

전자 미트 응용을 위한 유연 압전 충격 센서의 제조와 특성 평가

나용현^{1,2} · 이민선¹ · 조정호¹ · 백종후¹ · 이정우² · 박영준³ · 정영훈^{1,+}

Fabrication and Evaluation of a Flexible Piezoelectric Impact Force Sensor for Electronic Mitt Application

Yong-hyeon Na^{1,2}, Min-seon Lee¹, Jeong-ho Cho¹, Jong-hoo Paik¹, Jung Woo Lee²,
Youngjun Park³, and Young Hun Jeong^{1,+}

Abstract

Flexible impact force sensors composed of piezoelectric PZT/PDMS composite sandwiched between Al/PET films were fabricated and their voltage signal characteristics were evaluated under varying impact forces for electronic mitt applications. The piezoelectric impact force sensor on an ethylene-vinyl acetate (EVA) substrate exhibited an output voltage difference of no greater than 40 mV a periodical impact test in with the impact load was increased by as much as 240 N by a restoration time of 5 s in a five-time experiment, implying good sensing ability. Moreover, the impact force sensor embedded four electronic mitts showed a reliable sensitivity of less than 1 mV/N and good repeatability under 100 N-impact force during a cycle test executed 10,000 times. This indicated that the fabricated flexible piezoelectric impact sensor could be used in electronic mitt applications. However, the relatively low elastic limit of substrate material such as EVA or poly-urethane slightly deteriorated the sensitivity of the impact sensor embedded electronic mitt at over 200 N-impact forces.

Keywords: Piezoelectric, Composite, Impact force sensor, Electronic mitt, Flexible sensor

1. 서 론

태권도, 복싱, 가라테와 같은 격투기 스포츠 산업 분야에서는 운동량 및 기량 향상을 위해 미트(mitt) 또는 보호구(body protector)와 같은 다양한 보조 기구를 활용한다. 그러나, 최근 사물인터넷(IoT) 기술의 응용 영역이 다변화되면서 스포츠 분야에서도 센서와 통신 기술이 일체화된 기능을 가지며 신체에 착용이 가능한 웨어러블 IoT 센서 제품을 통한 디지털화가 급속히 전개

되고 있다[1-4]. 특히, 충격 에너지를 전기적 신호로 변환하는 기능을 가지는 압전 센서와 타격 시 발생하는 전기 신호 정보를 무선 송신 가능한 통신 회로로 구성되는 전자 미트 (electronic mitt)는 사용하기 쉽고 휴대가 간편할 뿐만 아니라, 신체에 착용 가능한 장점을 갖고 있어 많은 관심을 받고 있다. 쿼츠(quartz)와 같은 압전 결정을 이용한 하중 센서(force sensor)는 우수한 감도 특성을 나타내지만 형상을 다양화하기 어려울 뿐만 아니라 선수 보호를 목적으로 거의 사용되지 않는다[5]. 이러한 이유로 전자 미트는 기계적으로는 유연한 기능과 전기적으로는 빠른 응답속도와 우수한 출력 신호 기능을 가지는 유연 압전 센서를 활용한다.

현재 주로 사용되고 있는 전자 미트용 유연 압전 센서는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 PVDF (polyvinylidene difluoride)계 유기 압전 고분자 물질로 이루어진 필름형 압전 소재를 활용하고 있다[6]. PVDF는 소재 내부에 전기적 분극 구조를 갖고 있어 외부의 충격 시 소재 내에서 전기적 포텐셜(potential)이 발생하는 원리를 이용하여 충격 신호를 감지하고 이를 디지털 신호처리(DSP)를 통해 충격의 유무와 크기를 수신부에 전송하게 된다[7,8]. 그러나, 유연 압전 센서 소재로서 -25~-35 pm/V의 압전 변위 상수 (d_{33})와 약 200×10^{-3} Vm/N 이상의 높은 압전 전압상수 (g_{33}) 특성을 갖는 PVDF는 탄소, 수소와 불소로 구성된 유기 고분자

¹ 한국세라믹기술원 광전자부품소재센터 (Optic&electronic Components Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology)

101, soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Korea

² 부산대학교 재료공학과 (Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University)

Engineering Building #2, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

³ (주)아이엔아이테크, 기술연구소 (INI Tech R&D center)

Room 201, 109, soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Korea

⁺ Corresponding author: yhjeong@kicet.re.kr

(Received : Mar. 9, 2019, Revised : Mar. 25, 2019, Accepted : Mar. 25, 2019)

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.

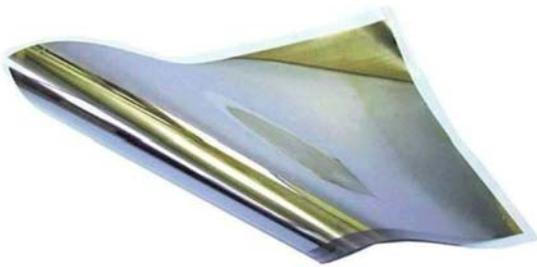


Fig. 1. Commercial PVDF piezoelectric impact force sensor for electronic body armour.

