

선형 및 원형편파 특성을 갖는 5G 단말용 28 GHz 배열안테나

Array Antenna with Linear and Circular Polarization Characteristics for 28 GHz Band 5G Mobile Handset Applications

김 성 필 · 최 재 훈

Sungpeel Kim · Jaehoon Choi

요 약

본 논문에서는 원형편파 구현을 위한 2×2 슬롯 배열안테나와 선형편파 및 3D 빔 커버리지 구현을 위한 1×8, 8×1 다이폴 배열안테나를 이용하여 선형 및 원형편파 특성을 갖는 28 GHz 대역 5G 단말용 적층구조 배열안테나에 대해 연구하였다. 2×2 슬롯 배열안테나는 적층구조의 접합면에 위치하고 있으며, ±z 방향으로 원형편파를 형성한다. 1×8, 8×1 다이폴 배열안테나는 슬롯 배열안테나와 동일 평면상에 위치하고 있으며, 고각 평면으로 fan-beam을 형성 및 방위각 방향으로 빔 조향이 가능하다. 제안된 안테나의 -10 dB 반사계수 대역폭 및 3 dB 축비는 목표대역인 28 GHz 대역(27.5~28.35 GHz)을 만족한다. 모의실험을 통한 다이폴 배열안테나 급전 시, 빔 조향을 하지 않은 경우에 고각 평면상으로 11.71 dBi의 최대이득 및 195°의 반전력빔폭을 갖는 fan-beam이 형성되었으며, 방위각 방향으로 최대 빔 조향 시 10.52 dBi의 최대이득을 만족하였다. 또한, 2×2 슬롯 배열안테나 급전 시에는 ±z 방향으로 각각 9.1 dBi, 9.19 dBi의 방사이득을 갖는 LHCP, RHCP가 형성되었다.

Abstract

In this paper, an array antenna with linear and circular polarization characteristics is proposed for 28 GHz band 5G mobile handset applications. A 2×2 slot array antenna is designed for circular polarization in ±z directions; 1×8 and 8×1 dipole array antennas with linear polarizations are designed for 3D beam coverage by fan-beam steering. The proposed antenna is a stacked structure, and all radiating elements are printed on the middle layer of the stacked structure. The -10 dB reflection coefficient bandwidth and 3 dB axial ratio bandwidth of the proposed antenna fully covers the 28 GHz target band (27.5~28.35 GHz). The simulated peak gain of the proposed dipole array antenna is 11.71 dBi, and the half-power beamwidth in the elevation plane is 195° without beam steering. With the maximum beam steering on the azimuthal plane, the simulated peak gain of the proposed dipole array antenna is 10.52 dBi. Moreover, the simulated peak gains of the proposed 2×2 slot array antenna are 9.1 dBi in +z direction with left-hand circular polarization and 9.19 dBi in -z direction with right-hand circular polarization.

Key words: mmWave, 5G Device, Beam Steering, Beam Coverage, Circular Polarization

I. 서 론

현재 28 GHz 대역 밀리미터파 5G 통신 기술 상용화를 위해 5G 단말용 배열안테나 연구가 활발히 진행되고 있

「이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018-0-00732, 밀리미터파 대역 5G 단말용 배열안테나의 병목기술 해결을 위한 기초 연구).」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received November 19, 2019 ; Revised December 24, 2019 ; Accepted January 23, 2020. (ID No. 20191119-123)

· Corresponding Author: Jaehoon Choi (e-mail: choijh@hanyang.ac.kr)

다^{[1][2]}. 28 GHz 대역 안테나에 관한 선행 연구를 살펴보면 기지국과 이동단말 간의 상향/하향 링크 통신을 위해 패치 안테나에 이중 급전을 통해 수평/수직의 이중 선형 편파를 구현하는 2x2 패치 배열안테나와 3D 빔 커버리지를 위한 1x2, 2x1 다이폴 배열안테나를 결합한 형태를 사용하고 있다^[1]. 하지만 밀리미터파 환경에서는 송수신단의 편파가 일치하지 않을 경우에 수신 신호 강도가 5~10 dB 정도 저하되는 문제가 발생할 수 있다^[3]. 또한, 실내 통신 환경에서 밀리미터파 대역을 사용하는 경우에는 선형편파보다 원형편파를 사용하는 것이 다중경로(multipath) 전파 현상에 의한 지연 확산(delay spread) 현상을 감소시키는 것에 더 효과적이다^{[4][5]}. 따라서 이 문제에 대한 해결방안으로 원형편파 안테나를 이용한 밀리미터파 대역 안테나가 제시되고 있다^{[6][7]}. 이처럼 5G 단말용 안테나 설계에 대한 연구가 국내외에서 활발히 수행되고 있으나, 선형 및 원형편파를 모두 고려한 배열안테나에 대한 연구는 미비한 상황이다.

또한, 이동통신 단말용 안테나는 인체 영향에 따른 성능변화가 크지 않도록 인체에 둔감한 방사특성이 요구된다. 인체 둔감성을 갖는 방사소자로는 magnetic dipole antenna, annular slot antenna, self-complementary slot antenna 등의 마그네틱 타입 안테나를 고려할 수 있으며, 이 중에서 magnetic dipole antenna가 인체영향에 가장 둔감하다는 연구결과가 있다^[8].

본 논문에서는 선행연구 결과들을 활용하여 magnetic dipole antenna인 슬롯 안테나를 2개 겹쳐서 십자가 형태로 설계하였고, 90° 위상차를 갖는 급전구조를 통해 원형 편파를 구현하였다. 또한, 28 GHz 대역 통신 링크 버짓(link budget)을 고려하여 9 dBi 이상의 최대방사이득을 갖기 위해 2x2 배열구조를 적용하였다^[9]. 1xN 형태의 배열 안테나에 의해 형성되는 fan-beam 패턴과 빔 조향 기술을 활용하면 3D 빔 커버리지를 확보할 수 있기 때문에 1x8, 8x1 다이폴 배열안테나를 추가하였으며, 임피던스 정합 개선을 위해 접지면을 평평한 형태가 아닌 사선 형태로 변형하였다^[10]. 다이폴 배열안테나는 선형편파를 구현하기 때문에 본 연구결과는 선형 및 원형편파 특성을 갖는 28 GHz 대역(27.5~28.35 GHz)^[11] 5G 이동통신 단말용 배열안테나 연구에 활용 가능할 것으로 사료된다.

