

35톤급 FRP선박 외판재의 충격파괴거동에 관한 연구 A Study on the Impact Fracture Behavior of Side Plate of 35 Ton Class FRP Ship

김형진 · 이진정 · 김재동 · 고성위

H. J. Kim, J. J. Lee, J. D. Kim and S. W. Koh

Key Words : Fracture Energy(파괴에너지), Failure Mechanism(파괴기구), Impact Fracture Toughness(충격파괴 인성치), SEM(주사전자현미경), Fracture Analysis(파면해석)

Abstract : The effects of temperature and initial crack length on impact fracture behavior of side plate material of 35 ton class FRP ship, which are composed by glass fiber and unsaturated polyester resin, were investigated. Impact fracture toughness of GF/PE composites displayed maximum value when the temperature of specimen is room temperature and 50℃, and with decrease in temperature of specimen, impact fracture toughness decreased. Impact fracture energy of GF/EP composites decreased with increase in initial crack length of specimen, and this value decreased rapidly when the temperature of specimen is lowest, -25℃. It is believed that sensitivity of notch on impact fracture energy were increased with decrease in temperature of specimen. As the GF/EP composites exposed in low temperature, impact fracture toughness of composites decreased gradually owing to the decrease of interface bonding strength caused by difference of thermal expansion coefficient between the glass fiber/polyester resin. Further, decrease of interface bonding strength of composites with decrease in specimen temperature was ascertained by SEM photograph of impact fracture surface.

1. 서 론

섬유강화 플라스틱 복합재료(FRP)는 금속재료에 비해 비강도와 비강성이 높고 내식성이 우수하며, 섬유방향 및 적층순서의 변화에 따른 유동적인 이방성을 갖는 특성 등으로 경량화 및 고속화가 요구되는 소형 선박의 외판 및 부재로 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 FRP의 선박재료에의 적용에 가장 문제가 되는 것은 충격하중에 매우 약하다는 것과 파손 시 보수가 쉽지 않다는 것이다. 이들 복합재료는 실제 사용 시 작업자의 부주의 또는 공구 등의 충격에 의해 층간분리와 같은 결함이 발생할 수 있고, 황천항해 중에는 큰 파도 등에 의해, 접안 또는 계류 시에는 충돌에 의해 큰 충격하중을 받을 수

있는데, 이러한 충격에 대한 복합재료의 응답은 국부적인 손상일 수도 있고 최악의 경우 총체적인 붕괴를 야기할 수도 있다.

충격실험은 금속이나 플라스틱과 같은 재료에 대해서 시험법의 기준이 제정되어 있으며 이에 따라 충격에 대한 많은 실험적 데이터가 나와 있다. 그러나 재료의 충격에 관한 정보는 일반적으로 재료설계에 이용되는 기본적인 특성치로는 사용되지 않고, 단지 동일한 충격을 받은 상이한 재료의 파괴모드 비교와 에너지 흡수율 비교에 이용되거나 또는 재료의 품질검사의 한 분야로 이용되어 왔다. 그러나 변형율에 민감한 재료에 있어서 충격파손에 대한 재료 설계를 할 때, 정적 기계적 특성치는 설계에 적절한 재료의 물성치로 이용되는데 무리가 있다. 그러므로 이러한 변형율에 민감한 재료에 있어서는 충격에 대한 저항과 같은 파괴인성이 정적 기계적 성질과 함께 고려되어야 할 것이다. 한편 에폭시나 불포화 폴리에스터(unsaturated polyester resin)와 같은 열경화성 수지는 수지의 경화온도가 상대적으로 낮고 온도에 의해 취성적으로 변화하기 때문에

접수일 : 2005년 10월 7일
김재동(책임저자) : 경상대학교/해양산업연구소
E-mail : jdkim@gsnu.ac.kr Tel:055-640-3168
김형진 : 경상대학교 기계항공공학부/해양산업연구소
이진정 : 경상대학교 대학원
고성위 : 부경대학교 기계공학부

사용조건으로서 온도의 조건이 중요시되고 있으며, 온도에 따른 충격특성 변화에 대한 연구는 이들 재료의 응용 상 매우 중요하다.

