

논문 2001-10-5-01

시간응답특성을 고려한 2광원 1센서 방식의 capnograph 시스템용 NDIR식 CO₂ 가스 챔버 설계 및 측정 회로의 구현

박일용*, 이인기*, 이성기*, 강경목**, 강신원*, 조진호*

An implementation of NDIR type CO₂ gas sample chamber and measuring hardware for capnograph system in consideration of the time response characteristics

I.Y. Park*, I.K. Lee*, S.K. Lee*, K.M. Kang**, S.W. Kang*, J.H. Cho*

요 약

본 논문에서는 동맥혈중 이산화탄소 분압을 실시간으로 추정하는 capnograph 시스템에 상용되는 대부분 NDIR 흡수식(non-dispersive infrared absorption) 광챔버와 신호처리회로를 설계 및 구현하였다. 광챔버 설계시 일반 정상인의 capnogram을 주파수 분석하여 적합한 광초핑 주파수를 결정한 뒤, 이에 근거하여 시간응답을 고려한 광챔버를 설계하였으며, 열잡음에 대한 영향을 줄이기 위해 2광원 1센서 방식의 CO₂ 농도 신호처리회로를 구현하였다. 구현된 광챔버에 대한 가스배출시간을 조사하였으며 신호처리회로를 외부 온도 변화 실험에 적용한 결과 2광원 1센서 방식이 안정된 출력 신호를 얻을 수 있음을 확인하였고, 실제 사람의 호흡에 대한 실험결과 정상적인 capnogram 형태의 CO₂ 농도 변화 곡선을 보였다.

Abstract

The capnograph system for determining the partial pressure of carbon dioxide in the blood of a patient was developed based on the NDIR(non-dispersive infrared) absorption technology. NDIR gas analyzing method requires an optical absorption chamber and signal processing hardware. In this paper, we have designed and implemented NDIR type CO₂ gas chamber in consideration of the time response characteristics and lamp chopping frequency. And we have implemented signal processing hardware using two infrared sources to reduce the thermal background effect. The implemented gas chamber and signal processing hardware were tested in the temperature variation experiment and human expiratory experiment. The results showed that the system could produce a stable output signal and a good CO₂ gas concentration curve like a typical capnogram.

1. 서 론

* 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부(School of
Electroinc, Electric, and Computer,
Kyungpook National Univ.)
** 경북대학교 대학원 센서공학과
(Dept. of Sensor Eng., Kyungpook National
Univ.)
<접수일자 : 2001년 4월 6일>

환자의 혈중 이산화탄소 분압인 pCO₂ 값을 실시간으로 측정하는 capnograph 시스템⁽¹⁾에 있어서 대표적 측정 방식으로 NDIR 흡수법(non-dispersive infrared absorption)⁽²⁾이 사용된다. 일반적으로 NDIR식 CO₂ 가스 농도

측정에 사용되는 광챔버의 내부 구조는 CO₂ 가스 센서 출력 신호의 SN비와 시간응답특성에 영향을 준다. 즉, SN비를 높이기 위해서는 광통로의 길이가 길어야하나 이로 인해 광챔버에 축적되는 CO₂ 가스의 양이 증가되어 시간 응답 특성이 나빠지는 단점을 가지고 있다. 따라서 광챔버 설계시 정상적인 capnogram을 얻기에 적합한 광초평 주파수와 시간응답특성을 고려해야 한다. 또한 CO₂ 가스 센서는 외부의 열적 잡음에 영향을 받아 출력 신호가 드리프트되는 문제점이 발생한다⁽³⁾. 본 논문에서는 일반 정상인 capnogram을 주파수 분석하여 적합한 광초평 주파수를 결정한 다음, 이에 근거하여 시간응답을 고려한 광챔버를 설계하였다. 그리고, 챔버 내에서 발생하는 열적 잡음의 영향을 줄이기 위해 2광원 1센서 방식⁽⁴⁾을 적용하여 CO₂ 농도 측정용 신호처리회로를 설계 및 구현하였다. 제작한 광챔버에 대한 가스 배출 시간을 조사하였으며 구현된 시스템에 대한 외부 온도 변화 실험과 일반 정상인의 호흡에 대한 CO₂ 검출 실험을 한 결과, 안정된 출력 신호와 정상적인 capnogram 형태의 CO₂ 농도 변화 곡선을 보였다.

