

## Conformal Antenna and Wearability<sup>1)</sup>

**MINYOUNG SUH** Associate Professor, Wilson College of Textiles, North Carolina State University, USA<sup>2)</sup>

---

### 초록

인류가 사용하고 있는 대다수의 기계들은 많은 사람들이 공유하던 형태에서 시작되어 각 개인이 소유하고 휴대할 수 있는 형태로 발전되어 왔다. 의학계에서도 장기적, 지속적으로 치료가 필요한 환자들을 위해 신체에 직접 착용해도 불편함이 없는 웨어러블 의료 기구를 개발하고자 다양한 연구를 진행하고 있다. 본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로서 textile antenna 를 사용하여 유방암 환자들의 열 치료법을 돕기 위한 구형 conformal antenna 기구를 개발하는 연구 과정에 대해 서술하고 있다. 우선 textile antenna 가 휘어진 상태에서도 충분한 효과를 낼 수 있음을 검증한 후, cut-and-sew 와 3D 프린팅이라는 두 가지의 방식으로 conformal antenna 를 개발하였다. 그 결과 기대했던 성능의 절반 정도에 해당하는 효과가 나타났으며, 이를 보완하기 위한 후속 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

---

### 키워드

웨어러블, 의료 기구, 항암치료

---

1) 본 원고는 2021년 2월 23일 숙명여자대학교 창의융합 디자인연구소의 크리에이티브 컨버전스 국제학술대회 발표 자료를 재구성한 원고임.

2) [msuh2@ncsu.edu](mailto:msuh2@ncsu.edu)



## 1. 서론

현대 인류가 일상 생활에서 사용하는 기계들의 진화는 공유, 소유, 휴대, 착용이라는 네 가지 단계에 걸쳐 진화해왔다. 기계가 처음 개발된 초창기에는 지역의 모든 사람들이 한 대의 기계를 공유하였다. 이 시기가 지나 기술이 발전한 이후에는 사람들이 점차 기계를 각자의 가정에 들여 놓고 소유할 수 있게 되었다. 다음으로 이 기계들의 형태가 사람들이 휴대하기 편하도록 소형화된 후에는 단순히 집 안에서만 사용하는 것을 넘어 손에 들고 다니면서 이동 중에 사용할 수 있게 되었다. 진화의 마지막 단계에서는 기기를 휴대하되 손이 자유로울 수 있도록 몸에 걸칠 수 있는 형태로 발전하게 된다.

이런 식으로 기계가 진화해 나가는 과정은 의료 기기의 발전에서 또한 유사하게 적용된다. 현재 x-ray 나 CT, MRI 와 같은 대부분의 의료 기기들은 병원이나 요양원 등의 의료 시설을 통해 많은 사람들과 공유하여 사용되고 있다. 하지만 그보다 사용 방법이 간단하고 저가인 장비들 중에서는 각 가정에 소유화나 휴대화가 이루어진 경우도 있다. 체온계나 혈압계 등이 그 예이다. 이처럼 대다수의 의료 기기들이 공유, 소유, 휴대의 단계에 있는 현 시대에 장기적인 의료 조치가 필요한 사람들을 위해 의료 기기를 몸에 걸칠 수 있는 웨어러블 형태로 개발하기 위한 연구가 지속되고 있다.

기계의 진화 과정 내에서 다음 단계로 발전하기 위해서는 반드시 충족되어야 할 요건이 있다. 우선 공유에서 소유의 단계로 변화하기 위해서 필요한 핵심 기술은 대량 생산이다. 대량 생산을 통해 해당 기계가 다수의 사람들에게 보급되기 위해서는 적당한 규격으로 표준화되어야 하며, 기계를 생산하는데 필요한 비용이 줄어들어야 할 것이다. 다음으로 소유에서 휴대의 단계로 나아가기 위해서는 기계의 무선화가 이루어져야 하며, 특히 무선 배터리를 통해서도 충분한 전력을 공급할 수 있어야 한다. 마지막으로 휴대에서 착용의 단계로 나아가기 위해서는 기기를 소형화하고 경량화하는 과정이 우선적으로 필요하다.



