

소형 공기챔버를 센서소자로 사용하는 새로운 호식기류 측정기술

김경아 · 이재현 · 김군진** · 이태수* · 차은종*[†]

New Measurement Technique of Expiratory Air Flow Rate Using Miniatured Air Chamber

Kyung Ah Kim, Jae Hun Lee, Goon Jin Kim**, Tae Soo Lee*, and Eun Jong Cha*[†]

Abstract

Asthma is one of the important respiratory diseases requiring home self care usually performed by commercialized peak expiratory flow meter (PEFM). However, this simple device can measure only single parameter, PEF, due to its purely mechanical principle, significantly limiting disease management quality. The present study introduced a new expiratory flow measurement technique by miniatured air expansion chamber easily installed within PEFM. Continuous pressure signal obtained from the chamber demonstrated an accurate quadratic relationship with flow. The volume measurement error was $\pm 1\%$ well within the American Thoracic Society (ATS) criteria of 3%. Important spirometric parameters of FVC, PEF, and FEF25-75% were all accurately estimated with correlation coefficients > 0.95 . The present technique obtains continuous expiratory air flow signal, making possible and convenient to perform spirometric test at home. Electronic interface capability would be also useful for remote asthma management.

Key Words : peak expiratory flow meter, spirometry, miniatured air expansion chamber, asthma management

1. 서 론

천식(Asthma)은 사회적으로 중요한 만성질환의 하나로서, 영국의 경우 인구의 약 12%가 천식 환자이다. 아시아에서도 최근의 산업화에 따른 환경공해 및 대기 오염 등으로 인해 환자의 수가 급증하고 있어 사회적으로 그 심각성이 증대되고 있다. 천식은 기관지 염증으로 인해 기도가 좁아져 호흡곤란을 가져오며, 천식 발작에 의해 사망에 이르게 하는 질병으로서 자가 관리가 필수적이다^[1]. 천식 환자는 천식 발작이 있는 동안 기도가 점차 좁아지기 때문에 주기적으로 강제 호식하여 최대호식기류(PEF, Peak Expiratory Flow Rate)를 측정하며 자가 관리를 행하게 되는데 PEF를 간편하게 측정할 수 있는 최대호식기류계(PEFM, Peak Expiratory Flow Meter)를 사용한다^[2]. 현재 상용화된

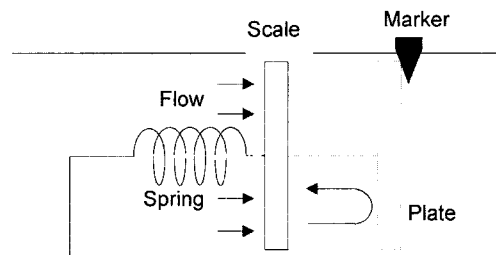


그림 1. 상용화된 최대호식기류계의 동작원리
Fig. 1. Operation principle of commercial PEFM.

최대호식기류계는 그림 1에 보인 바와 같이 역학적 원리로만 동작한다. 기구 내에 이동판이 스프링에 연결되어 있어 환자가 호식을 행하면 이동판에 힘이 가해지고 반대방향으로 스프링 힘을 발생시킨다. 이동판은 환자의 기류가 증가함에 따라 앞으로 이동하면서 이동판과 접촉해 있던 표시자를 최대 변위 위치에 남겨두고, 기류가 감소함에 따라 스프링에 의해 복귀한다. 이때 표시자가 위치하는 최대 변위가 PEF를 나타낸다. 이러한 동작원리는 간단하지만 PEF 한 번수만을 측정할 수 있다.

