

PTT를 이용한 수축기 혈압의 측정에 관한 연구

박은경, 이상민, 한영호, 이종연, 권세윤, 김인영, 김선일

한양대학교 의공학교실
(2004년 8월 31일 접수, 2004년 12월 20일 채택)

A Study on Estimation of Systolic Blood Pressure using PTT

E.K. Park, S.M. Lee, Y.H. Han, J.Y. Lee, S.Y. Kwon, I.Y. Kim, Sun I. Kim

Dept. of Biomedical Engineering, Hanyang University
(Received August 31, 2004. Accepted December 20, 2004)

요약 : 혈압은 심혈관계 질환을 비침습적인 방법으로 진단할 때 사용하는 중요한 생리적 지표 중 하나이다. 보통 동맥 혈압을 측정하기 위해 사용되는 기존의 비침습적인 방법들은 커프를 사용해야 하며, 연속적 혈압 측정이 어렵다. 수축기 혈압과 맥파전달시간은 서로 반비례 관계를 가지고 있다. 실험은 피검자로부터 휴식을 통한 평온한 상태와 운동을 통한 격한 상태로부터 수축기 혈압과 맥파전달시간 데이터를 얻었다. 얻어진 데이터를 이용하여 각 피검자용 회귀식과 전체 피검자용 회귀식을 만들기 위해 선형회귀분석을 하였다. 만들어진 회귀식의 정확도를 검증하기 위해 측정된 수축기 혈압값과 예측한 수축기 혈압값을 비교하였다. 비교 결과, 각 피검자용 회귀식이 혈압계는 오차의 평균과 표준편차가 각각 $\pm 5\text{mmHg}$, 8mmHg 를 가져야 된다고 규정한 American National Standards Institute of the Association of the Advancement of Medical Instrument (ANSI/AAMI)에 적합하였다. 그러나 전체 피검자용 회귀식은 ANSI/AAMI의 규정에 적합하지 않았다. 이 결과는 맥파전달시간과 각 피검자에 맞는 초기 보정을 통해서 커프를 사용하지 않고, 연속적으로 수축기 혈압을 측정할 수 있음을 의미한다.

Abstract : Blood pressure (BP) is one of the important physiological parameters for diagnosing cardiovascular diseases by means of noninvasive method. Existing noninvasive methods for measuring arterial BP have to use cuff and difficult in measuring arterial BP continuously. Systolic blood pressure (SBP) and pulse transit time (PTT) have a kind of inverse relationship. We acquired PTT data when subjects were in relaxation and also after exercise. We performed the linear regression analysis for making the regression equations for each subject and the regression equation for all subjects. We compared the estimated SBP with the measured SBP to check the accuracy of our regression equations. From the result, the regression equations for each subject was appropriate according to the American National Standards Institute of the Association of the Advancement of Medical Instrument (ANSI/AAMI) which says that BP devices should have $\pm 5\text{mmHg}$ mean of error and 8mmHg standard deviation of error. However, the regression equation for all subjects was not proper to ANSI/AAMI recommendation. The result means that, without cuff, we can continuously estimate each subject's SBP through PTT and individual calibration.

Key words : Systolic blood pressure, Pulse transit time(PTT), Noninvasive, Cuffless

서 론

환자에게 혈압을 측정하는 일은 임상에서 보편적인 방법 중의 하나로 진찰실이나 수술 중에 시행하고 있다. 측정된 혈압은 매우 중요한 생리적 지표로서 심장의 출력, 혈관 벽의 탄력성, 생리적인 변화 등을 나타내 의사가 환자의 심혈관계의 통합된 기능을 이해하는데 도움을 준다. 혈압의 측정방법에는 크게 침습적인 방법과 비침습적인 방법으로 나눌 수 있다[1][2]. 침습적인 방법으로는 연속적이

이며 정확한 혈압 측정과 함께 혈액샘플의 채취가 가능하지만 도관(catheter)의 삽입에 따른 기술적인 문제와 감염 및 부작용의 위험이 따르는 단점이 있다[2]. 비침습적인 방법으로는 코르토코프 소리(korotkoff sound)를 이용한 청진법(auscultatory method)과 혈류의 흐름에 따른 진동에 의한 오실로메트리 방법(oscillometry method) 등이 존재한다[1][2]. 이러한 비침습적인 혈압 측정방법은 간편하게 혈압을 측정할 수 있는 장점이 있지만 측정자의 주관에 의해 측정값이 변동될 수 있고, 커프(cuff)를 사용해야하며 연속적인 혈압파형을 측정할 수 없는 단점이 있다.[1-4]

이러한 단점들을 보완하기 위해 최근에는 심장의 대동맥판(aortic valve)에서 말초까지 혈류가 흐르는 시간을 이용한 맥파전달시간(pulse transit time, PTT)으로 혈압을 측정하기 위한 방법이 연구되고 있다[5-8].

