

평직유리섬유강화 에폭시 적층판의 기계적 특성 이방성

김연직*

전북대학교 공과대학 기계설계공학과

Mechanical Properties Anisotropy of Plain Weave Glass Fabric Reinforced Epoxy Resin Laminates

Yonjig Kim*

Division of Mechanical Design Engineering, College of Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea
(Received 2 August 2008 / Accepted 16 December 2008)

Abstract : The anisotropic mechanical properties were measured for the three orthogonal orientations of plain weave glass fabric reinforced epoxy resin laminate. In tensile and flexural tests, axial and edge type specimens failed by pull-out of warp and fill yarns, respectively. In contrast, the thickness type specimens failed by adhesive failure process. Longitudinal cracking occurred in several of the edge type specimens during tensile test. That cracking caused pop-in in the stress-strain curve. Defects induced by improper coupon machining caused that cracking.

Key words : Composite anisotropy(복합재료 이방성), Glass fiber reinforced plastic(유리섬유강화 플라스틱), Autoclave molding(오토클레이브 성형), Plain weave prepreg(평직 프리프레그), Flexural strength(굽힘강도)

Nomenclature

- AT : axial type tensile specimen
- ET : edge type tensile specimen
- TT : thickness type tensile specimen
- AF : axial type flexural specimen
- EF : edge type flexural specimen
- TF : thickness type flexural specimen

1. 서론

최근 자동차공업 분야에서는 자동차의 성능 향상과 함께 환경오염을 줄이기 위한 노력이 다방면으로 진행되고 있다. 그 중 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화하고 연료절감을 통해 환경오염을 줄일 수 있는 가장 효과적인 방

법으로 인식되고 있다. 경량화를 위해 자동차에 사용되는 플라스틱 소재는 알루미늄합금과 거의 비슷한 8% 수준이며 아직은 내장부품과 범퍼, 연료탱크 등에 한정되어 있다.

한편 섬유강화 복합재료는 필요성에 맞도록 설계할 수 있는 장점을 가지고 있어서 기계, 우주항공, 해양 및 토목 등의 분야에 활용되고 있으며 오늘날 자동차 분야에도 가능성이 타진되고 있다.^{1,2)} 유리섬유는 고강도, 고강성이며 상대적으로 싸고 쉽게 구입할 수 있으며, 뛰어난 경화성을 갖는 에폭시 수지는 점착성, 내약품성, 내식성, 내열성이 좋을 뿐만 아니라 가공성, 내마모성, 치수안정성이 우수하고 수지의 종류, 경화제의 선택과 배합에 의해 폭넓은 요구에 대응할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 이들을 조합한 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic ; GFRP)이 폴리머기지

*Corresponding author, E-mail: yonjig@chonbuk.ac.kr

복합재료(Polymer Matrix Composite ; PMC)의 대표적인 복합시스템의 하나로 자리 잡고 있다.³⁾

복합재료 부품의 설계는 대상 복합재료에 대해 조사된 기초 데이터에 강하게 의존한다. 지금까지 많은 연구자들은 강화섬유의 함량, 섬유 종류와 형태, 수지의 종류, 부하의 형식 등에 따른 강도 및 파괴 특성에 관한 가치 있는 결과들을 제시하였다.⁴⁻⁸⁾ 그러나 복합재료 설계에 있어서 가장 먼저 분석되어야 하는 이방성의 문제는 복합재료의 유용성을 결정하는 가장 중요한 과제이면서도 그에 관한 연구결과는 여전히 부족하다. 구성요소의 다양성, 강화 방법과 제조 방법의 다양성, 하중 형식의 특이성 만큼이나 나타나는 복합재의 이방성은 독특하다.^{9,10)} 따라서 복합재료의 이방성에 관한 문제는 재료와 조건의 유사성만으로 유추될 수 없으며 각각의 사례에 대한 수많은 반복 연구를 통해 실험 중 나타날 수 있는 사소한 문제 하나까지도 검토·정리되어야 한다.

간단한 기계적인 강도시험을 통해 유리섬유강화에폭시 수지 적층재의 이방특성을 조사하는 것이 이 연구의 주된 목적이다. 자체 제작한 GFRP 적층재를 대상으로 샘플의 채취 방향에 따른 기계적 특성의 변화를 설명하고 그에 따른 파괴기구에 대해 논의한다. 또 시험 중 일부 시험편에서 발생한 팝인(pop-in) 현상에 대해 조사하고 그 원인과 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서도 검토한다.

