

토끼 관절연골의 마찰 및 윤활 특성

이권용[†] · 이홍철*

대구대학교 자동차 · 산업 · 기계공학부,
*연세대학교 기계공학과

Friction and Lubrication Behaviors of Rabbit Joint Cartilage

Kwon-Yong Lee[†] and Hong-Chul Lee*

School of Automotive, Industrial, and Mechanical Engineering, Taegu University
*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract – The friction and lubrication characteristics of joint cartilage were investigated using the metatarsophalangeal joint cartilage of rabbit against rotating stainless steel disk. Friction tests were conducted by dry and bovine serum lubricated sliding at room and body temperatures. For the dry sliding tests, low friction coefficient of 0.1-0.15 was observed at the early period of test, and then the friction coefficient increased as a test continued. With increasing applied load the early period of low friction lengthens. For the lubricated sliding tests, the coefficient of friction decreased as the applied load increased. And also the coefficient of friction decreased continuously to 0.07 as the test duration increases. These results can be interpreted that the squeeze or weeping lubrication mechanism dominates the friction and lubrication characteristics in the joint cartilage of rabbit.

Key words – friction, weeping lubrication, joint cartilage, rabbit.

1. 서 론

인간 또는 동물의 관절연골은 관절의 원활한 동작을 제공하는 천연적인 베어링물질이다. 인간 또는 동물의 관절의 마찰, 마멸, 윤활에 관한 기계적 분석을 통하여 정상적인 관절이 어떻게 오랫동안 원활하게 작동하며, 왜 질병이 발생한 관절이 기능을 제대로 발휘하지 못하는 지 이해할 수 있다. 이러한 관절 내의 tribologic 현상에 대한 기초 data는 관절 질병 시 수행되는 인공 관절 치환술이나, 관절연골 대체술, 또는 최근에 조직 공학을 이용하여 연구개발이 진행 중인 연골 재생술 등에 관련자료로 활용될 수 있다.

관절 베어링에서 실질 접촉이 이루어 지는 연골의 마찰 및 윤활 특성을 연구하기 위하여 동물의 관절이 대상이 되었으며[1,2], 또한 인간의 관절이 대상이 되기도 하였다[3,4]. 연골과 연골의 접촉 하에서 작용하는 생물

학적 윤활기구로 초기에는 관절낭 내의 체액 유체막에 의한 유체윤활(hydrodynamic lubrication)이 주된 윤활기구로 여겨졌으나, 높은 접촉 하중 때문에 경계윤활(boundary lubrication)이 매우 낮은 마찰계수를 발생시킨다는 연구 결과가 발표되었고[5], 연골의 미세구조가 스폰지같이 많은 공극을 가지고 쉽게 변형되면서 높은 하중 하에서 내포하고 있던 체액을 내보내고, 낮은 하중 하에서는 체액을 다시 흡수하며 윤활작용을 하는 삼출성윤활(weeping lubrication) 기구가 규명되었다[1]. 한편, 유체막 두께 계산에 의하여 관절운동 시에 탄성 유체윤활(elastohydrodynamic lubrication)이 가능하다는 주장도 발표되었다[6,7]. Fein [8]은 스쿼즈막윤활(squeeze film lubrication)이 걸음걸이 중 낮은 속도에서 높은 하중을 견디어 내고, 낮은 하중이 작용하는 다리 전후운동 시에는 유체윤활에 의해서 스쿼즈막을 다시 체액으로 채우는 것으로 결론지었다. 결국, 정상적인 걸음걸이 하에서 유체막윤활과 삼출성(스쿼즈)윤활이 섞여 있는 혼합윤활(mixed lubrication)이 관절연골의 윤활 기

[†]주저자 · 책임저자 : kwonlee@taegu.ac.kr

구라고 할 수 있다[9,10].

