

고분자/MoS₂ 복합재료의 마찰 및 마모특성

문탁진 · 윤호규

고려대학교 재료공학과

Characteristics of Friction and Wear of Polymer/MoS₂ Composites

Tak Jin MOON and Ho Gyu YOON

Materials Sci. Dept., Korea Univ.

Abstract— The friction and wear behavior of molybdenum disulfide filled polymer composites sliding against metal has been investigated using pin-on-disc machine and microscope.

The observed wear rates were reduced by the addition of MoS₂ to nylon and this can be attributed to the homogenous transfer of MoS₂ to the counterface thereby modifying sliding conditions. The friction of filled and unfilled nylon was increased with increasing sliding speed, and the catastrophic wear rate was occurred at high normal load. This have been explained by thermal degradation.

In the case of HDPE, however, the wear rate was not always reduced by the addition of MoS₂ and the influence of MoS₂ was mainly even the opposite. Filled and unfilled HDPE had lower values of friction and wear rate than those of nylon.

Micrographs appeared that the delamination of the worn surface in nylon/MoS₂ composite occurred and revealed that the worn surface of HDPE presented a number of characteristic features as wear grooves, pulls, and smears and crescents.

1. 서 론

지난 수십년 동안 고분자 재료와 이를 모체로 한 복합재료의 활용은 트라이볼로지(tribology) 분야에서 폭넓고 다양하게 사용되어 왔으며[1-3] 특히 polyamide 수지는 열가소성 수지로 nylon 기어와 베어링에 많이 응용되었음을 볼 수 있었다.

고분자의 마찰 및 마모메카니즘은 고분자막의 전이로써[4-6] 설명될 수 있으나 이 전이막(transferred film)의 역할은 확실하게 밝혀지지는 않았다. 이 막이 금속상대접촉면을 매끄럽게 할 수 있고, 금속표면에 대한 고분자재료의 운동이 박막전이에 의해 마찰과 마모율(wear rate)을 감소시킨다고도 하였다[4]. Nylon, polyethylene, polyacetal 과 같은 연성이 있는 열가소성 수지는 상대접촉면(counterface)에 전이된 미세한 마모조각들이 연속적인 미끄럼 운동에 의해 변형이 되면서 궁극적으로 상대접촉면의 표면조도를 감소시키고,

따라서 마모율도 감소하게 되는 것이다. Nylon은 결정질 고분자이나 그 결정성이 고밀도 polyethylene(HDPE)나 polytetra-fluoroethylene(PTFE)보다는 매우 낮으며, 마찰계수는 온도와 하중에 따라 최대값을 갖는 것으로 알려져 있으며[7] 아직은 정확한 마찰 행동은 알려져 있지 않다. 반면에 HDPE와 PTFE는 분자사슬의 매끄러운 molecular profile에 의해 낮은 속도에서도 매우 낮은 마찰계수 및 마모특성을 나타낸다[8-10].

고분자의 마모특성을 향상시키기 위해 첨가제를 사용할 수 있는데, Briscoe[11]는 HDPE에 금속산화물(CuO, Pb₃O₄)을 첨가하여 전이막이 상대접촉면에서 강한 접착력을 갖게 함으로서 마모율의 감소를 보았고, Furber[12] 등은 graphite, MoS₂(molybdenum disulfide), PTFE와 같은 고체 윤활제를 써서 마찰과 마모를 감소시키는데 금속상대접촉면에서 전이막이 우선적으로 균일하게 형성한다고 하였다.

본 논문에서는 마모메카니즘을 더욱 깊이 알기 위하여 MoS₂를 nylon에 첨가한 복합재료의 마모특성을 여러 하중 및 운동속도에 따라 고찰하였으며, nylon에 비하여 매우 낮은 마모율을 갖는 HDPE에 대해서도 같은 실험을 행하여 결과를 비교검토하여 전반적인 고분자복합재료의 마모메카니즘을 규명하였다.

2. 실험

2-1. 재 료

본 실험에서 사용된 nylon 66과 HDPE의 특성은 Table 1에 표시하였으며, 충전제로 사용한 MoS₂ (LM-13, SM powder, Lockery Company, U.S.A.)는 평균입자 크기가 0.4 μm인, 순도 98% 이상의 분말을 사용하였으며, MoS₂의 트라이볼로지 주요특성은 Table 2와 같다.

Table 1. Properties of materials

Description	unit	nylon 66	HDPE
Tensile strength of yield	kg/cm ²	880	270
Elongation at break	%	200	>500
Flexural strength	kg/cm ²	1,200	350
Flexural modulus	kg/cm ²	30,000	8,000
Impact strength (notched)	kg-cm/cm	6.0	12
Melting point	°C	255	132
Heat deflection temperature*	°C	75	50

* At 18.6 kg/cm² fiber stress

Table 2. Properties of Molybdenum disulfide powder

pv limit kg/cm ² m/sec	heat-resistant °C	pressure-resistant kg/cm ²	coefficient of friction
940	-193~ +450	29,000	0.03

Table 3. Properties of specimen

Materials	NYLON/ MoS ₂ composite		HDPE/ MoS ₂ composite	
	NYLON	MoS ₂	HDPE	MoS ₂
Density*	1.162	1.1981	0.9625	1.0082
Hardness*	106	108	52	56

* g/cm³

** Rockwell, R-Scale

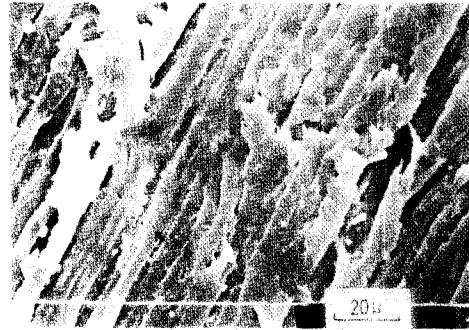


Fig. 1. Scanning electron micrograph of nylon/MoS₂ composite surface worn against grade 600 abrasive paper.

