

2.45/5.8 GHz 무선전력전송 시스템에 적용 가능한 광대역 고이득 인쇄형 안티포달 비발디 안테나 설계

Design of Broadband High-Gain Antipodal Vivaldi Antenna for 2.45/5.8 GHz Wireless Power Transmission Systems

엄성식 · 강은정 · 이준용* · 추호성

Sungsik Ohm · Eunjung Kang · Jun-Yong Lee* · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 2.45 GHz 및 5.8 GHz의 무선전력전송 시스템에 적용가능한 광대역 고이득 인쇄형 안티포달 비발디 안테나 설계를 제안한다. 제안된 안테나의 방사체는 두 개의 flare 및 diagonal slot으로 구성되며, diagonal slot은 이득을 개선하기 위해 flare의 양 끝에 삽입된다. Diagonal slot은 원하지 않는 방향으로의 복사 이득을 감소시켜 2.45 GHz에서의 전면방향 이득을 4.1 dB 증가시켰다. 추가적으로, 두 개의 위쪽 flare 사이에 director를 두어 안테나의 중앙부에 E-field를 집중시켜 5.8 GHz에서 전면방향 이득을 1.5 dB 개선하였다. 무반사실에서 제안된 안테나의 성능을 측정하였으며, 반사계수는 ISM band인 2.45 GHz 및 5.8 GHz에서 모두 -10 dB 이하임을 확인하였다. 또한, 전면방향 이득은 각각 2.45 GHz에서 8.31 dBi, 5.8 GHz에서 13.1 dBi임을 확인하였다.

Abstract

This paper proposed a broadband, high-gain antipodal Vivaldi antenna for 2.45 GHz and 5.8 GHz wireless power transmission systems. The proposed antenna consists of a radiator with two flares and diagonal slots which are inserted at the edges of the radiator to improve the bore-sight gain. The diagonal slots reduce radiation gain in undesired directions, thus enhancing the bore-sight gain by 4.1 dB at 2.45 GHz. The directors between two upper flares concentrate the E-field, resulting in increased bore-sight gain at 5.8 GHz. The performance of the proposed antenna is measured in a full anechoic chamber, and it is confirmed that reflection coefficients are less than -10 dB in ISM bands, with bore-sight gains of 8.31 dBi and 13.1 dBi at 2.45 GHz and 5.8 GHz, respectively.

Key words: Antipodal Vivaldi, Broadband, High-Gain, Wireless Power Transmission

「이 연구는 2015년도 및 2017년도 정부(교육부, 과학기술정보통신부와 이공분야 기초연구사업)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A5A1015596, 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*홍익대학교 컴퓨터공학과(Information and Computer Engineering, Hongik University)

· Manuscript received December 4, 2022 ; Revised January 7, 2023 ; Accepted January 30, 2023. (ID No. 20221204-019S)

· Corresponding Author: Jun-Yong Lee (e-mail: jlee@hongik.ac.kr)

I. 서 론

무선전력전송기술은 모바일, 차량, 의료기기 응용분야에서 무선으로 전원을 공급하기 위한 수단으로 활용되고 있다^{[1]~[4]}. 특히, 마이크로파 방식의 무선전력전송기술은 ISM(industry-science-medical) band인 2.45 GHz와 5.8 GHz를 주로 사용하며, 배열 안테나 설계를 통해 수 m의 원거리에 있는 수신기에, 원하는 방향으로 전력전송이 가능하다는 장점이 있다^[5]. 이러한 ISM band에서 운용되는 다양한 어플리케이션에 적용하기 위해, 마이크로파 방식 무선전력전송시스템에서는 2.45 GHz 및 5.8 GHz에서 동작하는 광대역 특성의 안테나 설계가 요구된다. 광대역 특성을 도출하기 위해 슬랏을 삽입한 패치 안테나^[6], coplanar 도파관을 적용한 LPDA^[7], 디스크가 장착된 모노폴을 이용한 루프 안테나^[8] 등의 선행 연구들이 수행되었다. 하지만 전송거리가 멀어짐에 따른 자유공간의 높은 전력손실을 고려한 무선전력전송용 고이득 광대역 안테나 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 논문에서는 2.45 GHz 및 5.8 GHz의 무선전력전송 시스템에 적용가능한 광대역 고이득 인쇄형 안티포달 비발디 안테나 설계를 제안한다. 제안된 안테나의 방사체는 두 개의 flare 및 diagonal slot으로 구성된다. Diagonal slot을 통해 2.45 GHz에서의 전면방향 이득을 개선하고, 추가적으로 director를 적용하여 5.8 GHz에서 전면방향 이득을 개선한다.