그림 1 How Equipment Evolves

현재 웨어러블 기기의 발전은 이러한 단계를 거쳐 착용 이후의 영역인 invisible 단계에 들어서는 과정에 있다. 이때 가장 중요한 핵심 기술은 conformity 이다. 즉, 보다 유연하고 부드러운 소재를 사용하여 장치가 착용자의 몸에 알맞게 들어맞아서 물리적인 불편함이나 시각적인 불쾌감을 주지 않아야 한다. 이를 위해 웨어러블 장치를 개발하는 데 가장 필수적인 요소인 textile antenna 를 이용한 연구가 진행되고 있다.

## 2. Conformal Textile Antenna 기초 연구

### 2.1. Conformal Antenna 연구

Textile antenna 를 활용한 의료 기기 개발 연구의 시작점은 textile 이 휘어짐에 따라 성능이 어떻게 변화하는가에 대해 알아보는 것이었다. 우선 textile 을 이용해 유연한 antenna 를 개발하는 과정에서 충분한 성능을 얻기 위해서는 substrate 의 두께가 두꺼워야 했다. 따라서 이 기초 연구를 위해서 일반적인 폴리에스터 직물을 10 장 겹쳐서 사용하였다.

해당 연구 결과 textile antenna 가 휘어지며 형태가 변화할 때마다 antenna 성능이 최적화되는 지점이 크게 달라진다는 점이 관찰되었다. 또한 휘어지기 전과 달리 antenna 의 성능은 전체적으로 크게 약화되는 양상을 보였다. 하지만 이 문제는 성능 약화 정도가 예측 가능한 범위내에 있었기 때문에 휘어진 환경에서도 작동할 수 있도록 antenna 를 새로 디자인함으로써 극복이 가능하다는 결론에 도달하였다.

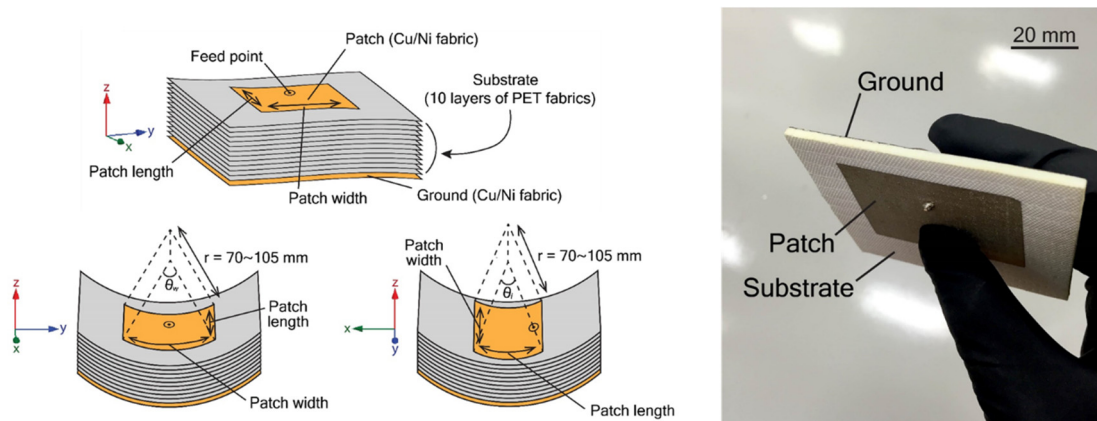


그림 2 Bending Textile Antenna (Mukai, Bharambe, Adams, and Suh, 2019)

## 2.2. 유전율 연구

개발을 시작하기에 앞서 antenna 를 만들 때 사용하는 textile 의 유전체적 특성(Dielectric Property)에 대한 기초 연구가 진행되었다. 유전율(dielectric permittivity)은 antenna substrate 를 사용하기 위해 가장 먼저 확인해야 할 소재의 기본 물성이다. 전기가 통하지 않는 절연성 소재라도 자기장에 반응하는 성질을 가지고 있는데, 이를 측정하는 값이라고 할 수 있다. 우리가 일상 생활에서 사용하는 섬유소재들은 기본적으로 공기와 섬유의 혼합물이다. 이 중 섬유가 차지하는 비율은 10%~20% 정도에 불과하며, 공기가 대부분의 부피를 차지하고 있다. 따라서 이 기초 연구에서는 다양한 조직의 소재를 사용해 solid volume fraction 이 유전 상수(dielectric constant)에 어떤 영향을 미치는지 관찰하였다.

