

The Tribological and Lubrication Responses of a Cobalt-Chromium Femoral Head in Total Hip Arthroplasty

Seonghun Park, PhD^{*,†}, Duong Cong Truyen, MS[†], Jae-Hoon Lee, MS[†], Younho Cho, PhD[†],
Seung-Jae Park, MD^{*}, Keun-Min Park, MD^{*}, Jun-Dong Chang, MD^{*}, Sang-Soo Lee, MD^{*}

Institute for Skeletal Aging & Department of Orthopedic Surgery, College of Medicine, Hallym University, Chuncheon, Korea^{},
School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea[†]*

Purpose: This study aimed at investigating the role of albumin as a boundary lubricant in the lubrication of the Co-Cr femoral head of artificial hip implants by measuring the tribological parameters of the Co-Cr femoral head with Atomic Force Microscope (AFM) techniques.

Materials and Methods: Samples were prepared from the main wear region of a Co-Cr femoral head from revision hip surgery. Two types of solutions were prepared as lubricants: PBS (Phosphate Buffered Saline) as a control solution and BSA (Bovine Serum Albumin) as a lubricant at concentrations of 10, 20, 30 and 40 mg/ml in PBS solution.

Results: There were statistically significant differences in the frictional coefficients (μ) of a Co-Cr head between the PBS control and all the concentrations of BSA (10, 20, 30, 40 mg/ml) ($P < 0.001$). Similarly, there were statistically significant differences for the μ between the BSA concentrations of 10, 20, 30 and 40 mg/ml for all the cases except between the BSA of 30 and 40 mg/ml ($P < 0.01$).

Conclusion: There exists a maximum protein concentration of BSA to play a role as an effective boundary lubricant through adsorption on the surface of Co-Cr femoral head.

Key Words: Atomic force microscope (AFM), Bovine serum albumin (BSA), Boundary lubrication, Total hip arthroplasty, Co-Cr femoral head

서 론

인공 고관절 치환술에서의 마찰과 마모와 관련된 문제는 수명의 제한으로 이어지며 다양한 연구가 요구되는 분야이다. 인공 관절면 삽입물의 마찰계수는 금속/금속 및 세라믹

/세라믹 조합에서 가장 낮으며 윤활제도 관절면 종류에 따라 서로 다른 패턴으로 마찰계수에 영향을 준다. 따라서, 인공 관절면의 마모특성 조사를 위해서 관절면 표면의 마찰계수와 윤활제가 마찰계수의 변화에 미치는 영향에 대한 자세한 연구가 요구되고 있다^{1,2)}. Atomic Force Microscopy (AFM)을 이용한 표면 거칠기와 마찰계수의 측정이 나노단위에서 가능해 짐에 따라, 의공학 영역에도 마찰학 지표에 대한 마이크로/나노 단위의 접근이 가능하게 되었다^{3,4)}. 그러나 현재까지는 알부민 등의 단백질이 인공 고관절면 윤활제로서 중요한 역할을 한다는 등의 내용이 pin-on-disk test 같은 마크로 스케일의 연구에서만 보고되어 있다⁵⁾. 이러한 마크로 스케일 연구에서도 인공 관절면의 접촉 표면에 우혈청 글로불린이 흡착되어 경계윤활제 및 혼합윤활제로 작용한다고 보고하였으나, 마크로 스케일 연구의 한계로 인하여 자세한 윤활 기전은 밝혀지지 않고 단백질 윤활의 존재를 인정하는 수준에 머무르고 있다⁶⁾.

AFM을 사용하면 동일한 표면 거칠기에서도, 여러 종류

Submitted: May 31, 2010 1st revision: August 16, 2010
2nd revision: September 16, 2010 3rd revision: September 24, 2010
Final acceptance: September 27, 2010

• Address reprint request to Sang-Soo Lee, MD

Institute for Skeletal Aging & Department of Orthopedic Surgery,
Chuncheon Sacred Heart Hospital, College of Medicine, Hallym
University, 153 Gyo-dong, Chuncheon 200-704, Korea
TEL: +82-33-240-5197 FAX: +82-33-252-9875
E-mail: totalhip@hallym.ac.kr

- 본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업 (WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (R33-10155).

Copyright © 2010 by Korea Hip Society

의 경계윤활제 (boundary lubricant)에 의한 마찰계수의 영향을 마이크로/나노 단위에서 미세한 분석이 가능함에도 불구하고, 아직까지 인공 고관절 전치환술에서 경계윤활제로서의 역할에 대해서는 자세히 밝혀진 바가 없다. 또한 다양한 조합의 인공 고관절면에 관련된 마찰학적 연구가 있지만, 코발트-크롬 대퇴골두 자체와 관련한 특성 연구는 드물다^{1,7-9)}. 이에 본 연구에서는 인공 고관절 코발트-크롬 대퇴골두 표면에서 알부민을 표면 윤활제로 사용하여 알부민이 경계 윤활에 미치는 나노 단위에서의 영향을 분석하고자 마찰 관련 지표를 AFM으로 측정하여 분석하였다.

