

PMMA (Poly Methyl Methacrylate) 박막 코팅 층의 마찰 및 마멸 거동

강석하* · 김용석#

(2004년 10월 6일 접수)

Tribological Behavior of Thin PMMA (Poly Methyl Methacrylate) Coating Layers

S. H. Kang and Y. S. Kim

Abstract

Effects of sliding speed, applied load, and thickness of PMMA (Poly Methyl Methacrylate) coating layers on their dry sliding frictional and wear behavior were investigated. Sliding wear tests were carried out using a pin-on-disk wear tester. The PMMA layer was coated on Si wafer by a spin coating process with two different thicknesses, 1.5 μ m and 0.8 μ m. AISI 52100 bearing steel balls were used as a counterpart of the PMMA coating during the wear. Normal applied load and sliding speed were varied. Wear mechanisms of the coatings were investigated by examining worn surfaces using an SEM. Friction coefficient of the coatings decreased with the increase of the applied load. Both adhesion and deformation of the coating determined the coefficient. The thicker PMMA layer with the thickness of 1.5 μ m showed lower friction coefficient than the thinner layer under most test conditions. Effects of sliding speed and applied load on the frictional behavior were varied depending on the thickness of the coating layer.

Key Words: PMMA, Thin Coat, Friction, Sliding Wear, Coat Thickness, Ploughing, Adhesion

1. 서 론

폴리머(polymer)는 경량성, 광학성, 가공의 편리성, 화학적 안정성 등의 이점을 지녀 산업 전반에 널리 이용된다. 그러나, 폴리머의 낮은 내마멸성은 폴리머의 적용 분야 및 사용 수명을 매우 제한하고, 이에 따라, 폴리머의 마찰 및 마멸 특성 연구는 폴리머의 사용 범위를 넓히고, 그 사용 수명을 높이는 측면에서 필수적이다.

폴리머의 마찰 및 마멸 특성은 이미 많은 연구자들에 의해 연구, 보고되었는데⁽¹⁻⁸⁾, 그 특성은 온도 및 습도 등의 환경적 요소, 그리고 적용 하

중 및 미끄럼속도 등 마멸 조건 요소에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

C. Gauthier, B.J. Briscoe 등은 PMMA를 포함한 여러 폴리머의 긁힘시험(scratch test)을 행하고, 폴리머의 긁힘 경도(scratch hardness)가 긁힘 속도의 변화에 따라 변화하는 것을 보이고, 이를 폴리머의 점탄성 거동과 연계시켜 해석하였다.⁽²⁻⁵⁾ 그들은 또한 변형율에 따른 PMMA의 변형 거동을 분석하고 각 마멸 조건에서의 마멸 지도(wear map)를 도출해 내었다. 그러나 이들의 연구 결과는 일회 긁힘 시험에 국한되었으므로, 폴리머가 반복적인 변형을 받으면서 나타내는 마멸 거동은

* 국민대학교 신소재공학부

교신저자: (ykim@kookmin.ac.kr)

예측할 수 없는 문제점을 지닌다. 또한 연구에 사용된 PMMA는 벌크(bulk) 소재에 국한되었다. 최근 PMMA가 초 집적 저장재료로 활용될 가능성이 커짐에 따라, 수 nm 두께의 PMMA를 증착시킨 소재 연구가 활발하다.⁽⁶⁾

본 연구는 박막 PMMA 코팅 층의 마찰 및 마멸 거동을 규명하는 목적으로 수행되었다. 코팅 층의 두께, 적용하중을 변수로 마멸시험을 수행하였고, 마멸 시험에서의 반복적인 변형에 따른 마찰 및 마멸 거동의 분석에 중점을 두었다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 박막 PMMA 코팅 층은 분자량 350,000g/mol의 PMMA 분말을 톨루엔(toluene) 용매에 용해한 후, 2.5cm×2.5cm 크기의 Si 웨이퍼(wafer)에 스핀 코팅(spin coating) 방식으로 도포하여 제조되었다. 도포 후 코팅 층 내에 잔류하는 톨루엔은 120℃에서 24시간 진공 열처리하여 제거되었다. Si 웨이퍼 위에 도포된 PMMA 코팅 층의 두께를 변화시키기 위하여, 스핀 코우터(spin coater)의 RPM을 2500과 7000의 두 조건으로 달리 하였다. FESEM을 이용하여 측정된 이들 RPM에서 제조된 박막 PMMA 코팅 층의 두께는 각각 1.5μm와 0.8μm 이었다.

