

모자이크 패턴 전극 압전 페인트 센서를 이용한 충격 위치 검출

강상현^{1,2} · 강래형^{1,2,3†}¹전북대학교 메카트로닉스공학과, ²로스알라모스연구소-전북대학교 한국공학연구소,
³전북대학교 유연인쇄전자공학과

Impact Localization Using Piezoelectric Paint Sensor with Mosaic Pattern Electrodes

Sang-Hyeon Kang^{1,2} and Lae-Hyong Kang^{1,2,3†}¹Department of Mechatronics Engineering, ²LANL-CBNU Engineering Institute-Korea,
and ³Department of Flexible and Printable Electronics, Chonbuk National University

Abstract

To detect the impact location of a structure, the authors' group conducted a study on piezoelectric paint sensor. The piezoelectric paint sensors are used for impact detection due to their inherent characteristics: sensitivity to high-frequency signal and impact. Additionally, the paint sensor can be applied on curved and complex structures where ceramic sensor would not be applicable. Moreover it is a self-powered sensor therefore no need for an external power source. For impact localization, mosaic pattern electrodes were coated on the specimen and the impact signal obtained from any part of the electrode where the impact occurred. If we more precise impact localization is required, the electrodes should be divided into more parts and impact data acquisition conducted in all the points of the electrode. In this paper, we developed a light, cheap and simple multi-channel data acquisition system to aid in data gathering. In total four channels data acquisition have been tested using the ARM Cortex-M3.

초 록

구조물의 충격 위치 검출을 위해 본 연구그룹에서는 압전 페인트 센서를 연구하고 있다. 압전 페인트는 고주파 신호 및 충격에 민감한 특성으로 인하여 충격 감지에 사용할 수 있다. 또한, 압전 페인트 센서는 세라믹 센서가 적용될 수 없는 곡선 또는 복잡한 구조에 코팅될 수 있으며 외부 전원을 필요로 하지 않는다. 충격을 검출하기 위해 모자이크 패턴 전극을 시험편 위에 코팅하였고, 충격 신호는 충격이 발생한 전극부에서 얻을 수 있었다. 보다 더 정확한 충격 위치 검출을 위해서는 전극을 더 많은 부분으로 나누어 해당 전극부로부터 충격 데이터 수집이 필요하다. 본 연구에서는, 데이터 수집을 위하여 가볍고 저렴한 간단한 멀티채널 데이터 수집 시스템을 개발하였다. ARM Cortex-M3의 UART 통신을 이용하여 총 4채널의 데이터를 수집하였다.

Key Words : Piezoelectric(압전), Paint(페인트), Impact test(충격 실험), Data acquisition(데이터 수집), Impact localization(충격 위치 검출)

1. 서 론

복합재료가 항공기에 처음 사용된 1974년 이래로

항공기 제조업체들은 항공기의 경제성을 높이기 위하여 복합재료의 비중을 높이고 있다[1]. 복합재료는 기존 금속재료에 비해 가볍고, 내열성 및 강도가 뛰어나 항공기를 가볍게 하여 연료비를 절감할 뿐만 아니라 부품의 부식 속도를 늦춰 유지비용을 줄일 수 있다. 하지만 복합재료는 기존 금속재료에 비해 충격 손상에 취약한 특성을 지니고 있어 구조 건전성 모니터링이

필요하다[2]. 구조 건전성 모니터링에 사용되는 대표적인 재료로는 압전 재료가 있다.

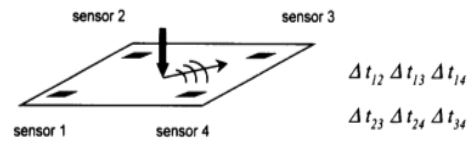
압전 재료는 응력이 가해지면 분극 현상으로 인한 전압이 발생하고, 전계를 가하면 기계적인 변형을 일으키는 압전 효과를 나타내는 재료로 센서, 액추에이터, 점호 장치, 스피커 등 산업의 많은 분야에 활용된다[3,4]. 압전 재료는 크게 압전 세라믹, 압전 폴리머, 압전 합성물로 구분할 수 있다.

