

저유량 마취를 위한 전자제어식 기화기 개발

A Development of the electronic controlled vaporizer for low flow anesthesia

오 영 택* 박 재 훈** 장 인 배***
Oh, Yeong-Taek Park, Jae-Hoon Chang, In-Bae

Abstract

For the environmental safety of the operating room and patient healthcare, the closed type rebreathing system is widely adopted. In order to reduce the anesthesia gas during surgery, the mixing ratio of anesthesia gas with breathing air should be precisely controlled. Generally, the breathing air passes through the vaporizer to mix the anesthesia gas, but there is a difficulty in controlling the mixing ratio precisely. In this paper, the stand-alone style vaporizer is designed and the operating characteristics are investigated. The vaporizer measures the temperature and pressure in the vaporizing chamber and chamber temperature is precisely controlled by proportional controlled heater. Exact quantity of anesthesia media is feeded by PID controlled peristaltic pump and vaporized gas is mixed with breathing air flow by PWM controlled solenoid valve. The experimental result shows that the vaporizer has an excellent command following performances that it can be applied to the low flow anesthesia system.

키워드 : 저유량 마취, 기화기, 온도, 압력

Keywords : low flow anesthesia, vaporizer, temperature, pressure

1. 서론

최근 환경오염에 대한 인식, 작업환경 및 안전에 대한 엄격한 규제는 점차 필요성을 더해가고 있다. 인간의 질병을 다스리는 방편의 하나로 수술을 하는데 이때 마취를 위해 사용하는 마취가스의 양을 줄이기 위한 마취기구의 현명한 사용도 아주 중요

하다. 염화불화탄소인 마취제는 아직 규제를 받지 않고 사용되며 대기로 방출되고 있지만 매년 생산 및 소비되는 염화불화탄소의 비율이 증가하고 따라서 대기로 방출되는 마취가스가 환경에 미치는 영향에 대하여 심각하게 고려할 단계에 와 있다. 전신 마취에 사용되는 마취제인 할로탄, 엔푸루란, 이소푸루란 등은 대기로 방출될 시에 상당한 영향을 미친다. 전신 마취제에 세보푸루렌과 데스푸루렌도 속하는데 이 마취제 들은 오존층 파괴력이 훨씬 약하다고는 하지만 이들도 상당한 온실효과를 가지고 있어서 결코 환경 친화적이라고 할 수 없다. 또한 신선가스의 유량을 1L/min 이상으로 하는 고유량 마취기법으로 위와 같은 마취제를 사용하는 것은 비경제적이어서 경제성을 높이기 위

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정, 교신 저자
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정
*** 강원대학교 메카트로닉스전공 교수, 공학박사

해서는 저유량 마취 기법이 적합하다[1].

마취 기법은 신선가스의 유량에 따라 고유량, 중등도 유량, 저유량, 최소유량 마취로 나뉘게 되며, 이 중 저유량 또는 최소유량 마취기법은 마취제 사용이 경제적이고, 작업환경의 개선과 대기오염의 감소를 줄 수 있기 때문에 선호되고 있다.

따라서 본 논문에서는 저유량 마취방법을 이용하는 마취기에 사용될 기화기에 대해 접근하였다.

일반적으로 많이 사용되고 있는 기화기와는 달리, 마취제와 기화실이 분리된 형태로 온도와 압력을 피드백 제어한 전자제어식 기화기를 개발하였다.

2. 이론적 배경

2.1 흡입마취와 유량에 따른 마취기법

흡입마취제는 폐를 통하여 투여되고, 폐혈류를 통해 흡수되며 심장을 통해 결국 각각 장기의 혈류를 따라 조직에 도달하고 조직에서 흡수된다[2].

흡입마취는 기화기를 통하여 공급되는 흡입마취제와 유량계를 통하여 공급되는 신선가스를 폐로 공급함으로써 이루어진다. 이때 이용되는 신선가스 사용량은 자발호흡 혹은 조절호흡 등과 같은 환자의 호흡 상태, 마취회로의 종류, 마취과 의사의 습관 등에 따라 달라지게 된다[3].

신선 가스는 아산화질소(N_2O)와 산소(O_2)로 구성된 가스로 수술시 마취와 호흡에 이용된다. 이 신선가스의 유량에 따라서 마취기법이 나누어지게 되며, Table 1과 같다.

