

REVIEW

웨어러블 응용을 위한 소프트전자기파 소자 기술 동향

정훈엽^{1,2*}

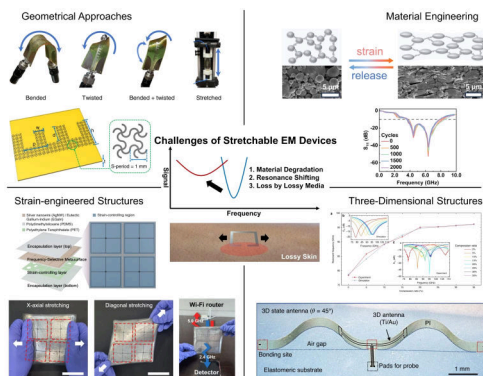
¹부산대학교 첨단융합학부, ²부산대학교 휴머노이드 후각 디스플레이 연구소

Recent Advances in Soft Electromagnetic Devices for Wearable Applications

Hoon Yeub Jeong^{1,2*}

¹School of Transdisciplinary Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

²Humanoid Olfactory Display Innovation Research Center, Pusan National University, Busan, Korea



ABSTRACT

Soft electronic platforms have emerged as promising technologies for wearable, implantable, and human-robot interface applications. However, compared with DC-based soft electronics, soft radiofrequency (RF) devices remain less explored because electromagnetic characteristics are highly sensitive to mechanical deformation, material degradation, and surrounding dielectric environments. These challenges become more crucial at high frequency and mmWave (millimeter wave) regimes due to shorter wavelengths and increased dielectric losses. To address these issues, this review summarizes recent advances in stretchable RF devices, including transmission lines, antennas, metasurfaces, and resonators. Strategies for mitigating material degradation, suppressing resonance shifting, and reducing dielectric loss are discussed. Finally, future perspectives for mmWave wearable systems and adaptive soft electromagnetic platforms are discussed.

Key Words: Soft electromagnetic devices, Wearable soft electronics, mmWave, Human-robot interface

*Correspondence: hoonyeub@pusan.ac.kr



1. 서론

기존의 딱딱한 전자소자 플랫폼에서 벗어나 소프트한 플랫폼에서의 전자소자가 활발히 연구되고 있다[1-4]. 이는 웨어러블(wearable), 체내삽입형(implantable) 소자 등의 발전을 견인하고 있으며 최근 산업계에서도 폴더블(foldable) 또는 롤러블(rollable) 디스플레이와 같은 폼팩터(form factor) 혁신을 이루는 제품들을 출시하고 있다[5]. 가까운 미래에는 피지컬 AI(physical AI)와 접목되어 가사노동, 병 간호 등의 사용자의 육체적인 부분에서 도움을 줄 수 있는 개인 맞춤형 비서 로봇의 역할뿐만 아니라, 소프트한 플랫폼이 주는 인간과의 동질감을 통해, 감정 위로, 정서적 교감 등의 사용자의 정서적인 부분까지 돌볼 수 있는 인간형 휴머노이드(humanoid) 로봇이 실현될 것이다.

이를 실현하기 위해, 다양한 웨어러블, 체내 삽입형 소자 등이 연구되었으며 인간의 오감을 모방하는 소프트 센서들이 활발하게 연구가 진행되고 있다[6,7]. 그러나, 인간과 휴머노이드의 실시간 통신 및 상호작용을 위한 교류형 또는 전자기파 소자에 대한 연구는 직류형 전자소자 연구에 비해 양이 많지 않은 실정이다. 현재는 외부 무선 통신을 위해 소자 시스템 내에 블루투스 칩을 실장하는 방법을 주로 사용해왔다[8,9]. 그러나, 미래의 휴머노이드와의 실시간 멀티모달(multi-modal) 센싱 및 저 지연 통신에서는 이러한 저주파 대역이 한계에 직면하기 때문에, mmWave (millimeter wave) 대역 또는 고주파 대역 사용을 통해 고대역폭, 저지연, 그리고 고해상도 센싱을 실현할 것으로 예상된다. 또한, 웨어러블 상황에서는, 다양한 센서 모듈들이 신체의 다양한 부위에 부착되게 될 것이다. 이는 변형이 큰 신체 부위에도 센서들이 부착되어 바디 네트워크를 형성하게 된다[10]. 이러한 센서들은 고신뢰도를 위해 피부의 굴곡에 맞게 컨포멀하게 착용되어야 하고, 각 센서들은 유기적으로 실시간 데이터

통신 및 외부 통신을 통해 실시간 데이터 처리가 가능해야 한다. 이를 실현하기 위해, 내재적 신축성을 가지는 전자기파 소자들에 대한 연구가 진행되고 있으나, 고주파 대역대가 아닌, 자기적 커플링을 이용하거나 주로 저주파 대역대에서의 연구가 활발히 진행되고 있다[11-13].

이러한 연구들을 고주파 대역에서 적용하기 위해서는, 단순히 특성 저하를 고려하는 직류 전자소자와는 다르게, 추가적으로 고려해야 할 요인들이 존재한다. 첫째로는 기계적 변형 하에서의 증가하는 재료의 저항에서 기인한 전자기파 소자의 특성 저하이다. 또한, 전자기파 소자의 특성은 주변 환경에도 영향을 받기 때문에, 전자기파 소자를 구성하는 기판 부의 유전율 변화, 인장 상황에서의 다른 축으로의 수축 현상인 푸아송 효과(Poisson's effect) 등을 고려해야 한다. Albeltagi et al.은 내재적 신축성을 가지며, 자기수복이 가능한 동일평면도파관(coplanar waveguide, CPW)을 구현하였다[14]. 그러나, 인장 정도에 따라, 전도성 물질의 증가하는 저항과 함께, 자기수복이 가능한 기판(EC7-CNT)에서 유전상수의 변화와(Fig. 1(a)) 유전손실의 증가로(Fig. 1(b)) 인해 CPW의 전송 특성이 인장 정도에 따라 저하됨이 확인되었다(Fig. 1(c)).

둘째 요인은, 공진 효과를 이용하는 전자기파 소자의 특성은 형상에 직접적으로 연관되어 있기 때문에, 기계적 변형 하에서는 전자기파 소자의 공진 주파수 특성이 달라진다. 이를 적극적으로 이용하여 기계적 변형을 감지하는 센서 등으로 활용하는 연구가 이루어져왔다[15-19]. 그러나, 안정적인 저지연의 통신을 위해 기계적 변형에도 공진 주파수를 유지할 수 있는 안테나 등은 추가적으로 고려해야 할 요소들이 남아있다. Hajiaghajani et al.은 자기적 결합을 통한 무선 데이터 전송과 전력 전송이 가능한 바디 네트워크를 제시하였다(Fig. 1(d), Fig. 1(e))[20]. 그러나, 인장 상황에서 전력 전송을 위한 공진기의 형상이 변화되어 공