(주)씨케이인터내셔널(CKInternational Co., Ltd.)
*충북대학교 의과대학 의공학교실(Biomedical Engineering Department,
School of Medicine, Chungbuk National University, Cheongju, Korea)
**정주기능대학(Chongju Polytechnic College)

[†]Corresponding author: ejcha@med.chungbuk.ac.kr
(Received : January 31, 2004, Accepted : February 15, 2004)

천식환자의 실질적인 호흡기 질환 평가를 위해서는 PEF 뿐만 아니라 폐 및 기도의 환기능 평가 변수인 FVC(Forced Vital Capacity), FEV1.0(Forced Expiratory Volume at 1sec), FEF25-75%(Forced Expiratory Flow rate over 25 to 75% FVC) 등 중요한 폐활량 변수들을 함께 측정해야 한다^[1]. 그러나 현재 상용되고 있는 최대호식기류계는 단순한 역학적 원리에 의해 PEF값 만을 측정할 수 있으므로 천식환자의 자가관리에 있어 한계성을 내포하고 있다.

이에 본 연구에서는 질환자들이 자가 진단을 하는 동안 PEF 뿐만 아니라 호흡기능의 평가 변수들을 산출하기 위하여 기존의 상용화된 최대호식기류계 내에 센서소자의 역할을 하는 소형의 공기 챔버를 장착함으로써 연속적인 호식기류 신호를 추출할 수 있는 새로운 호식기류 계측기술을 제안하였다.

2. 소형공기챔버를 사용하는 기류계측 원리

2.1. 기류-압력 변환 원리

피검자의 호식 기류 $F(t)$ 가 이동판 상에 힘 $f(t)$ 를 가하면 이동판에 연결된 스프링이 함께 늘어나며 반대 방향의 스프링 탄성력 $f_s(t)$ 가 발생한다(그림 2). 이때 t 는 시간 변수이다. 스프링의 반대쪽에 용적변화가 가능한 공기챔버를 연결하면 역시 스프링에 의해 동일한 힘으로 흡입되므로 공기챔버 내의 공기가 팽창하여 음압 $P(t)$ 가 형성된다. 기류에 의한 힘 $f(t)$ 와 스프링의 반작용력 $f_s(t)$ 가 서로 평형이 될 때까지 이동판이 이동할 것이므로

$$f(t) + f_s(t) = 0 \quad (1)$$

이다. 이때 $f_s(t) = -f_s(t)$ 는 $F(t)$ 가 커질수록 커지게 된

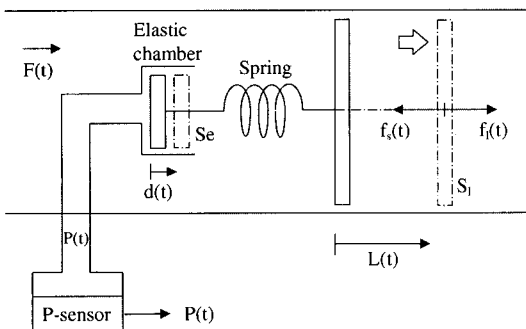


그림 2. 공기챔버를 사용한 기류계측원리

Fig. 2. Measurement principle using miniaturized air chamber.

다. 공기챔버의 팽창에 의한 변형거리($d(t)$)는 이동판의 이동거리($L(t)$)에 비해 무시할 수 있고($d(t) \ll L(t)$) Hook's law에 의해 $L(t)$ 가 $f_s(t)$ 에 비례하므로

$$F(t) = k_s \cdot L(t) \quad (2)$$

where $k_s = \text{constant}$

가 된다. 식 (2)에서 $F(t)$ 와 $f_s(t)$ 는 단순 비례관계가 될 수 없으나 수식 유도 편의상 비례관계로 가정하였다^[4]. 기류에 의해 $f_s(t)$ 가 공기챔버에 전달되고 이에 따라 챔버 내에는 공기가 팽창하여 식 (3)과 같이 음압이 형성된다.

