

Mechanical Properties of Insulator FRP Rod According to the Winding Orientation of Glass Fiber

朴孝烈* · 姜銅弼** · 韓東熙* · 表鉉東*** · 金泰玉§

(Hoy-Yul Park · Dong-Pil Kang · Dong-Hee Han · Hyun-Dong Pyo · Tae-Ok Kim)

Abstract - FRP has been used very much as high strength and electrical insulation materials. The fiber contributes the high strength and modulus to the composite. The main roles of the matrix in composite materials like FRP are to transmit and distribute stresses among the individual fibers. The fiber orientation in FRP has a great effect on the strength of FRP because the strength of FRP mainly depends on the strength of fiber. In this study, compressive and bending stresses of FRP rods were simulated and measured according to the winding orientation of glass fiber. Inner part of FRP was made unidirectionally by pultrusion method and outer part of FRP was made by filament winding method to give fiber orientation to the FRP. The shear stresses had great effect on the strength of FRP although the stress of parallel direction of FRP was much higher. The tendency of compressive and bending strengths with glass fiber orientation was different each other.

Key words : FRP, glass fiber, orientation, simulation, strength, filament winding, pultrusion

1. 서 론

기계적, 화학적, 전기적 특성이 우수하여 적용분야와 사용량이 증가하고 있는 FRP(fiber reinforced plastics)는 에폭시나 불포화폴리에스테르와 같은 열경화성 수지를 접착성 결합제(binder)로 하고 고강도 섬유를 보강재로 한 복합재료로서 일반적으로는 유리섬유를 주로 사용한다. 다양한 변형수지의 개발로 내열성, 계면접착성, 성형성, 전기절연성, 기계적 강도 등이 향상되어 FRP는 전기절연체의 구조재료로서 많이 사용되어 왔다. FRP에서 유리섬유는 기계적 강도를 부여하고 주어진 응력하에서 파괴와 굽힘에 대한 저항을 크게 해 준다. 수지는 각각의 섬유에 인가된 스트레스를 분산시키고 배향되어 있는 섬유를 각각 분리하여 유지시켜주며 외부환경 및 기계적인 마모로부터 섬유를 보호하는 역할도 한다. FRP의 구성재료인 유리섬유나 경화성수지는 전기부도체이기 때문에 FRP는 우수한 절연재료로서 사용되고 있다. FRP는 옥외용 애자의 심봉(core)재료[1, 2, 3], GIS 등 중전기기의 부품 및 고분자 복합부싱(composite bushing)의

절연튜브[4], 송전용 절연암(arm insulator)[5, 6] 등 절연성이 요구되는 구조재료 많이 사용되고 있다.

복합재료의 강도를 높이기 위하여 연속상의 장섬유를 사용하여야 하는데 FRP의 기계적 강도가 거의 보강재 섬유에 의존하기 때문에 섬유의 배향이 기계적 강도에 크게 영향을 미친다. FRP에 하중이 가해질 때 재료에 작용되는 응력의 분포는 섬유의 배향에 따라서, 작용되는 하중의 방향에 따라서 다르게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 복합재료에서의 섬유의 배향은 제조공법에 따라 제약을 받을 수밖에 없는 한계를 지니고 있으므로 용도에 따라서 제조공법을 잘 선택하여야 한다.

FRP가 사용되는 초고압 절연물의 경우 절연물의 종류에 따라서 응력을 받는 방향이 크게 다르다. 현수애자는 인장하중, 지지애자(line post insulator)와 절연암은 압축과 굽힘하중을 주로 받는다. 장섬유가 강화된 FRP의 인장강도는 압축강도나 굽힘강도에 비하여 매우 우수하여 문제가 전혀 없지만 최근 새로운 절연물로 부각되고 있는 절연암의 경우 FRP의 압축강도와 굽힘강도의 향상이 핵심기술로 부각되고 있다.

