

# VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 방법에 의해 목재 및 파티클보드를 유리섬유로 보강한 복합소재의 성질\*1

차재경\*2† · 이성우\*3

## Properties of Composites Reinforced with Fiberglass to Wood and Particleboard Using VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) Fabrication Process\*1

Jae Kyung Cha\*2† · Sung Woo Lee\*3

### 요 약

본 연구는 목재 및 파티클보드의 기계적 성질들을 향상시키기 위해 유리섬유를 VARTM 방법에 의해 보강한 복합소재에 대해 조사하였다. 시편들은 상업용 파티클보드 및 간벌소경재로 생산된 목재로 제작하였다. 시편들은 대조구(control)와 유리섬유로 보강된 목재/파티클보드 사이의 변이를 줄이기 위해 제재목과 파티클보드를 각각 길이 방향으로 둘로 잘라 한쪽은 대조구 시편으로 사용했고, 다른 한쪽은 한 층의 단축방향으로 짤 유리섬유 조방사로 시편의 양면을 보강하였다. 목재 및 파티클보드를 VARTM 방법에 의해 유리섬유로 보강한 복합소재는 기계적인 성질들이 크게 향상되었다.

### ABSTRACT

This research investigates the composites reinforced with fiberglass to wood and commercial particleboard using VARTM process to enhance the mechanical properties. Specimens were pre-

\* 1 접수 2007년 2월 26일, 채택 2007년 4월 24일

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원사업의 일환으로 수행되었음(R01-2004-000-10696-0).

\* 2 국민대학교 임산공학과 Dept. of Forest products, College of Forest science, Kookmin University, Seoul 136-702

\* 3 국민대학교 건설시스템공학부 School of civil and environmental engineering, Kookmin University, Seoul 136-702

† 주저자(corresponding author) : 차재경(e-mail: jcha@kookmin.ac.kr)

pared from lumbers from thinning crop-trees and commercial particleboard. Matched specimen were reinforced on both sides with one layer of unidirectional fiberglass roving. Fiberglass reinforcement to wood and particleboard using VARTM process improved mechanical properties.

**Keywords:** VARTM process, fiberglass, reinforcement, thinning crop-tree and particleboard

## 1. 서 론

국내에서 간벌에 의해 주로 생산되는 목재들은 낮은 강도와 강성 때문에 구조재료 이용에 많은 문제점들을 가지고 있다. 구조용으로 이들 목재들을 효과적으로 이용함에 있어 문제점들 중 하나는 생장과 관계가 있는 결함들의 존재이다. 특히 웅이 및 웅이와 관계가 있는 목리경사는 낮은 강도에서 파괴가 일어나게 하며, 결점이 없는 부분이 최대강도에 이르르게 한다. 즉, 웅이 및 웅이를 둘러싸고 있는 비틀린 목섬유에 의한 응력집중은 목재부재를 낮은 강도에서 파괴에 이르르게 한다. 하지만 섬유보강중합체(fiberglass reinforced polymer; FRP)의 발달은 유리섬유 등의 인공적인 보강에 의해 이들 목재의 성능향상 가능성을 검토하게 하는 동기를 제공하였다. 유리섬유로 보강한 복합소재는 성장에 따른 결함으로 품질이 나빠진 목재의 구조적인 이용을 증가시킬 것이다.

많은 노력들이 목재의 강도와 강성을 증가시키기 위해 이루어져 왔다. 과거에는 철 등 금속(Hoyle, 1975)으로 목재를 보강하기 위한 연구가 있었다. Hoyle의 연구는 기계적인 철판의 보강으로 집성재의 성능이 25~36% 증가되었고, 단순한 제작공정이 요구되었지만 목재와 철판 사이를 단단히 고정시키는 접착 등이 요구되었다. 또한 최근에는 목재에 비금속물질의 합성으로 제작된 복합소재에 대한 연구들이 많이 이루어지고 있다. 특히 많은 연구가 목재를 보강하기 위해 탄소섬유(Pirvu 등, 2004)와 유리섬유에 집중되고 있다. 목재보와 적층 목재보(Rowlands 등, 1986; Davis, 2005; Lopez-Auido 등, 2000; Spaun, 1981), 합판(Biblis와 Carino, 2000), 하드보드(Smulski, 1987), 중밀도섬유판과 플레이크보드

(Cai, 2006) 및 파티클보드(Saucier와 Holman, 1975)는 유리섬유를 이들의 표면에 보강시켜 휨성질 등이 크게 향상되었다. Soltis 등(1998)은 유리섬유를 목재에 보강하여 결합부의 성능을 크게 개선시켰다.

