

PSP를 이용 다양한 공동 후류의 전역적 압력분포 측정

서형석* · 오주영* · 전영진* · 변영환** · 이재우**

The Whole Region Pressure Measurement of Cavity Downstream using PSP Technique

Hyungseok Seo* · Juyoung Oh* · Youngjin Jeon* · Yunghwan Byun** · Jaewoo Lee**

ABSTRACT

Pressure Sensitive Paint(PSP) means a reacting paint in pressure. PSP can measure continuous pressure field by analyzing the oxygen quantity using optical method. The surface pressure of downstream 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. Until now, the results of numerical analysis were compared with the discrete points such as the results of pressure tap. In this study, the whole region pressure was measured using PSP technique and its results were similar to CFD. Therefore, the flow phenomenon of cavity downstream was clearly grasped.

초 록

Pressure Sensitive Paint(PSP)는 압력에 반응하는 도료를 뜻한다. PSP는 압력에 반응하는 대기 중의 산소량을 측정하여 전역적인 압력정보를 광학적으로 측정 할 수 있다. 본 연구에서는 PSP를 사용하여 제트 분사 후류의 표면압력 분포를 알아보았다. 또한 제트 분사구 5mm앞에 종횡비 1에서 4까지의 사각형 공동을 위치시켜 후류에 미치는 영향을 알아보았다. 제트 분사 후류의 압력 분포는 공동의 전단층의 영향으로 공동이 없을 때와 비교해서 옆으로 넓게 퍼지면서 강도는 약해지는 모습을 보였다. 또한 공동의 종횡비가 커짐에 따라서 전단층의 크기가 커지고 그 영향이 커졌다. 현재까지의 계산 결과는 압력공과 같은 불연속점에서의 압력측정 결과와 비교하였다. 본 연구에서는 전영역에서의 압력을 측정하여 전산해석 결과와 근접함을 증명함으로써 공동 후류에서의 유동현상을 보다 명확히 파악하였다.

Key Words: PSP(Pressure Sensitive Paint, 감압도료), Jet injection(제트 분사), Cavity(공동)

† 2007년 11월 13일 접수 ~ 2007년 12월 9일 심사완료

* 학생회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

** 종신회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
연락처, e-mail : yhbyun@konkuk.ac.kr

공기역학에서 물체표면의 압력을 안다는 것은 중요하다. 공기 중에 위치한 물체 표면의 압력을 알아냄으로써 물체에 걸리는 힘을 알 수 있고, 결과적으로 이러한 측정결과들은 비행체의 성능 및 설계에 이용된다.

일반적으로 사용되는 압력공을 이용하는 방법은 압력값을 취득하는데 있어서 압력공을 뚫은 지점의 압력값만을 취득할 수 있고, 압력공을 가공하는데 있어서 여러 가지 제약이 따른다. 반면 PSP에 의한 압력측정의 경우는 빛의 흡수에 의한 발광(Photoluminescence)에 기초를 두고 있기 때문에 모델표면에 다수의 압력공을 가공할 필요가 없고, 원하는 지역의 압력값을 전역적으로 취득할 수 있다는 장점이 있다. 또한 전산해석의 결과물과 마찬가지로 압력 이미지를 통해서 압력분포를 한 눈에 볼 수 있다는 장점도 있다. 또한 다수의 압력데이터를 얻어야 하는 실험과정에 소요되는 비용과 시간도 줄어든다.

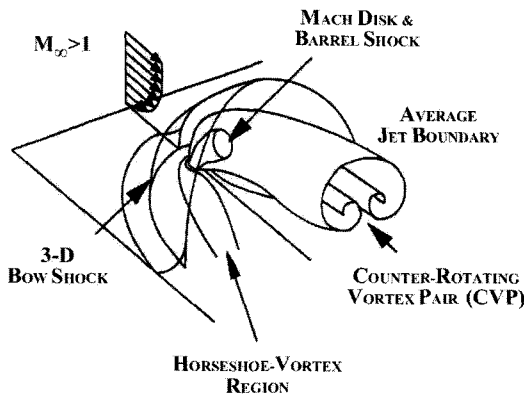


Fig. 1 Structure of the Jet in Supersonic [1]

