연 구 논 문

접착제 접합된 자연섬유강화 복합재료의 파괴강도 특성에 미치는 섬유 방향의 영향

윤 호 철*

*전북대학원 기계설계학과

Effect of Fiber Orientation on Failure Strength Properties of Natural Fiber Reinforced Composites including Adhesive Bonded Joints

Ho-Chel Yoon*

*Dept. of Mechanical Design, Chonbuk Nat'l Univ., Duckjin 1-664-14, Jeonju, Korea

Abstract

This paper is concerned with a fracture strength study of composite adhesive lap joints. The tests were carried out on specimen joints manufactured hybrid stacked composites such as the polyester and bamboo natural fiber layer. The main objective of the work was to test the fracture strength using hybrid stacked composites with a polyester and bamboo natural fiber layer. Tensile and peel strength of hybrid stacked composites are tested before appling adhesive bonding. From results, Natural fiber reinforced composites have lower tensile strength than the original polyester. and The load directional orientation and small amount and low thickness of bamboo natural fiber layer have a good effect on the tensile and peel strength of natural fiber reinforced composites. The failure strength of these materials applied adhesive bonding is also affected by fiber orientation and thickness of bamboo natural fiber layer. There for, Fiber orientation of bamboo natural fiber layer have a great effect on the tensile-shear strength of natural fiber reinforced composites including adhesive bonded joints.

*Corresponding author : yoonhc@chonbuk.ac.kr (Received May 18, 2006)

Key Words : Natural fiber reinforced composites, Adhesive bonded joints, Fiber orientation, Hybrid stacked joints

1. 서 론

자연섬유강화 복합재료는 저가이고 친환경적이며 유리섬유 복합재료(GFRP)의 대체 가능성 때문에 최근 많은 관심을 얻고 있다. 유리섬유강화 복합재료는 이미 자동차 산업에서 많은 부분을 차지하고 있지만, 가볍고 고강성인 장점에도 불구하고 분해가 어려워 폐기가 쉽지 않기 때문에 많은 공해문제를 일으키고 있다. 따라서 자연섬유의 활용은 이들 문제를 해결할 수 있는 대안이 될 수 있다. 자연섬유는 여러 가지를 생각할 수 있으나, 사이잘(sisal), 대마 등은 우리나라 실정을 고려할 때 가격이 비싸서 사용에 제약이 있으므로, 쉽게 구할 수 있는 대나무를 쓰는 방안을 생각할 수 있다. 일반적으로 알려진 자연섬유강화 복합재료의 특성으로 모재에 천연물이 들어가면 재료의 단가는 낮아지지만 인장강도 또한 낮아지게 된다. 그러나 섬유형 보강재를 이용함으로서 급격한 강도하락을 방지할 수 있으며 보강재가 없는 재료와 비교해 보면 굽힘이나 충격에는 강한 능력을 갖게 된다[1]. 현재 세계적으로 자연섬유를 보강재로 사용하여 제품을 생산하려는 연구는 많이 이루어지고 있다. 자연섬유강화 복합재료를 활용하는데 있어서 중요한 한 가지는 복합재를 조립하는 것이며, 접착제 접합은 그 중 한 방법이 될 수 있다. 접착제 접합

의 장점은 쉽고 편리하게 이종재료를 체결하는데 유리하며 건축, 의료, 기계 등 산업 전반에 걸쳐 두루 사용되는 방식이다. 본 연구에서는 대나무 섬유를 직조한 후 보강재로 사용한 자연섬유강화 복합재료를 제작하였다. 가격이 저렴하고 일반적으로 널리 사용되는 열경화성 수지인 불포화 폴리에스테르를 모재로 선택하였고 보강재로는 대나무 직조판을 적층형 구조로 하여 복합재료를 제조하였다. 이 복합재료를 이용하여 섬유 방향성에 따른 재료의 박리강도와 파괴강도를 평가하였다. 이러한 결과를 바탕으로 자연섬유강화 복합재료에 접착제 접합을 적용하였을 때 섬유의 방향성이 접착강도에 어떤 영향을 주는가를 평가하였다. 그러기 위해서는 접착부 가장자리에 의한 응력집중으로 파괴가 전파하는 방향을 접착부 계면으로 향하기보다는 복합재료 쪽으로 유도하여야 복합재료에서 보강재 섬유의 방향성에 의한 파괴를 좀더 확실히 알 수 있다. 따라서 강한 접착력을 가지게 하여 접착부 계면에서 파괴가 일어나지 않게 하였다[2].

