

CFRP 복합재료의 충격파괴거동에 관한 연구

고성위 · 김학돌* · 엄운성 · 최영근 · 김형진** · 김재동** · 김엄기***

부경대학교, *부산기계공고, **경상대학교 해양산업연구소, ***공주대학교
(2002년 10월 30일 접수)

A Study on the Impact Fracture Behavior of Carbon Fiber Reinforced Plastics

Sung-Wi Koh, Hack-Doll Kim*, Yoon-Sung Um, young-Kuen Choi,
Hyung-jin Kim**, Jae-Dong Kim** and Am-Kee Kim***

Pukyung National University, *Pusan Mechanical Technical High School,
**The Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University,
***Kongju National University
(Received October 30, 2002)

Abstract

In this paper the failure mechanisms and Charpy impact tests of carbon fiber polypropylene composites have been studied in the temperature range $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 3 different supported length of specimen (span length). There are significant effects of temperature and span length on impact fracture toughness, which shows a peak at ambient temperature and decrease as temperature is reduced. Fracture toughness shows a maximum at span length $s=20\text{mm}$. Failure mechanisms are characterized based on SEM examination, which is correlated the measured fracture toughness. Major mechanisms of this composites can be classified as fiber matrix debonding, delamination, fiber pull-out and matrix deformation.

서론

최근 자원, 에너지 고갈 그리고 환경오염 등의 해결을 위해 다양한 조건이 요구되는 재료로서 경량성, 내식성, 절연성 등의 특성을 가지고 있는 복합재료가 크게 각광을 받고 있다.

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 가격 대비 성능이 우수한 유리섬유와 탄소섬유가 널리 쓰이고 있다. 이 두 섬유를 강화재로 사용한 복합재료는 사용한 섬유의 종류에 따라 유리섬유강화플라스틱(GFRP : glass fiber reinforced plastic)과 탄소섬유강화플라스틱(CFRP : carbon fiber reinforced plastic)으로 구분하며, 이 두 복합재료가 건설, 선박, 자동차 그리고 우주항공분야에 이르기까지 거의 모든 산업에서 다양하게 이용되고 있다.

복합재료의 충격강도에 영향을 미치는 인자로는 섬유함유율, 섬유방향, 섬유의 형상, 섬유-기지의 접착정도, 지지길이(span length) 그리고 기지의

특성들이 있으며, 다음과 같다. Famsteiner와 Theyson¹⁾은 유리섬유/PP복합재료를 사용하여 섬유와 기지의 계면은 충격강도에 큰 영향을 미친다고 하였다. Volker 등²⁾은 유리섬유와 PP수지를 이용하여 성형한 장섬유복합재료를 저온($22^{\circ}\text{C} \sim -32^{\circ}\text{C}$)에서 행한 충격시험을 통하여 취성과 연성 파괴가 일어나지 않고 섬유함유율의 증가에 따라 충격값이 증가한다고 하였다. Chen 등³⁾은 $-40^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 칼슘탄화 첨가물을 이용한 PP 단일 중합체와 이중중합체의 충격파괴에너지 G_c 는 이중중합체에서는 첨가물의 영향이 없으며, 20°C 보다 낮은 온도에서 단일중합체의 첨가물은 G_c 를 향상시킨다고 하였다. Sova 등⁴⁾은 유리섬유와 PP수지를 이용한 단섬유복합재료의 충격파면은 섬유방향에서 복합적인 파괴와 파편에 의해 형성되는 거시적인 파괴를 보인다고 하였다.

