

논문 2002-11-3-01

호흡기류를 동압력으로 변환하는 기능성 일회용 호흡관

김경아*, 김현식*, 이태수*, 차은종*

Functional disposable use flow tube converting the respiratory air flow rate into averaged dynamic pressure

Kyung Ah Kim*, Hyun Shik Kim*, Tae Soo Lee*, and Eun Jong Cha*

요 약

호흡기류는 모든 호흡기능검사시 측정해야 하는 필수적인 생체신호이다. 기존에 사용되는 호흡기류 측정기들은 검사의 신뢰도와 위생상의 문제가 상존해 있는 바, 새로운 측정기술을 창안하였다. 베르누이의 물리적 에너지 보존원리에 입각하여 양방향 호흡기류를 평균동압력으로 변환함으로써 호흡기류를 측정하는 기법을 도입하였다. 플라스틱 재질의 측정소자를 종이 재질의 호흡관에 체결한 기능성 일회용 호흡관을 설계·제작하였다. 미국 흉부학회의 표준 실험방법에 따라 측정의 정밀도를 평가한 결과 용적측정의 95% 신뢰구간이 약 $\pm 1.5\%$ 이었다. 미국 흉부학회의 오차기준이 $\pm 3\%$ 이고 상용센서들의 오차 측정치가 최대 $\pm 8\%$ 까지 도달함을 볼 때 월등히 정확한 측정이 가능하였다. 일회용으로 설계·제작한 결과 사공간과 위생상의 문제도 없으므로 기존의 호흡기류 측정기술들이 내포하는 문제점들을 모두 제거하였다. 따라서 본 연구의 기능성 일회용 호흡관은 폐활량계와 같은 임상검사를 위한 호흡기류 측정장치에 유용하게 적용될 수 있다.

Abstract

Respiratory air flow rate is necessarily measured for the pulmonary function evaluation. The currently used devices are exposed to the problems of measurement reliability and cross-patient infection. The present study introduced a new technique which converted the bidirectional air flow rate into averaged dynamic pressure based on the famous Bernoulli's energy conservation principle. Single use plastic sensing element was assembled within the flow tube(mouth piece) made of paper, which was named "functional single use flow tube". Experiment demonstrated only $\pm 1.5\%$ relative error in the standard 3L volume measurement procedure well within the error limit suggested by the American Thoracic Society(ATS). Disposable use design completely eliminated cross-patient infection. The present device is best useful and safe for clinical respiratory air flow measurement such as spirometry.

1. 서 론

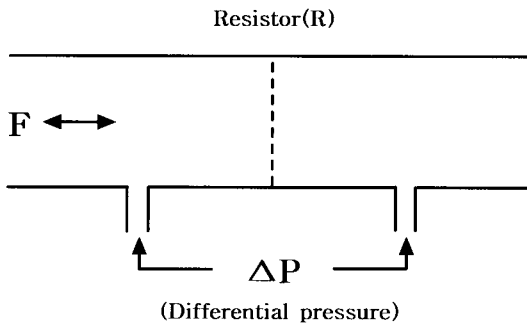
폐활량검사(spirometry) 등 모든 호흡기능 검사를 수행하려면 호흡기류의 측정이 필수적이다^[1]. 호흡기류는 피검자가 기도를 통하여 단위 시간당 내쉬거나(expiration) 들이쉬는(inspi-

ration) 공기의 용적(부피)으로 정의된다. 호흡기류를 측정하기 위하여 가장 광범위하게 사용되는 기술로는 pneumotachography^[2]와 turbinometry^[3]가 있는데, 전자는 기류가 기류통로 상에 위치한 유체저항을 통과할 때 발생하는 정압력(static pressure 혹은 lateral pressure)강하량을 측정하는 방식이고 후자는 작은 터빈이나 프로펠러의 회전수를 측정함으로써 기류를 추정한다.

