

페라이트가 적용된 인공자기도체 기반 저자세 HF/VHF/UHF 다이폴 안테나

Low-Profile HF/VHF/UHF Dipole Antenna with Ferrite-Loaded Artificial Magnetic Conductor

권 오 현 · 황 금 철

Oh Heon Kwon · Keum Cheol Hwang

요 약

본 논문에서는 페라이트가 적용된 인공자기도체 기반 저자세 HF/VHF/UHF corrugated fan 형상 다이폴 안테나를 제안한다. HF/VHF/UHF 대역에서 동작하는 소형 인공자기도체를 설계하기 위해서 높은 투자율을 갖는 페라이트를 적용하여 인공자기도체를 설계하였다. 설계된 인공자기도체의 $\pm 90^\circ$ 반사 위상 대역폭 비는 25.5:1 (19~485 MHz)이다. 설계된 인공자기도체를 기반으로 HF/VHF/UHF 대역에서 동작하는 corrugated fan 형상 다이폴 안테나를 설계하였다. Corrugated fan 형상은 부채꼴을 중심으로 위아래로 위치한 15개의 arm으로 구성되어 있다. 인공자기도체와 결합된 다이폴 안테나의 3.5:1 이하 VSWR 대역폭 비는 31:1 (10~310 MHz)이며, 크기는 $0.002 \times 0.002 \times 0.00005 \lambda_L^3$ 이다(λ_L 는 최저 동작 주파수에서 파장 길이). 설계된 인공자기도체 기반 다이폴 안테나의 성능을 검증하기 위해서 직접 제작 후 측정을 진행하였다. 또한, reference 안테나를 선정 후 설계된 안테나와의 수신 전력 특성을 측정한 후 비교하였다.

Abstract

In this study, a corrugated fan-shaped dipole antenna with a ferrite-loaded artificial magnetic conductor (AMC) is introduced. Ferrite, which has high permeability in the HF/VHF/UHF band, is employed to design a compact size AMC operating in the HF/VHF/UHF band, and the reflection phase frequency bandwidth of the designed AMC is 25.5:1 (19~485 MHz). Subsequently, a corrugated fan-shaped dipole antenna was designed and combined with the AMC. The proposed antenna with the AMC was fabricated and measured to verify its performance. The measured voltage standing wave ratio (VSWR < 3.5) bandwidth ratio was 31:1 (10~310 MHz), and the overall size of the proposed antenna was $0.002 \times 0.002 \times 0.00005 \lambda_L^3$ (λ_L is the wavelength of the lowest operating frequency). A comparison of the measured receiving power between the reference antenna and the proposed antenna was also conducted.

Key words: Artificial Magnetic Conductor(AMC), Dipole Antenna, Ferrite, Low-Profile, HF/VHF/UHF

I. 서 론

HF(high-frequency) 대역은 전리층에서 전파가 반사되는 특성을 활용하여 인공위성 없이 장거리 통신이 가능

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다(UD190033ED).」
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)
· Manuscript received April 9, 2021 ; Revised April 22, 2021 ; Accepted May 3, 2021. (ID No. 20210409-034)
· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail : khwang@skku.edu)

