

## FRP 복합재료의 온도변화 및 제작인자별 비선형 전단거동 조사

정우영\* · 황진섭\*\*

Woo-Young, Jung\*, Jin-Seop, Hwang\*\*

### An Investigation on the Nonlinear Shear Behavior of FRP Composites Considering Temperature Variation and Fabricating Parameters

#### ABSTRACT

In the case of composite material, a variety of characteristics were expressed depending on the materials that were composed of. In this study, the materials showing non-linear shear behavior were investigated among FRP composite. Each specimen was designed and analyzed according to ASTM D4255 method: regulations on the 2-rail. The dependent variables included in this experiment were a variety of fiber, fiber volume ratio, fiber array direction, temperature, material homogeneity. For determination of characteristics based on the fiber array, fiber array direction of 0, 30, 45, and 60 degrees were selected for test specimen. Temperature of 25, 40, 60, and 80°C were considered for investigation of FRP materials' shear behavior based on the external temperature. Nonlinear shear behavior was observed throughout the FRP composite material in this study. Also, using vinyl ester resins, high fiber volume ratio, and fiber array direction of 45 degree appeared to show the most prominent nonlinear shear behavior. As for the findings related to the temperature change, non-linear behavior was decreased as the external temperature increased. For factory manufactured product, non-linear behavior was relatively at parity in comparison to the behavior found in the hand lay-up FRP composite specimen.

**Key words :** FRP, Shear, Nonlinearity, Material Test, Resin Matrix

#### 초록

복합재료의 경우 다양한 재료에 따라 제작이 가능하며 이들 완성재료의 경우 다양한 재료특성을 나타낸다. 이 연구는 건설용 FRP 복합재료의 재료특성 중 선형거동이 뚜렷이 나타나는 인장, 압축과는 달리 비선형 거동이 발생하는 전단거동 특성에 대한 실험적 연구로서 ASTM D4255 규정에 의한 2-Rail 전단시험 방법을 토대로 각각의 시편들을 제작, 실험결과를 분석하였다. 고려된 실험변수로는 함침 수지류의 종류와 섬유 체적비, 섬유배열 방향 및 온도 특성, 공장용 생산제품의 균질성 등을 고려하였다. 섬유배열 방향에 따른 특성조사의 경우 섬유 배열방향을 0°, 30°, 45°, 60°로 각각 시편을 제작하였으며, 온도에 따른 외부환경 변화에 의한 FRP 재료의 전단거동을 조사하기 위하여 실험온도를 25°C, 40°C, 60°C, 80°C로 각각 고려하여 시험을 수행하였다. 이 연구를 통하여 대부분의 복합재료 시편에서 비선형 전단거동이 확인되었으며 비닐에스테르수지를 사용하고, 높은 섬유체적비와 45°의 섬유배열방향을 가진 시편에서 비선형 전단거동이 가장 두드러지게 나타나는 것으로 조사되었다. 온도 변화에 따른 실험결과에 의하면, 온도가 증가함에 따라 전단 내 비선형 거동의 감소가 나타났으며 공장용 제작제품의 경우 hand lay-up 제작시편에 비하여 비선형 전단거동이 비교적 동등하게 나타났다.

**검색어 :** 복합재료, 전단, 비선형, 재료시험, 수지류

\* 정회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University · woojung@gwnu.ac.kr)

\*\* 강릉원주대학교 토목공학과 공학석사 (hjsstar03@hanmail.net)

Received July 13 2012, Revised November 20 2012, Accepted February 19 2013

## 1. 서론

콘크리트는 경제성과 내구성이 우수하며, 내화성이 좋고 구조물의 형상과 크기에 제약이 받지 않아 현재까지도 가장 많이 사용되어 지는 재료지만 콘크리트 구조물은 사용시간이 경과함에 따른 노후화 현상이 발생한다. 특히 외부환경에 노출되어 있어 계절의 변화 즉 구조물의 급격한 온도변화에 의해서 콘크리트 구조물의 성능을 저하시킨다. 따라서 구조물에 있어 완공까지의 품질 및 공정관리가 필요할 뿐만 아니라 완성 후에도 정기적인 점검을 실시하여 구조물의 노화 현상, 즉 성능저하 정도를 파악하고 유지 및 보수보강이 필요하다(Yoo, Y. C., 2006).

우리나라에서는 노후화된 건축물에 대하여 강관외부 부착공법, 단면증설공법, 외부 프리스트레싱 보강공법 등이 사용되어 왔으나, 1990년대 이후 탄소섬유시트, 탄소섬유관, 유리섬유시트 등 다양한 종류의 FRP(Fiber Reinforced Polymer)를 사용한 보강공법으로 대체되는 경향을 보이고 있다(Park, Y. H., 2003). 특히 새로운 FRP 보강공법들은 FRP재료의 고강도, 경량성, 부식 저항성 및 시공의 용이성 이외에도, 신소재를 건설재료로 응용한다는 하이테크적 이미지 등으로 인해 이전의 보강방법에 비하여 시공에 많이 이용되고 있으며, 앞으로의 전망도 더욱 광범위하게 사용될 것으로 예상되고 있다. 최근 미국 일본 등 선진국에서는 이미 복합재료 자체구성 구조물의 경우 재료적 비선형과 이와 관련된 파괴역학 메커니즘에 대한 많은 관심을 가지고 정확한 재료특성파악을 위한 실험적 연구를 시작하였다. 국내의 경우 FRP 보수·보강이 증가하고 있는 추세임에도 불구하고 아직까지 FRP 제조특성에 따른 정확한 재료거동을 제시하지 못하고 있으며 특히 전단 비선형성과 이에 의한 적용 구조물의 장기거동변화에 대한 예측은 주도적으로 많은 연구가 진행되지 못하고 있는 실정이다.