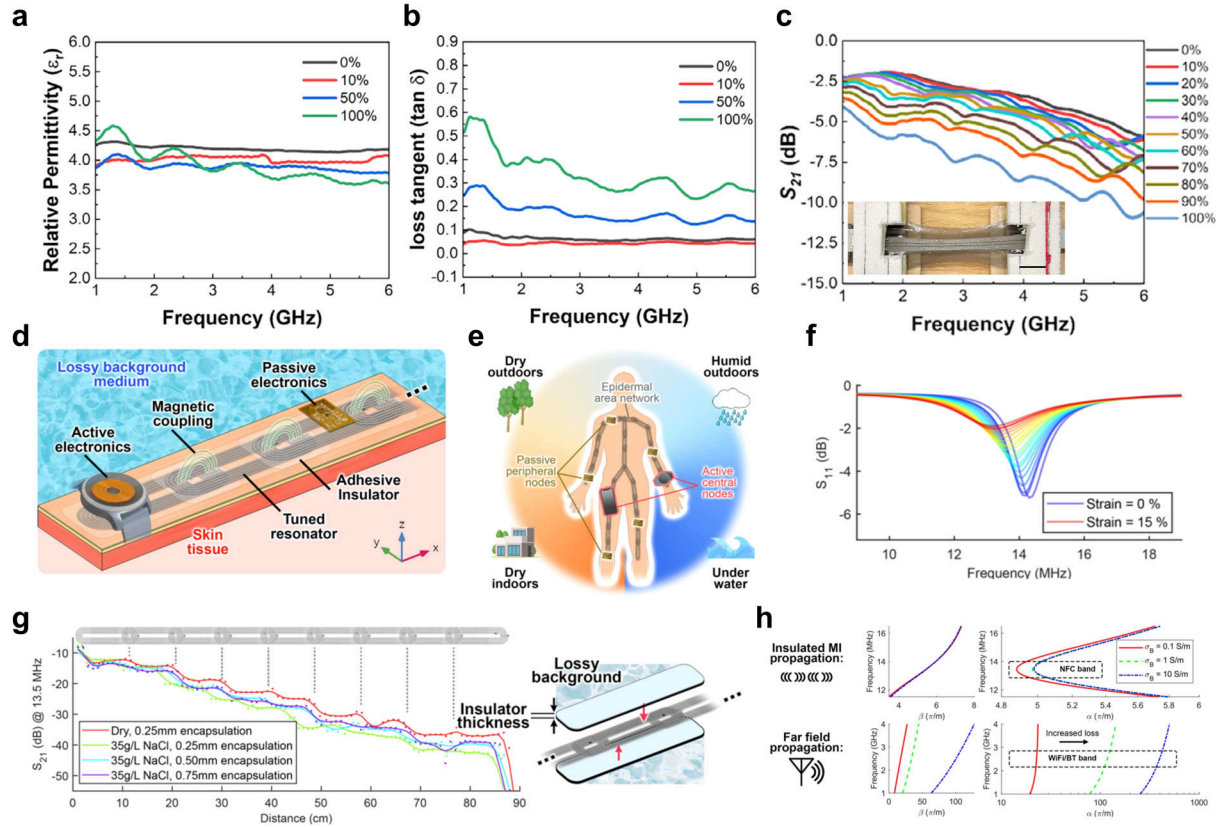


Fig. 1. Challenges of soft electromagnetic devices for wearable applications. (a) Measured relative permittivity of EC7-CNT under uniaxial tensile strain at frequencies of 1–6 GHz. (b) Measured loss tangent of EC7-CNT as a function of uniaxial tensile strain at frequencies of 1–6 GHz. (c) Measured transmission coefficient of the stretchable coplanar waveguide under varying tensile strain, showing degradation in transmission characteristics. Adapted with permission from [14]. Copyright 2026, Wiley-VCH GmbH. (d) Schematic of magneto-inductive (MI) wave propagation across magnetically coupled epidermal skin patches exposed to lossy unpredictable environments. (e) Schematic of multi-environment area networks, spanning consumer wireless communication and powering from lossless dry to lossy underwater environments. (f) Resonance properties of the silver ink-based coil under normal strain. (g) Transmission profile of the MI array measured under various encapsulation thicknesses and background medium losses. (h) Dispersion diagrams of near-field MI and far-field propagation. Both exhibit attenuation due to lossy background media. Adapted with permission from [20]. Copyright 2023, Springer Nature.

진 주파수의 변화를 보고하였다(Fig. 1(f)).

마지막 요인은, 고주파 대역으로 갈수록 파장은 짧아지게 되며, 더 이상 손실이 높은 인체나 엘라스토머 기판, 또는 주변 환경부를 무시할 수 없게 된다. 저주파 대역에서는 파장에 비해 이러한 요소들의 두께가 상당히 얇기 때문에 비교적 마진(margin)이 남아있으

나, 고주파 대역으로 갈수록 전자기파 소자를 안정적으로 구동하기 위해 주변 손실 환경을 고려한 설계가 필수적이다. Fig. 1(g)는 13.5 MHz에서 피부 위에서 구동하는 전송선로의 거리별 및 손실이 있는 캡슐화(encapsulation) 층에 따른 전송특성을 나타낸다. 해당 주파수에서 파장이 22 m에 달함에도 불구하고, 피부



의 높은 유전 손실로 인한 신호 감쇄가 명확함이 자명하며, 캡슐화 층의 두께 또한 증가할수록 신호 감쇄가 일어남을 보여준다. Fig. 1(h)는 자기적 근거리장 커플링과 장거리장 커플링의 유전손실에 따른 감쇄정도를 보여준다. 유전 손실이 증가할수록 감쇄는 커지며, 2.4 GHz 대역에서 구동하는 장거리장은 13.5 MHz를 사용하는 근거리장 대역과 비교하여 파장이 짧아져 주변환경의 유전손실에 따른 감쇄가 훨씬 큰 것으로 보고하였다. 이로부터, 2.4 GHz 대역을 넘어 mmWave 같은 고주파 대역에서는 이러한 유전 손실에 의한 감쇄는 더욱 커질 것으로 예상할 수 있다.

본 리뷰에서는 앞서 서술한 소프트 전자기파 소자의 세 가지 문제를 해결하는 방안들을 검토하고, 이를 바탕으로 향후 웨어러블 및 인간-휴머노이드 상호작용을 위한 고주파 대역의 소프트 전자기파 소자 연구 방향 및 전망을 논의한다.

2. 소프트 전자기파 소자 실현을 위한 기술

2.1. 재료 특성 열화 완화 기술

기계적 변형 환경에서 동작하는 소프트 전자기파 소자는 반복적인 인장, 굽힘 및 뒤틀림 상황에서 전도 재료의 균열, 전도 네트워크의 단절, 그리고 저항 증가로 인해 전자기적 특성이 쉽게 열화될 수 있다. 특히 고주파 대역에서는 표면 전류 및 표피 효과로 인해 전도 재료의 미세한 특성 변화 또는 전송 손실 및 방사 효율 저하로 직접 연결될 수 있다. 이에 따라, 전기적 특성이 우수한 금속 재료를 기계적 변형으로부터 보호할 수 있는 구조적 설계 전략과 함께, 기계적 변형 하에서도 안정적인 전도 네트워크를 유지할 수 있는 고신축성 전도 재료 개발이 활발히 연구되고 있다. 본 절에서는 서펜타인(serpentine) 및 키리가미(kirigami) 기반 구조 설계 전략과 액체금속 및 복합 전도 재료 기반의 고신축 안정성 재료 기술을 중심으로, 기계적 변형 하에서

재료 특성 열화를 완화하기 위한 연구들을 소개한다.

2.1.1. 서펜타인(Serpentine) 구조

기계적 변형 하에서 전자기파 소자를 구성하는 재료 특성 열화를 완화하는 기술 중 하나인 서펜타인 구조를 활용한 전극 구조 기술을 소개한다. 서펜타인 구조를 사용하면, 재료 사용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 전기적 특성이 우수한 금속 재료로도 신축성을 가지는 구조를 실현할 수 있어 장점이 있다[21-24]. Yu et al.은 이러한 구조를 활용하여 소프트 플라즈모닉 메타구조체 기반 전송선로를 구현하였다[25]. Fig. 2(a)는 해당 전송선로의 디자인 개요이며 Fig. 2(b)는 실제 측정 셋업을 나타낸다. 굽힘, 뒤틀림, 신축 하에서도(Fig. 2(c)) 안정적인 2~5 GHz 대역에서 -5 dB 이상의 전송 특성을 보여주었으나(Fig. 2(d), Fig. 2(e)), 서펜타인 구조로부터 기인한 의도치 않은 정전 용량 및 유도 용량 영향으로 본래의 전자기파 소자보다 다소 성능이 저하될 수 있음을 시사한다.

2.1.2. 키리가미(Kirigami) 구조

키리가미 구조적 설계 전략은 서펜타인 구조와 마찬가지로, 우수한 금속 재료의 성능 열화 없이 변형을 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 기판 또한 기계적 변형으로 인한 유전 성능의 변화 없이 구조를 변형할 수 있다[26]. 이러한 이유로 정교한 파형 엔지니어링(wavefront engineering) 메타표면(metasurface)에 응용될 수 있다. Jeong et al.은 은 입자 잉크를 잉크젯 프린팅 하여 2D 메타표면을 제작하고, 이를 3D 키리가미 메타표면으로 변환하여(Fig. 2(f)) 신축 상황에서도 투과 스펙트럼이 변하지 않는 메타표면을 구현하였다(Fig. 2(g))[27]. 또한 이들은 다른 키리가미 구조를 도입하여 신축 상황에서 입사하는 전자기파의 투과와 반사 방향을 조절함으로써, 기계적 변형을 통한 능동적인 파형 엔지니어링

