



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 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](#)

공학석사 학위논문

Wearable 가스 센서 응용을 위한
Flexible 무선 마이크로 히터 소자
개발

Fabrication of a flexible, wireless
micro-heater for wearable gas sensor
applications

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

조요남

Wearable 가스 센서 응용을 위한
Flexible 무선 마이크로 히터 소자
개발

지도교수 신건철

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함


2022년 06월

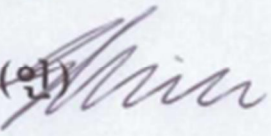
울산대학교 대학원


첨단소재공학과

조요남

조요남의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 정 지원 (인) 

심사위원 신 상 용 (인) 

심사위원 신 건 철 (인) 

울산대학교 대학원

2022년 06월

국문 요약

마이크로 히터는 특정 온도가 필요한 전자 제품 및 센서 등의 핵심 문제이며 필수 요소로서 주요 관심사가 되었다. 또한 기존의 전통적인 전자 소자는 실리콘 웨이퍼나 유리판과 같은 딱딱하고 평평한 기판위에 제작되어 왔다. 이러한 평평한 시스템은 이미 상용화되어있는 반도체 소자에는 적합하나 인체의 피부나 장기와 같은 곡면이 있는 시스템에는 적용하기 어려운 상황이다. 최근 들어 실리콘 나노리본 등을 이용하여 스트레칭이 가능한 소자를 제작하여, 전자눈 카메라, 태양전지, 발광다이오드, 논리소자, 바이오 응용 소자 등이 발표되고 있고 이들의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 본 연구에서는 LASER ablation을 활용하여 PDMS (polydimethylsiloxane), PET 필름과 같이 유연한 substrate위에 얇은 Al을 Patterning 하여 신축성 디자인의 무선 안테나를 갖추었고, 또한 LASER ablation을 활용하여 Pt 기반 마이크로 히터 개발을 보고하며, 히터 온도를 지속적으로 조절할 수 있도록 하였다. 신축성 디자인의 무선 안테나는 Al 기반으로 제작되었고 물리적/화학적 열화를 막기 위해 PDMS으로 도포하였고 고분자 소재로 인해 높은 스트레칭이 요구되는 형태까지 자유자재로 변형할 수 있도록 신축성을 증가시켰다. 이를 복층 안테나로 구현하면서 20% 이상의 스트레인에서도 안정적으로 무선 신호를 받아 LED, micro-heater 등을 구동하였으며, 기존의 반도체 공정 없이도 멀티 레이어 형태의 스택 안테나를 구현하여 안테나의 수신 성능 향상을 확인할 수 있었다. 또한, 마이크로 히터는 전기저항이 높은 Pt로 제작한 후 안테나와 연결시켜 NFC(Near Field Communication)로 구동시켰고 특정 온도까지 도달할 수 있었다. 이렇게 제작한 마이크로 히터 소자 개발 기술은 공정의 단순화뿐만 아니라 비용적 측면에서도 경쟁력이 있으며 신축성을 가질 뿐만 아니라 유연성을 가지기 때문에 동적인 환경에서도 사용할 수 있고 약물 투입 센서, 가스센서 등 열이 필요한 센서에 사용될 거라 기대한다. 또한, 스마트폰의 NFC 등을 활

용해 스마트 무선 센서나 웨어러블 바이오 메디컬 소자 등에 다양하게 적용 가능할 것으로 기대한다.

주요 단어: micro-heater; wireless; NFC; PDMS; gas sensor; wearable; SnO₂ nanowire; flexible, stretchable

목차

1. 서론	10
1.1. 연구배경.....	10
1.2. 연구목적.....	11
2. 이론적 배경	13
2.1. Pt Micro-heater.....	13
2.2. AI Antenna.....	13
2.3. LASER ablation.....	14
3. 실험방법	15
3.1. Pt Micro-heater manufacture.....	15
3.2. AI Antenna manufacture.....	16
3.2.1. 단층 AI Antenna.....	16
3.2.2. 복층 AI Antenna.....	17
3.3. LASER ablation.....	19
3.4. Measurements.....	21
4. 결과 및 고찰	21
4.1. Pt Micro-heater manufacture.....	21

4.1.1. Heating line 개수에 따른 온도 측정.....	23
4.2. AI Antenna manufacture	25
4.2.1. 단층 AI Antenna.....	25
4.2.2. 복층 AI Antenna.....	26
4.2.3. Transmitting antenna	29
4.2.4. 단층 AI antenna 성능 측정.....	31
4.2.5. 복층 AI antenna 성능 측정.....	32
4.2.6. Wearable 가스 센서 응용을 위한 Flexible 무선 마이크로 히터 소자 개발.....	38
5. 결론.....	42
참고문헌.....	46
Abstract.....	51

그림 목차

그림 2-1. LASER system 개략도.....	15
그림 3-1. Pt Micro-heater 제작법 개략도.....	16
그림 3-2. Al Antenna 제작법 개략도.....	17
그림 3-3. 스마트/웨어러블 전자 애플리케이션을 위한 신축성 복층 스택 안테나.....	18
그림 3-4. 신축성 복층 스택 안테나 제작 과정	19
그림 3-5. LASER system.....	20
그림 4-1. 무선 마이크로히터 소자의 제작 절차.....	22
그림 4-2. Pt Micro-heater 제작법.....	23
그림 4-3. Micro-heater 의 Heating line 개수에 따른 온도 측정	24
그림 4-4. 최대 124.4°C까지 도달하는 히터의 Geometry 디자인과 IR image.....	25
그림 4-5. Al Antenna 제작법.....	26
그림 4-6. 복층 무선 안테나.....	27
그림 4-7. Optoelectronic 장치의 복층 무선 안테나.....	29
그림 4-8. 무선 마이크로히터 및 근거리 무선 통신 기반 전력 전송 시스템.....	30
그림 4-9. 수신 안테나의 안테나 성능 비교.....	32
그림 4-10. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 정도 그래프.....	34
그림 4-11. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 비교.....	35
그림 4-12. Optoelectronic 장치 복층 안테나의 신축성 및 구부릴 수 있는 성능	36
그림 4-13. 변형률에 따른 Optoelectronic 장치 신축성 복층 안테나의 무선 작동	37

그림 4-14. 수신 안테나의 신축성 특성.....	38
그림 4-15. 다양한 변형으로 무선 마이크로히터의 작동.....	39
그림 4-16. 웨어러블 및 스마트 전자제품에 대한 응용.....	40

1.서론

1.1. 연구배경

바이오메디컬 응용이나 헬스케어에 위한 스마트 웨어러블 디바이스가 많이 연구되고 있고, 이들은 피부 밖에 붙이거나 생체 내부에 삽입되어, 압력, 온도, 습도, 자외선 지수, 산소포화도, 맥박, 땀성분 등 다양한 정보를 읽어 들이거나, 약물 전달, 열치료, 빛치료 등 치료 목적으로 다양하게 활용되고 있다.

최근 들어 인체에 유해한 가스로 인해 치명적인 사고가 발생하는 일이 많이 보고되었고, 기존의 가스 센서가 bulky 하고 휴대가 쉽지 않아, micro gas sensor, smart gas sensor 등 휴대성 및 기능이 극대화된 새로운 센서 소자가 요구되고 있다. 수십년간 실리콘 소재를 기반으로 하는 반도체 소자의 개발이 이어졌다. 실리콘은 쉽게 구할 수 있는 소재이면서, 단결정의 웨이퍼 형태로 구현하는 공정이 타 재료들에 비해 수월했고, 도핑을 통해 원하는 반도체 소재의 특성을 구현할 수 있었다. 다만 결정성이 좋은 실리콘은 재료의 특성상 딱딱하고 쉽게 깨지는 특성이 있어 구부러지거나 휘어지는 소자 또는 웨어러블 일렉트로닉스를 위한 적용이 어려운 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 나노미터 스케일의 두께를 갖는 리본의 형태로 실리콘을 가공해 flexible 또는 stretchable 소자를 만들기도 했는데, SOI wafer 와 같은 특별한 웨이퍼나 anisotropic etching 등을 통한 나노 리본 제작 등 제한이 있었다. 최근 들어 기존의 딱딱한 칩을 그대로 활용하면서 스트레칭이 가능한 소자 등이 보고되고 있으며, 웨어러블 응용을 위해 배터리나 무선 안테나 등을 활용하고 있다. 이러한 소자들은 다양한 기능 및 스트레칭 특성을 충분히 확보하였으나, 기존의 실리콘 반도체 공정 기술을 활용하기

어려워 단층의 안테나 및 회로로 주로 구성되었으며, 이로 인해 무선 수신 기능의 제약이 컸다. 사용하는 주파수 및 수신 안테나 크기에 따라 활용 거리가 달라졌는데, NFC 기반의 무선 안테나의 경우 수 cm 정도의 짧은 거리에서만 적용이 가능한 단점이 있었다. Micro gas sensor 는 기존의 bulky 한 형태와는 달리 thin film 형태의 gas sensor 와 micro heater 등으로 구성되어 있다. 마이크로 히터는 원하는 gas 를 높은 감도로 민감하게 측정하기 위해 gas sensor 의 온도를 높이는 데 사용된다. 기존의 gas sensor 와는 달리 portable 하거나 wearable 형태의 gas sensor 에 적용하기 위해서는 박막 형태의 micro-heater 가 필요한데, 이를 구동 하기 위해 박막형 배터리나 무선 전력 전송 기술 등이 활용될 수 있지만, 높은 전력 소모로 인해 제한이 있는 상황이다. 본 연구에서는 NFC 기반의 13.56 MHz 의 무선 주파수 신호를 얇은 알루미늄으로 제작한 안테나 코일로 수신하고, 이를 Pt 로 제작한 micro-heater 에 전달하여, 최대 124 도의 온도로 heating 할 수 있는 wireless micro heater 를 제작하였다. 수신 안테나와 마이크로 히터의 geometry 를 바꿔가며 무선 히터의 성능을 확인하였으며, SnO₂ 나노선 소자를 활용해 일산화탄소 가스 센서에 적용하여 센싱 성능 향상을 확인하였다. 본 연구에 더해 소자의 geometry 개선 등 추가적인 연구를 진행하면 더 효율 높은 무선 마이크로 히터 시스템을 만들 수 있을 것이라 기대한다. 또한, multi-layered stack 안테나를 통해 1.6 cm *1.6 cm 정도의 작은 크기에서도 다양한 응용에 적용 가능한 충분한 거리인 수십 cm 거리에서 수신 받아 LED, micro-heater 등을 구동할 수 있었다. 또한 기존의 클린룸 기반의 반도체 공정을 배제하고, 간단한 패터닝 공정을 통해 스트레칭이 가능한 복층 무선 안테나를 갖는 소자를 제작하고, 안테나 성능의 향상을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 실리콘 기반 소자로 접근하기 어려운 flexible, 스트레처블 소자 등에 적용하여 smart, wearable 제품으로 활용이 가능할 것으로 기대한다.

1.2. 연구목적

본 연구에서는 열이 필요한 소자에 활용하기 위해 Pt 기반 마이크로 히터 개발과 기존의 실리콘 기반 소자로 접근하기 어려운 flexible, 스트레처블 소자 등에 적용하여 smart, wearable 제품으로 활용이 가능한 Flexible/Wearable 센서 소자 구현을 목표로 하였다.

Wearable 가스 센서 응용을 위해서는 가스 센싱 특성과 무선 구동 기능뿐만 아니라 부드럽고 Flexible 형태로 소자를 구현해야 한다. 기존의 conventional 소자와는 달리, 우리의 피부나 옷 등에 소자를 적용하기 위해서는 낮은 모듈러스를 갖는 소재로 소자를 제작해야 한다. 무선으로 구동 가능한 마이크로 히터는 열이 필요한 다양한 웨어러블 소자 및 헬스 케어 소자 등에 활용이 가능하며, 특히 gas sensor 등과 같이 sensing 성능을 향상시킬 수 있는 온도 제어에 활용할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 LASER ablation 기술을 활용하여 저렴하게 안테나 및 마이크로 히터를 제작할 수 있었다.

2. 이론적 배경

2.1. Pt Micro-heater

Micro-heater 는 바이오메디컬 응용이나 헬스케어에 사용되는 센서 중 특정 온도가 필요한 전자 제품 및 센서에 핵심 소자이며, 약물 전달, 열치료 등 치료 목적으로 다양하게 활용되고 있고, 특히 gas sensor 등과 같이 sensing 성능을 향상시킬 수 있는 온도 제어에 활용할 수 있다.

Micro-heater 는 주로 Pt 로 사용되는데 Pt 는 열전도율이 $71.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 전기 저항도가 $105 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ (20°C)로 나타나고 내부식성, 내마모성이 우수하다.

2.2. AI Antenna

Antenna 는 특정 영역대의 전자기파를 송신 혹은 수신하기 위한 변환장치이다. Antenna 는 주파수의 전기 신호를 전자기파로 바꾸어 발신하거나 그 반대로 전자기파를 전기 신호로 바꾸는 역할을 한다. 물리적으로 Antenna 는 어떤 전압이 변조된 전류와 함께 가해질때 발생하는 전자기장을 방사하는 전도체의 배열이다. 또는 전자기장의 영향에 의해 안테나 안에 유도되는 전류와 전압이 그 말단사이에서 발생하는 것을 말한다. 이렇듯 Antenna 는 전자기장에 의해 전기 신호로 바꾸어 전자가 잘 흐를 수 있는 즉, 전기 전도도가 높은 전기 전도체 (electrical conductor)를 사용한다.

전기 전도체에는 은, 구리, 금, 알루미늄 등이 있지만 이들 중 저렴한 알루미늄을 택했다. 알루미늄의 전기 저항도는 $26.50 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ($20\text{ }^\circ\text{C}$) 이며, 전기 전도성이 좋기 때문에 전선을 만드는데 이용된다.

2.3. LASER ablation

기본적으로 LASER ablation 은 렌즈에 집속된 고에너지의 레이저 빔을 소재의 표면에 조사하여 해당 영역의 물질을 제거하는 레이저 가공기술이다. 레이저 빔이 소재 표면에 조사되면 전자의 진동이 발생하고, 이 진동이 격자(lattice)로 전달되어 재료에 열이 발생하는 열 확산(thermal relaxation) 현상이 발생된다. 이러한 현상에 의해 레이저 빔이 조사된 부위가 가공이 되어진다.

최근 많은 연구들에 의해 레이저 빔의 성능이 향상되었으며, 이로 인해 다양한 재료를 미세 가공할 수 있을 정도로 이르렀다. 이로 인해 LASER ablation 기술은 최근 자동차, 의료, 태양전지, 반도체 등 다양한 분야에서 활용되어지고 있다.

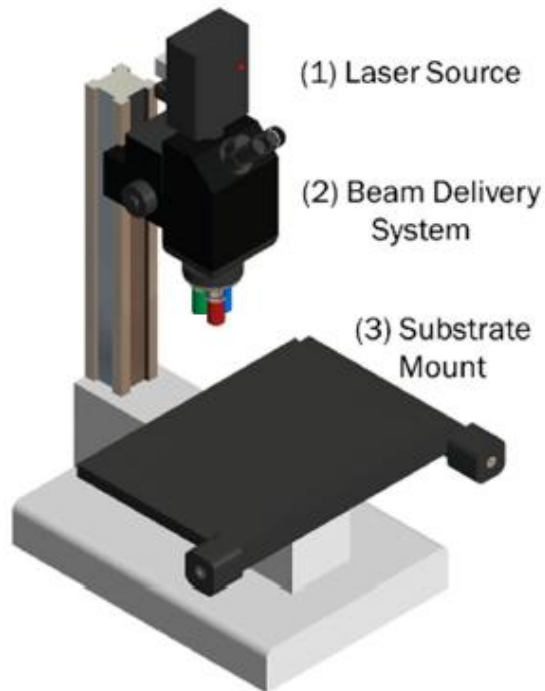


그림 2-1. LASER system 개략도

3. 실험방법

3.1. Pt Micro-heater manufacture

본 연구에서 사용된 Pt Micro-heater 는 Ion Sputter Coater(G20, GSEM, Suwon, Korea)를 이용하였고, Ion Sputter 을 이용하여 유리기판 위에 Pt 박막을 증착(Deposition)시켰다. Pt Micro-heater 는 기본적으로 slide glass 를 10mm X 10mm 로 cleaving 한 후 ethanol 로 glass 표면의 이물질을 제거하였다. 세척된 glass 는 Ion

Sputter Coater 를 이용하여 약 100nm 의 Pt (Purity 99.97%)를 증착하여 샘플링 하였다. 그 후 LASER ablation 기술을 이용하여 Micro-heater 의 pattern 을 새겼다. 본 연구에서 LASER ablation system 의 주요 변수인 LASER power, speed, frequency 는 각각 10%, 250mm/sec, 25Hz 로 조사하였다. 본 연구는 **그림 3-1** 에 나타난 순서와 같이 진행되었다.

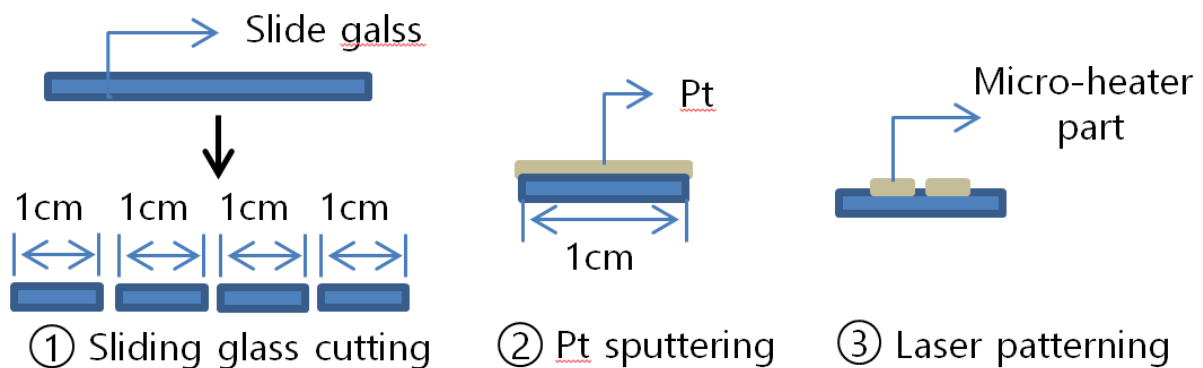


그림 3-1. Pt Micro-heater 제작법 개략도

3.2. AI Antenna manufacture

3.2.1. 단층 AI Antenna

본 연구에서 사용된 AI Antenna 는 먼저 elastomer 중 가장 많이 사용하는 고분자 물질인 polydimethylsiloxane (PDMS)를 제작하는 것에서부터 시작한다. PDMS 는 sylgard 184 와 경화제를 10:1 의 질량비로 섞어 기포를 제거한 후 상온에서 48 시간 이상 경화시켜 제작한다. 알루미늄 안테나의 경우 Slide glass 위에 붙인 PDMS piece 위에 약 15 μm 정도 두께를 가진 알루미늄 호일을 붙인 후 LASER marker 장비를 이용하여

안테나 패턴으로 LASER ablation 한다. LASER ablation 기술을 이용하여 안테나의 pattern 을 새겼다. 본 연구에서 LASER ablation system 의 주요 변수인 LASER power, speed, frequency 는 각각 70%, 270mm/sec, 25Hz 로 조사하였다. 본 연구는 그림 3-2 에 나타난 순서와 같이 진행되었다.

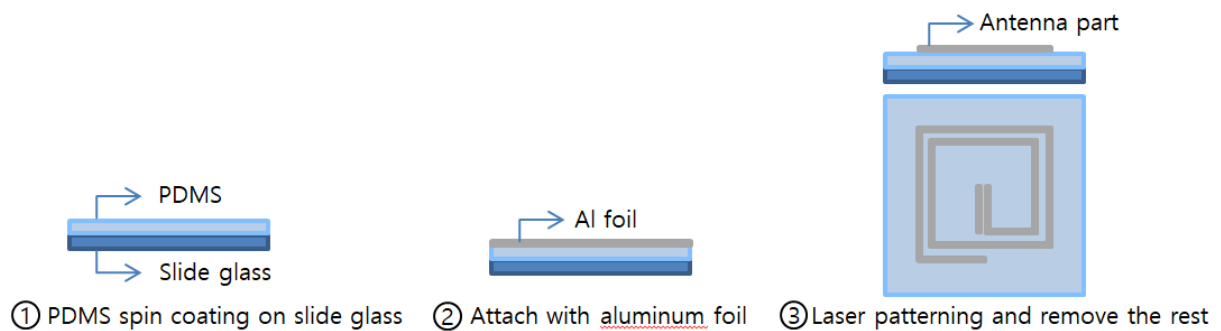


그림 3-2. Al Antenna 제작법 개략도

3.2.2. 복층 Al Antenna

3.2.1. 에서와 같이 PDMS 를 섞고 기포를 제거 후 탈착이 쉬운 PET 계열의 고분자 필름위에 스핀코팅을 통해 박막 형태로 제작한다. 그 위에 알루미늄 호일(두께: 15 um)을 부착하고, LASER marker 장비를 통해 1 층의 안테나 레이아웃을 패터닝한다. 필요없는 알루미늄을 제거하고, LED 솔더링 후에 다시 PDMS 를 스핀코팅한다. 2 층의 안테나도 동일하게 LASER 를 이용한 패터닝으로 알루미늄 안테나를 제작하며, 최대 6 층까지 동일한 방식으로 제작한다. 층간의 안테나는 micro punching tool 을 이용하거나 연결 패드위의 PDMS 부분을 제거한 후 Ag conductive epoxy 를 이용해 연결하여 마무리한다.

소자의 형태는 **그림 3-3** 에서 보여주고 있으며, 최대 6 층의 안테나로 구성된 소자는 최대 두께 300 um 이하로 제작되었으며, 자세한 제작 과정은 **그림 3-4** 에서 확인할 수 있다.

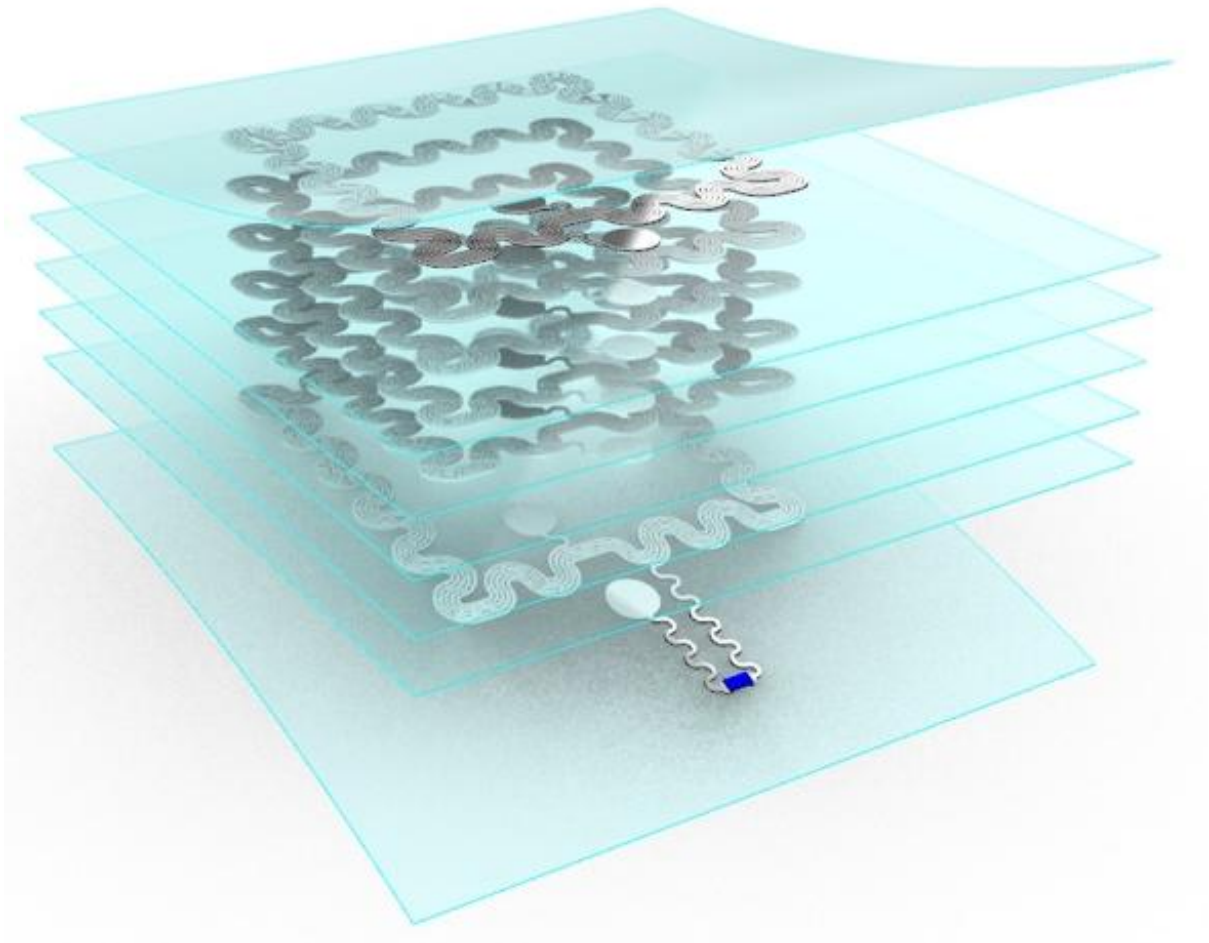


그림 3-3. 스마트/웨어러블 전자 애플리케이션을 위한 신축성 복층 스택 안테나

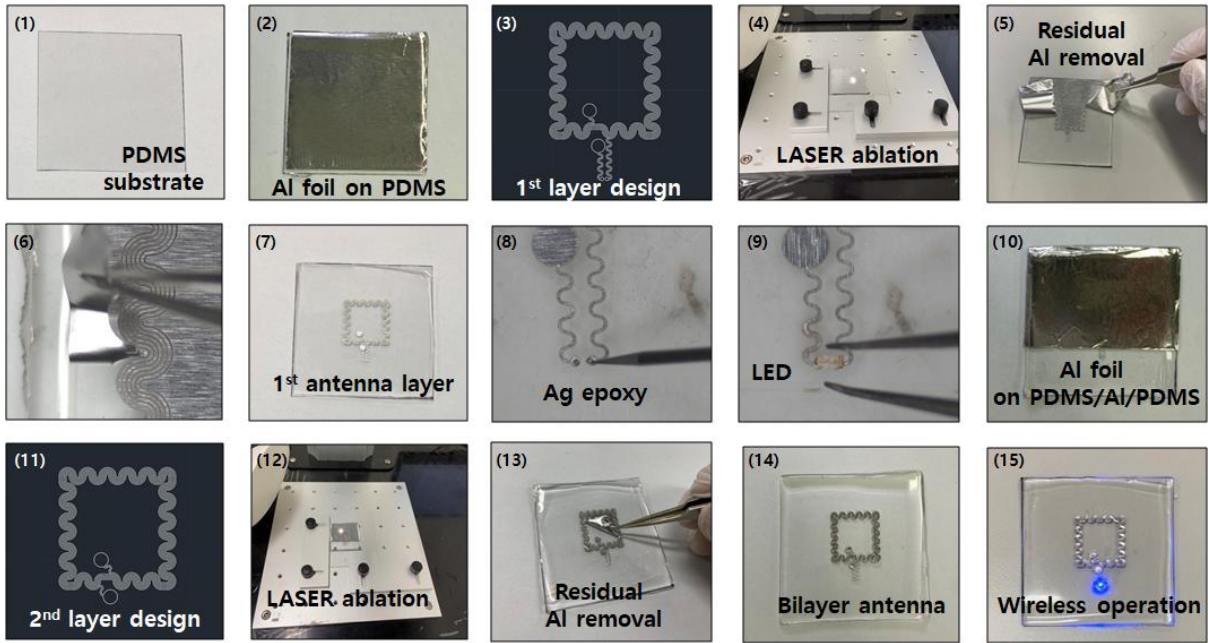


그림 3-4. 신축성 복층 스택 안테나 제작 과정

3.3. LASER ablation

본 연구에서는 반도체 소자 패턴 제작에 LASER system (LASER Marker, Hyosung LASER, Bucheon, Korea)을 활용하였다.