Table 1. anesthesia methods by fresh gas flow rate, Baker

Anesthesia methods	Fresh gas flow rate
High flow	2 ~ 4 L/min
Medium flow	1 ~ 2 L/min
Low flow	0.5 ~ 1 L/min
Minimal flow	0.25 ~ 0.5 L/min

마취 시스템에서 신선가스 유량을 증가시킬수록 흡입마취제의 소모량이 증가 된다. 재호흡 마취 시스템에서 저유량 마취는 고유량 마취에 비하여 저산소증 및 재호흡의 위험성이 있기는 하지만 마취제의 소모량을 줄이고, 수술실 내 공기 오염을 감소시킬 수 있으며, 환자 기도의 가온 및 가습이 가능한 장점들이 있다[3].

저유량 또는 최소유량 마취를 위해서는 안전장치와 반폐쇄식 또는 폐쇄식 호흡회로를 가지는 재호흡 장치에서 사용 되어야 한다.

Fig 1.은 신선가스 유량에 따른 마취제의 시간당 비용을 보여주고 있다.

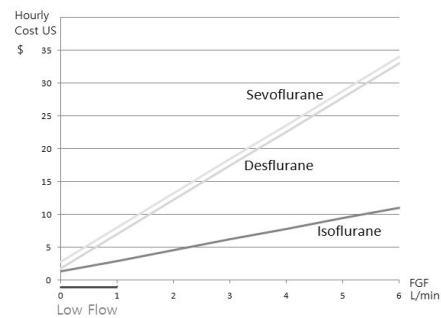


Fig 1. Cost of three inhalants as a function of fresh gas flow [4]

2.2 호흡장치의 방식에 따른 분류

호흡장치는 신선가스, 호기가스와 주위공기들 간의 역동적인 과정으로 환자가 흡입하는 가스 혼합물을 결정하는 기능적인 요소이다. 호흡장치들은 유량조절기구, 혼합물과 기화기에 의해 환자에게 신선가스를 수동적으로 제공하는 구성요소일 뿐 아니라 최종적으로 마취가스 구성을 결정하는 중요한 요소이다[1].

Table 2. Comparisons of rebreathing system and non-rebreathing system

Re breathing system	<p>- <u>Merits</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Decreases of agents consumption • Reduce the cost by increasing the efficiency of anesthesia gas and vapor • Decreases of the workplace and air pollution • Warming and humidification of anesthesia gas <p>- <u>Demerits</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Complicated construction and device • Difficult that obtain the detail information of anesthesia gas and lack of control ability
Non-re breathing system	<p>- <u>Merits</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • The simple construction • Great the control ability <p>- <u>Demerits</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Extremely high consumption of agents • High cost by the low efficiency of anesthesia gas • Workplace and air pollution

호흡장치는 크게 재호흡장치, 비재호흡장치 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 재호흡장치에는 신선가스의 양이 흡수된 양과 같고, 이산화탄소의 흡수가 뒤따르며 또한 호기가스가 완전히 환자에게 재호흡 되는 폐쇄식 호흡장치와 신선가스유량이 흡수량보다 많으나 분당호흡량보다 적고 일부 재호흡을 하는 반폐쇄식 호흡장치가 있다.

다음으로 비재호흡장치는 재호흡이 안되며 호기가스는 배출되고 신선가스가 흡입 시 공급되게 설계되어 있다[1].

Table 2는 재호흡 장치와 비재호흡 장치의 장단점을 정리한 것으로 재호흡 장치가 경제적, 그리고 환경적으로 장점이 많음을 알 수 있다.

2.3 일반적인 기화기의 원리

기화기는 마취기의 한 중요부분으로 휘발성 액체 흡입 마취제를 기화시키는 역할을 한다. 최근의 마취회로와 기화기는 유량계에서 흘러나오는 가스량과 기화기 속의 액체 마취제량의 다스와 관계없이 그리고 기화열로 인한 내부온도의 변화에 상관없이 일정하게 표시된 농도를 정확하게 지속적으로 유지시키도록 정밀한 장치로 설계되어 있다[5].

