

접촉 형상과 기구학적 운동형태가 초고분자량 폴리에틸렌의 마멸에 미치는 영향

이 권 용

대구대학교 자동차·산업·기계공학부

Effects of Kinematic Motions and Contact configurations on the Wear of UHMWPE

Kwon-Yong Lee

School of Automotive, Industrial, and Mechanical Engineering, Taegu University

Abstract—The effects of contact configuration and kinematic motion on the wear of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) were investigated. Two different contact configurations were adopted for wear testing under the two different kinematic motions with un-irradiated UHMWPE specimens. Wear of UHMWPE pins against the linear reciprocating stainless steel disks was 8% higher than that against the uni-directional repeat pass rotating disks. Wear of UHMWPE disks moving in the linear reciprocating motion against stainless steel ball was 37% higher than that moving in the uni-directional repeat pass rotating motion. The results in this study show that the contact configuration and kinematic motion of sliding definitely affect the wear of UHMWPE through the differences in the contact stress states of UHMWPE.

Keywords: UHMWPE, Wear, Contact configuration, Kinematic motion.

1. 서 론

초고분자량 폴리에틸렌 (UHMWPE)은 현재 산업용으로 사용되고 있는 폴리머 가운데 가장 좋은 연삭마멸 저항성과 충격 저항성을 가지며 낮은 마찰계수와 좋은 생체 적합성 등의 특징을 가지고 있기 때문에 인공관절 치환술에 활용되는 베어링 라이너 재료로 가장 널리 사용되고 있다 [1]. 그러나, 초고분자량 폴리에틸렌 부분으로부터 발생하는 미세 마멸 입자들이 인공관절 주위의 골세포와의 세포반응을 통하여 골용해(bone resorption)를 일

으키고 세균의 감염 없이도 골과 인공관절 임플란트와의 분리(aseptic loosening)를 일컫어 인공관절 재 치환술을 수반시키는 것으로 보고되었다 [2-3]. 따라서, 초고분자량 폴리에틸렌의 마멸 저항성을 향상시키는 것이 마멸입자들의 수와 골용해를 줄여서 인공관절의 수명을 증가시킬 것이다. 과거 30년간의 많은 연구를 통하여 마멸계수, 마멸기구, 마멸면의 특성분석 등의 기초연구와 마멸양 평가를 위한 마멸 실험들이 진행되고 있다.

초고분자량 폴리에틸렌의 마멸에 영향을 미치는 인자들은 산화작용에 의한 물

성치 변화, 접촉형상, 접촉면의 접합정도, 표면 거칠기, 3rd body particles, 기구학적 운동형태, 환자의 무게와 활동성 등 많은 요소들이 있다. 초기 기초연구에는 pin-on-disk type의 마멸실험이 주로 활용되었으며, 이를 통하여 하중의 크기, 미끄럼 속도, 접촉면의 재질, 윤활제의 종류, 상대 접촉면의 거칠기 등의 정성적 연구 결과가 보고되었다 [4-7]. 또한 최근에는 인체의 관절에서 발생하는 관절하중과 관절의 운동을 재현할 수 있는 시뮬레이터를 활용한 정량적인 마멸실험 등이 실시되고 있다 [8-10].

인체의 하지부위에서 임상적으로 가장 널리 시술되는 인공관절의 대상은 고관절(hip joint)과 슬관절(knee joint)이다. 이 두 관절에서의 가장 큰 차이는 관절하중, 접촉형상, 관절운동 범위의 차이에 의한 접촉 응력의 차이이다. 특히, 인공 고관절의 경우, 금속 femoral head와 acetabular UHMWPE cup은 반구의 conformal contact을 이루며 관절운동 방향에 따라 sliding이 주로 발생한다. 반면에 인공 슬관절의 경우, 금속 femoral condyle과 tibial UHMWPE plateau는 부분적인 line 혹은 narrow surface contact을 이루며 부분적인 rolling과 sliding이 복합적으로 발생한다.

이 두가지 다른 접촉형상을 가지는 관절의 마멸분석을 위하여, 고관절의 경우는 UHMWPE pin과 금속 disk의 flat-to-flat contact 아래에서 pin-on-disk 마멸실험이 실시되고, 슬관절의 경우는 금속 ball (또는 cylinder 측면)과 UHMWPE disk의 point (또는 line) contact 아래에서 pin-on-disk 마멸실험이 실시된다. 대표적인 pin-on-disk screening 마멸실험에서는 한쪽 방향 반복 회전운동과 왕복 직선운동의 두가지 sliding운동 형태가 주로 채택된다.

