

반파장 공명기를 장착한 모형연소실의 흡음특성에 대한 실험적 연구

손채훈* · 박주현**

An Experimental Study on Acoustic Absorption in a Model Chamber with a Half-Wave Resonator

Chae Hoon Sohn* · Ju Hyun Park**

ABSTRACT

Acoustic design parameters of a half-wave resonator are studied experimentally for acoustic stability in a model chamber. According to the standard acoustic-test procedures, acoustic-pressure signals are measured. Quantitative acoustic properties of damping factor and sound absorption coefficient are evaluated and thereby, the acoustic-damping capacity of the resonator is examined. The diameter and the number of a half-wave resonator, its distribution, and the diameter of an enclosure are selected as the design parameters for optimal tuning of the resonator. Acoustic-damping capacity of the resonator increases with its diameter. When the open-area ratio of the resonator exceeds the optimum value, over-damping appears, leading to the decrease in the peak absorption coefficient and the broadening of absorption bandwidth. As the resonator diameter increases, optimum open-area ratio decreases.

초 록

로켓엔진 연소기의 음향 안정성 향상을 위해, 반파장 공명기의 음향학적 설계인자를 실험적으로 연구하였다. 표준 음향시험 절차에 따라 음향파 응답 신호가 측정되었다. 감쇠인자와 흡음계수가 정량적으로 평가되었고, 이로부터 공명기의 음향감쇠 성능을 파악하였다. 공명기의 직경과 개수, 배치, 연소실의 직경이 설계 인자로 채택되었다. 공명기 직경이 증가함에 따라 음향감쇠 성능이 증가하였다. 연소실 단면에 대한 공명기의 면적비가 최적 값을 초과할 때 과감쇠가 발생하였고, 이로 인해 음향 감쇠 성능이 저하됨을 확인하였다. 공명기 직경이 증가할수록 작은 면적비에서 최적 흡음성능이 달성되었다.

Key Words: Half-wave Resonator(반파장 공명기), Absorption Coefficient(흡음률), Optimal Tuning(최적 동조), Over-Damping(과감쇠)

† 2008년 5월 15일 접수 ~ 2008년 6월 11일 심사완료

* 정회원, 세종대학교 기계항공우주공학부

** 학생회원, 세종대학교 대학원 기계공학과
연락처, E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

액체 로켓엔진 연소기의 개발과정에 있어서 매우 중요한 설계 인자 중 하나는 고주파 연소 불안정이다. 이는 연소실 내부 반응 유동장과 음향장과의 상호 작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며, 연소 과정으로부터 공급된 에너지가 연소실 내부 유동장의 압력파를 증폭시키는 현상이다. 이로 인해 연소실의 진동과 연소실 벽면으로의 과도한 열전달이 수반된다. 따라서 고주파 연소 불안정은 엔진과 발사체 개발에 있어서 큰 장애 요인으로 인식되어 왔다[1-3]. 고주파 연소 불안정 발생시 연소성능 저하 및 심한 경우 로켓엔진 자체의 파괴와 전체 발사체의 작동에 치명적인 손상을 유발한다.

연소 불안정을 제어하기 위한 방법으로 수동적 제어기구인 배플(baffle)과 음향 공명기(acoustic resonator)의 장착이 있다. 배플은 연소실내 공진 주파수/모드를 변화시켜 연소실 내부에서 진동하는 음향파의 작용을 방해하여 연소 불안정을 제어한다. 그러나, 배플은 연소실 내부 공간을 차지하므로 추력을 감소시키고, 횡방향 모드의 감쇠에 초점을 맞추고 있어 종방향 모드는 억제시킬 수 없다는 단점이 있다. 공명기는 압력파를 소산 또는 상쇄시켜 압력 섭동 에너지를 감쇠시킨다. 하지만, 연소 생성물의 정확한 물성치를 알 수 없어 정확한 주파수 동조가 어렵고 감쇠 주파수 대역이 좁은 것이 단점이며, 최적의 감쇠효과를 얻기 위하여 정교한 음향학적 동조(tuning)가 필요하다[4, 5]. 이를 위해 다양한 수치해석적/실험적 연구가 수행되어 왔다[4-10].