재료 및 방법

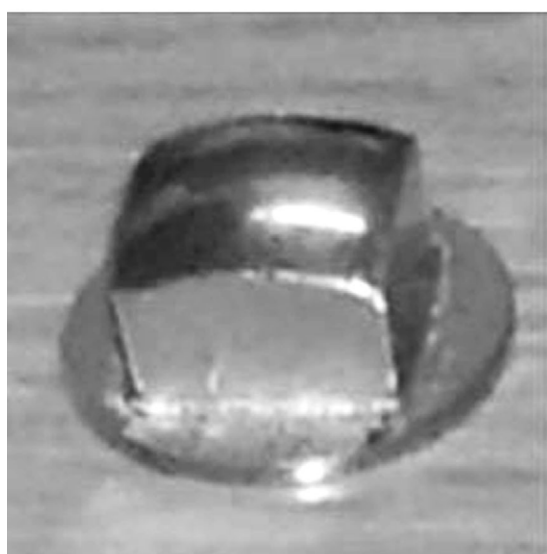
1. 시편의 제작

표면 윤활제의 영향을 효과적으로 측정하기 위하여 사용으로 인하여 표면 거칠기가 변화된 대퇴골두를 사용하였다. 10년 이상 경과된 인공 고관절 전치환술 후 비감염성 해리로 수술을 받은 환자의 코발트-크롬 대퇴골두의 마모된 부위를 길이, 너비, 두께가 각각 10 mm, 10 mm, 5 mm 인 실험 모델을 제작하였다. 윤활제 처리 전 시편은 초음파를 이용하여 5분 동안 소독 되었으며, 두께, 직경이 각각 1 mm, 19 mm 인 원통형의 판 위에 시아노아크릴레이트로 접합시켰다(Fig. 1A). 윤활 물질은 대조용액으로

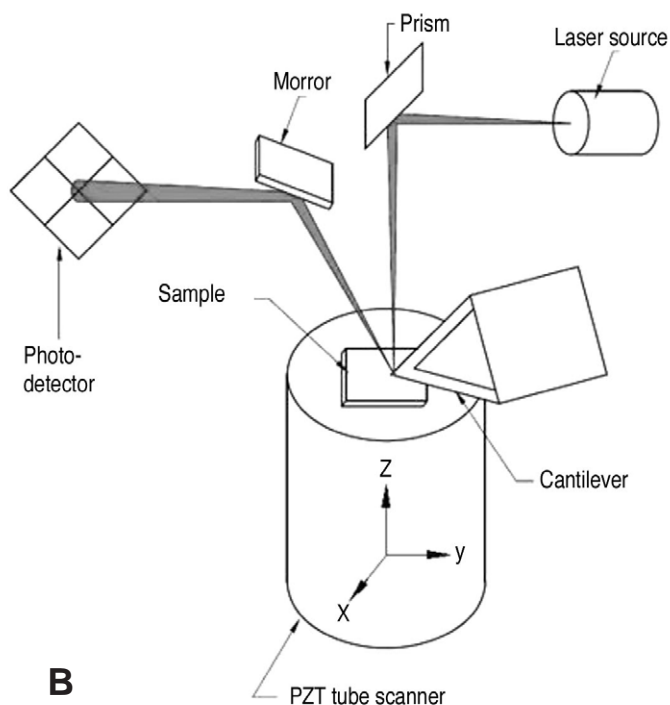
PBS (Phosphate Buffered Saline: Sigma-Aldrich, P5493)가 사용되었으며 실험용액으로는 각각 10 mg/ml, 20 mg/ml, 30 mg/ml, 40 mg/ml 농도의 BSA (Bovine Serum Albumin: Sigma-Aldrich, A2153)를 사용하였으며 4 °C에 저장 후 실온에서 실험을 진행하였다.

