

유리섬유/폴리에스테르 복합재료 패널 접합부의 접착강도에 관한 표면성질의 효과[§]

팜 탄 닷*·염 영 진**†

* 울산대학교 기계공학부

Effect of Surface Properties on Adhesive Strength of Joint of Glass Fiber/Polyester Composite Panels

Pham Thanh Nhut* and Young Jin Yum**†

School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan,

(Received May 22, 2012 ; Revised August 10, 2012 ; Accepted August 10, 2012)

Key Words: Terminal-Joint(말단접합), Secondary-Joint(이차접합), Shear Stress(전단응력), Adhesive Strength(접착강도)

초록: 복합재료 접합부의 접착강도에 대한 접착면 성질의 영향을 알아 보기 위해 불포화폴리에스테르, 우븐과 매트 유리섬유를 사용하여 복합재료 접합시편들을 제작하였다. 접착제, 복합재료 접착물, 말단접합과 이차접합 시편들의 기계적 성질을 실험에 의해 구하고 실험결과를 접합이론에 적용하였다. 6 개의 접합부들에서 발생하는 최대 및 평균 전단 응력은 최대 인장력과 접합 시편의 기하학적 변수들로부터 계산되었다. 실험 결과 접합면을 연마한 후 아세톤으로 처리한 경우가 말단접합의 3 가지 형태 중 가장 큰 강도를 가지고 있음이 관찰되었다. 마찬가지로 매트-매트와 매트-우븐 접합이 거의 같은 값으로 이차 접합의 3 가지 형태 중 가장 큰 강도를 가지고 있었다. 반대로 아무 처리도 하지 않은 접합시편과 우븐-우븐 접합시편은 매우 낮은 강도를 가졌다. 각각의 경우 파손은 접합부 양끝에서 심하게 발생하였고 접합부 가운데로 이동하였다.

Abstract: Adherend samples were made from unsaturated polyester and woven and mat glass fibers by the hand layup and vacuum methods. The mechanical properties of the adhesive, composite adherends, and terminal-joint and secondary-joint specimens were determined experimentally. Combinations of the experiment results and the bonding theory were used in this study. The maximum and average shear stresses were calculated based on the maximum tensile force and geometry parameters of the joint specimens. The results of the maximum and average shear stresses were compared and evaluated for six joints. The results showed that the grinding and grind/acetone joint had the highest strength among three types of terminal-joints. Similarly, the mat-mat and mat-woven joints had the highest strength among three types of secondary-joints with the same value. Conversely, no treatment and woven-woven bonding had very low strength. In each case, failure occurred always at two ends and then moved toward the middle area of the overlap length.

1. 서 론

가볍고 고강도와 고강성을 갖는 구조물의 부품을 만들기 위해 층상 복합재료가 널리 사용된다.

상업용 복합재료는 대개 에폭시나 폴리에스테르 수지 같은 열경화성 중합체 매트릭스에 유리나 탄소 섬유를 포함한다.⁽¹⁾ 유리섬유와 불포화 폴리에스테르 수지로 만들어진 복합재료 구조물들이 많이 있는데 이러한 복합재료들은 중간의 기계적 성질을 가지고 선박 건조, 인테리어 장비(욕조, 테이블) 등과 같이 여러 분야에 사용될 수 있다.

유리섬유 복합재료의 접합에는 세 종류의 접합; 동시경화, 이차결합, 말단접합 등이 있다. 동시경화

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012.5.10-12, 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, yjyum@ulsan.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

(co-curing)는 경화과정 동안 지속적으로 레이어들을 접합하는 것이다. 상부와 하부 접착물의 접합면(불완전한 면)을 반경화시키고 같이 결합하는 것은 이차접합(secondary bonding)이다. 상부와 하부 접착물의 표면을 경화시킨 후 이 둘을 접합하면 말단접합(terminal joint)이라 부른다. 필요한 기계적 성질을 얻기 위해서 이차결합과 말단접합시 접합 표면은 잘 준비되어야 하는 반면, 동시경화는 제작하기 쉽고 층간 결합 능력이 우수하기 때문에 접합물 제작시 주로 사용된다.

