

자세변화에 따른 PWV 변화량의 평가

전석환, 정인철, 정상오, 윤형로

연세대학교 의공학과

Estimation of the Variation of Quantity in PWV in Accordance with the Changes of Position in Human

Sukhwan Jun, Incheol Jeong, Sango Jung, Hyungro Yoon

Department of Biomedical Engineering, Yonsei University

(Received October 29, 2008. Accepted April 2, 2009)

Abstract

The ideal method which measures a blood vessel of senility and degree of arteriosclerosis is to measure compliance of arterial and condition of blood circulation at the periphery. In these days vascular stiffness have been assessed by analyzing PTT (pulse transit time) from ECG and PPG. PTT is that between toe and finger each subject estimated through ECG and PPG signals. Two parameters, which are related to PWV, were tested with the time delay between the finger and toe. PWV is a variation of quantity which is associated with vascular stiffness. These researches which use PTT and PWV don't consider the blood vessel characteristic of an individual. In this current research, we have used with the blood vessel characteristic of an individual. That is an assessment of vascular stiffness using the variation of quantity in PWV with the changes of position in the subject.

PWV variation increased as functions of the subject's age. The increase of the PWV variation parameters with age is attributed to the direct decrease of the blood vessel compliance with different position. The quantity of variation estimated by experimental results is that old age's (75.78±7.75) case is 113.68% and young age's (26.47±2.04) case is 85.69%. We proved and presented about estimation of vascular stiffness of possibility by this result.

Key words : Vascular stiffness, pulse wave velocity (PWV)

1. 서론

A. 혈관의 경직도 측정법

혈관 관의 노화와 동맥경화의 정도를 판단하는 이상적인 방법은 동맥의 탄력성과 말초부위의 순환상태를 측정하는 것이다. 그러나 간편하면서도 신뢰할 수 있는 측정방법에 대한 연구가 아직 부족한 실정이다. 현재 임상에서는 심전도, 혈액검사, 혈압 등을 종합적으로 참고하여 판단하거나, 혈관 초음파나 조영제를 혈관에 투입해 검사하는 PET, MRI, CT 등을 통하여 판단하기도 한다. 이 검사들은 모두 혈관의 노화나 동맥경화와 관련은 있으나, 직접적으로 경화 정도를 나타내지는 못한다. 또한 기존 검사법은 환자의 혈관에 약물을 투여함으로써 환자에게 고통을 느끼게 하거

나, 모두 공간분해적인 검사들로 단순히 혈관의 폐쇄 정도만을 파악하는 수준에 머물러 있어 지금까지 혈관의 경직도를 정량적으로 파악하기 어렵다.

최근 혈관 경직도 평가를 위한 연구를 보게 되면 대동맥 경직도는 그림1과 같이 심전도(Electrocardiogram, ECG) 신호와 광용적맥파(Photo-plethysmography, PPG) 신호 이용하여 ECG의 R파와 말초에서 맥파의 특징 점까지의 시간을 측정하여 얻을 수 있는 맥파전달 시간 (Pulse transit time, PTT)을 분석함으로써 평가하는 방법이 일반적이다[1,2].

B. PTT & PWV 측정법

PTT의 시작점을 ECG의 R파에서부터 잡는다면 R파가 시작된 후 대동맥 판막이 열릴 때까지 심장의 등척성 수축기의 시간이

Corresponding Author : 윤형로
강원도 원주시 풍암면 매지리 연세대학교 첨단의료기기센터 218호
Tel : +82-33-760-2807 / Fax : +82-33-763-1953
E-mail : hryoon@yonsei.ac.kr

