

스크램제트 엔진 내 후퇴각 공동의 주파수 특성 분석

정은주* · 정인석* · Sean O'Byrne** · A.F.P. Houwing*** · 강상훈**** · 양수석****

Frequency Analysis of the Sweepback Cavity in the Scramjet Engine

Eunju Jeong* · In-Seuck Jeung* · Sean O'Byrne** · A.F.P. Houwing***
Sang-Hun Kang**** · Soo-Seok Yang****

ABSTRACT

Using the T3 free-piston shock tunnel in ANU, the cavity frequency and flow characteristics of no mass-injection, inclined mass-injection before the cavity, parallel or reverse mass-injection in the cavity are investigated in the case of Mach 3.7 inflow condition. No mass-injection doesn't have the harmonic frequencies but has high amplitude of pressure spectrum at 10 kHz. Inclined mass-injection attenuates the cavity flow fluctuation as disturbing the shear layer reflection at the trailing edge. Parallel mass-injection flow reflects at the trailing edge of the cavity directly hence, increases the cavity flow fluctuation at high injection pressure.

초 록

호주국립대학의 T3 자유충격파관을 이용하여, 마하수 3.7의 유입 유동에 대해 비분사유동, 공동이전 경사분사유동, 공동내부 평행분사유동, 공동내부 역분사유동에 대해 주파수를 확인하고, 공동 유동 특성을 살펴보았다. 비분사유동은 고조파 형태의 주파수가 나타나지 않았으나 10 kHz 부근에서 비교적 큰 압력 스펙트럼이 나타났다. 공동 이전 경사분사는 공동의 앞전에서 박리되는 전단층의 두께를 증가시켜 공동 뒷전에서 발생하는 유동의 진동 현상을 현저히 감소시켰다. 공동 내부 평행분사는 공동의 뒷전에 분사 유동이 직접 부딪히게 되고, 공동의 진동 현상을 오히려 증가시켰다.

Key Words: Scramjet Engine(스크램제트 엔진), Cavity(공동), Frequency(주파수)

1. 서 론

스크램제트 엔진의 연소기에서 연료-공기 혼합 및 연소 효율을 높이기 위한 여러 방법 중에서 공동에 관한 연구가 수십 년에 걸쳐 진행되어 오고 있다. 그러나 공동의 형상, 유동의 진동 현상, 비정상 상태 등과 같은 공동 유동의 복잡함으로 인해 아직까지 초음속 연소기 내 공동 형

* 서울대학교 항공우주공학과

** Australian Defence Force Academy, Australia

*** Australian National University

**** 한국항공우주연구원, 첨단추진기관팀

연락처, E-mail: newaero1@snu.ac.kr

상에 대한 단일화된 의견이 모아지지 않고 있는 실정이며, 여전히 초음속 유동장 내 공동 유동 현상에 관한 연구가 진행되고 있다. 공동 내 진동 현상의 주요한 요인은 공동의 앞전에서 박리된 전단층과 뒷전 벽면의 상호작용이므로, 전단층을 안정화시키거나 조절함으로써 공동 유동의 진동 현상을 억제시킬 수 있다. 가장 잘 알려진 방법으로는 공동 이전이나 앞전에서 연속적 또는 간헐적으로 유동을 분사시키는 것인데, 이 방법은 전단층의 두께를 증가시킴으로써 공동 내에서 발생하는 주파수를 공동의 고유 주파수 범위에서 벗어나게 한다. 본 연구는 고마하수 유입 유동의 초음속 연소기 내 후퇴각이 있는 공동의 유동 특성과 공동 이전 경사분사, 공동 내부 평행분사 및 역분사를 통해 공동 유동의 특성을 살펴보고자 한다.

