

로켓엔진 연소기내 공명기에 의한 비선형 음향감쇠에 관한 수치해석적 연구

손채훈* · 박이선**

Numerical Study of Nonlinear Acoustic Damping Induced by Acoustic Resonators in a Rocket Combustor

Chae Hoon Sohn* · I Sun Park**

ABSTRACT

Nonlinear acoustic damping of a half-wave acoustic resonator in a rocket combustor is investigated numerically adopting a nonlinear acoustic analysis. First, in a baseline chamber without any resonators, acoustic behavior is investigated over the wide range of acoustic amplitude from 80 dB to 150 dB. Damping factor increases nonlinearly with acoustic amplitude and nonlinearity becomes appreciable at acoustic amplitude above 125 dB. Next, damping effect of a half-wave resonator is investigated. It is found that nonlinear acoustic excitation does not affect optimum tuning condition of the resonator, which is derived from linear acoustics. A half-wave resonator is effective even for acoustic damping of high-amplitude pressure oscillation, but its function of acoustic damper is relatively weakened compared with the case of linear acoustic excitation.

초 록

연소 안정화를 위해 로켓엔진 연소기에 장착될 수 있는 반파장 음향 공명기의 비선형 음향 감쇠 특성을 비선형 해석을 통해 조사하였다. 먼저, 공명기가 장착되지 않은 기본 연소실에 대해 넓은 범위의 진폭(80~150 dB)을 갖는 음향 가진에 대한 연소실의 감쇠 거동을 조사한 결과, 진폭에 따라 연소실의 감쇠인자가 증가하며 125 dB 이상의 진폭에 대해서는 비선형 거동이 뚜렷이 나타남을 알았다. 반파장 공명기가 장착된 연소기에서의 계산 결과, 해당 공명기의 최적 동조조건은 진폭에 무관하였고, 높은 진폭의 압력파를 감쇠하는 기능은 유지되지만, 상대적으로 음향 공명기로서의 역할은 약화됨을 알 수 있었다.

Key Words: Nonlinear Acoustic Damping(비선형 음향 감쇠), Half-Wave Resonator(반파장 공명기), Tuning Condition(동조 조건), Nonlinearity(비선형성)

† 2007년 1월 19일 접수 ~ 2007년 2월 27일 심사완료

* 정회원, 세종대학교 기계항공우주공학부

** 학생회원, 조선대학교 대학원 항공우주공학과

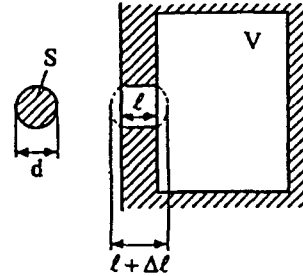
연락처, E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

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 발생하는 음향파 모드를 억제하는 수동제어기구(배플, 음향공명기 등)의 장착이 있다[1, 2]. 이러한 기구는 연소실에 부가적으로 장착되므로, 연소 성능을 감소시키거나 제작의 복잡성을 유발하는 문제점을 수반하지만, 적절히 설계될 경우 효과적인 음향 감쇠 효과를 볼 수 있다.

기존에 이미 널리 알려진 대표적인 공명기로는 Fig. 1에 나타낸 Helmholtz 공명기와 1/4파장 공명기가 있다[2]. 한편, 최근의 연구 결과, Fig. 2에 나타낸 기체-액체형 분사기의 경우, 본질적인 기능은 추진제 분사이지만, 내부 체적의 대부분을 기체가 차지하므로 그 형태상 공명기(resonator)의 역할을 할 수 있음이 제시되었다[3, 4]. 그러나, 이전 연구[3-5]에서는, 연소실내 음향파(압력파)의 진폭이 아주 작다는 가정을 도입하여 공명기의 선형적인 감쇠기능을 파악하였다. 공명기의 기능은, 발생한 압력파의 에너지를 소산시키거나 흡수하여 압력파 진동의 진폭을 줄이는 것이다. 실제로 연소실내에서 음향 불안정이 야기될 때, 미소한 진폭의 압력파가 시간이 경과함에 따라 서서히 증폭되는 경우도 있지만, 연소실 내외부로부터 예기치 않은 큰 진폭의 압력파가 발생하여 짧은 시간내에 큰 압력파로 성장하는 경우도 있다. 따라서, 공명기를 설계할 때, 선형적인 음향 감쇠 특성과 더불어 큰 진폭의 압력파를 감쇠시킬 수 있는 특성을 파악하는 것이 필요하다. 만일, 작은 진폭의 압력파를 충분히 감쇠시키던 공명기가, 큰 진폭의 압력파에 대해서는 감쇠 성능을 제대로 발휘하지 못한다면, 그러한 공명기의 실제 효용성은 크게 떨어질 것이다.

