

초음속 유동장 내 평판/cavity를 이용한 연료-공기 혼합의 실험적 연구

김정우* · 정은주* · 김채형* · 정인석*

Experimental Study on Fuel-Air Mixing Using Flat Plate/Cavity in Supersonic Flow

Jeong-Woo Kim* · Eunju Jeong* · Chae Hyoung Kim* · In-Seuck Jeung*

ABSTRACT

Rapid mixing of air-fuel (<1 ms) is needed to accomplish supersonic combustion. In this experiment, helium was injected laterally in to the Mach 1.92 air flow. 2 kinds of model, flat plate/cavity, were used in this experiment and images were taken by schlieren visualization. Pressure was affected by shock structure in the supersonic duct, and penetration height was increased by increasing J. Penetration height was higher in the cavity model than flat plate model.

초 록

초음속 연소가 성공하려면 1 ms의 시간 안에 충분한 연료-공기 혼합이 이루어져야 한다. 본 실험은 마하 1.92유동에서 헬륨을 수직 분사하여 연료-공기 혼합이 어떻게 이루어지는지 살펴보았다. 평판과 공동 두 가지 모델로 실험을 수행하였고, 슐리렌 가시화를 통해 사진을 찍었다. 압력은 초음속 덕트 내에서 충격파가 어떻게 생성되는지에 영향을 많았고, 침투 거리는 J가 커질수록 두꺼워졌다. 공동이 있는 경우 평판일 때보다 침투 거리가 더 컸다.

Key Words: Injection Location(분사), Flat Plate(평판), Cavity(공동), Supersonic Flow(초음속 유동)
Penetration Height(침투거리)

1. 서 론

마하 6 이상의 높은 비행 속도를 가지는 차세대 비행체가 성공하기 위해서는 초음속 공기 흡입 추진 기관의 개발이 필수적이며 대표적인 추

진기관으로 스크램제트 엔진이 알려져 있다. 스크램제트 엔진에서 초음속 유동이 연소기 내부에 머무는 시간은 일반적인 극초음속 비행조건에서 1 ms 정도이므로, 이 시간 내에 효율적으로 연료가 분사되고 공기와 혼합되어 연소가 완전히 이루어져야 한다[1]. 짧은 유동 체류 시간에 의하여 발생하는 문제점을 극복하기 위하여 연료 분사기의 형태와 분사 방법, 혼합방법 등에

* 서울대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: kjw8211@freechal.com

대한 다양한 연구가 수행되어왔다. 가장 기초적이고 간단한 형상은 채널 형태의 연소기에 수직으로 연료를 분사하는 것이며, 호주 UQ(University of Queensland)에서 주관하고 있는 HyShot 프로그램의 스크램젯 엔진이 이와 같은 형태를 가지고 있다[2].

분사 실험에의 중요한 변수는 운동량비이고 식은 다음과 같다[3].

$$J = \frac{(\rho u^2)_{Fuel}}{(\rho u^2)_{Air}} = \frac{(\gamma p M^2)_{Fuel}}{(\gamma p M^2)_{Air}}$$

따라서 본 연구에서는 호주 UQ의 HyShot 실험과 같은 J에서 평판/공동을 이용하여 수직분사 실험을 수행하고, 2가지 다른 J에서의 실험도 병행하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 풍동의 모식도는 Fig. 1과 같다.

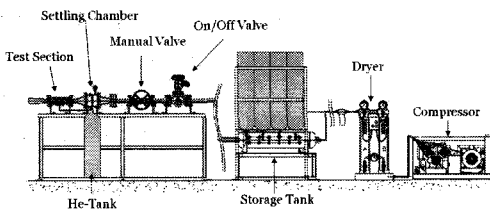


Fig. 1 Schematic of Wind Tunnel

압축기와 건조기를 거친 공기는 고압 탱크에 30 kgf/cm²까지 압축되고, 수동 밸브로 정체실 압력을 일정하게 유지하였다. 유동은 노즐을 거쳐 마하 1.92의 속도로 높이 20 mm, 너비 30 mm의 시험부에 들어오며, 동시에 헬륨을 수직으로 분사한다.

실험 모델은 평판과 공동 2가지인데, 각각의 센서 위치는 Table 1과 같다. 거리는 노즐 끝에서부터 측정된 것이고, 12 mm 위치에 있는 센서는 자유류 압력을 측정하는 것으로 덕트의 윗부

분에 위치한다. 그 외의 센서는 덕트의 아랫부분에 위치한다. 유동 방향은 왼쪽에서 오른쪽이며 센서 위치 개략도는 Fig. 2와 같다. 헬륨은 노즐 끝에서 12 mm 떨어진 지점에서 지름 1 mm 구멍을 통해 마하 1의 속도로 수직 분사된다. 분사 구멍과 센서는 모두 덕트 너비의 중심에 위치한다.

