Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 25, No. 2 pp. 35-42, 2024

https://doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.2.35
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

웨어러블 안테나의 인체 근접 및 구조적 변형 영향성 연구

오세명
Texas A&M 대학교 전기컴퓨터공학과

Study on the Effects of Body Proximity and Structure Deformity of Wearable Antennas

Semyoung Oh
Department of Electrical & Computer Engineering, Texas A&M University

요 약 최근, 웨어러블 센서는 편리함과 경제성으로 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 센서의 무선 통신 및 충전 기능의 일차적 수단으로서 안테나 또한 활발히 연구되고 있다. 웨어러블 안테나는 높은 유연성과 탄력성으로 신체 표면에 밀착하여 부착할 수 있으나, 해당 부위의 전기적 • 구조적 특성에 따라 성능이 변화할 수 있고, 이는 센서의 동작 신뢰성 저하로도 이어질 수 있다. 따라서, 안테나 설계 시 이러한 문제점을 인지 및 고려 하여야 하며, 본 논문에서는 인체로 인한 전기적 • 구조적 변형이 공진 주파수, 대역폭, 방사패턴 및 방사효율과 같은 안테나의 동작 특성에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다. 더불어, 여러 조건에서도 안테나와 센서가 안정적으로 동작해야 하므로, 인체 영향성을 억제 혹은 완화하는 방법에 관해서도 연구하였다. 마지막으로, 인체 영향성 해석 및 억제 기법 설계의 정확성을 위해, 전자파 해석 시뮬레이션과 유사인체모델의 활용을 제안하였다.

Abstract Recently, wearable sensors have been used in various fields owing to their convenience and affordability. Antennas are also being assessed as a primary method of wireless communications and wireless charging for sensors. Wearable antennas can be attached to the body surface tightly because of their high flexibility and elasticity, but their performance can vary according to the electrical and structural characteristics of the corresponding area, which can lead to a decrease in the reliability of the sensors. Therefore, it is necessary to recognize and consider these problems when designing and developing antennas. This study examined the effects of electrical and structural deformation caused by the human body on the operating characteristics of antennas, such as the resonant frequency, bandwidth, radiation pattern, and radiation efficiency. In addition, methods to inhibit or mitigate the effects of the human body were also evaluated because it is essential to maintain the operational stability of antennas and sensors under all conditions. Finally, this study proposed using electromagnetic simulation and phantom models to enhance the precision of human body effect analysis and suppression technique design.

Keywords : Wearable Sensor, Wearable Antenna, Body Proximity, Structual Deformity, Metamaterials

1. 서론

웨어러블 센서는 생체 신호 및 주변 환경 정보를 수집하는 착용형 장치이다. 반도체 및 재료공학 기술의 발전으로 소형화 및 경량화가 이루어지고 있으며, 형상을 자유롭게 변형할 수 있는 피부 부착형 센서 또한 활발히 연

*Corresponding Author : Semyoung Oh(Texas A&M Univ.)
email: semyoung.oh.air@tamu.edu
Received November 13, 2023 Revised December 6, 2023
Accepted February 6, 2024 Published February 29, 2024

