

〈技術論文〉

고체추진제의 연소불안정특성 측정방법에 대한 연구

윤재건* · 유지창** · 이정권***

(1993년 12월 7일 접수)

A Study on Determining Method of Combustion Instability Characteristics of Solid Propellants

Jae-Kun Yoon, Ji-Chang Yoo and Jeong-Guon Ih

Key Words : Solid Propellant(고체추진제), Combustion Instability(연소불안정성), Helmholtz Oscillation(헬름홀쯔 공명)

Abstract

The phenomena called "combustion instabilities" in a solid-propellant rocket motor may be viewed as sustaining or amplifying pressure waves. Energy is supplied by combustion processes near the surface of the burning propellant. T-burner method is used to determine the response function of the propellant to the pressure wave. But initial tests were failed because of the Helmholtz resonance inside the T-burner. Acoustic analysis of the original T-burner is carried out and suppression techniques for the Helmholtz oscillation are introduced.

기 호 설 명

- a : 이론적음속
- a_m : 실제음속
- f : 주파수
- k : 파수
- L : 튜브길이
- m_b : 연소면에서의 질량유속
- n : 모드수
- p : 압력
- r : 구멍의 반경
- \bar{r}_b : 추진제 연소속도
- R_{pc} : 추진제의 압력변동에 대한 반응함수
- S_b : 추진제 연소 표면적
- S_c : 튜브의 단면적
- γ : 비열비
- α : 압력펄스의 감쇠계수

- ρ_p : 추진제의 밀도
- τ : 음향파워 전달율
- ω : 각주파수

1. 서 론

제 2 차 세계대전에서 로케트가 사용된 이래로 연소불안정 현상은 로케트 추진기관에서 자주 일어나는 현상이다. 연소불안정성이란 추진제의 연소과정에서 발생하는 열에너지의 극히 일부가 기계적인 에너지로 전환되어서, 지속되거나 증폭되는 압력파 (pressure wave)를 의미한다.⁽¹⁾ 엄밀하게 보면 모든 로케트 추진기관은 이러한 진동하는(oscillating) 압력파를 갖고 있다. 이러한 압력파의 크기가 연소실 평균 압력의 5% 이상이 될 때 이 로케트 추진기관은 연소불안정 현상이 일어나고 있다고 한다.

연소불안정 현상을 제거해야 하는 이유는 크게 3

*정회원, 국방과학연구소 추진기관부

**국방과학연구소 추진기관부

***정회원, 한국과학기술원 기계공학과

가지다. 첫째는 압력파에 의해 추진제의 연소속도가 빨라져서 연소실 평균 압력이 크게 증대하여 연소관의 파괴를 초래할 수 있기 때문이다. 둘째로는 연소관의 진동이 유도장치와 같은 전자장비의 오동작을 야기할 수 있고, 셋째로는 추력의 진동이 유도탄의 궤도에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 상당히 많은 로켓 추진기관들이 연소불안정 현상으로 인하여 개발기간의 지연과 설계변경 등으로 경제적 손실을 야기하였다.

이러한 연소불안정은 선형안정성해석(linear stability analysis)을 통하여 어느 정도 예측이 가능하다.⁽²⁾ 선형적으로 안정하다는 것은 매우 작은 압력 교란(disturbance)에 대해서도 시스템이 안정하다는 것을 의미한다. 선형시스템에서는 음향에너지(acoustic energy)의 증감과정(gain/loss process)들이 교란의 크기에 무관하고, 음향학적 모드들간에 서로 독립적이다.

