하중변화에 따른 GF/PUR 복합재료의 연삭마모특성

고 성 위*

부경대학교 기계시스템공학과

Effect of load upon the abrasive wear characteristics of glass fiber reinforced polyurethane composites

Sung Wi KOH*

Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

The effect of load and sliding speed on abrasive wear characteristics of glass fiber/polyurethane (GF/PUR) composites were investigated at ambient temperature by pin-on-disc friction test. The friction coefficient, cumulative wear volume and surface roughness of these materials against SiC abrasive paper were determined experimentally. Experimental results showed that the surface roughness of the GF/PUR composites was increased as applied load was higher in wear test. The cumulative wear volume tended to increase nonlinearly with increase of sliding distance and depended on applied load and sliding speed for these composites. It could be verified by scanning electric microscopy (SEM) photograph of surface tested that major failure mechanisms were lapping layers, ploughing, delamination, deformation of resin and cracking.

Keywords: Abrasive wear, Surface roughness, Wear characteristics, Cumulative wear volume, Friction coefficient

서 론

직접 혹은 간접적으로 표면접촉을 하고 있는 두 고체가 상대운동을 할 때 그 운동에 대한 저항이 항상 생기는데 이러한 현상을 마찰이라고 하며, 이때의 저항력을 마찰력이라 한다. 인류가 소비하는 에너지의 많은 부분이 마찰손실로 소비되는 것을 생각할 때 마찰이 얼마나 중요한 문

제인가 알 수 있다. 따라서 설계의 개선이나 우수한 재료의 선택으로 인한 개선 혹은 윤활제의 개선을 통하여 마찰을 줄이는 일은 현대기술에 있어서 매우 중요한 것이라고 할 수 있다.

그러나 우리의 일상생활 가운데 많은 부분들이 적당한 마찰을 필요로 하며, 경우에 따라서는 충분한 마찰을 유지하는 것이 매우 중요하다. 예

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

를 들면 우리가 걸음을 걷는 일, 자동차의 시동을 걸거나 혹은 커브 길을 달리는 일, 또 손으로 어떤 물체를 잡는 일 등은 만일 마찰이 너무 작다면 이루어질 수 없는 일이다. 충분한 마찰의 유지는 나사 그리고 볼트 등과 같은 체결기구에서 필수적인 것이기도 하다.

섬유강화 복합재료는 경량이기 때문에 과거에는 단지 구조물의 무게를 경감하기 위하여 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 중의 하나에 좌우됨을 보이고 있으며, 이러한 연구결과들은 다음과 같다. CFRP 복합재료와 상대재에서 섬유방향이나 매트릭스는 마모에 어떠한 영향을 주지 않는다 (Giltrow and Lancaster, 1970)고 하였고, 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재료의 미끄럼 마모시 섬유 방향의 영향과 섬유방향에 대한 마찰계수의 변화 (Sung and Suh, 1979)를 연구하였다. 마찰계수의 차이가 마모의 환경을 지배한다는 새로운 마찰이론 (Suh and Sin, 1981)과 탄소섬유강화 복합재료에서 마찰 및 마모 거동은 마찰조건과 섬유방향에 따라 변한다 (Shim et al., 1991)고 하였다. 다양한 폴리머 복합재의 연삭마모가 일어나는 동안 지배적인 미소 마모 메커니즘을 분류 (Friedrich, 1986)하였다. 탄소섬유 복합재료에서 마찰 및 마모거동은 섬유방향, 하중 그리고 마찰 속도에 영향을 받는다 (Koh et al., 2004, 2006, Kim and Koh, 2008)고 하였다. 18가지의 고분자에 대하여 실험하여 저밀도 폴리에틸렌은 거친 연강에 대하여 낮은 연삭마모율을 나타낸다 (Evans and Lancaster, 1979)고 하였다. 상용 치과 재료 4가지 재료에 대하여 마찰계수를 구하였고, 이들 주 마

찰기구는 응착마모 (Ren et al., 2001), 나노구리 입자/PTFE 복합재료는 내마모성이 증가한다 (Kim et al., 2010)고 하였다.

따라서 이 논문에서는 복합재료의 건식 미끄럼 마모거동에 대한 종합적인 연구의 일환으로 상대재인 SiC 연마지에 대한 복합재료의 누적마모체적과 마찰계수를 속도와 하중의 변화에 대하여 고찰하였다. 복합재료는 전력용 지중자재로 사용되는 유리섬유/폴리우레탄 (GF/PUR)재료를 실험재료로 사용하였다. 이 재료의 마모메커니즘을 주사현미경 (SEM)의 관찰을 통하여 비교·고찰하였다.