FRP의 충격강도에 영향을 미치는 제조인자로는 섬유함유율, 섬유방향, 섬유와 기지의 접착정도 및 섬유와 기지의 특성 등이 있으며, 이에 대한 이전 연구는 다음과 같다. Mateen 과 Sidiqii¹⁾는 유리섬유강화 폴리우레탄 복합재료의 충격실험을 통해 충격저항은 섬유의 체적분율이 증가함에 따라 증가한다고 했으며, Fernando 등²⁾은 섬유방향이 [(+45, -45,0,0)₂]_s 인 유리-케브라 하이브리드 복합재료의 파괴 실험을 통해 파괴인성은 유리섬유의 비율에 의존한다고 하였다. Famsteiner와 Theyson³⁾은 유리섬유/PP 복합재료의 계면강도 실험을 통해 기지의 계면은 충격강도에 큰 영향을 미침을 밝혔다. 온도에 따른 재료 특성의 변화에 대해서, Koh 등^{4,5)}은 실리카 입자강화 복합재료의 연구에서 충격파괴인성치는 실온에서 가장 높은 값을 나타내고 실온보다 높거나 낮은 온도에서는 감소하며, 굽힘강도는 온도가 증가함에 따라 감소 하였다. 또한 탄산칼슘 입자강화 폴리프로필렌 복합재료의 실험에서 충격파괴에너지는 온도가 증가함에 따라 증가하며 높은 충격파괴에너지는 케비테이션이나 디본딩, 소성변형에 기인한다고 하였다. 또한 Throt⁶⁾와 Munro등⁷⁾은 탄소/유리 하이브리드 재료의 파괴인성이 온도에 의존한다는 결과를 보고하였다. 이상과 같이 FRP의 충격강도에 미치는 제조변수의 영향에 대하여 많은 연구가 있어왔으나, FRP 선박재료의 충격에 대한 연구는 그리 많지 않은 것 같다. 또한 선박의 설계와 검사에 관련 있는 기관(선급협회 또는 선박검사기술협회)에서도 FRP선박의 재료시험 항목에 인장이나 굽힘강도 및 섬유함유율에 대한 규정은 있으나 충격강도에 대해서는 별도의 규정이 없다.

그러므로 본 연구에서는 전장이 약 25m 되는 FRP 선박의 선측 및 선저외판에 사용되는 GFRP 적층판에 대하여, 초기노치 및 실험온도의 변화가 충격파괴인성치에 미치는 영향을 충격시험과 충격시험편 파단면의 관찰을 통하여 고찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

실험에 사용된 재료는 35톤급 해양조사선(경상대학교 참바다호)의 외판재로 사용된 GFRP로, 유리섬유로는 잘려진 섬유 매트(chopped strand mat:

450g/m²)와 직조 섬유(woven roving: 860g/m²)를, 수지는 불포화 폴리에스테르를 사용하였으며, 잘려진 섬유 매트와 직조섬유를 각각 한 층씩 교호로 수지에 함침시켜 12플라이를 적층하였다. 적층작업 시 기포, 부풀음, 수지 부족 또는 과다현상이 발생되지 않도록 주의하여 작업하였으며, 최하부층과 최상부층은 chopped strand mat가 위치하도록 적층하였다. Table 1은 이 재료를 온도 20℃, 상대습도 52% 조건에서 시험한 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 1 Mechanical properties of GFRP

| Items | Unit | Value | Test method |
|--------------------------|------|-------|-------------|
| Tensile strength | MPa | 151 | KS M 3305 |
| Tensile elastic modulus | GPa | 24.5 | " |
| Bending strength | MPa | 238 | " |
| Bending elastic modulus | GPa | 10.4 | " |
| Hardness(Bacol) | - | 48 | " |
| Volume fraction of fiber | % | 39.8 | " |
| Thickness | mm | 12.3 | |

