

인체에서 맥파전달시간을 이용한 호흡노력 모니터링

정동근

동아대학교 의과대학 의공학교실
(2002년 10월 9일 접수, 2002년 12월 27일 채택)

Respiratory Effort Monitoring Using Pulse Transit Time in Human

Dong-Keun Jung

Department of Medical Engineering and Biophysics, College of Medicine, Dong-A University
(Received October 9, 2002. Accepted December 27, 2002)

요약: 본 연구는 동맥의 압력에 따라 변하는 맥파전달시간(pulse transit time, PTT)을 이용하여 호흡노력을 검출하기 위하여 호흡에 따른 PTT 변화를 관찰하였다. PTT는 심전도의 R파 피크로부터 말초에서 나타나는 광전용적맥파(photoplethysmograph, PPG)의 최대기울기점까지의 시간이다. 생체 신호를 아날로그-디지털 변환하여 PC에서 매번 심장주기마다 PTT를 측정하였으며 이산적인 결과를 스플라인 보간법을 사용하여 그래프로 제시하였다. 소프트웨어는 C++를 사용하여 windows 환경에서 운용하였다. 안정상태 호흡 시에는 호흡의 주기와 일치하는 주기적인 PTT의 변화가 있었다. 호흡 심도를 증가시키면 따라 PTT의 진폭이 증가하였으며, 기도저항을 증가시킨 경우에도 PTT의 진폭이 증가하는 양상을 보였다. 이러한 결과는 PTT가 호흡노력에 따라 반응하는 것을 시사한다. 아울러 PTT를 이용한 호흡노력 모니터링은 비침습적 방법으로써 호흡장애를 감시하는데 유용하게 사용될 수 있음을 시사한다.

Abstract: In this study, respiratory efforts were monitored by the change of pulse transit time (PTT) which is related with the arterial pressure. PTT is the time interval between the peak of R wave in ECG and the maximal slope point of photoplethysmogram(PPG). Biosignals, ECG and finger photoplethysmogram(PPG), were converted to digital data, and PTT was evaluated in personal computer with every heart beat. Results were presented as a graph using spline interpolation. The software was implemented in C++ as a window-based application program. PTT was periodically changed according to airflow in resting respiration. In the resting respiration, PTT was changed according to the respiratory cycle. The amplitude of PTT fluctuation was increased by deep respiration, and increased by partial airway obstruction. These results suggest that PTT is responsible to respiratory effort which could be evaluated by the pattern of PTT change. And it is expected that PTT could be applied in the monitoring of respiratory effort by noninvasive methods, and is very useful method for the evaluation of respiratory distress.

Key words: Pulse transit time (PTT), Respiratory effort, Respiratory distress

서 론

인체 호흡 운동의 비침습적 측정은 현재 체외에서 호흡운동에 따른 흉곽의 길이변화를 측정하는 것과 비강 입구에서 호흡기류의 온도를 모니터링하는 방법이 널리 사용되고 있다. 호흡장애가 있는 경우 호흡운동을 측정하여 평가할 수 있으나

호흡 노력에 대한 평가는 보고되어 있지 않다. 따라서 기도폐쇄에 의한 무호흡인 경우 호흡노력은 있으나 호흡기류 및 흉곽의 길이 변화는 나타나지 않는다. 흡식 중에 기도폐쇄가 있는 경우 호흡노력에 의하여 흉강 내 음압이 형성되며 수면 중에 발생하는 경우는 교감신경의 긴장도가 증가하여 숙면을 방해하는 작용이 있다[1,2].

