

碩士學位論文

유전자 알고리즘을 이용한 WLL용
개구결합 마이크로스트립 안테나
설계 및 제작



濟州大學校 大學院
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

通信工學科

徐 豪 辰

1999年 12月

유전자 알고리즘을 이용한 WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계 및 제작

指導教授 金 興 洙

徐 豪 辰

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



徐豪辰의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 梁斗榮 印

委 員 李鎔鶴 印

委 員 金興洙 印

濟州大學校 大學院

1999年 12月

Design of Aperture-Coupled Microstrip Antenna for WLL Using Genetic Algorithms

Ho-Jin Seo

(Supervised by professor Heung-Soo Kim)



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1999. 12.

목 차

Abstract	1
I. 서론	3
II. 마이크로스트립 슬롯 안테나	6
III. 개구결합 마이크로스트립 안테나	12
1. 슬롯에 대한 그린함수와 모멘트법	12
2. 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스	15
IV. 유전자 알고리즘	18
1. 염색체와 변수의 코드화	20
2. 자연 도태	21
3. 유전자 연산자	22
4. 유전자 알고리즘의 적용	24
5. 유전자 알고리즘을 이용한 안테나 설계방법	27
V. 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계 및 제작	31
1. 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계	31
2. WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계	36
3. 제작 및 결과 고찰	44
VI. 결론	51
참 고 문 헌	52

Abstract

In this thesis, the aperture coupled microstrip antenna that has a large bandwidth is designed and manufactured for WLL using genetic algorithms. The experimental results are compared with the simulation results

The reflection coefficient and the transmission coefficient caused by a slot are analyzed using reciprocity theorem. To analyze the microstrip slot antenna, the equivalent magnetic current is obtained by the structure of the substrate with a feed line and slot. The exact Green's function is defined by the equivalent magnetic current and equivalent admittance of the microstrip slot antenna is analyzed by moment method using PWS mode functions assumed as an unknown E field of a slot. To treat the aperture coupled microstrip antenna, the equivalent admittance of the patch is obtained using moment method with a boundary condition and then the equivalent series impedance seen by the microstrip feed line is obtained by adding the equivalent admittance of the slot to that of the patch.

Genetic algorithms are used to design of aperture coupled antenna with a large bandwidth by changing the width and length of the patch and slot. Genetic algorithms transform the binary codes of these parameters of antenna to represent by genes in the chromosome. a generation includes 50 chromosomes. After 200 generations, genetic algorithms can find a optimal chromosome which has a large bandwidth of antenna.

The bandwidth of the antenna which is designed using genetic algorithms is compared with Pozar's in order to prove a excellent

optimization for antenna design. To design of the aperture coupled microstrip antenna for WLL, genetic algorithms can search a optimal chromosome which has a larger bandwidth at 2.35GHz and the aperture coupled microstrip antenna is manufactured by the width and length of the patch and slot which are decoded by the optimal chromosomes. The measured results show that this aperture coupled microstrip antenna has 6% bandwidths.



I. 서론

최근 무선통신 수요의 급격한 증가와 광대역화로 인하여 앞으로 2000년대에는 전세계 어느 지역에서나 통화가 가능한 GMPCS(Global Mobile Personal Communications Service)와 IMT 2000(International Mobile Telecommunication 2000) 등의 차세대 이동통신 시스템에 고주파수 대역이 활용될 예정이다. 이러한 주파수 대역에서 MIC(Microwave Integrated Circuit)와 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 기술의 발달로 소형이면서 저가이고 급전회로나 능동회로와 쉽게 집적화할 수 있는 마이크로스트립 안테나를 많이 사용할 것이다. 마이크로스트립 안테나는 마이크로파 응용분야에서 이동통신 안테나와 위성탑재용 안테나에 적용이 되고 있으며 연구가 활발히 진행되고 있는 안테나 중에 하나이다.

마이크로스트립 안테나의 급전에는 방사소자에 마이크로스트립 선로를 연결하거나, 기판 뒷면으로 동축선을 직접 연결하는 방법이 있다(Carver & Mink, 1981). 그러나 마이크로스트립 선로로 급전할 경우 일반적으로 안테나의 입력 임피던스와 급전선로의 임피던스가 같지 않으므로 정합회로가 필요하게 되며 급전선로는 안테나 측에 유도성 리액턴스를 증가시키게 된다. 동축선 급전의 경우도 주파수가 증가할수록 동축선 자체의 자기 리액턴스가 커지게 된다(Pozar, 1992). 이러한 문제점들을 해결하기 위해 안테나의 방사소자와 급전선로를 직접 연결하지 않고 이들을 전자기적으로 결합시켜 안테나를 여기시키는 새로운 급전방법이 1985년 Pozar(1985)에 의해 제안되었다. 이 급전방법은 접지면에 의해 분리된 서로 다른 기판 위에 각각 방사소자와 급전선로를 만들고, 이 두 부분을 접지면에 있는 슬롯의 개구면을 통하여 결합시키는 방법이다. 이 방법은 방사소자와 급전선로 특성에 가장 적합한 유전체 기판을 서로 다르게 선택할 수 있어 급전부와 방사부에 적합한 설계를 할 수 있다. 또한 접지면이 급전선로의 기생방사를 차폐시켜 주므로 방사패턴과 편파특성이 매우 우수하다(Pozar & Kaufman, 1990).

개구결합 마이크로스트립 안테나에 대한 연구는 1985년 Pozar가 원형 개구면

에 의해 구형 패치를 여기시키는 결합구조를 최초로 제시한 이래, 1986년 Sullivan(1986)은 모멘트법을 이용하여 이 안테나의 입력임피던스를 구하고 설계변수가 안테나 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Ittipiboon(1991)은 공진기 모델을 이용하여 근사적이지만 결합 구조를 갖는 안테나의 간략한 해석방법을 제시하였고, Bhattacharyya(1992)는 모드 해석방법을 이용하여 급전선로에 대해 경사진 슬롯결합 안테나의 근사적인 설계식을 제시하였다. 또한 Pozar(1989)는 개구결합 무한 배열 안테나를 스펙트럼 영역에서 해석하였고, Pan(1992)은 Katechi(1989)가 제안한 방법을 확장하여 유한 배열 구조에서 소자간의 상호 결합도를 계산하였다.

마이크로스트립 안테나를 해석하는 방법에는 두 개의 슬롯이 반파장 정도 떨어져 있다고 가정하는 전송선로 해석방법과 상부 도체와 접지면 사이를 공진기로 가정하여 해석하는 실험적이고 근사화된 방법이 있다(Pues & Van de Capelle, 1984, Lo 등, 1979). 이러한 해석 방법은 동작 주파수가 낮고 기판의 두께가 작을 경우 좋은 결과를 얻을 수 있지만 동작주파수가 높아지면 정확한 결과를 얻기가 힘들며 주파수에 따라 증가하는 표면파를 해석하는데 어려움이 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해 그린함수와 모멘트법을 사용하여 개구결합 마이크로스트립 안테나를 해석했다(Pozar, 1986).

목적하는 주파수에서 넓은 대역폭을 갖는 안테나의 설계변수를 찾는 데 일반적인 최적화 알고리즘을 적용하려면 안테나를 해석하는 수학적 모델식의 특성을 고려해야 한다. 함수가 비선형적이고 불연속 특성을 나타내면 해의 영역이 매우 복잡하므로 최적화 방법을 적용하는데 어려움이 많다. 그러나 유전자 알고리즘은 최적화 과정에 적합도 함수 이외에 도함수나 다른 보조적인 함수가 필요하지 않고 해의 영역에서 생기는 불연속 특성을 고려하지 않아도 정확하게 최적의 해로 수렴해 간다(Holland, 1975, Goldberg, 1989). 최근 여러 분야에서 유전자 알고리즘은 우수한 전역 최적화 결과를 보이고 있으며 특히 전자기 분야에서는 와이어 안테나, 배열 안테나, 전자파 흡수체 등의 설계에서 뛰어난 최적화 결과를 보이고 있다(Johnson & Rahmat-Samii, 1997, Altshuler & Linden, 1997, Haupt, 1994, Michielssen 등, 1993).

개구결합 마이크로스트립 안테나는 패치와 슬롯의 폭과 길이, 기판의 유전율과

두께 등과 같은 변수를 고려하여 넓은 대역폭을 갖도록 설계하게 된다. 일반적으로 유전체 기판은 두께와 유전율이 한정된 종류로 대량생산되므로 안테나를 설계할 때 기판의 두께와 유전율은 정해진 변수가 된다. 그러므로 패치와 슬롯의 폭과 길이를 이용하여 넓은 대역폭을 갖는 안테나를 유전자 알고리즘으로 설계한다. 유전자 알고리즘은 이 설계변수를 유전자로 코드화하여 하나의 염색체로 표현한다. 이 염색체는 유전자 정보에 따라 다양한 대역폭 특성을 가지고 있는데 안테나 설계 목적에 적합한 염색체는 유전자 연산자를 통해 다음 세대로 진화하게 된다. 그리고 여러 세대의 진화과정을 거쳐 목적하는 주파수에서 넓은 대역폭을 갖는 염색체의 유전자를 찾아 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계한다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 WLL(Wireless Local Loop)용 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하고자 한다. 우선 Pozar가 설계한 개구결합 마이크로스트립 안테나의 제원으로 넓은 대역폭을 갖는 안테나를 유전자 알고리즘으로 설계하여 최적화 성능을 검증한다. 그리고 FR-4 유전체 기판을 사용하여 유전자 알고리즘으로 2.35GHz에서 넓은 대역폭을 갖는 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하고 이로부터 WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나를 제작한다. 그리고 설계된 안테나와 제작된 안테나의 특성을 비교한다.

본 논문의 구성은 제Ⅱ장에서 접지면에 슬롯이 있는 급전선로에 대해서 해석을 하고 제Ⅲ장 개구결합 마이크로스트립 안테나를 해석하기 위한 그린함수와 입력 임피던스식을 유도한다. 제Ⅳ장에서는 유전자 알고리즘에 대한 이론과 유전자 알고리즘으로 안테나를 설계하는 과정을 설명하며 제Ⅴ장에서 유전자 알고리즘의 안테나 최적화 성능을 확인하고 WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계 및 제작하여 특성을 분석한다. 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 마이크로스트립 슬롯 안테나

접지면에 슬롯이 있는 마이크로스트립 슬롯 안테나를 가역정리를 이용하여 해석한다. Fig. 1은 슬롯이 기판 윗면인 접지면에 있고 반대면에 마이크로스트립 급전선로가 있는 마이크로스트립 슬롯 안테나의 구조이다.

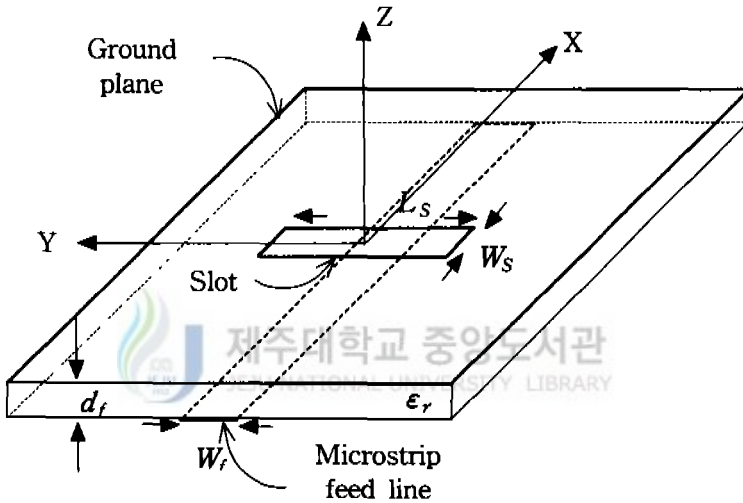


Fig. 1. Geometry of a slot on the ground plane with an infinite microstrip line

개구면을 사각 슬롯으로 구성하여 개구결합 마이크로스트립 안테나의 구형 방사 소자와 전자기적으로 결합하게 했고 접지면의 슬롯에 의한 불연속 특성을 고려하여 폭이 좁은 슬롯을 사용한다. 무한히 긴 마이크로스트립 급전선로를 전파하는 에너지가 슬롯을 통하여 방사하게 되지만 동가적으로 단락이 되는 유한한 급전선로에서 $\lambda_g/4$ 떨어진 곳에 슬롯이 위치한다.

마이크로스트립 슬롯 안테나의 동가회로는 Fig. 2와 같다. 안테나의 동가 임피

던스 Z 와 마이크로스트립 급전선로의 특성 임피던스 Z_c 가 직렬로 연결되며, 등가적으로 무한히 긴 급전선로를 유한한 급전선로로 만들기 위해 스텐브를 사용하여 마이크로스트립 슬롯 안테나의 등가회로를 표현한다.

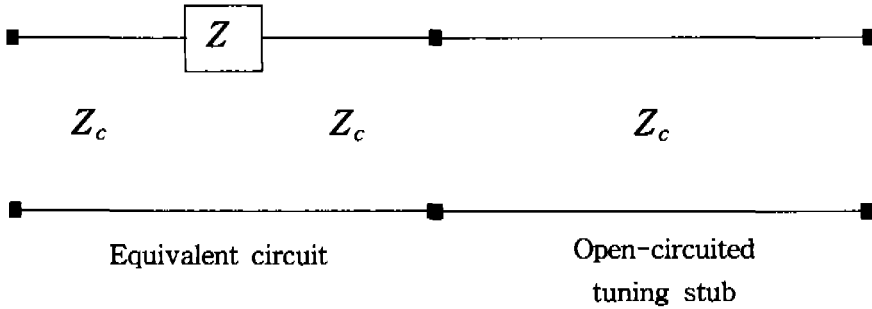


Fig. 2. The equivalent circuit of a slot on the ground plane with a microstrip line

접지면의 슬롯은 마이크로스트립 급전선로에 불연속 특성을 만들어 슬롯에서 마이크로스트립 급전선로의 전자계성분을 반사시키거나 전파되게 한다. 이때의 반사계수와 전달계수는 가역정리를 사용하여 구할 수 있다. Fig. 1과 같이 마이크로스트립 급전선로의 접지면에 슬롯이 있는 구조에서 반사계수 R 과 전달계수 T 를 구하기 위해 마이크로스트립 급전선로가 무한히 길고 근사 TEM모드가 전파된다고 가정하면 마이크로스트립 급전선로의 횡방향 전자계 모드는 다음과 같다.

$$\bar{e}(y, z) = e_y \hat{y} + e_z \hat{z} \quad (1)$$

$$\bar{h}(y, z) = h_y \hat{y} + h_z \hat{z} \quad (2)$$

위의 전자계 성분은 정규화 되었다고 가정하며 \bar{e} 와 \bar{h} 는 다음의 관계식을 만족한다.

$$\int_{y=-\infty}^{\infty} \int_{z=0}^{\infty} \bar{e} \times \bar{h} \cdot \hat{x} \, dy \, dz = 1 \quad (3)$$

이로부터 마이크로스트립 급전선로를 전파해 가는 전자계는 다음과 같다.

$$\overline{E}^{\pm} = \overline{e} e^{\mp j\beta x} \quad (4)$$

$$\overline{H}^{\pm} = \overline{h} e^{\mp j\beta x} \quad (5)$$

여기서 β 는 마이크로스트립 급전선로의 전파상수이다.

