

## 평직유리섬유 강화 에폭시 적층판의 저온 인장 특성

김 연 직<sup>†</sup>

(2008년 5월 20일 접수, 2008년 8월 19일 수정, 2008년 8월 25일 심사완료)

### Tensile Properties of Plain Weave Glass Fabric Reinforced Epoxy Resin Laminates at Low Temperatures

Yonjig Kim

**Key Words** : Polymer Matrix Composite(폴리머기지 복합재료), Glass Fiber Reinforced Plastic(유리 섬유강화 플라스틱), Autoclave Molding(오토클레이브 성형), Plain Weave Prepreg(평직 프리프레그), Tensile Chord Modulus of Elasticity(인장 현 탄성계수)

#### Abstract

To understand the tensile behaviors of GFRP at low temperature, three types of specimen have been used in this study. Tensile properties and fracture mechanisms for three orthogonal orientations of plain weave glass fabric reinforced epoxy resin laminate were investigated at temperature range of about -30 to 15°C. The tensile properties of axial and edge type specimen decrease slightly with decreasing temperature to -20°C. However, at -30°C the decreases in the tensile properties increased considerably. Below -20°C, thickness type specimen showed a marked decreases in the tensile properties. It was obvious that the fracture manner of thickness type specimen was adhesive failure at above -10°C and a mixed adhesive and cohesive failure at below -20°C.

#### 1. 서 론

PMC(Polymer Matrix Composite)는 고성능이며 제조공정이 쉽다는 장점 때문에 현대 공업용 재료의 중요한 부분을 차지하고 있다.<sup>(1,2)</sup> 비강도, 비강성이 기존 금속재료에 비해 크고, 원하는 방향으로 강성과 강도를 높여 재료의 낭비를 막을 수 있다는 특징 때문에 스포츠 용품을 포함한 가정용품에서부터 우주·항공 등 초 첨단분야에 이르기 까지 광범위한 산업분야에 사용된다. 특히 화학공업분야에서 탱크와 각종 용기 뿐만아니라 송유, 송수관 등은 거의 유리섬유강화 복합재로 제조되고 있다.<sup>(3)</sup>

한편 유리섬유는 고강도이고 열팽창계수가 크지 않아 구조물의 치수 안정성에 유리하며, 경화시 휘발성물질의 발생과 수축이 작고 화학물질에 강한 저항성을 가진 에폭시 수지와 함께 사용하여 범용의 복합재로 실용성을 높이고 있다.

오늘날 새로운 에너지원으로 핵융합로의 개발이 추진되고 있는 가운데 우리나라에서도 1995년 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)라는 핵융합 실험장치 건설에 착수하여 2007년 완공하기에 이르렀다. KSTAR의 핵심구성품인 전자석시스템에는 고전압, 대전류가 인가되고 큰 전자기력이 생기므로 충분한 절연강도를 갖는 소재가 필요하게 되어 고전압 절연재로 전기적 절연성과 기계적 성질이 우수한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)가 추천되고 있다.<sup>(4)</sup> 아울러 초전도 자석과 관련된 분야의 저온환경에도

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계설계공학부  
E-mail : yonjig@chonbuk.ac.kr  
TEL : (063)850-0826 FAX : (063)270-2460

각종 복합재의 적용이 적극 고려되고 있다.<sup>(5)</sup>

이렇듯 GFRP를 포함하여 에폭시 수지를 기지로 사용하는 많은 PMC들은 수지, 경화제 및 첨가제들의 종류가 다양하여 재료의 특성을 광범위하게 구현하는 것이 가능하므로 다방면에서 많은 효용성을 가진다. 이러한 이유로 PMC에 대한 많은 연구가 진행되어 강화섬유의 종류와 형태, 수지의 종류, 부하의 형식 등에 따른 강도 및 파괴 특성 등에 관한 가치 있는 결과들이 제공되고 있다.<sup>(6~9)</sup>

그러나 이들 재료는 실 사용분야에서 다양한 분위기 조건을 경험하게 되므로 다양한 환경에서의 파괴 및 강도 특성을 조사하는 것이 필요하다. 많은 연구자들에 의해 환경강도 특성에 관한 연구가 진행되었지만 주로 부식이나 고온 분위기에 집중되어 있고,<sup>(10~12)</sup> 일상에서 만나게 되는 저온 분위기에서의 PMC의 파괴 특성에 관한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 섬유강화 플라스틱 복합재의 실용 온도조건에서의 건전성을 확보할 목적으로 유리섬유강화 에폭시 적층재를 제작하여 상온과 저온 분위기에서 인장시험을 행하므로 강도특성과 파괴특성의 변화를 조사하였다. 또한 적층재로부터 시험편의 채취 방향을 달리하므로 각 온도조건에서의 이방특성도 평가하였다.

