

강성계수가 복합재 광학판 성능에 미치는 영향성 연구

김경표
한라대학교 기계자동차공학부

Influence of Stiffness Coefficients on Optical Performance in Composite Optical Substrate

Kyung-Pyo Kim

Department of Mechanical and Automobile Engineering, Halla University

요약 준등방성 라미네이트내의 확장강성 계수는 방사방향으로 균일하지만, 굽힘강성 계수는 플라이 적층순서에 의해 방사 방향으로 변화한다. 이 논문에서는 복합재 광학에서 사용되는 단방향섬유 복합재료와 무작위로 분포된 단섬유 복합재료로 이루어진 세 가지 유형의 준 등방성 라미네이트 반사경내의 굽힘강성 계수의 방사방향의 변화량을 비교하였다. 단섬유 복합 재료 반사경 방사방향의 확장강성 계수와 굽힘강성 계수는 균일하게 나타나는 반면, 단방향섬유 복합재료 반사경의 경우에는 굽힘강성 계수의 방사방향으로의 변화량이 11%에서 많게는 26%까지 변화하는 것으로 나타났다. 또한 강성계수의 차이로 인한 굽힘-비틀림-커플링 효과 등 강성 민감도 또한 큰 것으로 나타났다. 이러한 요소는 정밀성이 요구되는 광학분야에 복합재 반사경의 적용을 어렵게 할 커다란 문제점으로 인식되며, 이러한 복합재료의 이방성 성질로 인한 필연적인 방사형 방향으로의 강성계수의 변화 및 그 영향성을 줄이기 위해서는 단섬유나 무작위로 공간에 흩어져있는 섬유 복합재료를 사용하는 것이 복합재 반사경내에 존재하는 굽힘강성 계수의 변화를 제거하는 하나의 방법이다.

Abstract The extensional stiffness in quasi-isotropic laminates is uniform in the radial direction, but the bending stiffness varies radially due to the stacking sequence. This paper addresses the directional dependency of the bending stiffness and its radial variation in three types of quasi-isotropic laminate reflectors consisting of unidirectional fiber composite materials (UDM) and randomly distributed composite materials (short fiber, RDM). The extensional stiffness and bending stiffness in optical reflectors using RDM are uniform, while the bending stiffness in those using UDM varies radially from 11% to 26%. Also, the stiffness sensitivity, such as the bend-twist or bend-torsion effect, due to the differences in the stiffness value in the composite, is large. These factors are problematic in the optical field requiring precision surfaces. Utilizing RDM might be one way to eliminate the presence of bending stiffness in composite mirror substrates.

Keywords : Composite Optics, Stiffness Effect, Continuous Fiber Material, Short Fiber Material, Uniform Flexural Stiffness

1. 서론

복합재료는 무게대비 강성, 강도 및 낮은 열팽창계수의 특성으로 인해 항공분야는 물론 기계설비 및 광학분야에 걸쳐 그 쓰임새가 다양해지고 있다. 최근에는 복합

재료를 광학분야에 많이 적용하고 많은 연구의 대상이 되고 있다.[1,2] 그러나 이 최첨단 기술을 적용한 복합재 반사경도 단방향 복합재료의 fiber-print through, 환경적 민감도, 안정성 등 적응방법에서 나오는 필연적인 특성에 의해 정확한 표면처리, 회절관계 등의 설계요구조건

*Corresponding Author : Kyung-Pyo Kim(Halla Univ.)

Tel: +82-33-760-1213 email: h_kykim@halla.com

Received July 18, 2017

Accepted November 3, 2017

Revised (1st September 15, 2017, 2nd October 25, 2017)

Published November 30, 2017

을 맞추기 어려운 실정이며 해결해야 할 큰 도전과제로 남아 있다. 준등방성 라미네이트의 면내의 확장강성계수 [A]는 방사형 방향으로 일정한 계수를 갖기 때문에 광학용 거울 및 능동/수동으로 적용하는 미래의 망원경 용 반사경을 대체 할 수 있다고 믿고 있으며 또한, 제조방법, 표면처리 등 복합재 반사경에 대한 많은 연구가 수행되었다.[3-5] H.E Bennett[6]은 낮은 열팽창계수 복합재료를 사용하여 1미터 직경의 경량 복합재 거울을 성공적으로 제작했다고 발표했다. 복합재 광학업계의 일반적인 생각은 복합재료가 방사형 내의 균일한 확장강성계수, 무게대비 높은 강성과 강도 그리고 낮은 열팽창계수의 특성으로 인해 미래의 망원경 산업의 적용에 적합하다고 단언하고 있다. 그러나 Rolf Paradies[7]는 그의 논문에서 단방향 복합재료로 만들어진 준등방성 라미네이트 내의 굽힘강성계수[D]은 방사형 방향으로 변화한다는 것을 보여 주었다. 복합재료로 제작된 광학 반사경이 광학 기기로서 제 기능을 발휘하기 위해서는 고정밀의 표면정밀도 및 정확도가 요구된다. 여러 층의 얇은 박판의 복합재료를 적층하고 고온, 고압의 건조경과 진행과정 후, 서서히 경화시키는 제작단계를 걸치는 복합재료의 경우 이러한 제작 절차와 복합재 적층으로 인해 반사경 표면에 하이버-프린-스루(fiber-print-through) 현상이 존재한다.[8] 이것은 반사경이 경화되는 동안 라미네이트 내의 섬유와 기지간의 열팽창계수의 차이로 인해 화학적 수축으로 발생하는 것으로 표면에 고주파 파형이 발생 표면정밀도에 치명적인 오류를 준다. 이러한 이유로 복합재 반사경 응용연구는 대부분 이러한 현상을 완화하는 기술 개발에 초점을 두고 있다.[9] 하지만 하이버-프린-스루 현상으로 초래하는 표면정밀도의 왜곡보다 복합재의 이방성 재료의 특성으로 인해 발생 가능한 표면변형의 연구는 전무한 실정이다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 준등방성 라미네이트의 모델에 대하여 간략히 언급하고, 그 모델내의 방사형 방향의 굽힘강성계수의 변화량을 측정했으며 그로 인해 발생할 수 있는 영향성에 대해 언급하였다. 또한 단방향 섬유 복합재료 소재와 무작위로 분포된 단 섬유 복합재료의 기계적 특성을 비교를 통해 단방향 섬유 복합재료가 실제로 회절한계(diffraction limited) 광학성을 가진 복합재료 반사경 개발에 적합한지 여부를 확인하거나 굽힘강성계수의 방사방향의 변화로 인해 발생 가능한 반사판의 변형을 극복하기 위한 대체 소재 복합재료가