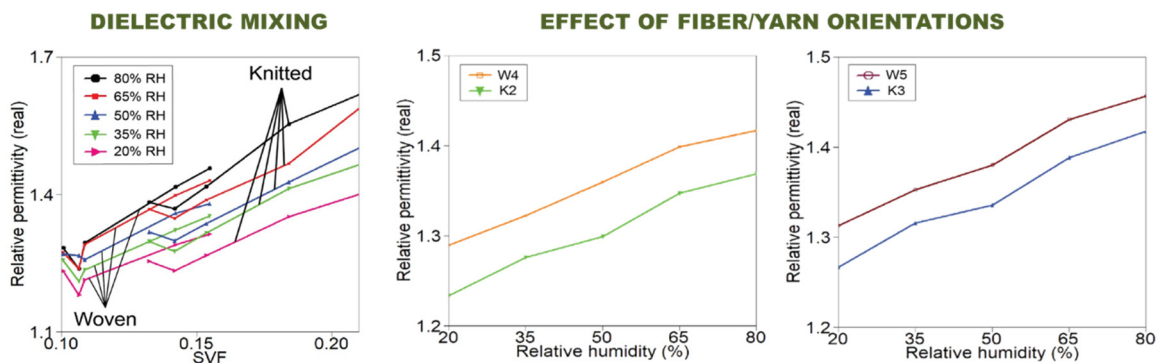


그림 3 Textile Structure & Dielectric Properties (Mukai and Suh, 2020)

그 결과 섬유의 함유량이 높아질수록 측정된 유전 상수의 값이 계속해서 높아지는 것으로 확인되었다. 이 연구에 사용된 직물과 편물 소재들 중 일부는 같은 수준의 solid volume fraction 을 가지고 있었는데, 직물(woven)의 구조가 편물(knitted)에 비해 더 높은 유전율을 보이는 것으로 관찰되었다. 소재 내의 섬유와 공기의 비율이 같은 경우에도 조직이 어떤 구조를 가지고 있느냐에 따라 실과 섬유의 방향성이 다르기 때문에 유전율이 달라지는 것으로 보인다. 이렇게 직물의 유전체적 특성을 확인한 후, 본격적으로 conformal antenna 를 개발하는 연구가 시작되었다.

## 3. Conformal Textile Antenna 를 적용한 의료 기기 개발 연구

앞서 textile antenna 에 대한 기초 연구를 통해 textile antenna 가 웨어러블 의료 기기로 사용 가능하다는 결론을 얻었다. 따라서 이를 이용해 여성의 유방암 치료에 사용되는 열 치료법(hyperthermia)을 돕기 위한 구형의 conformal antenna 를 개발하는 연구가 시작되었다. 열 치료법은

암세포가 있는 신체 부위의 체온을 국소적으로 5°C에서 6°C 정도 올려주는 치료이다. 열 치료법은 직접적으로 암세포를 죽이지 못하는 것으로 알려져 있지만, 유방암이나 갑상선암과 같이 재발 위험이 높은 몇 가지 암들을 치료하는 과정에서 항암 화학 요법(chemotherapy)이나 방사선요법(radiation therapy)과 병행했을 때 치료 효과를 높여주는 것으로 보고되고 있다.