고체추진 로켓의 선형안정성에 가장 크고 결정적으로 기여하는 것은 고체추진제 표면에서 발생하는 음향에너지의 압력결합(pressure coupling)항이다. 따라서 연소중에 추진제 표면의 압력변동(pressure fluctuation)에 대한 반응함수(response function)는 추진제 특성치로써 선형안정성 해석에서 가장 중요한 입력자료이다. 반응함수는 여러가지로 고안된 장치에 의해서 측정될 수 있으나 일반적으로 T-burner라는 시험장치를 사용한다.⁽³⁾

본 논문에서는 고체추진제의 연소불안정 특성을 측정하는 방법을 소개하고, 예상치 못했던 T-burner에서의 헬름홀츠(Helmholtz) 공명의 규명과 분석, 그리고 헬름홀츠 공명의 억제기술에 대하여 논하고자 한다.

2. T-burner와 측정방법

T-burner는 1950년대 NAWC(naval air warfare center)에서 처음 개발되어 측정방법이 정립된 장비로 현재 추진제 연소불안정 측정에 가장 널리 쓰이고 있다.

Fig. 1은 T-burner의 개념도와 축방향 모드의 정상파(standing wave)를 보여주고 있다. 가늘고 긴 튜브 양 끝단의 추진제는 그 표면이 항상 정상파의 절점(nodal point)에 위치한다. 추진제의 반응함수의 정의는 다음과 같다.⁽¹⁾

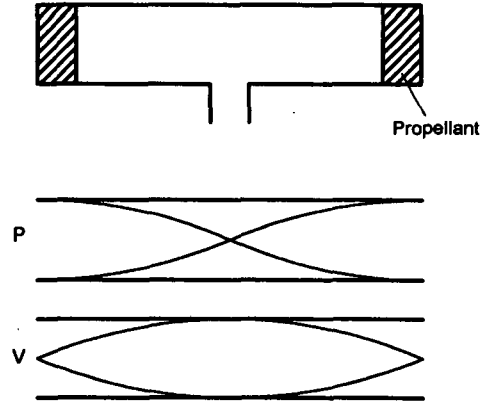


Fig. 1 Concept of T-burner

$$R_{pc} = \frac{m_b / \bar{m}_b}{\bar{p}' / \gamma \bar{p}} \quad (1)$$

여기서, m_b 는 연소면에서의 질량유속(mass flux)이다. 결국 압력진동에 대한 질량유속의 반응을 표현한 것이다. 이 값은 추진제 고유의 특성치이고, 추진제 조성의 아주 작은 변경에도 민감하게 변화한다. 따라서 추진제의 연소불안정 특성을 대표하는 값이다. 이 값은 절대치이기는 하나 측정 장비에 따라서 큰 차이가 날 수 있으므로 상대적인 비교 분석에 유용하다.

Fig. 2는 실제 T-burner의 구성도를 보이고 있으며 T자형의 튜브, 열교환기, 서지탱크(surge tank), 그리고 제어시스템으로 구성되어 있다. T자형 튜브의 내부는 음향에너지의 손실을 최소화하기 위하여 양쪽 끝이 막힌 실린더형으로 이루어져 있고, 내경은 1.5"이고, 튜브길이는 최소 7"에서 최대 50"까지 변화시킬 수 있으며, 튜브 한쪽 끝단에 스트레인게이지형(strain gauge) 압력변환기(Dynisco, PT139)와 압전형(piezoelectric) 압력변환기(Kistler, 606A; resonant frequency: 130 kHz; max. pressure: 5,000 psi; sensitivity: 5.5 picocoulomb/psi)가 장착되어서 측정된 압력신호를 제어 시스템으로 보내게 된다. 연소실은 Uniflow section을 통해 내부 부피가 1 ft³인 열교환기와 연결된다. Uniflow section 내부에는 Fig. 3과 같은 경사통로 유니트(conical passage unit) 4개가 일렬로 배열되어 있다. 열교환기 내부에는 철구조물이 충전되어서 추진제 연소가스의 온도를 낮추어 주며 고체 연소생성물을 걸러주는 역할을 하게 된다. 열교환기는 다시 내부 부피가 6 ft³인 서지탱크와 연