물질로 때문에 유연하고 대면적화 할 수 있는 장점을 가지지만 높은 단가와 전기기계변환 커플링 계수(k_{33})가 0.19 정도로 낮은 단점을 가진다[9-11]. 최근 ZnO, (K, Na, Li)NbO₃나 BaTiO₃와 같이 PVDF와 비교하여 상대적으로 높은 유전율과 커플링 특성을 가지는 세라믹 복합 소재 기반의 나노 구조체를 이용한 웨어러블 압전 센서가 활발히 연구되고 있지만 낮은 제조 비용과 대면적 제조 기술이 요구되는 상용화 제품 개발까지는 소재, 센서 구조, 대면적화 등 보다 다양한 연구가 필요한 실정이다[12-15].

본 연구에서는 대면적 제조가 가능하면서도 압전 물성과 기계적 유연성을 동시에 가지는 압전 세라믹/폴리머 복합체 소재를 이용한 유연 압전 센서를 제조하였다. 제조한 압전 센서는 미트용 충격흡수체로 사용되는 EVA (ethylene-vinyl acetate)기판 상에 부착한 후 기계적 충격 변화에 따른 센서 신호의 출력 특성 평가를 통하여 전자 미트로의 응용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 유연 압전 충격 센서 제조

본 연구에서는 우수한 압전성을 가진 세라믹 분말과 유연성이 우수한 PDMS (polydimethylsiloxane)폴리머 소재를 사용하였다. PDMS는 투명한 고분자 원료 소재로서 다양한 기능성 소재와 복합화하여 널리 사용되는 물질이다[16-18]. 원료 분말로 사용된 압전 세라믹 파우더는 양산성을 고려하여 상용 소재로서 대만 Sunny Tech. Co.의 소프트 PZT계 S55이다. 사용된 압전 원료 분말은 지름 10 mm 크기의 디스크 시편으로 제조한 후 평판형 캐패시터 구조로부터 임피던스 분석기(E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하여 유전율과 압전 물성을 평가하였으며, 이들 물성을 Table 1에 나타내었다. 또한 폴리머 원료로 사용된 PDMS소재는 실리콘 계열의 Sylgard 184A (Sewang Hightech, ROK) 및 184B (Sewang Hightech, ROK)의 이액형 원료를 사용하여 제조하였으며, 각 원료를 약 9:1의 일정한 비율로 혼합한다. 균일한 입도를 가지는 압전 세라믹 원료 분말을 제조하기 위하여 일반적인 습식 혼합법을 사용하여 24시간 동안 볼밀링 공정을 수행한 후 상온에서 24시간 건조하였다. 건조

Table 1. Piezoelectric and dielectric properties of the piezoelectric ceramic (S55, Sunny Tech. Co., Taiwan) sintered at 1,100°C.

Piezoelectric properties	S55 (Sunny Tech.)
Coupling coefficient (k_{31})	45%
Coupling coefficient (k_{33})	80%
Mechanical quality factor (Q_m)	55
Piezoelectric charge constant (d_{31})	-300 pC/N
Piezoelectric charge constant (d_{33})	750 pC/N
Piezoelectric voltage constant (g_{31})	-7.5×10^{-3} Vm/N
Piezoelectric voltage constant (g_{33})	18.4×10^{-3} Vm/N
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	4,320
$\tan\delta$ (%)	1.9

한 분말은 체거름을 통하여 거른 후 PDMS폴리머와 7:3의 부피비로 혼합하여 paste mixer를 이용하여 2000 rpm으로 10분간 균일하게 혼합된 슬러리(slurry)를 제조하였다. 사용된 압전 세라믹 원료 분말의 입도는 약 5.45 μm 를 가졌으며, 총 분말 누적질량의 50%에 해당하는 입자의 지름을 의미하는 D_{50} 의 경우 약 5.18 μm 를 나타내었다. 해당 원료 분말의 입도분석기(Horiba, LA950, Japan)를 이용한 입도 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

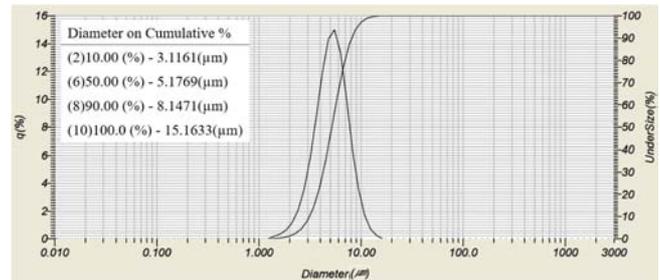


Fig. 2. Particle size analysis spectra of the piezoelectric ceramic powders (S55, Sunny Tech. Co., Taiwan) after ball-milling for 24 h.

