

대장 내시경을 위한 링크형 이동 메커니즘

김경대* · 임헌영* · 김병규† · 박종오** · 홍예선***

(2001년 8월 25일 접수, 2002년 4월 6일 심사완료)

A Linkage-type Locomotive Mechanism for Colonoscopes

Kyoung-Dae Kim, Hun-Young Lim, Byungkyu Kim,
Jong-Oh Park and Yeh-Sun Hong

Key Words : Colonoscope(대장 내시경), Linkage(링크), Elliptic motion(타원 운동), Locomotive Mechanism(이동 메커니즘)

Abstract

In recent years, the pathology in the colon grows up annually since people of all ages prefer to have less fiber and more fat food. Therefore, the colonoscopy is generalized in developed countries. But it requires much time to acquire a dexterous skill to perform an operation and the procedure is painful to the patient. Therefore, some studies on the development of autonomous colonoscope are carried out. In this paper, we propose a new and simple locomotive mechanism that can be propelled by elliptic motion of a leg. It has several legs that have constant phase difference each other and those legs are disposed along the upper and lower of the body. In order to evaluate the performance of locomotive mechanism, we carried out the simulations of moving characteristics and the experiments in the colon of a dead pig.

기호설명

- r : 크랭크 축의 편심된 길이
- L : 링크의 길이
- θ : 크랭크 축의 회전각
- α : 링크의 길이방향과 y 축 사이의 각도
- x_i : 링크 하단의 x 좌표
- y_i : 링크 하단의 y 좌표
- F_i : 추진력
- μ : 정마찰계수
- W : 이동 메커니즘의 중량

1. 서론

기존 내시경은 의사가 직접 조작하여 환자의 장기 내부를 이동하여야 하므로 고도의 숙련도를 요구하고, 이 숙련도에 따라서 시술 시간과 환자가 느끼는 고통이 크게 좌우된다. 이와 같은 문제점의 해결 방안으로서, 장기의 내부를 촬영할 수 있는 초소형 카메라, 질병 검사를 위해 조직을 떼어 내기 위한 그리퍼(gripper), 외부에 장기 내부 영상을 보낼 수 있는 통신기기, 기타 진단/처치를 위한 도구 등을 탑재한 자율 주행 내시경의 개발에 대한 요구가 오래 전부터 제기되어 왔다. 자율 주행형 내시경 로봇이 개발된다면 의사와 환자의 정신적 육체적 부담을 크게 덜 수 있고, 기능 면에서는 소화기 전체에 대한 촬영뿐만 아니라 국부적인 수술, 조직 검사, 약물 주사 등이 가능해 질 것이다.

최근에 Given Image 사가 개발하여 상용화에 성공한 소장 검사용 캡슐형 내시경 M2A⁽¹⁾는 자율주행 기능은 없으나 향후 이러한 내시경 로봇의 시대가 전개될 것임을 입증한 첫 사례가 될 것이다. 지금까지 자율 주행형 내시경의 이동 메커니즘에 대한 선행 연구들은 주로 자벌레형 메커니즘

* 한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터

E-mail : bkim@kist.re.kr

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

** 회원, 한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터

*** 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

(Inchworm Mechanism)을 기반으로 하고 있다. 그 이유는 자벌레형 메커니즘은 몸체의 길이를 진행 방향으로 수축, 신장할 수 있는 유연한 bellows 와 이 bellows 의 전면부와 후면부를 교대로 대장 벽에 고정시켜주는 클램핑 장치로 구성되는데, 클램핑 동작만 확실하게 이루어지면 신축성이 큰 장기 내부에서 이동이 용이하고, 기구 구조가 단순하다는 장점이 있기 때문이다. 클램핑 방식으로서, Italy 의 Dario⁽²⁾는 진공압을 이용하여 대장 벽을 흡착하는 방식을 사용하였고, Caltech 의 Burdick⁽³⁾은 진공압을 이용하는 대신에 풍선을 무풀려 대장 벽에 물체를 고정시키는 방식을 사용하였다. 이러한 클램핑 방식들은 대장 직경의 변화가 25~50mm 까지 심하고, 장벽이 미끄럽고 유연하기 때문에 클램핑이 어려워 원활한 이동을 보장하기 어렵다. 특히 흡착 클램핑 방식은 대장 내벽에 흔적을 남김으로써 병변에 의한 흔적과 혼돈을 일으킬 수 있으며, 클램핑력이 과대하면 대장 혈관의 압력이 높아져 혈관의 국소 출혈을 초래할 위험성이 있다.

