

PSP를 이용한 Cavity 후류의 전역적 압력분포 측정

김기수* · 전영진* · 서형석* · 변영환** · 이재우*

The Whole Region Pressure Measurement of Cavity Downstream using PSP Technique

Ki-su Kim* · Young-jin Jeon* · Hyung-seok Seo* · Yung-Hwan Byun** · Jae-Woo Lee*

ABSTRACT

PSP (Pressure Sensitive Paint) technique can measure continuous pressure field by analyzing the oxygen quantity using optical method. The surface pressure of down stream after the sonic jet that injected transversely into the supersonic freestream was measured by PSP technique. Moreover the effect of various rectangular shaped cavities in front of the jet was measured by PSP technique. A comparison of the PSP results with conventional pressure tap and CFD indicates good agreement. The result shows that the cavity affects the pressure distribution in the rear of the jet injection.

초 록

PSP는 Pressure Sensitive Paint의 약자로 대기중의 산소량을 측정하여 전역적인 압력정보를 광학적으로 측정 할 수 있다. 본 연구에서는 PSP를 사용하여 jet injection 후류의 표면압력 분포를 알아 보았다. 또한 Jet injection 5mm앞에 종횡비 1에서 4까지의 사각형 Cavity를 위치시켜 후류에 미치는 영향을 알아보았다. Jet injection 후류의 압력 분포는 Cavity의 전단층의 영향으로 Cavity가 없을 때와 비교해서 옆으로 넓게 퍼지면서 강도는 약해지는 모습을 보인다. 또한 Cavity의 종횡비가 커짐에 따라서 전단층의 크기가 커지고 그 영향이 커졌다. 측정된 압력은 압력공의 결과, CFD의 결과와 비교하였으며 근접한 값을 보였다.

Keyword: PSP : Pressure Sensitive Paint (감압도료), Jet injection (젯 분사), Cavity (공동)

1. 서 론

스크램젯 엔진의 연소기를 통과하는 유동은 초음속으로 1ms단위의 체류시간을 가지며, 이

짧은 시간 동안 연소의 모든 과정이 이루어져야 한다. 연소과정 중 가장 기본적으로 이루어져야 하는 연료의 분사와 연료-공기의 혼합과정은 물리적으로 작용하는 과정이므로 연소과정 중 가장 오랜 시간이 걸린다. 따라서 효율적인 혼합에 대한 연구는 오랜 기간 수행되어 왔으며, 그 결과 여러 혼합 방법이 제안되었다.

* 건국대학교 항공우주공학과

** 건국대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: yhbyun@konkuk.ac.kr

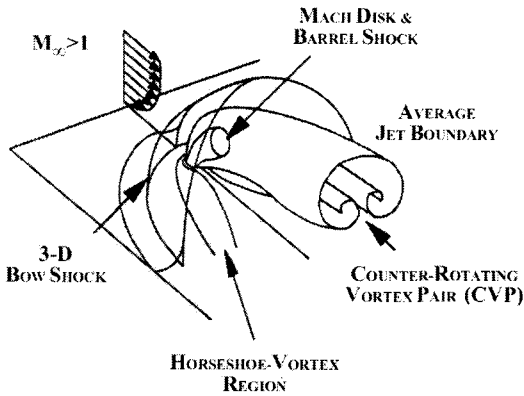


Fig. 1 Structure of the Jet in Supersonic [1]

1.1 수직분사 제트

가장 기본적인 혼합 방법으로 연료를 유동에 수직 분사하는 방법이 있다. Fig. 1은 초음속 유동장에 분사된 수직 분사 제트의 구조를 나타낸 그림이다. 수직분사 제트는 제트의 앞쪽에 궁형 충격파를 형성한다. 궁형충격파에 의하여 바닥면의 유동이 박리되고, 궁형충격파 앞단에 Separation Shock을 형성한다. 제트의 주위와 후방에는 4가지의 와류구조들이 발생하는데 그 중 후방에서 발생하는 상호반전하는 와류쌍(CVP)은 자유류를 제트-전단층 속으로 빨아들여 제트와 자유류의 접촉면적을 증가시키고, 결과적으로 혼합증대의 효과를 가져온다[1].