$$P(t) = \frac{S_e(t) \cdot d(t)}{C_{air}} \quad (3)$$

이때 $S_e(t)$ 는 챔버의 단면적, $d(t)$ 는 팽창거리, C_{air} 는 공기의 compliance이다. 식 (3)에서 $d(t)$ 는 스프링에 의한 팽창거리이므로 $f_s(t)$ 에 비례하고 $f_s(t)$ 가 $L(t)$ 에 비례하므로(식 (2))

$$P(t) = k_e \cdot L(t) \quad (4)$$

where $k_e = \text{constant}$

가 된다. 식 (2)와 (4)로부터

$$F(t) = \frac{k_s}{k_e} \cdot P(t) \quad (5)$$

가 되어 $P(t)$ 를 계측함으로써 $F(t)$ 를 얻을 수 있으며 $P(t)$ 는 범용 압력센서를 사용하여 연속적인 전압신호의 형태로 얻을 수 있다. 식 (5)에서 k_s 와 k_e 를 상수로 가정하였으나 그림 2의 구조물들 간의 마찰 등에 따라 $F(t)$ 와 $P(t)$ 는 정비례할 수 없다. 따라서 실제 응용시에는 $F(t)$ 와 $P(t)$ 간의 비선형 관계식을 실험적으로 결정하였다. 이와같은 원리에 따라 최대호식기류계 내에 공기챔버를 설치함으로써 연속적인 기류신호를 추출하고 이로부터 호흡기능 평가를 위한 제반 진단 매개변수 산출이 가능해진다.

2.2. 소형 공기챔버의 제작

상술한 기류계측 원리에 입각하여 연속적인 호식기류를 계측하기 위하여 실리콘 러버 재질의 챔버를 제작하여(그림 3) 최대호식기류계 내에 장착하였다(그림 4). 공기챔버의 돌출구를 관으로 연장하여 범용 압력센서에 연결함으로써 챔버 내 음압을 연속적으로 계측하도록 하였다.

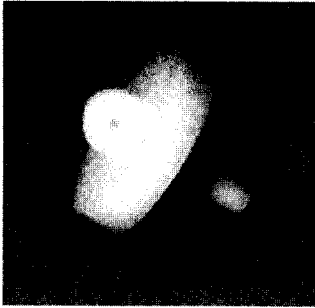


그림 3. 소형공기챔버
Fig. 3. Miniatured air chamber.

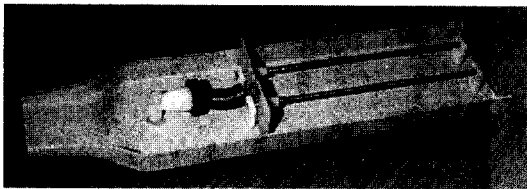


그림 4. 소형공기챔버가 장착된 최대호식기류계
Fig. 4. PEFM with miniatured air chamber installed.

3. 정밀도 검증 실험

3.1. 실험장치

본 연구에서 제시하는 새로운 호식기류 계측기술의 정밀도를 검증하기 위해 미국 흉부학회(ATS, American Thoracic Society)에서 권고하는 표준 시험방법에 따라 기류생성 및 계측장치를 그림 5와 같이 구성하였다⁵⁾. 선형거리센서(LTM550, Gefran, Italy)를 부착한 3L 시린지에 공기챔버가 내장된 최대호식기류계를 연결하였다. 선형거리센서는 저항성 센서로서 시린지의 거리 변화에 비례하는 전압이 얻어지며(상관계수>0.9999,

$P < 0.0001$) 시린지의 직경이 일정하므로 시린지의 용적변화 신호(V_s)가 정확하게 얻어진다. 시린지를 수동으로 밀어 3L의 공기를 최대호식기류계로 통과시키면서 선형거리센서로부터 용적 신호를, 최대호식기류계 내의 공기챔버에 연결된 압력센서(MPX2010D, Motorola, U. S. A.)로부터 공기챔버 내의 음압 신호(P_m)를 추출하였다. 두 신호 모두 A/D 변환(12 bits, 100 Hz)한 후 PC에 축적하였다. 상기 과정을 ATS 권고안에 따라 시린지 이동속도를 넓게(PEF = 5~12LPS) 변화시키며 6회 반복하였다.

