

내시경용 로봇을 위한 공압구동기의 운동특성 해석

이진희* · 정연구* · 김병규† · 박종오*

(2002년 1월 5일 접수, 2002년 5월 2일 심사완료)

Analysis for Movement Characteristics of Pneumatic Impulsive Actuator for Robotic Colonoscope

Jinhee Lee, Younkoo Jeong, Byungkyu Kim and Jong-Oh Park

Key Words : Colonoscope(대장 내시경), Pneumatic Impulsive Actuator(공압구동기), Inchworm(인치웜), Resistance(저항력)

Abstract

A novel locomotion using the pneumatic impulsive actuator was proposed for robotic colonoscope. This locomotion showed good moving performance in the environment of rigid pipe, however, the displacement per one impact(step displacement) is greatly reduced due to the low stiffness and high damping characteristics of the colon. Therefore, the modeling technique based on spring and damping system is studied to predict the step displacement and some parametric studies are carried out to investigate main parameters that influence the step displacement of locomotion. Based on simulation result, a new locomotion to control the resistance force is suggested and fabricated. Through the experiment on the colon, the usefulness of modeling technique is confirmed and successful improvement of moving characteristics is achieved.

기호설명

- m_1 : 관성체의 질량
- m_2 : 실린더의 질량
- μ_i : 관성체와 실린더 사이의 마찰계수
- γ : 대장과 공압구동기 사이의 저항력계수
- g : 중력가속도
- k : 대장의 탄성계수
- c : 대장의 감쇠계수
- L : 관성체의 행정길이
- d_p : 관성체의 반지름
- l_p : 관성체의 길이
- D_i : 실린더의 내부 반지름

1. 서론

현재의 대장 내시경은 영상에 의한 진단 뿐 아니라 적절한 도구를 투입하여 간단한 시술을 행할 수 있는 구조로 대장의 질환을 판단하고 치료하는데 매우 유용하다. 그러나 능숙한 내시경 시술에는 많은 노력과 시간을 요구하고 있으며 내시경의 구조상 환자에게 고통과 불쾌감을 주고 있다.

이러한 이유에서 다양한 형태의 대장 시술용 내시경에 대한 연구가 진행되었다. Ikuta 등은 "Virtual Endoscope System"을 시술자의 훈련용으로 개발하였으며, "Hyper Endoscope"라는 일종의 매니플레이터(manipulator)를 개발하였다.^(1,2) 자율이동 내시경에 대한 연구도 인치웜 방식을 중심으로 진행되고 있지만 전반부와 후반부의 고정확실하게 이루어져야 이동의 효율성이 보장된다는 면에서 연구의 어려움이 있다. 따라서 이에 따른 고정부의 다양한 형태가 개발되고 있으며 "vision guided" 조향 방식의 기능 등이 동시에 연구되고 있다.^(3,4)

* 한국과학기술연구원(KIST)

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원

E-mail : bkim@kist.re.kr

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

이런 인치웸 방식과는 다른 형태로 대장을 미끄러지듯 이동하는 방식의 이동 메커니즘을 저자들은 제안한 바 있다. 이 방식은 피스톤과 실린더의 충돌에 의해 발생한 관성력에 의해 원하는 방향으로 미끄러지듯 이동 가능하며 구동기의 외부에는 유연 지지부를 장착하여 대장과 적절한 접촉력을 유지하도록 하였다.⁽⁵⁾

공압구동기에 관한 이전 연구에서는 파이프와 같은 강성 재질의 환경에서는 외부 접촉력을 일정하게 유지함으로써 이동이 용이하지만 대장과 같은 연성 재질의 환경에서는 이동이 용이하지 못한 한계가 있었다. 따라서 대장과 같은 환경에서의 이동 성능과 파라미터의 변화에 따른 이동성능 변화에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대장 환경에서 이동을 예측하기 위하여 대장을 스프링, 댐퍼 시스템으로 모델링하고 이에 따른 이동 성능을 시뮬레이션 하였다. 이러한 결과를 확인하기 위해 구동기를 제작하고 대장에서의 이동 실험을 수행하였다. 실험을 통해 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하였으며 운동 특성에 중요하게 작용하는 요소들을 확인하였다. 또한 작용 파라미터들을 조절함으로써 운동 성능을 향상시켰다.

