[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 5, No. 8 (1995)

적층형 복합재료에서 Unit Ply의 두께가 기계적 성질에 미치는 영향

문 창 권
부산수산대학교 재료공학과

Influence of Layer Thickness on the Mechanical Properties in the Laminated Composites

C. K. Moon
Department of Materials Science and Engineering, National Fisheries University. Pusan 608-737, Korea

초 록 탄소섬유와 epoxy 수지의 prepreg로 성형된 cross형 적층판 복합재료에서 unit ply의 두께가 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향과, unidirectional prepreg 및 fabric prepreg로된 적층판의 기계적 성질의 차이를 비교 검토하였다. 그 결과 unit ply의 두께가 두꺼울수록 면내전단강도는 작아졌으며, 면내전단강도가 작아질수록 층간박리 현상이 현저하게 나타났다. 또 적당한 층간박리의 발생은 파괴인성치와 충격치를 증가시키지만 심한 층간박리는 오히려 그 값들을 감소시켰다. 그리고 unidirectional prepreg로 성형된 적층판이 fabric prepreg로 성형된 적층판보다 인장강도, 파괴인성치, 파괴일 및 충격치 등의 기계적 성질이 우수했다.

Abstract This study has been investigated the influence of layer thickness on the mechanical properties of cross laminated carbon fiber/epoxy composites. And also the difference of mechanical properties between cross laminated composites of unidirectional prepreg and fabric prepreg has been investigated. Experimental results are showed that the Interlamina Shear Strength(ILSS) of cross laminated carbon fiber/epoxy composites decreased with increasing thickness of unit ply and the degree of delamination in the laminated composites increased as ILSS decreased. Fracture toughness and impact values were found to increase as delamination occurs to some extent in the laminated composites. It is also shown that mechanical properties of cross laminates from unidirectional prepreg were better than those of cross laminates from fabric prepreg.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 경량, 고강도의 특징을 가지며 내식성, 성형성 및 비탄성률이 뛰어나 우주 항공산업을 비롯한 여러분야에서의 구조용 재료로서 사용되고 있다. 그러나 섬유강화 복합재료는 파괴 메카니즘이 매우 복잡하고 아직 재료물성에 대한 기초자료가 충분하지 못하여 우주, 항공 등의 높은 신뢰성을 요구하는 구조용 재료에서의 사용에는 많은 제약을 받고 있다. 이와같은 점에서 이방성 및 비균질성인 복합재료의 파괴특성과 물성개선에 관한 연구[1~4]가 많은 연구자들에 의해 활발하게 연구되어 왔다.

섬유강화 복합재료에서 물성에 영향을 미치는 인자로는 섬유와 matrix 수지의 종류[5~7], 섬유의 길이[7~10], 섬유의 방향[9~12] 및 섬유와 matrix 수지 간의 계면전단강도[13~18]등이 있다. 현재 이들 중에서 섬유와 matrix 수지 간의 계면전단강도에 대한 관심이 고조되고 있으며, 특히 계면전단강도의 평가방법[19~21] 및 계면전단강도가 복합재료의 최종물성과 환경에 대한 내구성[22~24]에 미치는 영향을 검토하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

그리고 prepreg로 제작되는 적층판형 복합재료에서의 기계적 성질에 미치는 인자로는 적층시의 섬유의 방향[6, 25~27], 적층판의 두께[28, 29], 및 적층순서[27, 30] 등이 있으며, 이에 관해서는 많은 연구의 논문이 보고되고 있다. 그러나 적층판에서 unit ply의 두께가 적층판의 기계적

Table 1. Laminates Configurations.

Type	Fiber	Laminate Sequence	Fiber Volume Fraction(%)
A	carbon	$[0/90]_{6S}$	54.0±0.6
B	carbon	$[0_2/90_2]_{3S}$	52.8±1.0
C	carbon	$[0_3/90_3]_{2S}$	53.3±0.9
D	carbon	fabric	53.6±1.3
E	glass	fabric	34.8±0.8

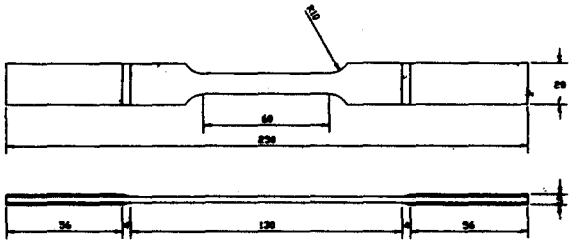

Fig. 1. Shape and dimension of tensile test specimen (㎜).

성질에 미치는 영향에 대한 연구보고는 거의 없는 실정이다.

그래서 본 연구에서는 탄소섬유와 epoxy 수지로 성형된 prepreg를 이용하여 unit ply 수가 다른 corss laminates를 제작하여, cross 적층형 복합재료에서 unit ply thickness가 기계적 성질에 미치는 영향을 검토했다. 그리고 fabric과 unidirection의 prepreg로 제작된 적층판의 기계적 성질도 비교 검토하였다.