Karmaker와 Prasad⁵⁾는 섬유강화 복합재료의 굽힘시험을 통해 시험편지지길이의 영향에 대해 보고하였고, 고 등^{6,7)}은 복합재료의 충격시험을 통하여 임계파괴에너지 G_{IC} 는 실온에서 가장 높게 나타나고 유리섬유의 비율이 감소함에 따라 그 값이 점차 낮아진다고 하였다. Matheswaran와 Padmanabhan⁸⁾은 에폭시지가 복합재료에서 첨가물의 첨가에 의하여 충격저항치가 커지며, 강인화 기구가 달라진다고 하였다. Pritchard와 Yang⁹⁾은 입자강화 복합재료에서 주 충격파손모드는 섬유와 매트릭스 사이의 디본딩이라고 하였다. 이러한 연구들을 종합적으로 살펴보면 충격파괴기구에 대한 연구에서 지지길이(스팬길이)와 환경적요인 중 온도의 변화에 따른 충격파괴기구에 대한 고찰은 아직 희박한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 열경화성 복합재료의 기계적 성질과 파괴거동에 관한 종합적인 연구의 일환으로 장섬유 CFRP 복합재료의 충격시험을 통하여 스패ん길이를 20, 30 그리고 40mm로 변화하여 스패ん길이 변화에 대한 영향을 고찰하고, 각각의 스패ん길이를 가지는 복합재료를 50°C 에서 60°C 사이의 온도범위에서 충격시험을 통하여 임계 파괴에너지의 거동을 고찰하고 파면관찰을 통하여 미세파괴기구를 상호 비교 검토하였다.

재료 및 실험방법

실험에 사용한 재료는 HCU 100N(한국화이버) 프리프레그를 16플라이(ply)로 적층하여 핫프레스

를 이용하여 성형하였다. 성형된 복합재료는 스패ん 20, 30 및 40mm가 되도록 가공한 후 충격속도 3.46m/s인 샤피 충격시험기(Tinius Olsen Model 892)를 이용하여 실험을 행하였다.

Fig.1은 시험편폭 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, 노치팁이 더욱 날카롭게 하기 위해 신포의 면도날을 이용하여 총 크랙길이가 1~2.25mm의 범위가 되도록 이차 가공하였다. 시험편 길이가 35mm(스팬길이 20mm)와 45mm(스팬길이 30mm)인 시험편도 동일한 방법으로 가공하였다.

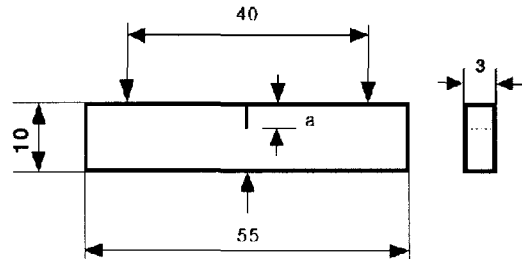


Fig. 1. Specimen geometries for Charpy impact (unit : mm).

온도는 -50°C 에서 60°C 사이의 범위에서 변화시켰으며, 충격시험기에 고온과 저온의 환경조건을 위해 스테인리스와 강화유리로 단일처리한 챔버를 부착하여 온도를 변화시켰다. 고온의 실험시에는 챔버내부에 heating coil을 설치하여 내부의 공기를 가열하였으며 챔버내부의 온도분포가 고르게 하기 위하여 팬을 이용하여 챔버안의 공기를 대류시켰다. 그리고 저온의 실험시에는 외부에 특수제작된 액체질소통을 부착하여 챔버안의 공기를 냉각시켰으며, 온도가 저하되면 고온에서처럼 팬을 사용하는 것이 불가능하므로 액체질소가 챔버안에서 고르게 분포할 수 있도록 분사 노즐을 가공하여 챔버안에서 냉각된 공기가 순환하도록 하였으며, 챔버안의 내부온도는 열전대(thermocouple)로 감지하여 온도제어기로 필요한 임의의 온도를 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내에서 유지시켰다. 임의의 온도에 도달하면 시험편의 내부도 표면과 동일한 온도가 되도록 10분이상 유지한 후 충격속도

3.46m/s인 샷피 충격실험기를 이용하여 실험을 행하였다. 충격시험 후 파단면의 미소파괴를 관찰하기 위하여 파면을 주사현미경(scanning electron microscopy : SEM) 을 이용하여 관찰하였다.

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 임계 파괴에너지 G_{IC} 로 한 Williams 등⁷⁾이 제안한 방법으로 계산 한 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.

$$\phi = \frac{C}{dC/d(a/W)} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 C 는 컴플라이언스(Compliance)이고, a 는 크랙길이이다.

무차원계수 ϕ 를 다른 방법으로 나타내면 다음과 같다.