2-2. 시편 제조

Nylon 66는 dry oven에서 100°C로 48시간 동안, 그리고 vacuum oven에서 24시간 동안 건조시킨 후 사용하였고 MoS₂는 80°C dry oven에서 수분을 제거하였다. 건조된 nylon 66과 HDPE는 무게비 5%의 MoS₂와 twin screw compounding machine을 사용하여 혼합하였고 혼합된 pellet 형태의 혼합물은 적당한 온도에서 150 kg/cm²의 압력으로 hot pressing한 뒤, 지름 6mm, 길이 10mm의 모양의 시편으로 가공하였다. 이와같이 가공된 pin 모양의 시편은 실험에 임하기 전에 steel disc와의 접촉을 일정하고 균일하게 하기 위하여 grade 600의 abrasive paper로 시편의 접촉표면을 갈아냈으며 ethyl alcohol로 세척한 후 desiccator에 보관하였다. 이때 grade 600 abrasive paper로 갈아낸 시편표면의 전형적인 모양을 Fig.1에 나타냈으며 이와같이 하여 만든 각 시편의 밀도와 경도는 Table 3과 같다.

3-3. 실험장치

마찰과 마모는 Fig.2와 같이 pin-on-disc 마찰, 마모 측정기기로 측정하였다. 운동속도는 disc 표면의 track 지름과 disc의 분당 회전수에 의해 결정되었으며, disc의 회전은 모터에 부착된 속도조절박스에 의해 조절되었다. 운동거리는 5km로 고정시킴으로써 운동속도에 따라 최고 6시간, 최소 1시간 30분의 운동기간(sliding duration)을 설정하였다.

Disc는 grade 600 abrasive paper로 회전방향에 따라 마모시킨 AISI 52100 steel을 채택하였으며, 이때의 표면조도는 Taylor-Hobson의 Talysurf 6로 측정된 결과 Ra=0.09 μm의 값을 나타내었다. 이와같이 준비된 steel disc는 ethyl alcohol을 사용하여 초음파

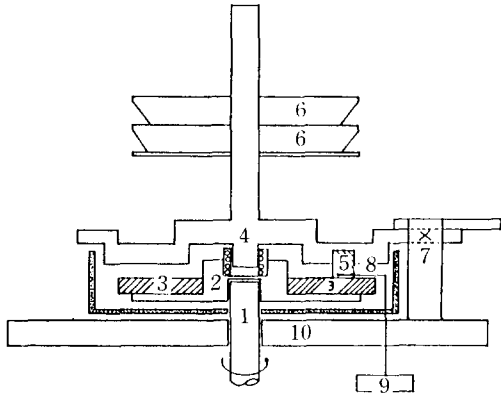


Fig. 2. Schematic diagram of three pin-on-disc wear machine; 1, drive shaft; 2, lower carrier; 3, disc; 4, upper carrier; 5, specimen; 6, weights; 7, device for measuring friction; 8, thermocouple; 9, temperature indicator; 10, platform.

세척기로 세척 불순물을 제거하고 증류수로 세척한 뒤 desiccator에 보관하였다.

시편의 접촉면 온도는 접촉부위에서 약 2mm 떨어진 곳에 구멍을 뚫고 열전대를 삽입하여 측정하였으며 마찰계수는 strain gauge로 관측하였다. 측정 완료 후의 시편표면 및 disc 표면은 optical microscope와 scanning electron microscope (SEM)을 사용하여 관찰하였고, SEM 관찰시에는 금(Au)으로 coating 시킨 뒤 관찰하였다.

모든 실험은 20±2°C의 온도와 50±5%의 상대습도 하에서 실시되었으며 윤활제 사용없이 dry condition에서 이루어졌다.

3. 결과 및 고찰

Adhesive wear는 adhesion이 국부접촉응력(localized contact stress)의 크기 및 분포에 따라 모든 마모과정에서 발생되기 때문에 단일한 마모역학으로 설명할 수는 없으나 고분자 물질이 매끈한 금속표면과 같은 재료와 마찰운동을 반복적으로 할 때의 주요한 마모역학은 adhesion과 transfer이다. 이때 specific wear rate는 최초 “running-in”하고 난 다음에는 거의 일정한 값을 가지며 그때 마찰포면들은 평형상태, 또는 정상상태에 도달하였다고 가정할 수 있다[13].