한편, 액체추진제 로켓엔진 연소기에는 추진제를 분사하기 위해 분사기가 장착된다[11]. 분사기는 분사되는 추진제의 형태에 따라 액체-액체형과 기체-액체형 분사기로 나눌 수 있다. 고추력, 고성능을 이루기 위해 가스발생기 등이 채용되면, Fig. 1에 나타낸 바와 같은 기체-액체형의 동축형 분사기가 연소기에 장착될 것이다[12]. 이러한 동축형 분사기를 통해 분사기 중심으로는 기체 추진제가, 분사기 출구 근처에서 액체 추진제가 공급된다. 분사기의 본질적인 기능은

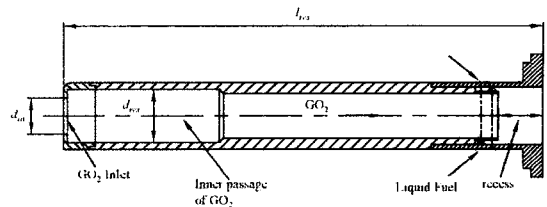


Fig. 1 Schematic diagram of a coaxial gas-liquid scheme injector

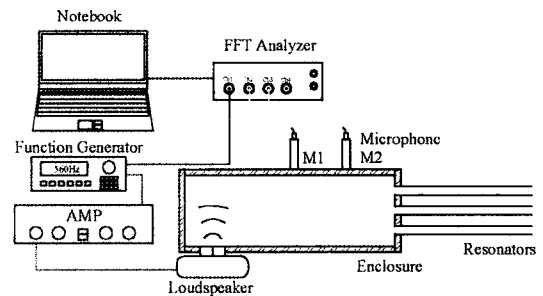


Fig. 2 Schematic diagram of acoustic-test apparatus ($D_{en} = 70 \sim 100$ mm, $L_{en} = 300 \sim 500$ mm)

분사이지만 내부 체적의 대부분을 기체가 차지하므로 형태상 반파장 공명기의 역할을 할 수 있으며[13], 따라서 적절한 설계를 통해 음향 감쇠 효과를 볼 수 있을 것이다. 그러나, 기존에 널리 사용되어온 공명기인 Helmholtz형 공명기 또는 1/4파장 공명기에 대한 자료[5]에 비해 반파장 공명기의 설계 자료는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 위 분사기의 반파장 공명기로서의 음향학적 역할에 초점을 맞추어, 반파장 공명기의 설계인자 변경에 따른 음향감쇠 성능을 정량화하고, 최적화 방향을 조사하였다. 실험적 방법을 채택하였고, 상온에서의 표준 음향시험 절차[14]에 따라 진행되었다.

2. 실험장치 구성 및 방법

Figure 2는 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도로서, 모형 연소실의 역할을 하는 원통형의 공동(enclosure)과 음향가진부(loudspeaker), 음향센서(microphone), FFT 분석기 등으로 구성되어 있다. 원통은, 공명기와 연소실 단면의 면적비

(open-area ration; 개구율)에 따른 음향 감쇠효과를 확인할 수 있도록 세 가지 크기로 제작하였다. 첫 번째 원통의 직경(D_{en})은 70 mm, 길이(L_{en})는 300 mm이고, 두 번째 원통은 직경 100 mm, 길이 300 mm, 세 번째 원통은 직경 150 mm, 길이 500 mm이다. 원통의 직경과 길이는 흡음률 측정 표준 규정[14]에 부합하도록 설정되었다. 아크릴로 제작된 원통의 끝단에 한 개 혹은 다수의 반파장 공명기를 설치하여 음향 흡음률(absorption coefficient)[14]을 측정한다. 흡음률은 입사되는 음향파의 음향 에너지가 공명기에 의해 흡수되는 비율로 정의된다. 반파장 공명기는 기체-액체형 분사기의 형상을 단순화하여 원통관으로 만들어졌으며, 양단이 open 되어있다. 공명기의 동조주파수(f_0)는 공명기의 길이(l_{res})를 조절하여 가변시킬 수 있다. 원통(enclosure)과 공명기는 아크릴로 제작되었고, 실험은 상온에서 진행하였다.

ISO 10534-2의 규정을 토대로 원통과 실험장치가 제작 및 구성되었다[14]. 함수발생기(Agilent 33220A)를 통해 랜덤노이즈 또는 정현파(sine wave)가 발생되고 음향앰프(InterM QD-4960)를 통해 증폭된 후, 스피커로 가진되었다. 원통(enclosure) 벽면에 장착된 음향센서를 통해 내부의 음향 신호를 계측하고 FFT분석을 수행한다. 이를 통해, 스피커 반대쪽에 장착된 공명기에 의한 음향파의 흡음률을 측정하였다.