대부분의 실험은 연골-연골 접촉을 위하여 인간이나 동물의 관절연골을 시편으로 진자마찰 실험장치(pendulum friction tester)로 수행하였는데 이에선 시편의 확보와 시험장비의 확보에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 간단한 pin-on-disk 마찰시험기를 이용하여 연골-금속 접촉으로 연골의 스퀴즈윤활(squeeze lubrication) 기구를 간편하게 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 실험방법

2-1. 시 편

토끼 뒷발의 셋째와 넷째 발가락의 Metatarso-Phalangeal Joint로부터 가급적 비슷한 크기의 관절연골을 채취하여 연골표면에 손상이 가지 않도록 거즈로 싸서 섭씨 영하 70도로 냉동보관하고 실험 바로 전에 상온으로 해빙하여 사용하였다.

2-2. 시험장비

마찰실험은 상온에서 Pin-on-Disk(repeat pass sliding) Tribo-tester를 사용하여 회전하는 평판(SS316, 70 mm dia., mirror polished $Ra=0.01 \mu m$)과 시편 holder에 고정된 연골시편을 접촉시켜서 추로 하중을 가하여 상대 미끄럼 운동 중의 마찰력을 측정하였다. 마찰력 측정을 위하여 Ring Type Transducer가 사용되었으며, 마찰계수는 측정된 마찰력과 수직하중의 비(ratio)로 정의하였다. Transducer의 전기신호를 정량화하기 위하여 마찰력 작용방향으로 추를 달아서 캘리브레이션을 실시하였다. 변위센서 길이변화에 의한 전압변화를 전기

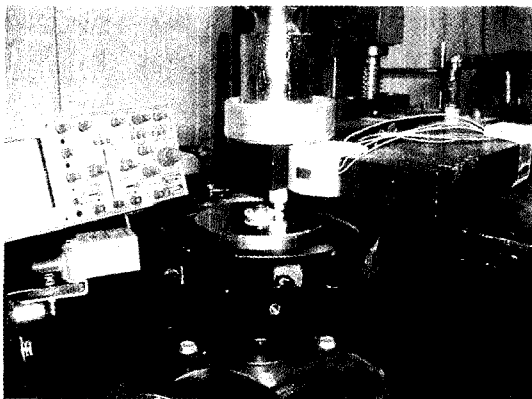


Fig. 1. Pin-on-disk friction testing apparatus.

신호 증폭기를 거쳐서 100 Hz의 sampling rate로 PC에 수록하였다. Fig. 1은 실험에 사용한 마찰시험기와 소 혈청 없이 건조상태로 진행중인 실험을 보여준다.

2-3. 예비 실험

예비실험을 통하여 마찰력 측정에 영향을 끼치는 요인들을 조사하였다. 첫째, 평판의 표면 거칠기가 마찰과 마멸에 직접적인 영향을 줄 것이 예상되므로 거울면 같이 연마된($Ra=0.007-0.01 \mu m$) 평판만을 시험에 사용하였다.

토끼 연골은 적당한 길이로 잘라서 직경 8 mm 알루미늄 봉에 뼈 두께에 해당하는 홈을 파고 끼워 넣어 순간접착제로 고정하고 pin holder에 장착하였다. 이때 관절뼈의 모양이 시편마다 일정하지 않아서 평판에 접촉하는 부위의 연골 상태가 일정하지 않게 되므로 가능한 충분한 연골접촉이 이루어지도록 알루미늄 봉에 홈을 만들 때 주의를 기울였다. 실제로 예비실험에서 관절뼈의 어느 부분이 접촉하느냐에 따라 마찰계수가 매우 민감하게 영향을 받는 것이 확인되었다.

평판의 회전속도는 같은 평판 내 미끄럼 트랙의 반경을 달리하며 접촉면에서의 선속도가 0.05-0.06 m/s 범위 내에서 예비실험을 실시하였으며 차이가 관찰되지 않았다. 따라서 이 속도 영역 내에서 속도의 영향은 무시할 수 있었다.

