

## 論文

## 주파수 선택적 투과막이 결합된 복합재료의 잔류응력평가 및 선택적 투과막 설계

김가연\*, 전홍재\*+, 강경탁\*, 이경원\*\*, 홍익표\*\*\*, 이명진\*\*\*\*

## Thermal Residual Stresses in the Frequency Selective Surface Embedded Composite Structures and Design of Frequency Selective Surface

Ka-Yeon Kim\*, Heoung-Jae Chun\*+, Kyung-Tak Kang\*, Kyung-Won Lee\*\*,  
Ic-Pyo Hong\*\*\*, and Myoung-Keon Lee\*\*\*\*

## ABSTRACT

In this paper, Particle Swarm Optimization(PSO) is applied to the design of the Frequency Selective Surface(FSS) and residual stresses of hybrid radome is predicted. An equivalent circuit model with Square Loops arrays was derived and then PSO was applied for acquiring the optimized geometrical parameters with proper resonant frequency. Residual stresses occur in the FSS embedded composite structures after cocuring and have a great influence on the strength of the FSS embedded composite structures. They also effect transmission quality because of delamination. Therefore, the thermal residual stresses of FSS embedded composite structures were analyzed using finite element analysis with considering the effects of FSS pattern, and composite stacking sequence.

## 초 록

본 연구에서는 최적화 알고리즘 중 하나인 PSO기법을 이용하여 주파수 선택적 표면을 설계하였으며, 설계된 주파수 선택 구조를 적용한 하이브리드 레이돔의 잔류응력을 예측하였다. 주파수 선택 구조로서 Square Loop의 등가회로모델에 PSO를 적용하여, K-band(23GHz)에서 차단특성을 갖는 최적의 설계값을 구하였다. 또한 FSS와 복합재료의 하이브리드 레이돔을 제작 할 때 발생하는 잔류응력의 효과가 클 경우 구조적 안정성이 떨어질 뿐만 아니라 층간분리가 발생하여 FSS의 전파투과특성에 영향을 미칠 수 있으므로, 하이브리드 레이돔의 제작 시에 동시경화 후 상온으로 냉각되는 과정에서 발생하는 잔류 열응력에 대하여 예측하였으며, FSS패턴과 복합재료의 적층각 변화에 따른 영향을 비교하였다.

**Key Words** : 주파수 선택적 투과막(Frequency Selective Surface), 잔류응력(Residual stress), 유한요소해석(Finite element analysis), PSO(Particle Swarm Optimization)

## 1. 서 론

무기체계(Weapon system)가 레이더 파에 탐지되는 정도를 나타내는 무기체계의 Radar Cross Section(RCS)를 줄이는 피탐

지 감소 기술은 현대전에서 무기체계의 생존성을 좌우하는 핵심 기술 분야로 인식되고 있다. RCS를 감소시키는 방법으로는 스텔스 형상 설계 (Stealth shape design)를 통해서 입사되는 전자기파를 다른 방향으로 산란시킴으로써 레이더 파에 탐지되

접수: 2010년 11월 8일, 게재승인: 2011년 2월 8일

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*+ 연세대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:hjchun@yonsei.ac.kr)

\*\* 연세대학교 전기전자공학과

\*\*\* 국립공주대학교 정보통신공학부

\*\*\*\* 국방과학연구소

는 반사파를 감소시키는 기술과 구조물에 Radar Absorbing Material(RAM)을 도포하여 입사 전자기파를 RAM 내부에서의 도전 손실이나 자성 손실 또는 유전 손실 등과 임피던스 정합(Impedance matching)에 의한 손실로 소멸시킴으로써 반사파를 감소시키는 기술의 연구가 주를 이루고 있다. 하지만 RAM 기술은 항공기의 무게를 증가시킬 뿐만 아니라 성능을 저하시킬 수 있고, 지속적으로 유지 보수를 해주어야 한다는 문제점을 발생시킬 수 있다. 따라서 RAM 적용 시의 문제점을 해결하기 위해서 전파흡수 재료를 이용한 구조물 자체에 추가로 전파흡수 기능을 부여한 Radar Absorbing Structure(RAS)에 대한 연구가 대두되고 있다. RAS의 한 방법으로 전자기파를 주파수에 따라서 선택적으로 투과 또는 반사시키는 Frequency Selective Surface(FSS:주파수 선택적 투과막)를 복합재에 적용시킨 하이브리드구조 레이돔(Hybrid Radome)연구가 활발히 진행되고 있다. 이 방법은 복합재료를 이용하여 적의 탐지 레이더로부터 입사하는 전자기파를 흡수함과 동시에 구조 재료로서의 안정성을 동시에 갖는 장점을 가지고 있다. 현재 FSS의 전자기파 투과 및 전파특성의 해석에 대한 연구가 주로 진행되고 있다.[1-3] Kim[4]은 Dipole slot의 배열주기와 길이, 폭 변화가 FSS의 전자기파 투과 특성에 미치는 영향을 보았으며, Kim 과 Lee[5]는 하이브리드 레이돔을 구성하는 요소들 간의 접합을 통한 샌드위치 형태의 복합재료 레이돔 제작에 중점을 두어 Copper foil과 Polyimide film, 복합재료의 접합능력을 향상시키는 방법을 연구하였다.