## 2. 재료 및 시험편

### 2.1 복합재료의 제조

복합재에 사용한 강화섬유는 범용의 유리섬유(E-glass)이며, 경사(Warp yarn)와 위사(Fill yarn)가 1본씩 교차하여 양방향의 강도가 일정한 평직 프리프레그(Plain weave prepreg)다. 이 프리프레그는 경화시 반응수축이 매우 작고, 우수한 기계적 성질을 보여주는 에폭시 수지를 기지(Matrix)로 하고 있다. 사용한 유리섬유의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

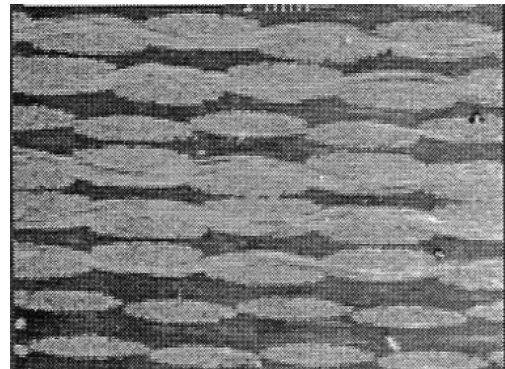
복합재료의 제조는 제품의 질을 높이기 위해 경화를 위한 열과 압밀을 위한 압력을 동시에 적용하는 성형법 중 가장 우수한 제조법으로 알려진 오토클레이브 성형법(Autoclave molding)을 이용하였다. 이 방법은 기포를 최소화하고 조직이 치밀한 장점이 있는 반면에 일괄 작업이 이루어지므로 경화사이클이 길고 생산비용이 높다.

**Table 1** Chemical compositions of E-glass(wt.%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>
54	14	20.5	0.5	8	1

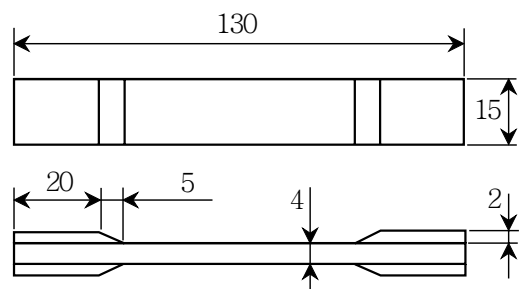
**Table 2** Mechanical properties of E-glass

Elastic modulus(GPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)	Dielectric strength(kV/cm)
72.4	3,450	5.00	103



**Fig. 1** Cross section of laminated composite

성형은 진공백 내에 열경화성 에폭시 수지를 기지로 하는 평직인 유리섬유 프리프레그를 적층하고 예열한 다음 내부 최고온도 650°C, 압력 3.5 MPa까지 가능한 오토클레이브 내에서 가열, 가압하는 방식<sup>(13)</sup>으로 진행하였다. 적층재는 350×350×130mm 크기의 블록으로 제조되었으며, 731장의 유리섬유 평직 프리프레그가 사용되었다. 적층재는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 고온, 고압으로 압밀되어 플라이의 간격이 균일하고 기공도 거의 관찰되지 않았다. 이때 유리섬유의 최종 함량은 약 40.53vol.%였다.



