

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

이 권 용 · 김 석 영* · 김 신 윤**

대구대학교 자동차 · 산업 · 기계공학부, *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 Automotive, Industrial, and Mechanical Engineering, Taegu 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 기술에는 여러 종류의 생체재료들이 사용되어져 왔으며, 이러한 인공관

절 대체물의 수명을 연장하기 위한 노력이 지속되고 있다. 이 가운데 인공관절 베어링 역할을 하는 라이너 재질로는 초고분자량 폴리에틸렌 (UHMWPE)이 가장 성공적으로 널리 사용되고 있다. 초고분자

량 폴리에틸렌은 현존하는 폴리머 중에서 가장 좋은 충격 저항성과 연삭마멸 저항성을 가질 뿐 아니라 생체 적합성도 매우 우수한 재질로 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.

재치환수술이 필요한 인공관절에서 축출한 라이너로부터의 임상결과 뿐 아니라 실험실에서 수행한 시뮬레이션 마멸실험 결과들이 마멸 형태의 관찰, 마멸 기구의 분석, 마멸에 끼치는 인자의 확인 등을 통하여 분석되어지고 있다. 이들 중에는 고관절과 슬관절의 임상 적용에서 발생하는 마멸 형태와 마멸입자의 형상분석을 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 마멸 형태 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 실험실 수준에서의 마멸실험에서 폴리에틸렌 마멸에 크게 영향을 끼치는 것으로 확인되었다 [12-14]. 다른 기구학적 운동과 상대운동 방향성의 중복현상은 폴리에틸렌 접촉면에 각기 다른 응력 분포를 발생시키고 따라서 마멸현상에도 차이가 발생하게 되는 것이다.

본 연구에서는 반복 회전운동과 왕복 직선운동을 하는 pin-on-disk 마멸시험기를 이용하여 생체재료로 사용되는 금속 disk와 초고분자량 폴리에틸렌 pin의 접촉하에 두 가지 서로 다른 기구학적 운동이 폴리에틸렌의 마멸에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 실험방법

2-1. 시편

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

2-2. 실험 방법

반복 회전운동과 왕복 직선운동을 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 4MPa의 접촉 응력이 발생하도록 lever 끝에 dead weight를 가하였다.

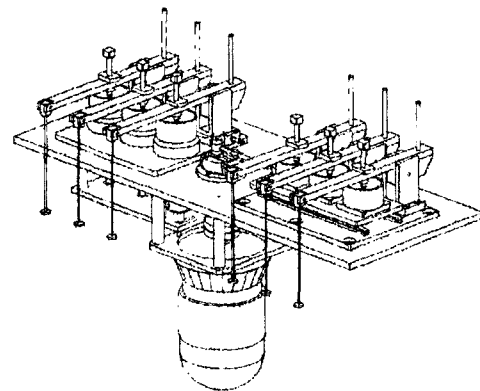


Fig. 1. Schematic diagram of pin-on-disk wear testing apparatus.

반복 회전운동과 왕복 직선운동 모두 1Hz의 속도로 움직이며 각 cycle 당 63mm의 미끄럼 거리를 이동하도록 설정하였다.

모든 마멸실험은 1% sodium azide 용액으로 체적비가 2:1 되도록 희석된 bovine resum이 윤활제로 사용되고 상온에서 10^6 cycle 동안 지속하여 실험을 실시하였다.

폴리에틸렌 pin의 마멸양은 무게 변화를 microbalance (10^{-5} g 정확도)로 매 105 cycle마다 측정하였다. 이 측정치는 폴리에틸렌 시편이 실험 중에 흡수하는 수분에 의한 무게 변화를 soak control 실험을 실시하고 보정하여 실질 마멸양을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

폴리에틸렌 pin 시편과 Ti-alloy 및 Stainless steel disk 시편과의 마멸실험으로부터 측정된 일백만 sliding cycle 후의 평균 마멸양이 Fig. 2에 도시되었다. 두가지 disk 재질에 대하여 왕복 직선운동의 경우가 반복 회전운동의 경우보다 더 많은 폴리에틸렌의 마멸을 일으키는 것으로 밝혀졌다. 이것은 long molecular chain으로 구성된 폴리에틸렌 미세구조가 접촉응력의 방향이 상대적으로 적게 바뀌는 반복 회전운동 접촉 시 보다, 왕복 직선운동 접촉 시에 지속적으로 정반대로 바뀌는 접촉응력의 방향에 대하여 취약하여 마멸입자를 생성하기 쉬운 것으로 해석된다. 이러한 기구학적 운동과 폴리에틸렌의 미

