

# LTE, ISM, WLAN에 적용 가능한 Arm 구조 삼중대역 안테나 최적 설계

## The Optimal Design of a Triple-Band Antenna with Additional Arm Resonating Structure for LTE, ISM and WLAN Application

이 승 제\* · 오 승 훈\* · 이 정 혁\* · 김 형 석†  
(Seung-Je Lee · Seung-Hun Oh · Jeong-Hyeok Lee · Hyeong-Seok Kim)

**Abstract** - In this paper, we propose a design of a triple-band microstrip circular patch antenna. The proposed antenna generates the triple frequency resonance at 1.85GHz(LTE), 2.45GHz(ISM) and 5.5GHz(WLAN). Firstly, we design the dual-band antenna. The dual-band antenna consist of the circular patch, slits, and the slot. The circular patch and slot are designed for dual frequency of 2.45GHz and 5.5GHz, respectively. And then the dual-band antenna is combined with additional arm-shaped structure for the triple-band characteristic. The arm-shaped structure is operated as the dipole. It is designed for lowest frequency of 1.85GHz. Each part of the antenna unites to a new structure. In order to design the proposed antenna automatically and optimally, APSO algorithm is adopted. During APSO, the mismatch of the proposed antenna is resolved. The optimal designed antenna has an acceptable return loss(-10dB) at each bands(i.e, 1.85GHz, 2.45GHz and 5.5GHz).

**Key Words** : Triple band antenna, Multi band antenna, Circular patch, Additional resonator, Arm structure

### 1. 서 론

통신 기술의 발달로 전파의 이용범위가 확장되고 있다. 기존의 음성 위주의 통신으로부터 오늘날의 단말기를 이용한 데이터통신에 이르기까지, 통신, 방송, 개인 휴대통신 분야에서 전파의 이용이 급증하였다. 그에 따라 전파분야 설비의 중요성이 부각되고 있다. 특히 휴대용 컴퓨터, 스마트폰 등의 보급이 확산됨에 따라 유선의 공간적 한계를 극복하며 인터넷에 연결시키는 무선 LAN의 활용이 폭발적으로 증가하고 있다[1]. 또한 무선 설비 및 소자 설계의 중요성이 부각되고 있다. LAN을 구성하기 위해선 안테나는 필수적인 요소로 꼽히며 현재 주 상용대역으로 꼽히는 주파수 대역은, Industrial, Scientific and Medical(ISM) 대역과 Wireless Local Area Network(WLAN)대역이다. 현재 IEEE802.11a 표준에 따르면 ISM대역은 국내에서 2.45GHz 대역을 중심으로 2.4 - 2.435GHz 까지 대역으로 Bluetooth, RFID 시스템 등 다양한 용도로 활용되는 주파수 대역이다. WLAN 대역의 경우 IEEE802.11b 표준에 따라 사용범위가 5.15~5.8GHz 대역으로 기존의 무선 네트워크를 구성하는 주요한 주파수이다[2]. 뿐만 아니라 현재 무선통신의 가장 중요한 적용은

모바일이라고 할 수 있을 것이다. 현재 기존의 3G 통신을 넘어 현재 LTE-A에 이르기까지 최근 10년간 많은 발전을 해왔고, 현재 국내 통신 배급사에서 이용하는 다운링크 대역은 1.85GHz와, 2.3GHz 대역을 사용하고 있다.

앞서 언급한 1.85, 2.45, 5.5GHz의 주파수 대역은 각각 단일 트랜시버에서 모두 처리할 수 있어야 한다. 하지만 안테나가 시스템 내부에서 차지해야하는 유효면적을 고려했을 때 이러한 다중주파수는 하나의 안테나로 처리되는 것이 유용하다.

다중 대역 안테나는 개별 대역 공진구조를 같은 공간 내 삽입하여 다중대역의 특성을 부여 할 수 있다. 각각의 공진 구조는 서로에게 독립적이어야 하며, 공진을 할 때 서로 다른 공진 특성을 보여야 한다. 하지만 다중의 공진구조가 결합된 안테나는 각 구조물 간 간섭이 심해지고 구조가 복잡해져서 설계의도와는 다르게 공진특성이 틀어지게 되며, 이를 다시 정합하기 위해 많은 시행착오적인 시간과 불필요한 전자기 해석 과정이 소요될 수 있다. 또한, 재연성 없는 부정확한 설계 결과를 얻을 위험성이 있다[3].

