

저속 유동용 Pressure Sensitive Paint 기술개발과 응용

강 종 훈* · 이 상 준†

Development of Pressure Sensitive Paint (PSP) Technique for Low-speed Flows and Its Application

Jong Hun Kang and Sang Joon Lee

Key Words : Pressure Sensitive Paint(감압도료), Oxygen quenching(산소 켄칭), Luminophore(발광분자), Polymer binder(고분자 바인더)

Abstract

The PSP technique has been used to measure pressure distribution on a model surface quantitatively. The objective of this study is to develop PSP technique which can be applied to low-speed flows. Four different PSP formulations including two porphyrins (PtOEP and PtTFPP) and two polymers (Poly(TMSP) and RTV-118) were tested and the performance of each combination was checked. In the static calibration, the luminescent intensity of the PSP coatings was measured from 0kPa to 11kPa with 0.5, 1, 2kPa increments. Among 4 PSP formulations tested, the combination of PtOEP and RTV-118 shows the best performance. The PSP technique was applied to an oblique impinging jet to measure the pressure field distribution on the impinging plate.

기호설명

- I_0 : 진공에서의 발광강도
 I_{ref} : wind-off 영상의 발광강도
 I : wind-on 영상의 발광강도
 K_q, K : 켄칭상수
 A_n : Stern-Volmer 관계식의 계수

1. 서 론

산소 켄칭(oxygen quenching)의 원리를 이용하여 표면압력을 측정하는 PSP(pressure sensitive paint)는 기존의 압력측정 방법인 압력탭(tap), 압력변환 센

서(pressure transducer), 그리고 마이크로폰(microphone)등과 비교하여 여러 가지 장점을 가지고 있다. 우선 좋은 공간분해능(spatial resolution)으로 모델 표면 전체에 대한 압력측정이 가능하다. 그리고 압력탭 설치를 위해 모델의 구조를 변형시킬 필요가 없기 때문에 바이어스(bias) 에러를 줄일 수 있다. 또한, 기존의 압력탭 방식으로는 측정이 쉽지 않았던 굴곡이 심한 모델의 표면 압력측정이나 팬(pan)이나 프로펠러와 같은 회전 물체의 표면 압력 측정도 가능하다.

1980년대 중반 러시아를 시작으로 하여 본격적으로 개발되기 시작한 PSP 기술은 최근 들어 전 세계적으로 많은 관심을 받고 있다. 초창기에는 주로 초음속(supersonic) 유동 실험에 적용하였으나, 최근에는 비행기 날개와 자동차 모형을 40~60m/s의 저속 유동실험에 PSP 기술을 적용하여 표면압력을 측정한 논문이 발표되고 있다.⁽¹⁾ 그리고 PSP 기술은 항공우주 분야에 국한되지 않고 유체기계, 자동차 등 그 인접분야로 응용이 확대되어 가는 실정이다.

본 연구에서는 본 연구실에서 수행해온 기존의

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : sjlee@postech.ac.kr
 TEL : (054) 279-2169 FAX : (054) 279-3199

연구⁽²⁾를 토대로 저속 유동에 적용 가능한 PSP의 조성방법과 실험기술을 개발하고 충돌분류의 압력장 측정에 적용하여 응용 가능성과 유용성을 연구하고자 한다. 이를 위하여 두 가지의 발광분자와 두 가지의 고분자를 이용하여 서로 다른 4 가지의 PSP 조합(formulation)을 조성하여 성능을 비교하였다.

2. 배경 이론

2.1 광물리학적 이론

PSP 기법은 산소분자(oxygen molecule)에 의해 광화학적으로 여기된(excited) 발광분자(luminescent molecule)들이 비활성화되는 현상을 압력측정에 이용한 것이다. Fig.1은 발광분자의 발광과정과 산소 켄칭이 발생하는 과정을 보여주는 기본적인 광물리학적 개념도이다.

발광분자는 적절한 에너지의 광자(photon)를 흡수하여 기저 상태(ground state; S_0)에서 여기 상태(excited state; S_1, S_2)로 에너지 레벨이 상승하게 된다. 여기 상태의 발광분자는 보다 높은 에너지 수준으로 남겨지게 되어 광자를 방출하거나 또는 외부의 다른 분자와의 충돌로 인하여 처음의 기저 상태로 돌아오게 된다. 후자의 경우를 켄칭 과정이라 하고, 주로 산소분자에 의해 발생하기 때문에 일반적으로 산소켄칭이라고 한다.

