

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

• 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 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 🖃







2020년 2월 석사학위 논문

전기수력학적 젯 프린팅을 이용한 격자식 크랙 탐지 센서의 위치 추정 알고리즘

조선대학교 대학원 항 공 우 주 공 학 과

이 용 찬



전기수력학적 젯 프린팅을 이용한 격자식 크랙 탐지 센서의 위치 추정 알고리즘

Location Estimation Algorithm of Grid-type Crack
Detection Sensor Using Electrohydrodynamic Jet
Printing

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원 항 공 우 주 공 학 과 이 용 찬

전기수력학적 젯 프린팅을 이용한 격자식 크랙 탐지 센서의 위치 추정 알고리즘

지도교수 이 창 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함 2019년 10월

> 조선대학교 대학원 항 공 우 주 공 학 과 이 용 찬



이용찬의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 <u>김 태 규 (인)</u>

위 원 조선대학교 교 수 이 현 재 (인)

위 원 조선대학교 교 수 이 창 열 (인)

2019 년 11 월

조선대학교 대학원



목 차

LIST OF FIGURES ·····iii
ABSTRACT ····································
제 1 장 서론
제 2 장 전기수력학적 잉크젯 프린팅 기술3
제 1 절 메니스커스 형성 및 토출 원리3
제 2 절 전기수력학적 잉크젯 시스템 ‥‥‥‥.4
제 3 절 전기수력학적 토출 모드6
제 3 장 미세전극 패터닝 실험 및 결과8
제 1 절 샘플 제작 과정 ‥‥‥‥8
제 2 절 공정 변수에 따른 토출 안정성 실험10
1. 공급 유량 - 인가 전압에 따른 토출 안정성 및 토출
모드 분포 · · · · · · · · · 10
2. 작동 높이 - 인가 전압에 따른 토출 안정성 및 토출
모드 분포 · · · · · · · · 12
제 3 절 소결 시간에 따른 Ag 입자 상태 ····· 15
제 4 장 Conductive Line 유연 전도성 실험 ····17

제 5 장 저항변화 기반 크랙 탐지를 위한 Metal-
grid 전극 응용 ·····21
제 1 절 크랙 탐지 알고리즘 ‥‥‥‥‥.21
1. 단일 크랙 ······ 21
2. 다중 크랙 ‥‥‥‥‥36
3. 위치 추정 좌표 필터링 ‥‥‥‥43
제 2 절 크랙 위치 추정 프로그램 제작 ·····48
제 6 장 결론54
찰고무허



LIST OF FIGURES

그림 2 - 1 EHD 잉크젯 프린팅 원리 및 제팅 개략도 ········3
그림 2 - 2 EHD 잉크젯 프린팅 시스템 구성 모듈 ·········4
그림 2 - 3 EHD 잉크젯 프린팅 시스템 ······5
그림 2 - 4 공정 변수에 따른 전기수력학적 토출 모드 ········7
그림 3 – 1 EHD 잉크젯 프린팅 실험을 통한 샘플 제작 과정 ······9
그림 3 - 2 공급 유량 - 인가 전압에 따른 제팅 안정성 분포도 •••••11
그림 3 - 3 작동 높이 - 인가 전압에 따른 제팅 안정성 분포도 ·····14
그림 3 - 4 소결 시간 별 Ag 나노 입자의 상태 ··········16
그림 4 - 1 유연 전도성 시험의 개략도 •••••••••17
그림 4 - 2 벤딩 모듈을 통한 곡률 반경에 따른 벤딩 케이스 ••••••18
그림 4 – 3 Ag conductive line의 곡률 반경별 저항 변화율 ······20
그림 5 - 1 우측상단 단일 크랙 샘플(10X10) ·······22
그림 5 - 2 우측상단 단일 크랙 샘플(10X10)의 회로 별 저항변화율 ····23
그림 5 - 3 우측상단 단일크랙 샘플(10X10) 저항 변화율 ······25
그림 5 - 4 우측상단 단일 크랙 샘플(20X20) ··········26
그림 5 - 5 우측상단 단일 크랙 샘플(20X20)의 회로 별 저항변화율 ····27
그림 5 - 6 우측상단 단일크랙 샘플(20X20) 저항 변화율 ······28
그림 5 - 7 하단 단일 크랙 샘플(10X10) ·······29
그림 5 - 8 하단 단일 크랙 샘플(10X10)의 회로 별 저항변화율 ·····30
그림 5 - 9 하단 단일크랙 샘플(10X10) 저항 변화율 ········32

그림	5	-	10	하단 단일 크랙 샘플(20X20) · · · · · · · · · · · · · · · 33
그림	5	-	11	하단 단일크랙 샘플(20X20)의 회로 별 저항변화율 ·····34
그림	5	-	12	하단 단일크랙 샘플(20X20) 저항 변화율 ······35
그림	5	-	13	중앙 다중크랙 샘플(10X10) ······36
그림	5	-	14	중앙 다중크랙 샘플(10X10)의 회로 별 저항변화율 ·····37
그림	5	-	15	중앙 다중크랙 샘플(10X10) 저항 변화율 ······39
그림	5	-	16	중앙 다중크랙 샘플(20X20) ······40
그림	5	-	17	중앙 다중크랙 샘플(20X20)의 회로 별 저항변화율 ·····41
그림	5	-	18	중앙 다중크랙 샘플(20X20) 저항 변화율 ······42
그림	5	-	19	필터링 후 보간법을 적용한 우측상단 단일크랙 샘플
				저항 변화율45
그림	5	-	20	필터링 후 보간법을 적용한 하단 단일크랙 샘플
				저항 변화율46
그림	5	-	21	필터링 후 보간법을 적용한 중앙 다중크랙 샘플
				저항 변화율47
그림	5	-	22	우측상단 단일크랙 샘플에 대한 크랙 위치를 표기한
				프로그램 · · · · · · · · · · · · · · · · · · 49
그림	5	_	23	하단 단일크랙 샘플에 대한 크랙 위치를 표기한
				프로그램 ······51
그림	5	-	24	중앙 다중크랙 샘플에 대한 크랙 위치를 표기한
				프로그램 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·



ABSTRACT

Location Estimation Algorithm of Grid-type Crack Detection Sensor Using Electrohydrodynamic Jet Printing

Lee Yong-Chan

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

Department of Aerospace Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, as the number of old structures and the collapse of structures frequently occur, the importance of the structural health monitoring (SHM) technology that can reduce the damage is emerging. So, SHM sensors are developed using principles of various fields such as mechanical engineering, chemistry, and electricity to ensure the durability of structures and to increase their precision. The cracks gradually increase in size from the micro cracks. That is why it is important to diagnose micro cracks early. For diagnose micro cracks, the sensor must have excellent precision and sensitivity. If nano structures are used to diagnose the micro crack, it can receive signals down to the smallest detail. So, electrohydrodynamics(EHD) inkjet printing technology is applied for crack detection.

In this paper, the crack detection algorithm of micro-electro mechanism systems(MEMS) based grid-type sensor is comprehended for detecting micro cracks using EHD inkjet printing technology. In order to apply the EHD inkjet printing technology, the process variable control is essential. So the optimization of voltage, flow rate and working height was performed for EHD inkjet printing. In addition, flexible conductivity was measured for the application of the curved part and flexible device.

The crack location was estimated using the tendency of the resistance



change ratio of the cracked circuit. The crack detection algorithm was verified through three-dimensional graphs. In addition, a crack estimation program was created for intuitive crack location, which was compared for 10X10 and 20X20 samples. By increasing the grid scale, it was possible to construct a detailed grid in the PI film used as the substrate of the sample, thereby increasing the accuracy of crack detection based on the resistance change.



제 1 장 서론

건축 및 기계 구조물은 일반적으로 다양한 하중과 부식 환경에 지속적으로 노출되는데, 이러한 효과에 의해 구조물이 균열 등의 문제를 일으킬 가능성이 있다. 균열이 어느 정도 진행 중인 구조물은 동일한 하중에서도 크랙으로인해 추가 변형 에너지가 생성되므로 추가 에너지에 의해 추가적인 변형이발생한다[1]. 미세 크랙의 수와 규모가 증가하면 균열 간의 상호 작용이 중요하다. 지금까지 많은 연구들이 미세 균열의 상호 작용과 성장에 초점을 맞추고 있다[2]. 성장 균열은 미세 균열로 인한 국소 결함이 존재한다. 이 결함은 마이크로 스케일에 의한 국부적 기계적 변형을 가속화시킨다. 따라서구조적 무결성을 위해 미세한 균열을 감지하는 것이 필수적이며 중요하다. 지속적인 부하로 생기는 결함을 방지하기 위해 구조적 안정성을 확보하기 위한 실시간 모니터링에 대한 연구가 진행 중이다[3].

또한 노후화된 구조물이 증가하고 붕괴사고가 빈번히 발생함에 따라. 그로 인한 피해를 감소시킬 수 있는 구조물 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring : SHM) 기술에 대한 중요성이 부각되고 있다. SHM 시스템이란, 구조물의 건전성 진단을 위한 일련의 시스템으로, 항공분야에서는 항공기 운 용 시 하중. 균열 등에 의한 구조 손상 감지가 가능하다는 점에서 그 중요도 및 잠재력이 증대되고 있다[4]. 또한 실시간으로 문제점에 대한 정보를 축적 하고 분석함으로써 직관적으로 파악할 수 있고 노동력 및 정비기간의 감소, 총체적 파괴에 대한 대비. 그에 따른 비용 절감 등의 효과를 제공하기도 한 다. SHM 시스템에는 해당 구조물의 구조적 상태가 위험할 때 손상 및 경고를 평가할 수 있는 통합 센서 시스템이 있다. 현재 그리드 형 광섬유 센서 기술 은 강화 플라스틱(Fiber Glass Reinforced Plastic : FRP) 구조 모니터링을 위한 대규모 응용 분야에서 가장 매력적인 기술이다[5]. 기본적으로 구조물 의 생존성을 보장하고 정밀도를 보다 높일 수 있도록 하는 것에 중점이 맞춰 져 있는데, 특히 최근에는 기계, 화학, 전기 등 다양한 분야의 원리를 이용 한 새로운 기술들이 SHM 센서에 적용되어 개발 중에 있다[6]. 더욱 정밀한 센서를 위해선 나노 공정 기술의 발달이 필수적이다. 그에 따라, 초미세 전

자 기계 시스템 (Micro Electro-Mechanism Systems : MEMS)이 발달하게 되며 센서의 소형화, 정밀화가 가능하게 되었다[7].