II. 안테나 설계 및 특성

그림 1은 제안된 선형 및 원형편파 특성을 갖는 배열안테나의 구조를 나타낸다. 실제 단말기 크기를 고려한 70 mmx150 mm 면적 기판에 3D 빔 커버리지 구현 및 높은 격리도 특성을 갖도록 단일 구조 2개를 대각선 방향으로 배치하였다. 포트 1, 2, 3을 통해 동작하는 안테나와 포트 4, 5, 6을 통해 동작하는 안테나를 묶어서 각각의 단일 구조라고 정의하였다. 포트 1과 4를 통해 동작하는 2x2 슬롯 배열안테나는 ±z 방향으로 방사하며, 각 방향으로 형성되는 편파는 반대이다. 포트 2, 3, 5, 6을 통해 동작하는 1x8, 8x1 다이폴 배열안테나는 고각 평면(xz-, yz-평면)상으로 fan-beam을 형성하며, 방위각 방향으로 빔 조향이 가능하다. 따라서 여러 위치의 배열안테나를 선택적으로 이용하면 단말의 다양한 사용 환경에 따른 안테나 성능 저하 극복 및 3D 빔 커버리지 구현이 가능하다.

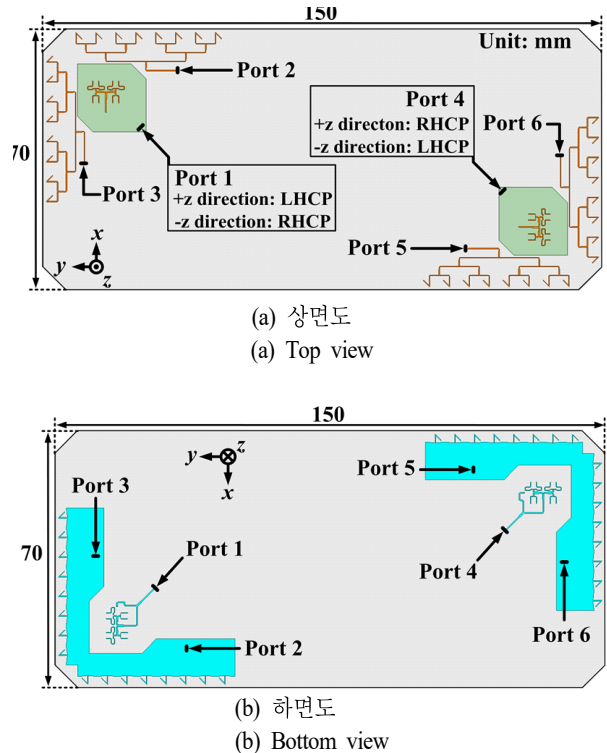


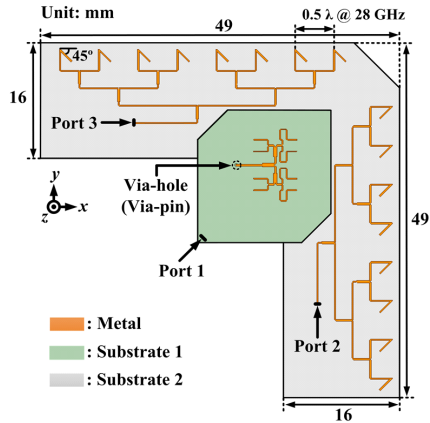
그림 1. 제안된 선형 및 원형편파 특성을 갖는 배열안테나
Fig. 1. Proposed array antenna with linear and circular polarization characteristics.

그림 2는 제안된 배열안테나의 단일 구조를 나타낸다. 그림 2(f)와 같이 제안된 안테나는 두께 0.127 mm Taconic TSM-DS3 ($\epsilon_r=3, \tan \delta=0.0011$) 기판 2개를 겹친 적층구조로 구성되어 있으며, 상부 기판을 기판 1, 하부 기판을 기판 2로 정의한다. 기판 1은 단면 기판이며, 기판 2는 양면 기판이다. 그림 2(a)는 기판 2의 윗면에 기판 1이 적층된 구조를 바라본 모습이다. 그림 2(b)와 같이 기판 1의 윗면에는 2x2 슬롯 배열안테나 동작을 위한 급전구조가 위치하고 있으며, 기판 1은 단면 기판이기 때문에 아랫면에는 도체가 없다. 그림 2(c)와 같이 적층구조 접합면(기판 2의 윗면)에 원형편파 구현을 위한 2x2 슬롯 배열안테나(연두색)와 fan-beam 및 선형편파 구현을 위한 1x8, 8x1 다이폴 균일(uniform) 선형 배열안테나(주황색)가 위치한다. 그림 2(d)에 나타나 있듯이, 기판 2의 아랫면에 위치한 포트 1을 통해 급전이 되면 인가된 신호는 전력분배구조를 통해 나뉘지고, 위상지연 구조에 의해 90° 위상차가 발생한다. 90° 위상차가 발생한 신호는 직경 0.4 mm의 via-pin을 통해 기판 1의 윗면에 위치한 급전구조에 인가된다. 따라서 2x2 슬롯 배열안테나는 90° 위상차를 갖는 급전구조에 의해 동작하여 원형편파를 형성한다. 그림 2(c)와 그림 2(d)에 나타나 있듯이, 다이폴 배열안테나 및 그것의 접지면(하늘색)은 기판 2의 윗면과 아랫면에 각각 위치한다. 그림 2(e)는 적층구조의 이해를 돕기 위하여 나타낸 투시도이다.