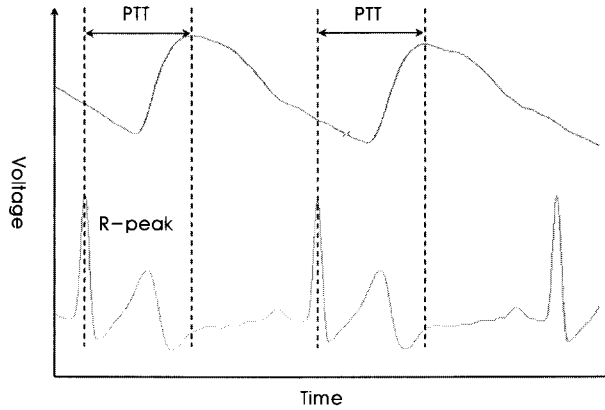


그림 1. PTT(Pulse Transit Time).
Fig. 1. PTT(Pulse Transit Time).

PTT안에 함께 포함되게 된다. 실제 혈관의 상태를 평가하기 위한 PTT 측정은 대동맥 판막부터 말초혈관까지 맥파가 혈관을 통과하는 시간만을 고려하여야 한다. 물론 비교적 짧은 시간이지만 각 개인의 심장 기능에 따라서 등척성 수축기의 시간은 PTT에 영향을 주게 된다. 이러한 심장의 등척성 수축기의 영향을 줄이기 위한 한 방법으로 손가락과 발가락 끝에서 측정된 PPG를 이용하여, 두 PTT(finger), PTT(toe)값의 차이를 최종 PTT(t-f)로 사용하는 방법이 있다. 이 방법은 개인적 특성인 등척성 수축기 요인의 영향을 줄임과 동시에 PTT(finger), PTT(toe)와 높은 상관성이 있어 혈관 경직도를 평가하는데 일반적으로 사용되고 있다[3].

혈관의 경직도가 심해질수록 혈류는 파이프 같은 대동맥을 타고 빠른 속도로 말초동맥으로 흘러갔다 돌아오는 동작을 반복하게 된다. 즉 대동맥 맥파전달 속도(Pulse wave velocity, PWV)가 빠르면 대동맥 경직도가 심한 것을 의미한다. 따라서 현재까지 비관혈적이며 비침습적인 방법으로 혈관 경직도 평가에 PWV가 사용되고 있다. PWV는 수식 (1)과 같이 PTT(t-f)를 구하기 위해 심장에서 서부터 PPG를 측정 한 곳까지의 거리 (l)를 PTT(t-f)로 나눈 값을 말한다. 이는 측정된 신체의 길이를 고려한 것으로 PTT와는 반비례 관계에 있다. PWV는 시간분해적인 측면에서 기존 임상적 평가 방법을 대체할 가능성을 제공하므로 혈관경직도 측정의 가장 보편적인 방법으로 사용된다. 하지만 이 방법들 역시 각 개인의 혈관 특성인 동맥벽의 두께, 혈관의 탄성계수, 내외부의 직경 등을 고려하지 않는다는 문제점이 있다.

$$PWV = \frac{l}{PTT} \tag{1}$$

식 (2)로 표현되는 원통 탄성관(Cylindrical thin-walled elastic tube)을 흐르는 유체에 대한 파동방정식에서 파동의 전파 속도는 식 (2)로 얻어진다. 식 (3)은 Moen-Korteweg 방정식으로 불리며 동맥의 PWV를 나타내는데 이용된다[4,5].

$$\frac{a^2 p}{az^2} = \frac{1}{\left(\frac{hE}{2ap}\right)} \cdot \frac{a^2 p}{at^2} = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{a^2 p}{at^2} \tag{2}$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{hE}{2r_1 p}} \tag{3}$$

$$E = \Delta P \left(\frac{r_2}{\Delta r_2} \right) \tag{4}$$

Co: 맥파 전달 속도, h: 동맥벽의 두께, E: 탄성계수,
r1 : 내부 반지름, p: 혈액의 밀도, ΔP: 내부 압력의 변화,
r2 : 외부 반지름, Δr2: 외부 반지름의 변화량

탄성 계수(E)는 내부 압력의 변화에 따른 외부 반지름의 변화의 비로서 나타내며 식 (4)과 같이 표현된다. 따라서 PWV는 혈관의 탄성계수, 내부반지름과 동맥벽의 두께의 비에 비례함을 알 수 있다. 이 수식들이 나타난 바와 같이 PWV는 혈관의 경직도를 평가할 수 있는 동맥의 탄력성과 직접적인 관련이 있는 정보이다. 하지만 각 개인마다 혈관특성이 다르기 때문에 PWV로만 혈관의 경직도를 평가하기에는 부족하다[6,7].