이러한 여러 장점을 가지는 PSP를 이용하여 스크램제트 엔진의 연료분출 제트 후류 압력분포를 측정하였다. 스크램제트 엔진의 연소기 내부를 통과하는 유동은 초음속으로 1ms단위의 체류시간을 가지며, 이 짧은 시간 동안 연소의 모든 과정이 이루어져야 한다[2]. 연소과정 중 가장 기본적으로 이루어져야 하는 연료의 분사와 공기-연료의 혼합과정은 물리적으로 작용하는 과

정이므로 연소과정 중 가장 오랜 시간이 걸린다. 따라서 효율적인 혼합에 대한 연구는 오랜 기간 수행되어 왔으며, 그 결과 여러 혼합 방법이 제안되었다.

본 연구에서는 제안된 여러 혼합 방법 중 가장 기본적인 방법인 수직분사 제트와 공동을 이용하였다.

수직분사 제트는 연료를 유동에 수직 분사하는 방법이다. Fig. 1은 초음속 유동장에 분사된 수직 분사 제트의 구조를 나타낸 그림이다. 수직 분사 제트는 제트의 앞쪽에 궁형충격파를 형성하고, 이때 형성된 궁형충격파에 의하여 바닥면의 유동은 바리되며, 궁형충격파 앞단에는 분리충격파(Separation Shock)를 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 제트와 자유류와의 혼합은 Eq. (1)과 같이 모멘텀 비로 나타낼 수 있는데, 이 비가 커질수록 혼합 증대를 가져오는 것으로 밝혀졌다 [3].

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

또 하나의 혼합 방법인 공동은 초음속 연소기에서 혼합증대의 역할을 한다. 공동에서 발생한 전단층은 공동의 앞전에서 불안정한 파동을 발달시켜 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의한 Roller를 발생시킨다. 이것은 공기-연료의 혼합증대에 영향을 미친다[4]. 실제로 Yu 와 Schadow는 Fig. 2와 같이 노즐의 끝에 공동을 장착하여 그렇지 않은 것과 비교하여 전단층이 50% 증가하는 것을 확인하였다[5].

본 연구에서는 위에서 제시한 혼합방법을 사용하였을 때 생기는 제트 후류의 압력장의 분포를 실험적인 방법으로 측정하여 압력장의 구조를 이해하는 기초연구를 수행하였다. 또한 수직

분사 제트와 공동을 혼합한 실험모형을 사용하여 공동의 종횡비(길이/높이비: L/H)에 의하여 달라지는 후류의 압력을 비교하였다.

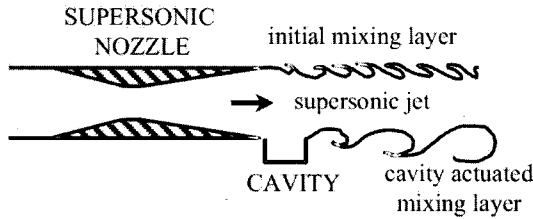


Fig. 2 Cavity-actuated Supersonic Mixing Layer [5]

2. PSP 압력측정 시스템 및 실험방법

2.1 PSP의 원리

PSP에서 압력을 측정할 수 있는 가장 대표적인 원리는 빛의 흡수(Absorption)에 의한 발광과 산소에 의한 차단(Oxygen Quenching)이다.

PSP는 발광과정을 거치면서 짧은 파장의 빛을 흡수하여 긴 파장의 빛을 방출한다.

PSP를 이용한 또 다른 압력측정 원리는 산소 분자에 의한 차단이다.

PSP 내의 Probe는 산소분자와 결합한다. 대기 중의 산소분자가 PSP 내부에 침투하여 PSP의 Probe와 상호작용을 하게 된다. 이때 산소분자가 Probe의 발광을 차단하는 것을 'Oxygen Quenching' 이라고 한다.

