

〈 논문 〉

직조된 대나무 자연섬유 복합재료의 제조인자에 따른 굽힘강도

송 준 희* · 임 재 규*

(2006년 1월 10일 접수, 2006년 5월 8일 심사완료)

Bending Strength of Natural Woven Bamboo Fiber-reinforced Polymer Composites with Manufacturing Factors

Jun Hee Song and Jae Kyoo Lim

Key Words: Natural Fiber(자연섬유), Reinforced Polymer Composites(폴리머 강화 복합재료)
RTM(수지이동성형), Bending Strength(굽힘강도), Bamboo Fiber(대나무 섬유)

Abstract

In recent years there has been a growing interest for the use of natural fibers in composite applications due to their low cost, environmental friendliness, and good mechanical properties. The purpose of this study is to determine the characteristic of bending strength on bamboo fiber reinforced polymer composites. The parameters of RTM process depend on the weight ratio of bamboo fiber and resin, the number of bamboo ply and amount of hardening agent. Mechanical properties was investigated for each process factor of polymer composites. Test result shows that bending strength was a maximum(approximately 85MPa) value when composite thickness was 6mm and weight ratio of resin was 13%.

1. 서 론

급속도로 발전하는 산업화로 인해 산업 폐기물은 매년 급증하고 있으며, 특히 자동차 산업의 경우 국내 자동차 생산업체에서는 해마다 새로운 모델의 차량을 생산하고 있어, 이로 인한 재활용 문제가 대두 되고 있다. 이러한 환경적인 문제는 전 세계적인 관심거리이며, 각 나라마다 규제를 강화하고 있는 추세이다. 그러나 아직 국내의 환경적인 문제보다는 매출, 효율, 이윤, 품질 등과

같은 생산 자체에 더 비중을 두고 있는 실정이다. 하지만 향후 몇 년 후 국내에서도 환경규제가 강화될 것이며, 기업의 전 세계적 경쟁력을 감안한다면 자연 친화적인 제품의 개발이 필요한 시기이다.⁽¹⁻⁵⁾ 이러한 욕구에 발맞추어 방안으로 대두 되는 것이 바로 자연섬유를 이용한 강화 플라스틱(Natural Fiber Reinforced Polymer: NFRP)이다. 자연섬유 강화 복합재료는 우수한 기계적 특성 뿐 아니라 재활용과 생산비 절감, 대기오염 감소, 에너지 절감 등의 부수적인 이점을 갖고 있는 재료로서 연구 및 개발이 시급한 분야이다.⁽⁶⁻⁹⁾

대표적인 자연섬유들은 아마, 황마, 대마, 사이잘삼, 비단, 대나무, 셀룰로오스 등으로 인공섬유보다 기계적 강도면에서는 열등하지만 저렴하고 쉽게 구할 수 있는 장점과 친환경이라는 측면에서 환영받고 있다. 자동차 산업에서 NFRP의 적

* 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부
및 공학연구원 공업기술연구소

E-mail : jklim@chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2321 FAX : (063)270-2460

* 회원, 전북대학교 공학연구원 자동차산학협력원

용은 경량화, 재활용, 환경보호 측면에서 새로운 돌파구가 될 수 있다.⁽¹⁰⁾ 일례로, 트럭 바닥재로 사용하고 있는 목재는 모두 수입에 의존하고 있기 때문에 이를 대체할 수 있는 재료가 시급하다. 대면적의 재료를 필요로 하는 구조물에서 보강될 섬유는 크기가 커야 제작이 용이할 것이다.

따라서 본 연구는 값이 저렴하고 일반적으로 널리 사용되는 열경화성 수지인 불포화 폴리에스테르 수지와 기계적인 강도에서 우수한 성질을 나타내는 에폭시 수지를 모재로 선택하고 폴리머 복합재료의 제작은 수지이동성형(Resin Transfer Molding ;이하 RTM) 공정을 이용하였다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 자연섬유의 주 대상재료는 많은 면적을 쉽게 보강할 수 있는 직조형태의 대나무이며,^(14,15) 부가적으로 대나무와의 상대적인 비교를 위해 주위에서 쉽게 구할 수 있는 왕겨, 쌀겨, 광목을 충전재로 사용하였다. 또한 기존의 트럭 바닥재인 목재를 대체할 목적에서 기계적 강도치가 타당성이 있는지를 검토하는 것이 또 하나의 목적이다. 각각의 공정 변수에 따른 복합재료의 기계적 특성은 굽힘시험을 통한 굽힘강도로 특성을 조사하였다.

