

FRP 본딩한 복합재료의 인장을 받는 Double Lap 조인트의 응력과 접합 조인트의 특성

손충열* · 김익태** · 최재원*** · 이강수****

인하대학교 선박해양공학과* 홍익대학교 조선공학과** 인하대학교 선박공학과대학원*** 한국에너지기술연구소****

A study of FRP bonded Double lap joints of Tensile and bonded joint Characteristic

CHOONG-YUL SON, IK-TAE KIM, JAE-WON CHOI, Kang-Soo Lee

Key Words: 2nd-Reinforced ply(2차 접착보강 ply), Double Lap joint, Weight fraction, Weight ratio(중량비), Adhered area(접착면)

ABSTRACT

F.R.P specimens were made by mixture CM(chopped mat)450-104 Matrix & RC(roving clothes)570-100 Roving, the mixture ratio Resin: hardener (92:8)for tensile test.

It was also made of plates by hand lay-up method and was been cured for 24 hours and then was cut tensile specimens in accordance with ASTM D638 Type 3.

Knowing exact behavior of bonded area's stress and strain when the tensile test was going on, the test specimens were made of 2 plies laminae of F.R.P. in each for supporting cut part in middle of specimen length. And in middle part also, were covered of F.R.P plies of 1/2,2/3 length of specimen in each as well. Also we consider shear stress in adhered area.

This study reveals that as plys length is more longer, rupture stress grows remarkably larger

1. 서 론

섬유강화 플라스틱 복합재료는 화학적으로 성질이 다른 두 가지 이상의 구성물이 거시적으로 서로 결합되어 개개의 구성물이 갖는 장점뿐 아니라, 구성물들의 결합으로 인하여 특유의 장점들을 갖는다. 복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성, 비강도가 높을 뿐 아니라 감쇠특성과 충격특성이 우수하여 항공과 선박에서 많이 사용되고 있다. 그래서 오늘날에 선박 건조는 강성은 높게하고 좀 더 가벼운 선박을 만들 수 있는 복합재료에 관심이 매우 높아지고 있다. 더욱이 옛날에는 중·소형 선박 또는 레저 용에만 적용하던 것이 이제는 대형 선박에까지 적용 사례가 늘고 있어 더욱 그러하다.

또한 요즘에는 미리 조립된 Block을 접착시키는 Modular 건조기법의 개념이 도입되어 선박 건조에 적용되고 있는 실정이다. 이런 Modular 기법을 적용함은 숙련 기능공의 채용과 고 임금의 부담 및 큰 자본투자 없이도 대량 생산

의 기술개발과 생산중에 발생하는 조립오차 및 시간 지연 등을 줄일 수 있게 하는 복합재료 건조 기술을 발전시킬 수 있는 방법중의 하나이다.

금속의 경우 접착 즉, Welding, Bonding, Bolting 등에 대해 많은 연구와 논문이 나와있어 설계 기준으로서 사용되고 있다. 그러나 복합재료에 대한 접착에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 실험에서는 복합재료의 다양한 접착 형태 중 Double Lap Joint를 대상으로 FRP 인장시편을 제작하고 시편 중앙부를 컷팅한 후 그 면을 Epoxy로 접착하고 중앙 접착부에 대해서 2차 보강 접착을 하여 길이를 변수로 두어 실험을 수행하였고, 파단이 일어나면서 보강ply 전단면의 거동을 파악하였다. Single Lap joint는 하중의 비대칭성 때문에, 굽힘하중이 발생하기 때문에, Double Lap joint의 응력해석이 용이하다.

또한 이러한 인장 시편에 대해서 범용 Package Program

인 Ansys를 이용하여 FEM Simulation을 실시해 그 결과를 비교하고 경향을 분석하였다.

그러나 Hand-ray-up에 의해 제작된 FRP과 같은 복합재료는 그 거동을 예측하기란 대단히 어렵다. 그 이유는 Fiber와 Resin, 다양한 적층순서, 섬유양의 정도, 환경적 요인 등의 변수에 따라 물성치가 판이하게 다르기 때문이다. 거기에 Epoxy의 접착과 보강Ply의 2차 접착은 더욱 더 거동의 파악을 어렵게 한다.

