

대장내시경을 위한 자기 충격 액츄에이터

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

Magnetic Impact Actuator for Robotic Endoscope

Hyun-Jin Min*(Mechanical Eng. Dept., KAIST), Hyung-Jun Lim(Mechanical Eng. Dept., KAIST),
Byungkyu Kim(Microsystem Research Center., KIST), Soo Hyun Kim(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

For robotic endoscope, some researchers suggest pneumatic actuators based on inchworm motion. But, the existing endoscopes are not seemed to be replaced completely because human intestine is very sensitive and susceptible to damage. We design and test a new locomotion of robotic endoscope able to maneuver safely in the human intestine. The actuating mechanism is composed of two solenoids at each side and a single permanent magnet. When the current direction is reversed, repulsive force and attractive at the opposition side propels permanent magnet. Impact force agamst robotic endoscope transfer momentum from moving magnet to endoscope capsule. The direction and moving speed of the actuator can be controlled by adjusting impact force. Modeling and simulation experiments are carried out to predict the performance of the actuator. Simulation experiments show that force profile of permanent magnet is the dominant factor for the characteristic of the actuator. The results of simulations are verified by comparing with the experimental results.

Key Words : English Key Word: endoscope (내시경), magnetic impact(자기충격), human intestine (대장)

1. 서론

과학기술이 발전함에 따라 생명연장과 건강에 대한 관심이 날로 커지고 있다. 이런 관심 때문에 의료용 기구나 장치가 다양해지고 기능도 예전에 비해 훨씬 좋아졌다. 의료용 장비들 중에 요즘 가장 이목이 집중되는 장비는 의사들이 보기 어려운 곳을 볼 수 있게 해 주는 관측장비인데, 그 중에서도 내시경 장치는 의사들이 환자들의 건강 상태를 정확히 판단하게 해 주는 핵심적 장비이다. 이러한 시대적인 요구에 따라 미국이나 서부유럽의 선진국들은 내시경 장치 개발을 서두르고 있다. 특히 대장이나 소장 심지어 혈관같이 좁고 섬세한 공간 내에서 원하는 운동과 시술을 가능하게 하는 자기 구동형 내시경의 개발은 의료산업의 중추적인 분야가 되고 있다.

내시경 장비 개발은 이미 여러 나라에서 진행 중인데 그러한 개발의 효율성은 자기 구동 내시경의 기계적인 구조에 따라 의존된다. 일본에서는 지난 몇 년간 내시경 개발에 앞서 파이프 내에서 구동하며 내벽에 존재하는 결함을 찾는 로봇개발을

시작하였다. 대부분 나뿔 구동을 하는 로봇을 시작으로 많은 형태의 구동기가 만들어 졌는데, 그 중에서도 가장 전망이 밝은 것이 인치웜 방식과 관성구동 방식이다. 이러한 구동 방식들은 다소간의 장단점들을 가지고 있다. 인치웜 구동 방식은 정확한 구동은 가능 하지만, 이 방식을 내시경시스템에 적용할 경우 시술에 걸리는 시간이 너무 오래 걸린다. 관성구동은 중력에 의한 영향으로 자세제어에 따른 부수적인 장치들이 필요하다. 이와 같은 결점들 때문에 현재의 내시경 구동을 위한 적절한 구동기의 개발은 매우 중요하다. 본 논문에서는 자기 구동형 내시경의 적절한 구동기로서 영구자석을 사용하는 자기 충격 액츄에이터를 제안하고, 그에 대한 개발을 이야기할 것이다.

3. 내시경 액츄에이터의 개념 디자인

본 연구에서 제시한 자기 충격 액츄에이터의 기본 구조는 Fig. 1 과 같은 구조를 갖는다. 원통의 형

태를 갖는 중앙 가이드와 그 속에서 움직이는 영구 자석 그리고 양끝은 전자석이 장착되어 있다. 좌우가 대칭구조를 갖기 때문에 구동 시 전후진이 가능하다.

