

# 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료의 충격파괴기구에 대한 온도효과

고성위<sup>†</sup> · 엄운성<sup>\*</sup>  
부경대학교

## Temperature Effects on Impact Fracture Mechanisms of Glass Fiber/Polypropylene Composites

S. W. KOH and Y. S. Um  
Pukyong National University

### KEY WORDS:

Temperature Effect(온도효과), Impact Test(충격시험), Thermoplastic Composites(열가소성 복합재료), Critical Fracture Energy(임계파괴에너지), Fracture Analysis(파면해석), GF/PP Composites(GF/PP 복합재료)

### ABSTRACT:

Many of researches regarding mechanical properties of composite materials are associated with humid environment and temperature. Especially the temperature is a very important factor influencing the design of thermoplastic composites. However, the effect of temperature on impact behavior of reinforced composites have not yet been fully explored. An approach which predicts critical fracture toughness  $G_{IC}$  was performed by the impact test in this work. The main goal of this work is to study effects of temperature in the impact test with glass fiber/polypropylene(GF/PP) composites. The critical fracture energy and failure mechanisms of GF/PP composites are investigated in the temperature range of 60°C to -50°C by impact test. The critical fracture energy shows a maximum at ambient temperature and it tends to decrease as temperature goes up or goes down. Major failure mechanisms can be classified such as fiber matrix debonding, fiber pull-out and/or delamination and matrix deformation.

### 기호설명

- a : 크랙길이
- B : 시험편 두께
- $G_{IC}$  : 임계파괴에너지
- S : 스패길이
- U : 총 충격에너지
- $U_k$  : 운동에너지
- W : 시험편 폭
- $\Phi$  : 무차원형상계수

### 1. 서론

최근에 널리 쓰이고 있는 섬유강화 복합재료는 플라스틱 재료가 갖고 있는 가공성의 장점을 충분히 발휘한 재료로서 모재인 수지와 강화재인 강화섬유로 구성된다. 이 섬유강화 복합재료의 구성요소 중 모재로 사용되는 수지는 열경화성수지와 열가소성수지로 분류된다. 강화재로 사용되는 강화섬유는 케블라(keblar), 유리섬유(glass fiber) 그리고 탄소섬유(carbon fiber) 등이 있으나 가격대비 성능이 우수한 유리섬유와 탄소섬유가 널리 쓰이고 있다. 이 두 섬유를 강화재로 사용한 복합재료는 사용한 섬유의 종류에 따라 유리섬유강화플라스틱(glass fiber reinforced plastic :GFRP) 과 탄소섬유강화플라스틱(carbon fiber reinforced plastic :CFRP)으로 구분하며 이 두 복합재료가 건설, 선박, 자동차 그리고 우주항공분야에 이르기까지 거의 모든 산업에서 다양하게 이용되고 있다.

열가소성 복합재료에 대한 연구결과들은 다음과 같다. Famsteiner와 Theyson<sup>1)</sup>은 유리섬유/PP복합재료를 사용하여 섬유와 기지의 계면은 충격강도에 큰 영향을 미친다고 하였

---

<sup>†</sup> 부경대학교  
E-mail : swkoh@pknu.ac.kr  
TEL : (051)620-1579 FAX : (051)620-1574  
<sup>\*</sup> 부경대학교

---

다. Voelker<sup>2)</sup>는 유리섬유와 폴리프로필렌(PP)수지를 이용하여 성형한 장섬유복합재료를 22℃ ~ -32℃의 온도범위에서 행한 충격시험을 통하여 취성과 연성파괴가 일어나지 않고 섬유함유율의 증가에 따라 충격값이 증가한다고 하였다. Chen 등<sup>3)</sup>은 -40℃ ~ 40℃의 온도에서 실험을 통하여 20℃ 보다 낮은 온도에서 단일중합체의 첨가물은 충격파괴에너지를 향상시킨다고 하였다. Sova 등<sup>4)</sup>은 유리섬유와 PP수지를 이용한 단섬유복합재료의 충격파면은 섬유방향에서 복합적인 파괴와 파편에 의해 형성되는 거시적인 파괴를 보인다고 하였다. Tomlinson과 Holland<sup>5)</sup>는 환경적요인, 즉 염분과 온도에 대한 유리섬유/폴리프로필렌(GF/PP)의 충격거동에 관한 연구를 하였고, Um 등<sup>7)</sup>은 실온 ~ -50℃에서 충격실험을 통하여 충격에너지의 변화와 파괴기구를 규명하였다. 이처럼 충격강도에 영향을 미치는 인자에 대한 연구결과는 많지만 온도변화에 따른 충격파괴기구에 대한 고찰은 아직 부족한 실정이다.