각 시편의 경도는 AFM을 이용한 긁힘 시험(scratch test)을 통하여 긁힘 경도(scratch hardness)로 측정하였다. 긁힘 경도는 다음의 식을 사용하여 산출하였다.

$$H_s = \frac{4F_n}{\pi d^2} \quad (1)$$

식에서 F_n 은 수직 하중, d 는 긁힘 폭을 나타낸다. AFM을 이용한 긁힘 시험 시 사용한 하중 및 미끄럼 속도는 각각 100nN 와 2μm/s 이었다. 1.5μm와 0.8μm 두께의 코팅 층에서의 긁힘 폭은 각각 27nm, 22nm로 측정되었고, 이에 따라 1.5μm와 0.8μm 두께 코팅 층의 긁힘 경도는 각각 1.75×10^9 MPa과 2.6×10^9 MPa로 계산되었다.

박막 PMMA 코팅 층의 미끄럼 마멸 시험은 pin-on-disk 형태의 마멸 시험기를 사용하여 상온 대기 중에서 실시 되었다. 마멸 상대재로는 지름 12.7mm의 AISI 52100 베어링강 구(ball)를 사용하였다. 마멸 시험 시 습도는 40~45%로, 시험 온도

는 20~25℃로 고정시켜, 마멸 시험 조건이 전 시편에 대하여 일정하도록 하였다. 코팅 층 위의 마멸 트랙 반경은 1cm로 고정시켰다. 미끄럼속도는 3.14cm/s와 12.56cm/s의 두 속도로 변화되어, 미끄럼속도에 따른 마멸 거동의 변화를 관찰하였다. 적용하중은 0.25, 0.5, 1N의 세 하중이 사용되었고, 마멸 거리는 반복적 변형에 따른 마멸 기구 분석을 위하여, 6.28cm에서 50cm까지 변화되었다. 시험된 시편의 마멸면을 SEM으로 관찰하여, 마멸 양상의 분석과 마멸 기구 규명에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 적용하중 및 미끄럼속도의 영향

Fig. 1은 적용하중과 미끄럼속도가 두께가 다른 PMMA 코팅 층의 마찰계수 변화에 미치는 영향을 나타낸다.

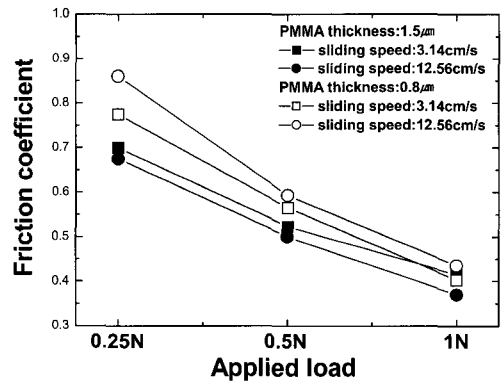


Fig. 1 Variation of friction coefficient of PMMA coating layers with different thickness as a function of applied loads and sliding speeds

시험된 전 하중에서, 상대적으로 더 얇은 0.8μm 두께의 코팅 층이 1.5μm 두께의 코팅 층에 비하여 더 높은 마찰계수를 나타내었다. 미끄럼 속도의 영향은 두 코팅 층에서 상반되게 나타났다. 0.8μm 두께 코팅 층에서는 빠른 미끄럼 속도(12.56cm/s)에서 마찰계수가 높은 반면, 1.5μm 두께 코팅 층에서는 낮은 미끄럼 속도(3.14cm/s)에서 마찰계수가 더 높게 측정되었다.