2. Atomic Force Microscope (AFM)를 사용한 표면 거칠기와 마찰계수의 측정

AFM (Atomic Force Microscope)은 프로브(probe), 레이저 빔, 포토-디텍터, x-y-z 방향으로 움직일 수 있는 piezo-electric 스캐너로 구성된 장비로서 단일 물질의 마찰 계수와 표면 거칠기를 나노 단위에서 정확히 같은 지점에서 측정하여서 비교할 수 있는 장점이 있다. AFM 프로브는 캔틸레버와 캔틸레버의 끝에 달려 있는 뾰족하거나 둥근 팁으로 구성되어 있다. 이 샘플 표면에 위치한 AFM 프로브(probe)에 레이저 빔이 가해지고, 다시 4개의 사각형 영역으로 구성된 포토-디텍터(photo-detector)로 반사되어 진다(Fig. 1B). 이 때, 반사된 레이저 빔이 포토-디텍터에서 차지하는 영역의 변화를 통해서, AFM 프로브를 구성하는 캔틸레버의 변형량을 계산하고, 이 캔틸레버의 변형량이 다시 힘의 단위로 환산된다. AFM 장비는 AFM 프로브에 아주 작지만, 일정한 크기의 수직력(상하 방향의 캔틸레버 변형량을 통해서 계산)을 가하도록 제어를



A



B

Fig. 1. (A) Specimen (10 × 10 mm² squared area, 5 mm thickness) for AFM analysis was prepared from CoCr femoral head retrieved from revision surgery. (B) Schematic of Atomic Force Microscope (AFM): AFM device is composed of laser source, cantilever, photo-detector, and piezo-electric (PZT) tube scanner.

수행하게 되고, 이 때 샘플의 굴곡면을 따라서 AFM 프로브가 래스터(raster) 형상으로 움직이면서 3차원 표면 이미지를 생성한다. 또, 3차원 표면 이미지를 생성한 동일한 지점에서 측정된 수평 방향의 캔틸레버 변형량을 바탕으로, 기존의 다양한 연구에서 보고되고 있는 방법들을 사용하여 마찰력을 계산할 수 있다.

본 연구에서 사용된 AFM 프로브는 직사각형 모양의 수직 스프링 상수가 $KN=0.95 \text{ N/m}$ 인 캔틸 레버(cantilever)와 피라미드 모양의 끝이 둥근 팁으로 구성되어 있고, AFM (XE 70, Park Scientific Instruments, South Korea) 측정 실험은 실온에서 밀봉된 상태로 수행되었다. 표면 거칠기는 AFM 장비와 같이 구매한 XEI 프로그램 (version 1.6.5)을 사용하여, $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 크기에서 측정된 3차원 표면 이미지로부터 제곱평균 값 (RMS: root mean squared)을 계산하여 구하였다(Fig. 2).

마찰계수는 PBS와 BSA의 각 농도에 대하여 12 부위에서 계산한 평균 값이다. 수직 하중을 단계적으로 6회간 5 nN의 힘을 증가하며 마찰력을 측정 하였고, 그 결과 각 부위마다 총 6개의 수직 하중과 6개의 마찰력을 구하였다. 이 수직 하중과 마찰력에 대한 일차함수 그래프의 그래프로부터 선형 직선 기울기를 계산하여 마찰계수를 구하였다. 특히, 마찰력은 기존의 논문에서 제시한 방법을 이용하여, AFM 캔틸레버의 횡 방향 편향 전압(VLFM, Lateral deflection voltage signal), 횡 방향 편향 민감도 (SL, Lateral deflection sensitivity), 횡 방향 스프링 상수 (KL, Lateral spring constant)의 곱으로 계산하였다^{4,10,11}. 수직 하중과 마찰력을 계산하기 위한 횡 방향 편향 전압 (VLFM)은 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 의 이미지에 대하여 $50 \mu\text{m/s}$

의 속도에서 동시에 측정 되었고, 횡 방향 편향 전압은 AFM 프로브가 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 의 이미지에 대하여 전향 시 측정된 값과 후향 시 측정된 값의 평균을 구하였다.

3. 경도 측정

경도 측정은 Micro-Vickers 경도측정기 (HM-112, Mitutoyo, Japan)의 Vickers 다이아몬드 경도기 indenter (첨부 직경 50 nm)를 이용하여 10초간 1.96 뉴턴의 부하를 주어 이루어졌다. Vickers 경도는 보고된 공식을 사용하여 계산하였으며¹⁰, 50 가지 다른 위치에서 측정하여 평균치를 택하였다.

4. 통계분석

PBS를 사용했을 때와 다양한 알부민 농도 (10 mg/ml , 20 mg/ml , 30 mg/ml , 40 mg/ml)를 사용했을 때, 마찰계수 사이의 통계적 차이를 분석하기 위하여, One-Way ANOVA test를 수행하였다(SAS, Version9, NC,USA,).

결 과

1. 경도

실험 모델의 Vickers 경도는 $382.01 \pm 12.17 \text{ HV}$ (equivalent to $39.00 \pm 1.26 \text{ HRC}$, $n=30$)이다.

