

## 삼각 배치 구동에 의한 스마트 캡슐의 이동 특성

임형준\*(한국과학기술원 기계공학과), 민현진(한국과학기술원 기계공학과),  
 김병규(한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터), 김수현(한국과학기술원 기계공학과)

### Motion Characteristics of Smart Capsule with Triangular Arrangement of Actuators

H. J. Lim (Mech. Eng. Dept., KAIST), H. J. Min (Mech. Eng. Dept., KAIST),  
 B. K. Kim (Microsystem Research Center, KIST), S. H. Kim (Mech. Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

At present, colonoscopy is performed by means of quite long and flexible endoscopes and controlled manually. Although the flexibility of the distal tip allows the endoscope to follow the tortuous path of the colon, the insertion of the endoscope requires the endoscopist to exert forces on and to perform rotations of the proximal end; these actions cause discomfort to the patient. Though self-propelling colonoscopic systems has been suggested to overcome these problems, it is difficult to pass through highly curved regions of the intestine. In this paper, we introduce a steering mechanism for a self-propelling colonoscope, the smart capsule, which has three actuator units. The mechanism is designed not only to move forward and backward but also to pass through the curved regions. We derived the governing equations of this mechanism. Active movements and motion control are developed.

**Key Words :** Endoscope (내시경), Self-propelling colonoscope (자가 구동형 대장내시경), Smart capsule (스마트캡슐), Impact actuator (충격 구동기)

#### 1. 서론

스마트 캡슐은 그 내부에 구동기능을 포함하여 진단, 채취, 처치 등의 복합적인 기능을 가지는 캡슐형태의 로봇을 의미한다. 한 예로, 인체의 장이나 혈관 내부에서 자유롭게 이동하며 그 내부를 촬영하고, 조직 채취, 주사약 투약 등의 기능을 수행하는 자가 구동형 내시경을 들 수 있다.

인체의 장 내부는 일반적인 원통형 파이프와는 달리 그 재질이 상당히 유연하며 단면의 모양도 다양하게 변한다. 대장의 경우 그 직경은 25-75 mm이며, 길이는 1.5-1.6 m이다. 내부가 비어 있는 경우에는 공기를 불어넣지 않으면 흡착되어 있다. 현재 내시경은 외부에서 삽입하는 방식을 주로 이용한다. 길고 유연한 내시경은 그 끝부분이 원하는 방향으로 구부러질 수 있으며, 숙련된 사람의 조작에 의하여 위 또는 대장으로 삽입된다. 이러한 방식의 내시경은 환자에게 상당한 불편감을 가해줄 우려가 있기 때문에 점점 그 직경이 가늘어지고, 외벽이

유연하도록 제작되고 있다. 하지만 무선 방식이 아닌 이상 불편감을 전혀 없앨 수는 없다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 상황에서 스스로 구동하는 내시경 시스템의 제작에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 최근 1990 년대에 들어서 주로 인치웸 방식을 이용한 구동방식에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 이들의 특징은 내시경 시스템이 장 내부에 밀착되도록 설계되어 반경방향으로의 수축과 팽창으로 몸체를 지지하며 이동하는 방식이다. 이중 일부는 인간과 유사한 폐지 창자에서 실험이 되었지만, 아직까지 인체의 장 검사용으로는 사용되지 못하였다. 이것은 인체의 장은 그 단면의 직경이 일정하지 않으며 일부분에서는  $\alpha$  또는  $\gamma$  모양으로 구부러져 있는 데에 주요 원인이 있다고 할 수 있다. 결국 장 내부에서 이동하며 원하는 부분의 정확한 검사를 위해서는 다양한 직경에서 구동이 가능하며, 방향 전환 기능을 가지도록 설계할 필요가 있다.

본 논문은 스마트 캡슐의 방향 전환 기능에 대

한 설계와 그 성능 평가에 관한 것이다. 기본 구동 소자로는 충격 방식 구동기를 이용하기로 한다. 이는 외벽을 딛고 진행하는 것이 아니라 자체 추진력으로 진행하기 때문에 외벽에 가하는 영향을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 전후진 기능을 가지는 단일 구동소자 3 개를 사용하여 스마트 캡슐이 회전 기능을 가지도록 제작하여 그 가능성을 평가해 보기로 한다.