연구자들에 의해 복합재료-복합재료, 복합재료-금속, 금속-금속과 같은 많은 접합과 관련된 연구들이 행해졌다. Kim 과 Kedward⁽²⁾는 경사 하중을 받는 상태에서 유리/에폭시 및 탄소/에폭시 접합시편에 대한 접합 면내 전단응력의 여러 가지 예를 제시하였다. Kim 등⁽³⁾은 다양한 접합법들이 사용된 일방향 복합재료 단일 겹침 결합 접착부의 파손모드 및 강도에 대한 연구를 수행하였다. EA9309NA, EA9309.3NA, FM73 등의 접착제가 사용되는 경우와 접착제를 사용하지 않는 경우 동시경화와 이차결합에 따른 파손강도를 비교하였다. 또한 그들은 접합 강도의 평가를 위해 표면거칠기, 결합선 두께, 필렛과 균열 발생 등의 여러 가지 특성에 따른 분석도 수행하였다. Putic 등⁽⁴⁾은 유리섬유/폴리에스테르 복합재료의 층간전단강도를 결정하였다. 샘플은 3 종류의 수지(bisphenolic, water resistant, acid resistant)를 사용한 8 종류의 유리섬유(mat 240, 360, 400 g/m² and 0/90° woven 180, 240, 360, 600, 800 g/m²)로 만들어졌고 층간전단강도를 비교하기 위해 굽힘 시험이 수행되었다. Seong 등⁽⁵⁾은 탄소 복합재료와 알루미늄의 단일 겹침 결합 접합부의 파손을 분석하였다. 하나의 알루미늄 샘플과 3 가지 종류의 복합재료 샘플(USN125 carbon/epoxy, WSN-3k carbon fabric, GEP215 glass fabric)들을 접합 압력, 접합 길이, 접착물 두께, 접착물 종류 등을 다양하게 변화시켜가면서 접합시편을 제작하였다. Magalhães 등⁽⁶⁾은 적층 복합재료의 단일 겹침 결합 접합부의 응력 집중 효과를 평가했다. 그들은 수치 해석법을 사용하여 탄소/에폭시-탄소/에폭시, 유리/에폭시-유리/에폭시, 탄소/에폭시-유리/에폭시 등의 세 접합부분의 겹침 길이에 따른 박리응력(peel stress)과 전단응력을 결정하였다. Broughton 과 Hinopoulos⁽⁷⁾는 유한요소해석으로 접착제두께와 하중에 따른 4 가지 접합부(강-강, 티타늄-티타늄, 알루미늄-알루미늄, GRP-GRP)의 박리응력, 전단응력, 미세스 응력을 구하였다.

많은 연구결과를 볼 때 접합은 일반적으로 구조물 설계에서 가장 중요한 연구과제 중 하나이고 특히 적층 복합재료 구조물에서는 더욱 중요하다.⁽⁸⁾ 복합재료 접합시 접착면의 표면처리 여부, 표면처리 방법 등은 접합강도에 커다란 영향을 미친다. 넓은 면적을 가지거나 두꺼운 판들의 제작시 열응력의 영향과 제작 시간 때문에 여러 단계에 걸쳐 제작한다. 이것은 접합면의 표면처리 없이 이차접합을 사용하여야 하는 것을 의미한다. 역으로 별개의 판들로 구조물을 만들거나 기존 판들을 재사용할 때 우리는 말단접합이라 불리는(접합면 처리 방법에 상관없이) 완전경화된 표면끼리의 접합을 해야 한다.

이론적으로도 접합부 성질에 대한 많은 연구, 분석, 평가가 있다. 대부분의 결합강도 이론식들은 기본적인 기하학적 파라미터들과 접합 물성들로 이루어졌다.^(1,8-11) 다른 연구에서는 적절한 결합 구조 디자인을 선택하기 위해 유한요소법을 사용했거나 접합부 구조를 해석하기 위해 현미경 관찰을 수행하였다.^(2,3,6,7,12)

본 연구에서는 복합적층판의 접합시 접합면의 표면성질이 접착강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 다른 접합표면 조건(매트와 매트, 매트와 우븐, 우븐과 우븐 섬유 표면)을 가진 유리섬유/폴리에스테르 단일 겹침 접합부 샘플을 제작한다. 이때 접합면의 처리 방법을 세 가지(표면처리 없음, 연마, 연마 및 아세톤 처리)로 변화시켜서 인장 시험을 수행하고 접합부 강도 결합 이론⁽⁹⁾을 적용하여 접합부 강도를 계산하려고 한다.

