

표면압력 분포 가시화를 위한 압력감응 페인트의 제작

안최란* · 기효진* · 진병규* · 김정균* · 김석범** · 조용화** · 노영철** · 최용덕** · 박재수*** · 최용규****

Fabrication of Pressure Sensitive Paint for Visualizing Surface Pressure Distribution

Choiran An* · Hyojin Ki* · Byeong Kyou Jin* · Jung Kyun Kim* · Sug Bum Kim** · Yong Hwa Jo** · Young Cheol Nho** · Yong Duk Choi** · Jae Su Kwak*** · Yong Gyu Choi****

ABSTRACT

We have fabricated pressure sensitive paint films consisting of PtTFPP activators dispersed in fluorinated polymer matrix. This matrix material is unique in its composition and structure. We evaluated the oxygen quenching effects, and thus the pressure sensitivity, of the fabricated films in terms of various processing parameters. Based on the experimental results, we anticipate that a good but new pressure sensitive paint would be presented through further elaboration of the polymer compositions and optimization of the processing conditions.

Key Words: Pressure Sensitive Paint, Oxygen Quenching, Luminophore

1. 서론

압력감응 페인트(Pressure Sensitive Paint; PSP)는 형광체의 일종으로써 자외선이나 짧은 가시광 파장이 조사되면 긴 가시광 대역에서 형광을 방출할 수 있는 발광체(activator)와 이를 균일하게 안정적으로 분산시키는 기지(matrix)로 구성된다[1]. 다양한 형태의 표면에 도포할 수 있는 압력감응 페인트에서 발광체의 형광강도가 산소압력에 민감하게 변화하기 때문에 표

면 압력의 분포를 가시화하는데 사용될 수 있다. 압력감응 페인트를 활용하는 표면 압력 측정방법은 압력 탭을 활용하는 기존 방법과 비교하여 다음과 같은 장점을 가진다. 즉, 기존의 압력측정 방법은 압력 탭의 설치와 자료 분석에 많은 시간이 소요되며 측정 장비가 고가이고 압력의 측정치가 한정되어 자료 분석에 한계를 나타내는 반면 압력감응 페인트를 이용하는 방법은 측정치의 수집 속도가 빠르고 기존 방법에 비해 우수한 분해능을 가지며, 복잡한 형태의 표면에 형성되는 압력 장을 연속적으로 2차원 형태로 가시화할 수 있다[2-5]. 따라서 압력감응 페인트는 항공우주 분야뿐만 아니라 유체, 기계, 자동차 분야에서 활용도가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다[2].

* 한국항공대학교 항공재료공학과

** 한국항공대학교 항공우주기계공학부

*** 한국항공대학교 항공우주기계공학부

공동연락처자, E-mail: jskwak@kau.ac.kr

**** 한국항공대학교 항공재료공학과

공동연락처자, E-mail: ygchoi@kau.ac.kr

압력감응 페인트를 구성하는 발광체의 형광 강도는 산소분압의 변화에 민감하여야 하며 기지의 경우 산소분자에 대한 높은 투과성을 가져야 한다. 짧은 파장의 가시광으로 여기되어 긴 파장의 형광을 방출할 수 있는 유로퓸(Eu), 루테튬(Ru) 또는 백금(Pt)을 포함하는 발광체와 고분자 또는 다공성 세라믹 등의 기지재료의 조합이 압력감응 페인트로 적용될 수 있다[6]. 그러나 관련된 대부분의 연구가 실험결과에 대한 현상학적인 기술에 머물고 있으며, 상용 압력감응 페인트가 있음에도 불구하고 아직까지 발광체와 산소분자 사이의 에너지 전달 메커니즘이 확실히 규명되지 않은 실정이다. 또한, 기지재료의 구조 및 기공도 등에 대한 산소분자의 확산, 흡착 또는 충돌 등의 이동 특성에 대한 체계적인 분석이 미흡한 상황이다.

본 연구에서는 새로운 조성을 가지는 압력감응 페인트를 제작하고자 하였으며, 나아가 상기한 바와 같은 의문점을 설명하는 모델을 제시하고 신조성 압력감응 페인트를 활용하는 표면 압력분포 가시화 실험을 진행하고자 하였다. 이와 같은 목표를 달성하기 위하여 수행된 일련의 실험 및 분석결과 중에서 선행연구로 얻어진 공정 변수에 대한 형광의 압력감응 특성 최적화에 대한 부분을 본 논문에서 기술하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 발광체로써 PtTFPP(platinum meso-tetra(pentafluorophenyl)porphine)를 적용하고 기지재료로써 새로운 조성과 구조를 가지는 fluorinated polymer를 채용하였다. 예비실험으로써 상용 고분자와 nonfluorinated polymer의 특성을 평가하였으며, 결과적으로 fluorinated polymer의 특성이 가장 우수함을 확인하였다. 이 경우 발광체와 기지의 비율이 약 1 : 10일 때 발광체가 광학적으로 가장 활성화되었다. Fig. 1에 본 연구에서 적용한 공정 순서도를 도시하였다. 발광체와 기지재료를 일정한 비

율로 고정하고 용매의 양을 변화시키면서 샘플을 제작하였으며, 용매로 사용된 PGMEA(propylene glycol methyl ether acetate)는 일반적으로 널리 사용되는 용매이다.

