

음향공 형상에 따른 연소 불안정 제어 효과

차정필* · 양재준* · 서주형* · 김홍집** · 고영성*

The effects of the Control of Combustion Instabilities in accordance with various Acoustic Cavities

Jungphil Cha* · Jeajun Yang* · Juhyoung Seo* · Hongjip Kim**** · Youngsung Ko*****

ABSTRACT

Acoustic cavity as a stabilization device to control high-frequency combustion instabilities in liquid rocket engine is adopted and its damping capacity is verified in atmospheric temperature. Geometric effects of acoustic cavity on damping characteristics are analyzed and compared quantitatively. Satisfactory agreements have been achieved with linear acoustic analysis and experimental approach. Results show that the acoustic cavity of the largest orifice area or the shortest orifice length was the most effective in acoustic damping of the harmful resonant frequency. Finally, it is proved that an optimal design process is indispensable for the effective control of combustion instabilities.

초 록

액체 로켓엔진에서의 고주파 연소불안정 제어를 위한 수동 안정화 제어 기구로 음향공을 적용하여 감쇠 효과의 적합성을 검증하였다. 음향공의 기하학적 형상에 따른 음향 감쇠 효과를 비교하기 위하여, 주요 설계 변수를 변화시킨 음향공 모델에 대해 유해 공진주파수 감쇠 효과를 정량적으로 비교, 분석하였다. 선형음향해석과 실험적 방법 모두 만족할만한 일치성을 나타내었으며, 오리피스 입구 면적이 가장 크거나 오리피스 길이가 가장 짧은 경우에서 감쇠 효과가 가장 크게 나타났다. 결론적으로 음향공을 이용한 최적의 음향공 제어를 위해서는 음향공 부피를 고려한 최적의 음향공 설계가 절대적으로 필요함을 입증한다.

Key Words: Acoustic Cavity(음향공), Stabilization Device(안정화 기구), Decay Rate(감쇠율), Area Ratio(면적비), Acoustic Damping(음향 감쇠)

1. 서 론

지난 수십 년간의 로켓엔진 개발에 있어서 큰 장애 요소인 연소불안정(combustion instability) 현상은 음향장과 밀접한 관련이 있으며, 또한 고주파수의 공진 특성을 가지므로 음향 불안정(acoustic instability) 또는 고주파 연소불안정

* 충남대학교 항공우주공학과
** 한국항공우주연구원 엔진그룹
연락처, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

(high-freq. combustion instability)이라 불린다. 이는 분사기면과 연소실 벽면으로의 과도한 열 전달 및 이로 인한 열적 손상, 극심한 구조물의 진동, 작동 조건의 예상치 못한 변화를 초래하게 된다[1-3].

이러한 연소 불안정을 해소하기 위한 수동 제어 기구로는 음향공과 배플이 있는데 음향공은 배플과 같이 분사기면에 직접장착하지 않으므로 별도의 냉각 시스템이 필요 없다. 음향공의 단점은 감쇠할 수 있는 음향모드의 주파수 대역이 좁아, 정확한 동조주파수를 찾지 못하면 감쇠 효과가 미미하다는 점이다[2,6]. 정확한 동조주파수의 파악을 위해 음향공 내부에서의 온도 및 화학적 조성과 같은 물성치 예측이 필수적이다.

본 연구에서는 선행 연구로서 상온 음향시험 및 해석을 통해 고전적인 주파수 분석에 대한 이론적인 접근과 특정 음향 모드에 동조시킨 음향공의 기본 특성을 재검토했다. 이를 통하여 음향공의 기하학적 형상에 따른 음향학적 감쇠 능력을 정량화하여 최적의 음향공 설계를 위한 선행 데이터베이스 확보를 주목표로 하였다.

2. 연구 방법 및 실험 장치

2.1 실험장치 및 방법

가장 기본적인 음향모드 중 하나인 1L 모드를 대상으로 하여 모델 연소실을 설계하였다. 연소실의 길이는 324mm, 직경 100mm로서, 1000Hz 이내의 주파수 범위에 1L모드만이 존재하여 cavity를 이용한 1L모드 제어를 보여주는데 용이하도록 하였다. 이에 따른 모델 연소실의 모드별 공진주파수는 Table 1과 같다.

Figure 1는 제작한 실험부의 3D 형상이고 Fig.2는 실험장치도이다. 음향공은 Helmholtz 공명기를 선택하고, 다양한 기하학적 형상에 따른 효과를 정량화하기 위하여 오리피스 직경을 12, 14, 18mm로 제작하였으며 오리피스 직경이 18mm 일 때에는 오리피스 길이를 36.8, 41.8, 46.8, 51.8mm로 변화시킬 수 있도록 제작하였다. 또한 음향공의 부피를 조절하기 위하여 직경 40mm, 높이는

Table 1 Resonant frequency in chamber

| Mode | 1L | 2L | 3L | 1T | 1T1L |
|----------|-----|------|------|------|------|
| 주파수 (Hz) | 524 | 1048 | 1573 | 1992 | 2060 |

0~90mm까지 피스톤 형식으로 조절 가능하도록 제작하였다. 모델 연소실 벽면에 음향공을 장착할 수 있는 홀(C1~C3)과 마이크로폰을 설치하는 홀(H1~H5)을 뚫어 위치별 특성을 파악 할 수 있도록 설계하였다.