따라서 본 논문에서는 앞서 언급한 세 주파수에서 공진하는 구조를 결합한 새로운 구조의 삼중대역 안테나를 제안한다. 안테나는 슬릿과 슬롯을 이용한 이중대역 원형 패치 안테나와 Arm 형태의 추가 공진구조를 결합하여 삼중대역 특성을 갖도록 설계되었다. 특히 설계과정에서 소요되는 시간과 불필요한 해석과정 및 구조 간 전자기 간섭으로 인한 오류를 줄이고, 설계의 재연성 확보를 위해 APSO 최적화 알고리즘을 이용하여 안테나를 최적 설계하였다.

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Korea  
E-mail: kimcaf2@cau.ac.kr

\* School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Korea

Received : November 05, 2014; Accepted : November 19, 2014

## 2. 안테나 구조 및 설계

본 논문에서 제안하는 구조는 원형패치 안테나를 기본으로 슬롯과 슬릿을 삽입하여 이중대역을 구현한다. 구현된 이중대역 안테나와 Arm 형태의 추가 공진 구조를 삽입함으로써 삼중대역 안테나의 특성을 부여하는 것을 목표로 하였다. 먼저 각 구조물의 특성을 파악하고, 두 구조의 결합을 통하여 삼중대역의 특성을 확인하도록 한다.

### 2.1 슬릿/슬롯을 적용한 원형 패치 안테나

마이크로스트립 패치 안테나는 주파수의 전기적인 길이에 기인하여 공진하게 된다. 추가적인 공진을 위한 구조를 결합하는 것이 용이하도록 안테나의 기본구조로서 원형 패치를 이용한다. 원형패치 안테나의 공진 주파수에 따른 설계 공식은 식 (1)~(3)과 같다.

$$f_r = \frac{1.8412}{2\pi F \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1.8412 \times c}{2\pi F \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

$$R = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[ \ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

식 (1)~(3)에서 R은 원형 패치의 반지름이다. 1.8412는 TM110mode에서 Bessel Function의 도함수의 해이며  $\epsilon_r$  은 비유전율,  $\mu$ ,  $\epsilon$ 은 각각 투자율, 유전율을 의미한다.  $f_r$ 은 공진주파수,  $c$ 는 빛의 속도이며 F는 식 (1)과 식 (3)의 관계를 연결해주는 변수이다.[4][5]. 식 (1)~(3)에 의거하여 2.45GHz에서 동작할 수 있는 원형 패치의 형태를 설계한다. 특히, 마이크로스트립 라인을 이용한 급전의 경우 선로 폭에 의해 임피던스가 결정된다. 패치 안테나의 경우 각 주 주파수 별 공진구조의 형태 및 임피던스가 다르고, 구조물 형태의 변화에 따라 임피던스가 변화하기 때문에 임피던스 정합의 어려움이 발생한다. 따라서 안테나 구조에 따른 임피던스 정합 문제를 해결하기 위해 동축선로 형태의 급전을 사용하였다.

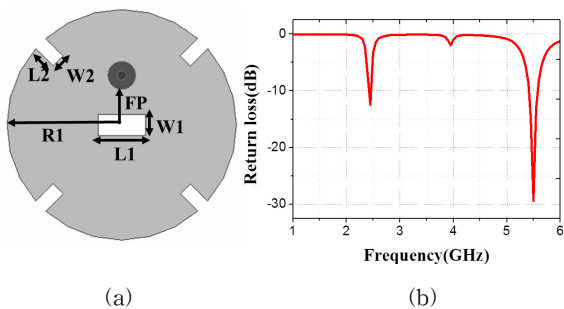


그림 1 슬롯과 슬릿이 추가된 원형 패치 안테나 (a) 안테나 형상 (b) 반사손실 그래프

Fig. 1 The circular patch antenna with slot and slit (a) Top view of the antenna (b) Return loss