분출하는 제트는 식 (1)과 같이 모멘텀의 비로 나타낼 수 있는데, 이 비가 커질수록 혼합 증대를 가져오는 것으로 밝혀졌다[2].

$$J = \frac{(\rho u^2)_j}{(\rho u^2)_f} = \frac{(\gamma P M^2)_j}{(\gamma P M^2)_f} \quad (1)$$

1.2 Cavity

Cavity는 초음속 연소기에서 혼합증대의 역할을 할 수 있다. Cavity에서 발생한 전단층은 Cavity의 앞전에서 불안정한 파동을 발달시켜 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의한 Roller를 발생시킨다. 이것은 공기-연료의 혼합증대에 영향을 미친다[3]. 실제로 Yu and Schadow는 Fig. 2와 같이 노즐의 끝에 Cavity를 장착하여 그렇지

않은 것과 비교하여 전단층이 50% 증가하는 것을 확인하였다[4].

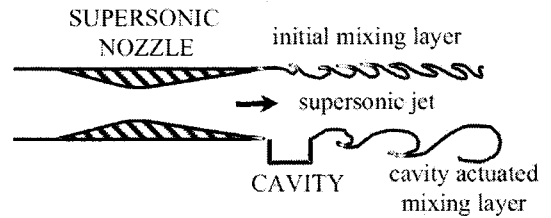


Fig. 2 Cavity-actuated Supersonic Mixing Layer [4]

본 연구에서는 위에서 제시한 혼합방법을 사용하였을 때 생기는 제트 후류의 압력장의 분포를 실험적인 방법으로 측정하여 압력장의 구조를 이해하는 기초연구를 수행한다. 또한 수직분사 제트와 Cavity를 혼합한 실험모형을 사용하여 Cavity의 종횡비(길이/높이비: L/H)에 의하여 달라지는 후류의 압력을 비교한다.

2. 실험방법 및 실험장치

2.1 PSP 압력 측정 기술

PSP는 Pressure Sensitive Paint의 약자로 Paint를 도포한 부분에 접촉한 산소량을 측정하여 압력정보를 알 수 있다. 산소량은 PSP가 특정 파장의 빛을 흡수하여 다시 방출하는 광발광(Luminescent)을 산소분자가 방해하는 현상(Oxygen Quenching)을 통하여 측정 할 수 있다. 이러한 압력과 광량의 관계는 표면 압력과 발광도의 관계는 'Stern-Volmer Relation'을 통해서 알 수 있다. 여기에서 I 는 빛의 세기, I_0 는 산소가 없을 때의 빛의 세기, K 는 켄칭(Quenching) 상수, c 는 압력과 온도에 관련된 산소의 농도를 나타낸다.

$$\frac{I_0}{I} = 1 + Kc \quad (2)$$

PSP Technique은 광학적인 측정을 기반으로 하고 있어서 기존의 압력공을 사용한 압력측정

방법으로는 어려운 부분의 압력측정을 할 수 있다. 날카로운 모서리, 압력공을 설치하기 힘든 작은 물체, 회전하는 물체, 다점 압력 측정 등이 그 예가 될 수 있다.

2.2 초음속 풍동

건국대학교 교육용 초음속 풍동은 Blowdown 형태로 $M=2.5$ 의 유속을 낼 수 있다. Test Section은 $30(W) \times 35.6(H)$ mm이고, 유동장의 압력과 온도는 약 $P=0.2\text{MPa}$, $T=129\text{K}$ 이다.

2.3 Jet injection과 Cavity 실험모형

실험모형은 초음속 풍동의 시험부의 밑면에 장착되며 Fig. 3과 Table 1과 같은 형상을 가진다. 각각의 Case는 수직분사 제트만 있는 모형과 종횡비를 변화시킨 Cavity의 후방에서 제트분사를 하는 모형이다. 제트의 분사는 Cavity가 끝나는 지점에서 5mm 떨어진 위치에서 실시한다. 수직분사 유체는 공기를 사용하였고, 제트 모멘텀비는 2로 고정하였다. Fig. 4는 실제로 실험에 사용했던 모형으로 PSP를 도포하기 전(좌)과 도포한 후(우)의 모형을 보여준다.