II. 챔버 설계 및 신호처리회로의 구현

1. 챔버의 설계

적외선 램프에서 방출되는 4.3 μ m의 적외선은 Beer's law에 의해 이산화탄소의 농도와 광통로의 길이의 함수로 표현된다. 흡수된 광량만큼 초전형 센서 출력의 감소가 발생하는데 이를 측정하면 이산화탄소의 농도를 알 수 있게 된다. 그런데, 높은 SN비의 센서 출력 신호를 얻기 위해서는 광통로의 길이가 길수록 유리하다. 하지만, 광통로의 길이가 길어질 경우 챔버 내에 CO₂ 가스가 통과하는 시간이 길어져서 CO₂ 가스 농도변화에 대한 시간 응답 특성이 나빠지게 된다. 또한 CO₂ 가스의 입구 및 출구의 위치에 따라 실제 적외선이 CO₂ 가스에 의해 흡수되는 경로는 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같은 기존의 광챔버와는 달리 그림 2와 같이 가스 흡입구와 배출구를 위치시켜 적외선이 최대한 CO₂ 가스에 의해 흡수되도록 하였으며, 식(1)의 관계를 이용하여 CO₂ 가스 흡입구의

직경을 배출구의 직경보다 작게 하여 빠른 흡입 속도를 낼 수 있도록 설계하였다. 그리고 챔버 내부의 체적은 식(2)와 같이 광초평의 한 주기 시간 동안에 챔버 내의 한번 측정된 가스가 모두 빠져나갈 수 있도록 설계하였다.

$$v_i = v_o \times \frac{A_o}{A_i} \quad - (1)$$

$$V_c \leq \frac{A_o \cdot v_o}{f_s} \quad - (2)$$

where v_i, v_o : 흡입 및 배출 유속

A_i, A_o : 흡입 및 배출구의 단면적

V_c : 챔버 내의 체적

f_s : 광초평 주파수

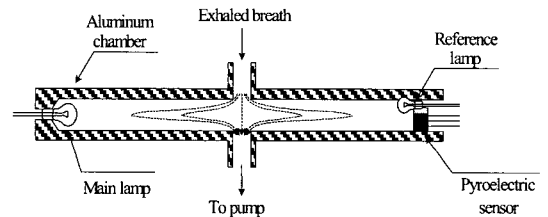


그림 1. 기존의 2광원 1센서 방식의 광챔버구조
Fig. 1. The conventional optical absorption chamber structure using two IR sources

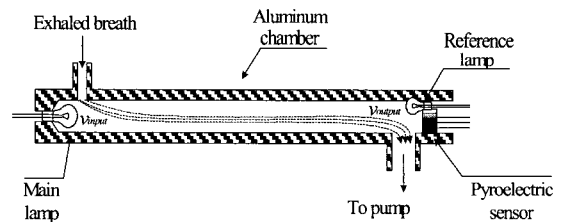


그림 2. 설계한 광챔버의 구조
Fig. 2. The newly designed optical absorption chamber structure

그런데, 광챔버의 광초평 주파수는 CO₂ 가스 농도를 연속적으로 aliasing없이 측정하기 위한 샘플링 주파수에 해당된다. 따라서 Capno

-graph 시스템에서 얻어지는 실제의 정상적인 capnogram에 대한 주파수 분석을 하여 신호 주파수 대역의 2배 이상의 광초핑 주파수를 선택하여야한다. 그러나, 전기적 광초핑의 주파수는 적외선 램프의 열시상수 특성 때문에 20Hz 이하로 제한되는 특성이 있다.