산소에 의해서 발생하는 켄칭 과정은 산소농도의 증가에 따라 증가하게 되고, 방출되는 발광강도는 켄칭의 발생비율에 따라 변하게 된다. 즉, 켄칭 과정 동안 방출되는 발광강도를 측정하게 되면 산소농도의 변화를 측정할 수 있게 된다. 이때, 측정된 발광강도와 공기 중 산소의 몰분율(mole fraction)은 항상 일정하며 압력에 비례한다는 Henry의 법칙을 이용하게 되면 다음과 같은 압력과 발광강도 비의 관계(Stern-Volmer 식)를 얻을 수 있다.

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

여기서 I_0 는 진공상태에서 측정된 발광강도를, I 는 실험에 의해서 측정된 발광강도를 나타낸다. 또한, K_q 는 발광분자에 따른 켄칭비율을 나타내는 상수이며, K 는 산소의 몰분율을 포함하는 켄칭 상수이다. 그리고, $[O_2]$ 는 공기 중 산소농도를, P 는 압력을 나타낸다. 하지만 진공상태에서 발광강도를 측정해야 하는 식(1)은 여러 가지 복잡한 실험장치를 필요로 할 뿐 아니라, 풍동실험과 같

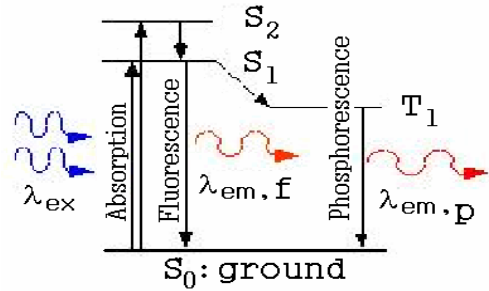


Fig. 1 Photo-physical foundation of oxygen quenching

은 공기역학적 실험에 직접 적용하기에 쉽지 않다. 이에 따라 실제 실험에서는 다음과 같이 두 가지 서로 다른 유동 즉, 서로 다른 켄칭 조건에 대한 발광강도 비율을 이용하여 수정된 Stern-Volmer 관계식을 사용하게 된다.⁽³⁾

$$\frac{I_{ref}}{I} = A_0(T) + A_1(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (2)$$

여기서, P_{ref} 와 I_{ref} 는 각각 기준 압력과 기준 발광강도를 나타내는데, 일반적으로 압력이 가해지지 않은 상태(wind-off)의 값을 의미하고, I 는 압력이 가해진 상태(wind-on)의 발광강도를 의미한다. 그러나 식(2)는 PSP 재료들이 가지는 비선형성을 고려하지 않은 것이다. 최근에는 이러한 PSP의 특성을 고려하여 고차항을 가지는 다음과 같은 비선형 관계식을 사용하기도 한다.

$$P = \sum_{n=0}^N A_n(T) \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^n \quad (3)$$

여기서, A_n 은 온도에 의존하는 보정상수이다.

본 연구에서는 저속 유동에 대한 PSP의 특성을 보다 자세히 관찰하기 위하여 3차($N=3$)의 Stern-Volmer 관계식을 이용하였다.

2.2 PSP 조합과 구조

일반적으로 PSP는 발광분자와 이것을 모델 표면에 안착시켜주는 고분자 바인더(polymer binder)로 구성된다. 특히 고분자 바인더는 발광분자가 모델표면에 붙어 있도록 하는 역할뿐만 아니라, 발광분자와 복잡한 상호작용으로 PSP의 광화학적 성질에 영향을 주기도 한다.⁽⁴⁾

아직까지 고분자 바인더가 PSP의 광화학적 성질에 미치는 영향과 발광분자와의 상호작용에 대한 체계적인 해석이 이루어지지 않아서 반복실험을 통하여 최적의 혼합비를 결정하고 있는 실정이다. 그리고 저속 유동에 적용 가능한 PSP 기술을 개발하는데 필요한 바인더를 선정하기 위해서는 고분자의 산소투과성, 공기압 변화에 대한 빠른

Table 1 The composition of PSPs used in present study

	Luminophore	Polymer binder
PSP-1	PtTFPP	RTV-118
PSP-2	PtTFPP	Poly(TMSP)
PSP-3	PtOEP	RTV-118
PSP-4	PtOEP	Poly(TMSP)