**Fig. 2** Configuration of tensile specimen

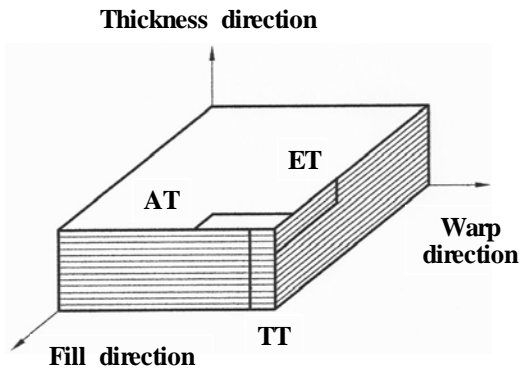


Fig. 3 Definition of three types of tensile specimen

## 2.2 시험편

저온에서의 인장특성 평가를 위해 고탄성계수의 섬유를 강화시킨 PMC재의 인장시험에 관한 표준 규격인 ASTM D 3039<sup>(14)</sup>에 따라 Fig. 2와 같은 시험편을 제작하였다. 시험편 물림부의 손상을 막기 위해 시판되는 두께 2mm의 GFRP 판재를 25mm 길이로 절취하여 시험편의 양단, 양면에 탭을 부착하였다. 시험편의 전체 길이는 130mm이며, 50mm의 표점거리를 갖는다.

시험재의 인장특성에 대한 이방성은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 제작한 GFRP 블록으로부터 세 개의 다른 방향에서 시험편을 채취하여 동일한 실험을 통해 판단하였다.

인장시험편은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 시험편의 면이 블록의 두께 방향에 수직이고 경사 또는 위사방향으로 부하되는 AT재(Axial type tensile specimen), 시험편면이 경사 또는 위사에 수직이고 경사 또는 위사 방향으로 하중을 가하는 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.

## 3. 실험방법

이방성 평가를 위해 준비한 AT, ET 및 TT 등 세 종류의 시험편은 ASTM D 3039의 절차에 따라 인장시험에 제공되었다. 시험은 알앤비(R&B)사의 만능재료시험기인 Unitech-M(용량 10톤)을 이용하였으며, 시험속도(Crosshead speed)는 AT와 ET재에 대해서는 2.0mm/min, TT재의 경우는 시험규격의 조건<sup>(14)</sup>을 맞추기 위해 0.5mm/min로 조정하

였다.

시험온도는 범용의 복합재료인 본 GFRP가 일 상에서 쉽게 경험할 수 있는 상온(15°C)~ -30°C 범위로 설정하였다. 저온 분위기를 조성하기 위해 직경 9.53mm인 연질의 동 튜브(Copper tube)를 코일 형으로 감고 튜브의 안쪽에 다수의 작은 구멍을 낸 다음 시험편을 내부에 설치한 후 -196°C의 액체질소를 흘려보낼 수 있도록 챔버(Chamber)를 제작하였다. 튜브 내의 액체질소 유량에 따라 구멍을 통해 분무되는 질소 증기의 양이 조절되어 쉽게 시험온도를 맞출 수 있었다.

시험 중 연신율의 측정은 2.0in.의 표점거리를 갖는 Epsilon Technology Corp.의 신율계(모델 3542)를 통해 이루어 졌으며 모든 데이터는 컴퓨터시스템을 통해 자동으로 기록, 저장되었다. 본 시험에서의 탄성계수는 AT, ET 및 TT재 모두 0.1~0.3%의 연신율 범위 안에서 코드계수(Chord modulus)를 계산하여 결정하였다. 이 방법은 천이점이 존재하는 경우에도 그 점이 코드계수를 계산하기 위한 연신율 범위 밖에 존재한다면 타당성을 갖는다.<sup>(14)</sup> 모든 시험조건에 대해 5개씩의 시험편을 사용하였고 제시된 특성치는 평균값이다.

한편 시험 조건에 따른 파면 양상과 파괴기구 의 관찰은 주사전자현미경을 통해 이루어 졌다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 축 방향 시험편의 인장 특성

AT재에 대한 대표적인 응력-변형률 곡선을 Fig. 4에서 보여준다. 모든 시험온도에서 시험 초기 응력-변형률 곡선에 knee 현상으로 알려진 천이점(Transition point)이 나타나며 그 후 파괴까지 전형적인 선형거동을 보여준다.

시험온도에 따른 축 인장특성을 Fig. 5에 정리하였다. 여기서 파괴에너지는 하중-변위 선도에서 파단 변형률까지 곡선의 하부면적을 시험편의 단면적으로 나눈 값이다. 모든 시험온도에서 경사 방향의 인장강도는 ASTM D 709<sup>(15)</sup>에서 정의하고 있는 G10 등급의 최소 인장강도 276MPa를 만족하고 있다. 이 등급은 유리섬유직물을 에폭시 수지에 강화한 적층 열경화성재료의 표준사양 중에서 실온에서 높은 기계적 강도를 가지며, 특히 습한 조건에서도 높은 절연강도특성을 갖는 등급으로

얇은 판(Sheet)이나 튜브(Rolled tube) 형태로 사용하기에 적합하다.