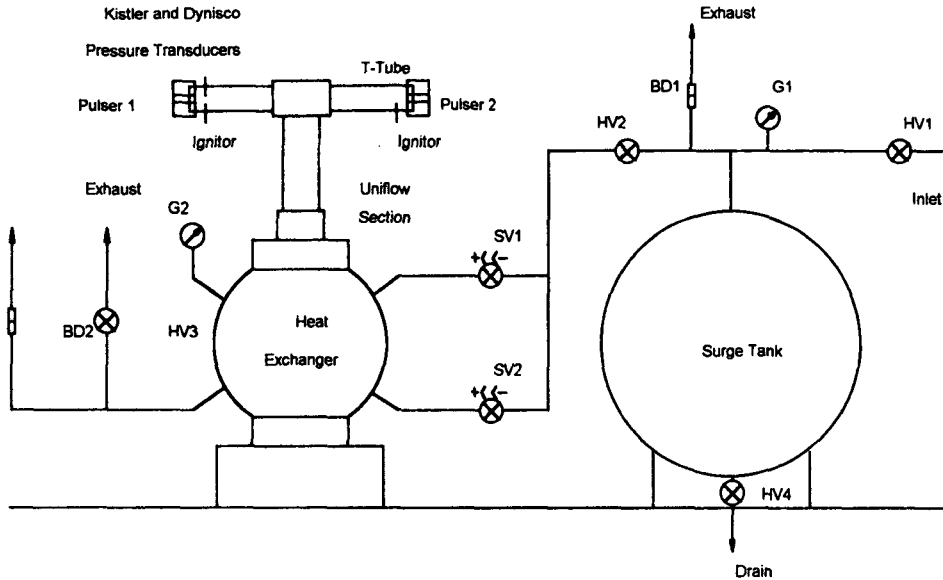


Fig. 2 Schematic diagram of T-burner system

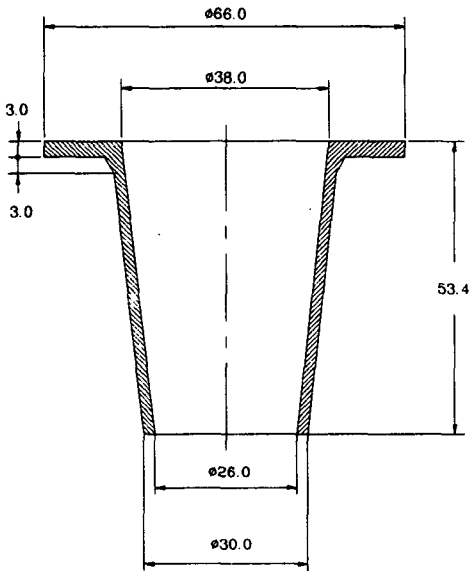


Fig. 3 Conical passage unit

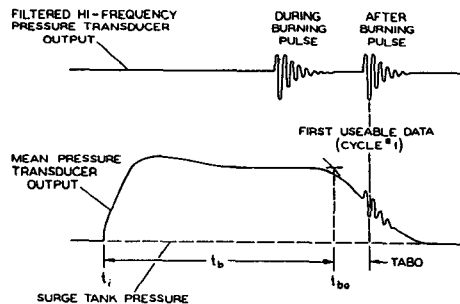


Fig. 4 Typical sketch of pulsed DB/AB test record

결되며 서지탱크는 제어밸브에 의해 연소실의 압력 상승을 낮추어 주는 역할을 한다.