혈압은 Bramwell 과 Hill에 의해 소개되어진 식(1)에 의

This study was supported by a grant of the Korea Health 21 R & D Project, Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea. (02-PJ3-PG6-EV08-0001)

통신저자 : 김인영

Sungdong P.O. Box 55, Seoul, KOREA 133-605

Tel. 02-2291-1713, Fax. 02-2296-5943

E-mail. iykim@hanyang.ac.kr

해 PTT와 반대 개념인 맥파전달속도(pulse wave velocity, PWV)를 이용하여 예측될 수 있다[9].

$$c^2 = \Delta pV / \Delta v\rho \tag{1}$$

$c = PWV(m/s)$, $\Delta p =$ 혈압변화, $\Delta v =$ 부피변화,
 $V =$ 초기부피, $\rho =$ 유체밀도

혈압 측정을 위해 PTT를 이용한 Zhang의 연구방법은 심전도(electrocardiogram, ECG)의 Q-peak점부터 광전용적 맥파(photoplethysmography, PPG)의 peak점까지를 PTT로 정의하였다. 그리고 피검자가 안정적인 상태를 유지하는 동안 PTT를 5초간 측정하여 이 값의 평균값으로 혈압을 예측하는데 사용하였다[7]. 하지만 피검자가 안정적인 상태에서 측정된 PTT를 이용하여 예측한 혈압은 매우 제한적이고, 안정된 상황에서만 정확한 혈압예측이 가능하다는 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 ECG의 R-peak점부터 검지에서 측정된 PPG의 peak점까지를 PTT로 정의하고, 60초간 PTT를 측정하여 얻은 데이터의 평균값(PTT_{ave})으로 혈압을 예측하였다. 그리고 안정적인 조건뿐만 아니라 혈압이 상승하였을 때의 조건에서도 혈압 예측이 가능하도록 하기 위하여 피검자는 정해진 운동을 통해 인위적으로 혈압을 상승시켜 보았다. 이때 각 피검자로부터 얻은 운동 전·후에 대한 혈압과 PTT_{ave} 값으로 각각의 피검자에게 알맞도록 회귀분석을 통해 개별적인 회귀식을 산출하였다. 또한 각 피검자들로부터 얻은 모든 데이터를 이용하여 개별적이 아닌 모든 피검자에게 적용 가능한 일반 회귀식을 산출하였다. 이때 얻은 개별적인 회귀식과 일반회귀식을 이용한 수축기혈압 측정 결과를 정량적, 통계적으로 비교 분석하여 보았다.

실 험 방 법

실험은 25~29세의 건강한 성인 남자 10명으로 피검자 모두 과거 심혈관계 질환이 없었으며 ECG와 PPG상에서도 정상 소견을 보이는 것으로 확인하였다. 실험은 조용한 공간에서 10차례에 걸쳐 피검자가 침대에 누운 상태를 유지하면서 혈압과 PTT를 측정하였다. 데이터 수집을 위해 사용한 하드웨어로는 BIOPAC system, Ins. MP100 시스템의 ECG100B 모듈을 사용하여 sampling rate 1000Hz로 Lead I의 ECG를 얻었고, PPG100B 모듈과 반사형 PPG 센서를 사용하여 sampling rate 1000Hz로 PPG신호를 얻었다. 소프트웨어로는 AcqKnowledge 3.7.3 프로그램을 Window XP 환경에서 사용하였다. 그리고 혈압측정을 위해 KFDA(Korea Food & Drug Administration) 승인을 받아 시중에 시판되고 있는 BM3 Patient Monitoring(Bionet Co., Ltd) 기기를 사용하여 오실로메트리 방법으로 상완에서 혈압을 측정하였다.

실험은 아래와 같은 5단계로 진행되었다.

