

# 대칭형 인공자기도체 구조를 이용한 메타물질 특성의 고임피던스 표면 구현 및 SAR 특성 분석

이 승 우\*, 이 명 희\*, 이 승 엽\*\*, 김 남<sup>o</sup>

## Embodiment of High Impedance Surface of Meta-Material Characteristic Using Symmetrical AMC Structure and Its SAR Analysis

Seungwoo Lee\*, Moungh-Hee Lee\*, Seung-Yeop Rhee\*\*, Nam Kim<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 메타물질 특성을 구현하기 위하여 고임피던스 표면을 갖는 인공자기도체(AMC) 구조를 제안하였다. 설계한 AMC 구조는 3.2GHz에 적용하는 것을 목표로 하였으며, 특성 분석을 위해 다중의 AMC 구조를 일정하게 배열한 반사판으로 제작 및 측정하였다. AMC 반사판의 표면에 형성되는 높은 임피던스로 인하여 반사 특성이 좋아지고, 간섭 및 시스템의 크기를 줄이며, 안테나의 성능을 증가시킨다. 제안된 구조는 설계된 AMC와 접지면을 잇는 via hole을 사용하지 않고, 유전체의 두께와 유전율, 구조의 특성을 이용하여 고임피던스를 구현하였다. 기존의 연구된 via hole이 없는 구조와 비교하여 대역폭이 약 150% 증가하였다. 또한, 금속(PEC) 반사판과 동일한 반사특성을 보이는 대신, 안테나와 반사판 간의 거리를  $\lambda/10$ 까지 줄일 수 있다. 실험을 통하여 안테나와의 거리가 약 10mm 지점에서 방사 특성이 3dB 증가한 것을 확인하였다. 설계된 반사판은 반사거리가 작아 휴대용 무선 통신기기의 내부에 삽입이 가능하며, 안테나의 효율을 증가시키고, 후방 방사를 차폐함으로써 전자파인체흡수율을 94% 이상 획기적으로 감소시킬 수 있다.

**Key Words** : Artificial Magnetic Conductor, Meta-material, High Impedance Surface, Reflector, Specific Absorption Rate

### ABSTRACT

In this paper, we proposed new type of an artificial magnetic conductor(AMC) structure, which has a high impedance surface for realizing the meta-material characteristics. The designed AMC structure set a goal of 3.2GHz, and the reflector, which consists of periodically arrayed AMCs is fabricated and measured. The high impedance improves the reflection coefficient, decreases the system size and interference, and increases the antenna performance. The structure has embodied the high impedance by the thickness and relative permittivity of the dielectric substrate and the design configuration without the metallic via hole which connects the AMC to the GND. The bandwidth is 150% broader than the similar AMC structures. Also, the distance between the antenna and the AMC reflector is decreased by  $\lambda/10$  as working as the metal(PEC) reflectors. The antenna radiation

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A2044339)

• 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학부, swlee@osp.chungbuk.ac.kr, 정희원

o 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학부, namkim@chungbuk.ac.kr, 종신회원

\* 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학부, lmh-86@hanmail.net

\*\* 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부, yrsy@chonnam.ac.kr

논문번호 : KICS2013-07-291, 접수일자 : 2013년 7월 11일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 9일

characteristics are 3dB increased at 10mm away from reflector by measurement. The proposed reflector could be inserted in the portable mobile devices, and the antenna's performance has improved by the reflector. The specific absorption rate is dramatically decreased over 94% because the back radiation of the antenna is shielded.

### I. 서론

정보화 사회로의 발전이 급속도로 이루어지면서, 무선통신 시장의 발달과 이에 필요한 기기의 개발이 다양한 분야로 확대되었다. 무선통신기기가 통신이 가능하기 위해서는 하드웨어적인 부분과 소프트웨어적인 부분이 필요한데, 하드웨어적인 부분은 정보처리 시스템, 송수신 시스템, 안테나 등이 있다. 특히 안테나는 원하는 정보를 전송하고 수신하기 위하여 반드시 필요한 객체이며, 특정 주파수에 정보를 실어 공간을 통하여 정보를 송수신한다. 따라서 무선통신을 이용하기 위해서는 안테나가 반드시 필요하다.

