

유공압 부품이 내장된 인쇄회로기판을 활용한 내시경 수술용 기복기의 개발

이희남¹ · 김인영² · 지영준³

¹한양대학교 의용생체공학 협동과정

²한양대학교 의과대학 의공학교실

³울산대학교 의공학과

Development of the Insufflator for Endoscopic Surgery using the Fluidic System in Printed Circuit Board

Heenam Lee¹, Inyoung Kim² and Youngjoon Chee³

¹Interdisciplinary program of Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

²Dept. of Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

³Dept. of Biomedical Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

(Received November 2, 2010. Accepted February 5, 2011)

32

Abstract: The insufflators in endoscopic surgery supply carbon dioxide to make the air-filled cavity in the abdomen. It contains many kinds of pneumatic and electronic parts and they are connected with the air tubes and electrical wires. The printed circuit boards (PCB) perform wiring, holding and cooling tasks in electronic systems. In this study, the PCB is used as the air channel for insufflators to decrease the cost, volume, and the malfunction according to aging of the device. Three layers of PCB made of FR4 are combined with prepreg as adhesive which has the internal airway channel according to the design. By mounting the pressure sensors and valves, the PCB based fluidic system is implemented. After calibration of flow sensor, the flow rate of the gas also can be measured. The climate test, temperature test, and biocompatibility test showed this idea can be used in insufflators for laparoscopic surgery.

Key words: insufflator, pressure control, laparoscopic surgery, PCB, flow sensor, endoscopy

I. 배 경

담낭절제술, 충수절제술과 같은 외과적 수술뿐 아니라, 자궁 및 주변에 대해 실시되는 부인과 영역의 수술에서 복강경(laparoscopy)등을 이용한 내시경 수술(endoscopic surgery)이 널리 행해지고 있다[1-2]. 복부에 대한 내시경 수술이 진행되기 위해서는 광학계와 각종 수술 도구가 활동할 수 있

는 복강내 공간을 확보해야 하는데, 이를 위해서 수술 전에 이산화탄소(CO₂)를 공급하여 내부 장기(internal organs)와 복벽(abdominal wall) 사이에 공기가 찬 공간(기복: air-filled cavity)을 만들어 주는 장비가 기복기(gas insufflator)이다(그림 1). 기복기는 복강의 압력을 대기압보다 약 12 mmHg 높게 유지하도록 이산화탄소를 공급한다. 복강경 수술 기구를 교체하거나 흡인기(suction device)를 사용할 때, 기복 내부의 압력이 떨어지면 자동으로 기체를 주입하여 설정된 압력이 유지되도록 제어한다.

기복기는, 고압의 이산화탄소(80~100 기압)를 2단계에 걸쳐 3~4 기압으로 낮추는 감압 레귤레이터, 제어기에 설정된 유속(flow rate)에 따라 기체를 흘려 줄 수 있는 유속 제어 장치, 공압 밸브, 복강내의 압력이 튜브로 연결되어 압력을

Corresponding Author : 지영준

울산광역시 남구 대학로 102 울산대학교 의공학과

TEL: +82-252-259-1305 / FAX: +82-52-259-1306

E-mail: yjchee@ulsan.ac.kr

본 연구는 한국연구재단에서 시행하는 일반연구자 지원사업(2009-0064912)의 지원으로 수행되었음.

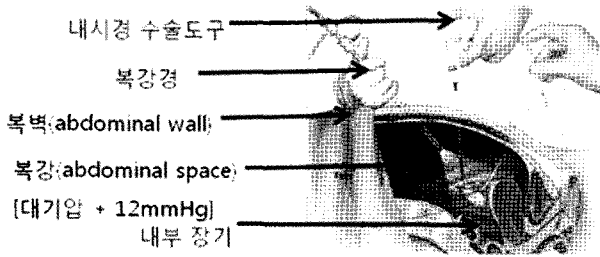


그림 1. 복강경 수술과 기복기의 역할
Fig. 1. The role of insufflators during laparoscopic surgery

