

논문 2008-45TC-2-18

임의의 패턴을 갖는 FSS의 자동 설계

(Automatic Design of FSS with Arbitrary Pattern)

심형원*, 이지홍**, 서일성***, 김근홍***

(Hyungwon Shim, Jihong Lee, Ilsong Seo, and Geunhong Kim)

요약

본 논문에서는 원하는 주파수 특성을 갖는 FSS(Frequency Selective Surface)를 설계자가 원하는 주기 패턴으로 자동 설계해주는 효율적인 시스템을 제안한다. 제안된 설계 시스템은 임의의 패턴의 FSS를 해석할 수 있는 톨과 측정 및 시뮬레이션을 통해 구축된 유한한 숫자의 FSS들의 데이터베이스(DB) 및 최적 설계 파라미터를 구하기 위한 수치 해석적 도구인 유전알고리즘(GA)을 이용하여 최적화된 설계 파라미터를 구해준다. 설계 시스템에 사용된 FSS 해석 톨은 모멘트 방법을 이용하여 임의의 형상의 구멍을 갖는 단층 금속판의 FSS를 해석할 수 있는 톨에 시뮬레이션 시간을 줄이기 위한 유전체가 포함된 FSS의 근사적 해석 방법을 도입한 시스템이다. 또한, DB 시스템은 설계자가 원하는 패턴의 형상과 주파수 특성이 설계 시스템에 입력되면, 설계자가 요구한 특성과 가장 유사한 패턴을 찾아 GA의 초기 개체로 설정해주어, GA로 하여금 FSS 해석 톨을 이용하여 최적화된 FSS 설계 파라미터들을 구하기 위한 연산 시간을 단축시켜준다. 본 논문에서는 다양한 패턴에 대한 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 FSS 설계 시스템의 타당성을 검증하였다.

Abstract

This paper proposes the efficient system for automatic design of FSS(Frequency Selective Surface) with periodic pattern and frequency characteristics specified by operator. The proposed system derives optimal design parameters through tool for analysis of FSS with arbitrary pattern, DB(Data Base) implemented from limited simulation and measurement data of FSS, and GA(Genetic Algorithm) for optimizing design parameters. FSS analysis tool consists of two analysis tools. One is the simulator for analysis of monolayer FSS that using moment method, another is the tool with approximated analysis method of FSS with dielectric layer. Given pattern configuration and characteristics specified by operators, the DB system searches the best matching FSS, and provides initial genes to GA from the searched parameters, which drastically reduces running time of GA for finding the FSS design parameters. In this paper, the proposed design system is verified through simulation and measurement about FSS with various patterns.

Keywords : FSS, Various patterns, DB, Genetic algorithm, Approximated analysis method

I. 서론

현재, 그림 1과 같은 스텔스 기능을 갖춘 전투기나 레이더의 걸 외장재와 같은 전파흡수구조체에 관한 해

석 기술은 국내외에서 많이 연구되어 상용화에 까지 이

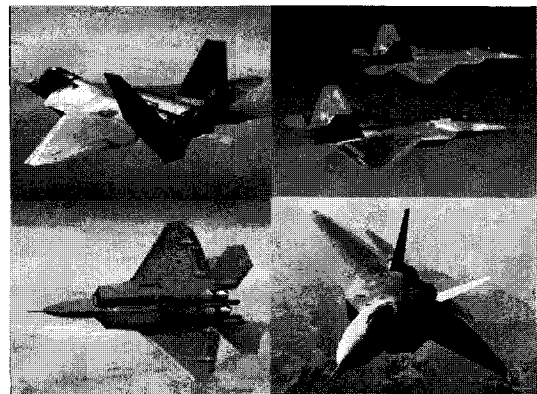


그림 1. F-22 랩터(스텔스 전투기)
Fig. 1. F-22 Raptor(Stealth aircraft).

* 학생회원, ** 정회원, 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단 (BK21 Mechatronics Group at 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: 2007년12월14일, 수정완료일: 2008년2월18일

르렀으나 이 구조제에 대한 설계 기술은 아직까지 많은 연구 과제가 남아 있는 실정이다. 단적으로 전파흡수구조제를 개발하기 위해서는 설계와 검증의 단계를 무수히 반복하는데, 설계 단계에서 현재 기술은 설계를 위해 사용하는 전자파 해석 툴과 수치 해석적 도구가 연산 시간을 많이 소요하여 개발의 걸림돌로 작용하고 있다. 이런 점을 감안하여 최근까지 FSS 최적 설계를 위한 많은 방법들이 제안되었으나^[1~4], 실용적인 측면에서 검증이 된 연구는 극히 적다.

따라서 본 논문에서는 설계자가 원하는 주기 패턴과 주파수 특성을 갖는 FSS(Frequency Selective Surface)를 설계하기 위한 효율적인 시스템을 제안한다. 제안된 설계 시스템은 다양한 패턴의 FSS를 해석할 수 있는 툴과 측정 및 시뮬레이션을 통해 구축된 FSS들의 특성을 저장하고 있는 데이터베이스(DB) 및 최적 설계 파라미터를 구하기 위한 수치 해석적 도구인 유전알고리즘(GA)으로 구성된다. 설계 시스템의 설계 과정은 그림 2에서 보는 바와 같이 크게 3단계로 구분되어 수행된다. 첫 번째 단계는 설계자가 원하는 패턴의 형상과 주파수 특성을 설계 시스템에 입력하고 설계 시스템을 실행시키는 단계이다. 설계 시스템이 실행되면 두 번째 단계로 DB 시스템이 설계자가 요구한 특성과 가장 유사한 패턴을 찾아 GA의 초기 개체로 설정해주는 과정이 수행되며, 마지막으로 GA는 이 초기 개체와 FSS 해석 툴을 이용하여 최적화된 FSS 설계 파라미터들을 구해주는 단계가 실행된다. 이 설계 시스템은 설계의 효율성을 높이기 위해 두 가지 기술이 적용되었다. 첫 번째 기술은 설계 시스템에 사용된 FSS 해석 툴로 모멘트 방법을 이용하여 임의의 형상의 구멍을 갖는 단층 금속판의 FSS를 해석할 수 있는 툴에 유전체의 근사적 전자파 해석 방법을 도입하여 유전체 층이 있을 경우

FSS 해석 시간을 줄여준다. 두 번째 기술은 DB 시스템으로 설계자가 요구한 특성과 가장 유사한 특성을 갖는 FSS 파라미터들을 추출하여 GA의 초기 개체로 설정해 줌으로써 FSS 설계 파라미터를 구하기 위한 GA의 연산 시간을 단축시켜준다.