적용하중이 증가하면서 PMMA 코팅 층의 마찰계수는 코팅 층의 두께와 상관 없이 모두 감소하였다. 0.25N의 저 하중에서는 각 코팅 층의 마찰계

수가 마멸 시험 조건에 따라 큰 차이를 나타내었으나, 상대적으로 고 하중인 1N에서는 마멸 시험 조건에 따른 마찰계수 차이가 크지 않았다. 1.5 μ m 두께 코팅 층에서는 미끄럼속도가 증가하면서 마찰계수가 감소하였으나, 0.8 μ m 두께 코팅 층의 마찰계수는 미끄럼속도의 증가와 함께 증가하는 상반된 결과가 얻어졌다.

PMMA 코팅 층의 마찰계수는 적용하중이 증가함에 따라, 코팅 층의 두께 및 미끄럼 속도와 무관하게 감소하였는데, 하중 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 현상은 이전의 연구에서도 관찰되었다. B.H. Stuart는 하중에 따른 PEEK 폴리머의 마찰계수 변화를 연구하고, 임계하중인 100N까지는 마찰계수가 하중에 따라 감소하고 이후 다시 증가한다고 보고하였다.⁽⁷⁾

마찰계수는 적용하중에 대한 당김 힘(tangential force)의 비이고, 당김 힘은 표면 변형과 응착(adhesion)의 정도에 의해 결정된다. B.J. Briscoe 등은 응착이 폴리머의 마찰계수 변화에 미치는 영향을 최소화한 block-on-ring 형태의 마멸 시험을 통하여, 폴리머를 마멸시험할 때 발생하는 변형에 의한 당김 힘, F_{def} 의 변화를 다음과 같이 제안하였다.⁽⁸⁾

$$F_{def} = 0.17\beta W^{4/3} R^{-2/3} (1 - \nu^2)^{1/3} E^{-1/3} \quad (2)$$

식에서 β 는 상수, W 는 적용하중, R 은 링의 반경, ν 와 E 는 폴리머의 포아송 비와 탄성계수를 각각 나타낸다. 식 (2)는 마멸 시 변형에 따른 당김 힘은 $W^{4/3}$ 에 비례함을 보인다. 마찰계수는 당김 힘을 적용 하중으로 나눈 값이므로, 변형에 따른 마찰계수 μ_{def} 는 $W^{1/3}$ 에 비례한다.

응착에 따른 마찰계수는 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽⁸⁾

$$\mu_{ad} = \frac{A\tau}{L} \quad (3)$$

식에서 A 는 실제 접촉 면적, τ 는 접촉면에서의 평균 전단 강도, L 은 적용 하중을 나타낸다. 식 (3)은 응착에 따른 마찰계수가 상대재와 폴리머 간의 실제 접촉 면적 A 에 비례하는 것을 보이는데, Hertz 접촉 이론은 상대재가 구형일 때 기지와 상대재 간의 접촉 면적은 $W^{2/3}$ 에 비례하는 것으로 예측한다.⁽⁹⁾ 식 (2)와 (3)을 근거로, 하중에 따른

전체 마찰계수는 다음과 같은 식으로 나타내어 질 수 있다.

$$\mu = aW^{1/3} + bW^{-1/3} \quad (4)$$

식에서 a 와 b 는 마멸 시험 시 변형과 응착의 정도를 나타내는 상수로, 이들 상수는 소재의 기계적 성질, 마멸 조건, 마멸 기구, 마멸 계(system) 등의 영향을 받는다. 식 (4)는 폴리머의 변형에 따른 마찰계수는 하중이 증가함에 따라 증가하고, 응착에 따른 마찰계수는 하중 증가와 함께 감소하는 것을 나타낸다. 이에 따라, 변형과 응착 두 기구 영향의 합으로 나타내어지는 전체 마찰계수는, 응착이 주도하는 특정한 임계 하중까지는 하중에 따라 감소하고, 이후 변형의 영향이 커지면서 다시 증가하게 된다. 응착과 변형의 영향이 교차하는 임계 하중 값은 변형과 응착의 정도를 나타내는 상수 a, b 에 의해 결정된다. Fig. 1에서 보인대로 본 연구의 시험 조건 하에서는, 적용하중 증가에 따라 폴리머의 마찰 계수가 감소하였다. 이는 본 연구에 사용된 하중 범위가 임계 하중보다 낮았음을 시사한다.

