

複合材料의 電氣的 絕緣特性和 開發에 關한 研究(I)

—GFRP를 中心으로—

論 文
34~8~4

A Study on the Dielectric Strength of Composite Materials(I)

鄭 垠 植* · 姜 昌 男** · 朴 正 后***
(Eun-Shik Jeung · Chang-Nam Kang · Chung-Hoo Park)

Abstract

Dielectric loss tangent and ac dielectric strength of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics, G-10) was investigated as parameters of mechanical and thermal stresses, in order to study the basic dielectrical characteristics of composite insulating materials.

The dielectric loss tangent was increased and the ac dielectric strength was decreased with increase in the mechanical stresses beyond the mechanical yield point on account of fiber-matrix debonding, but the dielectric constant was not varied significantly. The dielectric strength of G-10 was about 2 MV/cm and the dielectric constant was about 4.8.

1. 序 論

최근 에너지절약의 일환으로 發電機의 單機大容量化, 高電壓化 및 電動機의 소형화, 사용환경의 多樣化가 추진되고 있으며 수명의 면에서도 高壓發電機와 같은 대형회전기의 경우는 수십년의 장기수명이 요구되고 있다. 이와 같은 대형회전기의 수명에 결정적인 인자가 되는 것이 절연재료이다. 특히 이경우의 절연재료는 종래의 사용조건과는 달리 가혹한 전기적, 기계적 및 열적응력하에서 충분한 절연성능을 발휘해야 하므로, 여기에 적합한 절연재료의 개발이 절실히 요망되고 있다.

현재의 실정으로는 有機 혹은 無機絶緣物의 단독 절연만으로는 이러한 절연재료의 요구를 만족시킬 수 없으므로, 최근 신재료로 등장된 複合材料 (composite material)에 의한 대형회전기의 絶緣設計 및 試作이 발표되고 있다.^{1)~6)} 그러나 복합재료의 절연 특성이 아직 충분히 해명되고 있지 않으며, 복합절

연재료의 개발도 충분하지 못한 상태에 있다.

필자는 복합재료에 대한 전기적특성의 해명 및 복합절연재료개발에 관한 연구의 일환으로 본 연구에서는 대용량회전기의 권선간 및 對地絶緣 그리고 극저온기기의 절연재료로 유망시 되고있는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic, Glass Fiber/Epoxy NEMA 규격: G-10)의 전기적특성에 관한 실험과 고찰을 행하였다.

GFRP는 섬유형 복합재료중에서 가장 다량으로 생산되고 있으며, 광범위하게 이용되고 있다. 유리를 섬유형으로 하면 그 직경이 작을 수록 확률적으로 내부결합의 수가 적게 될뿐아니라, 그 결합 자체의 크기도 적어지기 때문에 많은 기계적 특성이 향상된다고 알려져 있다.⁶⁾ 예를들면 판유리의 상태에서 약 7MPa의 인장강도를 가지지만, 가느다란 섬유상(직경 약 3~15 μm)으로 하면 약 280~500MPa로 된다. 그러나 유리섬유강화 복합재료에 대한 체계적인 전기적특성연구는 거의 없는 실정이다.

2. 實驗方法

본 연구에서 사용한 試料는 고주파특성이 양호하

*正 會 員 : 東義工業專門大學 電氣科 副教授

**正 會 員 : 釜山水產大學 機關科 碩士課程

***正 會 員 : 釜山水產大學 機關科 副教授 · 工博

接受日字: 1985年 5月 18日

여 전자회로의 기판재료로서도 잘 알려져있는 Glass Fiber/Epoxy 복합재료(NEMA 규격: G-10)로서 유리섬유 基材의 積層枚數는 2枚이다. 그림 1은 시료의 나면사진이며 그림 2는 유리섬유의 組織을 나타내고 있다. 그림 3은 유리 스트란드(glass strand) 1개를 확대한 것으로 유리섬유의 조성은 無알카리유리(E-glass)이다.

시료의 유리섬유 含量(혹은 含有率)은 68.8%였으며 含有率은 다음식에서 구해진 것이다.

$$\text{유리섬유 함유율(\%)} = \frac{\text{유리섬유의 중량}}{\text{시료의 전 중량}} \times 100$$

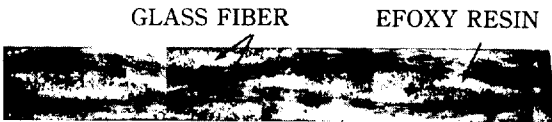


그림 1. 시료의 단면도
Fig. 1. Section of the sample.

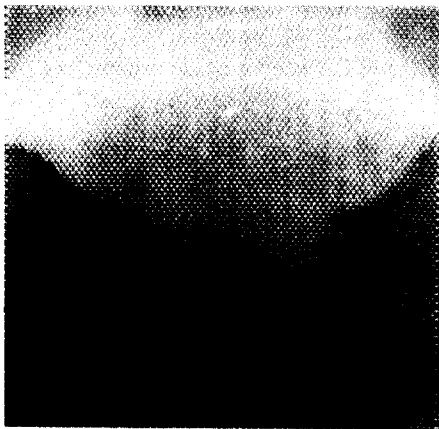


그림 2. 유리 섬유 조직
Fig. 2. The Fabric pattern of glass fiber in GFRP.