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

제작에 사용된 수지는 열경화성(thermoset) 불포화 폴리에스테르(unsaturated polyester)이다. 여기에 수지와 함께 보강재로 사용될 자연섬유로 대나무를 선택하였다. 자연적인 대나무를 두께 1mm의 긴 직사각형 형태로 만든 것과, 이를 직조하여 2mm두께의 직사각형 직조판(bamboo natural fiber layer)으로 만든 것을 준비하였다. 이러한 재료를 RTM(resin transfer molding)을 이용하여 수지 내에 대나무 직조판의 섬유의 방향이 원하는 위치에 올 수 있도록 조절하면서 판(plate)형태의 복합 적층재를 제조하였다. RTM에 유입된 공기압은 6~8bar, 진공도는 -0.8~-0.9bar, 주입압력은 1~2bar로 하였다. 폴리에스테르는 초기 경화현상이나 기포발생을 최소화 하도록 주제와 경화제의 최적 혼합비를 사용하였다. 폴리에스테르 내부의 기포를 제거하기 위하여 진공로에서 0.1bar, 50℃상태로 3~4시간 유지하여 경화시켰다. 제조된 판형태의 자연섬유강화 복합재료는 보강재의 섬유 방향성을 고려하여 소정의 크기로 절단한 후 시험편 제작에 이용하였다. 본 연구에서는 섬유 방향성에 따라 이방성 재료로 간주되는 재료를 각 방향에 따라 인장시험, 전단시험, 박리시험, 접착강도시험으로 평가하려고 했다. 따라서 시험에 사용하는 시험편을 크게 4종류로 나누어 제작하였다. 본 실험에 사용된 시험편을 Fig. 1에 정리하였다.

(a) 자연섬유강화 복합재료가 갖는 인장강도를 구하기 위하여 ASTM D 638에 따라 150×35×5mm 크기의 인장 시험편을 제작하였다. 시험편은 두께 1mm의 하중에 평행한 방향과 수직방향을 가진 보강재(각각 전체재료에서 대나무가 부피비 20%를 차지함), 두께 2mm의 직조한 보강재(부피비 40%)를 가지고 있다. (Fig. 1(a))

(b) 나중에 유한요소해석에 사용할 이방성 재료들의 물성치를 직접 실험에 의하여 구하기 위하여 대나무 보강재를 기본으로 섬유 방향에 따른 가로방향과 세로방향의 인장시험편 및 전단시험편을 제작하였다. (Fig. 1(b))

(c) 모재와 대나무 보강재의 계면강도를 알기 위하여 ASTM D 5528에 의거하여 복합재료에 Loading Block을 장착한 DCB(double cantilever beam) 시험편을 제작하였다. (Fig. 1(c))

(d) 단일겹침 접착제 접합(single lap adhesive bonding)을 위하여 ASTM D 1002를 기준으로 시험편을 제작하였다. 사용한 접착제는 구조용 에폭시(epoxy) 접착제 (3M사 DP-460)로 2액상 혼합형이며 상온 건