본 논문의 II장에서는 FSS를 해석하기 위한 시뮬레이터의 단층 FSS 해석 툴과 유전체의 근사적 해석 방법을 제시하고, III장에서는 DB와 GA를 이용한 FSS 설계 시스템에 대해 소개한다. IV장에서는 주파수 특성을 알고 있는 FSS의 패턴 형상과 주파수 특성을 이용하여 제안한 FSS 설계 시스템으로 시뮬레이션해 보고 타당성을 제시한다. V장에서는 FSS 설계 시스템을 이용하여 FSS를 설계하고 그 결과를 이용하여 FSS를 제작한 후 측정하여 그 측정 결과와 설계 결과를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 제시한다.

II. 근사적 기법이 도입된 FSS 해석 시뮬레이터

본 장에서는 유전체를 포함하는 FSS의 해석 시간을 줄이기 위해 사용된 단층 FSS 해석 툴과 유전체의 근사적 해석 방법을 제시한다.

1. 단층 FSS의 주파수 특성 해석 시뮬레이터

본 논문에서 제안하는 FSS 설계 시스템에 사용된 FSS 해석 시뮬레이터는 모멘트 방법과 자계 적분 방정식을 이용하여 특정 형상의 구멍이 나있는 단층 금속판을 주기 셀로 갖는 FSS 스크린의 반사파와 투과파를 해석하는 툴이다^[5]. 이 시뮬레이터는 구멍의 형상을 결정짓는 최외각 점들 *c*를 입력으로 받기 때문에 그림 3의 a와 b에서 보는 바와 같이 임의의 형상의 패턴에 대

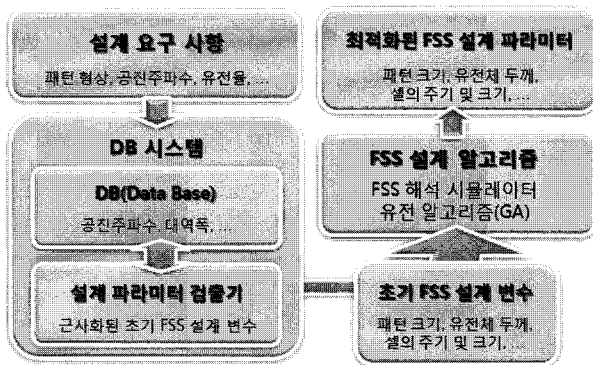


그림 2. FSS 설계 시스템의 설계 과정
Fig. 2. Design process of the FSS design system.

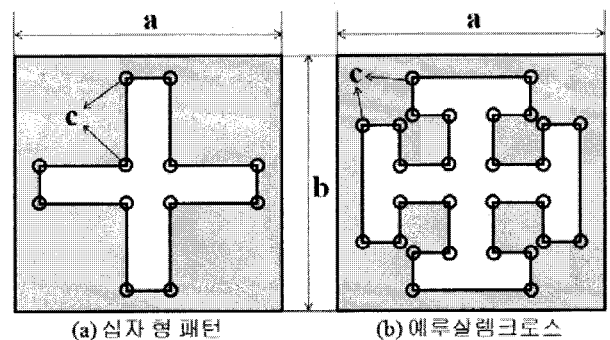


그림 3. 단층 FSS 해석 시뮬레이터로 해석 가능한 패턴의 예
Fig. 3. Analyzable examples through monolayer FSS analysis simulator.

표 1. 단층 FSS 해석 시뮬레이터의 입력 파라미터
Table 1. Input parameters of monolayer FSS analysis simulator.

입력 파라미터	그림 3의 해당 기호
주기 셀의 크기	a, b
패턴의 최외각 점들	c
입사각	.
시뮬레이션 주파수 영역	.
Waveguide 모드 주파수	.
Floquet 모드 주파수	.

해 전자파 특성 해석이 가능하며, 단층의 FSS 해석만을 수행하기 때문에 연산 시간이 짧아 설계 시간을 단축시켜준다.

2. 유전체를 포함하는 FSS의 근사적 해석 방법

단층 FSS 스크린에 유전체 층이 추가되면 FSS의 주파수 특성을 해석하는데 단층의 경우보다 많은 시간이 소모된다. 이 시간적 손실을 줄이기 위해 본 절에서는

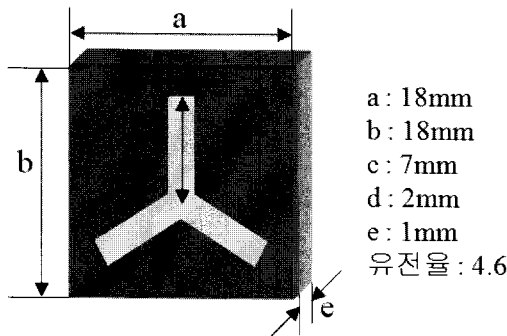


그림 4. 트라이폴 패턴을 갖는 FSS의 주기 셀
Fig. 4. Unit cell of FSS with tri-pole pattern.

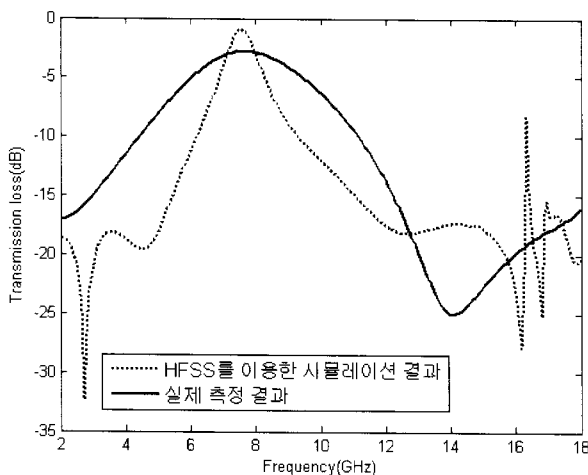


그림 5. 그림 4의 시뮬레이션 결과와 측정 결과
Fig. 5. The simulated and measured results of and pattern in Fig. 4.

유전체 층을 근사적으로 해석하여 FSS의 주파수 특성을 구하는 방법을 제시한다.