2. 접합이론과 실험

2.1 접합이론

접합시편(Fig. 1)에 대한 인장시험의 결과로부터 전단응력은 다음과 같이 결정된다.⁽⁹⁾

접착전단응력:

$$\tau_{yz}^a = \lambda_T \left[\left(\frac{N_y}{2} - \frac{C_1}{\lambda_T^2} t_o \right) \frac{\sinh \lambda_T y}{\cosh \lambda_T c} + \frac{N_y}{2} \frac{\cosh \lambda_T y}{\sinh \lambda_T c} \right] \quad (1)$$

평균 접착전단응력:

$$\left(\tau_{yz}^a \right)_{ave} = N_y / 2c \quad (2)$$

여기서 λ_T , C_1 은 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{G_a N_y}{E_y^* t_a t_t t_o} \quad (3)$$

Table 1 The geometric characteristics of joint samples

Parameters	Outer adherend thickness t_o	Inner adherend thickness t_i	Adhesive thickness t_a	Overlap length $2c$	Bonding width b
Values, mm	1.5	1.5	0.35	20	20

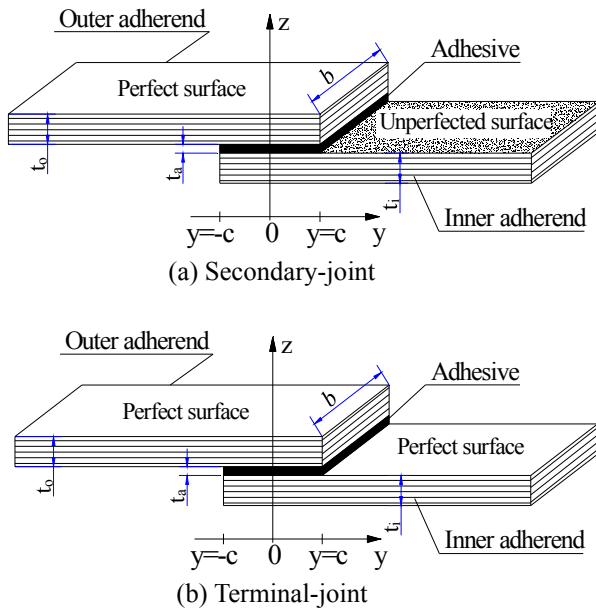


Fig. 1 Geometry of tensile test specimen

$$\lambda_r^2 = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_y^o t_o} + \frac{1}{E_y^i t_i} \right) \quad (4)$$

t_o , t_i , t_a 는 인장시편의 바깥쪽 및 안쪽 접착물과 접착제의 두께, $2c$ 는 겹침 길이, N_y 는 인장 하중, E_y^o , E_y^i 는 부착물의 바깥쪽 및 안쪽의 탄성계수, G_a 는 접착제의 전단 탄성계수이다.

2.2 실험

시편은 6 가지 종류로 다음과 같이 크게 두 케이스로 나눌 수 있다(Fig. 2).

1) 단일 말단접합은 다음과 같이 세 가지 종류로 제작한다: 접착면에 아무 처리도 안 한 경우(TJ1), 접착면을 연마한 경우(TJ2), 연마한 후 아세톤 처리한 경우(TJ3)

2) 단일 이차접합은 다음과 같이 세 가지 종류의 접합물들로 제작한다: mat/mat (SJ1), mat/woven (SJ2), woven/woven (SJ3)

E-glass 우븐과 매트 of 단위 면적 당 무게는 각각 $360g/m^2$ 과 $300g/m^2$ 이고 불포화 폴리에스테르 수지와 메틸에틸케톤을 사용하였다.

