

전기절연용 FRP의 강도특성

박호열*, 강동필*, 한동희*, 표현동**
한국전기연구소*, 부산대학교**

Mechanical Properties of FRP for Electrical Insulators

Hoy-Yul Park*, Dong-Pil Kang*, Dong-Hee Han*, Hyun-Dong Pyo**
Korea Electrotechnology Research Institute*, Pusan National University**

Abstract - FRP has been used very much as high strength core materials for insulators because of its high strength and good insulation properties. The fiber orientation of FRP has a great effect on FRP strength because the strength of FRP mainly depends on the strength of fiber. In this study, compression and bending stress were simulated along to the orientation of glass fiber. In addition, FRP was made by pultrusion and filament winding method. The compression and flexural strength were measured. The tendency of compression and flexural strength according to the fiber orientation of practical measured value of FRP was similar to simulated results.

1. 서 론

FRP(fiber reinforced plastics)는 에폭시나 불포화 폴리에스테르와 같은 열경화성 수지를 접착성 결합제(binder)로 하고 고강도 유리섬유를 보강제로 한 복합재료이다. 유리섬유보강 FRP는 기계적 강도가 크고 절연성이 우수하여 composite insulator의 core재료 등 절연성의 구조제로 많이 사용되고 있다.

복합재료의 강도를 높이기 위하여 연속상의 장섬유를 사용하여야 하는데 FRP의 기계적 강도가 거의 보강제 섬유에 의존하기 때문에 섬유의 배향이 대단히 중요하다. 그러나 복합재료에서의 섬유의 배향은 제조공법에 따라 제약을 받을 수밖에 없는 한계를 지니고 있으므로 용도에 따라서 제조공법을 잘 선택하여야 한다.

본 연구에서는 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 이해하기 위하여 시편을 제작하여 강도를 측정하고 응력의 분포를 유한요소법을 통하여 수치해석하여 서로 비교하여 보았다.

인발성형(pultrusion)법으로 FRP rod를 제작하고 인발성형된 FRP rod에 일정하게 각도의 변화를 주면서 winding을 하였다. 제작된 시편을 각각 굴곡강도와 압축강도를 측정하여 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 알아보았다. 섬유의 배향에 따른 응력분포를 알기 위하여 수치해석을 하였다. 수치해석은 FRP rod에 굴곡 및 압축응력을 받을 때의 응력의 분포를 유한요소법을 이용하여 수행하였으며 3-D Shell과 3-D Brick⁽¹⁾ 요소를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 FRP rod의 시편제작

novolac epoxy modified vinyl ester 수지와 E-glass 섬유를 사용하여 인발성형방법으로 FRP를 제작하였다. 인발성형시의 수지와 유리섬유의 비율은 4:6(부피비율)으로 하였다. 인발성형방법으로 지름 32mm의 rod를 제작하고 winding각에 따른 특성을 조

사하기 위하여 32mm의 rod에 ±15, ±30, ±45, ±60, ±75, 90°의 각으로 winding하였다.

32mm의 인발성형 rod에 winding 후의 지름이 35.7mm가 되도록 하여 인발성형 rod 부분과 winding 부분과의 단면적 비율이 4:1이 되도록 하였다.

2.2 기계적 강도 측정

2.2.1 굴곡강도 측정⁽²⁾

굴곡강도(flexural strength, modulus of rupture)는 파괴순간에 바깥쪽의 섬유의 최대 스트레스를 말한다.

FRP는 상당히 취성이 강한 재료이기 때문에 3점 가압방식(3-point bending)으로 압력을 가하였고 장비는 INSTRON 8516 시리즈 IX를 사용하였다. span의 길이는 지름의 15배가 되도록 하였다.

가압속도는 다음의 식에 의하여 13.4mm/min으로 하였다.

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

R = rate of cross head motion, mm/min

L = support span, mm

d = depth of beam, mm

Z = 0.01

3점 가압방식을 사용할 경우 원통형의 rod에 대해서는 굴곡강도가 다음의 식으로 나타내어진다^(3, 4).

$$\text{Flexural Strength} = 8F_m L / \pi D^3$$

F_m = maximum force (force at fracture)

L = support span

D = diameter of rod

그림 1에 winding 각에 따른 굴곡강도의 변화를 나타내었다. 여기에서 0°는 인발성형법으로만 제작된 UD(unidirectional) 층으로만 이루어진 rod를 측정 한 것이다.