하다^[1]. 이러한 특성을 활용하여 HF 대역은 험준한 지형, 전시 상황 등 통신 기반 시설이 부족한 환경에서 활용된다. 하지만 동작 주파수의 파장에 비례하여 크기가 증가하는 안테나의 특성으로 인해 파장의 길이가 10~100 m 인 HF 대역에서 동작하는 안테나의 크기는 커질 수밖에 없다^[2]. 따라서 HF 대역의 파장 대비 크기가 작으며, 이동의 용이성이 중요한 비행체, 차량과 같은 물체에는 실장이 어렵다는 단점이 있다. 이를 보완하여 이동체에 실장 가능할 수 있도록 소형화된 HF 대역 안테나들이 제안되었다^{[3]~[5]}. VHF(very-high frequency) 대역, UHF(ultra-high frequency) 대역 또한 LoS(line of sight) 특성을 확보하기 힘든 험준한 지형 등에서 활용되고 있다^[6]. VHF/UHF 대역도 긴 파장 특성으로 인해서 안테나의 크기가 커져야 하며, 이를 개선하여 이동체에 실장하기 위해 소형화된 안테나들이 제안되었다^{[7]~[9]}. 기존에 제안된 HF, VHF, UHF 대역에서 동작하는 소형 안테나^{[3]~[5][7]~[9]}들은 협대역 동작 주파수 대역 특성으로 인해 넓은 통신 대역을 커버하기 위해서는 해당 주파수 대역에서 동작하는 여러 종류의 안테나들이 필요하다. 하지만 안테나의 개수가 증가할수록 이동체의 이동성 저하 및 탑재된 안테나 간의 mutual coupling에 의해 RCS(radar cross section)가 증가하여 피탐지 특성이 저하된다^[10]. 따라서 HF/VHF/UHF 대역에서 동작하며, 이동체의 이동성을 고려한 광대역 저자세 소형 안테나의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 페라이트가 적용된 인공자기도체 기반 저자세 HF/VHF/UHF corrugated fan 형상 다이폴 안테나를 제안한다. 인공자기도체(AMC)는 주기적인 단위 구조로 구성되어 자연계에 존재하지 않는 완전 자계 도체(PMC: perfect magnetic conductor)와 유사한 특성을 가지며, 이러한 특성을 활용하여 안테나의 저자세 특성 및 광대역 특성 구현이 가능하다^[11]. 광대역 소형 인공자기도체를 설계하기 위해서 높은 투자율을 갖는 페라이트를 인공자기도체에 적용하였다. 또한, 15개의 arm으로 구성된 corrugated fan 형상 다이폴 안테나 형상을 설계하였다. 설계된 인공자기도체와 corrugated fan 형상의 다이폴 안테나가 결합되어 HF/VHF/UHF 대역에서 동작한다. II 장에서는 인공자기도체의 형상 및 성능과 인공자기도체와 결합된 corrugated fan 형상 다이폴 안테나의 구조에 대하여

설명하였고, 제안하는 안테나의 시뮬레이션 및 측정 결과를 비교하였다. III 장에서는 결론을 서술하였다.

II. 안테나 설계

그림 1은 설계된 페라이트가 적용된 인공자기도체의 단위 구조 형상이다. 단위 구조는 유전율 $\epsilon_r=4.3$, 두께 $t_s=1.6$ mm, 손실 탄젠트 $\tan \delta=0.0025$ 인 두 개의 FR-4 기판과 두 기판 사이에 위치하는 페라이트(ferrite)로 구성된다. 페라이트의 두께 $t_f=10$ mm이다. 단위 구조의 한 변의 길이 $W_{AMC}=100$ mm이며, 총 높이는 13.2 mm이다. 위쪽에 위치한 기판의 윗면에 한 변의 길이 $W_p=60$ mm인 사각형 패치가 위치하며, 아랫면에 위치한 기판의 아랫면에 접지면이 위치한다.

그림 2는 인공자기도체 설계에 적용된 페라이트인 MP2106-0M0^[12]의 투자율 그래프이다. 투자율은 실수부와 허수부로 구성되어 있으며, 페라이트의 유전율은 $\epsilon_r=12$ 로 설정하였다. 그림 2를 통하여 적용된 페라이트는 HF/VHF/UHF 대역에서 높은 투자율을 갖는 것을 확인할 수 있다. 높은 투자율을 갖는 페라이트를 적용할 경우, 인공자기도체의 등가회로 성분 중 인덕턴스 성분을 높일 수 있다. 이를 통하여 인공자기도체의 소형화 및 광대역화를 구현할 수 있다^[13].

