

Pressure Sensitive Paint 의 성능비교 및 경사충돌분류의 압력장 측정

이 상 익* · 이 상 준†

(2001년 12월 31일 접수, 2002년 3월 28일 심사완료)

Performance Comparison of Pressure Sensitive Paint and Pressure Field Measurement of Oblique Impinging Jet

Sang Ik Lee and Sang Joon Lee

Key Words : Pressure Sensitive Paint(PSP), Oxygen permeability(산소 투과성), Luminophore(발광분자), Oxygen quenching, Impinging jet, Polymer(고분자)

Abstract

The pressure sensitive paint (PSP) has recently received a considerable attention in the fields of aerodynamics and fluid mechanics as a new revolutionary optical technique to measure pressure fields on a body surface. In this study, the feasibility and effectiveness of the PSP pressure field measurement technique have been investigated experimentally. Seven different PSP formulations including two porphyrins(PtOEP and PtTFPP) and four polymers(Polystyrene, cellulosus acetate butyrate, GP-197 and Silicon-708) were tested to check the performance and characteristics of each combination. The static calibration of each PSP formulation was carried out in a constant-pressure chamber. The PSP technique was applied to an oblique impinging jet flow to measure variation of pressure field on the impinging plate at an oblique jet angle of $\theta=60^\circ$. Pressure field images were captured by an 12bit intensified CCD(ICCD, 1K×1K)camera. As a result, the dynamic response of PSP depends on the oxygen permeability of polymer and the photochemical interaction between luminophore and polymer as well as the reaction of luminophore itself. The reaction of luminophore was changed by employing different polymers. In conclusion, Among 7 PSP formulation tested, the combination of PtTFPP and cellulosus acetate butyrate show the best performance. In addition, the detail pressure field of an oblique high-speed impinging jet was measured effectively using the PSP technique.

기호설명

- I_o : 진공상태에서의 발광강도
- I_{off} : wind-off 상태의 기준 발광강도
- I : 실제(wind-on) 측정된 발광강도
- K_q, K : 켄칭(quenching) 상수
- A, B : 보정상수

1. 서 론

공기역학적 문제에 대한 실험적 연구에 있어서 정확하고, 공간적으로 연속적인 표면 압력분포를 측정한다는 것은 주어진 유동현상을 이해하거나 CFD 수치해석 결과와 비교하는데 있어서 매우 중요하다.

일반적으로 표면 압력분포는 모델 표면에 설치된 압력탭(tap)이나 압력변환기(pressure transducer)에 의해 측정된다. 전통적으로 사용되어온 이 방법은 모델 표면에 작용하는 압력정보를 정확히 제공하기는 하지만 몇 가지 단점을 가지고 있다. 우선, 측정된 표면 압력의 공간 분해능(spatial resolution)이 압력탭의 숫자와 설치된 위치에 제한되기 때문에 상세한 압력분포를 얻기 위해서는 많은 제작비와 시간을 필요로 하게 된다. 또한, 모델

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2169

FAX : (054)279-3199

표면에 설치한 압력탭은 공기역학적 측면에서나 구조적인 측면에서 bias 에러를 유발 시킬 수 있다는 단점을 가지고 있다.

반면, 산소 퀘칭(oxygen quenching)을 기본으로 하여 표면압력을 측정하는 PSP(pressure sensitive paint)는 기존의 압력탭 방식과 비교하여 여러 가지 장점을 가지고 있다. 우선 실험이 간단하며, 값이 싸고, 우수한 공간분해능으로 측정하고자 하는 모델의 전체 표면에 대한 압력측정이 가능하다. 또한, 기존의 압력탭 방식으로는 측정이 쉽지 않았던 굴곡이 심한 모델의 표면 압력측정이나 팬(pan)이나 프로펠러와 같은 회전 물체표면의 압력 측정도 가능하다. 뿐만 아니라, 압력탭 설치를 위해 모델 구조를 변형시킬 필요가 없기 때문에 측정시스템에 기인한 에러를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

PSP기술은 1980년대 중반, 러시아의 TsAGI와 모스크바 대학이 공기역학 실험에 적용하면서 본격적으로 표면 압력측정에 적용되기 시작하였다.⁽¹⁻³⁾ 이후, 표면압력측정 기법으로서 PSP기술의 유용성이 입증되면서 점차 사용이 확대되기 시작하였으며, 현재는 세계적으로 여러 연구기관들이 각자 독립적인 PSP system 개발에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.⁽⁴⁻⁷⁾

미국의 경우, Washington 대학과 Purdue 대학, McDonnell Douglas사 그리고, NASA의 여러 연구소들이 주축이 되어 PSP 연구를 수행해오고 있다. 최근에는 저속 유동에 적용할 수 있는 새로운 PSP조합을 연구하고 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾

일본에서도 PSP에 관한 많은 연구가 수행되고 있는데, 특히 새로운 코팅기법의 개발과 다양한 PSP조합을 통하여 민감도(sensitivity)를 향상시키려는 노력을 하고 있다.⁽¹²⁻¹³⁾ PSP 압력측정기술이 이처럼 세계적으로 많은 관심을 받고 있지만, 국내의 경우 아직 그 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 PSP를 이용한 압력장 측정기술의 특성과 적용가능성을 알아보고자 한다. 이를 위해 두 가지의 발광물질과 4가지의 고분자를 이용하여 서로 다른 7가지의 PSP 조합을 조성하여 성능을 비교하였으며, 경사충돌분류에 적용하여 압력장 측정기법으로서의 유용성을 확인하고자 한다.