2.2 유연 압전 충격 센서 제조

혼합된 압전 세라믹/폴리머 혼합 슬러리는 roll to roll 공정을 통해 PET 필름 위에 Al이 코팅된 100 mm (가로) × 100 mm (세로) 크기를 가지는 Al(10 μm)/PET(Polyethylene; 60 μm) 필름은 위에 스크린 프린팅 공정을 이용하여 약 60 μm 두께를 가지는 필름을 형성하도록 인쇄하였다. 인쇄된 압전 복합소재 필름 위에 다시 Al/PET필름을 적층한 후 고압가열오븐(PO1-700-20, Korea)에서 65°C, 3.5 bar 조건으로 20분 동안 가압 경화 공정을 통해 최종적으로 50 μm 두께의 압전 복합소재 필름이 임베딩된 Al/PET필름 구조의 유연 압전 충격 센서를 제조하였다. Fig. 3는 유연 압전 충격 센서를 제조하기 위한 공정 흐름도를 도식화하여 나타내고 있다. 전체 공정은 총 6단계로 진행되며, 에이징(aging) 공정을 제외한 각 공정은 20분 내외로 제작에 소

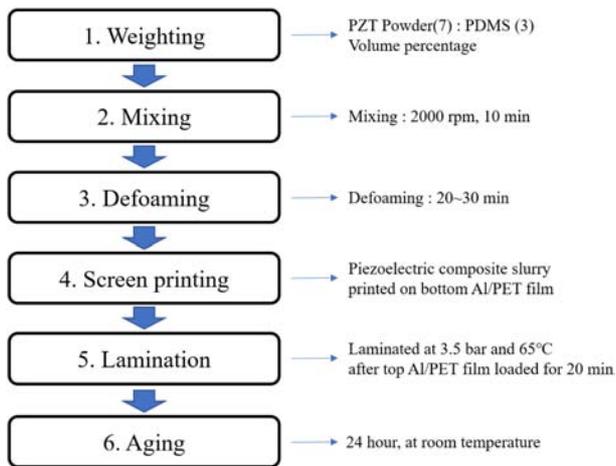


Fig. 3. Flow chart of fabrication process for flexible piezoelectric impact force sensor composed of 50 μm -thick piezoelectric composite film sandwiched Al/PET film.

요되는 전체 공정은 약 1시간의 짧은 제조시간을 가진다. 분극 (poling)은 High voltage power supply(SHV300, ConverTech, Korea)를 이용하여 6 kV/mm의 전계 조건으로 60°C 실리콘 오일에서 20분 동안 수행하였다.

2.3 전자 미트 충격 센서 특성 평가

제조된 전자 미트용 유연 압전 센서는 출력 신호 특성을 얻기 위하여 오실로스코프(oscilloscope)에 연결 후 충격 테스트 장비를 사용하여 일정한 충격 인가하였다. 충격 센서의 물성 평가를 위하여 제작된 충격 테스트 장비의 구조를 Fig. 4(a)에 나타내었으며, 실제 사용된 충격 평가 시스템의 동작 이미지를 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 보듯이, 로드셀(load cell)이 장착된 stage에 테스트용 압전 충격 센서가 지그에 장착되면 충격을 인가하기 위하여 약 1 m 길이를 갖는 shaft의 한쪽 끝단에 질량체(mass)를 부착한다. 질량체가 부착되지 않은 shaft의 다른 반대편 끝단에는 질량체를 들어올리도록 설계된 전기 모터가 장착되어 있으며, 이를 이용하여 일정한 각도(θ)만큼 질량체를 들어올린 후 전력을 차단하면, shaft에 연결된 해머(hammer)형 질량체가 가진 위치에너지는 자유낙하하며 원심력을 가진 운동에너지로 변환된다. 이 때, 압전 센서의 중심부에 충격이 인가되면 로드셀에 의해 모니터링되는 하중과 압전 센서에서 발생하는 출력 전압을 평가하도록 설계되었다.

Fig. 5는 본 연구에서 제조한 압전 충격 센서의 특성을 분석하기 위한 테스터 기구를 보여주고 있다. 센서의 성능 평가를 위해 미트의 내부 구조에 적용될 150 mm (가로) \times 150 mm (세로) 크기의 EVA기판 위에 압전 센서가 위치한다. 테스트용 센서가 장착된 EVA기판은 로드셀에 부착된 지그의 상판에 고정된 채, 반구상의 돌출부를 가지는 충격체(impactor)의 회전력에 의한 충격이 인가되면 원형의 충격된 영역에서 센서의 전압 신