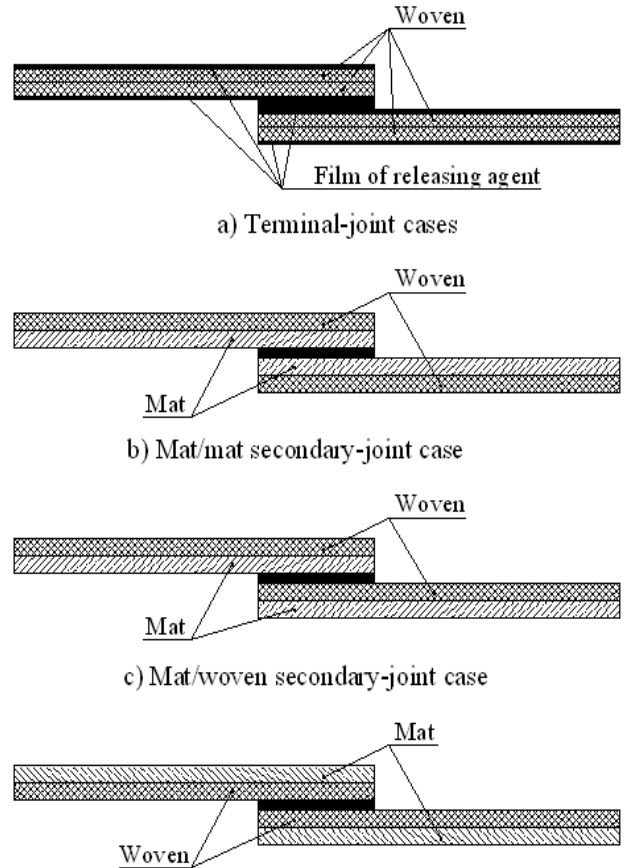


Fig. 2 Layered structure of adherends

접착물 복합재료 샘플은 다음과 같이 1.5mm 두께의 섬유 레이어 2 장으로 제작하였다. SJ1, SJ2 는 매트/우븐이고, 다른 접합부들은 우븐/우븐 접합구조이다. 말단접합 접착물을 제작할 경우 $250 \times 150 \times 1.5mm$ 크기의 알루미늄 상하 몰드를 이용하였고 이차접합 접착물의 경우 하부 몰드만 이용하여 제작하였다. 폴리왁스 P600 이 이형제로서 사용되었고 0.7% wt. methyl ethyl ketone peroxide 를 불포화 폴리에스테르와 혼합하였다. 이 수지와 유리섬유는 45:55 무게 비율을 유지하도록 하였다. 유리섬유와 수지를 혼합한 후 혼합물을 상온에서 48 시간동안 경화시켰다. 적층판 샘플은 몰드에서 분리하여 말단접착용과 이차접착용으로 절단한 후 6 가지 접합을 시행

Table 2 Material properties of polyester resin and composite

Materials	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	Poisson's ratio	Elongation at failure (%)
Polyester resin	1.15	46.09	2185.41	-	0.381	2.5
Polyester/ woven 0 ⁰ /90 ⁰	1.60	113.82	7842.32	-	0.195	1.5
Polyester/mat and woven 0 ⁰ /90 ⁰	1.50	83.63	6885.71	-	-	1.4
Polyester/woven 45 ⁰ /45 ⁰	1.60	65.08	4721.41	1557.85	-	8.1
Polyester/mat and woven 45 ⁰ /45 ⁰	1.50	60.51	3225.00	1027.17	-	3.5

하였다. 이 때 한 접합 종류마다 3 개의 시편씩 총 18 가지 인장 시험 시편을 제작하였다. 접합 시편의 기하학적 특성은 Table 1 에 나타내었다.

기계적 물성치와 접착물과 접착제의 인장강도는 INSTRON UTM 장비로 측정하였다. 몇 가지 유리 섬유 복합재료와 폴리에스테르 수지의 기계적, 물리적 성질들은 Table 2 에 나타냈다. 말단접합과 이차접합 시편들도 같은 기계로 인장시험을 수행하였다. 각 경우 3 개의 샘플에 대한 실험을 수행하고 평균값을 구하였다. 모든 실험은 ASTM D3165 - 07 기준⁽¹³⁾으로 수행되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 인장시험 결과

각 접합부의 타입은 INSTRON UTM 장비의 인장 속도를 다르게 하여 시험을 수행하였다(TJ1 와 SJ3 는 1mm/min, SJ1 와 SJ2 는 1.5mm/min, TJ2 와 TJ3 는 2mm/min).

