

사이징제에 따른 유리섬유/불포화 폴리에스터 복합재료의 계면 접착력과 기계적 물성

박수진[†] · 김택진 · 이재락 · 홍성권* · 김영근**

한국화학연구소 화학소재연구부, *충남대학교 고분자공학과, ** (주)강남정공
(1999년 12월 9일 접수)

Influence of Sizing Agent on Interfacial Adhesion and Mechanical Properties of Glass Fiber/Unsaturated Polyester Composites

Soo-Jin Park[†], Taek-Jin Kim, Jae-Rock Lee, Sung-Kwon Hong*, and Yeung-Keun Kim**

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,
P.O. Box 107, Yusong, Taejeon 305-600, Korea

*Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University,
Yusong, Taejeon 305-764, Korea

**Kangnam Industrial Co., Sunggok, Ansan, Kyunggi 425-110, Korea

[†]e-mail: psjin@pado.kRICT.re.kr

(Received December 9, 1999)

요약: 유리섬유/불포화 폴리에스터 복합재료에서 섬유에 처리된 사이징제가 복합재료의 최종 물성에 미치는 영향을 상온에서의 접촉각 측정을 통해 고찰하였다. 본 연구에서는 폴리비닐알코올, 폴리에스터, 그리고 에폭시계 사이징제를 사용하여 유리섬유의 표면을 처리하였으며 각각의 물성을 비교하였다. 유리섬유의 접촉각은 증류수와 diiodomethane을 젖음액으로 사용하여 Washburn식을 기본으로 한 wicking법으로 측정하였다. 결과적으로 접촉각 측정에 의해 구한 표면자유에너지는 에폭시계 사이징제로 처리된 유리섬유에서 최대값을 나타내었다. 복합재료의 층간 전단 강도(ILSS)와 파괴 인성(K_{IC})의 측정 결과로부터 사이징제의 처리에 따라 계면 결합력이 증진되며 결과적으로 복합재료의 기계적 강도가 증가함을 알 수 있었다. 이것은 복합재료에서 유리섬유의 표면 자유에너지 증가에 기인한다고 사료된다.

ABSTRACT: The effects of sizing agent on the final mechanical properties of the glass fiber/unsaturated polyester composites were investigated by contact angle measurements at room temperature. In this work, glass fibers were coated by poly(vinyl alcohol), polyester, and epoxy type sizing agent and each property was compared. Contact angles of the sized glass fiber were measured by the wicking method based on Washburn equation using deionized water and diiodomethane as testing liquids. As an experimental result, the surface free energy calculated from contact angle showed the highest value in case of the glass fiber coated by epoxy sizing agent. From measurements of interlaminar shear strength (ILSS) and fracture toughness (K_{IC}) of the composites, it was found that the sizing treatment on fibers could improve the fiber/matrix interfacial adhesion, resulting in growing the final mechanical properties. This was due to the enhanced surface free energy of glass fibers in a composite system.

Keywords: fiber/matrix adhesion, sizing, contact angle, surface free energy, interlaminar shear strength, fracture toughness.

서 론

유리섬유는 최초로 복합재료에 적용된 강화 섬유로 알려져 있으며 복합재료의 주요 성능을 만족시키고 가격면에서 최적의 강화재로서 범용 복합재료에서 지속적으로 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 유리섬유 강화 복합재료의 물성은 흔히 강화재와 매트릭스 수지의 중간 물성을 나타낸다는 혼합법칙에 의해 설명된다.¹⁻³ 그러나 실제 응용에서는 이 혼합법칙을 따르지 않는 경우가 발생하는데, 이는 복합재료에 적용되는 외부 에너지가 매트릭스로부터 강화재로 전이될 때 강화재 및 매트릭스 각각의 고유 물성보다는 그들 사이의 계면에 의하여 최종 물성이 좌우되기 때문이다. 다시 말하면 강화재 또는 매트릭스 각각은 내부의 강한 화학적 결합을 이루고 있는 것에 반하여 그들 계면은 약한 물리적 결합을 이루고 있기 때문에 외부로부터 전달되는 힘은 그 물리적 결합의 정도에 의존될 것이기 때문이다.^{4,5}

