

논문 2006-43TC-4-8

유전알고리즘과 특성 DB를 이용한 FSS 설계 시스템

(FSS Design System Using Genetic Algorithm and Characteristic Data Base)

이지홍*, 이필엽**, 서일성***, 김근홍***

(Jihong Lee, Fillyoub Lee, ilsong Seo, and Geunhong Kim)

요 약

본 논문에서는 설계자가 원하는 주파수 특성을 갖는 FSS(Frequency Selective Surface)를 자동으로 설계해주는 시스템을 개발하고 실제 적용한 예를 기술한다. 설계 시스템은 전자파 산란 해석이론, 실제 제작한 FSS들의 특성을 측정하여 구축된 DB, 그리고 유전 알고리즘을 이용해서 설계자가 기대하는 특성을 가진 FSS의 설계 요소들을 제시한다. 설계 시스템은 첫 단계로 설계자가 요구한 특성과 가장 유사한 특성을 갖는 FSS 파라미터들을 DB로부터 구하고, 두 번째 단계로 이 파라미터들로부터 초기 개체들을 구성하여 유전학적 진화를 통해 설계자가 요구한 특성을 갖는 FSS 설계 파라미터가 출력되도록 개발되었다. 유전 알고리즘 내에서 사용되는 FSS 해석이론은 실제 제작된 FSS 샘플을 혼 안테나를 사용하여 실제로 측정한 데이터와 비교 분석하여 그 타당성을 검증하였다. 아울러 FSS를 제작하는 과정도 간단히 소개하였다.

Abstract

This paper proposes an FSS(Frequency Selective Surface) design system that automatically derives design parameters minimally specified by engineers. The proposed system derives optimal design parameters through theory of electromagnetic scattering on FSS, database implemented from real data obtained from practically manufactured FSS, and GA(Genetic Algorithm) for optimizing design parameters. The system, at the first step, searches the best matching FSS within preconstructed DB with given characteristics specified by operators, and then sets initial genes from the searched FSS parameters. GA iterates the optimization process until the system finds the FSS design parameters that matches the characteristics specified by operators. The theory for the electromagnetic scattering on FSS is verified by comparing the simulation results with real data obtained by measuring system composed of horn antenna and receiver. The process for manufacturing the FSS is also included in the paper.

Keywords : FSS, Electromagnetic Scattering Analysis, Genetic Algorithm, Data Base

I. 서 론

1970년대 초에 발표된 C.C.Chen의 방법을 적용한 주파수 선택 표면(FSS, Frequency Selective Surface) 설

계에 관한 연구는 특정한 공진 주파수를 갖는 필터를 만들기 위해서 시작되었다^[1,2,3]. 이후 이 연구는 스텔스 기의 핵심 기술인 RCS(Radar Cross Section : 전파반사면적) 감소에 초점을 맞추어 주로 전파흡수 재료와 전파흡수 구조에 대한 연구로 진행되어 왔다^[4,5]. 스텔스 기와 같이 무게 증가 부담이 많은 분야에서 구조물에 강도를 부여함과 동시에 우수한 레이더 흡수 특성을 가지는 경량의 전파흡수구조체에 대한 필요성이 대두되었고 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 전파흡수구조체 개발에 대한 연구가 진행 및 실용화되고 있다. 그러나 전파흡수구조체에 관한 기술은 대부분 각국의 군사기밀로 취급되고 있기 때문에, 공개된 자료를 접하기

* 정회원, ** 학생회원, 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Chungnam National University)

*** 정회원, 국방과학연구소 기술 5-5팀 (Agency for Defense Development)

※ 본 논문은 국방과학연구소 "선택적 전파흡수/투과형 다층 구조물 설계 및 제작 기법에 관한 연구" 과제 (UD030062GD)의 지원으로 연구되었습니다.

※ 접수일자: 2006년1월4일, 수정완료일: 2006년4월13일

매우 어렵고, 일부 발표된 전파흡수구조재의 고주파 전자기 특성을 분석하더라도 그 전파흡수재료 및 구조와 전파특성을 분석하는 방법 자체가 전부 공개되지 않아 실제 전파구조재개발에 활용하기는 매우 어렵다. 현재 국내에서는 FSS 해석과 관련된 전파 특성 및 구조에 대한 연구가 일부 진행 중에 있지만^[6-8] 매우 미미한 상태이고 이러한 연구의 대부분은 설계된 FSS에 입사하는 입사파에 대한 각 주파수에서의 반사 및 투과 계수를 구하는 연구가 주를 이루고 있다.

본 연구에서는 FSS를 활용한 레이돔 및 전파흡수구조재의 개발에 활용 될 수 있는 FSS 설계 시스템을 제안하고 이 시스템의 결과로 얻어진 FSS 설계 파라미터들을 이용하여 FSS를 제작한 후 결과 특성을 FSS 설계 시스템의 주파수 특성 곡선과 비교 분석하였다. 그림 2는 본 연구에서 개발한 시스템의 전체적인 구조를 나타내는 것으로서 이 시스템은 크게 DB(Data Base) 알고리즘, FSS 설계 알고리즘, FSS 제작 및 측정 활용의 3단계로 이루어져 있다.

첫째로 DB 시스템은 설계자의 설계 요구사항에 가장 근사한 초기 FSS 설계 파라미터 값을 DB에서 찾아주기 위한 시스템으로 설계 요구사항으로는 주파수의 특성 곡선을 직접 입력하는 방법과 주파수 특성을 나타내는 공진주파수, -1dB에서의 주파수 대역폭, 최소 손실율등을 입력으로 넣어주는 방법으로 구성되어 있고 DB에는 단

위 셀과 안테나의 크기, 유전율, 유전체의 두께에 대한 정보가 추가로 들어있다. 결과로는 초기 FSS 설계 파라미터들에 대한 정보를 얻는데 이는 유전 알고리즘의 설계 파라미터 범위를 설정하는 기준으로 사용되기 때문에 기존의 유전 알고리즘에 비해 설계파라미터 범위를 설정하는데 매우 용이하다.