인공자기도체는 메타물질 특성을 갖는 하나의 새로운 구조물이다. 메타물질은 자연 속에 존재하지 않는 물질로써, 연구 동거나 응용분야에 따라 특성을 제어하고, 인공적으로 창조가 가능한 물질이다. 인공자기도체 구조<sup>[1]</sup>를 이용하면, 구조의 표면에서 매우 높은 임피던스를 갖게 되며, 이 경우에 메타물질 특성이 나타나게 된다. 표면이 고임피던스를 갖기 위해서는 표면의 셀 주기가 매우 작고, 특정 주파수 대역에서 표면과의 전파가 이루어지지 않아야 한다. 이러한 특성의 구조를 안테나에 적용할 경우 여러 장점이 있는데, 간섭영향을 줄일 수 있고, 접지면의 크기를 감소시킬 수 있으며, 안테나의 방사 성능을 증가시킬 수 있다<sup>[2]</sup>.

인공자기도체 개발 초창기에 제시된 전형적인 구조의 모양은 버섯모양의 구조<sup>[1]</sup>인데, 이는 유전체를 사이에 두고 넓은 접지면과 AMC 셀을 전도체의 via hole을 이용하여 연결하였다. 하지만, 본 논문에서는 via hole을 사용하지 않고, 구조의 특성과 사용된 기판의 유전체의 특성(두께 및 유전율)을 이용한 대칭형 AMC 구조를 개발하였다. Via hole을 사용하지 않으며, RF 대역에서 사용이 가능한 구조는 기존에도 연구가 진행되었으나, 사용할 수 있는 대역폭이 좁다는 단점과 AMC의 특성을 분석하기 어렵다는 단점 때문에 폭넓게 연구되지 못하였다<sup>[2-11]</sup>.

AMC 구조의 특성을 평가하기 위해서 주로 두 대의 혼 안테나를 이용하여 반사특성을 분석하거나, 진파 흡수 특성을 이용한 분석 등을 이용하였는데, 본 연구에서는 반사판으로 응용하여 반사특성을 분석하였다. AMC의 공진주파수에 대한 안테나를 반사판 근처에 놓을 경우 안테나의 반사특성을 분석할 수 있는

데, 전형적인 PEC로 이루어진 반사판의 경우 파장의 1/4이 되는 거리에서 완벽한 반사특성을 보이는 반면, 제안된 AMC 구조를 이용한 반사판의 경우 파장의 1/10 정도 거리에서도 완벽한 반사특성을 보인다.

이를 무선통신기기에 적용할 경우 안테나와 거의 밀착된 상태에서도 방사가 가능하며, 안테나의 방사특성은 반사판의 영향으로 2배가 증가한다. 또한, 이러한 경우 안테나에서 인체 쪽으로 향하는 후방방사가 거의 차폐가 되기 때문에 안테나로부터 발생하는 전자파가 인체에 흡수되는 양이 대폭 감소되는 것을 모의실험을 통하여 확인하였다.

### II. AMC 구조의 설계

인공자기도체의 성능을 평가하는 대표적인 방법은 반사위상이  $-180^\circ \sim +180^\circ$ 로 변한다는 것이다. 여기에서, 반사위상이  $0^\circ$ 가 되는 지점이 공진 주파수로 결정된다. 또한, 대역폭은  $-90^\circ \sim +90^\circ$  범위에서 결정된다. 대역폭 내에서 임피던스는 공진점에서 실수부 및 허수부가 매우 큰 계수를 갖는다.

본 연구에서 설계된 인공자기도체는 패치와 접지면을 도전체로 연결하는 via hole이 없는 구조이며, 3.22GHz를 중심으로 약 12.4%의 대역폭(3~3.4GHz)을 갖고 동작하도록 설계되었다. 설계의 초기 단계에서는 일반적인 사각 패치에 슬롯을 추가하여 커패시턴스 성분을 만들어 줌으로써 특성을 변화시켜 원하는 대역폭과 공진 주파수 특성 등을 만족하도록 해주었다. 우선 3.2GHz에서 공진할 수 있도록 AMC 단위 셀의 크기를 계산하였으며, 일반화된 계산식은 다음과 같다.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{3.2GHz}}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

