

루프 종류의 FSS가 결합된 복합재료 구조의 잔류응력과 전파 투과 특성

박경미* · 황인한* · 전흥재*† · 홍익표** · 박용배*** · 김윤재****

Study on Thermal Residual stresses and Transmission Characteristics in Loop Type Frequency Selective Surface Embedded Composite Structures

Kyoung-Mi Park*, In-Han Hwang*, Heoung-Jae Chun*†, Ic-Pyo Hong**,
Yong-Bae Park***, Yoon-Jae Kim****

ABSTRACT: In this paper, the delamination and deformed FSS caused by residual stresses in the Loop type FSS embedded composites and the transmission characteristic changes due to deformation of FSS by residual stresses were studied. FSS may have different electromagnetic characteristics depending on the type of element, design variables, and array. Therefore, design variables of square loop FSS embedded composites structures were determined to obtain the transmission characteristic for X-band (8~12 GHz). Then the design variables of other types of loops (triangular loop and circular loop) were determined based on the dimensions of square loop. Thereafter, the residual stresses and transmission characteristics of FSS embedded composite structures with various single and double loop FSS's, and stacking sequence of composite laminates were compared.

초 록: 본 논문은 Loop 종류의 주파수 선택적 투과구조(FSS)를 결합시킨 복합재료 구조의 잔류응력으로 인한 층간분리, FSS의 손상 등 구조적 파손과 잔류응력으로 인해 변형된 FSS의 전파 투과 특성의 영향을 연구하였다. FSS는 단위요소 종류, 설계 변수, 배열에 따라 일정 대역에 전파를 투과 혹은 반사시킬 수 있다. 그래서 사각 루프 FSS를 복합재료와 결합시켰을 때 X-band(8~12 GHz)에서 공진이 발생하도록 설계한 후, 그에 따른 치수를 규격화하여 다른 루프형상(삼각 루프, 원형 루프)에 적용하고 단일 Loop와 이중 Loop 구조일 때 복합재료의 적층을 변화시켜 비교 분석하였다.

Key Words: 주파수 선택적 투과구조(frequency selective surface), 잔류응력(residual stress), 전파 투과 특성(transmission characteristics)

1. 서 론

오늘날, 항공기, 미사일, 전함과 같은 무기분야에서 스텔

스에 대한 관심은 대단히 높으며 그에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 여러 스텔스 기술에서 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)을 줄이기 위한 기술로는 크게 Stealth

Received 10 May 2013, received in revised form 15 October 2013, accepted 17 October 2013

*연세대학교 기계공학과 대학원

*†연세대학교 기계공학과, Corresponding author (E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr)

**국립공주대학교 정보통신공학부

***아주대학교 전자공학과

****국방과학연구소 연구원

Shape Design로 전자기파를 다른 방향으로 산란시켜 레이더 파에 탐지되는 반사파를 감소시키는 기술과 특별한 코팅이나 복합재료를 이용하여 전투기에서 수신되는 레이더 신호를 흡수 또는 산란시키는 Radar Absorbing Material (RAM) 이나 전파흡수 재료를 이용한 구조물 자체에 추가로 전파흡수 기능을 부여한 Radar Absorbing Structure(RAS)로 나눌 수 있다.

이 중에서 전투기의 외피나 레이돔 등에 특수한 전자기 구조를 포함하여 전파신호 선택적으로 투과하거나 반사시키는 주파수 선택적 투과구조(Frequency Selective Surface: FSS)는 스텔스 기능을 요구하는 미사일이나 항공기의 레이돔, 스텔스 기능의 항공기 동체, 리플렉터 안테나 등에 사용될 수 있으며 이 중에서도 최근에 와서 가장 대표적으로 응용되는 분야는 스텔스 기능을 가지는 레이돔이다.

FSS가 레이돔과 결합된 하이브리드 레이돔은 레이더의 전파를 선택적으로 차단할 수 있는 스텔스 기술의 전파기술에 핵심적으로 적용될 수 있고, 대역통과특성을 선택적으로 가지게 되어 일반적인 레이돔에 비해 RCS를 현저하게 줄일 수 있고 저 피탐지성을 확보하게 된다. 이러한 하이브리드 레이돔은 FSS와 복합재료로 구성하게 된다. 복합재료는 유전손실이 적고 기계적 물성이 우수한 섬유로 강화된 복합재료를 사용하고, 유리섬유/에폭시 복합재료가 전기절연성뿐만 아니라 구조적 강도가 좋고 내 환경성이 우수하여 레이돔 재료로 주로 쓰이고 있다.

FSS는 실제로 국외의 여러 나라에서 이미 연구가 지속적으로 이루어지고 있는 추세이며 국내에서 또한 FSS에 대한 연구가 이루어지고 있다[1-4]. 국내는 Dipole slot의 배열주기와 길이, 폭 변화가 FSS의 전자기파 투과 특성에 미치는 영향과 하이브리드 레이돔의 구성 재료간의 접합능력을 향상시키는 방법이 연구되었다[5,6]. 하이브리드 레이돔의 동시경화과정에서 경화 후 성형온도인 고온에서 상온으로 온도가 내려가면서 재료간의 열팽창계수 차이로 열 잔류응력이 발생한다. 이러한 열 잔류응력은 구조적으로 층간 분리 현상을 야기하고 전자기파 특성에 영향을 줄 수 있어[7], Square Loop의 경화 공정에 따른 잔류응력 및 그에 의한 층간 분리(Delamination)의 발생 가능성을 확인하는 연구가 수행되었다[8]. 하지만, 복합재료 구조의 제작과정에서 발생한 잔류응력에 의하여 복합재료의 결합된 FSS 단위요소의 변형을 고려한 전파특성 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 논문은 일정한 치수로 규격화한 Loop FSS(Square Loop, Triangular Loop, Circular Loop)를 기준요소로 설정하고, Loop 구조를 단일과 이중 구조로 적용한다. 이러한 FSS와 E-glass/Epoxy 복합재료로 구성된 하이브리드 레이돔의 동시경화 과정에서 발생하는 잔류응력과 그로 인한 FSS의 파손여부와 복합재료의 층간 분리 및 전파특성을 FSS 단위요소와 Loop 구조 별로 복합재료 적층을 변화하여 비교하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 FSS 단위요소

FSS의 단위요소는 Jerusalem Cross, Square Loop, Hexagon Element, Ring 등이 있다[4]. 그 중에서 대칭적인 형상으로 인하여 전자기파의 입사각 변화에 대해 안정된 공진주파수를 갖는 Loop type의 Square Loop(SL)를 기본요소로 설정하였다.

