

모재의 표면 거칠기가 DLC 코팅의 마멸수명에 미치는 영향

신경섭 · 조정우 · 이영제*†

성균관대학교 대학원 기계공학과
*성균관대학교 기계공학부

The Effects of Surface Roughness on Wear-life of DLC Coating in Dry Sliding

Kyung-Seob Shin, Chung-Woo Cho and Young-Ze Lee*†

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract – Dry sliding wear resistance of DLC coated silicon disk with different surface roughness has been evaluated using a ball-on-disk sliding tester. It was found that the transfer layer formed on steel ball produced a low friction regime and the formation of transfer layer was more active with increasing the substrate surface roughness. Wear life of DLC coating was increased as increasing the real area of contact.

Key words – wear life, diamond-like carbon, surface roughness, transfer layer.

1. 서 론

미끄럼 운동을 하는 표면층이 최적의 마찰 및 마멸 특성을 갖도록 하기 위해서는 모재의 표면에 새로운 층을 만들어주는 기술이 필요하다. 대표적인 것이 표면박막 처리인데, 그 중에서도 세라믹 재질을 이용한 코팅이 많이 사용된다[1,2].

세라믹코팅은 마멸에 대한 저항성 및 고체윤활 효과가 매우 우수하여 초기부터 연구가 매우 활발하였고, 최근에는 내마멸성 및 저마찰이 요구되는 공구, 금형, 사출 성형 기계부품 및 신소재 등 다양한 분야에 사용되고 있다[3,4]. 세라믹코팅은 공구의 경우 초경합금을 모재로 TiN, TiC, Al₂O₃ 등을 증착하여 사용하고 있으며, 내식성이 요구되는 증기터빈 부품에도 응용되고 있다. 이러한 세라믹코팅은 내열성이 우수하고 표면경도가 매우 높아 상대재료와의 접촉 시 마찰계수가 낮아서 내마멸성이 우수하며 화학적으로 매우 안정하기 때문에 열화학적으로는 차단막의 역할을 한다[3-5]. 따라

서 앞으로 전반적인 기계 부품에 있어 세라믹코팅의 사용이 광범위하게 응용될 것으로 기대된다[6-8].

특히 DLC 코팅은 경질박막 가운데서도 고경도이며, 우수한 내마멸성과 매우 낮은 마찰계수를 가지고 있고, 화학적으로도 매우 안정하다[8,9]. 또한 코팅의 합성온도가 다른 코팅들과는 달리 상온에서의 합성이 가능하므로 모재의 제한이 거의 없이, 종이, 폴리머, 세라믹스, 그리고 각종 금속에 이르기까지 거의 모든 재료에 응용을 위한 코팅이 가능하며, 최근 전자기기, 고성능 기계류 부품, 금형, 공구, 자동차 부품 등 다양한 분야에 고윤활성, 내식성, 내마멸 코팅재료로서 주목을 받고 있다[9-10].

범용의 세라믹코팅 즉 DLC, TiN 등과 상대재료와의 미끄럼접촉 시 형성되는 전이층은 두 재료의 접촉부에 새로운 재료, 즉 전이층의 접촉을 유도하여 표면의 마찰마멸 특성에 많은 영향을 준다[11]. 일반적으로 전이층은 미끄럼 운동과 같이 상대운동하는 두 재료가 응착 과정을 겪으면서 한 표면에서 다른 표면으로 재료의 전이가 발생하여 형성된 얇은 층을 말한다. 또한, 대부분의 금속은 공기 중에서 산화되므로 상대운동 시

†주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

마멸에 의해 나타나는 새로운 표면은 산화물로 구성된 산화 전이층을 생성한다[12]. 이는 상대재료에 의한 마멸에 대하여 보호막의 역할을 할 수 있다는 면에서 연구자들의 많은 관심의 대상이 되어 왔다[13-15]. 이러한 전이층이나 산화막의 형성에 미치는 영향 중에 하나가 표면거칠기인데, 거칠기에 따라 접촉면적과 압력이 달라지기 때문이다[8]. 본 연구에서는 이러한 거칠기를 변수로 하여 미끄럼 운동시 변화하는 DLC 코팅의 수명을 살펴보고자 한다.

