

주파수 선택막이 삽입된 복합재 평판의 잔류 열응력과 스프링 백 효과

박 경 미¹ · 서 윤 석¹ · 전 흥 재^{1*} · 홍 익 표² · 박 용 배³ · 김 윤 재⁴

¹연세대학교 기계공학과, ²공주대학교 정보통신공학부, ³아주대학교 전자공학과, ⁴국방과학연구소

Thermal Residual Stresses and Spring back Effects on the Frequency Selective Surface Embedded Composite Laminates

Kyoung-Mi Park¹, Yun-Seok Seo¹, Heung-Jae Chun^{1*}, Ic-Pyo Hong², Yong-Bae Park³ and Yun-Jae Kim⁴

¹School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

²School of Information Communication Engineering, Kongju National University, Cheonan, 330-717, Korea

³School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, 443-749, Korea

⁴Agency for defense development, Daejeon, 305-152, Korea

Abstract

The residual stresses occur in the Frequency Selective Surface(FSS) embedded hybrid composite structures after co-curing due to mismatch among the coefficient of thermal expansions and stiffness values between the FSS and composite materials. The spring backs occur due to these residual stresses. Therefore, in this paper, the spring-backs caused by residual stresses in FSS embedded composite structures were studied with considering effect of symmetric and unsymmetric stacking sequence of composite laminates.

Keywords : frequency selective surface, residual stress, spring back

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 비강도 및 비강성이 기존에 많이 이용되는 철이나 알루미늄 등의 단일 재료에 비해 크게 높고 우수한 피로특성 및 치수안정성 등의 재료 특성을 지녀 고성능을 요구하는 우주항공, 자동차 등의 산업에서 널리 사용되고 있다. 그 중 유리섬유는 기계적, 전자기적 특성이 뛰어나 레이더의 외부 열이나 기계적인 충격 등으로부터 보호하는 레이돔(Radome)의 재료로 쓰인다. 레이더는 송신부에서 보낸 전자기파가 표적에서 반사되어 수신안테나에 감지되어 표적의 거리와 위치를 알아내는 장치이다. 전자기파에 탐지되는 정도를 나타내는 Radar Cross Section(RCS) 감소 기술은 스텔스 기술의 한 분야로 국방 분야에서 항공기, 미사일, 전함과 같은 무기체계의 생존성을 좌우하는 핵심기술 분야로 인식되고 있다(Jenn, 1991). 따라서 입사되는 특정대역의 전자기파를 투

과시킬 수 있는 주파수 선택 기능을 레이돔에 적용하여, 기존의 레이돔에 전자기파를 선택적으로 투과 또는 반사시킬 수 있는 주파수 선택적 투과구조(Frequency Selective Surface: FSS)의 기능을 적용한 하이브리드 레이돔의 개발이 필요하다. 하이브리드 레이돔은 FSS와 복합재료로 구성되어 적의 탐지 레이더로부터 입사하는 전자기파를 흡수하며 구조적으로 안전하다는 장점을 가지고 있어 각국에서 활발히 연구되었다(Chen *et al.*, 2008; Wahid *et al.*, 1991; Munk, 2000). 국내는 Dipole slot의 배열주기와 길이, 폭 변화가 FSS의 전자기파 투과 특성에 미치는 영향과 하이브리드 레이돔의 구성 재료간의 접합능력을 향상시키는 방법이 연구되었다(Lee *et al.*, 2006; 2009). 하이브리드 레이돔의 동시 경화과정에서 경화 후 성형온도인 고온에서 상온으로 온도가 내려가면서 재료간의 열팽창계수 차이로 열 잔류응력이 발생한다. 이러한 열 잔류응력은 구조적으로 FSS의 국부 항복을 일으키거나 층간

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-4827; E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr
Received November 4 2013; Revised November 30 2013;
Accepted December 2 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분리 현상을 야기할 수 있다(Lee, 2000). 이에 따라 하이브리드 구조에 대한 접합특성연구, 접합과정에서 발생하는 잔류응력으로 인한 층간분리(Delamination)와 그에 따른 FSS의 단위 셀이 변형이 하이브리드 구조 전파투과특성에 미치는 연구가 시행되었다(Lee *et al.*, 2010; Chun *et al.*, 2011; 2013). 그러나 잔류 열응력으로 하이브리드 구조의 구조 안정성에 영향을 미칠 수 있는 스프링 백(Spring-back) 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 동시 경화접합 방법과정에서 온도 변화가 발생할 때 하이브리드 레이돔에서 복합재료 스킨의 적층 각의 대칭성에 따른 잔류 열응력과 스프링 백 효과에 대하여 연구하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 FSS 단위요소

FSS의 단위요소는 Jerusalem cross, Square loop, Hexagon element, Ring, N-pole 등이 있다. 이 중에서 N-pole 종류 중 하나인 Cross dipole을 기본 요소로 설정하였다(Munk, 2000). Fig. 1은 연구에 사용된 Cross dipole FSS의 Unit cell이며, 이에 대한 치수는 Table 1과 같다.