2. 배경 이론

2.1 광물리학적 기초

PSP기법은 발광분자(luminophore)가 산소분자에 의해 광화학적으로 반응하는 산소 퀘칭 현상을 압

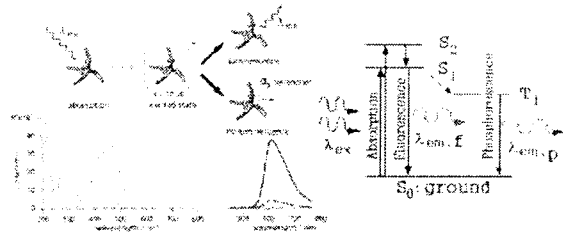


Fig. 1 Photo-physical foundation of oxygen quenching

력측정에 응용한 것으로, Fig. 1은 발광분자의 발광 과정과 산소 퀘칭이 발생하는 과정을 보여주는 기본적인 광물리학적 개념도이다.

발광분자는 가해지는 적절한 파장의 빛(UV)으로부터 광자(photon)를 흡수하게 되어 기저상태(S_0)에서 여기상태(S_1, S_2)로 에너지 레벨이 상승하게 된다. 이때 여기된 상태의 발광분자는 크게 두가지 과정을 통해 기저상태로 돌아가게 된다. 첫번째 과정은 기저상태로 가는 과정 동안 빛을 방출하는 형광(fluorescence)과 인광(phosphorescence) 과정이고, 두번째 과정은 외부의 다른 분자와 충돌하여 빛을 방출하지 않고 기저상태로 돌아가는 퀘칭 과정으로 주로 산소분자에 의해 발생하기 때문에 일반적으로 산소 퀘칭이라고 한다.

산소에 의해서 발생하는 퀘칭 과정은 산소농도의 증가에 따라 증가하게 되며, 이로 인해 방출되는 발광강도는 퀘칭의 발생비율에 따라 변하게 된다. 즉, 이 두 과정 동안 방출되는 빛의 강도를 측정하게 되면 공기중의 산소농도를 측정할 수 있게 된다. 이때, 측정된 발광강도와 공기 중 산소의 몰분율(mole fraction)은 항상 일정하며 압력과 비례한다는 Henry의 법칙을 이용하게 되면 다음과 같이 압력과 발광강도의 관계를 나타내는 Stern-Volmer 관계식을 얻을 수 있게 된다.⁽⁶⁾

$$\frac{I_0}{I} = 1 + K_q \cdot [O_2] = 1 + K \cdot P \quad (1)$$

여기서 I_0 는 진공상태에서 측정된 발광강도를, I 는 실제 실험조건에서 측정된 발광강도를 나타낸다. 또한, K_q 는 발광분자에 따른 퀘칭비율을 나타내는 상수이며, K 는 산소의 몰분율을 포함하는 퀘칭 상수이다. 그리고, $[O_2]$ 는 공기중 산소농도를, P 는 압력을 나타낸다. 하지만 진공상태에서 발광강도를 측정해야 하는 식 (1)은 여러 가지 복잡한 실험장치가 필요할 뿐만 아니라, 풍동 실험과 같은 공기역학적 실험에 직접 적용하기에 쉽지 않다. 이에 실제 실험에서는 다음과 같이 두 가지 서로 다른 유동 즉, 서로 다른 퀘칭 조건에 대한 발광강도 비율을 이용하여 수정된 Stern-Volmer 관계식을 사용하게 된다.⁽¹⁴⁾

$$\frac{I_{ps}}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (2)$$

여기서, P_{ref} 와 I_{ref} 는 기준 압력과 기준 발광강도를 나타내는데, 일반적으로 압력이 가해지지 않은 (wind-off) 상태의 값을 의미한다. 여기서 A 와 B 는 보정실험을 통해 구해지는 보정상수이다.

2.2 PSP Formulation and Coating

Fig. 2는 발광분자를 포함한 일반적인 PSP층의 구성을 나타낸 것이다. 여기서 실제 발광강도 측정에 중요한 sensing layer는 발광분자와 고분자 바인더(polymer binder)로 구성되어 있으며 보통 바인더 용액에 발광분자를 혼합하여 만든다. 특히 고분자는 단순히 바인더로서의 역할뿐만 아니라, 발광분자와 복잡한 상호작용으로 PSP의 광화학적 성질에 영향을 주기도 한다.⁽⁹⁾

그러나, 아직까지 고분자가 PSP의 광화학적 성질에 미치는 영향과 발광분자와의 상호작용에 대한 체계적인 해석이 이루어지지 않고 있어 반복실험을 통하여 최적의 혼합을 결정하고 있는 실정이다. 그리고, 고분자의 산소투과성도 PSP의 반응성도 즉, 압력에 대한 민감도에 큰 영향을 미치므로 고분자 선정시에 이러한 점들을 고려하여야 한다.