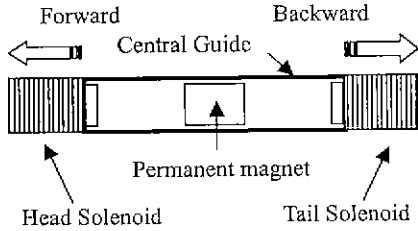


Fig. 1 Schematic Structure of Impact Actuator

액츄에이터의 구동 방식은 전진의 경우 꼬리의 전자석에는 영구자석과 반대 극성을 갖도록 정전류를 가하고, 헤드 전자석 부분은 전류의 방향을 순방향과 역방향으로 스위칭하면서 전자석의 극성을 바꾼다. 전자석의 극성을 바꾸게 되면 영구자석과 전자석 사이에 스위칭하는 시간차에 따라 인력과 척력이 발생하게 된다. 인력이 발생할 때에는 영구자석이 액츄에이터 몸체보다 질량이 작기 때문에 왼쪽으로 움직여 전자석과 붙게 되는데 이 과정에서 영구자석과 몸체와 충돌이 일어나게 된다. 이러한 충격으로 인해 충격력이 발생하고 이 힘으로 몸체가 전진하게 된다. 충격 후 헤드 전자석의 전류의 방향이 바뀌게 되면 척력이 발생하여 영구자석이 뒤로 밀려나가 원래의 위치로 돌아오게 된다. 앞에서 설명한 과정이 되풀이 되면 액츄에이터는 계속해서 전진을 하게 되는 것이다. 후진의 경우는 헤드의 전자석을 영구자석과 반대 극성을 가지도록 정전류를 가한 뒤 꼬리 전자석의 전류를 스위칭하면 후진을 하게 된다.

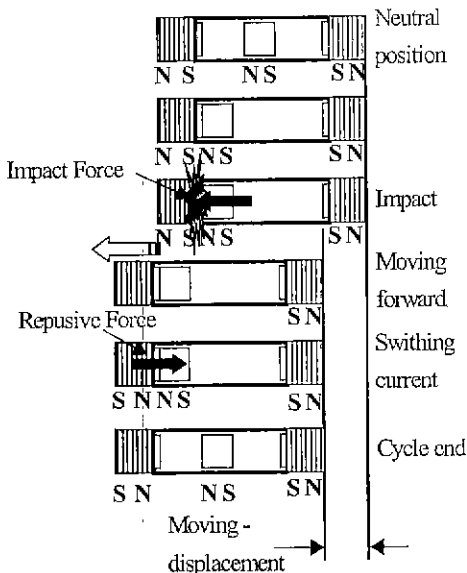


Fig. 2 Impact and Repulsive Force in Actuator
Fig. 2는 구동기 전진 시 구동기 내에서 일어나

는 영구자석과 양끝의 전자석의 극성 변화 과정을 나타낸다. 이러한 구동을 가능하게 하려면 적당한 자력을 갖는 영구자석을 사용해야 하며, 전자석에 흐르는 전류의 세기와 스위칭하는 주기를 잘 선택하여야 한다. 특히, 영구자석과 액츄에이터 간의 상대 질량이 중요한데, 액츄에이터의 질량이 영구자석보다 작을 경우 인력과 척력이 발생할 때, 몸체가 영구자석을 중심으로 움직이는 경우가 일어나는데 이럴 경우 액츄에이터는 전진이나 후진을 하지 않게 된다.

4. 모델링 및 시뮬레이션

시스템 모델링은 Fig. 3 과 같다. 중앙의 영구자석과 액츄에이터 몸체를 독립 질량 m_1 , m_2 로 설정하고, 영구자석과 몸체사이의 반력을 $F(x,t)$, 동마찰계수와 정마찰계수를 각각 μ_{D1} , μ_{S1} 으로 정하였다. 또한, 몸체와 외부 접촉면과의 동마찰계수와 정마찰계수를 각각 μ_{D2} , μ_{S2} 로 설정하였다. x_2 는 몸체의 절대 변위를 나타내며, x_1 는 영구자석의 몸체에 대한 상대 변위를 의미한다. L_p 는 영구자석의 행정거리를 의미한다.