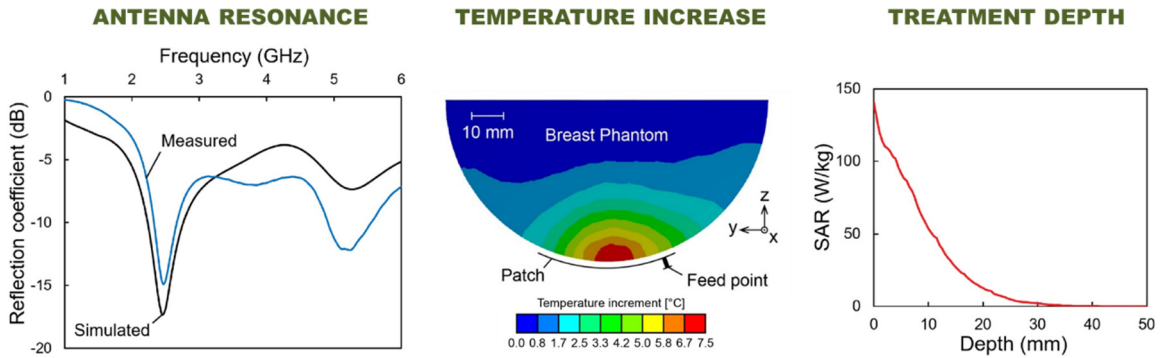


그림 4 Cut & Sewn Antenna Performance (Mukai and Suh, 2021)

일반적으로 열 치료법과 관련된 antenna 의 성능을 측정하기 위해서는 세 가지의 평가 기준이 사용된다. 첫 번째는 antenna 가 주어진 신호나 에너지를 얼마나 많이 반사하는지를 측정하는 것이며, 두 번째는 specific absorption rate(SAR), 즉 세포가 얼마나 많은 에너지를 흡수하는지를 측정하는 것이다. 세 번째는 온도나 에너지가 세포를 관통하여 얼마나 깊숙하게 도달할 수 있는지 측정하는 것이다. 이러한 측정 값들은 이론적으로 계산이 가능하다. 따라서 연구를 통해 개발될 conformal antenna 의 성능을 예상하여 이론적으로 계산한 값과 실제 모델을 제작하여 측정한 값의 차이에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

### 3.1. Cut-and-sew 방식

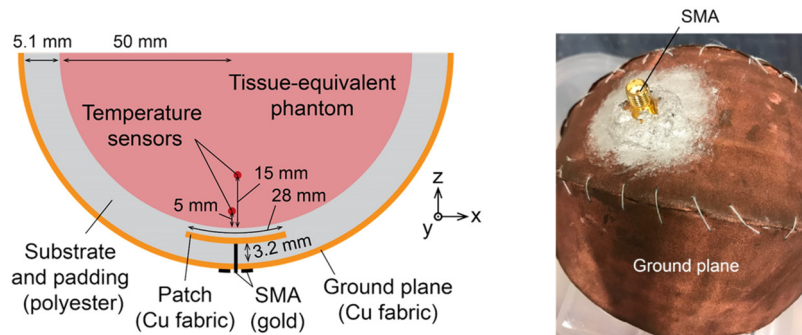


그림 5 Cut and Sewn Conformal Antenna (Mukai and Suh, 2021)

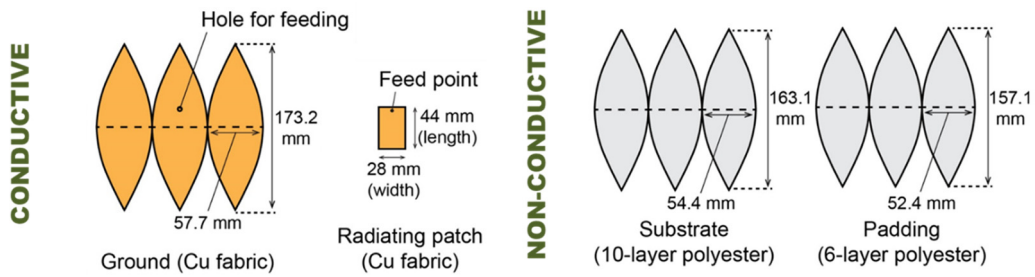


그림 6 Flat Patterning Method (Mukai and Suh, 2021)

이 연구에서는 보다 간단한 모델을 구현하기 위해서 여성의 유방을 완벽한 반구형으로 가정하고 개발에 착수하였다. Non-conductive substrate 로는 폴리에스터 소재를 사용하였으며, conductive patch 에는 copper-plated 폴리에스터 소재를 사용하여 제작하였다. 이때 의류학에서 널리 사용하는 평면재단법(flat pattern making) 을 사용해 cut-and-sew 과정을 거쳐 구형의 antenna 형태를 완성하였다. 제작된 conformal antenna 는 breast phantom 을 사용하여 그 성능을 측정하였다.

