

FRP 선박 외판재의 연삭마모 특성에 관한 상대재 거칠기의 영향

김형진* · 고성위** · 김재동***

*경상대학교 기계항공공학부/해양산업연구소

**부경대학교 기계공학부

***경상대학교 해양산업연구소

Effect of Counterpart Roughness on Abrasive Wear Characteristics of Side Plate of FRP Ship

HYUNG JIN KIM*, SUNG WI KOH*** AND JAE DONG KIM***

*School of Mechanical and Aerospace Engineering/Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Abrasive wear 연삭마모, Wear characteristics 마모특성, SiC paper SiC 연마지, Cumulative wear volume 누적 마모체적, Friction coefficient 마찰계수, Counterpart roughness 상대재 거칠기

ABSTRACT: The effect of counterpart roughness on abrasive wear characteristics of side plate materials of FRP ship, which were composed of glass fiber and unsaturated polyester resin composites, were investigated at ambient temperature by pin-on-disc friction test. The friction coefficient, wear rate and cumulative wear volume of these materials against SiC abrasive paper were determined experimentally. The wear rate of these materials decreased rapidly with sliding distance and then maintained a constant value. It was increased as counterpart roughness was rougher in a wear test. The cumulative wear volume tended to increase nonlinearly with sliding distance and depended on applied load and sliding speed for these composites. It could be verified by SEM photograph of fracture surface that major failure mechanisms were overlapping layers, microcutting, deformation of resin, delamination, and cracking.

1. 서 론

산업재료로서 사용이 증가되고 있는 복합재료의 특징은 높은 비강도, 높은 비강성과 섬유와 기지의 조성 및 섬유방향을 제어하는 공정기술들을 통한 재료특성을 조절할 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 이들 재료로 부품을 만들면 충격과 진동을 흡수할 수 있고, 내마모성과 내부식성이 우수하며, 사용 시 유지 보수가 필요 없거나 작기 때문에 항공우주산업, 화학산업, 자동차산업, 조선산업 등에서 매우 우수한 재료이다. 또한 고분자 복합재의 응용은 기계부품 즉 기어, 캠, 휠(Wheel), 임펠러(Impeller), 브레이크와 베어링 등에서 찾을 수 있다. 화학 플랜트 및 조선산업에서 강화플라스틱은 배관, 덕트(Duct) 작업, 펌프, 혼합용기, 분리기(Separator) 및 열압축기 등의 여러 분야에 사용된다. 다른 주요 응용분야는 농업, 광업, 건설기계와 석탄, 코크스, 광석과 유리 제조 산업의 컨베이어 부품 및 운송장치의 라이너(Liner)로 사용된다.

이러한 복합재료에 대한 연구는 대부분 기계적 거동에 집중되어 있으나 일부는 마모거동에 대하여 연구결과들이 발표되었으며 다음과 같다. 7가지 고분자들을 4가지 마모조건 즉 응축, 연삭, 부식 및 왕복과 고분자들의 여러 가지 특성에 대한 성능 순위를 관찰하여 평가하였다(Anderson and Williamson, 1985). 미끄럼 마모 시 섬유 방향의 영향과 섬유방향에 대한 마찰계수의 변화(Sung and Suh, 1979), 마찰 및 마모거동은 섬유방향, 하중 그리고 마찰 속도에 영향을 받는다는 결과(고성위 등, 2006)가 있으며, 다양한 폴리머 복합재료의 연삭마모가 일어나는 동안 지배적인 미소마모 메커니즘을 분류하였고(Friedrich, 1986), 마찰 및 마모 거동은 마찰조건과 섬유방향에 따라 변한다(Shim et al., 1991)는 결과 등이 있다. 상용 치과 재료 4가지 재료에 대하여 마찰계수를 구하였고, 이들 주 마찰 기구는 응착마모라는 연구결과(Ren et al., 2001)가 있다.

또한 선박이중판에 대한 강도를 서로 비교하고 강도분석을 통한 설계 및 평가지침을 제시한 결과(함주혁, 2001)와 복합재료의 주 파괴특성을 해석하는 도구로서 음향방출법을 이용하여 파괴양상을 규명한 결과(남기우와 문창권, 2002)가 있다. 하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴인성치에 영향을 주는

교신저자 고성위: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-629-6192 swkoh@pknu.ac.kr

인자들인 시험편형상이나 하중점 변위율, 성형압력 등에 대하여 결과(김형진 등, 2002), 스트란드 형의 시험편을 이용한 내구성 시험이 기존 시험법에 비하여 간편하고 신뢰성이 확보된다는 결과(이승렬 등, 2006), 온도변화에 따른 FRP 선박 외판재의 충격파괴거동에 관한 연구결과(김형진 등, 2005)가 있다. 무가압침투법에 의한 입자강화 금속복합재료의 마찰거동(Kim et al. 2006)과 입자강화 에폭시 복합재료의 마찰거동(Koh et al., 2007) 등의 연구가 있다.

