

잉크젯 인쇄기술을 이용한 종이 스트레인게이지 개발

이 영 태[†]

[†]안동대학교 전자공학교육과

Development of a Paper Strain Gauge using Inkjet-printing Technology

Young Tae Lee[†]

[†]Department of Electronic Engineering Education, Andong National University

Abstract

In this paper, eco-friendly paper strain gauge was fabricated in the way of printing strain gauge on paper substrate, using PEDOT:PSS ink and inkjet printer technology. As a p-type conductive high polymer, PEDOT:PSS is known to be piezoresistive effect. I formed a strain gauge by connecting in parallel 5 lines of 60 μm width printed with PEDOT:PSS. To minimize surrounding influence such as temperature, I formed wheat-stone bridge by combining 4 strain gauges (quarter-bridge strain gauge) which were made up of PEDOT:PSS 5 lines and measured. In quarter-bridge strain gauge, only two strain gauges, facing each other, arranged in strain and horizontal direction were deformed while the other two strain gauge of vertical direction were not. Therefore, quarter-bridge strain gauge showed the output of half bridge. The fabricated quarter-bridge strain gauge had output sensitivity of 105.6 $\mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{mm}$ and its output linearity was relatively good.

Key Words : PEDOT:PSS, Strain gauge, Paper, Ink-jet printing

1. 서 론

스트레인게이지(strain gauge)는 산업 현장의 다양한 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. 구조물의 변형, 진동, 충격 등을 간편하게 센싱(sensing)할 수 있을 뿐 아니라 다양한 형태의 구조물에 쉽게 접착하여 비전문가들도 사용할 수 있어서 그 응용 분야가 매우 넓다. 하지만 아직 자동화 생산시설을 이용한 대량 생산이 힘들고, 단가가 비교적 높은 것이 문제점으로 지적되고 있다. 스트레인게이지를 대량 생산 가능한 기술 개발을 통하여 단가를 낮추고 더욱 간편한 사용 방법을 제시한다면 그 시장 규모를 획기적으로 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

스트레인게이지를 대량 생산하기 위하여 카본(carbon), P형 전도성 고분자인 PEDOT:PSS 등의 잉크를 이용한 인쇄 기술을 이용한 압저항형 스트레인게이지(piezoresistive type strain gauge)[1-4] 개발이 점차

이루어지고 있다. 스트레인게이지 제작에는 카본이나 PEDOT:PSS 잉크를 이용한 스크린 인쇄(screen printing)[5] 또는 잉크젯 인쇄(ink-jet printing) 기술 등이 활용되고 있다. 스크린 인쇄 기술의 경우 공정이 간단하고 단가가 비교적 낮은 장점이 있지만 사이즈가 작은 패턴 형성이 어렵고 제작된 소자간의 특성 차가 다소 나타나는 문제 및 상대적으로 대량 생산에 불리한 단점이 있다. 반면에 PEDOT:PSS 를 이용한 잉크젯 인쇄 기술[6]의 경우 미세한 패턴 형성이 가능하며, 대량 생산에 유리한 장점이 있다.

본 논문에서는 친환경 재료인 종이 기판에 PEDOT:PSS 잉크를 사용하고, 잉크젯 인쇄 기술을 이용한 종이 스트레인게이지를 개발한다[7]. 종이 기판을 사용하기 때문에 단가가 낮고, 구조물에 접착이 간단하며, 친환경적[8]인 것이 특징이다. 따라서 종이 스트레인게이지는 일회용으로의 응용이 가능할 것으로 판단된다. 종이 스트레인게이지는 종이 박스, 우편물, 상품 라벨 등에 응용하여 유통 과정에서 발생할 수 있는 충격이나 파손 이력 모니터링이 가능한 스마트 패키지

[†]E-mail : ytleee@anu.ac.kr

또는 스마트 라벨 시스템에 응용 할 수 있으며, 책이나 잡지 등에 응용한 스마트 인쇄물뿐 아니라 기존의 스트레인게이지의 응용 분야에도 활용이 가능하여 다양한 분야에 응용이 기대된다.