마이크로스트립 급전선로에서 슬롯에 의한 불연속점이 $x=0$ 이면, 전체 마이크로스트립 급전선로의 전자계 필드는 불연속점에서 반사계수 R 과 전달계수 T 에 의한 반사와 필드와 진행파 필드로 다음과 같이 표현하게 된다.

$$\overline{E} = \begin{cases} \overline{E}^+ + R \overline{E}^-, & x \leq 0 \\ T \overline{E}^+, & x > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\overline{H} = \begin{cases} \overline{H}^+ + R \overline{H}^-, & x \leq 0 \\ T \overline{H}^+, & x > 0 \end{cases} \quad (7)$$

마이크로스트립 급전선로의 전체 필드 \overline{E} , \overline{H} 와 진행파의 필드 \overline{E}^+ , \overline{H}^+ 그리고 반사와 필드 \overline{E}^- , \overline{H}^- 에 대하여 가역성 이론을 적용하면 두 개의 방정식을 구하게 된다. 전체 전자계 \overline{E} 와 \overline{H} 그리고 x 축의 양의 방향으로 진행하는 파에 대하여 가역정리를 적용하면 다음과 같다.

$$\int_S \overline{E} \times \overline{H}^+ \cdot d\overline{s} = \int_S \overline{E}^+ \times \overline{H} \cdot d\overline{s} \quad (8)$$

여기서 S 는 슬롯을 포함하는 폐곡면으로 Fig. 3과 같이 S_o , S_a , S_w 의 세부분으로 나누어진다.

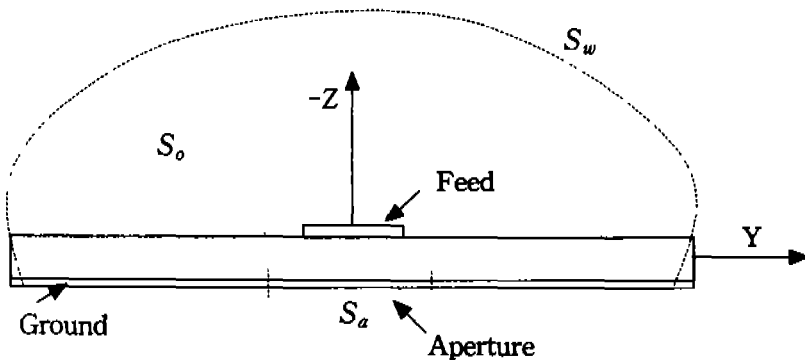


Fig. 3. The closed surfaces S in the reciprocity analysis

Fig. 3의 S_o , S_a , S_w 에 대한 정의는 다음과 같다.

S_o : 마이크로스트립 안테나의 단면적 ($-\infty < y < \infty$; $-\infty \leq z < 0$)

S_a : 슬롯의 개구면

S_w : 마이크로스트립 급전선로를 감싸는 면 ($y \rightarrow \pm\infty$; $z \rightarrow -\infty$; $z = 0$)

S_w 에서 $\hat{n} \times \bar{E} = \hat{n} \times \bar{E}^+ = 0$ 가 되므로, 식(8)의 적분에서 S_w 에 해당하는 적분 값은 0이 된다. S_a 에서 $\hat{n} \times \bar{E}^+ = 0$ 이지만 $\hat{n} \times \bar{E} = \hat{n} \times V_0 e_x^a \hat{x}$ 가 된다. 슬롯 개구면의 $V_0 e_x^a$ 는 미지의 전계로 모멘트법으로 해석하기 위해서 PWS(Piecewise sinusoidal) 모드의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$V_0 e_x^a = V_0 \frac{\sin k_e(L_S/2 - |y|)}{W \sin k_e L_S/2}, \quad |x| < W_S/2, \quad |y| < L_S/2$$

$$k_e = k_0 \sqrt{(\epsilon + 1)/2} \quad (9)$$

여기에서 k_e 는 PWS 모드의 실효파수가 된다. 식(8)을 세 개의 면적에 대해서 적분을 하고, 다시 정리하여 반사계수 R 에 대한 적분식을 구하면 다음과 같다.

$$R = \frac{V_0}{2} \int_{S_a} e_x^a(x, y) h_y(x, y) ds = \frac{V_0}{2} \Delta v \quad (10)$$

급전선과 슬롯의 결합정도를 나타내는 결합계수를 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta v = \int_{S_a} e_x^a(x, y) h_y(x, y) ds \quad (11)$$

전달계수 T 에 대한 식도 반사계수 R 을 구하는 방법과 같은 과정으로 구할 수 있다. 전체 전자계 \bar{E} 와 \bar{H} 그리고 x 축의 음의 방향으로 진행하는 파에 대하여 가역정리를 적용하면 다음과 같다.

$$\int_S \bar{E} \times \bar{H}^- \cdot d\bar{s} = \int_S \bar{E}^- \times \bar{H} \cdot d\bar{s} \quad (12)$$

이를 다시 정리하면 다음과 같은 전달계수 T 에 관한 식을 얻는다.

$$T = 1 - \frac{V_0}{2} \Delta v = 1 - R \quad (13)$$

가역정리를 이용하여 반사계수와 전달계수 그리고 슬롯의 전계에 대한 세 개의 미지수에 대하여 두 개의 적분식을 구했고, 한 개의 관계식은 슬롯의 개구면에서 자계 H_y 가 연속인 경계조건으로부터 구한다. 슬롯에서 개구면의 필드 $V_0 e_x^a$ 에 의해 발생하는 내부자계와 급전선로에서 생기는 내부자계의 합은 $V_0 e_x^a$ 에 의해 발생하는 외부자계와 같으므로 다음의 식을 얻는다.

$$H_y^e = H_y^f + H_y' \quad (14)$$

$$H_y^e : V_0 e_x^a \text{에 의한 외부 자계} \quad (z < 0)$$

$$H_y' : V_0 e_x^a \text{에 의한 내부 자계} \quad (z > 0)$$

$$H_y^f : \text{급전선로에 의한 내부 자계} \quad (z > 0)$$

$x=0$ 에서 급전선로의 자계는 다음과 같다.

$$H_y^f = T h_y = (1-R) h_y \quad (15)$$

개구면에서 y 방향의 자류에 의해 생기는 자계 H_y 성분을 구하기 위해 그린함수 G_{yy}^{HM} 를 다음과 같이 정의한다.

$$H_y^e - H_y' = V_0 \int_{S_a} G_{yy}^{HM}(x, y; x_0, y_0) e_x^a(x_0, y_0) ds_0 \quad (16)$$

식(15)와 식(16)을 식(14)에 대입하면 다음과 같다.

$$V_0 \int_{S_a} G_{yy}^{HM}(x, y; x_0, y_0) e_x^a(x_0, y_0) ds_0 = (1-R) h_y(x, y) \quad x, y \in S_a \quad (17)$$

개구면의 어드미턴스를 정의하기 위해 식(17)에 e_x^a 를 곱하고 개구면 S_a 에 대해서 면적분을 하면 다음과 같다.

$$V_0 Y^e = \Delta v (1-R) \quad (18)$$

$$Y^e = \int_{S_a} \int_{S_a} e_x^a(x, y) G_{yy}^{HM}(x, y; x_0, y_0) e_x^a(x_0, y_0) ds ds_0 \quad (19)$$

여기에서 Y^e 는 슬롯의 어드미턴스이다. 가역정리를 이용하여 구한 식(10)과 식(13) 그리고 슬롯에서의 자계의 경계조건으로부터 구한 식(18)에서 미지수인 V_0, R, T 를 Y^e 와 Δv 의 함수로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_0 = \frac{2\Delta v}{\Delta v^2 + 2Y^e} \quad (20)$$

$$R = \frac{\Delta v^2}{\Delta v^2 + 2Y^e} \quad (21)$$

$$T = \frac{2Y^e}{\Delta v^2 + 2Y^e} = 1 - R \quad (22)$$

이로부터 Fig. 2의 등가 직렬 임피던스 Z 를 구하면 다음과 같다.

$$Z = Z_c \frac{2R}{1-R} = Z_c \frac{\Delta v^2}{Y^e} \quad (23)$$

여기에서 Z_c 는 마이크로스트립 급전선로의 특성 임피던스이다.

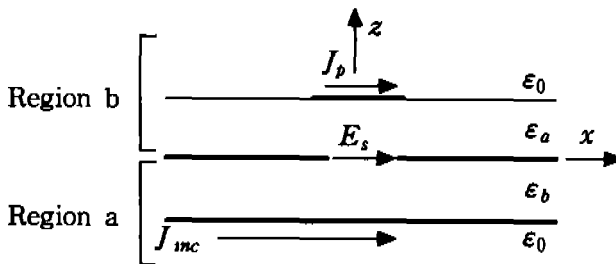


Ⅲ. 개구결합 마이크로스트립 안테나

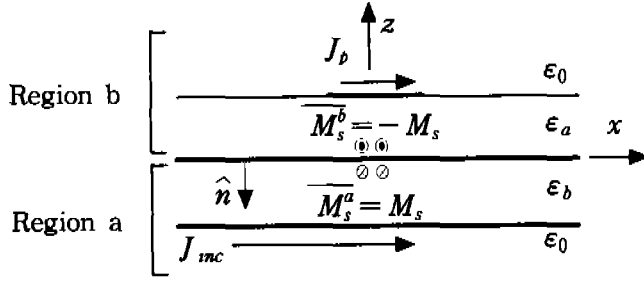
개구결합 마이크로스트립 안테나의 급전은 슬롯결합 구조의 방식이다. 패치와 슬롯의 결합에 대한 정확한 해석을 하기 위해 개구면의 자류에 의한 전자계와 패치에 유도된 전류로부터 생기는 전자계의 그린함수를 정의하고 모멘트법을 이용하여 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력임피던스를 구한다.

1. 슬롯에 대한 그린함수와 모멘트법

슬롯에 의한 전자계를 해석하기 위해 그린함수를 정의하고 모멘트법을 이용하여 슬롯의 어드미턴스와 결합계수를 구한다. 개구결합 마이크로스트립 안테나의 단면도는 Fig. 4(a)와 같고 여기서 J_{mc} 는 급전전류이며, E_s 는 슬롯의 전계 그리고 J_p 는 패치에 유도된 전류를 나타낸다. 접지면과 유전체 기판은 x, y 방향으로 무한하며 패치상의 전류와 급전선로의 표면전류, 개구면의 전계는 모두가 x 방향성분만 있다고 가정한다.



(a) cross-sectional view



(b) analytical model using equivalence theorem

Fig. 4 Analytical model of aperture coupled microstrip antenna

등가정리에 의해 Fig. 4(b)와 같이 슬롯은 개구면 위와 아래의 표면자류 M_s 로 대체되면서 도체로 차폐된다. 슬롯의 개구면에서 전계의 접선성분은 연속이 되므로 접지면 위와 아래의 표면자류는 방향이 서로 반대가 된다. 이로부터 슬롯의 자류에 의한 전계와 자계의 그린함수를 구하고 푸리에 변환과정으로 다음과 같이 그린함수를 표현할 수 있다(Pozar, 1986).

$$\tilde{G}_{xy}^{EM} = \frac{j k_x^2 (\epsilon_r - 1) \sin k_1 d}{T_e T_m} - \frac{k_1}{T_e} \quad (24)$$

$$\tilde{G}_{yy}^{HM} = \frac{-j}{k_0 Z_0} \left[\frac{j(k_1 \cos k_1 d + j k_2 \epsilon \sin k_1 d)(\epsilon k_0^2 - k_y^2)}{k_1 T_m} - \frac{j k_y^2 k_1 (\epsilon_r - 1)}{T_e T_m} - \frac{(\epsilon k_0^2 - k_y^2)}{j k_2} \right] \quad (25)$$

$$T_e = k_1 \cos k_1 d + j k_2 \sin k_1 d \quad (26)$$

$$T_m = \epsilon_r k_2 \cos k_1 d + j k_1 \sin k_1 d \quad (27)$$

$$k_1^2 = \epsilon_r k_0^2 - \beta^2, \quad \text{Im } k_1 < 0 \quad (28)$$

$$k_2^2 = k_0^2 - \beta^2, \quad \text{Im } k_2 < 0 \quad (29)$$

$$\beta^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (30)$$

개구면의 전계 e_x^a 를 N개의 PWS모드로 전개하면 다음과 같다.

$$e_x^a = \sum_{n=1}^N V_n e_{xn}^a(x, y) = \sum_{n=1}^N V_n \frac{1}{W} f_p(y - y_n) \quad (31)$$

$$y_n = -L/2 + (N+1)h$$

여기서 V_n 은 미지의 모드 계수이고 f_p 는 PWS모드로 다음과 같다.

$$f_p(y) = \begin{cases} \frac{\sin k_e(h - |y|)}{\sin k_e h} & |y| < h \\ 0 & |y| > h \end{cases} \quad (32)$$

$$h = L/(N+1)$$

식(19)에 식(31)을 대입하여 슬롯의 어드미턴스 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$Y_{mn}^e = \int_{S_a} \int_{S_a} e_{xm}^a(x, y) G_{yy}^{HM}(x, y; x_0, y_0) e_{xn}^a(x_0, y_0) ds ds_0 \quad (33)$$

식(33)에 대한 푸리에 변환과정으로 어드미턴스 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$Y_{mn}^e = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_u^2(k_x) \tilde{G}_{yy}^{HM}(k_x, k_y) F_p^2(k_y) \cdot \cos ky(y_m - y_n) dk_x dk_y \quad (34)$$

식(34)에서 무한대 적분구간을 갖는 이중적분은 다음과 같이 적분식을 변형하여 계산한다.

$$Y_{mn}^e = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F_u^2(k_x) \tilde{G}_{yy}^{HM}(k_x, k_y) F_p^2(k_y) \cdot \cos ky(y_m - y_n) \beta d\beta da \quad (35)$$

$$k_x = \beta \cos a, \quad k_y = \beta \sin a$$

식(10)의 반사계수 R 을 급수형태로 표현하면 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N V_n \int_{S_a} e_{xn}^a(x, y) h_y(x, y) ds \quad (36)$$

그리고 식(36)에서 결합계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta v &= \int_{S_a} e_{xn}^a(x, y) h_y(x, y) ds \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{Z_c}} \int_{-\infty}^{\infty} F_u(k_y) \tilde{G}_{yx}^{HJ}(k_x = -\beta, k_y) F_p(k_y) \cos k_y y_n dk_y \end{aligned} \quad (37)$$

식(10)의 반사계수 R 을 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$R = 1/2[V]^t[\Delta v] \quad (38)$$

개구면에서 자계에 대한 식을 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$[Y^e][V] = (1-R)[\Delta v] \quad (39)$$

확장모드의 크기를 나타내는 $[V]$ 는 다음과 같다.

$$[V] = \{[Y^e] + 1/2[\Delta v][\Delta v]^t\}^{-1}[\Delta v] \quad (40)$$

2. 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스

개구결합 마이크로스트립 안테나의 구조는 Fig. 5와 같다 급전선로는 하층기판 밑에 있으며, 패치는 상층기판 위에 있다. 급전선로와 패치는 접지면의 슬롯을 통해 전자기적으로 결합된다.

