

Poly(ether imide)/Carbon Fiber 열가소성 복합재료의 수분 흡수에 관한 연구

남 주 영 · 강 호 중
단국대학교 고분자공학과
(1993년 8월 16일 접수)

Moisture Penetration into Poly(ether imide)/Carbon Fiber Thermoplastic Composites

Joo Young Nam and Ho-Jong Kang

Dept. of Polymer Science and Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

(Received August 16, 1993)

요 약 : 열가소성 복합재료의 consolidation 공정에 있어서 가장 중요한 가공변수인 몰드의 압력 및 온도가 가공된 laminates의 흡수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 poly(ether imide)[PEI]를 매트릭스로 하고 탄소섬유를 보강제로 사용한 열가소성 복합재료의 수분 확산현상과 이에 따른 구조적 변형에 관하여 고찰하였다. PEI/carbon fiber 열가소성 복합재료의 흡수는 Fickian 확산 현상을 따르고 몰드의 온도 및 압력의 감소에 따라 확산속도의 증가 및 확산에 의한 평형 무게의 증가(mass uptake)를 확인할 수 있었다. 사용 증류수 온도의 증가 및 복합재료에 가해진 응력은 이러한 확산 현상을 더욱 더 촉진시킴을 확인하였다. 수분이 확산된 laminates 단면의 현미경 사진으로부터 낮은 몰드압력은 수분의 확산에 따른 delamination 현상을, 몰드온도의 저하는 수지와 탄소섬유의 debonding현상을 유발시키는 요인이 됨을 확인하였다. 이러한 수분 확산의 결과로 laminates의 void content가 증가하고 따라서 밀도의 감소를 초래하며 이로 인하여 굴곡탄성을 및 굴곡강도가 감소함을 보여주었다.

Abstract : The fundamental studies of PEI/carbon fiber thermoplastic composites have been carried out to understand the correlation between the moisture penetration phenomena of laminates and processing variables for consolidation process such as the mold temperature and pressure. It has been found that the relationship between mass uptake and square root of diffusion time in the initial stage of diffusion is linear. This means that the diffusion phenomena of PEI/carbon fiber thermoplastic composites follow the Fickian diffusion. The initial diffusion rate and equilibrium mass uptake values were increased with reducing mold temperature and pressure due to the debonding and delamination of laminates. A similar tendency has been obtained with increasing water temperature and applied stress. From the optical micrograph, the delamination and debonding phenomena by the water diffusion have been confirmed. The effects of processing parameter on structural defects have been found to be the decrease of mechanical properties and the increase of void content.

서 론

열가소성 복합재료는 그 강도와 내열성이 우수하고 기존의 열경화성 복합재료에 비하여 가볍고 가공성이 뛰어나 경량성 및 복잡한 모양의 성형이 요구되는 군사용 항공기의 재질¹로서 그 응용성이 점차 확대되고 있다. 이러한 우수한 가공성은 열가소성 복합재료의 응용특성으로 인하여 경화과정이 필요없이 생산시간 및 생산단가를 줄일 수 있고 현재 고분자 가공에서 널리 사용되고 있는 metal forming의 기술을 그대로 적용할 수 있기 때문이다. 이와 아울러 보관이 용이하고 용접 및 보수가 가능하다는 장점도 열가소성 복합재료의 응용성을 확대시키는 요인으로 작용하고 있다. 그러나 열경화성 복합재료의 매트릭스에 비하여 수지의 점도가 높아 프리프레그의 제조에 상대적으로 어려움이 있으며 수분 및 용매의 흡수가 심한 단점을 갖는다.

열가소성 복합재료의 매트릭스로는 poly(ether ether ketone)[PEEK], poly(ether imide), poly(phenylene sulfide)[PPS], poly(ether sulfone)[PES] 등과 같은 특수 엔지니어링 플라스틱이 주로 사용되고 있으며 보강재로는 unitape, fabric 등의 구조를 갖는 탄소섬유가 주로 사용되고 있다. 열가소성 복합재료의 프리프레그의 가공방법은 1960~70년대 Bradt,² Hall,³ Moyer⁴ 등에 의한 유리섬유에 열가소성 수지를 코팅시키는 기술로부터 시작하여 Lind와 Coffey⁵의 mandrel을 사용하여 보강섬유층에 열가소성수지를 가압하여 프리프레그를 제조하는 기술 등이 개발되었다. 1982년 들어 Cogswell, Hazel, Williams⁶ 등과 Cogswell, Staniland⁷ 등은 PET, PEEK와 액정 폴리에스터를 사용한 pultrusion 기술을 이용하였다. 그러나 이러한 연구는 특허상의 기술개발에 중점을 두었으며 따라서 체계적이고 학문적인 연구는 아직 성숙하지 못한 단계에 있고 열가소성 복합재료의 consolidation 공정 및 이들 laminates 물성에 대한 기초적인 연구^{8~10}가 최근에서야 진행되고 있다.