이렇게 제조된 PSP paint는 빛의 반사율을 높이기 위해서 먼저 물체 표면에 흰색으로 코팅하게 된다. 주로 스프레이 방법을 이용하여 직접 물체 표면에 입히지만, 다른 방법들로는 먼저 고분자를 물체 표면에 입힌 후 고분자가 굳기 전에 따로 준비해둔 발광분자액을 입히는 고분자 매트릭스(matrix)방법과 Asai⁽¹⁵⁾가 제안한 anodizing 기법 등이 있다. 그리고, PSP 코팅에 있어 가장 중요한 것은 PSP의 두께를 되도록 얇고 일정하게 하는 것으로 이는 PSP의 반응속도를 좌우하게 된다.

본 연구에서는 고분자 바인더가 PSP 페인트 반응에 미치는 영향을 알아보기 위하여 4가지의 다른 고분자와 2가지의 발광물질(PtOEP, PtTFPP)조합을 사용하여 PSP paint를 조합하였으며, 각각의 조합은 다음의 Table 1과 같다.

조합된 PSP 페인트는 핀 니들이 아주 미세한 air-brush (Richpen 013G)를 사용하여 알루미늄 평판(100mm×100mm)에 코팅하였으며, 실온($T \approx 25^\circ\text{C}$)에서 약 6시간 정도 말린 후 실험에 사용하였다. 이때 실온에서 쉽게 마르지 않는 GP-197와 Silicon708의 경우는 드라이어(hair dryer)를 약 30분 정도 사용하여 말린 후 실험에 사용하였다.

PSP를 이용한 실험에서 반응속도를 좌우하게 되는 코팅의 두께는 코팅 측정기를 이용하여 측정

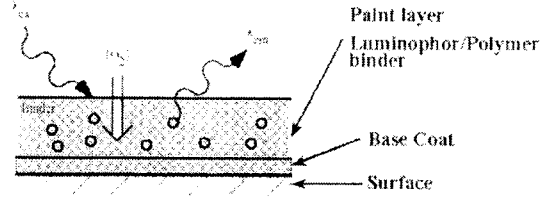


Fig. 2 Schematic of PSP layer

Table 1 The composition of PSPs used in the test

	Luminophor	Binder
PSP-1	PtOEP	PS
PSP-2	PtTFPP	PS
PSP-3	PtOEP	CAB
PSP-4	PtTFPP	CAB
PSP-5	PtTFPP	GP-197
PSP-6	PtOEP	Silicon 708
PSP-7	PtTFPP	Silicon 708

하였으며, PSP 페인트가 입혀진 평판에 대해 임의의 30지점을 측정하여 평균두께를 얻었다. 이때, white primer를 포함한 코팅 두께는 대략 20~30 μm 정도였으며, PSP 페인트만의 두께는 약 8~15 μm 정도 이었다.

3. 실험

3.1 정적 보정실험(static calibration)

정적 보정실험은 제작된 PSP paint를 실험 모델에 직접 적용하여 수행하는 것이 아니라, 별도로 제작된 PSP 시편을 광학용 가시화 창(window)을 가진 압력용기 내에 넣고 용기내의 압력을 일정한 간격으로 증가시키면서 압력에 따른 발광강도를 측정하여 Stern-Volmer 계수를 정하는 방법이다. 이때 시편 뒷면에 열전소자(peltier heater)를 설치하게 되면 온도에 따른 효과도 동시에 측정할 수 있게 된다. 이 방법은 주로 새롭게 조성된 PSP paint의 여러 가지 특성을 파악하기 위해서 사용되어진다.

Fig. 3은 본 연구에서 PSP paint의 발광특성을 알아보기 위한 보정실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

PSP paint가 입혀진 알루미늄 평판을 빛의 변화를 줄이기 위해 압력용기 앞쪽에 설치한 가시화 창쪽으로 향하도록 용기 내에 설치하였다. 내부압력은 압축공기를 이용하여 조절하였으며, 압력조절기로 일정 압력을 유지하도록 하였다. 또한, 온도 변화에 따른 PSP paint의 특성 변화를 보기 위해서 시편 뒤에 열전소자를 부착하였으며, DC 전

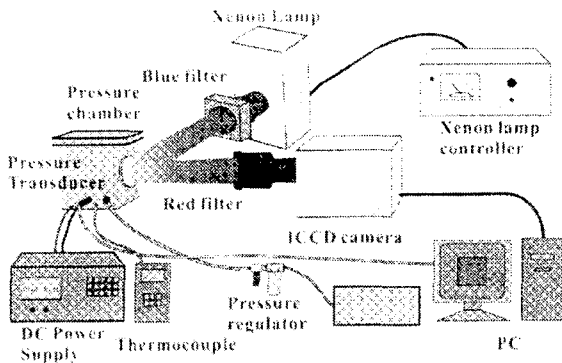


Fig. 3 Schematic of calibration set-up for PSP pressure field measurement

원공급장치(HP 6555A)를 이용하여 온도를 조절하였다. 압력용기내부의 압력과 시편의 온도는 각각 압력 변환기와 열전대를 이용하여 측정하였으며, 이때 압력과 온도의 불확실도는 각각 $\pm 1.5\text{kPa}$ 과 $\pm 2^\circ\text{C}$ 정도 이었다.