II. 안테나 설계 및 성능 분석

그림 1(a)와 그림 1(b)는 제안된 광대역 고이득 인쇄형 안티포달 비발디 안테나의 형상을 나타내며, 높이가 l_1 인 안티포달 비발디 방사체의 두 개의 flare는 너비 w , 두께 t , 길이 l 인 Rogers RO4350B 기판($\epsilon_r=3.48$, $\tan \delta=0.0037$)의 전면과 후면에 각각 인쇄되어 있다. 각 flare의 위쪽 곡선은 $f_1(z)$, 아래쪽 곡선은 $f_2(z)$ 의 함수로 설계하였으며, 식 (1) 및 식 (2)에 나타내었다. 이때, k_1 과 k_2 는 각 곡선의 지수를 의미하며, 식 (3) 및 식 (4)를 통해 계산하여 함수에 적용하였다. 전면 flare는 너비가 w_f 인 급전라인과 연결되

$$f_1(z) = \frac{1}{2} a_1 e^{k_1 z} - \frac{a_1}{2} - \frac{w_f}{2}, \quad (0 \leq z \leq l_1) \quad (1)$$

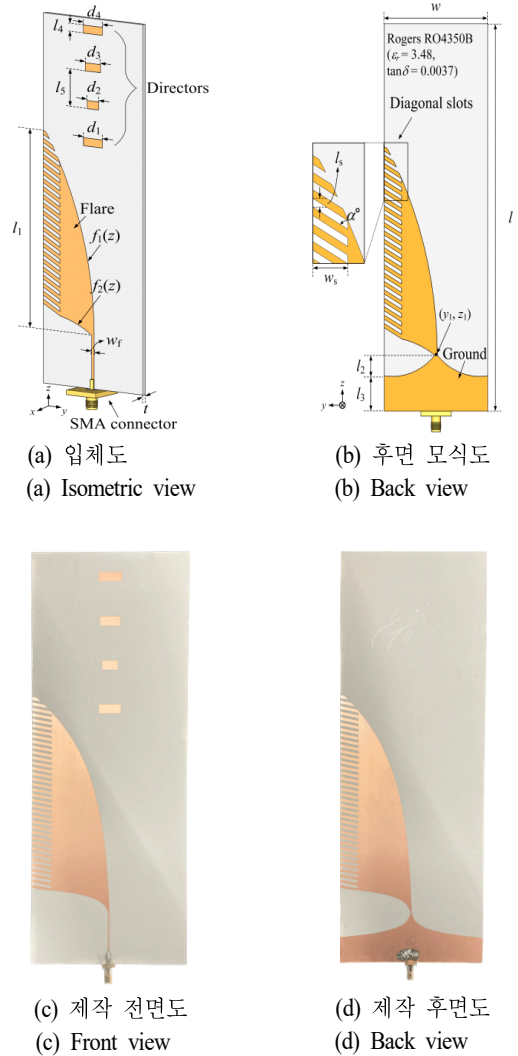


그림 1. 제안된 안테나 형상

Fig. 1. Geometry of the proposed antenna.

$$f_2(z) = \frac{1}{2} a_2 e^{k_2 z} - \frac{a_2}{2} - \frac{w_f}{2}, \quad (0 \leq z \leq l_2) \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{1}{l_1} \ln \left(\frac{w + w_f + a_1}{a_1} \right) \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{1}{l_2} \ln \left(\frac{w - w_f + a_2}{a_2} \right) \quad (4)$$