이 연구는 복합재료 전단특성 및 비선형 거동에 관한 실험적 연구로서 수지의 종류, Fiber Volume Ratio, 섬유배열방향, 온도변화, 공작용 제품의 품질성 등 다양한 제조회장에 따른 GFRP 및 CFRP 재료의 거동을 조사하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 FRP 복합재료의 전단시험 개요

In-plane 전단특성을 파악하기 위해서는 순하중을 발생시켜 실험을 수행하여야 하며 단일방향으로 합성된 시편의 in-plane 전단특성을 측정하기 위해 ASTM 기준(D4255/ D4255M)에서 제시되는 방법으로는 크게 네 가지로 분류된다. 이는  $\pm 45^\circ$  예각 적층판 인장시험, off-axis 인장시험, Two-rail Shear Test와 Three-rail Shear Test로 구분된다. Figure 1은 이들 중 일반적으로 많이

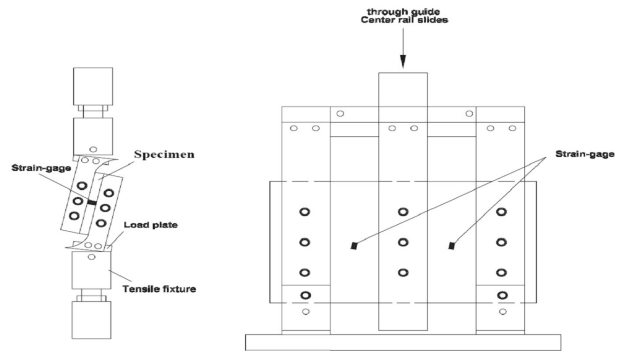


Fig. 1. Two-rail, Three-rail Shear Test

적용되는 Two-rail 와 Three-rail shear Test의 실험방법을 보여주고 있다. 복합재료에 대한 대부분의 전단시험의 경우 신뢰성 측면에서는 Three-rail Shear Test가 높으나 시험기에 부착되는 지지제작 등의 여건상 Two-rail Shear Test가 실제 현장에서 많이 적용되고 있다. 이 연구에서도 활용 시험기의 재원 및 제작환경을 고려하여 Two-rail Shear Test 방법에 의하여 실험을 수행하였다(Go, K. T., 2001; Olderhaw, B., 2008).

Two-rail shear test는 제작된 전단시편을 rail 고정지그와 고정 장치 사이를 조여 실험하는 방법으로 고정 장치는 단부하중에 영향을 받아 시편 내 in-plane 전단하중을 발생시키며 시편 내 부착된 strain gauge를 통하여 변형률을 측정하는 방법이다. Two-rail Shear test방법에 대한  $(x,y)$ 축의 평균 전단응력은 전단방향의 길이  $(L)$ , 하중  $(P)$ , 시편두께  $(t)$ 의 향으로 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{xy} = P/Lt \quad (1)$$

변형률의 경우 일반변형  $\epsilon_{45}$ 를 측정하므로  $x,y$ 축 방향에 따라 전단변형률이 결정되며  $\epsilon_{45}$ 는  $x$  축으로부터 시계방향으로  $45^\circ$  방향에 대한 변형률을 의미한다. 식(2)는 Two-rail shear test에 의해 산정된 전단변형률을 표현한다.

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon'_{45} \quad (2)$$

### 2.2 실험계획

실험변수는 사용수지, 섬유체적비, 섬유배열방향, 온도변화, 상업용 FRP재료로 총 5가지변수에 대한 전단거동평가를 실시하였으며 Table 3과 같다. 첫째, 수지류에 따른 평가는 같이 폴리에스테르 수지, 비닐에스테르 수지, 에폭시 수지를 각각 사용하였으며 각수지류에 따른 전단비선형시험을 실시하였다. 둘째, 섬유체적비에 따른 거동평가는 합침 수지량을 기준으로 제작한 p-r1 시편 0.446%, 추가 제작된 시편 p-r2 0.415%, p-r3 0.384%에 따른 거동평가를

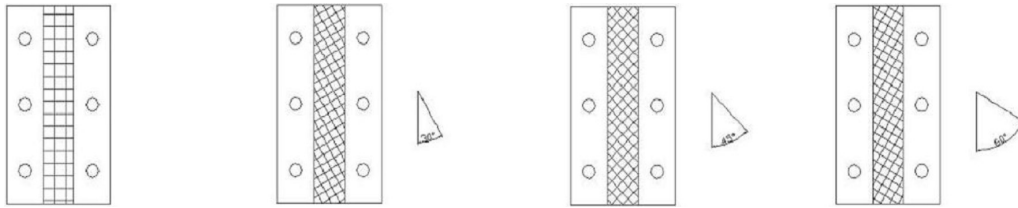


Fig. 2. Fiber Arrangement Direction (0°, 30°, 45°, 60°)