여기에서,  $\lambda_{3.2GHz}$ 는 3.2GHz에서의 파장이며,  $\epsilon_r$ 은 사용된 기판의 유전율이다. 이때 유전체의 두께는 0.5mm로 고정되어 계산된다. 우선 파장을 계산하게 되면, 3.2GHz에서 약 93.75mm가 되며, 이를 상기의 식에 대입하면 원하는 공진대역에서 패치 크기를 구할 수 있다. 계산된 결과 약 21mm 정도의 크기가 계

산되었다. 유전체의 두께를 조절하거나 유전율을 조절할 경우에도 공진주파수를 조절할 수 있다.

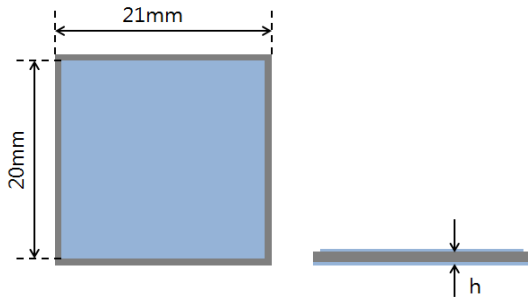


그림 1. 기본적인 사각형 AMC 구조  
Fig. 1. The basic rectangular AMC structure.

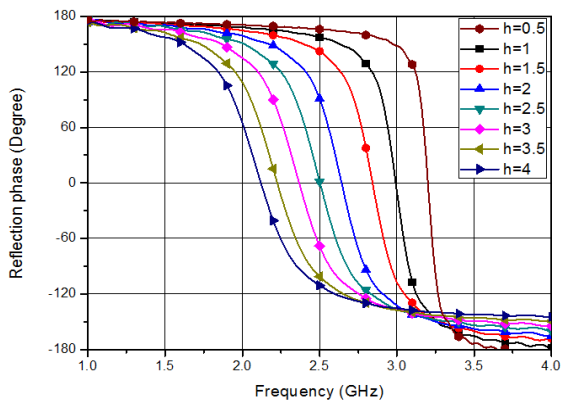


그림 2. AMC 두께에 따른 반사위상의 변화  
Fig. 2. Variation of reflection phase by the thickness of AMC.

여기에서 주의해야 할 사항은 두께(h)가 너무 얇아지면, 전체 AMC의 크기가 감소하기는 하나 공진 주파수가 높아지고, 대역폭이 좁아진다는 단점이 있다. 따라서 우선 계산된 크기인 21mm를 이용하고, 두께를 0.5mm부터 4.0mm까지 0.5mm 간격으로 변화시켜 원하는 공진주파수 대역과 최적의 대역폭을 보이는 값을 선택하였다. 그림 1은 기본적으로 설계된 AMC 패치의 모양이며, 그림 2에서는 AMC 유전체 두께에 따른 공진주파수가 변하는 결과를 보여주고 있다.

그림 2의 결과에서 알 수 있듯이, 두께에 따라 공진 주파수 대역과 대역폭이 동시에 변하는 것을 알 수 있다. 두께가 두꺼워질수록 대역폭은 넓어지고 공진주파수는 낮아졌으나, AMC의 두께가 증가된다는 단점이 있다. 반대로 두께가 너무 얇아지면, 대역폭이 너무 좁아지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 실제 제작을 고려하고 대역폭 특성이 10%가 넘게 계산된 2.6mm를 고려하였다.

그림 3은 AMC를 구성하는 기판 유전체의 유전율

에 따른 반사위상의 변화를 보여준다. 기판 유전체의 유전율이 낮아질수록 주파수 대역은 높아지고 유효 대역폭이 넓어지나, 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되는 유전율 4.6인 FR-4 기판을 사용하였다.

앞서 제시된 기본적인 AMC 구조에서 고임피던스 특성을 구현하기 위하여 사각형 내에 다중으로 슬롯을 만들었으며, 좌우 대칭(symmetric)이 되도록 설계하였다. 슬롯은 커패시터 성분을 만들어 공진 주파수를 결정할 수 있는데,  $1/\sqrt{LC}$ 의 식으로부터 낮아지게 된다. 즉, 커패시터 성분이 많아질수록 공진 주파수는 내려가게 되는 것이다. 최종적으로 제안된 사각슬롯 인공자기도체의 도체 패치의 크기는 20mm × 20mm이며, 단위 셀의 크기는 21mm × 21mm이다. 패치와 패치 간의 간격이 1mm이며, 두께가 2.6mm인 FR4 기판을 사용하였다.