전반적으로 상온에 비해 영하의 온도에서 인장 특성이 저하하는 것을 알 수 있다. 특히 -30℃의 온도에서 인장강도, 연신을 및 파괴에너지의 저하가 현저하다.

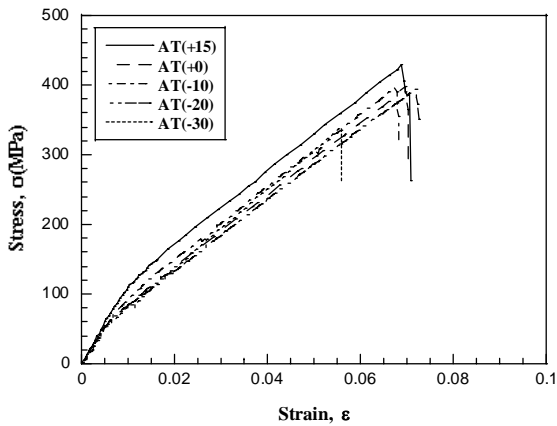


Fig. 4 Stress-strain curves of axial type specimen

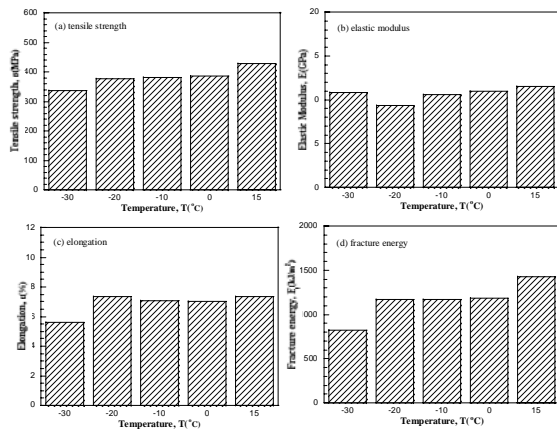
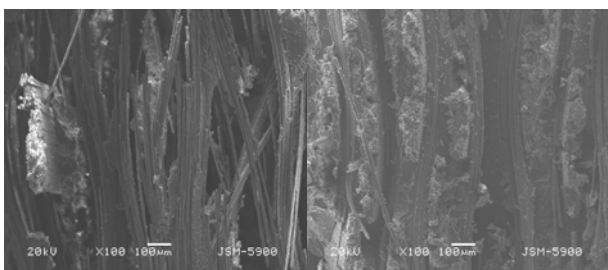


Fig. 5 Mechanical properties of axial type specimen



(a) 15℃

(b) -30℃

Fig. 6 SEM photographs of fracture surfaces of axial type tensile specimen

Fig. 6는 상온과 -30℃에서 시험한 AT재의 파면사진이다. 두 경우 모두 위사의 손상은 보이지 않으며 하중 방향의 경사가 파면에 직각 방향으로 파단된 것을 알 수 있다. 전반적으로 하중은 위사보다 경사에 의해 지탱되지만 상온의 경우 위사의 섬유다발들이 상당부분 일어나 있고 파단된 경사의 길이가 -30℃인 경우에 비해 상대적으로 길다. 이러한 관찰은 위사에서 발생한 균열이 경사와 만나면 부하방향으로 경사면을 따라 상당부분 박리가 진행되며 이때 시험편의 신장과 함께 위사도 섬유 울들 사이에 박리를 일으키고 한계하중에 이르렀을 때 경사가 파단되어 시험편이 최종 파괴에 이르는 유추를 가능하게 한다. 반면에 시험온도의 저하는 섬유와 수지를 더욱 경직시키며 위사에서 발생한 균열이 대부분 경사면에서 짧은 박리를 일으키고 일부는 경사를 직접 관통하므로 Fig. 6(b)에 보이는 바와 같이 파단된 경사의 길이가 짧고 위사면도 매끈하다. 이러한 파괴과정의 차이가 저온에서 AT재의 인장특성을 떨어뜨리는 것으로 판단된다.

#### 4.2 날 방향 시험편의 인장특성

Fig. 7은 시험온도에 따른 ET재의 응력-변형률 곡선이다. AT재와 마찬가지로 시험 초기에 천이 점이 발생한 후 파괴까지의 거동은 모든 시험온도에서 선형적이다.

