한국동력기계공학회지 제13권 제6호 pp.123~128 2009년 12월

FRP선박 외판재의 충격 및 마모 거동
Impact and Wear Behavior of Side Plate of FRP Ship

김형진 · 김재동 · 고성위 · 김영식
H. J. Kim, J. D. Kim, S. W. Koh and Y. S. Kim

(접수일 : 2009년 9월 30일, 수정일 : 2009년 11월 6일, 채택확정 : 2009년 11월 17일)

Key Words : FRP Ship(FRP선박), Impact Fracture Toughness(충격파괴인성치), Abrasive Wear(연삭마모), Counterpart Roughness(상대재 거칠기), Volumetric Wear(체적마모)

Abstract : The effects of temperature and initial crack length on the impact fracture behavior for the side plate material of FRP ship were investigated. And the effects of the counterpart roughness and sliding distance on the volumetric wear of same material were investigated as well. Impact fracture toughness of GF/PE composites displayed maximum value when the temperature of specimen is room temperature and 50℃, and with decreasing the temperature of specimen, impact fracture toughness decreased. Impact fracture energy of GF/EP composites decreased with increasing the 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 decreasing the temperature of specimen. With increasing the sliding distance, the transition sliding distance, which displayed different aspect on the friction coefficient and the volumetric wear loss, were found out. Counterpart roughness had a big influence on the wear rate at running in period, however the effect of counterpart roughness became smaller with sliding speed increase in. Volumetric wear loss were increased with increasing the applied load and the counterpart roughness.

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 충돌 및 마찰에 의해 큰 하중을 받을 수 있는데, 이러한 충격 및 마찰에 대한 복합재료의 응답은 국부적인 손상일 수도 있고 최악의 경우 총체적인 붕괴를 야기할 수도 있다.

FRP의 충격강도에 영향을 미치는 재료인자로는 섬유함유율, 섬유방향, 섬유와 기지의 접착정도 및 섬유와 기지의 특성 등이 있으며, 또한 사용온도 조건에 따라 충격강도는 상이한 양상을 나타낸다. 충격강도에 관한 이전 연구 결과는 다음과 같다. 충격저항[1]과 파괴인성[2]은 섬유의 체적분율이 증가함에 따라 증가하고, 기지와 강화섬유의 계면은 충격강도에 큰 영향을 미친다[3]. 온도에 따른 재료의 충격특성 변화에 있어서, 실리카 입자강화 복합재료의 충격파괴인성치는 실온에서 가장 높은 값을 나타내고 실온보다 높거나 낮은 온도에서는 감소하나[4], 탄산칼슘 입자강화 폴리프로필렌 복합재료에 있어서는 온도가 증가함에 따라 충격파괴인성치가 증가하는 것으로 나타나[5], 재료에 따라 상이한 결과를 나타내고 있다.

일반적으로 금속재료에서는 접촉하중과 마모속도가 증가함에 따라 마모면에서의 온도상승에 의한

김재동(책임저자) : 경상대학교 해양산업연구소
E-mail : jdkim@gsnu.ac.kr, Tel : 055-640-3168
김형진 : 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소
고성위, 김영식 : 부경대학교 기계공학부

급격한 연화현상이 발생하여 마모량이 증가한다[6]. 그러나 섬유강화 복합재료의 경우에는 마모시험 중에 발생하는 생성물간의 상호작용이 불확실한 상태에서 여러 외부조건이 복합적으로 작용하므로 금속재료에서와 같이 마모특성이 일반화되어 있지 않다[7,8]. 연삭마모는 단단한 면의 돌기나 경질입자의 절삭작용에 의해 일어나는 마모로서 미세절단에 의한 변형이 주요 원인이다. 연삭마모에서는 마모부스러기나 상대마모재의 경도가 중요한 역할을 하는데 복합재료에서는 기지 내에 존재하는 강화상의 경도 또한 마모량에 큰 영향을 준다.