2. 실험 조건

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 모델 스크램제트 엔진 연소기는 길이 500 mm, 폭 52 mm, 높이 25 mm를 가지는 사각형 덕트이다. 연소기 입구로부터 152.5 mm 지점에 위치한 공동은 깊이가 5 mm이며, 22.5°의 경사각을 가지고 있다. 이 공동의 길이-깊이 비는 4.8이며, 개방형 공동이다. 분사 시스템으로 상온 상태의 수소 기체 사용하였고, 튜브 내 수소 기체의 주입 압력은 실험 조건에 맞추어 조절하였다. 공동과 분사 유동 위치와의 관계를 살펴보기 위해 본 연구에서는 공동 이전 경사분사, 공동 내부 평행분사, 공동내부 역분사를 시행하였다. 공동 이전 경사분사는 공동의 앞전에서 20 mm 상류 위치에서 15°의 각을 가지고 유동을 분사한다. 공동 내부 평행분사는 공동의 앞전에서 공동 높이의 1/2 지점에서 유입 유동의 방향과 평행하게 분사되고, 공동 내부 역분사는 동일한 높이에 대해 유입 유동 방향과 반대 방향으로 분사된다. 모든 경우에 대해 분사구는 총 4개이며, 직경은 2 mm 이다. 연소기 내 유동의 주파수를 측정하기 위해 PCB 社의 동

압력 센서를 사용하였다. 연소기 입구로 유입되는 유동의 압력을 측정하기 위해 연소기 입구로부터 70 mm 지점에, 공동 내부의 압력을 측정하기 위해 공동의 앞전으로부터 15 mm 지점에 압력 센서를 설치하였다. 본 실험은 호주국립대에 있는 T3 자유-피스톤 충격파 터널에서 수행되었다. 장비의 구동에 대한 설명은 참고 문헌에 제시하였다.[1]

2.2 유동 조건

측정된 충격파 속도와 노즐 정체실의 압력값을 이용하여 노즐 끝에서 연소기 내부로 들어오는 유동의 조건을 결정하게 된다. 정체실과 연소기 내 유입 유동 조건에 관한 계산 결과는 Table 1에 제시하였다.

Table 1 Flow Conditions of Combustor Inlet

h_0	6.45 MJ/kg	p_∞	111±7 kPa
T_∞	1667±55 K	ρ_∞	0.23 ±0.009 kg/m ³
u_∞	2952±28 m/s	M_∞	3.71±0.03

전엔탈피 6.45 MJ/kg에 대해, 수소 연료의 충전 압력이 900 kPa, 1500 kPa, 2500 kPa 일 때, 유입 유동에 대한 분사 유동의 모멘텀 비(J)는 각각 0.237, 0.415, 0.716이다.