반파장 공명기의 동조주파수는 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다[13].

$$f_0 = \frac{c_{res}}{2(l_{res} + \Delta l)} \quad (1)$$

여기서 c_{res} 는 공명기내의 음속이고 Δl 은 질량 또는 길이 보정인자(correction factor)이다. 실험시 온도는 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 로 설정되었다. 본 연구에서 공명기의 길이, l_{res} 는 300 mm로 설정되었다. 이 공명기 길이는, 원통(연소실)에서 진동하는 제 1 종방향(1L) 음향모드의 공진주파수에 공명기가 동조되도록 선택된 길이이다. 이전 연구[13]를 통해 공명기의 길이 효과는 상당히 밝혀

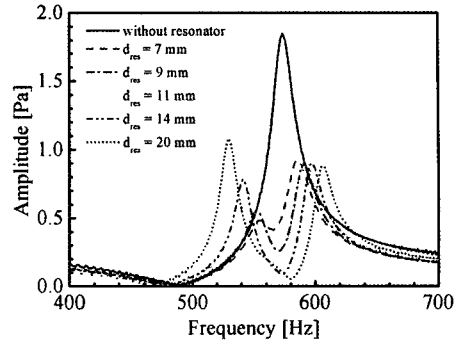


Fig. 3 Acoustic-pressure responses in the enclosure without and with a single half-wave resonator of various diameters($D_{en} = 100$ mm)

졌으므로, 본 연구에서는 설계인자로서 공명기 직경(d_{res}), 개수, 배치를 선택하였다.

3. 실험결과 및 논의

3.1 모형 연소실의 기본 음향응답

먼저 반파장 공명기가 장착되지 않은 $D_{en} = 100$ mm의 원통(즉, 모형 연소실)으로 실험을 수행하였다. Fig. 3은 음향 가진에 대한 원통 내부의 응답을 나타낸 것으로 원통의 길이방향 공진주파수는 $f_{1L} = 572$ Hz 인 것을 알 수 있다. 이후 공명기의 직경을 7 mm에서 20 mm까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 공명기를 장착하였을 때, 한 개의 공진된 음향신호의 peak이 2개로 분할(split)되었고[2, 6], 음향신호의 크기(진폭)가 크게 감소하였다. 공명기의 직경을 증가시킬수록 분할된 음향신호의 peak간 간격이 커지며, 공명기의 동조주파수가 이동하는 것을 확인할 수 있다.

공명기 장착으로 인한 음향모드 분할 현상은 흔히 관찰되어왔으며[2, 6], 이로 인해 감쇠인자(damping factor)로 음향감쇠 정도를 정량화하기가 곤란해진다. 이러한 어려움을 해결하기 위해, 본 연구에서는 흡음률(absorption coefficient), α 를 이용한 정량화를 시도하였다. 예를 들어, 공명기에 의한 흡음률이 100 %라는 것은, 해당 주

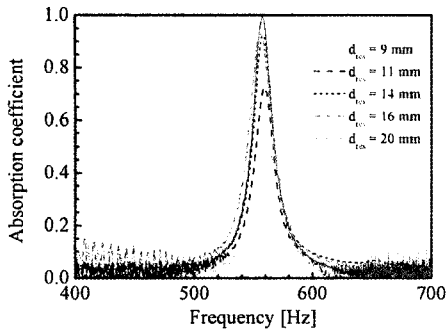


Fig. 4 Absorption coefficients as a function of frequency for a single resonator with various diameters ($D_{en} = 100$ mm)

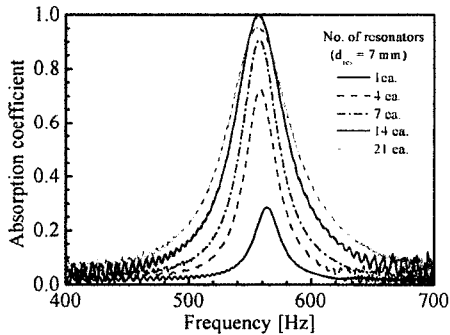


Fig. 5 Absorption coefficients of the resonators with $d_{res} = 7$ mm and $D_{en} = 100$ mm for the various numbers of resonators

파수의 음향파가 공명기에 의해 완전히 흡수되어 감쇠됨을 의미한다. 흡음률은 ISO 10534-2 규정에 따라 측정되었다[14].