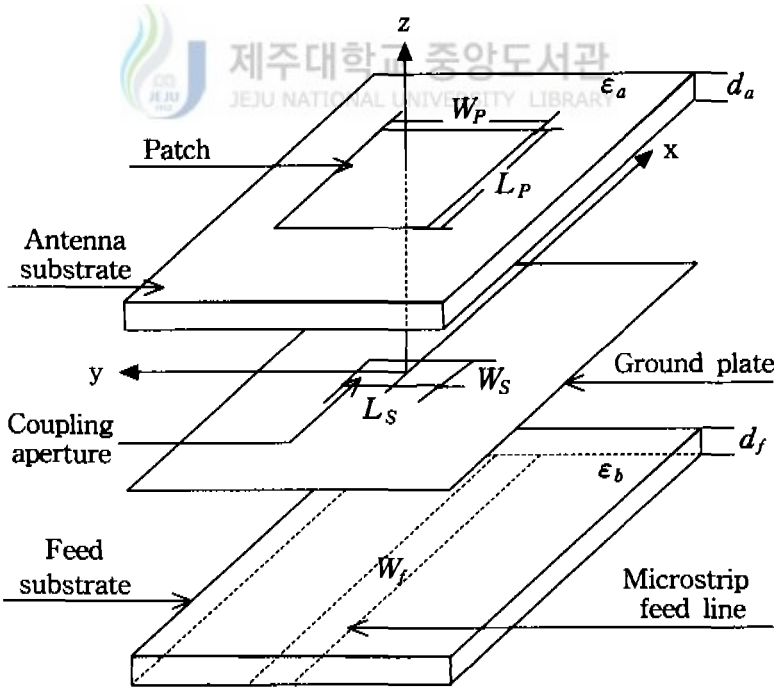


Fig. 5. Configuration of aperture coupled microstrip antenna

마이크로스트립 급전선로에서 본 안테나의 등가 직렬 임피던스는 개구면의 전계와 패치의 전자기적 결합을 해석하여 구해진다. 마이크로스트립 슬롯 안테나의 구조에 방사소자를 가진 유전체 기판이 추가되므로 급전선에서 바라본 안테나의 어드미턴스는 슬롯의 어드미턴스 Y^e 와 패치에서 바라본 슬롯의 어드미턴스 Y^o 를 더하여 구한다. 전계 E_x^e 는 슬롯 개구면의 등가 자유 M_s 에 의해 패치에 입사되는 전계이다. 그리고 패치에 유도되는 전류 J_b 를 x 방향의 EB(Entire domain Basis)함수로 확장하고 y 방향으로는 일정한 분포를 갖는다고 가정하면 다음과 같다.

$$J_b = \sum_{n=1}^N I_n f_s^m(x) f_u(y) \quad (41)$$

여기서 확장함수 f_s 와 f_u 는 다음과 같다.

$$f_s^m = \begin{cases} \sin \frac{m\pi}{L_P} (x + L_P/2) & |x| < L_P/2 \\ 0 & |x| > L_P/2 \end{cases} \quad (42)$$

($m=1, 3, 5, \dots$)

$$f_u(y) = \begin{cases} \frac{1}{W_P} & |y| < W_P/2 \\ 0 & |y| > W_P/2 \end{cases} \quad (43)$$

슬롯의 자유 M_s 에 의한 전계 E_x^e 와 패치의 유도전류 J_b 에 의해 생기는 전계는 패치에서 0되는 경계조건으로부터 다음의 적분식을 구할 수 있다.

$$E_x^e = - \int_{S_p} \sum_{n=1}^N I_n f_s^m(x_0) f_u(y_0) ds \quad (44)$$

여기서 S_p 는 패치면을 나타낸다. 위 식에 확장함수 f_s 와 f_u 를 곱하여 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

$$[V] = [Z][I] \quad (45)$$

여기서 $[I]$ 는 전류의 크기를 갖는 행벡터가 되고 $[Z]$ 와 $[V]$ 는 다음과 같다.

$$Z_{mn} = - \int_{S_p} \int_{S_p} f_s^m(x) f_s^n(x_0) f_u(y) f_u(y_0) G_{xx}^{EJ}(x, y; x_0, y_0) ds ds_0 \quad (46)$$

$$\begin{aligned}
 V_n &= \int_{S_p} E_x^i f_s^m(x) f_u(y) ds \\
 &= \int_{S_p} \int_{S_p} e_x^a(x_0, y_0) G_{xy}^{EM}(x, y, x_0, y_0) f_s^m(x) f_u(y) ds ds_0
 \end{aligned} \tag{47}$$

Z_{mn} 과 V_n 의 적분식을 푸리에 변환과정으로 구하면 다음과 같다.

$$Z_{mn} = \frac{-1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_s^m(k_x) F_s^n(k_x) F_u^2(k_y) \tilde{G}_{xx}^{EJ}(k_x, k_y) dk_x dk_y \tag{48}$$

$$V_n = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_s^n(k_x) F_p(k_x) F_u^2(k_y) \tilde{G}_{xy}^{EM}(k_x, k_y) dk_x dk_y \tag{49}$$

여기서 푸리에 변환된 \tilde{G}_{xx}^{EJ} 와 \tilde{G}_{yx}^{HJ} 는 다음과 같다.

$$\tilde{G}_{xx}^{EJ} = \frac{jZ_0}{k_0} \frac{(\epsilon_r k_0^2 - k_x^2) k_2 \cos k_1 d + jk_1 (k_0^2 - k_x^2) \sin k_1 d}{T_e T_m} \sin k_1 d \tag{50}$$

$$\tilde{G}_{yx}^{HJ} = \frac{j k_x^2 (\epsilon_r - 1) \sin k_1 d}{T_e T_m} - \frac{k_1}{T_e} \tag{51}$$

또한 $F_u(k_y)$, $F_p(k_y)$, $F_s^m(k_x)$ 는 각각 $f_u(y)$, $f_p(y)$, $f_s^m(x)$ 가 푸리에 변환된 함수로 다음과 같다.

$$F_u(k_y) = \frac{\sin k_y W/2}{k_y W/2} \tag{52}$$

$$F_p(k_y) = \frac{2k_e [\cos k_y h - \cos k_e h]}{\sin k_e h (k_e^2 - k_y^2)} \tag{53}$$

$$F_s^m(k_x) = \frac{m\pi}{a} \frac{\cos k_x a}{(m\pi/2a)^2 - k_x^2} \tag{54}$$

패치에서 바라본 개구면의 어드미턴스는 다음과 같다.

$$Y^a = [V]^t [Z]^{-1} [V] \tag{55}$$

마이크로스트립 급전선로에서 본 등가 직렬 임피던스는 다음과 같다.

$$Z = Z_c \frac{\Delta v^2}{Y^e + Y^a} \tag{56}$$

개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{in} = Z - jZ_c \cot \beta L_s \tag{57}$$

여기서 L_s 는 스택브의 길이이다.

IV. 유전자 알고리즘

19세기 이후 생물학에서는 다윈이 생물의 자연도태와 진화를 발견하고 멘델이 유전에 대한 기본적인 법칙을 발견하였는데 수세기 동안 지구에 살고 있는 생물들은 생존하기 위해 생물의 기관을 자연환경에 적응하도록 변화시켜 점차 우수한 생존능력을 가지게 되었다. 이러한 생물들은 유전자를 통해 자기와 닮고 자연환경에 적응하는 능력이 보다 뛰어난 다음 세대를 생성하였다. 생물학적 시스템의 규칙은 자연환경에 적응한 개체가 다음 세대에 영향을 미치는 진화론적 개념과 다음 세대의 자손을 생산하는 교배 연산자 그리고 부모의 유전자로부터 자손의 유전자 구성을 결정하는 유전자 연산자가 있다. 이것을 기본으로 현대의 고성능 컴퓨터와 발전된 컴퓨터 언어를 사용하여 생물학적 최적화 방법인 유전자 알고리즘을 만들었다(Holland, 1975).

진화 원리와 유전 법칙에 기초한 유전자 알고리즘은 부모 개체 집단에서 일차변환인 돌연변이 형태와 고차변환인 교배 형태를 통해 부모 개체보다 더 나은 자손 개체를 만들고 이러한 세대의 반복을 통해서 생존을 위한 개체의 진화가 이루어지며 몇 세대가 반복된 후에는 목적하는 최적의 해에 수렴하는 개체가 생성된다. 이러한 유전자 알고리즘은 일반적인 최적화 알고리즘과 달리 생물학적 이론을 사용하므로 정확한 이론의 근거는 없지만 복잡한 해의 영역을 갖는 적합도 함수에서 유전자 연산자를 통해 최적의 해를 찾는 것이 스키마 이론과 모의실험에서 입증되었다(Goldberg, 1989, Michalewicz, 1996).

이러한 유전자 알고리즘은 일반적인 최적화 방법과 차이점이 있는데, 첫째로 변수를 직접 바꾸는 것이 아니라 유전자로 표현하여 변수를 조작하게 된다. 둘째로 해의 영역에서 한 개의 점으로 탐색을 하지 않고 여러 개의 점을 세대의 집합으로 구성하여 최적의 해를 찾는다. 셋째는 최적의 해를 찾기 위해 도함수나 다른 보조적인 함수를 사용하지 않고 적합도 함수의 정보를 이용한다. 넷째는 정해진 규칙들과 제약에 의해서 해를 찾지 않고 추정 통계학적 연산자를 이용한 확률적인 규칙들을 사용한다(Gen, 1997, Johnson & Rahmat-Samii, 1997).

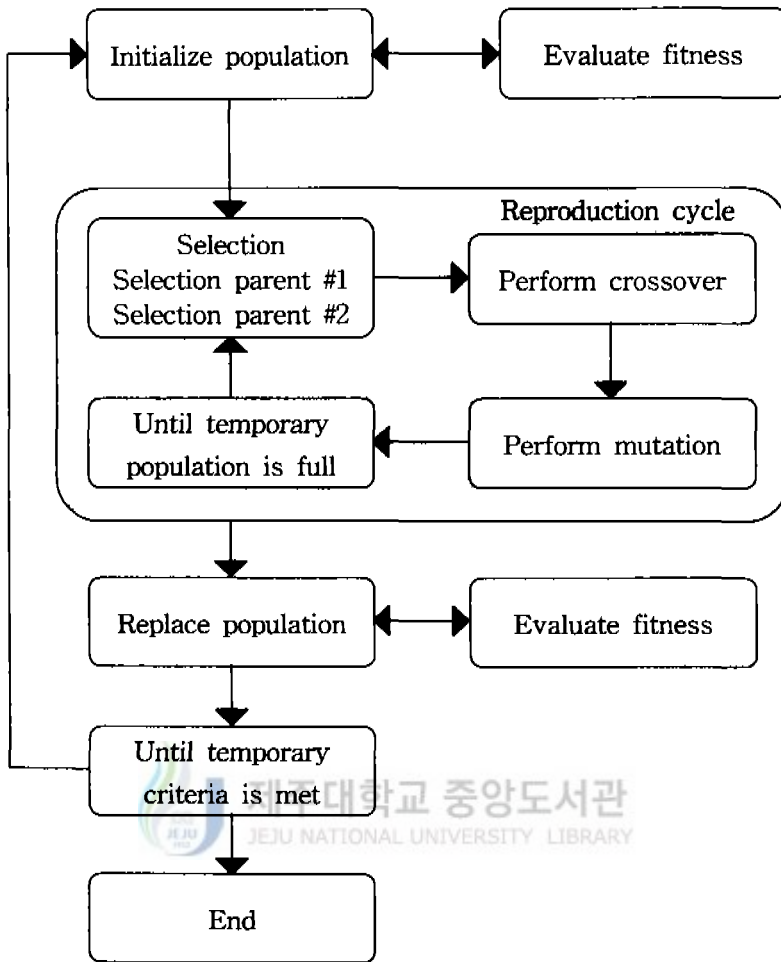


Fig. 6. A block diagram of a simple genetic algorithm optimizer

Fig. 6은 일반적인 유전자 알고리즘 순서도이다. 유전자 알고리즘은 초기 세대 집단, 재생산, 세대 재배치 과정으로 나눌 수 있다.

초기 세대 집단 과정에서는 해의 영역에서 임의의 염색체들을 구성하여 유전자 연산자에 사용되는 첫 번째 집단을 만든다. 설계변수의 유전자가 모인 염색체는 이진 코드로 표현한다. 초기 세대 집단 중에는 목적하는 주파수에서 넓은 대역폭을 갖는 염색체가 존재한다. 이 염색체를 선택하기 위해 초기 세대 집단의 염색체는 변수로 변환되어 안테나의 대역폭을 계산하는 적합도 함수에 대입한다.

재생산 과정에서는 자연도태, 교배 연산자 그리고 돌연변이 연산자가 있다. 초기 세대 집단인 염색체가 갖는 대역폭에 따라 가장 넓은 대역폭을 갖는 부모 염색체를 자연도태 방법으로 찾는다. 이렇게 선택된 부모 염색체는 유전자 알고리즘의 교배 연산자와 돌연변이 연산자에 의해 최적의 해가 포함될 가능성이 높은 자손 세대 집단을 만들어 낸다.

세대 재배치 과정은 부모 세대 집단에서 새로 생성된 자손 세대 집단으로 재배치시키고 이 집단의 염색체를 다시 적합도 함수에 대입하여 최적화의 목적에 적합한 염색체를 찾는다. 이러한 과정을 반복하여 목적하는 주파수에서 최대의 대역폭을 갖는 염색체의 유전자를 찾아 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계한다.

1. 염색체와 변수의 코드화

유전자 알고리즘은 적합도 함수에 대입하는 변수를 유전자로 코드화해서 유전자 연산자에 적용한다. 생물학적으로 유전자의 대립형질은 우성과 열성으로 나타나므로 유전자의 코드 표현은 이진코드가 적합하다(Holland, 1975). 여러 변수를 유전자 표현형인 이진 코드로 변환하고 이 코드를 하나의 집합으로 표현하면 이것을 염색체라고 한다. 염색체는 유전자 알고리즘을 적용하는데 가장 중요한 요소이며 세대가 진화를 하면서 생존을 위해 적용하는 유전자 코드를 포함한다. Fig. 7은 안테나 설계에 필요한 변수를 코드화하는 예를 나타낸 것이다. 12bit의 이진수로 나타낸 염색체는 3개의 유전자로 구성이 되었다. 1bit에서 3bit까지는 기판의 특성과 관련된 변수의 유전자이고 4bit에서 9bit까지는 패치와 슬롯의 물리적인 크기에 관한 변수의 유전자를 나타내며 10bit에서 12bit까지는 제조 과정에 필요한 변수의 유전자이다. 유전자로 사용되는 변수들은 우수한 특성을 갖는 최적의 안테나를 설계하는데 중요하다. 이런 설계 변수를 이진수로 표현하여 하나의 염색체로 만들고 여러 개의 염색체를 모아 하나의 세대를 구성한다. 그리고 세대의 진화를 통해 목적하는 주파수에서 최적의 특성을 갖는 염색체를 찾는다. 이 염색체의 유전자를 설계 변수로 변환하여 우수한 안테나를 설계하게 된다.