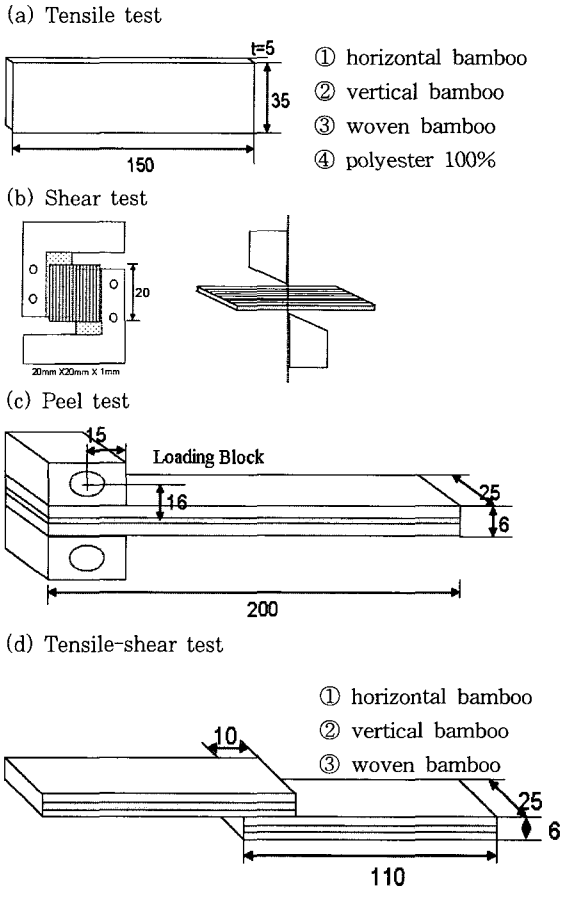

Fig. 1 Geometry of Specimens (dimensions in mm)

조 경화가 가능하다. 접착부위는 #1000의 사포(sand paper)로 연마하고, 아세톤으로 세척하였다. 접착두께를 조절하기 위하여 0.1mm 구리선을 사용하였으며 접착제가 충분한 접착강도를 갖도록 상온 건조한 다음 실험에 제공하였다. 모든 시편에서 접착부위의 표면조도, 접착두께 등 접착조건은 동일하게 수행하였다. 접착부의 겹침길이는 6mm, 10mm, 14mm로 하였으며, 접착제 필릿(spew fillet)은 모두 시편에서 제거하였다. (Fig. 1(d))

2.2 실험 및 해석모델

인장시험기(Instron 4206)를 이용하여 시험편이 파괴되는 강도를 로드셀(loadcell)로 측정하여 데이터를 저장하였다. 하중속도(crosshead speed)는 기본적으로 3mm/min로 일정하게 유지하여 자연섬유강화 복합재료의 인장시험과 접착제를 적용한 시험편의 인장전단시험(tensile-shear test)을 하였다. DCB 시험편은 하중속도(strain rate)를 0.25mm/min으로 보강재와 모재 계면간의 박리(peel)하중을 평가하였다.

적층형 복합재료에서 모재에 보강재의 섬유 방향에 따른 시편에서 접착부 주변의 응력분포를 알아보기 위하여 유한요소 해석모델을 이용하였다[3]. 단지 대나무 보강재의 두께와 섬유 방향만 다르게 하였고 다른 모든 조건은 동일하게 한 3차원 해석모델을 만들었다. 물성치는 대나무 보강재의 인장시험과 전단시험, 자연섬유강화 복합재료의 인장시험을 통하여 얻은 데이터와 그래프를 이용하였다. 접착부에 인장전단하중이 가해지도록 경계조건을 적용시켰으며[4] 하중을 0에서 980N까지 점차 증가시키는 방법으로 비선형 해석을 하였다. Fig. 2에 해석모델과 경계조건을 나타내었고, Table 1에 해석에 사용한 물성치[5]를 나타내었다.