일반적인 마취 기화기들은 눈금으로 농도를 조절할 수 있는 가변의 바이패스 형태로 설계되어 있다. 가변의 바이패스 기화기(Variable-bypass vaporizer)에서 마취장비의 유량계로부터 흐르는 모든 신선 가스는 기화기로 흐른다. 기화기는 들어오는 가스를 포화증기 농도의 마취제가 들어 있는 기화실로 들어가는 작은 흐름과 다이얼로 농도를 조절할 수 있고 기화실 출구와 섞이는 큰 바이패스 흐름으로 분리한다[6].

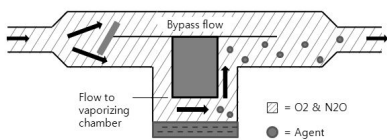


Fig. 2 Variable bypass vaporizer principle

이러한 기화기는 액체 마취제를 기화기에 넣을 때 규정선 이상으로 채우거나, 기화기 자체를 수직으로 놓지 않으면 기화기에 유입된 가스가 액체 속을 기포상태로 통과하여 기화된 마취제 농도가 계기의 농도보다 높아질 수도 있다[7].

이 논문에서는 고정되어 있는 기술에서 벗어나 일반적으로 많이 사용되는 기화기와는 다른 새로운 방식으로 접근하여, 액체 마취제에서 기화된 마취가스가 따로 저장된 후 배출되는 방식의 기화기를 개발하였다.

3. 연구 방법

3.1 연구 개발 방향 및 설정

기화기의 개발에 있어서 기존의 기화기와 차별성을 두기 위해 마취제와 기화실을 분리하는 새로운 방식으로 접근을 하였다. 기화실의 온도와 압력을 일정하게 제어를 하고, 기체 상태의 마취가스가 존재하도록 하여, 솔레노이드 밸브를 통하여 일정량의 가스만이 배출 되도록 하였다.

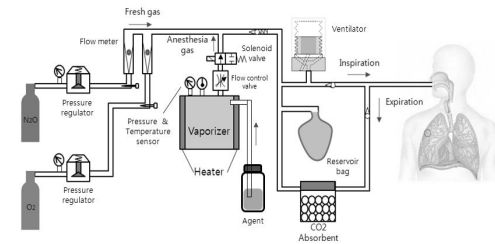


Fig. 3 Schematic of flow arrangements of anesthesia machine

Fig. 3은 마취 시스템의 흐름도를 간략하게 보여주고 있다. 온도는 히터를 이용해 비례 제어를 하였고, 압력은 유량 펌프를 이용하여 비례, 적분, 미분 제어를 하였다.

3.2 기화기 설계

액체 마취제가 기화실 내부에는 최종적으로 기체 상태로만 남게 하기 위해서 기화실 몸체를 거쳐 지나가며 기화가 되도록 Fig. 7에서와 같이 U자 배관을 가공하였다. 가열된 기화실의 U자 배관을 통과 하면서 기화가 된다. 기화기 몸체의 크기는 가로, 세로, 높이가 100mm × 100mm × 100mm 이고, 내부에 직경 80mm의 원으로 몸체를 관통하도록 가공하여 내부에 약 500ml의 부피를 갖도록 하였다. 몸체의 위, 아래로는 두께 10mm의 판과 오링을 통해서 밀봉을 하였다.

상판에는 압력센서와 온도센서를 장착할 부분과 마취제의 입구와 출구를 가공하였고, U자 배관의 가공 후 생긴 필요 없는 부분은 무두 볼트와 예폭

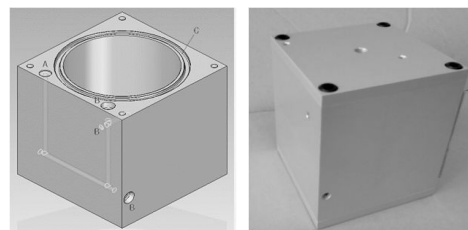


Fig. 4 3D modeling(left) and real view(right) of the designed vaporizing chamber

시로 밀봉하여 마취가스가 누출되는 것을 방지하였다.

3.3 계측 제어 시스템 구축

3.3.1 온도 계측

기화기 내부의 온도를 측정하기 위해서 실용화되어 있는 온도 검출 소자 중에서 온도 변화에 따른 전기 저항치 변화가 민감하고, 안정성 및 재현성이 우수하고, 내구성이 매우 높은 백금 축온저항체(Pt-100)를 사용하였다. 축온저항체 재료로 백금을 이용하는 것은 백금이 온도변화에 따라 직선성이 좋고, 저항 변화율이 커 사용하기 편리하기 때문이다.