2. 재료 및 실험

2.1 GFRP의 제작

실험에 제공된 복합재료는 범용의 유리섬유(E-glass)를 경사(warp yarn)와 위사(fill yarn)로 1본씩 교차시킨 직물형태의 강화용 섬유를 경화시 수축반응이 매우 작고, 우수한 기계적 성질을 가지며 건조하거나 습한 상태에서도 뛰어난 절연 특성을 보여주는 TGDM(Tetraglycidyl Diaminodiphenyl Methane) 계열의 열경화성 에폭시 수지(CTD-112P)에 함침시킨 평직 프리프레그(plain weave prepreg)를 사용하여 제작하였다. 복합재료 제조에 사용한 유리섬유의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of E-glass

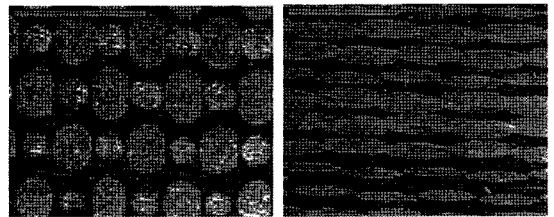
(a) Chemical compositions(%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	CaF ₂
54	14	20.5	0.5	8	1

(b) Mechanical properties

Elastic modulus(GPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)	Dielectric strength(kV/cm)
72.4	3,450	5.0	103

진공백 내에 평직인 유리섬유 프리프레그를 적층하고 오토클레이브(autoclave) 내에서 예열한 다음 177°C에서 2시간 유지한 후 200°C에서 7시간 경화시켜 성형하였으며 경화시의 압력은 560kPa이었다.¹¹⁾ 적층재는 350×350×130mm 크기의 블록으로 제조되었으며 731장의 프리프레그가 사용되었다. 적층재는 Photo. 1에 보이는 바와 같이 고온, 고압으로 압밀되어 기공이 거의 없으며 플라이의 간격이 비교적 균일하고 밀도는 1.88 g/cm³였다. 적층재에 포함된 유리섬유의 최종 함량은 40.53vol.%였다.



(a) Surface view

(b) Cross section view

Photo. 1 Surface and cross section of the fabricated composite using autoclave molding

2.2 시험편

시험재의 기계적 특성 평가는 인장시험과 굽힘시험을 통해 이루어졌다. 실험에 사용한 시험편은 각각 강화플라스틱에 대한 시험을 규정하고 있는 ASTM D 3039¹²⁾와 ASTM D 790¹³⁾에 따라 Fig. 1과 같이 제작하였다. 인장 시험편은 시험편 몰림부의 손상을 막기 위해 두께 2mm인 GFRP 판재를 25mm 길이로 절취하여 시험편의 양단, 양면에 탭을 부착하였다. 전체 길이는 130mm 이고 표점거리는 50mm이다. 굽힘 시험편의 경우엔 인장 시험편과 폭 및 두께가 같으며 길이는 80mm이다.