시편에 입혀진 PSP paint의 반응을 일으키기 위해서 175W의 제논 램프(Oriel Model 6137)를 사용하였으며, 이때 조명장치의 앞쪽에는 높은 광 에너지에 의한 온도 상승을 막기 위해 water filter를 장착하였고, 가해주는 빛의 파장을 일정하게 유지하기 위해서 파장 $\lambda_0=420\pm 30\text{nm}$ 의 대역 필터를 사용하였다.

조명에 의해서 PSP paint로부터 방출된 발광강도는 Nikon 사의 105mm렌즈가 장착된 12bit intensified CCD 카메라 (1280×1024 pixels², DiCAM PRO)를 이용하여 측정하였으며, 이때 가해주는 빛과 방출되는 빛을 구분하기 위해서 CCD 카메라 앞에는 파장 $\lambda_0=650\pm 30\text{nm}$ 의 대역 필터를 설치하였다.

3.1.1 보정 결과

용기내부의 압력을 10~140kPa로 10kPa씩 증가시키면서 7가지 PSP paint에 대해 정적 보정실험을 수행하였다. 기준압력 P_{REF} 는 140kPa로 잡았으며, 이때 평판의 표면온도는 $T=22^\circ\text{C}$ 이었다. Fig.4는 각각의 압력조건에서 취득한 원시(raw)영상으로, 압력이 증가함에 따라 발광강도가 떨어지고 있음을 볼 수 있다.

각 압력조건에서 10개의 영상을 취득하여 평균한 후 Stern-Volmer 관계식(식 (2))과 영상처리를 통하여 발광강도의 비값을 구하였다. Fig. 5는 이렇게 얻어진 발광강도 비를 압력비의 함수로 나타낸 것이며, Table 2는 각 그래프를 선형보간하여 얻은 Stern-Volmer식의 계수 A, B의 값을 나타낸다.

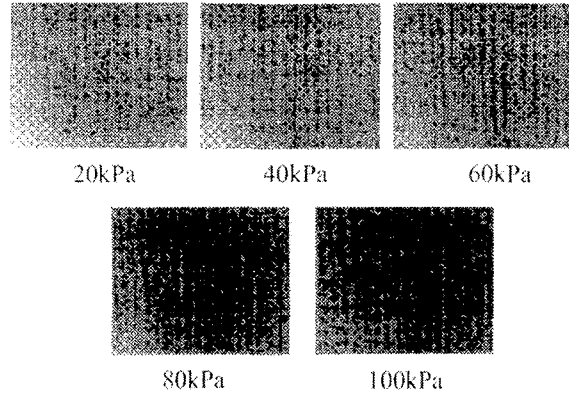


Fig. 4 Variation of luminescent intensity due to pressure change (PSP-1, T=22°C)

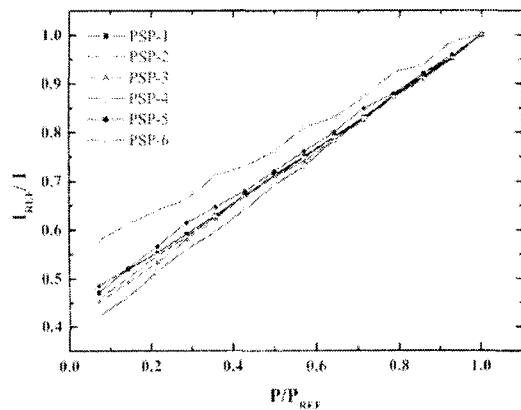


Fig. 5 Comparison of PSP intensity-ratio variation with pressure (T=22°C)

Table 2 Stern-Volmer Coefficient A,B

	$T = 22^\circ\text{C}$	
	A	B
PSP-1	0.4724	0.5217
PSP-2	0.4620	0.5322
PSP-3	0.4532	0.5409
PSP-4	0.4222	0.5810
PSP-5	0.4866	0.5129
PSP-6	0.5720	0.4354

Fig. 5의 보정실험 결과를 보면, 각 PSP paint조합의 발광강도는 압력에 대해 비교적 우수한 선형성을 보여주고 있으며, PSP-4가 다른 경우에 비해 상대적으로 발광강도 변화량이 큰 것으로 보아 압력에 대한 반응성이 다소 우수함 알 수 있다. 또한, 일반적으로 압력에 대해 높은 감응특성을 보이는 PSP는 Stern-Volmer식의 계수 A가 0.5보다 크다고 알려져 있는데,⁽¹⁵⁾ 이러한 사실에 입각하여 실험결과를 보면 계수 A의 값이 0.4354인 PSP-6과 전혀 반응을 보이지 않은 PSP-7을 제외하고는 대

