

GF/PP 복합재료의 충격파괴거동에 대한 온도효과

고성위[†] · 엄윤성

부경대학교

Temperature Effect on Impact Fracture Behavior of GF/PP Composites

Sung-Wi KOH[†] and Yoon-Sung UM

Pukyong National University

Abstract

The main goal of this work is to study the effects of temperature and volume fraction of fiber on the Charpy impact test with 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 increased as the fiber volume fraction ratio increased. 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.

Key words : thermoplastic composites(열가소성 복합재료), impact test(충격시험), critical fracture energy(임계파괴에너지), fracture analysis(파면해석), temperature effect(온도효과), fiber volume fraction ratio(섬유체적함유율)

서론

섬유강화 복합재료는 경량성, 내식성, 절연성 등의 기계적 특성을 가지고 있으므로 최근 크게 각광을 받고 있으며, 널리 사용되고 있다. 이는 경량이기 때문에 과거에는 단지 구조물의 무게를 경감하기 위해 부속품으로 사용되었으나 고강도이며 고강성의 성질을 가지는 열경화성 복합재료¹⁾가 구조물의 주하중을 받는 주 부품으로 사용되기 시작하였다.

열가소성 복합재료가 실제 구조물에 주하중을 받는 기본 구조물로서 사용이 될 때 이들 요인들의 영향으로 인한 강도저하나 파괴거동에 대한 예측은 필수적이며 이러한 예측을 하기 위한 기초 자료의 축적이 필요하다. 이 기초 자료들의 축적을 위해 다양한 하중상태의 시험을 행해야 하며, 다양한 하중

상태의 시험 중 짧은 시간동안 국소부위에 큰 힘이 작용하여 탄소성변형과 파괴를 일으키는 충격시험이 필요하다.

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

열가소성 복합재료에 대한 연구결과들은 다음과 같다. Famsteiner와 Theyson²⁾은 유리섬유/PP복합재료를 사용하여 섬유와 기지의 계면은 충격강도에 큰 영향을 미친다고 하였다.

Voelker와 Marvin³⁾은 유리섬유와 PP수지를 이용하여 성형한 장섬유복합재료를 22°C ~ -32°C의 온도범위에서 행한 충격시험을 통하여 취성과 연성

[†]Corresponding author : swkoh@pknu.ac.kr

파괴가 일어나지 않고 섬유함유율의 증가에 따라 충격값이 증가한다고 하였다. Chen 등⁴⁾은 -40℃ ~ 40℃의 온도에서 실험하여 충격파괴에너지 G_{IC} 는 20℃보다 낮은 온도에서 단일중합체의 첨가물은 G_{IC} 를 향상시킨다고 하였다.

Sova 등⁵⁾은 유리섬유와 PP수지를 이용한 단섬유복합재료의 충격파면은 섬유방향에서 복합적인 파괴와 파편에 의해 형성되는 거시적인 파괴를 보인다고 하였다. Tomlinson과 Holland⁶⁾는 환경적요인, 즉 염분과 온도에 대한 GF/PP의 충격거동에 관한 연구를 하였고, Sjogren과 Berglund⁷⁾는 GF/PP의 인장시험과 충격시험을 통해 수지안에서의 유리섬유 거동에 대하여 보고하였고, Sahnoune 등⁸⁾은 열가소성 수지인 고밀도 폴리에틸렌과 PP에 두 가지의 탄성중합체를 혼합하여 만든 복합재료의 충격시험과 인장시험을 통하여 증가된 충격강도와 인장강도에 대하여 보고하였고, 엄 등⁹⁾은 실온 ~ -50℃에서 충격실험을 통하여 충격에너지의 변화와 파괴기구를 규명하였다.

