

캡슐형 내시경 개발을 위한 소장 내에서의 캡슐저항력 특성

백남국*(연세대 대학원 기계공학과), 김대은(연세대 기계공학부)

Tribological Characteristics of Endoscope Capsule Inside of Small Intestine

N. K. Baek(Mecha. Eng. Dept., Yonsei Univ.), D. E. Kim(School of Mecha. Eng., Yonsei Univ.)

ABSTRACT

In order to develop a self-propelled microendoscope, the frictional resistance of the capsule-type endoscope inside the intestine should be understood. In this work the frictional resistance behaviors of capsules with different designs were experimentally investigated using a pig intestine. It was found that cylindrical capsule design had the least frictional resistance. Also, the resistance increased as the speed of the capsule motion was decreased. It is expected that the results of this work will be used to design the optimum propulsion system for the microendoscope.

Key Words : Self-propelled robotic endoscope (자가구동형 캡슐형내시경), Intestinal juice (장액), Small intestine (소장), Peristalsis (연동운동), Migrating motor complex (소화간 이동운동 복합체), Friction(마찰력)

1. 서론

오늘날 MEMS의 발전과 더불어 매크로한 시스템에서 가능한 기능들이 같은 기능을 가지면서 크기는 마이크로 스케일로 가능하게 되었다. 이러한 microfabrication 기술에 기초하여 여러 응용 제품들이 개발되고 있는데 그 중 체내 자가구동 캡슐형 내시경은 이러한 기술의 총아라 할 수 있다. 이러한 내시경이 필요한 이유는 현 유선형 삽입식 내시경이 숙련된 검사자가 행하여야 하고 피검자에게 불편감과 고통을 주는 검사방법이고 또한, 소장은 내시경검사로는 한계가 있는 영역이다. 이에 현재 지능형 마이크로시스템 개발 사업단에서 개발중인 자가구동 캡슐형 내시경은 최종 개발되어 나올 내시경 크기가 지름 약 10mm, 길이 20mm 정도로 인체 내에서 진단을 위한 생체정보, 영상을 수집하고 치료를 위한 샘플 추출, 약물주입 등을 하며 이동, 정지, 센싱, 통신 등의 기능을 내장한 것이다. 이러한 내시경이 체내에서 안정적인 구동을 하고 위치제어를 하기 위해서는 기초적인 체내 마찰데이터와 내시경형상에 대한 제안이 필요하고 본 연구는 이를 바탕으로 수행되었다. 실험부위를 소장으로 선택한 이유는 내시경이 소화관을 이동한다고 볼

때 소장의 지름이 10-15mm 정도로 내경이 가장 작으며 길이가 길고 연동운동이라는 특유의 소장내 움직임 때문에 다른 소화관에 비해 많은 마찰저항을 받을 것이라 판단되었고 캡슐 내시경이 가장 오래 동안 머무는 곳이기 때문이다. 또한, 소장은 소화, 흡수를 위한 접촉 면적을 늘리려는 특성을 가지고 있는데 접촉 면적에 따른 마찰력변화를 예상할 수 있다. 캡슐 내시경은 길이 20mm에 지름 9-10mm 정도를 가지는 첨단 미세공정기술이 집약된 것으로 출력의 한계가 존재한다. 내시경이 소장내 어떤 위치에서 정지 상태를 유지하고 있을 때 공복시 소장 운동 형태인 MMC (Migrating Motor Complex)운동을 만났을 때 이 MMC는 보통 20mmHg의 압력으로 5분 이상 지속된다.⁽¹⁾ 20mmHg를 하중으로 환산하면 0.27gf/mm² 이고 실험에 사용된 표면적이 가장 작은 I형 실린더의 표면적이 565.49mm² 이고 실린더가 받는 하중은 152.68gf가 된다. 이것은 5분의 시간동안 150gf의 압력을 견뎌야 제자리 유지가 가능하다는 예측을 할 수 있다. 실험에는 사람소장과 가장 흡사한 돼지소장을 이용하여 실험하였다.⁽²⁾