필요한 지의 여부를 확인하였다.

2. 연구방법(모델 및 해석방법)

준등방성 라미네이트 모델은 업계에서 가장 많이 사용되고 있는 세가지 종류 $\pi/3$, $\pi/4$, 그리고 $\pi/6$ 의 라미네이트를 선정하였다. 각각의 준등방성 라미네이트의 총 플라이수의 선정에 있어 일반적으로 총 플라이수가 16개 이상이면 라미네이트내의 굽힘강성계수의 영향이 감소하는 것으로 알려져 있으나, 본 논문에서는 세가지 준등방성 라미네이트의 총 플라이수를 24개로 동일하게 선정하여 굽힘강성계수의 영향성 유무를 확인하였다. 본 논문에서 사용된 라미네이트의 적층각 및 적층순서는 표1과 같다. 준등방성 라미네이트내의 확장강성계수 및 굽힘강성계수의 방사방향 변화량을 구하기 위해 표2에서 명시된 재료의 특성이 사용되었다.

Table 1. Types of quasi-isotropic laminates, 24 plies

Laminate Type	Lay-up Sequence
$\pi/3$	$[\pm 60, 0, 60, 0, \pm 60, 0, -60, 0, \pm 60]_s$
$\pi/4$	$[\pm 45, 0, 90, 0, 90, \pm 45, 90, 0, \pm 45]_s$
$\pi/6$	$[\pm 60, \pm 30, 0, 90, \pm 30, 0, 90, \pm 60]_s$

Table 2. Engineering constants for analysis(CFRP, Short fiber material)

Engineering Constants	Carbon/Epoxy	Short Fiber Material
E_1 (Gpa)	128.9	52.1
E_2 (Gpa)	13.1	52.1
ν_{12}	0.3	0.311
G_{12} (Gpa)	5.86	19.8

준등방성 내의 확장강성계수 및 굽힘강성계수의 계산 및 비교를 위하여 표1, 2, 9의 복합재료의 재료의 특성과 준등방성 라미네이트 적층방법이 사용되었으며, 방사형 방향의 강성계수 계산을 위해 고전 복합재 이론(Classical laminate theory, CLT)의 강성계수 계산 수식이 사용되었다.

$$[A]_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$$

$$[B]_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$[D]_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

[A], [B], 그리고 [D]는 라미네이트의 확장, 비틀림, 굽힘강성계수이다.

3. 강성계수 해석결과 및 고찰

세가지 준등방성 라미네이트(π/n , $n=3,4,6$)의 방사방향의 확장강성계수, 비틀림강성계수 및 굽힘강성계수를 계산하여 비교하였다. 강성계수 계산을 위해 사용된 복합재 재료의 물성치는 표2에서 보여주는 것처럼 단방향 및 단섬유 복합재료를 사용하였다. 복합재료 반사경내의 방사형 방향의 강성계수 계산은 먼저 표3의 도식된 것처럼 0도(On-axis)축의 강성계수를 기준으로 방사형 방향으로 5도씩 섬유각도를 증가시켜 모든 방사형 방향으로의 강성계수들을 계산하여 비교하였다. 또한 반사경 제작(적층) 시 발생 가능한 섬유 적층각의 휴면에러를 기준 적층각도 대비 +/-2도로 정의하고 이때의 비대칭 라미네이트내의 방사형 방향의 강성계수의 변화량 또한 측정하여 그 영향성을 대칭 라미네이트 강성계수 결과 값과 비교하였다.