Schultz와 Friedrich¹⁰⁾는 매트릭스가 취성파괴되고 섬유가 풀어오되는 현상을 보이며 실온에서 보다 기계적 특성이 좋아지며, 고변형률에서는 섬유와 매트릭스 계면에 높은 전단강도가 발생한다고 하였다. Karmaker와 Prasad¹¹⁾는 섬유강화 복합재료의 굽힘시험을 통하여 시험편 지지길이의 영향에 대하여 보고하였고, Edward¹²⁾는 장섬유 유리-열가소성 수지 복합재료와 단섬유 유리-열가소성 복합재료의 충격실험과 굽힘시험을 통해 파괴된 섬유 끝단에 대해 연구하였다.

이처럼 충격강도에 영향을 미치는 인자에 대한 연구결과는 많지만 GF/PP 복합재료의 온도변화 및 섬유함유량에 따른 충격파괴기구에 대한 고찰은 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 열가소성 복합재료의 기계적 특성과 파괴거동에 관한 종합적인 연구의 일환으로 섬유체적함유율(섬유함유율)이 10%, 20%, 30%인 GF/PP 복합재료를 충격시험을 통하여 실험온도를 -50℃에서 60℃로 변화시켜 온도변화에 대한 임계파괴에너지의 거동을 고찰하고 파단면을 SEM 사진을 통해 비교 검토하여 파괴기구를 고찰하였다.

재료 및 실험방법

실험에 사용한 복합재료의 매트릭스는 PP수지와 PE수지, 강화섬유로는 유리단섬유(2~4mm)를 사

용하였으며 용융된 PP수지와 PE수지에 유리섬유를 혼합하여 인라인 스크류(in-line screw)식의 사출기를 사용하여 3mm의 두께로 성형하였다. 성형조건은 스크류속도 60rpm, 1차 사출속도 1200kg/cm³ 그리고 2차 사출속도 900kg/cm³으로 사출 성형하였으며 성형시 수지에 대한 섬유함유의 체적비(섬유함유율)는 10%, 20% 그리고 30%의 세 종류로 성형한 국산 단섬유 GF/PP복합재료(현대산업개발(주)에서 제작)를 사용하였다. GF/PP복합재료와 GF/PE복합재료의 각종 성질은 Table 1과 같다.

성형된 복합재료는 Fig. 1에서 보여지는 것과 같이 성형된 복합재료의 중앙부위는 노즐의 분사압력의 영향으로 인하여 섬유의 배열이 전체적으로 고루 분포되어 있지 못하므로, 가능한 일정한 조건의 충격시험편을 제작하기 위하여 섬유의 배열이 최대한 고르게 배열이 되어 있는 부분을 다이아몬드 커터를 이용하여 절취하였다. Fig. 1에서 절취된 복합재료를 충격시험편으로 가공한 후 충격시험은 하중 2.82~25J 그리고 충격속도 3.46m/s인 살피 충격실험기(Tinius Olsen Model 92T)를 이용하여 20J의 하중과 3.46m/s의 충격속도로 실험을 행하였다.

Table 1. Properties of GF/PP composites

| volume fraction (%) | 10 | 20 | 30 |
|--|---------|---------|---------|
| density (g/cm ³) | 0.92 | 1.03 | 1.12 |
| co. of thermal expansion (%) | 0.6~1.6 | 0.6~1.6 | 0.4~0.8 |
| molding temperature (°C) | 200~240 | 200~240 | 200~240 |
| elongation (%) | 4 | 4 | 4 |
| bending modulus (kgf/cm ²) | 23000 | 38000 | 53000 |

Fig. 2는 충격 시험편을 나타낸 것으로 원재료에서 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였고, 이 표면을 밀링에 의하여 가공하였다. 노치는 시험편의 중

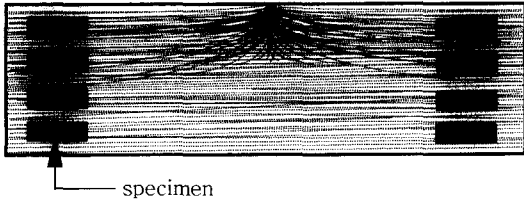


Fig. 1. Cutting part for test.

