

## 절연용 FRP의 와인딩 각도에 따른 압축강도 연구

박효열, 강동필, 안명상, 명인혜  
한국전기연구원

### Compressive Strength of FRP for Insulator According to Winding Angles

Park Hoy Yul, Kang Dong Pil, Ahn Myeong Sang, Myung In Hae  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 전기절연재의 구조재로 많이 사용되고 있는 FRP(fiber reinforced plastics)는 열경화성 수지를 접착성 결합제(binder)로 하고 고강도 섬유를 보강재로 한 복합재료로서 기계적, 화학적, 전기적 특성이 매우 우수하다. FRP의 기계적 강도는 유리섬유에 의존하고 있으므로 유리섬유의 방향과 힘을 가하는 방향에 따라서 그 강도의 차이는 매우 크게 나타난다. 본 연구에서는 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 이해하기 위하여 시편을 제작하여 압축강도를 측정하고 압축강도와 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션하였다. FRP rod에 압축응력이 가해졌을 때 섬유의 배향에 따른 파괴강도와 응력의 분포를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션하였고 모델링에는 3-D Shell과 3-D Brick 요소를 사용하였다. 제작된 시편의 강도특성과 시뮬레이션을 통한 응력의 분포를 서로 비교하여 시편의 파괴에 미치는 응력을 고찰하였다.

## 1. 서 론

송배전용 설비에 사용되는 옥외절연물로서는 porcelain이나 glass insulator가 주로 사용되어 왔지만 최근 신소재의 발달로 가볍고 절연능력이 우수한 폴리머(polymer) 애자가 보편화되기 시작하였다. 폴리머 애자가 자기재 애자에 비하여 내열성과 내후성이 부족한 것은 사실이지만 절연물이 물에 의하여 젖고 오손되어도 폴리머 애자의 표면절연능력은 자기재에 비하여 훨씬 우수한 것으로 밝혀지고 있다.

폴리머 애자의 내후성을 위한 하우징 재료로서는 실리콘 및 EPDM 고무가 많이 사용되고 있고 강도유지를 위해서는 에폭시나 불포화폴리에스테르를 접착제로 하고 유리섬유를 강도 보강재로 한 FRP(fiber reinforced plastics)를 주로 사용하고 있다. FRP에 사용되는 E-glass 및 에폭시나 불포화폴리에스테르는 전기적, 기계적 성능이 매우 우수하다.

FRP에서 유리섬유는 기계적 강도를 부여하고 수지는 각각의 섬유에 인가된 스트레스를 분산시키고 섬유를 각 각 분리하여 유지시켜주며 외부환경 및 기계적인 마모로부터 섬유를 보호하는 역할을 한다. FRP의 기계적 강도가 거의 보강재 섬유에 의존하기 때문에 섬유의 배향이 기계적 강도에 크게 영향을 미치게 된다. FRP에 응력이 가해질 때 재료에 작용되는 응력의 분포는 섬유의 배향에 따라서, 작용되는 응력의 방향에 따라서 다르게 나타날 것으로 예상된다.

장섬유를 보강하여 인발성형(pultrusion)법으로 제작한 일축방향의 섬유로 구성된 FRP는 인장강도는 매우 우수하지만 그에 비하여 압축강도는 작게 나타난다. 일축방향(unidirectional)의 FRP의 표면에 filament winding의 방법으로 winding 층(보강층)을 형성시킨다면 섬유의 방향으로 압축응력이 가해질 때 보강층에서는 인장응력을 받으므로 섬유의 우수한 인장강도를 고려하면 FRP의 압축강도가 향상될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 이

해하기 위하여 시편을 제작하여 압축강도를 측정하고 압축강도와 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션하였다. 인발성형법으로 일축방향의 연속섬유로 된 FRP rod를 제작하고 인발성형 된 FRP rod에 일정하게 각도의 변화를 주면서 winding 하였다. 또 다른 방법으로 인발성형 봉을 wrapping하여 제작하였다. 제작된 시편의 압축강도를 측정하여 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 조사하였다. FRP rod에 압축응력이 가해졌을 때 섬유의 배향에 따른 파괴강도와 응력의 분포를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션하였고 모델링에는 3-D Shell과 3-D Brick 요소 사용하였다[1]. 제작된 시편의 강도특성과 시뮬레이션을 통한 응력의 분포를 서로 비교하여 시편의 파괴에 미치는 응력을 고찰하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 FRP rod 시편제작