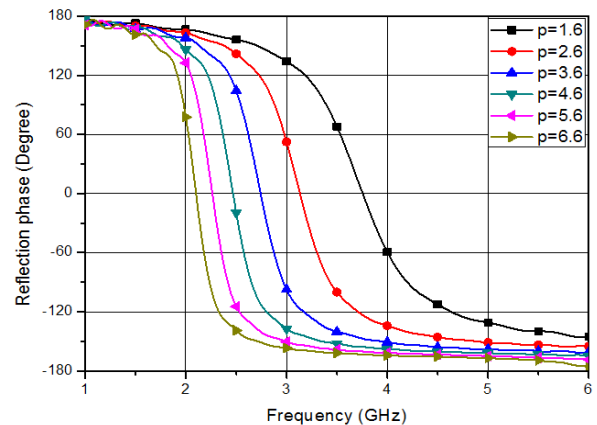


그림 3. 기판 유전율에 따른 반사위상의 변화  
Fig. 3. Variation of reflection phase by the relative permittivity of substrate.

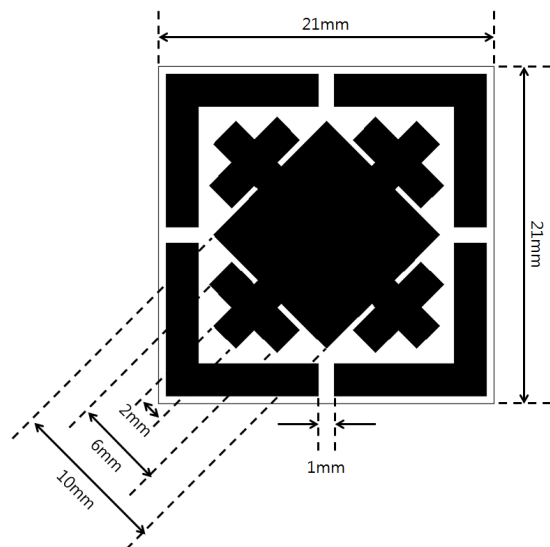


그림 4. 설계된 대칭형 인공자기도체 구조  
Fig. 4. The designed symmetrical AMC structure.

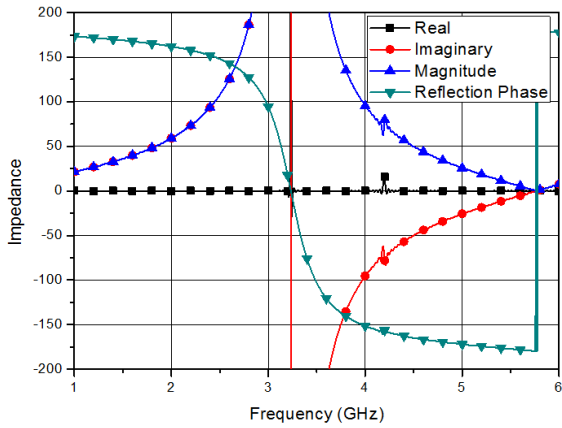


그림 5. 제안된 AMC 구조의 반사위상 및 임피던스 변화  
Fig. 5. Variation of reflection phase and impedance of the proposed AMC structure.

그림 5는 설계된 대칭형 AMC의 반사위상의 변화 및 임피던스의 변화를 보여주고 있다. 그림 5를 통하여 대역폭을 결정할 수 있으며, 공진주파수에서 임피던스가 매우 큰 것을 알 수 있다.

그림 6에서는 금속(PEC) 반사판을 안테나로부터 파장(wavelength)의 1/4 지점과 1/10 지점에 두었을 때 반사손실을 보여준다. 1/4 지점에서는 완벽하게 동위상으로 반사가 발생하여 안테나 성능이 좋아지는 것을 확인하였다. 반면, 안테나와 반사판의 간격이 좁아질수록 위상이 반대가 되어 1/10 지점에서는 거의 반사손실이 발생하지 않는다. 이것은 반사되어 나오는 파의 위상이 완전히 역위상이 되어 전파 특성을 잃어버리는 것이다.