그림 3은 설계된 인공자기도체 단위 구조의 페라이트 유무에 따른 시뮬레이션된 반사 위상 특성이다. 일반적으로 인공자기도체의 동작 주파수 대역은 반사 위상 특성

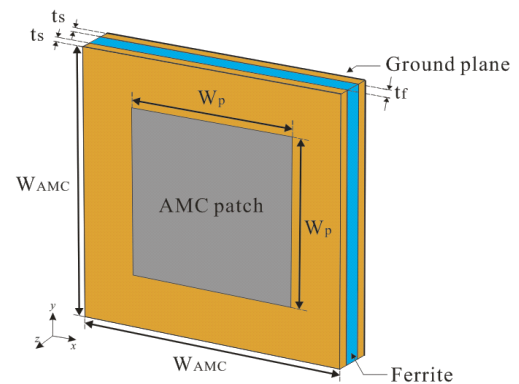


그림 1. 인공자기도체의 단위 구조
Fig. 1. Structure of the unit cell of the AMC.

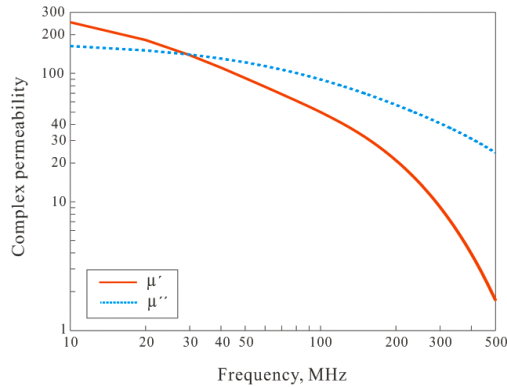


그림 2. 페라이트의 투자율 특성
Fig. 2. Complex permeability of the MP2106-0M0 ferrite.

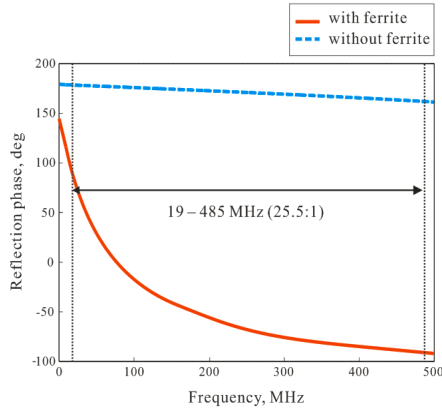


그림 3. 시뮬레이션된 페라이트 유무에 따른 인공자기도체 단위 구조의 반사 위상 특성
Fig. 3. Simulated reflection phase of the unit cell of the AMC with and without of the ferrite.

이 $\pm 90^\circ$ 인 주파수 대역으로 정의된다. 시뮬레이션된 페라이트가 적용된 인공자기도체 단위 구조의 동작 주파수 대역폭 비는 25.5:1(19-485 MHz)이다. 페라이트가 적용되지 않은 인공자기도체의 단위 구조의 반사 위상 결과는 그림 1의 인공자기도체 단위 구조와 동일한 한 변 길이, 높이 및 패치 크기이며, 페라이트 대신 FR-4 기판으로만 구성되어 있을 때의 결과이다. 페라이트가 적용되지 않았을 경우, HF/VHF/UHF 대역에서 동작하지 않는다. 이를 통해서 인공자기도체 설계 시 높은 투자율을 갖는 페라이트를 적용하여 HF/VHF/UHF 대역에서 동작하는 것을 확인할 수 있다. 설계된 인공자기도체 단위 구조의 크기

는 $0.0006 \times 0.0006 \times 0.00009 \lambda_L^3$ 이다.