따라서 실험결과와 Simulation 사이의 오차는 필연적이었고, 본 논문에서는 거동에 대한 경향파악과 파단면의 전단력 거동에 주안점을 가지고 접근하였다.

본 연구에서 1차 접착제인 Epoxy는 FRP 접착 강도 증가의 측면에서 영향을 끼치지 못했다는 점을 밝힌다. 이는 시편의 크기가 작아서 Epoxy 접착면적이 그리 크지 않았고 접착 단면이 Flat한 단면이기 때문에 그러하다.

그렇기 때문에 본 연구의 관심은 2차 접착 보강 ply의 길이와 파단면에서의 전단력에 있었고, 그에 대한 변화를 주안점으로 하여 시편을 제작하였다. 본 논문에서 실험 결과 파단응력은 접착면의 길이와 상관이 있음을 보였다. 다시 말해, 2차 보강 접착의 길이가 늘어남에 따라 파단응력도 증가함을 보였다.

그러나 시편의 크기가 작아 2차 보강 접착의 길이에 대한 변화를 다양하게 줄 수가 없었고, 본 실험에서도 그 길이의 차를 2Cm로 밖에 주지를 않았다. 그러므로 2차 접착 보강재의 길이에 대해 좀 더 심도 있는 연구가 필요하고, 길이와 보강형상의 다양화를 통해 2차 접착 보강재의 길이에 대해 최적 설계에 대한 연구가 진행되어야 하겠다.

2. 이 론

2.1 Lap Joint

이 타입의 접착은 형태와 방법이 무수히 많고 이론해석과 응용설계 면에서는 접착의 기본이 되지만 적절한 해석 기법에 따른 접착부위의 기하학적 형태 결정 및 접착제 선택 역시 기초적으로 중요한 부분을 차지하므로 Lap Type Joint의 이론에 대한 응용과 발전과정을 이해하는 것은 접착과정을 이해하는 데에 꼭 필요하다.

$$\tau = \frac{P}{bt} \quad (1)$$

(1)식은 ASTM D1002-72에 명시된 평균 전단 응력을 구하는 식이다. 이 식은 오랫동안 설계와 계산에서 기본이 되어 왔지만 Adams(1986)는 접착을 계산하는 과정에서

너무 많은 이상화를 시켰기 때문에 설계시에는 안전계수가 10을 넘는 경우가 대부분이라고 언급하고 있다.

Hart-Smith(1993)는 ASTM D1002의 실험에 대한 결과자료의 허점을 지적하는 데 노력했고 그 결과를 토대로 한 설계의 위험을 경고했다.

Lap Joint를 포함한 접착부위의 이론에 대한 공헌은 비록, 리벳된 평판을 대상으로 한 이론해석이었지만 Volkerson(1938)부터 시작되었고 그는 주로 접착의 편심효과를 무시한 접착제 자체의 늘어남과 접착의 전단면을 고려한 'Shear lag'에 대해서 중점적으로 조사했다.

이러한 선형 탄성적 해석은 이상화를 통하여 단순화시켰지만 접착이론에서는 기본이 되고 double lap joint에서는 더욱 잘 일치한다. Volkerson의 접착층에 분포하는 전단 응력식은 다음과 같다.

$$\tau_x = \frac{P}{b} \sqrt{\frac{G_3}{t_3} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)^{-1}} - \frac{1}{E_2 t_2} \sinh(\lambda x) + \frac{1}{E_1 t_1} + \frac{\cosh(\lambda)}{E_2 t_2} \frac{\cosh(\lambda x)}{\sinh(\lambda)}$$

$$\text{where, } \lambda = \sqrt{\frac{G_3}{t_3} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

3. 인 장 실험

3.1 재료 및 시험편

본 논문에서 사용된 F.R.P의 시편은 CM450-104 매트와 RC570-100 로빙을 수지로 경화시킨 평판을 ASTM D638 Type III에 따라 Fig 1.의 그림과 같이 시편 중앙부를 컷팅하여 Alteco사의 C-301Epoxy로 접착하였다. 수지와 경화제의 혼합비율은 중량비로 1:1로 하여 인장실험을 수행하였다. 그 컷팅부에 보강길이를 표점거리(D)의 D/3, D/2 두 종류에 두께에 대한 변화를 각각 1,2,4 Ply로 보강한 것과 보강하지 않은 것으로 나누어 시편을 제작하였다. 시편의 형상은 아래와 같다.