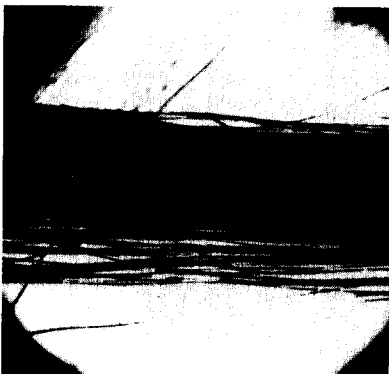


그림 3. 유리 섬유의 스트란드
Fig. 3. A strand of glass fiber.

여기서 시료의 전중량은 매트릭스(matrix)인 에폭시수지와 필라(filler)인 유리섬유의 중량의 합이 된다. 한편 시료의 두께는 $325 \pm 3 \mu m$ 이다.

기계적응력하에서 시료의 전기적특성시험을 행하기에 앞서 시료의 기계적 압축 및 인장특성시험을 행하였다. 특히 시료의 인장특성에 대한 異方性을 측정하기 위하여 유리섬유 배향방향과 $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$ 방향으로 인장응력을 가하여 인장강도와 변형율을 구하였다. 각 시료에는 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 인장강도 및 시간변화에 따른 변형율을 측정하였으며 이경우 인장시험기(Shimadzu 社)의 인장속도는 30cm/min로서 각 시료에 대하여 6개씩 시험을 행하였다. 그림 4는 인장시험편의 모양을 나타내고 있다. 한편, 스트레인 게이지의 부착으로 인하여 시료의 인장특성이 영향을 받으므로 이 영향을 최소로 하기 위하여 스트레인 게이지는 시험편의 중앙부를 조금 피하여 부착하였다. 또 인장시험기의 그립(grip) 양단에서 발생하는 슬립(slip)을 방지하기 위하여 시험양단을 에폭시 접착제로 처리하였다.

시료의 전기적 특성실험에서는 기계적응력을 받지 않은 시료 및 $0 \sim 250 \text{MPa}$ 의 압축응력을 받은 시료에 대하여 표면 및 체적저항율, 誘電正接($\tan \delta$), 比誘電率(ϵ) 및 교류절연강도를 측정하였으며, 상온에서 150°C 에 이르기까지의 온도변화에 대한 $\tan \delta$ 및 ϵ 의 변화도 측정 하였다. 이경우 $\tan \delta$ 및 ϵ 의 측정은 Precision TAN δ and C-Bridge(TETTEX AG 社)를 이용하였고, 저항율의 측정은 High Resistance Meter(Hewlett Packard)를 이용하였다.

기계적응력하에서 시료의 절연강도측정에는 주형전극을 이용하여 실리콘油中에서 행하였으며 전극제작 및 실험방법은 앞의 보고^{17),19)}에서 상세히 기술하였으므로 여기서는 간단히 유압장치를 이용한 실험장치와 주형전극만을 그림 5에 나타내었다. 한편 절연과괴한 시료의 방전경로(discharge path)를 편광현미경으로 관찰하여 기계적응력하에서 절연강도 변화의 원인을 규명하려고 노력하였다.

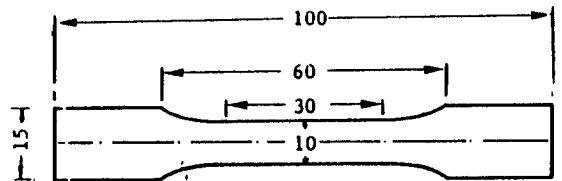
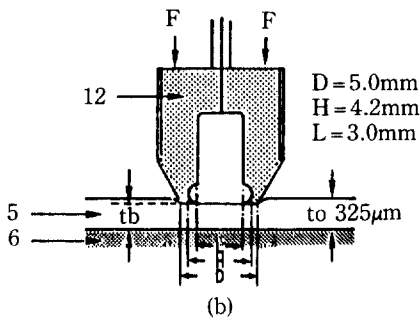
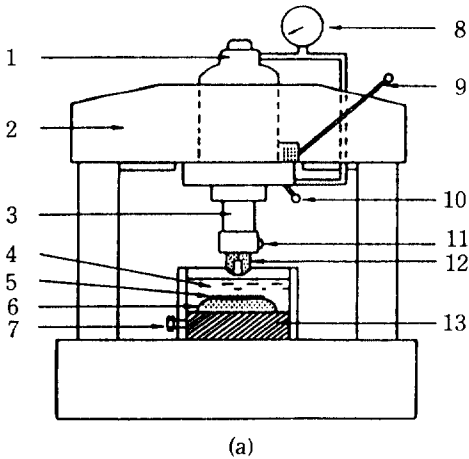


그림 4. 시료의 인장 시험편 (단위 mm)
Fig. 4. Sample size for tensile test (mm).