PWV를 측정 중 개인의 혈관의 특성 변화가 없다는 가정을 세우면, 식 (3)을 통해 PWV의 변화 요인은 혈관의 내부반지름이고 이 요인은 PWV와 반비례 관계에 있음을 확인할 수 있다[1,6].

이 같은 근거를 바탕으로 본 연구에서는 PWV와 내부반지름의 관계를 통해 실험 시 자세의 변화를 줌으로써 몸에 공급 되는 혈액의 양에 변화를 주고 이에 따른 속도의 변화량을 측정하여 혈관의 내부 반지름의 변화량을 간접적으로 측정하였다. 이는 압력 변화 시 혈관이 경직되어 있으면 상대적으로 탄성력이 좋은 혈관에 비해 혈류 속도의 변화량이 크다는 것을 역으로 유추 하는 방법으로 혈관의 경직도를 평가 할 수 있다. 이에 본 연구는 자세의 변화를 줌으로써 각 개인의 혈관특성을 고려하여 혈관의 경직도를 보다

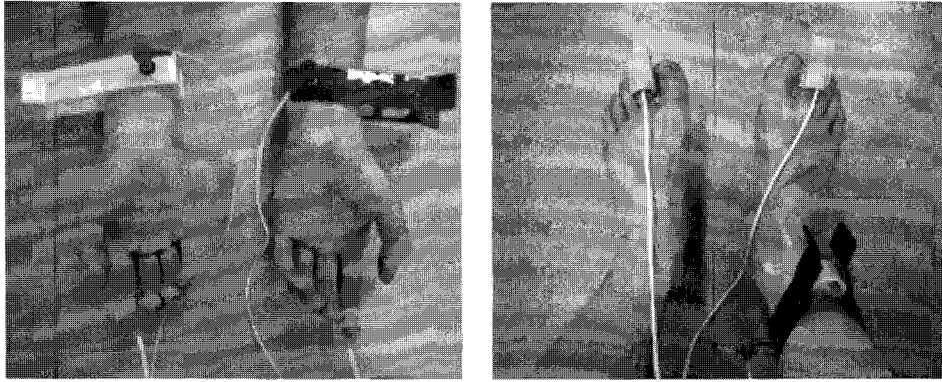


그림 2. Photo Plethysmograph 신호를 측정하기 위한 센서의 위치.
 Fig. 2. Sensor Position for acquiring Photo Plethysmograph Signal.

정확하게 평가하기 위한 새로운 방법을 제안하고 이를 평가하기 위하여 임상 실험을 실시하였다.

II. 본 론

A. 실험 대상

20대의 신체 건강한 성인 남녀 9명(남5, 여4 26.47 ± 2.04)과 60대 이상의 노인 8명(남2, 여6 75.78 ± 7.75)을 대상으로 실험을 진행하였다. 실험 전 모든 실험 대상자들은 실험에 관한 간단한 교육을 받았으며 연구 참여 동의서에 서명하였다. 대상 선정에 있어서 실험 전 설문지를 통해 흡연, 고혈압, 심장 질환, 당뇨병 여부를 확인하였고 기록하였으며 이는 니코틴이나 카페인, 심장질환, 당뇨병들이 혈액의 흐름과 혈관상태에 영향을 주기 때문이다. 따라서 실험 전 4시간 동안 물을 제외한 음식물, 흡연 및 과도한 운동을 금하게 하였다[7].