Table 3. Description of lay-up sequence for $\pi/4$ quasi-isotropic circular composite mirror, ideal at 0 degree(symmetric and balanced) and radial directions(off-axis)

Axis (deg.)	$\pi/4$ Quasi-isotropic laminate lay-up for analysis(24 layers, top half for symmetric)											
On axis (0)	45	-45	0	90	0	90	-45	45	90	0	45	-45
5	40	-50	-5	85	-5	85	-50	40	85	-5	40	-50
10	35	-55	-10	80	-10	80	-55	35	80	-10	35	-55
15	30	-60	-15	75	-15	75	-60	30	75	-15	30	-60
20	25	-65	-20	70	-20	70	-65	25	70	-20	25	-65
25	20	-70	-25	65	-25	65	-70	20	65	-25	20	-70
.
.
.
360	45	-45	0	90	0	90	-45	45	90	0	45	-45

3.1 단방향 섬유 복합재료(Continuous Fiber Reinforced Plastic) 반사경

일반적으로 준등방성내의 방사방향의 굽힘강성계수는 적층순서 및 적층각에 영향을 받으며 그 값 또한 균일하지 않다. 다음의 결과는 연속적인 단방향 복합재료 및 단섬유 복합재료로 적층된 π/n 준등방성 라미네이트

내의 방사방향 강성의 변화를 정리한 것이다. 표3은 24장의 $\pi/4$ 준등방성 라미네이트의 적층순서의 구체적인 예로서 반사판내의 거시적-기계적 강성의 특성 계산을 위한 설명을 나타낸다. 강성변화의 결과를 비교하기 위해 π/n 라미네이트의 0도값과 방사방향의 변화량을 표4에 정리하였다. 표4에서 보여주듯이 단방향 섬유 복합재료를 사용하여 얻은 확장강성계수는 방사방향으로 동일한 반면, 굽힘강성계수는 방사방향으로 그 값이 변화하는 것으로 나타났다.

Table 4. Variations of [A], [B], and [D] matrices for 24 layer π/n quasi-isotropic laminates using unidirectional material. Black values indicate for ideal laminate mechanical properties of [A], [B], and [D] matrices (at 0 degree) and the right-side values from red and blue values indicate maximum (top) and minimum (bottom) values of corresponding black values of circular mirror in radial variation. Note: unit in [A], [B], and [D] are Gpa-mm, Gpa-mm², and Gpa-mm³ respectively.

Extensional stiffness [Gpa-mm]	=	1.827E+02	5.691E+01	0.000E+00			
		5.691E+01	1.827E+02	0.000E+00			
		0.000E+00	0.000E+00	6.291E+01			
π/n Laminates (n=3, 4, and 6)							
Coupling stiffness [Gpa-mm ²]	=	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00			
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00			
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00			
π/n Laminates (n=3, 4, and 6)							
Flexural stiffness [Gpa-mm ³]	=	1.439E+02	1.745E+02	4.939E+01	5.178E+01	4.125E+00	1.171E+01
		1.388E+02	4.341E+01	1.388E+02	1.745E+02	1.171E+01	2.721E-02
		4.939E+01	5.178E+01	1.585E+02	1.745E+02	1.171E+01	1.171E+01
		4.341E+01	1.388E+02	1.388E+02	1.745E+02	5.441E+01	5.679E+01
		4.125E+00	1.171E-02	1.171E+01	1.171E+01	2.721E-02	4.843E+01
$\pi/3$ Laminate							
Flexural stiffness [Gpa-mm ³]	=	1.588E+02	1.604E+02	4.862E+01	4.862E+01	1.882E+00	4.902E+00
		1.442E+02	4.862E+01	4.862E+01	1.604E+02	1.882E+00	8.902E-02
		4.862E+01	4.862E+01	1.448E+02	1.604E+02	1.882E+00	4.902E+00
		4.862E+01	1.604E+02	1.442E+02	1.604E+02	8.902E-02	8.902E+01
		1.882E+00	4.902E+00	1.882E+00	4.902E+00	5.364E+01	5.364E+01
$\pi/4$ Laminate							
Flexural stiffness [Gpa-mm ³]	=	1.467E+02	1.712E+02	5.480E+01	5.480E+01	6.034E+00	1.165E+01
		1.427E+02	4.038E+01	1.427E+02	1.712E+02	9.079E-02	9.079E-02
		5.480E+01	5.480E+01	1.445E+02	1.712E+02	5.142E+00	1.165E+01
		4.038E+01	1.427E+02	1.427E+02	1.712E+02	9.079E-02	9.079E-02
		6.034E+00	1.165E+01	5.142E+00	1.165E+01	5.982E+01	5.982E+01
$\pi/6$ Laminate							

이러한 굽힘강성계수값의 방사형 방향의 변화 및 반사경내의 섬유와 기지의 열팽창계수의 불일치는 복합재

반사판이 주변 환경 및 온도에 민감한 우주공간에 적용될 때 광학적 성능의 필수조건인 표면 치수안정성이 우수한 반사경의 제작을 방해하는 요소로 작용한다. 세 개의 준등방성 라미네이트의 강성계수 해석에서 $\pi/3$ 라미네이트에서는 최대 25.7%의 굽힘강성계수(D_{11})의 변화가 해석결과로 나타났고, $\pi/4$ 라미네이트에서 11.25%의 가장 작은 변화량이다. 결과를 미루어볼 때 굽힘강성계수의 방사방향 최소변화량이 $\pi/4$ 라미네이트에서 관측되었지만, 수치적으로 볼 때 굽힘강성계수의 변화값은 여전히 크며 그로 인한 굽힘강성의 불균형으로 인한 심각한 표면변형을 필연적이라 할 수 있다. 그러므로 준등방성 라미네이트내의 확장강성계수는 방사형방향으로 일정하여 광학이나 망원경 등에 사용되는 반사경의 제작에 적합한 것으로 보이나 굽힘강성계수의 변화량을 보면 무시할 정도가 아니라는 것을 알 수 있다. 그림1은 준등방성 라미네이트내의 D_{11} 의 방사방향 변화량을 나타낸다.