- 1. high pressure cell
- 2. framework
- 3. piston
- 4. silicon oil
- 5. sample
- 6. grounded plane
- 7. grounded terminal
- 8. pressure gauge
- 9. hand pump
- 10. change lever
- 11. ac source
- 12. molded plane electrode
- 13. electrode bed electrode

그림 5. 실험 장치의 개략도
Fig. 5. Experimental set-up.

3. 結果 및 考察

3.1 試料의 機械的 特性

그림 6은 유리섬유의 방향과 0°, 15°, 25° 및 45° 방향으로 引張荷重을 가하였을 경우의 引張應力 - 變形率曲線(實線) 및 시료의 면에 수직으로 荷重(貫層荷重)을 가하였을 경우 壓縮應力 - 變形率曲線(點線)을 나타내고 있다. 이 그림에서 유리섬유방향으로 인장한 경우는 응력-변형률관계가 직선적으로 되고 약 4%의 변형률에서 파단되는 취성적성질(脆性的性質)을 나타내지만 25° 및 45° 방향으로 인장한 경우는 비직선적으로 되면서 延性的 거동을 나타내고 있다. 또 시료의 압축탄성율은 인장탄성율보다 크며,

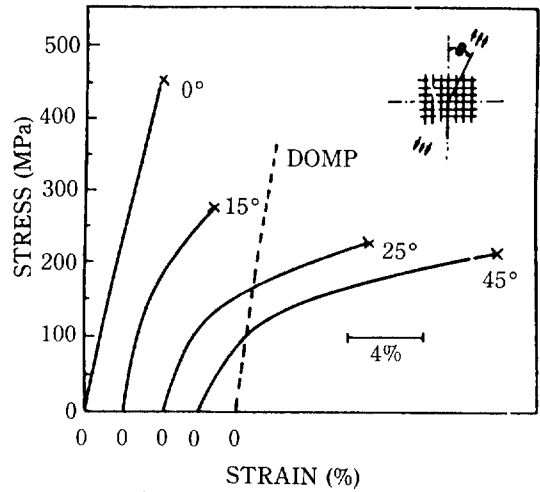


그림 6. 유리섬유와 인장축과의 사이각이 변화할 경우의 인장응력-변형률 곡선
Fig. 6. Stress-strain curve of the samples.

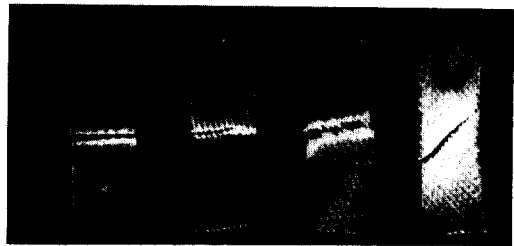


그림 7. 시료의 파단 모양(유리섬유와 인장축과의 사이각 0 - 45°)

Fig. 7. Fracture section of the sample with different angle between fiber orientation and tensile stress direction.

압축의 경우 탄성율은 약 17×10^3 MPa 이다.

그림 7은 유리섬유방향과 인장응력 방향과의 사이각(이하 "사이각")이 0°, 15°, 25° 및 45°인 경우 시료의 파단모양을 나타내고 있으며, 사이각 0°의 시료에서 파단이 가장 급격히 일어나며 파단면은 인장축과 90°를 이룬다. 사이각 45°의 시료에서 에폭시수지의 크랙(crack)은 유리섬유방향으로 진행하여, 파단응력부근에서 시료전면에 白化現象(whitening phenomena)을 나타내며 파단면은 인장축과 약 ±45°를 이룬다. 이 백화현상은 필라(filler, 分散材; 유리섬유 등)와 매트릭스(matrix; 에폭시수지 등) 사이의 界面剝離現象에 의한 空洞(void)의 발생 및 매트릭스에서의 크랙발생이 그원인으로 알려져있다. 그림 8은 인장응력을 가한후의 時間 - 變形率曲線을 나타내고 있다.

그림 6 ~ 8에서 다음과 같은 고찰을 행할 수 있다. 사이각 0°의 시료에서는 유리섬유의 방향과 인장방향이 일치하므로, 인장응력은 주로 유리섬유가

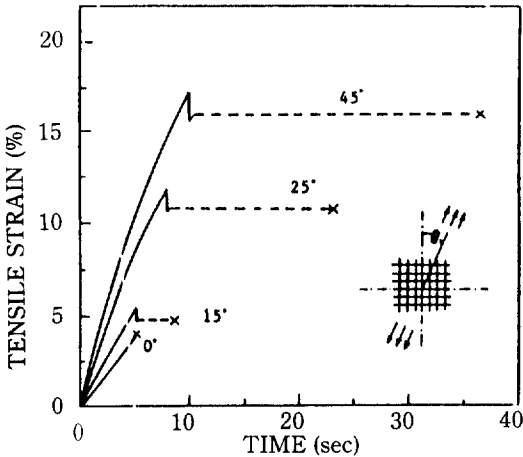


그림 8. 인장응력을 가한후의 시료의 변형율-시간곡선

Fig. 8. Tensile strain-time curve of the sample.

