

# 원자힘 현미경을 이용한 인체 대퇴부 연골의 표면 및 마찰 특성 연구

## Surface and Frictional Properties of Human Articular Cartilage by Using Atomic Force Microscopy

\*이재훈<sup>1</sup>, 즈엉 쩡 쩡웬<sup>1</sup>, 이상수<sup>2</sup>, #박성훈<sup>1</sup>

\*J. Lee<sup>1</sup>, C. T. Duong<sup>1</sup>, S. S. Lee.<sup>2</sup> #S. Park(paks@pusan.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 기계공학부, <sup>2</sup>한림대학교 의과대학 골격노화연구소

Key words : Human Articular Cartilage, Atomic Force Microscopy, Friction Coefficient

### 1. 서론

연골(articular cartilage) 조직은 골격을 통해 전달되는 하중을 지지하며 관절의 구동에 따른 마찰을 감소시켜서 관절 말단의 뼈가 손상, 마모되는 것을 줄여주는 역할을 수행한다. 인체의 무게를 가장 많이 지탱하는 부위 중 하나인 고관절의 연골이 관절염에 의해 손상되어 제 기능을 발휘하지 못할 때 고관절 임플란트나 인공 연골의 이식을 통해 치료되고 있는 실정이다.

이러한 고관절에 사용될 임플란트나 인공 연골의 제조와 시술에 있어서 고관절 연골부의 표면거칠기와 마찰 특성에 대한 기초 연구가 반드시 수반되어야 한다. 본 연구는 원자힘 현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)을 이용하여 새롭게 개발된 마찰계수 측정방법을 도입하여 정상적인 고관절 연골의 마이크로/나노 단위의 정밀한 표면거칠기와 마찰특성을 파악하는 데 목적이 있다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 시편의 제작

정상인의 대퇴부 관절 연골의 표면 거칠기와 마찰계수를 측정하기 위하여 관절 연골의 손상정도를 나타내는 Outerbridge Classification 단계 0(grade 0 - normal)으로 판명된 인체 연골 표면에서 약 7mm×7mm 크기의 정방형 시편을 채취하였다. 시편 채취 전과 후에는 생물학적인 손상을 방지하기 위하여 대표적 완충용액인 PBS(Phosphate Buffered Saline: Sigma-Aldrich) 내에서 보관하였으며, AFM 실험시에는 페트리디쉬에

시편의 하부를 부착하고 PBS 용액을 부어서 실험을 실시하였다. Fig. 1 에 실험용 시편과 실험장비를 나타내었다.

#### 2.2 실험방법

실험을 위하여 수직 스프링 상수(Spring constant) 0.95 N/m 의 직사각형의 캔틸레버와 피리미드 형태의 팁을 가진 AFM 프로브(probe)와 AFM(XE 70, Park Systems) 장비를 이용하여 30 μm×30 μm 크기의 영역에서 256×256 해상도의 데이터를 습득하였다. 해상도의 한 라인(line)의 스캔비율은 1Hz 였다.

연골의 표면거칠기는 측정된 표면형상의 제곱평균거칠기(Rq)로 정의하였다. 또한, 마찰력은 기존의 논문에서 제시한 방법들을 개선하여서, 측정된 측방향 변형 전압값(lateral