Fig. 5는 축온저항체와 온도-저항 값 변화의 특성을 보여준다. 축온저항체는 사용온도 범위에서 좋은 선형성을 보여주며, 이는 온도 값의 변화에 따라 선형적으로 비례하는 전압 값으로의 변환을 용이하게 해준다.

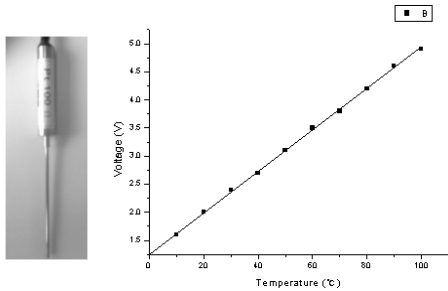


Fig. 5 Pt-100 temperature sensor and analog calibration of the temperature sensor

센서에서 나오는 전압 값과 전압 분할기를 통해 나오는 전압 값을 비교하여, 차동 증폭기를 통해 증폭 시켜, 0~5V의 전압 신호로 변환 된다.

100℃의 끓는 물에서부터 물의 온도를 낮춰가며 백금 축온저항체의 저항 값을 테스트기로 측정하고, 그 저항 값에서의 온도를 읽고 전압을 측정하였다.

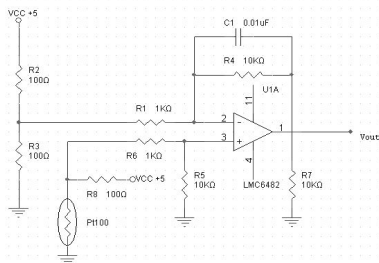


Fig. 6 The temperature measuring circuit

3.3.2 온도 제어

기화기를 가열시키는 요소로 판형 실리콘 히터를 이용하였다. 이 히터는 기화기의 몸체에 붙이고, 무접점 릴레이를 이용하여 마이크로프로세서로 PWM제어를 하였다. 그리고 이 PWM은 다시 비례제어를 하여 히터의 발열량을 제어하였다.

마이크로프로세서에서 정한 목표온도 값과 센서로부터 받은 현재온도 값의 차인 에러 값에 비례게인을 곱해줌으로써 PWM의 펄스폭을 제어 하였다. 펄스폭의 변화에 따라 0~5V의 전압 값이 나

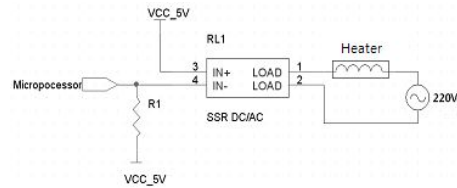


Fig. 7 The heater control circuit

오게 되는데, 0V일 경우에 히터는 거의 발열하지 않고, 5V가 되었을 때 최대로 발열을 하게 된다.

비례제어기만 사용할 경우에는 언제나 비례대가 0보다 크게 되므로 정상상태에서 잔류편차가 존재하게 된다. 하지만 이 시스템에서는 매우 정밀한 온도제어를 요하지 않기 때문에 비례제어기만으로도 충분하다.

Fig. 7은 무접점 릴레이와 히터를 연결하여 마이크로프로세서로 제어하기 위한 회로이며, Fig. 8은 위 회로를 마이크로프로세서로 제어하기 위한 블록선도 이다.

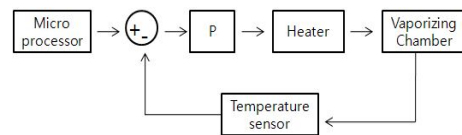


Fig. 8 The block diagram of temperature control

3.3.3 압력 계측

압력센서는 기본적인 물리량의 하나인 압력을 감지해서 전기신호로 변환시키는 목적으로 사용된다. 특히 반도체 압력센서는 최근 실용화가 가속화되고 있는 센서로 크리프현상이 없고, 직선성이 우수하며 압력감도 및 고유진동수가 높고 소형, 경량으로서 저가격화와 대량생산이 가능하며 직접화가 용이하다는 장점이 있다.

이 논문에서 사용된 압저항형 압력센서는 모든 분야에 응용이 가능하며, 물질이 가지는 물리적 특성 중의 하나인 압저항 효과(Piezo-resistive effect : 물질이 외부의 응력을 받아 그 고유 저항 값이 변하는 현상)를 이용한다.