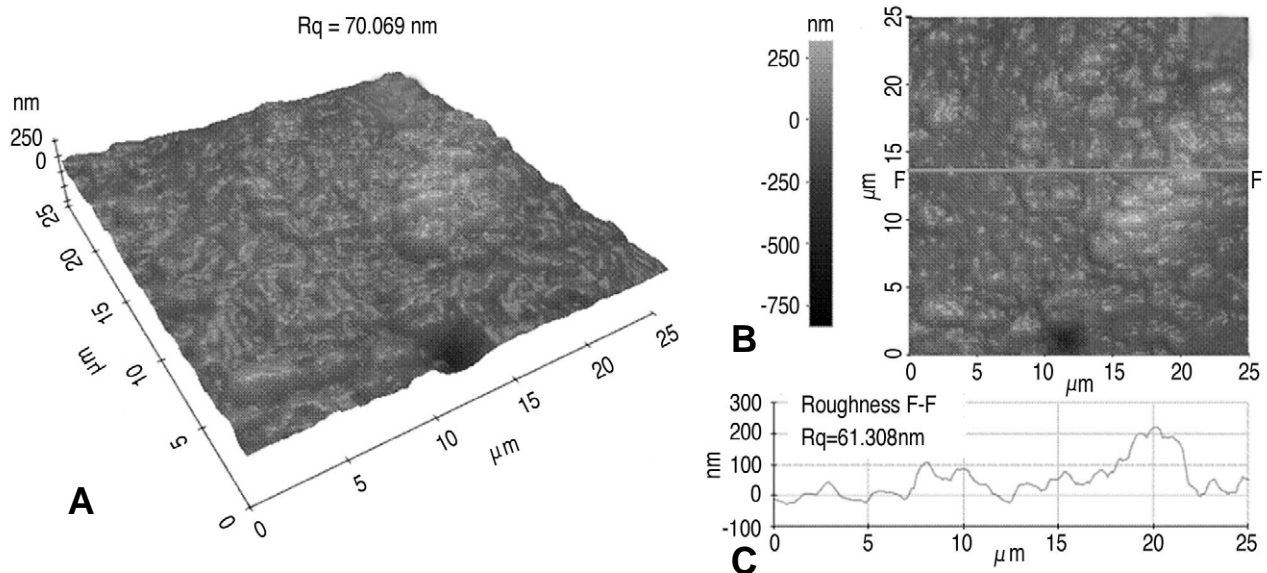


Fig. 2. Typical AFM surface topographies over a dimension of $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ for CoCr femoral head, which are used to calculate surface roughness (Rq): (A) Three-dimensional AFM image, (B) Two-dimensional AFM image, (C) Average line profile analysis.

2. 표면 거칠기(Rq)

코발트-크롬 대퇴골두의 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ 범위에서 측정된 표면 거칠기(Rq)의 평균 값은 $59.248 \pm 13.813\ \text{nm}$ ($n=10$)였다(Fig. 2).

3. 마찰계수 (μ)

마찰계수 (μ)는 PBS에서 0.248 ± 0.005 ($R^2=0.996 \pm 0.005$, $n=10$), 10 mg/ml BSA 혼합용액에서 0.195 ± 0.015 ($R^2=0.998 \pm 0.001$, $n=10$), BSA 20 mg/ml 혼합용액에서 0.087 ± 0.015 ($R^2=0.992 \pm 0.006$, $n=10$), BSA 30 mg/ml 혼합용액에서 0.069 ± 0.009 ($R^2=0.994 \pm 0.008$, $n=10$), BSA 40 mg/ml 혼합용액에서 0.066 ± 0.022 ($R^2=0.987 \pm 0.011$, $n=10$)로 측정되었다(Fig. 3, 4). One-Way ANOVA test에서 실험군과 대조군 사이의 마찰계수가 통계적으로 유의하였다 (PBS와 10 mg/ml, 20 mg/ml, 30 mg/ml, 40 mg/ml BSA: $p < 0.001$). 30 mg/ml과 40 mg/ml BSA 용액 사이를 제외한 각각 다른 농도의 BSA 혼합 용액 사이에서도 통계적으로 유의한 마찰계수의 차이를 보였다($p < 0.01$).