2. 공압구동기의 원리

2.1 공압구동기의 구성

공압 구동기는 Fig. 1 과 같이 실린더와 관성체로 구성된다. 관성체는 스테인리스 스틸을 사용하여

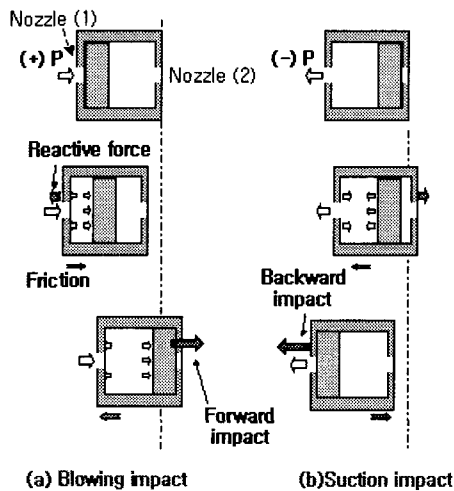


Fig. 1 Configuration and fundamentals of the actuator

여 원기둥 형태로 제작하였고, 아크릴로 제작한 실린더 내부에서 자유롭게 움직이도록 실린더 벽과의 마찰 계수를 표면 가공을 통해 낮추었다. 실린더의 양쪽 끝에는 공기가 밸브로부터 유입되는 노즐(1)과 실린더 내의 공기가 외부로 유출되는 노즐(2)이 있다. 노즐(1)을 통해 유입된 공기는 관성체를 밀어내고, 실린더 내의 공기는 노즐(2)를 통해 외부로 유출된다. 노즐(2)의 크기는 실린더 내의 공기가 압축 효과를 나타내어 관성체의 운동을 방해하지 않을 정도의 충분한 크기를 갖도록 하였다.

공압 구동기는 Fig. 1 에서와 같이 그 구조가 매우 간단하기 때문에 필요에 따라 구조의 변경이 용이하고 소형화가 매우 유리한 장점을 가지고 있다. 또한 공기압을 구동력으로 사용하는 구조이므로 진단 시 대장 내 시야확보와 에너지 소모면에서도 유리하다.

2.2 공압구동기의 이동원리

실린더 내로 공기압이 유입되면 공기압력에 의해 관성체와 실린더가 동시에 힘을 받아 반대방향으로 이동하게 된다. 이때 실린더 내로 (+)압력이 전해지면 실린더는 초기에 (-)방향으로 이동하게 된다. 그러나, Blowing impact 과정에 의해 관성체가 실린더에 충돌함으로써 발생하는 이동 변위 초기 실린더가 받은 impulsive force 인한 이동변위보다 크면 전체적인 구동기의 방향은 (+)으로 움직이게 된다. 이러한 원리는 Suction impact 과정에서도 동일하게 작용하여 충돌 방향인 (-)으로 움직이게 된다. Fig. 1 에 이러한 이동원리를 나타내었다. 이러한 이동원리에 의해 공기압이 유입되는 초기에 실린더가 어떻게 움직이느냐가 이동 성능을 좌우하는 중요한 요소로 작용함을 알 수 있다. 따라서 관성체와 실린더의 움직임을 조절하여 원하는 방향으로 관성력을 증가시키는 방법이 필요하다.