둘째로 FSS 설계 알고리즘은 앞 단계에서 얻은 초기 FSS 설계 파라미터들로부터 최적화된 FSS 설계 파라미터들을 얻기 위한 알고리즘으로서 전자파 산란 해석과 유전 알고리즘으로 구성되어 있다. 전자파 산란 해석은 전자파의 전자계 방정식과 자계 밀도 방정식을 유도하고 이를 주파수 영역으로 변환하여 방정식을 풀어 줌으로써 전자파 산란을 해석 하는 방법이다^[4,5,6]. 전자파 산란을 해석할 때 사용되는 주파수 영역 방법(Spectral domain method)은 Raj Mittra에 의해 1970년대 초에 연구된 이론으로 전자기파의 전파, 산란 등의 문제에 매우 유용하게 사용될 수 있는 도구로 모멘트법(Method- Of-Moment)에 적용하면 효율적인 계산이 가능하다^[7,8,9]. 유전 알고리즘은 1970년대에 정립된 이론으로 자연계의 적자생존과 유전 현상을 이용하여 교배를 통해 최적화로 접근해 나가는 알고리즘으로서 본 논문에서는 유전 알고리즘의 유전 연산자로 전자파 산란 해석을 사용하였고 유전 알고리즘의 설계 파라미터 범위는 DB의 결과로 얻은 FSS 설계 파라미터들을 이용하여 설정하였다. 최종적으로 최적화된 FSS 설계 파라미터들을 이용하여 FSS를 제작 및 측정하는데 활용하였다.

이상의 3단계를 이용하여 최적화된 FSS를 설계 및 제작하는데 활용되는 FSS 설계 시스템은 설계자가 주파수 특성 성분들 또는 주파수 특성 곡선의 모양만 알고 있으면 되기 때문에 FSS 설계가 매우 용이한 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 주기적인 형상을 갖는 FSS에 대한 전자파 산란 해석이론에 대해 소개하고 III장과 IV장에서는 DB와 유전 알고리즘을 이용한 FSS 설계 시스템에 대해 소개한 후 예를 적용하여 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

II. 전자파 산란 해석

II장에서는 먼저 FSS 설계 시스템에 사용되는 전자파 산란 해석과 유전알고리즘 중에서 전자파 산란 해석에 대해 다루도록 하겠다.

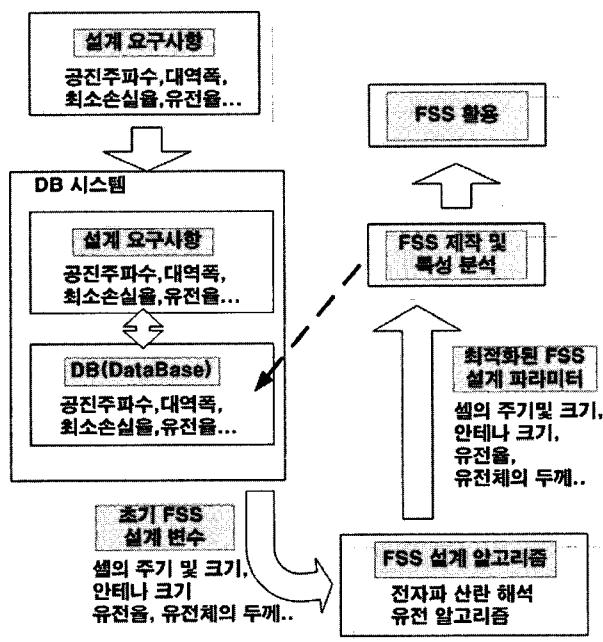


그림 1. GA를 이용한 FSS 설계 동작 원리
Fig. 1. FSS design flow chart using the genetic algorithm and DB(Data Base).

1. 유전체가 있는 FSS 스크린의 일반적인 수식
직교 좌표계에서의 TE 모드와 TM 모드를 Floquet vector modal 함수로 나타내면 다음과 같다^[1].

$$\bar{\Phi}_{pqr}^{\pm i} = \bar{\Phi}_{pqr}(x, y) \cdot e^{\mp j\gamma_{pq}^i z} \quad (1)$$

여기서 γ_{pq}^i 는 z축 방향으로의 i 번째 유전체의 전파 상수를 나타내고 p, q 는 Floquet 모드를 나타내며, r 은 TE, TM 모드를 나타낸다($r=0$:TE, $r=1$:TM).

그림 2에서 보는 바와 같이 유전체 사이에 FSS 스크린이 놓여 있고 z축 방향으로 평면파가 입사한다고 가정하면 유전체의 종류에 따라 FSS는 총 4개의 영역으로 나누어진다. Region 1은 입사파와 $z=-h_2$ 의 경계면에 대한 반사파의 합을 나타내는 영역으로 이 영역에서의 전계와 자계는 식 (2)와 (3)으로 표현된다.

$$\bar{E}_T^{b_2} = \sum_p \sum_q \sum_r (R_{pqr} \Phi_{pqr}^{-b_2} + \delta_{p0} \delta_{q0} A_{pqr} \Phi_{pqr}^{b_2}) \quad (2)$$

$$-\hat{z} \times \bar{H}_T^{b_2} = \sum_p \sum_q \sum_r (-R_{pqr} \Phi_{pqr}^{-b_2} + \delta_{p0} \delta_{q0} A_{pqr} \Phi_{pqr}^{b_2}) \xi_{pqr}^{b_2} \quad (3)$$

여기서 R_{pqr} 과 A_{pqr} 은 region 1에서의 반사와 입사 계수를 나타내며 ξ_{pqr}^i 는 i 번째 유전체에서의 modal admittance를 나타낸다. 동일한 과정을 region 2 ~ 4에 적용하면 식(4)~(9)와 같이 표현된다.