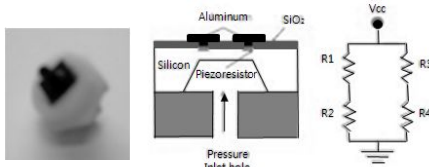


Fig. 9 Structure of the silicon pressure sensor (Piezo-resistive type)

사용한 압력센서에서는 압력의 변화에 따라 +, - 두 개의 출력신호가 나오게 된다. 이 출력 전압 값은 매우 작은 값이기 때문에 차동 증폭기를 이용하여 출력 값을 크게 하였다.

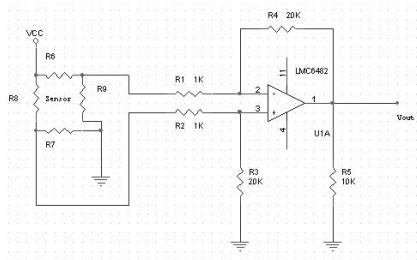


Fig. 10 The pressure measuring circuit

압력센서의 보정은 공압 레귤레이터를 이용하였다. 공압 레귤레이터로 공기의 압력을 일정하게 유지시킨 후 해당 압력에서 센서의 전압 값을 측정하여, 각 압력에 따른 전압 값을 측정하였다.

Fig. 11은 압력센서의 압력에 따른 전압 그래프이며, 선형적인 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

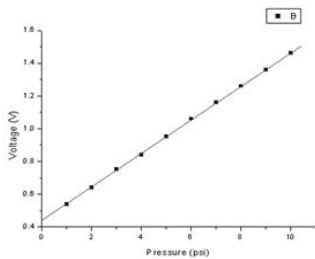


Fig. 11 The analog calibration of the pressure sensor

3.3.4 압력 제어

액체 마취제는 가열된 기화실의 몸체를 지나면서 기화되어 기화실에 저장되며, 압력을 발생시킨다. 일정량의 마취가스만을 내보내기 위해서는 일정한 압력이 필요하다. 이 시스템에서 압력을 제어하는 방법은 입력되는 액체 마취제의 양을 조절하는 것이다. 액체 마취제는 튜브 연동식 펌프를 통

해 들어오며 펌프 모터의 속도제어를 통해 입력되는 마취제의 양을 조절하였다.

펌프모터를 제어하기 위해 PWM방식을 사용하였으며, PID제어를 하였다.

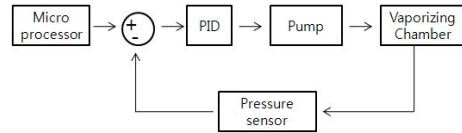


Fig. 12 The block diagram of pressure control

PID 제어는 기본적으로 PD제어의 성능과 PI제어의 성능을 합한 것이다. PD제어는 주로 과도 응답의 형상을 구성하고 시스템을 안정화하는데 사용되며, PI 제어는 정상상태 오차를 줄이기 위해 사용된다[8].

3.4 솔레노이드밸브 제어

마취가스를 분사하기 위해 유량제어밸브와 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 성인의 분당 호흡수는 평균 12~25회로 Fig. 13과 같이 흡기와 호기의 비율이 약 1 : 2 정도가 된다.

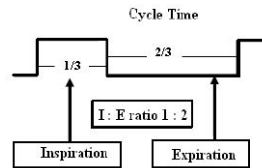


Fig. 13 Cycle time of normal respiration [8]

따라서 솔레노이드 밸브를 아날로그 PWM제어를 하여 온, 오프 주기를 결정하였다. 아날로그 PWM 제어는 555 멀티바이브레이터 칩을 이용하였다. Fig. 14에서 표시된 커패시터의 용량을 조절하여 펄스폭의 주기를 조정할 수 있고, 가변저항을 조절함으로써 펄스폭을 조정할 수 있다.