그로 인해 항공전자부품의 소형화 및 드론, 소형위성의 초미세 전기기계시스템 도입 등 많은 발전을 이루었다[8-10]. 이처럼 MEMS 기술 응용을 위한나노 공정의 기술 개발에 따라, 정밀한 전자 프린팅에 관한 연구가 활발히이루어지고 있다[11]. 그러나 과거에 기술 발전 방향은 화학적인 공정 방식을 선택했고 이로 인해 공정 과정에 많은 시료 손실과 환경오염 등을 발생시켰다[12]. 또한 MEMS/NEMS 제품을 제작하기 위해서는 간단한 공정 방식으로는 제작이 어렵다는 단점이 존재한다[13]. 최근에 이러한 문제들을 보완하기위해 친환경 기술에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이 중 주목을 끌고 있는 기술이 전기장을 이용한 전기수력학적 (Electrohydrodynamics : EHD) 잉크젯프린팅이다[14].

이는 이전의 잉크젯 프린팅과는 달리, 전기장을 이용하여 전도성 잉크를 수 마이크로 단위부터 나노 단위까지 미세하게 토출할 수 있는 최신 기술이다. EHD 기술을 이용하면 미세 패터닝으로 회로를 제작할 수 있으므로, 센서부의 Detecting Point의 민감도를 향상시킴으로써 민감도를 중요시하는 센서제작 등에 용이하다[15]. 실제로 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 보다작고 정밀한 가스센서, 바이오센서, 습도센서 등과 전방표시장치용 투명전국과 미세균열감지용 격자식 센서에 대한 연구가 수행되고 있다[16-19]. 현재까지 마이크로/나노 단위의 균열을 검출하기 위한 많은 방법이 제안되어 왔지만, 복합 구조물에서 미세 크랙을 검출하는 것은 매우 어렵다. 미세 균열을 감지하기 위해서는 미세 패턴 기술에 기반한 민감한 센서가 필요하다.

본 논문에서는 앞서 기술한 배경을 토대로 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 미세 크랙을 탐지하기 위한 MEMS 기반의 Grid-type 크랙 탐지 센서 개발을 위한 크랙 탐지 알고리즘을 파악하고자 하였다. 저항 변화를 이용하여 크랙이 발생한 부분의 저항변화율의 경향성을 이용하여 크랙의 위치를 추정하고자 했으며, 3차원 그래프와 크랙 위치 추정 프로그램을 제작하였다.



제 2 장 전기수력학적 잉크젯 프린팅 기술

제 1 절 메니스커스 형성 및 토출 원리

EHD는 전도성 잉크에 노즐과 기판에 인가하는 전압으로 전기장을 생성하여 노즐 내경보다 얇은 두께의 회로를 제작할 수 있는 방법이다. 전기장이 형성되지 않은 상태로 노즐에 잉크가 공급되면, 반달형의 메니스커스가 형성된다. 여기서 노즐과 기판 사이에 전압을 인가하게 되면 두 전극 사이에 전기장이 형성되고, 또한 잉크가 대전된다. 유도된 전하와의 상호 작용으로 전기력 방향으로 잉크가 이동하여 같은 극성을 가진 이온들이 메니스커스의 표면에 집중된다. 인가 전압이 점차 증가하게 되면 메니스커스 표면의 electrical shear stress가 커지므로 Taylor-cone을 형성하게 된다. 그림 2 - 1은 EHD 잉크젯 프린팅 원리 및 제팅 개략도이다.

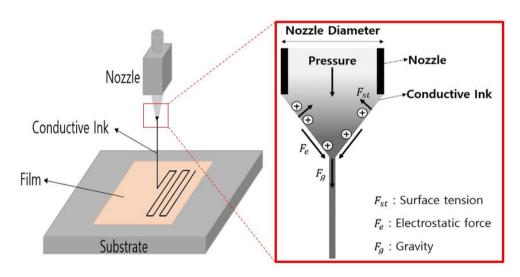


그림 2 - 1 EHD 잉크젯 프린팅 원리 및 제팅 개략도



제 2 절 전기수력학적 잉크젯 시스템

EHD 잉크젯 프린팅 시스템은 다양한 전도성 재료를 정전기력을 통해 목표기판 위로 패터닝하기 위한 공정 시스템이다. EHD 잉크젯 프린팅 시스템은그림 2 - 2와 그림 2 - 3과 같은 모듈 단위의 시스템으로 구성된다. 공정 변수 제어를 위한 주요 모듈은 크게 5가지가 있다. 일정한 유량의 전도성 잉크토출을 위해 지속적인 압력을 가해주는 시린지 펌프와 기판과 노즐 사이에전압을 인가시켜 전기장을 형성시키기 위한 고전압 증폭기, 사용자가 원하는방식의 패턴을 가능하게 하는 3축 구동 시스템, 전압을 인가하여 잉크 대전시키기 위한 정전기력 패터닝 헤드, 소프트웨어를 통해 전체적인 모듈들을제어할 공정 제어 시스템으로 구성되었다. 또한, 디스플레이를 통한 토출 상태 확인 및 촬영을 위한 서브 모듈인 고속카메라와 LED 조명이 있다.

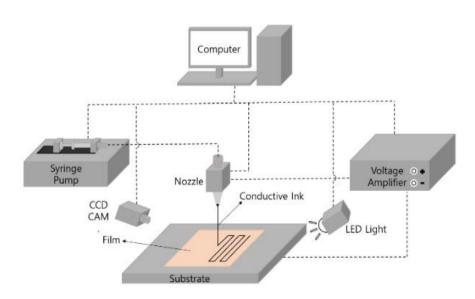


그림 2 - 2 EHD 잉크젯 프린팅 시스템 구성 모듈



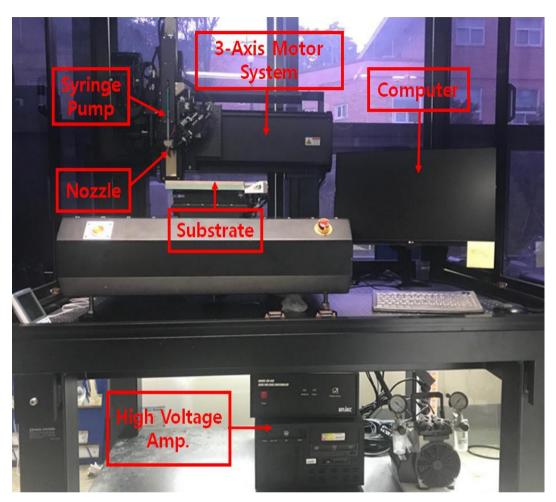


그림 2 - 3 EHD 잉크젯 프린팅 시스템

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 전기수력학적 토출 모드

그림 2 - 4는 Jaworek and Krupa 가 분류한 10가지의 EHD 토출 모드이다. EHD 잉크젯 프린팅 기술은 인가 전압, 유량 등의 최적 조건에 따른 각각의 모드를 사용하는 기술이다[20].

Dripping 모드는 인가되는 전압이 없는 상태에서 대부분 중력에 의해 발생한다. 일정한 유량이 노즐로 공급되면 노즐 끝단의 메니스커스가 형성되며 그 크기는 점점 커지는데 그 무게가 형성된 메니스커스의 표면장력보다 커지게 되면 중력에 의해 토출되는 형태이다. 전기장의 영향을 거의 받지 않게되고 전하의 공급을 늘리게 되면 노즐 끝단의 메니스커스는 점점 작아진다.

Micro-dripping 모드는 dripping 모드에서 인가 전압을 높이게 되면 나타나는 형태로 dripping 모드 보다는 작은 액적이 노즐 끝단에 형성된다.

Spindle 모드는 dripping 모드와 micro-dripping 모드와는 다르게 구의 형상이 아닌 기둥 형상으로 토출되는 현상이다. 공급 유량이 증가함에 따라 발생되며, 유체에 과잉 공급된 전하가 넓은 표면적을 통해 토출되는 현상이다. 인가 전압이 증가하여 토출 액적은 작아지고 주변에 위성 액적이 생기므로 안정적인 패티닝이 어려운 모드이다.

Multi-spindle 모드는 spindle 모드와 유사하지만 그에 비해 스프레이 현상도 함께 발생하며 고점도 재료에서 주로 발생한다. 또한, 액적이 전기장을 벗어난 위치에 토출이 되기도 한다.

Cone-jet 모드는 메니스커스가 원뿔 형태이고 Taylor-cone 이라고도 부른다. 가장 안정적으로 미세하게 토출할 수 있는 모드이며 메니스커스 끝 단에서 미세한 액적으로 분리되어 일반적인 EHD 기술 활용이 주로 쓰이는 모드이다. 인가 전압이 증가함에 따라 토출되는 액적은 작아지며 토출 유효 거리는짧아진다.

Oscillating-jet 모드는 인가 전압 및 공급 유량에 따라 다소 불규칙한 젯이 나타나는 현상이다. cone-jet 모드처럼 안정적인 토출이 어려우며 떨림이 발생하여 불규칙한 액적이 토출된다.

Precession 모드는 나선형으로 토출되는 젯이 회전하면서 토출되는 현상이



다. 노즐 끝단에서 회전하며 인가 전압이 증가할수록 회전속도가 빨라진다. Whipping 현상이라고도 부른다.

Multi-jet 모드는 전압이 과잉으로 인가되었을 때, 메니스커스의 원뿔 형태가 사라지게 되며 노즐 끝단에서 여러 갈래의 젯이 발생하는 현상이다. 그형태가 불규칙하게 지속적으로 바뀌며 안정적인 상태이 불가능한 상태이다.

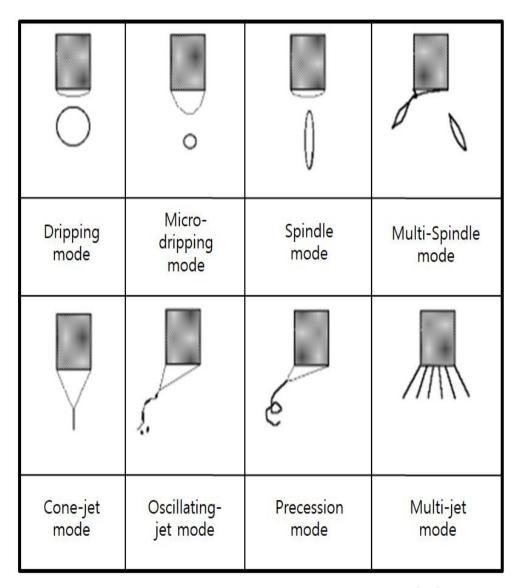


그림 2 - 4 공정 변수에 따른 전기수력학적 토출 모드[20]



제 3 장 미세전극 패터닝 실험 및 결과

제 1 절 샘플 제작 과정

그림 3 - 1은 EHD 잉크젯 프린팅 실험을 통한 샘플 제작과정이다. 은 나노잉크 제조를 위해 먼저 무극성 용매인 DBA (Diethylene glycol monobutylether acetate)와 계면활성제인 α-terpineol을 혼합하여 solvent를 제조하였다. 그 후,은 나노 페이스트 66.56 wt%과 제조된 solvent 33.44 wt%를 혼합하고, 제조된 잉크를 교반기를 이용해 4시간동안 분산하여 사용하였다[21]. 제조된 은 나노 잉크를 EHD 프린팅 시스템을 이용하여 미세회로를 제작하였다. 은 나노 잉크를 사용하여 미 필름위에 토출시켜 10 X 10 과 20 X 20 Grid-Type 회로를 제작하였고 은 나노 잉크가 패터닝된 미 필름을 convection oven을 이용하여 95℃에서 24시간 가량 소결을 진행하였다. 제작된 Metal-grid 패터닝에 임의의 크랙을 형성시켜 샘플을 제작하였다.