물리화학적으로 고체상 표면 또는 계면 특성이라는 두 가지 서로 다른 조성 사이에 일어나는 분자간의 인력성으로 동일시 할 수 있으며, 고체상 내부간의 인력에너지와는 상이한 현상을 나타내는데, 이를 흔히 Gibbs 표면자유에너지(Gibbs surface free energy) 또는 과잉자유에너지(excess free energy)라 일컫는다.^{6,7} 이와 같은 기준 고체상의 표면자유에너지는 그 주위에 어떤 기체(흡착) 및 액체(젖음) 또는 고체상(접착) 분자가 서로간의 인력이 작용될 수 있는 평형 거리에 도달하더라도 고체 표면에서의 열역학적인 양은 변하지 않는다. 따라서 고체 표면에서의 에너지를 정량적으로 표현할 수 있다면 위와 같은 흡착, 젖음, 접착, 코팅, 염색 등 매우 다양하고 유용한 정보를 얻을 수 있다고 할 수 있겠다.⁵⁻⁷

유리섬유는 표면이 hydroxyl기로 덮여 있기 때문에 친수성이 매우 크고 또한 마찰이나 정전기에 의해 손상을 받기 쉬운 단점이 있다. 따라서 매트릭스 수지와 계면 접착력을 향상시키고 제조 공정 중에 섬유를 마찰이나 정전기로부터 보호하기 위한 처리가 필요하며 이를 "사이징(sizing)"이라고 한다.^{8,9} 유리섬유의 사이징 처리는 또한 적절한 섬유/매트릭스의 용력의 전달로 인해 결과적으로 최종 복합재료의 기

계적 성질을 향상시키는 역할을 하게 된다.

일반적으로 유리 섬유에 적용되는 사이징제는 다성분계 시스템으로 film-former, 커플링제, 정전기 방지제, 윤활제 그리고 그 밖의 다양한 첨가제로 구성되어 있다. 사이징제의 중요한 구성 성분인 실란 커플링제는 Plueddemann의¹⁰ 연구 이래로 많은 주목을 받아왔으며, 현재까지 많은 연구자들에 의해서 활발한 연구가 진행되고 있다.¹¹⁻¹⁴ 그러나 유리섬유의 사이징 처리에 따른 섬유와 고분자 매트릭스 사이의 계면 접착력과 복합재료의 기계적 물성에 대한 연구는 상대적으로 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 유리섬유/매트릭스 수지와 계면 형성에 대해 각기 다른 종류의 사이징 처리에 대한 효과를 복합재료의 표면자유에너지와 기계적 물성 측정에 의해 고찰하였다.

실 험

재료 및 시편 제조. 매트릭스 수지로 쓰인 불포화 폴리에스터는 세원화성(주)에서 생산된 R-235를 사용하였으며, 개시제로는 methylethylketone peroxide (MEKPO)를 사용하였다. 유리섬유는 현대화이바(주)에서 생산한 미리 열처리된 HD 324-01 (23 × 23 count/inch, 중량 248 g/m²)을 사용하였다.

사이징제의 film-former가 유리섬유/불포화 폴리에스터 매트릭스의 계면 접착력에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 폴리비닐알코올계 (POLINOL-P-17, 동양화학), 폴리에스터계 (EW-100G, SK Chemical) 그리고 에폭시계 (KEM-128-70, 국도화학) 수지를 사이징제의 film-former로서 사용하였다. 이들을 각각 5.0 wt%의 조성으로 첨가한 수용액에 γ -methacryloxy propyl trimethoxy silane 0.5 wt%, glycerin 0.1 wt% 그리고 formic acid 0.05 wt%를 첨가하여 상온에서 교반시켰다. 충분히 건조시킨 유리섬유를 제조된 각각의 사이징제에 함침시켜 표면처리한 후 물과 휘발성분을 제거시키고 사이징제 성분을 고형화시키기 위하여 120 °C에서 1시간, 상온에서 24시간 건조시켰다. 이때 유리섬유에 처리된 사이징제의 무게 비율은 0.8 wt%로 조절하였다. 각각의 사이징제로 처리된 유리섬유에 MEKPO 1 wt%가 첨가된 불포화 폴리에스터 매트릭스 수지를 알루미늄