따라서 열가소성 복합재료의 파괴거동을 예측하기 위한 기초자료로서 먼저 유리섬유와 열가소성 수지의 일종인 폴리프로필렌수지로 성형한 열가소성복합재료의 충격실험을 통하여 이들 요인들의 영향에 대한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 열가소성 복합재료의 기계적 특성과 파괴거동에 관한 종합적인 연구의 일환으로 섬유함유율이 20%와 30%인 GF/PP 복합재료를 충격시험을 통하여 실험온도를 -50℃에서 60℃로 변화시켜 온도변화에 대한 임계파괴에너지의 거동을 고찰하고 파단면을 SEM 사진을 통해 비교 검토하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

실험에 사용한 복합재료의 수지는 폴리프로필렌 수지이고, 강화섬유로는 섬유길이 2~4mm인 단섬유를 사용하였다. 용융된 폴리프로필렌 수지와 유리섬유를 혼합하여 인라인 스크류(in-line screw)식의 사출기를 사용하여 3mm 두께로 성형하였다. 성형조건은 스크류속도 60rpm, 1차 사출속도 1200kgf/cm<sup>2</sup>, 그리고 2차 사출속도 900kgf/cm<sup>2</sup> 으로 사출성형하였다. 성형시 수지에 대한 섬유함유의 체적비는 20%와 30% 두 종류로 성형한 국산 단섬유 유리섬유/폴리프로필렌(GF/PP) 복합재료(H사)를 사용하였다. GF/PP 복합재료의 각종 성질은 Table 1과 같다.

성형된 복합재료는 성형된 복합재료의 중앙부위는 노즐의 분사압력의 영향으로 인하여 섬유의 배열이 전체적으로 고루 분포되어 있지 못하므로, 충격시험편을 제작하기 위하여 섬유의 배열이 최대한 고르게 배열이 되어 있는 부분을 다이아몬드 커터를 이용하여 절취하였다.

Fig. 1은 시험편 폭 10mm, 시험편 길이가 55mm 그리고 스패ん길이 40mm인 시험편을 나타낸 것으로 원재료에서 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였고 이 표면을 밀링에 의하여 가공하였다. 노치는 시험편의 중심에 두께 1mm인 톱으로

일차 가공한 후, 노치깊이 더욱 날카롭게 하기 위해 신품의 면도날을 이용하여 총 크랙길이가 1~2.25mm의 범위가 되도록 이차 가공하였다. 시험편 길이가 35mm(스패ん길이 20mm)와 45mm(스패ん길이 30mm)인 시험편도 동일한 방법으로 가공하였다.

Table 1 Properties of GF/PP composites

volume fraction (%)	20	30
density(g/cm <sup>3</sup> )	1.03	1.12
co. of thermal expansion(%)	0.6~1.6	0.4~0.8
molding temp.(℃)	200~240	200~240
elongation(%)	4	4
bending modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	38000	53000

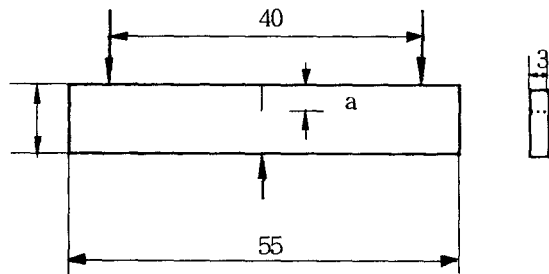


Fig. 1. Specimen geometries for Charpy impact (unit : mm)

임계파괴에너지  $G_{IC}$ 의 평가는 식 (1)과 같이 충격시험에서 얻은 총 충격에너지  $U$ 와 시험편 두께와 시험편 폭 그리고 무차원형상계수의 곱  $BW\phi$ 를 이용하여 최소자승법에 의하여 기울기를 구하여 이 기울기를 임계파괴에너지  $G_{IC}$ 로 한 Plati와 Williams<sup>7)</sup>가 제안한 방법으로 계산한 것이다.

$$U = Uk + G_{IC}BW\phi \quad (1)$$

무차원계수  $\phi$ 를 다른 방법으로 나타내면 다음과 같다.