실험 결과(Fig. 3)를 보면 각 타입의 세 시편은 비슷한 거동을 보였다. 하중과 변형률의 관계는 거의 선형적이었다.

파손 하중에 대해 살펴보면 연마 후 아세톤 처리한 TJ3 시편의 경우가 2258.5N 으로 가장 컸다. 연마한 TJ2 시편은 1925.1N 으로 약간 작았지만 아무 처리도 하지 않은 TJ1 시편의 169.9N 에 비해서는 10 배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이차접합 시편에 대한 인장 실험에서 매트/매트 SJ1 와 매트/우븐 SJ2 는 비슷한 파손 하중 값(947.7N, 870.1N)을 보인 반면 우븐/우븐 SJ3 의 파손하중은 이보다 훨씬 낮은 318.9N 에 불과하였다.

3.2 y-z 평면에서의 전단강도

Fig. 3 에 보인 인장시험 결과로부터 인장하중 N_y 를 얻은 후 이 값과 기하학적 파라미터의 수치 및 공학적 상수를 식 (3), (4), (2), (1)에 넣으면 y-z 평면에서 겹쳐진 길이 $y=c \pm 10\text{mm}$ 의 두 끝단에서의

전단응력의 최대값과 평균값을 얻을 수 있다(Table 3). 식 (1)의 변수 y 를 -10mm 에서 10mm 로 변화시키면 전단응력 그래프(Fig. 4,5)를 그릴 수 있다.

Fig. 4 와 5 를 보면 전단응력의 최대값과 최소값에 큰 차이가 발생했음을 알 수 있다. 양 끝단의 값은 겹쳐진 부분의 중앙에서의 값보다 246 배나 더 컸다. 이것은 파손이 먼저 양 끝단에서 강하게 일어나고 이후 가운데로 이동하였음을 의미한다. 이로부터 경우에 따라 층간분리의 방지를 위해 접합면 끝부분의 강화가 필요하다고 볼 수 있다. Fig. 4 는 접합 방법에 따라서도 큰 차이가 있음을 보여 준다. 연마/아세톤 말단접합(TJ3) 케이스의 전단응력이 가장 컸고(17.5MPa) 아무 처리도 안 한 랩접합의 경우(TJ1)가 가장 작았다(1.32MPa). 이렇게 접합방법에 따른 차이는 접합면 위의 수지 분자(폴리에스테르)의 특성에 기인한 것으로 판단된다. TJ1 케이스에서 접착물 위의 폴리에스테르 분자들은 이형체의 막에 의해 몰드에서 분리되므로 접착물들을 접착제로 서로 붙이기가 어렵다. 그러나 TJ2 케이스에서는 연마에 의해 이형체의 막이 손상되어 접착성이 좋아지게 된다. 그리고 TJ3 케이스에서는 폴리에스테르 분자들이 아세톤 화학물질에 의해 부드럽게 되어 접착물과 접착제의 연결 상태가 매우 좋아졌음을 알 수 있다.