3.2. 표준 기류신호의 산출

그림 5의 실험장치에서 추출되는 용적신호를 미분하면 최대호식기류계로 유입되는 기류신호를 얻을 수 있다. 그러나 미분과정에서 발생하는 잡음을 제거하기 위하여 일차적으로 용적신호를 3점 이동평균(moving average)한후 미분하였다. 미분된 신호에 대해 이차적으로 5점 이동평균하여 최종적인 기류신호를 얻었다. 이와같이 산출된 기류신호는 정확한 용적의 시린지로부터 얻은 것이므로 최대호식기류계로 유입되는 정확한 표준 기류신호로 간주할 수 있다. 또한 2단계의 이동평균 과정을 통하여 불필요한 잡음을 제거할 수 있었다.

3.3. 압력-기류 특성식 산출

압력신호로부터 기류신호를 산출하기 위해서는 두 신호 간의 특성식이 필요하다. 따라서 6회의 시린지 운동에서 얻은 압력신호(P_m)와 표준기류신호(F_s)로부터 최대치를 각각 구하였으며 2차 선형 회귀분석을 행하여 최대압력치들과 최대기류치들 간의 관계식을 산출하였다. 최대치를 사용하여 특성식을 구성한 것은 기존

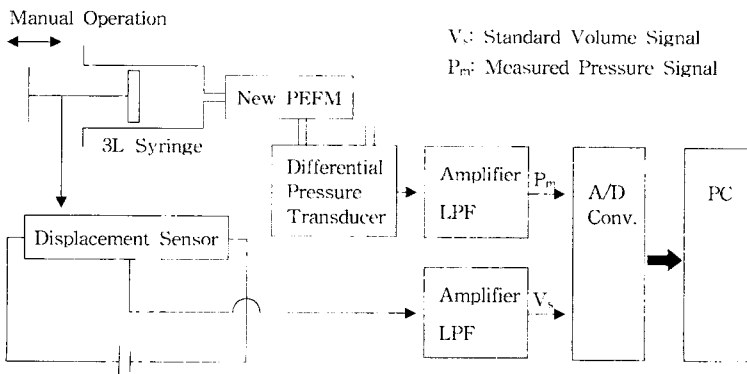


그림 5. 기류생성 및 계측장치의 모식도
Fig. 5. Experimental set-up of flow generation and measurement.

의 상용 최대호식기류계가 호식기류의 최대치들을 측정하는 것이므로 기류 최대치인 PEF의 계측 정밀도를 최대화하기 위함이다. 압력-기류 특성식을 구한 후 압력신호를 이 특성식에 대입함으로써 계측되는 기류신호(F_m)를 산출하였으며, 이를 용적신호로부터 얻은 표준기류신호와 비교하였다.

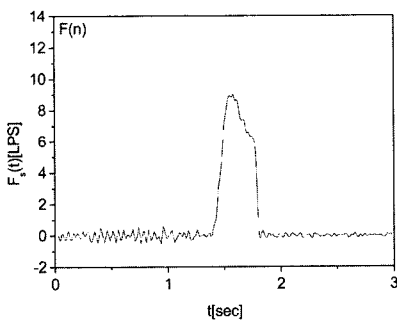
3.4. 폐활량 매개변수 산출

압력신호로부터 얻은 기류신호와 용적신호로부터 얻은 표준 기류신호 각각으로부터 중요한 폐활량 매개변수인 강제폐활량(FVC, Forced Vital Capacity), 최대호식기류(PEF, Peak Expiratory Flow Rate), 그리고 평균기류(FEF25-75%, Forced Expiratory Flow rate over 25-75%FVC)를 산출하여 상호 비교함으로써 계측 정밀도를 평가하였다. 가능한 큰 PEF를 얻기 위하여 실험시 시린지 스트로크의 시간 간격이 1초를 넘지 않았기 때문에 FEV1.0은 산출하지 않았다. 그러나 FEV1.0 역시 FVC와 유사한 용적 변수이므로 실험 결과의 해석에 주요한 영향을 미치지 않는다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 표준기류신호의 산출