## 2. 삼각 배치를 채용한 스마트 캡슐

### 2.1 기본 개념

그림 1 은 3 개의 구동소자(A1, A2, A3)를 120도 간격의 방사형으로 배치한 스마트 캡슐 구동부의 개념도이다. 외부에는 판 내부의 외벽에 지지하기 위해서 90도 간격으로 4 개의 다리가 부착되어 있다. 이 다리들은 다양한 직경의 장 내부에서 내벽의 손상을 최소화 하며 이동하도록 하기 위하여 연한 재질로 되어 있다. 각각의 구동소자는 단순히 전진 또는 후진의 기능만을 가진다. 하지만 스마트 캡슐의 3 차원 공간 상에서 비틀림 방향을 제외한 임의의 방향으로 회전이 가능하게 된다. 이러한 회전을 위해서는 최소 3 개의 구동기가 필요하다.

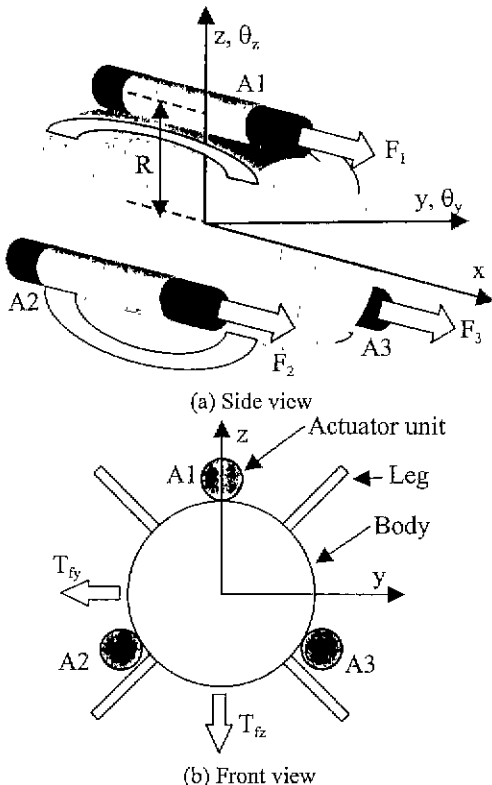


Fig. 1 Coordinate definition of the smart capsule

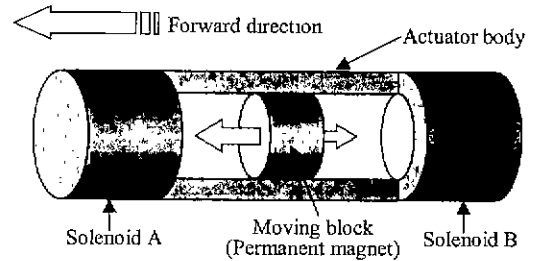
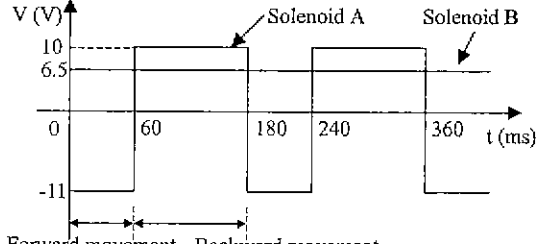


Fig. 2 Schematic diagram of an actuator unit



Forward movement Backward movement

Fig. 3 Voltage profiles for an actuator unit

### 2.2 구동 소자

그림 2 는 충격 방식을 이용한 구동소자의 이동 메커니즘을 보여준다. 중간에 위치한 충격자가 자석-코일 간의 전자력으로 인하여 전진하다가 내벽과 충돌하게 되면 물체는 전진하게 된다. 그리고 다시 서서히 후진하였다가 전방의 내벽과 다시 충돌하는 과정을 반복하며 물체가 전진하게 된다. 그림 3 은 구동소자의 전진을 위한 전방과 후방 코일의 전압 입력의 한 예를 보여준다. 실제로 뒷부분에 있는 코일은 일정한 전압이 인가되어 충격자를 일정한 힘으로 밀고 있으며, 앞부분에 있는 코일의 전압 부호 변화로 인하여 충격자가 왕복 운동을 할 수 있다. 사실, 전후진이 아닌 단일방향의 이동을 위한다면 뒷부분의 코일은 영구자석으로 충분히 대체될 수 있을 것이다.