Fig. 1에서 미끄럼 속도 12.56cm/s, 하중 1N의 조건 하에서 두께가 1.5 μ m인 PMMA 박막은 약 0.37의 마찰계수를 나타내었다. 이 같은 실험 조건에서 식 (4)는 $a+b=0.37$ 로 나타내어 질 수 있다. Fig 2는 $a+b=0.37$ 인 조건에서, 식 (4)를 이용하여 계산된 하중에 따른 마찰계수의 변화를 a 값이 0, 0.05, 0.185, 0.2 그리고 0.37인 경우에 대하여 나타낸 결과이다. 비교를 위하여 실험에서 측정된 마찰계수도 Fig. 2에 함께 나타내었다. Fig. 2에서 마찰계수의 하중 의존성은 a 값의 증가와 함께 변화하고 있다. 미끄럼 마멸 시에 변형이 마멸의 주 기구인 경우에는 마찰계수가 하중의 증가와 함께 증가하고, 응착이 주 마멸 기구이면 하중 증가에 따라 마찰계수는 감소한다. 실제 실험에서 획득된 마찰계수를 계산 결과와 비교한 결과, 응착이 주 마멸 기구인 $a=0$ 의 경우의 계산치가 실험 결과와 가장 유사하였다. 이 같은 결과는 본 연구의 실험 조건에서, PMMA 박막 코팅 층의 미끄럼 마멸 마찰계수는 변형 보다는 응착의 영향을 더 받으며 변화하였음을 나타낸다. 한편 0.25N과 0.5N에서의 실험 결과와 식 (4)에 의한 예측치가 정확히 일치하지 않는 것은, 변형과 응착의 정도를 나타내는 a, b 상수 값이 하중에 따라 달라진다는 것을 시사

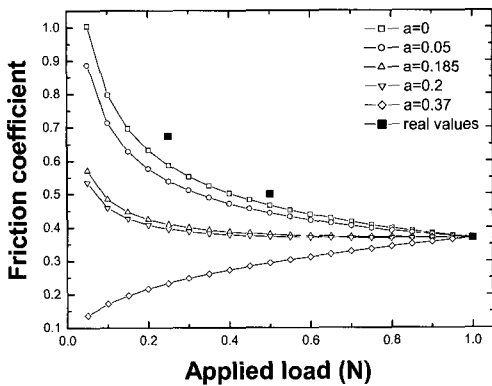


Fig. 2 Variation of friction coefficient of the 1.5 μ m thick PMMA coating as a function of applied loads; the coefficients were calculated following the Eqn. (4) under the condition of the sliding speed of 12.56cm/sec

한다.

1 N의 하중으로 마멸 시험된 시편의 마멸면을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

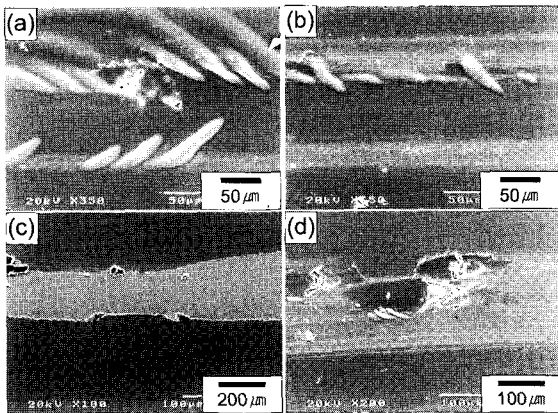


Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of the PMMA coating layers with different thicknesses 1.5 μ m (a, b) and 0.8 μ m (c, d) and with different sliding speeds 3.14cm/s (a, c) and 12.56cm/s (b, d)

Fig. 3 (a), (b)는 1.5 μ m 두께의 PMMA 코팅 층을 각각 3.14cm/s와 12.56cm/s의 미끄럼 속도로 마멸 시험한 후 관찰한 마멸면이다. Fig. 3 (a)는 Fig. 3 (b)