각 용액을 교반기에서 60분 동안 혼합한 후 슬라이드 유리를 기판으로 스펀코팅함으로써 막을 제작하였다. 제작된 막은 용매를 증발시키고 polymerization을 유도하기 위하여 150°C에서 60분간 경화시켰다. 열처리 단계를 거친 막의 흡수 스펙트럼은 UV-Vis-NIR 분광기로 300 ~ 800 nm 범위에서 2 nm 간격으로 측정하였다. 제작한 박막의 두께는 α -step으로 측정하였고 막을 구성하는 화학결합을 확인하기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광기를 이용하여 투과 스펙트럼을 측정하였다.

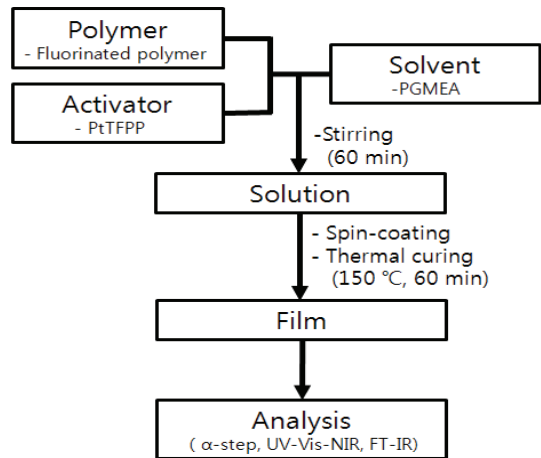


Fig. 1 Fabrication process of PSP samples used in this study

산소분압 변화에 대한 PSP의 형광강도의 변화를 측정하기 위해 Fig. 2에 나타난 PSP 보정 실험 장치를 제작하였다. 보정 실험 장치는 395nm 파장의 LED array와 600nm long pass filter가 장착된 14bit cooled CCD 카메라, PSP가 코팅된 시편의 온도를 일정하기 유지시키기 위한 온도

조절기, 진공 챔버의 압력을 조절하는 압력 조절기 등으로 구성되었다. PSP가 코팅된 시편은 챔버 내에 놓여지며, 시편의 온도는 보정 실험 중 온도 컨트롤러에 의해 일정하게 유지된다. 챔버 내 압력을 대기압에서 진공까지 0.1기압씩 변화시키며 이때의 압력에 따른 PSP의 발광 강도를 CCD 카메라를 통해 저장하였다. 코팅의 불균일과 시간에 따른 조명이나 PSP 발광 변화의 영향을 최소화하기 위해 각 압력에서 시편의 평균 발광 강도는 50×50 픽셀을 50장 평균하여 계산하였다.

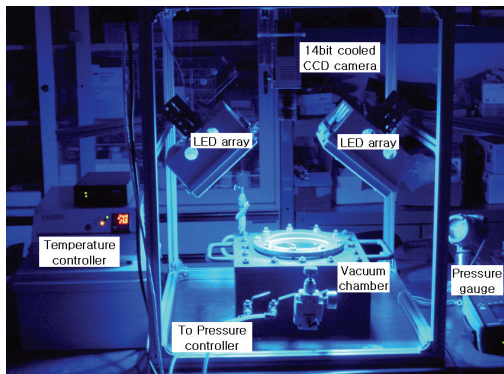


Fig. 2 Configuration of PSP calibration test facility

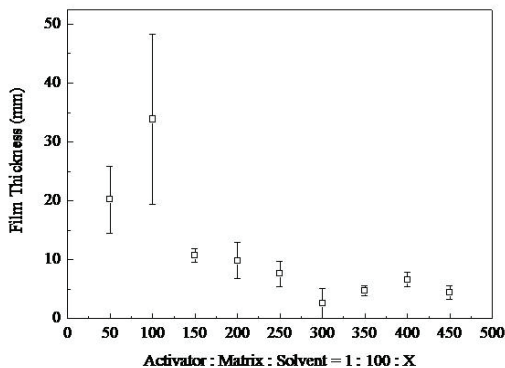


Fig. 3 Thickness of fabricated films plotted as a function of relative compositions

3. 실험결과 및 토의

제작된 PSP 막의 두께를 Fig. 3에 도시하였다. 일부 샘플에서 경향을 벗어나고 있으나 전반적으로 용매의 양이 증가되면서 막의 두께가 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 용매의 첨가에 다른 용액의 점도 감소에 기인하는 것이다. 따라서 스핀코팅 시의 공정조건과 더불어 용액의 점도를 조절함으로써 막의 두께를 임의로 조절할 수 있음을 알 수 있다.