본 연구에서는 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 이해하기 위하여 시편을 제작하여 강도를 측정하고 응력의 분포를 시뮬레이션하였다. 인발성형(pultrusion)법으로 일축방향(unidirectional)의 연속섬유로 된 FRP rod를 제작하고 인발성형된 FRP 봉(rod)에 일정하게 각도의 변화를 주면서 권취(winding)하였다. 제작된 시편의 굽힘강도와 압축강도를

* 正會員 : 韓國電氣研究所 戰略技術研究團 先任研究員
 ** 正會員 : 韓國電氣研究所 戰略技術研究團 責任研究員 · 工博
 *** 準會員 : 釜山大 機械設計學科 碩士
 § 正會員 : 釜山大 材料工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 10月 22日
 最終完了 : 2000年 4月 19日

측정하여 섬유 배향에 따른 강도의 변화를 조사하였다. FRP 봉에 굽힘 및 압축하중이 가해졌을 때 섬유의 배향에 따른 응력의 분포를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션하였고 모델링에는 3-D Shell과 3-D Brick 요소를 사용하였다. [7]. 제작된 시편의 강도특성과 시뮬레이션을 통한 응력의 분포를 서로 비교하여 시편의 파괴에 미치는 응력을 고찰하였다. FRP를 전기절연재의 구조재로 사용하기 위한 대표적인 전기적인 물성을 측정하고 전계해석을 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 FRP rod 시편제작

FRP 시편의 제작에는 novolac epoxy modified vinylester 수지와 E-glass 섬유를 사용하였다. 사용한 유리섬유의 단 섬유 굵기는 평균 23μm였다. 인발성형방법으로 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48mm의 FRP 봉을 제작하였다. 이때 유리섬유의 비율은 78%(무계비)가 되도록 하였다. 유리섬유의 배향에 따른 특성을 조사하기 위하여 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48mm의 봉에 필라멘트 권취(filament winding)법으로 ±15°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75°, 90°의 각으로 권취하였다. 권취두께는 1층이 0.18mm가 되어 교차된 1층의 두께가 0.36mm가 되었다. 총 교차된 층이 9층으로 이루어져 권취 후 지름이 35.72mm가 되었고 인발성형된 봉 부분과 권취 부분과의 단면적 비율은 약 4:1이 되었다.

그림 1에 인발성형법으로 제작한 FRP 시편의 주사전자현미경사진을 나타내었다.

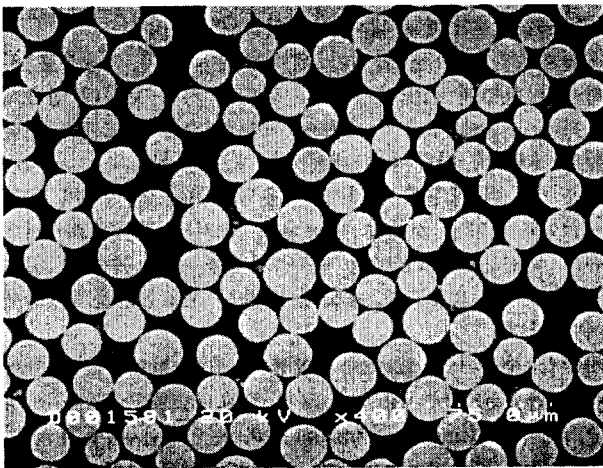


그림 1 인발성형법으로 제작한 FRP 시편의 주사전자현미경 사진

Fig. 1 SEM photograph of FRP specimen fabricated by pultrusion method

2.2 기계적 강도

2.2.1 굽힘강도 측정

굽힘강도(bending strength)는 굽힘하중에 의하여 파괴될 때 나타나는 최대 응력을 말한다.

FRP는 상당히 취성이 강한 재료이기 때문에 3점 가압방

식(3-point bending)으로 압력을 가하였고 장비는 Instron 8516 Series IX을 사용하였다. 굽힘강도를 측정할 때 support span은 시편지름의 15배가 되도록 하였다. 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48mm의 인발성형시편과 인발성형시편에 권취한 지름 35.72mm의 권취시편의 변위에 따른 하중의 변화곡선을 비교하기 위한 경우에는 지름이 다르지만 같은 길이의 support span을 사용하였다. 이 때 support span은 지름 35.72mm의 15배가 되도록 하였다.

가압속도는 다음의 식에 의하여 13.4mm/min으로 하였다[8].

$$R = ZL^2/6d$$

- R = rate of cross head motion (mm/min)
- L = support span (mm)
- d = diameter of specimen (mm)
- Z = 0.01

3점 가압방식으로 굽힘강도를 측정할 경우 원통형의 봉에 대해서 굽힘강도는 다음의 식으로 나타내어진다[9, 10].

$$M = 8F_m L / \pi D^3$$

- M = bending strength (MPa)
- F_m = maximum force (force at fracture) (N)
- L = support span (mm)
- D = diameter of rod (mm)

그림 2에 굽힘강도 실험의 형태 및 장치를 나타내었다.

