

## 기능성 대장 내시경 로봇 시스템

임현영\* · 정연구\* · 김병규† · 박종현\*\* · 박종오\*\*\*

(2002년 9월 9일 접수, 2003년 4월 9일 심사완료)

### Functional Colonoscope Robot System

Hun-Young Lim, Younkoo Jeong, Byungkyu Kim, Jong Hyeon Park and Jong-Oh Park

**Key Words :** Colonoscope(대장 내시경), Inchworm Type Locomotion(자벌레형 이동), Hollow Body(중공형 몸체), Steering System(조향 시스템), In Vivo Test (동물 실험)

#### Abstract

Colonoscopy is an important medical procedure for the diagnosis of various diseases like cancers in the colon and rectum. But it requires a lot of time for a doctor to acquire dexterous skills necessary to perform successful colonoscopy. Moreover, to many patients, conventional colonoscopy simply takes too long time. Therefore, some studies on the development of autonomous and more convenient colonoscope are carried out. In this paper, we propose a functional colonoscope robot system that has a locomotive function with a hollow body, a steering system, and other basic functions of typical conventional colonoscope systems. The concept and each component of the functional colonoscope system are described in this paper. In order to evaluate the functional performance of the colonoscope robot, we carried out in-vitro and in-vivo tests.

#### 1. 서론

내시경 시술은 입이나 항문을 통해 내시경 장치를 삽입하여 사람의 장기 내부를 관찰하고, 생검을 이용하여 질병치료를 한다. 그러나 내시경 검사를 위해 환자의 입 또는 항문을 통해 의사가 직접 내시경을 삽입하여 병변을 관찰하거나 치료하는 개념은 지난 수 십년 간 전혀 변화가 없었다. 또한 기존 내시경의 경우, 내시경을 장기 내에 삽입할 때 많은 통증을 유발하고 내시경을 다루는 기술이 의사 개개인의 능력에 따라 크게 달라질 뿐 아니라, 내시경의 조작으로 인하여 의사가 병변의 판단에 집중할 수 없다는 단점이 있었다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 자율 주행형 내시경

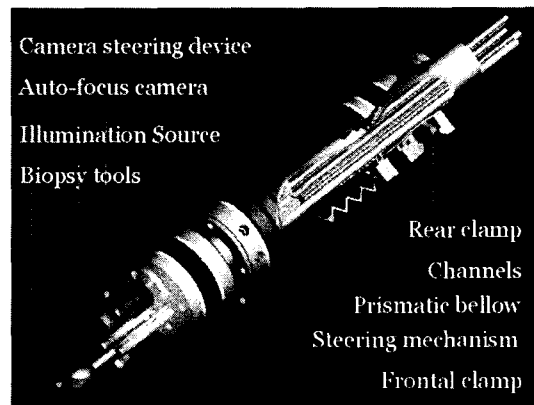


Fig. 1 Conceptual design of the proposed functional colonoscope

시스템 개발에 관한 요구가 있어왔다.

자율 주행형 내시경을 위하여 링크 구조,<sup>(1)</sup> 방사형 바퀴,<sup>(2)</sup> 공압 구동기,<sup>(3)</sup> 강선(Tendon)과 고정장치<sup>(4)</sup>를 이용한 이동 메커니즘과 자벌레형 이동 메커니즘<sup>(5,6)</sup> 등이 선행연구 되어왔다. 그 중 자벌레형 이동 메커니즘은 몸체의 길이방향으로 수축 및 신장이 가능한 유연한 몸체와 대장벽에 고정할 수 있는 장치로 구성되어 있으며, 대장과 같이 유