복합재료에서의 수분 확산현상은 일반 고분자와 비교하여 볼 때 그 구조의 복잡성으로 인하여 매우

다르다. 복합재료의 확산 메커니즘은 수분의 매트릭스로의 확산, 미세하지만 보강섬유 자체로의 확산 그리고 보강섬유와 매트릭스 수지사이로의 capillary 확산, 그리고 복합재료 자체에 존재하는 void 및 microcrack으로의 확산 등으로 나눌 수 있다. Muzzy와 Kays¹¹의 조사에 따르면 열가소성 수지 및 보강재 자체로의 확산은 다른 것들에 비하여 미약함이 확인되었고 따라서 capillary 확산 및 void와 microcrack에서의 확산이 복합재료의 수분확산의 대부분을 이룸을 알 수 있다.

복합재료의 수분 확산에 대한 연구는 사용환경이 열악한 복합재료에 있어서 필수적으로 수행되어야 하나 대부분의 연구는 열경화성 복합재료에 한정되어 있다. Mazor와 Broutman¹²은 탄소섬유-epoxy와 graphite-epoxy 복합재료의 장기간 수분의 침투에 따른 영향을 고찰하였다. 11년동안 증류수 혹은 수분에 방치한 복합재료의 확산현상은 Fickian 현상을 보이며 이로 인한 shear strength와 flexural strength의 감소를 초래함을 알 수 있었다. Shen과 Springer¹³ 등은 수분의 확산현상을 graphite T-300/Fiberite 1034 복합재료를 사용하여 연구하였고 이들의 실험 결과를 확산 이론과 비교하였다. Marom과 Broutman^{14,15} 등은 응력하에서의 유리섬유-epoxy, graphite-epoxy 복합재료의 수분의 확산 현상을 고찰하였다. 응력이 증가함에 따라 평형 mass uptake가 커짐과 이와 아울러 확산속도도 빨라짐을 알 수 있었고 확산현상은 응력과 보강 섬유와의 방향에도 영향을 받음을 확인하였다. 이와 같이 열경화성 복합재료의 수분 확산에 대한 연구가 활발한 반면 열가소성 복합재료의 경우에는 Buchman과 Isayev⁹의 PEEK, PES, PEI 등의 복합재료에 있어서의 수분 흡수현상을 재료적 측면에서 고찰한 연구가 있으나 가공조건에 따른 확산현상에 대한 체계적인 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 열가소성 복합재료의 가공 공정에 대한 연구의 일환으로 consolidation 공정에 있어서 몰드의 온도 및 압력이 가공된 laminates의 수분 확산에 미치는 영향과 이에 따른 구조적 결합의 발현을 고찰하여 봄으로써 수분 및 용매의 확산에

따른 열가소성 복합재료의 구조적 결합에 대처할 수 있는 최적의 가공조건 확립을 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

실 험

시편의 제조. 본 연구에서 사용한 프리프레그는 American Cyanamid사의 poly(ether imide)를 매트릭스로 하고 밀도가 1.76인 탄소섬유를 사용한 8-harness fabric을 보강재로 하는 프리프레그를 사용하였으며 이때 탄소섬유와 수지의 무게비는 65 : 35였다. 흡습실험을 위한 시편은 고온용 Tetrahedron compression molding machine(Model MPT-14)을 사용하여 laminates를 제조하여 1.5 cm×5 cm와 7 cm×2.5 cm(응력실험용) 크기로 잘라 수분흡습 실험용 시편으로 사용하였다.

