유리섬유강화 복합재료의 미끄럼 속도변화에 따른 마모 특성

김형진¹ · 고성위^{2*}

¹경상대학교 기계시스템공학과/해양산업연구소

²부경대학교 기계시스템공학과

Characteristics of Wear on Sliding Speed of Glass Fiber Reinforcement Composites

Hyung Jin KIM¹ and Sung Wi KOH^{2*}

¹*Department of Mechanical System Engineering/Institute of Marine Industry,
Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea*

²*Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea*

The characteristics of abrasive wear on sliding speed of glass fiber reinforcement (GF/PUR) composites were investigated at ambient temperature by pin-on-disc friction test. The cumulative wear volume, friction coefficient and surface roughness of these materials on sliding speed were determined experimentally. The major failure mechanisms were lapping layers, deformation of resin, ploughing, delamination, and cracking by scanning electric microscopy (SEM) photograph of the tested surface. As increasing the sliding speed the GF/PUR composites indicated higher friction coefficient. The surface roughness of the GF/PUR composites was increased as the sliding speed was higher in wear test.

Keywords: Friction coefficient, Wear characteristics, Sliding speed, Cumulative wear volume, Surface roughness.

서 론

하중을 갖고 있는 물체가 다른 물체와의 접촉면 사이에 상대운동이 일어날 경우 물체의 운동 방향과 반대방향으로 저항력이 생기며, 이 저항력을 마찰력이라 한다. 마모는 물체의 표면에서

기계적인 운동에 의해 물체가 점차적으로 부스러져 떨어져 나가는 현상을 말하며, 여기서 기계적인 운동으로는 기체, 액체, 고체 등의 접촉에 의한 것들이 있다. 그러나 마모만이 독자적으로 작용하는 경우는 흔하지 않으며 대부분 마찰

*Corresponding author: swkoh@pkn.ac.kr, Tel: 82-51-629-6192, Fax: 82-51-629-6188

(friction)과 윤활 (lubrication)이 마모와 같이 작용하여 나타나므로 매우 복잡한 양상을 보이게 된다. 마찰 상태를 크게 나누면 고체마찰, 유체마찰 및 경계마찰로 나눌 수 있다.

산업현장에서 실제로 생산되는 총에너지의 30%정도가 마찰마모 과정에서 소실될 정도로 생산성과 밀접한 관계가 있으며, 에너지 절약에 직접적으로 연관되므로 마모에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Badmos and Ivey, 2001; Chand et. al., 2000; Dasari et.al., 2009; Kim and Koh, 2008; Westergård et.al., 2000).

섬유강화 복합재료는 경량이기 때문에 과거에는 단지 구조물의 무게를 경감하기 위한 부재로 사용되었으나, 고강도이며 고강성의 성질을 가지는 열경화성 복합재료가 구조물의 주 부품으로 사용되었고, 최근 소형 선박에는 거의 전 구조물을 이러한 복합재료로 대체하기 시작하였다. 복합재료의 마찰 및 마멸 특성에 영향을 미치는 인자로는 강화섬유의 재질, 구성, 함유량, 섬유방향 및 수지의 미끄럼 거리 등 복잡한 인자들에 의해 좌우됨을 보이고 있다 (Koh et al., 2006; Koh et al., 2007; Kim et. al., 2010a). 또한 복합재료의 마모기구는 응착마모 (Ren et al., 2001), 충전재료의 영향 (Kim et al., 2010b)에 의하여 발생한다고 하였다.

따라서 이 논문에서는 복합재료의 미끄럼 마모거동에 대한 연구의 일환으로 복합재료의 마모기구를 주사현미경 (SEM)의 관찰을 통하여 고찰하였다. 복합재료는 전력용 지중자재로 사용되는 유리섬유/폴리우레탄 (GF/PUR)재료를 실험재료로 사용하였다. 이 재료의 마모거동을 고찰하기 위하여 누적마모체적과 마찰계수를 미끄럼 속도와 상대재인 SiC 연마지의 평균입자 지름의 변화에 대하여 고찰하였다.