2. 실험

마찰 및 마멸실험을 위한 시편 재료로는 실리콘 디스크와 베어링 강구를 사용하였다. 서로 운동하는 상대면 두 재료 모두 대량 생산되어 품질이 비교적 균일하다. 실리콘 디스크는 두께가 750 μm이며, CMP 공정에 의해 정밀 표면 가공하여서 중심선 거칠기 0.017 μm R_a의 표면 거칠기를 나타내었다.

서로 다른 표면 거칠기를 갖는 시편을 제작하기 위해 연마지를 사용하여 R_a 0.386 μm, 0.166 μm, 0.073 μm, 0.057 μm로 연마를 한 후 아세톤으로 초음파세척을 하여 불순물과 잔류 유기물을 제거하였다. 서로 다른 표면 거칠기를 갖는 모재가 DLC 코팅의 마멸수명에 미치는 영향을 조사하기 위하여 마이크로 웨이브 플라즈마 증착법(microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition method)을 이용하여 DLC로 코팅을 하였다. 직류 바이어스 전압은 -450 V이고, 코팅의 두께는 폴리싱을 하지 않은 제일 고운 실리콘디스크 경우 0.12 mm이다. 이렇게 하여 각각 DLC로 증착된 시편의 R_a값은 0.366 mm, 0.177 mm, 0.084 mm, 0.062 mm, 그리고 별도 연마하지 않은 시편의 코팅 후 거칠기는 0.020 mm이었다.

모재가 서로 다른 표면 거칠기를 갖는 DLC 코팅의 마찰 및 마멸특성을 살펴보기 위해 사용한 실험장치는 압자와 시편의 형상을 바꿀 수 있도록 multi-type으로 제작된 미끄럼마멸시험기이다. 이 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 마찰 및 마멸 실험에 사용한 볼시편은 지름이 10 mm인 베어링 강구를 사용하였다. 상대재인 DLC가 코팅된 실리콘디스크의 경우 코팅의 보호를 위하여 알코올로 불순물과 잔류 유기물을 제거하였다.

실험은 대기 중에서 윤활유를 사용하지 않고 수행되었으며, 실험 조건은 미끄럼속도 10 rpm, 수직하중 0.4

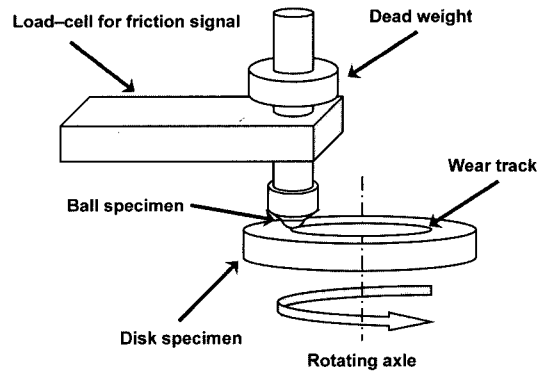


Fig. 1. Schematic diagram of sliding wear tester.

N을 사용하였다. 이는 가급적 속도를 낮추어 회전에 따른 흔들림과 시편의 상하운동을 최소화하여 균일한 마멸자국을 얻기 위하여 저속을 선택하였다. 하중은 다른 변형 없이 코팅의 수명을 측정하기 위해서 점진적 마멸이 일어나도록 사전 실험을 통해 선택되었다. DLC 코팅의 마멸수명은 베어링 강구와 DLC 코팅간의 미끄럼마멸에 의해 발생한 마찰신호가 갑자기 증가하는 시점까지로 하였다. 실험은 다섯번 이상 수행하였고, 평균값을 결과로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 미끄럼 실험결과

Fig. 2는 연마하지 않아서 시편 중에서 가장 고운 실리콘디스크(R_a 0.017 μm) 위에 DLC 코팅을 증착한 디스크 시편과 강구와의 미끄럼 운동시 나타나는 전형적인 마찰신호이다. DLC 코팅과 강구 사이의 마찰은 세 부분으로 나눌 수 있다. 각 부분은 미끄럼 운동 초기에 나타나는 강구와 DLC 코팅의 직접적인 초기마

