

FRP에서 와인딩 각도에 따른 압축강도의 시뮬레이션과 특성평가

Simulation and Evaluation of Compressive Strength of FRP According to the Winding Orientation of Glass Fiber

박효열*, 강동필*, 한동희*, 김인성*, 표현동**

(Hoy-Yul Park*, Dong-Pil Kang*, Dong-Hee Han*, In-Sung Kim*, Hyun-Dong Pyo**)

Abstract

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. Unidirectional FRP made by pultrusion method has comparatively lower compressive strength than tensile strength. Compressive strength of unidirectional FRP may be increased by filament winding layer which has tensile stress when compressive stress was loaded. In this study, compressive strength and stresses of FRP rods were simulated 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. Simulated value and real evaluated compressive strength were compared to investigate stresses which is prominent to the fracture of FRP. The shear stresses had a great effect on the strength of FRP although the stress of parallel direction of FRP was much higher.

Key Words(중요용어) : FRP(유리섬유강화플라스틱), compressive strength(압축강도),
fiber orientation(섬유배향), simulation(시뮬레이션), evaluation(평가)

1. 서론

FRP(fiber reinforced plastics)는 에폭시나 불포화 폴리에스테르와 같은 열경화성 수지를 접착성 결합제(binder)로 하고 고강도 섬유를 보강재로 한 복합 재료로서 기계적, 화학적, 전기적 특성이 매우 우수하다. FRP에서 유리섬유는 기계적 강도를 부여하고 수지는 각각의 섬유에 인가된 스트레스를 분산시키고 배향되어 있는 섬유를 각각 분리하여 유지시켜주며 외부환경 및 기계적인 마모로부터 섬유를 보호하

는 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 이해하기 위하여 시편을 제작하여 압축강도를 측정

* 한국전기연구소 전략기술연구단
(경남 창원시 성주동 28-1, Fax: 0551-280-1590
E-mail : hypark@keri.re.kr)
** 부산대학교 기계공학과
(부산시 금정구 장전동 부산대학교)

하고 압축강도와 응력의 분포를 유한요소법으로 시뮬레이션하였다. 인발성형법으로 일축방향의 연속섬유로 된 FRP rod를 제작하고 인발성형된 FRP rod에 일정하게 각도의 변화를 주면서 winding 하였다. 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 요소를 사용하였다[1]. 제작된 시편의 강도특성과 시뮬레이션을 통한 응력의 분포를 서로 비교하여 시편의 파괴에 미치는 응력을 고찰하였다.

2. 실험 및 방법

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. 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° 의 각도로 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.

2.2 FRP의 압축강도 및 응력분포 시뮬레이션

2.2.1 Tsai-Wu 파괴이론

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 최대변형률 기준(maximum strain failure criteria), 일정한 응력이 발생하였을 때 파괴가 발생하는 것으로 정의하는 최대응력기준(maximum stress failure criteria), 변

형률과 응력 등을 복합적으로 고려하여 파괴를 정의하는 Tsai-Wu 파괴이론(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.

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

ξ_3 : Tsai-Wu failure criteria 의 값

$$A = -\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{xt}^2 \sigma_{xc}^2} - \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yt}^2 \sigma_{yc}^2} - \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{zt}^2 \sigma_{zc}^2} + \frac{\sigma_{xy}^2}{(\sigma_{xy}^t)^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{(\sigma_{yz}^t)^2} + \frac{\sigma_{xz}^2}{(\sigma_{xz}^t)^2} + \frac{C_{xy} \sigma_x \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^2 \sigma_{xc}^2 \sigma_{yt}^2 \sigma_{yc}^2}} + \frac{C_{yz} \sigma_y \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^2 \sigma_{yc}^2 \sigma_{zt}^2 \sigma_{zc}^2}} + \frac{C_{xz} \sigma_x \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^2 \sigma_{xc}^2 \sigma_{zt}^2 \sigma_{zc}^2}}$$

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

여기서 σ_{xt}^t : x방향으로 인장강도 (yt, zt 동일)

σ_{xc}^t : x방향으로 압축강도 (yc, zc 동일)

C_{xy} : x-y coupling 계수 (yz, xz 동일)

ξ_3 값이 1 이상이 되면 파괴가 일어날 것으로 예상하고 그 때의 응력이 강도가 된다.

2.2.2 시뮬레이션

하중이 시편에 가해질 때 섬유의 배향에 따른 압축강도의 변화와 응력의 분포를 알기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션하였다[3]. 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_t (tension) 및 F_c (tension)는 Instron 8516을 사용하여 측정하였고 그 나머지는 문헌[4]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_t : 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. 높이 71.44 mm와 지름 35.72 mm의 시편에서 대칭성을 이용하여 원주방향으로 $\frac{1}{4}$, 길이방향으로 $\frac{1}{2}$ 을 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.

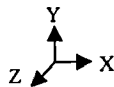
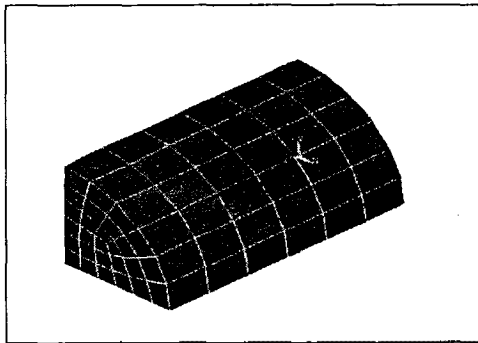


그림 1. 압축응력의 모델링
Fig. 1. Modeling of compressive stresses

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션을 통한 섬유 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.

