

음향공명기의 비선형 음향감쇠 특성에 관한 수치적 연구

손채훈* · 박이선**

Numerical Study of Nonlinear Acoustic Damping Induced by Acoustic Resonators in a Combustion Chamber

Chae Hoon Sohn* · I Sun Park**

ABSTRACT

Nonlinear acoustic damping of a half-wave acoustic resonator in a combustion chamber is investigated numerically. 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. Decay rate 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. 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

반과장 공명기가 장착된 연소실의 비선형 음향 감쇠를 알아보기 위하여 비선형 음향해석을 수행하였다. 먼저 공명기가 없는 기본 연소실에 80 dB에서 150 dB의 넓은 범위의 음향파를 가진하여 음향장을 분석하였다. 제 1 접선방향 음향 모드의 감쇠율은 가진되는 음향파의 크기에 따라 비선형적으로 증가하였고, 125 dB 이상부터 비선형성이 나타나기 시작했다. 다음으로 반과장 공명기의 감쇠 효과를 조사하였다. 선형해석으로부터 유도된 최적의 음향학적인 동조 조건이 비선형 음향해석에서도 여전히 유효함을 알 수 있었다. 큰 음향파의 섭동에 대한 감쇠는 효과적이지만, 선형 음향 가진에 비해서 음향학적인 감쇠기로써의 기능은 작아짐을 알 수 있었다.

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

* 세종대학교 기계항공우주공학부

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

과정중에 발생하는 열방출이, 연소실 내부에서 진동하며 전파하는 음향파(acoustic wave)와 상호작용하여 음향파의 진폭을 어느 한도 이상으로 증폭시키는 현상을 말한다.

기존에 이미 널리 알려진 대표적인 공명기로 Helmholtz 공명기와 1/4파장 공명기가 있다[1]. 한편, 최근의 연구 결과, 기체-액체형 분사기의 경우, 본질적인 기능은 추진제 분사이지만, 내부 체적의 대부분을 기체가 차지하므로 그 형태상 공명기(resonator)의 역할을 할 수 있음이 수치해석적/실험적 연구를 통해 보고되었다. 그러나, 이전 연구[2, 3]에서는, 연소실내 음향파(압력파)의 진폭이 아주 작다는 가정을 도입하여 공명기의 선험적인 감쇠기능을 파악하였다. 본 연구에서는, 이전 연구[2, 3]에서 수행된 공명기의 선험 감쇠 특성을 바탕으로 비선형 압력파에 대한 공명기의 감쇠특성을 수치해석적으로 조사하였다. 기존의 Helmholtz 공명기, 1/4파장 공명기와 더불어 주로 반파장 공명기의 비선형 감쇠특성을 고찰하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 비선형 해석

Navier-Stokes 방정식을 풀어 비선형 해석을 하였으며, 반파장 공명기의 경우, 공명기(분사기) 주위 벽면에는 벽조건을 부여하고, 입구부에는 압력파 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.

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 압력파의 진폭을 나타내며, δ 는 델타(delta) 함수, t 는 시간을 나타낸다.

예비 계산을 통해 격자 의존성을 확인하고, 공

간차분에는 2차 전방차분법(upwind scheme)을, 시간적분을 위해서는 Crank-Nicolson법을 사용하였다. 과도해석을 위한 시간 간격은 10 μ s로 설정하였다.

2.2 연소실과 공명기

음향해석을 수행할 연소실의 기하학적 형상과 대표적인 격자계를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기 직경과 노즐목 직경은 각각 380 mm, 190 mm이고, 분사기면으로부터 노즐 입구부까지의 거리는 250 mm, 노즐 수축 반각은 30°이다. 1/4파장 공명기와 반파장 공명기의 경우, 최적의 공명기 길이는 각각 1/4파장과 1/2파장의 길이에 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

먼저, 공명기가 장착되지 않은 연소실에 넓은 범위의 진폭을 갖는 압력파를 가진하여 연소실의 기본 감쇠 특성을 파악하였다.

압력 진폭의 단위는 편의상, 데시벨(dB)로 표현하였으며, 관찰점에서 감지되는 압력의 크기로 나타내었다. 약 84 ~ 150 dB로 가진되었을 때의 기본 연소실의 싸이클당 음향 감쇠율(acoustic

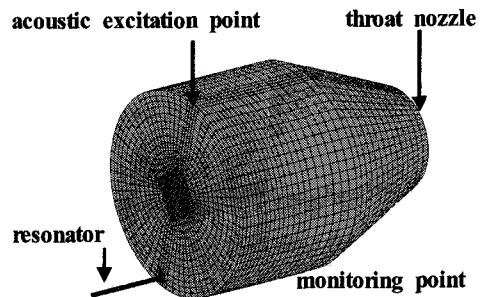


Fig. 1 Geometry and Computational Grids of the Chamber and Resonator

decay rate)를 Fig. 2에 나타내었다. 제 1 접선 방향 음향 모드($f_{1T} = 570$ Hz)를 관심 대상으로 선택하였다.

Figure 2를 보면, 감쇠율이 125 dB 이후에 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이를 통해, 압력과 진폭이 증가하면 어느 이상의 진폭에서 비선형성이 나타나며 큰 진폭의 압력파가 더 용이하게 감쇠됨을 예상할 수 있다.