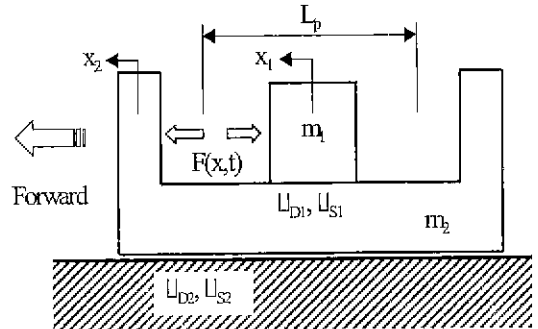


Fig 3 Actuator System Modeling

모델링을 통한 free body diagram은 각 요소별로 표현하면 다음 그림과 같다. 여기서 F_n 은 영구자석과 몸체간의 마찰력을, F_p 는 몸체와 접촉면 사이의 마찰력을 나타낸다. N_1 는 영구자석이 받는 중력에 대한 수직 항력이고, N_2 는 몸체가 받는 중력에 대한 수직 항력이다.

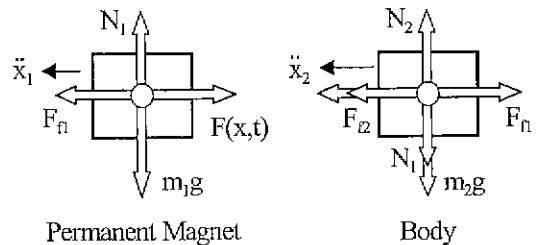


Fig. 4 Free Body Diagram

Free body diagram을 통한 운동방정식은 다음과

같이 표현된다. 식 (1)-(6)에서 v_1, v_2 은 각각 영구자석과 몸체의 이동 속도이다.

$$m_1 \ddot{x}_1 = F(x, t) - F_{f1} \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -F(x, t) + F_{f1} - F_{f2} \quad (2)$$

$$N_1 = m_1 g \quad (3)$$

$$N_2 = (m_1 + m_2) g \quad (4)$$

$$F_{f1} = \begin{cases} f(x, t) & \text{if } v_1 = 0 \text{ and } |f(x, t)| \leq \mu_{s1} N_1 \\ \mu_{s1} N_1 & \text{if } v_1 = 0 \text{ and } f(x, t) > \mu_{s1} N_1 \\ -\mu_{s1} N_1 & \text{if } v_1 = 0 \text{ and } f(x, t) < -\mu_{s1} N_1 \\ \mu_{d1} N_1 & \text{if } v_1 > 0 \\ -\mu_{d1} N_1 & \text{if } v_1 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{f2} = \begin{cases} -f(x, t) + F_{f1} & \text{if } v_2 = 0 \text{ and } |-f(x, t) + F_{f1}| \leq \mu_{s2} N_2 \\ \mu_{s2} N_2 & \text{if } v_2 = 0 \text{ and } -f(x, t) + F_{f1} > \mu_{s2} N_2 \\ -\mu_{s2} N_2 & \text{if } v_2 = 0 \text{ and } -f(x, t) + F_{f1} < -\mu_{s2} N_2 \\ \mu_{d2} N_2 & \text{if } v_2 > 0 \\ -\mu_{d2} N_2 & \text{if } v_2 < 0 \end{cases} \quad (6)$$

영구자석과 몸체가 부딪치게 되면 모멘텀 변화에 의해 다음과 같은 속도의 변화가 일어나게 된다.

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2 e)v_1 + m_2(1 + e)v_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

$$v_2' = \frac{m_1(1 + e)v_1 + (m_2 - m_1 e)v_2}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

$$\text{if } x_1 - x_2 \geq \frac{L_p}{2} \text{ or } x_1 - x_2 \leq -\frac{L_p}{2} \quad (9)$$

식 (7)-(9)에서 e 는 영구자석과 몸체간의 충격계수이고 v_1', v_2' 는 각각 충격 후 영구자석과 몸체의 이동 속도이다.