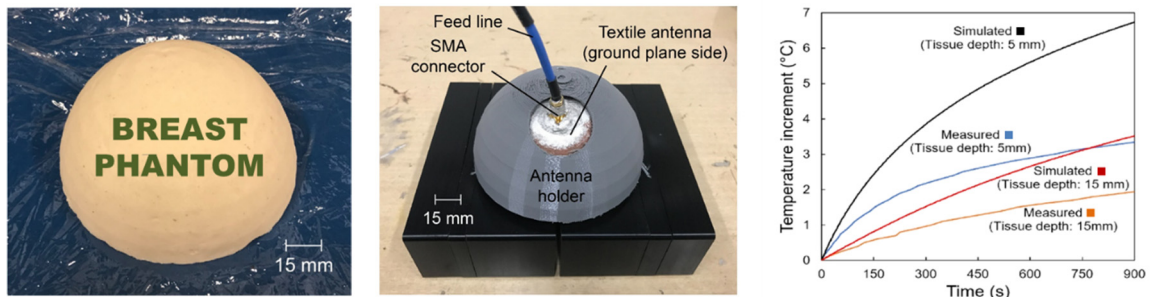


그림 7 Measurement Challenges and Resulting Performance (Mukai and Suh, 2021)

하지만 cut-and-sew 방식으로 만들어진 conformal antenna 의 성능을 측정하는 과정에서 몇 가지의 한계점이 있었다. 첫 번째로 인간의 유방조직은 주로 지방으로 이루어져 있는데, breast phantom 은 이와 비슷하게 제작되었지만 실제 인간의 유방조직과는 차이가 있다는 점이다. 두 번째로 개발된 antenna 가 웨어러블 기기의 특성상 유연하고 부드러운데, 기존의 뻣뻣한 측정 케이블로 인해 형태가 끊임없이 변형되어 정확한 성능 측정이 어려웠다는 점이다. 따라서 측정 과정에서 antenna 의 모양이 변형되지 않도록 특별 제작한 홀더를 사용해야 했다. 이렇게 측정된 성능은 이론상으로 계산한 성능과 상당한 차이를 보였다. 예상치 못한 에너지 및 열손실 때문인 것으로 추정된다.

### 3.2. 3D 프린팅 방식

Cut-and-sew 방식을 사용한 conformal antenna 개발 이후 비슷한 방식으로 후속 연구를

진행했는데, 이때 이전과 달리 직물을 사용하지 않고 3D 프린터를 이용하였다. 3D 프린터를 이용할 경우 substrate 내의 공기 비율을 조절하기가 용이하기 때문이다. 유연한 antenna 를 얻기 위해 플라스틱 대신 폴리우레탄 필라멘트를 substrate 에 사용하였는데, 폴리우레탄의 특성상 완전히 굳어지기 전까지는 프린팅된 구형태가 완벽하게 유지되지 어렵다는 어려움이 있었다.

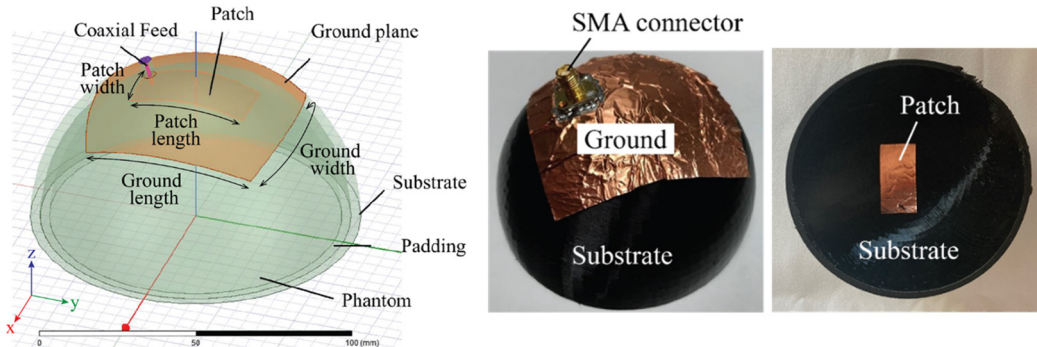


그림 8 3D Printed Conformal Antenna (Mukai, Li and Suh, 2021)

또한 연구의 초반에는 substrate 뿐만 아니라 전도성 패치에 해당하는 부분까지 3D 프린팅을 하는 것으로 기획하였었다. 그러나 전도성 필라멘트를 3D 프린팅하는 과정에서 원하는 구형의 형태를 얻어내기 어려웠고, 형태를 바로 잡기 위해서는 상당한 전도성 손실이 수반되었다. 이러한 이유로 antenna substrate 만을 3D 프린팅하고 전도성 패치 부분은 기존의 구리 호일을 사용하는 방향으로 연구방법이 수정되었다.

