

## 상하지 광체적변동파형(Photoplethysmogram)의 진폭과 맥파전도시간을 이용한 지속적 동맥혈압 추정

서울대학교치과병원 치과마취과, \*서울대학교 의과대학 의공학교실, †서울대학교병원 마취통증의학과

서광석 · 김정수\* · 안원식† · 박광석\* · 김현정 · 염광원 · 구의경†

### Estimation of Continuous Blood Pressure with Amplitude of Photoplethysmogram and Pulse Transit Time of Finger and Toe

Kwang-Suk Seo, M.D., Jung Soo Kim, M.S.\*, Wonsik Ahn, M.D.†, Kwang Suk Park, Ph.D.\*, Hyun-Jeong Kim, M.D., Kwang-Won Yum, M.D., and Eui-Kyoung Goo, M.D.†

Department of Dental Anesthesiology, Seoul National University Dental Hospital, \*Department of Biomedical Engineering, Seoul National University College of Medicine, †Department of Anesthesiology and Pain Medicine, College of Medicine, Seoul National University Hospital, Seoul, Korea

**Background:** The amplitude (AMP) of Photoplethysmogram (PPG) is used as a marker of vasodilatation. The pulse transit time (PTT), which shows a good correlation with blood pressure (BP), is not strong enough to detect the changes in BP. This study examined the sensitivity of the combined effect of the finger and toe AMP, and the PTT of PPG as a marker of the changes in BP during general anesthesia.

**Methods:** Forty patients receiving maxillofacial surgery under general anesthesia were enrolled in this study. During surgery, the intra-arterial BP, ECG, finger and toe PPG signals were measured. Using the R-wave from the ECG, the AMP and PTT was derived from PPG data. The correlation between BP and PPG parameters (AMP and PTT) were compared. New parameters that show high correlation with the BP were found. Regression equations for calculating the BP using the PPG parameters were formulated.

**Results:** The new parameter,  $\log(\text{fingerAMP}/\text{toeAMP})$ , showed the highest correlation in each patient (mean correlation coefficient in the systolic BP:  $-0.846$ , diastolic BP:  $-0.858$ ). However, when the data from all 40 patients were combined, the correlation coefficient of the toe PTT was highest (systolic BP:  $-0.726$ , diastolic BP:  $-0.646$ ). The regression equation showed the highest correlation between the actual BP and calculated BP when the toe PTT and  $\log(\text{fingerAMP}/\text{toeAMP})$  were included.

**Conclusions:** The AMP of the toe and finger PPG can be used to estimate the invasive continuous blood pressure. (**Korean J Anesthesiol 2007; 53: 159~68**)

**Key Words:** blood pressure, measurement, photoplethysmogram, pulse transit time.

### 서론

심혈관계 기능은 수술과 마취 중에 급격하게 변화할 수 있다. 그래서, 심전도 감시, 혈압 측정 등이 마취 중 필수 환자 감시 항목으로 간주되고 있다. 이 중 혈압 측정은, 간

험적이지만 비침습적인 혈압(noninvasive blood pressure, NIBP) 측정법과 지속적이지만 침습적인 혈압(invasive blood pressure, IBP) 측정법이 있다.<sup>1)</sup> 이 중 환자의 상태가 안 좋거나 심혈관계 활력 징후가 급격히 변화할 것이 예상될 경우 IBP를 주로 사용한다. 그러나, IBP 측정법은 동맥 내 도관을 삽입하여 혈압을 측정하므로 각 맥박의 혈압을 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있지만 동맥혈관의 손상, 혈전, 말초기관의 허혈 그리고 감염 등의 합병증이 발생할 수 있기 때문에 모든 환자에서 적용하기는 어렵다.<sup>2)</sup> 이에 대한 대안으로 지속적이면서 비침습적인 혈압측정을 위한 방법들이 다양하게 연구되고 있는데, 이 중 마취 중 실시간으로 산소포화도 감시를 위해 이용되는 맥박산소측정기(pulse

논문접수일 : 2007년 4월 9일

책임저자 : 안원식, 서울 종로구 연건동 28

서울대학교병원 마취통증의학과, 우편번호: 110-744

Tel: 02-2072-3087, Fax: 02-747-5639

E-mail: aws@snu.ac.kr

이 연구는 한국 생체신호 은행(Korea Biosignal Bank)의 도움으로 이루어졌음.