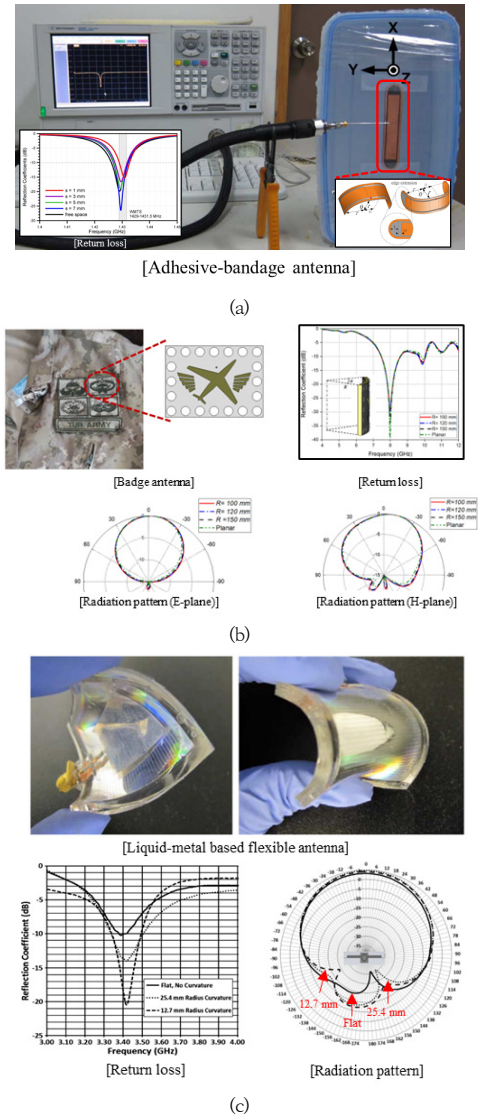


Fig. 1. Wearable antennas for wireless communications. (a) Adhesive-bandage [9], (b) badge [10], and (c) liquid-metal [11] antennas.

구되고 있다. 예를 들어, 핏피트 및 애플과 같은 글로벌 테크 기업 주도로, 일상 생활에서 활용할 수 있는 웨어러블 센서가 출시되고 있으며, 스포츠 활동에 유용하게 활용할 수 있는 걸음걸이 속도 및 소모 칼로리와 같은 정보를 제공하고 있다[1,2]. 또한, 의료의 경우, 심박 및 체온 등의 생활징후 감시를 위한 부착형 웨어러블 센서가 개발되어, 신생아 중환자실에서 임상실험을 완료했으며, 스트레스 데이터 수집용 센서가 연구되어 정신과 진료에서 그 가치를 인정받고 있다[3,4].

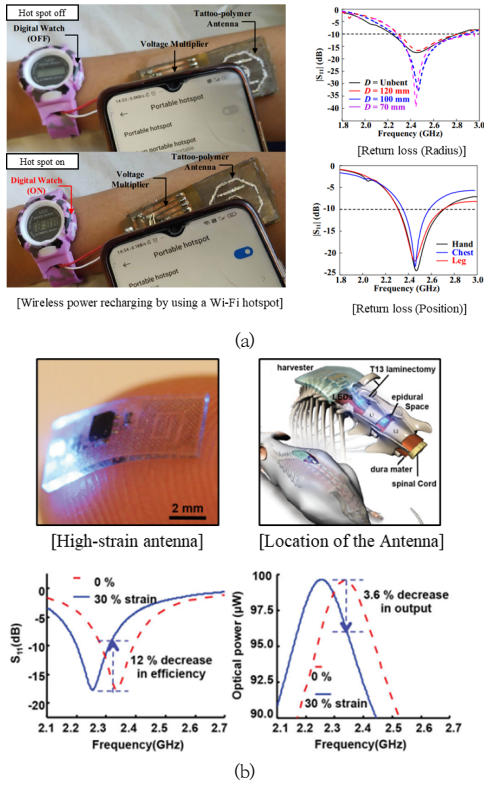


Fig. 2. Wearable antennas for wireless power transfer. (a) Far-field [12] and (b) resonant-coupling [13] antennas.

웨어러블 센서는 국방 분야에서도 잠재력을 보이고 있다. 미 육군은 전투복의 열선과 전투원의 신체에 부착된 체온 센서를 연동해 극한의 환경에서도 최적의 전투환경을 유지할 수 있는 시스템을 개발하고 있다. 또한, 심전도 및 혈당 등을 측정할 수 있는 패치형 센서를 개발해 전투원의 피로도와 정신 및 영양 상태를 수치화하고, 이를 통해 병력 관리 효율화를 꾀하고 있다[5,6]. 국내에서도 웨어러블 센서에 대한 관심이 높아지고 있으며, 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 신체 강화 로봇의 정교한 조작에 유용한 위치, 가속, 근전도 센서를 개발하고자 여러 기관이 협력하고 있다[7,8].

일반적으로 웨어러블 센서는 외부 디바이스와의 무선 통신을 목적으로 안테나(이하, 웨어러블 안테나)가 필요하며, 피부 표면이나 내부에 설치되어도 성능을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 예를 들어, 원격 의료 서비스를 위한 반창고형 안테나(Fig. 1(a))는 굽혀지거나 피부와 가까이 밀착되어도 40% 이상의 방사효율을 발휘하도록 제작되었으며[9], 전투복 휘장 내장형 섬유 재질 안

Table 1. Relative permittivity (conductivity) for various tissues at different frequencies [17].

