

論文

액체 로켓엔진 분사기의 음향감쇠 효과에 관한 수치적 연구

박이선*, 손채훈**

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

I-Sun Park* and Chae-Hoon Sohn**

ABSTRACT

The role of the injector as an acoustic resonator is studied for the high performance rocket engine adopting the gas-liquid scheme injector. Acoustic behavior in the combustor with single injector is investigated numerically adopting linear acoustic analysis for cold condition. Acoustic-damping effect of the injector is evaluated by damping factor as a function of the injector length. From the numerical results, it is found that the injector can play a significant role in acoustic damping and the optimum length of the injector corresponds to half of a full wavelength of the longitudinal mode with the acoustic frequency to be damped in the chamber. In baffled chamber, the optimum lengths of the injector are calculated as a function of baffle length for both cold and hot conditions.

초 록

기체-액체형 분사기를 사용하는 고성능 로켓엔진을 위하여 공명기로서의 분사기의 역할을 연구하였다. 단일 분사기가 장착된 연소기에서의 음향 거동을 상온 선형 음향해석을 통해 조사하였다. 음향감쇠 효과는 분사기 길이에 따른 감쇠인자를 통해 정량화되었다. 계산 결과, 분사기는 음향 감쇠에 있어 큰 역할을 하며, 최적의 분사기 길이는 감쇠시키 고자 하는 음향 주파수에 대한 반파장 길이에 해당함을 알 수 있었다. 배플이 장착된 연 소기에서, 상온 조건과 실제 연소 상황의 조건을 설정하여 각 조건에 대해서 배플길이에 따른 최적 분사기 길이의 변화를 계산하여 제시하였다.

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

1. 서 론

액체 로켓엔진의 고주파 연소 불안정은, 연소과 정중에 발생하는 열방출이, 연소실 내부에서 진동 하며 전파하는 음향파(acoustic wave)와 상호작용

하여 음향파의 진폭을 어느 한도 이상으로 증폭시 키는 현상을 말한다[1]. 고주파 연소 불안정의 억제 를 위해 여러 가지 방법을 적용할 수 있는데, 그 중 한 방법으로 연소실내에서 발생하는 음향파 모 드를 억제하는 수동제어기구의 장착이 있다[1]. 수 동제어기구로서 배플이나 음향공명기 등을 장착하 여 원치않는 음향 진동을 억제할 수 있게 된다. 그 러나, 이러한 기구는 연소실에 부가적으로 장착되 므로, 연소 성능을 감소시키거나 제작의 복잡성을 유발하는 문제점을 수반한다.