$$\bar{E}_T^{d_2} = \sum_p \sum_q \sum_r (c_{pqr} \Phi_{pqr}^{-d_2} + d_{pqr} \Phi_{pqr}^{d_2}) \quad (4)$$

$$-\hat{z} \times \bar{H}_T^{d_2} = \sum_p \sum_q \sum_r (-c_{pqr} \Phi_{pqr}^{-d_2} + d_{pqr} \Phi_{pqr}^{d_2}) \xi_{pqr}^{d_2} \quad (5)$$

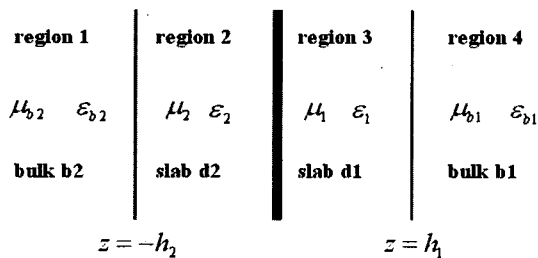


그림 2 FSS의 유전체 모델

Fig. 2. Dielectric substance of FSS.

여기서 c_{pqr} 와 d_{pqr} 는 Resion 2에서의 반사 및 투과 계수를 나타낸다.

$$\bar{E}_T^{d_1} = \sum_p \sum_q \sum_r (a_{pqr} \bar{\Phi}_{pqr}^{-d_1} + b_{pqr} \bar{\Phi}_{pqr}^{d_1}) \quad (6)$$

$$-\hat{z} \times \bar{H}_T^{d_1} = \sum_p \sum_q \sum_r (-a_{pqr} \bar{\Phi}_{pqr}^{-d_1} + b_{pqr} \bar{\Phi}_{pqr}^{d_1}) \xi_{pqr}^{d_1} \quad (7)$$

여기서 a_{pqr} 와 b_{pqr} 는 Resion 3에서의 반사 및 투과 계수를 나타낸다.

$$\bar{E}_T^{b_1} = \sum_p \sum_q \sum_r (B_{pqr} \bar{\Phi}_{pqr}^{b_1}) \quad (8)$$

$$-\hat{z} \times \bar{H}_T^{b_1} = \sum_p \sum_q \sum_r (B_{pqr} \bar{\Phi}_{pqr}^{b_1}) \xi_{pqr}^{b_1} \quad (9)$$

여기서 B_{pqr} 은 Region 4에서의 투과 계수이다.

2. 경계조건 적용

각 영역에 대해 유도된 식들을 서로 연관시키기 위해 경계면에서의 전계 및 자계의 접선 성분은 연속이고 도체의 경계면에서의 전계는 0인 경계조건을 적용 하였다. 경계면 $z=h_1$ 에 위 두 경계조건을 적용하면 식(6)~(9)로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$B_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{b_1} h_1} = a_{pqr} e^{j\gamma_{pq}^{d_1} h_1} + b_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{d_1} h_1} \quad (10)$$

$$B_{pqr} \xi_{pqr}^{b_1} e^{-j\gamma_{pq}^{b_1} h_1} = (-a_{pqr} e^{j\gamma_{pq}^{d_1} h_1} + b_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{d_1} h_1}) \xi_{pqr}^{d_1} \quad (11)$$

동일한 방법으로 경계면 $z=-h_2$ 에 위의 두 경계조건을 적용하면 식(2)~(5)로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$R_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{b_2} h_2} + \delta_{p0} \delta_{q0} A_{pqr} e^{j\gamma_{pq}^{b_2} h_2} = c_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{d_2} h_2} + d_{pqr} e^{j\gamma_{pq}^{d_2} h_2} \quad (12)$$

$$(R_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{b_2} h_2} - \delta_{p0} \delta_{q0} A_{pqr} e^{j\gamma_{pq}^{b_2} h_2}) \xi_{pqr}^{b_2} = (c_{pqr} e^{-j\gamma_{pq}^{d_2} h_2} - d_{pqr} e^{j\gamma_{pq}^{d_2} h_2}) \xi_{pqr}^{d_2} \quad (13)$$

경계면 $z=0$ 에 경계조건을 적용하면 (4)와 (6)으로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$a_{pqr} + b_{pqr} = c_{pqr} + d_{pqr} \quad (14)$$

식(10)과 (11)을 a_{pqr} 과 b_{pqr} 에 대한 식으로 정리하면

다음과 같다.

$$a_{pqr} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\xi_{pqr}^{b_1}}{\xi_{pqr}^{d_1}} \right) e^{-j(\gamma^{b_1} + \gamma^{d_1})h_1} B_{pqr} \quad (15)$$

$$b_{pqr} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\xi_{pqr}^{b_1}}{\xi_{pqr}^{d_1}} \right) e^{-j(\gamma^{b_1} - \gamma^{d_1})h_1} B_{pqr} \quad (16)$$

마찬가지로 식(12)과 (13)을 c_{pqr} 와 d_{pqr} 에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$c_{pqr} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\xi_{pqr}^{b_2}}{\xi_{pqr}^{d_2}} \right) e^{-j(\gamma^{b_2} - \gamma^{d_2})h_2} R_{pqr} \quad (17)$$

$$+ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\xi_{pqr}^{b_2}}{\xi_{pqr}^{d_2}} \right) e^{j(\gamma^{b_2} + \gamma^{d_2})h_2} \delta_{p0} \delta_{q0} A_{pqr}$$

$$d_{pqr} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\xi_{pqr}^{b_2}}{\xi_{pqr}^{d_2}} \right) e^{-j(\gamma^{b_2} + \gamma^{d_2})h_2} R_{pqr} \quad (18)$$

$$+ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\xi_{pqr}^{b_2}}{\xi_{pqr}^{d_2}} \right) e^{j(\gamma^{b_2} - \gamma^{d_2})h_2} \delta_{p0} \delta_{q0} A_{pqr}$$

