

기구학적 운동이 돼지 무릎 관절연골의 마찰계수 변화에 미치는 영향

김환 · 김충연** · 이권용*** · 김대준*** · 임도형**

세종대학교 기계공학과
*세종대학교 신소재공학과
**세종대학교 의공학연구소

Effect of Kinematic Motion on Changes in Coefficients of Friction of Porcine Knee Joint Cartilage

Hwan Kim, ChoongYeon Kim**, KwonYong Lee***, DaeJoon Kim*** and DoHyung Kim**

Dept. of Mechanical Engineering, Sejong University

**Dept. of Advanced Material Engineering, Sejong University*

***Bioengineering Research Center, Sejong University*

(Received November 20, 2012 ; Revised December 31, 2012 ; Accepted January 4, 2013)

Abstract – In this study, the frictional behaviors of articular cartilage against a Co-Cr alloy in two types of kinematic motions were compared. Cartilage pins were punched from the femoral condyles of porcine knee joints, and Co-Cr alloy disks were machined from orthopedic-grade rods and polished to a surface roughness (R_a) of 0.002. Friction tests were conducted by using a pin-on-disk-type tribotester in phosphate buffered saline (PBS) under pressures of 0.5, 1, and 2 MPa. All tests were performed in the repeat pass rotational (ROT) and the linear reciprocal (RCP) sliding motions with the same sliding distance and speed of 50 mm/s. The coefficients of friction of the cartilage against the Co-Cr alloy increased with the sliding time in both kinematic motions for all contact pressures. The maximum coefficients of friction in RCP motion were 1.08, 2.82, and 1.96 times those in ROT motion for contact pressures of 0.5, 1, and 2 MPa, respectively. As the contact pressure increased, the coefficients of friction gradually increased in RCP motion, whereas they decrease and then increased in ROT motion. The interaction between the directional change of the shear stress and the orientation of collagen fiber in the superficial layer of the cartilage could affect the change in the frictional behaviors of the cartilage. A large difference in the coefficients of friction between the two kinematic motions could be interpreted as differences in the directional change of shear stress at the contact surface.

Keywords – kinematic motion(기구학적 운동), contact pressure(접촉압력), coefficients of friction(마찰계수), porcine knee joint cartilage(돼지무릎 관절연골), Co-Cr alloy(코발트 크롬 합금)

1. 서 론

연골(cartilages)은 뼈대를 이루는 고형 구조물로서 뼈와 마찬가지로 변형된 특수결합조직(specialized connective

tissue)의 한 종류이다. 연골 역시 뼈와 마찬가지로 표면은 섬유성 막인 연골막(perichondrium)으로 덮여 있어 연골의 재생은 이 막에서 이루어 진다. 그러나 연골 속에는 혈관이나 신경이 분포되어 있지 않은 것이 특징이다. 따라서 연골은 신진대사의 대사율이 낮고 재생도 느리며 조직이 한 번 생기게 되면 수명이 오래가고, 물리적 특성은 매끄러우면서도 질기고 때로는 탄력성이 있기 때문에

†주저자 · 책임저자 : kwonlee@sejong.ac.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2012년도 추계 학술대회 (2012.10.17~19. 제주) 발표논문임.