샘플을 패터닝 하기에 앞서 CAD (Auto CAD, AUTODESK, California, USA)를 통해서 원하는 디자인의 마이크로 히터 및 안테나 회로의 패턴을 제작하였다. 그 후 준비된 샘플을 stage 위에 고정해 두고 LASER system 에서 CAD 파일을 불러온 후 장비를 작동시켜 패턴을 제작하였다.

특히 Micro-heater 및 Antenna 패턴 제작 시 정밀하고 깔끔한 패턴을 얻기 위해 LASER system 의 주요 변수인 LASER power, speed, frequency [37-38]를 조절하는 등 여러가지 방안을 모색하여 실험을 진행하였다.

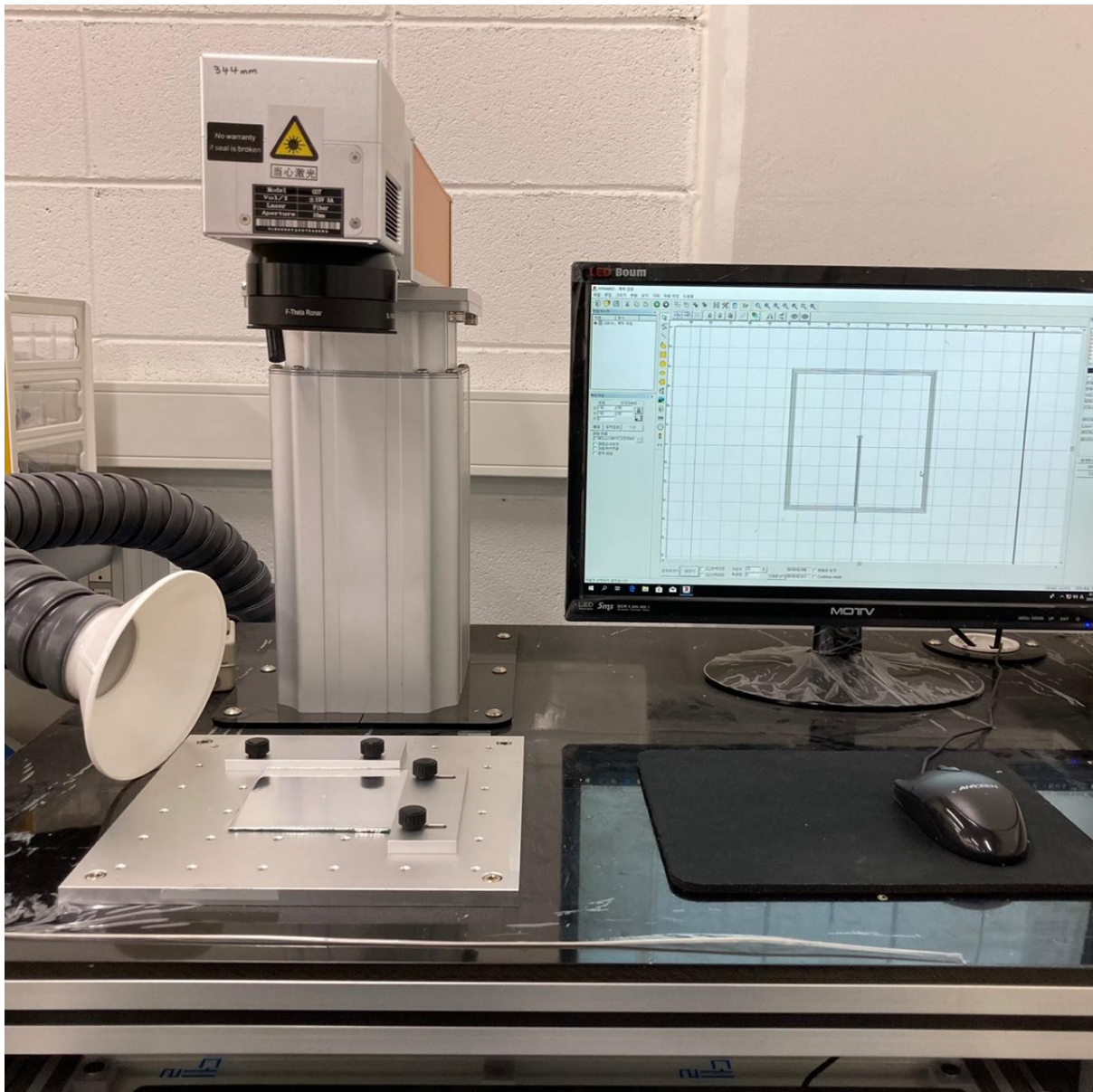


그림 3-5. LASER system

3.4. Measurements

최종적으로 안테나와 마이크로 히터를 Ag paste 를 이용하여 전기적으로 연결해주고, slide glass 에서 떼어내 주면 소자가 완성된다. 히터 소자 동작은 외부의 Near field communication(NFC) 기반의 무선 전력 전송 장치로 구동되는데, 13.56 MHz 의 무선 주파수를 만들고, 제어할 수 있는 무선 전력 송신 시스템을 갖추고 있다.

전력 전송 시스템 전력으로 무선 구동된 마이크로 히터의 사진과 IR camera 로 temperature gradient image 를 얻을 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1. Pt Micro-heater manufacture

무선 마이크로 히터 제작은 알루미늄 안테나 그리고 마이크로 히터, 두 가지 소자를 각각 제작한 후 연결하여 완성하며, 제작 과정과 완성된 무선 마이크로 히터는 **그림 4-1** 에서 볼 수 있다. Al antenna 와 Pt heater 로 구성된 무선마이크로 히터 소자는 PDMS substrate 위에 제작되었으며, 공정에 따라 최소 두께 50 um 로 가능하며, 얇고 유연한 고분자 박막 형태로 되어 있어 wearable application 이 가능할 것으로 기대한다.

본 연구에서 기본적으로 Pt Micro-heater 는 10mm X 10mm 로 cleaving 한 slide glass 를 Ion Sputter 을 이용하여 유리기판 위에 약 100nm 정도의 Pt 박막을 증착하여 샘플링 하였다. 그 후 LASER ablation 기술을 이용하여 Micro-heater 의 pattern 을

새겼으며, 그림 4-2. (6)에서 나타난 바와 같이 깔끔하게 pattern 이 새겨진 것을 확인할 수 있다. 실제 제작된 sample 의 사진을 그림 4-2. (10)에 나타내었다. 사진속의 소자는 핸들링을 위해 slide glass 위에 올려져 있으며, 74 mm * 74 mm 의 외경을 갖는 Al antenna 에 연결된 micro-heater 소자를 보여주고 있다.

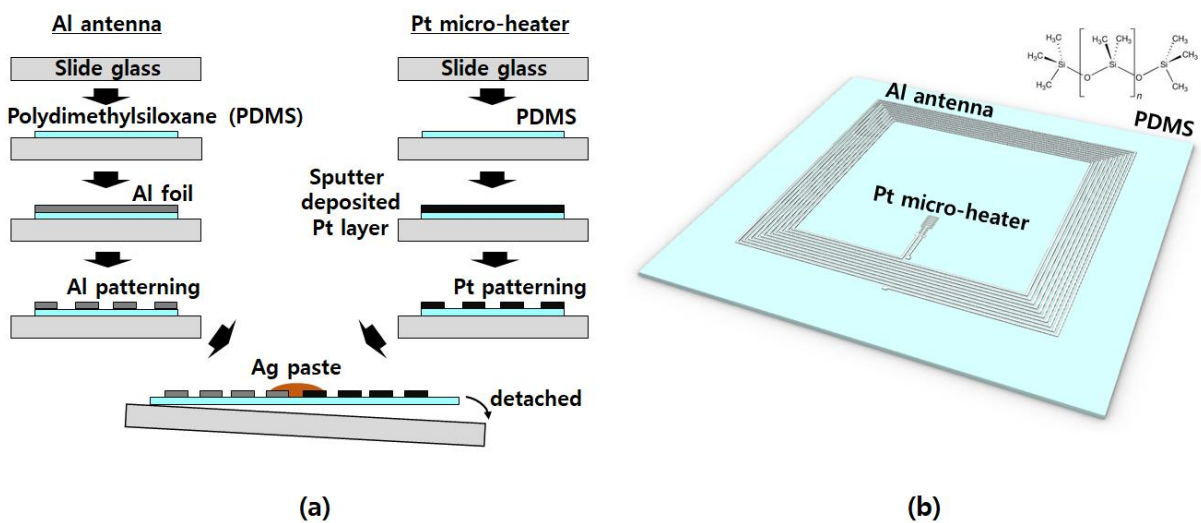


그림 4-1. 무선 마이크로히터 소자의 제작 절차. (a)개략도, (b)모식도

Pt 박막을 증착한 샘플에 CAD 를 통해서 다양한 디자인을 통해 최대효율을 갖는 조건에서 heating line 의 width, length, area, 개수 등 geometry 를 바꿔가며 히터의 성능을 개선할 수 있을 것이라 판단하여 조건을 조절해가며 실험을 진행하였다.

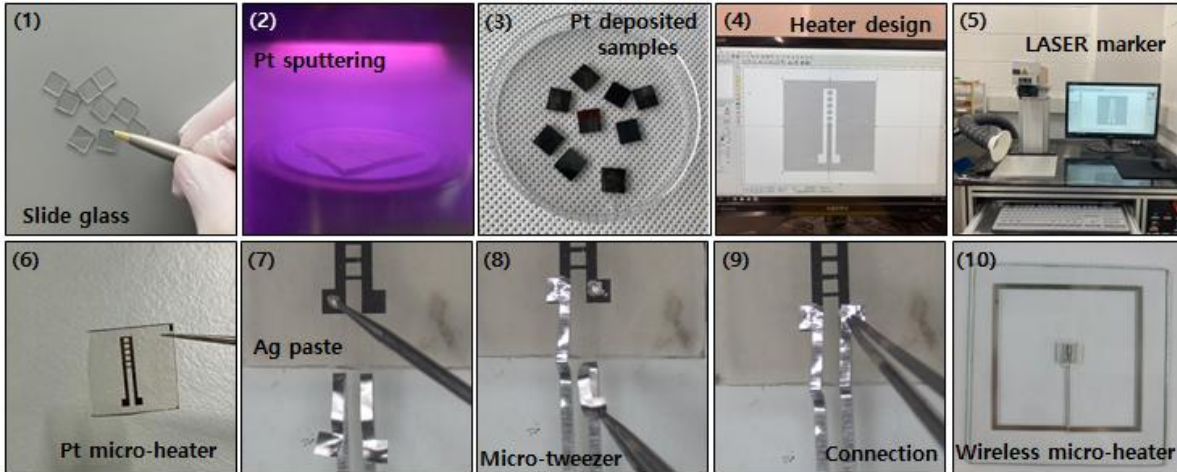


그림 4-2. Pt Micro-heater 제작법

4.1.1. Heating line 개수에 따른 온도 측정

본 연구에서는 1 개에서 6 개까지의 heating line 이 있는 마이크로 히터를 연결하여 무선으로 구동 시켜 heating 결과를 IR camera 를 이용하여 확인하였다. 그림 4-3 에서는 송신 파워를 10 W 으로 하고, 마이크로 히터의 heating line 간격을 0.7 mm, 폭을 0.2 mm, 길이를 0.5 mm 로 설정한 후 heating line 의 개수를 바꿔가며, 히터 소자들의 평균 온도를 측정한 결과를 보여준다. 측정 온도에 도달할 때까지 걸리는 시간은 모두 1 분으로 고정하였으며, 각각의 결과에 따른 히터의 IR image 를 위에, 각 히터의 도식을 아래에 나타내었다. Single layer 안테나 기준 impedance matching 을 하지 않은 상태에서 주어진 안테나와 히터 geometry 에서 약 100 도의 heating 온도를 보여주는 것을 확인하였다. 또한 안테나를 multi-stack 형태로 구성하거나, 히터의 geometry 를 다르게 구성하여 더 높은 히터 온도를 얻을 수도 있다. 그림 4-4 에서 1 개의 heating line 을 갖는 히터로도 최대 124 도까지 heating 이 되는 것을 확인하였다. 안테나의

geometry 가 성능에 영향을 많이 끼치는 것처럼, Pt heater 의 경우도 두께, 길이, 폭, 라인 수, 라인 형태 등 다양한 변수가 존재한다.

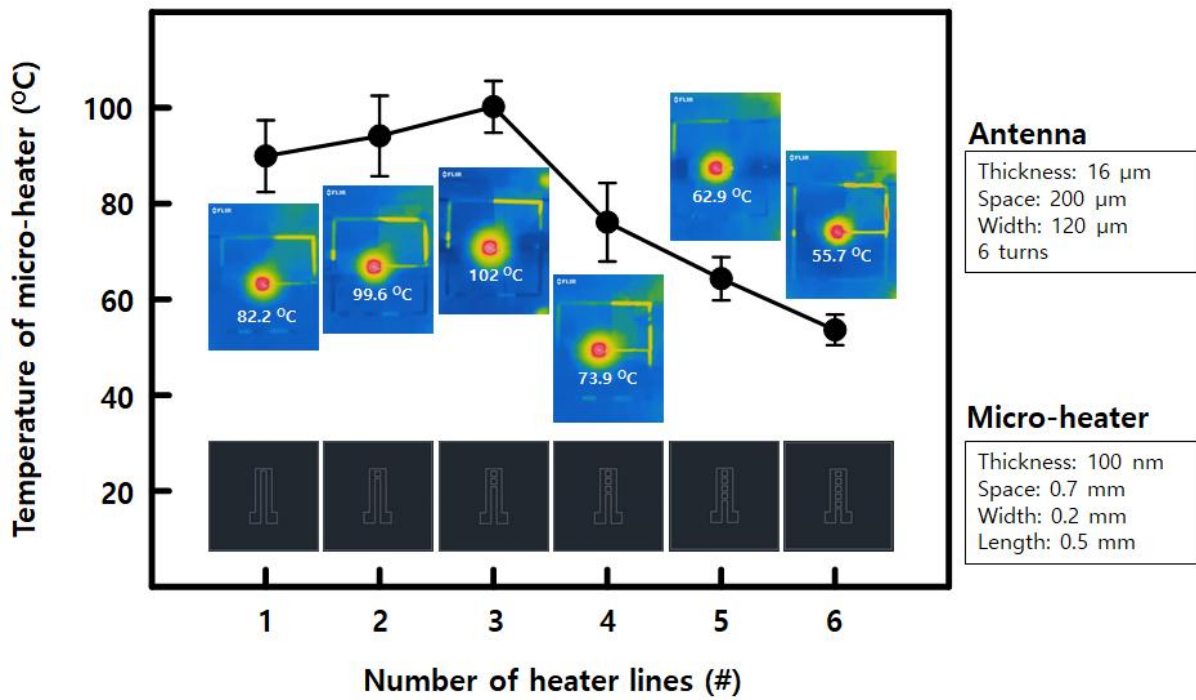


그림 4-3. Micro-heater 의 Heating line 개수에 따른 온도 측정

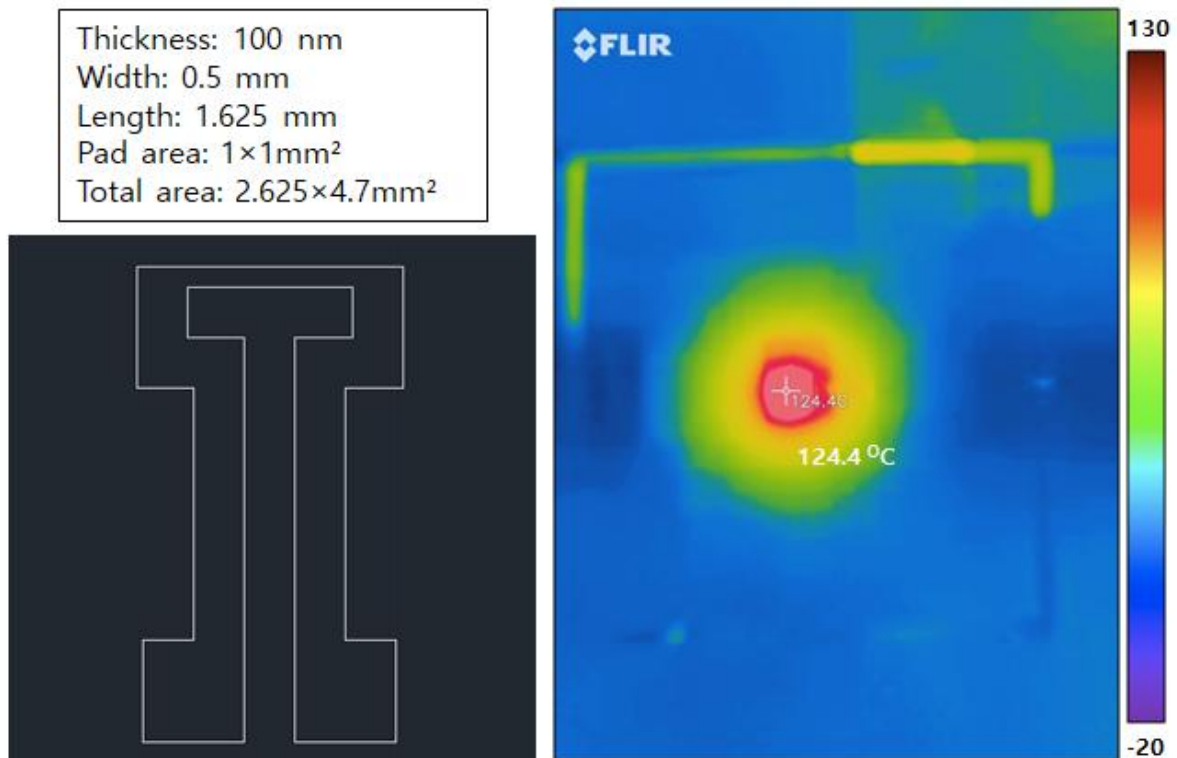


그림 4-4. 최대 124.4°C까지 도달하는 히터의 Geometry 디자인과 IR image

4.2. Al Antenna manufacture

4.2.1. 단층 Al Antenna

본 연구에서 사용된 단층 Al Antenna 는 100mm X 100mm Slide glass 위에 polydimethylsiloxane (PDMS) piece 를 붙인 후 그 위에 약 $15 \mu\text{m}$ 정도 두께를 가진 알루미늄 호일을 붙인 후 4.1 과 동일하게 LASER marker 장비를 이용하여 안테나 패턴으로 LASER ablation 한다. LASER ablation 기술을 이용하여 안테나의 pattern 을 새겼으며, 그림 4-5 에서 나타난 바와 같이 간단하게 제작할 수 있었다. 사진속의 소자는

핸들링을 위해 slide glass 위에 올려져 있으며, 74 mm X 74 mm 의 외경을 갖는 Al antenna 소자를 보여주고 있다.

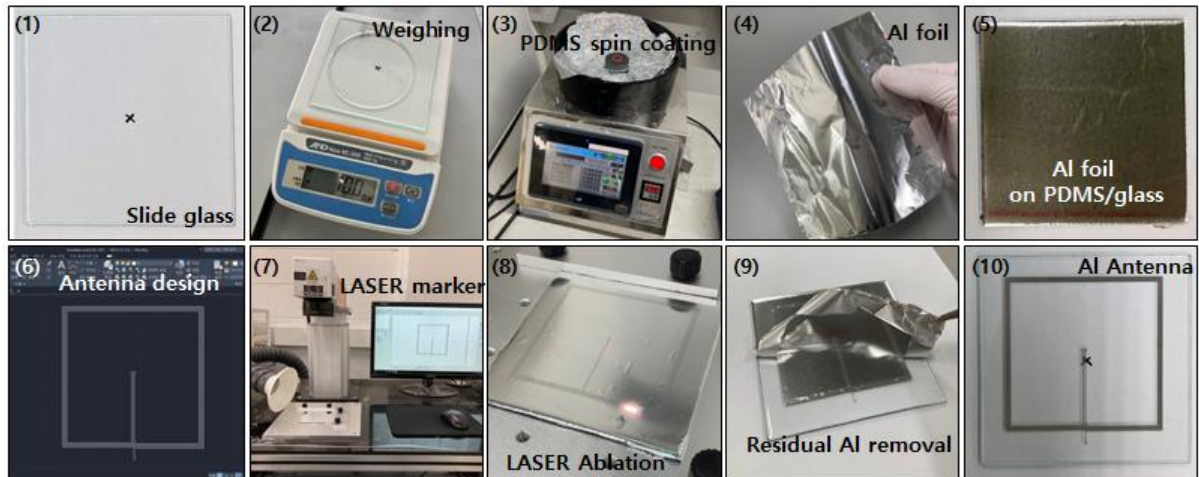


그림 4-5. Al Antenna 제작법

4.2.2. 복층 Al Antenna

완성된 소자는 그림 4-6 (a)에서 확인할 수 있는데, 복층의 무선안테나로부터 받은 전력을 이용해 무선으로 LED 를 구동한 모습을 볼 수 있다. 1.6 cm * 1.6 cm 크기의 외경을 갖는 무선 안테나가 serpentine 형태로 구현되어 스트레칭이 가능하며, 각 층 당 5 바퀴의 코일이 200 um 의 폭, 60 um 의 간격을 갖는 형태로 구현되었다. 1 층부터 최대 6 층까지 멀티레이어 안테나를 올려가면서, serpentine 안테나를 최대한 아래층과 정렬하여 패터닝하였고, 그림 4-6 (b)에서 각 층별로 안테나 패턴을 확인할 수 있다. 수신 안테나의 성능을 최대로 하기 위해서는 안테나의 외경을 키울 수 있는데, 이는 전체 소자의 크기를 크게 만들어, 웨어러블 소자 등에 활용 시에 제약이 될 수 있다.

안테나의 크기를 크게 하지 않고 안테나의 내경을 줄이지 않으면서 수신 안테나의 성능을 향상시키기 위해 본 연구에서는 멀티레이어 안테나를 적용하였다. 기존의 반도체 공정을 활용하면, 금속 박막 증착을 위한 evaporator 나 sputter 장비, 절연 박막 형성을 위한 PECVD, 패터닝을 위한 Mask aligner 등 다양한 공정 장비가 필요하지만, 본 연구에서는 절연을 위한 PDMS 박막, 알루미늄 안테나를 패터닝하기 위한 LASER marker 그리고 층간 연결을 위한 Ag paste 등 간단한 장비 만을 활용해 non-cleanroom condition 에서 제작 가능한 소자를 개발하였다.

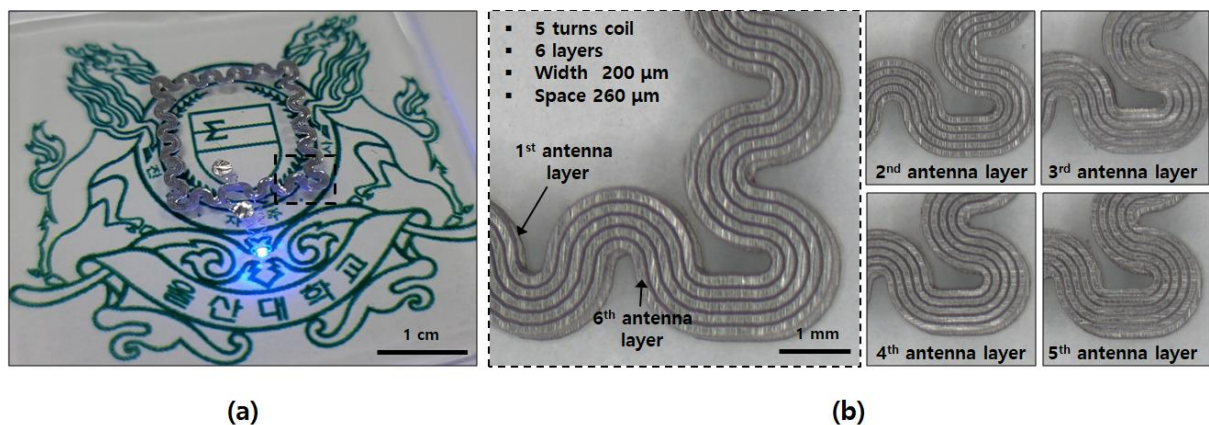


그림 4-6. 복층 무선 안테나; (a) Optoelectronic 장치의 복층 무선 안테나 구동한 모습, (b) 각 층별로 신축성 안테나 OM img.

복층의 안테나를 구성하기 위해 층간의 연결을 위한 공정을 개발하였다. 기존의 반도체 via 제작 공정은 박막 증착과 리소그래피를 이용한 패터닝, 그리고 에칭 공정 등을 통해 진행하나, 여기에서는 마이크로 punching tool 과 conductive epoxy 를 통해

쉽게 층간 연결을 할 수 있었다. **그림 4-7 (a)~(c)**에서는 복층 안테나의 연결 과정을 차례대로 보여주고 있다. 2 층으로 쌓은 안테나 패턴과 연결 패드는 **그림 4-7 (d)**에서 볼 수 있는 마이크로 펀칭 틀을 이용해 홀을 만들고 Ag 에폭시 paste 를 홀에 채운 후 100 도씨의 열처리를 통해 완성한다. 완성된 소자는 NFC 기반의 무선 전력 전송 시스템을 통해 무선으로 구동된다. 13.56 MHz 의 radio frequency 신호는 RF signal generator 에서 발생한 후 control system 을 통해 책상 아래쪽에 설치된 송신 안테나로부터 제공된다 (**그림 4-7 (e)~(g)**). 책상 표면에서 아래쪽으로 3 cm 밑에 설치된 30 cm * 40 cm 규격의 송신 안테나를 이용해, 완성된 스트레칭 가능한 멀티레이어 안테나가 수신하고 여기에 연결된 optoelectronic 소자가 구동되는 것을 확인하였다.