본 연구에서는, 이전 연구[3-5]에서 수행된 공명기의 선형 감쇠 특성을 바탕으로 비선형 압력파에 대한 공명기의 감쇠특성을 수치해석적으로 조사하였다. 기존의 Helmholtz 공명기, 1/4파장 공명기

Helmholtz Resonator



Quarterwave Resonator

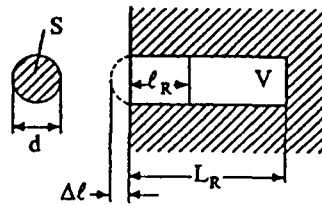


Fig. 1 Helmholtz and Quarter-Wave Resonators [2]

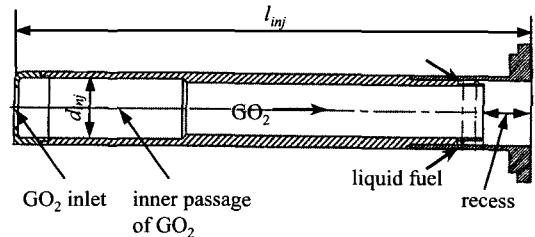


Fig. 2 Geometry of Typical Coaxial Injector (Half-Wave Resonator)

와 더불어 주로 반파장 공명기의 비선형 감쇠특성을 고찰하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치 해석

선형 음향해석을 위해서는 질량, 운동량 그리고 에너지에 대한 보존방정식을 풀기보다 선형 음향 가정(linear acoustic assumption)을 도입하여 유도되는 단순화된 파동방정식(wave equation)을 푸는 것이 편리하다[6-8]. 그러나, 음향파의 진폭이 크면 선형 가정이 성립하지 않으므로 일반적인 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다. 음향 불안정과 관련한 비선형성을 고려할 수 있는 해석에 사

용되는 수치해석 방법은 일반적인 Navier-Stokes 방정식의 풀이 방법과 본질적으로 동일하다. 보존 방정식으로 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식을 채택하여 풀이하였다[9-13]. 보조적으로 공기에 대한 상태방정식을 이용하였다.

연소실 벽면과 분사기 장착면에는 벽 경계조건을 부여하였고, 각 공명기에 대해서 부분별로 적절한 압력과 배(antinode)와 마디(node) 조건을 부여하였다. 예를 들어, 반파장 공명기의 경우, 공명기(분사기) 주위 벽면에는 벽조건을 부여하고, 입구부에는 압력과 진동의 마디 조건을 부여하였다. 노즐 목은 음향학적으로 닫혀 있다고 가정하고, 벽 조건을 부여하였다. 초기 조건으로는 정지 상태의 공기가 연소실내에 있다고 가정하였으며, 공기의 압력은 1기압으로, 온도는 300 K으로 설정하였다.

압력 진동을 해석하기 위해서는, 과도 해석(transient analysis)을 수행해야 하며, 인위적인 압력 교란을 위해 다음과 같은 압력 가진 함수를 적용하였다.

$$p_{ext} = p_{amp} \delta(t - 0.0001) \quad (1)$$

여기서 p_{amp} 는 교란 압력과의 진폭을 나타내며, δ 는 델타(delta) 함수, t 는 시간을 나타낸다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 압력 가진부는 분사기(공명기) 장착면의 상단부 연소실 벽 근처에 위치시켰고, 압력 진동을 관찰하기 위한 관찰점(monitors point)은 압력 가진부의 180도 맞은편에 위치시켰다. 이러한 위치들의 관계는 이전의 선형 해석 수행[3, 14]시와 동일하다.