3. 실험 결과

3.1 압력 스펙트럼

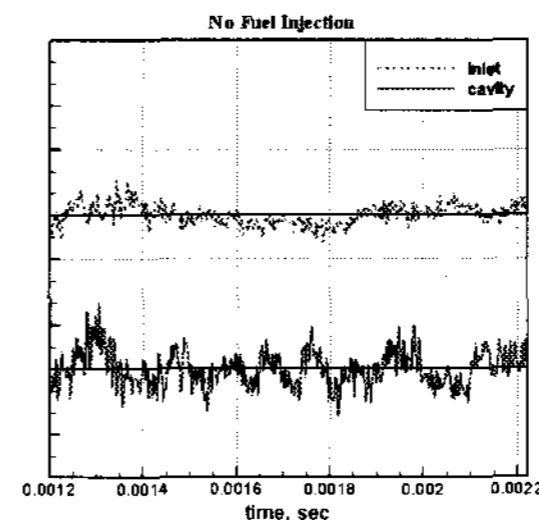


Fig. 1 Pressure Oscillation in the cavity

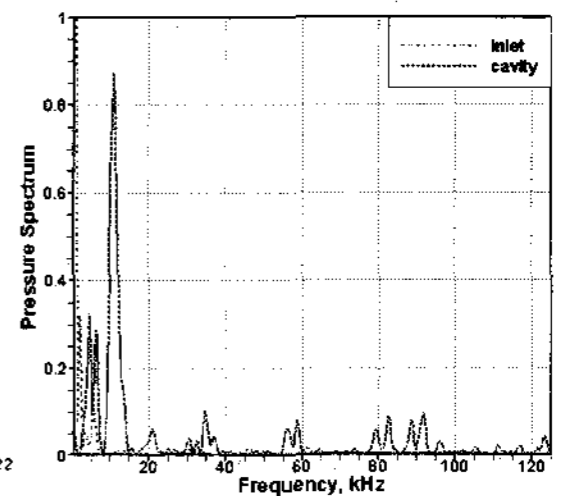


Fig. 2 Cavity Pressure Spectra without injection

Figure 1는 스크램제트 연소기의 유입 유동과 공동에서의 압력 신호를 나타낸 것이다. 시험 시간동안 연소기 내 유동 분사는 시행하지 않았다. 그 결과, 공동 내에서 압력 신호의 높낮이가 발생했는데, 공동 내부에서 유동의 진동하고 있음을 알 수 있다. 특히 공동 내 압력 신호는 유입 유동의 신호와 확실한 차이를 보이고 있으므로, 이러한 압력 신호의 진동 현상은 공동의 고유한 유동 특성이다. 본 압력 신호로부터 압력 스펙트럼 값을 이용한 FFT 분석을 수행하였다. Fig. 2는 유입 유동과 공동 내부 유동의 압력 스펙트럼을 나타내고 있다. 우선 유입 유동의 경우 1 kHz 이하에서 나타나는 1 이상의 크기의 압력 스펙트럼은 시험 시간이 1 ms 이라는 점을 고려할 때 시험 시간 내에 압력 진동이 거의 일어나지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 5.6 kHz 에서 약 0.1 정도의 약한 압력 스펙트럼은 이는 노즐의 정체부에서 비롯된 유동의 진동 또는 시험 시간 동안 모델에서 발생하는 진동 등에 의해 나타나는 진동수라 생각된다. 10.8 kHz 부근에서 약 0.9 정도의 큰 압력 스펙트럼을 나타내고 있으며, 또한 4.4 kHz, 6.6 kHz에서도 0.3 정도의 압력 스펙트럼을 나타내고 있다. 이는 유입 유동에서 발생하는 주파수와 그 크기 면에서 확연한 차이를 보이고 있으므로, 본 실험에서 공동의 고유 주파수라 볼 수 있다. 또한 Heller와 Bliss[2]의 연구에 따르면, 길이-깊이비가 4 이상이고 뒷전에서 후퇴각을 가지는 공동은 마하수가 적어도 0.8에서 2 사이의 영역에서 유동의 진동 크기를 최소화 시킬 수 있다. 따라서 본 연구의 마하수는 3.8로써 선행 연구자들의 마하수 영역에서 벗어나 있음을 고려하면, 본 연구에서의 실험 조건과 공동 형상은 완전히 안정된 공동 유동을 형성하지 못한다고 볼 수 있다. 그러므로 Fig. 2에서 높은 크기를 가지는 10 kHz는 본 실험에서의 특정 주파수이다. 그러나 여기서 살펴볼 점은 일반적인 사각 형상의 개방형 공동에서는 일련의 진동 모드인 고조파가 나타나는데[3], 본 실험에서는 고조파의 형태를 살펴볼 수 없다. 따라서 비록 공동 유동의 진동을 완전히 감쇠시키지는 못하였으나, 여러 주파수에 걸쳐 나타나는 고

조파는 형성시키지 않음을 알 수 있다.