FRP로 보강된 목재는 품질이 나쁜 목재의 강성과 강도를 증가시켜 크고 무겁게 만든 부재들을 대체할 수 있게 하여 보에 요구되는 두께와 무게를 줄이고 측면좌굴을 막기 위한 다른 보강재의 필요성을 제거할 수 있다. 따라서 FRP로 보강한 복합소재는 적은 양의 목재사용과 목재가 가지고 있는 기계적인 성질의 변이를 최소화시킬 수 있어 목재의 효과적인 구조적 이용을 증가시킬 것이다. 특히 국내에서 많이 생산되는 간벌 소경재로부터 얻은 제재목의 FRP 보강은 이들 수종들을 구조용으로 개발할 기회를 제공할 수 있다. 하지만 목재에 FRP의 보강으로 얻어진 좋은 결과들에도 불구하고 상업적 생산을 위한 실질적이고 경제적인 공정은 개발되지 않고 있다. 따라서 본 연구는 FRP로 보강된 목재의 상업적 생산 가능성을 고려하기 위해 진공에 의해 접착제를 침투시키는 방법(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding; VARTM)을 사용했다. VARTM 공정에서 진공이 접착제 이동과 주입을 위한 추진력으로 사용되었다. 본 연구의 목적은 목재 및 파티클보드에 유리섬유로 보강한 복합소재에 의한 목재 및 파티클보드의 성능 향상 가능성을 평가하는데 있다. 이를 위해 접착시험은 목재와 FRP 사이에 적당한 접착력을 제공할 수 있도록 수종의 선택 및 VARTM 공정의 적합성을 평가하기 위해 실시되었다. 또한 휨강도, 경도 및 충격 시험이 유리섬유로 보강한 복합소재의 기계적 성능을 평가하기 위해 실시되었다.

VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 방법에 의해 목재 및 파티클보드를 유리섬유로 보강한 복합소재의 성질

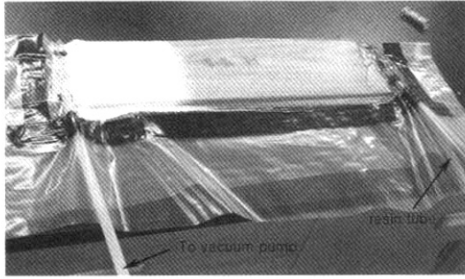


Fig. 1. VARTM fabrication setup for reinforcing wood.

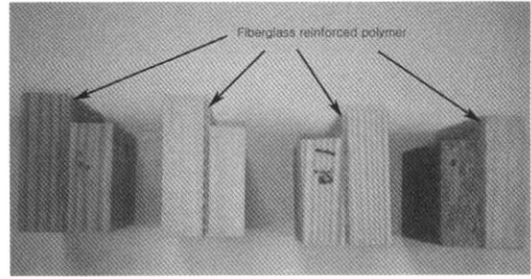


Fig. 2. Shear block specimen by compression loading.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 유리섬유로 보강한 복합소재의 제작

목재에 유리섬유로 보강한 복합소재의 제조에는 국내에서 생산되는 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 밤나무의 목재 및 국내에서 제조하여 판매되고 있는 파티클보드를 사용하였다. 이들 목재들은 간벌에 의해 국내에서 많이 생산되지만 낮은 품질과 용도 개발이 이루어지지 않아 저가로 팔리고 있다. 파티클보드 또한 구조용도로 더 널리 사용될 수 있도록 보강을 위한 노력이 요구되고 있다. 따라서 복합소재는 이들 목재 및 파티클보드의 양면에 유리섬유를 사용하여 샌드위치 모양으로 만들었다. 목재 및 파티클보드는 두께가 15 mm이고, 폭이 14 cm이며, 길이를 1 m로 재단하였다. 각각의 목재와 파티클보드는 다시 길이를 50 cm로 잘라 복합소재의 제조에 사용했다. 한편 다른 한쪽은 기계적인 성질을 측정하기 위해 목재시험의 표준조건인 함수율 12%가 되도록 항온항습기에서 조습하였다. 복합소재를 제조하기 위한 목재 및 파티클보드는 항온항습기에서 접착에 적합한 목재함수율 8%가 되도록 조습하였다. 유리섬유와 목재 사이의 접착력을 증가시키기 위해 목재표면은 자동대패기로 면삭하였다.

