



압전 기반 페인트 센서 기술 동향

한형수¹ , 조영 짱 안¹, 안창원², 김병우³, 이재신¹

¹ 울산대학교 첨단소재공학부

² 울산대학교 물리학과 에너지 하베스트-스토리지 연구센터

³ 울산대학교 전기공학부

A Brief Review on Piezoelectrics-Based Paint Sensors

Hyoung-Su Han¹, Trang An Duong¹, Chang Won Ahn², Byeong Woo Kim³, and Jae-Shin Lee¹

¹ School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

² Department of Physics and EHSRC, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

³ Department of Electrical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received July 24, 2023; Revised August 12, 2023; Accepted August 14, 2023)

Abstract: Piezoelectric ceramics play an important role in electrical and electronic devices such as sensors, actuators, and microelectronic devices. However, traditional ceramics are difficult to be used in various process industries due to their high brittleness and low flexibility. Therefore, piezoelectric paint sensors have been designed for application to the curved surfaces of complicated structures. Furthermore, recently, significant attention has been focused on the development of paint sensors that can be used as structure health monitoring sensors for vibration, impact, and acoustic emission. Several studies have successfully demonstrated the possibility that smart paint sensors can take the place of traditional ceramic sensors. In this review, we briefly introduce the concept of the piezoelectric paint sensors and the expected application field as well as their preparation and history.

Keywords: Piezoelectrics, Paint sensors, Structure health monitoring, Composites

1. INTRODUCTION

압전재료는 힘을 가하면 전하가 발생되고, 전기장을 인가하면 변형이 발생하는 재료를 말하며, 이러한 특성으로 인하여 센서와 액추에이터로 널리 활용되고 있다 [1-3]. 특히, 압전재료를 센서로 활용할 경우 별도의 외부 전원을 공급하지 않고서도 자가 구동(self-powered)이 가능하기 때문에 충격, 진동, 응력 센서와 같이 광범위한 분야에 사용할 수 있다 [4,5].

✉ Hyoung-Su Han; hsejs@ulsan.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일반적으로 센서용 압전재료는 산화물 세라믹스와 폴리머 기반 물질이며, 현재 상용화되고 있는 대표적인 압전세라믹스는 $Pb(Zr, Ti)O_3$ (PZT)계가 있고, 압전폴리머는 polyvinylidene fluoride (PVDF)가 있다 [2,5]. 세라믹스 기반 압전재료의 경우 비교적 저렴한 가격과 간단한 제작 공정, 그리고 높은 신뢰성과 압전 성능을 기대할 수 있으나 세라믹스 본질적 문제점인 취성(brittleness)과 비유연성(inflexibility) 등으로 인하여 강한 충격에 취약하고 복잡한 형태의 구조물이나 곡면 등에 사용은 한계가 있다 [4-7]. 반면에 압전폴리머의 경우 높은 유연성으로 설치하고 자 하는 표면 형상에 크게 구애받지 않지만 상대적으로 높은 가격과 낮은 압전 성능 및 온도 안정성으로 실제 응용에는 많은 제약이 있다 [7]. 따라서 압전 세라믹스와 폴리머

의 장점은 유지하면서 단점은 상호보완 할 수 있는 압전 세라믹/폴리머 복합소재 개발에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 일반적인 압전 세라믹/폴리머 복합소재의 경우 자연에서 버려지는 에너지를 수확하는 에너지 하베스팅 기술에 널리 활용되고 있지만, 더 나아가 페인트 형태로 제조하고 도포할 수 있다면 그림 1과 같이 높은 범용성으로 다양한 센서로 활용 가능하다 [4,6-8]. 특히, 페인트 또는 페인트의 특성을 고려하였을 때, 필름의 형태뿐 아니라 붓질 또는 스프레이 분사 형태로도 제작이 가능하기 때문에 대면적 표면과 복잡한 형상에 쉽게 도포할 수 있으며, 기존 보호필름 역할을 하는 페인트를 대신하기 때문에 압전 기반 센서로서뿐만 아니라 다양한 산업에 유용하게 활용할 수 있다 [4,6-8]. 2014년 전북대학교 강래형 등의 연구내용을 참조하면 압전 기반 페인트는 다음과 같은 특징을 가진다 [9].

- 1) 압전 세라믹 분말과 고분자 수지로 구성된다.
- 2) Self-powered 페인트로 외부의 추가적인 동력원 필요 없이 센서 역할이 가능하다.
- 3) 표면의 형태에 영향을 받지 않아 곡선 형태나 좁은 영역에도 쉽게 적용 가능하고, 기존 센서와 달리 접착층이 따로 필요 없다.
- 4) 매트릭스(수지) 상에 적합한 중합체 재료를 선택함으로써, 압전 페인트의 특성을 특정 요구 사항에 충족시킬 수 있다.

압전 기반 페인트 센서는 그림 1과 같이 대부분 감지해야 할 범위가 넓은 대형 구조물(교량, 건물, 항공기 등)에 적용이 용이하며 결함이나 파손 등을 검지함으로써 대형 사고로 이어질 수 있는 붕괴조짐을 조기에 예측할 수 있다. 대부분의 대형 구조물의 붕괴나 파괴는 장기간에 걸쳐 피로 파손의 유형으로 진행되므로 징조를 조기에 검출하게 되면 대형사고를 미연에 방지할 수 있어서 페인트 센서를 매우 유용하게 활용할 수 있다. 이러한 특징으로 최근에 압전 기반 페인트 센서에 대한 연구가 보고되었고, 가장 응용가능성이 큰 분야는 실시간 구조물 안전 감지용 (structure health monitoring, SHM) 센서로 많은 연구가 수행되고 있다 [7,10,11]. 따라서 이러한 배경을 바탕으로 본 리뷰에서는 압전 기반 페인트 센서의 제조방법에서 각 응용분야에 대한 전반적인 기술을 소개하고자 한다.

