

# 인체 장기 내 마찰 유발을 위한 의료장치의 표면구조 설계에 관한 연구

## Effect of surface structure Design of Medical Device for Friction Generation in Organs

\*김영태<sup>1</sup>, #김대은<sup>2</sup>

\*Y. T. Kim<sup>1</sup>, #D. E. Kim(kimde@yonsei.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup>연세대학교 기계공학과

Key words : Surface structure, friction, medical device, organ inside body, biotribology

### 1. 서론

인체 장기 내부로 투입되어 장기검사에 이용되는 캡슐 내시경(capsule endoscope)은 2001년 이스라엘 Givenimaging사에서 세계 최초로 상업화되었다. 이 알약만한 크기의 캡슐 내시경은 약 8시간의 영상획득 시간이 소요되며 장의 연동운동에 의존하여 이동하게 된다. 또한 장기 내의 영상을 획득할 뿐 환부에 약물 투여 및 용종제거와 같은 간단한 시술조차 할 수 없어 결국 필요할 경우 개복수술을 할 수 밖에 없는 실정이다. 최근 이러한 캡슐 내시경에 구동기능을 추가하고 나아가 간단한 수술 및 약물투여, 조직샘플 채취 등의 기능을 부여하고자 하는 연구가 국내외적으로 관련 분야를 중심으로 매우 활발히 진행되고 있다[1-4]. 이러한 소형 내시경 로봇이 인체 장기 내부에서 효과적으로 이동하기 위한 핵심기술로는 효과적인 로봇 추진 메커니즘 개발이 요구된다. 추진 메커니즘은 장기 내벽 표면에 마찰력을 유발하여 장기 표면에 지지되어 몸체를 장기 내부에서 효율적으로 이동시킬 수 있어야 한다. 현재 마치 곤충처럼 소형 다리가 달린 내시경 로봇들에 대한 연구가 진행되고 있으며 이미 어느 정도의 구동성능을 확보한 수준에 있다. 그러나, 그러한 로봇들의 다리나 발끝이 매우 날카롭게 설계되어있어 장기 내벽표면에서 충분한 마찰력을 유발 할 수는 있지만 지속적인 발의 운동을 통해 장기 표면에 적지 않은 상처를 유발할 수 있다. 따라서 과도한 마찰력 발생을 억제하고 장기 표면의 상처를 최소화 할 수 있는 의학적으로 안전한 마찰표면의 개발이 더욱 중요하다.

한편, 최근 국내에서도 이미 사용되고 있으며 점차 대중화 되어 가는 수술용 로봇은 수술자의 손놀림에 따라 정교히 움직일 수 있는 다양한 형태의 집게손(forceps)을 가지고 있는데 이러한 집게손은 환부의 조직을 미끄러짐 없이 잡는데 이용되고 있다[5-7]. 수술용 로봇은 환자의 몸에 직경 5 mm 내외의 구멍을 5 개 내외로 뚫고 이곳을 통해 다양한 수술도구를 넣어 시술하기 때문에 기존의 개복수술에 비해 상처가 적고 피를 많이 흘리지 않아 환자의 회복속도가 빠른 장점이 있으며 사람의 손보다 정교하며 안정성이 커 향후 많은 수술이 로봇 수술로 대체될 전망이다. 그러나 현재 가장 성능이 좋은 수술용 로봇 조차 그것의 수술 범위가 다소 한정적인데 이는 매우 약한 조직부위에 대한 안전한 수술과 로봇 조작법 자체가 장시간의 훈련을 요구하는 등 아직 적지 않은 어려움과 한계가 있기 때문이다. 특히, 현재 사용되고 있는 날카로운 집게손의 경우 환부의 손상을 최소화 하며 정교하게 다루는 데는 큰 개선을 요구하고 있어 보다 덜 날카로우면서 동시에 적당한 마찰력을 일으킬 수 있는 마찰표면 설계기술개발이 관건이 되고 있다.

이러한 문제는 앞서 언급한 내시경 로봇의 마찰표면 설계의 경우에도 해결되어야 할 동일한 문제로 인식되고 있다. 따라서 인체 장기표면에서 효과적으로 마찰력을 발생시키고 이를 제어할 수 있는 기술개발이 요구되며 이를 위해 장기표면에서의 마찰발생 메커니즘에 대한 근본적인 이해가 필요하게 된다. 본 연구에서는 인체 장기 중에서 그

길이가 가장 길어 내시경 로봇의 마찰표면 설계에 있어 중요한 환경인 소장 내벽 표면에 있어 마찰표면의 미세 표면 구조물들의 크기 및 표면 간의 미끄러짐 속도, 접촉하중에 따른 마찰특성에 관한 기초연구를 수행하였다.

