인체부착형 Headset MIMO 안테나 설계

Design of Headset MIMO Antenna for On-Body Application

김성진 · 김동호 · 권 결 · 최재훈

SungJin Kim · Dongho Kim · Kyeol Kwon · Jaehoon Choi

요 약

본 논문에서는 인체부착형 Headset MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 안테나를 제안하고, 인체의 영향을 고려한 안테나 성능과 인체에 미칠 수 있는 영향에 대한 분석을 하였다. 제안된 MIMO 안테나는 접지면 위에 PIFA(planar inverted-F antenna) 형태의 두 안테나와 격리도 특성 개선을 위하여 안테나 사이에 위치한 isolator로 구성되어 있다. 근거리장에 인체가 존재할 때 안테나에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하고, 팬텀을 이용하여 시뮬레이션과 측정을 하였다. 측정 결과, MIMO 안테나의 성능을 평가하는 파라미터 중 하나인 상관 계수(Envelope Correlation Coefficient: ECC)는 ISM 대역에서 0.1 이하의 값을 가지므로 제안된 MIMO 안테나의 diversity 성능이 우수함을 입증하였다. 또한, 측정된 SAR(Specific Absorption Rate) 값은 공급전력 250 mW에서 안테나 1, 2 각각 0.575, 0.571 W/kg이었다. 이는 1 g 평균 전자파 흡수율을 1.6 W/kg으로 제한한 FCC의 지침을 초과하지 않음을 알 수 있다. 따라서 제안된 인체부착형 Headset MIMO 안테나는 실용이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, a headset multiple-input multiple-output(MIMO) antenna for on-body application is proposed and the antenna performance with body effect and the impact on human body are investigated. The proposed MIMO antenna is composed of two planar inverted-F antennas(PIFA) above ground plane and an isolator located between the two antennas enhance the isolation characteristic. Simulation was carried to analyze the effect of human body on antenna performance when a human body is located in the near field of the antenna. According to the measurement result, the diversity performance of the proposed antenna can be considered good since ECC(Envelope Correlation Coefficient), which commonly indicates the performance of a MIMO antenna, remains below 0.1 over the ISM band. The measured SAR values for antennas 1 and 2 are 0.575 W/kg and 0.571 W/kg, respectively when 250 mW input power is engaged. These values satisfy the FCC guideline which states that the 1-g average SAR should be lower than 1.6 W/kg.

Key words : MIMO, PIFA, Isolation, WBAN, Headset

I. 서 론

통신 기술의 발달에 의한 다양한 통신 서비스의 출현으로 점차 진화되고 있는 사용자의 요구를 충족

시키기 위한 고속의 멀티미디어 데이터 통신이 가능한 새로운 네트워크 환경에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 수 백 m 내외에서 사용되는 WLAN(Wireless Local Area Network) 기술^[1]과 수 십

「본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20110016495).」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronic & Computer Engineering, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20110916-103

· 교신저자 : 최재훈(e-mail : choijh@hanyang.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 11월 14일

m 내외에서 사용되는 WPAN(Wireless Personal Area Network) 기술^[2]과 함께 인체의 내부 및 외부 수 m 내의 통신 기기들 간에 수 kbps에서 수 십 Mbps에 이르는 데이터를 전송하는 새로운 전송 방식인 WBAN(Wireless Body Area Network)에 관한 연구가 주목 받고 있다. WBAN은 인체 내부 또는 인체 표면에 부착된 기기들 간의 통신, 또는 그 기기와 외부 가전 기기나 네트워크를 무선으로 연결하는 기술이다^[3].

기존에 연구된 Headset 안테나의 경우 자유 공간에서의 안테나 성능만을 분석했을 뿐 인체 영향에 대한 분석이 이루어지지 않아 실제 동작하는 환경에서의 안테나 성능을 제대로 분석할 수 없었다^{[4],[5]}. WBAN에 적용하기 위한 안테나 설계 시, 인체에 근접함에 따라 나타나는 인체의 영향이 고려되어야 한다. 인체는 주파수 대역, 인체 내외부의 위치 등에 따라 전기적 특성(유전율, 도전율)이 변하므로 이를 고려하여 안테나가 설계되어야 한다^[6].

2.4 GHz ISM 대역에는 Bluetooth, WLAN, ZigBee 등 다양한 무선 통신 서비스가 집약되어 있다. 특히 인체부착형 Headset 안테나는 외부 기기로부터 음성 또는 비디오 등의 다양한 형태의 데이터를 송수신할 수 있어야 한다. 따라서 On-body 채널에서의 통신 가능 범위의 확장과 데이터의 용량 증대 및 속도의 향상이 필요하다. 그러나 현재 사용되고 있는 Headset은 단일 안테나로 구성되어 있어 고속 멀티미디어 데이터 통신을 구현하기에 어려움이 있다.