표 1 원형 패치 안테나 설계변수

Table 1 Design parameters of the Circular patch antenna

unit (mm)	R1	L1	W1	L2	W2	FP
size	16	3	6.7	3.5	2	5

앞서 설계된 원형 패치 안테나에 슬롯을 삽입하여 이중대역의 특성을 구현하였다. 아래 그림 1(a), 표 1의 형태와 같이 원형패치 내부에 슬롯을 삽입하여 안테나를 구현하였으며, 그림 (b)와 같이 설계된 안테나의 이중대역의 동작 특성을 확인하였다. 설계된 원형 패치 안테나는 2.45GHz와 5.5GHz에서 동작을 하게 된다. 2.45GHz에서 원형 패치 자체의 공진 주파수 특성에 따라 공진하게 되며, 5.5GHz에서는 안테나 내부 슬롯을 이용하여 공진하게 된다. 또한, 원형 패치 안테나를 사각의 슬릿 형태로 식각하여 전체적인 원형 패치 안테나를 소형화 하였다.

### 2.2 Arm 공진 구조

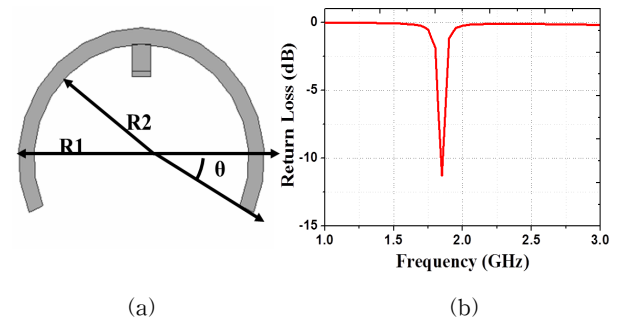


그림 2 Arm 모양의 안테나 (a) 안테나 형상 (b) 반사손실  
Fig. 2 Arm-shaped antenna (a) Layout of antenna (b) Return loss

표 2 Arm 모양의 안테나 설계변수

Table 2 Design variables of arm-shaped antenna

unit (mm)	R1	R2	$\Theta$	w
size	21	24	29.74°	2

Arm 구조 형태의 안테나는 공간적 활용도를 높이기 위해 원형 패치 안테나 주변에 배치하는 형태로 설계 될 수 있다 [6]. 원형 패치의 주변에 위치할 Arm 형태의 안테나는 그림 2(a), 표 2 와 같이 설계되었다. 해당 구조물은 1.85GHz에서 공진하도록 설계되었으며, Arm 구조물의 경우 최 외각길이에 대해 주파수의 전기적인 길이 공진 관계( $=\lambda/2$ )에 따라 공진을 하게 된다. 즉, 설계된 Arm 구조 형태의 안테나는 dipole안테나로서 동작할 수 있다. 원형 패치와 결합을 위해 Arm 구조 중앙에 급전부를 위치 시켰으며, 안테나의 공진 특성은 그림 2(b)와 같이 1.85GHz에서 공진하는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3 제안 안테나 구조

그림 1에서 제시된 원형 패치 안테나와 그림 2 제시된 Arm 구조의 안테나를 결합하였고, 삼중대역의 특성의 안테

나를 그림 3(a)와 같이 설계 할 수 있다. 특히, 두 구조를 서로 결합하면, 원형 패치 안테나의 방사를 Arm 구조가 저해할 수 있기 때문에 두 구조간의 이격거리를 확보는 필수적인 설계 요소라 할 수 있다. 뿐만아니라 두 구조체는 하나의 급전 선로로 연결되어 있기 때문에 전류 유입이 발생하여 두 구조의 공진 특성도 의도한 바와 다르게 바뀔 수 있다.

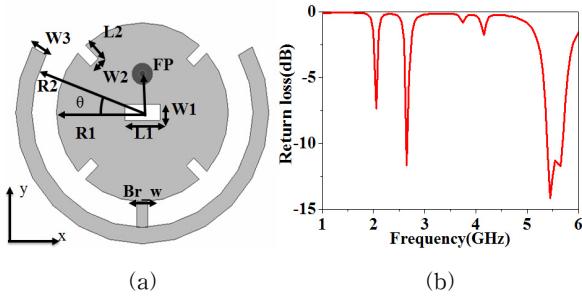


그림 3 Arm 구조 추가된 원형 패치 안테나 (a) 안테나 형상 (b) 반사손실 그래프

Fig. 3 The circular patch antenna with additional arm structure (a) Top view of antenna with arm-geometry (b) Return loss