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{W} + \frac{1}{18\pi} \cdot \frac{S}{W} \cdot \frac{1}{a/W} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 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

Fig. 2는 스패ん 길이가 20mm인 복합재료의 온도 변화에 대한 임계파괴에너지 G_{IC} 를 Williams 등⁷⁾이 제안한 파괴에너지 U 와 $BW\phi$ 와의 기울기를 이용하여 구한 결과로서 \square 는 실온, \circ 는 60℃, \triangle 는 -15℃ 그리고 ∇ 는 -50℃인 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 실온에서의 기울기, 즉 임계파괴에너지 G_{IC} 가 가장 높게 나타나고 60℃, -15℃ 그리고 -50℃의 순으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 이것은 고온에서의 재료가 갖는 온도에 대한 영향보다 저온에서의 온도영향이 더 큰

을 알 수 있으며, 복합재료의 수지로 사용한 에폭시수지가 열경화성수지이기 때문에 고온에서는 별 영향을 받지 않으나 저온에서는 강화섬유로 사용한 탄소섬유와 매트릭스로 사용한 에폭시수지 모두 취성화되어 나타난 저온에 대한 취성특성이라고 생각된다.

Fig. 3은 스패ん의 길이가 30mm인 복합재료의 온도의 변화에 따른 임계파괴에너지 G_{IC} 를 나타낸 것으로 G_{IC} 의 값은 Fig. 2과 동일한 방법으로 산출하였고 \square 는 실온, \circ 는 60℃, \triangle 는 -15℃ 그리고 ∇ 는 -50℃를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 실온의 임계파괴에너지 G_{IC} 가 가장 높게 나타나고 60℃, -15℃ 그리고 -50℃의 순으로 낮게 나타남을 알 수 있으며, 이러한 결과는 스패ん 길이가 20mm인 Fig. 2의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

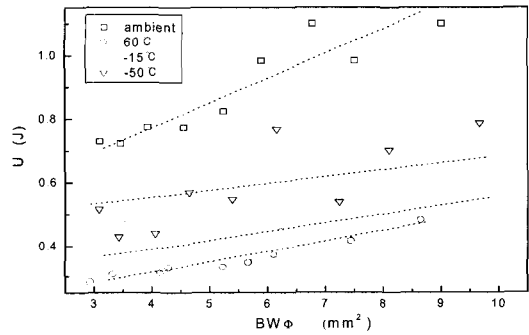


Fig. 2. U vs $BW\phi$ for various temperature with the span of 20mm.

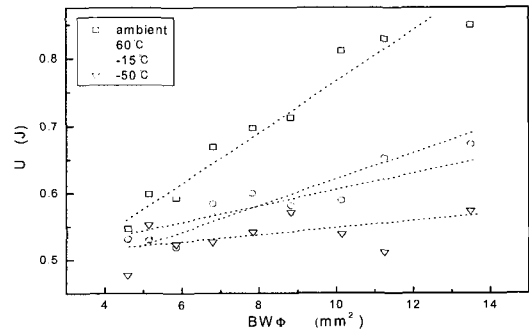


Fig. 3. U vs $BW\phi$ for various temperature with the span of 30mm.

Fig. 4는 스패ん의 길이가 40mm인 복합재료의 온

도의 변화에 따른 임계파괴에너지 G_{IC} 를 나타낸 것으로 G_{IC} 의 값은 Fig. 2과 동일한 방법으로 산출하였고, □는 실온, ○는 60℃, △는 -15℃ 그리고 ▽는 -50℃를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 총 충격에너지는 60℃일 때 가장 높으므로 나타나나 $BW\Phi$ 를 이용하여 기울기로서 나타내어지는 임계파괴에너지 G_{IC} 는 스패ん 길이가 20mm인 Fig. 2와 스패ん 길이가 30mm인 Fig. 3의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

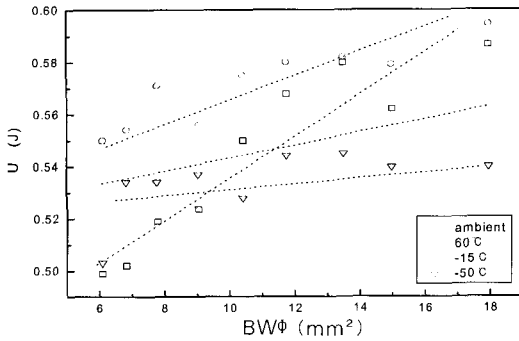


Fig. 4. U vs $BW\Phi$ for various temperature with the span of 40mm.