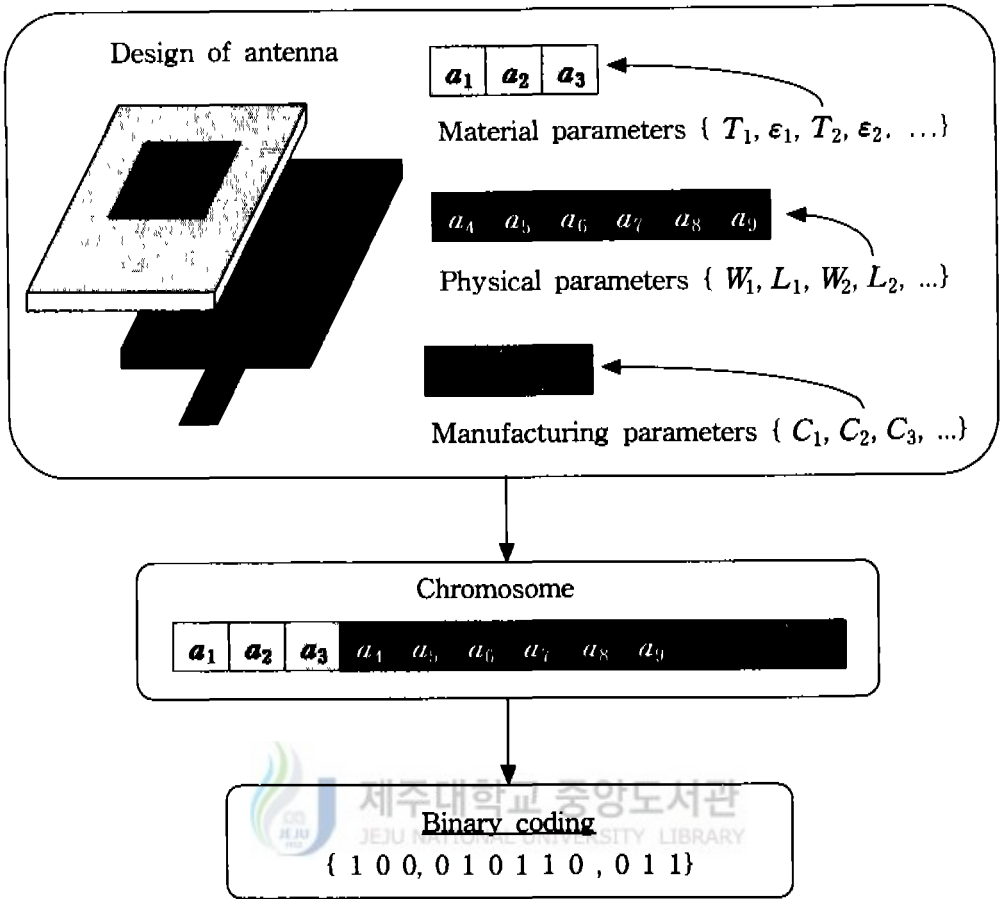


Fig. 7. A binary-encoded chromosomes of parameters

2. 자연 도태

유전자 알고리즘에서 자연도태는 부모 세대 집단에서 다음 자손 세대 집단을 만들어 낼 부모 염색체를 선택하는 것이다. 자연도태는 최적의 해에 가장 근접한 염색체를 부모 염색체로 선택하여 다음 자손 세대 집단이 좀더 최적의 해에 수렴하도록 만든다.

자연 도태의 과정은 부모 세대 집단에 있는 염색체들의 유전자를 변수로 변환하고 이 변수들을 적합도 함수에 대입하여 각 염색체들의 대역폭을 내림차순으로 정

렬한다 정렬된 염색체들은 다음의 확률에 따라 부모 염색체로 선택되어진다.

$$P_{selection} = \frac{f(parent_i)}{\sum_i f(parent_i)} \quad (57)$$

Fig 8에는 10개의 염색체가 부모 염색체로 선택될 확률을 원형차트로 표현하였다 p_4 의 염색체가 가장 높은 선택 확률을 가지므로 임의로 부모를 선정할 때 가장 많이 선택될 것이다 이렇게 선택된 부모 염색체는 유전자 연산자 과정을 통해 최적의 해로 수렴하는 자손세대를 생성하게 된다

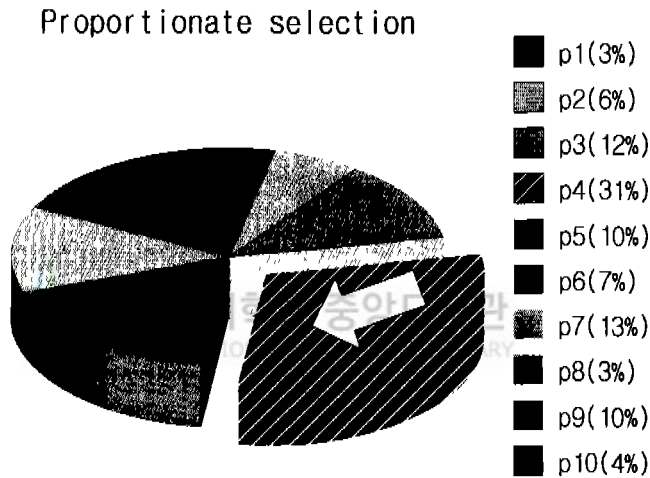


Fig. 8. Proportionate selection

3 유전자 연산자

유전자 연산자에는 자연도태로 선택된 부모 염색체에 확률적으로 적용되는 교배 연산자와 돌연변이 연산자가 있다 한 쌍의 부모 염색체는 교배와 돌연변이 연산자에 의해 한 쌍의 자손 염색체를 생성한다.

교배 연산자는 부모 염색체의 유전자 일부를 서로 교환하여 자손 염색체의 유전자를 구성한다. Fig. 9는 단일점 교배 과정을 나타낸 것으로 선택된 부모 염색체의 유전자 일부를 서로 교환하여 두 개의 자손 염색체를 생성한다. 12bit의 부모 염색체는 교배 확률이 $p > p_{cross}$ 이면 임의로 교배 위치를 선택하게 된다. 7bit와 8bit 사이를 교배점으로 선정하면 이 교배점을 중심으로 염색체를 교환하여 새로운 한 쌍의 자손 염색체를 만들게 된다. 만일 $p < p_{cross}$ 이면 염색체는 교배의 단계를 거치지 않고 부모 염색체의 유전자가 그대로 자손 염색체의 유전자가 된다. 일반적으로 교배확률인 p_{cross} 는 0.6과 0.8 사이의 값이 적합하다(Goldberg, 1989, Johnson & Rahmat-Samii, 1997).

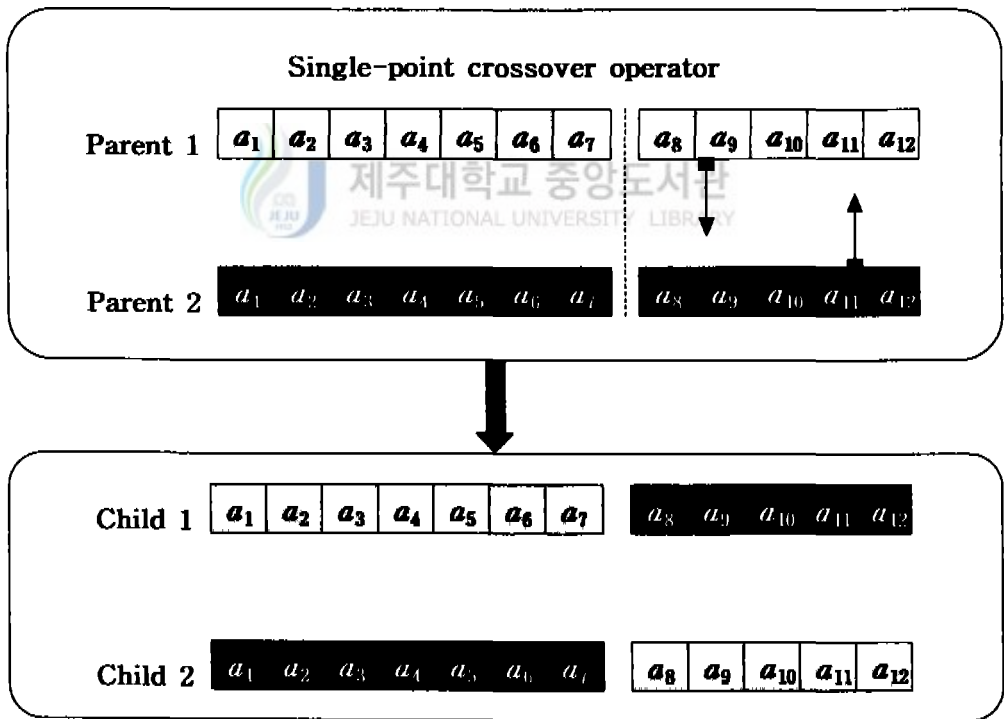


Fig. 9. The single-point crossover operator

돌연변이 연산자는 부모 세대 집단이 가지고 있는 해의 영역에서 벗어나서 자손 세대의 일부가 새로운 영역에서 최적의 해를 탐색하도록 만들어 준다. 돌연변이 연산자는 유전자 알고리즘이 지역 최적화로 수렴하는 것을 방지한다. 하지만 돌연변이를 너무 많이 하게 되면 유전자 알고리즘이 최적의 해에 수렴하지 못하게 된다. 일반적으로 유전자 알고리즘에서 사용하는 돌연변이 확률 $p_{mutation}$ 은 0.01과 0.1사이 값으로 정한다(Goldberg, 1989. Johnson & Rahmat-Samii, 1997).

돌연변이 확률이 $p > p_{mutation}$ 이면 교배 연산자를 거친 자손 염색체에서 임의의 점을 선택하여 돌연변이를 시키는데 이진수로 표현된 염색체에서 돌연변이로 선택된 점이 0인 유전자는 1로 1인 유전자는 0으로 유전자를 바꾸어서 돌연변이 연산자를 하게 된다. Fig. 10은 염색체의 유전자중 7bit에 유전자를 돌연변이시키고 있다.

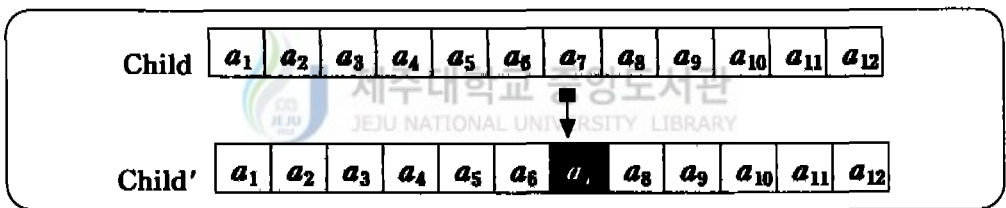


Fig. 10. The mutation operator

4. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

함수의 최대값을 구하는 문제에 일반적인 유전자 알고리즘을 적용하여 최적화 특성을 살펴본다. 두 개의 변수를 가진 다음과 같은 함수에서 최대값을 갖는 x, y 를 유전자 알고리즘을 이용하여 구한다.

$$f(x, y) = \left| \frac{\sin[\pi(x-3)]}{\pi(x-3)} \right| \left| \frac{\sin[\pi(y-3)]}{\pi(y-3)} \right| \quad (58)$$

식(58)은 x 와 y 의 변수를 갖는 함수로 이 변수들은 유전자 알고리즘에 적용될 유전자가 되며 하나의 염색체로 표현이 된다. 유전자 알고리즘의 최적화 목적은 변수의 범위가 $x, y \in \{0, 8\}$ 인 영역에서 최대값을 찾는 것이다. x, y 는 각각 16bit의 유전자로 표현되고 두 유전자를 합한 염색체는 32bit가 된다. 유전자를 변수로 변환하는 관계식은 다음과 같다.

$$x = b_x (Max - Min) / (2^{bit} - 1) + Min \quad (59)$$

여기서 Max 와 Min 은 주어진 범위의 최대값과 최소값을 나타내고 b_x 는 유전자의 이진코드를 나타낸다. 유전자 알고리즘은 100세대를 반복하여 최대값을 갖는 염색체를 찾는다. Fig. 11은 주어진 변수의 범위에서 식(58)의 결과값을 그래프로 나타내었고 $x=3$ 이고 $y=3$ 에서 최대값이 되는 것을 알 수 있다.

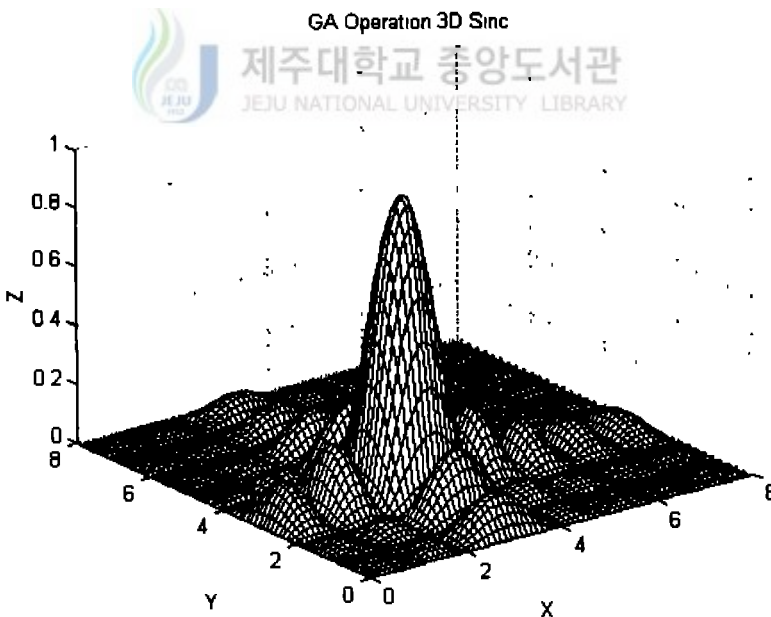


Fig. 11. A plot of the solution surface of equation (58)