Table 1. Dimension of Experimental Variables

Experimental Species	experimental argument	Used Materials	Specimen number	Specimen Quantity
Resin type shear test	Polyester	Glass fiber	p	3
	Epoxy		e	3
	Vinylester		v	3
Shear test of fiber volume ratio	0.44%	Glass fiber / Polyester fiber	p-r1-1	2
	0.42%		p-r2-1	2
	0.38%		p-r3-1	2
Shear Test of Fiber array direction	0°	Glass fiber / Polyester fiber	p-a0	2
	30°		p-a30	2
	45°		p-a45	2
	60°		p-a60	2
Temperature Shear test	25°C	Glass fiber / Polyester fiber	p-t25	2
	40°C		p-t40	2
	60°C		p-t60	2
	80°C		p-t80	2
Shear test of Commercial products	0°	Factory fabricated CFRP	c-0	2
	90°	Factory fabricated CFRP	c-90	2
	0°	Factory fabricated GFRP	g-0	2
	90°	Factory fabricated GFRP	g-90	2

실시하였다. 셋째, 섬유 배열방향에 따른 거동평가는 Figure 2와 같이 일반적인 섬유배열 방향인 0°를 비롯하여 30°, 45°, 60°로 각각 시편을 제작, 전단시험을 실시하였다.

넷째, 온도변화에 따른 전단시험은 상온 25°C를 기본으로 조금씩 온도를 상승시켜 최대 4가지 온도영역에서 복합재료의 전단특성에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험에 고려된 고려된 외부온도 범위로는 초기 상온에서 15°C를 승강시켜 40°C, 이후 각각 20°C를 승강시켜 60°C, 80°C의 온도영역에서 복합재료의 전단비선형 특성에 대하여 실험을 실시하였다. 증가 온도분에 대하여 정량적인 값이 적용되지 못한 것은 본 실험에 적용된 온도챔버 셋업에 있어 디지털 기능의 제어가 불가능했기 때문이다. 마지막으로 상용섬유판에 대한 전단비선형 실험을 실시하였으며 상용재료 CFRP(탄소섬유판)와 GFRP(유리섬유판)로 각각 나누어 실험을 수행, 섬유판 내 고려된 0°와 90° 섬유배열 방향에 따른 전단거동평가를 하였다(Jung, W. Y., 2003).

## 2.3 실험재료

### 2.3.1 강화섬유

이 연구에서 활용된 유리섬유는 (주)KCC에서 생산된 Woven roving 형태의 E-glass fiber를 사용하였다. E-glass fiber의 경우 풍화성이 높고 성능이 우수하며 S-glass에 비해 저렴함으로 복합재료 적용용으로 가장 많이 사용된다. Woven roving은 단위 면적당 일정한 무게가 되도록 평직으로 제작된 FRP용 유리직물이며 상세 제원은 Table 1과 같다. 또한 공장도 제품은 CFRP, GFRP판은 (주)SK케미칼에서 실제 제작, 판매하고 있는 제품으로써 예폭시 수지에 섬유를 함침시켜 경화한 제품으로 기계적으로 함침된 수지의 양이 일정하여 제품품질의 균일도가 매우 높은 제품이다. 이 연구에서 사용된 섬유판의 물성치는 Table 2와 같다(Sim, J. S., 2006).

Table 2. Properties of Woven roving

Specifications		Standards
Per unit area ( $g/m^2$ )		580
Weave density (Piece/inch)	weft	6.3
	Slope	6.3
Weaving width (mm)		1000

Table 3. Properties of Commercial FRP Panel

Species	thickness	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)
CFRP	1.4mm	3000	165
GFRP	1.4mm	1000	40

2.3.2 수지(Matrix)

FRP 복합 재료의 전단특성 및 비선형 거동 분석을 위한 전단시험에 사용된 매트릭스용 수지는 건설용 복합재료에서 가장 일반적으로 사용되는 불포화 폴리에스테르수지 (모델명: G-613BT)를 비롯하여 비닐에스테르수지 (모델명: RF-1001MV), 에폭시 수지 (모델명: YD-128)를 각각 사용하였다.

2.4 전단시험 제작

이 연구에서 제작된 복합재료 시험시편들은 모두 Hand lay-up 공정에 의하여 제작되었으며, 3 layer씩 각각 적층하여 경화시킨 후 제작하였으며 제작패널은 Figure 3과 같다. 제작된 복합재료 패널의 섬유함유량은 약 50%로 조사되었다. 시험형상은 ASTM규정에 따라 판형으로 제작되었으며, 전단시험에 대한 설계와 실제 제작된 전단시험은 Figure 4와 같다. 지그와 부착될 시험부분의 경우 천공된 구멍으로 인한 국부응력이 집중 발생하여 시험 내 지그접합부에서 파괴가 자주 발생하는데 부가 플레이트로 Tab을 만들어 부착, 모체의 두께를 증가시켜 국부파괴를 방지하였다(Lee, I., 1989).

2.5 실험방법

다양한 조건의 제작변수에 따른 GFRP복합재료의 전단특성 또는 비선형 거동을 알아보기 위하여 전단지그를 설계, 자체 제작하여 Two-rail 전단시험을 수행하였다. 제작된 FRP 전단시험은 최대 하중 50kN인 UTM기를 사용하여 실시하였다. 제작한 FRP전단시험을 전단지그에 단단히 볼팅한 후 Figure 5와 같이 UTM기에 결합하였다.