FSS 해석방법은 수치해석 방법과 등가회로를 이용한 해석방법 두 가지가 있다. 등가회로를 이용한 해석은 수치해석을 이용한 해석보다 정확성에 한계가 있지만 쉽고 간편하게 FSS의 특성을 예측할 수 있다. Marcuvitz[6]는 주기적인 격자 구조를 등가회로 모델로 처음 제안하였으며 Anderson이 FSS구조에 적용하였다[7]. Lanhley, Parker등은 Square Loop와 Jerusalem Cross FSSs에 대해 등가모델을 추출하고 해석을 수행하였다[8-12].

하이브리드 구조 레이돔의 제작 과정 중 금속재료와 복합재를 접합시키는 방법으로 주로 사용되는 동시경화접합의 방법은 동시 경화 후 상온으로 돌아오면서 재료에 따른 열팽창 계수의 차이에 의해 잔류 열응력이 발생하게 된다. 발생한 잔류응력은 층간분리 현상을 야기시키며, 이는 전자기파 투과 특성에 영향을 줄 수 있다.[13] 그러나 경화 공정에 따른 잔류응력 및 그에 의한 층간분리(Delamination)의 발생에 대한 연구는 미비한 수준이다.

본 연구에서는 Square Loop FSS(Square Loop, Gridded Square Loop, Double Square Loop)들의 등가회로 모델을 Particle Swarm Optimization(PSO)알고리즘에 적용하여 K-band(23GHz)에서 차단특성을 갖는 최적화된 Square Loop FSS들의 파라미터들을 추출하였다. 추출한 파라미터를 적용한 FSS와 유전체로는 E-glass/epoxy를 적용하여 설계된 하이브리드 레이돔의 제작 시에 동시경화 후 상온으로 냉각되는 과정에서 발

생하는 잔류 열응력과 층간분리 발생 가능성에 대하여 예측하였으며, FSS패턴과 복합재료의 적층각 변화에 따른 영향을 비교하였다.

## 2. Square Loop FSSs의 최적화

### 2.1 Square Loop FSS

FSS의 단위요소로는 Jerusalem Cross, Square Loop, Hexagon Element, Ring등이 있다.[14] 그 중에서 대칭적인 형상으로 인하여 전자기파의 입사각 변화에 대해 안정된 공진 주파수를 갖는 Square Loop(SL)을 기본 패턴으로 설정하였다. Fig. 1은 Square Loop FSS 구조들을 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 SL로서 낮은 주파수 대역에 사용된다. SL을 수정한 구조인 Fig. 1(b)의 Gridded Square Loop(GSL)은 대역의 공진주파수가 입사되는 각도에 따라 크게 변하지는 않지만 대역폭은 입사각에 따라 민감하게 동작한다. Double Square Loop(DSL)은 Fig. 1(c)와 같이 SL이 두 개 적용된 구조로 두 개의 공진이 발생한다. 즉, 두 개의 공진이 차단대역이 되며 두 공진 사이 부분이 투과 대역이 된다. Fig. 1의 구조들은 등가회로 모델을 이용하여 근사적으로 Fig. 2에 나타낸 회로와 같이  $L$ 과  $C$ 로 구성되는 공진회로를 만들 수 있다.

식 (1)은 FSS구조의 투과계수 식이며 정규화된 어드미턴스를 이용하여 구할 수 있다. 각 FSS모델에 따른 어드미턴스의 값은 식 (2), 식 (5), 식 (10)과 같다.

$$|r|^2 = \frac{4}{4 + |Y|^2} \quad (1)$$

### 2.2 Square Loop FSS의 등가회로

Fig. 2는 [15]과 [16]로부터 얻은 각 Square Loop FSSs의 등가회로 모델이다. Fig. 2(a)의 SL에서 어드미턴스는 식 (2)와 같이 계산된다. 여기서  $B_1$ 은  $C$ 에 대한 항이며  $X_1$ 은  $L$ 의 대한 항으로 식 (3)과 (4)와 같다. 식 (3)에서  $w$ 는 주파수를  $p$ ,  $g$ ,  $d$ 값은 각각 설계변수의 값을 나타내며, 각각  $\lambda$ 값은 전자기파 파장을  $\epsilon_r$ 은 복소 비유전율을 의미한다.