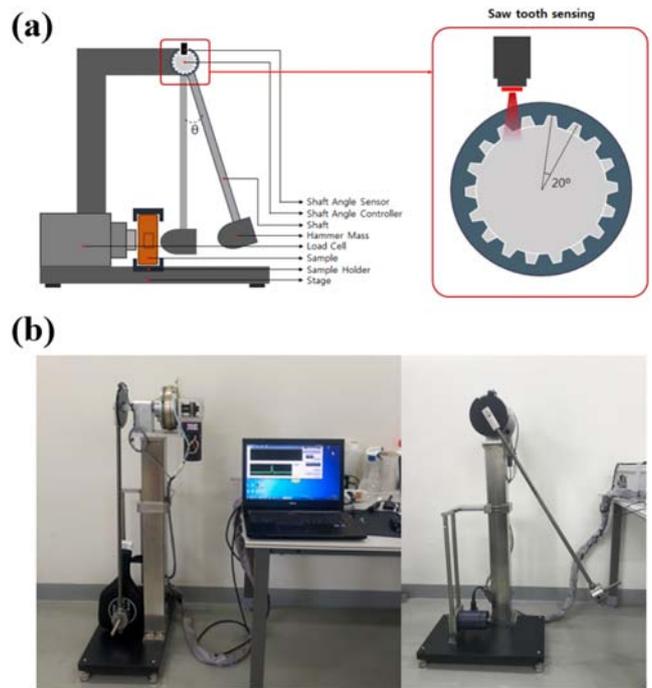


Fig. 4. (a) Schematic image of the impact force tester for measurement of output signal from the electronic mitt and (b) real images of the impact force tester system.

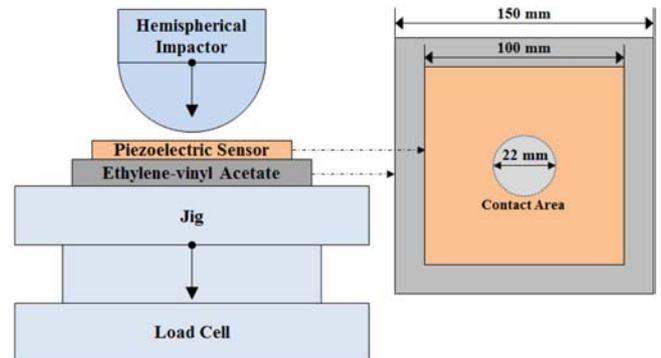


Fig. 5. Testing apparatus using a rotating hammer fitted with a hemispherical impactor.

호 출력이 생성된다. 충격 면적(contact area)의 지름은 충격체의 질량이 증가할수록 조금씩 증가하는 경향을 나타내지만 본 연구에서 인가된 충격의 최대치인 330 N 이내에서는 22 mm 지름의 약 7% 이내 범위를 갖는 충격 면적 크기를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유연 압전 센서의 구조 특성

Fig. 6(a)는 제조한 유연 압전 충격 센서의 단면 모식도를 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 압전 복합소재 필름을 Al/PET 필름 상

에 인쇄한 모습과 최종적으로 제조된 유연 압전 충격 센서 이미지를 각각 보여주고 있다. 100 mm (가로) × 100 mm (세로) 크기와 약 60 μm 두께를 갖는 PET필름 위에 10 μm 두께의 Al 전면 전극이 형성된 유연 필름이 형성되어 있으며, PZT/PDMS 소재로 구성된 압전 복합 소재가 Al/PET 유연 전극 필름 위에 안정적이고 균일하게 인쇄된 것을 Fig. 6(b)위 왼쪽 사진으로부터 관찰할 수 있다. Fig. 6(a)의 적층 순서대로 압전 복합 소재 필름을 중심으로 다시 Al/PET 유연 필름이 적층된 샌드위치 구조는 가압 공정을 통해 최종적으로 완성되었으며 Fig. 6(b)의 오른쪽 사진에서 이를 확인할 수 있다. Fig. 6(b)의 센서 중심 부분에 표시된 붉은색 원(circle)은 반구형 해머가 충격 시 접촉하는 영역을 나타낸 것으로 210 N의 충격 인가시 약 22 mm의 지름을 가진다.

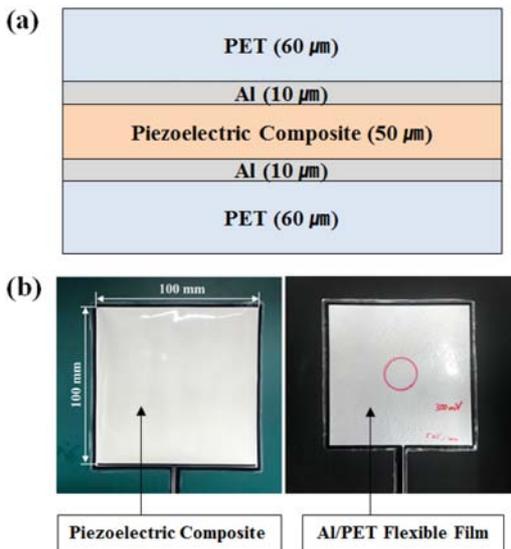


Fig. 6. (a) Schematic of cross-sectional structure of the flexible piezoelectric impact force sensor, (b) the printed piezoelectric composite film on Al/PET film (left) and the final product of flexible piezoelectric impact force sensor.

