

경사충돌제트의 PSP 압력장 가시화

강종훈* · 이상준†

PSP Pressure Field Visualization of an Oblique Impinging Jet

Jong Hoon Kang* and Snag Joon Lee†

Abstract

The PSP (pressure sensitive paint) technique has recently received a large attention as a new revolutionary optical method to measure absolute pressure distribution on a model surface. The PSP technique can be applied to quantitatively investigate flow structure using a CCD camera and image processing technique. In the static calibration, the luminescent intensity of PSP coatings was measured from 0kPa to 11kPa with 0.5, 1, 2kPa increments. In this study, the low-pressure PSP technique was applied to an oblique impinging jet to measure pressure field variations on the impingement plate with varying angle of an oblique jet. The flow structure over the impingement plate was visualized using a surface tracing method. As a result, the detail pressure field distributions of the oblique low-speed impinging jet were visualized effectively using the PSP technique.

Key Words : Pressure Sensitive Paint (감압 도료), Oblique impinging jet (경사충돌분류), Oxygen quenching (산소 켜칭), Static calibration (정적 보정)

1. 서론

충돌제트 충돌면에서의 압력분포에 관한 연구는 그 학문적 관심뿐만 아니라 산업적으로 중요하다. 일반적으로 충돌면에 작용하는 압력분포를 압력탭, 압력변환기, 그리고 마이크로폰 등을 이용하여 측정하고 있다. 그러나, 전통적으로 사용되어온 이 방법들은 압력정보를 정확히 제공하지만, 압력탭 위치의 압력값만을 측정하기 때문에 모델 표면에 작용하는 전체적인 압력분포를 얻기 어렵다.

최근에는 산소켄칭(oxygen quenching) 원리에 기초한 PSP (pressure sensitive paint) 측정기법을 이용하여 모델 표면 전체의 압력정보를 정확히 측정하고 있다. 이 방법은 점측정 방식의 기존 압력측정 방법과 비교하여 실험이 간단하고, 우수한 공간분

해능으로 모델표면 전체에 대한 압력장 측정이 가능하다. 본 연구는 자체적으로 개발하여 사용하고 있는 저속 유동용 PSP 조합[1]을 이용하여 경사충돌분류의 압력장을 측정하였다.

2. PSP의 정적 보정

제작된 PSP 시편을 가시화 창(window)을 가진 압력용기 내에 넣고 용기내부의 압력을 일정 간격으로 증가시키면서 압력에 따른 발광강도를 측정하여 아래의 Stern-Volmer 관계식의 계수를 보정하는 정적 보정실험(static calibration)을 수행하였다.

$$P = \sum_{n=0}^N A_n (T) \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^n \quad (1)$$

여기서, I_{ref} 는 기준 발광강도로 압력이 가해지지 않은 상태(wind-off)의 발광강도를 의미하고, I 는 압력이 가해진 상태(wind-on)의 발광강도를 나타낸다. 그리고 A_n 은 온도에 의존하는 보정상수이다.

Fig.1은 PSP의 발광특성을 구하기 위한 보정

† 포항공과대학교 기계공학과 교수
E-mail: sjlee@postech.ac.kr

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

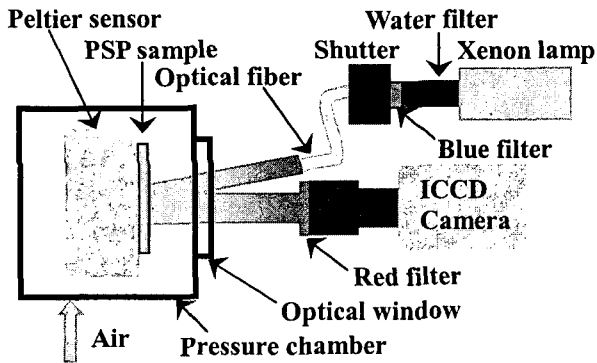


Fig. 1 Schematic of PSP calibration set-up

실험장치의 개략도를 보여주고 있다. PSP 가 코팅된 알루미늄 평판을 가시화 창쪽을 향하도록 압력용기 내에 설치하였다. 용기 내부 압력은 압력조절기를 이용하여 일정 압력을 유지하도록 하였다. 압력 변화는 분해능이 10Pa 인 디지털 압력게이지를 이용하여 측정하였다.