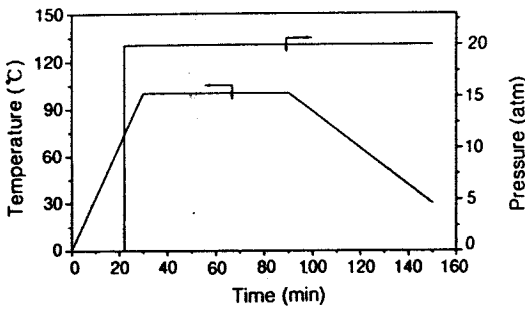


Figure 1. Composite manufacturing cycle.

로올러를 사용하여 균일하게 도포시킨 후 적층하였다. 이렇게 적층된 유리섬유는 vacuum bagging method를 사용하여 상온에서 100 °C까지 30분간 승온시킨 후 20 atm의 압력하에서 100 °C에서 1시간 동안 경화시켜 복합재료를 제조하였는데 이 때 섬유 체적비는 약 52% ($\pm 2\%$)이었다. Figure 1에 복합재료 제조시의 온도, 압력 profile을 나타내었다.

접촉각 측정. 고분자의 표면 특성 중 표면에너지는 표면장력을 알고 있는 용매와 고분자간의 접촉각을 측정함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 미처리된 유리섬유와 폴리비닐알코올, 폴리에스터 그리고 에폭시계 사이징제로 처리된 유리섬유 각각에 대한 접촉각을 Kruss Processor Tensiometer K-12를 사용하여 wicking 법으로 측정하였다.¹⁵⁻¹⁷ 일반적으로 고체와 액체와의 접촉각은 고체를 필름 형태나 판 모양으로 만든 후 면 접촉각 측정법, captive bubble법, sessile drop법 또는 Wilhelmy plate법으로 측정하는 것이 널리 알려져 있으나⁶ 섬유 형태의 재료는 정확한 접촉각 측정이 어려운데 Washburn식을 기본으로 하는 wicking 법은 면 접촉각 측정기로 측정이 어려운 분체 및 섬유와 같은 물질의 접촉각을 결정하는데 사용되는 방법이다.¹⁵⁻¹⁷

Wicking 법은 고체 충전층 내의 빈 공간을 통하여 상승하는 액체의 오름 속도를 결정함으로써 섬유와 액체의 접촉각을 측정하는 방법이고, 이때 다음의 Washburn식을 적용할 수 있다.¹⁵

$$\frac{h^2}{t} = \frac{r \cdot \gamma_L \cdot \cos \theta}{2\eta} \quad (1)$$

여기서, h 는 상승하는 액체의 높이, t 는 흐름 시간, r 은 충전입자 사이의 세공평균반경, γ_L 은 액체의

표면장력, 그리고 η 는 액체의 점도를 각각 나타낸다.

Wicking 법으로 접촉각을 측정할 때 다음과 같은 가정을 필요로 한다. 즉, 충전된 섬유 크기와 충전도는 일정하며 충전관을 통과하는 액체는 층류 흐름(laminar flow)이고 중력은 무시한다. 이 때 시간에 따른 충전층의 섬유를 적시는 액체의 질량을 측정하는 수정된 Washburn 식은 다음과 같다.¹⁸

$$\frac{m^2}{t} = \frac{c \cdot \rho^2 \cdot \gamma_L \cdot \cos \theta}{\eta} \quad (2)$$

여기서, m 은 액체의 질량, ρ 는 액체의 밀도, 그리고 c 는 충전도를 각각 나타낸다.

