

로켓엔진 연소기와 공명기간의 선형 음향 coupling에 관한 수치적 연구

박이선* · 손채훈**

Numerical Study of Acoustic Coupling between Combustion Chamber and Resonators in Liquid Rocket Engine

I Sun Park* · Chae Hoon Sohn**

ABSTRACT

Acoustic coupling between combustion chamber and gas-liquid scheme injectors are studied numerically in liquid rocket engine adopting linear acoustic analysis. The injectors can play a role as half-wave resonators. The combustion chamber with numerous injectors shows peculiar acoustic coupling with the injectors. As the injector length approaches a half wavelength or the original tuning length, new injector-coupled acoustic modes show up in the chamber and thereby, the acoustic-damping effect of the tuned injectors is appreciably degraded.

초 록

고성능 액체 로켓엔진에서 일반적으로 사용되는 기체-액체형 분사기가 장착된 연소실의 음향장을 수치적으로 해석하였다. 해당 분사기는 반파장 공명기의 역할을 할 수 있다. 다수의 공명기가 장착된 경우 연소실과 분사기간의 음향학적인 연계성으로 특이한 음향학적 특성이 관측되었다. 분사기 길이가 반파장 공명기 길이에 도달함에 따라 분사기와 연계된 새로운 음향 모드가 나타났으며, 그 음향 모드의 감쇠인자는 상당히 작았다. 따라서, 분사기의 음향감쇠 효과를 최적화 하려면 본래의 반파장 길이보다 약간 작은 길이를 갖도록 해야함을 알았다.

Key Words: Gas-Liquid Scheme Injector(기체-액체형 분사기), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Acoustic Coupling(음향학적 연계), Half-Wave Resonator(반파장 공명기)

1. 서 론

* 조선대학교 대학원 항공우주공학과

** 조선대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: chsohn@chosun.ac.kr

액체 로켓엔진의 고주파 연소 불안정은, 연소 과정에서 발생하는 열방출이, 연소실 내부에서

진동하며 전파하는 음향파(acoustic wave)와 상호작용하여 음향파의 진폭을 어느 한도 이상으로 증폭시키는 현상을 말한다[1]. 고주파 연소 불안정의 억제를 위해 여러 가지 방법을 적용할 수 있는데, 그 중 한 방법으로 연소실내에서 발생할 수 있는 음향파 모드를 억제하는 수동제어 기구의 장착이 있다[1]. 연소실 내의 원치않는 음향파 감쇠를 위하여 배플이나 음향공명기 등의 수동제어기구를 장착할 수 있으나, 그 외에 연소기에 필수적으로 장착되는 분사기의 적절한 설계를 통해서도 상당한 음향감쇠 효과를 볼 수 있음을 이전의 연구[2]에서 제시하였다.

본 연구에서는, 연소실과 분사기간의 음향장에 대한 선형 음향 해석을 수행하여 음향학적 특징을 파악하고, 음향학적 특징을 고려하여 분사기 길이를 최적화하는 방안을 제시하였다.

2. 지배방정식과 수치해법

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 파동방정식(wave equation)의 풀이를 통해 연소실내 음향파 거동을 모사하였으며, 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다 [2].

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (1)$$

여기서 p 는 음향파에 의한 압력 섭동값, t 는 시간, c 는 음속, ∇^2 는 Laplacian 연산자를 나타낸다. 위 식(1)에 대한 경계조건과 파동방정식의 풀이, 유한요소법은 참고문헌[3]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

본 연구에서는 음향해석(acoustic analysis)에 대해 이미 신뢰성이 검증된 수치해석 코드인 KAA3D[6]를 이용하여 파동방정식의 해를 구하였다.

2.2 연소실 사양

음향해석을 수행할 연소실의 주요 사양은 다음과 같으며, 분사기 직경은 30mm이다.

·연소실 직경 : 380 mm, 노즐목 직경 : 190 mm

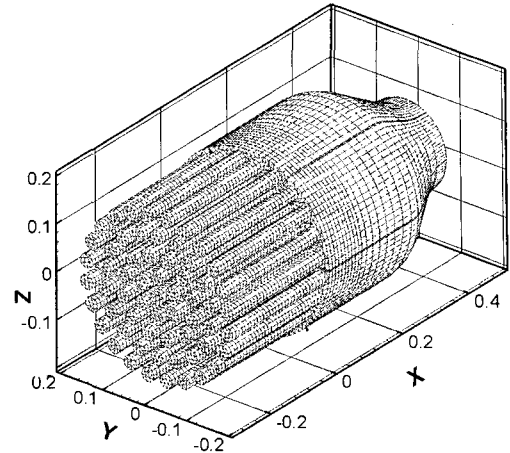


Fig. 1 Geometry and computational grids of the chamber with numerous injector (unit: m)

- 분사기면으로부터 노즐 입구부까지의 거리 : 250 mm, 노즐 수축 반각 : 25°

2.3 분사기의 음향학적 동조(tuning)