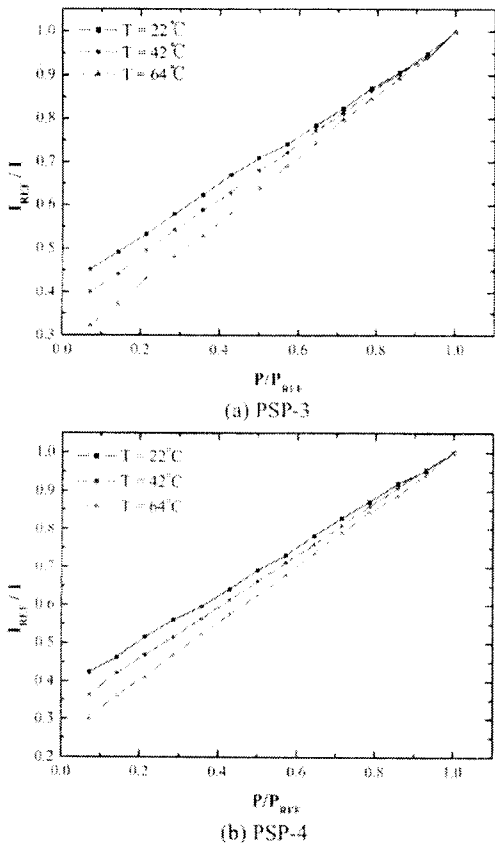


Fig. 6 Effect of temperature on luminescent intensity

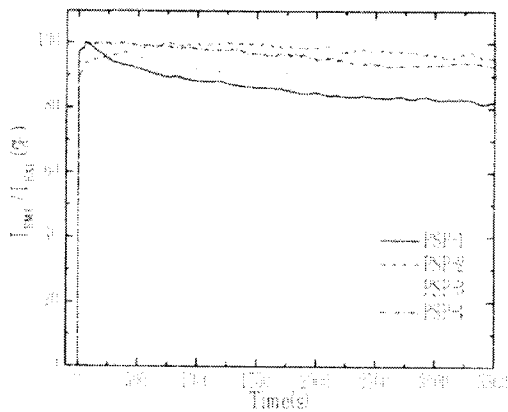


Fig. 7 Photodegradation response of four PSP paint coatings (P=1atm)

제적으로 압력에 대한 민감도가 비교적 높은 것으로 나타났으며, 그 중에서 PSP-4가 압력에 대한 가장 높은 반응특성을 보여주고 있다. 다른 PSP paint조합과 달리 PSP-7의 경우는 압력변화에 대하여 발광강도의 변화가 전혀 나타나지 않았는데 ($I_{REF}/I=1$). 이것은 앞에서도 언급하였듯이 발광분자와 코분자 바인더 사이의 복잡한 광화학적 상호작용에서 비롯된 것으로 보인다.

Fig. 6(a)와 (b)는 온도변화에 따른 PSP paint의 특성을 관찰하기 위해 시편의 온도를 22, 42, 64°C로 변화시키면서 수행한 정적보정 실험결과를 나타낸 것으로, 각 온도조건의 기준압력 $P_{REF}=140kPa$ 에서 얻은 발광강도를 기준 발광강도(I_{REF})로 하여 발광강도 비를 계산한 것이다.

여기서 보면, 온도가 높을수록 발광강도 비값의 기울기가 커지고, 압력에 대한 민감도가 높아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 온도가 상승함에 따라 산소분자의 운동에너지가 증가하게 되고, 이에 따라 발광물질에 대한 산소분자의 쿨링 발생률이 증가하여 발생하는 것으로 보인다.

3.2 Photodegradation

일반적으로 모든 발광계열의 PSP paint는 조명에 계속 노출되게 되면 시간 경과에 따라 방출되는 발광이 감소하는 photodegradation 현상을 보인다. 이러한 현상은 PSP를 이용한 압력측정 실험에 제약을 주게 된다. 우선 photodegradation이 발생하는 시간이 짧으면 그 만큼 실험할 수 있는 시간이 줄어들게 되는데, 심한 경우에는 수분에서 수십초 사이에 발생하는 경우도 있다. 이런 경우에는 아무리 압력에 대한 반응특성이 우수하다 하여도 실험에 적용하기가 쉽지 않다. 그러므로, PSP 페인트 조합에 대해 이러한 photodegradation 특성의 파악은 중요한 의미를 갖게 된다.

보정실험 결과 비교적 우수한 성능을 보인 4가지 PSP 페인트 조합에 대해 PSP paint가 임혀진 평판에 약 40분간 조명하면서 photodiode를 이용하여 photodegradation을 측정하였다. 이때 평판의 온도는 오랜 조명으로 인해 $T=22^{\circ}C$ 에서 $T=26^{\circ}C$ 로 약 $4^{\circ}C$ 정도 상승하였다. Fig. 7은 각 PSP 페인트 조합에 대해 측정된 발광강도(I_{REF})를 방출되는 최대강도($I_{REF}(0)$)로 무차원화한 photodegradation 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 7을 보면 본 연구에서 테스트한 4가지 PSP paint의 경우, photodegradation 현상이 약 3~20%정도 발생하는 것으로 나타났다. 특히, PtTFPP가 섞인 PSP-2와 PSP-4의 경우는 오랜 시간의 경과에도 불구하고 거의 일정한 발광강도를 지속적으로 유지하고 있음을 볼 수 있다. 특히, PSP-2의 경우는 초기에 낮은 발광강도를 보이는 하지만, 조명 시간이 경과함에 따라 오히려 증가하는 현상을 보이다가 가장 낮은 기울기로 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면에, 발광초기 큰 발광강도를 보인 PSP-1과 PSP-3의 경우는 시간이 경과함에 따라 PSP-2나 PSP-4에 비해 상대적으로 발광강도가 감소하였다. 즉, PtOEP가 발광분자로 섞인 PSP의 경우, PtTFPP가 섞인 PSP에 비해 상대적으로 발광강도의 감소

