

論文

자동섬유적층법을 이용한 열가소성 복합재료 접시형 안테나 반사판 개발

김진봉^{*+}, 김태욱^{*}

Development of a Thermoplastic Composite Parabolic Antenna Reflector using Automated Fiber Placement Method

Jin-Bong Kim^{*+}, Tae-Wook Kim^{*}

ABSTRACT

It is very difficult to make complex 3 dimensional curved-shape composite laminates using the advanced unidirectional composite prepregs. This study shows development process of subscale composite parabolic antenna reflector using unidirectional AS4/PEEK prepreg tapes. The AS4/PEEK thermoplastic composite materials are known to have good thermal and chemical stabilities in addition to their high specific strength and modulus. Various lamination methods were investigated through finite element analyses to make up the laminate design of the reflector. The automated fiber placement method was used to fabricate the reflector. The thermal expansion test using full-bridge strain gage circuits was done to verify the performance of the composite product.

초 록

일방향 섬유로 보강된 고성능 복합재료의 경우 모든 방향에서 곡률을 가지는 구조물의 제작에 용이하지 않다. 본 연구에서는 높은 비강성, 비강도를 가지는 일방향으로 보강된 AS4/PEEK 프리프레그 테이프를 이용한 축소 시제 복합재료 접시형 안테나 반사판의 개발 결과를 보여준다. 개발을 위해서 유한요소법을 통한 적층인자 연구를 통한 저열팽창/등방변형의 반사판 설계기법을 확립하였으며, Fiber Placement System을 통한 자동섬유적층법을 이용하여 접시형 안테나 반사판이 제작되었다. 제작된 반사판은 Full Bridge Circuit의 Strain Gage를 이용한 열변형 실험법으로 열팽창 거동에 대한 실험을 수행하였으며, 열변형 해석결과와의 비교를 통하여 제작된 구조물을 검증하였다.

Key Words : 열가소성(Thermoplastic), 복합재료(Composite), 섬유자동적층(FPS), 자동화(Automated), 포물선(Parabolic), 안테나(Antenna), 반사판(Reflector), 열변형(Thermal deformation), 열팽창계수(CTE), 피이크수지(PEEK)

1. 서 론

복합재료는 뛰어난 비강성, 비강도 뿐만 아니라 우수한 내환경성, 피로내구성으로 인하여 수송, 건축, 항공/방산 산업으로부터 해양, 전기/전자, 소비재 산업에 이르기까지 그 사용량

이 해마다 증가하고 있다. 이러한 복합재료 산업은 생산비 중 인건비 부분이 다른 산업에 비하여 비교적 큰 특징을 가지고 있다. 따라서 생산 공정의 자동화를 통하여 인건비를 줄이고 공정을 개선하려는 연구가 국내외적으로 많이 진행되고 있다[1].

*+ 한국기계연구원 신기능재료연구본부 소재성형연구센터, 교신저자(E-mail:jbkim@kmail.kimm.re.kr)

* 한국기계연구원 신기능재료연구본부 소재성형연구센터

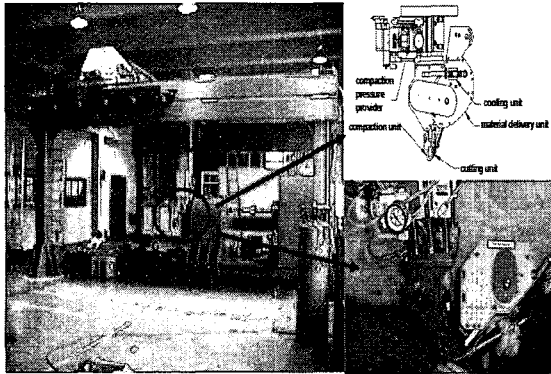


Fig. 1 The 7-axis automated Fiber Placement System (FPS) at KIMM (Changwon City).