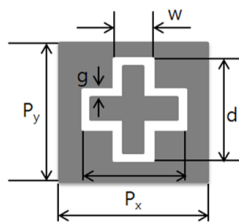


Fig. 1 Unit cell of cross dipole FSS showing design parameters

Table 1 Values of design parameter for cross dipole FSS

Parameters	x	y	w	d	g
Initial value(mm)	9.06	9.06	3	7.55	0.5

2.2 하이브리드 복합재료 모델

하이브리드 복합재료 모델은 FSS(구리, 폴리이미드 필름)와 복합재료 스킨(E-glass/epoxy)로 구성된다. FSS에서 구리의 빈 부분은 에폭시 레진이 채워져 있는 것으로 가정하였고, FSS의 윗부분과 아래에 복합재료 유전체를 접합시켰다. 복합재료의 두께는 위와 아래 값이 동일하게 8ply로 적층하여 1.20mm, FSS의 두께는 18 μ m, 폴리이미드 필름의 두께는 40 μ m이다. UG NX 7.0(Siemens PLM Software)으로 3D

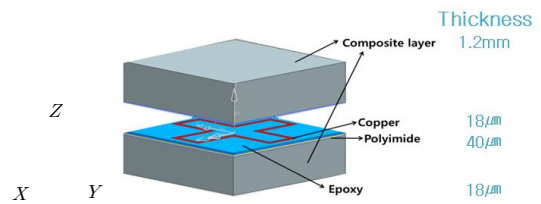


Fig. 2 3D model of cross dipole FSS embedded hybrid composite

Table 2 Mechanical properties of copper FSS, polyimide film and epoxy

Property	Copper FSS	Polyimide film	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 3 Mechanical and electromagnetic properties of E-glass/epoxy composite

Property	E-glass/epoxy
Mechanical properties	
Longitudinal modulus	38.6GPa
Transverse modulus	8.27GPa
In-plane shear modulus	2.3GPa
Poisson's ratio	0.26
Longitudinal coefficient of thermal expansion	6.3(10 ⁻⁶ /°C)
Transverse coefficient of thermal expansion	20(10 ⁻⁶ /°C)
Transverse tensile strength	65MPa
Out-of-plane shear strength	40MPa
Electromagnetic properties	
Dielectric Constant	4.35
Loss tangent	0.0032

모델링하였다. Fig. 3은 Cross dipole FSS을 기본요소 가지는 하이브리드 복합재료 구조의 모델의 3D 모델이다. 각 구성 재료들의 물성은 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

2.3 구조해석

FSS가 삽입된 하이브리드 복합재료에 대하여 구조해석 시 물레이션은 ABAQUS 6.10(Dassult Systems SIMULIA, Inc.)을 사용하였다.

각 구성 요소는 솔리드 요소로 하였으며, 복합재료 스킨의 적층각의 영향을 확인하기 위하여 선택적 투과막(Frequency Selective Surface)을 중심으로 위와 아래의 복합재료 스킨이 대칭구조([0]₈-FSS-[0]₈, [0/90]₄-FSS-[0/90]₄, [±45]₄-FSS-[±45]₄, [0/±45/90]₂-FSS-[0/±45/90]₂)와 비대칭 구조의 조합 3가지([0]₈-FSS-[0/±45/90]₂, [0/90]₄-FSS-[0/±45/90]₂,

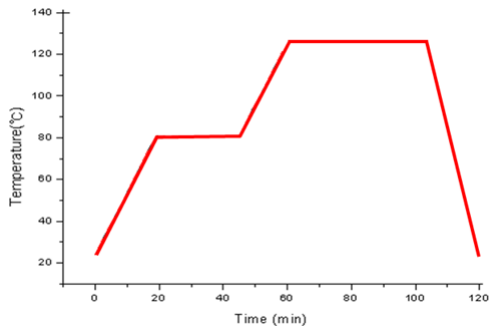


Fig. 3 Cure cycle used to co-cure E-glass/epoxy composite and FSS

[±45]₄-FSS-[0/±45/90]₂의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 자유열팽창 조건을 구현하기 위해 하이브리드 구조 윗면(X-Y면)의 한 끝점에서 모든 방향에 대하여 구속하였다.

