

Rijke Tube를 이용한 열환경에서의 음향공 특성연구

김기우* · 김근철* · 김종일* · 고영성* · 김홍집** · 권오성***

Research on Damping Characteristic of Resonator in Flow with Thermal Gradient using the Rijke Tube

Kiwoo Kim* · Keuncheol Kim* · Joongil Kim* · Youngsung Ko* · Hongjip Kim** · Osung Kwon***

ABSTRACT

A horizontal Rijke tube with an electric heating part is a convenient system for studying the thermo acoustic instability. In this work, horizontal Rijke tube is manufactured to investigate and compare damping characteristics of Helmholtz resonator under unsteady heat release and room temperature conditions. We obtained basic data using the Helmholtz resonator which is used as passive damper under the thermo acoustic instabilities.

초 록

수평방향의 전기히터 방식의 Rijke tube는 구조와 원리가 비교적 간단하여 열 음향 불안정 연구에 대표적으로 사용되고 있다. 본 논문은 음향공 특성연구의 일환으로 현재까지 수행하였던 상온감쇠실험과 열적 구배를 갖는 열 음향 불안정 환경과의 실험을 비교하기 위하여 연속적인 실험을 위하여 장시간에도 안정적인 Rijke Tube 제작 및 구성 방법을 제시하였다. 또한 조사된 열 음향 불안정 환경에 음향공을 장착하여 감쇠특성을 확인하여 추후 연구에 필요한 기초자료를 확보하였다.

Key Words: Rijke Tube, Thermo Acoustic Instability(열 음향 불안정), Resonator(음향공)

1. 서 론

연소불안정 현상은 1930년대 고체로켓과 액체로켓에 관한 연구 중 각각의 추진기관에서 거의 동시에 발견 되었으며 대부분의 항공우주 추진

기관의 개발 단계에서 빈번히 관측되는 현상이다. 연소불안정의 근본적인 원인은 연소과정에서 발생하는 열 방출이 연소실 내부의 음향모드와 상이 일치하게 되어 음향파의 진폭을 일정 한도까지 증폭하기 때문이다. 이러한 현상은 단위 체적 당 에너지가 GW/m^3 단위의 에너지 밀도를 갖는 항공우주 추진기관의 연소실 내부에서 대표적으로 발생한다. 연소불안정 현상에 의한 과도한 열전달은 연소실 벽면 및 분사기 면의 열

* 충남대학교 항공우주공학과

** 충남대학교 기계공학과

*** 한국항공우주연구원 추진제어팀

연락처, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

적 손상을 초래하여 엔진의 전체적인 성능을 감소시키며 경우에 따라 엔진을 파손시키기도 한다[1-3]. 따라서 각종 엔진의 개발 과정에서 연소 불안정 현상의 해결은 연소실에 국한된 문제가 아닌 발사체 임무의 성패를 좌우하는 요소이므로, 로켓 엔진의 개발 과정에서 연소불안정 해소는 필수 요소로 인식되고 있다.

로켓엔진의 연소불안정 현상은 음향장과 연소장의 상호 연계성을 차단함으로써 제어가 가능하며, 대표적인 수동적 제어방법에는 음향공과 배플이 있다. 그중 음향공은 연소 효율 및 냉각 문제, 분사기면에 영향을 주지 않는 장점이 있지만 감쇠할 수 있는 음향모드의 주파수 대역이 좁아 정확한 동조가 이루어져야만 연소 안정성을 위해 필요한 감쇠 효과를 기대할 수 있다. 따라서 음향공의 적용에 앞서 정확한 음향공의 감쇠 특성을 파악하는 것이 필수적이지만 국내에서 진행된 연소불안정의 기본 특성 연구는 수치 해석과 음향실험을 중심으로 일부분이 수행되었으며, 온도 구배를 갖는 유동장에서 음향공 제어 특성 연구는 거의 전무한 실정이다[4-6].

본 연구에서는 온도 구배를 갖는 열적 환경을 모사하기 위하여 수평형 전기히터 방식의 Rijke tube를 설계/제작하여 열적 구배를 갖는 열환경의 특성을 제시하고, Rijke tube로부터 발생한 열/음향 불안정 환경 하에 음향공을 적용하여 열적 환경에서의 음향공 감쇠 특성연구를 수행하였다.

2. 연구 방법 및 실험장치

초기에 고안된 수직형태의 Rijke tube는 양 끝이 열려있는 tube 내부에 가열된 mesh를 장착하여 자연대류에 의한 공기의 유동을 생성하는 방법이다[3]. 따라서 열원부로 정량적인 에너지를 지속적으로 공급할 수 없고 공급되는 공기의 유량 또한 조절이 불가능하다. 본 연구에서는 기존 실험장치의 단점을 보완하기 위하여 Matveev[4]가 제시한 수평형의 Rijke tube를 기반으로 전기적인 장치 및 blower(KJB - 750, 최대 흡입압력 1300mmaq, 최대 흡입유량 $0.056\text{m}^3/\text{s}$)를 이용하

여, 공기 공급유량 및 열원부의 온도를 조절하였다. 실험장치의 개략도는 Fig 1과 같다.