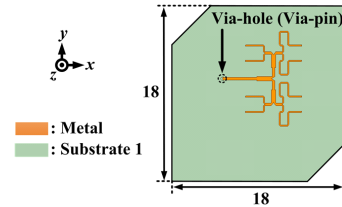
그림 3은 원형편파 배열안테나의 동작원리를 나타낸다. 그림 3(a)는 원형편파 배열안테나와 급전구조를 함께 나타낸 투시도이다. 앞에서 설명했듯이 위상지연 구조에 의해 급전구조 사이에 90° 위상차가 발생하여 원형편파가 형성되는 원리이다. 4개의 슬롯 안테나를 통해 유기되는 E-field 벡터가 같은 방향을 향해 형성되어야 하기 때문에 그림 3(a)에 나타나 있듯이 기판 1의 윗면에 위치한 급전구조의 +x 방향 부분과 기판 2의 아랫면에 위치한 급전구조의 +y 방향 부분에는 180° 위상지연을 위한 구조가 삽입되어 있다. 만약에 180° 위상지연 구조가 없다면 슬롯안테나에 유기되는 전류분포가 반대로 형성되고, 이로 인해 유기되는 E-field 벡터도 반대 방향을 향하게 되어 서로 상쇄되어 버린다. 그림 3(b)를 보면 포트 1을 통해 급전되어 전송선로에 흐르는 전류의 위상이 0°일 때 슬롯

안테나가 위치한 도체에 형성되는 표면전류가 ±y 방향으로 위치한 슬롯을 따라 흐르며 -x 방향으로 E-field 벡터가 유기되는 것을 볼 수 있다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 포트 1과 4 급전 시 28 GHz의 한 주기(T) 동안의 전류 위상에 따른 표면전류 분포도를 나타낸다. 이 그림들을 보면 유기된 E-field 벡터의 방향(빨간색 및 파란색 화살표)은 위상에 따른 전류분포의 변화에 따라 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 입력 포트에 인가되어 전송선로에 흐르는 특정 주파수(f)의 정현파 신호는 1초 동안에 $2\pi f$ 만큼 변하며, 정현파의 위상(θ)은 각속도(ω)와 시간(t)의 곱으로 나타낸다($\theta = \omega t = 2\pi f t = 2\pi t/T$). 따라서 t 의 변화($0 \rightarrow T/4 \rightarrow T/2 \rightarrow 3T/4$)는 θ 의 변화($0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 270^\circ$)에 대응된다. 포트 1 급전 시의 경우를 활용하여 제안된 안테나로부터 형성되는 원형편파의 동작원리를 설명하겠다. 그림 3(e)는 포트 1 급전 시 모의실험된 방사패턴을 나타내며, 그림 3(c)에 나타나 있듯이 위상이 변함에 따라 E-field 벡터가 회전하는 것을 볼 수 있다. 편파의 성질은 전파 진행 방향의 뒤에서 바라봤을 때 E-field 벡터가 위상에 따라 어떻게 변하는지에 의해 결정되기 때문에 그림 3(e)와 같이 ±z 양방향으로 방사하는 경우에는 바라보는 관점에 따라서 편파가 달라진다. 따라서 +z 방향으로 전파되는 빔은 LHCP이며, -z 방향으로 전파되는 빔은 RHCP임을 알 수 있다. 제안된 안테나는 ±z 방향으로 LHCP와 RHCP를 모두 지원하기 위하여 포트 1과 4에 연결된 급전구조는 좌우대칭 형태로 설계하였다. 결과적으로 포트 1 급전 시 LHCP(+z 방향)/RHCP(-z 방향)가 형성되며, 포트 4 급전 시 RHCP(+z 방향)/LHCP(-z 방향)가 형성된다. 그림 3(f)는 모의실험 및 측정된 축비 결과를 나타낸다. 모의실험 결과, 포트 1 급전 시 +z 방향(LHCP)과 -z 방향(RHCP)으로 각각 27.47~28.6 GHz, 27.4~28.37 GHz의 3 dB 축비 대역을 만족하며, 포트 4 급전 시에도 목표대역에서 3 dB 축비 성능을 만족한다. 측정은 커넥터 영향으로 인한 성능 열화를 고려하여 커넥터가 위치하지 않은 포트 1의 -z 방향에 대해서만 실시하였다. 27.5 GHz에서 28.5 GHz까지 0.5 GHz 간격으로 측정하였으며, 27.5 GHz를 제외한 구간에서는 3 dB 이하 또는 그에 준하는 축비 성능을 만족함을 확인하였다.

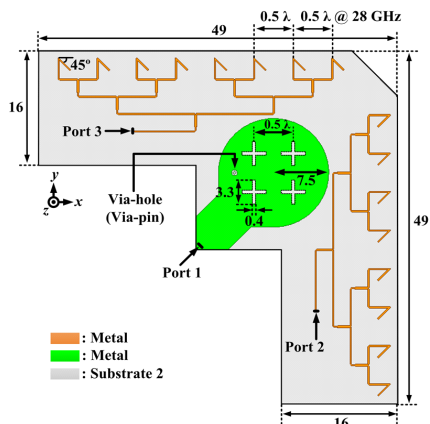
그림 4는 선형편파 및 fan-beam, 빔 조향 구현을 위한



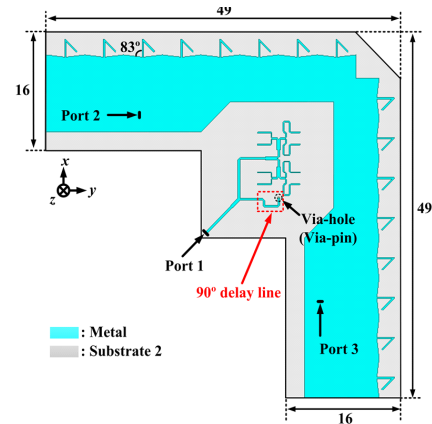
(a) 상면도
(a) Top view



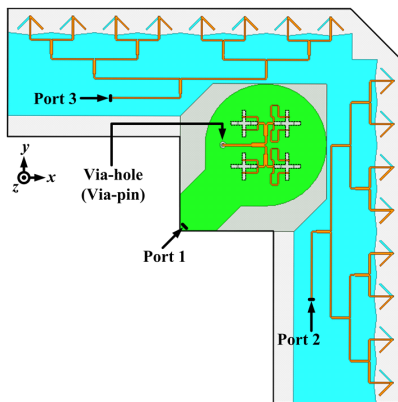
(b) 기판 1 상면도
(b) Top view of substrate 1



