

분극 전기에 따른 압전 페인트 센서 감도 측정

한대현* · 박승복* · 강래형*†

Sensitivity Measurement of the Piezoelectric Paint Sensor according to the Poling Electric Field

Dae-Hyun Han*, Seung-Bok Park*, Lae-Hyong Kang*†

ABSTRACT: In this study, the experimental study has been performed by varying the polarization of the electric field and impact force to check the piezoelectric characteristics of piezoelectric paint sensor. Piezoelectric paint sensor used in this study is composed of epoxy resin with a hardener and PNN-PZT powder in 1:1 weight ratio. The dimensions of the paint sensor specimen are $40 \times 40 \times 1 \text{ mm}^3$ and regular specimens were made using a mold. The voids are removed from the specimen in the vacuum desiccator. Both upper side and bottom side of the paint sensor were coated with silver paste for making an electrode and then dried at room temperature for a day. The poling treatment has been carried out under controlled conditions of the electric field in order to check the effect of piezoelectric sensitivities, while the poling temperature was fixed at room temperature and the poling time was set to 30 min. The piezoelectric sensitivities have been measured by comparing output voltage from paint sensor with output force from impact hammer when the impact hammer hits the paint sensor. In result, the effect of the electric field has been evaluated for the sensitivity and describe the result.

초 록: 본 연구에서는 분극 전기에 따른 압전 페인트 센서의 특성을 확인하기 위해 충격힘과 분극 전계를 변화시켜 가면서 실험적인 연구를 수행하였다. 페인트 센서 제작을 위해 유연 압전 재료인 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr, Ti})\text{O}_2$ (PNN-PZT) 파우더와 경화제를 포함하고 있는 에폭시 수지를 중량비 1:1로 혼합 후 몰드를 사용하여 $40 \times 40 \times 1 \text{ mm}^3$ 크기를 갖는 시편을 제작 하였다. 이후 시편의 기공을 제거하기 위해 진공 데시케이터를 사용하였다. 분극 작업을 위해 시편의 전극은 실버페이스트를 윗면과 아랫면에 바르고 하루 동안 건조시켜 제작하였다. 분극 작업은 온도는 상온으로, 분극 시간은 30분으로 고정하고 분극 전계를 달리하여 진행되었다. 1 mm의 두께를 갖는 압전 페인트센서를 제작하여 실험에 사용하였으며, 감도 측정 및 감도 변화는 충격 망치를 사용하여 시편에 충격을 가했을 때 압전 페인트에서 출력되는 전압과 충격 망치에서 출력되는 전압을 측정 후 신호처리 하여 비교하였다. 그 결과 압전 페인트의 민감도에 분극 전계가 미치는 영향에 대해 평가 하였고 그 결과를 기술하였다.

Key Words: 전기(Electric field), 센서(Sensor), 압전 페인트(Piezoelectric paint), 감도(Sensitivity), 분극(Poling)

1. 서 론

압전 세라믹은 응력 센서나 액추에이터 등과 같이 광범

위하게 사용되고 있다[1]. 이는 기계적 신호와 전기적 신호 사이의 변환되는 효율이 매우 높기 때문이다. 이러한 장점을 바탕으로 기존의 연구자들이 압전 재료에 대한 많은 연

Received 7 July 2014, received in revised form 22 August 2014, accepted 25 August 2014

*Dept. of Mechatronics Engineering, and LANL-CBNU Engineering Institute Korea, Chonbuk National University

*†Dept. of Mechatronics Engineering, and LANL-CBNU Engineering Institute Korea, Chonbuk National University, Corresponding author(E-mail:reon.kang@jbnu.ac.kr)