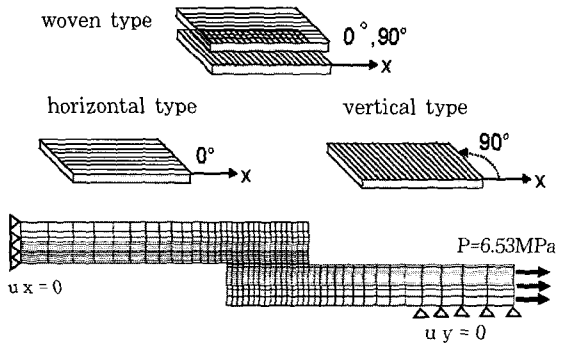

Fig. 2 Mesh model and boundary condition for finite element method

Table 1 Mechanical Properties

Unsaturated polyester	Tensile strength	75 [MPa]
	Young's modulus	5.2 [GPa]
	Poisson's ratio	0.26
Epoxy Adhesive	Tensile strength	10 [MPa]
	Young's modulus	30 [MPa]
	Poisson's ratio	0.30
Bamboo Fiber (heat pressed)	Tensile strength	4 [MPa]
	Longitudinal modulus	3 [GPa]
	Major Poisson's ratio	0.26
	Longitudinal shear modulus	10 [Mpa]
	Transverse modulus	0.1 [GPa]
	Transverse Poisson's ratio	0.26
	Transverse shear modulus	5 [Mpa]

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험

5mm두께의 폴리에스테르, 폴리에스테르+대나무 섬유를 인장시험을 하였다. Fig. 3을 보면 대나무는 섬유방향이 하중방향과 일치할 때 큰 하중을 얻을 수 있다. woven의 경우에는 섬유를 직조하기 위하여 섬유들을 여러 갈래로 나누기 때문에 한 덩어리에 가까운 horizontal보다 약간 낮은 강도를 얻었다. 본 실험에 사용된 대나무 보강재는 모재인 폴리에스테르보다 강도가 약하므로 인장강도가 8.49, 15.46%하락하였으며, 이것은 재료에 포함된 대나무의 부피비 20, 40%와 관계있는 것으로 나타났다.