재료 및 방법

재료는 전력용 지중자재로 사용되는 유리섬유/폴리우레탄 (GF/PUR) 복합재료를 사용하였

으며, 섬유는 휘스커형 유리섬유가 사용되었고 수지는 폴리우레탄을 사용하여 성형하였다. Table 1은 사용재료의 기계적 성질을 나타낸 것으로 인장강도는 98Mpa, 탄성계수는 10.2GPa, 포아송비는 0.26, 유리섬유의 체적함유량은 30.2%이다. 성형된 복합재료는 성형된 복합재료의 판을 섬유의 배열이 전체적으로 고루 분포되어 있는 중앙부분을 다이아몬드 커터를 이용하여 절취하였으며, 마모시험편은 이를 가공연마하여 완성시킨 후 실험에 사용하였다.

Fig. 1은 핀온디스크 (pin-on-disc)형 시험기를 나타낸 사진이다. 연삭마모시험은 핀온디스크형 시험기를 사용하여 실시하였으며, 시험 시 온

Table 1. Mechanical properties of GF/PUR (KEPCO, 2006)

Item (unit)	Unit	Results
Tensile strength	MPa	98.0
Tensile modulus	GPa	10.2
Poisson ratio		0.26
Bending modulus	MPa	167.0
Glass fiber volume fraction	%	30.2

Fig. 1 Photograph of pin-on-disc wear tester.

도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 시험편의 마찰력은 실시간으로 측정하며 시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시험편의 질량을 측정하여 계산하였다. 15mm×4.5mm×5.5mm의 크기로 절단하고 표면을 사포로 연마하여 마찰과 마모시험의 시험편으로 사용하였다. 상대재인 SiC 연마지 (3M)는 지름 80mm×두께 1.5mm인 디스크의 표면에 접착제를 사용하여 부착하고 건조로에서 7일간 완전히 경화 시킨 후 연삭마모시험을 실시하였으며, 실험에 사용한 SiC 연마지의 평균입도는 9 μ m, 15 μ m, 30 μ m 세 종류이다. 시험장치는 서로 다른 미끄럼 속도로 동작하게끔 조정되어 있으므로 수직하중 상대재의 거칠기가 9 μ m, 15 μ m, 30 μ m에서 서로 다른 속도인 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6 m/s를 유지시키며 미끄럼 거리 1000m까지 연삭마모시험을 실시하였다.

동일한 시험조건에서 3개의 시험편을 각각의

시험거리에 대하여 연삭마모시험을 실시하였으며, 시험 전후 시험편의 질량손실은 Mettler 분석천칭 (감도 0.01mg)으로 측정하여 같은 환경조건에서 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였으며, 로드셀을 통하여 마찰력은 실시간으로 측정하여 마찰계수를 얻었다. 마모된 시험편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 주사식전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다.

표면조도는 표면조도계 (SJ-201, Mitutoyo)를 사용하여 측정하였으며, 미끄럼 거리가 100m일 때 세부분 이상을 측정하여 평균값을 이용하였다.

결과 및 고찰

GF/PUR 복합재료에서 핀온디스크 마모시험기를 사용하여 적용하중이 10N과 20N이고, 상대재인 SiC 연마지의 평균입자지름이 9 μ m일 때 미끄럼 속도를 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 하였을

Fig. 2 SEM photographs of worn surface for GF/PUR composites.(D; delamination, F; fiber, M; matrix, MCR; microcracking, MCU; microcutting).