측정하는 압력 센서 등의 장치로 구성된다(그림 2). [3] 이를 위한 각종 유공압 부품과 함께 마이크로컨트롤러가 중심이 되는 전자회로로 구성되어 있다. 현대적인 내시경 수술에 있어 필수적인 의료 장비로 사용되고 있는 기복기는 복잡한 배관과 유공압 부품, 전자 회로가 결합되어 있어 부피도 크며, 복잡한 조립 과정을 거쳐야 하고, 장시간 사용시 공기 튜브 등의 공압 부품의 내구성이 떨어지는 문제가 있다.

한편 전자회로 제작에 사용되는 인쇄회로기판(PCB)이 다층으로 제작되는 특성을 활용하여 기판 내부의 유체가 흐를 수 있는 채널을 확보하고, 이에 추가적으로 필요한 센서와 액추에이터를 장착시킨 ‘PCB기반 유공압 시스템’ (PCB based fluidic system)이 개발되어 밸브, 펌프, 압력 센서가 탑재된 마이크로 시스템이 개발되고 있다[4-5]. 이 기술은 대량 생산에 적합한 기술로, 유공압 부품과 이들의 측정 및 제어에 필요한 전자부품을 하나의 기판에 장착하여 대량 생산을 할 때, 원가절감 및 고장 가능성 감소, 소형화 등의 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 PCB 기반 유공압 기술을 50 liter/min까지의 기체의 흐름이 필요한 복강경용 기복기에 응용한 사례를 보고한다. 이 기술이 복강경용 기복기에 사용될 수 있다면, 장비의 소형화는 물론이고, 양산시 생산 원가 절감, 유공압 부품의 최소화에 따른 고장을 감소 등의 긍정적 효과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다. 기존의 기복기의 구성과 작동 과정을 기술하고, 이 중에서 PCB 기반 유공압 기술로 대체될 수 있는 부분을 구현하여, 실험한 결과를 요약하였다.

II. 방 법

1. 기존 복강경용 기복기의 구성과 제어 조건, 사용되는 유공압 부품

그림 2에서 보는 바와 같이 기복기로 유입되는 이산화탄소는 통상 80~100 기압의 고압이다. 이를 1~2 단계의 감압 조절기를 통해 일반적인 유공압 부품으로 다룰 수 있는 낮은 압력으로 낮춘다. 통상 3~4 기압의 압력으로 낮추는데, 이 압력도 대기압보다는 상당히 높은 압력이어서 별도의 추진 동력

없이, 압력 차이에 의해 복강으로 이산화탄소가 밀려들어가는 구조로 되어 있다. 수술이 시작되는 초기 단계에서는 40~50 liter/min 정도의 빠른 속도의 기체 유입이 필요하다. 한편 수술이 진행중인 동안은 낮은 속도로 이산화 탄소를 주입할 수 있어야, 불필요한 초과 압력(overshooting) 생기지 않는다. 수술중에도 흡인기가 사용되거나, 수술 기구가 포트에서 빠지는 등의 상황이 발생하면 복벽이 내려가 수술에 방해가 되거나 시야 확보가 어려워 지므로 다시 50 liter/min 수준의 고속의 기체 유입이 필요하다. 정리하면 기복기에서는 기복 내의 압력을 계속 측정하면서 미리 설정된 압력으로 부풀려 수술 중 공간을 확보하며, 저속 (1~2 liter/min)에서 고속 (40~50 liter/min)까지, 원하는 속도로 기체의 유입이 가능하도록 설계되어야 한다.