앞서 기술한 대로 시린지의 수동 운동시 선형거리센서로부터 얻은 용적 신호를 2단계 이동평균하여 표준기류신호(F_s)를 얻었다. 6번의 반복실험 결과 중 대표적인 예를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 2단계 이동평균 없이 용적신호를 단순 미분한 기류신호이고 6(b)는 2단계 이동평균을 적용한 표준 기류신호이다. 이동평균 과정에 의해 신호파형의 왜곡없이 현저하게 잡음이 감소된 것을 관찰할 수 있다. F_s 를 적분한 결과



(a) 용적을 미분한 기류신호

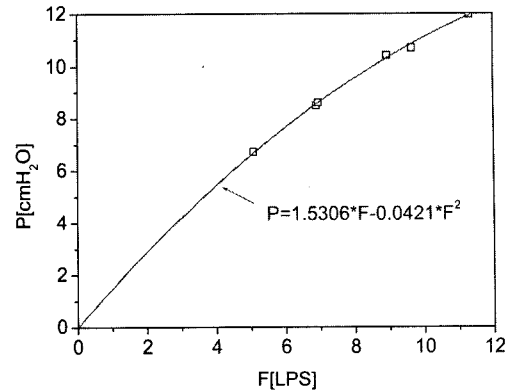


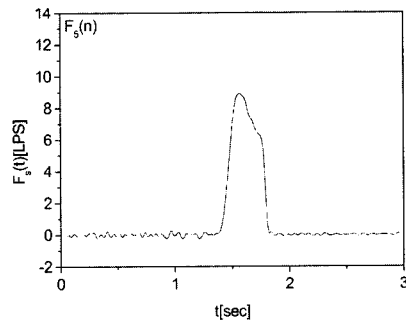
그림 7. 최대압력과 최대기류치간의 특성곡선
Fig. 7. Quadratic relationship between maximal pressure and flow rate.

시린지 용적인 3 L로부터 $\pm 1.0\%$ 이내의 오차범위 내로 정확하였으므로 이동평균 과정에 의한 신호 왜곡이 없음을 재차 확인할 수 있었다. 따라서 선형 거리센서를 사용하여 용적신호를 얻고 이로부터 표준 기류신호를 산출하는 과정이 충분히 정확함을 확인하였다.

4.2. 압력-기류 관계

압력신호로부터 계측(P-F) 특성식을 산출하기 위해 6번 반복한 실험 각각에서 최대압력과 최대기류치를 구하여 그래프 상에 나타내었다(그림 7). 최대압력과 최대기류치 간에 2차 선형 회귀분석을 행하였으며, 매우 높은 상관관계를 얻을 수 있었다($r > 0.9999$, $P < 0.0001$).

압력-기류 특성식에 압력신호를 대입하여 기류신호(F_m)를 산출하였으며, 그림 6(b)의 F_s 신호와 함께 중첩하였다(그림 8). 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 최



(b) 2단계 이동평균한 기류신호

그림 6. 표준기류신호

Fig. 6. Standard flow rate signal.

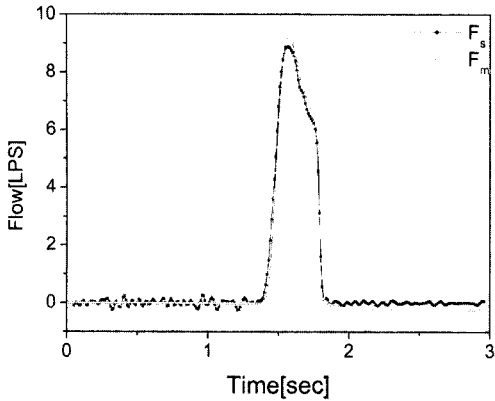


그림 8. 측정기류신호(F_m)와 표준기류신호(F_s)
Fig. 8. Measured flow rate and standard flow rate.