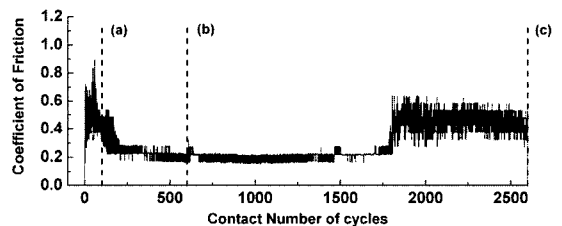


Fig. 2. The typical signal of friction coefficients signal from sliding test with steel ball and DLC coated silicon disk specimen (0.017 μm in surface roughness, R_a and 0.12 μm in coating thickness).

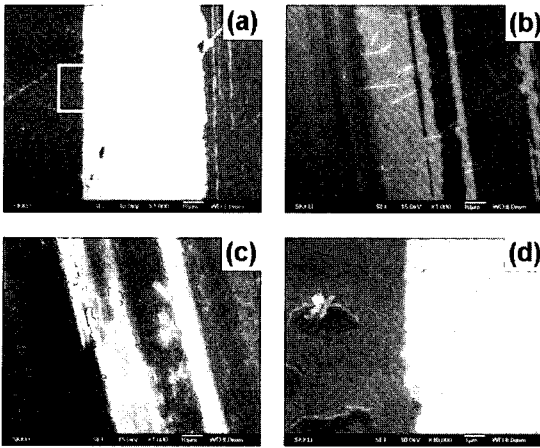


Fig. 3. SEM images of DLC coated silicon disks (R_a 0.017 μm in surface roughness) sliding after (a) 90 cycles, (b) 600 cycles, and (c) 26000 cycles, and (d) magnified image of (a).

찰로 인한 마찰 천이구간, 그리고 시간이 지나 마찰이 안정된 신호를 보이는 저마찰구간, 마지막으로 마찰이 다시 급격히 상승하는 고마찰구간이다. 이러한 DLC 코팅과 강구의 미끄럼실험 결과 나타나는 마찰계수의 변동으로부터 두 미끄럼 면 사이에서 발생하는 현상이 일정한 것이 아니라 매우 다양하며 시간에 따라 변화한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(a), Fig. 3(b), 그리고 Fig. 3(c)는 각각 마찰 천이구간(90 cycles), 저마찰구간(600 cycles), 고마찰구간(26,000 cycles)에서 실험을 멈추고 디스크 시편의 표면을 SEM을 이용하여 관찰한 사진이다. Fig. 3(d)는 Fig. 3(a)를 확대한 사진이다. Fig. 4는 각 구간에서 상대 표면인 강구의 표면과 그 표면의 EDX 분석결과이다.

마찰천이 구간에서는 Fig. 3(a)에서 보듯이 전반적으로 평탄한 시편의 접촉부에 응착이 발생하여 마찰이 증가하였고, Fig. 4에서 보듯이 강구의 표면에는 많은 미세한 연삭 자국이 나타난다. EDX 분석을 통해서 표면에 DLC 코팅의 성분인 탄소가 검출된다. 이는 연삭된 강구 표면에 코팅된 디스크에서 일부분 전이된 층이 형성되었음을 알 수 있다. 마찰천이구간에서는 접촉면적은 넓으나 전이층이 미끄럼 초기에는 강구의 접촉면에 조밀하게 형성되지 않았고 미세한 연삭작용의 의해 마찰계수가 높고 불안정하게 나타났다.