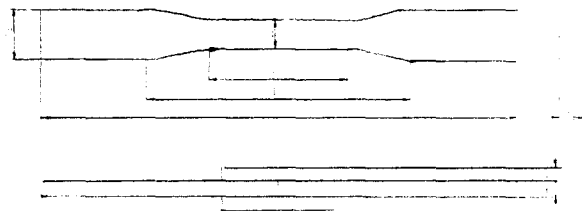


Fig. 1 인장시편

Table 1. Specimen Dimensions(mm)

Dimen	length(mm)	Tolerance
W ₀	35	± 6.4
W	20	± 3.18
G	120	± 0.25
L	140	± 0.5
L ₀	270	no max
t _a	7.5	no max
t ₀	15	no max

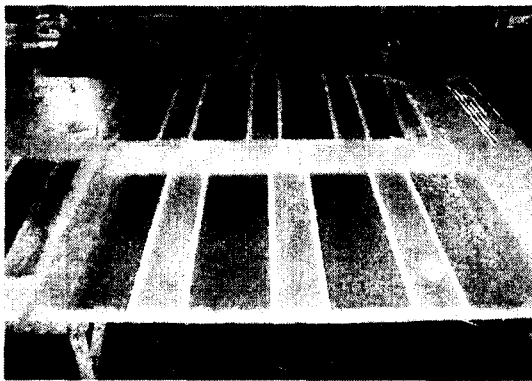


Fig. 2 시편 제작과정

3.2 물 성 치

Table 2.에 나온 물성치들은 각각의 업체에서 제공한 자료와 본 실험에서 실험과 이론식을 바탕으로 얻어진 결과를 나타낸다.

Table 2. 물 성 치

	Young's Modulus(E), N/mm ²	Density(ρ), g/mm ³	Poisson's ratio(ν)
FRP 적층판	6 E6	1.67	0.17
Epoxy	1.3 E-3	1.52	0.2

3.3 인 장 실 험

본 연구에서는 제작된 인장시편을 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Toyo Baldwin Co. Ltd.사의 제품인 UTM -10T 만능시험기에 부착하고 2mm/min의 속도로 인장시키고 시편

의 표면에 Tokyo ssoki Kenkyujo Co., Ltd. 제품인 Strain Gage 120Ω을 순간접착제(CN)를 사용하여 인장축과 직교축으로 완벽히 부착한 후 Oscilloscope (Lecroy)에 연결하여 변형률(ε)을 얻어내고, 시험기에서 파단까지의 하중을 얻었다. 시편은 종류당 각각 4개씩 실험하여 데이터 분석 Program인 Origin을 사용하여 Normalizing한 후, System에 대한 σ-ε 선도를 얻어내었다. Fig. 2 와 Fig. 3은 각각 시편제작과정과 실험 계통도를 나타내고 있다.

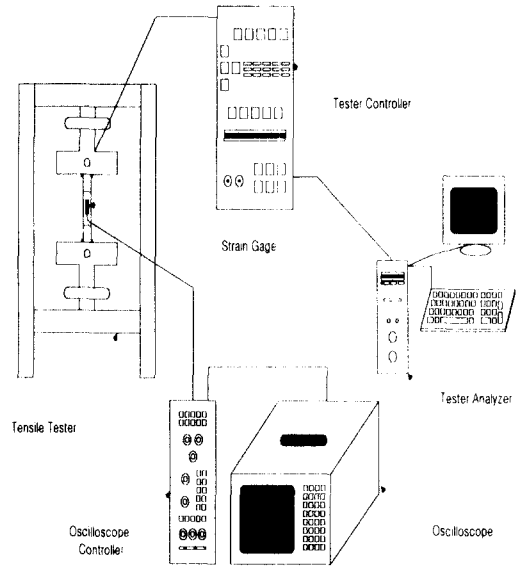


Fig. 3 실험계통도



Fig. 3 만능시험기(UTM-10T)