Fig. 1은 본 실험에 사용된 충격시험편의 형상으로, 원재료에서 다이아몬드 카터를 이용하여 절단하여 가공하였다. 노치는 시험편의 중심에 두께 1mm의 카터로 1차 가공을 한 후, 노치선단을 더욱 날카롭게 하기 위하여 신퐁의 면도날을 이용하여 총 크랙길이가 1~3mm의 범위가 되도록 2차 가공하였다.

충격시험을 위한 시험편의 온도설정을 위해 항온항습기를 이용하여 -25℃에서 50℃범위에서 변화시켰다. 설정온도에서 2시간 이상 경과하여 시험편 내부까지 온도가 도달되도록 한 후 각각의 시험편에 대하여 충격시험을 실시하였다. 충격실험 후 파단면을 관찰하기 위하여 주사현미경(scanning electron microscope : SEM)을 이용하여 관찰하였다.

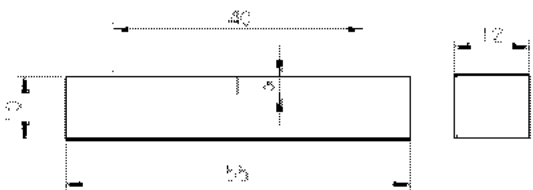


Fig. 1 Specimen geometries for Charpy impact test

충격파괴인성치 G_{IC}의 계산에는 다음과 같은 두 가지 식을 사용할 수 있다. 첫번째는 충격시험에서 얻은 파괴에너지를 크랙을 제외한 단면적으로 나눈

값으로 식 (1)과 같다.

$$G_{IC} = \frac{U}{B(W-a)} \quad (1)$$

여기서 U 는 총 충격파괴에너지이고, B 는 시험편의 두께, W 는 시험편의 폭, a 는 크랙길이 이다.

한편 Williams 등^{8,9)}은 충격에 의한 파괴에너지의 계산에 다음과 같은 식을 제안했다.

$$U = U_k + G_{IC}BW\phi \quad (2)$$

여기서 U_k 는 운동에너지이고, ϕ 는 무차원 형상계수로 다음과 같다

$$\phi = \frac{C}{dC/d(a/W)} \quad (3)$$

여기서 C 는 컴프라이언스(compliance)이다.

또한 무차원형상계수 ϕ 를 다른 방법으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{W} + \frac{1}{18\pi} \cdot \frac{S}{W} \cdot \frac{1}{a/W} \quad (4)$$

충격파괴인성 G_{IC} 는 충격시험에서 얻은 총 파괴에너지 U 와 시험편 두께와 폭 및 무차원계수의 곱인 $BW\phi$ 를 도시화하고 최소자승법에 의해 이들의 기울기를 구하면 이 기울기가 충격파괴인성 G_{IC} 가 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시험편의 노치 및 온도 변화에 따른 충격파괴인성치의 거동

Fig. 2는 시험편의 온도 변화에 따른 충격파괴에너지(U)를 시험편의 크랙을 제외한 리가먼트(ligament: $W-a$)에 대하여 나타낸 것이다. 모든 온도조건에서 리가먼트의 길이가 증가함에 따라 충격파괴에너지는 높아지고 있으며, 실온과 50°C에서 가장 높고 0°C, -15°C, -25°C로 온도가 낮아짐에 따라 충격파괴에너지는 낮아지고 있다. 특히 가장 저온인 -25°C에서는 초기크랙의 길이(a)가 커짐에 따라 파괴에너지는 급격히 낮아지고 있어 노치에 대한 충격파괴에너지의 민감도가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 시험편 온도의 변화에 따른 충격파괴인

성치(G_{IC})를 식 (1)에 의해 구하여 리가먼트에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 G_{IC} 는 단위 면적 당의 파괴에너지를 나타내고 있으며 초기크랙에 따라 약간의 산포가 있으나, 각 각의 시험편 온도 조건에서의 충격파괴인성치를 대략적으로 구할 수 있다. 실온과 50°C에서 가장 높은 값을 나타내었고, 0°C, -15°C, -25°C로 온도가 낮아짐에 따라 충격파괴인성치는 낮아짐을 알 수 있다.