3.2 유연 압전 센서의 신호 출력 특성

Fig. 7은 EVA기판 위에 놓인 유연 압전 충격 센서에 가해진 충격 크기 변화에 따라 출력되는 전압 변화를 나타내는 그래프이다. 인가된 충격 크기의 변화는 충격 테스트 장비의 해머 질량을 변화시키면서 조절하였으며, 최소 90 N에서부터 330 N까지 30 N씩 증가시키며 동일한 충격이 5초마다 인가된 조건에서 총 5회 측정된 결과와 평균치를 도출하였다. 충격 증가에 따른 출력 전압은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 240 N 이하의 충격이 반복적으로 인가되면 출력 전압은 대체로 고른 분포 특성을 나타내었다. 이 경우, 최대 출력 전압과 최소 출력 전압의 차이(ΔV)가 40 mV 이하를 나타낸 반면에 270 N의 충격이 인가되면 ΔV 는 106 mV로 급격히 증가하였다. 인가되는 충격이 300 N까지 증가하면 ΔV 는 다시 감소하기 시작하며 충

격이 330 N까지 더욱 증가하면 ΔV 는 31 mV까지 감소하는 특성을 나타내었다. 이는 약 270 N의 충격이 인가되면, 센서와 부착되어 있는 EVA 기판의 충격 이후 탄성 복원력이 급격히 떨어지기 때문에 5초 간격의 충격 인가 조건에서 복원되지 않은 EVA기판의 형상에 부착되어 있는 센서의 해머 접촉면에 균일한 충격이 인가되지 않기 때문이다. 또한, 그 이상의 충격이 인가되면 EVA 기판은 압축 소성되어 최초 형상으로 더 이상 복원되지 않았기 때문에 다시 센서의 출력 전압의 ΔV 는 31 mV로 감소하였으나, 비교적 균일한 센서 신호의 출력 재현성(reproducibility)을 확인할 수 있었다. 충격 인가에 따른 보다 상세한 출력 전압 특성을 Table 2에 나타내었다.

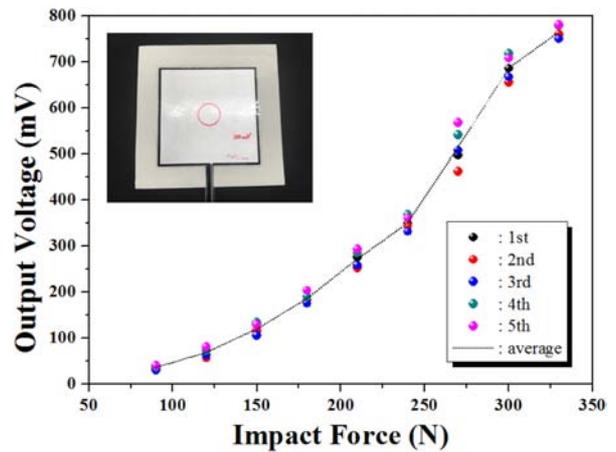


Fig. 7. Output voltage obtained from the flexible piezoelectric impact force sensor at various impact force.

Table 2. Summary of voltage signals from piezoelectric impact force sensor on EVA (ethylene-vinyl acetate) plate after impact force loading.

Impact force (N)	Output voltage (mV)			
	min.	max.	ΔV	average
90	31	40	9	36
120	56	80	24	69
150	106	134	28	120
180	168	203	35	186
210	253	293	40	273
240	331	368	37	350
270	462	568	106	515
300	656	718	62	687
330	750	781	31	766

3.3 전자 미트 제조

유연 압전 충격 센서는 Fig. 8에서 볼 수 있는 미트 구조에서 검은 사각형 점선으로 표시된 위치에 부착하였다. Fig. 8(a)는

전자 미트의 내부 구조를 나타낸 것으로 충격을 흡수할 수 있는 가운데 두 개의 poly-urethane (PU) 내부층과 이를 둘러싼 하늘색의 EVA 층이 미트의 바깥 양면에 형성되어 있다. 센서로부터 도출된 전기 신호는 손잡이 부분(grip part) 주변의 신호 표시(signal display) 장치와 전기적으로 연결되어 기계적 충격 신호로부터 출력되는 전압 신호를 모니터링 할 수 있도록 제작되었다. Fig. 8(b)는 압전 센서가 내장된 전자 미트의 실제 제작된 사진을 보여주고 있다. 전자 미트는 내부 구조를 보호하고 설계된 구조에 적합하도록 인조 가죽 재질의 검은색 포장재로 제작되었다.

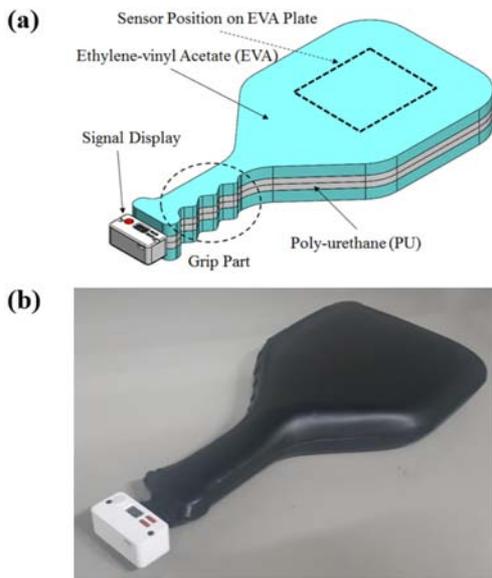


Fig. 8. (a) Internal structure and (b) photograph of the fabricated electronic mitt.

