

원통형 셸 구조를 갖는 한방향 CFRP 적층 복합재료의 정적인장파괴거동

Mechanical Properties and Fracture Behavior of Cylindrical Shell Type for Unidirectional CFRP Composite Material under Tension Load

오 환 섭(경희대 기계공학과), 최 용 준*(경희대 대학원)

Hwan-sup Oh (Kyung-Hee Univ.), Yong-jun Choi (Graduate School Kyung-Hee Univ.)

ABSTRACT

In this paper, basic micro-mechanical properties of unidirectional CFRP composite shell such as bonding strength, fiber volume fraction and void fraction are measured and tensile strength test is performed with a fixture. And then fracture surfaces are observed by SEM.

In case of basic micro-mechanical properties, bonding strength is reduced with decreasing of radius of each ply in a shell for the effect of residual stress, fiber volume fraction is smaller than plate, and void fraction is vice versa. For these reason, tensile strength of shell is smaller than plate fabricated with same prepreg. For failure mode shell has many splitted part along its length, and it is assumed that this phenomenon is caused by the difference of bonding strength for residual stress.

Keywords : Unidirectional composite shell(한방향 적층 복합재료 셸), Bonding strength(접착강도), Fiber volume fraction(섬유 체적비), Void fraction(보이드 체적비), Tensile strength test(인장강도실험), Fractography (파면관찰)

1. 서 론

탄소 섬유 강화 복합재료는 수지에 Carbon Fiber를 함침시킨 Prepreg를 임의의 각을 가지게 적층하여 가열,가압하여 성형한 것으로 비강성(탄성률/밀도), 비강도(인장강도/밀도) 및 열, 기계적 특성뿐만 아니라 최적설계를 할 수 있는 유연성을 가지고 있기 때문에 항공우주 구조물, 자동차, 선박의 재료로 많이 사용되고 있다.

위와 같은 우수성으로 인해 탄소섬유강화 복합소재는 개발초기에서부터 동적, 정적 기계적 특성과 더불어 피로강도, 적층배열에 따른 해석이 수행되어 왔고, 최근에는 외부물체에 의한 강도저하, 고온, 고습환경등의 환경 인자까지 고려한 기계적 특성 및 해석방법이 연구되고 있으며 이 분야의 연구는 아직까지 수많은 산적한 과제를

안고 있다.

최근에 들어 복합소재의 활용분야가 넓어지면서 Shell 구조물의 사용이 점차로 증가해 감에 따라 이에 대한 새로운 해석이 요구되고 있는 실정이다. 물론 이에 대해 여러 가지 복합소재 Shell 이론이 발표되어 있지만 등방재 Shell에서와는 달리 이론치와 실험치에 큰 오차가 있어¹⁾ 실제적인 적용이 힘들며, 주로 실험적인 방법에 의존^(2~4)하고 있으나 이의 체계적인 정리는 되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 제조방법과 기하학적 형상이 판재와 확연한 차이를 가지는 한방향 복합재료 Shell의 기계적 성질을 규명하기 위한 기초적 연구로서 정적인장하중에 대한 응용된 시험법

의 개발과 이를 이용한 실험으로 정적하중에 대한 강도평가, 파면해석을 행하여 Plate와의 비교함으로써 복합재료 Shell의 정적 인장파괴거동을 검토하고자 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1. 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 시험재료는 일본 Toray사의 T300 Fiber를 사용하여 한방향으로 적층하여 성형한 것을 사용하였다. Fiber와 Prepreg의 사양과 기계적 성질을 각각 Table 1와 Table2에 표시하였다.

Table 1. Specification of prepreg

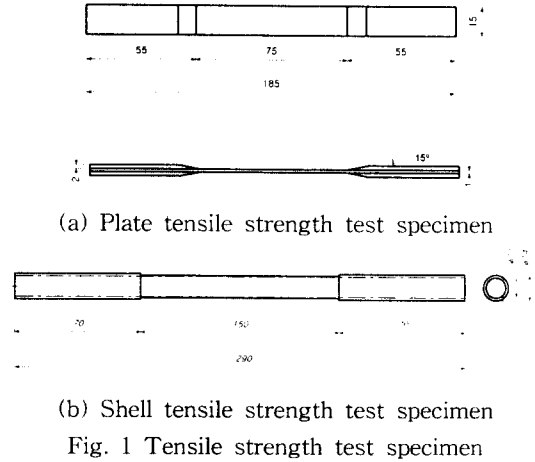
Thickness (mm)	CF WT (g/m ²)	Resin content (%)
0.137	150	30