2. DEVELOPMENT OF SMART PAINT SENSORS

명칭에서 알 수 있듯이 압전 페인트는 유연성, 편리성, 보호성 등의 일반적인 페인트의 특징을 바탕으로 압전 특성을 동시에 발현할 수 있어서 진동(vibration) [12], 충격(impact) [11], 음향 방출(acoustic emission: AE) [6] 등과 같이 응용성이 다양하다 [13]. 압전 페인트에 대한 초기 연구는 1980년대 초까지 거슬러 올라간다. Newnham과

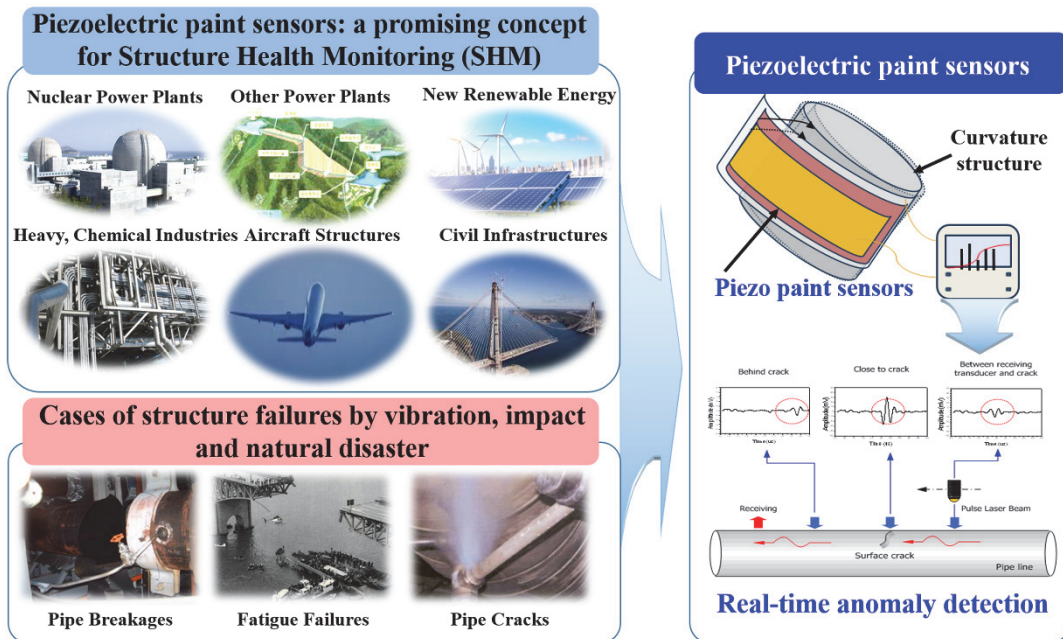


Fig. 1. Piezoelectric paint sensor and its applications [10].

그의 동료 [14,15]는 PZT와 PbTiO₃를 폴리머에 분산시켜 만든 페인트를 수중 청음기(hydrophone)에 활용하는 연구를 보고한 후에 Egusa와 Iwasawa [12,16,17]는 PZT와 에폭시수지를 활용하여 제조한 페인트를 진동과 충격 감지 센서로 활용하는 연구를 보고하였다. Hale와 그의 동료는 인장응력, 하중 및 환경 시험을 통하여 PZT와 항공기의 마감재로 사용되는 아크릴 래커(acrylic lacquer)를 이용하여 제조한 압전 페인트의 특성을 평가하였다 [18,19]. Zhang과 동료들 [20]은 압전 페인트 제조와 이를 이용한 In-situ 피로 균열(fatigue crack) 검출을 수행하였으며, Li와 Zhang은 음향 방출에 대한 압전 페인트의 성능을 평가하였다 [6]. Dietze와 Ez-Souni는 indium-tin-oxide (ITO)기반 glass 위에 스크린 프린팅 공법을 이용하여 PZT-PVDF-TrEF 복합소재 기반 페인트를 도포하여 필름의 특성을 평가하였다 [21]. Kobayashi 등은 sol-gel 스프레이 공법을 이용하여 비파괴 시험용 초음파 트랜스듀서를 구조물 표면에 도포하였다 [22,23]. Payo와 Hale는 2축 인장력 하에서 압전 페인트 특성을 평가하는 방법 [24]을 제안하였으며, 압전 페인트 센서의 분극 전위, 도막의 두께와 PZT 함량 변화에 의한 민감도 등을 분석하였다 [25]. 지난 2012년 Yang과 Frizen [13]은 스마트 페인트 센서의 제작부터 응용에 대한 전반적인 내용을 소개하였다. 2014년 전북대학교 강래형 등은 PNN-PZT 압전분말과 에폭시수지를 혼합한 페인트센서 제작과 이를 이용하여 항공기 날개의 충격과 진동을 성공적으로 검출하였고 [26], 2017년에는 동일한 구성의 압전 페인트 센서를 풍차 날개에 도포하여 성공적으로 무선 충돌 모니터링 시스템을 개발하였다 [27]. 이후 2018년에 강래형 등은 PNN-PZT/Epoxy 페인트 센서의 분극 조건을 최적화하는 연구를 보고하였으며, Osho 등은 산화아연(ZnO), poly vinyl acetate (PVA), 탄소나노튜브(CNT)를 이용하여 압전 페인트를 제작하여 변형률 센서와 압전트랜스듀서 등의 응용 가능성을 평가하였다 [28]. 2020년 강래형 등은 다양한 압전 세라믹스를 활용하여 압전 페인트 센서를 제작하고 성능을 평가하였으며 [4], 압전 페인트 센서를 이용하여 철도차량 운용 중에 발생하는 충격신호를 실시간 감지하는 연구를 보고하였다 [29].