분담하게 되고 破斷伸度(elongation at break)가 작은 것이 특징이다. 이 시료의 파단과정은 에폭시수지의 가장 취약부에서 발생한 크랙이 인장축과 90° 방향으로 시료를 횡단하게 되고, 응력이 더욱 증가하면 인장방향과 90° 방향에 있는 유리섬유-에폭시수지의 경계면에 백화현상을 나타낸 후 최대크랙부분의 유리섬유가 파단됨으로써 끝나게 된다.

한편 사이각이 증가하면 초기에는 매트릭스와 유리섬유가 거의 같이 인장응력을 분담하게 된다. 인장응력이 더욱 증가하면 에폭시수지에 크랙이 발생하고 유리섬유와 계면박리현상을 나타내면서 시료전면에 걸쳐 백화하며 이때 유리섬유의 응력분담율이 증가한다. 유리섬유에서의 응력의 증가로 유리섬유가 인장방향으로 배향하게 되고 시료의 스트레인(strain)이 증가하며, 이때 스트레인은 사이각이 증가할수록 당연히 증가하게 된다. 일단 유리섬유가 인장방향으로 배향하면서 에폭시와 박리되면 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 순간적인 피크치를 나타내며 이때부터 대부분의 인장응력은 유리섬유가 분담하게 되며 유리섬유의 연속적인 슬립(slip)이나 절단에 의해 시료가 파단에 이르게 된다.

그림 6에서 사이각이 증가할 수록 인장강도가 저하하는 이유는 사이각이 증가할 수록 시료양단의 그림(grip)에 연결되어 응력을 분담할 수 있는 유리섬유의 수가 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 그림 8에서 피크치이후 일정스트레인을 유지하며 사이각이 증가할 수록 긴시간 이후에 파단 되는 것은 피크치를 지난후 유리섬유는 인장방향으로 배향하게 되므로 시료 전체의 길이는 늘어나게 되며 사

이각이 큰 시료일 수록 인장방향으로 배향하는데 시간이 걸리기 때문이다. 그러나 스트레인 게이지는 에폭시수지에 부착되어 있고 피크치이후는 에폭시수지가 유리섬유와 박리현상으로 분리되므로 일정 스트레인을 나타내는 것으로 생각된다.

3.2 試料의 電氣的特性

1) 誘電正接(Tan δ) 및 誘電率(ε)의 電壓 및 溫度特性

그림 9와 10은 0~220MPa 범위의 압축응력을 받은 시료에 대한 Tan δ-전압특성 및 ε-전압특성을 나타내고 있다. 이 경우 시료는 알콜로 깨끗이 한후 50°C에서 72시간 가열하였으며, 데시케이터(desicator)내에 보관하여 흡습의 영향을 가능한 배제하였다. 그림 9에서 Tan δ 값은 전압이 낮은 경우 일정한 값을 유지하지만, 어느전압치 이상이 되면 대체로 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 인가전압에 대한 Tan δ 값의 증가분이 클 수록 시료는 보이드(void)의 함유량이 크거나, 흡습 및 열화해 있다고 생각할 수 있다.⁸⁾ 본 시료의 경우에는 다음항에서 논하는 바와 같이 압축을 받고난 후에는 시료내부에 보이드가 증가한다고 볼 수 있으므로 각 시료에 대한 Tan δ 증가분의 相異는 이 내부 보이드의 증가에 의한 것으로 생각된다. 즉 압축응력이 큰 시료일 수록 내부 보이드가 많아지고, 어느 전압이상이 되면 보이드에서 크로나방전이 발생하며, 이로 인하여 Tan δ 값이 증가한다고 볼 수 있

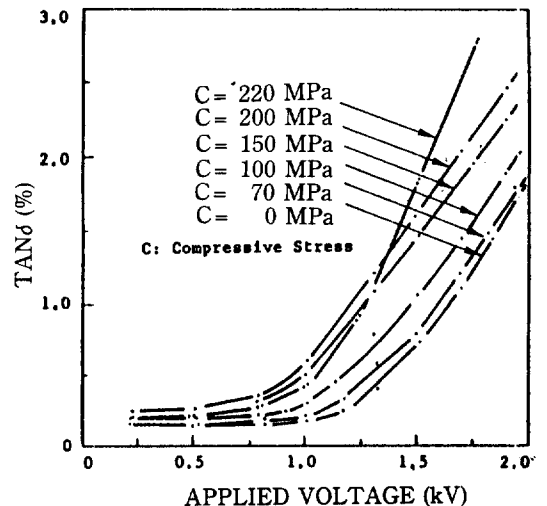


그림 9. 시료의 Tan δ-전압특성 (60 Hz)

Fig. 9. Tan δ-applied voltage curves of the sample at 60Hz.