구[2,3]를 수행하였지만 압전 페인트에 대한 연구는 아직 미비하다. 본 연구에서는 압전 세라믹을 사용한 압전 페인트 센서에 대한 내용을 다루고자 한다. 압전 효율을 증가시키기 위해서는 분극 처리가 필요한데, 일반적으로 압전 특성은 분극 온도, 분극 시간, 분극 전계에 따라 그 성질이 변하게 된다. 기존의 분극 방법은 실리콘 오일 용기 안에서 높은 온도, 높은 전계, 그리고 긴 시간 동안 진행되었다. 압전 폴리머의 경우[4] 실리콘 오일 용기 내에서 0-9 kV/mm, 60-120°C, 약 2시간 전후에서 분극이 이뤄졌고, 압전 세라믹의 경우[5], 압전 폴리머와 비슷하게 실리콘 오일 용기 안에서 1-20 kV/mm, 50-150°C, 약 2시간 전후에서 분극이 진행되었다. 압전 세라믹은 매우 작은 충격에도 감도가 좋은 신호를 검출할 수 있는 장점을 가지고 있지만 구조물 전체에 설치하는 것이 어렵고 센서가 부착되지 않은 곳에서 충격이나 파손이 발생하게 될 경우 신호를 감지하지 못할 수 있다. 또한, 압전 센서에 직접 충격이 가해지면 센서가 파손되어 사용이 불가능하며 복잡한 형상이나 곡면에 적용하기 어려운 단점이 있다. 하지만 압전 페인트의 경우, 구조물 표면의 범위에 제한 없이 곡면뿐만 아니라 복잡한 형상을 가지는 구조물에 적용이 가능하고, 충격이 직접 가해져도 쉽게 파손되지 않는 장점이 있다. 압전 세라믹 센서의 단점을 개선하고자 일부 연구자들은 압전 페인트 센서를 개발하고 분극 처리 및 두께가 압전 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Egusa와 Iwasawa[6]는 압전 파우더(Fuji Titanium Industry, PE 60A)와 에폭시 수지(Yuka Shell Epoxy K, Epikoto 1001)를 88:12 중량비로 섞어 압전 페인트 센서를 제작하고 상온에서 5-25 kV/mm 전계로 분극 처리를 수행하였다. Zhang과 Li[7]는 PZT5A powder와 epoxy resin을 7:3의 중량비로 혼합해 압전 페인트 센서를 제작하고 70-80°C의 온도에서 6.5 kV/mm의 전계로 1시간 동안 분극 처리를 수행하였다. Poumeyron과 Hale[8]는 PZT5A 파우더와 페인트 도료를 4:1의 중량비로 혼합하여 센서를 제작하고 40-50°C의 온도에서 5-10 kV/mm의 전계 하에 20분 정도 분극 처리를 수행하였다. 압전 페인트는 분극 처리가 높은 전계와 높은 온도에서 수행되어야 하며, 압전 파우더 비율이 높아 구조물 전체에 적용하기 위해서는 큰 비용이 소요된다. 이러한 단점을 개선하기 위해 본 연구에서는 상온에서 추가적인 장비 없이 낮은 전계 하에 안전하게 분극 처리가 가능하고 압전 페인트의 비싼 비용과 무거운 단점을 개선하기 위해 압전 파우더와 에폭시 수지를 1:1 중량비로 혼합하여 제작하는 방법에 대해 다루고자 한다.

2. 연질 압전 세라믹 파우더 제작

압전 세라믹은 연질 압전 세라믹과 경질 압전 세라믹으로 분류될 수 있다. 연질의 압전 세라믹은 높은 전기기계적 결합 상수와 압전 변형률 상수를 갖기 때문에 상대적으로

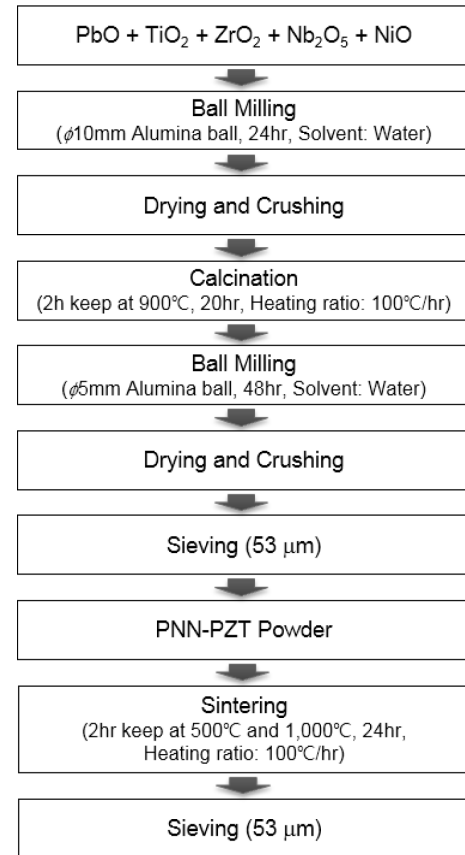


Fig. 1. Manufacturing procedure of PNN-PZT powder

Table 1. Mixing ratio for PNN-PZT powder

Material	PbO	NiO	TiO ₂	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
wt%	66.91	6.10	7.54	4.98	14.46