기체-액체 동축형 분사기는 가늘고 길며 입출구가 open되어 있으므로 종방향 모드(mode)에 대한 half-wave 형태의 공명기로 간주할 수 있으므로 다음의 음향공명기 설계식을 적용할 수 있을 것이다.

$$l_{inj} = \frac{c_{inj}}{2f_0} - \Delta l \quad (2)$$

여기서, l_{inj} 은 분사기의 길이, c_{inj} 는 분사기내 유체의 음속, f_0 는 동조주파수(즉, 연소실내에서 압력 섭동을 보이는 유해 주파수), Δl 은 질량보정인자이다. 이 식은, f_0 의 주파수를 갖는 연소장의 압력섭동이 분사기내로 입사될 때, 입사파동을 분사기내에서의 반사파동에 의해 최대로 상쇄시키기 위해 만족되어야 하는 이론 식이다.

3. 계산 결과 및 논의

3.1 계산 결과

이전 연구에서 단일분사기가 반파장 공명기의 역할을

할 수 있음을 제시하였다. 그러나, 실제 엔진에서는 분사기면에 수백 개의 분사기가 장착되므로, Fig.1에 나타난 바와 같이 직경이 30mm인 분사기 61개 장착된 연소실을 수치해석적으로 조사하였다. 분사기면에서 장착된 분사기의 면적 비율은 38%이며, 분사기면에서 분사기장착에 의한 열린 면적비 $\sigma_A = 0.38$ 이다.

관찰점에서 계산된 음향응답은 주파수와 분사기의 길이의 함수로써 Fig. 2에 나타내었다. 분사기의 길이는 0에서 한파장 λ 의 범위로 Fig. 2에 나타난대로 압력과 주파수가 분사기의 길이 변화에 따라 달라지고 있다. 이러한 특성들은 단일분사기[2]가 장착된 연소실의 음향응답과 뚜렷하게 구분된다. 분사기 길이가 $l_{inj} = 303\text{mm}$ 일 때, 즉 $1/2\lambda$ 에서 음향응답을 살펴보면 390, 460, 604Hz에서의 peak이 $l_{inj} = 0\text{mm}$ 일 때의 peak에 비해 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 음향응답은 음향파의 충분한 감소와 흡수를 나타내며, 특히 $f = 548\text{Hz}$ 에서 음향 섭동을 더욱 감소시킨다.

각각의 peak에서의 음향장으로부터 주파수 오름차순으로 1L, 1T, 1T계열 모드임을 확인하였다. 세 번째의 604 Hz peak은 새로 형성된 peak으로써 단일분사기를 장착한 연소실에서는 관찰되지않은 것이다. Figure 3a는 1T 모드의 음향장을 갖고 있지만 거의 감소가 되어 아주 약한 압력장을 형성하고 있으며, 지속적으로 유지가 되는 반면, Fig. 3b는 특이한 음향장을 보여준다. 만약, 분사기를 연소실에 포함시켜 하나의 체적으로 간주한다면, 그것은 순수한 1T모드라기보다 1T와 1L이 결합된 1T1L모드와 거의 유사하다. 따라서 1T1L* (분사기 연관 1T1L) 모드로 표시한다.

Figure. 3b를 음향학적으로 고찰하면, 연소실과 분사기의 상호작용에 의해서 독특한 모드가 새로 생겨남을 알 수 있다. 단일 분사기가 장착된 연소실에서 σ_A 는 단지 0.14%밖에 되지않았으며[2], 분사기와 연소실의 음향학적 상호작용은 거의찾아 볼 수 없다. σ_A 가 더욱 증가하여, 1에 도달하면, 분사기 끝이 곧 연소실의 분사기

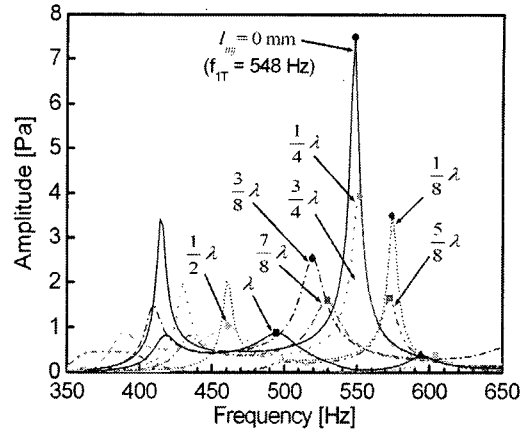


Fig. 2 Acoustic-pressure responses in un baffled chamber with numerous injectors (symbols of ●, ■ and ▲ indicate peaks of 1T, 1T1L*, and 1T2L* modes, respectively)

면에 해당하게 되고, 단일 체적이 되어 분사기 역시 음향학적으로 연소실의 일부가 될 것이다.

다음으로, 분사기의 동조에 의한 acoustic coupling 효과를 감소인자와 주파수 측면에서 조사하였다. 분사기 길이 l_{inj} 변화에 따라 음향응답의 감소인자와 1T계열 모드의 주파수를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. l_{inj} 가 증가하면, 음향 주파수는 $l_{inj} = 1/2\lambda$ 이내에서는 지속적으로 감소하는데, 감소인자는 서서히 증가하다가 빠르게 증가한다.