위에서 구한 식(15)~(18)을 식(14)에 대입하여 정리하면 반사계수 R_{pqr} 을 구할 수 있다.

$$R_{pqr} = \frac{K_{pqr}^{(1)} B_{pqr} - \delta_{p0} \delta_{q0} K_{pqr}^{(3)} A_{pqr}}{K_{pqr}^{(2)}} \quad (19)$$

여기서 $K_{pqr}^{(1)}$, $K_{pqr}^{(2)}$, $K_{pqr}^{(3)}$ 은 다음과 같다.

$$K_{pqr}^{(1)} = \left(\cos(\gamma^{d_1} h_1) + j \frac{\xi_{pqr}^{b_1}}{\xi_{pqr}^{d_1}} \sin(\gamma^{d_1} h_1) \right) e^{-j\gamma^{b_1} h_1} \quad (20)$$

$$K_{pqr}^{(2)} = \left(\cos(\gamma^{d_2} h_2) + j \frac{\xi_{pqr}^{b_2}}{\xi_{pqr}^{d_2}} \sin(\gamma^{d_2} h_2) \right) e^{-j\gamma^{b_2} h_2} \quad (21)$$

$$K_{pqr}^{(3)} = \left(\cos(\gamma^{d_2} h_2) - j \frac{\xi_{pqr}^{b_2}}{\xi_{pqr}^{d_2}} \sin(\gamma^{d_2} h_2) \right) e^{j\gamma^{b_2} h_2} \quad (22)$$

3. 투과 계수

Inductive Mesh인 경우 element는 aperture 형태이

고 이를 도파관 모드에 관한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{E}_T^{d_1} = \vec{E}_T^{d_2} = \sum_m \sum_n \sum_l F_{mnl} \vec{\psi}_{mnl} \quad (23)$$

여기서 $\vec{\psi}_{mnl}$ 은 도파관 모드 함수를 나타내고 m, n은 도파관 모드를 나타낸다.

식(23)의 좌변에 식(4)와 (6)을 대입한 후 식의 양변에 $\vec{\Phi}_{pqr}^*$ 을 곱하여 정리하면 다음과 같다.

$$a_{pqr} + b_{pqr} = c_{pqr} + d_{pqr} = \sum_m \sum_n \sum_l F_{mnl} C_{pqr}^{mnl} \quad (24)$$

여기서 C_{pqr}^{mnl} 은 다음과 같다.

$$C_{pqr}^{mnl} = \iint_{\text{aperture}} \vec{\psi}_{mnl} \vec{\Phi}_{pqr}^* da \quad (25)$$

식(15), (16), (20)을 통해 식 (24)는 다음과 같이 바꾸어 줄 수 있다.

$$B_{pqr} = \frac{\sum_m \sum_n \sum_l F_{mnl} C_{pqr}^{mnl}}{K_{pqr}^{(1)}} \quad (26)$$

식(26)에서 B_{pqr} 을 구하기 위해서는 F_{pqr} 을 구해야 하는데 이는 $z=0$ 에서의 자계의 경계조건

$$\hat{z} \times [\vec{H}_T^{d_1} - \vec{H}_T^{d_2}] = 0 \quad (27)$$

을 이용하여 구할 수 있다. 식(24), (26)에 식 (27)을 적용하여 적분 방정식으로 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\sum_r Y_{00r}^{(in)} A_{00} C_{00}^{*MNL} = \sum_m \sum_n \sum_l F_{mnl} C_{pqr}^{mnl} \sum_p \sum_q \sum_r Y_{pqr}^{(eff)} C_{pqr}^{*mnl} \quad (28)$$

위 식에서 $Y_{00r}^{(in)}$ 은 입력 어드미턴스를 나타내며 $Y_{pqr}^{(eff)}$ 은 특성 어드미턴스를 나타낸다.

식(28)은 식(29)와 같은 형태로 정리가 되며

$$[I_{MNL}] = [Y_{MNL}^{mnl}] [F_{mnl}] \quad (29)$$

식(29)으로부터 F_{mnl} 은 Y_{MNL}^{mnl} 의 역행렬을 양변에 곱해 줌으로써 구할지고 이를 식(26)에 대입함으로써 반사 계

수 B_{pqr} 을 구할 수 있다. 여기에서 구한 B_{pqr} 을 다시 식(19)에 대입해 주면 반사 계수 R_{pqr} 을 구할 수 있게 된다.

III. DB와 유전 알고리즘을 이용한 FSS 설계 시스템

III장에서는 FSS 설계 시스템에 사용되는 DB 시스템과 유전 알고리즘을 살펴본 후 이를 앞장에서 다룬 전자파 산란해석에 적용하는 과정에 대해 다룬다.

1. DB 시스템

DB 시스템은 설계자의 설계 요구사항에 가장 근사한 초기 FSS 설계 파라미터 값을 DB에서 찾아주기 위한 시스템으로 설계 요구사항으로는 주파수의 특성 곡선을 직접 입력하는 방법과 주파수 특성을 나타내는 공진주파수, -1dB에서의 주파수 대역폭, 최소 손실을 등을 입력으로 넣어주는 방법으로 구성되어 있고 DB에는 단위 셀과 안테나의 크기, 유전율, 유전체의 두께에 대한 정보가 추가로 들어있다. 그림 3은 초기 FSS 설계 파라미터들을 검출하기 위해 작성한 프로그램이다.

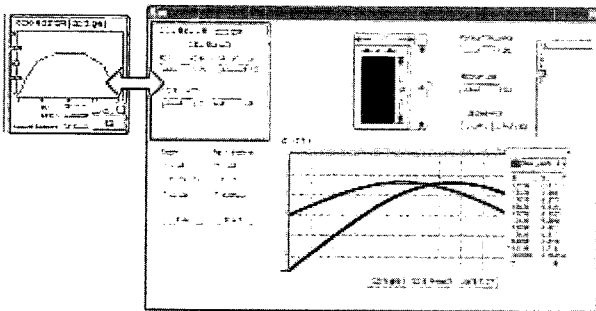


그림 3. DB 시스템의 GUI
Fig. 3. The GUI of DB System.