응답성과 낮은 온도 의존성 등이 고려되어야 한다. 조성된 PSP 조합을 물체 표면에 코팅하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 가장 많이 쓰이는 방법이 spray 장치를 이용하는 것이다. 이 밖에도 고분자를 물체 표면에 입힌 후 고분자가 굳기 전에 따로 준비해둔 발광분자액을 입히는 고분자 매트릭스(matrix) 방법과 Asai⁽⁵⁾가 제안한 anodizing 기법 등이 있다. PSP의 코팅 두께는 PSP의 반응시간에 영향을 주게 되는데, 일반적으로 반응시간 t 는 PSP의 코팅 두께 l 과 다음과 같은 관계식을 갖고 있다.⁽⁶⁾

$$t \sim \frac{l^2}{D} \quad (4)$$

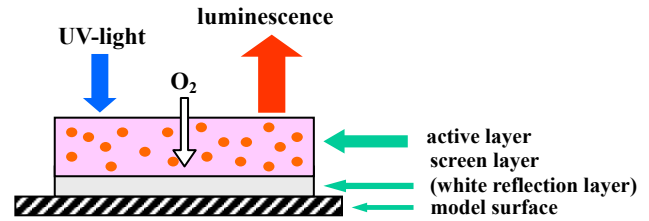
여기서, D 는 산소의 확산을 나타내는 확산계수로 PSP 층의 두께가 얇을수록 반응속도가 빨라진다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 사용된 실리콘(silicon)계열의 고분자 대신 높은 산소투과성과 빠른 응답성을 가지는 Poly(TMSP)와 RTV-118을 사용하였고, 발광분자로는 백금계열의 발광물질인 PtOEP와 PtTFPP를 사용하였다. 본 연구에서 조성된 PSP 조합들은 Table 1과 같다. 이것들을 코팅하기 전에 미세한 니들을 가진 air-brush를 사용하여 먼저 알루미늄 평판(100mm×100mm)에 흰색 페인트를 코팅하고, 실온에서 말린 후 조성된 PSP 조합들을 코팅하였다. Fig.2는 발광분자를 포함한 PSP 층의 구조를 나타낸 것이다. PSP를 이용한 압력장 측정 실험에서 반응속도를 좌우하는 PSP 코팅의 두께를 측정한 결과, 흰색 페인트 층을 포함한 코팅 두께는 대략 25~30 μm 정도였으며, PSP의 두께는 약 10~15 μm 정도이었다.

3. 실험 및 결과

3.1 정적 보정(static calibration)

제작된 PSP 시편을 광학용 가시화 창(window)을 가진 압력용기 내에 넣고 용기내의 압력을 일정한 간격으로 증가시키면서 압력에 따른 발광강도를 측정하여 Stern-Volmer 관계식의 계수를 보정하는 정적 보정실험을 수행하였다. 이때 시편 뒷면에

**Fig. 2** Composition of PSP layer

열전소자(peltier heater)를 설치하여 온도에 따른 효과도 동시에 측정할 수 있게 하였다.

Fig.3은 본 연구에서 PSP의 발광특성을 살펴보기 위한 보정실험장치의 개략도를 보여주고 있다. PSP가 코팅된 알루미늄 평판을 빛의 굴절 효과를 줄이기 위해 가시화 창쪽을 향하도록 용기 내에 설치하였다. 용기 내부 압력은 압력조절기를 이용하여 일정 압력을 유지하도록 하였다. 압력 변화는 분해능이 10Pa인 디지털 압력계이저를 이용하여 측정하였다. 이때 압력 측정의 불확실도는 약 ±50Pa 정도이다. 고속 유동에서는 유동에 의해 모델 표면이나 주위 공기의 온도가 급격하게 변하게 된다. 그러나 저속 유동의 경우에는 온도의 영향을 무시할 만큼 온도 변화가 적다. 그래서 본 연구에서는 온도 변화에 따른 PSP 조합들의 특성을 고려하지 않았다.

코팅된 PSP 조합들을 반응시키기 위해 광원으로 제논 램프(300W)를 사용하였으며, 이때 광원의 앞쪽에는 광 에너지에 의한 온도 상승을 막기 위해 water filter를 장착하였고, 가해주는 빛의 파장을 일정하게 유지하기 위해서 파장 $\lambda_c=420\pm30\text{nm}$ 의 대역 필터(band pass filter)를 사용하였다. 그리고 압력용기의 가시화 창으로 조사되는 빛의 굴절을 최소화시키기 위해 카메라와 조명장치를 수평으로 설치해야 하므로 본 연구에서는 광섬유(optical fiber) 케이블을 사용하여 조명하였다. 저압에서의 보정실험 시 PSP가 조명에 계속 노출되어 발광이 시간에 따라 감소하는 효과를 최소화 해야 한다. 그래서 본 연구에서는 조명장치에 셔터(shutter)를 부착하여 측정하는 순간에만 빛을 조사하게 하였다.