한편, 액체추진제 로켓엔진 연소기에는 추진제를

† 2004년 12월 9일 접수 ~ 2005년 4월 11일 심사완료

* 조선대학교 대학원 항공우주공학과

** 정희원, 조선대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail : chsohn@chosun.ac.kr

광주광역시 동구 서석동 375번지

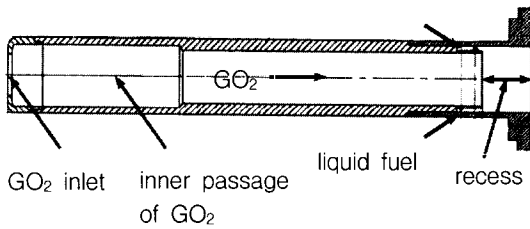


Fig. 1. Geometry of typical coaxial injector

분사하기 위해 필수적으로 분사기가 장착된다. 분사기는, 분사시점에서의 추진제의 상(phase)에 따라 액체-액체형과 기체-액체형으로 나눌 수 있다. 장차 사용될 고성능, 고추력의 연소실에서는 가스 발생기를 사용하고 재생냉각을 채택하는 밀폐형의 사이클을 선택하게 될 것이다[2]. 이 경우 Fig. 1과 같은 형태의 동축형 분사기를 사용하게 된다. 그림에서 보듯이, 이와 같은 연소 사이클에서 사용되는 동축형 분사기에서는 분사기의 중심으로는 기체 추진제가, 그리고 분사기 출구 근처에서 액체 추진제가 공급되어 연소기 내부로 분출된다. 이러한 분사기의 경우, 본질적인 기능은 분사이지만, 내부체적의 대부분을 기체가 차지하므로 그 형태상 공명기(resonator)의 역할도 할 수 있을 것으로 추론할 수 있다. 만일, 이러한 가능성이 실현된다면, 추가적인 수동제어기구의 장착이 아닌 분사기의 적절한 설계를 통해서도 상당한 음향감쇠 효과를 볼 수 있을 것으로 예측된다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는, 향후 고성능 연소기에서 채택될 기체-액체 조합의 추진제를 분사하는 분사기의 사용에 대비하여 기체-액체형 분사기가 장착된 연소실내 음향장에 대한 선형 음향 해석을 수행한다. 이를 통해 분사기의 공명기로서의 역할에 대한 가능성을 검토하고, 분사기의 음향감쇠 효과를 조사하여 최대의 음향 감쇠를 위한 최적의 분사기 길이를 조사하고자 한다. 또한, 배플이 연소기에 장착되는 경우, 횡방향 음향모드의 공진주파수 값이 감소하고 음향공진 현상을 완화시키게 되는데, 실제 연소 상황의 조건을 모사하는 연소실 및 분사기 내부 물성치를 이용하여 배플길이에 따른 최적 분사기 길이의 변화를 계산한다.

II. 지배방정식과 수치해석 방법

2.1 지배방정식

연소실내의 음향학적 거동을 해석하기 위해 고전적인 음향학 이론을 도입할 수 있다[3, 4]. 유체 매질은 점성이 무시된 완전기체로서 등엔트로피

과정을 겪는다고 가정하고 음향학적 상태량들을 아래와 같이 평균값과 섭동량으로 구분한다.

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x}, t) &= p_0(\mathbf{x}) + p'(\mathbf{x}, t), \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) &= \mathbf{u}_0(\mathbf{x}) + \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t), \\ \rho(\mathbf{x}, t) &= \rho_0(\mathbf{x}) + \rho'(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, p 는 압력, \mathbf{u} 는 속도 벡터, ρ 는 밀도를 나타내며, 하첨자 0는 평균값, '은 섭동량을 나타낸다.

평균값에 비해 섭동량의 크기가 매우 작다는 선형 음향가정(linear acoustic assumption)을 도입하면, 질량, 운동량 그리고 에너지에 대한 보존방정식으로부터 일반적으로 잘 알려진 다음의 파동방정식(wave equation)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{2}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{M} \cdot \nabla p') \\ - (\mathbf{M} \cdot \nabla)(\mathbf{M} \cdot \nabla p') = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 c_0 는 음속, \mathbf{M} 은 마하수를 나타낸다. 따라서, 식(2)의 마지막 두 항은 유체 매질내에 평균 속도가 존재하는 경우에 나타난다. 여기서 모든 음향학적 변수들이 주어진 주파수, ω 에 대해 시간에 따라 주기적으로 나타난다는 조화 가정(harmonic assumption)을 도입한다. 이를 통해 비정상적 시간 영역상에서 나타나는 변수들을 공간상의 변화만을 갖는 주파수 영역(steady frequency domain)으로 변환할 수 있으며, 복소음향압력(complex acoustic pressure)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p'(\mathbf{x}, t) &= \text{Re}\{\tilde{p}'(\mathbf{x}, t)\} = \text{Re}\{\mathbf{P}(\mathbf{x})e^{-i\omega t}\} \\ \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t) &= \text{Re}\{\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)\} = \text{Re}\{\mathbf{U}(\mathbf{x})e^{-i\omega t}\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 (\sim)는 복소수임을 나타내고, $\omega = 2\pi f$ 는 각 주파수(angular frequency)이다. 식(3)을 파동방정식 (2)에 대입하면 시간에 따른 항이 소거되고 아래와 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{P} + k^2 \mathbf{P} + i2k(\mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{P}) \\ - (\mathbf{M} \cdot \nabla)(\mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{P}) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $k = \omega/c_0 = 2\pi f/c_0$ 를 나타낸다. 식(4)에서 평균유동의 공간상 구배가 크지 않다고 가정하면, 다음과 같은 convected Helmholtz 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} (1 - M_x^2) \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial x^2} + (1 - M_y^2) \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial y^2} \\ + (1 - M_z^2) \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial z^2} + i2k(M_x \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial x} \end{aligned} \quad (5)$$

