

자율이동 대장 내시경을 위한 공압구동기의 이동 특성

김병규* · 이진희* · 박지상* · 임영모* · 박종오* · 김수현** · 홍예선***

**Movement characteristics of pneumatic actuators
for the semi-autonomous colonoscopic system**Byungkyu Kim, Jinhee Lee, Jisang Park, Young Mo Lim,
Jong-Oh park, Soo Hyun Kim and Yeh-Sun Hong**Key Words :** Colonoscope(대장 내시경), Pneumatic actuator(공압 구동기), Reactive actuator(반발력 구동기), Impact actuator(충돌 구동기), Contact load(접촉 하중), Inchworm(인치웜).**Abstract**

In recent years, as changing the habit of eating, the pathology in the colon grows up annually. For that reason, the colonoscopy is generalized. But it requires much time to acquire a dexterous skill to perform an operation. And the procedure is painful to the patient. Therefore, biomedical and robotic researchers are developing a locomotive colonoscope that can travel safely in colon. In this paper, we propose a novel design and concept of semi-autonomous colonoscope and two actuators for the micro robot. The micro robot comprises camera and LED for diagnosis, steering system to pass through the loop, pneumatic actuator and bow-shaped flexible supporters to control a contact force and to keep the space between colon wall and the actuator. For actuating mechanism, we suggest two models. One is based on the reaction force, and the other is impact force. In order to validate the concept and the performance of the actuators, we carried out the preliminary experiments in rigid pipes.

1. 서 론

대장 내시경은 직장 및 대장에 있을 수 있는 다양한 병변을 진단하는데 매우 유용하다. 기존의 내시경은 부드럽게 굽어지지 않을 뿐만 아니라 말단 부분만을 시술자가 조작할 수 있도록 되어있다. 따라서 원활한 시술을 위해서는 의사의 오랜 경험과 기술이 필요하다. 특히, 기존의 대장 내시경을 이용하여 시술할 때에는 α, γ 루프를 통과하면서 환자는 고통이나 불편함을 느끼게 된다. 따라서 이러한 기존의 내시경을 대체할 자율이동이 가능한 마이크로 로봇의 필요성이 제기되고 있다.

자율 이동 대장 내시경의 개발에 대한 연구는 다양하게 진행되어 왔다. Ikuda, et al (1988)는 처음으로 "MEDIWORM"이라는 이름으로 인치웜

(inchworm) 방식의 구동 방식을 제안하였다⁽¹⁾. P. Dario, et al 는 2 개의 수축 팽창이 가능한 고정 장치를 직렬로 연결한 인치웜 방식을 채택하여 개발하였다⁽²⁾. 여기서 고정 장치는 미세한 구멍을 통해 장에 흡착하는 방식을 채택하였다. Joel Burdick, et al 은 팽창식 풍선 방식의 고정 장치를 장의 주름에 맞춰 고정 및 진행하는 방식을 취하였다⁽³⁾. Sanjiv Kumar 는 공압을 이용한 인치웜 구동방식과 vision-guided 진행 및 조향 방식을 채택하였다⁽⁴⁾. 이것은 진공 컵이라는 개념의 고정장치를 고안하여 크게 변화하는 대장의 지름에 적절히 대처하도록 하였다. 조향은 이미지와 촉각센서에 의한 종합적 자료를 토대로 이루어지도록 했다.

위에서 살펴본 바와 같이 대부분의 구동 방식이 인치웜 방식을 채택하였다. 그러나 여전히 굽 변하는 대장의 지름에 적절히 대처하는 고정장치의 개발이 큰 문제시되고 있다. 또한 흡착 방식의 고정장치는 대장에 자국을 남기게 되고 그러한 자

* 한국과학기술연구원(KIST)

** 한국과학기술원(KAIST)

*** 한국항공대학교

국은 병의 흔적으로 오인될 수 있는 소지를 가지고 있으므로 적당한 고정방식이 되기 어렵다.