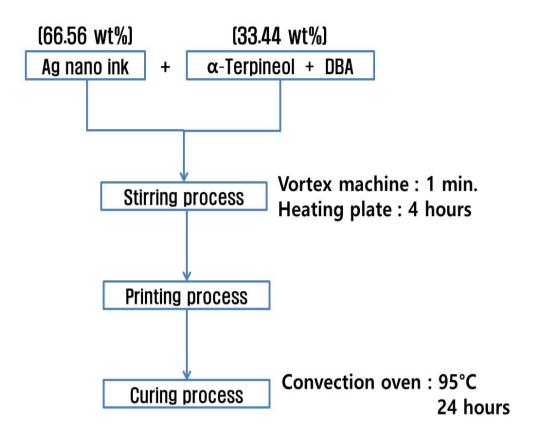


그림 3 - 1 EHD 잉크젯 프린팅 실험을 통한 샘플 제작 과정

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 공정 변수에 따른 토출 안정성 실험

1. 공급 유량 - 인가 전압에 따른 토출 안정성 및 토출 모드 분포

본 실험에 앞서, 그림 3 - 2은 Ag 나노 잉크의 공급 유량 - 인가 전압에 대한 토출 안정성 실험을 수행한 결과이다. 은 나노 잉크를 이용한 토출 실험을 통해 Dripping, Unstable cone-jet, Stable cone-jet, Multi-jet 모드까지 4가지의 토출 모드와 비교적 낮은 인가전압으로 인해 토출에 필요한 만큼의 electrical shear stress가 가해지지 않아 토출되지 않는 것을 확인하였다. 각각의 모드는 전압, 유량 등 세팅 파라미터의 영향을 받으며 각 구간마다 여러 모드의 일정 분포를 확인하였다.

첫째로, Dripping 모드는 높이에 따른 토출 유효 전압에 미치지 못할 때 발생된다. 실린지로부터 일정한 유량이 노즐 끝으로 공급되면, 생성되는 액 적의 크기는 증가하게 되며, 액적의 무게로 인해 토출되는 원리이다. 기본적 으로 액적의 크기가 노즐보다 크기 때문에 미세한 토출이 어려워 미세 회로 제작에 적합하지 않다. 또한 전기장의 영향을 거의 받지 않는 상태이기 때문 에 오히려 중력에 더 큰 영향을 받아 토출된다. 인가전압을 늘릴수록 액적의 크기가 작아지고, 토출되는 빈도가 높아진다.

둘째로, Unstable cone-jet 모드의 경우는 dripping 과 stable cone-jet 의 경계에서 불안정하게 cone-jet을 형성하는 모드이다. dripping과 안정적인 토출이 반복해서 발생하고, 안정적으로 토출이 되다가도 dripping 현상이불규칙하게 이루어진다.

셋째로, Stable cone-jet 모드는 가장 일반적인 EHD 토출 모드 중 하나이다. Cone-jet 모드를 이용하여 미세하고 정교한 패턴형성이 가능하기 때문에미세 패턴 응용이 가능하다.

마지막으로, Multi-spindle 모드는 액적의 표면장력보다 인가 전압에 의한 정전기적 척력이 클 때 발생한다. 2개 이상의 cone이 형성되며 여러 방향으



로 불규칙하게 토출되는 모드이다. 토출 유량 대비 전압이 높을 때 발생하고 또한 전 구간에서 일정 부분 발생하는 것을 확인하였다.

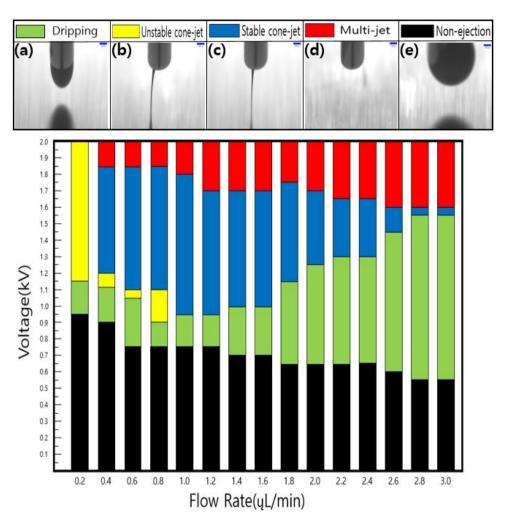


그림 3 - 2 공급 유량 - 인가 전압에 따른 제팅 안정성 분포도

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2. 토출 높이 - 인가 전압에 따른 토출 안정성 및 토출 모드 분포

또한, 그림 3 - 3는 제작된 Ag 나노 잉크의 토출 높이 - 인가 전압에 대한 제팅 안정성 실험을 수행한 결과이다. 은 나노 잉크를 이용한 토출 실험을 통해 'Dripping 모드', 'Micro-dripping 모드', 'Stable cone-jet 모드', 'Unstable cone-jet 모드' 및 'Whipping 모드' 등 5 가지의 토출 모드와 과 전압에 의한 'Short out' 현상을 확인하였다. 각각의 모드는 전압, 높이 등세팅 파라미터의 영향을 받으며 각 구간마다 여러 모드의 일정 분포를 확인하였다.

첫째로, 'Dripping 모드'는 높이에 따른 토출 유효 전압에 미치지 못할 때 발생되고, 각각의 토출 높이에서 모두 확인할 수 있었다. 실린지(syringe)로 부터 일정한 유량이 노즐 끝으로 공급되면, 생성되는 액적의 크기는 증가하게 되며, 액적의 무게로 인해 토출되는 원리이다. 기본적으로 액적의 크기가 노즐보다 크기 때문에 미세한 토출이 어려워 미세 회로 제작에 적합하지 않다. 또한 전기장의 영향을 거의 받지 않는 상태이기 때문에 오히려 중력에 더 큰 영향을 받아 토출된다. 인가전압을 늘릴수록 액적의 크기가 작아지고, 토출되는 빈도가 높아진다.

둘째로, 'Micro-dripping 모드'는 역시 전 구간에서 확인할 수 있었으며 dripping 모드에서 전기장의 세기를 증가시킬 때 관찰되는 토출 모드이다. dripping 모드와는 달리 미세한 액적을 부분적으로 토출하는 형태이므로, 토출된 이후에도 액면의 크기가 거의 줄어들지 않는다.

셋째로, 'Stable cone-jet 모드'는 가장 일반적인 EHD 토출 모드 중 하나이다. 토출 높이 200 μm부터 700 μm 까지 안정적인 구간이 존재한다는 것을 확인하였고, 750 μm부터는 안정적으로 토출이 되지 않는다. cone-jet 모드를 이용하여 미세하고 정교한 패턴형성이 가능하기 때문에 미세 패턴 응용이 가능하다. 다만 인쇄 거리가 매우 길어 질 때(750 μm 이상), 토출은 전기장에 의해 액적 줄기에서 분무되는 형태로 변하므로, 미세 패터닝을 위해서는 인쇄 거리를 최소화하여야 정교한 인쇄 공정이 가능하다.

넷째로, 'Unstable cone-jet 모드'의 경우는 stable cone-jet 모드와 뒤에서 언급할 whipping 모드의 경계에서 불안정하게 cone-jet을 형성하는 모드이다. 안정적인 토출과 whipping이 반복해서 발생하고, whipping이 발생하다가도 안정적인 토출이 불규칙하게 이루어진다.

마지막으로, 'Whipping 모드'는 액적의 표면장력보다 인가 전압에 의한 정전기적 반발력이 클 때, 요동치듯 다소 불안정하게 토출되는 모드이다. 토출높이 대비 전압이 높을 때 발생하고 또한 전 구간에서 일정 부분 발생하는 것을 확인하였다.

토출 높이 200 μm부터 400 μm까지 일정 이상의 전압을 인가하면 낮은 높이에서 과전압이 흐르며 short out 현상이 발생하여 실험이 불가능하였다. 토출 높이 400 μm 부터 1000 μm까지는 2 kV까지 증가시켜도 과전압에 의한 short out 현상이 발생하지 않아 실험에 적합한 토출 높이를 확보할 수있었다.

따라서 PI 필름의 두께가 150 μm 이므로 토출 높이가 400 μm 이하에서는 기판과 가깝기 때문에 전기적 요인이 과하게 작용한다. 이러한 점을 고려했을 때, 미세회로 제작을 위한 공정 조건으로 토출 높이 450 μm 그리고 인가전압 1.25 kV에서 EHD 프린팅 조건이 적합하다고 판단하여 실행하였다.

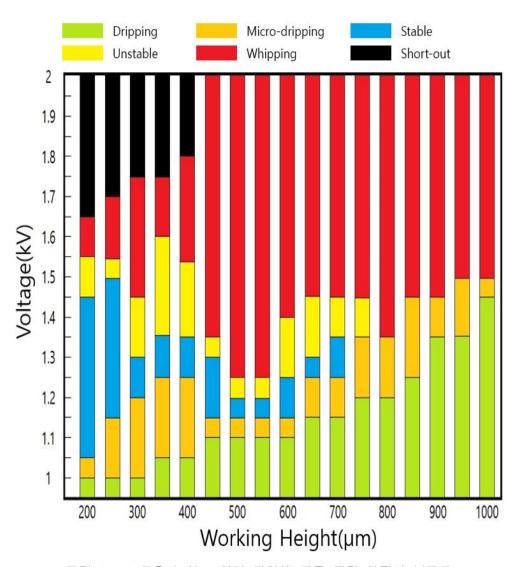


그림 3 - 3 토출 높이 - 인가 전압에 따른 제팅 안정성 분포도



제 3 절 소결 시간에 따른 Ag 입자 상태

그림 3 - 4는 Ag 나노 잉크로 제작한 회로의 소결 시간을 4시간마다 달리하여 SEM으로 촬영한 사진이다. 소결 온도는 95℃로 설정하였고 소결 시간은 4시간부터 24시간까지 총 6가지로 달리하여 입자의 상태를 확인하였다. 각입자들은 다소 불규칙한 형상의 구형들이고 600nm 정도의 크기를 가지지만, 편차가 다소 큰 입도 분포를 나타냄을 알 수 있었다. 그림 3 - 4(a)는 Ag 나노 회로를 4시간 소결시킨 후 SEM으로 촬영한 사진이다. 입자 간의 조밀화가거의 일어나지않아 목 크기 및 수축이 매우 적으며 입자 사이마다의 기공이존재한다. 그에 반해 그림 3 - 4(f)는 24시간 동안 소결하였는데, 입자간 조밀화로 인해 입자 성장이 진행되었고, 각 입자 간 목이 생성되어 물리적 성질의 효율을 증가시킨다. 소결 시간이 오래 지속됨에 따라 입자 성장이 차이남을 알 수 있다.