Fig. 1은 SL의 구조를 나타낸 것이다.

SL의 설계는 PSO 알고리즘(Particle swarm optimization)을 사용하여 SL FSS가 유리섬유 복합재 사이에 포함되었을 때 전파 투과특성이 X-band(8~12 GHz)에서 나타나도록 하였다[8,9]. FSS의 단위요소로서 Loop 구조 별로 FSS의 각의 증가에 따른 특징을 파악하기 위해서 각이 세 개인 Triangular Loop(TL)과 네 개의 각을 가지는 SL, 무한대의 각을 가진 Circular Loop(CL)을 채택하였으며, 각 Loop 형상이 동일한 치수를 가질 때 단위요소의 형상 변화가 잔류응력과 전파특성에 미치는 영향을 비교하기 위하여, SL의 설계 치수를 기준으로 하여 TL과 CL에 동일하게 적용하였다. 또한 각 Loop 종류의 단위요소에 대하여 단일 Loop와 Loop를 두 개 적용한 이중 Loop일 때 발생하는 전파투과 특성의 차이를 확인하기 위하여 단일 Loop의 치수를 기준으로 단일 Loop 구조에 대하여 Loop가 안과 밖으로 추가된 이중 Loop를 연구대상으로 추가하였다.

Table 1은 단일 Loop FSS와 이중 Loop FSS의 설계 치수이다. 단일 Loop FSS는 PSO 알고리즘을 이용하여 얻은 단일 SL FSS의 설계치수를 사용하였으며[8,9], 이중 Loop FSS의 설계치수는 단일 Loop FSS에서 Unit cell의 p (간격), w (두께), d (크기)를 고정하고, 추가되는 Loop에 대하여 Loop 간 간

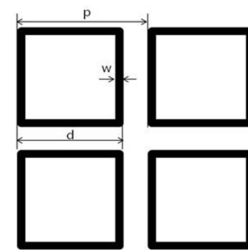


Fig. 1. Square loop FSS and design parameter

Table 1. Parameters of each Loop
(a) Single Loop

Parameters	p (pitch)	w (width)	d (distance)
Value (mm)	9.06	0.85	5.71

(b) Double Loop Inner model and Double Loop Outer model

Parameters	p	w_1	w_2	g_1	g_2
Value (mm)	9.06	0.85	0.2125	3.35	0.2125

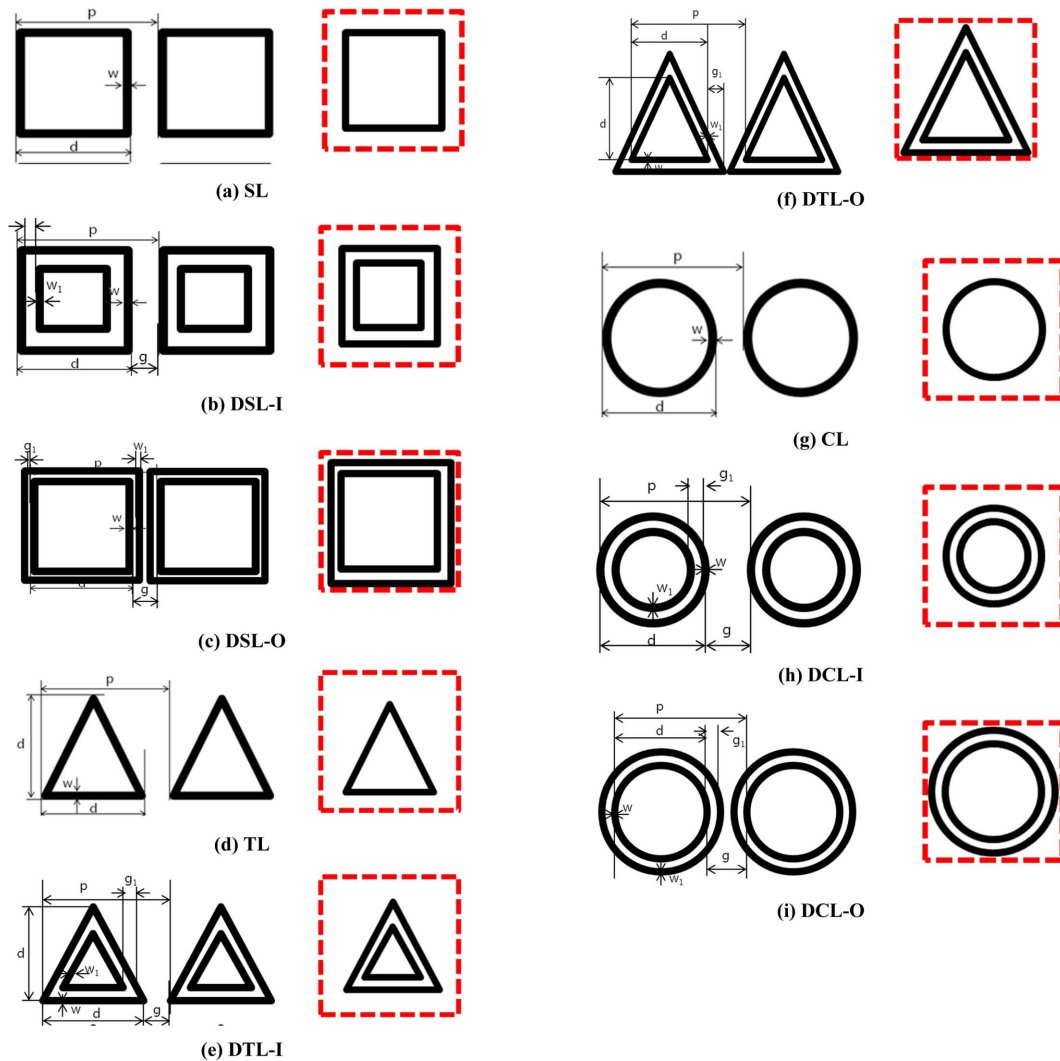


Fig. 2. FSS elements and unit cell

격이 비례하도록 설정하였다.