설계된 구조의 특성을 분석하기 위하여 구조를 주기적으로 배열하여 반사판으로 구현하였고, PEC 반사판과 성능을 비교 분석하였다. 특성을 비교하기 위해 사용된 안테나는 연구실에서 제작된 약 3.2GHz 대역에서 공진하는 다이폴 안테나이다. 그림 7은 안테나의 특성과 일반 PEC 반사판 및 AMC 반사판이 있는 경우의 특성을 보여준다. PEC 반사판은 안테나와의 간격이  $\lambda/4$  정도 이격되어 있으나, AMC 반사판은  $\lambda/10$  정도 이격되어 있다. 그림 6을 통하여 이미 확인하였듯이 일반적인 PEC 반사판이라면  $\lambda/10$  이격할 경우 반사손실이 거의 나타나지 않으나, AMC 반사판에서는 동위상으로 완벽히 반사가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

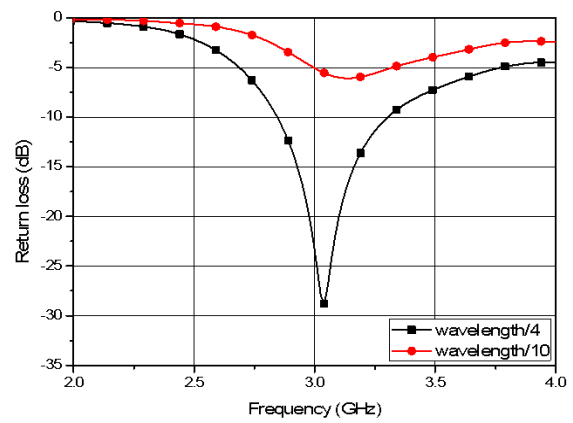


그림 6. PEC 반사판과 안테나 사이의 거리에 따른 반사손실  
Fig. 6. Return loss by the distance between the PEC reflector and the antenna.

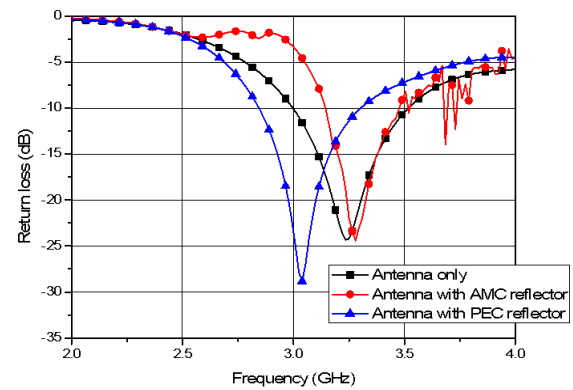


그림 7. AMC 반사판과 PEC 반사판을 적용한 안테나 반사손실 비교  
Fig. 7. Comparison of the antenna return losses by applying the AMC reflector and PEC reflector.

### III. 전자파인체영향 분석

다이폴 안테나를 내장한 가상의 무선기기로부터 발생하는 전자파의 인체영향을 분석하기 위하여 상용 시뮬레이션 툴인 SEMCAD-X를 사용하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험에 사용된 팬텀과 가상의 무선기기는 다음 그림 8에서 보여주고 있다.

인체팬텀은 인체의 모든 조직을 내포하는 성인 남성 모델로 하였으며, 무선기기의 크기는 상용 태블릿 PC와 유사한 185mm(가로) × 240mm(세로) × 20mm(두께)이며, 삽입된 AMC 반사판의 크기는 84mm × 126mm이다.

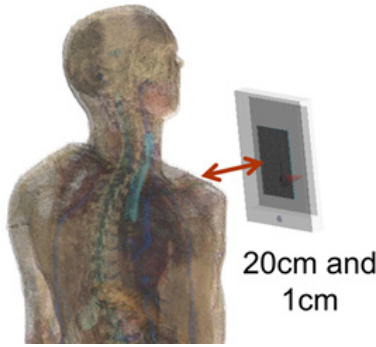


그림 8. 모의실험에 사용된 인체팬텀과 휴대용 무선기기  
 Fig. 8. The human phantom and the portable wireless devices used for simulation.