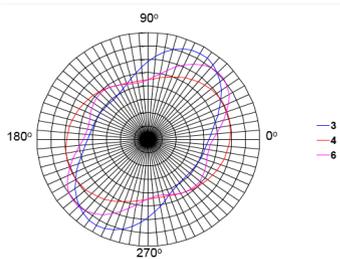


Fig. 1. Radial variations of D_{11} in π/n laminates, $n=3, 4$, and 6. Note: 25.7% variation of D_{11} in $\pi/3$, 19.9% variation of D_{11} in $\pi/6$, and 11.26% variation of D_{11} in $\pi/4$ laminate. Unit in $Gpa \cdot mm^3$

3.2 단섬유 복합재료(Homogenous materials, short fiber, chopped mat.) 반사경

앞선 장에서는 단방향 섬유 복합재료내의 굽힘강성계수의 변화량을 보여 주었다. 이러한 결과는 복잡하고 능동적으로 제어되는 광학장비 기술에 적용 시 표면수치 및 허용치를 벗어난 복잡한 표면변형의 결과를 초래할 뿐만 아니라 표면변형의 제어도 어렵게 할 수 있다. 굽힘강성계수로 인한 방사방향의 변형을 없애기 위해 단섬유 복합재료를 사용한 반사경을 적용하면 방사형 방향으로 균일한 확장강성계수 및 굽힘강성계수를 얻을 수 있다. 하지만 실제적으로 균일한 기계적 성질을 나타내는 복합재료는 없다. 이 장에서는 chopped mat(short fiber)와 같은 단 섬유 소재가 무작위로 분포된 섬유방향을 가지

므로 종 방향과 횡 방향 모두에서 균일한 기계적 특성을 갖는다고 가정하였다. 표5는 단섬유 재료를 사용한 준등방성 라미네이트의 거시적 기계적 성질을 계산하여 도표화 한 것이다.

결과에서 보여주는 것처럼 단섬유 소재로 제작된 라미네이트내의 확장강성계수 및 굽힘강성계수는 방사형 방향으로 균일한 것으로 나타났다. 섬유 부피 또는 섬유 배향 분포에 의해 발생 가능한 확장강성의 국부적 변동 또한 이러한 대체 재료에서 고려되어야 하지만, 무작위 배향의 충분한 복합재 층은 이러한 국부적 효과를 감소시킬 수 있다.

Table 5. Variations of [A], [B], and [D] matrices for 24 layer π/n quasi-isotropic laminate using chopped mat (Homogenous material). Note: No variations in matrices

Extensional stiffness [Gpa·mm]	=	1.827E+02	5.690E+01	0.000E+00
		5.690E+01	1.827E+02	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	6.291E+01
Coupling stiffness [Gpa·mm ²]	=	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Flexural stiffness [Gpa·mm ³]	=	1.528E+02	4.759E+01	0.000E+00
		4.759E+01	1.528E+02	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	5.261E+01

π/n Laminates ($n=3, 4, \text{ and } 6$)

3.3 준등방성 라미네이트의 굽힘-비틀림 영향성

방사형 복합재 반사판에 굴곡 변형의 영향을 줄 수 있는 준등방성 라미네이트내의 굽힘강성비를 평가하는 것도 중요하다. 이 장에서는 외부하중의 영향으로 반사판이 변형될 수 있는 굽힘과 비틀림 강성비를 비교하였다. 다음은 준등방성 라미네이트내의 굽힘-비틀림 강성비에 대한 결과와 비교를 보여준다. 표6에 나타난 바와 같이 모든 3개의 준등방성 라미네이트내의 굽힘-비틀림 강성인 D_{16} 및 D_{26} 는 축방향 굽힘강성계수 D_{11} 보다 상대적으로 작다. 그러나 D_{12} 값은 라미네이트에서 커플링을 일으킬 수 있는 중요한 계수이다. 표7는 π/n 라미네이트

에서의 D_{12}/D_{11} 비의 값의 범위를 나타낸다. D_{12}/D_{11} 의 범위는 14.7~60.76%로 나타났으며, $\pi/4$ 에서 가장 적은 변화량을 $\pi/6$ 에서 최대 변화량을 나타냈다. 이와 같이 라미네이트내에 굽힘이 발생할 때 굽힘과 비틀림 강성비의 차이로 인한 커플링 또한 중요한 표면변형의 요인이 된다. 이러한 현상 또한 단섬유 소재 복합재료를 이용하면 제거될 수 있다. 표5와 표8은 단섬유 소재로 이루어진 라미네이트내의 강성도 및 굽힘-비틀림 강성의 비의 결과를 보여준다. 이 결과는 앞선 장에서 논의한 바와 같이 모든 굽힘강성계수의 값이 방사형방향으로 일정하므로 이러한 현상을 완화하는데 도움이 될 것이다. 따라서 균일재료를 사용하는 3개의 준등방성 라미네이트내의 굽힘-비틀림으로 인한 커플링은 존재하지 않을 것이다.