### 2.3 구동 방법

그림 1 에서 같이 스마트 캡슐이 앞으로 이동하는 방향을 x 축으로 두고, 상하 회전(수직면에서의 회전)을 y 축, 좌우 회전(수평면에서의 회전)을 z 축으로 둔다. 이때 장 또는 판 내부에서 자유로운 회전 기능을 수행하기 위해서는 y 축과 z 축의 회전을 필요로 한다. 이 두 방향의 회전이 가능하면 이들의 조합으로 임의의 방향의 회전이 가능하게 된다.

구동소자 1 이 정지하고, 2 는 전진, 3 이 후진을 하면 물체는 z 축 방향으로 회전한다. 구동소자 1 은 전진, 2 와 3 이 후진을 하면 물체는 y 축 방향으로 회전하게 된다. 그리고 모든 구동소자들이 전진 또는 후진을 하면 물체도 역시 전진 또는 후진을 한다. 이와 같은 운동 관계는 표 1 에 정리되어 있다.

Table 1 Body motion according to moving directions of three actuator units

Moving Direction of Actuator Units			Body motion (axis)
A1	A2	A3	
Forward	Forward	Forward	Translation (+x)
Backward	Backward	Backward	Translation (-x)
Not Used	Forward	Backward	Rotation (+z)
Not Used	Backward	Forward	Rotation (-z)
Forward	Backward	Backward	Rotation (+y)
Backward	Forward	Forward	Rotation (-y)

## 2.4 동역학 모델

그림 1의 스마트 캡슐에 대하여 y축과 z축 각각의 회전에 대한 운동 방정식을 다음과 같이 세울 수 있다.

$$y\text{-axis rotation (yaw): } I_y \ddot{\theta}_y = RF_1 - \frac{R(F_2 + F_3)}{2} - T_y \quad (1)$$

$$z\text{-axis rotation (pitch): } I_z \ddot{\theta}_z = \frac{\sqrt{3}R(F_2 - F_3)}{2} - T_z \quad (2)$$

여기서 R은 구동소자들에 대한 중심과의 거리이고, 구동소자  $A_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )가 내는 힘이  $F_i$ 이다. y축에 대하여 스마트 캡슐의 회전각을  $\theta_y$ , 관성 모멘트를  $I_y$ , 회전을 방해하는 마찰토크를  $T_y$ 라 둔 것이다. z축의 경우에도 역시 같은 식으로  $\theta_z$ ,  $I_z$ ,  $T_z$ 이다. 위 식을 보면 y축으로 회전하는 경우에는  $F_2$ 와  $F_3$ 이 음의 값을 가져야 하며, z축으로 회전하려면  $F_2$ 이 음의 값을 가져야 함을 확인할 수 있다.

그림 1의 캡슐은 실제로 x축을 제외한 모든 방향의 회전이 가능하다. 그리고 이러한 모든 방향의 회전은 y축의 회전과 z축의 회전을 조합하여 얻을 수 있다. 따라서, 이 두 방향의 회전 각도를 제어함으로써 캡슐을 임의의 방향으로 회전시킬 수 있다.

## 3. 실험

### 3.1 제작 및 실험 방법

그림 4는 제작된 스마트 캡슐을 보여준다. 구동소자의 직경은 8 mm이며 길이는 40 mm이다. 구동소자 내부의 충격자는 영구자석을 이용하였으며, 그 크기는 길이 5 mm, 직경 4 mm이다. 한쪽 면에는 코일을 감았으며, 다른 한쪽에는 영구자석을 붙였다. 실제로 전후진 양방향 모두의 이동을 위해서는 양쪽에 코일을 감아야 하지만 본 실험에서는 한쪽 방향으로만 이동하는 구동기를 사용한다. 이렇게 제작된 3개의 구동기를 직경 35 mm, 길이 35 mm의 몸체에 부착한다.



