

35톤급 FRP선박 외판자재의 충격파괴거동에 관한 연구

A Study on the Impact Fracture Behavior of Side Plate
for G/T 35ton Class FRP Vessel

이진정*†
Jin-Jung Lee*†

Abstract

This paper describes the failure mechanism and Charpy impact test of Fiber glass Reinforced Plastic composites which it was actually used for side plate of vessel. There are two examinations. The examination I, the specimens which it given temperature range $-25^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ and with different initial notch length did impact test and then it compared impact energy(U_c) and impact fracture toughness(G_{IC}). The examination II, the specimens which it putted into fresh water and sea water for scheduled hours did impact test and it compared impact energy(U_c) and impact fracture toughness(G_{IC}). From examination I, it showed that impact energy(U_c) and impact fracture toughness(G_{IC}) were peak at ambient temperature and decrease as temperature reduced. Fracture toughness(G_{IC}) showed increase as initial notch length reduced. From examination II, impact energy(U_c) and impact fracture toughness(G_{IC}) tended to increase which specimens putted in fresh water compared with sea water and maximum tolerance rate tend to decrease as permeation hours will be long.

※ **Keywords** : Fiber glass Reinforced Plastic composites(FRP 복합재료), impact test(충격 시험), impact energy(U_c)(충격파괴에너지), impact fracture toughness(G_{IC})(충격파괴인성치)

* 선박안전기술공단 통영지부

† 논문 주저자

1. 서 론

개개의 우수한 재료의 특성을 조합하여 보다 나은 새로운 기계적 특성을 가지는 복합재료 중 섬유 강화 플라스틱(Fiber glass Reinforced Plastic)은 우수한 고강성, 고강도 및 경량성, 내식성으로 인해 크게 각광받는 복합재료이다. 이 재료는 일반적으로 연속적인 장섬유(fiber)에 기지재(matrix)를 함침시키는 연속적인 적층(lamination)과정을 거쳐 복합재료(composite materials)를 완성시킨다. 이때 섬유는 주로 구조물의 하중을 담당하게 되며, 기지는 섬유간의 접착력을 강화시키고 층간 사이에 하중을 원활하게 섬유로 전달하는 역할을 한다. 그리고 압축하중이 작용하는 경우, 수지는 유리섬유를 고정시키면서 면내하중에 견디며 직접적인 압축을 통하여 하중을 전달하므로 면외 하중을 지지하는 역할을 한다. 섬유강화 복합재료의 제조공정은 물리적, 화학적 변화를 수반하는 기지재에 의하여 달라지게 된다. 기지재는 성형시의 화학반응 유무에 따라 열경화성 수지와 열가소성 수지로 나눌 수 있으며 열경화성수지에 비해 열가소성 수지는 선박건조에는 소형선박이나 레저선박에 일부 국한되어 사용하고 최근에 구조물의 일부로서 큰 규모의 제품에 적용하기위해 연구되고 있다. 우리나라에서 FRP 선박건조에는 사용상의 간편성 때문에 열경화성수지가 많이 이용되며 열경화성 복합재료^①에 사용되는 열경화성 수지의 종류에는 폴리에스테르, 비닐에스테르, 에폭시 등이 있고 그 중 불포화 폴리에스테르 수지는 말레산 무수물 또는 푸마르산과 같이 불포화 물질로 구성되며 양호한 내화학성과 간단한 사용법 및 기계적 특성에 비해 가격이 저렴하여 국내 FRP 소형선박의

선체재료로 대부분 사용되고 있다. 그러나 이러한 열경화성수지는 강화재인 섬유에 비해 상대적으로 열에 약하고 화학적으로 불안정하며 취성을 가진다.^{②-③} 이러한 결함은 복합재를 이용한 구조물의 파괴인성이나 손상 허용성(damage tolerance) 등을 감소시킨다. 또한 근래 수 십 년간 소형선박의 선체재료로 사용되어온 섬유강화복합재료(FRP)는 경량성, 내식성, 절연성 등 기계적 특성이 금속이나 목재 등 타 재료에 비해 탁월한 재료이나 선박의 선체는 파도나 해상의 부유물질 등 외부요인에 의한 충격저항에 노출되어 있고 기온이나 수온의 변화 및 수분흡수에도 영향을 받기 때문에 이러한 인자에 대한 검토는 반드시 이루어져야 한다. 그리고 환경인자로서 수분에 관한 연구는 복합재료의 정역학적 특성의 열화를 나타내었다고 보고하고 있다. 유기화학 복합재료가 습한 환경 또는 수분에 노출되면 수분함유량과 재료의 온도는 시간에 따라 변하게 된다. 이러한 변화로 적층판의 기계적 성질이 저하하게 된다. 수분은 대기 중에서 또는 재료가 장시간 수 환경 속에 노출되었을 때 흡수된다. FRP 복합재료 역시 수분을 흡수하는 것으로 알려져^④ 있다. 이러한 것으로 보아 외부 충격저항에 노출되어 있는 FRP 선박의 안정성을 확보하기 위해 FRP 복합재료에 대한 온도나 수분흡수 등 외부환경에 대한 충격강도에 관련한 연구가 필요한 실정이다. 그러나 우리나라에는 FRP 선박 건조 시 선체의 재질검사의 항목 중 충격강도에 관한 것은 제외되어 있다. 따라서 본 연구에서는 유리섬유와 불포화폴리에스테르 수지로 적층한 실제 선체재료에 대하여 초기 노치변화의 영향을 고찰하고 각각의 노치조건에서, 충격시험을 하여 온도변화에 따른 충격파괴인

성치와 수분흡수 영향에 따른 충격파괴인성치 G_{IC} 의 거동을 고찰하고 파면관찰을 통하여 미세 파괴기구를 상호비교 검토하여 외부영향에 의한 환경조건에서 충격저항이 FRP 선체에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 35톤급 해양조사선 (경상대학교 참바다호)의 선측외판에 사용된 GFRP로 구성은 다음과 같다.