하중조건은 경화가 된 이후, 상온으로 냉각되는 과정을 가정하기 위하여 Fig. 3의 E-glass/epoxy 복합재의 경화 사이클에서와 같이 경화온도인 120°C에서 상온(25°C)이 되도록 설정하였다.

2.4 복합재료 층간분리 파손기준

E-glass/epoxy 복합재료의 층간분리 파손을 위하여 식 (1)과 같이 Delamination failure index(D.F.I.)를 사용하였다(Chun *et al.*, 2011). D.F.I. 값이 1을 넘으면 층간 분리가 발생한다고 가정하였다.

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

식 (1)에서 σ_{33} 과 σ_{13} 은 면의 층간 응력을, F_{3T} 와 F_{13} 은 각각 면의 인장강도와 전단강도를 나타낸다.

3. 결 과

하이브리드 복합재료 구조에서 발생하는 잔류 열응력과 그로 인하여 발생할 수 있는 구조적 문제점인 복합재료의 층간 분리현상, 스프링 백 효과를 확인하기 위하여 구조해석을 수행하였다.

Table 4는 복합재료의 적층 각이 대칭구조인 하이브리드 구조에서 FSS의 구성요소(구리, 폴리이미드, 에폭시)들의 등가 응력 결과이다.

Table 4 Maximum Residual stresses in epoxy, polyimide, copper of cross dipole(MPa) with symmetry stacking sequence structures

Stacking sequence	Maximum Von Mises stress(MPa)		
	Copper	Polyimide	Epoxy
[0] ₈ -FSS-[0] ₈	138.9	48.77	13.28
[0/90] ₄ -FSS-[0/90] ₄	134.1	40.96	12.888
[±45] ₄ -FSS-[±45] ₄	135.6	47.21	12.78
[0/±45/90] ₂ -FSS-[0/±45/90] ₂	134.3	44.67	13.01

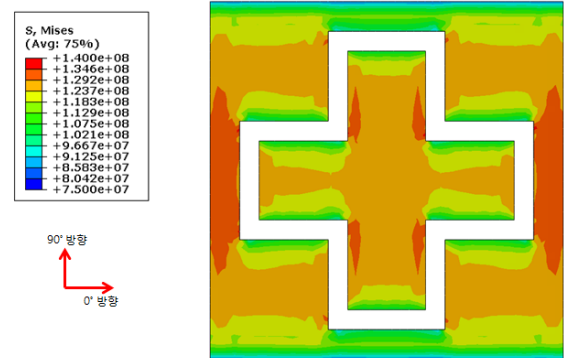


Fig. 4 Maximum Von Mises stress distribution of unit cell of cross dipole copper with symmetry stacking sequence structure([0]₈-FSS-[0]₈)

FSS의 구성요소들 중에서 구리 FSS의 등가응력은 모든 대칭구조 적층일 때 구리의 강도(350MPa)보다 낮은 값을 보여 구리 FSS의 파손가능성이 낮음을 확인하였다. 가장 높은 값을 보인 [0]₈-FSS-[0]₈ 적층인 경우의 응력분포는 Fig. 4와 같다.

Table 5는 앞서 해석에 적용한 대칭구조 적층모델([0]₈-FSS-[0]₈, [0/90]₄-FSS-[0/90]₄, [±45]₄-FSS-[±45]₄, [0/±45/90]₂-FSS-[0/±45/90]₂)과 다르게 복합재료 하이브리드 구조에 대하여 비대칭으로 적층을 한 3가지 조합([0]₈-FSS-[0/±45/90]₂, [0/90]₄-FSS-[0/±45/90]₂, [±45]₄-FSS-[0/±45/90]₂)의 하이브리드 구조의 FSS 구성요소(구리, 폴리이미드, 에폭시)의 등가 응력 결과이다.

구리의 잔류응력은 대칭구조인 모델들과 유사한 값을 보여주나, 적층구조에서 잔류응력이 가장 높게 나타난 [0]₈ 적층 각이 포함된 [0]₈-FSS-[0/±45/90]₂에서 다른 비대칭 보다 높은 값을 보여주어 구리의 잔류응력은 적층각의 영향을 받는 것으로 나타났다. 비대칭 구조의 구리 FSS에서 가장 높은 잔류 응력을 보인 [0]₈-FSS-[0/±45/90]₂ 모델의 응력분포는 Fig. 5와 같다.