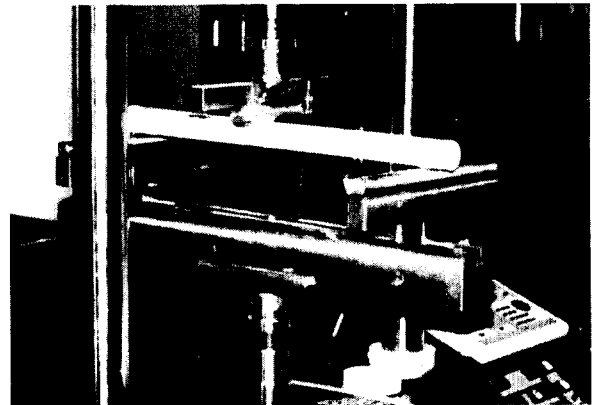


그림 2 굽힘강도 실험장치

Fig. 2 Apparatus for bending experiment

2.2.2 압축강도 측정

압축강도(compressive strength)는 압축하중에 의하여 파괴될 때 나타나는 최대의 압축응력을 말한다.

압축강도 측정시편의 형태는 높이를 지름의 2배로 하였다. 압력을 가하는 속도는 1.3mm/min으로 하였고[11], 사용한 장비는 Zwick Materials Testing 1494였다.

압축강도는 다음의 식으로 계산하였다.

$$M = F_m / \pi D^2$$

M = compressive strength (MPa)
 F_m = maximum force (force at fracture) (N)
 D = diameter of rod (mm)

그림 3에 압축강도 실험의 형태 및 장치를 나타내었다.

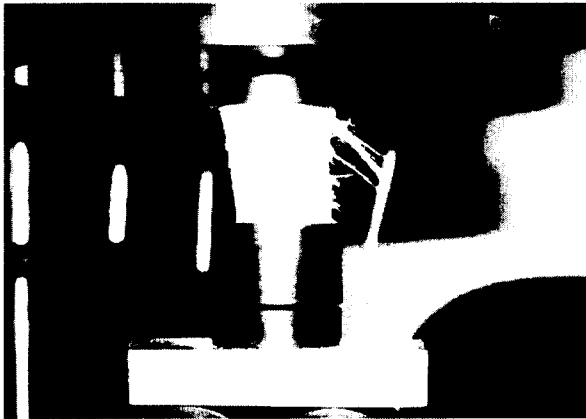


그림 3 압축강도 실험장치
 Fig. 3 Apparatus for compressive experiment

2.3 FRP의 응력분포 시뮬레이션

하중이 시편에 가해질 때 섬유유 배향에 따른 응력의 분포를 알기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션하였다[12]. 상용패키지 ANSYS를 사용하여 일정한 하중이 가해졌을 때 발생하는 응력의 분포를 해석하였다.

시뮬레이션에 필요한 재료의 강도와 관련한 계수는 다음과 같으며 문헌[13]에서 인용하였다.

- Longitudinal modulus = 45GPa
- Transverse modulus = 12GPa
- Shear modulus = 5.5GPa
- Poisson's ratio = 0.28

인발성형법으로 일축방향의 유리섬유로 제작한 봉의 모델링은 3-D brick 요소를 택하고 인발성형 봉의 바깥부분을 권취한 부분에 대해서는 3-D shell 요소를 택하였다[7]. 시뮬레이션의 결과와 제작된 시편의 강도의 실험결과를 서로 비교하기 위하여 시뮬레이션에서의 모델링은 실제 제작한 시편과 크기를 동일하게 하였다. shell의 1층을 0.18mm로 하여 교차된 1층의 두께가 0.36mm가 되도록 하였다. 총 교차된 9층을 권취하였고, 권취각도를 0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75°, 90° 로 하였다.

2.3.1 굽힘응력의 시뮬레이션

시뮬레이션은 경계조건으로서 봉의 중앙면에 대하여 대칭 조건을 붙여 봉의 1/2을 모델링하였으며 그림 4에 나타내었다. -X방향으로 하중을 가하였고 응력이 집중되는 모델의

중앙부분에 요소(element)를 좀 더 세분하여 모델링하였다. 시뮬레이션 해야 할 총 길이 267.9mm 중에서 중심과 먼 200mm는 길이방향으로 10등분하고 중심과 가까운 67.9mm는 6등분하였다. 19.6kN의 하중을 가하여 시뮬레이션하였다.