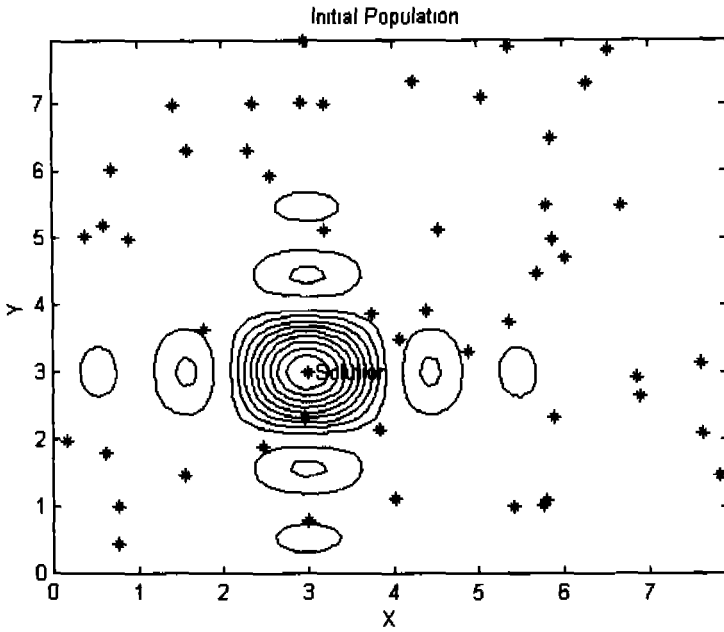


Fig. 12. Distribution of a GA population at the first generation

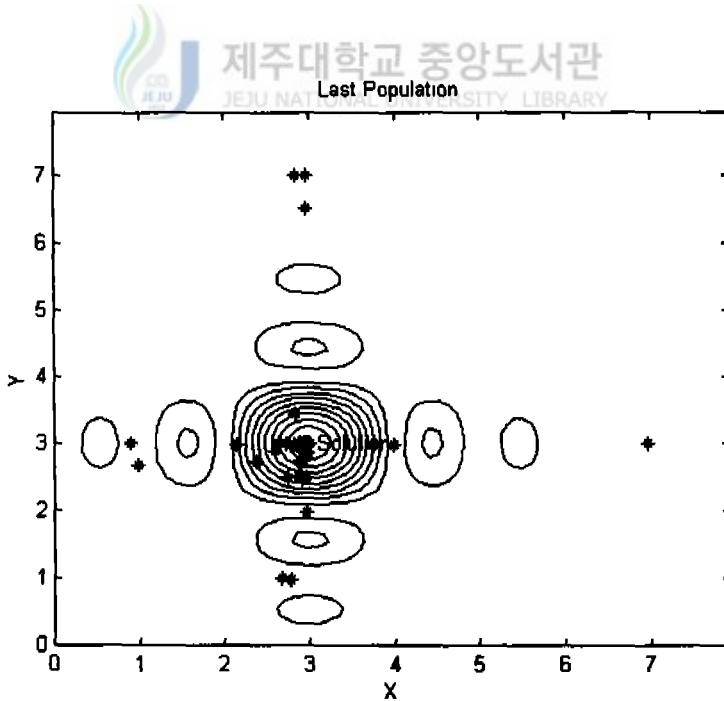


Fig. 13. Distribution of a GA population at 100 generations

교배확률이 0.7이고 돌연변이 확률이 0.05일 때 적합도 함수인 식(58)을 유전자 알고리즘에 적용하여 초기 세대와 100세대의 염색체 분포를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12는 초기 세대에서 50개의 염색체가 해의 영역에 분포하는 것을 나타낸다. 주어진 해의 영역에서 50개의 염색체가 고르게 분포하고 있어 비교적 모든 영역에서 최적의 해를 찾게 된다 Fig. 13은 100세대에서 50개의 염색체들이 최대값에 수렴하는 것을 나타내고 있다. 초기 세대의 염색체들은 자연도태와 유전자 연산자를 통해 대부분의 염색체들이 최대값에 수렴하게 진화된 것을 알 수 있으며 일부 염색체들은 돌연변이 연산자로 인해 최대값에서 떨어진 점들로 나타나고 있다

5. 유전자 알고리즘을 이용한 안테나 설계방법

유전자 알고리즘을 사용하여 안테나를 설계하려면 최적화의 목적과 설계변수의 특성을 알아야 한다. 소형이고 저가이면서 대역폭이 넓은 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하는 것이 최적화의 목적이면 이러한 특성과 관련되는 설계변수는 기판의 유전율과 두께 그리고 무게와 가격, 패치와 슬롯의 폭과 길이, 급전선로의 위치 등이 될 수 있으며 Fig. 14는 최적화 방법을 이용하여 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하는데 필요한 변수를 설명한 그림이다.

마이크로스트립 안테나에 사용되는 유전체 기판의 두께와 유전율은 일반적으로 사용되는 기판을 선택하게 되는데 안테나의 제작단가도 유전체 기판의 특성과 관련이 된다. 그래서 이러한 설계 변수는 유전자 알고리즘에서 정해진 변수들이 된다. 패치와 슬롯의 크기에 관련된 설계 변수는 개구결합 마이크로스트립 안테나의 대역폭과 관련되는 설계 변수인데 유전자 알고리즘은 이들 변수를 유전자로 표현하여 하나의 염색체로 구성하게 된다.

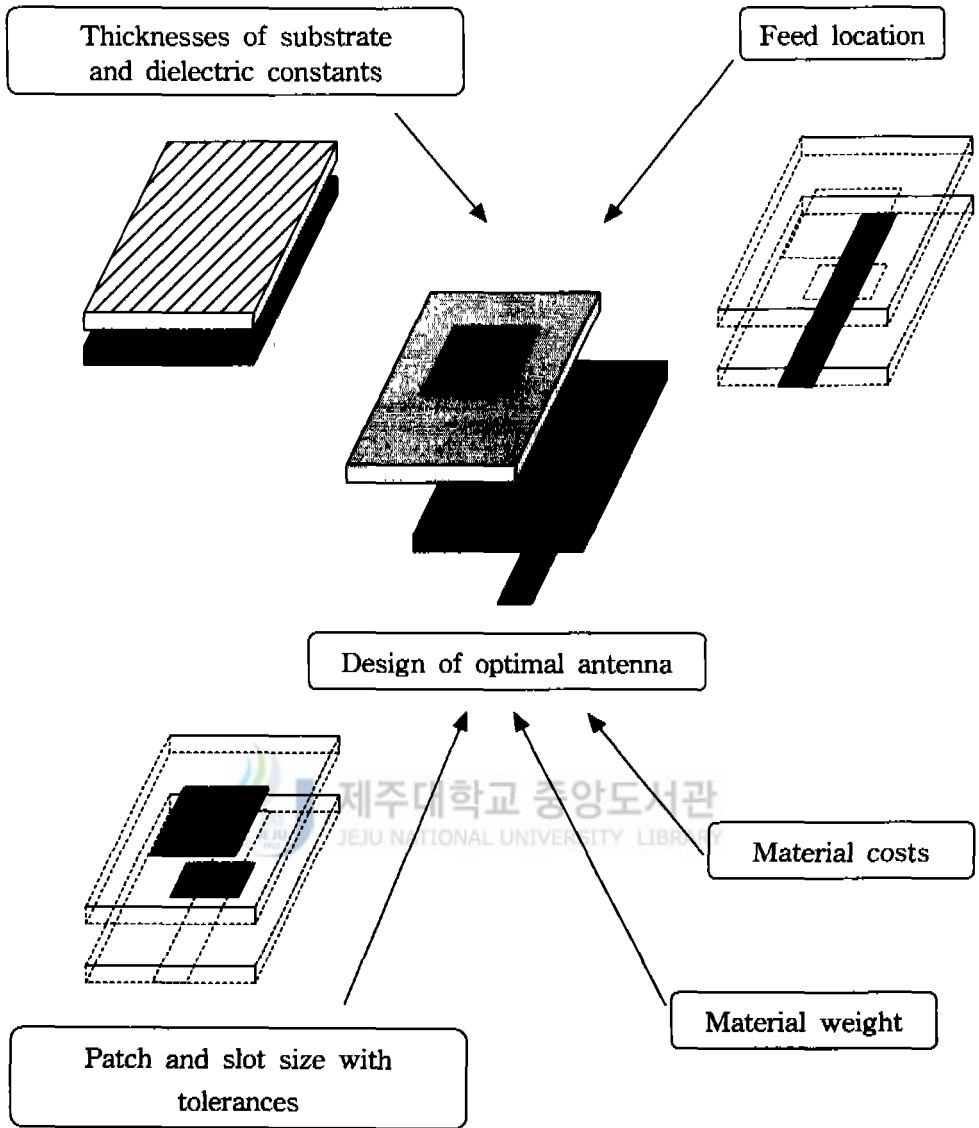


Fig. 14. The design parameters of the antenna

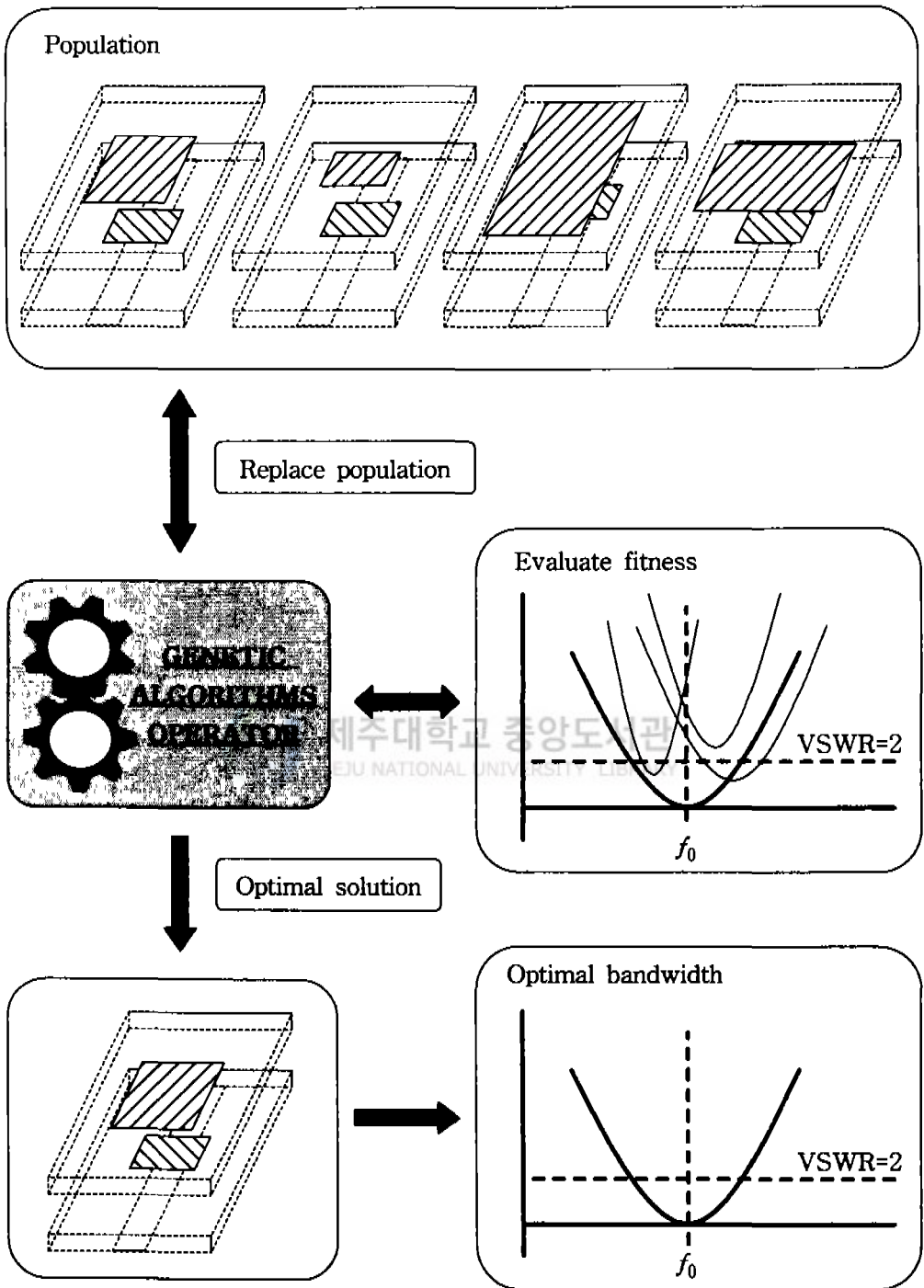


Fig. 15. The motivation of antenna designs using genetic algorithms

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 목적하는 주파수에서 대역폭이 넓은 개구결합 마이크로스트립 안테나의 패치와 슬롯을 설계한다. Fig. 15는 유전자 알고리즘으로 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하는 과정을 나타낸 것이다.

다양한 패치와 슬롯을 갖는 안테나를 여러 개의 염색체로 표현하고 하나의 세대로 구성하여 유전자 알고리즘 연산기에 대입한다. 유전자 알고리즘 연산기는 안테나의 대역폭을 구하는 적합도 함수를 통해 각 염색체들이 갖고 있는 대역폭에 대한 정보를 얻는다. 대역폭을 구하는 함수는 주파수에 따라 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스를 구하고 Fig. 15와 같이 이를 주파수에 따른 정재파비로 나타낸다. 그리고 정재파비가 2보다 작은 주파수 대역은 개구결합 마이크로스트립 안테나의 대역폭이 된다.

자연선택 과정은 각 염색체들이 갖는 대역폭에 따라서 넓은 대역폭을 갖는 부모 염색체를 선택한다. 그리고 교배 연산자를 통해 자손 염색체를 만들게 되며 지역적 수렴을 막기 위해 자손 염색체의 일부를 돌연변이시켜 새로운 자손 세대를 생성하고 이 자손 세대는 다시 유전자 알고리즘 연산기에 대입한다. 이러한 부모 세대에서 자손 세대의 생성과정을 통해 새로운 세대는 넓은 대역폭을 갖도록 진화를 하게 된다. 그래서 유전자 알고리즘의 연산기는 진화된 새로운 세대를 생성하여 목적하는 주파수에서 넓은 대역폭을 갖는 안테나의 염색체를 찾게 된다. 이 염색체는 패치와 슬롯의 폭과 길이 변수로 변환하여 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하게 된다.

V. 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계 및 제작

유전자 알고리즘을 이용하여 목적하는 주파수에서 넓은 대역폭을 갖는 안테나의 설계를 검증하기 위해 Pozar의 안테나 설계결과와 비교한다. 그리고 WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계하고 제작한다.

1. 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계

유전자 알고리즘의 설계 성능을 확인하기 위해 유전자 알고리즘으로 설계한 안테나와 Pozar가 설계한 안테나를 비교한다. Fig. 5의 개구결합 마이크로스트립 안테나에 대한 유전체 기판과 급전선로의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Specifications of the substrate and the feed line

Dielectric constant of substrate	Patch ϵ_a	2.200
	Feed ϵ_f	2.540
Thickness of substrate	Patch $d_a(\text{cm})$	0.160
	Feed $d_f(\text{cm})$	0.160
Width of feed line	Feed $W_f(\text{cm})$	0.442

급전선로는 임피던스가 50Ω 이 되도록 설계하였으며 급전부와 방사부의 유전율과 유전체의 두께는 Pozar가 설계한 제원을 이용하여 안테나를 설계하였다. 패치의 폭과 길이 그리고 슬롯의 길이는 9bit의 유전자로 나타내었고 슬롯의 폭은 5bit의 유전자로 표현하여 네 개의 유전자를 모인 염색체는 총 32bit가 된다. 각 변수들의 설계범위는 Table 2와 같다.

Table 2. The range of patch and slot

	Min	Max
Patch length L_P (cm)	1	6
Patch width W_P (cm)	1	6
Slot length L_S (cm)	1	6
Slot width W_S (cm)	0.1	0.4

유전자 연산자에서 교배가 일어날 확률은 0.8이고 돌연변이가 발생할 확률은 0.02로 하였다. 한 세대의 개체수는 30개이며 세대 반복횟수는 200번이다.

설계 변수의 비트수로 표현할 수 있는 이진 코드의 유전자와 이를 변환하여 주어진 범위에서 표현되는 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Decodes from gens

Gen(9Bit)		Decode(cm)	Gen(5Bit)		Decode(cm)
0	000000000	1.0000	0	00000	0.1000
1	000000001	1.0098	1	00001	0.1097
2	000000010	1.0196	2	00010	0.1194
3	000000011	1.0294	3	00011	0.1290
4	000000100	1.0391	4	00100	0.1387
5	000000101	1.0489	5	00101	0.1484
6	000000110	1.0587	6	00110	0.1581
7	000000111	1.0685	7	00111	0.1677
8	000001000	1.0783	8	01000	0.1774
...
500	111110100	5.8921	20	10100	0.2935
501	111110101	5.9022	21	10101	0.3032
502	111110110	5.9119	22	10110	0.3129
503	111110111	5.9217	23	10111	0.3226
504	111111000	5.9315	24	11000	0.3323
505	111111001	5.9413	25	11001	0.3419
506	111111010	5.9511	26	11010	0.3516
507	111111011	5.9609	27	11011	0.3613
508	111111100	5.9706	28	11100	0.3710
509	111111101	5.9804	29	11101	0.3806
510	111111110	5.9902	30	11110	0.3903
511	111111111	6.0000	31	11111	0.4000

패치의 폭과 길이, 슬롯의 길이를 9bit로 나타내면 0에서 511까지 총 512개의 값을 갖는다. 그리고 슬롯의 폭을 5bit로 나타내면 0에서 31까지 총 32개의 값을 갖는다. 이 유전자 코드들은 식(59)에 의해 실제 주어진 범위내의 값들로 변환된다.