재료 및 방법

전력용 지중자재로 사용되는 유리섬유/폴리우레탄 (GF/PUR)재료를 실험재료로서 사용하였으며, 섬유는 휘스커형 유리섬유가 사용되었고, 기지재로는 폴리우레탄을 사용하여 성형하였다. 유리섬유의 체적함유량은 30.2%이고, 성형된 복합재료는 성형된 복합재료의 판을 섬유의 배열이 전체적으로 고루 분포되어 있는 중앙부분을 다이아몬드 커터를 이용하여 절취하였다.

연삭마모시험은 Fig. 1과 같은 핀온디스크 (pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였으며, 시험 시 온도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 시험편의 마찰력은 실시간으로 측정을 하며

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

시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시험편의 질량을 측정하였다. $15\text{mm} \times 4.5\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ 의 크기로 절단하고 표면을 사포로 연마하여 마찰과 마모시험의 시험편으로 사용하였다. 상대재인 SiC 연마지 (3M)는 지름 $80\text{mm} \times$ 두께 1.5mm 인 디스크의 표면에 접착제를 사용하여 부착하고 건조로에서 7일간 완전히 경화시킨 후 연삭마모시험을 실시하였으며, 실험에 사용한 SiC 연마지의 평균입도는 $9\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 세 종류이다. 시험장치는 서로 다른 미끄럼 속도로 동작하게끔 조정되어 있으므로 수직 하중 10N, 20N, 30N에서 서로 다른 속도인 0.1m/s 과 0.6m/s 를 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 시편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 주사식전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다.

표면조도는 표면조도계 (Mitutoyo SJ-201)를 사용하여 측정하였으며, 미끄럼 거리가 100m일 때 3부분 이상을 측정하여 평균값을 사용하였다.

결과 및 고찰

전력용 지중자재로 사용되는 유리섬유/폴리우레탄 (GF/PUR)재료의 연삭마모 특성을 하중과 미끄럼 속도의 변화에 대하여 실험하였다. 실험한 결과는 초기마모가 일어나는 시간이 대체적으로 3분정도 소요되었으며, 초기마모동안 복합재료 시험편과 마찰상대재 사이에는 단단한 SiC 입자들에 의한 연삭과 쟁기질 등으로 인하여 마모가 많이 일어났으며, 마찰계수가 떨어져 안정상태로 되면 마모가 현저히 줄어들었다.

Fig. 2는 미끄럼 속도 0.1m/s , SiC 연마지의 평

Fig. 2. Variation of friction coefficient as a function of sliding distance for GF/PUR composites on $9\mu\text{m}$ SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 10, 20, 30N.

Fig. 3. Variation of friction coefficient as a function of sliding distance for GF/PUR composites on $30\mu\text{m}$ SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 10, 20, 30N.

균입자지름이 $9\mu\text{m}$ 일 때 각각의 적용하중에 대하여 미끄럼 거리의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 미끄럼 거리가 짧은 200m 미만에서는 마찰계수는 증가하다가 점차 감소하는 것을 알 수 있으나 미끄럼 거리가 400m 이상에서는 거의 일정한 값이 되어 안정상태가 됨을 알 수 있다. Fig. 3은 미끄럼 속도 0.1m/s , SiC 연마지의 평균입자지름이 $30\mu\text{m}$ 일 때 각각의 적용하

중에 대하여 미끄럼 거리의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 그 경향은 Fig. 2와는 다르게 미끄럼 거리가 600m까지 미소하게 증가하다가 거의 일정하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 GF/PUR 복합재료에서 미끄럼 속도 0.1m/s, 상대재인 SiC 연마지의 평균입자지름이 9 μ m일 때 적용하중이 10, 20, 30N으로 변화할 때 미끄럼 거리에 따른 누적 마모체적의 변화를 나타낸 것이다. 적용하중이 10N일 경우 미끄럼 거리가 증가하더라도 누적 마모체적은 비교적 완만하게 증가하여 그 차이가 적게 되는 것을 알 수 있으며, 적용하중이 20N이나 30N일 경우에는 미끄럼 거리가 200m까지는 비교적 급격하게 증가하다가 미끄럼 거리가 점차 길어질수록 누적마모체적은 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 미끄럼 거리가 짧은 때에는 마모가 많이 일어나지만 미끄럼 거리가 증가할수록 점차 마모가 적게 일어난다는 것을 의미한다. 또한 각각의 적용하중에서도 선형적으로 증가하지 않고 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 비선형적으로 증가하는 것은 Ravikiran and Jahanmir의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으나 Chand et al.의 결과와는 상반