이러한 이동원리는 주위환경이 강성재질이고 마찰 저항이 일정하게 유지될 때 적용이 가능하다. 대장과 같이 변형이 크고 부드러운 환경에서는 강성재질로 구성된 환경과 달리 이동이 용이하지 못하다. 이는 대장이 공압구동기의 운동에너지를 흡수하고, 구동기가 이동하는 것만큼 변형했다가 다시 되돌아오는 성질을 나타내기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 대장의 물리적 특성을 조사하여 모델링 함으로써, 구동기가 대장내에서 안정적으로 이동하기위한 방법에 관한 연구를 수행하였다.

3. 대장 및 구동기 모델링

3.1 대장의 물리적 특성

3.1.1 대장의 특성

공압구동기가 강성 재료의 환경에서는 계단식 이동특성을 보인다는 것과 이런 특성은 외부 접촉력에 의한 마찰력의 변화가 중요한 요인임을 선행 연구를 통해 확인했다.⁽⁶⁾ 그렇지만 대장은 연성 재료의 환경이기 때문에 접촉력 변화에 의한 이동으로 강성 재료와 같은 계단식 이동이 용이하지 않다.

대장은 접촉 부위에서 변형이 크게 나타나고, 마찰계수 또한 대장 내부의 상태에 따라서 변화가 심하다. 또한 변형 후에는 원래의 형상으로 돌아가려는 성질이 강하며 점성계 특성이 나타난다. 대장의 이러한 성질은 탄성을 가진 스프링과 에너지 소산체인 댐퍼로 단순화하여 표현할 수 있다.

Table 1 Mechanical properties of the colon

| | |
|-----|---------------|
| k | 643.8 [N/m] |
| c | 2.303 [N·s/m] |

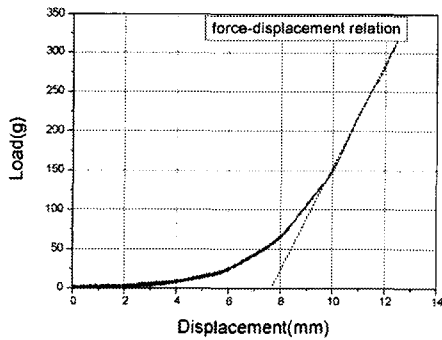


Fig. 2 Spring constant of the colon

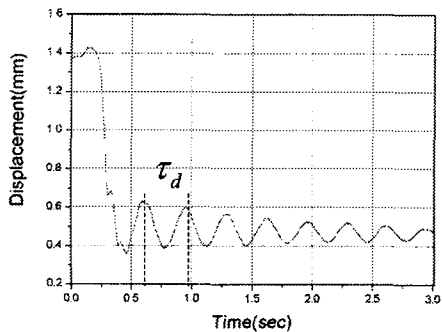


Fig. 3 Damping coefficient of the colon

3.1.2 대장 물성치 실험

대장의 탄성계수와 감쇄계수는 인장실험과 진동실험을 통하여 추정할 수 있다. 탄성계수는 대장에 일정한 변형을 주면서 그때 작용하는 힘을 측정함으로써 힘과 변형과의 관계를 통해 구할 수 있다. 감쇄계수는 대장에 일정한 힘을 가할 경우, 그에 따른 고유진동수와 결과로 나타나는 진동 주기를 측정함으로써 구할 수 있다. 그 결과를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 실험을 통해 탄성계수와 감쇄계수를 Table 1 같이 산출하였다.

대장에서 중요한 작용력 중에 하나는 대장과 구동기 사이의 저항이다. 강성 재료에서는 구동기와 주고 받는 마찰력으로 저항을 표현 가능하지만 대장에서는 마찰력과 동시에 대장의 변형까지 포함되어 발생하는 저항력의 고려가 필요하다. 이 저항력(resistance force)은 대장 표면의 상태에 따라 달라질 수 있다. 인위적으로 습기를 증가시키고 변형을 작게 하는 환경을 만들어주면 상대적으로 작은 값을 갖는다.⁽⁷⁾