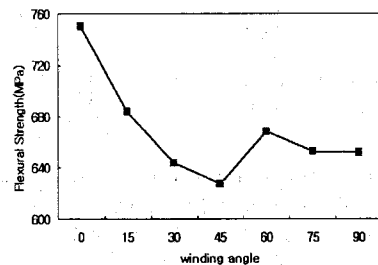


그림 1. winding 각에 따른 굴곡강도의 변화

UD 층으로만 이루어 질 경우에 굴곡강도가 가장 높게 나타났으며 winding 각이 0° 에서 45° 로 됨에 따라서 굴곡강도는 감소를 하다가 60° 에서는 오히려 약간 굴곡강도가 높아지는 경향을 나타내고 있다.

2.2.2 압축강도 측정⁽⁵⁾

압축강도(compression strength)는 압축실험에서 나타나는 최대의 압축스트레스이다. 일반적으로 FRP와 같이 취성이 있는 재료에서는 파괴시의 압축스트레스를 압축강도라고 한다.

측정시편의 크기는 높이를 지름의 2배로 하였고 압축 응력을 가하는 속도는 1.3mm/min으로 하였다. 사용한 장비는 Universal testing machine Shimadzu UH-100이다.

그림 2에 winding 각의 변화에 따른 압축강도의 변화를 나타내었다. 여기에서 0° 는 인발성형법으로만 제작된 UD(unidirectional) 층으로만 이루어진 rod를 측정한 것이다.

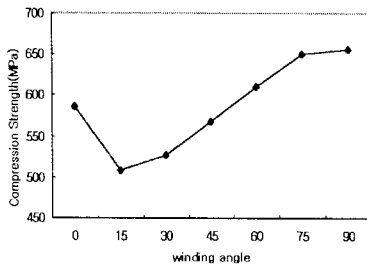


그림 2. winding 각에 따른 압축강도의 변화

압축강도는 winding 각이 15° 에서 90° 로 변화됨에 따라서 점차 증가함을 나타내고 있고 60° 이상이 되면서 0° 일 때보다 더 큰 값을 나타내고 있다.

2.3 FRP의 강도 simulation

적층각의 최적각도⁽⁶⁾를 찾기 위한 유한요소해석을 하였다. 유한요소해석은 상용패키지 ANSYS를 사용하여 수행하였다. 일정한 하중이 가하여 졌을 때 발생하는 응력의 분포를 해석하였다.

유한요소해석에 필요한 재료의 물성값은 다음과 같으며 문헌⁽⁷⁾에서 인용하였다.

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

인발성형법으로 제작한 UD 부분은 3-D brick 요소를 택하고 winding한 부분에 대해서는 3-D shell 요소를 택하였다. shell은 각각 0.18mm를 9층 적층하였다. 적층은 각각 9층을 0, ±15, ±30, ±45, ±60, ±75, 90° 로 하였다.

2.3.1 굴곡강도의 simulation

수치해석시 경계조건은 rod의 반을 모델링하고 중앙면에 대한 symmetric 조건을 붙였다. 그림 3에 표시된 것처럼 -X방향으로 하중을 가하고 모델의 중앙부분에 element를 좀 더 세분화하여 모델링하였다.

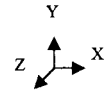
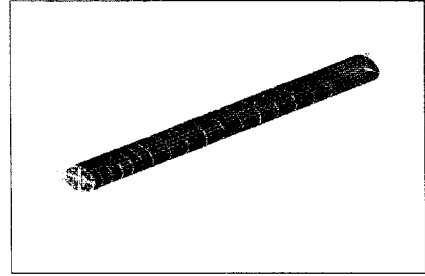


그림 3 bending 시의 modeling

winding 각에 따라 같은 19.6kN의 하중을 가하여 해석하였고 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

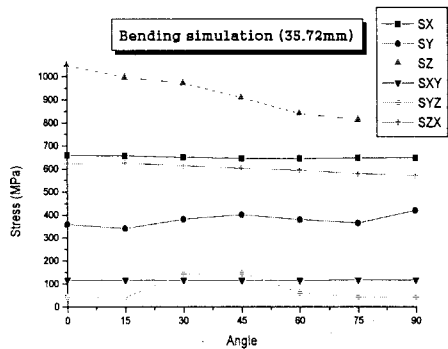


그림 4 Bending simulation

유한요소 해석에서는 응력에 있어서 Z방향의 응력이 가장 영향을 많이 주고 그 외의 응력성분들은 미미한 수준이다. 그러나 파괴는 Z방향 (인발성형된 섬유 방향)의 응력에 의한 파괴보다는 fiber와 resin사이의 분리에 의해서 발생하게 된다. 즉 τ_{xz} , τ_{yz} 에 의해서 발생하게 되는데 τ_{xz} 의 경우 그래프에서 최대와 최소의 편차가 별로 나지 않지만, τ_{yz} 의 경우는 편차가 크게 나타났다.