예비 계산을 통해 격자 개수에 따른 해의 의존성, 가진부의 영향, 관찰점의 위치에 따른 영향을 조사하였으며, 그 영향이 미약함을 확인하였다. 공간차분에는 2차 전방차분법(upwind scheme)을, 시간적분을 위해서는 Crank-Nicolson법을 사용하였다. 과도해석을 위한 시간 간격은 $10 \mu\text{s}$ 로 설정하였으며, 시간 간격을 더 짧게 하여도 계산 결과의 변화가 거의 없음을 확인하였다.

본 연구에서는 위와 같은 방법과 모델들을 채택하여 CFD-ACE[13]라는 수치해석 코드를 solver로

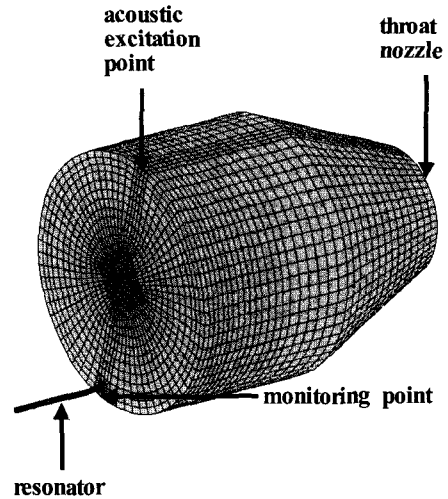


Fig. 3 Geometry and Computational Grids of the Chamber and Resonator

사용하여 계산을 수행하였다. 관련된 물리적 현상들의 상세한 모델링과 지배방정식들은 참고문헌[9-13]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다. 또한, 본 연구에서 채택한 수치해석 방법론과 이를 통해 얻은 결과들의 타당성은 선행 연구[10, 11]에서 실험 결과와의 비교를 통해 충분히 검증하였다.

2.2 연소실과 공명기

음향해석을 수행할 연소실의 기하학적 형상과 대표적인 격자계를 Fig. 3에 나타내었다. 연소기의 직경은 380 mm이고, 노즐목(nozzle throat) 직경은 190 mm, 분사기면으로부터 노즐 입구부까지의 거리는 250 mm, 노즐 수축 반각은 30° 이다. 공명기의 감쇠 특성을 파악하기 위해 단일의 공명기를 분사기 장착면(faceplate)에 장착하였으며, Figs. 1~2에 나타낸 모양의 공명기를 장착하여 비선형적 감쇠 특성을 조사하였다.

각 공명기의 사양은 다음과 같다. Fig. 1의 첫 번째 그림에 나타낸 바와 같은 모양의 Helmholtz 공명기에 대해서는, 우선 기존의 문헌[2]에 기술되어 있는 선형 설계식에 따라 공명기의 체적(8100 mm^3)과 오리피스 단면적(38.5 mm^2), 길이(40 mm)를 설정하였다. 즉, 선형해석

에 기초한 최적의 공명기 설계안이 비선형 압력 파에 대해 어떠한 감쇠 특성을 나타내는 지를 조사하였다. 1/4파장 공명기와 반파장 공명기의 경우, 최적의 공명기 길이는 각각 1/4파장과 1/2파장의 길이(각각 150 mm, 300 mm)에 해당하므로[2, 3], 이 길이의 공명기가 나타내는 음향 감쇠 특성을 계산하였다. 공명기의 직경은 7 mm로 설정하였다. 연소실 내부의 평균 유동 속도는 고려하지 않았다.

3. 계산 결과 및 논의

3.1 기본 연소실의 비선형 음향 거동

공명기의 비선형적 음향 감쇠 특성을 계산하기에 앞서 먼저, 공명기가 장착되지 않은 연소실에 넓은 범위의 진폭을 갖는 압력파를 가진하여 연소실의 기본 감쇠 특성을 파악하였다. 이를 통해, 비선형성이 나타나기 시작하는 진폭의 크기도 파악할 수 있다.