표 3 제안된 안테나의 설계변수

Table 3 Design parameters of the proposed antenna

unit (mm)	R1	L1	W1	L2	W2	Fp
size	16	3	6.7	3.5	2	5
	R2	Br_w	θ			
size	21	2	29.74°			

그림 3과 같이 해당 구조에서는 세 가지 구조물이 결합된 형태이기 때문에 전기적 길이의 변화 및 임피던스 정합의 문제가 발생하여 공진 주파수가 변화하였다. 또한 임피던스 정합의 문제 때문에 전반적 Return loss가 -10dB 이하의 반사손실 또한 얻을 수 없었다.

2.4 APSO알고리즘을 이용한 최적화

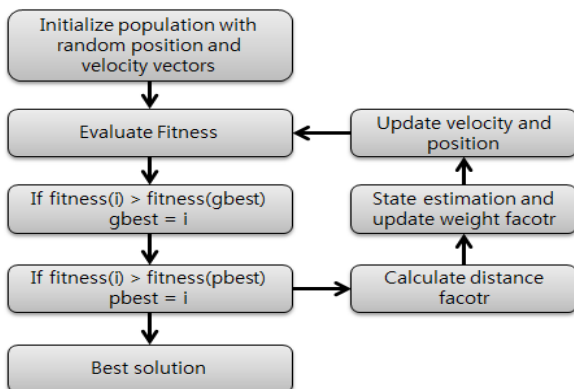


그림 4 APSO 알고리즘 순서도 Fig. 4 The flow chart of APSO algorithm

그림 3에 제시된 안테나는 두 구조가 서로 공진에 많은 전자기 간섭을 미치게 된다. 구조간의 전자기 간섭으로 인한 임피던스 부정합 문제를 해결하고, 정확한 공진을 만족하기 위해서는 정밀한 설계변수의 수정과정이 필요하다. 하지만 세 가지의 구조물이 결합된 형태이고, 3가지 목표 주파수 중 한 주파수에 대한 모든 주파수에서 정확한 동작을 해야 하기 때문에 매우 세밀한 설계 수정과정이 필요하다. 또한 하나의 설계변수에서 안테나의 특성이 매우 민감하게 변화함으로 기존의 시행착오적 방법을 이용한 설계기법 사용의 한계가 존재한다. 설계 소요 시간 감소 및 신뢰성 있는 동작 및 재연성 있는 설계를 위하여 APSO알고리즘을 적용한 최적화를 수행하였다.

APSO는 빠른 수렴속도를 위하여 PSO 알고리즘에서 변형된 방법이다. 기본적인 알고리즘의 흐름 및 위치 업데이트 방식은 PSO와 동일하지만, 입자의 위치에 따라 탐험(exploration), 개발(exploitation), 수렴(convergence), 도약(jumping out)의 4가지 경우의 조건을 추가한다. 각 추가된 경우에 따라서 속도 업데이트 과정의 가속도 계수를 변화시켜 수렴속도를 개선한다. 그림 4는 APSO 알고리즘의 순서도를 보여주고 있다[7].

그림 4는 알고리즘의 순서도이다. Gbest/Pbest 각각 전체 세대수 입자에서의 최소점과, 입자 이동 경로 중의 최소점을 의미한다. 다음 순서에 따라서 입자의 위치 업데이트 과정을 거친다. 거리 인자 계산의 경우 각 임의로 배치된 입자와 Gbest와 거리 차를 바탕으로 현재 Gbest가 위치한 곳의 정보를 구분하고 식 (4)를 이용하여 계산하며 d는 입자간 위치정보, f는 입자간 거리인자를 의미한다.

$$f = \frac{d_g - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \tag{4}$$

가속도 상수 제어는 거리 인자를 바탕으로 상태를 탐험, 개발, 수렴, 도약 4가지의 경우로 구분하여 가속도 상수를 변화시킨다. 식 (4)에서 계산된 거리인자를 바탕으로 각각 경우에 따라 가속도 상수를 조절하게 된다. 가중치 상수 w(f)의 경우 식 (5)를 통하여 조절된다.