열원부는 40mesh의 니크롬 mesh(Ni 80%, Cr 20%)를 사용하였고 열선으로 원활한 전력을 공급하기 위하여 Fig 2와 같이 구리를 가공하여 열선을 고정하였다. 또한 열선 고정장치와 SUS 재질의 tube 벽면 사이에 세라믹을 위치시켜 tube 벽면과 절연시켰다. Tube 내부에서 1L mode의 공진이 발생할 경우 tube 양 끝단의 압력은 대기압과 같으므로 진동의 node는 tube의 양 끝에 형성되고, tube내부의 acoustic velocity 분포는 Fig 3과 같이 압력의 진폭과 반대가 된다. Tube 중앙의 압력이 최저가 되었을 때 tube 양 끝단의 acoustic velocity는 모두 안쪽을 향하게 되고, tube 절반의 입구쪽 부분은 blower에 의한 평균 유속과 결합하여 전체 사이클 중 가장 큰 속도성분을 갖게 된다. 열전달률은 공기의 속도와 비례하므로, 이때의 열전달률 또한 최고가 된다. 반대의 사이클일 경우 이미 가열된 공기가 열선을 지나게 되며 열원과의 온도차가 최소가 되기 때문에 열전달률 또한 최소가 된다. 이 과정 중 열선을 지나는 공기는 평균 유동에 의해 이미 가열된 공기 이외의 저온공기를 일부 포함하게 되고 열선 후단부의 압력 증폭과 열적 구배를 갖는 공기 유동을 발생시킨다[7].

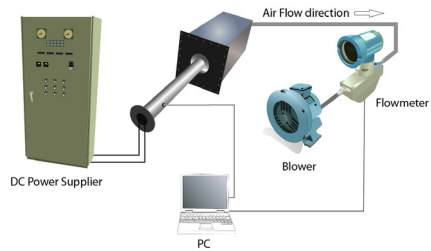


Fig 1. Schematic of horizontal Rijke tube

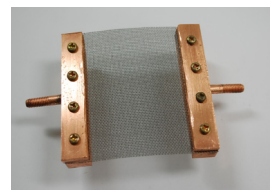


Fig 2. Heating part

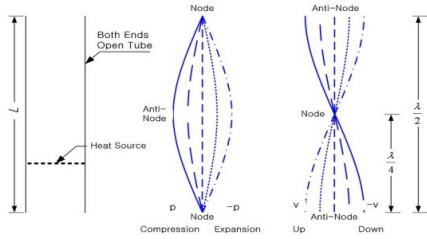


Fig 3. Pressure distribution and acoustic velocity in the tube

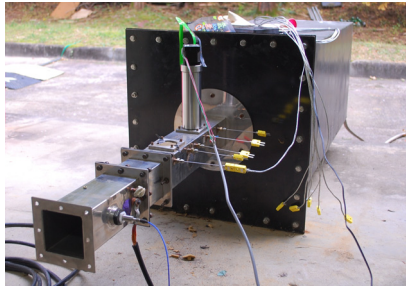


Fig 4. Horizontal Rijke tube system

이러한 원리에 의거하여 가장 강한 열 음향 불안정 현상은 최대의 압력진폭과 열적 구배를 갖는 환경에서 발생하며, 이는 tube 입구의 1/4 위치에 열선 장착을 통해 가능하다. 따라서 열선의 위치는 tube 입구로부터 17.5cm에 위치시켰다. 열선으로 전력을 공급하기 위하여 3상 380V로 공급되는 1차 교류 전압을 DC 0~50V, 0~800A로 변환하여 최대 40kW의 전력공급이 가능한 직류전력 공급 장치를 사용하였다.

Tube는 열선의 고정방법을 고려하여 8×8cm의 정사각형 단면으로 70cm의 길이로 제작하여 공진 발생 시 2nd mode의 주파수가 이전 상온실험의 공진주파수(530Hz)와 일치하도록 설정하였고, Fig. 4와 같이 tube 입구방향으로부터 56cm에 상온음향 실험에 사용된 음향공을 장착하여 감쇠특성을 확인하였다. 음향공의 부피는 피스톤 방식으로 임의로 부피 조절이 가능하고 본 연구에서는 직경 18mm, 길이 2mm의 오리피스를 사용하였다[6].

Tube에 공급되는 공기의 유량은 blower와 유량계 사이에 위치한 볼 밸브를 이용하여 조절하

였고, 공급 유량은 Coriolis type의 유량계 (Micromotion)로 측정하였다. 또한 tube와 유량계 사이에 위치한 450×450×1200mm 크기의 댐핑챔버는 tube와 blower 사이의 음향적인 상호 영향을 최소화하기 위하여 내부에 흡음재를 부착하였다.