Material	Frequency [GHz]			
	0.27	0.43	0.91	2.45
Fat	22 (0.21)	15 (0.26)	15 (0.35)	12 (0.82)
Muscle	112 (0.76)	57 (1.12)	55 (1.45)	50 (2.56)
Bone	9 (0.04)	5.2 (0.11)	4.9 (0.15)	4.8 (0.21)
Kidney	229 (0.83)	60 (1.22)	55 (1.41)	50 (2.63)
Liver	182 (0.58)	47 (0.89)	46 (1.06)	44 (1.79)
Lung	57 (0.32)	35 (0.71)	33 (0.78)	-
Brain (Grey)	186 (0.45)	57 (0.83)	50 (1.0)	43 (1.43)
Brain (White)	123 (0.33)	48 (0.63)	41 (0.77)	36 (1.04)

테나(Fig. 1(b))는 다양한 신체 움직임이 요구되는 야외 활동에서도 70% 이상의 방사효율을 유지되도록 개발되었다[10]. 또한, 액체금속(갈륨)과 고분자 실리콘(PolyDiMethylSiloxane, 이하 PDMS)으로 구성된 고탄성 안테나는 비복원 파괴가 되도록 휘어져도 반사 손실(return loss)이 −10 dB 이하로 유지되도록 만들어졌다[11].

이러한 웨어러블 안테나는 통신 이외에도, 무선 충전 기능을 제공하기 위해 연구되고 있다. 설치 위치나 물리적 변형과 상관없이 낮은 반사 손실을 유지할 수 있는 액체금속 루프 안테나가 개발되었으며, 원거리 영역(far-field)에서 59%의 높은 RF-DC 변환율을 달성하였다. 이는, Wi-Fi와 같은 수 mW 크기의 약한 전파 신호로도 전자시계를 성공적으로 동작시킬 수 있는 수준이다[12]. 또한, 피하 삽입형 의료 센서의 무선 충전을 위해 개발된 근거리(near-field) 공진형 결합(resonant coupling) 안테나(Fig. 2(b))는 multi-fold와 같은 안테나 소형화 기술을 적용하였음에도 28%의 응력에 전송 효율이 단 3.6%만 감소하였다[13].

앞서 살펴봤듯이, 웨어러블 안테나는 다양한 동작 환경에서 성능의 안정성이 보장되어야 한다. 따라서, 설계 시 인체 근접(body proximity) 및 구조적 변형(structual deformity)에 의한 영향성을 고려해야 하며, 이유는 다음과 같다[14-16]. 첫 번째, 안테나의 후면 방사는 설치된 인체 부위에 유전성(dielectric property)을 띄게 만들어 동작 특성을 변질시키고, 피부의 높은 전도율(conductivity)은 후면 방사(backward radiation) 산란과 전면 방사(broadside radiation) 간섭을 일으켜 방사패턴(radiation pattern)을 왜곡시키고 방사효율(radiation efficiency) 또한 감소시킨다. 두 번째, 설치 부위의 곡률이나 움직임으로 안테나가 휘어지거나 구겨

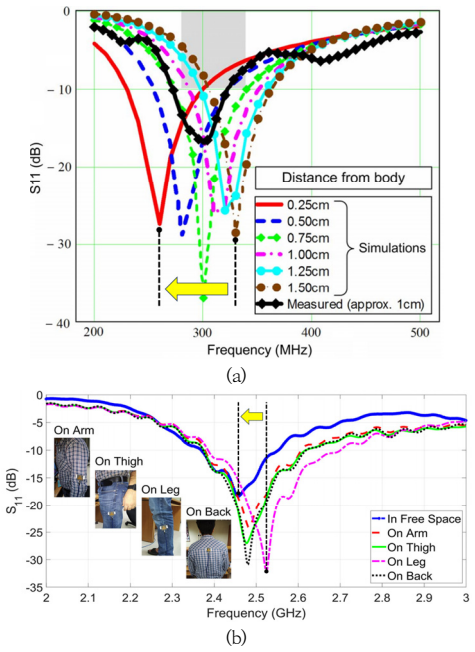
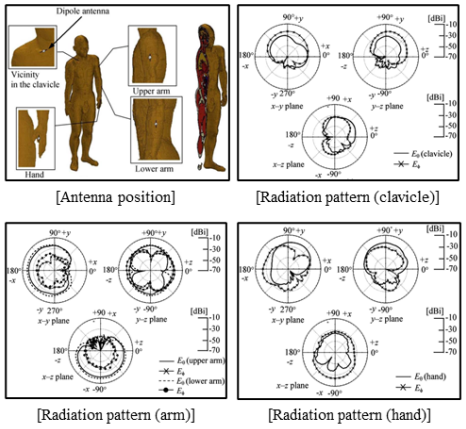


Fig. 3. Resonant frequency shifts by the body proximity effect. (a) Distance [18] and (b) position [19].