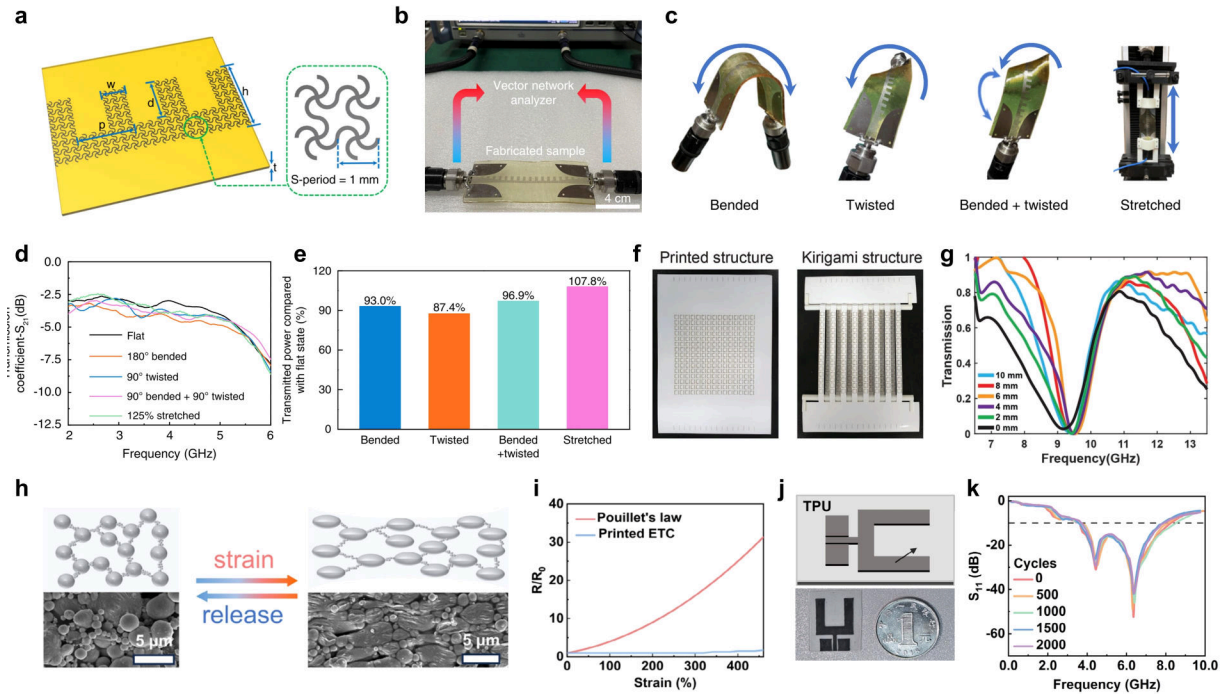


Fig. 2. Strategies for mitigating material degradation. (a) Serpentine-type plasmonic metamaterial unit. (b) Experimental photograph of the meta-waveguide in the flat state. (c) Experimental photograph of the meta-waveguide in a different deformed state. (d) Measured transmission coefficients and (e) power comparison of the deformed waveguides. Adapted with permission from [25]. Copyright 2022, Springer Nature. (f) Images of the printed structure and the kirigami structure of the wavefront engineering metasurface. (g) Measured transmission spectra for the kirigami metasurface under varying mechanical strain. Adapted with permission from [27]. Copyright 2020, Wiley-VCH GmbH. (h) Schematic diagrams and SEM images of the sonicated composite under 60% strain. (i) Relative resistance-strain curves of the printed EGaln-TPU composite and Pouillet's law. (j) Schematic picture and photograph of the printed antenna. (k) Measured S_{11} of the antenna after different stretching cycles under 60% strain. Adapted with permission from [31]. Copyright 2025, Wiley-VCH GmbH.

어링 어플리케이션을 구현하였다.

2.1.3. 고 신축안정성 재료

구조적인 해결책을 벗어나, 재료의 기계적 변형에서의 특성 열화를 최소화할 수 있는 연구 또한 활발히 진행되었다. 금속 입자 복합체 또는 액체 금속과 그 복합체 등이 사용되었으며 전송선로, 메타표면, 안테나 등으로 활용되었다[28,29]. Kim et al.은 은 나노입자(silver nanoparticle, AgNP)와 은 나노와이어(silver

nanowire, AgNW) 하이브리드 복합잉크를 프린팅하여 4~7 GHz 대역에서의 다양한 신축성 안테나를 구현하였으며 이를 인간 손에 부착하여 실시간 움직임을 추적하였다[30]. Guo et al.은 액체금속을 열가소성 폴리우레탄(TPU)에 분산시켜 잉크를 제작하여 안정적인 전도 네트워크(Fig. 2(h))로 인해 300% 인장 시까지도 저항 변화율을 무시할 수 있었다(Fig. 2(i))[31]. 이를 4~6 GHz 대역에서 동작하는 광대역 안테나를 제작하여 2,000회의 60% 인장 변형에도 안정적인 동작을 입증하였다.



2.2. 공진 특성 변화 완화 기술

전자기파 소자의 공진 특성은 구조체의 형상, 배열 간격, 그리고 전자기적 커플링에 의해 결정되기 때문에, 기계적 변형에 따른 형상 변화는 공진 주파수 이동, 임피던스 부정합, 방사 패턴 왜곡 등의 문제를 유발할 수 있다. 이러한 문제는 단순한 직류 특성 저하를 넘어 전자기파 소자의 본질적인 동작 특성을 변화시키기 때문에, 안정적인 무선 통신 및 파형 제어를 위해 반드시 해결되어야 한다. 이를 위해 최근에는 변형에 따른 공진 특성 변화를 최소화할 수 있는 보상 설계 기술과 함께, 기계적 변형 자체를 제어하여 전자기적 핵심 구조의 형상 변화를 억제하는 기술들이 제시되고 있다. 본 절에서는 공진 특성 변화를 완화하기 위한 구조적 보상 설계, 능동형 프로그래머블(programmable) 메타표면, 그리고 변형 제어 기반 설계 전략들을 중심으로 관련 연구들을 정리한다.

2.2.1. 변형 보상 기술

전자기파 소자의 공진 특성은 형상적 특성에 의해 결정이 되므로, 변형 환경에서 형상이 변화되면 공진 주파수가 변하게 되는 것이 일반적이다. 따라서, 적절한 보상설계를 곁들이는 경우 기계적 변형에 따른 공진 주파수의 변화를 완화할 수 있다. Zhou et al.은 기존의 십자 형태의 공진 유닛 셀(unit cell)을 가지는 전자기파 흡수 메타표면에 적절한 추가의 빈 십자 형태를 추가하여, TM(transverse magnetic) 모드에서 35% 인장 시, 기존 1 GHz 공진 주파수 변화에서 0.3 GHz 변화로 공진 주파수 변화를 완화시키는 결과를 보고하였다[32]. 또한, Li et al.은 기계적 인장 환경 하에서도 안정적으로 입사되는 전자기파를 원하는 방향으로 일정하게 조향할 수 있는 메타표면을 구현하였다[33]. 인장 시, 늘어나는 유닛 셀들의 간격과 유닛 셀들의 형상 변화로 인해 입사된 전자기파를 반사하는 각도가 틀어

지게 된다. 이를 보상하기 위한 요구되는 위상 그라디언트(phase gradient)와 이를 만족시키는 유닛 셀 디자인 및 배치를 머신러닝(machine learning)을 통해 계산하고, PDMS(polydimethylsiloxane)와 액체금속을 이용하여 메타표면을 제작하였다. 실제 측정에서, 8 GHz에서 35° 각도로의 일정한 반사를 20% 인장까지 유지함을 입증하였다. 이를 바탕으로, 위상 그라디언트가 아닌 180° 위상차를 유지할 수 있는 유닛 셀 디자인과 배열을 계산하여, 인접 영역 내에서 상쇄 간섭을 통해 20% 인장 범위에서 -10 dB 이상 RCS(radar cross section) 감소를 입증하였다. 그러나, 이러한 보상 설계 방식은 특정 방향으로의 인장 변형 하에서 공진 주파수의 변화를 완화시키는 것이 일반적이기 때문에, 다축 변형상황이나 임의의 변형 상황에서는 그 효과가 미비할 수 있다. 이를 해결하기 위해, Li et al.은 실시간으로 변형 상태를 감지하여 파형의 적응형 프로그래밍이 가능한 지능형 메타표면을 보고하였다[34]. 실시간으로 메타 유닛 셀의 전자기적 특성을 튜닝하기 위해 전압에 따라 정전용량을 변화시킬 수 있는 벡터(varactor) 다이오드를 메타 유닛 셀 사이에 실장하였다(Fig. 3(a)). 이에, 0 V부터 30 V의 외부 직류전압의 인가를 통해 0° 입사부터 45° 입사까지 반사 세기(Fig. 3(b)) 및 위상을 변화시킬 수 있었고(Fig. 3(c)), 이를 토대로 3~3.4 GHz 대역에서 270°의 위상 변화를 이끌어낼 수 있었다. 제작한 메타표면 뒷면에 인장 센서 어레이를 부착하여 실시간으로 굴곡을 센싱할 수 있었으며(Fig. 3(d)), 미리 설계한 인공지능 신경망 네트워크(artificial neural network, ANN)를 통해 각 유닛 셀의 외부 인가 전압을 조절함으로써, 16.76 ms라는 짧은 시간 안에 임의의 형상에서 설계된 파형을 반사하는 결과를 입증하였다. Fig. 3(e)는 임의의 3개의 굴곡을 가지는 형상에서의 전자기파의 수직 입사 상황에서 평행하게 반사를 시키는 모습이며 이는 장거리장 패턴에서 주 로브가 3개의 굴곡 형상에서 0°로 형성되는 것