이상과 같이 복합재료의 기계적 성질, 마찰 및 마모에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으나 실제 선박에 사용된 부재인 FRP에 대한 연구는 비교적 많지 않으며, 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 이 논문에서는 복합재료의 건식 미끄럼 마모거동에 대한 종합적인 연구의 일환으로 FRP 선박의 외판에 사용되는 유리섬유/폴리에스테르 복합재료를 사용하여 SiC 연마지의 평균입자지름의 변화에 대한 마찰계수, 비마모율 그리고 누적 마모체적을 대하여 실험적으로 고찰하였다. 이때 적용하중도 변화시켜 이들의 변화를 함께 고찰하였다. 또한 이 재료의 마모메커니즘을 주사현미경(SEM)의 관찰을 통하여 연삭마모특성을 비교하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

실험에 사용된 재료는 35톤급 해양조사선(경상대학교 참바다호)의 선박 외판재로 사용되는 유리섬유/폴리에스테르 복합재료이며, 복합재료의 유리섬유는 잘려진 섬유매트(Chopped strand mat : 450g/m²)와 직조섬유(Woven roving : 860g/m²)를, 수지는 불포화 폴리에스테르를 사용하였으며, 잘려진 섬유매트와 직조섬유를 각각 한 층씩 교대로 수지에 함침시켜 12플라이(Fly)를 핸드레이업(Hand lay-up)법으로 적층하였으며, 최상부층과 최상부층은 잘려진 섬유매트가 위치하도록 적층하였다. 적층작업시 기포, 부풀음, 수지 부족 또는 과다현상이 발생하지 않도록 주의하여 작업하였으며, 이 재료의 다른 기계적 성질은 Table 1(김형진 등, 2005)과 같다.

2.2 실험방법

연삭마모시험은 핀온디스크(Pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였으며, Fig.1은 핀온디스크형 시험기의 개략적인 것을 나타낸 것이다.

준비된 시험편의 시험 시 환경조건은 온도와 습도의 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하여 온도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 마찰 및 마모시험편은 15mmx4.5mmx5.5mm의 크기로 절단하여 표면을 사포로 연마하여 사용하였다. 마찰 및 마모시험 전의 복합재료는 표면의 불순물과 습기를 제거하기 위하여 알콜로 깨끗이 세척하고 건조로 속에서 24시간 이상 유지시킨 후 실험을 실시하였다.

상대재인 SiC 연마지(3M)는 지름 80mm×두께 1.5mm인 디스크의 표면에 접착제를 사용하여 부착하고 건조로에서 7일간

Table 1 Mechanical properties of CFRP(김형진 등, 2005)

Item(unit)	Unit	Results
Tensile strength	MPa	151.0
Tensile modulus	GPa	24.5
Bending strength	MPa	238.0
Bending modulus	GPa	10.4
Glass fiber volume fraction	%	39.8

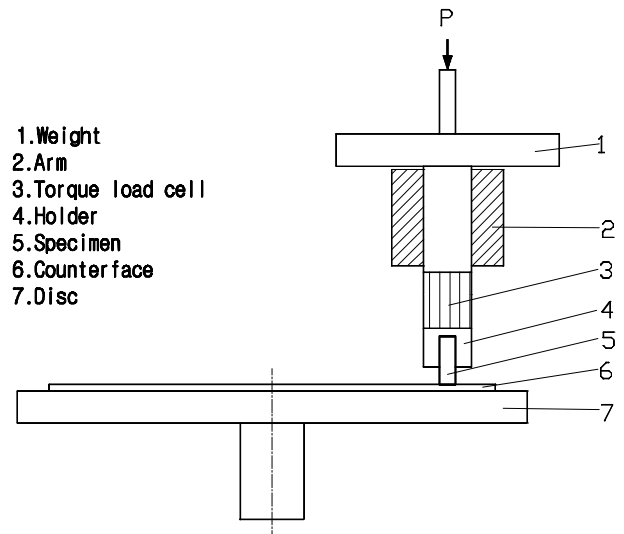


Fig. 1 Schematic diagram of pin-on-disc test apparatus

완전히 경화 시킨 후 연삭마모시험을 실시하였다.