$$+ M_y \frac{\partial P}{\partial y} + M_z \frac{\partial P}{\partial z} + k^2 P = 0$$

만약 평균유동이 존재하지 않는다면 식(5)는 다음의 일반적인 Helmholtz 방정식이 된다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + k^2 P = 0 \quad (6)$$

결국 평균 유동이 존재하지 않는 Helmholtz 방정식인 식 (6)을 풀어서 복소음향압력 $P(\mathbf{x})$ 에 대한 정상상태 해를 얻을 수 있다면 실제 알고자 하는 음향압력 $p'(\mathbf{x}, t)$ 를 조화가정에 의한 관계식 (3)을 통해 구할 수 있다. 이러한 조화가정에 의한 해석 방법은, 파동방정식인 식 (2)를 직접적으로 시간에 따라 해석하는 것에 비해 훨씬 더 효과적이고 편리한 방법임을 알 수 있다. Helmholtz 방정식은 타원형(elliptic)이지만, 해가 복소수로 나타나며 공간상의 파형으로 나타나므로 일반적인 Laplace 방정식에 비해 수치해를 구하기가 상당히 까다로우며, 특히 일반적인 반복계산법으로는 행렬식의 수렴해를 계산하기 매우 어렵다. 따라서 효율적이고 동시에 수렴안정성을 보장할 수 있는 iterative solver로서, ILUT(Incomplete LU factorization with dual truncation strategy) 예조건화 기법을 사용한 GMRES(Generalized Minimal Residual)를 통하여 해를 구하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 이러한 방법을 채택하여 개발된 수치프로그램인 KAA3D[4]를 사용하였다.

2.2 연소실과 분사기 사양

음향해석을 수행할 연소실의 기하학적 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 통상 수백개의 분사기가 연소기에 장착되지만 분사기의 음향감쇠 효과를 파악

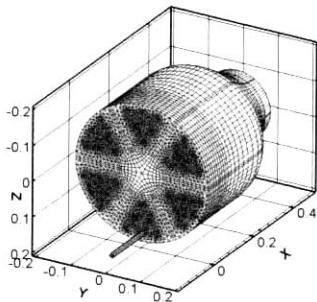


Fig. 2. Geometry and computational grids of the chamber with single injector [unit: m]

하기 위해 굳이 여러개의 동일한 분사기를 고려할 필요가 없으므로 한 개의 분사기만을 연소기에 장착하여 계산을 수행하였다. Figure 2에, 한 개의 분사기가 장착된 연소실의 모습을 나타내었으며, 확산 노즐 부분을 제외하고 노즐 목(throat)까지를 해석 영역으로 설정하였다. 채택된 연소기의 직경은 380 mm이고, 노즐목 직경은 190 mm, 분사기면으로부터 노즐 입구부까지의 거리는 250 mm, 노즐 수축 반각은 30°이다. 분사기의 직경은 14 mm로 설정하였으며, 길이를 변화시켜가며 음향해석을 수행하였다. 수치적인 가진 음원의 주파수를 변화시켜가면서 각각의 가진주파수에 대한 연소실내의 압력섭동의 응답 특성을 조화해석을 통하여 살펴 보았다. 조화해석에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [4, 5]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