본 연구에 사용된 유리섬유와 접착제는 시중에서 판매되는 제품을 사용하였다. 유리섬유는 단축방향(unidirection)으로 짚 조방사(roving)로 목재의 길이방향과 같은 방향으로 배열하였다. 유리섬유를 단

축방향으로 짚 조방사는 매우 우수한 기계적 성질, 취급의 용이성, 짚 가격 및 다양하게 이용이 가능한 형태를 가지고 있어 본 실험에 사용되었다. 사용된 유리섬유의 단위중량은  $975 \text{ g/m}^2$ 로 두께가 약 1 mm였다. 유리섬유로 보강한 복합소재를 제작하기 위해 폴리에스테르 수지가 사용되었다. 수지의 도포량은 단위면적( $\text{cm}^2$ )당 0.04~0.09 g이 사용되었다. MEKPO (methyl ethyl keton peroxide)라는 경화제와 8% 코발트촉진제의 양은 대기 중에서 경화되는 시간을 고려하여 수지중량의 0.5~1.0%를 사용했다. 각각의 목재 표면에는 1층의 유리섬유 조방사와 접착제의 이동을 돕기 위해 1층의 섬유매트(chopped strand mat: CSM)가 사용되었다. 진공이 Fig. 1과 같이 접착제가 피착재와 유리섬유 조방사에 이동될 수 있도록 추진하기 위해 사용됐다. 진공펌프가 비닐과 봉합테이프를 사용하여 만든 봉지(bag)를 진공으로 만들기 위해 사용되었다.

### 2.2. 접착시험

모든 시편에 FRP와 목재/파티클보드 사이의 접착 강도를 측정하기 위해 압축하중이 가해졌다. 시편은 ASTM D905에 있는 시편의 형태와 장치를 사용하였다. 접착실험용 시편은 목재의 한 면에만 3층의 유리섬유 조방사와 1층의 CSM을 사용하여 제조하였다. 또한 시편은 유리섬유 소재의 두께가 약 3 mm로 얇아 Fig. 2와 같이 수정되었다. 대구조로 사용하기 위해 목재와 목재 사이 및 목재와 복합소재의 FRP 표면 사이에 기존의 도포방법으로 접착하여 만

Table 1. Average density of wood samples and fiberglass reinforced wood samples

Samples	Density (g/cm <sup>3</sup> )	
	Control	Reinforced
<i>Larix kaempferi</i> Carr	0.62 (0.04*)	0.78 (0.02*)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	0.45 (0.03)	0.62 (0.03)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	0.60 (0.04)	0.80 (0.07)
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.	0.96 (0.03)	1.11 (0.04)
particlebosrd	0.99 (0.04)	1.21 (0.04)

\* Standard deviation.

든 시편에 대하여도 접착시험을 실시하였다. 모든 제조가 완료된 시편들은 상대습도 65%와 온도 21°C를 유지한 항온항습기에서 조습하였다. 그 후에 만능재료시험기에 의해 분당 5 mm의 하중속도로 접착층이 파괴될 때까지 하중을 가했다.

### 2.3. 휨강도시험

각각의 목재/파티클보드 시편과 유리섬유로 보강한 복합소재 시편에는 휨 성질을 측정하기 위해 휨하중이 가해졌다. 휨하중은 3점 하중 실험방법에 의해 복합소재 (ASTM D1037), 목재 (ASTM D143) 및 파티클보드 (ASTM D1037)의 시편이 파괴될 때까지 만능재료시험기에 의해 분당 2.5 mm의 하중속도로 시편 중앙에 가해졌다. 복합소재의 휨탄성계수와 휨강도의 계산에는 전체 횡단면의 치수를 사용하였다.

### 2.4. 경도시험

복합소재와 복합소재 제조에 사용된 목재 및 파티클보드의 표면 경도(hardness)를 비교하기 위해 경도시험이 실시되었다. 경도시험은 표준시험 방법 (ASTM D1037)에 의해 실시되었다. 하중은 만능재료시험기에 의해 분당 6 mm의 하중속도로 직경이

11.3 mm인 볼이 시편의 표면으로부터 5.65 mm 이상 압입될 때까지 가했다. 경도는 볼의 직경이 표면으로부터 볼 직경의 절반 크기인 5.65 mm 압입했을 때 하중을 사용하였다. 시편의 두께는 시편의 특성상 복합소재 및 목재의 두께를 그대로 사용하였다.