ET재의 시험온도에 따른 날 방향 인장 특성의 평균치를 Fig. 8에서 보여준다. 상온에 비해 영하의 온도에서 대체로 인장 특성치의 저하를 확인할 수 있다. 탄성계수의 경우엔 시험온도 저하에 따른 변화를 판단하기 어렵지만 인장강도, 연신율과 파괴에너지 등에서는 그 차이가 뚜렷하다. 특별히 -10℃ 이하에서는 인장강도의 감소 폭은 작지만 거의 1%가까운 연신율의 저하로 단위면적당 파괴에너지의 변화가 점차 크게 나타나며, -30℃에서는 더욱 현저하다.

ET재의 인장 특성치 수준이 전반적으로 AT재와 비슷하게 나타나는데, 이것은 경사와 위사의 역할이 서로 바뀌었을 뿐 강화섬유 구조상의 큰 차이가 없기 때문이다.

날 방향 시험편의 파단면 사진을 Fig. 9에서 보여준다. 상온에서 시험한 ET재의 경우 경사면을 따라 상당한 수준의 박리가 일어나므로 파단된 경사의 길이가 길다. Fig. 9(a)는 파단된 경사가

뽑혀나간 다수의 깊은 골을 보여주고 있어서 이러한 사실을 뒷받침한다. -30°C에서 시험한 시험편의 파단면은 박리가 일어난 위사면과 파단된 경사면이 많은 부분에서 일치하며 섬유인발(pull out)이 일어난 경사의 길이도 상대적으로 짧아 매끈하다. 기본적으로 ET재의 파괴는 AT재에서와 같은 과정을 통해 이루어지는 것을 알 수 있다.