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{W} + \frac{1}{18\pi} \cdot \frac{S}{W} \cdot \frac{1}{a/W} \quad (2)$$

총 충격에너지  $U$ 와  $BW\phi$ 를 도식화하여 최소자승법으로 그 기울기를 구하면 이것이 임계파괴에너지  $G_{IC}$ 가 된다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 임계파괴에너지

Fig. 2는 섬유함유율이 20%인 경우  $BW\phi$ 의 변화에 대한 총 충격에너지  $U$ 를 각각의 온도조건에 대해 나타낸 것으로

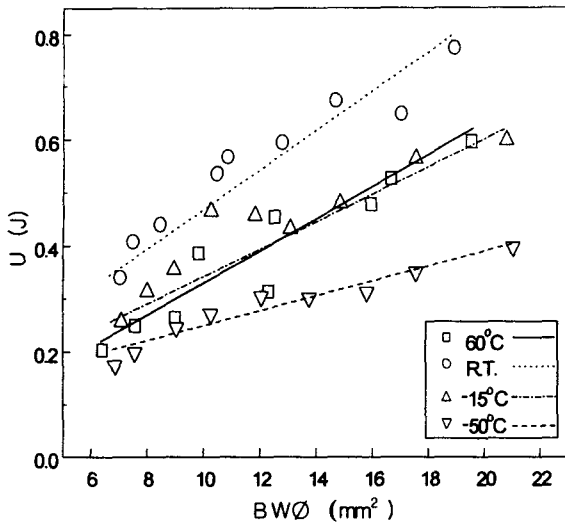


Fig. 2. U vs BWφ for various temperature with 20% fiber volume fraction.

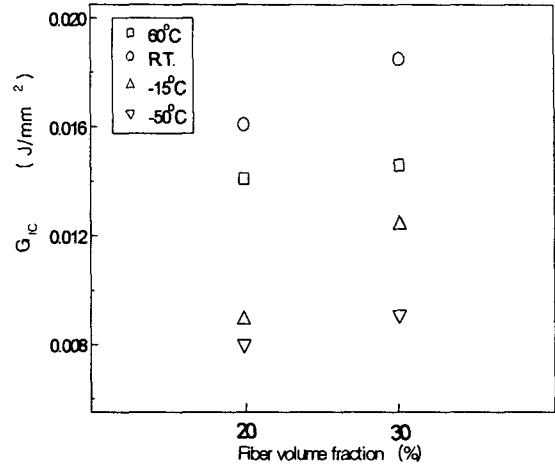


Fig. 4.  $G_{IC}$  vs fiber volume fraction for various temperature.

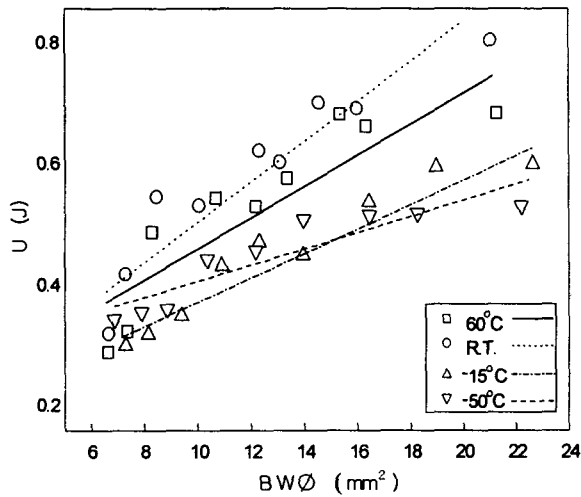


Fig. 3. U vs BWφ for various temperature with 30% fiber volume fraction.

□는 60°C, ○는 실온, △는 -15°C 그리고 ▽는 -50°C인 경우를 나타내고 있다. 총 충격에너지 U는 BWφ가 증가함에 따라 실온의 경우가 가장 높게 나타나고 실험에서 가장 낮은 온도인 -50°C에서의 그것은 가장 낮게 나타났다. 한편 실온과 -15°C에서 U는 BWφ가 적은 경우에는 60°C의 경우보다 높게 나타나지만 BWφ가 증가하면 이와는 반대되는 경향을 나타냈다. 또한 실험한 온도범위에서 U는 BWφ가 증가함에 따라 증가하지만 완전히 선형화는 되지 않고 대체적으로 선형화 하는 경향을 보이고 있다.

