

와인딩 각도에 따른 절연용 FRP의 굽힘강도 시뮬레이션 및 평가

박효열, 강동필, 안명상, 명인혜
한국전기연구원

Simulation and Evaluation of Bending Strength of FRP for Insulator According to Winding Angle

Hoy-Yul Park, Dong-Pil Kang, Myeong-Sang Ahn, In-Hae Myung
KERI

Abstract

FRP has been used widely for insulator. FRP consists of fiber and resin. The fiber contributes the high strength and modulus to the composite. 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, FRP was made unidirectionally by pultrusion method. Outer part of the FRP was made by filament winding method to give fiber orientation to the FRP. And outer part of FRP was also made by wrapping method. The bending strength and bending stresses of FRP rods were simulated according to the winding orientation of glass fiber. The bending strength of FRP was also evaluated. The results of simulation and evaluation were compared each other to investigate main stresses which affect the fracture of FRP. The main stresses which had a great effect on the strength of FRP were shear stresses. Bending strength of the FRP was different with the winding angle. The bending strength of 15° winded FRP was the highest.

Key Words : FRP, winding angle, orientation, simulation, bending strength

1. 서론

최근 폴리머 애자의 보급이 확대되면서 송배전 급 폴리머 애자와 이것을 응용한 암 절연물(arm insulator) 등에 대한 관심이 증폭되고 있다. 이러한 응용분야에 사용이 급증하고 있는 FRP(fiber reinforced plastics)는 열경화성 수지를 접착성 결합제(binder)로 하고 고강도 섬유를 보강재로 한 복합재료로서 FRP가 절연재료로 사용될 경우 보강재로는 유리섬유를 주로 사용한다. FRP에서 유리섬유는 기계적 강도를 부여하고 주어진 응력하에서 파괴와 굽힘에 대한 저항을 크게 해 준다. 수지는 각각의 섬유에 인가된 스트레스를 분산시키

고 배향되어 있는 섬유를 각각 분리하여 유지시켜 주며 외부환경 및 기계적인 마모로부터 섬유를 보호하는 역할을 한다. FRP의 구성재료인 유리섬유나 경화성수지는 전기부도체이기 때문에 FRP는 우수한 절연재료로서 사용되고 있다. FRP는 옥외용 애자의 core 재료[1, 2, 3], GIS 등 중전기기의 부품 및 composite bushing의 절연tube[4], 송전용 arm insulator[5, 6] 등 절연성이 요구되는 구조재로 많이 사용되고 있다.

FRP의 기계적 강도가 거의 보강재 섬유에 의존하기 때문에 섬유의 배향이 기계적 강도에 크게 영향을 미친다. FRP에 응력이 가해질 때 재료에

작용되는 응력의 분포는 섬유 배향에 따라서, 작용되는 응력의 방향에 따라서 다르게 나타날 것으로 예상된다.

본 연구에서는 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 이해하기 위하여 시편을 제작하여 굽힘강도를 측정하고 굽힘강도와 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션하였다. 인발성형(pultrusion)법으로 일축방향(unidirectional)의 연속섬유로 된 FRP rod를 제작하고 인발성형된 FRP rod에 일정하게 각도의 변화를 주면서 winding 하였다. 제작된 시편의 굽힘강도를 측정하여 섬유의 배향에 따른 강도의 변화를 조사하였다. FRP rod에 굽힘응력이 가해졌을 때 섬유의 배향에 따른 파괴강도와 응력의 분포를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션하였다. 모델링에는 3-D Shell과 3-D Brick 요소를 사용하였다[7]. 제작된 시편의 강도특성과 시뮬레이션을 통한 응력의 분포를 서로 비교하여 시편의 파괴에 미치는 응력을 고찰하였다. 또한 제작방법에 따른 강도의 특성을 비교분석하기 위하여 인발성형봉의 바깥부분을 wrapping하여 강도를 측정하였다.

2. 실험

2.1 FRP rod 시편제작

FRP rod 시편의 제작에는 novolac epoxy modified vinyl ester 수지와 E-glass 섬유를 사용하였다. 사용한 유리섬유의 단섬유 굵기는 평균 23 μm 였다. 인발성형방법으로 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48 mm의 FRP rod를 제작하였다. 이때 유리섬유의 비율은 78%(무게비)가 되도록 하였다. 유리섬유의 배향에 따른 특성을 조사하기 위하여 일축방향의 유리섬유로 된 지름 32.48 mm의 rod에 filament winding법으로 $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 75^\circ$, 90° 의 각으로 winding 하였다. winding의 두께는 1층이 0.18 mm가 되어 교차된 1층의 두께가 0.36 mm가 되었다. 총 교차된 층이 9층이고 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 2가지 방법으로 시편을 제작하였다.