2. 2광원 1센서 방식의 알고리즘

2광원 1센서 방식의 센싱 챔버는 그림 2에서와 같이 서로 180° 위상차가 나는 왼쪽의 주광원과 오른쪽의 기준 광원으로 동작한다. 왼쪽의 주광원에 의한 초전형 센서의 출력과 오른쪽의 기준광원에 의한 출력은 같은 열적잡음의 영향을 받는다고 가정할 때, 초전형 센서의 출력 성분은 식(3)과 같은 수식으로 설명된다. I_1 , I_2 는 각각 주광원과 기준광원에서 나온 광량의 세기를, ΔI_c 는 CO₂에 의해서 흡수된 주광원의 광량을 나타낸다.

$$v_0 = \eta[(kI_1 - \Delta I_c + n) \cdot u + (I_2 + n) \cdot \bar{u}]$$

$$= \eta(kI_1 - I_2 - \Delta I_c) \cdot u + N \quad (3)$$

Where η : sensor responsivity

$$u = \begin{cases} 1 & \text{if main lamp is active} \\ 0 & \text{if main lamp is inactive} \end{cases}$$

$$\bar{u} = \begin{cases} 1 & \text{if reference lamp is active} \\ 0 & \text{if reference lamp is inactive} \end{cases}$$

N : DC and low frequency component ($< 10\text{Hz}$)

식(3)과 같은 센서 출력성분에 대해 대역통과 필터링을 하면 낮은 주파수 대역을 갖는 열적 잡음이 포함된 N 항이 제거된 식(4)와 같은 신호를 얻을 수 있다.

$$v_{BPF} = \eta(kI_1 - I_2 - \Delta I_c) \cdot u \quad (4)$$

그런데, 보조 광원을 밝기를 조절하여 $I_2 = kI_1$ 이도록 조정하면 CO₂에만 의한 안정된 신호 성분을 얻어 낼 수 있게 된다. 그림 3은 CO₂ 농도 변화에 따른 2광원 1센서 방식의 출력신호 변화 형태를 보여주는 것이다.

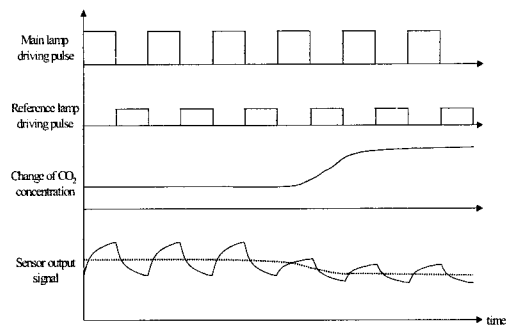


그림 3. CO₂ 농도 변화에 따른 2광원 1센서 방식의 센서 출력신호 변화

Fig. 3. The sensor output signal variation according to the change of CO₂ gas concentration

3. CO₂ 농도 신호 처리 회로

CO₂ 농도 검출 회로는 크게 램프 구동 회로 부분과 센서 출력 신호 처리 회로 부분으로 나뉘어진다. 램프 구동부는 주광원과 기준광원을 180° 위상차가 나도록 교번적으로 동작된다. 기준 광원은 밝기의 조절이 가능하도록 조절 장치를 설치하였다. CO₂ 광반응 챔버의 센서에서 출력되는 1차 신호를 증폭시켜주기 위한 전치 증폭단으로서 2차 대역통과필터 형태의 증폭기를 이용하였으며, 증폭된 신호에서 광초핑 주파수 성분만을 뽑아내기 위해 4차 Chebysev 대역통과필터를 이용하였다. 또한 굽셈기를 이용하여 신호의 주파수를 광초핑 주파수의 2배로 만들어 4차의 MFB(multiple feedback) 저역통과필터를 통과 후 높은 신호대 잡음비의 CO₂ 농도 신호를 얻도록 하였다.