인체의 흉곽내 심장과 대동맥 및 흉강은 연부조직으로 연결되어 있으며 호흡에 따른 흉강 내 압력 변화는 동맥계 압력에 영향을 미치는 구조로 되어 있다. 따라서 동맥내 압력 또는 긴장도를 측정함으로써 흉강 내압의 변화를 추정할 수 있다. 직접적인 방법으로 동맥 내압을 측정하면 호흡시의 흉강 내압의 변화를 측정할 수 있다. 그러나 침습적인 방법으로 동맥 내 카

Acknowledgement: 이 논문은 1997학년도 동아대학교 학술연구조성비(심진과제)에 의하여 연구되었음

부신저자: 정동근, (602-714) 부산시 서구 동대신동 3가 1
동아대학교 의과대학 의공학교실

Tel. (051)240-2868, Fax. (051)246-6481

E-mail. dkjung@daunet.donga.ac.kr

테터를 삽입하여 직접적인 동맥 내압을 측정해야 하므로 현실적으로 적용하는데 한계가 있다. 비교적 비침습적인 방법으로 흉강 내압을 측정하려는 시도는 그 동안 많이 있었으며 현재는 식도내로 카테터를 삽입하여 식도 내압을 측정하여 흉강 내압을 평가하는 실정이다[2]. 식도 내 카테터를 삽입하는 것은 합병증을 초래할 수 있으며 시술에 있어 많은 제약이 있다. 특히 수면중 식도 내압의 측정은 정상적인 수면을 방해하므로 합리적인 방법이 아니다. 심장에서 발생하는 맥동성 압력파형은 혈관계를 따라 전파되며 말초에서 기록이 가능하다. 맥파의 전파는 혈관의 긴장도에 비례하는 특성이 있으며 혈압의 상승 또는 혈관의 수축상태에서 맥파전파속도는 증가하고 맥파전달 시간(pulse transit time, PTT)은 감소하게 된다[3]. PPG를 이용한 PTT 측정법은 현재 임상적 응용을 위하여 순환기계 및 호흡기계에서 많은 연구가 진행되고 있으며, 연령과 혈관계의 상태에 따라 달라지는 특성이 있다[4]. 인체에 적용하는데 있어 PTT는 혈관의 경로에 지배를 받으므로 손가락과 발가락에서 기록되는 PTT는 다르며[5], 심박동수에 따라서도 변동이 생긴다[6]. 따라서 일정한 자세에서 측정할 경우 상대적인 비교를 할 수 있다. 말초 맥파를 이용한 의학적 진단 응용은 주로 동맥경화의 정도를 평가하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[7]-[9].

호흡 모니터링은 환자감시장치에 있어 필수적인 요소이며 독립적인 채널을 구성하고 있다. 본 연구에서는 환자의 호흡노력을 모니터링하는 데 있어 별도의 생체신호 검출을 하지 않고 기존 사용하고 있는 생체신호인 심전도와 PPG를 이용하여 호흡노력을 검출하는 방법을 개발하고자 하였다. 말초에서 PTT를 측정하기 위하여 심전도와 말초맥파를 기록하여 혈관 긴장도 변화를 검출하고 호흡노력에 따른 PTT의 변화 양상을 관찰하였다.

실험 방법

실험은 정상 성인 남자 (22 - 34세)를 대상으로 호흡 방법에 따라 PTT를 기록하였다. PTT 측정 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 심전도, 광전용적맥파(PPG)로 구성되어 있다. 피검자에게 Lead I으로 심전도용 일회용 디스크 전극을 가슴 양측에 부착하고 공통전극은 가슴 앞부분 아래쪽에 부착하였다. PPG는 오른손의 두번째 손가락에 투과형 광전용적센서(Sarotech, Seoul)를 설치하여 측정하였다. 피검자로부터 호흡 기류를 측정하기 위하여 구호흡시에는 마우스피스, 비호흡시에는 벤츄리마스크를 이용하여 호흡 기류를 Airflow transducer(BioPac, USA)를 이용하여 신호를 검출하였다. 생체신호증폭기는 ECG-Amp(Sarotech, Seoul), PPG-Amp(Sarotech, Seoul) 및 Bridge-Amp(Sarotech, Seoul)을 이용하였으며 아날로그-디지털 변환은 12 bit, 1 kHz로 RS-232C 포트를 통하여 PC에서 기록하였다. 30초간 심전도와 PPG를 화면에서 파형을 관찰하며 기록한 후 20초간 영역을 결과로 제시하였다. PTT를 그래프로 제시하기 위하여 심전도와 미분맥파의 피크

