

압력 섭동 장치 설계/제작 및 검증시험

김태완* · 황오식* · 고영성** · 정세용***

A Development of A Gas Mechanical Pulsator

Tae-Woan Kim* · Oh-Sik Hwang* · Young-Sung Ko** · Se-Yong Jung***

ABSTRACT

A gas mechanical pulsator is developed for the study of combustion instabilities in various combustors such as LRE combustor. First, it shows that the mass flow rates and the perturbation frequencies can be successively controlled by the inlet pressure and the rotating speed of a rotating disk with many holes. Second, the device is used as an acoustic amplification source as a substitute for the speaker in the previous acoustic tests and its results show almost the same resonant frequency and damping characteristics compared with the previous results. In conclusion, the result shows that it can be used as a substitute for a speaker in the studies of LRE combustion instabilities, which has a flow and no limitation of amplification, and a device for making a perturbation source in gas flow.

초 록

본 연구에서는 액체로켓 및 가스터빈 등의 각종 연소기의 연소불안정 특성 연구에 활용하기 위하여, 공급 기체에 인위적인 섭동을 유발할 수 있는 압력 섭동 장치의 설계/개발을 수행하였다. 이를 위하여 디스크 형태의 교란 발생 장치를 설계/제작하고, 디스크 회전속도를 제어하면서 압력 진폭, 주파수와 질량 유량을 측정하였다. 먼저 이 장치를 기존의 연소불안정 연구를 위한 모델 연소기의 스피커를 대신하여 장착한 후 음향공 감쇠 효과 특성 실험을 수행한 결과, 기존의 스피커를 이용한 실험 결과와 거의 유사함을 확인하였다. 또한 일정한 장치 상류 압력 하에서 회전 주파수의 변화는 공급 유량에 영향을 미치지 않고, 가압 압력에 따라 공급 유량을 조절할 수 있음을 확인하였다. 따라서 이 장치는 향후 가진 크기에 제한이 없으며 유동이 있는 상태에서의 연소불안정 특성을 위한 가진 장치와 기체 공기를 이용하는 각종 연소기에서의 기체 교란에 따른 연소 특성 연구에 활용할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Gas Mechanical Pulsator(기체압력섭동장치), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Gas Turbine(가스터빈), Combustion Instability(연소불안정), Frequency(주파수)

† 2009년 2월 4일 접수 ~ 2009년 6월 2일 심사완료

* 학생회원, 충남대학교 항공우주공학과

** 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

*** 정회원, (주)한화 대전공장 개발부
연락처, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

1. 서 론

연소불안정 현상은 1950년대에 주로 액체로켓

엔진에서부터 연구된 이래로 특정 엔진에 국한된 것이 아니라 거의 모든 개발 엔진에서 관측되어 왔고, 현재에도 이와 관련된 연구는 계속해서 수행되어지고 있다[1-5]. 각종 연소기에서 발생하는 연소불안정의 근본적인 원인은 연소실에서의 연소장과 음향장의 상호 커플링 때문이며, 이는 연소 과정에서 발생하는 열방출이 연소실 내부에서 진동하게 되고 이것이 연소실 내부의 음향모드와 상이 일치하게 되면서 음향과의 진폭을 어느 한도 이상으로 증폭시키기 때문에 일어나는 현상으로 알려져 있다[1]. 이러한 연소불안정 현상은 과도한 열전달을 유발시켜 분사기 및 연소실 벽면에 열적 손상 입히거나 극심한 구조물의 진동을 일으켜 최악의 경우 연소기 파괴를 초래할 수 있다[1-5]. 따라서 추진기관의 엔진이나 산업용 보일러 등의 개발에 있어 연소불안정 제어는 매우 중요한 핵심기술이며, 계속해서 진보하고 있는 추진기관 및 연소기 개발 분야에서 지속적인 연구가 필요한 과제이다.

연소불안정의 제어에는 현재 능동적 제어와 수동적 제어 방법이 소개되고 있고, 국내에서도 액체 로켓 엔진 개발 및 각종 연소기 개발에 따라 각종 연구가 활발히 진행 중에 있다[6-9]. 특히 액체로켓엔진에서의 연소불안정 현상의 파악 및 제어를 위한 음향공에 관한 연구와 액체분사기의 동특성을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있으나[6-9], 상대적으로 기체 추진제를 사용하는 연소기에서의 연소불안정 현상에 대한 연구는 미약한 실정이다[10].