Table 6. Comparison of bend-twist ratios in π/n quasi-isotropic laminates using unidirectional material.
Note: ideal (0 degree)

Bend-twist ratios in π/n quasi-isotropic laminate with CFRP			
$\pi/3$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.44E-01	2.88E-02	8.16E-02
Max.	3.59E-01	7.35E-02	8.12E-02
Min.	2.49E-01	3.76E-06	3.06E-06
$\pi/4$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.06E-01	1.19E-02	1.19E-02
Max.	3.36E-01	3.23E-02	3.16E-02
Min.	2.94E-01	5.82E-04	5.25E-04
$\pi/6$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.74E-01	4.11E-02	3.51E-02
Max.	3.79E-01	7.35E-02	7.99E-02
Min.	2.36E-01	6.37E-04	5.54E-04

Table 7. Percentage change in variation of D_{12}/D_{11} in π/n laminates

	D_{12}/D_{11} in $\pi/3$	D_{12}/D_{11} in $\pi/4$	D_{12}/D_{11} in $\pi/6$
Ideal laminate (at 0 degree), (1)	0.3443	0.3062	0.3736
Maximum value, (2)	0.3590	0.3365	0.3792
Minimum value, (3)	0.2488	0.2934	0.2359
% D_{12}/D_{11} between (1) and (2)	4.28	9.88	1.49
% D_{12}/D_{11} in values between (2) and (3)	44.29	14.70	60.76

Table 8. Comparison of bend-twist ratios in π/n quasi-isotropic laminates using short fiber material (Homogenous material)

Bend-twist ratios in π/n quasi-isotropic laminate with Short Fiber			
$\pi/3$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.11E-01	6.95E-07	6.95E-07
Max.	3.11E-01	7.59E-07	7.59E-07
Min.	3.11E-01	6.07E-08	6.07E-08
$\pi/4$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.11E-01	3.05E-22	3.05E-22
Max.	3.11E-01	1.84E-07	1.84E-07
Min.	3.11E-01	1.57E-23	1.57E-23
$\pi/6$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.11E-01	8.18E-08	8.18E-08
Max.	3.11E-01	7.51E-07	7.51E-07
Min.	3.11E-01	8.10E-08	8.10E-08

3.4 섬유배열 불일치로 인한 강성계수 민감도

일반적으로 광학분야에 사용되는 정밀한 표면이 요구되는 복합재 반사경을 제조하기 위해서는 정확한 레이업 (lay-up)이 필요하다고 믿고 있다. 복합재료 구조물 제작 시 발생 가능한 섬유각도의 어긋남은 보통 +/-2도 정도로 알려져 있다. 이 질의 주된 내용은 세가지 준등방성 라미네이트의 적층각에 제작 시 휴먼에러로 발생 가능한 2도의 섬유각도의 어긋남을 상단 적층각에 -2도, 하단 적층각에 +2도를 적용하여 반사경내의 그로 인한 최대 비대칭 라미네이트의 기계적 성질인 확장강성, 비틀림 및 굽힘강성의 변화량을 측정/비교 하였다. 이러한 접근법은 π/n 준등방성 라미네이트내에 대한 적층각의 비대칭에 의해 야기되는 커플링 정도에 대한 기계적 특성을 민감도를 알아보기 위함이다. 표9는 적층각의 비대칭으로 인한 라미네이트내의 강성계수의 민감도 연구를 위한 $\pi/4$ 라미네이트의 적층순서를 보여준다. 표10의 결과에서 알 수 있듯이 이러한 비대칭으로 인한 π/n 라미네이트의 강성계수의 변화량은 표4에 나와있는 대칭 π/n 적층판의 강성분석과 비교할 때 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 비대칭 라미네이트에서의 굴곡강성계수 또한 방사방향으로 큰 변화가 있으며, 결과적으로 대칭 및 비대칭 π/n 라미네이트 강성분석의 유일한 차이점은 비대칭 효과로 인한 커플링 강성[B]이 존재하는 것으로 나타났다.

Table 9. Description of stacking sequence of asymmetric circular composite mirror based on $\pi/4$ quasi-isotropic lay-up sequence

Axis (deg.)	Asymmetric-unbalanced layup for analysis($\pi/4$, 24 layers, top half)											
On axis (0)	43	-47	-2	88	-2	88	-47	43	88	-2	43	-47
5	38	-52	-7	83	-7	83	-52	38	83	-7	38	-52
10	33	-57	-12	78	-12	78	-57	33	78	-12	33	-57
15	28	-62	-17	73	-17	73	-62	28	73	-17	28	-62
20	23	-67	-22	68	-22	68	-67	23	68	-22	23	-67
25	18	-72	-27	63	-27	63	-72	18	63	-27	18	-72
.
.
.
.
360	43	-47	-2	88	-2	88	-47	43	88	-2	43	-47

Axis (deg.)	Asymmetric-unbalanced layup for analysis($\pi/4$, 24 layers, bottom half)											
On axis (0)	47	-43	2	92	2	92	-43	47	92	2	47	-43
5	42	-48	-3	87	-3	87	-48	42	87	-3	42	-48
10	37	-53	-8	82	-8	82	-53	37	82	-8	37	-53
15	32	-58	-13	77	-13	77	-58	32	77	-13	32	-58
20	27	-63	-18	72	-18	72	-63	27	72	-18	27	-63
25	22	-68	-23	67	-23	67	-68	22	67	-23	22	-68
.
.
.
.
360	47	-43	2	92	2	92	-43	47	92	2	47	-43

Table 10. Variations of [B] and [D] matrices for 24 layer asymmetric laminate based on stacking sequence of π/n quasi-isotropic laminate using unidirectional material. Black values indicate for ideal laminate mechanical properties and red and blue values indicate maximum (top) and minimum (bottom) values of corresponding bold values of circular mirror in radial variation.

