

EMC 최근 기술 동향

전도성 섬유 안테나 기술 동향

정재영
서울과학기술대학교

I. 서론

무선 통신기술은 더 많은 정보를 더 편리하게 접근할 수 있는 방향으로 빠르게 진화하고 있다. 이와 함께 무선통신기기는 점점 소형화되는 추세를 넘어 인체에 착용 가능한(wearable) 형태로 발전하고 있다. 무선 wearable 기기의 출하량은 2018년에는 1억 5000만 대, 관련 시장 매출은 58억 달러를 넘을 것으로 전망하고 있다^[1]. 또, 초기에는 시계, 안경 등의 가젯(gadget) 형태의 제품이 각광을 받다가 2030년에는 모든 시스템이 옷 안에 내장 또는 인체에 부착될 것으로 예상된다.

이러한 기술 진화 추세에 대응하기 위한 통신 표준이 IEEE 802.15.6의 주도하에 진행되고 있다^[2]. Body Area Network(BAN)으로 알려진 이 무선 네트워크는 [그림 1]과 같이 사용자 인체 내부(in-body), 외부(on-body)에 무선 송수신기를 장착하여 통신을 피하는 기술 전반을 포함하며, 용도에 따라 의료용과 비의료

용으로 구분한다. 현재 대두되고 있는 가용 주파수는 400 MHz 대역의 MICS(Medical Implant Communication Service), 900 MHz 대역의 ISM(Industry, Science, Medical), 2.4 GHz 대역의 ISM 또는 MBAN(Medical Body Area Network), 3~10 GHz의 UWB(Ultra-wide-band) 등이 있다. BAN 표준은 현재 저전력(<100 mW), 근거리(<3 m), 저용량(수 백 Kbps~수 Mbps) 응용에 맞춰져 있으나, 향후 그 응용분야가 확장되면서 빠르게 고사양 통신 표준으로 진화할 것으로 예상된다.

BAN을 바탕으로 하는 wearable 무선기기의 대중화를 위해 시스템 최종 단계에서 RF 신호의 송수신을 관장하는 안테나에 대한 연구가 필수적이다. 더 구체적으로, 인체 내부 또는 근접한 곳에 위치해야 하는 제한적 전파환경에서도 대역폭을 유지하면서 효율적으로 방사할 수 있는 소형 안테나 개발이 선행되어야 한다. RF신호 입장에서 보면 인체는 손실이 큰 유전체로 간주할 수 있다. 예를 들어, 2.4 GHz 대역에서 피부의 손실 탄젠트(loss tangent)는 0.9에 육박한다. 보통 안테나가 효율적으로 방사하기 위해 안테나가 장착되는 기판(substrate)의 손실 탄젠트가 0.02보다 작아야 한다고 볼 때, in- 또는 on-body 안테나 설계는 상당히 어려운 과제라 할 수 있다. 더불어, 안테나 제작 재료의 생체 적합성, 방사 에너지의 인체 유해성, 인체 삽입 및 착용가능성, 미관 등을 고려한 안테나 설계기법이 요구된다.

본고에서는 on-body 안테나 구현 기술로 관심 받



[그림 1] In- 또는 on-body wearable 기기를 이용한 통신 네트워크의 예

고 있는 전도성 섬유 재질(conductive fiber) 안테나에 대해 논한다. 즉, 인체 내부나 피부에 삽입/부착하는 안테나는 다루지 않고, [그림 2]와 같이 전도성을 갖는 실오라기나 천을 직접 옷에 봉제하는 방식으로 안테나를 구현하는 기술 동향에 대해 알아본다.

최근 wearable IT, flexible IT, conformal electronics 등의 기술 트렌드가 구체화되면서 전도성 섬유를 이용하는 전자 소자 상용화에 많은 관심이 집중되고 있다. 전도성 섬유는 기존 도체에 비해 가볍고 유연할 뿐 아니라, 사용자에게 편안하고 부드러운 감성까지 전달할 수 있는 소재이다. 또, 기존에 축적된 섬유 제작 기술을 바탕으로 대량 생산이 가능하기 때문에 우수한 경제성을 확보할 수 있다. 전도성 섬유 안테나 기술은 새로운 소재를 이용해 안테나 설계 한계를 극복하고자 하는 최신 안테나 기술 트렌드의 일환으로 전자공학과 섬유재료공학의 융합 기술로 간주할 수 있다.