2. 소장

2.1 소장외의 구성

소장은 위의 유문부와 대장사이의 총길이 6-7m 정도이고 소화와 흡수가 이루어지는 중요한 부분이다. 소장을 구분하여 보면 제 1-3 요추의 우측에서 C 자형으로 구부러진 길이 25cm 의 십이지장(duodenum)으로부터 시작되며 복강의 좌상복부에 2.5m 가량의 공장(jejunum)과 공장에 이어 우하복부에 3.5m 가량의 회장(ileum)으로 나누어진다. 특히 십이지장 하행부에는 췌장의 췌관과 담낭으로부터 오는 총담관이 개구하는 대십이지장유두(duodenal papilla)가 있어 이곳으로 췌액과 담즙이 나오며 소장 점막으로부터 분비되는 장액이 첨가되어 소장에서 소화가 시작된다. 소장내벽은 윤상주름(circular folds)이 있고 그 위에 0.2-1mm 크기의 융모(intestinal villi)가 있어 소장내강의 표면적을 늘려 소장내의 음식물과 접촉하는 면적을 크게 하는 구조를 하고 있다.⁽³⁻⁵⁾

2.2 소장액 (intestinal juice)

장선(intestinal gland) 및 상피세포로부터 분비되며 인단백질성의 점액으로 이루어져 있다. pH 7.7 인 알칼리성으로 대부분이 수분이고 염화나트륨 0.58-0.67%, 탄산나트륨 0.22%를 함유한다. 소화효소로서 아미노펩티다아제, 수크라아제, 락타아제, 말타아제 등을 함유한다. 음식물이 장에 들어왔을 때 장점막의 기계적 자극이나 화학적 자극 또는 세크레틴의 작용에 의해서 분비된다. 분비량은 하루에 약 1,500-3,000ml 정도가 되며 특히 브루너선(Brunner gland)에서 분비되는 점액은 대단히 끈끈하고 많은 양의 HCO_3^- 으로 인하여 pH 8.3-9.3 정도인 알칼리성 물질이다. 장액은 위로부터 십이지장에 들어온 음식물의 산도를 조절하여 십이지장 점막의 파손을 막아 괴양성 질환을 방지한다.^(4, 5)

2.2 소장운동

소장운동은 크게 연동운동, 분절운동, 용모운동으로 나눌 수 있다. 연동운동은 소장벽 안쪽의 윤상근(circular muscle)과 바깥쪽 종주근(longitudinal muscle)의 수축으로 발생하며 구강쪽에서 항문쪽을 향하여 전파되며 십이지장과 공장상부에서 관찰된다. 분절운동은 윤상근이 수축하여 일어나는 교반운동으로서 15-20cm 정도의 간격을 두고 1-2cm 폭의 윤상근이 수축하여 수축환을 이루면서 내용물을 여러 개의 덩어리로 나누고 5-6 초가 지나면 덩어리의 중앙부에 새로이 수축환이 생기면서 이쪽 저쪽으로 합쳐지고 나뉘어지는 운동이다. 용모운동은 진자운동 이라고도 하는데 종주근이 수축, 이완됨으로써 장관이 장축을 따라 전후 좌우로 흔들면서 미즙과

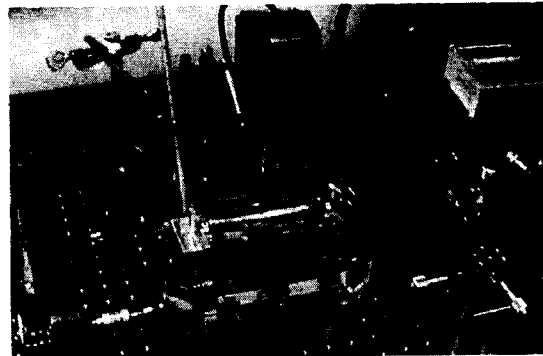


Fig. 1 Experimental setup of intestine friction test

소화액을 고투 혼합해 소화작용을 돕고 아울러 소화된 영양물질이 소장점막에 있는 융모와의 접촉을 촉진하여 영양물질의 흡수를 돕게 된다. 진행속도는 4-5cm/sec 이다.^(3, 5)

3. 실험장치 및 실험조건

실험장치는 Fig. 1 과 같이 체온인 36.5°C-37°C를 유지시켜 주기 위한 heat reservoir, 내시경형상의 더미와 연결된 센서, 소장시편의 이송부로 만들어져 있다. 온도를 유지시켜 주기 위해 heat reservoir 의 온도 측정을 위한 수온온도계, 시편의 온도측정을 위한 적외선온도계를 사용하였으며 마찰력측정에는 반도체 스트레인게이지를 사용 하였으며 소장 시편 이송부는 모터 콘트롤러를 이용한 정속 제어를 하였다. 시편의 건조를 막기 위해 소장액 등장액(isotonic solution)을 뿌려주었다. 소장액 등장액을 사용한 이유는 삼투압에 의한 세포파괴를 막고 조직의 변화를 막아 소장의 기계적 특성을 최대한 살아 있는 상태와 유사하게 유지하기 위함이다. 등장액의 제조에는 Krebs-Hensleit solution 을 기본으로 하고 혈액응고를 방지하는 헤파린(heparin)과 체내 수