Table 6에는 FSS와 맞닿는 복합재료 층의 윗면과 아랫면에 대한 σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 과 층간분리현상을 나타내는 D.F.I.를 나타내었다.

Table 5 Maximum Residual stresses of epoxy, polyimide, copper of cross dipole(MPa) with asymmetry stacking sequence structures

Stacking sequence	Maximum Von Mises stress(MPa)		
	Copper	Polyimide	Epoxy
$[0]_8\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	139.1	43.47	13.55
$[0/90]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	135.7	42.85	12.93
$[\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	138.5	45.29	12.83

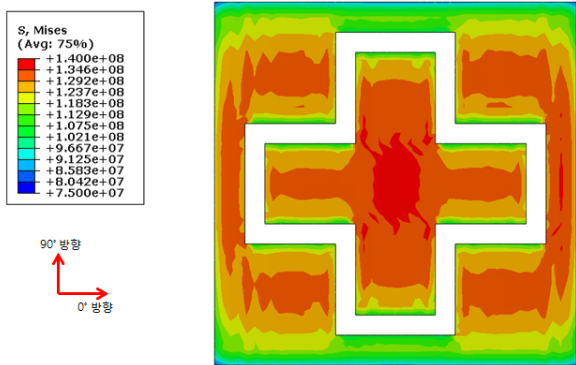


Fig. 5 Maximum Von Mises stress distribution of unit cell of dipole copper with asymmetry stacking sequence structure ($[0]_8\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$)

복합재료의 상하부의 재료 주방향 면내 응력 σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 는 각각의 적층각별로 $[0]_8\text{-FSS-}[0]_8$ 는 σ_{11} , $[0/90]_4\text{-FSS-}[0/90]_4$ 는 σ_{22} , $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4$ 에서는 σ_{12} , $[0/\pm 45/90]_2\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 구조는 σ_{11} 가 가장 높게 나타났으며, 잔류 응력에 대하여 최댓값을 나타낸 $[0/\pm 45/90]_2\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 적층 모델의 응력분포를 Fig. 6에 나타내었다. 또한 E-glass/epoxy 복합재료의 D.F.I. 값은 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4$ 적층모델에서 최댓값 0.153을 나타냈으며, D.F.I. 값이 가장 높은 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4$ 적층의 층간응력(σ_{33} , σ_{13})분포는 Fig. 7과 같다. Cross dipole FSS의 형태의 해석에 고려된 복합재료의 적층에 대하여 E-glass/epoxy 복합재료의 D.F.I. 값이 1에 도달하지 않으므로 복합재료 간의 층간분리현상이 발생할 가능성은 낮다.

Table 7에는 비대칭으로 적층한 하이브리드 구조에서 FSS와 맞닿는 복합재료 층의 윗면과 아랫면에 대한 재료 주 방향 면내 응력 σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 의 최댓값과 층간분리현상을 나타내는 D.F.I를 정리하였다.

σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 는 FSS를 기준으로 복합재료는 적층 각이 상하부에 따라 비대칭으로 적층하였기 때문에 상부와 하부의 응력 차가 나타났으며, 각각의 비대칭 구조에서 상부 복합재료 σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 값은 대칭구조의 결과값처럼 $[0]_8\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 는 σ_{11} , $[0/90]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 는 σ_{22} , $[\pm 45]_4\text{-FSS-}$

Table 6 Maximum Residual stresses(MPa) and D.F.I. of E-glass/epoxy composite with symmetry stacking sequence structures

Stacking sequence		Maximum stress(MPa)			D.F.I.
		σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	
$[0]_8\text{-FSS-}[0]_8$	Top	4.06	1.36	2.15	0.036
	Bottom	3.90	1.49	1.97	
$[0/90]_4\text{-FSS-}[0/90]_4$	Top	1.59	2.87	2.11	0.145
	Bottom	1.65	2.44	1.91	
$[\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4$	Top	1.77	1.69	1.80	0.153
	Bottom	1.82	1.65	2.12	
$[0/\pm 45/90]_2\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	Top	6.53	3.10	3.27	0.147
	Bottom	7.14	3.17	3.12	