본 실험에 이용한 실험 조건은 미끄럼 속도 0.1m/s, 사용한 SiC 연마지의 평균입자지름은 9, 15, 30 μ m, 적용하중은 10, 20, 30N이다. 각각의 경우에 대하여 미끄럼거리 1000m까지 마모 시험을 실시하였으며, 마모손실은 실험 전 및 실험도중 50m와 100m의 미끄럼 거리를 포함해서 200m마다 1000m까지 무게손실을 구하여 누적마모체적을 계산하였고, 또한 실험기간 중의 마찰계수 및 마모율을 구하였다.

동일한 시험조건에서 3개의 시험편을 각각의 시험거리에 대하여 연삭마모시험을 실시하였으며, 시험 전후의 시험편의 질량손실은 분석천칭(Mettler toledo, 0mg~200g, 감도 0.01mg)으로 측정하여 같은 환경조건에서 3번 이상 측정하였다.

마모량은 무게로 계산하였으며, 각각의 경우 실험 전과 실험 후(진행과정 포함)의 무게의 차를 측정하여 구하였다. 구한 마모량을 비중량(1.569g/cm³)으로 나누어 계산하여 누적 마모체적을 구하였다.

마찰계수는 실험도중 매초단위로 측정된 마찰력을 적용수직 하중으로 나누어서 계산하였다.

마모된 시험편의 마찰 특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면관찰은 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 FRP 선박외판재에서 미끄럼 속도 0.1m/s, 적용하중 10N일 때 각각의 SiC 연마지의 평균입자지름이 9, 15, 30 μ m에 대하여 미끄럼 거리의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 미끄럼 거리가 짧은 200m 미만에서는 마찰계수는 점차 감소하는 것을 알 수 있으나 미끄럼 거리가 400m 이상에서는 거의 일정한 값이 되어 안정상태가 됨을 알 수 있다. 또한 동일 미끄럼 속도에서 SiC 연마지의 평균입자지름이 큰 경우가 작은 경우보다 마찰계수는 크게 됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 FRP 선박외판재에서 미끄럼 속도 0.1m/s, 적용하중 20N일 때 각각의 SiC 연마지의 평균입자지름이 9, 15, 30 μ m에 대하여 미끄럼 거리의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로서, 미끄럼 거리가 400m 이상에서는 마찰계수는 거의 일정한 값을 나타내는 경향은 Fig. 2와 유사하다. 그러나 미끄럼 거리가 200m 부근에서도 마찰계수가 거의 일정한 값을 나타내어 안정된 값을 나타내고 있다.

Fig. 4는 FRP 선박 외판 복합재료의 마찰계수를 나타낸 것이다. 이때 조건은 미끄럼 속도 0.1m/s, 적용하중이 10, 20, 30N인 각각의 하중에서 SiC 연마지의 평균입자지름이 9, 15, 30 μ m으로 변화할 때 미끄럼 거리가 400m 이상이 되는 안정적인 경우의 마찰계수를 나타낸 것이다. 동일 상대재의 거칠기에서 하중의 증가에 따라 마찰계수는 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 있다. 즉 상대재의 거칠기가 9 μ m에서는 하중이 10N, 20N, 30N으로 증가함에 따라 마찰계수가 증가하지만 상대재의 거칠기가 30 μ m로 거친 경우에는 반대로 적용하중의 증가에 따라 마찰계수는 오히려 감소하는 경향을 보인다. 적용하중이 클 경우에는 마찰의 결과로 생긴 마모입자가 잘 섞여 윤활

재의 역할을 하여 마찰계수가 감소한다고 생각할 수 있지만 이에 대한 상세한 연구가 필요하다.

