

유리섬유로 보강된 제재목의 기계적 성질에 대한 연구¹

차재경²

Study on the Mechanical Properties of Lumber Reinforced with Glass-Fiber¹

Cha, Jae Kyung²

ABSTRACT

This research examined the technical feasibility of composite that had two layers of fiberglass reinforcement to enhance the load carrying capacity of lumber. Specimens were prepared from standard lumber made of thinning crop trees such as *Larix kaempferi*, *Pinus koraiensis*, and *P. rigida*. Results indicated that bending properties, hardness, and wood screw withdrawal load of low density lumber from the *P. koraiensis* increased as the number of layers of fiberglass reinforcement increased. Composite produced by VARTM method showed the MOE increased in all specimens, while the MOR differed on the location, whether the 2-layers of FRP is put on tensile zone or compressive zone. The MOR of high density lumber from *Larix kaempferi* and *P. rigida* decreased when they placed into tensile zone, but low density lumber from *P. koraiensis* increased in same location. The bending toughness only increased high density lumber of *Larix kaempferi* as the number of layers of fiberglass reinforcement increased. The technique developed by this study may increase an opportunity to use small diameter log with low density for commercial purposes.

Key words: Bending properties, hardness, wood screw withdrawal load, fiberglass and domestic thinning crop tree.

1. 서 론

목재의 기계적 성질들은 비중, 함수율 및 결함 등과 함께 하중의 지속기간에도 영향을 받는다. 특히 하중지속기간은 목재의 기계적 성질에 중요한 역할을 하여 하중지속기간이 길면 목재로 만든 구조물을 안전하게 지지할 수 있는 하중의 크기가 작아진다. 또한 목재로 만든 구조물은 서로 연결된 부재들로 구성되기 때문에 결합부가 중요하지만 종종 파괴가 결합부에서 일어난다. 부재들의 결합에는 여러 종류의 휼쇠가 사용되고, 보통 휼쇠들은 연결 부재들 사이에 전단과 축

1. 논문접수: 2009. 03. 20.; 심사: 2009. 04. 30.; 투고확정: 2009. 7. 17. 본 연구는 국민대학교 교내연구비(2009) 지원에 의해 수행되었음.

2. 국민대학교 임산공학과 Dept. of Forest Products, College of Forest science, Kookmin University, Seoul 136-702. E-mail: jcha@kookmin.ac.kr.

하중을 지지하도록 설계된다. 특히 나사못 등은 부재로부터 뽑기 및 측면지지를 위한 하중이 가해지고, 하중의 크기는 비중에 크게 영향을 받는다.

목재 사용량과 임목 축적량의 증가에도 불구하고, 국내에서 간벌에 의해 주로 생산되는 목재들은 낮은 강도와 강성 때문에 주택 및 가구 등의 구조재로 이용하는데 많은 문제점들을 가지고 있다. 구조용으로 이들 목재들의 효과적인 이용에 있어 문제점들 중에 하나는 성장과 관계가 있는 결함들의 존재이다. 간벌 소경재는 낮은 비중과 큰 마이크로피털 각 때문에 작은 하중에서 파괴가 일어난다. 따라서 많은 노력들이 목재의 강도와 강성을 증가시키기 위해 이루어져 왔다. 처음에는 철 등 금속(Hoyle 1975)으로 목재를 보강하기 위한 연구가 있었다. Hoyle의 보강방법은 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. 섬유보강중합체(fiberglass reinforced polymer; FRP)의 발달은 유리섬유 등의 인공적인 보강에 의해 이들 목재의 성능향상 가능성을 검토하게 하는 동기를 제공하였다. 특히 유리섬유로 보강한 복합소재는 성장에 따른 결함으로 품질이 나빠진 목재의 구조적인 이용을 증가시킬 것이다. 많은 연구들(Rowlands 등 1986; Davis 2005; Lopez-Auido 등 2000; Spaun 1981; Biblis와 Carino 2000; Smulski 1987; Cai 2006; Saucier와 Holman 1975)이 유리섬유로 목재 표면을 보강시켜 휨성질 등을 크게 향상시켰다. Soltis 등(1998)은 유리섬유로 목재 표면을 보강하여 결합부의 성능을 크게 개선했다.