2. 실험재료 및 제작

2.1 시험편 제작

RTM법은 1930년대에 매크로 프로세스(macro process)로 알려진 일종의 몰딩(molding)법으로, 혼합된 수지와 촉매제가 섬유 다발이나 프리폼을 담고 있는 밀폐된 몰드에 사출되는 저압 성형 공

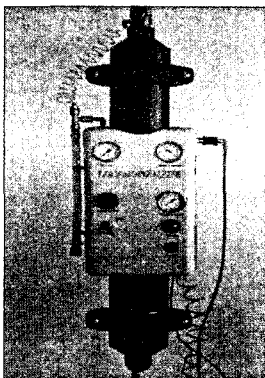


Fig. 1 The manufacturing apparatus of RTM

정이다. 본 실험에서 사용한 RTM장치는 Plastech 사(英)의 용량 6ℓ인 HYPAJECT이다. 유입된 공기압은 0.6~0.8 MPa, 진공도는 -0.08~-0.09 MPa, 주입압력은 0.1~0.2 MPa로 실시하였다. RTM 장치의 사진과 공정의 순서 흐름도가 Fig.1과 2에 나타나있다.

2.2 몰드(mold) 제작

RTM용 제작에 사용한 실제 몰드의 사진이 Fig. 3에 제시되었다. RTM용 몰드와 제작품과의 이형처리는 몰드 표면과 제작품이 접착되는 것을 방지하고 탈형을 용이하게 하기 위하여 테프론 필름과 DEXTER사(미국)의 FREKOTE 4368을 이용하였다.

2.3 사용재료

제작에 사용된 수지는 2종류로서 열경화성 수지인데 하나는 불포화 폴리에스테르 수지이고 다른 하나는 에폭시 수지이다. 폴리에스테르 수지는 CRAYVALLEY사의 EPOVIA VUP-3518T이고, 에폭시 수지는 국도화학의 YD-115이다. 여기서

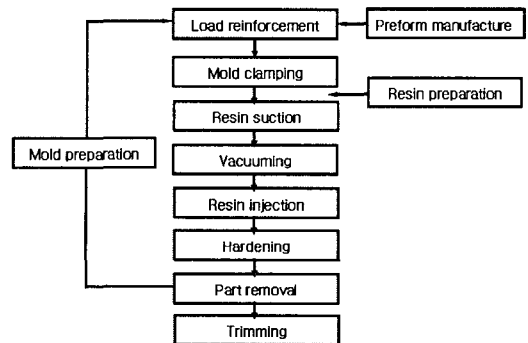


Fig. 2 Flow chart of RTM process

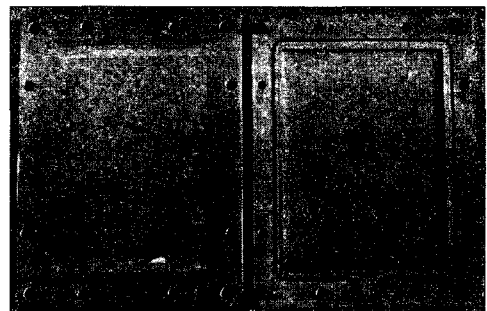


Fig. 3 The manufacturing mold for RTM

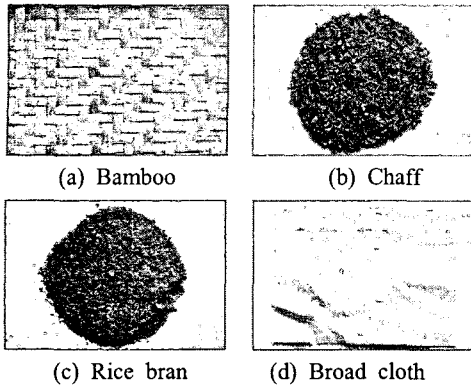


Fig. 4 The shape of natural fiber

폴리에스테르 수지가 기본 재료계이고, 에폭시 수지는 기계적인 물성치의 비교를 위해 선택하였다. 수지와 함께 보강제로 사용될 섬유는 자연섬유인 대나무이다. 자연적인 대나무를 얇은 판 두께(0.5~1.0mm)의 긴 직사각형 형태로 가공한 후 이를 직조하여 2mm 정도의 직사각형 직조판(295×210mm)을 만들었다. 부가적인 자연섬유 대상으로는 왕겨와 쌀겨, 팥묵을 사용하였다. 수지에 대한 섬유들의 중량 분율에 따른 영향을 고려하고자 1장, 2장, 3장씩 적층하였다. 사용된 자연 섬유들은 Fig. 4에 제시하였다.