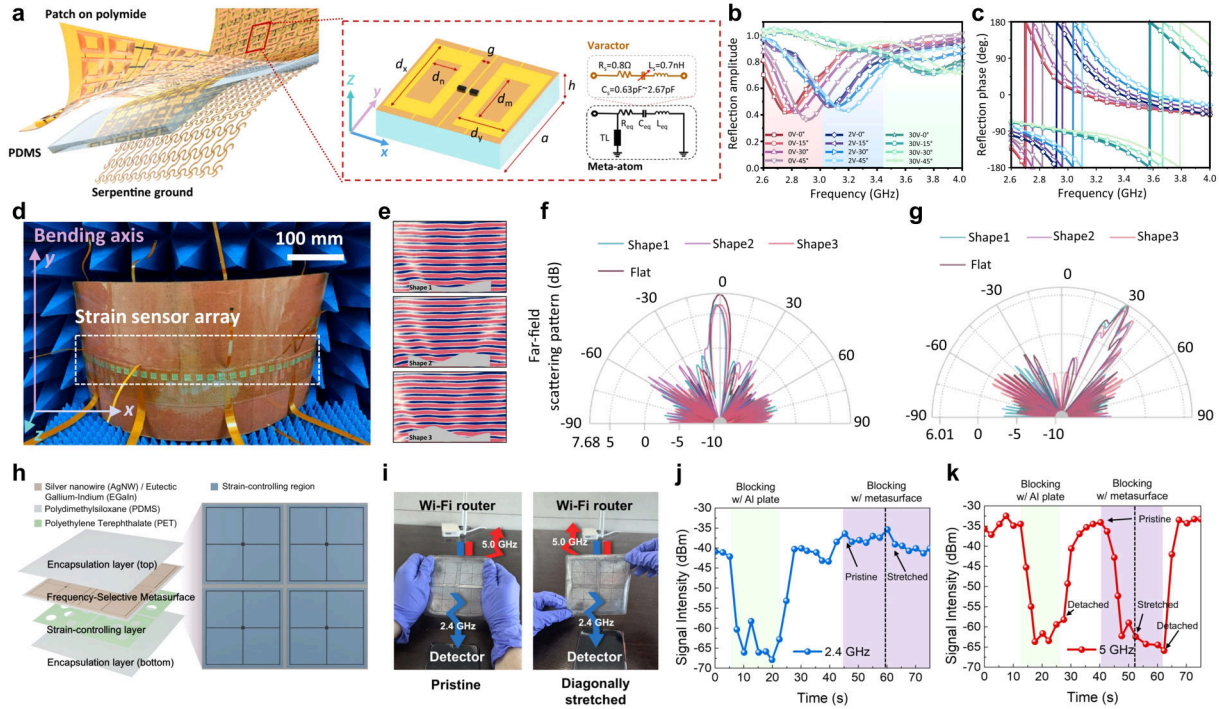


Fig. 3. Strategies for suppressing resonance variation. (a) Exploded view of the reconfigurable metasurface and the structure of the meta-atom. (b) Measured reflection magnitude of meta-atoms with varying varactor capacitance and angle of incidence. (c) Measured phase of meta-atoms with varying varactor capacitance and angle of incidence. (d) Arrangement of strain sensors on the bottom surface of the reconfigurable metasurface. (e) Near-field distribution of the magnetic field in the flat illusion. (f) Corresponding polar plots of the far-field patterns of the plane illusion and (g) the oblique illusion at 3.1 GHz under normal incidence. Adapted with permission from [34]. Copyright 2025, Springer Nature. (h) Exploded view of the multilayer configuration of the EMI-shielding metasurface. (i) Images of the measurement setup utilizing commercial Wi-Fi routers and smartphones under realistic conditions. Measured signal intensity of (j) 2.4 GHz and (k) 5 GHz Wi-Fi signals blocked by either the conventional shielding material or the metasurface. Adapted with permission from [36]. Copyright 2025, Springer Nature.

을 확인할 수 있다(Fig. 3(f)). 또한, 적절한 프로그래밍을 통해, 3개의 굴곡 형상에서 임의의 반사 파형을 형성할 수 있었으며 Fig. 3(g)는 그 중 30° 방향으로의 반사 장거리장 패턴을 보여준다.

기계적 변형을 보상하는 방법 중, 변형에 따라 재료의 물성을 조절하여 기계적 변형에 따른 전자기파 소자의 특성 주파수 변화를 완화시키는 전략 또한 새롭게 제시되었다. Kim et al.은 신축 엘라스토머(elastomer)인 에코플렉스(ecoflex) 내부에 티탄산바륨(BaTiO₃)을

균일한 분산 대신 군집 형태로 분산시켜, 기계적 변형 하에서 티탄산바륨 군집의 변형을 통해 전체 신축복합체의 유전상수의 선형적 감소를 이끌어 내었다[35]. 이를 통해, 기존 엘라스토머 상에서 제작된 신축 안테나들이 신축 상황에서 적색편이를 보이는 반면, 군집 형태로 분산된 엘라스토머는 유전상수의 감소를 통해 이를 보상하여 신축 정도에 상관없이 일정한 공진 주파수를 유지하는 결과를 입증하였다. 이를 통해 13.56 MHz 대역의 무선전력전송 안테나와 2.4 GHz 대역의



통신 안테나를 인장센서와 함께 결합하여 손목에 부착 후 신축 상황에서도 안정적으로 심박 시그널 센싱을 입증하여 소프트 전자기파 소자 시스템의 실제 응용 가능성을 제시하였다.

2.2.2. 변형 제어 기술

기계적 변형을 통한 전자기적 특성 변화를 보상하는 방법 대신, 기계적 변형 제어를 통해 전자기파 소자의 특성 변화를 억제하는 시도들 또한 제시되었다. Kim et al.은 주파수 선택 메타표면을 인장 시 메타표면의 유닛 셀의 변형을 방지하는 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 변형 제어 층을 도입하여 30% 인장 시에도 2.4 GHz의 전자기파의 선택적 투과를 이끌어내어 이를 통신소자를 위한 웨어러블 전자파 차폐 소재 플랫폼을 구현하였다(Fig. 3(h))[36]. 메타표면의 경우, 유닛 셀의 형상이 전체 메타표면의 특성을 주로 결정하고, 주기적 배열 간격은 유닛 셀의 커플링 조절을 결정하게 된다. 따라서, 변형 제어 층은 유닛 셀의 변형을 억제하고, 인가된 기계적 변형의 재 배열을 통해, 상대적으로 메타표면의 특성에 덜 영향을 미치는 배열 간격에 변형을 집중시켜 메타표면의 공진 주파수 변화를 억제한다. 또한, 메타표면은 인장 시에도 안정적인 공진 특성을 유지할 수 있도록, 인장 시 저항 변화가 거의 없는 액체 금속은 나노와이어 복합 전도 잉크를 도입하고 레이저 패터닝으로 메타 표면을 제작하였다. 제작된 메타표면은 혼 안테나(horn antenna)를 사용한 실험실 측정 셋업에서 2.4 GHz 전자기파만을 선택적으로 투과하는 특성을 보여주었다. 또한, 상용 와이파이 공유기와 스마트폰의 와이파이 수신신호 센싱 어플리케이션을 통한 측정을 실시하였다(Fig. 3(i)). Fig. 3(j)는 2.4 GHz 와이파이 수신 신호는 선택적으로 투과하여 메타표면으로 스마트폰을 보호하였을 때도 일정한 세기를 유지하고, 인장 상황에서도 일정한 세기를 유지하여 와이파이 신호가 원활히

통신 되고 있음을 입증하였다. 그러나 5 GHz 대역의 와이파이 신호는 메타표면의 도입 후 현격한 수신 신호 감쇄를 입증하여 실험실 환경만이 아닌 실제 사용 환경에서의 선택적 투과 전자파 차폐 메타표면의 실효성을 입증하였다(Fig. 3(k)).

또한 Chen et al.은 변형 제어 기술을 통해 20% 인장 시에도 4~6 GHz의 방사 주파수를 유지하는 비발디 안테나를 구현하였다[37]. 이 연구에서 비발디(vivaldi) 안테나의 동작 주파수는 기판 집적 도파관(substrate integrated waveguide, SIW) 구조의 하단 차단 주파수와, 슬롯 플라즈모닉(plasmonic) 도파관 구조의 상단 차단 주파수가 결합되어 통합된 대역 통과 필터 구조로 정해진다. 신축 상황에서 늘어날 수 있도록 PDMS와 구리 서펜타인 구조가 사용되었으며 안테나의 차단 주파수를 결정하는 슬롯 형상을 신축 상황에서 보호할 수 있도록 폴리이미드(polyimide, PI) 변형 제어 층을 도입하였다. 또한, 안테나의 피드(feed) 근처는 늘어나지 않도록 설계하여 인장 상황에서도 임피던스 매칭을 유지하도록 설계하였다. 인가된 나머지 기계적 변형은 안테나의 전자기적 특성 영향에 미비한 서펜타인 구조로 분산시켜 다양한 굽힘, 뒤틀림, 그리고 20%의 인장 상황에서도 안정적인 안테나 특성을 유지할 수 있음을 입증하였다.