이러한 문제점을 고려하여 본 논문에서는 자율 주행 내시경 로봇을 위한 링크 구동 방식의 새로운 이동 메커니즘을 제안하였고, 그 유용성을 입증하기 위하여 주행특성 시뮬레이션(simulation)과 돼지의 대장을 대상으로 한 성능실험을 수행하였다.

2. 링크 구동 방식 이동 메커니즘

2.1 이동 메커니즘의 기본원리

다리가 많은 곤충은 표면이 무르고 험난한 지형에도 잘 적응하면서 안정적인 이동을 할 수 있다.

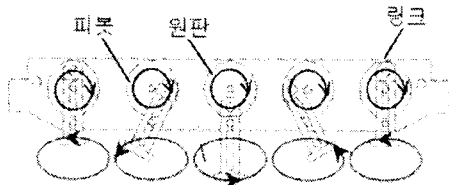


Fig. 1 Concept design of the linkage type mechanism

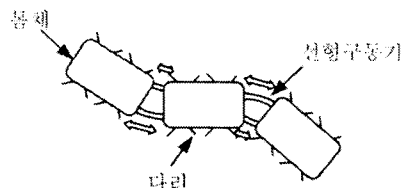


Fig. 2 Concept design of the multi linkage type mechanism

따라서, 곤충의 다리와 유사한 이동 메커니즘을 갖는 내시경 로봇은 대장내에서의 이동이 용이할 것이다.

Fig. 1 은 본 논문에서 제안한 링크 구동 방식 이동 메커니즘의 기본 원리를 나타낸 것으로서, 다리 역할을 하는 각 링크의 초기위치와 원판이 회전하면서 형성되는 링크 하단의 궤적을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 링크의 상단은 원판과 회전 조인트에 의해 연결되고, 링크에는 슬라이드 홈이 형성되어 있다. 따라서 원판이 회전하면 링크는 일종의 크랭크-슬라이더 운동을 하면서 그 하단은 타원 궤적을 만든다. 이러한 링크 하단의 타원 운동에 의해 로봇의 이동이 가능하며, 원판의 회전방향에 따라 전진 및 후진이 가능하게 된다. 이 구조의 장점은 대장에서의 이동 시 장벽의 손상이 적고, 장벽과 다리 끝의 접촉이 불완전하여도 안정적인 이동이 가능하다는 것이다. 또한 Fig. 2 와 같이 여러 개의 물체를 선형 구동장치로 연결하여 구동 변위를 제어하면 능동적인 조향이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 링크 구동 방식 이동 메커니즘을 설계, 제작하였고 돼지 대장의 일부를 잘라내어 이동실험을 수행하여 그 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

2.2 링크형 이동 메커니즘의 구조

Fig. 3 은 위에서 설명한 링크 구동 방식 이동 메커니즘의 성능 시험을 위해 제작된 시제를 보여 준다. 시제의 전체 길이는 125mm 이고 직경은 회전하는 크랭크축에 의해 다리가 하사점에 있을 때 40mm, 상사점에 있을 때 30mm 이다. 무게는 90g 에 불과하며, 몸체에 내장된 구동기로는 Table 1 과 같은 사양의 DC 모터를 사용하였다.