그림 5는 그림 4의 주기 셀을 갖는 FSS에 대해 상용화된 해석 툴(HFSS)을 이용하여 시뮬레이션 한 결과와 실제 시편을 제작하여 측정한 결과를 비교한 그래프이다. 위 그래프에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 공진주파수 대역을 제외한 나머지 대역에서는 오차가 많이 발생됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 유전체 층에 대한 근사적 해석 방법을 FSS의 주파수 특성 해석에 적용하여 시뮬레이션 한 결과가 실제 측정 결과와 유사한 공진주파수 대역을 갖는다면, 이 근사적 해석 방법을 통해 FSS 해석 및 설계 시간이 단축될 것이라는 사실을 예측할 수 있다. 이 점을 착안하여 본 논문에서는 공진 주파수 대역의 일치에 초점을 맞추어 유전체 층의 전자파 투과 특성과 유전체 층이 FSS의 공진 주파수 대역에 미치는 영향을 분석하여 유전체 층의 해석 방법을 근사화하였다.

가. 유전체에 대한 전자파 투과 특성의 근사적 해석

본 연구에서 사용된 단층 FSS 해석 시뮬레이터는 자체의 특성을 이용하여 특정 형상의 구멍을 갖는 단층 금속판에 대한 전자파의 투과/반사를 해석하는 툴이다. 시뮬레이터로부터 반사와 투과 계수가 주어지기 때문에 유전체의 투과율만 구할 수 있다면 유전체를 포함하는 FSS의 반사와 투과에 대한 근사적 해석이 가능하다. 따라서 유전체의 투과 해석은 그림 6에서 보는 바와 같이 자체 성분만을 이용하였으며, 투과 해석 방식은 Scott의 연구에 사용되었던 방법^[6]을 이용하였다.

먼저 그림 6의 $z = 0$ (유전체 경계면)에서 자체의 입사

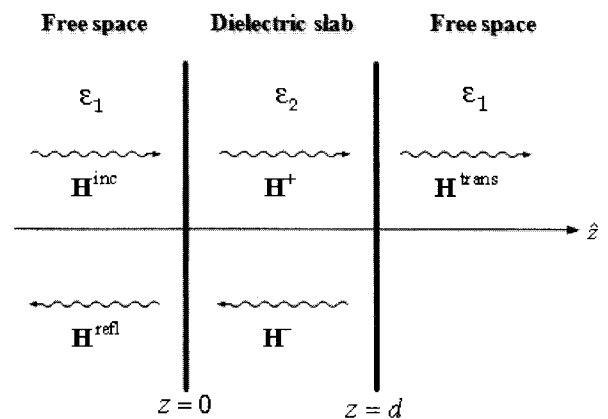


그림 6. 유전체의 전자파 반사 및 투과
Fig. 6. Reflection and transmission wave of dielectric substance.

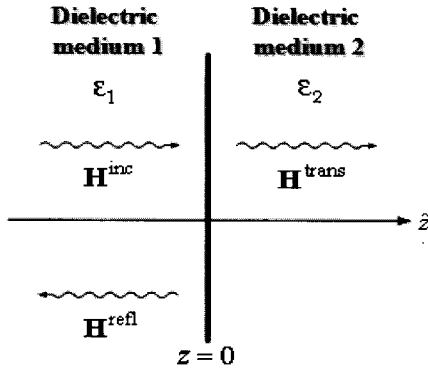


그림 7. 두 유전체 매질 경계면에서의 자계
Fig. 7. Magnetic field on boundary of two dielectric medium.

와 반사/투과의 관계는 그림 7에서 보는 바와 같이 서로 다른 두 유전체 매질의 경계면에 존재하는 자계의 관계로부터 구할 수 있다.

$$H^{inc} + H^{refl} = H^{trans} \quad (1)$$

$$E^{inc} + E^{refl} = E^{trans} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 두 유전체 매질 경계면에서의 자계와 전계 방정식이다. 식 (2)의 전계 방정식은 전계와 자계와 관계를 이용하여 다음과 같은 자계 방정식으로 표현할 수 있다.

$$X^{-1}K_1^{-1}H^{inc} - X^{-1}K_1^{-1}H^{refl} = X^{-1}K_2^{-1}H^{trans} \quad (3)$$

위 식 (3)의 X 는 자계를 전계의 위치로 회전시켜 주는 행렬이며, K 는 주파수 영역에서의 Floquet 모드와 유전체 매질의 특성이 고려된 행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$K = -\frac{1}{2\omega\mu} \begin{bmatrix} \frac{k^2 - \alpha_m^2}{\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}} & \frac{-\alpha_m\beta_n}{\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}} \\ -\alpha_m\beta_n & k^2 - \beta_n^2 \\ \frac{\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}}{\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}} & \frac{\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}}{\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)의 ω 는 각주파수를 나타내며, μ 는 투자율을, k 는 $2\pi f\sqrt{\mu_r\mu_0\epsilon_r\epsilon_0}$ 를, α_m, β_n 은 주파수 영역에서의 도파관 모드를 고려한 함수를 나타낸다.

식 (1)과 (3)을 이용하여 그림 7의 유전체 매질 경계면에서의 입사파와 반사파/투과파에 관련된 자계 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$H^{trans} = T_h H^{inc} \quad (5)$$

$$(T_h = 2[K_1^{-1} + K_2^{-1}]K_1^{-1})$$

식 (5)와 유전체의 두께를 고려하여 그림 6의 $z = d$ 에서의 자계 H^+, H^- 를 구하면 다음과 같다.

$$H^+ = e^{-j\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}d} T_h H^{inc} \quad (6)$$

$$H^- = R_h H^+ \quad (7)$$

$$(R_h = [K_1^{-1} + K_2^{-1}]^{-1} [K_2^{-1} - K_1^{-1}])$$

그림 6의 $z = d$ 에서 자계의 연속성을 고려하여 식 (6)과 (7)로부터 입사파와 투과파의 관계를 나타내는 자계 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$H^{trans} = e^{-j\sqrt{k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}d} [1 + R_h] T_h H^{inc} \quad (8)$$

유전체의 근사적 해석을 위해 식 (8)의 주파수 영역에서의 Floquet 모드와 관련된 항들을 제거하여 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H^{trans} = e^{-jk_2d} [1 + R_h] T_h H^{inc} \quad (9)$$

식 (9)의 입사 자계는 단층 FSS 시뮬레이터로부터 투과계수로 주어지기 때문에 T_h, R_h 에 포함된 K_1, K_2 는 다음과 같이 근사화하였다.

$$K_i = -\frac{k_i}{2\omega\mu} \quad (k_i = 2\pi f\sqrt{\mu_i\mu_0\epsilon_i\epsilon_0}) \quad (10)$$

나. 유전체를 고려한 FSS의 반사/투과 특성 해석

단층 FSS에 유전체가 붙게 되면 공진주파수 대역의 이동 및 손실이 발생된다. 그림 8은 그림 4의 트라이폴 패턴 뒤에 붙는 유전체의 두께를 0.1mm에서 1mm까지 변화시키면서 투과파의 변화를 측정 한 결과이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 유전체의 두께가 증가함에 따라 공진주파수가 낮아지고 투과파 패턴이 낮은 주파수쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 각 공진주파수에서 주파수 손실이 점점 커짐을 볼 수 있다. 본 절에서는 이 유전체의 두께에 따른 FSS의 주파수 특성이 나타내는 경향을 이용하여 근사화 된 유전체 해석 방법을 FSS 해석에 적용할 수 있는 방법을 제시한다.

