

# 진화 알고리즘을 이용한 삼중 대역 PIFA 최적 설계 프로그램의 구현

## Development of an Optimal Design Program for a Triple-Band PIFA Using the Evolution Strategy

고재형 · 김군태 · 김동훈\* · 김형석

Jae-Hyeong Ko · Koon-Tae Kim · Dong-Hun Kim\* · Hyeong-Seok Kim

### 요 약

본 논문에서는 진화 알고리즘을 이용하여 U형 슬롯을 갖는 433 MHz, 912 MHz 및 2.45 GHz의 삼중 대역 PIFA(Planar Inverted-F Antenna)를 설계할 수 있는 프로그램 구현에 대해 다룬다. 일반적으로 U형 슬롯의 넓이와 길이에 따라 개구형 공진 주파수를 결정할 수 있으나, 두 개의 U형 슬롯의 영향으로 공진 주파수가 변화하기 때문에 진화 알고리즘을 이용한 최적 설계 프로그램을 통하여 최적의 U형 슬롯의 넓이와 길이를 구하였다. 변이와 재생산의 반복 과정을 통해 설계 목표에 적합한 설계 변수 값을 찾는 진화 알고리즘을 자동화하기 위하여 상용 전자장 해석 프로그램과 최적 설계 프로그램간의 연동 인터페이스를 구축하였다. 구현한 최적 설계 프로그램을 통한 삼중 대역 PIFA 시뮬레이션 결과는 430 MHz, 910.5 MHz 및 2.458 GHz의 공진 주파수를 갖는다.

### Abstract

In this paper, we deal with the development of an optimal design program for a triple-band PIFA(Planar Inverted-F Antenna) of 433 MHz, 912 MHz and 2.45 GHz by using evolution strategy. Generally, the resonance frequency of the PIFA is determined by the width and length of a U-type slot used. However the resonance frequencies of the multiple U slots are varied by the mutual effect of the slots. Thus the optimal width and length of U-type slots are determined by using an optimal design program based on the evolution strategy. To achieve this, an interface program between a commercial EM analysis tool and the optimal design program is constructed for implementing the evolution strategy technique that seeks a global optimum of the objective function through the iterative design process consisting of variation and reproduction. The resonance frequencies of the triple-band PIFA yielded by the optimal design program are 430 MHz, 910.5 MHz and 2.458 GHz that show a good agreement to the design target values.

Key words : Optimum Design, Evolution Strategy, Triple-band PIFA

### I. 서 론

무선 통신 시장의 급격한 성장에 따라서 이동 통신 단말기의 다양한 발전이 이루어지고 있다. 휴대용 전화를 비롯한 각종 기기들은 소형화, 다기능화,

정량화되는 추세이며, 특히 전체 단말기의 크기를 줄이는 것이 일반적인 흐름이다. 안테나 시장은 작고, 고효율, 다중 대역 및 광대역, 적은 비용 등의 요구로 소형 및 고효율의 안테나 개발이 필수적인 요소가 되었다. 또한, 하나의 안테나로 여러 대역을 사용할

「본 논문은 2008년도 중소기업 산학연 공동기술개발지원사업의 지원에 의해 수행되었음.」

중앙대학교 전자전기공학부(School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

\*경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20090529-10S

· 수정완료일자 : 2009년 8월 12일

수 있는 다중 대역 및 광대역 안테나의 중요성도 점점 부각되고 있다. 이에 최근 다중 대역 및 소형 안테나에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 평면형 안테나 중에서는 PIFA(Planar Inverted-F Antenna)에 관한 연구가 가장 활발하다. PIFA는 패치 길이가 반파장의 1/4정도로 안테나의 크기를 소형화할 수 있어 소형 안테나로 PIFA를 많이 적용하고 있다. 일반적으로 PIFA의 다중대역 기법으로는 기생 소자를 이용하는 방법, 슬릿(slot)을 이용하는 방법<sup>[1]</sup>과 L형 및 U형 슬롯(slot)을 이용하는 방법<sup>[2]</sup> 등이 있다.

