문제점 중의 하나로 대두되어 왔으며 엔진 개발을 위해

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

서는 반드시 해결해야 할 사항이다.

액체로켓엔진에서의 연소 불안정은 대부분 고주파 진동에 의한 것으로서 대부분의 로켓엔진 개발에 있어서 고주파 연소 불안정 현상에 관한 실험을 수행해왔다.

본 연구팀에서는 연소불안정을 제어하기 위한 수동적인 장치 중 하나인 음향공을 이용한 관련 기술의 필요성을 인식하여 상온 음향실험을 통한 음향공의 오리피스 단면적의 변화 및 개수의 증가에 따른 연소실의 응답특성을 파악하였다. 또한 임피던스 튜브를 이용한 흡음계수를 측정하여 음향공의 감쇠 효율을 정량화하였다.[2,3]

본 연구에서는 음향공의 오리피스 길이를 변화시켜 그에 따른 감쇠 효과를 파악하고 가진 음원의 크기를 변화시키면서 음압의 크기에 따른 음향공의 비선형을 정량화하였다.

2. 연구 방법 및 실험 절차

2.1 이론적 접근

Figure 1과 같이 생긴 Helmholtz Resonator의 음향 감쇠 메카니즘은 다음과 같다. 오리피스 내부의 기체(M)가 강성을 가지는 음향공의 체적(K)을 가지면서 진동(mass-spring-dashpot system)을 함으로서 오리피스 내부 기체의 진동에 의한 벽면 점성소산이 감쇠효과를 가져오고, 또한 오리피스 출구에서 주위매질로 소리가 방사할 때 음향에너지를 소모함으로서 음향 감쇠를 발생시킨다. 즉 오리피스 벽면에서의 점성소산과 외부로의 음향 방출에 의한 효과에 의한다고 할 수 있다.

위의 가정 하에 Mass-Spring-Dashpot 시스템을 적용하여 음향공의 감쇠효과를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M\ddot{\xi} + R\dot{\xi} + K\xi = P_e S \quad (\text{Eq. 1})$$

Equation 1을 속도에 관한 식으로 나타내면

$$u = \frac{P_e S}{R + i(\omega M + K/\omega)} \quad (\text{Eq. 2})$$

이 때 공진점에서는 $i(\omega M + K/\omega)$ 가 무시[4]

되므로 다음과 같이 나타내어진다.

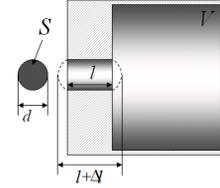


Fig. 1. Schematic of Helmholtz Resonator

$$u = \frac{P_e S}{R} = \frac{P_e \pi r^2}{2M\zeta\omega_n} = \frac{P_e \pi r^2}{2\rho_0 \pi r^2 L_{eq} \zeta\omega_n} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$= \frac{P_e}{2\rho_0(L + 1.7r)\zeta\omega_n}$$

Equation 3에서 보듯이 오리피스의 길이가 짧아질수록 오리피스 내부를 이동하는 유체의 속도가 증가하는 것을 알 수 있다.

2.2 음향공의 기하학적 형상

연소실 설계는 가장 기본적인 음향모드 중 하나인 1L 모드를 530Hz대역에 존재하도록 제작하였다. 본 연구에서는 오리피스 길이변화에 따른 효과뿐만이 아니라 길이가 변화할 때 단면적이 미치는 효과도 알아보았다. 따라서 오리피스 단면적이 다른 몇 가지의 경우에 대하여 각각 오리피스 길이를 변화시켜 수행하였다. 음향공의 설계는 오리피스의 지름(d)이 12, 14, 18mm로 하여 길이(l)가 2, 7, 17mm로 변화시킬 수 있도록 하였다. 또한 긴밀한 동조를 위해서 부피조절은 피스톤 형식을 채택하였다.