다음 그림 9는 유전체가 고려된 FSS의 자계 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 예측할 수 있듯이, 유전체의 투과 특성을 알고 있다고 가정하면 그림 9(a)의 경우 단층 FSS 해석 시뮬레이터로부터 H^- 가 주어지기 때문에 반사파를 구할 수 있으며, (b)의 경우는 시뮬레이터로부터

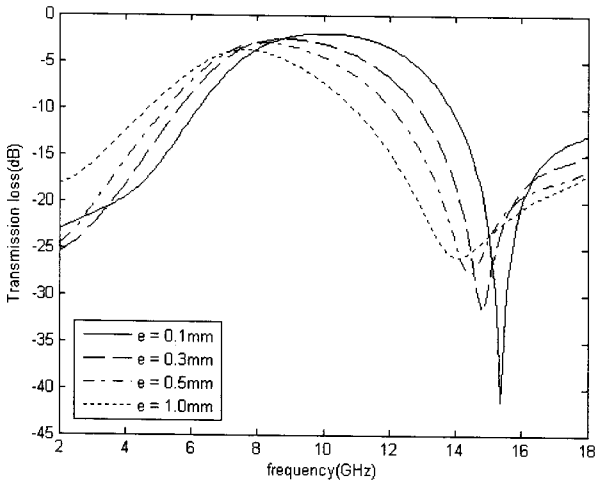


그림 8. 그림 4의 유전체 두께 변화에 따른 투과 특성 측정 결과
 Fig. 8. Measured results of pattern in Fig. 4 with different thickness of dielectric substance.

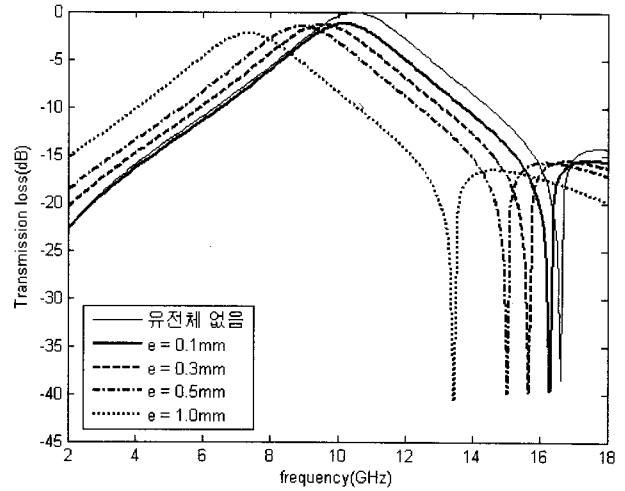


그림 10. 그림 4의 유전체 두께 변화에 따른 투과 특성 시뮬레이션 결과
 Fig. 10. Simulated results of pattern in Fig. 4 with different thickness of dielectric substance.

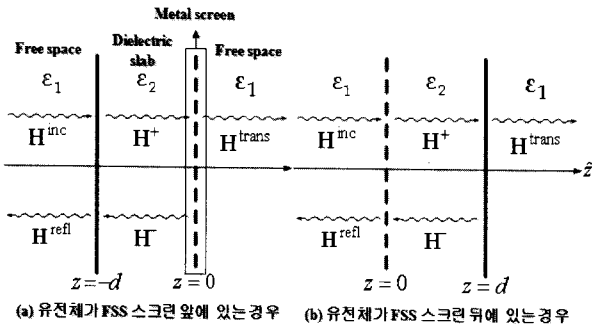


그림 9. 유전체를 포함하는 FSS의 전자파 반사 및 투과
 Fig. 9. Reflection and transmission wave for FSS with dielectric substance.

H^+ 가 주어지기 때문에 투과파를 구할 수 있다.

본 연구에서는 유전체의 투과 특성을 근사적으로 구했기 때문에 FSS 해석에 있어 주파수 전역에 걸쳐 각 주파수에 대응하는 투과 특성을 적용하기는 어렵다. 이 같은 점을 고려하여 보다 효율적인 계산을 위해 유전체의 유전율과 두께에 의해 공진주파수에서 발생하는 손실과 주파수 이동량을 주파수 전역에 걸쳐 시뮬레이터로부터 나온 반사/투과 계수에 적용하였다.

우선 유전체의 유전율과 두께에 따른 공진주파수에서의 손실을 고려한 반사/투과 계수를 구하는 식은 식 (9)에 단층 FSS 시뮬레이터로 구해지는 반사/투과 계수와 공진주파수를 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{loss} = Re(e^{-jk_2d}) [1 + R_h] T_h C_f^{in} \quad (11)$$

$$(k_2 = 2\pi f_r \sqrt{\mu_2 \mu_0 \epsilon_2 \epsilon_0})$$

위 식에서 C_{loss} 는 주파수 손실이 고려된 반사/투과 계수를, C_f^{in} 는 단층 FSS 해석 시뮬레이터로부터 구해진 반사/투과 계수를, $Re(e^{-jk_2d})$ 는 반사/투과 계수의 크기에 영향을 미치는 e^{-jk_2d} 의 실수 부분을, f_r 은 단층 FSS의 반사파/투과파의 공진주파수를 나타낸다.

공진주파수의 이동은 유전체에 의해 발생하는 위상차의 영향에 기인함으로 이동된 주파수 영역은 이 위상차를 유발시키는 허수항이 포함된 식 (9)의 e^{-jk_2d} 를 이용하여 다음과 같이 근사적으로 구하였다.

$$f_{move} = f_o + \left(\tan^{-1} \left(\frac{Re(e^{-jk_2d})}{Im(e^{-jk_2d})} \right) / \frac{\pi}{2} \right) f_r \quad (12)$$

위 식에서 f_{move} 는 이동된 주파수 영역을 나타내며, f_o 는 단층 FSS 해석 시뮬레이터에서 구해진 반사/투과 계수의 주파수 영역이다. 공진주파수 이동량은 e^{-jk_2d} 의 실수부와 허수부($Im(e^{-jk_2d})$)를 이용하여 유전체로 인해 변환된 위상각을 구하고, 이 위상각을 $\pi/2$ 로 나누어 구한 위상 변화율에 공진주파수를 곱하여 구하였다.

