



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2021년 2월
석사학위 논문

전기수력학적 프린팅 기술을 이용한
실시간 모니터링 센서 메커니즘

조선대학교 대학원
항공우주공학과
김건영

전기수력학적 프린팅 기술을 이용한 실시간 모니터링 센서 메커니즘

Real-time Monitoring Sensor Mechanism Using
Electrohydrodynamic Printing Technology

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

항공우주공학과

김건영

전기수력학적 프린팅 기술을 이용한 실시간 모니터링 센서 메커니즘

지도교수 이 창 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

항공우주공학과

김 건 영

김건영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김태규 (인)

위원 조선대학교 교수 이현재 (인)

위원 조선대학교 교수 이창열 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
ABSTRACT	vi
제1장 서론	1
제2장 전기수력학적 프린팅 기술	3
제3장 EHD 잉크 개발 및 공정 기술의 품질 확보	6
제1절 고분자 PVP 함량에 따른 Ag+PVP 잉크 개발	6
1. 서론	6
2. 고분자 PVP 잉크 제작	7
3. EHD 패터닝 조건	8
4. 결과	9
제2절 압전 PZT/PVDF 복합잉크 개발	12
1. 서론	12
2. PZT/PVDF 복합잉크 제작	13
3. EHD 패터닝 조건	14
4. 유연성 평가	15
5. 결과	16

제3절 Ag와 PZT/PVDF 복합잉크의 유연 전도성 실험	20
1. 실험 구성 및 방법	20
2. 유연성 기판에서의 저항 특성	22
제4장 생체 모방을 통한 센서 민감도 향상	24
제1절 서론	24
제2절 실험 구성 및 방법	25
1. EHD 센서 패터닝	25
2. 거미의 감각기관을 모방한 균열 센서 제작	26
제3절 결과	28
제5장 구조 건전성 모니터링을 위한 메커니즘 검증	30
제1절 서론	30
제2절 센서 메커니즘	31
제3절 시험 구성 및 방법	33
1. 굽힘 시험	33
2. 충격 시험	35
제4절 결과	36
1. 굽힘 시험에서의 성능 평가	36
2. 충격 시험에서의 성능 평가	39
제6장 결론	41
참고문헌	42

LIST OF TABLES

표 2 - 1 실험에 사용된 잉크의 성분 및 폴리머 PVP 함량	7
표 2 - 2 Ag 잉크에서의 EHD 프린팅 패터닝 조건	8
표 2 - 3 폴리머 PVP 함량에 따른 전기전도도	11
표 3 - 1 실험에 사용된 잉크의 성분 및 PZT와 PVDF의 부피비	13
표 3 - 2 PZT/PVDF 복합잉크에서의 EHD 프린팅 패터닝 조건	14
표 4 - 1 센서 제작에 사용된 EHD 프린팅 패터닝 조건	25
표 5 - 1 시편과 굽힘하중의 실험적 설정	33

LIST OF FIGURES

그림 2 - 1 (a) EHD 패터닝 원리 및 개략도 (b) 전기장이 인가되지 않은 유체 메니스커스 (c) 전기장이 인가된 유체 메니스커스	3
그림 2 - 2 EHD 패터닝 실험 설정과 개략도	4
그림 2 - 3 실험에 사용된 EHD 장비의 설정과 구성	5
그림 3 - 1 고분자 PVP 함량에 따른 전자현미경 이미지	9
그림 3 - 2 고분자 PVP 함량에 따른 두께 비교	10
그림 3 - 3 곡률 반경 시험 설정과 개략도	15
그림 3 - 4 전압에 따라 패터닝된 라인의 두께 변화	16
그림 3 - 5 인쇄 속도에 따라 패터닝된 라인의 두께 변화	17
그림 3 - 6 PVDF의 부피비에 따른 패터닝된 라인의 두께 차이	18
그림 3 - 7 PZT와 PVDF의 부피비에 따른 곡률 반경에서의 발생된 크랙 크기	19
그림 3 - 8 다양한 굽힘 반경에서의 시편의 변형	20
그림 3 - 9 실험에 사용된 Ag 센서	21
그림 3 - 10 실험에 사용된 PZT/PVDF 센서	21
그림 3 - 11 상단 표면에서의 굽힘하중에 따른 저항 변화율	23
그림 3 - 12 하단 표면에서의 굽힘하중에 따른 저항 변화율	23
그림 4 - 1 거미의 외골격에 위치한 균열의 연속적인 구조	26
그림 4 - 2 거미의 감각기관을 모방한 센서	27

그림 4 - 3 (a) 센서 표면의 확대 이미지 (b) 센서에 증착된 Ag nano paste의 SEM 이미지	27
그림 4 - 3 하중에 따른 균열의 간격 변화	28
그림 4 - 5 굽힘하중에 따른 저항 변화	29
그림 5 - 1 손상 영역 모니터링을 위한 그리드 설계	31
그림 5 - 2 손상 모니터링을 위한 10 X 8 그리드 센서	32
그림 5 - 3 3D 프린터를 이용한 허니컴 코어 모델링	33
그림 5 - 4 굽힘하중 실험의 개략도	34
그림 5 - 5 굽힘하중 시험의 설정과 구성	34
그림 5 - 6 3D 프린터를 이용한 정사각 판 모델링	35
그림 5 - 7 충격 시험의 설정과 구성	35
그림 5 - 8 굽힘 시험에 따른 센서의 실시간 저항 변화	37
그림 5 - 9 굽힘하중에 따른 저항 변화	38
그림 5 - 10 충격 시험에 따른 센서의 실시간 저항 변화	40

ABSTRACT

Real-time Monitoring Sensor Mechanism using Electrohydrodynamic Printing Technology

Keon-Young Kim

Advisor : Prof. Chang-Yull Lee, Ph.D.

Department of Aerospace Engineering

Graduate School of Chosun University

Aircraft inspection methods have been developed with various individual technologies. Among them, the proposed mechanism overcomes several key weakness of conventional inspection methods. Currently, aircraft inspection using non-destructive testing is being conducted. However, non-destructive testing consumes a lot of time and money for testing. In particular, technologies that can be monitored in real time are needed to identify potential hazards arising during aircraft operation. This paper proposes a new detection mechanism to estimate and monitor microscopic damage to structures using electrohydrodynamic patterning technology. Sensors for monitoring are patterned into a grid structure using electrohydrodynamic technology. Polymer PVP is added to form a continuous pattern in order to increase the uniformity of the pattern and use of high viscosity ink. In addition, the piezoelectric ceramic PZT was mixed with the piezoelectric polymer PVDF to keep the line intact in the curved shape. The optimized polymer PVP content is 2 *wt%* and the volume ratio of PZT and PVDF is 7:3.

It mimics the spider's sensory organs to detect subtle deformations of the structure. The sensitivity of the sensor is increased by artificially implementing a continuous structure of cracks located in the spider's exoskeleton. Cracks show high resistance fluctuations due to increased spacing under load.

The sensor for real-time monitoring is composed of a grid structure by forming a patterned layer in the horizontal and vertical directions. The load test and impact test are used to verify the structural integrity monitoring

mechanism of the developed sensor. The sensor can estimate the deformation of the structure through the change in resistance and can accurately detect the location of the damage using the intersection of the damaged line. Therefore, the proposed mechanism is a powerful methodology for estimating and monitoring microscopic damage to structures.

제1장 서론

항공기의 대형 사고에서 보는 바와 같이 항공기 사고가 발생하면 항공기의 동체나 날개가 파손되어 재산 및 인명의 피해가 매우 크다. 따라서 항공기 사고는 잠재적 위험을 식별하고 예방하는데 매우 중요하다. 항공기는 작동 수명 동안 가볍고 안전하며 충분히 신뢰할 수 있어야 한다. 일반적으로 항공기는 고강도 알루미늄 합금 또는 금속으로 만들어지며 성능을 향상을 위해 상대적으로 높은 강도 대 중량 비율을 가지는 복합 재료를 사용하는 방향으로 이동하고 있다[1-4]. 하지만 항공기는 반복적 이착륙과 운행 중 발생하는 하중, 피로, 충격 등에 노출되어 운용되며 항공기의 복합 구조물에 여러 가지 형태의 서로 다른 유형의 손상이 발생한다. 이러한 하중에 의해 복합 구조물이 외부 충격을 받는 경우 매트릭스 균열, 섬유 절단, 압입 및 박리와 같은 균열이 내부적으로 발생한다. 발생한 균열은 점차 성장하여 한계에 도달하게 되며 결국 피로 수명에 미치지 못하고 파괴된다[5,6]. 따라서 균열의 조기 발견은 항공기의 심각한 손상을 방지하고 예방하는데 매우 중요한 요소이며 반복적 하중과 충격에 발생하는 손상을 방지하기 위한 파손 모니터링 분야에 대한 연구가 진행 중이다[7-11].

비파괴 검사는 구조물의 균열이나 결함을 파괴하지 않고 외부적으로 검사하는 방법으로 열전파, 단층촬영, 초음파 등 다양한 개별 기법으로 개발되고 있다 [12-14]. 하지만 Non-destructive testing (NDT), Non-destructive inspection (NDI), Non-destructive evaluation (NDE)와 같은 대부분의 비파괴 검사는 균일하게 분포된 미세 균열에 취약하고 복잡한 구조물의 내부 부품을 검사하기에는 어려움이 있다. 이러한 기존의 검사방법은 비용이 많이 들고 시간이 많이 소요되며 내부 검사를 위해 구조물을 분해 및 재조립해야 할 수 있다. 이는 항공기의 가동 시간을 감소시킴으로써 경제적 피해를 초래할 수 있다. 또한, 운용 중에 항공기를 검사할 수 없다는 치명적인 단점도 존재한다. 따라서 항공기 피로 파괴의 정확한 시간을 예측할 수 없으며, 유지 보수주기 사이에 발생하는 균열을 방지하기에는 한계가 있다.

현재 검사 기술의 단점을 극복하기 위해서는 구조 건전성 모니터링 기술이 필요하다. 구조 건전성 모니터링은 구조물에 대한 관리 및 유지를 목적으로 진단하는 일련의 과정으로 구조물에 적용되어 관찰함으로써 운용 중에 발생하는 하중, 피로,

균열 등에 의한 손상 감지가 가능하다[15]. 실시간 모니터링을 이용하여 구조물에 발생하는 문제점에 대한 정보를 축적하고 분석함으로써 잠재적 위험에 대한 솔루션을 제공한다. 따라서 항공기 운행 중 발생하는 사고에 대해 직관적으로 파악하여 대처할 수 있으며 불필요한 유지 보수 비용과 시간을 줄이고 항공기 검사에 높은 신뢰성을 제공한다[16-18].

구조 건전성 모니터링을 위한 방법으로 여러 가지 기술이 사용되고 있다. 그 중에서도 직접 쓰기 기술은 간단한 공정단계를 사용하고 폐기물을 줄여 생산비용을 줄이고 공정속도를 높인다. 또한, 직접 쓰기 기술은 진공이나 열환경과 같은 특수한 환경을 필요로 하지 않기 때문에 전도성 구조 및 디스플레이와 같은 다양한 분야에서 각광받고 있다[19-22]. 직접 쓰기 기법에서 분사된 잉크는 미세한 패턴을 형성하고 설정된 조건에 따라 기판 표면에 물질을 증착 또는 처리한다[23,24]. 직접 쓰기 기술에서 전기수력학적(EHD) 기술은 액체 표면에 가해진 전기적 및 물리적 힘에 의해 액체 표면을 끌어당겨 토출시키는 물리적 프로세스[25,26]로 노즐 끝단에서 표면장력에 의해 형성된 액체 메니스커스에 고전압을 인가하면 Taylor-cone[27] 형태로 변한다. 이것은 노즐의 크기를 제한하지 않고 더 미세한 패턴을 형성할 수 있다. 이는 구조물에 발생하는 미세한 균열을 검출하기 위한 미세 패턴 기술을 제공한다. 따라서 전기수력학적 기술을 이용하여 미세 패턴을 형성함으로써 구조물의 건전성 모니터링을 위한 센서를 개발하고자 한다.

본 논문에서는 전기수력학적 기법을 이용한 새로운 손상 모니터링 메커니즘을 제안한다. 센서는 패턴닝은 EHD 인쇄 공정에서의 최적화를 통해 격자 구조 그리드를 형성하였으며 생체 모방을 통해 센서의 민감도를 향상시키고자 하였다. 센서는 굽힘 시험과 충격 시험을 통해 구조물이 손상되는 동안 실시간으로 모니터링되며 저항 변화를 기반으로 구조물의 손상된 부위의 위치를 추정하였다.

제2장 전기수력학적 프린팅 기술

EHD 잉크젯 프린팅 기술은 전기장을 노즐과 기판에 전기장을 인가하여 유체를 토출시키는 기술이다. 전도성을 가지는 잉크에 인가된 전계는 노즐의 직경보다 더 얇은 토출을 허용한다. 그림 2 - 1의 (a)는 일반적인 EHD 패터닝의 원리 및 개략도이다. 잉크 토출을 위해 노즐 챔버를 지속적으로 가압하면 노즐 끝단에서 잉크가 가지는 표면장력에 의해 반구 형태의 메니스커스가 형성된다. 유체 메니스커스가 고전압이 인가되는 노즐 끝단에 형성될 때, 메니스커스는 cone-jet 형태로 변하게 되며 노즐의 직경보다 얇은 패터닝이 가능하다. 그림 2 - 1의 (b)와 (c)는 기존의 잉크젯 패터닝과 EHD 패터닝 사이의 토출되는 해상도 차이를 보여준다. 기존의 잉크젯 패터닝은 유체의 특성에 의한 노즐의 직경보다 큰 메니스커스 형성 및 노즐 직경의 한계 등으로 인하여 수백 마이크로 단위의 제한된 범위에서의 패터닝이 가능한 한계점이 존재한다. EHD 패터닝 기술은 노즐 끝단에 형성된 메니스커스에 정전기력을 인가하여 토출하는 방식으로써 노즐의 직경보다 미세한, 나노 스케일까지 패턴 구현이 가능하다.