3. PIEZOELECTRIC PAINT SENSORS

앞서 설명한 내용과 같이 일반적으로 센서로 활용되고 있는 압전소재는 세라믹스 기반으로 취성과 강도가 강하여 외부 충격이나 진동이 심하면 내구성에 문제가 발생할

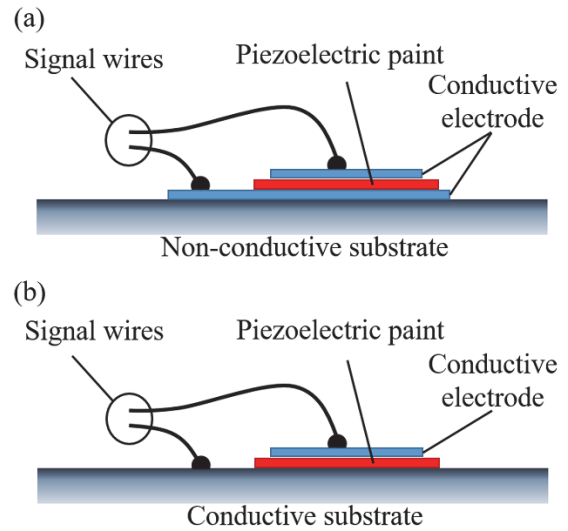


Fig. 2. Schematic of a section through the sensor: (a) Non-conductive substrate and (b) conductive substrate [8].

수 있고, 가공성이 나빠 곡면이나 대면적 활용에 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제안된 압전 페인트 센서는 유연성과 도포에 편리성을 부여하여 진동, 충격, 비파괴 시험 등에 활용하여 구조물의 안전 감지용 센서로 개발되어 왔다. 이러한 압전 페인트 센서는 그림 2에 나타난 바와 같이 일반적으로 상, 하부 전극 사이에 분말 형태의 압전 세라믹스와 고분자 수지가 0-3 형태의 복합소재로 구성된 페인트층으로 구성되어 있으며 센서 제조 시 압전 페인트층을 형성시키는 방법으로 분무(spraying) [12,18], 테이프 캐스팅(tape casting) [6], 스크린 프린팅(screen-printing) [22]과 sol-gel법 [22]을 적용할 수 있다.

본 장에서는 압전 페인트 센서를 구성하는 압전 페인트 제조 방법 및 분극 방법 등을 소개하고자 한다.

3.1 Structures of piezoelectric paint sensors

압전 페인트 센서의 구조는 기본적으로 하부 전극, 압전 페인트 그리고 상부 전극 층으로 구성된다. 하부 전극의 경우 기판 또는 목표 물질의 표면에 설치되기 때문에, 기판의 종류에 따라 달라질 수 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이 기판이 부도체일 경우 전도성의 하부전극을 반드시 설치해야 하며, 도체일 경우 기판을 하부 전극으로 활용하여 그 위에 압전 페인트를 바로 설치할 수 있다. 상부 전극의 경우 압전 페인트층 위에 설치하고 상, 하부 전극에 도선을 연결하여 압전 페인트 센서에서 충격이나 진동에 의해 발생하는 전기 신호를 수신하는 구조이다.

3.1.1 Piezoelectric paint; Ceramic/polymer composites

압전 페인트 센서를 구성하는 요소 중에서 가장 중요한 것은 센서 성능에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있는 압전 페인트라고 할 수 있다. 앞서 설명하였듯이 압전 페인트는 압전 센서의 특성과 페인트의 특성을 모두 가져야 하므로 가장 적합한 형태는 세라믹/폴리머 복합소재이다. 압전 페인트는 0-3 형태로 미세한 크기의 압전 입자를 3차원적으로 연결되어 있는 폴리머 matrix에 분산시켜 제조한다. 0-3 형태의 복합소재는 다른 형태의 복합소재보다 유연하고 얇은 sheet, 압출된 bar 형태나 섬유, 성형체 제작 그리고 다양한 곡면에 도포 시 큰 장점을 가질 수 있다. 실제, 0-3 형태의 복합소재가 일반적인 단일 상 물질보다 정수압에서 높은 압전 전압 상수(piezoelectric voltage coefficient)를 가진다는 것이 보고되었다 [15].

압전 페인트를 제작할 때, 세 가지 주요 요소를 고려하여야 한다. 첫 번째는 압전 세라믹 입자(필러), 두 번째는 페인트를 도포하는 동안 필러의 현탁을 촉진하고 경화 후 필러를 함께 결합하는 폴리머, 그리고 페인트 혼합, 침착 및 경화 특성을 향상시키는 화학 첨가제가 있다 [10]. 압전 페인트의 압전 성능은 첨가한 압전 세라믹스의 성능과 밀접한 관계가 있어서 높은 압전특성을 가지는 세라믹스가 주로 활용된다. 이에 PZT계 [8,9,12,15-17,20,24-26]를 이용한 연구가 가장 많이 보고되었으며, BaTiO₃ (BT) [30,31], 산화아연 (ZnO) [32]도 압전 페인트 제조에 활용되었다. 또한 압전 페인트의 기본적인 페인트 특성에 강한 영향을 끼칠 수 있기 때문에 목적에 맞는 폴리머 물질 선정도 중요하다. 압전 페인트 제조에 활용한 폴리머 종류는 폴리우레탄 [8], 에폭시 [4,11,12,17,20,29,30], 상용 아크릴 페인트 [8,24,25], PVDF [21,31,32] 등이 있다.