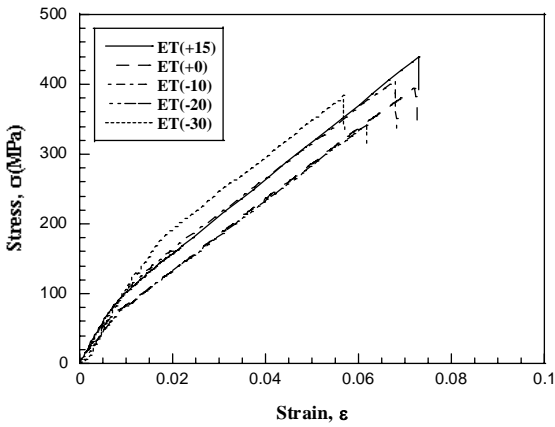


Fig. 7 Stress-strain curves of edge type specimen

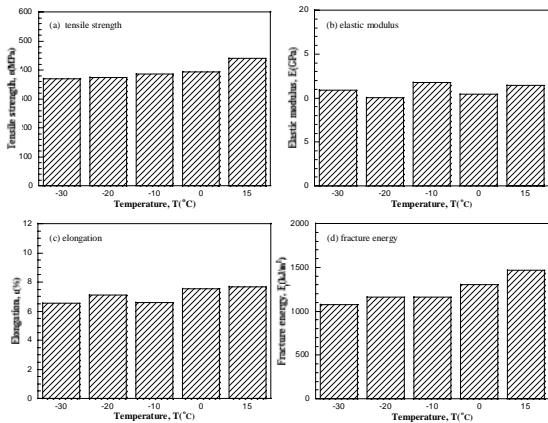


Fig. 8 Mechanical properties of edge type specimen

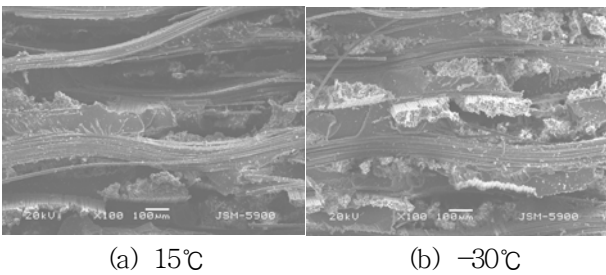


Fig. 9 SEM photographs of fracture surfaces of edge type tensile specimen

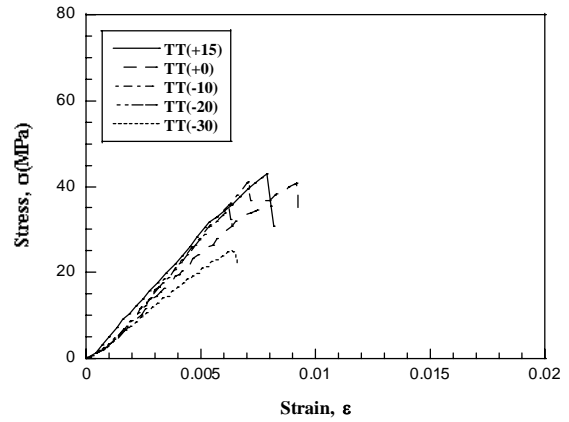


Fig. 10 Stress-strain curves of thickness type specimen

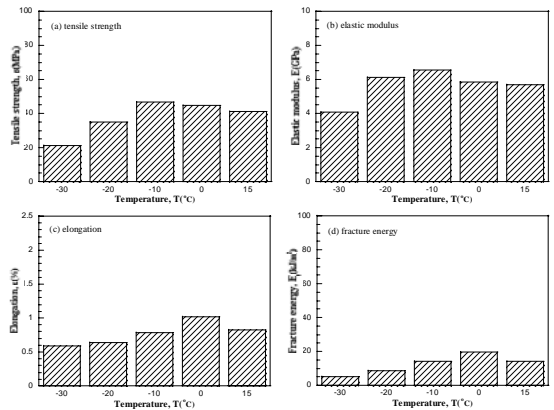
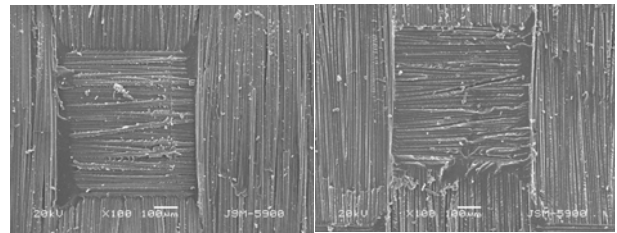
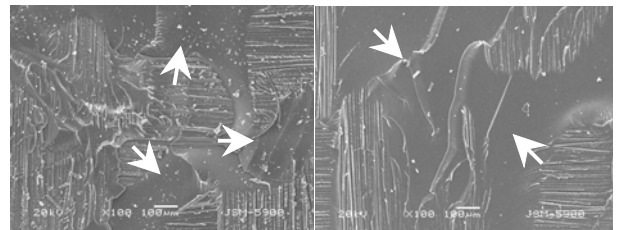


Fig. 11 Mechanical properties of thickness type specimen



(a) 15°C

(b) -10°C



(c) -20°C

(d) -30°C

Fig. 12 SEM photographs of fracture surfaces of thickness type tensile specimen

4.3 두께 방향 시험편의 인장특성

TT재의 응력-변형률 선도를 Fig. 10에서 보여준다. AT나 ET재와는 달리 시험 초기의 천이점은 나타나지 않으며 파단까지 거의 선형적인 거동을 보여준다. 응력과 변형률의 수준이 현저히 낮아 TT재의 파괴거동은 에폭시 기지와 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다.

두께 방향 시험편의 인장 특성치를 Fig. 11에 정리하였다. -10℃의 온도까지는 인장강도를 포함한 특성값의 변화가 거의 없는 것으로 보여진다. 그러나 -20℃의 시험온도에서 인장특성의 변화가 나타나며 -30℃에서 현저한 특성 저하를 보여준다. AT 및 ET재에서와 마찬가지로 TT재에서도 온도 저하에 따른 인장 특성치의 변화는 인장강도와 단위면적당의 파괴에너지 값에서 확실하게 구분되어 나타난다.