에 비해 더 격렬한 마멸 양상을 나타내고 있다. 이는 점탄성 거동을 보이는 PMMA가 3.14cm/s의 속도로 마멸 시험될 때 12.56cm/s의 미끄럼 속도로 시험될 때에 비해 더 많은 시간 동안 변형을 받게 되고, 이에 따라 더 격렬한 마멸 양상을 나타낸 것으로 설명된다. 이와 같은 변형량의 차이로 인하여 1.5 μ m 두께 PMMA 코팅 층은 3.14 cm/s의 낮은 미끄럼 속도에서 또한 더 높은 마찰계수를 나타낸 것으로 생각된다. 0.8 μ m 두께의 PMMA 코팅 층을 3.14cm/s와 12.56cm/s의 미끄럼 속도로 마멸 시험하고 관찰한 마멸면인 Fig. 3 (c)와 (d)에서, Fig. 3 (c)는 격렬한 마멸에 의해 PMMA 코팅 층이 벗겨져 나가고, 기지 Si이 드러난 양상을 보인다. Fig. 3 (d) 또한, 상대재에 의해 PMMA 코팅 층이 밀려나간 듯한 격렬마멸 양상의 마멸면을 보이지만, Fig. 3 (d)에서는 PMMA 코팅 층의 박리는 관찰되지 않는다. 이 같은 마멸면은, 1.5 μ m 두께의 PMMA 코팅 층에서와 같이, 0.8 μ m 두께의 PMMA 코팅 층에서도 낮은 미끄럼 속도에서 더 격렬한 마멸이 발생하였음을 보인다. 그러나, 이 경우에는 PMMA 코팅 층이 박리되면서 상대적으로 낮은 마찰계수가 측정되었다.

3.2 코팅 층 두께에 따른 마찰 거동 분석

0.8 μ m 두께의 코팅 층은 1.5 μ m 두께의 코팅 층과 비교하여, 대부분의 마멸 조건에서 더 높은 마찰계수를 나타내었다. 이 같은 거동은 미끄럼 속도의 영향에서와 같이 시편 두께에 따라 달라지는 변형량의 정도로 설명될 수 있다. 1.5 μ m 두께와 0.8 μ m 두께, 두 PMMA 박막을 12.56cm/s의 미끄럼 속도로 마멸 시험 한 경우, 두 시편 모두에서 적용 하중과 관계 없이 코팅 층이 박리되며 Si 기지가 드러나는 현상이 관찰되지 않았다. Fig. 1에 나타난 하중에 따른 두 코팅 층의 마찰계수의 변화를 비교해 보면, 두 코팅 층의 마찰계수 차이는 초기 저 하중에서는 약 0.2 이었고, 이후 적용하중이 증가함에 따라 그 차이가 점점 감소하여, 본 실험 중에 사용된 최대 하중인 1N에서는 마찰계수 차이가 약 0.06 정도에 불과하였다. 또한 SEM으로 관찰한, 1N 하중으로 시험된 마멸면, Fig. 3(b)와 (d)를 비교하여 보면, 0.8 μ m 두께 코팅 층에서 마멸 중 더 많은 변형이 발생하였음을 볼 수 있고, 1.5 μ m 두께 코팅 층 마멸면에서는 마멸 중에 생성된 마멸 입자를 관찰할 수 있다.