그러므로 현재 이동 통신의 핵심 기술로 주목받는 다중 입출력 기술(MIMO)을 이용하면, 여러 개의 안테나를 사용해 동일한 무선 채널에서 두 개 이상의 데이터 신호를 전송함으로써 무선 통신의 범위를 넓히고, 속도도 크게 향상시킬 수 있는 고속 멀티미디어 데이터 통신을 가능하게 한다^[7].

본 논문에서는 2.4 GHz ISM 대역에서 동작하는 Headset MIMO 안테나를 제안하였다. 제안된 MIMO 안테나는 PIFA 구조를 이용하여 소형화하였고, 두 안테나 사이에 LC 공진기를 위치시켜 격리도 특성을 개선하였다. 또한, 인체의 특성을 고려하기 위하여 SAM phantom^{[8],[9]}에 안테나를 위치시켜 ANSYS사의 HFSS^[10]를 이용하여 안테나의 성능을 분석하고, 이를 측정을 통해 검증하였다.

II. 안테나 설계

2-1 안테나 설계

그림 1은 제안된 인체부착형 Headset MIMO 안테나의 구조를 나타낸다. 제안된 MIMO 안테나는 서로 가깝게 위치한 두 개의 PIFA 형태의 안테나가 접지면 위에 위치하고, isolator가 두 개의 PIFA 안테나 사이에 위치하고 있다. 각각의 PIFA 안테나의 크기는 10 mm×7 mm×4 mm이므로 headset 시스템의 안테나

(a) 제안된 안테나의 구조

(a) Perspective view of the proposed MIMO antenna

(b) PIFA 요소의 구조 및 크기

(b) Detailed structure and dimension of the PIFA element

(c) Isolator의 구조 및 크기

(c) Detailed structure and dimension of the isolator

그림 1. 제안된 안테나의 구조

Fig. 1. Geometry of the proposed antenna.

표 1. PIFA 요소의 설계 변수

Table 1. The design parameters of the PIFA element.

Parameter	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
Unit(mm)	4.7	1	4.8	2	1
Parameter	L6	L7	G1	G2	G3
Unit(mm)	4	3	0.18	0.8	0.2

로 사용되기에 적합하다. 안테나 설계에 사용된 기판은 비유전율 4.4를 가지고 두께가 1 mm인 FR-4 기판을 사용하였으며, 50 Ω 동축 케이블을 이용하여 급전하였다. 그림 1(a)은 제안된 안테나의 전체적인 구조, 그림 1(b)는 PIFA 안테나의 상세한 구조, 표 1에는 PIFA 안테나의 설계 변수 값들을 나타내었다. 그림 1(c)는 isolator로 목표 주파수 대역인 ISM 대역(2.4 ~ 2.48 GHz)에서 격리도 향상을 위해 접지면 위 PIFA 안테나 사이에 위치시켰다.

그림 2는 SAM phantom에 안테나를 부착하고 isolator가 있을 때와 없을 때의 산란 파라미터의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. ISM 대역(2.4 ~ 2.48 GHz)에서 Isolator가 없을 때에는 S_{21} 값이 -15 dB 이상을 나타내므로 격리도 특성이 좋지 않으나, isolator를 추가함으로써 2.45 GHz 대역에서 S_{21} 값이 -14.8 dB에서 -42 dB로 낮아져 격리도 특성이 개선된 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 안테나 1이 2.45 GHz에서 동작하고, 1 W가 인가되었을 경우의 표면전류 밀도를 도시한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 3(a)

그림 2. Isolator의 유무에 따른 산란 파라미터 특성
Fig. 2. S-parameters characteristic according to with or without of isolation.

(a) Isolator가 없는 경우
(a) Without isolator

(b) Isolator가 있는 경우
(b) With isolator

그림 3. 2.45 GHz의 MIMO 안테나의 표면 전류 분포
Fig. 3. The current distributions of the MIMO antenna at 2.45 GHz.

에서 볼 수 있듯이, isolator가 없을 때에는 안테나 #1에 인가된 전력이 안테나 #2로 전달되는 것을 확인할 수 있지만, 그림 3(b)에서는 isolator를 PIFA 안테나 사이에 위치시킴으로써 앞의 경우에 비해 격리도 특성이 개선되었음을 확인할 수 있다.