고 찰

AFM (Atomic Force Microscope)은 단일 물질의 마찰계수와 표면 거칠기를 나노 단위에서 정밀하게 측정할 수 있는 장비이다. 윤활제에 포함된 알부민이나 글로불린 같은 단백질은 생체 연골이나 인공 관절면 표면에 흡착됨으로써 마찰학적 특성에 영향을 미치게 된다. 관절 연골이나 인공 관절에서의 이러한 영향들은 AFM을 이용하면 생체 단백질 경계윤활제의 마찰계수의 변화를 나노 단위에서 정밀한 분석이 가능하다. 이에 본 연구에서는 사용된 금속

대퇴골두 표면을 소재로 하여 경계윤활제에 의하여 발생하는 마찰 관련 지표의 변화를 AFM을 사용하여 분석을 하였다. 표면 윤활제의 영향을 효과적으로 측정하기 위하여 표면 거칠기가 변화된 코발트-크롬 대퇴골두를 선택하여, 최대 마모 부위에서 AFM을 이용하여 표면 거칠기와 마찰계수를 측정하였다. 실험 모델의 Vickers 경도는 $382.01 \pm 12.17\ \text{HV}$ (equivalent to $39.00 \pm 1.26\ \text{HRC}$, $n=30$)이며 340~380 HV로 보고되어 있던 이전의 논문들과 유사하였다. 코발트-크롬 대퇴골두 마모 부위의 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ 범위에서 측정된 표면 거칠기(Rq)의 평균 값은 $59.248 \pm 13.813\ \text{nm}$ ($n=10$)로서 미사용 부위보다 심한 거칠기 변화를 보였다(Fig. 3). 동일 부위에 우혈청 알부민 (BSA: Bovine Serum Albumin)을 농도 별로 첨가한 결과 BSA는 코발트-크롬 대퇴골두 마모 부위의 마찰계수를 감소시키며 이 현상은 BSA의 특정 농도와 범위에서 존재할 것으로 사료된다.

표면거칠기와 마찰계수는 관절면 물질의 특성에 따라 상관관계가 양성¹²⁾, 혹은 음성¹³⁾으로 나타난다. 현재까지 시행되어온 pin-on-disk test 같은 매크로 스케일의 표면 거칠기와 마찰계수에 관련된 연구에서는 표면 거칠기에 따른 마찰계수의 차이는 없는 다양한 금속물질이 존재하며, Cu, Al, Zn, Sn 등의 표면 처리 물질에 따라 마찰계수 사이에는 유의한 차이가 있다^{14,15)}. 비록 표면 거칠기와 마찰계수 사이에 유의한 관계가 있다는 보고가 있지만, 이들은 비금속 물질 사이에서 측정된 연구이다¹⁶⁾. 그러므로 기존의 매크로 스케일의 연구 결과는 측정 범위의 한계로 인하여 나노 단위의 분석 시에도 동일한 양상을 보일지는 실제로 재분석 연구가 필요하다. 한편 인공관절에서 사용되는 Al_2O_3 및 100Cr6와 같은 금속성 물질에 대하여 Sedlacek 등은 표면 거칠기와 상관없이 마찰계수가 일정한 값을 유지한다고 보고하였으나 마찬가지로 나노 단위의 재연구가 필요할 것이다¹⁶⁾.

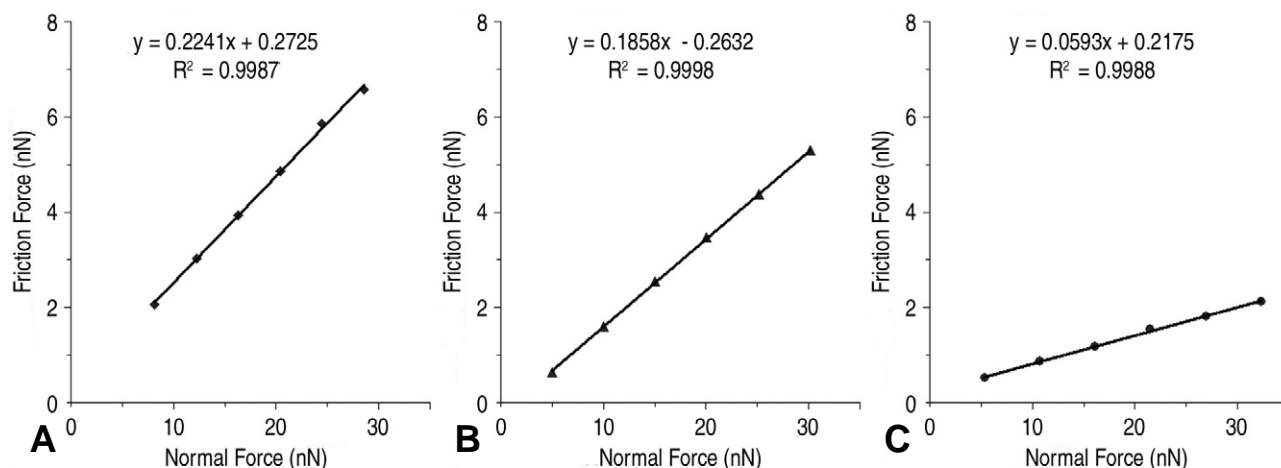


Fig. 3. Typical plots of friction forces versus normal forces for the lubricants of (A) PBS, (B) BSA of 20 mg/ml, (C) BSA of 40 mg/ml.