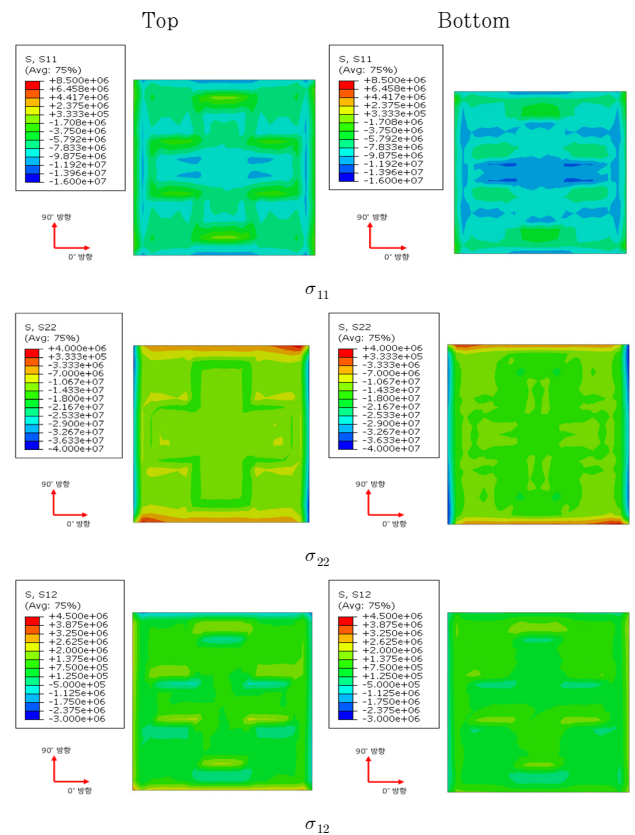


Fig. 6 Maximum In-plane residual stress distributions (σ_{11} , σ_{22} and σ_{12}) of composite layer at the interface in cross dipole FSS embedded hybrid composite with symmetry stacking sequence structure ($[0/\pm 45/90]_2\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$)

$[0/\pm 45/90]_2$ 에서는 σ_{12} 에서 높은 값을 나타낸다. 각 방향의 응력에 대하여 최댓값을 나타낸 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 적층 모델의 응력분포를 Fig. 8에 나타내었다.

E-glass/epoxy 복합재료의 D.F.I. 값은 1을 넘지 않아 층간분리가 발생하지 않았음을 확인하였고, $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 모델에서 최대 D.F.I. 값 0.149를 보였는데, 이 값은 복합재료 스킨 상부의 $[45]_4$ 적층 각의 영향으로 비대칭 구조에

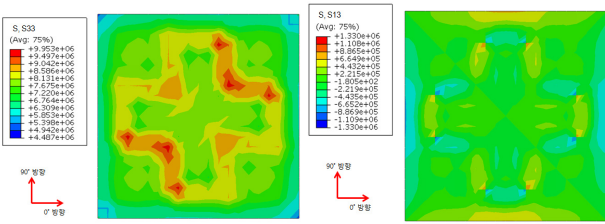


Fig. 7 Maximum out-of-plane residual stress distributions (σ_{33} and σ_{13}) of composite layer at the interface in cross dipole FSS embedded hybrid composite with symmetry stacking sequence structure $[(\pm 45)_4\text{-FSS}-(\pm 45)_4]$

Table 7 Maximum Residual stresses(MPa) and D.F.I. of e-glass/epoxy composite with assymetry stacking sequence structures

Stacking sequence	Maximum stress (MPa)			D.F.I.	
	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}		
$[0]_8\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$	Top	4.65	2.69	3.12	0.146
	Bottom	5.76	6.22	5.29	
$[0/90]_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$	Top	2.26	2.32	1.80	0.149
	Bottom	5.17	3.25	3.51	
$[\pm 45]_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$	Top	3.54	3.78	3.88	0.145
	Bottom	6.25	3.62	4.24	

서 가장 높게 나타난다. 비대칭 구조에서 D.F.I. 값이 가장 높은 $[\pm 45]_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$ 모델의 층간응력(σ_{33} , σ_{13}) 분포는 Fig. 9와 같다.

본 연구에서 스프링 백은 하이브리드 구조에서 두께방향으로의 변위 량의 값으로, 두께방향으로의 변위 량의 최대값에 대하여 Unit cell의 폭으로 나누어 정규화하였다.

Table 8은 스킨을 대칭적으로 적층한 하이브리드 구조의 정규화 스프링 백 값이다. 각 복합재료 적층 각에 따라 $[\pm 45]_4\text{-FSS}-[\pm 45]_4$ 에서 가장 큰 값을 나타내었다. 스프링 백이 가장 높게 나타난 $[\pm 45]_4\text{-FSS}-[\pm 45]_4$ 의 높이방향의 변위분포를 Fig. 10에 나타내었다.