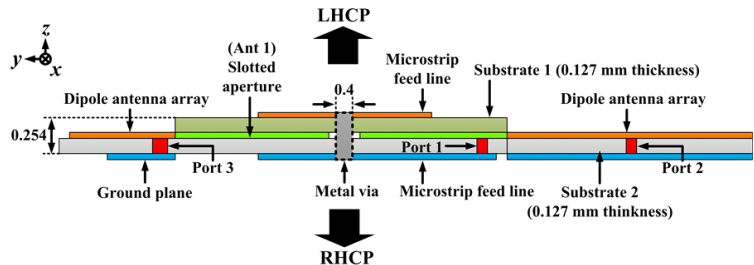
(c) 기판 2 상면도
(c) Top view of substrate 2



(d) 기판 2 하면도
(d) Bottom view of substrate 2



(e) 투시도
(e) Perspective view



(f) 측면도
(f) Side view

그림 2. 제안된 배열안테나의 단일 구조
Fig. 2. Unit element of the proposed array antenna.

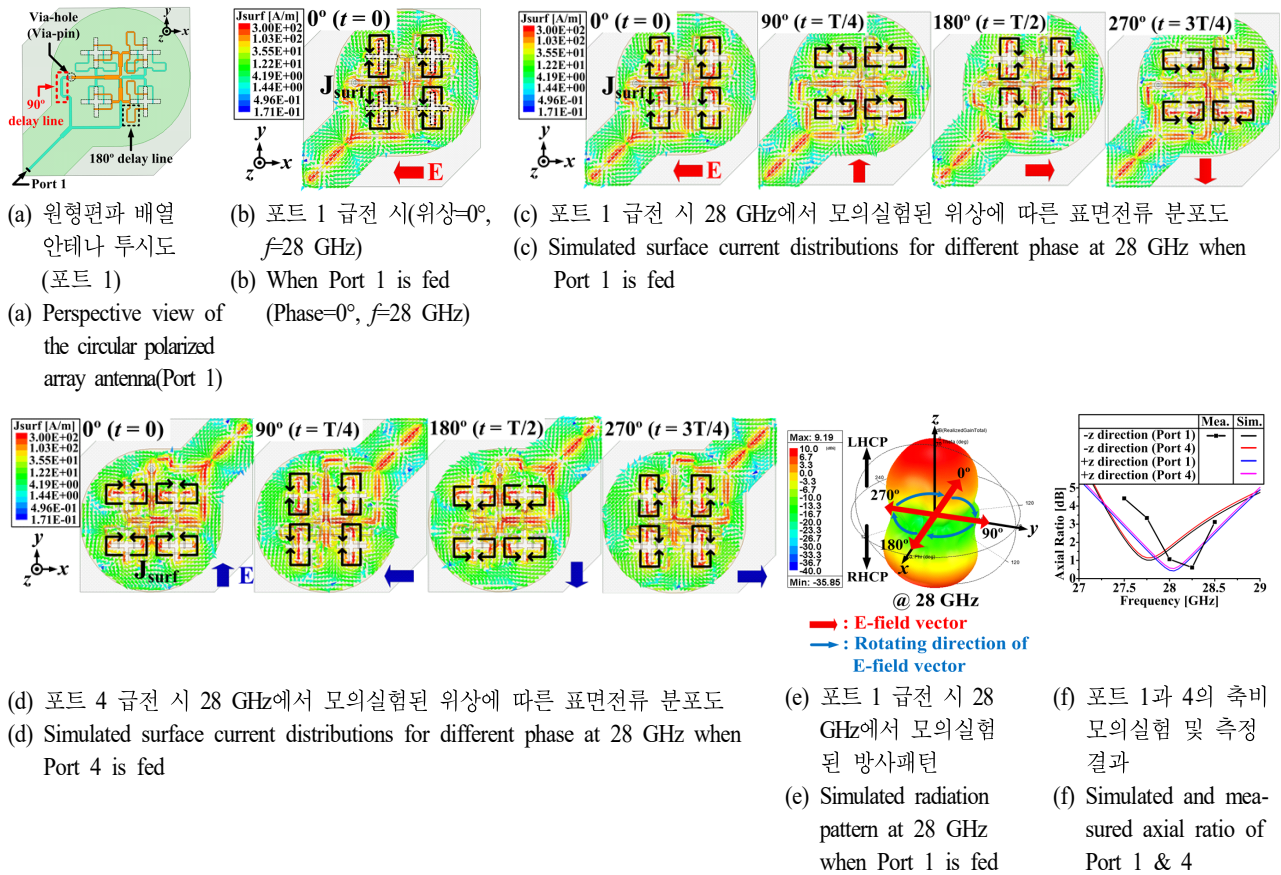


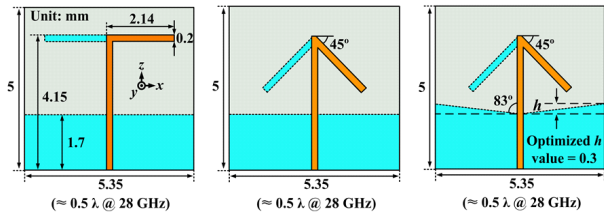
그림 3. 원형편파 배열안테나의 동작원리 및 측비 성능

Fig. 3. Operation principle and axial ratio performances of the circular polarized array antennas.