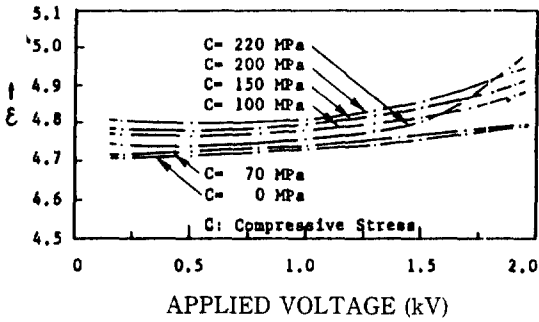


그림 10. 시료의 ϵ -전압특성 (60Hz)

Fig. 10. Dielectric constant-applied voltage curves at 60Hz.

다. 한편 코로나 개시전압이상에서 $\tan \delta$ 의 값이 직선적으로 증가하는 원인은 보이드의 크기 및 형상이 불규칙하게 분포함으로써, 전압증가에 대하여 연속적으로 보이드의 내부방전이 시작되기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 그림 10에서 ϵ 의 증가는 근소함을 알 수 있다.

표 1은 그림 9와 10으로 부터 시료의 열화판정에 필요한 항목을 표로 작성한 것이며 시료의 표면저항 및 체적저항율의 변화도 병기하였다. 표 1에서 $\tan \delta$ (혹은 ϵ)의 증가분 $\Delta \tan \delta$ (혹은 $\Delta \epsilon$)은 최대 시험전압에서 $\tan \delta$ 값 (혹은 ϵ 값)과 코로나발생전압이하에서 誘電正接 $\tan \delta_0$ (혹은 ϵ_0)의 값과의 차를 표시하고 있다. 표 1에서 표면저항율 및 체적저항율의 값이 압축응력의 증가와 더불어 증가하는 원인은 압축응력에 의한 시료표면 및 내부의 크랙 및 보이드의 증가가 그 원인으로 생각된다.

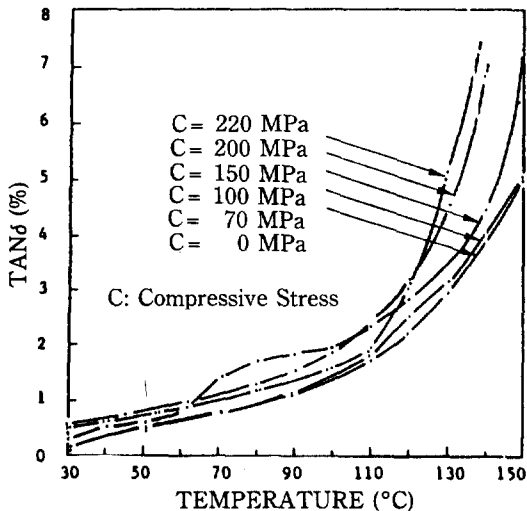


그림 11. 시료의 $\tan \delta$ -온도특성 (60Hz)

Fig. 11. $\tan \delta$ -t temperature curves of the sample at 60Hz.

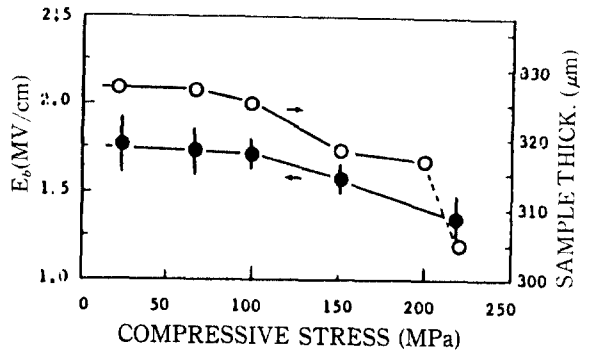


그림 12. 압축응력을 받은 시료의 교류절연 파괴강도 (peak치) 및 두께 변화

Fig. 12. AC dielectric strength and thickness of the sample after compression.

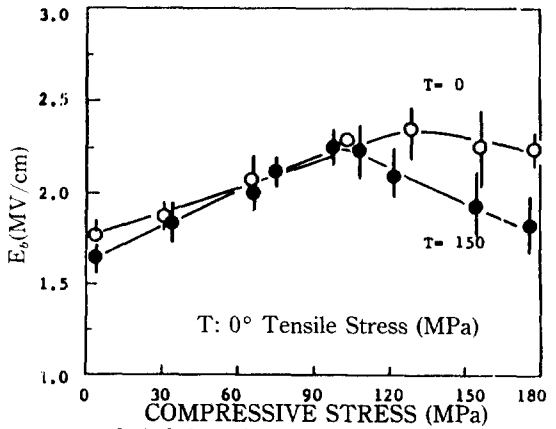


그림 13. 0° 방향의 인장응력을 받은 시료의 압축응력하의 교류 절연강도 특성

Fig. 13. Dielectric strength under compressive stress for the samples after tension.