2-4. 마찰 및 윤활 실험

마찰실험은 건조상태(외부로부터의 윤활 공급 없이 연골 자체만으로)에서 연골 시편에 각각 3 N, 5 N, 7 N, 10 N의 수직하중을 가하여 실행하고, 실험을 더 이상 진행할 수 없을 때까지(대부분 30분 이내의 짧은 시간동안) 실시하였다. 건조상태의 실험을 통하여 연골 자체가 수행할 수 있는 윤활 특성을 파악할 수 있었으며, 하중 증가에 의한 윤활 기구의 변화를 분석하였다.

또한, 소혈청(fetal bovine serum)을 윤활제로 사용하여 하나의 시편에 단계적으로 5 N, 10 N, 15 N의 하중을 가하여 각각 100분간 연속하여 실험하였다. 하나의 연골 시편에 한가지 하중을 가하여 장시간 실험하지 않고, 마찰계수에 큰 변화가 관찰되지 않을 정도의 일정 시간이 지난 후에 하중을 증가시키며 같은 실험을 반복하였다. 이러한 step loading 실험을 통하여 체액이 연골의 마찰특성에 미치는 영향을 분석하였다.

이와 같은 두 가지(건조 및 윤활) 상태의 마찰실험을 종합적으로 분석함으로써 체내 관절에서 발생하는

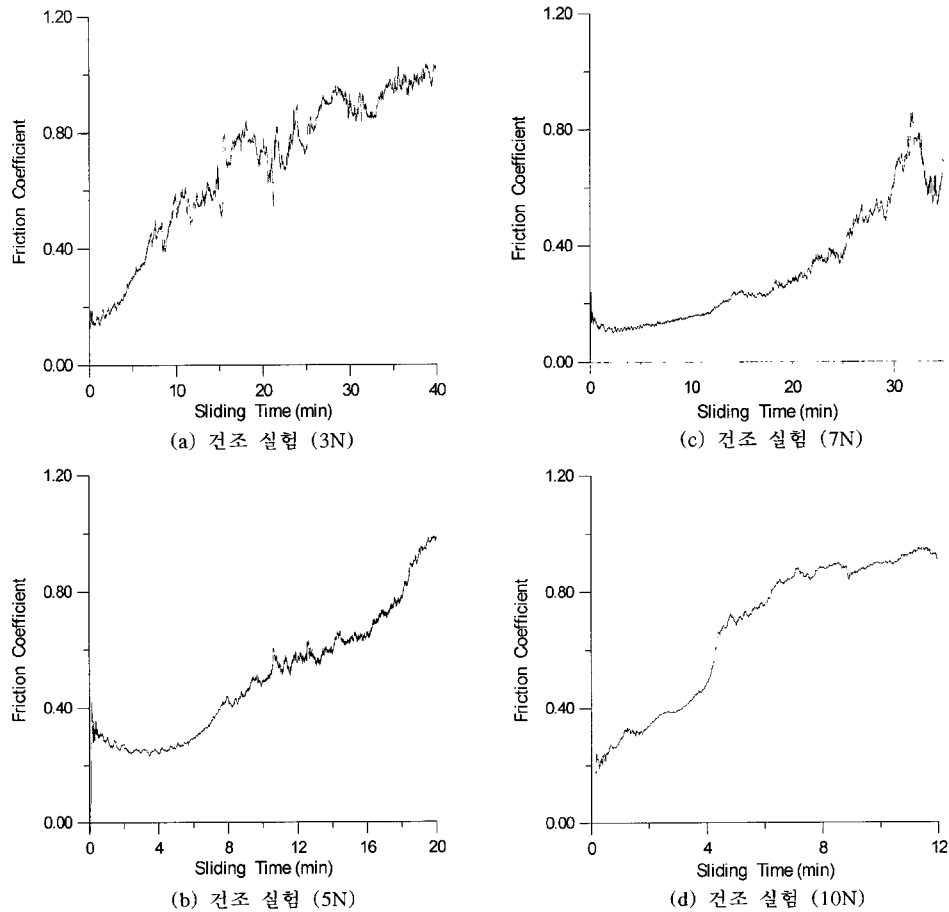


Fig. 2. Friction coefficients as a function of sliding time in dry testing.