Table 4는 유전자 알고리즘으로 찾은 최적의 염색체를 유전자 코드와 설계변수로 나타내었다.

Table 4. Optimal chromosomes of genetic algorithms

	Bit	Binary code	Real number(cm)
Patch length L_P	9 bit	$(101001000)_2 = (328)_{10}$	4.2
Patch width W_P	9 bit	$(011011001)_2 = (217)_{10}$	3.1
Slot length L_S	9 bit	$(000110100)_2 = (52)_{10}$	1.5
Slot width W_S	5 bit	$(00011)_2 = (3)_{10}$	0.12

Table 5에서는 패치와 슬롯의 대한 폭과 길이 그리고 대역폭에 대하여 Pozar(1986)의 설계결과를 유전자 알고리즘을 이용한 설계결과와 비교하였다. 유전자 알고리즘으로 설계한 안테나의 대역폭이 넓음을 알 수 있다.

Table 5. Simulation results by genetic algorithms and Pozar's

		This theory	Pozar
Frequency(GHz)		2.22	2.22
Patch	Length(cm)	4.2	4
	Width(cm)	3.1	3
Slot	Length(cm)	1.5	1.12
	Width(cm)	0.12	0.155
Bandwidth(%)		1.8	1

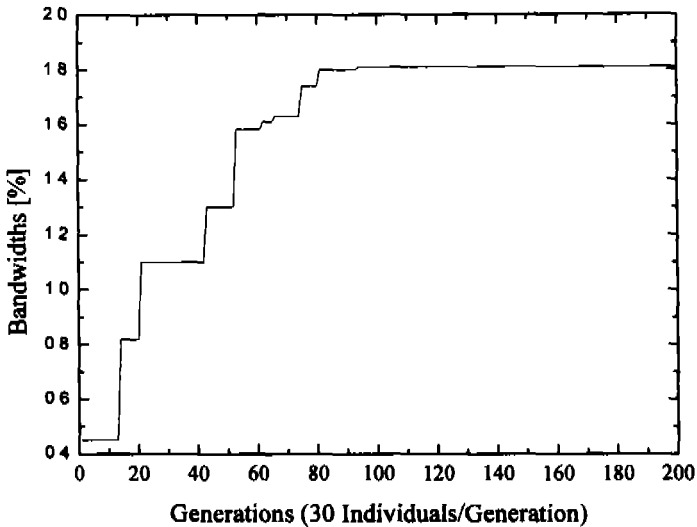


Fig. 16. Genetic algorithms optimization converges to the optimal solution

Fig. 16은 유전자 알고리즘을 이용하여 최대 대역폭에 수렴하는 결과를 나타내고 있다. 처음 세대에서 찾은 부모 염색체로부터 200세대의 최대 대역폭을 갖는 염색체가 되기까지 각 세대마다 찾은 부모 염색체의 대역폭을 그래프에 나타내었다. 유전자 알고리즘의 진화과정을 통해 각 세대의 대역폭이 점차적으로 증가하다가 100세대 이후부터 안테나의 대역폭이 수렴하게 되므로 200세대에서 약 1.8%의 대역폭을 갖는 염색체를 찾았다.

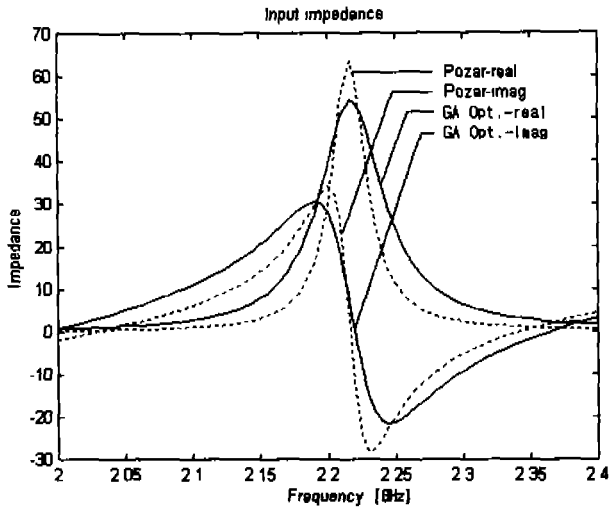


Fig. 17. Comparison of input impedance

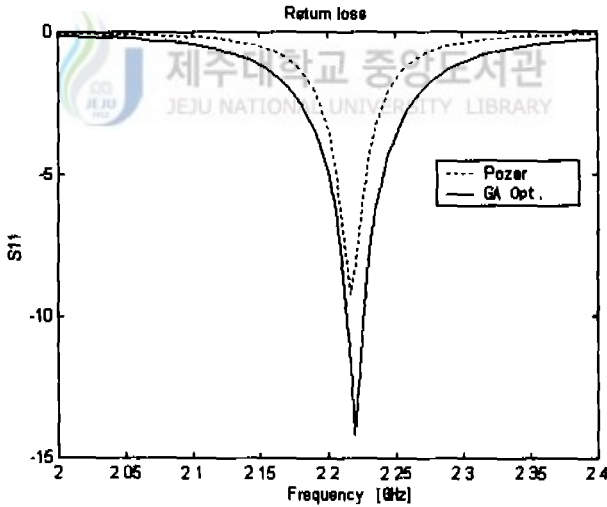


Fig. 18. Comparison of return loss

Fig. 17은 입력 임피던스를 나타낸 것이고, Fig. 18은 반사손실을 나타낸 것이다. 그림과 같이 유전자 알고리즘으로 설계된 안테나는 Pozar의 설계 결과보다 정합이 잘 되었고 반사손실이 작은 것을 알 수 있다.

2. WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나 설계

대역폭에 대한 최적화 설계가 우수한 유전자 알고리즘을 이용하여 WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나를 설계한다. 2.35GHz에서 동작하는 WLL용 개구결합 마이크로스트립 안테나의 설계변수 중에서 유전체 기판의 유전율과 두께는 FR-4 기판의 제원을 사용하므로 정해진 변수가 된다.

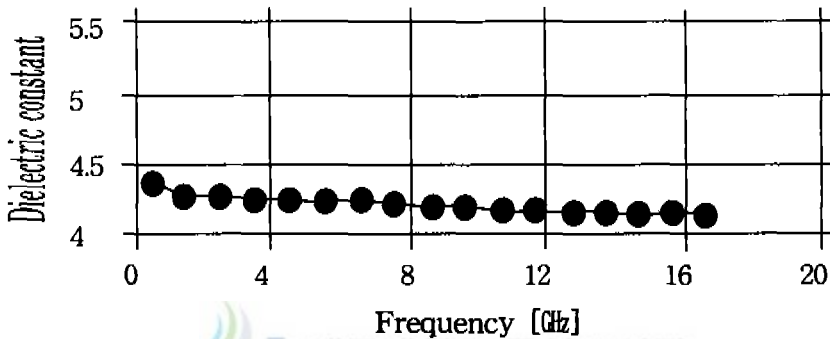


Fig. 19. Dielectric constant of FR-4

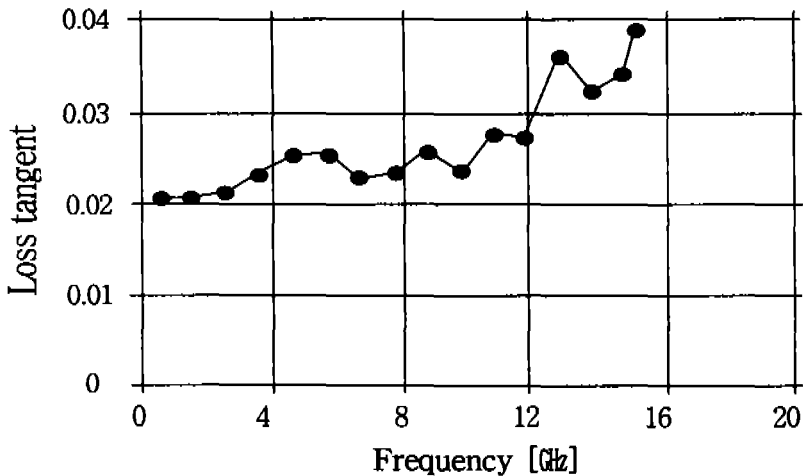


Fig. 20. Loss tangent of FR-4

Fig. 19와 Fig. 20은 DuPont사가 제공한 FR-4 기판의 특성 그래프로 Fig. 19는 FR-4의 주파수에 따른 유전율 변화를 나타낸 그래프이며 Fig. 20은 FR-4의 주파수에 따른 손실 탄젠트 변화를 나타낸 것이다. 2.35GHz에서 FR-4 기판의 유전율은 약 4.22이며 손실 탄젠트는 약 0.024이다.

FR-4 유전체 기판의 유전율과 손실 탄젠트를 이용하여 급전선로의 특성 임피던스가 50Ω이 되도록 급전선로 폭을 설계하였다. 급전부와 방사부의 기판 두께와 유전율 그리고 급전선로의 폭을 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Specifications of the substrate and the feed line

Dielectric constant of substrate	ϵ_a	4.22
	ϵ_f	4.22
Thickness of substrate	$d_a(\text{cm})$	0.48
	$d_f(\text{cm})$	0.16
Width of feed line	$W_f(\text{cm})$	0.30

패치의 폭과 길이 그리고 슬롯의 길이는 각각 8bit의 유전자로 나타내었고 슬롯의 폭은 7bit의 유전자로 표현하여 네 개의 유전자를 모인 염색체는 총 31bit가 된다.

Table 7은 안테나의 대역폭 특성에 큰 영향을 주는 패치와 슬롯에 대한 폭과 길이의 설계 범위를 나타내었다.

Table 7. The range of patch and slot

	Min	Max
Patch length $L_P(\text{cm})$	0.9	2.7
Patch width $W_P(\text{cm})$	0.9	2.7
Slot length $L_S(\text{cm})$	0.9	2.7
Slot width $W_S(\text{cm})$	0.005	0.01

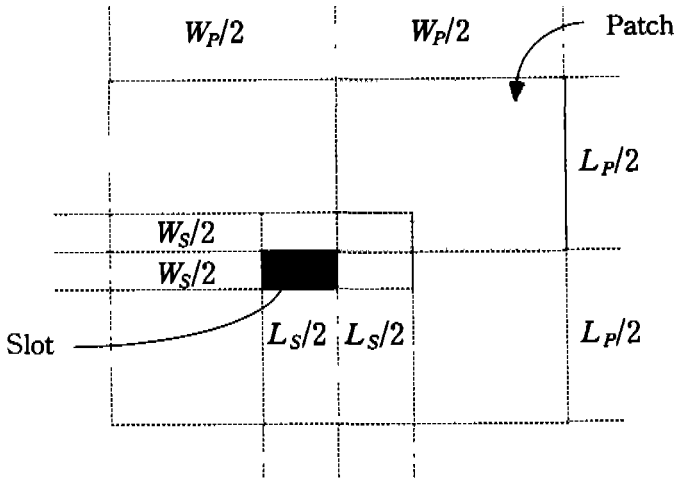


Fig. 21. The tolerances of patch and slot

Fig. 21과 같이 패치와 슬롯의 폭과 길이가 서로 대칭이 되므로 최대 길이의 반과 최소 길이의 반을 변수의 범위로 정했다.

유전자 알고리즘으로 안테나를 설계하는데 필요한 적합도 함수는 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스로부터 정재파비를 구하여 대역폭을 계산하는 함수이다. 한 세대의 염색체 수는 30개이며 적합도 함수에서 얻은 30개의 대역폭을 토대로 자연도태 과정을 통해 넓은 대역폭 특성을 갖는 부모 염색체를 얻는다. 부모 염색체의 교배 확률은 0.8이고 교배로 얻어진 자손 염색체에 돌연변이가 발생할 확률은 0.03이다. 이렇게 생성된 자손 세대는 다시 자연도태와 유전자 연산자를 통해 다음 세대를 생산하는 과정을 반복하는데 세대 생성의 반복 횟수는 200번으로 하였다.

Table 8은 유전자의 코드를 설계변수로 변환하여 주어진 범위에서 실제 표현되는 값을 나타내었다. 패치의 폭과 길이 그리고 슬롯의 길이를 8bit로 나타내면 0에서 255까지 총 256개의 값을 갖는다. 또한 슬롯의 폭을 7bit로 나타내면 0에서 127까지 총 128개의 값을 갖는다. 이 유전자 코드들은 식(59)에 의해 실제 주어진 범위내의 값들로 변환된다.

Table 8. Decodes from gens

Gen(8Bit)		Decode(cm)	Gen(7Bit)		Decode(cm)
0	00000000	0.9000	0	0000000	0.0050
1	00000001	0.9071	1	0000001	0.0057
2	00000010	0.9141	2	0000010	0.0065
3	00000011	0.9212	3	0000011	0.0072
4	00000100	0.9282	4	0000100	0.0080
5	00000101	0.9353	5	0000101	0.0087
6	00000110	0.9424	6	0000110	0.0095
7	00000111	0.9494	7	0000111	0.0102
8	00001000	0.9565	8	0001000	0.0110
...
244	11110100	2.6224	116	1110100	0.0918
245	11110101	2.6294	117	1110101	0.0925
246	11110110	2.6365	118	1110110	0.0933
247	11110111	2.6435	119	1110111	0.0940
248	11111000	2.6506	120	1111000	0.0948
249	11111001	2.6576	121	1111001	0.0955
250	11111010	2.6647	122	1111010	0.0963
251	11111011	2.6718	123	1111011	0.0970
252	11111100	2.6788	124	1111100	0.0978
253	11111101	2.6859	125	1111101	0.0985
254	11111110	2.6929	126	1111110	0.0993
255	11111111	2.7000	127	1111111	0.1000

Table 9는 유전자 알고리즘으로 찾은 최적의 염색체를 유전자 코드와 설계변수로 나타내었다.

Table 9. Optimal chromosomes of genetic algorithms

	Bit	Binary code	Real number(cm)
Patch length L_P	8 bit	$(00110101)_2 = (53)_{10}$	1.275
Patch width W_P	8 bit	$(01101011)_2 = (107)_{10}$	1.65
Slot length L_s	8 bit	$(00011101)_2 = (29)_{10}$	1.1
Slot width W_s	7 bit	$(0111001)_2 = (57)_{10}$	0.005

Table 10은 유전자 알고리즘으로 설계한 패치와 슬롯의 폭과 길이 그리고 대역폭 특성을 나타내었다.