2-2 인체 영향에 따른 안테나의 성능 분석

그림 4에는 자유 공간에서와 SAM phantom을 가까이 하였을 경우 안테나의 산란 파라미터 특성을 도시하였다. 실제 Headset의 사용 환경과 유사하도록 귀로부터 10 mm 떨어진 곳에 안테나를 위치시키고

그림 4. 인체 영향에 따른 산란 파라미터 특성
Fig. 4. S-parameter characteristics according to body effect.

시뮬레이션을 통해 안테나 구성 변수를 최적화하였다. 제한된 안테나의 동작 주파수는 SAM phantom에 접근시켜도 자유 공간에서의 동작주파수와 큰 차이를 보이지 않으며, ISM 대역에서 -20 dB 이상의 격리도 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

III. 안테나 측정 결과

그림 5는 최적의 안테나 설계 변수 값에 따라 제작된 안테나의 사진이다. 안테나는 유전율 4.4이고, 높이가 1 mm인 FR-4 기판을 사용하였고, 전체 크기는 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 로 제작되었다. 그림 6은 실제 Headset의 사용 환경과 유사하도록 귀로부터 10 mm 떨어진 지점에 안테나를 위치시킨 측정 환경을 나타낸다. 안테나의 시뮬레이션 결과와 함께 측정

그림 5. 제작된 안테나
Fig. 5. The fabricated antenna.

값을 그림 7에 나타내었다. 측정은 Agilent사의 Vector Network Analyzer 8753ES를 이용하였으며, 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 유사한 값을 가지며, 10 dB 반사 손실 대역폭은 $2.39 \sim 2.49\text{ GHz}$ (100 MHz)이고, ISM($2.4 \sim 2.48\text{ GHz}$) 전 대역에서 -15 dB 이하의 격리도 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

그림 8은 실제 제작된 Headset MIMO 안테나를 서로 다른 이격 거리(0 mm , 10 mm , 20 mm)를 가지고 SAM phantom에 부착시켰을 때의 방사 패턴 측정 결과를 나타낸 것이다. 안테나 #1을 측정할 때, 안테나 #2는 50 Ω 로 종단시키고, 방사 패턴을 측정하였다. 마찬가지로 안테나 #2를 측정할 때, 안테나 #1은 50 Ω 로 종단시키고, 방사 패턴을 측정하였다.

그림 6. 측정에 사용된 SAM phantom
Fig. 6. SAM phantom used for measurement.

그림 7. 측정 결과와 시뮬레이션 산란 파라미터 특성 비교
Fig. 7. Comparison of the measured and the simulated S-parameter characteristics.

그림 8. 인체부착형 headset MIMO 안테나의 3D 방사 패턴 측정 결과

Fig. 8. Measured 3D radiation patterns of headset MIMO antenna for on-body applications.

그림 8에서 알 수 있듯이, 제안된 안테나의 방사 패턴은 인체 외부 지향성을 보이며, phantom로부터의 이격 거리가 멀어질수록 최대 이득은 증가하나, 그 형태는 유지되는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 제안된 Headset MIMO 안테나의 안테나 최대 이득 및 효율을 측정한 결과이다. 안테나 최대 이득과 효율은 (주)EMW 사의 전자파 무반사실에서 측정하였다. 제안된 MIMO 안테나의 경우, ISM 대역에서 측정된 안테나의 최대 이득은 SAM phantom과 안테나의 거리가 0 mm일 때 $-3.58 \sim -0.2$ dBi, 10 mm일 때 $-0.5 \sim 3.63$ dBi, 20 mm일 때 $0.48 \sim 4.28$ dBi의 값을 나타내며, 측정된 안테나의 효율 또한 거리 0 mm일 때 $6.48 \sim 13.41$ %, 10 mm일 때 $17.22 \sim 32.43$ %, 20 mm일 때 $21.14 \sim 41.45$ %의 값을 나타낸다.

MIMO 안테나 성능 검증을 위해 주로 사용되는 성능 지수인 상관 계수는 방사 패턴으로부터 계산할 수 있는데, 그 과정이 복잡하므로 균일한 다중 경로 환경을 가정하면 측정된 산란 파라미터로부터 상관 계수를 근사화시켜서 식 (1)처럼 구할 수 있다^[11].

$$\rho_c = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (1)$$

일반적으로, 식 (1)의 근사식으로부터 기지국에서는 0.7 이하, 휴대단말기에서는 0.5 이하를 만족해야 격리도 특성을 보장할 수 있다^[12].

