상대재료의 표면거칠기에 따른 PTFE와 UHMWPE의 마찰 및 마멸 특성

Sun Dong[†] · 정구현 · 이경식[‡]

울산대학교 기계공학부

Effect of Surface Roughness of Counterface on Tribological Characteristics of PTFE and UHMWPE

Sun Dong[†], Koo-Hyun Chung and Kyung-Sick Lee[‡]

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

(Received July 19, 2011; Revised September 20, 2011; Accepted September 23, 2011)

Abstract – Understanding of the tribological characteristics of polytetrafluoroethylen (PTFE) and ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) is crucial for their applications such as bearing and total joint replacement. In this work, the effect of the surface roughness of carbon steel on the tribological behaviors of PTFE and UHMWPE was experimentally investigated by using block-on-ring tribotester with friction force monitoring capability. It was found that the amount of material transfer layers of PTFE formed on the carbon steel was significantly larger than those of UHMWPE, which was responsible the lower friction coefficient of PTFE. It was also concluded that the effect of surface roughness of carbon steel on the friction coefficient of UHMWPE was more significant than that of PTFE. For UHMWPE, it was found that the effect of surface roughness of counterface was varied with respect to applied normal force and sliding as well. Based on Archard's wear law, the wear coefficient of PTFE and UHMWPE was calculated to be $3 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ and $7 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$, respectively.

Keywords – friction (마찰), materials transfer (재료 전이), polymer (폴리머), surface roughness (표면거칠기), wear (마멸)

1. 서 론

폴리머는 많은 경우, 금속이나 세라믹재료와는 다른 마찰 및 마멸 특성을 나타낸다. 특히, 폴리머는 금속이나 세라믹 재료에 비하여 비교적 낮은 마찰 특성을 가지나, 낮은 기계적 물성으로 인하여 다른 탄/소성 거동을 나타내며, 높은 마멸 특성을 나타내기도 한다. 폴리머가 낮은 마찰 특성을 나타내는 가장 중요한 이유 중 하나는, 재료 전이층 (material transfer layer)의 영향이다. 폴리머가 금속이나 세라믹과 같이 경도가 높은 상

대재료와 접촉미끄럼 운동을 할 경우 재료가 전이되는 현상이 많이 발생하게 되므로, 전이된 재료와 접촉 미끄럼 운동이 발생하게 되며, 계속적인 상대운동에 의하여 정상상태에 도달하면 재료 전이층의 두께가 비교적 일정하고 낮은 마찰 및 마멸 특성을 나타내게 된다 [1]. 또한, 폴리머는 점탄성 특성을 가지므로, 상대속도의 영향을 크게 받으며, 많은 경우 수직하중이 증가함에 따라 마찰계수는 감소하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라, 폴리머는 금속/세라믹 분말이나 섬유(fiber)와 함께 사용되어 높은 기계적 강도를 유지하는 동시에 낮은 마찰 및 마멸 특성을 얻는데 많이 사용되고 있으며, 고체 윤활제로 사용되기도 한다. 특히, polytetrafluoroethylen

[†]주저자 : dong-sun@live.cn

[‡]책임저자 : kslee@ulsan.ac.kr

(PTFE)과 ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE)는 다른 폴리머에 비해 더욱 낮은 마찰 특성을 가지고 있어, 자동차, 전기, 정밀기계, 의료 분야 등에서 광범위하게 사용되고 있다[2,3].

PTFE는 강한 탄소/불소 결합을 형성하여 화학적으로 안정되어 있으며, 낮은 표면에너지를 가지므로 상대 재료와의 결합이 덜 발생하고, 낮은 응착(adhesion) 특성을 나타낸다. 이와 같은 안정된 화학적 특성에 의하여, PTFE는 다른 폴리머 재료에 비하여 더욱 낮은 마찰 특성을 나타낸다. 그러나 한편으로는 낮은 기계적 특성에 의한 높은 마멸이 발생하기 쉬우므로, 마멸 현상을 이해하고 저감기술을 도출하기 위한 연구들이 수행되고 있다. PTFE의 마멸기구가 제시되었으며[4], 상대속도와 온도가 마멸 특성에 미치는 영향이 고찰되기도 하였고, 정량적인 마멸률 (wear rate)도 함께 평가되었다[5]. 특히, 경도가 높은 금속, 또는 세라믹과 함께 형성된 복합재의 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위한 연구도 활발히 진행되어 오고 있다[6,7].