복합재료의 전단시험은 변위제어로 1mm/min의 속도로 전단 시험이 파괴될 때까지 가력 하였다. 하중가력 시 FRP의 변형률을 측정하기위하여 일본 KYOWA사의 삼축게이지(Rosette Gauge)가

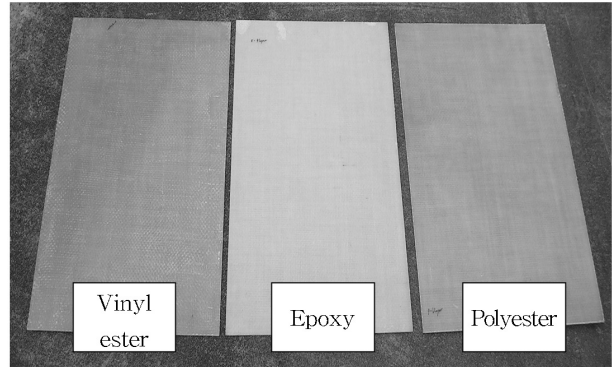


Fig. 3. Impregnated Resin Type GFRP Panel

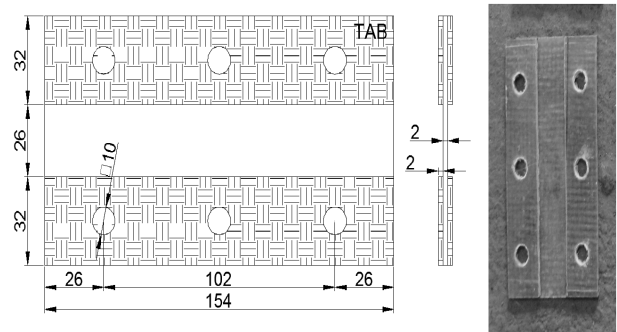


Fig. 4. Shear Test Specimen in ASTM(Unit:mm)

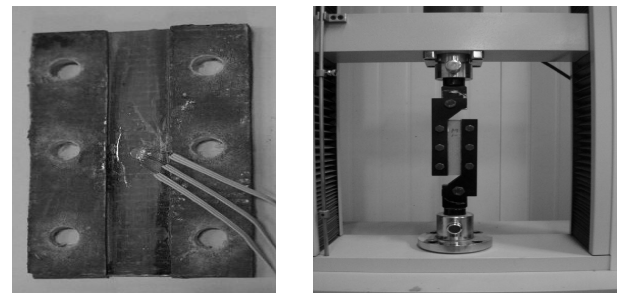


Fig. 5. Test Setup



Fig. 6. Data Logger, LVDT and Triaxial gauge

사용되었다. 전단시편의 가운데 부분에 삼축 게이지를 전단방향과 전단방향에서 45°방향, 전단방향에서 직각방향으로 맞추어 접착제를 바르고 완전히 눌러 접착시켰다(Yang, D. S., 2004). 변위, 변형률 측정을 위해 데이터로거(TDS-303)와 LVDT, 삼축 게이지(Rosette Gage)는 Figure 6과 같다.

### 3. 연구결과 및 분석

#### 3.1 파괴 형상

사용수지, 섬유체적비, 섬유배열방향, 온도변화, 상업용 FRP 재료로 총 5가지변수에 대한 전단시험결과 시편파괴형상은 Table 4에 나타냈다. 수지종류 및 섬유최적비에 따른 파괴형상은 시편에 큰 변형 없이 발생하였다. 섬유 배열방향에 따른 전단파괴 형상은 섬유 배열 방향이 0°인 시편의 전단파괴 형상과는 달리 섬유 배열방향이 다른 시편의 경우 경사면 균열에 의한 파괴모드를

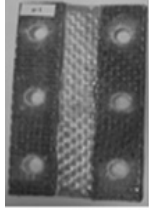
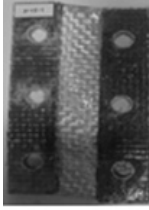
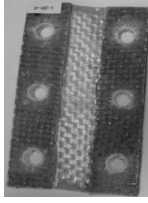
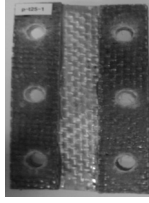
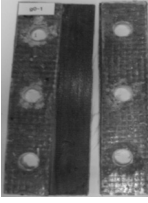
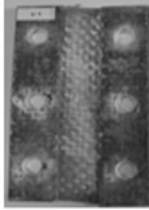
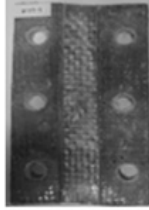
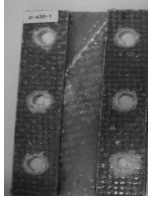
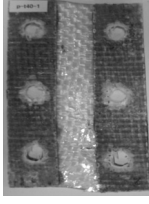
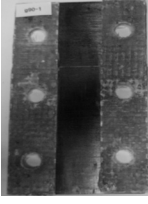
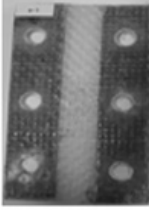
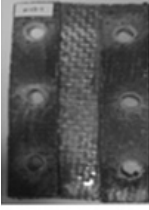
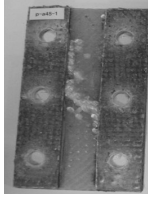
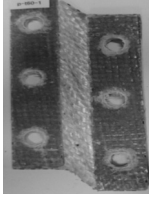
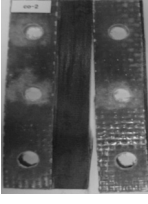
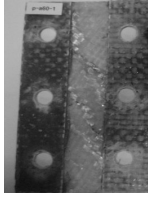
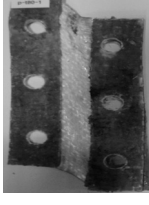
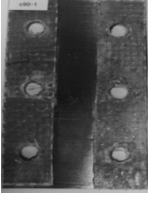
명확히 나타냈다. 온도에 따른 시편의 파괴형상은 온도가 증가함에 따라 시편의 파괴와 변형이 급격하게 변형되었다. 상용 FRP시편의 파괴형상은 섬유배열방향으로 많은 균열이 점차적으로 발생하여 파괴된 시편의 파괴형상을 나타낸다.