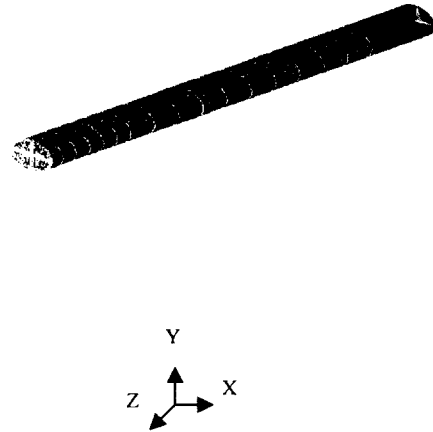


그림 4 굽힘응력의 모델링
 Fig. 4 Modeling of bending stress

2.3.2 압축응력의 시뮬레이션

높이 71.44mm와 지름 35.72mm의 시편에서 대칭을 이용하여 원주방향으로 1/4, 길이방향으로 1/2을 모델링하여 시뮬레이션하였다. 요소는 원주 및 길이방향으로 균등하게 6등분하였고 그것을 그림 5에 나타내었다. Z방향으로 620MPa의 하중을 가하여 시뮬레이션하였다.

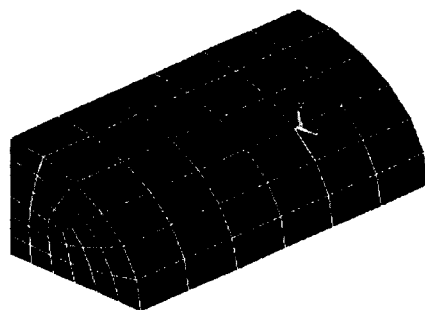


그림 5 압축응력의 모델링
 Fig. 5 Modeling of compressive stress

2.4 전기적 특성

FRP를 전기절연재의 구조재로서 사용하기 위한 대표적인 전기적인 물성을 측정하고 FRP를 실제 절연암에 적용할 경

우의 모델에 대하여 전계해석을 하였다. 특성평가는 인발성형법으로 제작된 일축방향의 연속섬유로 된 FRP에 대하여 전극의 방향을 섬유 방향과 직각으로 하여 측정하였다. 절연저항은 HP 4339A(High Resistance Meter)를 사용하여 500V의 전압을 인가하여 체적절연저항과 표면절연저항을 측정하였다. 절연과피전압은 3mm 두께의 시편에 구형전극을 사용하여 15kV까지는 순간적으로 승압을 하고 그 이후 각 단계마다 20초의 유지시간을 두고 3kV씩 승압을 하여 측정하였다. 유전율과 손실율의 측정은 HP 4194A (Impedance/Gain Phase Analyzer)를 사용하였다. 시편은 두께 2mm로 하고 상온용의 은분접착제(silver paste)로 지름 12mm가 되도록 전극을 구성하였다. 은분접착제를 건조한 후 HP 16334A Test Fixture를 사용하여 0.5V의 전압을 인가하여 1MHz에서 측정하였다. 전계해석은 Ansoft의 Maxwell 2D Simulator를 사용하였다. 모델의 양단에 전압을 인가하기 위한 금구가 부착되어 있고 FRP의 표면에는 장기적인 성능의 유지를 위하여 실리콘고무를 부착한 형상으로 되어 있다. FRP의 지름은 40mm이고 시편의 길이(금구 사이의 거리)는 375mm이다. 실제의 절연암의 길이를 2.3m 정도로 예상할 수 있고 인가되는 전압을 154kV로 가정하여 모델의 양단에는 25.1kV의 전압을 인가하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 시편의 강도를 측정하여 섬유의 배향이 강도에 미치는 영향을 조사하였고 하중이 시편에 가해질 때 섬유의 배향에 따른 응력의 분포를 시뮬레이션하였다. 시편의 굽힘 및 압축강도의 측정값과 굽힘 및 압축하중의 작용에 따른 응력분포의 시뮬레이션 결과를 서로 비교함으로써 시편의 파괴에 미치는 응력을 조사하였다.