압력 진폭의 단위는 편의상, 데시벨(dB)로 표현하였으며, 관찰점에서 감지되는 압력의 크기로 나타내었다. 약 84 ~ 150 dB로 가진되었을 때의 기본 연소실의 감쇠인자비(damping factor ratio)를 Fig. 4에 나타내었다. 제 1 접선 방향 음향 모드를 관심 대상 모드로 선택하였다. 감쇠인자의 정의는 기존 문헌[2, 4]에 상세히 기술되어 있으며, 그 값의 크기는 특정 음향 모드의 음향 공진성(acoustic resonance)의 강약을 나타낸다. 즉, 감쇠인자가 크다는 것은 음향파가 약하게 공진되어 있고 압력 진동의 감쇠 정도가 큼을 의미한다. 이는, 연소 불안정이 발생하여 압력 진동이 생길 때, 그 감쇠 정도가 커서 압력 진동이 약화됨을 의미한다. 본 계산에서, Fig. 4의 감쇠인자비는, 특정 진폭의 압력과 가진시 계산된 감쇠인자값을 선형 범위의 압력파(즉, 아주 작은 진폭의 압력파) 가진시 계산된 감쇠인자값으로 나누는 것으로 정의하였다. 선형 가진시의 감쇠인자값은 이전의 수치적 연구 결과(참고문헌[3]의 Fig. 6)로부터 취하였다. 이전 연구[3]에서 나타낸 바와 같이, 선형 가진시의 감쇠인자값은 파동

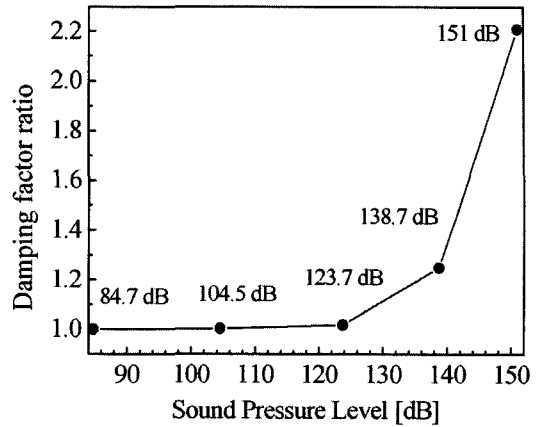


Fig. 4 Damping Factor Ratio of 1T Mode as a Function of Sound Pressure Level in a Combustion Chamber without a Resonator

방정식(wave equation)의 풀이를 통해 구할 수 있다.

Figure 4에 나타낸 바와 같이, 감쇠인자비는 압력 진폭이 증가함에 따라 변화없이 유지되다가 125 dB 이후에 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이를 통해, 압력파 진폭이 증가하면 어느 이상의 진폭에서 비선형성이 나타나며 큰 진폭의 압력파가 더 용이하게 감쇠됨을 예상할 수 있다. 한편, Fig. 4에 나타낸 결과로부터, 비선형적 특성을 파악하기 위해서는 125 dB 이상의 진폭을 갖는 압력파 가진이 필요함을 알 수 있다.

또한, 이 그림으로부터 선형 가진과 비선형 가진의 압력파 진폭 크기를 구분할 수 있다. 채택한 시스템에 따라 선형과 비선형 가진을 구분짓는 진폭의 크기가 다를 수 있는데, Fig. 4로부터 본 시스템은 약 120 dB가 그 경계임을 알 수 있다.

3.2 비선형 가진에 대한 공명기의 동조(tuning) 조건과 감쇠 특성

기존의 선형 이론 및 해석적 연구[3]를 통해 선형 범위내에서의 반파장 음향 공명기 설계식이 다음과 같이 제시되었다.

$$l_R = \frac{c_R}{2f_0} - \Delta l \quad (2)$$

여기서, l_R 은 공명기의 길이, c_R 은 공명기내 유체의 음속, Δl 은 질량보정인자 - 길이보정인자라고도 볼 수 있음 - 를 나타낸다. 이 식은, f_0 의 주파수를 갖는 연소장의 압력섭동이 공명기내로 입사될 때, 입사파동을 공명기내에서의 반사파동에 의해 최대로 상쇄시키기 위한 최적의 공명기 길이를 나타내는 식이다. 위 식은 선형이론을 통해 유도된 식이므로 비선형 압력파에 대해서도 그대로 적용이 될 수 있는 지, 아니면 수정되어야 하는 지를 조사하기 위해 공명기 길이 변화에 따른 감쇠 인자비를 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 선형 해석 결과는 이전의 연구 [3] 결과로부터 취하였다. 선형 및 비선형 가진시의 결과로부터, 전반적인 감쇠 특성은 공명기 길이에 따라 변함이 없이 유지되며, 최적의 공명기 길이도 약 300 mm 내외로 변함없음을 알 수 있다. 즉, 압력 진동의 진폭과 무관하게 위 식 (2)의 반파장 공명기 동조식을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 채택한 해석 방법을 적용하여 90 dB와 150 dB로 가진시의 감쇠인자와 감쇠인자