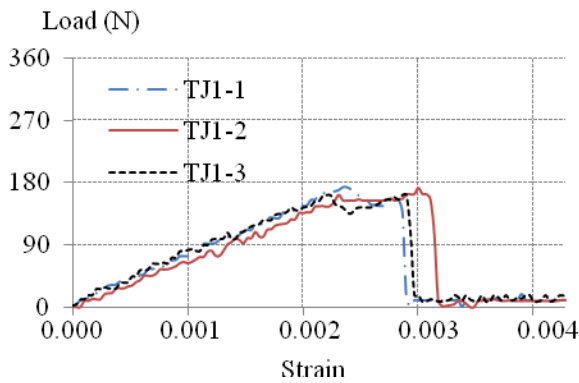
말단접합의 경우와 비슷하게 이차접합의 경우 매트/매트(SJ1)와 매트/우븐(SJ2) 이차접합 케이스는 거의 같은 값(23.67MPa 과 21.77MPa)에서 높은 전단응력을 가지고 우븐/우븐(SJ3) 이차접합 케이스는 낮은 전단응력(7.97MPa)을 가진다. 이러한 차이는 접착물 표면의 유리섬유 분포에 의해 결정된다. 유리섬유 매트는 같은 평면에 무작위로 배열된 짧은 유리 섬유로 만들어졌기 때문에 매트와 매트 크지는 않지만 복합구조물에서 다른 레이어들과의 연결성이 좋다. 따라서 SJ1 의 표면은 매트와 매트이기 때문에 두 개의 우븐 레이어가 접합된 SJ3 이나 우븐과 매트가 접합된 SJ2 케이스에 비해 큰 전

단 응력을 갖는다고 볼 수 있다.

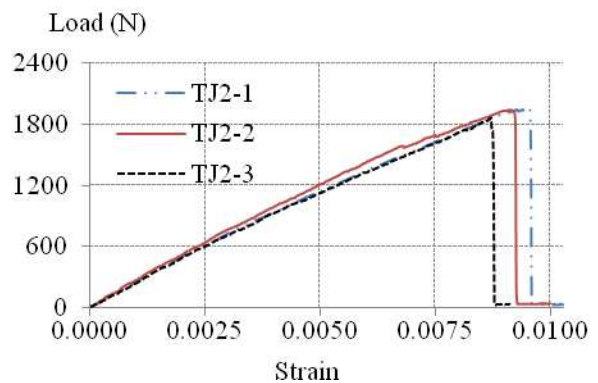
6 종류의 시편들의 전단응력을 비교해 보면 비슷한 크기를 갖는 세 쌍으로 나눌 수 있다. TJ3 와 TJ2 케이스는 가장 높은 강도를 가지고 있고, TJ1 과 SJ3 는 가장 낮은 강도를 가지는 반면, SJ1 과 SJ2 는 중간 정도의 강도를 갖는다. 또한 접합길이에 따른 전단응력과 평균전단응력의 비($(\tau_{yz})/(\tau_{yz})_{ave}$)를 구해서 그려 보면 Fig. 5 와 같이 모든 접합부는 접합부 길이 y 에 따라 거의 비슷한 값을 가지는

Table 3 Results of tensile loading test and the calculated shear stresses from theory

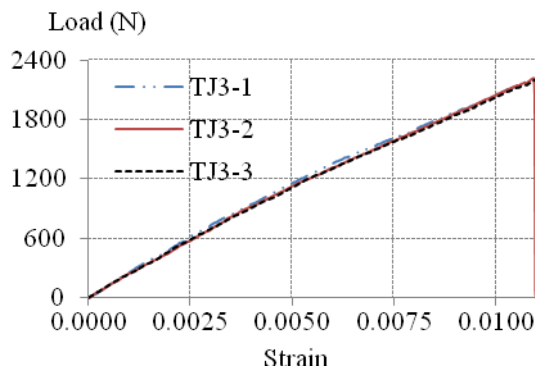
Types of bonding	N_y (N/mm)	$(\tau_{yz})_{ave}$ (MPa)	$(\tau_{yz})_{y=\pm c}$ (MPa)
No treatment TJ	4.25	0.21	1.32
Grinding TJ	48.13	2.41	14.92
Grind/acetone TJ	56.46	2.82	17.50
Mat/mat SJ	23.69	1.19	7.84
Mat/woven SJ	21.77	1.09	7.20
Woven/woven SJ	7.97	0.40	2.47