Fig. 3(b)는 저마찰구간에서 실리콘디스크의 마멸면인데 코팅이 일부분 떨어져 나간 것을 확인할 수 있

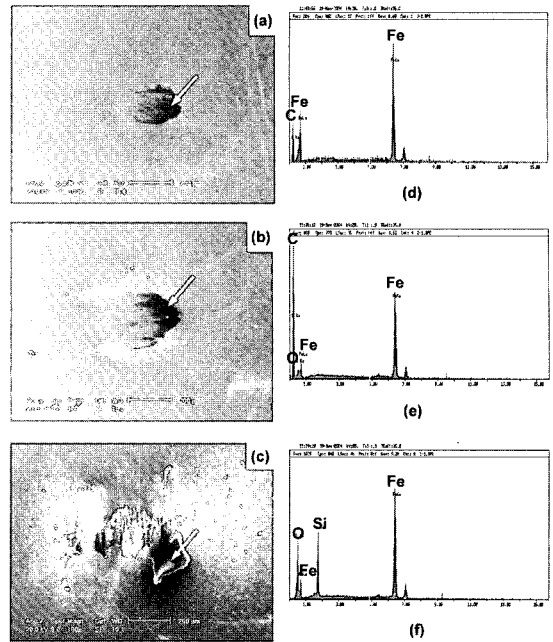


Fig. 4. SEM images of steel balls against DLC coated silicon disks (R_a 0.017 μm surface roughness) sliding after (a) 90 cycles, (b) 600 cycles, and (c) 26000 cycles with EDX analysis of marked area.

다. 상대 강구면 사진인 Fig. 4(b)에서 보듯이 화살표 부분에 DLC 코팅의 상당한 응착으로 인한 전이가 발생했음을 EDX 분석에서 검출된 탄소 원소로부터 알 수 있다. 또한 디스크 마멸트랙의 중앙부분에 Fe, O 성분의 산화막 전이층이 나타난 것을 알 수 있는데 계속적인 반복 미끄럼에 의해 강구에서 떨어져 나온 마멸입자들이 응착되었음을 알 수 있다.

미끄럼 운동이 계속되면 DLC 코팅의 응착과 강구의 연삭에 의해 실리콘디스크의 DLC 코팅과 전이층이 크게 떨어져 나가게 되고 이것으로 인해 표면의 거칠기가 증가하게 된다. 이렇게 계속적으로 증가한 거칠기는 강구표면에 연삭마멸을 증가하게 한다. 이렇게 발생한 연삭마멸에 의해 Fig. 4(b)의 탄소 성분의 전이층이 점차 제거되고, 두 면의 접촉은 강구와 DLC 코팅과의 접촉으로 다시 변화하게 되어 높은 마찰력을 나타낸다. 실리콘디스크와 강구 재료의 접촉에 의해 Fig. 3(c)에서처럼 Fe계열의 산화막 전이층이 대부분 떨어져나가고, 또한 강구 표면에는 Fig. 4(c)에서처럼 실리콘디스크에서 떨어져 나온 Si 성분과 Fe, O 성분이 나타난 것으로 보아 Fe계열의 산화 전이층이 형성되는 것을 EDX 분석에 의해 알 수 있다. 즉, DLC

코팅의 저마찰특성은 강구에 응착된 C와 Fe, O 성분의 전이층에 의한 것임을 알 수 있고, 이것이 제거되면서 마찰이 크게 증가함을 알 수 있다.

3-2. DLC 코팅의 마멸수명

시편이 거칠어지면 접촉면적이 줄어들고, 국부적인 접촉부에서 전이층의 형성이 활발하여 표면을 보호한다. DLC 코팅과 강구의 미끄럼운동시 발생하는 마멸의 초기 접촉에서 DLC 코팅의 표면 거칠기 때문에 강구에 응착과 더불어 미소 스크래치 마멸이 발생한다. 이때 발생한 마멸입자들이 DLC 코팅과 강구에 응착을 하게 되고, DLC 코팅막도 미소부분 떨어져 나와 강구로의 응착이 발생한다. 강구로 전이된 DLC 코팅 성분이 계속되는 미끄럼운동에 의해 성장하고 DLC 코팅과 강구의 마찰에 중요한 영향을 미치는 전이층을 형성하게 된다. Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 DLC 코팅에 의해 생성된 전이층에 의해 저마찰특성이 나타나게 된다. 또한 강구에서 떨어져 나온 마멸입자들이 DLC 코팅과 강구의 접촉면에 Fe 계열의 산화 전이층을 형성하게 되고, 이렇게 형성된 산화전이층이 물질 친화도(material compatibility)에 의해 DLC 코팅의 전이층이 강구로 전이되면서 코팅을 모재로부터 떼어내어 코팅의 파괴가 발생하게 된다. 코팅의 파괴가 발생하면 강구와 DLC 코팅의 모재인 실리콘디스크와의 접촉으로 변하게 되어 고마찰구간으로의 전이가 급속히 발생한다.