조명에 의해 PSP로부터 방출된 발광강도는 해상도가 1280×1024 pixels인 12bit intensified CCD 카메라를 이용하여 측정하였으며, 이때 가해주는 빛과 방출되는 빛을 구분하기 위해서 CCD 카메라 앞에는 파장 $\lambda_o=650\pm30\text{nm}$ 의 대역 필터를 설치하였다.

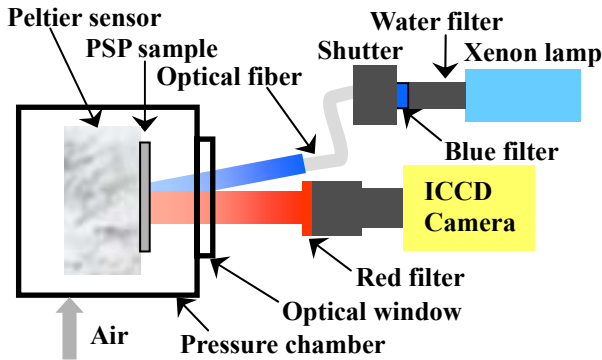


Fig. 3 Schematic of calibration set-up for PSP

3.2 보정 결과

저압 영역에서 압력을 정확히 측정하기 위해서 압력용기 내부의 압력을 0~3kPa 사이는 500Pa, 5kPa 까지는 1kPa, 그리고 11kPa 까지는 2kPa 씩 증가 시키면서 4 가지 PSP 에 대해 정적 보정실험을 수행하였다. 기준압력 P_{ref} 은 0kPa, 즉 대기압으로 잡았으며, 평판의 표면온도는 $T=24^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

각각의 압력조건에서 120 장의 영상에 대해 CCD 카메라 자체에 내재된 암전류(dark current)에 기인한 노이즈(noise)를 제거한 후 이들을 평균하여 발광강도의 비 값을 구하였다. Fig.4 는 이렇게 얻어진 발광강도의 비를 압력의 함수로 나타낸 보정결과이다. Fig.4 를 자세히 보면, PSP-1 조합의 경우 그래프가 거의 수직($I_{ref}/I=1$)으로 나타나 저압의 압력변화에 대하여 전혀 반응을 하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 언급하였듯이 발광분자와 고분자 바인더 사이의 복잡한 광화학적 상호작용에서 비롯된 것으로 보인다. 그러나 PSP-3 의 경우에는 다른 PSP 에 비해 상대적으로 저압 영역에서 발광강도 변화량이 커서 압력 변화에 대한 반응성이 우수함을 알 수 있다. 그래서 PSP-3 을 선정하고 이를 경사충돌분류에 적용하기 위하여 5 회의 반복실험을 통하여 평균값을 획득하였다. Fig.5 는 3 차($N=3$)의 Stern-Volmer 관계식의 계수를 구하기 위해 최소자승법(least-square fitting)으로 구한 보정결과이다.