B. 실험 방법

측정 전에 심혈관 상태의 안정을 위해 5분 동안 휴식 할 것을 요청하였으며, 실험 대상자의 어깨를 기준으로 양쪽 팔, 다리까지의 길이를 측정하였다. PPG는 동시적으로 실험 대상자의 양쪽 손가락과 발가락에서 측정하였으며 PPG 신호는 광원과 광 검출기의 거리, 접촉력, 온도 등과 같은 외부 요인들에 영향을 받는다[11].

따라서 외부 요인들의 영향을 최소화 하고 심혈관계의 변화에 따르는 파형의 변화만을 관찰하기 위해 그림 2와 같은 밴드형과 집게형 PPG 센서(NELLCOR Max-N, DS-100A)를 이용하였으며 ECG 측정을 위한 전극은 그림2와 같이 고정하였다. 또한 온도에 의한 영향을 줄이기 위해 실험을 진행하는 동안 실험 대상자의 체온을 일정하게 유지시키고 실험실 내 온도는 24 ± 0.7 도를 유지하였다 [12].

전체적인 실험 과정은 그림 3과 같이 진행하였다. 누운 자세는 실험 대상자의 팔과 몸을 평행하게 하여 편안한 상태를 유지하도록 하였다. 이것은 유체의 압력 혼동 영향을 최소화 하는 자세이다 [8]. 움직임을 최소화하도록 하여 누운 자세에서 양 손가락과 발가락에서 네 개의 PPG 신호와 ECG 신호를 10분간 검출하였다. 앉은 자세는 최대한 편안 하도록 팔다리를 가능한 상체와 평행하도록 유도했다. 즉 실험 대상자는 누웠을 때와 유사한 자세를 취함으로써 자세변화에 따른 다른 영향들을 최소화하고, 심박출량 증가로 인해 혈압의 증가를 유도하였다[9]. 이러한 변화를 이용하여 누웠을 때와 동일한 방법을 통해 데이터를 획득했다.

C. 실험 장치 및 분석

데이터 획득 및 처리 과정은 그림 4와 같다. PPG 신호를 측정하기 위해 각각 Center-wavelength 940nm의 Infrared LED와 900nm의 Photo-detector로 구성된 센서를 사용하였으며 신호는

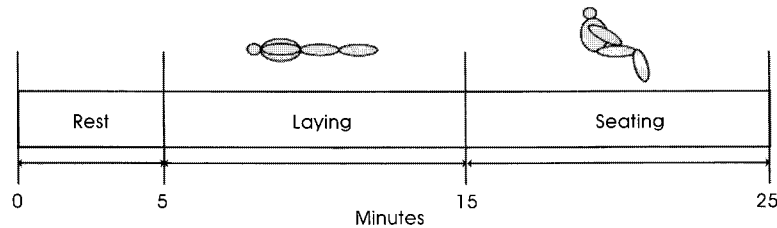


그림 3. 실험 방법.
 Fig. 3. Experiment Method.

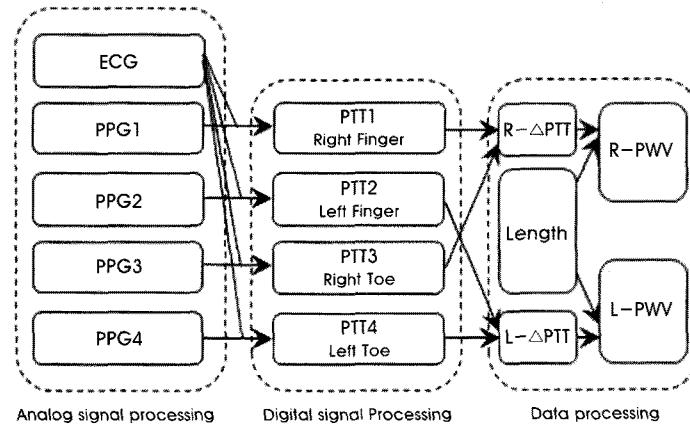


그림 4. 데이터 획득 및 데이터 처리 과정.
 Fig. 4. Data Acquiring and Processing Procedure.