Laminates의 제조는 프리프레그에 존재하는 수분을 제거하기 위하여 100℃에서 4시간 동안 건조한 후 탄소섬유의 배향이 같은 방향으로 4장의 프리프레그를 이형 필름인 폴리이미드 필름(kepton film)과 고온용 지지천 사이에 넣고 consolidation하였다. Consolidation 조건은 몰드의 온도를 315℃로 예열한 후 프리프레그를 몰드사이에 넣고 이를 15 psi 정도로 압력을 가해준 상태에서 5분정도 유지한 다음 분당 1℃의 승온속도로 350℃까지 온도를 올려 15분동안 유지한 후 압력을 200 psi로 올려 1시간 동안 등온 상태를 거쳐 분당 25℃의 속도로 상온으로 냉각시켜 laminate 1을 얻었다. 가공조건이 다른 시편을 얻기 위하여 위의 조건과 동일하나 압력을 200 psi에서 50 psi로 낮추어 준 조건 2의 laminate 2와 예열 온도를 315℃에서 260℃로, 가공온도를 350℃에서 290℃로 낮추어 가공한 조건 3의 laminate 3를 얻어 시편으로 사용하였다. 이때 얻어진 모든 시편의 두께는 1.48 mm였다.

수분 흡수 실험. 시편은 잔존하는 수분을 제거하기 위하여 100℃의 진공오븐에서 24시간동안 건조하여 사용하였으며 이를 100 ml의 증류수 및 14 wt % 소금물이 든 시료병에 담구어 온도가 $\pm 2^\circ\text{C}$ 내외로 조절되는 항온조를 사용하여 25℃와 50℃에서 수

분 확산실험을 수행하였다. 확산실험은 일정시간 동안 시편을 각 시료병에 담구어 둔 후 꺼내어 표면에 잔존하는 과량의 증류수 혹은 소금물을 필터 paper로 충분히 제거한 후 무게를 측정하여 이로부터 초기의 시편의 무게를 빼준 값, 즉 확산시간에 따른 무게의 증가(mass uptake)와 시간이 경과하여도 무게가 더 이상 증가하지 않는 평형 mass uptake를 구하는 수분 absorption 실험에 의하여 수행하였다.

응력에 따른 수분의 흡수정도의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 1과 같은 고강도 탄성 스프링과 시편 장착장치를 제작하여 사용하였고 응력의 크기는 스프링이 수축된 길이를 8 cm로 하였을 때의 2.0 MPa로 하였다.

수분흡수에 따른 구조적 변형. 수분흡수에 따른 구조적 변형을 살펴보기 위하여 시편의 void 함량의 변화를 살펴보았다. Void의 함량을 계산하기 위하여 각 조건에서 수분이 흡수된 시편을 진공오븐에서 100℃에서 24시간 건조하여 흡수된 수분을 제거한 후 density hydrometer에서 밀도를 측정하고 탄소섬유의 함량은 ASTM-D3171-76에 의하여 황산용액을 이용하여 매트릭스 수지를 제거한 후 남은 탄소섬유의 무게를 측정하여 구하였다.

수분의 침투에 의한 프리프레그와 프리프레그의 delamination 현상과 탄소섬유와 매트릭스 수지와 의 debonding 현상은 reflection method를 이용한 현미경을 사용하여 1000배의 배율로 laminates 단면의 optical micrograph를 얻어 고찰하였다.

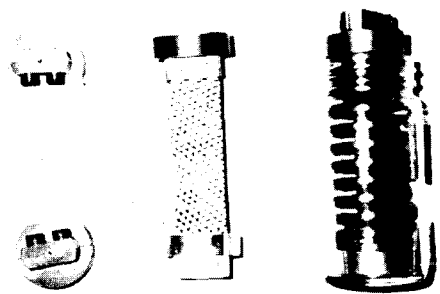


Fig. 1. A stressed specimen of PEI/carbon fiber composites.