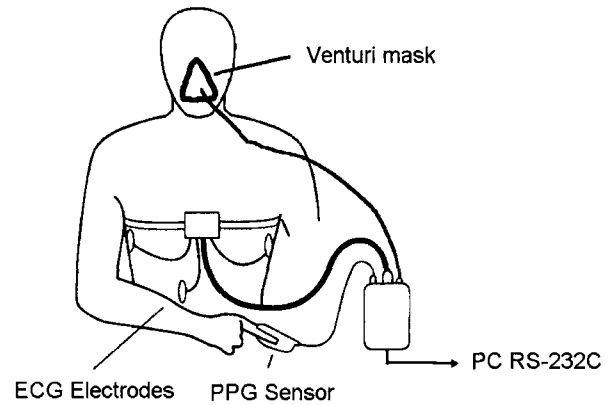


그림 1. PTT 측정 장면. 심전도 리드와 광전용적맥파 구강내압을 측정하기 위한 압력센서등이 생체신호증폭기에 연결되어 있다
 Fig. 1. PTT system setup configuration. This system presents electrocardiography (ECG) leads and photo-plethysmography(PPG) and airflow sensor

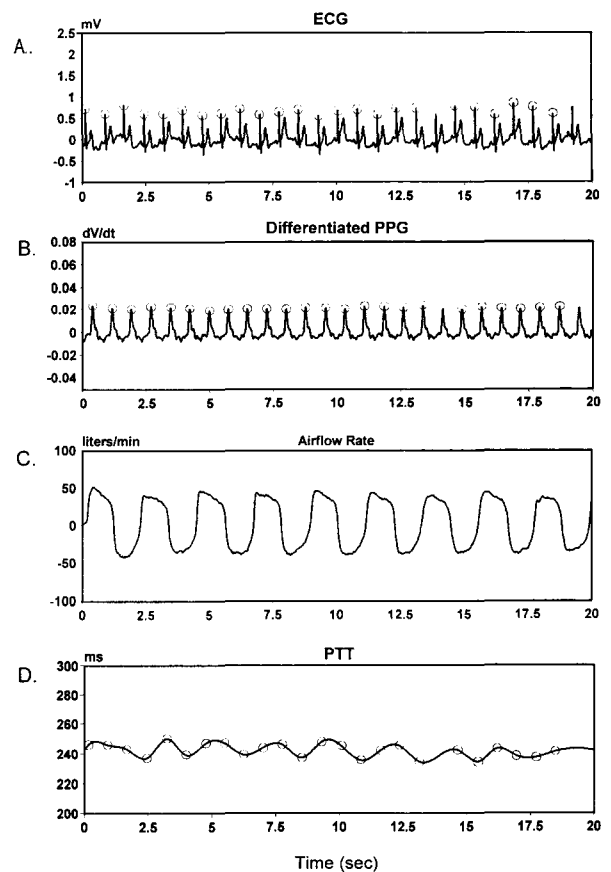


그림 2. 안정상태 앉은 자세 피검자에서 심전도, 미분맥파, 호흡기류, PTT의 기록
 Fig. 2. Tracings of ECG(A), differentiated PPG(B), airflow rate(C), and PTT in the subject of resting sedentary state

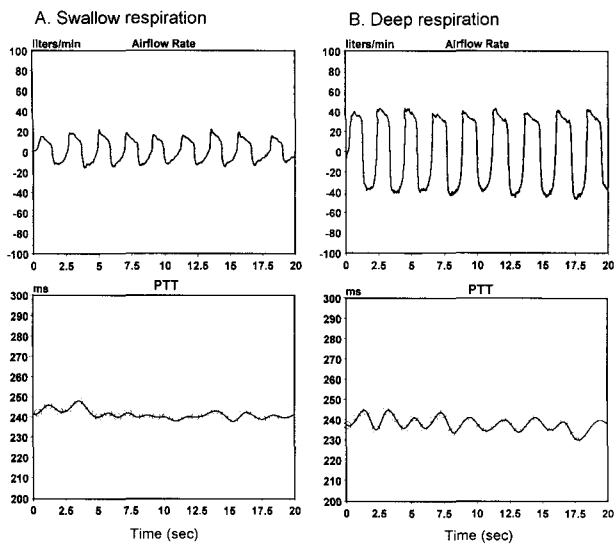


그림 3. 호흡 심도에 따른 PTT의 변화
 Fig. 3. Changes of PTT by the change of respiratory depth. Upper traces are airflow rate, and lower traces are PTT trends. A, swallow respiration; B, deep respiration