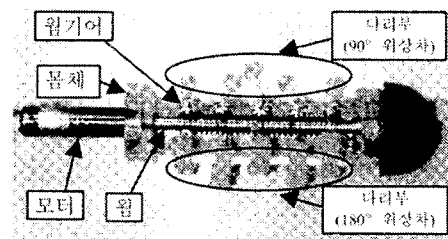


Fig. 3 Sectional view of the locomotive mechanism

Table 1 Specifications of a DC motor with a reduction Gear

크 기	φ 10×36.3 mm
정격 토크	129.6 mNm
정격회전속도	48.5 rpm

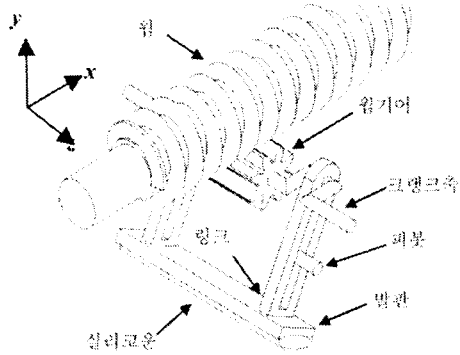


Fig. 4 Detailed view of the link part

모터의 정격전력은 약 0.3W 를 소모하게 되며 5V 의 수은전지를 사용할 경우 약 60mA 의 전류가 인체에 흐를 수 있는 가능성이 있으나 인체에 손상을 입히지 않는 것으로 알려져 있다. 제작된 로봇 시제는 크게 구동 장치, 몸체 그리고 다리로 나뉜다. 로봇의 이동에 직접적인 영향을 주는 다리는 Fig. 4 와 같이 크랭크 축, 링크, 피봇, 발판으로 구성된다.

앞에서 설명한 바와 같이 타원 궤적을 갖는 각 다리의 발판 운동을 연동시켜 장기내 이동이 가능하도록 구현한 이동 메커니즘의 구조는 다음과 같다. 모터에 의해 회전하는 웜을 중심으로 각 다리의 크랭크 축과 연동하는 웜기어를 몸체의 길이 방향으로 배열함으로써 각 다리 끝의 타원 궤적 운동을 기계적으로 동기화하였다. 여기에서 각 크랭크축의 회전각이 일정한 위상차를 갖도록 조립하면, 각 다리의 발판이 몸체의 길이 방향으로 일정한 위상차를 띤 타원운동을 하므로 다리 전체를 보면 발판들이 부드러운 물결 운동을 만들게 된다.

이러한 물결 운동은 내시경 로봇이 장기 내에 서 부드럽게 이동하는데 중요한 역할을 한다. 만약 각 발판이 위상차가 없이 동시에 동일한 궤적으로 움직인다면 장벽의 신축성이 크기 때문에 모든 발판은 장벽과 붙어 있는 상태에서 제자리 운동만 하게 된다. 즉, 발판의 물결운동은 다른 발판들이 장벽을 밀어 내는 동안 다리 하나가 장벽에서 이탈하여 앞으로 전진하게 함으로써 다음 주기에서 몸체를 밀 수 있게 해준다. 또, 본 연구에서는 발판이 장벽과 교대로 접촉할 때 충분한 마찰력이 발생될 수 있도록 발판에 실리콘을 부착하였으며, 웜기어의 양단에 두개의 링크를 사용함으로써 장벽과의 접촉 면적을 크게 하였다.

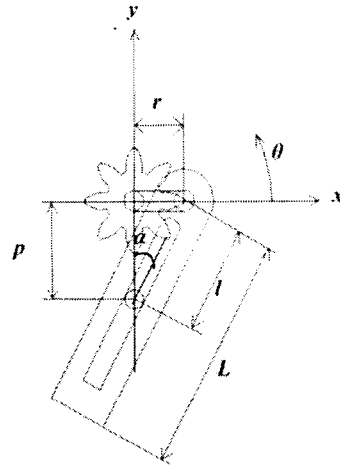


Fig. 5 Coordinate system of a leg

3. 이동 특성 해석

Fig. 5 는 위에서 소개한 이동 메커니즘의 기구학적 해석을 위해 회전하는 크랭크축을 중심으로 설정한 x, y 좌표평면을 나타낸다. 이와 같은 좌표계에서 크랭크축이 θ 방향으로 회전함에 따라 생성되는 링크 하단의 궤적은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_c &= r \cos \theta - L \sin \alpha \\ y_c &= r \sin \theta - L \cos \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{r^2 + p^2 - 2rp \cos(\pi/2 + \theta)} \\ \alpha &= \sin^{-1} \left(\frac{r \sin(\pi/2 + \theta)}{l} \right) \end{aligned}$$