3.2 대장 모델의 구성

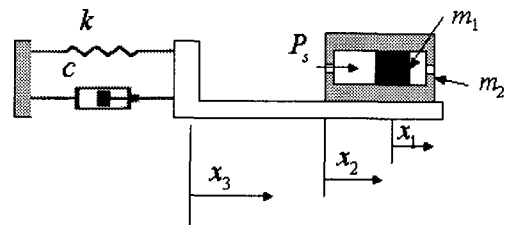


Fig. 4 Colon model with a spring and a damper

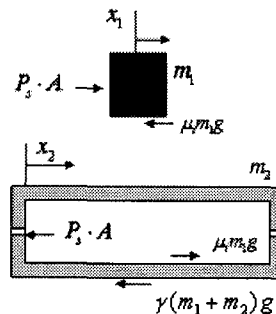


Fig. 5 Free body diagrams of the cylinder and the piston before impact

대장을 Fig. 4 와 같이 스프링, 댐퍼 시스템으로 모델링하였다.

실린더와 관성체에 관한 자유물체도는 Fig. 5 와 같다. 이때 각각의 운동방정식은 식 (1), (2)와 같다. 이에 따른 대장부 자유물체도는 Fig. 6 과 같고 이때 운동방정식은 식 (3)으로 표현된다.

$$m_1 \ddot{x}_1 = (P_s \times A) - \mu_1 m_1 g \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = \mu_1 m_1 g - (P_s \times A) - \gamma(m_1 + m_2)g \quad (2)$$

$$k \Delta x_3 + c \dot{x}_3 = \gamma(m_1 + m_2)g \quad (3)$$

실린더와 관성체 사이에 충돌이 일어난 후에는 실린더의 자유물체도는 Fig. 7 과 같고 이때 구동기의 운동방정식은 식 (4)와 같이 된다.

$$(m_1 + m_2) \ddot{x}_2 = -\gamma(m_1 + m_2)g \quad (4)$$

충돌 직후의 관성체와 실린더의 속도는 식 (5), (6)과 같이 산출할 수 있다.

$$v'_{m_1} = \frac{1}{m_1 + m_2} \{ (m_1 - m_2)e v_{m_1} + m_2(1 + e)v_{m_2} \} \quad (5)$$

$$v'_{m_2} = \frac{1}{m_1 + m_2} \{ (m_2 - m_1)e v_{m_2} + m_1(1 + e)v_{m_1} \} \quad (6)$$

여기서 e 는 충돌계수이다. 그런데 충돌 직후 내부에 남아있는 압력(P_s)으로 인해 관성체와 실린더가 하나의 물체가 되어 운동한다. 따라서 이 경우 완전소성충돌($e=0$)이 되어 충돌 후의 실린더와 피스톤의 속도는 식 (7)과 같이 단순화 될 수 있다. 이 속도는 충돌 이후에 구동기의 이동 성능을 결정짓는 중요한 요소이다.

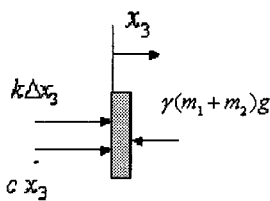


Fig. 6 Acting forces to the colon

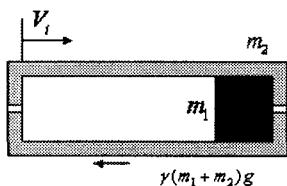


Fig. 7 Free body diagram of the cylinder and the piston after impact

$$V_i = v'_{m_1} = v'_{m_2} = \frac{m v_{m_1} + m_2 v_{m_2}}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

4. 시뮬레이션 및 실험

앞에서 구성한 모델에 따라 대장 위에서의 이동 특성에 대한 시뮬레이션을 Matlab 을 사용하여 수행하였다. 시뮬레이션 모델에 사용한 기본 파라미터는 Table 2 와 같고 Fig. 8 은 모델에 사용한 Flowchart 를 나타낸다.