c 는 실험으로 결정되는 값으로 입자 크기와 충전층 내에 채워진 섬유의 채움 정도에 따라 달라지며 섬유의 c 값을 결정하기 위하여 앞에서 언급하였던 바와 같이 상온에서 표면자유에너지가 낮아 고체에 대해 완전 적심 액체인 hex산을 사용하였다. 섬유와 hex산은 완전 적심이 이루어진다고 가정하면 $\theta=0$ 이며 hex산의 점도, 밀도, 표면장력 값과 시간에 따른 섬유를 적시는 hex산의 적심 질량과의 기울기 값을 결정하여 식 (2)로부터 c 값이 계산된다. 계산된 c 값과 접촉각 측정에 사용하는 젖음액의 밀도, 점도, 표면장력 값을 알고 시간에 따른 섬유를 적시는 액체의 질량을 측정하면 이로부터 섬유의 접촉각을 측정할 수 있다.

섬유의 접촉각을 측정하기 위하여 한쪽 끝을 필터로 막은 원기둥 모양의 금속 충전관을 사용하여 약 5 g의 섬유로 채워진 충전관을 젖음액과 접촉시켜 시간에 따라 충전층 내로 올라가는 액체의 질량을 측정하였다. 실험장치의 개략적인 모습을 Figure 2에 나타내었다. 본 연구의 접촉각 측정에 사용된 젖음액은 증류수와 diiodomethane을 사용하였으며 섬유의 충전율을 결정하기 위해 상온에서 표면장력 값이 가장 낮아 모든 고체에 대해 완전 적심 액체인 hex산을 사용하였다.¹⁵⁻¹⁷ Table 1에 사용된 젖음액에 대한 표면자유에너지와 각각의 성분들의 값을 나타내었다. 각각의 사이징 처리된 유리섬유에 대하여 그들의 접촉각을 10회 이상 측정한 후 그 평균값을 취하였고 이를 이용하여 유리섬유/매트릭스의 표면자유에너지를 구하였다.

기계적 특성. 제조된 복합재료의 기계적 계면 특성

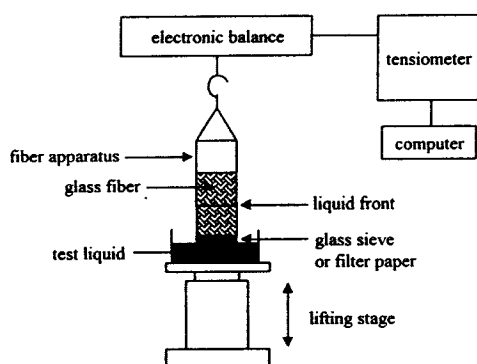


Figure 2. Schematic diagram of capillary rise method.

Table 1. Characteristics of Wetting Liquids Used in This Work

wetting liquids	γ_L^L ^a (mJ/m ²)	γ_L^{SP} ^b (mJ/m ²)	γ_L^c (mJ/m ²)	η^d (mPa.s)	ρ^e (g/cm ³)
n-hexane	18.4	0	18.4	0.33	0.661
water	21.8	51	72.8	1	0.998
diiodomethane	50.42	0.38	50.8	2.76	3.325

^a London dispersive component of surface free energy at 20 °C.

^b Specific or polar component of surface free energy at 20 °C.

^c Total component of surface free energy at 20 °C.

^d Viscosity at 20 °C. ^e Density.

은 층간 전단 강도 (interlaminar shear strength, ILSS)와 파괴 인성 (K_{IC}) 측정을 통하여 알아보았다. ILSS는 Instron #1125 시험기를 사용하여 ASTM D2344에 따라 cross-head speed는 2 mm/min, span-to-depth ratio는 5:1로 고정하여 실험하였다. 또한 K_{IC} 는 single edge notched bending (SENB) 시편을 ASTM E399에 준해 노치의 깊이를 두께의 1/2로 고정하고 cross-head speed는 1 mm/min, span-to-depth ratio는 4:1로 고정하여 측정하였다.