### 2.5. 충격시험

충격시험이 목재와 복합소재의 시편에 실시되었다. 충격시험은 합판에 대한 표준 충격시험 방법 (ASTM D3499)에 의해 실시되었다. 하중은 국립산업과학기술원에 있는 충격시험기를 사용하여 복합소재의 유리섬유로 보강된 면 및 목재의 넓은 면에 수직으로 스펀 중앙에 가해 충격에너지를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에 사용된 목재/파티클보드 및 유리섬유로 보강된 복합소재에 대한 밀도의 평균과 표준편차를 보여주고 있다. 기계적 성질과 접착성을 측정하기 위한 모든 시험들은 각각 7개의 시편을 사용했다. Table 2는 여러 형태의 접착층에 대한 접착강도를 보여주고 있다. 평균 접착강도는 VARTM 방법에 의해 제조된 복합소재의 FRP와 목재 사이에서 가장 크게 나타났고, 다음은 FRP로 보강하지 않고 접착제를 기존의 도포방법을 사용했던 목재와 목재 사이에 접착강도로 같은 방법에 의해 접착제를 도포한 목재와 FRP 사이의 접착강도보다 크게 나타났다. 특히 밀도가 작은 리기다소나무와 파티클보드가 매우 큰 접착강도를 보여주고 있다. 이는 접착제가 진공에 의해 많은 공간에 침투하였기 때문으로 판단된다. 밀도가 작은 잣나무 목재에서 낮은 접착력을 보인 것은 제작할 때 사용된 목재의 높은 함수율 때문이었을 것으로 판단된다. 밀도가 가장 큰 밤나무의 목재로 만든 복합소재는 작은 시편 크기로 시편 제작에서 절단할 때 위험 등의 문제점 때문에 실험을 마칠 수 없었다. Fig. 3은 접착시험을 마친 시편의 FRP-목재 사이의 파괴 모습을 보여주고 있다. FRP와 목재 사이의 파괴는 VARTM 방법으로

Table 2. Average bond strength of wood to wood and wood to fiberglass reinforced polymer

Samples	Wood to wood bonding		Wood to FRP bonding (Control)		Vacuum-forming FRP to wood bonding	
	MC (%)	Bond strength (N/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	Bond strength (N/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	Bond strength (N/mm <sup>2</sup> )
<i>Larix kaempferi</i> Carr	8.7 (0.14*)	143 (115)	8.7 (0.33)	103 (0.49)	8.8 (0.28)	292 (115)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	10.0 (0.20)	137 (0.36)	9.3 (0.09)	0.93 (0.07)	9.5 (0.34)	289 (0.51)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	8.9 (0.58)	155 (0.71)	8.8 (0.41)	1.13 (0.73)	8.7 (0.28)	450 (1.20)
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.	8.3 (0.12)	1.03 (0.41)	8.1 (0.21)	1.17 (0.48)	-	-
particleboard	8.6 (0.25)	1.47 (0.47)	8.4 (0.39)	1.20 (0.55)	6.4 (0.46)	4.56 (1.17)

\* Standard Deviation.

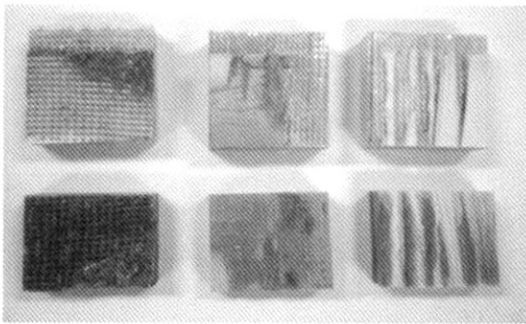


Fig. 3. Typical failure modes of fiberglass reinforced shear blocks.

제조한 복합소재는 목재의 결을 따라 파괴된 모습을 보였지만, 다른 종류의 시편인 기존방법으로 접착제를 도포한 목재와 목재 사이 및 목재와 FRP 사이에는 주로 접착층의 파괴를 보였다.

