

고-저저항 잉크로 구현한 투명하고 플렉서블 한 광대역 메타물질 흡수체

김정현*, Prabhakar Jepiti, 임성준

중앙대학교

wjdgus6748@naver.com, prabhakar.jepiti@gmail.com, sungjoon@cau.ac.kr

Optically transparent, flexible, and broadband metamaterial absorber using high-low resistive inks

Junghyeon Kim, Prabhakar Jepiti, Sungjoon Lim

Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 실버 나노와이어 기반 고-저저항 잉크와 스크린 프린팅 기술을 활용하여 투명하고, 플렉서블 한 광대역 메타물질 흡수체를 제안하였다. 제안된 메타물질 흡수체는 X-band에서 동작하며, 측정을 통해 투명하고, 플렉서블 한 성능을 검증하였다. 제안하는 흡수체는 X-band 통신에서 전자파 차폐나 흡수가 필요한 다양한 어플리케이션에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

우리는 블루투스, global positioning systems (GPS), near-field communication (NFC) 등 다양한 통신 시스템을 사용하고 있으며, 미래에는 Wi-Fi 7, 6G 등의 유망한 통신 시스템들이 상용화될 예정이다. 이렇게 통신 시스템들은 점점 늘어나고 있으며, 이에 따라 불필요한 전자파의 반사, 산란 등의 현상이 일어나고 있다. 이런 현상은 특정 어플리케이션에 안 좋은 영향을 줄 수 있으며, 특히 안테나나 전자기기를 측정하고 평가하는 환경에서는 잡음으로 작용하여 치명적인 문제가 된다. 이러한 문제는 전자파를 흡수하는 전자파 흡수체로 해결할 수 있으며, 관련 연구가 이루어지고 있다.

전자파 흡수체는 대표적으로 두 가지 종류의 흡수체가 있다. 첫 번째는 피라미드형 흡수체이다. 피라미드형 흡수체는 저주파수에서 흡수 성능이 좋으며, 광대역 주파수 대역에서 흡수율이 훌륭하다는 장점이 있다. 현재 안테나를 측정하는 무반사실이나, electromagnetic interference (EMI) / electromagnetic compatibility (EMC) 성능을 테스트하는 무반사실에도 사용되고 있다. 하지만 단점으로는 크기가 크고, 무거우며, 가격이 비싸다는 단점이 있다. 최근 이러한 단점을 극복할 수 있는 전자파 흡수체로 메타물질 흡수체 연구가 이루어지고 있다. 메타물질 흡수체는 저렴한 가격으로 제작이 가능하고, 피라미드형 흡수체에 비해 매우 작은 크기로 구현이 가능하다는 장점이 있다. 물론 피라미드형 흡수체에 비해 흡수 성능이 떨어진다는 단점이 있지만, 이러한 단점을 극복하기 위해 광대역 흡수 성능을 가지는 메타물질 흡수체 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 최근에는 광대역 특성뿐만 아니라 다양한 기기에 활용이 가능하도록 투명한 특성을 추가한 메타물질 흡수체 연구가 관심 받고 있다. 전자파 차폐용 창문 [4], 고주파수 radio frequency identification system (RFID) [5] 등 다양한 분야에서 활용될 수 있는 투명 메타물질 흡수체가 연구되고 있는 추세이다. 하지만 기기의 모양과 굴곡이 복잡해지면서 투명한 특성만으로는 다양한 기기에 흡수체를 적용하는데 어려움이 있다. 이에 따라 투명성뿐만 아니라 유연성도 고려되어야 하는데, 이러한 특성을 고려한 연구들이 부족한 실정이다.

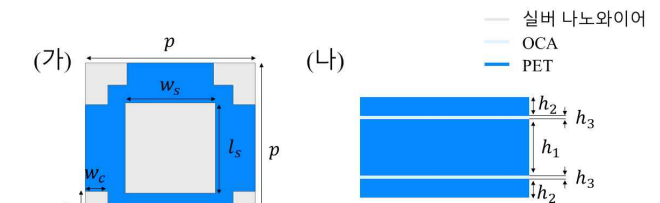


그림 1. 제안하는 메타물질 흡수체의 (가) 윗면, (나) 옆면

본 논문에서는 X-band에서 동작하는 투명하고, 유연한 광대역 메타물질 흡수체를 제안하였다. 제안하는 메타물질 흡수체는 실버 나노와이어 기반 고-저저항 잉크와 스크린 프린팅 기술을 활용하여 다른 저항의 패턴을 형성하여 광대역 흡수 특성능을 만족하였다. 뿐만 아니라 실버 나노와이어 물질을 사용하여서 투명하고, 유연한 특성을 가진다. 제안하는 메타물질 흡수체는 X-band 내에서 전자파의 차폐, 흡수가 필요한 어플리케이션에 활용될 것으로 기대된다.