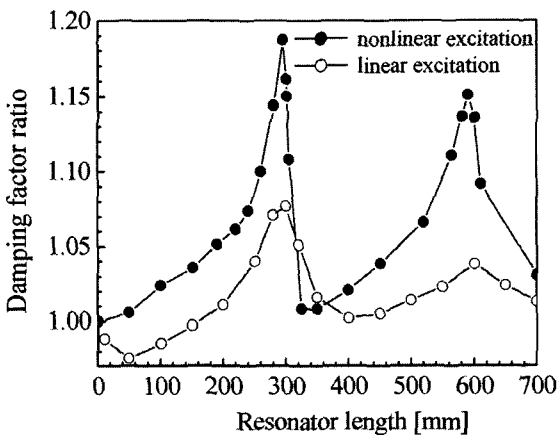
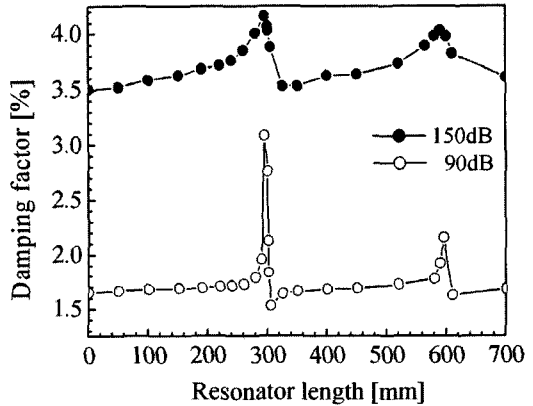


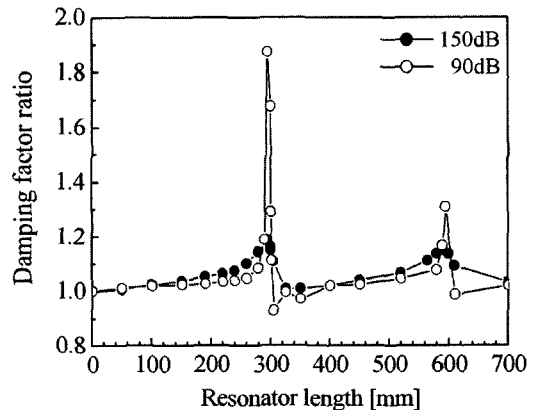
Fig. 5 Damping Factor Ratios Calculated in Cases of Linear and Nonlinear Excitations as a Function of Sound Pressure Level in a Combustion Chamber with a Single Half-Wave Resonator

비를 서로 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 앞의 Fig. 4에 나타낸 결과로부터 예측할 수 있듯이 높은 진폭으로 가진시 상대적으로 감쇠인자가 크게 나타났으나, 최적의 공명기 길이는 진폭에 무관하게 유지되었다.

감쇠인자비로 표현된 Fig. 6b로부터는, 진폭이 작은 크든 감쇠인자비 거동은 유사하지만 최적 공명기 길이 부근에서의 감쇠인자비 변화율은 서로 다름을 관찰할 수 있다. 즉, 선형 가진(90 dB로 가진)의 경우에는 최적 공명기 길이 부근



(a)



(b)

Fig. 6 Damping Factors Calculated in Cases of Linear and Nonlinear Excitations as a Function of Resonator Length in a Combustion Chamber with a Single Half-Wave Resonator