III. 음향학적 고찰과 계산 전략

3.1 분사기에 관한 음향학적 고찰

앞에서 언급하였듯이, 수동제어기구조로 사용되는 음향공명기로서 여러 가지 형태가 있을 수 있는데, 그 중 하나로 Fig. 3에 나타낸 것과 같은 1/4 파장 공명기(quarter-wave resonator)가 있다[6]. 본 연구에서 채택한 기체-액체형 분사기는 1/4 파장 공명기와 형태가 비슷하며, 오직 한쪽 면의 경계 조건만이 다르다고 볼 수 있다. 기체-액체형 분사기와 1/4 파장 공명기는 모두, 분사기와 연소기의 연결면에서는 열린 조건(open condition)이 적용되지만, 반대쪽 면에는 서로 다른 조건이 적용된다. 즉, 1/4 파장 공명기의 경우, 그 면에서 닫힌 조건(closed condition)이 적용되지만, 분사기의 경우에는 여전히 열린 조건이 적용된다.

이와 같은 경계조건으로부터, 1/4 파장 공명기의 경우에는 각각의 면에서 압력 마디(node)와 배(antinode) 조건이 형성되므로, 문자 그대로 1/4 파

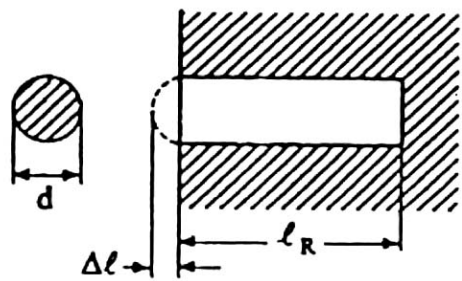


Fig. 3. Quarter-wave Resonator [6]

장 공명기의 역할을 하게 된다. 그렇다면, 같은 원리로 분사기의 경우에는 양쪽 면에서 압력 마디 조건이 형성될 것이므로 반파장 공명기(half wave resonator)의 역할을 하게 될 것이라고 추론할 수 있다. 파장의 길이만 다를 뿐이므로, 분사기의 음향 불안정 억제 메카니즘은 1/4-파장 공명기의 음향 진동 억제 메카니즘[6]과 동일할 것이다.

1/4-파장 공명기의 동조주파수(tuning frequency) 설정 식은 다음과 같다[6].

$$f_0 = \frac{c_R}{4(L_R + \Delta l)} \quad (7)$$

여기서, f_0 는 동조주파수(즉, 연소실내에서 압력 섭동을 보이는 유해 주파수), c_R 은 공명기내 유체의 음속, L_R 은 공명기의 길이, Δl 은 질량보정인자 - 길이보정인자라고도 볼 수 있음 - 를 나타낸다. 만일, 분사기를 반파장 공명기로 간주할 수 있다면, 우변항의 분모에서 사용되는 숫자인 4를 2로 바꾸어 식 (7)의 설계식을 그대로 사용할 수 있을 것이다.

3.2 계산 전략

앞절에서 기술하였듯이, 기체-액체 동축형 분사기는 가늘고 길며 양쪽면(입출구면)이 open되어 있으므로 종방향 모드(mode)에 대한 반파장 공명기로 간주할 수 있다고 가정하고, 식 (7)을 응용하여 다음의 음향공명기 설계식을 유도하였다.

$$l_{inj} = \frac{c_{inj}}{2f_0} - \Delta l \quad (8)$$

여기서, l_{inj} 은 분사기의 길이, c_{inj} 는 분사기내 유체의 음속을 나타낸다. 이 식은, f_0 의 주파수를 갖는 연소장의 압력섭동이 분사기내로 입사될 때, 입사파동을 분사기내에서의 반사파동에 의해 최대로 상쇄시키기 위한 분사기 길이의 이론 식이다.

본 연구에서는 액체로켓엔진에서 존재할 수 있는 여러 가지 유해 음향모드중 제 1 접선방향(1T) 모드를 감쇠대상으로 설정하였다. 그리고, 분사기의 반파장 공명기로서의 역할 즉, 감쇠효과를 조사하는데 있어서 상온의 조건(cold condition)을 설정하여도 무방하므로[1] 대부분의 계산을 상온 조건에서 수행하였다.