시편의 굴곡 탄성을 및 굴곡강도는 tensile tester (Instron 4201)를 사용하여 three point bending test로써 측정하였다. 이때 support span과 시편의 두께의 비를 16으로 하였고 crosshead의 속도는 1 mm/min였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 복합재료의 가공 특히 consolidation 공정시 가공온도 및 압력에 따라 발생하는 defects 즉 탄소섬유와 수지의 함침 및 프리프레그와 프리프레그의 autoadhesion 정도에 따라 발생하는 확산을 중심으로 고찰하고자 한다. Fig. 2는 프리프레

그의 확산 시간에 따른 수분의 확산정도를 보여주고 있다. 일반적으로 확산은 Fickian 확산을 따르고 있으며 5% 정도의 평형 mass uptake를 보여주고 있다. 이는 프리프레그의 제조시 탄소섬유와 수지의 함침이 충분하게 이루어지지 않았음을 의미하고 아울러 void가 존재¹⁰하고 있음을 알 수 있다. 증류수 온도의 증가에 따른 증류수의 확산능의 변화를 보면 증류수의 온도 50°C인 경우 평형 mass uptake는 비슷하나 초기의 확산속도가 빨라지고 25°C와 비교하여 짧은 시간에 평형 mass uptake에 도달하는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 25°C에서의 각각 consolidation 조건에 따라 얻은 laminates의 수분확산 정도를 보여주고 있다. 프리프레그의 확산에서와 마찬가지로 Fickian 확산현상을 따르고 있으며, 프리프레그에 비하여 평형 mass uptake가 0.2%~0.7%로 감소함을 알 수 있다. 이는 매트릭스 수지인 폴리에테르이미드의 유리전이 온도가 210°C임으로 이보다 높은 가공 온도를 사용한 consolidation의 경우 매트릭스 수지의 흐름성이 증가하여 수지와 탄소섬유의 함침 정도가 프리프레그에 비하여 좋아진 것에 기인한다. 그러나 조건 2 및 조건 3의 laminates의 경우 그림에서 보는 바와 같이 몰드의 압력 및 온도의 감소에 의하여 상대적으로 조건 1에 비하여 초기 확산속도 및 평형 mass uptake가 증가됨을 알 수 있다. 이러한 가공조건에 따른 평형 mass uptake의 증가는 프리프레그와는 달리 void를 통한 흐름 및 수지와 탄소섬유사이의 capillary 흐름 이외에도 프리프레그와 프리프레그 사이의 확산흐름이 존재한다는 것을 의미한다. 이는 몰드압력을 낮춘 조건 2, 즉 프리프레그와 프리프레그의 autoadhesion 정도가 상대적으로 낮은 laminates에서 수분 확산이 증가함으로써 확인할 수 있다. 몰드온도를 낮춘 조건 3의 경우 이러한 현상이 더욱 두드러짐을 확인할 수 있는데 이는 온도의 감소에 따른 프리프레그와 프리프레그 사이의 autoadhesion의 감소와 아울러 낮은 온도로 인한 수지 흐름성의 감소에 따라 탄소섬유에 수지가 함침되는 정도가 조건 1보다 좋지 않음에 기인한다. 즉 압력의 감소는 프리프레그와 프리프레그의 autoadhe-

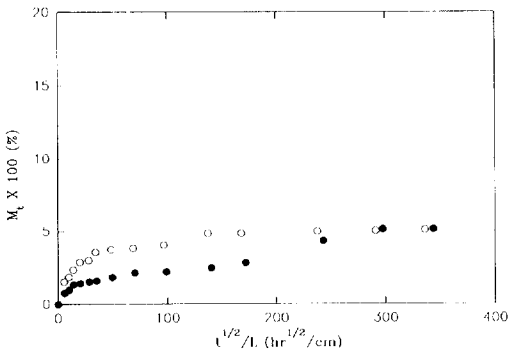


Fig. 2. Mass uptake per mass of PEI/carbon fiber prepreg as a function of reduced square root of exposure time for water.(○ : 50°C water, ● : 25°C water)

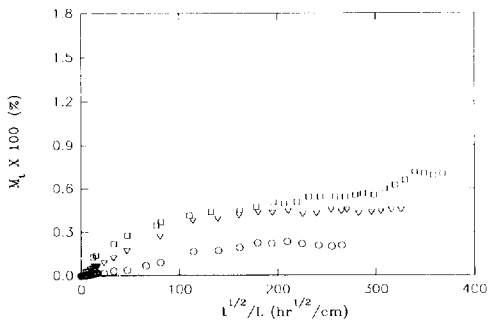


Fig. 3. Mass uptake per mass of PEI/carbon fiber laminates as a function of reduced square root of exposure time for water at 25°C.(○ : condition 1, ▽ : condition 2, □ : condition 3)