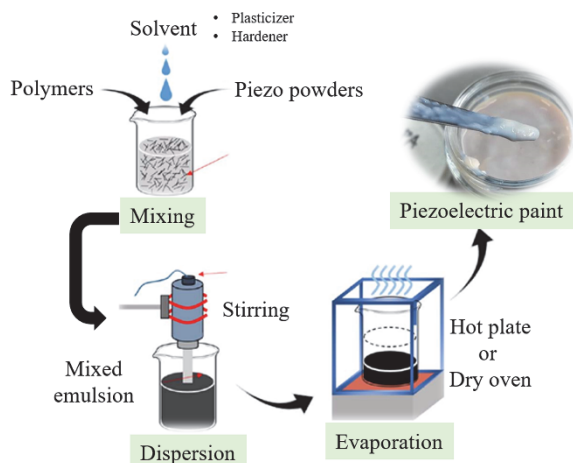


Fig. 3. Fabrication process of piezoelectric paint.

압전 페인트의 제조 방식은 보고된 대부분의 연구에서 유사한 방식이나 폴리머의 종류에 따라 차이가 있을 수 있다. 본 기고문에서는 Yang과 Fritzen [13]의 연구에서 보고한 가장 보편적인 세라믹/폴리머 복합소재 제조방법을 소개하고자 한다. 이해를 돕기 위하여 스마트 페인트 제조 방법을 그림 3에 나타내었다. 먼저 준비한 압전 세라믹 분말을 가소제(plasticizer), 소포제(defoamer), 용매(solvent)를 폴리머와 혼합하여 분산시킨다. 제조한 페인트 내부에 세라믹 분말의 침전과 공기 공극(air voids)이 발생하여 페인트의 성능이 저하될 수 있기 때문에 압전 세라믹 분말이 충분히 분산시키는 것이 중요하다. 첨가한 압전 세라믹 분말의 중량비는 최대 60%가 적당하며, 그 이상의 분말이 함유되면 페인트의 작업성이 저하된다 [13].

제조한 압전 페인트를 목적 구조물에 설치하거나 압전 페인트 센서로 제작할 때, 앞서 설명한 바와 같이 다양한 방법으로 압전 페인트층을 형성시킬 수 있다. 대표적인 방법으로 분무(spraying) [12,18], 테이프 캐스팅(tape casting) [6], 스크린 프린팅(screen-printing) [22]과 sol-gel법 [22]이 있다. 분무법의 경우 접착층이 없는 방식으로 압전 페인트를 목적 구조물에 직접 분사하여 설치하게 된다. 일반적인 페인트 도포 방식으로는 가장 편리하고 빠르게 도포할 수 있는 장점이 있고 전도성이 있는 목적 구조물에 하부 전극층을 형성하지 않고 설치할 수 있다는 특징이 있다. Sol-gel법은 분무법과 동일한 기술이 적용되며, 목적 구조물에 도포 한 후에 압전 페인트층에 열을 가해 경화시켜야 하는 문제가 있다. 스크린 프린팅법의 경우 일정 면적과 두께 조절이 가장 용이한 방법이나 센서의 면적이나 모양이 변경됨에 따라 그에 맞는 마스크를 별도로 제작하여 설치하여야 한다. 테이프 캐스팅법의 경우 유연하고 얇은 sheet를 제조하기에 가장 용이한 방법이나 압전 페인트 sheet를 목적 구조물의 표면에 설치 시 접착성 문제가 발생할 수 있다. 이렇듯 다양한 방법이 제안되고 있으나 압전 페인트 센서를 설치하고자 하는 목적 구조물의 환경과 조건을 고려하여 적절한 방법을 선택하는 것이 중요하다고 결론지을 수 있다.

3.1.2 Electrode

앞서 소개한 다양한 종류의 압전 페인트 센서에 관한 연구를 통하여 확인할 수 있듯이 센서 성능에 영향을 끼칠 수 있는 요인으로 압전 페인트 내의 압전 분말(필러) 크기, 종류와 함량 [15,16,31], 페인트 센서층의 면적과 두께 [11] 그리고 전극의 종류 [8]가 있다. 이러한 여러 요인들 중에서 본 장에서는 압전 페인트 센서에 적용 가능한 전극의 종류에 대해 소개하고자 한다.