FRP rod 시편의 제작에는 novolac epoxy modified vinylester 수지와 E-glass 섬유를 사용하였다. 사용한 유리섬유의 단섬유 굵기는 평균 23  $\mu\text{m}$ 였다. 인발성형법으로 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48 mm의 FRP rod를 제작하였다. 이 때 유리섬유의 비율은 78%(무게비)가 되도록 하였다. 유리섬유의 배향에 따른 특성을 조사하기 위하여 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48 mm의 rod에 filament winding 방법으로  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 75^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 각으로 winding 하였다. winding의 두께는 1층이 0.18 mm가 되어 교차된 1층의 두께가 0.36 mm가 되었다. 총 교차된 층이 9층으로 이루어져 winding 후 지름이 35.72 mm가 되었다.

또 다른 방법으로 위에서 제작한 32.48 mm의 인발성형 봉에 wrapping 방법으로 인발성형한 봉을 감아서 35.72mm의 지름으로 만들었다. wrapping은 위사와 경사로 구성된 prepreg로 감는 방법(1층으로 표현), UD와 위사와 경사로 구성된 prepreg를 함께 감는 방식(3층으로 표현)등의 2가지의 방법으로 시편을 제작하였다.

### 2.2 FRP의 압축강도 및 응력분포 시뮬레이션

#### 2.2.1 Tsai-Wu 파괴기준

복합재료의 파괴에 미치는 인자는 여러 가지가 있는데 재료구성을 해석이 가능한 구조모형으로 치환시켜 조사한 것과 미시적인 파괴역학에 기초한 확률론적 방법을 도입해서 특성을 파악하는 것으로 크게 구분된다. 본 연구에서는 전자에 대하여 고찰하였다. 복합재료의 파괴강도기준은 일정한 변형이 발생하였을 때 파괴가 일어나는 것으로 정의하는 최대변형률기준(maximum strain failure criteria), 일정한 응력이 발생하였을 때 파괴가 발생하는 것으로 정의하는 최대응력기준(maximum stress failure criteria), 변형률과 응력 등을 복합적으로 고려하여 파괴를 정의하는 Tsai-Wu 파괴기준

(Tsai-Wu failure criteria) [2]등이 있다.

본 연구에서는 전단응력이 많은 영향을 미칠 것으로 예상되므로 최대변형률기준과 최대응력기준은 시뮬레이션에 오차를 발생시킬 가능성이 크므로 모든 응력을 고려하여 파괴를 예측하는 Tsai-Wu 파괴이론을 사용하였다. Tsai-Wu 파괴이론은 다음과 같다.

$$\xi_3 = \frac{1.0}{-B/2A + \sqrt{(B/2A)^2 + 1.0/A}}$$

$\xi_3$  : Tsai-Wu failure criteria 의 값

$$A = -\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{xt}\sigma_{xt}} - \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yt}\sigma_{yt}} - \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{zt}\sigma_{zt}} + \frac{\sigma_{xy}^2}{(\sigma'_{xy})^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{(\sigma'_{yz})^2} + \frac{\sigma_{xz}^2}{(\sigma'_{xz})^2} + \frac{C_{xy}\sigma_x\sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}\sigma_{xt}\sigma_{yt}\sigma_{yt}}} + \frac{C_{yz}\sigma_y\sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}\sigma_{yt}\sigma_{zt}\sigma_{zt}}} + \frac{C_{xz}\sigma_x\sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}\sigma_{xt}\sigma_{zt}\sigma_{zt}}}$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{xt}} + \frac{1}{\sigma_{xc}}\right)\sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{yt}} + \frac{1}{\sigma_{yc}}\right)\sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{zt}} + \frac{1}{\sigma_{zc}}\right)\sigma_z$$

여기서  $\sigma_{xt}^f$  : x방향으로 인장강도 (yt, zt 동일)

$\sigma_{xc}^f$  : x방향으로 압축강도 (yc, zc 동일)

$C_{xy}$  : x-y coupling 계수 (yz, xz 동일)

$\xi_3$  값이 1 이상이 되면 파괴가 일어날것으로 예상하고 그 때의 응력이 강도가 된다.