3.1 굽힘강도

그림 6에 일축방향의 유리섬유만으로 인발성형한 지름 32.48mm의 시편과 인발성형한 시편에 15°로 권취한 지름 35.72mm의 시편에 대하여 굽힘응력을 가했을 때 변위에 따른 굽힘하중의 변화곡선

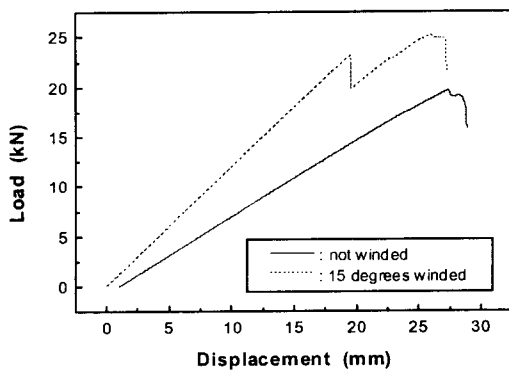


그림 6 15° 권취시편과 권취하지 않은 시편의 변위에 따른 굽힘하중의 변화곡선
 Fig. 6 Graph of bending load of 15° winded and not winded specimen with displacement

른 하중의 변화곡선을 나타내었다. 여기에서는 지름 32.48mm의 시편과 지름 35.72mm의 권취시편의 변위에 따른 하중의 변화곡선을 서로 비교하기 위하여 support span은 길이 535.8mm로 같게 하였다.

그림 6에서 15°로 권취한 시편에서의 1차 변곡점은 인발성형한 봉 부분과 권취 부분과의 계면의 파괴에 의한 것으로 생각된다.

그림 7에 권취각에 따른 굽힘강도의 변화를 나타내었다.

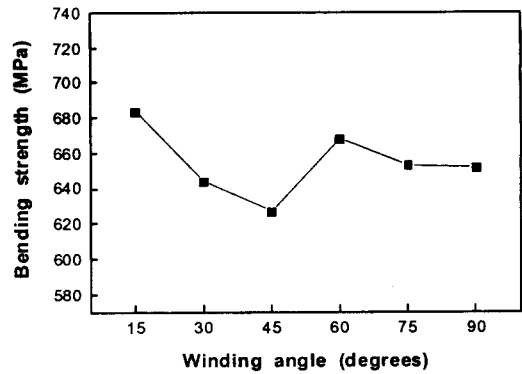


그림 7 권취각에 따른 굽힘강도의 변화
 Fig. 7 Variation of bending strength with winding angle

그림 7의 그래프에서 15°로 권취한 시편의 굽힘강도가 가장 높게 나타났다. 권취각이 15°에서 45°로 뒀을 때 굽힘강도는 감소를 하다가 60°에서 굽힘강도가 높아진 뒤 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 권취각에 따른 굽힘강도의 결과와 굽힘응력의 작용에 따른 응력의 분포를 서로 비교하면 굽힘강도에 영향을 미치는 응력을 알 수 있게 된다. 따라서 권취각에 따른 응력의 분포를 시뮬레이션하여 그 결과를 서로 비교하였다.

-X 방향으로 굽힘하중을 가하였을 때 권취각에 따른 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션한 결과를 그림 8에 나타내었다. 19.6kN의 하중을 가하여 시뮬레이션한 결과이다.

그림 8의 시뮬레이션 결과 Z방향의 응력이 가장 높은 값을 나타내었고 그 외의 방향의 응력 및 전단응력의 값은 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 그러나 파괴는 Z방향 (인발성형된 섬유의 방향)의 응력에 의한 파괴보다는 섬유와 수지사이의 분리에 의해서 발생하게 될 것으로 예상된다. 즉 전단응력 τ_{zx} , τ_{yz} 에 의해서 발생할 것으로 예상되는데 τ_{zx} 의 경우 그래프에서 권취각에 따라서 응력의 크기의 편차가 별로 나지 않지만, τ_{yz} 의 경우는 권취각에 따라서 응력의 크기의 편차가 크게 나타나므로 파괴에 미치는 영향이 크게 된다. 실제 시편을 만들어서 굽힘강도를 측정한 그림 7과 굽힘응력의 분포를 시뮬레이션한 그림 8에서 굽힘강도는 전단응력 τ_{yz} 에 의존하는 모습을 잘 나타내고 있다.

