

초음속 엔진 모델 연소기에서의 연소불안정 및 제어 시험 기법

최호진* · 황용석* · 진유인** · 박익수* · 윤현걸* · 강상훈*** · 이양지***

Method of Test for Combustion Instability and Control at Model Combustor of Supersonic Engine

Hojin Choi* · Yongseok Hwang* · Youin Jin** · Iksoo Park* · Hyungull Yoon* · Sanghun Kang*** · Yangji Lee***

ABSTRACT

The method of test for observing the combustion instability and controlling the instability actively by using secondary injection of fuel through flame stabilizer was studied by constructing model combustor of supersonic engine. The frequency of combustion instability was detected by measuring the pressure of combustor using pressure sensor and by optical sensing of flame intensity. Electro-magnetic valve was adopted as actuator for active control and the characteristics of modulated fuel was studied by measured pressure of valve outlet and scattering signal of spray at secondary fuel injection.

초 록

초음속 엔진으로부터 구성한 모델 연소기를 설계/제작하여 연소시험 중 발생하는 연소불안정을 측정하고 화염안정화 장치를 이용하여 2차 연료를 분사하는 방법으로 연소불안정을 능동제어하는 기법에 관해 연구하였다. 연소실 압력측정이나 화염의 광학적 계측을 통해 연소불안정 주파수를 검출하였고, 고속으로 운용할 수 있는 마그네틱 밸브를 구동기로 선정하여 밸브 후단 압력 및 2차 분사되는 연료의 분무의 광학적 계측을 통해 연료 변조 특성을 확인하였다.

Key Words: Supersonic engine(초음속 엔진), Model combustor(모형연소기), Combustion instability(연소 불안정), Active control(능동 제어), Secondary fuel injection(2차 연료분사)

1. 서 론

연소 불안정 현상은 연소기 내부에서 발생하는 열방출 과정과 음향학적 특성이 서로 복잡하게 상호작용하면서 발생하는 동적 불안정 현상으로 연소기 내부에 과도한 기계적 하중이나 진동하중 또는 국부적 열전달에 의한 열적 손상

* 국방과학연구소 1기술본부 5부

** 과학기술연합대학원

*** 한국항공우주연구원 첨단추진기관 그룹
연락처, E-mail: 5genie@hanmail.net

등의 문제를 발생시켜 연소기 또는 추진기관의 고장을 가져오기 때문에 오랜기간 추진기관을 연구하는 사람들의 주제가 되어오고 있다.[1][2] 많은 연구에도 불구하고 연소 불안정 메커니즘에 대한 이해는 여전히 불완전하며, 시험을 통한 메커니즘 이해를 위한 연구활동과 함께, 현장에서의 연소불안정 현상을 방지하거나 줄이기 위한 연구활동이 더욱 활발히 진행되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 대표적 초음속 추진기관의 모델 연소기를 구성하여, 여기에서 발생하는 연소 불안정 현상을 시험적으로 구현하고, 발생한 연소 불안정 현상을 완화시키기 위해 능동제어 기법을 적용하는 시험 기법에 관해 다루고자 한다. 본 논문에서는 전반적인 시험기법에 관해 살펴보고, 특히 구동시스템인 연료분사 시스템에 관해 집중적으로 다루고자 한다.

2. 연소시험 설비 및 장치 구성

2.1 시험 설비

시험설비는 한국항공우주연구원(KARI)의 가스 터빈 구성품 시험용 설비를 이용하였는데, 공기 공급은 압축기를 이용하여 최대 유량 1 kg/s, 최고 압력 4 bar 수준으로 연속 공급할 수 있으며, 압축기 후단에는 전기히터를 이용하는 열교환기 방식의 공기 가열기가 설치되어 있다. 공기 온도는 시험목적에 고려하여 450℃까지 사용가능하도록 설비를 구성하였다.

연료는 일반 항공유 (Jet-A1)를 사용하였으며, 연료펌프를 이용하여 70 bar 까지 가압하여 사용하였다. 연소가스는 후류덕트에 설치된 물 분사장치를 이용하여 특정온도 이하로 냉각된 후, 소음기를 거쳐 공기 중으로 배출된다.