$$Y = j \left( \frac{B_1}{1 - X_1 B_1} \right) \quad (2)$$

$$B_1 = \omega C_1 = 4F(p, g, \lambda) \left( \frac{d}{\epsilon_r p} \right) \quad (3)$$

$$X_1 = \omega L_1 = F(p, 2w, \lambda) \left( \frac{d}{p} \right) \quad (4)$$

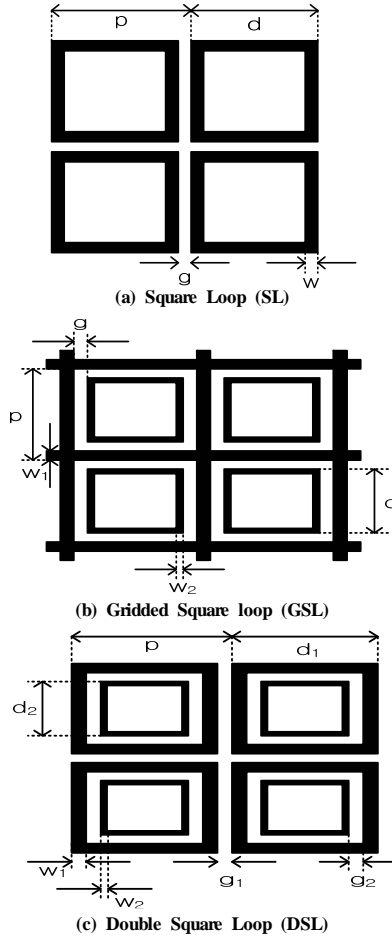


Fig. 1 Square Loop FSSs and design parameter.

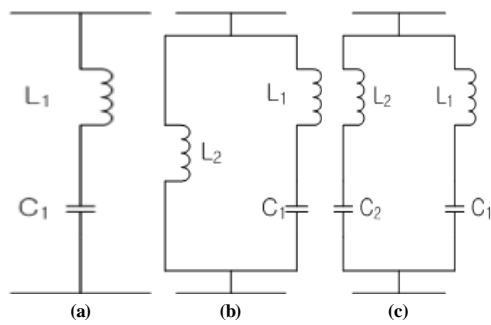


Fig. 2 Equivalent circuit model. ((a) SL, (b) GSL, (c) DSL).

Fig. 2(b)에 표현된 GSL의 등가회로의 어드미턴스는 식 (5)과 같으며, 이 식에서 사용되는 항은 [16]로부터 구할 수 있다.

$$Y = j \left[ \left( \frac{B_1}{1 - X_1 B_1} \right) - \frac{1}{X_2} \right] \quad (5)$$

$$B_1 = \omega C_1 = 2 \varepsilon_r F(p, g, \lambda) \left( \frac{d}{p} \right) \quad (6)$$

$$X_1 = \omega L_1 = 2 (X_2 \parallel X_3) \quad (7)$$

$$X_2 = \omega L_2 = F(p, w_1, \lambda) \quad (8)$$

$$X_3 = \omega L_3 = F(p, 2w_2, \lambda) \left( \frac{d}{p} \right) \quad (9)$$

마찬가지로 Fig. 2(c)의 DSL에서 등가회로의 어드미턴스는 식 (10)과 같다.

$$Y = j \left[ \left( \frac{B_1}{1 - X_1 B_1} \right) - \left( \frac{B_2}{1 - X_2 B_2} \right) \right] \quad (10)$$

식 (10)에 사용되는 항들은 [15]에서 주어지며 다음과 같다.

$$B_1 = \omega C_1 = 0.75 B_{1p} \left( \frac{d}{p} \right) \quad (11)$$

$$B_2 = \omega C_2 = \frac{B_{1p} B_{2p}}{B_{1p} + B_{2p}} \left( \frac{d}{p} \right) \quad (12)$$

$$B_{1p} = 4 \varepsilon_r F(p, g_1, \lambda) \quad (13)$$

$$B_{2p} = 4 \varepsilon_r F(p, g_2, \lambda) \quad (14)$$

### 2.3 PSO를 이용한 최적화 설계

유전알고리즘(Genetic algorithm)이 진화론에 기반한 우형형질의 취사 선택으로 최적화 파라미터를 결정하는 반면 PSO기법은 확률론적 최적화 기법으로 집단을 이루는 구성요소들의 사회성 기반으로 최적화를 수행하여 최적화 속도가 더 빠르다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 앞에서 언급한 바와 같이 Square Loop FSS들의 구조에 대한 등가 회로 모델로부터 설계 파라미터를 최적화 하였다. 이를 위하여 식 (15)와 같은 목적함수를 정의하였다.  $N_{pass}$ 는 관심 주파수의 통과 주파수 대역이며,  $N_{stop}$ 은 차단 주파수 대역을 나타낸다. 통과 주파수 대역의 기준 투과계수는 -0.5dB이며, 차단 주파수 대역의 기준 투과계수는 -10dB이다. 목적함수에 사용되는 Weighting factor는 식 (16), (17)과 같이 정의된다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_{pass}} W_{-0.5dB} |\tau_i + 0.5| + \sum_{j=1}^{N_{stop}} W_{-10dB} |\tau_j + 10| \quad (15)$$

$$W_{-0.5dB} = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_i \geq -0.5 \text{ dB passband} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$W_{-10dB} = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_i \leq -10 \text{ dB stopband} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