2. 스트레인게이지 설계

PEDOT:PSS잉크를 이용한 스트레인게이지의 기본 구조를 Fig. 1에 나타냈다. 스트레인게이지의 구조는 잉크의 소모량을 줄이고 제작 공정 시간을 줄이면서 필요한 저항치를 확보하기 위하여 약 60 μm 폭의 5개 선을 300 μm 간격으로 병렬 배치하였다. 제작된 5개의 PEDOT:PSS 선을 silver paste를 이용하여 병렬 접속하였다[6]. 이 스트레인게이지의 저항치를 제어하기 위해서는 선의 길이, 선의 폭 및 선의 수를 파라미터로 활용하여 설계 가능하다. 본 논문에서는 선의 길이는 10 mm, 선의 수는 5개로 설계하였다. 일반적으로 스트레인게이지는 온도를 비롯한 외부의 영향을 최소화시키기 위하여 휘트스톤브리지(wheat-stone bridge) 회로를 구성하여 사용한다. 본 논문에서는 PEDOT:PSS로 제작된 5개 선의 병렬 구조로 설계된 10 mm 길이의 스트레인게이지 4개의 패턴을 연결하여 휘트스톤브리지 회로를 구성하였다. 그 구조 및 사이즈를 Fig. 2에 나타냈다.

Fig. 2에서 R1 ~ R4 까지 4개의 스트레인게이지와 ①과 ②의 전원 전극, ③과 ④의 측정 전극을 확인할

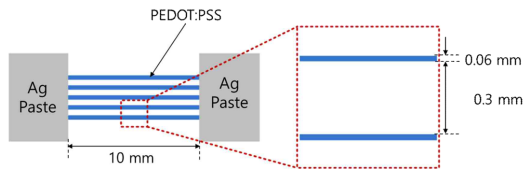


Fig. 1. Structure of a strain gauge using PEDOT:PSS.

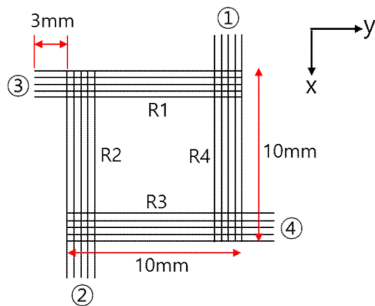


Fig. 2. Quarter-bridge strain gauge circuit.

수 있다. Fig. 2와 같이 휘트스톤브리지를 구성할 경우에, x축 방향의 변형이 발생할 경우에는 R2와 R4의 스트레인게이지에만 저항 변화가 발생한다. 또한 y축 방향으로 변형이 발생할 경우에는 R1과 R3 스트레인게이지에만 저항 변화가 발생하기 때문에 half bridge 형의 휘트스톤브리지와 같이 동작한다. 본 스트레인게이지는 x축 또는 y축 등 한 축의 변형만 측정 가능하도록 설계되었다. x축과 y축의 변형이 동시에 인가되어 벡터 합성 성분이 발생할 경우에는 휘트스톤브리지 회로에서 합성 성분에서 공통 부분(x축과 y축의 동일 양의 변형) 제거되어 출력으로 나타나지 않도록 설계되었다.

3. 스트레인게이지 제작

PEDOT:PSS 잉크를 이용하여 스트레인게이지를 제작하기 위하여 잉크젯 프린터(Microfab 사, Jetlab4)를 사용하였으며, 기판으로는 트레이싱 지(tracing paper)를 사용하였다. PEDOT:PSS 잉크는 PEDOT:PSS (Heraeus 사, CLEVIOS™ PH500)에 점도를 제어하기 위하여 Ethylene glycol과 DI-water로 희석하여 제작하였다. 종이 기판 상에 스트레인게이지 패턴을 인쇄하기 위하여 최적의 공정 조건을 도출하였다. 공정 조건 도출에는 인쇄 속도와 점적 간격을 파라미터로 실험하였다. Fig. 3에 인쇄 속도 별 패턴 사진을 나타냈다. 인쇄 속도 1 mm/s부터 10 mm/s 구간에서 속도를 변화시키면서 실험한 결과 속도 2 mm/s에서 최적의 패턴을 인쇄할 수 있었다. 또한 점적 간격의 경우에도 Fig. 4에 나타낸 것과 같이, 노즐 사이즈가 50 μm일 때 점적 간격 10 μm에서 100 μm 구간에서 간격을 변화시키면서 실험한 결과 점적 간격 20 μm에서 최적의 PEDOT:PSS

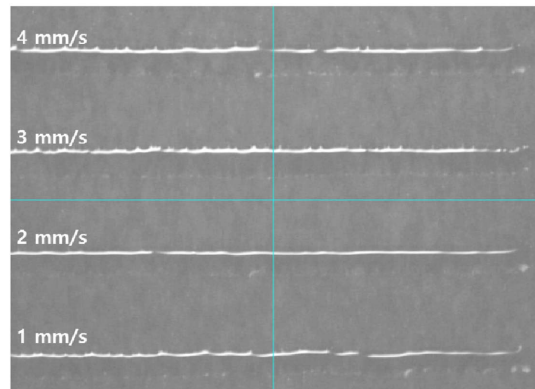


Fig. 3. Optical image of PEDOT:PSS pattern changed by printing speed of the ink jet printer.