2.3. 유전 변화 및 손실 완화 기술

소프트 전자기파 소자는 일반적으로 엘라스토머와 같은 연성 기판 위에서 구동되며, 웨어러블 환경에서는 인체와 직접 접촉한 상태에서 동작하게 된다. 그러나 이러한 연성 기판 및 인체 조직은 높은 유전 손실을 가지기 때문에, 고주파 대역으로 갈수록 전자기파의 감쇄, 공진 특성 변화, 그리고 방사 효율 저하를 유발할 수 있다. 특히 mm Wave 이상의 고주파 대역에서는 파장이 짧아짐에 따라 주변 환경과의 전자기적 상호작용이 더욱 민감해지므로, 유전 손실 환경으로부터



전자기파 소자를 효과적으로 디커플링할 수 있는 설계 전략이 중요해지고 있다. 이에 따라 최근에는 공기 중에 공진을 형성할 수 있는 3차원 구조체와 저 손실 유전 플랫폼을 활용하여, 주변 환경의 영향을 최소화하면서 안정적인 전자기적 특성을 유지하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 본 절에서는 3차원 구조 기반 전자기파 소자 및 저 손실 플랫폼 기술을 중심으로 전자기적 특성 손실 완화 전략들을 소개한다.

2.3.1. 3차원 구조체

주변 손실 환경으로 인한 전자기파 소자의 신호 감쇄 또는 특성 변화는 기판 또는 소자가 놓이는 위치에 기인할 수 있다. 반면, 공기의 유전 상수는 1에 근접하고 유전 손실 또한 거의 없는 것으로 간주된다. 따라서, 전자기파 소자의 형상을 3차원으로 만든다면, 손실이 없는 공기 중에 공진을 형성할 수 있게 되어 주변 환경의 손실로 인한 감쇄를 현격히 줄일 수 있다. 이러한 관점에서, Zhu et al.은 유전 손실이 큰 몸체에 부착되어도 안정적인 통신이 가능한 3차원 형태의 신축성 다이폴(dipole) 안테나를 구현하였다[38]. 3차원 안테나는 늘려진 엘라스토머 상에서 2차원 형태의 구리 전극을 선택적으로 접합하고 변형을 제거함으로써 제작된다(Fig. 4(a), Fig. 4(b)). 이를 통해 기존 2D 형태의 안테나 구조보다 엘라스토머 기판의 유전 손실이 완화될 뿐만 아니라, 유전 손실이 큰 피부 주변에서도 안테나 신호의 감쇄를 완화시킬 수 있음을 입증하였다(Fig. 4(c), Fig. 4(d)). 또한 유사한 방식으로, Wang et al.은 버클링을 활용한 2차원과 3차원 형상 변형을 통해 77 GHz와 94 GHz 두 주파수 영역에서 동작할 수 있는 가변형 안테나 구조를 제안하였다(Fig. 4(e))[39]. 또한, 안테나 구조의 압축되면서 버클링이 일어나는 정도를 연속적으로 튜닝이 가능하며, 고주파수 대역인 W 대역(75~110 GHz)에 대응 가능한 가변형 안테나 구조를 실현하였다. Fig. 4(f)는 이러한 2차원에서 3차원 변형

으로의 과정에서 안테나의 공진 주파수 변화를 보여준다. 3차원에서 2차원으로 변형될 때, 안테나의 공진 주파수는 비교적 일정하게 유지된다는 특성이 시뮬레이션과 실제 안테나 측정에서도 확인되었다.

이러한 금속 구조의 버클링을 통한 3차원 형상의 전자기파 소자로의 응용은 메타표면에도 적용될 수 있다. Fan et al.은 메타표면의 유닛 셀 구조를 십자가 모양으로 설정하고, 2축 인장을 인가하여 버클링 기반 3차원 전자기파 흡수 메타표면을 제시하였다[40]. 앞선 W 대역 버클링 안테나와 마찬가지로, 3차원에서 2차원으로 변형되는 초기에는 유닛 셀의 공진 주파수가 비교적 일정하게 유지하는 특성을 가져, 17.8%의 2축 인장까지는 일정한 공진 주파수를 가지는 메타표면을 제안하였다.

또한, 3차원 구조는 유전 손실을 완화하여 전자기파 소자의 성능을 유지하는 측면도 유용하지만, 임의의 3차원 구조의 전자기파 소자는 기존 2차원 구조보다 향상된 성능을 가질 수 있다. Ling et al.은 필즈 메탈(Field's metal) 3D 프린팅을 통해 기존 40 mm 크기의 2D 나선형 안테나 구조를 6 mm 크기의 3D 나선형 안테나로 설계하였다[41]. 이는 단순히 안테나 구조를 작게 만들 뿐 아니라, 3차원 안테나는 6 dB 향상된 방향성으로 인해 기존 2차원 안테나보다 반사를 줄여 효율성을 높였다. 설계한 3차원 안테나는 인간의 호흡과 심박 정보를 무선으로 센싱하는 어플리케이션을 입증하였다. 또한, 3차원의 전자기 밴드갭(electromagnetic bandgap)을 갖는 메타물질을 구현하여 인접한 박형 안테나 어레이의 상호 결합을 99% 이상 감소시켜 안테나 어레이의 원치 않는 전자기적 간섭을 억제할 수 있는 실효성을 입증하였다.

이러한 3차원 형상의 전자기파 소자는 플라즈모닉 공진구조체에도 응용될 수 있음이 Jeong et al.에 의해 보고되었다[42]. 기존의 2차원 공진구조체는 폴리스티렌(polystyrene) 기판 상에서 공진 신호가 -4 dB 수준