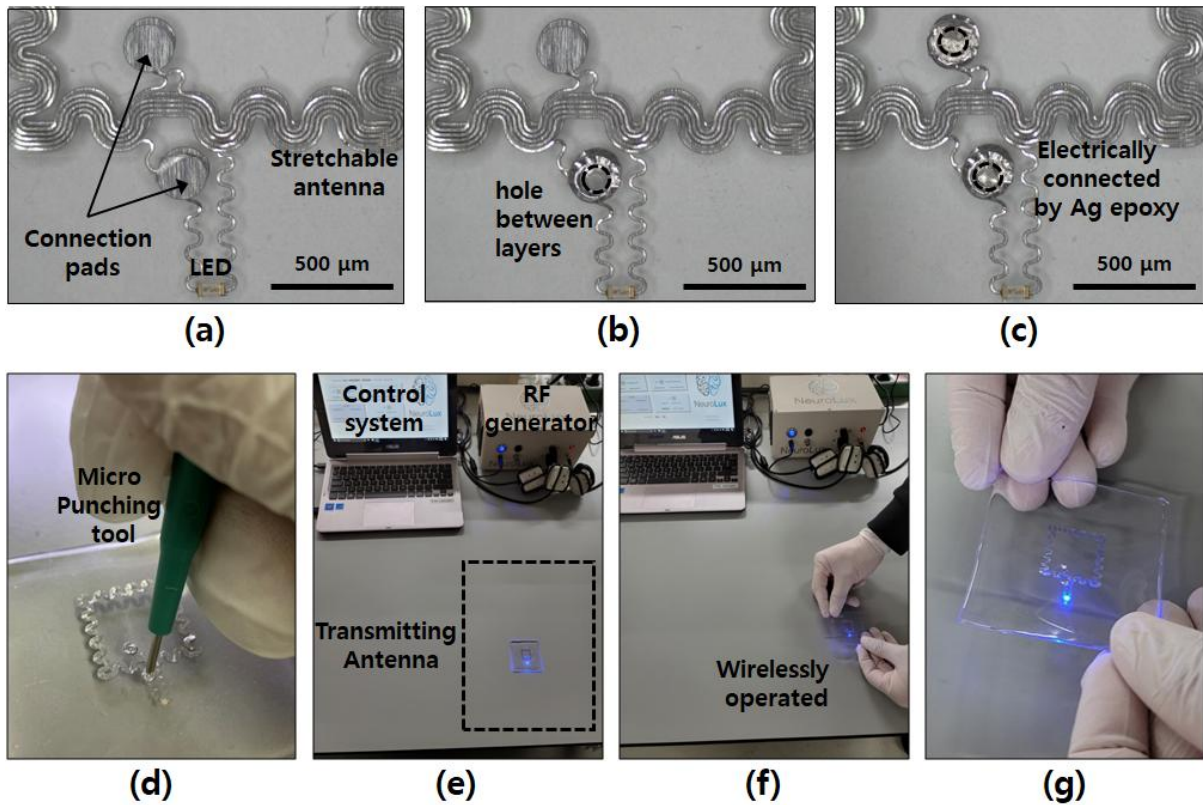


그림 4-7. Optoelectronic 장치의 복층 무선 안테나; (a-c) 가공 및 연결 과정의 OM 이미지; (d) 마이크로 펀칭 도구; (e) 무선 전력 전송 시스템; (f,g) 제작된 Optoelectronic 장치의 무선 작동

4.2.3. Transmitting antenna

안테나와 히터 소자 동작은 외부의 Near field communication(NFC) 기반의 무선 전력 전송 장치로 구동되는데, 그림 4-8. (b)에서 13.56 MHz 의 무선 주파수를 만들고, 제어할 수 있는 무선 전력 송신 시스템을 보여주고 있다. 무선 송신 시스템은 RF generator 와 control system 그리고 transmitting antenna 로 구성되어 있다. Transmitting antenna 는

그림 4-8. (b)에서 표시된 영역인 실험용 테이블 아래쪽에 설치되었으며, 대략 50 cm * 50 cm 면적 기준으로 설치된 안테나를 통해 높이 방향으로 최대 20 cm 까지 무선 전력 전송이 가능하게 셋업되었다. 전력 전송 시스템 전력으로 무선 구동된 마이크로 히터의 사진과 IR camera 로 얻는 temperature gradient image 를 각각 그림 4-8. (c)와 (d)에 나타내었다. 테이블 아래쪽 5 cm 거리에 설치된 송신 안테나로부터 최대 10W 송신 파워로 구동될 수 있으며, 무선 LED 소자와 무선 마이크로 히터가 해당 무선 전력 전송 장치를 이용해 성공적으로 구동되는 것을 IR image(그림 4-8. (d))를 통해 확인할 수 있었다. 무선 LED 소자 또한 동일한 수신 안테나로 제작되었으며, 무선 구동 확인을 위해 함께 배치하였다.

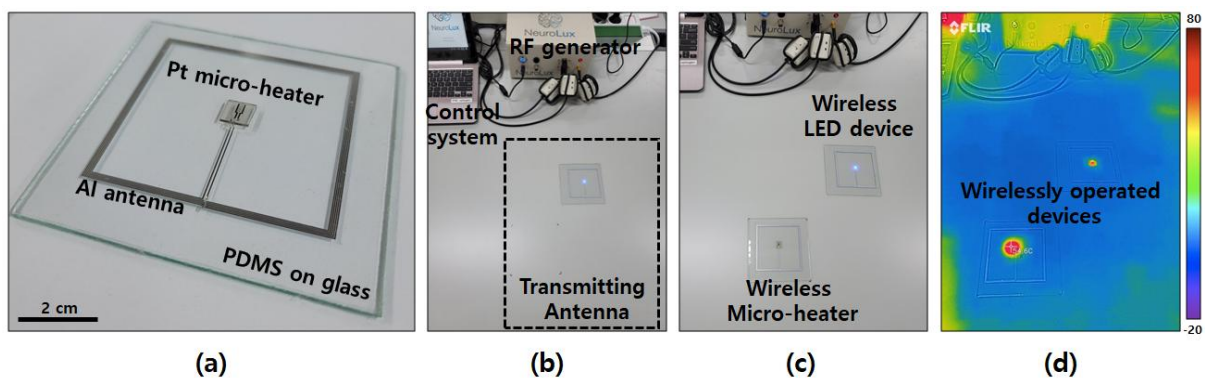


그림 4-8. 무선 마이크로히터 및 근거리 무선 통신 기반 전력 전송 시스템; (a) PDMS/유리 기판의 무선 마이크로히터 장치; (b) 무선 전력 전송 시스템은 RF 발생기, 제어 시스템 및 송신 안테나; (c) and (d) 무선으로 작동하는 LED 및 마이크로히터 소자의 사진과 IR camera 로 얻는 temperature gradient image

4.2.4. 단층 AI antenna 성능 측정

무선 구동 안테나의 성능을 분석하고, 최적의 안테나 형태를 쉽게 확인하기 위해 micro heater 대신 LED 를 연결하여 안테나로 수신하는 전력으로 구동되는 LED 의 output power 성능을 비교하였다. **그림 4-9. (a)** inset 이미지는 LED 가 연결된 무선 안테나로 동작하는 모습을 보여준다. 수신 안테나의 성능은 안테나 coil 외경의 크기, coil 의 회전수, coil 간의 간격, coil 물질의 저항, coil 의 폭, 그리고 coil 내경의 크기로 결정된다. 본 실험에서 그 중에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 변수는 외경의 크기와, 회전수, 그리고 간격이라고 할 수 있다. Coil 의 저항과 폭은 비저항값이 매우 낮은 알루미늄을 두껍게 사용함으로써 영향이 적으며, 내경의 경우 외경, 회전수, 폭 그리고 간격에 따라 자동으로 결정되는 변수이기 때문이다. **그림 4-9. (a), (b), 그리고 (c)**는 각각 coil 의 외경, 회전수 그리고 간격에 따라 수신 안테나 성능이 어떻게 달라지는지 비교하는 결과이다. 같은 송신 안테나 구동 조건으로 다른 변수를 동일하게 제어하며 LED 밝기 변화를 기준으로 수신 안테나 성능을 비교하였다. 안테나 외경의 경우, 정사각형 형태의 안테나의 외경이 커질수록 크기에 비례하여 수신 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 한쪽 면의 길이를 2 cm 부터 7.4 cm 로 1.8 cm 씩 키워가며 비교하였는데, 외경 한 변의 길이가 길어질수록 성능의 증가폭이 더 커지는 것을 확인하였다. 이는 impedance matching 을 하지 않고 테스트를 진행하였기 때문에, 큰 안테나에서 13.56 MHz 에 더 근접한 peak frequency 를 갖는 수신 안테나 특성을 보여주기 때문으로 생각한다. 또한, 안테나 코일의 회전수가 많을수록 수신 성능이 향상되는 것으로 나타나는데, 외경의 결과와는 달리 드라마틱한 향상이 없었다. 이는 회전수가 많아질수록 내경의 크기가 감소하기 때문이며, 또한 코일 전체의 길이가 길어져 저항이 커지기

때문($R \propto L$)으로 생각된다. 내경의 크기를 크게 유지하면서도 회전수를 높이는 multi-stacked 안테나 형태를 도입하면 성능 향상이 더 좋아질 것으로 기대한다. 코일간의 간격은 간격이 좁을수록 수신 성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 실험 장비의 특성상 레이저의 직경이자 최소 중심 간격인 약 $200 \mu\text{m}$ 간격까지 꾸준히 성능 향상을 보였다. 이로써 수신 안테나의 성능을 최적화하기 위해서는, 외경의 크기를 높이고, 내경이 작아지는 않는 범위내에서 회전수를 높이고, 코일간의 간격을 최소로 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

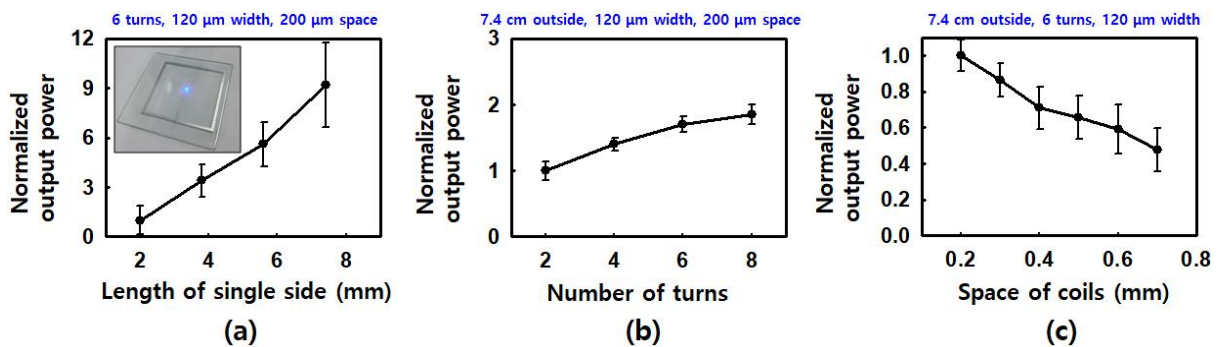


그림 4-9. 수신 안테나의 안테나 성능 비교; (a) coil 의 외경, (b)회전수 및 (c)coil 의 간격에 따른 것이다. (a)의 inset 이미지는 LED 가 연결된 안테나 소자를 나타낸다.

4.2.5. 복층 AI antenna 성능 측정

안테나 층의 늘어남에 따라 무선 안테나의 수신 성능이 달라지는 것을 수신하는 전력으로 구동되는 LED의 밝기를 기준으로 확인하였다. 송신 안테나의 사용 전력을 2.5 W 에서부터 2 배씩 증가시켜 5W, 10W 로 설정한 후 single layer 안테나부터 최대

6 층의 멀티레이어로 스택된 안테나를 제작하여 LED 의 output power 를 비교하였다. 1.6 cm * 1.6 cm 크기의 serpentine 구조 안테나를 기본 구조로 하였으며, 싱글레이어 안테나형의 경우는 2.5W 와 5W 에서는 LED 불빛이 거의 보이지 않았다. 또한 싱글레이어 안테나 기준 10 W 에서의 밝기를 1 로 normalize 해서 데이터를 **그림 4-10** 에 그래프로 나타내었다. 층의 개수가 많아질수록 LED 의 밝기는 밝아졌으며, 6 층 소자에서 LED 의 밝기는 같은 송신 파워의 1 층 소자 대비 약 3 배의 밝기 향상이 있었다. 또한 낮은 파워의 경우는 향상폭이 더 컸으며, 5W 기준 약 15 배, 2.5 W 기준 약 30 배 정도의 밝기 향상이 있었다. 이는 복층 안테나로 인해 coil 의 turn 수가 배로 증가하고, 코일 단면적(A)이 최대 3 배까지 증가하면서도 내경의 변화가 없어, 코일의 저항이 감소하고 ($R=\rho L/A$), 수신하는 전압이 multiply 됨으로 인해 낮은 송신 파워에서도 충분히 LED 가 구동될 수 있게 전압이 인가되기 때문으로 생각된다. 기존에 보고한 결과에서도 무선 수신 성능을 극대화하기 위해서는 안테나의 외경의 크기를 키우는 것이 가장 효과적이거나, 사용하는 용도에 따라 소자 크기의 제한이 있으므로, 외경의 크기를 유지하면서 성능 향상을 위해 내경의 크기를 줄이지 않는 한에서 코일의 turn 수를 증가시키거나 코일의 저항을 낮추는 방식으로 접근하였다. 추가적으로 commercial 반도체 공정을 통해 미세 패턴을 제작하게 되면, 더 좁은 coil 간격으로 안테나의 성능을 향상시킬 수도 있으나, 본 연구에서는 레이저의 직경으로 인해 최소 간격 60 um 로 고정하여 실험을 진행하였다. 정리하면, 무선 수신 안테나의 성능을 향상시키기 위해서는 안테나의 외경과 내경을 키우고, coil 의 turn 수를 늘이거나 저항을 줄이고, 코일간의 간격을 최소로 하는 것이 좋으며, 본 연구에서는 외경의 크기를 제한하면서, 내경을 줄이지 않고 턴수를 2 배로 하고, 저항을 1/3 로 줄일 수 있는 멀티레이어로 안테나를 구성하여 수신 안테나의 성능을 향상시킬 수 있었다. 안테나 층의 개수와 송신 파워를

바뀌가며 영향을 받는 수신 안테나로 구동되는 LED 의 밝기 이미지는 그림 4-11 에서 더 확인할 수 있다.

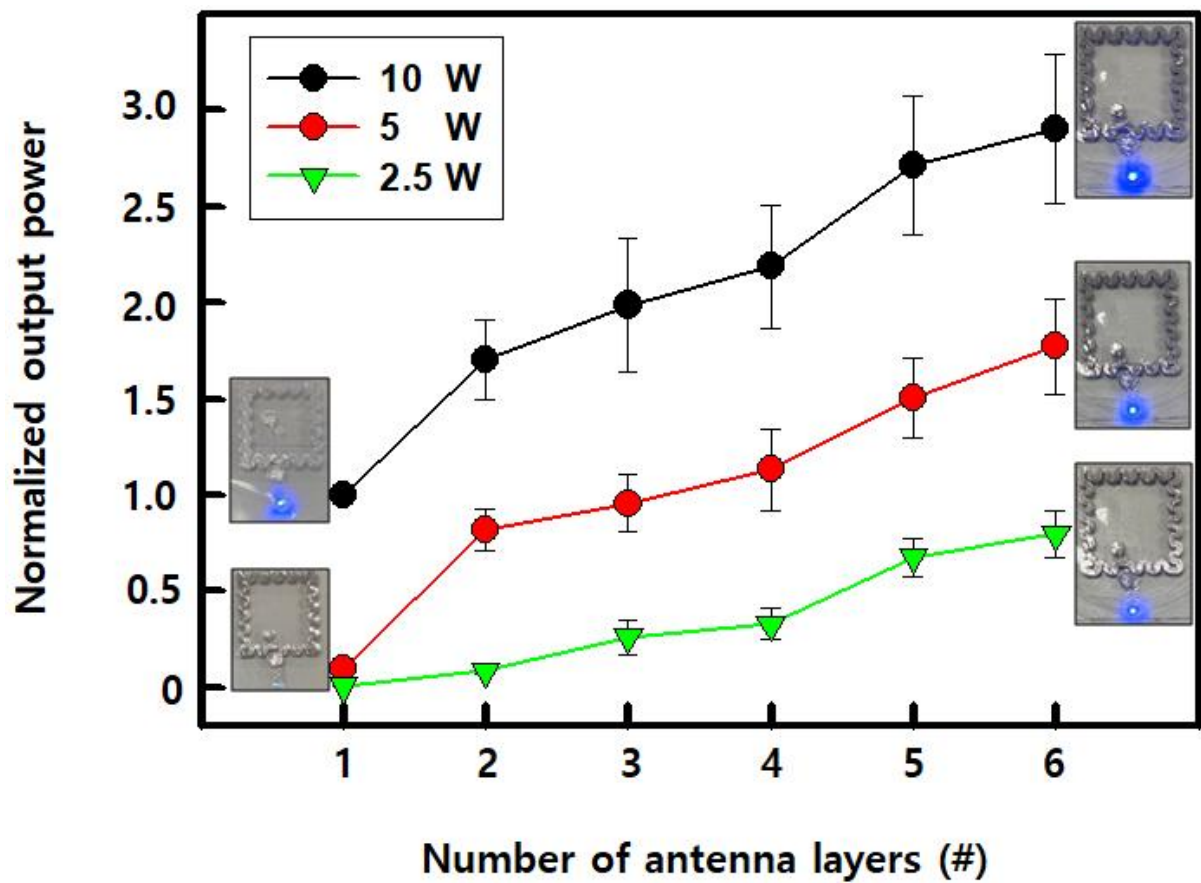


그림 4-10. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 정도 그래프

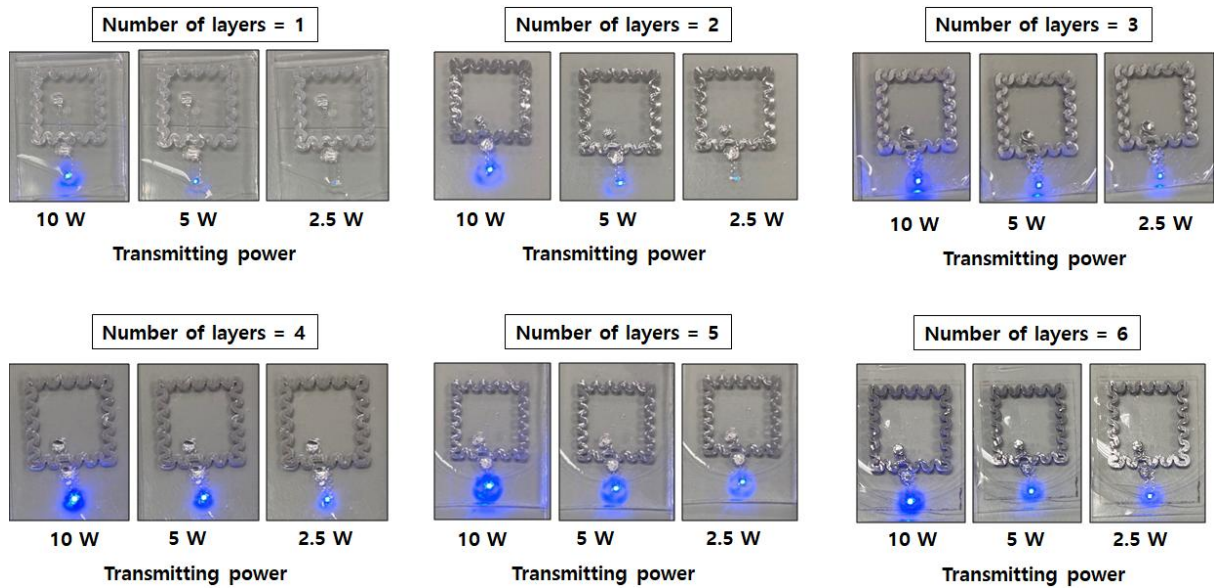


그림 4-11. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 비교

실리콘 기반의 전자소자와는 달리 elastomer 중 하나인 PDMS 와 알루미늄 호일로 만든 안테나로 제작하였기 때문에, 구부리거나 잡아 늘일 수 있는 유연성을 가지고 있다. 그림 4-12 에서는 다양한 형태로 유연성을 테스트하였는데, 반경 12 mm 인 비커 위에 감은 것부터 (그림 4-12 (a)), 사각형 형태의 안테나의 좌우(그림 4-12 (b)), 위아래 (그림 4-12 (c)) 방향으로 구부린 상태로 무선 구동을 확인하였다. 또한 대각선 기준 서로 다른 방향으로 비틀거나(그림 4-12 (d)), horizontal 방향(그림 4-12 (e))이나 lateral 방향(그림 4-12 (f))으로 잡아 늘이는 조건에서도 무선으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다. 잡아당기는 테스트에서는 각각 20%의 스트레인에서도 LED 밝기의 큰 감소 없이 무선으로 잘 구동되는 것을 볼 수 있으며, 이는 serpentine 형태의 안테나가 PDMS 가 늘어나면서 길게 펴지면서 알루미늄 소재가 끊어지는 것을 방지하기 때문이다. 현재 스트레처블 구조에서는 5 turn 의 안테나 코일을 유지하기 위해 최대 2 mm 폭(안테나

내경과 외경 차이)으로 구성했는데, 해당 소자 구조 기준 약 25%에서 30% 사이의 최대 허용 스트레인을 갖는 것을 그림 4-13 에서도 확인 할 수 있었다.

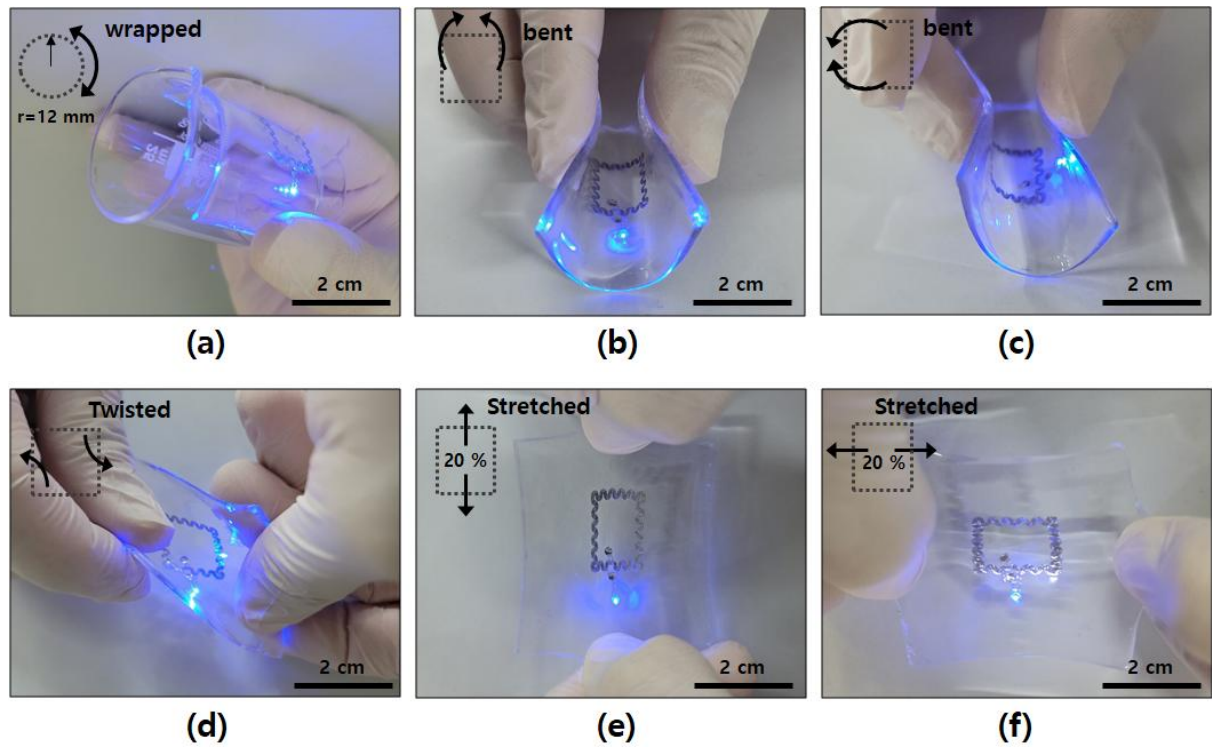


그림 4-12. Optoelectronic 장치 복층 안테나의 신축성 및 구부릴 수 있는 성능; (a) 반경 12mm 의 비커에 감겨 있음; (b) 가로 방향으로 구부림; (c) 세로 방향으로 구부림; (d) 대각선 방향으로 비틀림; (e) 세로 방향으로 뻗음; (f) 가로 방향으로 뻗음.

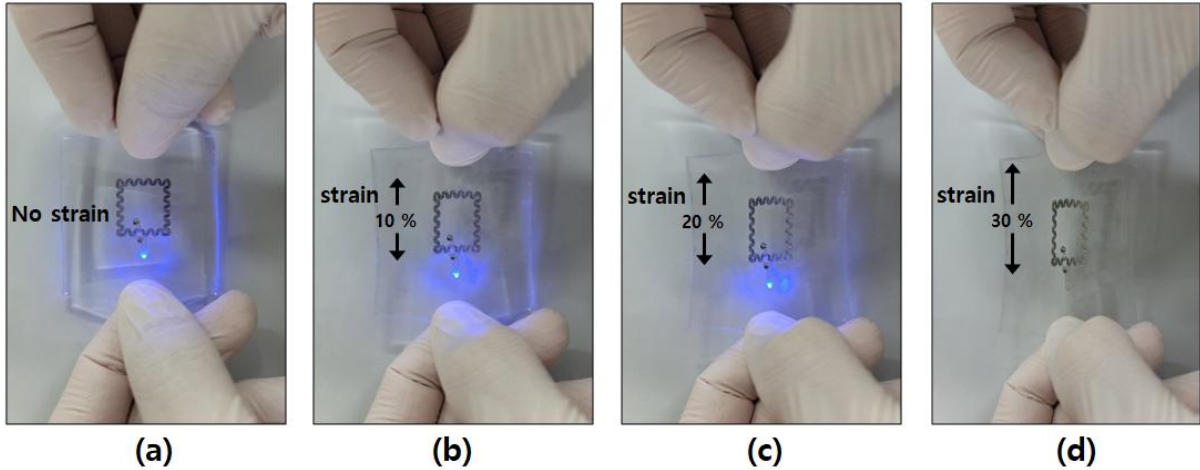


그림 4-13. 변형률에 따른 Optoelectronic 장치 신축성 복층 안테나의 무선 작동; (a) 변형 없음, (b) 변형률 10%, (c) 변형률 20%, (d) 변형률 30%(고장)

그림 4-14에서는 bending 과 stretching 에 대해 정량평가를 위한 테스트를 한 결과를 보여주는데, 구부리는 경우 radius of bending 이 6 mm 정도부터 안테나 수신 성능이 눈에 띄게 약화되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 안테나가 늘어남에 따라 데미지를 받은 게 아니라 소자 크기 대비 bending 하는 반경이 작아 안테나의 위치가 송신 안테나에 평행이 아닌 수직 방향으로 배치되고 이로 인해 수신하는 신호의 세기가 감소하기 때문이다. 스트레칭의 경우 lateral, horizontal 그리고 diagonal 방향으로 테스트하였는데, 가로 세로 방향에서는 최대 25 % 정도의 스트레인에서 안테나 또는 LED 연결 부위 등에서 failure 가 발생했으며, 대각선 방향의 경우 최대 30% 정도까지 구동되기도 하는 것을 확인하였다. 반복적인 스트레칭에 대한 안정성을 확인하기 위해 fatigue test 를 진행했으며, 스트레인에 따라 각각 5 % 에서는 3000 회 이상, 10 %에서는 약 1000 회, 20%에서는 수십번의 스트레칭에서 안정적인 특성을 유지하는 것으로

나타났다. 기존에 보고된 스트레처블 소자에 비해 최대 스트레인이나 안정성 결과가 다소 낮게 나타났으나, 이는 안테나의 외경과 내경 크기의 제한과 함께 멀티레이어 안테나 구조로 인한 전체 두께 증가 및 Ag epoxy 를 이용한 수직 연결의 접착 강도가 낮음 등의 복합적인 원인으로 인한 것으로 여겨진다.