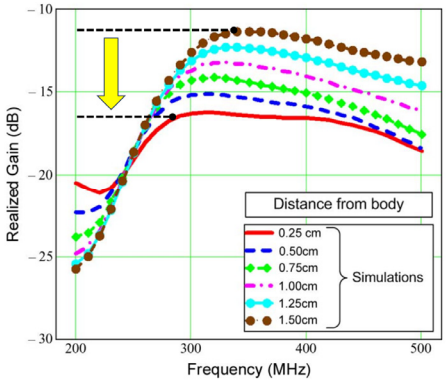
질 경우, 입력 임피던스(input impedance), 공진 주파수(resonant frequency) 및 대역폭(bandwidth) 등의 동작 특성 역시 변하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 인체 근접과 구조적 변형이 웨어러블 안테나에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고, 나아가 이를 완화할 방안에 대해 알아보고자 한다. 이러한 연구 결과를 향후 웨어러블 안테나 개발을 위한 기초연구자료로 활용하고자 한다.

2. 인체 근접 효과

웨어러블 안테나는 일반적으로 피부 표면으로부터 최대 수 cm 정도로 근접하게 설치되므로 인체에 의해 큰 영향을 받는다. 우선 안테나에서 방사된 전자파는 설치 부위의 피부, 지방, 근육 및 뼈에 전기 분극화(electrical polarization)를 일으켜 유효 유전율(effective permittivity) 증가시키며, 나아가 안테나의 공진 주파수 또한 변화시킬 수 있다. 예를 들어, Volakis 연구팀은 기판형 다이폴(printed dipole) 안테나를 제작하여, Fig. 3(a)와 같이 피부 표면과의 거리가 가까워질수록 공진 주파수가 감소한 것을 확인하였으며[18], 이는 다이폴 안테나의 공진 주파수와 유효 유전율이 반비례 관계로 인한 것이다.



(a)



(b)

Fig. 4. Radiation patterns at different body positions [20] and realized gain at various distances [18].

거리 뿐만 아니라 설치 위치에 따라 안테나의 동작 특성이 달라질 수 있으며, 그 이유는 생체 조직의 구성 비율이 상이하여, 유전율(Table 1)이 다르기 때문이다(예, 가슴: $\epsilon_r = 53.08$, 팔: $\epsilon_r = 5.3$). 이를 입증하고자, [19]의 연구팀은 팔, 다리 및 등에 프랙털 안테나(fractal antenna)를 설치하여 반사 손실을 측정했으며, 그 결과 공진 주파수에 최대 70 MHz 차이가 발생하였다(Fig. 3(b)).

인체 표면은 높은 수분 함량(65 ~ 80%)으로 인해 전도성(예, 가슴: 3.458 S/m) 또한 띠고 있다(Table 1). 따라서, 피부 표면에 가상의 금속 반사면(metallic reflector)이 형성되어, 후면 방사를 반사, 전면 방사에 원치 않은 간섭을 일으킬 수 있다(Fig. 4(a)). 이를 확인하고자 [20]에서는 인체에 의해 방사패턴이 변형될 수 있고 나아가 위치에 따라 그 정도가 다른 것을 보여주었으며(Fig. 4(b)), [18]에서는 인체와의 거리가 줄어듬에 따라 안테나 이득(antenna gain) 역시 감소할 수 있음을 실험을 통해 입증하였다.

3. 구조적 변형 효과

본 장에서는 구조적 변형이 웨어러블 안테나의 동작 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 웨어러블 센서는 편의성 및 안정성을 위해 신체 표면에 밀착하여 설치되는 경우가 많으며, 이를 위해 웨어러블 안테나는 높은 유연성을 갖추어야 한다. 하지만, 안테나의 곡률에 따라 동작 특성 또한 변화할 수 있으며, 대표적인 경우가 공진 주파수이다. 예를 들어, 금속 섬유 패치 안테나는 곡률 반경(CR: Curvature Radius, 이하 CR)이 66% 감소할 때 0.5 GHz 증가하였으며(Fig. 1(c))[21], Wi-Max 및 5G 통신용 웨어러블 안테나는 CR이 30% 감소할 때 0.2 GHz 증가하였다(Fig. 5(a))[22].