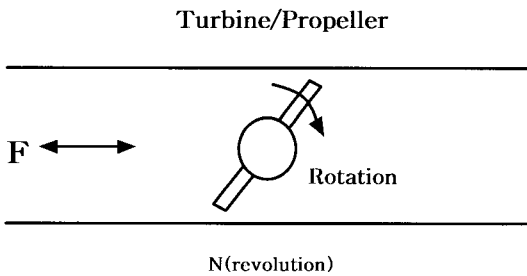
Pneumotachography나 turbinometry 기술 모두 호흡경로 상에 유체저항이나 터빈과

* 충북대학교 의과대학 의공학교실(Biomedical Engineering Department, School of Medicine, Chungbuk National University)
<접수일자 : 2001년 11월 30일>

같은 계측소자가 위치하고 있기 때문에 피검자의 호흡을 방해하는 임피던스 효과를 피할 수 없고, 호흡기류 내의 침 혹은 습기와 미세균 및 미세물질이 계측소자에 흡착함으로 말미암아 계측 특성이 변화하므로 검사의 신뢰도가 하락한다. 이 물질의 흡착은 피검자 간 감염(cross-patient infection)의 요인이 되므로 위생상의 안전 문제가 크다. 또한 임상검사시 계측소자를 포함하는 계측장치와 피검자의 입을 마우스피스로 분리하는 종이 재질의 일회용 호흡관으로 연결해야 하는데, 일회용 호흡관과 계측기가 직렬로 연결되므로 계측기가 차지하는 공간이 사공간(dead space)으로 작용하게 된다. 사공간이 커지면 피검자가 호흡할 때 이산화탄소가 축적되어 정상적인 호흡을 방해하게 되므로 검사의 신뢰도 하락 원인이 된다.



(a) Pneumotachography



(b) Turbinometry

그림 1. 기존에 사용되는 호흡기류 계측기술.
Fig. 1. Currently used respiratory air flow measurement techniques.

상술한 여러 가지 문제점들을 제거하기 위하여

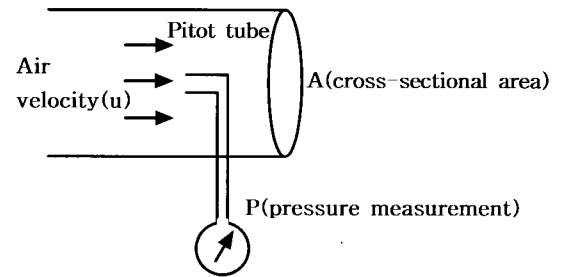
계측기 전체를 가열하여 습기를 증발시키거나 감염 방지용 필터(microbial filter)를 호흡 경로 상에 위치시키는 기법들을 사용한다. 그러나 전자의 경우 습기만이 제거될 뿐 미세균과 미세물질은 제거되지 않으므로 위생상의 문제는 그대로 남게 되고, 후자의 경우에는 추가적인 사공간이 발생하므로 검사의 신뢰도가 더욱 하락한다. 이와같이 호흡기능 검사의 신뢰도와 환자의 안전에 관계되는 위생상의 문제는 호흡기류 계측기술이 극복해야 하는 중요한 기술적 문제이다.

본 연구에서는 잘 알려진 베르누이의 에너지 보존 원리에 입각한 새로운 동압력(dynamic pressure) 계측기법을 창안함으로써, 기존에 사용하는 일회용 호흡관이 기류계측소자로 작용할 수 있도록 기능성 일회용 호흡관을 개발하였다. 이는 기존의 호흡기류 계측기술들이 내포한 문제점들을 일거에 모두 극복할 수 있었으며 실험 결과, 계측의 정확도 역시 우수하였으므로 저자들의 연구결과를 보고하고자 한다.

II. 기능성 일회용 호흡관의 설계 및 제작

1. 동압력 계측원리

호흡기류가 관 내를 흐를 때 기류가 보유하는 운동에너지와 위치에너지의 합이 보존된다는 베르누이 법칙을 도입하였다.



$$P = P_s + P_D = P_s + \frac{1}{2} \rho u^2, \quad \rho = \text{density}$$

그림 2. 단방향 기류속도의 계측원리.

Fig. 2. Unidirectional velocity measurement principle.