Transmission mode로 측정되었다. Photo-detector에 의해 검출된 각 PPG 신호는 cut-off 주파수 20Hz로 Low-pass filtering, 0.05Hz로 High-pass filtering을 하고, ECG 신호는 cut-off 주파수 100Hz로 Low-pass filtering, 0.05Hz로 High-pass filtering을 하여 추출하였으며 12bit A/D converter를 갖는 DAQ CARD-6062E (National Instrument, USA)을 이용하여 1000Hz의 샘플링 주파수로 데이터를 획득하였다, PPG와 ECG 신호의 Windows XP 기반의 PC에서 Labview 8.2 소프트웨어를 통해 분석되었다.

ECG의 R peak와 각 채널의 PPG 특징 점 사이의 시간을 구하기 위해 저장된 데이터는 LabVIEW 8.2를 이용하여 FIR digital filtering을 통해 신호처리를 하고 Peak 검출을 실시하였다. 각 실험 대상자의 자세에 따른 10분 데이터를 각 채널 마다 2분씩 5개로 분할하여 ECG의 R peak와 PPG특징 점 사이의 PTT를 구하였다. 오른발-오른손(PTT3-PTT1), 왼발-왼손(PTT4-PTT2)의 PTT 차이를 구하고 그것을 각 개인의 혈관 길이의 차이([어깨-다리]-[어깨-팔])에 나누어 PWV를 구하였다. 그 후 실험 대상자들의 나

이와 자세변화에 따른 PWV 변화양상을 그래프와 표로 표시하였다. 이때 초기 5분간의 안정기의 데이터평균값을 1로 하여 각 자세 변화의 10분 데이터를 Normalization하였다.

III. 결과

그림 5는 자세 변화에 따른 PTT와 PWV의 변화를 2분씩 나누어 그 평균값을 나타낸 그래프이다. Normalization한 그래프를 보게 되면 자세 변화 시 연령이 높은 실험 대상자의 PTT와 PWV의 변화의 폭이 연령이 낮은 실험 대상자의 변화의 폭보다 큰 것을 볼 수 있으며 그 중에서도 각 개인의 측정부위의 길이(어깨부터 발까지의 길이-어깨부터 손까지의 길이)를 고려한 값인 PWV의 변화의 폭이 PTT보다 작은 것을 볼 수 있다. 그리고 누운 자세에서는 변동양상이 연령에 관계없이 일정한 것을 볼 수 있으며, 앉은 자세에서는 연령이 높은 실험 대상자들의 변동양상이 연령이 낮은 실험 대상자들 보다 큰 것을 볼 수 있다.