분극이 용이하고 압전성이 좋다. 경질의 압전 세라믹은 낮은 전기기계적 결합 상수와 안전 변형률 상수를 가지기 때문에 분극 처리가 상대적으로 어렵다. 이에 본 연구에서는 연질의 압전 재료를 사용하여 압전 페인트 센서를 제작하였으며, 압전 세라믹을 연질화 시키기 위해 Nb₂O₅가 사용되었고 소결 온도를 1,000°C로 낮추기 위해 NiO가 사용되었으며, 압전 세라믹 재료인 PbO, TiO₂, ZrO₂(상기 모두 SIGMA ALDRICH)가 사용되었다.

PNN-PZT 압전 파우더 제작은 Fig. 1에 요약되어 있으며 소결이 완료된 파우더는 수평 Sieve 장비(AS ONE, SKH-01)를 사용하여 53 μm의 입자 크기로 제작되었다. 또한, 압전 세라믹 파우더 제작을 위한 각각의 재료 혼합 비율은 Table 1에서 확인할 수 있다.

3. 압전 페인트 센서 제작

압전 페인트 센서는 압전 파우더와 경화제를 포함하고

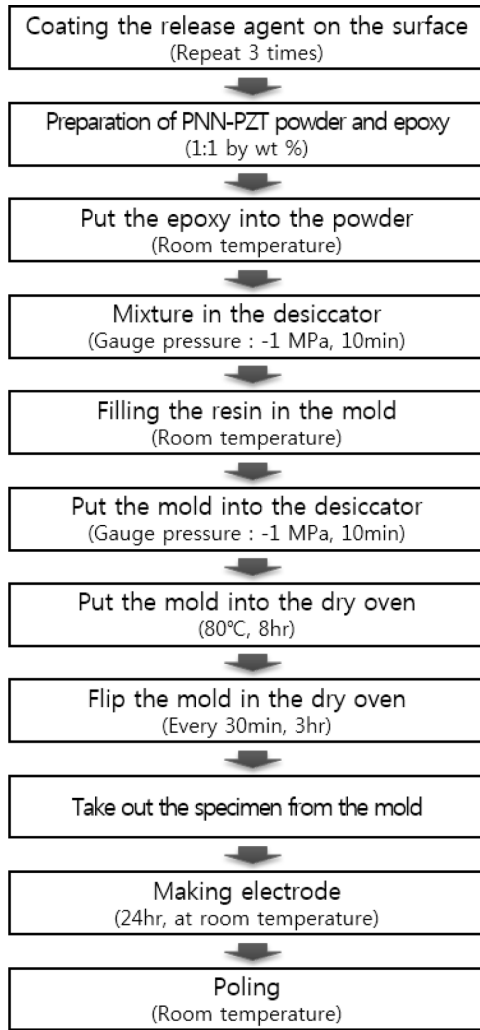


Fig. 2. Manufacturing procedure of PNN-PZT/Epoxy paint sensor

있는 에폭시 수지를 1:1 무게비로 혼합하여 제작되었고 제작 공정은 Fig. 2에 요약되었다. 시편은 몰드를 사용하여 제작되었으며, 시편을 몰드에서 쉽게 취출하기 위해 릴리즈 에이전트(HANKEL, 700-NC)를 사용하였다. 압전 파우더와 에폭시 레진이 혼합되면서 포함된 기공을 제거하기 위하여 진공 데시케이터를 이용했다. 이렇게 제작된 시편은 압전 파우더와 에폭시 레진의 밀도차에 인하여 압전 파우더가 침전되는 현상을 방지하기 위해 경화 공정에서 일정한 시간 간격으로 윗면과 아랫면을 교차시켰다. 시편의 전극은 실버 페이스트(CANS, P-100)를 사용하여 윗면과 아랫면에 $40 \times 10 \text{ mm}^2$ 면적을 갖는 전극을 제작하였다. 이렇게 제작된 페인트 시편의 두께는 1 mm이며 센서로 사용하기 위해 고전압 앰프(FUG, HCN-140)를 사용하여 분극 시간은 30분, 분극 온도는 상온으로 고정하고 분극 전계를 1 kV/mm, 2 kV/mm, 3 kV/mm, 4 kV/mm, 5 kV/mm 총 5가지 조건으로 변경하면서 분극처리를 진행하였다.