FRP로 보강된 목재는 품질이 나쁜 목재의 강성과 강도를 증가시키고 측면좌굴 등을 막기 위한 다른 보강재가 필요하지 않게 할 수 있다. 따라서 FRP로 보강한 복합소재는 국내에서 생산되는 간벌 소경재로부터 얻은 목재가 가지고 있는 기계적인 성질의 변이를 최소화시켜 이들 수종들을 구조용으로 개발할 기회를 제공할 수 있다. 그러나 목재에 FRP의 보강으로 얻어진 좋은 결과들에도 불구하고 국내에서는 그에 대한 연구(차와 이 2007; 차 2008)가 매우 미흡하다. 따라서 본 연구는 FRP로 보강된 목재를 진공에 의해 접착제를 침투시키는 방법(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding; VARTM)으로 차 등이 사용했던 복합소재에 유리섬유 layer를 추가하여 제작했다. 본 연구의 목적은 유리섬유 보강에 의한 목재의 성능을 향상시키는데 있다. 휨강도, 경도 및 충격실험이 유리섬유로 보강된 복합소재의 기계적 성능을 평가하기 위해 실시되었다. 나사못은 사용하는데 많은 인건비가 소요되지만 쉽게 제거할 수 있고 다시 사용했을 때 크게 지지력을 잃지 않으며, 취성물질을 결합하는데도 사용할 수 있다. 이러한 이유들로 나사못 뽑기 실험도 실시했다.

2. 재료 및 실험방법

2-1 복합소재의 제조

본 연구는 유리섬유로 보강한 복합소재의 제조에 잣나무목재, 낙엽송목재 및 리기다소나무목재를 사용하였다. 이들 목재들은 간벌에 의해 국내에서 많이 생산되지만 낮은 품질과 용도 개발이 이루어지지 않아 저가에 팔리고 있다. 본 연구는 유리섬유 layer 수의 효과를 연구하기 위해 차와 이(2008)의 실험 자료를 또한 이용했다. 이를 위해 복합소재는 그들과 같은 제작 방법으로

목재의 양면에 유리섬유를 사용하여 샌드위치와 같은 모양(Fig. 2)으로 만들었다.

차와 이(2008) 및 본 연구에 사용된 유리섬유와 접착제는 시중에서 판매되는 제품을 사용하였다. 연구범위는 국산재, 하나의 상온수지인 폴리에스테르 및 2매의 유리섬유로 제한했다. 유리섬유는 단축방향(unidirection)으로 짠 조방사(roving)로 목재의 길이방향과 같은 방향으로 배열하였다. 사용된 유리섬유의 단위중량은 975g/m^2 로 두께가 약 1mm였다. 복합소재를 제작하기 위해 폴리에스테르 수지가 사용되었다. 수지의 도포량은 단위면적(cm^2)당 $0.04\sim 0.09\text{g}$ 이 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 1매와 2매의 유리섬유 조방사와 접착제의 이동을 돕기 위해 1층의 섬유매트(chopped strand mat; CSM)가 사용되었다. 진공이 Fig. 1과 같이 접착제가 피착재와 유리섬유 조방사로 이동될 수 있도록 추진하기 위해 사용됐다. 진공펌프가 비닐과 봉합테이프를 사용하여 만든 봉지(bag)를 진공으로 만들기 위해 사용되었다.

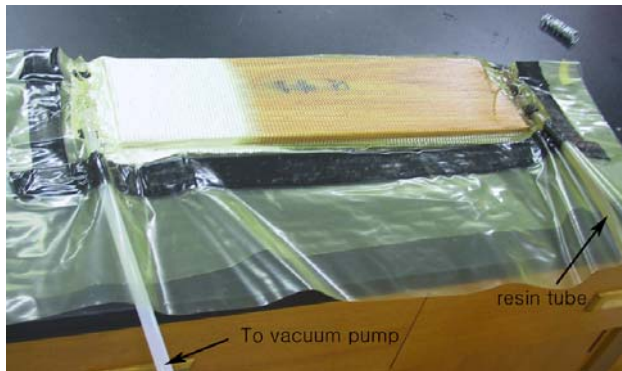


Fig. 1. VARTM fabrication setup for reinforcing wood(Cha & Lee 2008).

