

Rijke Tube를 이용한 열환경에서의 음향공 감쇠 특성연구

김근철* · 전준수* · 김중일* · 고영성* · 김홍집**

A Study on Damping Characteristic under the Thermo-acoustic Condition using the Rijke Tube

Geuncheol Kim* · Junsoo Jeon* · Joongil Kim* · Youngsung Ko* · Hongjip Kim**

ABSTRACT

A Rijke tube which has an electric heater and a flow controller was designed and thermo-acoustic instability was induced by the Rijke tube. The thermo-acoustic instability was damped by a resonator and the damping characteristics were investigated and compared to room temperature acoustic test. Results show that decay time of the thermo-acoustic condition was increased by about 40% compared to that of room temperature acoustic test.

초 록

본 연구에서는 열/음향 불안정성 환경 모사를 위하여 수평형의 Rijke tube를 설계/제작하였고, 이를 이용하여 구현하고자 하는 주파수대의 열구배를 갖는 공진현상이 발생됨을 확인하였다. Rijke tube를 이용해 열 음향 불안정 환경을 조성한 후, 음향공을 장착하여 얻어진 감쇠특성을 상온실험 자료와 비교/분석하여 열 음향 불안정 환경에서의 음향공 감쇠특성을 확인하였다. 열/유동 환경하에서의 감쇠 시간이 상온 환경에 비해 약 40% 증가함을 확인하였으며, 이로부터 음향공 설계시 열/유동 환경이 고려되어야 함을 확인하였다.

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

1. 서 론

연소 불안정 현상은 액체로켓 엔진의 개발과정에 있어서 반드시 해결해야만 하는 매우 중요한 인자이다. 이 현상은 1930년대 고체로켓과 액

체로켓 연구 중 각각의 추진기관에서 거의 동시에 발견되었는데 이러한 현상이 일어나게 되는 원인은 연소과정에서 생성된 열 방출이 연소실 내부의 고유주파수와 상이 일치하게 되어 음향파의 진폭이 일정 한도 이상까지 증폭되기 때문으로 알려져 있다. 연소 불안정 현상에는 추진제 공급 시스템과 연소실과의 상호작용에 의해 나타나는 저주파 연소 불안정 현상, 엔진 구조와 분사기 매니폴드 등의 기계적 진동에 의해 나타

* 충남대학교 항공우주공학과

** 충남대학교 기계공학과

* 충남대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

나는 중주파 연소 불안정 현상, 그리고 연소 과정 중 연소실 내부 유동장과 음향장과의 공진에 의해 나타나는 고주파 연소 불안정 현상이 있다. 이러한 연소불안정 현상은 일단 발생하게 되면 과도한 열전달로 인하여 연소실 벽면 및 분사기면의 열적 손상을 초래하므로 엔진의 성능 감소는 물론이고 엔진이 파괴되는 경우까지 발생할 수 있다[1-2].

본 연구에서는 열적 구배를 갖는 압력진동 환경에 음향공을 장착하여 얻어진 감쇠특성을 상온실험 자료와 비교/분석하여, 열/유동이 존재하는 불안정 환경에서의 음향공 감쇠특성을 확인하고자 하였다[3,4]. 이를 위하여 수평형 전기 히터 방식의 Rijke tube를 설계/제작하고 그로부터 발생한 열/유동 불안정 환경 하에 음향공을 장착하여, 상온 환경과 열적 환경에서의 음향공 감쇠 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 연구 방법 및 실험장치

2.1 실험장치 구성

선행 연구를 통해 구축된 Rijke tube를 이용하여, 연소 불안정 모사 실험을 수행하였다[5]. Fig. 1은 전체 실험장치 개략도를 나타낸 것으로서 Rijke tube 내에 일정한 유량 공급을 위하여 blower(KJB - 750, 최대 흡입압력 1300 mmAq, 최대 흡입유량 0.056 m³/s)를 사용하여 tube 입구의 공기를 출구 방향으로 흡입하는 방법으로 공기를 공급하였고, tube와 blower 사이에 볼밸브와 유량계(Coliolis type, Mircomotion)를 설치하여 공기의 평균유량을 제어하였다. 또한, 열원부에 안정적인 전원 공급을 하기위하여 DC 50V, 800A까지 공급하여 최대 40kW의 전력을 공급할 수 있는 전력 공급 장치를 사용하였다. 열원부는 40 mesh의 니크롬선 (Ni 80%, Cr 20%)를 사용하였고, 전력 손실을 막기 위해 세라믹을 사용하여 tube 벽면과 절연시켰다. Fig. 2와 같이 Rijke tube에는 내부의 동압 측정을 위한 동압 센서와 음향공 내부, 오리피스 주변, tube의 길이 방향을 따른 온도를 측정하기 위한

K-type 열전대를 장착하였고, 측정된 데이터 들은 A/D board (NI 6254), GL820을 이용하여 저장 및 분석하였다.