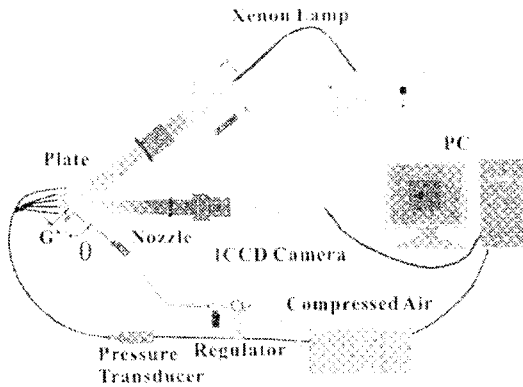


Fig. 8 Schematics of experimental set-up of inclined impinging jet

Fig. 9 Location of pressure taps and coordinate system (unit mm)

현상이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4. 경사충돌분류에의 적용

4.1 실험장치

보정실험을 통해 얻은 결과를 토대로 하여 7가지의 PSP 페인트조합 중에서 압력에 대한 민감도가 비교적 좋은 PSP-3과 PSP-4를 경사충돌분류에 적용하여 압력장 측정기법으로서의 가능성을 확인하기 위해 평판에서의 압력분포를 측정하였다.

Fig. 8은 경사충돌분류의 충돌평판에서 표면압력을 측정하기 위해 사용된 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험에 사용되어진 조명장치와 발광강도를 측정하기 위한 CCD 카메라는 앞의 정적보정실험에서 사용된 실험장치와 동일하다. 실험에 사용된 충돌제트의 노즐(nozzle) 출구 직경은 $D=3\text{mm}$ 이고, 노즐 출구에서의 최대 속도는 $\text{Ma}\approx 1.3$ 이었다. 노즐 출구와 PSP paint가 입혀진 알루미늄 평판($100\text{mm}\times 100\text{mm}$)사이의 거리(G/D) 변화에 따른 압력분포 변화를 보기위해서 $G/D=1$ 인 경우에 대하여 압력장을 측정하였다. 이때 노즐과 평판사이의 각도는 $\theta=60^\circ$ 로 고정시켰다.

경사충돌분류 실험시 평판의 온도를 $T=22\pm 0.2^\circ\text{C}$ 로 유지시켜 온도변화에 기인한 영향을 무시

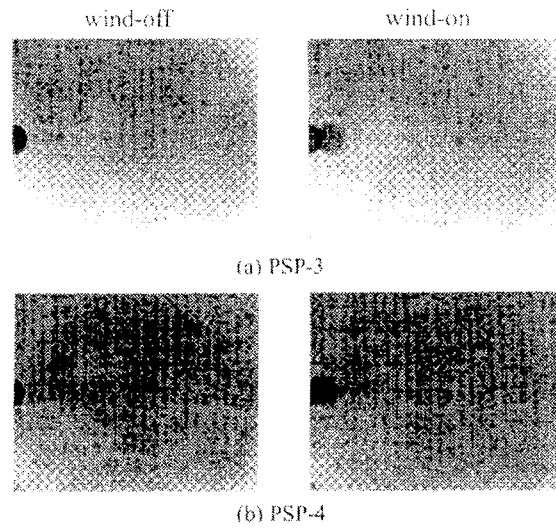


Fig. 10 Raw images on the impinging plate for wind-off and wind-on with PSP-3 and PSP-4

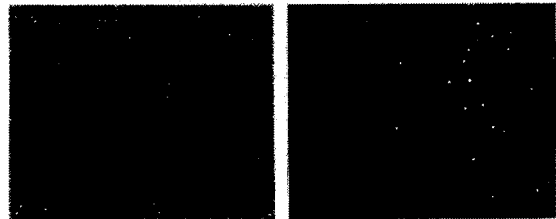


Fig. 11 Dark current noise of CCD camera

할 수 있도록 하였다.

ICCD 카메라를 이용한 PSP paint의 발광강도 측정과 동시에 평판의 표면압력은 압력변환기(PCB, 101A06)를 이용하여 측정하였는데, 압력탭의 위치를 Fig. 9에 표시하였다.

4.2 실험결과 및 토의

Fig. 10은 wind-off와 wind-on 상태에서 PSP가 코팅된 충돌면에서 취득한 전형적인 PSP 원시영상(raw image)을 보여주고 있다. 각각의 실험조건에서 5개의 PSP 영상을 취득하였으며, 이렇게 얻어진 영상으로부터 압력분포를 구하기 위해서 다음과 같은 몇 가지 영상처리 과정을 거쳤다.

우선 CCD 카메라 자체에 내재된 암전류(dark current) dc offset에 의해 발생하는 노이즈를 제거하기 위해 실험 전후에 조명을 끈 상태에서 암전류 레벨의 영상을 취득하였다. Fig. 11은 본 연구에 사용한 ICCD 카메라의 암전류 노이즈 영상을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 조명이 전혀 없는 상태에서도 CCD 카메라를 통해 얻어지는 영상은 자체의 암전류에 의해 노이즈가 발생하고 있다. 따라서, PSP 영상을 이용하여 압력분포를 구하기 위해서는 먼저 적절한 영상처리를 이용하여