자동화된 로봇을 이용하여 수지가 함침되어 있는 Tow, Ribbon, Tape 등을 자동으로 적층하는 방법은 고성능 섬유 강화 복합재료 구조물을 제작하는데 있어 가장 효과적이고 경제적인 성형방법 중 하나이다. 미국에서부터 시작된 이러한 자동섬유적층법에 대한 개념은 필라멘트와인딩(Filament Winding) 공법으로부터 유래되었다. 1979년에는 이것을 고등 필라멘트와인딩이라고 불렀는데, 이것은 필라멘트와인딩 공법의 한계를 넘는 다양한 기능을 가지고 있으며 다양한 형태의 재료를 이용할 수 있는 공법이라는 뜻이었다. 6축의 자동섬유적층장비는 1980년에 시작되었으며, 1983년에 실제로 운용될 수 있었다. 대형의 복합재료 구조물의 제작이 가능한 장비는 1989년부터 운용되었는데, 지금까지도 장비의 규모 및 그 수가 계속해서 증가하고 있는 추세이다.

매우 복잡하고 정교한 컴퓨터 소프트웨어에 의하여 운영되는 자동섬유적층법은 전통적인 Hand Lay-up 공법에 비하여 약 25%의 인력감소 및 30%까지의 재료절감을 가져올 수 있을 뿐만 아니라, 설계해석과의 차이도 획기적으로 줄일 수 있다. 따라서 비용절감뿐만 아니라, 구매자에게도 확실한 신뢰를 줄 수 있는 장점이 있다. Fig. 1은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 7축 제어 자동섬유적층장비이다.

일반적으로 복합재료를 이용하여 여러 방향으로 비교적 큰 곡률을 가지는 구조물을 제작하는 방법은 평판 형태의 복합재료를 일정한 크기의 작은 조각으로 나누어 적층하는 방법이 있다. 이러한 방법은 복합재료 구조물의 설계에 대한 어려움을 주고, 작업성이 떨어지며, 재료의 손실도 큰 대표적인 예가 될 수 있다.

테이프 형태의 재료를 자동으로 적층하는 방법은 이러한 형태의 복합재료 구조물의 제작에 효과적으로 적용될 수 있는데, 본 연구에서는 자동섬유적층장비를 이용하여 고온용 복합재료인 AS4/PEEK 점시형 안테나 반사판을 개발하는데 응용함으로써 장비 및 제작공정의 효율성을 보여주고자 한다[2].

2. 설계

2.1 형상설계

점시형 안테나 반사판은 식 (1)과 같이 반사판의 높이가 반지름 방향의 제곱인 형태로 얻어진다[3].

$$z = \frac{r^2}{4f} \tag{1}$$

식 (1)에서 f 는 초점거리이다. 본 연구에서 사용된 형상은 초점거리가 100 mm이고 반경이 150 mm인 축소형이다. Fig. 2는 그 형상을 나타낸다.

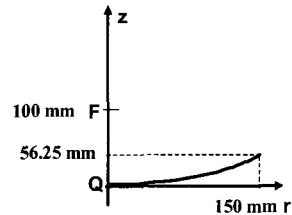


Fig. 2 The schematic shape of parabolic antenna reflector.

2.2 열변형 해석

일반적으로 점시형 안테나 반사판은 대기 중에 장시간 노출된 상태에서 사용되기 때문에, 태양열이나 대기 중의 분위기에 의하여 발생하는 변형량의 크기와 변형된 형상은 안테나 반사판의 성능을 저하시키는 주요 인자가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 안테나 반사판의 열변형에 대한 해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소코드인 MSC/PATRAN과 MSC/NASTRAN을 이용하여 선형 정적 해석을 수행하였다. Fig. 3은 열변형 해석에 사용된 유한요소모델을 나타낸다. 해석에 사용된 요소는 대표적인 판형 요소인 CQUAD4를 사용하였으며 PCOMP 카드를 이용하여 적층판을 표현하였다.

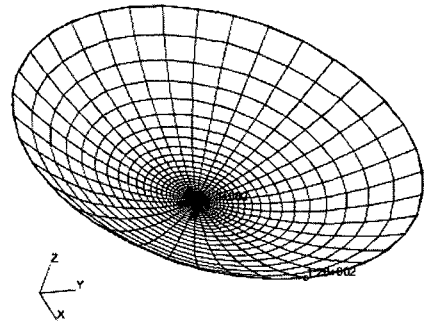


Fig. 3 The FE model for the thermal deformation analyses of the parabolic antenna reflector.

Table 1 Material properties of Hercules AS4 carbon fiber and Victrex PEEK resin used to calculate CTE of AS4/PEEK parallel to fiber direction.