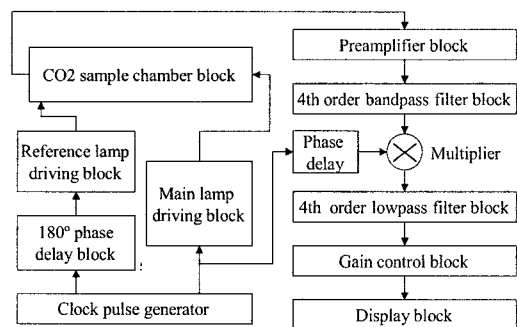


그림 4. CO₂ 농도 측정 회로의 전체 블록도
Fig. 4. The overall block diagram for CO₂ gas concentration measurement circuit

그리고, 240×64 크기의 그래픽 LCD를 사용하여 실시간 CO₂ 농도 파형 관찰 및 측정이 용이하도록 하였다. 그림 4는 전체 블록도를 나타낸다.

III. 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 먼저 그림 5의 (a)와 같은 정상적인 사람의 capnogram에 대한 주파수 분석을 행한 결과, 그림 5의 (c)에서와 같이 에너지 스펙트럼의 95% 이상이 0~5Hz 대역에 모여 있음을 확인하였고, 적외선 램프의 열시상수를 고려하여 20Hz의 광초핑 주파수를 선정하였다.

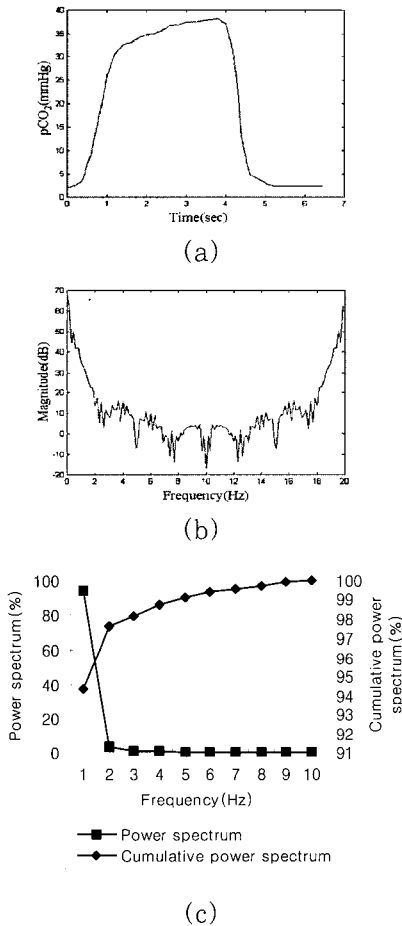


그림 5. (a) 실제 정상적인 capnogram에 대한 (b) 에너지 스펙트럼과 (c) 대역별 에너지 분포
 Fig. 5. (a) The practical capnogram, (b) its power spectrum and (c) the distribution of power spectrum for each frequency

정해진 20Hz의 광초핑 주파수값을 이용하여 챔버 체적 내의 가스 배출 시간이 광초핑 시간 간격보다 작게 되도록 챔버의 체적을 결정하였으며 광통로의 길이를 달리하여 챔버를 제작하였다.

그림 6은 제작된 체적별 챔버를 보여주며, 그림 7은 각 챔버들의 가스 배출 시간을 보여준다. 2 l/min의 흡입속도를 가지는 펌프에 대한 챔버 내 가스 배출 시간을 조사한 결과 제작된 모든 챔버가 광초핑 간격인 50msec보다 짧은 시간 내에 가스를 배출할 수 있음을 알 수 있었다.

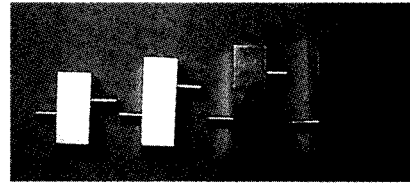


그림 6. 구현된 광챔버들
 Fig. 6. The implemented optical absorption chambers

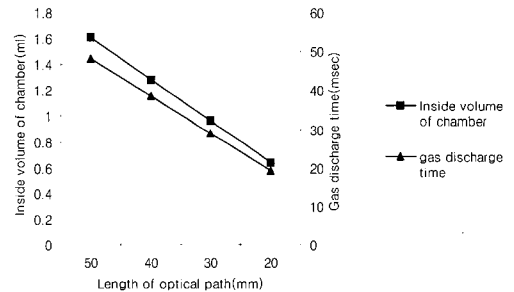


그림 7. 구현된 광챔버들에 대한 내부체적 및 가스 배출 시간
 Fig. 7. The calculated values of internal volume and gas discharging time for the implemented optical absorption chambers