코팅된 PSP 조합들을 반응시키기 위해 광원으로 300W 제논(Xenon) 램프를 사용하였으며, 이때 광원 전방에 광에너지의 연속적 공급에 기인한 온도 상승을 막기 위해 water filter 를 설치하였고, 입사광의 파장을 일정하게 유지하기 위해서 파장 $\lambda_c = 420 \pm 30 \text{nm}$ 의 대역 필터(band pass filter)를 사용하였다. 그리고 압력용기의 가시화 창으로 조사되는 빛의 굴절을 최소화 시키기 위해 카메라와 조명장치를 수평으로 설치해야 하므로 본 연구에서는 광섬유(optical fiber) 케이블을 사용하여 조명하였다. 저압유동에 대한 보정실험 시 PSP 가 조명에 계속 노출되어 발광이 시간에 따라 감소하는 효과(photodegradation)를 최소화 시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 조명장치에 셔터(shutter)를 부착하여 발광강도를 측정하는 순간에만 셔터를 열어 빛

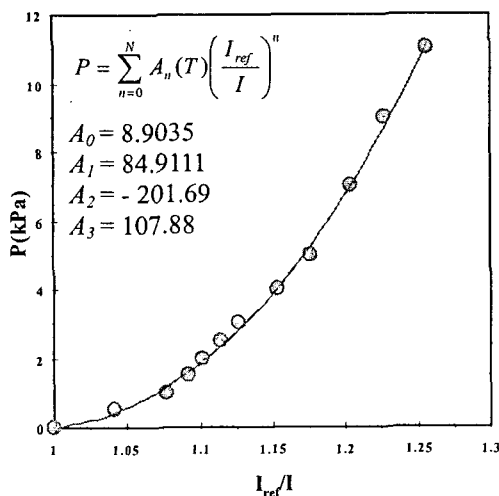


Fig.2 PSP calibration curve (T=24 °C)

을 조사하도록 하였다.

조명에 의해 PSP 로부터 방출된 발광강도는 해상도가 1280×1024 pixels 인 12bit intensified CCD (ICCD) 카메라를 이용하여 측정하였다. 이때 조사되는 빛에 의한 산란광을 막고 방출되는 빛만을 취득하기 위해서 ICCD 카메라 앞에 파장 $\lambda_c = 650 \pm 30 \text{nm}$ 의 대역 필터를 설치하였다.

저압 영역에서 압력값을 정확히 측정하기 위해서 압력용기 내부압력을 0~3kPa 사이는 500Pa, 5kPa 까지는 1kPa, 그리고 11kPa 까지는 2kPa 씩 증가시키면서 PSP-3 에 대해 정적 보정실험을 수행하였다. 기준압력(P_{ref})은 0kPa, 즉 대기압으로 잡았으며, 평판의 표면온도는 $T=24^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

각각의 유동조건에서 120 장의 PSP 영상에 대해 CCD 카메라 자체에 내재된 암전류(dark current)에 기인한 노이즈(noise)를 제거한 후 이들을 평균하여 발광강도의 비 값을 구하였다. 본 연구에서는 PSP 조합을 경사충돌분류에 적용하기 위하여 5 회씩의 반복실험을 통하여 평균값을 획득하였다. Fig.2 는 3 차(N=3)의 Stern-Volmer 관계식의 계수를 구하기 위해 최소자승법(least-square fitting)으로 구한 보정결과를 나타낸 것이다.