4. 압전 페인트 센서의 감도 측정 실험 준비

압전 재료의 물성 측정은 일반적으로 공진-반공진법[9]을 이용하여 수행된다. 하지만 압전 페인트는 에폭시 수지가 포함되어 있어 순수 세라믹과 비교하면 압전 파우더가 차지하는 비율이 낮아 압전성이 좋지 않다. 즉 기존의 공진-반공진법으로 압전 페인트 센서의 물성 측정이 어려우므로 본 연구에서는 충격 망치를 사용하여 페인트 센서에 충격을 주었을 때 충격 망치에서 출력되는 힘 신호와 페인트 센서에서 출력되는 전기 신호를 비교 분석하여 민감도를 식 (1)과 같이 정의하고 평가하였다.

$$\text{Sensitivity } (S) = \frac{\text{Output Voltage } (mV)}{\text{Impact Force } (N)} \quad (1)$$

Fig. 3은 감도 측정 실험의 개념도를 보여준다. 테이블 위에 고무 패드를 설치하여 충격을 주었을 때 발생할 수 있는 잡음신호를 최소화하였다. 충격을 줄 때 페인트 센서의 움직임을 방지하기 위해 실리콘 테이프를 이용하여 고정했다. Fig. 4는 페인트 센서에 동일한 충격 조건을 가하기 위하여 고안된 충격 장치를 보여준다. 충격 장치는 자유낙하 운동에 의해 페인트 센서에 충격을 가할 수 있도록 고안되었으며 연질의 충격 팁이 충격 망치에 사용되었다. 충격 장치에 의해 충격을 가할 때 페인트 센서에서 출력되는 전기 신호와 충격 망치에서 출력되는 전기 신호는 DAQ 장비(DS-1102)의 입력 단자에 연결되어 10 kHz로 데이터가 계측되

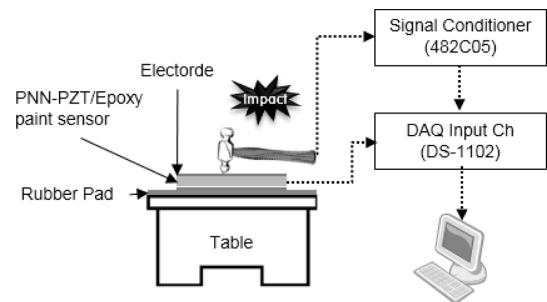


Fig. 3. A schematic of the impact test set-up

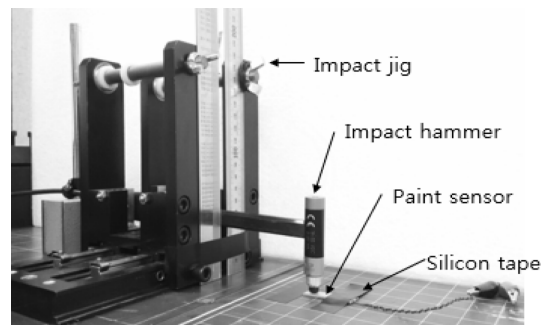


Fig. 4. Impact test set-up for measurement of sensitivity

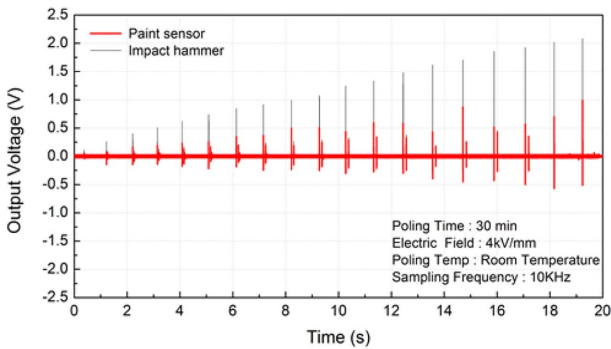


Fig. 5. Measurement of the output voltage from the paint sensor and the impact hammer