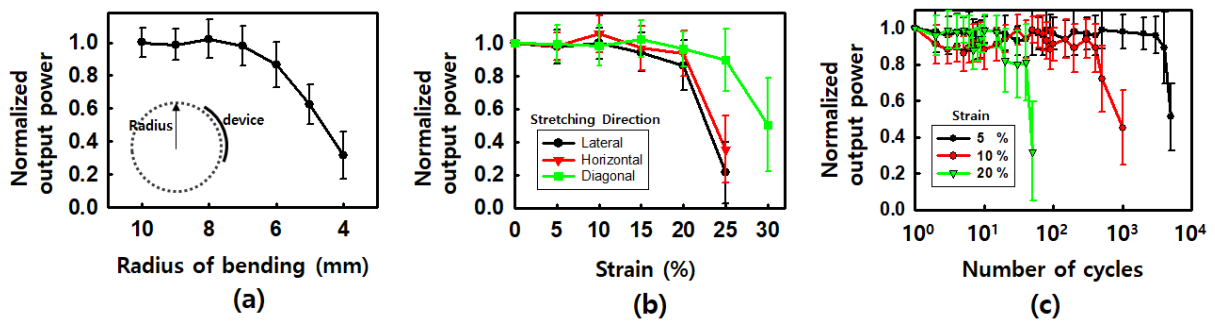


그림 4-14. 수신 안테나의 신축성 특성; (a) 굽힘 정도에 따른 출력세기 그래프, (b) 변형률에 따른 출력세기 그래프, (c) 반복적인 스트레칭 사이클 수에 따른 출력세기 그래프

4.2.6. Wearable 가스 센서 응용을 위한 Flexible 무선 마이크로 히터 소자 개발

웨어러블 가스 센서 응용을 위해서는 가스 센싱 특성과 무선 구동 기능뿐만 아니라 부드럽고 플렉서블한 형태로 소자를 구현해야 한다. 기존의 conventional 소자와는 달리, 우리의 피부나 옷 등에 소자를 적용하기 위해서는 낮은 모듈러스를 갖는 소재로 소자를 제작해야 한다. 이는 기존의 반도체 기반 소자들이 높은 모듈러스를 갖음으로 피부 등의

낮은 모듈러스와의 modulus mismatching 에 의한 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 마이크로 히터와 무선 안테나는 매우 낮은 모듈러스의 PDMS 위에 제작되었고, 최종적으로 핸들링을 위한 유리 기판에서부터 떼어내면, **그림 4-15** 에서 볼 수 있는 것처럼 flexible 한 형태가 된다. 안테나 기준 대각선 방향과 가로세로 방향 그리고 손가락 사이에 넣는 듯 다양한 형태로 구부림 등의 변형을 하였고, 동시에 무선으로 마이크로 히터를 구동하였다. 관련한 사진과 적외선 이미지를 통해 구부림 등의 변형이 있음에도 정상적으로 히터 소자가 무선으로 구동되는 것을 확인할 수 있다.

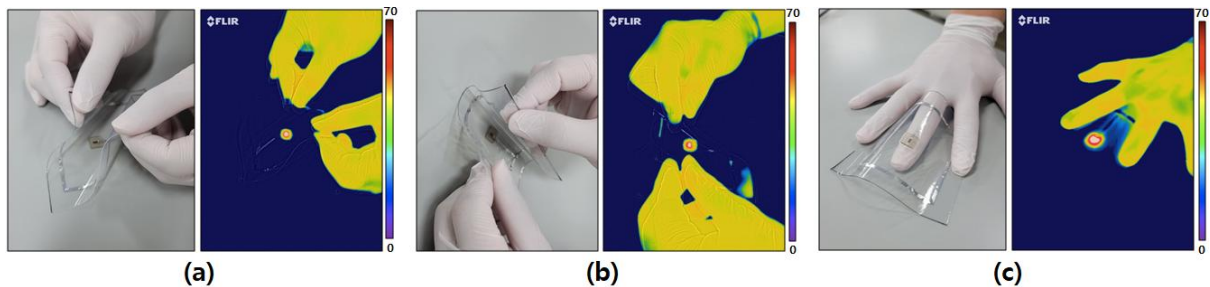


그림 4-15. 다양한 변형으로 무선 마이크로히터의 작동; (a) 대각선 방향, (b) 수평 방향, (c) 손가락 사이에 끼우듯 구부러지는 동작

또한 복층 안테나는 스트레칭이 가능하며, 작은 크기로 높은 무선 수신 성능을 보이는 안테나는 다양한 웨어러블 소자에 응용이 가능할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 최신 신경공학 기술 중의 하나인 optogenetics 에 활용이 가능한 무선 optoelectronics 소자를 기본으로 제작하였다. 해당 소자는 동물의 뇌, 척수 또는 말초 신경등에 implant 된 후 LED 가 빛에 의해 자극되도록 유전적으로 변형된 신경을 자극하는 용도로 활용할 수 있다. **그림 4-16 (a)** 에서는 오픈된 넓은 공간에 배치한 모형 쥐가 광유전학 소자를 implant 한 상태로 자유롭게 돌아다니면서 실시간으로 무선 광자극이 되는 것을

모사하고 있다. 두 마리의 모형 쥐의 척수와 대퇴근 부근에 각각 optogenetic device 를 부착한 후 무선으로 구동 가능한 것을 보여준다. 이는 실제 동물실험에서도 실험기구 공간 안의 움직이는 동물에 삽입된 optogenetic 소자가 기존에 보고한 reports 에서처럼 실시간으로 신경을 자극할 수 있을 것이라 기대한다. 기존의 무선 전력 전송 시스템뿐만 아니라, 스마트폰의 NFC 기능을 이용해서도 여기서 제작 소자를 무선으로 구동할 수도 있는데, 특별한 mobile application 등이 없어도 해당 LED 소자를 구동할 수 있는 것을 **그림 4-16(b)**에서 확인할 수 있었다. 이는 smartphone 의 NFC 가 사용하는 RF 가 13.56 MHz 로 본 소자와 같은 주파수를 사용하기 때문이다. 추후 NFC chip 등 추가 등으로 복잡한 제어 등도 가능할 것으로 기대한다. 또한 **그림 4-16 (c)**에서 처럼 LED 대신 마이크로 히터를 연결하여 무선 마이크로 히터 소자에도 응용할 수 있었으며, IR camera 측정을 통해 1.6 cm * 1.6 cm 의 작은 수신안테나를 이용해 성공적으로 마이크로 히터의 무선 구동을 확인할 수도 있었다.

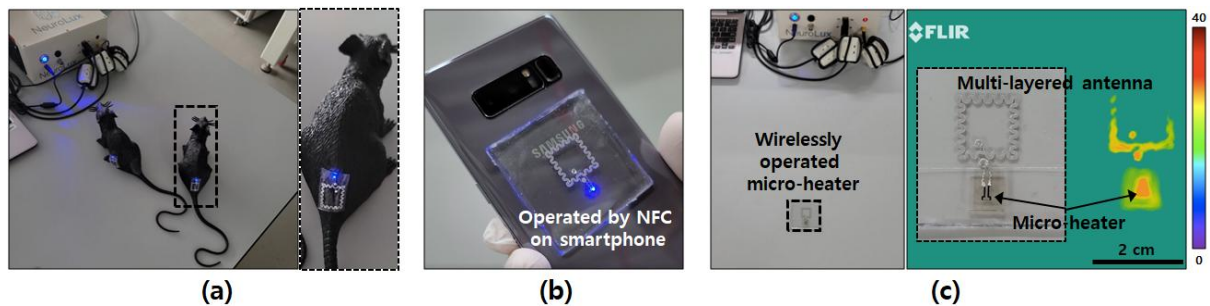


그림 4-16. 웨어러블 및 스마트 전자제품에 대한 응용; (a) 광유전학적 접근을 보여주는 마우스 모델에 부착, (b) 스마트폰의 NFC 기능으로 작동, (c) 웨어러블 히터 장치의 무선 작동을 위한 마이크로 히터와 통합

위와 같은 부드러운 소재위에 제작한 무선으로 동작 가능한 마이크로 히터는 피부나 의류 등에 직접 적용하여 다양한 웨어러블 응용이나 센서 등에 활용이 가능할 것으로 본다. 또한 스트레칭이 가능한 고성능의 복층 무선 안테나는 다양한 기능성 소자와 연결되어, 헬스 케어나 치료 등을 위한 바이오 메디컬 디바이스, 웨어러블 센서 또는 smart electronics 등에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결론

유연한 고분자 기반 소재 위에 알루미늄과 Pt 박막의 간단한 패터닝을 통해 무선 마이크로 히터소자를 제작하였고, 수신 안테나 및 micro-heater 의 geometry 대비 특성 비교를 통해 마이크로 히터의 성능을 향상시킬 수 있었다. Pt micro-heater 기반 소자의 기술적 한계를 해결할 수 있는 방안을 모색하기 위해 Pt micro-heater, flexible AI Antenna 각각에 알맞은 조건들로 실험을 진행하였다.

1. Pt Micro-heater 은 Ion Sputter Coater 을 이용하여 약 100nm 두께의 Pt 박막을 증착시켰으며, LASER system 을 활용하여 주요 변수인 LASER power, speed, frequency 를 조절하며, CAD 를 통해서 원하는 디자인의 pattern 으로 조사하여 Micro-heater 을 제작하였다. 1 개에서 6 개까지의 heating line 이 있는 마이크로 히터를 연결하여 무선으로 구동 시켰고 heating line 간격을 0.7 mm, 폭을 0.2 mm, 길이를 0.5 mm 로 설정한 후 heating line 의 개수를 바꿔가며 진행하였고, 측정 온도에 도달할 때까지 걸리는 시간은 모두 1 분으로 고정하고, 히터 소자들의 평균 온도를 측정한 결과, Single layer 안테나 기준 impedance matching 을 하지 않은 상태에서 주어진 안테나와 히터 geometry 에서 약 100 도의 heating 온도를 보여주는 것을 확인하였다. 또한 안테나를 multi-stack 형태로 구성하거나, 히터의 geometry 를 다르게 구성하여 최대 124 도까지 heating 이 되는 것을 확인하였다. 안테나의 geometry 가 성능에 영향을 많이 끼치는 것처럼, Pt heater 의 경우도 두께, 길이, 폭, 라인 수, 라인 형태 등 다양한 변수가 존재한다는 것을 확인하였다.

2. 단층 AI Antenna 는 Slide glass 위에 polydimethylsiloxane (PDMS) piece 를 붙인 후 그 위에 약 15 μm 정도 두께를 가진 알루미늄 호일을 붙이고 LASER marker 장비를 이용하여 안테나 패턴으로 LASER ablation 하여 제작하였다. 무선 구동 안테나의 성능을 분석하고, 최적의 안테나 형태를 쉽게 확인하기 위해 LED 를 연결하여 안테나로 수신하는 전력으로 구동되는 LED 의 output power 성능을 비교하였다. 수신 안테나의 성능에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 변수는 외경의 크기와, 회전 수, 그리고 간격을 조절하며, 즉 같은 송신 안테나 구동 조건으로 다른 변수를 동일하게 제어하며 LED 밝기 변화를 기준으로 수신 안테나 성능을 비교하였다. 안테나 외경의 경우, 정사각형 형태의 안테나의 외경이 커질수록 크기에 비례하여 수신 성능이 향상되었고 한쪽 면의 길이를 최대 7.4 cm 까지 키워가며 비교하였는데, 외경 한 변의 길이가 길어질수록 성능의 증가폭이 더 커지는 것을 확인하였다. 이는 impedance matching 을 하지 않고 테스트를 진행하였기 때문에, 큰 안테나에서 13.56 MHz 에 더 근접한 peak frequency 를 갖는 수신 안테나 특성을 보여주기 때문으로 생각한다. 또한, 안테나 코일의 회전수가 많을수록 수신 성능이 향상되는 것으로 나타나는데, 외경의 결과와는 달리 드라마틱한 향상이 없었다. 이는 회전수가 많아질수록 내경의 크기가 감소하기 때문이며, 또한 코일 전체의 길이가 길어져 저항이 커지기 때문($R \propto L$)으로 생각된다. 내경의 크기를 크게 유지하면서도 회전수를 높이는 multi-stacked 안테나 형태를 도입하면 성능 향상이 더 좋아질 것으로 기대한다. 코일간의 간격은 간격이 좁을수록 수신 성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 이로써 수신 안테나의 성능을 최적화하기 위해서는, 외경의 크기를 높이고, 내경이 작아지는 않는

범위내에서 회전수를 높이고, 코일간의 간격을 최소로 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

3. 복층 AI Antenna 는 PDMS 를 탈착이 쉬운 PET 계열의 고분자 필름위에 스프인코팅 후 경화시키고 그 위에 알루미늄 호일(두께: 15 um)을 부착하고, LASER marker 장비를 통해 1 층의 안테나 레이아웃을 패터닝한다. 필요없는 알루미늄을 제거하고, LED 솔더링 후에 다시 PDMS 를 스프인코팅한다. 2 층의 안테나도 동일하게 LASER 를 이용한 패터닝으로 알루미늄 안테나를 제작하며, 최대 6 층까지 동일한 방식으로 제작한다. 층간의 안테나는 micro punching tool 을 이용하거나 연결 패드위의 PDMS 부분을 제거한 후 Ag conductive epoxy 를 이용해 연결하여 마무리한다. 최대 6 층의 안테나로 구성된 소자는 최대 두께 300 um 이하로 제작되었으며, 1.6 cm * 1.6 cm 크기의 외경을 갖는 무선 안테나가 serpentine 형태로 구현되어 스트레칭이 가능하며, 각 층 당 5 바퀴의 코일이 200 um 의 폭, 60 um 의 간격을 갖는 형태로 구현되었다. 1 층부터 최대 6 층까지 멀티레이어 안테나를 올려가면서, serpentine 안테나를 최대한 아래층과 정렬하여 패터닝하였고 층의 개수가 많아질수록 LED 의 밝기는 밝아졌으며, 6 층 소자에서 LED 의 밝기는 같은 송신 파워의 1 층 소자 대비 약 3 배의 밝기 향상이 있었다.

기존의 반도체 공정을 활용하면, 금속 박막 증착을 위한 evaporator 나 sputter 장비, 절연 박막 형성을 위한 PECVD, 패터닝을 위한 Mask aligner 등 다양한 공정 장비가 필요하지만, 본 연구에서는 절연을 위한 PDMS 박막, 알루미늄 안테나를 패터닝하기 위한 LASER marker 그리고 층간 연결을 위한 Ag paste 등 간단한 장비만을 활용해 non-cleanroom condition 에서 제작 가능한 소자를 개발하였다.

실리콘 기반의 전자소자와는 달리 elastomer 중 하나인 PDMS 와 알루미늄 호일로 만든 안테나로 제작하였기 때문에, 구부리거나 잡아 늘일 수 있는 유연성을 가지고 있다. 잡아당기는 테스트에서는 각각 20%의 스트레인에서도 LED 밝기의 큰 감소 없이 무선으로 잘 구동되는 것을 볼 수 있으며, 이는 serpentine 형태의 안테나가 PDMS 가 늘어나면서 길게 퍼지면서 알루미늄 소재가 끊어지는 것을 방지하기 때문이다.

이렇게 무선으로 구동가능한 마이크로 히터는 열이 필요한 다양한 웨어러블 소자 및 헬스 케어 소자 등에 활용이 가능하며, 특히 gas sensor 등과 같이 sensing 성능을 향상시킬 수 있는 온도 제어에 활용할 수 있다. 앞으로 IoT 기반의 스마트 센서 그리고 헬스 케어용 모니터링 시스템 등 다양한 무선 시스템과 연동하여, 매우 높은 활용성이 기대가 된다. 또한 복층 안테나 공정 및 소자는 유연성과 고성능 특성을 기반으로 생체에 적용하는 soft biomedical device, optogenetics 또는 웨어러블 electronic device 등에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Han, S.; Kim, J.; Won, S.M.; Ma, Y.; Kang, D.; Xie, Z.; Lee, K.-T.; Chung, H.U.; Banks, A.; Min, S.; et al. Battery-free, wireless sensors for full-body pressure and temperature mapping. *Sci. Transl. Med.* 2018, 10, eaan4950.
2. Jeong, W.; Song, J.; Bae, J.; Nandanapalli, K.R.; Lee, S. Breathable nanomesh humidity sensor for real-time skin humidity monitoring. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 44758–44763.
3. Zhou, C.; Zhang, X.; Tang, N.; Fang, Y.; Zhang, H.; Duan, X. Rapid response flexible humidity sensor for respiration monitoring using nano-confined strategy. *Nanotechnology* 2020, 31, 125302.
4. Pang, Y.; Jian, J.; Tu, T.; Yang, Z.; Ling, J.; Li, Y.; Wang, X.; Qiao, Y.; Tian, H.; Yang, Y.; et al. Wearable humidity sensor based on porous graphene network for respiration monitoring. *Biosens. Bioelectron.* 2018, 116, 123–129.
5. Park, Y.-G.; Lee, S.; Park, J.-U. Recent progress in wireless sensors for wearable electronics. *Sensors* 2019, 19, 4353.
6. Kang, S.-K.; Murphy, R.K.J.; Hwang, S.-W.; Lee, S.M.; Harburg, D.V.; Krueger, N.A.; Shin, J.; Gamble, P.; Cheng, H.; Yu, S.; et al. Bioresorbable Silicon Electronic Sensors for the Brain. *Nature* 2016, 530, 71–76.

7. Shin, G. Soft, wirelessly powered humidity sensor based on SnO₂ nanowires for wireless/wearable sensor application. *Materials* 2020, 13, 2176.
8. Yu, K.J.; Yan, Z.; Han, M.; Rogers, J.A. Inorganic semiconducting materials for flexible and stretchable electronics. *NPJ Flexible Electronics*, 2017, 1, 4.
9. Choi, J.; Ghaffari, R.; Baker, L.B., Rogers, J.A. Skin-interfaced systems for sweat collection and analytics. *Sci. Adv.* 2018, 4, eaar3921.
10. Chung, H.U.; Kim, B.H.; Lee, J.Y.; Lee, J.; Xie, Z.; Ibler, E.M.; Lee, K.; Bank, A.; Jeong, J.Y.; Kim, J.; et al. Binodal, wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care. *Science* 2019, 363, 947.
11. Oh, Y.S.; Kim, J.-H.; Xie, Z.; Cho, S.; Han, H.; Jeon, S.W.; Park, M.; Namkoong, M.; Avila, R.; Song, Z.; et al. Battery-free, wireless soft sensors for continuous multi-site measurements of pressure and temperature from patients at risk for pressure injuries. *Nat. Comm.* 2021, 12, 5008.
12. Heo, S.Y.; Kim, J.; Gutruf, P.; Banks, A.; Wei, P.; Pielak, R.; Balooch, G.; Shi, Y.; Araki, H.; Rollo, D.; et al. Wireless, battery-free, flexible, miniaturized dosimeters monitor exposure to solar radiation and to light for phototherapy. *Sci. Transl. Med.* 2018, 10, eaau1643.
13. Jeong, J.-W.; McCall, J.G.; Shin, G.; Zhang, Y.; Al-Hasani, R.; Kim, M.; Li, S.; Sim, J.Y.; Jang, K.-I.; Shi, Y.; et al. Wireless optofluidic systems for programmable in vivo pharmacology and optogenetics. *Cell* 2015, 162, 662–674.

14. Zhang, H.; Zhao, H.; Zhao, X.; Xu, C.; Franklin, D.; Vazquez-Guardado, A.; Bai, W.; Zhao, J.; Li, K.; Monti, G.; et al. Biocompatible light guide-assisted wearable devices for enhanced UV light delivery in deep skin. *Adv. Funct. Mat.* 2021, 31, 2100576.
15. Wang, D.; Chen, Y.; Liu, Z.; Li, L.; Shi, C.; Qin, H.; Hu, J. CO₂-sensing properties and mechanism of nano-SnO₂ thick-film sensor. *Sens. Actuators* 2016, B227, 73–84.
16. Hwang, W.-J.; Shin, K.-S.; Roh, J.-H.; Lee, D.-S.; Choa, S.-H. Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors. *Sensors* 2011, 11, 2580-2591.
17. Kang, J.-G.; Park, J.-S.; Park, K.-B.; Shin, J.; Lee, E.-A.; Noh, S.; Lee, H.-J. Temperature control of micro heater using Pt thin film temperature sensor embedded in micro gas sensor. *Micro and Nano Syst Lett* 2017, 5, 26.
18. Toskov, S.; Glatz, R.; Miskovic, G.; Radosavljevic, G. Modeling and fabrication of Pt micro-heaters built on alumina substrate. *IEEE 36th Int. Spring Seminar on Electronics Technology* 2013, 47-52.
19. Wang, C.-P.; Hsiao, M.-H.; Lee, G.-H.; Chang, T.-L.; Lee, Y.-W. The investigation of electrothermal response and reliability of flexible graphene micro-heaters. *Microelectronic Engineering* 2020, 111334.
20. Lee, K.; Park, J.; Jung, S.I.; Hajra, S.; Kim, H.J. Direct integration of carbon nanotubes on a suspended Pt microheater for hydrogen gas sensing. *J. Mater. Sci: Mater Electron* 2021, 32, 19626-19634.

21. Zhang, T.-Y.; Zhao, H.-M.; Yang, Z.; Wang, Q.; Wang, D.-Y.; Deng, N.-Q.; Yang, Y.; Ren, T.-L. Improved electrothermal performance of custom-shaped micro heater based on anisotropic laser-reduced graphene oxide. *Appl. Phys. Lett.* 2016, 109, 151905.
22. Yeh, C.-C.; Yang, Y.-J. An rf-powered wireless micro-heater integrated with acrylate-composite-based temperature regulator for hyperthermia treatment. *IEEE MEMS 2020 Vancouver Canada 2020*, 357-360.
23. Chung, G.-S.; Jeong, J.-M. Fabrication of micro heaters on polycrystalline 3C-SiC suspended membranes for gas sensors and their characteristics. *Microelectronic Engineering* 2010, 87, 2348-2352.
24. Shin, G. Studies of Parylene/Silicone-Coated Soft Bio-Implantable Optoelectronic Device. *Coatings* 2020, 10, 404.
25. Han, S.; Shin, G. Biodegradable optical fiber in a soft optoelectronic device for wireless optogenetic applications. *Coatings* 2020, 10, 1153.
26. Park, S.-I.; Brenner, D.S.; Shin, G.; Morgan, C.D.; Copits, B.A.; Chung, H.U.; Pullen, M.Y.; Noh, K.N.; Davidson, S.; Oh, S.J.; et al. Soft, stretchable, fully implantable miniaturized optoelectronic systems for wireless optogenetics. *Nat. Biotechnol.* 2015, 33, 1280–1286.
27. Shin, G.; Gomez, A.M.; Al-Hasani, R.; Jeong, Y.R.; Kim, J.; Xie, Z.; Banks, A.; Lee, S.M.; Han, S.Y.; Yoo, C.J.; et al. Flexible Near-Field Wireless Optoelectronics as Subdermal Implants for Broad Applications in Optogenetics. *Neuron* 2017, 93, 509–521.

28. Kim, D.; Kim, Y.-K.; Park, S.C.; Ha, J.S.; Huh, J.; Na, J.; Kim, G.-T. Photoconductance of aligned SnO₂ nanowire field effect transistors. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95, 043107.
29. Fan, Z.; Ho, J.C.; Jacobson, Z.A.; Yerushalmi, R.; Alley, R.L.; Razavi, H.; Javey, A. Wafer-scale assembly of highly ordered semiconductor nanowire arrays by contact printing. *Nano Lett.* 2008, 8, 20–25.
30. Choi, Y.J.; Hwang, I.S.; Park, J.G.; Choi, K.J.; Park, J.H.; Lee, J.H. Novel fabrication of an SnO(2) nanowire gas sensor with high sensitivity. *Nanotechnology* 2008, 19, 095508.
31. Kuang, Q.; Lao, C.; Wang, Z.L.; Xie, Z.; Zheng, L. High-sensitivity humidity sensor based on a single SnO₂ nanowire. *J. Am. Chem. Soc.* 2007, 129, 6070–6071
32. Li, Z.; Sinha, S.K.; Treich, G.M.; Wang, Y.; Yang, Q.; Deshmukh, A.A.; Sotzing, G.A.; Cao, Y. All-organic flexible fabric antenna for wearable electronics. *J. Mater. Chem. C* 2020, 8, 5662-5667.
33. Sidek, O.; Ishak, M.Z.; Khalid, M.A.; Abu Bakar, M.Z.; Miskam, M.A. Effect of heater geometry on the high temperature distribution on a MEMS micro-hotplate. *IEEE 3 rd Asia symposium on quality electronic design* 2011, 100.
34. CHO, Jonam; SHIN, Gunchul. Fabrication of a Flexible, Wireless Micro-Heater on Elastomer for Wearable Gas Sensor Applications. *Polymers*, 2022, 14.8: 1557.
35. Kiwoong Hong, Jonam Cho and Gunchul Shin. "Stretchable, multi-layered stack antenna for smart/wearable electronic applications." *Materials*, 2022, 15.x

Abstract

Thin-film microdevices can be applied to various wearable devices, due to their high flexibility compared to conventional bulk-type electronic devices. Among the various microdevice types, many IoT-based sensor devices have been developed recently. In the case of such sensor elements, it is important to control the surrounding environment to optimize the sensing characteristics. Among these environmental factors, temperature often has a great influence. There are cases where temperature significantly affects the sensor characteristics, such as is the case for gas sensors. For this purpose, the development of thin-film-type micro-heaters is important. For this study, a wirelessly driven thin-film micro-heater was fabricated, the antenna was optimized, and the heater was driven at the required temperature. The effect of its use on gas-sensing characteristics was compared through application of the proposed micro-heater to a gas sensor. While implementing this as a multilayer antenna, LED, micro-heater, etc. were operated stably by receiving wireless signals even at strain of 20% or more, and multilayer stack antennas were implemented without existing semiconductor processes to improve the reception performance of the antenna. It is expected that thin-film-type micro-heaters that can be operated wirelessly are suitable for application in various wearable devices, including those for smart sensors and health monitoring. In addition, it is expected that it can be applied in various ways to smart wireless sensors and wearable biomedical devices by utilizing NFC of smartphones.