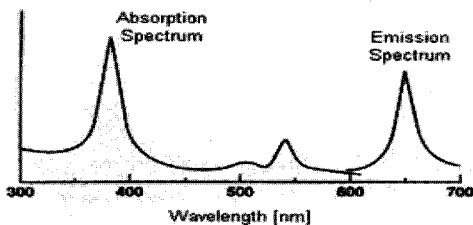


Fig. 3 Absorption and Emission of UNI-FIB PSP

Probe는 짧은 파장의 빛을 흡수해서 긴 파장의 빛을 내지만, 산소와 결합한 Probe는 흡수한

에너지를 산소에 빼앗겨 빛을 내지 못한다. 또한 PSP가 도포된 표면에 압력 차이가 있으면, 압력이 높은 부분은 산소 분자의 침투가 많고, 압력이 낮은 부분은 반대가 된다. 이러한 차이에 의해서 압력에 따라 Probe 입자가 빛을 방출하는 정도가 달라지는 것이다. 이 차이를 CCD 카메라를 통해서 컴퓨터에 입력 받고 이미지 처리 과정에 의해서 압력의 값으로 변환 시킬 수 있다. Fig. 4은 Oxygen Quenching 과 Photon Excitation의 원리와 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

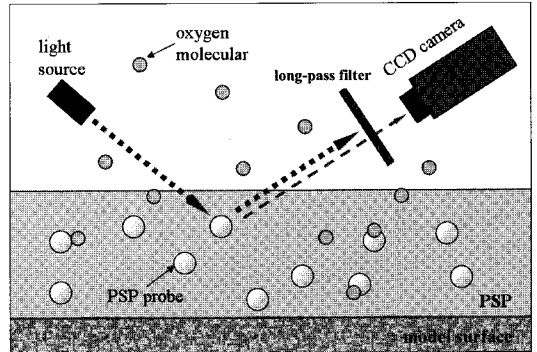


Fig. 4 Principle of PSP

2.2 Calibration Chamber

Calibration 장치는 도료 보정(Paint Calibration)의 방법 중의 하나인 'A Priori Method'를 위해 필요한 장치이다[6]. Priori Calibration은 압력과 온도를 변화시키면서 발광량의 변화를 측정하여 그 관계를 관계식으로 나타낸다. Calibration 장치는 Calibration Chamber의 내부와 외부로 완전히 차단시킬 수 있는 Chamber와 내부의 압력과 온도를 제어할 수 있는 컨트롤 모듈로 구성된다. Chamber의 설계는 ISSI社의 Calibration Chamber를 참고 하였다.

Figure 5는 Calibration Chamber의 외형이다.

Calibration 본체는 알루미늄으로 제작하였다. 내부는 표본점시, 온도센서, 열전소자, 수냉식 쿨러, 압력호스로 구성되어 있다.

Calibration Chamber의 표본점시는 황동으로 제작해 열전도율을 높이고, 내부에는 온도센서를

설치하여 보정표본(Calibration Cell)의 온도를 직접 측정할 수 있도록 하였다.

또한 압력튜브를 통하여 밀폐된 표본접시 내부의 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 표본접시 밑면에는 열전소자를 이용하여 표본접시를 직접 가열/냉각 한다.



Fig. 5 Calibration Chamber

다음 Fig. 6은 Calibration을 실시하는 실험장면을 보여주고 있다.

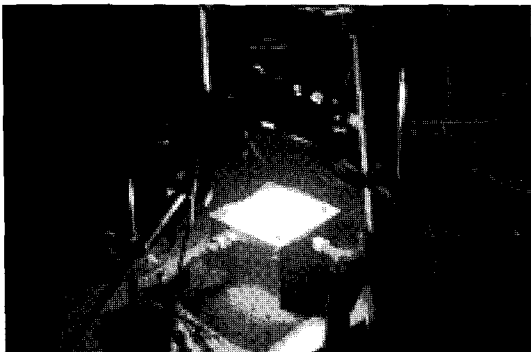


Fig. 6 Calibration Experiment

2.3 페인트, 광원, 영상획득 장치, 도포기기

본 연구에서 사용된 PSP는 ISSI社의 PtTFPP (백금 포르피린)를 PSP Probe로 사용하고, FIB를 고정제로 사용한 UNI-FIB UF300을 사용하였다. UNI-FIB의 흡수 파장은 430nm(Blue)이며 방출 파장은 630nm(Red)이다.

광원은 흡수 파장에 맞게 460nm의 푸른색을

방출하는 LED 조명을 사용하였다.