본 연구에서는 새로운 자율이동 방식의 내시경을 제시하였다. 새로운 내시경에 사용될 구동기를 두 가지 방식으로 제안하고 각각의 이동 특성을 고찰하였다. 실험을 통하여 개념적 설계의 타당성을 확인하였다.

2. 자율이동 내시경의 구성

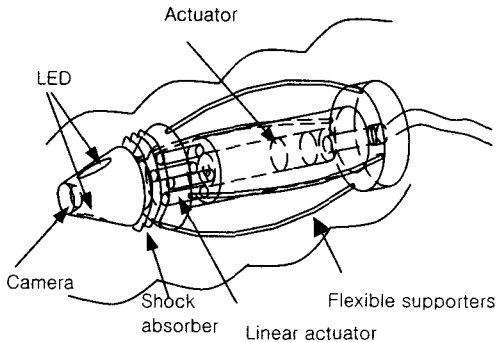


Fig. 1 Schematic of locomotive colonoscope

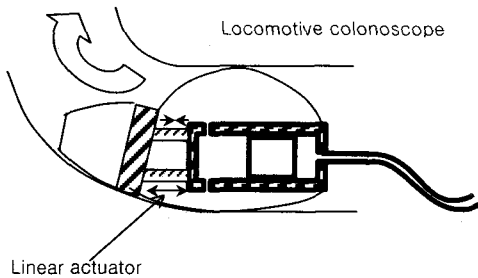


Fig. 2: Concept of colonoscope steering system

새롭게 제안된 내시경은 Fig. 1 과 같이 진행을 위한 공압 구동기, 팽기추벽 통과를 위한 활 모양의 유연한 지지부, 조향을 위한 선형 구동기, 진단을 위한 카메라와 LED 부로 구성된다. 또한 공압 구동기에서 전달되는 충격력으로부터 카메라를 보호하기 위한 완충부가 필요하다.

공압 구동기는 공압 실린더와 비슷한 구조인데 그 길이는 변화하지 않고 단지 내부에 피스톤이 존재한다. 이러한 공압 구동기는 진행 방향으로 운동량을 전달하는 역할을 한다. 활 모양의 지지부는 대장과 구동기 사이의 간격을 유지하는 역할과 내시경 자체와 대장 벽과의 힘을 적절히 조절

하는 역할을 한다.

대장 내에 존재하는 α, γ 루프를 통과하기 위해서는 Fig.2 와 같이 선형구동기를 조절하여 그 모양과 모멘트 차에 의해서 극복해 나간다.

연구의 대상은 공압 구동기와 유연 지지부에 중점을 두고 진행하였다.

3. 공압 구동기

3.1 반발력 공압 구동기

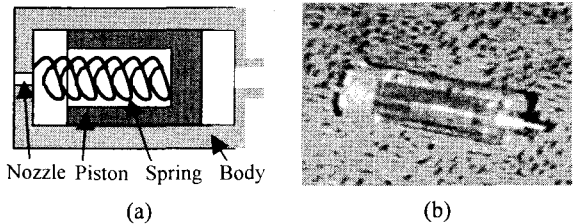


Fig. 3 Pneumatic reactive actuator

3.1.1 반발력 공압 구동기의 구조

반발력 공압 구동기의 간단한 구조를 Fig. 3 에 나타내었다. Fig. 3-(a)에서와 같이 이 반발력 구동기는 코일 스프링, 피스톤, 실린더와 같은 몸체로 구성된다. 피스톤은 스프링과 공기압에 의해 실린더 안에서 양방향으로 이동이 가능하다. 공압선이 연결되는 반대 부분에는 노즐이 존재하여 피스톤의 이동이 용이하도록 돕는다. 성능평가를 위해 실제 제작된 구동기는 Fig. 3-(b)와 같다. 실린더의 바깥 지름은 15mm, 피스톤의 지름은 6mm 이다. 실린더 전체 길이는 43mm 이고 피스톤에는 스프링을 안내하기 위한 홈이 내부에 존재한다. 여기서 사용한 압축 스프링은 지름 4mm 이며 피스톤을 원래의 위치로 되돌리는 역할을 한다.