Coupling stiffness [Gpa-mm ²]	=	2.568E-01	7.265E-01	2.349E-01	2.349E-01	0.000E+00	4.196E-01
		1.177E-02	4.079E-02	4.079E-02	4.079E-02	0.000E+00	0.000E+00
		2.349E-01	2.349E-01	7.265E-01	7.265E-01	0.000E+00	4.196E-01
		4.079E-02	4.079E-02	1.177E-02	1.177E-02	0.000E+00	0.000E+00
		0.000E+00	4.196E-01	0.000E+00	4.196E-01	2.349E-01	2.349E-01
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.079E-02	4.079E-02
Flexural stiffness [Gpa-mm ²]	=	1.435E+02	1.744E+02	4.938E+01	5.174E+01	4.143E+00	1.165E+01
		1.388E+02	4.345E+01	4.345E+01	4.345E+01	5.213E-04	5.213E-04
		4.938E+01	5.174E+01	1.585E+02	1.744E+02	1.165E+01	1.165E+01
		4.345E+01	1.388E+02	1.388E+02	1.388E+02	5.213E-04	5.213E-04
		4.143E+00	1.165E+01	1.165E+01	1.165E+01	5.440E+01	5.676E+01
		5.213E-04	5.213E-04	5.213E-04	5.213E-04	4.847E+01	4.847E+01
$\pi/3$ Laminate							
Coupling stiffness [Gpa-mm ²]	=	1.419E-01	4.670E-01	0.000E+00	2.671E-01	3.422E-01	3.422E-01
		7.577E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.835E-02	3.835E-02
		0.000E+00	2.671E-01	1.419E-01	4.670E-01	2.003E-01	3.422E-01
		0.000E+00	0.000E+00	7.577E-03	7.577E-03	3.835E-02	3.835E-02
		3.422E-01	3.422E-01	2.003E-01	3.422E-01	0.000E+00	2.671E-01
		3.835E-02	3.835E-02	3.835E-02	3.835E-02	0.000E+00	0.000E+00
Flexural stiffness [Gpa-mm ²]	=	1.588E+02	1.604E+02	4.861E+01	4.861E+01	1.878E+00	4.883E+00
		1.442E+02	4.657E+01	4.657E+01	4.657E+01	8.397E-02	8.397E-02
		4.861E+01	4.861E+01	1.448E+02	1.604E+02	1.878E+00	4.883E+00
		4.657E+01	1.442E+02	1.442E+02	1.442E+02	8.397E-02	8.397E-02
		1.878E+00	4.883E+00	1.878E+00	4.883E+00	5.363E+01	5.363E+01
		8.397E-02	8.397E-02	8.397E-02	8.397E-02	5.159E+01	5.159E+01
$\pi/4$ Laminate							
Coupling stiffness [Gpa-mm ²]	=	3.633E-01	1.026E+00	1.174E-01	4.210E-01	1.230E-01	6.907E-01
		7.514E-02	2.878E-02	2.878E-02	2.878E-02	4.123E-02	4.123E-02
		1.174E-01	4.210E-01	1.284E-01	1.026E+00	6.907E-01	6.907E-01
		2.878E-02	7.514E-02	7.514E-02	7.514E-02	4.123E-02	4.123E-02
		1.230E-01	6.907E-01	6.907E-01	6.907E-01	1.174E-01	4.210E-01
		4.123E-02	4.123E-02	4.123E-02	4.123E-02	2.878E-02	2.878E-02
Flexural stiffness [Gpa-mm ²]	=	1.467E+02	1.711E+02	5.473E+01	5.473E+01	6.017E+00	1.157E+01
		1.428E+02	4.045E+01	4.045E+01	4.045E+01	9.473E-02	9.473E-02
		5.473E+01	5.473E+01	1.446E+02	1.711E+02	5.133E+00	1.157E+01
		4.045E+01	1.428E+02	1.428E+02	1.428E+02	9.473E-02	9.473E-02
		6.017E+00	1.157E+01	5.133E+00	1.157E+01	5.975E+01	5.975E+01
		9.473E-02	9.473E-02	9.473E-02	9.473E-02	4.547E+01	4.547E+01
$\pi/6$ Laminate							

그림 2은 표10의 결과에 기초한 비대칭 라미네이트에서의 D_{11} 방사형 변화를 나타낸 것이다. 결과에서 보여주는 것처럼 대칭과 비대칭 사이의 강성변화의 차이는 0.05% 미만인 것으로 나타났다. 비대칭 라미네이트의 경우 표10에서 보여주듯이 라미네이트내의 커플링 강성계수가 존재하는 것을 보여준다. 그러나 커플링 강성 행렬에 존재하는 B_{11} , B_{22} , B_{12} 등의 커플링 강성계수의 값은 표면변형의 큰 영향을 줄 수 있는 확장강성계수 A_{11} , A_{22} 및 굽힘강성계수 D_{11} , D_{22} 보다 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 비대칭 라미네이트내의 굽힘강성계수의 비 또한 대칭인 준등방성 라미네이트와 거의 동일한 것으로

확인되었다. 표 10, 11, 12에서 보여주듯이 D_{12}/D_{11} 의 비율 범위는 14.62 ~ 60.1%로 대칭 라미네이트의 경우와 같이 $\pi/4$ 에서 변화가 가장 적고, $\pi/6$ 라미네이트에서 최대로 나타났다. 또한 대칭의 적층순서를 가진 라미네이트의 결과와 유사하게 굽힘으로 인한 비틀림 계수인 D_{16} 의 값도 축 방향 강성계수인 D_{11} 보다 훨씬 작은 것으로 나타났다. 또한 비대칭의 경우에도 대칭의 경우와 같이 방사형 방향에서 D_{12} 와 D_{11} 의 값이 동일하게 나타났다. 이것은 단방향 섬유재료의 적층으로 인한 섬유방향 의존성이 동일하게 비대칭 라미네이트에서도 존재한다는 것을 의미한다.