2.4 시험편 제작종류 및 명칭

시험편은 각각 수지의 종류, 대나무 적층수와 섬유 종류, 진공시간, 경화제의 양, 제작 두께 등의 인자에 따라 제작하였다. 수지는 폴리에스테르와 에폭시이고, 대나무 적층수는 1, 2, 3장이다. 자연섬유 대상은 대나무, 왕겨, 쌀겨, 팥묵이고 제작두께는 3, 6, 8, 10mm이었다.

2.5 실험 장치 및 방법

각 성형 조건별로 제작된 판재는 기계적 물성치의 변화를 보기 위하여 소정의 크기로 절단 가공되었다. 이 시험편들은 인장시험기(INSTRON 4206)에서 일정 변위속도(3mm/min)로 시험을 행하였다. 이때 하중-변위 데이터는 데이터 획득 장비(Data Acquisition System: DAS)를 사용하여 실시간으로 그래프화하고 저장되었다.

굽힘실험은 ASTM D 790-90⁽¹⁶⁾ 규정을 참조하여 3점 굽힘하중을 가하여 실시하였다. 시험편은

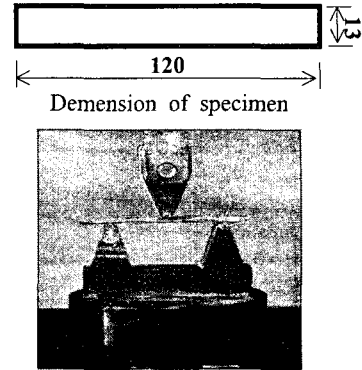


Fig. 5 Photograph of bending test

길이(120mm)×폭(13mm)의 크기로 가공하였다. 지지간거리는 80mm이며 시험속도는 3mm/min로 일정하게 부하시켰다. 시험편과 실험의 세팅 사진이 Fig. 5에 보인다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 경화제 첨가량의 영향

폴리에스테르 수지에 대나무 직조 섬유를 1장 적층시키고 전체 두께를 6mm, 기포 제거를 위한 진공시간은 6분 경과한 후 진공압을 -0.1 MPa로 유지시켜 제조한 시험편을 표준으로 하였다. 경화제 첨가량을 달리한 3종류의 하중-변위 선도는 Fig. 6에 나타낸다. 이들 하중변위 선도에서 얻어진 정보로 굽힘강도를 계산하였다. Fig. 7은 이러한 표준 시험편에 경화제의 양에 따른 굽힘강도를 변화를 알아보려고 경화제의 양을 수지의 함량에 대해 각각 0.4, 0.7, 1.2wt% 첨가하였다. 4개 이상의 동일한 조건에서 실험한 결과치를 최소자승법(RMS)에 의한 평균치로 제시하였다. 그림에서처럼 경화제의 양이 증가함에 따라 굽힘강도는 72MPa에서 94MPa까지 선형적인 증가를 보였다. 이는 경화제의 양이 많아짐에 따라 응집효과가 높아져 강도가 증가된 것으로 판단된다. 파괴의 형태에서 보면, 경화제의 양이 적은 것은 파괴면이 복잡하고 요철이 많은 반면 경화제가 과다한 것은 직선형으로 뚫겨져나간 것처럼 파괴되었다. 즉, 경화제의 양이 더 많을수록 수지의 취성적인 경향이 가속화되고 섬유와의 접착력이 강화되어 복합재의 경화도가 높아져 강도를 증가시킨 것으로 파악된다. 또한, 경화제의 양이 많아지면