\* 한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원

마이크로시스템 연구센터

E-mail : bkim@kist.re.kr

TEL : (02)958-6730 FAX : (02)958-6910

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

\*\*\* 회원, 지능형 마이크로시스템 개발 사업단

연하고 미끄러운 환경에서 이동 가능성을 보여주었다. 최근 Dario<sup>(7)</sup>가 흡입 및 기계적 고정장치를 이용한 자벌레형 이동 로봇을 개발하여 동물 실험에서 장내 이동을 성공한 바 있다. 그러나, 이러한 대장 내시경 로봇은 이동기능에만 치중하여 내시경으로서 필수적인 여러 기능들을 통합하지 못했다는 단점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 이동 기능을 가지며 내시경으로서 요구되는 기본기능인 카메라, 조향장치, 생검장치, 물 분사장치 등이 통합된 새로운 기능성 대장 내시경 로봇을 기술하고자 한다. 본 기능성 대장 내시경 로봇을 사용하면, 의사는 내시경 조작에 큰 신경을 쓰지 않고 병변의 판단 및 치료에만 집중할 수 있어 내시경 기술 기술이 한단계 높아질 것으로 예상된다. Fig. 1은 본 기능성 대장 내시경 로봇의 구성 및 내부 구조를 보여주는 개념도이다. 개발된 기능성 내시경 로봇의 성능을 검증하기 위해 죽은 돼지의 대장(In vitro) 및 살아있는 돼지의 대장(In vivo)에서 실험을 수행하였다.

2. 기능성 대장 내시경 로봇

2.1 장내 이동 기능을 갖는 중공형 몸체

본 논문에서 소개되는 기능성 대장 내시경 로봇의 장내 이동 원리는 Dario<sup>(7)</sup>가 제안한 자벌레형 장내 이동 원리와 동일하다. Fig. 2는 이상의 자벌레형 이동 메커니즘의 이동 원리를 도식화 한 것이다. 이동 중 로봇은 몸체의 길이 방향으로 신장 및 수축을 반복하고 동시에 전-후방에 장착되어 있는 고정장치(Clamp)를 순서대로 열고 닫음으로써 한쪽 방향으로 이동 추력을 얻어낸다. 이상의 원리는 대장과 같이 부드럽고 미끄러우며, 그 형태가 일정하지 않은 환경에서도 훌륭한 이동 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 그러나 이동 중 몸체의 길이가 수축과 신장을 반복하며 변화하기 때문에 내시경으로서 필요로 하는 기본 장치인 카메라, 방향전환장치, 생검장치 등을 통합하기는 어려움이 있다. 따라서 이동성능에 해를 끼치지 않으면서 내시경으로서 필요로 하는 요소들을 통합하기 위한 구조로 가운데가 비어있는 중공형 몸체를 제안하고자 한다.

Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 두 가지 중공형 구조의 로봇 몸체 설계도를 보여준다. Fig. 3(a)는 몸체부에 장착된 유연한 실리콘 튜브에 벨로우즈가 기밀을 유지하며 슬라이딩할 수 있게 하여, 자벌레형 이동 메커니즘을 구현할 수 있는 구조로서 상대적으로 구조가 단순한 장점이 있다.

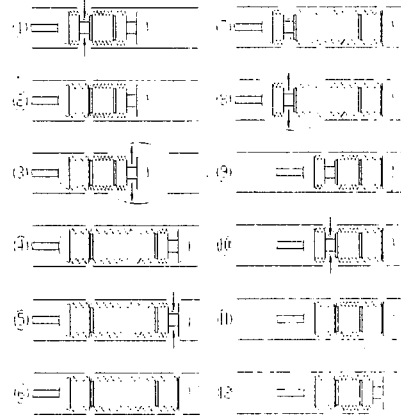
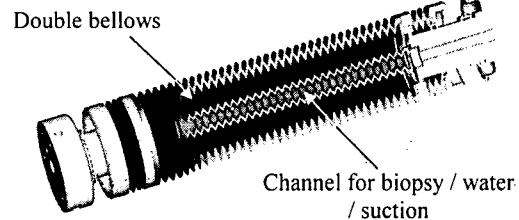
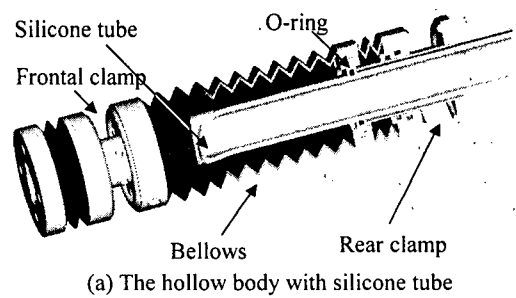


Fig. 2 The principle of the inchworm type locomotion with clamping devices



(b) The hollow body using double bellows

Fig. 3 Sectional view of the hollow body

그러나, 실리콘 튜브와 벨로우즈 사이에 기밀을 완벽하게 유지하기 어렵고, 내부에 삽입된 실리콘 튜브로 인하여 몸체의 유연성이 떨어질 수 있다는 단점이 있다. Fig. 3(b)는 실리콘 튜브 대신 소형 벨로우즈를 내부에 삽입한 모델로서, 이중 벨로우즈의 형태로서 중공형 몸체를 구현하는 구조이다. 이 모델은 몸체부가 유연하고 기밀의 유지가 용이하여 몸체의 길이 변화에 유리한 장점들을 지니고 있지만, 구조가 복잡하고 제작이 어렵다는 단점을 지니고 있다.