그림 2에 보인 바와 같이 기류와 평행한 방향으로 가는 관(Pitot tube)을 위치시키고 압력센

서를 연결하여 압력을 계측하면 기류의 위치에너지와 운동에너지에 각각 해당하는 정압력(P_S)와 동압력(P_D)의 합이 계측된다. 이때 운동에너지를 반영하는 동압력, P_D ,는 기체입자의 속도의 제곱에 비례하며 유체역학에서 단 방향 기류속도를 계측할 때 널리 사용되는 원리이다⁽⁴⁾. 즉,

$$u = S \cdot \sqrt{P_D} \quad (1)$$

S =sensitivity coefficient

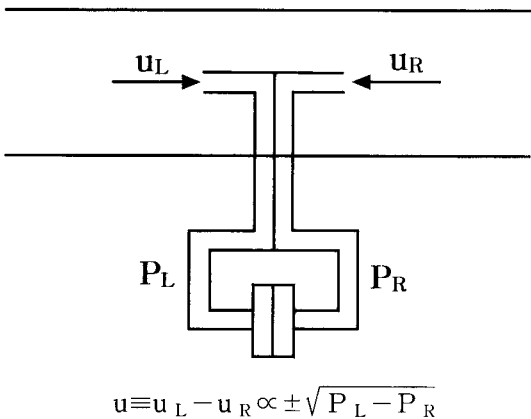


그림 3. 양 방향 기류속도의 계측 원리.

Fig. 3. Bidirectional velocity measurement principle.

호흡기류는 양 방향이므로 그림 3과 같이 가는 관을 대칭으로 위치시키고 압력의 차이(차압, differential pressure)를 계측하면 위치에너지가 서로 상쇄되어 기류속도에만 관계되는 동압력만이 계측되며 그 부호가 기류의 방향을 나타내게 된다. 기체입자들의 속도에 관의 단면적을 곱하면 기류가 얻어지므로 그림 3의 차압센서로부터 얻는 압력신호의 크기와 부호로부터 양 방향 호흡기류를 계측할 수 있다. 이때 기류의 속도는 원형관의 단면 내에서 일정치 않으므로 기류(F)는 속도의 면적적분으로 얻어지는데 원형관의 대칭성을 고려하여 원통좌표계를 사용하면

$$F = \int u(r)dA$$

$$= 2\pi \int r \cdot u(r)dr \quad (2)$$

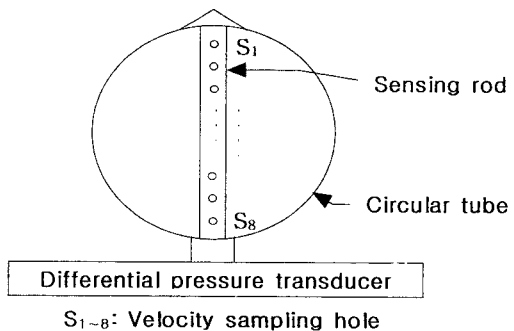
이다. 이때 r 은 단면의 중심으로부터의 거리이다. 식(1, 2)로부터

$$F = 2\pi S \int r \sqrt{P_D(r)} dr \quad (3)$$

이 된다. 따라서 원형 단면적 내의 동압력 분포를 중심으로부터의 거리함수로 얻으면 기류가 계측된다.