IV. 계산 결과 및 논의

4.1 분사기 길이에 따른 감쇠 특성

먼저, 상온 조건으로서 연소실과 분사기내 유체의 음속과 밀도를 각각 340 m/s, 1.2 kg/m³으로 설정하고 배플을 장착하지 않은 경우의 연소실에 대해 음향 해석을 수행하였다. 연소실에 장착되는 분사기의 길이를 0 mm부터 700 mm까지 증가시켜가며 계산을 수행하였다. 두 가지 분사기 길이에 대해, 해석 결과로 구한 음향 응답을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 분사기를 장착하더라도 각 음향모드가 나타나는 주파수 값은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. Figure 5에는 세가지 분사기 길이에 대해서 계산된 1T 모드 근처에서의 음향 응답을 나타내었다. 이로부터 분사기 길이의 변화에 따라 공진주파수 값의 변화는 없지만, 음향 진폭의 변화는 크게 나타나므로 음향 감쇠량은 달라질 것으로 예측할 수 있다. 제1접선방향 모드의 주파수는 548 Hz(파장은 620 mm)로 계산되었다. 이에 따라 계산된 반파장의 길이는 310 mm이다.

분사기의 음향감쇠 효과는 감쇠인자[5, 6]로 정량화하여 평가하였다. 감쇠인자가 클수록 감쇠효과가 크다고 판단할 수 있다. 분사기 길이에 따른 감쇠인자를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 가장 큰 감쇠인자를 나타내는 분사기의 길이는 303 mm임을 알 수 있다. 길이보정을 하지 않은 경우의 반파장 길이가 310 mm인 점을 감안하면, 7 mm의 차이는 Δl 에 해당하며 결국 303 mm의 길이의 분사기는 반파장 길이를 갖는 분사기라고 판단할 수 있다. 즉, 앞에서 추론한 분사기의 반파장 공명기로서의 역할 가능성은 충분히 가능한 것으로 검증되었다.

두번째로 큰 감쇠인자는 610 mm의 분사기 길이에서 나타났다. 이는 한 파장의 길이에 해당하는 것이다. 엄밀히 말하면, 양쪽이 open된 경계조건을 만족하는 파장의 길이는, 반파장의 정수배에 해당하는 파장의 길이이다. 따라서, 반파장 공명기뿐만 아니라 한 파장, 3/2-파장, 두 파장, 5/2-파장 등등의 공명기 역할도 할 수 있을 것이다. 그런데, Fig. 6의 결과를 보면 반파장 공명기로 작용할 때 최적인 것으로 나타났다.

반파장과 한 파장의 두가지 길이를 갖는 분사기내에 형성되는 압력 진동의 축방향 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 반파장의 분사기 길이를 갖는 경우 분사기내 압력진폭이, 한 파장의 분사기의 경우에 비해 훨씬 큼을 알 수 있다. 분사기내 압력 섭동의 진폭이 클 수록 연소실의 신호를 상쇄시키는 정도

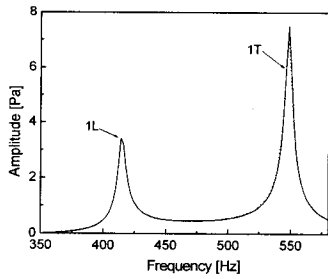


Fig. 4. Acoustic-pressure responses in unbuffered chamber with single injector(solid line: $l_{inj} = 0$ mm, dotted line: $l_{inj} = 250$ mm)