또한 구현된 2광원 1센서 방식에 대한 열적 잡음의 영향을 확인하기 위하여 그림 8과 같은 실험 환경을 이용하였다. 1광원 1센서방식의 광챔버와 2광원 1센서 방식의 광챔버 각각에 대하여 약 100초간의 온도 상승 실험을 행하였다. 그림 9의 (a)와 그림 9의 (b)에서와 같이 1광원 1센서 방식의 신호 출력 결과에서는 센서 주위의 온도가 올라감에 따라 100초 후에는 출력 신호가 1.2V정도 변동하였으나, 2광원 1센서 방식은 1광원 1센서 방식에 비해 변동이 매우 작음을 확인하였다. 그림 10은 구현된 회로와 챔버를 적용

한 시스템을 이용하여 정상인 성인남자의 호흡에 대한 연속 측정한 결과로서 아주 안정되고 정상적인 capnogram 형태의 CO₂ 농도 변화 곡선을 보여주고 있다.

Capnograph System

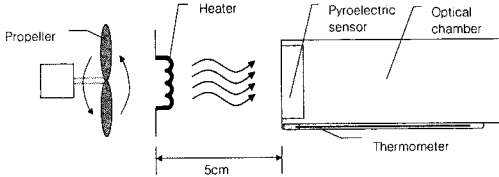
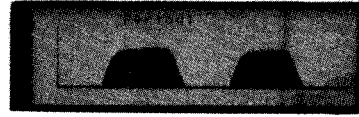
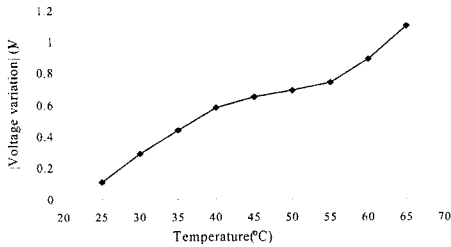
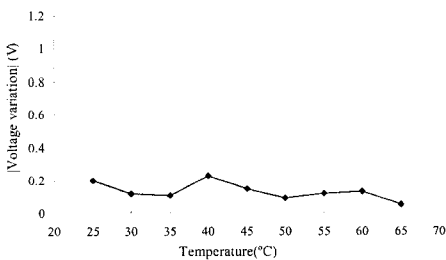


그림 8. 온도 변화 실험 장치의 개략도
Fig. 8. The experiment apparatus for varying the temperature of sensor



온도 (°C)	25	30	35	40	45	50	55	60	65
전압 절대 변동분 (V)	0.11	0.29	0.44	0.58	0.65	0.69	0.74	0.89	1.10

(a)

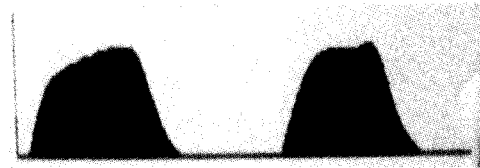


온도 (°C)	25	30	35	40	45	50	55	60	65
전압 절대 변동분 (V)	0.2	0.12	0.11	0.29	0.15	0.09	0.12	0.19	0.05

(b)

그림 9. (a) 1광원 1센서 방식의 온도 실험 결과와 (b) 2광원 1센서 방식의 결과
Fig. 9. The experiment results (a) for one IR source sensing method and (b) two source method

(a)



(b)

그림 10. (a) 구현된 회로와 챔버를 적용한 실험용 시스템과 (b) 이를 이용하여 얻은 정상인 성인남자의 호흡에 대한 CO₂ 농도 변화 곡선

Fig. 10. (a) The experimental system using the implemented sensing circuit and designed chamber and (b) the measured CO₂ concentration curve for a male adult's expiration in normal condition