## 2.4 시뮬레이션

PSO를 이용하여 K-band(23GHz)에서 차단 특성을 갖는 각각의 FSS구조의 파라미터를 추출하였으며, PSO의 수렴하는 과정은 Fig. 3과 같다. 파단 선은 글로벌 베스트를 나타내며, 이는 최적화된 값을 뜻한다. 주파수 범위는 2GHz에서 30GHz로 하였으며, 주파수 간격은 0.1 GHz로 하였다. 그리고 각 설계파라미터 탐색 범위는  $3 \text{ mm} \leq p \leq 10 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ mm} \leq d \leq 7 \text{ mm}$ ,  $0.1 \leq w \text{ or } g \leq 2 \text{ mm}$ 로 설정하였다.

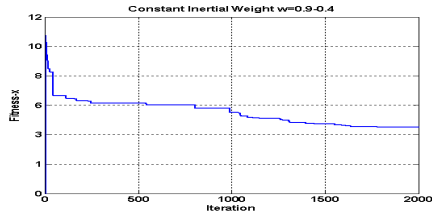


Fig. 3 Convergence process of PSO.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 유한요소해석 FSS 모델

유한요소해석에 사용된 각 FSS의 패턴과 그 Unit cell은 Fig. 4에 표시되어 있다. 본 연구에서는 유한요소해석 시에 단위요소 간의 상호작용을 고려하기 위하여 Fig. 4의 점선부분을 Unit cell로 정하였다. 각 Unit cell은 Copper foil의 형상을 나타내며, Unit cell의 치수는 앞에서 구한 최적화된 치수를 적용하였다.

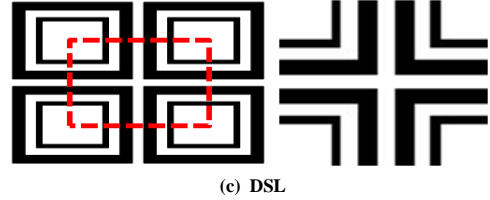
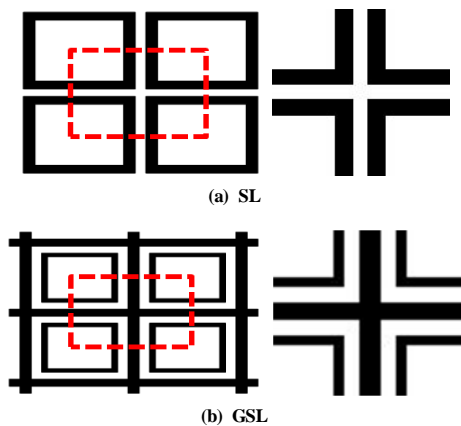


Fig. 4 FSS patterns and Unit cells.

Copper foil의 빈 부분은 Epoxy resin이 채워져 있는 것으로 가정하였으며, Polyimide film에 접합한 후, 복합재료 유전체를 윗부분과 아래에 접합시켜 최종 모델인 하이브리드 레이더를 모델링 하였다. FSS를 감싸는 유전체의 두께는 1.24mm로 위와 아래 값이 동일하였으며, Copper foil의 두께는 20 $\mu\text{m}$ , Polyimide film의 두께는 40 $\mu\text{m}$ 로 가정하였다.

### 3.2 Method and Boundary Condition

본 연구에서는 Abaqus 6.9을 이용하여 유한요소 모델을 생성하였다. 하이브리드 레이더의 각 요소는 C3D8T Element를 23364개 적용하였으며, FSS를 감싸는 복합재료 유전체는 8층의 E-glass/epoxy로 구성하였다. 적층각에 따른 영향을 확인하기 위하여  $[0]_s$ ,  $[(0/45)_2]_s$ ,  $[\pm 30]_{2s}$ ,  $[\pm 45]_{2s}$ 와 같은 다양한 적층각을 가진 복합재료 유전체를 생성하였다. 유한요소 해석에 사용된 Copper foil과 Polyimide film의 물성은 Table 1과 같으며, E-glass/epoxy 복합재료의 물성은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Material properties of Copper, Polyimide and Epoxy

Property	Copper	Polyimide	Epoxy
Elastic modulus	110GPa	2.5GPa	4.3GPa
Poisson's ratio	0.343	0.35	0.35
Coefficient of thermal expansion	16.4(10-6/°C)	4.014(10-6/°C)	45(10-6/°C)

