<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.10.1069 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

분극 시간에 따른 압전 페인트 센서의 압전 특성 연구

한대현* · 박승복* · 강래형*†
* 전북대학교 메카트로닉스공학과, 로스알라모스연구소-전북대학교 한국공학연구소

Study on Piezoelectric Characteristics of Piezoelectric Paint Sensor According to Poling Time

Dae-Hyun Han*, Seung-Bok Park* and Lae-Hyong Kang*†
* Dept. of Mechatronics Engineering, and LANL-CBNU Engineering Institute Korea, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received April 11, 2014 ; Revised July 16, 2014 ; Accepted July 16, 2014)

Key Words: Piezoelectric Paint(압전 페인트), Poling(분극), Sensor(센서)

초록: 본 논문에서는 분극 시간에 따라 압전 페인트 센서의 특성이 어떻게 변하는지 평가하고, 그 결과를 기술하였다. 연구에 사용된 압전 페인트 센서는 유연 압전 재료인 $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$–$Pb(Zr, Ti)O_2$ (PNN-PZT)와 에폭시 수지를 무게비 1:1로 혼합하여 제작하였다. 센서 시편은 몰드를 사용하여 $40\times10\times1mm^3$ 크기로 제작하였고, 윗면과 아랫면에 실버 페이스트를 사용하여 전극을 제작하였다. 분극 작업 시 온도는 상온으로, 분극 전계는 4kV/mm 고정한 상태에서 분극 시간을 달리함으로써 분극 조건을 달리하였다. 분극 특성은 충격 망치를 이용하여 충격을 시편에 가했을 때 충격 망치에서 측정되는 힘과 압전 페인트 센서에서 출력되는 전압을 비교하여 살펴보았다. 그 결과, 상온에서 분극 전계가 4kV/mm인 경우, 30분 정도 분극 처리를 한 경우 가장 최적의 분극 조건임을 확인하였다.

Abstract: In this study, the piezoelectric characteristics of a piezoelectric paint sensor were investigated in relation to the poling time. This piezoelectric paint sensor was composed of PNN-PZT powder and epoxy resin with a 1:1 weight ratio. The dimensions of the paint specimen were 40 × 10 × 1 mm3, and the top and bottom sides were both coated with a silver paste to create electrodes. During the poling treatment, the poling time was controlled to examine the effect of the piezoelectric properties, while the poling temperature was fixed at room temperature and the electric field was set to 4 kV/mm. The piezoelectric properties were measured by comparing the output voltage from the paint sensor to the force signal from an impact hammer when the impact hammer hit the specimen. In conclusion, the optimal poling conditions were found to be an electric field of 4 kV/mm and a poling time of around 30 min at room temperature.

1. 서 론

압전 재료는 외부에서 가해지는 기계적인 움직임에 대한 반응을 전기적 신호로 출력하고, 그 반대로 전기적 신호가 가해지면 기계적인 신호로 출력하는 특성을 가진다. 전기적 신호와 기계적 신호 간의 변환 효율이 매우 높기 때문에 많은 연구자들이 압전 재료에 대해 연구를 수행하였으며,[1~3] 본 연구에서는 압전 센서의 분극에 대한 내용을 다루고자 한다. 압전 재료를 센서로 사용하기 위해서는 분극 과정을 수행하게 되는데, 일반적으로 분극 온도, 분극 시간, 분극 전압에 따라 압전 특성이 달라지게 된다.[4] 압전 세라믹의 경우, 분극 온도는 50-150℃ 정도에서 실리콘 오일 용기 안에서 0.5-20kV/mm, 2 시간 이내의 분극 조건을 가진다.[5,6] 압전 폴리머의 경우에는, 60-120℃ 정도의 실리콘 오일 용기 내에서 0-9kV/mm, 2 시간의 분극 조건을 가진다.[7] 기존의 압전 센서와 비교할 때, 압전 페인트 센서는 넓은 범위의 표면과 곡면 형상을 갖는 구조물에 사용할 수 있는 장점과 더불어, 페인트 내 압전 재료 비율을 달리함으로써 다양한 응용분야에 적용이 가능하다. 압전 세라믹 센서의 경우 구조물 전체에 설치하는 것이 어렵고

† Corresponding Author, reon.kang@jbnu.ac.kr
Ⓒ 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