3.4 Weight Fraction

이론적으로 영스 모듈러스(E)값을 계산하는 방법에는 Weight Fraction과 Volume Fraction의 방법을 사용하는

데, 후자의 방법은 연소시킨 후 정확한 Volume값을 구해 내기가 난해하다. 따라서 본 논문에서는 Volume Fraction 보다는 보다 정확한 방법인 Weight Fraction을 사용하여 중량비를 구하였다. 중량비를 측정하기 위해 인장실험을 하고난 후 파괴된 시편을 Random으로 Sampling해서 각 종류별로 Ply당 5개씩 선정하여 완전히 연소시킨 다음, 이렇게 연소시킨 시편들을 1/1000g 까지 측정할 수 있는 정밀저울을 사용하여 무게를 측정한 후, 토치 랩프를 사용하여 1차 연소시킨 후, 남아있는 수지를 확인하고 이것을 다시 찢어서 남아있는 수지를 2차 연소시켜 완벽한 연소가 되도록 하였다. 이렇게 완전 연소시킨 수지를 태워서 남은 Fiber의 무게를 측정하여 연소전과 연소후의 중량비를 구하였다. Table 3은 그 결과를 보여주는 값이다.

Table 3. Weight Ratio

5ply	case1	case2	case3	case4	case5	평 균	중량비
연소전	63.465	65.296	68.385	70.747	68.249	67.628	0.405
연소후	26.201	26.621	27.742	28.943	27.269	27.355	

7ply	case1	case2	case3	case4	case5	평 균	중량비
연소전	83.963	84.603	85.166	87.469	89.542	86.149	0.420
연소후	33.963	39.690	33.383	38.288	35.559	36.177	

9ply	case1	case2	case3	case4	case5	평 균	중량비
연소전	102.76	100.85	101.01	97.948	108.73	102.26	0.396
연소후	42.140	39.353	44.036	35.802	41.372	40.544	

Fig. 5 시편연소과정

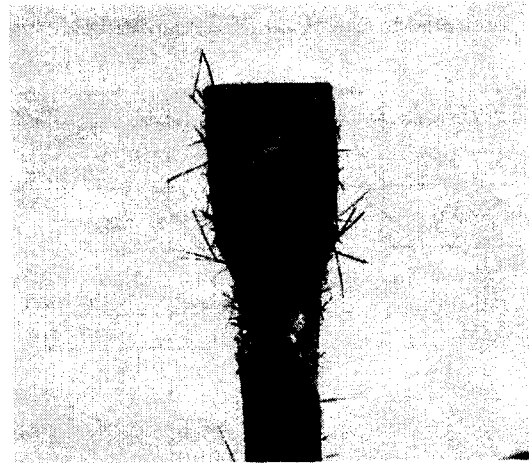


Fig. 6 연소시킨 후의 시편

4. 결 과

이번 실험을 통해 얻은 데이터를 분석 프로그램인 94tran 과 Origin을 사용하여 각각의 시편에 대한 인장실험값을 얻어내었다. 또한 FEM 범용 해석 Program인 Ansys를 이용하여 Simulation을 수행하여 실험과 비교하였다.

4.1 실험 결과

그림에서 보여주는 것과 같이 시편은 Epoxy로 접착한 부위에서 정확히 파단이 일어났다. Fig. 3은 만능시험기를 나타내고 Fig. 6는 시편의 파단 형상을 보여주고 있다.

시편과 보강Ply 사이의 면에서 뜯어지는 형상을 가지면서 일어난 파단은 그 면이 전단력에 의해 뜯어짐과 동시에 보강ply에서 파단이 일어났다.

실험을 통해 얻은 Data는 파단강도와 응력(σ)-변형률(ϵ) 선도로서 나타내었고 최대 응력과 최대 변형률은 Table 4에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 어느 일정한 응력이 작용하기 전까지는 변형률이 발생하지 않았다. 변형률이 발생한 후에도 continuous하게 진행되는 것이 아니라 일정한 하중에 도달하면 변형률이 증가하는 계단식 증가 형태를 보여주고 있음을 나타내고 있다.