기존의 국내 연소불안정 연구에서는 주로 스피커를 이용한 연소실의 가진 방법이 사용되고 있으나[7-8], 스피커를 이용할 경우 가진 크기의 한계와 실제 현상과 달리 기체 유동이 존재하지 않는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 스피커를 이용한 가진 방법의 단점을 보완할 수 있는 기체 압력 섭동 장치(Gas Mechanical Pulsator)를 설계/제작하여, 다양한 주파수와 가진 크기를 구현할 수 있는 가진 장치를 개발하는 것을 첫 번째 목표로 하였다. 또한 가스터빈이나 다단 연소(staged combustion)

액체로켓엔진 등과 같이 기체를 추진제로 사용하는 추진기관에서 기체 공급 과정에서의 교란으로 인하여 발생할 수 있는 연소 특성의 변화나 연소불안정 현상 등의 연구에 사용될 수 있는 기체 공급 교란 장치의 개발을 두 번째 목표로 하였다. 이를 위해서는 기체 공급의 섭동 주파수를 제어할 수 있어야 하며, 공급 섭동 주파수 하에서도 일정 질량 유량이 공급되어야 하기 때문에 질량 유량의 제어가 가능하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 연소불안정 제어를 위해 음향공 감쇠효과에 대한 연구와 교란된 기체에 따른 연소 특성 연구에 활용할 수 있도록 설계 요구 조건을 충족하는 기체 압력 섭동 장치를 설계/제작을 목표로 하였으며, 몇 가지 검증 실험을 통하여 활용 가능성 여부를 판단하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 기체 압력 섭동 장치 설계/제작

본 연구에서 개발하고자 하는 기체 압력 섭동 장치는 연소불안정 특성 연구 차원에서 사용할 수 있도록 음향장의 가진을 위한 기존의 스피커를 대체할 수 있는 환경을 조성해야 하며[7], 교란된 기체 공급에 따른 연소 특성 연구에 활용할 수 있도록 교란된 기체를 일정한 질량 유량으로 지속적으로 공급할 수 있어야 한다.

연소불안정 환경을 모사하기 위해서는 모델 연소실의 공진주파수 영역대로 연소실 내부를 가진시킬 수 있어야 한다. 모델 연소실의 공진주파수는 기하학적 형상에 따라 결정되는데 본 논문에서는 기존 실험과 비교를 위하여 기존 실험과 동일한 길이 324mm, 내경 100mm의 모델 연소실을 사용하였고, 이로 인하여 모델 연소실의 공진주파수가 1L, 2L mode에서 각각 531 Hz, 1059.5 Hz에서 형성되었다[7]. 따라서 기체 압력 섭동 장치의 가진 주파수 대역을 2L mode 까지 모사할 수 있도록 목표 사양을 설정하였고, 이를 기반으로 기체 압력 섭동 장치 설계가 이루어졌다.

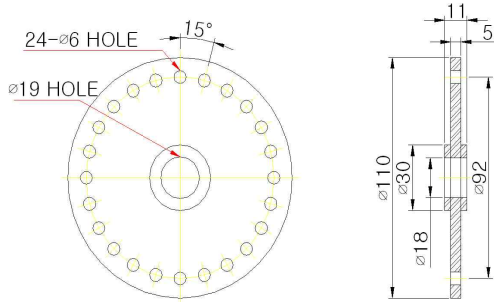


Fig. 1 Schematic of a rotating disk

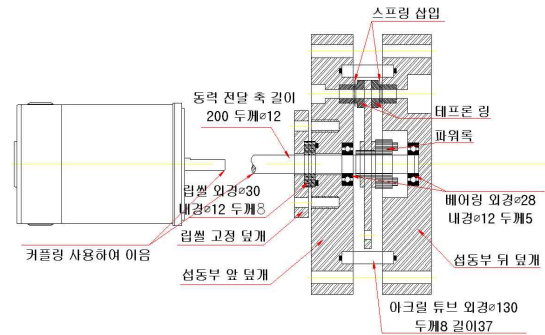


Fig. 2 Schematic of a mechanical pulsator

Table 1. Specification of a selected motor

모델명	S9D-300-90V
Voltage	90 [V]
Output	300 [Watt]
RPM	Max 3000
Torque	10.6 [kg · cm]

본 기체 압력 섀동 장치는 전기 모터를 이용하여 Fig. 1과 같은 회전 디스크(disk)에 존재하는 구멍(hole)의 개폐를 통하여 기체 공급의 단속을 반복하면서 섀동을 유발하게 되며, 따라서 구멍의 개수는 디스크의 회전수와 관련하여 섀동 주파수를 결정하는 중요한 인자가 된다.