Fig. 5는 실온에서의 임계파괴에너지 G_{IC} 를 스패ん 길이에 대해 나타낸 것으로 □는 스패ん 길이가 20mm, ○는 30mm 그리고 △는 40mm인 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 스패ん 길이가 20mm 일때의 임계파괴에너지 G_{IC} 가 가장 높고 30mm 그리고 40mm의 순으로 낮게 나타나서 스패ん 길이가 임계파괴에너지 G_{IC} 에 영향을 줄을 알 수 있다.

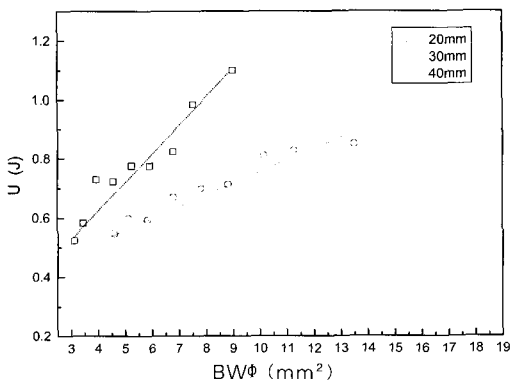


Fig. 5. U vs $BW\Phi$ for various span at ambient.

Fig. 6은 60℃에서의 임계파괴에너지 G_{IC} 를 스패ん 길이에 대해 나타낸 것으로, □는 스패ん 길이가 20mm, ○는 30mm 그리고 △는 40mm인 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 임계파괴에너지 G_{IC} 는 실온에서의 결과인 Fig. 5와 유사한 경향을 보이고 있다.

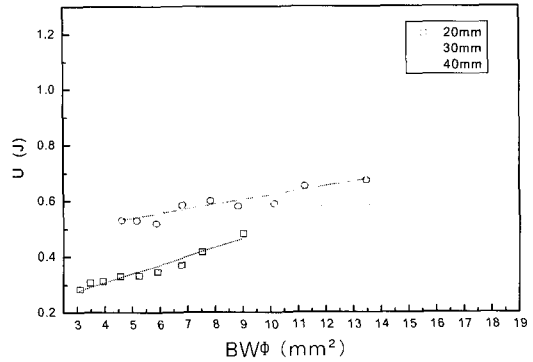


Fig. 6. U vs $BW\Phi$ for various span at 60℃.

Fig. 7은 -15℃에서의 임계파괴에너지 G_{IC} 를 스패ん 길이에 대해 나타낸 것으로, □는 스패ん 길이가 20mm, ○는 30mm 그리고 △는 40mm인 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 임계파괴에너지 G_{IC} 는 실온에서의 결과인 Fig. 5와 유사한 경향을 보이고 있다.

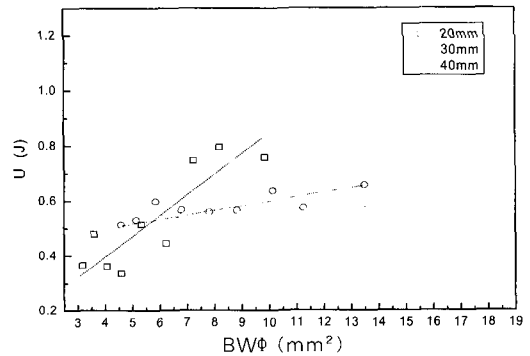


Fig. 7. U vs $BW\Phi$ for various span at -15℃.

Fig. 8은 -50℃에서의 임계파괴에너지 G_{IC} 를 스패ん 길이에 대해 나타낸 것으로, □는 스패ん 길이가 20mm, ○는 30mm 그리고 △는 40mm인 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 임계파괴에너지 G_{IC} 는 실온에서의 결과인 Fig. 5와 유사한 경향을 보이고 있다.