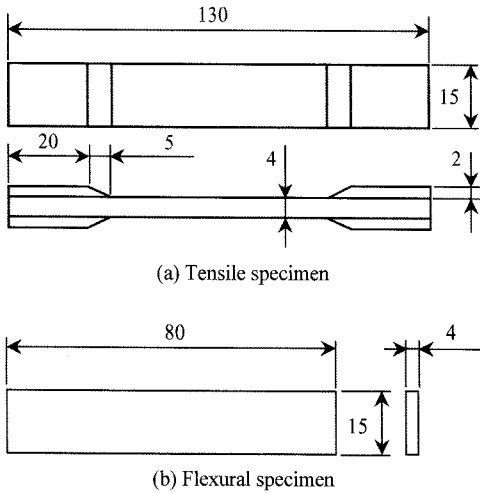


Fig. 1 Configurations of tensile and flexural specimen

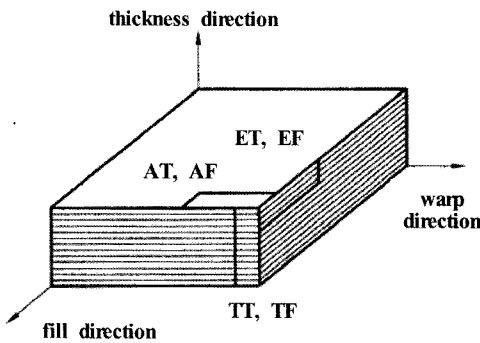


Fig. 2 Definition of three types of tensile and flexural specimens

시험재의 기계적 특성에 대한 이방성은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 제작한 GFRP 블록으로부터 세 개의 다른 방향에서 시험편을 채취하여 동일한 실험을 통해 판단하였다. 인장 시험편은 시험편의 면이 블록의 두께 방향에 수직이고 경사 또는 위사 방향으로 부하되는 AT재(axial type tensile specimen), 시험편 면이 경사 또는 위사에 수직이고 경사 또는 위사 방향으로 하중이 걸리는 ET재(edge type tensile specimen)와 시험편의 표면이 경사 또는 위사 방향에 직각이고 두께 방향으로 부하가 이루어지는 TT재(thickness type tensile specimen)의 세 종류다. 또한 굽힘 시험편은 인장 시험편과 같은 방법으로 채취되며 각각 AF재(axial type flexural specimen), EF재(edge type flexural specimen) 및 TF재(thickness type flexural specimen)로 명명한다.

2.3 실험방법

인장시험과 굽힘 시험은 각각 ASTM D 3039와 ASTM D 790에서 추천하는 절차를 따라 수행하였다. 모든 시험에는 알앤비(R&B)사의 만능재료시험기인 Unitech-M(용량 10톤)을 이용하였으며 굽힘 시험인 경우 GFRP의 강도수준을 고려하여 로드셀을 2톤으로 교체하여 실험하였다.

인장 시험인 경우 부하속도는 AT와 ET재에 대해서는 2mm/min, TT재인 경우는 시험규격의 조건¹²⁾을 맞추기 위해 0.5mm/min로 조정하였다. 이 때 변위의 측정은 2in의 표점거리를 갖는 Epsilon Technology Corp.의 신율계(Model 3542)를 통해 이루어졌다. 인장 시험에서의 탄성계수는 AT, ET 및 TT재 모두 0.1~0.3%의 인장 변형률 범위 안에서 코드계수(chord modulus)를 계산하여 결정하였다.

굽힘 시험인 경우 시험편의 기하학적 형상을 고려하여 1.7mm/min의 부하속도를 적용하였고 가장 약한 굽힘 강도를 보이는 TF재는 0.5mm/min의 속도로 시험하였다.¹³⁾ 또한 지지점간 거리는 64mm로 하였으며 굽힘 시험에서의 탄성계수는 접선탄성계수(tangent modulus of elasticity)로 결정하였다.

모든 시험 조건에 대해 5개씩의 시험편을 사용하였고 제시된 특성 치는 평균값이다. 한편 시험 조건에 따른 파면 양상과 파괴 기구의 관찰은 주사전자현미경을 통해 이루어졌다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장 특성 이방성

세 개의 특성 방향 시험편에 대해 인장 시험을 행하여 얻은 대표적인 응력-변형률 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 경사 또는 위사가 하중을 부담하는 AT와 ET재는 시험 초기 knee 현상으로 알려진 천이점(transition point)이 나타나며 그 후 파괴까지 전형적인 선형거동을 보여준다. 강화섬유가 평직인 경우 경사와 위사가 1본씩 교차되고 각 날 실(filament)의 크기도 같으므로 두 시험편의 인장 거동은 유사하다. 반면 TT재는 시험 초기 천이점이 없으며 매우 작은 연신율과 함께 파단까지 강성의 변화가 거의 없는 직선형 거동을 보여준다. 이는 예상된 것으로 적어도 강화재의 경사 또는 위사가 TT재의 인장 특

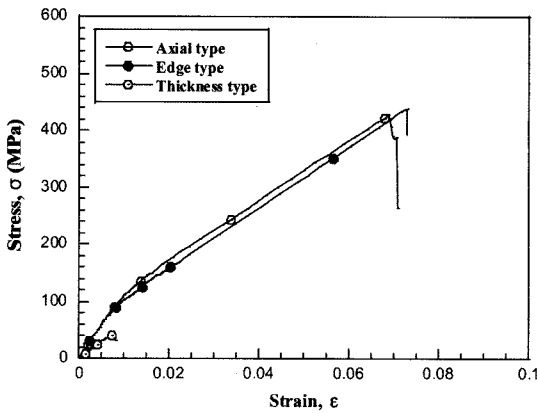


Fig. 3 Tensile stress-strain curves of AT, ET and TT specimens

성에 아무런 영향을 주지 못한다는 사실을 반영한다.