Fig. 2는 본 논문에서 사용된 FSS 단위요소구조들과 각 단위 요소의 Unit cell이다. Fig. 2(a)는 SL, Fig. 2(b)는 이중 Loop 구조에서 SL을 안으로 추가한 Double Square Loop Inner (DSL-I), Fig. 2(c)는 SL을 바깥방향으로 적용한 Double Square Loop Outer (DSL-O)이다. Fig. 2(d)는 TL, Fig. 2(e)는 Double Triangular Loop Inner (DTL-I), Fig. 2(f)는 Double Triangular Loop Outer (DTL-O)이다. Fig. 2(g)는 CL이고, Fig. 2(h)는 Double Circular Loop Inner (DCL-I), Fig. 2(i)는 Double Circular Loop Outer (DCL-O)이다.

2.2 하이브리드 레이돔 모델

논문에 사용된 하이브리드 레이돔 모델은 UG NX7.0 (Siemens PLM Software)으로 3D 모델링을 하였다. FSS (Copper, Epoxy, Polyimide Film)와 복합재료 유전체 E-glass/Epoxy로 구성된다. FSS는 Polyimide Film를 아래로 그 위에

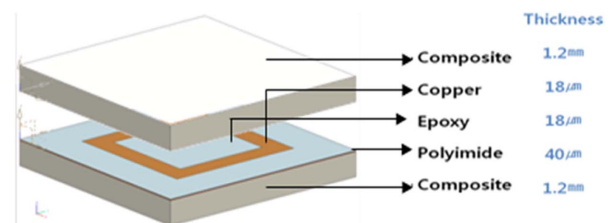


Fig. 3. 3D modeling of SL

는 Copper와 Copper의 빈 부분인 채우는 Epoxy가 있으며, 복합재료 유전체는 FSS의 윗부분과 아래 부분에 결합된 형태이다. 복합재료의 두께는 FSS의 윗부분과 아래 부분이 동일하게 8층의 E-glass/Epoxy로 구성되어 1.20 mm, Copper의 두께는 18 μm, Polyimide Film의 두께는 40 μm이다. Fig. 3은 SL를 기본요소 가지는 하이브리드 레이돔의 3D Model이다.

해석에 사용된 Copper, Epoxy와 Polyimide Film의 물성은

Table 2. Mechanical and electromagnetic properties of copper, polyimide and epoxy

Property	Copper	Polyimide	Epoxy
Mechanical			
Elastic modulus	110 GPa	2.5 GPa	4.3 GPa
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)
Electromagnetic			
Relative permittivity	1	3.5	4.4
Loss tangent	0	0.008	0.02

Table 3. Mechanical and electromagnetic properties of E-glass/epoxy composite

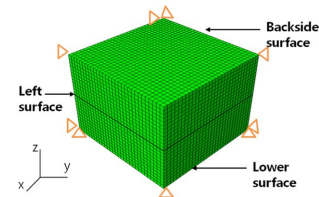
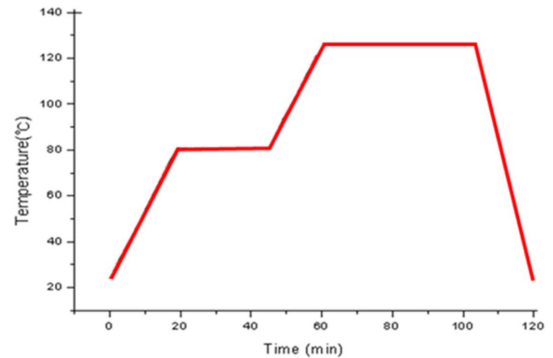
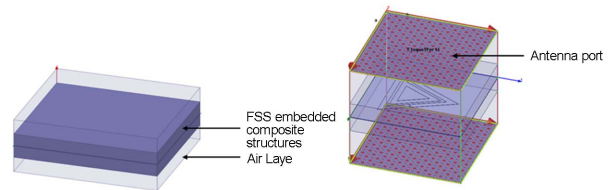
Property	Symbol	E-glass/Epoxy
Mechanical		
Longitudinal modulus	E1	38.6 GPa
Transverse modulus	E2	8.27 GPa
In-plane shear modulus	G12 = G13	2.3 GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.26
Longitudinal coefficient of thermal expansion	α_1	6.3 (10-6/°C)
Transverse coefficient of thermal expansion	α_2	20 (10-6/°C)
Transverse tensile strength	F3t	65 MPa
Out-of-plane shear strength	F13	40 MPa
Electromagnetic		
Relative permittivity	ϵ_r	4.35
Loss tangent	$\tan\sigma$	0.0032

Table 2와 같으며, E-glass/Epoxy 복합재료의 물성은 Table 3에 나타내었다.

2.3 연구방법

2.3.1 구조해석 시뮬레이션

잔류응력 및 그에 의한 층간 분리와 FSS 손상을 예측하기 위해 구조해석 시뮬레이션 ABAQUS 6.11(Dassult Systems SIMULIA, Inc.)을 사용하였다. 하이브리드 레이돔의 각 요소는 열 변형을 고려하여 C3D8T Element를 사용하였다. 복합재료의 적층각의 영향을 확인하기 위해 4가지 $[0]_8$, $[0/90]_4$, $[\pm 45]_4$, $[0/\pm 45/90]_2$ 적층에 대하여 해석하였다. 경계조건은 각 축 방향에 따라 대칭 조건을 사용하였고, 자유로운 팽창 및 수축이 가능하도록 복합재료 하단의 Z축만 고정하였다 (Fig. 4). 하중조건은 경화가 된 이후, 상온으로 냉각되는 과정을 가정하기 위하여 Fig. 5의 경화 사이클을 참조하여 경화온도 120°C에서 상온(25°C)이 되도록 설정하였다.

**Fig. 4.** Boundary conditions**Fig. 5.** Cure cycle used to co-cure E-glass/epoxy composite and FSS**Fig. 6.** FE model for electromagnetic analysis

2.3.2 전자기장해석 시뮬레이션

HFSS 13(Ansys Corporation)을 이용하여 E-glass/Epoxy 복합재료 사이에 FSS가 결합된 하이브리드 모델의 전파 특성과 특성을 예측하였다. 또한 하이브리드 레이돔은 경화과정에서 발생하는 잔류응력으로 변형될 수 있다. 이에 따른 전파 특성과 특성의 변화를 고려하기 위하여 연구에 고려된 모든 FSS 단위요소와 복합재료의 적층에 대하여 잔류응력을 받아 변형된 형상을 추가적으로 모델링 하여 특성 예측을 실행하였다.