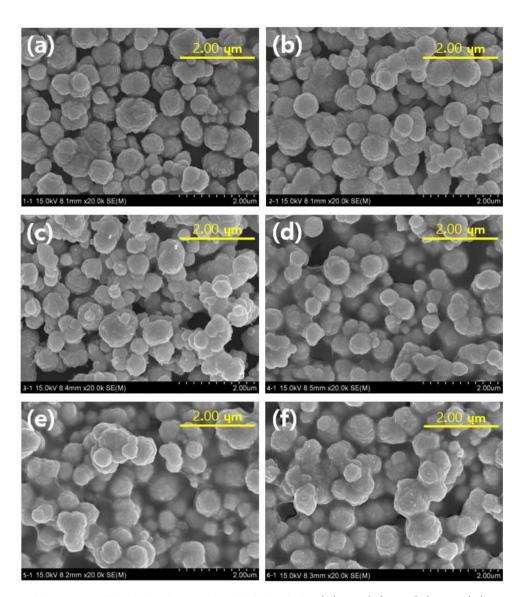


그림 3 - 4 소결 시간 별 Ag 나노 입자의 상태; (a)4h, (b)8h, (c)12h, (d)16, (e)20h, (f)24h



제 4 장 Conductive Line 유연 전도성 실험

전자기기의 기술개발에 따라 플렉서블 장치에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 플렉서블 장치는 굽힘과 같은 물리적 변화에 대한 전기적 특성 연구가 필수적이다[21]. 따라서 은 나노 미세회로의 굽힘에 따른 저항변화율을확인하기 위해 앞서 진행한 토출 안정성 실험을 토대로 은 나노 미세회로를제작하여 유연 전도성 실험을 진행하였다.

유연전도성 실험을 위한 곡률 반경은 다음 식 (1)과 같이 정의된다[22].

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

그림 4-1은 유연 전도성 시험의 개략도이다. 여기서 L은 기판 길이, dL은 굽힘 시 변형 거리, 그리고 h_s 는 필름의 두께를 나타낸다. 그 후 제작된 굽힘 장치를 이용해 곡률 반경이 25, 22, 19, 16, 13, 10 mm 일 때의 저항을 각각 측정하고 초기 저항과 비교하여 저항 변화율을 측정하였다.

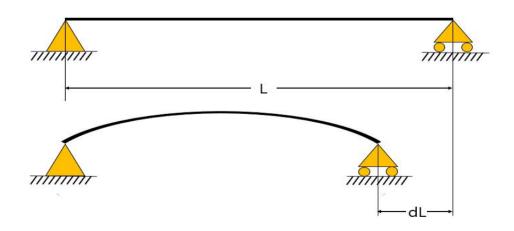


그림 4 - 1 유연 전도성 시험의 개략도



식 1을 이용해 곡률 반경 별 이송 거리를 구하였고 그에 따라 6 가지의 굽힘 케이스로 측정을 진행하였다. 그림 4 - 2는 제작된 굽힘 장치를 이용해 곡률 반경의 6가지 케이스를 측정한 사진이다.

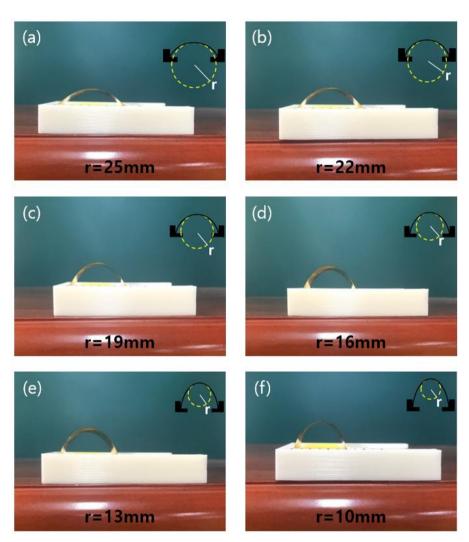


그림 4 - 2 벤딩 모듈을 통한 곡률 반경에 따른 벤딩 케이스; (a) r = 25mm, (b) 22mm, (c) 19mm, (d) 16mm, (e) 13mm, (f) 10mm



곡률 반경 별 저항 측정 결과 및 저항변화율을 Table. 1에 정리하였다. 저항 변화율은 $\Delta R/R_0$ 로 나타내었고 여기서 R_0 는 초기 저항, R은 굽힘 시험후 저항 값이다. 저항변화율은 작게는 0.2701, 크게는 0.6972까지 변화함을 알 수 있었다.

그림 4 - 3은 곡률 반경 별 저항변화율을 나타낸 그래프이다. 유연전도성 실험 결과, 곡률 반경이 25 mm에서부터 19 mm까지는 저항변화율이 1.0066 ~ 1.0105 사이인 것을 알 수 있고, 저항 변화가 미비하여 비교적 안정적이라는 것을 확인하였다. 곡률 반경 19 mm 이후에는 저항변화율이 1.0105 ~ 1.3851 까지 점차 증가하면서 16 mm, 13 mm 및 10 mm로 곡률 반경이 작아질수록 점 진적으로 증가함을 확인하였다. 측정값보다 곡률반경을 더 작게 하는 경우, 저항변화율이 기하급수적으로 증가할 것으로 사료된다.

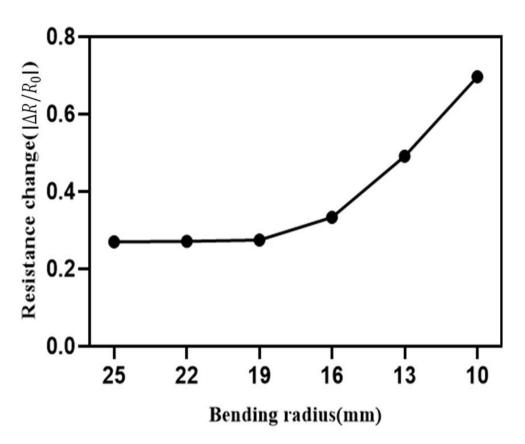


그림 4 - 3 Ag conductive line의 곡률 반경별 저항 변화율



제 5 장 저항변화 기반의 크랙 탐지를 위한 Metal-grid 전극 응용

제 1 절 크랙 탐지 알고리즘

1. 단일 크랙

각 샘플별 metal-grid의 전기 저항 변화는 크랙이 생긴 회로의 전류의 경로가 직접적으로 달라지기 때문에 물리적 손상 혹은 충격에 의해 야기될 수있다. 따라서, 회로의 단락에 의한 크랙 탐지 알고리즘은 전기 저항 변화에의해 정립된다. 그림 5 - 1은 우측 상단에 y축 방향의 크랙을 형성한 10X10 metal-grid 샘플의 사진과 개략도이다. 크랙은 Y9, Y10 사이에 X1, X2, X3을 가로지르는 방향으로 생성되었다. 그림 5 - 2는 우측상단 단일 크랙 샘플 (10X10)에서의 크랙 유무에 따른 저항변화율을 측정한 데이터이다. 크랙이직접적으로 형성된 X1, X2, X3에서는 크랙이 관여되지 않은 회로에 비해 저항의 변화가 큰 경향성을 보이며 해당 구간에 크랙이 형성되었음을 알 수 있다.



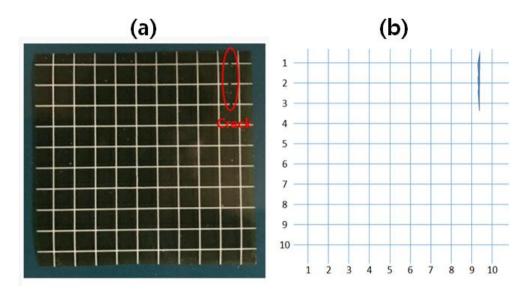


그림 5 - 1 우측상단 단일 크랙 샘플(10X10); (a) 샘플 사진, (b) 개략도

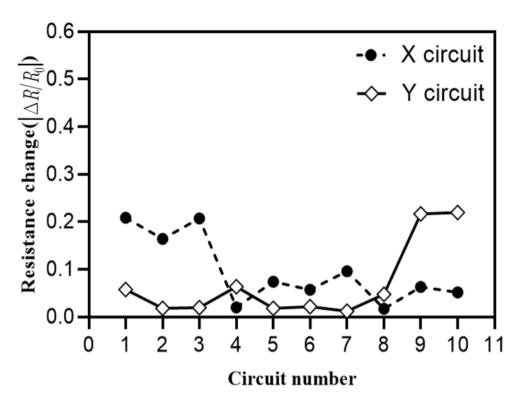


그림 5 - 2 우측상단 단일 크랙 샘플(10X10)의 회로 별 저항변화율

그림 5 - 2에서 보여주듯 크랙이 형성된 각 회로에서 저항변화율이 크랙이 관여되지 않은 회로보다 더 많은 변화를 보임을 알 수 있다. 하지만 저항변화율 그래프만으로는 각 회로의 저항변화율로 크랙의 위치를 손쉽게 확인하기엔 어렵다는 점에 있어서 더 직관적인 데이터가 필요하다. 그리하여 각 저항변화율을 교차시킴으로써 3차원 그래프로 나타내었다.

저항변화율을 통한 직관적인 크랙 탐지를 위한 저항변화율 데이터 교차, 이후 보간법을 이용한 데이터 보정이라는 두 가지 과정을 통해 2차원 및 3차원 크랙 탐지 좌표를 나타내었다. 그림 5 - 3은 우측상단 단일크랙 샘플 (10X10)에 관한 2차원 및 3차원으로 나타낸 데이터 교차 그래프와 보간법이 적용된 그래프이다. 그림 5 - 3(a)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 교차하여 나타낸 2차원 저항변화 그래프이다. 그림 5 - 3(b)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율 데이터에 메쉬스케일을 증가시키고 보간법을 적용하여 보정한 2차원 저항변화 그래프이다. 그림 5 - 3(c)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 교차하여 3차원으로 나타낸 그래프이다. 그림 5 - 3(d)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율 데이터에 메쉬 스케일을 증가시키고 보간법을 적용하여 보정한 3차원 저항변화율 데이터에 메쉬 스케일을 증가시키고 보간법을 적용하여 보정한 3차원 저항변화율 그래프이다.