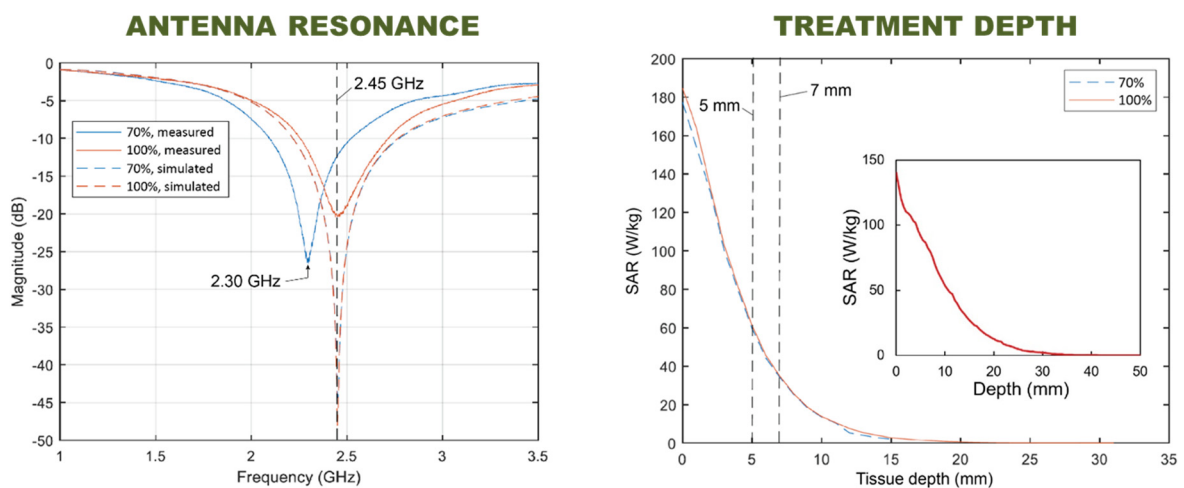


그림 9 3D Printed Antenna Performance (Mukai, Li and Suh, 2021)

이와 같이 3D 프린팅 자체가 가지고 있는 방법적인 한계를 최대한 보완하였음에도 위의 그래프에 나타난 바와 같이 3D 프린팅 방식으로 개발된 conformal antenna 또한 이론상으로 계산한 값과 실제 측정된 값에 2 배에 가까운 성능차이가 나타났다.

#### 4. 결론

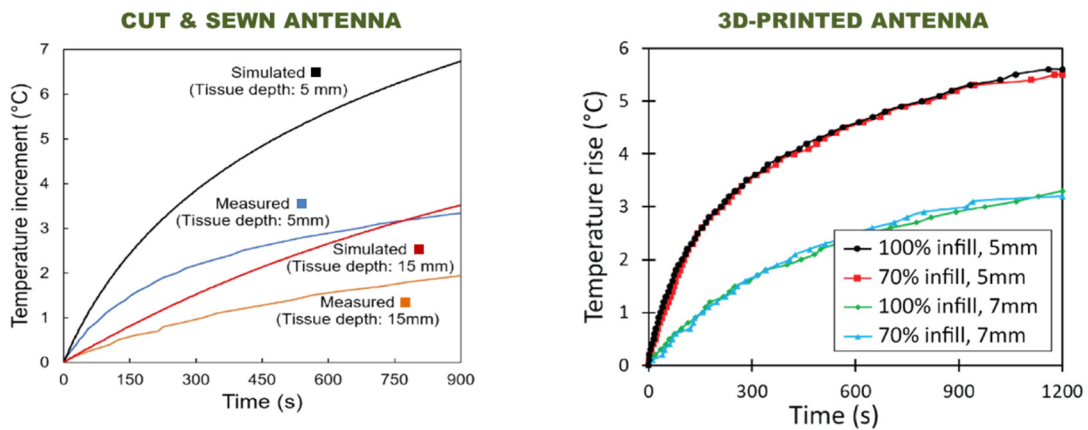


그림 10 Conformal Antenna Comparison (Mukai and Suh, 2021; Mukai, Li and Suh, 2021)