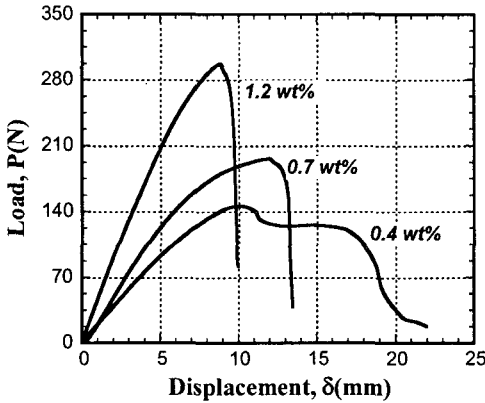


Fig. 6 Load(P) and displacement(δ) behaviors for several change of hardener

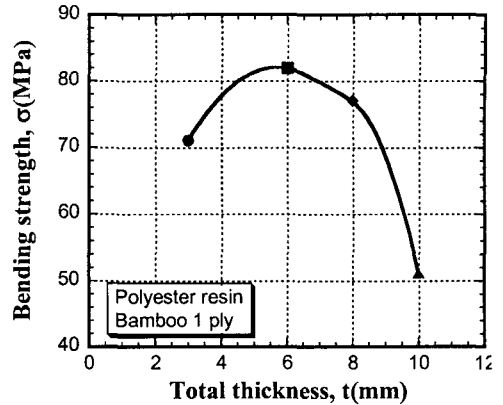


Fig. 8 Effect of the bending strength for the manufacturing thickness

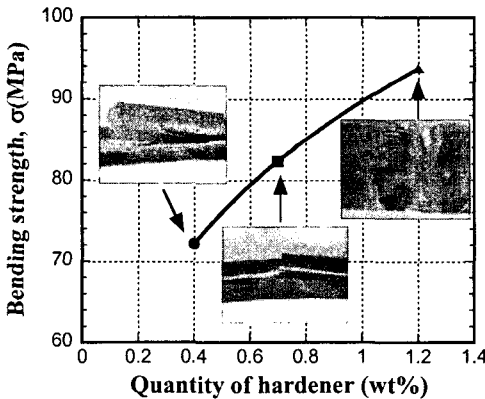


Fig. 7 Effect of the bending strength for various quantity of hardener

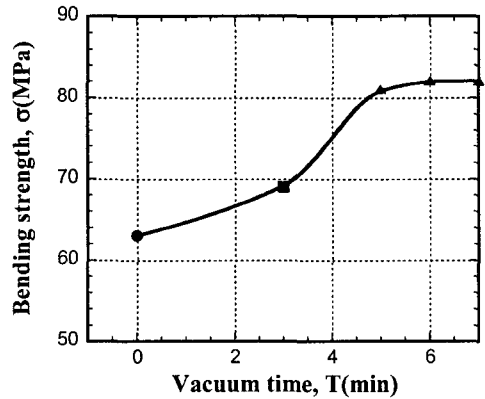


Fig. 9 Effect of the bending strength according to the manufacturing factor of vacuum time

굽힘강도는 높지만 제조시 공정시간이 짧고 너무 적으면 강도도 낮고 작업시간이 길어지며 재료 제조시 균열이 발생하는 단점이 있으므로 적절한 수준이 요구된다. 따라서 경화제량은 재료가 안정적으로 제조되는 0.7wt%를 기준으로 삼아 다른 재료와의 기계적 성질을 비교하였다.

3.2 제작 두께의 영향

대나무 직조 섬유는 1장으로 동일하지만 전체 두께에 따른 굽힘강도의 영향을 조사하고자 3, 6, 8, 10mm로 각각 제조하였다. 이들 두께에 따른 강도의 분포가 Fig. 8에 제시되었다. 두께가 두꺼워짐에 따라 굽힘강도는 82에서 51MPa까지 대체로 낮아지는 경향을 나타냈으나 너무 얇은 3mm 조건

에서는 수지에 대해 보강재가 역할을 하지 못해 오히려 강도가 71MPa로 낮게 얻어졌다. 두께가 두꺼워지면 대나무 보강재가 굽힘응력에 저항하는 비율보다 상대적으로 낮은 강도를 갖는 모재의 강도 부담 비중이 높아졌기 때문이다. 이는 복합재료에서 섬유와 수지의 함량비에 따라 강도치가 의존한다는 기존의 사실을 입증하고 있으며 본 제작에서는 직조 섬유 적층수에 대해 2~3배의 전체 두께가 되는 조건이 가장 우수하였다.

3.3 진공시간의 영향

진공펌프를 이용하여 진공화를 시작하면 수지와 섬유의 내부에서 미세한 기포가 발생하다가 소정의 시간이 경과되면 기포 발생의 빈도가 줄어들었다.