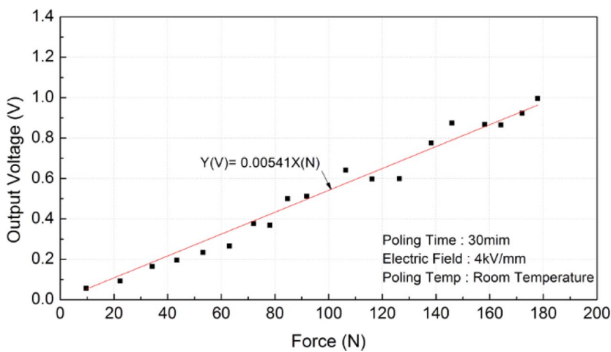


Fig. 6. Piezoelectric sensitivity poled at 4 kV/mm

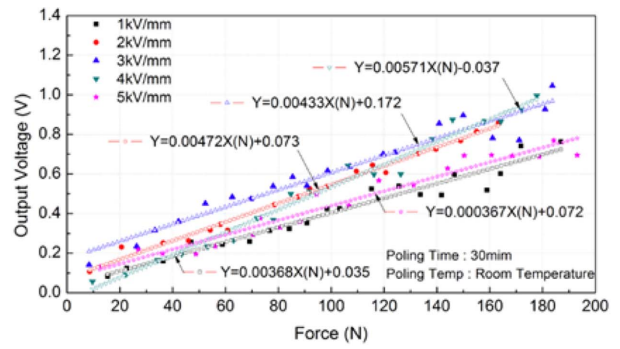
였으며 두 신호를 비교 분석하였다.

5. 압전 페인트 센서의 충격 방법 검증

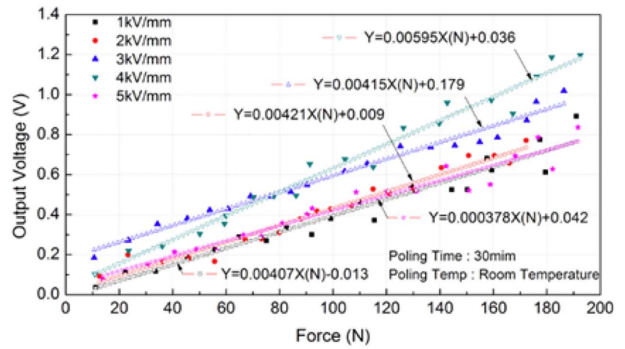
충격량 변화가 압전 페인트 센서의 출력에 미치는 영향과 충격량의 범위를 확인하기 위해서 전계 4 kV/mm, 분극 시간 30분, 그리고 분극 온도를 상온으로 고정한 압전 페인트 센서를 사용하였다. Fig. 5는 충격 변화에 따른 압전 페인트 센서의 출력 전압을 보여주고, Fig. 6는 Fig. 5 신호에서 피크 값을 구해 충격량 변화에 따른 페인트 센서의 출력 값을 도시화하였다. 압전페인트 센서는 충격에 대하여 0.1-1.2 V의 출력 전압이 측정되었고 충격장치의 충격량은 약 5-200 N의 힘으로 압전 페인트에 충격이 가해졌다. 고안된 충격 장치의 낙하 높이가 제한되어 있어 200 N 이상의 충격은 사람의 손으로 내려치는 행위가 필요하다. 하지만 임의적으로 충격을 주면 충격 망치의 충격 각도, 그리고 충격 위치 등 충격 조건이 변동할 수 있어 본 연구에서는 충격량의 범위를 0-200 N으로 선정하였다.

6. 분극 전계에 변화에 따른 압전 페인트 센서의 특성 평가 결과

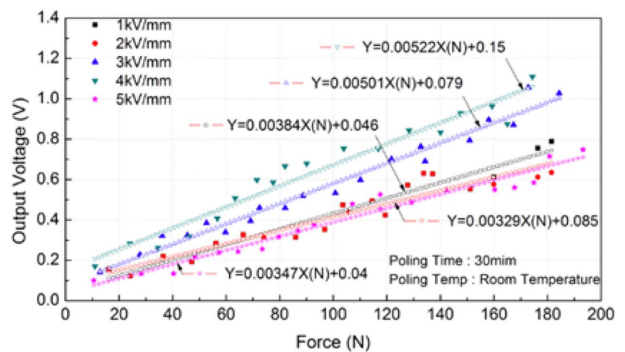
페인트 센서의 분극 조건은 분극 시간 30분, 분극 온도는



(a)