됨을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 상대재인 SiC 연마지의 평균입자가 15 μ m이지만 다른 조건은 동일한 Fig. 4와 동일한 경우에도 유사한 결과를 나타냄을 Fig. 5를 통해서 알 수 있다. 미끄럼 속도 0.1m/s, 미끄럼 거리 1000m에서 10N, 20N, 30N의 누적 마모체적은 0.0057, 0.0101, 0.0116 mm³으로 측정되었으며, 이 값은 Fig. 5의 결과와는 다소 다르게 나타나서 일의적으로 누적 마모체적과 적용하중에 비례하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 미끄럼 속도가 0.1m/s일 경우에 각각의 적용하중과 상대재의 평균 입자지름에 따라 미끄럼 거리가 1000m일 때의 평균 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 상대재의 평균입자지름이 큰 경우가 상대재의 평균입자지름이 작은 경우보다 누적 마모체적이 크게 됨을 알 수 있으며, 또한 적용하중이 큰 30N인 경우가 누적 마모체적이 크게 됨을 알 수 있다. 또한 상대재의 평균 입자지름이 큰 경우인 30 μ m일 때 적용하중이 증가할수록 누적 마모체적이 더욱 크게 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 종합하면 전체적으로 적용하중이 증가할수록 누적마모체적도

Fig. 4. Variation of wear volume as a function of sliding distance for GF/PUR composites tested on 9 μ m SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 10, 20, 30N.

Fig. 5. Variation of wear volume as a function of sliding distance for GF/PUR composites tested on 15 μ m SiC paper at sliding speed of 0.1 m/s and applied load of 10, 20, 30N.

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

Fig. 8. Variation of surface roughness as a function of applied load for tested on 9, 30μm SiC paper at sliding speed of 0.6m/s.

Fig. 7. Variation of surface roughness as a function of applied load for tested on 9, 30μm SiC paper at sliding speed of 0.1m/s.

증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 미끄럼 속도가 0.1m/s, 상대재의 평균 입자지름이 9, 30μm일 때 각각의 적용하중에 대한 표면조도를 나타낸 것이다. 표면조도는 표면조도계를 사용하여 미끄럼 거리가 100m일 때의 시험편 표면조도를 측정된 것이다. 상대재의 평균입자지름이 9μm인 경우 적용하중이 10N, 20, 30N로 증가함에 따라 표면조도는 0.45, 0.51, 0.68μm로 나타나 하중의 증가에 따라 표면조도가 증가하는 것으로 나타났다. 상대재의 평균입

자지름이 30μm인 경우에도 적용하중이 증가함에 따라 표면조도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 응착마모로 인해 마모표면에 응집된 덩어리들이 탈락되면서 파괴된 마모면의 표면 요철들이 마모를 증가시키고 마모된 상대마모재의 성분들이 마모표면에 응착되거나 탈락되기 때문이라고 생각한다. 미끄럼 속도가 0.6m/s인 경우에도 증가폭이나 그 값의 차이는 있으나 적용하중의 증가에 따라 표면조도가 증가하는 것을 Fig. 8을 통해 알 수 있었다.

Fig. 9는 GF/PUR 복합재료에서 핀온디스크 마모시험기를 사용하여 미끄럼 속도 0.1m/s로서 동일하지만 상대재인 SiC 연마지의 평균입자지름과 적용하중을 다르게 하였을 때 시험한 마모면을 나타내고 있다. 이때 마모면은 각각의 경우에 미끄럼 거리가 50m까지 마모시험을 행한 상태를 SEM 사진촬영한 것을 나타낸 것이다. Fig. 9 (a)는 적용하중 10N, 상대재의 평균입자지름이 9μm인 경우에 대한 마모면을 나타낸 것으로 전체적으로 마모막이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 수지인 폴리우레탄이 변형되어 미시균열 (microcrack)이 발생되기 시작했으며, 유리섬유의 일부 단면에 미시균열이 발생한 후 미시절단 (microcutting)과 파단이 발생하

Fig.9 SEM photographs of worn surface for GF/PUR composites.