때 시험한 마모면 사진이 Fig. 2이다. 이때 마모면은 각각의 경우에 미끄럼 거리가 50m까지 마모시험을 행한 상태를 SEM 사진촬영한 것을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)는 적용하중 10N, 상대재의 평균입자지름이 $9\mu\text{m}$, 미끄럼 속도 0.1m/s인 경우에 대한 마모면을 나타낸 것으로서 전체적으로 마모막이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 섬유 (fiber, F)와 수지 (matrix, M)가 확연히 구분되고 일부는 미시균열 (Microcrack, MCR)이 발생하고 일부이지만 박리 (delamination, D)도 발생함을 알 수 있다. 적용하중과 상대재의 평균입자지름이 동일한 상태에서 미끄럼 속도가 0.3m/s인 경우에는 마모막이 형성된 것이 일부 파손되어 다소 거친 곳이 있으며, 수지인 폴리우레탄의 변형이 점차 많아지고, 수지의 파괴가 상대적으로 많이 발생되고 쟁기질 (ploughing, p)의 흔적이 있음을 알 수 있다 (Fig. 2 (b)참조). 또한 수지인 폴리우레탄이 변형되어 미시균열

(microcrack)이 발생되기 시작했으며, 유리섬유의 일부 단면이 파단되어 부스러기가 주변에 떨어져 있음을 알 수 있다. 또한 마모막 중의 일부는 파손되고, 거친 단면을 보여주고 있다. 이와 더불어 미끄럼 속도가 0.6m/s인 경우에도 유리섬유의 파단과 절단이 증가하여 파손된 유리섬유가 더욱 증가하고 있음을 Fig. 2 (c)를 통하여 알 수 있다.

Fig. 2 (d, e, f)는 적용하중 20N, 상대재의 평균입자지름이 $9\mu\text{m}$ 로 동일하지만 미끄럼 속도를 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 하였을 때 마모면을 나타낸 것이다. 적용하중이 더 크기 때문에 형성된 마모막이 파손된 형태가 더욱 증가하고 또한 전체적으로 미끄럼 속도의 증가에 따라 섬유와 수지 사이에 박리현상 (delamination)이 발생하면서 증가하고, 쟁기질의 흔적도 많으며, 이와 더불어 균열과 파단이 대체적으로 많이 이루어짐을 Fig. 2 (f)를 통하여 알 수 있다.

Fig. 3 Variation of wear volume as a function of sliding distance for GF/PUR composites.

Fig. 3은 GF/PUR 복합재료에서 적용하중이 10N과 20N, 상대재의 평균입자지름이 $9\mu\text{m}$ 과 $15\mu\text{m}$ 일 때 미끄럼 속도를 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 변화시킬 때 미끄럼 거리의 변화에 따른 누적 마모체적을 나타낸 것이다. Fig. 3 (a)를 살펴보면 적용하중 10N, 상대재의 평균입자지름 $9\mu\text{m}$, 미끄럼 속도가 0.1m/s인 경우 미끄럼 거리가 50m, 100m, 200m로 증가함에 따라 누적 마모체적은 0.00021mm^3 , 0.00041mm^3 , 0.00063mm^3 으로 급격히 증가하다가 미끄럼 거리가 400m, 600m, 800m, 1000m로 증가해감에 따라 0.00091 mm^3 , 0.00111 mm^3 , 0.00125 mm^3 , 0.00139 mm^3 로 완만하게 증가하여 그 차이가 적게 되는 것을 알 수 있다. 미끄럼 속도가 0.3m/s나 0.6m/s인 경우에도 그 값의 차이는 있으나 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 상대재의 평균입자지름이 $15\mu\text{m}$ 일 때 (Fig. 3 (b))나 적용하중이 20N인 경우 (Fig. 3 (c,d))에도 유사한 경향임을 알 수 있다. 또한 각각의 미끄럼 속도에 따라 누적마모체적은 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Ravikiran and Jahanmir (201)의 결과와 유사한 경향을 보이고 있고 Chand et al. (200)의 결과와는 다른 결과임을 알 수 있다.

Fig. 4 Variation of wear volume as a function of sliding distance for GF/PUR composites tested on applied load of 10N and counterpart roughness $9\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, and $30\mu\text{m}$.