Fig. 12에 두께 방향 시험편에 대한 파면 사진을 정리하였다. 어떤 온도 조건에서도 파면에서의 섬유 손상은 관찰되지 않는다. -10℃까지의 시험 조건에서는 Fig. 12(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이 직조된 유리섬유가 파면에 깨끗하게 노출되어 나타나므로 전반적으로 강화섬유와 에폭시 수지의 계면을 따라 파괴가 진행된 것으로 판단된다. 이러한 형태의 파괴는 접착제를 이용한 접합부의 파괴에서 주요 파단 기구의 하나인 접착파괴(adhesive failure)<sup>(16)</sup>와 유사하다. 그러나 시험온도가 -20℃에 도달하면 파면에 에폭시 수지에서 파단된 흔적(※)이 점차 증가하고 있다. 이것은 접착제 층을 따라 파괴가 일어나는 응착파괴(cohesive failure)<sup>(16)</sup>에 해당된다. 결국 TT재는 -10℃까지는 거의 완벽한 접착파괴를 보이며, -20℃부터는 응착파괴가 접착파괴와 함께 동반되어 나타나는 파괴 양상을 보여준다. 이러한 사실로부터 TT재의 인장 특성은 -10℃까지는 강화섬유와 에폭시 수지의 계면특성의 지배를 받지만, 더욱 온도가 떨어져 -20℃이하에서는 점차 에폭시 수지 특성의 영향이 증가하는 것으로 판단된다.

4.4 평직유리섬유강화 에폭시의 이방성

실온에서 시험한 AT, ET 및 TT재의 대표적인 응력-변형률 곡선을 Fig. 13에 나타낸다. AT와 ET재는 시험 초기에 천이점이 형성되고 이후 파괴에 이르기까지 선형적인 거동을 보이며, 측정된 대부분의 특성치에서 비슷한 수준의 값을 보

여주고 있다. 이것은 Fig. 14(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이 이들 재료에서 경사와 위사의 역할이 바뀌었다는 점을 감안할 때 경사와 위사 방향에서의 인장 특성의 차이는 없다는 것을 의미한다. 또한 AT와 ET재의 인장 특성은 하중을 지지하는 경사(또는 위사)의 특성에 지배되므로 이들 섬유의 파괴 양상에 따라 재료의 파괴 형식이 결정된다.

반면에 TT재의 경우는 AT 및 ET재에 비해 현저한 인장 특성의 저하를 보여주는데 이는 강화섬유 자체의 특성보다는 Fig. 14(c)의 점착파괴가 시사하는 바와 같이 계면과 수지의 영향이 절대적이기 때문이다. 따라서 이러한 형식의 재료는 기지 수지의 특성에 따라 파괴 형식이 결정된다.

결국 온도를 포함한 다양한 조건에서의 인장 특성과 파괴형식의 변화는 축 방향과 날 방향에서는 경사(또는 위사)의 특성에, 두께 방향에서는

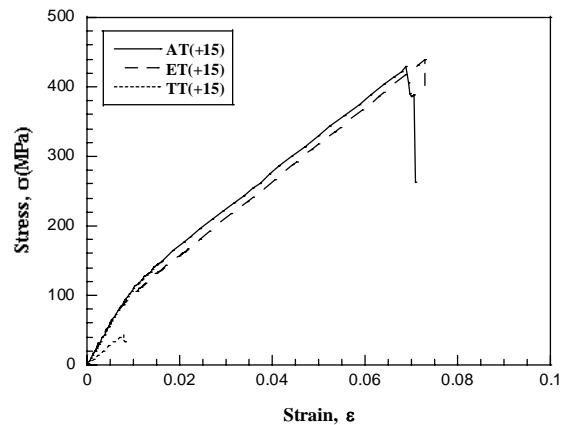


Fig. 13 Stress-strain curves of AT, ET and TT specimen tested at room temperature

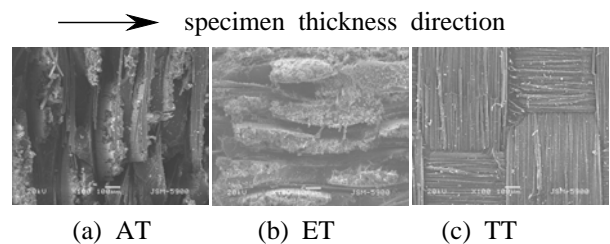


Fig. 14 SEM photographs of fracture surfaces of three types of specimen after tensile test at room temperature

기지 수지의 특성에 어떤 변화를 일으킬 수 있는냐에 따라 결정된다.

## 5. 결 론

평직유리섬유강화 에폭시 적층재의 축, 날 및 두께 방향에 대한 인장 특성을 일상에서 쉽게 접할 수 있는 온도 범위에 대해 조사하였다.