Fig. 6는 해석에 사용된 하이브리드 레이돔 모델이다. 안테나 포트에 신호가 입사될 때의 FSS를 거쳐 자유 공간으로 복사되는 전파의 패턴을 확인하기 위해 경계 면의 매질을 공기로 선택하였다.

2.4 복합재료 층간 분리 파손기준

E-glass/Epoxy 복합재료의 층간분리 파손을 위하여 식 (1)과 같이 Delamination. Failure. Index. (D.F.I.)를 사용하였다 [8]. D.F.I. 값이 1을 넘으면 층간 분리가 발생한다고 가정하였으며, σ_{33} 과 σ_{13} 은 층간 응력을, F_{3T} 와 F_{13} 은 각각 면 외 인

장강도와 전단강도를 나타낸다.

$$D.F.I. = \begin{cases} \frac{\sigma_{33}}{F_{3T}} & \text{when, } \frac{\sigma_{33}}{F_{3T}} > \frac{\sigma_{13}}{F_{13}} \quad (\sigma_{33} > 0) \\ \frac{\sigma_{13}}{F_{13}} & \text{when, } \frac{\sigma_{13}}{F_{13}} > \frac{\sigma_{33}}{F_{3T}} \end{cases} \quad (1)$$

3. 해석결과

3.1 구조해석 결과

본 연구에서는 FSS가 결합된 복합재료에 대하여 동시 경화 후 발생하는 잔류응력과 그로 인한 복합재료의 층간 분리 현상의 가능성을 확인하기 위하여 Loop 종류의 FSS 단위 요소에 대하여 단일 Loop와 이중 Loop 구조로 적용하여 복합재료의 적층을 $[0]_8$, $[0/90]_4$, $[\pm 45]_4$, $[0/\pm 45/90]_2$ 로 변화시켜 구조해석을 하였다.

Table 4는 SL 종류(SL, DSL-I, DSL-O) FSS의 구성요소간의 등가 잔류 응력과 E-glass/Epoxy 복합재료와 FSS의 경계 면에서 복합재료의 D.F.I. 값을 정리한 것이다.

FSS의 구성요소에서 Copper FSS의 잔류응력은 다른 2가

Table 4. Maximum residual stresses of epoxy, polyimide, copper of SL type FSSs (MPa) and D.F.I. of E-glass/epoxy composite

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	Composite
$[0]_8$	138.5	10.830	16.68	0.026
$[0/90]_4$	134.6	11.740	16.23	0.156
$[\pm 45]_4$	137.6	14.830	15.61	0.210
$[0/\pm 45/90]_2$	137.1	14.420	16.19	0.170

(a) SL

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	Composite
$[0]_8$	139.8	8.289	16.20	0.026
$[0/90]_4$	137.9	8.060	16.44	0.171
$[\pm 45]_4$	139.1	9.757	17.27	0.200
$[0/\pm 45/90]_2$	138.0	9.317	16.24	0.156

(b) DSL-I

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	Composite
$[0]_8$	139.5	8.851	21.08	0.032
$[0/90]_4$	138.2	8.662	19.38	0.178
$[\pm 45]_4$	138.7	9.849	17.87	0.224
$[0/\pm 45/90]_2$	138.3	9.218	19.70	0.173

(c) DSL-O

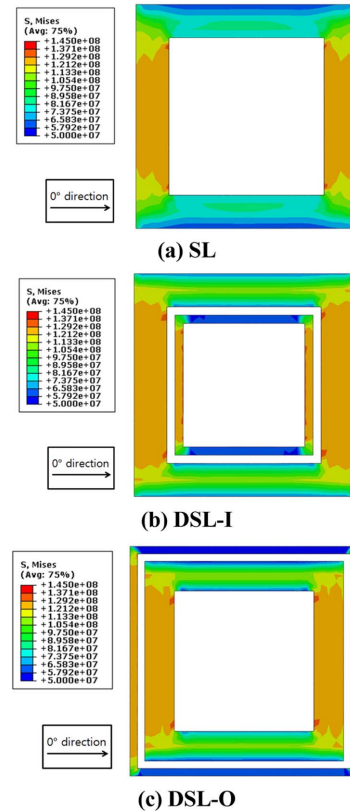


Fig. 7. Maximum Von Mises stress distribution of unit cells of copper SL type FSSs

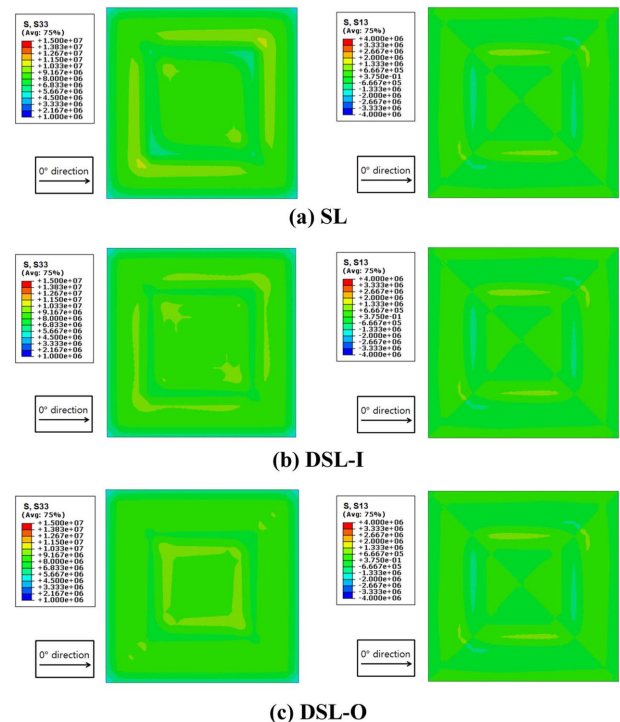


Fig. 8. Maximum out-of-plane residual stress distributions (σ_{33} and σ_{13}) of composite layer at the interface between FSSs and composites in SL type FSSs embedded hybrid composites($[\pm 45]_4$)

지 구성요소에 비하여 높은 값을 가지며, Copper 강도 (350 MPa) 보다 낮으므로, Copper FSS의 국부적 파손은 발생하지 않는다. 최댓값을 보인 $[0]_8$ 적층의 응력분포는 Fig. 7과 같다. E-glass/Epoxy 복합재료의 층간 분리 현상을 판단할 수 있는 D.F.I. 값은 SL, DSL-I, DSL-O 모두 $[\pm 45]_4$ 적층에서 최댓값을 가졌으며, 최댓값을 가지는 $[\pm 45]_4$ 적층의 층간응력(σ_{33} , σ_{13})분포는 Fig. 8에 나타내었다. 해석에 고려된 4가지 복합재료 적층에 대하여 E-glass/Epoxy 복합재료 D.F.I. 값은 1에 도달하지 않아 층간 분리가 발생하지 않을 것이라 예상된다.