1) 유리섬유

Chopped strand mat 450g/m²,

Woven roving 860g/m²

적층순서 (12ply) : Mat + Mat + Roving +

Mat + Roving + Mat + Roving + Mat +

Roving + Mat + Roving + Mat

2) 불포화 폴리에스테르 수지(Unsaturated polyester resin)

적층은 매트와 로빙 각 각 한층 씩 교호로 수지에 함침시켜 12 ply를 적층하였다. 적층 작업 시 기포, 부풀음, 수지 부족, 또는 과다 현상이 발생되지 않도록 주의하여 작업하였으며, 최 상부와 최 하부 층은 Chopped strand mat가 위치하도록 적층하였다. Table 1은 이 재료를 온도 20℃, 상대습도 52%의 조건에서 시험한 기계적 성질을 나타내고 있다(한국화학시험연구원: 2004).

Table 1. Mechanical properties of FRP Specimen

Items	Unit	Value	Test Method
Tensile strength	MPa	151	KS M 3305 : 2004
Tensile elastic modulus	GPa	24.5	KS M 3305 : 2004
Bending strength	MPa	238	KS M 3305 : 2004
Bending elastic modulus	GPa	10.4	KS M 3305 : 2004
Hardness(Bacol)	-	48	KS M 3305 : 2004
Volume fraction of fiber	%	39.8	KS M 3305 : 2004
Thickness	mm	12	KS M 3305 : 2004

2.2 실험 방법

1) 온도 변화에 의한 충격시험은 시험편의 온도 설정을 위해 항온습습기를 이용하여 -25℃, -15℃, 0℃, 실온 (25℃), 50℃에서 변화시켰으며 설정온도에서 2시간 이상경과 후 살피충격기(Tinus Olsen, Model 892)를 이용하여 충격시험을 행하였다. Fig 1은 실험에 사용된 충격시험편으로 시험편폭 10mm, 길이 55mm, 두께는 12mm이며 동일한 시험편 폭에서 초기크랙의 영향이 충격파괴인성치에 미치는 영향을 조사하기 위해 초기크랙의 길이를 1mm, 1.5mm, 2mm, 2.5mm, 3mm의 조건으로 변화시키면서 충격파괴인성치를 측정하였다.

2) 수분흡수에 따른 흡수시험과 충격시험은 해수, 청수 중에 각각 240시간, 480시간, 720시간, 960시간, 1200시간 침수시켜 놓고 설정시간 도달 후 꺼내 외부의 습기를 제거하고 전자저울로 무게를 측정하여 수분흡수율을 구하였고 살피충격기(Tinus Olsen, Model 892)를 이용하여 충격시험을

행하였다. Fig 1은 실험에 사용된 충격시험편으로 시험편폭 10mm, 길이 55mm, 두께는 12mm이며 동일한 시험편 폭에서 초기크랙의 영향이 충격파괴인성치에 미치는 영향을 조사하기 위해 초기크랙의 길이를 1mm, 1.5mm, 2mm, 2.5mm, 3mm의 조건으로 변화시키면서 충격파괴인성치를 측정하였다. 각각의 노치길이에 대하여 시험편은 최소 3개 이상으로 실험하여 실험값의 평균을 취하였다.

3) 충격실험 후 파단면의 미소파괴상태 및 유리섬유와 기지재(matrix)의 파단면을 관찰하기 위하여 파면을 주사현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 평가방법

3.1 충격파괴인성치 G_{IC} 의 평가

충격파괴인성치 G_{IC} 의 평가는 아래 식 (1)과 같이 충격시험에서 얻은 파괴에너지 U 와 시험편 두께와 폭 및 무차원 형상계수 $BW\phi$ 를 이용하여 최소자승법에 의하여 기울기를 구하여 이 기울기를 충격파괴인성치 G_{IC} 로 한 Williams⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾등이 제안한 방법으로 아래 식(3)로 계산한 것이다.

$$U = Uk + G_{IC} \times B \times W \times \phi \quad \text{식 (1)}$$

U : 총충격에너지(J) Uk : 운동에너지 (J)

B : 시험편의 두께(mm)

W : 시험편의 폭 (mm) ϕ : 무차원 형상계수

ϕ 는 무차원 형상계수로 다음과 같다.

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

a : 크랙 길이(mm) S : 스패 길이(mm)

$$G_{IC} = \frac{U}{W - a} \times B \quad \text{식 (3)}$$

G_{IC} : 충격파괴인성치(KJ/mm²)

3.2 수분흡수율의 평가

수중에 침수시킨 충격시험편의 수분흡수율 $M(t)$ 에 대한 평가⁽⁷⁾는 다음의 식을 사용하였다.

$$M(t) = \frac{Wm - Wd}{Wd} \times 100 \quad \text{식 (4)}$$

M : 수분흡수율 (%)

Wd : 수분흡수 전의 시험편(건조시험편) 무게

Wm : 수분흡수 후의 시험편 무게

4. 결과 및 고찰

4.1 온도변화에 따른 충격실험

Fig. 1은 온도변화에 따른 충격에너지 U 와 시험편 형상 $BW\phi$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 실온