### 2.2.2 시뮬레이션

하중이 시편에 가해질 때 섬유 배향에 따른 압축강도의 변화와 응력의 분포를 알기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션하였다[3]. 상용패키지 ANSYS를 사용하여 섬유 배향에 따른 압축강도의 변화와 일정한 하중이 가해졌을 때 발생하는 응력의 분포를 해석하였다. 시뮬레이션에 필요한 재료의 강도와 관련된 계수는 다음과 같으며 가장 큰 영향을 미치는  $F_1$ (tension) 및  $F_1$ (tension)는 Instron 8516을 사용하여 측정하였고 그 나머지는 문헌[4]에서 인용하였다.

### Elastic constants

$E_1$  : 45 GPa (longitudinal modulus)

$E_r$  : 12 GPa (transverse modulus)

$G_{12}$  : 5.5 GPa (shear modulus)

$\nu_{12}$  : 0.28 (Poisson's ratio)

### Strength properties

$F_1$  : 1008.95 MPa (Tension)

$F_t$  : 40.02 MPa (Tension)

$F_1$  : 620 MPa (Compression)

$F_t$  : 40 MPa (Compression)

$F_s$  : 70 MPa (Interlaminar Shear)

$F_{ps}$  : 70 MPa (In Plane Shear)

인발성형법으로 일축방향의 유리섬유로 제작한 rod의 모델링은 3-D brick 요소를 택하고 인발성형 rod의 바깥부분을 winding한 부분에 대해서는 3-D shell 요소를 택하였다. 시뮬레이션의 결과와 제작된 시편의 강도의 실험결과를 서로 비교하기 위하여 시뮬레이션에서의 모델링은 실제 제작한 시편과 크기를 동일하게 하였다.

shell의 1층을 0.18 mm로 하여 교차된 1층의 두께가 0.36 mm가 되도록 하였다. 총 교차된 9층을 winding하였고, winding 각은  $0^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 75^\circ$ ,  $90^\circ$ 로 하였다. 높이 71.44 mm와 지름 35.72 mm의 시편에서 대칭성을 이용하여 원주방향으로  $\frac{1}{4}$ , 길이방향으로  $\frac{1}{2}$ 를 모델링하여 시뮬레이션하였다. element는 원주 및 길이방향으로 균등하게 6 등분하였고 그것을 그림 1에 나타내었다. 파괴(압축강도)는 Tsai-Wu 이론을 사용하여 강도를 평가하였고 응력의 분포는 Z방향으로 620 MPa의 일정한 하중을 가하여 시뮬레이션하였다.

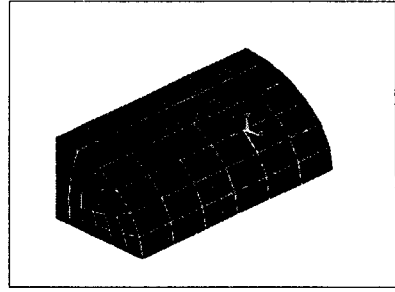


그림 1. 압축응력의 모델링

## 3. 결과 및 고찰

시뮬레이션을 통한 섬유의 배향에 따른 FRP의 압축강도와 실제 실험을 하여 측정된 압축강도를 서로 비교하였다. 압축응력의 작용에 따른 응력분포를 시뮬레이션하여 압축강도와 서로 비교함으로써 FRP의 파괴에 미치는 응력을 조사하였다.

섬유의 배향에 따른 FRP의 압축강도를 시뮬레이션하여 그림 2에, 실제 측정된 압축강도를 그림 3에 나타내었다.

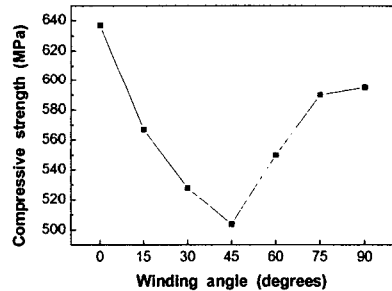


그림 2. winding 각에 따른 압축강도의 시뮬레이션

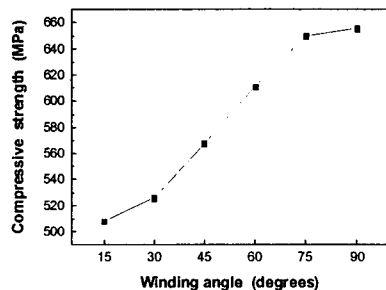


그림 3. winding 각에 따른 압축강도의 변화

압축강도의 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 결과의 차

이가 크게 나타났다. 따라서 그 원인을 분석하고자 압축 응력(620 MPa)이 작용될 때의 응력의 분포를 시뮬레이션하였다. 그림 4에 대표적으로 Z 방향의 응력분포를 나타내었고 그림 5에 응력의 종류에 따른 분포를 그래프로 나타내었다.