2. 유전 알고리즘

유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)은 자연세계의 진화 현상을 기반으로 한 계산 모델로서 유전 알고리즘을 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 '구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 생성하는 이론이다^[12].

유전 알고리즘을 FSS 설계에 적용하기 위해서는 유전 알고리즘의 설계 파라미터와 목적 함수를 정의하는 두 단계가 필요하다. 유전 알고리즘을 이용한 FSS 설계 중 첫 번째 단계는 설계 파라미터를 정의하는 것이

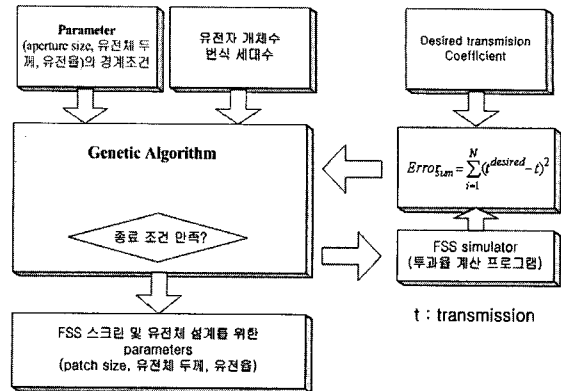


그림 4. 유전 알고리즘을 이용한 FSS 설계 과정
Fig. 4. FSS design flow chart using GA.

다. 본 논문에서는 주기적인 사각형 모형의 FSS를 모델로 하였고 단위 셀과 안테나의 크기, FSS의 유전체의 두께를 설계 파라미터로 정하였다. 두 번째 단계로 유전 알고리즘의 목적 함수를 정의하는 것이다. 목적 함수는 설계 파라미터들의 적합성을 확인하는 도구로서 본 논문에서는 다음과 같이 목적 함수를 정의 하였다.

$$Error_{sum} = \sum_{i=1}^N (t^{desired} - t)^2 \tag{30}$$

각 주파수에서 설계하고자 하는 투과율과 유전 알고리즘에 의해 구해진 투과율의 오차를 이용하여 목적 함수를 구성하였다.

그림 4는 정의된 파라미터와 목적 함수를 가지고 최적화된 FSS 설계 파라미터를 구하는 과정을 도식화한 것이다. 설계파라미터 범위와 유전자의 개체수와 번식 세대수를 유전 알고리즘에 대입하면 유전 알고리즘은 목적 함수의 오차 범위 안에 있는 설계 파라미터들을 찾을 때까지 FSS 시뮬레이터를 반복적으로 수행하고 결과 값으로 최적화된 FSS 설계 파라미터 값들을 얻는다. 투과율 계산은 Floquet 모드와 도파관 모드의 값에 따라서 계산 시간이 상당히 차이가 난다. 그리고 개체수와 세대수를 늘리면 목적 값에 더욱 근접하게 접근하지만, 투과율 계산 프로그램의 계산 시간이 오래 걸리기 때문에 설계 파라미터의 값을 획득하는데 상당 시간이 소요된다. 본 논문에서 사용된 유전 알고리즘은 MIT 대학에서 1996년 Matthew Wall에 의해 만들어진 프로그램이다.

IV. 실제 적용 예제

III장에서 제시한 FSS 설계 시스템의 신뢰성을 검증

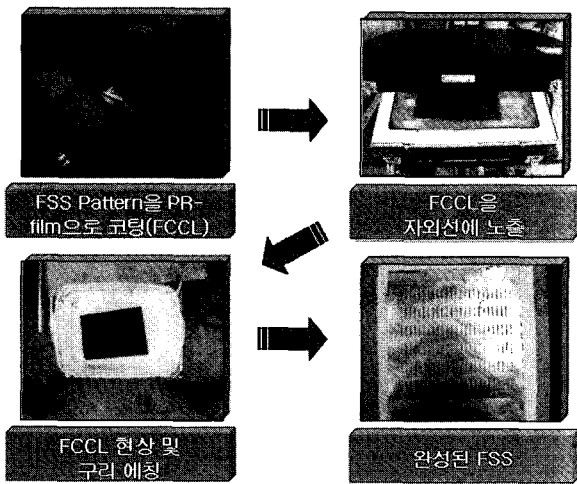


그림 6. FSS 제작 과정
Fig. 6. FSS design process.

하기 위해 먼저 II장에서 다룬 전자파 산란 해석의 타당성을 입증한 후 설계자의 설계 요구사항에서부터 FSS 제작 및 측정까지의 각 단계에서 얻어지는 결과를 비교 분석하였다.

1. 전자파 산란 해석수식의 검증

전자파 산란 해석과 실제 측정에 사용된 FSS의 기본 구조는 그림 5와 같다. 실 제작에 사용된 FSS 스크린의 도전체는 구리로 이루어져 있으며 유전체는 두께가 40 μm 이고 유전율이 4.2인 polyimide 필름을 사용하였으며 제작 과정은 그림 6과 같다. 그림 7은 앞 장에서 제시한 수치해석 방법을 이용하여 만든 FSS 해석 프로그램으로 FSS 설계 시스템의 해석 시뮬레이터로 사용

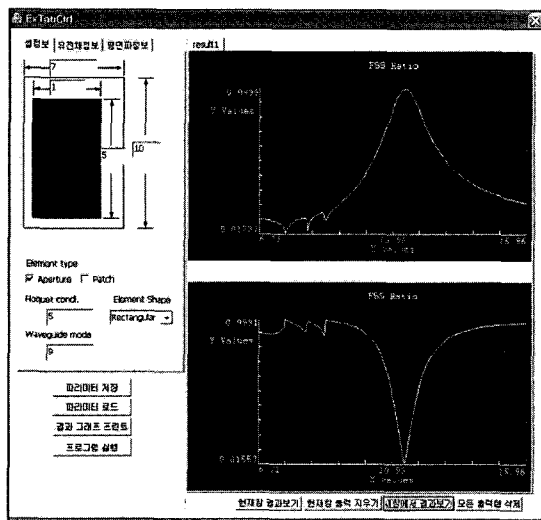


그림 7. 전자파 산란 해석 프로그램의 GUI
Fig. 7. The GUI of electromagnetic scattering analysis program.