그림 10은 그림 4의 패턴에 대해 단층 FSS 해석 시뮬레이터로 투과 계수를 구한 후 이 계수와 식 (11), (12)를 이용하여 그림 8에서와 같이 유전체 두께를 0.1mm에서 1mm까지 변화시키면서 시뮬레이션 한 것이다. 그림 8과 비교하면 공진주파수와 이 주파수에서의 투과 손실을 제외한 나머지 부분에서 차이를 보이지만, 표 2에서 보는 바와 같이 투과 손실과 FSS 설계에 있어 최대 관심 영역인 공진주파수는 거의 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

표 2. 그림 8과 10의 각 패턴에 대한 공진주파수 및 투과 손실

Table 3. Resonances and transmission loss of patterns in Fig. 8 and Fig. 10.

유전체 두께	측정(그림 8) 결과		계산(그림 10) 결과	
	공진주파수	투과 손실	공진주파수	투과 손실
0.1mm	10.08GHz	-1.9759dB	10.1GHz	-1.2444dB
0.3mm	8.8GHz	-2.5857dB	9.24GHz	-1.3221dB
0.5mm	8.24GHz	-3.0153dB	8.82GHz	-1.4789dB
1.0mm	7.68GHz	-3.7881dB	7.43GHz	-2.2404dB

그림 10과 표 2로부터 본 논문에서 제안한 유전체의 근사적 해석 방법이 공진주파수만을 고려한 측면에서는 타당성을 가짐을 알 수 있다.

III. DB와 GA를 이용한 FSS 자동 설계 시스템

1. DB 시스템

DB 시스템은 FSS 설계 시스템이 실행되는 과정에서 초기에 설계 요구사항 입력을 제외한 모든 과정을 자동화를 위하여 도입된 시스템으로 GA의 실행에 필요한 초기값을 자동으로 설정해 주기위해 사용되었다. 이 시스템의 역할은 다양한 패턴에 대해 시뮬레이션 및 실제 측정을 통하여 패턴 형상 및 주파수 특성을 저장하고 있는 DB로부터 설계자의 설계 요구사항에 가장 근사한 초기 FSS 설계 파라미터 값을 추출하여 GA에 전달하는 것이다. 또한 새로 시뮬레이션되거나 측정된 패턴의 물리적 특성 및 주파수 특성을 DB에 저장할 수 있도록 하는 데이터 추가 기능을 가지고 있다.

DB 시스템은 공진주파수 대역 및 최소 손실을, 또는 반사/투과 특성 곡선 등을 입력으로 받으며, 설계 요구

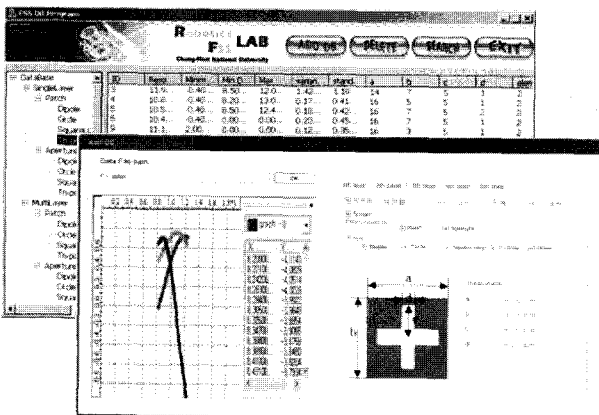


그림 11. DB 시스템의 GUI
Fig. 11. The GUI of DB System.

사항과 유사한 단위 셀의 크기와 패턴의 형상 및 크기, 유전체의 유전율과 두께에 대한 정보를 출력한다. 출력된 정보는 자동으로 GA의 실행을 위한 초기 파라미터로 입력되어 설계자의 수고를 덜어주며, GA가 최종 설계 파라미터를 찾는데 걸리는 시간을 줄여준다. 그림 11은 본 연구에서 사용된 DB 시스템의 GUI를 보여주는 그림이다

2. GA를 이용한 FSS 설계

유전 알고리즘(GA)은 그림 12와 같이 최적의 FSS 설계 파라미터를 구하기 위해 도입된 수치해석 툴로 설계자가 지정한 유전자의 개체수와 번식 세대수만큼 반복 실행하여 설계자가 원하는 주파수 특성과 FSS 해석 시뮬레이터로부터 출력된 주파수 특성의 오차가 최소화될 수 있는 FSS의 기하학적 형상과 유전체의 두께 및 유전율 등을 출력해준다. 유전 알고리즘의 초기 유전자로 입력되는 FSS 파라미터는 DB 시스템으로부터 출력된 설계 요구 사항과 유사한 주파수 특성을 갖는 FSS의 파라미터이며, 이 파라미터로 인해 GA의 반복 회수, 즉 유전자의 개체수와 번식 세대수를 크게 설정하지 않아도 설계자가 원하는 출력을 얻을 수 있다.

GA는 단층 FSS 해석 시뮬레이터와 유전체의 근사적 해석 기법을 이용한 해석 시뮬레이터를 이용하고 있기 때문에 최적의 FSS 설계 파라미터를 찾기 위한 반복되는 시뮬레이션 시간을 단축시킬 수 있으며, DB 시스템으로부터 전달받은 초기 파라미터로 인해 GA의 전체 수행 시간을 더욱 단축시킬 수 있다. 이로 인해 본 논문에서 제안한 FSS 설계 시스템은 설계자가 FSS를 설계하고 검증하는 걸리는 시간적 부담을 줄여 원하는 특성

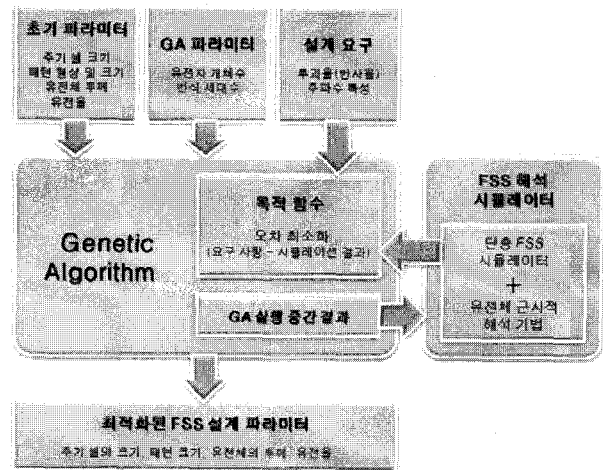


그림 12. GA를 이용한 FSS 설계 동작 원리
Fig. 12. FSS design flow chart using the GA.