진공화의 정도에 따라 내부의 기포량이 달라지므로 진공시간을 0, 3, 5, 6, 7분으로 변화시켜 두께 6mm의 시험편을 제작한 후 강도를 평가하였다. 이들의 굽힘강도 분포가 Fig. 9이다. 진공시간이 0인 시험편은 육안으로도 다수의 기공이 관찰되었고, 3분인 조건은 기공이 현격히 줄어들었으며 5분 정도(-0.1 MPa 이하)에서는 기공이 관찰되지 않았다. 따라서 진공을 실시하지 않았던 0분의 굽힘강도가 63MPa로 가장 낮았고, 진공시간이 길어짐에 따라 70~82MPa로 증가량이 커지며 5분 이상에서는 변화가 거의 없었다. 기공의 존재로 인해 균열의 발생 및 전파가 용이하여 강도의 저하를 가져오므로 본 실험에서는 6분의 진공시간이 적합하였다.

3.4 수지의 종류에 따른 영향

동일한 제작조건에서 수지만 변화시켰을 때 굽힘강도의 영향을 조사한 결과가 Fig. 10에 제시되었다. 일반적으로 폴리에스테르 수지보다 에폭시 수지가 강도는 우수하지만 가격이 비싸다. 여기서는 수지 종류에 따른 복합재의 굽힘강도를 비교하기 위한 것이다. 1장 적층재에서는 폴리에스테르 수지(82MPa)보다 에폭시 수지에서 25MPa의 30% 증가를 보였고, 2장 적층재는 41MPa의 57% 증가를 나타냈다. 따라서 폴리에스테르 수지보다는 에폭시 수지가 기계적 강도가 우수하며 제작조건에 따라 증가폭은 달라질 수 있음을 알았다.

3.5 자연섬유 종류에 따른 변화

실험에 사용된 대나무 보강재와 비교를 위해 가공되지 않고 후처리 하지 않은 상태의 왕겨, 쌀겨,

광목을 보강하여 제조된 재료의 굽힘강도 변화를 조사하였다. 동일한 두께에서 왕겨(Chaff)의 함량은 3.2, 12.5wt%이고, 쌀겨(Rice bran)는 4.1, 12.2wt%, 광목(Broad cloth)은 1, 2장 적층시켜 2.2, 5.5wt%이었다. 이들 함량에 따른 굽힘강도를 Fig. 11에 나타냈다. 쌀겨는 25MPa로 수지 자체의 31MPa보다 낮은 강도를 나타내어 강화효과가 없었고, 왕겨의 강도는 이보다 약간 증가하여 보강효과는 그리 크지 않았지만 수지의 양을 줄일 수 있어 비용이 절감될 수 있다. 그러나 자연섬유로 광목을 보강한 재료에서는 44, 71MPa의 굽힘강도를 나타내어 대나무 복합재와 근사한 기계적 강도를 보였다. 따라서 광목 같은 자연섬유는 대나무와 더불어 보강재료의 역할이 커서 구조재료의 적용이 기대되며, 왕겨와 쌀겨는 자연 친화적인 비구조재료의 이용가치가 높다고 판단된다.