본고의 구성은 다음과 같다. 2장과 3장에서는 전



[그림 2] 전도성 섬유로 구현한 안테나의 예^[3]

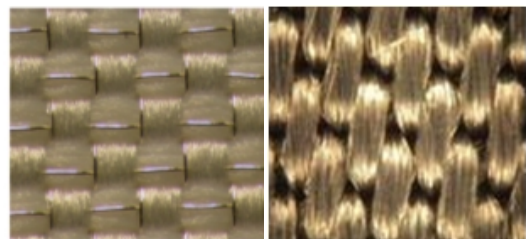
도성 섬유 재질에 대해 소개하고, 이를 통해 구현된 안테나의 예에 대해 알아본다. 4장에서는 전도성 섬유 안테나 구현 시 고려 사항과 연구 동향에 대해 언급한다.

II. 전도성 섬유 재질

E-textile 또는 e-fiber로 일컬어지는 전도성 섬유는 전통적으로 전자 부품간 원치 않는 전파 유입을 막는 차폐제로 이용되어 왔으며, 그 소재에 대한 연구가 RF 신호의 차폐율 향상을 꾀하는 방향으로 진행되어왔다^[4]. 이와 달리, 전도성 섬유가 RF 신호의 효율적 전달을 위한 방사체로 사용되기 위해서는 고효율 안테나 설계 기술과 함께 높은 도전율, 낮은 열손실 및 기계적 강도가 확보되는 재료 개발이 중요하다.

이에 적합한 전도성 섬유는 제작 방법에 따라 크게 금속 섬유사와 도금 섬유사로 나눌 수 있다. 금속 섬유사는 [그림 3] (a)와 같이 가느다란 금속 와이어를 일반 섬유에 꼬아(threading) 만든 형태이다. 이와 달리, 도금 섬유사는 [그림 3] (b)에서 보듯이 무전해 도금법(plating) 또는 박막 증착(sputtering) 기법을 통해 섬유재 위에 도전층을 형성하는 방법으로 제작한다.

두 재료 각각의 장단점이 있어 용도 및 사용 환경에 따른 올바른 선정이 필요하다. 예를 들어, 금속 섬유사는 금속 와이어의 비중을 높여 전도성을 높일 수 있는 장점이 있으나, 이에 따른 복원성 및 인장강



(a) 금속 섬유사^[5]

(b) 도금 섬유사^[6]

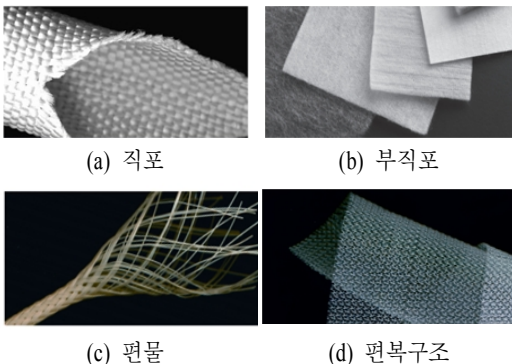
[그림 3] 전도성 섬유 재질의 예

도 저하의 문제가 있다. 도금 섬유사 역시 도금 두께에 따라 전도성을 향상시킬 수 있는 반면, 장기간 사용이나 세탁 시 도금이 벗겨질 우려가 있다.

전도성 섬유의 안테나 응용에 있어 가장 중요한 물성은 도전율이다. 보통 도금 섬유사가 $\sim 10^6$ S/m의 도전율을 가져 $\sim 10^3$ S/m 정도에 그치는 금속 섬유사보다 전도성이 우수한 것으로 알려져 있다^[7]. 이에 더하여 전도성 섬유를 이용해, 안테나 방사판을 어떠한 방식으로 구성하느냐에 따라 그 유효 도전율이 개선된다. 더 촘촘히 그리고 더 두껍게 방사판을 짜면 유효 도전율이 증가한다는 결과가 연구를 통해 알려져 있다^[7,8]. 전도성 섬유 안테나가 주로 직포(woven)의 형태로 구현된 경우가 많으나, 부직포(non-woven), 편물(knitted), 편복(braided) 등의 기술을 이용할 경우 전도성 및 내구성을 다양화할 수 있다(그림 4 참조).