2-2 휨강도실험

각각의 목재와 유리섬유로 보강한 복합소재 시편에는 휨 성질을 측정하기 위해 휨하중이 가해졌던 차와 이(2008)의 자료도 사용했다. 휨하중은 비교를 위해 그들과 같은 3점 하중 실험방법에 의해 복합소재(ASTM D1037)의 시편이 파괴될 때까지 만능재료시험기에 의해 분당 2.5mm의 하중속도로 시편 중앙에 가해졌다. 유리섬유 layer 수의 영향을 측정하기 위해 표준 실험방법(ASTM D1037)에 따라 2매의 유리섬유 layer로 제작된 면은 하중이 작용하는 면과 인장면으로 하여 각각 실험을 실시했다. 복합소재의 휨탄성계수와 휨강도의 계산에는 전체 횡단면의 치수를 사용하였다. 휨탄성계수, 휨강도 등의 휨성질을 구하기 위해 모든 하중과 변형량은 개인용 컴퓨터에 자동으로 저장하였다.

2-3 경도실험

경도시험은 표준시험 방법(ASTM D1037)에 의해 실시되었다. 하중은 만능재료시험기에 의해 분당 6mm의 하중속도로 직경 11.3mm인 볼이 2매의 유리섬유 시편표면으로부터 2.5mm이상 압입될 때까지 가했다. 경도는 하중-압입량 곡선의 직선 부분에서 기울기를 사용하여 볼의 절반

크기인 5.65mm 압입됐을 때 하중을 계산하였다. 시편의 두께는 시편의 특성상 복합소재의 두께를 그대로 사용하였다.

2-4 나사못 유지력 실험

나사못 유지력 실험은 표준시험 방법(ASTM D1037)에 의해 일반적으로 사용되는 길이가 25 mm인 No. 10 나사못을 표면에 수직으로 박아 실시하였다. 나사못의 위치는 각 시편의 모서리에 두 개의 선을 그어 만나는 점을 중심으로 표면에 표시한 다음 천공을 하였다. 표면의 나사못 뽑기 실험을 위해 나사못을 박을 때 나사못 주위의 분할을 방지하기 위해 직경이 3.2 mm인 구멍을 미리 천공하였다. 나사못은 나사나기가 모두 감추어질 때까지 약 17 mm 정도 박아 실험했다. 실험은 나사못을 박는 즉시 실시하였다. 시편을 고정하는 결합 철물은 만능 재료기의 아래에 위치한 플레이트에 고정하였다. 고정된 결합 철물의 위쪽에 만들어진 가늘고 긴 홈을 통하여 시편 표면 위로 나온 나사못은 Hounsfield 사의 만능재료 실험기의 위쪽에 위치한 플레이트에 고정된 고정물에 의해 하중을 가했다. 하중은 만능재료 실험기의 두 플레이트가 서로 다른 방향으로 멀어지게 함으로 가해졌다. 하중속도는 위쪽에 위치한 플레이트의 이동 속도가 분당 1.5 mm로 실시했다.

2-5 충격실험

충격실험은 합판에 대한 표준 충격시험 방법(ASTM D3499)에 의해 실시되었다. 충격에너지 측정에는 여러 실험기계들이 유용하지만 간단한 실험에 의해 측정할 수 있다. 흔들리는 추에 의한 실험기는 추의 위치에너지 차에 의해 파괴에 요구되는 에너지를 측정하는데 국제적으로 표준화된 24cm 지지점 사이의 스패 중앙에 하중을 가한다. 하중은 국립산림과학원에 있는 충격시험기를 사용하여 보합소재의 유리섬유로 보강된 면에 수직으로 스패 중앙에 가해 충격에너지를 측정하였다. 하중은 휨강도 실험과 같은 방법으로 2매의 유리섬유로 제작된 면을 하중이 작용하는 면과 인장면에 각각 위치시켜 가했다.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에 사용된 목재 및 유리섬유로 보강된 복합소재에 대한 밀도의 평균과 표준편차를 보여주고 있다. 기계적 성질을 측정하기 위한 모든 시험들은 각각 7개의 시편을 사용했다.