- 단계 1 : 피검자는 10분 동안 침대에 누운 상태를 유지하며 휴식을 취한다.
- 단계 2 : 먼저 혈압을 측정하고, 60초 동안 ECG와 PPG를 동시에 측정하여 PTT를 얻고, 다시 한 번 혈압을 측정한다.

단계 3 : 피검자는 계단 120개(각 계단의 높이: 17.4cm)를 오르고 내리는 운동을 제한된 시간 내에 한차례 실행한다.

단계 4 : 운동이 종료된 직후 단계 2를 한 번 더 실행한다.

단계 5 : 단계 1에서 단계 4까지의 과정은 날짜를 다르게 하여 1일 1회씩, 총 7회에 걸쳐 반복 실행한다.

위 실험과정의 단계 2에서 60초간 측정된 PTT의 평균값과 2회에 걸쳐 측정된 수축기 혈압의 평균값을 취득하였다.

그림 1은 ECG의 R-peak값과 PPG의 peak값의 차이 t_n 을 이용하여 각 beat에서 PTT값을 나타낸 것이다. 각 beat에서 PTT값을 60초간 측정하여 식 (2)를 통해 그것의 평균 PTT_{ave} 값을 계산하였다.

$$PTT_{ave} = \sum_{n=1}^k t_n / k \tag{2}$$

식 (2)에서 t_n 은 각 beat에서의 PTT값을 나타내고, k 는 1분 동안 얻은 전체 PTT의 개수를 의미한다.

이와 같은 실험방법을 통해 10명의 피검자로부터 취득한 PTT_{ave} 데이터와 수축기 혈압(systolic blood pressure) 데이터는 범용 통계 분석 프로그램인 SPSS 10.0을 사용하여 그림 2와 같은 분석과정을 거쳐 $y = ax + b$ 형태의 선형회귀식을 얻게 된다.

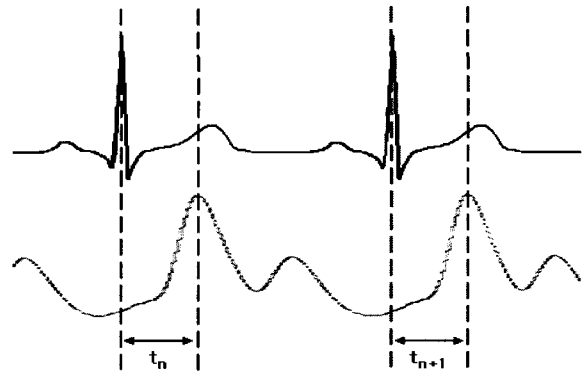


그림 1. ECG와 PPG의 각 beat로 부터의 PTT
 Fig. 1. PTT from each beat of ECG and PPG

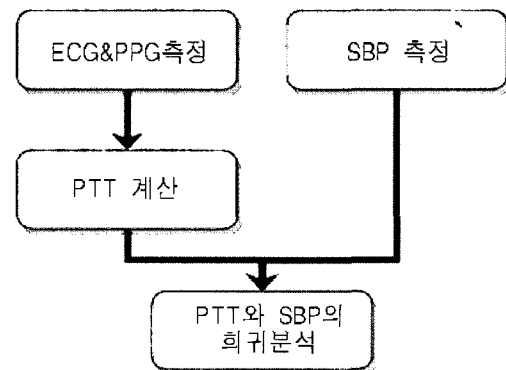


그림 2. PTT를 이용한 회귀분석 과정
 Fig. 2. Process of regression analysis using PTT

실험결과 및 고찰

표 1은 10명의 피검자로부터 얻은 PTT_{ave} 와 수축기 혈압과의 데이터를 이용하여 $y=ax+b$ (y:혈압, x: PTT_{ave}) 형태의 선형회귀분석결과를 95% 신뢰수준에서 나타낸 것이다. 먼저 피검자 10명에 대해 PTT_{ave} 와 수축기 혈압과의 선형회귀분석을 각각의 피검자를 위해 개별적으로 수행하여 각 피검자에게 알맞은 선형회귀식을 얻었다. 그리고 각각의 회귀식에 대한 검증과정을 통해 10명의 피검자로부터 계산된 수축기 혈압과 측정된 수축기 혈압에 대한 오차의 평균과 표준편차의 평균은 각각 $\pm 3.694\text{mmHg}$ 와 2.855mmHg 라는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 American National Standards of the Association for the Advancement of Medical Instrumentation(ANSI/AAMI)에서 혈압계 인증을 위해 요구하는 평균오차 $\pm 5\text{mmHg}$, 표준편차 8mmHg 보다 작아야 된다는 규정을 만족하였다. 그림 3은 표 1에 나타난 10명의 피검자에 대한 개별적인 선형회귀식 중에 대표적으로 한명의 피검자에 대한 기록을 그래프로 제시하여 PTT와 수축기 혈압과의 관계를 나타낸 것이다.