기계적 접촉 조건 아래에서 발생하는 관절연골의 마찰 및 윤활 기능의 특성을 규명해 낼 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 건조 마찰실험

Fig. 2는 각 하중에 대한 마찰계수의 변화를 보여준다. 건조상태의 마찰실험 결과는 모든 하중의 경우에 실험시간이 길어질수록 마찰계수가 증가하였다. 3 N 하중의 경우, 초기에는 0.1-0.2의 마찰계수를 보이다 점차 증가하고 약 28분 경과 시에 간헐적 grinding sound가 시작되어 마찰계수가 계속 증가하는 가운데 40분 경과 시에 실험을 중단하였다. 5 N 하중의 경우, 초기 마찰계수는 0.3 이상의 높은 값을 보이다 점차로 감소하여 0.2 부근의 값을 5분간 유지하다 다시 증가하기 시작하여 약 7.5분 경과 시에 grinding sound가 시작되고

마찰계수가 계속 상승하며 grinding sound가 심해져서 20분 경과 시에 실험을 중단하였다. 7 N 하중의 경우, 초기 0.1-0.15의 낮은 마찰계수 영역이 더욱 오래 유지되다 증가하기 시작하여 약 30분 경과 시에 둔탁한 grinding sound가 시작되고, 3분 후 날카로운 소리로 변하며 마찰계수가 약간 감소하였으나, 다시 3분 후에 stick-slip이 발생하여 실험을 중단하였다. 10 N 하중의 경우, 0.2의 낮은 마찰계수로 시작하였으나, 5 N과 7 N의 경우와는 달리 마찰계수가 당분간 감소하는 현상이 관찰되지 않고, 짧은 시간 안에 마찰계수가 크게 증가하며 squeak sound와 stick-slip이 발생하여 11분 경과 후 실험을 중단하였다.

건조상태의 실험 결과를 분석해 보면 관절연골 자체에 함유되어 있던 체액이 하중에 의해서 빠져 나와 실험 초기에는 윤활 상태의 마찰특성을 보이고, 하중이 커질수록 초기의 낮은 마찰계수가 유지되는 시간이 길

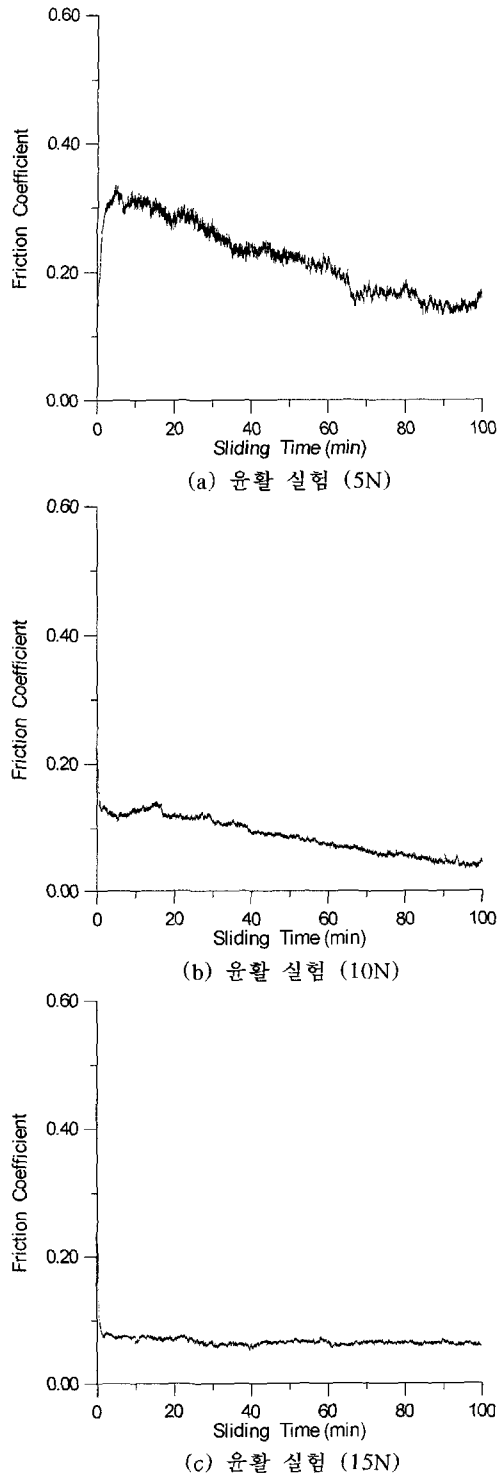


Fig. 3. Friction coefficients as a function of sliding time in lubricated testing.