Hercules AS4			
E'_{11}	234	GPa	Ref [5, 6]
α'_{11}	$-1.2 \sim -0.5$	$\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	Ref [8]
Victrex PEEK (Polyarylether etherketone)			
E'_m	3.6	GPa	
$\alpha'_{11}^{(1)}$	50	$\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	Ref [5]

¹⁾ Average value from 25°C to 120°C.

Table 2 Material properties of AS4/PEEK UD prepreg (APC-2 Cytec-Fiberite) tape

Material Property		Value	Unit
Tensile Modulus	Longitudinal	138	GPa
	Transverse	10.2	GPa
Poisson's ratio 12		0.3	
Shear Modulus 12		5.7	GPa
Shear Modulus 23		2.0	GPa
Shear Modulus 31		5.7	GPa
CTE	Longitudinal	See text	$\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
	Transverse ¹⁾	26	$\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

¹⁾ Value at reference temperature 25°C [5].

구조물의 설계 및 제작에 사용된 AS4/PEEK는 수분흡수가 적고 내화학성이 좋으며 비교적 고온에서 사용이 가능하다[4]. 사용된 AS4/PEEK 프리프레그 테이프는 Cytec-Fiberite에서 생산된 것으로 너비가 12.5 mm (0.5 inch)이며 두께는 0.125 mm이다 AS4/PEEK의 섬유방향의 열팽창계수는 비교적 작은 값으로 매우 측정하기 어렵다 [5-7]. 일반적으로 탄소섬유의 열팽창은 0에 가까운 음의 값을 가지며, 본 연구에서는 복합재료의 섬유방향의 열팽창계수를 섬유 및 기지재료의 물성으로부터 계산된 값을 사용하였다.

$$\alpha'_{11} = \frac{\alpha'_f E'_f V_f + \alpha'_m E'_m (1 - V_f)}{E'_f V_f + E'_m (1 - V_f)} \quad (2)$$

식 (2)에서 첨자 f, m, c 는 각각 섬유, 기지재료, 복합재료의 물성을 나타내며, 첨자11은 섬유방향을 나타낸다. Table 1은 식 (2)에 사용하기 위한 Hercules AS4의 물성과 PEEK수지의 물성이다.

복합재료의 열팽창계수의 계산에 사용된 복합재료의 섬유체적율(V_f)는 0.58이다. 식 (2)를 이용하여 계산된 AS4/PEEK 복합재료의 섬유방향 열팽창계수(α'_{11})는 $-0.64 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \sim 0.06 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 의 값을 가진다.

Table 2는 해석에 사용된 재료특성을 나타낸다. AS4/PEEK (APC-2)의 기계적 특성 (Modulus, Poisson's ratio)은 많은 연구자들에 의해 제공되고 있다[9-12].

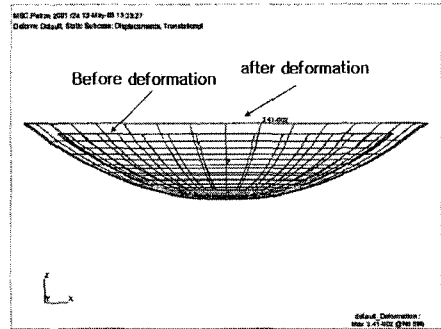


Fig. 4 The deformed shape of parabolic antenna reflector by thermal expansion induced from temperature increase from 25°C to 120°C.

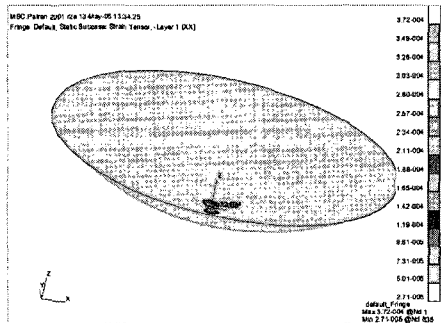


Fig. 5 The strain distribution in longitudinal direction on the upper surface of parabolic antenna reflector by thermal expansion induced from temperature increase from 25°C to 120°C.