2.2 FRP의 굽힘강도 및 응력분포 시뮬레이션

하중이 시편에 가해질 때 섬유의 배향에 따른 굽힘강도의 변화와 응력의 분포를 알기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션하였다[8]. 상용패키지 ANSYS를 사용하여 섬유의 배향에 따른 압축강도의 변화와 일정한 하중이 가해졌을 때 발생하는 응력의 분포를 해석하였다. 시뮬레이션에 필요한 재료의 강도와 관련한 계수는 다음과 같으며 가장 큰 영향을 미치는 F_1 (tension) 및 F_t (tension)는 Instron 8516을 사용하여 측정하였고 그 나머지는 문헌[9]에서 인용하였다.

Elastic constants

E_l : 45 GPa (longitudinal modulus)

E_r : 12 GPa (transverse modulus)

G_{lt} : 5.5 GPa (shear modulus)

ν_{lt} : 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° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 75^\circ$, 90° 로 하였다. 경계조건으로서 rod의 중앙면에 대하여 symmetric 조건을 붙여 rod의 $\frac{1}{2}$ 을 모델링하였다. 19.6 kN의 하중을 가하여 시뮬레이션하였다. 파괴강도의 기준은 모든 응력을 고려하여 파괴를 예측하는 Tsai-Wu 파괴이론[10]을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션을 통한 섬유의 배향에 따른 FRP의 굽힘강도와 실제 실험을 하여 측정된 굽힘강도를 서로 비교하였다. 굽힘응력의 작용에 따른 응력분

포를 시뮬레이션하여 굽힘강도와 서로 비교함으로써 FRP의 파괴에 미치는 응력을 조사하였다.

섬유의 배향에 따른 FRP의 굽힘강도를 시뮬레이션하여 그림 1에, 실제 측정된 굽힘강도를 그림 2에 나타내었다.

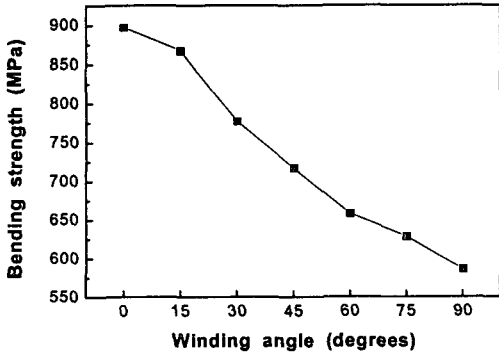


그림 1. winding 각에 따른 굽힘강도의 시뮬레이션
Fig. 1. Simulation results of bending strength with winding angle.

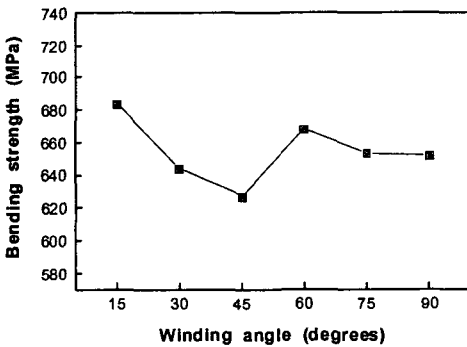


그림 2. winding 각에 따른 굽힘강도의 변화.
Fig. 2. Variation of bending strength with winding angle.

굽힘강도의 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 결과의 차이가 크게 나타났다. 따라서 그 원인을 분석하고자 -X 방향으로 굽힘하중(19.6 kN)이 작용될 때의 응력의 분포를 시뮬레이션하였다. 그림 3에 응력의 종류에 따른 분포를 그래프로 나타내었다.