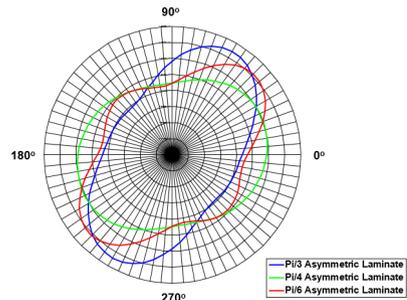


Fig. 2. Radial variations of D_{11} in asymmetric laminates. Note: 25.63% variation of D_{11} in $\pi/3$, 19.81% variation of D_{11} in $\pi/6$, and 11.23% variation of D_{11} in $\pi/4$ laminate

Table 11. Percentage change in variation of D_{12}/D_{11} in asymmetric laminates

	D_{12}/D_{11} in $\pi/3$	D_{12}/D_{11} in $\pi/4$	D_{12}/D_{11} in $\pi/6$
Ideal laminate (at 0 degree), (1)	0.3443	0.3062	0.3736
Maximum value, (2)	0.3586	0.3364	0.3785
Minimum value, (3)	0.2491	0.2935	0.2364
% D_{12}/D_{11} between (1) and (2)	4.17	9.84	1.31
% D_{12}/D_{11} in values between (2) and (3)	43.94	14.62	60.10

Table 12. Comparison of bend-twist ratios in asymmetric laminates using unidirectional material. Note: ideal (0 degree)

Bend-twist ratios in π/n quasi-isotropic asymmetric laminate with CFRP			
$\pi/3$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.44E-01	2.88E-02	8.16E-02
Max.	3.59E-01	7.35E-02	8.12E-02
Min.	2.49E-01	3.76E-06	3.06E-06
$\pi/4$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.06E-01	1.19E-02	1.19E-02
Max.	3.36E-01	3.23E-02	3.16E-02
Min.	2.94E-01	5.82E-04	5.25E-04
$\pi/6$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.74E-01	4.11E-02	3.51E-02
Max.	3.79E-01	7.35E-02	7.99E-02
Min.	2.36E-01	6.37E-04	5.54E-04

동일한 조건으로 단섬유 복합재료를 사용했을 때의 비대칭 적층각의 영향성 평가도 수행하였다. 표13 및 14는 단섬유 복합소재를 사용하여 비대칭 적층을 적용하였을 때의 확장강성, 커플링계수 및 굽힘강성계수의 변화량과 강성계수의 비를 나타낸 것이다. 표에 도식된 결과에서 보여주는 것처럼 단 섬유 재료를 사용하는 비대칭 라미네이트에서의 굽힘-비틀림 강성계수의 비율 또한 모든 방사방향으로 일정한 것으로 나타났다.

Table 13. Variations of [A], [B], and [D] matrices for 24 layer asymmetric laminate based on stacking sequence of π/n quasi-isotropic laminate using chopped mat (Homogenous material). Note: no variations

Extensional stiffness [Gpa-mm]	=	1.827E+02	5.690E+01	0.000E+00
		5.690E+01	1.827E+02	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	6.291E+01
Coupling stiffness [Gpa-mm ²]	=	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Flexural stiffness [Gpa-mm ³]	=	1.528E+02	4.759E+01	0.000E+00
		4.759E+01	1.528E+02	0.000E+00
		0.000E+00	0.000E+00	5.261E+01

Table 14. Comparison of bend-twist ratios in asymmetric laminates using short fiber material (Homogenous material)

Bend-twist ratios in π/n quasi-isotropic asymmetric laminate with Short Fiber			
$\pi/3$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.11E-01	6.95E-07	6.95E-07
Max.	3.11E-01	7.59E-07	7.59E-07
Min.	3.11E-01	6.07E-08	6.07E-08
$\pi/4$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.11E-01	3.05E-22	3.05E-22
Max.	3.11E-01	1.84E-07	1.84E-07
Min.	3.11E-01	1.57E-23	1.57E-23
$\pi/6$	D_{12}/D_{11}	D_{16}/D_{11}	D_{26}/D_{11}
Ideal	3.11E-01	8.18E-08	8.18E-08
Max.	3.11E-01	7.51E-07	7.51E-07
Min.	3.11E-01	8.10E-08	8.10E-08

4. 결론

단방향연속 복합재료를 사용한 준등방성 복합재 광학 반사경은 방사방향으로 균일한 확장강성계수[A]와 낮은 열팽창계수(CTE)의 특성으로 인해 기존의 석영 등의 무거운 광학장비를 대체할 미래의 광학분야에 적합한 것으로 잘 알려져 있지만, 적응효과로 인한 반사경내의 굽힘강성계수[D]의 방사형 변화는 필연적이다. 복합재 광학분야에서 이러한 굽힘강성계수값의 방사형 변화는 능동형/자율형 반사경의 지상 및 우주공간에서의 적용에 표면변형으로 인한 문제를 유발할 수 있다. 따라서 적층으로 인한 굽힘강성계수값의 변화를 제거하는 것은 복합재 광학분야에서 가장 시급히 다뤄야 할 문제이다. 본 논문 연구결과를 바탕으로 적응순서의 효과에 의한 굽힘강성계수의 방사방향 변화를 최소화 하려면 다음과 같은 2조건이 만족해야 한다.