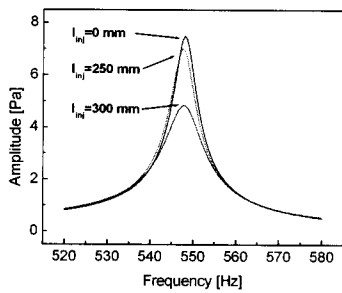


Fig. 5. Acoustic responses near f_{1T} with several injector lengths

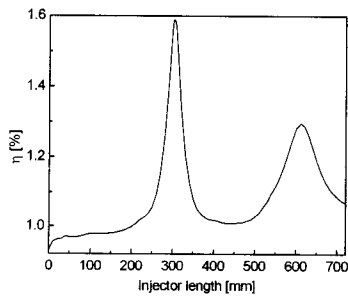


Fig. 6. Damping factors as a function of injector length at 1T mode

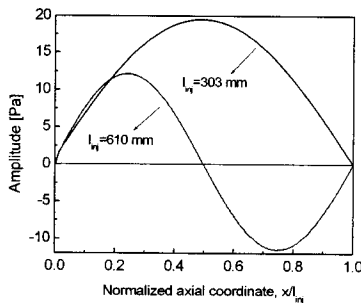
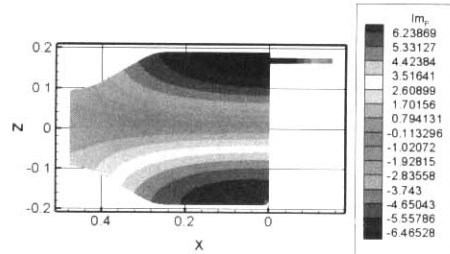
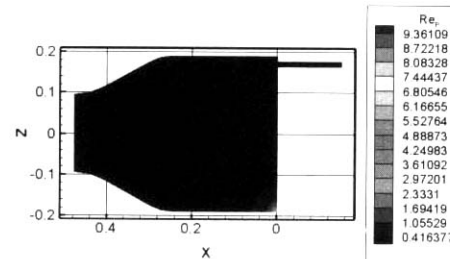


Fig. 7. Amplitudes of pressure fluctuation in injectors with $l_{inj} = 303$ and 610 mm

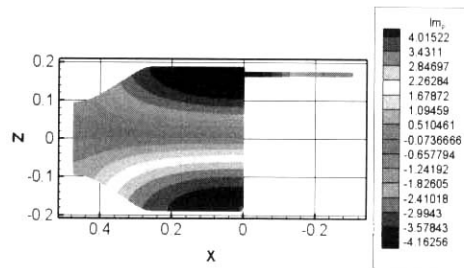


(a) $Im(\tilde{p})$

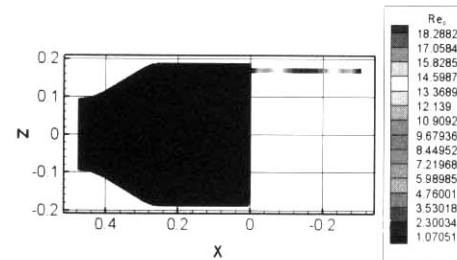


(b) $Re(\tilde{p})$

Fig. 8 Acoustic fields with $l_{inj}=1/4\lambda$



(a) $Im(\tilde{p})$



(b) $Re(\tilde{p})$

Fig. 9. Acoustic fields with $l_{inj}=1/2\lambda$

가 크게 되므로, 반파장 공명기로서 작용하는 것이 음향 감쇠의 관점에서 가장 최적임을 알 수 있다.

Figures 8과 9에는 1/4-파장과 1/2-파장 길이의 분사기가 장착된 경우의 연소실내 음향장을 나타내었다. 여기서 1/4-파장은, 분사기의 공명기로서의 역할이 약하게 나타나는 길이의 대표값이라고 볼 수 있다. 어느 경우나, 1T 모드 공진성은 뚜렷하지 않지만, 1/2-파장 공명기가 장착된 경우에는 연소실내 압력 섭동 진폭이 작게 나타났다. 그리고, 압력섭동의 실수부 분포를 보면, 분사기내 압력 섭동이 두 경우에 현저히 다를 수 있다. 즉, 1/4-파장 분사기의 경우, 분사기내 압력 섭동이 미미한 반면, 1/2-파장 분사기의 경우에는 상당히 크게 섭동함을 알 수 있다. 분사기내에서 나타나는 큰 압력 섭동은, 앞서 언급하였듯이 연소실내 압력 섭동에 민감하게 응답하여 효과적으로 감쇠시킴을 의미한다.