Table 5는 TL 종류(TL, DTL-I, DTL-O)의 Copper FSS와 Polyimide 필름, Epoxy 수지의 등가 응력 결과와 복합재료의 D.F.I. 값을 정리한 것이다.

잔류응력은 해석에서 고려된 모든 복합재료의 적층의 Copper FSS는 Copper 강도 값보다 낮아 국부적 파손이 발생하지 않는다. 이중 FSS 구조에서 단일 FSS 구조 보다 응력차가 다른 SL, CL 종류의 FSS보다 크게 나타났는데, 이는 TL 종류의 꼭지점 부에 다른 종류의 FSS보다 높은 응력이 발생하기 때문이다. TL 종류 FSS에서 가장 높은 값을 보인 $[0]_8$ 적층의 응력분포는 Fig. 9와 같다. 층간 분리의 유무를

Table 5. Maximum residual stresses of epoxy, polyimide, copper of TL type FSSs (MPa) and D.F.I. of E-glass/epoxy composite

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0]_8$	158.9	5.911	12.33	0.021
$[0/90]_4$	154.8	5.846	13.45	0.161
$[\pm 45]_4$	157.1	8.059	14.95	0.178
$[0/\pm 45/90]_2$	154.2	7.426	13.38	0.163

(a) TL

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0]_8$	182.0	5.910	14.53	0.035
$[0/90]_4$	180.4	5.887	17.12	0.182
$[\pm 45]_4$	181.8	8.057	16.32	0.203
$[0/\pm 45/90]_2$	181.2	7.425	17.19	0.168

(b) DTL-I

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0]_8$	168.8	6.195	13.14	0.045
$[0/90]_4$	162.8	5.817	14.00	0.163
$[\pm 45]_4$	167.5	7.621	15.15	0.213
$[0/\pm 45/90]_2$	161.9	7.932	14.14	0.165

(c) DTL-O

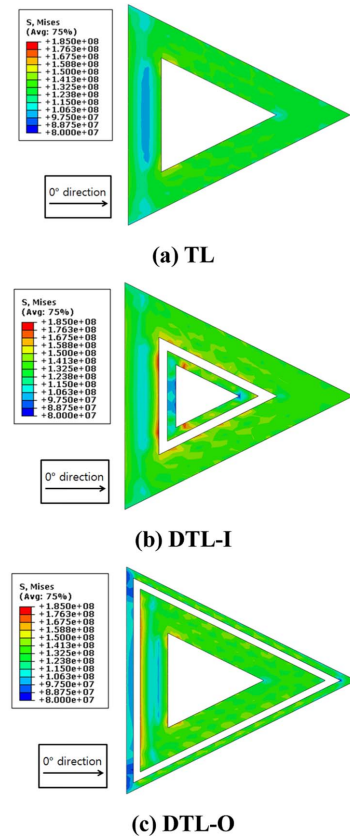


Fig. 9. Maximum Von Mises stress distribution of unit cells of copper TL type FSSs

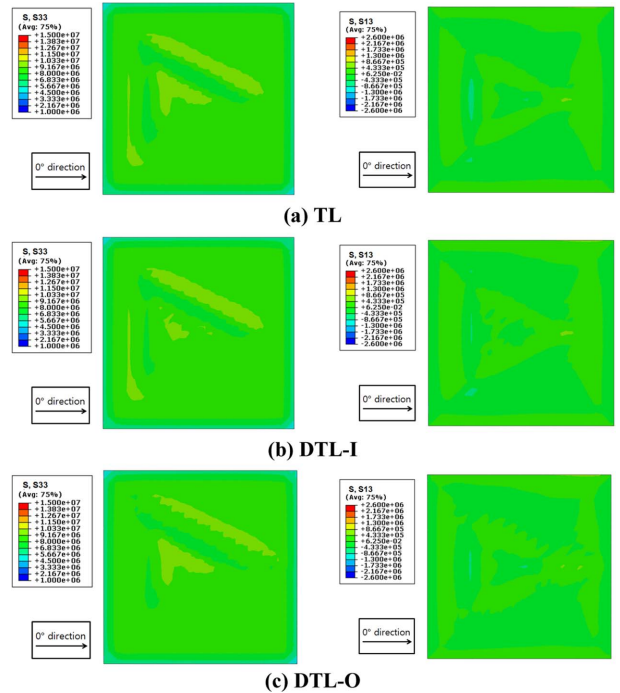


Fig. 10. Maximum out-of-plane residual stress distributions (σ_{33} and σ_{13}) of composite layer at the interface between FSSs and composites in TL type FSSs embedded hybrid composites ($[\pm 45]_4$)

Table 6. Maximum residual stresses of epoxy, polyimide, copper of CL type FSSs (MPa) and D.F.I. of E-glass/epoxy composite

(a) CL

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0]_8$	139.5	8.969	22.57	0.026
$[0/90]_4$	136.3	8.877	23.59	0.174
$[\pm 45]_4$	138.8	9.865	21.25	0.192
$[0/\pm 45/90]_2$	138.0	9.035	23.98	0.160

(b) DCL-I

Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0]_8$	139.3	9.365	25.85	0.032
$[0/90]_4$	137.1	9.238	25.32	0.197
$[\pm 45]_4$	138.9	9.605	25.3	0.208
$[0/\pm 45/90]_2$	138.7	9.351	25.66	0.161