III. 전도성 섬유 안테나

전도성 섬유를 이용한 wearable 안테나 구현 연구가 국내외 전파연구 그룹의 주도로 이루어지고 있다. [그림 5] (a)는 미국 오하이오 주립대에서 발표한 전도성 섬유 안테나 어레이이다^[10]. 이 안테나는 polydimethylsiloxane(PDMS) substrate 위에 은도금된 전도

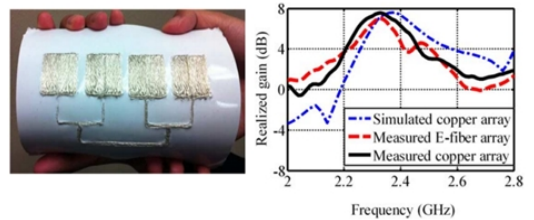


[그림 4] 전도성 섬유 구성의 예^[9]

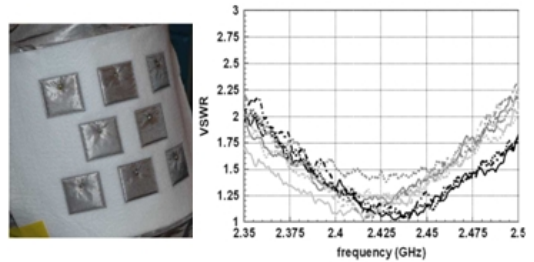
성 섬유를 봉제하여 제작하였다. 안테나의 방사판 뿐 아니라 급전 라인까지 전도성 섬유로 제작하였고, 동작주파수인 2.4 GHz에서 안테나 이득이 기존 동판 제작 안테나와 유사한 성능을 나타냄을 보였다.

[그림 5] (b)는 미국 NASA에서 발표한 우주복 부착용 안테나 어레이이다^[11]. 이 안테나는 전도성 나일론을 이용해 제작한 패치 안테나를 부직포에 봉제한 형태이다. 측정된 안테나의 정재파비가 2.35~2.45 GHz 대역에서 <2가 되도록 구현하였다.

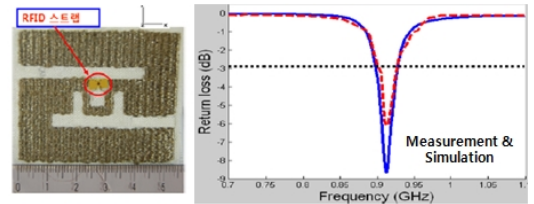
[그림 5] (c)는 대구대학교에서 발표한 글자 모양 RFID 태그 안테나이다^[12]. 니켈을 포함한 전도성 섬유를 이용해 ‘ㄹ’자 모양의 방사체를 제작하고, 스트랩을 통해 급전하여 900 MHz 대역에서 동작하는 RFID 안테나를 구현하였다.



(a) 미국 오하이오 주립대



(b) 미국 NASA



(c) 대구대학교

[그림 5] 전도성 안테나의 예^[10~12]



[그림 6] 국외업체에서 선보인 안테나의 예^[13]

[그림 6]은 국외업체에서 선보인 전도성 섬유 제작 안테나의 예이다. 군용 또는 산업용 등, 특정용으로 제한되어 있지만, 축적된 안테나 설계 기술 및 섬유재료 기술을 통해 그 상용화를 목전에 두고 있다. 국내에서도 체계적인 연구 방법론 구축을 통해 고효율 안테나 설계 기술 확보와 동시에 섬유 학계-업계와의 긴밀한 공조를 통한 재료 기술 국산화가 필요한 시점이라고 생각된다.

IV. 전도성 섬유 안테나 연구 동향

본 장에서는 전도성 섬유 안테나 상용화를 앞당기기 위해 이루어지고 있는 연구 동향에 대해 알아본다.