$$w(f) = \frac{1}{1 + 1.5e^{-2.6f}} \in [0.4, 0.9] \tag{5}$$

개선된 가속도 상수와 가중치 상수를 이용하여 속도 업데이트를 수행하고 속도 자료를 기반으로 다음 입자의 위치를 업데이트 한다. 속도는 현재의 위치와 속도의 정보를 바탕으로 Pbest와 Gbest의 정보를 이용하여 업데이트 한다. 입자의 속도는 식 (6)과 같이 Pbest와 Gbest의 상대적 위치에 따라 변경된다.

$$v_n(i+1) = w(i) \cdot v_n(i) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best,n}(i) - x_n(i)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best,n}(i) - x_n(i)) \tag{6}$$

식(6)에서 n은 알고리즘에 삽입된 설계변수를 구분하기 위한 지표이며, v\_n(i)는 각 입자의 속도이고 x\_n(i)는 i번째 반복 과정에서 각 입자의 위치를 나타낸다. 그리고 w(i)는

초기속도 가중치이며  $c_1$ 과  $c_2$ 는 각 입자가 Pbest와 Gbest로 향하는 확률적인 가속의 가중치를 표현한다.  $r_1$ 과  $r_2$ 는 0과 1사이의 임의의 변수이다. 속도 업데이트를 바탕으로 위치 업데이트 과정을 수행한다. 식 (7), (8)을 이용하여 다음 위치의 정보를 얻을 수 있다.  $x_n^{min}$ 과  $x_n^{max}$ 는 설계변수의 초기 제한조건을 나타낸다. 즉, 다음 세대  $x(i+1)$ 은 설계변수 제한범위 범주 내에서 벗어날 수 없는 구속조건을 가지게 된다.

$$x_n(i+1) = x_n(i) + v_n(i+1) \tag{7}$$

$$x_n^{min} \leq x_n(i+1) \leq x_n^{max} \tag{8}$$

각 입자들의 위치에서 해를 계산하고 식(7)~(8) 과정을 통해 일련의 과정을 반복 수행한다. Gbest의 결과와 수렴조건을 비교하여 만족 시 최적화과정을 종료한다.[8]

제안된 안테나의 설계변수는 패치 반지름(R1)과 슬롯 사이즈(L1, W1), 공진구조(R2), 브릿지(Br\_w)와 급전부 위치의 좌표(FP\_x, FP\_y)로 총 7개이며, 최적화를 위하여 5개의 개체를 사용한다. 목표 성능에 대한 목적함수는 다음과 같이 정의한다. 공진 구조가 아닌 급전부의 위치를 설계변수에 포함시킨 이유는 급전부의 위치에 의한 안테나의 전기적 길이변화에 의하여 공진에 영향을 끼칠 수 있으며, 동축선로를 이용한 급전의 경우 동축선로의 위치에 의한 임피던스 정합이 결정되고 민감도가 매우 높기 때문에 최적설계과정의 설계변수에 포함하였다.

$$\text{Minimize} : F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{9}$$

$$F_1 = (f_{o,1} - f_{obj,1})^2 \tag{10}$$

$$F_2 = (f_{o,2} - f_{obj,2})^2 \tag{11}$$

$$F_3 = (f_{o,3} - f_{obj,3})^2 \tag{12}$$

식 (9)~(12)은 목적함수를 나타낸다.  $f_o$  는 공진 주파수이며, 3개의 목표 공진주파수에 대하여  $f_{obj,1} = 1.85GHz$ ,  $f_{obj,2} = 2.45GHz$ ,  $f_{obj,3} = 5.5GHz$ 로 설정한다. 채택한 목적함수의 형태는 공진점 비교방식으로서 목표주파수 주변에 일정한 주파수 구간을 설정하고 구간 내 최소의 반사손실과 목표주파수의 값을 비교하는 방식으로 선정하였다.

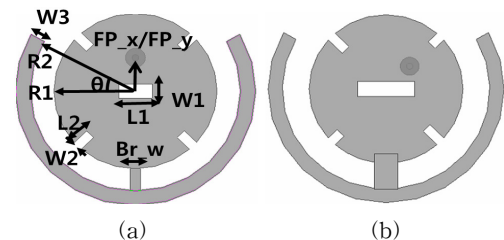


그림 5 최적화 전과 후의 안테나 구조 (a) 초기 형상 (b) 최적화 후의 형상

Fig. 5 The antenna shape changes by the proposed method (a) Initial shape (b) Optimized shape

그림 5를 보면 두 가지 구조를 연결한 브릿지의 폭이 넓어지고, 안테나 내부 슬롯의 길이가 전반적으로 길어졌다.