(c) DCL-O

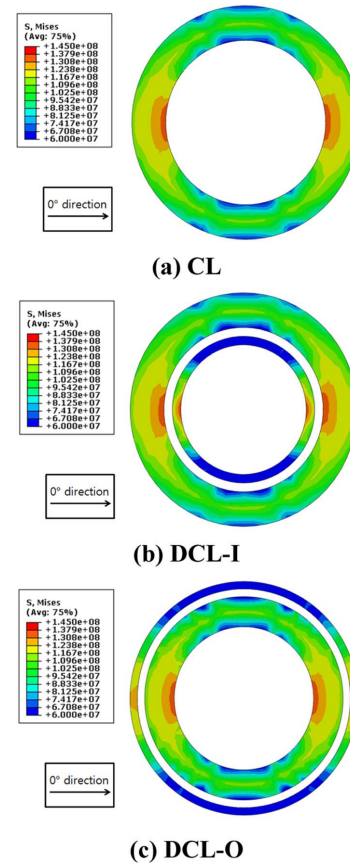
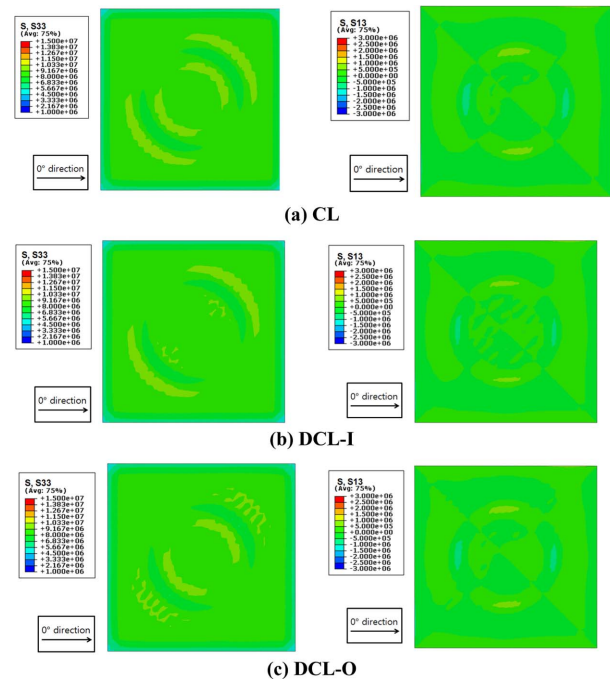
Stacking sequence	Max Von Mises stress (MPa)			D.F.I.
	Copper	Polyimide	Epoxy	
$[0]_8$	139.0	9.865	21.25	0.040
$[0/90]_4$	136.7	9.874	19.60	0.193
$[\pm 45]_4$	138.0	9.758	19.79	0.215
$[0/\pm 45/90]_2$	138.4	10.030	19.55	0.157

알 수 있는 D.F.I. 값은 $[\pm 45]_4$ 적층에서 최댓값을 나타냈고, 층간 분리와 관련이 높은 층간 응력(σ_{33} , σ_{13}) 분포는 Fig. 10과 같다. E-glass/Epoxy 복합재료 D.F.I. 값은 1에 도달하지 않아 층간 분리 현상이 발생하지 않기 때문에 하이브리드 복합재료의 강도도 안정적이다.

CL, DCL-I, DCL-O의 Copper FSS와 Polyimide 필름, Epoxy 수지의 등가 응력 결과복합재료의 D.F.I. 값을 정리하여 Table 6에 나타내었다. CL, DCL-I, DCL-O의 Copper FSS 잔류응력은 다른 종류의 Loop 종류의 FSS처럼 $[0]_8$ 에서 최대 값을 가진다. 최대 잔류응력은 $[0]_8$ 적층으로 각각의 응력분포는 Fig. 11과 같다. 복합재료의 D.F.I. 값은 0.3보다 낮은 값들로, 복합재료와 FSS 경계 면에서의 층간 분리 현상은 일어나지 않는다. 또한 CL 종류 FSS들에 대하여 D.F.I.는 공통적으로 $[\pm 45]_4$ 적층에서 최댓값 나타났고, 이 때 층간 분리와 관련이 높은 층간 응력(σ_{33} , σ_{13})의 분포를 각각의 모델에 대하여 Fig. 12에 나타내었다.

Loop 종류의 FSS가 포함된 하이브리드 레이돔 모델들의 Copper FSS의 잔류응력과 E-glass/Epoxy의 D.F.I. 값을 Fig. 13에 나타내었다.

Copper FSS의 등가응력은 TL 종류의 FSS가 SL FSS나 CL

**Fig. 11.** Maximum Von Mises stress distribution of unit cells of copper CL type FSSs**Fig. 12.** Maximum out-of-plane residual stress distributions (σ_{33} and σ_{13}) of composite layer at the interface between FSSs and composites in CL type FSSs embedded hybrid composites ($[\pm 45]_4$)

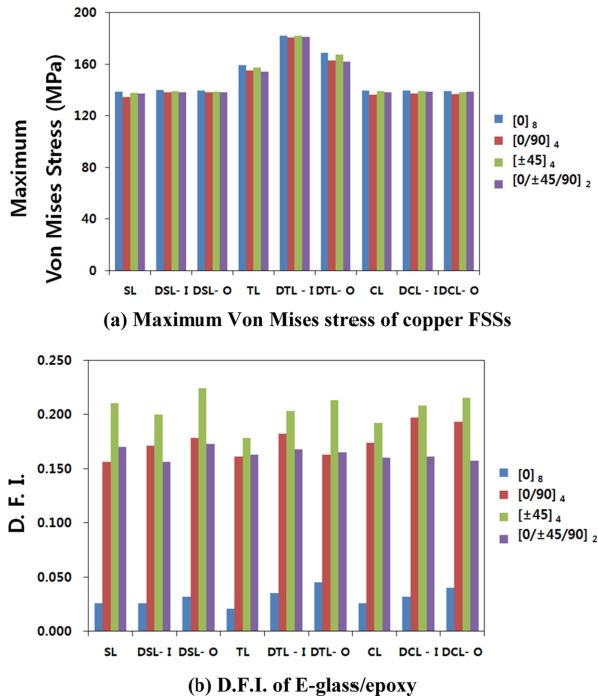


Fig. 13. Comparisons of residual stresses in copper FSS and D.F.I. of E-glass/epoxy with different stacking sequences

FSS보다 큰 값을 가지며, 이는 TL 종류의 꼭지점 부에서 SL, CL 종류의 FSS보다 응력이 높게 발생하기 때문이고, 복합재료 적층각에 따라 비교하면 일 방향 적층인 $[0]_8$ 에서 가장 높은 값을 가진다. Copper FSS는 등가응력의 크기는 복합재료의 적층각보다 FSS의 형상이 영향 성이 크다.