U형 슬롯 방법에서 공진주파수는 U형 슬롯의 넓이와 길이에 따라 결정된다. 따라서 다중 대역 PIFA 설계에서 U형 슬롯을 포함한 패치의 설계는 매우 중요하다. 일반적으로 U형 슬롯은 목표 공진 주파수에 따라 기본 길이를 계산한다<sup>[3]</sup>. 그러나 설계 목표 주파수에서 공진을 하기 위해서는 정확한 U형 슬롯의 길이를 찾아야 한다. 이때 많은 경우 설계자의 직관과 경험에 의존하는 시행착오를 통해 설계 변수 값을 결정하고 있다. 그러나 설계자의 노하우에 의존하는 경우에는 새로운 안테나 설계 과정마다 많은 시간과 비용이 소요되는 어려움이 있다. 이러한 기존 설계 기법의 문제점을 해결하기 위해 최근에 안테나 설계에서 기존의 구조를 개선하거나 설계 시간을 단축하기 위한 최적화 기법이 소개되고 있다<sup>[4]-[6]</sup>.

본 논문에서는 비결정론적 최적화 방법 중의 하나인 진화 알고리즘(evolution strategy) 기법<sup>[7]</sup>을 통한 PIFA 최적 설계를 수행하였다. 진화 전략 기법은 설계 변수와 돌연변이 요소를 이용하여 최적의 설계 변수값을 찾아가는 기법이다. U형 슬롯의 최적 설계 변수값을 찾기 위해 전자장 해석 프로그램에서 제공하는 스크립트 명령어(script command)를 이용하여 진화 알고리즘과 전자장 해석 프로그램과 연동하는 최적 설계 프로그램을 엑셀(excel)과 비주얼 베이직(visual basic)을 이용하여 구현하였다.

## II. 본 론

### 2-1 삼중 대역 PIFA 구조 설계

U형 슬롯을 갖는 PIFA 구조의 삼중 대역 안테나를 그림 1과 같이 설계하였다. 설계된 안테나는 사각형의 기본 패치와 2개의 U형 슬롯으로 구성되어 433

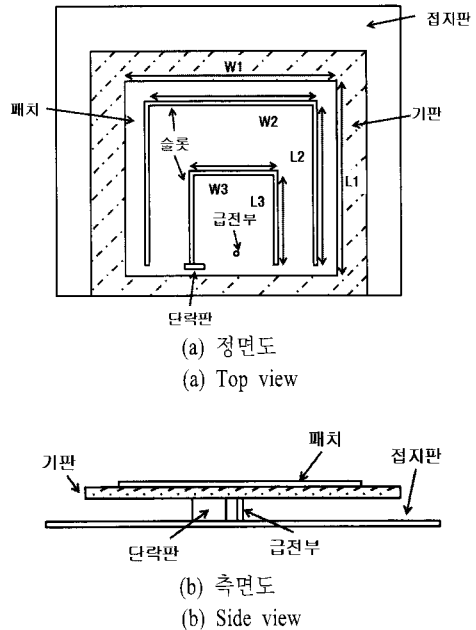


그림 1. 설계한 삼중 대역 PIFA 구조  
Fig. 1. Structure of designed triple-band PIFA.

MHz와 912 MHz 및 2.45 GHz에서 공진 주파수를 갖도록 하였다.

일반적으로 기본 패치에 의해 가장 낮은 공진 주파수를 형성한다. 기본 패치 내부에 있는 U형 슬롯의 넓이( $W_{2,3}$ )와 길이( $L_{2,3}$ )에 의해 높은 공진 주파수가 식 (1)과 같이 결정된다<sup>[8]</sup>.

$$f_0 = \frac{c}{4(W+L)} \quad (1)$$

두 개의 U형 슬롯이 있는 안테나 설계 시에 많은 경우 낮은 주파수에 기본 패치 크기를 결정하고 중간 주파수에 따라 첫 번째 U형 슬롯의 넓이와 길이를 결정한다. 두 번째 U형 슬롯은 높은 주파수에 따라 결정하는 순서로 설계한다. 하지만, 그림 2와 같이 기본 패치의 넓이와 길이가 각각 85 mm, 85 mm 일 때 낮은 공진 주파수는  $W_2$ 와  $L_2$  모두 41 mm를 갖는 첫 번째 U형 슬롯에 의해 498.5 MHz에서 445 MHz로 낮아진다. 또한, 각각 15 mm와 15 mm의  $W_3$ 와  $L_3$ 의 U형 슬롯에 의해 낮은 공진 주파수는 439.5 MHz로 낮아질 뿐만 아니라, 첫 번째 41 mm의 U형 슬롯에 의한 중간 공진 주파수가 1,005 MHz에서 981.5 MHz로 낮아진다. 기본 패치 내부에 41 mm와 15 mm의 U형 슬롯이 추가됨에 따라 기존의 공진