Table 9는 스킨을 비대칭적으로 적층한 구조의 정규화 스프링 백 값이다. 각 복합재료 적층 각에 따라 비교해 보았을 때, 상부 스킨의 적층 각 $[\pm 45]_4$ 의 영향으로 $[\pm 45]_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$ 에서 가장 큰 값을 나타내었다. 스프링 백이 가장 높게 나타난 $[\pm 45]_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$ 의 높이방향의 변위분포를 Fig. 11에 나타내었다.

구리 FSS의 최대 잔류 열응력, E-glass/epoxy의 D.F.I., 하이브리드 구조의 스프링 백을 복합재료의 적층 각에 따라서 정리하면 Fig. 12와 같다.

구리 FSS의 잔류 열응력은 복합재 스킨이 대칭일 때 $[0]_8\text{-FSS}-[0]_8$, 비대칭은 $[0]_8\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$ 에서 가장 크게 나타난다.

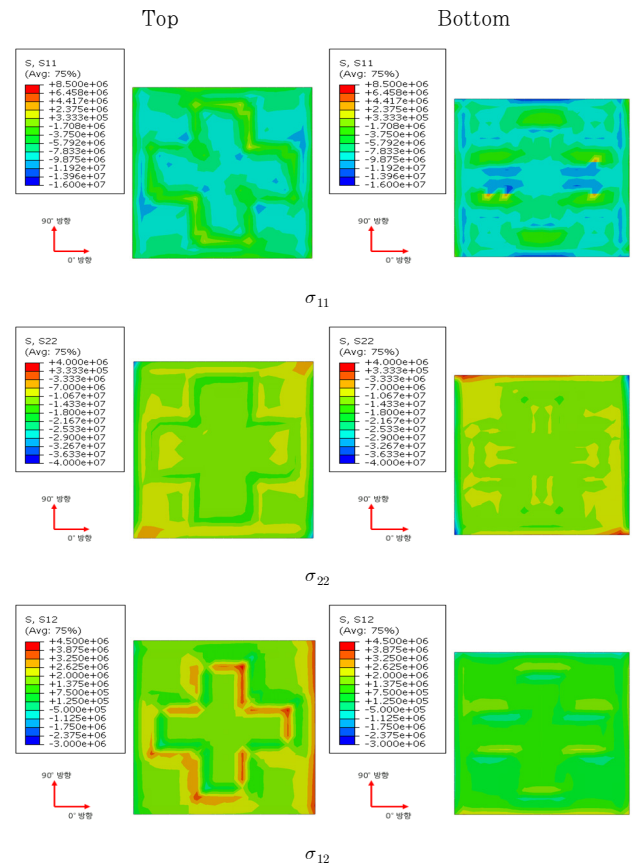


Fig. 8 Maximum In-plane residual stress distributions (σ_{11} , σ_{22} and σ_{12}) of composite layer at the interface in cross dipole FSS embedded hybrid composites with assymetry stacking sequence structure $[(45)_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2]$

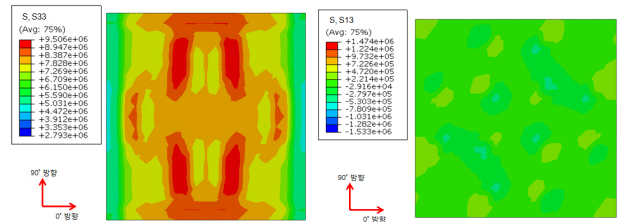


Fig. 9 Maximum out-of-plane residual stress distributions (σ_{33} and σ_{13}) of composite layer at the interface in cross dipole FSS embedded hybrid composite with assymetry stacking sequence structure $[(45)_4\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2]$

Table 8 Normalized spring back of cross dipole FSS embedded hybrid structures with symmetry stacking sequence structures

Stacking sequence	Normalized spring-back($\times 10^{-4}$)
$[0]_8\text{-FSS}-[0]_8$	5.752
$[0/90]_4\text{-FSS}-[0/90]_4$	6.106
$[\pm 45]_4\text{-FSS}-[\pm 45]_4$	6.283
$[0/(\pm 45/90)]_2\text{-FSS}-[0/(\pm 45/90)]_2$	6.116

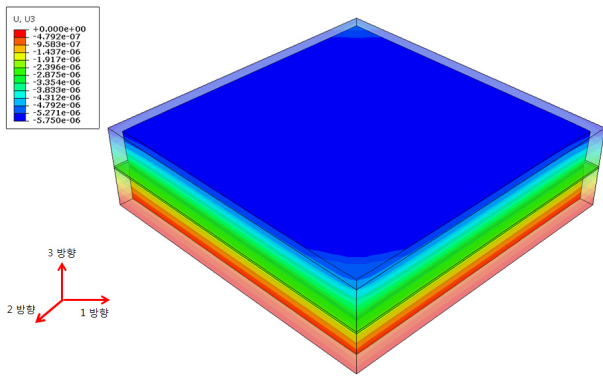


Fig. 10 Maximum deformation in the z-axis FSS embedded hybrid structures with symmetric laminate structure $([\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4)$