센서가 부착되지 않은 곳이나 국부적인 충격 진동 신호를 감지 못할 수 있다. 게다가 강한 충격이 센서에 직접 가해지면 센서가 파손되어 사용이 불가하다. 이러한 단점을 개선하고자 일부 연구자들은 압전 페인트 센서를 개발하고 분극 처리가 센서의 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Egusa 와 Iwasawa 는 압전 파우더(PE 60A, Fuji Titanium Industry) 와 에폭시 수지(Epikoto 1001, Yuka Shell Epoxy K)를 88:12 중량비로 섞어 압전 페인트 센서를 제작하고 상온에서 5–25 kV/mm 전계로 분극 처리를 수행하였다.[8] Zhang 과 Li 는 PZT5A powder 와 epoxy resin 을 7:3 의 중량비로 혼합해 압전 페인트 센서를 제작하고 70-80℃ 의 온도에서 6.5kV/mm 의 전계로 1 시간 동안 분극 처리를 수행하였다.[9,10] 여러 장점에도 불구하고 압전 페인트는 여전히 고가이며 무겁고 높은 전계와 높은 온도에서 분극 처리를 수행해야 되는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하고자 본 연구에서는 압전 세라믹의 무게비를 줄이고, 상온에서 보다 쉽고 낮은 전계에서 압전 페인트 센서의 분극 처리를 할 수 있는 방법에 대해 다루고자 한다. 먼저 압전 세라믹은 크게 연질(soft) 압전 세라믹과 경질(hard) 압전 세라믹으로 나눌 수 있는데, 상대적으로 분극이 용이하고 압전성이 좋은 연질 압전 세라믹을 이용하여 압전 페인트를 제작하여 분극 처리를 용이하게 하고자 하였다. 또한 압전 페인트의 비싼 가격 및 무거운 단점을 개선하기 위해 압전 파우더와 에폭시 수지를 1:1 중량비로 섞어 제작하였다.

2. 압전 페인트 센서 제작

2.1 연질 압전 파우더 제작

압전 재료는 연질 압전 세라믹과 경질 압전 세라믹으로 분류될 수 있다. 연질 압전 세라믹 재료는 큰 전기 기계적 결합 상수와 압전 변형률 상수를 갖고 분극 처리가 용이하다. 반면에 경질 압전 세라믹 재료는 작은 전기기계적 결합 상수와 압전 변형률 상수를 가지며 분극 처리가 상대적으로 어렵다. 이러한 장점 때문에 연질의 압전 재료를 사용하여 압전 페인트 센서를 제작하였다.

본 연구에서는 Nb_2O_5 가 연질화 목적으로 사용되었고 PbO, TiO_2, ZrO_2, 그리고 소결 온도를 1000℃로 낮추기 위해 NiO(상기 모두 Sigma Aldrich)가 사용되었다. Table 1 은 연질 압전 세라믹 파우더를 제작하기 위해 사용된 재료의 혼합비를 나타낸다. PNN-PZT 압전 파우더 제작 절차는