Fig. 5는 미끄럼 속도 0.1m/s, 적용하중 10N에서 SiC 연마지의 평균입자지름이 9, 15, 30 μ m로 비췌에 따라 미끄럼 거리의 변화에 따른 마모율의 변화를 나타낸 것이다. 적용하중과 미끄럼 속도가 같은 경우 동일 SiC 연마지의 평균입자지름에서 미끄럼 거리가 증가할수록 마모율은 초반에는 급격히 감소하다가 그 감소폭이 작아지다가 거의 일정한 값이 됨을 알 수 있다. 또한 동일 미끄럼 거리에서 각각의 SiC 연마지의 평균입자지름에 대한 마모율을 살펴보면 평균입자지름이 클수록 마모율도 크게 됨을 알 수 있다. Fig. 6은 미끄럼 속도 0.1m/s,

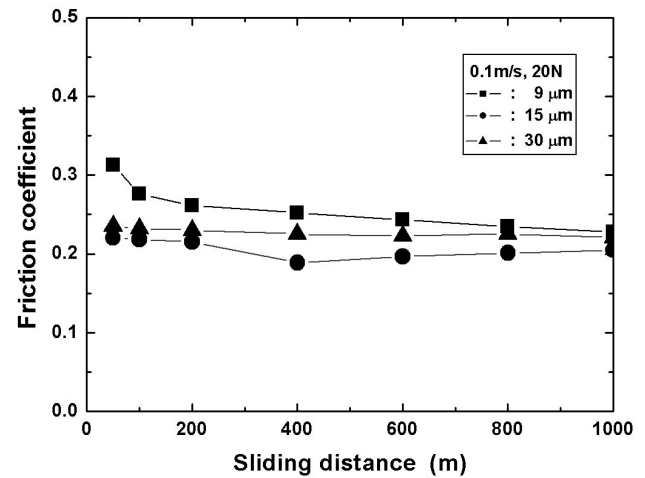


Fig. 3 Variation of friction coefficient as a function of sliding distance for composites tested on 9, 15, 30 μ m SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 20N

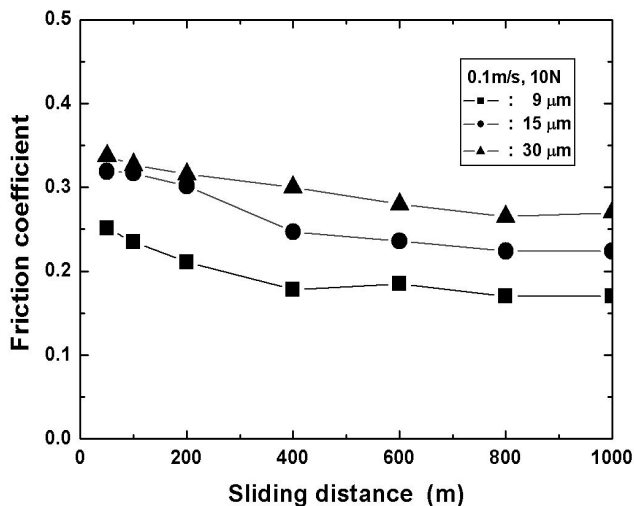


Fig. 2 Variation of friction coefficient as a function of sliding distance for composites tested on 9, 15, 30 μ m SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 10N

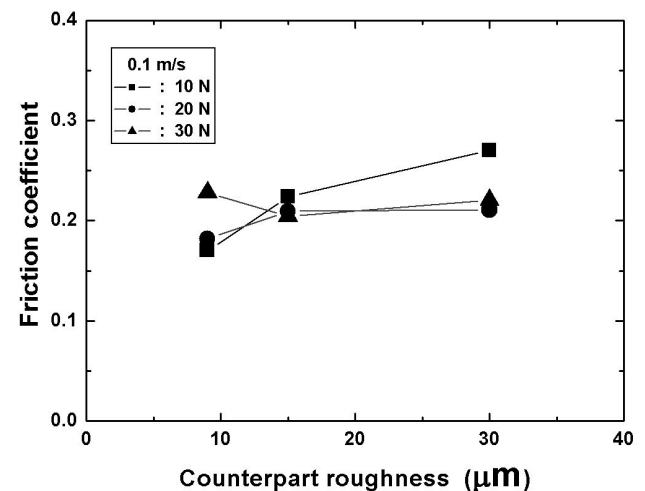


Fig. 4 Variation of friction coefficient as a function of counterpart roughness for composites tested on sliding speed of 0.1m/s at applied load of 10, 20, 30N