Table 4. 최대응력과 최대변형률

	실험		Simulation		파단하중
	최대응력 (N/mm ²)	최대변형률	최대응력 (N/mm ²)	최대변형률	
5	201.904	0.845e-4			14133
5-1-4	109.64	0.397e-3	123.602	0.513e-4	3070
5-1-6	116.36	0.397e-3	187.729	0.750e-4	3258
5-2-4	117.38	0.396e-3	214.813	0.901e-4	6573
5-2-6	142.86	0.397e-3	269.961	0.121e-3	8000
5-4-4	101.96	0.198e-3			11420
5-4-6	128.57	0.198e-3			14400

	실험		Simulation		파단하중
	최대응력 (N/mm ²)	최대변형률	최대응력 (N/mm ²)	최대변형률	
7	215.85	0.855e-4			21163
7-1-4	123.57	0.289e-3	174.328	0.790e-4	3460
7-1-6	138.39	0.289e-3	196.042	0.886e-4	3875
7-2-4	121.88	0.132e-3	206.793	0.962e-4	6825
7-2-6	132.98	0.142e-3	216.101	0.107e-3	7447
7-4-4	133.10	0.397e-3	204.927	0.116e-3	14907
7-4-6	141.16	0.397e-3			15180

	실험		Simulation		파단하중
	최대응력 (N/mm ²)	최대변형률	최대응력 (N/mm ²)	최대변형률	
9	241.75	0.105e-3			30460
9-1-4	115.71	0.397e-3	147.03	0.711e-4	3240
9-1-6	115.54	0.397e-3	154.15	0.757e-4	3235
9-2-4	115.98	0.397e-3	166.159	0.885e-4	6495
9-2-6	134.82	0.142e-3	236.874	0.126e-3	7550
9-4-4	146.34	0.397e-3	243.443	0.137e-3	16390
9-4-6	149.92	0.146e-3	232.469	0.131e-3	16790

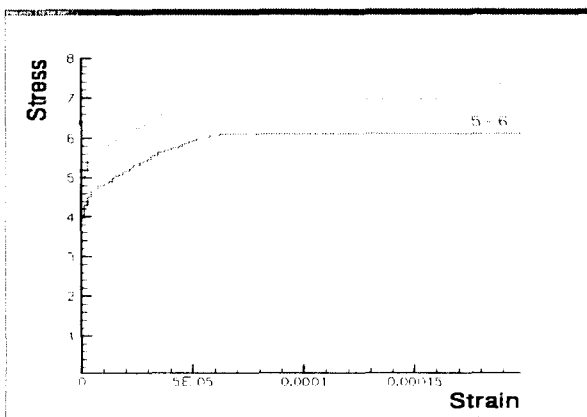


Fig. 7 5-Ply Stress-Strain Line

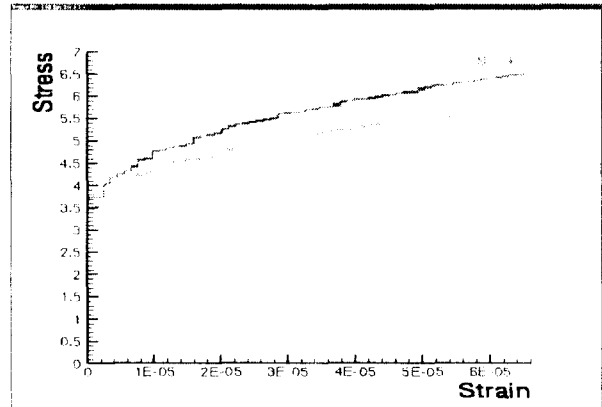


Fig. 8 9-Ply Stress-Strain Line

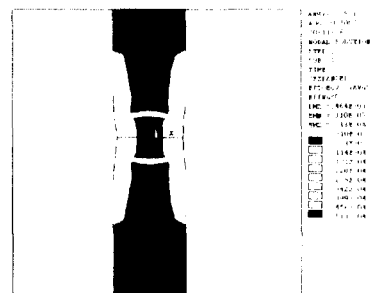
4.2 FEM simulation

Simulation에 의해 해석된 결과는 모두 유사한 응력과 변형률의 분포를 보이고 있다

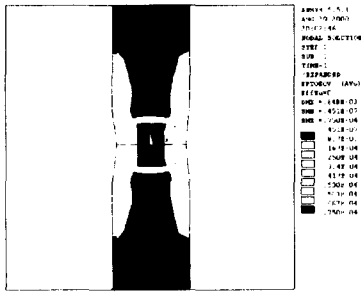
다시 말해 FRP와 Epoxy 접착면에서 최대응력이 나오고 Epoxy에서는 응력을 거의 받고 있지 않는 것으로 나온다.