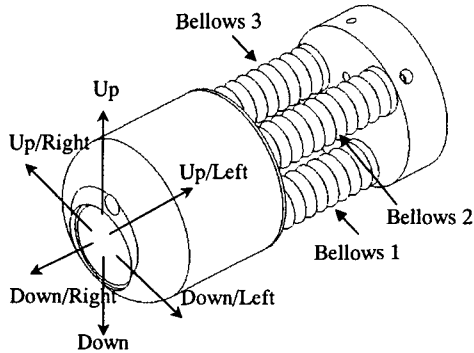


Fig. 4 Configuration of Steering system

Table 1 Steering system derive code

	Bellows 1	Bellows 2	Bellows 3
Elongation	ON	ON	ON
Retraction	OFF	OFF	OFF
Up	ON	OFF	OFF
Up/Left	ON	OFF	ON
Down/Left	OFF	OFF	ON
Down	OFF	ON	ON
Down/Right	OFF	ON	OFF
Up/Right	ON	ON	OFF

2.2 조향 장치

사람의 대장은 구조상 여러 부위에 급격한 예각을 지닌 부위가 있기 때문에, 로봇의 장내 이동을 위해 이동방향을 바꾸는 조향장치가 필수적이다. 또한 의사가 관찰하고자 하는 방향으로 카메라의 시점(Viewpoint)을 변화하기 위해서도 본 장치가 필요하다. 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 벨로우즈를 이용한 조향장치 구조를 사용하였다. 이러한 구조는 간단하고, 소형화가 가능하며, 반응속도가 빠르다는 장점을 가지고 있어 마이크로 액추에이터<sup>(6)</sup> 등에 많이 적용되고 있다. 세개의 소형 벨로우즈를 120° 간격으로 로봇의 머리부 장착하여, 각각의 벨로우즈에 동일한 압력을 공급하면 머리의 길이방향으로 움직이고 그 이외의 경우 각 벨로우즈들의 구속조건을 만족시키기 위하여 머리가 굽어지는 움직임을 유발한다. 이렇게 굽어지는 움직임을 사용하면 손쉽게 2자유도 조향 장치를 구현할 수 있다. Table 1은 공압(ON)과 진공압(OFF)을 사용하여 8가지 방향으로 손쉽게 조향할 수 있도록 하는 조작표를 보여준다. 단, 각 벨로우즈들의 길이를 정밀하게 제어하면, 각 방향의 움직임 또한 정밀하게 제어할 수 있다.

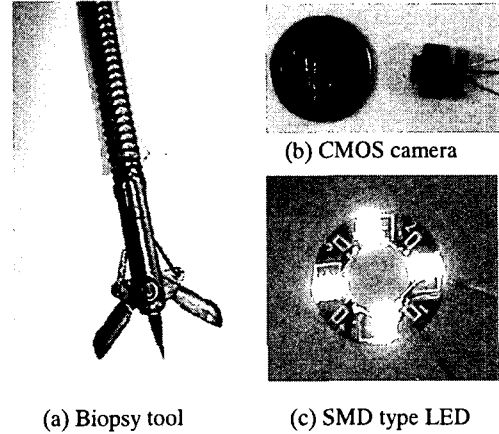


Fig. 5 Components for the diagnosis and treatment

2.3 진단 및 치료를 위한 구성 요소

내시경의 기능을 위하여 로봇에 통합되어야 하는 주요 구성부품들은 Fig. 5에서 보는 바와 같다. Fig. 5(a)는 생검을 위한 집계를 보여주는 것으로서 정밀한 진단을 위해 조직을 잘라내거나 간단한 치료를 위해 많이 사용되는 의료용 기구이다. 이러한 생검용 집계는 강선(tendon)을 이용하여 작동되며 굵은 직경에 단단한 재질로 만들어져 내시경 로봇에 통합하는 데 어려움이 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 로봇은 내부가 비어있기 때문에 이러한 생검 장치의 사용이 가능하다. 진단을 위해 가장 중요한 장치인 카메라는 Fig. 5(b)와 같다. 크기는 직경 11.8 mm 길이 11.7 mm 이고 510\*492 픽셀의 해상도를 가지고 있다. 또한 핀홀(pin hole) 렌즈를 사용하여 8 mm에서 무한대까지 이르는 심도를 활용할 수 있어 내시경 검사와 같이 그 피사체의 거리가 일정하지 않은 환경에서 좋은 이미지를 얻을 수 있도록 만들어져 있다. Fig. 5(c)는 광원 장치를 보여주는 것으로서 SMD type LED로 밝기 조절이 가능하며 50 mm거리에서 600 Lux의 밝기를 낼 수 있도록 제작되어 있다.