한편, UHMWPE는 높은 분자량 (molecular weight) 및 높은 얽힘 밀도 (entanglement density)를 가지므로, 우수한 기계적 물성 및 마멸 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 각종 조인트에서 베어링재료로 많이 사용되고 있으며, 특히 바이오재료로써 인공관절에 매우 넓게 활용되고 있다. 이와 같은 응용을 위해서, 탄소강과 같은 재료와 상대 운동할 때 발생하는 마찰 및 마멸 거동에 대한 연구가 수행되었으며[8,9], 다양한 윤활조건에서의 마멸 특성에 관한 연구[10,11]도 진행되었다. 특히, 마멸입자가 관절의 파손을 유발할 수 있음[3]에 따라 마멸입자의 거동을 분석하고 마멸률을 저감시키기 위한 연구가 많이 수행되고 있으며, 마멸 특성을 더욱 향상시키기 위해서는 가교(crosslink)를 형성하거나 다른 재료와 함께 사용하여 기계적 강도를 높이는 방법 등이 제시되었다[12,13]. 그러나 강도를 높이기 위하여 사용된 경한 입자나 섬유들은 상대재료의 마멸을 유발하는 등의 문제도 함께 나타나고 있다.

이와 같은 폴리머의 마찰 및 마멸 특성을 이해하기 위해서는 각 응용분야에 해당하는 마찰 특성이나 마멸 기구 등을 명확히 이해하고, 응용분야에 적합한 표면 설계를 통하여 상대운동에 따른 신뢰성 문제들을 더욱 향상시키는 것이 요구된다. 특히, 미끄럼 운동을 경험하는 상대재료의 표면거칠기가 폴리머의 마찰 및 마멸 특성에 미치는 영향은 조금 복잡하게 전개된다[14]. 일반적으로 상대재료의 표면거칠기가 거칠 경우 연삭

(abrasion) 현상이 발생할 확률이 커지므로 마멸률이 클 것으로 예상된다. 그러나, UHMWPE와 같은 재료의 경우, 표면거칠기가 낮은 상대재료와의 마멸률은 상대재료의 표면거칠기가 큰 경우만큼 크게 나타나며, 최소의 마찰 특성을 나타내는 특정한 상대재료의 표면거칠기 값이 있는 것으로 제시되고 있다[8]. 또한, 이러한 현상은 상대속도에 따라 다르게 전개되는데, 특히 고속에서 표면거칠기에 덜 민감하게 전개되는 것으로 제시되고 있다. 이와 같은 마찰 및 마멸 특성들은 각 폴리머 재료에 따라 다르게 나타날 것으로 예상되며, 특히, 상대재료가 거친 경우, 마멸된 입자가 표면 요철 사이에 삼입될 가능성이 높으므로 마멸입자의 거동 및 표면전이층의 형성과 그에 따른 마찰력의 변화 등에 대한 이해가 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 상대재료인 탄소강의 표면거칠기 변화에 따른 PTFE와 UHMWPE의 마찰 및 마멸 특성을 평가하고, 그 영향을 근본적으로 이해하고자 하였다. 이를 위하여, 본 연구에서는 block-on-ring tribotester를 이용한 실험적 연구를 수행하였으며, 향후 폴리머의 활용도를 더욱 높이고 신뢰성을 향상시키기 위한 표면설계의 기반자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

본 연구에서는 폴리머 블록과 금속간의 마찰 및 마멸 특성을 실험적으로 이해하기 위하여 Fig. 1에 제시된 바와 같이 block-on-ring tribotester를 제작하여 사용하였다. 금속 링의 상단에 폴리머 블록을 위치시킨 후, 추의 자중을 이용하여 원하는 수직하중을 가하며 금속 링은 모

Fig. 1. Photograph of experimental setup: the block-on-ring tribotester.

(a)

(b)

Fig. 2. Photographs of (a) PTFE and UHMWPE blocks and (b) carbon steel rings.

터를 이용하여 일정속도로 회전하게 된다. 이때 폴리머 블록과 금속 링 사이에서 발생하는 마찰력은 실험전에 교정(calibration)된 센서를 이용하여 측정하였다.

