음향공 형상 변화에 따른 감쇠 특성 변화

김재호* · 박진호* · 유이상* · 장지훈* · 고영성*†

Damping Characteristic of Resonator according to Geometry Variation

Jaiho Kim* · Jinho Park* · Isang Yu* · Jihun Jang* · Youngsung Ko*†

ABSTRACT

Damping characteristic according to acoustic cavity's geometries was investigated to control the high frequency combustion instability occurring in the Liquid Rocket Combustion Chamber by experimental test and linear analysis. Its diameter was determined as a design parameter and its orifice length and diameter were appointed as fixed parameter in this study. Result shows that the damping capacity has been almost constant through all the experiments despite using the same orifice and helmholtz resonators which have different volume.

초 록

본 연구에서는 액체로켓엔진에서 발생되는 고주파 연소불안정 문제를 제어하기 위한 수동제어 장치인 헬름홀쯔 음향공의 형상변화에 따른 음향공의 감쇠 특성에 대하여 연구하였다. 오리피스의 지름과 길이가 일정한 헬름홀쯔 형상 음향공의 지름을 점차 줄여 음향공의 형상이 헬름홀쯔 음향공의 오리피스 지름과 같은 지름을 가진 쿼터웨이브 형상으로 변화 할 때 각 단계별 튜닝되는 음향공의 부피는 작아지지만 그에 따른 음향공의 음향 감쇠 효과는 거의 일정하다는 것을 상온 음향실험과 수치해석을 비교 하면서 그 특성을 확인 하였다.

Key Words: Helmholtz Resonator(헬름홀쯔 음향공), Quarter-wave Resonator(1/4파장 음향공), Damping Ratio(감쇠비)

1. 서 론

역사적으로 거의 모든 액체로켓엔진을 개발하는 과정에 있어 연소불안정현상은 꼭 해결되어져야하는 과제였다[1-5]. 고주파 연소불안정은 연소기의 분사기면과 연소실 벽면으로의 과도한 열전달과 이로 인한 연소실의 구조적 손상으로 인하여 심하게는 연소기의 파괴를 초래한다. 우리나라 KSR-Ⅲ의 개발 과정에서도 연소불안정 현상이 관측되어 이를 해소하기 위한 연구가 진행된 바 있지만, 현상 자체의 복잡성에 의해 연

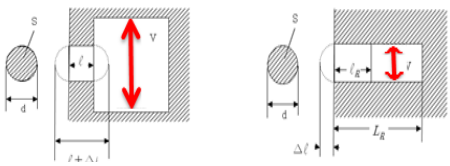
* 충남대학교 항공우주공학과
† 교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

소불안정 현상에 대한 정확한 제어방법은 현재까지 존재하고 있지 않은 실정이다. 액체로켓 엔진의 연소불안정을 제어하는 대표적인 수동 제어장치로는 배플(baffle)과 음향공(resonator)이 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 헬름홀쯔 음향공(Helmholtz resonator)의 지름 변화에 따른 연소실의 음향 감쇠 특성을 파악하였으며, 최종적으로 음향공의 지름과 오리피스의 길이가 같은 1/4파장 음향공(quarter-wave resonator)의 감쇠 특성을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연구방법

헬름홀쯔 음향공과 1/4파장 음향공은 액체로켓 고주파 연소불안정 현상을 제어하데 가장 널리 사용되는 음향공의 형상이다. Fig. 1의 (a)와 (b)는 헬름홀쯔 음향공과 1/4 파장 음향공을 각각 나타내고, 음향공 오리피스의 지름과 음향공의 지름에 따라 각각을 분류한다. Fig. 1에서와 같이 헬름홀쯔 음향공의 오리피스를 고정한 후 원기둥모양의 음향공 지름을 점차 감소시켜 음향공의 지름이 최종적으로 오리피스지름과 같아지는 1/4파장 음향공으로 변화시켰으며, 이 때 음향공 감쇠 특성을 비교하였다.



(a) Helmholtz b) Quater-wave

Fig. 1 Two types of resonator

2.2 선형 음향 해석

이전 연구를 통하여 검증된 선형음향해석기법을 사용하여 실험에 앞서 음향공의 감쇠 특성을 알아보고, 이를 통해 상온음향 실험을 위한 음향공을 설계를 수행하였다[1,2]. 선형음향 해석은 상온에서 530 Hz에서 공진을 일으키는 모델연소실(L=340 mm, D=100 mm)에 맞춰 동일 조건에서 식(1)과 식(2)을 이용하여 선형음향해석을 위한 음향공의 이론적 음향공의 형상의 파라미터를 계산하였다. 계산된 파라미터를 상용 프로그램인 Gambit을 이용하여 약 5만개의 격자를 생성하고, KAA-3D 프로그램을 이용하여 선형음향해석을 수행하였다[2,5].