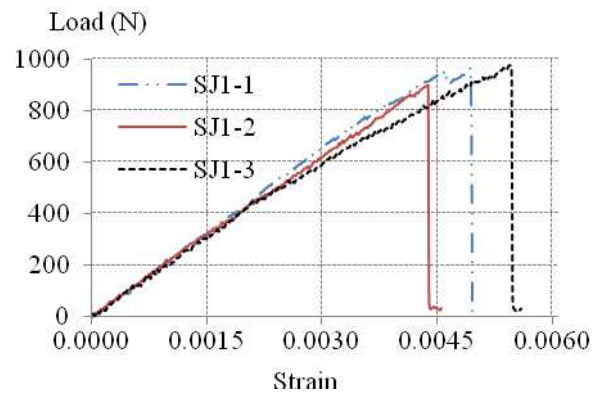
(a) No treatment terminal-joint



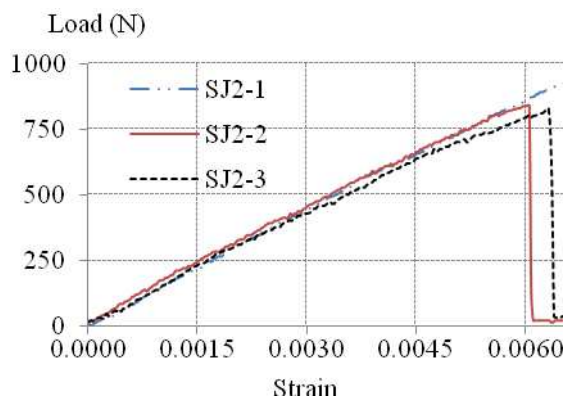
(b) Grinding terminal-joint



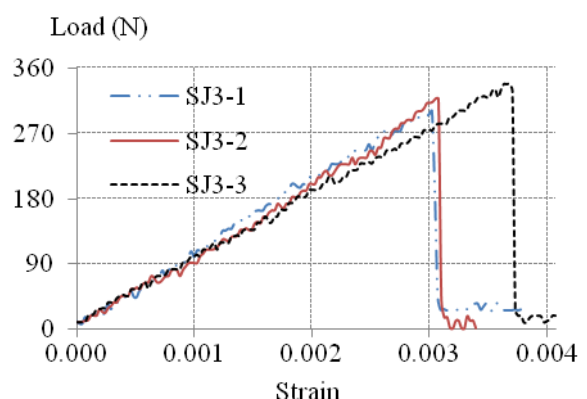
(c) Grind/acetone terminal-joint



(d) Mat/mat secondary-joint



(e) Mat/woven secondary-joint



(f) Woven/woven secondary-joint

Fig. 3 Results of tensile loading test

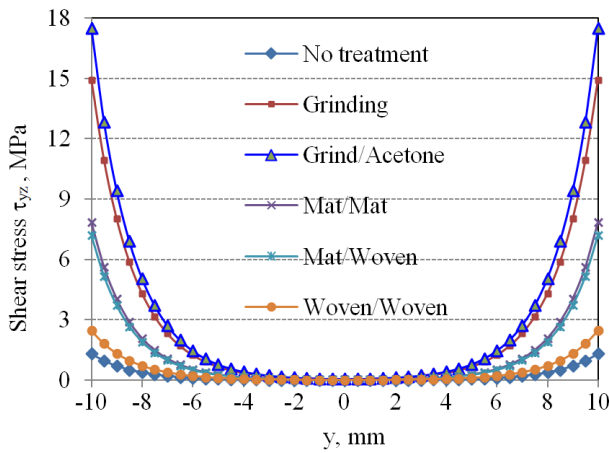


Fig. 4 Shear stresses in y-z plane along y

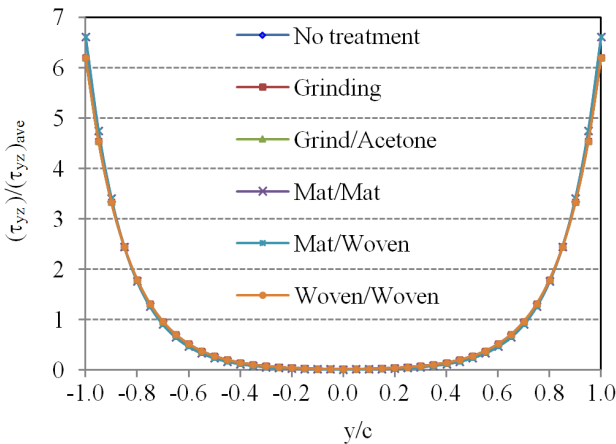


Fig. 5 Ratios of $(\tau_{yz})/(\tau_{yz})_{ave}$ vs. y/c in tensile test case

것을 알 수 있다. 이것은 파손 양상이 모든 케이스에서 거의 같음을 의미한다

4. 결론

본 연구에서는 유리 섬유/폴리에스테르 복합재료 단일 접합부의 접착강도에 대한 표면 조건의 효과를 조사하기 위해 6 가지 타입(접합면에 아무 처리도 하지 않은 TJ1, 연마한 TJ2, 연마 후 아세톤 처리한 TJ3, mat/mat SJ1, mat/woven SJ2, woven/woven SJ3)의 시편들을 제작하고 인장시험을 수행하였다. 그 결과 말단접합 3 가지 타입에서 연마/아세톤 처리한 시편의 접합부의 강도가 가장 컸다. 반면에 우븐/우븐 결합은 무시할만한 강도를 가졌고, 매트/매트와 매트/우븐 접합부는 거의 비슷한 값인 높은 강도를 가졌다. 아무 처리도 하지 않은 TJ1와 우븐/우븐 SJ3는 낮은 접합강도 때문에 실제 사용에 주의를 기울여야 한다. 각 케이스에서 파손은

양 끝에서 발생되어 겹쳐진 길이 가운데 부분으로 빠르게 이동하는 것이 관찰되었다. 따라서 접착제에 의한 접합을 사용하여 복합 구조물을 만들 때 층간분리를 방지하기 위해 접합면 끝단에서의 강화가 필요하다.

후 기

이 논문은 2011년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- (1) Clyne, B., 2000, "Mechanics of Composite Materials," Version 2.1, University of Cambridge.
- (2) Kim, H. and Kedward, K., T., 2001, "Stress Analysis of Adhesive Bonded Joints Under in-Plane Shear Loading," *Jo.adhesion*.
- (3) Kim, K.-S., Yoo, J.-S., Yi, Y.-M. and Kim, C.-G., 2006, "Failure Mode and Strength of Uni-Directional Composite Single Lap Bonded Joints with Different Bonding Methods," *Composite Structures*, 72, pp. 477~485.