복합재료의 마모저항에 영향을 미치는 재료인자로는 강화상의 체적분율, 강화상의 크기, 강화섬유의 방향, 강화상과 기지의 접착강도 등이 있으며, 실험인자로는 접촉하중, 마찰속도, 마찰거리, 상대마찰재의 강도와 거칠기 정도 및 분위기 온도상태 등이 있다. 마모저항에 관한 이전 연구 결과는 다음과 같다. 체적마모 손실은 가해진 하중과 미끄럼 거리에 비례한다[9,10]. 미끄럼속도에 관해서는 상대재료에 따라 마모기구가 다르므로 재료마다 다른 결과를 보이고 있다[11]. 재료인자인 강화상의 체적분율과 크기 또한 강화상의 종류에 따라 마모저항은 다른 결과를 보이고 있다[12].

이상과 같이 FRP의 충격강도와 마모저항에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 있어왔으나, 실제 FRP 선박 재료에 대한 사용온도 조건에 따른 충격강도와 상대재 거칠기에 따른 마모저항에 대한 연구는 그리 많지 않다. 또한 선박의 설계와 검사에 관련 있는 기관(선급협회 또는 선박검사기술협회)에서도 FRP선박의 재료시험 항목에 인장이나 굽힘강도 및 섬유함유율에 대한 규정은 있으나 충격강도와 마모저항에 대해서는 별도의 규정이 없다.

그러므로 본 연구에서는 전장이 약 25 m 되는 FRP 선박의 선측 및 선저외판에 사용되는 GFRP 적층판에 대하여, 초기노치 및 사용온도의 변화가 충격파괴인성치에 미치는 영향과, 상대마찰재의 거칠기와 미끄럼 거리의 변화에 따른 외판재의 마찰계수 및 체적마모손실을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료

실험에 사용된 재료는 35톤급 해양조사선의 외판재로 사용된 GFRP로, 유리섬유로는 잘려진 섬유매트(chopped strand mat: 450 g/m^2)와 직조 섬유(woven roving: 860 g/m^2)를, 수지는 불포화 폴리에스테르를 사용하였으며, 잘려진 섬유 매트와 직조섬유를 각 각 한 층씩 교호로 수지에 함침시켜 12 플라이를 적층하였다. 적층작업시 기포, 부풀음, 수지부족 또는 과다현상이 발생되지 않도록 주의하여 작업하였으며, 최하부층과 최상부층은 잘려진 섬유매트가 위치하도록 적층하였다. Table 1은 이 재료를 온도 20℃, 상대습도 52% 조건에서 시험한 기계적 성질을 나타내고 있다.

2.2 충격실험

Fig. 1은 본 실험에 사용된 충격시험편의 형상으로, 원재료에서 다이아몬드 카터를 이용하여 절단하여 가공하였다. 노치는 시험편의 중심에 두께 1 mm의 카터로 1차 가공을 한 후, 노치선단을 더욱 날카롭게 하기 위하여 신품의 면도날을 이용하여 총 크랙길이가 1~3 mm의 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 각 각의 시험편에 대하여 충격시험을 실시하였다. 충격실험 후 파단면을 주사현미경(scanning electron microscope : SEM)으로 관찰하였다.

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	

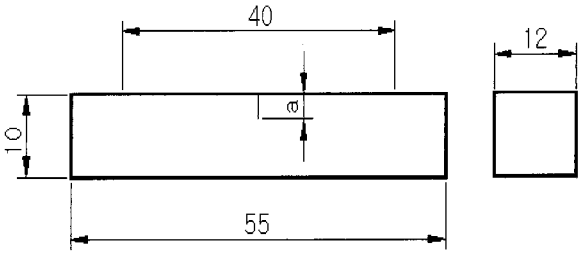

Fig. 1 Specimen geometries for Charpy impact test (unit : mm)

충격파괴인성치 GIC의 계산에는 다음의 (1) 식을 사용하였다13).

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

여기서 U는 총 충격파괴에너지이고, B는 시험편의 두께, W는 사험편의 폭, a는 크랙길이 이다.

2.3 마모실험

마모시험은 핀온디스크(Pin-on-disc)형 마모시험기를 사용하였으며, Fig. 2는 핀온디스크형 마모시험기의 개략도를 나타낸다. 이 시험기에서 미끄럼 속도는 상대재의 회전속도에 의해 결정되고 미끄럼 거리는 상대재가 회전한 거리를 나타낸다.