4. 경사충돌분류에의 적용

4.1 실험장치

보정실험을 통해 얻은 결과를 토대로 하여 4가지의 PSP 조합 중 저압구간에서 압력에 대한 민감도가 가장 좋은 PSP-3을 경사충돌분류에 적용하

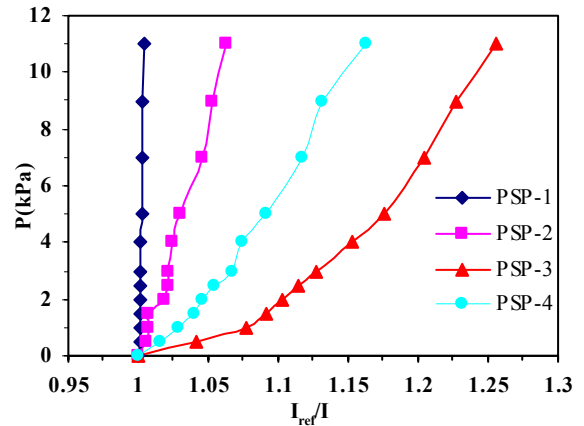


Fig.4 Comparison of PSP intensity-ratio variation

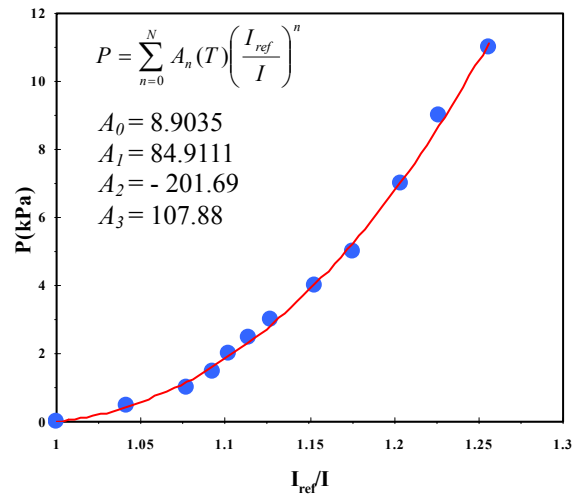


Fig.5 Calibration curve of PSP-3 ($T=24^{\circ}\text{C}$)

여 압력장 측정기법으로서의 유용성을 확인하기 위해 충돌평판에서의 압력분포를 측정하였다.

Fig.6 은 경사충돌분류의 충돌평판에서 표면압력을 측정하기 위해 사용한 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험에 사용된 조명장치와 CCD 카메라는 앞의 정적 보정실험에서 사용된 실험장치와 동일하다. 실험에 사용된 충돌체트의 노즐(nozzle) 출구 직경은 $D=3\text{mm}$ 이다. 노즐 출구와 PSP 가 입혀진 충돌평판($100\text{mm}\times 100\text{mm}$)사이의 거리가 $G/D=3$ 인 경우에 대하여 압력장을 측정하였다. 이때 노즐과 평판 사이의 경사각은 $\theta=60^{\circ}$ 로 고정시켰다. 경사충돌분류 실험 시 열전대(thermal couple)로 측정한 평판의 온도 변화가 정적 보정실험과 비교하여 온도차이가 0.5°C 이기 때문에 온도 변화에 기인한 영향을 무시하였다.

4.2 결과 및 토의

PSP 가 코팅된 충돌 면에서 취득한 wind-off 영상(I_{ref})과 wind-on 영상(I)을 이용하여 압력분포를

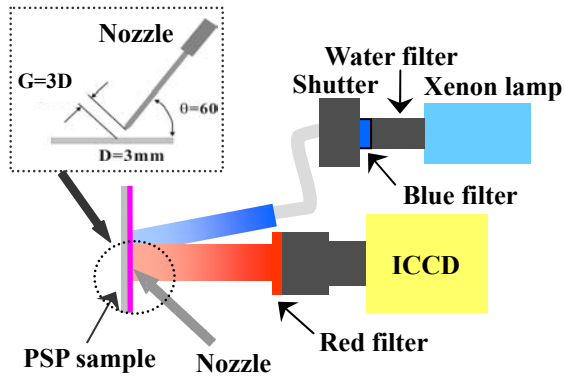


Fig. 6 Experimental set-up for PSP measurements of oblique impinging jet

구하기 위해서 다음과 같은 몇 가지의 영상처리과정(image processing)을 거쳤다.

우선 보정실험과 같은 방법으로 CCD 카메라 자체에 내재된 노이즈를 제거하기 위해 실험 전후 조명을 끈 상태에서 암전류 레벨의 영상을 취득하였다. 그리고 노즐을 통해 충돌제트 유동이 있는 경우(wind-on), 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 계산된 보정계수 A_0, A_1, A_2, A_3 와 식(3)을 이용하여 적절한 영상처리과정을 거치게 되면 최종적으로 충돌평판에서의 표면 압력 분포를 구할 수 있다.

Fig.7 은 위와 같은 영상처리 과정을 거쳐서 얻어진 120 장의 PSP 영상을 평균하여 구한 평균압력분포를 나타낸 것이다. 그리고 압력이 같은 점을 선으로 연결하여 등압선(pressure contour)을 그려 충돌면에서의 공간 압력분포를 자세히 관찰하였다. 충돌분류의 최대 압력은 충돌분류와 평판이 직접 충돌하는 중심에서 나타났고, 충돌 중심에서 멀어짐에 따라 압력값이 급격하게 감소하였다.