2. 실 험 방 법

적층판 성형

본 연구에 사용된 재료는 강화섬유로서 Torey(주) 제품인 T300의 탄소섬유(ρ=1.8 g/㎤)와 matrix로는 epoxy 수지를 사용하여 한국 화이바(주)에서 제작된 prpreg를 사용하였으며, unidirectional prepreg의 두께는 0.15 ㎜, fabric prepreg의 두께는 0.25㎜였다. 참고로 한국화이바(주)에서 만든 E-glass fiber/epoxy수지의 0.3㎜의 fabric prepreg도 사용하였다.

Fabric으로된 prepreg는 모든 섬유가 0/90 방향이 되도록 적층을 실시하였고, 일방향 prepreg는 0/90도 방향으로 같은 방향의 prepreg의 적층수를 다르게 하여 unit ply의 두께가 다른 세 종류의 적층판을 적층했으며, coupling 효과를 없애기 위해 적층판의 중앙면에 대해 대칭이 되게 적층을 실시하였다. 적층판의 종류와 섬유의 체적함유율은 Table 1에 나타내었으며(이하 A, B, C, E type이라 칭한다)

성형 후에 각 적층판의 unit ply의 평균두께는 차례대로 0.133, 0.270, 0.540, 0.25, 0.28㎜였다. 섬유 체적함유율의 결정은 가스버너를 이용한 연소법을 사용하였으며, 0.5~1.0 g 정도의 시험편을 5개씩 각 종류의 적층판으로 부터 채취하여 니크롬선으로 묶어서 핀셋으로 고정하여, 가스버너의 환원불꽃으로 수지 만을 열분해한 후, 섬유의 무게를 정밀 balance로 측정하여 섬유의 체적함유율을 구하였다. 적층판의 제작은 Hand Lay-up법을 사용하였으며, prepreg를 한장 씩 둥근 유리병으로 적당하게 압력을 가하면서 적층하여 silicone oil의 이형제(mold release agent)가 칠하여진 금형에 넣은 후, 기공의 제거를 위해 상온의 진공 오븐에서 30분을 유지시켰다. 그리고 열프레스에서 130℃, 1kgf/㎠으로 10분간 유지 후 5kgf/㎠으로 압력을 올려 130℃, 60분간 유지시켜 250×250㎜의 크기에 두께가 3.2㎜ 정도의 적층판을 제작하였다.

시험편 제작

제작된 적층판을 1㎜ 두께의 다이아몬드 휠을 이용하여 여러 종류의 시험편 형상으로 절단하였으며, 인장 시험편의 경우는 연마기를 사용하여 dog-bone 형으로 가공했다. 그리고 Compact Tension(C T)시험편의 경우에 구멍의 가공을 위해 초경 합금의 특수 드릴을 사용하였다. C T 및 충격 시험편의 노치는 두께 0.2㎜의 소형의 다이아몬드 휠을 이용하여 가공하였다.

시험 및 방법

인장 시험편은 dog-bone형으로 가공된 시험편의 양단에 60×20×1㎜의 알루미늄판을 에폭시 접착제로 부착시켰으며, 시험편은 각 type당 7개를 제작하였다. 인장시험은 Instron (5 ton)에서 cross head speed는 2㎜/min로 실온에서 행하였으며, 시험편의 규격은 Fig. 1과 같다.

Compact tension 시험편은 각 type당 5개의 시험편을 Fig. 2와 같이 제작하였으며, 시험조건은 인장 시험과 동일하게 하였다. 그리고 파괴인성치의 계산은 다음과 같은 식[31]을 사용하였다.

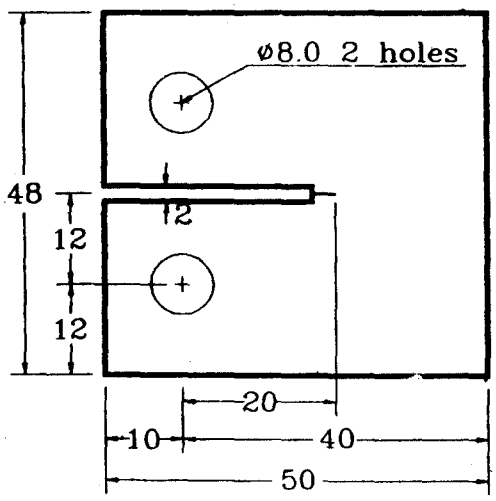

Fig. 2. Shape and dimension of C T specimen(㎜).

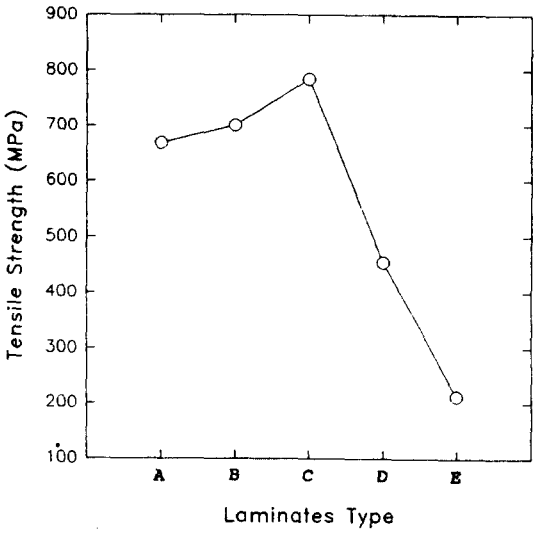

Fig. 3. Relationship between tensile strength and each type laminates.