식 (1)에서 유도된 링크 하단의 좌표를 시간에 대하여 미분하면, 링크 하단의 속도는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= -r \sin \theta \cdot \dot{\theta} - L \cos \alpha \cdot \dot{\alpha} \\ \dot{y}_c &= r \cos \theta \cdot \dot{\theta} + L \sin \alpha \cdot \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\dot{\alpha} = \frac{r \cos(\pi/2 + \theta)}{l \cos \theta} \cdot \dot{\theta}$$

식 (1)에서 유도한 링크 하단의 좌표식에 $r = 2.5mm, p = 4.8mm, L = 13mm$ 의 변수 값을 적용하여 그 궤적을 구하면 Fig. 6 과 같다. 앞에서 예상했던 바와 같이 링크 하단은 타원 운동을 하며, 링크 하단의 길이 방향 변위는 약 10mm 이고 반경 방향의 변위는 약 5mm 이다.

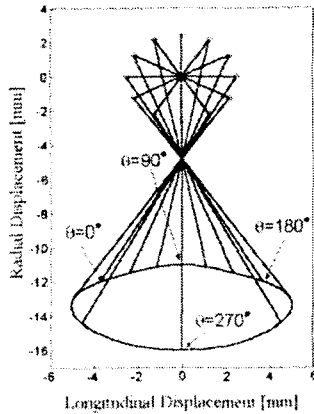


Fig. 6 Trajectory of a leg tip

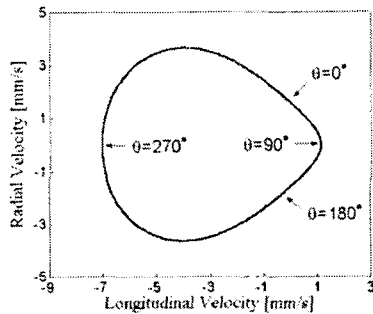


Fig. 7 Velocity of a leg tip

식 (2)를 이용하여 다리 하단의 속도를 구하면 Fig.7 과 같다. 다리 하단의 속도는 길이 방향으로 $1\text{mm/s} \sim -7\text{mm/s}$ 의 범위 내에서 왕복운동을 하는 것을 알 수 있다. 이때 모터의 회전 속도는 약 48.5rpm 이다.

이러한 다리 하단의 궤적 및 속도는 r, p, L 의 설계 변수를 적절하게 선정함으로써 원하는 조건에 맞출 수 있다. 한편, 이들 변수는 로봇의 전체 지름 및 길이에 상당한 영향을 미치므로 이동 메커니즘의 소형화 조건도 고려하여 결정해야 한다.

다수의 다리를 링크로 구동할 때 링크 간의 위상차가 이동특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 3 에 예시한 바와 같이 90° 와 180° 의 위상차를 갖는 두가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과는 Fig. 8 과 같다. 이동변위의 결과에서 보면 180° 의 위상차를 가졌을 때의 이동속도는 약 1.6mm/s , 위상차가 90° 일 때 약 3.9mm/s 로서, 위상차가 180° 일 때의 이동속도보다 약 두 배 정도 높게 나타났다.