Table 2. Mechanical properties of fiber

Type	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Elongation (%)	Density (%)
T300	3530	235	1.5	1.67

실험에 사용한 시험편은 서로의 하중에 대한 특성비교를 목적으로 Plate 시험편과 Shell 시험편 두가지를 제작하여 사용하였는데 Plate시험편의 경우 ASTM D 3039M에 따라 제작된 시험편을 이용하였다. Shell 시험편은 Plate 시험편과는 달리 자체가 가지는 형상의 영향과 더불어 기본적으로 취성을 가지므로 인장시험이 상당히 어렵고 기존의 규정화된 시험법이 없어 새로운 시험편을 설계하여 사용하였다.

본 연구에 제작 사용된 Shell 시험편과 Plate 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다.



(a) Plate tensile strength test specimen

(b) Shell tensile strength test specimen

Fig. 1 Tensile strength test specimen

2-2. 실험방법

Fiber와 Matrix의 접합강도 측정시험시 Micro-Vickers 경도계를 사용하였다. 또 Fiber와 Resin의 접합강도를 추정할 목적으로 하중감도시험을 실시하고 이 때 하중은 200gr, 300gr, 500gr, 1Kg, 하중유지시간은 30초로 시험하고, Ply별 강도시험시에는 하중 300gr, 하중유지시간 30초로 각 시편종류에 대해 일정하게 하였다.

Fiber 체적비 측정시에는 시편의 단면을 SEM으로 촬영하여 Fiber의 전체면적을 산출하였고 Void 체적비 측정시에는 시편의 단면을 광학 현미경을 통해 CCD로 촬영하여 이를 화상처리하여 측정하였다. 접합강도, Fiber 체적비 측정, Void 체적비 측정시 사용된 시편은 모두 표면을 #80 0~2400 사포를 사용하여 연마한 후 Void 체적비 측정에 사용된 시편을 제외하고 모두 0.01 μm 산화 알루미늄과 파우더를 사용하여 미세 연마를 하였다.

인장시험시 ZWICK 25 Ton 인장시험기를 사용하여 Cross head load rate를 1mm/min로 하여 시험하였다. Shell 시험편의 경우 시험편 양쪽에 Core를 삽입하여 시험하였는데 Core는 Fig 2에 그려진 치수와 형상을 갖도록 가공한 것으로 표면 열처리를 하고 시험편 내부와 공차없이 제작되었으며 중심부에 Air Hole을 뚫어 시편에 삽입하거나 빼낼 때 용이하게 되어 있다.

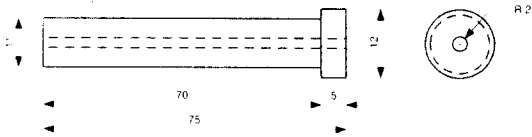


Fig. 2 Core for tensile strength test of shell

3. 실험결과 및 고찰

3-1. Fiber와 Matrix의 접합강도

Shell 내경 11mm와 Plate 시험편의 일정부위(2 번째 Ply)에 대해 하중을 증가시켜 가며 경도를 측정 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