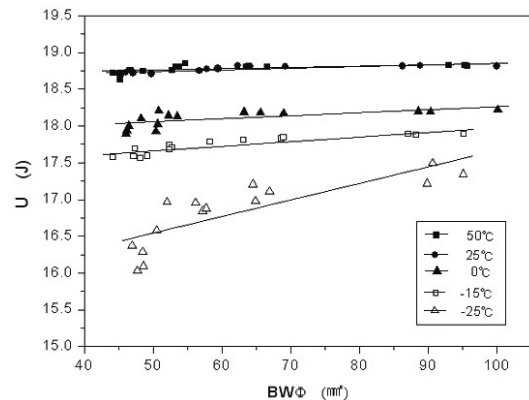


Fig. 1. U Vs $BW\phi$ for various temperature

(25°C)과 50°C에서 U가 가장 높게 나타나고 0°C, -15°C, -25°C의 순으로 낮게 나타났다. 실온에서는 파괴에너지 U의 변화가 완만하고 -25°C에서는 급격한 기울기를 나타내었으며, 이것은 연성파괴의 전형적인 형태로 보여지며 연성파괴가 취성파괴에 비하여 높은 파괴에너지를 얻는 결과라 판단된다.

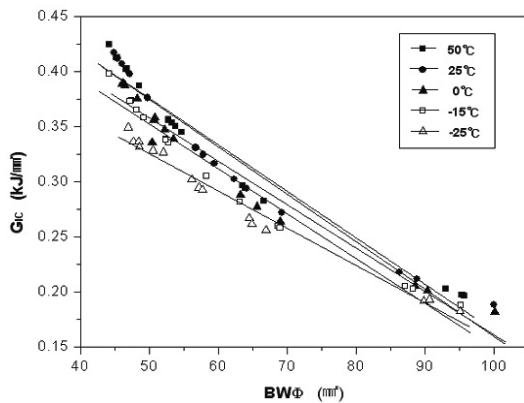


Fig. 2. G_{IC} Vs $BW\Phi$ for various temperature

Fig. 2는 각 온도에서의 충격파괴인성치 G_{IC} 와 시험편 형상 $BW\Phi$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 실온과 50°C에서 비슷한 경향을 보이며 0°C, -15°C, -25°C의 순으로 낮게 나타났다. 이러한 현상은

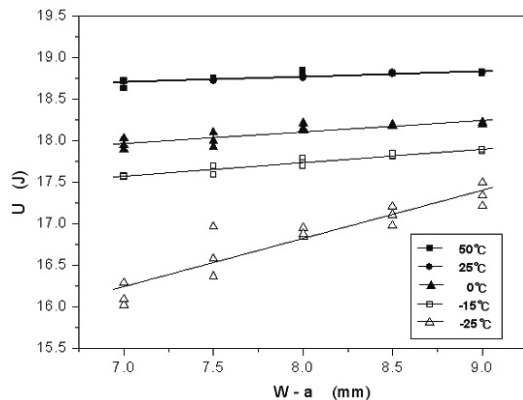


Fig. 3. U Vs W-a for various temperature

온도가 저온으로 내려감에 따라 연성파괴에서 취성파괴현상으로 변하여 가는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각 온도에서의 충격에너지 U와 리가먼트 W-a와의 관계를 나타낸 것이다. 실온(25°C)과 50°C에서 U가 가장 높게 나타나고 0°C, -15°C, -25°C의 순으로 낮게 나타났다. 이것은 고온에서 재료가 갖는 온도에 대한 영향보다 저온에서 온도 영향이 더 큼을 나타낸다. 그리고 본 실험에서 사용한 수지는 불포화 폴리에스테르수지로 열경화성 수지이기 때문에 열가소성수지와 달리 고온에서는 별 영향을 받지 않으나 저온에서는 취성화되어 저온 취성특성의 영향을 받는 결과라 판단된다.

그러나 이러한 현상은 섬유함유율이나 적층방법 등의 영향으로 취성화가 억제되기 때문에 실험값으로 천이온도의 구별은 할 수 없고 온도변화에 따른 미세한 변화만을 확인할 수 있었다.

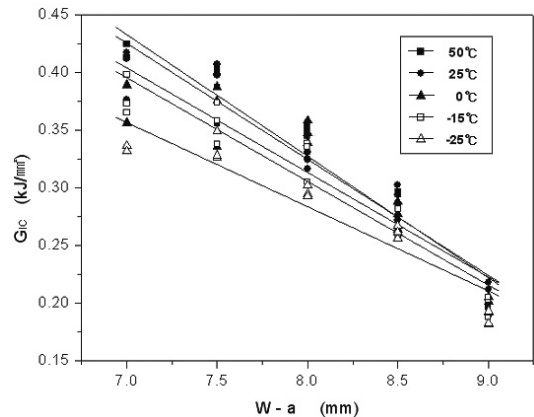


Fig. 4. G_{IC} Vs W-a for various temperature

Fig. 4는 각 온도에서의 충격파괴인성치 G_{IC} 와 리가먼트 W-a와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 G_{IC} 는 단위면적당의 파괴에너지를 나타내고 있으며 초기크랙에 따라 약간의 산포가 있으나, 각 각의

시험편 온도조건에서의 충격파괴인성치를 대략적으로 구할 수 있다. 실온과 50℃에서 가장 높은 값을 나타내었고, 0℃, -15℃, -25℃로 온도가 낮아짐에 따라 충격파괴인성치는 낮아짐을 알 수 있다.