어있으며, 후면 flare는 ground와 연결되어 각각 SMA connector를 통해 급전된다. 전면과 후면 flare의 양 끝에

너비와 높이가 각각 w_s , l_s 이며, z 축을 기준으로 α 만큼 기울어진 diagonal slot 45개를 삽입하여 방사체의 바깥쪽 전류를 안쪽으로 유도하여 원하지 않는 방향으로의 복사이득을 감소시켜 2.45 GHz에서 이득을 개선하였다^{[9],[10]}. 안티포달 비발디의 전면부 중앙에 높이가 l_4 이고, 너비가 각각 d_1 , d_2 , d_3 , d_4 인 director 네 개를 l_5 의 배열 간격으로 두어 안테나의 중앙부에 E-field를 집중시켜 5.8 GHz에서 이득을 개선하였다. 제안된 안테나는 CST studio suite로 설계하였으며^[11] 안테나의 자세한 설계변수는 표 1에 나타내었으며, 그림 1(c)와 그림 1(d)는 설계된 안테나를 제작한 사진을 보여준다.

그림 2는 제안된 안테나의 측정 및 시뮬레이션 반사계수를 보여주며, 실선은 전파 무반사실에서의 측정값, 점선은 시뮬레이션값을 나타낸다. 2.45 GHz에서 -12.7 dB, 5.8 GHz에서 -18.9 dB의 측정값을 가지며, 시뮬레

표 1. 제안된 안테나 설계 변수

Table 1. Parameters for the proposed antenna.

Parameters	Values
w	80 mm
w_s	10 mm
w_f	0.7 mm
l	227 mm
l_1	150 mm
l_2	13.5 mm
l_3	14.5 mm
l_4	4.8 mm
l_5	24 mm
l_s	1.5 mm
d_1	11 mm
d_2	8 mm
d_3	10 mm
d_4	12 mm
t	0.8 mm
(y_1, z_1)	(0 mm, 0 mm)
a_1	1.5
a_2	0.8
α	81.5°

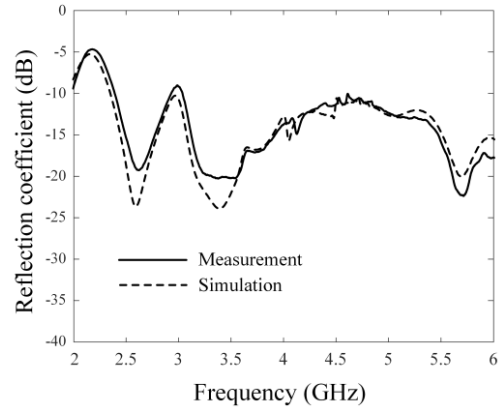


그림 2. 제안된 안테나의 반사계수 특성

Fig. 2. The reflection coefficients of the proposed antenna.

이션값은 2.45 GHz에서 -14.9 dB, 5.8 GHz에서는 -17.6 dB로 측정값과 유사한 경향성을 가진다.

그림 3은 제안된 안테나의 전면방향 이득을 나타낸다. ‘+’ 마커는 전파 무반사실에서 측정 결과를 보여주며, 실선은 시뮬레이션값을 의미한다. 2.45 GHz에서 8.31 dBi, 5.8 GHz에서 13.1 dBi의 측정값을 가지며, 시뮬레이션값은 2.45 GHz에서 8.69 dBi, 5.8 GHz에서 13 dBi로 측정과 시뮬레이션의 경향이 서로 매우 유사함을 확인하였다.

ISM band에 해당하는 2.45 GHz에서의 전면방향의 이득을 개선하기 위해, diagonal slot의 유무에 따른 이득 비교를 그림 4에 나타내었으며, 실선과 점선은 diagonal slot

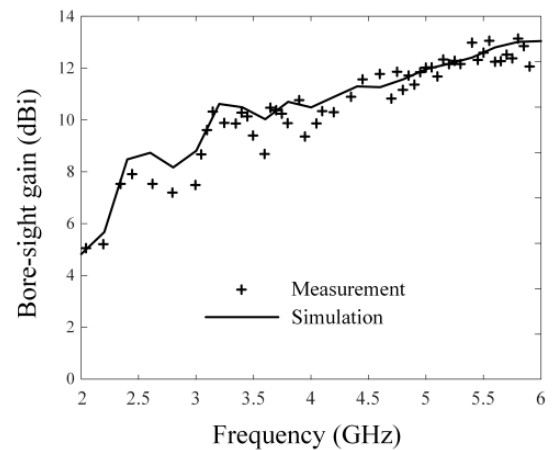


그림 3. 제안된 안테나의 전면방향 이득

Fig. 3. Bore-sight gain of the proposed antenna.