유한요소해석은 반사판의 중앙의 모든 병진 및 회전자유도가 고정되어 있는 상태에서 구조물의 온도가 상온 (25°C)으로부터 120°C로 증가하였을 경우에 대하여 수행하였다. 반사판의 적층순서는 재료의 열팽창거동에 의해 발생 하는 열변형 형상이 온도의 상승에 불구하고 접시형태를 그대로 유지하는 경우를 적당한 설계 적층으로 선택한다. 따라서, 동일한 경계조건 하에서 다양한 적층순서를 가지는 구조물에 대한 열변형해석을 수행하고 그 변형량 (displacement)과 변형률(strain)을 살펴보았다.

해석모델에 사용된 적층방향은 직교좌표계인 전체좌표계 (Global coordinate system)를 사용하였으며 실제의 구조물의 제작도 이에 따라서 수행된다. 해석은 $\alpha'_{11} = -0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 인 경우에 준등방성 적층순서인 [0/+45/-45/90]s와 [0/+60/-60]s에 대해서 실시하였다. 해석결과 두 준등방성 적층순서를 가지는 경우는 동일한 변형량과 변형률을 가지는 것으로 나타났다. Fig 4는 [0/+45/-45/90]s의 적층판의 해석결과인 변형된 형상을 나타내고, Fig. 5는 reflector의 안쪽 면에 위치한 최외각층의 변형률을 나타낸다.

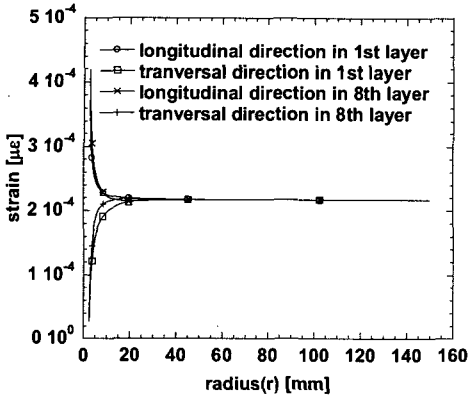


Fig. 6 The strain distribution in longitudinal and transverse direction on the upper(1th) and bottom(8th) surfaces of parabolic antenna reflector along the radius, *r*.

Fig. 6은 복합재료 적층판의 반경을 따라서 취한 최상층(1th)과 최하층(8th)에서의 섬유방향과 섬유의 수직인 방향으로의 변형률의 크기를 나타낸다. 반사판의 변형률의 분포를 살펴보면 반사판 중심부에서 곡률의 변화가 급격하게 발생하고 나머지 부분에서는 면내변형만 발생하는 것을 볼 수 있다. 각 층의 변형률은 반사판의 중심부를 제외하고는 모두 섬유의 방향과 섬유의 수직방향으로 모두 217.45×10^{-6} 의 값으로 동일한 값을 가진다. 실제 이러한 해석결과는 고전적층판이론으로 얻어질 수 있는 결과를 그대로 반영한다. 고전적층판이론에 의하면 위의 두 가지의 적층순서가 모두 동일한 크기의 유효강성($E_{11} = E_{22} = 54.1$ GPa) 및 열팽창계수 (CTE; $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 2.29 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)를 가지며 면내거동과 굽힘거동의 연성(Coupling)을 나타내는 강성행렬 $[B]$ 값은 0을 가진다.

본 연구에서는 [0/+45/-45/90]_s 적층순서를 시제품 제작을 위한 설계 적층으로 선택하였다.

3. 제 작

3.1 자동섬유적층을 위한 Pattern 설계

사용된 자동섬유적층장비는 자동화된 로봇시스템에 Fig. 7과 같은 Automated Dynamics Inc.에서 제작된 섬유적층을 위한 헤드가 부착되어 연동되어 움직이는 구조로 구성된다 [2]. 헤드는 열가소성 복합재료의 적층에 필요한 열원과 함께 프리프레그 테이프를 금형표면 위에서 자르고 붙이고 압착하는 기능들이 통합되어 있다.

자동화된 로봇 기술과 복합재료 구조물 제작기술이 함께 적용된 이 공법은 자동 적층을 위한 소프트웨어 부분과 하드웨어 부분적인 체계로 분류될 수 있다.

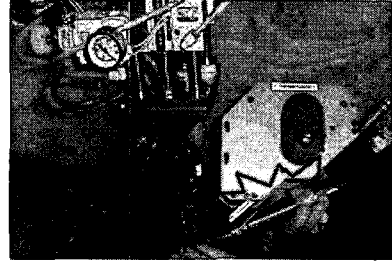


Fig. 7 The fiber placement head on the fiber placement system in KIMM provided from Automated Dynamics Inc., USA.