4.1 전도성 섬유 도전을 측정

앞서 언급했듯이, 전도성 섬유 제작 안테나의 방사효율에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 해당 전도성 섬유의 도전율이다. 이를 측정하는데 있어 주로 표면저항계측기인 four-point-probe를 이용해 측정한다. DC 저항의 역수를 도전율로 간주하고, 안테나 설계 요소로 적용하곤 한다. 하지만 전도성 섬유는 비금속인 실 또는 천을 도체와 엮거나 도금해서 제작하는 이종물질 간의 합성체로, 일반 도체에 적용되는 위 가정을 그대로 사용하기에 무리가 있다. 특히, 주

파수가 높아짐에 따라 표면 효과(skin effect)와 분산현상(dispersion)이 합성체 도전율에 미치는 영향이 커져, 정확한 주파수 도전율을 측정하고 안테나 설계에 반영할 필요가 있다. 또, 유효 도전율 측정이 중요하다. 전도성 섬유 안테나 응용에 있어 재료 자체의 도전율과 함께, 방사체를 구성하는 자수의 두께와 패턴 등의 form factor를 고려한 총체적 도전율의 측정이 선행되어야 한다.

RF 유전율 및 투자율 측정 방법이 다수 존재하는 반면, RF 도전율 측정 방법은 흔치 않다. 공진기를 이용하여 측정하는 방식이 주로 사용되나^[14], 이는 특정 주파수 또는 협대역 도전을 측정만이 가능하다. 특정 전도성 섬유의 안테나 응용 적합성을 확인하기 위해 도전율의 주파수에 따른 변화를 관찰할 수 있는 광대역 측정법이 필요하다.

광대역 도전을 측정법으로 transmission/reflection (T/R) 방법이 있다^[15]. 이 측정법은 네트워크 분석기를 이용해 측정한 산란계수(S-parameter)로부터 물질상수 값을 추출하는 방법으로, 재료에 RF 전파를 인가하여 투과되는 전파량(S_{21})과 반사되는 전파량(S_{11})을 정확히 측정하는 것이 중요하다. 전도성 섬유와 같이 도전율이 높은 물질의 경우, 인가된 전파가 대부분 반사하므로 S_{21} 은 작고, S_{11} 은 클 수밖에 없다. 이로 인해 측정 동적 범위(dynamic range)가 좁아 작은 측정 에러에도 결과 값에 큰 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차를 최소화하기 위해 여러 가지 보정알고리즘을 적용한 새로운 측정법에 대한 연구가 진행 중이다.

4.2 전도성 섬유 안테나 해석

안테나의 이론적 해석은 맥스웰 방정식으로부터 파생된 파동방정식을 이용하여 안테나의 전류 분포에 따른 방사 성분을 계산하는 방식으로 이루어진다. 일반도체와 달리 전도성 섬유 안테나의 정확한 해석을 위해서는 직물 패턴에 따라 전류가 전달되는

원리를 고려한 해석법이 필요하다. 최근 전도성 합성체(예, 탄소나노튜브)로 제작된 안테나 해석에 있어 dynamic conductivity를 고려한 적분방정식^[16], 맥스웰 방정식에 양자역학적 요소를 보완한 Maxwell-Schrödinger 방정식^[17] 등을 이용하는 시도가 잇따르고 있다. 전도성 섬유 안테나 해석 또한 이러한 미세 구조 분석을 바탕으로 하여 방사체의 도전을 및 전류분포를 대표하는 수식을 도출하고자 하는 노력이 이루어지고 있다.

전파 시뮬레이션(full-wave EM simulation) 방법 역시 전도성 섬유 안테나 해석에 최적화되도록 개선되고 있다. 앞서 언급한 일반화를 통한 이론적 모델은 학문적으로 가치가 있으나, 실제 전도성 섬유 안테나 해석에 부족함이 있다. 이론적 모델은 크기가 무한한 전도성 섬유 평판을 가정하고 도출되는 반면, 실제 안테나는 유한한 경계면을 가지기 때문에 경계면에서의 반사와 산란을 반영한 full-wave 시뮬레이션 해석이 필요하다. 과거에는 분석하고자 하는 전도성 섬유 안테나를 단일물질화(homogenized)시켜 해석하는 경우가 많았다. 최근에는 전도성 섬유가 엮인 방식, 옷감에 미싱된 패턴 등 세부 사항을 고려한 모델링을 통한 정확한 해석방법이 연구되고 있다.