2. 계측소자의 설계

식(3)에서 동압력의 분포를 모든 지점에서 얻을 수는 없으므로 한정된 수의 동압력(혹은 기류속도) 샘플 지점을 설정해야 한다. 또한 차압센서를 2개 이상 사용하는 것은 비현실적이므로 샘플 지점들에서 나타나는 동압력값들을 물리적으로 평균하여 1개의 차압센서로 측정하는 것이 합리적일 것이다. 따라서 그림 4에 보인 것과 같이 가는 막대기 형태의 계측소자를 설계하였다. 직경이 27mm이고 기류가 통과하는 원형관 단면에 지름 방향으로 설치할 수 있도록 가는 막대기 형태로 하였으며 직경이 0.5mm인 8개의 샘플링 구멍(S_{1-8})을 설치하였다. 샘플링 구멍은 원형 단면의 중심으로부터 상·하부 반원에 각각 4개씩 서로 대칭이 되도록 하였다. 또한 측면 구조를 보면 기류 방향으로 좌우 대칭이 되도록 설치하여 그림 3의 양 방향 호흡기류 계측이 가능하게 하였다. 계측소자의 내부는 공기가 서로 통할 수 있도록 공간을 형성하되 좌·우 간에는 공기유통이 불가능하도록 벽을 설치하였다. 이 내부공간을 통하여 샘플링 구멍에서 나타나는 압력값들이 물리적으로 평균된다. 계측소자의 하부에는 차압센서가 연결되어 좌·우측 내부 공간에서 평균된 차압을 계측한다. 계측소자 몸체의 단면은 다이아몬드형으로 하여 기류가 안정된 유선을 형성하도록 하였다.



(a)

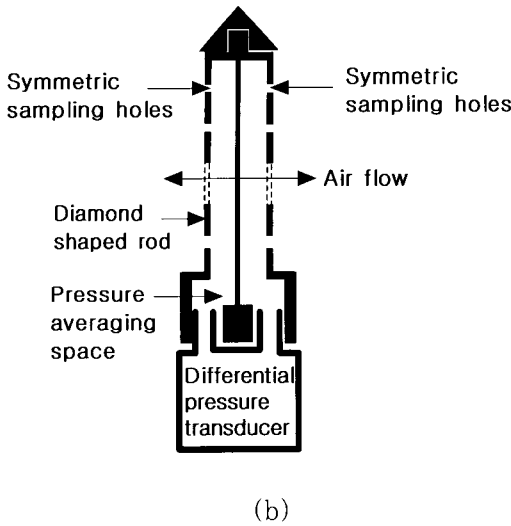


그림 4. 일회용 계측소자의 구조. : (a)정면도, (b)측면도
 Fig. 4. Single use sensor element. : (a) front view, (b) side view

한정된 수의 샘플링 구멍에서 발생하는 동압력을 계측하기 때문에 주어진 기류의 속도분포 (velocity profile)에 따른 오차가 발생한다. 일반적으로 기류의 축(flow axis)에서 가장 큰 속도를 보이며 축으로부터 멀어질수록 이차 이상의 함수로 속도가 감소되므로 기류 경사가 커지게 된다. 또한 축으로부터 먼 곳에 위치하는 샘플링 구멍은 상대적으로 넓은 면적 상의 속도를 반영하며 기류는 속도의 면적 적분이므로 각 샘플링 구멍에서의 동압력 계측치들을 물리적으로 단순 합산하는 것은 불합리하다. 따라서 그림 4(a)에 보인 샘플링 구멍들의 위치를 등간격으로 하지 않고 기류의 축에서 멀어질수록 샘플링 구멍 간의 간격이 좁아지도록 구멍 간의 간격을 조정하였다. 이를 "비균등 속도 샘플링 기법"이라 하며 오차를 최소화하는 효과가 있음이 발표된 바 있다⁽⁵⁾. 이 기법에서 샘플링 구멍의 위치는 아래와 같이 계산된다.

$$r_n = R \sqrt{\frac{2n-1}{8}} \quad \text{for } n=1,2,3,4 \quad (4)$$

이때 R은 원형 단면의 반경(13.5mm)이다. 식 (4)는 원형 단면의 중심(기류의 축)으로부터 샘플링 구멍까지의 거리를 나타내며 상부와 하부 반원 각각에 대칭으로 설치되는 4개씩의 샘플링 구멍의 위치이다. 이들이 비균등한 간격으로 설

치되기 때문에 동압력 평균과정에서 속도 경사가 큰 부분에서 계측되는 동압력들이 보다 큰 가중치를 가지게 되고, 따라서 계측오차를 최소화하는 효과가 나타난다⁽⁵⁾.

