

## 유리섬유/폴리프로필렌 복합재에서 섬유 함유비가 파괴특성에 미치는 영향에 대한 연구

A Study of Fiber Content Effect on the Fracture Behavior of Glass/Polypropylene Composites

이경엽\*, 신동혁\*\*, 이종희\*\*\*  
Kyongyop Rhee, Donghyok Shin, Joonghee Lee

### ABSTRACT

This study investigates the effect of fiber content on the fracture behavior of thermoplastic composites (glass fiber/polypropylene). The fiber contents used were 20%, 30%, and 40% by weight. Fracture tests were performed using compact tension (CT) specimens made of composite sheets of three fiber contents (20%, 30%, 40%). The results showed that compliance, fracture load, and fracture toughness were affected by the fiber content. The compliance decreased with fiber content while the fracture load increased as the fiber content increased. The fracture toughness also increased as fiber content increased. Specifically, the fracture toughness increased 14% as the fiber content increased from 20% to 40%.

주요기술용어 : Thermoplastic composites(열가소성 복합재), Glass fiber/polypropylene composites(유리섬유/폴리프로필렌 복합재), Energy release rate(에너지 방출률), Fracture toughness(파괴인성), Compliance method(컴플라이언스 방법), CT specimen(CT 시편)

### 1. 서 론

폴리머 복합재는 고분자를 기지재로 하고 섬유를 보강재로 섞어서 그 특성을 목적으로 유용하게 적용할 수 있도록 만든 재료이다. 이와 같은 폴리머 복합재는 금속재에 비해 가볍고, 비강도, 비강성, 내식성 등이 우수해 우주산업, 항공산업, 조선 및 자동차 산업에서 적용이 급속도로 증가하고 있다.

폴리머 복합재는 고분자의 종류에 따라 열

경화성 복합재와 열가소성 복합재로 분류된다. 열경화성 복합재는 강성 및 강도가 우수하나 재활용이 안 되는 단점이 있다. 이에 비해 열가소성 복합재는 상온에서 보관이 용이하고 제조공정 시간이 짧으며 재활용을 할 수 있는 장점이 있어 이를 자동차의 바디 및 범퍼 구조물로 적용하려는 연구가 이루어지고 있다.<sup>1,2)</sup> 그러나 이와 같은 연구의 대부분이 짧은 길이의 섬유로 강화된 복합재에 대해서만으로서 긴 섬유가 임의의 방향으로 강화된 열가소성 복합재에 대한 기계적 특성에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 특히 긴 유리섬유로 보강된 열가소성 복

\* 회원, 경희대학교 기계·산업 시스템공학부  
\*\* 회원, 경희대학교 기계과 대학원

\*\*\* 회원, 전북대학교 신소재 공학부

합재료는 얇은 유리섬유로 보강된 경우에 비해 인장강도 및 충격강도가 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 이러한 유망한 복합재 중 유리섬유 길이가 10mm에서 20mm 정도이며 임의의 방향으로 보강된 폴리프로필렌(polypropylene) 복합재는 최근 구조재로서 각광을 받고 있는 열가소성 복합재 중 하나이다. 한편 폴리머 복합재는 섬유의 끊어짐, 섬유이탈, 기지재의 미소균열 등 복잡한 형태로 파괴가 발생하는 것이 일반적으로서 이에 대한 상당한 연구가 열경화성 복합재료에 대해 이루어졌지만,<sup>4,6)</sup> 이에 비해 긴 유리섬유 강화 열가소성 복합재료의 파괴거동 특성에 대한 연구는 미진한 상태이다.

본 연구에서는 고상 성형 방법(solid phase forming)으로 성형된 유리섬유/폴리프로필렌 열가소성 복합재에 있어 유리섬유 함유량이 파괴거동에 미치는 영향을 검토하였다. 즉 12.7mm의 유리섬유가 임의의 방향으로 보강된 폴리프로필렌 열가소성 복합재에 대해 섬유 함유량을 20%, 30%, 40%로 변화시켜 그에 따른 캠플라이언스, 파괴하중, 파괴인성의 변화를 실험적으로 검토하였다.