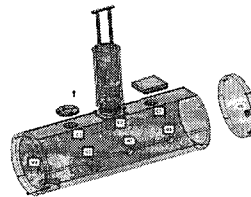


Fig. 1 Schematic of model

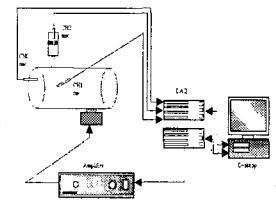


Fig. 2 Experimental set-up

2.2 선형해석을 통한 음향 감쇠효과 분석

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

3. 실험 및 해석 결과

3.1 동조된 음향공의 기하학적 형상 선정

설계된 모델 연소실의 1L 모드 공진주파수는 531Hz(실험), 538.5Hz(선형해석)로 각각 측정되었으며, 이것은 이론값(524Hz)에 1% 오차 내의 값이다. 음향공을 연소실 외부에 장착하고 1L모드에 동조시키는 음향 실험과 선형해석을 수행하였다. Table. 2는 음향공의 형상에 따라서 분류한 표이다. l, d, V 는 각각 오리피스 길이, 오리피스 직경, 연소실 단면적 대비 오리피스

면적, 음향공의 체적이다. Case G는 선형해석에
만 사용한 형상이다.

Table 2 Dimension of acoustic cavity & orifice

| Case | l [mm] | d [mm] | 면적비[%] | $V[\text{mm}^3] \times 10^4$ |
|------|----------|----------|--------|------------------------------|
| A | 36.8 | 18 | 3.24 | 5.1 |
| B | 41.8 | 18 | 3.24 | 4.6 |
| C | 46.8 | 18 | 3.24 | 4.2 |
| D | 51.8 | 18 | 3.24 | 3.9 |
| E | 36.8 | 12 | 1.44 | 2.5 |
| F | 36.8 | 14 | 1.96 | 3.3 |
| G | 36.8 | 16 | 2.56 | 4.1 |

3.2 오리피스 형상에 따른 연소실 응답특성

오리피스의 직경은 고정 시킨 상태에서 음향공 부피와 오리피스 길이를 변화시킨 실험결과를 보면 오리피스 길이가 최대 15mm까지 증가 하였어도 감쇠되는 정도는 거의 변화가 없다. 이것은 동조주파수가 일정해야할 조건에서 오리피스의 길이가 길어지면 음향공 부피는 줄어들기 때문이다. 즉 길이의 증가는 점성소산을 증가시키는 효과가 있지만, 부피의 감소로 인해 전체적인 감쇠 성능에는 변화가 없는 것이다. Fig. 3을 보면 실험과 해석 모두 오리피스 길이에 대한 유해주파수 대역의 감쇠율은 민감하지 않은 것을 알 수 있다.

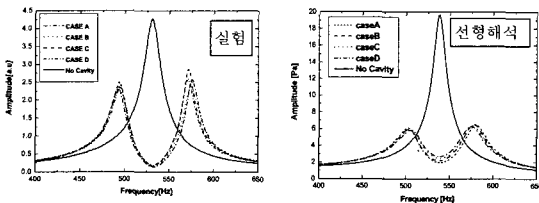


Fig. 3 Feature of acoustic damping in model chamber with various orifice length of acoustic cavity

오리피스 면적 변화에 따른 감쇠 특성은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 오리피스 면적의 증가에 따라 공진주파수 대역의 감쇠 효과도 크고 양쪽으로 분할된 모드들의 간격도 커져서 1L 모드의

상호작용이 더욱 힘들어져 연소불안정 제어에 보다 효과적으로 판단된다. 이는 오리피스의 단면적이 증가하면 일정한 동조주파수를 유지하기 위해서는 음향공의 부피는 비례적으로 증가하기 때문이다.

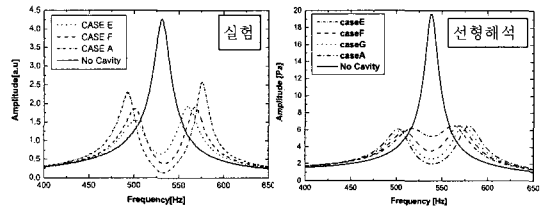


Fig. 4 Feature of acoustic damping in model chamber with various area ratio of acoustic cavity

3.3 오리피스 형상에 따른 감쇠능력

모드 분할 폭은 유해주파수와 멀어짐이 클수록 연소장과 상호작용을 피할 수 있어 효과적이다. 동일한 진폭으로 1L 모드에 해당하는 sine wave를 가진했을 때 음향공을 장착하지 않은 기본 연소실 대비 감쇠진폭비가 음향공의 형상에 따라서 다르게 나타난다. 이와 같은 방법을 통해 제작한 음향공 case별로 정량화 하였다.