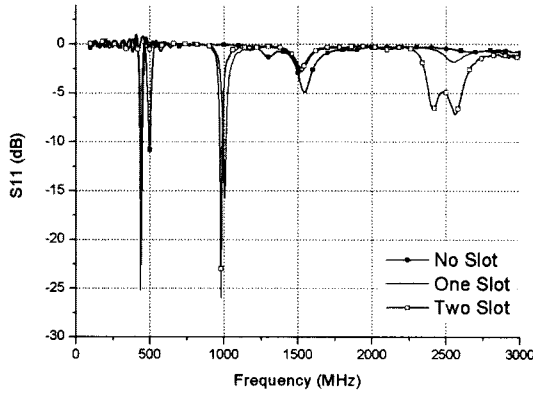


그림 2. U형 슬롯의 수에 따른 반사계수( $S_{11}$ ) 변화  
Fig. 2. Variation of  $S_{11}$  vs. U-slot numbers.

주파수는 낮아지는 것을 그림 2에서 확인할 수 있다.

두 개의 U형 슬롯의 설계 변수가 각각  $W_2=L_2=41$  mm와  $W_3=L_3=15$  mm일 때 하나의 설계변수를 변화시키며 공진 주파수 변화를 확인하였다. 이때 변경되는 설계변수 이외의 나머지 설계 변수는 일정한 값을 갖도록 하였다.

그림 3과 4에서 첫 번째 U형 슬롯의 설계 변수인  $W_2$ 와  $L_2$ 가 각각 36~46 mm의 변화에 따라 중간 공진 주파수의 위치가 변하는 것은 물론 높은 공진 주파수의 반사계수 또한 변하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5와 6에서는 두 번째 U형 슬롯의  $W_3$ 과  $L_3$ 이 각각 12~18 mm의 변화에 따른 안테나의 반사계수 변화를 나타내었다. 높은 공진 주파수의 특성 변화와 함께 중간 공진 주파수의 공진 위치가 변하는 결과를 확인할 수 있다.

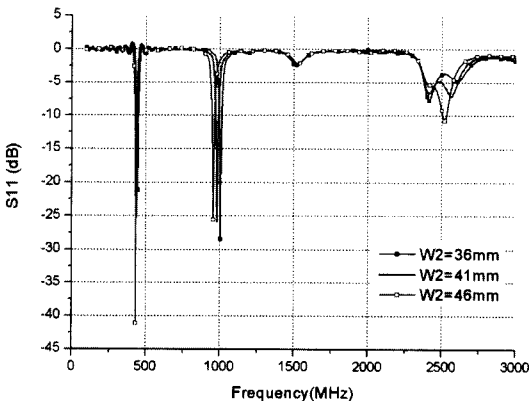


그림 3.  $W_2$ 에 따른 반사계수( $S_{11}$ ) 변화  
Fig. 3. Variation of  $S_{11}$  vs.  $W_2$ .

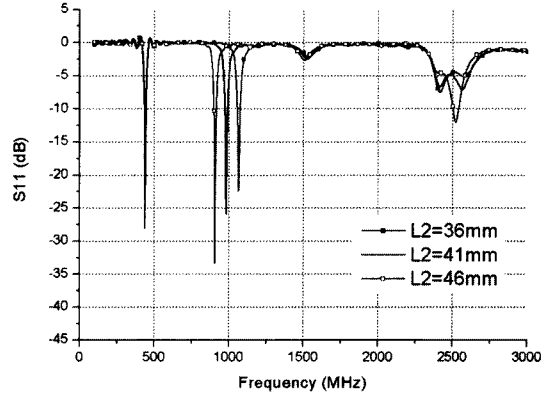


그림 4.  $L_2$ 에 따른 반사계수( $S_{11}$ ) 변화  
Fig. 4. Variation of  $S_{11}$  vs.  $L_2$ .