PTFE와 UHMWPE 블록의 상대재료로는 저널 베어링에서 많이 사용되는 탄소강 (ASTM 1045)을 이용하였다. Fig. 2 (a)는 실험에 사용된 PTFE와 UHMWPE 블록들의 사진을 나타내며, Fig. 2 (b)는 상대재료로 사용된 탄소강 링을 나타낸다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 링의 형상은 본 실험에 사용된 block-on-ring tribotester에 적합하도록 내경 15 mm, 외경 40 mm로 가공되었으며, 폭은 12 mm로 가공되었다. 원하는 표면거칠기를 얻기 위하여 제작된 링은 서로 다른 번호를 가지는 연마지(polishing paper)를 이용하여 연마하였다. 평균표면거칠기 (average surface roughness, R_a) 0.1 μm , 0.2 μm , 0.4 μm , 0.8 μm 를 얻기 위하여 각각 1200, 1000, 800, 400의 번호를 가지는 연마지가 이용되었다. 일정시간 연마후 표면거칠기 측정기(Surfest 301, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 표면거칠기를 측정하는

Fig. 3. Optical micrograph of carbon steel ring surface before experiment.

과정을 여러 번 거친 후, 원하는 탄소강의 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 실험전 탄소강의 표면 광학현미경 사진은 Fig. 3에 제시하였다.

2.2. 실험방법

상대재료의 표면거칠기가 PTFE와 UHMWPE의 마찰 및 마멸 특성에 미치는 영향을 보다 체계적으로 이해하기 위하여 수직하중, 상대운동속도, 미끄럼거리를 등을 변화시켜 실험을 수행하였다. 수직하중은 9.8 N, 98 N으로, 상대운동속도는 95 rpm, 238 rpm으로 변화시켰으며, 1시간동안 실험을 진행하였다. 각각의 회전속도에 대한 접촉부위에서의 선속도는 0.2 m/s, 0.5 m/s이며, 1시간 동안의 미끄럼 거리는 각각 720 m와 1800 m에 해당한다. 실험 후에는 폴리머 블록의 표면을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 표면거칠기의 변화를 파악하였다. 상대운동에 따른 탄소강의 마멸 정도는 폴리머의 마멸에 비해 극히 작을 것으로 예측되었으며, 실험후 탄소강 표면을 관찰하고, 마멸에 따른 표면거칠기의 변화를 파악하였다. 예상했던 바와 같이 실험 전후 탄소강의 표면거칠기 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러므로, 세척후의 탄소강은 다음 실험을 위하여 다시 사용되었다. 마멸량을 정량적으로 측정하기 위해서는 폴리머 블록의 질량변화를 정밀저울 (micro-balance)을 이용하여 측정하였으며, 다음과 같이 주어진 Archard의 마멸법칙을 이용하여 마멸 정도를 분석하였다.

$$V = k \frac{Lx}{H}$$

Fig. 4. Variations of friction coefficient of PTFE slid against carbon steel ring under 9.8 N and 98 N normal forces with (a) 0.2 m/s (b) and 0.5 m/s sliding speeds.

여기서 V 는 마멸량, k 는 마멸계수, L 은 수직하중, x 는 미끄럼 거리, H 는 마멸된 재료의 경도를 나타낸다. 마멸계수, k 는 마멸이 발생하는 정도 및 가능성을 의미한다. UHMWPE의 마멸량은 1시간의 실험후 정량적으로 측정하기 어려울 정도로 작았으므로, 가장 가혹한 실험 조건인 98 N 수직하중, 0.5 m/s 상대운동속도에서 실험시간을 3, 5, 10시간으로 증가시키며 실험을 수행하였다. 각 시간에 대한 미끄럼 거리는 각각 5,400 m, 9,000 m, 18,000 m에 해당한다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. PTFE의 마찰 및 마멸 특성

Fig. 4은 대표적인 실험 결과로써, 각 수직하중과 상

Fig. 5. Friction coefficient of PTFE with respect to surface roughness of carbon steel ring.