영상획득 장치는 PSP에서 방출하는 빛을 디지털화 하여 컴퓨터를 이용한 후처리 과정에 필요한 그림파일을 생성해내는 역할을 한다. 본 연구에 사용된 CCD 카메라는 Cooke社의 Sensi-Cam으로 12-Bit, 1024×1024pixel의 분해능으로 10⁷분의 1초의 노출 속도로 촬영할 수 있다. 뿐만 아니라 액체질소에 의한 냉각시스템으로 실리콘 가열에 따른 노이즈(Dark Current)를 줄일 수 있는 장점이 있다. CCD 카메라에는 LED 조명이 모델에 반사되어 들어오는 짧은 파장대의 빛은 차단하고 압력 변화에 따른 PSP Probe에 의해 발생하는 긴 파장대의 빛만 통과하는 Long-pass filter를 장착하여 이미지를 획득하였다.

PSP를 실험모델의 표면에 고르게 입히지 못하면 이미지 획득 시 노이즈가 생기는 원인이 된다. 도료를 얇고 고르게 도포하는데 적합한 도구인 '에어브러시(Airbrush)'를 사용하였다.

2.4 후처리 과정(Post Processing)

풍동실험에서 얻은 PSP의 발광 이미지만으로는 압력정보를 도출할 수 없다. 풍동실험에서 얻은 이미지와 Calibration 과정에서 얻은 보정상수를 조합해야 압력정보를 알 수 있다. 이러한 과정이 필요하기 때문에 PSP를 이용한 실험에는 이미지의 후처리 과정이 포함된다.

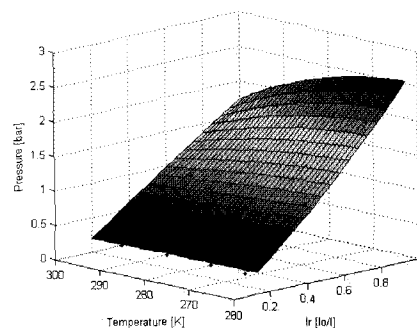


Fig. 7 Result of Calibration

또한, 풍동실험 시 물체가 움직이는 경우의 보

정, CCD 카메라에 의한 노이즈 제거 등의 기술도 후처리 과정에 포함된다. 본 연구에서는 Calibration을 위하여 Matlab을 이용하여 제작한 프로그램을 사용하였고, 압력 이미지 획득을 위하여 상용 프로그램인 ISSI社의 ProImage OMS 3.0을 사용하였다[6].

2.4 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 $P=0.2MPa$, $T=129K$ 이다.

2.5 제트 분사 공동 실험모형

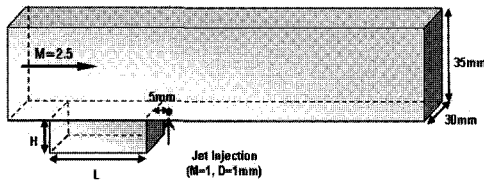


Fig. 8 The Geometry of the Cavity

실험모형은 초음속 풍동의 시험부의 밑면에 장착되며 Fig. 8과 Table 1과 같은 형상을 가진다. 각각의 Case는 수직분사 제트만 있는 모형과 종횡비를 변화시킨 공동의 후방에서 제트분사를 하는 모형이다. 제트의 분사는 공동이 끝나는 지점에서 5mm 떨어진 위치에서 실시한다. 수직분사 유체는 공기를 사용하였다. Fig. 9는 실제로 실험에 사용했던 모형으로 PSP를 도포하기 전(좌)과 도포한 후(우)의 모형을 보여준다.