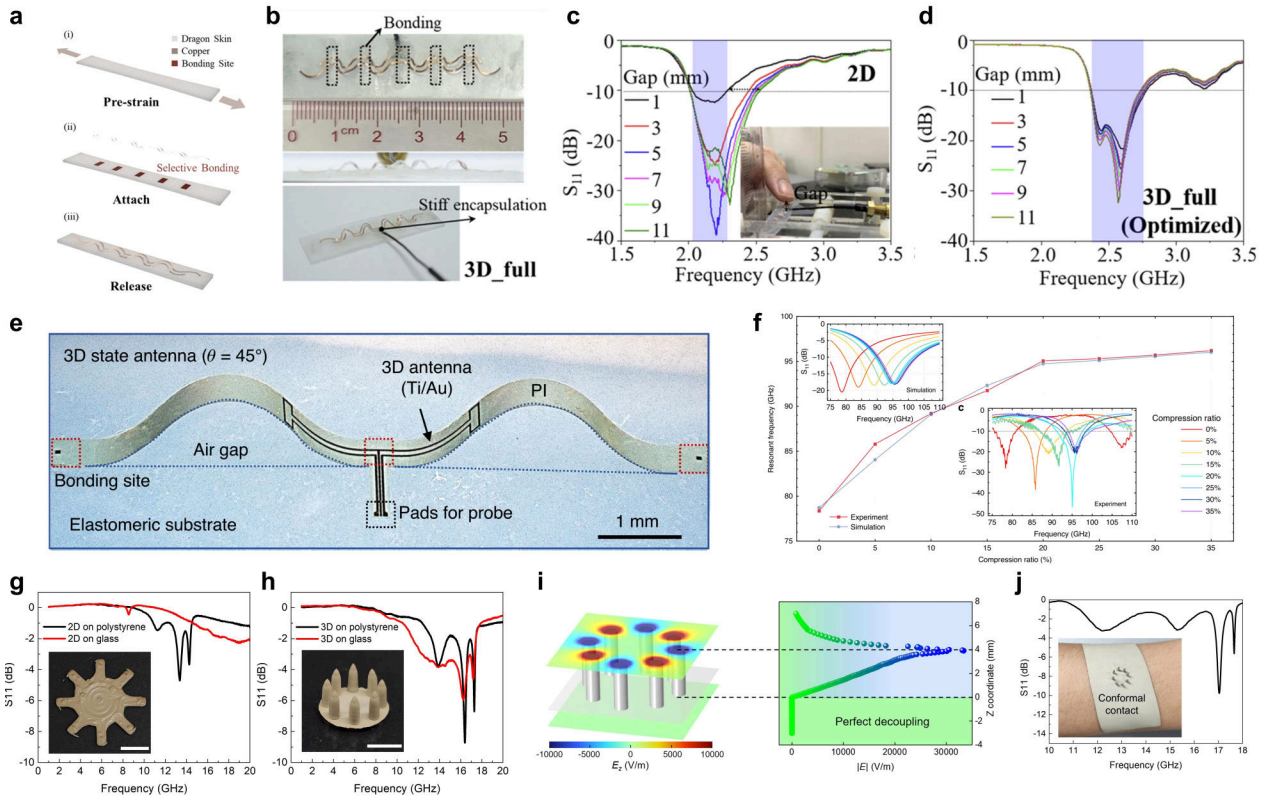


Fig. 4. Strategies for mitigating attenuation from surrounding lossy media. (a) Fabrication process of the 3D dipole antenna via mechanical assembly. (b) Optical images of 3D dipole antennas. (c) On-body radiation performance of the 2D and (d) 3D dipole antennas with a fingertip placed on top at different distances. Adapted with permission from [38]. Copyright 2022, American Chemical Society. (e) Optical microscope image demonstrating the stable 3D configuration achieved through prestrain release. (f) Simulated (left inset) and experimental (right inset) reflection coefficient characteristics of the antenna at eight different states and resonant frequencies of the buckling reconfigurable antenna in different states. Adapted with permission from [39]. Copyright 2025, Springer Nature. Measured reflectance spectra of (g) 2D and (h) 3D resonators on different substrates, exhibiting different attenuation behaviors due to a lossy substrate. (i) Simulated multi-sliced electric field distribution of 3D resonators with coplanar ground planes, showing perfect decoupling from the base. (j) Measured reflectance spectrum of the 3D resonator on lossy human skin. Adapted with permission from [42]. Copyright 2025, Wiley-VCH GmbH.

을 형성하는 반면, 유리 기판 상에서는 공진 주파수의 적색편이를 보이면서 공진 신호의 큰 감쇄를 보였다 (Fig. 4(g)). 반면, 3D 프린팅 가능한 내재적 신축성을 가지는 전도성 잉크로 제작된 3D 형상의 공진구조체는 2D 구조체에 비해 향상된 성능을 입증하였다(Fig. 4(h)). 폴리스티렌 기판과 유리 기판 상에서 공진 주파수 변화 및 감쇄가 2D 구조체에 비해 크게 개선됨을

확인할 수 있다. 이에 더 나아가 3차원 구조의 이점을 이용하여, 동일 평면 접지면의 도입을 통해 3차원 공진구조체 하부와의 완전한 전자기적 디커플링(decoupling)을 실현하였다(Fig. 4(i)). 이를 통해, 기판 및 놓이는 위치에도 관계없이 안정적으로 공진 특성을 유지할 수 있었으며 이는 유전 손실이 큰 피부 위에서도 안정적인 구동 결과를 Fig. 4(j)의 반사 공진 특성을 통해 입



증하였다. 이를 유전 손실이 큰 웨어러블 환경에서 고주파 대역인 17 GHz 근방에서의 무선 다축 인장 센서로 활용하는 데모를 통해 인간과 휴머노이드 간 실시간 센싱 플랫폼의 가능성을 제시하였다.

2.3.2. 저 손실 기판

고주파 대역의 소프트 전자기파 소자에서는 단순히 전자기파 소자의 형상 안정성뿐만 아니라, 기판 자체의 유전상수 및 유전손실 또한 중요한 고려 요소가 된다. 특히 mm Wave 이상의 고주파 대역에서는 기판의 높은 유전손실이 신호 감쇄, 임피던스 변화 및 발열 문제를 유발할 수 있기 때문에, 낮은 유전상수와 낮은 유전손실을 동시에 가지는 플랫폼 개발이 중요해지고 있다[43]. 또한 최근 웨어러블 및 고집적 전자 시스템에서는 발열 문제 또한 중요한 요소로 대두되고 있기 때문에, 저 손실 특성과 함께 효율적인 발열 특성을 동시에 만족할 수 있는 기판 플랫폼에 대해 연구가 활발히 진행되고 있다[44].

이러한 관점에서, Zhou et al.은 열팽창 마이크로스피어(Expandable Microsphere, EM)와 질화붕소 나노시트(Boron Nitride Nano Sheet, BNNS)를 PDMS 내부에 도입하여 경량, 저 유전, 저 손실, 고 방열 특성을 동시에 가지는 복합 기판 구조를 제안하였다[45]. 이 연구에서는 외부 자기장 또는 전기장 없이, 열팽창 마이크로스피어의 팽창 과정에서 발생하는 내부 응력을 이용하여 BNNS가 마이크로스피어 경계면을 따라 정렬되도록 유도하였다. 이를 통해, 기존의 무작위 분산 구조와 달리 연속적인 3차원 열전도 네트워크가 형성되었으며, 낮은 필러 함량(9.82 vol%)에서도 $0.94 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 수준의 높은 열전도도를 구현하였다. 동시에 복합체의 밀도를 0.55 gcm^{-3} 수준까지 감소시켰으며, 2.3 이하의 낮은 유전상수와 매우 낮은 유전손실 특성을 유지하였다. 이러한 연구 결과는, 단순히 유전 손실을 낮추는 것을 넘어, 열 관리 특성과 기계적 유연성을

동시에 확보할 수 있는 저 손실 복합 기판 플랫폼은 향후 소프트 안테나, 메타표면, 전송선로 및 웨어러블 RF 시스템 구현에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 전망 및 결론

3.1. mmWave 소프트 전자기파 소자의 기회와 기술적 난점

현재 대부분의 소프트 전자기파 소자는 수 MHz에서 수 GHz 수준의 비교적 낮은 주파수 대역에서 연구되고 있다. 반면, 미래의 웨어러블 시스템, 휴머노이드 로봇, 인간-기계 인터페이스 및 실시간 멀티모달 센싱 플랫폼은 보다 높은 데이터 전송량, 저지연 통신 및 고해상도 센싱을 요구할 것으로 예상되며, 이에 따라 mmWave 대역의 활용 가능성이 증가하고 있다.

mmWave 대역은 넓은 주파수 대역폭을 제공할 수 있기 때문에 대용량 데이터 전송과 저지연 통신에 유리하다. 또한 짧은 파장을 이용한 고해상도 레이더(RADAR) 센싱 및 공간 인식 기능을 제공할 수 있어 향후 휴머노이드 로봇 및 차세대 웨어러블 플랫폼에서 중요한 역할을 수행할 것으로 기대된다. 특히 인간과 휴머노이드 간의 실시간 상호작용 환경에서는 다수의 센서로부터 수집한 데이터를 초저지연으로 처리해야 하기 때문에 mm Wave 기반 무선 통신 기술의 필요성이 더욱 증가할 것으로 예상된다.

그러나 mm Wave 환경에서는 기존 저주파 대역에서 상대적으로 무시할 수 있었던 다양한 문제들이 더욱 심각하게 나타난다. 첫째, 파장이 짧아짐에 따라 구조적 오차 및 기계적 변형에 대한 민감도가 급격히 증가한다. 예를 들어 수 mm 수준의 형상 변화만으로도 안테나 및 공진 구조체의 공진 주파수, 방사 패턴 및 임피던스 특성이 크게 변화할 수 있다. 따라서 단순히 신축성 확보를 넘어, 기계적 변형 하에서도 전자적



특성을 안정적으로 유지할 수 있는 설계 전략이 필요하다.

둘째, 일반적으로 주파수가 증가할수록 파장이 짧아지기 때문에, mm Wave 대역에서는 수십 μm 수준의 패터닝 오차, 전도층 두께 변화, 기판 두께 편차 및 유닛 셀 간격 변화 등의 오차가 큰 전자기적 특성 변화를 초래할 수 있다. 특히 메타표면, 위성 배열 안테나 (phased array antenna)와 같이 정교한 위상 제어가 요구되는 시스템에서는 이러한 오차가 누적되어 방사 패턴 왜곡, 빔 조향 오차 및 효율 저하로 이어질 수 있다.

셋째, 액체 금속, 금속 입자 복합체는 우수한 신축성을 제공하지만, mmWave 대역에서는 표면 거칠기 및 유효 전도도 감소로 인해 손실 증가가 발생할 수 있다. 따라서, 기계적 신축성과 고주파 성능을 동시에 만족할 수 있는 새로운 전도성 재료 개발이 요구된다.

넷째, 인체 조직과 엘라스토머 기판은 모두 높은 유전 손실을 가지며, mmWave 대역에서는 이러한 손실이 더욱 크게 나타난다. 따라서, 저손실 기판, 전자기 디커플링 구조, 공기 중 공진을 활용한 3차원 구조체 및 메타표면 기반 전자기 제어 기술이 중요해질 것으로 예상된다.