유무에 따른 안테나의 전면방향 이득을 각각 보여준다. Diagonal slot이 있는 경우 전면방향 이득은 8.2 dBi이며, 없는 경우에는 4.1 dBi를 가져 2.45 GHz에서 diagonal slot을 통해 이득이 4.1 dB 증가하는 것을 확인하였다.

추가적으로 5.8 GHz에서 전면방향 이득을 개선하기 위해 디렉터를 삽입하였으며, 디렉터의 너비 d 에 따른 전면방향 이득을 그림 5에서 보여준다. 디렉터의 길이를 5 mm에서 25 mm로 변화시키며, 2.45 GHz와 5.8 GHz에서 전면방향 이득변화를 관찰하였다. 그 결과, 2.45 GHz에서는 전면방향 이득이 최대 0.5 dB 변화하였으며, 반면 5.8 GHz에서는 최대 6.4 dB 변화하여, 디렉터의 효과가 2.45

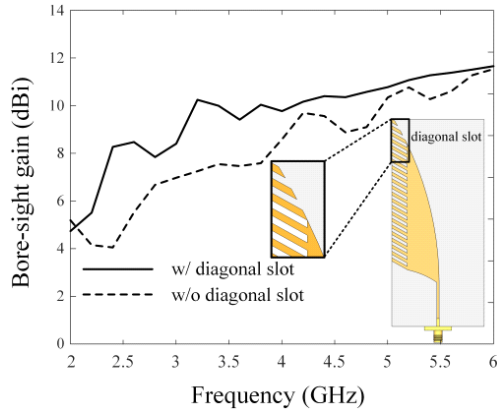


그림 4. Diagonal slot 유무에 따른 전면방향 이득
Fig. 4. Bore-sight gain depending on diagonal slot.

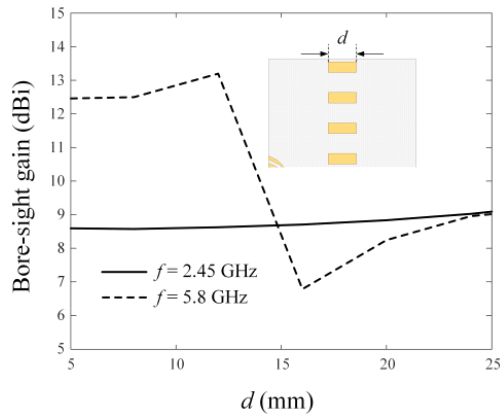


그림 5. d 의 길이 변화에 따른 전면방향 이득
Fig. 5. Bore-sight gain according to the length of d .

GHz보다 5.8 GHz에서 더 큰 것을 확인하였다. 이러한 분석을 바탕으로 5.8 GHz에서의 이득을 중점적으로 개선하기 위해 각 디렉터 길이는 유전 알고리즘을 통해 최적화하여 5.8 GHz에서 전면방향 이득을 1.5 dB 향상시켰다^[12]. 디렉터 유무의 따른 5.8 GHz에서의 시뮬레이션 반사계수는 각각 -17.7 dB와 -16.7 dB로 1 dB 감소하였다. 또한 디렉터 유무에 따른 2.45 GHz에서의 시뮬레이션 전면방향 이득이 서로 같아 디렉터의 영향이 2.45 GHz에서 적은 것을 다시 확인하였다.