심에 두께 1mm인 톱으로 일차 가공한 후, 노치팁이 더욱 날카롭게 하기 위해 신폼의 면도날을 이용하여 총 크랙길이가 1~2.25mm의 범위가 되도록 이차 가공하였다.

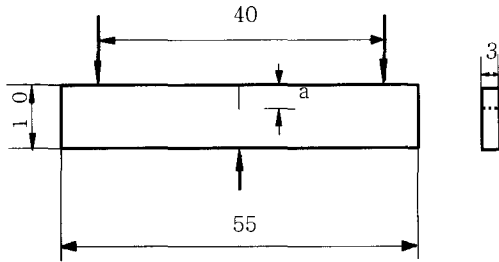


Fig. 2. Specimen geometries for Charpy impact (mm).

임계파괴에너지 G_{IC} 의 평가는 식 (1)과 같이 충격시험에서 얻은 파괴에너지 U 와 시험편 두께와 시험편 폭 그리고 무차원 계수의 곱 $BW\phi$ 를 이용하여 최소자승법에 의하여 기울기를 구하여 이 기울기를 임계파괴에너지 G_{IC} 로 한 Williams 등¹³⁾이 제안한 방법으로 계산한 것이다.

$$U = U_k + G_{IC} BW\phi \dots\dots\dots(1)$$

여기서 U 는 총 충격에너지이고, U_k 는 운동에너지, B 는 시험편 두께, W 는 시험편 폭 그리고 ϕ 는 무차원형상계수로서 다음과 같다.

무차원계수 ϕ 를 다른 방법으로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 a 는 크랙길이이고, S 는 스패ん길이이다.

파괴에너지 U 와 $BW\phi$ 를 도시화하여 최소자승법으로 그 기울기를 구하면 이것이 임계파괴에너지 G_{IC}

가 된다.

결과 및 고찰

1. 임계파괴 에너지

Fig. 3은 실온에서 섬유함유율의 변화에 따라 U 와 $BW\phi$ 의 관계를 나타낸 것이다. 동일 섬유함유량의 경우에서 $BW\phi$ 가 증가함에 따라 파괴에너지 U 는 증가하고 있으며, 이는 노치길이가 감소하기 때문에 나타나는 현상이다. 각각의 섬유함유율에 대하여 얻은 실험값을 최소자승법으로 직선화 시켜 나타낸 것도 함께 나타냈으며, 그 기울기는 섬유함유율이 증가할수록 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4는 섬유함유율이 20%인 경우 $BW\phi$ 의 변화에 대한 총 파괴에너지 U 를 각각의 온도조건에 대해 나타낸 것으로 □는 60°C, ○는 실온, △는 -15°C 그리고 ▽는 -50°C인 경우를 나타내고 있다. Fig. 5는 섬유함유율이 30%인 경우로서 Fig.4와 동일한 방법으로 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 총 파괴에너지 U 는 온도에 의존한다는 것을 알 수 있으나 일정한 경향을 나타내지 않아 상관관계를 파악하기 쉽지 않았으며, 이에 대하여 앞으로 상세한 연구가 필요하다.

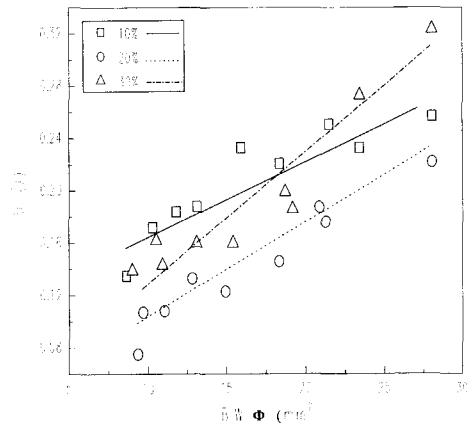


Fig. 3. U vs $BW\phi$ for various fiber volume fraction at ambient.