#### 3.2 수지종류에 따른 전단시험 결과 및 분석

유리섬유에 다양한 종류의 수지를 함침하여 제작된 시편에 대한 전단거동 특성을 조사한 결과, Figure 8과 같이 대부분의 복합재료 전단특성에서 비선형 거동이 관찰되었다. 특히 에폭시수지를 함침 제작한 복합재료 시편(v)의 경우 폴리에스테르나 비닐에스테르 수지함침 제작시편에 비하여 전단비선형 거동특성이 가장 크게 나타나는 것으로 조사되었으며 이는 각 수지별 항복응력의 차이에 기인하는 것으로 보여진다.

따라서 전단 항복강도의 경우 에폭시수지를 함침제작한 시편(e), 폴리에스테르를 함침제작한 시편(p), 비닐에스테르수지를 함

Table 4. Specimen Failure Shape by Experimental Variables

Experimental Species	Resin type	Fiber volume ratio	Fiber array direction	Temperature	Commercial Product
Specimen failure the shape	 (a) p-1	 (a) p-r1	 (a) p-a0	 (a) p-t25	 (c) g0
	 (b) e-1	 (b) p-r2	 (b) p-a30	 (b) p-t40	 (a) g90
	 (c) v-1	 (c) p-r3	 (c) p-a45	 (c) p-t60	 (d) c0
			 (d) p-a60	 (d) p-t80	 (b) c90