Table 1 Mixing ratio for PNN-PZT powder

Material	PbO	Nb_2O_5	NiO	ZrO_2	TiO_2
wt%	66.91	14.46	6.10	4.98	7.54

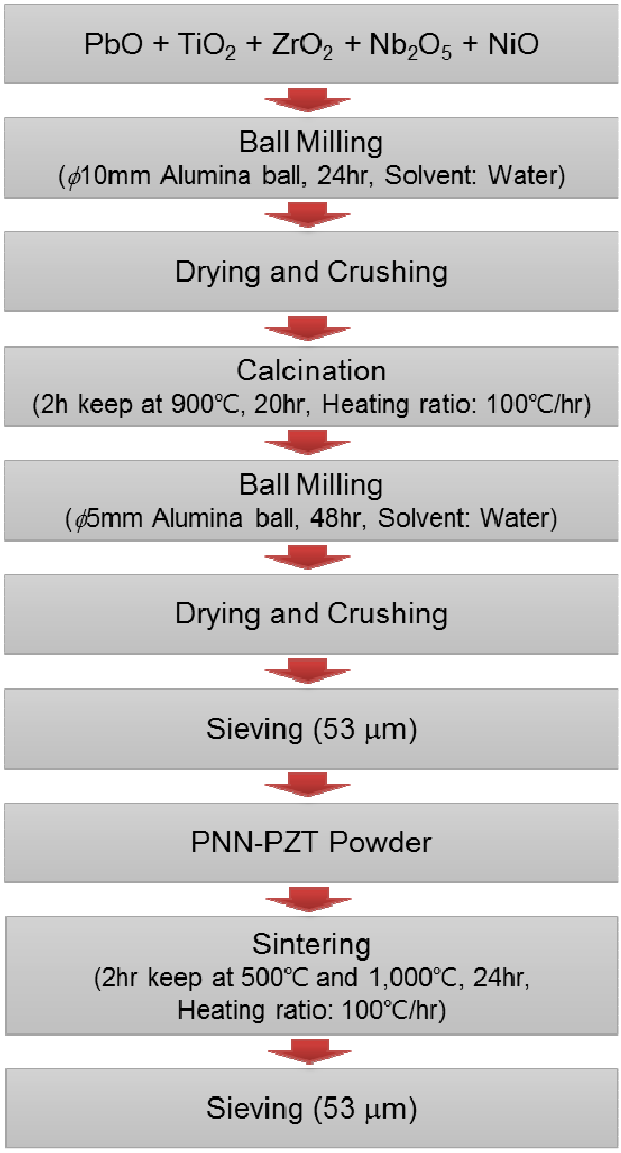


Fig. 1 Manufacturing procedure of PNN-PZT powder

Fig. 1 에 요약하였다. 소결이 완료된 압전 파우더는 Sieve 장비(SKH-01, AS ONE)를 사용하여 53 ㎛의 입자 크기로 제작하였다.

2.2 압전 페인트 센서 제작

Fig. 2 는 압전 파우더를 이용하여 압전 페인트 센서를 제작하는 공정을 나타낸다. 압전 파우더와

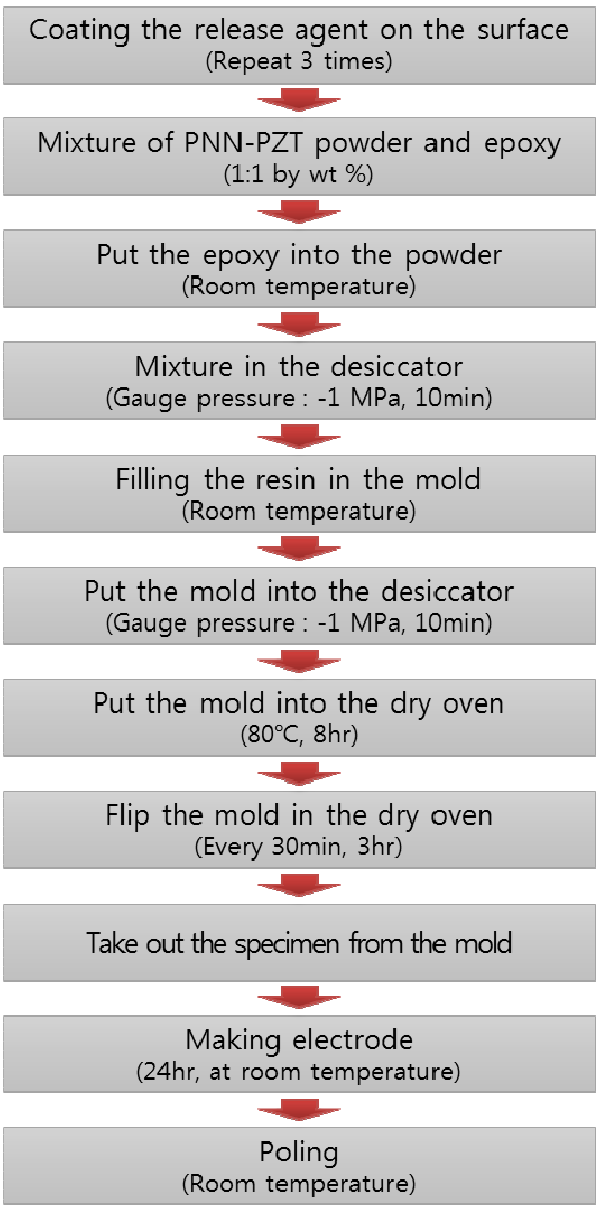


Fig. 2 Manufacturing procedure of PNN-PZT/Epoxy paint sensor

에폭시 수지가 1:1 중량비로 혼합된 압전 페인트는 기공을 제거하기 위해 진공 챔버에서 10 분간 혼합 후 몰드에 주입하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 전극은 실버 페이스트(P-100, CANS)를 사용하여 윗면과 아랫면에 40×10mm^2 크기의 전극을 만들고 상온에서 하루 동안 건조시켰다. 그 후 고전압 앰프(HCN-140, Fug)를 사용하여 분극 전계 4kV/mm, 상온에서 분극 시간을 10-90 분으로 변경하며 분극 처리하였다.