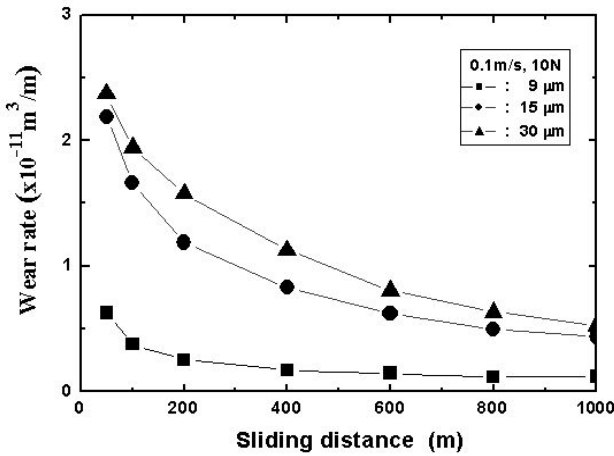


Fig. 5 Variation of wear rate as a function of sliding distance for composites tested on 9, 15, 30µm SiC paper at sliding speed of 0.1m/s and applied load of 10N

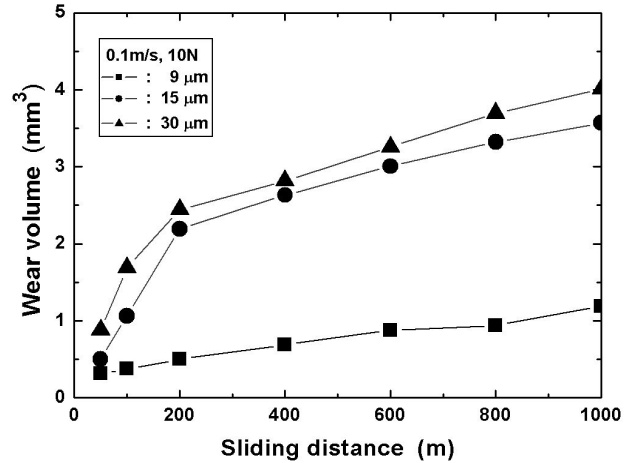


Fig. 7 Variation of wear volume as a function of sliding distance for composites tested on 9, 15, 30µm SiC paper at applied load 10N and sliding speed of 0.1m/s

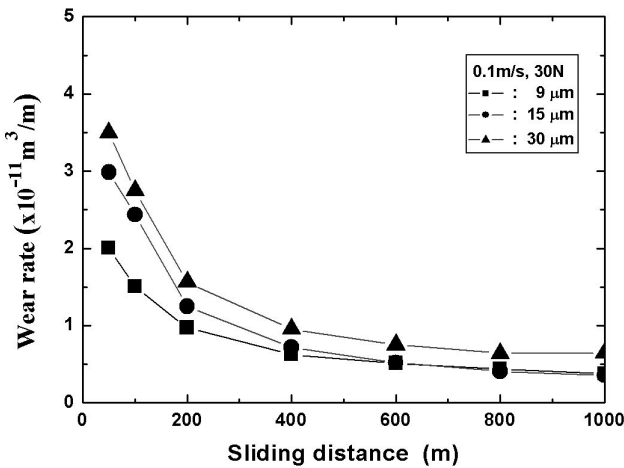


Fig. 6 Variation of wear rate as a function of sliding distance for composites tested on 9, 15, 30µm SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 30N

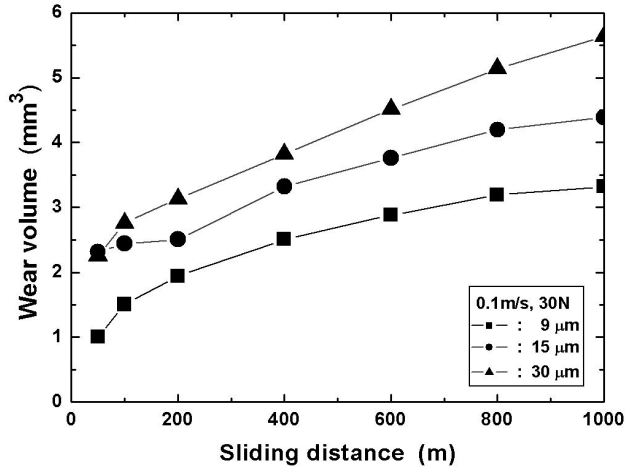


Fig. 8 Variation of wear volume as a function of sliding distance for composites tested on 9, 15, 30µm SiC paper at applied load 30N and sliding speed of 0.1m/s

적용하중이 30N에서 각각의 SiC 연마지의 평균입자지름에 대하여 미끄럼 거리의 변화에 따른 마모율을 나타낸 것으로서 SiC 연마지의 평균입자지름이 큰 경우가 마모율의 크다는 것을 알 수 있다.