Fig. 6은 스패ん길이 40mm인 복합재료의 섬유함유율 및 온도의 변화에 대한 임계에너지 G_{IC} 를 나타낸 것이다. 임계파괴에너지 G_{IC} 의 산출은 식(1)의

무차원 계수인 $BW\phi$ 와 총 파괴에너지 U 의 기울기로서 산출한 것이다. 그림에서 섬유함유율이 20%인 경우의 임계파괴에너지 G_{IC} 의 값은 실온에서 가장 높게 나타나고 60°C, -15°C 그리고 -50°C의 순으로 낮게 나타났다. 이러한 양상은 섬유함유율이 10%와 30%인 경우에도 유사한 경향을 보이고 있다.

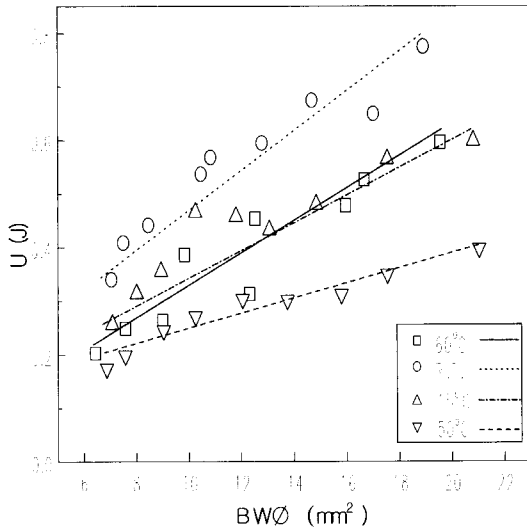


Fig. 4. U vs $BW\phi$ for various temperature with 20% fiber volume fraction.

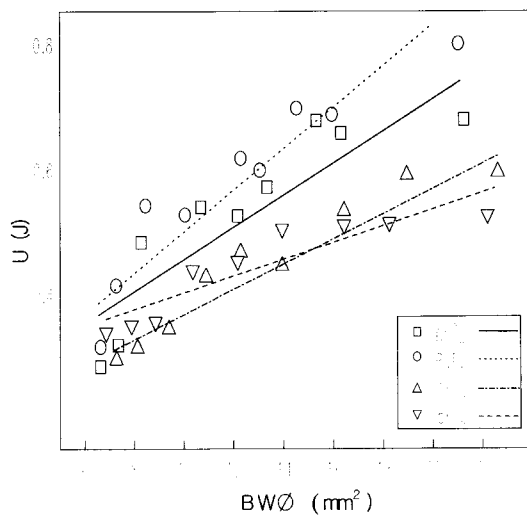


Fig. 5. U vs $BW\phi$ for various temperature with 30% fiber volume fraction.

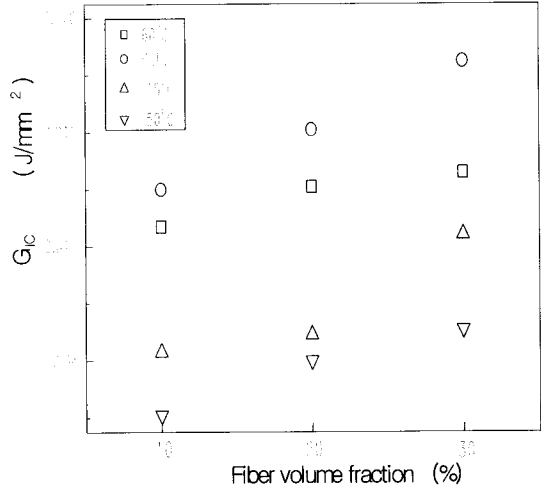


Fig. 6. G_{IC} vs fiber volume fraction for various temperature at 40mm span.