식(1)과 (2)의 관계식을 활용하여 각 샘플 막의 흡수 스펙트럼(absorbance spectrum)으로부터 흡수계수(absorption coefficient)를 계산할 수 있다.

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{t}(2.303A) \quad (2)$$

위의 식에서 A 는 흡광도, I 는 샘플을 지난 빛의 강도, I_0 는 초기 입사 빛의 강도, a 는 흡수 계수 그리고 t 는 두께를 의미한다. 한편, Fig. 4에 도시한 샘플의 흡수 스펙트럼으로부터 PtTFPP가 나타내는 특성 흡수 밴드를 확인할 수 있으며,

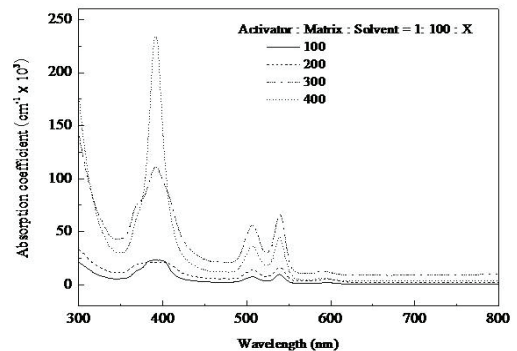


Fig. 4 Absorption spectra of some representative films fabricated in this study

이로써 본 연구에서 채택한 fluorinated polymer는 PtTFPP를 광학적으로 활성화시키며 해당 파장대역에서 추가적인 흡수를 나타내지 않음으로써

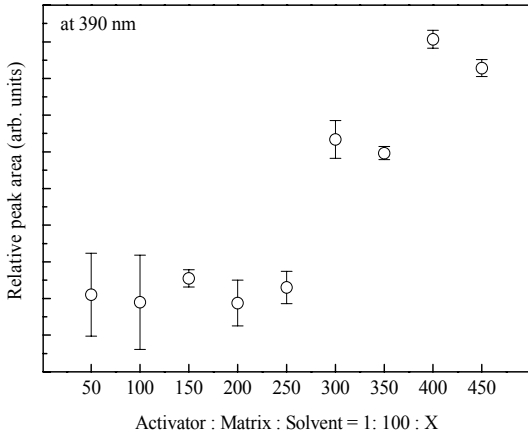


Fig. 5 Change of relative peak area at 390 nm as a function of relative compositions

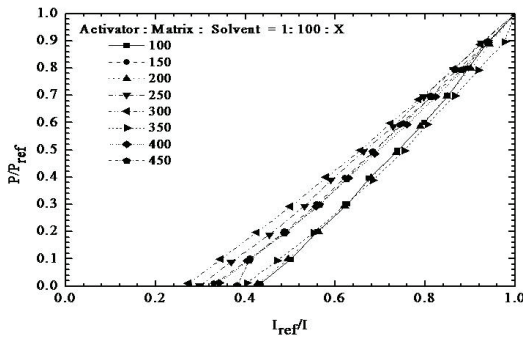


Fig. 6 Changes in fluorescence intensity of the activators embedded in the fluorinated polymer matrix plotted as a function of pressure

양호한 지지재료의 특성을 가짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에 도시한 바와 같이 용매의 함량이 증가함에 따라 390 nm 흡수 밴드의 흡수강도가 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 용매가 도입되면서 발광체 분자가 지지재료 사이에 고르게 분포되면서 발광체의 용해도가 증가됨과 동시에 막의 균일성을 향상시키기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에 본 연구에서 제작된 압력감응 페인트 막의 압력 변화에 따른 형광강도의 변화를 도시하였다. Fig. 6에서 P_{ref} 와 I_{ref} 는 각각 대기압과 대기압에서의 PSP 발광 강도를 나타낸 것이며, P 와 I 는 보정 실험 압력과 이에 해당하는 발광 강도를 나타낸 것이다. 압력이 낮아짐에 따라 PSP의 발광 강도는 강해지므로 대기압 이하의 압력에서는 I_{ref}/I 가 1보다 작은 값을 나타낸다. 모든 혼합비에 대해 산소압력 변화에 대한 형광강도의 변화가 확연하게 관찰되었으며, 이는 본 연구에서 새롭게 채용한 fluorinated polymer가 압력감응 페인트용 형광체의 지지재료로써 유망함을 보여주는 단서가 된다. 한편, 고분자와 용매의 비율 변화에 대한 형광강도의 변화는 비교적 작은 것으로 판명되었으나, 그 비율이 1:3일 때 가장 큰 형광강도의 변화가 나타났다.