Table 9 Normalized spring back dipole FSS embedded hybrid structures in the z-axis with asymmetry stacking sequence structures

Stacking sequence	Normalized spring-back ($\times 10^{-4}$)
$[0]_8\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	6.114
$[0/90]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	6.134
$[\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$	6.345

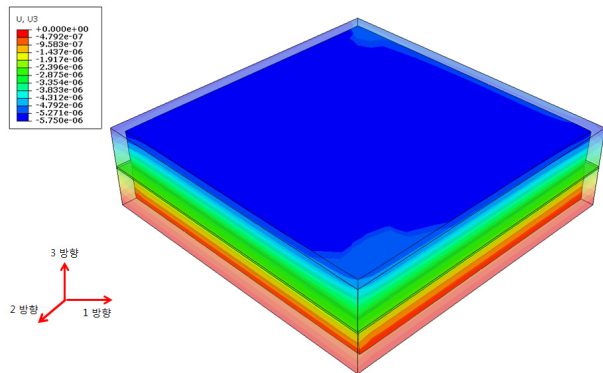
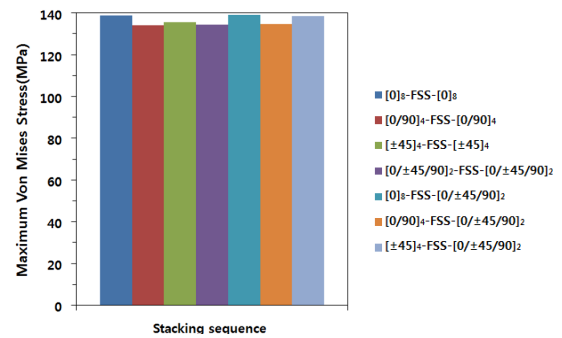


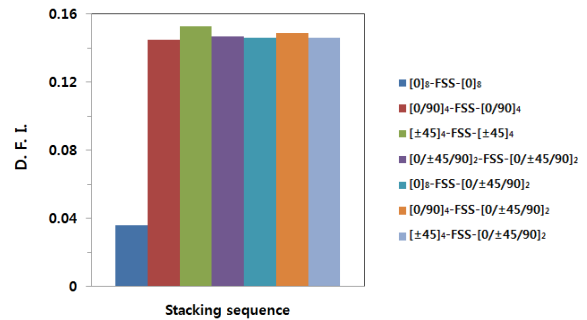
Fig. 11 Maximum deformation in the z-axis FSS embedded hybrid structures with asymmetric laminate structure $([\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2)$

E-glass/epoxy 복합재료의 D.F.I.는 복합재료의 적층에 따라 D.F.I. 값이 변화였다. 스킨이 대칭일 때는 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4$, 비대칭은 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 에서 최대값을 발생하였다. $[\pm 45]_4$ 적층 각이 포함된 구조에서 높은 D.F.I. 값을 보이며, 다른 적층에 비하여 층간 분리현상이 발생할 가능성이 높은 것으로 확인되었다.

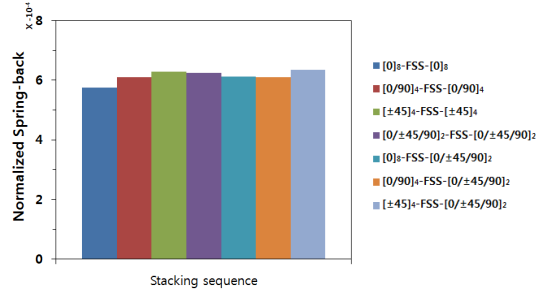
스프링 백의 크기는 대칭은 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[\pm 45]_4$, 비대칭일 때는 $[\pm 45]_4\text{-FSS-}[0/\pm 45/90]_2$ 에서 최대값을 발생하였다. 다른 적층에 비하여 $[\pm 45]_4$ 가 포함된 비대칭 구조에서 가장 높게 나타났다.



(a) Residual stresses of copper FSS



(b) D.F.I.