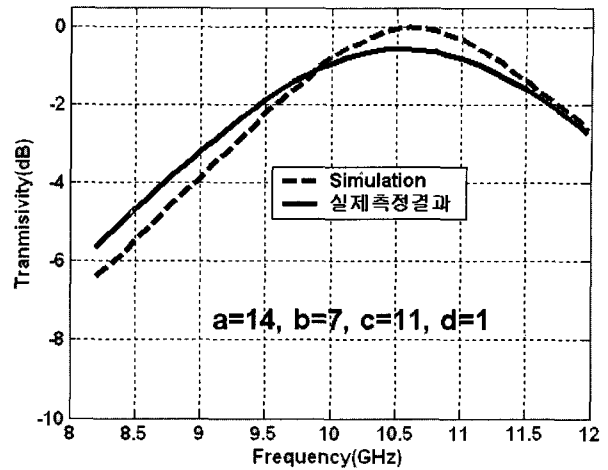


그림 8. 해석 프로그램의 시뮬레이션 결과와 측정 결과 비교(1)
Fig. 8. The results of simulation and measurement(1).

하였다.

그림 8은 a=14mm, b=7mm, c=11mm, d=1mm의 크기를 갖는 FSS의 S_{21} 특성을 비교한 결과 그래프이다. 그림 8에서 점선은 수치해석 방법의 시뮬레이션 결과를 나타내며 실선은 측정결과를 나타낸다. 그림 8에서 시뮬레이션 결과와 측정결과의 공진주파수는 각각 10.615와 10.594로 거의 일치하였고 -1dB에서의 주파수 대역폭 또한 시뮬레이션 결과와 측정결과가 1.40과 1.113으로 거의 일치하였다.

그림 9는 a=14mm, b=7mm, c=5mm, d=1mm의 크기를 갖는 FSS의 S_{21} 특성을 비교한 결과 그래프이다. 그림 9에서 점선은 수치해석 방법의 시뮬레이션 결과를 나타내며 실선은 측정결과를 나타낸다. 그림 8과 마찬가지로 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 공진주파수와 대역폭, 그리고 주파수 곡선이 거의 일치함을 볼 수 있다.

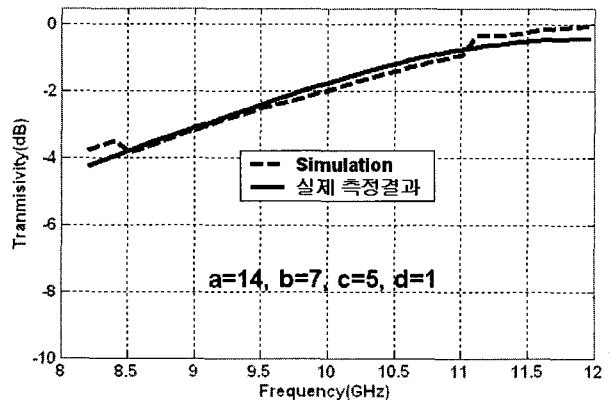


그림 9. 해석 프로그램의 시뮬레이션 결과와 측정 결과 비교(2)
Fig. 9. The results of simulation and measurement(2)

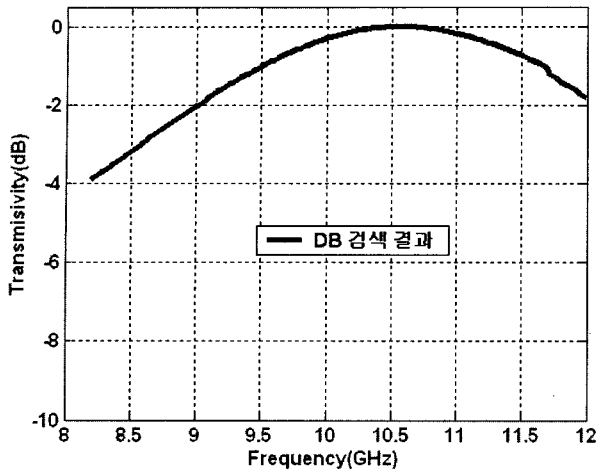


그림 10. DB 시스템의 검색 결과로 얻어진 결과 그래프(I)

Fig. 10. DB results for example I.

표 1. DB로부터 얻은 FSS 파라미터(I)

Table 1. FSS design parameters for example I.

구 분	DB 설계값
공진주파수	10.6GHz
-1dB B.W.	1.9GHz
안테나 크기	14.3mm×1.1mm
단위 셀크기	21.2mm×10.5mm
유전체두께	0.05mm

2. 제안된 FSS 설계 시스템을 이용한 FSS 설계 및 검토

제안된 FSS 설계 시스템의 설계 요구사항 입력 방법은 주파수 특성 성분을 입력하는 방법과 주파수 특성 곡선을 입력하는 방법으로 나뉘어지며 이 절에서는 이 두 가지 방법에 따른 시뮬레이션 결과와 측정결과를 각각 비교 분석하였다.

1) 주파수 특성 성분 입력

그림 10과 표1은 설계자가 설계 요구사항으로 공진주파수를 10.9GHz, -1dB에서의 대역폭을 1.8GHz로 입력하였을 때 DB 시스템을 통해 검색된 결과를 보여준다. -1dB에서의 대역폭의 오차는 0.1GHz로 거의 근접한 결과를 보이지만 공진주파수의 경우 0.3GHz정도의 오차가 발생함을 알 수 있다.