대역폭(bandwidth) 또한 곡률에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, DGS (Defected Ground Surface) 결합 패치 안테나의 경우(Fig. 5(b)) 굽힘의 정도가 심해짐(CR, 41% 감소)에 따라 최대 0.17 GHz 증가했으며[23], EBG (Energy Band Gap) 기반 섬유 안테나는 CR이 70 mm로 감소함에 따라 10 MHz 정도 증가하였다[22].

공진 주파수와 대역폭 외에도 방사 패턴, 편파(polarization) 그리고 방사효율에도 영향을 줄 수 있다. [24]에서는 안테나의 CR이 70 mm로 감소할 때 빔폭이 19 ° 증가하고 지향성이 감소된 것을 보고하였으며, [25]은 안테나의 CR이 62% 감소했을 때 빔폭은 24% 감소하고 교차 편차(cross polarization) 또한 77% 증가한 것을 보여주었다(Fig. 6).

4. 웨어러블 안테나 성능 안정화 기술

4.1 인체 근접 효과

인체 근접 효과로 인한 성능 변화를 최소화하기 위해서는 안테나를 신체 표면으로부터 전기적으로 분리(electrical isolation)해야 하며, 대표적인 방법이 접지면(ground plane) 사용이다. 실제로, 고글 프레임의 안테나 뒷면에 금속 접지면을 추가하여 머리에 의한 성능 저하를 억제했으며[26], 유연성을 유지하기 위해 0.17 mm 두께의 얇은 전도성 직물을 접지면으로 사용하여 반

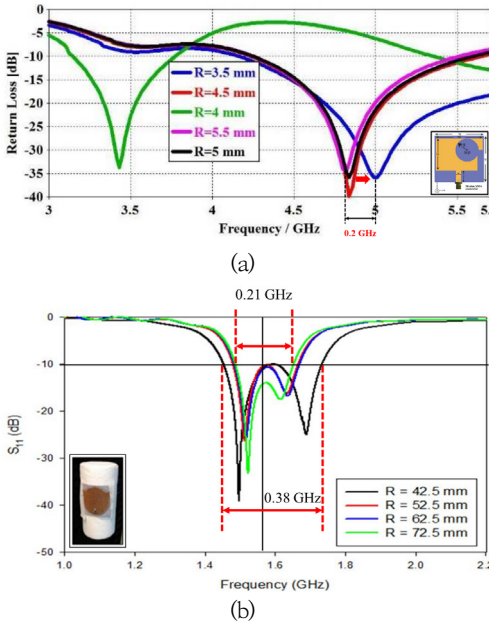


Fig. 5. Effect of bending curvature in terms of (a) resonant frequency [22] and (b) bandwidth [23].

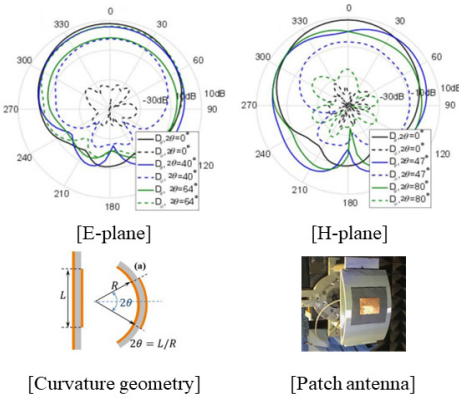


Fig. 6. Radiation patterns of the curved antenna [28].

사 손실을 −10 dB 이하로 유지하였다(Fig. 7(a))[27]. 하지만, 후면 방사에 의한 상쇄 간섭을 예방하기 위해서는 접지면과 안테나 간 거리가 적절히 유지되어야 하므로 두께가 늘어나고 유연성 또한 감소할 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 [28]와 [29]에서는 안테나 외곽에 금속 구조물을 추가하여 모서리면에서의 표면파(surface wave) 회절(diffraction)과 나아가 후면 방사를 효과적으로 차단하였다(Fig. 7(b)).