Table 2 Material properties of E-glass/epoxy composite material

Property	Symbol	Value
Longitudinal modulus	$E_1$	38.6 GPa
Transverse modulus	$E_2$	8.27GPa
In-plane shear modulus	$G_{12}=G_{13}$	2.3GPa
Poisson's ratio	$\nu_{12}$	0.26
Longitudinal coefficient of thermal expansion	$\alpha_1$	6.3(10-6/°C)
Transverse coefficient of thermal expansion	$\alpha_2$	20(10-6/°C)
Transverse tensile strength	$F_{3t}$	65MPa
Out-of-plane shear strength	$F_{13}$	40MPa

본 연구에 사용된 하중조건은 Fig. 5와 같다. 그림과 같이 FSS에서 각 단위요소간의 상호작용을 살펴보기 위하여 Unit cell을 사용했다는 점을 고려하여 각 축 방향에 따라 대칭 조건을

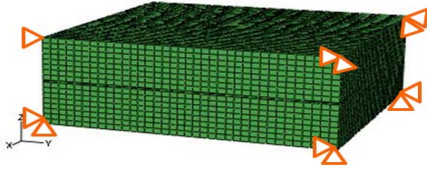


Fig. 5 Boundary and loading conditions.

사용하였고, 자유로운 팽창 및 수축이 가능하도록 복합재료 유전체 하단의 z축만을 고정시켰다. 열응력은 경화가 된 이후, 상온으로 냉각되는 과정을 가정하기 위하여 경화온도인 115℃에서 상온(25℃)으로 온도의 변화를 설정하였다.

### 3.3 복합재료 층간분리 파손기준

E-glass/epoxy복합재료의 층간분리 파손을 예측하기 위하여 Delamination Failure Index (DFI)값을 아래의 식과 같이 정의하여 DFI값이 1을 넘으면 층간분리가 발생하였다고 가정하였다.

$$D.F.I. = \begin{cases} \frac{\sigma_{33}}{F_{3T}} & \text{when, } \frac{\sigma_{33}}{F_{3T}} > \frac{\sigma_{13}}{F_{13}} \quad (\sigma_{33} > 0) \\ \frac{\sigma_{13}}{F_{13}} & \text{when, } \frac{\sigma_{13}}{F_{13}} > \frac{\sigma_{33}}{F_{3T}} \end{cases} \quad (18)$$

위의 식에서  $\sigma_{33}$ 와  $\sigma_{13}$ 는 층간 응력을,  $F_{3T}$ 와  $F_{13}$ 는 층간분리 허용응력을 의미한다.

## 4. 해석결과

### 4.1 FSS 최적설계 결과

Square Loop FSS들의 등가회로에 PSO를 이용하여 K-band (23 GHz)에서 차단특성을 가지는 FSS들을 설계하여 최적화된 각 FSS들의 파라미터들을 구하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Parameters of each Square Loop

(a) SL		
$p$	$w$	$d$
4.44	0.26	3.84

(b) GSL			
$p$	$w_1$	$d$	$w_2$
6.40	0.57	4.49	0.56

(c) DSL				
$p$	$w_1$	$w_2$	$g_1$	$g_2$
7.79	0.75	0.36	1.46	0.22

### 4.2 Square Loop(SL) Case

SL의 동 FSS, Polyimide 필름, Epoxy 수지의 잔류 등가

응력 결과와 E-glass/epoxy 복합재와 FSS의 경계면에서 복합재의 DFI 값은 Table 4와 같다. 동 FSS의 잔류응력은 해석에서 고려된 모든 복합재료의 적층각에 대하여 강도에 가까운 높은 값을 보였으며, 이는 국부적 파손이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있었고, 가장 높은 값을 보인  $[\pm 45]_{2S}$  적층인 경우의 응력분포는 Fig. 6과 같다. 또한 E-glass/epoxy복합재의 DFI값은  $[\pm 30]_{2S}$ 모델에서 최대값 0.4668을 나타냈으며, 층간분리와 관련이 높은 주방향 면의 응력( $\sigma_{33}$ ,  $\sigma_{13}$ )분포는 Fig. 7과 같다. 해석에 고려된 복합재의 적층과 FSS의 형태에 대하여 E-glass/epoxy 복합재의 DFI값이 1에 도달하지 않아 층간분리가 발생할 가능성은 낮으나 상당히 높은 DFI값을 보임으로서 하이브리드 복합재의 강도의 저하나 피로하중에 취약할 가능성이 예상된다.

Table 4 Residual stresses of Epoxy, Polyimide, Copper of SL (MPa) and DFI of E-glass/epoxy composite

Stacking sequence	Von Mises stress (MPa)			DFI
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0_4]_S$	209	25.31	52.12	0.067
$[(0/45)_2]_S$	210.2	24.22	50.2	0.2464
$[\pm 30]_{2S}$	208.7	30.09	60.83	0.4668
$[\pm 45]_{2S}$	212.6	30.26	60.86	0.3313

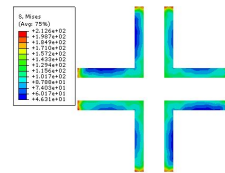


Fig. 6 Von Mises stress distribution of Unit cell of SL Copper.