T-burner를 사용하여 추진제의 반응함수를 측정하는 시험방법은 몇 가지 있으나, 가장 보편화되고 널리 사용되는 방법은 Fig. 4와 같이 추진제연소 중과 연소직후에 압력펄스(pressure pulse)를 주어 압력펄스의 감쇠율(attenuation rate)을 측정하는

pulsed DB/AB(during burning/after burning) 방법이다. 사용되는 펄서(pulser)로는 흑색화약(black powder) 150 mg을 M100 electric match를 사용하여 점화시키는 점화백을 사용하였다. 펄서에 의해 생긴 정상파는 시간이 흐르면서 감쇠되는데, 선형적으로 감쇠되는 신호를 고주파대역 통과필터(high-pass filter)를 통과시키고, 신호의 피크치들의 감쇠계수를 1차적으로 Curve fitting 방법에 의해 구한다. 연소중에는 추진제 표면의 연소면으로 인하여 감쇠율이 작고, 연소후에는 상대적으로 감쇠율이 크다. 이러한 선형적인 감쇠율의 크기 차이가 바로 추진제의 반응함수로 나타난다. 압력펄스에 의한 감쇠계수를 각각 α_1 과 α_2 라고 할때, 추진제의 반응함수 R_{pc} 는 다음과 같이 표현된다.⁽³⁾

$$R_{pc} = \frac{p(a_1 - a_2)}{4f a \rho_p r_o (S_b / S_c)} \left(\frac{a_m}{a} \right) \quad (2)$$

여기서, p 는 평균 압력, f 는 압력 변동성분(정상파)의 주파수, ρ_p 는 추진제 밀도, r_o 는 추진제 연소 속도, a 는 이론적음속, a_m 은 실제 측정되는 음속(=2fL), S_b 는 추진제 연소 표면적, S_c 는 T-burner 튜브의 단면적이다.

3. T-burner에서의 헬름홀츠 공명 및 억제기술

T-burner 시험에 있어서 인위적인 압력펄스를 주는 이유는 튜브내에 길이방향 정상파를 만들기 위함이다. 이 종방향 공명에 의한 압력 결합함을 알아내기 위하여, 생성된 정상파 크기의 감쇠율을 측정한다. 양단이 강체벽으로 주어진 관내에서의 정상파의 공명 주파수는 $na/2L$ (n 은 모드수, a 는 음속, L 은 튜브길이)로 주어진다. 그러나 일반적으로 알려져 있는 T-burner를 제작하여 시험을 수행한 결과, 압력펄스에 의한 압력변동성분을 분석하면, 종방향 정상파의 주파수뿐만 아니라 저주파에 있어서 매우 큰 크기의 압력 변동 성분이 있어서 감쇠율 측정이 용이하지 않다. Fig. 5에 초기 제작된 T-burner의 시간에 따른 변화 및 주파수 분석 결과의 한 예가 나타내어져 있다. 270~330 Hz 근방에서 발견되는 저주파수 피크는 T-burner의 형상을 고려할 때, 헬름홀츠 공명으로 생각되었고, 다음과 같은 식에 의하여 입증되었다.⁽⁴⁾

$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{\lambda' V}} \text{ (Hz)} \quad (3)$$