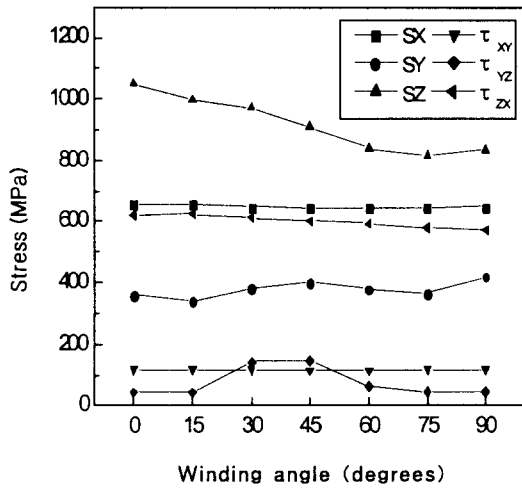


그림 8 권취각에 따른 굽힘응력 시뮬레이션 결과
 SX, SY, SZ : X,Y,Z 방향의 응력
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 전단응력

Fig. 8 Simulation results of bending stresses with winding angle
 SX, SY, SZ : stresses of X,Y,Z direction
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: shear stresses

3.2 압축강도

그림 9에 일축방향의 유리섬유만으로 인발성형한 지름 32.48mm의 시편과 인발성형한 시편에 15°로 권취한 지름 35.72mm의 시편에 대하여 압축하중을 가했을 때 변위에 따른 하중의 변화곡선을 나타내었다.

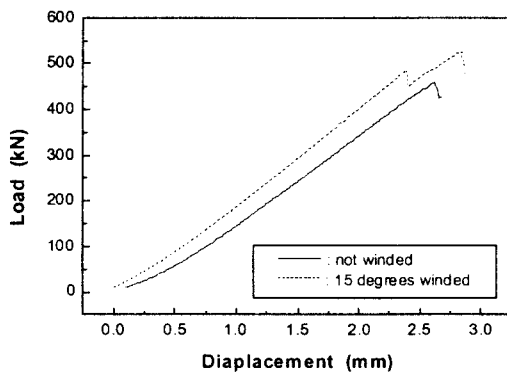


그림 9 15° 권취시편과 권취하지 않은 시편의 변위에 따른 압축하중의 변화곡선

Fig. 9 Graph of compressive load of 15° winded and not winded specimen with displacement

변위에 따른 하중의 변화곡선의 형태는 굽힘강도를 가했을 때와 아주 유사하였다.

그림 10에 권취각에 따른 압축강도의 변화를 나타내었다. 15°에서 90°로 권취각이 증가함에 따라서 압축강도도 증가함을 나타내고 있다.

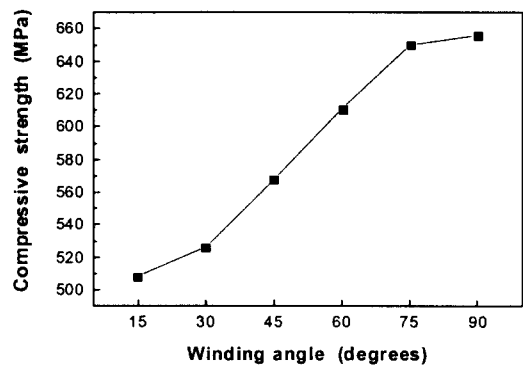


그림 10 권취각에 따른 압축강도의 변화
 Fig. 10 Variation of compressive strength with winding angle

압축강도에 영향을 미치는 응력을 알기 위하여 권취각에 따른 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션하였다. 그림 11은 Z 방향으로 620MPa의 하중을 가하였을 때 권취각에 따른 응력의 분포를 시뮬레이션한 결과이다.

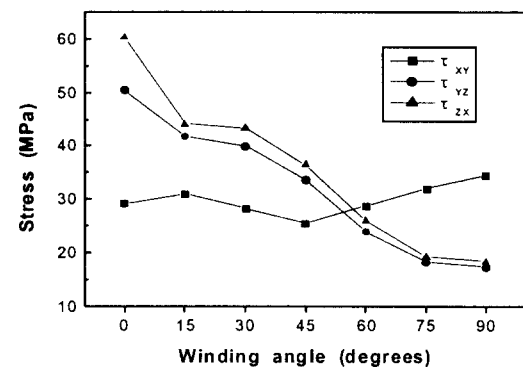
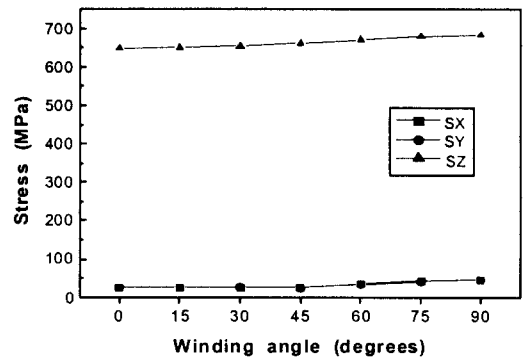