대운동 속도 조건에서 PTFE와 표면거칠기 $0.8 \mu\text{m}$ 를 가지는 탄소강 사이의 마찰계수 변화를 나타낸 것이다. 상대속도 0.2 m/s, 0.5 m/s에 대한 결과를 각각 Fig. 4 (a)와 (b)에 제시하였다. 모든 경우에서 상대운동 초기의 마찰계수는 정상상태에 비하여 약간 높은 값을 나타내었으나, 그 차이는 크지 않았다. 이러한 이유는 상대운동 초기, 재료 전이가 발생하기 전의 마찰력이 더 크기 때문으로 설명할 수 있다. 그러나, 마찰계수의 차이가 크게 나타나지 않은 이유로는 전이층이 예상보다 빨리 형성되었기 때문이며, 데이터 획득과정에서 마찰계수가 평균화되어 그 차이가 감소되어 나타난 것으로 생각된다. 실험 결과에서, 다른 많은 폴리머 재료들에서 관찰된 바와 같이 수직하중이 증가함에 따라 마찰계수가 감소[1] 하는 것을 알 수 있다. 또한, 하중이 클 경우 마찰계수의 변화도 작게 나타남을 알 수 있다. 상대속도의 차이에 따라서 평균마찰계수의 변화가 크게 다르지는 않았으나, 0.2 m/s인 경우에 비하여 0.5 m/s인 경우에는 마찰계수의 변화는 더욱 크게 나타났다.

Fig. 5는 각 하중 및 상대속도 조건에서의 탄소강의 표면거칠기 변화에 따른 PTFE의 마찰계수를 제시한 것으로써 정상상태의 마찰계수를 평균하여 나타낸 결과이다. 상대재료의 표면거칠기나 미끄럼속도의 변화와 상관없이 모든 경우에서 수직하중이 클 경우, 마찰계수가 작게 나타났다. 특히, 9.8 N의 수직하중에서 마찰계수는 0.28~0.4의 값을 나타내었으며, 수직하중이 10배로 증가함에 따라 마찰계수는 0.18~0.25로 약 1.5~2배 정도 증가하였다. 또한 Fig. 5에서 오차막대

(error bar)로 나타난 마찰계수의 변화도 저하중에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 이로부터, 수직하중이 크고, 상대속도가 작은 경우, 마찰계수뿐만 아니라 마찰계수의 변화도 작게 나타나는 것으로 결론지을 수 있었다. 이와 같이 수직하중이 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 이유는 수직하중이 클 경우, 상대적으로 기계적 물성이 작은 폴리머 표면의 요철 (asperity)은 크게 변형하게 되며, 이에 따라 실제 접촉 면적이 증가하여 접촉압력이 감소할 뿐만 아니라, 전이층이 더욱 많이 형성되어 결과적으로 양 표면에 작용하는 전단응력이 작아지기 때문으로 생각된다. 같은 이유로, 하중이 클 경우 전이층의 형성이 더욱 활발하게 진행되어 보다 빨리 정상상태에 도달하고, 마찰계수의 변화 또한 감소하여 안정된 거동을 나타내는 것으로 사료된다. 또한 상대속도가 작을수록, 보다 안정적인 접촉이 이루어지고 재료의 전이가 보다 활발하게 일어나므로 마찰계수도 작고 그 변화도 적게 나타나는 것으로 유추할 수 있다. 특히, 상대속도에 따른 마찰계수의 차이는 수직하중이 98 N일 경우 더 적게 나타났다.

탄소강의 표면거칠기 변화에 따른 마찰계수의 변화는 9.8 N 수직하중에 표면거칠기 증가에 따라 점차적으로 조금씩 증가하는 것으로 나타났으나, 98 N 수직하중에서 표면거칠기의 영향은 거의 나타나지 않았다. 즉, 높은 하중에서는 재료 전이층이 활발히 형성되고, 이에 따라 탄소강의 표면요철 사이가 평탄화되는 효과가 더 크게 나타나므로, 표면거칠기 변화에 따른 마찰의 영향이 덜 나타나는 것으로 예상된다. 그러나 낮은 하중에서는 이러한 현상이 상대적으로 덜 발생할 것이며, 이에 따라 상대재료의 표면거칠기의 영향이 미소하게 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 6은 각 실험조건에서 PTFE 블록의 질량감소량을 나타내고, Fig. 7은 Archard의 마멸법칙을 이용하여 계산한 마멸계수를 나타낸다. Fig. 6 (a)와 (b)에 제시한 바와 같이, 속도가 0.5 m/s인 경우의 마멸량이 0.2 m/s의 경우보다 대략 3배정도 크게 나타났는데, 이는 0.5 m/s의 상대속도에서 미끄럼거리가 2.5배 크기 때문이다. 또한, 예상한 바와 같이 수직하중이 큰 경우 마멸량이 더욱 크게 나타났으며, 이와 같이 수직하중이 상대적으로 큰 경우, 지속적으로 마멸이 발생하여, 재료 전이층을 꾸준히 형성함으로써, 마찰을 감소시키는 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, 98 N 수직하중에서 탄소강의 표면거칠기가 거칠수록 PTFE의 마멸량은 서서히 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 수직하