몸에서는 힘을 많이 받는 곳, 저항력과 탄력성이 필요한 곳, 바깥의 힘을 흡수하게 할 수 있는 곳에 연골이 놓여 있다[1]. 특히 관절연골은 관절에 가해지는 부하를 분산시켜 접촉압력을 감소시키고 마찰이 매우 낮으며 마모가 적은 부드러운 운동이 일어나도록 해 준다[2]. 무릎의 관절연골은 인체 내에서 가해지는 하중이 관절에 전달될 때에 그 전달되는 하중을 지지하고, 관절운동 시에 마찰을 감소시켜서 마모를 줄이는 베어링의 역할을 한다. 무릎 관절에는 일상적인 동작에 의해 체중의 4.5배나 되는 하중 (0.5-2 MPa에 해당하는 접촉압력) 이 가해지는데, 관절 연골은 이러한 높은 힘을 받는 관절을 수십 년 동안 기능적 문제를 일으키지 않고 잘 견딜 수 있게 하는 기능을 수행한다[3-5]. 관절 연골은 연골 세포(chondrocyte)의 밀도가 낮아 상대적으로 세포 외 기질(extracellular matrix)이 차지하는 부분이 많고, 관절 연골이 손상된 후 그 주변에 있는 연골 세포의 이동(migration)이 제한적이어서 관절 연골의 회복 능력은 다른 조직에 비해서 상대적으로 낮다[6-8]. 이러한 관절연골이 노화가 진행되거나 외부로부터 과도한 하중이 작용하게 되면 마모를 피할 수 없고 한번 손상된 연골은 생체 내에서 재생이 되지 않기 때문에 골 관절염의 진행 정도에 따라 지속적인 퇴행이 발생한다.

관절연골의 마찰에 관련된 연구는 Pin-on-Disk type tribotester를 사용하여 연골 대 연골, 또는 연골 대 금속 접촉으로 주로 이루어 진다[9-13]. 이 중에서 연골-연골 접촉쌍의 실험을 진행하기 위하여 대동물인 소의 무릎관절에서 채취한 연골을 이용하여 시편을 만들어야 한다. 하지만 국내에서 연골 세포가 살아있는 소의 연골을 개인이 구매하는 것은 법적으로 허락되지 않기 때문에 실험을 진행하기 어려운 형편이다. 또한 관절연골의 마찰에 관한 기존의 연구에서는 두 가지 서로 다른 기구학적 운동에 대한 마찰 특성의 비교는 거의 연구되지 않았다.

따라서 본 연구에서는, 두 가지 기구학적 운동하에서 무릎 관절연골에 순간적으로 가해질 수 있는 접촉압력의 범위 내에서 접촉압력이 변화함에 따라 마찰계수 값이 어떻게 변하는가를 돼지 무릎 관절연골을 사용하여 연골-금속 접촉에서 분석하고자 한다.

2. 시편 및 실험방법

2-1. 시편

본 실험에 사용한 돼지 무릎 관절연골 시편은 약 6

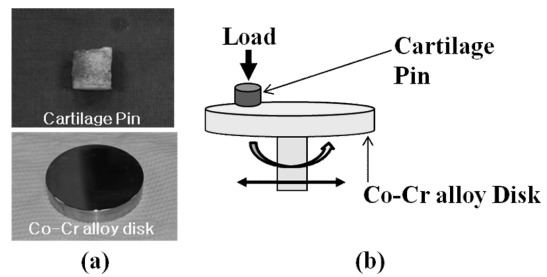


Fig. 1. (a) Cartilage pin and Co-Cr alloy disk specimens (b) Schematic diagram of contact configuration and kinematic motion for friction tests.

개월(160~180일) 정도 된 건강한 돼지(숫놈, 거세돈, 110~120 kg)의 뒷다리를 도살 후 약 1시간 정도 지난 것을 구입하여, 약 4시간 내에 연골부위와 하부 뼈를 포함하여 pin 시편(flat-ended 원통형, 지름: 9 mm, 길이: 8 mm)으로 제작하였다. Pin 시편 만들 때 사용한 drill type의 punch는 내경이 9 mm로 직접 제작해서 사용하였으며 각 마찰실험당 6번 반복실험을 진행하도록 충분한 개수의 시편을 제작하였다. 만들어진 연골 pin 시편은 즉시 극저온 냉동고에 넣어 보관하고, 실험 시작 전에 해동하여 PBS(Phosphate Buffered Saline, 10X) 용액에 넣어 4°C의 온도로 냉장 보관하였다가 실험에 사용하였다. 그리고 disk 시편은 의료용 코발트 크롬 합금을 지름 54 mm, 두께 12 mm의 평판으로 제작한 후 표면조도 Ra=0.002 μm 이하가 되도록 표면을 연마하여 사용하였다.