세 방향 시험편에 대한 인장 특성치를 Table 2에 정리하였다. ASTM D 709¹⁴⁾에서는 열경화성 수지 적층재의 표준사양을 분류해 놓았는데 이 실험에 사용한 GFRP재는 G10 등급의 경사 방향 최소 인장 강도 276MPa를 만족하고 있다. 이 등급은 유리섬유 직물을 에폭시 수지에 강화시킨 적층재의 표준사양 중에서 실온에서 높은 기계적 강도를 가지며, 특히 습한 조건에서도 높은 절연강도 특성을 갖는 등급으로 얇은 판(sheet)이나 튜브(rolled tube) 형태의 부품소재로 사용하기에 적합하다. 따라서 시험재는 실용제품으로 사용이 가능한 등급임이 확인된다.

AT재인 경우 강화재인 유리섬유직물이 평균 22겹 시험편 면에 평행하게 넓게 배열되어 있는 반면 ET재는 약 84겹의 직물이 두께 방향과 나란하게 좁게 자리 잡고 있다. 이러한 차이는 ET재에서 다소 향상된 인장 특성이 나타날 가능성을 기대하게 하지만 실험 결과는 Table 2에 보이는 바와 같이 거의 같은 값을 보여 준다. TT재는 AT나 ET재의 거의 1%에도 미치지 못하는 단위 면적당의 파괴에너지가

Table 2 Tensile properties of three types of specimens

Specimen type	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)	Fracture energy (kJ/m ²)
AT	429	11.57	7.33	1424
ET	439	11.48	7.67	1469
TT	41.3	5.70	0.82	14.2

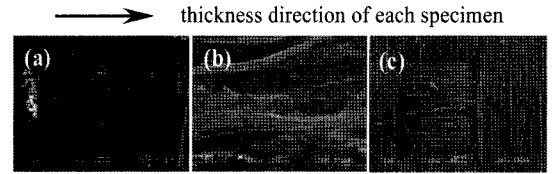


Photo. 2 SEM images of fracture surfaces of three types of specimens after tensile test, (a) axial type, (b) edge type and (c) thickness type

시사하듯이 강화 섬유가 아닌 다른 구성요소가 파괴에 영향을 미치는 것으로 예상할 수 있다.

각 시험편의 파면 사진을 Photo. 2에서 보여준다. AT재에서 위사의 손상은 거의 보이지 않고 부하 방향에 직각으로 경사가 파단된 것을 알 수 있다. 또한 파단된 경사가 빠져나간 틈과 함께 위사가 상당부분 일어나 있다. 이러한 관찰은 하중이 증가함에 따라 하중 방향에 직각 방향으로 모재나 위사에서 균열이 발생하여 경사와 만나면 하중 방향으로 경사면을 따라 상당부분 박리가 진행되며 이때 시험편의 신장과 함께 위사도 섬유 울들 사이에서 박리되고 한계 하중에 이르렀을 때 경사가 파단되어 시험편이 최종 파괴에 이른다라는 설명이 가능하다.

유사한 방법으로 ET재에서는 경사의 손상이 없고 하중을 부담하는 위사가 파단되어 뺏혀 나오는 형태(pull-out)이므로 AT재와 같이 파면에 크고 깊은 틈이 많이 관찰된다. 그러나 Photo. 2(c)의 TT재에서는 경사와 위사 어느 쪽에도 손상이 없으며 직조된 유리섬유가 파면에 깨끗하게 노출되어 나타나므로 강화섬유 면과 에폭시 수지의 계면에서 파괴가 진행된 것을 알 수 있다. 이러한 형태의 파괴는 접착제 접합부의 파괴에서 주요 파단 기구의 하나로 알려진 점착파괴(adhesive failure)¹⁵⁾와 매우 유사하다.

3.2 팝인과 인장 특성

각종 금속 또는 비금속 소재에 대한 인장 시험에서 팝인 현상을 종종 경험하게 된다. 일반적으로 이러한 팝인은 재료 내부에 존재하는 개재물 등과 같은 결함요소가 순간적으로 불안정파괴¹⁶⁾를 일으킬 때 발생하는 것으로 알려져 있다. 팝인은 흔하게 관찰되는 현상임에도 불구하고 특히 PMC재에서의 팝인에 대한 설명은 매우 드물다.