Fig. 6. Loss in Mass of the PTFE with respect to surface roughness of carbon steel ring with (a) 0.2 m/s and (b) 0.5 m/s sliding speeds before and after experiments.

Fig. 7. Wear coefficient of PTFE with respect to surface roughness of carbon steel ring

Fig. 8. Optical micrographs of PTFE blocks after the sliding test with carbon steel ring ($R_a=0.8 \mu\text{m}$) (a) under 9.8 N normal force with 0.5 m/s sliding speed and (b) under 98 N normal force with 0.2 m/s sliding speed.

중이 9.8 N인 경우에는 마멸량의 증가가 매우 작게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 7에 제시된 바와 같이 PTFE의 마멸계수는 $3 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ 로 나타났다. 마멸

계수는 수직하중과 미끄럼거리에 대하여 일반화한 값이므로 탄소강의 표면거칠기가 마멸 발생에 미치는 영향을 보다 명확하게 나타낸다. Fig. 7에 제시된 바와 같이, 상대재료의 표면거칠기가 증가할수록 마멸계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 상대재료가 거칠수록 마멸 입자가 더욱 활발히 형성되는 것을 의미한다. 전반적으로 마멸계수는 수직하중이 9.8 N인 경우에 더욱 크게 나타났으나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 재료 전이층을 효과적으로 형성하기 위한 절대적인 마멸량이 부족하며, 마찰계수는 상대적으로 크게 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 8은 실험후 탄소강의 표면을 나타내는 광학현미경 사진으로써 $0.8 \mu\text{m}$ 를 가지는 탄소강과 실험한 후의 결과를 나타낸다. Fig. 8 (a)는 마찰계수가 가장 큰 경우 (9.8 N 수직하중, 0.5 m/s 상대속도), (b)는 마찰계수가 가장 작은 경우 (98 N 수직하중, 0.2 m/s 상대속도)의 표면 사진을 나타낸다. Fig. 3에 제시된 실험전의 탄소강의 표면사진과 비교하여, 두 경우 모두에서, 실험후 재료 전이층이 확연하게 생성된 것을 알 수 있다. Fig. 8 (a)와 (b)를 비교하면, 마찰계수가 더 크게 나타난 (a)의 경우에 형성된 전이층이 좀 더 거칠고 균일하지 않을 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7 (b)의 수직하중이 크고, 상대속도가 작은 경우에는 재료 전이층이 좀 더 매끈하고 균일하게 형성되어 있는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 마찰계수 및 마찰계수의 변화가 작게 나타나는 것으로 여겨진다. Table 1은 실험 전후 PTFE의 표면거칠기 변화를 나타낸 것이다. 실험전 PTFE의 표면거칠기는 $0.7 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 이었으며, 실험후 모든 경우에서 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 98 N의 수직하중이 작용한 경우의 표면거칠기는 9.8 N인 경우에 비하여 6~14배 정도로 크게 나타났으며, 이로부터 수직하중이 표면거칠기변화에 지배적으로 작용하였음을 알 수 있다. 즉 수직하중이 크고 상대속도

Table 1. Change in surface roughness of PTFE blocks before and after experiments

Surface roughness of PTFE before experiment (μm)	Surface roughness of steel ring (μm)	Surface roughness of PTFE after experiment (μm)			
		0.2 m/s sliding speed		0.5 m/s sliding speed	
		9.8 N normal force	98 N normal force	9.8 N normal force	98 N normal force
0.7	0.1	0.013	0.079	0.033	0.19
0.7	0.2	0.014	0.098	0.034	0.29
0.7	0.4	0.017	0.11	0.042	0.30
0.7	0.8	0.021	0.30	0.042	0.37

Fig. 9. Variations of friction coefficient of UHMWPE slid against carbon steel ring under 9.8 N and 98 N normal forces with (a) 0.2 m/s (b) and 0.5 m/s sliding speeds.