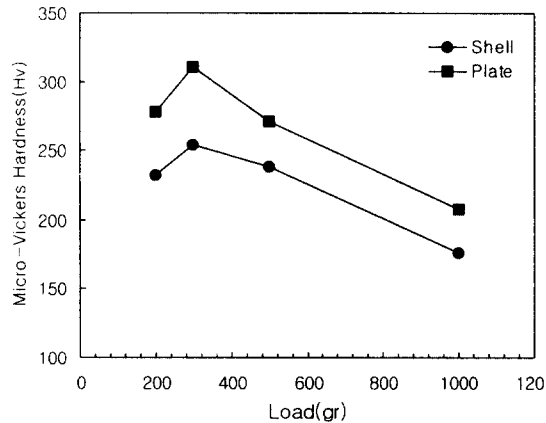


Fig. 3 Hardness variation for increasing load

이것은 경도시험으로 Fiber와 Matrix의 접착강도를 측정 한 것⁽⁵⁾으로 하중 200gr에서 300gr사이에서는 일시적인 경도값의 증가현상을 보이다가 300gr이후에는 일정한 비율로 감소하는 추세를 보이고 있으며, 이보다 작은 하중(100gr미만)에서는 경도값이 산출되지 않는다. 여기서 보여지는 경도값의 일시적인 증가현상은 Fiber와 Matrix 계면의 접착강도가 하중치보다 큰 경우로 Fiber가 고탄성 재료이므로 압흔이 찍힌후 탄성회복으로 인해 나타난 것으로 생각된다. 이후 하중이 증가하여 접착강도가상이 되면 Fiber와 Matrix에 손상이 발생하여 경도값이 계속적으로 감소하는 것으로 보여진다.

Fig. 4는 각 시험편에 대해 층수에 대한 경도

값의 변화를 나타낸 것이다. Plate 시험편의 경우 경도치가 일정하며 Shell 시험편은 층수가 증가(내경에서 외경방향)하면서 경도치가 감소하고 있다.

Shell 시험편의 경도감소 현상은 성형시 굽힘에 의해 잔류응력이 형성되어 발생하는 것으로 한 시험편안에서도 외경방향으로 갈수록 곡률반경의 증가로 인한 잔류응력의 감소로 경도도 같은 반응을 보이는 것이다. 기울기로 나타나는 각 Shell 시험편의 경도치의 변동폭은 점차 감소하는 추세를 보여 Shell 시험편의 직경이 증가함에 따라 점차 변동폭이 감소할 것으로 예상된다.

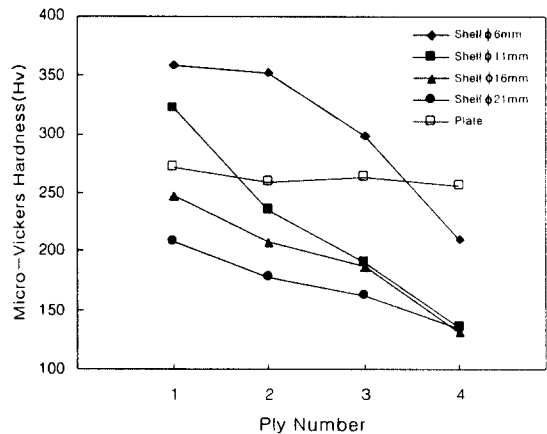


Fig. 4 Hardness variation for ply number

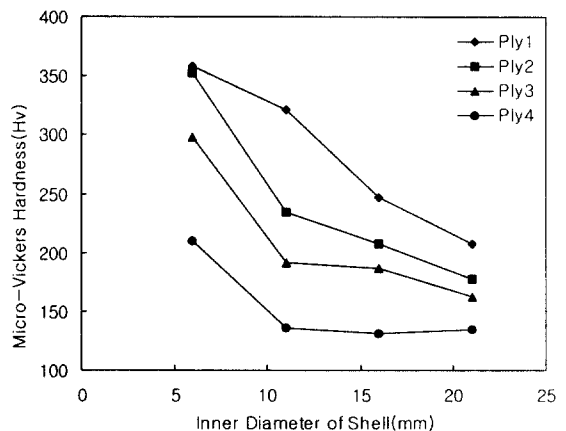


Fig. 5 Hardness variation for shell

Fig. 5는 Shell 시험편에 대해 내경변화에 따른 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 각 층별로 직경이 증가함에 따라 경도치가 감소하는 현

상을 나타내고 있고 기울기로 나타나는 층별 정도치의 변동폭이 외경방향으로 갈수록 감소하여 Shell 시험편 직경이 증가함에 따라 외경방향부터 정도치의 변화 정도가 완화될 것으로 보인다.

3-2. Fiber 체적비의 변화거동

Fig. 6은 각각의 Shell 시험편 직경에 대한 Fiber 체적비의 변화를 표시한 것으로 여기에 비교를 위해 Plate 시험편의 Fiber 체적비와 Prepreg의 체적비를 함께 나타내었다.