압전 세라믹은 감도가 높고 주파수 범위가 넓으며 노이즈가 낮다[5,6]. 따라서 매우 낮거나 높은 주파수 신호를 측정할 수 있으며 유량 또는 레벨 센서와 같은 다양한 응용 분야에서 사용할 수 있다[7,8]. 하지만 취성 파괴가 쉽게 발생하고, 열악한 환경과 곡면과 같은 다양한 구조물의 형태에 유연하게 적용하는데 문제가 있다. 압전 세라믹과 달리, PVDF (polyvinylidene fluoride)와 같은 압전 폴리머는 주로 얇은 foil 형태로 사용되며 곡선형 또는 복합형 등의 다양한 구조물에 적용하여 활용할 수 있다[9,10]. 그러나 압전 세라믹에 비해 감도가 많이 떨어지고 고온(80~100℃)에서 민감도가 낮아 사용 온도의 범위가 넓지 않다. 압전 세라믹과 압전 폴리머 모두의 장점을 얻기 위해 압전 합성물이 개발되었다.

압전 합성물인 압전 페인트는 고감도 압전 세라믹 분말과 고분자 수지의 결합으로 이루어진다[11]. 다른 압전 소자와 마찬가지로 추가적인 전원 공급 없이 센서 역할을 수행할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 페인트로서 구조물에 적용되기 때문에 압전 폴리머보다 유연하게 도포가 가능하며, 압전 페인트 제작 시 다양한 중합체 재료의 선택이 가능하다[12,13]. 이러한 장점을 지닌 압전 페인트는 구조물의 비파괴 검사나 내부 진단, 외력 측정 등 센서의 역할이 가능하다. 하지만 아직 압전 페인트에 대한 연구가 많이 부족한 실정이며 압전 페인트의 특성에 대한 정의, 효율적인 제작 과정, 중합체와의 혼합 비율 등 실제 활용하기 위한 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 압전 페인트 센서를 이용한 복합재 구조물의 충격 위치 검출에 초점을 두었다. 이전의 연구에서는 충격 위치 파악을 위한 음향 방출 기술을 다루고 있다. 음향 방출 방법은 등방성 물질에 매우 유용하지만 Fig. 1과 같이 이종 복합 재료에 적용하면

큰 오차를 보인다[14]. 이는 해당 구조의 파 속도에 크게 좌우되기 때문이다. 하지만 압전 페인트 센서는 구조의 재료 특성에 의존하지 않는다. 다른 연구자들은 사전 측정된 충격 응답을 활용하는 신호 매핑 기법 기반의 음향 방출 에너지를 사용하여 충격 위치를 검출하였다[15]. 그러나 충격 테스트를 진행하기 전에 사전 측정을 해야 하기에 많은 시간이 걸리며, 대상 시스템이 변경되면 오류가 크게 증가하는 단점이 있다.

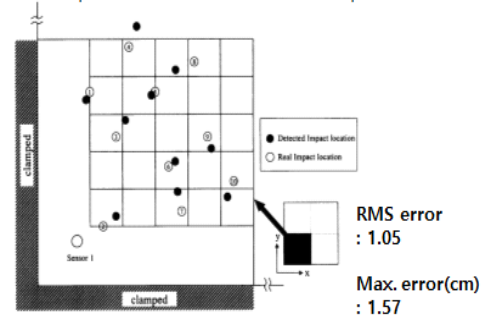


$$\Delta t = \Delta x / v : \Delta t = \text{arrival-time difference}$$

$$\Delta x = \text{distance between impact location and sensor}$$

$$v = \text{acoustic wave velocity}$$

(a) Detected impact location in the aluminum plate



(b) Detected impact location in the composite plate

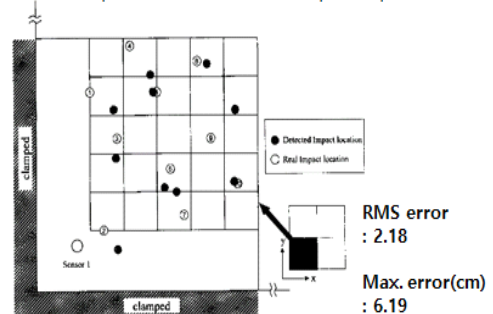


Fig. 1. AE method for impact localization: (a) in the case of aluminum plate; (b) in the case of composite plate[14]

본 연구에서는 제작한 PNN-PZT($\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_2$)/Epoxy 페인트 센서는 충격 검출을 위한

용도로 높은 감도를 필요로 하지 않아, 본 연구그룹에서 기계발된 PNN-PZT/Epoxy 페인트 센서와 비교하여 경제성을 위해 PNN-PZT의 비율을 낮춰 제작하였다. PNN-PZT/Epoxy 페인트를 Gr/Ep 복합재 시편에 도포하여 센서의 충격 응답을 측정하였다. 모자이크 패턴 전극에서 페인트 센서의 출력 전압을 측정하여 충격이 가해지는 지점을 판단하고자 하였다.