Table 1. Location of Pressure Sensor

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
위치 (mm)	12	38	65	98	131	164	197

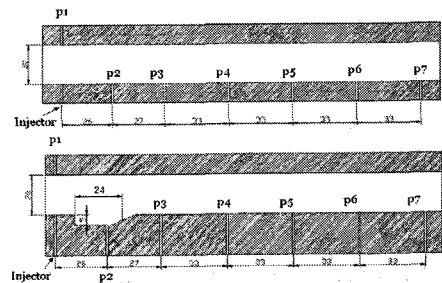


Fig. 2 Flat Plate/Cavity Pressure Sensor

가시화를 위하여 슐리렌 기법을 이용하였고, Fig. 3과 같이 배치했다. 광원으로는 점광원을 사용하였으며 지속시간은 2 μs이다.

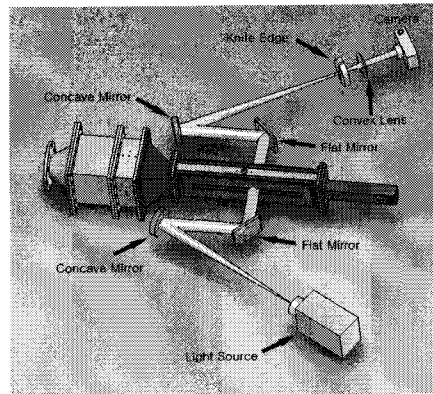


Fig. 3 Schlieren System

본 실험에 사용한 공동은 D=5 mm, L=24 mm, θ=22.5°이고, L/D=4.8인 개방형 공동이다.

2.2 실험조건

UQ의 실험과 같은 J 로 맞추기 위해 정체실의 절대압력은 658 kPa, 헬륨 분사 절대압력은 500 kPa로 하였다. 이 경우 $J=1.70$ 이다. 정체실 압력을 고정하고, 헬륨 분사 압력을 1/2, 2배로 조절하여 $J=0.85$, $J=3.40$ 실험도 수행함으로써 분사압력에 따른 침투거리 변화 및 덕트 내 압력 분포를 살펴보았다. 헬륨 분사를 하지 않은 경우는 $J=0$ 으로 표현하였다.

3. 실험 결과

3.1 슐리렌 사진

평판 수직 분사와 공동 수직 분사의 슐리렌 사진이 Fig. 4, Fig. 5에 나와 있다. a), b), c), d)는 각각 $J=0$, $J=0.85$, $J=1.70$, $J=3.40$ 을 나타낸다. 유동 방향은 왼쪽에서 오른쪽이다.

평판/공동 두 경우 모두 J 가 커질수록 분사로 인해 발생한 공형충격파의 각도가 커졌고, 혼합층의 높이를 살펴본 결과 J 가 커질수록 침투 거리가 높아짐을 알 수 있다. 공동이 있는 경우 뒷전에서 생긴 2차원 경사 충격파가 덕트 내 충격파구조의 주요한 요인임을 알 수 있었다.

3.2 압력곡선

Figure 6은 평판의 압력 곡선, Fig. 7은 공동의 압력 곡선이다. 압력은 5번 실험의 측정값을 평균 내어 표준편차와 함께 그래프로 나타내었다. 센서 위치와 비교할 수 있도록 $J=3.40$ 일 때의 슐리렌 사진을 첨부하였다.

두 그래프 모두 후류로 갈수록 반사되는 충격파들을 거치면서 압력이 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 평판일 때 P3 지점에서 $J=1.70$ 일 때의 값이 큰 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 4에서 나타나듯이 헬륨 분사로 인해 발생한 공형충격파가 반사되면서 P3 근처에서 부딪히기 때문이라 생각된다. $J=3.40$ 일 때는 증가된 공형충격파 각도로 인해 P3 보다 더 앞쪽에서 반사된다.