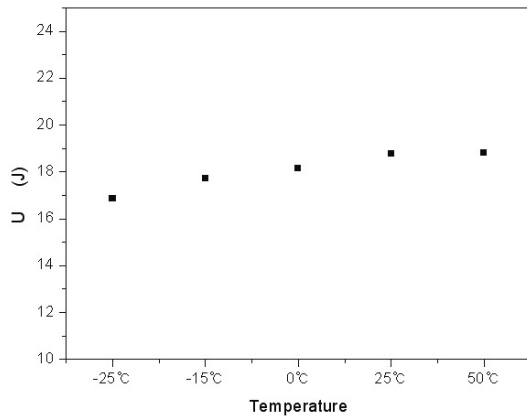


Fig. 5. U Vs various temperature with initial notch (length 2mm)

Fig. 5는 초기크랙 2mm의 조건에서 측정된 파괴에너지의 값을 나타낸 것이다. 실온과 50℃의 온도에서 가장 높았고 저온으로 갈수록 낮은 값을 나타낸다. 본 실험에서는 완만한 값이 나타내며, 이것은 매트와 로빙 직조섬유를 교대로 적층하여 취성 파괴를 예방한 적층 기법이 저온에서 취성 파괴 효과를 다소 감소시킨 영향이라 판단된다.

4.2 수중에서 시간경과에 따른 충격실험

Fig. 6은 25℃의 해수(■)와 25℃ 청수(◆)의 흡수율을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 해수의 경우가 수분흡수율이 급격히 증가되어 960시간이 지나면 포화되고 있다.

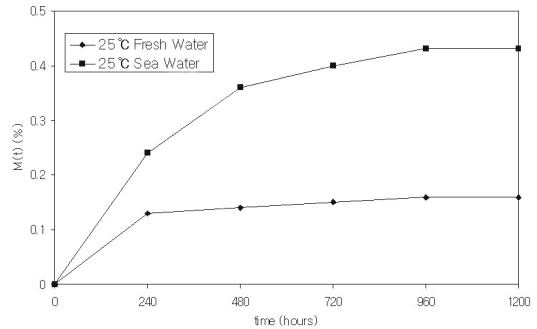


Fig. 6. Water absorption Vs Immersion time for sea water and fresh water

반면 청수의 경우, 수분흡수율은 240시간까지는 증가하지만 그 이후는 포화상태가 되어 거의 변화가 없다. 이것은 확산계수가 시간의 함수, 온도의 함수 외에 수용액의 조건에도 영향을 받는다는 것을 나타내고 있다. 즉 해수는 담수에 비하여 침투 활성화 에너지가 낮기 때문인 것으로 판단되어 수분침투가 용이하다고 생각된다.

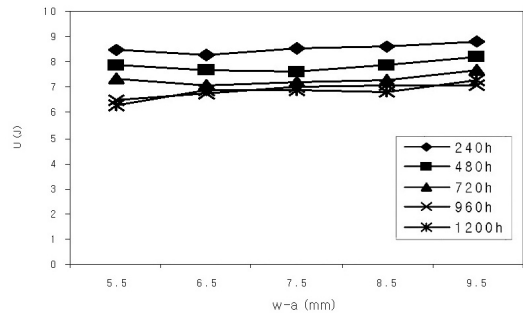


Fig. 7. U Vs W-a for various immersion time (Sea Water)

Fig. 7은 해수 중에서 시간의 경과함에 따른 충격파괴에너지 U와 리가먼트 W-a와의 관계를 나타낸 것이다. 해수 중에서 시간이 경과함에 따라 해수의 흡수 증가로 파괴에너지 U가 감소하는 것을 볼 수 있다. 초기에는 시간의 증가로 재료의

취성화가 뚜렷하게 진행되다가 이후 720시간 이후에는 파괴에너지의 감소가 점차 구분이 없어진다. 이는 수분 흡수가 거의 포화상태가 되어 시간경과가 별 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

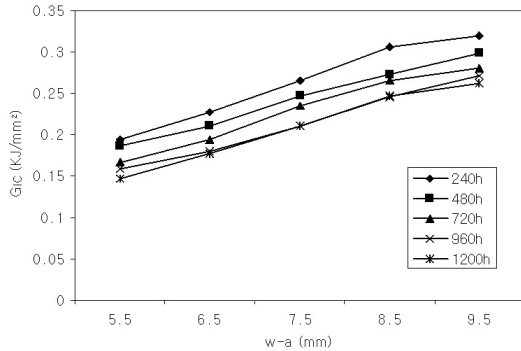


Fig. 8. G_{IC} Vs $W-a$ for various immersion time (Sea Water)

Fig. 8은 해수 중에서 시간의 경과함에 따른 충격파괴인성치 G_{IC} 와 리가먼트 $W-a$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 해수 중에서 시간이 경과함에 따라 충격파괴인성치 G_{IC} 가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 초기에는 시간의 증가로 재료의 취성화가 뚜렷하게 진행되다가 이후 720시간 부터는 충격파괴인성치 G_{IC} 의 감소가 점차 적어지는 것을 알 수 있다. 이는 수분흡수가 거의 포화상태가 되어 파괴에너지 U 와 같이 시간경과가 별 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 다만, 초기 크랙의 증가에 따라 충격파괴인성치 G_{IC} 의 감소는 뚜렷하다.

Fig. 9는 해수 중에서 시간의 경과함에 따른 충격파괴에너지 U 와 시험편 형상 $BW\phi$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 초기 240시간, 480시간에서는 충격파괴에너지 U 의 감소가 현저하고 이후에 감소가 뚜렷하게 나타나지 않음을 알 수 있다.