2-2. 실험 방법

반복회전(repeat pass rotational, ROT)운동과 직선왕복(linear reciprocal, RCP)운동의 두 가지 기구학적 운동에 대한 마찰실험은 코발트 크롬 합금 평판과 돼지 무릎 관절연골 pin 시편을 면접촉으로 Pin-on-Disk 마찰실험장치(Fig. 1)에 장착하여 실시하였다. 모든 실험에서 평판과 핀 시편에 작용하는 접촉압력은 0.5 MPa, 1 MPa, 2 MPa 세 가지 경우에 대하여 각각 6번의 반복실험을 실시하였다. 반복회전운동과 직선왕복운동 모두 미끄럼 거리(sliding distance)는 50 mm/cycle로 설정하여 60 rpm의 속도로 1시간 동안 실험을 실시하였으며, 모든 마찰실험은 PBS용액을 윤활액으로 사용하여 상온 상압에서 수행하였다. 마찰실험이 끝난 뒤 각각의 접촉압력에 대한 마찰계수들은 5, 30, 60, 120, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100,

2400, 2700, 3000, 3300, 3600초를 기준으로 각 초의 앞, 뒤 총 50개 데이터의 평균값으로 결정하였다.

2-3. 통계적 분석

컴퓨터 통계처리 프로그램인 SPSS (ver 19.k, IBM)을 이용하여 마찰계수의 차이에 대하여 통계처리를 실시하였다. 동일한 접촉압력에서의 반복회전운동과 직선왕복운동의 마찰계수 차이점 여부를 student *t*-test로 분석하였다. 각각의 운동에서 접촉압력 별 마찰계수의 차이는 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 통하여 분석하였다. 유의성의 판단 기준은 p-value가 0.05 이하의 값을 가질 때 유의한 차이를 가진다고 결정하였으며, 통계 분석 결과는 결과 그래프에 제시되었다.

3. 결과 및 고찰

반복회전운동과 직선왕복운동에서 세 가지 접촉압력(0.5, 1, 2 MPa) 각각에 대한 마찰계수 변화를 시간에 대한 그래프로 나타내었다(Fig. 2, Fig. 3).

두 가지 기구학적 운동 모두 각각의 접촉압력에서 시간이 증가함에 따라 마찰계수는 증가하는 경향을 보였다. 이 가운데 가장 큰 접촉압력인 2 MPa의 경우, 두 가지 기구학적 운동 모두에서 시간에 대한 마찰계수의 증가율이 가장 큰 것으로 관찰되었다. 그리고 접촉압력이 증가하였을 때, 반복회전운동에서의 최대 마

찰계수는 0.5 MPa에 비하여 1 MPa에서 가장 낮고 2 MPa에서 가장 큰 값을 나타내었고, 직선왕복운동에서의 최대 마찰계수는 이러한 변화 없이 접촉압력이 증가함에 따라서 같이 증가하는 경향을 보였다.

이와 같은 결과를 접촉압력과 두 가지 기구학적 운동의 영향을 분석하기 위해서 각각에 대한 그래프로 나타내었다(Fig. 4, Fig. 5). 두 가지 기구학적 운동에 대한 0.5, 1, 2 MPa의 접촉압력하에서의 최대 마찰계

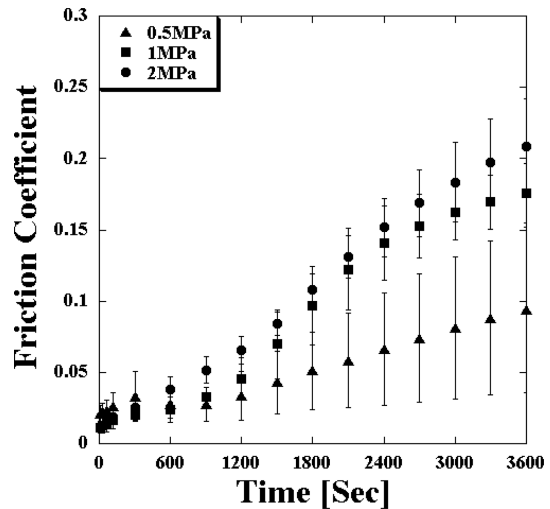


Fig. 3. Changes in coefficients of friction of cartilage as a function of sliding time in RCP motion.

