

DLP 몰드와 부분 경화를 이용한 접착형 크랙 기반 PDMS 스트레인 게이지의 에너지 인프라 구조 건전성 모니터링 적용

장훈희^{*1}, 조상민^{*2}, 박완기^{**3}, 소홍윤^{*,†}

^{*}한양대학교 반도체공학과, ^{**}한국전자통신연구원, [†]한양대학교 기계공학부

¹gsn020320@naver.com, ²sommer98@hanyang.ac.kr, ³wkpark@etri.re.kr, [†]hyso@hanyang.ac.kr

Adhesive Crack-Based Strain Gauge Fabricated by DLP Mold and Partially Cured PDMS for Structural Health Monitoring of Energy Infrastructure

Hoonhee Jang^{*1}, Sangmin Cho^{*2}, Wanki Park^{**3}, Hongyun So^{*,†}

^{*}Department of Semiconductor Engineering, Hanyang University

^{**}Electronics and Telecommunications Research Institute

[†]Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

요 약

에너지 인프라의 구조 건전성 모니터링을 위해서는 안정적인 부착과 신호 신뢰성이 확보된 센서가 필요하다. 그러나 기존 스트레인 게이지는 고비용 공정으로 인한 경제성 문제와 대량생산의 어려움, 그리고 접착제 열화에 따른 신호 불안정성이 한계로 지적된다. 본 연구에서는 Digital Light Processing 몰드에서 Polydimethylsiloxane 을 부분 경화시켜 자체 접착층을 형성하는 크랙 기반 스트레인 게이지를 제작하였다. 제작된 센서는 프리 스트레인에 의해 형성된 미세 크랙 네트워크를 통해 변형 시 민감한 전기적 응답을 나타내었으며, 별도의 접착제 없이 기판에 안정적으로 부착되어 반복 굴곡 후에도 신호를 유지하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 DLP 기반 부분경화 PDMS 센서가 저비용·대량생산 가능한 센서의 대안 기술로서 에너지 인프라 구조 건전성 모니터링 분야에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

송전선, 배관, 교량, 발전소 설비 등의 에너지 인프라는 사회 기반을 유지하는 핵심 요소로, 결함이 발생할 경우 안전사고로 이어질 수 있다. 이에 따라 구조 건전성 모니터링을 통한 상태 진단은 에너지 인프라의 안정성을 위해 중요하다. 최근에는 구조물 곳곳에 센서를 부착하고 변형, 응력을 측정하는 구조 건전성 모니터링 기술이 연구되고 있으며, 3D 프린터로 제작한 크랙 기반 Polydimethylsiloxane (PDMS) 스트레인 게이지 등의 기술이 적용 가능성을 보여준다. [1]

그러나 일반적인 금속 스트레인 게이지 사용은 구조 건전성 모니터링에 한계를 가진다. 첫째, 접착제의 열화와 습기로 인해 외부 환경에서 장기 부착 신뢰성이 떨어진다. 이와 관련하여 부착 안정성 개선을 위한 접근으로 PDMS 접착성 필름이 보고되었으며, 건식 및 수중 환경 모두에서 접착 특성을 확보하는 방안이 제시되었다. [2] 둘째, 포토리소그래피 기반의 센서 제작 공정을 사용하여 패턴을 형성하기 때문에 제작 비용이 높고 공정 생산량이 낮아 대량생산에 적합하지 않다.

이처럼 PDMS 가 적용성 및 부착에서 이점을 보이지만, 센서 제작 단계에서는 DLP 레진 몰드에서의 PDMS 경화 불량이 문제로 인식되어왔다. [3] 선행 연구들은 이를 결함으로 다뤘으나, 본 연구는 이러한 부분 경화 특성을 센서 자체 접착층으로 활용하여 새로운 센서 제작 방식에 이용하고자 한다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, Digital Light Processing (DLP) 방식 레진 프린터로 출력한 몰드와 PDMS 의 부분 경화 특성을 활용한 접착형 크랙 기반 스트레인 게이지를 제안한다. DLP 몰드와 PDMS 는 저비용으로 제작이 가능하며 복잡한 구조도 정밀하게 구현할 수 있어 대량생산에 유리하다. 또한 PDMS 부분

경화 특성을 본 연구에서는 접착층으로 활용하여 다양한 구조물 표면에 별도의 접착제 없이 안정적으로 센서를 고정할 수 있도록 설계하였다.

따라서 본 연구는 DLP 기반 부분 경화 PDMS 센서가 기존 스트레인 게이지의 한계 극복하고, 에너지 인프라 구조 건전성 모니터링에 적용 가능한 저비용·대량생산형 센서 제작 기술이 될 수 있음을 실험적으로 검증하고자 한다.