3. 로봇 제작 및 제어 시스템

3.1 로봇 제작

대장 내시경 로봇은 사람의 항문을 통하여 삽입한 후, 대장 내의 급격한 각도에 순응할 수 있도록 충분히 유연하고 인체에 무해한 재질을 사용해서 제작되어야 한다. 이를 위하여 생체 적합성 고무와 생체 적합성 재료인 Peek를 사용하여 몸체를 제작하였다.

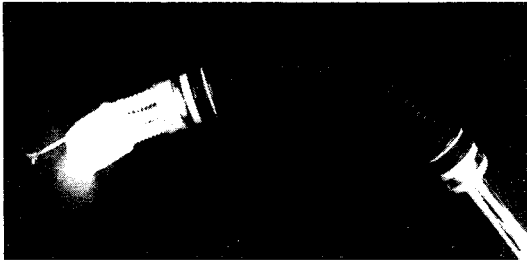


Fig. 6 Prototype of the functional colonoscope

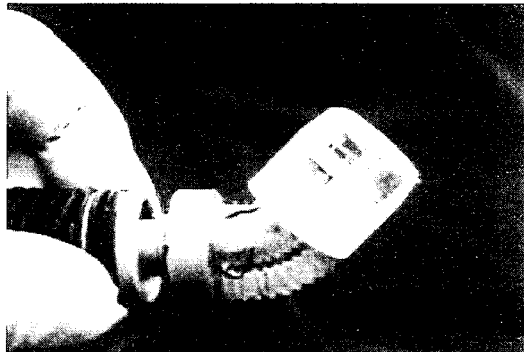


Fig. 7 Steering and head part of the prototype

Fig. 6은 본 논문에서 제안한 중공형 대장 내시경 로봇의 성능 시험을 위하여 제작된 로봇을 보여 준다. 로봇은 머리부, 조향부, 몸체부, 고정부로 크게 4가지로 구분된다. 로봇의 중량은 48 g이며 항문을 통한 삽입이 가능하도록 외경을 24 mm로 제작 하였으며, 정지 시 생검기능과 이동 시 흡입 및 물 분사기능을 위하여 로봇 몸체에 3 mm의 중공을 형성하였다. 전체 길이는 수축과 인장 시 각각 137 mm와 269 mm로 약 100 %의 높은 신장률을 가지고 있다. 로봇의 이동기능을 담당하는 몸체부는 유연한 벨로우즈를 사용하였으며, 벨로우즈의 유효단면적을 고려하여 볼 때 0.2 bar의 공압을 인가하면 약 8.28 N의 길이방향 추력이 발생하게 된다. 로봇의 머리 및 꼬리에 위치한 고정장치는 실리콘 튜브로 감싸 대장 고정 시 상처를 최소화 하도록 고안되어 있다.

Fig. 7은 로봇의 조향부와 머리부를 보여준다. 조향부는 몸체부와 머리부 사이에 직경 7 mm의 실리콘 벨로우즈를 120° 간격으로 평행하게 연결하였다. 각각의 벨로우즈에 동일한 압력을 인가하게 되면 로봇의 머리는 몸체의 길이방향으로 움직이고 수축과 인장 시 각각 13 mm, 24 mm의 길이를 갖는다. 최대 조향 각도는 45° 이고, 0.8 bar의 공압 인가 시 각각의 벨로우즈는 약 1 N의 힘을 발생하게 된다. 조향부 중앙에 부착된 실리콘 벨로우즈는 몸체에 형성된 중공과 머리부를 연결하