본 연구에서 제작한 유연 압전 충격 센서가 내장된 전자 미트의 성능을 평가하기 위하여 충격 하중의 크기 변화에 따라 전자 미트에서 출력되는 전압 신호의 변화 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 성능 평가를 위해서 총 4개 샘플의 동일한 전자 미트를 제작하였으며, 충격 테스트 장비를 통해 80 N에서 280 N까지 40 N의 수직 충격 하중 변화에 따른 출력 신호 특성을 비교 평가하였다. 소프트한 실리콘 계열의 매질 내에 압전 센서들이 불연속적으로 분포하는 경우, 즉 어레이 형태로 존재하는 경우에도 압전 센서에 직접적인 충격 하중이 인가되지 않는 상황에서 탄성을 가지는 매질로 인하여 센서의 신호는 연속적인 피드백을 구현할 수 있다[19]. 그러나, 실험 결과로부터 4개의 샘플은 조금씩 다른 신호 출력 패턴을 나타내었다. 모두 충격 하중이 증가할수록 출력되는 전압 신호는 증가하는 경향을 나타내었지만, 인가된 수직 하중의 크기가 40 N으로 균일하게 증가함에도 불구하고 출력되는 전압 신호의 크기 증가량은 샘플별로 차이를 나타내었다. 모두 동일한 소재와 센서 구조를 가짐에도 불구하고 이러한 신호 출력 특성의 차이를 나타내는 이유는 PDMS 폴리머 내의 압전 세라믹 입자 분산 형태가 동일하지 않고, 테스트 샘플

별로 포장재와 센서 간의 공극(cavity)이 다소 불균일하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 9에 나타내었듯이 영역 I(Region I)은 인가된 충격 하중이 200 N 이내의 구간으로 이 구간에서 모든 샘플은 충격 하중 증가에 따른 출력 신호 증가량이 약 1 mV/N 이하로 비교적 낮게 나타났지만 균일한 특성을 나타내었다. 그러나, 영역 II 구간, 즉 인가 충격 하중이 200 N을 초과하면 각 테스트 샘플은 서로 다른 출력 신호 증가량 변화를 나타내면서 각 센서의 평균 민감도(average sensitivity)는 급격히 증가하였다. 영역 II에서 약 1.41 mV/N의 가장 낮은 민감도를 나타낸 샘플 I과 달리 샘플 IV는 최대 5.1 mV/N로 센서 민감도가 증가하였다. 이러한 센서 민감도 특성이 특정 충격 하중, 즉 200 N - 240 N을 전후하여 큰 변화를 보이는 것은 Fig. 7의 실험 결과에서 나타난 특성과 유사하게 충격 흡수층으로 사용된 EVA 기판과 PU의 혼합층이 영역 I과 영역 II의 충격 하중 경계 지점에서 탄성 한계(elastic limit) 능력을 가지기 때문으로 판단된다. 이들의 충격 하중에 따른 신호 출력 특성과 센서 민감도 특성에 대한 보다 상세한 실험 결과는 Table 3에 나타내었다.

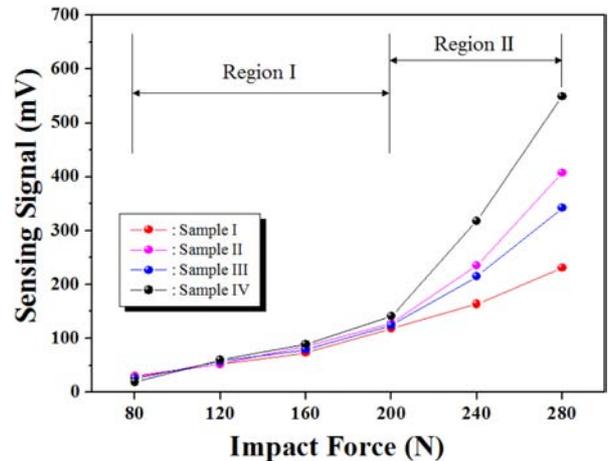


Fig. 9. Output sensing signal of the fabricated electronic mitt depending on applied impact force.

Table 3. Summary of impact sensing signal characteristics of the piezoelectric sensor embedded electronic mitts.