II. 본론

2.1 DLP 몰드에서의 PDMS 부분경화 특성

본 연구에서는 groove 형상을 가진 레진 몰드를 DLP 3D 프린터를 이용하여 출력하였다. PDMS (Sylgard 184)를 주제:경화제 = 10:1 비율로 혼합 후 몰드에 주입한 후, 60 °C 에서 2 시간 경화하였다. 이 과정에서 DLP 레진 몰드 표면에 잔류한 광개시제가 PDMS 표면층의 경화를 억제하여 접착력이 발생하게 된다. 이는 센서 표면에 자체 접착층이 형성되어 별도의 접착제 없이 센서를 다양한 구조물 표면에 안정적으로 부착할 수 있게 한다.

2.2 크랙 기반 스트레인 게이지 제작

경화된 PDMS 를 몰드로부터 탈형한 뒤, Pt 스퍼터링을 통해 전도성 경로를 형성하였다. 그 후, 약 5 % 프리 스트레인을 인가하여 Pt 층에 크랙을 유도한다. 센서 변형 시 크랙은 전도성 경로를 제한하여 저항이 증가하는 현상이 나타나며, 이를 통해 변형량 감지가 가능하다. 제작한 센서의 크기는 약 1 cm × 5 cm, 두께는 0.5 cm 이다.

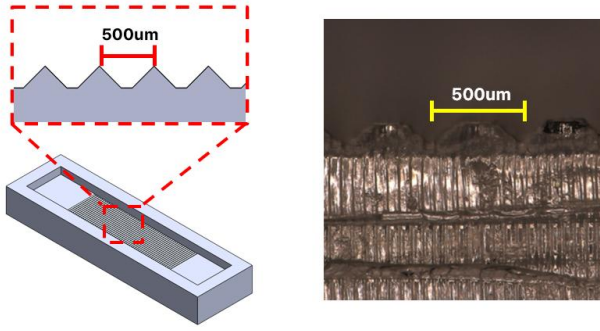


Figure 1. DLP 몰드와 형상이 전사된 PDMS 기판

2.3 전기적 측정 및 특성 평가

센서의 전기적 특성은 디지털 소스미터(SMU 2611B, Keithley Instruments)를 사용해 측정하였다. 반복 인장 시험은 인장력기를 활용하여 100 회의 사이클에서 전류 응답을 기록하여 안정성을 평가하였다. 또한, 에너지 인프라 구조물의 크랙 발생 모사를 위해 인장력기를 사용해 10% 인장 인가 후, 응답 특성을 평가하였다. 접착 특성은 아크릴 및 금속 기판 위에 접착 시험용 샘플을 통해 검증하였다.

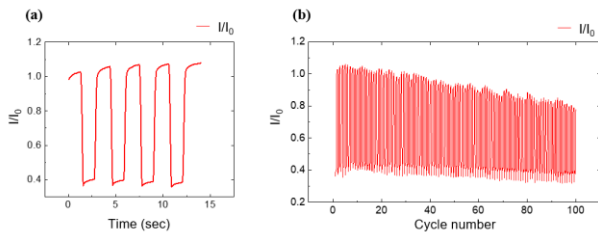


Figure 2. (a) Sensing test, (b) Cycle test

III. 결론

본 연구에서는 DLP 몰드의 부분경화 특성을 활용하여 자체 접착형 크랙 기반 PDMS 스트레인 게이지를 제작하였다. 제작된 센서는 별도의 접착제 없이 다양한 환경에서 안정적인 부착력을 가지며, 인장력기를 통한 구조물 변형 모사 실험에서도 반복적인 변형에 따른 전기적 응답을 유지하였다. 또한, 광학 현미경 분석과 반응 신호 측정을 통해 홈 구조 및 크랙 기반 스트레인 센서의 동작 메커니즘을 확인하였다. 기존의 크랙 기반 스트레인 센서가 고비용 공정 및 장기 부착 신뢰성이라는 단점을 가지는 반면, 본 연구의 센서는 저비용·단순 공정으로 제작 가능하여 대량생산에 유리하다. 게다가 센서 자체 접착성을 가져 현장 설치 과정이 간소화될 수 있어, 에너지 인프라 전반에 대규모로 적용하기 위한 경제성과 확장성을 동시에 확보할 수 있다. 따라서 제작된 센서는 향후 다양한 에너지 인프라 구조물의 변형 감지 및 결함 진단에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was partly supported by Institute for Korea Institute of Energy Technology Evaluation and planning (KETEP) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (No. 20202000000010) and Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE)(RS-2024-00410066, HRD Program for Industrial Innovation.

참 고 문 헌

- [1] Shin, S., Ko, B. & So, H. Structural effects of 3D printing resolution on the gauge factor of microcrack-based strain gauges for health care monitoring. *Microsyst Nanoeng* 8, 12 (2022).
- [2] Park S, Kim M, So H. TPU-assisted adhesive PDMS film for dry or underwater environments. *NPG Asia Mater.* 16:26, 2024.
- [3] Venzac B, Deng S, Mahmoud Z, Lenferink A, Costa A, Bray F, Otto C, Rolando C, Le Gac S. PDMS curing inhibition on 3D-printed molds: Why? Also, how to avoid it? *Anal. Chem.* 93:7180- 7187, 2021.