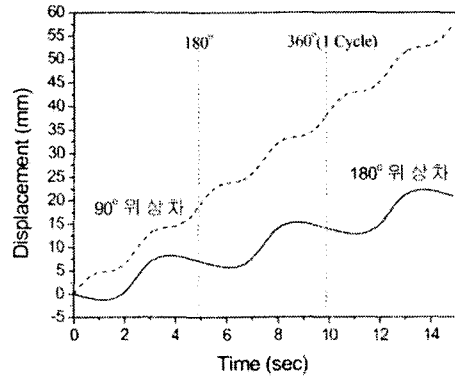


Fig. 8 Simulation of the Robot Movement with Various Phase differences

로봇은 링크 하단이 지면 위에 놓이면, 링크의 기울기 변화에 의해 몸체가 이동하게 된다. 이로 인해 그림에서와 같이 로봇은 전진 이동 시 몸체가 일시적으로 후진하는 특성을 보인다. Fig. 6 에서 180° 위상차로 다리를 배치한 경우를 예로 들면, 크랭크축이 θ 방향으로 회전할 때 $180^\circ \sim 225^\circ$ 에서 링크의 기울기는 감소하고, 전진이동에 영향을 주는 $225^\circ \sim 315^\circ$ 에서는 270° 를 기준으로 기울기가 증가하다가 감소하게 되며, $315^\circ \sim 360^\circ$ 에서 기울기는 다시 증가하게 된다. 이와 같은 링크 기울기의 변화에 의해 로봇의 몸체는 후진→전진→후진을 반복하게 된다. 이와 같은 현상은 로봇 몸체에 달려있는 각 다리의 위상차를 적게 함으로써 극복할 수 있다. 그러나, 길이 방향의 소형화를 위해서는 위상차가 다른 다리를 무한히 늘릴 수 없으므로, 시뮬레이션을 이용한 시행착오를 거쳐 최적의 다리수와 위상차를 선택해야 할 것이다.

4. 이동 메커니즘의 성능평가 실험

본 논문에서 제안한 이동 메커니즘의 성능을 확인하고자, 실리콘 패드와 대장 위에서의 이동 변위 및 속도, 그리고 견인력을 측정하는 실험을 수행하였다. 그리고 실제 대장에서의 적용성을 알아보기 위해 죽은 돼지의 대장을 절개하여 로봇을 삽입한 상태에서 대장 내 이동 및 검사능력에 대한 실험을 수행하였다. 단, 링크 위상차를 90° 로 하면 로봇이 이동할 때 이론 해석에서는 고려할 수 없었던 피칭 현상이 크게 발생하기 때문에 이동속도가 낮아짐에도 불구하고 링크 위상차를 180° 로 설정하였다.

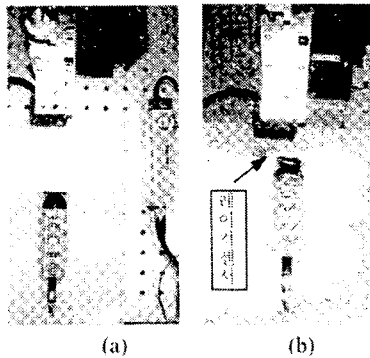


Fig. 9 Experimental setup for the displacement

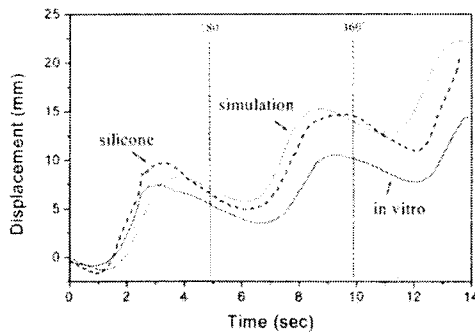


Fig. 10 Experiment result of the displacement

4.1 이동 변위 및 속도에 대한 실험

이동메커니즘의 변위를 측정하는 실험장치의 구성은 Fig. 9 와 같다. Fig. 9(a)는 로봇의 일반적인 이동 성능을 파악하기 위해 평평한 실리콘 패드를 접촉면으로 사용한 실험 장치이며, Fig. 9(b)는 실제 인체 장기와 유사한 돼지 대장을 접촉면으로 사용한 실험 장치이다. 로봇의 이동 변위는 비접촉 광학식 거리측정 센서를 이용하여 측정되어 PC 에 실시간으로 저장하였다.

웜기어 구동 모터의 회전 속도가 48.5 rpm, 다리의 각 링크 간의 위상차가 180°일 때의 측정 결과는 Fig. 10 과 같다. 실리콘 패드 위에서 이동 속도는 앞에서 설명한 시뮬레이션 결과와 비슷하게 약 1.6mm/s 로 나타났으며, 돼지 대장 위에서는 약 1mm/s 의 속도를 보여 줬다.