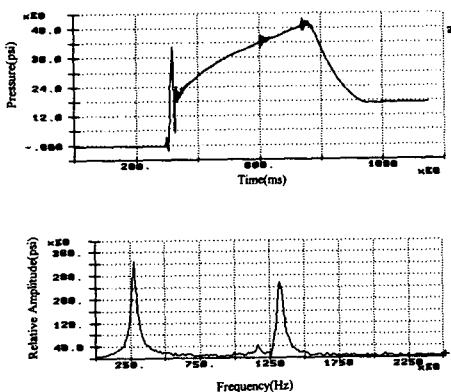


Fig. 5 Original T-burner test result

여기서, a 는 음속이고(884 m/s), S 는 배출구의 단면적(직경 $d=26$ mm), V 는 튜브의 체적, λ' 은 종단보정(end-correction)된 배출부(uniflow section)의 길이 ($\lambda' \approx 4\lambda + \Delta\lambda$; $\Delta\lambda = 4(0.85r_1 + 0.61r_2)$; λ 은 배출부를 구성하는 4개의 경사 통로 유니트 중 한 개의 길이; r_1 및 r_2 는 배출부 양단의 반경)이다. 위식에 실제 데이터를 대입하여 계산하면, 약 300 Hz 근방에서 헬름홀츠 공명이 일어날 수 있음을 알 수 있다. 식(3)은 집중 질량계로 모델화할 수 있는 첫번째 헬름홀츠 공명에 의한 것이므로, 공명기 형상 및 배출구의 형상에 대한 제약은 없다고 볼 수 있다. 그러나, 만약 관내의 고차 모드음파까지 고려한다면, 이들 형상도 충분히 고려되어야 한다.⁽⁵⁾ 이와 같이, 배출부에 있어서 매질의 진동에 의한 헬름홀츠 공명이 발생하고 이 크기는 초기 제작된 T-burner의 경우 종방향 정상파의 크기보다 훨씬 크거나, 거의 같은 정도의 수준이어서, 정상파의 감쇠율을 측정하기가 어려웠다. 즉, 측정치의 재현성도 없었을 뿐만 아니라, 잘못 측정된 데이터에 의해 반응함수가 음으로 산출되는 등 시험장치의 신뢰성이 전체적으로 문제가 되었다. 한편, 고주파 대역 통과필터에 의해 신호를 억제하면, 요구되는 종방향 정상파 성분만 얻어낼 수는 있지만, 튜브내에 존재하는 음장은 실제로 헬름홀츠 공명의 영향을 크게 받고 있다고 사료되었다. 이에 따라, 헬름홀츠 공명 그 자체를 기계적으로 제거 하고자 하였다.

제거 대책에 대한 근본적인 출발점은 배출구의 존재가 내부 음장에 최소한의 영향을 주도록 하는 점이다. 이를 위하여는 배출구를 통해 전달되는 음향 파워가 작게 설계되면서, 가스의 배출이 용이하게 되도록 하여야 한다. 음장 내부에서 구멍을 통해 전달되는 음향파워의 전달율은(전달파워/입사파워) 다음과 같이 정의된다.⁽⁶⁾

첫째, 구멍의 주변에 Flange가 있고, 길이가 짧은 관의 경우

$$r = \frac{2(kr)^2}{(1 + 1/2(kr)^2)^2 + (0.79kr)^2} \quad (4)$$

둘째, 구멍주변에 Flange가 없는 관의 경우

$$r = \frac{(kr)^2}{(1 + 1/4(kr)^2)^2 + (0.61kr)^2} \quad (5)$$

여기서, r 은 구멍의 반경을 나타내고, k 는 파수(wave number)로서 ω/a 이며, ω 는 각주파수

(circular frequency)이다. 위식들에서 분모에 있는 항 중, $1/2(kr)^2$ 및 $1/4(kr)^2$ 은 각 경우의 음향 저항을, $0.79 kr$ 및 $0.61 kr$ 은 각 경우에 있어서의 음향 리액턴스(reactance)를 나타낸다. 이를 실현하기 위해 몇 가지 대책을 수립하였다. Fig. 6은 배출구에 설치한 3종류의 오리피스판인데, $\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$ 의 직경을 갖고 여러 개의 구멍으로 이루어져 있다. 배출부에 설치되어 있는 경사통로유니트의 종단 직경을 $\phi 26$ 에서 $\phi 12.8$ 로 줄여 보았다. 각