3.2 공명기 설계에 따른 흡음성능

먼저, $D_{en} = 100$ mm인 원통에서 공명기의 직경과 개수, 배치 등의 조건을 바꿔가며 실험을 수행하였다. Fig. 4는 공명기 직경, d_{res} 를 7 mm에서 20 mm까지 변화시켜가며 구한 흡음률 그래프이다. 공명기의 직경을 증가시킬수록 흡음률이 증가하고 흡음대역이 넓어지며, 동주파수는 약간 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 흡음률이 클수록, 해당 주파수에 대한 음향감쇠 정도가 크

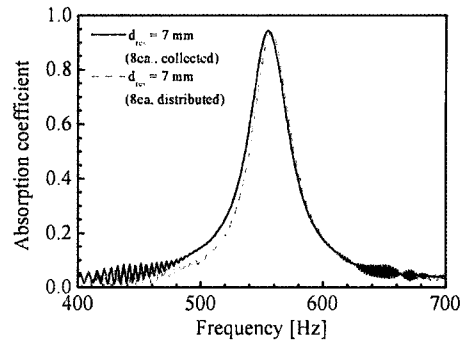


Fig. 6 Absorption coefficients of the resonators for several distributions with the identical open-area ratio

다고 판단할 수 있다. 그러나, 직경이 14 mm로부터 20 mm로 증가할 때에는, 흡음률의 증가가 미약하고, 흡음률은 약 94 %에 이른다. 이로부터 최적의 공명기 직경은 14~20 mm 사이에 있을 것으로 예상할 수 있다. 추가적인 실험을 통해, 직경 16 mm에서 흡음률이 100 %가 됨을 확인하였다. 따라서, 최적 직경은 16 mm이며, 이보다 직경이 큰 공명기의 경우 과감쇠(over-damping)[5]가 발생하여 16 mm 직경의 공명기보다 작은 흡음률을 나타낸다.

Figure 5는 동일한 직경의 원통에서 $d_{res} = 7$ mm인 공명기의 장착 개수에 따른 흡음성능을 나타낸 그래프이다. 길이가 동일한 공명기를 1개에서 21개까지 개수를 증가시켜가며 실험을 수행하였다. 이 결과로부터, 원통의 직경이 100 mm인 경우, 공명기의 개수가 14개일 때 최적의 흡음성능을 나타냄을 알 수 있다. 장착 개수가 14개를 초과하는 경우, 역시 과감쇠가 나타나 최고 흡음율이 감소하였으나, 흡음 대역폭은 증가하였다.

Figure 6에는, $D_{en} = 100$ mm인 원통의 단면적에 대해서 공명기가 차지하는 면적비(σ_A)를 고정시키고, 공명기의 배치를 달리하며 측정한 흡음률을 나타내었다. d_{res} 가 7 mm인 8개의 공명기를 선택하였고, 이때의 면적비, $\sigma_A = 0.04$ 이다. 그림으로부터, 다수의 공명기를 밀집시켜(collected) 배치하거나 균등하게 분산시켜 분포

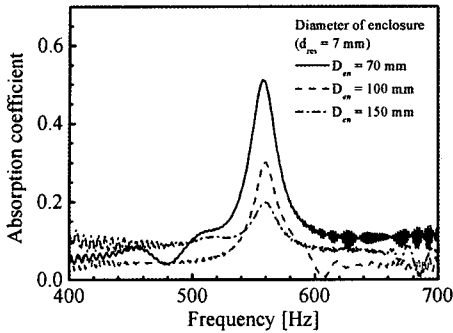


Fig. 7 Absorption coefficients as a function of frequency in the enclosures with $D_{en} = 70$, 100 and 150 mm ($d_{res} = 7$ mm)

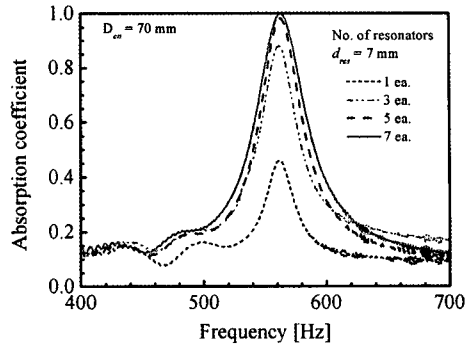


Fig. 8 Absorption coefficients of the resonators with $d_{res} = 7$ mm and $D_{en} = 70$ mm for the various numbers of resonators