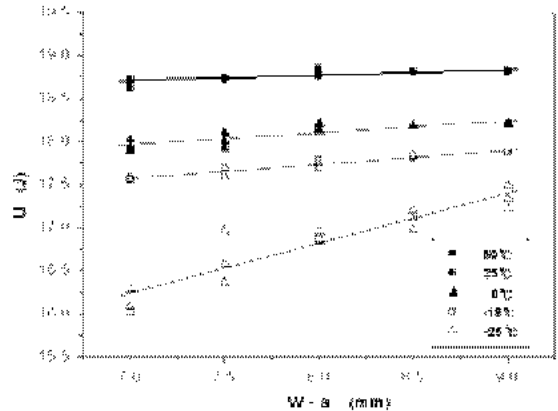


Fig. 2 Variation of impact fracture energy with ligament at various temperature

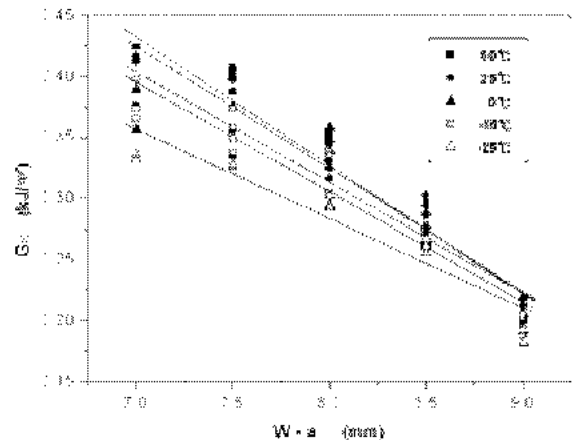


Fig. 3 Variation of impact fracture toughness with ligament at various temperature

Fig. 4는 시험편의 온도 변화에 따른 충격파괴에너지(U)를 시험편의 형상 $BW\phi$ 에 대하여 나타낸 것으로, 모든 온도조건에서 시험편의 $BW\phi$ 가 증가함에 따라 충격파괴에너지는 높아지고 있으며, Fig. 2에서와 같이 특히 저온인 -25°C에서는 시험편의 형상 $BW\phi$ 가 커짐에 따라 파괴에너지는 급격히 높아지고 있다.

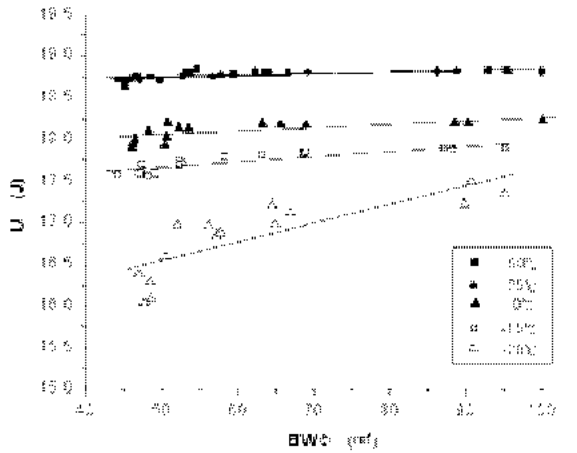


Fig. 4 Variation of impact fracture energy with BWφ at various temperature

Fig. 5는 시험편 온도의 변화에 따른 충격파괴인성치(G_{IC})를 시험편 형상 BWφ에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 3에서와 같이 실온과 50°C에서 가장 높은 값을 나타내었고, 0°C, -15°C, -25°C로 온도가 낮아짐에 따라 충격파괴인성치는 낮아짐을 알 수 있다.