oximetry)를 이용하는 방법이 연구 되고 있다.<sup>3,5)</sup> 맥박산소포화도 측정은 여러 파장의 광선에 대한 광체적변동 파형 (photoplethysmogram, PPG)을 이용하여 측정하는데, 이 때 한 파장에 대한 PPG 진폭의 변화는 동맥혈관 진동 폭 변화를 반영하고, 이 파의 전도속도인 맥파전도시간(pulse transit time, PTT)은 혈관의 강직도와 비례관계를 가져 동맥혈압과 상관관계를 보인다.<sup>6)</sup> 그래서 PPG 기술이 개발된 초기부터 PTT를 이용한 혈압의 추정이나 혈압변화를 감지하는 방법이 많은 연구자들로부터 보고되었다. 이 중 손과 발의 PTT와 혈압과의 관계를 알아보는 연구도 있어서 이완기 혈압 보다는 수축기 혈압에서 더 잘 맞는 경향이 있다는 보고가 있다.<sup>7)</sup> 그러나 PTT 단독으로는 혈압과 상관관계가 높지 않아 임상적으로 사용 가능한 혈압감시장치를 성공적으로 구현하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 혈압의 변동과 관련하여 상관관계가 높은 새로운 PPG 인자를 찾으려고 하였는데, 손과 발의 PPG의 진폭의 비가 혈압과 밀접한 관계가 있는 듯한 시험적 결과가 있어, 손, 발에 거치한 PPG 진폭 비와 PTT를 이용하여 비침습적으로 혈압을 추정하는 데 있어서 단일 PTT를 이용한 경우보다 더 나은 결과를 보일 수 있는지 알아보기 위해 이 연구를 기획하였다.

**대상 및 방법**

본원 윤리위원회에 승인을 받고, 서면으로 동의서를 받은 40명을 대상으로 하였다. 환자의 선택은 미국마취과학회 신체분류등급 1급에서 2급에 포함되는 환자로 하였으며, 전신마취를 시행하여 구강 및 악안면 수술을 받는 18세 이상의 성인 환자를 대상으로 하였다. 팔이나 다리에 질환이 있거

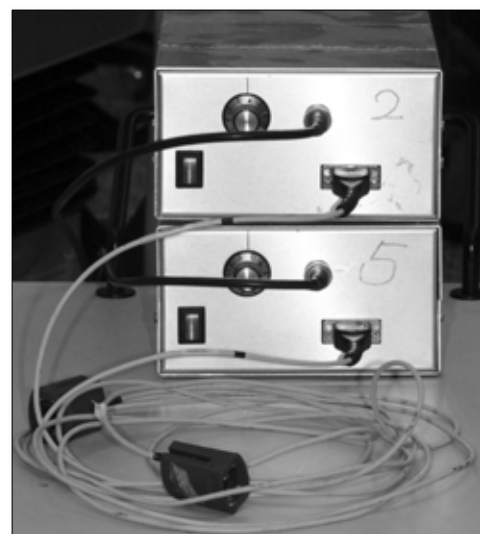
나, 수술 중 사지의 혈류장애를 가져올 시술이 필요한 환자, 심질환, 신장질환, 뇌질환, 폐질환을 가진 환자는 제외하였으며, 술 전 심전도 검사 상 부정맥이 있는 환자, 혈관병변 또는 동맥천자부위에 감염이나 상처가 있는 환자는 제외하였다. 대상환자의 인구학적 자료는 Table 1과 같다.

Allen's test를 시행한 환자의 좌측 요골 동맥에 국소마취를 시행한 후 20 게이지 동맥 내 카테터를 거치하고, 환자의 우측 상완에 oscillometric 비침습적 혈압 측정기 커프를 감았다. 산소포화도측정기 (PureLight<sup>®</sup> 8000A, Nonin Medical inc., Minnesota, USA)의 측정센서를 이용, 단일 파장(940 nm)에서 나오는 PPG 파형을 측정할 수 있는 장치 2개를 제조하여(Fig. 1) 왼쪽 2번째 손가락과 발가락에 각각 위치시켰다. 측정 전에 미리 2개의 센서를 실험자의 오른쪽 두 번째 손가락과 세 번째 손가락을 이용하여 2개의 센서의 진폭이 동일하게 되도록 신호강도(gain)를 일정하게 맞추었다. PPG 파형은 autogain 기능이 없도록 하여 수술 시간 중 파형 크기가 자동적으로 변화하지 못하도록 하였다. 환자감시장치(cardiacap II, Datex-Ohmeda, Helsinki, Finland)를 이용하여 심전도, 호기말 이산화탄소분압 및 비침습적 혈압을 측정 하였고 PPG 파형을 측정하기 위한 측정센서와는 다른 별도의 측정센서를 사용하여 다른 장소에서 맥박산소포화도를 측정하였다. 환자의 동맥 내 혈압은 압력변환기(Auto-Transducer<sup>®</sup>, Ace Medical, Seoul, Korea)를 통하여 측정하였다. 마취는 일반적인 전신마취 프로토콜에 따라 흡입마취제 또는 전정맥마취를 시행하였다. 흡입마취제의 농도는 1.5-2 MAC이 되도록 유지하였고, 정맥마취제를 사용한 경우