IV. 결 론

본 논문에서는 capnograph 시스템에서 사용되는 NDIR식 CO₂ 가스 측정 광챔버를 높은 광흡수도와 CO₂ 가스에 대한 시간응답특성을 고려하여 설계를 하였다. 또한 열적 잡음의 영향을 줄이기 위한 2광원 1센서 방식을 적용하여 광챔버와 신호처리회로를 설계 및 제작하였다. 구현한 광챔버의 챔버내 가스 배출 시간은 광초평 시간 간격보다 짧았으며, 구현한 신호처리 회로에 대한 외부 주위 온도 변화 실험에 적용한 결과, 안정되고 정상적인 capnogram 형태의 CO₂ 농도 변화 곡선을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부 보건의료기술연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것이며, 이에 감사를 드립니다. (HMP-99-E-11-0004)

V. 참고 문헌

- [1] W. Bao, P. King, J. Zheng, and B. E. Smith, "Expert Capnogram Analysis", *IEEE Engineering in medicine and biology*. Mar. 1992.
- [2] D. A. Skoog and D. M. West, "Infrared Absorption Spectroscopy", *Principles of Instrumental Analysis*. Holt-Saunders International Editions. 1990.
- [3] M. Yelderian, D. S. Goldbergers, and J. R. Braig, "Optically stabilized infrared energy detector", *United States Patent*, P. N. 5,081,998, Jan. 1992.
- [4] 박일용, 배상곤, 강신원, 조진호, "초전형 센서를 이용한 capnograph 시스템용 CO₂ 측정 방식 제안", *한국센서학회회 논문집*, pp. 339-342, Nov. 1999.
- [5] B. D. Schmitz and B. A. Shapiro, "Capnography", *Respir. Care Clin. Northwestern Memorial Hospital*. 1(1):107-17. Review, Sep. 1995.
- [6] J. L. Benumof, "Interpretation of capnography", *AANA J*, 66(2): 169-76, Apr. 1998.
- [7] 박진호, *FA 센서응용백과 1, 2*, 영진출판사, vol. 1, pp. 462-479, vol. 2, pp. 125-145, 1991.
- [8] 이승래, *센서응용기술*, 세화도서출판, pp. 157-230, 1993.
- [9] D. A. Bell, *Solid State Pulse Circuit*, 4th Ed., prentice hall, pp. 233-254, 1992.
- [10] J. Schilz, "Thermophysia minima: Applications of thermoelectric infrared sensors gas detection by infrared absorption: NDIR", *PerkinElmer Optoelectronics*, version 17, Mar. 1999.

著 者 紹 介



박 일 용

1998 경북대학교(공학사-전자공학)

2000 경북대학교(공학석사-전자공학)

2000~현재 경북대학교(박사과정-전자공학)

주관심 분야 : 디지털하드웨어 설계, 센서 응용 및 신호처리

이 인 기

1999 경북대학교(공학사-전자공학)

2001 경북대학교(공학석사-전자공학)

2001~현재 풍산 금속 안강 연구소 연구원

주관심 분야 : 전해질분석시스템, 센서 응용 및 분석시스템

이 성 기

2000 경북대학교(공학사-전자공학)

2001~현재 경북대학교(석사과정-전자공학)

주관심 분야 : 센서 및 분석 시스템 설계 및 시스템 프로그래밍

강 경 목

1997 동의대학교(이학사-물리학)

1999 동의대학교(이학석사-물리학)

1999~2000 2월 동의대학교 기초과학연구소 광정보연구실 연구원

2000~현재 경북대학교(박사과정-센서공학)

주관심분야 : 광섬유센서 및 통신소자, MOEMS 등

강 신 원

1978 경북대학교(공학사-전자공학)
1980 영남대학교(공학석사-전자공학)
1993 게이오대학교(공학박사-생체의공학)
1989~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수
주관심 분야 : 광소자, 반도체광학센서

조 진 호

1977 경북대학교(공학사-전기공학)
1979 경북대학교(공학석사-전자공학)
1988 경북대학교(공학박사-전자공학)
1986~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수,
경북대학교병원 의공학실장
주관심 분야 : 생체신호처리, 센서 및 의용전자
기기