또한 임피던스 정합을 위하여 급전부의 위치가 우측으로 변화한 것을 확인할 수 있다. 또한 1.85GHz에서의 공진을 위하여 외각구조의 반지름의 길이가 더 증가한 모습을 확인할 수 있다. 최적화를 통해 변화된 안테나의 형태에 따른 설계변수 자세한 값은 표 4와 같으며 각각의 설계 변수는 최적화 후 많은 변화가 있음을 알 수 있다.

표 4 안테나 초기 설계변수 및 최적화 결과

Table 4 Initial and optimal design parameters of the antenna

unit (mm)	R1	R2	L1	W1
Initial	16.5	21	13	2
Optimal	16.52	22.02	13.58	3.8
	FP_x	FP_y	Br_w	
Initial	-5	0	3.5	
Optimal	-5.81	3.02	3.53	

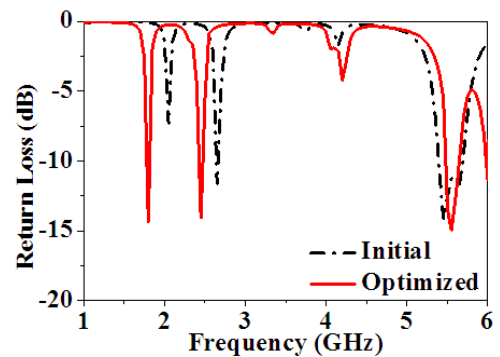


그림 6 최적화 전과 후의 안테나의 반사 손실

Fig. 6 Return loss of the antenna before and after optimization

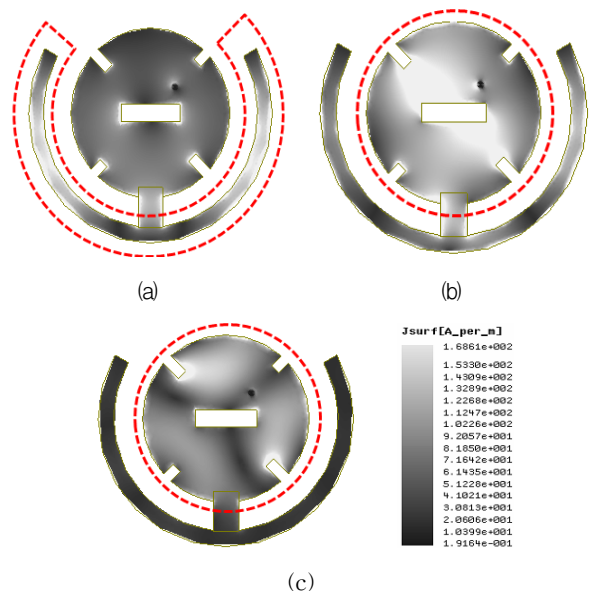


그림 7 주파수 별 전류분포 (a) 1.85GHz 전류분포 (b) 2.45 GHz 전류분포 (c) 5.5GHz 전류분포

Fig. 7 Current distribution of frequencies (a) 1.85GHz (b) 2.45GHz (c) 5.5 GHz

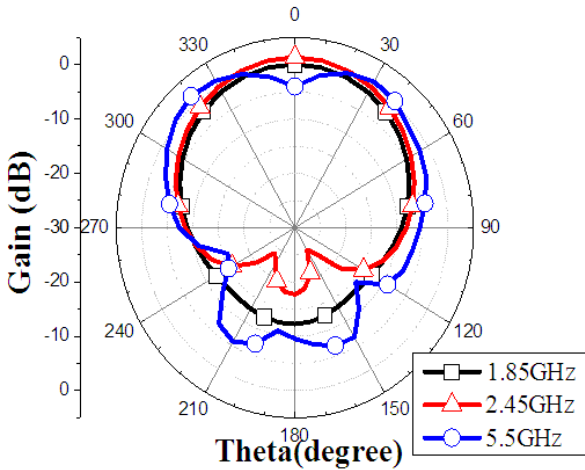


그림 8 제안된 주파수 대역(1.85, 2.45, 5.5GHz)에서의 방사패턴  
 Fig. 8 Radiation pattern at the proposed bands(1.85, 2.45, 5.5GHz)