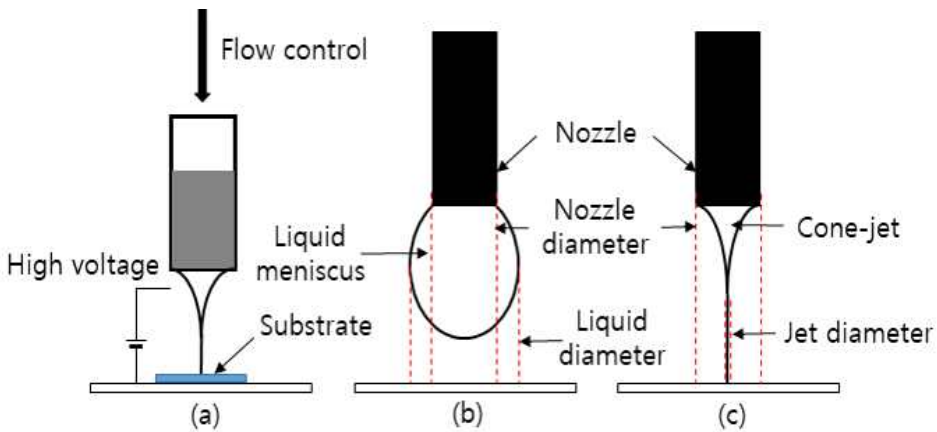


그림 2 - 1 (a) EHD 프린팅 원리 및 개략도. (b) 전기장이 인가되지 않은 유체 메니스커스. (c) 전기장이 인가된 유체 메니스커스

그림 2 - 2와 2 - 3은 패터닝 실험에 사용된 EHD 장비와 실험 설정의 구성이다. 유량 제어기를 통해 설정된 유량으로 잉크를 공급하고 패턴 형성을 위해 노즐 팁과 기판 사이에 고전압을 인가한다. 3축 구동 시스템을 통해 X-Y축 방향으로 기판상에 패턴을 형성한다. Z축 방향은 노즐과 기판 사이의 거리를 조절할 수 있다. 노즐과 기판 사이의 거리는 패턴 형성에 있어 중요한 요소이다. 거리 조절이 올바르지 않으면 휘핑이나 스프레이 등 토출 시 끊어지는 불안정한 패터닝이 발생한다. 고전압 증폭기를 통해 전압을 인가하여 전기장을 형성시키며 잉크 대전을 위한 정전기력 패터닝 헤드로 구성되어있다. CCD 카메라를 통해 노즐 팁에 형성된 메니스커스를 관찰하여 제어할 수 있다.

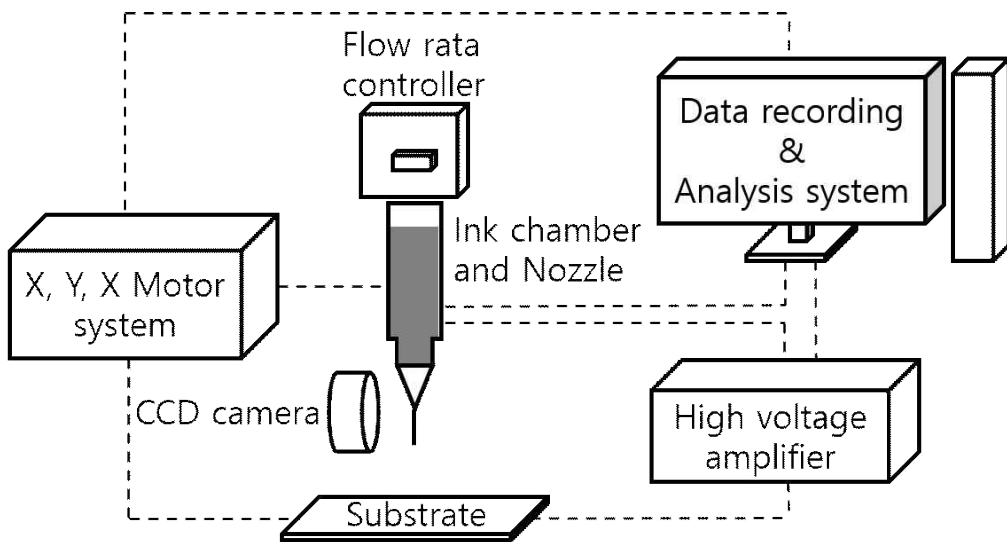


그림 2 - 2 EHD 패터닝 실험 설정과 개략도

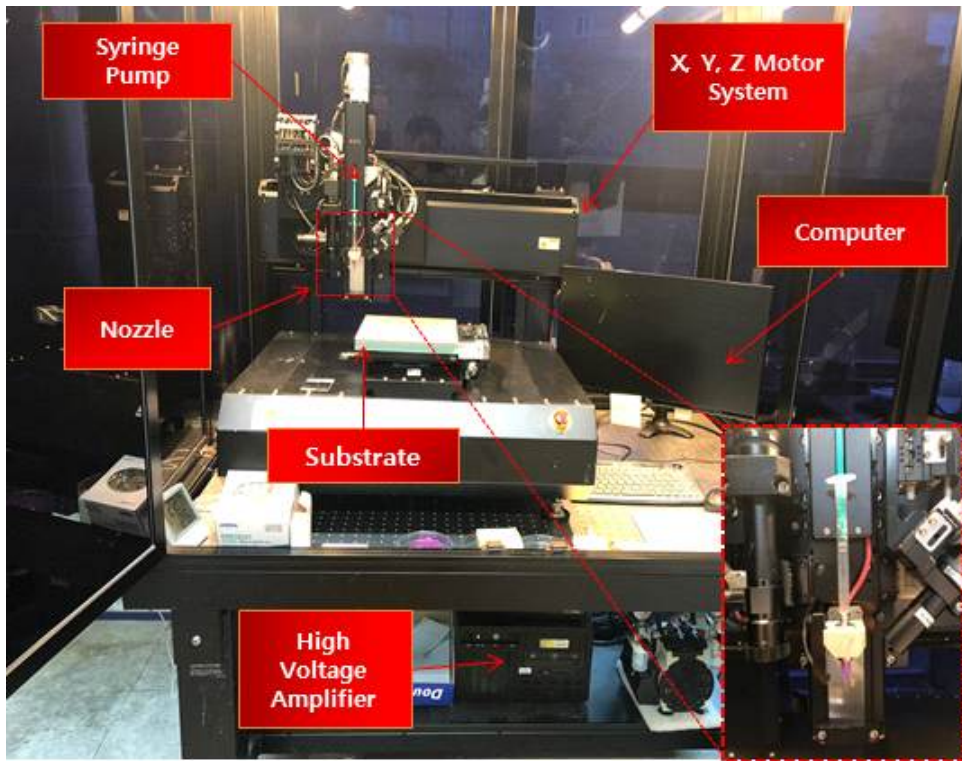


그림 2 - 3 실험에 사용된 EHD 장비의 설정과 구성

제3장 EHD 잉크 개발 및 공정 기술의 품질 확보

제1절 고분자 PVP 함량에 따른 Ag 잉크 개발

1. 서론

이 장에서는 고분자 PVP를 사용한 EHD 패터닝에 대해 설명한다. 격자 구조의 센서 패터닝을 위해서는 반복적인 패턴 형성이 가능하며 토출 시 끊어짐 없는 신뢰성 있는 패터닝이 필요하다. EHD 패터닝 공정 조건에서 안정적인 토출을 위해서는 여러 가지의 복합적 요소들이 중요하게 적용되지만, 전기수력학적 패터닝 특성상 고분자의 특성 및 점성의 영향을 받는다.

연속적인 패턴 형성을 위해서는 잉크가 기판상에 지속적으로 연신되어 토출되어야 한다. 이를 위해 제조된 잉크 내부에 고분자끼리의 체인(chain) 형성이 필요하다[28]. 체인이 형성된 잉크에서는 전반적으로 점도가 증가하게 되며 잉크 내에 접착력을 유지시켜준다. 고분자가 함유되지 않은 잉크에서는 패터닝 시 끊어지는 불안정한 토출이 발생할 수 있다. 따라서 잉크 내부에 고분자의 체인 형성 및 유지가 필수적이며 잉크에 적정 고분자 첨가물을 혼합하여 센서 패터닝을 위한 최적의 잉크를 개발하여야 한다.

이 장의 목적은 센서 제작에 적합한 인쇄 최적화를 통해 균일하고 반복 가능한 형태의 Ag 잉크의 패턴을 형성하고 섬유의 두께를 줄임으로써 다양한 PVP 함량 비율로 최적화된 인쇄 조건을 조사하는 것이다.

2. 고분자 PVP 잉크 제작

고분자 잉크를 제작하기 위해 Ag nano paste에 두 가지 용매 Alpha-terpineol과 Diethylene glycol monobutyl ether acetate를 혼합한 잉크에 Polyvinylpyrrolidone powder를 첨가하였다. 고분자 PVP 잉크의 제작과정의 세부 단계는 아래에 제시하였다.

- a. Solvent는 계면활성제인 Alpha-terpineol과 무극성 용매인 DB acetate (Diethylene glycol monobutyl ether acetate)를 혼합하여 제조한다.
- b. Ag nano paste와 solvent를 66.56 wt% : 33.44 wt%의 질량비로 혼합한다.
- c. 제조된 Ag 잉크에 고분자 PVP를 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%씩 첨가되며 교반기를 이용하여 4시간 동안 70℃에서 충분히 교반한다.

잉크의 성분표는 표 2 - 1에 나타내었다.

표 2 - 1 실험에 사용된 잉크의 성분 및 폴리머 PVP 함량

Ink	Ag [wt%]	Solvent [wt%] (Alpha-terpineol + DB acetate)	Composition	
			Ag + Solvent [wt%]	PVP [wt%]
Ink1	66.56	33.44	100	0
Ink2	66.56	33.44	99	1
Ink3	66.56	33.44	98	2
Ink4	66.56	33.44	97	3

3. EHD 패터닝 조건

실험에 사용된 EHD 패터닝 장비는 Enjet에서 개발하고 상용화된 장비를 사용하였으며 실험에 사용된 노즐은 30GA 이다. 잉크를 지속적으로 주입하기 위해 3 μ l 유량으로 잉크 챔버를 가압하였다. 고분자 PVP의 함량에 따른 인쇄 특성을 비교하기 위해 EHD 패터닝 속도와 전압은 동일한 값에서 패터닝 되었다. 실험에 사용된 EHD 패터닝 조건은 Table 2 - 2에 나타내었다.

표 2 - 2 Ag 잉크에서의 EHD 프린팅 패터닝 조건

Conditions	Values
Acceleration	200 mm/s^2
Fast move speed	200 mm/s
Print speed	300~500 mm/s
Z Working position	1800 μm
DC voltage	1.8~2.0 kV
Flow late	3 μl

4. 결과

센서 제작에 최적화된 잉크 개발을 위해 다양한 고분자 PVP 함량이 첨가된 잉크의 성분비율을 Table 1에 나타내었다. Ag 나노 잉크에 첨가된 고분자 PVP는 0 wt%, 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%이다. 그림 3 - 1은 다양한 고분자 PVP 함량에 따라 기판에 증착된 Ag 잉크를 전자현미경으로 촬영한 이미지다. 결과 이미지에 따르면 고분자 첨가물의 함량이 적을수록 증착된 Ag 표면의 결함이 증가하였다. 잉크가 기판에 증착될 때 잉크가 지속적으로 연신되지 않아 균일하지 않은 토출이 이루어졌다. 따라서 최종 경화 과정에서 Ag가 증착되지 않은 표면에서 용매가 증발하여 잉크 표면에 구멍이 발생하였다. 고분자가 첨가된 잉크에서는 고분자끼리의 체인이 형성되어 잉크 내부에 접착력을 유지시켜 잉크의 점도가 증가하였다. 따라서 고분자가 함유된 1 wt%와 2 wt%에서는 고속의 패터닝 조건에서도 끊어짐 없는 균일한 토출이 이루어졌다. 하지만 고분자가 3 wt% 이상 첨가될 경우 잉크 내부의 접착력이 강해 토출 시 노즐 끝단에서 cone-jet이 형성되지 않으며, 노즐 막힘 현상으로 인해 센서 패턴 형성에 적합하지 못한 토출이 이루어졌다.

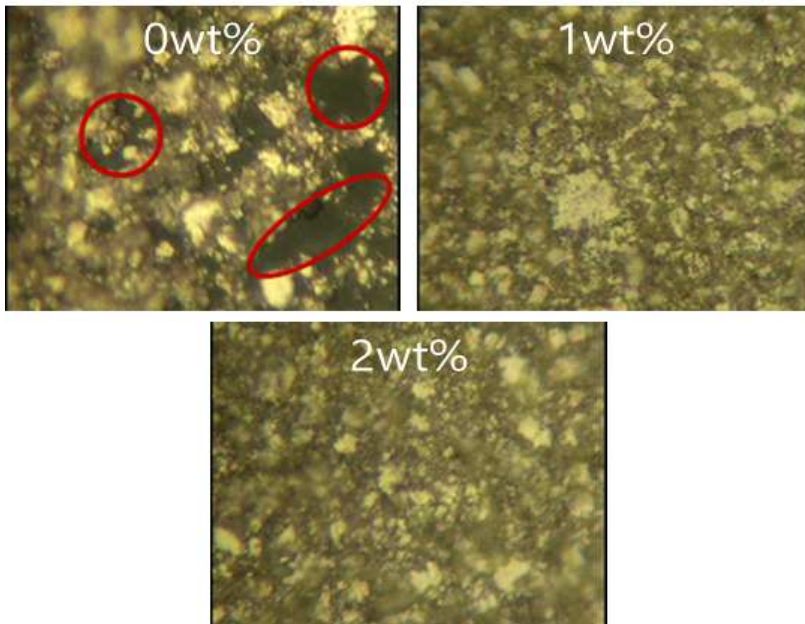


그림 3 - 1 고분자 PVP 함량에 따른 전자현미경 이미지

센서 패터닝에서 라인의 두께와 사이 간격에 따라 크랙을 감지할 수 있는 센서의 성능이 좌우된다. 패터닝된 라인의 두께가 감소할수록 미세 크랙에 민감하게 반응하며 패턴의 사이 간격이 감지할 수 있는 크랙의 크기를 결정한다. 따라서 토출되는 라인의 두께는 센서 제작의 중요한 요소이다. 그림 3 - 2는 다양한 고분자 PVP 함량에 따라 패터닝된 라인의 두께 차이를 전자현미경으로 촬영한 이미지이다. 고분자 함량에 따라 0 wt%에서 56 μm , 1 wt%에서 43 μm , 2 wt%에서 37 μm 의 크기로 고분자의 함량이 높을수록 토출되는 잉크의 두께가 감소하였다. 잉크는 노즐 팁과 기판 사이에 인가되는 전압에 의해 기판 쪽으로 잡아 당겨진다. 이에 인쇄 속도가 증가함에 따라 X-Y축 기판에서 X축 방향의 힘이 증가하게 되며 토출되는 섬유를 늘어트린다. 따라서 잉크 내부의 접착력이 강할수록 높은 인쇄 속도를 적용시킬 수 있다. 따라서 가장 높은 인쇄 속도에서 토출된 고분자 2 wt%에서 37 μm 의 두께로 가장 얇은 토출이 이루어졌다.