그림 4는 corrugated fan 형상의 개념도이다. Corrugated fan은 반지름이 P_r 이며, 중심각이 β 인 부채꼴을 중심으로 위쪽과 아래쪽에 폭이 각각 r_n, r_{n-1} ($n=1,2,3...$)이며, 중심각이 α 인 호로 구성되어 있다. 위쪽에 위치한 호들은 r_{n-1} 만큼의 간격을 두고 위치하고 있으며, 아래쪽에 위치한 호들은 r_n 만큼의 간격을 두고 위치하고 있다. 설계된 안테나의 소자는 15개이며, 각 설계 변수는 표 1에서 확인할 수 있다.

그림 5(a)는 corrugated fan 형상 다이폴 안테나의 구조이다. 다이폴 안테나의 소자는 15개의 arm으로 구성된

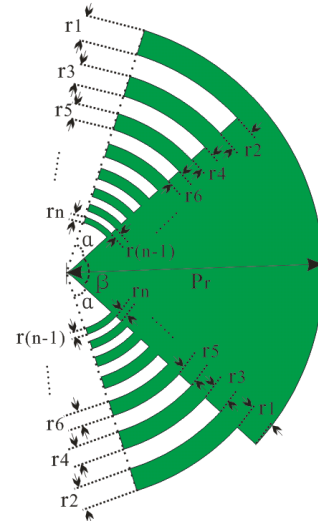


그림 4. Corrugated fan 형상의 개념도
Fig. 4. Concept of the corrugated fan shape.

표 1. Corrugated fan 형상 안테나의 설계 변수
Table 1. Design parameters of the corrugated fan shape antenna.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
P_r	250 mm	α	25.3 °	β	94.6 °
r_1	33.9 mm	r_6	20 mm	r_{11}	11.8 mm
r_2	30.5 mm	r_7	18 mm	r_{12}	10.6 mm
r_3	27.5 mm	r_8	16.2 mm	r_{13}	9.5 mm
r_4	24.7 mm	r_9	14.6 mm	r_{14}	8.6 mm
r_5	22.2 mm	r_{10}	13.1 mm	r_{15}	7.7 mm

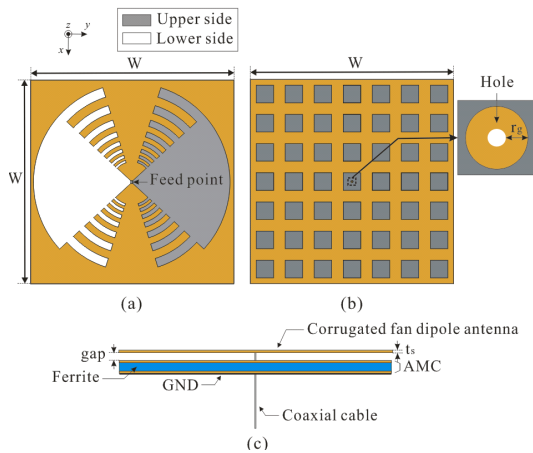


그림 5. 인공자기도체와 결합된 안테나의 형상: (a) corrugated fan 형상 다이폴 안테나, (b) 7×7 인공자기도체, (c) 측면도

Fig. 5. Geometry of the proposed antenna with the AMC: (a) corrugated fan shape dipole antenna, (b) 7×7 AMC, (c) side-view.

corrugated fan 형상이며, 좌우 대칭으로 기관의 윗면과 아랫면에 위치한다. 윗면과 아랫면에 위치한 다이폴 소자는 각각 회색과 흰색으로 표기하였다. Corrugated fan 형상 다이폴 안테나는 두께 $t_s=1.6$ mm, 유전율 $\epsilon_r=4.3$, 손실 탄젠트 $\tan \delta=0.0025$ 인 FR-4 기관에 설계되었다. 안테나가 설계된 기관의 한 변의 길이는 $W=700$ mm이다. Corrugated fan 다이폴 안테나는 동축 선로를 이용하여 급전된다. 그림 5(b)는 페라이트가 적용된 인공자기도체의 형상이다. 인공자기도체는 7×7개의 단위구조로 구성되어 있으며, 안테나의 한 변 길이인 700 mm와 동일한 길이가 되도록 단위 구조의 개수를 설정하였다. 안테나의 급전을 위한 동축 선로가 지나갈 수 있도록 인공자기도체에 동축 선로의 지름과 동일한 지름을 갖는 구멍을 형성하였다. 또한, 인공자기도체의 패치와 동축선로 간의 단락(short)을 방지하기 위해 $r_g=1.5$ mm만큼 도체를 제거하였다. 페라이트가 적용된 인공자기도체와 결합된 corrugated fan 다이폴 안테나의 구조의 측면도는 그림 5(c)에서 확인할 수 있다. 안테나와 인공자기도체는 gap=1 mm만큼의 간격을 두고 위치한다.