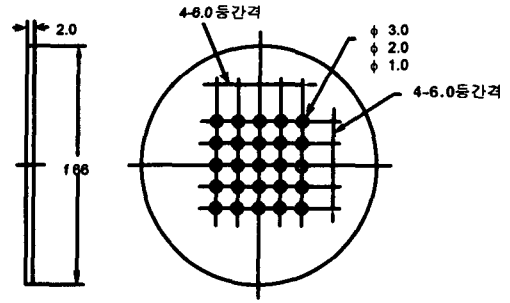


Fig. 6 Configuration of orifice plate

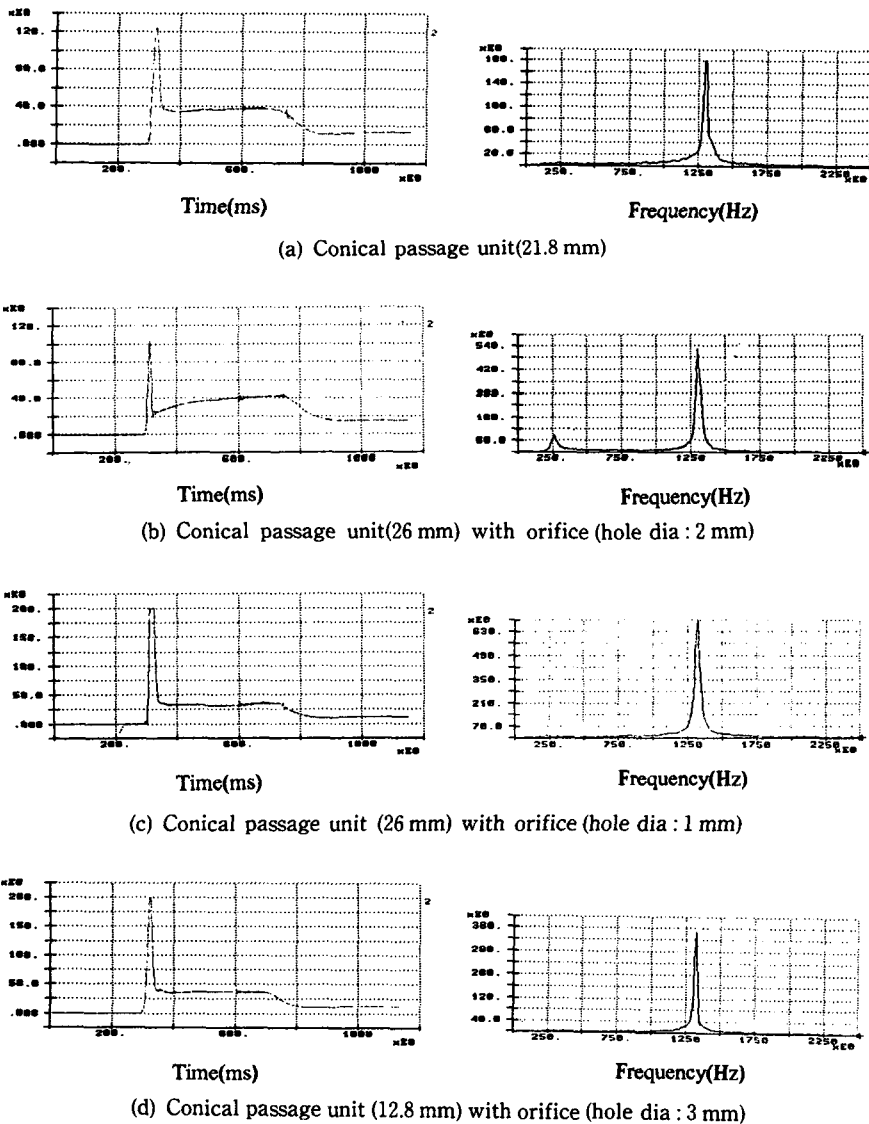


Fig. 7 T-burner test results using orifice plate and conical passage unit

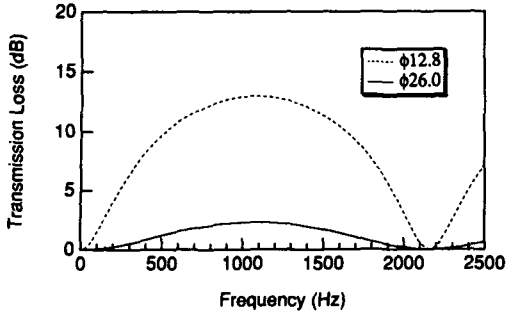


Fig. 8 Transmission loss curves for two conical passage unit connecting the T-burner and heat exchanger

경우에 있어서 식(4) 또는 식(5)에 따라 음향파워 전달율을 계산한 결과를 Table 1에 나타내었다. $\phi 12.8$ 의 경사통로 또는 $\phi 1$ 의 오리피스관에 있어서의 음향파워 전달율이 크게 작은 것을 볼 수 있고, 이들을 사용할 경우 효과적으로 T-burner와 열교환기 사이의 음향결합을 차단할 수 있다고 예측할 수 있다.