구동기의 주요 파라미터의 변화에 따른 이동특성 해석을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 관성체의 질량과 행정거리를 변화시키며 운동특성을 비교하여 보고 외부 마찰력을 능동적으로 변화시키며 그 특성을 분석하는 과정을 통하여 이루어졌다.

4.1 관성체 질량 변화에 따른 이동특성

공압 충돌 구동기의 1 회 충돌 이동거리(step displacement)는 최종적으로 실린더와 관성체의 관성력에 의한 초기 속도에 의해 좌우된다. 따라서

Table 2 Parameters for the simulation

| parameter | value | parameter | value |
|-----------|-------|-----------|-------|
| d_p | 6mm | m_2 | 8.15g |
| l_p | 15mm | D_i | 6mm |

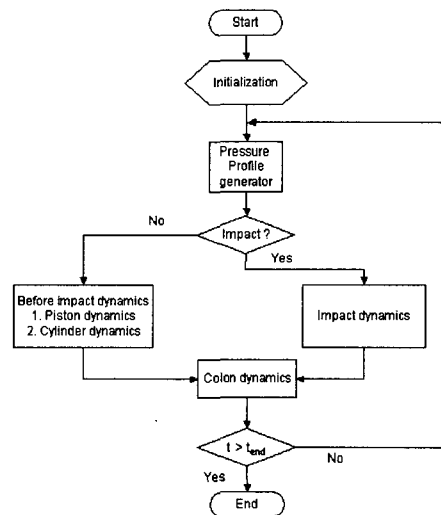


Fig. 8 Flowchart for the simulation

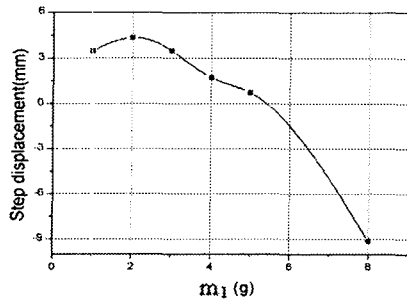


Fig. 9 Step displacement for various m_1 masses when $m_2=8.15$ g

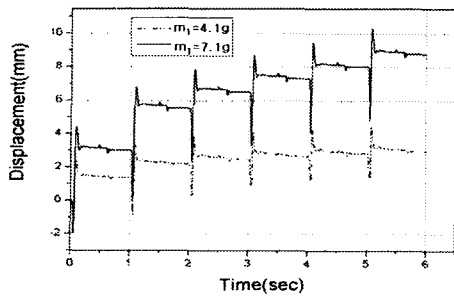


Fig. 10 Forward movement performance with different masses

관성체의 질량이 이동 특성에 중요하게 작용한다. 관성체의 질량 변화에 대한 이동특성 simulation 결과와 실험 결과를 Fig. 9 와 10 에 제시하였다.

관성체의 질량에 의해 작용하는 힘은 실린더와 관성체의 질량 비율에 의해 결정된다. 관성체의 질량이 커짐에 따라 관성력이 증가하지만, 역학적 관계에 의해 실린더에 대한 관성체의 질량 비율이 반발력에 의한 실린더의 이동을 먼저 발생시키게 되면 실린더의 운동이 더욱 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 결과적으로는 후방으로 이동하는 특성을 나타내는 것으로 해석된다.

4.2 관성체의 행정거리에 따른 이동특성

관성체의 이동거리가 길어지면 관성체의 속도가 증가하게 되고 결과적으로 관성체의 운동량이 증가할 것으로 예측된다. Fig. 11, 12 에서 위와 같은 내용의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 보여주고 있다.

