

Angle-Ply Carbon/Nylon6 적층 열가소성 복합재료의 인장 및 층간파괴 특성에 관한 연구

이덕래, 김학용, 서민강, 박수진*

전북대학교 섬유공학과(공업기술연구소), *한국화학연구소 화학소재연구부

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 매트릭스의 성질에 따라 열경화성 섬유강화 복합재료와 열가소성 섬유강화 복합재료가 있다. 열경화성 섬유강화 복합재료는 파괴에 대한 영구변형이 작고, 취성(brittleness)이 크며, 경화사이클이 길고 수분 흡수성이 높으며 성형작업과 재생형이 어려운 단점이 있으며, 물리적, 화학적인 제한 때문에 고성능 복합재료의 제조에 어려움이 있다. 이와 같은 문제점들을 극복하기 위하여 개발된 것이 열가소성 수지를 사용한 섬유강화 열가소성 복합재료이다[1-3]. 한편 섬유강화 열가소성 복합재료에 사용되는 고분자들은 내충격성이 우수하고, 크랙 전파에 대한 저항이 우수하나 점도가 높기 때문에 용융함침(melt impregnation)이 어려워 이의 개선을 위한 여러 방법들이 제안되고 있다[4]. 본 연구에서는, 이러한 개선 방법의 하나로 우선적으로 열가소성 복합재료의 기계적 물성 및 이의 계면 특성에 관하여 논의 하고자 한다. Angle-ply와 냉각조건에 따른 역학적 거동과 계면강도의 검토를 위하여 금속현미경에 의한 단면 및 측면, SEM 사진을 관찰하였으며, 연소법에 의한 void양, DSC를 이용한 결정화도와 편광현미경을 사용하여 결정, 비결정 영역을 관찰하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 보강섬유는 2000D의 탄소섬유매트(12×12본/인치)를 사용하였으며, 매트릭스는 나일론6 평직물(18×18본/인치)을 사용하여 angle-ply를 각각 0°/0°, 30°/0°/-30°/30°/0°/-30°, 60°/0°/-60°/60°/0°/-60° 하여 적층 프리폼을 만들었다.

2.2 시험편 제작

(1) 인장 · ILSS 실험용 시험편의 제작

탄소와 나일론 매트를 18×26cm 크기로 적층각을 각기 달리하여 절단한 후, 특수 제작한 몰드 위에 이형지를 놓고, 이를 265℃로 가열된 몰드내에 넣은 후 성형압력 1MPa, 가압시간 10분으로 성형을 하여 복합재료를 제작한 후 시험편으로 하였다.

(2) 층간파괴인성실험용 시험편의 제작

초기 크랙을 주기 위하여 적층 중간에 길이가 40mm되게 이미드 필름을 삽입하여 복합재료를 성형 한 다음 규격에 맞추어 절단하였으며, 이때 초기 크랙부분을 칼로 약 2mm 정도 예비 균열시켰다.

2.3. 물성실험

인장실험은 KS F 2241에 준하여, 층간전단강도 실험은 KS F 2246에 준하여, 층간파괴 인성 실험은 JIS K 69001과 ASTM D 5528에 준하여 행하였다.

냉각방법에 따른 결정화도를 알고자 Dupont-200형 DSC를 사용하여, 용해열량으로부터 결정화도(X_c)를 계산하였다. 금속현미경, SEM 및 편광현미경을 이용하여 형태학적 특성을 관찰하였다. 또한 KS F 2245에 준하여 void양을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 역학특성

Figure 1은 냉각방법을 달리한 angle-ply 적층 시험편의 인장강도와 탄성계수를 나타낸 것으로, 인장특성은 $0^\circ//0^\circ > 30^\circ//{-}30^\circ > 60^\circ//{-}60^\circ$ 의 순으로 우수했다. 이는 $0^\circ//0^\circ$ 시험편의 경우에는 인장시 하중이 가해지는 방향과 일직선상으로 강화섬유가 배열되어 있음을 알 수 있으나 $30^\circ//{-}30^\circ$ 와 $60^\circ//{-}60^\circ$ 시험편의 경우에는 강화섬유의 배열상태가 하중이 가해지는 방향과 angle-ply " θ " 만큼 경사되어 있어, 인장시 하중에 대한 저항은 θ 가 커질수록 작아진다고 생각된다. 또한 급냉의 경우가 서냉의 경우보다 인장특성에 있어서 보다 우수하게 나타나고 있다. 이는 수지의 부착정도, 결정화도, void양에 의한 함침효율에 의한 원인이라 생각된다. Figure 2는 냉각조건에 따른 층간전단 강도를 나타낸 것으로, $30^\circ//30^\circ$ 시험편이 $0^\circ//0^\circ$, $60^\circ//60^\circ$ 시험편보다 크게 나타나고 있는데, 이는 측정시 비틀림에 의한 영향이라 생각되나 $60^\circ//60^\circ$ 시험편의 경우에는 비틀림이 어느 한계를 지나쳐 층간전단 강도는 감소되었다고 생각된다.