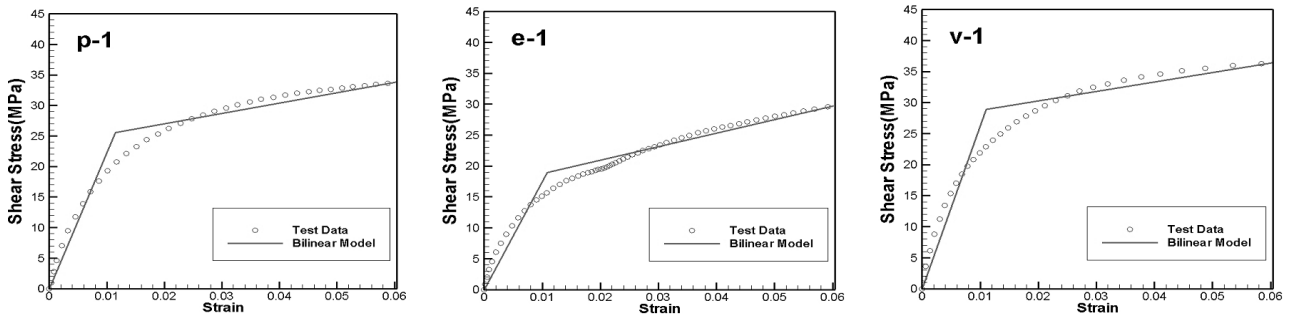


Fig. 7. Shear Bi-Linear Models according to the Type of Resin

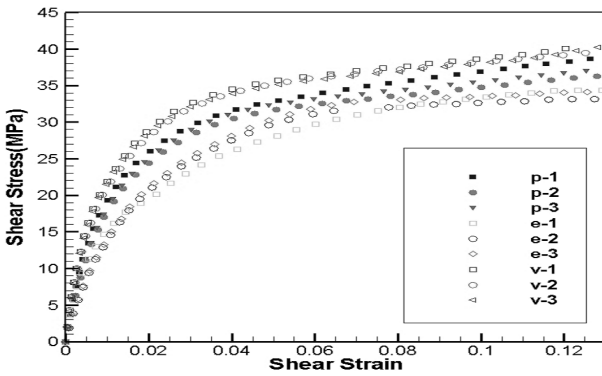


Fig. 8. Shear Non-Linear Characteristics according to the Type of Resin

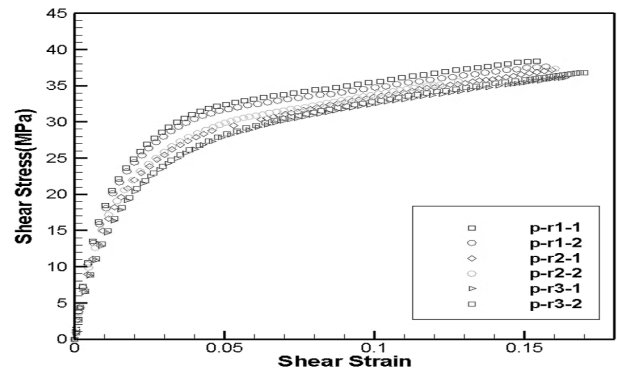


Fig. 10. Behavior of Shear Non-Linear according to the Fiber Volume Ratio

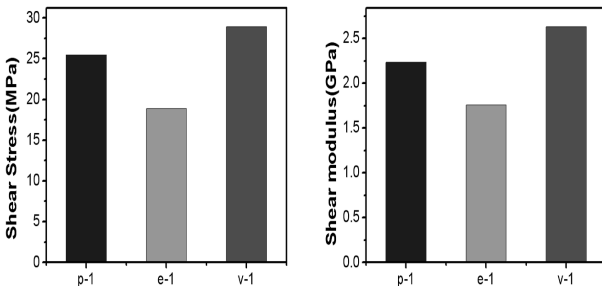


Fig. 9. Shear Yield Stress and Shear Modulus according to the Type of Resin

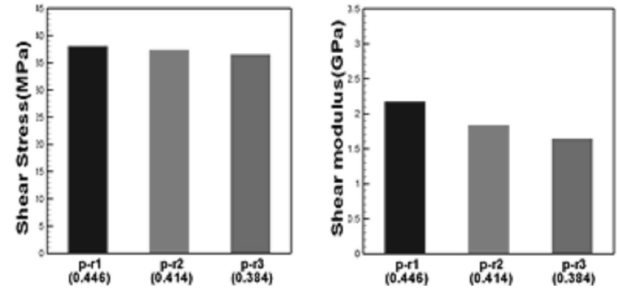


Fig. 11. Shear Yield Stress and Shear Modulus according to the Fiber Volume Ratio

침제작용 시편(v)순으로 강도의 증가하는 것으로 보아 함침 수지의 재료특성이 전단강도 설계에 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

Figure 7은 각 수치별 전단거동특성에 대하여 향후 해석적 연구 시 적용될 비선형 모델을 제시한 그림이다. Equivalent Energy Method에 의하여 전단 Bi-Linear 모델을 제시하였으며 제시된 선형모델을 토대로 향후 복합재료의 전단보강재 또는 전단지배 영역의 보강설계에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 7는 Bi-Linear 모델에 근거한 각 함침수지별 GFRP의 선형 전단응력과 전단계수를 나타낸다. 전단 항복응력의 경우, 에폭시수지로 함침제작한 시편(e)을 기준으로 폴리에스테르를

함침제작한 시편(p)의 항복응력은 16.09%, 비닐에스테르를 함침 제작한 시편(v)의 항복응력은 21.95%가 높게 나타났다. 또한 전단 계수 (G)의 경우 에폭시수지로 함침제작한 시편(e)에 비하여 폴리에스테르를 함침제작한 시편(p)의 전단계수는 28.28%, 비닐에스테르를 함침제작한 시편(v)의 전단계수는 35.65% 높게 각각 나타났다.

### 3.3 섬유체적비에 따른 전단시험 결과 및 분석

섬유체적비 변화에 따른 전단시험의 결과 Figure 10과 같이 섬유체적비에 따라 전단비선형에 따른 항복강도 및 전단계수의

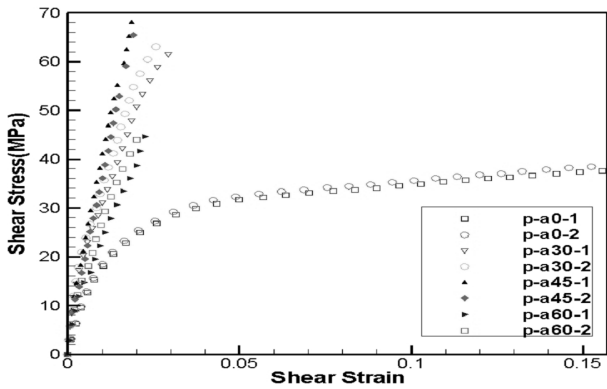


Fig. 12. Shear Non-Linear according to Fiber Arrangement Direction

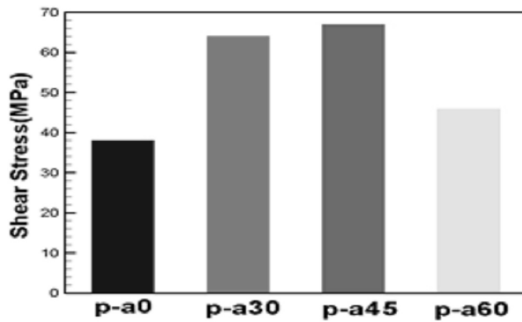


Fig. 13. The Maximum Shear Stress according to Fiber Arrangement Direction

특성이 조금씩 변화되는 것을 알 수 있었다. 섬유체적비를 감소시킨 경우에는 전단비선형 거동이 좀 더 구체적으로 나타나는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 섬유 대비 수치함침량이 많아짐에 따라 복합재료의 전단거동 특성이 조금씩 증가하는 것을 본 실험을 통하여 알 수 있었다.

Figure 11에서 보여지 듯 Fiber Volume Ratio에 따른 전단항복 응력의 경우 수치량이 증가함에 따라 항복응력과 전단계수는 점차적으로 감소하는 현상을 보였는데 이는 복합재료의 재료특성을 고려할 때 정상적으로 보여지는 현상이라 할 수 있다.