을 갖는 FSS를 설계, 제작하는데 보다 효율을 높일 수 있을 것이라 판단된다. 본 논문에서 사용된 GA는 MIT 대학에서 Matthew Wall에 의해 만들어졌으며, 프리웨어로 제공되고 있다.

IV. 설계의 예

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 FSS 설계 시스템(FDS)을 이용하여 실제 설계를 수행하기 전에 시스템의 성능을 검증하기 위해 유전체가 없는 FSS에 대해 다양한 패턴을 설정하여 주파수 특성을 해석하고, 이 특성을 제안된 FSS 설계 시스템의 목표 출력으로 하여 패턴을 설계한 후 설계된 패턴을 설정된 패턴과 비교함으로써 본 논문에서 제안한 설계 시스템의 신뢰성을 검증하였다.

1. 십자 패턴을 갖는 단층 FSS 설계

그림 13은 십자 패턴을 갖는 단층 FSS의 기하학적 파라미터를 미리 설정한 것이다. 이렇게 설정한 파라미터를 이용하여 단층 FSS 해석 시뮬레이터로 주파수 특

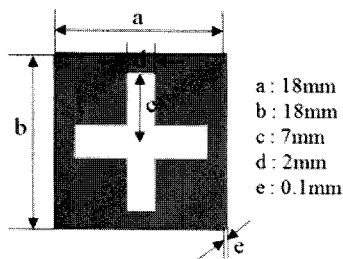


그림 13. 십자 패턴을 갖는 FSS의 주기 셀
Fig. 13. Unit cell of FSS with cross pattern.

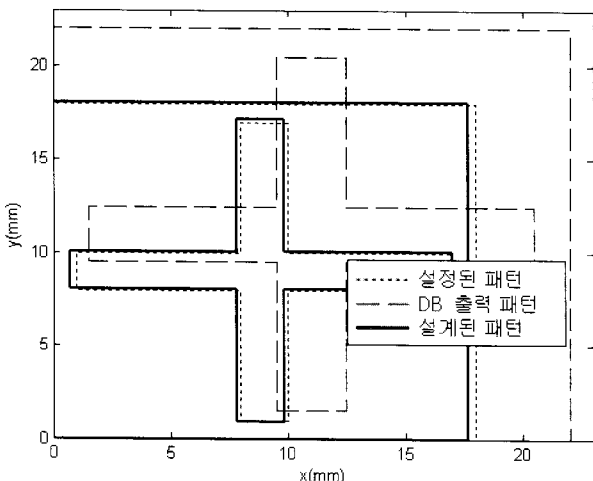


그림 14. FSS 설계 시스템을 이용한 패턴 설계 결과
Fig. 14. Calculated result from FSS design system.

표 3. 그림 14의 각 패턴 파라미터
Table 3. Parameters of patterns in Fig. 14.

변수	설정된 패턴	DB 출력패턴	설계된 패턴
a	18mm	22mm	17.6946mm
b	18mm	22mm	18.0688mm
c	7mm	8mm	7.1191mm
d	2mm	3mm	2.010mm

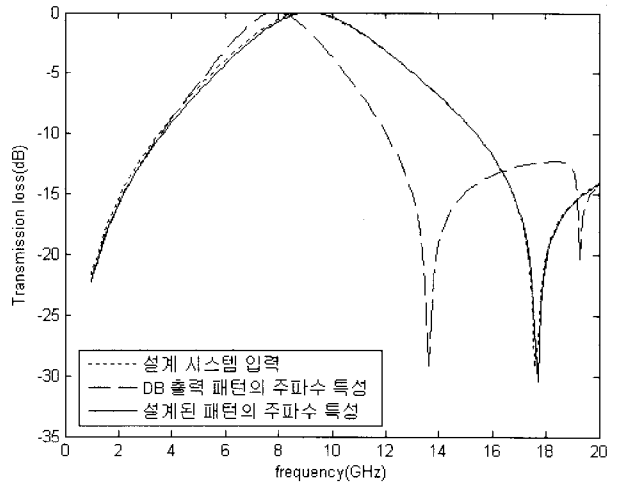


그림 15. 그림 14의 각 패턴의 투과 특성
Fig. 15. Transmitting patterns of Fig. 14.

표 4. 그림 15의 각 패턴 공진주파수
Table 4. Resonance frequency of patterns in Fig. 15.

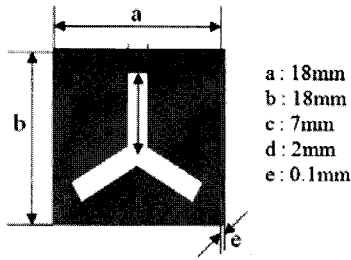
	설계 시스템 입력	DB 출력 패턴	설계된 패턴
공진 주파수	9.1GHz	7.9GHz	9.2GHz

성을 구한 후 이 특성 곡선을 FSS 설계 시스템에 입력하여 실행시킨 뒤 설계된 FSS 파라미터와 설정한 파라미터를 비교하면 그림 14와 같다.

설계 목표를 주파수 특성 곡선으로 주었을 경우, FSS 설계 시스템 내부의 DB 시스템을 통해 찾은 유사 패턴은 그림 14에서 보는 바와 같이 패턴의 파라미터가 1mm에서 크기는 4mm의 차이를 보이고, 공진주파수 또한 표 4와 같이 1.2GHz의 차이를 보임을 알 수 있다. 그러나 그림 14에서 보는 바와 같이 설계된 패턴과 원하는 패턴의 오차는 가장 큰 값이 약 0.3mm이며, 표 4에서 보는 바와 같이 공진주파수의 오차는 0.1GHz로 설계된 패턴이 설정된 패턴과 매우 유사함을 알 수 있다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안한 설계 시스템이 설계자의 요구 사항을 잘 만족함을 알 수 있다.

2. 트라이폴 패턴을 갖는 단층 FSS 설계

그림 16은 트라이폴 패턴을 갖는 단층 FSS와 기하학적



a : 18mm
b : 18mm
c : 7mm
d : 2mm
e : 0.1mm

그림 16. 트라이폴 패턴을 갖는 FSS의 주기 셀
Fig. 16. Unit cell of FSS with tri-pole pattern.