E-glass/Epoxy의 D.F.I. 값은 FSS의 종류보다 복합재료의 적층각의 영향이 크며, $[\pm 45]_4$ 적층에서 최댓값을 보였다. 이에 따라서 복합재료 적층이 $[\pm 45]_4$ 와 같은 앵글플라이일 때 층간 분리 현상이 발생할 가능성이 높다고 예상된다. 그러나 $[\pm 45]_4$ 적층 각 일 때도 D.F.I. 최대 값이 1보다 작으므로, 층간 분리 현상이 일어날 가능성이 작다.

3.2 전자기장해석 결과

FSS가 결합된 복합재료에 대하여 동시 경화 후 발생하는 잔류응력과 그로 인한 FSS 단위요소의 변형이 전파 차단특성에 미치는 변화를 예상하였다. 각각의 Loop 종류의 FSS 단위요소에 대하여 FSS가 변형되기 전 초기 모델과 잔류응력으로 FSS가 변형된 모델들을 복합재료의 적층 변화에 따라 비교하였다.

FSS가 변형되지 않은 초기 모델의 전파차단 특성이 나타나는 공진주파수를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14(a), (b), (c)는 순서대로 SL, TL, CL 종류의 공진주파수이다. Table 5는 초기 모델의 전파 차단특성이 나타나는 공진주파수를 정리한 것이다.

Loop가 단일구조일 경우에 대하여 공진이 한 번 발생하

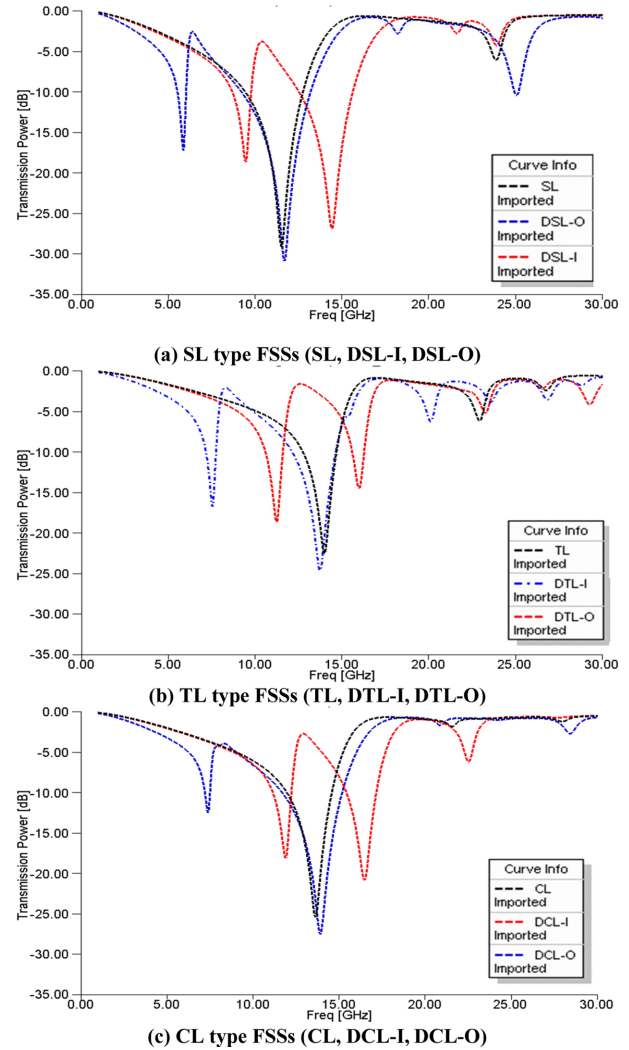


Fig. 14. Transmission characteristics of loop types FSSs

고 이중 구조가 적용되면 Loop에 대하여 공진이 두 번 발생한다. 단일 Loop의 경우 전파 투과특성이 나타나도록 설계한 목표 주파수 대역에서만 공진이 발생하고, 이중 Loop가 되면 두 개의 공진이 발생한다. 즉, 두 개의 공진이 차단 대역이 되며 두 공진 사이 부분이 투과 대역이 된다. Loop를 안쪽방향으로 추가한 DSL-I, DTL-I, DCL-I들은 단일 Loop 구조보다 공진주파수가 낮은 대역과 높은 대역에서 공진이 발생하였다. 안쪽방향으로 추가된 DSL-I, DTL-I, DCL-I와 다르게 반대방향으로 추가된 DSL-O, DTL-O, DCL-O는 단일 Loop 구조의 공진주파수보다 낮은 대역과 단일 구조의 공진주파수와 비슷한 대역에서 공진이 발생하였다.

Loop FSS는 Unit cell의 설계변수(간격, 크기, 너비)가 동일하더라도 형상이나 Loop간 간격에 대하여 투과특성이 다양하게 변화하기 때문이다.

Table 8은 SL 종류의 FSS가 결합된 복합재료 구조가 잔류응력으로 FSS가 변형된 경우에 대하여 예측한 공진주파수를 정리한 것이다.

Table 7. Resonant frequencies of loop type FSS embedded composite structures

Type	Resonant frequency (GHz)		
	SL	TL	CL
Single Loop	11.61	14.68	13.64
Double Loop Inner	9.45	11.24	11.89
	14.44	16.00	16.46
Double Loop Outer	5.87	7.56	7.38
	11.69	13.76	13.92

Table 8. Resonant frequencies of deformed SL type FSS embedded composite structures by residual stresses

Stacking sequence	Resonant frequency (GHz)		
	SL	DSL-I	DSL-O
Initial model	11.61	9.45	5.87
		14.44	11.69
[0] ₈	11.56	9.40	5.97
		14.27	11.67
[0/90] ₄	11.69	9.42	6.04
		14.63	11.73
[±45] ₄	11.30	9.13	5.93
		14.52	12.00
[0/±45/90] ₂	11.71	9.52	5.78
		14.38	11.73

잔류응력으로 변형되지 않은 모델을 Initial Model, 잔류응력으로 변형된 구조의 전파 차단특성은 복합재료 적층각에 따라 [0]₈, [0/90]₄, [±45]₄, [0/±45/90]₂로 분류하였으며, TL과 CL FSS들의 공진주파수에도 Table 8과 같은 방식으로 적용하였다.