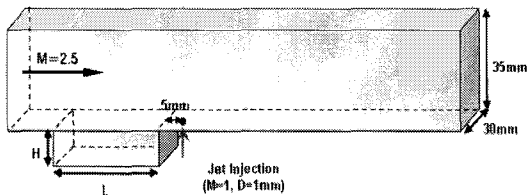


Fig. 3 The Geometry of the Cavity

Table 1. Cavity Size

Case	0	1	2	3	4
Length(mm)	0	10	20	30	40
Height(mm)	0	10	10	10	10

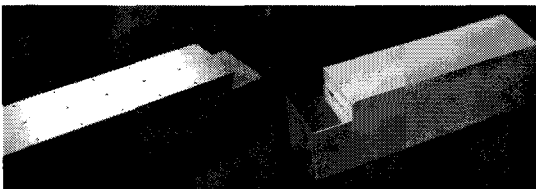


Fig. 4 Picture of the Cavity

3. 실험 결과

3.1 Shadow graph 가시화

Figure 5은 Cavity의 종횡비를 변화시키면서 Shadow graph 기법을 이용하여 가시화한 그림이다. 그림에서 흰색 화살표를 이용하여 제트 분출구의 위치를 표시하였다. Cavity의 종횡비가 증가할수록 제트 분출구를 지나는 전단층의 두께가 증가하고, 제트 분출구 상단에 생기는 Barrel shock의 기울기는 뒷방향으로 증가한다.

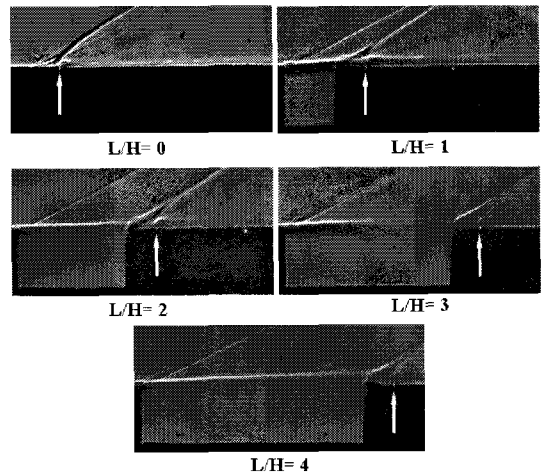


Fig. 5 Shadow Graph Images of the Cavity and Jet Injection

3.2 PSP 압력측정

Figure 6는 PSP 압력측정 기법을 사용하여 제트 분출구 근처의 압력 분포를 측정한 결과이며, 이미 수행된 전산해석결과[6]의 압력장과 비교하였다. 제트 분출구 앞의 궁형충격파에 의하여 압력이 급격히 상승하고 제트 분출구 이후에는 Vortex Structure에 의하여 압력이 하강하는 모습을 보인다. 또한 Cavity의 종횡비가 증가할수록 궁형충격파의 넓이가 점점 증가하는 경향을 보인다.

PSP의 압력측정 결과를 검증하기 위하여 종횡비가 0일 때 제트 분출구를 중심으로 후류방향의 C_p 분포를 Fig. 7에서 비교하였다. 각각의 데이터는 전산해석결과, 압력공의 압력데이터, PSP의 압력데이터를 나타낸다. 압력공의 압력데이터

는 Kistler사의 압력센서를 사용하였고 다섯 곳의 압력공에서 총 5회 반복실험을 한 결과를 평균하였다.