3. 압전 페인트 센서의 감도 측정

일반적으로 압전 물성을 측정하는 방법은 공진-

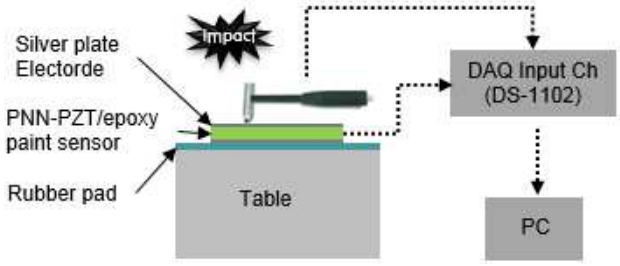


Fig. 3 A schematic of the impact test set-up

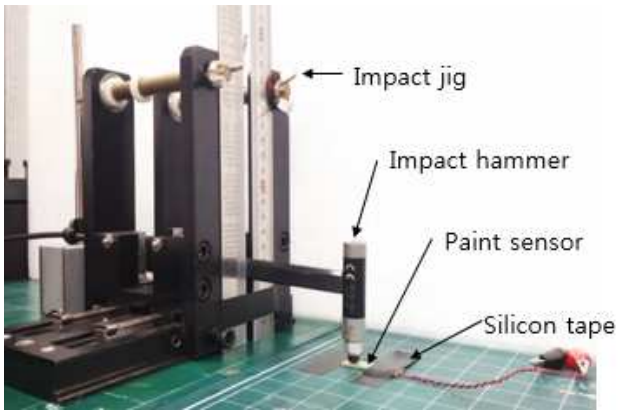


Fig. 4 Impact test set-up for paint sensor

반공진법[11]이 있으나, 압전 페인트와 같이 압전 파우더 비율이 낮아 압전 세라믹에 비해 압전성이 떨어지는 경우 압전 물성 측정은 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 압전 페인트 특성 정의를 압전 페인트 센서에 충격을 주었을 때 충격 망치에서 출력되는 힘 신호와 페인트 센서에서 출력되는 전기 신호를 비교하여 평가하였다. 이는 향후 압전 페인트 센서를 충격 센서로 사용하고자 하였기 때문이다. 압전 페인트 센서의 감도 측정 방법을 제안한 연구로는 Egusa 와 Iwasawa[8]의 연구를 들 수 있으며, 해당 감도는 압전 페인트 센서에 주파수 스윕을 통해 0.3-1.0MHz 주파수 대역에서 측정된 두께 방향 진동(속도)과 압전 페인트 출력 전압간의 관계(V/m/s)로 정의하였다. 해당 논문에서 측정된 감도는 최대 10V/m/s, 전압은 최대 0.4mV (페인트 두께 0.152mm)이었다. 본 연구 결과와 직접 비교는 어렵지만, 최종적으로 도출된 감도(4 장에서 언급)인 5.52mV/N 와 최대출력전압 1.1V 와 비교해 보더라도 본 연구에서 개발된 압전 페인트 센서의 성능이 우수함을 짐작할 수 있다. 특히, 기존 연구에선 압전 파우더와 수지 비율이 9:1 이었음에 반해 본 연구에서는 1:1 로 혼합하여 보다 유연하고 경제적이며 가벼운 페인트 센서를 개발하였고, 10N 정도의 작은 충격도 감지 가능하다는 점을 통해 충분히 충격 센서로서 적용이 가능할 것이라 판단한다. Fig. 3 에는 본 연구의 실험 개념도를 도시하였고, Fig. 4 는 실제

실험 사진을 나타내었다. 충격을 주었을 때 테이블에서 발생할 수 있는 잡음 신호를 줄이기 위해 고무 패드를 설치하였다. 압전 페인트 센서에 충격이 가해졌을 때 움직이는 것을 방지하기 위해 실리콘 테이프로 고정시켰다. 동일한 충격을 가하기 위해 충격 장치를 만들어 자유낙하 높이의 변화로 충격(0-200N)을 달리하였다. 충격 망치에 사용된 팁은 부드러운 연질의 팁을 사용하였다. 충격 장치에 의해 충격을 가할 때 충격 망치에서 출력되는 전기 신호와 압전 페인트 센서에서 출력되는 전기 신호는 DAQ 장비(DS-1102, dSPACE)의 입력단자에 연결하여 10kHz 로 계측하였다. Fig. 5 는 충격 변화에 따라 압전 페인트 센서의 출력 신호가 어떻게 변하는지를 보여 준다.