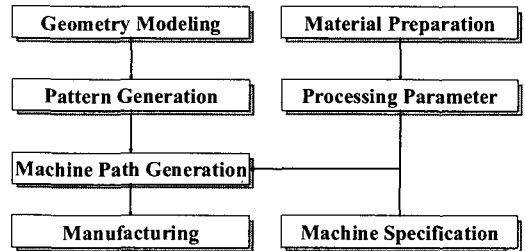


Fig. 8 The schematic flow of soft works to fabricate composite structures using automated fiber placement system.

소프트웨어 부분은 Fig. 8과 같이 컴퓨터 상에 모델링된 금형의 형상 데이터를 이용할 수 있도록 하는 인터페이스와, 금형 형상 위에 원하는 복합재료 적층순서에 따른 섬유의 적층경로를 정의하는 패턴 데이터(Fiber Placement Pattern)를 생성하는 부분과, 패턴 데이터와 장비의 축의 수, 각 축의 상하 운동반경의 한계, 속도, 각속도 등의 종합적인 사양을 고려하고 성형하고자 하는 재료의 성형온도, 재료의 치수 및 점도 등의 데이터를 이용하여 장비의 운동에 대한 데이터(Machine Path)를 생성하는 부분의 소프트웨어로 구성된다 [13].

Fig. 9은 접시형 안테나 반사판을 제작하기 위해 생성된 [0], [45], [-45], [90] 방향의 패턴파일을 출력한 것이다. 각 패턴에서 반사판의 각 플라이는 구조물 전체에서 동일한 각도를 가진다. 따라서, 제작된 패턴파일을 이용하여 만들어진 복합재료 구조물 모든 지점에서 장비의 허용오차 내에서 동일한 적층각을 가질 것을 예측할 수 있다.

3.2 자동섬유적층 및 압착

AS4/PEEK를 적층하기 위해서 프리프레그 테이프의 표면을 녹여서 이미 표면에 있는 재료와 용착을 시켜야 한다. 헤더가 지나가면서 계속해서 재료의 표면이 녹는점(약 400^oC 미만)의 온도를 가지도록 가열을 하여야 하는데, 본 장비에서는 Hot Gas Torch를 이용한다. Hot Gas Torch에서 나오는 열은 재료의 녹는점보다 더 높아야 하는데, 본 연구에서는 450^oC ~

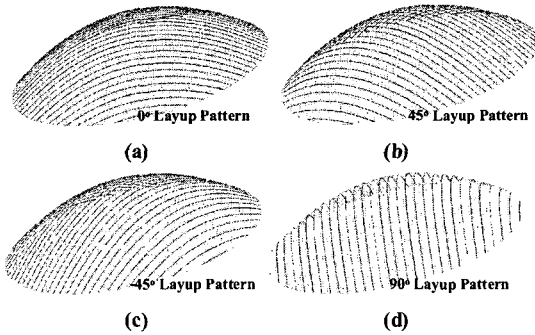


Fig. 9 The fiber placement patterns to drive the fiber placement system.

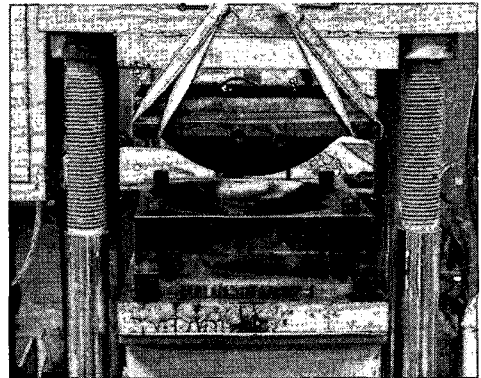


Fig. 12 The working view of hot pressing to compact and make surface treatment of the reflector.