Fig.3은 섬유함유율이 30%인 경우 BWφ의 변화에 대한 총 충격에너지 U를 각각의 온도조건에 대해 나타낸 것이다. 실험한 모든 온도에서 총 충격에너지 U는 BWφ가 증가함에 다

라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 섬유함유율이 20%인 경우와 같이 총 충격에너지 U는 실온의 경우가 가장 높게 나타나지만 그 외의 온도에서 U는 다르게 나타났다.

Fig.2와 3에서 알 수 있듯이 총 충격에너지 U는 온도에 의존한다는 것을 알 수 있으나 일관된 경향을 나타내고 있지 않으므로 온도와 U의 상관관계는 자세한 연구가 필요하다.

Fig. 4는 스펠길이 40mm인 복합재료의 온도의 변화에 대한 임계에너지  $G_{IC}$ 를 나타낸 것이다. 임계파괴에너지  $G_{IC}$ 의 산출은 식(1)의 무차원 계수인 BWφ와 총 충격에너지 U의 기율기로서 산출한 것이다. 그림에서 섬유함유율이 20%인 경우의 임계파괴에너지  $G_{IC}$ 의 값은 실온에서 가장 높게 나타나고 60°C, -50°C 그리고 -15°C의 순으로 낮게 나타났다. 이러한 양상은 섬유함유율이 30%인 경우에도 유사한 경향을 보이고 있다.

### 3.2 임계파괴에너지

Fig. 5은 섬유함유율 20%, 스펠길이 40mm인 복합재료의 온도변화에 대한 파단면을 나타낸 것이다. (a)는 60°C, (b)는 실온, (c)는 -15°C 그리고 (d)는 -50°C의 파단면을 나타내고 있다. 온도의 변화에 대한 수지의 변형을 비교하여 보면 그림 (b)에서 파단면의 수지형태는 연성과 인성의 영향이 거의 없고 취성의 파단형태를 보이고 있으며, 그림(a)는 연성과 인성이 증가한 파단형태를 보이고 있다. 이것은 온도가 상승하면 연성과 인성이 증가하는 수지의 고온특성에 의한 것으로 생각된다. 그리고 그림 (c)와 (d)에서는 그림 (b)보다 연성과 인성이 감소한 취성파단형태를 보이고 있으며 이것은 고온의 경우에서와 유사하게 열가소성수지의 저온에 대한 저온

특성에 의한 것으로 생각된다. 섬유와 수지사이의 풀아웃(pull out)과 디본딩(debonding)이 주로 일어나고 섬유의 표면에 남아있는 수지의 양도 거의 없고 섬유표면도 매끄러운 파괴양상을 보이고 있다. 그림(a)의 파단면은 상온과는 달리 섬유표면에 남아있는 수지의 양도 증가하고 풀아웃과 디본딩이 상온보다는 적게 발생함을 보여주고 있다. 또한 증가된 수지의 연성과 인성으로 인해 섬유의 배열상태도 불규칙하게 배열된 양상을 보이고 있다. 그림(c)와 (d)는 풀아웃이 주로 발생하는 양상을 보이고 있으며, 풀아웃의 정도가 심해지는 경향을 나타내고 있다. 또한 온도가 증가함에 따라 수지의 변형이 증가하고 있으며, 저온일수록 섬유와 수지 사이의 디본딩을 많이 관찰할 수 있다.

Fig.6은 섬유함유율이 30%인 경우의 파단면을 온도 변화에 따라 나타낸 것으로 Fig.5와 유사한 경향임을 알 수 있다.

Fig.5와 6에서 알 수 있는 바와 같이 GF/PP 복합재료의 충격파괴기구는 온도가 증가함에 따라 수지의 변형이 증가함을 알 수 있으며, 또한 저온일수록 섬유와 수지 사이의 디본딩이 더욱 많이 발생하여 섬유의 풀아웃이 증가함을 알 수 있다.



(a) 60°C



(b) R.T.