에서 감쇠인자가 급격히 증가하여 90 %까지 감쇠인자가 증가하였으나, 비선형 가진(150 dB로 가진)의 경우에는 최적 공명기 길이 부근에서 감쇠인자가 완만히 증감하였고, 감쇠인자값이 불과 20 % 정도 상승하는 데 그쳤다. 이러한 계산 결과는, 큰 진폭의 압력과 가진의 경우에는 기본적으로 감쇠 효과가 크게 나타나기 때문에 감쇠인자가 큰 것이며, 음향 공명기의 음향학적 감쇠 기능은 선형 압력파에 대해서보다 상대적으로 약하게 발휘됨을 의미한다. 즉, Fig. 4에서 보인 바와 같이 큰 진폭의 압력과 가진시 기본 연소실에서 큰 감쇠 효과가 나타나기 때문에 감쇠인자가 커지는 것이며, 오히려 음향 공명기의 동조(tuning)를 통해 추가로 얻을 수 있는 감쇠 효과는 기껏해야 20% 정도에 불과함을 알 수 있다.

3.3 각 공명기의 비선형 음향 감쇠 특성 비교

기존에 많이 사용되는 공명기인 Helmholtz 공명기, 1/4파장 공명기와 본 연구에서 주로 다룬 반파장 공명기의 비선형적 음향 감쇠 특성을 비교하였다. 앞의 두 공명기의 비선형적 효과에 대한 기존의 연구[2]에 따르면, Helmholtz 공명기는 비선형적 효과가 뚜렷이 나타나 감쇠 효과가 진폭에 따라 증가하며, 이에 반해 1/4파장 공명기는 비

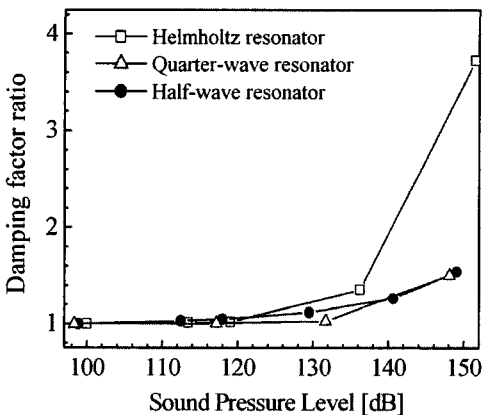


Fig. 7 Damping Factor Ratios as a Function of Sound Pressure Level in a Combustion Chamber with Various Resonators

선형적 효과가 상대적으로 미약하게 나타난다고 보고되었다. 본 연구에서는, 각 공명기가 최적으로 동조된 조건에서 압력 진동의 진폭에 따라 감쇠인자를 계산하여 각 공명기의 비선형 감쇠 효능을 비교하였다. 세 가지 공명기에 대한 계산 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Helmholtz 공명기의 경우 압력 진동 진폭의 증가에 따라 120 dB 이후부터 감쇠인자비가 비선형적으로 증가하였으나, 1/4파장 공명기와 반파장 공명기는 130 dB 이후에 비로소 약간의 감쇠인자비 증가를 보였다. Helmholtz 공명기와 1/4파장 공명기의 비선형 특성은 기존 문헌[2]의 결과와 유사함을 알 수 있었다. 한편, 반파장 공명기는 1/4파장 공명기와 유사한 비선형 특성을 가짐을 알 수 있다. 이를 통해, 반파장 공명기는 기하학적 형태와 음향 감쇠 원리가 1/4파장 공명기와 유사할 뿐만 아니라[2, 15], 음향 감쇠 특성도 유사함을 본 계산을 통해서 확인할 수 있었다.

4. 결 론

연소 안정화를 위해 연소기에 장착되는 음향 공명기의 비선형 음향 감쇠 특성을 수치해석적으로 조사하였다. 기존의 연구에서는 주로 선형 음향 이론에 바탕을 둔 선형 음향해석과 선형 음향실험을 통해 여러 공명기의 선형 감쇠 특성과 최적 동조 조건을 보고하였다. 본 연구에서는, 연소기에서 야기될 수 있는 큰 진폭의 압력 진동에 대해 이를 감쇠할 수 있는 공명기의 기능을 파악하고자 비선형 수치해석을 수행하였다. 음향 공명기중, 최근 공명기로서의 기능을 할 수 있다고 보고된 기체-액체형 동축 분사기를 반파장 공명기라 칭하고, 이 공명기의 음향감쇠 효과를 음향학적인 측면에서 분석하였다.