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

Samples	Density(g/cm ³)		
	Wood samples	Reinforced	
		1-layer	2-layer
<i>Larix kaempferi</i> Carr	0.62(0.04*)	0.78(0.02*)	0.82(0.04*)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	0.45(0.03)	0.62(0.03)	0.67(0.03)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	0.60(0.04)	0.78(0.05)	0.80(0.05)

* Standard deviation

복합소재의 휨강도와 휨탄성계수는 Table 2에서 보여주고 있다. 비중이 작은 잣나무목재와 리기다소나무목재로 만든 복합소재의 휨탄성계수는 비중이 큰 낙엽송목재로 만든 복합소재의 휨탄성계수보다 더 큰 증가율을 보여주고 있다. 이는 대조구인 양 표면이 각 1매의 유리섬유로 된 복합소재에서 휨탄성계수가 낙엽송목재에서 잣나무목재와 리기다소나무목재보다 더 큰 값을 보였기 때문에 휨탄성계수의 증가율이 밀도가 작은 잣나무목재와 리기다소나무목재로 만든 복합소재가 크게 나타났다. 휨강도의 증가율도 잣나무목재로 만든 복합소재가 가장 큰 증가율을 보여주고 있다. 낙엽송목재와 리기다소나무목재는 잣나무목재보다 상대적으로 적은 증가율을 보여주고 있다. 잣나무목재로 만든 복합소재는 23.3%의 증가를 보였지만 낙엽송목재와 리기다소나무목재로 만든 복합소재는 각각 5%와 2.8%의 증가를 보였다. 이는 잣나무목재로 만든 복합소재 표층의 접착제 침투로 인한 큰 밀도와 접착력 증가도 휨탄성계수 및 휨강도의 증가의 원인으로 판단된다. 2매의 유리섬유를 하중이 가해지는 압축역에 위치시켰을 때 1매의 복합소재보다 큰 휨탄성계수 및 휨강도의 증가를 보였지만, 2매의 유리섬유를 인장역에 위치시켰을 때 리기다소나무목재와 낙엽송목재로 만든 복합소재는 1매로 된 복합소재의 휨강도보다 적은 값을 나타냈다. 이는 목재에 유리섬유로 보강된 복합소재의 작은 표면경도와 인장역에서의 접착층 파괴가 원인으로 판단되며, Table 3과 같은 경도 시험의 결과가 이를 잘 뒷받침하고 있다. 특히 잣나무 목재에 1매의 유리섬유로 보강된 복합소재의 표면에 하중을 가했을 때 파괴 모습은 압축면에서의 주름이 중립축까지 확대되어 있음을 볼 수 있었다.(Fig. 2)

Table 2. Average values of flexural strength and stiffness of fiberglass reinforced wood specimens

Samples	Modulus of elasticity (X10 ³ kgf/cm ²)			Modulus of rupture (kgf/cm ²)		
	1-layer	2-layer		1-layer	2-layer	
		overall	compression		Overall	compression
			tension			tension
<i>Larix kaempferi</i> Carr	154.0 (9.7*)	177.6 (18.3*)	185.5 (10.9*)	1415.6 (70.0*)	1487.2 (205.7*)	1619.1 (124.1*)
			167.1 (23.1)			1311.2 (150.2)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	136.5 (12.0)	162.0 (11.5)	167.3 (11.8)	1112.6 (82.8)	1371.9 (212.9)	1430.1 (200.0)
			155.0 (7.9)			1294.4 (245.5)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	141.3 (21.6)	176.2 (11.9)	178.2 (10.5)	1452.5 (307.2)	1493.9 (211.8)	1616.2 (202.3)
			174.1 (16.3)			1330.9 (58.6)

* Standard deviation

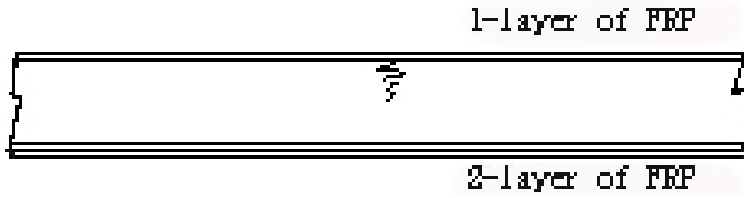


Fig. 2. FRP-wood composite having wrinkle and one layer of FRP at the compression zone, and 2-layer of FRP at the tensile zone.