한편 시험된 적용하중과 미끄럼 속도에서 선박외판재의 마모율은 매우 낮음을 알 수 있으며, 그 값은 CFRP 복합재료의 값보다 50% 이상 낮은 값으로서 내마모성이 우수하다는 것을 알 수 있다(고성위 등, 2006).

Fig. 7은 FRP 선박 외판 복합재료에서 미끄럼 속도 0.1m/s, 적용하중 10N일 경우에 SiC 연마지의 평균입자지름이 9µm, 15µm, 30µm로 다를 때 미끄럼 거리에 따른 누적 마모체적의

변화를 나타낸 것이다. SiC 연마지의 평균입자지름이 9µm일 경우에 미끄럼 거리가 증가함에 따라 누적 마모체적은 비교적 완만하게 증가하여 그 차이가 적게 되는 것을 알 수 있으나 SiC 연마지의 평균입자지름이 15µm와 30µm일 경우에는 미끄럼 거리가 짧은 200m까지는 경사가 급격해지다가 점차적으로 완만해지고 있으며, 그 후에는 점차 마모가 적게 일어남을 알 수 있으며, 이것은 미끄럼 거리가 짧은 때에는 마모가 많이 일어난다는 것을 의미한다. 또한 미끄럼 속도와 적용하중 그리고 SiC 연마지의 평균입자지름이 같은 경우에 미끄럼 거리가 증가함에 따라 누적마모체적은 선형적으로 증가하지 않고 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 비선형적으로 증가하는 것은 Ravikiran and Jahannir(2001)의 결과와 유사한

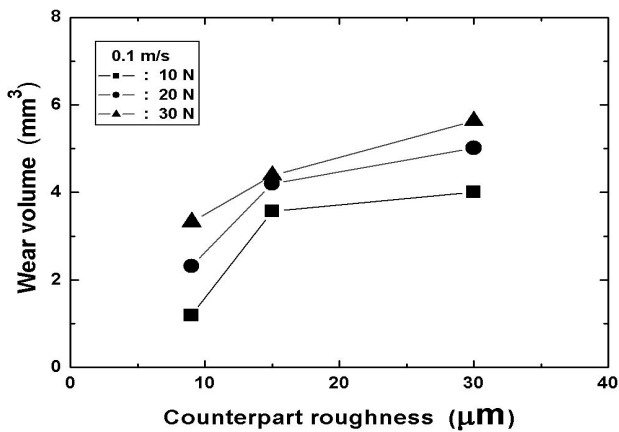


Fig. 9 Variation of wear volume as a function of counterpart roughness for the composites tested on sliding speed of 0.1m/s and applied load of 10, 20, 30N

경향을 나타내고 있으나 Chand et al.(2000)의 결과와는 상반됨을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 미끄럼 속도가 0.1m/s로 동일하고 적용하중이 30N인 경우에 SiC 연마지의 평균입자지름의 변화에 대한 실험을 한 결과, 동일 적용하중에서 미끄럼 거리의 변화에 따라 누적마모체적은 비선형적으로 증가한다는 비슷한 결과가 됨을 확인할 수 있다(Fig. 8 참조).

Fig. 9는 미끄럼 속도가 0.1m/s이고 적용하중이 10, 20, 30N에서 SiC 연마지의 평균입자지름이 9, 15, 30µm으로 변화할 때 미끄럼 거리가 1000m 되는 경우인 FRP 선박 외판 복합재료의 최종 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 동일 적용하중에서 SiC 연마지의 평균입자지름이 증가함에 따라 누적마모체적은 점차 증가함을 알 수 있다. 적용하중이 큰 20N과 30N의 경우에도 상대재의 거칠기가 커짐에 따라 누적마모체적은 증가함을 알 수 있다. 그러나 상대재의 거칠기의 증가에 따라 직선적으로 증가하지는 않았다. 또한 상대재의 거칠기가 동일한 경우에 적용하중의 증가에 따라 누적마모체적은 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10은 FRP 선박 외판재에서 핀온디스크 마모시험기를 사용하여 미끄럼 속도 0.1m/s로서 동일하지만 SiC 연마지의 평균입자와 적용하중을 다르게 하였을 때 시험한 마모면을 나타내고 있다. 이때 마모면은 각각의 경우에 미끄럼 거리가 50m까지 마모시험을 행한 상태를 SEM 사진촬영한 것을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 적용하중 10N, SiC 연마지의 평균입자지름이 9µm인 경우에 대한 마모면을 나타낸 것으로서 전체적으로 마모막이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 수지인 폴리에스테르가 변형되어 미시균열이 발생되기 시작했으며, 유리섬유의 일부 단면에 미시균열(Micro-crack)이 발생한 후 미시절단(Micro-cutting)과 파단이 발생하여 부스러기가 주변에 떨어져 있음을 알 수 있다. 동일한 적용하중 10N에서 SiC 평균입자지름이 15µm인 경우에는 마모막이 형성된 것이 일부 파손되고 매끈하였던 마모막이 다소 거친 곳이 있으며, 수지인