마크로 스케일의 연구를 통하여도 인공 관절에서의 마찰 계수는 관절면의 마모율과 직결된다는 점은 이미 잘 알려져 있다. 알루미늄/세라믹 조합의 마찰계수는 0.01 정도로 생체 관절면(0.008~0.02)에 맞먹는 수치를 보인다. 최근 고급 알루미늄의 연간 선상 마모율은 0.5~3 μm 로 알려져 있으며 (금속/금속 2.5 μm ; 세라믹/폴리에틸렌 30~70 μm ; 금속/폴리에틸렌 75~150 μm), 생성된 마모 입자의 무게로 계산한 용적 마모율은 금속/폴리에틸렌의 1/1,000, 금속/금속의 1/40에 불과 하다²⁾. 이러한 마모율의 차이는 낮은 마찰계수에서 기인한 마모 저항 때문이다¹⁷⁾. 실제로 Elasto-plastic 유한요소 분석에서 마찰계수가 0.0에서 0.3으로 증가하면 금속/폴리에틸렌의 마모율이 일정한 비율로 증가한다¹⁸⁾. 그러므로 마찰계수와 마모율과의 관계는 이미 임상적 혹은 실험적으로 정립되어 있으므로 마모 개선을 위한 연구에서의 마찰 지표의 나노 단위의 연구의 중요성을 생각할 수 있다. 또한 인공 관절면의 마찰계수는 마모율에 영향을 미치는 직접적 요소이므로 이러한 마찰 계수를 감소시킬 수 있는 윤활 및 마찰학적 연구는 인공 관절면 최적화에 매우 중요한 연구 분야가 될 것이다.

Hip simulator에서도 메탈/메탈 관절면(CoCr/CoCr), 금속/폴리에틸렌 관절면(CoCr/UHMWPE)에 흡착된 단백질이, 마찰 계수를 효과적으로 감소시키는 것으로 보고 되어 있다^{1,6)}. 마모 연구를 위한 Hip simulator 구동시에도 단백질 종류의 윤활 성분이 윤활제 조성에 주요한 인자로 작용하며 단백질의 증가는 마모율을 감소시킨다고 알려져 있다^{19,20)}. 그러므로 Hip simulator를 사용한 실험 시 단백질의 변성에 의한 농도 변화는 마모율에 영향을 주는 변수이므로 실험 진행 시 주의할 사항에 해당한다. 그러나

인공 관절면에서 알부민, 글로불린 등의 어떠한 생체 단백질이 주로 경계윤활의 특성을 어떻게 변화시키고 담당하는지는 구체적으로 밝혀진 바 없으므로 이 역시 향후의 집중할 연구 분야이다^{21,22)}. 또한 수분, 식염수, 젤라틴 용액 등은 임상적인 마모 속도나 마모편 생성을 의미가 있는 수준으로 감소시키지 못한다고 알려져 있다^{23,24)}.

본 연구 결과의 의의는 코발트-크롬 대퇴골두의 마찰계수를 감소시키는데 단백질의 농도가 중요한 영향을 미친다는 점이다. 저 농도의 BSA 농도에서 큰 마찰계수 ($\mu=0.195$ for BSA of 10 mg/ml)를 보였고, 고 농도의 BSA 단백질 농도에서 작은 마찰계수 ($\mu=0.066$ for BSA of 40 mg/ml)를 나타내었다. 그러나, BSA 농도가 30 mg/ml 이상일 경우, 더 이상 BSA 농도에 따른 코발트-크롬 대퇴골두의 마찰계수 감소를 보이지 않았다. 이러한 결과는 코발트-크롬 대퇴골두 표면의 마찰계수가 BSA 농도에 의존하고, BSA가 효과적인 경계윤활제로서의 역할을 한다는 것을 의미한다. 또한 마찰계수를 감소시키는 경계윤활제로서의 기능에 BSA 최대 농도 한계가 존재함을 나타낸다. 이러한 현상들은 알부민이 코발트-크롬 대퇴골두 표면에 흡착됨으로써, 윤활제 역할을 한다는 기존에 발표된 마크로 스케일의 연구 결과와 같은 맥락을 보인다^{5,6)}. 향후 생체 내에서 기여도가 큰 글로불린, 하이알루로닉산 등의 경계 윤활 물질들에 대한 AFM을 이용한 연구가 필요하며 이는 미래의 인공 활액 개발의 연구 기반을 제공에 기여할 수 있을 것이다.