APSO를 이용한 최적화 결과 목적함수는 25번에 수렴하였으며, 최적화 결과 3가지의 목표주파수에서 우수한 반사특성을 확인할 수 있었다. 최적화 안테나의 방사패턴과 전류분포 및 안테나 이득에 대해서 확인하여 본 결과 위와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 안테나 이득의 경우 각각 1.85/2.45/5.5GHz에서 각각 0/1.5/1.6 dB의 gain을 확인할 수 있었으며 방사패턴은 위와 같은 형태를 가지고 있다. 파의 발산은 무지향성의 특징을 가지고 있으며 5.5GHz에서 외각 구조 및 내부 슬롯의 영향으로  $\pm 40^\circ$  방향으로 파가 집중된 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 7은 1.85/2.45/5.5GHz에서 각각의 전류분포를 나타내고 있다.

### 3. 안테나 제작 및 측정

해당 시뮬레이션을 통해 안테나의 동작 성능을 확인하였으며 실제 제작 및 측정을 통하여 안테나의 실질적인 동작에 대해서 확인하여 보았다. 그림 6과 같이 FR4기판 위에 안테나를 제작하여 반사특성을 확인한 결과 그림 8과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 제작 및 측정 결과 목표 주파수 대역에서 안정적 성능을 보였다.

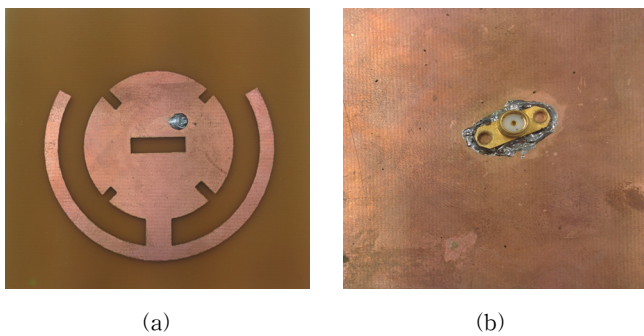


그림 9 최적화 설계된 안테나의 형상 (a) 윗면 (b) 뒷면  
 Fig. 9 The fabrication of the optimized antenna (a) Top-view (b) Bottom-view

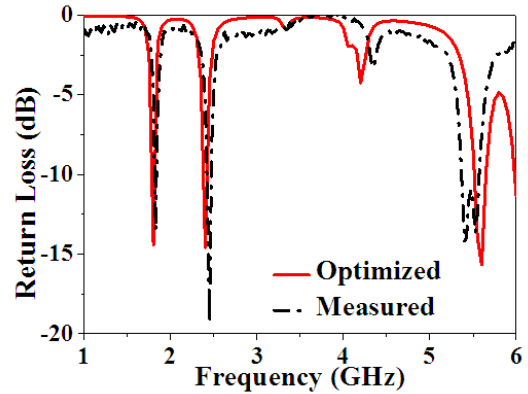


그림 10 제작된 안테나의 반사 손실 그래프  
 Fig. 10 Measured return loss of manufactured antenna

### 4. 결 론

본 논문에서 제안된 안테나는 기존의 안테나 구조에 새로운 공진구조를 삽입함으로써 삼중대역에서 공진 하도록 설계되었다. 원형 패치 안테나에 슬롯을 삽입하여 이중대역의 특성을 부여하고 슬롯을 사용하여 안테나의 크기를 축소하였으며, Arm 형태의 공진구조를 결합하여 삼중대역 특성을 가지도록 안테나를 설계하였다. 각 구조에 대해 전자장 해석을 통하여 안테나의 동작을 확인하였을 때 원형 패치 안테나는 2.45, 5.5GHz에서 동작하였고, Arm 구조는 1.8GHz에서 동작하는 것을 확인하였다. 두 구조를 결합하였을 때 기존 패치 내부의 공진형태와 임피던스 정합 형태가 달라지는 문제로 안테나의 주파수 특성이 변화하는 것을 확인하였고, 목표 주파수에서 정확한 동작 및 안테나의 신뢰성 있는 설계를 위하여 APSO 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 5개체 25세대에서 수렴하였고, 목표주파수에서 -10dB이하의 반사손실 특성을 확인하였다. 제안된 삼중대역 안테나는 LTE, ISM, WLAN과 같은 통신대역을 복합적으로 사용하는 통신기에 유용하게 사용되어질 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 공진구조간 간섭이 심한 결합구조의 최적화 설계 과정은 실제 RF 소자 설계의 신뢰성을 확보하고 인력 소모를 절약 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