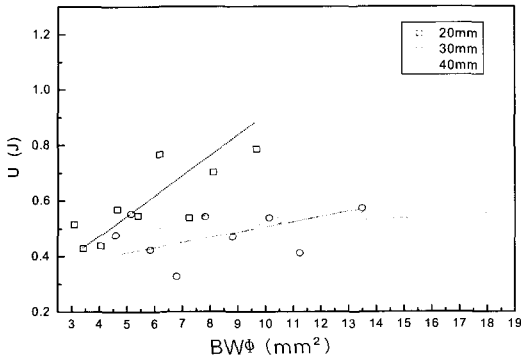


Fig. 8. U vs BWΦ for various span at -50 °C.

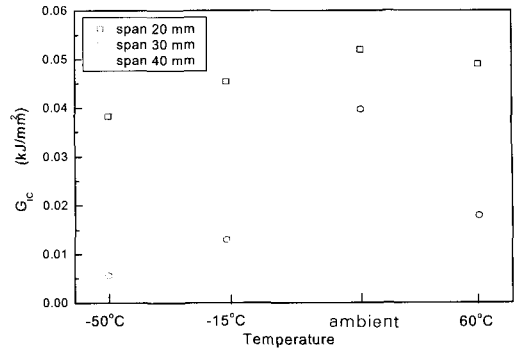


Fig. 9. GIC vs various temperature at various span.

Fig. 5~8의 결과들을 살펴보면 임계파괴에너지 G_{IC} 는 스패 길이가 20mm일 때가 가장 높고, 스패 길이가 40mm일 때가 가장 낮게 나타났으나, 스패 길이가 20mm일 때와 스패 길이가 30mm일 때는 수치의 흠여짐이 많고 온도의 변화에 따라 안정된 결과를 나타내지 않고 있다. 한편 스패 길이가 40mm인 경우에는 흠여짐이 적고 온도의 변화에 대해서도 비교적 안정된 결과를 나타내고 있다.

따라서 스패 길이가 작을수록 임계파괴에너지 G_{IC} 에 대한 스패 길이의 영향이 크다고 볼 수 있으며, 실험범위의 스패 길이에서 스패 길이가 40mm일 때가 이 실험범위에서 최적의 조건이라 생각된다.

Fig. 9는 온도의 변화와 스패 길이의 변화에 대한 임계파괴에너지 G_{IC} 의 값을 나타낸 것으로 G_{IC} 의 값은 Fig. 4와 동일한 방법으로 산출하였고 □는 20, ○는 30 그리고 △는 40mm를 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 각각의 온도조건에서 스패 길이가 20mm일 때가 가장 높게 나타나고, 30mm 그리고 40mm의 순으로 낮게 나타났다. 그러나 스패 길이가 20 그리고 30mm일 때의 값들은 40mm일 경우보다 분산이 높으므로 안정화되어 있지 않으므로 스패 길이 40mm의 시험편이 더 적절한 조건이라 생각된다. 그리고 온도변화에 대한 임계파괴에너지 G_{IC} 의 값은 실온인 경우가 가장 높게 나타났으며, 온도조건이 고온과 저온으로 변함에 따라 그 값이 낮게 나타났는데 이것은 고온과 저온에서 재료가 가지는 재료의 특성이라 생각된다.

파면해석

Fig. 10은 스패 길이가 20mm인 복합재료의 실온에서의 파단면을 파단부위에 따라 나타낸 것으로 (a)는 노치의 끝부분, (b)는 중앙부위 그리고 (c)는 파단 끝부분을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 노치의 끝부분과 파단 끝부분은 섬유와 파손이 많고 수지의 변형이 많음을 보이며 이러한 경향은 스패 길이가 30 그리고 40mm인 경우에도 유사한 경향을 보였다.