DLC 코팅의 마멸수명은 실리콘디스크에 증착된 DLC 코팅과 산화막 전이층이 모두 떨어져 나가면서 마찰력이 크게 증가하는 고마찰특성이 나타나는 회전수까지로 나타낼 수 있다.

Fig. 5는 모재의 표면 거칠기가 전보다 많이 큰 0.386 μm인 DLC 코팅의 마찰신호이다. Fig. 2의 실험

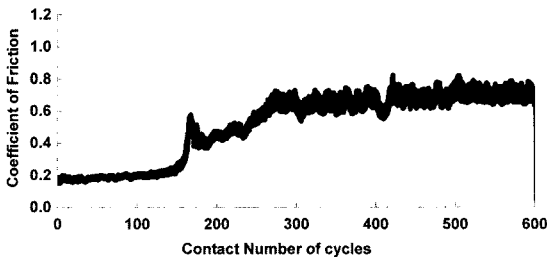


Fig. 5. The coefficient of friction from sliding test with DLC coated silicon disk (0.386 μm in surface roughness and 0.12 μm in coating thickness).

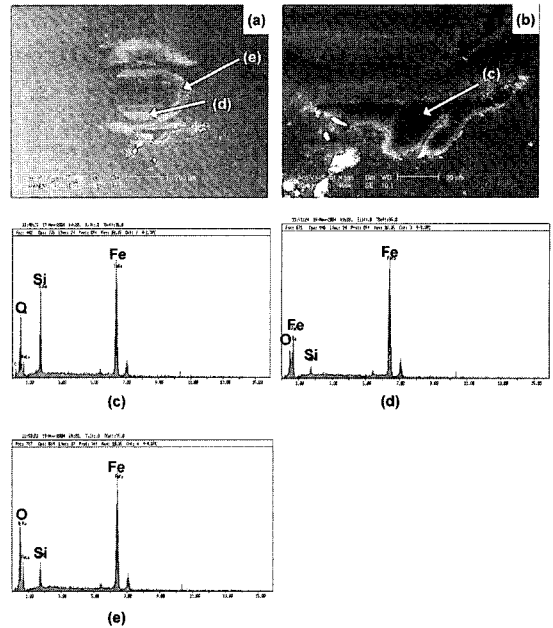


Fig. 6. Worn surface of steel ball sliding against DLC coated silicon disk (0.386 μm in surface roughness) sliding after 600 cycles, (a) worn surface, (b) magnified image of (a), and (c), (d), (e) are EDX analysis result of marked points.

과 동일하게 수행하였다. 고운 표면과는 달리 가장 거친 표면에 코팅을 한 경우에는 마찰전이구간이 없이 바로 저마찰 특성을 보이다가 고마찰로 옮겨가 수명을 다하는 양상을 보이고 있다. 마찰전이구간이 나오지 않는 이유는 Fig. 6(a)의 강구를 보면 알 수 있는데, DLC로 코팅된 실리콘디스크의 표면이 거칠기 때문에 강구와 DLC 코팅의 접촉이 균일하지 않고 표면이 매끈할 때 보다 접촉면적이 작아진다. 국부적으로 직접 접촉하는 부분에 응착이 발생하기 때문에 초기 미끄럼에서 바로 윤회효과가 좋은 전이층이 일부 형성되게 된다. 하지만 매끄러운 표면일 때와는 달리 상대재의 거친 표면 때문에 조밀한 전이층 형성이 어렵게 되고, 전이층의 형성과 파괴가 반복적으로 발생하게 된다. 그러므로 코팅의 마멸수명은 줄어들게 된다. Fig. 6(b)의 (c)부분에서 증가된 산소와 실리콘 성분은 강구에 코팅층이 전이되었고 떨어져나갔음을 보여준다. (e)와 (d) 부분에서는 강한 연삭작용으로 인해 전이된 코팅층이 떨어져 나간 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 단계별로 증가된 거칠기를 갖는 디스크 시편에 코팅을 하고 실험을 한 결과인데, 표면이 거칠