대압력치와 최대기류치 간의 특성식을 사용하여 산출한 F_m 이 정확한 기류신호인 F_s 와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 기류계측의 정밀도 검증시 궁극적으로 중요한 것은 폐활량 매개변수의 정밀도이므로(아래에 기술) F_m 과 F_s 간의 정량적 일치도를 추가적으로 검증하지는 않았다.

4.3. 폐활량 매개변수

폐활량 매개변수인 FVC를 계산하기 위해 F_m 과 F_s 를 적분하였으며, 두 신호의 용적 오차는 모두 1% 미만으로, ATS의 허용 오차(< 3%)를 잘 만족하였다. 이러한 작은 오차는 본 연구에서 제시하는 기류 계측기술을 폐용적 측정에 적용할 수 있으며, 또한 표준 기류신호 산출 과정이 충분히 정확함을 반영한다. F_m 과 F_s

로부터 PEF와 FEF25-75%를 산출하여 비교하였으며, 각각 0.9984, 0.9758의 충분히 높은 상관관계를 나타내었다(그림 9). 측정 오차는 6회 측정 모두 ATS의 허용 오차인 5% 미만이었다. 그림 9의 좌측은 F_m 과 F_s 로부터 산출한 PEF의 비교 그래프로서, 압력-기류 특성식 산출시 압력과 기류 각각의 최대치를 채택하였으므로 identity line과 일치함을 볼 수 있다. 또한 각 스트로크에 대한 평균기류(PEF25-75%)를 계산하였을 때, 그림 9의 우측에서 볼 수 있는 바와 같이 F_m 과 F_s 간에 작은 편차가 관찰되지만 상관계수 0.95 이상으로 F_m 이 F_s 를 충분히 만족함을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구가 제시하는 소형 공기챔버를 사용한 호식기류 계측기술은 중요 폐활량 매개변수들인 FVC, PEF, FEF25-75%를 충분히 정확하게 산출할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 호식 기류를 챔버 내 공기 압력으로 변환시키기 위해 상용화된 최대호식기류계 내에 장착할 수 있는 소형 공기챔버를 제작하였다. 공기챔버 내에서 측정된 압력신호는 기류와 2차식의 관계가 있었다. 압력으로부터 산출된 기류신호는 표준 기류신호와 잘 일치하였으며, 중요한 폐활량 매개변수들의 계측정밀도는 미국흉부학회의 표준 권고안을 충분히 만족시키는 것으로 평가되었다. 본 연구에서 제안하는 새로운 호식기류 계측기술을 적용하면 연속적인 기류신호를 얻을 수 있으므로 간편하게 폐활량 검사를 집에서 수행할 수 있으며, 데이터 통신도 가능하므로 만성 천식질