## 2. 시편제작 및 실험

본 실험에서는 Ahlstrom 회사에서 생산하는 semi-consolidate된 RTC-C-4000-20, RTC-C-3000-30, RTC-C-3000-40 등의 복합재를 가열 압축하여 판재형태로 제작한 후 이를 적용 파괴시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 복합재는 수지가 폴리프로필렌이고 강화재가 임의의 방향으로 분포된 유리섬유이다. 유리섬유의 직경과 길이는 각각  $11\mu\text{m}$ 와 12.7mm이다. 사용된 폴리프로필렌의 유리전이온도와 용융온도는 각각  $-10^\circ\text{C}$ 와  $165^\circ\text{C}$ 이다. 섬유 중량비가 파괴거동에 미치는 영향을 결정하기 위해 유리섬유를 중량비로 20%, 30%, 40% 함유한 폴리프로필렌 복합재료를 CT(Compact Tension)

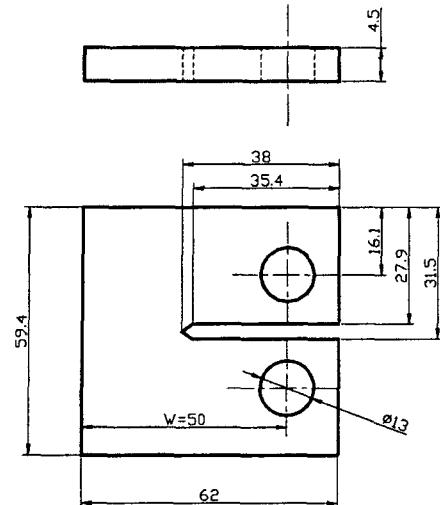


Fig. 1 Configuration of CT specimen

시험편으로 제작하여 각각에 대해 파괴실험을 수행하였다. 파괴실험은 0.1톤인 만능시험기를 사용하여 변위 조정을 통한 일정 변형률(2mm/min) 하의 하중-제하 방법을 적용하였다. 하중-제하에 따른 하중 및 변위 데이터는 만능시험기에 부착된 LVDT를 통해 측정하였고 하중 증가에 따른 균열 진전은 광학배율 100X의 이동현미경을 실험기에 부착하여 1/100 mm까지 측정하였다. 실험 결과의 유사성을 판단하기 위해 각 경우에 대하여 최소한 3가 이상의 파괴실험을 같은 조건에서 반복 수행하였다. 본 연구에 적용된 CT 시편의 모양, 크기 및 초기 균열 길이는 Fig. 1에 나타나 있다.

## 3. 결과 및 검토

본 연구에서는 캠플라이언스 방법을 적용, 세 경우 섬유 중량비에 대한 파괴인성을 결정하였다. 캠플라이언스 방법을 적용해 파괴인성 값을 결정하기 위해서는 균열 진전에 따른 캠플라이언스 및 파괴하중 변화 측정을 필요로 한다. 균열 진전에 따른 캠플라이언스 변화를 결정하기 위해서는 각 균열 진전에 대한 하중-변위 선도가 필요하다. Fig. 2는 30

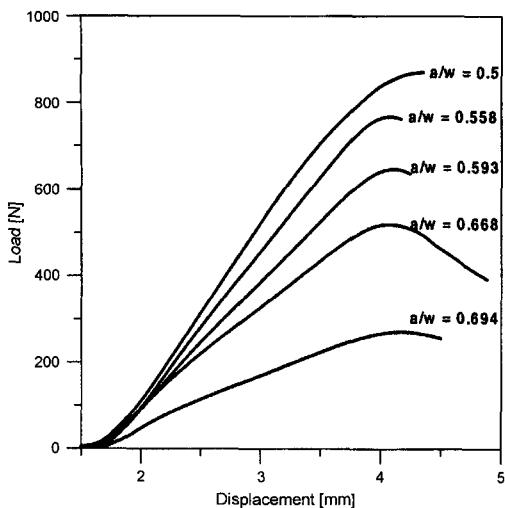


Fig. 2 Typical load-displacement curve for a 30% fiber weight fraction

% 섬유 함유량을 갖는 경우에 대한 균열 진전에 따른 전형적인 하중-변위 선도를 나타낸다. Fig. 2에 나타나 있듯이 균열이 시작하기 전까지는 하중은 변위에 대해 선형적으로 증가하다가 약간의 비선형을 거친 후 균열 진전이 시작되면 감소하는 것을 알 수 있다.