3.2 비선형 가진에 대한 공명기의 동조(tuning)조건과 감쇠특성

기존의 선형 이론 및 해석적 연구[2]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. Figure. 3의 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.

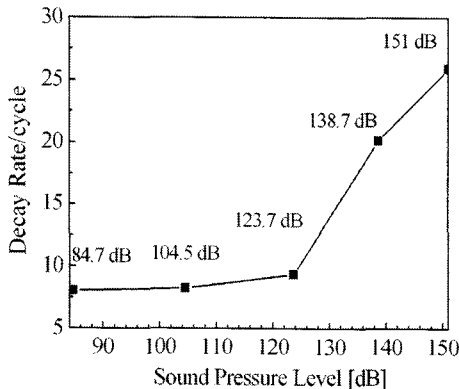


Fig. 2 Damping Factor Ratio of 1T Mode as a Function of Sound Pressure Level in a Combustion Chamber without a Resonator

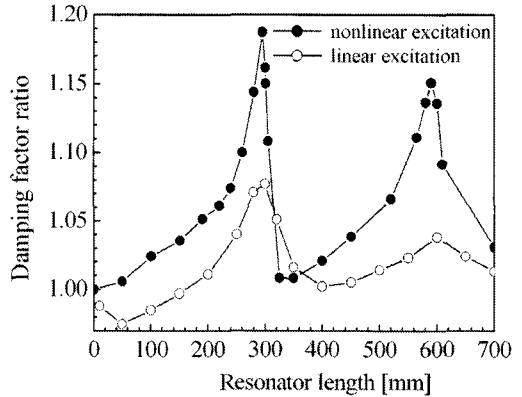


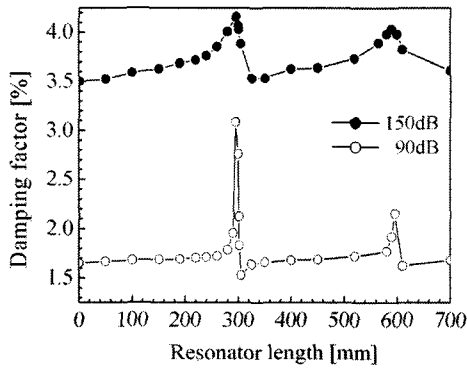
Fig. 3 Damping Factor Ratios Calculated in Cases of Linear and Nonlinear Excitations as a Function of Sound Pressure Level in a Combustion Chamber with a Single Half-Wave Resonator

감쇠인자비로 표현된 Fig. 4b로부터는, 진폭이 작은 큰 감쇠인자비 거동은 유사하지만 최적 공명기 길이 부근에서의 감쇠인자비 변화율은 서로 다름을 관찰할 수 있다. 이러한 계산 결과는, Fig. 2에서 보인 바와 같이 큰 진폭의 압력 파 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.

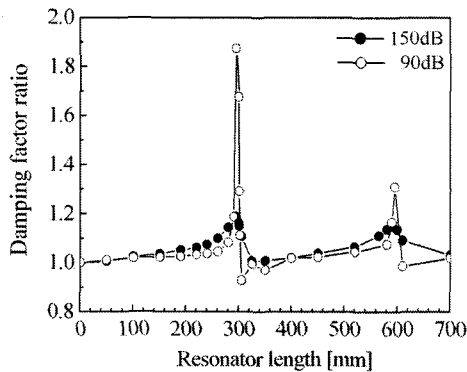
3.2 각 공명기의 비선형 음향 감쇠특성 비교

기존에 많이 사용되는 공명기인 Helmholtz 공명기, 1/4파장 공명기와 본 연구에서 주로 다룬 반파장 공명기의 비선형적 음향 감쇠 특성을 비교하여, Fig. 5에 나타내었다. Helmholtz 공명기와 1/4파장 공명기의 비선형 특성은 기존 문헌 [1]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[1], 음향 감쇠 특성도 유사함을 본 계산을 통해서 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 4 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

4. 결 론

기체-액체형 동축 분사기를 반파장 공명기라 칭하고, 음향감쇠 효과를 분석하였다. 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. 그러나, 압력 진동의 진폭에 따라서 공명기가 발휘하는 음향학적 감쇠 정도는 달라지는 특성을 보였으며, 큰 진폭의 가진에 대한 공명기에

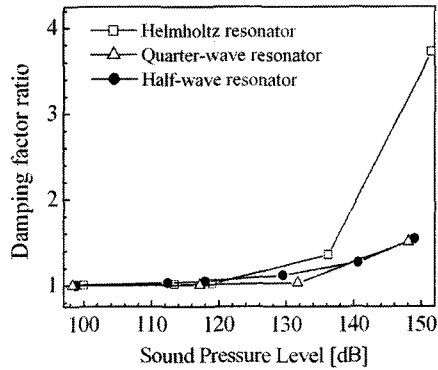


Fig. 5 Damping Factor Ratios as a Function of Sound Pressure Level in a Combustion Chamber with Various Resonators

의한 감쇠 효과 자체는 상대적으로 작게 나타났다. 반파장 공명기의 비선형성은 Helmholtz 공명기보다는 1/4파장 공명기의 비선형성과 유사함을 확인하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 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
2. 박이선, 손채훈, "액체 로켓엔진 분사기의 음향감쇠 효과에 관한 수치적 연구", 한국항공우주학회지, 제33권, 제5호, 2005, pp. 79-86
3. 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