다음으로 10명의 피검자들로부터 얻은 모든 PTT_{ave} 와 수축기 혈압 데이터를 이용하여 95% 신뢰수준에서 선형회귀분석 과정을 통해 모든 피검자에게 적용 가능한 일반회귀식을 산출하였다. 그리고 일반회귀식에 대해 동일한 검증과정을 거쳤을 때 오차의 평균과 표준편차의 평균은 각각 $\pm 9.489\text{mmHg}$ 와 6.038mmHg 로서 ANSI/AAMI의 혈압계 인증 규정을 만족하지 못하였다. 표 1에 나타난 일반회귀식을 그림 4에 그래프로 제시하여 PTT와 수축기 혈압과의 관계를 나타내었다.

이러한 결과는 표 2를 통해서도 확인 해 볼 수 있는데 표 2는 표 1의 결과에 나타내었던 선형회귀식에 대한 회귀계수분석결과와 ANOVA 분석결과를 보여주고 있다. 표에서 t-value는 test value를 의미하고, t^2 의 값은 F-value라고 하는데 보통 F-value가 1 이상이면 유효한 결과라고 볼 수 있다[10]. 표 2의 분석결과에서 각 피검자에 대한 10개의 회귀식과 모든 피검자에게 적용 가능한 일반회귀식에 대한 t-value와 F-value의 결과는 모두 유효한 결과임을 확인하였다. 또한 95% 신뢰수준에서 ANOVA Sig.는 P5값이 0.05 이하로서, 모든 회귀식은 의미가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 회귀식에 대한 기여율(R^2)과 자유도조정필 기여율(Adjusted R^2)의 결과를 보면 각 피검자에게 개별적으로 적용하기 위해 만들어진 10개의 회귀식에서 R^2 의 값은 평균 0.828 ± 0.062 (Mean \pm SD)를 가지고 있었고, Adjusted R^2 의 값은 평균 0.806 ± 0.070 (Mean \pm SD)를 가지고 있었다. 하지만 모든 피검자에게 적용하기 위해 만든 일반회귀식에서 R^2 와 Adjusted R^2 의 값은 각각 0.315와 0.309의 값을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 이것은 각 피검자들을 위해 개별적으로 적용 가능한 회귀식의 결과와 비교해 볼 때 일반회귀식은 기여율이 매우 낮으므로 수축기 혈압을 예측하기에 충분하지 못하다는 것을 의미한다.

표 3은 각 피검자들을 위해 개별적으로 적용 가능한 회귀식과 모든 피검자에게 적용하기 위한 일반회귀식을 이용하여 수축기 혈압을 추정할 때 운동 전·후에 나타나는 오차의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 각 피검자들을 위한 개별적인 회귀식의 오차는 운동 전과 후에 모두 ANSI/AAMI의 혈압계 인증 규정을 만족하였다. 하지만

모든 피검자에게 적용 가능한 일반회귀식을 이용하여 수축기 혈압을 예측하였을 때 나타나는 오차의 평균과 표준편차는 운동 전·후 모두 ANSI/AAMI의 혈압계 인증 규정을 만족하지 못하는 결과가 나타나는 것을 확인하였다. 이것은 안정적인 상태와 운동을 통해 혈압이 인위적으로 상승하였을 때 모두 개별적인 회귀식을 사용하여 각 피검자의 혈압을 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 모든 피검자에게 적용하기 위한 일반회귀식을 사용하였을 경우 안정상태일 뿐만 아니라 운동 후에 혈압이 인위적으로 상승하였을 때에도 혈압을 예측하기에는 적당하지 않다는 것을 의미한다.

이러한 결과는 PTT를 이용하여 혈압을 측정하기 위해서는 반드시 각 피검자마다 측정 초기에 피검자에게 알맞은 교정을 해주어야만 PTT를 이용하여 정확한 수축기 혈압을 측정 할 수 있다는 것을 의미한다.