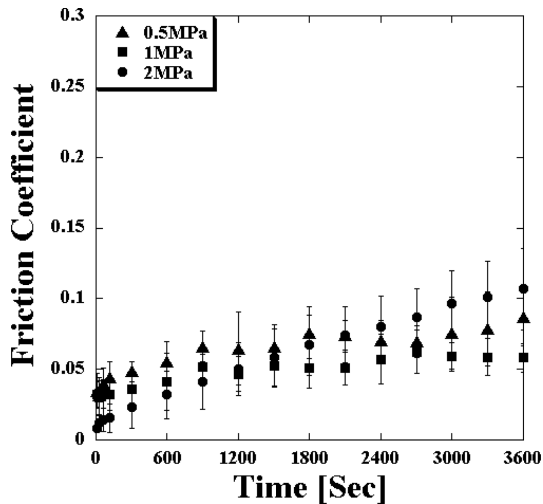


Fig. 2. Changes in coefficients of friction of cartilage as a function of sliding time in ROT motion.

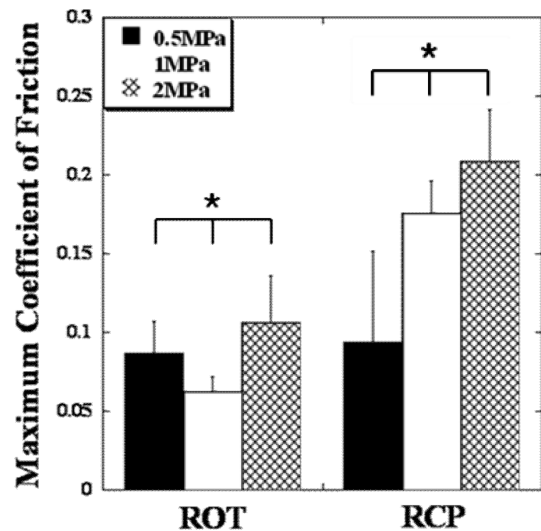


Fig. 4. Comparison of maximum coefficients of friction under each contact pressure between ROT and RCP motions (* : ANOVA-test, p<0.05).

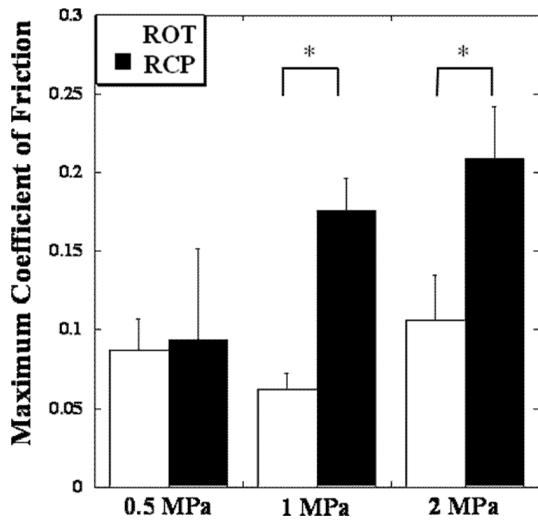


Fig. 5. Comparison of maximum coefficients of friction under each kinematic motions between three contact pressures (* : *t*-test, $p < 0.05$).