### 3.4 섬유배열방향에 따른 전단시험 결과 및 분석

섬유배열방향에 따라 각각 0°, 30°, 45°, 60°에 대하여 전단시험을 실시 한 결과 섬유배열방향 따른 전단비선형 특성은 Figure 12와 같이 각각의 배열방향에 따라 서로 다른 재료특성을 나타냈다.

섬유배열방향이 0°인 시편은 일반적인 전단비선형을 나타내었고 섬유배열방향이 30°, 45°, 60°일 경우 초기에 약간의 비선형을 나타낼 뿐 이후 선형으로 거동하였다. 이는 구조적으로 복합재료 내 하중전달 기능의 90%이상을 섬유가 담당하고 있어 전단시험 시 섬유배열방향이 0°인 시편은 섬유와 전단하중 진행방향이 평

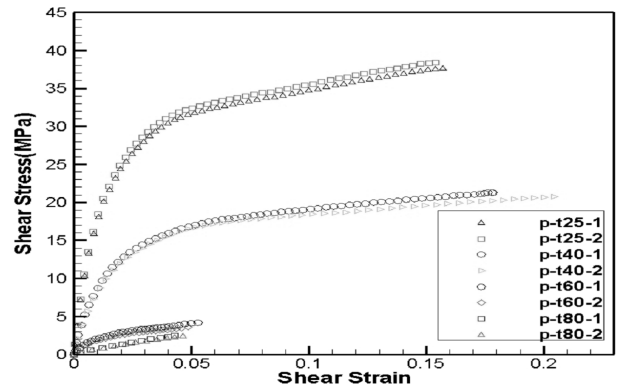


Fig. 14. Shear Non-Linear Graph according to Temperature

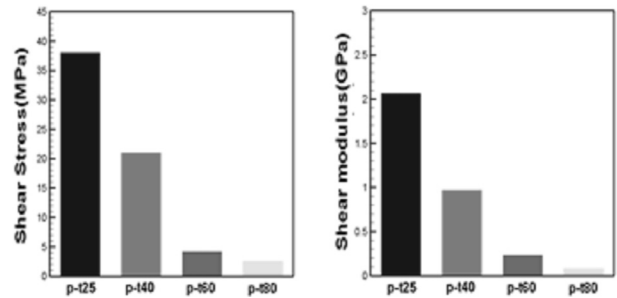


Fig. 15. Shear Yield Stress and Shear Modulus according to the Fiber Volume Ratio

행하여 섬유에 의한 전단저항이 거의 발생하지 않으나 섬유배열방향이 30°, 45°, 60°의 경우, 경사진 섬유에 의한 전단저항이 발생, 하중 증가에 따른 전단거동이 선형적으로 나타남 것으로 보여진다. 섬유배열방향에 따른 최대전단응력의 경우, 섬유배열방향이 45°와 60°인 경우 0°인 시편의 최대전단강도에 비하여 각각 75.01%와 20.64% 높게 나타냈다(Figure 13).

### 3.5 온도에 따른 전단시험 결과 및 분석

Figure 14는 온도별 상온(25°C), 40°C, 60°C, 80°C에서의 전단 시험 결과를 나타내며, 상온 온도인 25°C, 15°C 승강시킨 40°C에서의 전단시험 결과는 온도의 영향에 관계없이 일반적인 복합재료의 전단비선형을 나타내고 있다. 그러나 온도가 점차 증가함에 따라 60°C의 경우 비선형이 거의 없어졌으며 그 온도가 80°C의 경우 거의 선형거동을 하는 것으로 나타났다. 이는 전단비선형에 영향을 주는 주요 제작 구성요소인 함침수지의 온도 영향 때문으로 판단되며 온도가 증가함에 따라 수지재료의 이완현상이 발생, 섬유에 의한 영향력이 점진적으로 증가한 것으로 판단된다.

수를 비교한 것으로, 상온(25°C)일 경우를 기준으로 온도가 40°C일 경우는 최대전단응력은 약 44.78%가 감소하였으며, 60°C와 80°C일 경우 각각 89.07%, 93.46%의 비율로 최대전단응력이

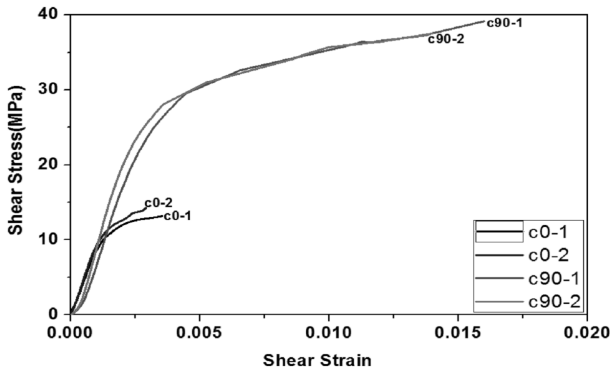


Fig. 16. CFRP Shear Non-Linear for the Production

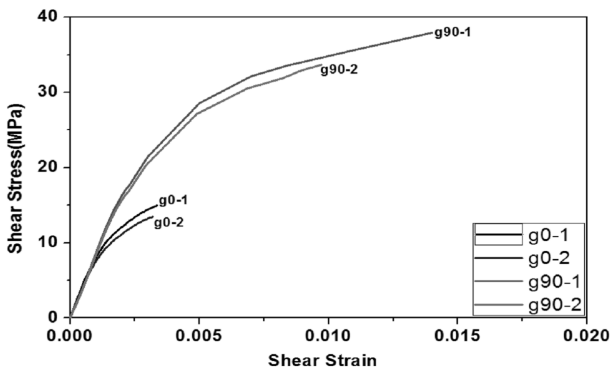


Fig. 17. GFRP Shear Non-Linear for the Production

감소함을 알 수 있다. 또한 전단계수의 경우도 상온(25℃)를 기준으로 40℃ 일 경우 53.22%의 비율로 전단계수가 감소하였으며, 60℃와 80℃ 일 경우 각각 88.72%, 96.23% 만큼 전단계수가 감소하였다.