### 2. 실험 시편 및 방법

장기 표면에 손상을 최소화 하기 위해서는 과도한 마찰력 발생을 억제하여 필요 이상의 마찰력을 발생시키지 않도록 마찰 표면을 설계하여야 한다. 본 연구에서는 마찰표면과 장기표면이 서로 접촉하고 상대운동이 일어날 경우 발생하는 마찰력의 크기를 마찰표면의 미세 표면 구조물의 크기에 변화를 주어 제어하고자 하였다. 따라서 크기가 다른 미세 표면 구조를 갖는 마찰표면들을 가공하고 이들 표면들과 소장 내벽과 간의 마찰실험을 통해 마찰력의 변화를 측정하는 방법으로 연구를 진행하였다. 마찰표면의 미세 구조는 비교적 가공하기 쉬운 피라미드 형상을 가공하였으며 화학적으로 안정하여 널리 쓰이는 용액상태의 Polydimethylsiloxane(PDMS)를 피라미드 패턴의 Si 몰드로 응고시켜 제작하였다. 이러한 미세 피라미드 구조물의 높이는 각각 100, 300, 400  $\mu\text{m}$  로 제작되었으며 각각의 다른 높이를 갖는 피라미드 패턴 PDMS 표면을 적당히 잘라 Fig. 1에 보이는 PEEK 로 제작된 시편홀더(specimen holder)에 끼워 접착제로 고정되었다. 시편홀더의 외각 모서리 부분의 마찰효과를 최소화 하기 위해 곡면가공을 하였다. 이와 함께 표면 구조물이 없는 Ra 0.02  $\mu\text{m}$  의 매끈한 PDMS 조각을 앞서와 동일한 방법으로 시편홀더에 끼워 매끈한 표면을 함께 제작하였다. 한편, 시편 조립시 발생할 수 있는 시편홀더 구멍의 모서리 부분과 마찰표면 간의 높이 차를 최소화 시켜 모서리에 의한 마찰효과를 최소화 시켰다. 또한, Fig. 1 에서와 같은 평탄한 형상의 마찰표면이 아닌 Rz 가 약 600  $\mu\text{m}$  인 매우 거친 구형(spherical)면의 PDMS 표면을 제작하여 일반적인 거친 표면의 마찰효과를 보았다.

마찰 실험은 생체 시편을 위해 설계된 생체 마찰 테스터(bio-tribotester)를 이용하였다. Fig. 1 의 시편홀더는 장기 표면과 마찰표면이 마주보며 접촉할 수 있는 방향으로 마찰 테스터의 마찰력 센서 부위에 설치되었으며 마찰 표면과 장기표면을 2~10 gf 의 하중으로 접촉시켜 100 mm 의 미끄러짐을 발생시켜 마찰력을 측정하였다. 이때 미끄러짐 속

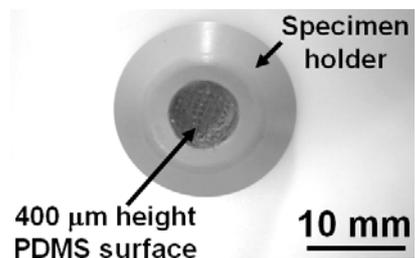


Fig. 1 Surface specimens inserted and fixed into the specimen holders.

도는 2~10 mm/s 까지 증가 시키며 마찰력을 측정하였다. 수직하중은 counter weight 방식으로 미끄러짐 중에도 일정하게 가하였다.

장기 시편은 인체와 구조적으로 유사한 돼지 소장 시편을 이용하였다. 작은 돼지의 경우 내벽 표면에 존재하는 융털(villi) 부분이 힘을 잃고 함몰되어 표면에서 잘 보이지 않으며 표면 조직의 물성 또한 서서히 변하게 되어 도축 후 신속한 실험이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 도축장에서 평균 5 개월된 돼지를 도축하여 잘라낸 소장을 saline solution 에 즉시 담가 연구실로 옮겨 5 시간 이내에 실험하였다. 장기 주변 Ph 농도를 유지 하기 위해 saline solution 을 장기 내벽 표면에 뿌려 항상 습윤상태로 유지하여 실험하였다. 상대습도는 약 35%, 온도는 상온으로 특별히 제어하지 않았다. 이는 장기의 온도를 인체의 온도인 36.5 °C 이상으로 유지하게 되면 장기가 급속히 부패되어 표면의 물성과 형상이 크게 변하기 때문이다.

### 3. 실험결과 및 논의

우선 세 가지의 서로 다른 높이를 갖는 피라미드 패턴을 갖는 마찰표면과 패턴이 없는 매우 매끈한 표면을 이용하여 2 gf 의 저하중에서 마찰 표면과 소장 표면 간의 미세한 마찰 상호 작용을 측정할 수 있었다. 미끄럼 속도는 2~10 mm/s 까지 변화시키며 마찰력을 측정하였다. 이는 소장 표면의 물성이 전형적인 점탄성(viscoelasticity)을 보이므로 미끄럼 속도에 대한 영향을 보일 수 있기 때문이었다. 마찰력 측정은 모든 경우 각각 3 회씩 측정하였으며 평균과 표준편차를 실험결과 Fig. 2 에 도시하였다.