Rijke tube는 선행 연구에서 수행된 상온 음향 실험 장치에서 발생한 공진 주파수인 530 Hz의 1L mode 주파수와 유사하게 설정하기 위하여 80×80×700 mm로 선정하였으며, 열선의 위치를 튜브 입구로부터 1/4지점에 위치시켜 tube 길이에 따른 1L mode와 2L mode가 커플링 된 열 음향 불안정 환경을 모사하였다. 음향공은 40 mm 내경에 피스톤을 장착한 형태로 음향공의 부피 조절이 가능하도록 하였다[4]. 실험에 사용된 오리피스의 직경과 길이는 각각 18 mm, 2 mm이고, 시간에 따른 음향공의 감쇠 과정을 관찰하기 위하여 스텝모터를 장착하였다. 상온 실험과 열/음향 실험에서의 스텝 모터의 반응 시간이 서로 같아지도록 설정하였다. 음향공의 장착 위치는 tube 전체 길이의 3/4 위치에 장착하였다.

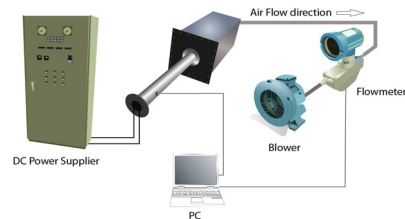


Fig. 1 Schematic of horizontal Rijke tube

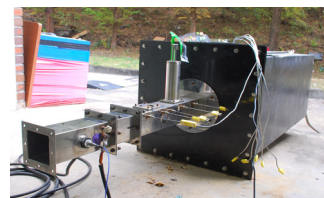


Fig. 2 Horizontal Rijke tube

2.2 음향공 감쇠특성 파악 방법

상온 환경과 열/음향 환경에서의 음향공 감쇠 특성을 비교하기 위하여, tube 길이, 공급전력, 공기유량, 열선의 위치를 일정하게 한 상태로 음향공의 감쇠특성을 확인하였다. 상온 실험의 공

진주파수는 약 530 Hz로 제작된 Rijke tube의 2L mode 주파수와 유사하기 때문에 열선의 위치를 1/4위치에 위치시켜 1L mode와 2L mode를 동시에 발생시켜 2L mode의 감쇠에 대한 연구를 수행하였다. 이 때 데이터 후처리 과정에서 적절한 범위의 band filter를 적용하여 2L mode의 주파수 감쇠 특성을 확인하였다.

감쇠시간 평가를 위해 동압신호를 처리하는 과정은 다음과 같다. 측정된 raw 데이터를 적절한 주파수 대역으로 필터링하여, Rijke tube의 2L mode의 주파수만을 수집하고 관심 주파수 대역 이외의 노이즈를 제거하였다. 음향공이 작동하기 이전의 최고점의 평균값(P_{max})를 계산하고, 스텝모터가 작동하기 시작한 시점을 t_0 로 설정한다. 국부 최고점(local peak)값을 시간에 따라 50개의 데이터를 평균한 값이 P_{max}/e 값 (여기서 e 는 자연상수)을 갖는 시점을 t_1 으로 설정한다. 마지막으로 음향공의 감쇠에 의하여 압력의 불안정 신호가 상쇄되는 감쇠시간을 $t_1 - t_0$ 로 계산한다.

반면 상온실험은 랜덤신호를 이용해 공진주파수를 확인하고, 이와 동일한 주파수로 스피커를 이용하여 모사 챔버를 가진하는 방식으로 Rijke tube와 기본조건을 같게 설정하였다[5]. 이후 동일한 방법으로 음향공의 부피를 조절하여 감쇠시간 평가를 위한 데이터를 획득하였다. 음향공의 부피는 스텝모터를 이용하여 제어되며, 일정 수준까지의 감쇠가 일어나는 시간을 상온실험과 비교하였다. 이 때 음향공은 관계식과 예비실험을 통해 각 환경에서 최적의 부피로 튜닝 하였고, 장착된 스텝모터의 이동거리와 작동시간은 동일하도록 구성하였다.

3. 실험결과

3.1 Rijke tube에 의한 연소불안정 구현 결과

이전 연구에서 수행한 열/유동 불안정 경계곡선은 tube의 길이가 1 m인 조건에서 수행하여 본 실험의 700 mm tube와 길이가 달라 직접적

인 비교는 불가능하지만, Fig. 3과 같이 공급 유량에 따른 연소 불안정 유발에 필요한 전력은 정성적으로 동일한 경향성을 보이고 있음을 확인하였다[5].