앞서 기술한 방법 외에도 메타물질 또한 인체 근접 효과

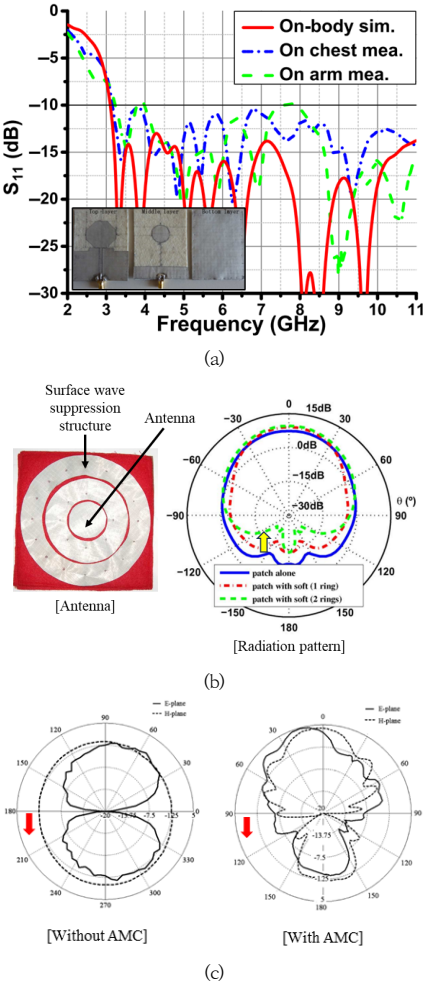


Fig. 7. Results of alleviating the body proximity and structure deformity. (a) Ground plane [27], (b) surface wave suppression structure [28], and (c) AMC [31].

대응에 유용하다. AMC (Artificial Magnetic Conductor)는 안테나와 피부 표면 사이에 설치되어 후면 방사와 반사파간 180 ° 위상차를 일으키고 상쇄 간섭을 유발할 수 있다. 이를 통해, 후면 방사를 대폭 감소시킬 수 있으며 [30], 실제로 [31]에서 의료용 웨어러블 안테나에 AMC를 추가하여 후면 방사를 64 % 감소시켰으며(Fig. 7(c)), 결과적으로 AMC가 없을 때와 비교하여 반사 손실이 약 15 dB 개선되었다. 또다른 메타물질인 HIS (High Impedance Surface)는 후면 방사를 흡수할 수 있으며, 인체와의 거리와 무관한 주파수 응답 및 방사패턴을 보여줌으로 그 성능을 입증하였다[32].

4.2 구조적 변형 효과

구부림이나 구김은 안테나의 대칭성(symmetry)을 훼손하여 주파수 응답과 방사 패턴에 영향을 미칠 수 있으나, 안테나와 접지면 사이에 단락 핀(shorting pin)등을 설치하여 이를 방지할 수 있다[33]. 하지만, 안테나의 구조적 변경은 설계 복잡도를 증가시키므로, 대역폭을 요구 성능 이상으로 늘리는 것 또한 대안이 될 수 있다[34].

구조적 변형은 대칭성 훼손 외에도 안테나에 전기적 불연속면을 만들며, 이러한 점에 착안하여 [35]에서는 I-shaped AMC로 전/후면 방사 비율을 최대 23 dB까지 개선하여, 불연속면으로 인한 후면 방사를 대폭 감소시켰다.

5. 시사점 및 결론

본 논문에서는 웨어러블 안테나의 성능에 영향을 미치는 인체 근접과 구조적 변형에 대해 살펴보았다. 그 결과, 공진 주파수를 포함한 동작 특성과 방사 패턴 등이 변할 수 있음을 확인하였고, 이러한 현상은 안테나를 포함한 웨어러블 센서의 안정적인 동작에 방해 요소로 작용할 수 있다.

다행히, 피부 표면으로부터의 전기적 분리를 위한 접지면, 안테나의 표면파 억제 및 대칭성 유지를 위한 구조물, 그리고 안테나의 후면 방사를 억제하기 위한 메타물질 등을 활용하여 안테나의 성능 저하 문제를 해결할 수 있다. 하지만, 이러한 보호재는 피부와 직접적으로 접촉하여 인체 근접 및 구조적 변형에 더욱더 민감하게 반응할 수 있다. 예를 들어, 극심한 신체 활동으로 인해 팽창한 근육과 증가한 체온 및 땀은 보호재의 전기적 길이와 성질, 나아가 동작 주파수와 대역폭 또한 변질시킬 수 있다.