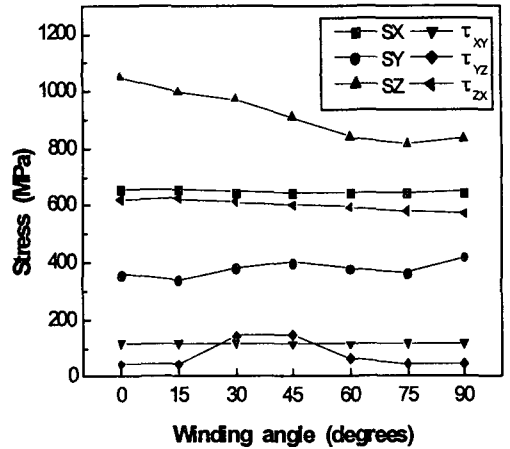


그림 3. winding 각에 따른 굽힘응력 시뮬레이션.
SX, SY, SZ : X,Y,Z 방향의 응력
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 전단응력

Fig. 3. Simulation results of bending stresses with winding angle.
SX, SY, SZ : stresses of X,Y,Z direction
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : shear stresses.

시뮬레이션 결과 Z 방향의 응력이 가장 높은 값을 나타내었고 그 외의 방향의 응력 및 전단응력의 값은 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 그러나 파괴는 Z 방향 (인발성형된 섬유의 방향)의 응력에 의한 파괴보다는 fiber와 resin사이의 분리에 의해서 발생하게 될 것으로 예상된다. 즉 전단응력 τ_{zx} , τ_{yz} 에 의해서 발생될 것으로 예상되는데 τ_{zx} 의 경우 그래프에서 winding 각에 따라서 응력의 크기의 편차가 별로 나지 않지만, τ_{yz} 의 경우는 winding 각에 따라서 응력의 크기의 편차가 크게 나타나므로 파괴에 미치는 영향이 크게 된다. 실제 시편을 만들어서 굽힘강도를 측정된 그림 2와 굽힘응력의 분포를 시뮬레이션한 그림 3에서 굽힘강도는 전단응력 τ_{yz} 에 의존하는 모습을 잘 나타내고 있다.

결과적으로 굽힘강도의 시뮬레이션 결과는 모든 응력을 다 고려하여 나온 결과이지만 실제 모든 응력이 굽힘강도에 균등하게 영향을 미치는 것이 아니고 전단응력이 더 크게 영향을 미친 것이다.

그림 4에 wrapping에 따른 굽힘강도의 변화를 나타내었다.

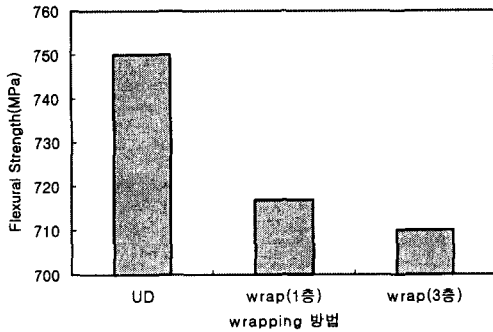


그림 4. wrapping 방법에 따른 굽힘강도의 변화.
Fig. 4. Flexural strength according to wrapping.

인발성형 봉(UD)에 비하여 wrapping 하면서 굽힘강도가 많이 감소하였지만 wrapping 방법의 변화에 따라서는 강도의 변화가 크지 않았다. 즉, wrapping에 따라서 UD보다 굽힘강도가 작은 것은 인발성형 봉(UD)에 비하여 90° 성분이 적어 졌기 때문인 것으로 보인다.

4. 결론

굽힘강도는 유리섬유의 배향에 따라서 다르게 나타났으며 $\pm 15^\circ$ 의 각도로 winding하였을 경우 가장 높게 나타났다. 굽힘강도의 시뮬레이션과 실제의 측정값이 차이는 응력의 분포를 시뮬레이션한 결과 시편의 파괴에 전단응력이 크게 작용하였기 때문임을 알 수 있었다. FRP rod의 굽힘파괴에 결정적인 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지사이의 전단응력이므로 섬유와 수지사이의 계면의 강도가 매우 중요함을 알 수 있었다.

wrapping하여 굽힘강도를 측정 한 결과 90° 층의 유효성분의 감소로 인발성형 봉(UD)에 비하여 굽힘강도가 감소하였다.

참고 문헌

[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. Lanteigne, 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] 김창완외 4인, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적 설계", 대한기계학회 논문집(A), 제20 권, 제3호, pp. 775-787, 1996

[9] C. Zweben, H. T. Hahn, T. W. Chou, "Mechanical behavior and properties of composite materials", Vol. 1, pp. 62-69, Technomic publishing Co., 1989

[10] Robert M. Jones, "Mechanics of composite materials", Mcgraw-Hill, pp80-83, 1967