Fig. 4는 적용하중 10N일 경우에 각각의 미끄럼 속도와 상대재의 평균 입자지름에 따라 미끄럼 거리가 1000m일 때의 평균 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 상대재의 평균입자지름이 $9\mu\text{m}$ 과 $15\mu\text{m}$ 일 경우에는 미끄럼 속도가 다르더라도 누적 마모체적은 거의 비슷한 값을 보이지만 상대재의 평균입자지름이 $30\mu\text{m}$ 일 경우에는 미끄럼 속도가 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 변함에 따라 누적마모체적은 0.0018 mm^3 , 0.0019 mm^3 , 0.0025 mm^3 으로 증가하여 그 차이가 크게 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 적용하중 20N일 경우에 각각의 미끄럼 속도와 상대재의 평균 입자지름에 따라 미끄럼 거리가 1000m일 때의 평균 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 상대재의 평균입자지름이 $9\mu\text{m}$ 일 경우에는 미끄럼 속도의 변화에도 누적 마모체적은 미세하게 증가하지만 상대재의 평균입자지름이 $15\mu\text{m}$ 일 경우에 미끄럼 속도가 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 변함에 따라 누적마모체적은 0.0011 mm^3 , 0.0014 mm^3 , 0.0018 mm^3 로 증가하고, 상대재의 평균입자지름이 $30\mu\text{m}$ 일 경우에 미끄럼 속도가 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 변함에 따라 누적마모체적은 0.0021 mm^3 , 0.0024 mm^3 , 0.0029 mm^3 로 증가하여 그 차이가 크게 됨을 알 수 있다.

Fig. 5 Variation of wear volume as a function of sliding distance for GF/PUR composites tested on applied load of 20N and counterpart roughness $9\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, and $30\mu\text{m}$.

Fig. 6 Variation of friction coefficient as a function of sliding speed for tested on sliding velocity 0.1m/s, 0.3m/s and 0.6m/s at applied load of 10N.

Fig. 8 Variation of surface roughness as a function of sliding speed for tested on counterpart roughness 9μm and 30μm at applied load 30N.

Fig. 7 Variation of surface roughness as a function of sliding speed for tested on counterpart roughness 9μm and 15μm at applied load 10N.

다. 이러한 결과를 종합하면 전체적으로 미끄럼 속도가 거칠수록 누적마모체적도 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 적용하중 10N일 때 각각 상대재의 평균입자지름과 미끄럼 속도의 변화에 따른 마찰 계수의 변화를 나타낸 것이다. 동일 적용하중과 상대재의 평균입자지름에 대하여 미끄럼 속도가 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 변화함에 따라 마찰 계수는 다소 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 적용하중 10N, 상대재의 평균입자지

름이 9μm과 30μm일 때 미끄럼 속도에 따른 표면조도를 나타낸 것이다. 표면조도는 표면조도계 (SJ-201, Mitutoyo)를 사용하여 미끄럼 거리가 100m일 때의 시험편 표면조도를 측정하였다. 상대재의 평균입자지름이 9μm인 경우 미끄럼 속도가 0.1m/s, 0.3m/s, 0.6m/s로 변화함에 따라 표면조도는 0.46μm, 0.58μm, 0.79μm로 나타나 미끄럼 속도의 증가에 따라 표면조도가 증가하는 것으로 나타났다. 상대재의 평균입자지름이 30μm인 경우에도 미끄럼 속도의 증가에 따라 표면조도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 응착마모로 인해 마모표면에 응집된 덩어리들이 탈락되면서 파괴된 마모표면의 표면 요철들이 마모를 증가시키고 마모된 상대마모재의 성분들이 마모표면에 응착되거나 탈락되기 때문이라고 생각한다. 적용하중이 30N인 경우에도 증가폭이나 그 값의 차이는 있으나 상대재의 거칠기가 증가함에 따라 마모면의 표면조도가 증가하는 것을 Fig. 8을 통해 알 수 있었다. 다만 적용하중 30N, 상대재의 평균입자지름이 30μm, 미끄럼 속도가 0.6m/s인 경우에는 표면조도가 상대적으로 좀 더 크다는 것만 특이한 것이다.