3.2 층간파괴인성

복합재료에서의 pull-out은 다음과 같다[5].

$$W_p = \overline{U}_p \times N = V_f \mu_s l_c^2 / 6D_f$$

Table 1은 적층각과 냉각방법에 따른 각 시험편의 임계섬유장(l_c)과 pull-out 값을 나타낸 것으로, pull-out work와 임계섬유장에서 급냉의 경우가 서냉인 경우보다 더 크게 나타난 것으로 보아, 급냉시에는 유동된 강화섬유가 원위치로 회복되지 못하고 그대로 복합화 되었다고 생각된다.

Table 1. Critical fiber length and pull-out energy according to the angle-ply types and cooling types

angle-ply \ cooling type	Slow cooling		Rapid cooling	
	l_c (mm)	pull-out work(kJ/m ²)	l_c (mm)	pull-out work(kJ/m ²)
$0^\circ_3 // 0^\circ_3$	0.4703	1.1167	0.6923	1.5609
$30^\circ/0^\circ/-30^\circ // 30^\circ/0^\circ/-30^\circ$	0.2823	0.8295	0.4503	1.5148
$60^\circ/0^\circ/-60^\circ // 60^\circ/0^\circ/-60^\circ$	0.5307	2.2973	0.8191	2.6542

Figure 3은 0°/0° 시험편의 냉각조건에 따른 크랙길이(Δa)와 G_{IC} 와의 관계를 나타낸 것이다. Crack initiation에서는 초기 크랙을 주기 위하여 삽입한 이미드 필름에 의해 크랙 팁 앞부분에 삽입 필름 두께의 2배 정도에 해당하는 resin-rich 영역을 형성하며, 크랙이 진행도중에는 fiber bridging이 관찰되지는 않았으나 크랙 팁 뒷부분에서 다량의 fiber bridging과 fiber breakage가 관찰되었다. 이로 인해 불안정한 stick-slip 거동을 나타내는 G_{IC} 곡선이 되었다고 생각된다. Figure 4는 냉각방법에 따른 angle-ply 적층 시험편의 G_{IC} 특성을 나타낸 것으로, 급냉의 경우가 서냉의 경우보다 약간 우수한데, 급냉시킨 시험편은 초기 크랙 팁 근처에서 소성변형에 견디는 힘이 있어 강화섬유들은 깃발형태로 pull-out 되어지기 때문에, 냉각조건의 차이가 섬유/매트릭스 계면영역의 미세구조에 영향을 주어 크랙이 확장되는 동안 서로 다른 에너지 분산을 가져오기 때문에 G_{IC} 에 차이가 나타난다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 카본매트와 Nylon6 매트를 사용하여, angle-ply를 각각 0°₃/0°₃, 30°/0°/-30°//30°/0°/-30°, 60°/0°/-60°//60°/0°/-60°로 하여 angle-ply carbon/nylon6 적층 복합재료를 제작하여, 적층방법, 냉각조건 등이 인장특성, ILSS 및 층간 파괴 인성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Angle-ply carbon/nylon6 적층 복합재료의 인장 특성은 급냉의 경우가 서냉의 경우보다 우수하게 나타났는데 이는 결정화도와 void 등에 의한 수지의 함침 효율성 때문으로 생각되며, 또한 인장특성은 냉각조건에 의한 영향보다는 ply의 적층 방법에 따라 더 큰 영향을 받는다고 사료된다.
2. Angle-ply carbon/nylon6 적층 복합재료는 불안정한 stick-slip 크랙전파에 의한 비선형적 변형 거동을 하며, 층간파괴 인성특성에서도 급냉시킨 시험편은 초기 크랙 팁 근처에서 소성변형에 견디는 힘이 있어 섬유가 깃발형태로 pull-out 되어지기 때문에 더 우수하다고 사료된다.