시험 진행은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 미리 설정된 시간에 정해진 이벤트를 진행할 수 있도록 시험제어시스템을 구성하여 사용하였으며, 데이터 저장은 설비 모니터링 및 시험계측을 위한 온도 및 압력을 10 kHz 속도로 시험제어 시스템 및 연소불안정 제어기와 연동되어 저장되도록 구성하였다.

2.2 시험 장치

시험 장치는 초음속 엔진의 연소기를 모사하기 위하여 Fig.1과 같이 설계/제작하였는데, 연소기의 일부를 가로 120 mm, 세로 90 mm 직사각형 단면 형상으로 구현하였다.

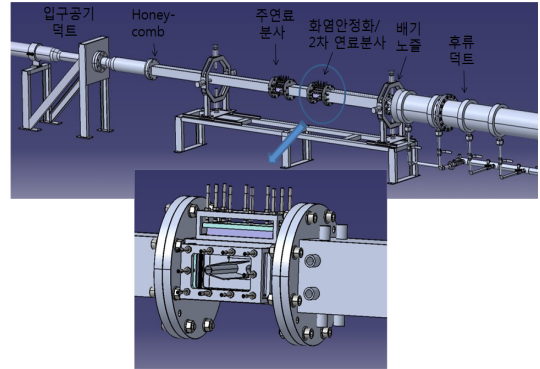


Fig. 1 Schematic of test facility and rig

입구공기 덕트와 시험장치 사이에는 초킹 오리피스를 설치하여 연소기 내부의 압력이 설비에 전달되는 것을 방지하면서, 동시에 음향학적 경계가 되도록 하였다. 이어서 공기유로 상에 하니콧을 설치하여 공기유동을 균일하게 만들어 주었으며, 램제트 엔진의 특징인 긴 공기흡입구 조건을 구현하였고, 초킹 오리피스 후단 2.8m 지점에 주 연료 분사장치를 설치하였다.

주 연료 분사장치는 교체가 가능하도록 설계하여 공기유동방향 대비 수직분사(Jet in cross injection)를 이용하는 방식과 스윙형 인젝터를 사용하는 방식을 모두 적용할 수 있도록 하였다.

화염안정화 장치부는 주 연료 분사장치와 화염안정화 장치의 거리가 0.6 m가 되는 위치에 설치하였는으며, 화염안정화 장치도 교환이 가능하도록 설계 하였다. 화염안정화 장치를 통하여 불안정 연소를 제어하기 위한 2차 연료 분사가 될 수 있도록 연료 공급부와 연료 분사부를 설치하였다.

주 연료 분사부와 화염안정화 장치부의 상부와 측면에는 각각 석영 (Fused silica) 재질의 가시창을 설치하여 분무 및 화염상태를 육안관찰 또는 광계측이 가능하도록 하였다.

화염안정화 장치부에 이어 1 m 길이의 후방 연소기 덕트가 설치되고, 마지막으로 소닉 노즐이 설치되어 전체 길이 4.8 m 길이의 모델 연소기가 구성된다. 후방 연소기 덕트와 소닉 노즐은 냉각을 위해 수냉 채널을 설치하였다.

3. 시험 기법 설계 및 확인

3.1 제어 기법 및 연소불안정 측정

연소불안정을 제어할 위해 기하학적 형상을 변경하는 수동제어방식은 현상에 대한 이해부족으로 많은 부분 시행착오에 의해 연구가 진행되고 이에 따라 많은 시간과 비용을 지불하게 되며, 특성상 특정영역에서만 효과를 볼 수 단점을 지니고 있다. 이에 넓은 영역에서 효과를 나타낼 수 있으며, 시스템의 설계를 변경하지 않고도 적용 가능한 능동제어를 이용하는 방법이 점차 활발하게 연구되고 있으며, 본 연구에서도 능동 제어 방식을 적용하고자 한다. 현재까지 가장 널리 사용되고 있고, 실제로 효과를 나타내고 있는 제어방식은 연소불안정에 의해 발생하는 압력파에 대해 적당한 위상지연을 두고 새로운 압력파를 발생시켜 두 압력파를 약화 또는 소멸시키는 시간지연 제어기법이다.[1-3]