압전 페인트 센서의 구조는 하부 전극(또는 목적 구조물이 전도성 표면인 경우 구조물을 하부전극으로 활용 가능), 압전 페인트층 그리고 상부 전극으로 구성되며, 상, 하부 전극은 센서에서 얻어지는 전기적 신호를 측정 장비와 연결시켜 주는 역할을 한다. 기존에 보고된 연구를 분석하면 압전 페인트 센서 제작에 활용된 전도성 전극은 금(gold) [18], 은(silver) [4,9,11,30], 니켈(nickel) [8,29] 등이 있다. 금 전극을 사용한 연구 사례는 흔하지 않지만 뛰어난 전도성과 지속성으로 지난 2004년 Hale이 압전 페인트 센서를 구조물의 충격과 진동을 감지하는 연구에 증착한 금을 전극으로 활용한 사례가 있다. 하지만 일반적인 실험실 수준의 연구에 국한된 내용이며 실제 산업현장에 활용하는 것은 무리가 있다. 이러한 이유로 지금까지 보고된 대부분의 연구에 사용된 전극은 공기 건조 아크릴 수지 바인더가 포함된 상업용 전도성 니켈 코팅 제품을 사용하거나 은 페인트가 주로 활용되었다. 니켈 코팅의 경우 에어로졸 형태로 적용 가능하여 복잡한 형상에 쉽고 빠르게 도포할 수 있는 장점이 있으나 상대적으로 금 또는 은 전극에 비하여 전도성이 낮은 문제가 있다. 은 페인트의 경우 니켈 코팅 제품에 비하여 더 작은 크기의 은 입자를 활용할 수 있어서 균일한 전극층을 형성시킬 수 있는 장점이 있는 반면에 하부 전극으로 활용 시, 분무법으로 도포하는 데 한계가 있어서 표면 마감처리가 에어로졸 형태의 니켈 코팅 제품에 비하여 나쁜 단점이 있고, 접착력이 니켈 코팅의 접착력보다 나빠서 층간 박리가 발생하는 것으로 보고되었다 [8]. 하지만 압전 페인트 위에 은 페인트를 상부전극으로 활용하게 되면 앞서 설명한 단점은 고려하지 않아도 된다. White 등 [8]이 보고한 연구결과를 따르면 분무법으로 니켈 코팅을 상부전극으로 도포하면 압전 페인트층과 상호작용을 일으켜 센서에 문제를 발생시키게 되므로 은 페인트를 상부전극으로 활용하는 것을 권장하였다.

3.1.3 Poling

압전 페인트 센서의 분극 처리는 단일 압전 세라믹스보다 어렵다. 그 이유는 폴리머 기질에 압전 세라믹 분말이 분산되어 있는 복합소재 형태로 기질 물질이 전기 전도성이 낮고 압전 세라믹 분말의 연결성이 낮아 실제 세라믹/폴리머 복합소재에 인가되는 전기장보다 상대적으로 낮은 전기장이 압전 분말에 인가되기 때문이다 [11,33]. 이러한 이유로 충분히 분극 처리를 하려면 강한 전기장을 인가하여야 하지만 이는 복합소재의 절연파괴를 발생시켜 센서로서 활용이 불가능하게 된다. 따라서 선택한 폴리머 물질 선정 시, 강한 절연강도를 가지는 물질을 권장하게 된다. 그 밖에 압전 페인트 센서의 분극처리에 고려해야 할

사항은 분극 전계의 전압, 적용 시간 및 온도 등이 있다고 보고되었다 [4,7,25,34].

4. PIEZOELECTRIC PAINT SENSORS FOR STRUCTURE HEALTH MONITORING

항공기, 우주선, 원자력 및 화학 공단 설비, 교량, 대형 건축물 등은 고립된 지역에 위치하거나 복잡한 구조, 광범위한 설비 등의 문제로 구조물의 상태를 모니터링 하는 것은 쉽지 않다. 또한 서론에 설명하였듯이 대부분의 이러한 구조물들은 사고 발생 시 대형 인명피해로 이어질 수 있어서 이를 미연에 방지하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 이러한 예측을 가능하게 하는 기술을 실시간 구조물 안전 감시(structure health monitoring, SHM)이라하며, 이 기술에 활용할 수 있는 가장 적합한 센서는 복잡한 설비나 고립된 지역의 구조물들에 부착하여 진동, 충격, 음향 방출 등을 탐지할 수 있는 압전 페인트 센서라고 할 수 있다. 따라서 본 장에서는 압전 페인트 센서를 이용하여 진동, 충격, 음향 방출 등의 센서로 활용한 사례들을 소개하고자 한다.

4.1 Vibration sensors

압전 페인트 센서를 이용한 진동감지 시험은 일반적으로 빔 형태의 구조물에 센서를 부착하여 인가된 진동에 대한 센서의 전기적 신호를 감지한다. 일 예로 진동센서로서 압전 페인트 센서의 sensitivity를 평가하는 방법을 그림 4(a)에 명시하였다. 진동 발생기를 이용하여 주기적인 진동을 알루미늄 빔에 인가하고 압전 페인트 센서는 알루미늄 빔 상부에 설치하고 변형계(strain gauge)를 반대편 하부에 부착하여 인가한 진동을 검출하는 구조다. 변형계와 압전 페인트 센서의 출력 신호는 각각 동시에 진동 주파수 분석기로 입력되게 연결되어 있다. 진동 시험에 사용한 압전 페인트의 두께는 $109 \mu\text{m}$ 이며, 24 kV/mm 의 전기장으로 분극 처리하였다. 변형계와 압전 페인트 센서로부터 얻은 출력 신호를 그림 4(b) [11]에 나타내었다.

압전 페인트 센서의 출력 신호는 도포한 전극의 단위 면적당 압전 페인트로부터 발생하는 전하의 양을 측정하였다. 전하와 변형 신호의 주파수 스펙트럼은 0~250 Hz의 주파수 범위에서 18 Hz와 112 Hz의 고유 주파수를 포함하며 변형계와 비교 시 패턴이 실질적으로 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 Egusa와 Iwasawa [11,12,16,17]는 압전 페인트 센서를 진동감지 센서로 활용 가능함을 입증하였다.