가 빠른 경우, 응착에 의한 재료의 전이가 더욱 크게 발생하므로 다른 경우에 비하여 실험후 표면거칠기가 더욱 크게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 상대재료인 탄소강의 표면거칠기가 거칠수록, 연삭현상이 많이 발생하므로, 실험후 PTFE의 표면거칠기도 더 커지는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 실험후의 표면거칠기는 실험전의 표면거칠기에 비하여 모두 감소하는 것으로 나타난 것으로 볼 때, 상대운동 초기에는 PTFE의 표면에 형성되어 있는 높은 요철들이 제거되는 것으로 생각된다.

3-2. UHMWPE의 마찰 및 마멸 특성

Fig. 9 (a)와 (b)는 같은 실험조건에서 UHMWPE의

Fig. 10. Friction coefficient of UHMWPE with respect to surface roughness of carbon steel ring.

실험결과를 나타내는 예이다. PTFE와 마찬가지로, 하중이 클 경우 더 작은 마찰계수를 나타냈으며, 마찰계수의 변화도 하중이 커짐에 따라 더 작게 나타났다. 또한 초기에 비하여 정상상태에 이르면서 마찰계수가 약간 감소하는 현상이 관찰되었다. Fig. 10은 정상상태에서 각 실험조건에 따른 UHMWPE의 마찰 특성을 나타낸다. UHMWPE의 마찰계수는 0.2~0.6 정도로, PTFE (0.18~0.4)에 비하여 크게 나타났다. UHMWPE의 경도는 PTFE에 비하여 매우 크므로, 연삭에 의하여 발생한 마멸입자가 적을 것으로 예상되고, 이에 따라 재료 전이층 형성이 적게 발생할 것이다. 또한, UHMWPE의 높은 기계적 특성은 높은 전단응력을 유발하여, 상대적으로 높은 마찰계수를 나타낸 것으로 생각된다. 이러한 관점에서, UHMWPE의 경우 상대재료의 표면거칠기가 마찰계수에 미치는 영향이 더 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다. PTFE와 마찬가지로, 수직하중이 클 경우에 작은 마찰계수를 나타냈으며, 각 마찰계수의 변화도 작게 나타났다. 그러나, 표면거칠기의 영향으로 인하여 9.8 N 수직하중에서 상대속도의 영향은 명확하게 파악하기 어려웠으며, 98 N 수직하중에서는 상대속도가 빠른 경우 대체적으로 마찰계수가 더 큰 것으로 나타났다.

앞서 예측된 바와 같이, UHMWPE의 경우, 표면거칠기의 영향이 PTFE에 비하여 크게 나타났으며, 특히 수직하중이 작은 9.8 N인 경우에 더욱 크게 나타났다. 이는 기존 연구결과[8]와 잘 일치하는 결과로써, UHMWPE의 경우, 마찰 특성이 상대재료의 표면거칠기에 따라 크게 변할 수 있으며, 최적의 마찰 특성을

Fig. 11. Variation of friction coefficient of UHMWPE slid against carbon steel ring with Ra 0.8 μm .