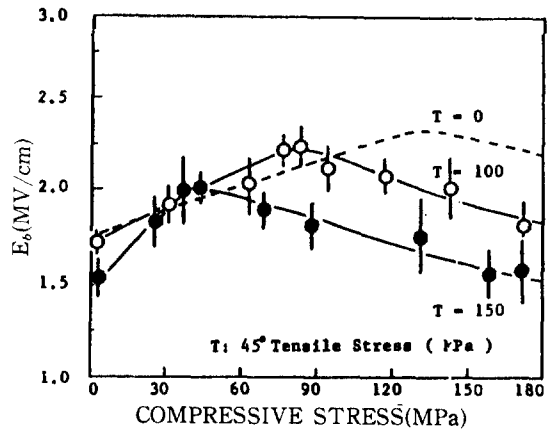


그림 14. 45° 방향의 인장응력을 받은 시료의 압축응력하의 교류 절연강도 특성

Fig. 14. Dielectric strength under compressive stress for the samples after tension.

그림 11은 압축을 받은 시료의 $\tan \delta$ —溫度特性을 나타내고 있다. 일반적으로 유진체 자체의 종류 및 형상에 대하여 고유의 $\tan \delta$ —온도특성이 존재하지만, 온도의 상승과 더불어 $\tan \delta$ 의 값이 증가하는 원인은 이온성전도전류가 증가하기 때문으로 생각되고 있으며⁸⁾의 전자성 전도전류는 온도의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 높은 압축응력을 받은 시료일 수록 고온에서 $\tan \delta$ 의 증가율이 큰 것은 압축응력에 의해 발생한 미소보이드의 코로나 개시전압이 온도의 상승과 함께 저하하는 경향을 가지기 때문인 것으로 생각된다.

그림 12는 압축응력을 받은 시료의 두께의 변화 및 교류(피이크值)절연파괴강도 E_b 를 나타 내고 있다. 시료의 절연 파괴강도는 약 100MPa의 압축응력을 받은 시료에서 부터 저하 하기 시작하며, 이 저하는 다음항에서 논하는 바와 같이 주로 압축응력에 의한 시료내부 보이드의 발생이 그 원인으로, $\tan \delta$ —電壓特性에 의한 시료의 열화특성해석과 일관된 해석이 가능함을 보여주고 있다.

2) 機械的應力下에서의 絶緣強度特性

그림 13과 14는 각각 사이각이 0° 및 45°인 경우 인장응력을 받은 시료에 대한 壓縮應力下의 交流(피이크值)絶緣強度特性을 나타내고 있다. 압축응력하에서

절연강도 E_b 는 일반적으로 초기에는 상승하여 최대치를 지난후에는 감소하는 특성을 나타 내고 있으며 인장응력 및 사이각의 변화에 따라 다음과 같은 특성의 변화를 나타내고 있다.

- a) 압축응력을 가하지 않았을 경우 시료의 절연강도는 인장응력을 많이 받은 시료일 수록 저하하다.
- b) 압축응력하에서 시료의 최대절연강도 및 최대절연강도값을 나타내는 압축응력의 값은 인장응력을 많이 받은 시료일 수록, 또 사이각이 큰시료 일 수록 더욱 저하하는 경향을 갖는다.

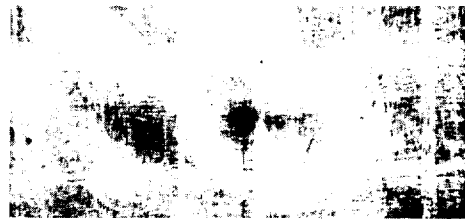
GFRP의 절연강도특성과 관련하여 이 특성을 지배하는 가장 중요한 인자중의 하나는 GFRP의 구조적결함으로 생각된다. 일반적으로 複合材料의 기계적특성을 지배하는 가장 큰 약점은 매트릭스와 필라와의 界面으로 지적되어 왔다.^{10)~12)} 이 계면에서 발



(a)



(b)



(c)

Compressive stress (MPa)	Eielectric strength (MV/cm)
(a) 5	1.7
(b) 120	2.3
(c) 200	2.0

그림 16. 압축 응력하에서의 시료의 방전경로의 변화
Fig. 16. The variation of discharge path length of GFRP under compressive stress.

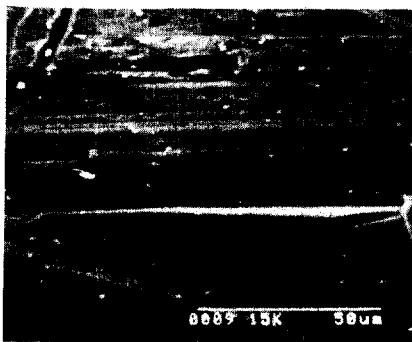
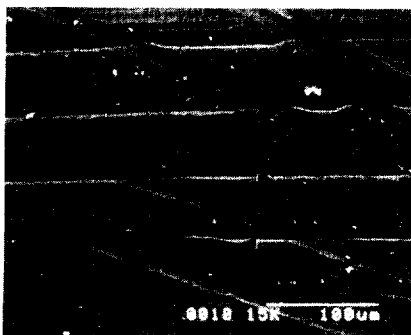


그림 15. 시료 표면의 주사형 전자 현미경 사진
Fig. 15. Electron micrograph of the sample surface.