3. 기능성 일회용 호흡관의 제작

전술한 대로 기류속도를 동압력으로 변환하는 계측소자를 플라스틱 재질로 제작하였다. 금형으로 대량 사출하는 방식을 사용하였으므로 저가 일회용 계측소자로 사용할 수 있다. 기존의 호흡기류 계측기를 피검자의 입에 연결할 때 필수적으로 사용해야 하는 종이 재질의 일회용 호흡관(마우스피스)의 구조를 일부 변경하여 계측소자를 손쉽게 끼워 조립할 수 있도록 하였다. 계측소자와 일회용 호흡관이 서로 체결되어 호흡기류를 동압력으로 변환하는 일차적인 계측기능을 가지므로 이를 "기능성 일회용 호흡관"으로 명명하였다.

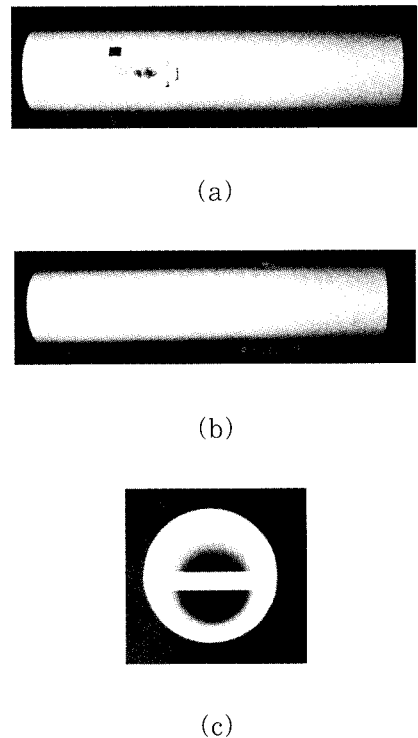


그림 5. 기류 계측기능을 가지는 일회용 호흡관의 실물사진. : (a)배면, (b)측면, (c)정면 사진
 Fig. 5. Functional single use flow tube for air flow rate measurement. : (a) bottom view, (b) side view, (c) front view

그림 5에 실물사진을 보였다. 계측소자의 하부가 기능성 일회용 호흡관의 배면 밖으로 돌출되므로 그림 4에 보인 바와 같이 호흡관의 하부에 차압 센서를 연결함으로써 평균 동압력을 계측할 수 있도록 하였다.

Ⅲ. 정밀도 검증실험

본 연구에서 설계·제작한 기능성 일회용 호흡관의 계측정밀도를 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 폐활량검사시 표준 calibration 기구인 3L 시린지(그림 6의 ①)를 수동으로 왕복 운동시키되 그 속도를 변화시켜 넓은 범위의 기류를 발생시켰다. 이 때 수동적인 방법을 사용하였으므로 임의의 속도 분포를 가지지만 그 적분치인 용적은 항상 일정한 3L이 된다. 이는 호흡기류 계측기를 calibration할 때 사용되는 표준 방식으로 미국 흉부학회(ATS, American Thoracic Society)에서 규정하였다⁶⁾. 3L 시린지의 출구에는 기능성 일회용 호흡관을 연결하고 이로부터 발생하는 동압력을 범용 차압센서(SDXL005D4, SenSym, U.S.A.)와 증폭 및 저역필터(20Hz) 회로를 통하여 전압신호로 변환한 후(그림 6). A/D 변환(12bit, 100Hz)하여 개인용 컴퓨터에 축적하였다. 3L 시린지의 수동 왕복운동이 피검자의 호식(push)과 흡식(pull)을 시뮬레이션하므로 각각 50회의 압력변화 신호를 축적하였다.

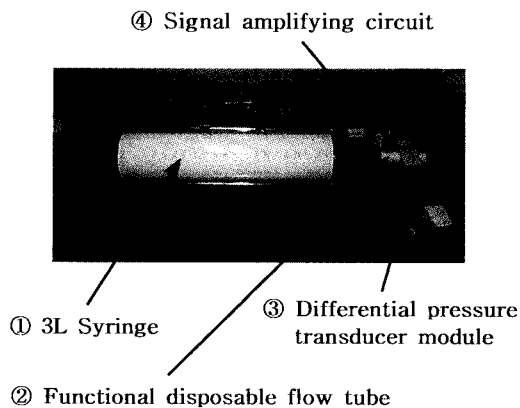


그림 6. 계측 정밀도 실험장치.
Fig. 6. Set-up for measurement accuracy experiment.