3.1.2 반발력 구동기의 이동 원리

반발력 구동기의 이동 원리는 Fig. 4 에 나타내었다. 밸브가 열리면서 압축 공기가 공압선을 따라 실린더 내로 유입되면, 피스톤은 전진하게 되고 그로 인한 반발력으로(pneumatic effect) 실린더는 그 반대 방향으로 움직이게 된다. 이때 밸브가 닫히면 스프링의 반발력(spring effect)으로 인해 피스톤은 뒤로 움직이고 이로 인해 몸체는 전진하는 방향으로 움직이게 된다. 이러한 과정을 되풀이하여 전체적으로 구동기는 전진 또는 후진을 하게 된다.

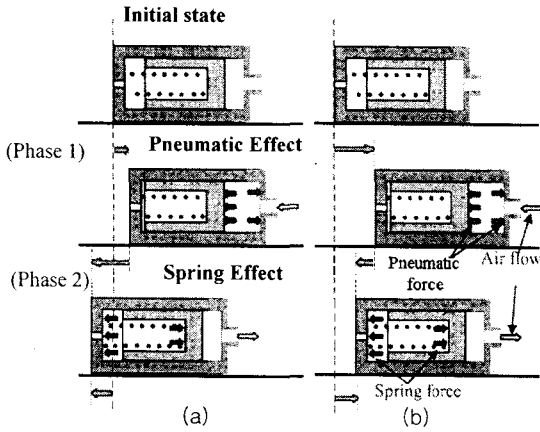


Fig. 4 Principle of movement (a) Forward movement (Pneumatic effect < Spring effect) (b) Backward movement (Pneumatic effect > Spring effect)

Fig. 4 에서 보는 바와 같이, 살펴본 바와 같이, 구동기의 이동 특성을 지배하는 것은 공기압에 의한 반발력과 스프링의 반발력으로 크게 대표할 수 있다.

3.1.3 반발력 구동기의 이동 특성

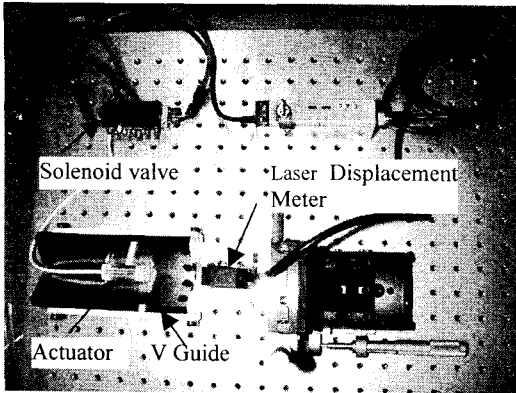


Fig. 5 Experimental setup

구동기의 이동 특성을 살펴보기 위한 실험 장치는 Fig. 5 와 같다. 구동기는 V 블록에 의해 한 방향으로 구속되며, 이동 특성은 레이저 거리 측정 장치(Keyence LB-72)로 측정된다. 밸브가 ON 되었을 경우는 실린더 내로 공기가 유입되고 OFF 되었을 때는 실린더 내의 공기가 대기 중으로 빠져나가게 된다. 밸브 ON/OFF 와 측정치 기록은 PC 에 의해 실시간으로 이루어진다.

반발력 구동기의 이동 특성을 Fig. 6 에 나타내었다. 실험 환경은 공기압 50kPa, 스프링 상수 88.2N/m, ON/OFF time 은 각각 45msec 로 설정했다.

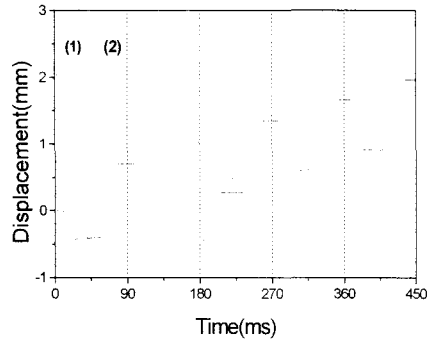


Fig. 6 The moving characteristics of actuator

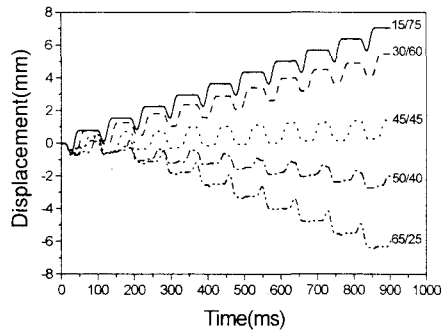


Fig. 7 The characteristics of movement for various duty ratio of solenoid valve (On time / Off time [ms])