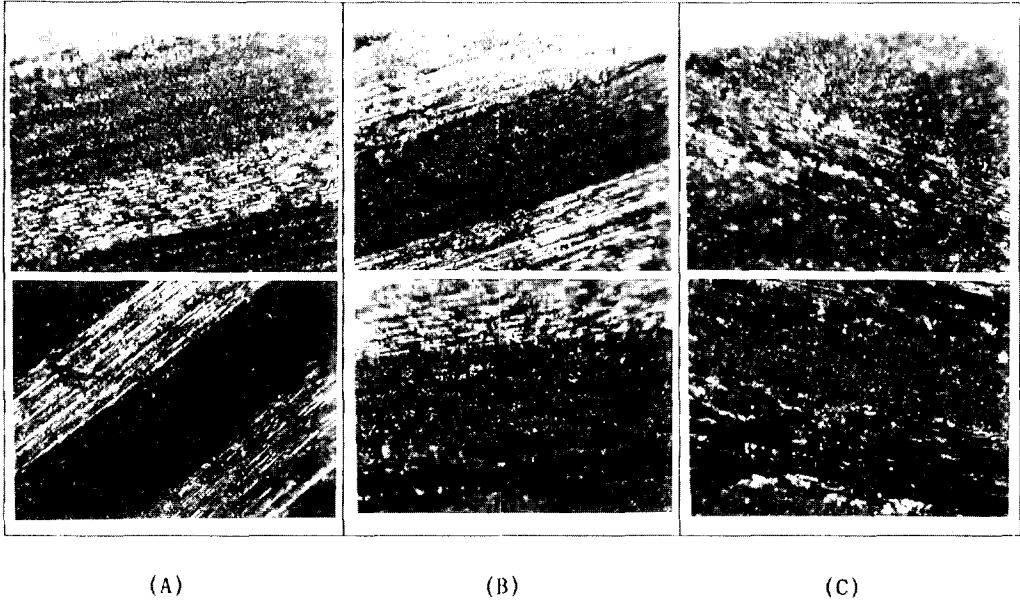


Fig. 4. Optical micrograph of the cross section of laminates : a) condition 1 : 0 hrs(top), 1500 hrs(bottom), b) condition 2 : 0 hrs(top), 1500 hrs(bottom), c) condition 3 : 0 hrs(top), 1500 hrs(bottom).

sion의 저하를 유발하여 수분의 확산에 의하여 delamination 현상을 초래하고 온도의 감소는 autoadhesion과 아울러 수지와 탄소섬유의 함침 정도의 감소를 유발하여 수분의 확산시 debonding 현상을 동시에 일으킴을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 4의 각 가공조건에서 얻은 laminates 단면에 대한 현미경사진으로 확인할 수 있다. 수분이 확산되기 전의 각 가공조건에서 얻은 laminates에서는 delamination 및 debonding 현상이 나타나지 않으나 수분이 확산된 후 1500시간이 경과한 laminates의 경우 가공조건 1과 가공조건 2에서 delamination 현상을 그리고 가공 조건 3에서는 delamination 현상과 debonding 현상 모두를 확인함으로써 Fig. 3의 가공조건에 따른 확산현상의 변화를 이해할 수 있었다. Table 1은 해당 consolidation 조건에서 만들어진 laminates의 평형 mass uptake와 확산계수를 나타내었다. 확산현상이 Fickian일 경우 식 1에 의하여 각 laminates의 확산계수를 구할 수 있다.

$$D_c = \pi(kL/4 M_\infty)^2 \quad (1)$$

여기서 D_c 는 확산계수, M_∞ 는 평형 mass uptake, L 은 laminate의 두께, 그리고 k 는 mass uptake 곡선의 초기 선형기울기를 나타낸다. Table 1에서 보는 바와 같이 laminates는 prepreg에 비하여 높은 mass uptake 값을 갖고 있으며 확산계수는 현저하게 감소함을 알 수 있다. 증류수의 온도가 25°C의 경우 몰드의 압력 및 온도의 저하에 따라 확산계수가 증가함을 보이고 있다.