능동제어를 위해서는 제어기, 센서, 구동장치의 3가지 부가장치가 필요한데[2], 본 연구에서는 연소불안정으로부터 발생하는 압력파를 측정하고, 측정신호로부터 제어기가 학습을 통하여 제어기 스스로 제어변수를 변화시키는 적응제어(Adaptive control) 방식을 채택하여 이를 구현하기 위한 제어기를 제작하였으며, 이 제어기로부터 발생하는 펄스폭변조(PWM) 신호로 구동되는 연료밸브를 이용하여 화염안정화장치 후면에 분사되는 2차 연료분사를 조절하여 화염에서 발생하는 열방출율을 조절하여 궁극적으로 연소불안정을 제어하는 방식을 적용하고자 한다.

제어를 위해서는 가장 먼저 연소불안정의 신속하고 정확한 측정이 필요한데, 가장 간단한 방법이 연소실 압력을 측정하는 것이다. 본 연구에서는 연소실 압력 외에 화염안정화장치부에 설

치된 가시창을 이용하여 광학적으로 연소불안정을 측정하는 방법을 동시에 적용하였다. 먼저 연소반응에서 발생하는 OH 라디칼의 파장만 주로 통과하는 305±5 nm의 광학필터를 사용하고 부족한 광량을 증폭할 수 있는 장치인 PMT(Photo Multiplier Tube : Hamamazu)를 사용하여 다음 Fig.2와 같은 결과를 얻었다. 화염에서의 OH 라디칼의 신호는 연소실 압력신호에 비해 1 msec 정도 앞서 정확히 진동하고 있는 것을 볼 수 있다.

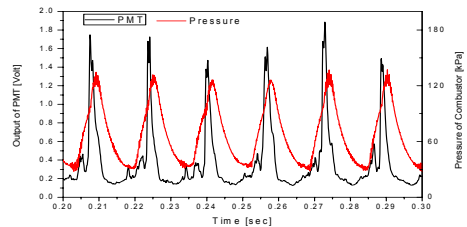


Fig. 2 Pressure and PMT signal of combustion test

두 신호를 FFT 분석하여보면 두 가지 방법이 모두 연소불안정 주파수를 정확히 나타내고 있음을 Fig.3 으로부터 확인할 수 있다. 다만, 기본 주파수에 대한 조화 진동수에 있어 진폭의 차이는 있으나, 그 주파수는 역시 완벽히 동일하다. 이로부터 연소불안정 주파수를 검출하기 위한 센서로는 연소실 압력이나 화염으로부터 얻어지는 광학센서 어느 것을 사용해도 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

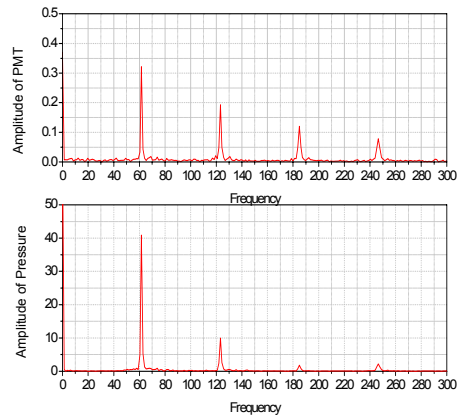


Fig. 3 FFT of pressure and PMT signal

3.2 연료분사 구동기 선정 및 특성

연소불안정 제어를 실제 구현함에 있어 구동기는 주어진 제어 신호로부터 주어진 압력장 또는 속도장에 영향을 주기 위해 압력이나 속도, 와류, 연료 또는 공기의 유량, 열방출 또는 이들의 조합에 변화를 주어야 하는데, 실제로 발생하는 연소불안정 주파수에 해당하는 빠른 응답을 보이면서도 넓은 영역에서 영향을 미칠 수 있는 큰 힘의 구동기를 물리적으로 구현하는 것은 쉬운 일이 아니다. 연소불안정 제어에 적용되는 구동기에는 스피커, 위치이동형 플랩이나 익형, 하나 또는 다수의 순방향/역방향 제트, 연료기화를 변경하기 위한 스윙발생기, 가열기 등이 적용된 사례들이 발표되고 있다.[3]