(1)번 구간은 밸브의 ON, (2)구간은 밸브의 OFF 를 나타낸다. 공압 반발력에 ON time 에는 후진을, OFF time 에는 스프링 반발력에 의해 전진하는 특성을 Fig. 6 을 통해 확인할 수 있다. 이것은 스프링에 의한 효과가 공압 반발력에 의한 효과보다 크게 작용하기 때문에 나타나는 현상이다.

공압에 의한 효과를 크게 하고 스프링 효과에 의한 운동을 상대적으로 작게 하면 구동기가 후진을 할 수 있을 것이다. 이러한 사실을 검증하기 위한 실험 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 위와 동일한 환경에 스프링 상수는 75N/m 으로 설정하였다. 밸브 주기는 위와 같이 90msec 내에서 ON/OFF time 의 비율을 변화하여 실험을 수행하였다.

ON time 의 비율이 증가할수록 공압 반발력의 효과가 지배적이 되어감을 Fig. 7 을 통해 확인할 수 있었다. 노즐과 공압선에 의한 영향은 받지 않도록 제한하면 공기압은 ON time 에 비례한다. 이와 같은 결과는 압력을 증가시켜가며 수행했을 경우도 같은 결과를 얻었다. 반발력 구동기의 속도와 이동 방향은 ON/OFF time 의 비로 간단히 조절할 수 있음을 확인하였다..

3.2 충돌 공압 구동기

3.2.1 충돌 구동기의 구조와 원리

공압 반발력 구동기는 간단히 ON/OFF time 을 조절함으로써 방향과 속도를 조절할 수 있었지만 스프링 상수가 크면 피스톤이 반대편 벽에 충돌하는 현상 등이 발생할 수 있다. 이것은 구동기의 운동을 조절하는 데 어려움을 줄 뿐 아니라 전체적인 성능에 문제를 야기할 수 있다

이러한 문제를 해결하기 위해 또 다른 방식의 구동기로서 공압 충돌 구동기를 제안하였다. 이것은 피스톤과 실린더의 충돌에 의해 이동하는 방식으로 그 구조는 반발력 구동기와 유사하나 내부에 스프링이 존재하지 않는다. 이 구동기는 스프링을 사용하지 않는 대신에 진공 발생기를 사용하여 피스톤을 제 위치로 복귀시키는 방식을 사용한다. 이 구동기는 충돌을 일으키기 위해 높은 공기압을 요구하지만 그로 인해 발생한 힘이 반발력 구동기에 의한 것보다 크기 때문에 높은 추력을 요구하는 경우에 유리하다.

충돌 구동기는 피스톤의 운동량을 실린더 벽에 충격량으로 전달하여 전체적인 운동으로 전환한다. 운동의 초기에는 반발력 구동기와 같이 공기압에 의한 반발력으로 후진하는 특성을 보이고 충돌이 일어나면 전체적으로 전진하는 경향을 나타낸다. 구동기는 한번의 주기에 두번의 충돌을 일으키게 된다. 처음 공기가 실린더 내부로 유입되면 피스톤이 전방으로 충돌을 일으키게 되고, 흡입이 진행되면 실린더의 후방으로 돌아오면서 충돌을 일으키게 된다. 이러한 두번의 충돌의 크기를 조절하여 전체적인 운동의 방향을 결정할 수 있다.