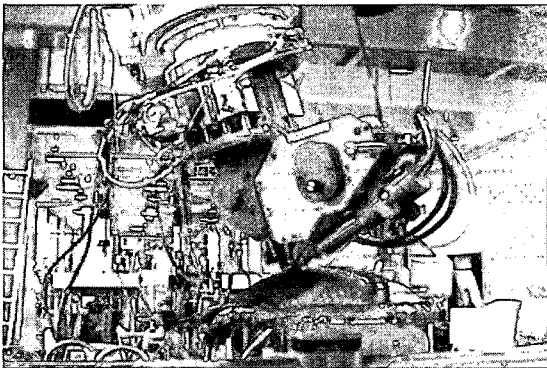


Fig. 10 The working view of the fiber placement system: prepreg tape lay-up with [45] angle.

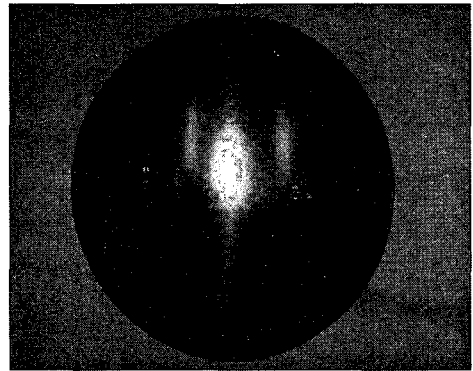
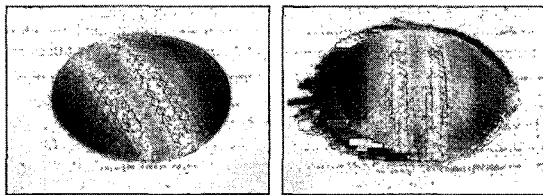


Fig. 13 The final product with strain gages attached on the surfaces.



(a) (b)

Fig. 11 The photographs of the product after the lay-up using the fiber placement system: (a) before trimming and (b) after trimming.

430℃로 하였다. 적층속도는 적층되고 있는 부분의 형상의 특징에 따라서 달라지는데, 평균 약 15 mm/sec의 속도로 적층을 수행하였다. Fig. 10은 섬유자동적층장비를 이용하여 적층하는 장면을 나타낸다.

Fig. 11은 적층작업후의 제품을 나타낸다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 제품의 표면이 고르지 않는데, 이것은 적층시에 재료를 금형표면에 눌러주는 구조물이 금속으로 되어 있어 곡률이 있는 금형표면과 거의 점접촉을 하기 때문이다. 이러한 압착시의 접촉문제는 제품표면의 문제뿐만 아니라 적층후의 각

층간의 불완전 접착의 문제를 발생시키게 된다. 따라서, 구조적 특성을 향상시키기 위해서는 반드시 구조물을 압착시키는 공정이 필요하다. 따라서, Fig. 12과 같이 두 개의 금형사이에 제품을 넣고 녹는점 이상의 온도에서 압력을 가하여 최종적으로 마무리한다. Fig. 13는 최종 제품의 형상이다.

4. 열팽창시험

제품의 검증을 위하여 Fig. 14과 같이 4개의 WK-06-500BH-350 변형률 센서로 구성된 Full bridge 회로를 구성하였다 [14]. 두 개의 지점에 각각 두 개씩의 능동센서를 제품의 양쪽 표면에 부착하였으며, 한 지점은 지름방향으로 한 지점은 원주방향으로 변형률 센서를 부착하였다.

실험결과는 약 124℃에서 $200 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 의 변형률을 얻었다. Fig. 15에서는 실험결과가 해석결과로 얻은 복합재료 구조물의 열팽창이 발생할 수 있는 영역을 만족함을 보여준다. 해석 결과의 영역은 Table 1에서 나타낸 AS4 탄소섬유의 열팽창계수를 적용하여서 얻을 수 있는 범위이다.

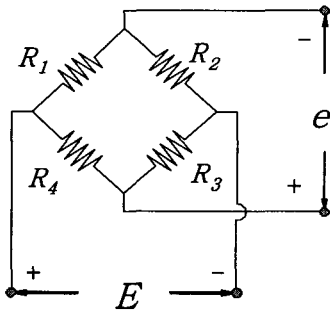


Fig. 14 The full bridge strain gage circuit used to measure thermal expansion: The resistors R_1 , R_2 are active gages on the surface of test structure and the resistors R_3 , R_4 are dummy gages on the surface of fused silica plate.