2. 압전 페인트 센서

2.1 압전 페인트 제작

압전 페인트 센서의 전체 제조 과정은 Fig. 2와 같다. 복합재 구조물에 압전 페인트를 도포한 후 페인트 센서를 활성화하기 위해 실온에서 4 kV/mm로 30분 동안 분극을 진행하였다.

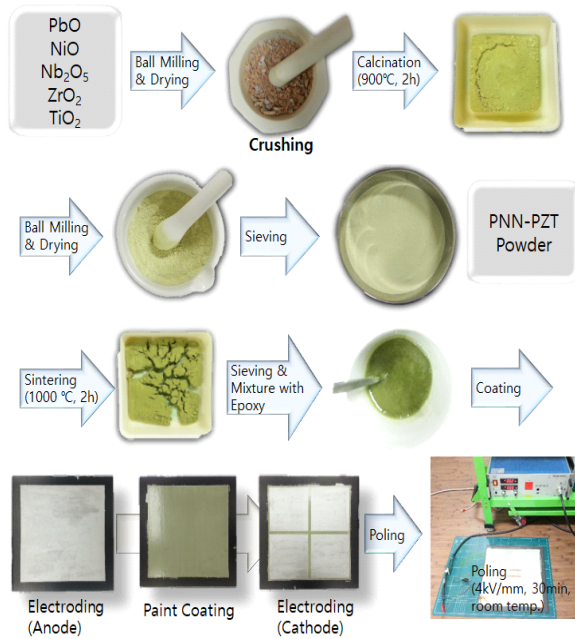
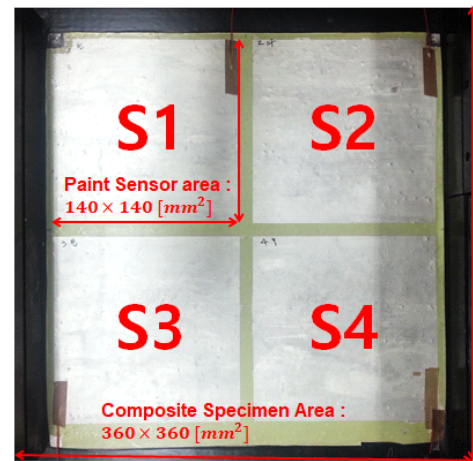


Fig. 2. Fabrication procedure for the piezoelectric paint sensor

2.2 압전 페인트 센서의 감도 측정

복합재 시편은 CU-125NS((주)한국화이버)를 사용하여 제작하였으며, 충분한 강성을 보유하기 위해 총 8장의 시트를 사용하였다. 복합재 제작 시 적층각에 대한 정확히 명시된 규정은 없으며, 복합재의 휨을 방

지하기 위해 대칭 구조로 적층하여 시편을 제작하였다. 복합재 시편에 압전 페인트를 도포하고, Fig. 3과 같이 도전성 도료를 사용하여 4개의 전극부(S1~S4)를 제작하였다. 각 페인트 센서의 감도를 확인하기 위해 Fig. 4와 같은 실험 셋업으로 충격 시험을 수행하였다. 충격 망치의 충격 신호와 압전 페인트 센서의 출력 전압은 10 kHz의 샘플링 주파수로 DS1202(dSPACE) 데이터 수집 장비를 통하여 측정하였다. 시간영역에서 충격 망치의 충격힘과 페인트 센서의 출력 전압을 Fig. 5에 나타내었다. 충격힘에 대한 출력 전압을 측정함으로써 Fig. 6과 같은 감도 그래프를 얻었다. 각 페인트 센서(S1~S4)의 감도는 Table 1에 나타내었으며, 감도의 변화가 매우 작음을 확인할 수 있다.