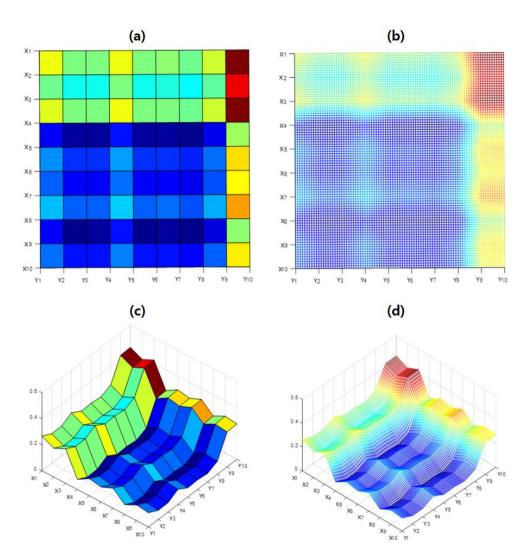


그림 5 - 3 우측상단 단일크랙 샘플(10X10) 저항 변화율;

- (a) 저항변화율 교차를 통한 2차원 좌표, (b) 보간법을 적용한 2차원 좌표,
- (c) 저항변화율 교차를 통한 3차원 좌표, (d) 보간법을 적용한 3차원 좌표

또한 크랙 탐지의 정확성을 향상시키기 위해 10X10 metal-grid 보다 스케일을 증가시킨 20X20 metal-grid 샘플을 제작하여 저항변화율 및 정확도를 비교하였다. 크랙은 10X10 샘플과 같은 위치, 같은 크기로 형성하였으며 Ag회로 간의 간격은 2mm로 토출하였다.

그림 5 - 4는 우측 상단에 y축 방향의 크랙을 형성한 20X20 metal-grid 샘플의 사진과 개략도이다. 크랙은 Y18, Y19 사이에 X1, X2, X3, X4, X5를 가로지르는 방향으로 생성하였다. 그림 5 - 5는 우측상단 단일크랙 샘플(20X20)의 저항변화율을 측정한 데이터이다. 크랙이 직접적으로 형성된 X1, X2, X3, X4, X5와 Y18, Y19에서는 저항변화율이 크랙의 영향을 받지 않는 회로의 저항변화율에 비해 비교적 큰 것을 알 수 있다. 이를 통해 대략적인 크랙의 위치를 추정할 수 있다.

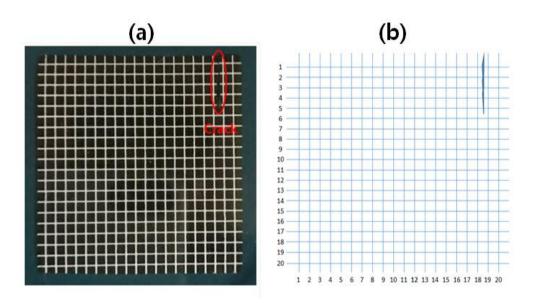


그림 5 - 4 우측상단 단일 크랙 샘플(20X20); (a) 샘플 사진. (b) 개략도

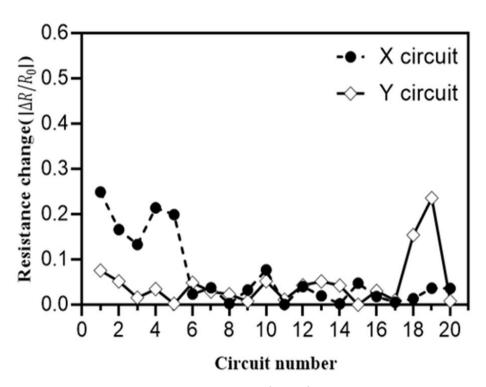


그림 5 - 5 우측상단 단일 크랙 샘플(20X20)의 회로 별 저항변화율

그림 5 - 6은 우측상단 단일크랙 샘플(20X20)에 관한 2차원 및 3차원으로 나타낸 보간법이 적용된 크랙 탐지 좌표이다. 그림 5 - 6(a)에서 보이듯 저항변화율이 교차되어 합해진 부분의 저항변화율의 크기에 따라 각각 청색, 녹색, 빨간색 순으로 커짐을 알 수 있다. 그 중 붉게 보이는 부분이 저항변화율이 가장 크며 해당 부분의 범위는 X18, X19와 Y1부터 Y5까지임을 그래프를 통해 확인할 수 있다, 그 중 이전 샘플에 비해 격자 스케일이 세밀해졌기때문에 더 정확한 크랙 위치를 나타낼 수 있었다.

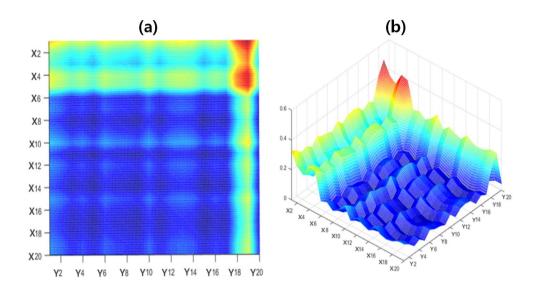


그림 5 - 6 우측상단 단일크랙 샘플(20X20) 저항 변화율; (a) 보간법을 적용한 2차원 좌표, (b) 보간법을 적용한 3차원 좌표



그림 5 - 7은 하단에 x축 방향으로 크랙을 형성한 10X10 metal-grid 샘플의 사진과 개략도이다. 크랙은 X9, X10과 Y2부터 Y9 사이에 x축 방향으로 형성하였다. 그림 5 - 8은 하단 단일 크랙 샘플(10X10)에서의 크랙 유무에 따른 저항변화율을 측정한 데이터이다. X9, X10 사이와, 크랙이 직접적으로 형성된 Y2부터 Y9까지 크랙이 관여되지 않은 회로에 비해 저항의 변화가 큰 경향성을 보이며 해당 구간에 크랙이 형성되었음을 알 수 있다.

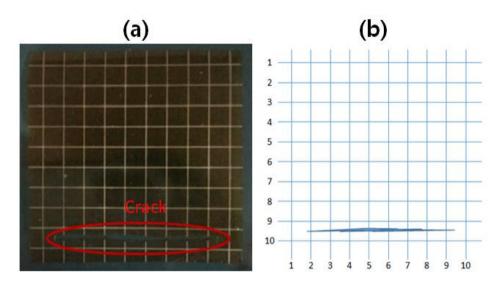


그림 5 - 7 하단 단일 크랙 샘플(10X10); (a) 샘플 사진, (b) 개략도

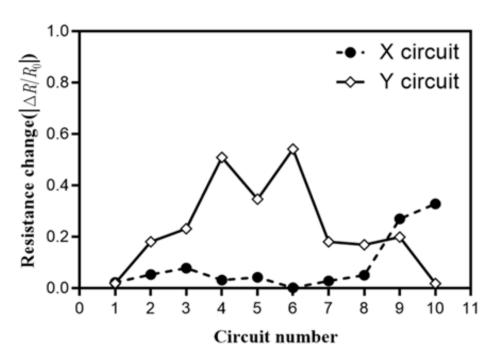


그림 5 - 8 하단 단일 크랙 샘플(10X10)의 회로 별 저항변화율



그림 5 - 9는 하단 단일크랙 샘플(10X10)에 관한 2차원 및 3차원으로 나타 낸 데이터 교차 그래프와 보간법이 적용된 그래프이다. 그림 5 - 9(a)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 교차하여 나타낸 2차원 저항변화 그래프이다. 그림 5 - 9(b)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율 데이터에 메쉬스케일을 증가시키고 보간법을 적용하여 보정한 2차원 저항변화 그래프이다. 그림 5 - 9(c)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 교차하여 3차원으로 나타낸 그래프이다. 그림 5 - 9(d)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변 한물을 교차하여 3차원으로 나타낸 그래프이다. 그림 5 - 9(d)는 우측상단 단일크랙 샘플(10X10)의 저항변화율 데이터에 메쉬 스케일을 증가시키고 보간법을 적용하여 보정한 3차원 저항변화 그래프이다.

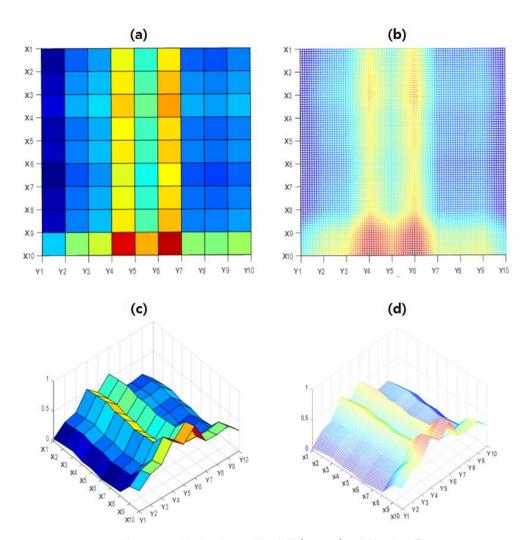


그림 5 - 9 하단 단일크랙 샘플(10X10) 저항 변화율;

- (a) 저항변화율 교차를 통한 2차원 좌표, (b) 보간법을 적용한 2차원 좌표,
- (c) 저항변화율 교차를 통한 3차원 좌표, (d) 보간법을 적용한 3차원 좌표



그림 5 - 10은 하단에 x축 방향의 크랙을 형성한 20 X 20 metal-grid 샘플의 사진과 개략도이다. 크랙은 X19에 Y3부터 Y17 길이만큼 형성하였다. 그림 5 - 11는 하단 단일크랙 샘플 (20X20)의 저항변화율을 측정한 데이터이다. 크랙이 직접적으로 형성된 X19와 Y3부터 Y17에서는 저항변화율이 크랙의 영향을 받지 않는 회로의 저항변화율에 비해 비교적 큰 것을 알 수 있다. 이를통해 대략적인 크랙의 위치를 추정할 수 있다.