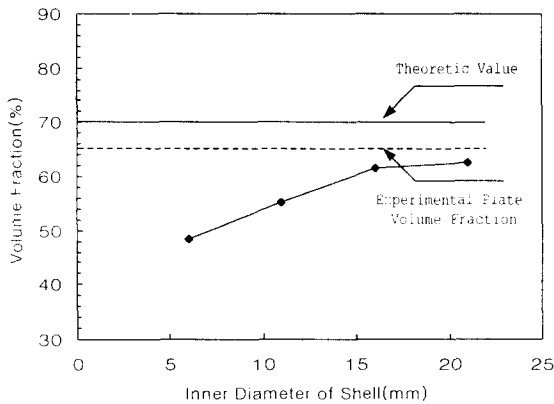


Fig. 6 Variation of volume fraction for shell

Shell 시험편의 Fiber 체적비는 내경이 7mm 경우에는 Plate 시험편에 비해서 많이 떨어지나 내경이 증가함에 따라 서서히 증가하여 내경 16mm, 21mm의 경우에 가서는 거의 같은 체적비를 보여주고 있다.

이와 같이 Shell 직경의 변화에 따라 Fiber 체적비가 변화를 보이는 것은 Shell 성형시에 직경이 작은 경우에는 심한 변형에 의한 국부적인 신연이 발생하여 전체적인 Fiber의 체적비가 떨어지는 것이 아니라 Fiber의 밀집정도가 떨어지는 결과를 반영하는 것으로 생각된다.

3-3. Void 체적비의 변화거동

Fig. 7은 각 Shell 시험편의 직경에 대한 Void 체적비와 Plate 시험편의 Void 체적비를 표시한 것이다. Plate의 Void 체적비가 가장 낮게 나타나고

Shell의 경우 내경 6mm, 11mm에서는 거의 같은 값을 보이다가 직경이 커짐에 따라 급격한 증가 추세를 보이고 있다.

이 실험에서 Void 측정시 Plate 시험편과 Shell 시험편 내경 6mm, 11mm의 경우에는 층 내부의 미소결함이 주된 원인이었으나 내경이 증가함에 따라 층간의 거대결함이 다수 발생한 것이 관찰되었다. 이 거대결함은 공정상의 문제로 인해 발생한 것으로 생각되며 Shell의 직경이 커짐에 따라 계속적인 증가추세를 보일 것으로 예상된다.

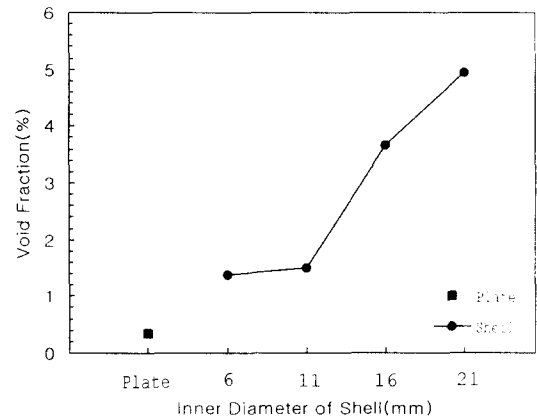


Fig. 7 Variation of void fraction for shell

3-4. 정적인장하중하에서의 파괴거동

3-4-1. Shell의 응력-변형률 특성

Fig. 8은 인장시험에서 얻어진 응력-변형률 선도를 표시한 것으로 Plate 시험편과 Shell 시험편 모두 선형적인 응력-변형률 특성을 나타내고 있다. 이는 시험에 사용된 재료가 같은 데서 기인한 것으로 보이며, 시험편의 형상이 전체적인 응력-변형률 거동에 영향을 미치지 않음을 보여준다.

그러나 Plate 시험편과 Shell 시험편의 인장강도를 비교해 보았을 때 Shell의 강도가 현저히 떨어짐을 알 수 있고 탄성계수의 값도 Shell의 경우가 작다. 이는 Shell의 기계적 성질에 영향을 미치는 기초적인 인자들-Volume Fraction, Void Fraction의 수치가 Plate에 비해 낮은 것에 기인한다고 생각된다.