패턴이 형성됨을 알 수 있었다.

본 논문에서는 잉크젯 프린터를 이용한 인쇄 조건을 인쇄속도 2 mm/s, 점적 간격 20 μm 로 설정하고 스트레인게이지 패턴을 형성하였다. 제작된 스트레인게이지 패턴 사진을 Fig. 5에 나타냈다.

제작된 PEDOT:PSS 스트레인게이지의 저항 값을 안정화시키기 위하여 120°C 분위기의 챔버(chamber) 내에서 IPA(Isopropyl alcohol)을 증발시키면서 10분간 solvent annealing을 실시하였다. Annealing 전에 20개 샘플(10 mm 길이 스트레인게이지)의 평균 저항(resistance)을 측정된 결과 414.375 k Ω , 표준 편차 61.0321의 전기적 특성을 나타냈다. Solvent annealing 후에는 평균 저항 68.4 k Ω , 표준 편차 16.3824로 개선된 특성을 나타내었다. 제작된 휘트스톤브리지의 전원 입력 단(Fig. 2에서 ① - ②)의 저항 및 출력 단(Fig. 2에서 ③ - ④)의 저항 값이 각각 51.26 k Ω 과 51.86 k Ω 으로 나타났다.

종이 기판 위에 PEDOT:PSS 잉크의 인쇄를 통하여 제작된 스트레인게이지의 뒷면에 양면 테이프를 접착하여 센서를 완성하였다. 이 양면 테이프는 스트레인게

이지를 구조물에 접착할 경우에 사용된다. 습도가 높은 장소에 사용할 경우에는 열용융형 플라스틱 필름인 surlyn(120°C, 3 min)을 압저항체 위에 접착하는 방법으로 제작할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

제작된 PEDOT:PSS 스트레인게이지의 특성을 분석하기 위하여 Fig. 6과 같이 측정용 회로를 구성하였다. 4개의 스트레인게이지로 형성된 휘트스톤브리지의 전원 전극에 3 V의 직류전압을 인가하고 측정 전극 사이에 전압 차를 측정하는 방법으로 스트레인게이지의 특성을 분석하였다. 본 스트레인게이지는 x축 또는 y축 중에 한 축의 변형을 half bridge 방식으로 측정할 수 있도록 설계되었다. 만약 x축과 y축 에서 동시에 변형이 발생할 경우 두 축의 변형의 합성 성분은 제거되어 출력 단에 나타나지 않도록 설계되었다. 종이를 기판으로 사용하는 스트레인게이지는 탄성을 가진 특정 구조물에 접착하여 사용되기 때문에 플라스틱 구조물에 부착한 상태로 측정했다. 10 mm 길이의 스트레인게이지의 한쪽 가장자리에서 스트레인게이지의 중앙부까지 하부를 고정하고 다른 가장자리에 힘을 인가하여 변위(displacement)시키면서 전기 저항을 측정하였다. Fig. 7에 변위-저항 특성을 나타냈다.

Fig. 7에서 스트레인게이지의 변위-저항 특성이 비교적 직선적으로 나타나, 구조물의 변형 측정이 가능한 스트레인게이지로서의 응용이 충분히 가능할 것으로 판단된다. 10 mm 길이의 스트레인게이지의 변위에 대한 저항 변화율은 23.3 Ω/mm 로 스트레인게이지의 패턴 설계에 따라서 이 값은 높일 수 있다. 휘트스톤브리

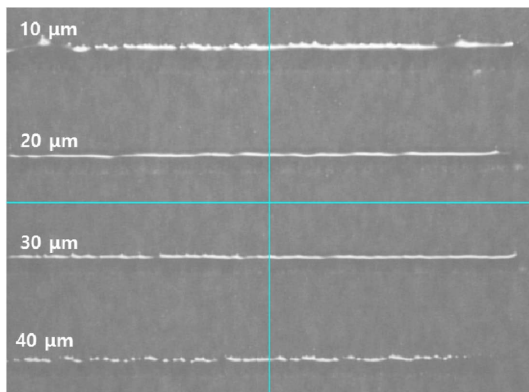


Fig. 4. Optical image of PEDOT:PSS pattern changed by drop space of the ink jet printer.