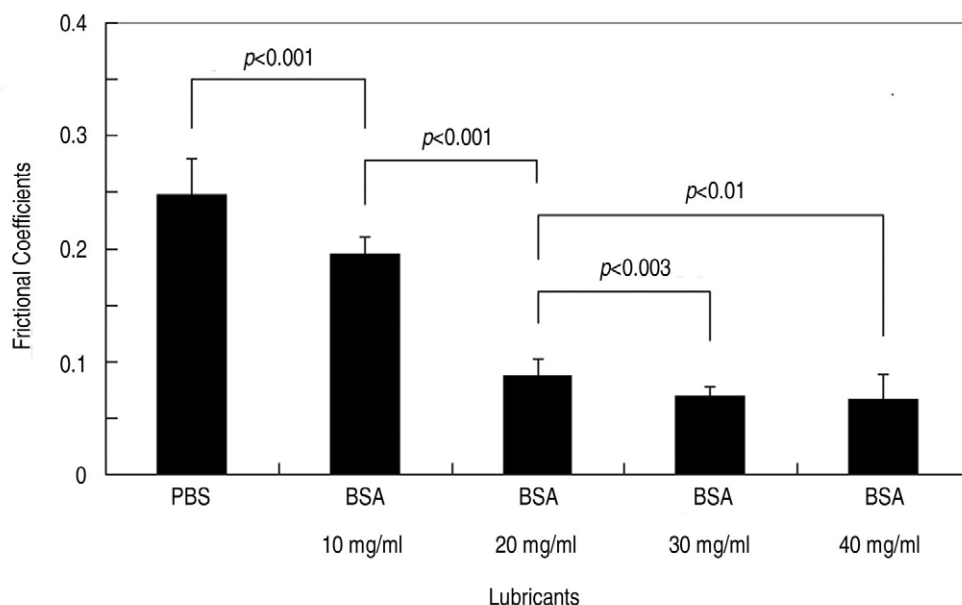


Fig. 4. The frictional coefficients (μ) of the CoCr femoral head through AFM was decreased with an increase in the concentrations of BSA.

결 론

인공 고관절 코발트-크롬 대퇴골두 표면을 손상시키는 추가적인 표면 가공 없이, 경계윤활에 의한 마찰 관련 지표와 지표들간의 상관 관계를 AFM을 사용하여서 나노 단위의 정밀한 분석이 가능함을 확인하였다. 또한 알루미늄이 코발트-크롬 대퇴골두 표면에 흡착됨으로써 윤활제 역할을 한다는 기존의 매크로 스케일 연구 결과를 나노 단위에서도 일치함을 확인하였고, 이를 통하여 경계윤활 효과를 극대화 시킬 수 있는 효과적인 BSA 농도가 존재한다는 새로운 사실을 발견하였다.