Fig. 4 Smart capsule with three linear actuator units

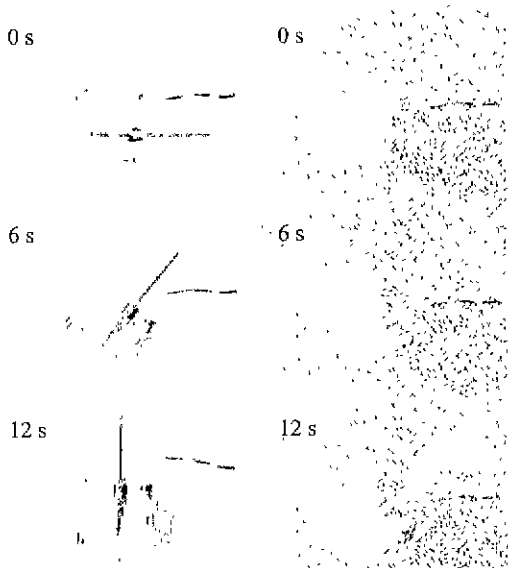
현재 시스템의 경우 구동소자들 사이의 거리가 30 mm 이내에 들어오게 되면, 상호 작용력으로 인하여 구동기 성능의 저하가 이루어지기 때문에 구동소자들을 몸체 바깥쪽에 부착시켜 이러한 현상들을 방지하였다. 몸체에는 직경 3 mm의 공압 튜브를 이용하여 발을 달았다. 이렇게 제작된 스마트 캡슐의 전체 직경은 58 mm, 길이는 40 mm이다. 이렇게 제작된 스마트 캡슐에 대하여 하나의 구동소자에 가해지는 전압 파형은 그림 3에 있다. 전압의 범위는 +10V에서 -11V이고 한 주기가 180 ms이다. 이러한 전압 조건에 대하여 표 1 중 스마트 캡슐의 y축 방향 및 z축 방향의 회전에 대한 성능을 검증한다. 두 가지 회전방향에 대하여 각각 매끄러운 표면과 거친 표면위에서의 회전 속도를 측정한다.

### 3.2 수평방향의 회전

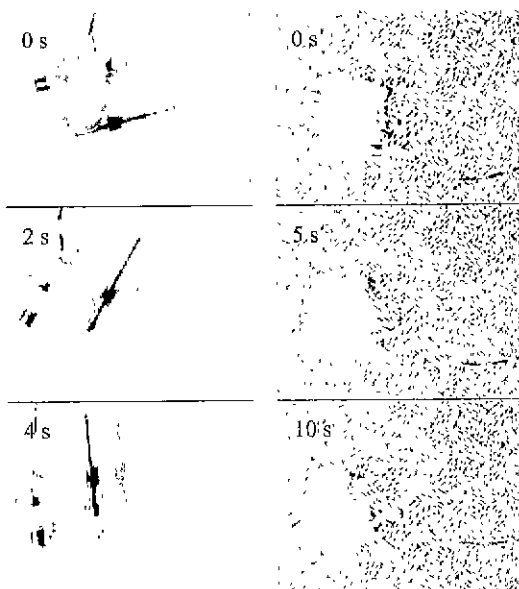
z축 방향의 회전 성능을 평가하기 위하여 구동기를 xy 평면 위에 두어 이동시킨다. 매끄러운 표면과 거친 표면에 대하여 각각 실험을 수행하였으며, 이때 정지마찰계수는 각각 0.28와 0.53이다. 이때 실험 결과는 그림 5에 있다. 정지마찰계수가 0.28인 경우 회전 속도는 7.6 %/s이며, 0.53인 경우의 회전 속도는 3.9 %/s로 측정되었다. 구동소자의 추진력이 동일한 경우에 대하여 마찰계수가 더 큰 경우에 그 회전 성능이 저하됨을 확인할 수 있다.