3.2 박리시험

복합재료에 Loading Block을 장착한 DCB 시험편으로 보강재와 모재 계면간의 박리시험을 하였다. 실험

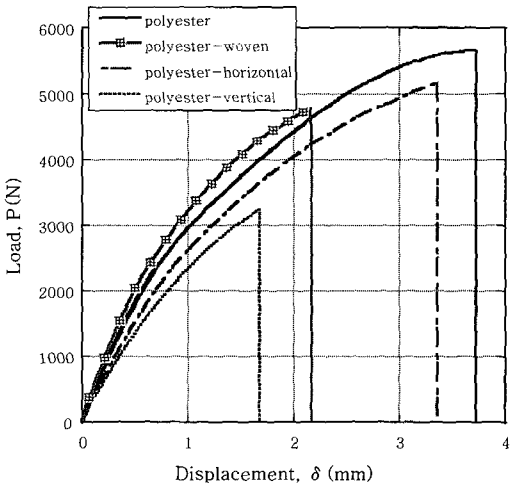

Fig. 3 The result of tensile test of bamboo composite materials

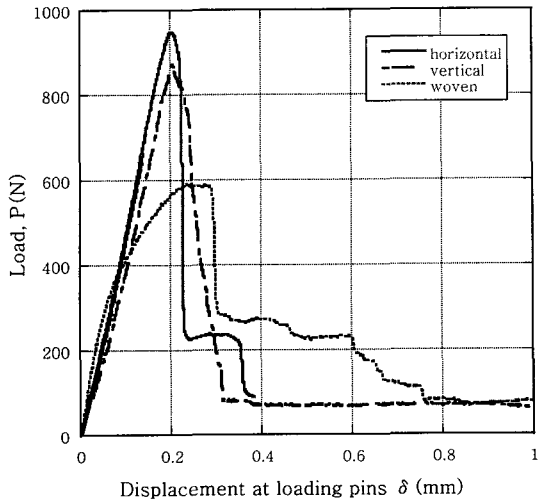

Fig. 4 The result of starting point in peel test at 0.25mm/min strain rate

개시 직후 박리에 의한 하중의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 얇은 두께의 보강재를 가진 재료(horizontal, vertical)쪽에서 박리하중이 더 크게 나타났다. woven인 경우에는 보강재 표면이 거칠게 배열되어 생기는 계면의 불균일성 때문에 최대 하중 직후에 하중의 변동이 심함을 알 수 있다. ASTM D 5528에 의거하여 박리에 의한 하중의 기준으로 DCB 시험편의 파괴역학적 기준이 되는 모드 I의 에너지해방율(energy release rate)(G_I)을 이용하였고[6] 진행된 크랙길이를 기준으로 5mm 단위로 계산하였다.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba}$$

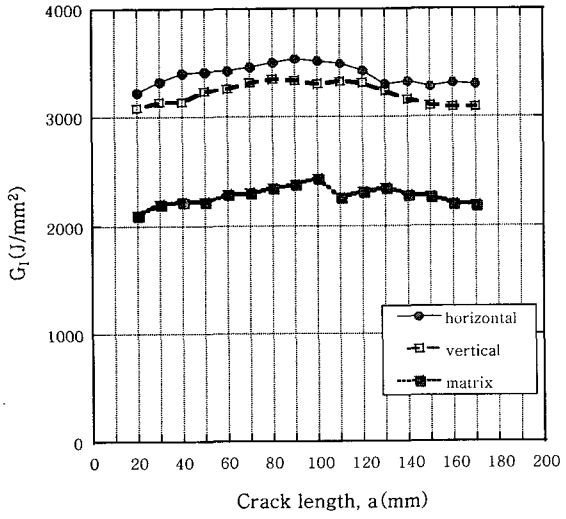

Fig. 5 The result of energy release rate in peel test at 0.25mm/min strain rate

여기서, P는 최대하중, δ는 개구변위, b는 시험편 폭, a는 진행된 크랙길이이다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 크랙 구동에 작용하는 에너지는 모든 길이에서 거의 일정함을 볼 수 있다. 약간의 진폭차이는 대부분 loading pin의 변위와 크랙진전 길이 비에 기인하는 것으로서 시편의 중간부분에서 균열진전 속도가 약간 빨라지기 때문이라 판단된다.

3.3 인장전단시험

적층형 복합재료로 단일겹침 형태의 접착제 접합 시험편을 제작하여 인장전단하중을 가했을 때 시험편의 파괴형상을 Fig. 6에 나타내었다. woven과 horizontal은 접착부 가장자리에서 파괴가 일어나기 시작하여 계면으로 균열이 전파하였다. 그러나 horizontal은 경우에 따라 계면파괴, 절단파괴 그리고 섬유의 pull out등 다양한 파괴의 양상을 나타내었다. 이것은 박리시험의 결과로 알 수 있듯이, horizontal이 woven보다 상대적으로 보강재 계면에서의 강도가 높아서, 계면전체로 균열이 진전하기보다는 수직으로 균열이 진전하고, 시편이 파괴되면서 일부 섬유가 빠져나간 것으로 생각된다. vertical도 접착부 가장자리에서 파괴가 일어나기 시작하였으나 시편을 가로지르는 방향으로 균열이 전파하여 절단파괴(sectional failure)[7]를 나타내었다.

자연섬유 강화 복합재료로 단일겹침 접착제 접합을 적용하였을 때, 인장전단 시험에 따른 파괴하중 값을 Fig. 7에 나타내었다. 접착부의 파괴는 접착부 가장자리에 응력이 집중하여 원래의 인장하중보다 낮은 강도에서 각각 파괴가 일어났다.

