

압전 페인트 센서를 이용한 복합재 구조물의 충격 신호 감지

박승복* · 한대현* · 강래형*†

Impact Signal Monitoring of a Composite Structure Using Piezoelectric Paint Sensor

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

ABSTRACT: This paper presents a structural health monitoring method using piezoelectric paint sensor designed for an impact sensor. The piezoelectric paint sensor can be flexibly deposited onto most structural surfaces in a thin form of the paint, and measure impact signals without any external device such as a power amplifier. In this study, a composite plate having four zones coated with piezoelectric paint was used for impact monitoring test. The sensitivity of the piezoelectric paint sensor was obtained by measuring the output voltages against the impact force. In addition to the sensitivity measurement, the impact position has been also estimated by comparing the output signals of the paint sensors when the impact occurs on the specimen.

초 록: 본 논문은 충격 센서로서 압전 페인트 센서를 사용해 구조물 건전성 모니터링을 수행하였다. 본 연구에 적용된 압전 페인트는 페인트 형태의 압전 재료로 물체에 얇게 코팅할 수 있고, 추가적인 외부 전원 필요 없이 충격 센서로 사용할 수 있다는 장점을 지닌다. 본 논문에서는 복합재 시편에 압전 페인트 센서를 네 부분으로 구분하여 도포한 후 충격 실험을 수행하였다. 압전 페인트 센서의 감도는 충격 힘에 따른 출력 전압을 측정하여 구하였고, 감도 측정과 더불어, 시편에 충격이 가해진 경우 압전 페인트 센서의 출력 신호를 비교하여 충격 위치도 추정하였다.

Key Words: 압전(Piezoelectric), 페인트(Paint), 복합재료(composite materials), 충격 실험(Impact)

1. 서 론

공 국내외에서 지진 등과 같은 자연 재해는 물론 구조물의 노후화로 발생하는 균열이나 외부 충격에 의해 발생한 작은 손상으로부터 건축, 교량, 선박 등에서의 피해가 발생하고 있다[1]. 미국에서는 20년 이상 된 교량의 보수 등과 관련하여 실시간 모니터링의 연구가 계속 진행되고 있고, 국내에서도 구조물의 안전성에 대한 중요도가 증가하며 이에 대한 제도 또한 강화되어 가고 있다[2]. 이런 현실에 구조물 안전성을 실시간 모니터링하기 위해서 여러 해석적

방법, 센서의 활용 등 여러 가지 연구가 진행[3-7]되어 왔다. 본 연구에서는 압전 페인트를 활용한 구조물에 발생하는 외력들을 실시간 모니터링 하고 그 충격의 위치를 예측하는 연구를 하고자 한다. 압전 물질은 압전 특성을 보유한 물질로써 그 특성을 활용하여 구조물에 작용하는 충격이나 진동, 건전성 모니터링 등에 활용[7,8] 가능한 센서이다. 특히, 압전 페인트의 경우 페인트 형태로 구조물에 적용되기 때문에 대형 선박이나 항공체, 교량 등의 거대한 구조물은 물론 그 형태에 크게 영향을 받지 않고 그 활용 위가 방대하다. 하지만 현재까지 압전 재료로서 연구되어온 압전 세

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)

라막이나 PVDF[9-12]와는 달리 압전 페인트의 제조 방법에 대한 표준화가 정립되어 있지 않고, 압전 페인트의 무게 비가 높으며[13] 그 특성에 대한 연구도 많이 부족한 실정이다. 본 논문에서는 PNN-PZT/Epoxy paint를 제조하여 그 특성에 대해 연구하고자 한다. 실험에서는 큰 구조물에 적용하기에 앞서 두께 1 mm의 정사각형 복합재 시편에 압전 페인트를 코팅하여 실험하였고, 그 위에 충격이 작용하였을 때 압전 페인트에서 발생하는 출력 신호를 분석하였다. 이 신호를 이용하여 구조물에 외력이 작용했을 때 실시간으로 모니터링이 가능[14,15]하고 신호의 크기로부터 외력의 크기를 예측 가능할 것으로 판단된다.

