

# 액체 로켓엔진 분사기의 음향감쇠 효과에 관한 연구

박이선\* · 김성구\*\* · 손채훈\*\*\*

## Effect of Gas-Liquid Scheme Injector on Acoustic Damping in Liquid Rocket Engine

I-Sun Park\* · Seong-Ku Kim\*\* · Chae Hoon Sohn\*\*\*

### ABSTRACT

In the future engine with high performance, the gas-liquid scheme injectors will be adopted and the role of the injector as an acoustic resonator is investigated as an advanced study. The injector can play a significant role in acoustic damping and the optimum length of the injector to maximize the damping capacity is calculated as a function of baffle length.

### 초 록

향후 고성능 연소기에는 기체-액체 조합의 추진제를 분사하는 분사기가 채택될 수 있는데, 이에 대비하여 기체-액체형 분사기의 음향감쇠 효과를 선형 음향해석을 통해 조사하였다. 계산 결과, 분사기는 반파장 공명기의 기능을 수행할 수 있었으며, 감쇠효과가 최대로 나타나는 최적 분사기 길이를 구하였다. 배플이 연소기에 장착되는 경우, 횡방향 음향모드의 공진주파수 값이 감소하는데 실제 연소 상황의 조건과 유사한 물성치를 이용하여 배플길이에 따른 최적 분사기 길이의 변화를 계산하였다.

Key Words: Gas-Liquid Scheme Injector(기체-액체형 분사기), Half-Wave Resonator(반파장 공명기), Acoustic Damping(음향감쇠)

### 1. 서 론

액체 로켓엔진의 고주파 연소 불안정은, 연소 과정에서 발생하는 열방출이, 연소실 내부에서 진동하며 전파하는 음향파(acoustic wave)와 상

호작용하여 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

\* 조선대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 한국항공우주연구원 엔진그룹

\*\*\* 조선대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: chsohn@chosun.ac.kr

설계를 통해서도 상당한 음향감쇠 효과를 볼 수 있을 것으로 예측된다.

본 연구에서는, 연소실내 음향장에 대한 선형 음향 해석을 수행하여 이러한 가능성을 검토하고, 음향 감쇠를 위한 최적의 분사기 길이 설계의 기초자료를 제공하기 위해 분사기의 음향감쇠 효과를 조사하였다.

## 2 지배방정식과 수치해법

### 2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 파동방정식(wave equation)의 풀이를 통해 연소실내 음향과 거동을 모사하였다. 파동방정식은, 연소실내 유체의 평균 유동을 무시하고, 압력 섭동이 매우 작으며, 매질이 압축되는 과정은 등엔트로피 과정(isentropic process)이고, 속도 섭동과 그 구배(gradient)가 매질의 음속보다 매우 작다는 등의 가정을 도입하여 연속방정식, 운동량 방정식, 음속방정식으로부터 유도되며, 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,  $\nabla^2$ 는 Laplacian 연산자를 나타낸다. 위 식(1)에 대한 경계조건은 참고문헌[2]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

파동방정식의 풀이를 위해 유한요소법(finite element method ; FEM)의 하나인 Galerkin 방법을 이용하였다[3, 4]. Galerkin 방법의 적용을 통한 수식 유도과정은 참고문헌[5]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 Fig. 1에 한 개의 분사기(직경 18

mm)가 장착된 연소실의 모습을 나타내었다. 그림에서 보듯이, 노즐 부분을 제외하고 연소실 목(throat)까지를 해석 영역으로 설정하였다.

- 연소실 직경 : 346 mm
- 노즐목 직경 : 173 mm
- 분사기면으로부터 노즐 입구부까지의 거리 : 197 mm
- 노즐 수축 반각 : 25°

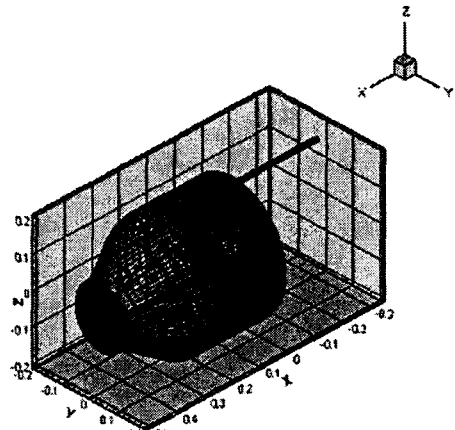


Fig. 1 Geometry and computational grids of the chamber with single injector (unit: m)