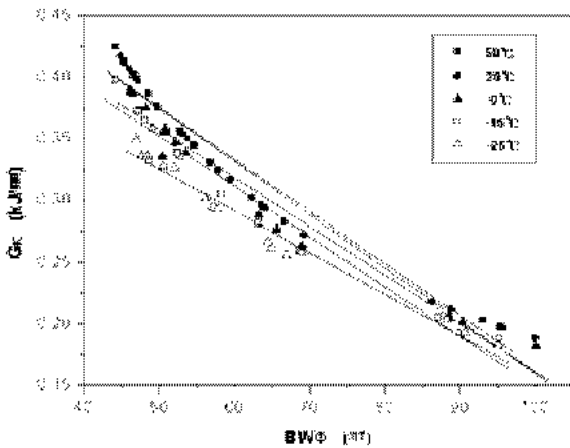


Fig. 5 Variation of impact fracture toughness with BWφ at various temperature

Fig. 6은 초기 크랙길이가 2mm인 충격시험편의 온도에 따른 충격파괴인성치 G_{IC} 를 식(1)에 의해 계산하여 나타낸 것이고, Fig. 7은 동일한 시험편의 온도에 따른 충격파괴에너지 U를 나타낸 것이다. 실온 및 50°C에서는 거의 비슷한 충격파괴값을 나타내나, 시험편의 온도가 0°C, -15°C, -25°C로 내려감에 따라 파괴에너지 및 파괴인성치는 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

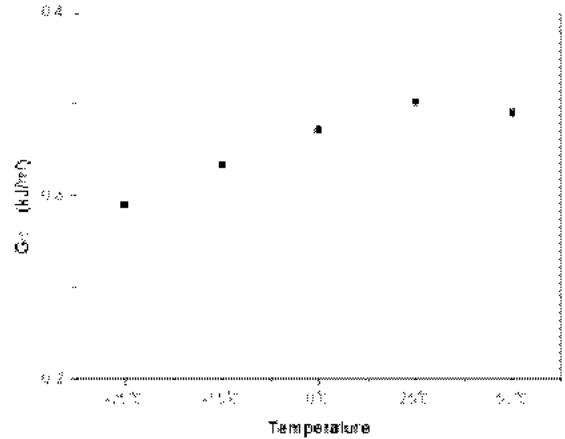


Fig. 6 Variation of impact fracture toughness with specimen temperature

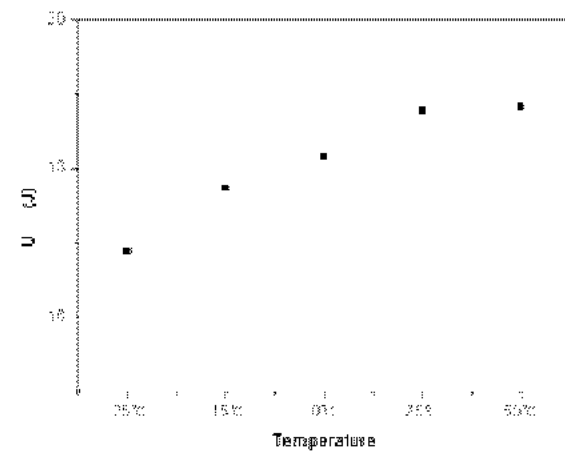


Fig. 7 Variation of impact fracture energy with specimen temperature

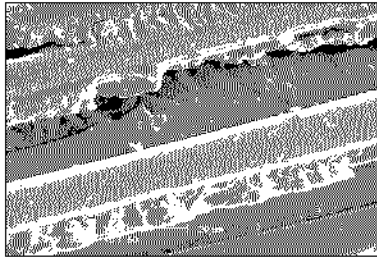
일반적으로 불포화 폴리에스터와 같은 열경화수지는 유리나 탄소섬유에 비하여 약 10배 이상의 열팽창계수($50\sim 80 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)를 나타내고 있다. 상이한 열팽창계수를 포함하고 있는 복합재료가 열을 받을 경우 강화상 섬유는 반경 방향의 압축응력과 길이 방향의 인장응력을 받게 되고, 냉각되어질 때에는 계면접착강도는 저하하고 수지는 취성화 된다. 이러한 열팽창/수축에 의한 복합재의 잔류응력(σ_r)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다¹⁰⁾.