Figure 1의 회전 디스크를 구동시키기 위해서 다음 Table 1과 같은 사양의 DC 모터(SPG, S9D-300-90V)를 선택하였고, 목표 주파수인 1200

Hz와 모터의 최대 RPM을 고려하여 디스크 구멍의 개수를 24개로 결정하였다.

또한 회전축 부분의 기밀을 위해 Fig. 2와 같이 립셀(lip seal)을 사용하였으며, 축 부분을 제외한 연결부의 기밀을 위해 O-ring을 사용하여 추가적으로 기밀을 유지할 수 있게 하였다.

2.2 압력 섀동 장치 구성

전체 압력 섀동 장치는 Fig. 3과 같이 가압부, 교란 장치(mechanical pulsator), 데이터 측정부, 데이터 처리부로 구성되어 있으며, 전체 실험 장치의 사진은 Fig. 4와 같다.

가압부는 공기 압축기와 공기 탱크 및 압력 조절기를 이용하여 일정 압력의 공기를 교란 장치에 공급하는 역할을 한다. 교란 장치는 가압부

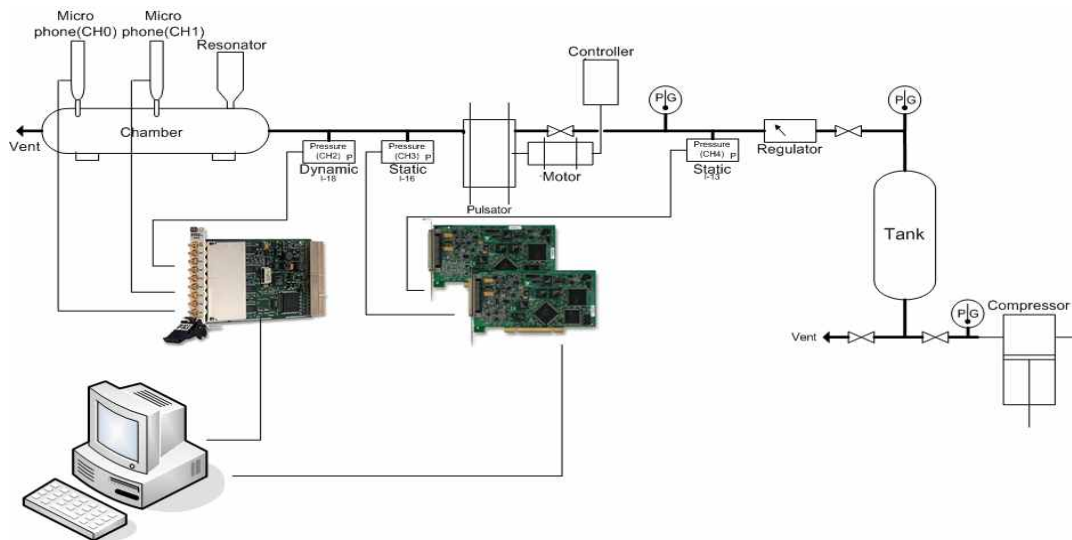


Fig. 3 Schematic of the experimental setup



Fig. 4 Photograph of a gas mechanical pulsator

로부터 공급받은 공기에 섭동을 유발시키게 되는데, 섭동 주파수 조절을 위하여 모터의 회전속도(RPM)를 제어할 수 있는 조절기(controller)를 장착하였다.

데이터 측정부에서는 모델 연소실에 장착된 음압, 동압/정압 센서를 이용하여, 모델 연소실에 교란 장치를 통해 섭동된 공기 공급(공급 튜브 내경 10.2mm) 시의 연소실 내의 유동 특성을 측정하였다. 데이터 처리부에서는 고속도 A/D board(NI-4472)와 LabVIEW를 이용한 후처리 프로그램을 이용하여 비교 분석 되었다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 기밀 확인 실험(Leak test)

본 기체 압력 섭동 장치는 가압 기체를 이용하는 실험 장비이므로, 특히 교란 장치 내부의 기밀 유지는 필수 조건이 된다. 즉, 만약 교란 장치 내에서 기체의 기밀이 유지 되지 않는다면, 기체 압력 섭동 장치에 유입되는 기체의 유량이 일정하지 않으며 기체의 섭동 압력 진폭에도 영향을 줄 수 있다.