3. 경사충돌분류의 압력장 측정

3.1 실험장치

Fig.3 은 충돌평판에서의 표면압력을 측정하기 위해 사용한 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험에 사용된 조명장치와 CCD 카메라는 앞의 정적 보정실험에서 사용된 것과 동일하다. 실험에 사용된 충돌체트의 노즐(nozzle) 직경은 $D=3 \text{mm}$ 이고, 노즐출구에서의 유속은 약 80m/s 이었다. 경사충돌체트의 경사각 변화에 따른 압력장 변화를 연구하기 위하여 노즐 출구와 PSP 가 코팅된 충돌평

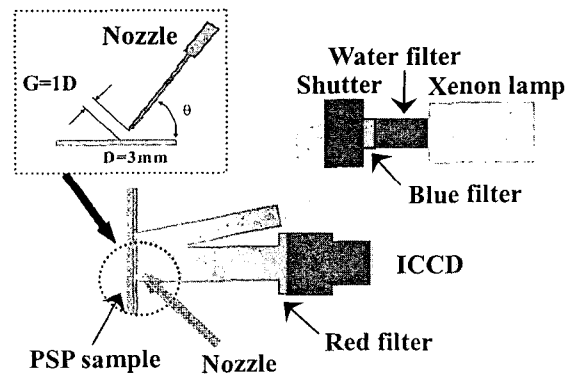


Fig. 3 Experimental set-up for PSP measurements of an oblique impinging jet

판 사이의 거리(G)를 $G/D=1$ 로 고정하고 충돌평판과 노즐 사이의 충돌각도를 $\theta=30\sim70^\circ$ 까지 20° 씩 변화시키면서 압력장 변화를 측정하였다. 경사충돌분류 실험 시 열전대(thermal couple)로 측정된 평판의 온도 변화가 정적 보정실험과 비교하여 그 온도차이가 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 이내 이기 때문에 온도 변화에 기인한 영향을 무시하였다.

또한 평판에 충돌하는 충돌분류의 유동특성을 확인하기 위하여 실리콘오일(KF-96-10CS)과 미세입자(숫)를 혼합한 오일 현탁액(oil suspension)으로 충돌면의 표면유동을 가시화하였다. 미세입자와 실리콘 오일의 혼합비는 1:2 정도이며, 올레산(oleic acid)을 현탁액에 소량 추가하여 입자와 오일의 혼합이 용이하도록 하였다. 현탁액의 색깔이 검은 색이므로 미세입자들의 거동을 잘 확인하기 위하여 충돌평판의 표면을 먼저 흰색페인트로 칠하였다. 현탁액을 유화용 붓으로 충돌평판에 균일하게 칠한 뒤 유동에 노출시켜 현탁액의 미세입자가 유동방향을 따라 움직이며 생성되는 궤적을 가시화하였다.

3.2 영상처리 및 결과

PSP 가 코팅된 충돌면에서 취득한 wind-off 영상(I_{ref})과 wind-on 영상(I)을 이용하여 압력분포를 구하기 위해서 다음과 같은 영상처리과정(image processing)을 거쳤다.

우선 보정실험과 같은 방법으로 ICCD 카메라에 내재된 노이즈를 제거하기 위해 실험 전 후 조명을 끈 상태에서 암전류 레벨의 영상을 취득하였다. 그리고 충돌제트 유동이 있는 경우(wind-on)와 없는 경우(wind-off)의 영상을 취득하였다. 적절한 영상처리를 이용하여 이들 영상에서 암전류 레벨 영상을 제거하였다. 이러한 과정을 거친 후 얻어진 wind-off 영상을 wind-on 영상으로 나누어 주고, 앞서 수행한 보정실험으로부터 구한 보정계수 A_0, A_1, A_2, A_3 와 식(1)을 이용하여 최종적으로 충돌평판에서의 표면압력분포를 구할 수 있다.