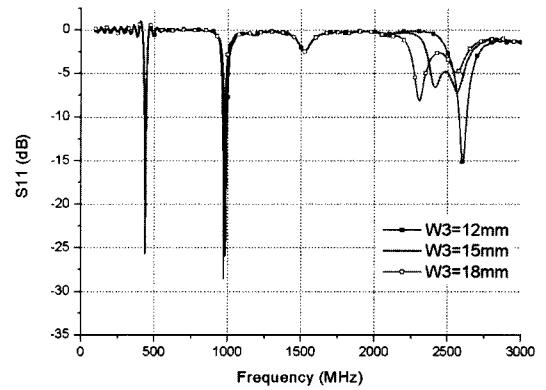


그림 5.  $W_3$ 에 따른 반사계수( $S_{11}$ ) 변화  
Fig. 5. Variation of  $S_{11}$  vs.  $W_3$ .

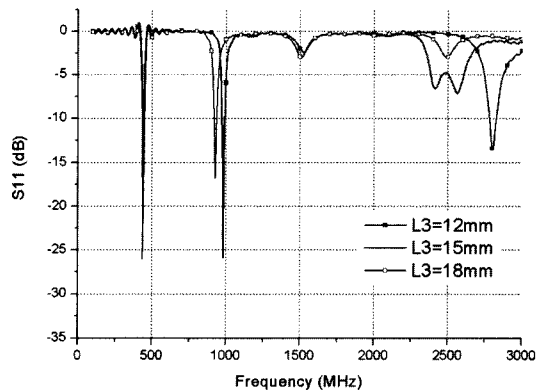


그림 6.  $L_3$ 에 따른 반사계수( $S_{11}$ ) 변화  
Fig. 6. Variation of  $S_{11}$  vs.  $L_3$ .

U형 슬롯의 설계 변수에 따라 중간 공진 주파수와 높은 공진 주파수의 특성 변화가 있음을 그림 3~6을 통해 확인할 수 있었다. 기존의 시행착오에 의한

설계 방식으로는 설계 목표 주파수인 433 MHz와 912 MHz 및 2.45 GHz의 공진 주파수를 갖는 안테나를 설계하기 위해서는 U형 슬롯의 모든 설계 변수 값을 조절하면서 찾아야 하는 어려움이 있다. 이에 슬롯의 설계 변수  $W_2, L_2, W_3, L_3$ 에 대해 진화 전략 기법을 통해 최적 설계에 대해 연구를 수행하였다.

2-2 진화 알고리즘(Evolution Strategy) 기법

확률론적 최적화 기법 중 하나인 진화 알고리즘의 기본 순서도는 그림 7과 같다.

진화 알고리즘은 미리 설정한 설계 변수 집합인 첫 번째 부모 개체군으로부터 일정한 범위 내에서 확률 변수를 발생시켜 식 (2)와 같이 차기 개체군을 생성시킨다.

$$X_c(i) = X_p(i) + \alpha(i) \times R(i) \tag{2}$$

여기서  $i$ 는 세대를 의미하며,  $X_p(i)$ 와  $X_c(i)$ 는 각각 부모 개체군과 차기 개체군이고,  $\alpha(i)$ 는  $X_p(i)$ 를 중심으로 한 변화 가능폭(step width)이며,  $R(i)$ 는 평균이 0인 균등 분포를 갖는 확률밀도 함수에 의해 발생하는 난수이다.

부모 개체군과 차기 개체군 전체를 통해 원하는 설계 목표에 가장 근접한 변수 집합을 택하여 식 (3)과 같이 다음 부모 개체군을 구성한다.

$$X_p(i+1) = \begin{cases} X_c(i), & \text{if } F_c(i) < F_p(i) \\ X_p(i), & \text{if } F_c(i) \geq F_p(i) \end{cases} \tag{3}$$

여기서  $F_c(i)$ 와  $F_p(i)$ 는 각각  $X_c(i)$ 와  $X_p(i)$ 에 대

한 목적함수 값이다. 이 과정을 변이와 재생산 과정이라 한다.