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

$$f_0 = \frac{c}{4(L_R+\Delta l)} \qquad \text{식 (2)}$$

Table 1 Conditions for the linear analysis

온도	288 K
음속	340.17 m/s
오리피스 길이	17 mm
오리피스 지름	18 mm

Table 2 Diameter of resonators

분류	음향공 지름
Case A	40 mm
Case B	36 mm
Case C	33 mm
Case D	30 mm
Case E	26 mm
Case F	22 mm
Case G	18 mm

2.3 상온 음향 실험

모델 연소실의 유해 공진주파수인 약 530Hz 대역의 주파수와 음향공의 비감쇠 공진 주파수(f_0)를 동조시킬 수 있는 음향공의 형상을 수치해석 결과를 바탕으로 설계 및 제작하였다. 음향공의 지름을 40 mm로 제작하고, 음향공의 직경 조절을 위해 두께 7, 14, 22 mm의 원기둥을 내부에 삽입하여 음향공 내부 직경을 변화할 수 있도록 설계/제작하였다. Fig. 2는 상온 음향실험장치의 개략도를 나타낸 것으로서 크게 모델 연소실에 공진 형성을 위한 신호 발생(가진)부, 공진을 동조시키는 음향공, 모델 연소실의 음향 신호를 수집하고 처리하는 처리부로 나눌 수 있다. 가진 및 음향 신호의 처리는 상용 프로그램인 NI사의 labview와 각종 보드(NI-6014, 4472)를 사용하여 수행하였으며, 가진된 신호는 앰프

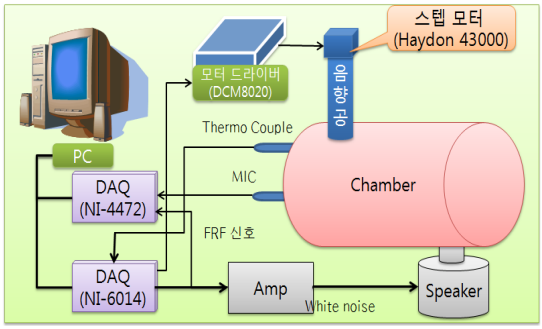


Fig. 3 Schematic of the experimental setup

(inter R300)을 통해 연소실 내부를 가진하게 된다. 연소실 내부 음압은 마이크로폰(B&K 4192)를 통하여 측정하였으며, 마이크로폰을 통해 측정되 음향신호는 FFT, FRF 등으로 분석하였다.

3. 해석 및 실험결과

3.1 선형 음향 해석 결과

상온 음향 실험에 앞서 선형 음향 해석을 통하여 음향공의 감쇠 특성을 예측하였다. 이전의 연구 결과에 의하면 음향공 오리피스의 길이가 일정한 상태에서 음향공 오리피스의 직경이 증가하면 감쇠 효과가 증가하고, 음향공 오리피스의 직경이 일정한 상태에서 오리피스의 길이가 감소하면 감쇠 효과가 증가하는 것으로 나타났다[2,5,6]. 본 연구에서는 오리피스의 형상은 일정하게 유지한 상태에서, 음향공의 직경을 변화시켜가면서 선형 음향해석을 수행하였다.

Figure 4는 기존의 음향공 식(1)과 질량보정인자(0.85d)를 사용한 음향공의 길이와 선형음향해석을 수행하여 구한 음향공의 길이를 나타낸 그래프이다. 음향공의 지름이 40 ~ 33 mm인 부분은 질량보정계수를 기존에 0.85d로 사용해 음향공의 길이를 예측하여도 길이 변화가 크진 않지만, 음향공 지름이 33 mm보다 작아지면 기존의 질량보정인자 값을 사용한 음향공의 길이는 튜닝이 되지 않았다. 즉 Helmholtz 음향공의 형상에서 1/4 파장 음향공의 형상에 가까워질수록, 질량보정계수가 0.85d 와는 차이가 많이 발생한다는 것을 확인하였다.

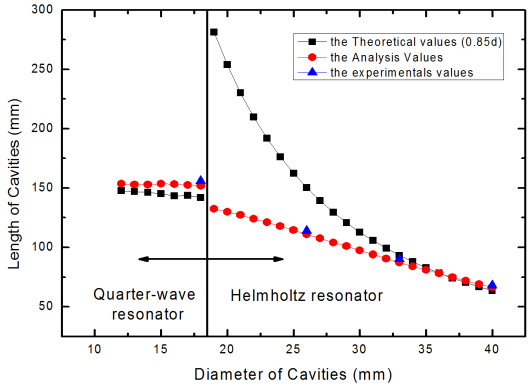


Fig. 4 Comparison of theoretical and optimum length of cavities

Table 3 Designed and Iterated parameters

지름 [mm]	음향공 길이[mm]		$\Delta\ell$
	설계(0.85d)	선형음향해석	
40	63.49	66.50	0.77·d
36	78.38	78.00	0.86·d
33	93.28	87.30	0.97·d
30	112.87	97.50	1.13·d
26	150.27	111.00	1.48·d
22	209.88	124.10	2.09·d
18	142.78	152.00	0.30·d