상대적으로 더 높은 경도를 나타낸 0.8 μ m 두께

의 코팅 층에서 마멸 중 상대재와 기지 간의 접촉 면적은 1.5 μm 코팅 층에 비해 적었을 것으로 생각된다. 상대재와 기지 간의 접촉 면적이 작으면, 식 (3)에 의해 응착에 의한 마찰계수가 작아지고, 결국 0.8 μm 두께 코팅 층의 마찰계수에는, Fig. 3 (d)에서 확인되는 바와 같이, 코팅 층의 변형이 더 큰 영향을 끼쳤음을 알 수 있다. 0.8 μm 두께의 코팅 층이 1.5 μm 두께 코팅 층에 비해 더 높은 마찰계수를 나타낸 것은, 0.8 μm 두께의 코팅 층의 상대적으로 더 높은 경도로 인하여 감소된 접촉면적에 기인한 응착 마찰의 감소와 코팅 층의 변형에 의한 마찰 계수의 증가가 복합적으로 영향을 미치며 나타난 현상으로 생각된다. 높은 적용 하중 영역에서 두 코팅 층 마찰계수의 차이가 줄어드는 것은 하중이 증가하면서 1.5 μm 두께 코팅 층에서도 마멸 중 변형이 마찰 계수에 미치는 영향이 더 커진 때문으로 설명될 수 있다. 1N의 하중 하에서 0.8 μm 두께와 1.5 μm 두께, 두 코팅 층의 마찰계수는 12.56cm/s의 미끄럼 속도로 마멸된 경우를 제외하고는 큰 차이를 보이지 않았다. Fig. 3 (b)와 (d)가 보이는 것처럼, 12.56cm/s의 미끄럼 속도로 마멸된, 1.5 μm 두께 코팅 층의 마멸면에서는 코팅 층의 변형과 함께 마멸 입자가 관찰되었으나, 0.8 μm 두께 코팅 층의 마멸면에서는 마멸 입자를 수반하지 않는 코팅 층의 변형만이 관찰되었다. 이와 같은 SEM 관찰 결과는, 1N의 고하중, 12.56cm/s의 빠른 미끄럼 속도 하에서도 0.8 μm 두께의 코팅 층이 더 높은 마찰계수를 나타내는 것은, 이 같은 마멸 조건에서도 0.8 μm 두께 코팅 층에서 여전히 더 많은 변형이 발생한 때문이었음을 뒷받침한다.

3.3 마멸면 변형율의 변화와 마멸 지도

마멸 시험 중 마멸 거리에 따라 마멸면에서 발생하는 변형율을 계산하였고, 그 방법을 개략적으로 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4 (a)는 원추형 팁(tip)을 사용한 일반적인 굽힘 시험 시에, 표면에서의 변형률을 계산하는 방법을 보인다. Fig. 4 (a)에 나타난 각도 β 는 굽힘 시험 중 굽힘 팁(tip)과 굽힘 시험 표면 간의 각도를 나타낸다. 이와 같은 조건 하에서 변형률은 $0.2\tan\beta$ 의 값을 갖게 된다.

본 연구에서 사용된 PMMA 코팅 층의 마멸 상대재는 강구(steel ball)이었으므로, 본 연구에서는 Fig. 4 (b)와 같은 방법으로 각도 β 를 정의 하였다. Fig. 4 (b)에서, Fig. 4 (a)와 같은 방식으로 상대제인

강 구와 마멸 면과의 각도를 정의하면, 그 각은 각 $\angle dbc$ (β') 이어야 한다. 그러나, 본 연구에서는 마멸 면에서의 변형율이 마멸 거리와 함께 반복 변형을 받으면서 증가하였으므로, 시험된 마멸 거리에서의 평균 변형율을 계산하였고, 이에 따라 각 $\angle dbc$ (β') 대신에 각 $\angle dac$ 를 β 로 계산하였다. 이와 같은 방법으로, 여러 조건으로 시험된 0.8 μm 두께 코팅 층 마멸면에서의 변형율을 계산하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

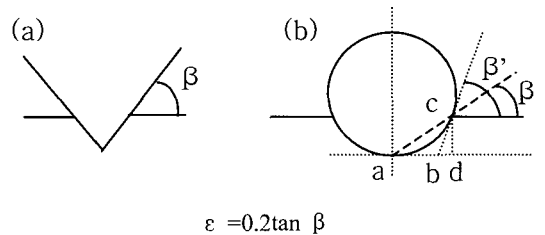


Fig. 4 A schematic diagram of the surface-strain-measuring during a sliding wear test