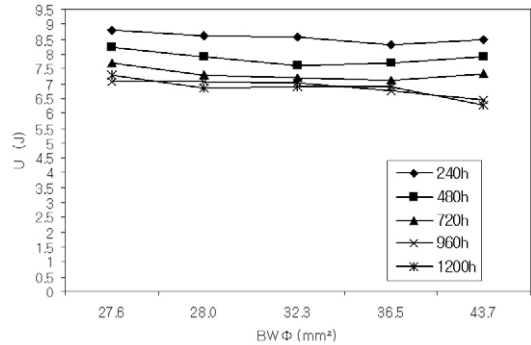


Fig. 9. U Vs $BW\phi$ for various immersion time (Sea Water)

이는 초기의 480시간 정도까지 해수의 수분흡수율의 급속한 증가로 재료의 열화 및 취성화가 진행되었고 이후에 충격파괴에너지가 감소하는 것은 매트와 로빙 직조섬유를 교대로 적층하여 취성 파괴를 예방한 적층 기법이 어느 정도 충격 에너지를 흡수한 것으로 판단된다.

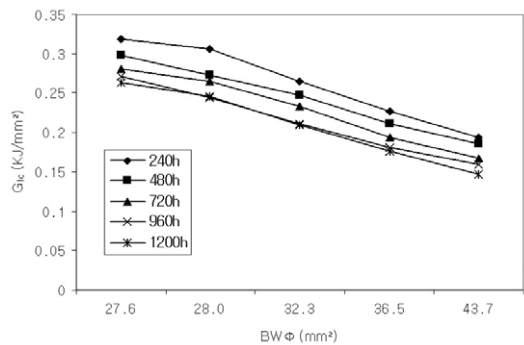


Fig. 10. G_{IC} Vs $BW\phi$ for various immersion time (Sea Water)

Fig. 10은 해수 중에서 시간의 경과함에 따른 충격파괴인성치 G_{IC} 와 시험편 형상 $BW\phi$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 초기 240시간, 480시간

에서 충격파괴인성치 G_{IC} 의 감소가 현저하고 이후에는 감소율의 변화가 적다. 이것은 충격파괴에너지 U 와 같이 초기의 480시간 정도까지 해수의 수분흡수율의 급속한 증가로 재료의 열화 및 취성화가 진행되었고 이후에 충격파괴에너지가 감소하는 것은 매트와 로빙 직조섬유를 교대로 적층하여 취성 파괴를 예방한 적층 기법이 어느 정도 충격에너지를 흡수한 것으로 판단된다.

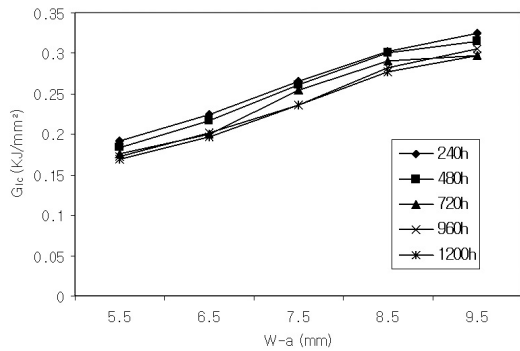


Fig. 11. G_{IC} Vs $W-a$ for various immersion time (Fresh Water)

Fig. 11은 시간경과에 따른 $W-a$ 와 충격파괴인성치 G_{IC} 의 변화를 나타낸 것으로 시간의 경과에도 충격파괴인성치 G_{IC} 는 큰 변화가 없었다. 그러나 초기 노치의 증가에 따른 충격파괴인성치 G_{IC} 의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 이것은 청수의 경우 초기 수분흡수율의 영향으로 초기 240시간이후로 거의 포화상태가 되어 시간경과가 별 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 12에서는 초기 240시간 이후에서 충격파괴에너지 U 의 감소가 현저하고 480시간 이후에는 감소가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이것은

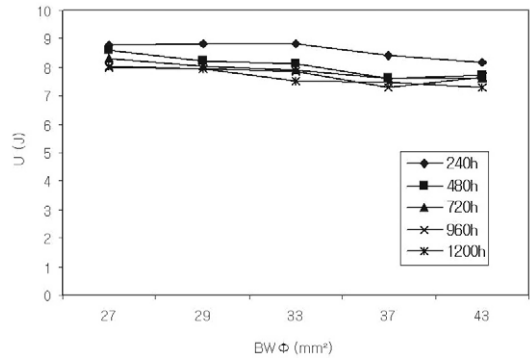


Fig. 12. U Vs $BW\Phi$ for various immersion time (Fresh Water)

청수의 경우 충격파괴인성치와 마찬가지로 초기 수분흡수율의 영향으로 초기(240시간) 이후로 거의 포화상태가 되어 시간경과가 별 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

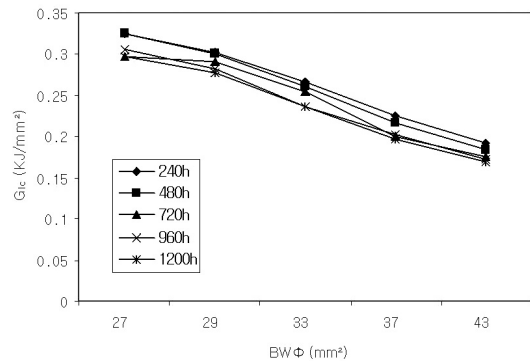
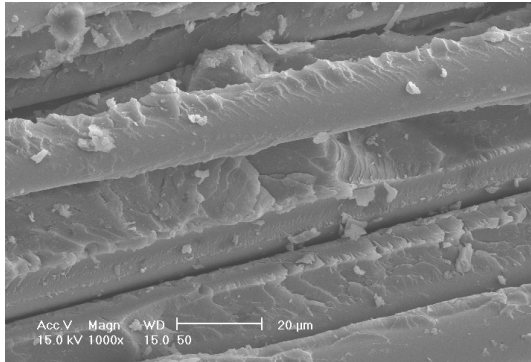