Specific wear rate ω_s 는 다음과 같은 식에 의해서 계산된다[14, 15].

$$\omega_s = \frac{\Delta M / (\rho AS)}{\rho} = \frac{\Delta M}{\rho SL}$$

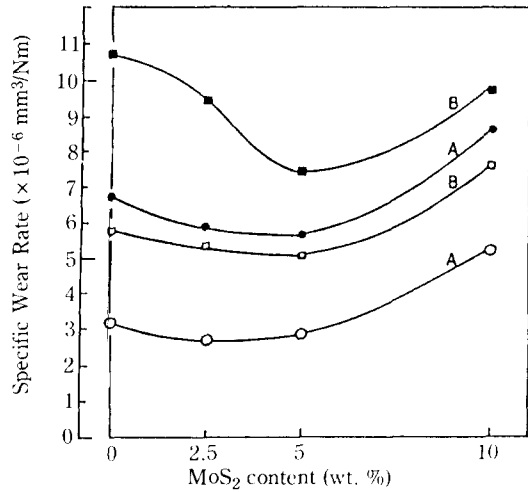


Fig. 3. Variation in specific wear rate with MoS₂ content at various sliding conditions; A, 0.25 m/s; ●, 2.5 kgf; ○, 1.0kgf; B, 1.0 m/s; ■, 2.5kgf; □, 1.0kgf.

여기서 ΔM 은 마모에 의해 손실된 무게로써 분 실험에서는 0.01 mg 까지 측정되었고 A는 접촉면적, S는 운동거리(sliding distance)이며 P는 넓이당 하중의 압력이다. 또한 ρ 는 시편의 밀도이다.

마모율을 감소시키는 최적의 MoS₂ 함유량을 알기 위해서 여러 운동조건에서 2.5 wt. %, 5 wt. %, 그리고 10 wt. %의 MoS₂를 충전시킨 nylon의 specific wear rate를 측정된 결과, Fig.3과 같았다. 대체적으로 2.5-5 wt.%의 MoS₂가 첨가되었을 경우 가장 낮은 마모율을 나타내었으며, 10 wt.%의 MoS₂가 충전된 nylon은 과다한 MoS₂ 사이에서 응집이 발생하여 이렇게 응집된 MoS₂ 입자들 주위로 응력이 집중되어 깨어지기 쉬운 재료에서 발생하는 Crack[16]이 나타났

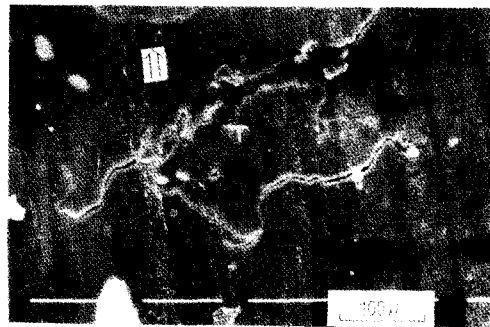


Fig. 4. Scanning electron micrograph of worn surface of 10 wt.% MoS₂ filled nylon; sliding velocity, 0.5m/s; load 2.5 kgf. (The arrow indicates the sliding direction).

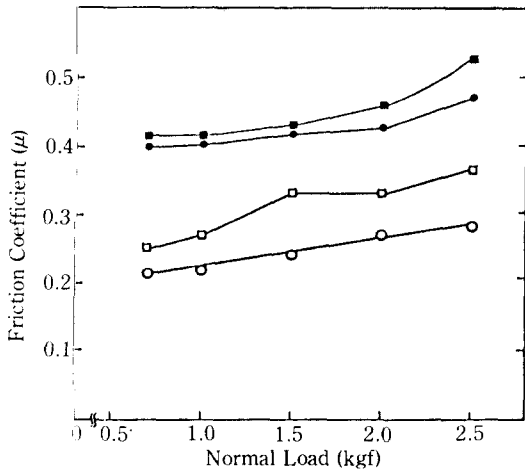


Fig. 5. Variation in friction coefficient with normal load; ○, 0.25m/s, ●, 1.0m/s, nylon; □, 0.25m/s, ■, 1.0m/s, nylon/MoS₂.

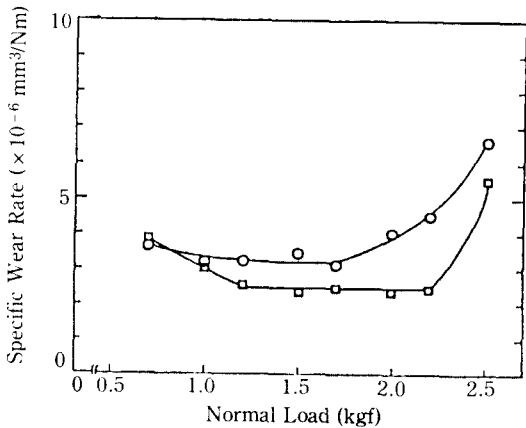


Fig. 6. Variation in specific wear rate with normal load at 0.25 m/s sliding speed; □, nylon/MoS₂; ○, nylon.

며(Fig.4) 따라서 높은 마모율을 나타내었다.