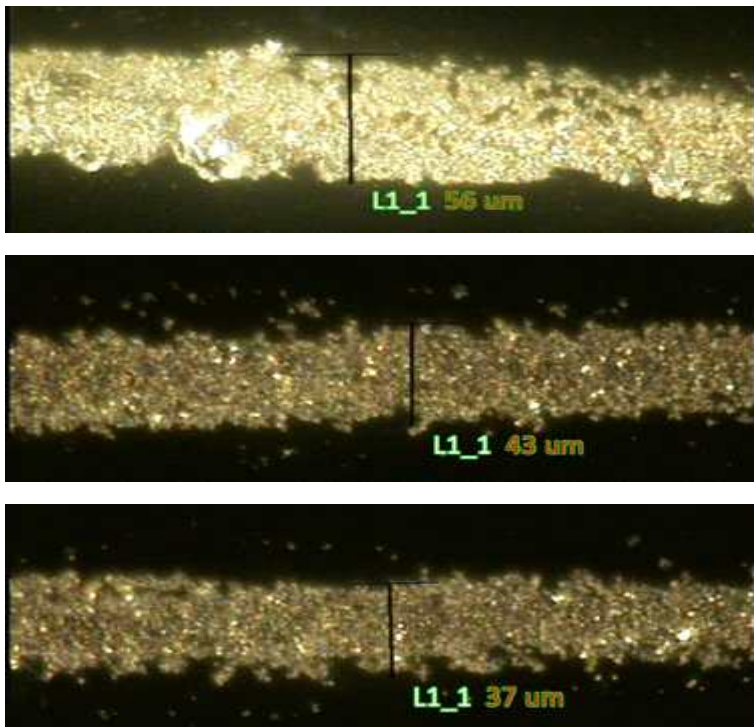


그림 3 - 2 고분자 PVP 함량에 따른 두께 비교

고분자 함량에 따른 전기전도도는 Table 3에 나타내었다. 고분자의 함량에 따른 측정된 전기전도도는 0 wt%에서 0.000434 S/cm으로 가장 낮은 전기전도도를 보였으며 고분자 함량이 1 wt%에서 가장 높은 0.00197 S/cm의 전기전도도가 측정되었다. 가장 얇게 토출된 고분자의 함량 2 wt%에서는 0.00138 S/cm의 전기전도도가 측정되었다. 결과적으로 고분자가 첨가되지 않은 잉크보다 고분자가 첨가된 잉크에서 높은 전기전도도가 측정되었다. 고분자가 첨가되지 않은 잉크에서는 패터닝 도중 라인이 얇아지거나 균일하지 못하고 틈이 발생하여 저항이 높게 측정되었다. 따라서 고분자가 첨가되지 않은 잉크에서 가장 두껍지만 가장 낮은 전기전도도가 측정되었다. 고분자가 첨가된 잉크에서는 고분자가 첨가되지 않은 잉크보다 패터닝된 라인이 얇지만 토출된 잉크 Ag의 밀도가 높고 균일하여 높은 전기전도도가 측정되었다. 또한 고분자 함량이 1 wt%에서 0.00197 S/cm로 2 wt%의 0.00138 S/cm보다 높은 전기전도도가 측정되었다. 고분자 함량이 증가함으로써 잉크의 접착력과 점도가 증가하게 되지만 잉크 내부의 전기전도성이 높은 Ag 비율이 감소하게 된다. 따라서 고분자가 1 wt% 첨가된 잉크에서 가장 높은 전기전도도가 측정되었다.

표 2 - 3 폴리머 PVP 함량에 따른 전기전도도

Polymer content	0 wt%	1 wt%	2 wt%
Electrical conductivity (S/cm)	0.000434	0.00197	0.00138

제2절 압전 PZT/PVDF 복합잉크 개발

1. 서론

이 장에서는 압전 특성을 가지는 PZT/PVDF의 복합잉크를 사용한 EHD 패터닝에 대해 설명한다. 압전소자는 구조물의 변화를 관찰하고 추정하는 데 사용된다. PZT는 대표적인 압전 세라믹으로 우수한 압전 및 유전 특성 때문에 구조 건전성 모니터링을 위한 구조물의 동적 응답을 측정하는 센서로 사용되고 있다[29]. 감지된 응답은 충격과 손상, 균열과 같은 구조물에서 발생하는 결함을 식별하여 구조물을 평가하고 제어할 수 있다[30,31]. 하지만 항공기 날개와 같이 하중에 의해 곡률 변화가 발생하는 구조물에서의 모니터링을 위해서는 곡선 형상에서의 유지가 필수적이다. PZT는 재료의 취성으로 인해 곡선 형상의 구현이 어려우며 센서의 재사용성이 제한되기 때문에 PZT를 이용한 센서 제작에는 한계가 있다. 반면 PVDF는 세라믹 대비 압전 성능은 떨어지지만 높은 비 반응성, 유연성, 압전 특성을 가지는 폴리머이다[32-34]. 이러한 기능은 곡선 현상에서 발생하는 구조물의 동적 응답을 감지할 수 있게 한다. 따라서 PZT와 PVDF의 복합화를 통해 곡선 형상에서 압전라인이 유지될 수 있다.

이 장의 목적은 곡선 형상에서의 사용이 가능한 패턴 형성을 위해 PZT와 PVDF의 다양한 함량 비율로 최적화된 인쇄 조건을 조사하는 것이다. 또한, 다양한 공정 변수를 이용하여 섬유의 두께를 줄이고 연속적인 패턴 형성을 위한 인쇄 최적화를 이루었다.

2. PZT/PVDF 복합잉크 제작

PZT/PVDF 복합잉크를 제조하기 위해 두 가지 용매 DMF와 Acetone을 사용한 solvent에 PZT(Lead zirconate titanate)와 PVDF(Polyvinylidene fluoride)를 다양한 부피비로 혼합하여 제조하였다. PZT/PVDF 잉크의 제조과정의 세부 단계는 아래에 제시하였다.

- a. Solvent는 DMF(N,N-Dimethylformamide)와 Acetone을 5:5 비율로 혼합하여 제조한다.
- b. PZT와 PVDF는 9:1, 8:2, 7:3, 6:4의 부피비로 혼합하여 제조한다.
- c. 다양한 부피비로 제조된 PZT와 PVDF의 복합잉크는 solvent와 1:1 비율로 혼합하였으며 교반기를 이용하여 72시간 동안 70℃에서 충분히 교반한다.

PZT/PVDF 복합잉크의 성분표는 표 3 - 1에 나타내었다.

표 3 - 1 실험에 사용된 잉크의 성분 및 PZT와 PVDF의 부피비

Ink	PZT [wt%]	PVDF [wt%]	Solvent [wt%]
			(N,N-Dimethylformamide + Acetone)
Ink1	45	5	50
Ink2	40	10	50
Ink3	35	15	50
Ink4	30	20	50

3. EHD 패터닝 조건

실험에 사용된 EHD 패터닝 장비는 앞 절에서 언급한 Enjet의 장비를 사용하였다. 연속적인 토출을 위해 잉크는 5 μl 의 유량으로 주입되었고 실험에 사용된 노즐은 30GA 크기의 노즐이 사용되었다. 복합잉크에서의 최적화된 인쇄 조건을 조사하기 위해 전압과 인쇄 속도를 달리하여 패터닝 되었다. 실험에 사용된 EHD 패터닝 조건은 Table 3 - 2에 나타내었다.

표 3 - 2 PZT/PVDF 복합잉크에서의 EHD 프린팅 패터닝 조건

Conditions	Values
Acceleration	300 mm/s^2
Fast move speed	100 mm/s
Print speed	200~500 mm/s
Z Working position	2000 μm
DC voltage	2.7~3.0 kV
Flow late	5 μl

4. 유연성 평가

최적화된 인쇄 조건으로 패터닝된 PZT/PVDF 복합잉크는 유연성 기판인 PET 필름에 패터닝 되었으며 다양한 부피비에 따라 4개의 압전라인을 형성하였다.

유연성 평가를 위한 곡률반경은 다음 식 (1)과 같이 정의된다[35].

$$r = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (1)$$

L 기판 길이

dL 굽힘 시 변형 거리

h_s 기판의 두께

그림 3 - 3은 유연성 평가를 위한 굽힘 시험의 개략도이다. 형성된 라인은 3D 프린터로 제작된 굽힘 시험기를 이용하여 구부러졌으며 10 mm, 20 mm, 30 mm의 곡률 반경에서 균열의 발생 여부를 확인하였다.

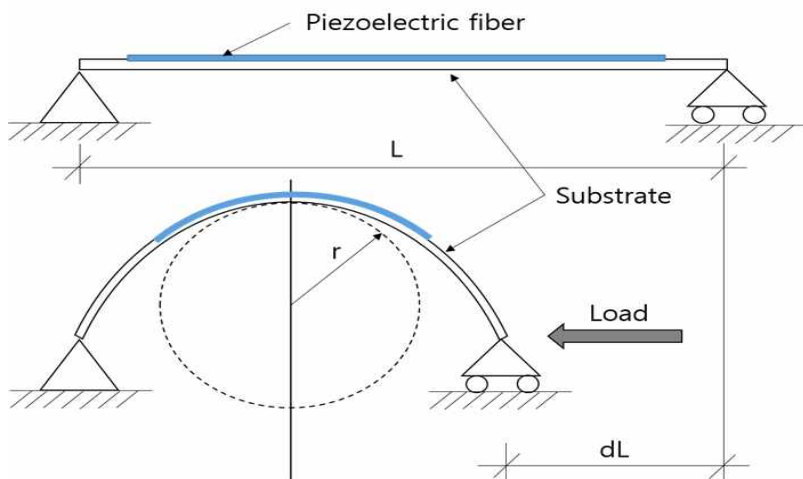


그림 3 - 3 곡률 반경 시험 설정과 개략도

5. 결과

전기수력학적 패터닝에서 적용된 전압은 토출의 주요 요인 중 하나로 작용한다. 인쇄 조건을 동일하게 적용하고 전압의 세기를 달리하였을 때 그림 3 - 4의 결과에서 볼 수 있듯이 전압이 증가할수록 패터닝된 나노 섬유 두께가 감소하였다. 낮은 전압에서 인가된 전압은 노즐 끝단에 생성되는 메니스커스를 Cone-jet 형태로 변형시키기에 충분한 정전기력을 생성할 수 없기 때문에 높은 전압에서 토출되는 나노 섬유보다 비교적 두껍게 형성되었다. 2.9~3.0 kV에서 안정적인 Cone-jet이 형성되어 이상적인 토출이 이루어졌으며 3.1 kV 이상의 전압에서는 높은 정전기력에 의해 토출 시 끊어지는 현상이 발생하였다.

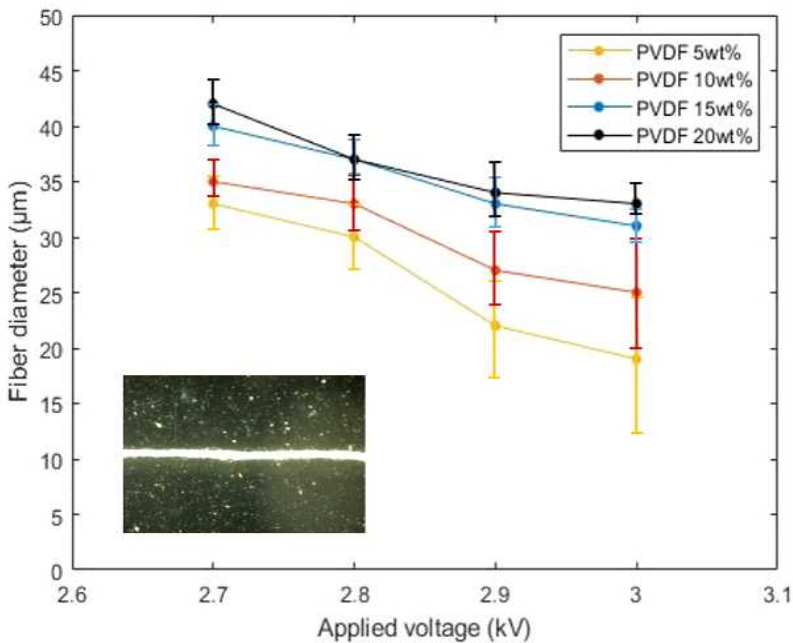


그림 3 - 4 전압에 따라 패터닝된 라인의 두께 변화

그림 3 - 5는 인쇄 속도에 따른 압전라인의 두께 변화를 보여준다. 인쇄 조건은 속도를 제외한 모든 조건을 동일하게 적용하였으며 결과 그래프에서 보여주듯이 속도가 증가할수록 압전라인의 두께는 감소하였다. 토출되는 잉크는 인가되는 전압에 의해 기관 쪽으로 잡아 당겨진다. 이에 인쇄 속도가 증가함에 따라 X-Y축 기관에서 X축 방향의 힘이 증가하게 되며 토출되는 섬유를 늘여트린다. 따라서 인쇄 속도의 증가는 토출되는 섬유의 두께에 영향을 미치며 500 mm/s에서 가장 얇은 패턴이 형성되었다. 500 mm/s 이상의 속도에서 두께의 변화는 미세하며 속도를 과도하게 증가시킬 시 토출되는 섬유가 끊어져 연속적인 패턴의 형성이 불가능하다. 결과적으로 압전라인의 형성에 가장 이상적인 조건은 3.0 kV의 전압과 500 mm/s 속도로 나타났다.