### 2.3 계산 전략

음향학적 지식에 비추어 볼 때, 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),  $\Delta l$ 은 질량보정인자이다. 이 식은,  $f_0$ 의 주파수를 갖는 연소장의 압력섭동이 분사기내로 입사될 때, 입

사파동을 분사기내에서의 반사파동에 의해 최대  
로 상쇄시키기 위해 만족되어야 하는 이론 식이  
다. 위 식을 통해 결국 공명기의 최적 길이,  
 $l_{inj}$ 을 이론적으로 예측할 수 있다. 음향해석을  
통해서는 분사기 길이 변화에 따라 감쇠인자,  
 $\eta$ [7]를 계산하여 최대의 감쇠인자를 나타내는  
분사기 길이를 최적의  $l_{inj}$ 라고 정할 수 있다.

### 3. 계산 결과 및 논의

#### 3.1 기본 결과

연소실과 분사기내 유체의 음속과 밀도를 각  
각 340 m/s, 1.2 kg/m<sup>3</sup>으로 설정하고 배플을 장  
착하지 않은 경우의 연소실에 대해 음향 해석을  
수행하여 구한 음향응답을 Fig. 2에 나타내었다.  
계산을 통해 제1접선 모드의 주파수는 548 Hz  
(파장은 0.620 mm)로 계산되었다. 이에 따라 반  
파장의 길이는 310 mm이다. 그리고, 분사기 길  
이에 따른 감쇠인자를 계산하여 Fig. 3에 나타  
내었다. 가장 큰 감쇠인자를 나타내는 분사기의  
길이는 303 mm이고, 그 다음으로 큰 감쇠인자  
는 610 mm의 분사기 길이에서 나타났다. 이 두  
가지 길이를 갖는 분사기내에 형성되는 압력 진  
동의 축방향 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

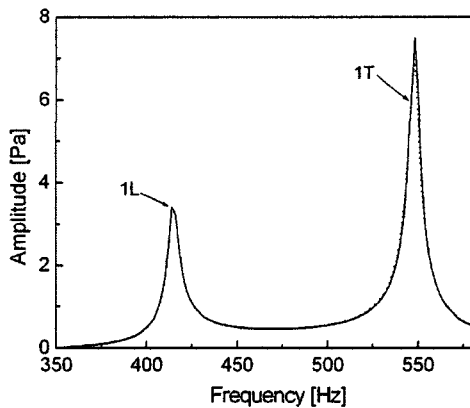


Fig. 2 Acoustic-pressure response of unbaffled chamber with single injector(solid line:  $l_{inj}=0$  mm, dotted line:  $l_{inj}=250$  mm)

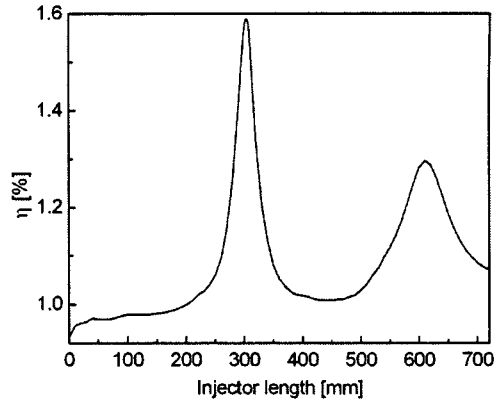


Fig. 3 Damping factors as a function of injector length

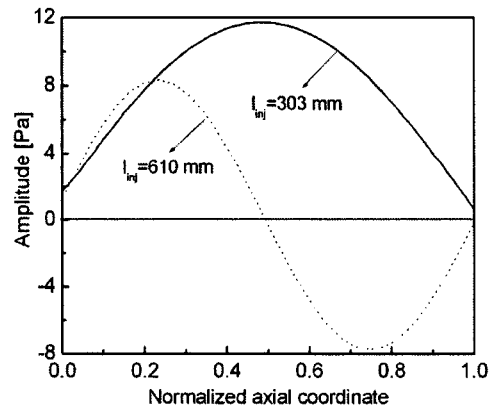


Fig. 4 Amplitudes of pressure fluctuation in injectors

위의 Fig. 3, Fig. 4에서 보듯이 반파장의 분사  
기 길이를 갖는 경우 분사기내 압력진폭이 가장  
크며, 연소실내 음향파 섭동에 대해 최대의 감  
쇠 효과를 보여주므로 분사기가 반파장 공명기  
로서의 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