그림 6은 시뮬레이션된 arm 유무 및 인공자기도체 유무에 따른 안테나의 VSWR 특성이다. 인공자기도체와 결

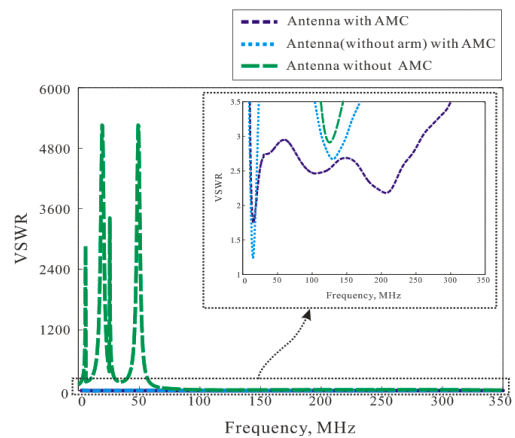


그림 6. 시뮬레이션된 arm 유무 및 인공자기도체 유무에 따른 안테나의 VSWR 특성

Fig. 6. Simulated VSWRs of the proposed antenna with and without of arms and AMC.

합된 안테나의 3.5:1 이하 VSWR 특성 주파수 대역은 10 ~300 MHz 이다. 인공자기도체가 존재하지 않을 때 안테나의 VSWR 특성은 HF/VHF/UHF 대역인 10~300 MHz 대역에서 3.5:1 이하 VSWR 특성을 만족하지 못한다. 인공자기도체의 영향으로 안테나와 인공자기도체가 결합 시, 10-300 MHz 대역에서 3.5:1 이하 VSWR 특성을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 인공자기도체와 결합된 다이폴 안테나의 형상이 arm이 없는 부채꼴 형상일 때 VSWR 특성 또한 3.5:1 이하를 만족하지 못한다. 인공자기도체와 결합된 안테나의 동작 대역폭 특성을 개선하기 위해서 corrugated fan을 구성하는 arm을 추가하였으며, 이를 통하여 HF/VHF/UHF 대역에서 동작하는 것을 확인할 수 있다. 3.5:1 이하 VSWR 대역폭은 reference 안테나^[14]의 대역폭 기준을 참고하여 선정하였다.

설계된 인공자기도체 기반 안테나의 성능을 검증하기 위해서 실제로 안테나를 제작 및 측정 후 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 7은 제작된 페라이트가 적용된 인공자기도체 기반 저자세 HF/VHF/UHF corrugated fan 형상 다이폴 안테나의 사진이다. 두께가 1 mm인 스티로폼을 활용하여 인공자기도체와 안테나 사이의 간격을 구현하였다. 제작된 인공자기도체 기반 안테나의 전체 크기는 700×700×15.8 mm³이다.