II. 본론

그림 1은 제안하는 메타물질 흡수체의 구조이다. 그림 1(가)는 메타물질 흡수체의 윗면이다. 윗면은 네모 모양의 패턴과 십자가 모양의 패턴을 결합하여 광대역 흡수 특성을 가지게 하였다. 그림 1(나)는 메타물질 흡수체의 옆면이다. 유연한 특성을 가질 수 있도록 3장의 polyethylene terephthalate (PET) 기판을 사용하였으며, PET 사이 간에는 optical clear adhesive (OCA) 필름을 사용하였다. 제안하는 메타물질 흡수체는 X-band에서 동작하며, 최적화된 파라미터는 $p = 7.7 \text{ mm}$, $l_s = 7.7 \text{ mm}$, $W_c = 1.9 \text{ mm}$, $l_c = 3.55 \text{ mm}$, $p = 14.5 \text{ mm}$, $h_1 = 0.95 \text{ mm}$, $h_2 = 0.25 \text{ mm}$, $h_3 = 0.05 \text{ mm}$ 이다. 여기서 네모 모양의 패턴은 30 Ohm/square , 십자가 모양의 패턴은 8 Ohm/square 의 면 저항을 가진다. 접지는 15 Ohm/square 의 면 저항을 가지도록 설계하였다.

스크린 프린팅 용 실버 나노와이어 투명 잉크와 오토 얼라인

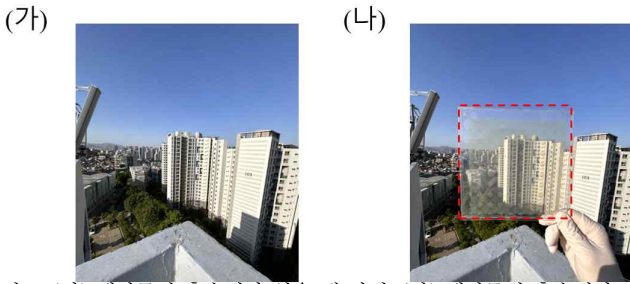


그림 2. (가) 메타물질 흡수체가 없을 때 사진, (나) 메타물질 흡수체가 있을 때 사진

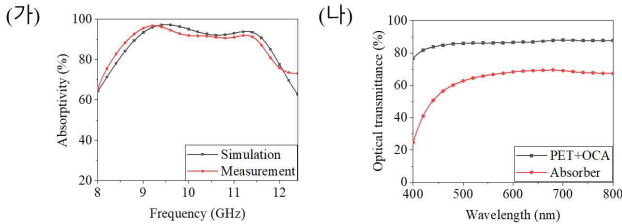


그림 3. 제안하는 메타물질 흡수체의 측정결과 (가) 흡수율, (나) 광 투과율

스크린 프린터를 활용하여 제안한 메타물질 흡수체 유닛 셀을 9×9 개수로 제작하였다. 먼저 십자가 패턴을 3번 스크린 프린팅을 반복하여서 8 Ohm/square 이하의 면 저항을 갖도록 하였다. 다음으로 네모 패턴을 1번 스크린 프린팅하여서 30 Ohm/square 이하의 면 저항을 갖도록 하였다. 제작한 윗면은 오븐에 140 ° 온도로 20분간 열 소결 해주었다. 마지막으로 접지 면을 2번 스크린 프린팅 반복하여서 15 Ohm/square 이하의 면 저항을 갖도록 하였다. 이후 윗면과 동일하게 오븐에 140 ° 온도로 20분간 열 소결 해주었다. 이후 제작된 윗면과 아랫면은 OCA 필름을 활용하여 결합하여서 최종 메타물질 흡수체 시제품을 제작하였다.