본 연구에서는 위에 언급한 이 두 가지 다른 접촉형상과 두가지 기구학적 운동형태에 따른 UHMWPE의 마멸 특성의 차이를 분석하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 실험방법

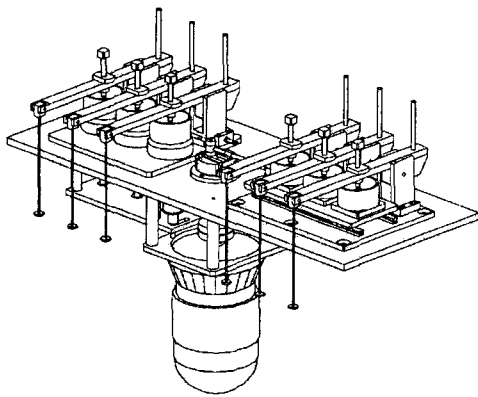
2-1. 시편

UHMWPE pin과 금속 disk의 flat-to-flat contact 아래에서의 pin-on-disk 마멸 실험을 위해서 8개의 원통형(직경 10mm, 길이 8mm) pin이 압출성형된 GUR 4150HP UHMWPE wafer로부터 가공되었다. 금속 disk로는 의료형 stainless steel disk (직경 70mm, 두께 20mm)가 사용되었다. 6개의 disk 시편들은 silicon carbide abrasive paper와 alumina powder로 polishing 처리되어 ($Ra=0.025\mu m$) 사용되었다. 3개의 pin이 각각 2가지 다른 기구학적 운동형태의 마멸실험에 사용되고, 나머지 2개의 pin은 윤활제내의 수분 흡수량의 측정을 위한 soak control 실험에 사용되었다.

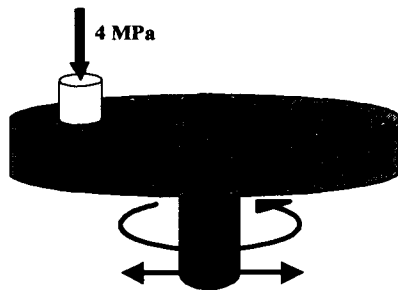
금속 ball과 UHMWPE disk의 point contact 아래에서의 pin-on-disk 마멸실험을 위해서, 6개의 stainless steel bearing ball (직경 8mm)과 8개의 UHMWPE disk (직경 70mm, 두께 8mm)가 압출성형된 GUR 4150HP UHMWPE rod로부터 가공되고 polishing 처리되었다. 3개의 disk가 각각 2가지 다른 기구학적 운동형태의 마멸실험에 사용되고, 나머지 2개의 disk는 윤활제내의 수분 흡수량의 측정을 위한 soak control 실험에 사용되었다.

2-2. 마멸 실험

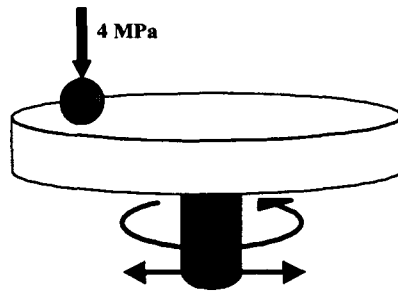
반복 회전운동과 왕복 직선운동을 동시에 실시할 수 있는 multi-function multi-station (각 기구학적 운동에 3 stations 씩) pin-on-disk 마멸시험기가 실험에 사용되었다 (Figure. 1). 각각의 pin과 disk에는 평균 고관절 하중에 해당하는 4MPa의 접촉 압력이 발생하도록 lever 끝에 dead weight를 부착하였고, 반복 회전운동과 왕복 직선운동을 모두 1Hz의 속도로 움직이며 각 cycle당 63mm의 미끄럼 거리를 이동하도록 설정하였다. 모든 마멸 실험은 1% sodium azide용액으로 체적비가 2:1이 되도록 희석된 bovine resum이 윤활제로 사용되고 상온에서 일백만 cycles동안 지속하여 실험을 실시하였다.