**Keywords: micro-heater; wireless; NFC; PDMS; gas sensor; wearable; SnO₂ nanowire;
flexible, stretchable**

공학석사 학위논문

Wearable 가스 센서 응용을 위한
Flexible 무선 마이크로 히터 소자
개발

Fabrication of a flexible, wireless
micro-heater for wearable gas sensor
applications

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

조요남

Wearable 가스 센서 응용을 위한
Flexible 무선 마이크로 히터 소자
개발

지도교수 신건철

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2022년 06월

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

조요남

조요남의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 정 지원 (인)

심사위원 신 상 용 (인)

심사위원 신 건 철 (인)

울산대학교 대학원

2022년 06월

국문 요약

마이크로 히터는 특정 온도가 필요한 전자 제품 및 센서 등의 핵심 문제이며 필수 요소로서 주요 관심사가 되었다. 또한 기존의 전통적인 전자 소자는 실리콘 웨이퍼나 유리판과 같은 딱딱하고 평평한 기판위에 제작되어 왔다. 이러한 평평한 시스템은 이미 상용화되어있는 반도체 소자에는 적합하나 인체의 피부나 장기와 같은 곡면이 있는 시스템에는 적용하기 어려운 상황이다. 최근 들어 실리콘 나노리본 등을 이용하여 스트레칭이 가능한 소자를 제작하여, 전자눈 카메라, 태양전지, 발광다이오드, 논리소자, 바이오 응용 소자 등이 발표되고 있고 이들의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 본 연구에서는 LASER ablation을 활용하여 PDMS (polydimethylsiloxane), PET 필름과 같이 유연한 substrate위에 얇은 Al을 Patterning 하여 신축성 디자인의 무선 안테나를 갖추었고, 또한 LASER ablation을 활용하여 Pt 기반 마이크로 히터 개발을 보고하며, 히터 온도를 지속적으로 조절할 수 있도록 하였다. 신축성 디자인의 무선 안테나는 Al 기반으로 제작되었고 물리적/화학적 열화를 막기 위해 PDMS으로 도포하였고 고분자 소재로 인해 높은 스트레칭이 요구되는 형태까지 자유자재로 변형할 수 있도록 신축성을 증가시켰다. 이를 복층 안테나로 구현하면서 20% 이상의 스트레인에서도 안정적으로 무선 신호를 받아 LED, micro-heater 등을 구동하였으며, 기존의 반도체 공정 없이도 멀티 레이어 형태의 스택 안테나를 구현하여 안테나의 수신 성능 향상을 확인할 수 있었다. 또한, 마이크로 히터는 전기저항이 높은 Pt로 제작한 후 안테나와 연결시켜 NFC(Near Field Communication)로 구동시켰고 특정 온도까지 도달할 수 있었다. 이렇게 제작한 마이크로 히터 소자 개발 기술은 공정의 단순화뿐만 아니라 비용적 측면에서도 경쟁력이 있으며 신축성을 가질 뿐만 아니라 유연성을 가지기 때문에 동적인 환경에서도 사용할 수 있고 약물 투입 센서, 가스센서 등 열이 필요한 센서에 사용될 거라 기대한다. 또한, 스마트폰의 NFC 등을 활

용해 스마트 무선 센서나 웨어러블 바이오 메디컬 소자 등에 다양하게 적용 가능할 것으로 기대한다.

주요 단어: micro-heater; wireless; NFC; PDMS; gas sensor; wearable; SnO₂ nanowire; flexible, stretchable

목차

1. 서론	10
1.1. 연구배경.....	10
1.2. 연구목적.....	11
2. 이론적 배경	13
2.1. Pt Micro-heater.....	13
2.2. AI Antenna.....	13
2.3. LASER ablation.....	14
3. 실험방법	15
3.1. Pt Micro-heater manufacture.....	15
3.2. AI Antenna manufacture.....	16
3.2.1. 단층 AI Antenna.....	16
3.2.2. 복층 AI Antenna.....	17
3.3. LASER ablation.....	19
3.4. Measurements.....	21
4. 결과 및 고찰	21
4.1. Pt Micro-heater manufacture.....	21

4.1.1. Heating line 개수에 따른 온도 측정	23
4.2. AI Antenna manufacture	25
4.2.1. 단층 AI Antenna.....	25
4.2.2. 복층 AI Antenna.....	26
4.2.3. Transmitting antenna	29
4.2.4. 단층 AI antenna 성능 측정	31
4.2.5. 복층 AI antenna 성능 측정	32
4.2.6. Wearable 가스 센서 응용을 위한 Flexible 무선 마이크로 히터 소자 개발.....	38
5. 결론	42
참고문헌	46
Abstract	51

그림 목차

그림 2-1. LASER system 개략도.....	15
그림 3-1. Pt Micro-heater 제작법 개략도.....	16
그림 3-2. Al Antenna 제작법 개략도	17
그림 3-3. 스마트/웨어러블 전자 애플리케이션을 위한 신축성 복층 스택 안테나.....	18
그림 3-4. 신축성 복층 스택 안테나 제작 과정	19
그림 3-5. LASER system.....	20
그림 4-1. 무선 마이크로히터 소자의 제작 절차.....	22
그림 4-2. Pt Micro-heater 제작법.....	23
그림 4-3. Micro-heater 의 Heating line 개수에 따른 온도 측정	24
그림 4-4. 최대 124.4°C까지 도달하는 히터의 Geometry 디자인과 IR image.....	25
그림 4-5. Al Antenna 제작법.....	26
그림 4-6. 복층 무선 안테나.....	27
그림 4-7. Optoelectronic 장치의 복층 무선 안테나.....	29
그림 4-8. 무선 마이크로히터 및 근거리 무선 통신 기반 전력 전송 시스템.....	30
그림 4-9. 수신 안테나의 안테나 성능 비교.....	32
그림 4-10. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 정도 그래프	34
그림 4-11. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 비교.....	35
그림 4-12. Optoelectronic 장치 복층 안테나의 신축성 및 구부릴 수 있는 성능	36
그림 4-13. 변형률에 따른 Optoelectronic 장치 신축성 복층 안테나의 무선 작동	37

그림 4-14. 수신 안테나의 신축성 특성.....	38
그림 4-15. 다양한 변형으로 무선 마이크로히터의 작동.....	39
그림 4-16. 웨어러블 및 스마트 전자제품에 대한 응용.....	40

1.서론

1.1. 연구배경

바이오메디컬 응용이나 헬스케어에 위한 스마트 웨어러블 디바이스가 많이 연구되고 있고, 이들은 피부 밖에 붙이거나 생체 내부에 삽입되어, 압력, 온도, 습도, 자외선 지수, 산소포화도, 맥박, 땀성분 등 다양한 정보를 읽어 들이거나, 약물 전달, 열치료, 빛치료 등 치료 목적으로 다양하게 활용되고 있다.

최근 들어 인체에 유해한 가스로 인해 치명적인 사고가 발생하는 일이 많이 보고되었고, 기존의 가스 센서가 bulky 하고 휴대가 쉽지 않아, micro gas sensor, smart gas sensor 등 휴대성 및 기능이 극대화된 새로운 센서 소자가 요구되고 있다. 수십년간 실리콘 소재를 기반으로 하는 반도체 소자의 개발이 이어졌다. 실리콘은 쉽게 구할 수 있는 소재이면서, 단결정의 웨이퍼 형태로 구현하는 공정이 타 재료들에 비해 수월했고, 도핑을 통해 원하는 반도체 소재의 특성을 구현할 수 있었다. 다만 결정성이 좋은 실리콘은 재료의 특성상 딱딱하고 쉽게 깨지는 특성이 있어 구부러지거나 휘어지는 소자 또는 웨어러블 일렉트로닉스를 위한 적용이 어려운 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 나노미터 스케일의 두께를 갖는 리본의 형태로 실리콘을 가공해 flexible 또는 stretchable 소자를 만들기도 했는데, SOI wafer 와 같은 특별한 웨이퍼나 anisotropic etching 등을 통한 나노 리본 제작 등 제한이 있었다. 최근 들어 기존의 딱딱한 칩을 그대로 활용하면서 스트레칭이 가능한 소자 등이 보고되고 있으며, 웨어러블 응용을 위해 배터리나 무선 안테나 등을 활용하고 있다. 이러한 소자들은 다양한 기능 및 스트레칭 특성을 충분히 확보하였으나, 기존의 실리콘 반도체 공정 기술을 활용하기

어려워 단층의 안테나 및 회로로 주로 구성되었으며, 이로 인해 무선 수신 기능의 제약이 컸다. 사용하는 주파수 및 수신 안테나 크기에 따라 활용 거리가 달라졌는데, NFC 기반의 무선 안테나의 경우 수 cm 정도의 짧은 거리에서만 적용이 가능한 단점이 있었다. Micro gas sensor 는 기존의 bulky 한 형태와는 달리 thin film 형태의 gas sensor 와 micro heater 등으로 구성되어 있다. 마이크로 히터는 원하는 gas 를 높은 감도로 민감하게 측정하기 위해 gas sensor 의 온도를 높이는 데 사용된다. 기존의 gas sensor 와는 달리 portable 하거나 wearable 형태의 gas sensor 에 적용하기 위해서는 박막 형태의 micro-heater 가 필요한데, 이를 구동 하기 위해 박막형 배터리나 무선 전력 전송 기술 등이 활용될 수 있지만, 높은 전력 소모로 인해 제한이 있는 상황이다. 본 연구에서는 NFC 기반의 13.56 MHz 의 무선 주파수 신호를 얇은 알루미늄으로 제작한 안테나 코일로 수신하고, 이를 Pt 로 제작한 micro-heater 에 전달하여, 최대 124 도의 온도로 heating 할 수 있는 wireless micro heater 를 제작하였다. 수신 안테나와 마이크로 히터의 geometry 를 바꿔가며 무선 히터의 성능을 확인하였으며, SnO₂ 나노선 소자를 활용해 일산화탄소 가스 센서에 적용하여 센싱 성능 향상을 확인하였다. 본 연구에 더해 소자의 geometry 개선 등 추가적인 연구를 진행하면 더 효율 높은 무선 마이크로 히터 시스템을 만들 수 있을 것이라 기대한다. 또한, multi-layered stack 안테나를 통해 1.6 cm *1.6 cm 정도의 작은 크기에서도 다양한 응용에 적용 가능한 충분한 거리인 수십 cm 거리에서 수신 받아 LED, micro-heater 등을 구동할 수 있었다. 또한 기존의 클린룸 기반의 반도체 공정을 배제하고, 간단한 패터닝 공정을 통해 스트레칭이 가능한 복층 무선 안테나를 갖는 소자를 제작하고, 안테나 성능의 향상을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 실리콘 기반 소자로 접근하기 어려운 flexible, 스트레처블 소자 등에 적용하여 smart, wearable 제품으로 활용이 가능할 것으로 기대한다.

1.2. 연구목적

본 연구에서는 열이 필요한 소자에 활용하기 위해 Pt 기반 마이크로 히터 개발과 기존의 실리콘 기반 소자로 접근하기 어려운 flexible, 스트레처블 소자 등에 적용하여 smart, wearable 제품으로 활용이 가능한 Flexible/Wearable 센서 소자 구현을 목표로 하였다.

Wearable 가스 센서 응용을 위해서는 가스 센싱 특성과 무선 구동 기능뿐만 아니라 부드럽고 Flexible 형태로 소자를 구현해야 한다. 기존의 conventional 소자와는 달리, 우리의 피부나 옷 등에 소자를 적용하기 위해서는 낮은 모듈러스를 갖는 소재로 소자를 제작해야 한다. 무선으로 구동 가능한 마이크로 히터는 열이 필요한 다양한 웨어러블 소자 및 헬스 케어 소자 등에 활용이 가능하며, 특히 gas sensor 등과 같이 sensing 성능을 향상시킬 수 있는 온도 제어에 활용할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 LASER ablation 기술을 활용하여 저렴하게 안테나 및 마이크로 히터를 제작할 수 있었다.

2. 이론적 배경

2.1. Pt Micro-heater

Micro-heater 는 바이오메디컬 응용이나 헬스케어에 사용되는 센서 중 특정 온도가 필요한 전자 제품 및 센서에 핵심 소자이며, 약물 전달, 열치료 등 치료 목적으로 다양하게 활용되고 있고, 특히 gas sensor 등과 같이 sensing 성능을 향상시킬 수 있는 온도 제어에 활용할 수 있다.

Micro-heater 는 주로 Pt 로 사용되는데 Pt 는 열전도율이 $71.6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 전기 저항도가 $105 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)로 나타나고 내부식성, 내마모성이 우수하다.

2.2. AI Antenna

Antenna 는 특정 영역대의 전자기파를 송신 혹은 수신하기 위한 변환장치이다. Antenna 는 주파수의 전기 신호를 전자기파로 바꾸어 발신하거나 그 반대로 전자기파를 전기 신호로 바꾸는 역할을 한다. 물리적으로 Antenna 는 어떤 전압이 변조된 전류와 함께 가해질때 발생하는 전자기장을 방사하는 전도체의 배열이다. 또는 전자기장의 영향에 의해 안테나 안에 유도되는 전류와 전압이 그 말단사이에서 발생하는 것을 말한다. 이렇듯 Antenna 는 전자기장에 의해 전기 신호로 바꾸어 전자가 잘 흐를 수 있는 즉, 전기 전도도가 높은 전기 전도체 (electrical conductor)를 사용한다.

전기 전도체에는 은, 구리, 금, 알루미늄 등이 있지만 이들 중 저렴한 알루미늄을 택했다. 알루미늄의 전기 저항도는 $26.50 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 이며, 전기 전도성이 좋기 때문에 전선을 만드는데 이용된다.

2.3. LASER ablation

기본적으로 LASER ablation 은 렌즈에 집속된 고에너지의 레이저 빔을 소재의 표면에 조사하여 해당 영역의 물질을 제거하는 레이저 가공기술이다. 레이저 빔이 소재 표면에 조사되면 전자의 진동이 발생하고, 이 진동이 격자(lattice)로 전달되어 재료에 열이 발생하는 열 확산(thermal relaxation) 현상이 발생된다. 이러한 현상에 의해 레이저 빔이 조사된 부위가 가공이 되어진다.

최근 많은 연구들에 의해 레이저 빔의 성능이 향상되었으며, 이로 인해 다양한 재료를 미세 가공할 수 있을 정도에 이르렀다. 이로 인해 LASER ablation 기술은 최근 자동차, 의료, 태양전지, 반도체 등 다양한 분야에서 활용되어지고 있다.

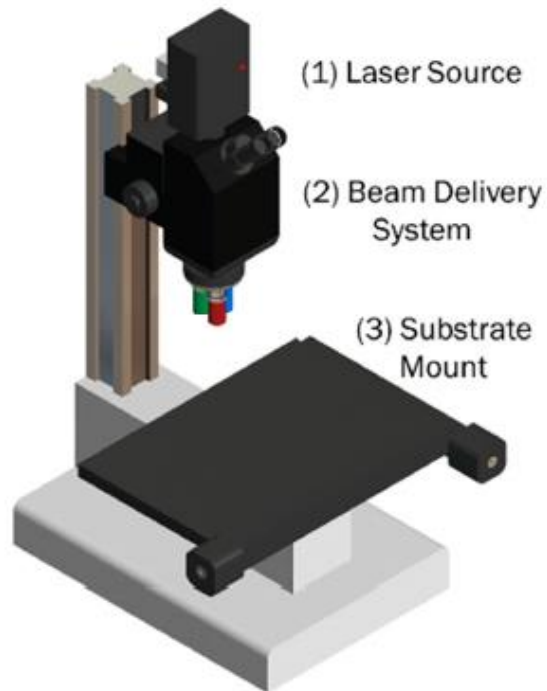


그림 2-1. LASER system 개략도

3. 실험방법

3.1. Pt Micro-heater manufacture

본 연구에서 사용된 Pt Micro-heater 는 Ion Sputter Coater(G20, GSEM, Suwon, Korea)를 이용하였고, Ion Sputter 을 이용하여 유리기판 위에 Pt 박막을 증착(Deposition)시켰다. Pt Micro-heater 는 기본적으로 slide glass 를 10mm X 10mm 로 cleaving 한 후 ethanol 로 glass 표면의 이물질을 제거하였다. 세척된 glass 는 Ion

Sputter Coater 를 이용하여 약 100nm 의 Pt (Purity 99.97%)를 증착하여 샘플링 하였다. 그 후 LASER ablation 기술을 이용하여 Micro-heater 의 pattern 을 새겼다. 본 연구에서 LASER ablation system 의 주요 변수인 LASER power, speed, frequency 는 각각 10%, 250mm/sec, 25Hz 로 조사하였다. 본 연구는 그림 3-1 에 나타난 순서와 같이 진행되었다.

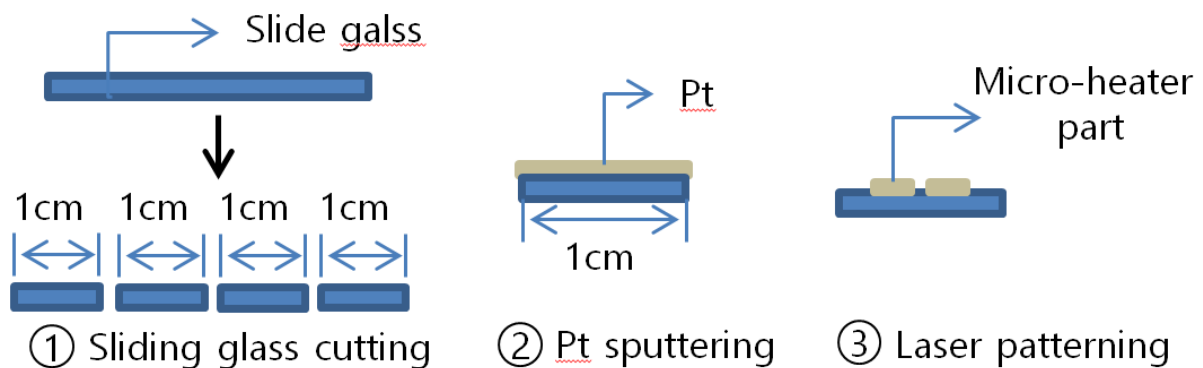


그림 3-1. Pt Micro-heater 제작법 개략도

3.2. Al Antenna manufacture

3.2.1. 단층 Al Antenna

본 연구에서 사용된 Al Antenna 는 먼저 elastomer 중 가장 많이 사용하는 고분자 물질인 polydimethylsiloxane (PDMS)를 제작하는 것에서부터 시작한다. PDMS 는 sylgard 184 와 경화제를 10:1 의 질량비로 섞어 기포를 제거한 후 상온에서 48 시간 이상 경화시켜 제작한다. 알루미늄 안테나의 경우 Slide glass 위에 붙인 PDMS piece 위에 약 15 μm 정도 두께를 가진 알루미늄 호일을 붙인 후 LASER marker 장비를 이용하여

안테나 패턴으로 LASER ablation 한다. LASER ablation 기술을 이용하여 안테나의 pattern 을 새겼다. 본 연구에서 LASER ablation system 의 주요 변수인 LASER power, speed, frequency 는 각각 70%, 270mm/sec, 25Hz 로 조사하였다. 본 연구는 그림 3-2 에 나타난 순서와 같이 진행되었다.

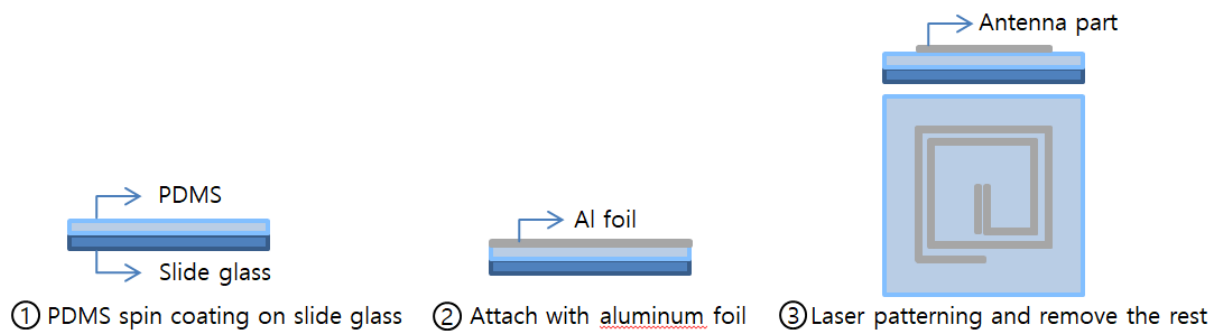


그림 3-2. Al Antenna 제작법 개략도

3.2.2. 복층 Al Antenna

3.2.1. 에서와 같이 PDMS 를 섞고 기포를 제거 후 탈착이 쉬운 PET 계열의 고분자 필름위에 스펀코팅을 통해 박막 형태로 제작한다. 그 위에 알루미늄 호일(두께: 15 um)을 부착하고, LASER marker 장비를 통해 1 층의 안테나 레이아웃을 패터닝한다. 필요없는 알루미늄을 제거하고, LED 솔더링 후에 다시 PDMS 를 스펀코팅한다. 2 층의 안테나도 동일하게 LASER 를 이용한 패터닝으로 알루미늄 안테나를 제작하며, 최대 6 층까지 동일한 방식으로 제작한다. 층간의 안테나는 micro punching tool 을 이용하거나 연결 패드위의 PDMS 부분을 제거한 후 Ag conductive epoxy 를 이용해 연결하여 마무리한다.

소자의 형태는 **그림 3-3** 에서 보여주고 있으며, 최대 6 층의 안테나로 구성된 소자는 최대 두께 300 um 이하로 제작되었으며, 자세한 제작 과정은 **그림 3-4** 에서 확인할 수 있다.

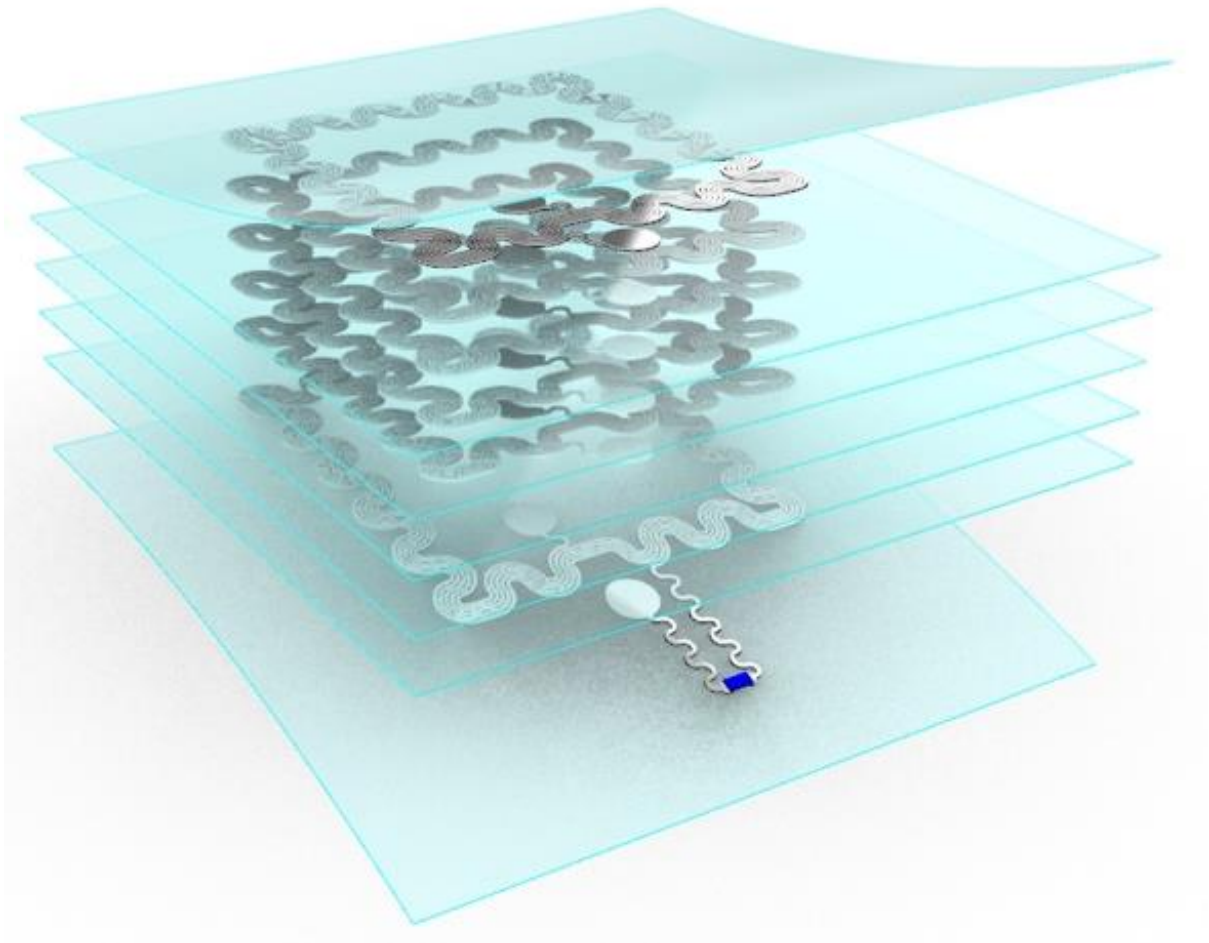


그림 3-3. 스마트/웨어러블 전자 애플리케이션을 위한 신축성 복층 스택 안테나

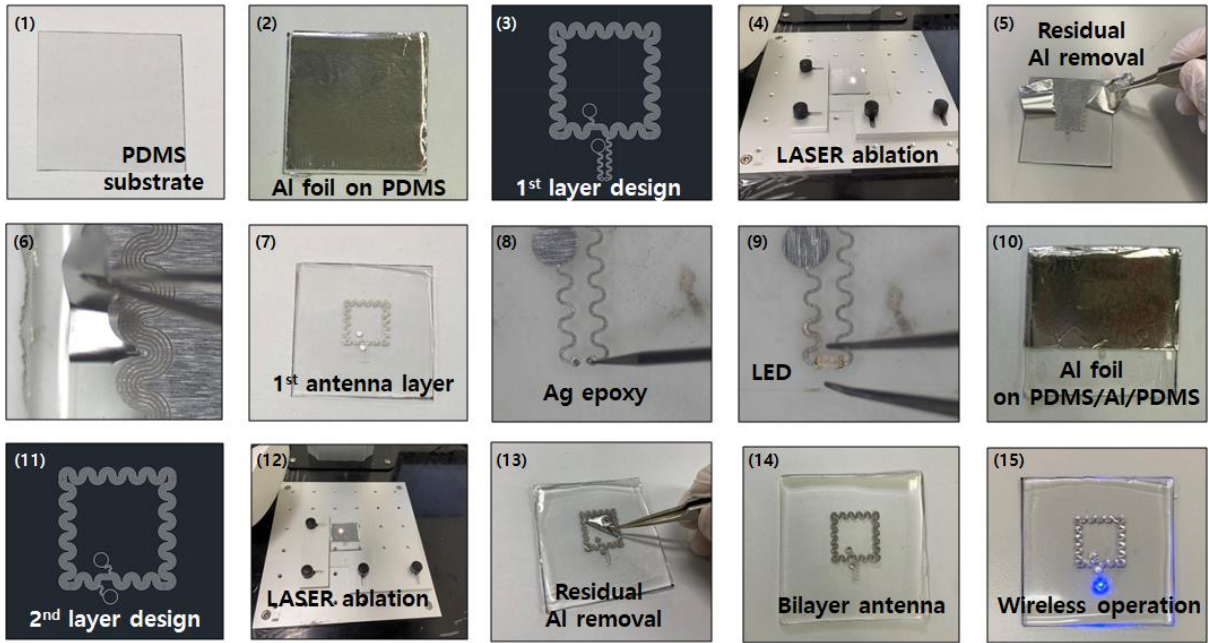


그림 3-4. 신축성 복층 스택 안테나 제작 과정

3.3. LASER ablation

본 연구에서는 반도체 소자 패턴 제작에 LASER system (LASER Marker, Hyosung LASER, Bucheon, Korea)을 활용하였다.

