

전기절연물용 GFRP의 winding 각도에 따른 굽힘강도

박효열, 강동필, 안명상, 이태주

한국전기연구원

Bending strength of GFRP for Insulator according to Winding Angle

Hoy-Yul Park, Dong-Pil Kang, Myeong-Sang Ahn, and Tae-Joo Lee

Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

The demand for electric power keeps growing, and tends to be more effective. Polymer insulators have been manufactured for almost twenty years and the excellent insulation performance of polymer insulators is attractive. Polymeric materials are now widely used as a replacement for inorganic materials such as porcelain or glass for the outdoor insulation of high voltage insulation. GFRP has been used widely as a core materials for polymer insulators. This paper reports the mechanical properties of GFRP for insulators. The bending strength was simulated and evaluated according to the winding angle. The fiber orientation in GFRP has a great effect on the strength of GFRP because the strength of GFRP mainly depends on the strength of fiber. Results of simulated and evaluated strength of GFRP were compared each other. The simulated strength of GFRP rod was different from the evaluated strength. It was caused that the shear stress had a great effect on the strength of GFRP although the stress of parallel direction of GFRP was much higher.

Key Words : GFRP, polymer insulator, bending strength, simulation, orientation

1. 서론

고분자소재 및 성형기술의 발달로 금속의 기계적 강도를 증가하는 절연성능을 가진 고분자 복합재료의 제작이 가능하게 되면서 큰 기계적 강도가 요구되는 철탍의 암(arm)을 고강도 GFRP를 적용한 암 절연물 (braced post insulator)로 대체하려는 시도가 진행되고 있다.

기존의 철탍에는 도체를 지지하고 고전압이 걸린 도체의 공간적 절연유지를 위하여 무거운 금속 암과 애자선이 필요하고, 도체의 swing 공간을 고려하여 철탍 본체와 도체가 허용되는 거리를 유지하도록 암의 길이를 충분히 길게 할 수밖에 없었다. 암 절연물은 도체를 지지하기 위하여 중심부분을 강도가 우수한 GFRP로 구성하고 GFRP의 바깥부분을 전기적 특성과 내환경성이 우수한 실리

콘 고무 소재로 molding한 것으로서 기존의 철탍의 암 대신에 사용하는 것이다. 암 절연물은 철탍 암의 구조재 역할과 절연물 역할을 동시에 수행한다. 암 절연물을 적용하면 jumper가 필요하지 않고 암의 끝에서 도체가 고정되어 전선의 swing 공간이 없어도 되므로 철탍의 소형화가 가능하다.

GFRP(glass fiber reinforced plastics)는 열경화성 수지를 접착성 결합제(binder)로 하고 고강도 유리섬유를 보강재로 한 복합재료이다. GFRP에서 유리섬유는 기계적 강도를 부여하고 주어진 응력 하에서 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 역할을 한다. GFRP는 옥외용 애자의 core 재료[1, 2, 3], GIS 등 중전기기의 부품 및

composite bushing의 절연tube[4], 송전용 압절연물[5, 6] 등 절연성이 요구되는 구조재로 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 섬유 배향에 따른 강도의 변화를 이해하기 위하여 시편을 제작하여 굽힘강도를 측정하고 굽힘강도와 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션하였다. 인발성형(pultrusion)법으로 일축방향(unidirectional)의 연속섬유로 된 GFRP rod를 제작하고 인발성형된 GFRP rod에 일정하게 각도의 변화를 주면서 winding 하였다. 제작된 시편의 굽힘강도를 측정하여 섬유 배향에 따른 강도의 변화를 조사하였다. GFRP rod에 굽힘응력이 가해졌을 때 섬유 배향에 따른 파괴강도와 응력의 분포를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션하였다.

2. 실험

2.1 Tube와 rod의 관성모멘트의 비교계산

직경이 70mm인 rod와 그와 단면적이 동일한 tube에 대하여 관성모멘트(moment of inertia)를 계산하였다. tube의 관성모멘트는 $I_z = I_{z0} - I_{zi}$ 이고 tube와 rod의 관성모멘트의 비는 다음과 같다.