어지는 것이 관찰되었으며, 하중이 더욱 증가하면 weeping에 의한 윤활 작용이 효력을 발생하지 못하는 상황이 생기게 된다.

3-2. 윤활 마찰실험

소 혈청 윤활 상태의 마찰실험 경우, 매 하중마다 시작과 동시에 adhesion에 의한 0.2 이상의 마찰계수가 관찰되고, 이후 바로 감소하기 시작하여 시간이 지날수록 계속 감소하고, 하중이 증가할수록 점점 더 감소하다가 0.07의 낮은 마찰계수 값으로 안정화되었다 (Fig. 3). 각 하중 당 100분씩 총 300분의 실험 동안 grinding sound는 들리지 않았다. 하중이 증가하였으나 마찰계수가 점차로 감소하는 것은 연골 자체의 윤활 작용에 의한 효과로 볼 수 있으며, 혈청의 윤활 작용과 더불어 매우 낮고 안정적인 마찰력을 일으키는 것으로 해석할 수 있다. 실험결과를 종합해 볼 때, squeeze 혹은 weeping에 의한 윤활 기구가 확인되었으며, 전통적인 기계재료들간의 접촉에서는 거의 관찰되지 않는 0.1 미만의 마찰계수가 측정된 것은 연골 생체조직의 마찰 및 윤활 특성이 얼마나 우수한가를 보여주는 결과이다.

3-3. 접촉상태의 영향

토끼 관절연골 시편이 바깥에 따른 실험결과를 분석하면, 하중이 커짐에 따른 마찰계수의 지속적인 감소와 일정한 값으로의 수렴은 정성적, 정량적으로 거의 모든 시편에서 동일하게 관찰되었다. 그러나, 경우에 따라서는 다른 대부분의 시편과는 달리 정량적으로 매우 높은(약 2배 수준) 마찰계수를 보이는 결과도 관찰되었다(Fig. 4(a)). 이는 연골 시편이 평판과 접촉할 때 다른 시편에 비하여 연골 자체의 윤활 효과가 상대적으로 적은 접촉상태 때문으로 볼 수 있다. 이러한 경우는 토끼 발가락뼈의 구조상 연골이 비교적 얇은 가운데 날개 뼈 주위가 평판과 접촉하여 실험이 진행된 것에 기인한다. 연골이 두꺼울수록 연골 내에 함유된 체액의 양이 많을 것이고, squeeze 상태에서의 윤활 효과가 더욱 좋을 것이다.

윤활 실험 진행 중에 접촉 위치의 확인이 불가능한 관계로, 건조 상태에서 시편의 가운데 날개 뼈가 평판과 접촉하도록 인위적으로 시편의 위치를 정하고 3N의 가장 낮은 하중으로 실험한 결과, 놀랍게도 마찰계수가 1.0이 넘는 극심한 마찰상태가 관찰되었고, 실험 초기에도 0.4의 매우 높은 마찰계수와 갑작스런 증가