Fig. 2 에서처럼 모든 시편의 경우 마찰력은 미끄럼 속도에 따라 증가함을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 것은 100 과 200  $\mu\text{m}$  높이의 피라미드 패턴의 경우 매우 매끈한 표면과 거의 유사한 마찰력 수준을 보이고 있음을 알 수 있지만 400  $\mu\text{m}$  의 경우 그 변화 폭은 크지 않지만 모든 미끄럼 속도에 대해 마찰력 수준이 다소 증가하여 다른 것들과 다른 영역에 있음을 쉽게 알 수 있다. 이를 통해 표면의 미세 피라미드 패턴의 높이가 300  $\mu\text{m}$  이하 수준에서는 소장의 표면 구조와 거의 작용하지 않고 있음을 잘 보여준다. 반면, 400  $\mu\text{m}$  이상의 높이에서는 표면과의 마찰상호 작용이 발생되기 시작하여 미끄럼 속도에 따라 마찰계수가 약 0.2~0.35 수준의 매우 미소한 마찰력이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한, Rz 가 약 600  $\mu\text{m}$  인 매우 거친 구형 PDMS 표면의 경우도 소장 표면과 반응하여 증가된 마찰력을 보임을 확인하였다. 이를 통해 표면의 거칠기가 마찰발생에 직접적인 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

한편, 2 mm/s 의 낮은 미끄럼 속도에서 수직하중을 2~10

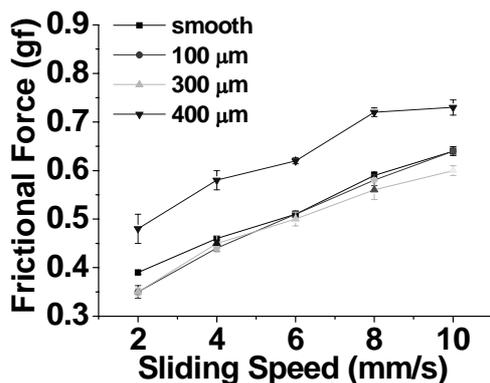


Fig. 2 Averaged frictional force of different surface specimens which have different sized micro structures with standard deviation.

gf 까지 2 gf 씩 증가시키며 동일한 실험을 수행하였다. 이 결과 마찰력은 수직하중에 따라 증가함을 알 수 있었으나 네 가지 시편이 거의 동일한 마찰력 수준을 보여, 수직하중이 증가할 경우 표면의 미세구조의 효과는 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 돼지 소장 표면과 높이가 서로 다른 피라미드 패턴 표면에 대한 마찰실험을 통해 마찰표면의 미세 표면구조의 크기에 따른 마찰특성을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 소장 시편의 상태에 따라 다를 수 있으나 약 0.02 gf/mm<sup>2</sup> 의 저접촉압력에서는 마찰표면의 미세 피라미드 표면구조의 높이가 약 400  $\mu\text{m}$  이상 수준에서 소장 표면과 마찰표면 간의 마찰 상호작용이 증가하기 시작함을 보여 마찰작용에 대한 표면구조물의 임계크기가 있음을 알 수 있었다.

2. 접촉압력이 0.05 gf/mm<sup>2</sup> 이상 증가할 경우 표면의 미세 구조의 효과는 크게 떨어져 마찰표면 간의 마찰효과는 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

4. 마찰력은 0.02 gf/mm<sup>2</sup> 의 접촉하중에서 2~10 mm/s 범위의 미끄러짐 속도에, 또한 2 mm/s 의 미끄러짐 속도하에 0.02~0.12 gf/mm<sup>2</sup> 범위의 접촉하중에 대해 각각 비례하여 나타남을 알 수 있었다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 21 세기 프론티어 기술개발사업인 지능형마이크로시스템개발사업(<http://www.microsystem.re.kr>) 의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

### 참고문헌

- Kim, J. S., Sung, I. H., Kim, Y. T., Kwon, E. Y., Kim, D. E., and Jang, Y. H., "Experimental Investigation of Frictional and Viscoelastic Properties of Intestine for Microendoscope Application," *Tribology Letters*, **22**(2), 143-149, 2006.
- Kim, Y. T., Kim, J. S., Sung, I. H., Kwon, E. Y., Kim, D. E., and Kim, B. K., "Frictional Behavior of Capsule-type Endoscope and Self-propelling Colonoscope inside the Intestine," *International Tribology Conference*, May 29-June 2, Kobe, Japan, 2005.
- Kwon, J., Park, S., Park, J., and Kim, B., "Evaluation of the Critical Stroke of an Earthworm-like Robot for Capsule Endoscopes," *Proc. IMechE, Part H: J. Engineering in Medicine*, **221**, 397-405, 2007.
- Cheung, E., Karagozler, M. E., Park, S., Kim, B., and Sitti, M., "A New Endoscopic Microcapsule Robot using Beetle Inspired Microfibrillar Adhesives," *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July*, 551-557, 2005.
- Curley, K. C., "An Overview of the Current State and Uses of Surgical Robots," *Operative Techniques in General Surgery*, (4), 155-164, 2005.
- Sangeeta, S., and Arnold, P. A., "Surgical Techniques: Robot-assisted Laparoscopic Myomectomy with the da Vinci® Surgical System," *J Robotic Surg*, **1**, 69-74, 2007.
- Francesco, C., Ben, C., and Rinaldo, C. M., "Trends in Robotic Surgery," *Journal of Endourology*, **1** (8), 940-951, 2005.