4.3 안테나-인체 간 커플링 저감

Wearable 안테나 설계에 있어 방사 전파가 인체에 미치는 영향을 최소화하기 위한 안테나-인체 간 커플링 저감 기술이 고려되어야 한다. 단순히 안테나 아래쪽에 차폐의 목적으로 접지면을 위치시키는 것은 바람직하지 않다. 이렇게 안테나와 접지면이 근접한 경우, 영상이론에 의해 안테나 매칭이 어렵고 효율적인 방사가 이루어지지 않는다. 이에 대한 해결책으로 메타물질 구조를 이용한 Artificial Magnetic Conductor(AMC)를 접지면과 안테나 사이에 위치시켜 인체로의 후방 방사를 억제함과 동시에 방사효율을 높이는 방법이 있다^[18]. 기존 연구에서 발표한 전

도성 섬유 안테나-AMC 일체형 구조의 경우, AMC의 크기가 안테나 동작주파수 1파장 정도(예, 2.4 GHz에서 $12 \times 12 \text{ cm}^2$)로, wearable 안테나 적용에 다소 무리가 있다. 이를 극복하기 위해 최근 발표된 AMC 소형화 연구 사례를 전도성 섬유 안테나 구조에 적용하는 연구가 진행되고 있다.

4.4 전도성 섬유 안테나 정밀 제작

전도성 섬유를 이용해 안테나를 제작하는데 있어 연구원이 직접 바늘 또는 미싱기를 이용해 옷감이나 특정 substrate에 꿰매는 방법으로는 복잡 정교한 패턴의 구현이 어렵다. 광대역 또는 다중대역 안테나의 경우, 방사체에 정교한 slit이나 slot을 여러 개 배치할 필요가 있다. 또, 표면 효과를 최소화하기 위해 안테나 패턴을 겹겹이 쌓아올려야 하는 경우 역시 정교한 제작 기법이 요구된다. 이러한 문제점 해결을 위해 컴퓨터 프로그램과 연동된 미싱기의 사용이 고려되고 있다. 안테나 시뮬레이션을 통해 최적화된 모델을 미싱기 제어 프로그램에 반영하여 자동 제작함으로써, 연구원의 피로도 및 제작 오차를 줄일 수 있다.

V. 결 론

무선 통신기술의 급격한 발달로 시간과 장소의 제약 없이 자유롭게 정보를 열람하고 주고받는 유비쿼터스 시대가 도래하고 있다. 정보홍수시대에 나타나는 여러 가지 부작용을 간과할 수 없지만, 무선 통신기술의 발전이 인간의 삶을 풍요롭게 해준 것은 분명한 사실이다. 본 고는 유비쿼터스 무선 네트워크 중 하나인 BAN에 대한 설명을 시작으로 이의 상용화를 앞당기는데 기여할 수 있는 전도성 섬유 안테나 기술에 대해 서술하였다. 안테나를 구성하는 전도성 섬유 재료의 종류 및 특성에 대해 기술하고, 이를 이용해 제작한 안테나의 예시에 대해 알아보았

다. 또, 최적 안테나 설계를 위해 진행되고 있는 연구 동향에 대해 살펴보았다.

전도성 섬유 기술은 안테나 외에도 여러 응용 분야가 존재한다. Wearable 컴퓨터, 센서, 배터리 등 전자 부품 및 디바이스 이외에도 다기능 의류, 인테리어 제품에 대한 응용연구도 진행되고 있다. 이러한 관점에서 전도성 섬유 기술의 상용화는 전기전자뿐만 아니라 섬유재료 산업에도 큰 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 도전율이 높고 유연하며 방수 가능한 전도성 섬유의 개발을 통해 고부가가치 산업으로 재도약 할 수 있는 단초를 제공할 수 있을 것이다. 전기전자공학 및 섬유재료공학 전문가의 협업을 통해 국제적으로 경쟁력 있는 전도성 섬유응용 기술 개발을 기대해 본다.