Fig.5는 서로 다른 운동조건에서의 nylon과 5 wt.% MoS₂-nylon의 마찰계수를 하중의 변화에 따라 나타낸 것으로서 모든 조건에서 하중 증가에 따라 마찰계수는 증가하고 있으며 순수한 nylon은 운동속도를 4배로 증가시켰을 때 약 2배에 가까운 마찰계수의 증가를 보이고 있다. 따라서 PV 값(겉보기 압력(nominal pressure)과 속도의 곱)을 4배로 증가시켰을 때의 마찰계수는 2배로 증가됨을 알 수 있었으며, nylon/MoS₂ 복합재료의 경우는 같은 운동조건하에서 순수한 nylon에 비해 높은 마찰계수를 나타내었고, 높은 속도에서의 마찰계수의 차이는 낮은 속도에 비하여 감소하

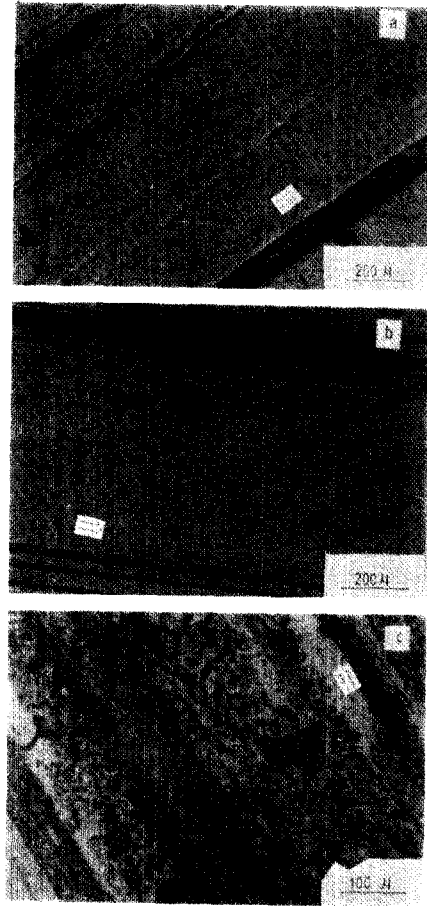


Fig. 7. Optical micrographs of worn surface of 5 wt.% MoS₂ filled nylon at various normal loads (speed 0.25 m/s); (a), 1.0 kgf; (b), 1.5 kgf; (c), 2.5 kgf. (The arrow indicates the sliding direction.)

였다.

Fig.6은 0.25 m/s에서 하중변화에 따른 specific wear rate의 변화로써 최초 저하중에서 감소하고 일정한 값을 유지하다가 고하중에서 급격히 증가하는 단계적 변화를 나타내고 있다. 또한 순수한 nylon의 경우는 5 wt.% MoS₂-nylon에 비하여 높은 wear rate를 가졌으며 특히 상대적으로 낮은 하중에서(약 1.7kgf) wear rate의 급격한 증가를 보이고 있다. 최초 하중이 증가하면서 마모율이 감소하는 것은 하중이 커짐에 따라 재료의 연화(softening)가 일어나게 되고 시편표면의 부드러운 asperity들에 대한 steel 표면의 반복되는 미끄럼 운동과 adhesion에 고분자 표면의 부분적인 melting 현상으로 윤활막이 형성되기 때문으로 판단되며, 높은 하중에서는 고분자 표면의 열적열화

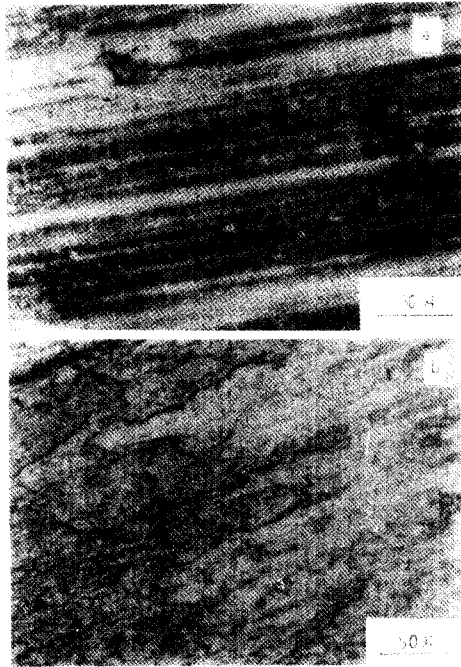


Fig. 8. Optical micrographs of frictional track under 2.2 kgf loads and 0.25 m/s sliding speeds; (a) nylon/MoS₂ composite; (b) nylon.

(thermal degradation)가 발생하여 마모율의 커다란 증가를 초래하는 것으로 생각된다[17].

마모율이 변하는 각 하중에서의 nylon/MoS₂의 마모표면(Fig.7)에서 보듯이 낮은 하중에서는 심한 ploughing 과 손상된 표면(Fig.7(a))을 나타내고 있으나 하중이 증가하면서 매끄러운 마모표면을 형성하였고 ploughing 에 의한 groove 의 크기도 작게 나타나 있다(Fig.7(b)). 그러나 높은 하중에 이르러 마모표면은 Fig.7(c)와 같은 열적열화현상이 지배적이었으며 마모율도 크게 나타났다. 따라서 MoS₂가 충전된 nylon 은 Fig.7(b)의 상태가 지속적으로 유지되는 것으로 보아 MoS₂에 의한 우선적인 전이에 따라 마모율이 감소하는 것으로 생각되며, 약 20-40%의 마모율의 감소를 가져왔다.

이러한 현상은 전이막에 의해서도 관찰될 수 있었으며, 낮은 속도로 인하여 전체적으로 빈약한 전이막을 형성하였으나 nylon/MoS₂ 복합재료의 전이막은 미끄럼 방향에 따라 비교적 균일한 형상을 하고 있으며 (Fig.8 (a)), 순수한 nylon 의 전이막은(Fig.8(b)) 덩어리가진 상태로 다량이 steel disc 표면에 전이되어 있음을 볼 수 있었다.