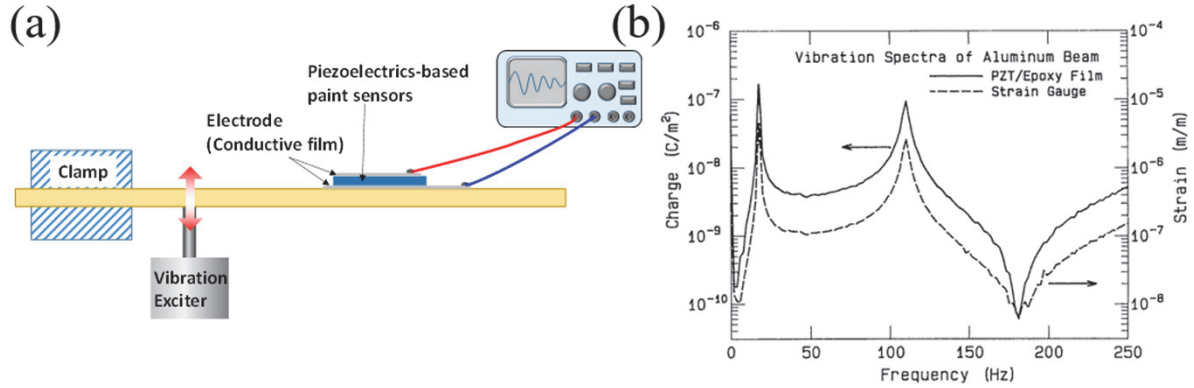


Fig. 4. (a) Schematic of an experimental setup for evaluating the piezoelectric sensitivity of the piezoelectric paint film as a vibration sensors and (b) frequency spectrum of output signals from a piezoelectric paint film formed on one surface of an aluminum beam and from a strain gauge bonded to the opposite surface of the beam (under pending decision from publisher [11] Copyright 1998, Smart Materials and Structures).

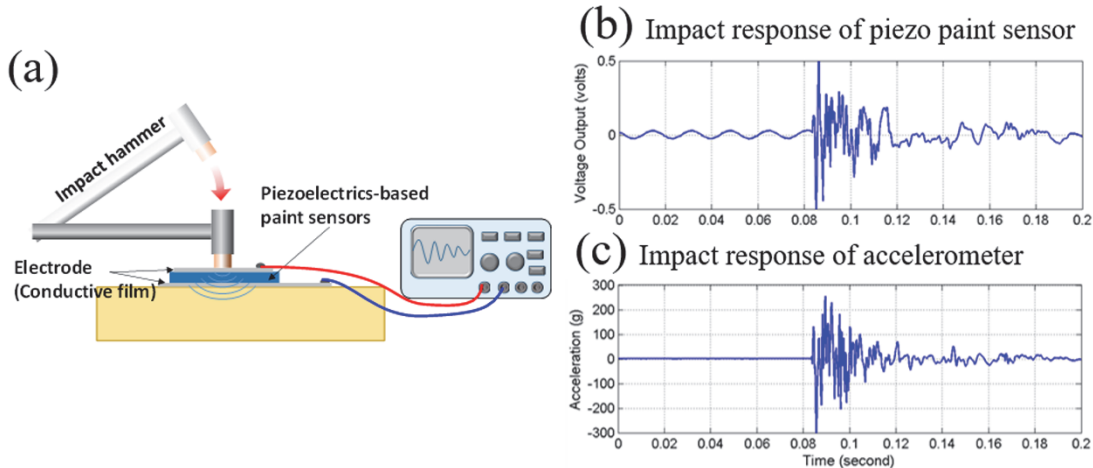


Fig. 5. Schematic of an experimental setup for evaluating the piezoelectric sensitivity of the piezoelectric paint sensors as an impact sensors and (b) response time history of piezoelectric paint sensor and accelerometer to impact loading [10].

4.2 Impact sensors

구조물에 대한 충격 감지는 단발성 충격의 크기가 파손을 일으킬 수준이 아니더라도 장기적으로 인가되게 되면 피로 파괴를 일으킬 수 있기 때문에 지속적인 감지 및 이에 따른 적절한 유지보수를 수행하여 안정성을 확보하는 차원에서 중요하다. 본 장에서는 압전 페인트 센서를 충격 센서로 활용하여 시험한 사례를 소개하고자 한다. 지난 2004년 Zhang [10]은 비파괴 구조물 감시를 위한 압전 페인트 센서에 관한 연구를 보고하였으며, 충격 시험에 대한 개념도와 연구의 결과 중 일부를 그림 5에 나타내었다.

압전 페인트 센서를 알루미늄 시트 도포하고 이를 캔틸레버 형태로 무거운 강철 블록 위에 설치하고 임팩트 해머

를 이용하여 충격과 진동을 인가하였다. 센서로 활용 가능성을 판단하기 위하여 가속도계 센서를 설치하여 비교하였다. 임팩트 해머 시험을 위한 주파수는 12.8 kHz을 사용하였고 충격이 인가된 후 압전 페인트 센서의 출력 신호는 그림 5와 같이 나타내었다. 분석한 결과를 살펴보면 두 센서에서 출력 신호가 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있으며, 충격이 인가되었을 때, 압전 페인트 센서의 출력 신호에서도 좋은 반복성을 나타내었으며, 이러한 결과들로부터 응용 가능성을 입증하였다 [10]. 이러한 연구뿐만 아니라 전북대학교 강래형 등도 압전 페인트 센서를 터빈 블레이드 [27], 항공우주 및 철도 [29] 분야 적용하여 성공적으로 센서 성능을 검증하였다.