참고 문헌

1. M. M. Schwarte, "Composite Materials Handbook", McGraw-Hill, New York (1992).
2. N. J. Johnston and P. M. Hergenrother, High Performance Thermoplastic: A Review of Neat Resin and Composite Properties, Proc. 32nd Int. SAMPE Symp., p.1400, April (1987).
3. D. R. Lee, *J. Korea Fiber Society*, **32**, 541 (1995).
4. Stolz, R. "Aramid and Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic: Opportunities in Comparison with Thermosetting Plastics, Need for New Manufacturing Processes", Report on the 25th Intern. Man-made Fibres Congress Dornbirn, September, (1986).
5. A. Kelly, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A319**, 95 (1970).

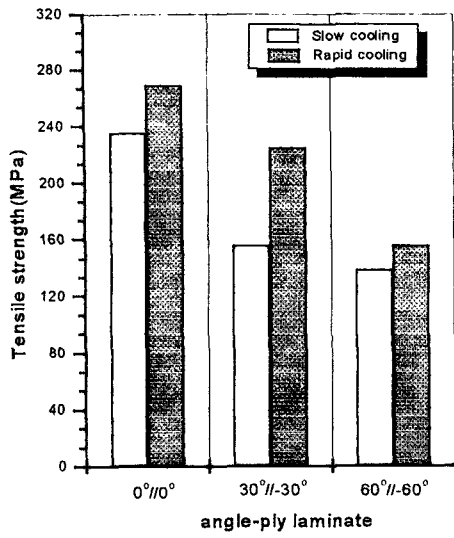


Figure 1. Tensile strength of each specimen according to the cooling types.

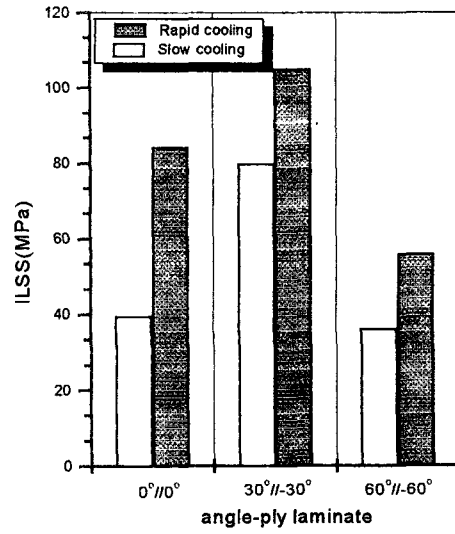


Figure 2. Interlaminar shear strength of each specimen according to the cooling type

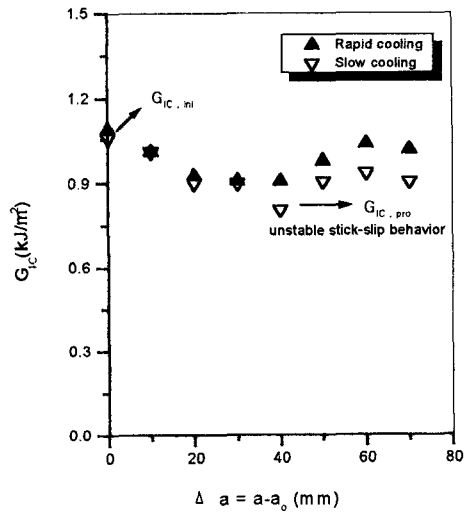


Figure 3. Relationship between G_{IC} values and Δa for the 0°//0° angle-ply laminate specimens.

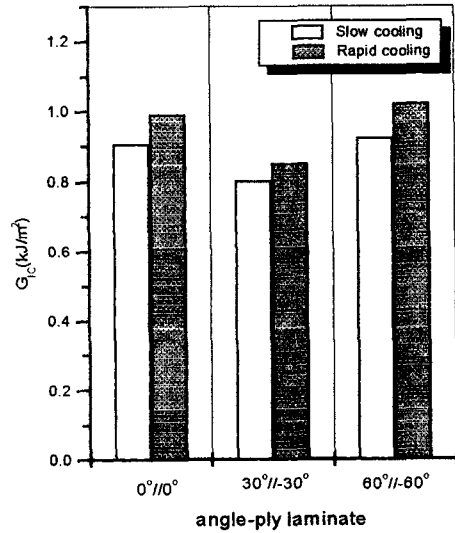


Figure 4. G_{IC} values of each specimen according to the cooling types