위 식들을 사용하여 모델에 대한 충격계수와 마찰계수 및 질량들을 정해주면 액츄에이터의 운동을 알 수 있다. 마찰계수의 선택은 실험을 통해서 정마찰계수를 알아낸 다음 동마찰계수를 정마찰계수의 0.7 정도로 가정하였다. 다음과 같은 결과는 영구자석의 질량 8.24g, 액츄에이터의 질량을 34.3g 으로 하며, 마찰계수가 작은 경우(0.28)와 큰 경우(0.53)의 변위 결과를 나타낸 것이다.

이 결과에는 전자석에 흐르는 전류, 영구자석의 상대 이동 변위, 그리고 액츄에이터의 절대 이동 변위를 나타낸다. 절대 변위를 나타내는 그림에서 충격이 발생하는 순간 액츄에이터가 전진함을 알 수 있다. 또한, 액츄에이터와 외부와의 마찰이 적은

경우 전진하는 변위는 마찰이 큰 경우보다 더 큼을 알 수 있다.

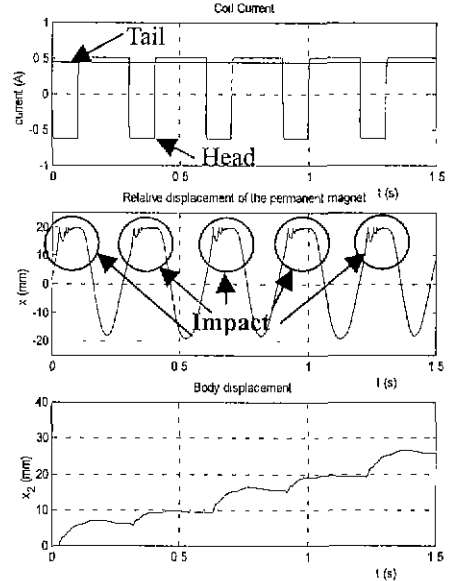


Fig. 5 Simulation Result at $\mu_s = 0.28$ (6.6 mm/step)

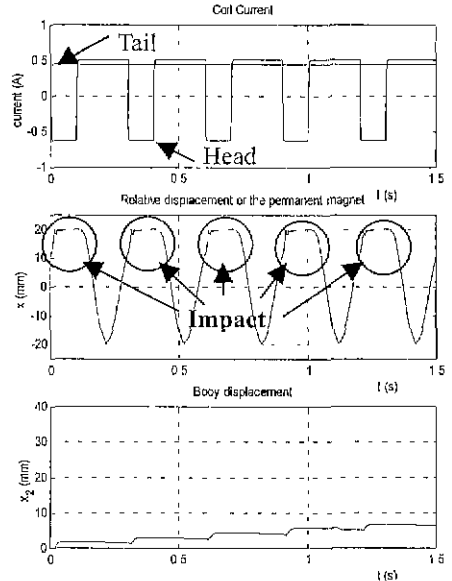


Fig. 6 Simulation Result at $\mu_s = 0.53$ (1.2 mm/step)

5. 실험

자기 충격 액츄에이터의 구동 실험에 앞서 마찰 표면과 액츄에이터간의 마찰계수와 영구자석과 중앙 가이드간의 마찰계수를 정하기 위해 Fig 7 과 같은 방법으로 20 번 반복하여 평균을 냈다. 마찰 평면은 두 가지 경우를 선택하였는데, 하나는 미끄러운 평면을 대표하기 위해 셀로판 테이프 위에서 측

정하였고 또 다른 하나는 이전과 비교하기 위해 거칠은 형질 위에서 측정을 하였다. 각 측정치는 0.28과 0.53이었다. 또한, 영구자석과 중앙 가이드간의 마찰계수는 0.17이었다.