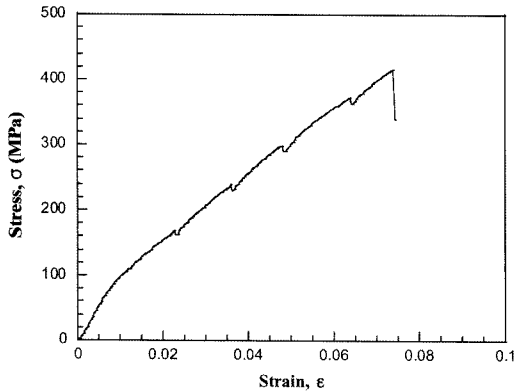


Fig. 4 Pop-ins in stress-strain curve of edge type tensile specimen

Fig. 4는 일부 시험편에서 관찰된 팝인을 보여준다. 본 연구에서 팝인은 주로 날 방향 시험편인 ET재에서 일부 관찰되었으며 AT와 TT재에서는 확인되지 않았다. 복합재료는 계면 등 많은 취약 요소를 가지고 있으나 팝인의 발생이 구조적인 문제로 인한 것 이라기보다는 복합재의 제작이나 시험편의 가공과정에서 발생할 수 있는 결함 요소가 더 큰 것으로 판단된다. 이러한 생각은 같은 블록에서 채취한 AT나 TT재에서는 팝인이 관찰되지 않았다는 점과 본 연구에서처럼 오토클레이브를 이용해서 제작한 복합재료는 Photo. 1에서 확인된 바와 같이 기공이 거의 없고 균일하며 치밀한 조직을 갖는다는 사실로부터 추정할 수 있다. 시험편은 밀링을 이용하여 규격화된 크기로 최종 가공되기 전 초경합금의 원형톱 기계를 사용하여 GFRP블록을 소피로 절단하고 다이아몬드 커터로 슬라이스 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 일부 시험편의 층간이나 모재에 결함이 생겼을 가능성을 배제할 수 없다. 이러한 결함들은 부하 중 시험편의 신장과 함께 하중 지지능력이 작은 모재 쪽에 시험편 길이 방향으로 크고 작은 종 균열을 만들고 동시에 순간적으로 응력이 완화되는 팝인을 일으킨다. 실제로 시험 중 종 균열이 생김과 동시에 팝인이 일어나는 것을 명확하게 관찰할 수 있었다. 이때 하중의 대부분은 경사 또는 위사가 담당하므로 팝인으로 인한 응력 완화는 작으며 이후 응력은 다시 증가한다.

Photo. 3에서와 같이 모재에서의 종 균열은 대개 시험편의 두께를 관통하여 생기는데 AT재에서는

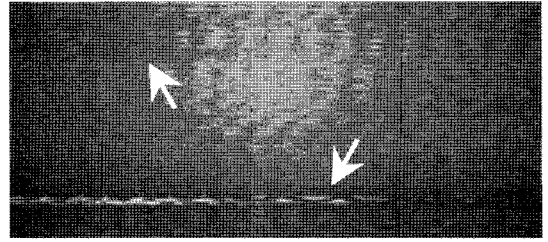


Photo. 3 Longitudinal cracks of edge type tensile specimen

위사가 종균열의 진행을 방해하므로 발생 가능성이 상대적으로 낮다. ET재인 경우는 모재 층이 시험편면에 직각 방향으로 배열되고 그 수 또한 AT재의 약 4배여서 종 균열의 발생이 상대적으로 용이하다.

팝인이 일어난 시험편의 인장 특성 치는 평균적으로 인장강도가 416MPa, 탄성계수 11.5GPa, 연신율 7.30%, 단위 면적당 파괴 에너지 1430kJ/m²로 정상 시험편에 비해 거의 차이가 없는데 이는 팝인이 섬유 손상과 관계없으며 오직 모재에서의 종 균열과 밀접한 관계가 있다는 것을 의미한다. 그림에도 본 논문에서는 팝인이 발생한 시험편에 대해서는 인장 특성 치를 계산하는데서 제외하였다.