(c) Normalized Spring-back

Fig. 12 Comparisons of residual stresses, D.F.I. and normalized spring-back in FSS hybrid composites with different stacking sequences

4. 결 론

본 논문에서는 평판인 하이브리드 구조에서 복합재료스킨의 적층 각 방향에 따라서, 동시경화 접합과정 중에서 잔류응력이 발생하고, 그로 인한 복합재료의 층간 분리현상과 스프링 백을 확인하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

층간분리 현상을 나타내는 복합재료의 D.F.I.는 적층각의 영향을 받아서, $[\pm 45]_4$ 적층 모델이 포함된 구조가 높은 값을 나타내었으나, D.F.I.값은 1을 넘지 않아 층간 분리현상은 발생하지 않았다.

구리 등가응력의 경우, 복합재료 스킨을 대칭과 비대칭으로 적층하였을 시 $[0]_8$ 적층 각이 포함된 경우에 대하여 가장 큰 등가응력이 확인되었으나, 구리의 강도보다 낮은 값으로 파손은 발생하지 않는다. 또한 복합재료 스킨의 상하부 잔류

열응력을 비교해 보았을 때 대칭적일 때보다는 비대칭적구조의 상하부의 응력차가 발생하였고, 이러한 잔류 열응력으로 스프링 백 현상이 발생한다. 본 연구에서 발생하는 스프링 백은 $[\pm 45]_4$ 적층 각을 포함하는 $[\pm 45]_4$ -FSS- $[-0/\pm 45/90]_2$ 에서 가장 크게 나타났으나, 그 값은 작고, 구리 FSS에 대한 파손이 발생하지 않으므로 동시 경화접합 과정을 이용하여 하이브리드 구조를 제작하여도 구조적 건전성에 크게 영향을 받지 않으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방파탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Chen, H., Hou, X., Deng, L. (2008) Design of Frequency-selective Surfaces Radome for a Planar Slotted Waveguide Antenna, *IEEE Trans. Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8(3), pp.1231~1233.
- Jenn, D.C. (1995) Radar and Laser Cross Section Engineering, American Institute Aeronautics and Astronautics Inc., Washington, DC, pp.1~13.
- Kim, K.Y., Kang, K.T., Chun, H.J., Lee, K.Y., Hong, I.P., Lee, M.K. (2011) 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*, 24(1) pp.37~44.
- Kim, P.C., Chin, W.S, Lee, D.G., Seo, I.S. (2006) EM Characteristics of the RAS Composed of E-Glass/Epoxy Composite and Single Dipole FSS Element, *Journal of Composite Materials*, 75, pp.601~609.
- Kim, P.C., Lee, D.G. (2009) Improvement of Bonding Characteristics Between the Frequency Selective Surface and E-glass/epoxy Composite, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23, pp.215~227.
- Lee, S.S. (2000) Analysis of Residual Stresses Induced during Adhesion Process of Chip and Leadframe, *Journal of the Computational Structural Engineering*, 13(1), pp.97~103.
- Munk, B.A. (2000), Frequency Selective Surfaces : Theory and Design, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York.
- Park, K.M., Hwang, I.H., Chun, H.J., Hong, I.P., Park, Y.B., Kim, Y.J. (2013) Study on Thermal Residual Stresses and Transmission Characteristics in N-pole Type Frequency Selective Surface Embedded Composite Structures, *Journal of the Computational Structural Engineering*, 26(2), pp.123~130.
- Seo, I.S., Kim, J.K., Choi, I., Lee, D.K. (2010) The Effects of Bonding Characteristics of FSS in Hybrid Structure, *Proceeding of the Korea Institute of Military Science and Technology conference*, pp.581~584.
- Wahid, M., Morris, S.B. (1991) Band Pass Radomes for Reduced RCS, *IEE Colloquium on Antenna Radar Cross-Section*, May 7, pp.4/1~4/4.

요 지

복합재료 사이에 주파수 선택적 투과막(Frequency Selective Surface)을 삽입하여 동시경화 공정을 이용하여 주파수 선택적 투과 기능을 가지는 하이브리드 복합재료를 성형하면 재료들 간의 열팽창 계수와 강성의 차이로 인해 구조 내에 잔류 열응력이 발생하게 되고, 이로 인하여 스프링 백 현상이 발생한다. 따라서 복합재의 적층에 따른 영향을 알아보기 위해 복합재료의 적층각을 선택적 투과막(Frequency Selective Surface)을 중심으로 대칭과 비대칭 적층으로 적용하여 하이브리드 구조의 잔류 열응력을 예측하고, 이에 대한 스프링 백에 대해서 연구하였다.

핵심용어 : 주파수 선택적 투과막, 잔류응력, 스프링 백