Table 1. Orifice Size

Case	l [mm]	d [mm]
D12L2	2	12
D12L7	7	
D12L17	17	
D14L2	2	14
D14L7	7	
D14L17	17	
D18L2	2	18
D18L7	7	
D12L17	17	

2.3 선형 음향 해석을 통한 감쇠 효과 분석

로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위해서 개발된 선형음향해석 기법[5,6]을 이용하여 본 연구에 시험부와 일치하는 연소실과 음향공을 설계하고 데이터를 얻어서 비교 검증하는 방법을 사용하였다. 선형음향해석을 수행함으로써 실험에 이용한 음향공 형상들의 다양한 제작의 제약을 보완하고 실험과의 비교를 통해 감쇠 효과를 검증할 수 있다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 오리피스 길이에 따른 감쇠 효과

본 연구에서는 음향공의 오리피스 길이 변화에 따른 모사 연소실의 주파수 응답 특성을 파악하고자 하였다. Figure 2와 Fig. 3은 각각의 오리피스 단면적에서 음향공의 오리피스 변화에 따른 모사 연소실내 주파수 응답 특성 경향을 실험과 수치해석을 통해 나타낸 것이다. 세 가지 오리피스 단면적에서 모두 오리피스 길이가 짧아질수록 유해주파수에 해당하는 주파수의 감쇠 특성이 우수해짐과 동시에 분할된 양쪽 모드들의 벌어지는 정도도 커짐을 알 수 있으며, 선형 음향 해석과 실험 결과도 경향성은 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 세 가지의 오리피스 단면적에 따른 유해주파수에서의 감쇠비(damping ratio)를 자세히 살펴보면, 오리피스 지름이 18mm 인 경우는 오리피스 길이가 피스 단면적에 따른 유해주파수에서의 감쇠비가 36.8 mm 일 때 이미 96.2%로 우수 했으므로 오리피스 길이가 짧아질수록 크게 증가하진 않으나, 오리피스 지름이 12mm 경우는 오리피스 길이가 짧아질수록 유해주파수에서의 감쇠비가 상당히 증가함을 볼 수 있다. 즉 오리피스 면적이 작을수록 오리피스 길이 변화에 따른 음향감쇠 효과의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 또한 오리피스의 길이가 짧을수록 오리피스 면적에 따른 감쇠 효율의 차이가 작아지는 것을 알 수 있다.

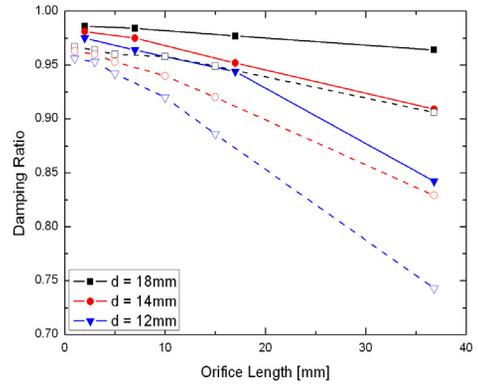


Fig. 2. Damping Ratio by changing Orifice length (Straight line : Experiment, Dash line : Linear acoustic analysis)

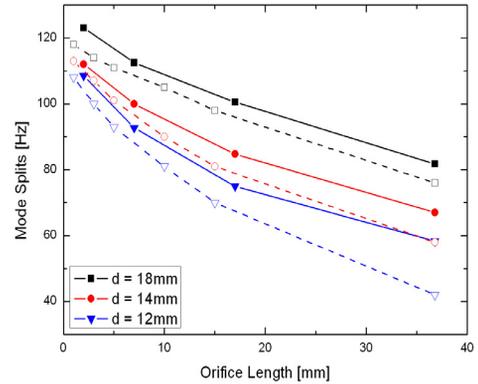


Fig. 3. Split Width by changing Orifice length (Straight line : Experiment, Dash line : Linear acoustic analysis)