결과 및 고찰

접착각과 표면자유에너지. 사이징제 종류에 따른 유리섬유의 접착각을 Table 2에 나타내었다. 물과 같이 표면 장력이 높은 젖음액이 유리섬유 표면에서의 접착각이 더욱 큰 것을 알 수 있었으며, 극성인 물을 젖음액으로 사용한 경우 폴리에스터와 에폭시 사이징의 경우 접착각이 감소하였다. 특히 에폭시제

Table 2. Contact Angle Determination (in Degree) on Unsized and Sized Glass Fibers at 20 °C

wetting liquids	as-recieved	PVA sizing	polyester sizing	epoxy sizing
water	85	81	70	73
diiodomethane	61	60	64	54

사이징의 경우 diiodomethane을 젖음액으로 사용하였을 때 가장 낮은 접착각을 나타내는 것으로 보아 분산력에 의한 영향이 클 것으로 사료된다.

유리섬유 사이징에 따른 표면에너지에 관한 보다 자세한 정보를 얻기 위하여 접착각을 이용한 표면자유에너지의 분석이 가능하며, 이것은 재료의 물리적 및 기계적 특성을 알아내는데 중요한 역할을 한다.^{16,19} Fowkes는²⁰ 1960년대 초반에 표면자유에너지의 개념을 보고하였는데, 표면자유에너지는 식 (3)과 같이 London 비극성 요소 (γ^L)와 극성 요소 (γ^{SP})로 나눌 수 있다.

$$\gamma = \gamma^L + \gamma^{SP} \quad (3)$$

여기에서, γ 는 표면자유에너지, γ^L 은 London 인력에 대한 van der Waals 힘을 나타내며 γ^{SP} 는 물리적 상호작용의 모든 극성 요소를 나타낸다.

다른 특성을 가진 두 가지 이상의 액체를 사용하여 접착각을 측정할 때 Owens와 Wendt,²¹ 그리고 Wu는¹⁶ geometric mean method를 이용한 Fowkes의 개념을 도입하여 다음과 같은 식 (4)을 유도해 냈다.²²

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_L^L \cdot \gamma_S^L)^{1/2} + 2(\gamma_L^{SP} \cdot \gamma_S^{SP})^{1/2} \quad (4)$$

여기서, 아래첨자 L과 S는 액체와 고체를 각각 나타낸다.

따라서, 표면자유에너지를 알고 있는 두 가지 젖음액에 대하여 측정한 접착각을 적용해 식을 연립하여 풀면 추정하고자 하는 고체의 표면자유에너지인 γ_S^L 과 γ_S^{SP} 값을 구할 수 있다.²³

Figure 3에 증류수와 diiodomethane을 사용하여 two-liquid geometric method로부터 구한 표면자유에너지 결과를 나타내었다. 각 유리섬유의 표면자유에너지는 약 31-39 mJ/m²의 범위 내에서 측정되었

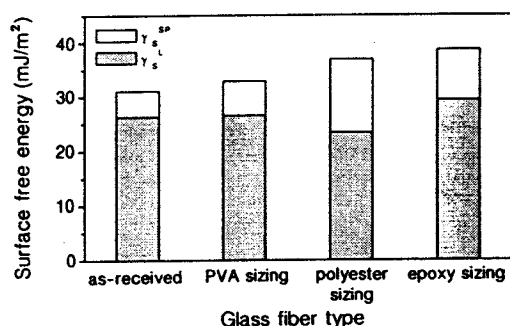


Figure 3. Evolution of surface free energy of the sized glass fibers calculated from London dispersive/polar analysis.

으며 폴리에스터와 에폭시 사이징의 경우 다소 높은 표면자유에너지 값을 보임을 알 수 있다.