그림 11과 표2는 DB 시스템을 통해 검색된 FSS 파라미터들을 FSS 설계 알고리즘에 입력으로 넣어 얻은 결과를 나타낸다. DB 시스템을 통해 검색된 FSS 파라미터들은 유전 알고리즘의 설계 파라미터 범위를 설정하는 기

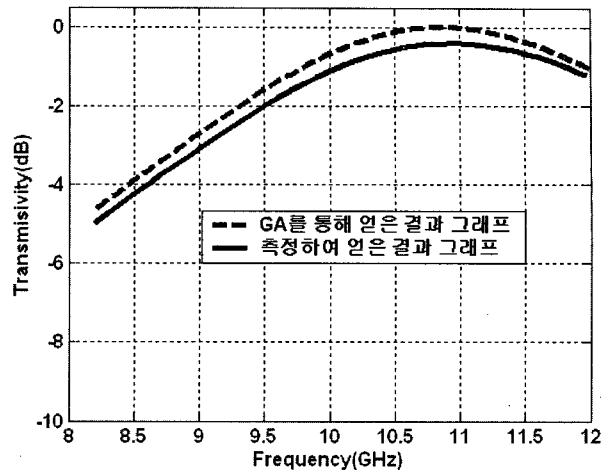


그림 11. FSS 설계 알고리즘의 설계 결과와 측정 결과 비교(I)

Fig. 11. Result comparison for FSS design algorithm and measurement (I).

표 2. FSS 설계 시스템으로부터 얻은 FSS 설계 파라미터(I)

Table 2. FSS design parameters obtained FSS design system.

구 분	FSS 설계 알고리즘에 의한 설계 값	FSS 제작 및 측정 결과
공진주파수	1072GHz	10.909GHz
-1dB B.W.	2.09GHz	1.7GHz
안테나 크기	14.57mm×1.48mm	14.57mm×1.48mm
단위 셀크기	21.38mm×10.19mm	21.38mm×10.19mm
유전체두께	0.042mm	0.042mm

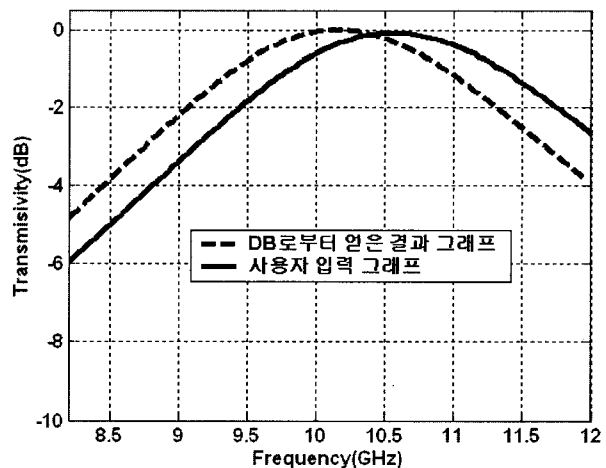


그림 12. DB로부터 얻어진 결과 그래프(II)

Fig. 12. DB results for example II.

준이 되었으며 설계 파라미터 범위는 (31)과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{설계파라미터} - 1 \leq & \text{DB로부터 얻어진 FSS 파라미터} \\ & \leq \text{설계파라미터} + 1 \end{aligned} \quad (31)$$

표 3. DB로부터 얻어진 FSS 설계파라미터(II)
Table 3. FSS design parameters for example II.

구 분	DB 설계값
공진주파수	10.216GHz
-1dB B.W.	1.7GHz
안테나 크기	14.8mm×1.1mm
단위 셀크기	22.4mm×12.2mm
유전체두께	0.041mm

설계 파라미터들의 정보를 가지는 세대 집단의 개체수와 세대수는 각각 50으로 설정하였다. 제안된 FSS 설계 시스템을 통해 얻어진 결과 그래프를 살펴보면 공진주파수와 -1dB에서의 대역폭의 오차는 각각 0.18, 0.29GHz로 거의 근접한 사실을 알 수 있다. 다음으로 FSS 설계 알고리즘의 설계 값에 의해 설계된 FSS의 측정결과를 설계자의 설계요구사항과 비교해보면 공진주파수와 -1dB에서의 대역폭의 오차는 각각 0.009와 0.1GHz로 설계자의 요구 사항과 거의 일치하는 사실을 확인 할 수 있다.

2) 주파수 특성 곡선 입력

그림 12와 표3은 설계자가 설계요구사항 입력으로 주파수 특성 곡선을 입력하였을 때 DB 시스템으로부터 얻은 결과를 나타낸 것이다. 설계자가 입력으로 넣은 주파수 특성 곡선의 공진주파수는 약 10.6GHz이고 -1dB에서의 대역폭은 약 1.7GHz이다. DB 시스템에서 검색된 결과 그래프를 살펴보면 공진주파수는 10.216GHz, -1dB에서의 대역폭은 1.7GHz로 -1dB에서의 대역폭은 일치하지만 공진주파수의 경우 0.4GHz의 오차가 발생함을

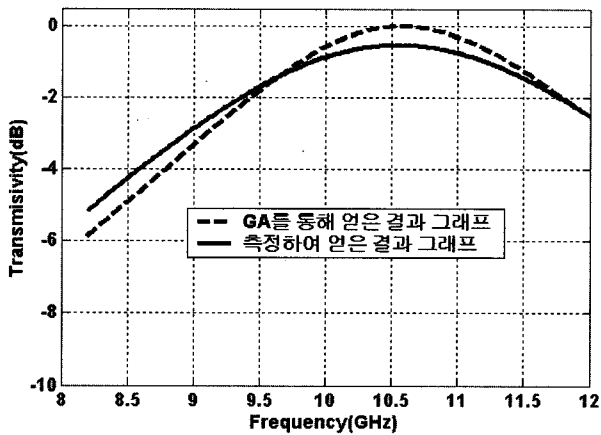


그림 13. FSS 설계 알고리즘 결과와 측정 결과 비교(II)
Fig. 13. Result comparison for FSS design algorithm and measurement(II).