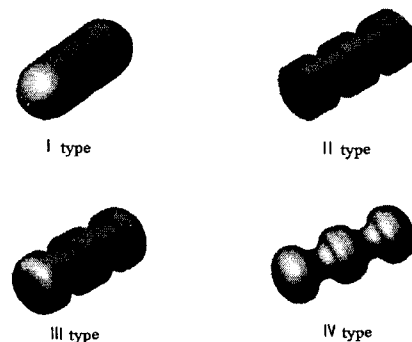


Fig. 2 Capsule design

용성 단백질인 알부민(albumin)을 첨가하여 주었으며 pH 조절은 HCl 과 NaOH 를 이용하였다.^(6,7)

실험조건에서 온도는 체내 평균 온도인 36.5℃ - 37℃로 하였으며 속도는 장내 연동운동 속도가 보통 2-7cm/min. 이고 평균 연동운동 속도가 3cm/min. 이다. 이런 속도로 지나가는 연동운동을 만나서 적어도 밀려가지 않고 제자리를 유지한다고 볼 때 적절한 속도라 판단한 3cm/min. 으로 설정해 주었다. 실험에 사용된 내시경시편은 알루미늄으로 만들어졌으며 Fig. 2 에 보면 네가지 형태의 내시경 형상을 제작하여 실험 하였는데 이러한 형상을 결정하게 된 이유는 내시경 표면과 소장벽의 접촉을 줄이기 위해 제안 하였으며 소장벽과 장내 내용물의 저항의 영향을 평가하기 위해 결정하였다. 크기는 지름 9mm, 길이 20mm 로 제작하였다. 각 시편의 하중은 I형 3.12g, II형 3.14g, III형 2.94g, IV형 2.81g 이다.

4. 실험결과

실험은 Fig. 3, 4 에서처럼 소장 형태 그대로의 시편과 소장을 편평하게 펼친 시편 두 가지에 대해서 속도에 따른 영향을 고찰 하였고 소장 형태 그대로의 시편에서는 실린더형상에 대한 마찰력 변화를 보았다. 기초실험결과에 따르면 마찰력이 소장 내부 표면형상에 많은 영향을 받았기 때문에 속도나 실린더형상에 따른 마찰력 변화를 볼 때 같은 시편 같은 부위에서 실험을 실시하여 비교 하였다.

실험결과를 보면(Fig. 5) flat 한 시편이 cylindrical 한 시편에 비해 1/4 정도의 값을 보이는데 이는 마찰력이 내시경자체의 하중보다는 접촉하는 면적에 비례한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6 은 같은 부위를 속도가 다르게 실험 하였을 때의 마찰력 변화를 나