변이 변화폭은 현 세대로부터 이전 10세대 동안의 재생산 과정에서 차기 개체군이 부모 개체군으로 변이가 일어난 횟수를 계산하여 식 (4)와 같이 변화시킨다.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha(i)/0.85, & \text{if 변이횟수} > 2 \times N \\ \alpha(i) \times 0.85, & \text{if 나머지 경우} \end{cases} \tag{4}$$

여기서  $N$ 은 설계 변수의 수이며, 보다 수렴 속도를 향상시키기 위해 변이 폭 변화 비율을 0.85로 설정하였다. 이와 같은 변이와 재생산 과정의 결과에 따라 변이 변화폭을 조절하며 이런 반복 과정을 거치면서 설계 목표에 가장 부합되는 최적의 설계 변수 값을 구할 수 있다.

본 논문에서 하나의 부모 개체군과 하나의 차기 개체군을 비교하여 선택하는 (1+1) 진화 전략 기법을 이용하여 설계 목표 주파수가 433 MHz와 912 MHz 및 2.45 GHz로 목적함수와 공진 주파수에서의 반사 계수 ( $S_{11}$ )를 구속 조건으로 식 (5)와 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수 } F &= \sum_{i=1}^3 \alpha_i (|f_i - f_{oi}|)^2 \\ \text{구속조건 } S_{11}(f_i) &\leq -15 \text{ dB} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $\alpha_i$ 는 가중치이고,  $f_i$ 는 전자장 해석한 결과의 공진 주파수이며,  $f_{oi}$ 는 설계 목표 주파수이다.

2-3 API(Application Program Interface) 구현

안테나 설계 시 진화 알고리즘을 적용하기 위해 전자장 해석 프로그램과 최적화 프로그램간의 연동 인터페이스 환경을 구현할 필요가 있다. 전자장 해석 프로그램인 CST의 스크립트 명령어를 활용하여 최적 설계의 자동화 프로그램을 엑셀 프로그램으로 구현하였다. 그림 8에 구현한 프로그램의 기본 구조를 제시하였다.

그림 9와 같이 구현된 프로그램에 목표 주파수 및 안테나의 설계 변수 값을 입력하여 안테나 모델링 및 전자장 해석을 수행한다. 식 (5)의 목적함수가 수렴할 수 있도록 안테나의 전자장 해석 결과를 분석하여 그림 10과 같은 설계 프로그램 순서도에 따라

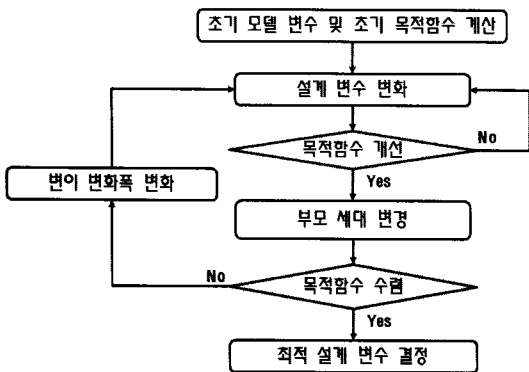


그림 7. 진화 알고리즘  
Fig. 7. Evolution strategy.

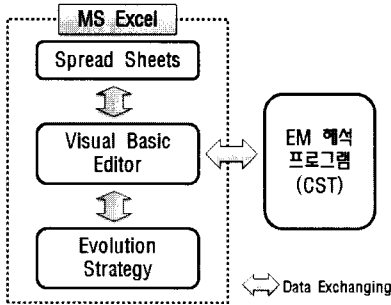


그림 8. 연동 프로그램 구조  
Fig. 8. The interface program architecture.