인체팬텀으로부터 무선기기는 일반적으로 사용할 때의 이격거리 20cm와 가장 근접하여 사용되는 경우의 이격거리 1cm에서 인체영향 분석을 실시하였다. AMC 반사판은 무선기기 내부에 삽입하였으며, 안테나와 인체팬텀 사이에 위치하여 반사판의 유무에 따라 전자파흡수율(SAR)을 분석하였다. 국내의 SAR(Specific Absorption Rate) 기준은 조직 1g을 평균으로 하여 1.6W/kg을 초과하지 못하도록 규정하고 있다. 모의실험 결과를 다음의 표 1에서 정리하였는데, 반사판을 삽입함으로써 94% 정도의 전자파가 차폐되었다. 이는 반사판을 삽입함으로써 후방(인체 방향)으로 방사되는 것을 저감시키기 때문이다. 일반 PEC 반사판도 동일한 효과를 낼 수 있지만, 앞서 언급하였듯이 PEC 반사판은  $\lambda/4$ 의 이격거리를 유지해야 하므로 본 논문에서 제안한 AMC 반사판에 비해 용적용량이 크다는 단점이 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 메타물질 특성을 구현하기 위하여 고임피던스 표면을 형성할 수 있는 인공자기도체(AMC) 구조를 설계하고, 특성을 분석하였다. 설계한 인공자기도체 구조는 3.2GHz 대역에 적용이 가능하며, 설계된 AMC 구조를 주기적으로 배열하여 반사판으로 응용하여 특성을 분석하였다. 제안된 인공자기도체 구조는 전도체의 via hole을 사용하지 않고, 상판의 구조 특성을 이용하여 고임피던스 표면을 구현하였다. 따라서 기존의 via가 있는 버섯모양의 구조와 비교하여 유사한 대역폭 특성을 얻었으며, via가 없는 구조와 비교하여 대역폭이 약 150% 증가하였다.

표 1. AMC 반사판 유무에 따른 SAR 분석 결과  
 Table 1. Analyzed SAR results by presence of AMC reflector.

	Separation	
	1cm	20cm
AMC Reflector exclusion	0.516W/kg	0.073W/kg
AMC Reflector inclusion	0.029W/kg	0.004W/kg
Note	94.4% shield	94.5% shield

제안된 인공자기도체 구조를 반사판으로 응용한 결과, 안테나와의 거리가  $\lambda/10$ 에서도 완벽한 반사 특성을 보였다. 또한, 방사패턴은 약 3dB 증가하여, 완벽한 반사가 이루어지고 있음을 보였다.

가상의 무선기기에 적용하여 전자파 인체영향을 분석한 결과, 기기로부터 발생하는 전자파가 인체로 흡수되는 SAR 값을 약 94% 이상 차폐시켰다. 추후 실제 무선기기에 적용하여 인체영향을 분석하거나, 전자파 흡수체로 응용할 수 있는 연구가 필요하다.

References

[1] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.

[2] S. Lee, N. Kim, and S. Rhee, "Embodiment of high impedance surface using artificial magnetic conductor with periodically rectangular lattices," *Microwave Optical Technol. Lett.*, vol. 55, no. 2, pp. 366-368, Feb. 2013.

[3] J. R. Sohn, K. Y. Kim, H. S. Tae, and H. J. Lee, "Comparative study on various artificial magnetic conductors for low-profile antenna," *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, vol. 61, pp. 27-37, June 2006.

[4] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang, and J. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas," *IEEE*

*Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 209-215, Jan. 2005.

[5] J. Sarrazin, A. C. Lepage, and X. Begaud, "Dual-band artificial magnetic conductor," *Applied Physics A*, vol. 109, no. 4, pp. 1075-1080, Dec. 2012.

[6] S. K. Hampel, O. Schmitz, O. Klemp, and H. Eul, "Design of Sievenpiper HIS for use in planar broadband antennas by means of effective medium theory," *Advances in Radio Sci.*, vol. 5, pp. 87-94, June 2007.

