

두가지 기구운동을 하는 타이타늄 합금과 스테인레스 스틸 디스크에 대한 초고분자량 폴리에틸렌 핀의 마멸

이권용[†] · 김석영* · 김신윤**

세종대학교 기계항공우주공학부, *영남대학교 금속 및 재료공학부
**경북대학교 정형외과학교실

Wear of UHMWPE Pins Against Ti-alloy and Stainless Steel Disks Moving in Two Kinematic Motions

Kwon-Yong Lee[†], Sukyoung Kim* and Shin-Yoon Kim**

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sejong University
*School of Metallurgy and Materials Engineering, Yeungnam University
**Department of Orthopedic Surgery, Kyungpook National University

Abstract – The wear behaviors of ultrahigh molecular weight polyethylene pins against titanium alloy and stainless steel disks moving in two different kinematic motion were investigated by conducting repeat pass rotational sliding and linear reciprocal sliding wear tests. Linear reciprocal motion wore more the polyethylene pin than did repeat pass rotational motion for both disk materials. It means that the repeated directional change of contact stresses generates more wear debris in polyethylene. For the linear reciprocal sliding tests, titanium alloy disks were damaged with some scratches after one million cycles but no surface damage was observed on the polyethylene pins. On the other hand, for the repeat pass rotational sliding tests, all titanium alloy disks were severely abraded on the entire region of sliding track. This phenomenon can be interpreted by that stress fatigue under repeated sliding contact initiated titanium oxide layer wear particles from disk surface, and these hard particles were embedded into polyethylene pin and then they severely abraded the disk surface. From these results it can be concluded that the kinematic motion in pin-on-disk wear tests play a crucial role on the wear behaviors of UHMWPE pins against titanium alloy and stainless steel disks.

Key words – wear, kinematic motion, UHMWPE, Ti-alloy, stainless steel.

1. 서 론

1960년대 Sir Charnley에 의하여 시작된 인공고관절 시술에는 여러 종류의 생체재료들이 사용되어져 왔으며, 이러한 인공관절 대체물의 수명을 연장하기 위한 노력이 지속되고 있다. 이 가운데 인공관절 베어링 역할을 하는 라이너 재료로는 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE)이 가장 성공적으로 널리 사용되고 있다. 초고분자량 폴리에틸렌은 현존하는 폴리머 중에서 가장 좋은 충격 저항성과 연삭마멸 저항성을 가질 뿐 아니

라 생체 적합성도 매우 우수한 재료로 알려져 있다. 그러나, 인공관절의 운동에 의한 초고분자량 폴리에틸렌 미세 마멸입자가 주위 골조직의 용해와 궁극적인 무균성 인공관절 해리 현상을 일으키는 것으로 확인되었다 [1-3] 따라서 폴리에틸렌의 마멸이 인공관절 관련 연구에 가장 주목을 받고 있는 실정이다.

재치환 수술이 필요한 인공관절에서 축출한 라이너로부터의 임상결과 뿐 아니라 실험실에서 수행한 시뮬레이션 마멸실험 결과들을 통하여 마멸 형상의 관찰, 마멸 기구의 분석, 마멸에 끼치는 인자의 확인 등이 이루어지고 있다. 이들 중에는 고관절과 슬관절의 임상 적용에서 발생하는 마멸 형태와 마멸입자의 형상분석을

[†]주저자 · 책임저자 : kwonlee@sejong.ac.kr

통한 마멸기구의 차이점에 대한 연구[4,5]와 인공관절 치환술 이후 X-선 촬영에 의한 마멸정도의 분석[6-8] 및 재치환수술 시에 확보된 라이너의 형상 변화 측정 및 마멸형태 관찰을 통한 마멸정도의 분석 결과[9-11] 등이 발표되었다.

실험실에서의 폴리에틸렌 마멸특성 연구는 pin-on-disk 시험기와, 관절의 기구운동을 인체와 유사하게 움직일 수 있으며 관절에 작용하는 하중 조건을 모방할 수 있는 joint simulator를 사용하여 수행되어 왔다. 특히, 최근에는 기구학적 운동과 상대 접촉 운동의 방향성이 폴리에틸렌 마멸에 크게 영향을 끼치는 것으로 확인되었다[12-14]. 이는 다른 기구학적 운동과 상대운동 방향성의 중복효과가 폴리에틸렌 접촉면에 각기 다른 응력 분포를 발생시키고 따라서 마멸현상에도 차이를 발생시키는 것으로 해석된다.