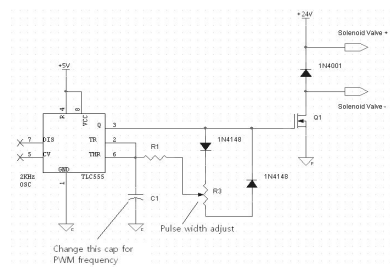


Fig. 14 555 Timer forms simple PWM motor controller circuit [10]

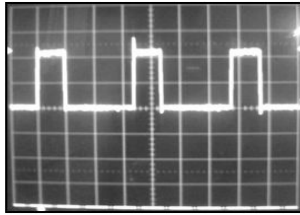


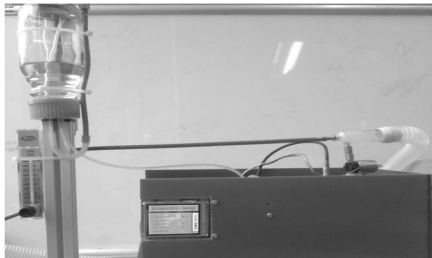
Fig. 15 A wave form of PWM controller circuit

Fig. 14 회로를 이용하여 흡기와 호기 즉, 온과 오프의 주기를 1 : 2의 비율로 1초간 켜지고, 2초간 꺼지도록 제어기를 만들었다. Fig. 15는 만든 제어기의 PWM 파형을 나타낸 것이다.

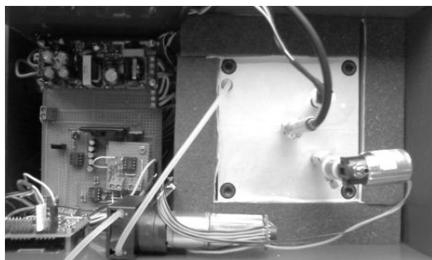
4 성능실험

4.1 실험장치

제어를 위한 마이크로프로세서는 ATmega128을 사용하였고, 정량의 마취제를 기화기에 공급하기 위하여 튜브 연동식 펌프(Watson-Marlow 社)를 사용하였다. 또한 기화된 마취가스를 분출시키기 위해서 유량제어밸브와 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 마취가스는 신선가스가 흐르는 관에 분사되기 때문에 신선가스의 흐름을 모사하기 위해 플로트 유량계(dwyer 社)와 공압을 이용하였다.



(a) Front view



(b) Inner view

Fig. 16 Experimental set up

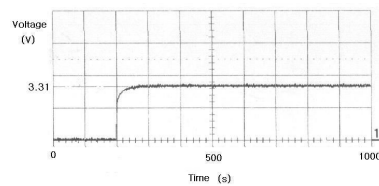
4.2 실험결과

설계된 실험 장치의 온도와 압력에 대한 제어기 성능 실험을 위해 온도와 압력을 바꿔가며 실험을

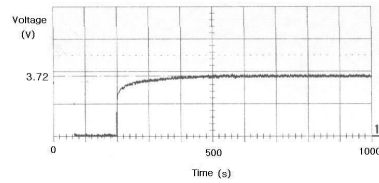
하였다. 온도는 실제 수술에 사용되는 마취제와 실험에 사용한 에탄올의 끓는점에 대하여 실험을 하였다. 수술 시에 사용되는 마취제와 에탄올의 끓는 점은 아래 표와 같다. 압력은 3에서 6 psi까지의 압력에 대해 실험을 하였다.

Table. 3 Boiling points at each agent

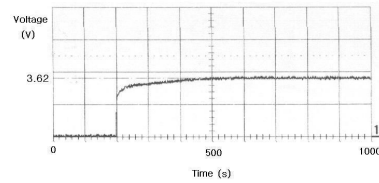
Agents	Boiling point
Isoflurane	48.5 °C
Enflurane	56.5 °C
Sevoflurane	58.5 °C
Ethanol	78.5 °C



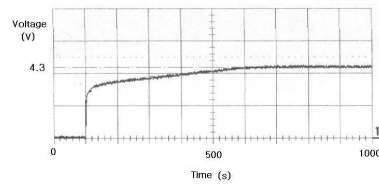
(a) Boiling point : 49°C



(b) Boiling point : 57°C



(c) Boiling point : 59°C



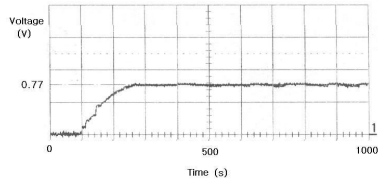
(d) Boiling point : 80°C

Fig. 17 Step response of each temperature

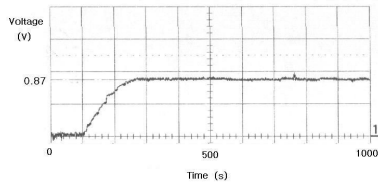
온도 제어는 가열만 가능하고, 냉각은 자연으로 냉각되는 방식이다. 그리고 기화실 외부를 단열을 하여 온도가 급격히 떨어지는 것을 방지 하였다.