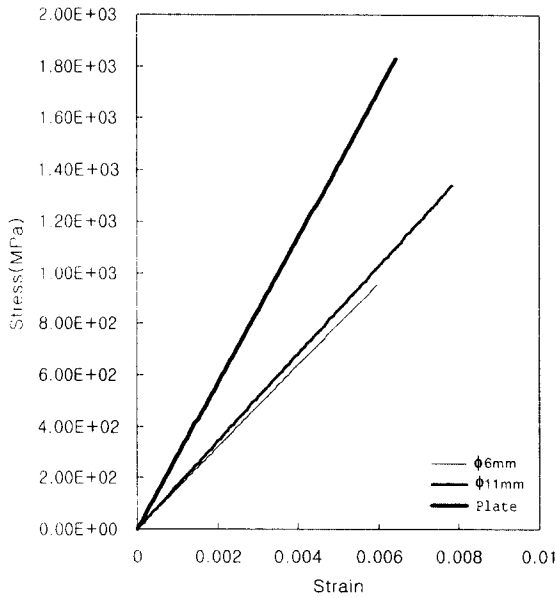


Fig. 8 Comparison of stress-strain behavior

3-4-2. 거시적 파면해석

Fig. 9는 Shell 시험편의 인장파면을 SEM에 의해서 관찰한 것을 나타낸 것이다.

파면은 횡단면 방향으로 직선적인 매끈한 형태를 취하고 있고 Fiber Pull-out이 크게 발생하지 않았으며 이는 Plate 시험편의 경우에서도 같이 나타난다. Delamination 현상은 층을 따라 발생하여 길이방향으로 성장하고 있으나 특이한 점은 Fig 8의 (a)와 (b)에서 보여지는 것처럼 Shell 시험편의 반경방향으로 단면을 가로지르는 균열의 발생이 관찰되는 점으로 인장시험시 프와송비에 따른 단면수축효과로 인해 시험편 외부로부터 내부로의 균열진전에 의한 것으로 보인다.

또한 앞서 관찰한 Shell 시험편의 경도치의 거동에서 나타난 것처럼 최외각 층의 잔류응력 완화로 인해 단면수축시 외부에서 균열의 진전이 이루어진다고 생각된다.

Fig. 10은 인장시험시 Shell 시험편과 Plate 시험편의 찢어져 나간 단면을 SEM을 통해 관찰한 것이다. Fig 10의 (b)는 Plate 시험편의 경우를 나타낸 것으로 Delamination에 의한 현상인 Hackle이 존재⁽⁶⁾하고 Fiber-bridging이 심하게 나타난다. 반면 (a)의 Shell 시험편의 경우

Hackle이나 심한 Fiber-bridging이 나타나지 않고 매끈한 단면이 관찰되고 있어 균열의 진전양상은 앞서 밝힌 바와 같이 시험편 최외각 층에서 반경방향으로 내부로 이루어져 파면을 형성하는 것을 알 수 있다.

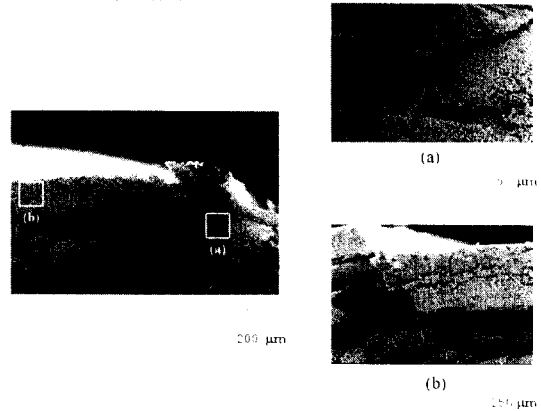
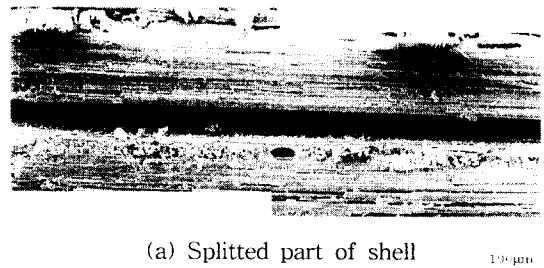
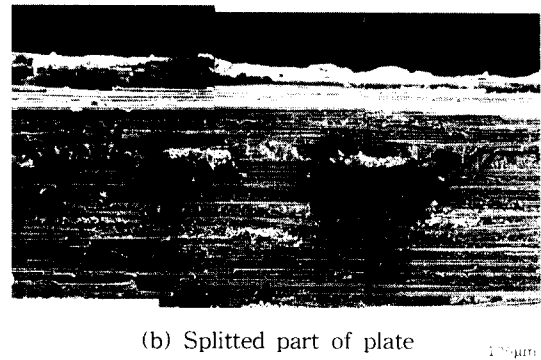