따라서 본 실험에서는 기체 압력 섭동 장치의 기밀 여부를 확인하기 위해, 통상적으로 사용되는 bubble test를 수행하였다. 기밀 여부가 의심되는 배관 연결부와 회전축 부분 그리고 장치 조립 틈새에 비누 막을 도포하여, 0~5bar의 가압 상태에서 모든 부위에서 공기 방울이 형성되지 않음과 정압 센서를 통해 가압 압력이 유지됨을

확인하였다. 또한 디스크의 고속 회전 중에도 회전축에서 공기 방울이 형성되지 않음을 확인하여, 본 기체 압력 섭동 장치가 완벽하게 기밀을 유지하고 있음을 확인하였다.

3.2 모터 회전수에 따른 주파수 측정 결과

교란 장치를 가압부에 연결하기 전에 모터의 성능 파악을 위해, 기체 공급이 없는 상태에서 모터 조절기 입력 전압에 따른 주파수 특성 실험을 수행하였다. 모터의 성능은 입력 전압에 대해 출력되는 주파수 영역으로 대변할 수 있으므로, 가압부에 연결하기 전에 타코미터(e-station check master)를 이용하여 입력 전압에 대한 주파수를 측정하였다. 측정 결과 입력 전압과 주파수의 관계가 Fig. 5와 같이 선형적인 관계를 형성하고 있음을 확인하였다.

또한 사용된 모터의 최대 허용 입력 전압인 90V를 적용하였을 때 최대 1425 Hz의 주파수를 생성할 수 있음을 알 수 있었는데, 이는 모델 연소실의 2L 모드 공진주파수(1059 Hz)영역을 초과하는 영역 범위로 선택된 모터가 본 실험에서 구현하고자 하는 충분한 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있었다.

Figure 6은 기체 압력 섭동 장치의 성능을 예측하기 위하여 교란 장치에 가압부를 연결한 후, 공기의 가압 압력 변화에 따른 입력 전압과 주파수 특성 결과를 나타낸 것이다. 기체 가압 시에도 입력 전압과 주파수의 관계가 선형적인 특

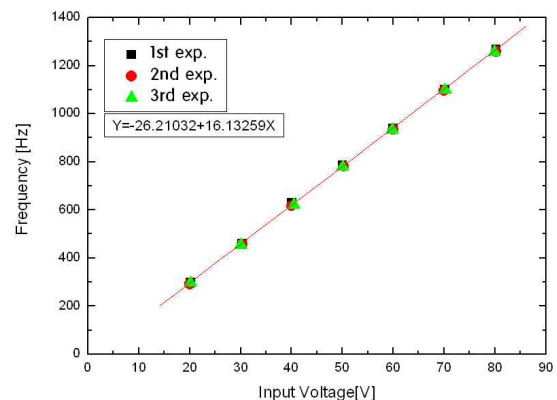


Fig. 5 Variation of frequency according to input voltage

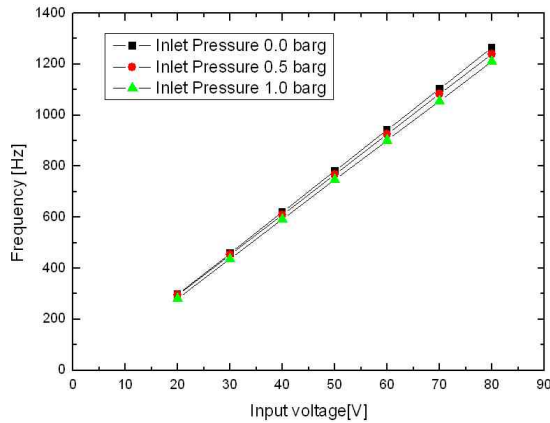


Fig. 6 Variation of frequency according to input Voltage with pressurization

성을 보여주고 있으나, 가압 압력을 증가시킬수록 기울기가 미소하게 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 립셀의 기밀유지 원리상 압력이 증가할수록 회전축을 조여 주는 힘이 증가하여 마찰력이 증가하기 때문이라 판단된다. 하지만 마찰력이 증가함에도 불구하고 주파수 영역의 감소는 미비하며, 본 장치의 목표 사양이었던 음향공감쇠특성 실험을 위해 충분한 주파수 영역대를 제공할 수 있음을 확인하였다.