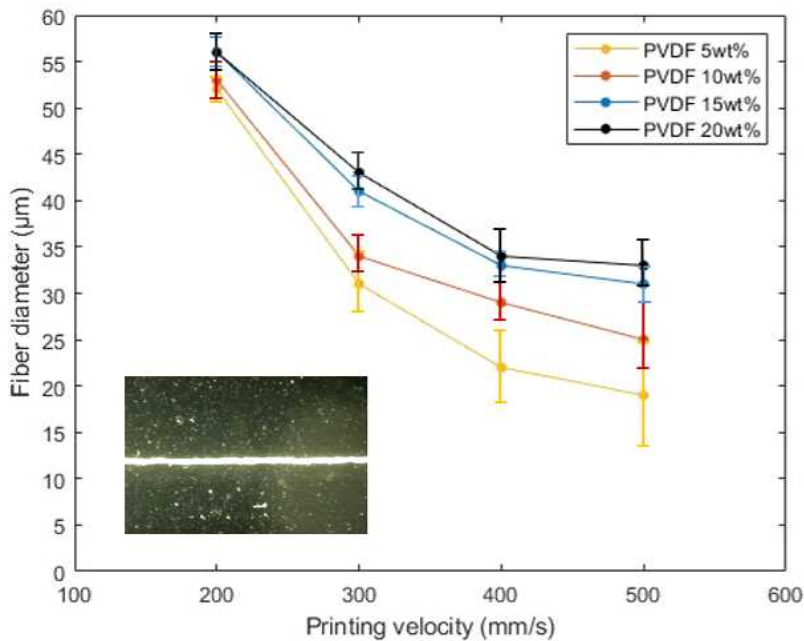


그림 3 - 5 인쇄 속도에 따라 패터닝된 라인의 두께 변화

앞 장에서 언급한 바와 같이 격자 구조 센서는 패터닝된 라인의 두께와 사이 간격에 의해 센서의 성능이 좌우된다. 따라서 개발된 잉크에 따라 미세한 토출이 이루어질 수 있는 패터닝 조건을 갖추어야 한다. 실험에 사용된 패터닝 조건은 3.0 kV의 전압과 500 mm/s의 인쇄 속도이다. PZT와 PVDF는 9:1, 8:2, 7:3, 6:4의 부피비로 제작되었으며 제작된 잉크의 성분비율은 표 3 - 4에 나타내었다. 그림 3 - 6은 PZT와 PVDF를 다양한 부피비에 따라 유연성 기판에 증착된 잉크의 두께 차이를 전자현미경을 사용하여 촬영한 이미지이다. 패터닝 결과 PVDF의 함량이 감소할수록 증착된 라인의 표면에 결함이 발생하였다. 잉크가 기판에 증착될 때 압전 폴리머인 PVDF의 함량이 감소할수록 잉크가 기판에 지속적으로 연신되지 않아 최종 소결 과정에서 용매가 증발하여 라인 표면에 미세한 구멍과 같은 결함이 발생하였다. 따라서 PZT/PVDF의 9:1 부피비에서 가장 얇은 패터닝이 이루어졌지만 패터닝된 라인에 결함이 발생하지 않고 가장 얇은 토출이 이루어진 부피비는 8 : 2로 나타났다.

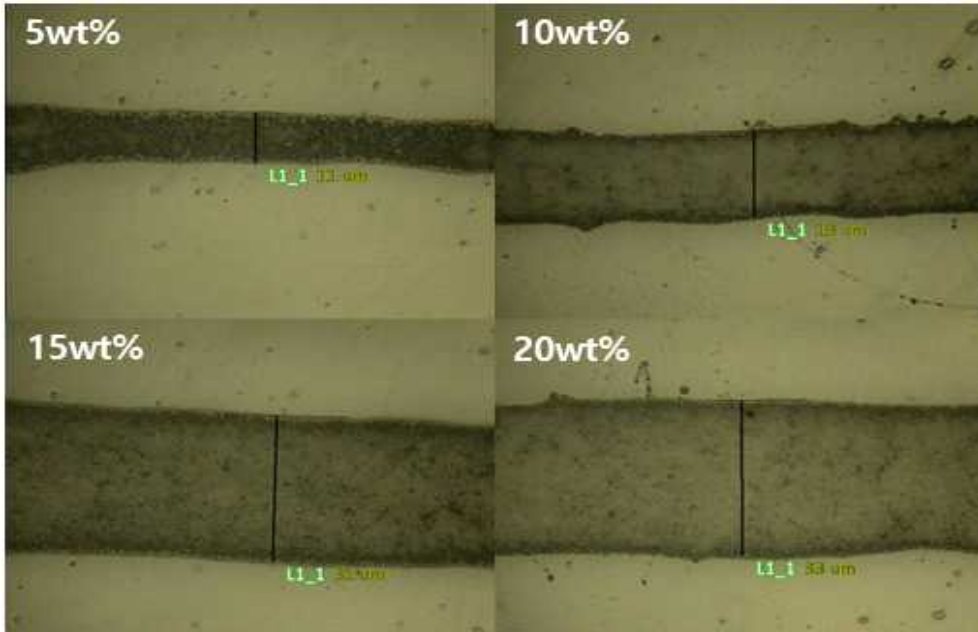


그림 3 - 6 PVDF의 부피비에 따른 패터닝된 라인의 두께 차이

그림 3 - 7은 PZT와 PVDF의 부피비에 따른 곡률 반경에서 섬유에 발생하는 균열의 크기를 보여준다. 결과 이미지에 따르면 PVDF 함량이 감소할수록 균열의 크기가 증가한다. PVDF인 압전 고분자의 양이 증가할수록 PZT의 세라믹 특성이 감소하여 압전라인의 연성이 증가하게 된다. 따라서 곡선 형상에서 균열이 발생하지 않고 유지될 수 있다. PVDF 함량 10 wt% 이하에서부터 곡선 형상에서 압전라인이 유지되지 못하고 균열이 발생하였다. 15 wt% 이상 함유된 압전라인에는 균열이 발생하지 않고 유지되었다. PVDF 5 wt% 함유된 압전라인은 곡률 반경 30 mm의 적은 변형에서도 균열이 발생하며 PVDF가 함유되지 않은 압전라인은 소결 과정에서 용매가 증발함과 동시에 미세 균열이 발생하였다. 따라서 센서 제작에 최적화된 PZT와 PVDF의 부피비는 7 : 3으로 나타났다.

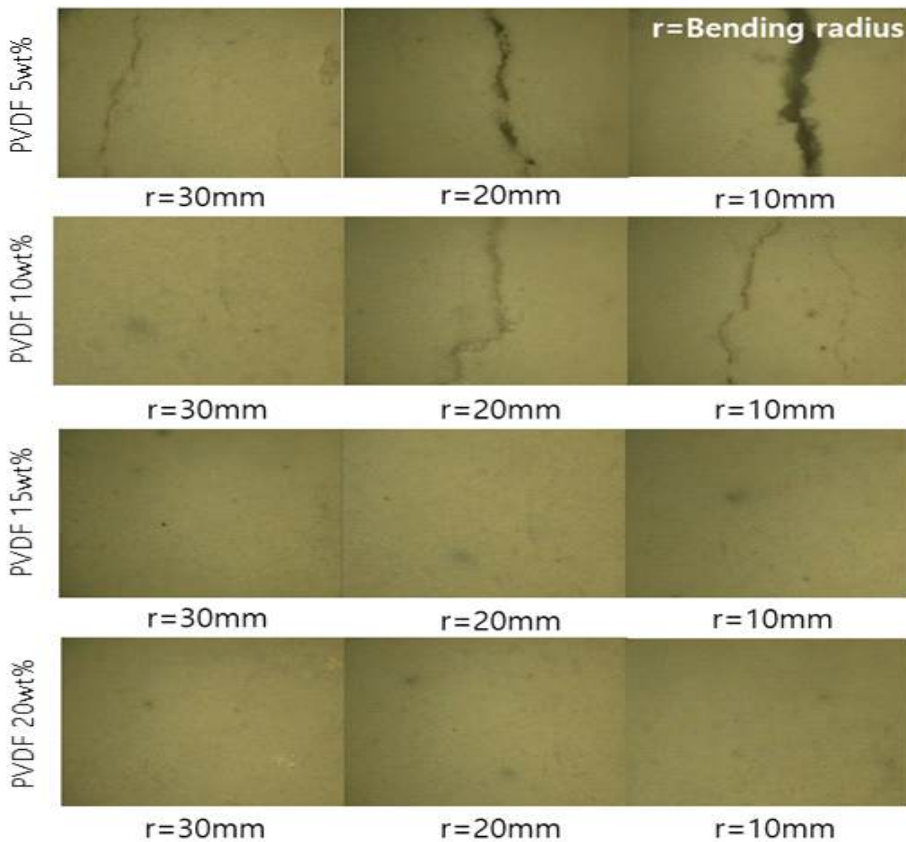


그림 3 - 7 PZT와 PVDF의 부피비에 따른 곡률 반경에서 발생된 크랙 크기

제3절 Ag 잉크와 PZT/PVDF 복합잉크의 유연 전도성 실험

1. 실험 구성 및 방법

앞 절에서 개발된 Ag+PVP 잉크와 PZT/PVDF 복합잉크의 유연성 기판에서의 저항 특성을 비교하기 위해 시편에 부착되어 굽힘하중에 의해 구부러졌다. 시편은 3D 프린터를 이용하여 ($10\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 3\text{ mm}$)의 크기로 제작하였으며 Ag+PVP와 PZT/PVDF 센서는 제작된 시편의 외부 (그림 3 - 8의 상단 표면) 또는 내부 (그림 3 - 8의 하단 표면)에 부착하였다. 그림 3 - 9는 실험에 사용된 Ag+PVP 센서이며 그림 3 - 10은 PZT/PVDF 센서이다. Ag+PVP 센서와 PZT/PVDF 센서는 각각 굽힘 반경에서 시편이 완전히 파손될 때까지 DAQ를 통해 실시간으로 모니터링되었으며 시편은 로딩 후 30 mm 에서 완전히 파손되었다.

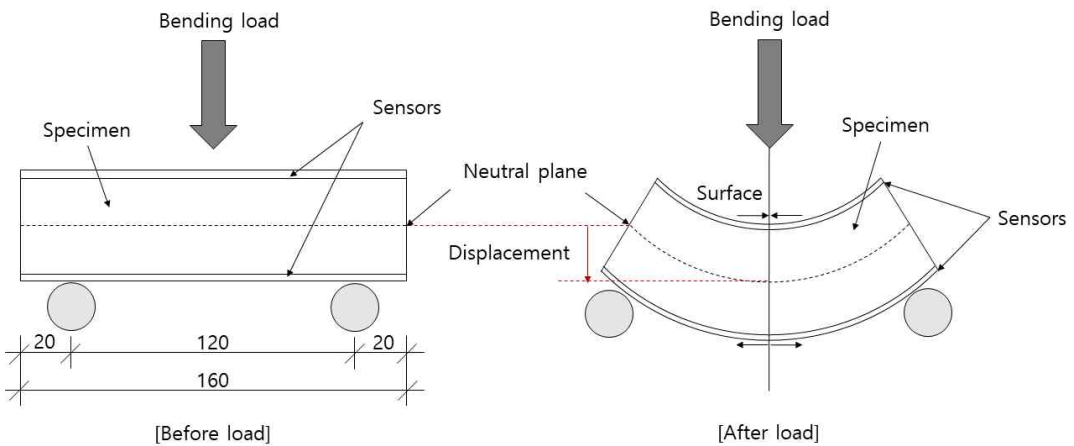


그림 3 - 8 다양한 굽힘 반경에서의 시편의 변형

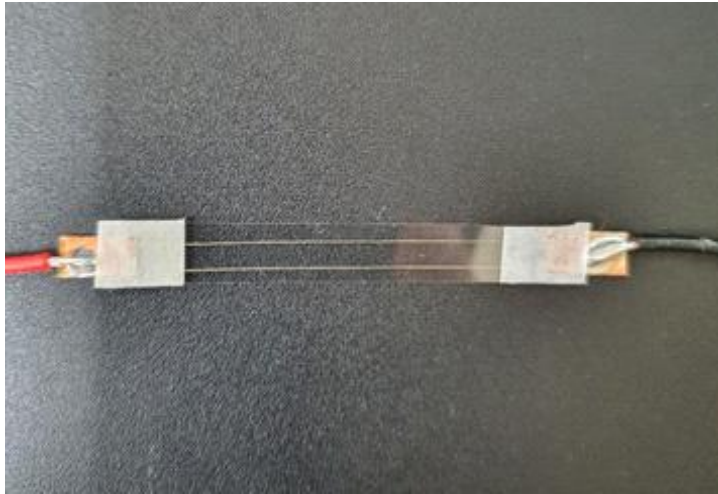


그림 3 - 9 Ag+PVP 센서

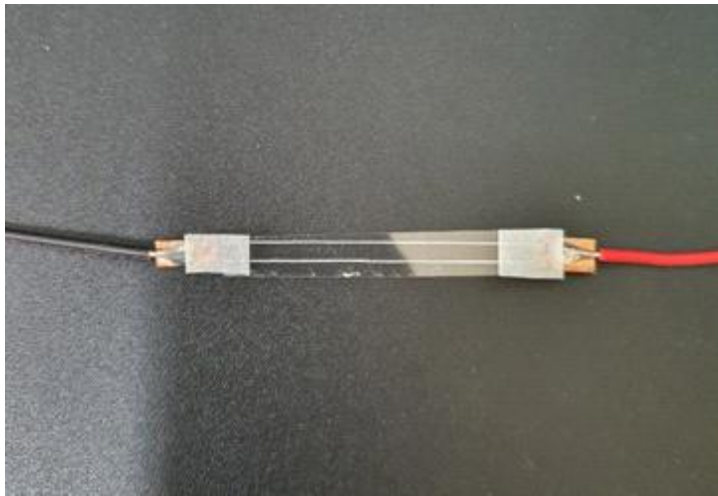


그림 3 - 10 PZT/PVDF 센서

2. 유연성 기판에서의 저항 특성

그림 3 - 11과 그림 3 - 12는 굽힘하중에 따른 저항 변화율을 보여준다. 저항 변화율은 $\Delta R/R_0$ 으로 표시되며, 여기서 R_0 는 초기 저항이고 ΔR 은 변화된 저항을 나타낸다. 결과 그래프에 따르면 상단 표면에서의 하중은 저항을 증가시키고 하단 표면에서의 하중은 저항을 감소시켰다. 그림 3 - 11의 상단 표면에서 파손 직전의 저항 변화율은 Ag+PVP 센서에서 2.5, PZT/PVDF 센서에서 2.2로 나타났다. 따라서 Ag+PVP 센서가 시편이 파손되기 직전에 더 민감하게 반응하였다. 그러나 25 mm까지 하중을 가했을 때의 저항 변화율은 Ag+PVP 센서에서 1.4로 파손 직전의 저항 변화율에 비해 낮은 저항 변화가 나타났다. PZT/PVDF 잉크에서는 파손 직전의 센싱 능력은 Ag+PVP에 비해 낮지만 전체적인 저항 변화율은 균일하게 증가하여 안정적인 응답을 나타냈다. 그림 3 - 12의 하단 표면에서는 파손 직전의 저항 변화율은 Ag+PVP 센서에서 0.9, PZT/PVDF 센서에서 0.6으로 나타났다. 또한, 전체적인 저항 변화율에서 PZT/PVDF 센서가 Ag+PVP 센서보다 높은 저항 변동을 보여주며 압전 소자가 압축 응력에 의한 저항 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그 결과, 하단 표면의 굽힘하중 하에서 PZT/PVDF 센서에서 더 높은 저항 변화가 측정되었으며 Ag+PVP 센서보다 민감하게 반응하였다. 결과적으로 파손 직전의 센싱 능력은 Ag+PVP 센서가 우수하고 하중에 따른 균일한 저항 변화로 안정적인 센싱 능력은 PZT/PVDF 센서가 우수하다.