Table 1. The numbers and the open-area ratios of half-wave resonators for optimal damping

Resonator Enclosure	Ø5		Ø7		Ø14		Ø16		Ø21	
	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)	Number (EA)	Area (mm ²)
Ø70 ($A_{en} = 3848$ mm ²)	17	333.8	7	269.4	1	154.0	-	-	-	-
		8.7 %		7.0 %		4.0 %				
Ø100 ($A_{en} = 7854$ mm ²)	31	608.7	14	538.8	-	-	1	201.1	-	-
		7.8 %		6.9 %				2.6 %		
Ø150 ($A_{en} = 17671$ mm ²)	-	-	33	1267.0	-	-	-	-	1	346.4
				7.2 %						2.0 %

시커거나(distributed) 흡음 성능의 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

3.3 면적비에 따른 흡음성능

원통과 공명기의 단면 면적비에 따른 흡음성능을 알아보기 위해 추가적으로 직경이 70 mm인 원통과 150 mm인 원통에서의 실험을 수행하였다. 각각의 원통은 ISO 10534-2 규격에 맞추어 제작되었다[14]. 동일한 직경의 반파장 공명기를 직경이 다른 원통에 장착하여 흡음성능을 측정하였을 때, 공명기가 차지하는 면적비에 따라 흡음성능이 변하는 현상을 실험적으로 관찰하였다. Fig. 7은, $d_{res} = 7$ mm의 반파장 공명기를, 직경

이 다른 원통에 장착하여 흡음성능을 측정한 그래프이다. $D_{en} = 70$ mm인 원통에서 $d_{res} = 7$ mm의 반파장 공명기 1개가 차지하는 면적비는 1%로서, 다른 직경의 원통에서보다 흡음성능이 높게 측정되었고, 다음으로 $D_{en} = 100$ mm, 150 mm의 순서로 나타났다. 이는 원통의 크기(직경)에 따라 흡음성능이 최적을 이루는 공명기의 직경과 개수가 달라짐을 의미한다. 따라서, 표준화(normalization)를 위해 원통의 단면적에 대한 공명기의 면적비(σ_A)로 최적 감쇠 조건을 나타내는 것이 필요하다.

Figure 8은 $D_{en} = 70$ mm의 원통에서 $d_{res} = 7$ mm인 공명기의 개수를 1개에서 7개까지 증가시

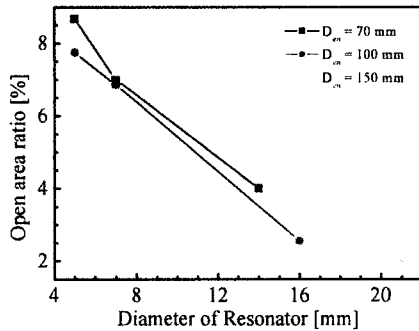


Fig. 9 Optimum open-area ratios of the resonators in the enclosures with various diameters

켜가며 측정된 흡음률을 나타낸 그래프이다. 직경 100 mm인 원통에서와 마찬가지로 공명기 개수가 증가할수록 흡음능력이 증가하고 7개에서 최적의 흡음능력을 나타내었다. 이때 공명기와 원통과의 면적비는 7%이다. 앞에서 100 mm 직경의 원통에서는 14개에서 최적의 흡음률을 나타내었는데, 이때의 면적비는 6.9%로 직경 70 mm인 원통에서와 유사한 단면 면적비에서 최적 감쇠를 이룸을 알 수 있다.

원통의 직경과 공명기의 직경을 변화시켜가면서 실험을 수행하여, 최적의 감쇠조건(즉, $\alpha = 100\%$)에 도달했을 때의 공명기 개수와 면적비를 구하여 Table 1에 요약하였다. 이로부터, 원통의 직경에 상관없이 공명기의 직경이 클수록 더 작은 면적비에서 최적 감쇠를 달성하는 것을 알 수 있다. 또한 원통의 크기가 커질수록 한 개로 최적을 이룰 수 있는 공명기의 면적비가 줄어들었다. Fig. 9는 각 원통에서 흡음능력을 최적화시킨 공명기의 면적비를 나타낸 그래프이다. 직경이 큰 공명기는 낮은 면적비에서 최적 감쇠를 달성함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 반파장 공명기의 설계 인자 변화에 따른 음향감쇠 성능의 변화와 감쇠 최적화에 대하여 실험적으로 연구하였다.