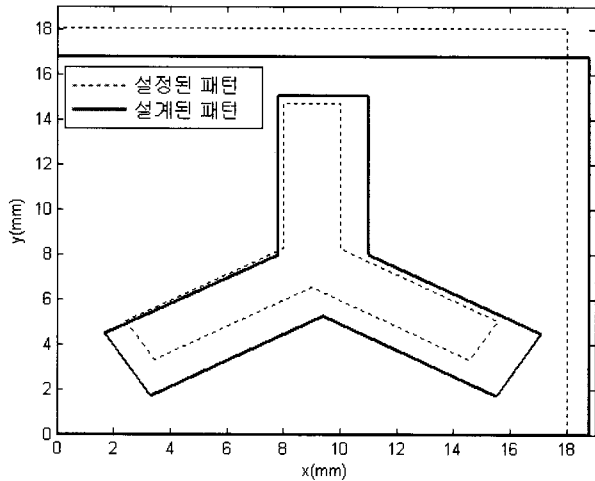


그림 17. FSS 설계 시스템을 이용한 패턴 설계 결과
Fig. 17. Calculated result from FSS design system.

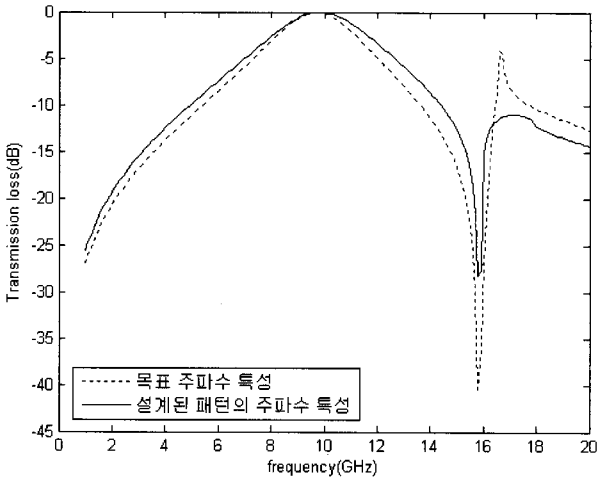


그림 18. 그림 17의 각 패턴의 투과 특성
Fig. 18. Transmitting patterns of Fig. 17.

표 5. 그림 17, 18의 각 패턴 파라미터
Table 5. Parameters of patterns in Fig. 17 and 18.

변수	설정된 패턴	설계된 패턴
a	18mm	18.8083mm
b	18mm	16.7459mm
c	7mm	7.9726mm
d	2mm	3.2020mm
공진주파수	9.7GHz	9.8GHz

파라미터를 나타낸 것이다. 앞 절에서 주파수 특성 곡선을 설계 시스템에 입력하여 설계한 방식과는 달리 본 절에서는 패턴에 대해 시뮬레이션하여 공진주파수를 구한 뒤, 이 공진주파수만을 설계 시스템에 입력하였다. 목표 공진주파수만으로 패턴을 설계한 결과 그림 17과 같은 패턴을 얻을 수 있었다.

그림 17의 결과를 보면, 설정된 패턴과 설계된 패턴이 잘 일치되지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 18과 표 5로부터 설계된 패턴의 공진주파수(9.7GHz)가 목표로 설정한 공진주파수(9.8GHz)와 매우 유사하다는 것을 알 수 있으며, 이 사실로부터 그림 17의 패턴 불일치는 공진주파수만을 설계 입력으로 사용하였기 때문에 발생한 결과라 판단할 수 있다. 패턴은 잘 일치하지 않았지만 목표로 설정했던 공진주파수는 잘 일치함을 볼 때, 본 논문에서 제안된 시스템이 FSS 설계에 있어 설계자의 요구 사항을 잘 만족함을 알 수 있다.

V. 구현 및 분석

본 장에서는 설계 요구 사항만으로 FSS를 설계하고 설계된 패턴의 파라미터를 이용하여 실제로 패턴을 제작한 후, 이 제작한 패턴의 주파수 특성을 측정하여 설계 요구 사항과 비교함으로써 본 논문에서 제안한 설계 시스템의 신뢰성을 검증하였다.

그림 19는 설계하고자 하는 패턴의 형상을 나타낸 것으로 유전체가 존재하는 트라이폴 타입의 FSS를 보여

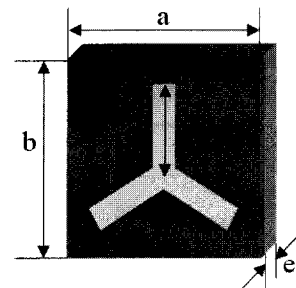


그림 19. 트라이폴 패턴을 갖는 FSS의 주기 셀
Fig. 19. Unit cell of FSS with tri-pole pattern.

표 6. 설계 요구 사항
Table 6. Design Specification.

설계 요구 사항	목표 값
트라이폴 타입	.
유전체 유무	유($\epsilon_r = 4.6$)
공진주파수	8GHz
최소 손실량	-1.3dB

표 7. 설계 및 제작 패턴 파라미터

Table 7. Parameters of patterns designed from FSD.

변수	설계된 패턴	제작을 위한 패턴
a	16.8450mm	17mm
b	17.2659mm	17mm
c	9.3734mm	9mm
d	1.7324mm	2mm
e	0.1387mm	0.1mm

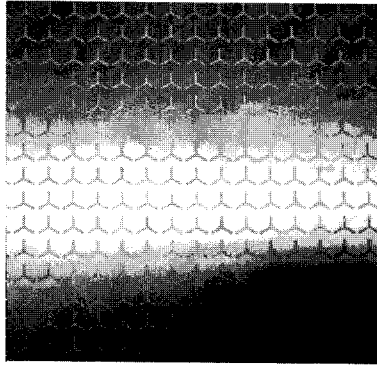


그림 20. 제작된 FSS
Fig. 20. Fabricated FSS.

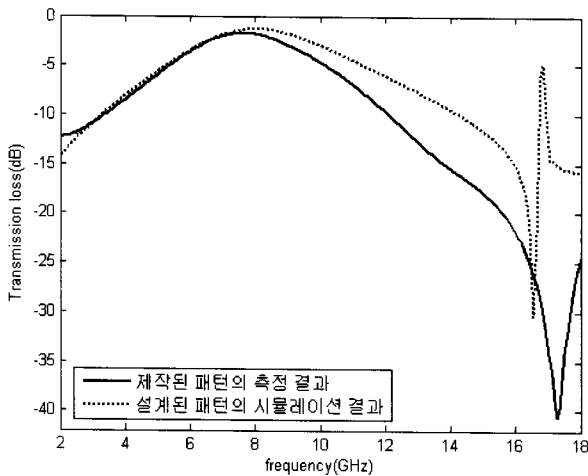


그림 21. 표 7에서 정의된 각 패턴의 투과 특성
Fig. 21. Transmission loss of each pattern in Table. 7.