그러나 FRP에서의 변형률은 거의 없으나 Epoxy부분에서 상대적으로 큰 변형률 값을 가지고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 접착에서 Epoxy는 접착면적이 작으므로 보강 Ply에 비해 강도에 대해 영향이 미미하다는 것을 보여주고 있다.

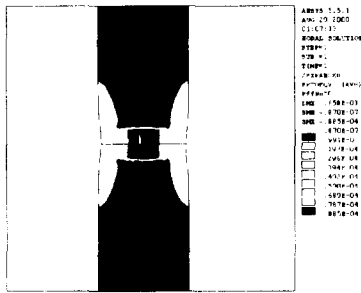
이것은 Fig. 에서 보이고 있는 것처럼 실험에서 시편의 파단 형상에서 보여주는 것과 잘 일치한다. 보강이 없는 시편은 그 하중의 크기와 변형률의 크기가 나오지를 않았기 때문에 여기서는 보여주지 않았다. 이 사실 역시 Epoxy가 접착 강도에 큰 영향을 미치지 못한다는 사실을 증명한다.



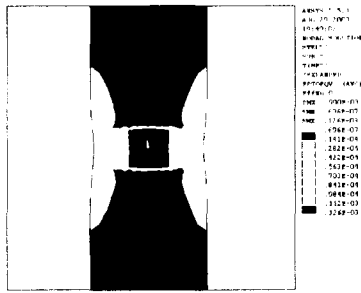
5ply-보강2ply-보강길이40cm



5ply-보강2ply-보강길이4Cm



9ply-보강2ply-보강길이4Cm



9ply-보강2ply-보강길이4Cm

5. 결 론

본 연구에서는 제작된 인장실험을 통하여 Double Lap joint와 접착제에 의한 접합의 접합특성을 주목하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

접착제의 두께가 두꺼워지면 접착제의 경화온도 2차 접착 보강 ply의 길이가 늘어남에 따라 파단 강도의 값이 증가한다는 것이다. 일반적으로 접착제는 소성역이 탄성역보다는 넓게 존재하기 때문에 접착강도의 해석은 접착제의 비선형성을 고려하여야 한다.

또한 시편 컷팅부에 1차 접착한 Epoxy는 FRP 접착 강도 증가의 측면에서 영향을 끼치지 못했다. 이는 시편의 크기가 작았을 뿐 아니라 Epoxy 접착면적이 크지 않았고 접착 단면이 Flat한 단면이기 때문에 더욱 그러하였다.

따라서 본 연구의 관심은 2차 접착 보강 ply의 길이의 변화와 2차 접착면의 강도와 응력에 있었고 그에 대한 변화

를 주안점으로 시편을 제작하였다.

본 연구에서 얻은 가장 큰 결과는 2차 보강 접착의 길이가 증가함에 따라 파단 강도 값이 크게 증가하였다는 점이다.

그러나, 시편의 크기가 작아 2차 보강 접착의 길이에 대한 변화를 다양하게 줄 수가 없었고, 본 연구에서도 그 길이차가 2Cm 밖에 나지를 않았다. 그러므로 2차 접착 보강재의 길이에 대해 다양한 경우에 대한 연구가 필요하고, 2차 접착 보강재의 형상에 대한 최적 설계의 연구가 진행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1]. CROCOMBE, A.D. and ADAMS, R.D., (1981), Peel Analysis Using the Finite
- [2]. Element method, Journal of Adhesion, Vol. 12, p. 127-13
- [3]. ERDOGAN, F. and Ratwani, M., (1971), Stress Distribution in Bonded Joint, Journal of Composite Material, July, Vol. 5, No. 3, p. 378-393
- [4]. Liyong Tong, Grant p. Steven Analysis and Design of Structural Bonded Joints
- [5]. Gibbs & Cox Inc. Marine Design Manual for Fiberglass Reinforced Plastics MacGraw-Hill, 1960.
- [6]. Structural Properties of Laminated Douglas Fir/Epoxy Composite Material
- [7]. James M. Whitney, Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials, The Society of Experimental Mechanics, 1984
- [8]. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D 638 - 98
- [9] 탄소섬유 에폭시 복합재료의 제조 및 집합에 관한 연구 1994 한국 과학기술원