반파장 공명기의 개수와 직경이 증가할수록 흡음능력이 증가하였다. 그리고 특정 개수 또는 직경에서 최적 감쇠를 이룬 후 과감쇠가 발생하였다. 과감쇠가 발생하면 동조 주파수에서의 최고 흡음률은 감소하지만, 흡음 대역폭은 증가하는 특성을 나타내었다. 연소실의 직경과 공명기의 직경에 따라 흡음 성능이 달라지므로, 표준화를 위해 면적비(연소실의 단면적에 대한 공명기의 면적비)를 도입하여, 이를 이용하여 최적 감쇠조건을 나타내었다. 이를 통해 최적 감쇠를 보이는 면적비는 상수(constant)가 아니라 공명기 직경의 증가에 따라 감소함을 알았다. 즉, 직경이 다른 반파장 공명기가 동일한 면적비를 가졌을 때, 공명기 개수가 적고 직경이 클수록 흡음 성능이 높았다. 달리 말하면, 단일 공명기의 입구면적이 작을수록 최적 감쇠를 위해서는 더 큰 면적비를 가져야 함을 알 수 있었다.

본 연구결과는 공명기 설계를 위한 정량화된 기본 자료로서 사용될 것이며, 최적 감쇠를 달성하기 위한 설계 지침으로 활용될 수 있을 것이다. 이를 통해, 기체-액체형 분사기를 실제 로켓 엔진 연소기에 장착할 때 분사기의 음향학적 형상 설계 자료로 사용될 수 있을 것이다. 향후에는 반파장 공명기와 기존 공명기의 성능 비교와 최적 감쇠를 위한 상관관계 도출을 위한 연구가 수행될 것이다. 또한, 실제의 연소실 상황에서 처럼 공명기(즉, 분사기) 내부에 유동이 존재하는 경우, 최적 설계 조건의 변화가 초래될 수도 있는데, 이에 대한 연구도 수행될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

1. Harrje, D. J. and Reardon, F. H., Liquid Propellant Rocket Combustion Instability,

- NASA SP-194, 1972
2. Natanzon, M. S., *Combustion Instability* (Translated by Culick, F. E. C. in 1966), Mashinostroyeniye, Moscow, 1986
 3. Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D. and Candel, S.: "Combustion Dynamics and Instabilities Elementary Coupling and Driving Mechanisms," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, 2003, pp.722-734
 4. Keller, Jr., R. B. (ed.), *Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices*, SP-8113, NASA, 1974
 5. Yang, V. and Anderson, W. E. (ed.), *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, Vol. 169, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA, Washington DC, 1995, pp.377-399
 6. 손채훈, 김영목, "음향공이 장착된 로켓엔진 연소실의 음향장 해석", *한국항공우주학회지*, 제30권, 제4호, 2002, pp.28-37
 7. 김홍집, 김성구, "로켓연소실에서 음향공의 음향학적 감쇠에 대한 정량적 고찰", *대한기계학회논문집 B권*, 제30권, 제1호, 2006, pp. 32-40
 8. 차정필, 송재강, 고영성, 김홍집, "흡음 계수를 이용한 연소불안정 제어용 음향공의 감쇠 정량화", *한국항공우주학회지*, 제35권, 제5호, 2007, pp.438-445
 9. 김병선, 김동준, 차은선, 윤영빈, 한영민, 최환석, V. G. Bazarov, "액체로켓 스웰인젝터의 음향학적 감쇠기능", *한국항공우주학회지*, 제34권, 제8호, 2006, pp.79-86
 10. 손채훈, 박이선, "로켓엔진 연소기내 공명기에 의한 비선형 음향감쇠에 관한 수치해석적 연구", *한국추진공학회지*, 제11권, 제2호, 2007, pp.1-8
 11. *Liquid Rocket Engine Injectors*, SP-8089, NASA, 1976
 12. Huzel, D. K. and Huang, D. H., *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket*, Vol. 147, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA, Washington, DC, 1992, p.35
 13. Sohn, C. H., Park, I.-S., Kim, S.-K., and Kim, H. J., "Acoustic Tuning of Gas-Liquid Scheme Injectors for Acoustic Damping in a Combustion Chamber of a Liquid Rocket Engine," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 304, 2007, pp.793-810
 14. ISO 10534-2, *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes, Part 2: Transfer-function method*, 1998