대나무 보강재의 섬유 방향에 따른 시편의 응력분포를 알기 위하여 유한요소 해석을 하였고 Fig. 8에 그 결과를 나타내었다. 모든 조건은 동일하고, 대나무 보강재의 두께와 섬유 방향만 다르게 하여 해석하였기 때

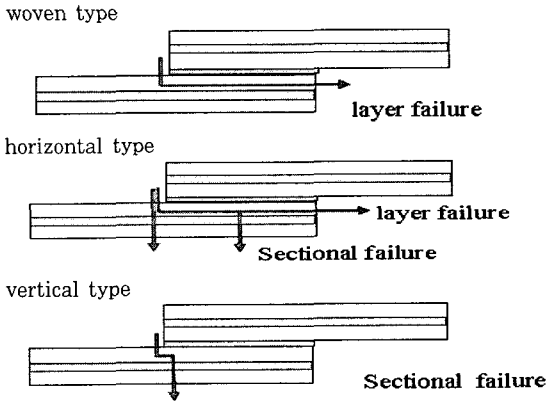

Fig. 6 The failure model of adhesive bonded joints

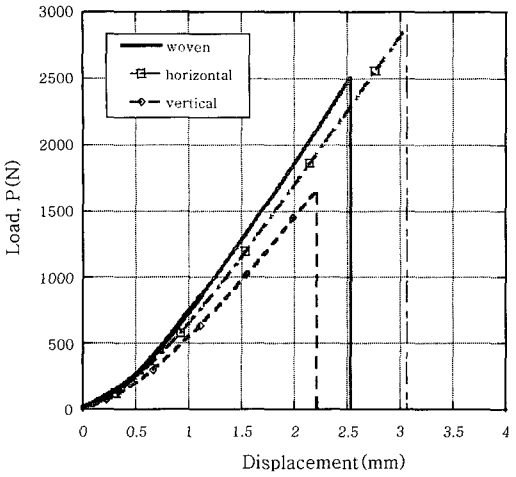

Fig. 7 The result of tensile-shear test of bamboo composite adhesive bonded joints

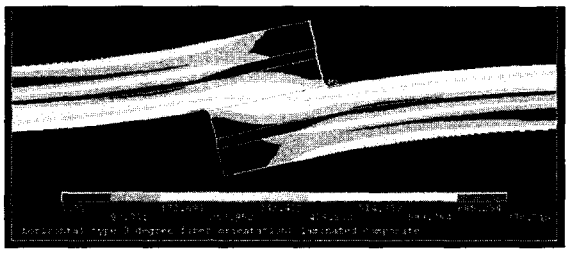

Fig. 8 Stress distribution of single-lap adhesive bonded joints (von Mises stress)

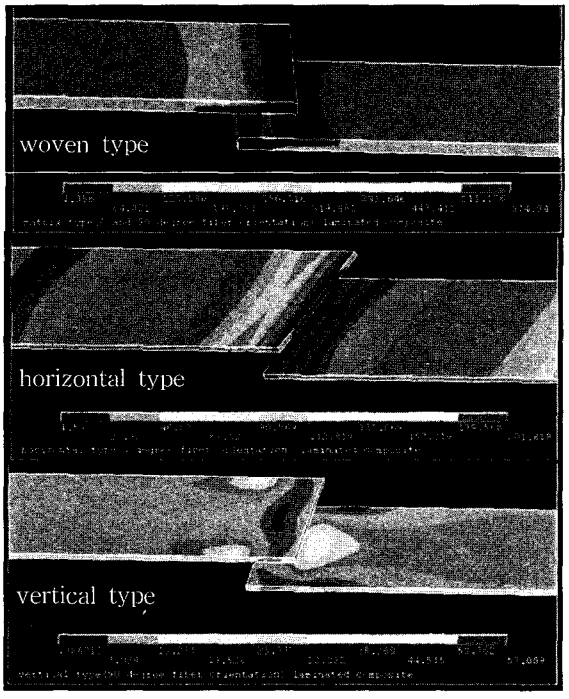

Fig. 9 Stress distribution of bamboo fiber layer in adhesive bonded joints (von Mises stress)

문에 시편의 응력분포는 모두 접착제 가장자리의 집중을 보였다. 그러나 horizontal의 경우, 보강재의 두께가 얇고 섬유 방향이 인장에 평행하기 때문에 모재와 보강재 사이의 계면에서 응력의 차이가 다른 보강재의 경우 보다 비교적 작았다. 이런 이유로 재료의 파괴강도가 다른 보강재의 경우보다 비교적 큰 것으로 판단된다.