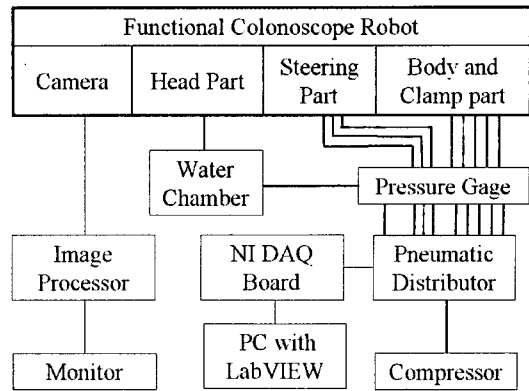


Fig. 8 Robot control system

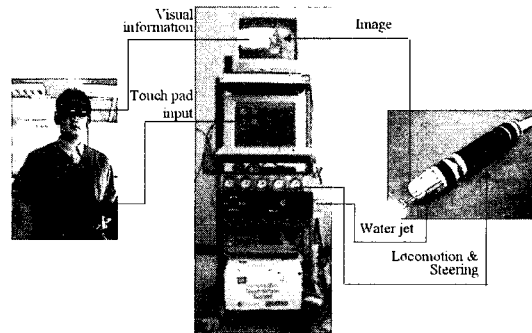


Fig. 9 Human-friendly interactive control system

는 부분으로서 조향 시 반발력을 최대한 억제하면서 생검 수행 시 생검장치가 부드럽게 통과하도록 한다. 머리부에는 장내 병변의 유무를 확인할 수 있는 초소형 마이크로 CMOS 카메라와 고휘도 SMD type LED로 광원 시스템이 통합 되어 있다.

### 3.2 제어 시스템

Fig. 8은 기능성 대장 내시경 로봇의 제어 시스템 구성도를 나타낸다. 카메라는 영상편집이 가능한 보드가 장착된 컴퓨터에 연결되어 내시경 시술 장면의 화면을 재생 및 저장하게 된다. 공압 분배장치는 비례 제어 밸브, ON/OFF 밸브, 3/2 Way 밸브 및 진공 발생기로 구성되어있으며, 5개의 공압 라인으로 로봇의 몸체 및 고정부에, 3개의 공압 라인은 조향 장치에, 물 분사장치와 연결된 1개의 공압 라인은 로봇에 형성된 중공부에 연결하여 각각의 기능을 수행한다. 또한, 공압 분배장치는 NI DAQ board와 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 로봇의 이동, 조향 및 물 분사장치 채널의 모든 공압을 제어하게 되며 이때 로봇에 인가되는 공압은 압력 게이지를 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 9는 의사가 내시경 시술 시 진단에 집중하며 조작하기 쉽도록 제작된 로봇의 전체 제어 시

시스템을 보여준다. 의사는 로봇에 내장된 초소형 CMOS 카메라와 연결된 모니터로부터 대장의 내부 영상을 정확하게 알아볼 수 있다. 또한 이 정보를 바탕으로 터치 스크린으로 작동되는 조작 패널에 간단한 동작만으로 로봇의 이동, 조향 기능 및 물분사 기능을 수행하게 된다. 따라서 초심자가 내시경 시술을 하더라도 조작과 진단에 어려움이 없을 것이라고 판단된다.

#### 4. 성능평가 실험

본 논문에서 제안한 로봇의 성능평가 실험을 위해 죽은 돼지 대장을 이용하여 다양한 환경에서 이동성능을 확인하였다. 또한 사람 대장에서의 유용성을 알아보기 위하여 살아있는 돼지의 대장에서 본 내시경 시스템의 이동, 진단 및 치료기능을 검증하였다.

##### 4.1 다양한 환경에서의 실험

실제 대장과 비슷한 환경에서 제작된 로봇의 이동 능력과 최적의 로봇 구동 변수를 찾아내기 위하여 다양한 형상의 환경에서 이동성능 실험을 반복 수행하였다. 최종 실험에 사용된 로봇의 구동조건은 신장 시 0.2 bar, 수축 시 -0.3 bar 그리고 대장 내벽 고정 시 0.3 bar의 공압을 인가하였다. 고정을 위한 대장 흡입 시간은 머리 및 꼬리부에 각각 12초 및 8초로 설정하였다. 로봇이 이동하는데 필요한 총 사이클 시간은 48초로 몸체부의 122 mm의 행정길이를 고려해보면 약 2.54 mm/s의 이론적 속도를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)는 로봇이 평면상에서 직선 및 곡선을 통과하는 실험장면을 보여주고 있으며, Fig. 10(c)는 인체 대장의 구조 및 형상과 유사하게 제작된 인체 모사 장치에서 실험으로 직선, 곡선 및 상하 높이차를 가지고 있는 환경에서의 이동 실험을 보여준다. Table 2는 다양한 환경에서 로봇의 이동거리 및 속도, 그리고 효율이 정리되어있다. 본 결과에서 알 수 있듯이 로봇의 높은 신장률로 인하여 직선구간을 이론속도와 거의 동일한 속도로 이동하였다. 곡선을 포함한 구간에서의 이동속도는 이론속도의 평균 55%로 다소 낮지만 조향장치로 인하여 부드럽고 안정적으로 통과하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 이동 효율이 떨어지는 요인은 곡선부분에서 몸체 수축 시 벨로우즈에 가해지는 진공압으로 인하여 몸체의 강성이 높아져 머리부 고정장치 효율이 떨어지고, 몸체의 길이 변화에 따라 대장의 길이 변화가 크게 유발되어 이동 성능을 낮추고 있기 때문이다.