생하는 문제는 주로 유리섬유와 매트릭스의 접촉상태의 문제로써, 매트릭스수지의 불충분한 경화, 섬유가 매트릭스에 완전히 함침되지 못하기 때문에 나타나는 불충분한 접착, 界面에서 발생하는 空洞(bubble 혹은 void), 界面剝離, 절단된 스트랜드(broken strand)의 존재 및 界面에서 형성되는 크랙등으로 複合材料의 제조공정에서 생기는 결함이 주가 되고있다. 이 중에서 GFRP의 절연강도특성에 큰 영향을 미치는 요인으로는 界面 및 유리섬유와 섬유의 교차점에서 발생하는 空洞, 界面剝離 및 界面에서 형성되는 크랙등을 들 수 있다. 또 시료표면의 상태는 트래킹현상(tracking phenomena)의 발생, 표면 저항등의 변화를 지배하는 원인이 되며 그림 15는 走査形전자현미경(SEM)으로 관찰한 시료의 표면사진으로 표면의 여러곳에서 매트릭스수지의 부족 및 과다한 영역으로 인한 표면계곡(crevice)등이 존재함을 알 수 있다.

복합재료의 이러한 결함요인과 관련하여 기계적응력의 증가에 따른 절연강도의 증가 및 감소는 다음과 같이 생각할 수 있다. 인장응력과는 달리 압축응력의 초기단계에서는 시료내부에 존재하는 空洞이나 界面에서의 크랙등이 감소내지는 축소되는 방향으로 작용하게 되며, 또 압축응력에 의해 매트릭스수지의 自由體積 (free volume) 이 감소하므로 시료의 절연강도가 증가한다고 생각된다.^{13), 20)} 그러나 최대절연강도값을 나타내는 압축응력값 이상으로 증가하면 섬유와 섬유의 접촉점은 應力集中點으로 되며, 섬유와 매트릭스의 界面박리현상으로 空洞이 증가되며, 압축응력이 더욱 증가하면 매트릭스의 표면과 내부에 크레이지(crage) 혹은 크랙이 발생하므로 절연강도는 감소한다.

이러한 사실은 시료의 절연과괴시의 放電徑路(discharge path)를 관찰함으로써 어느정도 해명될 수 있다. 그림 16은 압축응력이 변화할 경우 절연과괴된 시료의 방전경로를 편광현미경으로 관찰한 것이다. 이 관찰에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- a) 절연과괴는 섬유가 집중하는부분 및 섬유가 교차하는 접촉점에서 발생한다.
- b) 주절연과괴경로 외에 몇개의 방전경로가 형성되며 이 방전경로는 유리섬유의 표면에 따라 형성된다.
- c) 방전경로의 길이는 최대절연강도를 나타내는 압축응력을 지나면 급격히 감소하는 경향을 가진다.

이상의 고찰에서 알 수 있는 바와 같이 유리섬유의 교차점을 가능한 한 줄이는 것이 GFRP의 절연강도특성을 개선하는 한 방안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

다. 한편 인장응력을 받은 시료는 그림 17에서 볼 수 있는 바와 같이 인장축과 90° 방향의 유리섬유와 매트릭스의 界面에 크랙이 발생하며, 방전 및 절연과괴 경로가 이 크랙에서 시작되어 시료의 절연강도가 저하는 원인이 되고 있음을 알 수 있다.

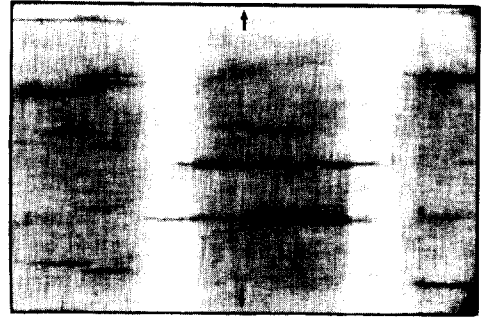


그림 17. 편광현미경으로 관찰한 인장된 시료의 내부 크랙 (화살표 : 인장 방향)

Fig. 17. Typical crack formation after tensile stress observed by a polarizing microscope.

표 1. 0 - 220 MPa 의 압축 응력을 받은 시료의 전기적 특성

Table 1. Electric characteristics of the sample after compression of 0-220 MPa.

Comp. stress (MPa)	0	50	70	150	200	220
Test temp. (°C)	30	30	30	30	30	30
Max. volt. (kV)	2	2	2	2	2	2
Tan δ (%)	0.15	0.18	0.2	0.25	0.25	0.2
ΔTan δ (%)	1.65	1.67	1.89	2.2	2.45	3.55
Corona onset volt. (kV)	1.2	1.0	0.8	0.7	0.55	0.67
ε	4.74	4.75	4.78	4.79	4.8	4.7
Δε/ε (%)	1.3	1.3	2.3	2.9	3.5	6.3
Surf. resis. 10 ¹¹ Ω	10 ¹²	10 ¹¹	10 ¹¹	0.56	1.8	1.1
Volume resis. 10 ¹¹ Ω cm	5	6	9.2	15	62	112

4. 結 論

복합재료의 장점으로는 시료에 기계적 하중이 가하여졌을 경우 매트릭스의 하중을 필라에 전달하므

로써 응력 집중의 분산, 구열 및 전위의 진행을 억제하여 매트릭스의 기계적 특성이 개선되지만, 본 실험에서 얻어진 유리섬유강화 플라스틱 복합재료(G-10)의 기계적 및 전기적특성에 관한 실험과 고찰에서 다음과 같은 결과를 요약할 수 있다.