Table 1. Cases of Cavity

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



Fig. 9 Picture of the Cavity

3. 실험 결과

3.1 Shadow graph 가시화

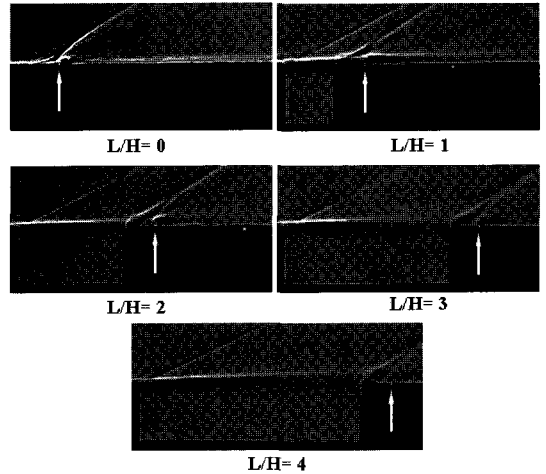


Fig. 10 Shadow Graph Images of the Cavity and Jet Injection

Figure 10은 공동의 종횡비를 변화시키면서 Shadow graph 기법을 이용하여 가시화한 그림이다. 그림에서 흰색 화살표를 이용하여 제트 분출구의 위치를 표시하였다. 공동의 종횡비가 증가 할수록 제트 분출구를 지나는 전단층의 두께가 증가하고, 제트 분출구 상단에 생기는 Barrel shock의 기울기는 윗방향으로 증가하였다.

3.2 실험결과

PSP 실험결과는 전산해석의 압력분포 이미지 결과와 C_p 값을 비교하였다. PSP의 실험결과와 비교할 전산해석결과는 본 연구실에서 수행한 선행 연구로부터 얻었다.

전산해석 조건은 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하였고, 공간 차분 기법으로는 Roe's FDS(Flux Difference Splitting)를 사용하였으며, 시간적분 방법으로는 완전 내재적인(Fully Implicit) 방법을 사용하였다. 난류 모델로는 Menter의 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다[7].

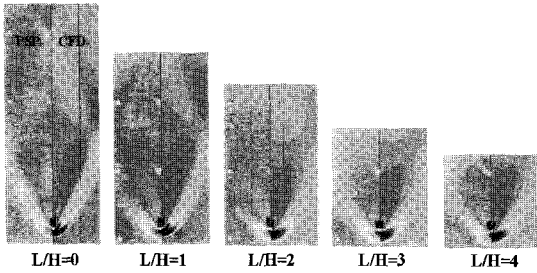


Fig. 11 Compare CFD(Right) with Experiment (Left) Pressure Field

Figure 11은 PSP와 전산해석의 압력장의 분포를 비교한 것이다. 각각 압력에 대한 범위가 다르기 때문에 정확한 압력값에 대한 정량적 비교는 압력분포 이미지만으로 판단하기 힘들지만 정성적으로는 비슷한 양상을 띠고 있다.

충격파가 형성된 이후 영역의 압력이 상승하였다. 압력 분포 이미지에서 종횡비가 늘어남에 따라서 공형충격파의 넓이가 점점 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 공동에 의한 유동의 교란이 가장 큰 원인이다.

충격파에 의한 압력 상승과 후류의 압력 분포를 알기 위하여 C_p 곡선에 대한 비교를 하였다. Fig. 12의 좌표계에서 $Y=0, Z=0$ 선에서 X 의 변화에 따른 C_p 곡선을 PSP를 이용한 압력값과 압력공에서 취득한 압력값, 그리고 전산해석의 압력값 세 가지를 비교하였다. 또한, $Y=0, X=5\sim 19$ 까지의 C_p 분포를 통해서 공동 종횡비 증가에 따른 후류의 특성을 알아보았다.

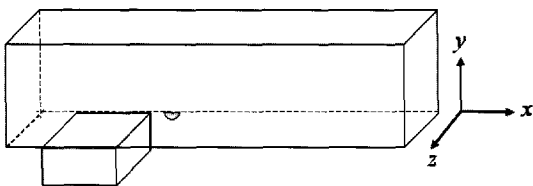


Fig. 12 Coordinate System

Figure 13에서 Fig. 17을 보면 공동 윗부분에서 생성된 충격파와 만나기 전까지의 C_p 값은 실험값, 전산해석, PSP 모두 유사한 경향을 보였다. 그러나 공동 윗부분의 충격파에 의한 압력상

승 이후의 결과는 실험상의 오차로써 전산해석과의 비교는 불가능하다.