이를 위해서는 2~3개의 감압 조절기를 포함하여 3~4개의 개방/폐쇄 제어 밸브, 유속 조절 장치, 튜브를 사용한 각종 배관, 안전 장치로서의 배기 밸브, 유속 측정 장치 등의 유공압 부품이 필요하다. 그림 2는 수술실에서 사용되는 제품화된 기복기의 사진으로 (ML-G, (주)엠지비엔도스코피, 서울, 대한민국), 유공압 부품이 부피를 많이 차지할 뿐 아니라 조립 시 많은 인력이 소요되며, 공압 부품의 내구성에도 한계를 가진다. 또한 기복기의 기능을 구현하기 위해서는 마이크로 컨트롤러를 비롯한 표시, 제어에 사용되는 각종 전자 회로가 함께 필요하게 되며, 유공압 부품과는 튜브 및 전선으로 복잡하게 연결되어야 한다. 이러한 문제를, 유공압 부품의 부피가 최소화 되어 전자 회로가 조립된 PCB에 통합되어 제작될 수 있다면 앞서 기술한 한계점을 극복할 수 있다.

2. PCB 기반 유공압 시스템의 기복기 응용

마이크로 시스템에서 연구되는 PCB 기반의 유공압 시스템은 두 장의 PCB에 마이크로 채널을 형성하여 맞붙이고 채널의 옆면 벽에 구리 박막을 입혀 공간을 형성한다. System on Board 를 위하여 채널뿐 아니라, 밸브, 압력 센서, 펌프와 같은 부품을 보드에 구현이 가능하다. 그러나 이러한 기

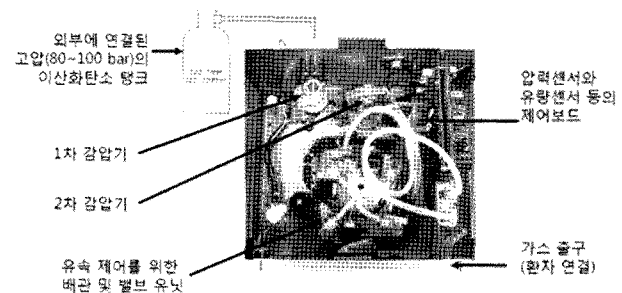
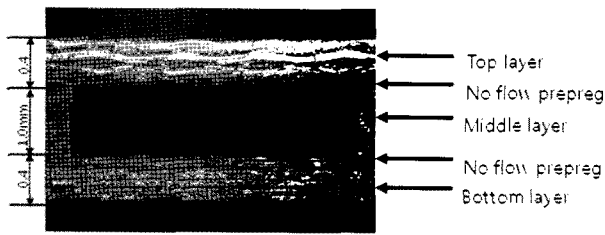


그림 2. 상용화된 기복기의 내부 구성 (ML-G, (주) 엠지비 엔도스코피, 서울, 한국)
Fig. 2. Internal structure of commercialized insufflators (ML-G, MGB Endoscopy, Seoul, Korea)

슬은 모두 수십 μm 에서 수백 μm 에 이르는 마이크로 시스템에 사용하는 기술이고, 수십 liter/min까지의 상대적으로 높은 유량의 기체를 제어하는 장치를 만들기에는 적합하지 않다.

기복기로의 활용을 위해서는 수 mm크기의 채널을 형성해야 하는데, FR4로 만들어진 PCB 3장을 겹쳐서 사용한다. 그림 3에서 보듯이 두께가 0.5 mm인 PCB를 상하로 덮고, 채널을 형성하는 두께 1 mm의 중간층을 겹쳐서 붙여 내부에 공기 통로를 형성한 PCB를 보여주고 있다. PCB간의 접촉은 프리프레그(prepreg)를 사용하여 접합시키면 높은 압력에서 기밀이 유지된다. 중간층은 밀링 가공을 통하여 미리 설계된 패턴의 채널을 내장시킬 수 있도록 한다. 모든 PCB 제조 공정의 마지막에 중간층 PCB가 만든 공간으로 구멍을 뚫어 다른 부품을 연결하는 방식을 통해 유공압 부품과 전자 부품이 한 보드에 조립될 수 있는 시스템으로 구성한다.