2.3.2 압축강도의 simulation

수치해석시 유한요소의 모델링은 rod의 대칭을 이용하여 1/4을 모델링하였으며 그것을 그림 5에 나타내었다.

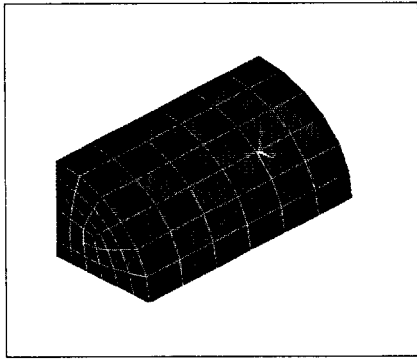


그림. 5 압축 simulation의 modeling

winding 각에 따라 같은 620MPa의 하중을 가하여 해석하였고 그 결과를 그림 6a, 6b에 나타내었다.

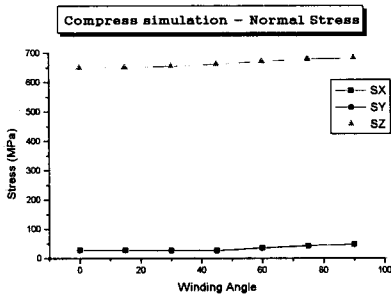


그림 6a. Compression simulation

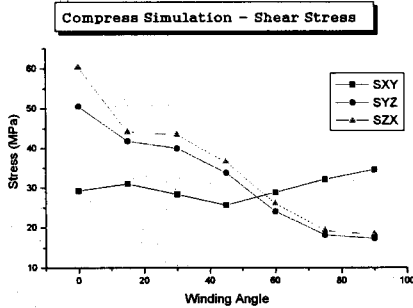


그림 6b. Compression simulation

인발성형된 섬유방향과 같은 응력인 σ_z 가 가장 크게 영향을 미친다. 그 외에 다른 응력 성분들은 각도에 따른 편차가 크지 않고 비슷하다. 그러나 전단응력 τ_{xz} , τ_{yz} 는 차이가 크게 나고 있다. 이것은 0도와 90도 사이에서 약 4배에 가까운 응력의 차이가 생긴다. 그러나 이것은 압축에 주된 응력인 σ_z 와 비교하면 값이 매우 작다. 값은 작지만 파괴를 일으키는 성분에 도움을 줌에 있어서 큰 차이를 보이고 있다.

3. 결 론

(1) 굴곡강도

강도의 측정결과 0°에서 굴곡강도가 가장 높게 나타났으며 45°로 winding하였을 경우 가장 낮게 나타났다.

simulation 결과 Z방향의 응력이 가장 높게 나타났지만 winding의 각도에 의한 응력의 차이는 전단응력에 의하여 크게 나타났으며 45°에서 응력이 크게 나타났다.

(2) 압축강도

강도의 측정결과 winding 각이 90°일 경우 압축강도가 가장 높고 15°일 경우 가장 낮게 나타났다.

simulation 결과 Z방향의 응력이 가장 높게 나타났지만 winding 각도에 의한 응력의 차이는 전단응력에 의하여 크게 나타났으며 0°에서 가장 응력이 크게 나타났다.

(참 고 문 헌)

- (1) Klaus-Jurgen Bathe, "Finite Element Procedures" Prentice Hall, 1996
- (2) ASTM D790-93, "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials"
- (3) ASTM C674-88 "Standard test methods for flexural properties of ceramic whiteware materials"
- (4) R.P. Brown, "Handbook of plastics test methods(3rd edition)", pp139-151, Longman Science & Technical, 1988
- (5) ASTM D695-91, "Standard test method for compressive properties of rigid plastics"
- (6) 김창완, 황운봉, 박현철, 신대식, 박의동, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적 설계", 대한기계학회 논문집 (A) 제 20권 제3호, pp775-787, 1996
- (7) Carl Zweben, H. Thomas Hahn, Tsu-Wei Chou, "Mechanical behavior and properties of composite materials", Vol1, pp62-69, 1989