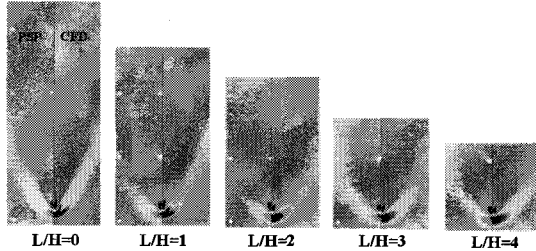


Fig. 6 Comparison of Pressure Distributions.
Left: PSP, Right: CFD

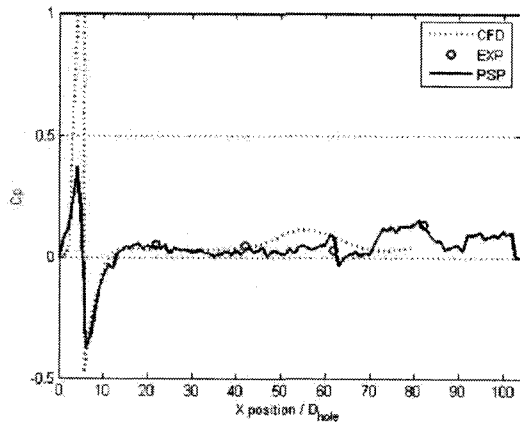


Fig. 7 Centerline C_p Distributions for $L/H=0$

3.3 Wake Pressure Profiles

제트 분출구의 위치에서 시작하여 후류 방향으로 0.5mm 간격으로 압력계수(C_p)를 나타낸 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 종횡비가 커질수록 Wake Zone이 좌우로 커지나 Vortex Structure에 의한 압력하강의 정도는 점점 줄어드는 경향을 보인다.

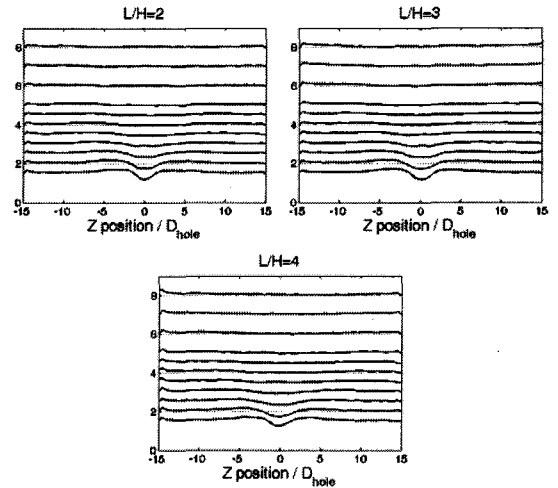
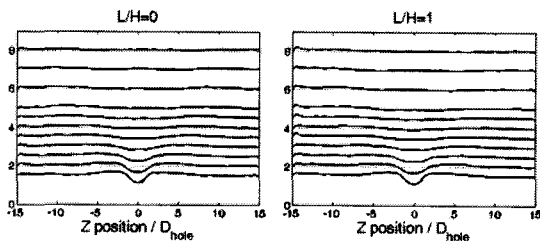


Fig. 8 C_p Profiles in the Wake Region

4. 결론 및 향후 계획

초음속 유동장에서 제트 분출구 주위의 압력에 Cavity가 미치는 영향을 파악하기 위하여 PSP 압력측정 기술을 적용하여 제트 분출구 후류의 전역적 압력 분포를 알아보았다. 유동 가시화를 통하여 Cavity의 종횡비가 증가 할수록 전단층의 두께와 Barrel Shock의 기울기가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 PSP에 의한 압력측정을 통하여 Cavity의 종횡비가 커짐에 따라 Wake Region이 넓어지고, 그것에 따른 압력하강의 정도가 낮아지는 것을 확인하였다.

PSP 압력측정 기술을 얼마나 해상도가 좋은 이미지를 사용하느냐에 따라서 그 정밀도가 달라진다. 본 연구에서는 낮은 해상도의 이미지를 사용하여 다소 노이즈가 있는 압력 데이터를 취득하였다. 현재는 고해상도 이미지를 통해서 노이즈를 줄이는 연구를 수행하고 있으며, 또한 노이즈의 제거를 위한 여러 장의 이미지를 평균화하여 CCD 카메라 자체에서 발생하는 노이즈도 제거하는 연구도 병행중이다.

참고 문헌

1. Yuan, L. L., R. L. Street, and J. H. Ferziger, Large-eddy simulations of a round jet in cross flow, *Journal of Fluid Mechanics* 379, 71-104, 1999.
2. Sang-Hyeon Lee and Tohru Mitani, Mixing Augmentation of Transverse Injection in Scramjet Combustor, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 1, 2003.
3. Adela Ben-Yakar, *Experimental Investigation of Mixing and Ignition of Transverse Jets in Supersonic Crossflows*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 2000.
4. Yu, K. H. and K. C. Schadow, Cavity-actuated supersonic mixing and combustion control, *Combustion and Flame* 99, 295-301, 1994.
5. 오주영, *Cavity 형상변화에 따른 스크램제트 엔진 연소기 내부의 혼합 성능 특성에 관한 연구*, 건국대학교 석사학위논문 2005. 2.