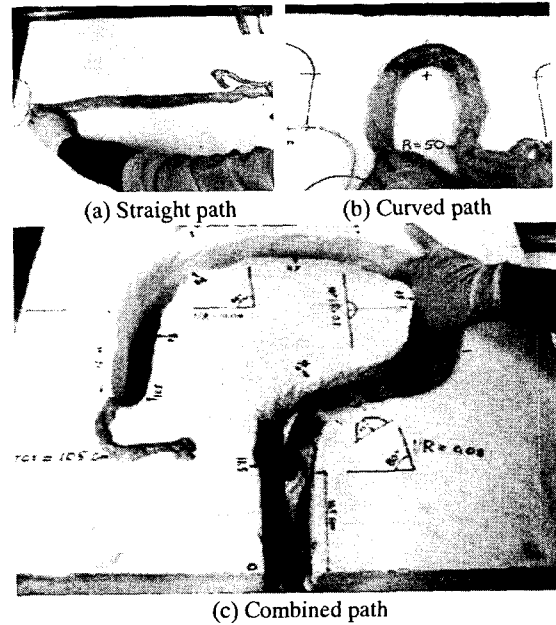


Fig. 10 in vitro test

Table 2 Experimental result of in vitro test

Description of path	Distance (cm)	Speed (mm/s)	Efficiency (%)
Straight path	50	2.21	87
Curved path (R=30 mm)	31	1.47	58
Curved path (R=50 mm)	37	1.34	52
Combined path	92	1.43	56

##### 4.2 동물 실험

마취되어 있는 35 kg의 돼지에 내시경 로봇을 삽입하여 이동성능과 검사 및 치료기능에 대한 실험을 수행하였다. 로봇을 돼지 항문에 삽입한 후 앞서 수행한 여러 환경에서의 실험과 동일한 구동 조건을 사용하여 대장 내에서 이동시켰다.

로봇은 높은 신장률과 조향장치로 대장 내의 곡선 등을 효율적으로 통과하여 약 60 cm를 이동하였다. Fig. 11은 로봇이 돼지 대장의 급격한 각도를 통과하는 장면을 형광 투시기를 이용하여 촬영한 사진이다. 로봇의 능동 조향장치는 급격한 각도를 부드럽고 안전하게 통과하는데 큰 역할을 하였다. Fig. 12에서 로봇 머리에 부착된 카메라가 생검 장치로 대장 내의 조직을 채취하는 것을 보여준다. 로봇에 장착된 소형 CMOS 카메라는 대장 내부를 선명하게 촬영할 수 있었으며, 생검 채널을 통하여 삽입된 생검은 머리부의 조향 장치를 이용하여 원하는 위치의 대장조직을 채취할 수 있