1) G-10은 인장특성의 이방성이 크며 유리섬유방향과 인장축방향의 사이각이 45도인 경우, 계면박리현상이 현저하여 인장강도가 가장 저하한다.

2) 기계적응력을 받을경우 내부공동(void)의 발생 및 계면박리현상으로 유전체손이 증가하고 절연강도가 현저히 저하한다.

3) G-10의 전기적 및 기계적특성을 개선하기 위한 한 방안으로 공동이 쉽게 발생하는 유리섬유의 교차점을 줄여야 하며, 섬유상조절보다 직선상의 유리섬유를 여러 층으로 배치하는 것이 효과적이라 생각된다.

4) G-10의 교류절연강도는 약 2MV/cm이며 비유전율은 약 4.8이다.

끝으로 본 실험에 많은 도움을 주신 부산대학교 전기과 광영순 교수님이하 여러 교수님께 감사 드리며 본연구의 일부는 1984년도 한국과학재단 연구조성비로 이루어진 것임을 부언하며 사의를 표하는 바입니다.

參 考 文 獻

- 1) K. Matsunobu, A. Aki, K. Kodotani, and H. Kuwashima, "A New High Strength Mica Insulation for Large Rotating Machinery", IEEE CH1717-8/81, 1981.
- 2) R.E. Gold et al., "Materials Technology for Fusion: Current Status and Future Requirements", Nuclear Technology/Fusion, Vol. 1, 169-237, 1981.
- 3) A. Dubois and X. Bertsch", New Trends in Mica Paper", IEEE CH1717-8/81, 1981.
- 4) A. Futakawa and S. Yamasaki, "Dynamic Deformation and Strength of Stator End Winding During Sudden Short Circuits", IEEE Vol. EI-16, 31-39, 1981.
- 5) A. Wichmann and P. Gruenewald, "Influence of Dielectric Stress Concentration on Voltage Endurance of Epoxy-Mica Generator Insulation", IEEE, EI-12, 1977.
- 6) T. Fugii and M. Zako", "複合材料의 破壞와 力學", 實教出版, Chap. 1. Japan. 1979.
- 7) E. Pink and J.D. Campbell, "Deformation

- Characteristics of Reinforced Epoxy Resin", J. Material Sci. Vol. 9, 658-664, 1974.
- 8) T. Hitoshi, "非破壞絶縁試験法" OHM ed. Chap. 9, 1964.
- 9) H. Mikawa and S. Kusabayashi, "高分子半導體", 講談社, Chap. 6, 1981.
- 10) L.E. Nielsen "Mechanical Properties of Polymers and Composites" Marcel Dekker Inc., Chap. 8, 1974.
- 11) E.P. Plueddemann, "Composite Materials-Interface in Polymer Matrix Composites" Academic Press, 1974.
- 12) D. Hull, "An Introduction to Composite Materials" cambridge University Press, Cahp. 3, 1982.
- 13) C.H. park, T. Kaneko, M. Hara and M. Akazaki, "Effects of Mechanical Stresses on the Dielectric Breakdown Strengths of PET and FRP" IEEE, Vol. EI-17, 234-240, 1982.
- 14) C.H. Park, M. Hara and M. Akazaki, "Effects of Temperature and Voltage on the Dielectric Breakdown Strengths of PET and FRP under Mechanical Stresses" IEEE, Vol. EI-17, 546-553, 1982.
- 15) C.H. Park, K. Okajima, M. Hara and M. Akazaki, "Effect of Heat Treatment on Dielectric Stregnth of PET under Compressive Stress" IEEE, Vol. EI-18, 380-389, 1983.
- 16) M. Hara, C.H. Park, T. Kaneko and M. Akazaki, "Dielectric Strength of PET and GFRP under Mechanical Stresses at Room and Cryogenic Temperatures" 4th Inter. Sympo. on High Voltage Eng. Greece, Paper No. 23.04, 1983.
- 17) 朴正后, "一軸延伸 PET의 絶縁強度特性에 미치는 結晶化度の 影響", 대한전기학회, Vol. 33-7, 22-29, 1984.
- 18) M. Hara, C.H. Park and M. Akazaki, "Effect of Heat Treatment and Mechanical Stresses on the Dielectric Strength of Uniaxially Drawn PET Film" IEEE, Vol. EI-19, 273-280, 1984.
- 19) 郭東周·朴正后, "二軸延伸 PET의 内部構造變變化와 電氣의 絶縁強度特性", 대한전기학회, Vol. 34-4, 135-143, 1985.
- 20) C.H. Park, D.J. Kwak, and M. Hara, "Some Dielectric and Mechanical Properties of Heat-Treated Biaxially Drawn PET Films", IEEE, Vol. EI-20, No. 3, 567-573, June 1985.