Fig. 7에 각 경우에 있어서의 시험결과를 보여 주고 있고, 그 결과는 예측한 바와 일치한다. 유동의 영향까지 고려한다면 점도(viscosity)의 영향으로 인하여 음향파워 전달율이 위에서 계산한 것보다 약간 증가할 것이다. 그러나 그 크기는 매우 작아서 전체적인 경향에 영향을 주지는 않는다. 한편, 천공율(porosity) 면에서 볼 때, $\phi 3$ 의 오리피스관은 15.6%로서, 일반적으로 이 정도는 음향학적으로 투명하다(acoustically transparent)고 할 수 있어서,⁷⁾ 그다지 효과적인 감쇠대책으로 생각될 수 없는 점도 결과와 일치한다. 여기서, $\phi 12.8$ 의 경사통로가 $\phi 26$ 형태보다 그 결과가 좋은 또한 가지 이유는, 4개의 경사통로 유니트를 중간에 3개의 방이있는 단순 팽창형 소음기로 모델링하여 볼 때, 전자(면적 팽창률 ≈ 8.8)가 후자(면적 팽창률 ≈ 2.1)보다 300 Hz 근방에서 약 6 dB정도의 추가적 감쇠능력이 있다는 점이다. Fig. 8을 보면 300 Hz 부근에서, $\phi 26$ 의 경우에는 거의 음향전달 감쇠가 이루어지지 않고 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

고체추진제의 연소불안정특성을 측정하는 T-

burner에서 헬륨홀츠 공명의 규명, 분석, 그리고 저감을 위하여 일련의 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 정상파가 가장 발생하기 쉽도록 만들어진 가늘고 긴 튜브에서도 배출구의 존재로 인하여 헬륨홀츠 공명이 일어났고, 정상파를 이용한 실험을 방해할 수 있을 만큼 공명의 크기도 컸다.

(2) 배출구의 존재가 내부 음장에 주는 영향을 최소화하기 위해서 즉, 연소가스의 배출은 용이하나 배출구를 통한 음향파워의 전달은 최대한 억제하도록 배출구를 설계하였다.

(3) 배출구에 오리피스판과 경사통로를 조합하여 사용한 결과 헬륨홀츠 공명을 거의 완벽하게 제거하였다.

참고문헌

- (1) Culick, F. E. C. and Yang, V., 1992, "Prediction of the Stability of Unsteady Motions in Solid-Propellant Rocket Motors," Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants, edited by L. De Luca, E. W. Price and M. Summerfield, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA, New York, Vol. 143, pp. 719~779.
- (2) Nickerson, G. R., Culick, F. E. C. and Dang, L., G., 1983, "Standard Stability Prediction Method for Solid Rocket Motors, Axial Mode Computer Program, User's Manual," *Software and Engineering Associates, Inc.*, AFRPL TR-83-017.
- (3) Culick, F. E. C., 1976, "T-burner Testing of Metallized Solid Propellants," *Air Force Rocket Propulsion Laboratory*, Rept. AFRPL-TR-74-28.
- (4) Beranek, L. L., 1986, *Acoustics*, Acoustical Society of America, New York, pp. 128~139.
- (5) Ih, J.-G., 1993, "On the Inertial End Correction of Resonators," *Acustica*, Vol. 78, pp. 1~15.
- (6) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 1982, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 225~228.
- (7) Okda, J., 1975, "Performance of Reactive Mufflers and Calculation of Engine Exhaust Noise," *Proceedings of Inter Noise 75*, pp. 655~662.