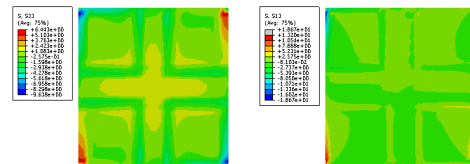


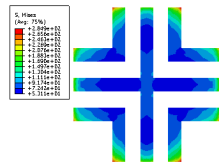
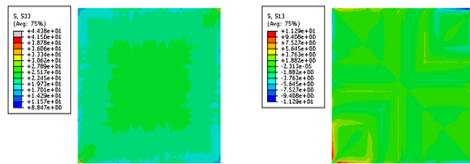
Fig. 7 Maximum residual stresses( $\sigma_{33}$ ,  $\sigma_{13}$ ) in E-glass/epoxy composite.

### 4.3 Gridded Square Loop(GSL) Case

SL의 변형된 형태로써 고려된 모델인 GSL에서 동 FSS와 Polyimide 필름, Epoxy 수지의 등가 응력 결과와 DFI를 예측한 결과는 Table 5와 같다. 동 FSS의 잔류응력은 강도 값보다 높은 값을 보여 동 FSS에서 국부적인 파손이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있었으며, 층간분리의 발생 유무를 확인할 수 있는 DFI값은 1을 넘지 않았으나 높은 값을 보여 잔류응력의 효과가 크며, 복합재료의 강도에 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다. 동 FSS에서 가장 높은 잔류 응력을 보인  $[0_4]_S$  적층인 경우의 응력분포는 Fig. 8과 같다. E-glass/epoxy는  $[\pm 30]_{2S}$ 모델에서 최대 DFI값 0.5385를 보였으며, 면의 응력( $\sigma_{33}$ ,  $\sigma_{13}$ )분포는 Fig. 9와 같다.

**Table 5** Residual stresses of Copper, Polyimide, Epoxy of GSL (MPa) and DFI of E-glass/epoxy composite

Stacking sequence	Von Mises stress (MPa)			DFI
	Copper	Polyimide	Epoxy	
[0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	284.9	28.24	55.82	0.1089
[(0/45) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	274.5	26.05	52.5	0.2695
[±30] <sub>2s</sub>	266.6	34.31	65.81	0.5385
[±45] <sub>2s</sub>	265.5	34.23	65.36	0.3723

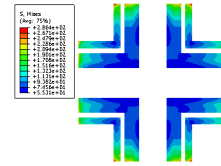
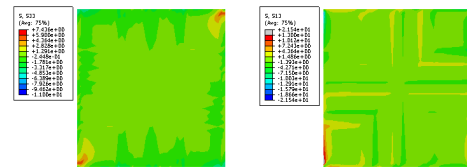
**Fig. 8** Von Mises stress distribution of Unit cell of GSL Copper.**Fig. 9** Maximum residual stresses( $\sigma_{33}, \sigma_{13}$ ) in E-glass/epoxy composite.

#### 4.4 Double Square Loop(DSL) case

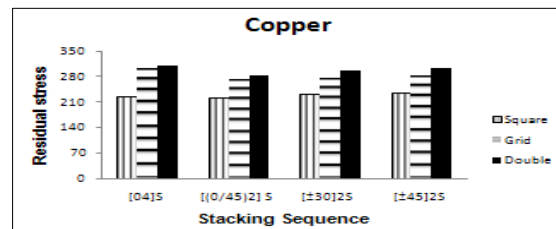
SL안에 또 하나의 SL을 적용시킨 모델인 DSL의 동 FSS와 Polyimide 필름, Epoxy 수지의 등가 응력 결과와 DFI를 Table 6에서 정리하였다. 표를 통하여 동 FSS는 앞에서 살펴본 SL과 GSL의 패턴을 갖는 모델과 같이 동 FSS의 강도보다 큰 잔류 응력이 발생하여 국부적인 파손이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있었으며, 동 FSS에서 최대 등가 응력을 갖는 동 FSS의 응력분포는 Fig. 10과 같으며, 이때의 복합재료는 [0<sub>4</sub>]<sub>s</sub>로 적층되었다. 또한 E-glass/epoxy의 최대 DFI값 역시, 앞에서 살펴본 SL, GSL과 같이 [±30]<sub>2s</sub>적층 모델에서 나타났으며, 면의 응력( $\sigma_{33}, \sigma_{13}$ )분포는 Fig. 11과 같다. DFI의 최대 값은 0.5755 으로 1에는 도달하지 않았으나 다소 큰 값을 보였으므로, 잔류응력에 의하여 구조물의 강도 및 피로특성에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