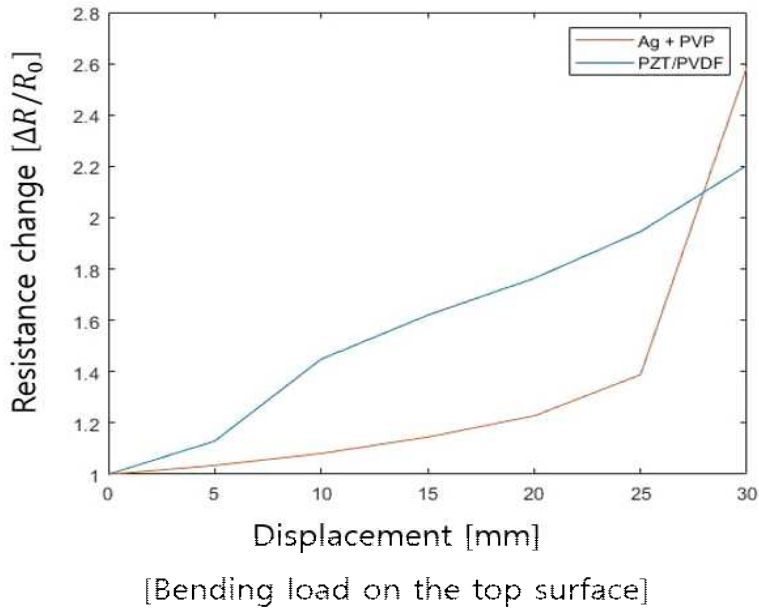


그림 3 - 11 상단 표면에서의 굽힘하중에 따른 저항 변화율

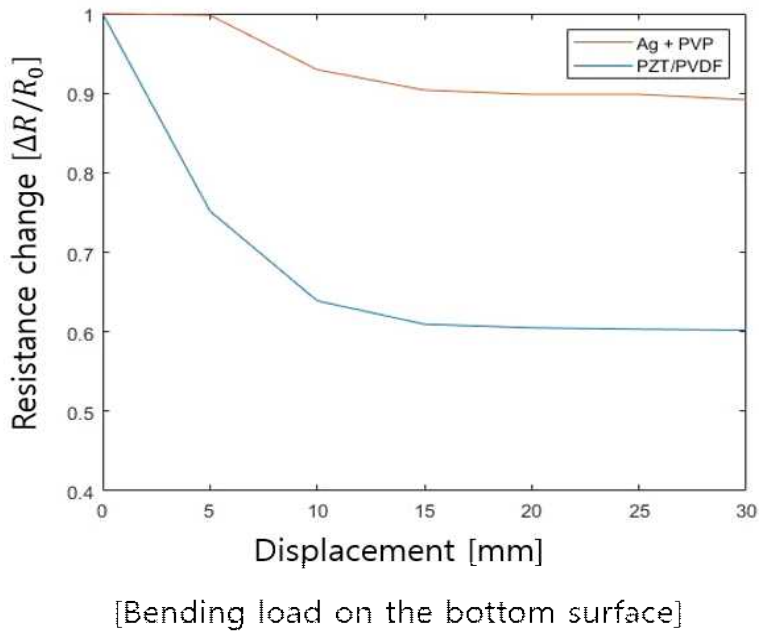


그림 3 - 12 하단 표면에서의 굽힘하중에 따른 저항 변화율

제4장 생체 모방을 통한 센서 민감도 향상

제1절 서론

이 장에서는 거미의 감각기관을 모방한 센서의 성능을 평가하고 구조의 미세한 손상을 추정하기 위한 센서 메커니즘을 제안한다. 최근 구조 건전성 모니터링 센서는 성능 향상을 위해 다양한 기술들이 적용되고 있다[36-38]. 그중에서도 생물학적 물질의 복잡한 계층 구조를 모방한 센서가 개발되고 있다[39,40].

곤충과 같은 생물들은 삶을 영위하기 위해 주어진 자연환경에 적응할 수 있도록 진화를 거듭해 왔다. 거미는 거미줄을 이용하여 삶을 영위하는 곤충으로써 거미줄의 진동을 인식하여 포식자와 먹이를 구분할 수 있도록 진화해 왔다. 거미의 감각기관은 외골격에 있는 균열의 연속적인 구조로써 진동에 매우 민감하게 반응한다 [41,42]. 먹이가 거미줄에 걸리면 거미는 8개의 다리 관절에 위치한 감각기관을 사용하여 거미줄의 진동을 감지한다. 따라서 거미줄의 진동은 거미의 감각기관을 자극하여 진동의 위치를 정확하게 파악할 수 있다.

이 장의 목적은 거미의 감각기관을 모사하여 인위적으로 구현함으로써 구조물의 변형에서 오는 동적 응답을 보다 민감하게 반응할 수 있는 센서를 제작하는 것이다. 거미의 감각기관을 모방하여 제작된 센서는 굽힘하중에 의해 구부러지며 기존의 센서와 비교를 통해 센서의 성능을 비교하였다.

제2절 실험 구성 및 방법

1. EHD 센서 패터닝

센서 제작을 위해 EHD 장비를 사용하였으며 거미의 감각기관을 모방하여 제작된 PET 기판 표면에 패터닝 하였다. 센서 패턴은 2 mm 간격으로 9개의 라인을 형성하였고 잉크는 전기전도성이 높은 Ag nano paste를 사용하였다. 잉크 제작은 Ag nano paste에 두 가지 용매, Alpha-terpineol과 DB acetate를 혼합한 후 고분자 PVP를 첨가하여 70°C에서 4시간 동안 교반하였다. 실험에 사용된 EHD 패터닝 조건은 표 4 - 1에 나타내었다.

표 4 - 1 센서 제작에 사용된 EHD 프린팅 패터닝 조건

Conditions	Values
Acceleration	200 mm/s ²
Fast move speed	200 mm/s
Print speed	500 mm/s
Z Working position	1800 um
DC voltage	1.8~2.0 kV
Flow late	3μl

2. 거미의 감각기관을 모방한 균열 센서 제작

거미의 외골격은 그림 4 - 1과 같이 외부의 동적 반응을 감지하기 위해 수많은 균열로 구성된다. 이러한 구조는 미세한 진동에 민감하게 반응하며 발생한 진동의 위치를 정확하게 감지할 수 있다. 구조물의 미세한 변형에서 높은 저항 변동을 얻기 위해 거미의 감각기관을 모방하여 초감도 센서를 제작하고자 한다.

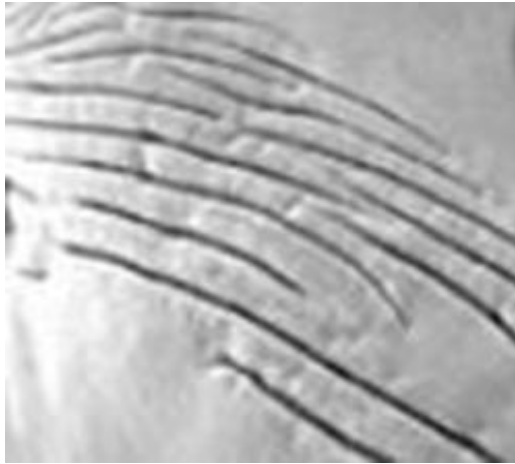


그림 4 - 1 거미의 외골격에 위치한 균열의 연속적인 구조[39]

실험에 사용된 센서는 유연성 기판인 PET에 그림 4 - 1과 같이 연속적인 구조의 균열을 발생시켜 거미의 감각기관을 모방하도록 설계하였다. 그림 4 - 2는 거미의 감각기관을 모방하여 제작된 센서이다. 센서는 EHD 장비를 이용하여 PET 기판에 2 mm 간격으로 9개의 라인이 형성되며 거미의 감각기관을 모방하여 생성된 균열 위에 패터닝 된다. 균열은 구조물의 변형에 대해 높은 동적 응답을 얻기 위해 패터닝된 라인의 수직 방향으로 생성되며 전기전도도를 측정할 수 있는 범위 내에서 제어된 균열을 발생시켰다. 라인 끝단에 구리 테이프를 부착함으로써 저항 측정이 가능하도록 설계되었다. 그림 4 - 3의 a는 센서에 생성된 균열을 보여주며 그림 4 - 3의 b는 모방된 균열 위에 증착된 Ag nano paste를 주사전자현미경으로 촬영한 이미지이다.

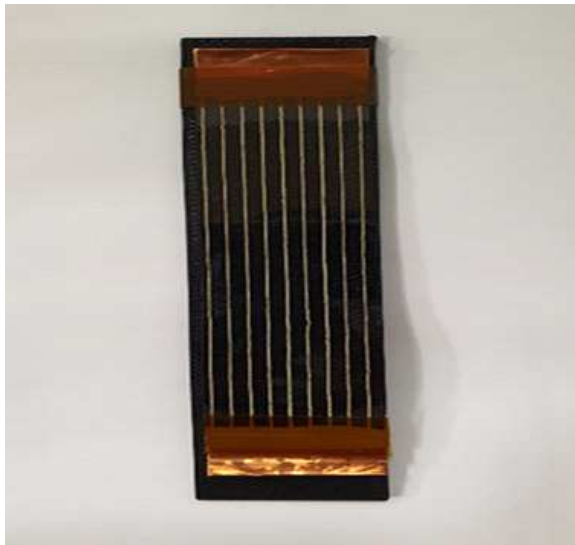


그림 4 - 2 거미의 감각기관을 모방한 센서

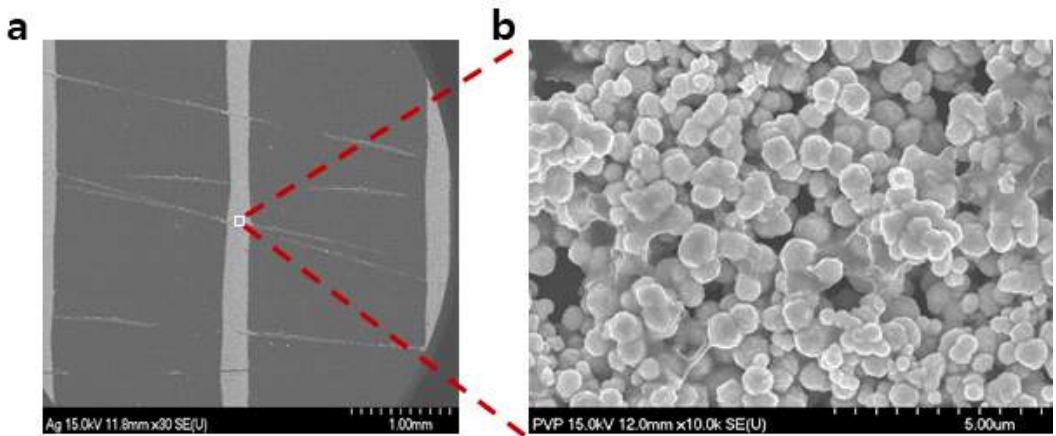


그림 4 - 3 (a) 센서 표면의 확대 이미지 (b) 센서에 증착된 Ag 나노 페이스트의 SEM 이미지

제3절 결과

거미의 감각기관을 모방한 센서를 시편 ($20\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 1\text{ mm}$)에 부착하고 굽힘 시험을 통해 기계적으로 구부렸다. 생성된 균열은 굽힘하중에 의해 그림 4 - 3의 a와 같이 균열의 간격이 증가하였다. 그림 4 - 3의 b는 생성된 균열이 PET 기판을 완전히 관통하지 않고 하중에 의해 기판이 확장됨을 보여준다. 이는 굽힘하중으로 인해 균열의 간격이 증가하면서 기판에 증착된 Ag 섬유를 늘어트렸다.

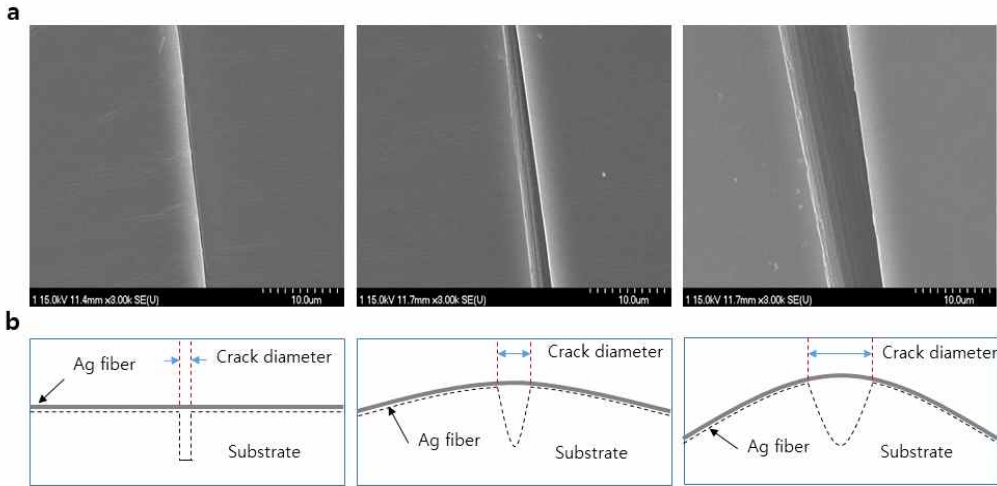


그림 4 - 3 하중에 따른 균열의 간격 변화

균열 센서는 굽힘하중에 의해 비 균열 센서 보다 확장된 균열의 간격만큼 Ag 섬유가 연신되어 같은 하중 조건에서 더 높은 저항 변동이 발생하였다. 굽힘하중에 따른 균열 센서와 비 균열 센서의 저항 변화는 그림 4 - 4에 나타내었다. 시편은 0.5 mm/s 의 속도로 최대 10 mm 까지 굽힘 시험기를 통해 구부렸다. 균열 센서는 비 균열 센서보다 변형으로 인한 저항 변화가 더 크다. 균열 센서의 저항 변화율은 1 mm 에서 1.025 이며, 이는 비 균열 센서 (1.001)보다 높은 저항 변동을 나타낸다. 따라서 균열 센서는 구조의 미세한 변형에 대해 비 균열 센서보다 높은 민감도를 보여준다. 제어된 방식으로 생성된 균열은 센서의 성능에 영향을 미치고 결과적으로 균열이 없는 센서에 비해 구조의 변화를 관찰하기 위한 센서의 민감도를 증가시켰다.