그림 2(가), (나)는 제작한 메타물질 흡수체가 없을 때와 있을 때의 사진이다. 메타물질 흡수체가 있을 때도 뒤의 아파트가 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(가)는 제안하는 메타물질 흡수체의 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교한 그래프이다. 90% 흡수율 기준 시뮬레이션 결과는 8.83~11.62 GHz로 나왔으며, 측정결과는 8.68~11.48 GHz로 나왔다. 측정결과와 시뮬레이션 결과를 비교했을 때 저주파수 쪽으로 시프팅이 되었으나, 경향성은 유사하였다. 그림 3(나)는 광 투과율 측정결과이다. 윗면과 아랫면에 패턴이 없는 PET와 OCA가 결합된 기판의 광 투과율은 550 nm에서 86.2%로 측정되었다. 제작한 메타물질 흡수체의 광 투과율은 550 nm에서 66.3%로 측정되었다. 그림 4(가)는 bistatic radar cross section (RCS) 측정 환경을 보여준다. 측정은 -75 ° ~ +75 ° 까지 5 ° 간격으로 진행하였다. 제안하는 흡수체의 성능을 비교하기 위해 기준은 PET에 스크린 프린팅 용 실버 잉크로 패턴이 된 기판을 사용하였다. 그림 4(나)는 9.5

GHz 주파수에서 측정된 bistatic RCS 결과를 보여준다. 기준이 되는 실버 잉크로 프린팅 된 기판과 비교하였을 때 제안하는 흡수체는 -15 ° ~ +15 °까지는 -10 dB 만큼 수신되는 값이 적었으며, -55 ° ~ +60 °까지는 -6 dB 만큼 수신되는 값이 적었다. 제안하는 흡수체는 유연성이 요구되는 환경에서도 전자파를 잘 흡수한다는 것을 본 측정을 통해 확인할 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 고-저저항 잉크와 스크린 프린팅을 활용하여 투명하고, 유연한 광대역 메타물질 흡수체를 제안하였다. 제안하는 메타물질 흡수체는 8.68~11.48 GHz까지 90% 이상의 흡수율을 가진다. 또한, 투명하고 유연한 특성을 측정을 통해 검증하였다. 제안하는 메타물질 흡수체는 X-band 통신에서 전자파 흡수가 필요한 어플리케이션에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A2C3005239, P0020967 스마트센서 전문인력양성사업).

참 고 문 헌

- [1] J. Ge, Y. Zhang, H. Li, H. Dong, and L. Zhang, "Ultra-broadband, tunable, and transparent microwave meta-absorber using ITO and water substrate", *Adv. Opt. Mater.*, vol. 11, no. 10, May 2023, Art. no. 2202873.
- [2] H. Wang, Y. Zhang, C. Ji, C. Zhang, Z. Lu, Y. Liu, Z. Cao, J. Yuan, J. Tan, L. J. Guo, "High-Performance Transparent Broadband Microwave Absorbers", *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9, 2101714.
- [3] H. Sheokand, G. Singh, S. Ghosh, J. Ramkumar, S. A. Ramakrishna and K. V. Srivastava, "An Optically Transparent Broadband Microwave Absorber Using Interdigital Capacitance", in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 113-117, Jan. 2019.
- [4] Y. Zhang, H. Dong, N. Mou, H. Li, X. Yao and L. Zhang, "Tunable and transparent broadband metamaterial absorber with water-based substrate for optical window applications", *Nanoscale*, vol. 13, no. 20, pp. 7831-7837, 2021.
- [5] Y. Okano, S. Ogino and K. Ishikawa, "Development of Optically Transparent Ultrathin Microwave Absorber for Ultrahigh-Frequency RF Identification System", in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 8, pp. 2456-2464, Aug. 2012.

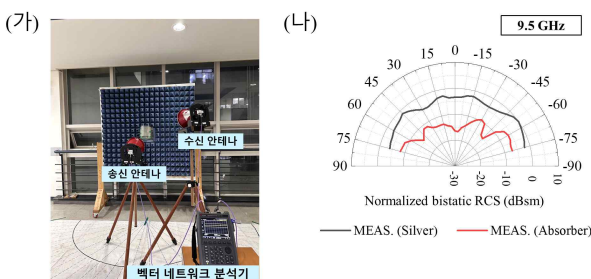


그림 4. (가) Bistatic RCS 측정환경, (나) Bistatic RCS 측정결과