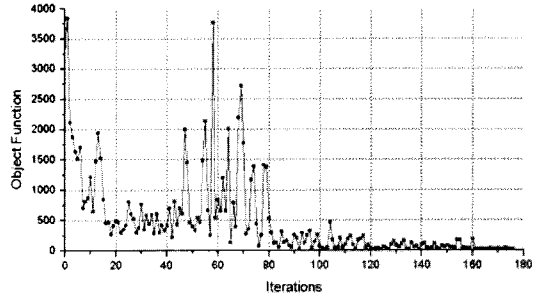


그림 11. 목적 함수 수렴도  
Fig. 11. Convergence of the object function.

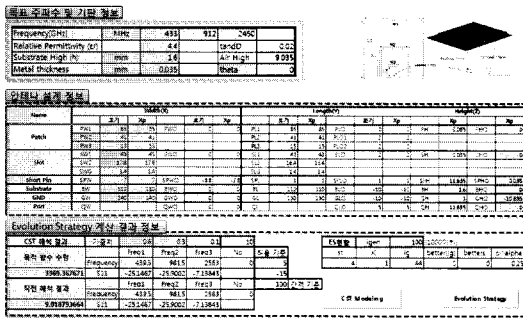


그림 9. 최적 설계 사용자 인터페이스  
Fig. 9. The user interface of the design program.

오차를 10으로 설정하여 수렴도가 10 이하에서 프로그램이 정지하도록 설정하였다.

그림 11은 안테나 설계의 목적함수 수렴도를 나타내었다. 80회 이상에서 목적함수 값이 안정적으로 형성하면서 총 176번의 반복을 통해 목적 함수 수렴도가 9.019에서 최종 설계변수 값을 구하였다.

구현한 API를 통한 PIFA의 최적 설계 결과를 표 1과 그림 12에 초기 설계와 비교 제시하였다.

표 1. 초기 설계와 최적 설계 비교

Table 1. Comparison of the initial and optimal design.

변수	단위	초기 설계			최적 설계		
$W_2$	mm	41			50		
$L_2$		41			43		
$W_3$		15			13		
$L_3$		15			16		
주파수	MHz	439.5	981.5	2,563	430	910.5	2,458.5
$S_{11}$	dB	-25.15	-15.9	-7.13	-40.82	-27.22	-16.24

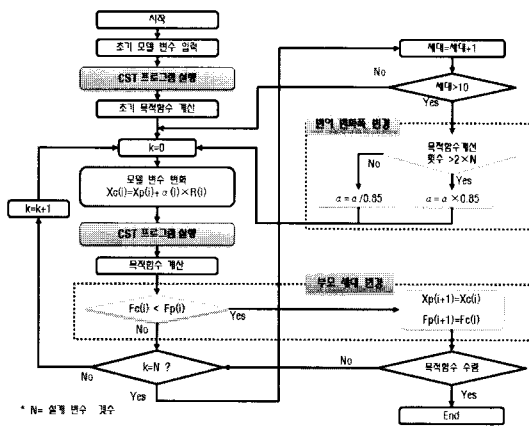


그림 10. 최적 설계 프로그램 순서도  
Fig. 10. Flow chart of the optimal design program.

반복 수행하여 최적의 설계 값을 구하여 엑셀에 결과를 표시하여 반복 설계과정을 확인하여 사용자가 판단할 수 있도록 하였다.

부모 개체군에서 차기 개체군을 생성하기 위한 식 (2)에서 변이 가능폭을  $\Delta W_2 = \Delta L_2 = 1$  mm와  $\Delta W_3 = \Delta L_3 = 0.5$  mm로 설정하였고, 목적함수 수렴 허용

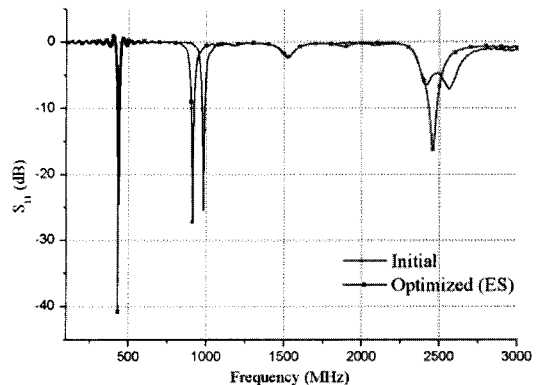


그림 12. 초기 설계와 최적 설계 반사계수 변화  
Fig. 12.  $S_{11}$  variation between the initial and optimal design.