샘플을 패터닝 하기에 앞서 CAD (Auto CAD, AUTODESK, California, USA)를 통해서 원하는 디자인의 마이크로 히터 및 안테나 회로의 패턴을 제작하였다. 그 후 준비된 샘플을 stage 위에 고정해 두고 LASER system 에서 CAD 파일을 불러온 후 장비를 작동시켜 패턴을 제작하였다.

특히 Micro-heater 및 Antenna 패턴 제작 시 정밀하고 깔끔한 패턴을 얻기 위해 LASER system 의 주요 변수인 LASER power, speed, frequency [37-38]를 조절하는 등 여러가지 방안을 모색하여 실험을 진행하였다.

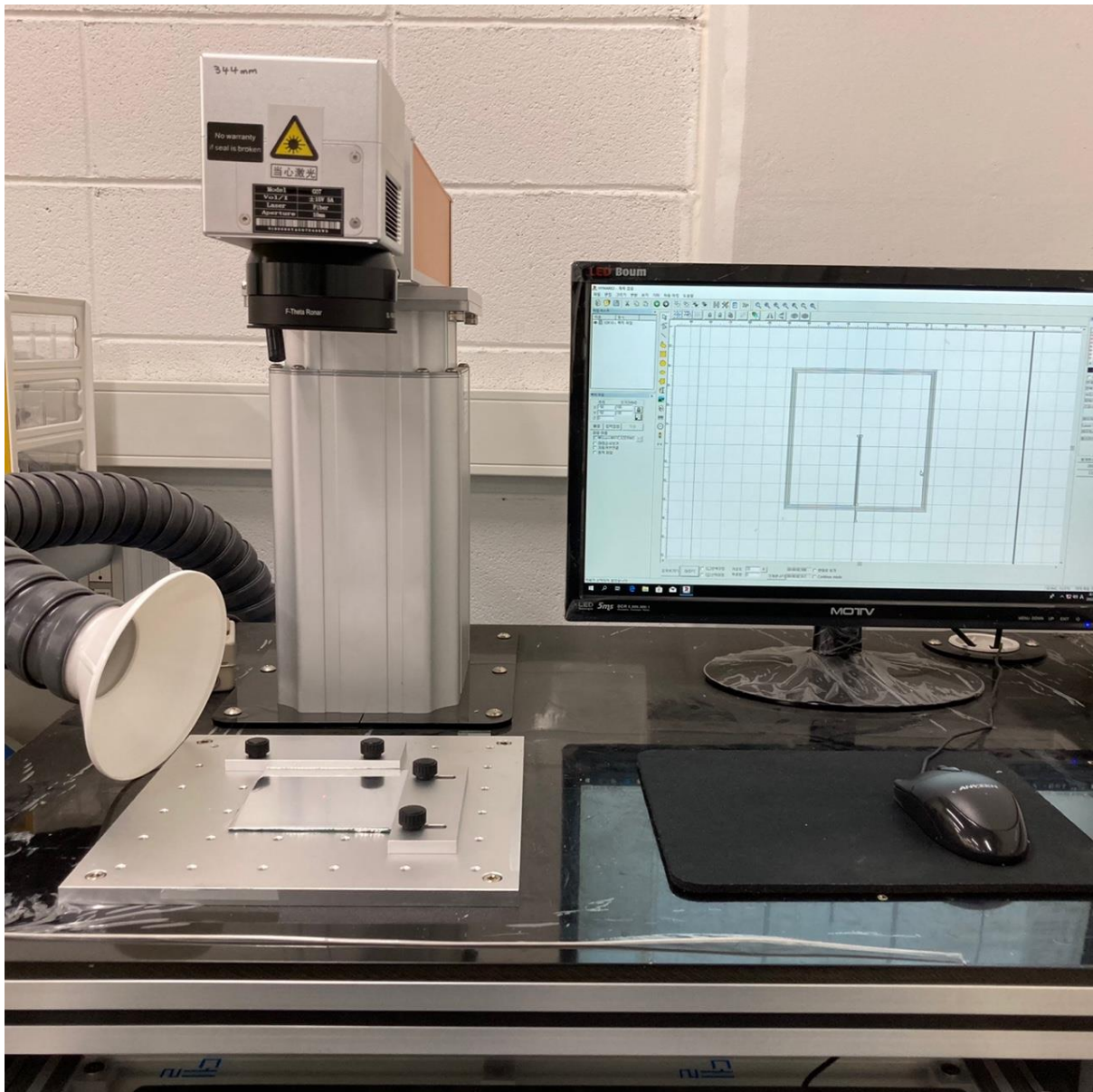


그림 3-5. LASER system

3.4. Measurements

최종적으로 안테나와 마이크로 히터를 Ag paste 를 이용하여 전기적으로 연결해주고, slide glass 에서 떼어내 주면 소자가 완성된다. 히터 소자 동작은 외부의 Near field communication(NFC) 기반의 무선 전력 전송 장치로 구동되는데, 13.56 MHz 의 무선 주파수를 만들고, 제어할 수 있는 무선 전력 송신 시스템을 갖추고 있다.

전력 전송 시스템 전력으로 무선 구동된 마이크로 히터의 사진과 IR camera 로 temperature gradient image 를 얻을 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1. Pt Micro-heater manufacture

무선 마이크로 히터 제작은 알루미늄 안테나 그리고 마이크로 히터, 두 가지 소자를 각각 제작한 후 연결하여 완성하며, 제작 과정과 완성된 무선 마이크로 히터는 **그림 4-1** 에서 볼 수 있다. Al antenna 와 Pt heater 로 구성된 무선마이크로 히터 소자는 PDMS substrate 위에 제작되었으며, 공정에 따라 최소 두께 50 um 로 가능하며, 얇고 유연한 고분자 박막 형태로 되어 있어 wearable application 이 가능할 것으로 기대한다.

본 연구에서 기본적으로 Pt Micro-heater 는 10mm X 10mm 로 cleaving 한 slide glass 를 Ion Sputter 을 이용하여 유리기판 위에 약 100nm 정도의 Pt 박막을 증착하여 샘플링 하였다. 그 후 LASER ablation 기술을 이용하여 Micro-heater 의 pattern 을

새겼으며, 그림 4-2. (6)에서 나타난 바와 같이 깔끔하게 pattern 이 새겨진 것을 확인할 수 있다. 실제 제작된 sample 의 사진을 그림 4-2. (10)에 나타내었다. 사진속의 소자는 핸들링을 위해 slide glass 위에 올려져 있으며, 74 mm * 74 mm 의 외경을 갖는 Al antenna 에 연결된 micro-heater 소자를 보여주고 있다.

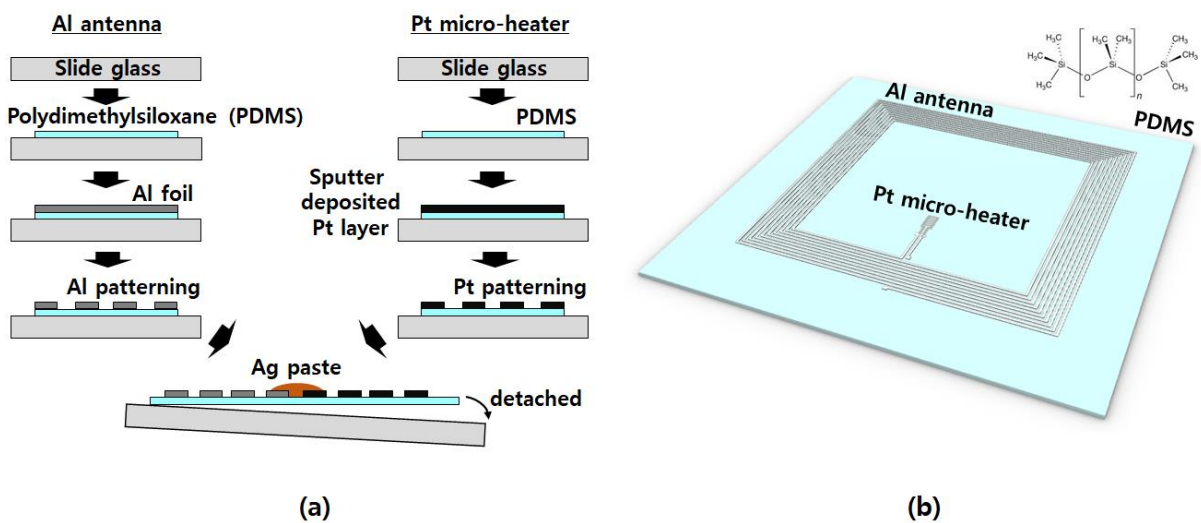


그림 4-1. 무선 마이크로히터 소자의 제작 절차. (a)개략도, (b)모식도

Pt 박막을 증착한 샘플에 CAD 를 통해서 다양한 디자인을 통해 최대효율을 갖는 조건에서 heating line 의 width, length, area, 개수 등 geometry 를 바꿔가며 히터의 성능을 개선할 수 있을 것이라 판단하여 조건을 조절해가며 실험을 진행하였다.

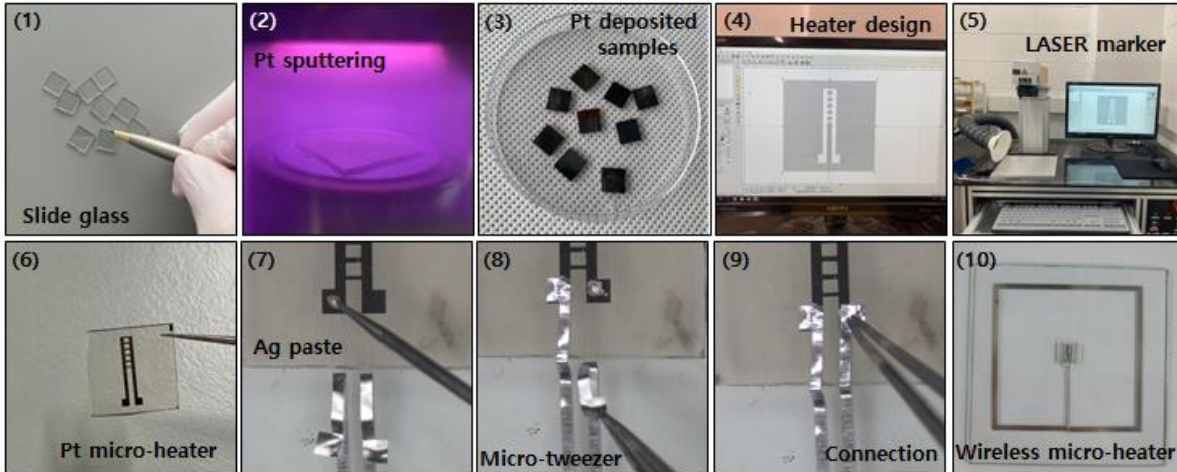


그림 4-2. Pt Micro-heater 제작법

4.1.1. Heating line 개수에 따른 온도 측정

본 연구에서는 1 개에서 6 개까지의 heating line 이 있는 마이크로 히터를 연결하여 무선으로 구동 시켜 heating 결과를 IR camera 를 이용하여 확인하였다. 그림 4-3 에서는 송신 파워를 10 W 으로 하고, 마이크로 히터의 heating line 간격을 0.7 mm, 폭을 0.2 mm, 길이를 0.5 mm 로 설정한 후 heating line 의 개수를 바꿔가며, 히터 소자들의 평균 온도를 측정한 결과를 보여준다. 측정 온도에 도달할 때까지 걸리는 시간은 모두 1 분으로 고정하였으며, 각각의 결과에 따른 히터의 IR image 를 위에, 각 히터의 도식을 아래에 나타내었다. Single layer 안테나 기준 impedance matching 을 하지 않은 상태에서 주어진 안테나와 히터 geometry 에서 약 100 도의 heating 온도를 보여주는 것을 확인하였다. 또한 안테나를 multi-stack 형태로 구성하거나, 히터의 geometry 를 다르게 구성하여 더 높은 히터 온도를 얻을 수도 있다. 그림 4-4 에서 1 개의 heating line 을 갖는 히터로도 최대 124 도까지 heating 이 되는 것을 확인하였다. 안테나의

geometry 가 성능에 영향을 많이 끼치는 것처럼, Pt heater 의 경우도 두께, 길이, 폭, 라인 수, 라인 형태 등 다양한 변수가 존재한다.

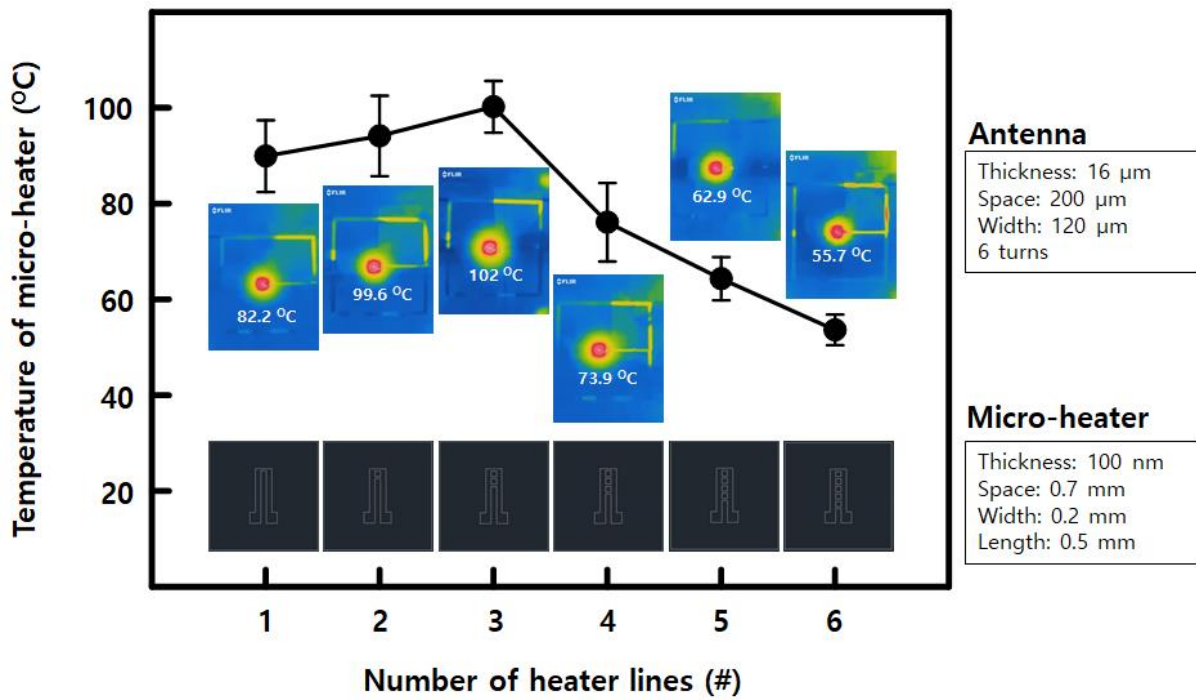


그림 4-3. Micro-heater 의 Heating line 개수에 따른 온도 측정

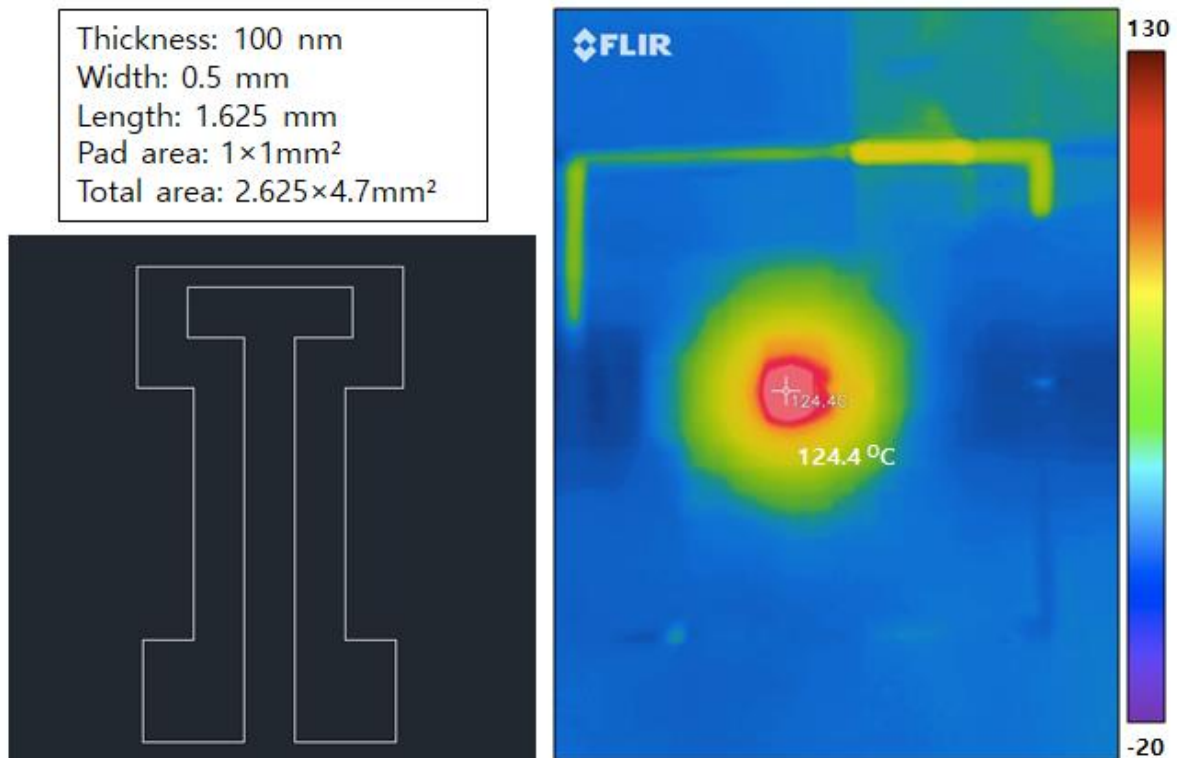


그림 4-4. 최대 124.4°C까지 도달하는 히터의 Geometry 디자인과 IR image

4.2. Al Antenna manufacture

4.2.1. 단층 Al Antenna

본 연구에서 사용된 단층 Al Antenna 는 100mm X 100mm Slide glass 위에 polydimethylsiloxane (PDMS) piece 를 붙인 후 그 위에 약 15 μm 정도 두께를 가진 알루미늄 호일을 붙인 후 4.1 과 동일하게 LASER marker 장비를 이용하여 안테나 패턴으로 LASER ablation 한다. LASER ablation 기술을 이용하여 안테나의 pattern 을 새겼으며, 그림 4-5 에서 나타난 바와 같이 간단하게 제작할 수 있었다. 사진속의 소자는

핸들링을 위해 slide glass 위에 올려져 있으며, 74 mm X 74 mm 의 외경을 갖는 Al antenna 소자를 보여주고 있다.

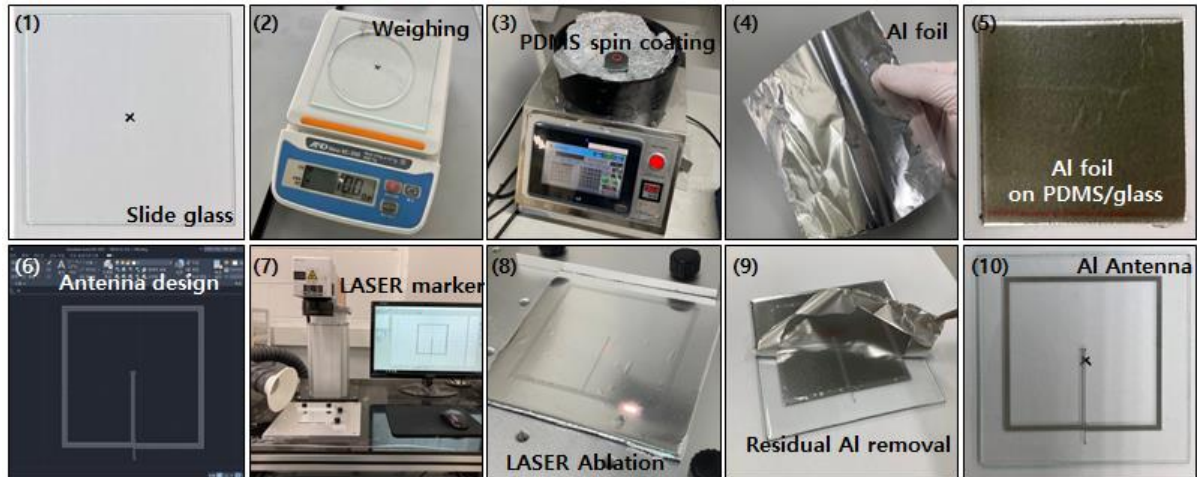


그림 4-5. Al Antenna 제작법

4.2.2. 복층 Al Antenna

완성된 소자는 그림 4-6 (a)에서 확인할 수 있는데, 복층의 무선안테나로부터 받은 전력을 이용해 무선으로 LED 를 구동한 모습을 볼 수 있다. 1.6 cm * 1.6 cm 크기의 외경을 갖는 무선 안테나가 serpentine 형태로 구현되어 스트레칭이 가능하며, 각 층 당 5 바퀴의 코일이 200 um 의 폭, 60 um 의 간격을 갖는 형태로 구현되었다. 1 층부터 최대 6 층까지 멀티레이어 안테나를 올려가면서, serpentine 안테나를 최대한 아래층과 정렬하여 패터닝하였고, 그림 4-6 (b)에서 각 층별로 안테나 패턴을 확인할 수 있다. 수신 안테나의 성능을 최대로 하기 위해서는 안테나의 외경을 키울 수 있는데, 이는 전체 소자의 크기를 크게 만들어, 웨어러블 소자 등에 활용 시에 제약이 될 수 있다.

안테나의 크기를 크게 하지 않고 안테나의 내경을 줄이지 않으면서 수신 안테나의 성능을 향상시키기 위해 본 연구에서는 멀티레이어 안테나를 적용하였다. 기존의 반도체 공정을 활용하면, 금속 박막 증착을 위한 evaporator 나 sputter 장비, 절연 박막 형성을 위한 PECVD, 패터닝을 위한 Mask aligner 등 다양한 공정 장비가 필요하지만, 본 연구에서는 절연을 위한 PDMS 박막, 알루미늄 안테나를 패터닝하기 위한 LASER marker 그리고 층간 연결을 위한 Ag paste 등 간단한 장비 만을 활용해 non-cleanroom condition 에서 제작 가능한 소자를 개발하였다.

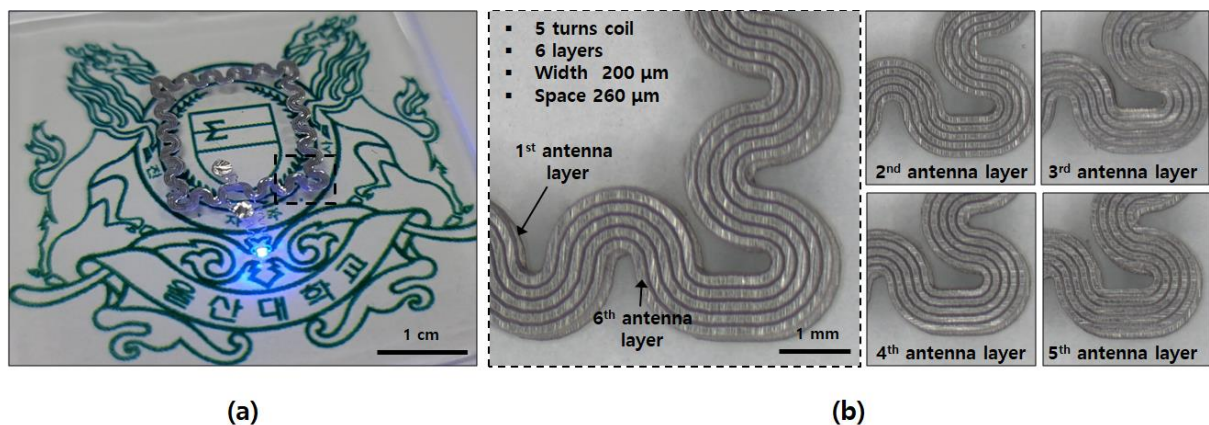


그림 4-6. 복층 무선 안테나; (a) Optoelectronic 장치의 복층 무선 안테나 구동한 모습, (b) 각 층별로 신축성 안테나 OM img.

복층의 안테나를 구성하기 위해 층간의 연결을 위한 공정을 개발하였다. 기존의 반도체 via 제작 공정은 박막 증착과 리소그래피를 이용한 패터닝, 그리고 에칭 공정 등을 통해 진행하나, 여기에서는 마이크로 punching tool 과 conductive epoxy 를 통해

쉽게 층간 연결을 할 수 있었다. **그림 4-7 (a)~(c)**에서는 복층 안테나의 연결 과정을 차례대로 보여주고 있다. 2 층으로 쌓은 안테나 패턴과 연결 패드는 **그림 4-7 (d)**에서 볼 수 있는 마이크로 펀칭 틀을 이용해 홀을 만들고 Ag 에폭시 paste 를 홀에 채운 후 100 도씨의 열처리를 통해 완성한다. 완성된 소자는 NFC 기반의 무선 전력 전송 시스템을 통해 무선으로 구동된다. 13.56 MHz 의 radio frequency 신호는 RF signal generator 에서 발생한 후 control system 을 통해 책상 아래쪽에 설치된 송신 안테나로부터 제공된다 (**그림 4-7 (e)~(g)**). 책상 표면에서 아래쪽으로 3 cm 밑에 설치된 30 cm * 40 cm 규격의 송신 안테나를 이용해, 완성된 스트레칭 가능한 멀티레이어 안테나가 수신하고 여기에 연결된 optoelectronic 소자가 구동되는 것을 확인하였다.