또한 이번 연구에서 PTT를 이용하여 혈압을 예측하기 위해 사용하였던 방법은 ANSI/AAMI에서 혈압계 인증을 위해 요구하는 최소 85명 이상의 환자에게 검증할 필요가 있을 것이다. 이것은 기존 비침습적인 혈압측정 방법에서 혈압 측정을 위해 반드시 커프를 사용해야하며 연속적인 혈압과형을 측정할 수 없다는 단점을 극복 할 수 있을 것으로 예상된다.

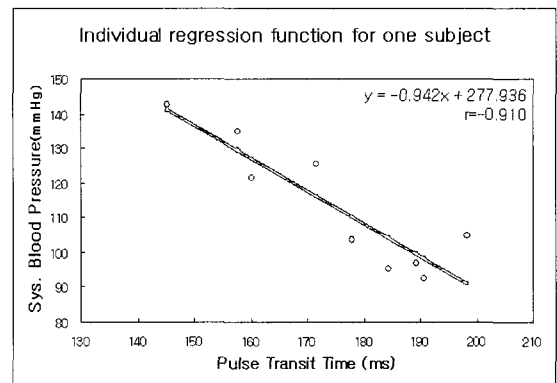


그림 3. 피검자 10명중 한명의 PTT와 수축기 혈압의 분포
Fig. 3. PTT and systolic blood pressure distribution of one among 10 subjects

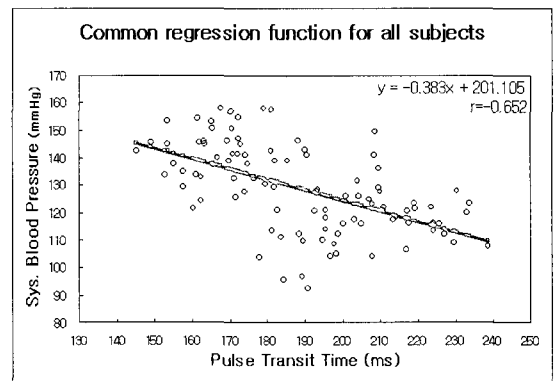


그림 4. 모든 피검자 대한 PTT와 수축기 혈압의 분포
Fig. 4. PTT and systolic blood pressure distribution of all subjects

표 1. 개별적인 회귀식과 일반회귀식의 오차분석

Table 1. Error analysis of individual and common regression function

	Regression Function		Mean(Error)±SD	
	Regression Function	Mean(Error)±SD	Regression Function	Mean(Error)±SD
Subject 1	$y = -0.640x + 258.946$	5.260±3.800	$y = -0.383x + 201.105$	10.192±7.159
Subject 2	$y = -0.688x + 269.655$	2.972±2.723		8.235±6.647
Subject 3	$y = -0.627x + 246.139$	4.680±4.578		6.726±7.644
Subject 4	$y = -0.638x + 238.273$	4.058±2.536		7.311±5.297
Subject 5	$y = -0.609x + 263.609$	4.940±5.562		10.800±9.520
Subject 6	$y = -0.440x + 216.548$	2.094±1.757		4.086±2.150
Subject 7	$y = -0.745x + 255.373$	3.742±2.744		14.466±3.915
Subject 8	$y = -0.942x + 277.936$	3.598±2.249		21.785±9.385
Subject 9	$y = -0.383x + 198.975$	2.708±0.996		3.406±2.513
Subject 10	$y = -0.645x + 259.222$	2.886±1.606		7.879±6.146

표 2. 회귀식의 회귀계수 분석과 ANOVA 분석결과

Table 2. Regression coefficient analysis and ANOVA analysis of the regression functions

	Individual regression functions(Mean±SD)	Common regression function
t-value	-6.542±1.521	-6.721
F-value	44.875±21.442	45.169
R ²	0.828±0.062	0.315
Adjusted R ²	0.806±0.070	0.309
ANOVA Sig.	$P < 0.05$	$P < 0.05$

표 3. 개별적인 회귀식과 일반회귀식에서 운동 전·후의 오차분석

Table 3. Error analysis of before&after exercise form individual and common regression function

	Individual regression functions		Common regression function	
	Before exercise (Mean±SD)	After exercise (Mean±SD)	Before exercise (Mean±SD)	After exercise (Mean±SD)
Error	3.770±3.030	3.580±3.080	8.539±8.512	10.914±6.626