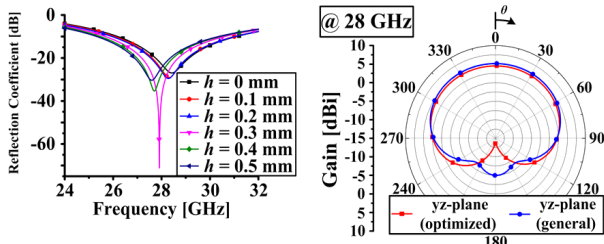
다이폴 배열안테나의 방사소자 구조 및 성능을 나타낸다. 일반적인 평면형 다이폴 안테나는 그림 4(a)와 같은 구조를 가지며, 안테나 배열 시 방사소자 간 격리도 특성을 향상시키기 위하여 그림 4(b)와 같이 접지면은 일반적인 구조와 같이 평평하게 유지하되, 다이폴의 팔(arm)을 45° 구부러진 형태로 변형하였다^[12]. 접지면은 다이폴 안테나의 반사판으로도 동작하기 때문에 접지면 변형을 통해 최적의 임피던스 정합 및 전후방비 개선을 달성할 수 있다. 그림 4(c)와 같이 접지면을 사선 형태로 변형하면 다이폴 소자와 접지면 간의 점진적인 임피던스 정합을 통해 성능을 개선할 수 있으며^[10], 사선의 기울기(h)를 조절하여 최적의 임피던스 정합 조건을 찾을 수 있었다. 위 과정은 그림 4(d)에 나타나 있으며, $h=0.3$ mm일 때 목표대역에서 최적의 임피던스 정합을 달성할 수 있었다.

그림 4(e)는 28 GHz에서 모의실험된 최적화된 다이폴 방사소자와 일반적인 다이폴 방사소자의 방사패턴을 나타내며, 접지면 최적화를 통해 최대 방사이득은 5 dBi 수준을 유지하며 전후방비가 대략 7.9 dB 증가하였다. 이와 같이 최적화된 방사 소자를 0.5λ 간격으로 배열하면 일반적인 다이폴 방사소자를 같은 간격으로 배열한 경우에 비해 격리도($|S_{21}|$)가 7.8 dB 정도 개선됨을 그림 4(f)에서 확인할 수 있다.

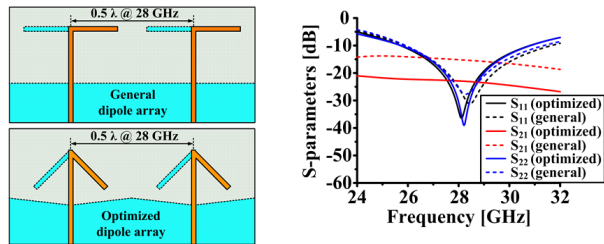
표 1은 단체별로 제정된 인체에 대한 전자파 전력밀도 노출량 제한 규격이다^{[13]~[15]}. 기존에 전자파의 인체노출량 분석에 활용되던 SAR는 전자파에 의해 인체조직이나 장기에 발생하는 열에 관한 지표였으나, 밀리미터파 대역 등의 10 GHz 이상의 주파수 대역에서는 전자파의 인체 침투 깊이가 매우 얇기 때문에 대부분의 에너지가 피부



(a) 일반적인 구조 (b) 구부러진 구조 (c) 접지면 변형
(a) General dipole (b) Folded dipole (c) Modified ground plane



(d) h값에 따른 모의실험된 반사계수 변화 (e) 일반적인 구조와 최적화된 다이폴 안테나의 방사패턴
(d) Simulated reflection coefficients for various h (e) Simulated radiation patterns of a general and an optimized dipole



(f) 안테나 구조에 따른 S-parameters 특성
(f) S-parameters characteristics according to antenna structure

그림 4. 여러 형태의 다이폴 안테나 구조 및 성능
Fig. 4. Various types of dipole antenna and performances.

수준에서 흡수되므로 SAR 대신 전력밀도가 인체노출량에 대한 지표로 활용된다^[13]. 현재 WHO에서는 국제비전리복사방호위원회(ICNIRP)에서 만들어진 기준을 권고하고 있으며, 우리나라에서는 전자파에 대한 강도 기준으로 WHO 권고 기준을 준용하여 고시하고 있다^[16]. 따라서 본 논문에서는 ICNIRP에서 제정한 규격을 활용하였다. 그림 5는 전력밀도 평가방식을 나타낸다. ICNIRP 규격의 경우, 안테나로부터 특정 거리(h)만큼 떨어진 평면상의 시험면

표 1. 단체별 전자파 전력밀도 제한 규격

Table 1. RF EMF exposure limits for general public in incident power density.

Organization	f [GHz]	Spatial peak / averaging area	S _{lim} [W/m ²]
ICNIRP ^[13]	10~300	1 cm ²	200
		20 cm ²	10
FCC ^[14]	6~100	Spatial peak	10
IEEE ^[15]	3~30	Spatial peak	18.56 f ^{0.699}
		100 λ ²	10
	30~100	Spatial peak	200
		100 cm ²	10
	100~300	Spatial peak	200
100 cm ²		(90f-7000)/200	

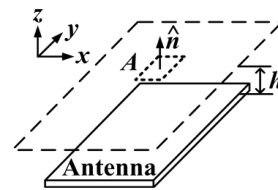


그림 5. 전력밀도 평가방식

Fig. 5. The diagram of the power density.

적(A)을 기준으로 공간평균 전력밀도(spatial-average incident power density)가 제한기준 이하를 만족해야 한다. 공간평균 전력밀도는 식 (1)과 같이 포인팅 벡터(poynting vector)를 이용하여 구할 수 있다^{[17]~[20]}.

$$S = \frac{1}{2A} \int_A \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \hat{n} dA \quad [W/m^2] \quad (1)$$

본 연구에서는 ANSYS社의 HFSS에서 제공하는 Fields Calculator 기능을 이용하여 전력밀도 모의실험을 수행하였다^[21]. 그림 6은 제안된 안테나의 단일 구조를 이용한 공간평균 전력밀도 모의실험을 나타낸다. 2x2 슬롯 배열 안테나에 23 dBm을 인가(포트 1 급전)하고 안테나로부터 +z 방향으로 h₁만큼 이격되어 있으며 xy-평면과 평행한 1 cm² 시험면적을 기준으로 전력밀도 모의실험을 수행하였다. 1x8 다이폴 배열안테나에 대한 전력밀도는 23 dBm을 포트 2에 인가하고 동일한 방식으로 수행하였다. 전력밀

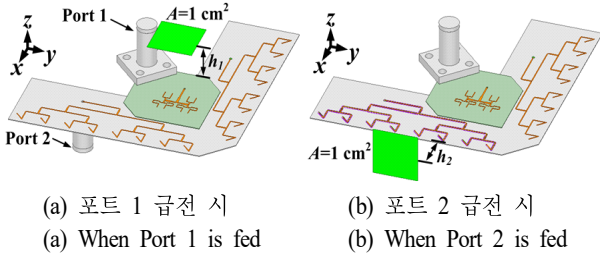


그림 6. 제안된 안테나의 공간평균 전력밀도 평가방식
Fig. 6. The diagram of the spatial-average power density of the proposed antennas.