컴플라이언스는 하중-변위 선도에서 하중이 변위에 대해 선형적으로 증가하는 구간의 기울기를 측정 이에 대한 역수를 취함으로써 결정하였다. Fig. 3은 세 섬유 중량비를 갖는 경우의 균열 진전에 따른 컴플라이언스의 변화를 나타낸다.

Fig. 3에 나타나 있듯이 세 경우 모두 컴플라이언스는 균열 길이가 증가함에 따라 비선형으로 증가함을 알 수 있다. 또한 섬유 함유량이 증가함에 따라 컴플라이언스는 점차 작아짐을 알 수 있다. 최소오차자승법을 적용해 세 경우의 균열 진전에 대한 컴플라이언스 변화를 균열길이의 함수로 나타내면 각각 다음과 같다.

$$C = [0.8 + 6.6(\frac{a}{W}) - 19(\frac{a}{W})^2 + 47(\frac{a}{W})^3] \times 10^{-3} m/N \quad (1)$$

$$C = [0.5 + 5.1(\frac{a}{W}) - 16(\frac{a}{W})^2 + 30(\frac{a}{W})^3] \times 10^{-3} m/N \quad (2)$$

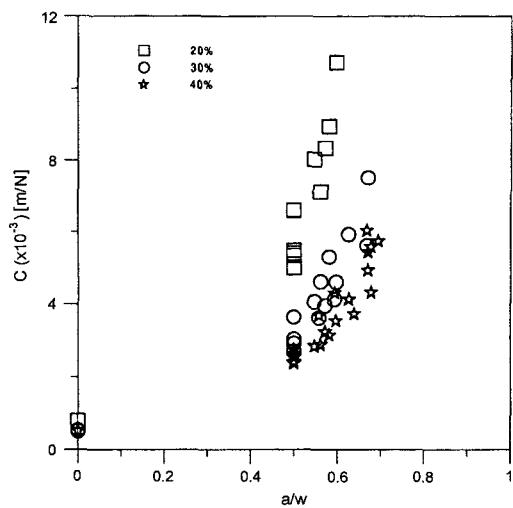


Fig. 3 Compliance change as a function of  $a/w$  for 20% (□), 30% (○), 40% (☆) where "a" and "w" represent a crack length and a specimen width respectively

$$C = [0.5 + 6.7(\frac{a}{W}) - 21(\frac{a}{W})^2 + 33(\frac{a}{W})^3] \times 10^{-3} m/N \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)은 각각 20%, 30%, 40% 경우의 균열진전에 대한 컴플라이언스 변화를 나타낸다. Fig. 2와 같이 파괴가 발생하기 전까지 하중이 변형에 대해 비선형 거동을 나타내는 경우에 있어  $P_{cr}$  결정은 세 가지 방법으로 할 수 있다.<sup>7)</sup> 첫 번째 방법은 Fig. 4에서처럼

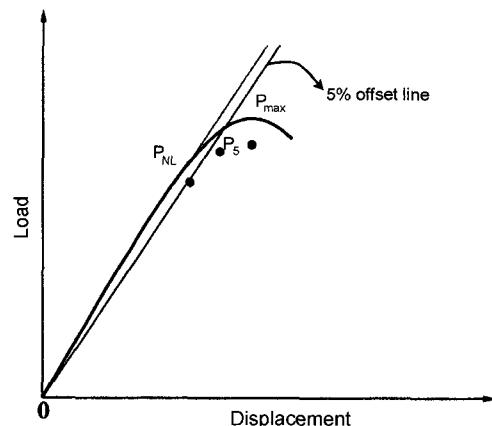


Fig. 4 Schematic illustration of determining  $P_{cr}$  in the load-displacement curve