준다. 표 6는 설계 요구 사항으로 8GHz의 공진주파수와 -1.3dB의 최소 손실량, 그리고 유전체를 갖는 FSS를 설계하는 것이 목표임을 보여준다.

표 6의 설계 요구 사항과 본 논문에서 제안한 FSS 설계 시스템을 이용하여 설계한 결과 표 7과 같은 패턴 파라미터를 얻을 수 있었다. 이 패턴 파라미터를 이용하여 제작이 가능한 패턴 파라미터를 표 7과 같이 근사적으로 설정하였다.

그림 20은 근사화시킨 패턴 파라미터를 이용하여 제작한 FSS로 구리로 이루어진 금속판에 유전율이 4.6인 폴리마이드 필름을 적층하였으며, 측정이 용이하도록 가로

표 8. 그림 21의 각 패턴의 주파수 특성

Table 8. Frequency characteristics of each pattern in Fig. 21.

	제작된 패턴	설계 패턴
공진주파수	7.7GHz	8.0506GHz
최소손실량	-1.7293dB	-1.2854dB

와 세로를 300mm의 크기로 제작하였다.

제작된 시편의 주파수 특성을 측정한 결과 그림 21과 표 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과로부터 설계 요구 사항을 잘 만족하는 설계된 패턴과 달리 제작된 패턴은 공진주파수가 0.3dB, 최소 손실량은 약 0.5dB의 오차를 보이고 있다. 그러나, 제작된 패턴의 주파수 특성은 설계 시스템 내부의 근사적 유전체 해석 툴과 제작 시 패턴 파라미터의 근사화를 고려하면 목표값에 상당히 근접하는 값이라 사료되며, 이 결과는 본 논문에서 제안한 FSS 설계 시스템의 설계 결과를 실제 FSS 제작에 이용할 수 있는 가능성을 보여주는 결과라 할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 단층 FSS 해석 시뮬레이터와 유전체 근사적 해석을 이용하여 유전체가 적층되어 있는 FSS의 주파수 특성을 근사적으로 해석할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이 방법의 타당성을 입증하기 위해 측정 결과와 비교 분석하였다. 또한 이 방법을 이용한 FSS 해석 시뮬레이터, DB 시스템, 그리고 GA를 이용한 FSS 설계 시스템을 제안하였으며, 시뮬레이션과 실제 제작된 시편의 측정 결과를 통해 시스템의 타당성과 신뢰성을 검증하였다. 이와 같은 연구는 선택적 주파수 투과를 필요로 하는 레이더와 같은 실제 FSS 구조물을 설계하는데 매우 유용하게 사용되어질 것으로 예상된다. 추후 유전체를 포함하는 다층 FSS의 해석이 가능한 시뮬레이터를 개발하여 설계 시스템의 활용 가능 범위를 넓히는 연구를 진행할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Jihong Lee, Hyungwon Shim, Fillyoub Lee, Geun-Hong Kim, and Il-Sung Seo, "Optimal FSS Design by Genetic Algorithm", *IASTD -Antennas, Radar, and Wave Propagation*, pp.115-120, 2006.
[2] S. Chakravarty, R. Mtra, and N.R. Williams, "Application of a Microgenetic Algorithm(MGA)

to the Design of Broad-Band Microwave Absorbers Using Multiple Frequency Selective Surface Screens Buried in Dielectrics”, *Proc. IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.50, March 2002.

[3] S. Chakravarty and R. Mittra, “Application of the micro-genetic algorithm to the design of spatial filters with frequency selective surfaces embedded in dielectric media”, *Proc. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.44, pp. 338-346, May 2002.

[4] 서호진, 김홍수, “유전자 알고리즘을 이용한 개구 결합 마이크로스트립 안테나 설계”, *대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집*, 207- 210쪽, 1999.

[5] Maurizio Bozzi, Luca Perregrini, Jochen Weinzierl, and Carsten Winnewisser, “Efficient Analysis of Quasi-Optical Filters by a Hybrid MoM/BI-RME Method”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 7, pp.1054-1064, 2001.

[6] Craig Scott, “The Spectral Domain Method in Electromagnetics”, *Artech House*, pp. 1- 39, 1989.

[7] C.C.Chen, “Transmission Through a Conducting Screen Perforated Periodically with Apertures”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, MTT-18, pp. 677-632, 1970.

[8] C.C.Chen, “Scattering by a Two-Dimension Periodic Array of Conducting Plates”, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, AP-18, pp. 660-665, 1970.

[9] C.C.Chen, “Diffraction of Electromagnetic Waves by a Conducting Screen Perforated Periodically with Circular Holes”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, pp. 475- 481, 1971.

[10] J. A. Reed, “Frequency Selective Surfaces with Multiple Periodic Elements”, *Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Dallas*, December 1997.

[11] Ben.A.Munk, “Frequency Selective Sur- faces : Theory and Design”, *John Wiley & Sons Inc*, 2000.

[12] 서일성, “주파수 선택적 투과 E-glass/Epoxy 적층 판 설계에 관한 연구”, *박사학위논문, KAIST*, 2004.

[13] 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.

[14] 장병탁, “유전 알고리즘 이론 및 응용”, *대한전자 공학회지*, 제22권 11호, 60-70쪽, 1995.

저 자 소 개



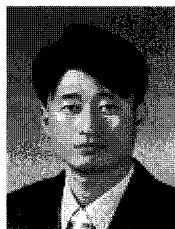
심 형 원(학생회원)
 2003년 충남대학교 메카트로닉스 공학과(공학사)
 2005년 충남대학교 메카트로닉스 공학 (공학 석사)
 2005년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학 박사 과정

2008년~현재 한국해양연구원
 <주관심분야 : 로봇틱스, 지능제어, DSP를 이용한 실시간 제어 시스템, FSS >



서 일 성(정회원)
 1983년 한양대학교 기계공학과 (공학사)
 1986년 한국과학기술원 기계공학과 (공학 석사)
 2005년 한국과학기술원 기계공학과 (공학 박사)

1986~현재 국방과학연구소
 <주관심분야 : 복합재료의 전자기적 응용>



이 지 흥(정회원)
 1983년 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학 석사)
 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학 박사)

1994~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수.
 <주관심분야 : 로봇틱스, 지능제어, 컴퓨터 기반 신호처리 시스템, FSS>



김 근 흥(정회원)
 1979년 서울대학교 금속공학과 (공학사)
 1986년 한국과학기술원 재료공학과 (공학 석사)
 1993년 한국과학기술원 재료공학과 (공학 박사)

1979~현재 국방과학연구소
 <주관심분야 : 전자기물질 합성 및 응용>