각각의 압력 신호에 제곱근을 취하고 적분한

후 평균치를 산출하였다. 이 압력 신호 평균치는 각각의 왕복 운동시 계측되는 용적들의 평균치에 해당하고 용적은 항상 3L이어야 하므로 3L와 평균치 간의 비(ratio)를 취하여 변환계수(calibration factor)로 사용하였다.

변환계수가 산출되었으므로 각각의 3L 시린지 왕복 운동 신호를 기류신호로 변환하였고 이를 적분하여 용적값들을 계산하였다. 또한 용적값들을 수동 왕복운동 시간으로 나누어 평균 기류를 산출하였다. 평균 기류값에 따라 용적값이 달라지는지, 그리고 참값인 3L와의 상대오차를 분석하여 계측정밀도를 평가하였다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

그림 7에 평균 기류 및 용적 계측 결과를 보였다. 수동 왕복 운동으로 발생시킨 평균기류값의 범위는 $\pm 10\text{L/sec}$ 이었으며 순간 최대 기류치는 약 $\pm 15\text{L/sec}$ 이었다. 이는 ATS에서 규정하는 최대치인 $\pm 12\text{L/sec}$ 를 훨씬 초과하는 충분히 넓은 범위의 기류이었다. 그림 7에서 평균기류값에 무관하게 용적 계측값 모두가 참값인 3L에 근접해 있음을 볼 수 있다. 상대오차는 모두 3% 이내이었으며 용적 평균치의 95% 신뢰구간은 약 $3\text{L} \pm 1.5\%$ 이었다. ATS가 오차 한계치를 3%로 규정하고 있음을 보면⁶⁾, 본 호흡관의 계측오차는 한계기준치의 50%이내이었다.

상용화된 제품들에 대해 동일한 방법으로 정밀도를 계측하였을 때 용적 계측 오차는 통상 5%이며 최대 8%까지 도달한다⁷⁾. 이와 비교해 볼 때 상용 제품들에 비해 적어도 3배 이상의 정밀도로 평가할 수 있다. ATS에서 3L 시린지를 수동으로 왕복시키며 인체의 호흡기류를 시뮬레이션하도록 규정하는 이유는 인체의 폐활량과 유사한 용적의 기류를 임의의 속도 분포로 발생시키기 위한 것이다. 본 연구의 기능성 일회용 호흡관이 ATS의 표준 방법에 따른 오차 한계보다 충분히 작은 계측오차만을 보였다는 것은 인체가 발생시키는 임의의 호흡기류를 정확하게 계측할 수 있음을 의미하므로 폐활량계와 같은 호흡기능 검사를 위한 기류계측장치에 유용하게 활용할 수 있다.

본 연구에서 개발한 기능성 일회용 호흡관은 별도의 계측기가 호흡 경로 상에 직렬로 연결되지 않고 차압센서만이 호흡관의 하부에 위치하기

때문에 사공간이 최소화되고, 호흡관의 내부에 설치되는 계측소자가 단지 가는 막대기 형태에 불과하므로 임피던스 효과가 0에 가깝다. 즉, 호흡방해 효과 거의 없으므로 검사의 신뢰도를 최대화할 수 있다. 또한 일회용이기 때문에 교차 감염 등 위생상의 문제는 전혀 없다. 따라서 기존에 사용해야 하는 감염방지 필터나 습기를 마르게 하는 건조장치 등이 모두 생략된다. 최근 환경 공해의 증가에 따라 호흡기를 통한 감염성 질환이 중요한 문제로 떠오르고 있음을 감안할 때 본 연구의 일회용 계측소자 및 호흡관은 호흡기류 계측기술을 진일보시킨 것으로 사료된다. 기능성 일회용 호흡관은 플라스틱 재질의 계측소자와 종이 재질의 호흡관으로 구성되므로 저가 대량생산이 가능하다. 특히 기존의 호흡기류 계측기 사용시 일회용 감염 방지 필터를 추가로 사용하거나 세척 및 소독이 필수적이므로 이에 소요되는 인력과 비용을 감안한다면 경제성 또한 월등하다. 따라서 임상검사를 위한 호흡기류 계측시스템에 적용한다면 기존의 계측기들이 지니는 문제점들을 모두 일거에 극복하면서도 기술성과 경제성이 동시에 높은 경쟁력 있는 제품화가 가능할 것이다.