결론

본 연구에서 ECG와 PPG를 이용하여 수축기 혈압을 측정하기 위해 PTT의 변화를 기록하였다. 그 결과 수축기 혈압이 증가함에 따라 PTT값이 감소하는 관계를 관찰하였다. 실험에서 피검자가 안정적인 상태일 뿐만 아니라 혈압이 상승하였을 때에도 혈압예측이 가능하도록 인위적인 운동을 통해 혈압을 상승시킨 상황에서 각 피검자에 대해 PTT와 수축기 혈압을 측정하였다. 이와같이 획득한 PTT와 수축기 혈압 데이터를 이용하여 각 피검자에 대한 선형회귀 분석을 통해 개별적인 회귀식을 만들었고 또한 각 피검자들로부터 얻은 모든 데이터에 대한 선형회귀 분석을 통해 모든 피검자에게 범용적으로 적용하기 위한 일반회귀식을 만들어 두 회귀식을 정량적, 통계적으로 비교분석하였다. 그 결과 개별적으로 피검자에 대한 회귀식을 만들었을 때 각 피검자마다 PTT를 이용하여 수축기 혈압을 예측할 수

있다는 것을 알 수 있었다. 개인별로 도출한 회귀식은 개인별로 적용하기에 ANSI/AAMI의 혈압계 인증 규정을 만족하였다. 하지만 각 피검자로부터 얻은 모든 데이터를 이용하여 작성한 일반회귀식으로 각 피검자의 수축기 혈압을 추정하였을 때 그 값은 ANSI/AAMI의 혈압계 인증 규정을 만족하지 못하였다. 이러한 결과는 PTT만을 이용하여 혈압을 추정하기 위해서는 반드시 각 피검자마다 측정 초기에 개별적인 회귀 분석을 통해 피검자에게 알맞은 교정을 해주어야만 정확한 수축기 혈압을 측정 할 수 있으며 PTT 만으로는 신뢰성 있는 범용식을 도출할 수 없음을 의미한다.

본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 다양한 연령대와 심혈관계 질환의 유·무에 따른 피검자를 대상으로 PTT뿐만 아니라 혈압과 혈관의 특성을 반영할 수 있는 다른 인자들과 함께 개별적인 보정이 필요하지 않는 범용적인 회귀식 산출이 필요할 것이다.

이러한 방법을 이용하여 개별적인 환자의 혈압을 연속적으로 모니터링 할 수 있어 향후 수술실에서 마취중인 환

자에 대해 연속적인 혈압측정을 가능하게 하여 수술중인 환자가 갑작스런 혈압저하로 쇼크 상태에 빠지는 것을 예측할 수 있는 의학적 응용이 가능할 것으로 예견된다.

참 고 문 헌

1. J. G. Webster, "MEDICAL INSTRUMENTATION: Application and design, third edition", WILEY, New York, pp. 287-331, 1998
2. J. J. Carr and J. M. Brown, "Introduction to Biomedical Equipment Technology, fourth edition", Prentice Hall, New Jersey, pp. 234-304, 2001
3. D. A. Paulus, "Noninvasive blood pressure measurement," Medical Instrumentation, Vol. 15(2), pp. 91-94, 1981
4. J. M. R. Bruner, "Automated indirect blood pressure measurement a point of view", Medical Instrumentation, Vol. 18(2), pp 143-145, 1984
5. J. Kerola, V. Kontra and R. Sepponen, "Non-invasive blood pressure data acquisition employing pulse transit time detection", Proceedings of the 18th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Vol. 3, pp. 1308-1309, 1996
6. K. Meigas, R. Kattai and J. Lass, "Continuous blood pressure monitoring using pulse wave delay", Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, Vol. 4, pp. 3171-3174, 2001
7. K. W. Chan, K. Hung and Y. T. Zhang, "Noninvasive and cuffless Measurements of blood pressure for telemedicine", Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, Vol. 4, pp. 3592-3593, 2001
8. M. H. Pollak and P. A. Obrist, "Aortic-radial pulse transit time and ECG Q-wave to radial pulse wave interval as indices of beat by beat blood pressure change", Psychophysiology, Vol. 20, pp. 21-28, 1983
9. J. C. Bramwell and A. V. Hill, "The velocity of the pulse wave in man", Proceedings of the Royal Society, London, pp. 298-306, 1922
10. 안재익, 유근영, "의학·보건학 통계분석", (주)데이터솔루션, 2003