Composite Specimen	CU-125NS, Hankuk Fiber Co., Ltd. Gr/Ep [90 ₂ /0 ₂]s
Specimen Size	360 × 360 [mm ²]
Sensor Area	140 × 140 [mm ²]
Thickness of Paint Sensor	0.1 mm
Poling Treatment	4 kV/mm, 30 min, at room temperature

Fig. 3. Specification of the composite specimen

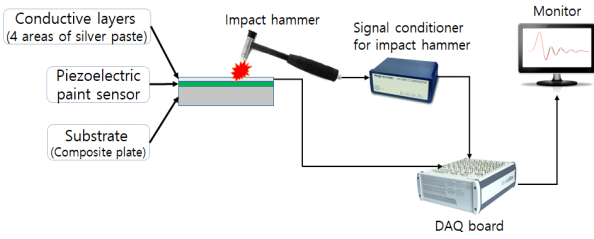


Fig. 4. Test setup for sensitivity measurement

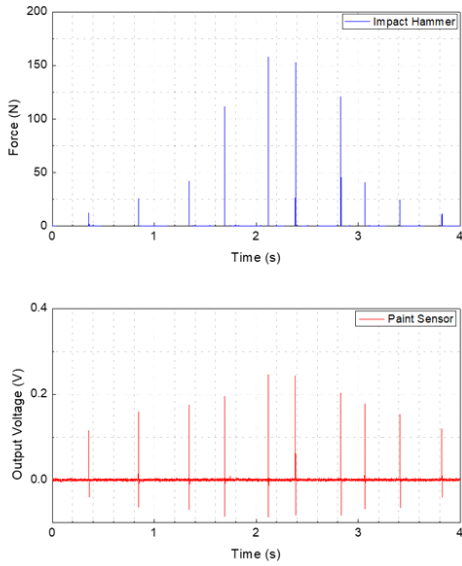


Fig. 5. Graph of impact force and output voltage

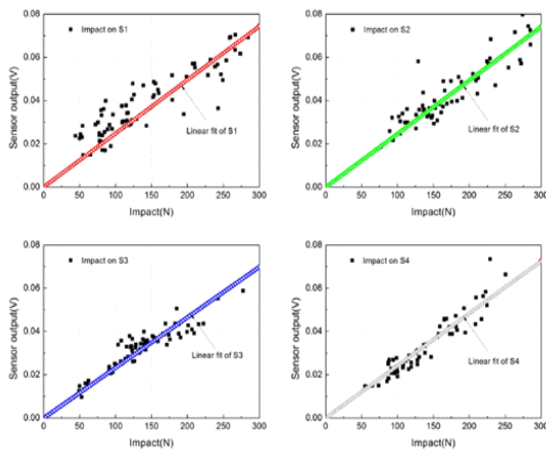


Fig. 6. Sensitivity measurement graphs of S1~S4

Table 1 Measured sensitivity of the piezoelectric paint sensor S1~S4

		Sensitivity (mV/N)	
Impact location	S1	0.248	0.243 (Average)
	S2	0.247	
	S3	0.233	
	S4	0.242	

2.3 복합재 시편의 반대면에 충격했을 때 압전 페인트 센서의 감도 측정

일반적으로 충격 신호는 구조물의 양쪽에서 발생할 수 있다. 따라서 압전 페인트 센서의 반대면에 충격이 가해졌을 때의 감도 확인이 필요하다. 복합재 시편에서 페인트 센서의 반대면에 충격을 가했을 때 감도 결과는 Fig. 7과 같고, 각 페인트 센서 (S1~S4)의 감도 데이터는 Table 2에 요약하였다. 센서 감도는 평균 0.251 mV/N이며, 이것은 페인트 센서의 코팅 표면에 충격이 가해졌을 때의 충격 감도 실험의 결과와 유사하다. 이것은 위쪽과 아래쪽 충격에 대해 유사한 출력 전압이 나타남을 의미한다.