Fig.4 는 노즐과 충돌평판 사이의 거리가 $G/D=1$ 인 조건에서 충돌 경사각도에 따른 압력분포 변화를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 평판에 걸리는 최대압력은 충돌각도가 증가할수록 커지고 있다. 그리고 충돌평판에 작용하는 압력 contour 는 $\theta=70^\circ$ 일 때 보다 $\theta=30^\circ$ 일 때 X 방향으로 길게 늘어나는 형태를 보여주고 있다. 이것은 평판과 이루는 각도가 작을수록 평판과 부딪히는 면적이 커지기 때문으로 생각되진다. 이에 따라 압력분포를 나타내는 등압선의 유동방향(X 축)은

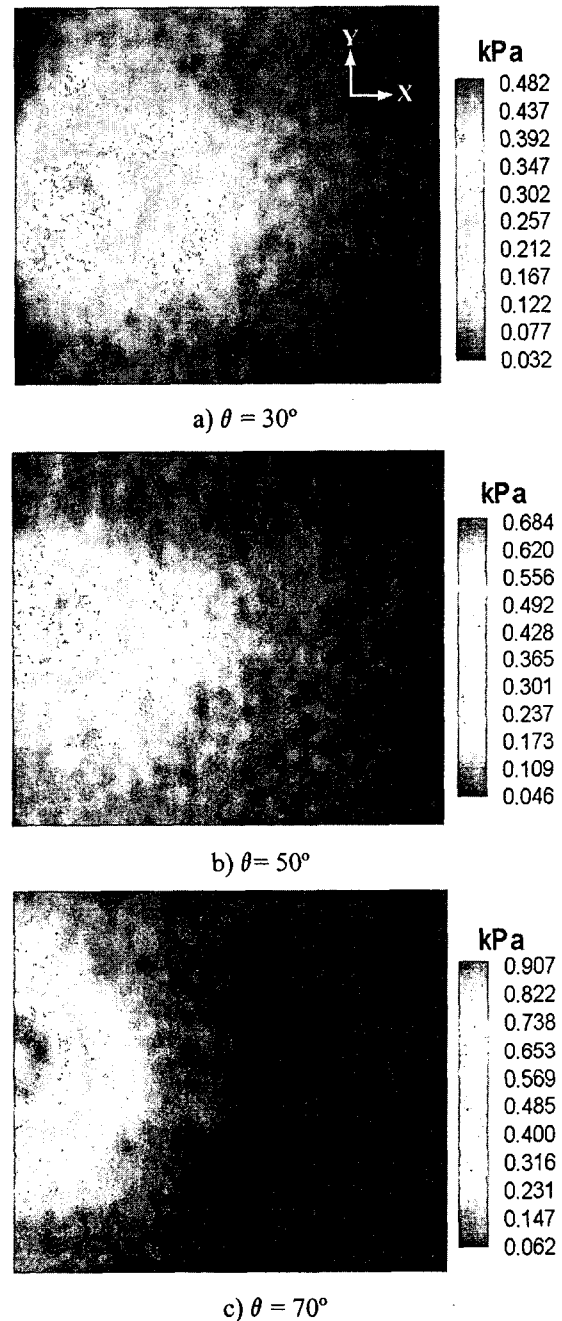
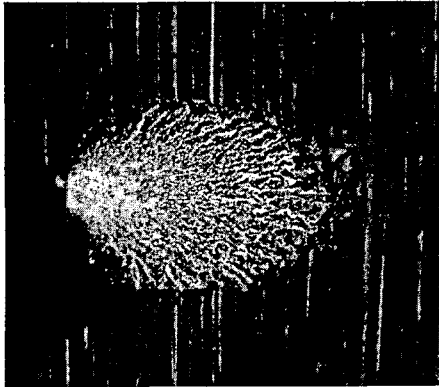


Fig. 4 Mean pressure distributions on the impingement plate at $G/D=1$

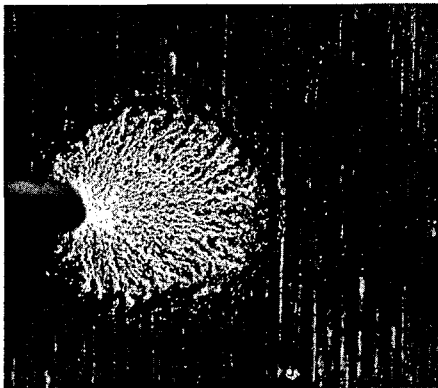
길어지고, 반경방향(Y 축)은 짧아지게 된다.