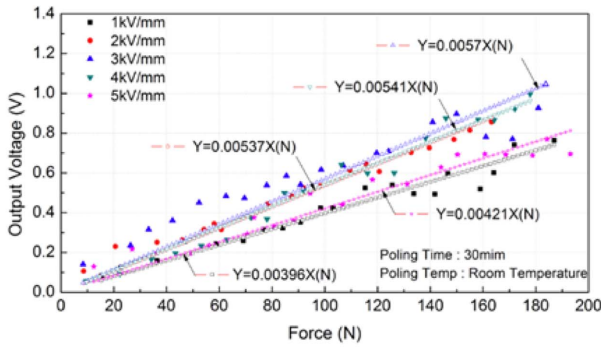
(b)



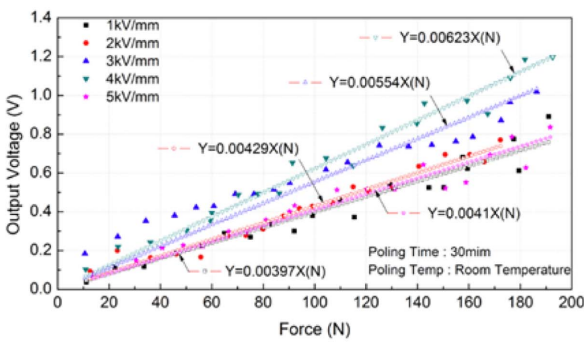
(c)

Fig. 7. Force-output voltage relationship for not fixed intercept at (0,0): (a) Test Case 1, (b) Test Case 2, (c) Test Case3

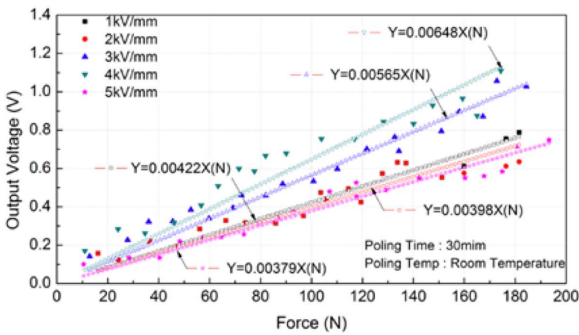
상온으로 고정하였고 분극 전계가 압전 페인트 센서의 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1-5 kV/mm로 선정하였다. 분극 시간은 분극 전계의 영향을 분석하기 위해 고정되었고, 분극 온도는 향후 비행기, 풍력발전 터빈, 그리고 교량과 같은 구조물에 적용될 경우 분극을 위해 추가적인 고온 장비의 필요성을 없앴과 동시에 열처리에 따른 구조물의 변형을 방지하고자 상온으로 고정했다. 각각의 분극 조건에 충격을 가할 때 동일한 시편에 10분 간격으로 3번씩 반복되어 진행되었고 충격 힘과 압전 페인트 센서의 출력 전압은 Fig. 7-8에 그래프로 표현되었다. 반복된 실험 모두 분극 전계에 따라 기울기가 변화되는 것을 확인할 수 있고 이는 분극 전계에 따라 압전 페인트 센서의 감도가 차이



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Force-output voltage relationship for fixed intercept at (0,0): (a) Test Case 1, (b) Test Case 2, (c) Test Case 3

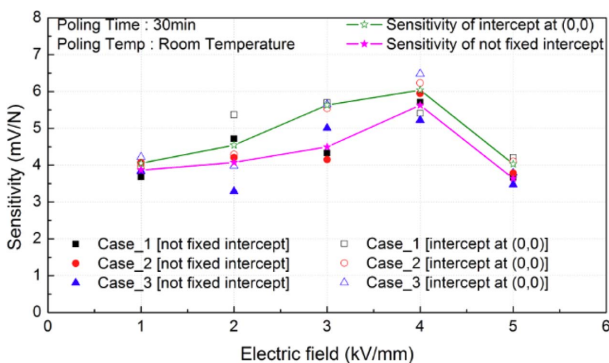


Fig. 9. Sensitivity of the piezoelectric paint sensor according to the electric field

Table 2. Sensitivity of piezoelectric paint sensor

Condition	Sensitivity (mV/N)				
	1 kV/mm	2 kV/mm	3 kV/mm	4 kV/mm	5 kV/mm
Intercept at (0,0)	4.04	4.78	5.63	6.03	4.03
Not fixed intercept	3.87	4.37	4.49	5.65	3.65