이런 분사기면의 경계조건을 적용한 연소실 음향장을 보면 1T 모드는 분사기면 근처에서 부분적으로 종방향화 되어있음을 알 수 있다. 흥미롭게도 가장 음향학적으로 동조가 이루어지지 않은 $l_{inj} = 1/4\lambda$ 의 음향장을 살펴보면 Fig. 2과 Fig. 4로부터 $l_{inj} = 1/4\lambda$ 일 때의 주파수 f 가 $l_{inj} = 0\text{mm}$ 일 때의 원래 주파수와 일치한다는 것이다. 이러한 점은 $l_{inj} = 1/4\lambda$ 일 때 음향학적으로 동조가 거의 이루어지지 않는다는 것을 잘 증명해준다. 즉, $l_{inj} = 1/4\lambda$ 일 때 수많은 분사기가 장착되었음에도 불구하고 음

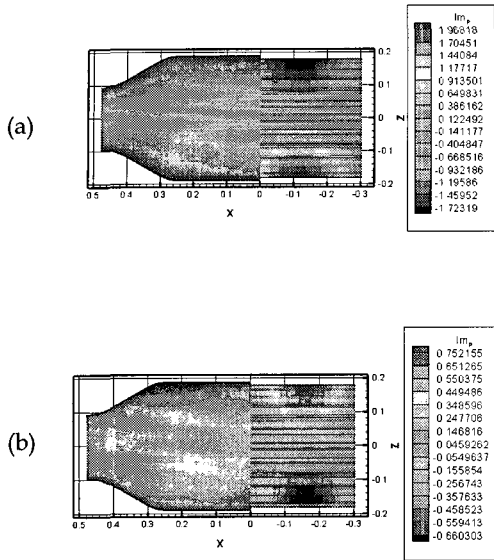


Fig. 3 Acoustic fields in un baffled chamber with numerous injectors of $l = 1/2\lambda$; (a) 1T mode resonant at 460 Hz and (b) 1T1L* mode resonant at 604 Hz

향학적으로 연소실과 coupling이 안되었다는 것이다. 그러나 감쇠인자는 단일분사기 장착의 경우보다 경계흡수 효과로 인해 55% 증가하였다. l_{inj} 가 $1/2\lambda$ 파장에 접근할수록 f_{1T} 는 점차 감소하고 η_{1T} 는 빠르게 증가한다. 1T 모드는 더욱 약해지고, 마지막에는 완전히 감쇠되어 없어진다. 동시에 새로운 모드 1T1L*가 좀더 고주파에서 반파장 길이 이전에 나타난다. 그리고 1T와 1T1L*가 중복되는 지역에서 1T1L*의 감쇠인자는 1T의 감쇠인자에 비해 아주 작다.

4. 결 론

다수의 분사기(공명기)가 장착된 연소실의 음향장을 수치해석하였다. 이전 연구의 결과에 의하면, 1T 모드의 반파장 길이가 되도록 분사기 길이를 설계해야 하지만, 연소실과 분사기 간의 acoustic coupling을 고려한다면, 동조 길

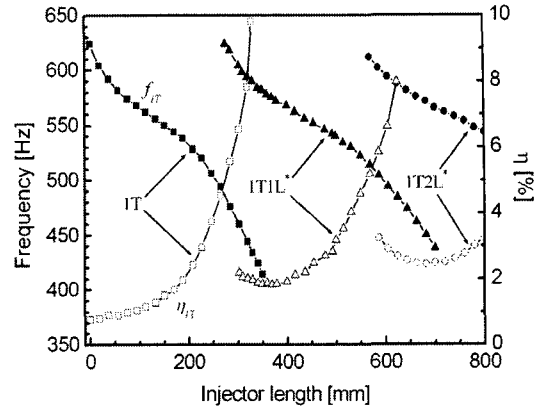


Fig. 4 Acoustic frequencies and damping factors of pure and injector-coupled 1T modes

이를 본래의 길이보다 약간 작게 하여야 할 것이다. 즉, 동조 길이를 선택할 때는 injecrot-coupled 모드를 피하면서 감쇠인자가 가장 크도록 설계해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2004-002-D00059).

참 고 문 헌

1. Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds.), Liquid Propellant Rocket Instability, NASA SP-194, 1972.
2. 박이선, 손채훈, "액체 로켓엔진 분사기의 음향감쇠 효과에 관한 수치적 연구", 한국항공우주학회지, 제33권, 제5호, 2005, pp. 79-86
3. 김성구, 김홍집, 손채훈, "로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발", 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp. 110-116
4. Sohn, C. H. and Cho, H. C, "Numerical Analysis of Acoustic Characteristics in Gas Turbine Combustor with Spatial Non-homogeneity," *KSME International Journal*, Vol. 18, 2004, pp. 1461-1469.