Table 10. Simulation results using genetic algorithms

Frequency(GHz)		2.35
Patch	Length(cm)	2.55
	Width(cm)	3.3
Slot	Length(cm)	2.2
	Width(cm)	0.01
Bandwidth(%)		7

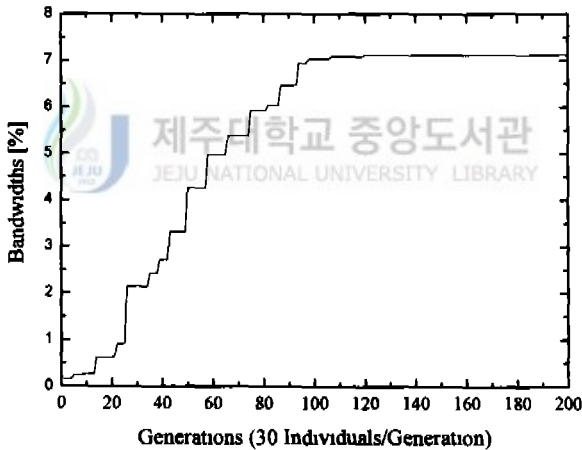


Fig. 22. Genetic algorithms optimization converges to the optimal solution

유전자 알고리즘으로 각 세대마다 찾은 안테나의 대역폭을 Fig. 22에 나타냈다. 대역폭은 세대수가 늘어갈수록 점차적으로 대역폭이 넓어졌고 최적의 대역폭은 100세대부터 수렴을 하기 시작하여 200세대에 약 7% 이상의 대역폭에 수렴을 하였다.

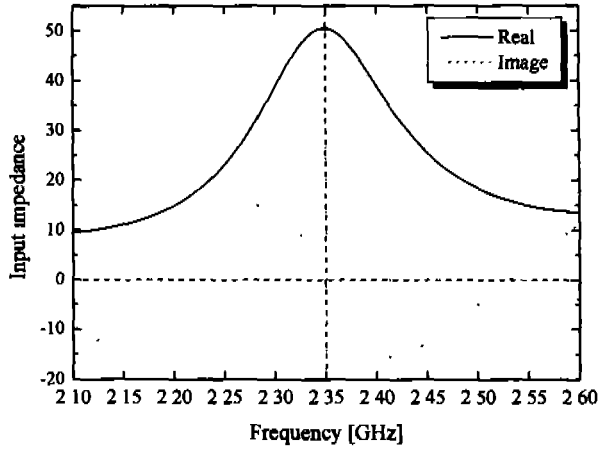


Fig. 23. Calculated input impedance

Fig. 23은 설계된 안테나의 입력 임피던스이다. 공진 주파수 2.35GHz에서 임피던스는 정합되었으며 실수부는 50Ω이고 허수부는 0이 되었다.

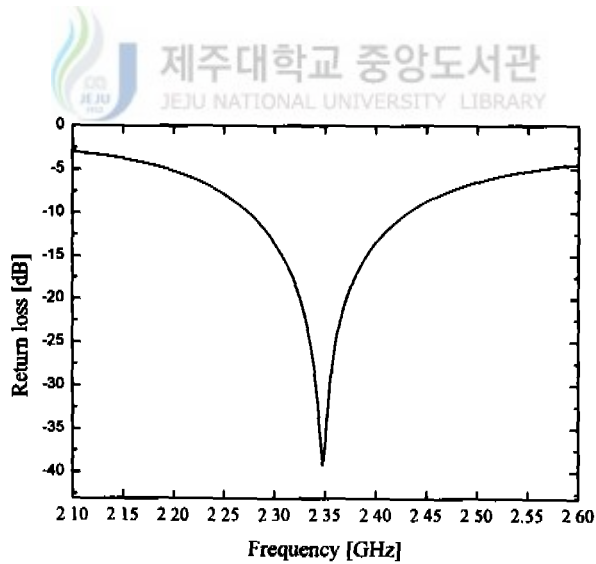


Fig. 24. Calculated return loss

Fig. 24는 설계된 안테나의 반사손실 그래프이며 공진 주파수에서 -40dB정도의 반사손실을 갖고 있다.

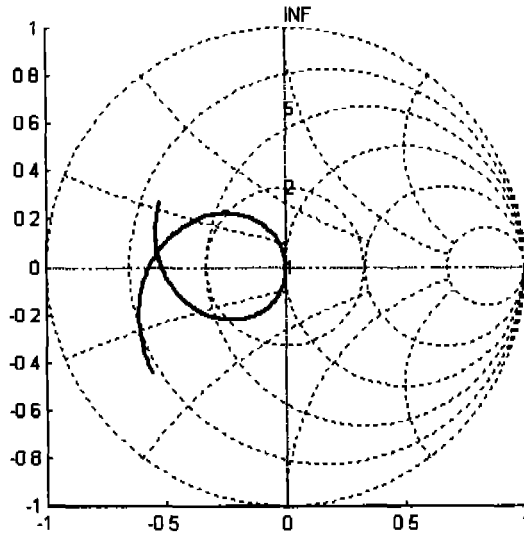


Fig. 25. Calculated smith chart

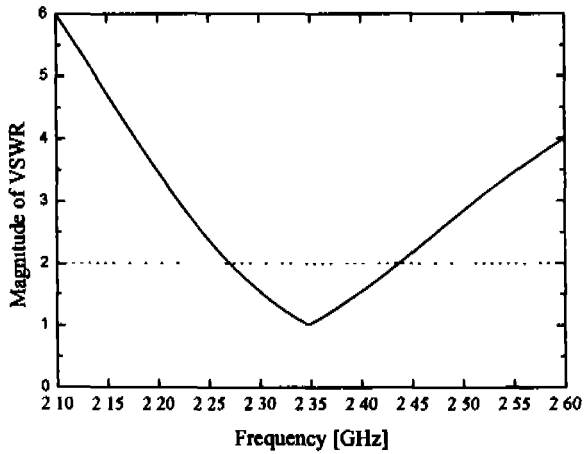


Fig. 26. Calculated VSWR

Fig. 25는 설계된 안테나의 입력임피던스를 스미스 차트에 나타내었다. 입력임피던스의 허수부가 공진 주파수에서 서로 대칭이 되므로 인덕티브나 컨덕티브쪽으로 편향되지 않고 잘 정합된 것을 알 수 있다. Fig. 26은 설계된 안테나의 정재파비 그래프이며 대역폭은 정재파비가 2인 곳에서 약 7%이상이 되므로 WLL용 주파수 대역인 2.3GHz에서 2.4GHz를 포함하고 있다.

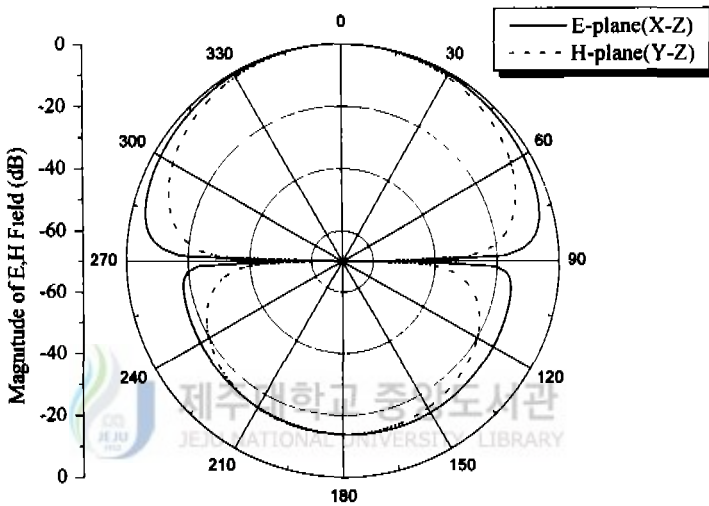


Fig. 27. Calculated E - and H -plane far-field patterns of the aperture coupled patch antenna

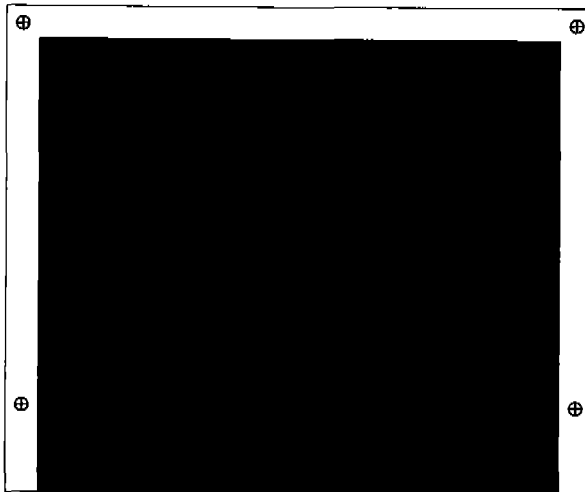
Fig. 27은 설계된 안테나의 복사 패턴이다. 패치와 급전선로에서 방사되는 패턴은 패치와 접지면 사이에 위치한 접지면에 의해 서로 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그리고 개구결합 마이크로스트립 안테나의 반전력 빔폭은 160° 이고 안테나의 전후방비는 약 13dB이상이 되었다.

3. 제작 및 결과 고찰

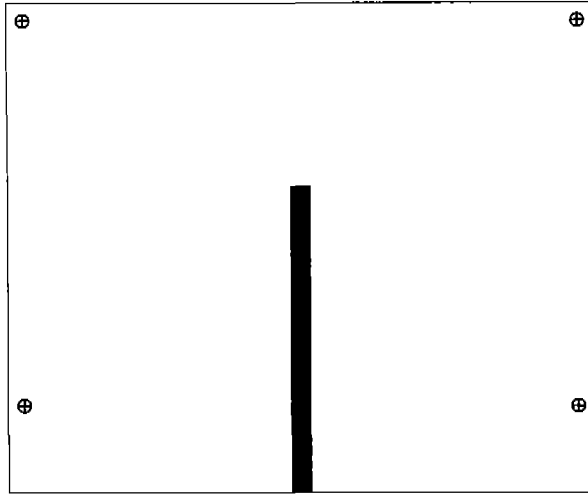
FR-4 기판에 대한 Table 6과 Table 10의 설계 데이터를 이용하여 2.35GHz의 개구결합 마이크로스트립 안테나를 제작한다. Fig. 28은 설계된 안테나의 패치와 슬롯 그리고 급전선로를 1:1 크기로 나타낸 CAD 도면이다.



(a) Patch



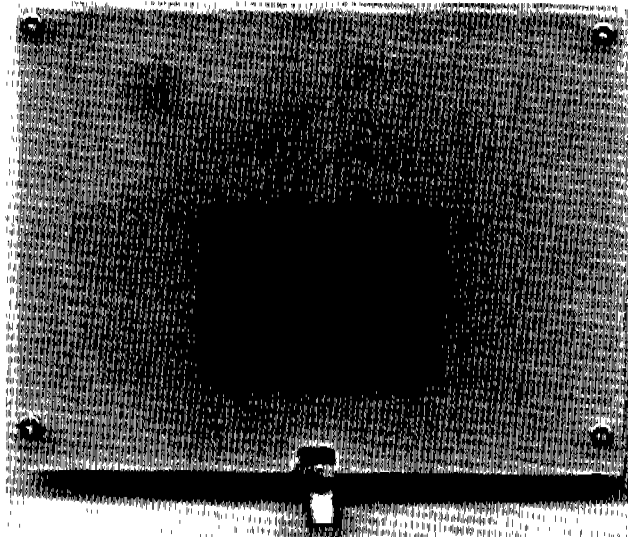
(b) Slot



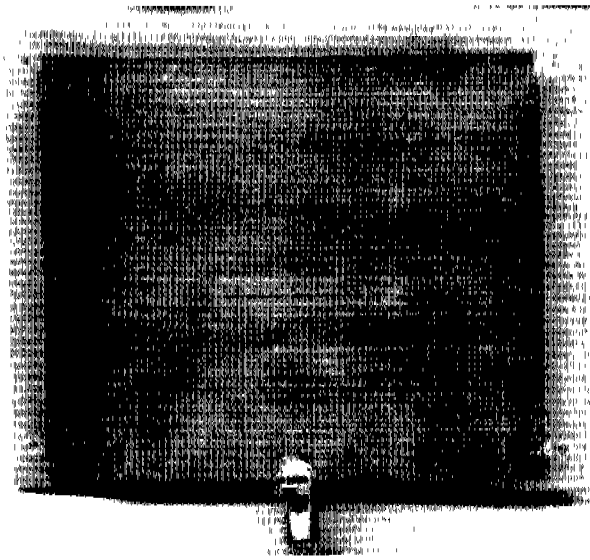
(c) Feeder

Fig. 28 The CAD of aperture coupled microstrip antenna

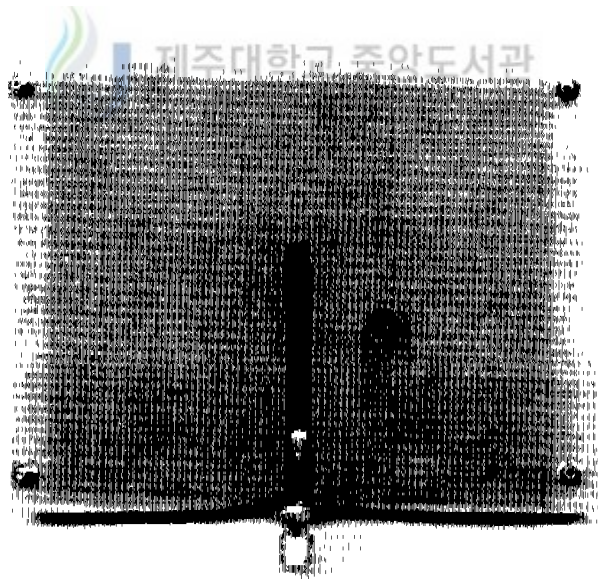
Fig 29는 사진부식방법을 이용하여 제작한 안테나의 사진이다



(a) Patch



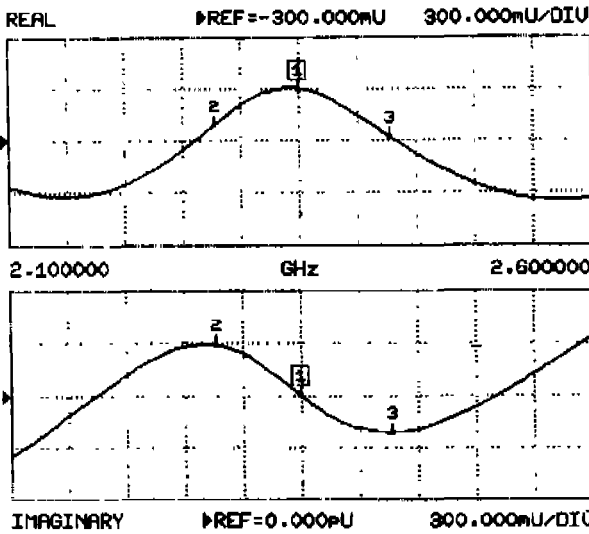
(b) Slot



(c) Feeder

Fig 29. The photograph of aperture coupled microstrip antenna

S11 FORWARD REFLECTION



CH 1 - S11
REF. PLANE
0.0000 mm

MARKER 1
2.349000 GHz
2.885 mU
4.620 jmU

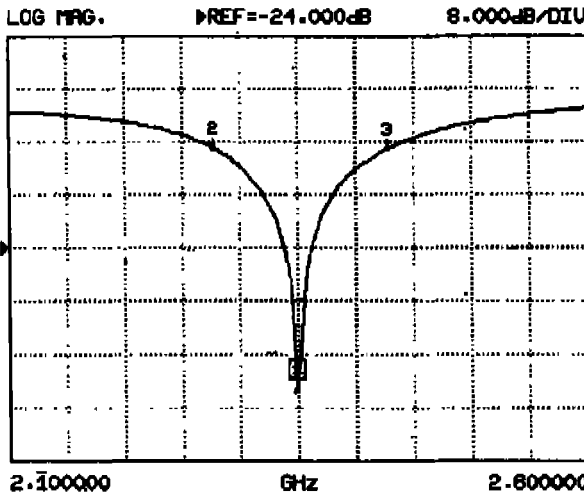
MARKER TO MAX
MARKER TO MIN

2 2.277000 GHz
-212.131 mU
290.406 jmU

3 2.427000 GHz
-275.822 mU
-211.052 jmU

Fig. 30. Measured input impedance

S11 FORWARD REFLECTION



CH 1 - S11
REF. PLANE
0.0000 mm

MARKER 1
2.349000 GHz
-45.181 dB

MARKER TO MAX
MARKER TO MIN

2 2.277000 GHz
-8.883 dB

3 2.427000 GHz
-9.188 dB

Fig. 31. Measured return loss

제작된 개구결합 마이크로스트립의 특성을 측정하기 위해 Wiltron vector network analyzer를 사용하였다. Fig. 30은 제작된 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스를 나타냈다. 설계한 안테나의 입력 임피던스인 Fig. 23의 계산결과와 측정결과를 비교하면 공진 주파수 2.35GHz에서 실수부와 허수부가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 31은 제작된 개구결합 마이크로스트립 안테나의 반사손실을 나타낸 그래프이다. 공진주파수인 점1에서 반사손실은 약 -40dB이하로 설계결과인 Fig. 24와 비슷한 특성을 나타냈다. 그리고 정재파비가 2인 점2와 점3사이의 주파수에서 반사손실은 약 -10dB이하가 되었다.