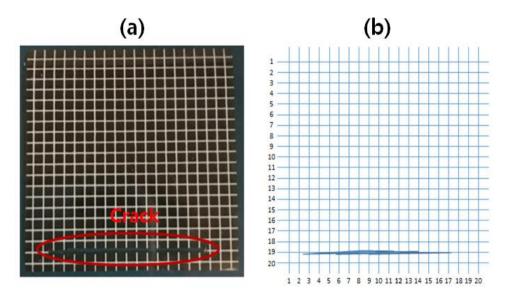


그림 5 - 10 하단 단일크랙 샘플(20X20); (a) 샘플 사진, (b) 개략도

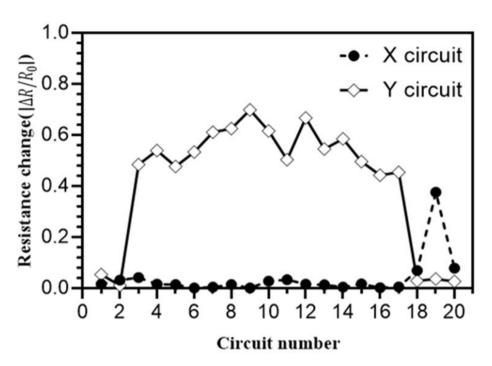


그림 5 - 11 하단 단일크랙 샘플(20X20)의 회로 별 저항변화율

그림 5 - 12는 하단 단일크랙 샘플(20X20)에 관한 2차원 및 3차원으로 나타낸 보간법이 적용된 크랙 탐지 좌표이다. 그림 5 - 12(a)에서 보이듯 저항변화율이 교차되어 합해진 부분의 저항변화율의 크기에 따라 각각 청색, 녹색, 빨간색 순으로 커짐을 알 수 있다. 그 중 붉게 보이는 부분이 저항변화율이 가장 크며 해당 부분의 범위는 X19와 Y3부터 Y17까지임을 그래프를 통해 확인할 수 있다, 이전 샘플에 비해 격자 스케일이 세밀해졌기 때문에 더정확한 크랙 위치를 나타낼 수 있었다.

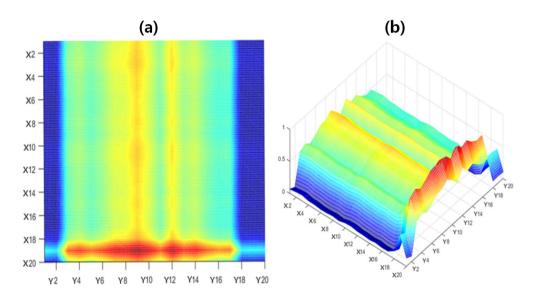


그림 5 - 12 하단 단일크랙 샘플(20 X 20) 저항변화율; (a) 보간법을 적용한 2차원 좌표, (b) 보간법을 적용한 3차원 좌표

2. 다중 크랙

그림 5 - 13은 중앙에 2개의 크랙을 가진 10X10 metal-grid 샘플의 사진과 개략도이다. 크랙은 Y8, Y9 사이에 X3, X4, X5을 가로지르는 방향으로 형성되었고, X3, X4 사이와 Y4, Y5, Y6에 크랙이 형성 되었다. 그림 5 - 14는 중앙 다중크랙 샘플(10X10)에서의 크랙 유무에 따른 저항변화율을 측정한 데이터이다. 크랙이 생기지 않은 회로에서 크랙이 직접적으로 형성된 X3, X4, X5에서는 크랙이 관여되지 않은 회로에 비해 저항의 변화가 큰 경향성을 보이며 해당 구간에 크랙이 형성되었음을 알 수 있다.

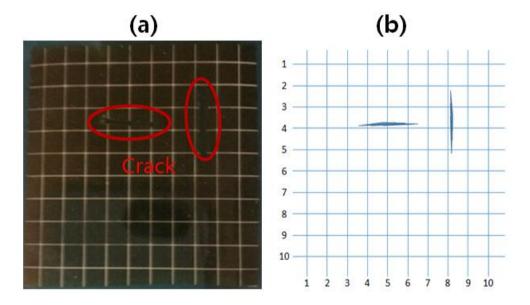


그림 5 - 13 중앙 다중크랙 샘플(10X10); (a) 샘플 사진, (b) 개략도

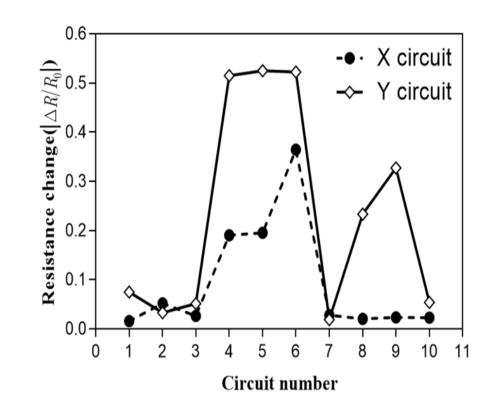


그림 5 - 14 중앙 다중크랙 샘플(10X10)의 회로 별 저항 변화율



그림 5 - 15는 중앙 다중크랙 샘플(10X10)에 관한 2차원 및 3차원으로 나타낸 데이터 교차 그래프와 보간법이 적용된 그래프이다. 그림 5 - 15(a)는 중앙 다중크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 교차하여 나타낸 2차원 저항변화 그래프이다. 그림 5 - 15(b)는 중앙 다중크랙 샘플(10X10)의 저항변화율 데이터에 메쉬스케일을 증가시키고 보간법을 적용하여 보정한 2차원 저항변화 그래프이다. 그림 5 - 15(c)는 중앙 다중크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 교차하여 3차원으로 나타낸 그래프이다. 그림 5 - 15(d)는 중앙 다중크랙 샘플(10X10)의 저항변화율을 해여 보정한 3차원 저항변화 그래프이다.

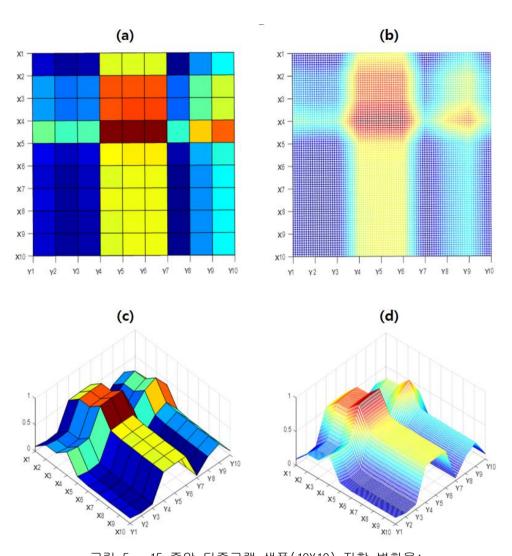


그림 5 - 15 중앙 다중크랙 샘플(10X10) 저항 변화율;

- (a) 저항변화율 교차를 통한 2차원 좌표, (b) 보간법을 적용한 2차원 좌표,
- (c) 저항변화율 교차를 통한 3차원 좌표, (d) 보간법을 적용한 3차원 좌표

그림 5 - 16은 중앙에 다중의 크랙을 형성한 20 X 20 metal-grid 샘플의 사진과 개략도이다. 크랙은 X6, X7과 Y8부터 Y12 사이에, 그리고 Y16에 X4부터 X9 길이만큼 형성하였다. 그림 5 - 17는 우측상단 단일크랙 샘플 (20X20)의 저항변화율을 측정한 데이터이다. 크랙이 직접적으로 형성된 Y8부터 Y12와 X6, X7 그리고 Y16에 X4부터 X9길이 만큼 형성된 크랙에서는 저항변화율이 크랙의 영향을 받지 않는 회로의 저항변화율에 비해 비교적 큰 것을 알수 있다. 이를 통해 대략적인 크랙의 위치를 추정할 수 있다.

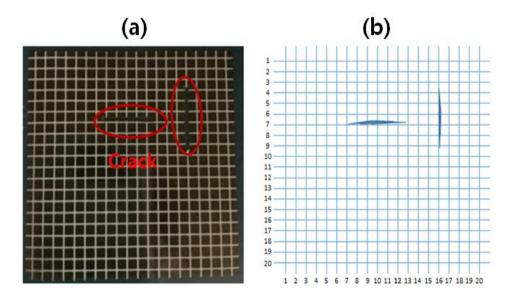


그림 5 - 16 중앙 다중크랙 샘플(20X20); (a) 샘플 사진, (b) 개략도

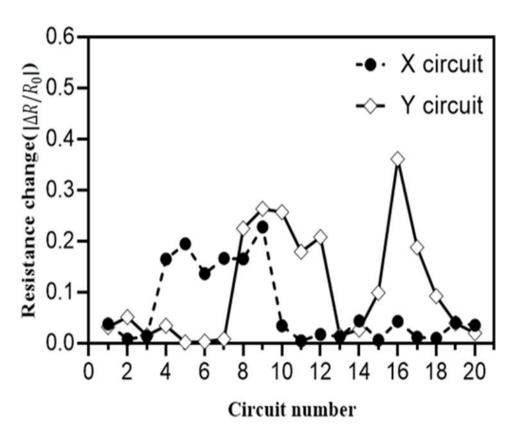


그림 5 - 17 중앙 다중크랙 샘플(20X20)의 회로 별 저항 변화율

그림 5 - 18는 중앙 단일크랙 샘플(20X20)에 관한 2차원 및 3차원으로 나타낸 보간법이 적용된 크랙 탐지 좌표이다. 그림 5 - 18(a)에서 보이듯 저항변화율이 교차되어 합해진 부분의 저항변화율의 크기에 따라 각각 청색, 녹색, 빨간색 순으로 커짐을 알 수 있다. 그 중 붉게 보이는 부분이 저항변화율이 가장 크며 해당 부분의 범위는 Y8부터 Y12와 X6, X7 그리고 Y16에 X4부터 X9 길이 만큼 형성된 부분부터 Y5까지임을 그래프를 통해 확인할 수 있다, 그 중 이전 샘플에 비해 격자 스케일이 세밀해졌기 때문에 더 정확한 크랙 위치를 나타낼 수 있었다.

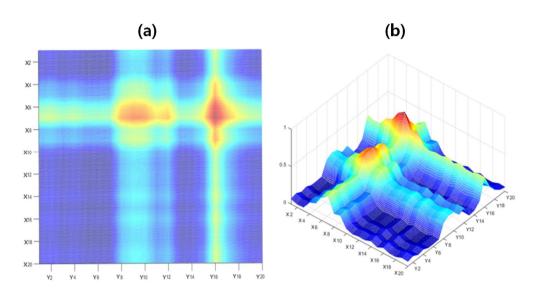


그림 5 - 18 중앙 다중크랙 샘플(20X20) 저항 변화율; (a) 보간법을 적용한 2차원 좌표, (b) 보간법을 적용한 3차원 좌표

3. 위치 추정 좌표 필터링

앞서 측정한 각 회로별 저항변화율을 교차한 데이터를 필터링시켰다. 크랙으로 인한 저항변화율의 경향성이 겹치게 되므로 더 해당 영역의 증폭된 데이터를 얻기 위함이다. 또한, 크랙으로 인한 저항변화율과 크랙이 없는 회로에서의 저항변화율이 중첩되는 부분의 데이터를 필터링하여 크랙위치 좌표의직관성을 얻고자 하였다. 필터링된 저항 변화율의 경향성을 3차원으로 나타나게 되며 그와 동시에 크랙 추정 위치를 확인할 수 있다.