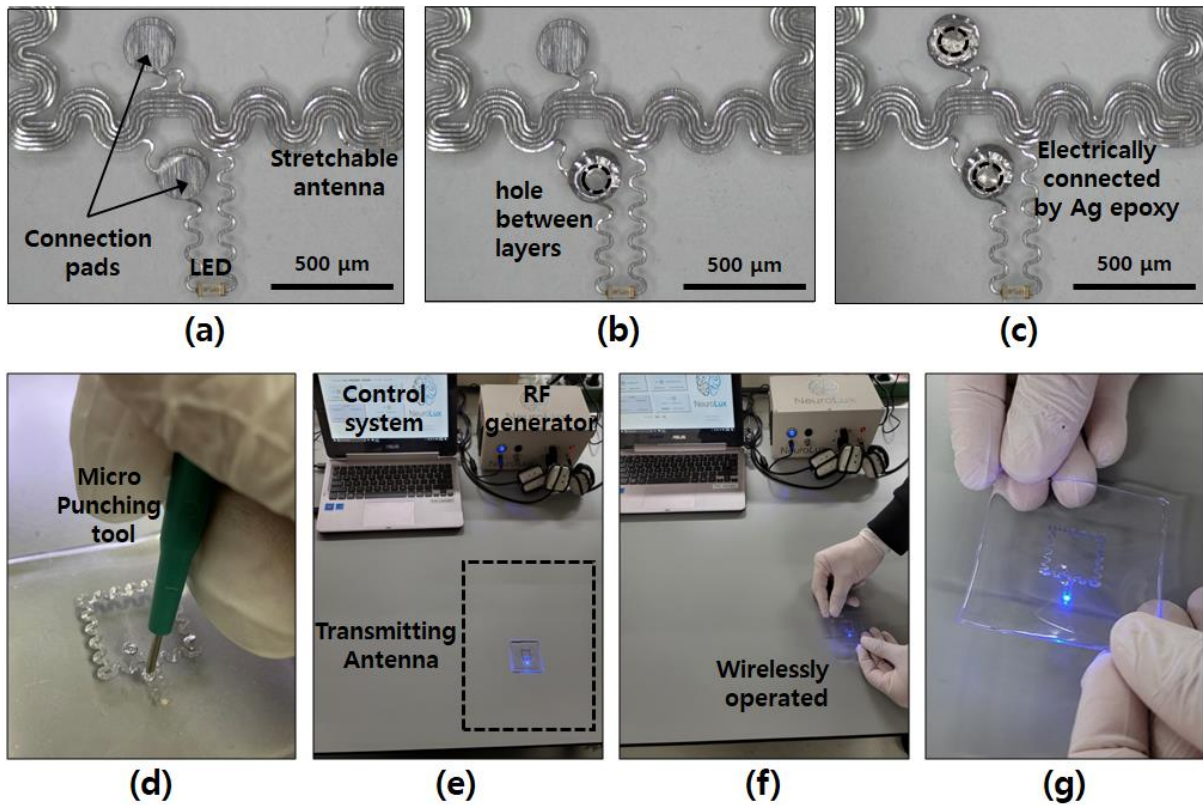


그림 4-7. Optoelectronic 장치의 복층 무선 안테나; (a-c) 가공 및 연결 과정의 OM 이미지; (d) 마이크로 펀칭 도구; (e) 무선 전력 전송 시스템; (f,g) 제작된 Optoelectronic 장치의 무선 작동

4.2.3. Transmitting antenna

안테나와 히터 소자 동작은 외부의 Near field communication(NFC) 기반의 무선 전력 전송 장치로 구동되는데, 그림 4-8. (b)에서 13.56 MHz 의 무선 주파수를 만들고, 제어할 수 있는 무선 전력 송신 시스템을 보여주고 있다. 무선 송신 시스템은 RF generator 와 control system 그리고 transmitting antenna 로 구성되어 있다. Transmitting antenna 는

그림 4-8. (b)에서 표시된 영역인 실험용 테이블 아래쪽에 설치되었으며, 대략 50 cm * 50 cm 면적 기준으로 설치된 안테나를 통해 높이 방향으로 최대 20 cm 까지 무선 전력 전송이 가능하게 셋업되었다. 전력 전송 시스템 전력으로 무선 구동된 마이크로 히터의 사진과 IR camera 로 얻는 temperature gradient image 를 각각 그림 4-8. (c)와 (d)에 나타내었다. 테이블 아래쪽 5 cm 거리에 설치된 송신 안테나로부터 최대 10W 송신 파워로 구동될 수 있으며, 무선 LED 소자와 무선 마이크로 히터가 해당 무선 전력 전송 장치를 이용해 성공적으로 구동되는 것을 IR image(그림 4-8. (d))를 통해 확인할 수 있었다. 무선 LED 소자 또한 동일한 수신 안테나로 제작되었으며, 무선 구동 확인을 위해 함께 배치하였다.

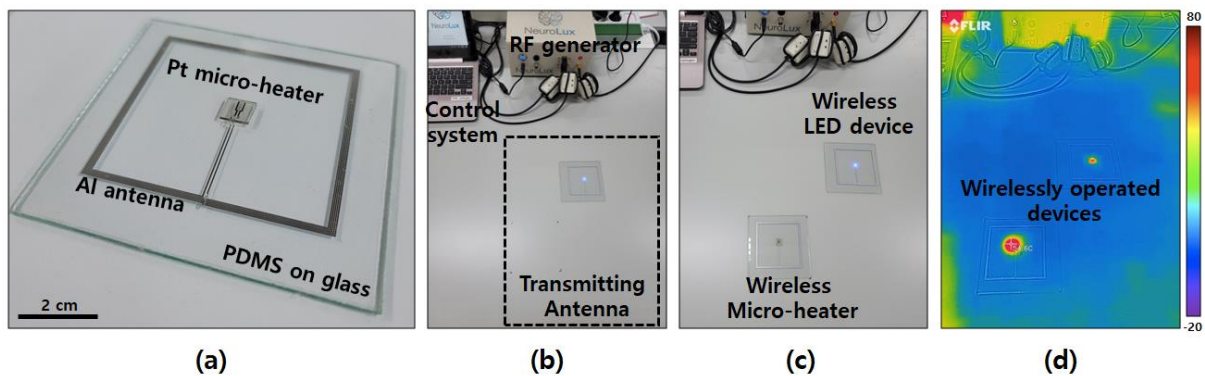


그림 4-8. 무선 마이크로히터 및 근거리 무선 통신 기반 전력 전송 시스템; (a) PDMS/유리 기판의 무선 마이크로히터 장치; (b) 무선 전력 전송 시스템은 RF 발생기, 제어 시스템 및 송신 안테나; (c) and (d) 무선으로 작동하는 LED 및 마이크로히터 소자의 사진과 IR camera 로 얻는 temperature gradient image

4.2.4. 단층 AI antenna 성능 측정

무선 구동 안테나의 성능을 분석하고, 최적의 안테나 형태를 쉽게 확인하기 위해 micro heater 대신 LED 를 연결하여 안테나로 수신하는 전력으로 구동되는 LED 의 output power 성능을 비교하였다. **그림 4-9. (a)** inset 이미지는 LED 가 연결된 무선 안테나로 동작하는 모습을 보여준다. 수신 안테나의 성능은 안테나 coil 외경의 크기, coil 의 회전수, coil 간의 간격, coil 물질의 저항, coil 의 폭, 그리고 coil 내경의 크기로 결정된다. 본 실험에서 그 중에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 변수는 외경의 크기와, 회전수, 그리고 간격이라고 할 수 있다. Coil 의 저항과 폭은 비저항값이 매우 낮은 알루미늄을 두껍게 사용함으로써 영향이 적으며, 내경의 경우 외경, 회전수, 폭 그리고 간격에 따라 자동으로 결정되는 변수이기 때문이다. **그림 4-9. (a), (b), 그리고 (c)**는 각각 coil 의 외경, 회전수 그리고 간격에 따라 수신 안테나 성능이 어떻게 달라지는지 비교하는 결과이다. 같은 송신 안테나 구동 조건으로 다른 변수를 동일하게 제어하며 LED 밝기 변화를 기준으로 수신 안테나 성능을 비교하였다. 안테나 외경의 경우, 정사각형 형태의 안테나의 외경이 커질수록 크기에 비례하여 수신 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 한쪽 면의 길이를 2 cm 부터 7.4 cm 로 1.8 cm 씩 키워가며 비교하였는데, 외경 한 변의 길이가 길어질수록 성능의 증가폭이 더 커지는 것을 확인하였다. 이는 impedance matching 을 하지 않고 테스트를 진행하였기 때문에, 큰 안테나에서 13.56 MHz 에 더 근접한 peak frequency 를 갖는 수신 안테나 특성을 보여주기 때문으로 생각한다. 또한, 안테나 코일의 회전수가 많을수록 수신 성능이 향상되는 것으로 나타나는데, 외경의 결과와는 달리 드라마틱한 향상이 없었다. 이는 회전수가 많아질수록 내경의 크기가 감소하기 때문이며, 또한 코일 전체의 길이가 길어져 저항이 커지기

때문($R \propto L$)으로 생각된다. 내경의 크기를 크게 유지하면서도 회전수를 높이는 multi-stacked 안테나 형태를 도입하면 성능 향상이 더 좋아질 것으로 기대한다. 코일간의 간격은 간격이 좁을수록 수신 성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 실험 장비의 특성상 레이저의 직경이자 최소 중심 간격인 약 $200 \mu\text{m}$ 간격까지 꾸준히 성능 향상을 보였다. 이로써 수신 안테나의 성능을 최적화하기 위해서는, 외경의 크기를 높이고, 내경이 작아지는 않는 범위내에서 회전수를 높이고, 코일간의 간격을 최소로 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

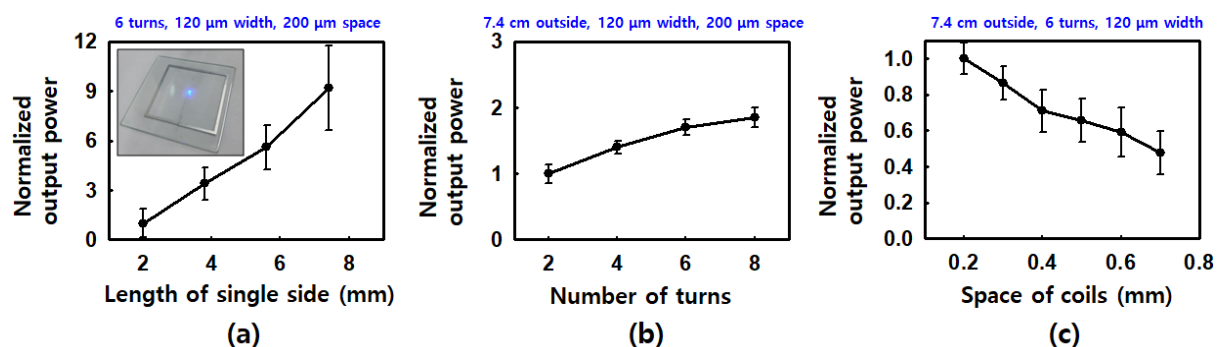


그림 4-9. 수신 안테나의 안테나 성능 비교; (a) coil 의 외경, (b)회전수 및 (c)coil 의 간격에 따른 것이다. (a)의 inset 이미지는 LED 가 연결된 안테나 소자를 나타낸다.

4.2.5. 복층 Al antenna 성능 측정

안테나 층의 늘어남에 따라 무선 안테나의 수신 성능이 달라지는 것을 수신하는 전력으로 구동되는 LED의 밝기를 기준으로 확인하였다. 송신 안테나의 사용 전력을 2.5 W 에서부터 2 배씩 증가시켜 5W, 10W 로 설정한 후 single layer 안테나부터 최대

6 층의 멀티레이어로 스택된 안테나를 제작하여 LED 의 output power 를 비교하였다. 1.6 cm * 1.6 cm 크기의 serpentine 구조 안테나를 기본 구조로 하였으며, 싱글레이어 안테나형의 경우는 2.5W 와 5W 에서는 LED 불빛이 거의 보이지 않았다. 또한 싱글레이어 안테나 기준 10 W 에서의 밝기를 1 로 normalize 해서 데이터를 **그림 4-10** 에 그래프로 나타내었다. 층의 개수가 많아질수록 LED 의 밝기는 밝아졌으며, 6 층 소자에서 LED 의 밝기는 같은 송신 파워의 1 층 소자 대비 약 3 배의 밝기 향상이 있었다. 또한 낮은 파워의 경우는 향상폭이 더 컸으며, 5W 기준 약 15 배, 2.5 W 기준 약 30 배 정도의 밝기 향상이 있었다. 이는 복층 안테나로 인해 coil 의 turn 수가 배로 증가하고, 코일 단면적(A)이 최대 3 배까지 증가하면서도 내경의 변화가 없어, 코일의 저항이 감소하고 ($R=\rho L/A$), 수신하는 전압이 multiply 됨으로 인해 낮은 송신 파워에서도 충분히 LED 가 구동될 수 있게 전압이 인가되기 때문으로 생각된다. 기존에 보고한 결과에서도 무선 수신 성능을 극대화하기 위해서는 안테나의 외경의 크기를 키우는 것이 가장 효과적이거나, 사용하는 용도에 따라 소자 크기의 제한이 있으므로, 외경의 크기를 유지하면서 성능 향상을 위해 내경의 크기를 줄이지 않는 한에서 코일의 turn 수를 증가시키거나 코일의 저항을 낮추는 방식으로 접근하였다. 추가적으로 commercial 반도체 공정을 통해 미세 패턴을 제작하게 되면, 더 좁은 coil 간격으로 안테나의 성능을 향상시킬 수도 있으나, 본 연구에서는 레이저의 직경으로 인해 최소 간격 60 um 로 고정하여 실험을 진행하였다. 정리하면, 무선 수신 안테나의 성능을 향상시키기 위해서는 안테나의 외경과 내경을 키우고, coil 의 turn 수를 늘이거나 저항을 줄이고, 코일간의 간격을 최소로 하는 것이 좋으며, 본 연구에서는 외경의 크기를 제한하면서, 내경을 줄이지 않고 턴수를 2 배로 하고, 저항을 1/3 로 줄일 수 있는 멀티레이어로 안테나를 구성하여 수신 안테나의 성능을 향상시킬 수 있었다. 안테나 층의 개수와 송신 파워를

바뀌가며 영향을 받는 수신 안테나로 구동되는 LED 의 밝기 이미지는 그림 4-11 에서 더 확인할 수 있다.

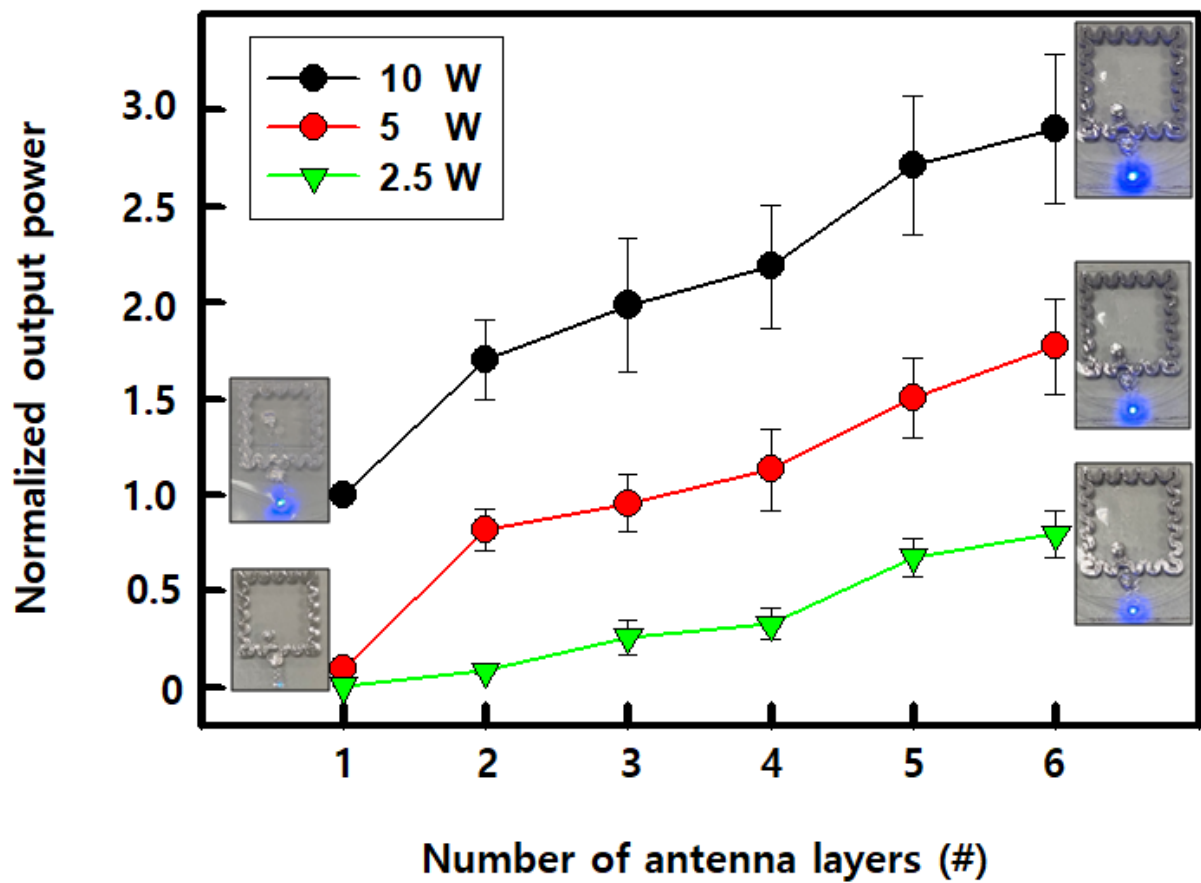


그림 4-10. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 정도 그래프

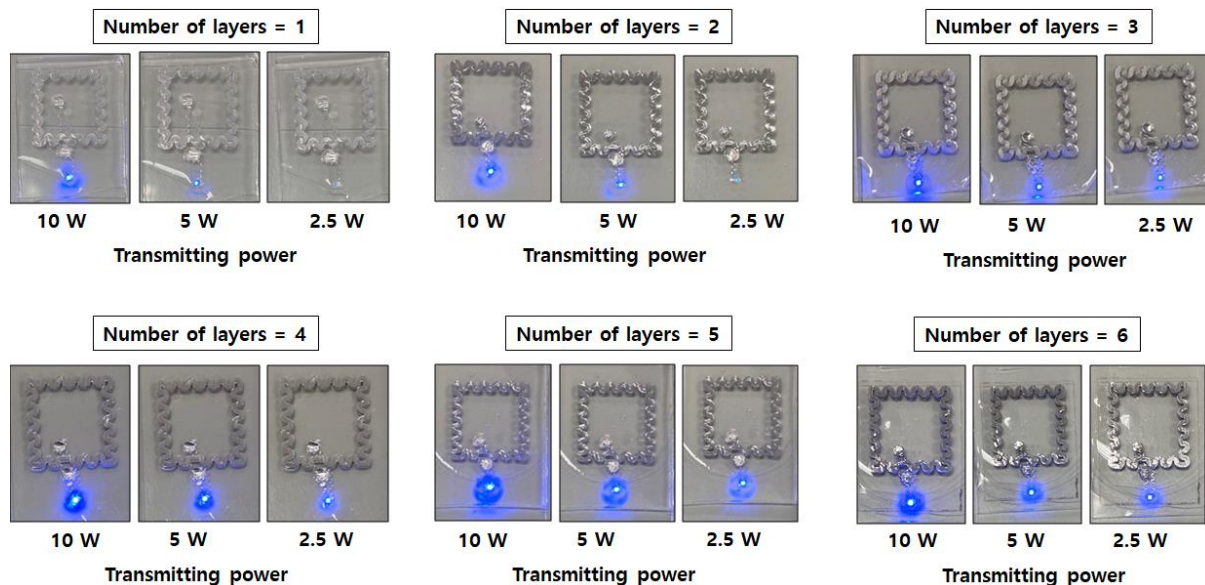


그림 4-11. 안테나 층수와 송신전력에 따른 Optoelectronic 장치의 LED 밝기 비교

실리콘 기반의 전자소자와는 달리 elastomer 중 하나인 PDMS 와 알루미늄 호일로 만든 안테나로 제작하였기 때문에, 구부리거나 잡아 늘일 수 있는 유연성을 가지고 있다. 그림 4-12 에서는 다양한 형태로 유연성을 테스트하였는데, 반경 12 mm 인 비커 위에 감은 것부터 (그림 4-12 (a)), 사각형 형태의 안테나의 좌우(그림 4-12 (b)), 위아래 (그림 4-12 (c)) 방향으로 구부린 상태로 무선 구동을 확인하였다. 또한 대각선 기준 서로 다른 방향으로 비틀거나(그림 4-12 (d)), horizontal 방향(그림 4-12 (e))이나 lateral 방향(그림 4-12 (f))으로 잡아 늘이는 조건에서도 무선으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다. 잡아당기는 테스트에서는 각각 20%의 스트레인에서도 LED 밝기의 큰 감소 없이 무선으로 잘 구동되는 것을 볼 수 있으며, 이는 serpentine 형태의 안테나가 PDMS 가 늘어나면서 길게 펴지면서 알루미늄 소재가 끊어지는 것을 방지하기 때문이다. 현재 스트레처블 구조에서는 5 turn 의 안테나 코일을 유지하기 위해 최대 2 mm 폭(안테나

내경과 외경 차이)으로 구성했는데, 해당 소자 구조 기준 약 25%에서 30% 사이의 최대 허용 스트레인을 갖는 것을 그림 4-13 에서도 확인 할 수 있었다.

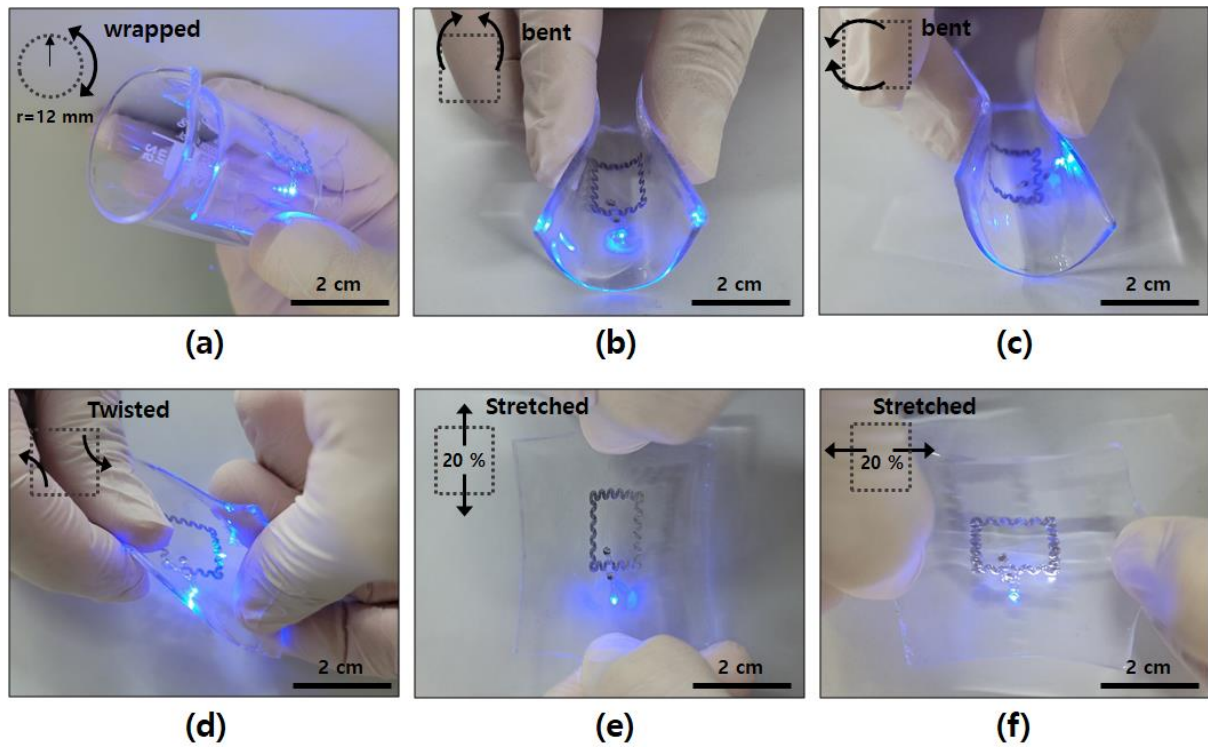


그림 4-12. Optoelectronic 장치 복층 안테나의 신축성 및 구부릴 수 있는 성능; (a) 반경 12mm 의 비커에 감겨 있음; (b) 가로 방향으로 구부림; (c) 세로 방향으로 구부림; (d) 대각선 방향으로 비틀림; (e) 세로 방향으로 뻗음; (f) 가로 방향으로 뻗음.

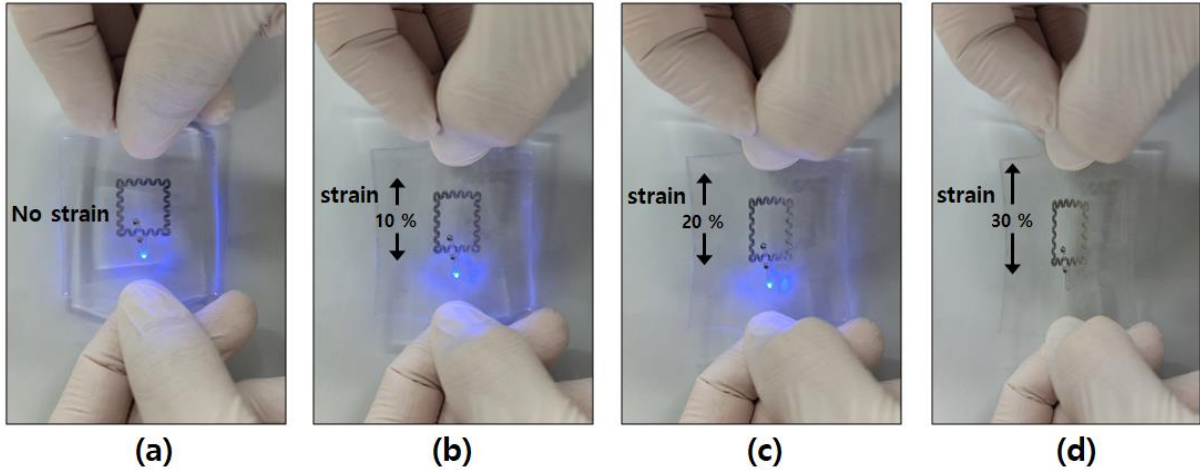


그림 4-13. 변형률에 따른 Optoelectronic 장치 신축성 복층 안테나의 무선 작동; (a) 변형 없음, (b) 변형률 10%, (c) 변형률 20%, (d) 변형률 30%(고장)

그림 4-14 에서는 bending 과 stretching 에 대해 정량평가를 위한 테스트를 한 결과를 보여주는데, 구부리는 경우 radius of bending 이 6 mm 정도부터 안테나 수신 성능이 눈에 띄게 약화되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 안테나가 늘어남에 따라 데미지를 받은 게 아니라 소자 크기 대비 bending 하는 반경이 작아 안테나의 위치가 송신 안테나에 평행이 아닌 수직 방향으로 배치되고 이로 인해 수신하는 신호의 세기가 감소하기 때문이다. 스트레칭의 경우 lateral, horizontal 그리고 diagonal 방향으로 테스트하였는데, 가로 세로 방향에서는 최대 25 % 정도의 스트레인에서 안테나 또는 LED 연결 부위 등에서 failure 가 발생했으며, 대각선 방향의 경우 최대 30% 정도까지 구동되기도 하는 것을 확인하였다. 반복적인 스트레칭에 대한 안정성을 확인하기 위해 fatigue test 를 진행했으며, 스트레인에 따라 각각 5 % 에서는 3000 회 이상, 10 %에서는 약 1000 회, 20%에서는 수십번의 스트레칭에서 안정적인 특성을 유지하는 것으로

나타났다. 기존에 보고된 스트레처블 소자에 비해 최대 스트레인이나 안정성 결과가 다소 낮게 나타났으나, 이는 안테나의 외경과 내경 크기의 제한과 함께 멀티레이어 안테나 구조로 인한 전체 두께 증가 및 Ag epoxy 를 이용한 수직 연결의 접착 강도가 낮음 등의 복합적인 원인으로 인한 것으로 여겨진다.