표 4. FSS 설계 시스템으로 얻은 FSS 파라미터 (II)

Table 4. FSS parameters obtained from FSS system(II).

구 분	FSS 설계 알고리즘에 의한 설계 값	FSS 제작 및 측정 결과
공진주파수	10.615GHz	10.552GHz
-1dB B.W.	1.9GHz	1.4GHz
안테나 크기	14.10mm×1.06mm	14.10mm×1.06mm
단위 셀크기	20.78mm×12.04mm	20.78mm×12.04mm
유전체두께	0.0402mm	0.0402mm

알 수 있다.

그림 13과 표4는 표 3의 FSS 파라미터들을 FSS 설계 알고리즘에 입력으로 넣어 얻은 결과를 나타낸다. 설계자 요구사항의 공진주파수와 FSS 설계 알고리즘의 설계 결과를 통해 얻은 공진주파수의 오차는 0.015GHz로 설계자의 설계요구사항에 거의 근접함을 알 수 있다. 다음으로 FSS 설계 알고리즘의 설계 값에 의해 제작된 FSS의 측정 결과를 설계자의 설계 요구 사항과 비교한 결과를 살펴보면 주파수 대역폭은 약간 차이가 발생하지만 공진주파수가 거의 일치해 설계 요구사항대로 FSS가 설계됨을 알 수 있다.

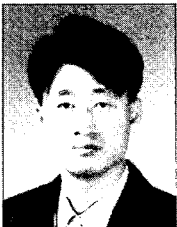
IV. 결 론

본 연구에서는 유전체 위에 안테나가 주기적으로 배열된 FSS에 대한 전자파 산란 해석 방법을 다루고 이 방법의 타당성을 입증하기 위해 측정결과와 비교 분석하였다. 그 결과로 논문에서 제시한 해석 결과와 측정결과는 거의 일치되는 결과를 확인할 수 있었다. 그리고 이 전자파 산란 해석에 DB 시스템과 유전 알고리즘을 적용함으로써 설계자의 설계 요구사항으로부터 FSS의 설계 파라미터를 찾는 알고리즘에 대해서도 살펴보았고 그 정확성 또한 확인 할 수 있었다. 이러한 연구는 특정 주파수를 투과/반사시키는 마이크로파 안테나와 레이돔을 설계하는데 매우 유용하게 사용되어질 것으로 예상된다. 추후 연구에는 DB 시스템의 데이터양을 늘리는 것과 직사각형 외에 사각형 루프, 원형 루프 구조를 가진 FSS 스크린을 설계하는 연구를 진행할 것이다.

참고 문헌

- [1] C.C.Chen, "Transmission Through a Conducting Screen Perforated Periodically with Apertures", IEEE Trans. Microwave Theory Tech, MTT-18, 677-632, 1970.
- [2] C.C.Chen, "Scattering by a Two-Dimension Periodic Array of Conducting Plates", IEEE Trans. Antennas Propagat, AP-18, 660-665, 1970.
- [3] C.C.Chen, "Diffraction of Electromagnetic Waves by a Conducting Screen Perforated Periodically with Circular Holes", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 475-481, 1971.
- [4] Ben.A.Munk, "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", John Wiley & Sons Inc, 2000
서일성, "주파수 선택적 투과 E-glass/Epoxy 적층판 설계에 관한 연구", 박사학위논문, KAIST, 2004.
- [5] 노행숙, 이동진, 최학근, "Ku/C 밴드 변형된 사각 루프 주파수 선택 반사기 특성 해석", 대한전자공학회지, 186-196, 11권 2호, 2000.
- [6] 강봉수, 강부식, 김홍수, "모멘트법을 이용한 주기적 배열을 갖는 무한 크기의 주파수선택 표면(FSS) 해석", 대한전자공학회 하계학술대회, 290-293, 2004.
- [7] 서호진, 김홍수, "유전자 알고리즘을 이용한 개구 결합 마이크로스트립 안테나 설계", 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, 207-210, 1999.
- [8] J. A. Reed, "Frequency Selective Surfaces with Multiple Periodic Elements", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Dallas, December 1997.
- [9] Craig Scott, "The Spectral Domain Method in Electromagnetics", Artech House, pp. 1-39, 1989.
- [10] N. Farahat and R. Mittra, "Analysis of frequency selective surfaces using the finite difference time domain (FDTD) method" Proc. IEEE. Antennas and Propagation Society International Symposium, vol.2, pp.568-571, 2002.
- [11] 장병탁, "유전 알고리즘 이론 및 응용", 대한전자공학회지, 제22권 11호, pp.60-70, 1995.

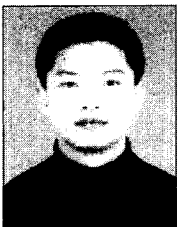
저자 소개



이지홍(정회원)
1983년 서울대학교 전자공학과
(공학사)
1985년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과(공학석사)
1991년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과(공학박사)

2001년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과
교수.

<주관심분야 : 로봇틱스, 인공지능>



이필엽(학생회원)
2004년 충남대학교 메카트로닉스
공학과(공학사)
2004년~현재 충남대학교 메카트
로닉스공학과 석사과정
재학 중.

<주관심분야 : 로봇틱스, FSS>



서일성(정회원)
1983년 한양대학교 기계공학과
(공학사)
1986년 한국과학기술원
기계공학과(공학석사)
2005년 한국과학기술원
기계공학과(공학박사)

1986년~현재 국방과학연구소

<주관심분야 : 복합재료의 전자기적 응용>



김근홍(정회원)
1979년 서울대학교
금속공학과(공학사)
1986년 한국과학기술원
재료공학과(공학석사)
1993년 한국과학기술원
재료공학과(공학박사)

1979년~현재 국방과학연구소

<주관심분야 : 전자기물질 합성 및 응용>