그림 10에서는 식 (1)을 사용하여 계산된 상관 계수 값과 Bluetest Chamber^[13]에서 측정한 상관 계수 값을 비교하였으며, 두 값이 유사함을 확인할 수 있

그림 9. 인체부착형 headset MIMO 안테나 최대 이득 및 효율 특성
Fig. 9. Measured peak gains and efficiencies of on-body headset MIMO antenna.

그림 10. 산란 파라미터로부터 추출한 상관 계수와 bluetest chamber에서 측정된 상관 계수의 비교
Fig. 10. Comparison of the measured and the simulated ECC.

다. 측정 결과, ISM 대역에서 0.1 이하의 ECC 값을 가지므로 본 논문에서 제안한 Headset MIMO 안테나

가 우수한 diversity 성능을 갖는 것을 알 수 있다.

MIMO 안테나의 성능을 평가하는 또 하나의 파라미터에는 평균 유효 이득(Mean Effective Gain: MEG)과 MEG 비율이 있다. 평균 유효 이득은 전체 평균 입사 전력과 평균 수신 전력의 비이며, 아래 식과 같이 나타낼 수 있다^[14].

$$\text{MEG} = \frac{\text{Mean Received Power}}{\text{Total Mean Incident Power}}$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\text{XPR}}{1+\text{XPR}} G_\theta(\theta, \phi) P_\theta(\theta, \phi) + \frac{1}{1+\text{XPR}} G_\phi(\theta, \phi) P_\phi(\theta, \phi) \right) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2)$$

여기서, XPR은 교차 편파비를 나타낸다. 균일한 Rayleigh 환경(등방성 환경)에서 $\text{XPR}=1$, $P_\theta = P_\phi = 1/4 \pi$ 이고, MEG는 안테나 전체 방사 효율을 2로 나눈 값과 같다. 즉,

표 2. 제작된 MIMO 안테나의 MEG 측정 결과

Table 2. Measured MEG of the fabricated MIMO antenna.

Freq. [GHz]	Ant #1 (MEG [dB])	Ant #2 (MEG [dB])	MEG ratio
2.4	9.04	8.95	1.01
2.45	7.62	7.88	0.97
2.5	9.89	10.49	0.94

$$MEG_i = \frac{e_{tot}^i}{2} \quad (3)$$

$$e_{tot}^i = e_{mis}^i \cdot e_{rad}^i \quad (4)$$

$$e_{mis}^i = 1 - \sum_{j=1}^N |S_{ij}|^2 \quad (5)$$

또한, 우수한 diversity 이득을 확보하기 위해서는 각각의 안테나로부터 수신된 평균 전력이 거의 같아야 한다. 즉, 수신 안테나의 MEG 비율이 일정한지가 중요한 요소이고, 두 안테나의 MEG 값의 차에 대한 절대값이 3 dB 이내가 되도록 해야 한다^[15].

$$P_i \approx P_j (|MEG_i - MEG_j| < 3 \text{ dB}; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j) \quad (6)$$

표 2는 제작된 안테나의 방사 패턴을 이용해서 구한 MEG 값으로 그 값이 절대값 3 dB 이내이므로 전

그림 11. 인체부착형 headset MIMO 안테나 SAR 분석

Fig. 11. SAR analysis of on-body application headset MIMO antenna.

체 평균 입사 전력과 평균 수신 전력의 비가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

WBAN은 인체와 인체 외 근거리의 전자기기들을 무선으로 연결하는 네트워크이므로 전파가 인체에 미치는 영향에 대한 연구와 검증이 필수적이다. 이를 위해 무선 전송에서 인체에 전달되는 전자파를 정량화한 지표인 SAR를 기준으로 인체로 흡수되는 전자파를 제한하고 있다. 그러나 기존의 연구에서의 SAR 분석은 시뮬레이션 위주의 결과이며, 인체의 형태나 크기 등은 거의 고려가 되지 않았다. 따라서 실제 사용 환경과 유사하도록 SAM phantom을 이용하여 측정을 진행하였다. 국립전파연구원 SAR 측정실에서 제안된 안테나의 SAR를 측정하였다. 그림 11은 제작된 Headset MIMO 안테나의 SAR 측정 결과로서, 공급 전력을 250 mW로 하고 SAM phantom과 안테나의 거리를 3가지로 나누어 측정하였다.