본 연구에서는 반복회전운동과 왕복직선운동을 하는 pin-on-disk 마멸시험기를 이용하여 생체재료로 사용되는 금속(Ti-alloy와 stainless steel) disk와 초고분자량 폴리에틸렌 pin의 접촉 하에 두 가지 서로 다른 기구학적 운동이 폴리에틸렌의 마멸에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 실험방법

2-1. 시편

12개의 원통형(직경 10 mm, 길이 8 mm) 폴리에틸렌 pin이 압출성형된 UHMWPE rod(GUR 4150HP)로부터 가공되었으며, 이들 각각의 절반이 Ti-alloy (Ti6Al4V) disk와 의료용 stainless steel (316L) disk에 대한 마멸 시편(직경 70 mm)으로 사용되었다. 두 가지 disk 재질에 대하여 각각 3개의 폴리에틸렌 pin이 두 가지 기구학적 운동(반복회전운동 및 왕복직선운동)에 대하여 시험되었다(n=3). 모든 disk 시편들은 거울과 같은 수준으로 polishing 표면처리 ($Ra=0.025 \mu m$)되어 사용되었다.

2-2. 실험 방법

반복회전운동과 왕복직선운동을 동시에 실시할 수 있는 pin-on-disk 마멸시험기가 본 실험에 사용되었다(Fig. 1). 각각의 기구운동 당 3개의 station이 하나의 구동으로 동시에 실시되었다. 각각의 pin과 disk에는 평균 고관절 하중에 해당하는 4 MPa의 접촉 응력이 발생하도록 lever 끝에 dead weight를 가하였다.

반복회전운동과 왕복직선운동 모두 정상 걸음걸이에

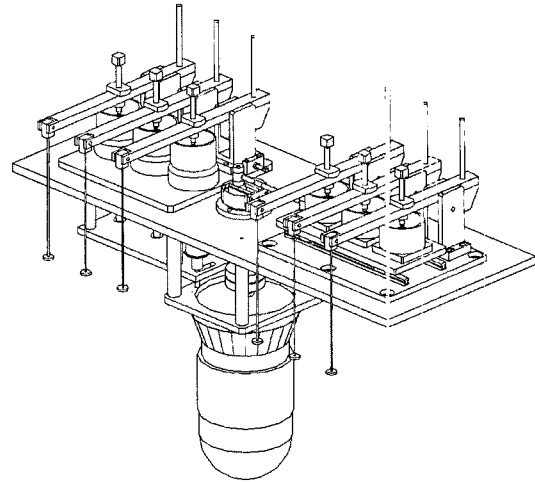


Fig. 1. Schematic diagram of pin-on-disk wear testing apparatus.

해당하는 1 Hz의 주기로 움직이며 각 cycle (초)당 63 mm의 미끄럼 거리를 이동하도록 설정하였다. 모든 마멸실험은 1% sodium azide 용액으로 체적비가 2:1 되도록 희석된 bovine serum이 윤활제로 사용되고 상온에서 10^6 cycles 동안 지속하여 실험을 실시하였다.

폴리에틸렌 pin의 마멸양은 무게 변화를 microbalance(10^{-5} g 정확도)로 10^5 cycles 마다 측정하였다. pin시편이 실험 중에 흡수하는 수분에 의한 무게 변화를 soak control 실험을 실시하고, 측정 마멸양을 보정하여 실질 마멸양을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

마멸실험으로부터 측정된 UHMWPE 시편의 평균 마멸양의 변화가 Fig. 2에 도시되었다. Stainless steel disk의 경우, 두 가지 기구운동에 있어서의 실험은 일백만 cycles까지 진행되었으며, Ti-alloy disk의 경우, 반복회전운동은 일백만 cycles동안, 왕복직선운동은 $2 \sim 3 \times 10^5$ cycles 이내에서 모든 실험을 중단하였다. 그 이유는 다량의 검은 색 Ti-alloy debris가 bovine serum에 섞여서 검게 색이 변화된 것이 관찰되었기 때문이다.