Fig. 3 Cylindrical small intestine



Fig. 4 Flat small intestine

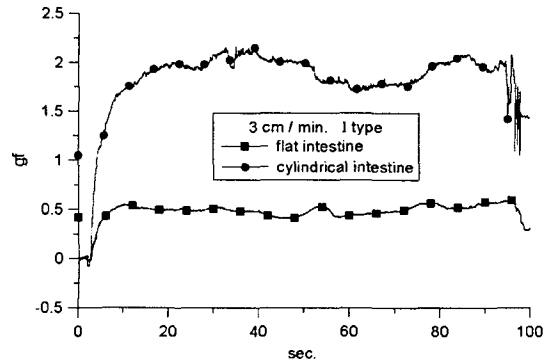


Fig. 5 Comparison of friction of flat and cylindrical intestine

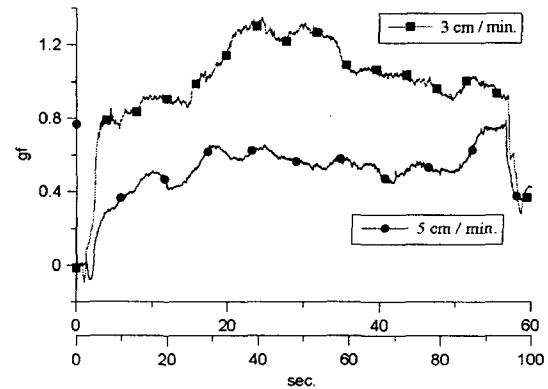


Fig. 6 Effect of capsule speed on friction

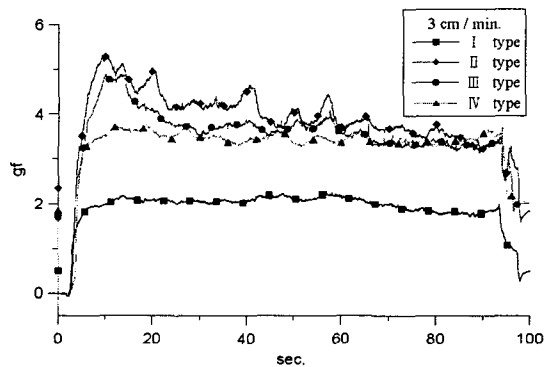


Fig. 7 Friction forces of different types of capsule

타내는데 속도가 빠르면 마찰력이 떨어짐을 알 수 있다. 이는 소장의 특성에 연유해서 이해할 수 있는데 소장 자체는 소장내 음식물을 소화, 흡수하기 위하여 최대한 접촉 면적을 늘리려는 성질이 있다. 내시경의 속도가 빠른 것 보다 느릴 때 소장이 어느 한 지점에 머무는 시간이 더 늘어나고 그만큼

소장이 변형하여 내시경과의 접촉면적이 늘어나는 시간이 늘게 되어 결과적으로 접촉 면적이 늘어나 마찰력이 커진다고 볼 수 있다. Fig. 7의 실린더 형상에 따른 마찰력을 보면 I형의 마찰력이 가장 작고 일정하게 나타남을 알 수 있고 IV형, III형, II형 순으로 마찰력이 증가한다. 실린더 외부형상에 각진 부분이 있는 실린더는 소장내 이동시 Fig. 8과 같이 주름 때문에 마찰력이 커짐을 볼 수 있고 외부 형상이 부드러운 유선형을 가질 때는 이러한 영향이 작음을 알 수 있다. 이는 I, IV형과 II, III형을 비교해보면 알 수 있다. I형과 IV형이 비슷한 마찰 특성을 보이며 IV형이 마찰력이 높은 이유는 I형보다 접촉하는 표면적이 크다는데 있다. 각 실린더형에 따른 표면적은 I형 565.49mm², II형 742.99mm², III형 690.89mm², IV형 645.13mm²이다.

5. 결론

본 연구에서는 체내 자가구동형 내시경의 개발에 대비하여 소장 내에서 최종 개발될 캡슐 내시경의 디자인을 위하여 형상에 따른 소장내 마찰력 변화를 고찰하였으며 속도변화에 따른 마찰력과 접촉면적변화에 따른 마찰력 변화를 비교하였다. 연구 결과는 속도가 빠르면 마찰력이 감소하며 캡슐의 하중에 의한 영향보다는 소장의 원주방향 장력이 크게 작용하며 내시경 표면적이 작은 I형이 2gf의 마찰력을 보였으며 나머지는 3gf 이상의 값을 보였다. 이는 표면적이 작고 속도는 빠를수록 마찰력이 작게 나타남을 알 수 있다.

후 기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어 개발사업 중 “지능형 마이크로시스템 개발사업단”의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Berk, J. E., "Bockus Gastroenterology," 4th ed. W. B. Saunders Company, Vol. 3, 1985.
2. Slatkin, A. B., "Modeling and Experiments for a class of Robotic Endoscopes," PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, June 1999.
3. 정영태, 정경아, "인체생리학," 개정 4판, 청구문화사, 2000.
4. Marieb, E. N., "Human Anatomy and Physiology," 3rd ed. Benjamin/Cummings, 1995.

5. 대한해부학회, "해부학," 고려의학, 1999.
6. Pestana, C., "Fluids and Electrolytes in the Surgical Patient," 5th edition, Lippincott Williams & Wilkins, 2000.
7. Krebs, H. A. and Hensleit, K., "Untersuchungen über die Harnstoffbildung im Tierkörper," Hoppe-Seyler's Zeit schrift für Physiol. Chemie, 210, pp. 33-66, 1932.