Tube 내부의 열 음향 환경의 압력 및 온도를 측정하기 위하여 tube 입구방향의 10cm 지점에 동압센서(PCB 106B52, 480C02)와 36, 44, 56, 64cm에 K-type 열전대를 장착하였고, 측정된 데이터는 A/D board(NI 6254, GL820)를 이용하여 각각의 데이터를 저장하였고 Rijke tube 및 음향공의 작동은 각각의 형상과 공기의 온도에 영향을 받으므로 열선의 10cm 후단온도를 기준으로 약 20℃일 때 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 Rijke tube 예비실험

열원부의 위치를 tube 입구방향의 5/8위치에 장착하여 순수한 2L mode의 열 음향 불안정 환경을 모사하는 것이 가능하나 음향공이 적절하게 튜닝 되었을 경우의 감쇠 능력이 Rijke tube 에서 발생하는 압력진동의 에너지를 상회하여 공진의 발생이 억제된다. 이는 음향공의 동조 후에도 지속적인 가진원이 존재하는 상온실험과 불안정 발생 조건이 다르기 때문에 단일 조성된 2L mode의 직접적인 비교에 무리가 있음을 확인하였다. 따라서 열선의 위치를 tube 입구방향의 1/4위치에 장착하여 1L mode와 2L mode를 동시에 발생시켜 2L mod의 감쇠에 대한 연구를 수행하였다.

3.2 Rijke tube 제작 검증

열/음향 환경에서의 음향공 특성 파악에 앞서 장시간 실험에도 안정적이고 일정수준 이상의 재현성을 갖는 Rijke tube 실험장치 확보가 요구된다. 따라서 Rijke tube 내부에서 열/음향 발생에 관계하는 변수를 고려하여, 주어진 조건에서의 열/음향 불안정 환경 모사실험을 반복 수행하여 재현성을 확인하였다. Fig 5의 그래프는 음

항공 장착 이전의 공진 그래프로 240Hz의 1L mode와 480Hz의 2L mode가 결합하여 일그러진 사인과 형태를 보이는 반면 Fig 6는 2L mode가 감쇠되어 이전의 그래프와 대조된다. 이때의 유량은 1.7g/s이고 공급된 전력은 약 600W이다.

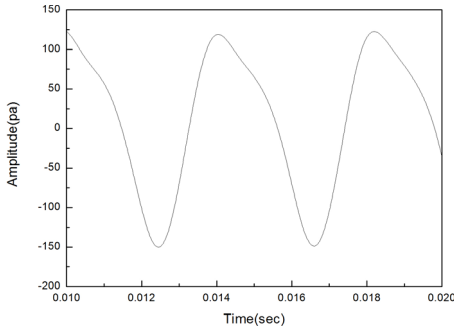


Fig 5. Pressure variation (Resonator off)

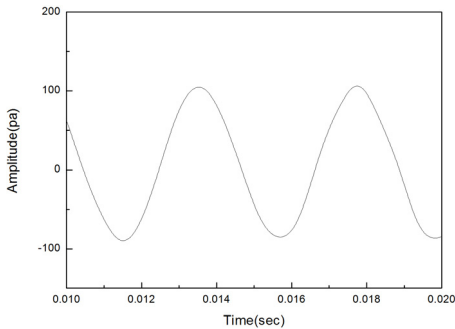


Fig 6. Pressure variation (Resonator on)

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 상온 음향 시험을 통한 음향공의 감쇠 특성 연구에 열/유동장을 추가할 수 있는 Rijke tube를 설계/제작하여, 열구배를 갖는 유동 환경 하에서의 음향공의 감쇠 특성을 살펴보기 위한 사전 기초 연구를 수행하였다. 설계/제작된 Rijke tube를 이용하여 구현하고자 하는 주파수대의 열구배를 갖는 공진 현상이 발생됨을 확인하였으며, 음향공을 이용하여 감쇠가 발생함을 예비적으로 확인하였다. 그러나 현재까

지 Rijke tube의 공진 재현성이 다소 떨어짐을 확인하였으며, 이를 보강하기 위한 연구가 진행 중이다. 향후 Rijke tube의 공진 재현성을 확보한 후 열유동을 갖는 유동장에서의 감쇠 특성과 상온 음향장에서의 감쇠 특성의 비교 연구가 수행될 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Harrje, D. J. and Reardon, F. H., "Liquid Propellant Rocket Instability," NASA SP-194, 1972
2. Natanzon, M. S., 1996, "Combustion Instability," (Natanzon, M. S. and Culick, F. E. C., eds).
3. Laudien, E., Pongratz, R., and Preclik, D., "Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities", in Liquid Rocket Engine Combustion Instability Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.169, AIAA, 1995, pp. 377~399.
4. 차정필, 고영성, 2006. 6. "연소불안정 제어를 위한 음향공의 감쇠에 대한 형상 효과", 한국항공우주학회지, 제34권 제6호, pp. 59-66
5. 차정필, 송재강, 고영성, 김홍집, 2007. 5. 1. "흡음계수를 이용한 연소불안정 제어용 음향공의 감쇠 정량화" 항공우주학회지, 제35권 제5호 pp. 438-445
6. 송재강, 김기우, 채병찬, 고영성, 김선진, "음향공의 기하학적 형상과 가진 음압에 따른 감쇠특성" 항공우주학회지, 제38권 제10호
7. Shekhar M Sarpotdar, N Ananthkrishnan and S D Sharma, "The Rijke tube - A Thermo acoustic Device", Resonance, January, 2003