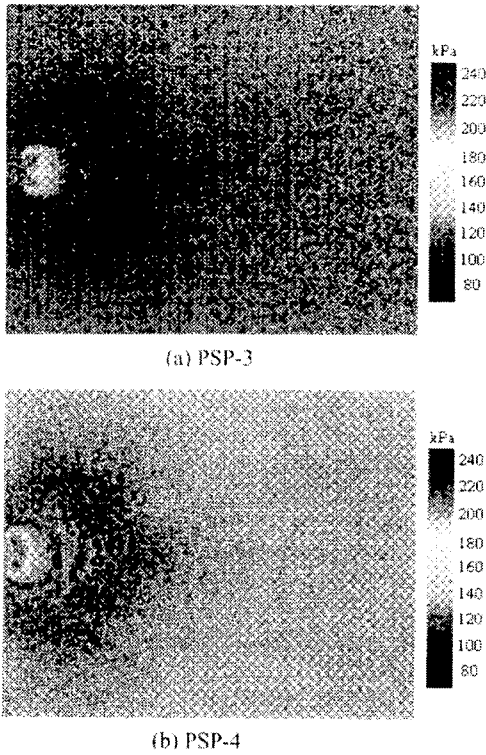


Fig. 12 Mean pressure distribution of an oblique impinging jet flow ($G/D=1, \theta=60^\circ$)

wind-off 영상과 wind-on 영상에서 압전류 레벨 영상을 제거하여야 한다.

이러한 과정을 거친 후 얻어진 wind-off 영상을 wind-on 영상으로 나누어 주고, 보정실험으로부터 얻은 보정계수 A, B와 식 (2)를 이용하여 적절한 영상처리과정을 거치게 되면 최종적으로 충돌평판에서의 표면 압력장을 구할 수 있게 된다.

Figs. 12(a)와 (b)는 위와 같은 영상처리 과정을 거쳐서 얻어진 순간 압력장 영상을 5회 앙상블(ensemble) 평균하여 구한 평균압력분포를 보여주고 있다. 여기서 Fig. 12(a)는 노즐과 충돌면 사이의 거리가 $G/D=1$ 인 조건에서 PSP-3를 이용하여 측정된 압력분포를 나타낸 것이며, Fig. 12(b)는 같은 조건에서 PSP-4로 측정된 압력분포를 나타내고 있다.

Fig. 12에서 충돌분류에 기인한 충돌평판의 최대 중심압력은 약 220kPa로 나타났으며, 충돌분류 중심의 높은 압력은 충돌 중심에서 멀어짐에 따라 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한, PSP-3와 PSP-4에 의해 얻어진 압력장 영상이 조금 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 앞에서도 언급하였듯이 사용된 발광분자와 고분자 바인더의 광화학적 특성이 서로 다르기 때문에 발생한 것으로 보인다. 그러나, 전체적인 경향은 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

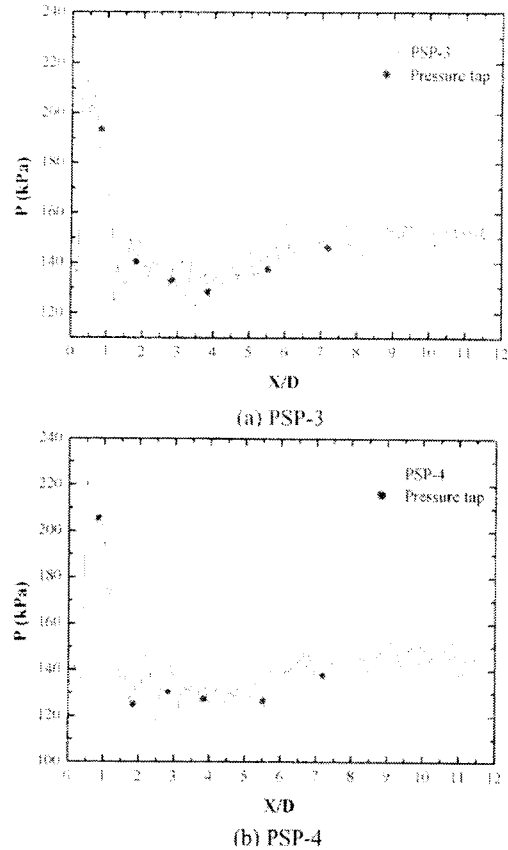


Fig. 13 Comparison of PSP results and pressure tap data

Figs. 13(a)와 (b)는 PSP 압력측정기법의 정확성과 유용성을 알아보기 위해서 충돌평판의 중앙 대칭선을 따라 구한 PSP 압력분포와 압력탭을 이용하여 측정된 압력분포를 비교한 것이다. 압력장 영상에서 관찰된 것과 마찬가지로 평판 중심에서 멀어질수록 압력이 크게 감소하고 있다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 평판에 충돌하는 분류의 중심이 첫번째 압력탭과 일치하지 않고 있으나, 기존의 압력탭을 이용한 측정결과와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 두 번째와 세 번째 압력탭 위치에서 두 가지 측정결과는 작은 차이를 보여주고 있다. 이것은 이 반경방향 위치에서 복잡한 3차원 toroidal 와류가 형성되어⁽¹⁶⁾ 5번의 순간압력장 평균으로는 충분히 신뢰할 수 있는 평균압력값을 얻기가 어렵고, 보다 많은 순간압력장을 평균하여야 함을 알 수 있다. 본 실험과 비슷한 조건에서 측정된 압력값들의 uncertainty는 95% 신뢰도에서 약 $\pm 1.5\%$ 정도로 알려져 있다.⁽¹⁷⁾