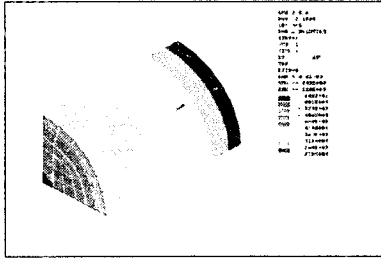


그림 4. Z 방향의 응력분포

시뮬레이션 결과 Z 방향의 응력이 가장 높은 값을 나타내었고 그 외의 방향의 응력 및 전단응력의 값은 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 그러나 파괴는 Z 방향 (인발성형된 섬유 방향)의 응력에 의한 파괴보다는 fiber와 resin사이의 분리에 의한 전단응력  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}$ 에 의해서 발생할 것으로 예상된다. 전단응력  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ 는 winding 각에 따라서 응력의 크기의 편차가 크게 나타나므로 winding의 각에 따라서 파괴에 미치는 영향이 크게 된다. 실제 시편을 만들어서 압축강도를 측정 한 그림 3과 압축응력의 분포를 시뮬레이션한 그림 5에서 압축강도는 전단응력  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}$ 에 의존하는 모습을 잘 나타내고 있다.

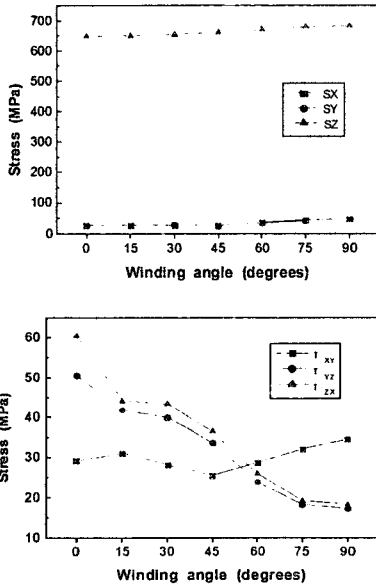


그림 5. winding 각에 따른 압축응력의 시뮬레이션

SX, SY, SZ : X, Y, Z 방향의 응력  
 $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$  : 전단응력

그림 6에 wrapping에 따른 압축강도의 변화를 나타내었다. 인발성형 봉(UD)에 비하여 wrapping 하면서 압축강도가 많이 증가하였지만 wrapping 방법의 변화에 따라서는 강도의 변화가 크지 않았다. 즉, wrapping에 따라서 UD보다 압축강도가 큰 것은 90°로 wrapping한 층은 실제로 압축이 가해질 때 인장응력을 받기 때문인 것으로 보인다.

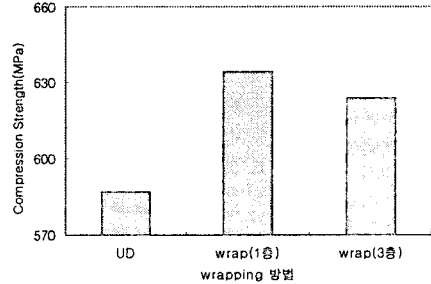


그림 6. wrapping에 따른 압축강도

### 3. 결 론

압축강도는 유리섬유의 배향에 따라서 다르게 나타났다. 압축강도는 90°의 각도로 winding하였을 경우 가장 높게 나타났고 winding에 의하여 압축강도는 향상되었다. 압축강도의 시뮬레이션과 실제의 측정값의 차이는 응력의 분포를 시뮬레이션한 결과 시편의 파괴에 전단응력이 크게 작용하였기 때문임을 알 수 있었다. FRP rod의 압축파괴에 결정적인 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지사이의 전단응력이므로 섬유와 수지사이의 계면의 강도가 매우 중요함을 알 수 있었다. wrapping하여 압축강도를 측정 한 결과 압축강도를 증가시키기 위해서는 90°의 각도로 바깥 층을 wrapping하거나 winding하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] K. J. Bathe, "Finite Element Procedures", Prentice Hall, 1996
- [2] Robert M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", McGraw-Hill, pp. 80-83, 1967
- [3] 김창완 외 4인, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적 설계", 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제3호, pp. 775-787, 1996
- [4] C. Zweben, H. T. Hahn, T. W. Chou, "Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials", Vol. 1, pp. 62-69, Technomic publishing Co., 1989