**Table 1.** Characteristics of Patients (n = 40)

Age (yr)	27.6 ± 11.9 (18-64)
Sex (M/F)	15/25
Weight (kg)	58.0 ± 10.9 (43-103)
Height (cm)	165 ± 8.4 (149-182)
Duration of PPG sampling (min)	9.8 ± 6.9 (2-30)
Maintenance anesthetics (cases)	
Enflurane & N <sub>2</sub> O	11
Isoflurane & N <sub>2</sub> O	8
Sevoflurane & N <sub>2</sub> O	5
Desflurane & N <sub>2</sub> O	6
Propofol & remifentanyl	11
Operation name (cases)	
Cyst enucleation	6
Orthognatic surgery	34

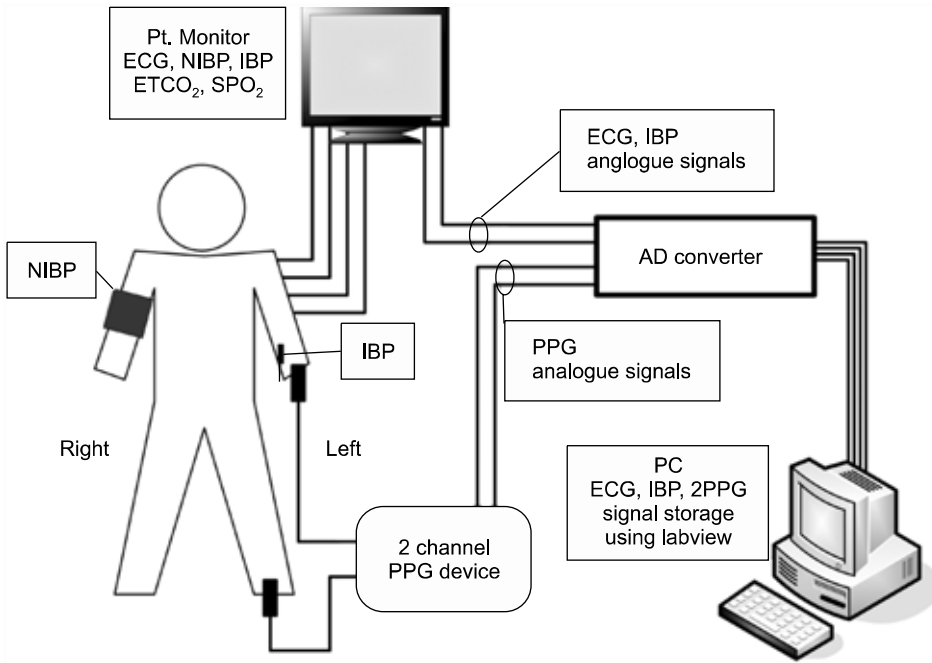
Values are number or mean ± SD (range). PPG: photoplethysmogram.