유리섬유의 보강 효과를 조사하기 위해 표면경도시험이 또한 실시됐다. 유리섬유로 보강된 재료의 표면경도는 하중-압입곡선의 직선부분의 기울기를 구한 다음, 기울기를 사용하여 5.65mm 압입되었을 때 하중을 계산하였다. 표면경도의 평균은 2매의 유리섬유로 보강된 복합소재에서 모두 증가했다(Table 3). 특히 비중이 작은 잣나무 목재가 2매의 유리섬유로 보강됐을 때 더욱 크게 경도를 증가시켰다. 이는 유리섬유의 보강이 표면성질을 향상시켰다는 사실을 증명한다. 유리섬유의 보강으로 표면경도가 개선됨으로써 비중이 작은 간벌 소경목인 잣나무 목재의 구조용도 증진을 위한 가능성을 또한 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Average hardness values of wood, particleboard and fiberglass-reinforced wood specimens

Samples	Hardness(kgf)		
	1-layer	2-layer	Increase rate(%)
<i>Larix kaempferi</i> Carr	716.4 (74.4)	745.1 (100.2)	4.0
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	415.9 (50.6)	680.4 (61.4)	63.6
<i>Pinus rigida</i> Mill.	690.6 (95.2)	707.8 (92.3)	2.5

* Standard deviation

Table 4는 충격실험으로부터 구한 충격에너지의 평균 및 표준편차를 보여주고 있다. 충격실험에 의해 측정된 에너지는 일정한 스펠길이에서 시편의 두께와 폭의 변이로 횡단면 치수 사이에 선형관계를 이용하여 $W_{adj} = \frac{A_{stan}}{A_{test}} W_{test}$ 에 의해 조정된 에너지(W_{adj})를 계산했다. W_{test} 는 충격실험으로부터 구한 최대 충격에너지를 사용했고 A_{test} 는 시편의 횡단면 면적이며, A_{stan} 은 충격에너지와 비교를 위해 표준 충격시편의 횡단면 면적 $4cm^2$ (KS F 2211 2004)를 사용하여 조정된 에너지(W_{adj})를 구하였다. Table 4는 양면에 1매의 유리섬유로 보강된 복합소재와 2매로 보강

된 유리섬유의 위치에 따라 복합소재의 충격에너지를 보여주고 있다. 1매의 유리섬유로 보강했을 때 충격에너지는 비중이 가장 작은 잣나무가 가장 큰 값을 보였고, 비중이 증가하므로 감소하였다. 1매를 더 보강하였을 경우 잣나무목재와 리기다소나무목재는 크게 감소하였지만 낙엽송목재는 증가하였다. 휨강도실험에서 목재의 비중이 증가하면 강도는 증가하지만 파괴가 일어날 때까지 하중-변형량 곡선 아래의 면적은 감소한다. 또한 차의 연구(2007)에서 함수율이 증가하므로 강도는 감소하였지만 낙엽송 목재는 하중-변형량 곡선 아래의 면적이 증가하였고, 잣나무목재와 리기다소나무목재는 크게 감소하였다. 그러나 충격에너지는 함수율이 증가하므로 비중이 작은 목재가 비중이 큰 목재보다 더 크게 감소했다. Table 4는 하중이 2매의 유리섬유로 된 면에 가졌을 때보다 1매의 유리섬유로 된 면에 가해졌을 때 더 큰 충격에너지를 보여주고 있다.

Table 4. Average bending toughness values of wood and fiberglass-reinforced wood specimens

Species	Bending toughness(kgf·m)		
	1-layer	2-layer	
		overall	compression
<i>Larix kaempferi</i> Carr	3.52 (0.91)	3.85 (0.98)	3.72(1.04)
			4.02(1.08)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	5.12 (1.98)	4.24 (1.25)	3.84(0.28)
			4.64(1.83)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	4.51 (1.88)	3.77 (0.51)	3.46(0.54)
			4.08(0.26)