그림 6은 제안된 안테나의 방사패턴을 나타낸다. 실선은 측정값, 점선은 시뮬레이션 값을 보여주며, 2.45 GHz에서의 zx -평면 측정 및 시뮬레이션 반전력빔폭은 각각 89.6° , 96.8° 이며, 동일하게 zy -평면에서의 반전력빔폭은 각각 43° , 46.1° 이다. 5.8 GHz에서의 zx -평면 측정 및 시뮬레이션 반전력빔폭은 각각 39.3° , 42.9° 이며, zy -평면에서의 반전력빔폭은 각각 31° , 32.1° 를 가져 측정과 시뮬레이

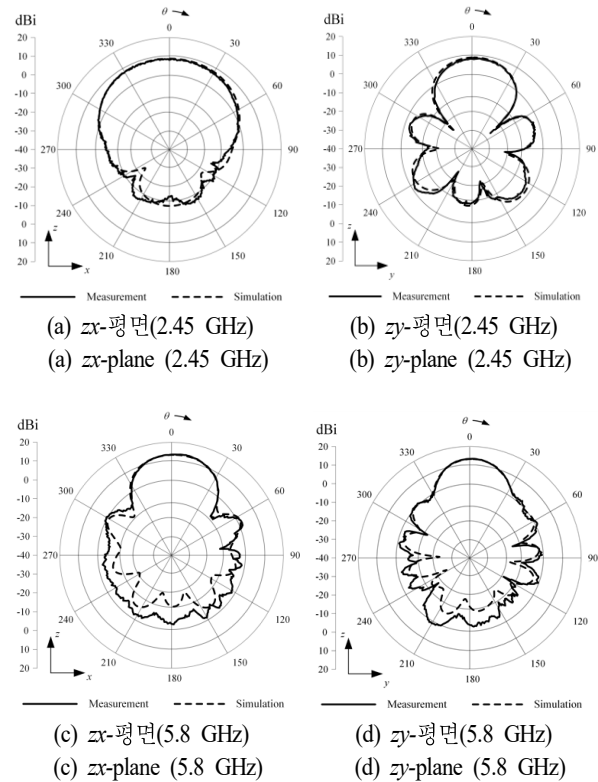


그림 6. 제안된 안테나의 방사 패턴
Fig. 6. Radiation pattern of the proposed antenna.

표 2. 제안된 안테나의 비교

Table 2. Comparison of the proposed antenna.

Ref.	Dimension (mm ³)	Frequency (GHz)	Bore-sight gain (dBi)	Reflection coefficient (dB)
[13]	77×86×0.25	2.5–57	11 (at 5.8 GHz)	–10 dB (at 5.8 GHz)
[14]	16×33.8×0.25	26.5–40	N/A	N/A
[15]	40.1×42.6×1.4	3.1–10.6	2.3 (at 5.8 GHz)	–12 dB (at 5.8 GHz)
Proposed	80×227×0.76	2.4–8	8.69 (at 2.45 GHz) 13 (at 5.8 GHz)	–17.7 dB (at 5.8 GHz)

선 결과가 유사함을 확인하였다.

기존 설계된 비발디 안테나와 비교하여 사이즈, 동작 주파수, 전면방향이득, 5.8 GHz에서의 반사계수를 비교하여 표 2로 정리하였고, 특히 제안된 안테나의 2.45 GHz와 5.8 GHz에서의 전면방향이득이 기존의 안테나 대비 높아 무선전력전송용 시스템에 적용 가능함을 확인하였다^{[13]~[15]}.

III. 결 론

본 논문에서는 2.45 GHz 및 5.8 GHz의 무선전력전송 시스템에 적용가능한 광대역 고이득 인쇄형 안티포달 비발디 안테나 설계를 제안하였다. 제안된 안테나의 방사체는 두 개의 flare 및 diagonal slot으로 구성되며, 각 방사체의 양 끝에 diagonal slot을 삽입하여 원하지 않는 방향으로의 복사이득을 감소시켜 2.45 GHz에서 전면방향 이득 개선을 하였다. 추가적으로, 두 flare 사이에 director를 두어 E-field를 전면방향으로 집중시켜 5.8 GHz에서의 이득을 개선하였다. 제안된 안테나를 제작 측정한 결과 2.45 GHz 및 5.8 GHz에서 반사계수는 모두 –10 dB이하의 성능을 보인다. 또한, 전면방향 이득은 diagonal slot과 director를 통해 2.45 GHz에서 4.1 dB 증가하여 8.31 dBi, 5.8 GHz에서는 1.5 dB 증가하여 13.1 dBi로 확인되어 고이득 특성을 가지므로, 제안된 안테나가 마이크로파방식 무선 전력전송 시스템에 적용가능함을 확인하였다.