도는 거리에 대하여 변하기 때문에 전계영역에 따른 전력밀도 모의실험을 수행하였다^{[18],[19]}. 식 (2)를 통해 거리에 따라 전계영역을 근거리장과 원거리장으로 나누었으며, D 는 안테나 최대 크기를 의미한다. 근거리장의 전력밀도 측정표면 위치는 이동통신 단말기의 실제 사용 환경을 고려하여 talk mode 경우에 머리로부터 10 mm 떨어진 거리에 안테나가 위치한다고 가정하여 $h_1=h_2=10$ mm로 결정하였다^[20]. 28 GHz에서 모의실험된 전계영역별 1 cm^2 시험면적에 대한 전력밀도는 표 2에 정리되어 있다. 2×2 슬롯 배열안테나의 근거리장 모의실험 결과를 제외한 경우에는 ICNIRP 제한규격을 만족하였다.

$$\text{근거리장} \leq 0.62 \sqrt{D^3/\lambda} \quad (2-1)$$

$$\text{원거리장} \geq 2D^2/\lambda \quad (2-2)$$

표 2. 28 GHz에서 모의실험된 배열안테나별 전계영역에 따른 1 cm^2 기준 공간평균 전력밀도 결과

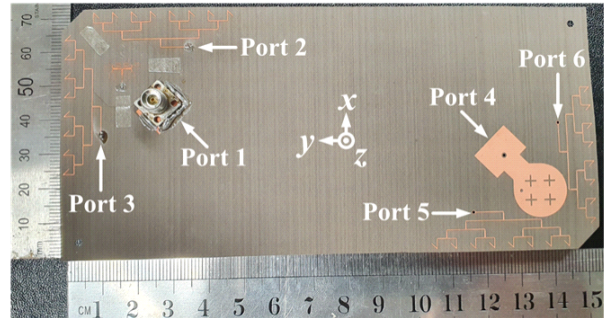
Table 2. Simulated spatial-average incident power density results over 1 cm^2 area for the field regions of various array antennas at 28 GHz.

Antenna type	Field region	S [W/m^2]
2x2 slot array antenna (When Port 1 is fed)	Near field ($h_1 \leq 11 \text{ mm}$)	220.01 ($h_1 = 10 \text{ mm}$)
	Far field ($h_1 \geq 42 \text{ mm}$)	31.97 ($h_1 = 42 \text{ mm}$)
1x8 dipole array antenna (When Port 2 is fed)	Near field ($h_2 \leq 53 \text{ mm}$)	61.99 ($h_2 = 10 \text{ mm}$)
	Far field ($h_2 \geq 343 \text{ mm}$)	11.04 ($h_2 = 343 \text{ mm}$)

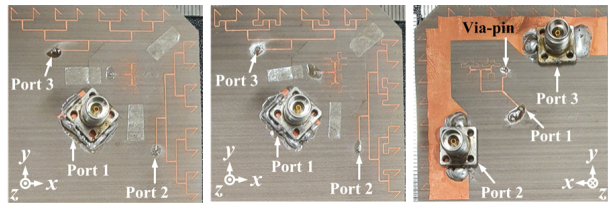
III. 모의실험 및 측정 결과

그림 7은 제작된 안테나이다. 그림 7(a)의 포트 4, 5, 6은 적층구조의 이해를 돕기 위해 커넥터(HPC3312-22, A-Info社)를 연결하지 않은 모습으로 표현하였다. 그림 7(b)와 그림 7(c)는 다이폴 배열안테나의 방위각 평면(xy-평면)상 빔 조향 성능(빔 피크 위치: $\phi=0^\circ, \theta=90^\circ / \phi=40^\circ, \theta=90^\circ$) 검증을 위해 각각 제작된 모습이다. 그림 7(d)는 제작된 안테나의 상세 하면도를 나타내며, 빔 조향과 관계없이 동일한 구조를 갖는다.

그림 8은 제안된 안테나의 모의실험 및 측정된 S-파라미터 결과이다. 모의실험 결과, 빔 조향을 고려하지 않았을 경우에 포트 1의 -10 dB 반사계수(S_{11}) 대역폭은 2.29 GHz(26.64~28.93 GHz)를 만족하며, 포트 2의 -10 dB S_{22} 대역폭은 2.26 GHz (26.93~29.19 GHz)를 만족한다. 또한, 목표대역에서 40.26 dB 이상의 높은 격리도 특성을 갖는다. 이는 빔 패턴 다이버시티(pattern diversity)를 고려하여



(a) 상면도($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$)
(a) Top view($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$)



(b) 상세 상면도 ($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$) (c) 상세 상면도 ($\phi=40^\circ, \theta=90^\circ$) (d) 상세 하면도
(b) Detailed top view ($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$) (c) Detailed top view ($\phi=40^\circ, \theta=90^\circ$) (d) Detailed bottom view

그림 7. 제작된 안테나 사진
Fig. 7. Photographs of the implemented antennas.