### 3.6 공장용 제품의 전단시험 결과 및 분석

공장제작용 GFRP, CFRP제품에 대하여 전단발생과 섬유배열이 평행한 방향(0°)과 섬유배열 대비 전단발생이 수직인 방향(90°)에 대하여 전단시험을 각각 수행하였다. 그 결과 Figure 16과 17에서 보여지 듯 섬유방향 대비 복합재료의 전단거동은 결과에서 많은 차이가 발생하였다. 이전 실험결과들과 비교할 때 균일하게 성형된 상용제품의 경우도 전단거동에 있어 비선형 특성과 섬유배열에 따른 전단거동의 차이 등이 동일하게 발생한다는 것을 보여준다.

## 4. 결론

이 연구는 FRP 복합재료의 수지 종류와 온도 및 섬유 배열 방향등에 따라 발생하는 복합재료의 전단비선형 거동특성을 조사

하기 위하여 다양한 실험변수에 대한 전단시험을 실시하였으며 수행된 전단시험에서 도출된 결과들은 다음과 같다.

- (1) FRP 복합재료의 전단특성은 널리 알려진 복합재료의 인장, 압축 재료특성과는 달리 선형거동이 아닌 비선형 거동을 나타내는 것으로 본 실험을 통하여 조사되었으며 비선형 거동에 있어 복합재료의 구성재료 및 제작특성 등이 복합재료의 전단거동에 주요 변수로서 고려됨을 알 수 있었다. 특히 상대적으로 품질의 균일성이 우수한 공장용 복합재료의 경우, 상대적으로 품질의 표준도가 떨어지는 일반적 Hand Lay-up 공법과 마찬가지로 동일한 전단비선형 거동이 나타났다.
- (2) 복합재료 제작 시 중요하게 고려되는 함침수지 종류(비닐에스테르수지, 폴리에스테르수지, 에폭시수지) 및 섬유함유량의 경우, 수지의 종류에 따라 복합재료의 전단비선형 거동이 각각 다르게 나타났으며 비닐에스테르수지의 경우 전단 저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 섬유함유율에 따른 전단거동의 경우 섬유함유량의 비가 증가할수록 전단거동에 있어 전단항복응력 및 전단계수가 증가하며 비선형성이 명확하게 발생하였다.
- (3) 복합 재료의 섬유배열방향에 따른 전단거동의 경우 섬유배열 방향에 따라 각기 다른 전단거동이 나타났으며 항복전단강도의 경우 45°, 30°, 60°, 0°순으로 크기가 다르게 나타났다. 이는 일반적으로 일방향 섬유를 주로 사용한 복합재료에서 전단진행에 따른 섬유배열방향의 변화에 따른 거동특성이라 할 수 있다.
- (4) 온도변화에 따른 FRP복합재료의 전단시험의 경우 온도증가에 따라 FRP표면의 수지가 이완되는 현상이 발생하여 전단응력 및 전단계수가 현저하게 감소함을 알 수 있으며 또한 온도증가에 따라 복합재료의 전단거동이 점진적으로 섬유수지의 부착능력 상실에 의하여 전단거동이 선형적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임[No. 2011-0028531].

## References

- Yoo, Y. C. (2006). *Establishment of test items, methods and criteria for certification of FRP strengthening technology*, No. 2004-Based Building-A13, Korea Institute of Construction Technology (in Korean).
- Lee, I. (1989). *Fabrication and design technology for thick Advanced composite laminates*, No. 88-10-0047-00-00, Ministry of



- Education, Science and Technology (in Korean).
- Park, Y. H. (2003). *Development of repair and rehabilitation material qualities and methods evaluation standard of reinforced concrete bridges*, No. OTMCRK040124, Ministry of Construction Transportation (in Korean).
- Sim, J. S. (2006). *RC Structure reinforced with FRP*, CheongMoon-Gak (in Korean).
- Go, K. T., Kim, D. G., Jo, M. S., Song, Y. C. (2001). "A Study on the deterioration prediction method of concrete structure subjected to cyclic freezing and thawing." *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 5, No. 1, pp. 131-140 (in Korean).
- Yang, D. S., Park, S. G. (2004), "Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete." *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 8, No. 2 (in Korean).
- Olderhaw, B. (2008). *Combined effects of freeze-thaw and sustained loads on reinforced concrete beams strengthened with FRPs*, MSc Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario.
- Jung, W. Y. (2003). *Seismic retrofitting strategies of semi-rigid steel frames using polymer matrix composite materials*, Ph. D. Dissertation, State University of New York, Buffalo, USA.