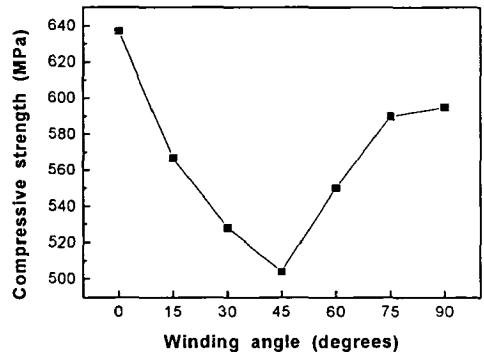


그림 2. winding 각에 따른 압축강도의 시뮬레이션
Fig. 2. Simulation results of compressive strength with winding angle.

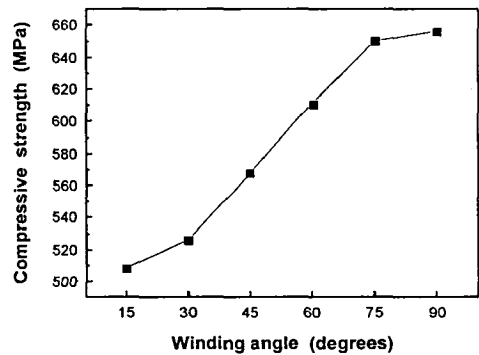


그림 3. winding 각에 따른 압축강도의 변화
Fig. 3. Variation of compressive strength with winding angle.

압축강도의 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 결과의 차이가 크게 나타났다. 따라서 그 원인을 분석하

고자 압축응력(620 MPa)이 작용될 때의 응력의 분포를 시뮬레이션하였다. 그림 4에 대표적으로 Z 방향의 응력분포를 나타내었고 그림 5에 응력의 종류에 따른 분포를 그래프로 나타내었다.

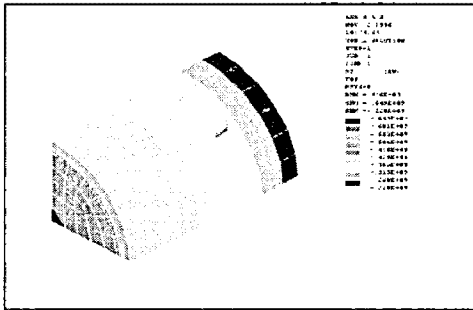


그림 4. Z 방향의 응력분포
Fig. 4. Stress distribution of Z direction

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 τ_{yz} , τ_{zx} 에 의해서 발생할 것으로 예상된다. 전단응력 τ_{yz} , τ_{zx} 는 winding 각에 따라서 응력의 크기의 편차가 크게 나타나므로 winding의 각에 따라서 파괴에 미치는 영향이 크게 된다. 실제 시편을 만들어서 압축강도를 측정한 그림 3과 압축응력의 분포를 시뮬레이션한 그림 5에서 압축강도는 전단응력 τ_{yz} , τ_{zx} 에 의존하는 모습을 잘 나타내고 있다.

4. 결론

압축강도는 유리섬유의 배향에 따라서 다르게 나타났다. 압축강도는 90°의 각도로 winding하였을 경우 가장 높게 나타났고 winding에 의하여 압축강도는 향상되었다. 압축강도의 시뮬레이션과 실제 측정값이 차이는 응력의 분포를 시뮬레이션한 결과 시편의 파괴에 전단응력이 크게 작용하였기 때문임을 알 수 있었다. FRP rod의 압축파괴에 결정적인 영향을 미치는 인자는 섬유와 수지사이의 전단응력 이므로 섬유와 수지사이의 계면의 강도가 매우 중요함을 알 수 있었다.

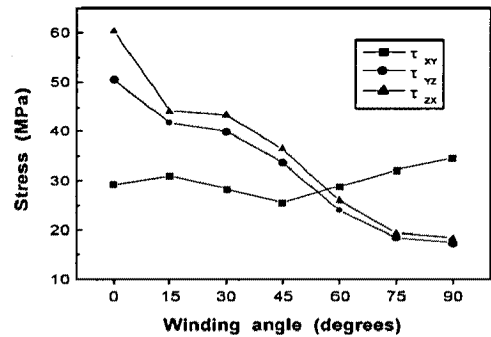
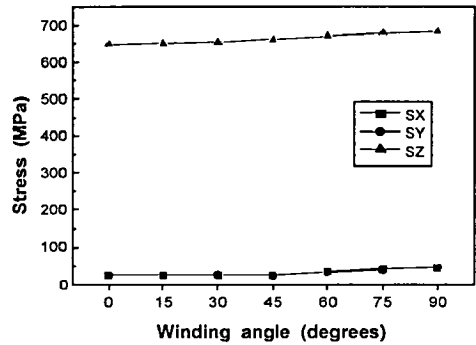


그림 5. winding 각에 따른 압축응력의 시뮬레이션
SX, SY, SZ : X,Y,Z 방향의 응력
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 전단응력

Fig. 5. Simulation results of compressive stresses with winding angle.
SX, SY, SZ : stresses of X,Y,Z direction
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : shear stresses

참고문헌

- [1] K. J. Bathe, "Finite element procedures", Prentice Hall, 1996
- [2] Robert M. Jones, "Mechanics of composite materials", Mcgraw-Hill, pp80-83, 1967
- [3] 김창완 외 4인, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적 설계", 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제3호, pp775-787, 1996
- [4] C. Zweben, H. T. Hahn, T. W. Chou, "Mechanical behavior and properties of composite materials", Vol. 1, pp62-69, Technomic publishing Co., 1989