Fig. 5는 증류수의 온도 50°C에서의 수분 확산 현상을 보여주고 있다. 가공조건 1의 경우에는 프리프레그와 마찬가지로 증류수 온도에 의한 확산능의 증가로 인하여 초기 확산속도의 증가를 보이고 평형 mass uptake에는 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 4에서 보는 것과 같이 구조적인 결합을 갖고 있는 조건 2와 조건 3의 경우에는 초기 확산속도의 증가와 아울러 증류수의 확산능에 의한 delamination과 debonding 현상의 증가에 따른 평형 mass uptake가 급격히 증가함을 알 수 있었고 특히 가공조건 3의 경우에는 확산현상이 Fickian보다는 two stage diffusion 현상을 보임을 알 수 있었다. 즉

증류수의 온도 증가는 가공조건이 적절하여 구조적 결함이 없는 laminate에는 거의 영향을 못미치나 구조적 결함이 존재하는 경우에는 이러한 구조적 결함

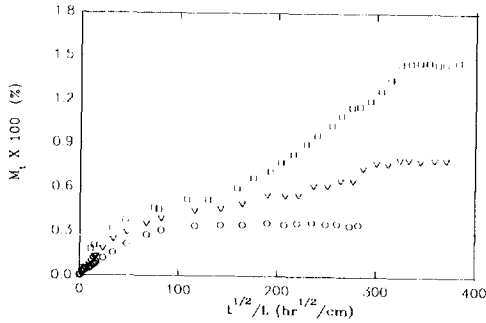


Fig. 5. Mass uptake per mass of PEI/carbon fiber laminates as a function of reduced square root of exposure time for water at 50°C.(○ : condition 1, ▽ : condition 2, □ : condition 3)

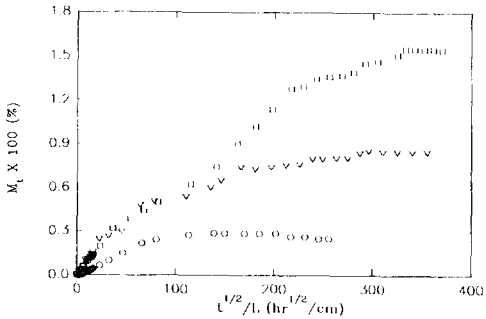


Fig. 6. Mass uptake per mass of PEI/carbon fiber laminates as a function of reduced square root of exposure time for water at 50°C with applied stress(2.0 MPa).(○ : condition 1, ▽ : condition 2, □ : condition 3)

의 진행에 중요한 역할을 함을 알 수 있었다. Table 1에서 보는 바와 같이 확산계수는 25°C에서와는 달리 물드온도 및 압력의 감소에 따라 작아짐을 볼 수 있는데 이는 식 1에서 보는 바와 같이 확산계수를 지배하는 두 인자인 초기 확산속도와 평형 mass uptake 중 laminate의 구조적 변형으로 인해 평형 mass uptake의 의존성이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

열가소성 복합재료는 일반적으로 하중이 걸린 상태와 같은 열악한 환경조건에서 사용하는 경우가 많다. 따라서 이러한 응력의 영향을 살펴보기 위하여 2.0 MPa의 응력을 지속적으로 가해 주면서 확산실험을 수행하여 Fig. 6의 확산결과를 얻었다. 조건 1의 경우에는 확산 현상의 변화를 찾아 볼 수 없었고 조건 2와 조건 3에서는 초기 확산속도와 평형 mass uptake의 변화는 거의 없으나 확산이 어느정도 진행이 됨에 따라 가해진 응력의 영향에 의하여 debonding 혹은 delamination 현상이 촉진되고 따라서 응력이 없을 경우와 비교하여 같은 시간이 경과했을 때 mass uptake가 증가함을 알 수 있었다. 따라서 laminates에 가해진 응력은 증류수의 확산능 증가와 같이 수분의 확산을 촉진시킴을 확인할 수 있었다. 열가소성 복합재료를 잠수정의 동체와 같이 바닷물 속에서 사용할 경우 소금물에 대한 확산 현상이 고려되어야 한다. Fig. 7은 소금물에서의 확산 현상을 보여주고 있다. 조건 1의 경우에는 증류수의 확산현상과 차이가 없으나 조건 2와 조건 3의 경우 증류수에서와는 달리 초기 확산이 진행된 이후 mass uptake의 증가가 둔화됨을 볼 수 있다. 이는 확산현