REFERENCES

1. Brockett C, Williams S, Jin Z, Isaac G, Fisher J. Friction of total hip replacements with different bearings and loading conditions. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2007;81:508-15.
2. Sedel L. Evolution of alumina-on-alumina implants: a review. *Clin Orthop Relat Res.* 2000;379:48-54.
3. Bhushan B. Nanotribology, nanomechanics and nanomaterials characterization. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci.* 2008;366:1351-81.
4. Park S, Costa KD, Ateshian GA. Microscale frictional response of bovine articular cartilage from atomic force microscopy. *J Biomech.* 2004;37:1679-87.
5. Gispert MP, Serro AP, Colaço R, Saramago B. Friction and wear mechanisms in hip prosthesis: Comparison of joint materials behaviour in several lubricants. *Wear.* 2006;260:149-58.
6. Scholes SC, Unsworth A, Hall RM, Scott R. The effects of material combination and lubricant on the friction of total hip prostheses. *Wear.* 2000;241:209-13.
7. Cho HJ, Wei WJ, Kao HC, Cheng CK. Wear behavior of UHMWPE sliding on artificial hip arthroplasty materials. *Mater Chem Phys.* 2004;88:9-16.
8. Saikko V. Friction measurement in the biaxial rocking motion hip joint simulator. *J Tribol.* 2009;131:011201.
9. Wang FC, Brockett C, Williams S, Udofia I, Fisher J, Jin ZM. Lubrication and friction prediction in metal-on-metal hip implants. *Phys Med Biol.* 2008;53:1277-93.
10. Duong CT, Nam JS, Seo EM, et al. Tribological property of the cobalt-chromium femoral head with different regions of wear in total hip arthroplasty. *Proc Inst Mech Eng H.* 2010;224:541-9.
11. Arias DF, Marulanda DM, Baena AM, Devia A. Determination of friction coefficient on ZrN and TiN using lateral force microscopy (LFM). *Wear.* 2006;261:1232-6.
12. Smith AM, Chapman CE, Deslandes M, Langlais JS, Thibodeau MP. Role of friction and tangential force variation in the subjective scaling of tactile roughness. *Exp Brain Res.* 2002;144:211-23.
13. Jiang H, Browning R, Fincher J, Gasbarro A, Jones S, Sue HJ. Influence of surface roughness and contact load on friction coefficient and scratch behavior of thermoplastic olefins. *Appl Surf Sci.* 2008;254:4494-4499.
14. Menezes PL, Kishore, Kailas SV. Influence of roughness parameters on coefficient of friction under lubricated conditions. *Sadhana.* 2008;33:181-90.
15. Menezes PL, Kishore, Kailas SV. On the effect of surface texture on friction and transfer layer formation-A study using Al and steel pair. *Wear.* 2008;265:1655-69.
16. Sedlacek M, Podgornik B, Vizintin J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. *Wear.* 2009;266:482-7.
17. Hwang DS, Kim YM, Lee CH. Alumina femoral head fracture in uncemented total hip arthroplasty with a ceramic sandwich cup. *J Arthroplasty.* 2007;22:468-71.
18. Teoh SH, Chan WH, Thampuran R. An elasto-plastic finite element model for polyethylene wear in total hip arthroplasty. *J Biomech.* 2002;35:323-30.
19. Brown SS, Clarke IC. A review of lubricant conditions for wear simulation in artificial hip joint replacements. *Tribol Trans.* 2006;49:72-8.
20. Saikko V. Effect of lubricant protein concentration on the wear of ultra-high molecular weight polyethylene sliding against a CoCr counterface. *J. Tribol.* 2003;125:638-42.
21. Clarke IC, Chan FW, Essner A, et al. Multi-laboratory simulator studies on effects of serum proteins on PTFE cup wear. *Wear.* 2001;250:188-98.
22. Wang A, Essner A, Schmidig G. The effects of lubricant composition on in vitro wear testing of polymeric acetabular components. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2004;68:45-52.
23. O'Connor DT, Choi MG, Kwon SY, Paul Sung KL. New insight into the mechanism of hip prosthesis loosening: effect of titanium debris size on osteoblast function. *J Orthop Res.* 2004;22:229-36.
24. Heuberger MP, Widmer MR, Zobeley E, Glockshuber R, Spencer ND. Protein-mediated boundary lubrication in arthroplasty. *Biomaterials.* 2005;26:1165-1173.

국문초록

표면 윤활 물질에 의한 인공 고관절 코발트-크롬 대퇴골두의 마찰 및 윤활 반응

박성훈^{*†} · Duong Cong Truyen[†] · 이재훈[†] · 조윤호[†] · 박승재^{*} · 박근민^{*} · 장준동^{*} · 이상수^{*}

한림대학교 의과대학 정형외과학교실 · 골격노화연구소*, 부산대학교 기계공학부[†]

목적: 인공 고관절에서 알부민의 경계윤활제로서의 영향을 나노 단위 수준에서 확인하기 위하여, 코발트-크롬 대퇴골두를 AFM (Atomic Force Microscope) 을 사용하여 마찰 관련 지표의 변화를 분석하였다.

대상 및 방법: 환자의 코발트-크롬 대퇴골 삽입물의 마모된 부위로부터 실험 모델을 제작하였다. 사용된 윤활제는 대조용액으로 PBS (Phosphate Buffered Saline)가 사용되었으며 실험용액으로는 우혈청 알부민(BSA: Bovine Serum Albumin)가 사용되었다.

결과: 마찰계수 (μ)는 실험군과 대조군 사이의 마찰계수가 통계적으로 유의하였다(10 mg/ml, 20 mg/ml, 30 mg/ml, 40 mg/ml BSA: $P < 0.001$). 각 농도의 BSA 혼합 용액 사이에서도 통계적으로 유의한 마찰계수의 차이를 보였으며, 30 mg/ml와 40 mg/ml사이에서는 마찰계수의 차이가 유의하지 않았다.

결론: 코발트-크롬 대퇴골두의 표면에 흡착되어서 경계 윤활 작용의 효과를 극대화 시킬 수 있는 효과적인 단백질 농도가 존재한다.

색인 단어: 원자힘 현미경, 우혈청 알부민, 경계윤활, 인공 고관절 전치환술, 코발트-크롬 대퇴 골두