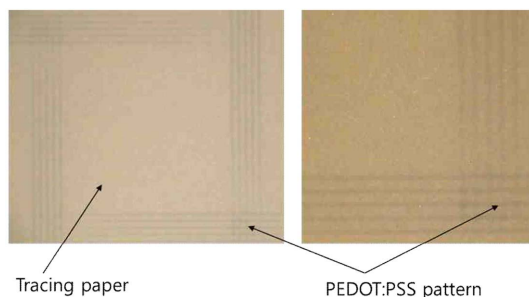


Fig. 5. Photographs of quarter-bridge strain gauge.

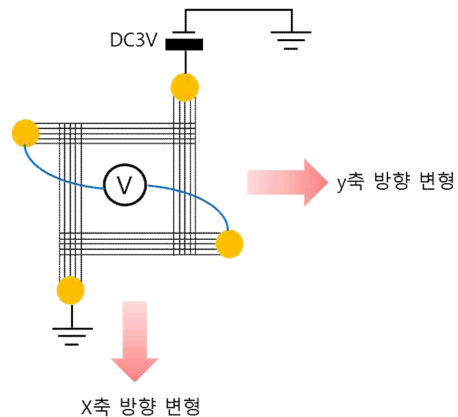


Fig. 6. Schematic of measurement set-up.

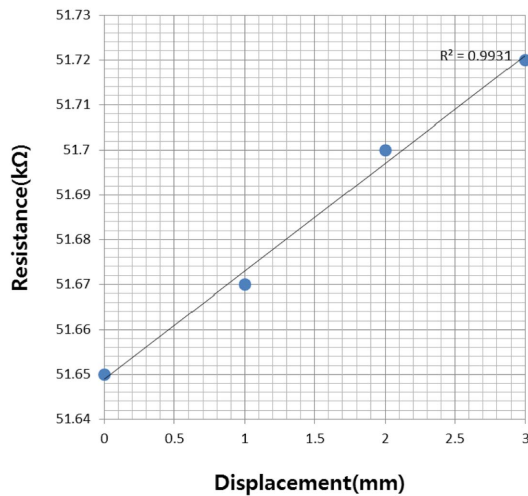


Fig. 7. Resistance variation versus displacement of a PEDOT:PSS strain gauge.

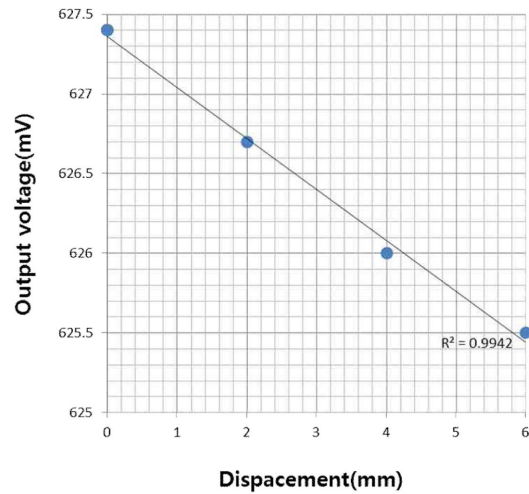


Fig. 8. Output voltage variation versus displacement of the quarter-bridge strain gauge.

지 회로로 구성된 스트레인지어의 경우에도 휘트스톤브리지 가장자리에서 중앙부까지 하부를 고정하고 다른 가장자리에 힘을 인가하여 변위 시키면서 전기 저항을 측정하였다. Fig. 8에 휘트스톤브리지 형태로 구성된 스트레인지어의 출력 특성을 나타냈다. 변위-출력 전압 특성의 직선성은 비교적 우수하며, 변위에 대한 감도(sensitivity)가 $105.6 \mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{mm}$ 임을 알 수 있었다. 본 휘트스톤브리지의 출력 방식이 half bridge 방식으로 full bridge 방식에 비해 감도가 낮지만, 다양한 변형 측정용 스트레인지어로 충분한 성능을 나타내고 있다. Fig. 8의 측정 결과에서 오프셋 전압이 다소 높은 것은 제작 과정에서 발생하는 공정 오차가 원인인 것으로 판단되며, 재현성이 확보된 생산 공정 개발이 효과적으로 이루어진다면 상당히 개선될 것으로 판단된다.