3.3 주파수 및 가압 압력 변화에 따른 질량 유량 측정

본 기체 압력 섭동 장치는 향후 가스터빈과 같이 기체를 사용하는 연소기의 연소불안정 현상을 연구하기 위한 기본 장치로 활용될 수 있기 때문에, 섭동 주파수에 따른 질량 유량 변화와 질량 유량 제어 특성을 확인하고자 하였다.

만약 일정 공기 가압 시 주파수의 변화에 따라 일정한 유량이 공급되지 않는다면, 이는 질량 유량 제어가 불가능하다는 것으로 교란된 기체에 따른 연소 특성 연구에 활용할 수 없게 된다. 실험 결과 Fig. 7과 같이 일정한 압력으로 공기 공급 시 측정된 질량 유량은 평균 유량의 6% 이내의 오차를 보임으로써, 교란 장치의 회전 주파수에 거의 영향을 받지 않는 것을 확인하였다.

또한 교란 장치의 회전 주파수를 일정하게 유지한 상태에서 가압 압력 변화에 따른 질량 유량 변화 특성을 확인하여, 향후 기체 추진제를

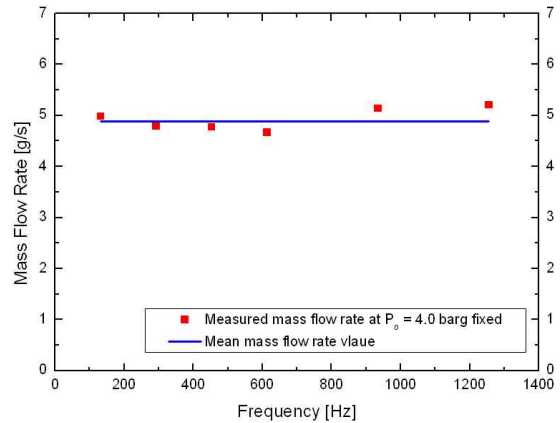


Fig. 7 Variation of mass flow according to frequency

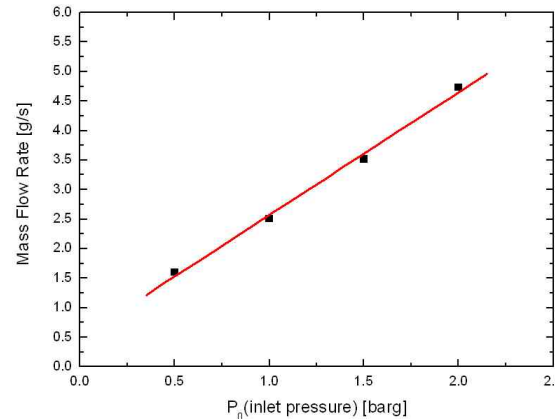


Fig. 8 Variation of mass flow according to pressurization with a fixed frequency

사용하는 연소기의 연소 특성 연구에 활용 가능성을 타진하였다. Fig. 8과 같이 모터의 회전주파수를 일정하게 한 상태에서 교란 장치 입구 압력에 따라 질량 유량의 관계가 선형적인 특성을 보였으며, 이를 통하여 교란 장치 입구 압력을 조절함으로써 유량 제어가 가능함을 알 수 있었다. 이상과 같은 유량 검증 실험을 통하여 본 기체 압력 섭동 장치를 이용하여, 요구 섭동 주파수와 질량 유량의 제어가 가능한 연소 특성에 연구에 활용이 가능함을 확인하였다.

3.4 음향 가진 성능 확인 실험 결과

연소불안정 연구에 기존에 사용되었던 스피커의 단점을 보완하는 음향 가진기(amplifier)로서

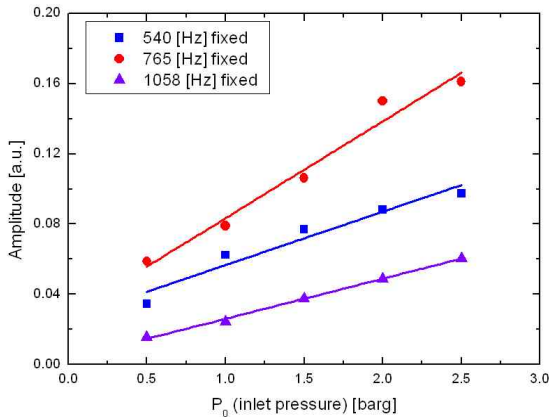


Fig. 9 Distribution of amplitude according to pressurization with fixed frequency

의 효과를 살펴보기 위하여, 교란 장치의 회전 주파수와 상류 가압 압력의 변화에 따른 가진 크기의 제어 가능성을 확인하는 실험을 수행하였다.