평판에 작용하는 충돌분류의 표면유동특성을 유동가시화한 결과를 Fig.5 에 나타내었다. Fig.5 에서 볼 수 있듯이 노즐과 평판 사이의 각도가 줄어들수록 충돌분류가 유동방향(X 축)으로 길게 늘어나고 반경방향(Y 축)으로의 유동진행은 감소하는 것으로 나타났다. 유동가시화 결과가 압력 contour 와 유사함을 알 수 있다.

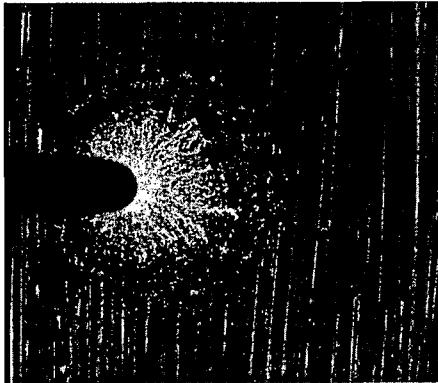
본 연구에서는 PSP 기법을 통해 기존의 압력탭 방식에 비해 현저히 높은 공간분해능으로 아음속



a) $\theta = 30^\circ$



b) $\theta = 50^\circ$



c) $\theta = 70^\circ$

Fig. 5 Flow visualization on the impingement plate at $G/D=1$

유동 속에 놓인 물체 표면에 작용하는 압력의 공간분포를 자세하게 측정할 수 있었다.

4. 결 론

아음속의 저속 유동에 적용 가능한 PSP 조성을 이용하여 기존의 점측정방식에 비해 매우 높은 공간분해능으로 경사충돌분류의 압력분포를 측정하였다.

충돌평판에 작용하는 압력 contour 결과는 충돌면 표면 유동가시화 결과와 잘 일치하였다. 이것으로부터 PSP 기법이 물체 표면의 압력분포 측정뿐만 아니라 표면유동의 가시화 기법으로도 사용 가능하다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kang, J. H. and Lee, S. J., 2004, "Development of Pressure Sensitive Paint(PSP) Technique for Low-speed Flows and Its Application," KSAS, Vol. 32, No. 4, 12-17.
- (2) Lee, S.I. and Lee, S.J., 2002, "Performance Comparison of Pressure Sensitive Paint and Pressure Field Measurement of Oblique Impinging Jet," KSME, Vol. 26, No. 7, pp. 1031-1038
- (3) McLachan, B.G. and Rell, J.H., 1995, "Pressure - Sensitive Paint in Aerodynamic Testing," Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.10, pp. 470-485.
- (4) Liu, T., Campbell, B.T., Burns, S.P. and Sullivan, J.P., 1997, "Temperature- and Pressure-Sensitive Paint Luminescent Paints in Aerodynamics," Appl. Mech. Rev., Vol. 50, No. 4, Apr.
- (5) Asai, K., 1998, "Surface Pressure Sensitive Measurement Using Pressure Sensitive Paint," 可視化情報, Vol. 18, No. 69, Apr.
- (6) Peterson, J.F. and Fitzgerald, R.V., 1980, "New Technique of Surface Visualization based on Oxygen Quenching of Fluorescence," Rev. Sci. Instrum, 51(5), May
- (7) Engler, R.H., Klein, C. and Trinks, O., 2000, "Pressure Sensitive Paint Systems for Pressure Distribution Measurements in Wind Tunnels and Turbomachines," Meas. Sci. Tech., Vol. 11, pp. 1077-1085.