34

그림 3. 공기 통로의 단면
Fig. 3. The Cross section of airway channel

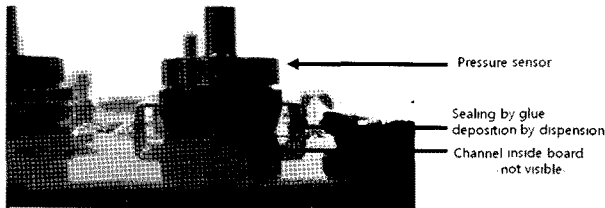


그림 4. 공기 통로가 포함된 PCB 위에 장착한 압력 센서
Fig. 4. Mounting of Pressure Sensor on the airway channel

3. 기존 압력 센서의 연결

기복기의 핵심 부품 중 하나인 공압 센서는 차동 압력 센서로서 대기 압력을 기준으로 복강 내부의 압력을 정량화하는데 사용한다. 통상의 경우라면 컨트롤러가 내장된 전자 보드에 센서를 조립하고, 공압부에서 튜브를 연결하여 사용한다. 본 시스템의 경우는 PCB에 공압 관련 부품이 모두 구현되어 있고, 특히 배관이 필요 없는 구조이므로 압력센서를 필요 위치의 배관(PCB 내부의 통로)과 연결해야 한다. 차동 압력센서의 대기압 측정용 구멍이 기판과 접하는 쪽 표면에 구멍이 나 있으므로, 이를 에폭시 레진 접착제(35-Z-10R, Solder Chemistry, Landshut, Germany)로 공기 채널에 뚫은 구멍과 맞대어 부착한 후 센서의 핀에 납땀을 수행하면 압력 센서의 연결이 가능하다(그림 5). 이 기법을 활용하여, 개구부를 사이에 둔 두 개의 압력 센서에서 신호를 측정하여, 유속을 측정할 수 있는 유량계로 제작할 수 있다. 유량계로 사용을 위해서는 두 측정 지점 사이에 공기저항이 존재하여 압력 강하가 일어나야 이로부터 유속을 측정할 수 있다. 본 시스템에서는 1 mm × 6 mm 단면의 45 mm 길이의 배관을 통과하는 것을 저항으로 간주하여 유량 센서로 구현하였다.

III. 결 과

그림 5에서 보는 바와 같이, PCB 기반 유공압 기술을 적용하여 기복기를 구현하였다. 3개의 밸브가 사용되고, 3개의 압력 센서(하나는 복강의 압력을 측정하고, 두 개는 유속을 측정하기 위한 센서)를 사용하여 기복기에서 사용되는 모든 공압부품을 공기 통로가 포함된 하나의 기판위에 조립함으로써, 제조 경비를 줄이고 내구성을 향상시킬 수 있다. 구현된 기복기의 기능상의 사양과 PCB에 내장된 공기 통로의 내구성 검증 실험 결과는 다음과 같다.

공기통로의 단면은 사각형으로 폭이 1 mm 에서 8 mm, 높이가 1 mm 에서 2 mm 로 경로에 따라 다르게 제작되어

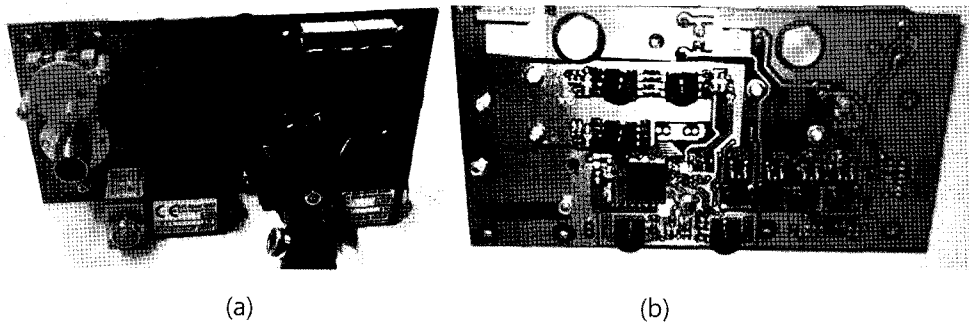


그림 5. 공압부품과 전자부품이 하나의 PCB에 조립된 기복기 모듈 사진 좌측은 공압 부품면, 우측은 전자 부품면
Fig. 5. Fluidic system in PCB for gas insufflator. Pneumatic parts side(left) and electronic part side(right)