### 3.3 수직방향의 회전

y축 방향의 회전 성능을 평가하기 위하여 구동기를 xz 평면 위에 두어 이동시킨다. 마찰 조건은 4.1의 xy 평면 위에서 수행한 실험과 동일하다. 이때 실험 결과는 그림 6에 있다. 정지마찰계수가 0.28인 경우 회전 속도는 25.0 %/s이며, 0.53인 경우의 회전 속도는 4.7 %/s로 측정되었다. y축 방향으로의 회전을 수행하는 경우에는 3개의 구동소자를 모두 이용한다. 따라서 구동소자 2개를 사용하는 경우와는 달리 회전 성능이 월등히 좋아진다.



(a) Smooth surface( $\mu_s=0.28$ ) (b) Rough surface( $\mu_s=0.53$ )  
 Fig. 5 Rotation of the smart capsule on a XY-plane



(a) Smooth surface( $\mu_s=0.28$ ) (b) Rough surface( $\mu_s=0.53$ )  
 Fig. 6 Rotation of the smart capsule on a XZ-plane

### 3.4 결과 분석

실제로 구동소자를 비롯한 스마트 캡슐의 이동 변위는 외부의 마찰 조건에 따라 달라진다. 충격 방식의 구동기는 외부 마찰이 너무 작은 경우에 몸체가 쉽게 밀리는 현상이 나타날 수 있으며, 너무 크면 충격으로 인하여 앞으로 전진하는 양이 작아지게 된다. 본 실험에서는 그림 5(a)와 그림 6(a)의 작은 마찰 조건에 비하여 그림 5(b)와 그림 6(b)의

큰 마찰 조건에서 스마트 캡슐의 이동 속도가 상당히 작게 나와, 이러한 현상을 보여준다. 그리고, 적절한 크기의 마찰이 존재하는 상황에서 구동기의 최적 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다

한편, 제안된 스마트 캡슐의 구조에 대해서 수평방향의 회전과 수직방향의 회전에 있어서 사용하는 구동소자의 형태가 다르다. z 축 방향의 회전에서는 A2와 A3의 두 개만 사용하지만, y 축 방향의 회전에서는 세 개의 모든 구동소자를 사용한다. 이로 인하여 z 축 방향의 회전속도(그림 5)보다 y 축 방향의 회전속도(그림 6)가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 이러한 속도의 차이는 매끄러운 표면에서 17.4%/s 로, 거친 표면의 0.8%/s 보다 더 크게 나타난다.

### 4. 결론

스마트 캡슐은 인체의 장이나 혈관 등을 진단하며 처치하는 기능을 가진다. 일반적인 파이프와는 달리 다양한 내부조건에서 원하는 작업을 수행하기 위하여 스마트 캡슐의 방향전환 기능은 필요하다 할 수 있다. 이러한 상황에서 삼각 형태의 구동기 메치를 이용한 스마트 캡슐을 제안하였으며, 그 회전 성능을 평가하였다. 캡슐의 회전 방향과 마찰 조건에 따라 4~25%/s 범위의 회전 속도를 가짐을 실험적으로 확인하였다. 이후의 연구 방향은 좀더 작은 크기를 가진 스마트 캡슐을 제작하여 장내부의 검사용으로 사용할 수 있도록 하는 데에 있다.

### 후기

본 연구는 지능형 마이크로시스템 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. P Dario, M. C. Carrozza, L. Lencioni, B. Magnani, S. D'Attanasio, "A Micro Robotic System for Colonoscopy," Proceedings of the 1997 IEEE International conference on Robotics and Automation, pp. 1567-1572, 1997.
2. Sanjiv Kumar, Irwan M. Kassim and Vijayan K. Asari, "Design of a vision-guided microrobotic colonoscopy system," Advanced Robotics, Vol. 14, No. 2, pp. 87-104, 2000.
3. A. Brett Slatkin, J. Burdick and W. Grundfest, "The Development of a Robotic Endoscope," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 162-171, 1995.