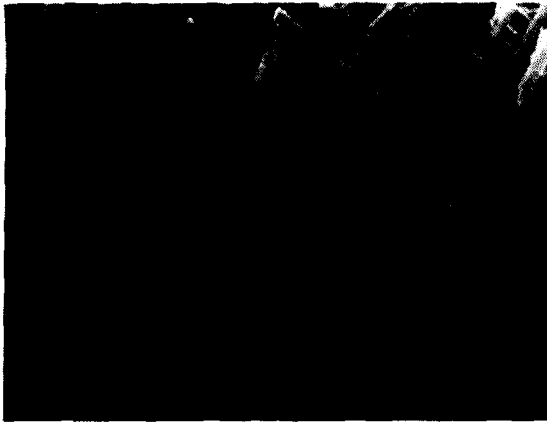


(c) -15°C

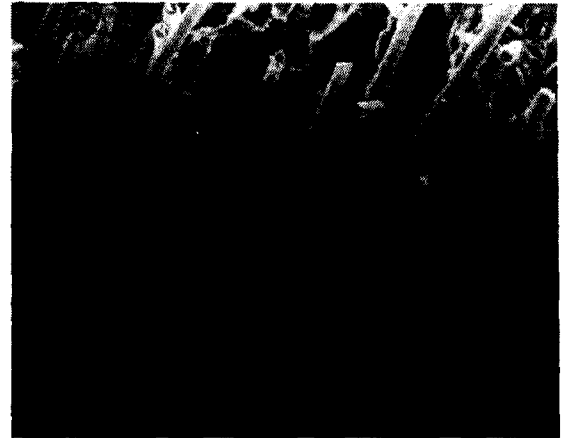


(d) -50°C

Fig. 5. SEM photographs of impact fracture surfaces for 20% fiber volume fraction span at various temperature.



(a) 60°C



(d) -50°C



(b) R.T.



(c) -15°C

Fig. 6. SEM photographs of impact fracture surfaces for 30% fiber volume fraction span at various temperature.

#### 4. 결 론

섬유함유율이 20%와 30%인 GF/PP 복합재료를 -50°C에서 60°C의 온도범위에서 충격실험과 파면해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) GF/PP복합재료의 총 충격에너지 U는 상온에서 가장 높게 나타났으며, 온도와 U의 상관관계가 있음을 알 수 있다.
- 2) 임계파괴에너지 $G_{IC}$ 의 값은 동일한 섬유함유율에서 실온에서의 임계파괴에너지 $G_{IC}$ 의 값이 가장 높게 나타나고 60, -15 그리고 -50°C순으로 낮게 나타났다.
- 3) GF/PP 복합재료의 파괴기구는 온도의 변화에 따라 수지의 변형이 나타났으며 섬유의 풀아웃, 섬유와 수지 사이의 디본딩을 관찰할 수 있었으며, 이와 같은 파괴기구가 종합적으로 상호작용한다고 생각된다

#### 참고문헌

- 1) Famsteiner, F. and Theysohn, R.(1979) : "Tensile and Impact Strengths of Unidirectional, Short Fiber-Reinforced Thermoplastics", Composites 12(2), pp.111-119.

2) Voelker, M. J.(1991) : Low Temperature Impact Properties of Long Fiber Thermoplastic Composite Molding Materials", Polymer Comp., 12(4), pp.119~121.

3) Chen, Le-Shang., Mai, Yie Wing, and Cotterell, Brian(1989) : "Impact Fracture Energy of Mineral-Filled Polypropylene", Polymer Eng. and Sci. 29(8), pp.505-512.

4) Sova, M., Raab, M. and Slizova, M.(1993) : "Polypropylene Composite Materials Oriented by Solid-state Drawing : low-temperature impact behaviour", J. Mat. Sci. 28, pp.6516-6523.

5) Tomlinson, W. J. and Holland, J. R.(1994) : "Pultrusion and Properties of Unidirectional Glass Fibre - Polypropylene Matrix Composites", J. Mat. Sci. Letters 13, pp.675~677.

6) Um, Yoon-Sung, Park, Ki-Ho, Koh, Sung-Wi and Kim, Hyung-Jin (1999) : "A Study on the Impact Fracture Behavior of Glass Fiber Polypropylene Composites", Bull. Korean Soc. Fish. Tech. 35(4), pp.421~427(in Korean).

7) Plati, E. and Williams J. G.(1975) : "The Determination of the Fracture Parameters of Polymers in Impact", Polymers Eng. Sci. 15, pp. 470~477.