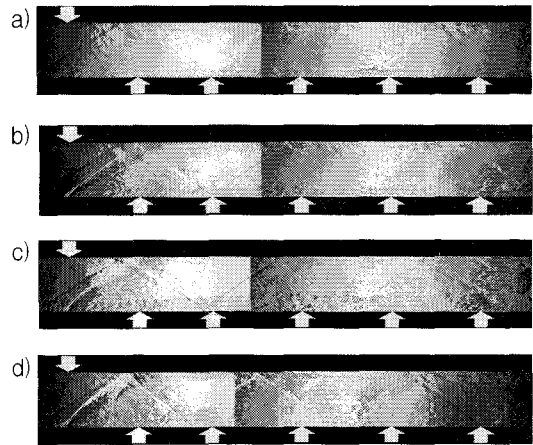


Fig. 4 Flat Plate Schlieren Image

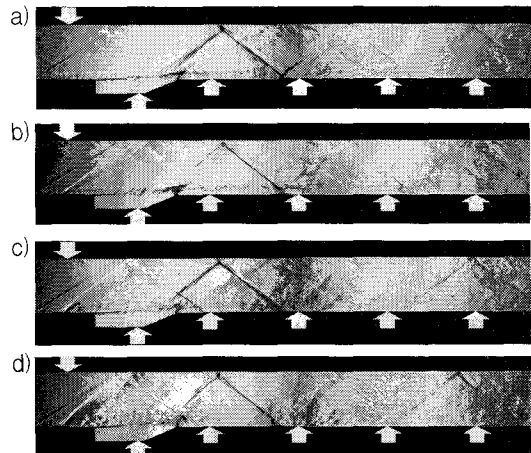


Fig. 5 Cavity Schlieren Image

공동의 경우 P4 지점에서 $J=0$ 인 경우가 압력이 큰데, 이 지점은 공동 뒷전에서 생기는 2차원 경사 충격파가 반사되는 지점이다. J 가 커질수록 공기-헬륨 혼합층의 영향으로 P4 근처에서 경사 충격파의 영향이 줄어들어서 P4 지점의 압력이 떨어진 것으로 생각된다.

Figure 8은 침투 거리 그래프이다. 역시 5번의 실험사진을 평균내어 그래프로 나타내었다. 같은 J 에서 공동이 있는 경우가 평판보다 침투 거리가 크다. 특히 공동의 뒷전 이후에서부터 침투 거리가 증가하는 것으로 보아 공동이 연료-공기 혼합에 도움을 줄 것이라 생각된다.

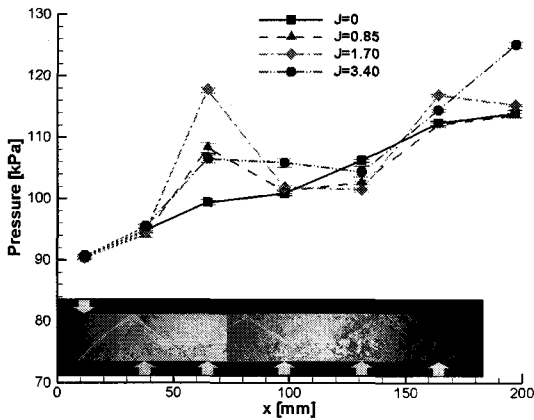


Fig. 6 Flat Plate Pressure

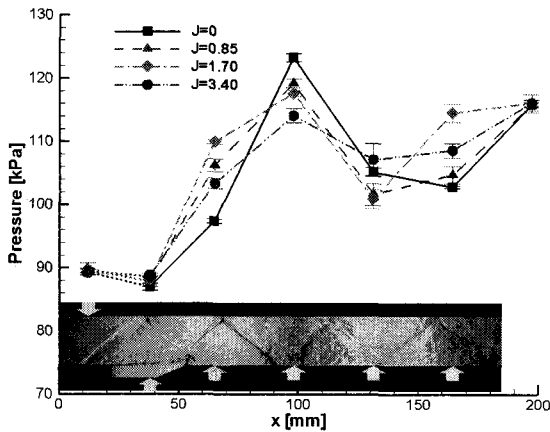


Fig. 7 Cavity Pressure

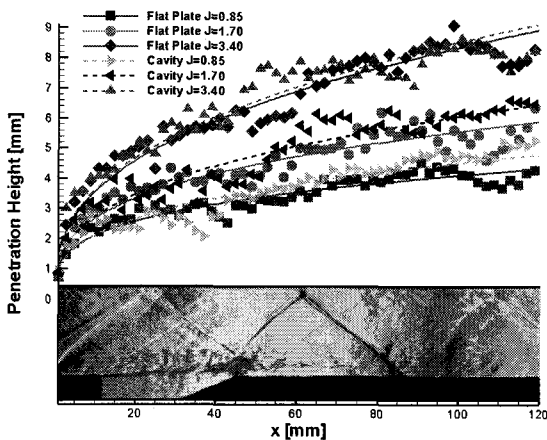


Fig. 8 Penetration Height

4. 결 론

마하 1.92의 유입 공기 유동에 평판과 공동 두 가지 모델로 J 를 0, 0.85, 1.70, 3.40으로 변화시키며 헬륨을 수직 분사 하였다. 측정된 압력 값은 연속적으로 반사되는 충격파를 지나면서 후류로 갈수록 점차 증가하였고, 덕트 내의 충격파가 반사되는 형태에 많이 영향 받았다. 침투거리는 J 가 커질수록 증가하였으며 같은 J 에서 공동의 경우가 평판보다 침투거리가 커 공동이 연료-공기 혼합에 효율적이라 생각된다.

후 기

본 연구는 2006년 과학기술부 국가지정연구실 사업 (NRL 과제 고유번호M105000000-7205J0000 07210)에 의해 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Adela Ben-Yakar and Ronald K. Hanson, "Cavity Flame-Holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: An Overview", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 4, July-August 2001
2. Centre for Hypersonics - HyShot Scramjet Test Programme, <http://www.mech.uq.edu.au/hyper/hyshot/>
3. John D. Abbitt III, Corin Segal, James C. McDaniel, Roland H. Krauss, and Robert B. Whitehurst, "Experimental Supersonic Hydrogen Combustion Employing Staged Injection Behind a Rearward-Facing Step", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 3, May-June 1993