종이 기판 위에 PEDOT:PSS 잉크를 사용하여 스트레인지어 패턴을 인쇄하는 방식으로 종이 스트레인지어를 개발하였다. 종이 스트레인지어는 기존의 플라스틱 필름 형 스트레인지어에 비해서 친환경적이며, 단가도 낮은 장점이 있다. 따라서 일회용으로의 응용이 가능할 것으로 판단되어 스트레인지어의 응용 분야 확대를 기대할 수 있을 것이다. 스마트 패키지, 스마트 라벨 시스템에 응용하여 박스에 가해지는 충격, 진동 및 변형 등을 모니터링 할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 종이 스트레인지어는 뒷면에 접착제가 도포되어 있기 때문에 현장에서 간편하게 구조물에 접착하여 일회용으로 사용할 수 있어서 다양한 응용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

PEDOT:PSS 잉크와 잉크젯 인쇄 기술을 이용하여 종이 스트레인지어를 개발하였다. 사용되는 잉크의 양을 최소화하고 공정 시간을 줄이기 위하여 폭 $60 \mu\text{m}$ 인 5개 선 패턴을 형성하고 병렬 연결하는 방식으로 스트레인지어를 형성하였다. 제작된 스트레인지어의 변위-저항 변화 특성은 $23.3 \Omega/\text{mm}$ 로 우수한 직선성을 나타냈다. 온도 등 주위 환경의 영향을 최소화하기 위하여 스트레인지어를 휘트스톤브리지 회로로 구성하였으며, 휘트스톤브리지에 힘을 인가하여 변위를 발생시키면서 출력 전압을 측정하였다. 변위에 대한 감도가 $105.6 \mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{mm}$ 이며, 출력의 직선성은 비교적 우수한 것으로 판단된다.

PEDOT:PSS를 이용한 종이 스트레인지어는 친환경적이며, 제작 단가가 비교적 낮아서 일회용으로 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 판단된다. 스마트 패키지, 스마트 라벨, 사물 인터넷 등 스트레인지어의 다양한 분야로의 응용 분야 확대를 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 안동대학교 산학연구비 지원 사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Udo Lang, Philipp Rust, Bernd Schoberle, Jurg Dual, "Piezoresistive properties of PEDOT:PSS," Microelectronic Engineering, 86, pp. 330-334, (2009).
2. G. Latessa, F. Brunetti, A. Reale, G. Saggio, A. Di Carlo, "Piezoresistive behavior of flexible PEDOT:PSS based sensor," Sensors and Actuators B, 139, pp. 304-309, (2009).
3. Udo Lang, Philipp Rust, Jurg Dual, "Toward fully polymeric MEMS: fabrication and testing of PEDOT:PSS strain gauge," Microelectronic Engineering, 85, pp. 1050-1053, (2008).
4. Nicolas Trifigny, Fern M. Kelly, Cedric Cochrane, Francois Boussu, Vladan Koncar, Damien Soulat, "PEDOT:PSS-based piezoresistive sensors applied to reinforcement glass fibres for in situ measurement during the composite material weaving process," Sensors, 13, pp. 10749-10764, (2013).
5. Young Tae Lee, Seung Woo Cho, "Development of a strain gauge for sensing large strain," J. of the Semiconductor & Display Technology, 13(4), pp.33-36, (2014).
6. Ji Won Kye, Dong Cheul Han, Han Jae Shin, Heon Gon Kim, Wang Hoon Lee, "Fabrication of flexible temperature & humidity sensor using inkjet-printing Technology," J. of Sensor Science and Technology, 24(2), pp. 119-123, (2015).
7. Xinyu Liu, Martin Mwangi, XiuJun Li, Michael O'Brien, George M. Whitesides, "Paper-base piezoresistive MEMS sensors," Lab Chip, 11, pp.2189-2196, (2011).
8. Young Tae Lee, "Development of eco-friendly paper glucose bio-sensor," J. of Sensor Science and Technology, 22(3), pp. 202-206, (2013).

접수일: 2015년 5월 27일, 심사일: 2015년 6월 12일,
 게재확정일: 2015년 6월 22일