본 연구에서는 제어기에서 발생하는 펄스폭변조(PWM) 신호로부터 단속적으로 연료를 공급하여 궁극적으로 열방출율을 조절할 수 있는 마그네틱 밸브를 구동기로 선정하였다. 마그네틱 밸브는 구매 및 운용이 비교적 용이하며, 기존 연구를 통해 그 특성 파악 및 연료조절기로의 사용 가능성이 연구된 바 있다.[4]

연소시험을 통해서 연소불안정 주파수가 60 ~ 110 Hz 사이에 주요하게 발생함을 확인하였고, 이러한 주파수 대역에서 연료량 변조가 가능한 밸브를 검색하여 Parker 사의 Pulse 밸브 "9S1" 모델을 선정하였다.

밸브의 고속동작을 위해서 함께 판매되는 전용 구동드라이버 "IOTA One"과 시험장치를 간단히 하기 위하여 자체적으로 제작한 밸브구동드라이버를 이용하여 밸브 성능을 비교하였는데, 결과는 fig.4 와 같다. 시험에서 PWM 신호의 듀티율은 항상 50%로 고정하여 사용하였다.

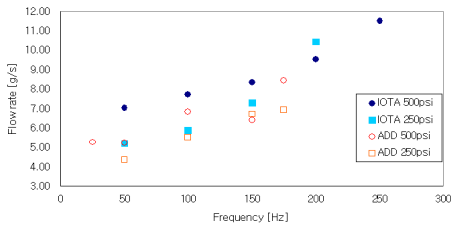


Fig. 4 Comparison of fuel modulation as valve driver

전용 드라이버(IOTA)를 사용한 경우 더 높은 구동 주파수까지 운용 가능할 뿐만 아니라 동일 압력과 주파수에서 더 많은 연료유량을 변조하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전용 드라이버의 경우, 초기에 밸브의 구동전압보다 매우 높은 전압을 순간적으로 인가하는 회로를 채택하여 개방명령에 따른 응답특성을 향상시킬 수 있었기 때문으로 판단된다. 또한 유량에 있어서도 개방신호에 따른 응답특성이 좋은 전용 드라이버를 사용하는 경우에 밸브가 개방되어 있는 시간이 자체제작 드라이버에 비해 상대적으로 길기 때문에 더 많은 유량을 공급하게 된다. 결과적으로 연소시험에는 밸브와 함께 구매한 전용드라이버를 사용하기로 결정하였다.

주어진 밸브 구동신호의 주파수를 밸브 응답이 얼마나 충실히 따르는지 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 밸브구동 PWM 신호대비 밸브출구 압력을 살펴보자. 구동 주파수 50 Hz 의 경우인데, 밸브구동신호에 대해 최고압력을 나타내는 시간이 늘 11 msec를 유지하며 동일하게 반복되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 주파수 분석을 위해 FFT를 수행하면 밸브 구동 주파수를 정확히 추종함을 확인할 수 있다.

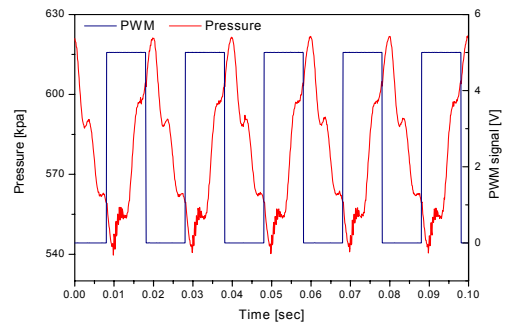


Fig. 5 Relation of input and output of valve

밸브 출구에서 압력으로 확인된 연료변조 상태가 연료 인젝터를 지나서까지 유지되는 지를 확인하기 위하여 인젝터 후단에 평면 레이저 빔을 조사하고 여기에서 연료 분무가 만들어 내는 산란신호(Mie scattering)를 PMT를 이용하여 측정하고 이것을 FFT한 결과를 Fig.6에 연료압력의