Table 1. Equilibrium Mass Uptake Values and Diffusion Coefficient of PEI/Carbon Fiber Laminates

sample	water					
	25°C		diffusion coefficient (cm ² /sec)			
	mass uptake	diffusion coefficient	50°C		50°C with 2 Mpa	
	mass uptake	diffusion coefficient	mass uptake	diffusion coefficient	mass uptake	diffusion coefficient
prepreg	5.7116	1.073 × 10 ⁻⁸	5.0776	1.524 × 10 ⁻⁸	2.7422	1.290 × 10 ⁻⁷
laminate 1	0.2331	1.516 × 10 ⁻⁹	0.3674	8.343 × 10 ⁻⁹	0.2835	6.580 × 10 ⁻⁹
laminate 2	0.4560	3.347 × 10 ⁻⁹	0.7986	3.384 × 10 ⁻⁹	0.8554	4.439 × 10 ⁻⁹
laminate 3	0.7145	4.510 × 10 ⁻⁹	1.5010	2.135 × 10 ⁻⁹	1.5505	1.528 × 10 ⁻⁹

상이 debonding 및 delamination에 의한 capillary 흐름에 기인하기 때문에 소금용액에 포함되어 있는 소금 이온이 확산이 일어나는 경로인 capillary를 막음으로서 더 이상의 debonding 및 delamination에 의한 확산을 막아주는 것으로 사료된다.

Laminates의 수분 확산에 의한 구조적 결함을 확인하는 방법으로서 Table 2에서 보는 바와 같이 laminate의 밀도와 fiber content를 측정하여 ASTM-D-2743에 따라 아래 식 2를 사용하여 void content를 계산하였다.

$$V = [1 - D_L \{1/D_f + Z/100 \times (1/D_R - 1/D_f)\}] \times 100 \quad (2)$$

여기서 D_L 은 laminate의 밀도, D_f 는 탄소섬유의 밀도, 그리고 D_R 은 resin의 밀도를 나타내고 Z 는 fiber content를 나타낸다. 본 실험에서 사용한 laminate의 fiber content는 66.3%였고 탄소섬유의 밀도는 1.76, 매트릭스 수지인 PEI의 밀도는 1.29였다. Table 2에서 보는 바와 같이 물드의 온도 및 압력의 감소에 따라 laminates 자체의 void content가 증가

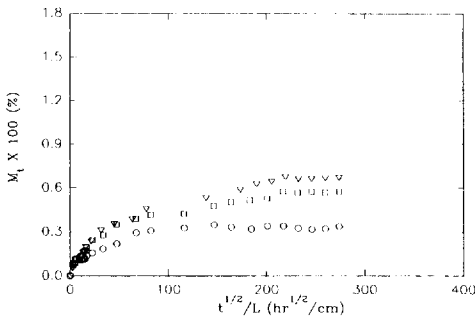


Fig. 7. Mass uptake per mass of PEI/carbon fiber laminates as a function of reduced square root of exposure time for 14wt% salt water at 50°C. (○ : condition 1, ▽ : condition 2, □ : condition 3)

Table 2. Density and Void Content of PEI/Carbon Fiber Laminates

water sample	Density				Void content			
	Original	50°C	25°C	50°C with 2 MPa	Original	50°C	25°C	50°C with 2 MPa
laminate 1	1.569	1.559	1.567	1.560	0.1316	0.4929	0.2441	0.7165
laminate 2	1.551	1.541	1.547	1.543	1.0903	1.2255	1.2717	1.7554
laminate 3	1.538	1.516	1.526	1.517	1.9411	3.5352	2.9184	3.4043

되고 수분이 확산됨에 따라 delamination 및 debonding의 발현으로 void content의 증가 현상이 심화됨을 확인할 수 있었고 사용된 증류수의 온도 및 응력에도 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 이러한 구조적 변형의 발현은 복합재료의 기계적 특성에 직접적으로 영향을 미친다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 저온 및 저압에서 가공된 laminates는 굴곡탄성을 및 굴곡강도가 조건 1의 가공조건에서 가공된 laminates에 비하여 떨어지고 이러한 기계적특성은 수분이 확산될수록 저하되는 것으로 보아 수분의 확산이 la-