나타내는 표면거칠기 값을 가지는 것으로 생각된다. 이러한 이유 중 하나는, 상대재료의 표면거칠기가 큰 경우, 경도가 낮은 UHMWPE의 표면에서 연삭현상이 많이 발생하므로 높은 마찰계수를 나타내며, 상대재료의 표면거칠기가 작은 경우에는, 요철에 의한 연삭효과가 적어 마찰을 저감시킬 수 있는 전이층 형성이 상대적으로 적게 발생하기 때문으로 설명할 수 있다 [1]. 본 연구의 실험결과에서는 9.8 N 수직하중, 0.2 m/s 상대속도 조건에서 가장 작은 마찰계수를 나타내는 상대재료의 표면거칠기는 0.2 μm 였으며, 9.8 N 수직하중, 0.5 m/s 상대속도 조건에서는 0.4 μm 였다. 이와 같이 상대속도에 따라, 최적의 마찰 특성을 나타내는 상대재료의 표면거칠기 값이 달라지는 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 10에서 수직하중이 큰 경우 표면거칠기의 영향은 작게 나타나거나 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 수직하중이 큰 경우, 수직하중이 작은 경우에 비하여 연삭의 영향이 크게 발생하여 모든 경우에서 전이층이 비교적 고르게 형성되어, 마찰계수도 작게 나타나고 상대재료의 표면거칠기의 영향도 적게 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 실험 결과에서 상대재료의 표면거칠기가 UHMWPE의 마찰계수에 미치는 영향은 수직하중과 상대속도에 따라 달라지는 것으로 결론지을 수 있다.

1,800 m의 미끄럼 거리 후 UHMWPE의 마멸량은, PTFE와는 달리 극히 적어, 본 연구에 사용된 정밀저울을 이용하여 정량적으로 측정하기 어려웠다. 그러므로, UHMWPE의 마멸 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 가장 가혹한 실험조건인 9.8 N 수직하중, 0.5 m/s의 상대

Fig. 12. Optical micrographs of PTFE blocks after the sliding test with carbon steel ring (Ra=0.4 μm) under 9.8 N normal force with 0.2 m/s sliding speed.

속도에서 실험시간을 3시간, 5시간, 10시간으로 변화시키며, 표면거칠기 0.8 μm 를 가지는 탄소강에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 11은 18,000 m의 미끄럼 거리 동안 마찰계수의 변화를 나타낸다. 실험 후의 질량 감소량은 1,800 m, 5,400 m, 9,000 m, 18,000 m의 미끄럼 거리에 대하여 각각 0.6 mg, 0.8 mg, 3.2 mg, 3.4 mg으로 미끄럼 거리가 증가함에 따라 대략적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 이는 PTFE에 비하여 극히 작은 양에 해당하였다. UHMWPE의 마멸계수는 $7 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ 으로 나타났는데, 이는 PTFE에 비하여 0.1배~0.7배 정도로 작은 값으로써, UHMWPE의 높은 경도로 인하여 마멸계수가 더 작게 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 12은 실험 후의 탄소강 표면의 광학현미경 사진을 나타내는 것으로 9.8 N의 수직하중, 0.2 m/s의 상대속도에서 표면거칠기 0.4 μm 를 가지는 탄소강과 실험한 결과를 나타낸다. Fig. 8에 제시된 PTFE에 비하여 재료 전이층을 확연하게 나타나지는 않았는데, 이는 UHMWPE의 마멸량이 PTFE에 비하여 0.001배 정도로 작기 때문으로 여겨진다. 그러나, 탄소강의 표면이 Fig. 3에 비하여 오염되어 있는 것을 알 수 있다. 즉, UHMWPE의 경우, 높은 기계적 물성으로 인하여 발생하는 마멸입자, 또는 전이층이 형성되는 정도가 PTFE에 비하여 극히 작고, 이에 따라 전이층 형성이 마찰계수에 미치는 영향이 상대적으로 적은 것으로 결론지을 수 있다. 또한, 마멸량이 작음에 따라 UHMWPE의 표면거칠기 변화는 실험 전후 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 상대재료인 탄소강의 표면거칠기가 PTFE와 UHMWPE의 마찰 및 마멸 특성에 미치는 영향에 대하여 block-on-ring tribotester를 이용하여 실험적으로 고찰하였다. 본 연구의 실험조건에서, 두 재료 모두에 대하여 수직하중이 크고 상대속도가 작은 경우 작은 마찰 특성을 나타내었으며, PTFE의 마찰계수 (0.18~0.25)는 UHMWPE의 마찰계수 (0.2~0.6)보다 작은 것으로 나타났다. 이는 PTFE가 가지는 재료 자체의 안정적인 화학적 특성 이외에, PTFE가 UHMWPE에 비하여 재료 전이층 형성이 더욱 활발히 형성되기 때문이며, 이와 같은 결과는 광학현미경 사진 분석을 통하여 확인할 수 있었다. 상대재료의 표면거칠기가 마찰 특성에 미치는 영향은 UHMWPE의 경우 PTFE에 비하여 훨씬 크게 나타났으며, 그 영향은 수직하중 및 상대속도에 따라 다르게 전개되는 것을 알 수 있었다. 이는 경도가 작은 PTFE의 경우 상대재료의 표면거칠기 변화에 따른 연삭효과가 모든 경우에 비교적 비슷한 정도로 발생하므로, 재료 전이층에 기여하는 연삭효과도 비교적 균일하기 때문으로 생각된다. 그러나 UHMWPE의 경우, 상대재료의 표면거칠기나 수직하중에 따라 국부적인 접촉압력이 다르고, 연삭에 의한 마멸입자 생성 및 전이층의 형성이 다르게 발생하는 것으로 여겨진다. Archard의 마멸법칙을 이용하여 각 재료의 마멸계수를 구한 결과, PTFE의 마멸계수는 $3 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ 로, UHMWPE의 마멸계수는 $7 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ 로 나타났다. 이와 같은 연구결과는 향후, PTFE와 UHMWPE의 응용분야에서 효과적인 표면설계를 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Bhushan, B, Principles and Application of Tribology, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999.
2. Blanchet, T.A. and Kennedy F.E., "Effects of Oscil-