표 1. PCB 내부에 형성한 공기 통로의 내구성 검사 결과
Table 1. Reliability test condition and results

신뢰성 검사 결과	
최대 압력에 대한 내구성 (Burst pressure)	@ room temperature, > 20 기압
습도와 온도에 대한 검사	80°C / 80% Humidity for 7days under pressure of 10 기압
내열 검사	-40°C - 80°C - 500 Cycles (IPC TM5050)
최대 작동 온도	@10 기압 burst at 135°C

있다. 최대 20기압까지의 압력을 견딜 수 있어, 통상 4~5 기압으로 압력을 낮추어 공급하는 본 시스템에서 사용하기에 무리가 없고, 최대 유속이 50 리터에 이르러 임상적 사용에 고속으로 복강을 형성하는 데에 충분하였다.

온도와 습도에 대한 내구성을 점검하기 위해서 온도 80°C, 습도 80%의 환경에서 10기압으로 7일간 보관한 후 검사하였으며, 외관상의 변형이나 기능상의 문제가 관찰되지 않았다. 열에 대한 내구성을 검사하기 위하여 135°C의 3기압의

공기로 가하였으나 접합부에 누출이 생기거나 작동상의 이상은 없었다. 반복적인 사용에 대한 내구성 시험을 위해서 10기압의 환경에서 -40°C에서 +80°C 까지 500회를 반복 노출시켰으나 공기 통로의 기밀은 잘 유지되었다. 이산화탄소가 기복기를 통과하여 인체로 주입이 되므로 생체적합성을 점검해야 한다. 이를 점검하기 위하여 기복기로 인입되는 가스와 기복기를 통해 나온 가스를 질량 분광 분석을 통해 비교해 보았으나 차이가 없었다. PCB에 높은 전류가 흘러 기판의 온도가 올라가면, 인체에 유해한 성분이 용출되어 환자에게 문제를 일으킬 가능성을 생각할 수 있겠으나, 본 장치의 특성상 전력을 많이 소모하는 소자가 없어 현실적으로 80°C 이상의 온도로 올라갈 가능성은 없다고 할 수 있다.

기체의 유속을 측정하는 유량 센서의 구현을 위해서 본 시스템에서는 저항 성분의 채널 양단에 각각 압력 센서를 위치시켜 압력이 떨어진 정도를 시간당 흐르는 유량에 비례하여 분석하는 기법을 사용하였다. 그림 7은 구현 결과를 보여 준다. 1 mm × 6 mm의 단면을 길이 45 mm를 흐른 기체의 압력을 양단에 위치시킨 센서 A, B에서 측정하는 것

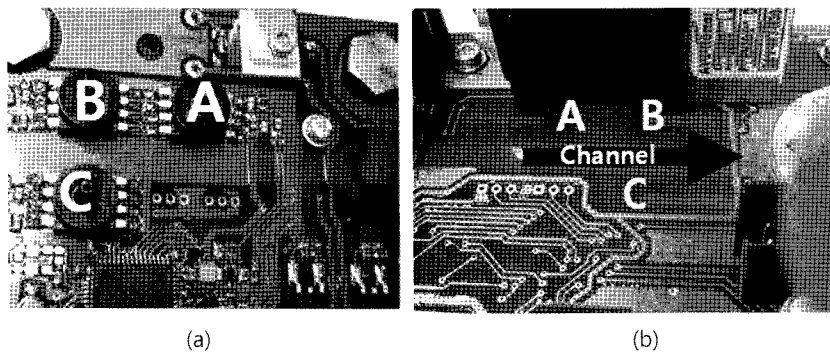


그림 6. 두 개의 압력 센서(A, B)와 공기 통로(channel →)를 통해 구현한 유량 센서 (a) 전자 부품면으로 A, B 두 개의 압력 센서가 채널 양단의 압력 강하를 측정 (b) 공압 부품면으로 화살표가 표시된 방향으로 공기의 흐름이 있을 때, 유량을 측정