3.3 굽힘 특성 이방성

적층 복합재의 구조적인 특징 중의 하나인 층간의 존재는 자동차용 부품소재 개발에 있어 주요한 관심 부분이며 특히 굽힘 특성과 관련된 층간의 거동¹⁷⁾은 매우 중요하다. Fig. 5는 세 방향 굽힘 시험편의 대표적인 굽힘 응력- 굽힘 변형률 곡선을 나타낸 것이다. AF, EF 및 TF재는 모두 부하 초기의 knee 현상은 없으며 파단까지 완벽한 선형 거동이다. AF재는 직물 면에 직각으로 굽힘 하중이 작용하여 경사에 굽힘 응력이 걸리는 형태이며, EF재는 직물 면의 날 방향으로 굽힘 하중이 작용하여 위사에 굽힘 응력이 유도되는 형식이다. 이러한 직물의 면 방향과 날 방향에서 굽힘 저항의 차이가 Table 3에서와 같이 굽힘 특성 치에 변화를 주지만 그 차이는 크지 않다. 그러나 TF재는 직물의 날 방향으로 굽힘 하중이 작용하지만 그에 대한 저항은 모재와 직물의 계면 또는 모재 그 자체의 몫이다. 따라서 측정된 모든 특성 치가 AF재나 EF재에 비해 현저히 낮다.

Photo. 4는 각 굽힘 시험편에 대한 파면 사진이다.

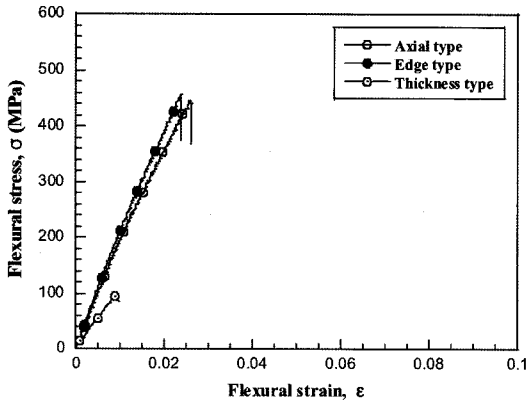


Fig. 5 Flexural stress-strain curves of AF, EF and TF specimens

Table 3 Flexural properties of three types of specimens

Specimen type	Flexural strength (MPa)	Tangent modulus of elasticity (GPa)	Elongation (%)	Fracture energy (kJ/m ²)
AF	434	18.98	2.58	42.04
EF	463	21.08	2.38	41.32
TF	95	10.04	0.97	3.50

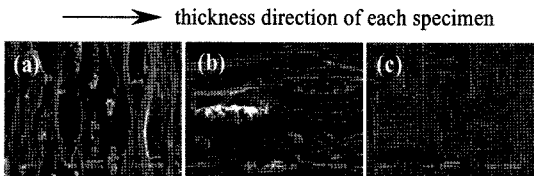


Photo. 4 SEM images of fracture surfaces of three types of specimens after flexural test, (a) axial type, (b) edge type and (c) thickness type

AF재와 EF재에서 굽힘 하중에 의한 층간 박리는 보이지 않는다. 다만 각각의 경우에 경사와 위사의 전부 또는 일부가 뿔어나간 흔적을 관찰할 수 있는데 뿔힘의 정도는 인장 시험의 결과에 비해 크지 않았다. 한편 AF재에서의 위사와 EF재에서의 경사는 전혀 손상이 없으며 각각을 구성하는 일부 날실들이 깨끗하게 박리(debonding)되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 AF재와 EF재에서 각각 위사와 경사가 굽힘 특성에 영향을 주지 못한다는 것을 의미한다. Photo. 4(c)의 TF재에서는 직물 면이 완벽하게 드러나 있으며 경사와 위사 어느 쪽도 심각한 손상은 없어 보인다. 약간의 에폭시 수지가 묻어 있으나 전체

적으로 직물과 모재 수지사이의 계면에서 파괴가 일어난 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 형식의 파괴는 같은 방향에 대한 인장 시험의 결과에서와 마찬가지로 접착제 접합부의 파괴 기구 중 점착 파괴¹⁵⁾에 해당한다. 결국 TF재의 굽힘 특성은 강화용 섬유 직물과 모재사이의 계면 특성에 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 차량용 부품 소재로 사용되려면 그 계면에서 일어날 수 있는 박리와 그로 인한 굽힘 특성의 정량적인 변화에 대한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

오토클레이브를 이용하여 평직유리섬유강화 에폭시 적층블록을 제작하고 세 개의 특성 방향에 대한 기계적 특성 이방성을 조사하였다.