Impact force (N)	Sensing signal (mV)			
	Sample I	Sample II	Sample III	Sample IV
80	30	28	25	19
120	52	53	28	60
160	73	85	79	89
200	118	128	124	141
240	164	235	215	318
280	231	407	342	549
Impact force (N)	Average sensitivity (mV/N)			
80-200	0.73	0.83	0.83	1.02
200-280	1.41	3.49	2.73	5.1

Fig. 10는 압전 충격 센서가 내장된 전자 미트의 피로 성능을 평가하기 위하여 측정한 반복성 시험 결과를 보여주고 있다. 전자 미트의 충격이 인가되는 부위에 100 N의 하중을 반복적으로 인가한 후 출력되는 전압 신호를 측정하였다. 붉은 점선 사각형으로 표시된 구간을 확대한 아래 그림에서 피크 신호는 1회의 충격이 인가되었을 때를 의미하며 충격시간은 0.16 s로 확인하였다. 총 10,000회 이상의 반복 실험을 수행하였다. 평균 민감도는 +49.0 mV와 -51.7 mV를 유지하며 장시간 반복 실험 후에도 센서 신호의 출력 저하가 관찰되지 않는 안정적인 피로 특성을 나타내었다. 이로부터 본 연구에서 제작한 유연 압전 충격 센서는 전자 미트로 응용하기에 충분히 안정적인 성능을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나, 전자 미트의 성능을 향상시키기 위해서는 인가되는 충격 범위에 따라 출력 전압 신호를 보다 정밀하게 보정(calibration)하거나 전자 미트의 내부 구조에 적용되는 충격 흡수층 소재를 탄성 한계가 우수한 소재로 대체할 필요가 있을 것으로 판단된다.

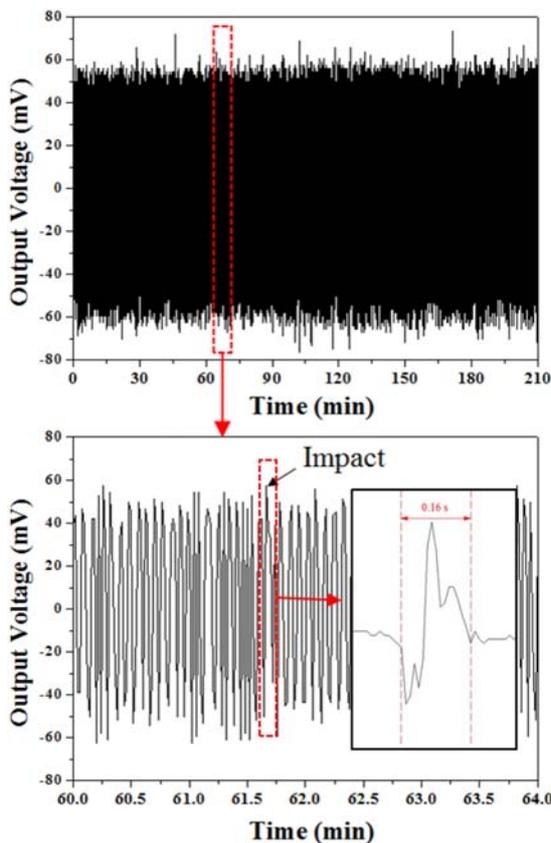


Fig. 10. Repeatability measurements of the impact force sensor for the electronic mitt set to periodic 100 N impact force.

4. 결 론

본 연구에서는 100 mm (가로) × 100 mm (세로) 크기를 가지는 50 μm 두께의 압전 복합소재 필름이 임베딩된 Al/PET 필

름 구조의 유연 압전 충격 센서를 제조하였다. 센서 소재는 소프트 PZT계 압전분말과 PDMS 폴리머 매트릭스 소재가 7:3의 비율로 혼합된 슬러리로 구성되었으며, 제작된 압전 충격 센서는 EVA 기판 상에 부착한 후 충격 변화에 따른 센서 신호의 출력 특성 평가를 수행하였다. 5초 간격의 5회 반복 충격 테스트에서 최대 출력 전압과 최소 출력 전압의 차이(ΔV)가 약 40 mV 이하로 안정적인 신호 출력 특성을 나타내었으며, 충격 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 약 270 N의 충격 시, EVA 기판의 충격 이후 탄성 복원력이 급격히 저하되어 ΔV는 106 mV로 증가하며, 비교적 불균일한 신호 출력 특성이 관찰되었다. 전자 미트로의 응용 가능성을 평가하기 위하여 유연 압전 충격 센서가 내장된 4개의 전자 미트를 제조하였으며, 충격 테스트를 수행한 결과, 충격 하중이 200 N 이내의 구간에서 모든 샘플은 약 1 mV/N 이하의 균일하면서도 안정적인 충격 민감도 특성을 나타내었으나, 인가 충격 하중이 200 N을 초과하면 전자 미트 제조 시 사용된 EVA/PU 충격 흡수층의 탄성 한계 능력으로 인하여 약 1.41 mV/N에서 5.1 mV/N까지 샘플별로 다양한 민감도를 나타내었다. 제조된 전자 미트는 충격 흡수층의 탄성한계 이내인 100 N의 충격 영역에서 총 10,000회 이상의 반복 실험에서도 약 +49.0 mV와 -51.7 mV의 신호 출력 특성을 나타내며 우수한 피로 성능을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청이 지원한 중소기업기술개발사업 ‘구매 조건부 신제품개발사업(과제번호: S2417449)’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다