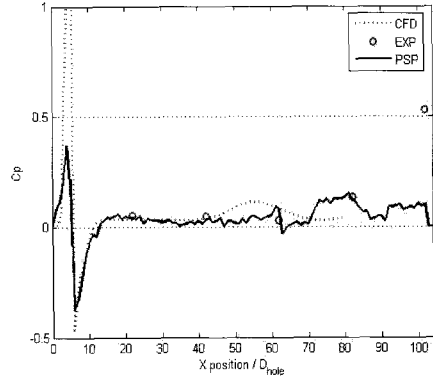


Fig. 13 Centerline C_p Distributions (L/H=0)

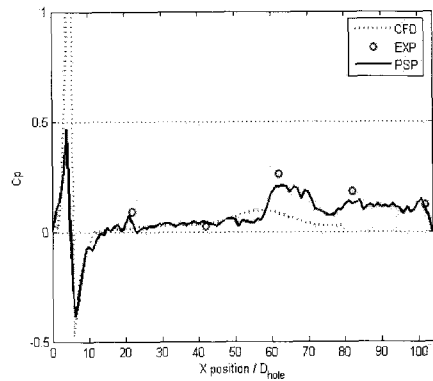


Fig. 14 Centerline C_p Distributions (L/H=1)

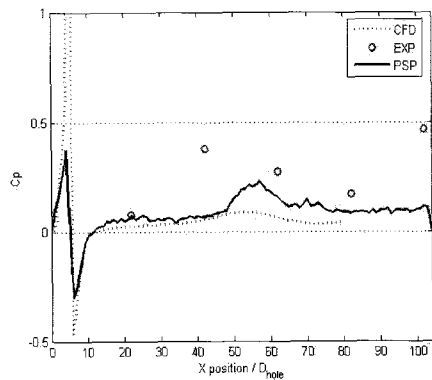


Fig. 15 Centerline C_p Distributions (L/H=2)

PSP의 결과가 전체적으로 노이즈가 많이 있는 것을 볼 수 있다. 렌즈의 특성상 초점거리의 한계가 있었기 때문에 원하는 해상도를 얻을 수 없었기 때문이다. 그 결과 압력정보를 포함하는 픽셀의 수가 모델의 형상과 비교해서 부족한 이미지를 얻었다. 이것은 다시 카메라의 위치에 따른 이미지 변환과정을 통해서 노이즈가 더욱 증가한 것이다. 궁형충격파에 의한 압력상승과 이후의 재순환영역의 압력하강은 전산해석에서 해석한 결과보다 낮은 폭을 보이고 있다. 그 이유는 PSP에서 취득한 이미지의 크기가 과도하게 작아서 노이즈 제거를 위한 필터링 과정에서 노이즈로 인식 되어 제거되었기 때문이다.

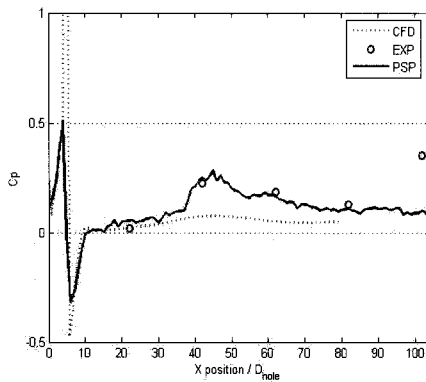


Fig. 16 Centerline C_p Distributions (L/H=3)

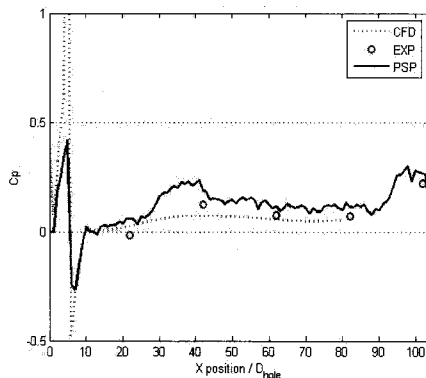


Fig. 17 Centerline C_p Distributions (L/H=4)

3.3 Wake Pressure Profiles

제트 분출구의 위치에서 시작하여 후류 방향으로 0.5mm 간격으로 압력계수(C_p)를 나타낸 그래프를 Fig. 18에 나타내었다. $Z_{\text{position}}/D_{\text{hole}}=0$ 에서 압력계수를 살펴보면 종횡비가 커질수록 Wake Zone이 좌우로 커지나 Vortex Structure에 의한 압력하강의 정도는 점점 줄어드는 경향을 나타내었다.