$$K_Q=\frac{P_Q}{B\cdot w^{\frac{1}{2}}}\cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \qquad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right)=\frac{(2+a/w)\cdot[0.886+4.64(a/w)-13.32(a/w)^2+14.72(a/w)^3-5.6(a/w)^4]}{(1-a/w)^{\frac{3}{2}}}$$

(1)식에서 P_Q는 하중, B는 시험편의 두께, w는 시험편의 넓이, a는 노치의 길이를 나타낸다. 그리고 본 실험에 사용된 시험편은 w=40㎜, a=20㎜였으며, 시험편의 두께는 각 type마다 미소한 차이는 있지만 대부분이 3.2mm 정도였다.

파괴인성치(K_C)는 하중-변위 곡선에서 최대 하중까지 선형일 경우는 최대하중을 사용하였으며, 비선형일 경우에는 초기 기울기각 θ에 대해 0.95θ의 사선을 그어 그 사선과 만나는 곡선의 하중(P_i)을 (1)식에 대입하여 구하였으며, 두 경우의 외에 first pop-in이 전술한 두 경우의 하중보다 낮게 나타날 때는 그 하중(P_i)을 사용하여 파괴인성치를 구하였다. 그리고 최대 하중을 이용하여 K_m 값도 구하였으며, 하중-변위 선도에서 면적계를 이용하여 구한 에너지를 단면적으로 나누어 단위면적당의 파괴일도 구하였다.

충격시험은 각 type당 6개의 시험편을 Charpy 충격 시험기를 이용하여 행하였으며, 헤드중량(W)=22.4kg, 회전축의 길이(R)=750㎜, 최초각(α)=30° 상태에서 실험하였다. 그리고 시험편의 치수는 60×20×3.2㎜이며 중앙에 4㎜ 깊이의 예리한 노치를 가공하였다.

ILSS(InterLamina Shear Strength)시험은 각 type당 8개의 시험편을 Instron의 압축 공구를 이용하여 전단파단이 일어나도록 span의 길이를 시험편 두께의 5배가 되도록 하여 3점 굽힘시험을 하였다. 시험편의 치수는 25×10×3.2㎜였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 각 type의 적층판과 인장강도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 인장강도는 unidirectional prepreg의 적층판으로된 A, B, C type이 fabric prepreg의 적층판인 D type보다 크게 나타났으며, A, B. C type 중에는 unit ply의 두께가 가장 큰 C type이 최고의 값을 나타냈다. 그리고 fabric prepreg의 적층판 중에서는 탄소섬유로된 적층판의 인장강도가 유리섬유로된 적층판의 인장강도 보다 크게 나타났다. D type이 A, B, C type 보다 인장강도가 작게 나타난 것은 unidirectional

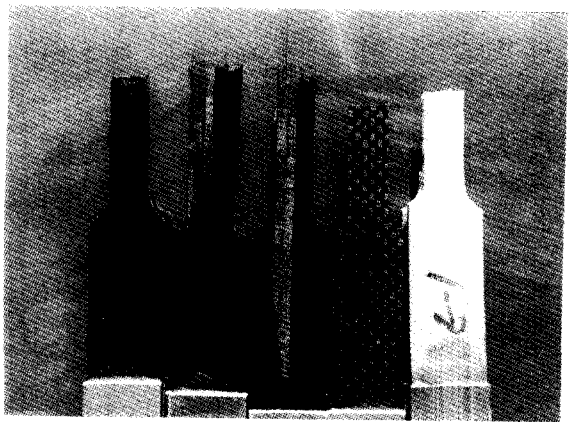

Fig. 4. Fracture shape of each type laminates after tensile test.

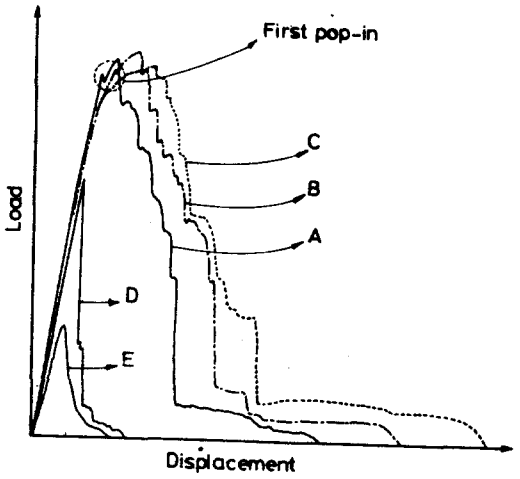

Fig. 5. Load-displacement traces of each type laminates obtained from C T test.