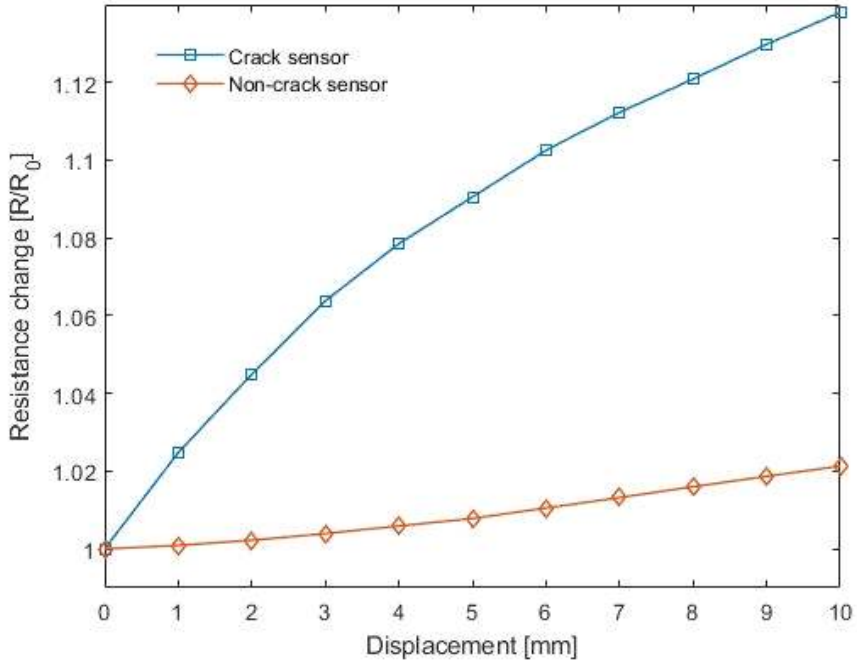


그림 4 - 5 굽힘하중에 따른 저항 변화

제5장 구조 건전성 모니터링을 위한 센서 메커니즘 검증

제1절 서론

이 장에서는 구조 건전성 모니터링을 위한 센서 메커니즘에 대해 설명한다. 복합 재료는 금속 재료보다 우수한 강도 특성으로 인해 항공기 구조물에서의 사용이 증가하고 있다. 하지만 복합 재료는 구조적 이방성과 재료의 서로 다른 위상은 전파 특성이 서로 다른 다양한 유형의 손상을 초래한다[43]. 따라서 구조의 남은 강도와 수명에 대한 결함 감지 및 결정은 여전히 어려운 작업이다. 복합 구조물의 강도와 수명에 대한 결함의 영향을 결정하고 손상의 임계 크기를 결정하기 위해 상당한 양의 작업이 수행되었다[44]. 하지만 여전히 항공기 운항 중에 검사할 수 없으며 운항 중 발생하는 잠재적 위험에 대해 즉각적인 대처가 필요하다. 따라서 항공기 운항 중에 실시간으로 실시간 모니터링이 가능한 기술이 필요하다.

이 장의 목적은 EHD 패터닝 기술을 통해 제작된 모니터링 센서를 다양한 하중 시험을 통해 구조물의 변화와 손상 위치를 추정할 수 있는 새로운 센서 메커니즘을 입증 증명하는 것이다.

제2절 센서 메커니즘

개발한 센서 메커니즘은 구조물의 변형 및 미세 균열을 감지하는 방법이며 수평 및 수직 방향으로 각각 패터닝하여 층을 구성한 격자 구조 그리드를 형성하였다. 제안된 메커니즘은 그림 5 - 1과 같이 센서에 입력 신호를 보내 수평 방향으로 손상된 위치를 감지하고 수직 방향으로 동일한 과정을 통해 출력 신호를 수신한다. 수평 및 수직 방향으로 변경된 저항의 교차점을 이용하여 발생한 균열의 위치를 정확하게 감지할 수 있다. 격자 구조 센서는 감지할 수 있는 균열의 크기가 제한되어 있으며, 감지 가능한 균열의 크기는 패터닝된 라인의 두께와 그 사이의 간격에 의해 결정된다. 패터닝된 라인의 두께가 얇을수록 센서의 민감도가 높아지며 패터닝된 라인의 사이 간격이 좁을수록 더 미세한 균열을 감지할 수 있다. 개발한 센서는 수직 방향으로 8 mm 간격으로 8개의 라인을, 수평 방향으로 6 mm 간격으로 10개의 라인을 형성하였다. 패터닝된 라인은 평균 50 μm 로 패턴화했으며 절연재를 사용하여 외부로부터 보호하였다. DAQ 케이블 연결을 위해 라인 양단에 구리 테이프를 부착하여 제작하였다. 개발된 센서는 그림 5 - 2에 나타내었다.

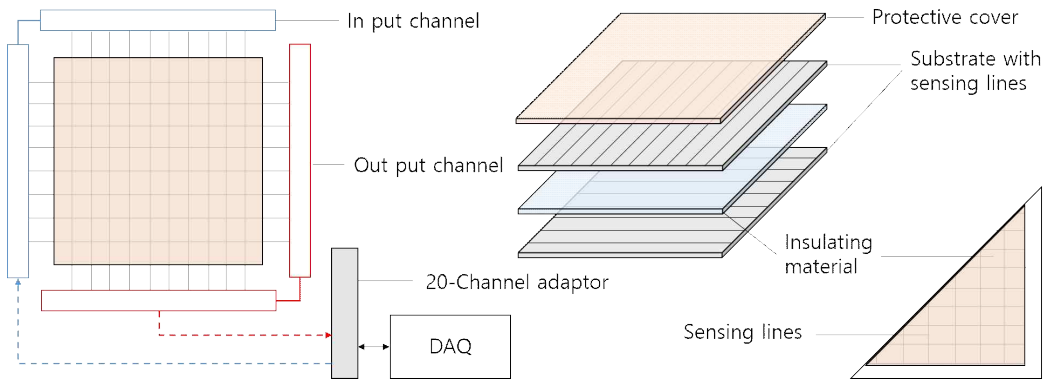


그림 5 - 1 손상 영역 모니터링을 위한 그리드 설계

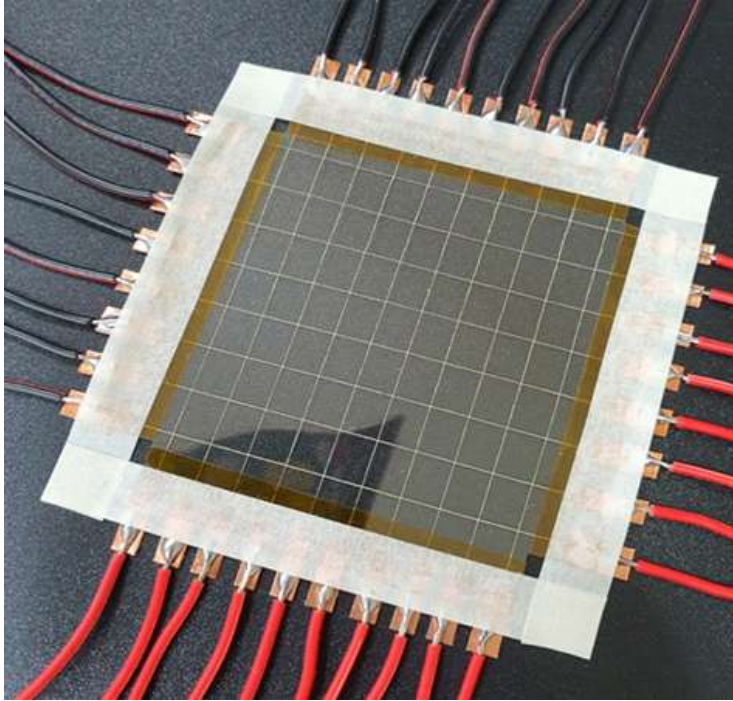


그림 5 - 2 손상 모니터링을 위한 10 X 8 그리드 센서

제3절 시험 구성 및 방법

1. 굽힘 시험

시험에 사용된 구조는 재료를 쌓고 모델링 하는 FDM(Fused Deposition Modeling) 방법과 STRATSYS 사의 3D 프린터 F-170을 사용하여 제작되었으며 3점 굽힘 시험을 위해 그림 5 - 3과 같이 3D 직사각형 ($225\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 25\text{ mm}$) 크기로 모델링하였다. 그림 5 - 4는 굽힘 시험의 개략도이며 그림 5 - 5는 시험의 설정과 구성을 보여준다. 200톤 굽힘 시험기는 시험기 상부의 로드셀을 통해 시편에 가해지는 하중을 측정하기 위해 하중 속도를 제어하였다. 하중은 2 mm/min 의 속도로 구조물 중앙에 선 하중으로 적용되었다. 자세한 실험 설정은 표 5 - 1에 나타내었다.

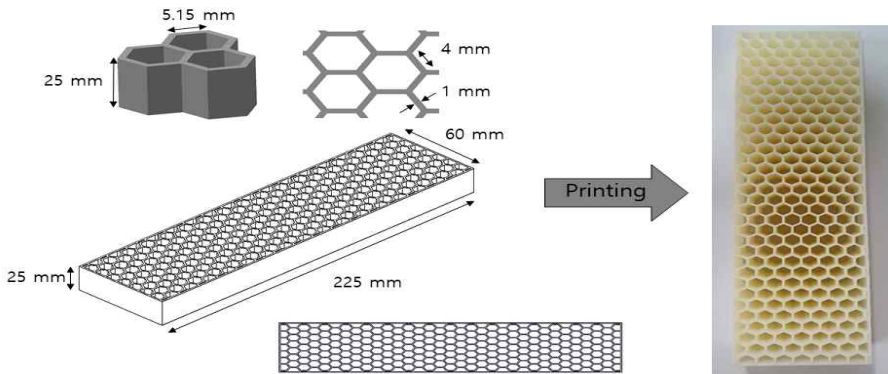


그림 5 - 3 3D 프린터를 이용한 허니컴 코어 모델링

표 5 - 1 시편과 굽힘하중의 실험적 설정

Honeycomb core		Bending test	
Material	ABS-M30	Specimen1	Specimen2
Additive manufacturing	FDM (Fused Deposition Modeing)	Adhesive application	1 2
Thickness	25 mm	Velocity	2 mm/min 2 mm/min
Mass	96.7 g	Fracture load	1100 N 1200 N

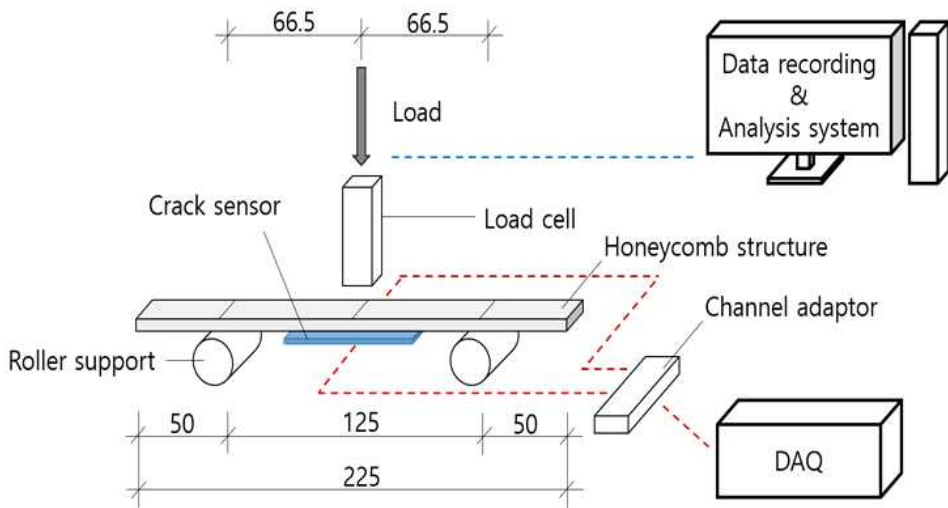


그림 5 - 4 굽힘하중 시험의 개략도



그림 5 - 5 굽힘하중 시험의 설정과 구성

2. 충격 시험

개발된 센서의 구조 건전성 모니터링 메커니즘을 검증하기 위해 충격 시험기를 사용하였다. 사용된 장비는 충격 시험기, 센서가 부착된 시편, DAQ가 사용되었다. 시편은 앞서 제작한 구조물과 같은 방식인 FDM을 이용하여 그림 5 - 6과 같이 정사각형 판 ($100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1\text{ mm}$)을 제작하였다. 충격 시험기는 자체 제작되었으며 충격 시험의 설정과 구성은 그림 5 - 7에 나타내었다. DAQ는 센서의 동적 응답을 실시간으로 측정된다.