마모시험편의 크기는 15 x 4.5 x5.5 (㎜³)이고 상대재는 지름 80 mm × 두께 1.5 mm인 SiC 연마지(3M)를 디스크의 표면에 접착하여 사용하였다. 시험 전 마모시험편의 표면은 #800 사포로 연마하여 표면조도를 일정하게 하였으며 표면의 불순물과 습기를 제거하기 위하여 알코올로 세척하고 건조로 속에서 24시간 이상 유지시킨 후 사용하였다. 상대재 또한 디스크에 접착 후 건조로에서 7일간 유지하여 완전히 경화시킨 후 마모시험을 하였다.

마모시험에 영향을 주는 변수로는 적용하중, 마모속도, 마모거리, 상대마모재의 강도와 거칠기 정도 및 분위기 온도상태 등이 있다. 본 연구는 온도와 습도가 일정하게 유지되는 환경 챔버 안에서 상온 건식 마모시험을 하였으며, 실험조건은 미끄럼 속도와 거리를 0.1 m/s와 1,000 m로 고정시킨 상태에서, 적용하중을 10, 20, 30 N로, 상대재의 거칠기(SiC 연마지의 평균입자 지름)를 9, 15, 30 μm로 변화시켜 가면서 마찰계수와 마모량의 변화를 계측하였다. 마찰계수와 체적마모손실은 초기 미끄럼 거리 200 m까지는 50 m 간격으로 관찰했으며 그 이후는 200 m 간격으로 관찰하였다. 동일한 시험조건에서 3개의 시험편에 대하여 마모시험을 하였으며, 시험편의 질량손실은 분석천칭(Mettler toledo, 0 mg~200 g, 감도 0.01 mg)으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시험편의 노치 및 온도 변화에 따른 충격파괴인성치의 거동

Fig. 3은 시험편의 크랙을 제외한 리가먼트(ligament: W-a)에 대한 충격파괴에너지(U)를 여러 가지 시험편 온도조건에 대하여 나타낸 것이다. 모든 온도조건에서 리가먼트의 길이가 증가함에 따라 충격파괴에너지는 높아지고 있으며, 실온과 50℃에서 가장 높고 0℃, -15℃, -25℃로 온도가 낮아짐에 따라 충격파괴에너지는 낮아지고 있다. 특히 가장 저온인 -25℃에서는 초기크랙의 길이(a)가 커짐에 따라 파괴에너지는 급격히 낮아지고 있어 노치에 대한 충격파괴에너지의 민감도가 큰 것을 알 수 있다.

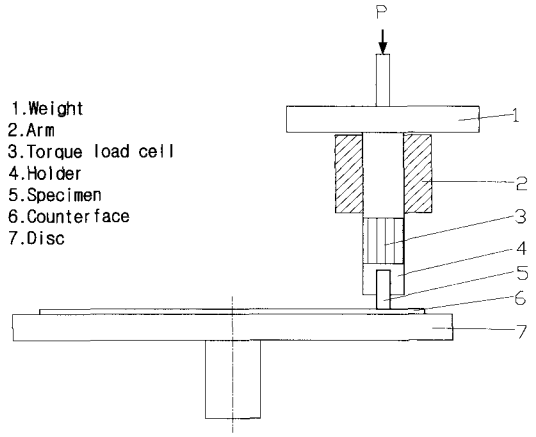

Fig. 2 Schematic diagram of pin-on-disc type wear tester

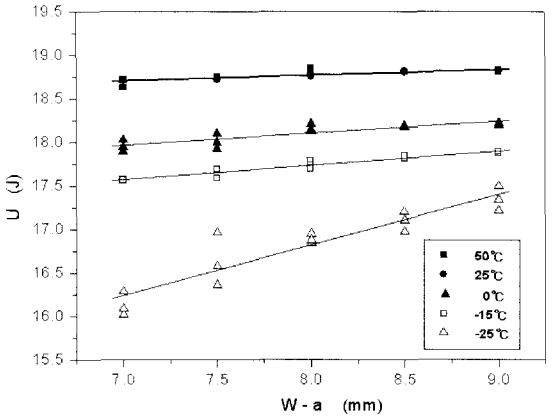

Fig. 3 Variation of impact fracture energy with ligament at various temperature

Fig. 4는 시험편 온도의 변화에 따른 충격파괴인성치(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℃에서 가장 높은 값을 나타내었고, 0℃,