수 값은, 반복회전운동에서는 0.086, 0.062, 0.106으로 나타났고, 직선왕복운동에서는 0.093, 0.175, 0.208으로 나타났다. 이때 반복회전운동과 직선왕복운동의 마찰계수 값은 접촉압력에 따른 통계학적인 분명한 차이를 나타내었다($p=0.004, 0.001$). 접촉압력하에서의 최대 마찰계수 값은 직선왕복운동이 반복회전운동에 비해서 각각 8.1%, 182.3%, 96.2% 증가하였다. 기구학적 운동에 따른 마찰계수의 차이는 0.5 MPa를 제외한 1, 2MPa에서 통계학적인 분명한 차이를 나타내었다 ($p=0.795, 0.000, 0.000$)

본 연구에서 실시한 접촉쌍인 연골 대 금속의 쌍과 재료적인 측면에서 유사한 점이 있고, 반복회전운동에서의 접촉압력 변화에 따른 마찰계수 값의 변화와 비교 가능한 다른 마찰실험의 연구결과는 다음과 같다. J. Pickard 등[11]의 연구에서는 소 연골 대 스테인레스 스틸($Ra=0.02 \mu m$)의 접촉으로 0.5~4 MPa의 접촉압력에서 직선왕복운동으로 45분 동안 실험한 결과 0.5 MPa에서는 약 0.48, 1 MPa에서는 약 0.42, 2 MPa에서는 약 0.35의 마찰계수 값을 나타내었고, J. L. Zang 등 [12]의 연구에서는 소 연골 대 코발트 크롬 합금($Ra=0.006 \mu m$)의 접촉으로 0.5~3.5 MPa의 접촉압력에서 직선왕복운동으로 1시간 동안 실험한 결과 0.5 MPa에서는 약 0.34, 1 MPa에서는 0.28, 2 MPa에서는 0.24, 3.5 MPa에서는 0.29의 마찰계수 값을 나타내었다. 이들 타 연구의 결과를 본 연구의 결과와 비교하면, 마

찰계수 값은 두 가지 기구학적 운동 모두 약 2-4배 정도 큰 값을 나타내었다. 이러한 큰 차이의 마찰계수 결과를 얻은 이유는, 다른 종류의 동물 연골이 사용되었고 이로 인한 연골의 두께가 차이가 있을 것이며, 사용된 금속 재료의 표면조도가 다르기 때문인 것으로 사료된다. 또한 본 연구 결과에서 반복회전운동에서는 접촉압력이 증가할 때 마찰계수 값이 감소하였다가 다시 증가였고, 직선왕복운동에서는 일정하게 증가하였다. 본 연구의 반복회전운동에서의 현상과 비슷한 결과를 J. L. Zang 등의 연구결과에서 확인 할 수 있는데 이들의 결과에서는 마찰계수 값이 0.5, 1, 2 MPa까지 감소하였다가 3.5 MPa에서 다시 증가하는 것으로 보고되었다. 그리고 직선왕복운동의 경우처럼 일정하게 증가하는 현상은 다음의 타 연구에서 확인할 수 있었다. J. katta 등[13]의 연구에서는 소 연골 대 소 연골의 접촉으로 0.5~2 MPa의 접촉압력에서 직선왕복운동으로 1시간 동안 실험한 결과 0.5 MPa에서는 약 0.015, 1 MPa에서는 약 0.025, 2 MPa에서는 약 0.045의 마찰계수 값을 나타내었다. 이들의 연구 결과에서 얻어진 마찰계수 값은 본 실험의 직선왕복운동에서의 결과와 비슷하게 접촉압력이 증가할수록 같이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 마찰계수 값은 본 실험에 비해 매우 낮은 값이다. 그 이유는 연골 대 금속, 연골 대 연골의 접촉쌍의 차이에서 발생한 것으로 사료된다. 연골은 활막과 활액을 가지고 자체적으로 윤활작용을 할 수 있는데 접촉쌍의 양쪽 모두가 연골인 경우 한쪽만 연골인 경우보다 좀더 원활한 윤활 작용이 이루어져서 위와 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다.

본 연구의 결과를 종합해 보면, 최대 마찰계수 값은 반복회전운동이 직선왕복운동보다 작게 나타났다. 두 가지 기구학적 운동에서 이러한 차이를 보이는 이유는 접촉 표면에서의 shear stress의 방향 변화 때문에 발생한 것으로 보여진다. 연골의 superficial 층의 콜라겐 섬유와 접착 표면의 shear stress의 방향 변화가 반복회전운동 보다 직선왕복운동에서 더 컸기 때문에 이러한 마찰계수 값의 차이가 나타났다고 사료된다.