마지막으로, 소프트 전자기파 소자와 집적회로 간의 인터페이스 문제이다. 현재 대부분의 mmWave 송수신기, 증폭기 및 빔포밍 (beam forming) 집적회로는 경성 반도체 칩을 사용한 리지드 (rigid) 플랫폼에서 구현되고 있다. 이들을 포함하여 소프트 플랫폼 시스템을 구성하기 위해서는, 리지드 집적회로와 소프트 안테나 또는 메타표면이 통합된 하이브리드 구조가 필수적이다. 그러나 mmWave 대역에서는 피드 구조, 패키징 구조, 접촉 저항 및 기생 인덕턴스와 정전용량이 시스템 성능에 직접적인 영향을 미친다. 특히 기계적 변형에 의해 칩-안테나 간 상대 위치가 변하거나 피드 구조가 변형될 경우, 임피던스 매칭이 붕괴되어 삽입 손실 증가 및 방사 효율 저하가 발생할 수 있다. 따라서, 향후

소프트 mmWave 시스템은 단순한 소자 수준 연구를 넘어, 안테나, 패키징, 집적회로 및 기계적 구조 설계까지 동시에 고려하는 공동 설계 접근이 필수적일 것으로 예상된다.

3.2. 웨어러블 소프트 전자기파 소자 시스템을 위한 과제

본론에서는 소프트 전자기파 소자 연구들은 기계적 변형 환경에서도 전송선로, 안테나, 메타표면 및 공진 구조체의 전자기적 특성을 유지하기 위한 다양한 재료 및 구조적 접근법을 제시하였다. 그러나 실제 웨어러블 시스템 구현을 위해서는 개별 전자기파 소자의 성능 확보를 넘어, 전력 공급, 패키징, 장기 신뢰성 및 사용자 안전성까지 고려가 필요하다.

우선, 웨어러블 센서 네트워크 또는 휴머노이드와의 실시간 상호작용을 위한 바디 네트워크에서는 다수의 센서들이 신체 전반에 분산 배치될 것으로 예상된다. 이러한 환경에서는 배터리 기반 구동뿐 아니라 무선 전력 전송, 에너지 하베스팅 (energy harvesting) 또는 저전력 구동 기술과의 통합이 필수적이다. 특히 소프트 전자기파 소자의 기계적 변형은 전력 전송 효율에도 직접적인 영향을 미칠 수 있기 때문에, 통신과 전력 공급을 동시에 고려한 시스템 설계가 요구된다.

현재 보고된 대부분의 연구들은 수천 회 수준의 반복 인장 실험을 수행하고 있으나, 실제 웨어러블 환경에서는 수년에 걸쳐 수십만 회 이상의 반복 변형이 발생할 수 있다. 또한 땀, 체온, 습도 및 외부 오염 물질과 같은 환경적 요인 또한 전도 재료와 기판의 열화를 초래할 수 있다. 따라서 반복 피로 특성, 환경 안정성, 생체 적합성 및 패키징 기술에 대한 연구가 향후 필수적으로 수행되어야 할 것으로 예상된다. 그리고, 인체 부착환경에서의 전자기적 안정성 또한 고려되어야 한다. 인체는 높은 유전 손실을 가지는 매질이며, 고주파 대역으로 갈수록 에너지가 피부 표면에 집중되는 특성



을 가진다. 따라서 피부 표면에 흡수되는 전자파 흡수율(specific absorption rate, SAR), 고주파로 인한 웨어러블 소자의 국소 발열, 전자파 장시간 노출에 따른 안정성 검증 등이 향후 웨어러블 전자기파 소자 시스템을 위해 반드시 요구될 것으로 예상된다.

3.3. 결론

본 리뷰에서는 웨어러블 및 소프트 플랫폼 환경에서 동작하는 소프트 전자기파 소자의 최근 연구 동향을 정리하였다. 특히 기계적 변형에 따른 재료 특성 열화, 공진 특성 변화, 그리고 유전 변화 및 손실 문제를 중심으로 이를 해결하기 위한 구조적, 재료적, 전자기적 접근법들을 고려하였다. 향후 소프트 전자기파 소자는 단순한 기계적 변형 대응을 넘어, 웨어러블 센서 네트워크, 인간-휴머노이드 상호작용, 적응형 메타표면 및 차세대 무선 통신 플랫폼의 핵심 기술로 발전할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 mmWave 대역에서의 전자기적 안정성을 확보하기 위한 새로운 설계 패러다임과 전자기파 소자의 장기 신뢰성, 생체 안정성, 능동 회로 집적 및 전력 공급 문제를 고려한 시스템 수준의 연구가 병행되어야 할 것이다. 이러한 연구들이 지속적으로 발전한다면, 소프트 전자기파 소자는 미래의 소프트 전자 시스템과 휴머노이드 플랫폼을 구현하기 위한 핵심 기반 기술로 자리매김할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

H.Y.J. conceived the topic and structure of the review, conducted the literature survey, analyzed the relevant studies, prepared the figures, and wrote, reviewed, and edited the manuscript.

Funding

Not applicable.

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHOR



정훈엽

2012~2016년: UNIST 재료공학과 학사

2016~2022년: UNIST 재료공학과 박사

2022~2024년: KIST 소프트융합소재연구 센터(Post-Doc)

2024~2026년: 고려대학교 연구교수

2026년~현재: 부산대학교 첨단융합학부

조교수

[관심분야] 유연전자, 전자기파 소자, 메타물질

REFERENCES

- [1] Choi, J. C.; Jeong, H. Y.; Sun, J. H.; Byun, J.; Oh, J.; Hwang, S. J. et al. Bidirectional Zero Poisson's Ratio Elastomers with Self-Deformable Soft Mechanical Metamaterials for Stretchable Displays. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34 (52), 2406725.
- [2] Park, D. H.; Lee, D. W.; Jeong, H. Y.; Choi, J. C.; Chung, S. Crosslinking Site Sharing-Driven Interface Engineering to Enhance Adhesion Between PDMS Substrates and Ag-PDMS Conductors. *J. Mater. Chem. C* 2025, 13 (41), 21137-21144.
- [3] Choi, J. C.; Lee, D. W.; Jeong, H. Y.; Yang, J.; Jeong, S.; Kim, W. et al. Depth-Modulus Engineered Meta-Elastomers for Multiaxial Strain Programming in Stretchable Displays. *Small Struct.* 2025, 6 (6), 2400513.
- [4] Yoo, C. J.; Yoon, J.; Kang, M.; Hong, Y. A Fully Embedded Stretchable Three-Dimensional Circuit via Highly Viscous Polydimethylsiloxane Bath. *Trans. Electr. Electron. Mater.* 2026, 27, 542-548.



- [5] Park, D. H.; Lee, D. W.; Jeong, H. Y.; Choi, J.C.; Chung, S. Auxetic Mechanical Metamaterials: Efficient Strain Engineering for Highly Reliable Free-Form Displays. *J. Inf. Disp.* 2025, 26 (4), 447-460.
- [6] Ghemari, Z.; Bendaikha, A.; Belkhir, S.; Saad, S. Fabrication of Flexible Resistive Pressure Sensors Using Graphene/Polydimethylsiloxane Composites. *Trans. Electr. Electron. Mater.* 2025, 26, 323-344.
- [7] Anwar, S. Design of Ultra-Sensitive Metamaterial Sensor Device for Environmental Sensing. *Trans. Electr. Electron. Mater.* 2024, 25, 722-731.
- [8] Kim, J.; Oh, S.; Avila, R.; Shin, H. S.; Banet, M.; Wicks, J. et al. A Compact, Wireless System for Continuous Monitoring of Breast Milk Expressed During Breastfeeding. *Nat. Biomed. Eng.* 2025, 9, 1645-1655.
- [9] Li, C.; Wang, H.; Song, Z.; Zhang, W.; Pan, Y.; Zhao, Z. et al. Wireless, Wearable Elastography via Mechano-Acoustic Wave Sensing for Ambulatory Monitoring of Tissue Stiffness. *Sci. Adv.* 2025, 11, eady0534.
- [10] Wang, C. M.; Xu, W.; Pang, C.; Wu, H. J.; Li, L.; Liu, H. W. Wearable Full-Textile Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Line for Secured Communication in Wireless Body Area Network. *Plasmonics* 2024, 19, 2705-2713.
- [11] Li, Z.; Liu, Z.; Wang, Z.; Deng, Y.; Yang, S.; Chen, J. et al. Body Sensor Networks Based on Flexible Topological Clothing. *Nat. Electron.* 2026, 9, 59-68.
- [12] Zeng, Q.; Tian, X.; Nguyen, D. T.; Li, C.; Chia, P.; Tee, B. C. K. et al. A Digitally Embroidered Metamaterial Biosensor for Kinetic Environments. *Nat. Electron.* 2024, 7, 1025-1034.
- [13] Lee, J.; Lee, M.; Kim, J.; Kim, H.; Yu, J.; Kim, N. et al. All-Textile, Chip-Less, Battery-Free Body Sensor Networks Enabled by a Concentric Multi-Node Hub Antenna Architecture. *npj Flex. Electron.* 2025, 9,
- [14] Albeltagi, A.; Tyystälä, T.; Nelo, M.; Jantunen, H.; Juuti, J.; Tolvanen, J. et al. Liquid Metal Elastomer Based Coplanar Waveguide Transmission Line for Stretchable and Self-Healing RF Electronics. *Adv. Electron. Mater.* 2026, 12, e00746.
- [15] Wang, Z.; Wang, H.; Liu, F.; Kang, Y.; Chen, Y.; Feng, X. 3D Kirigami Antennas with Robust Frequency for Stretchable Wireless Communication. *Extreme Mech. Lett.* 2022, 56, 101841.
- [16] Shi, J.; Li, W.; Tang, H.; Wang, S.; Liang, H.; Li, L.; et al. A 3D-Printed Flexible Radio Frequency Strain Sensor Based on Complementary Split Ring Resonator. *IEEE Sens. J.* 2023, 23(5), 4405-4412.
- [17] Mahmoud, H. A.; Nesser, H.; Mostafa, T. M.; Ahmed, S.; Lubineau, G. A Fully Printable Strain Sensor Enabling Highly-Sensitive Wireless Near-Field Interrogation. *Adv. Sci.* 2025, 12, 2411346.
- [18] Weng, S.; Peng, T.; Gao, K.; Zhu, H.; Yan, Y.; Yu, H. et al. Bidirectional Large Strain Monitoring Using a Novel Graphene Film-Based Patch Antenna Sensor. *Smart Mater. Struct.* 2024, 33, 075015.
- [19] Lin, R.; Jiang, C.; Achavananthadith, S.; Yang, X.; Ali, H. P. A.; Ping, J. et al. Soft Electronics Based on Particle Engulfment Printing. *Nat. Electron.* 2025, 8, 127-134.
- [20] Hajiaghajani, A.; Rwei, P.; Zargari, A. H. A.; Escobar, A. R.; Kurdahi, F.; Khine, M. et al. Amphibious Epidermal Area Networks for Uninterrupted Wireless Data and Power Transfer. *Nat. Commun.* 2023, 14, 7522.
- [21] Chen, Z. H.; Chen, H.; Yu, B. Y.; Ju, L.; Zhan, J.