3-1. 기구운동 및 disk 손상의 차이

실험결과 비교가 가능한 영역에서 (stainless steel은 전 영역, Ti-alloy는 20만 cycles까지), 두 disk 재질에 대하여 왕복직선운동의 경우가 반복회전운동의 경우보다 더 많은 pin 마멸을 일으키는 것으로 관찰되었다.

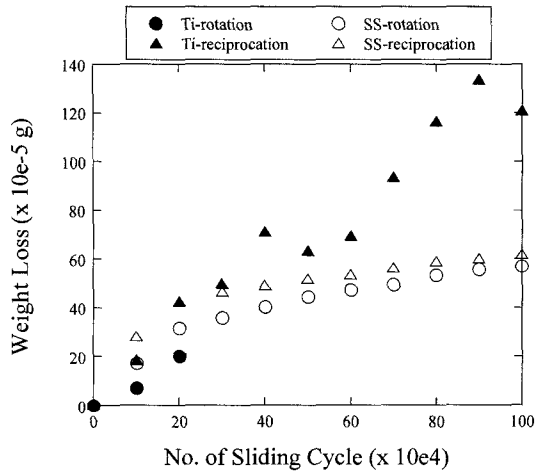


Fig. 2. Mean wear of UHMWPE pins against Ti-alloy and stainless steel disk.

이것은 long molecular chain으로 구성된 폴리에틸렌 미세구조가, 접촉응력의 방향이 반복회전운동 시에 제한적으로 바뀌는 접촉에 대하여 보다는 접촉응력의 방향이 연속하여 정반대로 바뀌는 왕복직선운동아래서의 접촉에 대하여 더욱 취약하여서 마멸입자를 생성하기 쉬운 것으로 해석된다. 이러한 기구학적 운동과 폴리에틸렌 미세구조와의 상관관계[15,16]를 일관성 있게 분석하기 위해서는 다른 미세구조를 가지는 폴리에틸렌에 대한 마멸 결과와의 비교가 필요하다.

Ti-alloy disk의 경우, 반복회전운동 아래서 2~3 × 10⁵ cycles 이내에 중단된 실험의 폴리에틸렌 pin을 관찰하면, 다량의 검은 색 Ti-alloy debris가 폴리에틸렌 접촉면에 박혀서 초음파 세척으로도 분리되지 않았으며, disk 위의 wear track은 심하게 긁혀서 전체 track에 groove가 형성되어 있는 것이 관찰되었다. 반면에, 왕복직선운동 아래서의 마멸실험에서는 약간의 scratch가 wear track에서 관찰되었으나, disk상의 심한 groove나 pin 시편에 박힌 Ti-alloy 입자는 관찰되지 않았다(Fig. 3).

한편, Stainless steel disk의 경우에는 왕복 직선운동 뿐 아니라 반복 회전운동에서도 약간의 fine scratch 이외에는 disk에 표면손상이 없었으며, stainless steel debris도 관찰되지 않았다.

3-2. Ti-alloy 산화와 피로마멸

반복회전운동 하는 두 가지 다른 disk 재질에서의 마멸손상의 두드러진 차이는 disk의 산화 정도의 차이

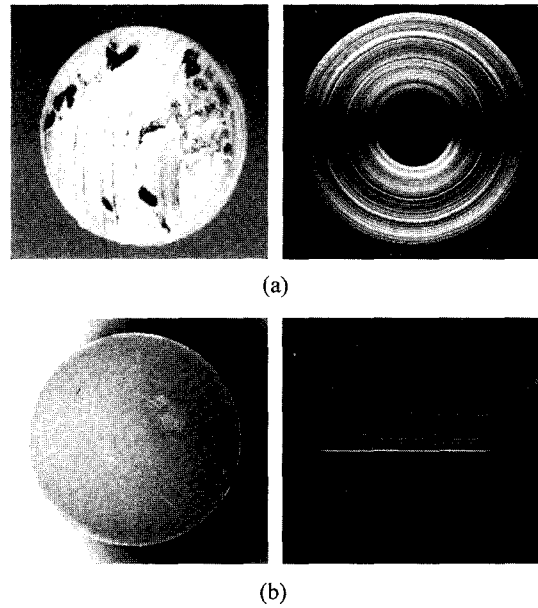


Fig. 3. Contact surfaces of pin and Ti-alloy disk pairs under (a) repeat pass sliding and (b) reciprocal sliding.