References

- [1] G. Kim, B. Lee, "Design of wireless power and information transfer systems considering figure of merit for information," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 4, pp. 241-247, Oct. 2020.
- [2] S. Li, C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, Mar. 2015.
- [3] J. Park, D. Kim, K. Hwang, H. H. Park, S. I. Kwak, and J. H. Kwon, et al., "A resonant reactive shielding for planar wireless power transfer system in smartphone application," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 2, pp. 695-703, Apr. 2017.
- [4] T. Campi, S. Crucianim, V. D. Santis, F. Maradei, and M. Feliziani, "Near field wireless powering of deep medical implants," *Energies*, vol. 12, no. 14, p. 2720, Jul. 2019.
- [5] J. Hur, H. Choo, "Design of a small array antenna with an extended cavity structure for wireless power transmission," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 1, pp. 9-15, Jan. 2020.
- [6] S. L. S. Yang, A. A. Kishk, and K. F. Lee, "Frequency reconfigurable U-slot microstrip patch antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 127-129, May 2019.
- [7] G. A. Casula, P. Maxia, G. Montisci, G. Mazzarella, and F. Gaudiomonte, "A printed LPDA fed by a coplanar waveguide for broadband applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1232-1235, Sep. 2013.
- [8] W. T. Hsieh, J. F. Kiang, "A small broadband folded-loop antenna with disk-loaded monopole," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 1248-1250, 2010.
- [9] C. Jarufe, R. Rodriguez, V. Tapia, P. Astudillo, D. Monasterio, and R. Molina, et al., "Optimized corrugated

- tapered slot antenna for mm-wave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1227-1235, Mar. 2018.
- [10] S. Sugawara, Y. Maita, K. Adachi, K. Mori, and K. Mizuno, "A mm-wave tapered slot antenna with improved radiation pattern," in *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Denver, CO, Jun. 1997, pp. 959-962.
- [11] Dassault Systems, "CST studio suite 2020," 2020. Available: <https://www.3ds.com/ko/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [12] Y. R. Samii, E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1999.

엄 성 식 [홍익대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9936-6958>



2020년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2021년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] 재밍 시스템, 배열안테나, 무선전력전송, UWB 방향탐지

- [13] J. Eichenberger, E. Yetisir, and N. Ghalichechian, "High-gain antipodal Vivaldi antenna with pseudoelement and notched tapered slot operating at (2.5 to 57) GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 7, pp. 4357-4366, Mar. 2019.
- [14] K. Yang, M. H. Hoang, X. Bao, P. McEvoy, and M. J. Ammann, "Dual-stub Ka-band Vivaldi antenna with integrated bandpass filter," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, no. 5, pp. 668-671, Apr. 2018.
- [15] A. Z. Hood, T. Karacolak, and E. Topsakal, "A small antipodal Vivaldi antenna for ultrawide-band applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 656-660, Mar. 2008.

이 준 용 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-4041-9565>



1986년 2월: 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
1988년 2월: 미국미네소타주립대 EECS (공학석사)
1996년 5월: 미국미네소타주립대 EECS (공학박사)
1996년 5월~1997년 2월: 미국 IBM 연구원

1997년 3월~현재: 홍익대학교 컴퓨터공학과 교수
[주 관심분야] 컴퓨터시스템 응용, 임베디드 시스템, 실시간 프로세싱 등

강 은 정 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0265-1144>



2016년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
2016년 7월~2017년 10월: 한국전자기술연구원 위촉연구원
2017년 11월~2018년 6월: (주)파워리퍼블릭 연구원
2020년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2020년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 배열안테나설계, 전파환경분석, 항재밍시스템, 무선전력전송, UWB 안테나

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수
[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나