음향공의 오리피스 길이 변화에 따른 감쇠진폭비를 보면 음향공을 장착하지 않았을 때와 비교해서 case A의 경우 96.2%의 감쇠효과를 보였으며 case D의 경우 93.3%의 감쇠효과를 보였다. 또한, 분할 폭도 오리피스 길이가 길어질수록 좁아지는 현상을 볼 수 있다. 하지만 그 효과는 크게 차이가 나지 않음을 볼 수 있다.(Fig. 5)

반면, 오리피스 면적 변화에 따른 진폭변화는 오리피스의 면적이 커질수록 음향공을 장착하지 않았을 때와 비교해 감쇠진폭비가 크게 나타났다. 분할 폭 또한 오리피스 면적이 클수록 유해주파수와 멀어짐을 볼 수 있다.(Fig. 6)

이와 같은 상온 실험결과를 연소장에 적용하게 되면 분할 폭은 대략 3.5배가량 증가할 것이므로 case A의 경우 분할 폭이 291Hz가 된다. 이것은 음향공에 의해 분할된 모드가 유해주파수와 상당히 멀어지게 됨을 뜻하며 유해주파수와 상호작용을 방지하는 효과를 가져 온다.

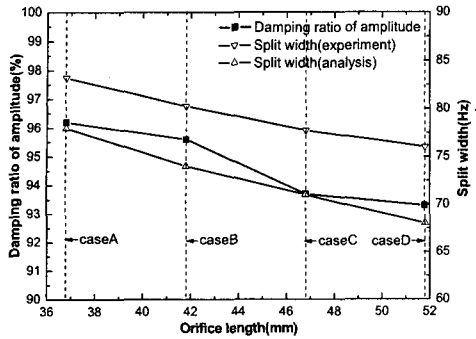


Fig. 5 Damping ratio of amplitude & split width(various orifice length)

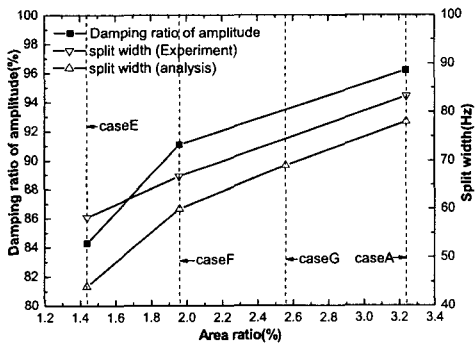


Fig. 6 Damping ratio of amplitude & split width(various area ratio)

4. 결 론

본 논문에서는 액체로켓에서 발생하는 연소불안정현상 제어를 위한 수동제어기구로서의 음향공에 대한 상온 음향실험과 선형음향 해석을 수행하였다. 음향공의 형상을 유해주파수라 가정한 1L 모드에 동조시켜 효과적으로 감쇠하는 것을 확인하였다. 또한, 음향공의 기하학적 형상에 따른 감쇠효과의 차이를 비교하였다. 음향공의 오리피스 면적은 고정하고 길이와 부피를 변화시켰을 때 감쇠효과는 거의 차이가 없었다. 음향공의 오리피스 길이는 고정하고 오리피스 면적과 부피를 변화시켰을 때 감쇠효과는 오리피스의 면적이 클수록 증가하였다. 결과적으로 본 연구에서 선정한 형상들 중에서는 오리피스의 길이

가 가장 짧고 면적이 가장 큰 case A가 제일 우수한 감쇠 능력을 보였다. 따라서 오리피스의 면적과 길이의 변화가 부피의 증가방향으로 변화될 때 감쇠효과는 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 실제 연소실 적용에 부피의 증가는 제약이 있으므로 이를 고려한 음향공의 설계가 중요하다.

참고 문헌

1. Harrje D. J and Reardon, F. H (eds), "Liquid Propellant Rocket combustion instability," SP-194, NASA, 1972
2. Natanzon, M. S., 1996, Combustion Instability, (Natanzon, M. S. and Culick, F. E. C., eds).
3. Laudien, E., Pongratz, R., and Preclik, D., "Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities," in Liquid Rocket Engine Combustion Instability (Yang, V. and Anderson, W. E., eds), Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.169, AIAA, Washington DC, 1995, pp. 377~399.
4. Sohn, C. H., and Kim, Y. M., 2002, "A Numerical Study on Acoustic Behavior in Combustion Chamber with Acoustic Cavity," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 30, No. 4, pp. 28~37.
5. 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, pp. 945-952.
6. Oberg, C. L., 1971, "Combustion Stabilization with Acoustic Cavities," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, No. 12, pp. 1220~1225.