3.2.2 시스템 구성

충돌 구동기의 이동 특성을 알아보기 위한 실험 장치는 Fig. 8 과 같다. PC 기반 ON/OFF time 조절의 개념은 같지만, 두개의 ON/OFF 밸브와 진공 발생기, 피스톤의 충격량을 조절하기 위한 스톱틀

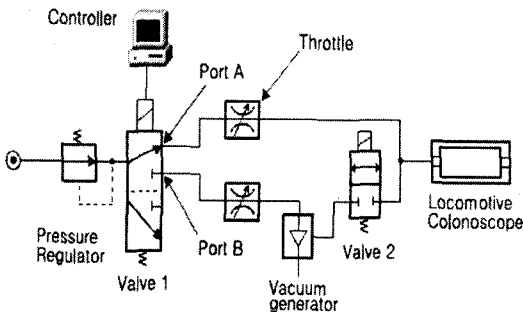


Fig. 8 Configuration of pneumatic system

로 구성된다. 밸브 1 은 구동기의 전체적인 ON/OFF time 을 조절하는 밸브이고 밸브 2 는 ON 상태에서 구동기를 작동하는 압력이 진공 발생기로 흘러 들어가지 못하도록 조절하고 진공의 효율을 높이도록 설치된 밸브이다. 피스톤의 이동 속도와 충돌 크기는 유입되는 유량에 비례하는데 유량의 조절은 두개의 스톱틀이 담당한다. 밸브의 ON/OFF time 은 운동의 주기를 결정한다.

3.2.3 충돌 구동기의 이동 특성

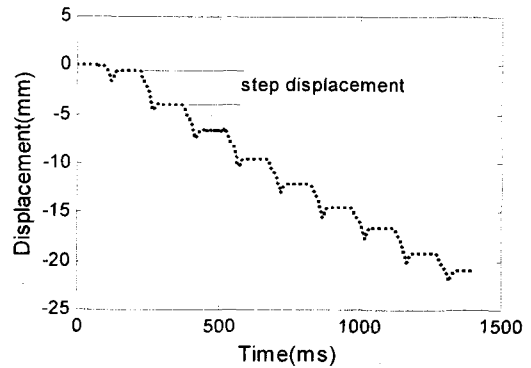


Fig. 9 Movement characteristics of pneumatic impact actuator at inlet pressure 130 kPa

충돌 구동기의 전진과 후진은 전후방의 충돌 정도에 따라 다르지만, 기본적으로 강한 압력으로 피스톤을 밀어내기 때문에 후방으로의 반발력에 의한 초기 이동이 존재한다. 이러한 충돌 구동기의 이동 특성을 Fig. 9 에 나타내었다.

원하는 방향은 전진 방향(+)이지만 충돌 구동기는 초기 반발력에 의한 운동이 지배적이기 때문에 전체적으로 후진하는 방향으로 이동한다. 이러한 초기 이동은 구동기와 주위에 적절한 마찰력을 줌으로써 해결할 수 있는데 여기서는 벽과 구동기와

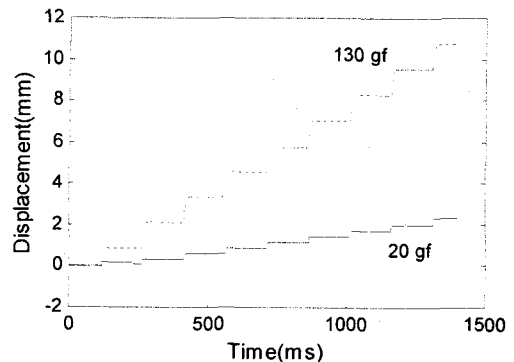


Fig. 10 Movement characteristics of pneumatic impact actuator for two contact loads at 130 kPa