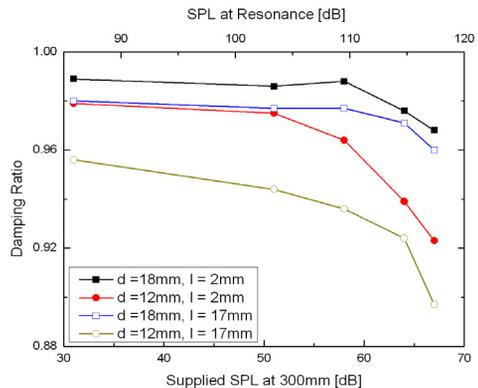


Fig. 4. Damping Ratio by changing sound pressure level(SPL)

3.2 가진 음압에 따른 감쇠 효과

음향공 오리피스스의 지름이 12, 18mm일 때 길이를 각각 2, 7mm로 하여 가진 음압(Supplied Sound Pressure Level)을 31dB에서 64dB까지(공진음압 87~118dB) 변화시켜가면서 모사 연소실에서의 주파수 응답특성을 파악하였다. Figure 4는 가진 음압에 따른 유해주파수에서의 감쇠비를 나타낸 것이다. 두 가지의 오리피스스의 단면적에서 모두 오리피스 길이가 17mm일 때보다 2mm일 때, 오리피스 지름이 18mm일 때 보다 12mm일 때 가진 음압의 증가에 따른 감쇠비가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉 오리피스스의 단면적과 길이가 작아질수록 가진 음압의 증가에 따른 비선형성이 증가하는 것을 알 수 있다. 오리피스 단면적과 길이의 감소시 오리피스 내부에서의 유동 속도의 증가한다. 따라서 오리피스 내부 유동 속도가 증가할수록 벽면에서의 난류현상에 의한 비선형성이 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 로켓의 연소실이나 항공 추진용 엔진에서의 고주파 연소불안정 제어를 위한 수동 안정화 제어 기구인 음향공의 감쇠 특성을 살펴보았다. 음향공의 특성을 결정하는 요인 중의 하나인 오리피스 길이를 변화시켜 선형 음향 해석 및 상온 음향 실험을 통해 그에 따른 감쇠 효과를 분석하였다. 또한, 가진 음압에 따른 감쇠 효과의 비선형성을 파악하였다.

오리피스스의 길이가 짧아질수록 유해주파수에 해당하는 주파수의 감쇠 능력이 증가하는 것을 알 수 있고, 오리피스 단면적이 작을수록 오리피스 길이의 감소에 의한 유해주파수에서의 감쇠비가 더 많이 증가함을 알 수 있었다. 즉 오리피스 면적이 작을수록 오리피스 길이 변화에 따른 음향감쇠 효과의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 그리고 오리피스스의 길이가 짧을수록 오리피스 면적에 따른 감쇠 효율의 차이가 작아지는 것을

알 수 있다. 또한, 가진 음압의 변화에 의한 실험을 통해 오리피스스의 단면적과 길이가 작아질수록 가진 음압의 증가에 따른 비선형성이 증가하는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E. Laudien, R. Pongratz, R. Pierro, and D. Preclik, "Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities," Liquid Rocket Engine Combustion Instability., AIAA., 1995
2. J. P. Cha and Y. S. Ko, 2006, "Geometric Effects on Damping Characteristics of Acoustic Cavity for the Control of Combustion Instabilities," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 34, No. 9
3. J. P. Cha, J. G. Song, Y. S. Ko and H. J. Kim., 2007, "A Study on Quantification of Damping Efficiency of Acoustic Cavities by Absorption Coefficient," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 35, No. 5
4. Laweren E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, and James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics," 4th ed., John Wiley & Sons Inc., 2000
5. Kim, S. K., Kim, H. J. and Sohn, C. H., 2004, "Development of Analysis Code for Evaluation of Acoustic Stability of Rocket Engine Combustor with Various Designs," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 32, No. 6
6. Kim, H. J., Kim, S. K. and Seol, W. S., 2004, "Acoustic Analysis for Design Optimization of Hub-Blade Baffle in Liquid Rocket Engine," Transactions of the KSME(B), Vol. 28, No. 8