2. 파면해석

Fig. 7은 섬유함유율 10%인 복합재료의 경우에 실온에서의 파단면을 나타낸 것으로 (a)는 파단 시작부분, (b)는 파단면의 중앙부위, (c)는 파단면의 끝부분을 나타내고 있다. (a)에서 섬유파손과 수지의 변형이 많이 나타나고 있다. (b)에서는 섬유의 풀아웃과 디분딩이 나타나고 수지의 변형은 (a)보다 적게 나타나고 있다. (c)에서도 섬유파손, 풀아웃, 디분딩 그리고 수지의 변형이 나타나며, (b)와 비교하면 수지의 표면이 매끈하게 파단된 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 섬유함유율 10%인 GF/PP 복합재료에 대하여 실온에서의 충격시험 파단면을 나타낸 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 풀아웃과 디분딩이 동시에 나타나고 있으며, 또한 매트릭스의 변형도 발생함을 알 수 있다. Fig. 9와 10의 (b)의 사진과 비교해보면 섬유함유율이 적음으로 인하여 매트릭스 변형이 많이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 9는 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 증가

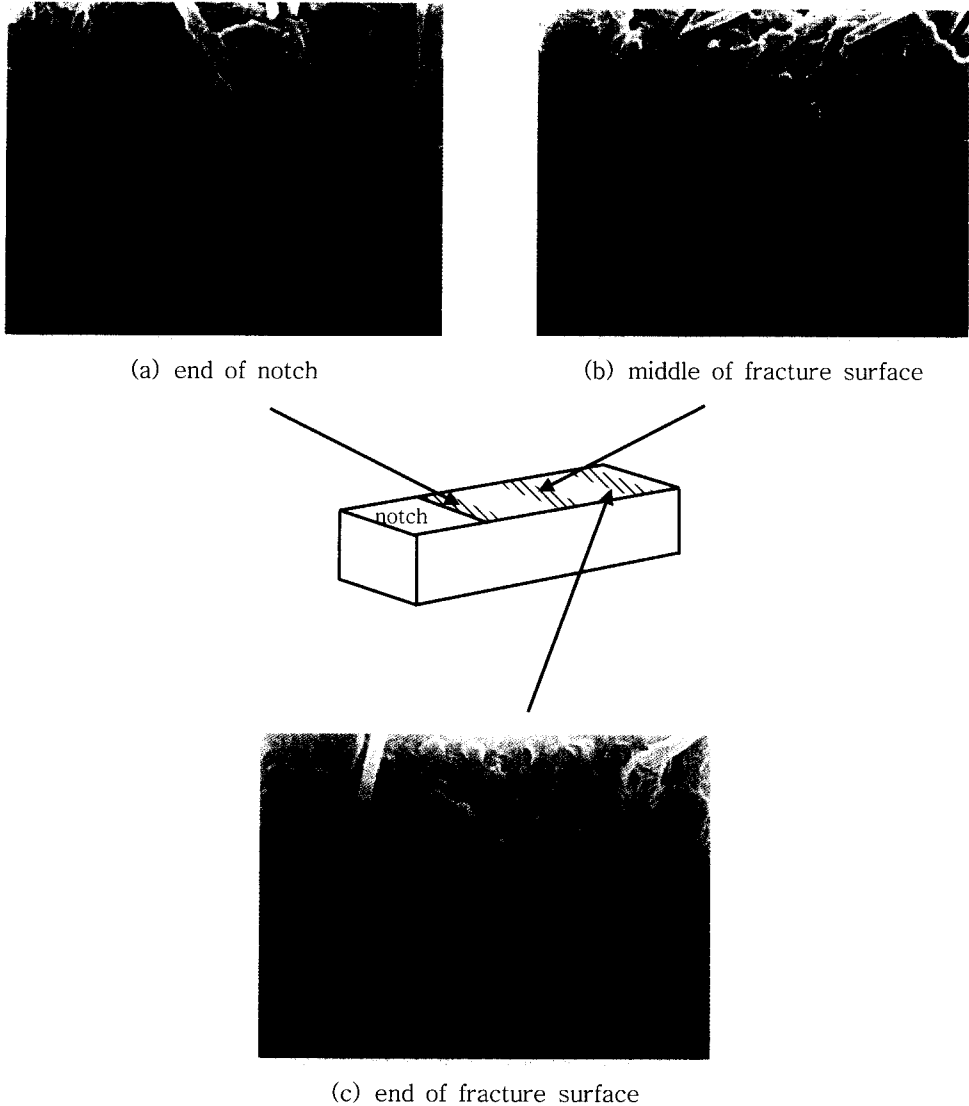


Fig. 7. SEM photographs of impact fracture surfaces for 20mm span at room temperature.

하는 수지의 고온특성에 의한 것으로 생각된다. 그리고 그림 (c)와 (d)에서는 그림 (b)보다 연성과 인성이 감소한 취성파면형태를 보이고 있으며 이것은 고온의 경우에서와 유사하게 열가소성수지의 저온에 대한 저온특성에 의한 것으로 생각된다. 섬유 의 파단형태를 비교하여 보면, 그림(b)는 섬유와 수 지사이의 풀아웃(pull out)과 디본딩(debonding)이 주로 일어나고 섬유의 표면에 남아있는 수지의 양도 거의 없고 섬유표면도 매끄러운 파괴양상을 보