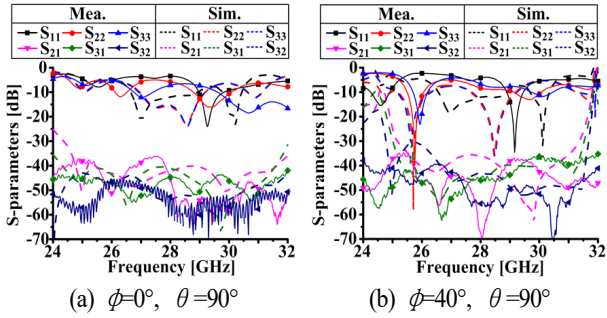
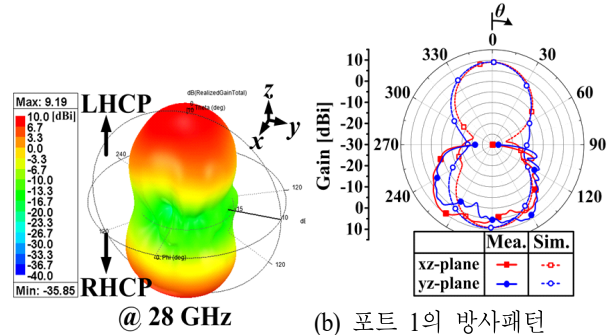


그림 8. 모의실험 및 측정된 S-parameters
Fig. 8. Simulated and measured S-parameters.

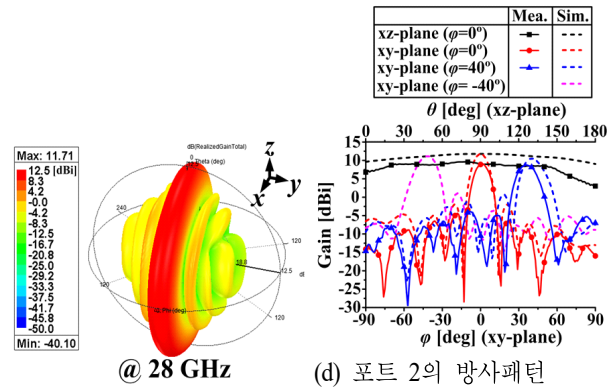
안테나들을 배치하였기 때문이다. 빔 조향을 고려한 경우 ($\phi=40^\circ, \theta=90^\circ$)의 -10 dB S_{11} 대역폭은 2.31 GHz(26.58~28.89 GHz)를 만족하며, -10 dB S_{22} 대역폭은 1.59 GHz(27.65~29.24 GHz)를 만족한다. 이 경우에도 목표대역에서 35.32 dB 이상의 높은 격리도 특성을 보인다. 측정 결과와 모의실험 결과는 비슷한 경향성을 갖지만, 일부 동작 주파수가 목표대역에서 벗어난 것을 볼 수 있었다. 밀리미터파 대역에서는 전송선로의 길이나 폭 등에서 발생한 미세한 제작 오차가 안테나 성능에 큰 영향을 주기 때문에 모의실험 결과와 차이가 발생할 수 있으며, 제안된 안테나의 기판 두께가 매우 얇기 때문에 측정 시 동축케이블 연결에 의한 장력 등으로 인해 미세한 기판 휘어짐 등이 불가피하게 발생하여 오차가 발생하였다.

그림 9는 배열안테나 종류별로 형성되는 방사패턴을 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 포트 1 급전 시에 해당하는 방사 패턴이며, 모의실험 결과, $\pm z$ 방향으로 각각 9.1 dBi, 9.19 dBi의 방사이득을 갖는 LHCP, RHCP 전파가 방사된다. 측정 결과, 약 2 dB 정도의 이득 저하는 있지만 비슷한 경향성을 보였다. 포트 4 급전 시에도 유사한 방사패턴이 형성되며, $\pm z$ 방향으로의 편파성분은 반대로 구현된다. 다이폴 배열안테나의 경우에 포트 2~6은 같은 형태의 배열안테나이므로 측정은 포트 2에 대해서만 실시하였다. 그림 9(c)와 그림 9(d)의 $\phi=0^\circ$ 결과는 포트 2 급전시 빔 조향을 고려하지 않은 경우에 해당한다. 모의실험 결과, 최대이득은 $\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$ 에서 11.71 dBi이며, xz -평면상으로 195° 반전력빔폭을 갖는 fan-beam 패턴이 형성된다. 최대 빔 조향 각도를 결정하는 판단기준으로는



(a) 포트 1 급전 시
(a) When Port 1 is fed

(b) 포트 1의 방사패턴
(b) Radiation patterns when Port 1 is fed



(c) 포트 2 급전 시
(c) When Port 2 is fed

(d) 포트 2의 방사패턴
(d) Radiation patterns when Port 2 is fed

그림 9. 28 GHz에서 모의실험 및 측정된 배열안테나의 방사패턴

Fig. 9. Simulated and measured radiation patterns of the antennas at 28 GHz.

sidelobe level이 -10 dB가 되는 각도를 고려하였다^[22]. 모의실험 결과, xy -평면상 최대 $\pm 40^\circ$ 까지 조향이 가능하며 밀리미터파 대역 통신을 위한 링크 버짓(방사이득 9 dBi 이상)을 고려하면 $\pm 46^\circ$ 까지 만족한다. $\phi=\pm 40^\circ, \theta=90^\circ$ 일 때, 모의실험된 최대이득은 10.52 dBi이다. 따라서 포트 2~6 동작을 통해 선형편파 및 3D 빔 커버리지 구현이 가능하다. 그림 9(d)의 측정 결과를 살펴보면 $\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$ 일 때의 최대이득은 9.1 dBi로 모의실험 결과에 비해 감소하였다. 이는 제작오차에 의한 S-파라미터 성능 열화 및 측정시의 동축케이블 영향 등에 의한 것으로 판단된다. 하지만 전체적인 빔 패턴은 유사함을 확인할 수 있었다. 빔 조향을 고려한 경우에는 8.8 dBi($\phi=38^\circ, \theta=90^\circ$ 에