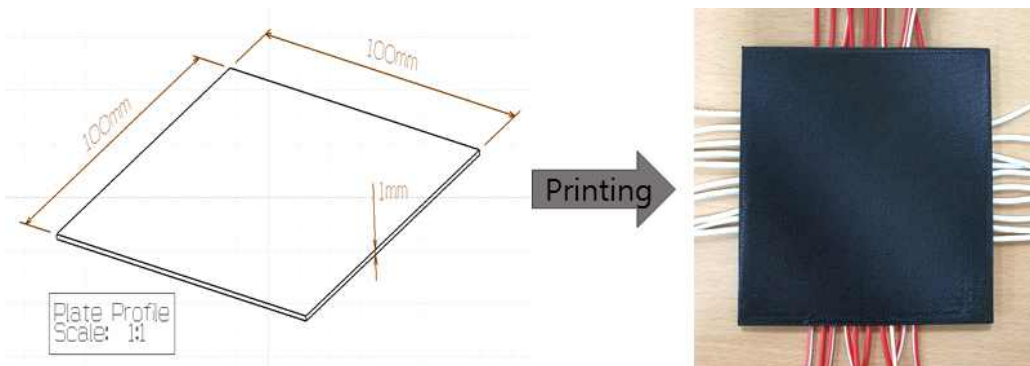


그림 5 - 6 3D 프린터를 이용한 정사각 판 시편

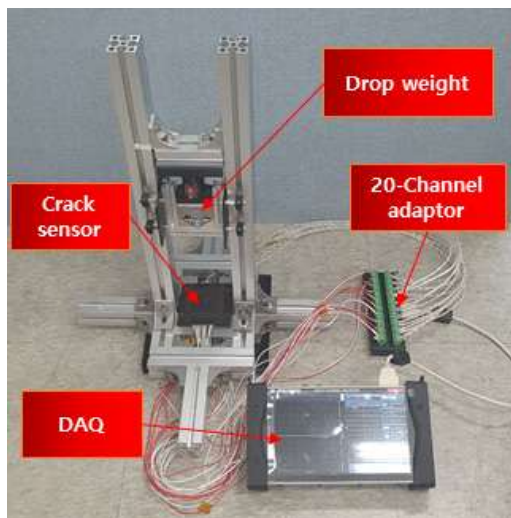


그림 5 - 7 충격 시험의 설정과 구성

제4절 결과

1. 굽힘 시험에서의 성능 평가

제작된 센서의 실시간 모니터링 성능을 확인하기 위해 3D 프린터로 제작된 허니컴 코어에 부착하여 구부러졌다. DAQ를 사용하여 시편이 완전히 파손될 때까지 저항을 측정하였다. 센서의 연결 케이블은 수평 및 수직 방향으로 각각 8채널과 10채널을 사용하였다. 허니컴 코어는 완전히 파손될 때까지 구부러졌으며 허니컴 코어에서 발생한 파손형태와 센서의 손상 부위는 완전히 일치하였다. 그림 5 - 8은 허니컴 코어의 완전한 파손까지 각 채널의 저항 변화를 보여준다. 일정하게 유지된 저항은 DAQ 작동 18초 후에 모든 수평 방향의 채널에서 저항은 점차 증가하기 시작하였다. 이는 굽힘하중에서 허니컴 코어의 인장 응력에 의해 변형이 발생하여 저항을 증가시켰습니다. 이후 52에서 60초 사이에 수직 방향의 (X5, X6) 라인과 수평 방향의 (Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Y9, Y10)에서 저항이 급격하게 증가하는데 이는 코어가 파손되면서 센서의 라인을 손상시켰다. 파손된 라인의 저항은 측정되지 않으며 최대값으로 나타나게 설정되었다. 따라서 손상된 라인을 수평 및 수직 방향으로 교차시켜 판단 위치를 판단할 수 있다.

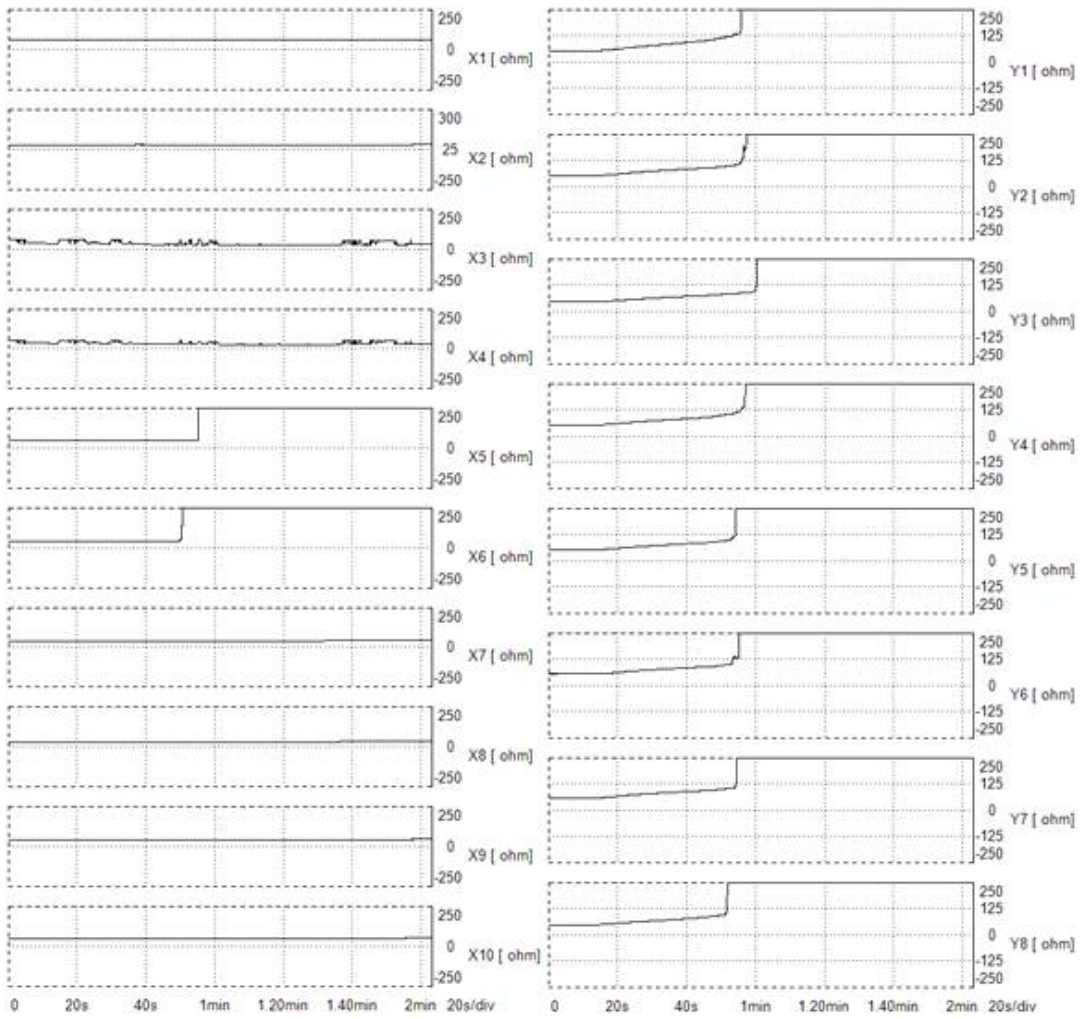


그림 5 - 8 급힘 시험에 따른 센서의 실시간 저항 변화

그림 5 - 9는 굽힘하중과 저항 변화 그래프를 비교하여 센서 성능을 확인한다. 센서는 허니컴 코어에 부착되어 실시간으로 모니터링되었다. 센서가 0 ~ 16초 사이에 작동되었을 때 초기값은 모든 라인에서 유지된다. 이 상태는 허니컴 코어가 변형되지 않았음을 나타낸다. 16초에 시편은 굽힘하중에 따라 구부러지기 시작하고 굽힘하중이 증가함에 따라 수평 방향의 센서 라인의 저항이 증가한다. 저항은 시편이 파손될 때까지 계속 증가하였고 허니컴 코어는 약 55초에 파손되며 저항은 무한의 값을 가진다. 피크에서의 하중 그래프는 최대 굽힘하중 지점을 나타내며 허니컴 코어가 파손됨을 나타낸다. 반면에 수직 방향의 라인은 초기값을 유지한다. 이는 허니컴 코어의 굽힘을 확인하는 수평 라인 센서이기 때문이다. 따라서 센서가 감지한 저항의 변화는 실제 시편의 하중 변화와 일치하며 손상된 선의 수평 및 수직 방향의 교차점을 이용하여 시편의 손상 위치를 검출할 수 있다.

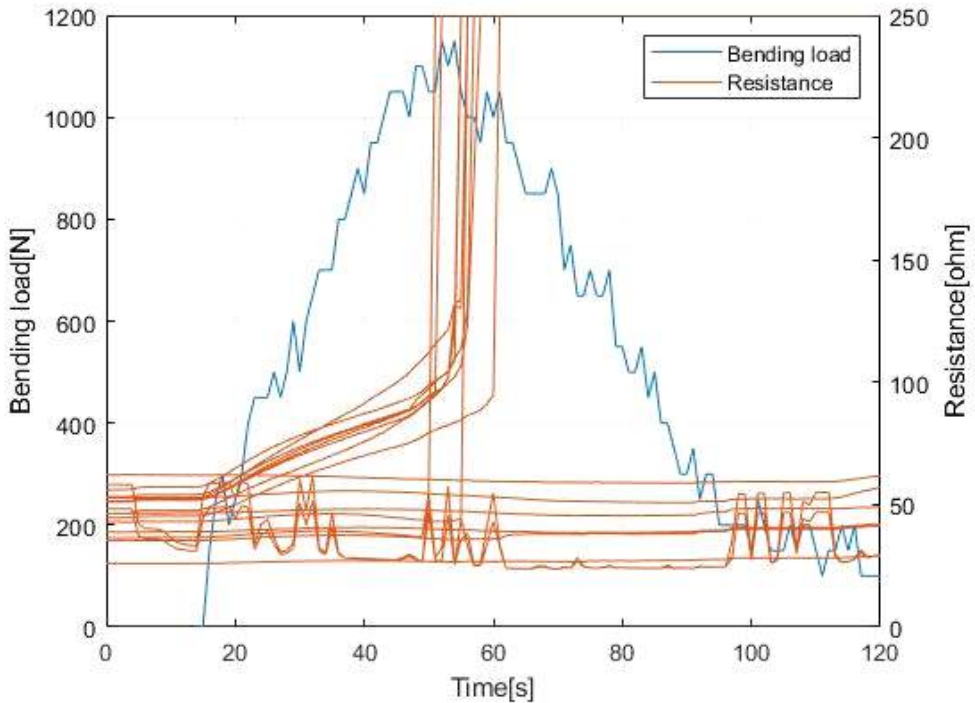


그림 5 - 9 굽힘하중에 따른 저항 변화

2. 충격 시험시험에서의 성능 평가

굽힘 시험과 같이 센서의 실시간 모니터링 성능을 확인하기 위해 3D 프린터로 제작된 시편에 부착되어 낙하 추를 자유낙하 시켰다. DAQ는 시편이 낙하 추에 의해 시편이 파손될 때까지 저항을 측정하였다. 센서의 연결 케이블은 수평 및 수직 방향으로 모두 10채널을 사용하였다. 시편은 DAQ 작동 이후 32초에 충격 시험기의 낙하 추를 통해 시편을 완전히 관통시켰다. 그림 5 - 10은 시편이 완전히 파손될 때까지의 각 채널의 저항 변화를 보여준다. 충격 직후 센서의 모든 라인에서 피크가 발생하였다. 피크는 초기 저항보다 최소 1.8배 최대 4.8배 높은 저항변동을 보여주며 센서가 구조물에 대한 충격을 감지할 수 있음을 나타낸다. 수직 방향의 X2, X3, X4 라인과 수평 방향의 Y3, Y4, Y5 라인은 피크 발생 후 0 값을 유지하였다. 시험에 사용된 DAQ에서 0의 값은 패터닝된 라인의 단선으로 인해 저항 측정이 불가능함을 나타낸다. 반면에 나머지 라인에서는 피크 발생 후 초기값을 유지하였다. 이는 충격에 의해 라인이 손상되지 않았기 때문이다. 따라서 손상된 수평 방향과 수직 방향의 라인을 교차하여 시편의 파손된 위치를 정확하게 감지할 수 있다.