잔류응력으로 인한 변형은 공진주파수의 변화를 일으킨다. 공진주파수가 초기모델에 비하여 가장 많이 변한 적층은 SL에서는 [±45]₄ 모델이며 변화량은 0.41 GHz이다. DSL-I와 DSL-O는 [±45]₄ 적층에서 공진주파수의 변화가 가장 컸으며, DSL-I에서 첫 번째 공진이 발생하였을 때 변화량이 0.32 GHz, DSL-O는 두 번째 공진의 발생하였을 때 0.31 GHz 만큼 변화였다.

TL, DTL-I, DTL-O FSS를 포함한 하이브리드 구조물의 설계 공진주파수와 변형된 하이브리드 모델의 공진주파수를 Table 9에 나타내었다. TL은 잔류응력을 받지 않은 경우와 비교해보았을 때 [0]₈ 적층에서 공진주파수의 변화가 0.13GHz로 최대로 변화하였다. DTL-I는 [0/90]₄ 적층에서 두 번째 공진주파수가 0.12 GHz 가장 많이 변화하였으며, DSL-O는 [0]₈ 적층에서 첫 번째 공진주파수가 0.09 GHz 만큼 변화하였다.

CL, DCL-I, DCL-O FSS가 결합된 하이브리드 구조물의 변형 전,후의 공진주파수 결과들을 Table 10에 정리하였다. CL

Table 9. Resonant frequencies of deformed TL type FSS embedded composite structures by residual stresses

Stacking sequence	Resonant frequency (GHz)		
	TL	DTL-I	DTL-O
Initial model	14.68	11.24	7.56
		16.00	13.76
[0] ₈	14.55	11.15	7.65
		15.92	13.76
[0/90] ₄	14.61	11.36	7.54
		15.95	13.61
[±45] ₄	14.63	11.29	7.52
		15.96	13.70
[0/±45/90] ₂	14.59	11.28	7.58
		16.01	13.70

Table 10. Resonant frequencies of deformed CL type FSS embedded composite structures by residual stresses

Stacking sequence	Resonant frequency (GHz)		
	CL	DCL-I	DCL-O
Initial model	13.64	11.89	7.38
		16.46	13.92
[0] ₈	13.76	11.56	7.94
		16.44	14.03
[0/90] ₄	13.64	11.96	7.55
		16.47	13.94
[±45] ₄	13.66	11.74	7.24
		16.40	14.04
[0/±45/90] ₂	13.68	11.88	7.24
		16.45	13.99

의 설계 공진주파수는 13.64 GHz이었지만, [0]₈ 적층에서 공진주파수가 0.08 GHz 만크이 다른 적층에 비하여 높았다. DCL-I와 DCL-O는 [0]₈ 적층에서 공진주파수가 가장 많이 변화하였는데, DSL-I에서 첫 번째 공진주파수에서 0.33 GHz 변화였고, DSL-O에서 첫 번째 공진주파수에서 0.54 GHz 만큼 변화였다.

Loop FSS는 잔류응력으로 FSS가 변형되었을 경우, Loop 종류와 적층각에 따라 전파투과특성이 발생하는 공진주파수의 변화 값이 다르다. 이에 따라 전파적인 입장에서 잔류응력은 FSS를 포함한 하이브리드 레이돔을 제작 시 고려해야 할 요소이며, 공진주파수의 변화 정도는 변형된 FSS의 변위에 영향이라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 Loop 종류의 FSS와 복합재료를 접합한 하

이브리드 레이돔의 제작 과정에서 발생할 수 있는 잔류응력과 그에 따른 영향으로 발생할 수 있는 문제점으로 FSS의 파손, 복합재료의 층간 분리, 변형으로 인한 전파 투과 특성의 변화의 여부를 확인하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

Copper FSS의 잔류응력은 Loop 종류에 따라서 TL 종류의 FSS가 SL과 CL의 경우보다 높은 응력을 가지는데 이는 삼각형 형상의 꼭지점 부에 높은 응력이 나타나기 때문이다. 복합재료의 적층각에 따라서 일 방향 적층인 $[0]_8$ 에서 가장 크게 나타나지만, FSS의 단위요소의 형상과 적층각에서 잔류응력에 대한 영향 성을 비교하면 단위요소의 형상의 영향이 크다.

하이브리드 구조의 D.F.I.는 FSS 단위요소 종류보다 복합재료의 적층각에 대하여 영향을 크게 받으며, $[\pm 45]_4$ 적층각에서 최대 D.F.I. 값을 가지나 층간 분리 현상은 발생하지 않는다.

잔류응력으로 하이브리드 레이돔이 변형되면 하이브리드 모델의 공진주파수는 설계 주파수에서 변화한다. Loop 종류에 따라서 SL모델에서는 $[\pm 45]_4$ 적층이 공진주파수의 변화가 크며, TL과 CL모델에서 $[0]_8$ 적층에서 공진주파수의 변화가 가장 크게 일어나며, 3가지 종류 중에서 TL FSS를 포함한 하이브리드 구조가 가장 변화가 적다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jenn, D.C., "Radar and Laser Cross Section Engineering,

- American Institute Aeronautics and Astronautics Inc., Washington, DC, 1995, pp. 1-13.
2. Chen, H., Hou, X., and Deng, L., "Design of Frequency-selective Surfaces Radome for a Planar Slotted Waveguide Antenna," *IEEE Trans. Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, No. 3, 2008, pp. 1231-1233.
3. Wahid, M., and Morris, S.B., "Band Pass Radomes for Reduced RCS," *IEE Colloquium on. Antenna Radar Cross-Section*, May 7, 1991 pp. 4/1-4/4.
4. Munk, B.A., *Frequency Selective Surfaces : Theory and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
5. 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.
6. 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.
7. Seo, I.S., Kim, J.K., Choi, I., and Lee, D.K., "The Effects of Bonding Characteristics of FSS in Hybrid Structure," *Proceeding of the Korea Institute of Military Science and Technology conference 2010*, JeJu, Korea, 2010, pp.581-584.
8. Kim, K.Y., Kang, K.T., Chun, H.J., Lee, K.Y., Hong, I.P., and Lee, M.K., "Thermal Residual Stresses in the Frequency Selective Surface Embedded Composite Structures and Design of Frequency Selective Surface," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 37-44.
9. Lee, K.Y., Jeong, Y.R., Hong, I.P., Lee, M.G., Chun, H.J., and Yook, J.G., "Simple Design Method of FSS Radome Analysis Using Equivalent Circuit Model," *IEICE Electronics Express*, Vol. 8, No. 23, 2011, pp. 2002-2009.