위 그래프는 cut-and-sew 방식으로 제작한 conformal antenna 와 3D 프린팅을 활용해 제작한 conformal antenna 의 성능을 비교한 것이다. 이를 확인해 보면 antenna 의 성능에는 큰 차이가 없이 비슷함을 알 수 있다. 1 분 30 초에서 15~20 분까지 열 치료법을 진행했을 때 이론상으로는 온도가 최대 7°C까지 올라갈 것으로 예측되었지만 실제 측정 결과 이의 절반 정도인 3°C의 온도 상승만을 관찰할 수 있었다. 실험을 통해 제작한 conformal antenna 가 예측한 만큼의 성능을 보이지 못하는 원인을 파악하여 기술적인 한계를 보완해 나갈 필요가 있을 것이다.

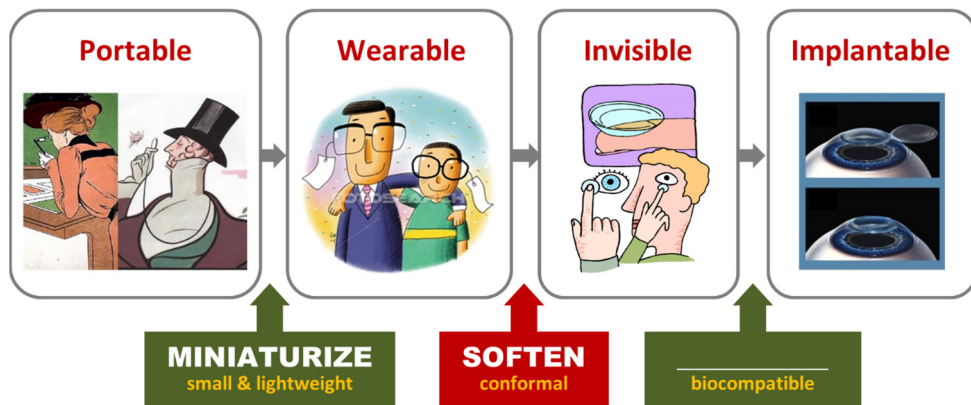


그림 11 Beyond Wearables



앞서 서론에서 언급한 바와 같이 현재 웨어러블 의료 기기는 invisible 의 단계로 발전하기 위한 과정에 있으며, conformal antenna 의 개발 과정 또한 이를 위한 연구라고 할 수 있다. 여기서 더 나아가면 기계를 인간의 몸 속에 장착하는 implantable 의 단계로 도약할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 위해서는 biocompatible, 즉 소재가 인간의 몸에 적합하고 생체 거부 반응을 일으키지 않아야 한다. 다음 진화의 단계에 도전할 수 있는 멀지 않은 미래에 대비해 이러한 소재의 기기를 개발하기 위해서는 어떠한 기술이 동원될 수 있을지 미리 고찰해 볼 필요가 있다.

---

## 참고문헌

- Mukai, Y., Bharambe, V., Adams, J., & Suh, M. (2019). Effect of bending and padding on the electromagnetic performance of a laser-cut fabric patch antenna. *Textile Research Journal*, 89(14), 2789–2801. DOI: 10.1177/0040517518801202
- Mukai, Y., & Suh, M. (2020). Relationships between structure and microwave dielectric properties in cotton fabrics. *Material Research Express*, 7(1), 1–12.
- Mukai, Y., & Suh, M. (2021). Development of a conformal woven fabric antenna for wearable breast hyperthermia. *Fashion and Textiles*, 8(7), 1–12.
- Mukai, Y., Li, S., & Suh, M. (2021). 3D-printed thermoplastic polyurethane for wearable breast hyperthermia. *Fashion and Textiles*, 8(24), 1–12.