**Table 6** Residual stresses of Copper, Polyimide, Epoxy of DSL (MPa) and DFI of E-glass/epoxy composite

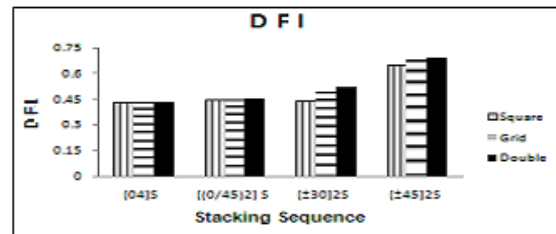
Stacking sequence	Von Mises stress (MPa)			DFI
	Copper	Polyimide	Epoxy	
[0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	286.4	28.24	55.82	0.1075
[(0/45) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	283.9	26.71	53.7	0.3008
[±30] <sub>2s</sub>	281.7	36.14	68.72	0.5755
[±45] <sub>2s</sub>	275.2	35.94	68.09	0.394

**Fig. 10** Von Mises stress distribution of Unit cell of Copper.**Fig. 11** Maximum residual stresses( $\sigma_{33}, \sigma_{13}$ ) in E-glass/epoxy composite.

FSS 패턴과 적층에 대하여 동 FSS의 잔류응력과 E-glass/epoxy의 DFI를 정리하면 Fig. 12과 같다. 동 FSS의 등가응력결과는 모든 적층에서 동 FSS의 강도에 근접하는 값을 보여 국부적인 파손이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있으며, 등가응력 값이 SL보다 GSL과 DSL의 패턴 모델에서 높은 잔류응력을 갖는 경향을 나타냈으며, 복합재료 적층의 영향보다는 패턴의 변화에 따른 영향을 받았다. 또한 E-glass/epoxy복합재의 DFI는 FSS의 패턴에 따른 영향보다는 적층에 따라 영향을 더 크게 받으며, [±30]<sub>2s</sub> 적층 모델에서 가장 높은 값을 보여 일방향 또는 일방향과 혼합된 복합재료의 적층보다는 앵글플라이를 갖는 적층에서 층간분리의 가능성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

**Fig. 12** Comparisons of DFI and residual stresses in FSS hybrid composites with fixed resonant frequencies with different stacking sequences.

동일한 Pitch를 가질 때 패턴의 변화가 잔류응력에 미치는 영향을 비교하기 위하여, 기본적인 FSS 모델인 SL의 Pitch 치수를 기준으로 하여 GSL과 DSL를 동일하게 수정하였으며, GSL과 DSL의 균일화 후의 치수는 Table 7과 같다.

Table 7 Parameters of GSL and DSL

(a) GSL				
$p$	$w_1$	$d$	$w_2$	
4.44	0.26	3.98	0.13	

(b) DSL				
$p$	$w_1$	$w_2$	$g_1$	$g_2$
4.44	0.26	0.13	0.6	0.1

#### 4.4 치수 균일화 후 GSL과 DSL

SL을 기준으로 하여 GSL과 DSL의 Pitch를 변경한 후 동 FSS의 잔류응력 값과 E-glass/epoxy의 DFI를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13 (a)는 동으로 구성된 FSS의 잔류응력 값의 결과로, 적층의 변화보다 패턴의 영향을 받았으며 DSL에서 SL과 GSL보다 높은 잔류응력이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 또한 Composite의 DFI는 패턴의 영향보다는 적층의 의한 영향을 더 크게 받았으며,  $[\pm 30]_{2S}$  적층 모델에서 가장 높은 값을 보였다.

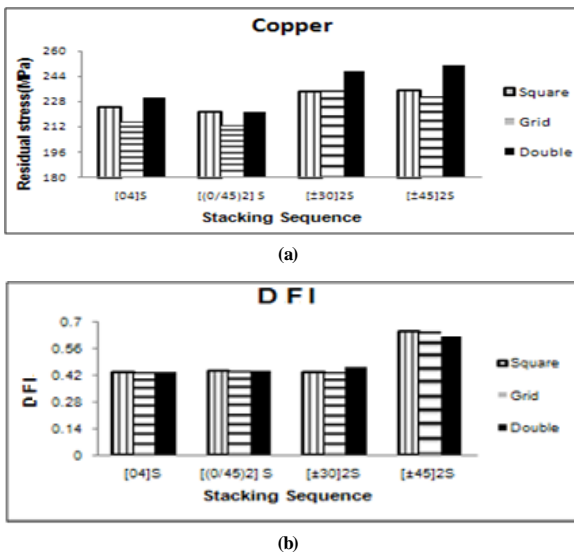


Fig. 13 Comparisons of DFI and residual stresses in FSS hybrid composites with fixed pitches.