prepreg와 fabric prepreg의 형상의 차이에 기인하며, 그것은 섬유방향(fiber orientation)의 차이라고 생각된다. 즉 fabric prepreg로된 적층판에서 섬유의 방향은 하중의 방향과 정확하게 일치하지 않고 조금 경사각을 이루고 있으므로 전단응력의 발생을 초래하며, 하중방향과 일치하는 섬유에 비해서 인장강도가 작은 것[32]이라고 생각된다. 그리고 복합측($\sigma_C = \sigma_{fu}V_f + \sigma_m V_m$)에서 matrix 수지의 기여부분은 섬유에 비해서 아주 작으므로 무시하고, 섬유의 인장강도(σ_{fu})를 300kgf/㎟로 계산하면 A type은 793.8 MPa, B type은 776.1 MPa, C type은 783.0 MPa이였다. 이 값과 Fig. 3의 실험치와 비교하면 A, B type은 실험치가 이론치 보다 실제로 작은 값이며, C type은 실험치와 이론치가 거의 같은 값을 보이고 있다. Table 1에서 섬유의 체적함유율 V_f는 A, B, C type이 거의 같은데도 인장강도가 다르게 나타난 것은 cross형 적층판에서 unit ply의 두께가 인장강도에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 그리고 비록 시험편 전체의 두께는 다르지만 $[0/90/0/90/0/90]_s$와 $[0_3/90_3]_s$의 탄소섬유/epoxy계의 적층판에 대한 저자의 앞서의 연구[33]에서도 본 연구와 같이 unit ply의 두께가 큰 적층판의 경우가 인장강도가 큰 결과를 얻었다.

Fig. 4는 인장파괴 후 각 type 적층판의 파단면을 나타낸 사진으로 좌로 부터 A, B, C 관찰해 보면 A, D, E의 경우 표면층 혹은 내부층에서 크랙이 발생하여, 그 크랙이 거의 직선적으로 전파하여 파괴가 일어난 것을 알 수가 있으며, 비교적 깨끗한 파단면을 보이고 있다. B type 역시 표면층 혹은 내부층에서 크랙이 발생했지만, 그 크랙이 곧바로 전파하여 파괴에 이르지 않고, 층간박리(delamination) 등의 현상을 동반하여 파단면은 A, D, E에 비해 매끈하지 않음을 알 수 있다. 그러나 C type는 크랙의 발생 후, 표면층 뿐만아니라 내부층에 까지 많은 층간박리를 일으키고 나서 파단된 것으로 추측되며, 파단면은 빗자루 모양을 하고 있는 것을 알 수가 있다. 그림에서 A, B, C type을 비교하여 보면, unit ply 두께가 클수록 표면에 delamination이 많이 발생하고 파단면이 직선적이 아닌 것으로 부터 crack 발생 후 외력에 대하여 많은 저항을 했음을 추측할 수 있으며, B, C type은 A type에서 볼 수 없는 delamination이 일어났으며 C type에서는 B type 보다 더 심하게 delamination이 발생되었다. 이 발생된 delamination으로 관측해 볼 때, A 보다 B, B 보다 C type에서 같은 외력의 작용시에 면내층간전단응력의 발생이 크게 나타난 것을 짐작할 수 있다. 그리고 이 면내층간전단응력으로 발생한 층간박리현상은 적층판의 인장강도에 많은 영향을 준다고 생각된다. 적층판 복합재료에서 delamination의 발생은 재료강도

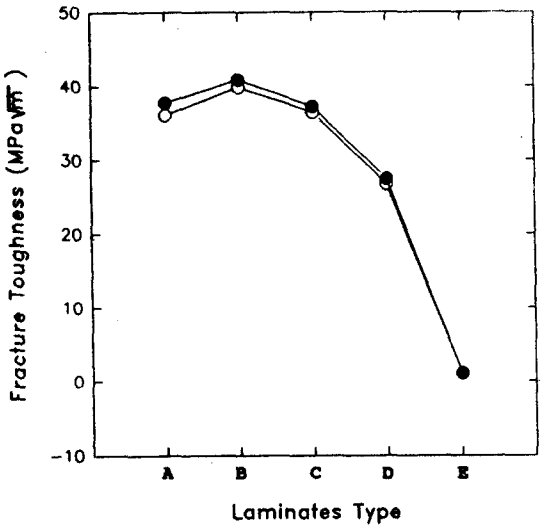

Fig. 6. Fracture toughness versus each type laminates.

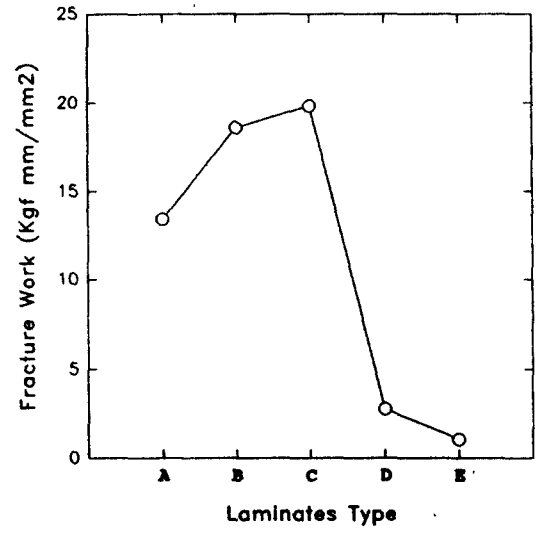

Fig. 7. Fracture work versus each type laminates.