이고 있다. 그림(a)의 파단면은 상온과는 달리 섬유 표면에 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, 섬유의 배열상태는 그림(a)의 불규 칩한 배열상태가 감소하는 것을 보여주고 있다. 이 러한 경향은 섬유함유율이 30%인 경우에도 유사한

경향을 보였다(Fig. 10 참조).

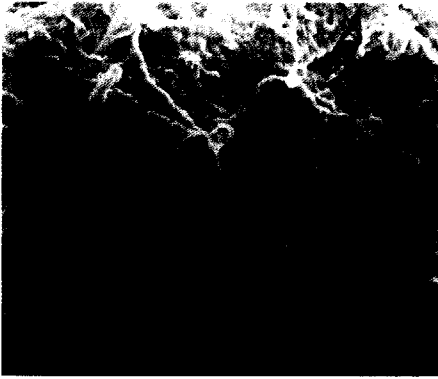
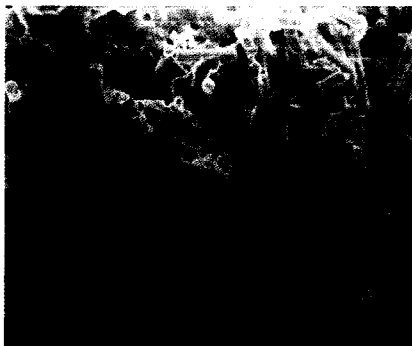


Fig. 8. SEM photograph of impact fracture surfaces for various span with 10% volume fraction at room temperature.

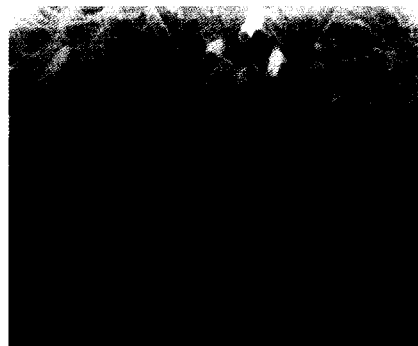
결론

이 연구에서는 충격실험을 통하여 열가소성 복합재료인 GF/PP의 파괴거동에 미치는 온도효과와 섬유함유율의 영향에 대하여 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) GF/PP 복합재료의 온도변화에 따른 임계파괴에너지 G_{IC} 의 값은 동일한 섬유함유율에서 실온에서의 임계파괴에너지 G_{IC} 의 값이 가장 높게 나타나고 60, -15 그리고 -50°C 순으로 낮게 나타났다.
- 2) GF/PP 복합재료의 섬유함유율에 따른 임계파괴에너지 G_{IC} 의 값은 섬유함유율이 증가함에 따라 높게 나타났다.
- 3) GF/PP 복합재료의 파괴기구(거동)는 온도의 변화에 따라 매트릭스의 변형이 나타났으며 섬유