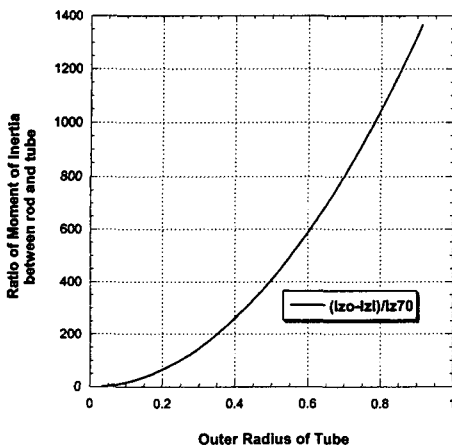


그림 1. Tube의 외경(m)의 변화에 따른 rod에 대한 tube의 관성모멘트 비의 변화

Fig. 1. Variation of ratio of moment of inertia between rod and tube.

같은 단면적에서 rod에서 tube로 바뀌면서 형상에 관련된 관성모멘트의 크기가 크게 변한다. 따라서 이에 따른 굽힘강성도의 크기가 변하므로 굽힘강도의 크기가 rod와 tube에 따라서 크게 좌우된다. 같은 단면적일 경우 tube가 rod 보다 매우 큰 강도를 나타낼 수 있다.

2.2 GFRP rod 시편제작

GFRP 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. 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° 의 각도로 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.

2.3 GFRP의 굽힘강도 및 응력분포

하중이 시편에 가해질 때 섬유 배향에 따른 굽힘강도의 변화와 응력의 분포를 알기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션하였다[7]. ANSYS를 사용하여 섬유 배향에 따른 압축강도의 변화와 일정한 하중이 가해졌을 때 발생하는 응력의 분포를 해석하였다. 시뮬레이션에 필요한 재료의 강도와 관련한 계수는 문헌[8]에서 인용하였다.

인발성형법으로 제작한 rod의 모델링은 3-D brick 요소를 택하고 인발성형 rod의 바깥부분을 winding한 부분에 대해서는 3-D shell 요소를 택하였다[9]. 시뮬레이션에서의 모델링은 실제 제작한 시편과 크기를 동일하게 하였다.

경계조건으로서 rod의 중앙면에 대하여 대칭조건을 부여 rod의 z 를 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 섬유 배향에 따른 GFRP의 굽힘강도와 실제 실험을 하여 측정된 굽힘강도를 서로 비교하였다. 굽힘응력의 작용에 따른 응력분포를 시뮬레이션하여 굽힘강도와 서로 비교함으로써 FRP의 파괴에 미치는 응력을 조사하였다.

섬유 배향에 따른 GFRP의 굽힘강도를 시뮬레이션하여 그림 2에, 실제 측정된 굽힘강도를 그림 3에 나타내었다.

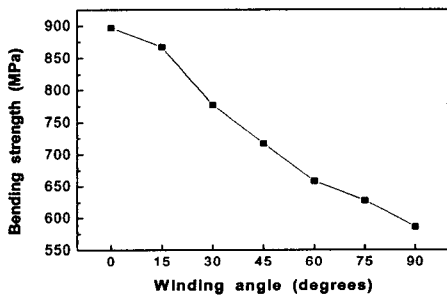


그림 2. Winding 각에 따른 굽힘강도의 시뮬레이션
Fig. 2. Simulated results of bending strength with winding angle.

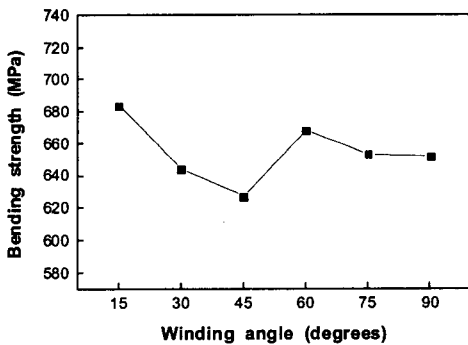


그림 3. Winding 각에 따른 굽힘강도의 변화
Fig. 3. Variation of bending strength with winding angle.