Fig. 6. Implementation of flow sensor using two pressure sensors (A, B) between air channel in PCB (a) electronic parts side view. Two sensors measure the pressure difference between airway channel (b) pneumatic parts side view. The arrow, A, and B indicates the location of air channel and pressure sensors respectively

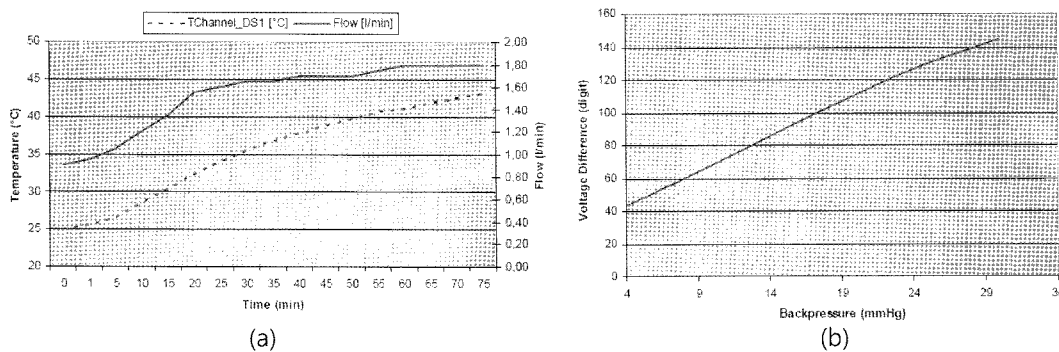


그림 7. 기체의 온도 및 배압의 변화에 따른 유속 측정 오차 (a) 온도 변화에 따른 측정치 오차 (b) 배압에 따른 측정치 오차
Fig. 7. Flow rate measurement error based on the temperature and back pressure (a) Drift for the temperature (b) Error for the back pressure

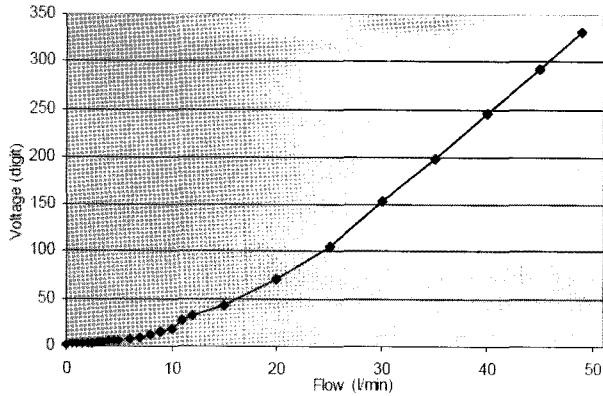


그림 8. 온도와 배압을 보정 한 상태에서의 유량에 따른 센서의 출력
Fig. 8. Output of the flow rate sensor after calibration of temperature and back pressure

이다. 이를 위해 두 개의 압력 센서의 drift와 offset의 차이를 보정해 주는 과정이 필요하다. 온도에 대한 drift도 달라 보정해 주어야 한다.

그림 7(a)에서는 측정 기체의 온도에 따라 유량 측정치의 차이를 보여주고 있다. 차동 압력뿐 아니라 배압(Back Pressure)에 따른 측정치 오차도 문제가 된다. 그림 7(b)에서는 1 liter/min의 일정한 유속을 배압을 달리했을 때 측정 전압을 보여주고 있다. 이상적인 경우라면 그림 7의 모든 그래프는 1 liter/min의 수평선을 결과로 보여야 하겠으나 온도와 배압에 따라 큰 drift 신호가 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 점들이 유속 측정 오차의 원인이 될 수 있으며, 이를 보정하여 유량 센서 시스템을 구현하였으며, 그림 8에서 보는 바와 같이 유량에 비례하여 5% 이내의 오차범위로 측정할 수 있었다.