Fig. 6 은 Fig. 5 신호에서 피크 값을 취해 충격시 페인트 센서의 출력 값을 표현하였다. 충격 망치에 의해 약 0-200N 의 힘으로 압전 페인트에 충격이 가해졌고 충격에 대한 압전 페인트 센서의 출력 전압은 0.1-1.1V 로 측정되어 외부 충격에 대하여 출력 전압이 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 충격 장치는 0-200N 의 충격을 가할 수 있도록 제작되었다. 그 이상의 충격은 충격 망치의 자유 낙하 운동으로는 한계가 있어 사람 손으로 내려치는 행위가 필요하다. 하지만 사람이 임의적으로 충격을 가할 때 충격 망치의 충격 각도, 위치 등 충격 조건의 변동이 발생할 수 있고, 미소 충격에 대해 압전 페인트 출력 신호가 잘 나오는지 살펴보기 위해 본 연구에서는 자유낙하가 가능한 0-200N 으로 충격힘의 범위를 선정하였다.

4. 분극 시간에 따른 압전 페인트 특성 평가 결과

분극 시간에 따른 압전 페인트 센서의 특성을 비교 분석하기 위하여, 분극 전계 4kV/mm, 분극 온도는 상온으로 고정한 상태에서, 분극 시간을 10 분, 20 분, 30 분, 45 분, 60 분, 90 분 총 6 개의 조건으로 달리하였다. 분극 온도를 상온으로 고정한 것은 추후 공학 구조물에 적용시 분극을 위해 추가적인 고온 장비(램프 등)가 필요하지 않도록 하기 위함이고, 분극 전계를 4kV/mm 로 한 것은 1 장 문헌 조사 결과 5kV/mm 이상의 기존 연구 결과에 비해 보다 낮은 전계 하에서 충분한 분극이 가능함을 확인하기 위함이었다. 30 분 분극 처리한 시편에 대한 결과만을 나타낸 Fig. 5 와 같이 각 분극 시간에 다른 시편에 다양한 충격을 가해 시간 영역에서 출력 전압을 측정하였고, 각각의 분극 시간에 대해 동일한 시편을 사용하여 3 번씩 반복 실험을 진행하였다. 분극 시간을 달리한 모든 시편에 대해 충격이 증가함에 따라