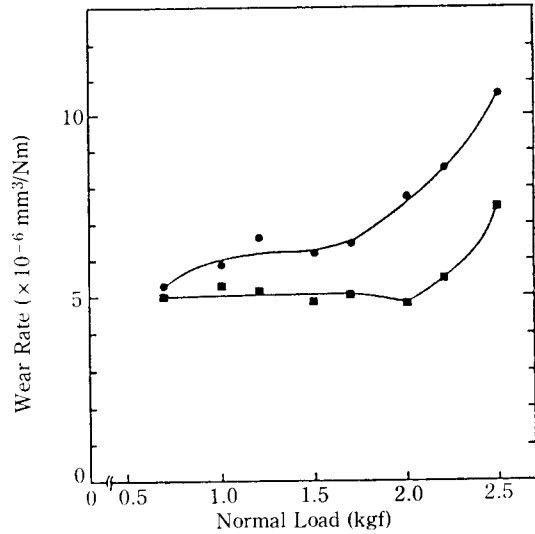


Fig. 9. Variation in specific wear rate with normal load at 1.0 m/s sliding speeds; ■, nylon/MoS₂ composite; ●, nylon.

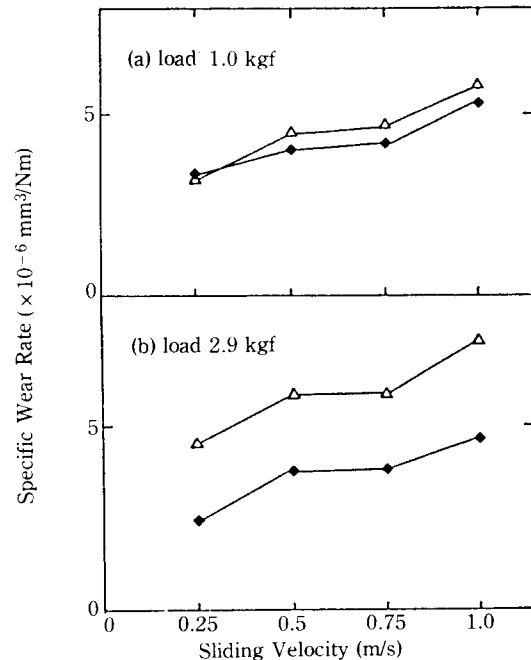


Fig. 10. Variation in specific wear rate with sliding speed at various normal loads; ◆, nylon/MoS₂ composites; △, nylon.

운동조건을 1.0m/s로 증가시켰을 때의 specific wear rate 를 Fig.9에 나타내었다. 0.25 m/s의 속도인 때와 마찬가지로 MoS₂의 첨가는 nylon의 마모율을

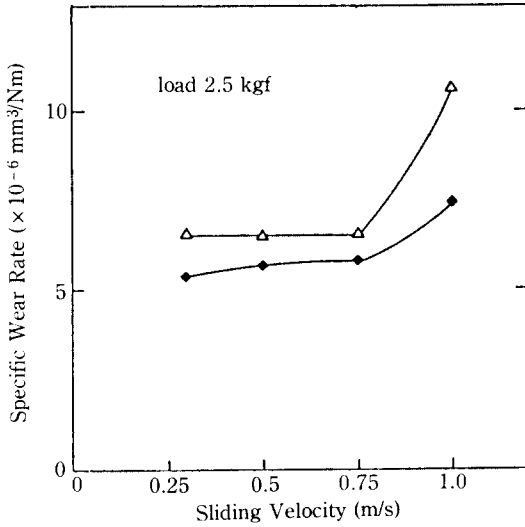


Fig. 11. Variation in specific wear rate with sliding speed at 2.5 kgf loads; ◆, nylon/MoS₂ composite; △, nylon.

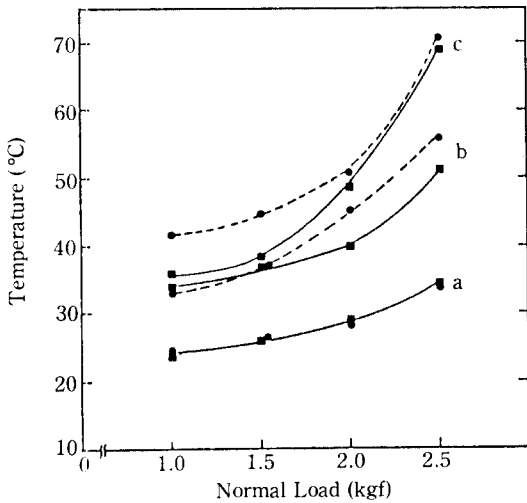


Fig. 12. Temperature vs. normal load data at various sliding speeds; A, 0.25 m/s; B, 0.75 m/s; C, 1.0 m/s; ● nylon; ■, nylon/MoS₂ composite.

감소시켰으며 높은 하중에서 마모율의 급격한 증가를 나타내었으나 최초 낮은 하중에서 감소하는 현상은 보이지 않고 있다. 또한 낮은 속도에서와 같이 순수한 nylon은 약 1.7 kgf의 하중에서부터 마모율이 급격하게 증가하기 시작한 반면 nylon/MoS₂ 복합재료는 2.0 kgf의 하중 이후부터 높은 마모율을 나타내었다.