해석결과 동일한 입력압력에 대해서는 실린더의 길이가 길어지면 이동 성능이 향상되는 것으로 관찰된다. 하지만 실린더의 길이가 기준값 이상으

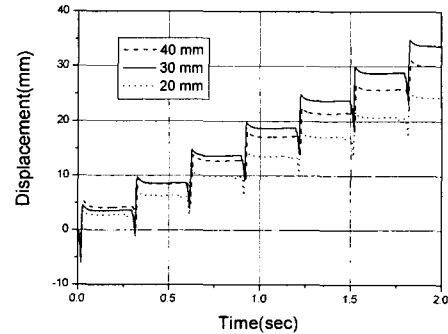


Fig. 11 Simulation for various working distance of the piston in the cylinder

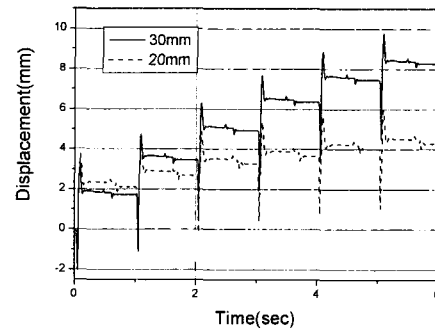


Fig. 12 Experimental result for different cylinder length

로 길어지게 되면 Fig. 11 의 40mm 길이에서 보여 주듯이 이동 성능이 오히려 저하되는 것을 알수 있다. 이와 같은 이유는 두 가지로 살펴볼 수 있다. 첫번째는 관성체가 충분히 되돌아오지 못하고 다시 충돌하기 때문에 오히려 속도가 충분하지 못하기 때문이고, 두번째는 충돌이 발생하기 전에 실린더의 운동량이 증가해서 전체적인 운동량은 줄어들기 때문이다. 이것은 실린더의 속도가 반대 방향으로 증가하는 것을 의미하므로 식 (7)에서 분자의 값이 감소하는 결과를 가져온다. 결과적으로 실린더의 길이가 길어져도 이동 성능이 저하되는 것이다.

4.3 외부 저항력 변화에 따른 이동특성

공압구동기는 대장의 저항력의 크기에 따라 이동성능이 좌우될 것으로 예측된다. Fig. 13 은 저항력이 다를 때의 구동기 움직임에 대한 해석 결과이다.

구동기와 대장 사이에 습기가 충분한 경우는 저항력이 낮아지는 것을 확인하였다. 따라서 대장

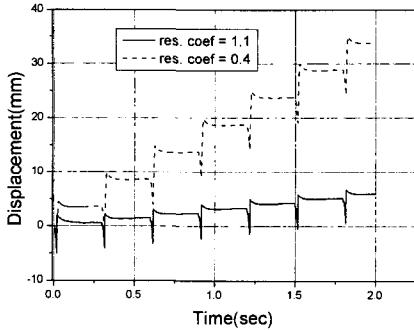


Fig. 13 Simulation with coefficient of resistance

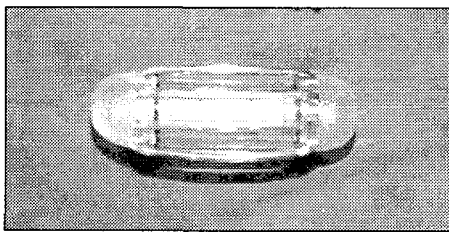


Fig. 14 Pneumatic actuator with a insufflating device

과 구동기 사이에 습기를 분사하는 것과 같은 효과를 발휘한다면 저항력을 낮출 수 있다. 이와 같은 원리를 이용하기 위하여 Fig. 14 와 같이 구동기 주변에 공기를 분사하는 장치를 고안해 장착하였다. 공기를 분사하여 저항력을 낮춘 경우와 공기를 분사하지 않는 경우에 대한 실험 결과는 Fig. 15 에 제시하였다.