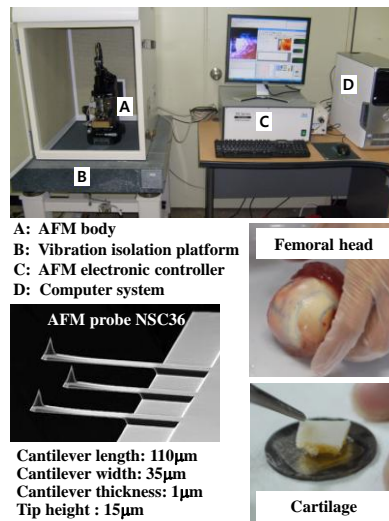


Fig. 1 Experiment devices and specimen

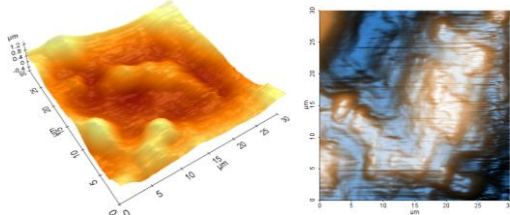


Fig. 2 3D surface image of human articular cartilage

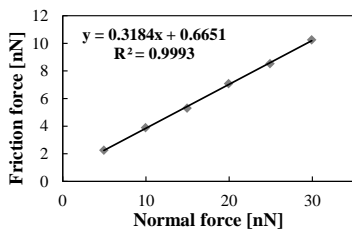


Fig. 3 Friction force versus normal force diagram

Table 1 Surface roughness and friction coefficient

Position	Surface roughness Rq (μm) of each normal forces						Average	Friction coefficient	
	Measuring direction	5nN	10nN	15nN	20nN	25nN			30nN
No. 1	left to right	0.307	0.336	0.354	0.345	0.346	0.342	<b>0.332</b>	<b>0.2642</b>
	right to left	0.297	0.324	0.342	0.332	0.335	0.328		
No. 2	left to right	0.384	0.387	0.394	0.395	0.403	0.401	<b>0.398</b>	<b>0.3184</b>
	right to left	0.394	0.401	0.402	0.404	0.406	0.405		
No. 3	left to right	0.361	0.394	0.398	0.352	0.368	0.37	<b>0.368</b>	<b>0.4559</b>
	right to left	0.348	0.371	0.387	0.341	0.361	0.364		
<b>Average</b>							<b>0.366</b>	<b>0.3462</b>	

deflection voltage signal)에 측방향 민감도(lateral sensitivity), 측방향 스프링 상수(lateral spring constant)를 곱하여 계산하였다.<sup>1,2</sup> 여기서, 측방향 변형 전압값은 AFM 프로브의 전향(왼쪽에서 오른쪽)과 후향(오른쪽에서 왼쪽)일 때 측정된 값의 평균값으로 구하였다.

실험시에 AFM 프로브에 가해지는 수직 하중을 5nN 에서 30nN 까지 단계적으로 5nN 씩 증가시키며 측정하여서, 각 측정지점마다 6개의 수직 하중에 대한 6개의 마찰력을 얻고, 수직 하중과 마찰력에 대한 선형적인 일차함수를 구하고 이 함수의 기울기를 마찰계수로 정의하였다.

### 3. 실험결과 및 결론

인체 고관절 연골 시편에서 3 지점에 대하여 마찰계수와 표면 거칠기를 측정하였으며, Fig. 2 는 측정된 고관절 연골 표면의 형상 중 하나를 나타내고 있다. Fig. 2 의 연골 표면 형상에서 AFM 프로브의 진행방향과 일치하는 줄이 나타나고 있는 것을

확인할 수 있다. 이것은 실험에 사용된 AFM 팁의 끝이 단단하고 뾰족하여서, 부드럽고 다공성인 연골표면에 스크래치와 같은 물리적 영향을 많이 주기 때문인 것으로 판단된다.

마찰계수는 Fig. 3 과 같이 각 지점에서 수직 하중을 증가시키며 실시한 6 회의 측정 결과를 선형화하여 구하였다. Table 1 에 측정된 3 개의 지점에 대한 표면 거칠기와 마찰계수를 나타내었다. 표면 거칠기는 각각의 수직 응력에서 전향과 후향을 포함한 전체 측정값들을 평균하여 계산하였다. 표면 거칠기는 0.366 μm 로 나타났으며, 마찰계수는 0.346 으로 기존에 AFM 에서 측정된 소의 대퇴부 연골의 마찰계수<sup>2</sup> 인 0.152 보다 2 배 이상으로 높게 나타났다. 다소 높은 마찰계수가 나타난 것은 Fig. 2 에서 나타난 현상과 동일하게, AFM 팁이 미세한 다공에 의하여 진행에 방해받았기 때문인 것으로 보여진다.

선행된 연구에서 피라미드 형상의 팁과 직사각형 캔틸레버를 가진 AFM 프로브가 Co-Cr 인공 고관절 표면의 마찰계수와 표면 거칠기 측정에는 유효하다는 것은 확인되었다.<sup>1</sup> 하지만 인체 연골에 대한 표면거칠기와 마찰계수의 측정에 있어서는 부적합한 것으로 판단된다. 연하고 다공성인 재료의 마찰계수 측정에는 기존의 소의 연골 측정에서 사용된 것과 같은 구체 형태의 AFM 팁이 더욱 적합할 것으로 보인다.

### 후기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2010-0021759, R33-10155)

### 참고문헌

1. Park, S., Duong, C. T., Lee, J., Cho, Y., Park, S., Park, K., Chang, J. Lee, S., "The Tribological and Lubrication Responses of a Cobalt-Chromium Femoral Head in Total Hip Arthroplasty," J Korean Hip Soc, **22(3)**, 227-233, 2010.
2. Park, S., Costa, K. D., Ateshian, G. A., "Microscale frictional response of bovine articular cartilage from atomic force microscopy," Journal of Biomechanics, **37**, 1679-1687, 2004.