굽힘강도의 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 결과의 차이가 크게 나타났다. 따라서 그 원인을 분

석하고자 -X 방향으로 굽힘하중(19.6 kN)이 작용될 때의 응력의 분포를 시뮬레이션하였다. 그림 4에 굽힘하중이 인가되었을 때 나타난 Z 방향의 응력분포를, 그림 5에 응력의 종류에 따른 분포를 그래프로 나타내었다.

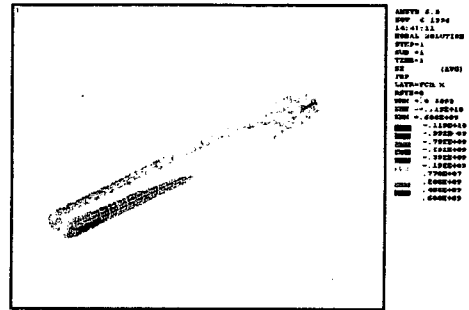


그림 4. Z방향의 응력분포
Fig. 4. Stress distribution of Z direction

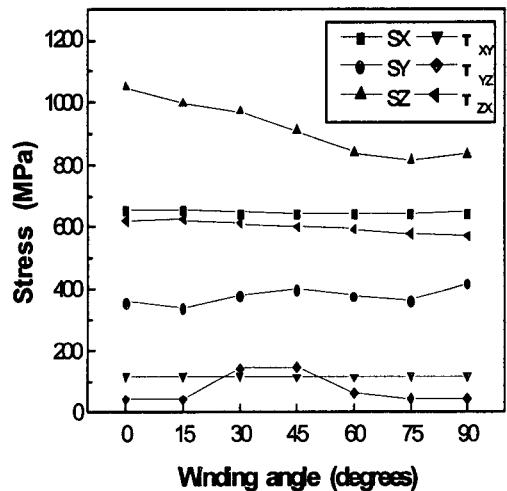


그림 5. Winding 각에 따른 굽힘응력 시뮬레이션
SX, SY, SZ : X,Y,Z 방향의 응력
 $\tau_{XY}, \tau_{YZ}, \tau_{ZX}$: 전단응력
Fig. 5. Simulated results of bending stresses with winding angle.
SX, SY, SZ : stresses of X,Y,Z direction
 $\tau_{XY}, \tau_{YZ}, \tau_{ZX}$: shear stresses

시뮬레이션 결과 Z 방향의 응력이 가장 높은 값을 나타내었고 그 외의 방향의 응력의 값은 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 그러나 파괴는 Z 방향(인발성형된 섬유 방향)의 응력에 의한 파괴보다는 섬유와 수지 사이의 분리에 의해서 발생하게 될 것으로 예상된다. 즉 전단응력 τ_{zx} , τ_{yz} 에 의해서 발생할 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 측정하한 그림 3과 굽힘응력의 분포를 시뮬레이션한 그림 5에서 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.

4. 결론

관성모멘트의 크기가 같은 단면적일 경우 rod에서 tube로 바뀌면서 크게 변함에 따라서 굽힘강도의 크기가 크게 변하므로 힘을 받는 절연 구조물의 설계시에 형상을 고려하여야 한다.

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. GFRP rod의 굽힘파괴에 결정적인 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지 사이의 전단응력이므로 섬유와 수지사이의 계면의 강도가 매우 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [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] 김창완외 4인, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적 설계", 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제3호, pp. 775-787, 1996.
- [8] C. Zweben, H. T. Hahn, T. W. Chou, "Mechanical behavior and properties of composite materials", Vol. 1, pp. 62-69, Technomic publishing Co., 1989.
- [9] K. J. Bathe, "Finite element procedures", Prentice Hall, 1996.
- [10] Robert M. Jones, "Mechanics of composite materials", Mcgraw-Hill, pp80-83, 1967.