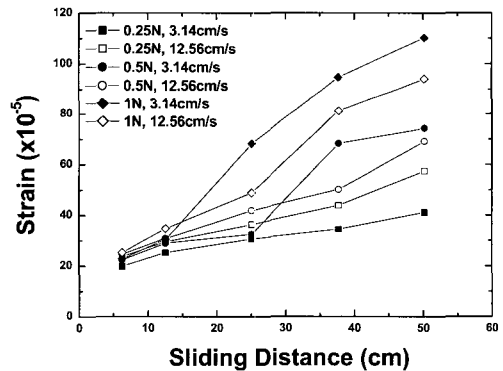


Fig. 5 Variation of surface strain of the PMMA coating layers as a function of sliding distance

0.5N과 1N의 하중 하에서 0.8 μm 두께 코팅 층 마멸면에서의 변형율이 급격히 증가하고 있는데, 이는, Fig. 3 (c)에 보인 코팅 층의 박리에 의한 것으로 여겨진다. 코팅 층이 박리된 경우를 제외하고, 본 실험에 사용된 전체 마멸 조건에서 변형률은 마멸 거리의 증가와 함께 직선적으로 증가하였다. 이와 같은 경향은 1.5 μm 두께의 코팅 층에서도 동일하였다.

SEM으로 관찰한 마멸면의 마멸 양상을 마멸 면에서의 평균 변형율과 적용 하중의 두 축으로

구성된 좌표 면에, 마멸 지도(map)로 Fig. 6, 7에 나타내었다. Fig. 6, 7의 마멸 지도는 한 하중에서 마멸 거리에 따라 변화하는 마멸 기구, 또는 일정 마멸 거리에서 하중에 따라 변화하는 마멸 기구를 잘 보여준다. 이와 같은 마멸 지도는 특정 마멸 조건에서 발생할 PMMA 박막 코팅 층의 마멸 기구를 예측할 수 있는 장점을 지닌다.

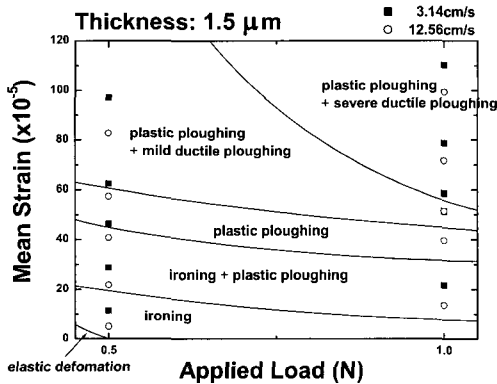


Fig. 6 Wear mechanisms of the 1.5 μm thick PMMA coating layer as a function of applied load and mean strain

1.5 μm 두께의 PMMA 코팅 층은 적용하중의 증가와 함께 마멸면에서의 평균 변형율이 증가하며, 격렬한 마멸 양상이 관찰되었다. 그러나, Si 기지로부터 PMMA 박막 코팅 층이 박리되거나, 코팅 층이 파괴되는 양상은 관찰되지 않았다. Fig. 6에 나타내진, 동일한 변형율에서 하중이 증가함에 따라 마멸 기구가 변화하는 양상은 마멸 기구의 변화에 적용 하중이 평균 변형율보다 더 큰 영향을 끼친다는 것을 시사한다. 1.5 μm 두께 코팅 층의 마멸 기구는 하중과 평균 변형율이 증가하면서, 초기의 놀림(ironing) 기구에서 후반부의 갈림(ploughing) 기구로 변화하였다.

Fig. 7에 나타낸 미끄럼속도에 따른 0.8 μm 두께 코팅 층의 마멸 지도는, 이 코팅 층의 마멸 양상이 미끄럼 속도에 따라 현저하게 변화하는 것을 보여준다. 3.14cm/s의 속도로 마멸된 경우에 주 마멸 기구는 코팅 층의 파괴(fracture)이었으나, 12.56cm/s의 빠른 속도에서는 갈림(ploughing)이 주 마멸 기구이었다. 미끄럼 속도에 따른 마멸 기구의 변화는 1.5 μm 두께 코팅 층보다는 0.8 μm 두께 코팅 층에서 더 두드러졌다. 하중과 평균 변형율의 증가에 따른 마멸 기구의 변화는 1.5 μm 두께 코팅 층과 유사하였다.