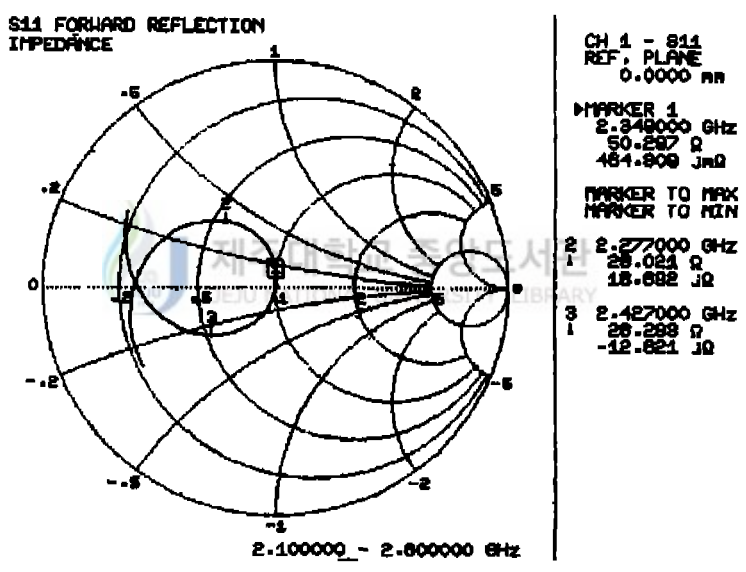
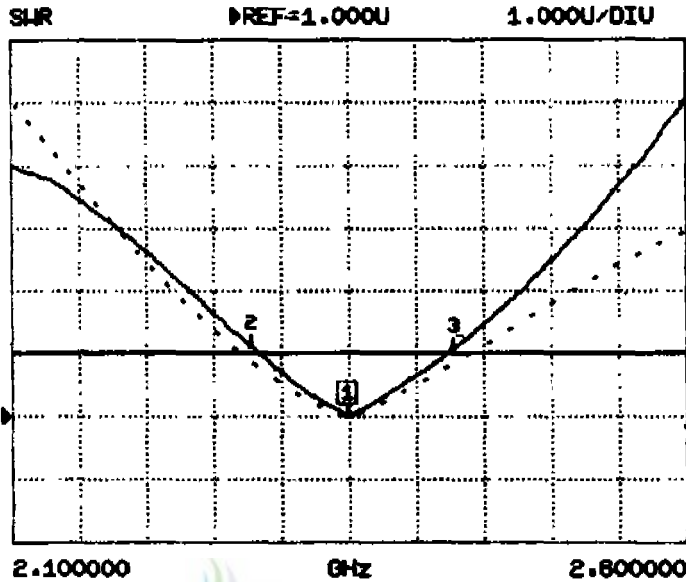


Fig. 32. Measured smith chart

제작된 개구결합 마이크로스트립 안테나의 입력 임피던스에 대한 스미스 차트는 Fig. 32이며 2.349GHz에서 실수부가 약 50Ω으로 정합이 되었고 Fig. 25의 설계한 안테나의 스미스 차트 결과 비교로 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 안테나의 대역폭이 되는 VSWR=2인 점2와 점3사이의 주파수는 정재파비가 2인 원에 들어있음을 알 수 있다.

S11 FORWARD REFLECTION



CH 1 - S11
REF. PLANE
0.0000 mm

MARKER 1
2.349000 GHz
1.011 U

MARKER TO MAX
MARKER TO MIN

2 2.277000 GHz
2.123 U

3 2.427000 GHz
2.064 U



Fig. 30. Measured(—) and calculated(.....) VSWR

Fig. 30은 제작된 안테나의 정재파비를 측정된 결과와 설계결과를 비교한 그래프이다. 측정결과에서 안테나의 중심 주파수인 점1의 정재파비는 대략 1정도가 되었고 VSWR=2일 때 제작된 안테나의 대역폭을 구하면 점2와 점3내의 대역폭은 약 6%정도가 되어 WLL 주파수 대역인 2.3GHz와 2.4GHz의 대역폭을 포함하고 있다. 측정결과와 설계결과를 비교하면 약 1%정도가 차이가 난다. 이것은 주파수에 따른 정재파비를 구할 때 2.35GHz에 대한 FR-4 기판의 유전율과 손실 탄젠트를 모든 주파수에 동일한 유전율과 손실 탄젠트로 적용했기 때문이다. Fig. 19와 Fig. 20에서 확인되듯이 FR-4기판의 유전율과 손실 탄젠트는 주파수에 따라서 변동하기 때문에 대역폭의 오차가 발생하게 되었다.

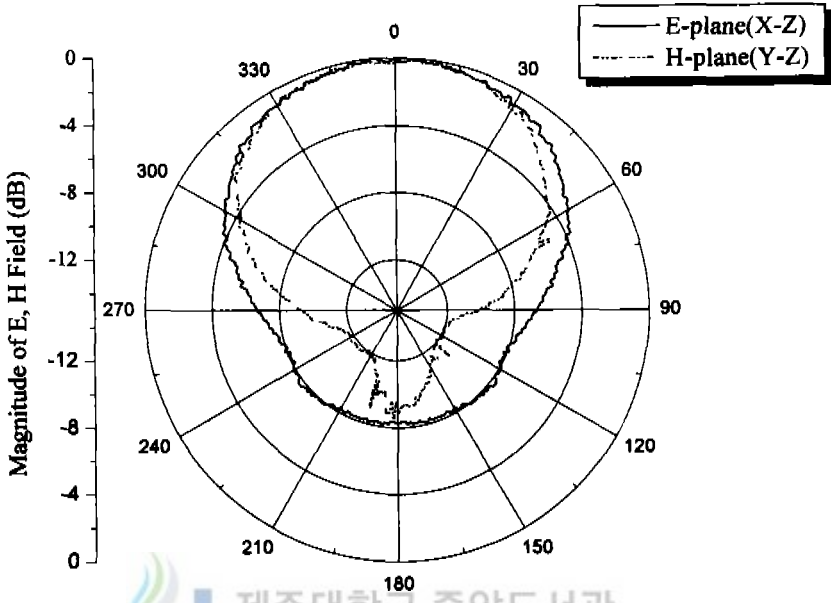


Fig. 31. Measured E - and H -plane far-field plots of the aperture coupled patch antenna

Fig. 31은 제작된 개구결합 마이크로스트립 안테나의 복사 패턴을 측정한 그림이다. 접지면에 의해 패치에서 방사되는 패턴은 급전선로부터 영향이 없음을 알 수 있다. 안테나의 반전력 대역폭은 약 113° 가 되었고 전후방비는 약 10dB이상이 되었다. 설계된 안테나는 무한한 유전체 기판에서 해석하여 설계했지만 실제 안테나는 유한한 기판으로 제작되므로 반전력 대역폭과 전후방비의 차이가 발생하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 2.35GHz에서 동작하는 WLL용 개구 결합 마이크로스트립 안테나를 설계하였고 이 안테나를 제작한 결과와 설계한 결과를 비교하였다.

개구 결합 마이크로스트립 안테나를 해석하기 위해 접지면이 있는 유전체에 대한 그린함수와 모멘트법을 이용한다. 슬롯에 의한 불연속을 해석하기 위해 가역정리를 이용하여 반사계수와 전달계수를 구하였다. 이로부터 슬롯의 전자계식과 슬롯에 의해 패치에 유도되는 전자계식을 그린함수와 모멘트법으로 구했다.

일반적으로 안테나 제작에 필요한 기판에 관한 변수들은 정해지므로 패치와 슬롯에 관한 변수를 이용하여 개구 결합 마이크로스트립 안테나를 설계하였다. 유전자 알고리즘에서 패치와 슬롯의 폭과 길이를 네 개의 유전자로 선택하여 하나의 염색체로 만들면 개구 결합 마이크로스트립 안테나의 대역폭 크기에 대한 정보를 갖게 된다. 한 세대에 포함되는 여러 개의 염색체는 유전자 연산자를 통하여 목적하는 주파수에서 최대 대역폭을 갖는 염색체가 되도록 진화를 하게 된다. 그래서 새로운 세대가 생성되는 진화의 과정을 반복하게 되면 주어진 설계환경에서 가장 우수한 특성을 갖는 염색체를 찾게 되며 여기에 들어 있는 유전자들을 변환하여 패치와 슬롯의 폭과 길이를 구해 목적하는 주파수에서 최대 대역폭을 갖는 안테나를 설계하였다.

Pozar가 설계한 안테나의 유전체 기판 제원을 사용하여 동일한 주파수에서 동작하는 개구 결합 마이크로스트립 안테나를 유전자 알고리즘으로 설계한 결과 Pozar의 설계보다 대역폭이 넓은 마이크로스트립 안테나를 설계하여 유전자 알고리즘의 최적화 성능이 우수함을 확인하였다. 그리고 FR-4 기판을 이용하여 2.35 GHz에서 동작하는 WLL용 개구 결합 마이크로스트립 안테나를 유전자 알고리즘으로 설계하였다. 설계된 제원을 이용하여 안테나를 제작한 결과 대역폭이 6%이상이 되는 WLL용 개구 결합 마이크로스트립 안테나를 제작할 수 있었다.

참 고 문 헌

- Altshuler, E. E. and D. S. Linden, 1997, Wire-antenna designs using genetic algorithms, *IEEE Antennas and Propagation Mag.*, vol.39, no.2, pp.33-43.
- Bhattacharyya, A. K., Y. M. M. Antar, and A. Ittipiboon, 1992, Full wave analysis for the equivalent circuit of an inclined slot on a microstrip ground plane, *IEEE Pro. H*, vol.139, no.3, pp.245-250.
- Carver, K. R. and J. W. Mink, 1981, Microstrip antenna technology, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.32, no.1, pp.2-24.
- Gen, Mitsuo, 1997, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, Addison-Wesley.
- Goldberg, D. E., 1989, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley.
- Haupt, R. L., 1994, Thinned arrays using genetic algorithms, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.42, pp.983-999.
- Holland, J. H., 1975, *adaptation in natural and artificial system*, The University of Michigan Press.
- Ittipiboon, A., R. Oostlander, and Y. M. M. Antar, and M. Cuhaci, 1991, A modal expansion method of analysis and measurement on aperture coupled microstrip antenna, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.39, no.11, pp.1567-1574.
- Johnson, J. M. and Yahya Rahmat-Samii, 1997, Genetic algorithms in engineering electromagnetics, *IEEE Antennas and Propagation Mag.*, vol.39, no.4, pp.7-25.

- Katehi, P. B., 1989, Mutual coupling between microstrip dipoles in multielement arrays, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.37, no.3, pp.275-280.
- Lo, Y. T., D. Solomen and W. F. Richards, 1979, Theory and Experiments on Microstrip Antenna, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.27, pp.137-145.
- Michalewicz, Zbigniew, 1996, Genetic algorithms + data structures = evolution programs, springer.
- Michielssen, E., J. Sajer, S. Ranjithan and R. Mittra, 1986, Design of lightweight, broad-band microwave absorber using genetic algorithms, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol.41, pp.1024-1031.
- Pan, S. G., and I. Wolff, 1992, Computation of mutual coupling between slot coupled microstrip patches in a finite array, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.40, no.9, pp.1047-1053.
- Pozar, D. M., 1985, A microstrip antenna aperture coupled to a microstripline, *Electron. Lett.*, vol.21, no.2, pp.49-50.
- Pozar, D. M., 1986, A reciprocity method of analysis for printed slot and slot-coupled microstrip antennas, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.34, no.9, pp.1439-1446.
- Pozar, D. M., 1989, Analysis of an infinite phased array of aperture coupled microstrip patches, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.37, no.4, pp.418-425.
- Pozar, D. M. and B. Kaufman, 1990, Design considerations for low sidelobe microstrip arrays, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.38, no.8, pp.1176-1185.
- Pozar, D. M., 1992, Microstrip antenna, *Proc. IEEE*, vol.80, no.1, pp.79-91.

Pues, H. and A. Van de Capelle, 1984, Accurate transmission-line model for the rectangular microstrip antenna, *IEE Proc.*, vol.131, no.6, pp.334-340.

Sullivan, P. L. and D. H. Schaubert, 1986, Analysis of an aperture coupled microstrip antenna, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.34, no.8, pp. 977-984.



감사의 글

2년이라는 석사과정동안 본 논문이 완성될 수 있도록 학문의 길로 이끌어 주시고 많은 충고와 관심을 아끼지 않으신 김홍수 교수님께 진심으로 감사드립니다. 본 논문에 대해 많은 조언을 해주신 이용학 교수님, 문 건 교수님, 임재운 교수님, 강진식 교수님께 감사드립니다. 그리고 안테나의 제작과 측정에 많은 도움과 조언을 해주신 양두영 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

대학원 생활을 하면서 항상 좋은 충고를 해주신 강부식 선배님께 감사드리며 바쁜 시간속에 안테나 제작과 측정을 도와주신 홍성욱 선배님과 이권익 선배님 그리고 김윤영 학우님께 고마움을 전합니다. 학부에서 석사과정까지 항상 같이 지내며 많은 충고와 격려를 해준 문성익 학우님과 연구실 행정애 많은 도움을 주신 고경생 선생님께 감사드립니다. 석사과정동안 힘들고 어려울 때나 즐겁고 기쁠 때 함께 있어준 김정주 조교선생님, 김형준 조교선생님, 통신공학과 대학원 선후배 여러분께 감사를 드리고 실험때 많은 도움을 준 문수민, 임수민, 김정표에게 고마운 마음을 전합니다. 그리고 멀리서 힘이 되어준 고장호, 강명진, 진성호와 항상 곁에서 격려를 해준 송승희에게 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 어려운 환경속에서도 학업의 길을 가게 해주신 아버님과 따뜻한 보살핌으로 저를 이끌어 주신 어머님 그리고 많은 일들을 도와준 동생들과 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.

끝으로 하늘에서도 저를 지켜보고 계실 할머니께 이 논문을 바칩니다.