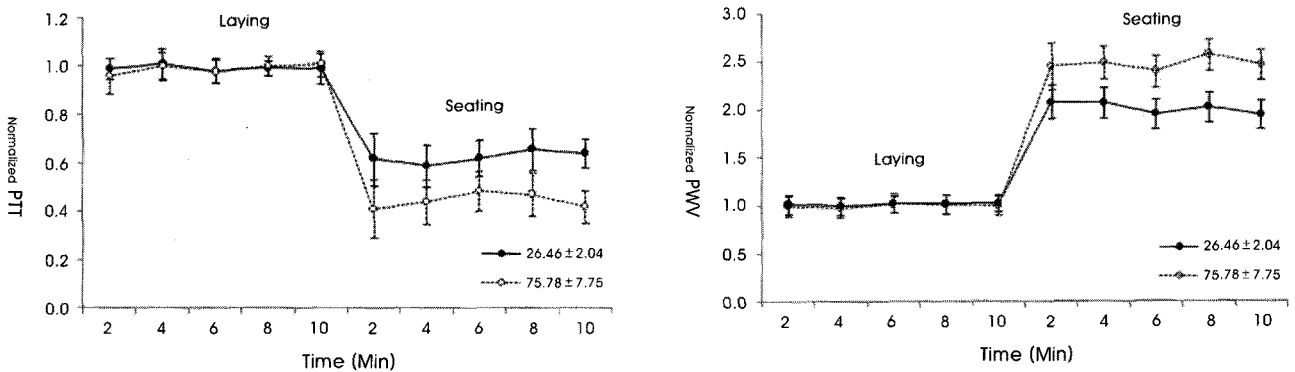


그림 5. 자세 변화에 의한 2분 마다의 PTT와 PWV의 변화 (a)PTT 변화양상, (b)PWV 변화양상.
 Fig. 5. Variations in PTT and PWV by Posture Change in 2 minutes (a)PTT Variation, (b)PWV Variation.

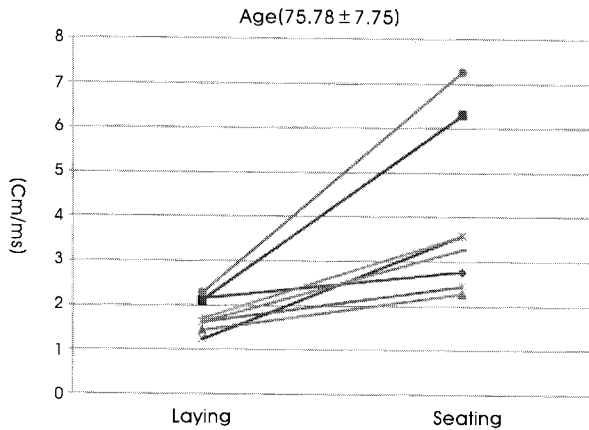


그림 6. 자세 변화에 따른 PWV 평균 변화량 (a)연령(75.78±7.75), (b)연령(26.47±2.04).
Fig. 6. Averaged PWV Variations by Posture Change (a)Age(75.78±7.75), (b)Age(26.47±2.04).

그림 6은 각 자세에서 평균값의 PWV변화량을 나타낸 그래프이다. 그림 6과 같이 각 개인들의 자세에 따른 변화량과 각 개인들 간의 전체적인 차이 또한 연령이 낮은 실험 대상자들 보다 연령이 높은 실험 대상자들이 큰 것을 볼 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 PTT나 PWV에 영향을 줄 수 있는 요인들을 고찰하고 동일한 실험대상자에 대하여 자세 변화를 통해, 혈관의 상태는 동일 조건으로 하고 자세 변화에 의한 혈액 순환량만을 변화시킴으로써 동맥 혈관의 탄성을 측정하였다. 20대(26.47±2.04)의 건강한 혈관을 가진 젊은이와 70대(75.78±7.75)의 비교적 혈관의 경화가 진행된 노인들의 자세 변화에 따른 PTT와 PWV의 변화 양상이 확연히 차이 남을 표 1, 2를 통해 확인할 수 있었다.

특히, 측정 혈관의 두께, 탄성계수, 혈액의 밀도가 변화 하지 않았다는 가정을 한 상태에서 측정 시 자세의 변화에 따라 연령이 높은 실험 대상자는 113.68%의 PWV변화를 보이고 연령이 낮은 실험 대상자는 85.69%의 PWV변화를 보였다. 이와 같은 PWV의 변화량은 연령이 높은 실험 대상자의 혈관 탄성도가 연령이 낮은 실험 대상자의 탄성도 보다 낮아서 자세에 따른 혈관변화, 즉 혈관의 내부반지름의 변화가 원활하지 못하다는 것을 두 값의 비교를 통해 확인 할 수 있었다.

PPG를 이용한 여러 선행 연구에서도 마찬가지로 혈관의 탄성도를 측정해 볼 수 있지만 [1,3] 본 연구에서 제시한 방법이 혈관의 경직도에 영향을 줄 수 있는 혈관의 여러 파라 메타의 영향을 고려하여 자세에 따른 PWV 변화량만으로 경직도를 평가한다는 점에서 본 연구의 의미를 찾을 수 있다.