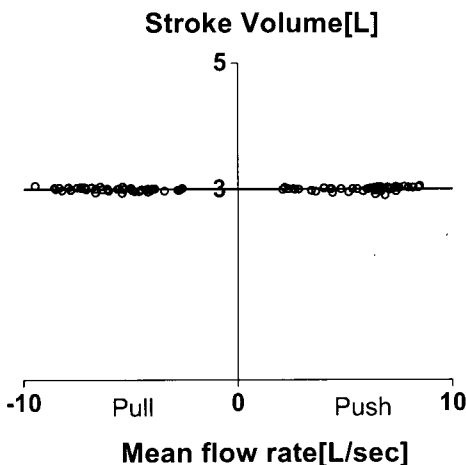


그림 7. 기능성 일회용 호흡관의 용적 측정 결과.
Fig. 7. Volume measurement results of the functional single use flow rate.

V. 결 론

본 연구에서는 물리적 기본원리인 베르누이의

에너지 보존원리에 입각한 새로운 호흡기류 계측 기술을 도입하였다. 호흡기류를 평균 동압력으로 변환하는 일회용 계측소자와 호흡관(마우스피스)을 일체화 한 "기능성 일회용 호흡관"을 설계·제작하였다. 실험 결과 상용화된 제품에 비해 월등히 우수한 계측정밀도가 검증되었다. 또한 사공간이 최소화되어 검사의 신뢰도가 최대화되고 일회용 계측소자이므로 위생성 등 피검자의 안전이 보장된다. 대량생산성 경제성 역시 높을 것으로 판단되므로 임상검사를 위한 호흡기류 계측장치에 유용하게 적용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업 지역대학 우수과학자 지원연구과제(2000-1-31400-001-3)의 지원에 의해 수행된 바, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 차은중, "호흡기 시스템의 측정", In: 의용 계측공학, 의공학 교육연구회 역편, 여문각, pp.509-598, 1993.
- [2] A. Fleisch, "Der pneumotachography: ein Apparat zur Beischwindigkeitregistrierung der Atemluft", Arch. Ges. Physiol. Vol.209, pp.713-722, 1925.
- [3] Micro Medical Ltd., "MicroLab Operating Manual", pp.2-4, 1998.
- [4] RM Olson, "Flow measurements", In: Essentials of engineering fluid mechanics, 4th. ed. pp.452-482, Maple Press Company, Ohio University, 1980.
- [5] 김경아, 김현식, 이태수, 차은중, "호흡기류 계측을 위한 기류속도 샘플링 기법", 제 24회 의용생체공학회 춘계학술대회, P77, 2001.
- [6] American Thoracic Society, "Standardization of spirometry", Am. Rev.

Respir. Dis., Vol. 136, pp.1285-1298, 1987.

용한 호흡기류 계측오차 최소화에 관한 연구”, 대한의료정보학회지, 제 6권 1호 pp. 67-78, 2000.

[7] 차은중, 강영규, 이태수, “히스토그램을 이

著 者 紹 介

김 경 아

1991 충북대학교 자연과학대학 물리학과 학사
1993 충북대학교 자연과학대학 물리학과 석사
2001 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 박사
2001 씨케이인터내셔널 인턴연구원
주관심 분야 : 생체계측, 물리센서, 심폐 의료기기

김 현 식

1993 한남대학교 화학과 학사
2002 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 석사수료
주관심 분야 : 생체계측, 물리센서, 심폐 의료기기

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 의료정보응용

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, 심폐 의료기기