#### 3.2 배플 길이에 따른 최적 분사기 길이 계산

앞에서 수행한 계산 결과에 따라 최적 분사기  
길이는 대략 연소실내의 유해주파수에 해당하  
는 파장의 반파장 길이라고 판단할 수 있다. 한편,  
가장 신뢰할 수 있는 연소 불안정 억제 기구로

서 배플을 연소실내에 장착하게 되는데, 배플의 장착은 음향 공진 현상을 깨뜨릴 뿐만 아니라, 공진 주파수를 낮은 영역으로 천이하는 효과를 가져온다[7]. 특정 길이의 배플을 장착함에 따라 공진 주파수가 특정한 값으로 변화하므로 이에 적합한 길이의 분사기를 설계하여야 할 것이다. 이를 위한 설계 기초 자료로 활용할 수 있도록 배플 길이에 따른 음향 감쇠를 위한 최적 분사기 길이를 계산하였다. 실제의 연소상황과 근사한 모사를 할 수 있도록 연소실내 유체의 음속과 밀도는 1270 m/s, 13.1 kg/m<sup>3</sup>로 설정하였고, 분사기내 유체의 음속과 밀도는 475.4 m/s, 103.3 kg/m<sup>3</sup>으로 설정하였다. 계산 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 배플 길이가 증가함에 따라 제 1 접선방향 모드의 주파수가 감소하고 이에 따라 최적 분사기 길이가 증가함을 알 수 있다.

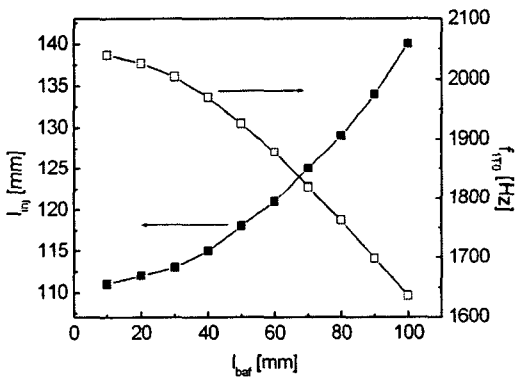


Fig. 5 Optimum injector length and  $f_r$  as a function of baffle length

#### 4. 결 론

향후 고성능 연소기에는 기체-액체 조합의 추진제를 분사하는 분사기가 채택될 수 있는데, 이에 대비하여 기체-액체형 분사기의 음향감쇠 효과를 선형 음향해석을 통해 조사하였다. 감쇠 효과가 최대로 나타나는 최적 분사기 길이를 구한 결과, 분사기는 반파장 공명기의 기능을 가지고 있음을 알 수 있었다. 연소실내 연소 상황을 모사하는 근사적인 물성치를 사용하여 최적

의 감쇠효과를 갖는 분사기 설계자료를 제시하였다.

분사기의 반파장 공명기로서의 역할외에, 분사기는 연소기와 음향학적인 연계성(coupling)을 가지기 때문에 연소기내 음향장에 다른 영향에 끼칠 수 있다. 이에 대한 연구는 향후의 연구로서 수행될 것이다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds.), Liquid Propellant Rocket Instability, NASA SP-194, 1972.
- Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D., Gas Dynamics, Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1977.
- 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. 1483-1491.
- Chapra, S. C. and Canale, R. P., Numerical Methods for Engineers, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, Singapore, 1989.
- ANSYS User's Manual for revision 5.0, Volume IV, Theory, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, 1993.
- 김성구, 김홍집, 손채훈, "로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발", 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp. 110-116.
- Sohn, C. H., Kim, S.-K., and Kim, Y.-M., "A Numerical Study on Effects of Various Baffle Designs on Acoustic Characteristics in Combustion Chamber of Liquid Rocket Engine" KSME International Journal, Vol. 18, 2004, pp. 145-152.