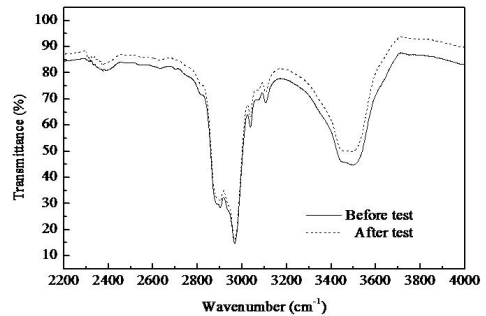


Fig. 7 FT-IR transmittance spectra of a representative film measured before and after the pressure sensitivity experiments (activator : polymer : solvent = 1 : 100 : 250)

전술한 바와 같이 본 연구에서 제작된 압력감응 페인트 막의 형광강도는 산소분압에 민감하다. 산소분자와 발광체 사이의 비복사 에너지 전달이 가역적으로 발생하는지 여부를 확인하기 위하여 대표적인 샘플에 대하여 측정된 적외선 투과 스펙트럼을 Fig. 7에 도시하였다. 압력 변화 대비 형광강도 변화 실험 전후의 샘플에 대한

각 스펙트럼은 공히 ~2380, ~2900, ~2960, ~3040, ~3100 및 ~3490 cm^{-1} 에서 다수의 흡수 피크를 보이며, 이는 모두 fluorinated polymer를 구성하는 탄소와 수소의 결합과 관련된 진동 모드이다[7]. 압력 변화 실험 전후의 투과 스펙트럼에서 주목할만한 차이가 확인되지 않았으며, 이로부터 본 연구에서 제작된 압력감응 페인트는 산소분자와 비가역적인 화학결합을 발생시키지 않으며 산소분압의 변화에 대하여 가역적으로 반응함을 확인할 수 있다.

4. 결론

새로운 조성과 분자구조를 가지는 fluorinated polymer를 기지재료로 채용한 압력감응 페인트를 제작하였다. 본 연구에서 제작된 압력감응 페인트 막을 대상으로 압력 변화에 대한 형광강도 변화를 확인한 결과 각 샘플이 확인한 산소분압 의존성을 나타내었으며, 공정변수의 차이에 따른 형광강도의 차이를 파악할 수 있었다. 추가적인 공정의 최적화 및 기지재료의 구조변화를 통하여 압력 민감도가 더욱 향상된 압력감응 페인트를 제작할 수 있을 것이며, 이러한 신조성 압력감응 페인트를 대상으로 발광체와 산소분자 사이의 에너지 전달 현상, 기지재료에서 산소분자의 이동형태 등을 규명하기 위한 기초연구뿐만 아니라 실용성 평가를 위한 각종 시험평가를 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Lie and Sullivan, Pressure and Temperature Sensitive Paint, Springer, 2005.
- [2] Kang, J. H. and Lee, S. J., "Development of Pressure Sensitive Paint(PSP) Technique for Low-Speed Flows and Its Application", KSME, Vol. 32[4], 2003, pp. 688-693.
- [3] Puklin, E., Carlson, B., Guoin, S., Costin, C., Green, E., Ponomarev, S., Tanji, H. and Gouterman, M., "Ideality of Pressure-Sensitive Paint. I. Platinum Tetra(pentafluorophenyl)porphine in Fluoroacrylic Polymer", Department of Chemistry, University of Washington, Seattle, Washington, 1999.
- [4] Guoin, S., Gouterman, M., "Ideality of Pressure-Sensitive Paint. II. Effect of Annealing on the Temperature Dependence of the Luminescence", Department of Chemistry, University of Washington, Seattle, Washington, 1999.
- [5] Basu, B. J., Anandan, C. and Rajam, K. S., "Study of the Mechanism of Degradation of Pyrene-Based Pressure Sensitive Paints", Sensors and Actuators B, Vol. 94 [3], 2003, pp. 257-266.
- [6] Zelelow, B., Khalil, G. E., Phelan, G., Carlson, B., Gouterman, M., Callis, J. B. and Dalton, L. R., "Dual Luminophore Pressure Sensitive Paint II. Lifetime Based Measurement of Pressure and Temperature", Sensors and Actuators B, Vol. 96[1-2], 2003, pp. 304-314.
- [7] Park, J. H., 1997, Atlas of infrared absorption lines, NASA Contractor Report 29.