- 1) 인장과 굽힘에 대한 파괴 기구는 축 방향인 경우 위사 또는 모재에서 발생한 균열이 경사와 만나면 경사면을 따라 박리가 일어나고 한계 응력에 도달했을 때 경사가 파단되어 뿔힘이 발생하는 형식이었다. 날 방향에서는 축 방향에서의 경사와 위사의 역할이 바뀐 형태로 진행되었다.
- 2) 두께 방향에서의 파괴는 인장과 굽힘 모두 접착제 접합부의 파괴에서 관찰되는 점착 파괴 형식을 나타내었다.
- 3) 시험편의 가공과정에서 발생할 수 있는 각종 결함은 인장 시험 중 시험편의 두께 방향을 관통하는 중 균열을 만들며 이것은 응력-변형률 곡선 상에 팝인을 만든다. 이러한 현상은 섬유 직물과 모재사이의 계면이 시험편의 두께 방향으로 배열된 날 방향 시험편에서 주로 발생하였다.
- 4) 중 균열은 모재 또는 섬유 직물과 모재사이의 계면에서 발생하여 부하 방향으로 진행하므로 하중을 부담하는 섬유에 손상을 입히지 않았다. 이 때문에 팝인 발생으로 인한 기계적 특성의 저하는 거의 없었다.

References

- 1) F. Dharmawan, G. Simpson, I. Herszberg and S. John, "Mixed Mode Fracture Toughness of GFRP Composites," Composite Structures,

- Vol.75, pp.328-338, 2006.
- 2) D. Lee, "Fabrication Methods for Composite Automotive Components," *Auto Journal*, Vol.28, No.1, pp.27-32, 2006.
 - 3) K. K. Chawla, *Composite Materials*, Springer-Verlag, New York, USA, pp.58-67, 1987.
 - 4) Y. Kim and J. Lim, "Synthetic Sea Water and Strain Rate Effects on Tensile Properties of E-Glass/Polyester Composites," *Kor. J. Materials Research*, Vol.2, No.2, pp.133-142, 1992.
 - 5) Y. Kim, I. Kwon, J. Lim and S. Chung, "Effect of Water Absorption on Fatigue Crack Growth Behavior of E-Glass/Polyester Composite," *Kor. J. Materials Research*, Vol.3, No.1, pp.84-94, 1993.
 - 6) R. O. Ochola, K. Marcus, G. N. Nurick and T. Franz, "Mechanical Behavior of Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites at Varying Strain Rates," *Composite Structures*, Vol.63, pp.455-467, 2004.
 - 7) A. B. Pereira, A. B. de Morais, M. F. S. F. de Moura and A. G. Magalhaes, "Mode I Interlaminar Fracture of Woven Glass/Epoxy Multidirectional Laminates," *Composites(A)*, Vol.36, pp.1119-1127, 2005.
 - 8) J. Lee, "The Stress-strain Relationship of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Compositem," *Transactions of KSAE*, Vol.4, No.5, pp.206-214, 1996.
 - 9) M. Sakai, R. C. Bradt and D. B. Fischbach, "Fracture Toughness Anisotropy of a Pyrolytic Carbon," *J. Materials Science*, Vol.21, pp.1491-1501, 1986.
 - 10) H. C. Kim, K. J. Yoon, R. Pickering and P. J. Sherwood, "Fracture Toughness of 2-D Carbon Fiber Reinforced Carbon Composites," *J. Materials Science*, Vol.20, pp.3967-3975, 1985.
 - 11) J. B. Schutz, P. E. Fabian, C. S. Hazelton, T. S. Bauer-McDaniel and R. P. Reed, "Effects of Cryogenic Irradiation on Electrical Strength of Candidate ITER Insulation Materials," *Cryogenics*, Vol.35, pp.759-762, 1995.
 - 12) ASTM D 3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2000.
 - 13) ASTM D 790, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2003.
 - 14) ASTM D 709, Standard Specification for Laminated Thermosetting Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2001.
 - 15) R. W. Messler jr., *Joining of Advanced Materials*, Butterworth-Heinemann, pp.107-141, 1993.
 - 16) T. L. Anderson, *Fracture Mechanics*, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, USA, pp.421-426, 1995.
 - 17) J. P. Hou and G. Jeronimidis, "Bending Stiffness of Composite Plates with Delamination," *Composites(A)*, Vol.31, pp.121-132, 2000.