속도변화에 따른 specific wear rate는 속도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다(Fig.10). 그러나

MoS₂ 충전에 따른 마모율의 감소는 낮은 하중에서 그 효과가 적었으며(Fig.10(a)) 하중이 증가함에 따라 마모율의 감소가 컸다(Fig.10(b)). 그러나 Fig.11과 같이 매우 높은 하중에서의 속도변화에 따른 마모율의 변화는 속도의 증가에 관계없이 일정한 값을 유지하다가 1.0 m/s에서 급격한 변이를 나타내고 있다.

Tanaka와 Uchitama[18]는 polyethylene과 그 밖의 열가소성 수지에 대한 속도변화에 따른 wear rate의 연구에서 wear rate의 급격한 증가는 운동표면으로부터 고분자의 총체적인 분출(gross extrusion)을 이룰만한 두께와 점도의 표면층을 가질 때 이루어지며 이것은 온도와 관계된다고 하였다. Fig.12는 하중과 속도변화에 따른 온도변화를 나타낸 것으로서 낮은 속도에서는 하중의 증가에 따라 서서히 온도가 증가하였으나 높은 속도에서는 2.5 kgf의 하중에서 커다란 증가를 나타냈다. 이러한 온도증가는 마모율의 증가를 초래하였으며 일반적으로 마모율과 온도는 비례관계에 있다고 할 수 있다.

Fig.13은 속도와 하중이 각각 1.0 m/s, 1.5 kgf에서의 마모표면과 전이막을 나타낸 optical micrograph로서 PV 값이 낮은 운동조건(Fig.7, 8)에 비하여 전체 마모표면에 걸쳐 열적열화현상이 심하게 나타났으며(Fig.13(a), (c)) 순수 nylon의 전이막 형성은 매우 두껍고 불균일하였으나 nylon/MoS₂의 전이막은 균일하게 분포되어 있었다. 마모표면의 더욱 많아진 열적열화현상은 속도증가에 따른 마찰열에 기인되며 이러한 마찰열은 재료의 shear rate를 증가시키고 더욱 큰 마모율을 나타내는 것이다[19].

고밀도 polyethylene(HDPE)은 그의 분자적인 특성으로 인하여 낮은 마찰계수와 마모행동을 나타낸다. Fig.14에 HDPE 및 5 wt.% MoS₂-HDPE의 마찰계수를 나타내었다. 순수한 HDPE는 하중이 증가함에 따라 약간씩 증가하였으나 HDPE/MoS₂의 마찰계수는 거의 일정한 값을 나타내었다. 또한 속도가 증가함에 따라서는 모두 증가하는 경향을 나타냈으며, HDPE에 비해 HDPE/MoS₂는 높은 값을 가지면서 변화하였다.

낮은 속도(0.25 m/s)에서의 specific wear rate는 HDPE에 비해 HDPE/MoS₂ 복합재료가 낮은 값으로 변화하였고 특히 하중의 변화에 따라 거의 일정한 마모율을 나타내었다. 그러나 속도가 증가하여 1.0 m/s에서는 HDPE가 HDPE/MoS₂ 복합재료보다 낮은 마모율을 나타내었으며, 하중이 증가함에 따라서 전체적인 마모율은 감소하는 경향을 보였다(Fig.15). 이와같

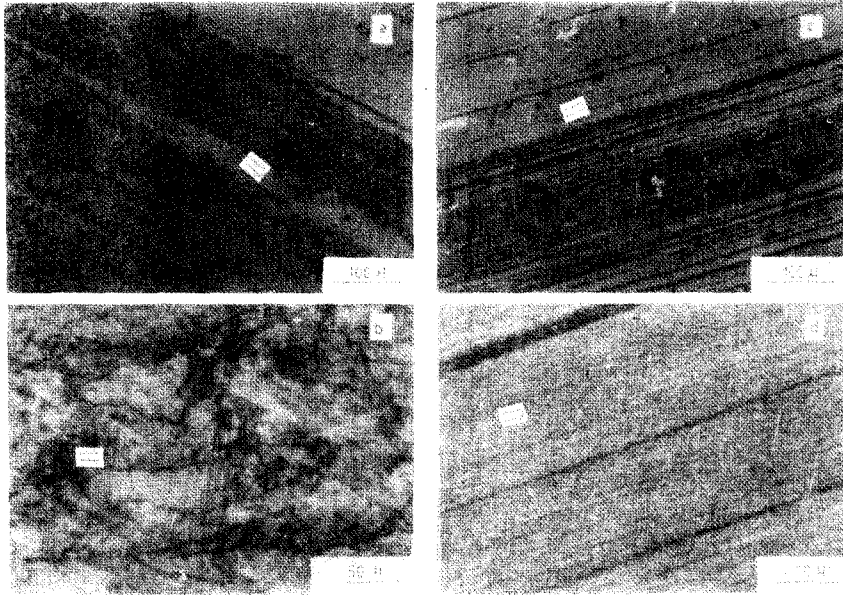


Fig. 13. Optical micrographs of worn surface and frictional tracks under 1.0 m/s speeds, 1.5 kgf loads; (a), (b) nylon; (c), (d), nylon/MoS₂ composite. (The arrow indicates the sliding direction.)