Fig.8 은 평균 압력장 영상으로부터 수평방향의 중앙 대칭선을 따른 압력값을 추출한 결과를 보여주고 있다. 여기서 보면 압력값이 $X=0\text{mm}$ 에서 최대값을 가지는 것이 아니라, $X=3\text{mm}$ 부근에서 최대값을 보여주고 있다. 이것은 충돌제트가 60° 기울어져 평판에 충돌하기 때문이다. 그리고 평판 중심에서 멀어질수록 압력이 크게 감소하여 $X=25\text{mm}$ 부근에서 대기압과 거의 같아짐을 볼 수 있다.

기존의 압력탭 방식으로 측정하기 어려웠던 충돌면에서의 압력의 공간분포를 PSP 측정을 통해 보다 자세하게 관찰할 수 있었다.

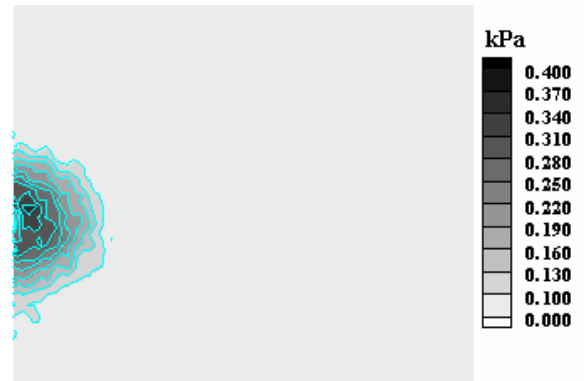


Fig. 7 Mean pressure distribution on the impingement plate of oblique jet ($G/D=3, \theta=60^\circ$)

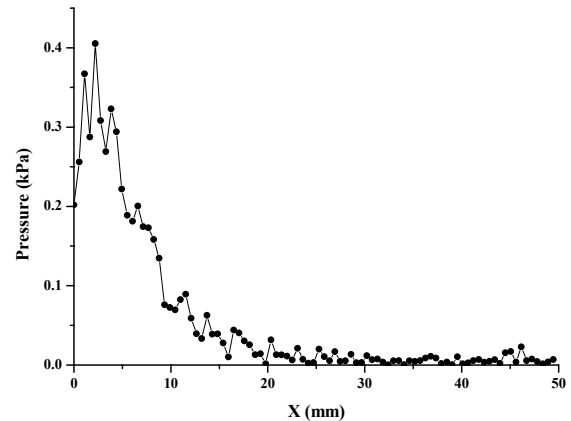


Fig. 8 Pressure variation along the center line

5. 결론

본 연구는 2 가지 서로 다른 고분자 바인더와 2 가지 발광물질을 조합하여 4 가지 PSP 조합들을 조성하고, 저압에서의 보정실험을 통해 각각의 발광특성을 연구하였다. 그리고 조성된 PSP 조합들 중 발광강도비가 가장 좋은 PSP-3 (PtOEP/RTV-118)를 저속의 경사충돌분류에 적용하여 압력분포를 측정하였다.

연구결과, PSP 의 저압에 대한 반응특성은 발광물질 자체에만 의존하는 것이 아니라 고분자 바인더의 산소투과성, 발광물질과 고분자사이의 광화학적 작용에 보다 많이 의존한다는 것을 알 수 있었다.

PSP 를 이용하여 기존의 점측정 방법으로는 측정하기 어려웠던 아음속 충돌분류의 복잡한 압력분포를 측정하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Engler, R.H., Mérienne, M.C., Klein, C. and Sant, Y.L., 2002, "Application of PSP in low speed flows," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 313-322
- (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) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Sant, Y. L. and Mérienne, M. C., 1995, "An Image Resection Method Applied to Mapping Techniques," CH34827-95, IEEE 16th Int. Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF), Wright-Patterson AFB, OH, pp. 46.1-8.
- (12) Volan, A. and Alafi, L., 1991, "New Optical Pressure Measurement System," IEEE 14th Int. Congress of Instrumentation in Aerodynamic Simulation Facilities (ICIASF), New York, pp. 10-16.
- (13) Liu, T., Guille, M. and Sullivan, J.P., 2001, "Accuracy of Pressure Sensitive Paint," *AIAA*, Vol.39, No.1, Jan.
- (14) 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.
- (15) 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*, No. 951989.
- (16) Asai, K., Kanda, H. and Iijima, Y., 1995, "Luminescent Characteristics of Pressure Sensitive Paint Based on Platinum Octaethylporphyrin," *The 23rd Symp. on Flow Visual.* July.