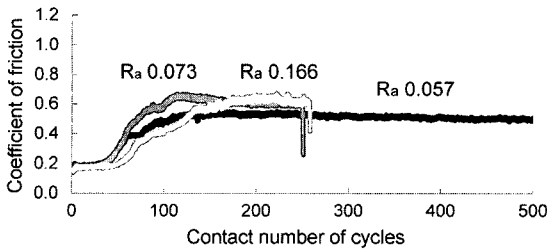


Fig. 7. The coefficient of friction from sliding test with DLC coated silicon disks (0.057 μm , 0.073 μm , and 0.166 μm in surface roughness and 0.12 μm in coating thickness).

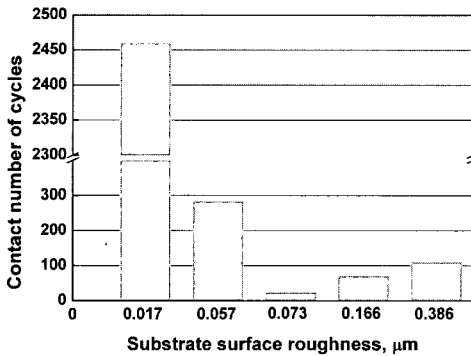


Fig. 8. Wear-life diagram of DLC coated silicon disk with different.

어지면서 DLC 코팅의 마멸수명이 줄어들다가 다시 약간 증가하는 것을 볼 수 있다.

코팅이 벗겨진 후 고마찰구간으로 천이가 되었을 때의 접촉회전수, DLC 코팅의 마멸수명(wear-life)을 Fig. 8에 나타내었다. 각각의 그래프는 동일한 조건으로 5회 측정된 결과이다. 모재의 표면 거칠기가 R_a 0.017 μm 에서 0.057 μm 로 변화할 때 급격한 마멸수명의 감소를 보이며, 0.057 μm 에서 0.073 μm 으로 변화할 때도 급격하게 마멸수명이 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 0.073 μm 이상의 표면 거칠기에서는 다시 증가하는 것을 알 수 있다. DLC 코팅과 강구 사이에서는 초기 미끄럼에 의해 DLC 코팅의 응착과 더불어 연삭마멸이 발생하게 되는데 시편이 거칠어 지면서 응착은 줄어들고 연삭작용이 활발하여져 수명이 감소한다. 시편의 거칠기가 더 증가하면 연삭작용이 더 활발하여지는데 이경우 초기에는 접촉면적의 감소하지만 마멸이 진행되면서 다시 접촉부의 면적이 증가하여 전이층의 형성이 활발하여지고 그로 인해 다시 마멸수명이 증가한다.

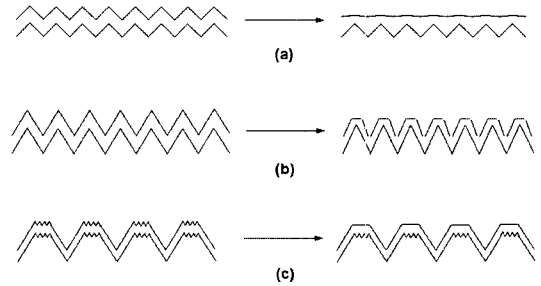


Fig. 9. Schematic view of surface roughness variation during the sliding with different substrate surface roughness: (a) 0.057 μm , (b) 0.073 μm , and (c) 0.386 μm .



Fig. 10. Worn surfaces of DLC coated silicon disk after sliding with different substrate surface roughness: (a) 0.057 μm , (b) 0.073 μm , and (c) 0.386 μm .

마멸이 진행되면서 변화하는 표면 형상을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(b), (c)에서와 같이 코팅 두께와 표면 거칠기(R_a)의 비가 0.5 이상에서는 초기의 미소마멸이 발생한 후 상대적으로 강구와 코팅 사이의 실접촉면적이 증가하면서 접촉응력은 감소하게 된다. 따라서 강구와 코팅사이의 접촉응력의 감소로 인하여 마멸수명이 증가하는 것을 알 수 있다.