Fig. 13. G_{IC} Vs $BW\Phi$ for various immersion time (Fresh Water)

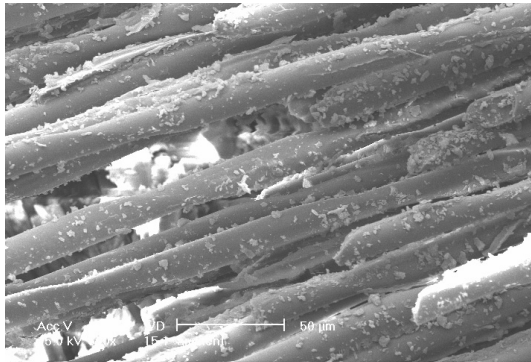
Fig. 13은 시간경과에 따른 시험편 형상 $BW\Phi$ 와 충격파괴인성치 G_{IC} 의 변화를 나타낸 것으로 시간의 경과에도 그다지 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 청수의 경우 해수에 비해 수분흡수율이 낮아 재료의 취성화에 별 영향을 미치지 않았으므로 판단된다.

5. 파면 해석

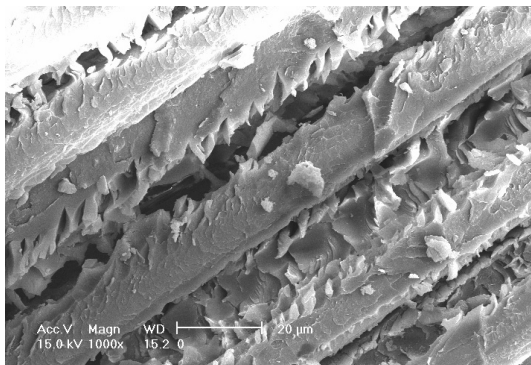
5.1 온도 변화에 따른 충격 실험 파면 SEM 분석



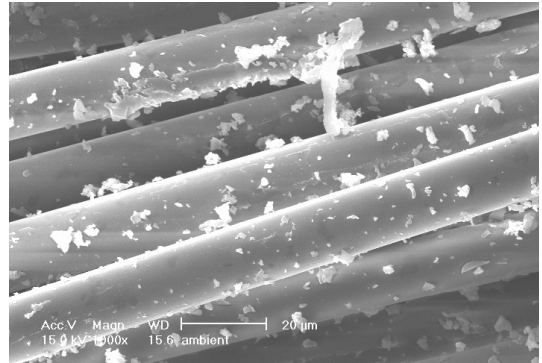
(a) 50 °C



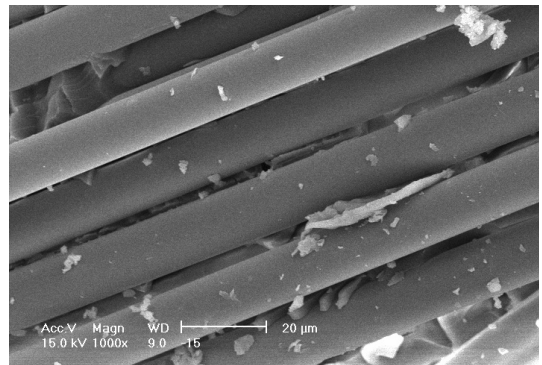
(b) 25 °C



(c) 0 °C



(d) -15 °C



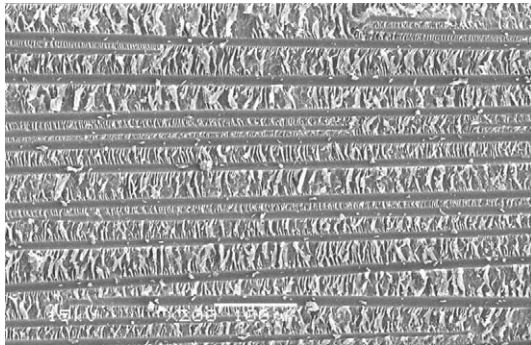
(e) -25 °C

Photo 1. SEM photograph of fractured surface by impact test (temperature)

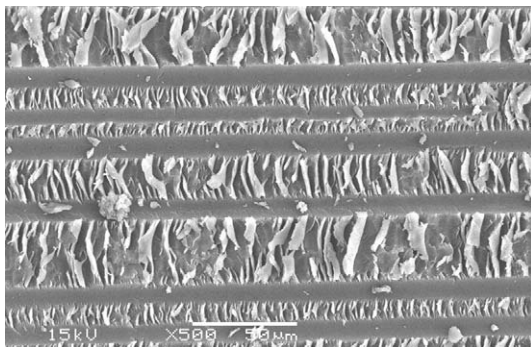
섬유 보강재와 수지의 기계적인 특성은 전혀 다르다.⁽⁸⁾ 예로 E-glass는 인장강도가 345KN/cm²이고 극한인장량은 4.8%정도이다. 등방성 폴리에스테르수지는 인장강도 6.9KN/cm²이고 극한인장량은 2%정도이다. 따라서 적층판이 응력을 받아 극한한도에 도달할 경우, 수지가 제일 먼저 파괴된다. Photo 1은 초기 노치길이 2mm 충격시험편 파면의 측면에서 MAT 적층재를 중심으로 섬유와 매트릭스의 분리 현상 관찰한 것이다. 이것에서 온도 변화에 따른 매트릭스의 형태에서 일어나는 변화를 볼 수 있고 이것이 파괴에너지의 변화에 주요한

변화에 영향을 미친다고 판단된다. 사진에서 (a)는 50℃, (b)는 실온, (c)는 0℃, (d)는 -15℃, (e)는 -25℃의 파단면을 나타내고 있다. 50℃와 실온에서는 매트릭스가 심한 충격에도 이탈율이 적고 대표적인 연성파면을 보이고 있다. 0℃에서 -25℃로 온도가 낮아짐에 따라 매트릭스가 잘게 부서지는 것을 볼 수 있고 탈락부분도 많아지는 것도 알 수 있다. -25℃의 경우에는 섬유에 남아있는 매트릭스의 양도 작고 거의 탈락되어 매끈하게 섬유만 남아있는 대표적인 취성파괴의 형태를 보이고 있다. 이러한 파면의 형태가 일반적으로 열경화성 복합재료에서 일어나는 저온 취성의 파단면 형태라고 생각된다.