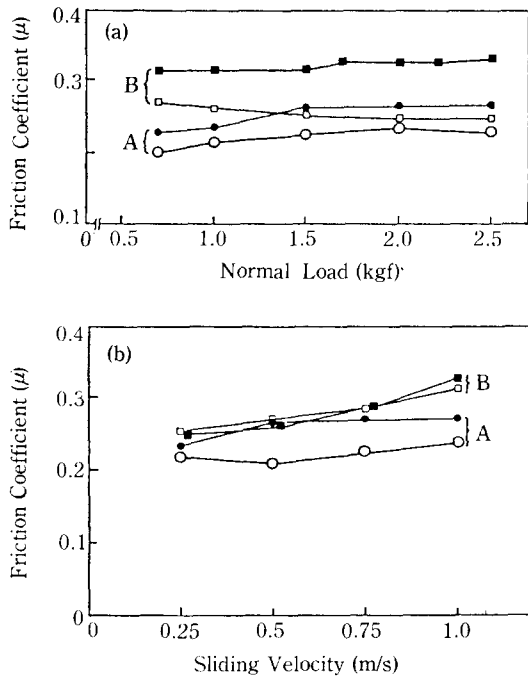


Fig. 14. Variation in friction coefficient with (a) normal load and (b) sliding speed; A, nylon; B, nylon/MoS₂; (a), ○, ● 0.25 m/s speeds □, ■ 1.0 m/s speeds; (b) ○, ● 1.0 kgf loads; □, ■ 2.5 kgf loads

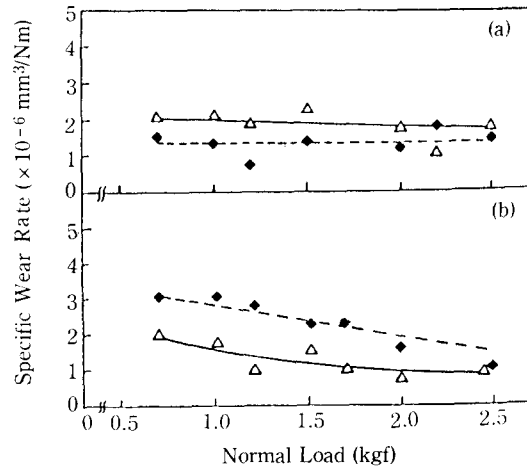


Fig. 15. Variation in specific wear rate with normal load; (a) 0.25 m/s sliding speeds; (b) 1.0 m/s sliding speeds; ◆, nylon/MoS₂ composite; Δ, nylon.

이 높은 속도에서 하중에 따라 마모율이 감소하는 것은, 높은 속도에서 재료의 마찰운동은 상대적으로 표면 자체의 마찰운동으로 이루어지고 하중증가에 따라 표면의 연화가 커지면서 부분적인 melting 현상이 일어나며 이러한 melting 부위가 윤활작용을 하여 마모율이 감소하는 것으로 생각된다.

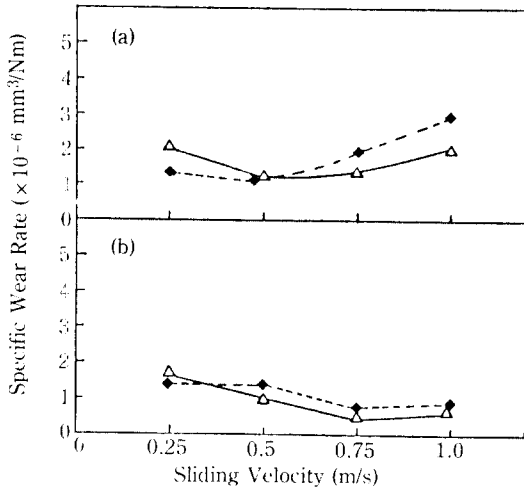


Fig. 16. Variation in specific wear rate with sliding speed: (a) 1.0 kgf loads; (b) 2.5 kgf loads; ◆, nylon/MoS₂ composite; △, nylon.

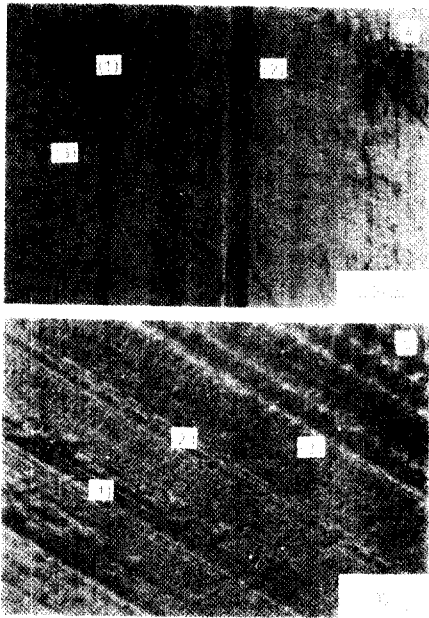


Fig. 17. Optical micrographs of worn surface of HDPE; (a) 0.25 m/s, 1.5 kgf; (b) 1.0 m/s, 2.0 kgf. Note features ① wear groove, ② pulls and smears and ③ crescents.