시뮬레이션 결과는 대장과의 저항력을 낮출 경우 이동이 유리할 것을 시사하고 있다. 실험에서 사용한 공기 분사 장치는 충돌 시점과 거의 일치하여 작동하도록 설정하였다. 따라서 공기 유입 시에 발생하는 반발력에 의해 실린더가 밀리는 것은 공기가 분사되지 않는 것으로 방지할 수 있으며 충돌 시에는 공기를 분사하여 전진하는 방향으로 미끄러지며 이동하도록 설정하였다. 이 결과를 통해 저항계수가 변화하면 이동이 가능한 것을 확인함과 동시에 능동적으로 저항계수를 이용하여 이동 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

이상과 같이 시뮬레이션을 통해 공압구동기의 운동성능을 향상시키는 파라미터를 확인할 수 있었다. 관성체의 질량이 크고 실린더의 길이가 길수록 공압구동기의 1 회 충돌에 대한 이동 거리가 늘어남을 확인하였다. 또한 대장 표면과의 접촉력을 변화시킴으로써 대장에서의 공압구동기의 이동

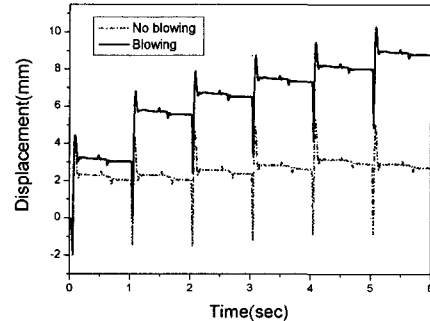


Fig. 15 Movement characteristic with air insufflation

성능을 향상시킬 수 있었다.

본 논문을 통해 얻은 결과를 이용하면 환자의 불편감과 고통을 덜 수 있는 대장내시경을 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

대장에서 이동하는 공압 충돌 구동기의 이동 성능을 살펴보기 위하여 대장을 스프링과 감쇄계가 있는 시스템으로 모델링하였다. 이러한 모델을 사용하여 시뮬레이션과 실험을 통해 이동특성을 확인하였고 모델의 타당성을 검증하였다.

대장에서 이동하기 위해서는 대장이 가지고 있는 감쇄특성과 탄성의 영향력에서 자유로워지기 위해 대장과 구동기 사이의 저항력을 낮춰주어야 한다는 것을 확인하였다. 또한 저항력을 능동적으로 이용함으로써 이동 시에는 저항계수를 낮추고 반발력을 받을 때에는 저항계수를 높이는 방법으로 효율적인 응용이 가능하다.

이동 성능을 향상시키는 것은 관성체의 질량을 증가시키고 실린더의 길이를 늘이는 것으로 가능하다는 것을 확인하였다. 하지만 일정한 값 이상으로 확대하면 일정한 입력압력에 대해 실린더의 운동량을 증가시키는 결과를 가져오므로 전체적인 이동성능을 저하시킨다. 따라서 최적화된 실린더의 길이와 관성체의 질량을 선택한다면 가장 효율적인 이동 성능을 보장할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21 세기 프론티어 사업의 일환인 지능형 마이크로시스템 사업단의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Ikuta K., Takeichi M. and Namiki T., 1999, "Virtual Endoscope System with Force Sensation," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1715~1031.
- (2) Ikuta K. and Nokata M., 1999, "Two-lead-wire Drive for Multi-micro Actuators," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1715~1031.
- (3) 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).
- (4) Sanjiv K., Irwan M. K. and Vijayan K. A., 2000, "Design of a Vision-guided Microrobotic Colonoscopy System," *Advanced Robotics*, Vol. 14, No. 2, pp. 87~104.
- (5) Lim Y.M., Lee J., Park J., Kim B., Park J.O., Kim S.H. and Hong Y.S., 2001, "A Self-Propelling Endoscopic System," *Proceedings of the IROS 2001*, pp. 1117~1122, Hawaii.
- (6) Kim B., Lee J., Lim Y.M., Park J.O., Kim H.S. and Hong Y.S., 2001, "Locomotive Colonoscope," *Proceedings of the 1st Intelligent Microsystem Symposium*, pp. 39~43, Seoul.
- (7) Lee J., 2001, "Movement Characteristics of a Pneumatic Impulsive Actuator for Robotic Colonoscopy System," MS Thesis, Hanyang University, Seoul.