5.2 수중에서 시간 경과에 따른 충격 실험 파면 SEM 분석



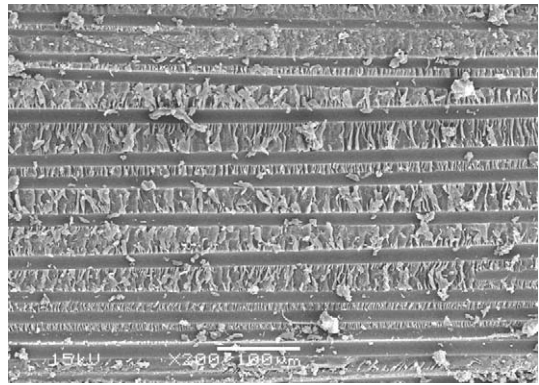
(a) 240 hours



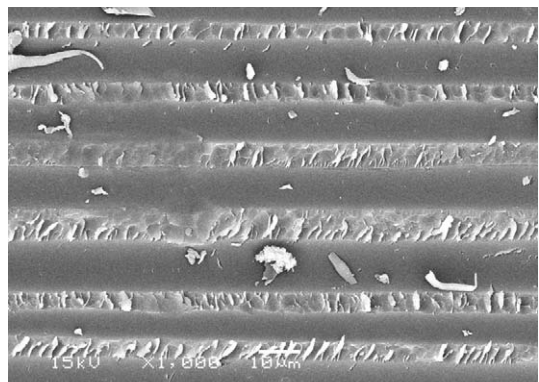
(b) 480 hours



(c) 720 hours

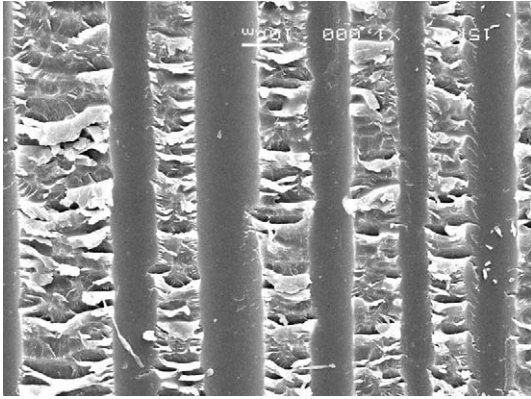


(d) 960 hours

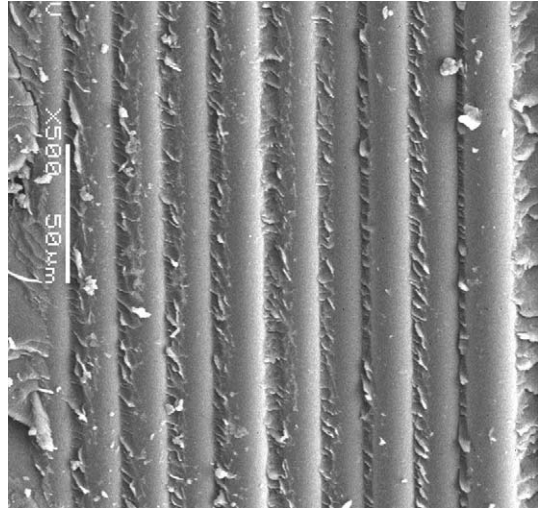


(e) 1200 hours

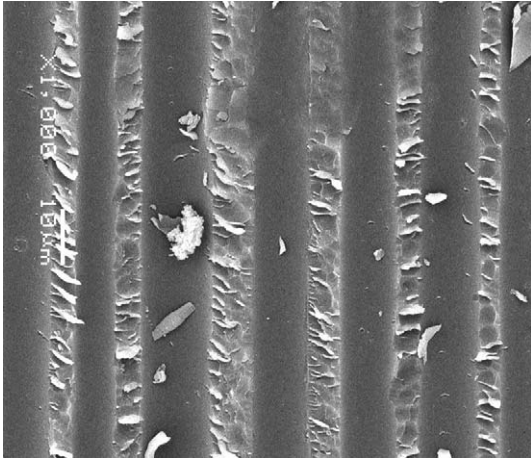
Photo 2. SEM photograph of fractured surface by impact test (time/fresh water)