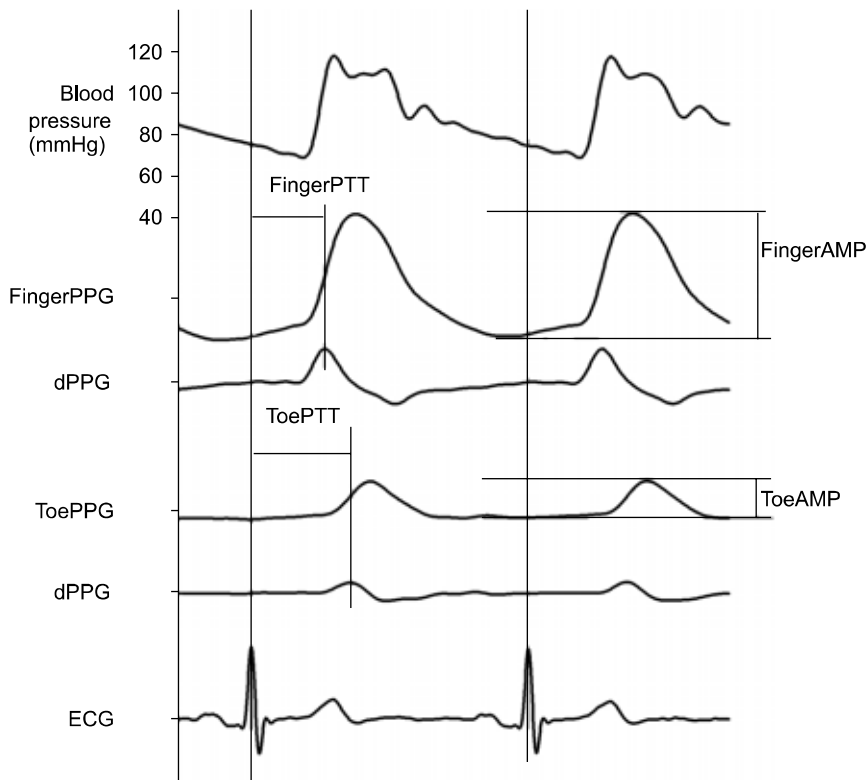
**Fig. 1.** We assembled two photoplethysmogram (PPG) devices. Each device has a PPG sensing probe, a signal connector, and a dial which controls amplitude of output signal.

목표농도조절주입장치 Diprifusor™ (Master TCI: Fresenius Vial S.A., France)를 이용하여 propofol의 혈중농도를 4-6µg/ml가 되도록 유지하고 remifentanil은 0.3µg/kg/min으로 주입

되도록 조절하여 마취유지를 하였다. 인공호흡은 마취기 (Aestiva/5, Datex-Omeda Inc, Colorado, USA)를 이용하였으며, 일회 호흡량 10 ml/kg, 분당 호흡수 12회, I : E ratio는



**Fig. 2.** Schematic graph of collecting data. The two photoplethysmogram (PPG) probes connect to the PPG device. The patient monitor (Cardicap II) sends out intra-arterial blood pressure (IBP) and ECG signals. IBP, ECG and 2 PPG signals enter an analogue-to-digital converter (AD converter) and a personal computer (PC).



**Fig. 3.** Detection method of photoplethysmogram (PPG) amplitude (AMP) and pulse transit time (PTT). AMP is defined as the distance between maximum and minimum value of PPG signal between the two ECG R-peaks. PTT is defined as the time delay between the ECG R-peak and the maximum first derivative point of the PPG (dPPG) signal.

1 : 2로 하였다. 환자의 침대 밑에 가온 물 담요를 설치하고 수술하는 얼굴 부위 이외에 수술포를 덮어 체온 소실을 막았으며, 액와 체온을 35.5-36.5°C로 유지하도록 조절하였다.

환자의 심전도 전기신호와 동맥 내 혈압 전기신호는 모니터의 analog output에서 나오는 신호를 사용하였고, 이와 함께 2개의 PPG device의 전기신호를 AD변환기(Ezad512™, ELBIO, Seoul, Korea)를 이용하여 4개의 채널(PPG 2개, IBP, 심전도)을 동시에 실시간으로 디지털 신호로 변환하여 Labview 6.1 (National Instruments Co., Texas, USA)로 작성된 프로그램을 이용하여 300 Hz로 샘플링하여 PC에 저장하였다(Fig. 2).

저장된 자료에서 각 항목을 검출하는 과정은 다음과 같이 시행하였다. 심전도 자료의 R파 탐색알고리즘을 이용하여 심전도의 R파를 탐색하여 추출하였다.<sup>8)</sup> R파를 기준으로 동맥 혈압 자료에서 연이은 R파 두 개 사이에 가장 높은 지점을 수축기 혈압으로 하고 가장 낮은 지점을 이완기 혈압으로 하여 각 박동마다 혈압을 추출하였다. PPG 자료에서도 마찬가지로 연이은 두 개의 심전도 R 파형 사이에서 가장 수치가 높은 점과 가장 수치가 낮은 점을 각각 계산해 내고 차이를 구하여 진폭을 측정하였다. PTT의 측정법은 심전도의 R파에서 말초 손가락 또는 발가락에 PPG파가 감지되는 시간과의 차이로 측정하였다. PTT의 기준이 되는 점은 PPG파의 기울기가 가장 가파른 지점으로 채택하였으며 손, 발의 PPG 데이터를 일차 미분하고 이어진 두 개의

R파 사이에서 미분 값이 가장 큰 점을 계산해 낸 후 두 개의 R파 중 앞쪽의 R파와의 시간 차이를 계산하여 PTT를 측정하였다(Fig. 3).<sup>9)</sup>