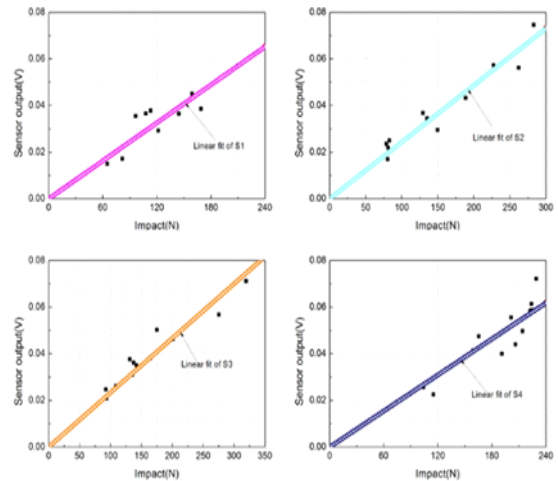


Fig. 7. Sensitivity measurement graphs of S1~S4 when the impact occurs on the opposite side

Table 2 Measured sensitivity of the piezoelectric paint sensor when impact is applied to the opposite side of the composite specimen

		Sensitivity (mV/N)	
Impact location	S1	0.271	0.251 (Average)
	S2	0.243	
	S3	0.233	
	S4	0.257	

3. 압전 페인트 센서를 이용한 충격 위치 검출

3.1 ARM Cortex-M3 기반의 충격 위치 검출 장치

각 페인트 센서의 출력 전압을 모니터링하여 충격 위치 검출을 위한 실험을 수행하였다. 다수의 아날로그 신호를 측정하기 위해 PC와 같은 다른 RS-232 장치와 통신할 수 있는 UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) 통신 기능이 있는 ARM Cortex-M3 마이크로 컨트롤러를 사용하였다. 실험에 대한 개념도는 Fig. 8에 나타내었고, 실제 실험 셋업은 Fig. 9와 같다. 마이크로 컨트롤러의 제어를 위한 펌웨어를 컴파일하기 위해 IAR Workbench 프로그램을 사용하였다. Fig. 10은 압전 페인트 센서가 도포된 복합재 시편의 충격 위치 검출을 위한 마이크로 컨트롤러의 작동 흐름도를 나타내고 있다. 페인트 센서의 데이터 수집을 위하여 12 bit의 분해능을 가지는 ADC (Analog to digital converter) 데이터 레지스터를 설정하여 마이크로 컨트롤러에서 4개의 ADC 채널을 통하여 페인트 센서의 전압을 측정한다. 본 연구에서는 충격 모니터링을 위해 4개의 개별 전극만을 사용하였지만, 더 많은 데이터 수집을 위해 개선할 계획이다.

3.2 충격 위치 검출

페인트 센서에 충격을 가했을 때 발생한 신호는 신호 조절기를 거쳐 개발 보드에서 수집한다. 일반적으로 페인트 센서는 임피던스가 매우 높은 반면, 측정 시스템은 임피던스가 상대적으로 낮아 임피던스 매칭이 필요하다. 임피던스 매칭을 하기 위해 높은 입력

저항($10^{12} \Omega$)과 낮은 출력 저항(25Ω)을 갖는 연산 증폭기를 이용하여 신호 조절 기능을 가진 증폭 회로를 구성하여 사용하였다.

개발 보드는 ADC를 통해 수집된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. ADC의 출력 전압은 0~3.3 V로 개발 보드를 통해서 음의 신호를 얻을 수 없다. 따라서 양의 신호와 음의 신호 모두를 검출하기 위해서는 DC offset 회로를 추가해야 한다. 항공기 운항 중의 조류 충돌이나 철도 차량 하부의 자갈 비산과 같은 충돌 신호를 모니터링하는 경우는 DC offset 회로가 필요하지 않다.

변환된 디지털 신호는 MATLAB으로 Fig. 11과 같이 시각화하여 충격 위치를 쉽게 구별할 수 있었다. Fig. 11의 (a)는 S1 영역에 충격을 가했을 때, S1 영역에서만 신호가 발생함을 보이고 있다. Fig. 11의 (b), (c), (d)도 각각의 영역에 충격을 가했을 때, 각 영역에서만 신호가 발생함을 보여주고 있다.