Fig. 17과 같이 비례제어로 일정한 온도를 유지

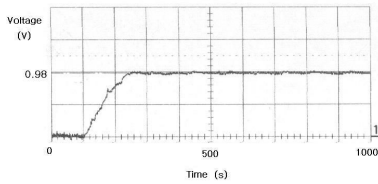
할 수 있음을 확인하였다. 밀폐된 기화실의 온도가 어느 정도 존재하기 때문에 그래프 상에서 수직으로 상승하는 구간이 생기게 되었다. 제어된 온도는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 분해능을 갖으며, 정상상태에서 정밀도 역시 $\pm 1^\circ\text{C}$ 가 되도록 하였다.



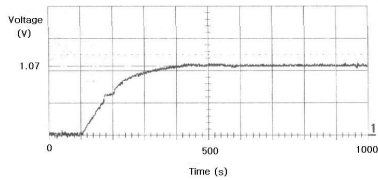
(a) 3psi



(b) 4psi



(c) 5psi



(b) 6psi

Fig. 18 Step response of each pressure

압력제어는 가스가 솔레노이드 밸브를 통해 가스가 일정하게 배출되는 가운데 입력되는 유량을 조절하여 제어를 하였다. 입력되는 액체 마취제의 양이 많아지게 되면 다 기화하지 못하고 액체 상태로 기화실 내부에 남게 되어 압력제어에 영향을 주게 되므로, 펌프 모터의 최고 속도를 제한하였다.

Fig. 18는 배출되는 가스의 양을 최소로 했을 때의 결과 그래프로 일정한 압력을 유지하는 것을 확인 하였다. 제어 압력의 분해능은 $\pm 0.1\text{psi}$ 이며, 정상상태에서 정밀도는 $\pm 0.3\text{psi}$ 를 갖도록 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 저유량 마취를 위한 전자제어식 기화기의 개발에 관련해, 새로운 방식의 기화기를 개발하고, 마취제를 기화시킬 수 있는 온도로 제어하는 것과 기화실 내부의 마취가스에 대한 압력을 일정하게 하도록 제어하는 것에 대하여 논하였다.

액체 마취제를 기화시켜 일정한 압력으로 마취가스를 기화실에 저장할 수 있음을 확인 하였으며, 기존의 기화기와는 다른 방식으로 마취가스를 공급할 수 있음을 보여주었다.

6. 후기

본 연구는 강원대학교 산학연 공동기술개발 지역혁신사업센터와 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Jan A Baum, *저유량 마취 - 저유량, 최소유량, 폐쇄장치 마취의 이론과 실제*, 2판, 군자출판사, 2006.
- [2] 신치민, "흡입마취제의 흡수와 분포", *대한마취과학회지*, 제45권, 제5호, pp. 559~565, 2003.
- [3] 장영호, "한국 마취과 의사들의 신선가스 사용 실제와 그 인식도", *대한마취과학회지*, 제46권, 제1호, pp. 78~82, 2004.
- [4] J. Philip, *Low flow and closed circuit anesthesia: safety and danger*, Annual International Winter Symposium Leuven, Belgium, 2006.
- [5] 연세대학교 의과대학 부속 영동세브란스병원 마취과, "불량 기화기로 인한 할로탄의 과량 투여", *대한마취과학회지*, 제21권, 제6호, 1998.
- [6] David E. Longnecker, *ANESTHESIOLOGY*, McGraw-Hill Professional, 1 edition, 2007.
- [7] J. A. Baum, *Low Flow Anesthesia with rager Machines*, www.draeger-medical.com, 2004.
- [8] Sabri Cetinkunt, *MECHATRONICS*, John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- [9] 김남진, "인공호흡기용 PEEP 밸브의 압력공압제어에 관한 연구", *대한기계학회 바이오공학부문 춘계학술대회 논문집*, pp. 178~184, 2008.
- [10] URL - <http://www.discovercircuits.com>