Fig. 9와 같이 가진 주파수가 일정할 경우 교란 장치의 입구 압력과 교란 장치 출구에 장착된 동압 센서를 이용하여 측정된 가진 진폭의 관계가 선형적인 특성을 보였으며, 이를 통하여 교란 장치 입구 압력을 조절하여 음향 가진 크기를 충분히 제어할 수 있음을 확인하였다. 따라서 연소불안정 제어를 위해 음향공의 감쇠 효과 특성 실험을 위한 최종 검증 실험으로서, 기존의 스피커를 이용한 음향 가진 방법 대신 본 기체 압력 섭동 장치를 이용한 음향공 특성 실험을 수행하여 과와 비교하였다.

Figure 10은 본 압력 섭동 장치를 음향 가진 소스로 활용하여 모델 연소실 내의 공진주파수를 측정할 결과로서, 음향공이 설치되지 않았을 때 모델 연소실내의 1L 모드 공진주파수가 약 540Hz에서 형성되는 것을 나타낸다. 이로부터 Fig. 11과 같은 기존의 스피커를 이용한 음향 실험에서 측정된 모델 연소실의 1L 모드 공진 주파수와 거의 동일함을 하였다[7].

또한 모델 연소실의 1L 모드에 동조(tuning)된 음향공을 장착하여 실험한 결과, 기존 실험과 같이 1L 모드 대역이 효과적으로 감쇠되는 효과와 함께 1L 모드의 양쪽으로 모드 분할이 일어남을

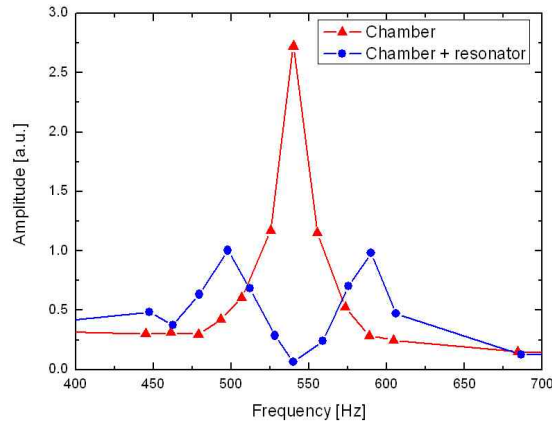


Fig. 10 Feature of acoustic attenuation by a mechanical pulsator

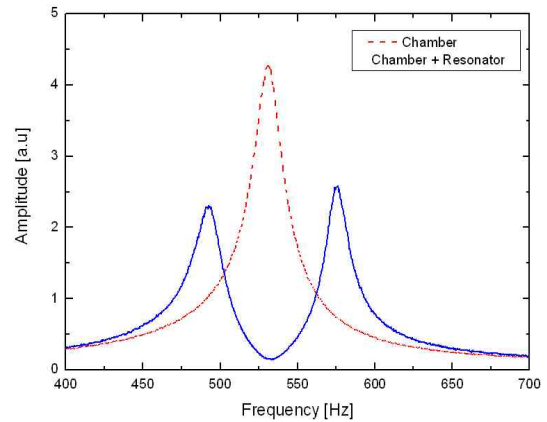


Fig. 11 Feature of acoustic attenuation by a speaker driver unit[7]

확인하였다. 따라서 본 기체 압력 섭동 장치를 이용하여 연소불안정 제어 연구를 위한 가진 장치로서의 활용 가능성을 확인하였으며, 기존의 스피커와 달리 가진 크기의 제한이 없으며 유동이 존재하는 상태에서 향후 비선형 특성 연구까지 수행할 수 있는 장치로서의 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 기체 압력 섭동 장치를 설계/제작하여 연소불안정 제어 방법 중 음향공 감쇠 특성에 대한 연구를 위해 기존의 스피커를 대신

하여 연소불안정 환경을 모사하는 것과, 교란된 기체의 연소 특성의 연구에 활용하기 위하여 기체의 질량 유량과 섭동 주파수 제어가 가능한 장치로 활용하고자 하였다. 이를 위한 몇 가지 검증시험을 통하여 활용 가능성에 대해 판단하고자 하였으며, 검증시험 결과 수행한 실험들은 모두 만족할만한 결과를 보여주었으며 그에 대한 내용은 다음과 같다.