고 있지만, 본 연구에서는 층간전단응력 때문에 발생한 delamination이 크랙의 선단을 무디게 하므로서 C type의 인장강도가 약간 증가되었다고 생각된다.

Fig. 5는 각 type C T 시험편의 대표적인 하중-변위곡선을 나타낸 것으로, 이 선도로 부터 파괴인성치와 파괴일을 구하였다. 그림에서 A type은 최대하중 이하의 거의 linear 상태에서 first pop-in이 발생했으며, B type은 최대하중 이하의 비선형 상태에서, C type은 비선형 상태의 최대하중에서 first pop-in이 발생하였다. 그리고 D, E type은 A, B, C type에 비해서 낮은 파괴하중과 적은 변위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하중-변위곡선에서 특히 C type은 비선형 부분을 많이 보이고 있는데, 이는 전술한 바와 같이 층간에 발생된 큰 전단응력으로 인한 전단변형의 발생에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 6은 각 type 적층판의 파괴인성치를 나타낸 것으로, ○는 K_c를 나타내고, ●는 최대하중을 사용하여 (1)식에 의해 계산된 K_m 값을 나타내고 있으며, 두 값은 거의 같은 경향을 보이고 있다. 그림에서 파괴인성치 K_c는 인장시험의 결과와 비슷하게 A, B, C type에 비해 D type은 작게 나타났다. A, B, C type에서 A, C type은 거의 동일한 값을 나타내며, B type은 A, C type보다 약간 큰 값을 나타내고 있다. E type은 D type에 비해 너무 적은 값임을 알 수 있으며, Table 1에서 알 수 있듯이, 두 종류는 섬유의 체적함유율에 차이가 있고, 또 인장강도도 차이가 있지만, 비록 그 두 차이를 고려하더라도 E type은 너무 작은 값이다. 이것은 fabric prepreg로 성형된 적층형 복합재료에서 유리섬유는 탄소섬유에 비해 낮은 파괴인성치를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 type 적층판에서 파괴일의 크기를 나타낸 것으로 C T시험의 하중-변위 곡선으로 부터 구한 것이다. 그림에서 D, E type에 비해 A, B, C type의 파괴일이 매우 큰 것을 알 수 있으며, A, B, C type에서도 unit ply의 두께가 클수록 파괴일이 크게 나타나 있는 것을 알 수가 있다. 이것은 unit ply의 두께가 C T 시험으로 얻은 파괴일에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 각 type 적층판의 C T 시험편의 파단면을 나타낸 사진이다. 그림에서 D와 E type은 crack이 발생한 후에 거의 직선적으로 crack이 전파된 것을 알 수 있으며, A, B, C type은 표면층이 delamination된 것을 알 수 있고, A 보다 B, B 보다 C type이 crack의 전파에 대한 많은 저항을 한 것임을 추측할 수 있다. Fig. 6, 7, 8에서 적층형 복합합재료의 파괴인성치와 파괴일의 크기는 층간박리(delamination)현상과 큰 관계가 있음을 알 수 있으며, 이 층간박리의 크기 정도는 적층판