2. 압전 페인트 센서 제작

2.1 PNN-PZT 파우더 제조

본 연구에 사용한 압전 페인트 제작 절차는 Fig. 1에 요약하였다. 압전 재료로는 많이 활용되고 있는 압전 세라믹의 재료인 PZT 원료 분말에 소량의 첨가제로 저온소결이 가능하다고 검증[16]된 PNN($\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$)를 첨가하여 사용하였다. NiO의 비율은 4.15% 정도로 유지하여 소결시 필요한 1200°C의 고온 과정을 1000°C로 낮추어 소결할 수 있었다. 분말의 혼합은 일반적인 산화물 혼합법으로 진행되었다. 혼합 용매로는 증류수(Distilled water)가 사용되었다. 사용 원료로 다섯 시약이 사용되었으며 PbO(99.9%, Sigma), NiO(99.99%, Aldrich), Nb_2O_5 (99.9%, Aldrich), ZrO_2 (99.99%, Aldrich), TiO_2 (99.5%, Aldrich)순도의 시약을 사용하였다. 먼저 다섯 가지 시약을 일정 비율로 증류수와 함께 혼합하여 Ball Milling 과정을 거친다. Ball Milling 과정은 280 rpm으로 24시간 동안 진행하였고 이후 혼합물을 건조시킨 후, 건조된 혼합물을 900°C에서 2시간 동안 하소하



Fig. 1. Manufacturing process of the piezoelectric paint

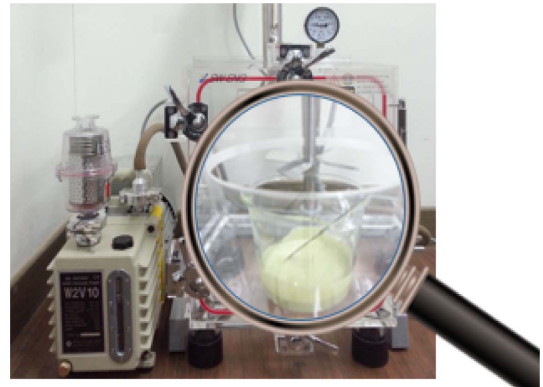


Fig. 2. Void removal process using the vacuum desiccator

였다. 하소과정에 도달하기까지 승온 속도는 100°C/h로 유지했고 하소과정으로 얻은 분말은 Sieving 과정을 거쳐 53 μm 이하의 분말을 얻을 수 있다. 얻은 분말은 소결과정을 진행한다. 1000°C에서 2시간 소결과정을 진행하였으며 고온으로 인한 장치의 사고를 방지하기 위해 승온 속도를 하소과정과 같이 100°C로 진행하였다. 소결이 완성된 분말은 압전 파우더를 에폭시와 혼합할 때 분산을 좋게 하고 크기를 고르게 하기 위해 다시 53 μm 의 Sieving 과정을 거쳤다.

2.2 PNN-PZT/Epoxy 페인트 제작

앞서 제조한 PNN-PZT 파우더를 에폭시와 혼합하여 페인트 제작을 한다. 에폭시는 국도화학의 KFR-120와 KFH-150을 혼합하여 사용하였다. KFR-120과 KFH-150의 무게 비는 100:27로 혼합하여 사용하였으며 압전 파우더와 에폭시의 무게 비는 1:1로 적용하였다. 이러한 에폭시와 혼합하여 사용하는 압전 페인트는 에폭시 수지 내에 압전 파우더들이 널리 분포되며 압전 세라믹과는 달리 분극에 어려움이 많다. 특히, 분극 시 압전 페인트의 불규칙한 코팅이나 내부의 미세 기공 등이 존재하면 상하부의 전극이 도전되어 타버리는 문제가 발생한다. 때문에 최대한 분극 과정에서 문제점을 줄이기 위해 페인트 내부의 기공을 없애는 작업을 하였다. Fig. 2와 같이 압전 페인트 내부의 공기를 제거하기 위해 진공 데시케이터를 이용하여 약 20분간 압전 페인트를 혼합하여 사용하였다. 압전 페인트는 일반 페인트의 사용법과 같이 페인트 붓을 이용하여 시편에 칠해졌으며, 상온에서 하루정도 건조 후 전극 생성을 위해 실버 페이스트를 압전 페인트 위에 도포하였다. 이후 분극 과정은 전계 4 kV/mm로 30분 동안 분극 처리를 하였다. 모든 실험은 일반적인 적용을 고려하여 상온에서 진행하였다.