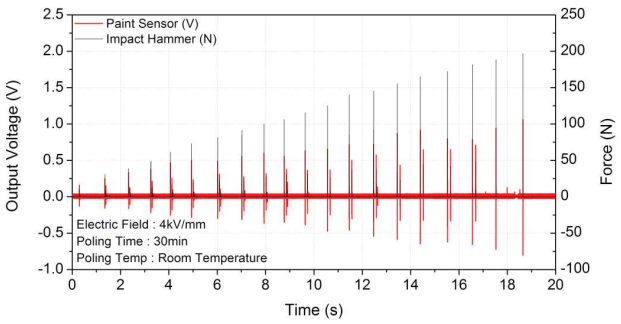


Fig. 5 Measurement of the output signals from paint sensor and impact hammer

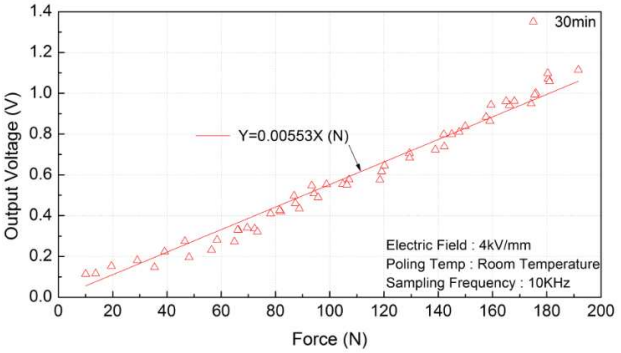
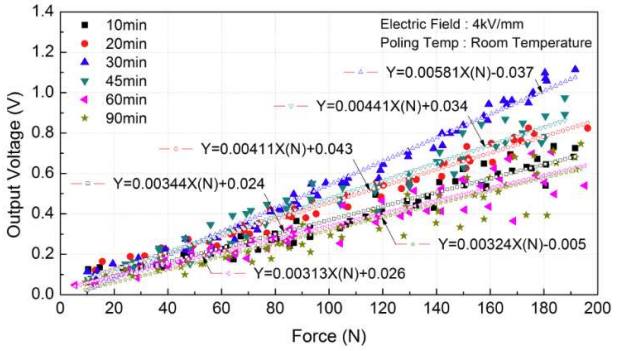
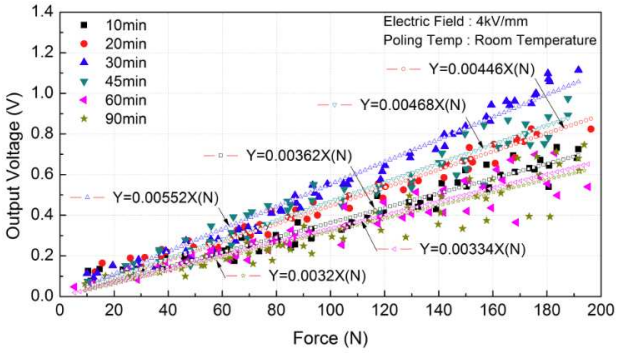


Fig. 6 Piezoelectric sensitivity in case of the poling time as 30min



(a)



(b)

Fig. 7 Force-Output voltage relationship: (a) intercept at (0, 0); and (b) not fixed intercept

출력전압이 증가함을 확인하였고, Fig. 5 에서 나타낸 시간 영역 결과를 이용하여 충격 힘의 피크치와 출력 전압의 피크치를 비교하여 Fig. 6 을 구한 것과 같이 Fig. 7 에 각각 분극 시간을 달리한 모든 경우에 대한 충격-출력 전압 측정 그래프를 나타내었다. Fig. 7 에서 보듯 분극 시간에 따라 그 기울기가 달라짐을 확인할 수 있으며, 이는 곧 분극 시간이 다른 시편에서 감도 차이가 난다는 뜻이다. 감도를 계산하기 위하여, 1 차 curve fitting 시 (0, 0)을 교차점으로 한 경우 [Fig. 7(a)]와 단순히 data set 을 가지고서 감도를 측정한 경우 - 교차점을 (0, 0)으로 고정하지 않은 경우 - [Fig. 7(b)]로 나누어 보았다. 각 시편에 대한 감도(기울기, V/N)를 계산한 후 Fig. 8 에 그 결과를 요약하였다. 동일한 시편에 3 번의 반복 실험을 한 결과를 각각 도형으로 나타내었고, 평균값을 취해 선으로 그려 Fig. 8 에 표기하였다. 그 결과, 교차점을 (0, 0)으로 한 경우 감도는 분극 시간이 10 분에서 20 분으로 증가할 때 기울기가 증가하였고 30 분이 되었을 때 가장 큰 감도를 가졌으며, 이후 45 분, 60 분으로 분극 시간이 증가하자 감도는 감소하는 경향을 보였다. 또한, 교차점을 (0, 0)으로 고정하지 않은 경우 20 분에서 30 분으로 증가할 때 가장 큰 기울기를 보였고 30 분에서 가장 높은 감도를 보였다. 이후 분극 시간이 60 분, 90 분으로 증가하자 감도는 감소하였다. 이러한 두 가지 다른 계산법에서 최적의 감도는 서로 다른 분극 시간을 갖지만 특정 분극 시간을 기점으로 민감도는 증가, 감소하는 경향을 확인 하였다. 실제 압전 페인트 센서에 충격 망치로 충격을 가하지 않았을 경우 압전 페인트 센서에서는 어떠한 출력 전압도 계측 되지 않는다. 이를 바탕으로 압전 페인트의 감도는 (0, 0)을 교차점으로 한 경우를 기준으로 정의하였고 최적의 분극 시간은 30 분으로 선정하였다.