향후 본 연구에서 제안한 방법의 신뢰성을 높이기 위해 직접적인 혈관의 경직도 평가와 측정 실험이 병행 되어야 하며, 또한 다양한 연령대 및 특정 혈관질환의 실험 대상자에 대한 실험 역시 병행 되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] S. W. Han, M. K. Byeon, J. K. Kim, W. Huh, "A study on arterial characterization by photoplethysmograph analysis", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol.41, no.5, pp.65-70, 2004.
- [2] K. Narimatsu, S. Takatani and K. Ohmori, "A multi-element carotid tonometry sensor for non-invasive measurement of pulse wave velocity", *Frontiers Med. Biol. Engng.*, vol. 11, no.1, pp.45-58, 2001.
- [3] M. Nitzan, B. Khanokh, and Y. Slovik "The difference in pulse transit time to the toe and finger measured by photoplethysmography" *Physiol. Meas.*, vol.23, no.1 pp.85-93, 2002.
- [4] W. Chen, T. Kobayashi, S. Lchikawa, Y. Takeuchi, "Continuous

표 1. 자세 변화에 따른 연령대 별 PPT의 평균값
Table 1. Averaged PTT Values by Posture Change

연령	Laying PTT평균값 (± 표준편차)	Seating PTT평균값 (± 표준편차)
(26.47 ± 2.04)	1.008(0.068)	0.631(0.161)
(75.78 ± 7.75)	1.037(0.103)	0.458(0.243)

표 2. 자세 변화에 따른 연령대 별 PWV의 평균값
Table 2. Averaged PWV Values by Posture Change

연령	Laying PWV평균값 (표준편차)	Seating PWV평균값 (표준편차)
(26.47 ± 2.04)	0.999(0.063)	1.855(0.583)
(75.78 ± 7.75)	0.972(0.135)	2.077(0.644)

- estimation of systolic blood pressure using the pulse arrival time and intermittent calibration”, *Med. & Biol. Eng. & Comput*, vol.38, no.5, pp.569-574, 2000.
- [5] M. W. Ramsey, W. R. Stewart, C. J. H. Jones, “Real-time measurement of pulse wave velocity from arterial pressure waveforms”, *Med. Biol. Eng. & Comput*, vol. 33, no.5, pp636-642, 1995.
- [6] T. K. Kim, A. R. Cho, B. Ch. Choi, and S. W. Baik, “The Changes of Differences of Pulse Transit Time between Toe and Finger in General and Epidural Anesthesia”, *Korean J Anesthesiol*, vol. 53, no. 1, pp.21-26, 2007.
- [7] Jason W. Daniels, “Effects of caffeine on blood pressure, heart rate, and forearm blood flow during dynamic leg exercise,” *J Appl Physiol*, vol.85, no.1, pp.154-159, 1998.
- [8] R. T. Netea, P. Smits, J. W. Lenders and T. Thien, “Does it matter whether blood pressure measurements are taken with subjects sitting or supine” *J. Hypertens*. vol. 16, no.3, pp.263-8, 1998.
- [9] R. Erts, I. Kukulis, J Spigulis, L. kere, “Dual channel photoplethysmography studies of cardio-vascular response to the body position changes”, *University of Latvia, Latvia*, vol.5859, pp.1-5, 2005.
- [10] J.G.Webster, Design of pulse Oximeters, IOP Publishing Inc, 1997
- [11] John Allen, 2007, “Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement”, *Physiol. Meas.*, Vol. 28, pp.R1-R39
- [12] Yukio Ito, Yoshihide Fuimoto and Takao Obara, 1992, “The role of epinephrine, norepinephrine, and dopamine in blood pressure disturbances in patients with pheochromocytoma”, *World Journal of Surgery*, Vol. 16, No.4, pp.759-763.