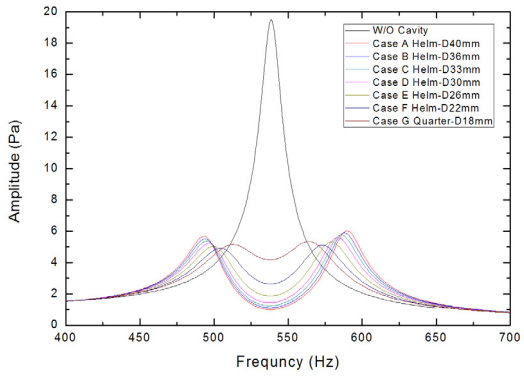


Fig. 5 Acoustic damping in model chamber by linear analysis

또한 식(2)를 사용하는 1/4파장 음향공의 질량보정계수는 헬름홀쯔 음향공과는 다른 값을 보였다. Fig. 5는 선형음향해석 결과를 나타내는 것으로, 음향공은 부피가 작아질수록 음향공의 감쇠효과가 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 상온 음향실험 결과

선형 음향해석을 통해 설계/제작된 실제 음향공(Case A, C, E, G)을 모델 연소실에 장착하여 상온 음향 실험을 수행하였다. Fig. 6은 음향공 내부 직경의 감소에 따른 감쇠 특성을 나타낸 실험 결과로서, 선형해석 결과와 같이 음향공의 직경이 작아질수록 감쇠 성능이 감소하지만 감쇠 효과는 그다지 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있다. Table 4은 음향공 직경 변화에 따른 음향공 부피 변화와 감쇠률을 나타낸 것으로서, 음향공의 직경이 작아질수록 튜닝되는 음향공의 길이가 커지지만 음향공의 부피는 상대적으로 작아지는 것을 볼 수 있다. 튜닝되는 음향공의 부피가 작아짐에도 상온 모델 연소실의 음향 감쇠 효과는 전체적으로 95% 이상의 흡음률을 보여 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 Helmholtz 음향공의 감쇠률이 1/4 파장 음향공보다는 다소 크며, 모드 분할폭도 다소 큼을 확인하였다.

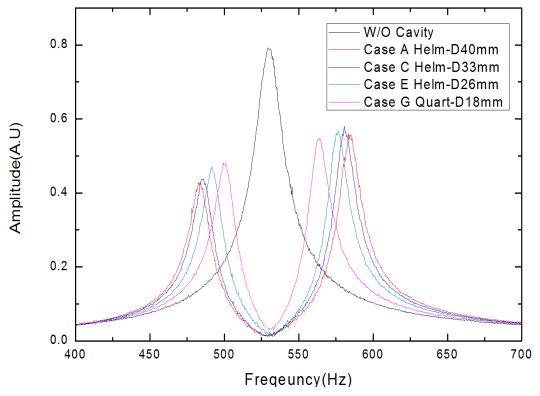


Fig. 6 Acoustic damping in model chamber by experiment

Table 4 Result of the experiments

지름	음향공 길이(mm)	음향공 부피(mm^3)	흡음률
40 mm	68 mm	85451.32	98.4%
33 mm	90 mm	76976.87	98.4%
26 mm	114 mm	60525.92	98.2%
18 mm	156 mm	39697.16	95.7%

4. 결 론

본 연구는 액체로켓에서의 고주파 연소불안정 제어를 위한 수동제어기구인 음향공의 형상변화에 따른 음향공의 감쇠 특성을 연구하였다. 이전 연구에서 수행하지 않은 음향공의 직경을 설계변수로 하여 직경이 점차 줄어들 때 튜닝되는 음향공의 부피가 작아지는 것을 알 수 있었다. 음향공의 부피가 작아짐에도 음향공에 따른 감쇠효과가 거의 일정한 것을 확인할 수 있었으며, Helmholtz 음향공의 감쇠률이 1/4 파장 음향공보다는 다소 크며, 모드 분할폭도 다소 큼을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김성구, 김홍집, 손채훈, “로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발,” 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp.110~116
2. 차정필, 고영성,"연소불안정 제어를 위한 음향공의 감쇠에 대한 형상 효과,“ 한국항공우주학회지, 제 34권, 제 6호, 2006년, pp.59~66
3. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
4. laudien, E., Pongratz, R.,. and Preclink, D., "Experimental Procedures Aiding the Desing of Acoustic Cavities," Vol. 169, AIAA, 1995
5. 송재강, 김기우, 채병찬, 고영성, 김선진 “음향공의 기하학적 형상과 가진음압에 다른 감쇠 특성,” 한국항공우주학회지, 제38권, 제10호, 2010, pp.966~972
6. 차정필, 송재강, 고영성, 김홍집, “흡음계수를 이용한 연소불안정 제어용 음향공의 감쇠 정량화” 한국항공우주학회지, 제 35권, 제 5호, 2007, pp.438~445