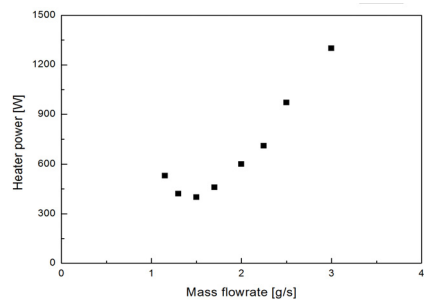
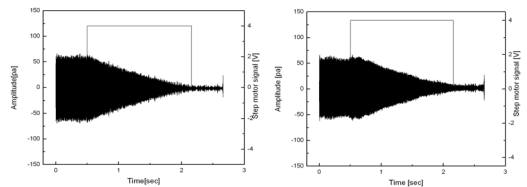


Fig. 3 Thermo-acoustic instability line in Rijke tube

3.2 음향공 감쇠 특성 비교

열/음향 환경과 상온환경에서의 음향공 감쇠 특성을 비교한 결과, Fig. 4와 같이 음향공의 감쇠 특성을 확인할 수 있었다. 실제 음향공은 연소불안정이 발생하는 연소실과 매우 빠르게 동조하여 감쇠 효과를 일으키지만, 스텝모터의 작동시간이 추가되어 1.7 ~ 1.9 초에 감쇠가 완료된다. 따라서 스텝모터의 작동에 대한 영향을 제거하는 과정이 필요하다.



(a) Room temperature (b) Thermo acoustic

Fig. 4 Comparison of the damping characteristic

Figure 5는 감쇠 종료 시점 부근의 음압을 나타낸 것으로서, 스텝모터의 작동이 완료된 이후에서 저주파 대역의 주기가 관찰되었다. 이를 low pass filter를 사용하여 진폭의 최고/최저 peak의 평균값이 그래프 마지막에 만나는 지점을 음향공의 최종 감쇠 시간 t_2 로 설정하였다. 또한 스텝모터의 작동시간을 포함한 전체 감쇠

시간이 t_2 - 스텝모터 작동시간과 같아지도록 데이터 전체 시간을 나눠주어 음향공의 작동시간에 대한 영향을 제거하였다. Fig. 6은 최종적으로 스텝모터 이동 시간이 제거된 그래프를 나타낸 것이다. 일반적인 감쇠 시간은 $P_{\max}/e(t/\tau)$ 에 해당하는 시간으로 나타내며, 상온 실험에서의 τ 는 69.25 ms, 열/음향 환경의 τ 는 97.77 ms로 계산되었다. 즉 열/음향 환경에서의 음향공에 의한 감쇠 시간은 상온 환경에 비해 약 40%가량 늦게 감쇠되었으며, 감쇠율($(P_{\max} - P_{\min})/P_{\max}$) 또한 94.97%에서 91.27%로 감소되었다.

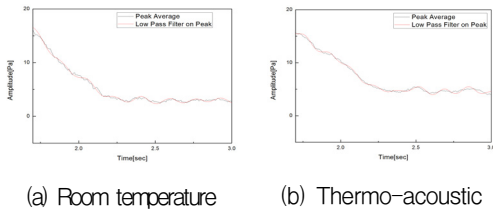


Fig. 5 Comparison of the low filter averaged data

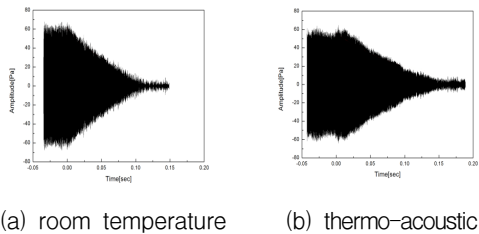


Fig. 6 Comparison of time-scaled damping time

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 상온 음향 시험을 통한 음향공의 감쇠 특성 연구에 열/유동 환경을 추가할 수 있는 Rijke tube를 설계/제작하여, 열구배를 갖는 유동 환경하에서의 음향공의 감쇠 특성을 살펴보았다. 설계/제작된 Rijke tube를 이용하여 구현하고자 하는 주파수대의 열구배를 갖는 공진 현상이 발생됨을 확인하였으며, 상온 환경과 열적 구배를 갖는 열/음향 환경에서 음향공의 감쇠특성을 확인하였다. 그리고 데이터

후처리 과정을 통하여 열/유동 환경이 추가된 조건에서의 음향공의 감쇠시간은 97.77 ms로 상온에서의 감쇠시간인 62.25 ms에 비하여 약 40%의 감쇠 지연이 확인되었고 감쇠율 또한 94.97%에서 91.27%로 다소 감소함을 확인하였다. 따라서 Rijke tube에서 모사된 환경보다 고온/고압인 실제 연소실 내부 환경에 적용을 위해서는, 보다 실제 환경에 근사한 모사실험 수행과 정량적인 음향공 감쇠 연구가 필요함을 확인하였다.

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. K.I. Matveev, F.E.C. Culick, "A study of the transition to instability in a Rijke tube with axial temperature gradient", Jet Propulsion Center, California Institute of Technology, MC 205-45 Pasadena, CA 91125, USA, Received 16 January 2002; accepted 10 July 2002
4. 차정필, 고영성, "연소불안정 제어를 위한 음향공의 감쇠에 대한 형상 효과", 한국항공우주학회지, 2006, 제34권 제6호, pp. 59-66
5. 김기우, 김근철, 김중일, 고영성, 김홍집, 권오성, "Rijke tube를 이용한 열환경에서의 음향공 특성 연구," 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, 2010, pp.610~613