그림 11 권취각에 따른 압축응력 시뮬레이션 결과
 SX, SY, SZ : X,Y,Z 방향의 응력
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 전단응력

Fig. 11 Simulation results of compressive stresses with winding angle
 SX, SY, SZ : stresses of X,Y,Z direction
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: shear stresses

그림 11에 나타난 시뮬레이션 결과 Z방향의 응력이 가장 높은 값을 나타내었고 그 외의 방향의 응력 및 전단응력의 값은 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 그러나 파괴는 Z방향 (인발성형된 섬유 방향)의 응력에 의한 파괴보다는 섬유와 수지사이의 분리에 의한 전단응력 τ_{zx} , τ_{yz} 에 의해서 발생할 것으로 예상된다. 전단응력 τ_{yz} , τ_{zx} 는 권취각에 따라서 응력의 크기의 편차가 크게 나타나므로 권취각에 따라서 파괴에 미치는 영향이 크게 된다. 실제 시편을 만들어서 압축강도를 측정한 그림 10과 압축응력의 분포를 시뮬레이션한 그림 11에서 압축강도는 전단응력 τ_{zx} , τ_{yz} 에 의존하는 모습을 잘 나타내고 있다.

3.3 전기적 특성

인발성형법으로 제작한 일축방향의 연속섬유로 된 FRP의 절연저항(체적 및 표면), 절연파괴전압, 유전특성(유전율 및 손실율)을 표 1에 나타내었다. 특성평가는 전극의 방향을 섬유의 방향과 직각으로 하여 측정하였다.

표 1 FRP의 전기적 특성

Table 1 Electrical properties of FRP

체적절연저항	$1.52 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$
표면절연저항	$1.42 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$
절연파괴전압	12.7 kV/mm
유전율(1MHz)	5.6
손실율($\tan \delta$)(1MHz)	0.0065

현재 옥외용 절연체로 가장 많이 사용되고 있고 전기적 특성과 기계적 특성을 동시에 만족해야 하는 자기재 애자의 전기적 특성[14]과 비교하여 FRP는 동등 이상의 특성을 나타내고 있다. FRP가 사용되는 절연암 및 고분자 애자의 경우 장기적인 내후특성의 향상을 위하여 FRP의 표면에 전기적 특성이 더 우수한 고분자 절연체를 부착하여 사용하므로 표 1의 전기적 특성을 나타내는 FRP는 전기절연체의 구조재로서 사용하기에 충분함을 알 수 있다.

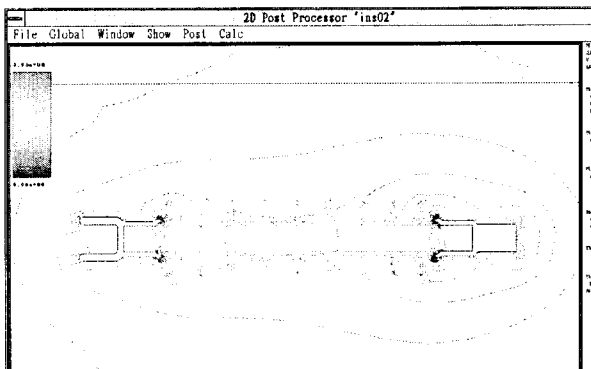


그림 12 절연암의 전계해석
Fig. 12 Electrical field simulation of arm insulator

그림 12에 FRP를 절연암에 적용한 경우의 모델에 대하여 전개해석한 결과를 나타내었다.

전계해석 결과 전압이 인가되는 금구 양단의 인접부위에 전압이 집중되는 현상을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유리섬유의 배향에 따라 시편을 제작하여 강도를 측정하고 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션 하였다. 또한 제작된 시편의 강도특성과 시뮬레이션을 통한 응력의 분포를 서로 비교하여 시편의 파괴에 미치는 응력을 조사하였다.

(1) 굽힘강도

FRP 시편의 굽힘강도측정에서 $\pm 15^\circ$ 로 권취한 시편의 강도가 가장 높게 나타났으며 $\pm 45^\circ$ 로 권취한 시편의 강도가 가장 낮게 나타났다.

권취한 각도에 따라서 시편을 실제 측정한 강도와 응력의 시뮬레이션을 비교한 결과 굽힘강도에 크게 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지사이의 전단응력임을 알 수 있었다.