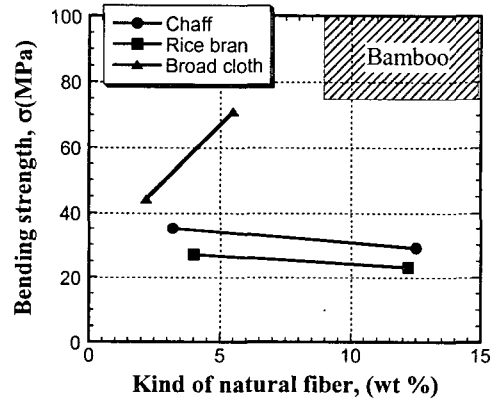


Fig. 11 Effect of the bending strength for the kind of natural fiber

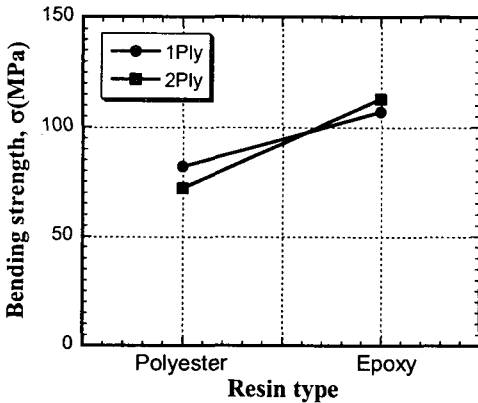


Fig. 10 Effect of the bending strength for resin type

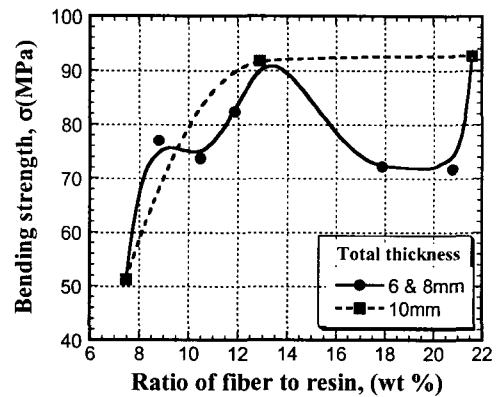


Fig. 12 Relationship between the bending strength and the weight fraction of fiber and resin