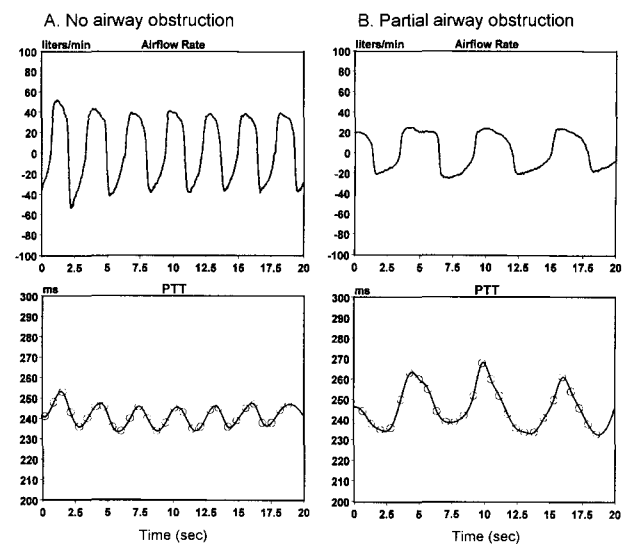


그림 4. 기도 저항에 따른 PTT 변화
 Fig. 4. Changes of PTT by the change of airway obstruction. Partial airway obstruction was performed by blocking one of nasal orifice. A, no airway obstruction; B, Partial airway obstruction

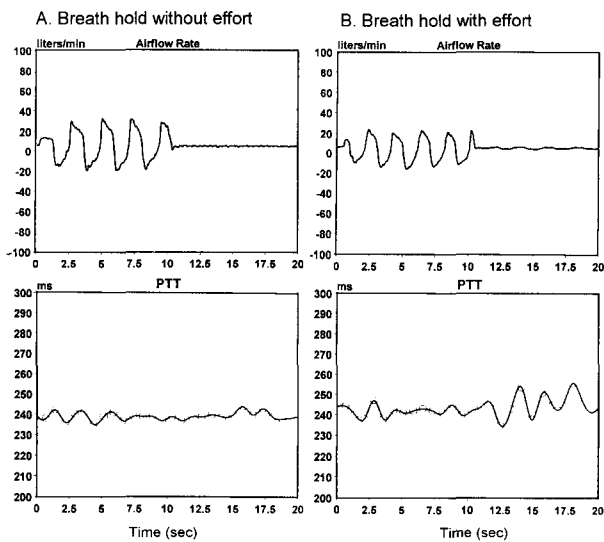


그림 5. 구호흡으로 호흡중 호흡을 멈추었을 때 PTT의 변화양상. 10초간 안정적인 호흡 후 기도를 폐쇄하였음. A, 자발적인 호흡 멈춤; B, 호흡성 노력을 하지만 기도를 폐쇄한 경우
 Fig. 5. Changes of PTT by the breath hold. Resting breathing for 10 seconds and following breath hold. A, breath hold without respiratory effort; B, breath hold with respiratory effort

를 표시하고 심장의 각 주기에서 두 신호의 시간 차이를 그래프로 제시하였다. PTT는 매 심박동마다 검출되는 이산적인 값이며, 데이터를 스플라인 보간하여 곡선으로 결과를 제시하였다. 소프트웨어는 C++을 사용하여 windows 환경에서 운용하였다.

피검자들은 검사전에 10분간 휴식을 취했으며 식후 2시간이 경과한 후에 실험을 시작하였다. 피검자 모두 심장혈관계에 질병이 없었으며 심전도 상에서 정상 소견을 보이는 것을 확인하였다. 혈압은 수축기 압력이 135 mmHg 이하이었으며 이완기 혈압은 95 mmHg 이하의 조건에서 PTT를 측정하였다. 호흡에 따른 PTT의 변화를 기록하기 위하여 피검자는 의자에 앉은 자세를 유지했으며 기도저항의 변화와 기류 측정을 위하여 벤츄리 마스크를 사용하였다. 안정상태 호흡과 과호흡 그리고 인위적인 기도 폐쇄에 따른 호흡을 피검자에게 방법을 지시하고 실험을 시작하였다.