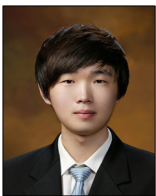
본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 결과입니다. (2012R1A1A2007758)

### References

[1] In-Gon Lee, Ic-Pyo Hong, "Design of Uiplanar Antenna of 2.45GHz Band for Wireless LAN Using Dipole Structures", The Journal of Korean Institute of Information Technology, JKIIIT, Vol.9, No.10, pp. 29-34, 10, 2011.

- [2] IEEE-SA Standards Board, "IEEE Std 802.11b-1999", 1999 Edition.
- [3] Dong-Hyeok Jang, Seong-In Kang, Jeong-Hyeok Lee, CHAO WU, Hyeong-Seok Kim, "performance comparison of 2.45GHz circular polarization antenna optimal design using GA and ES algorithm", Proceedings of the ITFE Summer Conference, pp. 105-108, August 28-30, 2014
- [4] Young-Sang Kim, Seung-Jin Noh, Nam-Soo Kim, Jin-Hyun Ko, Jae-Kwon Ha, "Design of a Single-Feed Dual-Band Circular Antenna for Reception of S-DMB and ITS Services", The Journal of Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol.17, No.9, pp. 866-873, 9, 2006.
- [5] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, Hoboken, 2005.
- [6] Sana Arif, Syeda Areeba Nasir, Muhammad Mastaqim, and Bail A.Khawaja, "Dual U-slot Triple Band Microstrip Patch Antenna for Next Generation Wireless Networks", IEEE International Conference on Emerging Technologies(ICET), pp. 1-6, Dec. 2013.
- [7] Zhi-Hui Zhan, Jun Zhang, Yun Li, and H.S.-H. Chung, "Adaptive Particle Swarm Optimization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol. 39, no. 6, pp. 1362-1381, Dec. 2009.
- [8] Kun-Tae Kim, Hyeong-Seok kim, "A Comparative Study on the PSO and APSO Algorithms for the Optimal Design of Planar Patch Antennas", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 11, pp. 1578~1583, 2013

저 자 소 개



**Seung-Je Lee** was born in Jeollanam-do, South Korea in 1988. He is working toward the B.S. degree in electrical and electronics engineering at Chung-Ang University, South Korea in 2014. His interests include analysis of RF components, antennas.



**Seung-Hun Oh** was born in Buan, South Korea in 1988. He received his B.S. degree in electrical and electronics engineering from Chung-Ang University, South Korea in 2013. He is working toward the M.S. degree in electrical and electronics engineering at the same university. His interests include optimize design of passive component, equivalent circuit model, analysis on RF components, and metamaterial.



**Jeong-Hyeok Lee** was born in Gyeonggi, South Korea in 1987. He received his B.S. degree in electrical and electronics engineering from Chung-Ang University, South Korea in 2013. He is working toward the M.S. degree in electrical and electronics engineering at the same university. His interests include optimal and robust design of passive components, FEM, and embedded systems.



**Hyeong-Seok Kim** was born in Seoul, South Korea in 1962. He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Seoul National University, South Korea in 1985, 1987, and 1990, respectively. From 1990 to 2002, he worked with the Division of Information Technology Engineering, Soonchunhyang University in Asan, South Korea. He was a Visiting Professor of Electrical Computer Science Engineering at the Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, New York in 1997. He transferred to the School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul, South Korea as a professor in 2002. His current research interests include numerical analysis of electromagnetic field and waves, optimal and robust design of passive components for wireless communication, RFID applications, wireless power transmission, and electromagnetic education.