그림 8은 시뮬레이션 및 측정된 인공자기도체 기반 안

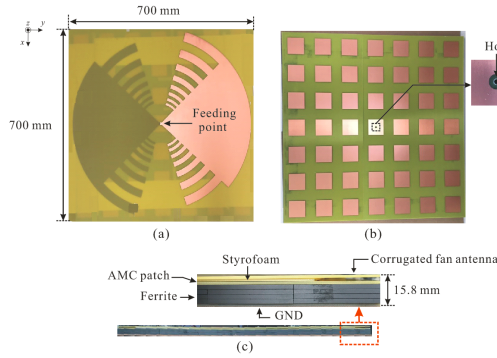


그림 7. 제작된 인공자기도체와 결합된 안테나의 사진: (a) corrugated fan 형상 다이폴 안테나, (b) 7×7 인공자기도체, (c) 측면도

Fig. 7. Photograph of the fabricated proposed antenna with the AMC: (a) corrugated fan shape dipole antenna, (b) 7×7 AMC, (c) side-view.

테나의 VSWR 특성이다. 시뮬레이션 및 측정된 3.5:1 이하 VSWR 대역폭 비는 각각 30:1 (10-300 MHz), 31:1 (10~310 MHz)이다. HF/VHF/UHF 대역에서 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 대체적으로 일치함을 확인할 수 있다.

그림 9는 시뮬레이션된 인공자기도체 기반 안테나의 15 MHz, 160 MHz, 260 MHz, 310 MHz에서의 복사 패턴이다. 인공자기도체의 영향으로 안테나의 주 방사 방향이 +z 축으로 형성되는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 일반 도체를 반사판으로 활용할 경우, 요구되는 $\lambda_L/4$ 보

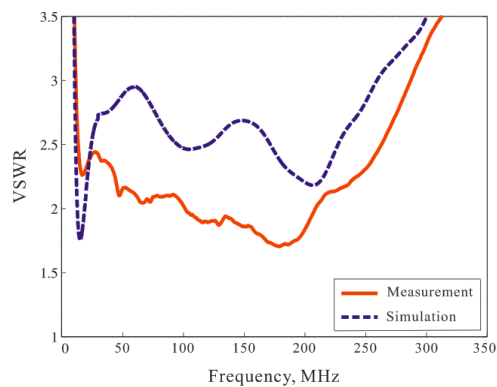


그림 8. 시뮬레이션 및 측정된 인공자기도체와 결합된 안테나의 VSWR 특성

Fig. 8. Simulated and measured VSWRs of the proposed antenna with the AMC.

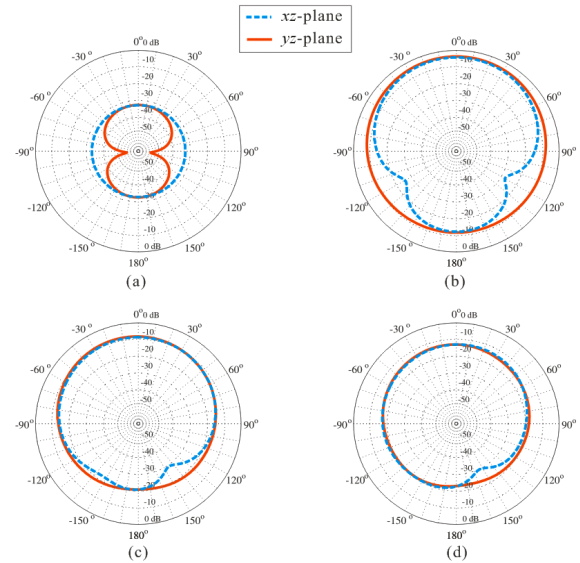


그림 9. 시뮬레이션된 인공자기도체와 결합된 안테나의 복사 패턴: (a) 15 MHz, (b) 160 MHz, (c) 260 MHz, (d) 310 MHz.

Fig. 9. Simulated radiation patterns of the proposed antenna with the AMC: (a) 15 MHz, (b) 160 MHz, (c) 260 MHz, (d) 310 MHz.