표면의 형상을 확대해서 살펴보면 표면의 거칠기가 0.057 μm 에서 0.073 μm , 그리고 0.386 μm 로 증가하면서 접촉면적이 Fig. 10에 회계 보이는 부분처럼 감소하다가 다시 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 접촉면적의 변화는 전이층의 형성에 영향을 주고, 따라서 마멸 수명이 달라지게 된다.

4. 결 론

건마찰 상태에서 강구와 서로 다른 표면 거칠기를 갖는 실리콘디스크에 증착한 DLC 코팅과의 미끄럼 운동 시 접촉부에 생성된 전이층이 코팅의 마멸수명에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 미끄럼실험을 반복하여 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DLC 코팅과 강구와의 미끄럼 접촉시 형성되는 전이층은 DLC 코팅에서 강구로 응착에 의해 형성된

다. DLC 코팅과 강구와의 저마찰특성은 이렇게 형성된 전이층이 두 재료 사이에서 전단력을 감소시키는 역할을 하기 때문에 나타나게 된다.

2. DLC 코팅과 강구와의 미끄럼 운동시 형성되는 전이층은 R_a 0.073 μm 이상에서는 실접촉면적이 줄어들어 빠르게 생성되므로 미끄럼시 발생하는 마찰계수는 마찰전이구간을 거치지 않고 바로 저마찰구간에서 고마찰구간으로 천이된다.

3. DLC 코팅의 마멸수명은 상대재와 코팅간의 실접촉면적이 감소할수록 접촉면에 발생하는 접촉응력은 증가하기 때문에 감소하며, 표면의 거칠기가 큰 경우에도 코팅과의 실접촉면적이 증가하게 되면 마멸수명은 증가한다.

후 기

본 연구는 2004년 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10822-0)지원 사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. M. Urgan and A.F. Cakir, "The effect of heating on corrosion behavior of TiN- and CrN-coated steels," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 96, pp. 236-244, 1997.
2. Y.L. Su, S.H. Yao, Z.L. Leu, C.S. Wei and C.T. Wu, "Comparison of tribological behavior of three films-TiN, TiCN and CrN-grown by physical vapor deposition," *Wear*, Vol. 213, pp. 165-174, 1997.
3. B. Navinsek, P. Panjan and J. Krusic, "Industrial applications of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 97, pp. 182-191, 1997.
4. K. Holmberg and A. Matthews, "Coating tribology: a concept, critical aspects and future directions," *Thin Solid Films*, Vol. 253, pp. 173-178, 1994.
5. S.J. Bull, "Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test," *Tribology International*, Vol. 30, pp. 491-498, 1997.
6. Y.L. Su and S. H. Yao, "On the performance and application of CrN coating," *Wear*, Vol. 205, pp. 112-119, 1997.
7. M.K. Kazmanli, B. Rother, M. Urgan and C. Mitterer, "Identification of cracks generated by indentation experiments in hard-coating systems," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 107, pp. 65-75, 1998.
8. K.C. Ludema, Friction, *Wear*, Lubrication, pp.238-239, CRC Press, 1996.
9. B. Bhushan and B.K. Gupta, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, New York, 1991.
10. S. Aisenberg, R. Chabot, *Journal of Applied Physics*, Vol. 43, pp. 29-53, 1971.
11. K. Holmberg, H. Ronkainen and A. Matthews, "Tribology of thin coatings," *Ceramics International*, Vol. 26, pp. 787-795, 2000.
12. G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, pp. 624-630, Elsevier, 1993.
13. Hiratsuka, K., Hu, L.L., Sugahara, A. and Sasada, T., "Wear Particles: from the Cradle to the Grave (Enhancement of the Growth of Transfer Particle by the Environmental Molecules in Adhesive Wear)," Elsevier, 1992.
14. Fayeulle, S. and Singer, I.L., "Wear Particles: from the Cradle to the Grave (Chemical and Microstructural Aspects of Debris Formation in Mild Sliding Wear)," Elsevier, 1992.
15. Brendle, M., Turgis, P. and Lamouri, S., "A General Approach to Discontinuous Transfer Films: the Respective Role of Mechanical and Physicochemical Interactions," *Tribology Transactions*, Vol. 39, pp. 157-165, 1996.