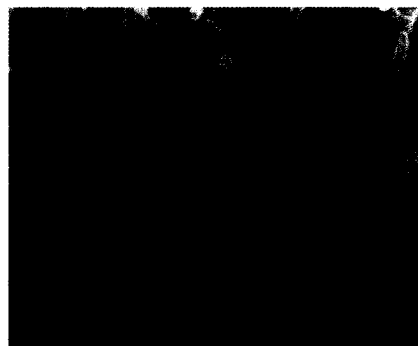
(a) 60°C



(b) R.T.



(c) -15°C



(d) -50°C

Fig. 9. SEM photographs of impact fracture surfaces for 20% fiber volume fraction span at various temperature.

의 풀아웃, 섬유와 매트릭스 사이의 디본딩을 관찰할 수 있었으며, 이와 같은 파괴기구가 종합적으로 상호 작용한다고 생각된다.

사 사

이 논문의 일부는 부경대학교 기성회연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- 1) Yue, C. Y. and Cheung, W. L.(1993) : Some Observations on the Role of Trans-crystalline Inerphase on the Interfacial Strength of Thermoplastic Composites, J. Mat. Sci. Letters 12, 1092-1094.
- 2) Famsteiner, F. and Theysohn, R.(1979): Tensile and Impact Strengths of Unidirectional, Short Fiber-Reinforced Thermoplastics, Composites, 111-119.
- 3) Voelker, and Marvin, J.(1991) : Low Temperature Impact Properties of Long Fiber Thermoplastic Composite Molding Materials, Polymer Comp., 12(4), 119-121.
- 4) Chen, Le-Shang., Yie Wing, Mai. and Cotterell, Brian(1989) : Impact Fracture Energy of Mineral-Filled Polypropylene, Polymer Eng. and Sci., 29(8), 505-512.
- 5) Sova, M., Raab, M. and Slizova, M.(1993) : Polypropylene Composite Materials Oriented by Solid-state Drawing : Low Temperature Impact Behaviour, J. Mat. Sci. 28, 6516-6523.
- 6) Tomlinson, W. J. and Holland, J. R., (1994) : Pultrusion and Properties of Unidirectional Glass Fibre-Polypropylene Matrix Composites, J. Mat. Sci., 13, 675-677.
- 7) Sjogren, B. A. and Berglund, L. A.(1997) : Failure Mechanisms in Polypropylene with Glass Beads, Polymer Comp., 18(1), 1-8.
- 8) Sahnoune, F., Lopez-cuesta, J. M. and Crespy, A.(1999) : Effect of Elastomer Interfacial Agents on Tensile and Impact Properpies of CaCO₃ Filled HDPE, J. Mat. Sci., 34, pp.534-544.
- 9) 엄윤성, 박기호, 고성위, 김형진(1999) : GF/PP복합재료의 충격파괴거동에 관한 연구, 한국어업기술학회지 35(4), 421-427.
- 10) Schultz, J. M. and Freiedrich, K.(1984) : Effect of Temperature and Strain Rate on the Strength of a PET/glass Fibre Composite, J. Mat. Sci., 19, 2246-2258.
- 11) Karmaker, A. and Prasad, A.(2000) : Effect of Design Parameters on the Flexural Properties of Fiber-Reinforced Composites, J. Mat. Sci., 19, 663-665.
- 12) Edward M. Silverman(1987) : Effect of Glass Fiber Length on the Creep and Impact Resistance of Reinforced Thermoplastics, Polymer Comp., 8, 8-15.
- 13) Plati. E. and Williams. J. G.(1975) : The Determination of the fracture parameters of polymers in impact. Polymers Eng. Sci., 15, 470-477.

2004년 10월 5일 접수

2004년 10월 18일 수리