-15℃, -25℃로 온도가 낮아짐에 따라 충격파괴인성치는 낮아짐을 알 수 있다.

일반적으로 불포화 폴리에스터와 같은 열경화수지는 유리나 탄소섬유에 비하여 약 10배 이상의 열팽창계수(50~80 x 10^{-6}/℃)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 (2)와 같이 나타낼 수 있다[14].

$$\sigma_r \propto \Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_m \qquad (2)$$

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

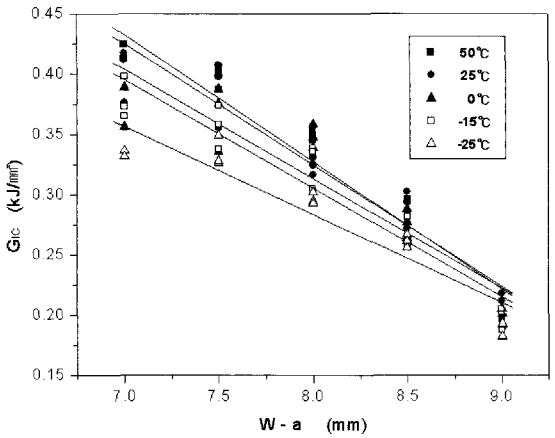

Fig. 4 Variation of impact fracture toughness with ligament at various temperature

3.2 미끄럼 거리 및 상대재의 거칠기에 따른 체적 마모의 거동

Fig. 5는 적용하중이 10N일 때 미끄럼 거리에 따른 마찰계수와 체적마모의 변화를 상대재 거칠기에 따라 비교한 것이다. 미끄럼 거리에 따라 마찰계수와 마모체적은 완연히 다른 변화를 보이고 있다. 즉 마찰계수의 경우 최초 마찰시 최대치까지 증가했다가 빠른 속도로 감소해 안정된 레벨로 떨어진 후로는 크게 변화가 없음을 보이고 있다. 한편 체적마모는 초기에는 가파르게 증가하다가 어느 미끄럼 거리 이후부터는 안정된 증가율을 나타낸다. 이러한 마찰계수와 체적마모가 천이하는 미끄럼 거리는 작용하중이 10 N일 경우 약 200 m에서 나타나고 있다. 그림에서 A구간 즉, 미끄럼 거리 200 m 이전은 길들이기 기간으로 급속한 연삭마모를 일으키는 구간임을 알 수 있다.

한편 Zhang 등은[11] 입자강화 복합재료의 마모시험에서 작용하중을 변화시킴에 따라 마모율이 급속히 변화하는 천이하중이 어떻게 변화하는가를 실험하여, 강화상의 부피분율이 증가함에 따라 천이하중이 증가함을 밝혀냈다. 본 실험에서는 작용하중이 증가함에 따라 천이 미끄럼 거리가 증가하는 경향을 나타냈다.

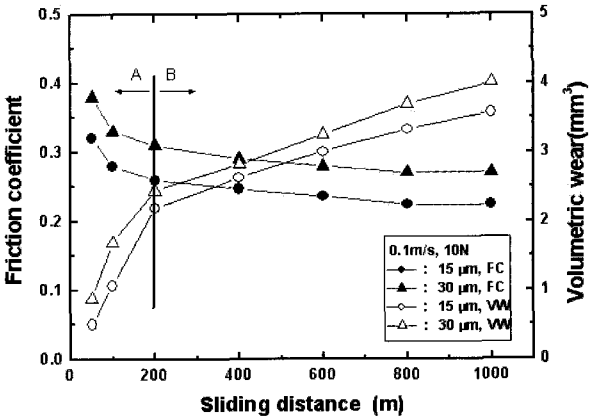

Fig. 5 Variation of friction coefficient and volumetric wear with sliding distance at applied load of 10N