시뮬레이션 결과와 실리콘 패드 위에서 실험 결과 사이에 약간의 오차가 발생한 것을 볼 수 있는데, 이것은 5 개 다리의 위상차가 정확히 180°가 되도록 조립하는데 어려움이 있었기 때문이다. 그리고 대장을 이용한 실험에서는 이동 속도가 실리콘 패드 위에서 보다 약 0.6mm/s 낮게 나타났는데, 이것은 대장 표면과 발판사이에 슬립(slip)이

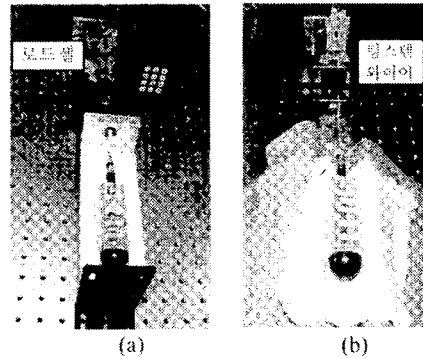


Fig. 11 Experimental setup for the dragging force

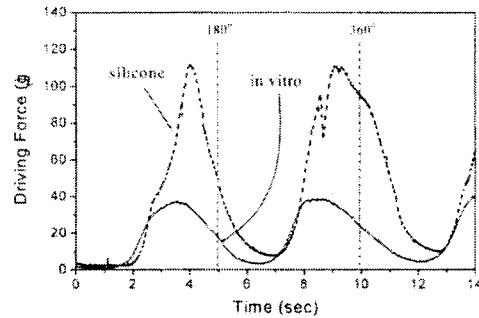


Fig. 12 Experiment result of the dragging force

발생하였기 때문이다. 이동속도를 증가 시키기 위해서는 모터의 회전속도를 높이는 방법을 고려할 수 있다.

4.2 견인력 측정 실험

로봇이 장기 내를 이동해 다닐 경우 생검 (Biopsy) 등을 위한 튜브를 끌고 들어갈 수 있어야 한다. 따라서 내시경 로봇을 위해서는 로봇이 대장 환경 내에서 움직이는 것 뿐만 아니라 튜브와 선들을 끌고 갈 수 있는 능력이 매우 중요하다. 이를 위해 로봇의 견인력을 측정하여 보았다.

Fig. 11 은 로봇을 와이어로 로드 셀과 연결한 상태에서 이동 메커니즘을 작동시켜 그 견인력을 측정할 실험장치의 구성을 보여준다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 각각 실리콘 패드와 돼지 대장에서의 견인력을 측정할 실험의 구성으로써, 이 실험 결과는 Fig. 12 와 같다. 실험 결과에서 보면 견인력이 급격하게 증가하는 부분은 로봇이 전진하는 구간으로써 크랭크축의 각도가 225°~315° 사이일 때이며, 급격하게 감소하는 구간은 180°~225°, 315°~360° 사이인 것을 볼 수 있다. 그러므로 로봇의 견인력의 변화는 다리의 변위 및 속도에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

최대 견인력에 영향을 미치는 요소는 식 (3)에서 보는 바와 같이 로봇의 중량과 접촉면과의 마찰 계수이다.

$$F_f = \mu \cdot N = \mu \cdot W \quad (3)$$

여기에서 실제로봇의 중량은 90 g, 이고 실리콘 패드와 로봇 사이의 마찰계수는 약 0.9 이므로 로봇이 최대로 낼 수 있는 이론 견인력은 81 g, 로 예상된다. 그러나 실험 조건에서 로봇이 제자리에 수평으로 놓여 있는 것이 아니라 다리의 동작에 따라 몸체가 미소한 피칭 운동을 하기 때문에 수직항력이 증가하여 다소 크게 나타난다. 한편, 대장 위에서 측정된 최대 견인력은 약 40 g, 으로서 실리콘 패드 위에서의 값에 비해 1/3 정도로 줄어 들었다. 이것은 대장 표면의 마찰계수가 현저하게 작기 때문이며 견인력을 증가시키기 위해서는 발판의 접지력을 높여야 할 것으로 생각된다.