## 5. 결론

본 연구에서는 Square Loop FSS들의 등가회로를 유도하여 원하는 공진주파수에 대한 설계 파라미터를 얻기 위하여 최

적화 알고리즘 중 하나인 PSO기법을 이용하였다. 또한 유한 요소해석을 이용하여 최적화된 치수의 FSS들의 잔류응력과 층간분리 발생 가능성에 대하여 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Square Loop FSS들에 PSO알고리즘을 적용함으로써 쉽고 빠르게 FSS를 설계할 수 있으며 다양한 성능의 FSS를 설계할 수 있음을 알 수 있었다. 이 결과로 PSO를 다양한 종류의 FSS에 적용될 수 있으며 안테나, 레이돔 등과 같은 다양한 전자기 구조에 사용될 수 있다.
- 2) 진공주파수가 동일한 모델과 Pitch가 동일한 모델 모두 Composite의 DFI는 패턴의 영향보다는 적층의 의한 영향을 더 크게 받음을 확인하였고,  $[\pm 30]_{2S}$  적층 모델에서 가장 높은 값을 보임을 확인하였다.
- 3) FSS는 모든 모델에서 적층의 변화보다 패턴의 영향을 더 크게 받았으며, DSL에서 높은 잔류응력이 발생하였으며, 국부적인 파손이 발생할 수 있음을 확인하였다.
- 4) DFI값이 1을 넘지 않아 층간분리현상은 발생하지 않았으나, 잔류응력의 효과가 크게 발생하였고, 따라서 Hybrid Radome 설계시 잔류응력의 영향을 감소시키기 위하여 적절한 FSS패턴과 복합재료 적층을 선정하여야 한다.

## 후 기

본 연구는 국방과학 연구소에서 지원하는 “곡면형상 주파수 선택구조 설계 기법 연구” 과제의 일부로 수행되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Mitra, R., Chan, C.H. and Cwik T., “Techniques for analyzing frequency selective surfaces-A review,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 12, 1988, pp. 1593-1615.
- 2) Grounds, P.W. and Webb, K.J., “Numerical analysis of finite frequency selective surface with rectangular patches of various aspect ratios,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 39, 1991, pp. 569-575.
- 3) Wu, T.K. Frequency selective surface and grid array, Wiley, New York. 1995.
- 4) Kim, P.C., Chin, W.S., Lee, D.G. and Seo, I.S., “EM Characteristics of the RAS Composed of E-Glass/Epoxy Composite and Single Dipole FSS Element,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 75, 2006, pp. 601-609.
- 5) Kim, P.C. and Lee, D.G., “Improvement of Bonding Characteristics Between the Frequency Selective Surface

- and E-glass/epoxy Composite,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 23, 2009, pp. 215-227.
- 6) Marcuvitz, N., *Waveguide Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1951.
  - 7) Anderson I., “On the Theory of Self-Resonant Grids,” *Bell system Technical Journal*, Vol. 54, 1975, p. 1725-1731.
  - 8) Langley, R. J., Drinkwater, A. J., “An Improved Empirical Model for the Jerusalem Cross,” *IEE Proceedings H-Microwaves Optics and Antennas*, Vol. 129, No. 1, 1982, pp. 1-6.
  - 9) Langley, R. J., Parker, E. A., “Equivalent Circuit Model for Arrays of Square Loops,” *Electronics Letters*, Vol. 18, No. 7, 1982, pp. 294-296.
  - 10) Langley, R. J., Parker, E. A., “Double Square Frequency Selective Surfaces and Their Equivalent Circuit,” *Electronics Letters*, Vol. 19, No. 17, 1983, pp. 675-677.
  - 11) Lee, C. K., Langley, R. J., “Equivalent- Circuit Models for Frequency Selective Surfaces at Oblique Angles of Incidence,” *IEE Proceedings H-Microwaves Optics and Antennas*, Vol. 132, 1985, pp. 395-399.
  - 12) Parker, E. A., “The Gentleman’s Guide to Frequency Selective Surfaces,” *Presented in 17th Q.M.W. Antenna Symposium*, London (UK), 1991.
  - 13) 서일성, 김진규, 최일, 이대길, “Hybrid 구조의 FSS 접합 특성 영향,” *한국군사과학기술학회 2010년 종합학술대회 학회지*, 2010, pp. 581-584.
  - 14) Munk, B.A., (2000), *Frequency Selective Surfaces : Theory and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
  - 15) Lee, C.K. and Langley, R.J., “Equivalent-Circuit Models for Frequency Selective Surfaces at Oblique Angles of Incidence,” *IEE Proceedings H Microwaves*, Vol. 132, 1985, pp. 395-399.
  - 16) Parker, E.A., “The Gentleman’s Guide to Frequency Selective Surfaces,” *17th QMW Antenna Symposium*, London(UK), 1991.
  - 17) 김가연, 전홍재, 홍익표, 강경탁, 이명진, “주파수 선택적 투과막이 결합된 복합재료의 잔류응력평가,” *국방과학연구소 창설 40주년기념 종합 학술대회 학회지*, 2010.