- latory Speed and Mutual Overlap on the Tribological Behavior of PTFE and Selected PTFE-based Self-lubricating Composites," *Tribology Transactions*, Vol. 34, pp. 327-334, 1991.
3. Wang, A., Sun, D.C., Stark, C., and Dumbleton, J.H., "Wear Mechanisms of UHMWPE in Total Joint Replacement," *Wear*, Vol. 181-183, pp. 241-249, 1995.
4. V.A. Smurugov, V.A. Senatrev, A.I., Savkin, V.G., Biran, V.V., and Sviridyonok, A.I., "On PTFE Transfer and Thermoactivation Mechanism of Wear," *Wear*, Vol. 185, pp. 61-69, 1992.
5. Blanchet, T.A. and Kennedy F.E., "Sliding Wear Mechanism of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE Composites," *Wear*, Vol. 153, pp. 229-243, 1992.
6. Sawyer, W.G., Freudenberg, K.D., Bhimaraj, P., and Schadler, L.S., "A Study on the Friction and Wear Behavior of PTFE Filled with Alumina Nanoparticles," *Wear*, Vol. 254, pp. 573-580, 2003.
7. Shi Y., Feng, X., Wang, H., and Lua, X., "The Effect of Surface Modification on the Friction and Wear Behavior of Carbon Nanofiber-filled PTFE Composites," *Wear*, Vol. 264, pp. 934-939, 2008.
8. Barrett, T.S., Stachwiak, G.W., and Batchelor, A.W., "Effect of Roughness and Sliding Speed on the Wear and Friction of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene," *Wear*, Vol. 153, pp. 331-350, 1992.
9. Turell, M.E., Friedlaender G.E., Wang A., Thornhill T.S., and Bellare, A., "The Effect of Counterface Roughness on the Wear of UHMWPE for Rectangular Wear Paths," *Wear*, Vol. 259, pp. 984-991, 2005.
10. Lloyd, A.I.G. and Noël, R.E.J., "The Effect of Counterface Surface Roughness on the Wear of UHMWPE in Water and Oil-in-water Emulsion," *Tribology International*, Vol. 21, pp. 83-88, 1988.
11. Clarke, C.G. and Allen C., "The Water Lubricated, Sliding Wear Behaviour of Polymeric Materials Against Steel," *Tribology International*, Vol. 24, pp. 109-118, 1991.
12. Xie, X.L., Tang, C.Y., Chan, K.Y.Y., Wu, X.C., Tsui, C.P., and Cheung, C.Y., "Wear Performance of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene/quartz Composites," *Biomaterials*, Vol. 24, pp. 1889-1896, 2003.
13. Ge, S., Wang, S., and Huang, X., "Increasing the Wear Resistance of UHMWPE Acetabular Cups by Adding Natural Biocompatible Particles," *Wear*, Vol. 267, pp. 770-776, 2009.
14. Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W., Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, Boston, 2001.