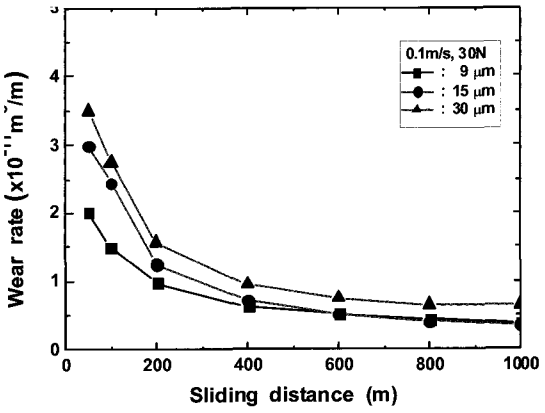

Fig. 6 Variation of wear rate with sliding distance at applied load of 30N

Fig. 6은 작용하중 30 N 일 때 미끄럼 거리에 따른 마모율의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 초기 길들이기 기간(미끄럼 거리 약 400 m 이전)에는

큰 마모율을 나타내다가 이후 안정구간으로 들어서며 마모율은 감소하여 거의 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 상대재 거칠기의 정도에 따른 마모율의 변화에 있어서는 상대재의 거칠기가 증가함에 따라 마모율은 증가하나, 초기 길들이기 기간에는 상대재의 영향이 크나 이후 안정화 구간으로 가면서 상대재 거칠기에 따른 마모율의 변화는 차이가 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 상대재 거칠기에 따른 체적마모의 변화를 여러 작용하중에 대하여 나타낸 것이다. 대체적으로 상대재의 거칠기가 증가함에 따라 체적마모손실은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 체적마모손실은 상대재의 거칠기의 증가에 따라 선형적으로 증가하지는 않았다. 한편 상대재의 거칠기가 동일한 경우에 적용하중이 증가함에 따라 체적마모손실은 증가함을 알 수 있다.

3.3 충격실험 파면해석

Photo 1은 충격실험 후 시험편의 파단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 시험편의 온도에 따라 파단 후 유리섬유 강화상에 부착된 수지의 양과 형상이 달라진 것을 사진에서 볼 수 있다. 50℃ 시험편은 유리섬유가 수지와 함께 떨어져 나가거나 유리섬유에 수지가 상당량 붙어있는 것으로 보아 섬유/수지간의 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.

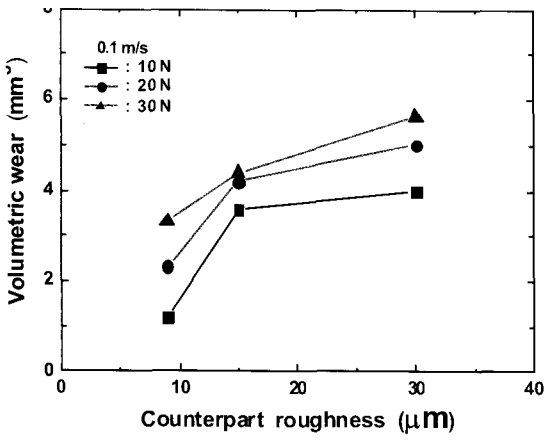

Fig. 7 Variation of wear volume with roughness of counterpart at various applied load

충격시험에 의해 계측된 총 충격파괴에너지는 적절한 설비에 의해 시간의 함수로서의 하중 및 누적에너지를 계측하면 파괴개시에너지와 파괴전파에너지로 나누어 생각할 수가 있다[15]. 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℃의 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 수지 부착상태로 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.