* Standard deviation

Table 5는 나사못이 박힌 단위 길이당 최대 나사못 뽑기 하중을 나타내고 있다. 나사못 뽑기 하중의 평균은 잣나무목재로 만든 복합소재가 92.3 kgf/cm로 가장 작았다. 비중이 가장 큰 낙엽송 목재로 만든 복합소재의 나사못 뽑기 하중의 평균이 156.8 kgf/cm로 잣나무 목재로 만든 것보다 약 70%가 더 컸다. 이는 복합소재의 제조에 사용된 목재의 비중이 나사못 뽑기 하중에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 국산 소경목재에서 낙엽송목재가 가장 커 138.0 kgf/cm로 잣나무 목재만의 나사못 뽑기 하중 82.0kgf/cm 보다 68.3% 큰 값을 보여주고 있다. 2매의 유리섬유로 된 복합소재의 표층에서의 나사못 뽑기 하중은 잣나무목재에 1매의 유리섬유 복합소재보다 25% 증가를 보였지만 리기다소나무목재와 낙엽송목재로 제조한 복합소재는 큰 차이가 없었다. 리기다소나무는 150.3 kgf/cm에서 154.2kgf/cm로 약간 증가하였지만, 밀도가 더 큰 낙엽송목재로 만든 복합소재는 156.8 kgf/cm에서 155.7kgf/cm로 약간 감소했다.

Table 5. Average wood screw withdrawal loads of wood and fiberglass-reinforced wood specimens

Samples	Wood screw withdrawal load(kgf/cm)		
	wood samples	Reinforced	
		1-layer	2-layer
<i>Larix kaempferi</i> Carr	138.0 (17.2)	156.8 (9.8)	155.7 (10.0)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	82.0 (10.9)	92.3 (11.6)	112.1 (14.8)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	125.8 (10.2)	150.3 (19.3)	154.2 (16.2)

4. 결 론

본 연구는 목재의 기계적 성질을 향상시키기 위해 2매의 유리섬유로 보강한 복합소재의 기계적 성질들을 조사하였다. 목재에 유리섬유로 보강한 복합소재는 휨강도와 휨탄성계수의 증가를 보여주었다. VARTM 방법에 의해 제작된 복합소재는 휨탄성계수가 모든 수종에서 증가했지만 휨강도는 2매의 유리섬유로 보강된 면을 인장역에 위치시켰을 경우는 낙엽송목재와 리기다소나무목재는 감소하였고, 비중이 작은 잣나무목재만 증가했다. 또한 비중이 작은 잣나무목재가 2매의 유리섬유로서 보강한 경우에 경도와 나사못 유지력이 크게 향상되었다. 그러나 비중이 큰 낙엽송목재는 충격에너지를 증가시켰지만, 리기다소나무목재와 잣나무목재는 2매의 유리섬유로 보강했을 때 모두 충격에너지가 감소했다. 이러한 기계적 성질의 증가는 비중이 작은 국산 소경재를 상업적이면서 구조적인 용도로의 사용 가능성을 증가시켰다.

5. 참고문헌

- American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method of testing small clear specimens of timber, ASTM D 143. ASTM, Philadelphia, PA.
- 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.
- American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method for toughness of plywood, ASTM D 3499. ASTM, Philadelphia, PA.

- 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.
- Cai, Z. 2006. Selected properties of MDF and flakeboard overlaid with fiberglass mat. *Forest Prod. J.* 56(11/12): 142~146.
- 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.
- 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.
- Hoyle, R. J. 1975. Steel-reinforced wood beam design. *Forest Prod. J.* 25(4): 17-23.
- Lopez-andino, R., Gardner, D.J. and Hensley, J.L. 2000. Adhesive bonding of eastern hemlock glulam panels with E-glass/vinyl ester reinforcement. *Forest Prod. J.* 50(11/12): 43-47.
- Pirvu, A., Gardner, D.J. 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.
- 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.
- 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.
- Smulski, S. J. and Ifju, G. 1987. Flexural behavior of glass fiber reinforced hardboard. *Wood and fiber science* 19(3): 313-327.
- Soltis, L.A., R.J. Ross and D.F. Windorski. 1998. Fiberglass reinforced bolted wood connections *Forest Prod. J.* 48(9): 63-67.
- Spaun, F.D. 1981. Reinforcement of wood with fiberglass. *Forest Prod. J.* 31(4): 26-33.
- 차 재경, 이 성우. 2007. VARTM(Vacuum assisted resin transfer molding)방법에 의해 보강된 목재 및 파티클보드를 유리섬유로 보강한 복합소재의 성질. *목재공학* 35(3): 29-35.
- 차 재경. 2008. 국산 소경재의 휨 성질을 이용한 충격에너지와 최대하중까지 일/에너지 예측연구. *한국가구학회지* 19(5): 350-357.