- (4) Slaviša, P., Branislav, B., Dragana, V., Marina, S. and Vladimir, P., 2009, "The Interlaminar Strength of the Glass Fiber Polyester Composite," *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 15(1), pp. 45-48.
- (5) Seong, M.-S., Kim, T.-H., Nguyen, K.-H., Kweon, J.-H. and Choi, J.-H., 2008, "A Parametric Study on the Failure of Bonded Single-Lap Joints of Carbon Composite and Aluminum," *Composite Structures*, 86, pp. 135~145.
- (6) Magalhães, A. G., de Moura, M.F.S.F. and Gon-calves, J.P.M., 2005, "Evaluation of Stress Concentration Effects in Single-Lap Bonded Joints of Laminate Composite Materials," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25, pp. 313~319.
- (7) Broughton, W. R. and Hinopoulos, G., 1999, "Evaluation of the Single-Lap Joint Using Finite Element Analysis," *NPL Report CMMT(A)*, 206.
- (8) Department of Defense, 2002, "Composite Materials Hand-Book: Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis," *MIL-HDBK-17-3F*, Volume 3.
- (9) Kim, H. and Kedward, K., 2001, "Stress Analysis of In-Plane, Shear-Loaded, Adhesively Bonded Composite joints and Assemblies," *DOT/FAA/AR-01/7*.
- (10) Veselovsky, R. A. and Kestelman, V. N., 2002, "Adhesion of Polymers," *McGraw-Hill eBook*.
- (11) Chadegani, A. and Batra, R. C., 2011, "Analysis of Adhesive-Bonded Single-Lap Joint Withan Interfacial Crack and a Void," *International Journal of Adhesion*

& *Adhesives*, 31, pp. 455~465.

(12) Miyazaki, Y. and Furusako, S., 2007, "Tensile Shear Strength of Laser Welded Lap Joints," *Nippon steel Technical Report No. 95*.

(13) "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single Lap-Joint Laminated Assemblies," *ASTM, D3165 - 07*.