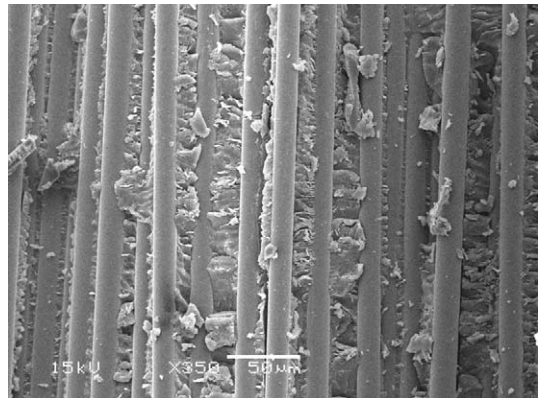
(a) 240 hours



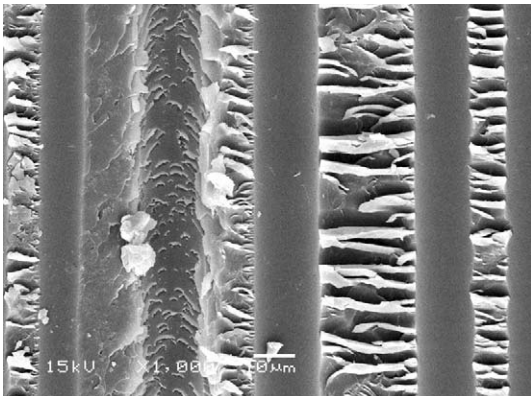
(d) 960 hours



(b) 480 hours



(e) 1200 hours



(c) 720 hours

Photo 3. SEM photograph of fractured surface by impact test (time/sea water)

Photo 2와 Photo 3은 청수와 해수 중에 침수된 초기 노치 4mm의 충격시험편의 파면으로 이 그림에서 시간의 경과 및 수용액의 조건의 차이에서 일어나는 변화를 볼 수 있고 이것 또한 파괴에너지와 충격파괴인성치에 영향을 미친다고 판단된다.

Photo 2는 청수 중에서 시간경과에 따른 것으로 초기 240시간과 480시간 경과 후 어느 매트릭스가 어느 정도 이탈되었음을 알 수 있고 이 후 시간이 경과함에 따라 매트릭스의 균열, 이탈을 등이 초기와 그렇게 변화가 없음을 볼 수 있다. Photo 3은 해수 중에서 시간경과에 따른 것으로 청수와는 달리 480시간 경과 후에는 매트릭스가 어느 정도 잘게 부서지고 720시간 경과한 후에는 매트릭스가 잘게 부서지는 것이 많아지고 1200시간 에서는 이탈된 매트릭스를 볼 수 있다.

6. 결 론

35톤급 FRP선박의 실제 외판자재에 대하여 50℃, 25℃, 0℃, -15℃, -25℃의 온도변화와 수중(해수/청수)에서 240, 480, 720, 960, 1200 시간경과에 따른 충격실험에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) GF/PE 복합재료의 온도 변화에 따른 충격 파괴인성치(임계파괴에너지) GIC는 동일한 스펀길이에서 실온의 경우가 가장 높고, 50℃, 0℃, -15℃, -25℃의 순으로 낮게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 초기 노치길이에 따른 파괴에너지 U는 노치길이가 증가함에 따라 감소하였으나, 임계파괴에너지는 증가하였다.
- 3) SEM 촬영을 통한 파단면을 보면 Glass Fiber와 Matrix 사이의 디본딩, 연성파괴와 취성파괴의 Matrix 변형을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 파괴양상은 온도에 가장 큰 영향을 받는다고 생각된다.
- 4) GE/PE 복합재료의 수중(해수/청수)에서

시간경과에 따른 충격파괴인성치 G_{IC} 는 해수의 경우 침수 후 초기에는 720시간 까지 뚜렷하게 감소하다가 960시간 이후에는 변화가 없었다.

청수의 경우에는 해수에 비해 충격파괴인성치의 감소폭이 크지 않으나 초기에는 다소 감소하다가 해수와 같이 960시간 이후에는 변화가 없었다.

- 5) 파괴에너지 U는 시간의 경과에 따라 청수의 경우 초기에는 어느 정도 감소하다가 480시간 이후에는 변화가 없고 해수의 경우 초기에는 뚜렷하게 감소하다가 720시간 이후에는 변동이 없었다.

초기노치에 따른 파괴에너지U는 청수, 해수 공히 초기에는 감소하였으나 480시간 이후에는 큰 변화가 없었고 다만, 해수의 경우 충격파괴인성치는 뚜렷하게 감소하였다.

- 6) 청수와 해수의 수분흡수율에서 알 수 있듯이 해수는 청수에 비해 초기수분침투가 현저하게 높아 시간이 경과함에 따라 충격파괴인성치의 감소로 재료가 뚜렷하게 취성화 됨을 알 수 있었으나 본 실험에서는 960시간 이후에는 큰 변동이 없어 어느 시점에서 수분흡수가 포화된 상태에서는 재료의 취성화가 느려진다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Yue, C. Y and Cheung, W. I. "Some Observations on the Role of Transcrystalline Interphase on the Interfacial strength of

- Thermoplastic Composites”, J. Mat Sci, Letters, No.12 (1993) :1093 ~1094
- (2) J.R Yeh : Engineering Fracture mechanis, 30 (1988) 827.
- (3) O. Konur and F. L. Matutews : Composite, 29 (1989) 317.
- (4) Tanaka, K., Hojo, M., Gustafson, C. and Hayashi, R., “Propagation of Delamination Fatigue Cracks in CFRP in Water” Trans. JSME(A) 54(499), (1987), : 455~460
- (5) E. Plati, and J. G. Willams, 1975, “The Determination of the Fracture Parameters or Polymer in Impact”, Polym. Eng. Sci. 15, : 470~477
- (6) G. P. Mashall, J. G. Williams and C. E. Tuner, 1973, Fracture Toughness and Absorbed Energy Measurements in Impact Test on Brittle Materials”, J. Mat. Sci. 8: 949~956
- (7) 김형진 “탄소섬유강화 복합재료의 층간파괴인 성치에 관한 연구” 공학박사 학위논문 (1997) : 131~138.
- (8) 선박검사기술협회 “FRP재 선박제조검사 실무 매뉴얼” 최종보고서 (2004.) : 22~26.