따라서, 본 논문은 연구 및 개발 시간 단축을 위한 참고 자료로 활용하되, 고성능 전자파 해석 프로그램인 CST MWS 및 HFSS와 인체의 물리적 형태를 높은 정확도로 구현한 Voxel phantom 등을 이용하여, 예상되는 모든 동작 환경을 모의하고 해당 환경에서 보호재의 성능을 철저히 검증할 필요가 있다.

References

[1] https://fitbit.kr/product/list.html?cate_no=44

[2] Https://support.apple.com

[3] C. L. et al., "Wireless, skin-interfaced devices for pediatric critical care: application to continuous, noninvasive blood pressure monitoring", *Advanced Healthcare Materials*, vol.10, no.17, Sep.2021. DOI: https://doi.org/10.1002/adhm.202100383

[4] Y. S. Can, et al., "Continuous stress detection using wearable sensors in real life: Algorithmic programming contest case study", *Sensors*, vol.19, no.8, Apr. 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/s19081849

[5] W. V. Rosenberg et al., "Smart helmet: Wearable multichannel ECG and EEG", I*EEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol.4, pp.221-225, Nov. 2010. DOI: https://doi.org/10.1109/JTEHM.2016.2609927

[6] S. Kodam, N. Bharathgoud, and B. Ramachandran, "A review on smart wearable devices for soldier safety during battlefield using WSN technology", *Materials Today: Proceeding*, vol.33, pp.4578-4585, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.191

[7] S.-E. Son et al., "Statistical foot sensor placement analysis for wearable robot development", *Conf. Korean Soc. Mech. Eng.*, Seoul, pp.1721-1722, 2019.

[8] Y.-S. Yoon, J.-S. Park, and D.-W Lee, "MEMS-based wearable bio smart sensor research and its military applications", *Def. Tech.*, Seoul, pp.110-119, 2021.

[9] Y.-J. Chi and F.-C. Chen, "On-Body adhesive-bandage -Like antenna for wireless medical telemetry service", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.10, pp.2472-2480, Feb. 2014. DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2308918

[10] Y.-J. Chi and F.-C. Chen, "All-Textile on-body antenna for military applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.21, no.5, pp.1065-1069, Mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3159301

[11] Y.-J. Chi and F.-C. Chen, "Flexible Liquid Metal Alloy (EGaIn) Microstrip Patch Antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.60, no.5, pp.2151-2156, May 2012. DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2189698

[12] X. L. Chang, P. S. Chee, and E. H. Lim, "Compact conformal tattoo-polymer antenna for on-body wireless power transfer." *Scientific Reports*, Nature, vol.13, no.1, pp.1-12, Jun. 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-36335-6

[13] S. I. Park, "Soft, stretchable, fully implantable miniaturized optoelectronic systems for wireless optogenetics." *Nat. Biotechnol.*, vol.13, no.33, pp.1280-1286, Nov. 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/nbt.3415

[14] N. H. M. Rais et al. "A review of wearable antenna", *2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, IEEE, Loughborough, Nov. 2009. DOI: https://doi.org/10.1109/LAPC.2009.5352373

[15] S. N. Mahmood et al., "Recent advances in wearable

antenna technologies: A review", *Progress in Electromagnetics Research B*, vol.89, pp.1-27, Sep. 2020.
DOI: https://doi.org/10.2528/PIERB20071803

[16] R. Salvado et al., "Textile materials for the design of wearable antennas: A survey", *Sensors*, vol.12, no.11, pp.15841-15857, Nov. 2022.
DOI: https://doi.org/10.3390/s121115841

[17] R. Pethig, "Dielectric properties of body tissues", *Clinical Physics and Physiological Measurement*, pp.5-12, Oct. 1988.
DOI: https://doi.org/10.1088/0143-0815/8/4a/002

[18] Y.-J. Chi and F.-C. Chen, "Conformal Asymmetric Meandered Flare (AMF) Antenna for Body-Worn Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.8, pp.931-934, Jul. 2009.
DOI: https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2028662

[19] A. Arif, M. Zubair, M. Ali, M. U. Khan, and M. Q. Mehmood, "A Compact, low-profile fractal antenna for wearable on-body WBAN applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.18, no.5, pp.981-985, May 2019.
DOI: https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906829