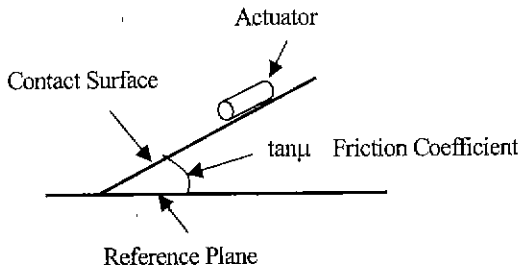


Fig. 7 Measurement of Friction Coefficient

액추에이터의 변위 측정을 하기 위해 Laser Vibro meter를 사용하여 다음과 같이 설치하였다.

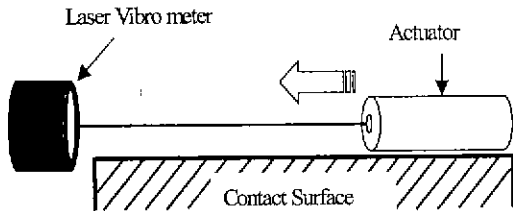


Fig. 8 Arrangement of Measurement System

실험에 사용된 액추에이터는 초기 모델과 이를 소형화한 모델이 사용되었다. Fig. 9과 같이 초기 모델은 길이가 113mm이며, 최대 반경이 11mm이다. 소형화된 모델은 길이가 40mm, 최대 직경 8mm이다.

초기 모델에 사용된 액추에이터의 경우 양끝 부분의 직경이 중앙부보다 더 큰데 이것은 영구자석의 세기가 크기 때문에 적절한 반력을 발생시키기 위해 큰 직경을 가지는 코일과 철심을 사용하였기 때문이다. 소형화된 액추에이터에 사용된 영구자석은 초기 모델에 비해 작은 직경을 가져 자력의 크기가 작아졌다. 이로 인해 코일과 철심의 직경을 줄일 수 있었으며, 좀 더 작은 크기로 만들 수 있었다.

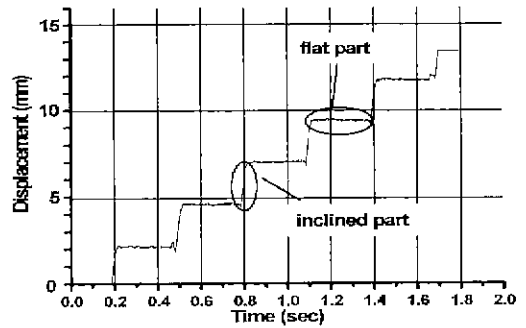


Fig. 9 Prototype and Miniature Actuator

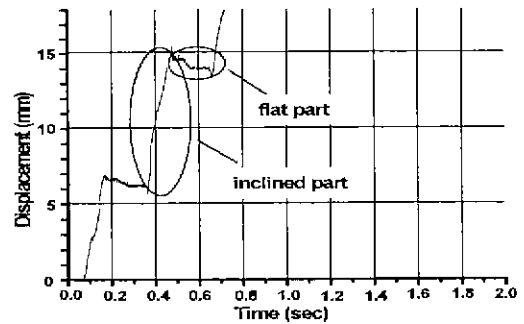
5.1. 작동 구동기의 변위 측정

먼저, 초기 개발 모델의 경우 형질 위에서 측정된 결과를 보면 한 행정의 이루어 질 때, 정확한 스텝이 일어남을 알 수 있다. 이러한 이유는 마찰이 상대적으로 크기 때문에 한 행정의 끝날 때 액추에이터가 미끄러지지 않고 멈춰있을 수 있기 때문이다. 하지만 셀로판 테이프 위에서는 행정의 끝날 때 미끄러짐이 발생한다는 것을 알 수 있는데 이는 마찰이 작아 행정의 시작되고 끝날 때 자력의 반발력으로 생기는 관성력 때문이다. 여기서 주목해야 할 점은 이러한 관성력의 추가인데 이러한 관성력으로 인해 액추에이터는 마찰이 큰 경우보다 작은 경우에 더 빨리 이동할 수 있다. 이 현상은 소형화된 액추에이터의 측정결과에서도 마찬가지이다. 미끄러운 마찰면에서 액추에이터의 이동 속도가 더 빠르다는 것은 아주 고무적인 내용인데, 자가 구동형 내시경이 움직이는 장 표면은 미끄러운 상태이기 때문이다.