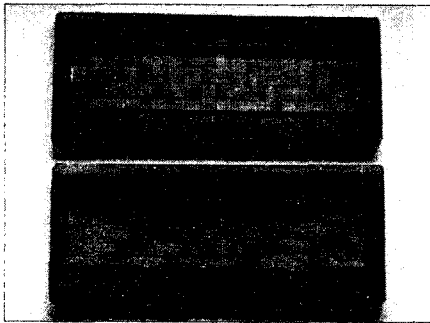


Fig. 13 Bamboo composite for application of field material

3.6 수지에 대한 섬유 함량에 따른 영향

지금까지의 여러 조건에 대한 재료들을 수지에 대한 섬유의 중량 백분율로 나타내고 이들의 굽힘강도 분포를 나타낸 것이 Fig. 12이다. 폴리에스테르 수지와 대나무 직조판의 중량비를 계산하여 7.5%[1장/10mm], 8.8%[2장/8mm], 10.5%[직조하지 않은 형태], 11.9%[1장/6mm], 12.9%[2장/10mm], 17.9%[2장/8mm], 20.8%[1장/3mm], 21.6%[3장/10mm]의 함유량이 대나무 적층수와 두께의 함수로 결정된다. 섬유율이 너무 낮으면 굽힘강도가 현격히 낮았고 섬유함량이 증가함에 따라 굽힘강도는 증가하는 경향을 보이며 실험조건 중 약 13%에서 가장 높은 강도치의 결과를 얻었다. 18%이상에서는 오히려 강도가 낮아지고 있었다. 그러나 21.6%에서는 강도가 크게 증가하였다. 그럼에서 점선으로 나타낸 것은 전체 두께가 10mm인 재료의 강도치이다. 적층수가 1장인 섬유함량 7.5%에서는 강도가 낮지만 2장, 3장으로 증가하면 강도의 분포는 거의 일정해지는 경향을 갖고 있다. 따라서, 10mm 두께는 섬유함량이 13%를 넘더라도 강도에 영향을 주지 않아 두께의 의존성이 섬유량보다 더 크다고 판단된다. 따라서 굽힘강도에 대한 최적의 섬유 함유량은 약 13%임을 알 수 있다. 또한 현재 바닥재로 사용되고 있는 목재의 굽힘강도가 약 100MPa인 점을 감안할 때, 자연섬유강화 폴리머 복합재료가 90MPa이상의 강도를 나타내어 대체 가능성이 높다고 판단된다. 실기부재로의 응용을 모의한 제작형상이 Fig. 13에 제시되어 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연섬유 강화제로 자연계에 널리 분포하는 대나무 조직을 이용한 직조판을 주요 대상으로 삼았고, 이 밖에 왕겨, 쌀겨, 팥묵 등의 재료들도 부가적으로 평가하였다. RTM 공정을 사용한 자연섬유 강화 폴리머 개발이 가능하였다. 제작시 기포발생으로 인한 재료의 건전성을 확보하기 위해 진공화 단계를 실시함으로써 가능하였다. 진공을 거친 제작품(-0.1 MPa)은 진공을 하지 않은 제작품과의 비교에서 굽힘강도는 19MPa의 차이를 보여 진공의 여부가 강도에 중요하게 영향을 미친다는 사실을 알아냈다. 진공화가 완전하지 않은 3분의 진공조건에서는 진공을 하지 않은 것과 큰 차이가 없었고 이는 기공이 내부에 잔존하기 때문이었다. 기공으로 인한 균열의 개시 및 전파가 발생하지 않도록 하기 위해서 -0.1 MPa 이하의 진공도를 유지해야 한다. 제작 두께의 영향을 알아보기 위해 3, 6, 8, 10mm로 변화시켜 굽힘특성을 조사한 결과 재료 두께가 증가함에 따라 포물선 형태의 강도변화를 나타내어 섬유와 수지의 함량비가 강도에 크게 의존하였다. 섬유 직조판이 1장의 경우 6mm 두께에서 가장 높은 82MPa의 굽힘강도를 보였다. 따라서 섬유 두께의 2~3배가 강도에 가장 유효하다고 판단되었다. 수지에 대한 대나무 자연섬유 중량비 함유량의 비교에서 섬유율이 너무 낮으면 굽힘강도가 현격히 낮았고 섬유함량이 증가함에 따라 굽힘강도는 증가하는 경향을 보이며 실험조건 중 약 13%에서 가장 높은 강도치(91MPa)의 결과를 얻었다. 10mm 두께에서는 섬유함량이 13%를 넘더라도 강도에 영향을 주지 않아 두께의 의존성이 섬유량보다 더 크다고 판단되었다. 굽힘강도 특성에서 볼 때 목재와 자연섬유강화 폴리머재료의 수준이 비슷하므로 바닥재의 대체가능한 후보재로 생각할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Paul Wambua, Jan Ivens, Ignaas Verposet, 2003, "Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics," *Composites Science and Technology*, Vol. 63 pp. 1259~1264.
- (2) Bisanda ETN and Ansell MP., 1991, "The Effect of Silane Treatment on the Mechanical and Physical Properties of Sisal-Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 41, pp. 165~178.
- (3) Herrera-Franco, P.J. and Valadez-Gonzalez, A., 2005, "A Study of the Mechanical Properties of Short Natural-Fiber Reinforced Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, pp. 597~608.
- (4) Ming Qiu Zhang, Min Zhi Rong and Xun Lu, 2005, "Fully Biodegradable Natural Fiber Composites from Renewable Resources: All-Plant Fiber Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 2514~2525.
- (5) Jennifer Smith and Shobha Bhatia, 2005, "Natural Fibers Raise Social Issues," *Materials Today*, Vol. 8, p. 72.
- (6) Bisanda ETN, Ansell MP., 1991, "The Effect of Silane Treatment on the Mechanical and Physical Properties of Sisal-Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 41, pp. 165~178.
- (7) Xiaofei Ma, Jiugao Yu and John F. Kennedy, 2005, "Studies on the Properties of Natural Fibers-Reinforced Thermoplastic Starch Composites," *Carbohydrate Polymers*, Vol. 62, pp. 19~24.
- (8) Torres, F.G. and Cubillas, M.L., 2005, "Study of the Interfacial Properties of Natural Fibre Reinforced Polyethylene," *Polymer Testing*, Vol. 24, pp. 694~698.
- (9) O'Donnell, A., Dweib, M. A. and Wool, R. P., 2004, "Natural Fiber Composites with Plant Oil-Based Resin," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 1135~1145.
- (10) Herrera-Franco, P. J. and Valadez-Gonzalez, A., 2004, "Mechanical Properties of Continuous Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, pp. 339~345.
- (11) Ryu, Y.M., Yoon, E.P., Yoon, Y.S. and Lee, S.H., 1998, "Stiffness Comparison with Design of GFRP Roof Panels Prepared by RTM Method," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 32~38.
- (12) Hwang, B.S., Um, M.K. and Lee, S.K., 1997, "A Study on the Process Parameters for High-Quality Laminates Using Resin Transfer Molding," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 10, No. 3, pp. 22~33.
- (13) Yoon, Y.K., Chung, S.H., Lee, W.I., Lee, B.H. and Byun, J.H., 2004, "A Study on the Measurement System Design for the Resin Flow and Curing in the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process Using the Long Period Fiber Bragg Grating," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 28, No. 5, pp. 489~494.
- (14) Shigeyasu, Sun Untao, 2001, "Fracture Properties of Bamboo," *Composites Science and Technology*, Vol. 32, pp. 451~459.
- (15) Moe Moe Thwe, Kin Liao, 2003, "Durability of Bamboo-Glass Fiber Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 375~387.
- (16) "ASTM Standard D 790 : Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," 2002, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01.