다 안테나와 가깝게 위치할 수 있어서 안테나의 성능 저하 없이 저자세 특성 구현이 가능한 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 시뮬레이션된 인공자기도체 기반 안테나의 +z축에서의 이득 특성이다. 설계된 안테나는 동작 주파수

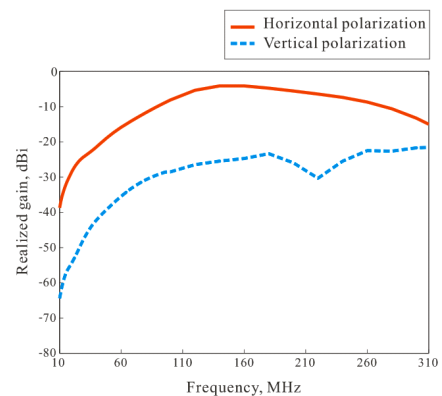


그림 10. 시뮬레이션된 인공자기도체와 결합된 안테나의 +z축에서의 이득 특성

Fig. 10. Simulated realized gain on the +z-axis of the proposed antenna with the AMC.

대역인 10~310 MHz에서 -38.7 dBi 에서 -4.1 dBi의 이득 특성을 갖고, 수평 편파 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

제안된 안테나의 성능을 검증하기 위해서 reference 안테나^[14]를 선정 후 제안된 안테나와 reference 안테나의 수신 전력을 측정 후, 결과를 비교하였다.

그림 11은 수신 전력 측정 환경 사진이다. 송신 안테나^[15]와 수신 안테나(제안하는 안테나, reference 안테나)와의 거리는 130 m이다. 수신 안테나들을 차량의 rooftop에 위치하였을 때의 수신 전력을 측정하였다. Reference 안테나는 데이터 시트를 참고하여 1,000×1,000 mm²의 크기를 갖는 스티로폼과 동테이프를 이용하여 구현된 접지면 위에 위치시킨 후 수신 전력을 측정하였다.

그림 12는 제안된 안테나와 reference 안테나의 측정된 수신 전력 특성이다. 송신 안테나에서 송신한 전력은 17 dBm이며, 10 MHz 간격으로 수신 전력을 측정하였다. 설계된 안테나와 reference 안테나의 수신 전력 차이는 안테나의 이득 특성 및 복사 패턴 특성으로 인해 발생하며, 측정된 결과로부터 reference 안테나와의 크기 차이를 고려하였을 때, 제안된 안테나는 양호한 수신 전력 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 페라이트가 적용된 인공자기도체 기반 저자세 HF/VHF/UHF corrugated fan 형상 다이폴 안테나

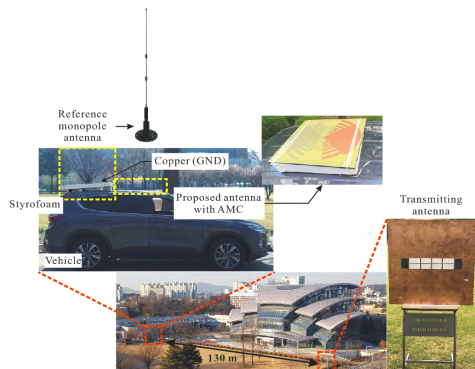


그림 11. 수신 전력 측정 환경
Fig. 11. Receiving power measurement setup.

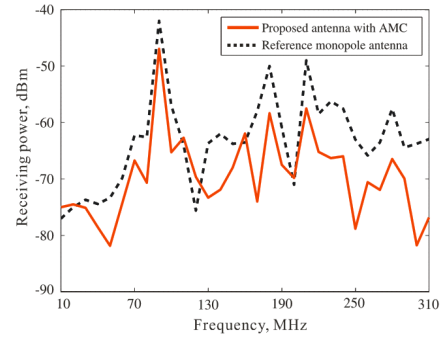


그림 12. 측정된 제안 안테나와 reference 안테나의 수신 전력 특성

Fig. 12. Measured receiving power levels of the proposed antenna with the AMC and reference antenna.