3.2 유동 분사 방법에 따른 압력 스펙트럼

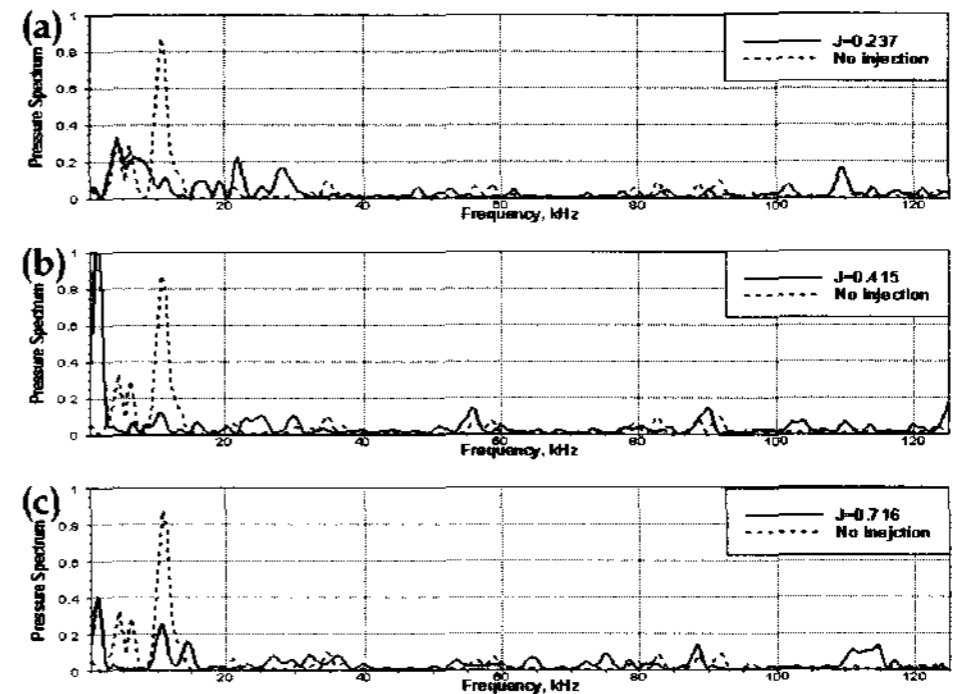


Fig. 3 Pressure Spectrum of Inclined mass Injection before the cavity

Figure 3는 공동 이전 경사분사에 대한 모멘텀비에 따른 압력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 비분사유동 마찬가지로 약 1 kHz 이하의 낮은 주파수에서는 유입 유동의 진동에 의한 영향으로 그 크기가 나타나고 있다. 비분사유동에서 큰 진폭을 가지고 나타났던 10 kHz 부근의 주파수가 Fig. 3에서는 크게 감소하였다. 세 가지 분사 압력 모두 0.2 크기까지 일부 주파수가 나타나고 있으나, 그 크기가 매우 작다. 이러한 현상은 공동 이전에서 분사된 유동이 공동 앞전에서 박리되는 전단층의 두께를 증가시켜 와류의 형성을 방해하거나 전단층이 공동 내부로 휘어지는 것을 방해하므로 공동의 뒷전에서 발생하는 유동의 진동 현상을 줄이게 된다[4].

Figure 4은 공동 내부 평행분사의 압력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 낮은 분사 압력(Fig.4-(a))은 20 kHz 이하에서 비슷한 크기의 여러 주파수들을 가진다. 이는 공동의 길이 방향으로 평행하게 분사되는 유동이 공동 뒷전에 직접적으로 부딪히고 압력이 증가함으로써 공동 내에서 진동 현상이 나타난다. 모멘텀비가 증가하면(Fig.4-(b)) 압력 스펙트럼의 크기가 약 10 kHz 지점에서 0.8 정도까지 상승하는데, 이는 비분사유동과 유사하다. 동일한 경사분사의 모멘텀비와 비교해보면, 평행분사의 압력 스펙트럼이 두드러지게

5. 후 기

본 연구는 2005년 과학기술부 국가지정연구실사업(NRL 과제 고유번호 M10500000072-05J000007210)에 의해 지원된 연구과제 중 일부이며, 2005년도 두뇌한국21사업과 서울대 항공우주신기술연구소에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