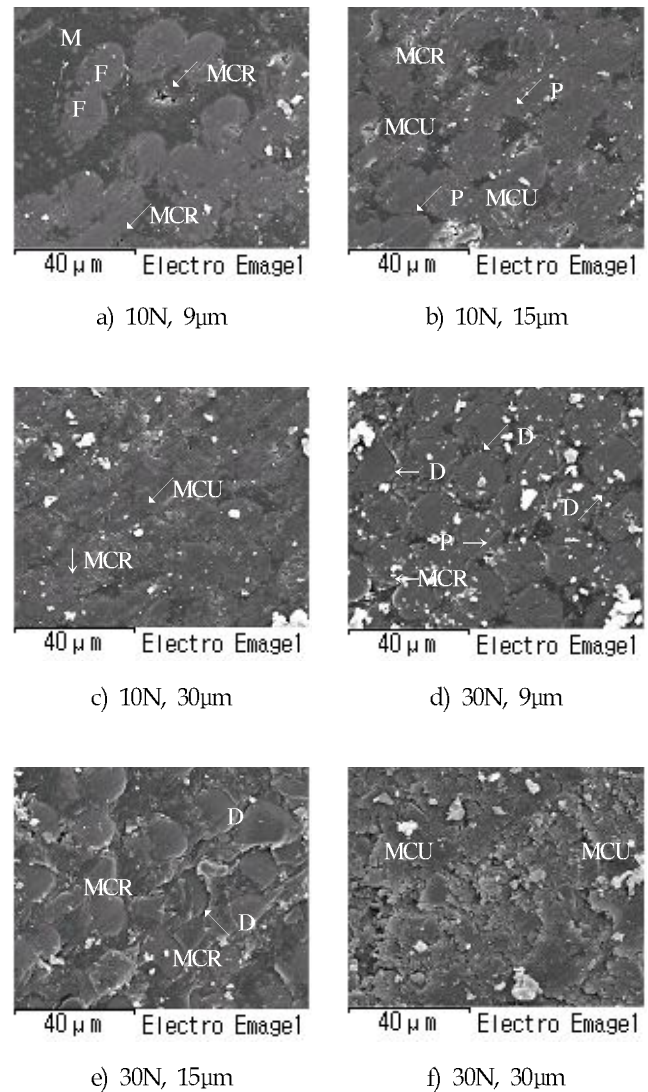


Fig. 10 SEM photographs of worn surface for composites tested on each test condition at applied load of 0.1m/s and sliding distance 50m(D: delamination, F: fiber, M: matrix, MCU: microcutting, MCR: microcracking, P: ploughing)

폴리에스테르의 변형이 점차 많아지고, 수지의 파괴가 상대적으로 많이 발생됨을 알 수 있다. 이와 더불어 상대재의 거칠기가 더 크게 됨에 따라 섬유와 수지 사이의 접착력이 약화되어 섬유와 수지 사이의 박리현상(Delamination)이 생기기 시작하였다. Fig. 10(d, e, f)는 미끄럼 속도가 0.1m/s로서 동일하지만 적용하중이 30N

인 경우에 SiC 평균입자지름의 변화에 대하여 나타난 것으로서 마모막이 형성되었지만 파손된 형태가 더욱 증가하고 또한 전체적으로 SiC 연마지의 평균입자지름이 증가함에 따라 섬유와 수지 사이에 박리현상이 발생하면서 증가하고, 손상되는 형태가 더욱 증가한다는 것은 알 수 있다. 하지만 적용하중이 30N, SiC 연마지의 평균입자지름이 30 μ m인 Fig. 10(f)를 보면 마모막의 형성이 깨어지고 용착마모가 많이 이루어지고, 또한 수지와 섬유의 변형이 매우 많이 되고 이와 더불어 균열과 파단이 상당히 많이 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결 론

FRP 선박 외관재의 마찰 및 마모 거동에 대한 상대제인 SiC 평균입자지름의 영향에 대하여 미끄럼속도 0.1m/s, 적용하중 10N~30N, 상대제 거칠기 9 μ m~30 μ m의 실험범위에서 실험적으로 고찰하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 미끄럼 거리가 짧은 경우에는 마찰계수는 감소하다가 미끄럼거리가 400m이상에서는 거의 일정한 값이 되어 안정된 값을 나타내고 있으며, 동일하중에서 상대제의 거칠기의 변화에 따라 복합재료의 마찰계수는 일정한 경향을 보이지 않는다.