소형화된 액추에이터의 경우 초기 모델에 비해 작은 이동변위와 속도를 갖는 이유는 영구 자석의 질량이 작아 충격 시 생기는 관성력이 작아지기 때문이다. 이동변위와 속도를 크게 하기 위해 영구자석에 부가질량을 달 경우 전체적인 크기가 커질 수 있기 때문에 적절한 선택이 필요하다.



(a) $\mu = 0.53$



(b) $\mu = 0.28$

Fig. 10 Experimental Result of Prototype Actuator

참고문헌

1. Takaharu Idogaki, Hitoshi Kanayama, Nobuyuki Ohya, "Characteristics of Piezoelectric Locomotive Mechanism for an In-Pipe Micro Inspection Machine", Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, pp. 193-198.
2. Shigeo Hirose, Hidetaka Ohno, Takeo Mitsui, and Kiichi Suyama, "Design of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ pipes", Proceedings of 1999 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, May., 1999, pp 2309-2314.
3. Iwashina Shigeru, Hayashi Iwao, Iwatsuki Nobuyuki, Nakamura Katsumi, "Development of In-Pipe Operation Micro Robots", Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science, Oct. 2-4, 1994, pp 41-45.
5. K. Ikuta, "The Application of Micro/Miniature Mechatronics to Medical Robotics", Proc. of IROS '88, Tokyo, Japan, Oct. 31-Nov. 2, 1988, pp.9-14.

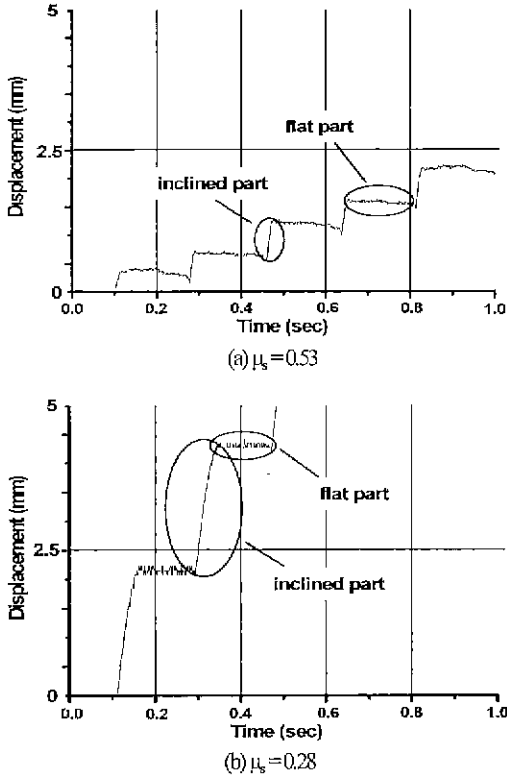


Fig. 11 Experimental Result of Miniature Actuator

6. 결론

본 연구에서 제안한 자기 충격 액츄에이터는 실험결과에서처럼 장내 환경처럼 미끄러운 조건에서 더 효율적인 구동을 할 수 있다. 또한, 대칭적 구조를 갖기 때문에 작동이 간편하며, 모듈화된 특성으로 다른 시스템이나 시스템의 디자인 변경 시 착탈이 간편하다. 이러한 점들을 고려할 때, 자가 구동형 내시경의 액츄에이터로서 자기 충격 액츄에이터는 좋은 구동기로서의 역할을 할 수 있다.

액츄에이터의 성능을 높이기 위해서는 영구자석에 부가 질량을 붙여 충격력을 크게 하여 이동 변위를 늘리면 되는데, 이때 부가 질량의 선택은 액츄에이터와의 상대 질량을 고려해야 한다.

이와 같은 자기 충격 액츄에이터를 공간상에 적절히 배치한다면 내시경 시스템을 구성하였을 때, 방향전환을 가능하게 할 수 있을 것이다.

후 기

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