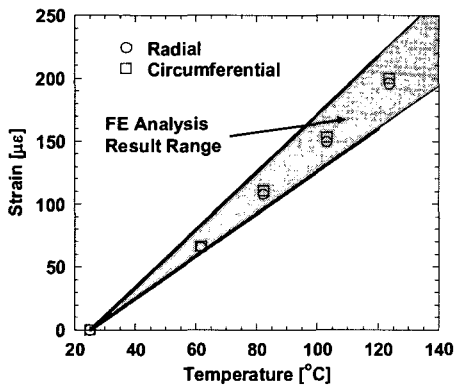


Fig. 15 The comparison of thermal expansion results of experiment and FE analysis for the AS4/PEEK composite reflector.

5. 결론

- (1) 열변형 해석을 통하여 초점길이가 100 mm이고 지름이 300 mm인 점시형 안테나 반사판을 설계하였다. 준등방성 적층순서를 갖는 제품은 중심부에서의 곡률의 변화를 보이며, 반사판을 이루는 면에서는 면내팽창거동만 보이고 구조물의 전 영역에서 동일한 변형률을 가진다.
- (2) 섬유자동적층장비를 이용하여 AS4/PEEK (APC-2) 열가소성 복합재료 반사판을 제작하였다. 제작된 제품은 구조물 내의 모든 위치에서 동일한 적층순서를 가지도록 제작되었다.
- (3) 제작된 제품에 변형률 센서를 이용한 열변형 실험을 수행하여 설계시의 해석결과를 비교하여 섬유자동적층공법의 효율성을 입증하였다. 따라서, 섬유자동적층장비를 이용한 공법이 복잡한 3차원의 곡면을 가지는 복합재료적층판의 제작에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) C.A. Mahieux, "Cost effective manufacturing process of thermoplastic matrix composites for the traditional industry : the example of carbon-fiber reinforced thermoplastic flywheel," *Composite Structures*, Vol. 52, 2001, pp. 517-521.
- 2) N.J. Johnston, H.L. Belvin, R. J. Cano, J. M Marchello, and A. B. Hulcher, "A prototype research laboratory for automated fabrication of high performance composites," *ICCM12-Europe, Paris*, 1999, pp. 748-755.
- 3) P. Cirese, M. Marchetti, S. Sgubini, "Design and manufacturing criteria for high precision composite antenna Reflector. prediction of residual distortions after the manufacturing process," *Composite Structures*, Vol. 16, 1990, pp. 209-235.
- 4) R. Sharp, S. Holmes, C. Woodall, "Material selection/fabrication issues for thermoplastic fiber placement," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 8, 1995, pp. 2-14.
- 5) J.A. Barnes, I.J. Simms, "Thermal expansion behavior of thermoplastic composite materials," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 3, pp.66-80, 1990
- 6) J.A. Barnes, "Thermal expansion behavior of thermoplastic composites, Part II," *Journal of Material Science*, Vol. 28, 1993, pp. 4974-4982.
- 7) K.J. Yoon, P.J. Kim, T.W. Kim, E.J. Kim, "Effect of anisotropy of thermal expansion properties on the thermal distortion of L-section AS4/PEEK composite structures," *Internationals SAMPE Symposium, USA*, 1995, pp. 1026-1033.
- 8) 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조기술, 시그마프레스, 1998.
- 9) T.J. Vogler, S. Kyriakides, "Initiation and axial propagation of kink bands in fiber composites," *Acta Mater*, Vol. 45, No. 6, 1997, pp. 2443-2454.
- 10) C.A. Weeks, C.T. Sun, "Modeling non-linear rate-dependent behavior in fiber-reinforced composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, 1998, pp. 603-611.
- 11) M.H. Jen, C.H. Lee, "Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads. Part I: Experimental," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 9, 1998, pp. 605-615.
- 12) M.H. Jen, C.H. Lee, "Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads. Part II: Formulation," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 9, 1998, pp. 617-629.

- 13) 김진봉, 김태욱, “자동섬유적층법을 이용한 고성능 복합재료 구조물 제작의 자동화,” 기계와 재료, 제14권, 1호, 2002, pp. 113-120.
- 14) 이상관, “직조형 탄소 섬유 강화 알루미늄 기지 금속복합재료의 제조와 특성 분석,” Ph. D. Thesis, KAIST, 2002.