(2) 압축강도

FRP 시편의 압축강도측정에서 $\pm 15^\circ$ 에서 90° 로 권취각이 증가함에 따라서 강도도 증가하였다.

권취한 각도에 따라서 시편을 실제 측정한 강도와 응력의 시뮬레이션을 비교한 결과 압축강도에 크게 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지사이의 전단응력임을 알 수 있었다.

(3) 전기적 특성

FRP는 전기절연체의 구조재로서 적절한 전기적 특성을 나타내었다.

시편의 강도는 유리섬유의 배향에 따라서 다르게 나타났으며 그 결과를 시뮬레이션을 통한 응력의 분포와 서로 비교한 결과 시편의 파괴에 전단응력의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다. 굽힘강도는 $\pm 15^\circ$, 압축강도는 90° 의 각도로 권취하였을 경우 가장 높게 나타났으므로 FRP 봉에 요구되어지는 강도의 종류에 따라서 권취각을 결정하여야 함을 알 수 있다. FRP 봉의 파괴에 결정적인 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지사이의 전단응력으로 나타났으므로 강도를 증가시키기 위해서는 섬유와 수지사이의 계면의 강도를 높여야 함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] D. Dumora, D. Feldman, M. Gaudry, "Mechanical behavior of flexurally stressed composite insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 1066-1073, April 1990
 [2] E. A. Cherney, "Long-term mechanical life testing of polymeric post insulators for distribution and a comparison to porcelain", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp.1141-1145, July 1988

- [3] J. Lantaigne, S. Lalonde, C. De Tourreil, "Optimization of stresses in the end-fittings of composite insulators for distribution and transmission lines", J. Reinforced Plastics and Composites, Vol. 15, pp. 467-478, May 1996
- [4] F. Hammer, "Insulating systems for HVDC power apparatus", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, pp. 601-609, June 1992
- [5] K. Izumi, T. Takahashi, T. Taniguchi, H. Homma, T. Kuroyagi, "Performance of line post type polymer insulation arm for 154kV", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Aug. 25-29, 1997
- [6] K. Izumi, "Development of 154kV compact overhead transmission line applying polymer insulation arms", Indian J. of Power&River valley development, pp. 214-219, 1997
- [7] K. J. Bathe, "Finite element procedures", Prentice Hall, 1996
- [8] ASTM D790-93, "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials"
- [9] ASTM C674-88, "Standard test methods for flexural properties of ceramic whiteware materials"
- [10] R. P. Brown, "Handbook of plastics test methods(3rd edition)", pp. 139-151, Longman Science & Technical, 1988
- [11] ASTM D695-91, "Standard test method for compressive properties of rigid plastics"
- [12] 김창완외 4인, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적 설계", 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제3호, pp. 775-787, 1996
- [13] C. Zweben, H. T. Hahn, T. W. Chou, "Mechanical behavior and properties of composite materials", Vol. 1, pp. 62-69, Technomic publishing Co., 1989
- [14] J. S. T. Looms, "Insulators for high voltages", Peter Peregrinus Ltd, pp. 10-13, 1988

저 자 소 개



박 호 열 (朴 孝 烈)
 1962년 3월 8일생. 1986년 부산대 무기재료공학과 졸업. 1988년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(석사). 1988년~현재 한국전기연구소 선임연구원
 Tel : 0551-280-1611
 E-mail : hypark@keri.re.kr



표 현 등 (表 鉉 東)
 1971년 10월 10일생. 1996년 부산대 기계공학과 졸업. 1999년 동 대학원 기계설계학과 졸업(석사)
 E-mail : eonsan@hanmail.net



강 동 필 (姜 銅 弼)
 1955년 11월 15일생. 1982년 부산대 대학원 고분자공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 고분자공학과 졸업(공학박). 1986년~현재 한국전기연구소 책임연구원
 Tel : 0551-280-1610
 E-mail : dpkang@keri.re.kr



김 태 옥 (金 泰 玉)
 1939년 7월 13일생. 1966년 서울대 물리학과 졸업. 1971년 부산대 대학원 물리학과 졸업(석사). 1981년 경북대 전자공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 교수
 Tel : 051-280-2387
 E-mail : kimto@hyowon.pusan.ac.kr



한 동 희 (韓 東 熙)
 1966년 6월 8일생. 1989년 경북대 고분자공학과 졸업. 1991년 동 대학원 고분자공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기연구소 선임연구원
 Tel : 0551-280-1613
 E-mail : dhhan@keri.re.kr