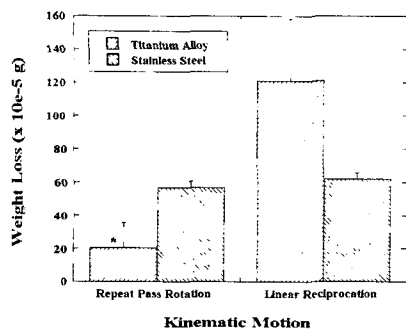


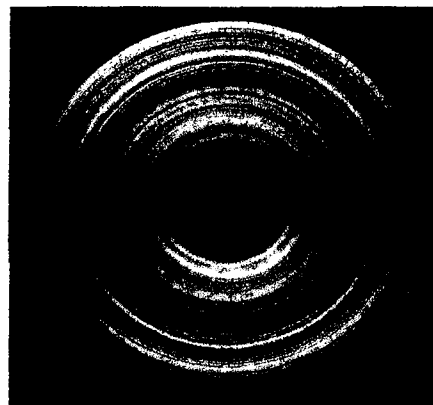
Fig. 2. Mean wear of UHMWPE pins against Ti-alloy and Stainless steel disks after one million sliding cycles. (*) stanks for after 3×10^5 sliding cycles.

세구조와의 상관관계 [15,16]를 일관성 있게 분석하기 위해서는 다른 미세구조를 가지는 산화된 폴리에틸렌에 대한 동일 실험이 필요하다.

Ti-alloy disk의 경우, 왕복 직선운동 아래의 마멸실험은 일백만 sliding cycles 동안 disk와 pin 시편의 접촉면에 별다른 손상이 발견되지 않았다. 그러나, 반복 회전운동 아래서는 $2 \sim 3 \times 10^5$ sliding cycles 이내에서 모든 실험을 중단하였다. 그 이유는 다량의 검은 색 Ti-alloy debris가 bovine serum에 섞여서 검게 색이 변화된 것이 관찰되었기 때문이다.



(a) UHMWPE pin



(b) Ti-alloy disk

Fig. 3. Contact surfaces of (a) a pin showing embedded Ti-alloy debris and (b) a disk showing severe grooves.

이 debris들은 폴리에틸렌 접촉면에 박혀서 초음파 세척으로도 분리되지 않았으며, disk 위의 wear track은 심하게 긁혀서 전체 track에 groove가 형성되어 있는 것이 관찰되었다 (Fig. 3.).

같은 Ti-alloy disk에 대하여 왕복 직선운동 아래서의 마멸실험에서는 약간의 긴 scratch가 wear track에서 관찰되었으나, 심한 groove나 pin 시편에 박힌 Ti-alloy debris는 관찰되지 않았다.

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

반복 회전운동 하는 두 가지 다른 disk 재질에서의 마멸손상의 두드러진 차이는 disk의 산화 정도의 차이에 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 disk 시편의 polishing 과정에서 표면에 미세 손상이 누적되어 피로 파괴과정을 거쳐서 마멸입자가 생성될 수도 있을 것이다 [17,18]. 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 가중된다.

같은 Ti-alloy disk에 대하여 반복 회전운동의 경우와 왕복 직선운동의 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, 왕

복 직선운동 하는 용기 내의 serum은 운동 방향이 바뀔 때마다 출렁이면서 피로 파괴에 의해 생성된 마멸입자가 wear track에 남아 있지 못하고 폴리에틸렌 pin에 박히지 않아서 지속적인 마멸손상을 일으키지 못하는 것으로 해석된다.

4. 결 론

반복 회전과 왕복 직선의 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.

기구학적 운동은 초고분자량 폴리에틸렌의 마멸 현상에 매우 중요한 역할을 하며, 반복 회전운동보다 왕복 직선운동 아래서 더 많은 마멸양이 발생하였다. 상대 접촉면의 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 끼치는 것으로 확인되었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] H.C. Amstutz, P. Campbell, N. Kossovsky, and I.C. Clarke, Mechanism and clinical significance of wear debris-induced osteolysis, Clin. Orthop. 276 (1992) 7-18.
- [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 (1995) 1448-1461.
- [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 (1993) 799-801.
- [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 (1994) 60-67.
- [5] T.P. Schmalzried, P. Campbell, A.K. Schmitt, I.C. Brown, and H.C. Amstutz, Shapes 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 (1997) 203-210.
- [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 (1995) 317-326.
- [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 (1997) 682-689.
- [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 (1997) 690-700.
- [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 (1993) 254-258.
- [10] G.H. Isaac, B.M. Wroblewski, J.R. Atkinson, D. Dowson, A tribological study of retrieved hip prostheses, *Clin. Orthop.*, 276 (1992) 115-125.
- [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 (1996) 1193-1200.
- [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 (1996) 141-155.
- [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 (1996) 157-165.
- [14] V. Saikko, A multidirectional motion pin-on-disk wear test method for prosthetic joint materials, *J. Biomed. Mater. Res.*, 41 (1998) 58-64.
- [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 (1997) 230-241.
- [16] K.Y. Lee and K.H. Lee, Wear of shelf-aged UHMWPE acetabular liners, *Wear*, 225-229 (1999) 728-733.
- [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 (1987) 367-377.
- [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 (1996) 447-457.