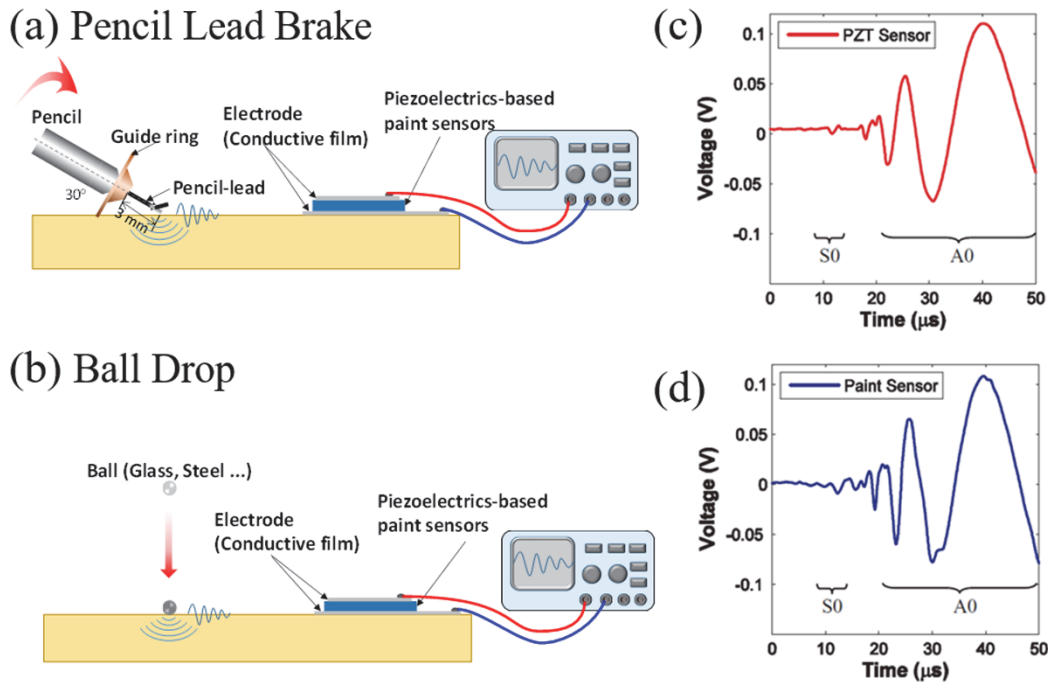


Fig. 6. Schematics of experimental setup for evaluating the piezoelectric sensitivity of the piezoelectric paint sensors as an AE sensors using (a) pencil lead brake or (b) ball drop and AE signal received by piezoelectric sensors: (c) PZT sensor and (d) paint sensor (with a 26 dB pre-amplifier) (reused with permission [6] Copyright 2008, John Wiley and Sons).

4.3 Acoustic emission sensors

음향 방출(acoustic emission) 시험은 구조물의 금속 또는 비금속을 포함한 부분 또는 부속품의 국부 손상 등을 검출할 수 있는 비파괴 시험 기술에 유용하게 활용할 수 있다. 음향 방출은 구조물의 내부 변화로 인해 재료의 급격한 내부 응력 재분배에 의해 생성되는 탄성응력파이며, 내부 구조 변화의 원인은 균열의 시작, 성장, 균열 개방과 폐쇄, 전위 이동, 재료의 쌍정과 상전이, 복합재료의 섬유 파손 및 섬유 매트릭스의 탈결합 등이 있을 수 있다. 대부분의 구조나 재료의 음향 방출 원인은 손상과 관계가 있기 때문에 구조물이나 재료에 대한 음향 방출 평가 및 모니터링은 파손을 진단하는 데 유용하게 활용될 수 있다. 따라서 음향 방출 시험은 압력 탱크, 배관, 암석 및 콘크리트의 균열 성장 및 부식과 같은 결함 감지용으로 널리 사용되고 있다 [6]. 따라서 본 장에서는 압전 페인트 센서를 이용하여 음향 방출 기반 구조물 파손 모니터링에 적용한 연구 [6]를 소개하고자 한다.

제작한 압전 페인트 센서와 비교용으로 PZT 압전세라믹 센서도 함께 알루미늄 패널에 부착하였다. 본 시험을 위해서 연필 심을 두 센서 중심에서 약 50.8 mm 떨어진 알루미늄 sheet 표면을 눌러 부러뜨려 음향 방출을 생성하였

다. 연필 심이 파손되면서 파손 에너지가 연필 심 끝을 따라 알루미늄 sheet에 전달된다. 부러진 연필 심 파손은 약 1 MHz까지 주파수 진폭 스펙트럼을 갖는다. 2.5 MHz의 초당 샘플링 횟수에서 얻어진 음향 방출 신호(처음 50μs까지)의 결과를 그림 6에 나타내었다. 그 결과 압전 페인트 센서에서 얻어진 출력 신호는 PZT 센서와 유사한 출력 신호를 나타내는 것을 확인하였으며, 이러한 결과는 압전 페인트 센서가 음향 방출 신호를 감지하는 센서로 활용 가능하다는 것을 의미한다 [6].

5. CONCLUSIONS

본 리뷰는 압전 기반 페인트 센서 제작과 응용 방안에 대한 동향을 간단히 소개하였다. 압전 페인트 센서는 기존의 압전 세라믹 기반 센서의 특성을 유지하면서 폴리머의 유연성을 부여하여 0-3 형태의 복합소재로 제작하여 대면적, 복잡한 구조, 곡면 등에 편리하게 페인트 형태로 설치할 수 있는 장점을 포함한다. 압전 페인트 센서의 성능을 최적화하기 위하여 압전 분말(필러) 크기, 종류와 함량 페인트 센서층의 면적과 두께 전극의 종류 등에 대한 다양한 연구가 수행되었으며, 향후 압전 페인트 센서를 활용하여

항공기, 우주선, 원자력 및 화학 공단 설비, 교량, 대형 건축물 등 고립된 지역에 위치하거나 복잡한 구조, 광범위한 설비 등 사고 발생 시 대형 사고로 이어질 수 있는 구조물의 상태를 모니터링 하는 센서로 널리 응용이 기대된다.