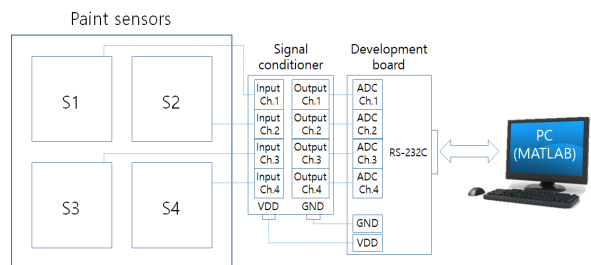


Fig. 8. Overall test setup for ADC data acquisition

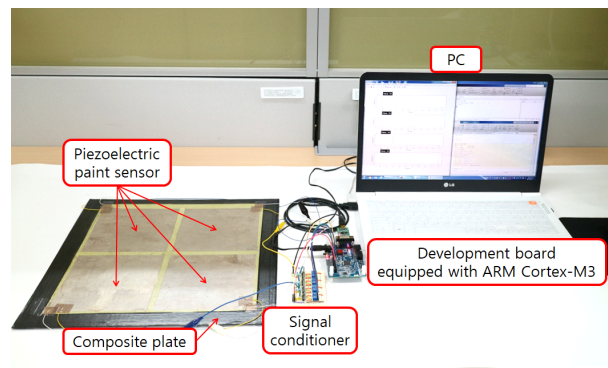


Fig. 9. Experimental setup for impact location detection

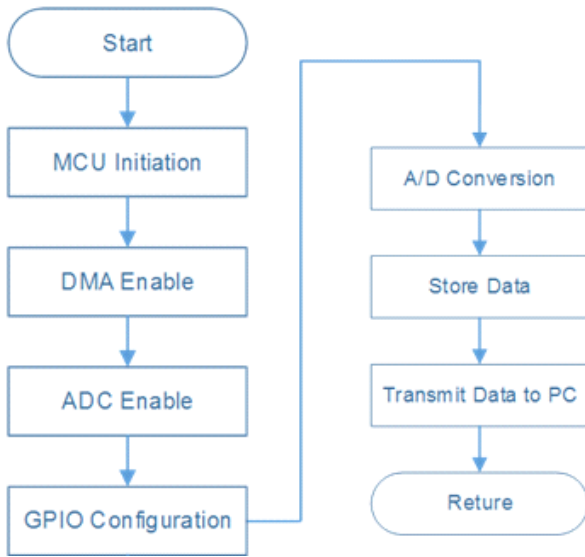


Fig. 10. Flow diagram for programmable microcontroller

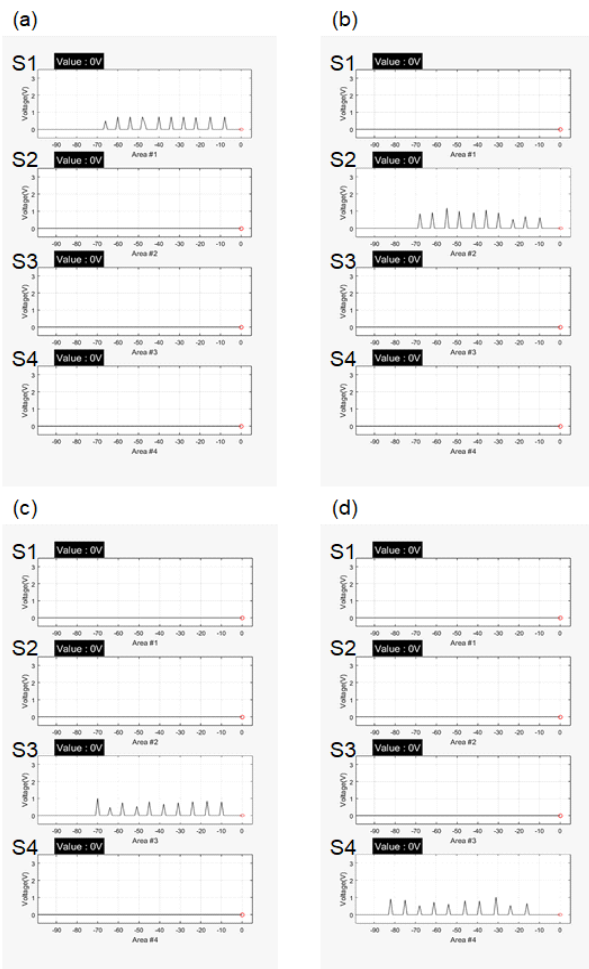


Fig. 11. Impact localization results in the case of: (a) Impact on S1; (b) Impact on S2; (c) Impact on S3; (d) Impact on S4