4.3 죽은 돼지 대장 내에서의 이동 실험

로봇의 실제 대장 환경에서의 이동 성능을 확인하기 위해 죽은 돼지 대장에서의 이동 실험을 수행하였다.

Fig. 13(a)는 본 연구에서 제작된 내시경 로봇 시제가 죽은 돼지의 대장내에서 실제로 이동하고 있는 상황을 촬영한 것이다. 로봇이 대장 내에서 주행할 수 있는 공간을 만들어주기 장내에 공기를 불어넣어 주었다. 이것은 기존의 내시경에 있어서 시야를 확보하기 위해 사용하는 방법으로 장기에 무리를 주지 않는 범위 내에서는 큰 문제가 없다. 또한, 로봇의 앞단에 소형 CCD 카메라를 장착하여 이동하면서 대장 내부를 촬영할 수 있도록 하였다. Fig. 13(b)는 로봇이 이동하면서 대장 내부를 촬영한 것이다.

이 실험을 통해 본 논문에서 제안한 링크 구동형 이동 메커니즘이 실리콘을 부착한 발판을 이용하여 대장 내부를 안정된 자세로 이동할 수 있으며, 위상차를 갖는 각 다리의 타원 운동이 대장 내벽을 손상시키지않고 로봇 몸체를 안전하게 추진시킬 수 있음을 확인하였다.

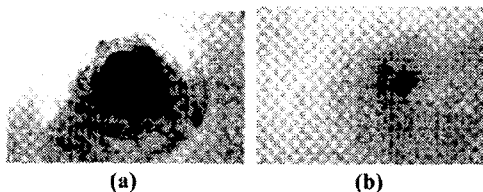


Fig. 13 In Vitro Test

5. 결론

본 논문에서는 유연하고, 미끄러운 인체 대장 내에서 자율 이동할 수 있는 내시경 로봇을 위한 링크형 이동 메커니즘을 제시하였다. 지내와 같이 많은 다리를 가지고 이동하는 형태의 메커니즘이 유리하다는 것을 확인하기 위해, 링크 하단이 타원운동을 하는 여러 개의 다리를 일정한 위상차로 로봇의 몸체에 배열한 이동 메커니즘을 설계, 제작하였다. 그리고 이 메커니즘을 죽은 돼지의 대장을 절개하여 실험한 결과 안정된 동작이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 이 링크 구동형 이동 메커니즘은 대장 내의 팽기 추벽과 같은 장애물을 통과하는데 유리하며, 대장 내벽을 손상시킬 염려가 없다.

대장 내시경 로봇이 사람의 항문을 통하여 삽입이 가능하고, 예각을 통과하기 위해선 로봇의 직경은 25mm 길이는 30mm 이하의 조건을 만족해야 한다. 그러나 로봇 시제는 상용화된 모터를 사용하였기 때문에 이보다 크게 설계 되어있다. 향후, 설계 변수의 최적화를 통해 현재 로봇의 이동 속도 1mm/s 를 기존 내시경 시술시간과 유사한 5mm/s 까지 증가시키고, 연속적인 추진력을 내도록 이동 메커니즘을 개선함과 동시에 소형 액추에이터를 개발하여 실제 대장 내부로 삽입이 가능하도록 크기를 축소한다면 자율 주행형 내시경으로서 응용될 수 있는 가능성이 높다고 평가된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Appleyard, M., Glukhovskiy, A., and Swain, P., 2001, "Wireless-Capsule Diagnostic Endoscopy for Recurrent Small Bowel Bleeding," *The New England Journal of Medicine*, Vol. 344, pp. 232~233.
- (2) Dario P., Carroza M.C., Lencioni L., Magnani B. and D'Attansio S., 1997, "A Micro-robotic System for Colonoscopy," *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1567~1572, Albuquerque (NM).
- (3) Slatkin, A. B., Burdick, J., and Grundfest, W., 1995, "The Development of a Robotic Endoscope," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 162~171.