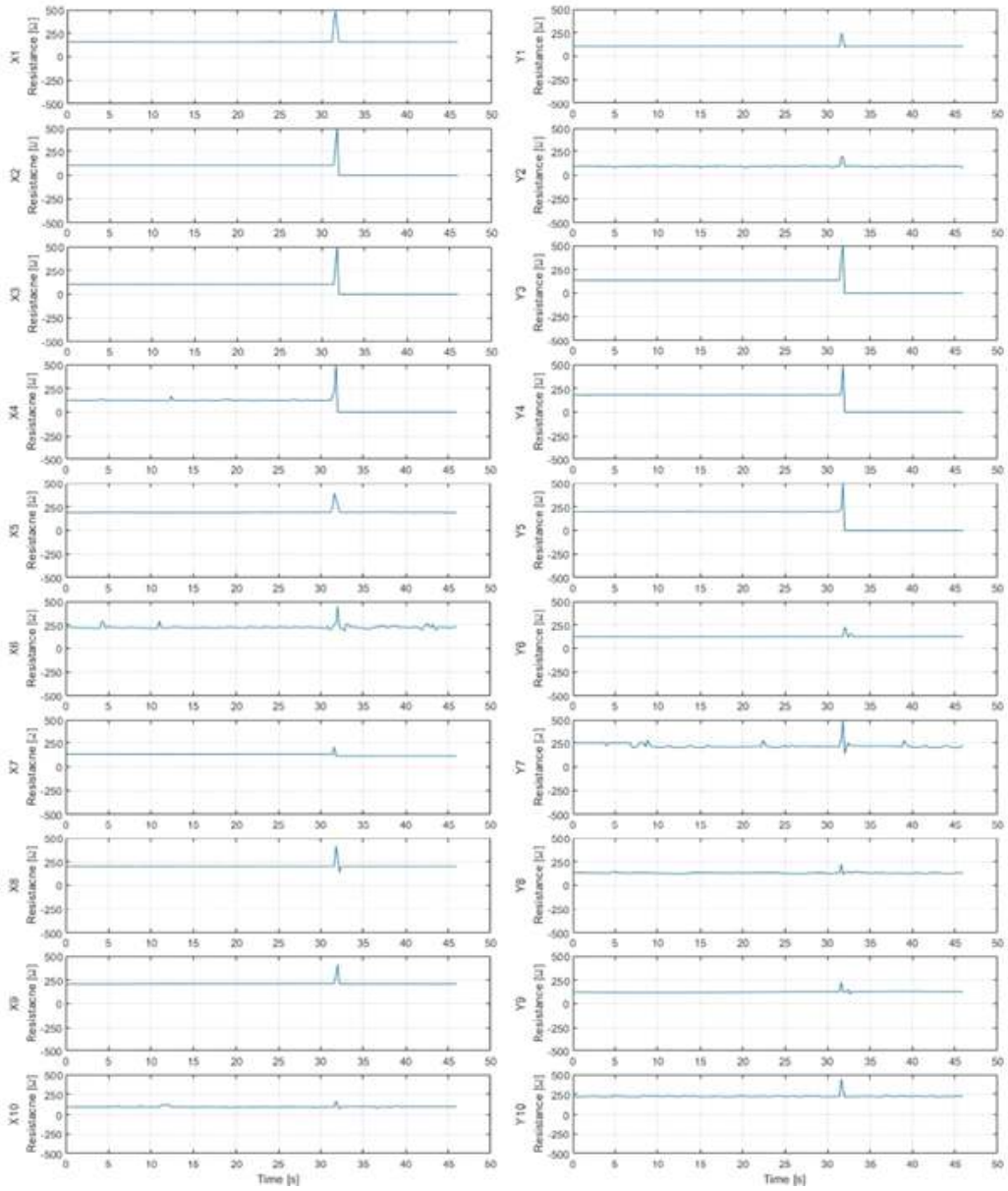


그림 5 - 10 충격 시험에 따른 센서의 실시간 저항 변화

결론

본 논문은 전기수력학적 패터닝 기술을 이용하여 구조물의 미세한 손상을 추정하고 모니터링하는 새로운 감지 메커니즘을 제안하였다. 우선 격자 구조인 모니터링 센서 제작에 필요한 전도성 라인을 형성하기 위해 잉크 개발에 초점을 맞추고 개발한 잉크의 인쇄 최적화를 위해 다양한 공정 변수에서의 인쇄 방법을 제시하였다. 연속적인 패턴 형성을 위해 고점도 잉크의 사용과 패턴의 균일성을 확대하기 위해 고분자 PVP를 첨가하였으며 최적화된 PVP 농도는 2 wt%로 나타났다. 또한, 높은 압전 특성과 곡선 형상에서의 모니터링을 위해 압전 세라믹인 PZT에 압전 폴리머 PVDF를 첨가하여 PZT/PVDF 복합잉크를 제조함으로써 곡선 형상에서 유지할 수 있었다. 복합잉크의 최적화된 부피비는 7 : 3으로 나타났다.

다음 장에서는 생체모방을 통해 센서의 성능 향상하기 위한 새로운 대안을 제시하였다. 거미의 감각 기관을 모방하는 새로운 메커니즘은 구조의 미세한 손상을 감지하기 위해 제안된다. 거미의 외골격에 위치한 연속적인 균열의 구조를 인위적으로 구현함으로써 센서의 성능이 향상되었다. 특히 균열 센서는 미세한 변형에 민감하게 반응하였고 비 균열 센서와 비교를 통해 균열 센서가 더 높은 저항 변동이 발생하는 것을 확인하였다.

마지막으로 EHD 패터닝 기술을 이용하여 격자 구조를 그리드를 구성한 센서의 새로운 감지 메커니즘을 검증하였다. 센서는 시편에 부착되어 하중 시험과 충격 시험에서 모니터링되며 저항 변화를 이용하여 구조물의 변형과 손상 위치를 정확히 감지할 수 있다. 하중이 증가할수록 저항은 점진적으로 증가하며 파손 시 피크가 발생하여 구조물의 파손 시점과 위치를 정확히 파악할 수 있다. 따라서 제안된 메커니즘은 구조물의 미세한 손상을 추정하고 모니터링하는 강력한 방법임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] X. Jian and L. Yao, Study on Airworthiness Requirements of Composite Aircraft Structure for Transport Category Aircraft in FAA, *Procedia Engineering*. 17 (2011) 270–278.
- [2] R. Jones, Fatigue crack growth and damage tolerance, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 37(5) (2014) 463–483.
- [3] S. L. Tsyfansky and V. I. Beresnevich, Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings, *J. Sound Vibr.* 236(1) (2000) 49–60.
- [4] S. K. Bhaumik, M. Sujata and M. A. Venkataswamy, Fatigue failure of aircraft components, *Eng. Fail. Anal.* 15(6) (2008) 675–694.
- [5] P. J. Forsyth, Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys, *Acta. Metal.* 11(7) (1963) 703–715.
- [6] J. R. Gregory and S. M. Spearing, Constituent and composite quasi-static and fatigue fracture experiments, *Compos. Pt. A–Appl. Sci. Manuf.* 36(5) (2005) 665–674.
- [7] I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov and D. Shi, A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring, *Smart Mater. Struct.* 15(3) (2006) 737–748.
- [8] X. Qing, W. Li, Y. Wang and H. Sun, Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications, *Sensors*. 19(3) (2019) 545.

- [9] K. Diamanti and C. Soutis, Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures, *rog. Aeosp. Sci.* 46(8) (2010) 342–352.
- [10] V. P. Vavilov, Dynamic thermal tomography: Recent improvements and applications, *NDT & E International*. 71 (2015) 23–32.
- [11] K. Y Kim, S. M. Jeong and C. Y. Lee, Biomimetic Crack Sensors Using Electrohydrodynamic Technology, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. (Accepted)
- [12] K. Y. Kim and C. Y. Lee, Real-time Detection of Damage Evolution Using Electrohydrodynamic Printing, *Engineering Failure Analysis*. 119 (2021) 104974.
- [13] K. Y. Jhang, Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: A review, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 10(1) (2009) 123–135.
- [14] R. Yang and Y. He, Optically and non-optically excited thermography for composites: A review, *Infrared Phys. Technol.* 75 (2016) 26–50.
- [15] S. H. Chang, S. O. Koo and J. W. Park, Development of the compact integrated flight control computer, *The Society for Aerospace System Engineering*. 2(1) (2008) 17–21.
- [16] C. F. Poranski, E. C. Greenawald and Y. S. Ham, X-Ray Backscatter Tomography: NDT Potential and Limitations, *Mater. Sci. Forum*. 210–213 (1996) 211–218.
- [17] X. Wang, B. S. Wong, C. Tan and C. G Tui, Automated Crack Detection for Digital Radiography Aircraft Wing Inspection, *Res. Nondestruct. Eval.* 22(2)

(2011) 105–127.

[18] K. Y. Kim and C. Y. Lee, Mechanism of micro crack sensor using electrohydrodynamic printing, *Journal of Advanced Engineering and Technology*. 12(2) (2019) 55–60.

[19] B.J. De Gans, P.C. Duineveld and U. S. Schubert, Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments, *Adv. Mater.* 16(3) (2004) 203–213.

[20] M. Singh, H.M. Haverinen, P. Dhagat and G.E. Jabbour, Inkjet printing—process and its applications, *Adv. Mater.* 22(6) (2004) 673–685.

[21] L. Huang, Y. Huang, J. Liang, X. Wan and Y. Chen, Graphene-based conducting inks for direct inkjet printing of flexible conductive patterns and their applications in electric circuits and chemical sensors, *Nano Res.* 4 (2011) 675–684.

[22] B. Yoon, D. Y. Ham, O. Yarimaga, H. An, C. W. Lee and J. M. Kim, Inkjet Printing of Conjugated Polymer Precursors on Paper Substrates for Colorimetric Sensing and Flexible Electrothermochromic Display, *Adv. Mater.* 23(46) (2011) 5492–5497.

[23] D. Y. Lee, Y. S. Shin, S. E. Park, T. U. Yu and J. Hwang, Electrohydrodynamic printing of silver nanoparticles by using a focused nanocolloid jet, *Appl. Phys. Lett.* 90(8) (2007) 081905.

[24] N. Wu and W.B. Russel, Micro- and nano-patterns created via electrohydrodynamic instabilities, *Nano. Today*. 4(2) (2009) 180–192.

[25] J. U. Park, M. Hardy, S. J. Kang, K. Barton, K. Adair, D. K. Mukhopadhyay, C. Y. Lee, M. S. Strano, A. G. Alleyne, J. G. Georgiadis, P.

M. Ferreira and J. A. Rogers, High-resolution electrohydrodynamic jet printing, *Nat. Mater.* 6 (2007) 782–789.

[26] M. S. Onses, E. Sutanto, P. M. Ferreira, A. G. Alleyne and J. A. Rogers, Mechanisms, Capabilities, and Applications of High-Resolution Electrohydrodynamic Jet Printing, *Small*. 11(34) (2015) 4237–4266.

[27] Y. Jang, T. I. Hartarto, H. Tak, N. V. Dat, T. Kang and D. Byun, Non-contact printing of high aspect ratio Ag electrodes for polycrystalline silicon solar cell with electrohydrodynamic jet printing, *Appl. Phys. Lett.* 102(12) (2013) 123901.

[28] D. H. Zhang and K. S. Kwon, High Speed and Continuous Electrospinning Printing Using Polymer Ink, *Korean Soc. Mech Eng. B.* 39(4) (2015) 379–384.

[29] H. Luo and S. Hanagud, PVDF Film Sensor and Its Applications in Damage Detection, *Journal of Aerospace Engineering.* 12(1) (1999) 23–30.

[30] C. K. Park, J. S. Yun, J. H. Cho, J. H. Paik, J. Y. Hun and D. Y. Jeong, Optimization of Electrospinning Conditions for PZT/PVDF Nanofibers, *Journal of the Korean Ceramic Society.* 51(6) (2014) 523~526.

[31] C. N. Xu, M. Akiyama, K. Nonaka and T. Watanabe, Electrical power generation characteristics of PZT piezoelectric ceramics, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.* 45(4) (1998) 1065–1070.

[32] C. Chang, Y.-K. Fuh and L. Lin, A direct-write piezoelectric PVDF nanogenerator, *TRANSDUCERS 2009 – 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference.* (2009).

- [33] N. Jaitanong, R. Yimnirun, H. R. Zeng, G. R. Li, Q. R. Yin and A. Chaipanich, Piezoelectric properties of cement based/PVDF/PZT composites, *Materials Letters*. 130 (2014) 146–149.
- [34] S. j. Kim, J. Y. Shin, Y. h. Yun, D. Y. Lee and D. H. Yang, Characteristics of Piezoelectric Polymeric PVDF Sensor by Impact Testing, *Polymer*. 43(5) (2019) 764–770.
- [35] S. I. Park, J. H. Ahn, X. Feng, S. Wang, Y. Huang and J. A. Rogers, Theoretical and Experimental studies of bending of inorganic electronic materials on plastic substrates, *Advanced Functional Materials*. 18(24) (2015) 2673–2684.
- [36] Y. C. Lee, H. Leeghim and C. Y. Lee, Micropatterning of Metal-Grid Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Sensor for Crack Detection Using Electrohydrodynamic Printing System, *Journal of Nanoscience and Nanotechnolog*. 20(7) (2020) 4385–4389.
- [37] X. Qing, W. Li, Y. Wang and H. Sun, Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications, *Sensors*. 19(3) (2019) 545.
- [38] I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov and D. Shi, A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring, *Smart Materials and Structures*. 15(3) (2006) 737–748.
- [39] P. Fratzl and F. G. Barth, Biomaterial systems for mechanosensing and actuation, *Nature*. 462 (2009) 442–448.
- [40] D. Kang, P. V. Pikhitsa, Y. W. Choi, C. Lee, S. S. Shin, L. Piao, B. Park, K. Y. Suh, T. I. Kim and M. Choi, Ultrasensitive mechanical

crack-based sensor inspired by the spider sensory system, *Nature*. 516(7530) (2014) 222–226.

[41] J. M. G. Segovia, G. Gainett and R. H. Willemart, Predatory behavior and sensory morphology of the whip spider *Charinus asturius* (Arachnida: Amblypygi), *Journal of Ethology*. 38 (2020) 273–280.

[42] M. I. Schacht, M. Francesconi and A. Stollewerk, Distribution and development of the external sense organ pattern on the appendages of postembryonic and adult stages of the spider *Parasteatoda tepidariorum*, *Development Genes and Evolution*. 230 (2020) 121–136.

[43] C. Soutis, Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction, *Materials Science and Engineering: A*, 412(1–2) (2005) 171–176.

[44] Y. Bar-Cohen, Emerging NDT technologies and challenges at the beginning of the third millennium, Part 2. *Materials evaluation*. 58(2) (2000) 141–150.

< 감사의 글 >

어느새 2년이라는 석사과정을 마치고 학위 논문을 제출하게 되었습니다. 패기만 가지고 무작정 도전한 석사과정을 교수님들과 선 후배들의 도움과 격려에 힘입어 석사 논문의 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 글로 남겨보려 합니다.

지난 2년 동안 훌륭한 가르침과 연구에 대해 누구보다도 많은 도움을 주시고 제가 여기까지 올 수 있게 지도해주신 이창열 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 바쁘신 와중에도 시간을 내주시어 논문의 부족한 부분에 대해 세심하고 날카로운 조언을 통해 향상된 논문을 완성할 수 있도록 심사해주신 김태규 교수님과 이현재 교수님께 정말 감사드립니다.

석사과정 동안 많은 우여곡절이 있었지만 정말 가족 같은 선 후배들이 있었기에 지금까지 버틸 수 있었던 것 같습니다. 짧지 않은 시간 동안 동고동락하며 함께 밤을 지새우던 추억들은 저에게 평생 잊혀지지 못할 소중한 추억과 자산이 되리라 확신합니다. 먼저 고민거리가 있으면 아낌없이 조언해주며 항상 후배들을 위해 헌신하는 박사 과정의 주훈이에게 감사의 마음을 전합니다. 그리고 연구실을 위해 많은 것을 희생하며 버팀목이 되어준 용찬이, 난관에 봉착할 때마다 조언해주며 많은 추억을 쌓아온 주환이와 대산이형, 학부 연구생으로 실험실 생활을 같이한 희주와 성빈이에게 고맙고 응원의 말을 전합니다.

마지막으로 항상 걱정으로 저를 보살펴주시고 어떠한 결정을 하더라도 굳게 믿고 지켜봐 주신 부모님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 아울러 항상 저의 편에서 고민을 들어주시고 조금이라도 올바른 선택을 할 수 있게 충고해 주신 우리 형, 항상 내 옆에서 포기하지 않게 응원해준 봄이에게 감사의 마음을 전합니다.