- L.; Liu, Z. G. et al. Flexible and Stretchable Microwave Filter Based on Substrate Integrated Plasmonic Waveguide. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2024, 72 (10), 5970-5983.
- [22] Li, W.; Li, F.; Tang, W.; Pan, T.; Zhu, J.; Wei, J. et al. Stretchable Antenna Arrays-Enabled Multi-Target Balloon Wireless Communication System. *Adv. Funct. Mater.* 2026, 36, e10521.
- [23] Lee, J.; Kim, S. H.; Zhang, H.; Min, S.; Choe, G.; Ma, Z. et al. Design and Fabrication of Stretchable Microwave Transmission Lines Based on a Quasi-Microstrip Structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, 16, 4896-4903.
- [24] Nikbakhtnasrabadi, F.; El Matbouly, H.; Ntagios, M.; Dahiya, R. Textile-Based Stretchable Microstrip Antenna with Intrinsic Strain Sensing. *ACS Appl. Electron. Mater.* 2021, 3, 2233-2246.
- [25] Yu, B. Y.; Yue, D. W.; Hou, K. X.; Ju, L.; Chen, H.; Ding, C et al. Stretchable and Self-Healable Spoof Plasmonic Meta-Waveguide for Wearable Wireless Communication System. *Light Sci. Appl.* 2022, 11, 307.
- [26] Zheng, Y.; Chen, K.; Yang, W.; Wu, L.; Qu, K.; Zhao, J. et al. Kirigami Reconfigurable Gradient Metasurface. *Adv. Funct. Mater.* 2022, 32, 2107699.
- [27] Jeong, H. Y.; Lim, Y.; An, S. C.; Nguyen, T. H. Y.; Byun, G.; Jun, Y. C. Tunable Resonance and Phase Vortices in Kirigami Fano-Resonant Metamaterials. *Adv. Mater. Technol.* 2020, 5, 2000234.
- [28] Watson, A. M.; Ford, M. J.; Markvicka, E. J.; Fong, W. W. L.; Venkatesh, S.; Sengupta, K. et al. Stretchable Microwave Transmission Lines Using Liquid-Metal Embedded Elastomers. *Adv. Eng. Mater.* 2022, 24, 2200345.
- [29] Mitra, A.; Xu, K.; Babu, S.; Choi, J. H.; Lee, J. B. Liquid-Metal-Enabled Flexible Metasurface with Self-Healing Characteristics. *Adv. Mater. Interfaces* 2022, 9, 2102141.
- [30] Kim, J.; Kim, M.; Jung, H.; Park, J.; Jun, B. O.; Kang, B.; et al. High-Quality Microprintable and Stretchable Conductors for High-Performance 5G Wireless Communication. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14, 53250-53260.
- [31] Guo, X.; Liu, Y.; Zhou, Z.; Peng, H.; Gao, Y.; Shao, M. et al. Direct-Ink-Writing Printed Stretchable Eutectic Gallium-Indium Antenna for Robust Wireless Communication. *Adv. Sci.* 2025, 12, 2414285.
- [32] Zhou, P.; Wang, L.; Zhang, G.; Jiang, J.; Chen, H.; Zhou, Y. et al. A Stretchable Metamaterial Absorber with Deformation Compensation Design at Microwave Frequencies. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, 291-297.
- [33] Li, F.; Pan, T.; Zuo, L.; Hu, T.; Xiao, Y.; Wang, L. et al. Stretchable Microwave Metasurface with Inherently Deformation-Unperturbed Performance. *Laser Photonics Rev.* 2026, e02669.
- [34] Li, F.; Pan, T.; Li, W.; Peng, Z.; Guo, D.; Jia, X. et al. Flexible Intelligent Microwave Metasurface with Shape-Guided Adaptive Programming. *Nat. Commun.* 2025, 16, 3161.
- [35] Kim, S. H.; Basir, A.; Avila, R.; Lim, J.; Hong, S. W.; Choe, G. et al. Strain-Invariant Stretchable Radio-Frequency Electronics. *Nature* 2024, 629, 1047-1054.
- [36] Kim, D.; Hwang, S. J.; Ryu, J.; Choi, J. C.; Kim, W.; Jeong, H. Y. et al. Strain-Invariant



- Frequency-Selective Metasurface for Electromagnetic Interference Shielding in Wearable Electronics. *npj Flex. Electron.* 2025, 9, 122.
- [37] Chen, Z. H.; Chen, H.; Qu, H. T.; Yu, B. Y.; Sun, T. S.; Sun, L. Y. et al. A Strain-Insensitive Stretchable and Flexible Wideband Vivaldi Endfire Filter. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2025, 73(9), 5941-5952.
- [38] Zhu, J.; Hu, Z.; Zhang, S.; Zhang, X.; Zhou, H.; Xing, C. et al. Stretchable 3D Wideband Dipole Antennas from Mechanical Assembly for On-Body Communication. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14, 12855-12862.
- [39] Wang, Q.; Wang, Z.; Yang, Y.; Zhang, C.; Han, M.; Wang, W. et al. A Stretchable Frequency Reconfigurable Antenna Controlled by Compressive Buckling for W-Band Applications. *Microsyst. Nanoeng.* 2025, 11, 86.
- [40] Fan, X.; Pan, Z.; Chen, S.; Li, Y.; Zhao, Z.; Pan, T. 3D Flexible Frequency Selective Surface with Stable Electromagnetic Transmission Properties. *Adv. Mater. Technol.* 2022, 7, 2101316.
- [41] Ling, S.; Tian, X.; Zeng, Q.; Qin, Z.; Kurt, S. A.; Tan, Y. J. et al. Tension-Driven Three-Dimensional Printing of Free-Standing Field's Metal Structures. *Nat. Electron.* 2024, 7, 671-683.
- [42] Jeong, H. Y.; Jeong, J.; Choi, J. C.; Kim, H.; Han, J. H.; Chung, S. Directly Printed 3D Soft Microwave Plasmonic Enhanced-Q Resonators by Decoupling from Lossy Media. *Adv. Mater.* 2025, 37, 2418182.
- [43] Piro, Y.; Areias, C.; Luce, A.; Michael, M.; Biswas, P.; Ranasingha, O. et al. Low-Loss Dielectric Ink for Printed Radio Frequency and Microwave Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2023, 15, 35449-35458.
- [44] Lu, Y.; Chi, J.; Chen, W.; Xu, X.; Luo, W.; Zhang, B. et al. Robust Flexible Microwave Dielectric Film with High Thermal Conductivity and Ultralow Loss. *Adv. Funct. Mater.* 2026, 36, e23628.
- [45] Zhou, S.; Xu, Y.; Tang, J.; Qian, K.; Zhao, J.; Wang, J. et al. Expansion Force Induced in Situ Formation of a 3D Boron Nitride Network for Light-Weight, Low-k, Low-Loss, and Thermally Conductive Composites. *J. Mater. Chem. A* 2022, 10, 14336-14345.