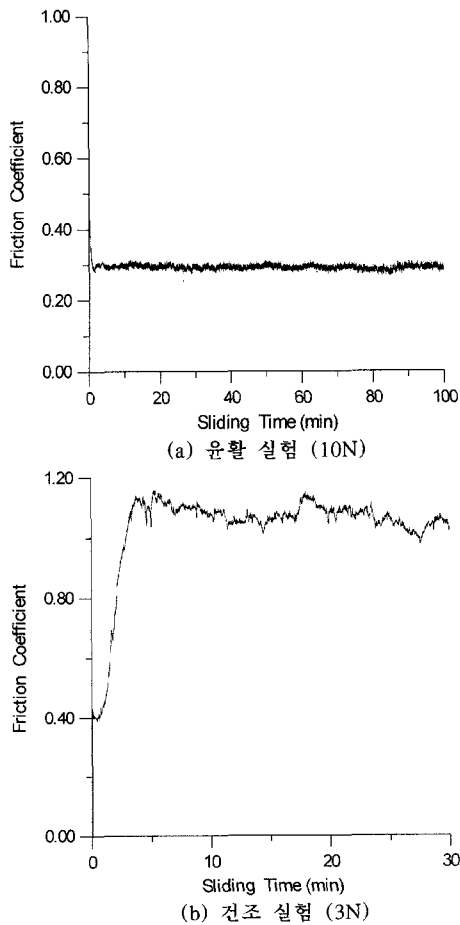


Fig. 4. Friction coefficients under the different contact conditions.

가 발생하였다(Fig. 4(b)). 이러한 접촉 조건 하에서는 연골 자체의 윤활 효과가 매우 미비한 것으로 판단된다. 이는 연골이 거의 없이 subcondral bone이 직접 접촉한 경우일 것이다.

Arthritis로 인해서 연골 손상이 심하여 뼈와 뼈가 직접 접촉되는 경우가 이에 유사한 경우라 할 수 있고, 심한 통증은 물론이고 관절의 stiffness가 매우 심하여 관절운동이 제한되는 현상에 대한 답변이 된다.

4. 결 론

토끼 관절연골과 의료용 stainless steel과의 미끄럼 상대운동 아래에서 간단한 pin-on-disk type 마찰 실험을 통하여, 관절연골의 윤활 상태를 분석한 결과, 관절 내의 기계적 하중조건에서 연골 내의 체액이 squeeze

현상에 의해 스며 나와 윤활 효과를 제공하고 낮은 마찰계수를 유지시키며, 관절하중이 낮아질 때 체액을 흡수하여 sponge와 같이 작동하는 삼출성(weeping) 윤활 기구를 확인하였다. 본 연구에서 사용된 연구 방법은 인공관절에 적용될 수 있는 cushion bearing 개념의 생체재료나 앞으로 조직공학을 이용하여 개발될 생체 재생 연골의 마찰 및 윤활 특성 비교분석에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1999년도 보건복지부 중점연구사업(과제 번호: HMP-99-E-05-0001)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. McCutchen, C.W., "The frictional properties of animal joints," *Wear*, 5, pp.1-17, 1962.
2. Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., and Griffiths, L.J., "Friction and wear changes in synovial joints," *Wear*, 171, pp.135-142, 1994.
3. O'Kelly, J., Unsworth, A., Dowson, D., Hall, D.A. and Wright, V., "A study of the role of synovial fluid and its constituents in the friction and lubrication of human hip joint," *IMEchE Engineering in Medicine*, Vol. 7, No. 2, pp.73-83, 1978.
4. Clarke, I.C., Contini, R., and Kenedi, R.M., "Friction and Wear Studies of Articular Cartilage: a Scanning Electron Microscope Study," *Trans. of ASME J. of Lubr. Technol.*, 97, pp.358-368, 1975.
5. Charnley, J., "The lubrication of animal joints in relation to surgical reconstruction by arthroplasty," *Ann. Rheum. Dis.*, 19, pp.10-19, 1960.
6. Tanner, R.I., "An alternative mechanism for the lubrication of synovial joints," *Phys.Med. Biol.*, 11, pp.119-127, 1966.
7. Dowson, D., "Modes of lubrication in human joints," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 181, pp.45-54, 1966-67.
8. Fein, R.S., "Are synovial joints squeeze film lubricated?," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 181, pp.125-128, 1966-67.
9. Linn, F.C., "Lubrication of animal joints II-the mechanism," *J. of Biomechanics*, 1, pp.193-205, 1968.
10. Roberts, B.J., Unsworth, A., and Mian, N., "Modes of lubrication in human hip joints," *Ann. Rheum. Dis.*, 41, pp.217-224, 1982.