전반적으로 압력에 대한 반응특성이 좀더 우수한 PSP-4의 경우가 PSP-3의 경우에 비해 보다 선명하고 자세한 압력정보를 보여주는 것으로 나타났으며, 결론적으로 기존의 압력탭 방식으로는 측정하기 어려웠던 고속 충돌분류의 복잡한 압력의

공간분포를 PSP를 통하여 보다 자세하게 관찰할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 4가지 서로 다른 고분자와 2가지 발광물질을 조합하여 PSP paint를 자체적으로 조성하였으며, 보정실험을 통해 각각의 발광특성을 알아 보았다. 또한, 이렇게 조합된 PSP를 경사충돌분류 적용하여 압력분포를 측정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 자체적으로 조합한 7가지 PSP 조성을 이용한 압력장 측정 연구를 통해 PSP의 압력에 대한 반응특성은 발광물질 자체에만 의존하는 것이 아니라 고분자 바인더의 산소투과성, 발광물질과 고분자사이의 광화학적 작용에 보다 많이 의존한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 평판의 온도 증가에 따라 민감도도 함께 증가하였다.

(2) 본 연구에서 다른 PSP paint조합 중에서 PSP-4의 경우 Stern-Volmer계수 A의 값이 0.5810로 압력에 대한 민감도가 가장 높은 것으로 나타났다.

(3) PSP를 이용하여 기존의 접촉성 방식으로는 측정하기 어려웠던 충돌분류의 복잡한 압력분포를 순간적으로 측정할 수 있었으며, 압력탭으로 측정 한 결과와 잘 일치하였다. 또한, PSP-4의 경우가 PSP-3의 경우 보다 자세하고 선명한 압력장 결과를 제공하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Peterson, J.F. and Fitzgerald, R.V., 1980, "New Technique of Surface Visualization based on Oxygen Quenching of Fluorescence," *Rev. Sci. Instrum.*, 51(5), pp. 670~671.
- (2) Bukov, A., Mosharov, V., Orlov, A., Pesetsky, V., Radchenko, V., Phonov, S., Matyash, S., Kuzmin, M. and Sadozsky, N., 1993, "Optical Surface Pressure Measurements: Accuracy and Application Field Evaluation," *73rd AGARD Fluid Dynamics Panel Meeting and Symp. on Wall Interference, Support Interference and Flow Field Meas.*, Brussels, Belgium.
- (3) Engler, R.H., Klein, C. and Trinks, O., 2000, "Pressure Sensitive Paint Systems for Pressure

Distribution Measurements in Wind Tunnels and Turbomachines," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 1077~1085.

- (4) Ardasheva, M. M., Nevskii, L. B. and Pervushin, G. E., 1985, "Measurement of Pressure Distribution by Means of Indicator Coatings," *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, No. 4, pp. 24~33.
- (5) Davies, A. G., Bedwell, D., Dunleavy, M. and Brownjohn, N., 1995, "Pressure Sensitive Paint Measurements Using Phosphorescence Lifetime Method," *7th Int. Symp. on Flow Visualization*, Seattle, WA.
- (6) Sant, Y. L. and Mérienne, M. C., 1995, "An Image Resection Method Applied to Mapping Techniques," *IEEE 16th Int. Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF)*, Wright-Patterson AFB, OH, pp. 46.1~8.
- (7) Volan, A. and Afati, L., 1991, "New Optical Pressure Measurement System," *IEEE 14th Int. Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF)*, New York, pp. 10~16.
- (8) Liu, T., Guille, M. and Sullivan, J.P., 2001, "Accuracy of Pressure Sensitive Paint," *AIAA*, Vol. 39, No. 1, pp. 103~112.
- (9) 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, pp. 227~246.
- (10) Rickard, S.J., Washburn, A.E., Morris, M.J. and Donovan, J.F., 1989, "Pressure Sensitive Paint Studies of Vortical Flow at Low Speed," *AIAA paper No. 95-1989*.
- (11) Schanze, K.S., Carroll, B.F., Korotkevitch, S. and Morris, M. J., 1996, "Temperature Dependence of Pressure Sensitive Paints," *AIAA*, Vol. 35, No. 2, pp. 306~310.
- (12) Asai, K., Kanda, H., Kunimasu, T. and Sullivan, J., 1996, "Detection of Boundary-Layer Transition in a Cryogenic Wind Tunnel by Using Luminescent Paint," *AIAA paper No. 96-2185*.
- (13) Asai, K., 1998, "Surface Pressure Sensitive Measurement Using Pressure Sensitive Paint," *可視化情報*, Vol. 18, No. 9, pp. 1~7.
- (14) McLachlan, B.G. and Rell, J.H., 1995, "Pressure - Sensitive Paint in Aerodynamic Testing," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 10, pp. 470~485.
- (15) Oblesby, D.M., Puram, C.K. and Upchurch, B.T., 1995, "Optimization of Measurements with Pressure Sensitive Paints," *NASA TM 4695*.
- (16) Lee, J.H. and Lee, S.J., 2000, "The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heat Transfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 555~575.
- (17) Woodmansee, M. A. and Dutton, J. C., 1998, "Treating Temperature-Sensitivity Effects of Pressure-Sensitive Paint Measurements," *Exp. in Fluids*, Vol. 24, pp. 163~174.