결 론

GF/PUR 복합재료의 마찰 및 마모 거동에 대한 미끄럼 속도의 영향을 고찰하기 위하여 마모 시험을 통하여 실험적으로 얻어진 결론은 다음과 같다. 마모 시험에서 파괴 메커니즘은 마모막이 형성되었다가 박리현상과 쟁기질이 발생하고 기지의 변형, 미소절단, 미소균열이 발생하고 성장하는 것을 파면의 SEM 사진을 통해 확인할 수 있었다. GF/PUR 복합재료의 누적 마모체적은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 그 증가폭이 떨어지는 비선형적으로 증가하였으며, 또한 누적 마모체적은 미끄럼 속도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. GF/PUR 복합재료의 마찰계수는 미끄럼 속도가 증가할수록 높아지는 경향을 나타냈다. 마모 시험후의 마모면의 표면조도는 적용하중이 증가할수록 그리고 미끄럼 속도가 증가할수록 거칠어지는 경향을 보였다.

참고문헌

- Badmos, A.Y. and D. Ivey, 2001, Characterization of Structural Alumina Ceramics used in Ballistic Armour and Wear Application. *J. Mat. Sci.* 36, 4995 – 5005.
- Chand, N., A. Naik and S. Neogi, 2000. Three-Body Abrasive of Short Glass Fibre Polyester Composite. *Wear*, 242 (1 – 2), 38 – 46.
- Dasari, A., Z.Z. Yu and Y.W. Mai, 2009, Fundamental Aspect and Recent Progress on Wear/Scratch Damage in Polymer Nanocomposites. *Mat. Sci. and Tech.*, 63, 31 – 80.
- KEPCO, 2006, Development of Manhole Insulation Cover for Low Voltage. Report KEPCO-05-C26. p. 85.
- Kim, B.T. and S.W. Koh, 2008. A Study on Abrasive Wear Characteristics of Side Plate of FRP Ship. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 44 (3), 250 – 256.
- Kim, J.D., H.J. Kim, S.W. Koh and Y.S. Kim, 2010a. Wear Properties of Epoxy Matrix Nonocomposites. *J. Kor. Soc. Pow. Sys. Eng.*, 14 (6), 83 – 88.
- Kim, S.Y., E.B. Kim, Q. Yoo and C.S. Ju, 2010b. Tribological Wear Behavior of PTFE Impregnated with Cu Nano Particles. *J. Kor. Soc. Pow. Sys. Eng.*, 14 (4), 50 – 55.
- Koh, S.W., B.C. Yang, H.J. Kim and J.D. Kim, 2006. Study on Abrasive Wear Behavior of a Carbon Fiber Composites. *J. Kor. Soc. Pow. Sys. Eng.*, 10 (1), 46 – 51.
- Koh, S.W., H.J. Kim, B.T. Kim, S.O. Hwang, J.D. Kim and W.S. Choi, 2007. Effect of Load upon the Abrasive Wear Sillica-Epoxy Resin Composite, *Mat. Sci. Forum* 544 – 545, 255 – 258.
- Ravikiran, A. and S. Jahanmir, 2001. Effect of Contact Pressure and Load on Wear of Alumina. *Wear*, 251 (1 – 12), 980 – 984.
- Ren, J.R., K.H. Kim and S.S. Kim, 2001. Tribological Evaluation of Dental Composite Resins Containing Prepolymerized Particle Fillers. *KSME Int. J.*, 15 (6), 727 – 734.
- Westergård, R., N. Axén, U. Wiklund and S. Hogmark. 2000. An Evaluation of Plasma Sprayed Ceramic Coatings by Erosion, Abrasion and Bend Testing. *Wear*, 246, 12 – 19.

2012년 8월 1일 접수
2012년 8월 20일 1차 수정
2012년 8월 20일 수리