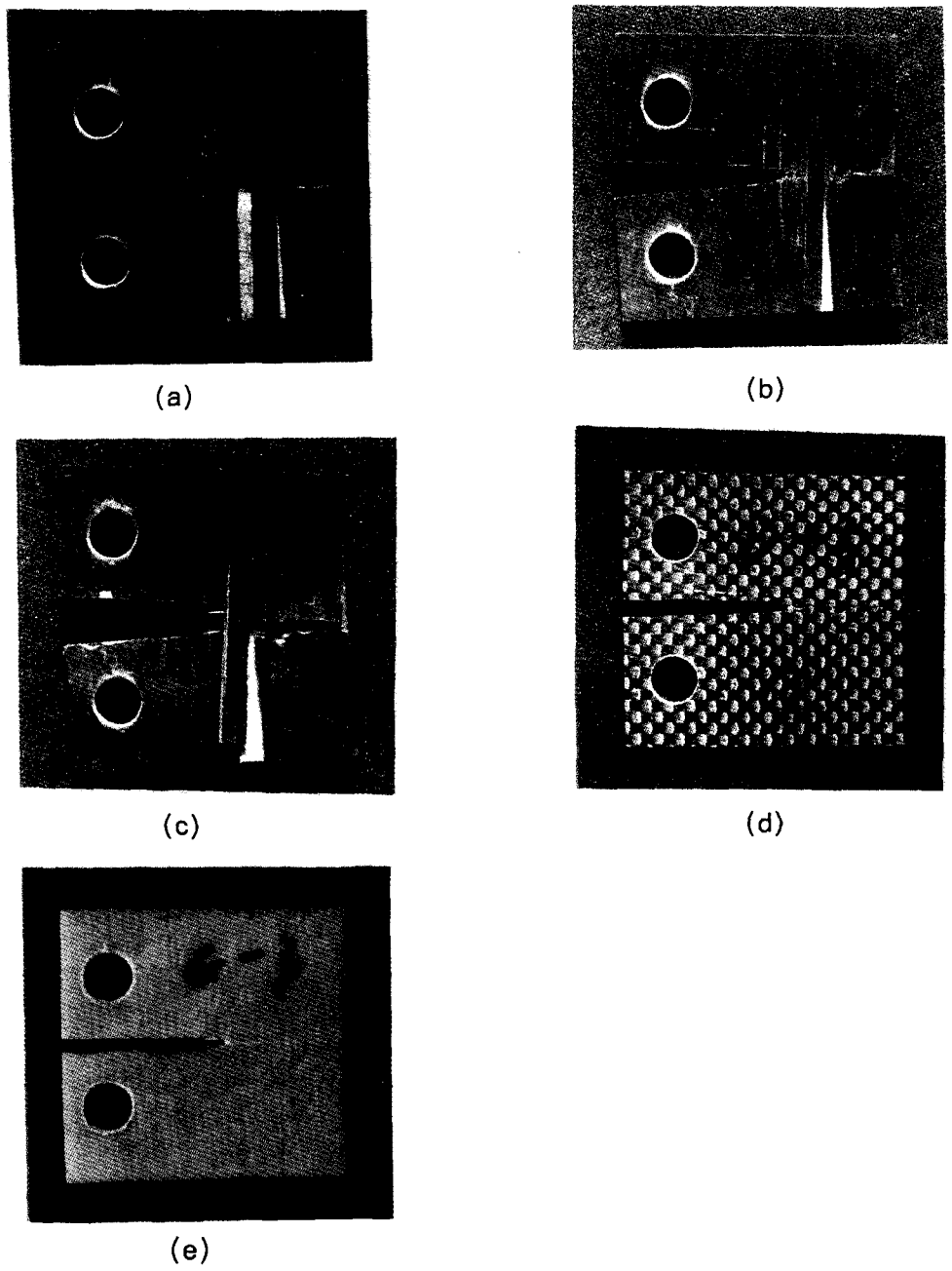

Fig. 8. Photographs of crack propagated shape after C T tset. (a) A type (b) B type (c) C type (d) D type (e) E type

의 unit ply의 두께가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수가 있다. Fig. 6에서 어느 정도의 층간박리는 crack 선단을 무디게 하여 크랙의 전파를 방해하여 파괴인성치를 증가시켰지만, 너무 심한 층간박리는 오히려 파괴인성치를 감소시키는 결과를 보였다. 그리고 Fig. 7, 8에서는 파괴일에 영향을 미치는 층간박리현상은 층간박리가 심할수록 층간박리 후, 각 ply들의 pull-out으로 인하여 오히려 파괴일을 증가시키는 결과를 나타내었다. 즉, A, B type은 비록 표면층이 박리되어도 crack은 거의 직선적으로 전파했지만, C type의 파괴양상은 층

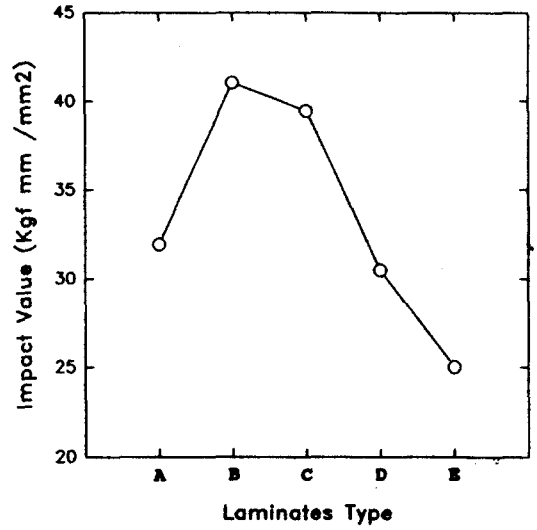

Fig. 9. Relationship between impact value and each type laminates.

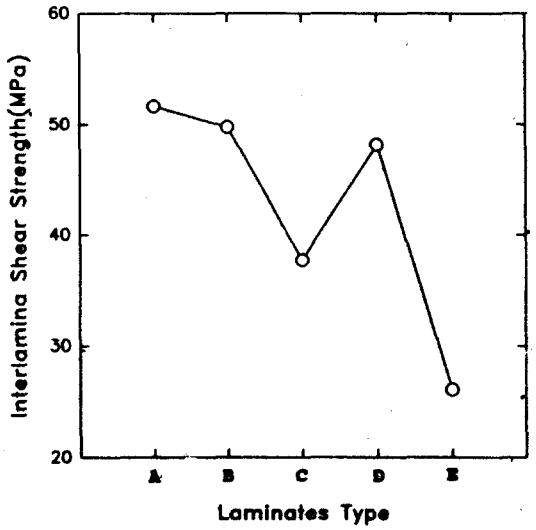

Fig. 10. Interlamina shear strength versus each type laminates.

간박리가 표면층 뿐만 아니라 내부층에서도 일어나, 적층판형이 아닌 섬유강화 복합재료에서 섬유가 pull-out되어 파괴일을 증가시키는 것처럼, 층간박리된 unit ply들이 pull-out되어 파괴일을 증가시키고 있는 것을 보여주고 있다. 그리고 D type의 fabric prepreg로된 적층판은 unidirectional prepreg로된 적층판과는 다르게 delamination현상이 나타나지 않고 있으며 파괴일은 매우 적다. 이것은 적층판형 복합재료에서 delamination현상이 적층판의 파괴시에 각 ply들의 pull-out을 유발시켜 파괴일을 증가시키는 것을 나타낸다.