[20] H.-Y. Lin, M. Takahashi, K. Saito, and K. Ito, "Characteristics of electric field and radiation pattern on different locations of the human body for in-body wireless communication", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.61, no.10, pp.5350-5353, Oct. 2013.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2272672

[21] U. Ali et al., "Design and comparative analysis of conventional and metamaterial-based textile antennas for wearable applications", *Int. J. Numer. Model., Electron. Netw., Devices Fields*, vol.32, Jan. 2019.
DOI: https://doi.org/10.1002/jnm.2567

[22] M. M. H. Mahfuz et al., "Design of wearable textile patch antenna using C-shape etching slot for wi-Max and 5G lower band applications", *in Proc. 8th Int. Conf. Comput. Commun. Eng. (ICCCE)*, pp.168-172, Jun. 2021.
DOI: https://doi.org/10.1109/ICCCE50029.2021.9467146

[23] N. I. Zaidi et al., "Analysis on bending performance of the electro-Textile antennas with bandwidth enhancement for wearable tracking application", *IEEE Access*, vol.10, pp.31800-31820, Mar. 2022.
DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3160825

[24] P. Salonen and Y. Rahmat-Samii, "Textile antennas: effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth", *2006 First European Conference on Antennas and Propagation,* IEEE, Nice, Nov. 2006.
DOI: https://doi.org/10.1109/EUCAP.2006.4584859

[25] L. Song and Y. Rahmat-Samii, "A Systematic investigation of rectangular patch antenna bending effects for wearable applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.66, no.5, pp.2219-2228, Feb. 2018.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2809469

[26] A. Cihangir, W. Whittow, C. Panagamuwa, G. Jacquemod, F. Gianesello, and C. Luxey, "4G antennas for wireless eyewear devices and related SAR", *Comptes Rendus Physique,* vol. 16, pp. 836-850, Nov. 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.10.009

[27] L. A. Y. Poffelie, P. J. Soh, S. Yan, and G. A. E. Vandenbosch, "A high-fidelity all-textile UWB antenna with low back radiation for offbody WBAN applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 2, pp. 757-760, Feb. 2016.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2510035

[28] E. Rajo-Iglesias, I. Gallego-Gallego, L. Inclan-Sanchez, and O. Quevedo-Teruel, "Textile soft surface for back radiation reduction in bent wearable antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3873-3878, Jul. 2014.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2321133

[29] K. W. Lui, O. H. Murphy, and C. Toumazou, "A wearable wideband circularly polarized textile antenna for effective power transmission on a wirelessly-powered sensor platform", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 7, pp. 3873-3876, Jul. 2013.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2255094

[30] M. Mantash, A.-C. Tarot, S. Collardey, and K. Mahdjoubi, "Investigation of flexible textile antennas and AMC reflectors", *International Journal of Antennas and Propagatio*, vol. 2012, Feb. 2012, Art. no. 236505.
DOI: https://doi.org/doi:10.1155/2012/236505

[31] H. R. Raa, A. I. Abbosh, H. M. Al-Rizzo, and D. G. Rucker, "Flexible and compact AMC based antenna for telemedicine applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 2, pp. 524-531, Feb. 2013.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2223449

[32] H. R. Raa, A. I. Abbosh, H. M. Al-Rizzo, and D. G. Rucker, "Fully Fabric High Impedance Surface-Enabled Antenna for Wearable Medical Applications", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 6948-6960, Jan. 2021.
DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049491

[33] B. Hu et. al., "Bending and on-arm effects on a wearable antenna for 2.45 GHz body area network," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 378-381, Jun. 2016.
DOI: https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2446512

[34] P. Salonen and Y. Rahimat-Samii, "Textile antennas: effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 22, no. 3, pp. 10-14, May 2014.
DOI: https://doi.org/10.1109/EUCAP.2006.4584859

[35] Z. H. Jiang, D. E. Brocker, P. E. Sieber, and D. H. Werner, "A compact, low-profile metasurface-enabled antenna for wearable medical bodyarea network devices," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 8, pp. 4021-4030, Aug. 2014.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2327650

오 세 명(Semyoung Oh) [정회원]

- 2007년 3월 : 공군사관학교 전자공학과 (공학사)
- 2011년 5월 : 위스컨신 대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 2021년 4월 : 대한민국 공군 근무
- 2020년 9월 ~ 2023년 12월 : Texas A&M 대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

〈관심분야〉
안테나, 빔포밍, 레이더, 무선통신 등