가. 질량 유량 측정을 통하여 교란 장치 상류 압력이 일정한 경우 주파수의 변화는 교란 장치를 통과하는 공기의 질량 유량과는 관계가 없음을 보였고, 주파수를 고정시킨 상태에서 가압 압력을 증가시킬수록 질량 유량이 일정하게 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 기체 압력 섭동 장치의 회전 주파수와 입구 압력 제어를 통해 기체 질량 유량 및 섭동 주파수 제어가 가능함을 알 수 있었고, 따라서 교란된 기체 공급에 따른 연소 불안정 특성 파악 연구의 활용할 수 있음을 확인하였다.

나. 교란 장치의 회전 주파수를 고정시킨 상태에서 교란 장치 입구 압력에 대한 음향 가진 크기를 측정된 결과, 교란 장치 입구 압력이 증가함에 따라 모델 연소실내에서 측정된 가진 크기도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 기체 압력 섭동 장치를 이용한 음향공 응답 특성 실험을 통하여, 기존의 스피커를 이용한 음향 가진의 결과와 동일한 공진 주파수 특성 및 음향공의 감쇠 특성을 확인하였다. 따라서 본 기체 압력 섭동 장치가 연소불안정 제어 방법 중 하나인 음향공을 이용한 연소실의 감쇠 특성 연구에 활용이 가능함을 확인하였다. 이는 기존의 스피커를 이용한 음향 실험에서는 음파만 존재했던 것과는 달리, 모델 연소실 내에 음파와 동시에 유동장을 함께 형성시켜 실제 연소실 내부 환경에 좀 더 가깝게 모사할 수 있는 특성이 있다. 또한 기존의 스피커에서는 저주파 영역과 일정 영역 이상의 고주파에서 비선형성(왜곡현상)이 존재하는 것을 보완할 수 있을 것이며, 입구

압력의 증가를 통해 상대적으로 매우 큰 음향 가진까지 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로 지원받아 수행되었습니다 (2008-03216).

참 고 문 헌

1. Harrje, D. J. and Reardol, F. H., Liquid Propellant Rocket Instability, NASA SP-194 1972
2. Laudien, E., Pongratz, R., Pierro, R., and Preklik, D., in Liquid Rocket Engine Combustion Instability (V. Yang and W. E. Anderson, eds.), Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, 1995
3. V. Yang, Combustion instability in Gas turbine Engines, Vol 210, AIAA, 2005
4. F. Giuliani, P. Gajan, O. Diers, and M. Ledoux, "Influence of pulsed entries on a spary generated by an air-blast injection device - an experimental analysis on combustion instability processes in aeroengines", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, 2002, pp.91-98
5. F. Giuliani, "Gas Turbine Combustion - Technology, dimensioning, diagnostics" Graz, 2007
6. 김인태, 이광진, 김승환, 한영민, 설우석, "분사기 동특성 파악을 위한 Mechanical Pulsator 개발 및 검증 시험" 한국항공우주학회 추계학술대회논문집, 2004
7. 차정필, 고영성, "연소불안정 제어를 위한 음

- 항공의 감쇠에 대한 형상 효과”, 한국항공우주학회지, 제34권, 제6호, 2006, pp.59-66
8. 김철희, 손채훈, “연소실내 공명기 장착 위치에 따른 음향 감쇠 효과에 관한 실험적 연구”, 한국추진공학회지, 제12권, 제2호, 2008, pp.1-7
9. 김현성, 김병선, 김동선, 윤영빈, “연소불안정 저감을 위한 음향학적 감쇠 기능성 스월 인젝터”, 한국추진공학회 춘계학술대회, 2007, pp.7-12
10. 임지혁, 김동준, 윤영빈, V. Bazarov, "Self-Pulsation Characteristics of A Swirl Coaxial Injector With Various Injection and Geometric Conditions", 한국액체미립화학회지, 제10권 제3호, 2005, pp.29-37