본 연구를 통해 구현된 API를 통해 삼중 대역 PIFA의 최적 설계 결과 목표 주파수에 근접한 430 MHz와 910.5 MHz 및 2.458 GHz의 공진 주파수와 -15 dB 이하의 반사계수를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

### III. 결 론

본 논문에서는 삼중 대역 PIFA의 두 개의 U형 슬롯의 설계 변수 값에 따라 세 개의 공진 주파수가 변화함에 따라 변이와 재생산 과정을 통해 최적의 값을 찾기 위해 진화 알고리즘을 이용하였다. 안테나의 반복적인 전자장 해석 및 진화 알고리즘 결과, 분석 과정을 자동화 할 수 있는 API를 구현하여 최적의 U형 슬롯의 설계 값을 구하였다. 구현된 API를 통해 최적 설계 결과 430 MHz, 910.5 MHz 및 2.458 GHz의 공진 주파수를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 안테나의 목적함수 수렴 허용 오차를 줄임으로써 보다 목표 주파수에 근접할 수 있을 것으로 사료된다. 이에 구현된 API를 통해 향후 다양한 주파수 대역의 안테나 및 다양한 구조의 안테나를 설계 가능할 것으로 사료된다. 또한, 진화 알고리즘 이외의 최적화 기법을 적용하여 보다 효율적인 안테나 설계에 대한 연구에 활용 가능할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

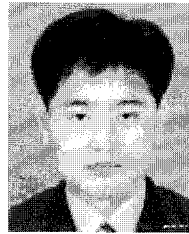
- [1] S. Tarvas, A. Isohatala, "An internal dual-band mobile phone antenna", *2000 IEEE Antenna Propagat. Soc. Int. Symp. Dig.*, pp. 266-269, 2000.
- [2] P. Salonen, M. Keskilammi, and M. Kivikoski, "New slot configurations for dual-band planar inverted-F antenna", *Microwave Optical Tech. Lett.*, vol. 28, pp. 293-298, Mar. 2001.
- [3] K. Hirisawa, M. Haneishi, *Analysis, Design and Measurement of Small and Low-profile Antennas*, Artech House, Boston: 1992.
- [4] J. M. Johnson, Y. Rahmat-Samii, "Genetic algorithms and method of moments (GA/MoM) for the design of integrated antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 1606-1614, Oct. 1999.
- [5] F. Ares, S. R. Rengarajan, E. Villanueva, E. Skochinski, and E. Moreno, "Application of genetic algorithms and simulated annealing technique in optimising the aperture distributions of antenna array patterns", *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 148-149, Feb. 1996.
- [6] C. Delabie, M. Villegas, and O. Picon, "Creation of new shapes for resonant microstrip structures by means of genetic algorithms", *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1509-1510, Aug. 1997.
- [7] T. Back, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1996.
- [8] Z. D. Liu, P. S. Hall, and D. Wake, "Dual-frequency planar inverted-F antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, pp. 1451-1458, Oct. 1997.

고 재 형



2004년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2008년 8월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학석사)  
2008년 9월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나, 최적 설계

김 동 훈



1992년: 서울대학교 전기공학 (공학사)  
1994년: 서울대학교 전기공학 (공학석사)  
1998년: 서울대학교 전기공학 (공학박사)  
2001~2002년: 성균대학교 공과대학 연구교수

2004년~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수  
[주 관심분야] 전자기 응용 소자 및 최적설계, 전자장 수치해석, 생체전자기학

김 군 태



2008년 2월: 서경대학교 정보통신공학 (공학사)  
2008년 2월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 전자기 응용 소자 및 최적설계

김 형 석\*



1985년: 서울대학교 전기공학 (공학사)  
1987년: 서울대학교 전기공학 (공학석사)  
1990년: 서울대학교 전기공학 (공학박사)  
1990~2002년: 순천향대학교 정보기술공학부 부교수

2002년~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 교수  
[주 관심분야] 전자장 및 수치해석, RF 및 마이크로웨이브 소자 해석 설계, RFID 시스템 연구, SoC 응용회로, 전력 IT

\*교신저자