참 고 문 헌

- [1] "Wearable Technology Market - Global Scenario, Trends, Industry Analysis, Size, Share and Forecast, 2012-2018", *Transparency Market Research*, 2013.
- [2] "IEEE 802.15 WPAN task group 6 body area networks", www.ieee802.org/15/pub/TG6.html
- [3] Z. Wang, L. Zhang, D. Psychoudakis, and J. L. Volakis, "Flexible textile antennas for body-worn communication", *Proc. IEEE iWAT*, pp. 205-208, 2012.
- [4] H. C. Chen, K. C. Lee, J. H. Lin, and M. Koch, "Comparison of electromagnetic shielding effectiveness properties of diverse conductive textiles via various measurement techniques", *J. Mat. Proc. Tech.*, vol. 192, pp. 549-554, 2007.
- [5] 김지은, 정현태, 조일연, "디지털 의류 기술 개발 동향", *전자통신동향분석*, 24(5), pp. 20-29, 2009년.
- [6] 장순호, "섬유산업의 IT 융합화 기술동향", 한국 섬유개발연구원, 2009년.
- [7] Y. Ouyang, W. J. Chappell, "High frequency of electro-textiles for wearable antenna applications", *IE-EE Trans. Antennas Propag.*, 56(2), 2008.
- [8] E. Moradi, T. Bjorninen, L. Ukkonen, and Y. Rahmat-Samii, "Effects of sewing pattern on the performance of embroidered dipole-type RFID tag antennas", *IEEE Antennas. Wireless Propg. Lett.*, vol. 11, pp. 1482-1485, 2012.
- [9] <http://www.bmsri.com>
- [10] Z. Wang, L. Zhang, Y. Bayram, and J. L. Volakis, "Embroidered conductive fibers on polymer composite for conformal antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 60(9), pp. 4141-4147, 2012.
- [11] T. F. Kennedy, P. W. Fink, A. W. Chu, N. J. Champagne, G. Y. Lin, and M. A. Khayat, "Body-worn E-textile antennas: The good, the low-mass, and the conformal", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 57(4), pp. 910-918, 2009.
- [12] 최재한, 정유정, "글자 모양의 자수형 도전사 UHF RFID 태그 안테나 디자인", *한국전자과학 회논문지*, 20(10), pp. 1114-1120, 2009년.
- [13] www.pharad.com, www.patria.fi, www.esa.int
- [14] J. Krupka, D. Nguyen, and J. Mazierska, "Micro-wave and RF methods of contactless mapping of the sheet resistance and the complex permittivity of conductive materials and semiconductors", *Meas. Sci. Tech.*, vol. 22, 085703, 2011.
- [15] J. Y. Chung, N. K. Nahar, L. Zhang, Y. Bayram, K. Sertel, and J. L. Volakis, "Broadband radio frequency conductivity measurement technique for engineered composites", *IET Microw. Antennas Propag.*, 6(4), pp. 371-376, 2012.
- [16] G. W. Hanson, "Fundamental transmitting properties of carbon nanotube antennas", *IEEE Trans. Anten-*

nas Propag., 53(11), pp. 3426-3435, 2005.

- [17] I. Ahmed, E. H. Khoo, E. Li, and R. Mittra, "A hybrid approach for solving coupled Maxwell and Schrödinger equations arising in the simulation of nano-devices", *IEEE Ant. Wireless Propag. Lett.*,

vol. 9, pp. 914-917, 2010.

- [18] S. Z. Zhu and R. Langley, "Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 57(4), pp. 926-935, 2009.

≡ 필자소개 ≡

정 재 영



2002년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)

2007년 3월: 미국 오하이오 주립대 전기 컴퓨터공학과 (공학석사)

2010년 6월: 미국 오하이오 주립대 전기 컴퓨터공학과 (공학박사)

2002년 6월~2004년 6월: 모토로라 코

리아 연구원

2010년 6월~2012년 8월: 삼성전자 책임연구원

2012년 9월~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나 설계, 안테나 측정, 물성측정