FFT 결과와 동시에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 연료압력에서 나타나는 주파수가 인젝터 출구에서도 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

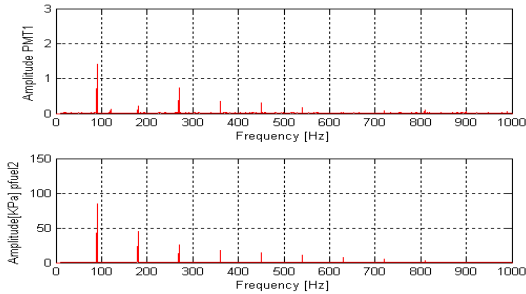


Fig. 6 Frequency response of fuel modulation in case of 90 Hz

동일한 연료공급압에서 밸브 구동 주파수에 따라 변조되는 연료특성이 차이나는 것을 볼 수 있는데, Fig.7 과 같이 현재 시스템에서는 100 Hz 근처에서 변조특성이 나빠지는 것을 볼 수 있다. 이는 연료공급 시스템 내부에서의 음향학적 특성에 기인하는 것으로 밸브와 인젝터 사이의 거리를 변경함으로써 특성을 변경시킬 수 있는데, Fig.7에서와 같이 밸브와 인젝터 사이의 거리를 가까이 할수록 유량이 감소하는 주파수가 작아지는 특성을 확인하였다. 따라서, 연소불안정 제어에 사용되는 연료시스템은 연료구동기 자체의 선정뿐만 아니라 연료시스템 전체의 구성이 사용하고자 하는 주파수 특성에 맞게 조절되어야 할 필요성이 있다.

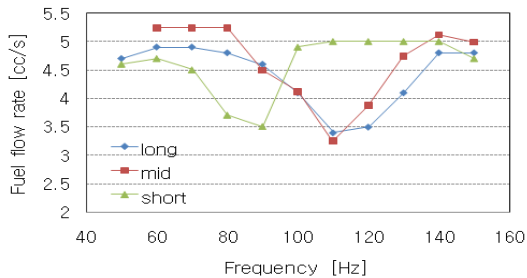


Fig. 7 Fuel modulation for different configuration of fuel system

4. 결 론

초음속엔진으로부터 구성된 모델 연소기를 설계/제작하여 연소시험 중 발생하는 연소불안정을 측정하고 화염안정화 장치를 이용하여 2차 연료를 분사하는 방법으로 연소불안정을 능동제어하는 기법에 관해 연구하였다. 연소불안정 검출을 위해 연소실 압력을 측정하거나 연소실 내부 화염을 광학적으로 측정할 때 동일한 연소불안정 주파수를 얻을 수 있었다.

제어구현을 위한 구동기로서 2차 연료분사를 고속으로 조절할 수 있는 마그네틱 밸브를 선정하였고, 밸브 후단 연료압력이나 2차 연료분사 인젝터 출구에서의 연료분무가 밸브 구동 주파수에 대해 정확히 추종함을 확인 하였다. 또한 연료시스템 구성에 따라 연료량 변조 특성이 변화하여 시험장치 구성 시, 사용하고자 하는 주파수 특성에 맞게 시스템을 정리할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

1. Annaswamy, A.M. and Ghoniem, A.F., "Active Control of Combustion Instability: Theory and Practice," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 22, No. 6, 2002, pp. 37-54.
2. K. Yu, B. Pang. and O. Hsu., "Implementing Active Combustion Control In Propulsion Systems", AIAA 2001-3849, 2001
3. Annaswamy, A.M. and Ghoniem, A.F., "Active control in combustion systems", IEEE control systems, Vol. 15, No. 6, 1995, pp. 49-63.
4. 주상현, 최호진, 박종승, 임진식, "초소형 터보엔진용 PWM 연료조절장치의 설계 및 모델링에 관한 연구", 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp. 95-101.