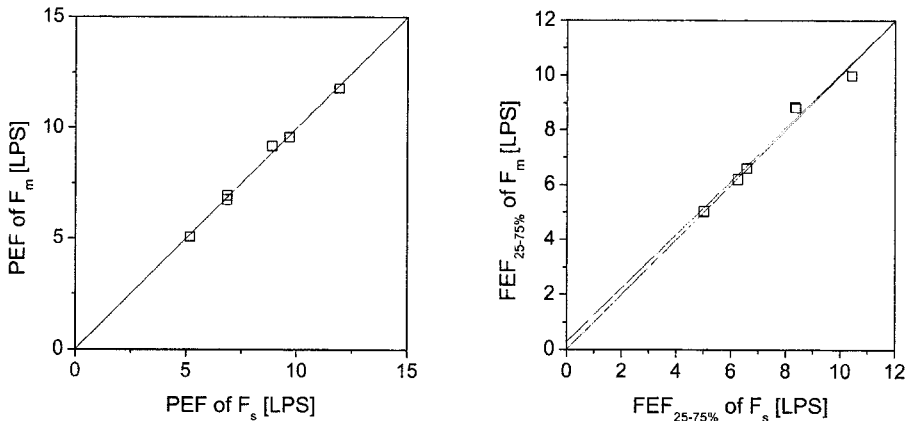


그림 9. F_s 와 F_m 으로부터 산출한 PEF(좌)와 FEF25-75%(우)
Fig. 9. PEF(left) and FEF25-75%(right) data evaluated from both F_m and F_s . High enough correlations are observed for both parameters.

환자들의 원격 관리에 유용하게 응용되리라 사료된다.

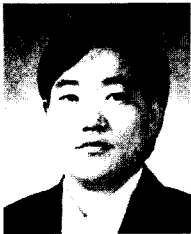
감사의 글

본 연구는 충청북도에서 지원하는 2003년도 첨단산업연구개발지원사업의 지원에 의해 수행된 바, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

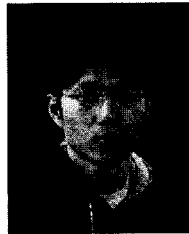
[1] A. Greening, "General Principles", In: Manual of Asthma Management, pp. 331-337, Ed. by P.M. O'byme, N.C. Thomson, W.B. Saunders, New York,

2001.
 [2] S. Bellofatto, "Portable Peak Flow Meter", U.S. Patent No. 5, 224487, 1993.
 [3] R.E. Kanner and A.H. Morris, "Forced Expiratory Spirogram", In: Clinical Pulmonary Function Testing, pp. 1-7-10, Intermountain Thoracic Society, Salt Lake City, 1975.
 [4] 김현식, 김경아, 이재현, 이태수, 차은중, "스프링 및 공기 탄성력을 이용하는 호식 기류 계측 기술", 제 26회 대한의용생체공학회 춘계학술대회, p. 103, 2002. 5. 18.
 [5] 차은중, 김경아, "연속적인 호식기류계측이 가능한 최대호식 기류계", 발명(한국), 출원번호 10-2003-0032763, 2003. 5.23.



김 경 아

- 1991 충북대학교 자연과학대학 물리학과 학사
- 1993 충북대학교 자연과학대학 물리학과 석사
- 2001 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 박사
- 2001 씨케이인터내셔널 연구실장
- 주관심 분야 : 생체계측, 물리센서, 심폐의료기



이 재 현

- 1999 고려대학교 응용전자공학과 졸업
- 2001 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 석사
- 2001 씨케이인터내셔널 연구원
- 주관심 분야 : 물리센서, 정밀계측



김 군 진

- 1990 한양대학교 전자공학과 학사
- 1992 한양대학교 전자공학과 석사
- 1991 대우전자(주) 정보통신연구소 선임연구원
- 1999 LG전자(주) DM연구소 선임연구원
- 2001 청주기능대학 전임강사
- 2003 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 박사과정
- 주관심 분야 : 생체계측, 정밀계측



이 태 수

- 1981 서울대학교 전자공학과 학사
- 1983 서울대학교 대학원 전자공학과 석사
- 1990 서울대학교 대학원 제어계측공학과 박사
- 1991 충북대학교 의과대학 의공학교실 교수
- 주관심 분야 : 의학영상 시스템, 의학영상 처리 및 분석, 3차원 의학영상 및 가상현실, PDA 의료정보 응용



차 은 중

- 1980 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사
- 1987 미국 남가주대학 의공학 박사, Research Associate
- 1988 충북대학교 의과대학 의공학교실 교수
- 2001 씨케이인터내셔널 대표 겸직
- 주관심 분야 : 생체계측, 물리센서, 심폐의료기, 정밀계측