1. 고전 적층판 이론의 굽힘강성계수[D] 계산식에 의거, 라미네이트를 구성에 사용될 복합재료의 기계적 특성이 섬유의 방사형 의존도[Q_k]가 낮은 소재를 사용하거나,
2. 라미네이트 내의 플라이 위치 의존성의 변화 즉 $h_k^3 - h_{k-1}^3$ 이 최소화 되어야 한다.

전자는 공간적으로 섬유가 방사형 방향으로 흩어져 있는 단섬유 복합재료(short fiber material)나 chopped mat.와 같이 섬유방향에 덜 민감한 소재를 사용하여 이루어 질 수 있으며, 후자는 라미네이트를 구성하고 있는 총 플라이수를 늘림으로써 가능하게 할 수 있다. 하지만 후자의 경우 구조물의 무게증가가 필연적 이어서 현실적이지 않다. 위의 두 조건을 만족하기 위해서는 매우 얇고 섬유방향의 의존도가 거의 없는 복합소재가 필요하다. 현재의 복합재료 기술이 플라이수를 무한정 늘릴 수 있는 매우 얇은 박판의 라미나 복합재료 제조 기술이 존재하지 않기 때문에 섬유방향의 의존도가 낮은 라미나 소재를 사용하는 것이 굽힘강성계수의 변화량을 줄이는 유일한 방법일 수 있다.

또한 일반적으로 라미네이트내의 굽힘-비틀림 영향성은 총 플라이수가 16장이 넘어가는 라미네이트내에서는 굽힘강성계수로 인한 영향성이 감소되는 것으로 알려져 있으나, 본 논문에서 연구에 적용된 라미네이트의 총 플

라이수는 24장으로 그 효과가 무시할 정도가 아니라는 것을 보여주었다.

결론적으로 균일하게 분산된 단섬유 복합재료는 원형 안테나 또는 광학거울과 같은 광학분야에서 연속 섬유 복합소재보다 우수하게 적용될 수 있다. 하지만 현실적으로 단섬유 복합소재 즉 *chopped mat*, *veil* 등의 소재들 또한 공간적으로 균일한 소재라고 단정 지을 수 없으며 다양한 기계적 성질을 나타낼 수 있다.

그렇지만 단섬유 복합재료로 충분히 흩어진 섬유 배향층을 갖는(공간에 섬유가 임의로 분포하도록) 라미네이트를 적층하고 또한 최대한 라미나 제품의 두께가 얇은 제품을 사용하면 라미네이트내에서 방사형으로 균일한 확장강성 및 굽힘강성계수의 특성을 갖게 할 수 있으며, 이러한 단섬유 복합재료의 사용이 단방향연속 복합재료 보다 광학분야에 더 적절할 것으로 판단된다.

References

[1] Abusafieh, Abdel, Connell, S.J. "Lightweight space mirrors from carbon fiber composites", *SAMPE Journal*, vol. 38, pp. 46-55, 2002

[2] Romeo, Robert C., Chen, Peter C., "CFRP composite thin-shelled mirrors for future space telescopes", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 4849, pp. 86-93, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.460550>

[3] Chen, Peter C. (Composite Mirror Applications, Inc), Romeo, Robert C., "Ultra lightweight composite replica mirror technology", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 4003, pp. 396-405, 2000

[4] Romeo, Robert C. (Composite Mirror Applications, Inc., CMA), Martin, Robert N., "Progress in 1m-class lightweight, CFRP composite mirrors for the ULTRA telescope", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 6273, pp. 62730S, 2006

[5] Massarello, Jack J. (Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate), Hochhalter, Jake D., Fuierer, Paul A., and Maji, Arup K., "Composite mirror replication: curing, coating and polishing", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5868, pp. 1-10, 2005

[6] Bennett, H. E. (Bennett Optical Research Inc.), Blazek, H. F., Danielson, A. O., "Large lightweight low scatter composite active/adaptive mirror development", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 6306, Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications IV, pp. 63060Q, 2006

[7] Paradies, Rolf, "Designing quasi-isotropic laminates with

respect to bending", *Composites Science and Technology*, vol. 56, pp. 461-472, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00006-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00006-1)

[8] J. D. Hochhalter, J. I. Massarello, A. K. Maji, and P. A. Fuierer, "The origins of fiber print-through in light weight composite optics," *Proc. SPIE, The International Society for Optical Engineering, Novel Optical Systems Design and Optimization IX*, vol. 6289, id 628902, 2006

[9] J. J. Massarello, J. S. Welsh, J. D. Hochhalter, A. K. Maji, P. A. Fuierer, "Fiber print-through mitigation technique for composite mirror replication," *Journal of Optical Engineering*, vol. 45, 123401, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2402497>

김 경 표(Kyung-Pyo Kim)

[정회원]



- 2009년 5월 : 미 캔자스대 항공우주공학(공학박사)
- 2010년 2월 ~ 2012년 2월 : 한국항공우주연구원 선임연구원
- 2012년 3월 ~ 2017년 2월 : 대한항공기술연구원 선임연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한라대학교 기계자동차공학부 조교수

<관심분야>

고체역학, 복합재역학(설계/해석/시험)