가 난다는 뜻이다. 충격에 대한 출력 전압을 1차 방정식으로 표현하기 위해 1차 curve fitting을 하여 감도 계산을 수행하였다. curve fitting시 교차점을 원점(0,0)으로 고정하지 않은 경우(Fig. 7)와 교차점을 원점(0,0)에 고정한 경우(Fig. 8)를 고려하여 각 시편에 대해 감도를 계산하고 Table 2와 Fig. 9에 그 결과를 요약하였다. 교차점 고정 여부와 관계없이 분극 전계가 1 kV/mm에서 4 kV/mm로 증가하자 감도 역시 증가하였고 4 kV/mm에서 가장 높은 기울기를 보였다. 이후 분극 전계가 5 kV/mm로 증가하자 감도는 반대로 감소하는 경향을 보였다. 두 가지 다른 감도 계산법을 통해 확인할 수 있는 것처럼 분극 전계에 대한 감도 변화가 비슷한 경향을 보였고 이는 본 연구에서 수행된 분극 처리와 충격 실험방법의 타당성이 있음을 말해준다. 이를 통해 최적의 분극 전계는 4 kV/mm로 선정하였다.

7. 결론

본 연구에서는 분극 전계에 따른 압전 페인트 센서의 특성을 정의하기 위해 분극 전계를 달리하였고 각 분극 조건에 대해 0-200N 범위를 갖는 충격력을 가해 실험적인 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 압전 페인트 센서에 충격 힘을 달리하면서 출력 전압을 측정한 결과 분극 조건과 관계없이 선형적으로 증가하는 경향을 확인하였다.

(2) 분극 전계를 달리하여 충격 힘에 대한 압전 페인트 센서의 출력 전압을 비교하여 감도를 분석한 결과 최적의 분극 전계는 4 kV/mm였다.

(3) 감도 곡선을 원점(0, 0)에 고정한 경우와 고정하지 않은 경우를 비교하여 분극 처리 및 충격 방법의 타당성을 검증하였다. 기존의 압전 페인트 센서와 달리 낮은 전계와 상온에서 분극 처리가 가능한 압전 페인트 센서를 개발하였고 분극 전계에 따른 페인트 센서의 압전 특성을 평가하여 최적의 분극 조건은 온도는 상온, 분극 시간은 30분, 분극 전계는 4 kV/mm임을 입증하였다. 향후 압전 페인트 센서는 구조물의 부식, 손상을 방지하는 페인트의 기본 기능에 외부 충격이나 구조물의 상태를 실시간으로 파악할 수 있는 안전성 관리 센서로 역할 수행이 가능하리라 본다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구임(2011-0030065).

참고문헌

1. Lee, I., "Research and Development Trends on Application of Piezoelectric Materials," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 90-98.
2. Park, C.Y., and Cho, C.M., "Impact Damage Detection in a Composite Stiffened Panel Using Built-in Piezoelectric Active Sensor Arrays," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 6, 2007, pp. 21-27.
3. Park, K.H., Yoon, K.G., and Park, H.C., "Piezoelectric Actuators for Smart Composite Materials," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 2, 2002, pp. 55-63.
4. Kholkin, A.L., Wutchrch, C., Taylor, D.V., and Setter, N., "Interferometric Measurements of Electric Field-induced Displacements in Piezoelectric Thin Films," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 67, No. 5, 1996, pp. 1395-1941.
5. Chure, M.C., Wu, M.J., Chen, B.H., and Li, W.J., "Effect of Poling Conditions on the Dielectric and Piezoelectric Characteristics of PZT Ceramics," *Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, 2009, pp. 313-320.
6. Egusa, S., and Iwasawa, N., "Thickness Dependence of the Poling and Current-voltage Characteristics of Paint Films Made Up of Lead Zirconate Titanate Ceramic Powder and Epoxy Resin," *Journal of Applied Physics*, Vol. 78, No. 10, 1995, pp. 843-852.
7. Li, X., and Zhang, Y., "Analytical Study of Piezoelectric Paint Sensor for Acoustic Emission-based Fracture Monitoring," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 31, No. 8, 2008, pp. 684-694.
8. White, J.R., Poumeyrol, B., Hale, J.M., and Stephenson, R., "Piezoelectric Paint: Ceramic-polymer Composites for Vibration Sensors," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, No. 9, 2004, pp. 3105-3114.
9. Matsubara, M., Kikuta, K., and Hirano, S., "Piezoelectric Properties of Ceramics," *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, No. 11, 2005, pp. 114105.