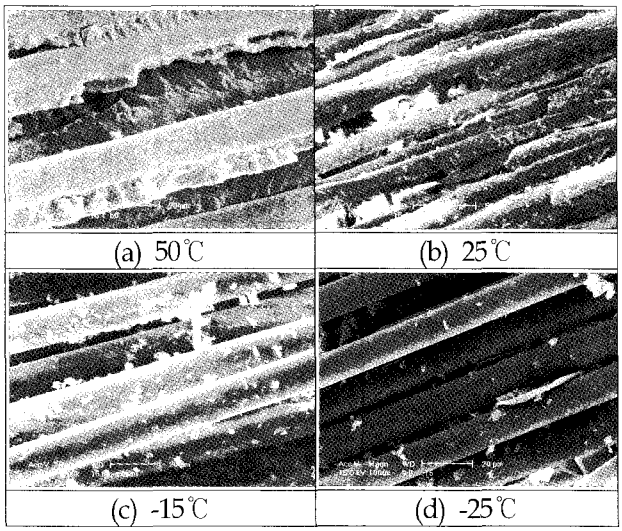

Photo. 1 SEM photograph of impact fracture surface with specimen temperature.

4. 결 론

35톤급(전장 25 m) FRP 선박의 선측 및 선저외판에 사용되는 GFRP 적층판에 대하여, 초기노치

및 사용온도 조건의 변화가 충격파괴강도에 미치는 영향과 상대마찰재의 거칠기와 미끄럼 거리의 변화에 따른 외판재의 마찰계수 및 마모체적에 대하여 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) GF/PE 복합재료의 사용온도 조건에 따른 충격파괴인성치는 실온(25℃)과 50℃의 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.

4) 마찰계수와 체적마모손실이 천이하는 미끄럼 거리가 작용하중 10N 일 때 200 m에서 나타났으며, 이 천이 미끄럼 거리 이전의 구간은 길들이기 기간으로 급속한 연삭마모를 일으켰다.

5) 초기 길들이기 기간에는 상대재 거칠기가 마모율에 큰 영향이 주었으나, 이후 안정화 구간으로 가면서 상대재 거칠기에 따른 마모율의 변화는 작아졌다.

본 연구의 결과는 FRP 선체 재료의 온도에 따른 파괴 및 손상의 원인 규명과 두께 결정의 기초적인 자료로 이용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. A. Q. Mateen and S. A. Siddiqi, 1989, "Impact Properties of Polyuretane 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. 고성위, 1993, "온도변화에 따른 실리카 입자강화 복합재료의 기계적 성질 및 파괴거동", 한국복합재료학회지, 6(2), pp. 52~60.
6. M. B. Perterson, 1980, "Design Consideration for Effective Wear Control", Wear Control Handbook ASME Centennial Research Project, pp. 413~434.
7. 문한규, 이해수, 김종집, 한준희, 1987, "마모시험", 재료시험법, 한국표준연구소, pp. 228~314.
8. 고성위, 양병춘, 김형진, 김재동, 2006, "탄소 섬유 강화 고분자 복합재의 연삭마모 특성에 관한 연구", 한국동력기계공학회지, 제10권 제1호, pp. 46~51.
9. Z. F Zhang, L. C. Zhang and Y. W. Mai, 1995, "Wear of ceramic partocle-reinforced metal-matrix composites Part II A model of adhesive wear", J. of materials Science, Vol. 30, pp. 1967~1971.
10. S. W. K, et al., 2007, "Effect of Load upon the Abrasive Wear Sillica-Epoxy Resin Composite", Materials Science Forum, Vol. 544-545, pp. 255~258.
11. Z. F Zhang, L. C. Zhang and Y. W. Mai, 1995, "Wear of ceramic partocle-reinforced metal-matrix composites Part I Wear mechanisms", J. Mat. Sci., Vol. 30, pp. 1961~1966.
12. J. D. Kim, H. J. Kim and S. W. Koh, 2006, "Wear Characteristics of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites by a Pressureless Metal Infiltration Process", Materials Science Forum, Vol 510~511, pp. 234~237.
13. 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., Vol 8, pp. 949~956.
14. J. J. Selsing, 1961, Am. Ceram. Soc. 44, pp. 419.
15. R. H. Toland, 1972, "Failure Mode in Impact-Loaded Composite Materials", Symposium on Failure Modes in Composites, AIME Spring Meeting, Ma., pp. 150~158.