(a) 10N 9μm 0.1m/s, (b) 20N 9μm 0.1m/s, (c) 30N 9μm 0.1m/s,
(d) 10N 30μm 0.1m/s, (e) 20N 30μm 0.1m/s, (f) 30N 30μm 0.1m/s

여 부스러기가 주변에 떨어져 있음을 알 수 있다. 마모막 중의 일부는 파손되고 또한 거친 단면을 보여주고 있다. 상대재의 평균입자지름이 동일한 상태에서 적용하중이 20N인 경우에는 마모막이 형성된 것이 일부 파손되고 매끈하였던 마모막이 다소 거친 곳이 있으며, 수지인 폴리에탄의 변형이 점차 많아지고, 수지의 파괴가 상대적으로 많이 발생되고 쟁기질 (ploughing)의 흔적이 있음을 알 수 있다. 또한 파단면에 부스러기가 많이 있으며 이것은 상대재의 마모량도 증가하였음을 알 수 있다. 상대재의 마모량이 증가하는 이유는 용착마모가 많이 발생하여 마모면에 응집된 덩어리들이 탈락하면서 마모면의 표면 요철들이 상대마모재의 마모를 증가시키기 때문이라 생각한다 (Fig. 9 (b)참조). 이와 더불어 적용하중이 30N인 경우에도 섬유와 수지 사이에 박리현상 (delamination)이 발생하면서 증가하고, 손상되는 형태가 더욱 증가한다는 것은 알 수 있다. 하지만 적용하중이 30N, 상대재의 평균입자지름이 30 μ m인 경우에는 마모막의 형성이 깨어지고 용착마모가 많이 이루어지고, 또한 수지와 섬유의 변형이 매우 많이 되고 이와 더불어 균열과 파단이 대체적으로 많이 이루어짐을 알 수 있다 (Fig. 9 (f)참조).

결 론

GF/PUR 복합재료의 마찰 및 마모 거동에 대한 적용하중의 영향을 연구하기 위하여 미끄럼 속도와 상대재의 평균입자지름에 관하여 실험적으로 고찰하여 얻어진 결론은 다음과 같다. 마

모시험후의 마모면의 표면거칠기는 적용하중이 높을수록 크게 나타났다. GF/PUR복합재료의 누적마모체적은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 그 증가폭이 떨어지는 비선형적으로 증가하였으며, 또한 누적마모체적은 적용하중이 증가함에 따라 그리고 상대재의 거칠기가 커질수록 증가하였다. 연삭마모 시험에서 파괴 메커니즘은 마모막이 형성되었다가 박리현상과 쟁기질이 발생하고 미소절단, 기지의 변형, 균열이 발생하고 성장하는 것을 파면의 SEM 사진을 통해 확인 할 수 있었다.

사 사

이 논문은 2009학년도 부경대학교 기성회 학술연구비로 연구되었음 (PK-2009-37).

참고문헌

- Chand, N., A. Naik and S. Neogi, 2000. Three-body abrasive of short glass fibre polyester composite. *Wear* 242 (1-2), 38-46.
- Evans, D.C. and J.K. Lancaster, 1979. The wear of polymers, *Treatise on materials science and technology*, 13, ed. Academic Press, New York, USA, pp. 85-139.
- Friedrich, K., 1986. Friction and wear of polymer composites. *Composite materials series*, 1, ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 233-287.
- Giltrow, J.P. and J.K. Lancaster, 1970. The role of the counterface in the friction and wear of carbon fibre reinforced thermosetting resins. *Wear*, 16 (5), 359-374.
- Kim, S.Y., E.B. Kim, Q. Yoo and C.S. Ju, 2010. Tribological wear behavior of PTFE impregnated with Cu nano particles. *J. Kor. Soc. Pow. Sys. Eng.*, 14 (4), 50-55.
- Koh, S.W. and B.C. Yang, H.J. Kim and J.D. Kim, 2004. Effect of sliding velocity on the wear and friction characteristics of a carbon fiber composites. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 40 (4), 344-350.
- Koh, S.W. and 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.
- 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.
- Ravikiran, A. and S. Jahanmir, 2001. Effect of contact pressure and load on wear of alumina. Wear 251 (1 – 12), 980 – 984.
- Ren, H.R., K.H. Kim and S.S. Kim, 2001. Tribological evaluation of dental composite resins containing prepolymerized particle fillers. KSME International Journal, 15 (6), 727 – 734.
- Shim, H.H., O.K. Kwon and J.R. Youn, 1991. Effects of structure and humidity on friction and wear properties of carbon fiber reinforced Epoxy composites. Proc. SPE ANTEC'91, 1977.
- Sung N. and N.P. Suh, 1979. Effect of fiber orientation in friction and wear of fiber reinforced polymer composites. Wear, 53 (1), 129 – 141.
- Suh, N.P. and H.C. Sin, 1981. The genesis of friction. Wear, 69 (1), 91 – 114.
-
- 2010년 10월 26일 접수
 2010년 11월 9일 1차 수정
 2010년 11월 9일 수리