측정 결과, 일반적으로 신체 부분에 흡수되는 전자파 흡수율은 1 g 평균 1.6 W/kg으로 제한한 FCC의 지침을 초과하지 않음을 알 수 있다^[16]. 그러나, SAR 측정시 near field를 scan하고 그 중 최고값인 hot spot을 가지고 규격의 통과 여부를 결정하게 되는데, 이 부분은 PAM이나 안테나 급전부분, 안테나에서 방사가 주된 부분에서 일어나게 되므로 안테나 단품의 측정 결과로 이를 만족했다고 보기는 어렵다. 따라서 SAR 측정 결과를 통해 규격을 만족하기 위해서는 안테나 단품의 측정 결과 및 시작품의 동작 환경에서의 SAR을 고려하여 제품을 설계하여야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 WBAN 환경에서의 인체부착형 Headset MIMO 안테나를 제안하였다. 제안된 MIMO 안테나는 실제 Headset의 크기와 착용 위치 등을 고려하여 설계하였고, 두 개의 방사체는 PIFA 구조로서 서로 가깝게 위치하고 있다. 제안된 MIMO 안테나는 ISM(2.4~2.48 GHz) 대역에서의 반사 손실 10 dB 대역폭을 만족하고, 두 방사체 사이에 isolator를 위치시켜 격리도 특성을 향상시켰다.

MIMO 안테나의 성능을 평가하는 파라미터 중 하나인 상관 계수(ECC)는 ISM 전 대역에서 0.1 이하의 값을 가지므로 MIMO 안테나의 diversity 성능이 우

수함을 입증하였다. 또한, 제안된 Headset MIMO 안테나의 SAR 측정 결과, 공급 전력 250 mW에서 SAM phantom과 안테나의 거리를 3가지로 나누어 측정한 결과, 일반적으로 신체 부분에 흡수되는 전자파 흡수율은 1 g 평균 1.6 W/kg으로 제한한 FCC의 지침을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 인체부착형 Headset MIMO 안테나는 실용이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE 802.11 WLAN WG homepage, <http://www.ieee802.org/11>
- [2] IEEE 802.15 WPAN WG homepage, <http://www.ieee802.org/15>
- [3] 최영우, 김유진, 이형수, 김재영, "IT/BT 융합분야에서의 WBAN 개발 동향", 정보통신산업진흥원, IT 기획시리즈, 융합기술 8, pp. 28-35, 2008년 8월.
- [4] H. Jidhage, A. Stiemann, "Hooked loop antenna concept for bluetooth headset applications", *IEEE Antenna And Propagation Society Symposium*, vol. 4, Jun. 2004.
- [5] K. Subramaniam, M. Esa, and A. Subahir, "Compact printed square meander loop antenna for a bluetooth headset", *Proceedings of the 2005 Asia Pacific Conference on Applied Electromagnetics(APACE2005)*, vol. 5, Dec. 2005.
- [6] 윤영중, 이상훈, 김기준, "WBAN 안테나 설계 기술", 한국통신학회지(정보와 통신), 25(2), pp. 32-40, 2008년 2월.
- [7] B. Widrow, S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall Inc., pp. 302-311, 1985.
- [8] IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate(SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques, IEEE Standard 1528-2003, 2003.
- [9] Human Exposure to Radio Frequency Fields From Hand-Held and Body-Mounted Wireless Communication Devices-Human Models, Instrumentation, and Procedures, Part 1: Procedure to Determine the Specific

- Absorption Rate(SAR) for Hand-Held Devices Used in Close Proximity to the Ear(Frequency Range of 300 MHz to 3 GHz), International Electrotechnical Committee, Geneva, Switzerland, IEC 62209-1, Feb. 2005.
- [10] ANSYS Inc. HFSS(High Frequency Structure Simulator) Ver. 13.
- [11] S. Blanch, J. Romeu, and I. Corbella, "Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description", *IEEE Electronics Letters*, vol. 39, no. 9, May 2003.
- [12] R. G. Vaughan, J. B. Anderson, "Antenna diversity in mobile communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 149-172, Nov. 1987.
- [13] The bluetest high performance chamber. [Online]. Available at: <http://www.bluetest.se>.
- [14] Taga, "Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 117-131, May 1990.
- [15] Y. Shin, S. Park, "Spatial diversity antenna for WLAN application", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 6, pp. 1290-1294, Jun. 2007.
- [16] "Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields", *FCC, Washington, DC, Tech. Rep. OET Bull. 65 Supp. C*, Jun. 2001.

김 성 진

2011년 2월: 서경대학교 정보통신공학과 (공학사)
2011년 3월~현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나 설계, WBAN

권 결

2010년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
2010년 3월~현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 안테나 설계, WBAN, Metamaterial

김 동 호

2009년 2월: 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2011년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학석사)
2011년~현재: 한국항공우주산업 연구원
[주 관심분야] 안테나 설계, WBAN

최 재 훈

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] 안테나 및 마이크로파 회로 설계, EMC