4. 결 론

두 가지 기구학적 운동하에서 돼지 무릎 관절연골과 의료용 코발트 크롬 합금의 접촉으로 시간과 접촉압력에 따른 마찰계수의 변화를 관찰한 결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

1. 기구학적 운동의 변화는 코발트 크롬 합금에 대한 돼지 무릎 관절연골의 마찰계수 값에 영향을 미쳤다.
2. 접촉압력 1MPa과 2MPa에서의 최대 마찰계수 값은 직선왕복운동이 반복회전운동 보다 통계학 적으로 분명하게 더 컸다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 세종대학교 미래전략 연구비 지원에 의한 논문임

참고문헌

1. All Rights Reserved by Samsung Medical Center General Radiology, 2006-2007.
2. 김환, 이권용, 이영제, “반복 회전운동에서 코발트 크롬 합금과 미끄럼 접촉하는 돼지 무릎 관절연골의 접촉압력이 마찰계수 변화에 미치는 영향,” *Journal of the KSTLE*, 제25권, 제4호, pp. 231-235, 2009.
3. 박성훈, “활액과 하이얼루리난이 소 연골의 마찰 특성에 작용하는 역할,” *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, 제25권, 제10호, pp. 137-143, 2008.
4. Fukubayashi, T. and kurosawa, H., “The Contact Area and Pressure Distribution Pattern of the Knee. A Study of Normal and Osteoarthrotic Knee Joint,” *Acta Orthop Scand*, Vol. 51, No. 6, pp. 871-879, 1980.
5. Yao, J. Q. and Seedhom, B. B., “A New Technique for Measuring Contact Areas in Human Joints—the ‘3s Technique’,” *Proc Inst Eng [H]*, Vol. 205, No. 2, pp. 69-72, 1991.
6. 윤희문, 김석중, 김태균, “줄기 세포를 이용한 관절 연골 손상의 치료,” *Journal of Rheumatic Diseases*, Vol. 19, No. 3, pp. 125-131, 2012.
7. Buchwalter, J. A. and Mankin, H. J., “Articular cartilage: degeneration and osteoarthritis, repair, regeneration, and transplantation,” *Instr Course Lect*, Vol. 47, pp. 487-504, 1998.
8. Brown, T. D., Johnston, R. C., Saltzman, C. L., Marsh, J. L., and Buchwalter, J. A., “Posttraumatic Osteoarthritis: A First Estimate of Incidence, Prevalence, and Burden of Disease,” *J Orthop Trauma*, Vol. 20, pp. 739-744, 2006.
9. Northwood, E. and Fisher, J., “A Multi-directional in Vitro Investigation Into Friction, Damage and Wear of Innovative Chondroplasty Materials Against Articular Cartilage,” *Clinical Biomechanics*, Vol. 22, pp. 834-842, 2007.
10. Katta, J., Stapleton, T., Ingham, E., Jin, Z. M., and Fisher, J., “The Effect of Glycosaminoglycan Depletion on the Friction and Deformation of Articular Cartilage,” *Proc. Inst Mech Eng [H]*, Vol. 222, No. 1, pp. 1-11, 2008.
11. Pichard, J., Ingham, E., Egan, J., and Fisher, J., “Investigation Into the Effect of Proteoglycan Molecules on the Tribological Properties of Cartilage Joint Tissues,” *Proc Inst Mech Eng [H]*, Vol. 212, pp. 177-182, 1998.
12. Zhang, J. L., Burton, A. P., Jin, Z. M., Fisher, J., and Williams, S., “Friction of Articular Cartilage Under Different Pressures and Sliding Velocities,” *Journal of Biomechanics*, Vol. 41, pp. S287, 2008.
13. Katta, J., Jin, Z., Ingham, E., and Fisher, J., “Effect of Nominal Stress on the Long Term Friction, Deformation and Wear of Mative and Glycosaminoglycan Deficient Articular Cartilage,” *Osteoarthritis and Cartilage*, Vol. 17, pp. 662-668, 2009.