유리섬유의 표면자유에너지는 열역학적인 wetting에 관한 사항을 예측할 수 있는 지표이며 복합재료 제조시 우수한 wetting 조건을 위해서는 유리섬유의 표면자유에너지가 액상 즉, 매트릭스 수지의 표면자유에너지보다 높아야 한다.²⁴ 사이징 처리되지 않은 유리섬유는 Table 2에서도 알 수 있듯이 큰 접촉각을 나타내며 표면자유에너지의 극성 요소 (4.8 mJ/m^2)와 전체 표면자유에너지 (31.0 mJ/m^2)가 가장 낮게 측정되었는데, 따라서 매트릭스 수지에 대해 가장 낮은 젖음성을 보이며 낮은 계면 결합력으로 기계적 계면 강도가 떨어질 것으로 사료된다. 반면 사이징 처리된 유리섬유의 표면자유에너지는 PVA (32.9 mJ/m^2), 폴리에스터 (36.9 mJ/m^2) 그리고 에폭시 사이징 (38.6 mJ/m^2) 순으로 증가하였다. 한편 표면자유에너지의 비극성 요소는 각각의 유리섬유에 대하여 극성 요소의 증가율과 비교하여 거의 유사한 값을 알 수 있다. Drzal 등은²⁴ 사이징 처리된 유리섬유의 표면자유에너지는 극성 요소에 의해 영향을 받게 된다고 보고하였는데, 본 실험에서 폴리에스터 사이징의 비극성 요소가 다소 낮은 이유는 diiodomethane 젖음액의 접촉각 측정시 극성기가 높은 사이징제와 불용성으로 인하여 결과적으로 표면자유에너지의 비극성 요소가 다소 낮아진 것으로 사료된다.¹⁹ 본 실험에서는 에폭시계 사이징제로 처리된 유리섬유의 경우 가장 높은 표면자유 에너지를 나타내었는데, 따라서 앞에서도 언급했듯이 매트릭스 수지 (표면자유에너지; 31.7 mJ/m^2)는 표면장력이 가장 높은 에폭시로

처리된 유리섬유와 우수한 젖음성을 이루게 되며 이로 인해 계면 결합력이 증가하여 우수한 기계적 물성을 나타낼 것으로 사료된다.

층간 전단 강도 (ILSS). 복합재료에서의 기계적 특성은 섬유와 매트릭스 수지간의 계면 접착력에 큰 영향을 받으며 우수한 기계적 특성을 얻기 위해서는 복합재료를 이루는 각각의 구성 요소들 사이에 물리적 계면 접착력이 더욱 요구된다. 본 연구에서는 사이징 처리된 유리섬유 강화 복합재료의 계면에서의 기계적 물성을 알아보기 위하여 하중 F 를 가하여 시편의 중앙면에 최대 전단 응력을 발생시켜 전단파괴 시킴으로써 τ_{max} 를 측정하였으며 다음의 식 (5)에 의해 ILSS를 구하였다.

$$ILSS = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \cdot d} \quad (5)$$

여기서 b 는 시편의 넓이, d 는 시편의 두께 그리고 F 는 span간의 거리를 나타낸다.

Figure 4에 사이징 처리에 따른 각각의 복합재료의 ILSS를 나타내었는데 이는 앞에서 논의하였던 표면자유에너지와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 폴리에스터와 에폭시계 사이징제로 처리된 복합재료의 경우 PVA로 사이징 처리된 것보다 높은 기계적 계면 강도를 나타내었으며 비처리된 유리섬유는 매트릭스 수지와 적절한 계면 형성이 이루어지지 않아 낮은 ILSS를 나타내었다. 이로써 유리섬유의 사이징 처리가 섬유의 표면 코팅으로 인한 응력 집중 완화 효과가 존재하여 최종 복합재료의 계면 결합력을 증가시키며, 기계적 물성 향상에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 유리섬유 표면에 코팅된 에폭시계와 폴리에스터계 사이징제는 매트릭스 수지내로 용해되며, 이러한 결과로 유리섬유 표면에 도입된 실란 커플링제가 매트릭스 수지와 상호 작용할 수 있는 계면을 생성시킨다. 따라서 본 실험에서 실란 커플링제로 사용된 γ -methacryloxy propyl trimethoxy silane의 메타크릴록시기의 이중결합과 매트릭스 수지와 높은 결합력에 따른 효과가²⁵ PVA계 사이징제보다 두드러져 매트릭스에 가해지는 응력 전달을 효과적으로 하여 결과적으로 높은 ILSS를 나타내게 된다.