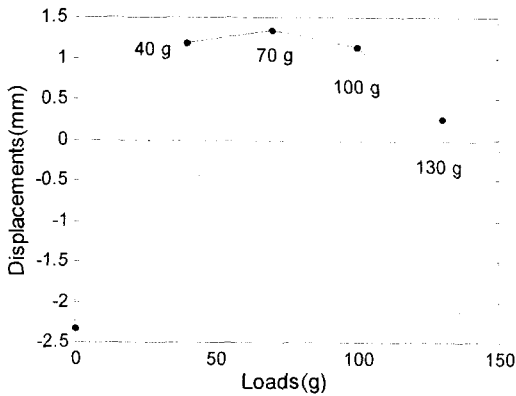


Fig. 11 Step displacements in various contact loads

의 접촉면에 가해주는 힘이라는 의미에서 contact load 라는 표현을 썼다. 적절한 접촉 하중(contact load)을 가할 경우 Fig. 10 과 같은 단계별로 매끈한 전진 특성의 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 접촉 하중을 적절히 조절하면 반발력의 영향을 없애고 충격력에 의해서만 전진하는 것을 보여준다.

적절한 접촉 하중을 가할 수 있다면 구동기의 이동 성능을 최대화할 수 있을 것이다. 이러한 가정에 대한 검증을 위해 다양한 하중에 대한 이동 특성을 Fig. 11 에 나타내었다. Fig.11 의 하중은 접촉 하중을 의미한다. 하중이 70gr 일 때 최대의 이동 거리를 나타냈다. 일정한 압력 조건에 대하여 하중을 적절히 조절함으로써 최대의 이동 거리를 보이는 최적의 접촉 하중이 존재함을 확인할 수 있었다. 이에 따라 유연 지지부를 설치한 구동기로 접촉 하중을 적절히 조절하여 동일 공급 압력 하에서 구동기의 성능을 극대화하기 위한 실험을 수행하였다.

4. 시스템 성능 평가 실험

4.1 유연 지지부를 설치한 공압 구동기

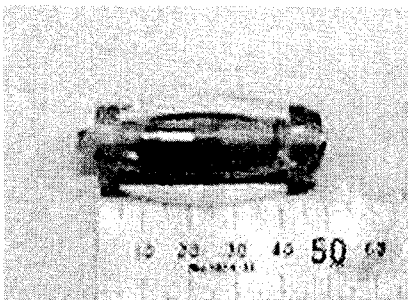


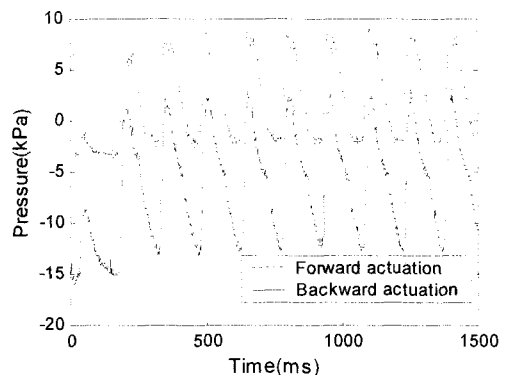
Fig. 12 Prototype with flexible supporters

유연 지지부의 역할에 대한 검증을 위하여 Fig. 12 과 같은 구동기를 제작하였다. 충돌 구동기의 주위에 4 개의 유연 지지부를 설치한 구동기의 길이는 50mm 이며, 유연 지지부에 의해 만들어지는 바깥 지름은 22mm ~30mm 까지 변화가 가능하다. 몸체의 재질은 아크릴이고, 유연 지지부는 super-elastic wire 를 사용했다.

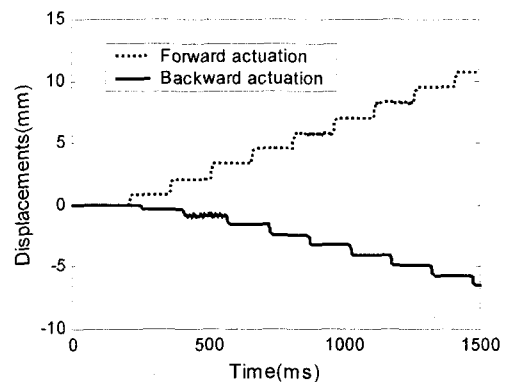
유연 지지부는 변형을 통해 적절한 지름으로 변화가 가능하여 적응 능력을 확보하고 최적의 접촉 하중을 유지할 수 있다.