3. 충격 실험 및 결과

3.1 충격 실험 셋업

제작된 압전 페인트는 그 충격 검출 특성을 알아보기 위

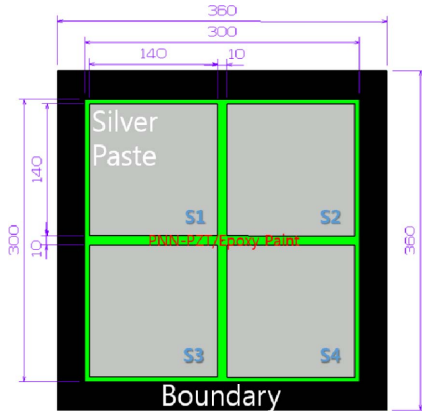


Fig. 3. Dimensions of the composite specimen



Fig. 4. Experimental setup for impact test

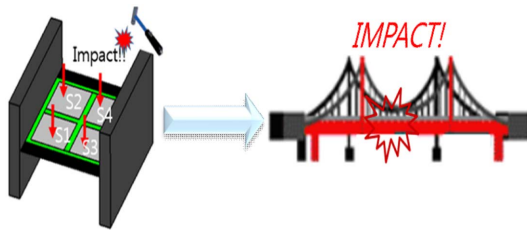


Fig. 5. Boundary condition definition for impact test

해 복합재 평판 시편(CU-125NS, Hankuk Fiber Co., Ltd., Gr/Ep [90₂/0₂]_s)에 적용했다. Fig. 3과 같이 한 변 360 mm 정 사각형의 복합재 시편 위에 복합재 시편의 외곽 경계로 30 mm 폭의 공간을 두었으며, 외력의 작용에 대한 보다 정확한 결과를 얻기 위하여 내부 전극을 네 영역으로 나누어 실험하였다. 네 부분의 140 × 140 mm² 면적 위에 약 50 g의 압전 페인트가 사용되었고, 압전 페인트의 두께는 약 0.15 mm로 얇게 코팅 되었다. 충격이 가해질 경우 발생하는 충격 신호 감도를 알아보기 위해 전극의 중심 부분에 충격 실험을 하여 그 출력 값을 측정하였다. 충격은 임팩트 해머(PCB 086C01)를 사용하여 입력되는 충격의 크기를 얻기 용이했으며 dSPACE DS1102 DSP Controller Board를 이용하여 10 kHz 취득 주파수로 데이터들을 수집하였다.

경계조건 설정은 여러 공학 구조물 중에 특히 교량과 같

은 형태의 구조물에 적용될 수 있는 경계조건을 고려하기 위해 Fig. 5와 같은 경계조건으로 실험을 수행하였다. 해당 경계 조건에서 각각의 압전 페인트 센서에 충격이 가해진 경우(S1~S4), 감도를 측정하여 각 센서별 감도 차이는 없는지 살펴보고, 충격 위치 검출시 각 센서별 신호는 어느 정도 차이가 나는지 실험을 수행하였다.