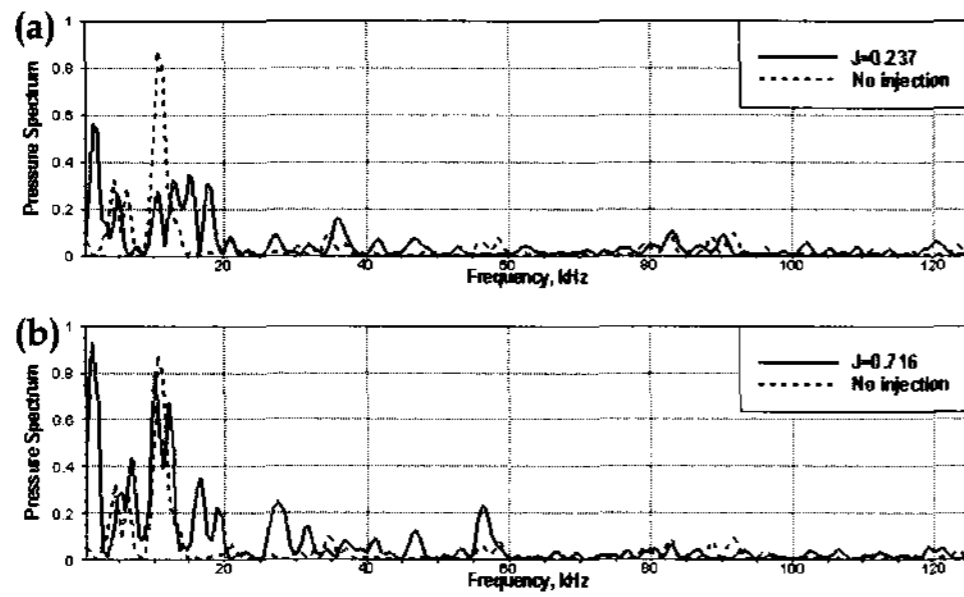


Fig. 4 Pressure Spectrum of Parallel mass Injection before the cavity

높게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 공동 내부에서 평행하게 분사되는 유동은 공동의 뒷전에 직접 부딪히면서 오히려 증가시킴으로써 공동 내부에서 여러 주파수를 발생시키게 되는 것이다. Sarno 와 Franke[5]의 연구에서는 외부 유동이 없이 공동 내부에서 유동을 분사시켜 발생하는 공동 유동의 진동 현상은 외부 유동이 존재할 때 공동 유동에 영향을 미치는 진동 현상과 매우 유사함을 실험적으로 제시하였다. 따라서 공동 내 직접적인 평행분사는 공동 내부에서 발생하는 진동 현상을 감소시키기 위한 방법으로는 효과적이지 못함을 알 수 있다.

4. 결 론

마하수 3.7의 유입 유동에 대해 후퇴각이 있는 공동은 10 kHz 부근에서 비교적 큰 압력 스펙트럼이 나타났다. 따라서 공동의 형상으로 인해 공동 유동의 진동 감쇠를 유도할 수 있으나, 특정 주파수는 여전히 발생함을 알 수 있다. 공동 이전에서 유동을 분사할 경우, 공동의 앞전에서 박리되는 전단층의 두께를 증가시켜 와류의 형성을 방해하거나 전단층이 공동 내부로 휘어지는 것을 방해하여 공동 뒷전에서 발생하는 유동의 진동 현상을 현저히 줄일 수 있다. 그러나 공동 내부 평행분사는 공동의 뒷전에 분사 유동이 직접 부딪히게 되고, 분사 압력을 증가함에 따라 공동의 진동 현상을 오히려 증가시켰다.

참 고 문 헌

1. 정은주, 정인석, Sean O'Byrne, A.F.P. Houwing, "공동 상류 경사 분사를 이용한 초음속 연소기의 실험적 연구 Part 1: OH-PLIF 측정," 한국연소학회지, 제 12권, 제 1호, 2007, pp.11-20
2. Heller, H. H. and Bliss, D. B., "The Physical Mechanism of Flow-Induced Pressure Fluctuations in Cavities and Concepts for Their Suppression", AIAA Paper, 75-491, 1975
3. Tracy, M.B. and Plentovich, E.B., "Characterisation of Cavity Flow Fields using Pressure Data Obtained in the Langley 0.3-meter Transonic Cryogenic Tunnel", NASA Technical Memorandum 4436, 1993
4. Vakili, A. D., Gauthier, C., "Control of cavity flow by upstream mass-injection," *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 1, 1994, pp.169-174
5. Sarno, R. L., Franke, M. E., "Suppression of flow-induced pressure oscillations in cavities," *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 1, 1994, pp.90-96