축 방향과 날 방향 시험편에서는 위사에서 발생한 균열이 경사와 만나 계면에 박리를 일으키며 한계하중에 도달할 때 경사가 파단되어 최종 파괴에 이른다. 시험온도의 저하는 위사에서의 균열이 경사에 짧은 박리를 만들어 파단된 경사의 길이를 짧게 하거나 직접 경사를 관통하므로 시험재의 인장특성의 저하를 초래한다. 두 경우 모두 시험온도가 내려가면 인장 특성치가 다소 저하되는 경향을 보이며  $-30^{\circ}\text{C}$ 에 이르면 저하의 폭이 크게 나타난다.

두께 방향 시험편에서는 파괴거동이 에폭시 기지와 밀접한 관계를 가진다.  $-10^{\circ}\text{C}$ 까지는 강화섬유와 에폭시 수지의 계면을 따라 파괴가 진행되어 점착파괴가 발생하고 인장특성치의 변화는 거의 없다. 그러나  $-20^{\circ}\text{C}$  이하로 온도가 떨어지면 점착제 층을 따라 파괴되는 응착파괴가 점착파괴와 함께 나타나고 인장 특성치가 큰 폭으로 저하된다.

전반적으로 인장 특성치는 인장강도와 단위면적당 파괴에너지에서 온도의 영향이 잘 반영되어 나타난다.

## 참고문헌

- (1) Shen Chou, Hong-Chu Chen and Hong-En Chen, 1992, "Effect of Weave Structure on Mechanical Fracture Behavior of Three Dimensional Carbon Fiber Fabric Reinforced Epoxy Resin Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 45, pp. 23 ~ 35.
- (2) Khashaba UA, 2003, "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites under Rotating Bending Loads," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 4, pp. 317 ~ 331.
- (3) Chawla, K. K., 1993, *Composite Materials*, Springer-Verlag, New York, pp. 98 ~ 100.
- (4) Last, J. R., Jeskins, J. S., Kaye, A. S. and Valeria Riccardo, 2002, "Tests on JET TF Coil Insulation," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 12, No. 1, pp. 1238 ~ 1241.
- (5) Gao, F., Boniface, L., Ogin, S. L., Smith, P. A. and Greaves, R. P., 1999, "Damage Accumulation in Woven-Fabric CFRP Laminates under Tensile Loading : Part 1. Observations of Damage Accumulation," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 123 ~ 136.
- (6) Raif Sakin, Irfan Ay and Ramazan Yaman, 2008, "An Investigation of Bending Fatigue Behavior for Glass-Fiber Reinforced Polyester Composite Materials," *Material and Design*, Vol. 29, pp. 212 ~ 217.
- (7) Ochola, R. O., Marcus, K., Nurick, G. N. and Franz, T., 2004, "Mechanical Behavior of Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites at Varying Strain Rates," *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 455 ~ 467.
- (8) Pereira, A. B. and de Morais, A. B., 2004, "ModInterlaminar Fracture of Carbon/Epoxy Multidirectional Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 2261 ~ 2270.
- (9) Pereira, A. B., de Morais, A. B., de Moura, M. F. S. F. and Magalhaes, A. G., 2005, "Mode I Interlaminar Fracture of Woven Glass/Epoxy Multidirectional Laminates," *Composites(A)*, Vol. 36, pp. 1119 ~ 1127.
- (10) Kim, Y. and Lim, J., 1997, "A Study on Properties of Corrosion Fracture Surfaces of GFRP in Synthetic Sea Water," *KSME International Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 249 ~ 254.
- (11) Kim, Y. and Lim, J., 2001, "A Study on Fatigue Crack Propagation Mechanism of GFRP in Synthetic Sea Water," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 10, pp. 1380 ~ 1385.
- (12) Marshall, I. H., 1981, *Composite Structures*, Applied Science Publishers, London and New Jersey, pp. 92 ~ 105.
- (13) Michael, C. Y. Niu, 1993, *Composite Airframe Structures*, Conmilit Press Ltd.
- (14) ASTM, 2000, "Standard Test Method for Tensile

Properties of Polymer Matrix Composite Materials,"  
ASTM D 3039.

(15) ASTM, 2001, "Standard Specification for

Laminated Thermosetting Materials," ASTM D 709.

(16) Messler Jr., R. W., 1993, *Joining of Advanced  
Materials*, Butterworth-Heinemann, pp. 107~141.