4. 결 론

본 논문에서 압전 페인트 센서와 간단한 데이터 수집 시스템을 이용하여 새로운 충격 위치 검출 방법을 제안하였다. 압전 페인트 센서는 소프트 타입의 압전 세라믹 재료(PNN-PZT)와 에폭시 수지로 제조되었다. 압전 페인트를 복합재 시편에 도포 후, 실온에서 4 kV/mm로 30분 동안 분극을 진행하여 압전 페인트 센서를 활성화하였다. 페인트 센서를 활성화한 후, 센서의 감도를 확인하기 위해 페인트 센서가 도포된 시편의 앞면과 도포되지 않은 시편의 반대면에 충격 감도 실험을 진행하였다. 감도 측정 결과에서 평균 앞면의 감도 0.243 mV/N, 뒷면의 감도 0.251 mV/N으로 유사한 감도가 측정되었다. ARM Cortex-M3 마이크로 컨트롤러가 장착된 개발 보드와 신호 조절기가 포함된 간단한 데이터 수집 시스템을 이용하여 페인트 센서의 충격 신호와 발생 위치를 모니터링하였다. 센서에서 출력된 전압 값으로 충격 위치를 쉽게 확인할 수 있었다. 이처럼, 압전 페인트 센서는 구동 전압이 필요 없고, 유연하고, 내구성이 있으며 복합재 구조물에 쉽게 적용할 수 있어, 충격 모니터링을 위한 센서로 매우 유망함을 확인할 수 있었다.

후 기

This material is based upon work supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea) under Sensor Industry Enhancement Program(20003125, Development of an ultraprecision measurement sensor based on the fiber composite for flaw detection of the composite structure).

References

- [1] H. B. Park, "A Study on Manufacturing and Structural Test of Wind Turbine System Blade using Natural Composite," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 30-35 (2017)
- [2] S. Y. Park, S.-W. Kim, and S. Park, "Impact

- localization on a composite plate using multiplexed FBG sensors and error-outlier algorithm," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 32-40 (2018)
- [3] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 17, No. 5, pp. 669-676 (2002)
- [4] J. J. Dosch, D. J. Inman, and E. Garcia. "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 3, No. 1, pp. 166-185 (1992)
- [5] D. H. Kim, "Recent Nondestructive Testing using Structural Health Monitoring Techniques," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, pp. 78-85 (2012)
- [6] C. G. Kim, D. U. Sung, and H. J. Bang, "Health Monitoring in Composite Structure using Piezoceramic and Fiber Optic Sensors," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 5, pp. 445-454 (2003)
- [7] F. Levassort, P. Tran-Huu-Hue, E. Ringgaard and M. Lethiecq, "High-Frequency and High-Temperature Electromechanical Performances of New PZT-PNN Piezoceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, No. 10, pp. 1361-1365 (2001)
- [8] X. Lin, and F. G. Yuan, "Experimental Study Applying a Migration Technique in Structural Health Monitoring," *Structural Health Monitoring*, Vol. 4, No. 4, pp. 341-353 (2005)
- [9] P. Ueberschlag, "PVDF Piezoelectric Polymer," *Sensor review*, Vol. 21, No. 2, pp. 118-126 (2001)
- [10] H. Luo, and S. Hanagud, "PVDF Film Sensor and its Applications in Damage Detection," *Journal of aerospace Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 23-30 (1999)
- [11] K. Shiratsuyu, K. Hayashi, A. Ando, and Y. Sakabe, "Piezoelectric Characterization of Low-Temperature-Fired Pb(Zr, Ti)O₃-Pb(Ni, Nb)O₃ Ceramics," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 39, No. 9S, pp. 5609-5612 (2000)
- [12] Y. Zhang, "Piezoelectric Paint Sensor for Nondestructive Structural Condition Monitoring," *Proc. SEM X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, pp. 7-10 (2004)
- [13] Y. Zhang, "In Situ Fatigue Crack Detection using Piezoelectric Paint Sensor," *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 17, No. 10, pp. 843-852 (2006)
- [14] J.-H. Oh, "Detection of Impact Location for Composite Plates Using Neural Networks," *Master's Thesis, KAIST* (1998)
- [15] B.-H. Han, D.-J. Yoon, C.-S. Park, and Y.-S. Lee, "Impact Source Location on Composite CNG Storage Tank Using Acoustic Emission Energy Based Signal Mapping Method," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 5, pp. 391-398 (2016)