(a) multi-function multi-station tester



(b) UHMWPE pin-on-stainless steel disk contact configuration



(c) stainless steel ball-on-UHMWPE disk contact configuration

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

폴리에틸렌 pin과 폴리에틸렌 disk의 마멸양은 무게 변화를 microbalance(10^{-5} g 정확도)로 매 10^5 cycles마다 측정하였다. 모든 측정은 ultrasonic cleaner에 의해 아

세톤과 증류수로 세척 후 실시하였다. 이 측정치는 폴리에틸렌 시편이 실험 중에 bovine serum 용액으로부터 흡수한 수분에 의한 무게 변화를 soak control 실험에서 측정된 무게 변화 값으로 보정하였다. 또한, 마멸실험 중에 생기는 폴리에틸렌 disk 위의 wear track의 변화를 움푹 들어간 형상의 폭 변화를 각각 50만 cycles과 100만 cycles 이후에 surface tracer로 측정하여 비교하였다.

3. 결 과

3.1 UHMWPE pin wear on SS disk

UHMWPE pin과 stainless steel disk의 flat-to-flat contact 아래에서 100만 cycles 동안 반복 회전운동과 왕복 직선운동의 마멸실험 결과 UHMWPE pin의 마멸양이 기구학적 운동형태에 대하여 Fig. 2에 도시되었다. 왕복 직선운동의 마멸이 반복 회전운동의 마멸보다 8%정도 높았다.

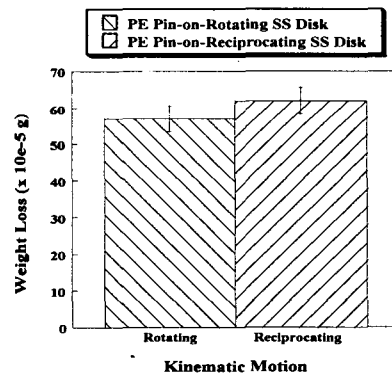


Fig. 2. Mean wear of UHMWPE pins against stainless steel disks.

3.2 SS ball on UHMWPE disk wear

Stainless steel ball 과 UHMWPE disk의 point contact 아래에서 100만 cycles 동안 반복 회전운동과 왕복 직선운동의 마멸실험 결과 UHMWPE disk의 마멸양이 기구학적 운동형태에 대하여 Fig. 3에 도시되었다. 왕복 직선운동의 마멸이 반복 회전운동의 마멸보다 37%정도 높았다.

4. 토 론

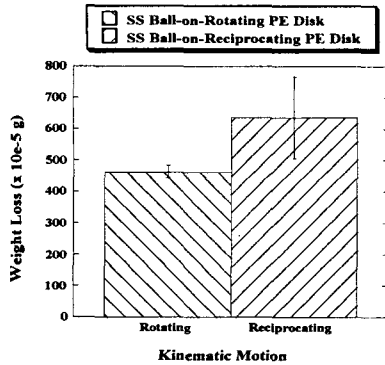


Fig. 3. Wear of UHMWPE disks against stainless steel balls.

Stainless steel ball 과 UHMWPE disk 의 point contact 아래에서 100만 cycles 동안 반복 회전운동과 왕복 직선운동의 마멸실험 중 폴리에틸렌 disk 위의 wear track 폭의 변화가 Fig. 4에 도시되었다. 마멸실험이 시작되기 전 4MPa의 접촉 압력 아래의 Herzian contact theory로부터 계산한 접촉 면적의 지름을 시작으로 하여 왕복 직선운동에서의 wear track 폭과 반복 회전운동에서의 wear track 폭을 비교하면, 초반과 후반에 반대의 증가를 경향을 보인다. 왕복 직선운동에서의 wear track 폭이 반복 회전운동에서의 wear track 폭보다 50만 cycles 이후 18.7%, 100만 cycles 이후 5.5% 더 크다.

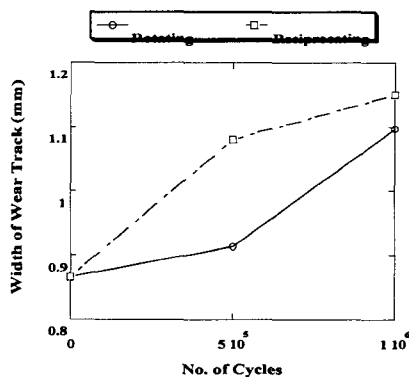


Fig. 4. Variation of width of wear track on the UHMWPE disks.