$$\sigma_r \propto \Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_m \quad (5)$$

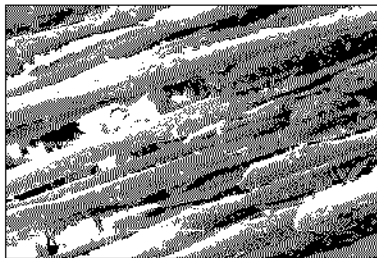
여기서 $\Delta\alpha$ 는 기지와 강화섬유의 열팽창계수 차이, ΔT 는 온도 차이 및 E_m 는 기지의 탄성계수이다. 그러므로 온도 저하에 따라 잔류응력이 증가하고 기지는 취성화되므로 충격에 의한 파괴인성은 감소하게 된다.

3.2 파면해석

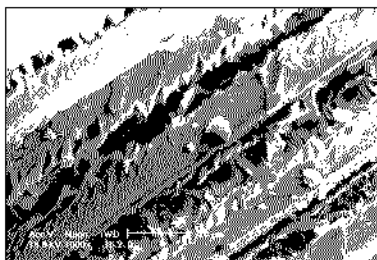
Photo. 1은 충격실험 후 시험편의 파단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 시험편의 온도에 따라 파단 후 유리섬유 강화상에 부착된 수지의 양과 형상이



(a) 50°C



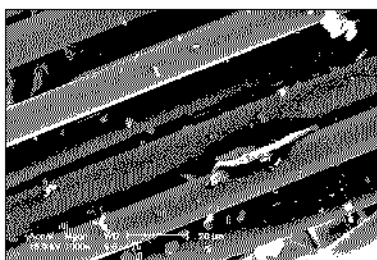
(b) 25°C



(c) 0°C



(d) -15°C



(e) -25°C

Photo. 1 SEM photograph of impact fracture surface with specimen temperature.

달라진 것을 사진에서 볼 수 있다. 50°C 시험편은 유리섬유가 수지와 함께 떨어져 나가거나 유리섬유에 수지가 상당량 붙어있는 것으로 보아 섬유/수지 간의 계면결합이 좋은 것을 알 수 있다. 반면에 시험편의 온도가 내려가면서 섬유에 부착된 수지의 양이 적어지고 시험편이 영하의 온도인 경우는 섬유에 붙어있는 수지의 양이 거의 없는 것을 알 수 있다.

충격시험에 의해 계측된 총 충격파괴에너지는 적절한 설비에 의해 시간의 함수로서의 하중 및 누적 에너지를 계측하면 파괴개시에너지와 파괴전파에너지로 나누어 생각할 수가 있다¹¹⁾. 그러므로 이들 두 에너지의 합이 같을지라도 파괴개시 및 파괴전파에너지의 상이에 의해 파괴거동은 전혀 다를 수 있다. 예를 들어, 고강도 취성재료는 높은 파괴개시에너지를 가지지만 파괴전파에너지는 낮다. 반면에 저강도 연성재료는 파괴개시에너지는 낮지만 높은 파괴전파에너지를 소비할 수 있다.