그림 5 – 19는 우측상단 단일크랙 샘플의 저항변화율을 교차/필터링시킨 후 보간법을 적용한 좌표이다. 그림 5 - 19(a), (c)에는 보간법을 적용한 저 항변화율을 2D 좌표로 나타내었다. 보간법을 적용하였기 때문에 각 arid 별 로 구간이 세분화된 것을 확인할 수 있었다. 그림 5 – 19(b), (d)에서는 앞 선 결과를 토대로 보간법을 적용한 저항변화율의 교차/필터링을 통해 3D 좌 표로 나타내었다. 보간법에 의해 보정된 저항 변화율의 경향성을 3차원으로 나타나게 되며 그와 동시에 크랙 추정 위치를 확인할 수 있다. 그림 5 - 20 은 하단 단일크랙 샘플의 저항변화율을 교차/필터링시킨 후 보간법을 적용한 좌표이다. 그림 5 - 20(a), (c)에는 보간법을 적용한 저항변화율을 2D 좌표 로 나타내었다. 보간법을 적용하였기 때문에 각 grid 별로 구간이 세분화된 것을 확인할 수 있었다. 그림 5 - 20(b), (d)에서는 앞선 결과를 토대로 보 간법을 적용한 저항변화율의 교차/필터링을 통해 3D 좌표로 나타내었다. 보 간법에 의해 보정된 저항 변화율의 경향성을 3차원으로 나타나게 되며 그와 동시에 크랙 추정 위치를 확인할 수 있다. 그림 5 – 21는 중앙 다중크랙 샘 플의 저항변화율을 교차/필터링시킨 후 보간법을 적용한 좌표이다. 그림 5 -21(a), (c)에는 보간법을 적용한 저항변화율을 2D 좌표로 나타내었다. 보간 법을 적용하였기 때문에 각 grid 별로 구간이 세분화된 것을 확인할 수 있었 다. 그림 5 - 21(b). (d)에서는 앞선 결과를 토대로 보간법을 적용한 저항변 화율의 교차/필터링을 통해 3D 좌표로 나타내었다. 보간법에 의해 보정된 저 항 변화율의 경향성을 3차원으로 나타나게 되며 그와 동시에 크랙 추정 위치 를 확인할 수 있다.



기존 10X10 샘플에서 Grid scale을 10x10에서 20x20으로 증가시켰기 때문에 20x20 샘플에서는 기존에 모호했던 추정 위치보다 실제 크랙의 위치에 근접함을 알 수 있다.

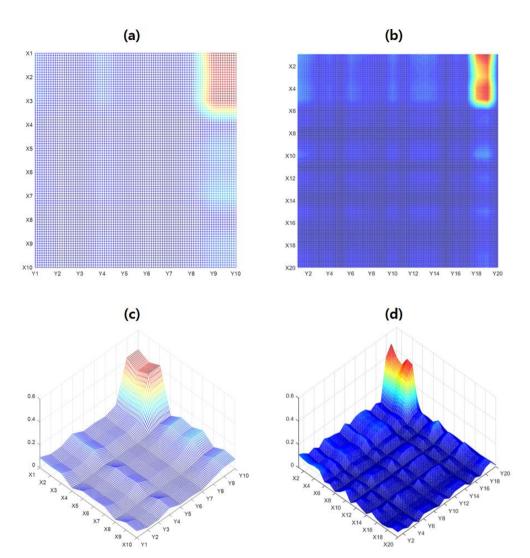


그림 5 - 19 필터링 후 보간법을 적용한 우측상단 단일크랙 샘플 저항 변화율; (a) 10X10 샘플의 2차원 좌표, (b) 20X20 샘플의 2차원 좌표,

(c) 10X10 샘플의 3차원 좌표, (d) 20X20 샘플의 3차원 좌표

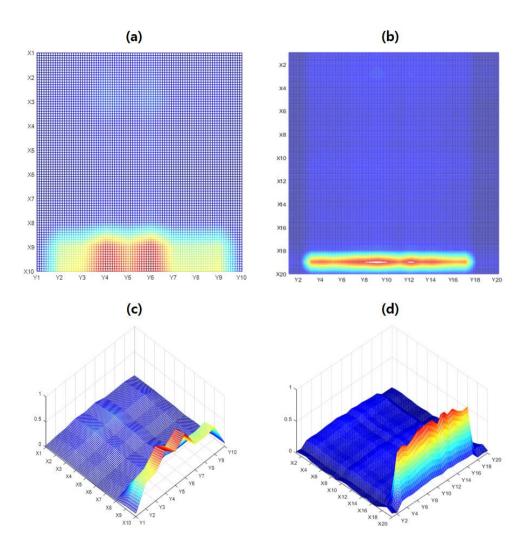


그림 5 - 20 필터링 후 보간법을 적용한 하단 단일크랙 샘플 저항 변화율; (a) 10X10 샘플의 2차원 좌표, (b) 20X20 샘플의 2차원 좌표,

- (c) 10X10 샘플의 3차원 좌표, (d) 20X20 샘플의 3차원 좌표

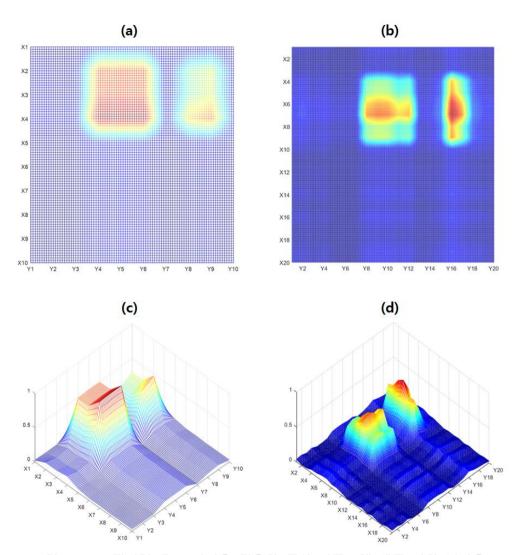


그림 5 - 21 필터링 후 보간법을 적용한 중앙 다중크랙 샘플 저항 변화율; (a) 10X10 샘플의 2차원 좌표, (b) 20X20 샘플의 2차원 좌표,

(c) 10X10 샘플의 3차원 좌표, (d) 20X20 샘플의 3차원 좌표



제 2 절 크랙 위치 추정 프로그램 제작

저항변화를 기반으로 한 크랙 위치를 2차원으로 확인할 수 있었는데, 앞선결과에서는 저항변화율의 크기에 따라 색상으로 나타내었기에 구간별 색상을통해 크랙 위치를 짐작할 수 있었다. 더 나아가 간단하면서 직관적으로 크랙위치를 확인 가능하도록 프로그램화를 하였다. 앞서 측정한 각 샘플별 저항변화율과 크랙 탐지 알고리즘을 토대로 크랙의 위치를 추정할 수 있는 프로그램을 제작하였다. 그림 5 - 22는 우측상단 단일 크랙 샘플에 대해 크랙 생성 위치를 표기한 프로그램이다. 그림 5 - 22(a)는 10 X 10에서의 우측상단단일 크랙 위치를 표기한 프로그램이고, 그림 5 - 22(b)는 20 X 20에서의 우측상단단일 크랙 위치를 표기한 프로그램이다. 그림 5 - 22(a)에서는 크랙의 추정 위치가 X1, X2, X3과 Y9, Y10 범위 안에서 형성됨을 알 수 있다. 그림 5 - 22(b)에서는 크랙의 추정 위치가 X1부터 X5, Y18과 Y19 범위 안에서형성됨을 알 수 있다. 격자의 스케일이 증가함에 따라 그림 5 - 22(a)에서의크랙 추정 위치보다 그림 5 - 22(b)에서의 크랙 추정 위치가 실제 샘플에 형성된 크랙의 위치가 흡사함을 알 수 있다.



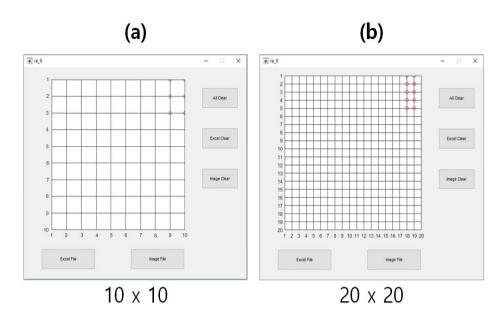


그림 5 - 22 우측상단 단일크랙 샘플에 대한 크랙 위치를 표기한 프로그램; (a) 10x10, (b) 20x20



그림 5 - 23는 하단 단일크랙 샘플에 대해 크랙 생성 위치를 표기한 프로그램이다. 그림 5 - 23(a)는 10 X 10에서의 하단 단일 크랙 위치를 표기한 프로그램이고, 그림 5 - 23(b)는 20 X 20에서의 하단 단일 크랙 위치를 표기한 프로그램이다. 그림 5 - 23(a)에서는 크랙의 추정 위치가 X9와 X10, Y2부터 Y9 범위 안에서 형성됨을 알 수 있다. 그림 5 - 23(b)에서는 크랙의 추정 위치가 X19에 위치하며, 그 길이는 Y3부터 Y17까지 임을 알 수 있다. 격자의스케일이 증가함에 따라 그림 5 - 23(a)에서의 크랙 추정 위치보다 그림 5 - 23(b)에서의 크랙 추정 위치가 흡사함을 알 수 있다.



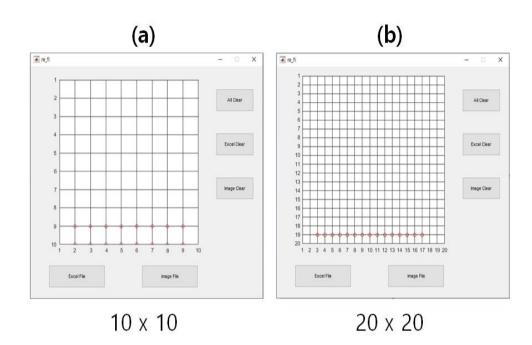


그림 5 - 23 하단 단일크랙 샘플에 대한 크랙 위치를 표기한 프로그램; (a) 10x10, (b) 20x20



그림 5 - 24는 중앙 다중 크랙 샘플에 대해 크랙 생성 위치를 표기한 프로그램이다. 그림 5 - 24(a)는 10 X 10에서의 중앙 다중 크랙 위치를 표기한 프로그램이고, 그림 5 - 24(b)는 20 X 20에서의 중앙 다중 크랙 위치를 표기한 프로그램이다. 그림 5 - 24(a)에서는 크랙의 추정 위치가 X3, X4와 Y4, Y5, Y6 그리고 X3, X4, X5와 Y8, Y9 범위 안에서 형성됨을 알 수 있다. 그림 5 - 24(b)에서는 크랙의 추정 위치가 X6, X7과 Y8부터 Y12 범위 안에서, 그리고 X4부터 X9의 길이를 가진 크랙이 Y16에서 형성됨을 알 수 있다. 격자의스케일이 증가함에 따라 그림 5 - 24(a)에서의 크랙 추정 위치보다 그림 5 - 24(b)에서의 크랙 추정 위치가 실제 샘플에 형성된 크랙의 위치가 흡사함을 알 수 있다.