[7] G. Niyomjan and Y. Huang, "Investigation of high impedance surface structure with different patch shapes using a new improved enhanced effective medium method," in *Proc. Int. Workshop Antenna Technol, 2008 (iWAT'08)*, pp. 187-190, Chiba, Japan, Mar. 2008.

[8] M. Imbert, P. J. Ferrer, J. M. Gonzalez-Arbesu, and J. Romeu, "Design of a bidirectional metamaterial spacer at 2.45 GHz," in *Proc. European Antenna Propagation (EuCAP'10)*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Apr. 2010.

[9] S. Lee, N. Kim, Y. Shin, and J. Jang, "Study on reduction of specific absorption rate of 2.4 GHz dipole antenna by using novel artificial magnetic conductor's reflector," in *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC 2012)*, pp. 592-594, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 2012.

[10] M. K. T. Al-Nuaimi and W. G. Whittow, "Novel Planar AMC for Low Profile Antenna Applications," in *Proc. Loughborough Antenna Propagation Conf. (LAPC 2009)*, pp. 145-148, Loughborough, U.K., Nov. 2009.

[11] I. Tomeo-Reyes and E. Rajo-Iglesias, "Comparative study on different AMC ground planes and its applications to low profile wire antennas," in *Proc. IEEE Antennas Propagation Soc. Int. Symp. 2009 (APSURSI'09)*, pp. 1-4, Charleston, U.S.A., June 2009.

[12] S. Lee, S. Y. Rhee, P. Y. Kim, and N. Kim, "Realization of high impedance surface characteristics using a periodically transformed

artificial magnetic conductor structure and reduction technique of specific absorption rate," *J. Electromagnetic Eng. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 113-119, June 2013.

[13] SPEAG, SEMCAD X, Retrieved August 1, 2012 from [www.speag.com](http://www.speag.com).

**이 승 우 (Seungwoo Lee)**



2003년 2월 충북대학교 정보통신공학과 학사  
 2006년 2월 충북대학교 정보통신공학과 석사  
 2012년 2월 충북대학교 정보통신공학과 박사  
 2012년 7월~현재 충북대학교

리서치펠로우

<관심분야> 안테나 설계, EMI/ EMC 및 전자파 인체 영향, 무선전력전송



**이 명 희 (Moungh-Hee Lee)**  
 1993년 2월 충북대학교 정보통신공학과 학사  
 2011년 2월~현재 2월 충북대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> 안테나 설계, EMI/ EMC 및 전자파 인체 영향

**이 승 엽 (Seung-Yeop Rhee)**



1986년 2월 연세대학교 전자공학과 학사  
 1988년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
 1993년 8월 연세대학교 전자공학과 박사  
 1993년 9월~2006년 2월 국립

여수대학교 전자통신공학과 교수

2004년 7월~2005년 8월 Syracuse 대학교 방문교수  
 2006년 3월~현재 국립전남대학교 전자통신공학과 교수

<관심분야> 안테나 해석 및 설계, 초고주파 회로설계, 전자파 해석,

김 남 (Nam Kim)



1981년 2월 연세대학교 전자  
공학과 학사

1983년 2월 연세대학교 전자  
공학과 석사

1988년 8월 연세대학교 전자  
공학과 박사

1992년 8월~1993년 8월 미국

Stanford 대학교 방문교수

2000년 3월~2001년 2월 미국 California  
Technology Institute 방문교수

1989년~현재 충북대학교 전자정보대학 교수

1997년~현재 컴퓨터정보통신연구소 참여연구원

1999년~2000년 컴퓨터정보통신연구소 연구소장

1996년~현재 한국전자과학회 전자장과 생체관계위  
원회 위원장

1999년~현재 한국통신학회 평의원/이사

2000년~현재 한국전자과학회 평의원/이사

2006년~2009년 BEMS(Bioelectromagnetics Society)  
이사

2008년~2012년 방송통신위원회 방송통신국가표준  
심의회 위원

2008년~현재 국립전파연구원 자문위원회 위원

2012년~현재 미래창조과학부 자체평가위원회 위원

<관심분야> 이동 통신 및 전파전파, 마이크로파 전  
송선로 해석, EMI/EMC 및 전자파 인체보호 규  
격