서 형성)의 최대이득이 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 선형 및 원형편파 특성을 갖는 5G 단말용 28 GHz 배열안테나를 연구하였다. 제안된 안테나는 목표대역에서 -10 dB 반사계수 대역 및 3 dB 축비를 만족하며, 빔 패턴 다이버시티를 고려한 안테나 배치에 의해 최대 빔 조향 경우에도 35.32 dB 이상의 높은 격리도를 갖는다. 사선 방향으로 위치한 각각의 2×2 슬롯 배열 안테나를 통해 $\pm z$ 양방향으로 9 dBi 이상의 LHCP, RHCP 지원이 가능하다. 또한, $1 \times 8, 8 \times 1$ 다이폴 배열안테나를 급전하면 빔 조향을 하지 않은 경우에는 고각 평면상으로 11.71 dBi의 최대이득 및 195° 의 반전력빔폭을 갖는 fan-beam이 형성되며, 이 fan-beam은 방위각 방향으로 $\pm 40^\circ$ 까지 빔 조향이 가능하다. 제안된 여러 형태의 배열안테나를 실제 사용 환경(talk mode, data mode, read mode 등)에 따라 선택적으로 이용하면 fan-beam 조향 및 fan-beam의 이득이 낮아지는 음영지역($\pm z$ 방향)을 2×2 슬롯 배열안테나를 통해 형성되는 방사패턴이 커버하여 3D 빔 커버리지가 가능하다. 본 연구결과는 전자파 인체노출량을 고려한 5G 이동통신 단말용 배열안테나 연구에 활용될 것으로 사료되며, 추후 실제 사용 환경에서 단말기 유전체 커버, 인체 등에 의한 성능열화 문제를 고려한 연구가 요구된다.

References

- [1] Qualcomm, "Snapdragon X50 5G modem," 2017. Available: <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-x50-5g-modem>
- [2] H. Xia, T. Zhang, L. Li, and F. C. Zheng, "A low-cost dual-polarized 28 GHz phased array antenna for 5G communications," in *2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, Nanjing, Mar. 2018, pp. 1-4.
- [3] J. O. Nielsen, G. F. Pedersen, "Dual-polarized indoor propagation at 26 GHz," in *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Valencia, Sep. 2016, pp. 1-6.
- [4] T. Manabe, Y. Miura, and T. Ihara, "Effects of antenna directivity and polarization on indoor multipath propagation characteristics at 60 GHz," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 441-448, Apr. 1996.
- [5] T. Manabe, K. Sato, H. Masuzawa, K. Taira, T. Ihara, and Y. Kasashima, et al., "Polarization dependence of multipath propagation and high-speed transmission characteristics of indoor millimeter-wave channel at 60 GHz," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 268-274, May 1995.
- [6] I. Syrytsin, S. Zhang, G. F. Pedersen, and Z. Ying, "User effects on the circular polarization of 5G mobile terminal antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4906-4911, Sep. 2018.
- [7] K. R. Mahmoud, A. M. Montaser, "Design of dual-band circularly polarized array antenna package for 5G mobile terminals with beam-steering capabilities," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, no. 1, pp. 29-39, Jan. 2018.
- [8] R. M. Makinen, T. Kellomaki, "Body effects on thin single-layer slot, self-complementary, and wire antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 1, pp. 385-392, Jan. 2014.
- [9] S. Kim, "5G mmWave module and antenna design for mobile devices," in *The 23rd Antenna Technology Workshop*, Seoul, Apr. 2019, pp. 171-193.
- [10] S. Kim, J. Han, Y. Jang, and J. Choi, "A compact VHF/UHF band quasi-Yagi antenna for multifunction radar applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 10, pp. 2525-2530, Oct. 2018.
- [11] 5G Americas, "5G Spectrum Vision," 5G Americas White Paper, pp. 8-9, Feb. 2019.
- [12] R. A. Alhalabi, G. M. Rebeiz, "High-efficiency angled-dipole antennas for millimeter-wave phased array applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 10, pp. 3136-3142, Oct. 2008.

- [13] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- [14] Federal Communications Commission, "Radiofrequency Radiation Exposure Limits," Federal Communications Commission, Washington, DC, 2013.
- [15] IEEE Standards Coordinating Committee, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," in *IEEE Std C95.1-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991)*, pp. 1-238, Apr. 2006.
- [16] H. D. Choi, N. Kim, "5G electromagnetic waves and analysis of impacts of EMF exposure," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 29, no. 6, pp. 26-30, Nov. 2018.
- [17] B. Xu, K. Zhao, Z. Ying, D. Sjoberg, W. He, and S. He, "Analysis of impacts of expected RF EMF exposure restrictions on peak EIRP of 5G user equipment at 28 GHz and 39 GHz bands," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20996-21005, Feb. 2019.
- [18] B. Xu, K. Zhao, B. Thors, D. Colombi, O. Lundberg, and Z. Ying, et al., "Power density measurements at 15 GHz for RF EMF compliance assessments of 5G user equipment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6584-6595, Dec. 2017.
- [19] R. Rodriguez-Cano, S. Zhang, K. Zhao, and G. F. Pedersen, "User body interaction of 5G switchable antenna system for mobile terminals at 28 GHz," in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, Mar. 2019, pp. 1-4.
- [20] K. Y. Yazdandoost, I. Laakso, "EMF exposure analysis for a compact multi-band 5G antenna," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 68, pp. 193-201, May 2018.
- [21] ANSYS, "ANSYS HFSS: 3D electromagnetic field simulator for RF and wireless design." Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [22] M. Khalily, R. Tafazolli, T. A. Rahman, and M. R. Kamarudin, "Design of phased arrays of series-fed patch antennas with reduced number of the controllers for 28-GHz mm-Wave applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1305-1308, 2016.

김 성 필 [한양대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-8243-8265>



2016년 2월: 건국대학교 전자공학부 (공학사)

2016년 3월 ~ 현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 밀리미터파 안테나 설계

최 재 훈 [한양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0596-7934>



1980년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

1986년: 미국 Ohio State University 전자공학과 (공학석사)

1989년: 미국 Ohio State University 전자공학과 (공학박사)

1989년 ~ 1991년: 미국 Arizona State University 연구교수

1991년 ~ 1995년: 한국통신위성사업단 연구팀장

1995년 ~ 현재: 한양대학교 융합전자공학부 교수

[주 관심분야] 이동통신/의료용/군용 안테나 설계, 무선전력전송, WBAN/IoT 시스템, EMC