복합소재와 무결점 목재의 휨강도와 휨탄성계수는 Table 3에서 보여주고 있다. 무결점제에 대한 잣나무와 리기다소나무로 만든 복합소재의 휨탄성계수는 낙엽송 목재로 만든 복합소재의 휨탄성계수보다 더 큰 증가를 보여주고 있다. 이는 대조구인 무결점제의 휨탄성계수가 낙엽송 목재에서 잣나무와 리기다소나무 목재보다 더 큰 값을 보였기 때문으로 휨탄성계수의 증가율은 밀도가 가장 낮은 잣나무로

부터 밀도가 큰 낙엽송 순으로 나타났다. 휨강도 역시 증가율은 밀도의 크기 순으로 증가하여 잣나무로 만든 복합소재가 가장 큰 증가율을 보여주고 있다. 파티클보드의 휨탄성계수와 휨강도의 증가율은 어떤 목재로 만든 복합소재보다 매우 큰 증가율을 보여주고 있다. 특히 파티클보드로 제작한 복합소재의 휨강도는 어떤 목재로 만든 복합소재보다도 더 큰 강도를 보여주고 있다. Cai (2006)는 열압에 의해 유리섬유판으로 보강한 중밀도섬유판과 플레이크보드의 휨강도 및 휨탄성계수가 각각 12~16% 및 16~19% 증가한다고 보고하였지만, 본 연구는 휨탄성계수가 2.4배, 휨강도가 10.8배 증가함을 보여주고 있다. 이는 파티클보드로 만든 복합소재 표층의 접착제 침투로 인한 큰 밀도와 접착력 증가가 휨탄성계수 및 휨강도의 매우 큰 증가의 원인으로 판단된다. 목재로 만든 복합소재는 큰 휨탄성계수 및 휨강도의 증가를 보였지만 어떤 목재로 만든 복합소재도 파티클보드로 만든 복합소재의 휨강도보다 작은 증가 값을 나타냈다. 이는 목재에 유리섬유로 보강된 복합소재의 작은 표면경도가 원인으로 판단되며, Table 4와 같은 경도 시험의 결과가 이를 잘 뒷받침하고 있다. 특히 잣나무 목재로 만든 복합소재의 파괴 모습을 보면 압축면에서 주름이 중립축까지 확대되어 있음을 볼 수 있었다.

Table 3. Average values of flexural strength and stiffness of wood and fiberglass reinforced wood specimens

Samples	Modulus of elasticity ( $\times 10^3$ kgf/cm <sup>2</sup> )			Modulus of rupture (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	Control	Reinforced	Increase rate (%)	Control	Reinforced	Increase rate (%)
<i>Larix kaempferi</i> Carr	1123 (13.8*)	1540 (9.7)	37.1	1127.7 (105.8)	1415.6 (70.0)	25.5
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	74.1 (12.1)	136.5 (12.0)	84.2	633.3 (58.0)	1112.6 (82.8)	75.7
<i>Pinus rigida</i> Mill.	93.2 (30.9)	141.3 (21.6)	51.6	906.3 (28.5)	1452.5 (307.2)	60.3
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.	114.3 (8.5)	158.2 (21.2)	38.4	1360.6 (116.3)	1485.1 (253.5)	9.2
Particleboard	29.3 (3.7)	100.8 (4.8)	244.0	141.2 (37.2)	1676.2 (136.2)	1087.1

\* Standard deviation.

Table 4. Average hardness values of wood, particleboard and fiberglass-reinforced wood specimens

Samples	Hardness (kgf)		
	Control	Reinforced	Increase rate (%)
<i>Larix kaempferi</i> Carr	382.9 (61.4*)	716.4 (74.4)	87.1
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	194.8 (21.8)	415.9 (50.6)	113.5
<i>Pinus rigida</i> Mill.	372.9 (58.0)	690.6 (95.2)	85.2
Particleboard	327.2 (32.5)	2388.8 (309.6)	630.1

\* Standard deviation.

Table 5. Average bending toughness values of wood and fiberglass-reinforced wood specimens

Species	Bending toughness (kgf · m)		
	Control	Reinforced	Increase rate (%)
<i>Larix kaempferi</i> Carr	254 (0.95*)	352 (0.91)	38.6
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	0.94 (0.16)	5.12 (1.98)	444.7
<i>Pinus rigida</i> Mill.	1.25 (0.51)	4.51 (1.88)	266.7

\* Standard deviation.

유리섬유의 얇은 층은 표면의 특성을 크게 향상시켰다. 유리섬유의 보강 효과를 조사하기 위해 표면 경도시험이 실시됐다. 표면경도의 평균은 유리섬유로 보강한 제재목과 파티클보드 모두 크게 증가했다 (Table 4). 이들 결과들은 유리섬유의 보강이 표면 성질을 크게 향상시켰다는 사실을 증명한다. 유리섬유의 보강으로 표면 경도가 개선됨으로써 간벌 소경

목과 파티클보드의 구조용도 증진을 위한 가능성을 또한 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