IV. 토의 및 결론

복강경 수술에 있어 필수적인 기복기를 구현함에 있어 전통적인 공기 튜브를 유공압 부품에 연결하는 방식을 개선하여 PCB 내부에 공기 통로를 형성하여 부피, 제조비용을 줄이고 내구성을 향상시켰다. 압력 센서를 공기 통로에 직접 장착함으로써 복강의 내부 압력을 측정할 수 있었고, 두 개의 압력 센서 사이에 일정 저항 성분을 위치 시킨 후 차동 압력을 측정하여 유량을 측정할 수 있었다. 유량 센서를 구현하는 과정에서는 두 개의 센서의 개별 편차뿐 아니라, 온도에 대한, Back Pressure 에 대한 drift를 보정해 주는 과정이 필요했다. 결과적으로 오차 5% 이내로 측정하여 기복

기 구현을 완료하였다.

마이크로 시스템에서 연구되는 PCB 기반의 유공압 시스템은 두 장의 PCB에 마이크로 채널을 형성하여 맞붙이고 채널의 옆면 벽에 구리 박막을 입혀 공간을 형성한다. System on Board 를 위하여 채널뿐 아니라, 밸브, 압력 센서, 펌프와 같은 부품을 보드에 구현이 가능하다. 그러나 이러한 기술은 모두 수십 μm 에서 수백 μm 에 이르는 마이크로 시스템에 사용하는 기술이고, 수십 liter/min까지의 상대적으로 높은 유량의 기체를 제어하는 장치를 만들기에는 적합하지 않다.

경우에 따라서는 공기 유량제어용으로 개발된 특수한 부품을 사용하여 기복기를 구성하기도 한다[6]. 이 경우도 높은 압력의 공기를 입력시키고 통과시키는 관의 단면적을 조절하여 결과적으로 유량을 조절하는 방식인데, 관의 단면적을 변경시키기 위한 스테핑 모터가 사용되며 제어가 포함 되어 비용이 비쌀 뿐 아니라 부피도 많이 차지하게 되는 단점이 있다. 본 논문에서 사용한 PCB 기반 유공압 기술을 사용한 제품이 생산성과 조립성에서 더 우수하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 초소형 장비에 사용되는 PCB 기반 유공압 기술[7] 50 liter/min의 높은 유량의 장비에 응용 사례를 보고하였다. 이 기술은 액체, 기체의 흐름과 압력을 제어해야 하는 시스템에 활용이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] G. Meeks, "Advanced laparoscopic gynecologic surgery," *Surgical Clinics of North America*, Vol. 80, No. 5, pp. 1443-1464, 2000.
- [2] A. Kong, C. Tran, and M. Stamos, "Laparoscopic-assisted colectomy: technique and discussion," *Surgical Technology International*, Vol. 15, No.2, pp. 95-101, 2006.
- [3] E. Verdaasdonk, L. Stassen, M. Elst, T. Karsten T, and J. Dankelman, "Problems with technical equipment during laparoscopic surgery. An observational study." *Surgical Endoscopy*, Vol. 21, No. 2, pp. 275-279, 2007.
- [4] S. Gassmann, I. Ibendorf, and L. Pagel, "Realization of a flow injection analysis in PCB technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, No.8, pp. 231-235, 2007.
- [5] S. Gassmann, and L. Pagel, "Printed Circuit Boards in Micro Fluidic Applications," *Actuator 2008*, 11th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, June 2008, pp. 230-233.
- [6] <http://www.world-of-medicine.de/>
- [7] Carmen Aracil, José M. Quero, Antonio Luque, J. Miguel Moreno, Francisco Perdigones, "Pneumatic impulsion device for microfluidic systems" *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 163, No. 1, pp. 247-254, 2010.