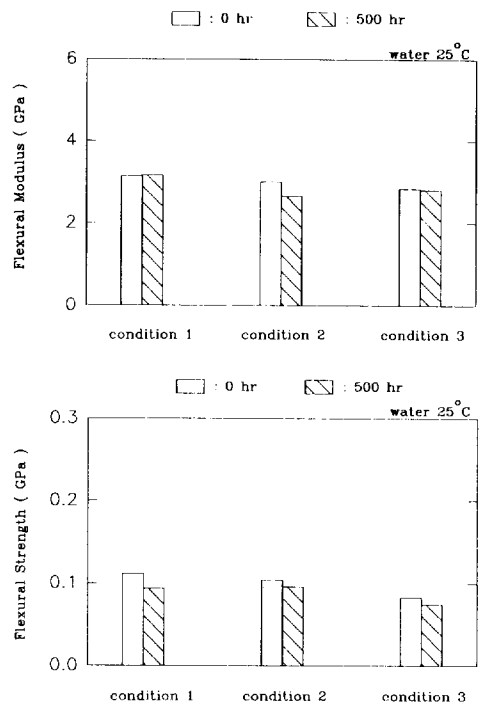


Fig. 8. The effect of water penetration on mechanical properties of PEI/carbon fiber composites. a) Flexural modulus, b) Flexural strength.

minates의 delamination 및 debonding을 일으킴을 다시 한번 확인할 수 있었다. 특히 이러한 구조적 결함의 발현은 굴곡강도에 더 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

결 론

열가소성 복합재료의 수분 흡수 현상과 consolidation 공정의 가공 변수인 압력 및 온도 감소의 상관 관계를 얻어 열가소성 복합재료의 최적 가공조건 설정의 기초자료를 얻고자 하였다. 아울러 복합재료의 사용환경 조건인 수분의 온도, 가해진 응력 그리고 수분에 포함된 염분이 수분 확산 현상에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열가소성 복합재료의 수분 확산 현상은 Fickian 확산을 따르며 consolidation시의 가공조건인 몰드의 압력 및 온도의 감소로 인한 구조적인 결함의 발현으로 수분 확산시 delamination 및 debonding을 유발시켜 수분확산이 증가됨을 확인하였다.
2. 수분의 온도 증가 및 가해진 응력은 delamination 및 debonding 현상을 증가시키고 따라서 확산 현상의 증가를 유발시키는 반면 수분에 포함된 염분은 laminate의 확산현상의 주요 요인인 capillary 흐름을 막는 것으로 보이며 따라서 확산현상을 감소시키는 결과를 초래하였다.
3. Consolidation 공정의 변수인 몰드의 온도 및 압력의 저하는 laminates의 굴곡탄성률 및 굴곡강도를 저하시키고 수분의 확산현상의 결과로 laminates의 void content가 증가되고 이에 따라 밀도의 감소

와 아울러 이들의 기계적 물성 감소를 초래하였다.

감사의 글 : 본 연구는 1992년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의해 이루어진 것입니다. 연구비를 지원하여 주신 교육부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. A. Stonier, *SAMPE J.*, **27**, 9 (1991).
2. R. Bradt, *U. S. Patent*, 3,042,570 (1962).
3. N. T. Hall, *U. S. Patent*, 3,608,033 (1971), 3,702,356 (1972), 3,709,773 (1973), 3,834,980 (1974).
4. R. L. Moyer, *U. S. Patent*, 3,993,762 (1976).
5. D. J. Lind and V. J. Coffey, *British Patent*, 1,485,586 (1975).
6. F. N. Cogswell, D. J. Hazel, and P. J. Williams, *European Patent*, 0056 703 (1982).
7. F. N. Cogswell and P. A. Staniland, *European Patent*, 0102 159 (1983).
8. D. M. Carlin, *SPE Tech. Papers*, **35**, 1447 (1989).
9. A. Buchman and A. I. Isayev, *SAMPE J.*, **27**, 19 (1991).
10. H. J. Kang, E. Buchman, and A. I. Isayev, *SAMPE J.*, **27**, 21 (1991).
11. J. D. Muzzy and A. O. Kays, *Polymer Composites*, **5**, 169 (1984).
12. A. Mazor, L. J. Broutman, and B. H. Eckstein, *Polym. Eng. Sci.*, **18**, 341 (1978).
13. C. H. Shen and G. S. Springer, *J. Composite Mater.*, **41**, 526 (1979).
14. G. Marom and L. J. Broutman, *Polymer Composites*, **2**, 132 (1981).
15. G. Marom and L. J. Broutman, *J. Adhesion*, **12**, 153 (1981).