4.2 아크릴 파이프에서의 성능 실험

테스트는 기본적으로 아크릴 파이프에서 전후진이 가능한 것이냐에 초점을 맞추었다. 실험에는 지름 26mm 아크릴 파이프를 사용하였다. 유연지지부가 아크릴 파이프에 가하는 힘은 이동성능에 있어서 최적에 가까운 80gr 으로 유지하였다. 유연 지지부에 의해 구동기가 최초 뒤로 밀리는 운동은 방지했으며 구동기의 전후진은 전적으로 피스톤의



(a) Pressure profiles



(b) Characteristics of movement

Fig. 13 Experimental results of the prototype moving backward and forward in a rigid pipe

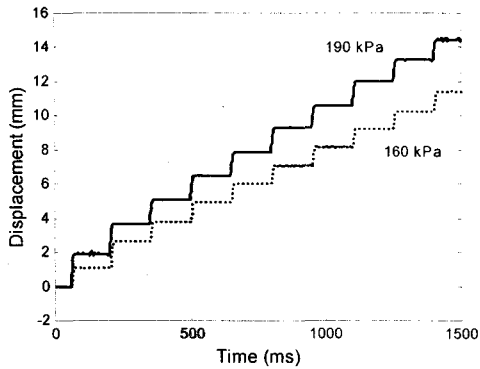


Fig. 14 Forward movement performance in two different pressures

전후방 충돌에 의하게 된다. 따라서 Fig. 13-(a)와 같은 형태의 압력 유형을 실린더 내로 유입 시키면, Fig. 13-(b)와 같은 전후진을 만들어낼 수 있다. 여기서 압력치의 '0'는 대기압을 의미한다. 이와 같은 실험을 통해 구현된 유연 지지부에 의해 시스템이 후방으로 밀리는 현상을 방지하고 원하는 방향으로 이동시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 구동기의 전후진은 압력 유형을 다르게 입력함으로써 원하는 동작을 만들어낼 수 있었다.

위의 구동기에 대한 전진 성능을 Fig. 14 에 나타내었다. 여기서 주어진 압력은 게이지 압력이며 실제 실린더 내부에 전달되는 압력은 아니다. 압력을 높여주면 전진 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

두 가지 형태의 공압 구동기를 가지는 자율이동 대장 내시경의 새로운 디자인을 제안하였다. 첫번째 구동기는 압축된 공기와 스프링의 반발력을 이용하는 반발력 구동기이다. 이것은 밸브의 작동 시간을 적절히 조절하여 전후진 및 속도를 쉽게 조절할 수 있었다. 또다른 하나는 충돌 구동기로서 피스톤과 실린더의 충격량을 이용하여 이동하는 방식이다. 이것은 마찰력을 이용하여 공기 유입 시에 발생하는 반발력에 의한 상대 이동을 방지하고 충돌 방향으로만 이동하도록 설계되었다. 반발력에 의한 이동 방지를 위한 유연 지지부의 개념은 실험을 통해 유용성이 입증되었다.

이러한 유연 지지부를 사용하기 위해서는 접촉 센서의 장착을 통해 스스로 최적의 접촉 하중을 유지할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다. 또한 대장에서의 이동을 시뮬레이션과 임상실험을 통해

예측하는 것이 필요하며 그에 따른 적절한 설계 변형이 필요할 것이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) K. Ikuta, M. Tsukamoto, S. Hirose, 1988, "Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 427~430.
- (2) P. Dario, M.C. Carroza, L. Lencioni, B. Magnani, S. D'Attansio, 1997, "A micro-robotic system for colonoscopy", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Albuquerque (NM), pp. 1567~1572.
- (3) H.D. Hoeg, A.B. Slatkin, J.W. Burdick, 2000, "Biomechanical Modeling for the Small Intestine as Required for the Design and Operation of a Robotic Endoscope", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Francisco (CA), pp.1599~1606.
- (4) S. Kumar, I.M. Kassim, V.K. Asari, 2000, "Design of a vision-guided microrobotic colonoscopy system", Advanced Robotics, Vol. 14, No. 2, pp. 87~104