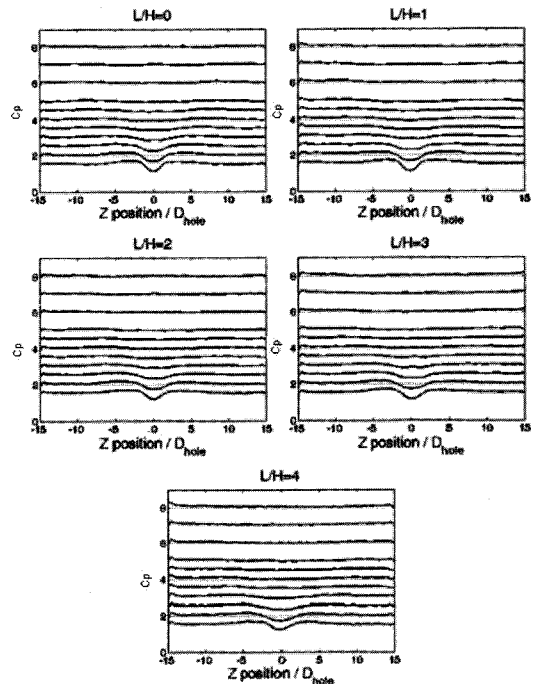


Fig. 18 C_p Profiles in the Wake Region

4. 결 론

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

기 및 연료 혼합정도가 증가할 것으로 예측된다.

PSP와 전산해석의 압력장의 분포를 정성적으로 비교한 결과 유사한 양상을 나타내었다.

충격파에 의한 압력 상승과 후류의 압력 분포를 알기 위하여 PSP, 압력공, 전산해석을 이용한 압력값 C_p 를 비교하여 공동 종횡비 증가에 따른 후류의 특성을 알아보았다.

공동 윗부분에서 생성된 충격파와 만나기 전까지의 C_p 값은 PSP, 압력공, 전산해석 모두 유사한 경향을 보였다.

제트 분출구의 위치에서 시작하여 후류 방향으로 C_p 를 그래프로 나타낸 결과 종횡비가 커질수록 Wake Zone이 좌우로 커지나 Vortex Structure에 의한 압력하강의 정도는 점점 줄어드는 경향을 나타내었다.

PSP 압력측정 기술은 얼마나 해상도가 좋은 이미지를 사용하느냐에 따라서 그 정밀도가 달라진다. 본 연구에서는 렌즈의 특성상 초점거리의 한계가 있었기 때문에 낮은 해상도의 이미지를 사용하여 다소 노이즈가 있는 압력 데이터를 취득하게 되었다. 노이즈의 증가는 압력 데이터의 손실을 의미하므로 PSP를 이용하여 보다 정확한 정량적 자료를 얻기 위해서는 장비의 개선 등 오차를 줄이기 위한 노력이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구지원(과제번호 R01-2006-000-10034-0) 및 방위사업청

과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD070041AD)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Yuan, L. L., R. L. Street, and J. H. Ferziger, Large-eddy simulations of a round jet in cross flow, *Journal of Fluid Meachanics* 379, 71-104, 1999
2. 성홍계, 윤현걸, 램제트/스크램제트 기술동향과 기술분석 II. 스크램제트 및 복합엔진, 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp.115-127
3. Sang-Hyeon Lee and Tohru Mitani, Mixing Augmentation of Transverse Injection in Scramjet Combustor, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 1, 2003
4. Adela Ben-Yakar, Experimental Investigation of Mixing nad Ignittion of Transverse Jets in Supersonic Crossflows, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 2000
5. Yu, K. H. and K. C. Schadow, Cavity-actuated supersonic mixing and combustion control, *Combustion and Flame* 99, 295-301, 1994
6. ISSI ProImage Version 3.0 User's GUIDE.
7. 오주영, Cavity 형상변화에 따른 스크램제트 엔진 연소기 내부의 혼합 성능 특성에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문 2005. 2