한편 1.0 kgf의 낮은 하중에서 속도에 따른 마모율의 변화는 오목한 모양으로 변화하였으며, 0.5 m/s의 속도를 경계로 하여 HDPE/MoS₂의 마모율이 더 크게 나타났다. 따라서 HDPE에 MoS₂의 첨가는 언제나 마모특성을 향상시키는 것은 아니었으며, 오히려 마모율의

증가를 초래한 것이 지배적이었다(Fig.15, 16).

Brown[20]은 마모에 의해 나타나는 polyethylene의 표면형상은 wear grooves, pulls와 smears, 그리고 초승달 모양(crescent) 등의 3가지로 특징 지을 수 있으며 wear groove와 pull 그리고 smear는 운동방향과 대체로 일치하는 방향에 따라 발생하며 초승달 모양은 운동방향에 수직으로 나타난다고 하였다. 본 실험에서도 HDPE의 경우 Fig.17과 같이 Brown에 의해 제시된 모양의 마모표면을 나타내었으나, HDPE/MoS₂의 경우는 이러한 형상을 발견할 수 없었다.

시편의 표면온도는 nylon과 같이 하중에 따라 증가하였으나 그 값이 매우 낮았고 마모율과도 아무런 관계를 찾을 수가 없었다.

4. 결 론

Nylon의 wear rate는 5 wt.% MoS₂의 충전에 의하여 감소되었으며, 이것은 상대접촉면으로의 MoS₂의 우선적이고 균일한 전이에 의해 설명된다. 그러나 마찰계수는 증가하였다.

Nylon 및 nylon/MoS₂ 복합재료의 마모율은 하중과 속도가 증가함에 따라 대체적으로 증가하였으며, 고하중에서의 마모율은 표면 용해 및 열적열화현상으로 설명된다.

HDPE의 경우 MoS₂의 첨가는 항상 마모특성을 향상시키는 것은 아니었으며, 오히려 마모율의 증가현상이 지배적이었다.

HDPE는 MoS₂의 충전에 관계없이 nylon에 비하여 낮은 마찰계수 및 마모율을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목격기초연구과제인 “고강도 플라스틱섬유의 합성 및 성질에 관한 연구”의 세부 과제 “복합재료의 특성연구”의 일부로 수행된 것으로서 이에 그 재정적 지원에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. J.K. Lancaster, Polymer-based bearing materials. The role of fiber and fiber reinforcement, *Tribology* **5**(16), 249, (1972).
2. T.D. Graham and G.H. West, A review of recent publication on the use of plastic bearing mate-

- rials, *Plastics and Polymers*, **42**, 17, (1974).
3. K.J. Brown, J.R. Atkinson, D. Dowson and V. Wright, The wear of Ultrahigh molecular weight polyethylene and a preliminary study of its relation to the *in-vivo* behaviour of replacement of hip joints, *Wear* **40**, 225 (1976).
 4. M.O.W. Richardson, Chemical aspect of wear processes in polymers-a review, *Wear* **17**, 89 (1971).
 5. I. Sviridyonok, V.A. Smurgov and V.G. Savking, A study of transfer in frictional interaction of polymers, *Wear* **25**, 301 (1973).
 6. K. Tanaka and T. Miyatake, Studies on the friction and transfer of semicrystalline polymers, *Wear* **41**, 383 (1977).
 7. M. Clerico, A study of the friction and wear of nylon against metal, *Wear* **13**, 183 (1969).
 8. R.C. Browsers, W.C. Clinton and W.A. Zisman, Frictional behavior of polyethylene, Polytetrafluoroethylene, and haogenated derivatives, *Lub. Eng.*, **9**, 204 (1953).
 9. K.R. Makinson and D. Tabor, The friction and transfer of PTFE, *Pro. Roy. Soc.*, **A281**, 46 (1964).
 10. R.P. Steijn, The sliding surface of polytetrafluoroethylene: an investigation with the electron microscope, *Wear* **12**, 193 (1968).
 11. B.J. Briscoe, A.K. Pogodin and D. Tabor, The friction and wear of high density polyethylene: the action of lead and copper oxide fillers, *Wear* **27**, 19 (1974).
 12. K. Furber, J.R. Atkinson and D. Dowson, Wear mechanisms for nylon 66, Paper 14, 3rd Leeds-Lyon Symposium on Leeds, Sept. (1976).
 13. D.C. Evans and J.K. Lancaster, Treatise on materials science and technology Vol. 13.
 14. K. Friedrich, Design Guide, (1983) (center for composites materials Univ. of Delaware, U.S.A.).
 15. C. Lhymn, K.E. Tempelmeyer and P.K. Davis, Abrasive wear of short fiber composites, *Composites* **16**, 127 (1985).
 16. D.A. Rigney and J.P. Hirth, Plastic deformation and sliding of metals, *Wear* **53**, 345 (1979).
 17. C. Lhymn, Effect of normal load on the specific wear rate of fibrous composites, *Wear* **120**, 1 (1987).
 18. K. Tanaka and Y. Uchitama, In Advances in Polymer Friction and Wear, (L.H. Lee, ed.) Polymer science and technology Symposia Series, Vol. 5B, p.499, Plenum Press, New York (1974).
 19. B.J. Briscoe and D. Tabor, Friction and wear of polymers, in Polymer surfaces, D.T. Clark and W.J. Feast (ed.), A Wiley-interscience pub. chap. 1 (1978).
 20. K.J. Brown, A study of the wear polyethylene, Ph.D Thesis, The university of Leeds. (1975).