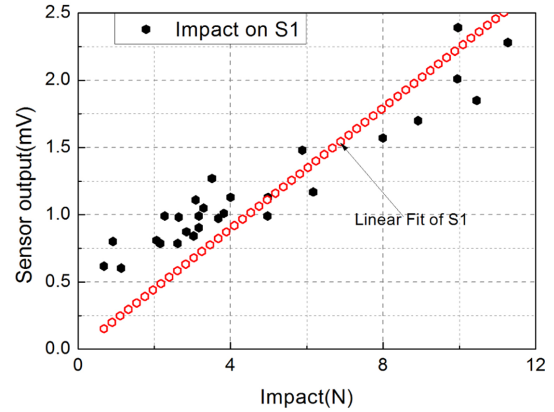


Fig. 6. Piezoelectric paint sensor output vs. impact force on S1

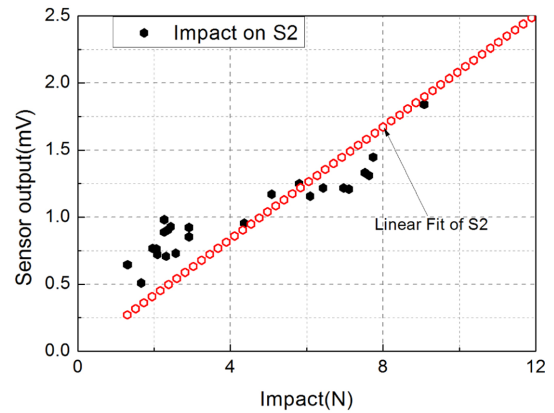


Fig. 7. Piezoelectric paint sensor output vs. impact force on S2

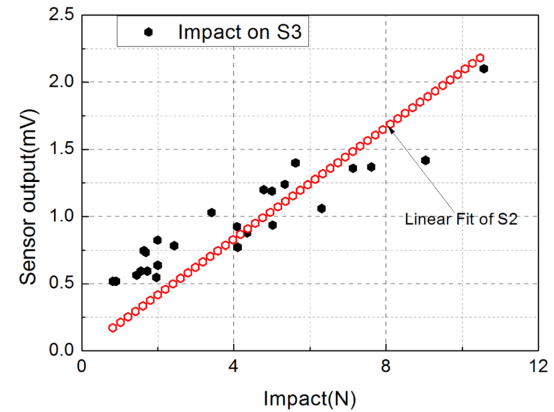


Fig. 8. Piezoelectric paint sensor output vs. impact force on S3

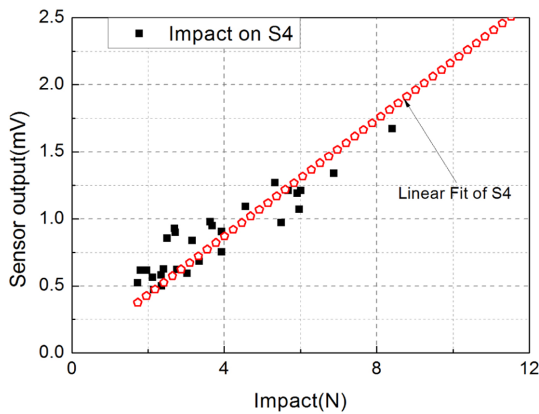


Fig. 9. Piezoelectric paint sensor output vs. impact force on S4

Table 1. Sensitivity of the PNN-PZT/Epoxy paint

		Sensitivity (mV/N)	
Impact Position	S1	0.224	0.215 (average)
	S2	0.209	
	S3	0.208	
	S4	0.217	

3.2 압전 페인트의 감도 분석

압전 페인트 센서의 감도를 측정하기 위하여 충격 힘의 peak 점과 해당 충격 힘이 가해진 경우 압전 페인트 센서에서 출력되는 peak 값을 정리하여 Figs. 6~9에 나타내었다. S1~S4 각 네 영역에서 압전 페인트 센서 출력과 충격 힘을 비교하였으며, 결과 데이터를 Fitting한 결과 약간의 차이는 있으나 충격 크기에 비례한 1차 그래프 형태의 결과를 얻을 수 있었다. 구분된 네 영역의 구체적인 감도 값은 Table 1에 요약하였으며, 실험 결과, 각 압전 페인트 센서 감도는 0.208~0.224 mV/N의 분포를 보이고, 평균적으로는 약 0.215 mV/N의 감도를 가짐을 알 수 있었다.

3.3 충격 위치 검출 특성 평가

압전 페인트 센서가 도포된 복합재료 평판에 충격이 가해진 경우 충격 위치가 S1~S4 영역 중 어느 부분인지 판단할 수 있는지 검토하여 보았다. 우선 각 센서 영역별 모서리 부분을 a, b, c, d로 두고(Fig. 10 참고) 센서 간 인접한 부분에 충격을 가한 경우에 서로 인접한 센서간 출력 신호의 차이가 어느 정도 되는지 살펴보았다. Fig. 10은 하나의 예로 S1의 세 모서리(b, c, d)에 임팩트를 가했을 때 주변 압전 페인트에서 발생하는 신호를 보여준다. 측정 결과, 충격이 가해진 지점 외에서는 거의 신호가 출력되지 않는 특성을 보였다. 좀더 정량적인 평가를 위해 충격이 가해진 지점의 출력 전압 peak 값을 1로 두었을 때 나머지 영역의 센서 신호는 어느 정도의 값을 가지는지 비교하였다. Fig. 11은 복

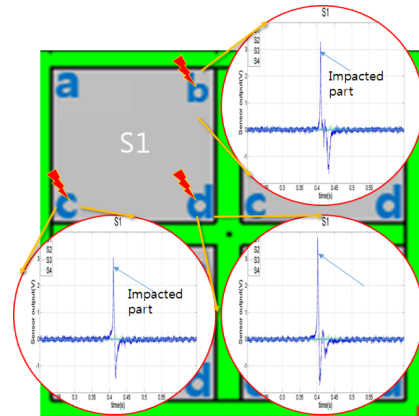


Fig. 10. The piezoelectric paint sensor output when impact is applied to the edge of S1 (b, c, d)