하중-변위 선도에서 비선형이 시작되는 점의 하중,  $P_{NL}$ 을  $P_{cr}$  값으로 하는 것이고, 두 번째 방법은 초기선형 기울기로부터 % 감소된 기울기를 가지는 직선을 그려서 선도와 만나는  $P_s$  값을  $P_{cr}$ 로 결정하는 것이며, 세 번째 방법으로는 하중-변위 선도에서 파괴가 발생하기 전까지의 최대하중인  $P_{max}$  값을  $P_{cr}$ 로 결정하는 것이다. 본 연구에서는 세 방법 중 가장 낮은 파괴인성이 결정되는 첫 번째 방법을 적용  $P_{cr}$  값을 결정하였다. Fig. 5는 세 경우의 균열진전에 따른  $P_{cr}$  값의 5 변화를 나타낸다. Fig. 5에 나타나 있듯이 세 경우 모두  $P_{cr}$  값은 균열 길이가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 또한 같은 균열 길이에 대해 섬유 함유량이 증가할수록  $P_{cr}$  값이 증가됨을 알 수 있다.

섬유 함유량이 열가소성 복합재의 파괴인성에 미치는 영향을 이해하기 위해 유리섬유를 중량비로 20%, 30%, 40% 함유한 폴리프로필렌 CT 복합재 시편에 대한 파괴인성 값을 캠플라이언스 방법을 적용하여 결정하였다. 캠플라이언스 방법을 적용하였을 때 파괴인성은 다음의 식으로 결정된다.<sup>8)</sup>

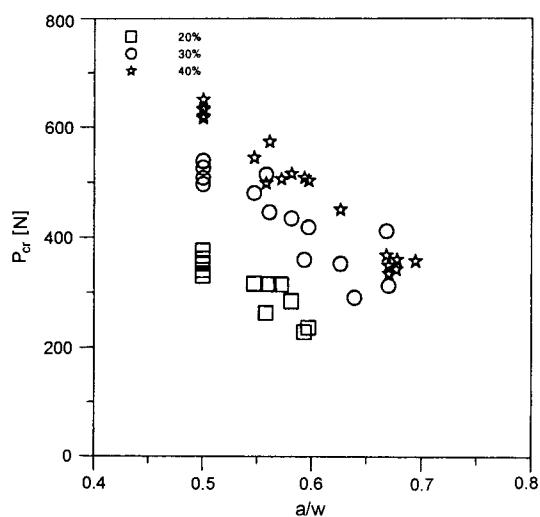


Fig. 5 Variation of  $P_{cr}$  as a function of  $a/w$  for 20% (□), 30% (○), and 40% (☆) cases

$$G_c = -\frac{P_{cr}^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (4)$$

윗 식에서  $G_c$ 는 파괴인성 값을,  $B$ 는 시편의 두께를,  $P_{cr}$ 은 임계하중을, “C”는 캠플라이언스를 나타낸다. 세 경우의 균열 진전에 대한  $G_c$  값을 결정하기 위해  $P_{cr}$  값을 Fig. 5로부터 캠플라이언스의 균열 진전에 따른 도함수  $dC/da$  값을 식(1)-(3)에서 결정하여 식(4)에 대입하였다.

Fig. 6은 각각 20%, 30%, 40%를 함유한 시편의 캠플라이언스 방법을 적용했을 때 균열 진전에 따른  $G_c$  값의 변화를 나타낸다. 위 그림에 나타나 있듯이 모두  $G_c$  값이 균열 진전 길이에 따라 약간씩 분산되어 있는데 이는 시험편 내의 섬유분포가 균질하지 않은데 기인하는 것으로 고려된다.