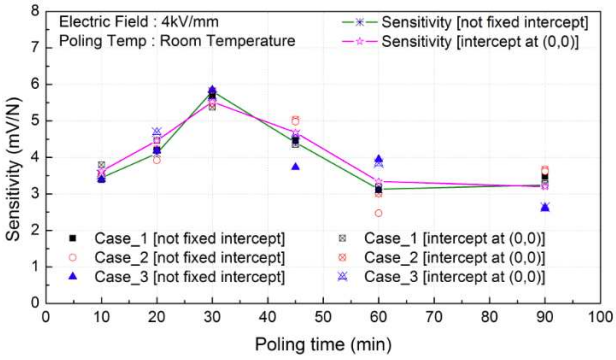


Fig. 8 Piezoelectric sensitivity according to the poling time

5. 결 론

분극 시간에 따른 압전 페인트 센서의 특성을 규명하기 위하여 충격힘, 그리고 분극 시간을 변화시켜 가면서 실험적 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) 압전 페인트 센서에 충격힘을 변화시켜 출력 전압을 측정하였고 충격힘에 따라 출력 전압은 분극 조건에 관계없이 선형적으로 증가하는 경향을 확인하였다. (2) 압전 페인트 센서에 분극 시간을 변화시킨 후 충격힘에 따른 압전 페인트 센서의 감도를 분석한 결과 (0, 0)을 교차점으로 한 경우 최적의 분극 시간은 30 분 이었다. 본 연구에서는 기존의 압전 페인트 센서와 달리 상온 조건에서, 그리고 좀더 낮은 전계(4kV/mm) 하에서 분극이 가능한 압전 페인트 센서를 개발함과 동시에 분극 조건에 따른 압전 페인트 센서의 압전 특성을 평가하였다. 최종적으로 분극 온도는 상온, 분극 전계는 4kV/mm, 분극 시간은 30 분 정도의 분극 조건을 통해 페인트 자체가 센서 역할을 할 수 있는 압전 페인트 센서를 개발하였고, 향후 이러한 압전 페인트 센서는 구조물의 부식, 손상을 방지하는 페인트의 기본적인 기능에 실시간으로 구조물 전체의 안전성을 관리하는 센서로 역할 수행이 가능하리라 본다.

후 기

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

참고문헌
(References)

(1) Kim, S. J. and Kim, Y. S., 2010, "Dependence of Permittivity and Piezoelectric Coefficient on Remanent Polarization and Temperature During Polarization Reversal in a PZT Wafer," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 20, No. 5, pp. 323~326.

(2) Goo, N. S., Kim, J. H. and Tien, M. T., 2010, "Design of a Piezocomposite Generating Element and Its Characteristics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 7, pp. 867~872.

(3) Chin, W. S., Lee, D. G. and Kwon, J. W., 2007, "Reliability Monitoring of Adhesive Joints by Piezoelectricity," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 8, pp. 1388~1397.

(4) Masako, K., Norikazu, S. and Takahiro, Y., 2000, "Influence of Poling Conditions on the Piezoelectric Properties of PZT Ceramics," *Materials in Electronics*,

Vol. 11, No. 5, pp. 425~428.
(5) Kholkin, A. L., Setter, N., Taylor, D. V. and Wutchrich, Ch., 1996, "Interferometric Measurements of Electric Field-Induced Displacements in Piezoelectric Thin Films," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 67, No. 5, pp. 1395~1941.
(6) Chen, B. H., Chure, M. C., Li, W. J. and Wu, L., 2009, "Effect of Poling Conditions on the Dielectric and Piezoelectric Characteristics of PZT Ceramics," *Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, pp. 317~320.
(7) Hagstrom, B., Lund, A., Johansson, C., Jonasson, C. and Nilsson, E., 2013, "Poling and Characterization of Piezoelectric Polymer Fibers for Use in Textile Sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 201, pp. 477~486.
(8) Egusa S. and Iwasawa N., 1995, "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, pp. 6060~6070.
(9) Zhang, Y., 2006, "In Situ Fatigue Crack Detection Using Piezoelectric Paint Sensor," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 10, pp. 843~852.
(10) Li, X. and Zhang, Y., 2008, "Analytical Study of Piezoelectric Paint Sensor for Acoustic Emission-Based Fracture Monitoring," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 31, No. 8, pp. 684~694.
(11) Du, H., Luo, F., Pei, J., Qu, S., Zhou, W. and Zhu, D., 2007, "An Approach to Further Improve Piezoelectric Properties of $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$-Based Lead-Free Ceramics," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, No. 20, pp. 20297-1~3.