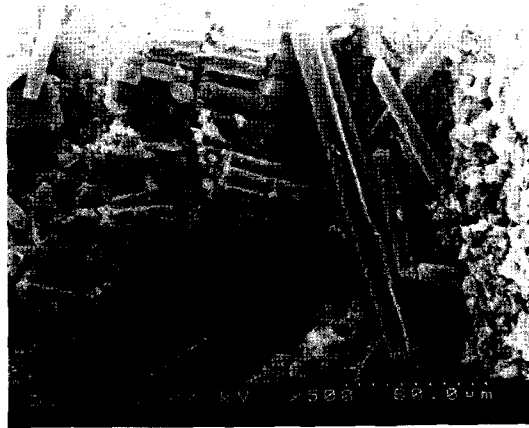
Fig. 11은 스패 길이가 20mm인 복합재료의 온도의 변화에 대한 파괴형상을 보여주는 것으로 (a)는 60°C, (b)는 실온, (c)는 -15°C 그리고 (d)는 -50°C에서의 파단면을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 온도변화에 대하여 풀아웃과 디본딩이 동시에 나타나고 있으나, 실온의 경우가 풀아웃과 디본딩이 많이 일어나고 온도가 낮아질수록 수지의 파단면이 매끈하게 파단되며, 섬유에 남아 있는 수지의 양도 작고 표면 또한 매끈하여 매트릭스의 변형이 적게 됨을 알 수 있으며, 이러한 경향은 스패 길이가 30, 40mm인 경우에도 재료에서도 유사하게 나타나고 있다. 따라서 복합재료의 파괴는 디본딩과 풀아웃 그리고 매트릭스 변형이 발생하며 이들 요인들이 모두 혼합되어 나타난 복합적인 파괴양상이라고 생각된다.



(a) end of notch

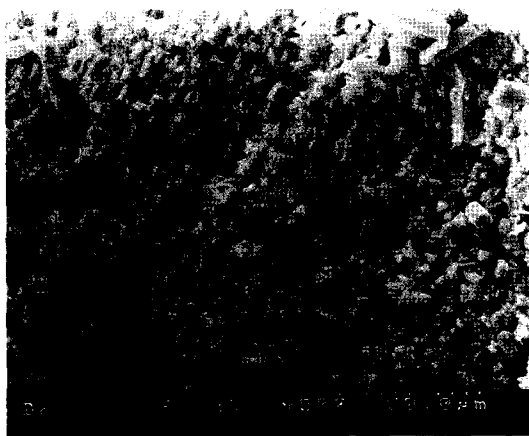


(b) middle of fracture surface

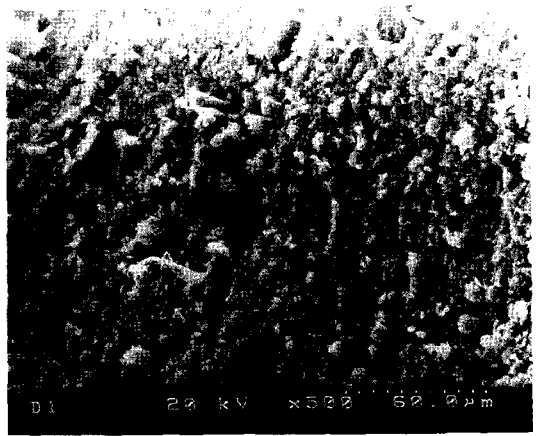


(c) end of fracture surface

Fig. 10. SEM photographs of impact fracture surface for 20mm span at room temperature.