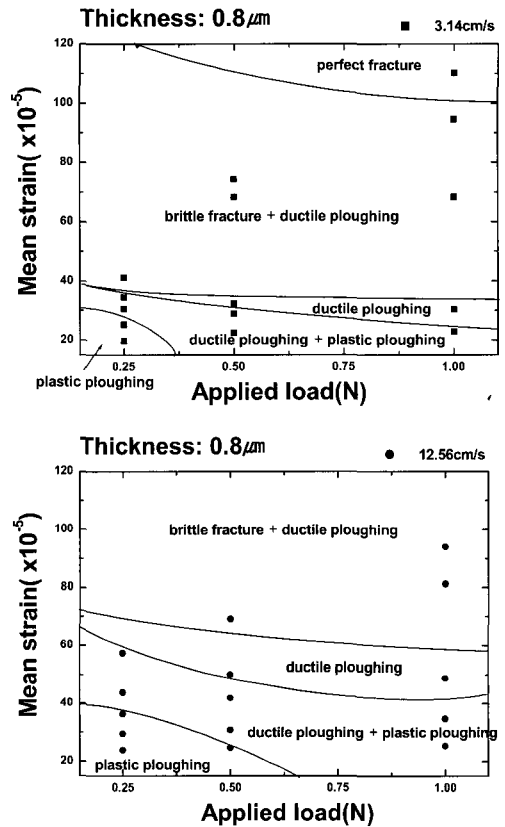


Fig. 7 Wear mechanisms of the 0.8 μm thick PMMA coating layer as a function of applied load and mean strain

4. 결론

- (1) 적용하중이 증가 함에 따라 PMMA 박막 코팅 층의 마찰계수는 감소하였다.
- (2) 미끄럼 속도가 감소함에 따라 1.5 μm 두께 코팅 층의 마찰 계수는 증가하였고, 0.8 μm 두께의 코팅 층의 경우에는 감소하였다. 이는 각 조건에서 마멸기구가 다른 때문으로 설명되었다.
- (3) PMMA 코팅 층의 마찰계수는 응력과 변형의 영향을 동시에 받아 변화하였고, 코팅 층 변형량의 증가와 함께 증가하였다.
- (4) 1.5 μm 두께 PMMA 박막 코팅 층의 주 마멸 기구는 놀림(ironing)과 갈림(ploughing)이었고, 0.8 μm 두께 코팅 층에서는 갈림(ploughing)과 파괴(fracture)가 주 마멸 기구로 관찰되었다.
- (5) PMMA 코팅 층의 두께, 미끄럼 속도 및 적

용 하중은 코팅 층의 마멸 기구 및 마찰 계수의 변화에 복합적으로 영향을 끼치었다.

참 고 문 헌

- (1) A.M.S. Hamouda, 2002, "The influence of humidity on the deformation and fracture behavior of PMMA", J. Mater. Pro. Tech., Vol. 124, pp. 238~243.
- (2) C. Gauthier, 2001, "Elastic recovery of a scratch in a polymeric surface: experiments and analysis", Tribo. int, Vol. 34, pp. 469~479.
- (3) B. J. Briscoe, 1996, "Scratching maps for polymers", Wear., Vol. 200, pp.137~147.
- (4) B. J. Briscoe, 1998, "Isolated contact stress deformations of polymer: the basis for interpreting polymer tribology", Tri. Int., Vol. 31, No. 1~3, pp. 121~126.
- (5) B. J. Briscoe, 1996, "The hardnesses of PMMA", Tribo. Int., Vol. 29, No 2, pp. 93~104.
- (6) M. J. Adams, 2001, "An experimental study of the nano-scratch behaviour of PMMA", Wear., Vol. 251, pp. 1579~1583.
- (7) B. H. Stuart, 1997, "Surface plasticisation of poly (ether ether ketone) by Cholroform", Poly. Test., Vol. 16, pp. 49~57.
- (8) I. M. Hutchings, 1992, Tribology: friction and wear of engineering material.
- (9) K. L. Johnson, 2001, Contact mechanics.