(2) 사용된 복합재료의 마모율은 미끄럼 거리의 증가에 따라 급격히 감소하다가 일정한 값이 되었으며, 상대제의 거칠기가 커질수록 마모율은 높게 나타났다.

(3) FRP 선박 외관제인 복합재료의 누적마모체적은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 그 증가폭이 떨어지는 비선형적으로 증가하였으며, 또한 누적마모체적은 적용하중이 증가함에 따라 그리고 상대제의 거칠기가 커질수록 증가하였다.

(4) 연삭마모 시험에서 파괴 메커니즘은 마모막이 형성되었다가 미소절단 기지의 변형, 균열이 발생하고 박리현상 등이 일어난다는 것을 파면의 SEM 사진을 통해 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

고성위, 양병춘, 김형진, 김재동 (2006). "탄소섬유강화 고분자 복합재의 연삭마모 특성에 관한 연구", 한국동력기계공학회지 제10권, 제1호, pp 46-51.

김형진, 박명일, 박대원, 김재동, 고성위 (2002). "하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴인성치에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제4호, pp 42-47.

김형진, 이진정, 김재동, 고성위 (2005). "35톤급 FRP 선박 외관재의 충격파괴거동에 관한 연구", 한국동력기계공학회지 제9권, 제4호, pp 137-142.

남기우, 문창권 (2002). "CFRP 적층 형태에 따른 파괴시 음향방

출 신호특성" 한국해양공학회지 제16권, 제2호, pp 67-71.

이승렬, 김부안, 문창권 (2006). "스트란드형 유리섬유 강화 복합재료의 특수환경에 대한 내구성 시험", 한국해양공학회지, 제20권, 제2호, pp 52-58.

함주혁 (2001). "양축방향 면내압축과 전단하중을 받는 선박 이중판의 강도 평가", 한국해양공학회지 제15권, 제1호, pp 85-91.

Anderson, J.C. and Williamson, P.K. (1985). "Relating Laboratory Wear Testing to the In-service Wear of Polymers, in: L.H. Lee (Eds.), Polymer Wear and Its Control", ACS Symposium Series, Vol 287, American Chemical Society, pp. 315-331.

Chand, N., Naik, A. and Neogi, S. (2000). "Three-body Abrasive of Short Glass Fibre Polyester Composite", Wear Vol 242, No1-2, pp 38-46.

Fridrich, K. (1986). Friction and Wear of Polymer Composites, Composite Materials Series, 1, ed. Elsevier, Amsterdam, pp 233-287

Kim, J.D., Kim, H.J., and Koh, S.W. (2006). "Wear Characteristics of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites by a Pressureless Metal Infiltration Process", Materials Science Forum, Vol 510-511, pp 234-237.

Koh, S.W., Kim, H.J., Kim, B.T., Hwang, S.O., Kim, J.D. and Choi, W.S. (2007). "Effect of Load upon the Abrasive Wear Silica-Epoxy Resin Composite", Materials Science Forum, Vol 544-545, pp 255-258.

Ravikiran, A. and Jahanmir, S. (2001). "Effect of Contact Pressure and Load on Wear of Alumina", Wear Vol 251, No 1-12, pp 980-984.

Ren, J.R., Kim, K.H., and Kim, S.S. (2001). "Tribological Evaluation of Dental Composite Resins Containing Prepolymerized Particle Fillers", KSME International Journal, Vol 15, No 6, pp 727-734.

Shim, H.H., Kwon, O.K. and Youn, J.R. (1991). "Effects of Structure and Humidity on Friction and Wear Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites", Proc. SPE ANTEC'91, p 1977.

Sung, N. and Suh, N.P. (1979). "Effect of Fiber Orientation in Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymer Composites", Wear, Vol 53, No 1, pp 129-141.

2008년 9월 1일 원고 접수

2008년 10월 14일 최종 수정본 채택