4.2 배플 장착에 따른 최적 분사기 길이 계산

앞에서 수행한 계산 결과에 따라 최적 분사기 길이는, 연소실내의 유해주파수에 해당하는 파장의 반파장 길이라고 판단할 수 있다. 한편, 연소 불안정 억제를 위한 수동제어기구로서 배플을 연소실내에 장착하는 경우가 있는데, 배플의 장착은 음향 공진 현상을 깨뜨리고 횡파를 종파화시킬 뿐만 아니라, 공진 주파수를 낮은 영역으로 천이하는 효과를 가져온다[7]. 이처럼 배플을 장착하게 되면 음향장 양상이 달라지는데, 배플을 장착했을 때에도 분사기의 길이가 반파장일 때 최대의 음향감쇠 효과가 나타날지 의문이다.

이러한 의구심의 근거를 Fig. 10에 도식적으로 나타내었다. 즉, 배플을 장착하면 횡파가 종파화되므로 분사기를 여전히 반파장공명기로 설계한다면 그림의 (a)처럼 분사기와 연소기의 연결면

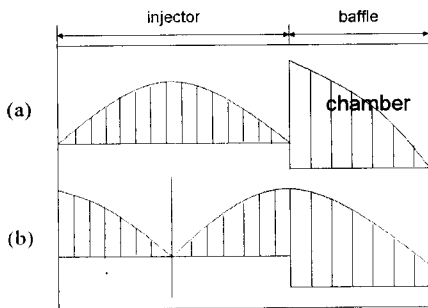


Fig. 10. Hypothetical diagram of injector-coupled baffle

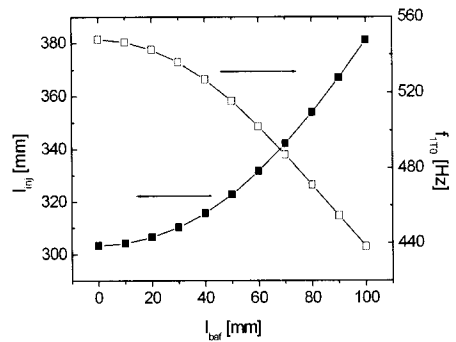


Fig. 11. Optimum L_{inj} as a function of baffle length for cold condition in baffled chamber

에서 음향학적 적합(matching)이 원만하게 이루어지지 못하므로 그림의 (b)에서와 같이 1/4-파장 공명기로 설계하는 것이 음향감쇠 관점에서 더욱 효과적일 것이라고 추론할 수 있다. 이러한 추론을 검증하기 위해 배플 길이에 따른 최적 분사기 길이를 구하여 Fig. 11에 나타내었다. 배플 길이의 증가에 따른 1T 모드 공진 주파수의 감소를 확인할 수 있었고, 이에 따라 최적 분사기 길이가 증가하였다. 그러나, 계산 결과, 배플을 장착해도 역시 최적의 분사기 길이는 식 (8)에 의한 반파장 공명기 길이를 가진다는 것을 알 수 있었다. 즉, Fig. 10에 의한 추론은 적용되지 않으며, 공명기 설계시에는 오직 연소실내 유해한 음향 모드의 주파수 값과 분사기의 양쪽 경계조건만이 주요한 역할을 함을 알 수 있었다.

4.3 연소 조건에서의 최적 분사기 길이 계산

앞에서 수행한 모든 계산은 상온 조건에서 수행되었다. 이를 통해 분사기의 음향감쇠 효과와 역할을 충분히 파악할 수 있으나, 정량적인 분사기 설계 기초 자료로 활용하기 위해서는 실제의 연소 조건을 모사하여 음향 해석을 수행해야 한다. 견본 연소 조건으로서, 연소실내 유체의 음속과 밀도는 1270 m/s, 13.1 kg/m³로 설정하였고, 분사기내 유체의 음속과 밀도는 475.4 m/s, 103.3 kg/m³으로 설정하였다[8].