Stainless steel disk 위의 폴리에틸렌 pin과 폴리에틸렌 disk 위의 stainless steel ball 접촉 형태에 따른 폴리에틸렌 시편에서의 응력 상태를 비교하면, 폴리에틸렌 pin은 quasi-static 응력 상태 아래에 있고 폴리에틸렌 disk는 cyclic fluctuated 응력 상태 아래에 놓여있다. 이들 다른 응력상태는 인공 고관절의 well-conformed ball-on-socket contact과, 인공 무릎관절의 non-conformed contact과 각각 유사하다.

또한, 왕복 직선운동 아래서는 surface traction의 방향이 half cycle 마다 정반대로 바뀌며, 반복 회전운동 아래서는 surface traction의 방향이 매 순간 선속도의 방향에 수평한 방향으로 작용하면서 변화하는 폭이 제한적이다. UHMWPE의 미세구조는 외부로부터 작용되는 응력의 방향에 따라 molecular chain의 방향성이 달라지고 이로 인한 기계적 물성치도 달라진다 [9]. 따라서, 반복되는 접촉응력의 방향 변화에 대하여 UHMWPE 미세구조의 반복적인 재배열에 따른 기계적 결합의 발생이 미세 마멸입자의 생성에 큰 영향을 끼칠 것으로 사려된다. 두가지 기구운동 아래서 실시된 마멸실험의 결과를 보면, 접촉응력의 방향성이 완전히 바뀌는 왕복 직선운동이 상대적으로 응력의 방향이 적게 변하는 반복 회전운동의 경우보다 더 많은 마멸을 일으켰으며, 두가지 접촉형상 모두의 실험결과 왕복 직선운동 아래서의 마멸양이 반복 회전운동 아래서의 마멸양 보다 크다.

5. 결 론

접촉형상과 기구학적 운동은 초고분자량 폴리에틸렌의 마멸 현상에 매우 중요한 역할을 하며, 반복 회전운동보다 왕복 직선운동 아래서 더 많은 마멸양이 발생하였다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 선도연구자지원사업 (과제번호: KRF-99-041-F00278)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. UHMWPE disk 시편의 형상변화 측정을 위하여 경북대학교 Tribology Lab.의 surface tracer를 사용하도록 허락하여 주신 김석삼 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Stein, H.L., Ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE). *Engineered Materials Handbook*, vol. 2, Engineering Plastics, Ohio, ASM International 1992, 167-171
- [2] Amstutz, H.C., Campbell, P., Kossovsky, N., Clarke, I.C., Mechanism and clinical significance of wear debris-induced osteolysis. *Clin. Orthop.*, 276 (1992) 7-18
- [3] Goldring, S.R., Clark, C.R., Wright, T.M., The problem in total-joint arthroplasty: Aseptic loosening [Editorial]. *J. Bone Joint Surg.*, 75A (1993) 799-801
- [4] Atkinson, J.R., Brown, K.J., Dowson, D., The wear of high molecular weight polyethylene, Part I: The wear of isotropic polyethylene against dry stainless steel in unidirectional motion. *Trans. ASME J. Lubrication Technology*, 100 (1978) 208-218
- [5] Saikko, V., Wear and friction properties of prosthetic joint materials evaluated on a reciprocating pin-on-flat apparatus. *Wear*, 166 (1993) 169-178
- [6] Fisher, J., Dowson, D., Hamdzah, H., Lee, H.L., The effect of sliding velocity on the friction and wear of UHMWPE for use in total artificial joints. *Wear*, 175 (1994) 219-225
- [7] Barbour, P.S.M., Barton, D.C., Fisher, J., The influence of contact stress on the wear of UHMWPE for total replacement hip prostheses. *Wear*, 181-183 (1995) 250-257
- [8] Bragdon, C.R., O'Connor, D.O., Lowenstein, J.D., Jasty, M., Syniuta, W.D., The importance of multi-directional motion on the wear of polyethylene. *Proc Instn Mech Engrs*, 210 (1996) 157-165
- [9] Wang, A., Sun D.C., Yau, S.-S., Edwards, B., Sokol, M., Essner, A., Polineni, V.K., Stark, C., Dumbleton, J.H., Orientation softening in the deformation and wear of ultra-high molecular weight polyethylene. *Wear*, 203-204 (1997) 230-241
- [10] DesJardins, J.D., Walker, P.S., Haider, H., Perry, J., The use of a force-controlled dynamic knee simulator to quantify the mechanical performance of total knee replacement designs during functional activity. *J. Biomechanics*, 33 (2000) 1231-1242