이러한 관점에서 상대적으로 낮은 온도의 시험편은 파괴개시에너지는 높지만 적층재의 계면분리 진행과정에서 흡수되어지는 파괴전파에너지는 적은 반면, 실온 및 50°C의 시험편은 파괴개시에너지에 적층재의 계면분리 진행과정에서 수지에 의한 에너지의 흡수가 더해져 파괴전파에너지가 높게 되어 전체적으로 파괴인성이 높아진 결과를 나타냈다고 생각된다. 이러한 사용온도에 따른 파괴인성치의 변화는 파단면 사진의 분석을 통해 섬유에의 수지의 부착상태의 관찰로 확인되어 졌다. 또한 전술한 바와 같이 유리섬유와 불포화폴리에스터 수지간의 열팽창계수 차이에 의해 시험편의 온도가 낮은 경우 계면접착강도가 저하하고 수지는 더욱 취성화되어 재료의 충격파괴인성치는 더욱 낮게 될 것이다.

5. 결 론

35톤급(전장 25m) FRP 선박의 선축 및 선저외판에 사용되는 GFRP 적층판에 대하여, 초기노치 및 사용온도 조건의 변화가 충격파괴강도에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) GF/PE 복합재료의 사용온도 조건에 따른 충격 파괴인성치는 실온(25°C)과 50°C의 경우가 가장 높고, 사용온도가 낮아질수록 충격파괴인성치는 낮아졌다

- (2) 사용온도가 가장 저온인 -25℃에서는 초기크랙의 길이가 커짐에 따라 파괴에너지는 급격히 낮아지고 있어 노치에 대한 민감도가 큰 것을 알 수 있다.
- (3) 저온의 사용조건에서 충격파괴인성치가 낮아지는 것은 유리섬유와 불포화 폴리에스터 수지간의 열팽창계수 차이에 의해 계면접착강도가 저하하고 수지는 더욱 취성화 되기 때문이라고 생각되며, 파단면 사진의 수지 접착상태를 통해 확인 할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005년도 두뇌한국21사업, NURI사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. A. Q. Mateen and S. A. Siddiqi, 1989, "Impact Properties of Polyurethane and Glass Fibres Reinforced Composites", J. Mat. Sci. 24, pp. 4516~4524.
2. G. Fernando, G. R. Dickson, 1988, T. Anderson, H. Reiter, and B. Harris, "Fracture of Hybrid Composites : part 1", J. Mat. Sci. 23, pp. 3732~3743.
3. F. Famsteiner and R. Theysohn, 1979, "Tensile and Impact Strengths of Unidirectional, Short Fiber-Reinforced Thermoplastics", Composites, pp.111~119.
4. S. W. Koh, J. K. Kim and Y. M. Mai, 1993, "Fracture Toughness and Failure Mechanisms in Silica-Filled Epoxy Resin Composites : Effects of Temperature and Loading Rate", Polymer 34, pp. 3446~3455.
5. 고 성위, 1993, "온도변화에 따른 실리카 입자강화 복합재료의 기계적 성질 및 파괴거동", 한국 복합재료학회지 6(2), pp. 52~60.
6. H. T. Throt and S. C. Lakkad, 1982, "Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Carbon Hybrid Composites", J. Mat. Sci. 17, pp. 2~14.
7. M. Munro and C. P. Z. Lai, 1988, "The Elevated-Temperature Dependence of Fracture Energy Mechanism of Hybrid Carbon-Glass

- Fiber Reinforced Composites", J. Mat. Sci. 23, pp. 3129~3168.
8. E. Plati and J. G. Williams, 1975, "The Determination of the Fracture Parameters of Polymer in Impact", Polym. Eng. Sci. 15, pp. 470~477.
9. G. P. Mashall, J. G. Williams and C. E. Turner, 1973, "Fracture Toughness and Absorbed Energy Measurements in Impact Test on Brittle Materials", J. Mat. Sci. 8, pp. 949~956.
10. J. J. Selsing, 1961, Am. Ceram. Soc. 44, pp. 419.
11. R. H. Toland, 1972, "Failure Mode in Impact-Loaded Composite Materials", Symposium on Failure Modes in Composites, AIME Spring Meeting, Ma., pp. 150~158.