Fig. 9는 각 type의 적층판의 충격치를 나타내고 있으며, Fig. 6의 파괴인성치와 비슷한 경향을 나타내고 있지만 크기의 경향은 매우 다르게 나타나 있다. A, B, C type에서 A type보다 B, C type의 경우가 훨씬 큰 충격치를 나타내고 있으며, B type이 C type 보다 큰 충격치를 보이고 있다. 이것이 파괴인성치의 경향과 다른 것이다. A, D type과 B, C type이 비슷한 충격치를 나타내고 있으며 E type은 매우 작은 충격치를 나타내고 있다.

Fig. 10은 각 type 시험편의 ILSS(Interlamina Shear Strength) 값을 나타낸 것으로, A, B, D type의 값이 비슷하고 C type이 낮은 값을 나타내고 있다. unidirectional prepreg로 제작된 적층판인 A, B, C type을 비교하여 보면, unit ply의 두께가 클수록 면내전단강도는 작게 나타나 있음을 알 수 있는데, 이것은 적층판에서 unit ply의 두께가 ILSS의 크기에 지대한 영향을 미친다는 것을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 11을 보면 알 수 있을 것이다. Fig. 11은 비록 cross laminates가 아니고 angle ply로 된 laminates이지만 unit ply의 두께가 크면, 같은 외력에 대하여 unit ply의 두께가 작은 것에 비하여 면내전단응력이 크게 발생되며, 결국 unit ply의 두께가 크면 작은 것에 비해 면내전단강도가 작게 된다는 것을 잘 나타내고 있다.[33]

적층판형 복합재료에서 면내전단강도가 크면 인장강도는 크게 되지만 Fig. 3과 Fig. 10을 비교하면 오히려 반대되는 경향을 보이고 있다. 이것은 면내전단강도가 너무 크면 취성에 약하여 오히려 인장강도를 저하시킬 수도 있다는 것을 나타내며, C type의 면내전단강도는 37.72 MPa로 탄소섬유/epoxy계 복합재료에서는 결코 작은 값이 아니고 보통 크기의 값이다. 섬유강화 복합재료에서 파괴인성치 K_c와 계면전단강도의 관계는 계면전단강도가 너무 크면 크랙전파에 대한 저항성이 약하여 파괴인성치는 작아지고, 계면전단강도가 너무 작아도 파괴인성치는 저하한다.[33] Fig. 6과 Fig. 10에서 층간전단강도가 적당한 값일 때 파괴인성치는 최대를 보이고 있다. 섬유강화복합재료에서 파괴일의 구성성분은 fiber debonding

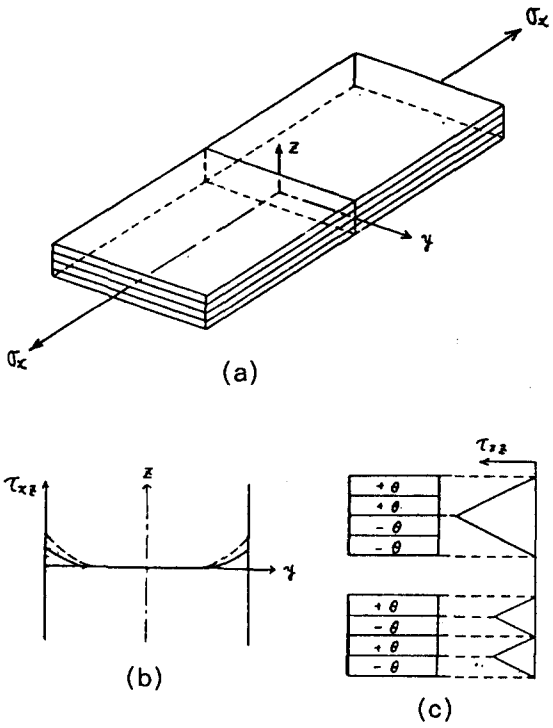

Fig. 11. Distribution situation of interlamina shear stress under tensile load in the laminates. (a) laminates under tensile stress (b) Distribution situation of interlamina shear stress at the free edge (c) Variation of interlamina shear stress by the thickness of unit ply

의 일, fiber 파괴일, matrix 수지 파괴일, 섬유의 pull-out 일 등이 있으며, 이들 중에서 pull-out 일이 가장 크다고 알려져 있다.[1] 이 pull-out 일은 계면전단강도가 크지도 작지도 않은 적당한 값일 때 최대가 되며, Harris 등은[13] 섬유강화 복합재료에서 계면전단강도가 13~15 MPa일 때가 파괴일이 최대가 된다고 보고하고 있다. Fig. 7과 Fig. 10에서 A, B, C type 중 층간전단강도가 적을수록 파괴일은 크게 되어 있는 것을 알 수 있으며, 층간전단강도가 가장 적은 C type은 37.72 MPa로 전술한 Harris 등이 보고한 크기와 비교하면 매우 큰 값이다. 그리고 층간전단강도가 작을수록 파괴일이 크게 나타났는데, 이것은 섬유 한가닥 씩의 pull-out 보다는 각 ply들이 delamination 후에 pull-out되기 때문이라고 생각된다. Fig. 9와 Fig. 10에서의 충격치 역시 층간전단강도에 민감한 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 충격치를 크게하기 위해서는 적당한 층간전단강도가 필요한 것도 알 수 있다.