실험 결과는 10명의 피검자에서 시행한 결과 중에서 대표적인 기록을 그래프로 제시하여 PTT와 호흡노력의 관계를 나타내었다.

결 과

의자에 앉아있는 안정상태 피검자로부터 심전도와 PPG 미분파형, 호흡기류, PTT의 양상을 그림 2에 제시하였다. 피검자는 벤츄리마스크를 이용하여 구호흡을 하고 있는 경우이다. 안정상태에서 심전도는 규칙적인 리듬을 보이고 있으며, 심전도와 미분맥파의 피크를 원으로 표시하였다. 호흡기류는 흡식을 +로 호식을 -로 표시하였다. 20초간 기록에서 호흡횟수는 9회이다. 매 심장주기에서 측정된 PTT를 원기호로 표시하였으며 스플라인 보간을 하여 그래프를 실선으로 제시하였다. 규칙적인 주기의 호흡에 일치하여 PTT의 변화가 있었으며 흡식 시에는 PTT가 증가하고 호식 시에는 감소하는 양상을 나타낸다.

그림 3은 구호흡에서 호흡 심도를 다르게 한 경우 PTT의 변화를 관찰한 것이다. 그림 3의 A는 호흡기류의 정점이 20 l/min 정도의 호흡을 하고있는 상태에서 PTT의 변화이며 B는 40 l/min 정도의 호흡시 PTT의 변화이다. 호흡빈도는 동일하면서 호흡 심도를 다르게 하였다. 그림 3의 A는 안정상태 앞은 호흡이며 PTT 변화가 작은 반면, 호흡심도가 커짐에 따라 PTT의 변화 진폭이 증가되는 것을 그림 3의 B에서 제시한다.

그림 4는 벤츨리 마스크를 착용하여 비호흡을 하면서 한쪽 코를 막아 기도저항을 다르게 한 상태에서 PTT의 변화를 관찰한 것이다. 그림 4의 A는 양쪽 코를 통하여 호흡하는 상태이며 B는 한쪽 코를 막고 호흡하는 경우이다. 한쪽 코를 막음으로써 기도저항을 증가시키고자 하였다. 기도저항의 증가로 호흡 기류의 진폭은 감소했으며 호흡빈도도 낮아졌다. 그러나 PTT는 진폭의 변화가 오히려 증가하는 양상을 보였다.

흉강내 압력변화를 인위적으로 조절한 경우 PTT의 변화 양상을 조사하기 위하여 안정상태 구호흡에서 호흡을 정지한 경우와 기도를 막고 호흡성 노력을 지속하는 경우에 PTT의 변화를 관찰하였다. 그림 5의 A는 자발적으로 호흡을 정지했을 때 PTT의 변화이다. 10초 경과부터 호흡을 멈추었으며 PTT는 특징적인 변화를 보이지 않았다. 그림 5의 B는 구호흡에서 기도를 폐쇄하고 호흡성 노력을 지속하는 경우에 PTT의 변화를 제시하였다. 10초 후부터 기도를 막았으며 이때 호흡기류는 변화가 없으나 PTT는 호흡운동에 따라 주기적인 변화를 보이며 안정상태 호흡보다 더 큰 진폭으로 변화를 나타내었다.