이러한 조건에 대해, 앞에서 언급한 상온 조건에서의 계산을 반복하였다. 무배플 연소실에서의 음향 응답과 분사기 길이에 따른 감쇠인자를 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. 한편, 배플 길이를 변화시켜가며 최적 분사기 길이를 구하여 Fig. 14에 나타내었다. 앞절의 Figs. 4, 6, 11과 각

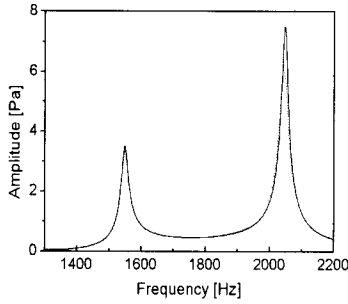


Fig. 12. Acoustic-pressure responses in un baffled chamber with single injector for hot condition(solid line: $l_{inj} = 0$ mm, dotted line: $l_{inj} = 90$ mm)

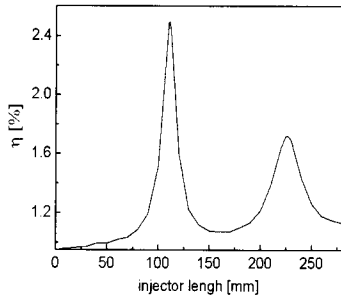


Fig. 13. Damping factors as a function of injector length at 1T mode for hot condition

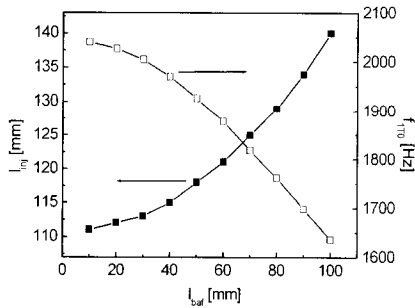


Fig. 14. Optimum l_{inj} as a function of baffle length for hot condition in baffled chamber

각 비교하여 정성적으로 동일한 경향이 나타남을 알 수 있다. 이 점은 상온 음향해석의 유용함을 증명하는 예이기도 하다. 정량적 관점에서, 상온 음향해석으로 구한 분사기 길이는 300 mm 이상으로 비현실적으로 크게 계산된 반면, 연소 조건에서 계산된 분사기의 길이는 100 mm 내외로 계산되었고, 이는 통용되는 동축형 분사기의 길

이와 같은 크기의 값이다.

V. 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. 감쇠효과가 최대로 나타나는 최적 분사기 길이를 구한 결과, 분사기는 반파장 공명기의 기능을 수행할 수 있음을 알았다. 즉, 분사기가, 감쇠시키고자 하는 음향파 주파수에 대한 반파장 길이를 가질 때 최고의 감쇠효과를 나타낸다. 연소실내 연소 상황을 묘사하는 근사적인 물성치를 사용하여 최적의 감쇠효과를 갖는 분사기 설계자료를 정량적으로 제시하였다.

분사기는 반파장 공명기로서의 역할외에, 상황에 따라 연소기와의 음향학적인 연계성(coupling)을 가질 수 있기 때문에 연소기내 음향장에 다른 영향을 끼칠 수도 있다. 이에 대한 연구는 향후의 연구로서 수행될 것이다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds.), Liquid Propellant Rocket Instability, NASA SP-194, 1972.
- 2) Huzel, D. K., and Huang, D. H., Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, Vol. 147, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington DC, 1992, p. 113.
- 3) Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D., Gas Dynamics, Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1977.
- 4) 김성구, 김홍집, 손채훈, "로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발", 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp. 110-116.
- 5) 손채훈, 김영목 "음향공이 장착된 로켓엔진 연소실의 음향장 해석", 한국항공우주학회지, 제30권, 제4호, 2002, pp. 28-37.

- 6) Yang, V. and Anderson, W. E. (eds.), *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, Vol. 169, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington, DC, 1995, pp. 377-399.
- 7) 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, No. 1, 2004, pp. 145-152.
- 8) Shibanov, A. A., Personal Communication, 2002.