파괴 인성. 복합재료의 크랙성장 저항 (crack

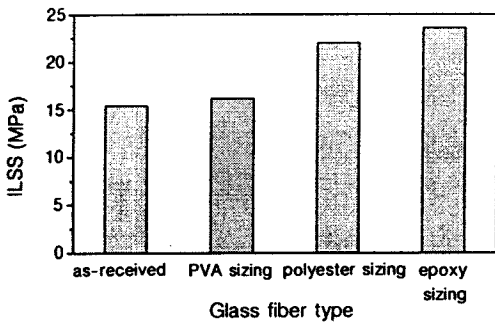


Figure 4. ILSS of the sized glass fiber/unsaturated polyester composites.

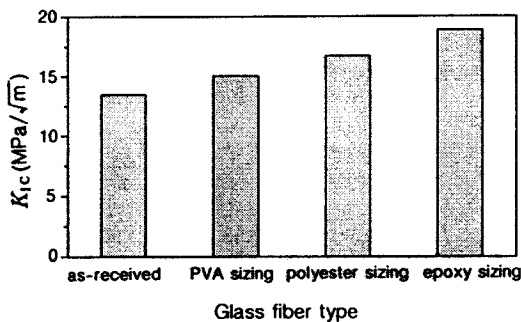


Figure 5. Fracture toughness of the sized glass fiber/unsaturated polyester composites.

growth resistance)을 나타내는 임계응력세기 인자 (critical stress intensity factor, K_{IC})는 다음 식 (6)으로부터 그 값을 구할 수 있다.^{26,27}

$$K_{IC} = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^{3/2}} \cdot Y \quad (6)$$

여기서, P 는 하중, L 은 span간의 거리, b 는 시편의 넓이, d 는 시편의 두께, 그리고 Y 는 크랙 길이, 크랙 위치, 하중 방법에 의존하는 geometric factor를 나타내며 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \frac{3(a/d)^{1/2}[1.99 - (a/d)(1-a/d)(2.15 - 3.93a/d + 2.7a^2/d^2)]}{2(1+2a/d)(1-a/d)^{3/2}} \quad (7)$$

여기서, a 는 크랙의 길이를 나타낸다.

Figure 5에 사이징 처리에 따른 복합재료의 K_{IC} 를 나타내었다. 이는 앞에서 논의하였듯이 에폭시 사이징의 경우 매트릭스 수지에 용해되어 수지와 상호

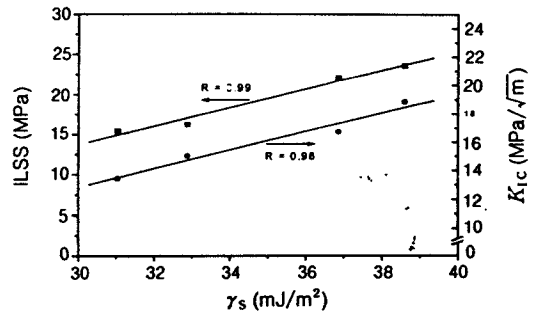


Figure 6. Dependence of ILSS and K_{IC} on surface free energy of the sized glass fiber/unsaturated polyester composites.

작용할 수 있는 계면을 생성시켜 줌으로써 유리섬유 표면에 도입된 실란 커플링제의 메타크릴록시기에 존재하는 이중결합과 매트릭스 수지와의 높은 결합력에 따른 효과가 두드러져 외부에서 가해지는 응력 및 에너지를 매트릭스에서 섬유로 매우 효과적으로 전달시키게 됨을 알 수 있다.

이러한 결과 또한 앞 절에서 언급한 사이징 종류에 따른 유리섬유의 표면자유에너지 증가와 유사한 경향을 나타내었는데, 이것의 결과로 Figure 6에 표면자유에너지와 기계적 계면 물성과의 관계를 도시하였다. 본 그림에서 알 수 있듯이 표면자유에너지의 관점에서 나타난 유리섬유 계면에서의 결합세기는 그 복합재료에서의 기계적 계면 물성인 ILSS 또는 K_{IC} 와 일정한 관계가 성립함을 알 수 있었다.