ORCID

Hyoung-Su Han

<https://orcid.org/0000-0002-7423-2862>

감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주)과 지방자치단체(울산광역시)의 지원으로 수행된 연구임(2022).

REFERENCES

- [1] B. Jaffe, W. R. Cook Jr, and H. L. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*, (Academic Press, New York and London, 1971) p. 7.
- [2] J. F. Tressler, S. Alkoy, and R. E. Newnham, *J. Electroceram.*, **2**, 257 (1998).
doi: <https://doi.org/10.1023/A:1009926623551>
- [3] K. Shibata, R. Wang, T. Tou, and J. Koruza, *MRS Bull.*, **43**, 612 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.180>
- [4] D. H. Han and L. H. Kang, *Funct. Compos. Struct.*, **2**, 025002 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ab90e1>
- [5] M. Habib, I. Lantgios, and K. Hornbostel, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 423002 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8687>
- [6] X. Li and Y. Zhang, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **31**, 684 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01249.x>
- [7] H. Bae and K. Choi, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **38**, 927 (2021).
doi: <http://doi.org/10.7736/JKSPE.021.092>
- [8] J. R. White, B. de Poumeyrol, J. M. Hale, and R. Stephenson, *J. Mater. Sci.*, **39**, 3105 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025839.98785.b9>
- [9] S. B. Park, D. H. Han, and L. H. Kang, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **38**, 1335 (2014).
doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.12.1335>
- [10] Y. Zhang, *Proc. SEM X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics* (Cost Mesa, CA, USA, 2004) p. 7.
doi: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14337568?utm_source=wikipedia
- [11] S. Egusa and N. Iwasawa, *Smart Mater. Struct.*, **7**, 438 (1998).
doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/7/4/002>
- [12] S. Egusa and N. Iwasawa, *J. Mater. Sci.*, **28**, 1667 (1993).
doi: <https://doi.org/10.1007/bf00363366>
- [13] C. Yang and C. P. Fritzen, *Smart Mater. Struct.*, **21**, 045017 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/4/045017>
- [14] R. E. Newnham, A. Safari, G. Sa-Gong, and J. Giniewicz, *Proc. IEEE 1984 Ultrasonics Symposium* (IEEE, Dallas, USA, 1984) p. 501.
doi: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1984.198348>
- [15] K. A. Hanner, A. Safari, R. E. Newnham, and J. Runt, *Ferroelectrics*, **100**, 255 (1989).
doi: <https://doi.org/10.1080/00150198908007920>
- [16] S. Egusa and N. Iwasawa, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **5**, 140 (1994).
doi: <https://doi.org/10.1177/1045389X9400500118>
- [17] S. Egusa and N. Iwasawa, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **15**, 806 (1996).
doi: <https://doi.org/10.1177/073168449601500804>
- [18] J. M. Hale and J. Tuck, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C*, **213**, 613 (1999).
doi: <https://doi.org/10.1243/0954406991522545>
- [19] J. M. Hale, *Proc. ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* (Manchester, England, 2004) p. 599.
doi: <https://doi.org/10.1115/ESDA2004-58352>
- [20] Y. Zhang, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **17**, 843 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1177/1045389X06059957>
- [21] M. Dietze and M. Es-Souni, *Sens. Actuators, A*, **143**, 329 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.11.016>
- [22] M. Kobayashi, C. K. Jen, J. F. Moisan, N. Mrad, and S. B. Nguyen, *Smart Mater. Struct.*, **16**, 317 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/009>
- [23] M. Kobayashi, C. K. Jen, J. F. Bussiere, and K. T. Wu, *NDT and E Int.*, **42**, 157 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.003>
- [24] I. Payo and J. M. Hale, *Sens. Actuators, A*, **163**, 150 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.08.005>
- [25] I. Payo and J. M. Hale, *Sens. Actuators, A*, **168**, 77 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.04.008>
- [26] L. H. Kang, *Adv. Compos. Mater.*, **23**, 73 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1080/09243046.2013.862390>
- [27] S. H. Kang and L. H. Kang, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **29**, 3426 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1177/1045389X17730925>
- [28] S. Osho, N. Wu, M. Aramfard, C. Deng, and O. Ojo, *Smart Mater. Struct.*, **27**, 035007 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa797>
- [29] K. Choi, M. Y. Hwang, D. Kang, M. Kang, D. Ahn, and L. H. Kang, *Struct. Health Monit.*, **19**, 1951 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1177/1475921720902274>
- [30] J. F. Capsal, C. David, E. Dantras, and C. Lacabanne, *Smart Mater. Struct.*, **21**, 055021 (2012).

- doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/5/055021>
- [31] W. Choi, K. Choi, G. Yang, J. C. Kim, and C. Yu, *Polym. Test.*, **53**, 143 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.05.018>
- [32] K. Choi, W. Choi, C. Yu, and Y. T. Park, *J. Nanomater.*, **2017**, 6590121 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1155/2017/6590121>
- [33] T. Furukawa, K. Suzuki, and M. Date, *Ferroelectrics*, **68**, 33 (1986).
doi: <https://doi.org/10.1080/00150198608238735>
- [34] D. H. Han, S. B. Park, and L. H. Kang, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **38**, 1069 (2014).
doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.10.1069>