이상을 종합하여 보면 결국 cross형 적층판 복합재료에서 unit ply의 두께가 같은 외력에 대하여 면내에 발생하는 전단응력의 크기를 변화시키고, 그것이 결국 면내전단강도에 크게 영향을 미치며, 이 면내전단강도의 크기에 의해 delamination 현상의 차이가 발생하여 적층형 복합재료의 인장강도, 파괴인성치, 파괴일 및 충격치와 같은 기계적 성질이 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그리고 cross형 적층판에서 면내전단강도는 요구되는 재료의 최종물성에 따라 적당한 크기가 존재하며, 실제로 적층판의 기계적 성질은 unit ply의 두께로도 어느 정도 제어가 가능할 수 있는 것을 나타낸다.

4. 결 론

Cross 적층형 복합재료에서 unit ply의 두께가 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향과, unidirectional prepreg와 fabric prepreg로된 적층판의 기계적 성질에 대한 차이점을 비교 검토하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) unidirectional prepreg로된 적층판의 기계적 성질은 fabric prepreg로된 적층판의 기계적 성질 보다 우수하였다.

2) unidirectional prepreg로된 cross형 적층판에서 unit ply의 두께가 클수록 면내전단강도가 작아졌으며, 그것으로 인하여 층간박리현상이 현저하게 나타났다.

3) 층간박리현상은 파괴에너지의 일부를 흡수하여 crack의 전파를 무디게하므로, 적당하게 발생될 때는 파괴인성치와 충격치 등을 증가시키지만 현저한 층간박리현상은 오히려 이들의 값을 저하시켰다.

4) cross형 적층판에서의 층간박리현상은 각 ply들의 pull-out을 유발시킴으로써 파괴일을 증가시켰다.

참 고 문 헌

1. G.A. Cooper, J. Mater. Sci., 5. 645 (1970)
2. J.M. Slepetz and L .Carlson, ASTM STP 503, 143 (1975)
3. A.C. Roulin-Moloney et al, Polymer Composites, 8, 314 (1987)

4. R.A. Pearson and A.F Yee, J. Mater. Sci., 26, 3828 (1991)
5. C.D. Ellis and B. Harris, J. Composite. Mater., 7. 76 (1973)
6. B. Harris, S.E. Dorey and R.G. Cooke, Composites Sci., Tech., 31, 121 (1988)
7. M. Minoru et al, J. Appl. Polymer Sci., 25, 795 (1980)
8. P. Hancock and R.C Cuthberson, J. Mater. Sci., 5, 762 (1970)
9. H. Fukuda and T.W. Chow, J. Mater. Sci., 17, 1003 (1982)
10. Z. Pawel and K. Hakan, Composites Sci., Tech., 27, 291 (1986)
11. T. Minoru and T.W. Chow, J. Mater. Sci., 17, 2081 (1982)
12. R.K. Mittal and V.B Gupta, J. Mater. Sci., 17, 3179 (1982)
13. B. Harris. P.W.R. Beaumont and E. Moncunill de Ferran J. Mater. Sci., 6, 238 (1971)
14. C.K. Moon et al, J. Apl. .Polym. Sci., 45, 443 (1992)
15. C.K. Moon, J. Appl. Polym. Sci., 54, 73 (1994)
16. B. Tissington and G. Poliard, J. Mater Sci., 26, 82 (1991)
17. J.K. Kim and Y.W. Mai. J. Mater Sci., 26, 4702 (1991)
18. H.M. Chou, M.W. Barsoum and M.J. Koczak, J. Mater. Sci., 26, 1216 (1991)
19. W. Saches, Mater. Sci., Eng., A126, 133 (1990)
20. L.T. Drzal, Mater. Sci., Eng., A126, 289 (1990)
21. B. Miller et al, Composite Sci., Tech., 28, 17 (1987)
22. G.B. Lowe et al, INT, J. Adhesion and Adhesive, 14, 85 (1994)
23. H.D. Wagner and A. Lustiger, Composites, 25, 617(1994)
24. C.L. Schutte et al, Composite, 25, 617 (1994)
25. P.A. Lagace, AIAA Journal 23, 1583 (1985)
26. D.C. Agrawal, Polymer Composites 6, 29 (1985)
27. C.T. Herakovinch, J. Composite Mater., 16, 216 (1982)
28. C.E. Harris and D.H. Morris ASTM STP 905, 124 (1986)
29. C.E. Harris and D.H. Morris ASTM STP 893, 177 (1986)
30. G.P. Senseckyj, M.D. Rickardson and J.E. Pappas ASTM STP 580, 528
31. ASTM E399-83
32. P.A. Lagace, AIAA Journal, 23,1583 (1985)
33. C.K. Moon, Ph. D Thesis, Tokyo Institute Technology, Tokyo. (1989)