본 수치해석을 통해, 기본적으로 비선형 압력 가진에 대해서 기본 연소실(공명기가 장착되지 않은 연소실)은 진폭에 따라 감쇠 효과가 증가하는 특성을 보였다. 또한, 선형 이론에 기초하여 유도된 반파장 공명기 설계식은 비선형 범위까지 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 최적의 감쇠 효과를 보이는 공명기의 동조 조건(즉, 최적의 공명기

길이)은 변함없음을 알았다. 그러나, 압력 진동의 진폭에 따라서 공명기가 발휘하는 음향학적 감쇠 정도는 달라지는 특성을 보였으며, 큰 진폭의 가진에 대한 공명기에 의한 감쇠 효과 자체는 상대적으로 작게 나타났다. 반파장 공명기의 비선형성은 Helmholtz 공명기보다는 1/4파장 공명기의 비선형성과 유사함을 확인하였다.

본 연구 결과로부터, 반파장 공명기의 경우 넓은 범위의 압력 진동 진폭에 대해서 감쇠 효과를 발휘하므로, 비선형 가진을 고려하더라도 심대한 설계 변경은 없을 것으로 판단된다. 본 연구 결과는, 큰 압력 섭동이 존재할 수 있는 실제 로켓엔진 연소실에서 수동제어기구로서 1/2파장 공명기를 설계할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 한편, 큰 진폭의 압력과 진동시 우려되는 또다른 사항으로서, 큰 진폭의 압력 가진을 통해 공명기 내부의 물성치 변화가 유발되어 공명기 동조 조건이 변화할 가능성이 있다. 이에 대해서는 향후의 연구에서 고려될 것이다. 또한, 비선형 감쇠 특성의 파악을 위해 감쇠인자외에도 흡수계수나 감쇠율(decay rate) 등과 같은 인자들을 이용한 정량화도 고려될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-331-D00094).

참 고 문 헌

- Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds.), *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, NASA SP-194, 1972
- 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
- 박이선, 손채훈, "액체 로켓엔진 분사기의 음향감쇠 효과에 관한 수치적 연구", 한국항공우주학회지, 제33권, 제5호, 2005, pp.79-86
- Kim, H. and Sohn, C. H., "Experimental Study of the Role of Gas-Liquid Scheme Injector as an Acoustic Resonator in a Combustion Chamber," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 6, 2006, pp.896-904
- 김홍집, 김성구, "로켓연소실에서 음향공의 음향학적 감쇠에 대한 정량적 고찰", 대한기계학회논문집 B권, 제30권, 제1호, 2006, pp.32-40
- Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D., *Gas Dynamics*, Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1977
- 김성구, 김홍집, 손채훈, "로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발", 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp.110-116
- Kinsler, L. E., Frey, A. R. Coppens, A. B., and Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, Jone Wiley & Sons, Inc., 2000
- Poinsot, T. and Veynante D., *Theoretical and Numerical Combustion*, R. T. Edwards, Inc., Philadelphia, PA., 2001.
- Sohn, C. H. and Cho, H. C., "A CFD Study on Thermal-Acoustic Instability of Methane/Air Flames in Gas Turbine Combustor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 9, 2005, pp.1811-1820
- 손채훈, 박이선, "공기분사 기법을 이용한 충돌형 제트 분사기의 연소 안정성 평가에 관한 수치적 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제30권, 제11호, 2006, pp.1093-1100
- Cannon, S. M., Adumitroaie, V. and Smith, C. E., "3D LED Modeling of Combustion Dynamics in Lean Premixed Combustors,"

- ASME paper #2001-GT-0375, 2001
13. CFDRC, CFD-ACE-GUI Modules Manual, Vol. 1, Ver. 2003, Huntsville, AL., 2003
 14. 손채훈, 박이선, 김성구, "로켓엔진 연소기에서 공명기의 음향 동조에 미치는 유동 및 노즐 감쇠 효과에 관한 연구", 한국추진공학회지, 제10권, 제3호, 2006, pp.41-47
 15. 김홍집, 김성구, 한영민, 최환석, "비행용 가스발생기 모사배관 도출 및 연소불안정 제어를 위한 음향해석", 한국추진공학회지, 제9권, 제3호, 2005, pp.1-9