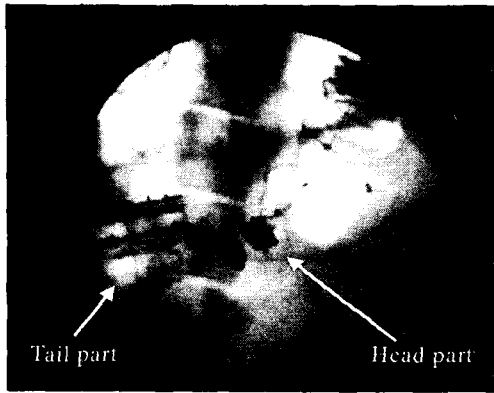


Fig. 11 Robot image through the fluoroscope

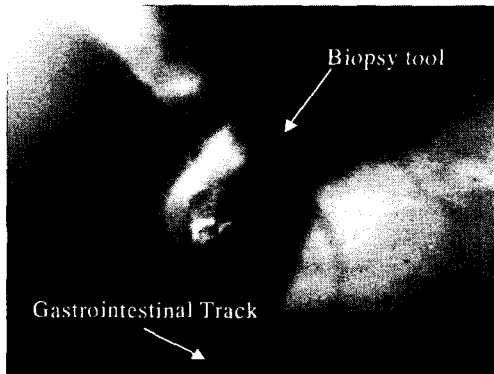


Fig. 12 Biopsy and camera test

었다. 이로써, 로봇이 대장 내에서 이동, 진단 및 치료에 관한 기능을 성공적으로 수행할 수 있음을 검증하였다.

동물 실험 종료 후, 고정장치로 인한 돼지 대장의 손상 정도를 알아보기 위하여 기존 대장 내시경을 삽입한 후 대장의 상태를 검사하였다. 검사를 수행 해본 결과, 대장의 상처는 거의 찾아 볼 수 없었으며, 다만 대장 고정을 위한 대장 흡입 과정에서 생긴 자국(Suction mark)을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 흡입에 의한 자국은 기존의 내시경에서도 발생 하는 것으로서 의료진의 소견상 그리 심각하지 않은 것으로 평가되었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 유연하고 미끄러우며 이물질이 많은 대장 환경에서 이동, 진단 및 치료를 위한 기능성 대장 내시경 로봇을 제시하여 제작 및 실험을 수행하였다. 이 로봇은 중공형 몸체를 가진 자벌레형 이동 메커니즘으로 조향장치, 카메라, 광원장치, 생검장치, 물 분사장치와 같은 기존 대장 내시경의 기능을 모두 갖추고 있다. 또한 로봇을

마취되어 있는 돼지에 삽입하여 실험한 결과 대장 내에서 안정된 이동과 검사 및 치료기능을 확인할 수 있었다.

향후, 로봇의 행정시간을 단축하여 속도를 향상하고, 고정장치의 재질 및 구조를 개선하여 상처를 최소화 하고, 인간 친화적인 조작장치가 추가 될 예정이다.

### 후 기

본 논문은 21C 프론티어 개발사업, 지능형 마이크로 시스템 개발사업의 일환으로 지원을 받아 수행된 연구의 일부분입니다.

### 참고문헌

- (1) Kim, K. D., Lim, H. Y., Kim, B. K., Park, J. O., Hong, Y. S., 2002, "A Locomotive Mechanism for Colonoscopes," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1296 ~1301.
- (2) Kim, K. D., Lee, S. H., Kim, B. K., Park, J. O., 2002, "Radial Type Locomotive Mechanism with Worm for Robotic Edoscope," *Transaction of the ICASE*, Vol. 8, No. 3, pp. 220~225.
- (3) Kim, B. K., Lee, J. H., Lim, Y. M., Park, J. O., Kim, S. H., Hong, Y. S., 2001, "Locomotive Colonoscope," *Proceedings of the 32nd ISR*, pp. 1829~1833.
- (4) Menciassi, A., Park, J. H., Lee, S., Gorini, S., Dario, P., Park, J. O., 2002, "Robotic Solutions and Mechanisms for a Semi-Autonomous Endoscope," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- (5) Slatkin, A. B., Burdick, J., Grundfest, W., 1995, "The Development of a Robotic Endoscope," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 162~171.
- (6) Kumar, S., Kassim, I. M., Asari, V. K., 2000, "Design of a Vision-guided Microrobotic Colonoscopy System," *Advanced Robotics*, Vol. 14, No. 2, pp. 87~104.
- (7) Phee, L., Arena, A., Gorini, S., Menciassi, A., Dario, P., Jeong, Y. K., Park, J. O., 2001, "Development of Microrobotic Devices for Locomotion in the Human Gastrointestinal Tract," *Int. Conf. on Computational Intelligence Robotics and Autonomous Systems*.
- (8) Phee, L., Menciassi, A., Gorini, S., Pernorio, G., Arena, A., Dario, P., "An Innovative Locomotion Principle for Minirobots Moving in the Gastrointestinal Tract," *proc. of IEEE int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1125~1130.
- (9) Suzumori, K., Iikura, S., Tanaka, H., 1991, "Development of Flexible Microactuator and its Applications to Robotic Mechanisms," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Systems*, pp. 1622~1626.