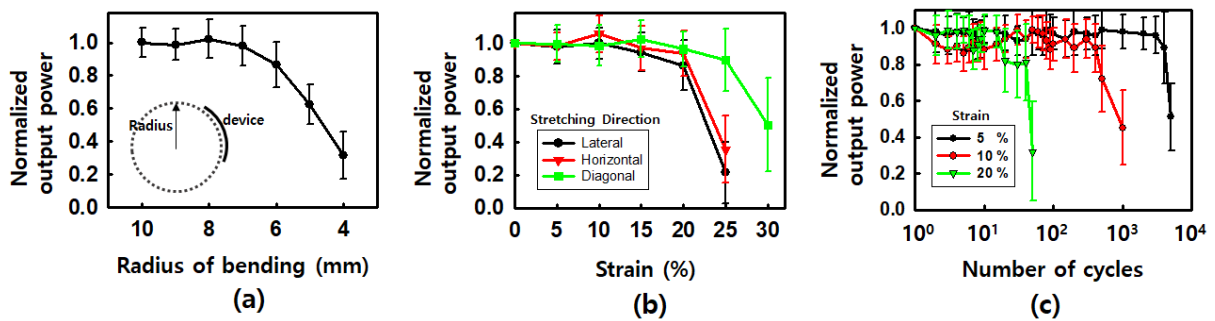


그림 4-14. 수신 안테나의 신축성 특성; (a) 굽힘 정도에 따른 출력세기 그래프, (b) 변형률에 따른 출력세기 그래프, (c) 반복적인 스트레칭 사이클 수에 따른 출력세기 그래프

4.2.6. Wearable 가스 센서 응용을 위한 Flexible 무선 마이크로 히터 소자 개발

웨어러블 가스 센서 응용을 위해서는 가스 센싱 특성과 무선 구동 기능뿐만 아니라 부드럽고 플렉서블한 형태로 소자를 구현해야 한다. 기존의 conventional 소자와는 달리, 우리의 피부나 옷 등에 소자를 적용하기 위해서는 낮은 모듈러스를 갖는 소재로 소자를 제작해야 한다. 이는 기존의 반도체 기반 소자들이 높은 모듈러스를 갖음으로 피부 등의

낮은 모듈러스와의 modulus mismatching 에 의한 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 마이크로 히터와 무선 안테나는 매우 낮은 모듈러스의 PDMS 위에 제작되었고, 최종적으로 핸들링을 위한 유리 기판에서부터 떼어내면, 그림 4-15 에서 볼 수 있는 것처럼 flexible 한 형태가 된다. 안테나 기준 대각선 방향과 가로세로 방향 그리고 손가락 사이에 넣는 듯 다양한 형태로 구부림 등의 변형을 하였고, 동시에 무선으로 마이크로 히터를 구동하였다. 관련한 사진과 적외선 이미지를 통해 구부림 등의 변형이 있음에도 정상적으로 히터 소자가 무선으로 구동되는 것을 확인할 수 있다.

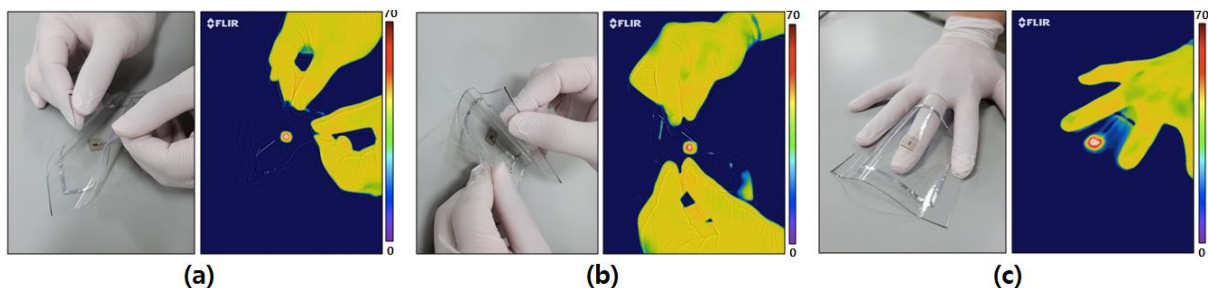


그림 4-15. 다양한 변형으로 무선 마이크로히터의 작동; (a) 대각선 방향, (b) 수평 방향, (c) 손가락 사이에 끼우듯 구부러지는 동작

또한 복층 안테나는 스트레칭이 가능하며, 작은 크기로 높은 무선 수신 성능을 보이는 안테나는 다양한 웨어러블 소자에 응용이 가능할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 최신 신경공학 기술 중의 하나인 optogenetics 에 활용이 가능한 무선 optoelectronics 소자를 기본으로 제작하였다. 해당 소자는 동물의 뇌, 척수 또는 말초 신경등에 implant 된 후 LED 가 빛에 의해 자극되도록 유전적으로 변형된 신경을 자극하는 용도로 활용할 수 있다. 그림 4-16 (a) 에서는 오픈된 넓은 공간에 배치한 모형 쥐가 광유전학 소자를 implant 한 상태로 자유롭게 돌아다니면서 실시간으로 무선 광자극이 되는 것을

모사하고 있다. 두 마리의 모형 쥐의 척수와 대퇴근 부근에 각각 optogenetic device 를 부착한 후 무선으로 구동 가능한 것을 보여준다. 이는 실제 동물실험에서도 실험기구 공간 안의 움직이는 동물에 삽입된 optogenetic 소자가 기존에 보고한 reports 에서처럼 실시간으로 신경을 자극할 수 있을 것이라 기대한다. 기존의 무선 전력 전송 시스템뿐만 아니라, 스마트폰의 NFC 기능을 이용해서도 여기서 제작 소자를 무선으로 구동할 수도 있는데, 특별한 mobile application 등이 없어도 해당 LED 소자를 구동할 수 있는 것을 **그림 4-16(b)**에서 확인할 수 있었다. 이는 smartphone 의 NFC 가 사용하는 RF 가 13.56 MHz 로 본 소자와 같은 주파수를 사용하기 때문이다. 추후 NFC chip 등 추가 등으로 복잡한 제어 등도 가능할 것으로 기대한다. 또한 **그림 4-16 (c)**에서 처럼 LED 대신 마이크로 히터를 연결하여 무선 마이크로 히터 소자에도 응용할 수 있었으며, IR camera 측정을 통해 1.6 cm * 1.6 cm 의 작은 수신안테나를 이용해 성공적으로 마이크로 히터의 무선 구동을 확인할 수도 있었다.

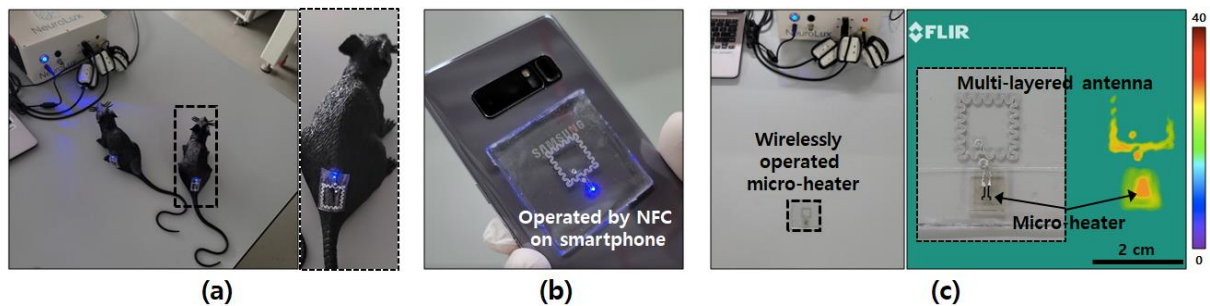


그림 4-16. 웨어러블 및 스마트 전자제품에 대한 응용; (a) 광유전학적 접근을 보여주는 마우스 모델에 부착, (b) 스마트폰의 NFC 기능으로 작동, (c) 웨어러블 히터 장치의 무선 작동을 위한 마이크로 히터와 통합

위와 같은 부드러운 소재위에 제작한 무선으로 동작 가능한 마이크로 히터는 피부나 의류 등에 직접 적용하여 다양한 웨어러블 응용이나 센서 등에 활용이 가능할 것으로 본다. 또한 스트레칭이 가능한 고성능의 복층 무선 안테나는 다양한 기능성 소자와 연결되어, 헬스 케어나 치료 등을 위한 바이오 메디컬 디바이스, 웨어러블 센서 또는 smart electronics 등에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결론

유연한 고분자 기반 소재 위에 알루미늄과 Pt 박막의 간단한 패터닝을 통해 무선 마이크로 히터소자를 제작하였고, 수신 안테나 및 micro-heater 의 geometry 대비 특성 비교를 통해 마이크로 히터의 성능을 향상시킬 수 있었다. Pt micro-heater 기반 소자의 기술적 한계를 해결할 수 있는 방안을 모색하기 위해 Pt micro-heater, flexible AI Antenna 각각에 알맞은 조건들로 실험을 진행하였다.

1. Pt Micro-heater 은 Ion Sputter Coater 을 이용하여 약 100nm 두께의 Pt 박막을 증착시켰으며, LASER system 을 활용하여 주요 변수인 LASER power, speed, frequency 를 조절하며, CAD 를 통해서 원하는 디자인의 pattern 으로 조사하여 Micro-heater 을 제작하였다. 1 개에서 6 개까지의 heating line 이 있는 마이크로 히터를 연결하여 무선으로 구동 시켰고 heating line 간격을 0.7 mm, 폭을 0.2 mm, 길이를 0.5 mm 로 설정한 후 heating line 의 개수를 바꿔가며 진행하였고, 측정 온도에 도달할 때까지 걸리는 시간은 모두 1 분으로 고정하고, 히터 소자들의 평균 온도를 측정한 결과, Single layer 안테나 기준 impedance matching 을 하지 않은 상태에서 주어진 안테나와 히터 geometry 에서 약 100 도의 heating 온도를 보여주는 것을 확인하였다. 또한 안테나를 multi-stack 형태로 구성하거나, 히터의 geometry 를 다르게 구성하여 최대 124 도까지 heating 이 되는 것을 확인하였다. 안테나의 geometry 가 성능에 영향을 많이 끼치는 것처럼, Pt heater 의 경우도 두께, 길이, 폭, 라인 수, 라인 형태 등 다양한 변수가 존재한다는 것을 확인하였다.

2. 단층 AI Antenna 는 Slide glass 위에 polydimethylsiloxane (PDMS) piece 를 붙인 후 그 위에 약 15 μm 정도 두께를 가진 알루미늄 호일을 붙이고 LASER marker 장비를 이용하여 안테나 패턴으로 LASER ablation 하여 제작하였다. 무선 구동 안테나의 성능을 분석하고, 최적의 안테나 형태를 쉽게 확인하기 위해 LED 를 연결하여 안테나로 수신하는 전력으로 구동되는 LED 의 output power 성능을 비교하였다. 수신 안테나의 성능에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 변수는 외경의 크기와, 회전 수, 그리고 간격을 조절하며, 즉 같은 송신 안테나 구동 조건으로 다른 변수를 동일하게 제어하며 LED 밝기 변화를 기준으로 수신 안테나 성능을 비교하였다. 안테나 외경의 경우, 정사각형 형태의 안테나의 외경이 커질수록 크기에 비례하여 수신 성능이 향상되었고 한쪽 면의 길이를 최대 7.4 cm 까지 키워가며 비교하였는데, 외경 한 변의 길이가 길어질수록 성능의 증가폭이 더 커지는 것을 확인하였다. 이는 impedance matching 을 하지 않고 테스트를 진행하였기 때문에, 큰 안테나에서 13.56 MHz 에 더 근접한 peak frequency 를 갖는 수신 안테나 특성을 보여주기 때문으로 생각한다. 또한, 안테나 코일의 회전수가 많을수록 수신 성능이 향상되는 것으로 나타나는데, 외경의 결과와는 달리 드라마틱한 향상이 없었다. 이는 회전수가 많아질수록 내경의 크기가 감소하기 때문이며, 또한 코일 전체의 길이가 길어져 저항이 커지기 때문($R \propto L$)으로 생각된다. 내경의 크기를 크게 유지하면서도 회전수를 높이는 multi-stacked 안테나 형태를 도입하면 성능 향상이 더 좋아질 것으로 기대한다. 코일간의 간격은 간격이 좁을수록 수신 성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 이로써 수신 안테나의 성능을 최적화하기 위해서는, 외경의 크기를 높이고, 내경이 작아지는 않는

범위내에서 회전수를 높이고, 코일간의 간격을 최소로 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

3. 복층 AI Antenna 는 PDMS 를 탈착이 쉬운 PET 계열의 고분자 필름위에 스피코팅 후 경화시키고 그 위에 알루미늄 호일(두께: 15 um)을 부착하고, LASER marker 장비를 통해 1 층의 안테나 레이아웃을 패터닝한다. 필요없는 알루미늄을 제거하고, LED 솔더링 후에 다시 PDMS 를 스피코팅한다. 2 층의 안테나도 동일하게 LASER 를 이용한 패터닝으로 알루미늄 안테나를 제작하며, 최대 6 층까지 동일한 방식으로 제작한다. 층간의 안테나는 micro punching tool 을 이용하거나 연결 패드위의 PDMS 부분을 제거한 후 Ag conductive epoxy 를 이용해 연결하여 마무리한다. 최대 6 층의 안테나로 구성된 소자는 최대 두께 300 um 이하로 제작되었으며, 1.6 cm * 1.6 cm 크기의 외경을 갖는 무선 안테나가 serpentine 형태로 구현되어 스트레칭이 가능하며, 각 층 당 5 바퀴의 코일이 200 um 의 폭, 60 um 의 간격을 갖는 형태로 구현되었다. 1 층부터 최대 6 층까지 멀티레이어 안테나를 올려가면서, serpentine 안테나를 최대한 아래층과 정렬하여 패터닝하였고 층의 개수가 많아질수록 LED 의 밝기는 밝아졌으며, 6 층 소자에서 LED 의 밝기는 같은 송신 파워의 1 층 소자 대비 약 3 배의 밝기 향상이 있었다.

기존의 반도체 공정을 활용하면, 금속 박막 증착을 위한 evaporator 나 sputter 장비, 절연 박막 형성을 위한 PECVD, 패터닝을 위한 Mask aligner 등 다양한 공정 장비가 필요하지만, 본 연구에서는 절연을 위한 PDMS 박막, 알루미늄 안테나를 패터닝하기 위한 LASER marker 그리고 층간 연결을 위한 Ag paste 등 간단한 장비만을 활용해 non-cleanroom condition 에서 제작 가능한 소자를 개발하였다.

실리콘 기반의 전자소자와는 달리 elastomer 중 하나인 PDMS 와 알루미늄 호일로 만든 안테나로 제작하였기 때문에, 구부리거나 잡아 늘일 수 있는 유연성을 가지고 있다. 잡아당기는 테스트에서는 각각 20%의 스트레인에서도 LED 밝기의 큰 감소 없이 무선으로 잘 구동되는 것을 볼 수 있으며, 이는 serpentine 형태의 안테나가 PDMS 가 늘어나면서 길게 퍼지면서 알루미늄 소재가 끊어지는 것을 방지하기 때문이다.

이렇게 무선으로 구동가능한 마이크로 히터는 열이 필요한 다양한 웨어러블 소자 및 헬스 케어 소자 등에 활용이 가능하며, 특히 gas sensor 등과 같이 sensing 성능을 향상시킬 수 있는 온도 제어에 활용할 수 있다. 앞으로 IoT 기반의 스마트 센서 그리고 헬스 케어용 모니터링 시스템 등 다양한 무선 시스템과 연동하여, 매우 높은 활용성이 기대가 된다. 또한 복층 안테나 공정 및 소자는 유연성과 고성능 특성을 기반으로 생체에 적용하는 soft biomedical device, optogenetics 또는 웨어러블 electronic device 등에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Han, S.; Kim, J.; Won, S.M.; Ma, Y.; Kang, D.; Xie, Z.; Lee, K.-T.; Chung, H.U.; Banks, A.; Min, S.; et al. Battery-free, wireless sensors for full-body pressure and temperature mapping. *Sci. Transl. Med.* 2018, 10, eaan4950.
2. Jeong, W.; Song, J.; Bae, J.; Nandanapalli, K.R.; Lee, S. Breathable nanomesh humidity sensor for real-time skin humidity monitoring. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 44758–44763.
3. Zhou, C.; Zhang, X.; Tang, N.; Fang, Y.; Zhang, H.; Duan, X. Rapid response flexible humidity sensor for respiration monitoring using nano-confined strategy. *Nanotechnology* 2020, 31, 125302.
4. Pang, Y.; Jian, J.; Tu, T.; Yang, Z.; Ling, J.; Li, Y.; Wang, X.; Qiao, Y.; Tian, H.; Yang, Y.; et al. Wearable humidity sensor based on porous graphene network for respiration monitoring. *Biosens. Bioelectron.* 2018, 116, 123–129.
5. Park, Y.-G.; Lee, S.; Park, J.-U. Recent progress in wireless sensors for wearable electronics. *Sensors* 2019, 19, 4353.
6. Kang, S.-K.; Murphy, R.K.J.; Hwang, S.-W.; Lee, S.M.; Harburg, D.V.; Krueger, N.A.; Shin, J.; Gamble, P.; Cheng, H.; Yu, S.; et al. Bioresorbable Silicon Electronic Sensors for the Brain. *Nature* 2016, 530, 71–76.

7. Shin, G. Soft, wirelessly powered humidity sensor based on SnO₂ nanowires for wireless/wearable sensor application. *Materials* 2020, 13, 2176.
8. Yu, K.J.; Yan, Z.; Han, M.; Rogers, J.A. Inorganic semiconducting materials for flexible and stretchable electronics. *NPJ Flexible Electronics*, 2017, 1, 4.
9. Choi, J.; Ghaffari, R.; Baker, L.B., Rogers, J.A. Skin-interfaced systems for sweat collection and analytics. *Sci. Adv.* 2018, 4, eaar3921.
10. Chung, H.U.; Kim, B.H.; Lee, J.Y.; Lee, J.; Xie, Z.; Ibler, E.M.; Lee, K.; Bank, A.; Jeong, J.Y.; Kim, J.; et al. Binodal, wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care. *Science* 2019, 363, 947.
11. Oh, Y.S.; Kim, J.-H.; Xie, Z.; Cho, S.; Han, H.; Jeon, S.W.; Park, M.; Namkoong, M.; Avila, R.; Song, Z.; et al. Battery-free, wireless soft sensors for continuous multi-site measurements of pressure and temperature from patients at risk for pressure injuries. *Nat. Comm.* 2021, 12, 5008.
12. Heo, S.Y.; Kim, J.; Gutruf, P.; Banks, A.; Wei, P.; Pielak, R.; Balooch, G.; Shi, Y.; Araki, H.; Rollo, D.; et al. Wireless, battery-free, flexible, miniaturized dosimeters monitor exposure to solar radiation and to light for phototherapy. *Sci. Transl. Med.* 2018, 10, eaau1643.
13. Jeong, J.-W.; McCall, J.G.; Shin, G.; Zhang, Y.; Al-Hasani, R.; Kim, M.; Li, S.; Sim, J.Y.; Jang, K.-I.; Shi, Y.; et al. Wireless optofluidic systems for programmable in vivo pharmacology and optogenetics. *Cell* 2015, 162, 662–674.

14. Zhang, H.; Zhao, H.; Zhao, X.; Xu, C.; Franklin, D.; Vazquez-Guardado, A.; Bai, W.; Zhao, J.; Li, K.; Monti, G.; et al. Biocompatible light guide-assisted wearable devices for enhanced UV light delivery in deep skin. *Adv. Funct. Mat.* 2021, 31, 2100576.
15. Wang, D.; Chen, Y.; Liu, Z.; Li, L.; Shi, C.; Qin, H.; Hu, J. CO₂-sensing properties and mechanism of nano-SnO₂ thick-film sensor. *Sens. Actuators* 2016, B227, 73–84.
16. Hwang, W.-J.; Shin, K.-S.; Roh, J.-H.; Lee, D.-S.; Choa, S.-H. Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors. *Sensors* 2011, 11, 2580-2591.
17. Kang, J.-G.; Park, J.-S.; Park, K.-B.; Shin, J.; Lee, E.-A.; Noh, S.; Lee, H.-J. Temperature control of micro heater using Pt thin film temperature sensor embedded in micro gas sensor. *Micro and Nano Syst Lett* 2017, 5, 26.
18. Toskov, S.; Glatz, R.; Miskovic, G.; Radosavljevic, G. Modeling and fabrication of Pt micro-heaters built on alumina substrate. *IEEE 36th Int. Spring Seminar on Electronics Technology* 2013, 47-52.
19. Wang, C.-P.; Hsiao, M.-H.; Lee, G.-H.; Chang, T.-L.; Lee, Y.-W. The investigation of electrothermal response and reliability of flexible graphene micro-heaters. *Microelectronic Engineering* 2020, 111334.
20. Lee, K.; Park, J.; Jung, S.I.; Hajra, S.; Kim, H.J. Direct integration of carbon nanotubes on a suspended Pt microheater for hydrogen gas sensing. *J. Mater. Sci: Mater Electron* 2021, 32, 19626-19634.

21. Zhang, T.-Y.; Zhao, H.-M.; Yang, Z.; Wang, Q.; Wang, D.-Y.; Deng, N.-Q.; Yang, Y.; Ren, T.-L. Improved electrothermal performance of custom-shaped micro heater based on anisotropic laser-reduced graphene oxide. *Appl. Phys. Lett.* 2016, 109, 151905.
22. Yeh, C.-C.; Yang, Y.-J. An rf-powered wireless micro-heater integrated with acrylate-composite-based temperature regulator for hyperthermia treatment. *IEEE MEMS 2020 Vancouver Canada 2020*, 357-360.
23. Chung, G.-S.; Jeong, J.-M. Fabrication of micro heaters on polycrystalline 3C-SiC suspended membranes for gas sensors and their characteristics. *Microelectronic Engineering* 2010, 87, 2348-2352.
24. Shin, G. Studies of Parylene/Silicone-Coated Soft Bio-Implantable Optoelectronic Device. *Coatings* 2020, 10, 404.
25. Han, S.; Shin, G. Biodegradable optical fiber in a soft optoelectronic device for wireless optogenetic applications. *Coatings* 2020, 10, 1153.
26. Park, S.-I.; Brenner, D.S.; Shin, G.; Morgan, C.D.; Copits, B.A.; Chung, H.U.; Pullen, M.Y.; Noh, K.N.; Davidson, S.; Oh, S.J.; et al. Soft, stretchable, fully implantable miniaturized optoelectronic systems for wireless optogenetics. *Nat. Biotechnol.* 2015, 33, 1280–1286.
27. Shin, G.; Gomez, A.M.; Al-Hasani, R.; Jeong, Y.R.; Kim, J.; Xie, Z.; Banks, A.; Lee, S.M.; Han, S.Y.; Yoo, C.J.; et al. Flexible Near-Field Wireless Optoelectronics as Subdermal Implants for Broad Applications in Optogenetics. *Neuron* 2017, 93, 509–521.

28. Kim, D.; Kim, Y.-K.; Park, S.C.; Ha, J.S.; Huh, J.; Na, J.; Kim, G.-T. Photoconductance of aligned SnO₂ nanowire field effect transistors. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95, 043107.
29. Fan, Z.; Ho, J.C.; Jacobson, Z.A.; Yerushalmi, R.; Alley, R.L.; Razavi, H.; Javey, A. Wafer-scale assembly of highly ordered semiconductor nanowire arrays by contact printing. *Nano Lett.* 2008, 8, 20–25.
30. Choi, Y.J.; Hwang, I.S.; Park, J.G.; Choi, K.J.; Park, J.H.; Lee, J.H. Novel fabrication of an SnO(2) nanowire gas sensor with high sensitivity. *Nanotechnology* 2008, 19, 095508.
31. Kuang, Q.; Lao, C.; Wang, Z.L.; Xie, Z.; Zheng, L. High-sensitivity humidity sensor based on a single SnO₂ nanowire. *J. Am. Chem. Soc.* 2007, 129, 6070–6071
32. Li, Z.; Sinha, S.K.; Treich, G.M.; Wang, Y.; Yang, Q.; Deshmukh, A.A.; Sotzing, G.A.; Cao, Y. All-organic flexible fabric antenna for wearable electronics. *J. Mater. Chem. C* 2020, 8, 5662-5667.
33. Sidek, O.; Ishak, M.Z.; Khalid, M.A.; Abu Bakar, M.Z.; Miskam, M.A. Effect of heater geometry on the high temperature distribution on a MEMS micro-hotplate. *IEEE 3 rd Asia symposium on quality electronic design* 2011, 100.
34. CHO, Jonam; SHIN, Gunchul. Fabrication of a Flexible, Wireless Micro-Heater on Elastomer for Wearable Gas Sensor Applications. *Polymers*, 2022, 14.8: 1557.
35. Kiwoong Hong, Jonam Cho and Gunchul Shin. "Stretchable, multi-layered stack antenna for smart/wearable electronic applications." *Materials*, 2022, 15.x

Abstract

Thin-film microdevices can be applied to various wearable devices, due to their high flexibility compared to conventional bulk-type electronic devices. Among the various microdevice types, many IoT-based sensor devices have been developed recently. In the case of such sensor elements, it is important to control the surrounding environment to optimize the sensing characteristics. Among these environmental factors, temperature often has a great influence. There are cases where temperature significantly affects the sensor characteristics, such as is the case for gas sensors. For this purpose, the development of thin-film-type micro-heaters is important. For this study, a wirelessly driven thin-film micro-heater was fabricated, the antenna was optimized, and the heater was driven at the required temperature. The effect of its use on gas-sensing characteristics was compared through application of the proposed micro-heater to a gas sensor. While implementing this as a multilayer antenna, LED, micro-heater, etc. were operated stably by receiving wireless signals even at strain of 20% or more, and multilayer stack antennas were implemented without existing semiconductor processes to improve the reception performance of the antenna. It is expected that thin-film-type micro-heaters that can be operated wirelessly are suitable for application in various wearable devices, including those for smart sensors and health monitoring. In addition, it is expected that it can be applied in various ways to smart wireless sensors and wearable biomedical devices by utilizing NFC of smartphones.

**Keywords: micro-heater; wireless; NFC; PDMS; gas sensor; wearable; SnO₂ nanowire;
flexible, stretchable**