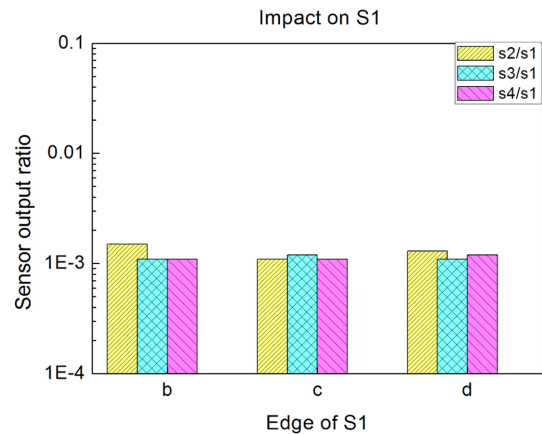


Fig. 11. The relative sensor output when impact is applied to the S1

합재 시편의 압전 페인트 S1 부분에 임팩트를 가했을 경우, 주변 다른 센서에서 발생한 값을 비율로 나타낸 것이다. 측정 결과 모두 직접 임팩트가 작용한 부분의 신호 외에는 세 결과 모두 거의 신호의 변화가 나타나지 않았으며 신호 차이는 100배 이상으로써 충격이 가해진 지점과 그렇지 않은 지점을 확연히 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전 페인트 센서로 PNN-PZT와 Epoxy를 혼합한 PNN-PZT/Epoxy 페인트를 제작하여 이를 복합재 평판에 적용 후 충격 실험을 수행하였다. 압전 페인트 도포 영역을 네 부분으로 나눠 각 영역별 센서 감도를 측정해 보고 각 센서별 감도의 차이가 없음을 확인하였다. 이후, 충격을 각 센서 모서리 부분에 작용하게 한 후 인접한 센서 간 신호 특성을 살펴봄으로써 충격 위치 검출 유무를 확인하였다. 실험 결과, 충격이 가해진 지점과 그렇지 않은 지점간에 출력 신호의 차이가 매우 크게 나타났으며 이를 통해 충

격 위치 판별이 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 압전 페인트 센서는 복합재 표면에 적용하여 충격 신호 감지에 사용될 수 있고, 추후에는 복합재료 제작에 직접 이용함으로써 복합재 구조/센서 일체형 구조물로 적용할 계획이다.

후 기

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

참고문헌

1. Richard, H.A., Fulland, M., Sander, M., and Kullmer, G., "Examples of Fatigue Crack Growth in Real Structures", 2013, In CP2006.
2. Cho, B.H., Lee, D.Y., and Kim, H.J., "Policy for Safety of Non-buildings and Non-structural Elements Against Natural Hazards in Korea." *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 5, 2013, pp. 119-128.
3. Yoon, D.J., "Development of Self-Sensing Sensors for Smart Structures," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 2003, No. 1, 2003, pp. 3-19.
4. Taha, M.R., Noureldin, A., Lucero, J.L., and Baca, T. J., "Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features," *Structural Health Monitoring*, Vol. 5, No. 3, 2006, pp. 267-295.
5. Ihn, J.B. and Chang, F.K., "Pitch-catch Active Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, 2008, pp. 5-19.
6. Kang, I., Schulz, M.J., Kim, J.H., Shanov, V., and Shi, D., "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring," *Smart materials and structures*, Vol. 15, No. 3, 2006, pp. 737.
7. Gul, M., and Catbas, F.N., "Structural Health Monitoring and Damage Assessment Using a Novel Time Series Analysis Methodology with Sensor Clustering," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 6, 2011, pp. 1196-1210.
8. Levassort, F., Tran-Huu-Hue, P., Ringaard, E., and Lethiecq, M., "High-frequency and High-temperature Electromechanical Performances of New PZT-PNN Piezoceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, No. 10, 2001, pp. 1361-1365.
9. Lin, X., and Yuan, F.G., "Experimental Study Applying a Migration Technique in Structural Health Monitoring," *Structural Health Monitoring*, Vol. 4, No. 4, 2005, pp. 341-353.
10. Ueberschlag, P., "PVDF Piezoelectric Polymer," *Sensor Review*, Vol. 21, No. 2, 2001, pp. 118-126.
11. Luo, H., and Hanagud, S., "PVDF Film Sensor and Its Applications in Damage Detection," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 12, No. 1, 1999 pp. 23-30.
12. Kim, J.W., and Kim, I.G., "Detection of High-Velocity Impact Damage in Composite Laminates Using PVDF Sensor Signals," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 6, 2005, pp. 26-33.
13. Payo, I., and Hale, J.M., "Sensitivity Analysis of Piezoelectric Paint Sensors Made Up of PZT Ceramic Powder and Water-based Acrylic Polymer," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 168, No. 1, 2011, pp. 77-89.
14. Zhang, Y., "Piezoelectric Paint Sensor for Nondestructive Structural Condition Monitoring," *Proc. SEM X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, 2004, pp. 7-10.
15. Zhang, Y., "In situ Fatigue Crack Detection Using Piezoelectric Paint Sensor," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 10, 2006, pp. 843-852.
16. Shiratsuyu, K., Hayashi, K., Ando, A., and Sakabe, Y., "Piezoelectric Characterization of Low-Temperature-Fired Pb (Zr, Ti) O₃-Pb (Ni, Nb) O₃ Ceramics," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 39, No. 9S, 2000, pp. 5609-5612.