결론

본 연구에서는 유리섬유와 매트릭스 수지와의 계면 형성에 대해 각기 다른 종류의 사이징 처리에 대한 효과를 표면자유에너지와 복합재료의 기계적 물성 측정에 의해 고찰하였다. 사이징 처리된 유리섬유의 표면자유에너지는 사이징제에 사용된 film-former의 종류에 따라 차이를 보였으며 특히 에폭시계 사이징제로 처리된 유리섬유의 경우 높은 표면자유에너지를 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 표면자유에너지는 최종 복합재료의 기계적 계면 물성에 영향을 미치며 유리섬유의 사이징 처리가 섬유와 매트릭스 수지와의 계면 결합력을 증진시켜 결과적으로 복합재료의 최종 기계적 계면 물성을 증가시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

1. C. E. Knox, "Handbook of Composites", ed. by George Lubin, van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
2. P. K. Mallick, "Fiber-reinforced Composites", Marcel Dekker, New York, 1988.
3. M. M. Schwartz, "Composite Materials Handbook", McGraw-Hill, New York, 1992.
4. T. Norita, J. Matsui, and H. S. Matsuda, "Composite Interfaces", eds. by H. Ishida and J. L. Koenig, Elsevier, New York, 1986.
5. S. J. Park, "Interfacial Forces and Fields: Theory and Applications", ed. by J. P. Hsu, Marcel Dekker, New York, 1999.
6. A. W. Adamson, "Physical Chemistry of Surfaces", 5th ed., John Wiley, New York, 1990.
7. J. N. Israelachvili, "Intermolecular and Surface Forces", Academic Press, San Diego, 1992.
8. K. L. Loewenstein, "The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers", Elsevier, Amsterdam, 1983.
9. B. J. R. Scholtens, "The Interactions in Polymeric Composites", Kluwer, Dordrecht, 1993.
10. E. P. Plueddemann, "Silane Coupling Agents", 2nd ed., Plenum Press, New York, 1991.
11. C. H. Chiang and J. L. Koenig, *J. Colloid Interface Sci.*, **83**, 361 (1981).
12. R. T. Graf, J. L. Koenig, and H. Ishida, *Anal. Chem.*, **56**, 773 (1984).
13. E. T. Vandenberg, L. Bertilsson, B. Liedberg, K. Uvdal, R. Erlandsson, H. Elwing, and I. Lundstrom, *J. Colloid Interface Sci.*, **147**, 103 (1991).
14. N. Suzuki and H. Ishida, *Macromol. Symp.*, **108**, 19 (1996).
15. E. W. Washburn, *Phys. Rev.*, **17**, 273 (1921).
16. S. Wu, "Polymer Interface and Adhesion", Marcel Dekker, New York, 1982.
17. C. J. van Oss, "Interfacial Forces in Aqueous Media", Marcel Dekker, New York, 1994.
18. S. B. Rho and M. A. Lim, *Polymer(Korea)*, **23**, 662 (1999).
19. S. J. Park, W. B. Park, and J. R. Lee, *Polymer J.*, **31**, 28 (1999).
20. F. M. Fowkes, *J. Phys. Chem.*, **66**, 382 (1962).
21. D. K. Owens and R. C. Wendt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **13**, 1741 (1969).
22. K. Ma, T. S. Chung, and R. J. Good, *J. Polym. Sci., Polym. Phys.*, **36**, 2327 (1998).
23. S. J. Park, M. S. Cho, and J. R. Lee, *Polymer(Korea)*, **23**, 717 (1999).
24. B. K. Larson and L. T. Drzal, *Composites*, **25**, 711 (1994).
25. Y. Suzuki, Z. Maekawa, H. Hamada, A. Yokoyama, and T. Sugihara, *J. Mater. Sci.*, **28**, 1725 (1993).
26. M. C. Chen, D. J. Hourston, and W. B. Sun, *Eur. Polym. J.*, **31**, 199 (1995).
27. P. Gopal, L. R. Dharani, and F. D. Blum, *Polym. & Polym. Compo.*, **5**, 327 (1997).