Fig. 9는 앞의 해석에서 대나무 보강재의 응력분포만을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 응력분포값은 하중이 시시각각 증가하는 비선형 해석에서 임의의 시간을 잡았으므로[8] 시편마다 다를 수 있다. woven의 경우 접착부에 가까운 표면과 접착부에 먼 표면의 응력차이가 거의 없으므로 유한요소 해석상 가장 이상적인 형태가 되겠지만 실제로는 낮은 박리강도로 horizontal보다 낮은 파괴강도를 가진다. vertical의 경우에는 접착제 가장자리에서 수직으로 대나무 보강재에 응력이 국부적으로 더 집중하므로 절단파괴에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 접착제 접합을 자연섬유강화 복합재료에 적용시켰을 경우 자연섬유의 방향성에 따른 파괴강도 평가를 수행하였다.

접착제 접합을 하기 전에 대나무 보강재를 사용한 자연섬유강화 복합재료의 인장강도와 박리강도를 먼저 평가하였다. 두께 5mm의 인장강도 시험편의 경우에 대나무가 hrizontal, vertical의 경우 부피비의 20%, woven 인 경우 부피비의 40%를 차지하였지만 인장강도의 하락은 각각 8.49, 15.46%정도로 나타났다.

이러한 재료에 접착제 접합을 응용한 결과 보강재의 섬유의 방향만을 바꾼 동일한 조건임에도 불구하고 horizontal(2892N)이 woven(2511N)보다 크고 vertical (1657N)이 가장 낮은 파괴강도를 나타내었다. 접착에 의한 파괴강도의 차이는 대나무 보강재와 모재사이의 계면강도에 대한 관점에서 볼 때 horizontal(949N)과 woven(592N)의 차이가 났다. 또한 접착에 의한 파괴강도의 차이는 섬유의 방향성에 따른 보강재내의 응력집중에 대한 관점에서 볼 때 vertical의 경우가 특히 응력집중이 큰 것으로 나타났다. 따라서 보강재의 섬유배열 방향성은 인장강도와 박리강도에 큰 영향을 주며, 인장시험과 박리시험을 통한 분석과 유한요소해석으로 접착제 접합을 적용한 자연섬유 강화 복합재료의 파괴특성의 영향을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. M. Ferreira, H. Silva, J. D. Costa and M. Richardson : Stress analysis of lap joints involving natural fibre reinforced interface layers, Composites Part B: Engineering, 36-1 (2005), 1-7
2. Robert W. messler Jr : Joining of advanced materials, Butterworth Heinemann Ltd, (1993) 135
3. M. Y. Tsai, J. Morton : The Effect of a Spew Fillet on Adhesive Stress Distributions in Laminated Composite Single-lap Joints, Composite Structures 32 (1995), 123-131
4. L. Dorn, Weiping Liu : The Stress State and Failure properties of Adhesive-bonded plastic/metal joints, Butterworth Heinemann Ltd (1992)
5. Mansur ahmad : Analysis of Calcutta Bamboo for Structural Composite Materials, Doc. paper of Virginia State Univ. (2000), Chapter 4. 84-11
6. ASTM D 5528-01 : Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer matrix Composites, (2004)
7. P. T. Cheuk, Liyong Tong : Failure of Adhesive Bonded Composite Lap Shear Joints with Embedded Precrack, Composites Science and Technology 62 (2002), 1079-1095
8. SAS Inc. : ANSYS structural analysis guide, chapter 8 Nonlinear structural analysis, ANSYS release 7.0 manual (2002), 8-4