고 찰

동맥계에서 맥파의 전달속도는 혈관의 긴장도에 따라 결정된다. 심장에서 발생하는 맥파는 동맥계를 따라 전달되면서 혈관의 기계적 특성에 따라 파형의 특성이 달라진다. 혈관에서 맥파전달속도는 인체 및 실험동물에서 혈관의 경화 정도를 평가하는 인자로 널리 사용되고 있다[10]-[12]. 동맥에서 맥파의 전달속도는 혈관의 Young의 탄성계수 및 혈관의 두께에는 비례하고 혈관의 직경에 반비례하는 관계를 갖는다[13]. 일반적으로 맥파의 전달속도는 혈관의 긴장도에 비례하여 증가하므로 혈관이 긴장되는 조건이라면 맥파전달속도가 증가하는 특성이 있다 [3]. 본 연구에서는 맥파전달속도를 반영할 수 있는 말초부위의 PTT를 측정하였다. 맥파전달속도는 동맥에서 거리를 알고 있는 두 지점에서 맥파의 발생시간 차이를 측정하는 방법이며, PTT는 심전도 R파의 발생으로부터 인체의 손가락 끝에서 PPG를 측정하여 말초부위에 도달하는 맥파의 전달시간을 측정하는 것이다. PTT의 증가 또는 감소는 PWV의 감소 또는 증가를 반영하고 있으며 심장에서 말초 소동맥에 이르는 전 구간의 특성을 나타낸다고 할 수 있다. PTT는 심장의 구출전 수축기와 맥파 전달시간을 합한 값이며 심장의 구출전 수축기는 비교적 고정된 값이며 혈관내 맥파전달시간은 조건에 따라 변하는 값이다. 사지의 동맥 내 압력은 자세에 따라 정수

압이 달라지지만 고정된 자세에서는 정수압의 효과를 배제할 수 있다 [14]. 따라서 PTT를 이용한 호흡운동 모니터링은 고정된 자세에서 시행하는 것이 타당하다.

PTT를 측정하는데 있어 기준 시간은 심전도의 R파를 이용하지만 PPG의 기준점은 연구자에 따라 다르다. 일반적으로 맥파에서 기준점을 결정하는 방법은 맥파의 최소점을 이용하는 방법, 일차 미분의 최대점을 이용하는 방법, 이차 미분의 최대점을 이용하는 방법, 수평선과 수축기 상승 곡선의 접선의 교점을 이용하는 방법등이 알려져 있다[15]. 현재 상용화되어 있는 PTT 전용 측정 장비인 RM50 recorder(DeVilbiss, Parca-Meslay, France)는 수축기 PPG 진폭의 중간값을 기준으로 이용하고 있으며 수면중 호흡 장애의 진단에 이용되고 있다[16].

본 연구에서는 호흡기계의 기도저항이 호흡운동에 영향을 미치며 이러한 효과가 PTT에도 영향을 미치고 있음을 관찰하였다. 그림 2에서 PTT는 호흡기류와 주기가 일치하며, 호흡시 흉강내 압력 변화와 동반되어 변하고 있음을 보여준다. 호흡의 심도는 흉강내압의 변화에 의하여 조절되고 있으므로 호흡심도의 변화는 흉강내압의 변화를 반영하고 있다. 그림 3의 결과에서 호흡심도가 커짐에 따라 PTT의 진폭 변화가 커지는 것은 PTT를 통한 호흡운동의 검출이 가능함을 보여준다. PTT의 이러한 특성은 호흡 빈도를 달리했을 때도 나타나지만 호흡 빈도가 빠른 경우에는 PTT의 진폭 변화가 작게 나타남을 그림 4에서 볼 수 있었다. 그림 5에서 자발적 호흡 중지와 인위적 호흡중지에 따른 차이를 보여주고 있으며, 자발적 호흡중지 시에는 PTT의 변화가 없고 인위적 호흡중지 상태에서 호흡 노력을 하는 경우에만 PTT 변화 신호가 있는 것은 PTT의 변화가 호흡기류의 변화가 아닌 호흡 노력을 대변하고 있음을 시사한다. 이러한 결과는 호흡근육에 의한 호흡노력 시 흉강내에 압력의 변화가 증가되며 이러한 양상은 동맥계로 전달되어 PTT에 변화를 초래하는 것으로 추측된다. 본 연구는 호흡 노력의 양상과 PTT의 관계를 정성적으로 다루었으며, 호흡노력을 PTT의 변화로 해석할 수 있음을 제시하고 있다.