세 경우 섬유 함유량에 따른  $G_c$  값을 비교하기 위해 각 경우에 대한 파괴인성치 변화를 에러바(error bar)로 표시 이를 비교하였다. Fig. 7은 세 경우의 파괴인성치 비교를 나타낸다. Fig. 7에서 “●”로 표시된 값은 각 경우의 파괴인성치 변화에 대한 평균값을 나타낸다.

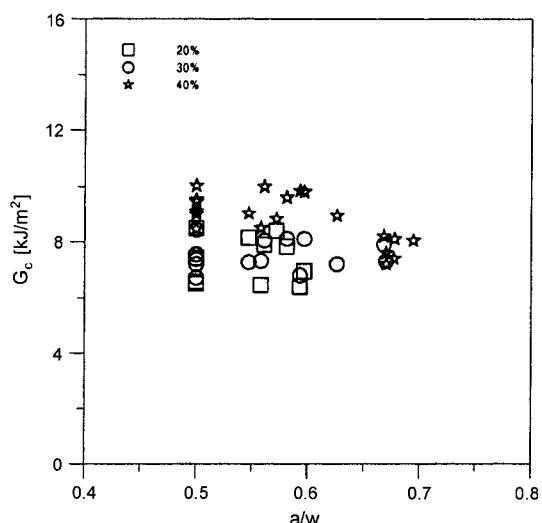


Fig. 6 Variation of  $G_c$  as a function of  $a/w$  for 20% (□), 30% (○), and 40% (☆) cases

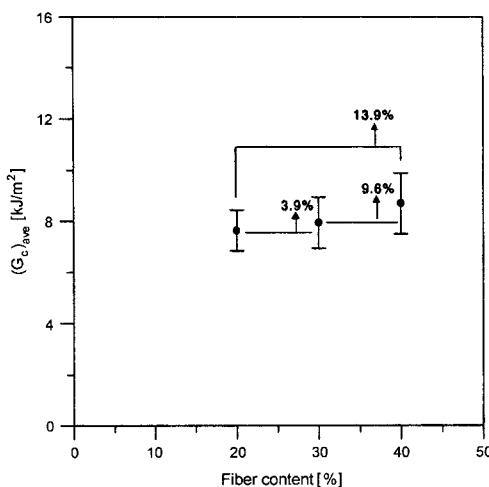


Fig. 7 Comparison of averaged  $G_c$  for 20%, 30% and 40% cases

위 그림에 나타나 있듯이 섬유 함유량이 증가에 따라  $G_c$  값이 증가함을 알 수 있다. 즉 20% 섬유를 함유한 경우에 대해 30% 섬유를 함유한 경우는 약 4%  $G_c$  증가율을 보이고 40% 섬유를 함유한 경우는 약 14%  $G_c$  증가율을 나타낸다. 한편 이것은 평균  $G_c$ 를 비교 한 것이며 그림에서 에러바를 보면 알 수 있듯이  $G_c$ 의 최대치와 최소치가 위와 같은 증가율을 나타내지는 않는다. 따라서 섬유 함유량이 증가함에 따라 파괴인성도 계속 증가될 것으로는 고려되지 않는다.

섬유함유량이 파괴기구에 미치는 영향을 이해하기 위해 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 20%인 경우와 40%인 경우에 대한 파단면을 검토하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 섬유 함유량이 20%와 40% 시편에 대한 500배로 확대한 SEM 파단면 사진이다. 그림에 나타나 있듯이 두 경우 모두 섬유 끊어짐, 기지재 균열, 섬유와 기지재 간의 분리 등이 일어났음을 알 수 있다. 20% 경우 대부분의 섬유가 파단면에 대해 수평한 상태로 남아 있으며 또한 기지재의 균열이 일어났음을 알 수 있다. 이에 비해 40% 경우는 많은 섬유들이 면에 수직하게 파단되어 있