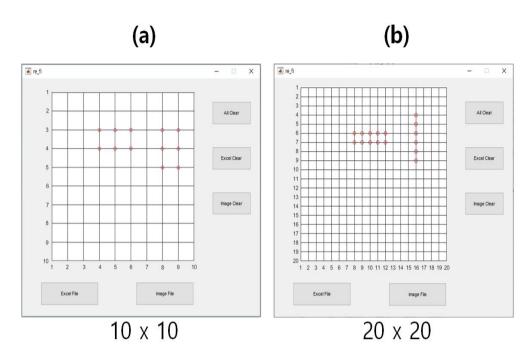


그림 5 - 24 중앙 다중크랙 샘플에 대한 크랙 위치를 표기한 프로그램;(a) 10x10, (b) 20x20



제 6 장 결론

최근 각종 센서의 응용과 기술 집약화로 인해 여러 분야의 원리를 이용하여 더 진보된 기술들이 선보여지고 있다. 수많은 구조물들의 건전성에 악영향을 초래하는 미세크랙을 탐지하기 위해선 정확성이 우선시 되어야 한다. 이런 미세한 변화를 탐지하기 위해 MEMS/NEMS 기술을 접목해야 하므로 MEMS 제작에 유용한 기술인 EHD 잉크젯 프린팅을 응용하였다.

본 논문에서는 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 미세 크랙을 탐지하기위한 MEMS 기반의 Grid-type 크랙 탐지 센서 개발을 위한 크랙 탐지 알고리즘을 파악하고자 하였다. EHD 잉크젯 프린팅 기술을 응용하기위해 공정 변수제어가 필수적이기에 전압, 유량, 작동 높이에 대한 최적화를 실시하였고, 각각의 변수별 제팅 안정성과 모드별 분포도를 확인하였다. 또한 곡면부 적용 및 플렉서블 장치의 응용 가능성 여부 판단을 위해 conductive line의 유연 전도성을 파악하여 범용성을 넓히고자 하였으며 일정 곡률 반경 이후로는 저항이 점진적으로 증가함을 확인했다.

저항 변화를 이용하여 크랙이 발생한 부분의 저항변화율의 경향성을 이용하여 크랙의 위치를 추정하고자 했으며, 정밀도 향상을 위해 Grid Scale이다른 10X10 샘플과 20X20 샘플에 대한 크랙 탐지 성능을 2차원 그래프와 3차원 그래프를 통해 크랙 탐지 알고리즘을 파악하였다. 또한 직관적인 크랙 위치 표기를 위해 크랙 위치 추정 프로그램을 제작하였으며 이 역시 10X10과 20X20 샘플에 대해 비교하였다. 격자 스케일을 높이므로써 샘플의 기판으로쓰인 미 필름에 더 세밀한 격자망을 구성할 수 있었으며 그로 인해 저항변화를 기반으로 한 크랙 탐지의 정밀도를 증가시킬 수 있었음을 확인하였다.

향후 더 세밀화된 격자 스케일 연구를 통해 한층 크랙 탐지의 정밀도가 향 상될 것으로 사료되며 더 나아가 구조 건전성 모니터링에 유용한 필수기술이 될 것이다.



참 고 문 헌

- 1) I. S. Son, J. R. Cho and S. J. Ahn, "Study on method of crack detection of L-beams with coupled vibration," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 6, 78-86, 2010.
- 2) J. G. Ning, H. L. Ren and M. J. Fang, "Research on the process of micro-crack damage evolution and coalescence in brittle materials," Engineering Failure Analysis, Vol. 41, pp. 65-72, 2014.
- 3) W. J. Brayshaw, A. J. Cooper and A. H. Sherry, "Assessment of the micro-mechanical fracture processes within dissimilar metal welds, Engineering Failure Analysis," Vol. 97, pp. 820-835, 2019.
- 4) S. H. Chang, S. O. Koo and J. W. Park, "Development of the compact integrated flight control computer," The Society for Aerospace System Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 17-21, Mar. 2008.
- 5) M. Amano, Y. Okabe, N. Takeda and T. Ozaki, "Structural health monitoring of an advanced grid structure with embedded fiver bragg grating sensors," Structural Health Monitoring, Vol, 6 No. 4, pp. 309-324, 2007.
- 6) M. S. Kang, J. H. Hwang and J. S. Bae, "Control of focal plane compensation device for image stabilization of small satellite camera," Journal of The Society for Aerospace System Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 86-94, Mar. 2016.
- 7) J. H. Lee, J. H. Hwang, J. Y. Yang, Y. H. Joo, J. S. Bae and J. Y. Kwon, "Design of the compound smart material pump for brake system of small-medium size UAV," Journal of The Society for Aerospace System Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 1-7, Sep. 2015.
- 8) S. H. Chang, S. O. Koo and J. W. Park, "Development of the compact integrated flight control computer," The Society for Aerospace

- System Engineering, vol. 2, no. 1, pp. 17-21, Mar. 2008.
- 9) M. S. Kang, J. H. Hwang and J. S. Bae, "Control of focal plane compensation device for image stabilization of small satellite camera," Journal of The Society for Aerospace System Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 86-94, Mar. 2016.
- 10) J. H. Lee, J. H. Hwang, J. Y. Yang, Y. H. Joo, J. S. Bae and J. Y. Kwon, "Design of the compound smart material pump for brake system of small-medium size UAV," Journal of The Society for Aerospace System Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 1-7, Sep. 2015.
- 11) J. W. Jung, J. W. Choi, D. K. Lee, J. H. Hwang and B. K. Kim, "A motor-driven focusing mechanism for small satellite," Journal of The Society for Aerospace System Engineering, vol. 12, no. 4, pp. 75-80, Sep. 2018.
- 12) C. H. Je, C. A. Choi, S. Q. Lee and W. S. Yang, "MEMS Pressure Sensor Technology and Industry Trends," Electronics and Telecommunications Trends, vol. 30, no. 6, pp. 21-30, Dec. 2015.
- 13) K. C. An, J. Choi, Y. J. Kim, S. Lee and S. U. Son, "High Aspect Ratio EHD Printing with High Viscosity Ink Ejection," Journal of Tech Connect Briefs, vol. 2, no. 4, pp. 267-270, June 2012.
- 14) B. W. An, K. J. Kim, M. J. Kim, S. Y. Kim, S. H. Hur and J. U. Park, "Direct Printing of Reduced Graphene Oxide on Planar or Highly Curved Surfaces with High Resolutions Using Electrohydrodynamics," Small, vol. 11, no. 19, pp. 2263-2268, May 2015.
- 15) S. Gamerith, A. Klug, H. Scheiber, F. U. Scher, E. Moderegger and E. J. W. List, "Direct ink-jet printing of Ag-Cu nanoparticle and Ag-precursor based electrodes for OFET applications," Adv. Funct. Mater., vol. 17, no. 16, pp. 3111-3118, Sep. 2007.
- 16) C. Nothnangle, J. R. Baptist, J. Sanford, W. H. Lee, D. O. Popa and

- M. B. J. Wijesundara, "EHD printing of PEDOT:PSS inks for fabricating pressure and strain sensor arrays on flexible substrates," Next-generation Robotics II, Vol. 9494, No. 8, pp. 1-8, 2015.
- 17) K. Y. Kim and C. Y. Lee, "Mechanism of Micro Crack Sensor Using Electrohydrodynamic Printing," Journal of Advanced Engineering and Technology, vol. 12, No. 2, pp. 55-60, June 2019.
- 18) M. S. Onses, E. Sutanto, P. M. Ferreira, A. G. Alleyne and J. A. Rogers, "Mechanisms, capabilities, and applications of high-resolution electro hydro dynamic jet printing," Small vol. 11, no. 34, pp. 4237-4266, Sep. 2015.
- 19) J. H. Ahn, Y. C. Lee, D. S. Choi and C. Y. Lee, "Effect of Conductive Particles on Electrical Conductivity using EHD Ink Jet Printing Technology," Journal of Aerospace System Engineering, vol. 12, no. 6, pp. 1-8, Nov. 2018.
- 20) A. Jaworek and A. Krupa, "Classification of the modes of EHD spraying", Journal of Aerosol Science, Vol. 30, No. 7, pp. 873-893, 1999.
- 21) 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," Adv. Funct. Mater., Vol. 18, No. 24, pp. 2673-2684, Nov. 2015.
- 22) Y. C. Lee, J. H. Ahn, and C. Y. Lee, "Bending Characteristics of Ag Micro Circuits using Electrohydrodynamics Printing Technology," Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 37-42, 2019.



< 감사의 글 >

열정과 패기만으로 석사과정을 시작한 지, 벌써 2년이 되어갑니다. 학부생 시절부터 연구원이 되길 꿈꿨고 제가 주도적으로 연구하길 원했습니다. 길다 면 길고 짧다면 짧았던 2년간, 도움을 주신 분들에게 감사의 말을 전하려고 합니다.

먼저 연구를 위해 지원을 아끼지 않으시고 많은 격려와 지도 및 인생에 대한 많은 조언을 해주신 이창열 교수님께 감사를 드립니다. 또한 세심하고 날카로운 조언을 통해 연구 방향을 상세하게 제시해주신 이현재 교수님과 부족한 부분들에 아낌없는 조언을 해주시고 좋은 가르침을 주신 김태규 교수님, 바쁘신 와중에도 학위논문 심사위원을 맡아주신 두 분께 감사드립니다. 앞으로 사회에 나갔을 때 부끄럽지 않은 제자가 되도록 더욱 노력하며 정진하겠습니다.

대학원 생활 동안 동기로 지내며 함께 생활하고 도와주던 최대산, 권순모, 안주훈, 김명진에게 감사를 전하고 첨단 구조 및 재료 연구실의 모든 학생들에게 감사를 전합니다. 함께 동고동락하며 고민도 들어주고 힘든 일에는 함께하며 좋은 일은 같이 축하해주던 모든 분들이 있었기에 석사과정 동안 버틸 수 있었습니다.

마지막으로 늘 건강부터 챙기라고 신신당부하시고 언제나 저를 믿어주시며 먼발치에서 지원해주시고 버팀목이 되어주시는 부모님께 감사를 드립니다.