Fig. 9 Transverse fracture surface of shell



(a) Splitted part of shell



(b) Splitted part of plate

Fig. 10 Splitted part of tensile fracture

3-4-3. 미시적 파면해석

Fig.11은 Shell 시험편의 미시적 파면을 나타낸 것으로 Fig.11 (a)의 경우 Fiber는 취성파면을 가지고 있는 반면 Matrix는 연성파면을 가지고 있

다. 또한 Fiber 끝에 나타나는 깊이 패인 홈으로 보아 균열 진전이 외경에서 내경방향으로 이루어진 것을 알 수 있다. Fig. 11 (b)에서 Fiber는 하중방향에 수직하게 매끈하게 파단되어 있어 역시 Fiber가 취성파면을 가지고 있음이 관찰된다.

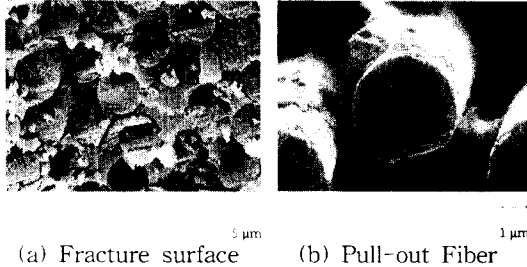


Fig. 11 Micro-fractography of fracture surface

4. 결 론

한방향 CFRP 복합재료 Shell에 대해 기초적인 미세역학적인 성질의 거동을 관찰하고 인장실험을 행한 후 파면해석을 통하여 인장 파괴거동을 검토한 결과를 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 접착강도는 내경에서 외경방향으로 갈수록 감소하는 데 이는 Shell의 성형시 굽힘변형에 의한 잔류응력의 발생이 주된 원인이라 생각된다.
- (2) Fiber 체적비는 Shell 외경이 증가함에 따라 점점 증가하여 Plate의 Fiber 체적비에 접근하며 이는 Shell 성형시에 변형으로 인해 국부적인 신연이 발생하여 Fiber의 밀집정도가 감소해 발생하는 것으로 보인다.
- (3) Void 체적비의 경우 Plate가 가장 낮은 체적비를 보이고 직경이 커짐에 따라 급격한 증가현상을 보이는 데 이는 공정상에 발생하는 거대결함에 의한 것으로 보인다.
- (4) 인장시험시 Shell의 강도와 탄성계수 값이 기초적인 물성의 수치가 Plate에 비해 낮은 것으로 인해 Plate에 비해 작게 나타난다.

- (5) Shell 파면의 횡단면은 직선적으로 매끈하게 파손되며 Fiber는 취성파면, Matrix는 연성파면을 갖는다. 또한 균열의 진전은 단면수축 효과와 최외각 층의 잔류응력 완화로 인해 외경에서 내경방향으로 이루어진다.

후 기

본 연구는 '98년도 산학연 지역컨소시엄 연구의 일환으로 수행되었고 (주) 윈다와 관련 기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. Peter, J. F., 1993, "Numerical and Experimental Investigation of The Bending Response of Thin-Walled Composite Cylinders", Virginia Polytec., Vol. 54-08B, pp.4240~4432
2. Sullivan, T. L., Chamis, C. C., 1973, "Some Important Aspects in Testing High-Modulus Fiber Composite Tubes in Axial Tension", ASTM STP 521, pp. 277~292
3. Krempf E., Niu T. M., 1981, "Graphite/Epoxy Tubes. Their Static Axial and Shear Properties under Completely Reserved Load Controlled Loading", J. of Composite Material, Vol. 15, pp. 173~187
4. Marlowe, D. E., Dexter, H. B., 1978, "Elastic Torsional Buckling of Thin-Walled Composite Cylinders", ASTM STP 546, pp. 84~108
5. Madhukar, M. S., Drzal, L. T., 1991, "Fiber-Matrix Adhesion and its Effects on Composite Material Properties. II. Tensile and Flexural Behavior of Graphite/Epoxy Composites", J. of Composite Materials, pp958~991
6. Kline, R. A., Chang F. H., 1980 "Surface Analysis" J. of Composite Materials, Vol. 14, pp315~324