결 론

본 연구는 PPG, 심전도 등을 이용하여 호흡운동을 기록하기 위하여 맥파전달시간(PTT)의 변화를 기록한 결과, PTT는 호흡운동에 따라 반응하는 것을 관찰하였다. 안정상태 호흡 시에는 호흡의 주기와 일치하는 주기적인 PTT의 변화가 있었다. 호흡 심도를 증가시킴에 따라 PTT의 진폭이 증가하였으며, 기도저항을 증가시킨 경우에도 PTT의 진폭이 증가하는 양상을 보였다. 이러한 결과는 호흡운동에 따른 흉강내압의 변화를 심전도와 PPG를 이용하여 비침습적인 방법으로 측정 가능함을 보여준다. 본 연구에서 제안하는 방법은 이러한 호흡장애 환자에서 비침습적으로 호흡운동을 검출할 수 있어 향후 호흡운동 장애가 있는 환자의 호흡감시시스템에 유용하게 사용될 수 있는 의학적 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

1. M.H. Bonnet, "Infrequent periodic sleep disruption: effects on sleep, performance and mood", *Physiol Behav*, Vol. 45, pp. 949-1055, 1989
2. C.E. Sullivan, R.R. Grunstein, "Continuous positive airway pressure in sleep-disordered breathing", In: H. Kryger, T. Roth, W.C. Dement (eds) *Principles and practice of sleep medicine*, Saunders, Philadelphia, pp. 559-570, 1989
3. D.J. Hughes, S.F. Babbs, L.A. Geddes, et al, "Measurements of Young's modulus of elasticity of the canine aorta with ultrasound", *Ultrason Imaging*, Vol. 1, pp. 356-367, 1979
4. R.P. Smith, J. Argod, J-L Pepin, P.A. Levy, "Pulse transit time: an appraisal of potential clinical applications". *Thorax*. Vol. 54. pp. 452-458. 1999
5. M. Nitzan, B. Khanokh, Y. Slovik, "The difference in pulse transit time to the toe and finger measured by photoplethysmography" *Physiol Meas*, Vol. 23(1). pp. 85-93. 2002
6. M.J. Drinnan, J. Allen, A. Murray, "Relation between heart rate and pulse transit time during paced respiration". *Physiol Meas*. Vol. 22(3). pp. 425-432. 2001
7. P.V. Vaitkevicius, J.L. Fleg, J.H. Engel, et al, "Effects of age and aerobic capacity on arterial stiffness in healthy adults", *Circulation*, Vol. 88, pp. 1456-1462, 1993
8. R.B. Hickler, "Aortic and large artery stiffness: Current methodology and clinical correlations", *Clin Cardiol*, Vol. 13, pp. 317-322, 1990
9. M. Okada, "Possible determinants of pulse-wave velocity in vivo", *IEEE Trans Biomed*, Vol. 35, pp. 357-361, 1998
10. M. Anliker, M.B. Hstrand, E. Ogden, "Dispersion and attenuation of small artificial pressure waves in the canine aorta", *Circ Res*. Vol. 23, pp. 539-551, 1968
11. J. Chillon, C. Capdeville-Atkinton, I. Lartaud, et al, "Chronic antihypertensive treatment with captopril plus hydrochlorothiazide improves aortic distensibility in the spontaneous hypertensive rat", *Br J Pharmacol*, Vol. 107, pp. 710-714, 1992
12. R. Asmar, A. Benetos, J. Topouchian et al, "Assesment of arterial distensibility by automatic pulse-wave velocity measurement validation and clinical studies", *Hypertension*, Vol. 26, pp. 485-490, 1995
13. A. Noordergraaf, "Circulatory system dynamics", Academic press, New York, 1978
14. J.T. Huh, G.Y. Huh, D.K. Jung, "Relationship between body position and peripheral pulse arrival time", *Journal of KOSOMBE*, Vol. 22, pp. 133-138, 2001
15. Y.C. Chui, P.W. Arand, S.G. Shroff, T. Feldman, J.D. Carroll, "Determination of pulse wave velocities with computerized algorithms", *Am Heart J*, Vol. 121(5), pp. 1460-1470, 1991
16. J. Argod, J-L Pepin, R.P. Smith, P. Levy, "Comparision of esophageal pressure with pulse transit time as a measure of respiratory effort for scoring obstructive nonapneic respiratory events", *Am J Resp Crit Care Med*, Vol. 162, pp. 87-93, 2000