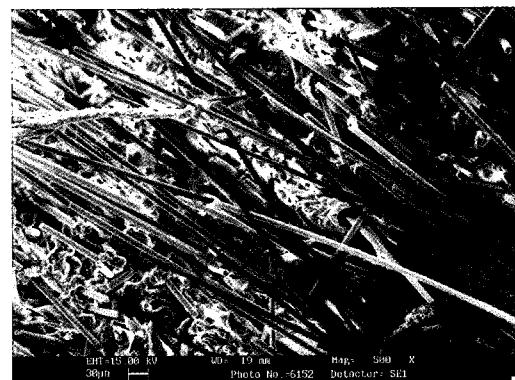


Fig. 8 SEM photograph of fracture surface for 20% case

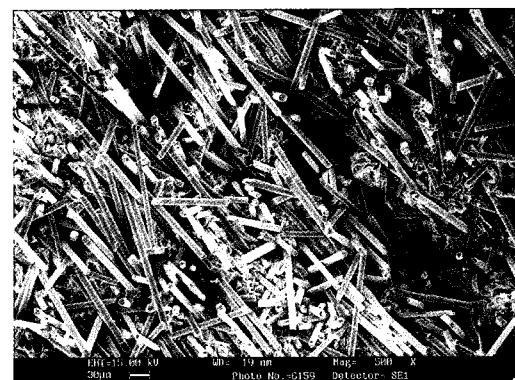


Fig. 9 SEM photograph of fracture surface for 40% case

으며 기지재 균열이 다소 적게 일어났음을 알 수 있다. 이는 20%에는 기지재 파단이 40% 경우에는 섬유 파단이 지배적인 파괴기구로 작용했음을 나타낸다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유리섬유를 20%, 30%, 40% 함유한 폴리프로필렌 열가소성 CT 복합재 시편에 대해 파괴시험을 수행, 섬유 함유비가 파괴거동에 미치는 영향을 검토하였는바 파괴거동은 섬유 함유비에 의해 상당한 영향을 받음을 알 수 있었다. 즉 섬유 함유비가 증가함에 따라 컴플라이언스는 감소하며 파괴하

증은 증가하였다. 또한 섬유 함유비가 20%에서 40%로 증가할 때 파괴인성 값은 약 14% 증가하였으며 이는 섬유 파단이 지배적인 파괴기구로 작용하는데 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 섬유 함유량이 증가함에 따라 파괴인성도 계속 증가될 것으로는 고려되지 않으며 따라서 최적의 섬유 함유량을 결정하기 위한 심도 있는 연구가 이루어져야 될 것으로 사려된다.

## 후기

본 논문은 원자력 기초연구사업의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

## 참고문현

- 1) V. B. Gupta, R. K. Mittal, and M. Goel, "Energy Absorbing Mechanisms in Short-Glass-Fiber-Reinforced Poly-propylene", Composite Science and Technology, Vol.37, pp. 353-369, 1990.
- 2) J. H. Lee, and J. H. Vogel, "An Investigation of Formability of Long Fiber Thermoplastic Composite Sheet", J. of Engineering Materials and Technology, Vol.117, pp.127-132, 1995.
- 3) M. Ericson and Berglund, "Deformation and Fracture of Glass-Mat-Reinforced Polypropylene", Composite Science and Technology, Vol. 43, pp.269-281, 1992.
- 4) C. Hwu, C. J. Kao, and L. E., Chang, "Delamination Fracture Criteria for Composite Laminates", J. of Composite Materials, Vol.29, pp. 1962-1987, 1995.
- 5) M. L. Benzeggagh, and M. Kenane, "Measurement of Mixed-mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-mode Bending Apparatus", Composite Science and Technology, Vol.56, pp.439-4493, 1996.
- 6) K. Y. Rhee, S. K. Koh, and J. H. Lee, "Mode I Fracture Resistance Characteristics of Graphite/Epoxy Laminated Composites", Polymer Composites, Vol.21, pp.150-161, 2000.
- 7) I. Chou, I. Kimpara, K. Kageyama, and I. Ohsawa, "Mode I and Mode II Fracture Toughness Measured Between Differently Oriented Plies in Graphite/Epoxy Composites", ASTM STP 1230, pp.132-151, 1995.
- 8) A. A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flaw in Solids, Transactions, Royal Society of London, A-221 Journal, 1920.