를 제안하였다. 높은 투자율을 갖는 페라이트를 적용하여 HF/VHF/UHF 대역에서 동작하는 소형 인공자기도체를 설계하였다. 그 후 15개의 arm을 갖는 corrugated fan 다이폴 안테나를 설계하였으며, 7×7개의 단위구조로 구성되어 있는 인공자기도체와 결합하였다. 설계된 인공자기도체 기반 안테나의 3.5:1 이하 VSWR 주파수 대역폭 비는 31:1(10~310 MHz)이며, 크기는 0.002×0.002×0.00005 λ_L이다. 따라서 제안된 인공자기도체 기반 안테나는 이동성 및 공기역학을 고려한 저자세 소형 HF/VHF/UHF 안테나를 요구하는 차량 등에 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] B. A. Austin, K. P. Murray, "The application of characteristic-mode techniques to vehicle-mounted NVIS antennas," *IEEE Antennas Propagation Magazine*, vol. 40, no. 1, pp. 7-21, Feb. 1998.
- [2] B. A. Austin, W. C. Liu, "Assessment of vehicle-mounted antennas for NVIS applications," *Proceedings of IEE Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 149, no. 3, pp. 147-152, Jun. 2002.
- [3] D. G. Lopez, M. Ignatenko, and D. S. Filipovic, "Low-profile Tri-band inverted-F antenna for vehicular applications in HF and VHF Bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4632-4639, Nov. 2015.

- [4] M. Ignatenko, D. S. Filipovic, "On the design of vehicular electrically small antennas for NVIS communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2136-2145, Mar. 2016.
- [5] J. Baker, H. S. Youn, N. Celik, and M. F. Iskander, "Low-profile multifrequency HF antenna design for coastal radar applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 1119-1122, Dec. 2010.
- [6] C. Wang, B. Yuan, W. Shi, and J. Mao, "Low-profile broadband plasma antenna for naval communications in VHF and UHF bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4271-4282, Mar. 2020.
- [7] X. Ding, B. Z. Wang, G. D. Ge, and D. Wang, "A broadband VHF/UHF double-whip antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 2, pp. 719-724, Feb. 2012.
- [8] R. Ma, T. Y. Shih, R. Lian, and N. Behdad, "Design of bandwidth-enhanced platform-mounted electrically small VHF antennas using the characteristic-mode theory," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2384-2388, Dec. 2018.
- [9] K. Ghaemi, R. Ma, and N. Behdad, "A small-aperture, ultrawideband HF/VHF direction-finding system for unmanned aerial vehicles," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 10, pp. 5109-5120, Jul. 2018.
- [10] H. L. Sneha, H. Singh, and R. M. Jha, "Mutual coupling effects for Radar Cross Section(RCS) of a series-fed dipole antenna array," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, pp. 1-20, Sep. 2012.
- [11] A. Foroozesh, L. Shafai, "Investigation into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beam shaping of low profile and conventional monopole antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 4-20, Nov. 2011.
- [12] Laird, "MP2106-0M0." Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/987/MP2106-0M0-1650723.pdf>
- [13] F. Costa, S. Genovesi, and, A. Monorchio, "On the bandwidth of high-impedance frequency selective surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1341-1344, Dec. 2009.
- [14] ALARIS, "OMNI-A0245." Available: <https://www.alaris-antennas.com/wp-content/uploads/2017/06/brochures/OMNI-A0245%20Version%201.2.pdf>
- [15] Super Antenna, "MP1DXTR80." Available: <http://newsuperantenna.com/>

권 오 현 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-2688-6623>



2016년 2월: 동국대학교 전자전기공학부 (공학사)
2016년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, 인공자기도체

황 금 철 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>



2001년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학석사)
2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학박사)
2006년 1월~2008년 7월: 삼성탈레스 기술연구소 책임연구원
2015년 3월~2018년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수
2018년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] 전자파 복사 및 산란 해석, 안테나, 최적화 알고리즘 등