에 기인한 것으로 사려된다. Stainless steel 표면은 산화가 거의 되지 않지만, Ti-alloy 표면은 시편 준비과정에서나 마멸실험동안에 쉽게 산화되어 산화막이 형성된다. 이 산화막은 매우 단단하고 취성이 강하여 반복되는 접촉 하중에 의하여 피로 파괴가 일어나며 이 과정을 통하여 미세한 마멸입자가 생겨나게 된다. 또한 Ti-alloy disk 시편의 polishing 과정에서 표면에 미세 손상이 누적되어 피로 파괴과정을 거쳐서 미세 마멸입자가 생성될 수도 있을 것이다.

이들 마멸입자는 wear track에 쌓이거나 끼어서 폴리에틸렌 pin에 박히게 되고 연이어서 disk 표면을 긁게 된다. sliding cycle이 계속될수록 마멸입자의 수가 급속하게 증가하고 groove가 심화되는 표면 손상이 가증된다.

위에 언급한 Ti-alloy disk의 마멸은 초기 인공관절의 골두용 재료로 사용되었던 Ti-alloy 골두의 임상결과와 같은 경향을 보여주고 있다[17,18]. 인공고관절 재치환 수술 시에 채취된 Ti-alloy 골두의 경우에 Ti-alloy의 산화작용과 이로 인한 극심한 골두 마멸현상에 대한 관찰과 동일한 맥락의 결과라고 할 수 있다.

3-3. 윤활제 거동의 영향

같은 Ti-alloy disk에 대하여 반복회전운동의 경우와

왕복직선운동의 경우에 마멸 현상의 현격한 차이에는 윤활제로 사용한 bovine serum의 용기 내에서의 움직임이 큰 영향을 끼친 것으로 사려된다. 1 Hz의 저속으로 반복 회전하는 용기 내의 serum은 점성이 매우 크고, 그 움직임이 매우 안정적이어서 실험 중에 발생한 마멸입자가 wear track 안에 머물러 폴리에틸렌 pin에 박힐 확률이 큰 반면에, 왕복직선운동 하는 용기 내의 serum은 운동 방향이 바뀔 때마다 출렁이면서 실험 중에 생성된 마멸입자가 wear track에 남아 있지 못하고 흩어지며, 폴리에틸렌 pin에 박히지 않아서 disk의 지속적인 마멸손상을 일으키지 못하는 것으로 해석된다.

4. 결 론

반복회전과 왕복직선의 서로 다른 기구 운동을 하는 의료용 Ti-alloy와 Stainless steel disks에 대한 초고분자량 폴리에틸렌 pins의 마멸실험을 통하여 기구학적 운동이 폴리에틸렌 마멸에 끼치는 영향에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