REFERENCES

- [1] J. Wei, “How wearables intersect with the cloud and the internet of things”, *IEEE Consum. Electr. M.*, Vol. 3, No. 3, pp. 53-56, 2014.
- [2] C. Perera, C. H. Liu, and S. Jayawardena, “The emerging internet of things marketplace from an industrial perspective: a survey”, *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, Vol. 3, No. 4, pp. 585-598, 2015.
- [3] A. Kos, V. Milutinović, and A. Umek, “Challenges in wireless communication for connected sensors and wearable devices used in sport biofeedback applications”, *Future Gener. Comput. Syst.*, Vol. 92, pp. 582-592, 2019.
- [4] A. Umek, Y. Zhang, S. Tomažič, and A. Kos, “Suitability of strain gage sensors for integration into smart sport equipment: A golf club example”, *Sensors*, Vol. 17, No. 4, pp. 916-933, 2017.
- [5] Z. H. Zhang, J. W. Kan, X. C. Yu, S. Y. Wang, J. J. Ma, and Z. X. Cao, “Sensitivity enhancement of piezoelectric force sensors by using multiple piezoelectric effects”, *AIP Adv.*,

- Vol. 6, No. 7, pp. 075320(1)-075320(10), 2016.
- [6] <http://www.directindustry.com/prod/measurement-specialties/product-9250-410196.html> (retrieved on Mar. 6, 2019).
- [7] C. Chang, V.H. Tran, J. Wang, Y.-K. Fuh, and L. Lin, "Direct-writ piezoelectric polymeric nanogenerator with high energy conversion efficiency", *Nano Lett.*, Vol. 10, No. 2, pp. 726-731, 2010.
- [8] A. Eddiai, M. Meddad, R. Farhan, M. Mazroui, M. Rguiti, and D. Cuyomar, "Using PVDF piezoelectric polymers to maximize power harvested by mechanical structure", *Superlattices Microstruct.*, Vol. 127, pp. 20-26, 2019.
- [9] Y. M. Yousry, K. Yao, S. Chen, W. H. Liew, and S. Ramakrishna, "Mechanisms for enhancing polarization orientation and piezoelectric parameters of PVDF nanofibers", *Adv. Electron. Mater.*, Vol. 4, No. 6, pp. 1700562(1)-1700562(8), 2018.
- [10] M. Platte, "PVDF ultrasonic transducers", *Ferroelectrics*, Vol. 75, No. 1, pp. 327-337, 1987.
- [11] H. Ohigashi, "Electromechanical properties of polarized polyvinylidene fluoride films as studied by the piezoelectric resonance method", *J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 3, pp. 949-955, 1976.
- [12] J. Han, D. Li, C. Zhao, X. Wang, J. Li, and X. Wu, "Highly sensitive impact sensor based on PVDF-TrFE/Nano-ZnO composite thin film", *Sensors*, Vol. 19, No. 4, pp. 830-841, 2019.
- [13] D. B. Deutz, N. T. Macarenhas, J. B. J. Schelen, D. M. D. Leeuw, S. V. D. Zwaag, and P. Groen, "Flexible piezoelectric touch sensor by alignment of lead-free alkaline niobate microcubes in PDMS", *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 27, No. 24, pp. 1700728(1)-1700728(7), 2017.
- [14] M. Xie, K. Hisano, M. Zhu, T. Toyoshi M. Pan, S. Okada, O. Tsutsumi, S. Kawamura, and C. Bowen, "Flexible multifunctional sensors for wearable and robotic applications", *Adv. Mater. Tech.*, pp. 1800626(1)-1800626(29), 2019. (online publish)
- [15] H. Kim, B. R. Wilburn, E. Castro, C. A. G. Rosales, L. A. Chavez, T.-L. B. Tseng, and Y. Lin, "Multifunctional sensing using 3D printed CNTs/BaTiO₃/PVDF nanocomposites", *J. Compos. Mater.*, 2018. (online publish)
- [16] M. H. Abdellah, C. A. Scholes, B. d. Freeman, L. Liu, and S. E. Kentish, "Transport of terpenes through composite PDMS/PAN solvent resistant nanofiltration membranes", *Sep. Purif. Technol.*, Vol. 207, pp. 470-476, 2018.
- [17] J. Peng, H. Zhang, Q. Zheng, C. M. Clemons, R. C. Sabo, S. Gong, Z. Ma, and L.-S. Turng, "A composite generator film impregnated with cellulose nanocrystals for enhanced triboelectric performance", *Nanoscale*, Vol. 9, No. 4, pp. 1428-1433, 2017.
- [18] S. Khan, S. Tinku, L. Lorenzelli, and R. S. Dahiya, "Flexible tactile sensors using screen-printed P(VDF-TrFE) and MWCNT/PDMS composites", *IEEE Sens. J.*, Vol. 15, No. 6, pp. 3146-3155, 2015.
- [19] M. Acer, M. Salerno, K. Agbeviade, and J. Paik, "Development and characterization of silicone embedded distributed piezoelectric sensors for contact detection", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 24, No. 7, pp. 075030(1)-075030(15), 2015.