유리섬유로 보강된 복합소재는 휨충격에너지를 또한 크게 증가시켰다. Table 5의 충격에너지는  $W_{adj} = \frac{A_{stan}}{A_{test}} W_{test}$ 에 의해 조정된 값이다. 충격에너지 ( $W_{adj}$ )는 실험에 사용된 시편의 횡단면적( $A_{test}$ )에

대한 에너지( $W_{test}$ )를 표준시편의 횡단면적( $A_{stan}$ )에 대한 에너지로 보정했다. 대조구인 무결점재의 휨충격에너지는 밀도의 크기에 따라 증가하였지만 유리섬유로 보강된 복합소재는 밀도가 작은 목재에 유리섬유로 보강했을 때 더 큰 충격에너지 값을 보여주고 있다. 특히 밀도가 가장 작은 잣나무목재로 만든 복합소재는 400%를 능가하는 높은 증가율을 나타냈다.

## 4. 결 론

본 연구는 목재 및 파티클보드의 기계적 성질을 향상시키기 위해 유리섬유로 보강한 복합소재의 기계적 성질들을 조사하였다. VARTM 방법에 의해 제작된 복합소재의 유리섬유와 목재 사이에 접착강도는 기존의 도포방법에 의해 접착한 목재와 목재 사이 및 목재와 유리섬유 사이의 접착강도보다 매우 크게 증가했다. 특히 파티클보드와 밀도가 작은 리기다소나무가 밀도가 큰 수종보다 더 큰 접착강도를 보였다. 또한 목재 및 파티클보드에 유리섬유로 보강한 복합소재는 휨강도와 휨 탄성계수의 큰 증가를 보여주었다. 이러한 기계적 성질의 증가는 국산 소경재와 파티클보드를 상업적이면서 구조적인 용도로의 사용 가능성을 증가시켰다. 또한 유리섬유의 보강은 경도 및 휨충격에너지를 크게 향상시켰다.

## 참 고 문 헌

1. American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method of testing small clear specimens of timber, ASTM D 143. ASTM, Philadelphia, PA.
2. American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method of evaluating the properties of wood-base fiber and particle panel materials, ASTM D 1037. ASTM, Philadelphia, PA.
3. American Society for Testing and Materials. 2003. Standard test method for strength properties adhesive bonds in shear by compression loading, ASTM D 905. ASTM, Philadelphia, PA.
4. American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method for toughness of plywood, ASTM D 3499. ASTM, Philadelphia, PA.
5. Biblis, E.J. and Carino, H.F. 2000. Flexural properties of southern pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic. Forest Prod. J. 50(4): 34~36.
6. Cai, Z. 2006. Selected properties of MDF and flakeboard overlaid with fiberglass mat. Forest Prod. J. 56(11/12): 142~146.
7. Davids, W. G, Richie, M. and Gamache, C. 2005. Fatigue of glulam beams with fiber-reinforced polymer tension reinforcing. Forest Prod. J. 55(1): 93~101.
8. Gardner, D. J., Davalos, J. F. and Munipalle, U. M. 1994. Adhesive bonding of pultruded fiber-reinforced plastic to wood. Forest Prod. J. 44(5): 62~66.
9. Hoyle, R. J. 1973. Steel-reinforced wood beam design. Forest Prod. J. 25(4): 17~23.
10. Lopez-andino, R, Gardner, DJ. and Hensley, JL. 2000. Adhesive bonding of eastern hemlock glulam panels with E-glass/vinyl ester reinforcement. Forest Prod. J. 50(11/12): 43~47.
11. Pirvu, A, Gardner, DJ. and Lopez-andino, R. 2004. Carbon fiber-vinyl ester composite reinforcement of wood using the VARTM/SCRIMP fabrication process. J. composites: part A 25: 1257~1265.
12. Rowlands, R.E., Deweghe, R.P.V., Laufenberg, T.L. and Krueger, G.P. 1986. Fiber-reinforced wood composites. Wood and fiber science 18(1): 39~57.
13. Saucier, J. R. and Holman, J.A. 1975. Structural particleboard reinforced with glass fiber- progress in its development. Forest Prod. J. 25(9): 69~72.
14. Smulski, S. J. and Ifju, G. 1987. Flexural behavior of glass fiber reinforced hardboard. Wood and fiber science 19(3): 313~327.
15. Soltis, L.A., R.J. Ross and D.F. Windorski. 1998. Fiberglass reinforced bolted wood connections Forest Prod. J. 48(9): 63~67.
16. Spaun, F.D. 1981. Reinforcement of wood with fiberglass. Forest Prod. J. 31(4): 26~33.