(a) 60℃



(b) ambient

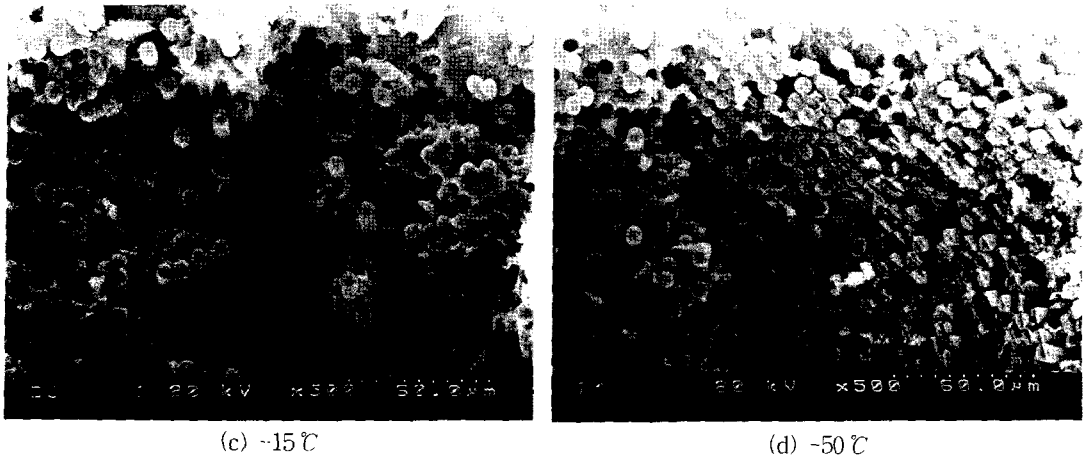


Fig. 11. SEM photographs of impact fracture surface for 20mm span at various temperature.

결 론

장섬유 CF/에폭시 복합재료를 사용하여 -50°C 에서 60°C 사이의 범위에서 스패길이를 변화시켜 충격시험으로 얻어진 임계파괴에너지의 거동을 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. CF/에폭시 복합재료의 온도변화에 따른 임계 파괴에너지 G_{1c} 는 동일한 스패길이에서는 실온의 경우가 가장 높고, 60°C , -15°C 그리고 -50°C 의 순으로 낮게 나타났다.
2. CF/에폭시 복합재료의 스패길이의 변화에 대한 임계 파괴에너지 G_{1c} 는 동일한 온도조건하에서는 스패길이가 20mm 인 경우가 가장 높게 나타났으나 불안정하며, 스패길이는 40mm 인 경우 임계파괴에너지 G_{1c} 는 가장 낮게 나타났으나 시험치의 흠어짐을 고려할 때 40mm 인 경우의 시험편이 더 적절한 조건이라 생각된다.
3. 본 실험에 사용한 재료의 파괴기구는 섬유의 풀아웃, 섬유와 매트릭스 사이의 디본딩 그리고 매트릭스의 변형을 관찰할 수 있었으며, 이와 같은 파괴기구가 종합적으로 상호작용한다고 생각된다.

참고문헌

- 1) Famsteiner, F. and Theysohn, R.(1978) : Tensile and impact strengths of unidirectional, short fiber-reinforced thermoplastics, *Composites*, 111-119.
- 2) Volker, Marvin J.(1991) : Low Temperature Impact Properties of Long Fiber Thermoplastic Composite Molding Materials, *Polymer Composites*, 12(4), 119-121.
- 3) Chen, Le-Shang., Mai, Yie Wing and Cotterell, Brian(1990) : Impact Fracture Energy of Mineral-Filled Polypropylene, *Polymer Eng and Sci*, 29(8), 505-512.
- 4) Sova, M., Raab, M. and Slizova, M., "Polypropylene composite materials oriented by solid-state drawing : low-temperature impact behaviour", *J. of Mat*, 28, 1993, 6516-6523.
- 5) Karmaker, A. and Prasad, A.(2000) : Effect of design parameters on the flexural properties of fiber-reinforced composites, *J. of Mat. Sci.*, 19, 2000, 663-665.
- 6) 노호섭 · 고성위(1992) : 유리-탄소 하이브리드 복합재료의 파괴인성에 관한 연구, *한국어업기술학회지* 28(3), 295-305.
- 7) 엄윤성 · 박기호 · 고성위 · 김형진(1999) : GF/P 복합재료의 충격파괴거동에 관한 연구, *한국어업기술학회지* 35(4), 421-427.
- 8) Matheswaran, M. and Kirshore, Padmanabhan, K.(1995) : Static and impact behaviour of thermoplastic modified glass fabric/epoxy composites, *J. of Mat. Letter*, 14, 951-954.
- 9) Pritchard, G. and Yang, Qiang(1994) : Microscopy of impact damage in particulate-filled glass-epoxy laminates, *J. of Mat. Sci.*, 29, 5047-5053.
- 10) Plati, E. and Williams, J. G.(1975) : The determination of the fracture parameters or polymers in impact, *Polymer Eng. Sci.*, 15, 1975, 470-477.