서로 다른 접촉응력을 일으키고 이들의 방향을 반복하여 변화시키는 서로 다른 기구학적 운동은 초고분자량 폴리에틸렌의 마멸 현상에 매우 중요한 역할을 한다. 금속 disk 시편으로부터의 마멸을 배제할 경우, 반복회전운동보다 왕복직선운동 아래서 더 많은 폴리에틸렌의 마멸이 발생하였다. 또한, 상대 접촉면의 금속 재질에 따라 산화작용과 피로 파괴에 의한 마멸입자 생성 및 마멸 손상 누적에 큰 차이가 있으며, 기구 운동에 의한 윤활제 움직임 또한 마멸 현상에 커다란 영향을 끼칠 수 있다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 선도연구자지원사업 (과제 번호: KRF-99-041-F00278)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. H.C. Amstutz, P. Campbell, N. Kossovsky, and I.C. Clarke, "Mechanism and clinical significance of wear debris-induced osteolysis," *Clin. Orthop.* **276**, pp.7-18, 1992.
2. W.J. Maloney and R.L. Smith, "Periprosthetic osteolysis in total hip arthroplasty: the role of particulate wear debris," *J. Bone Joint Surg.*, **77A**, pp.1448-1461, 1995.
3. S.R. Goldring, C.R. Clark, and T.M. Wright, "The problem in total joint arthroplasty: Aseptic loosening [Editorial]," *J. Bone Joint Surg.*, **75A**, pp.799-801, 1993.
4. A.S. Shanbhag, J.J. Jacobs, T.T. Glant, J.L. Gilbert, J. Black, and J.O. Galante, "Composition and morphology of wear debris in failed uncemented total hip replacement," *J. Bone Joint Surg.*, **76B**, pp.60-67, 1994.
5. T.P. Schmalzried, P. Campbell, A.K. Schmitt, I.C. Brown, and H.C. Amstutz, "Shape and dimensional characteristics of polyethylene wear particles generated in vivo by total knee replacements compared to total hip replacements," *J. Biomed. Mater. Res. (Appl. Biomater.)*, **38**, pp.203-210, 1997.
6. P.A. Devane, R.B. Bourne, C.H. Rorabeck, S. MacDonald, and E.J. Robinson, "Measurement of polyethylene wear in metal-backed acetabular cups, II Clinical application," *Clin. Orthop.*, **319**, pp.317-326, 1995.
7. P.A. Devane, E.J. Robinson, R.B. Bourne, C.H. Rorabeck, N.N. Nayak, and J.G. Horne, "Measurement of polyethylene wear in acetabular components inserted with and without cement, A randomized trial," *J. Bone Joint Surg.*, **79A**, pp.682-689, 1997.
8. C.M. Shaver, T.D. Brown, S.L. Hillis, and J.J. Callaghan, "Digital edge-detection measurement of polyethylene wear after total hip arthroplasty," *J. Bone Joint Surg.*, **79A**, pp.690-700, 1997.
9. J.M. Kabo, J.S. Gebhard, G. Loren, and H.C. Amstutz, "In vivo wear of polyethylene acetabular components," *J. Bone Joint Surg.*, **75B**, pp.254-258, 1993.
10. G.H. Isaac, B.M. Wroblewski, J.R. Atkinson, D. Dowson, "A tribological study of retrieved hip prostheses," *Clin. Orthop.*, **276**, pp.115-125, 1992.
11. C.J. Sychterz, K.H. Moon, Y. Hashimoto, K.M. Terefenko, C.A. Engh, Jr., and T.W. Bauer, "Wear of polyethylene cups in total hip arthroplasty," *J. Bone Joint Surg.*, **78A**, pp.1193-1200, 1996.
12. A. Wang, C. Stark, and J.H. Dumbleton, "Mechanistic and morphological origins of ultra-high molecular weight polyethylene wear debris in total joint replacement prostheses," *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part H: J. Eng. Med.*, **210**, pp.141-155, 1996.
13. C.R. Bragdon, D.O. O'Connor, J.D. Lowenstein, M. Jasty, and W.D. Syniuta, "The importance of multidirectional motion on the wear of polyethylene," *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part H: J. Eng. Med.*, **210**, pp.157-165, 1996.
14. V. Saikko, "A multidirectional motion pin-on-disk

- wear test method for prosthetic joint materials," *J. Biomed. Mater. Res.*, **41**, pp.58-64, 1998.
15. A. Wang, D.C. Sun, S.S. Yau, B. Edwards, M. Sokol, A. Essner, V.K. Polineni, C. Stark, and J.H. Dumbleton, "Orientation softening in the deformation and wear of ultra-high molecular weight polyethylene," *Wear*, **203-204**, pp.230-241, 1997.
 16. K.Y. Lee and K.H. Lee, "Wear of shelf-aged UHMWPE acetabular liners," *Wear*, **225-229**, pp.728-733, 1999.
 17. R.A. Buchanan, E.D. Rigney, Jr., and J.M. Williams, "Wear-accelerated corrosion of Ti6Al4V and nitrogen-implanted Ti6Al4V: Mechanisms and influence of fixed-stress magnitude," *J. Biomed. Mater. Res.*, **21**, pp.367-377, 1987.
 18. T.E. McGovern, J. Black, J.J. Jacobs, R.M. Graham, and M. LaBerge, "In vivo wear of Ti6Al4V femoral heads: A retrieval study," *J. Biomed. Mater. Res.*, **32**, pp.447-457, 1996.