혈압의 변동과 PPG의 PPT 또는 진폭의 변화에 대한 상관관계를 분석하기 위하여 40명 각각의 환자 데이터에서 기관내 삼관 또는 처음 피부절개 시기의 혈압변동이 많은 부분을 선택하여 데이터를 추출하였다. 환자별로 추출된 데이터에서 혈압이 상승하기 시작하는 시점에서 최고점에 올랐다가 다시 혈압이 하강하여 안정화되는 시점을 선택한 후 그 사이의 기간에 같은 간격으로 50개의 혈압 및 PPG자료(약 30초-1분 자료)를 선택하였다. 40명의 자료를 모두 모아 전체 2000개 자료를 가지는 데이터를 가지고 분석하였다(Fig. 4).

혈압의 변동과 상관관계가 높은 PPG의 인자를 찾기 위하여 각 환자별로 왼손가락 PPG 진폭(fingerAMP), 왼발가락 PPG 진폭(toeAMP), 왼손가락 PTT (fingerPTT), 왼발가락 PTT (toePTT)와 혈압과 상관분석을 시행하였다. 그리고 PPG 진폭은 fingerAMP/toeAMP로 비의 관계로 인자를 합성 후 혈압과의 산포도 분석 후 log 변환을 시행하여 log (fingerAMP/toeAMP) 인자를 만들어 환자 별로 혈압과 상관계수를 구하였다. 한편 각 환자별 뿐만 아니라 전체적인 PPG 인자의 분포가 어떻게 되었는지를 알아보기 위하여 2,000개 자료의 혈압과 PPG인자간의 상관관계를 분석하였다.

또한 혈압 추정에 어떤 인자가 포함되었을 때 가장 좋은

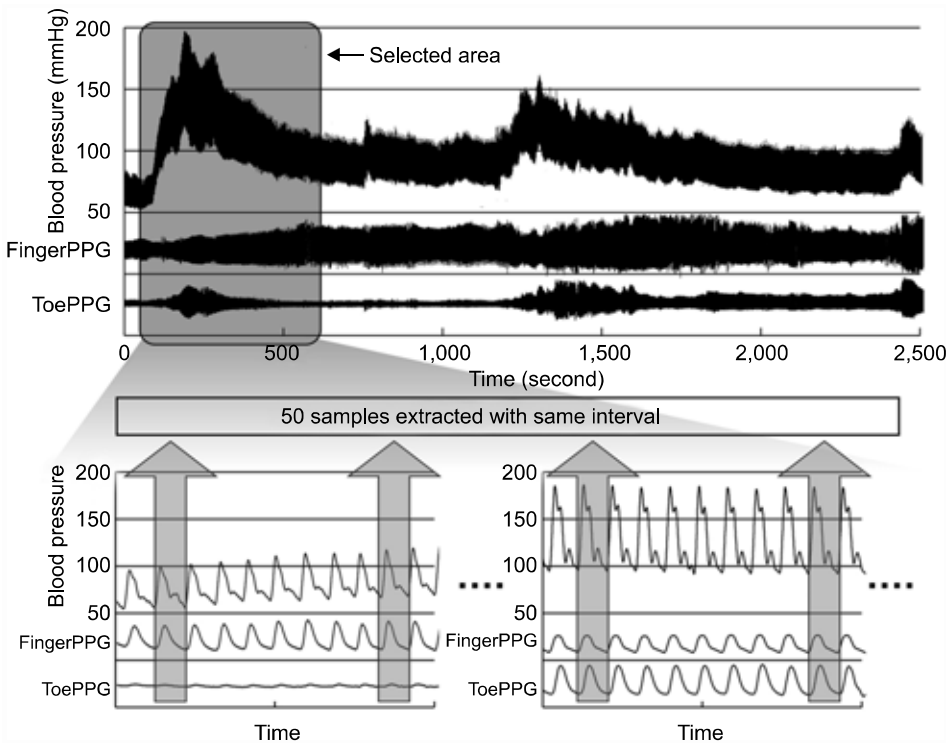


Fig. 4. Schematic drawing of sample extraction methods. Finger and toe photoplethysmogram (PPG) waves and blood pressure (BP) signals were stored. After trend analysis of stored signals, a time interval was selected in a patient when BP changed abruptly. Fifty samples of BP and 2 PPG signals were extracted with the same interval in each patient. Note that the amplitude of finger PPG was decreasing and one of toe PPG was increasing when blood pressure was increasing.

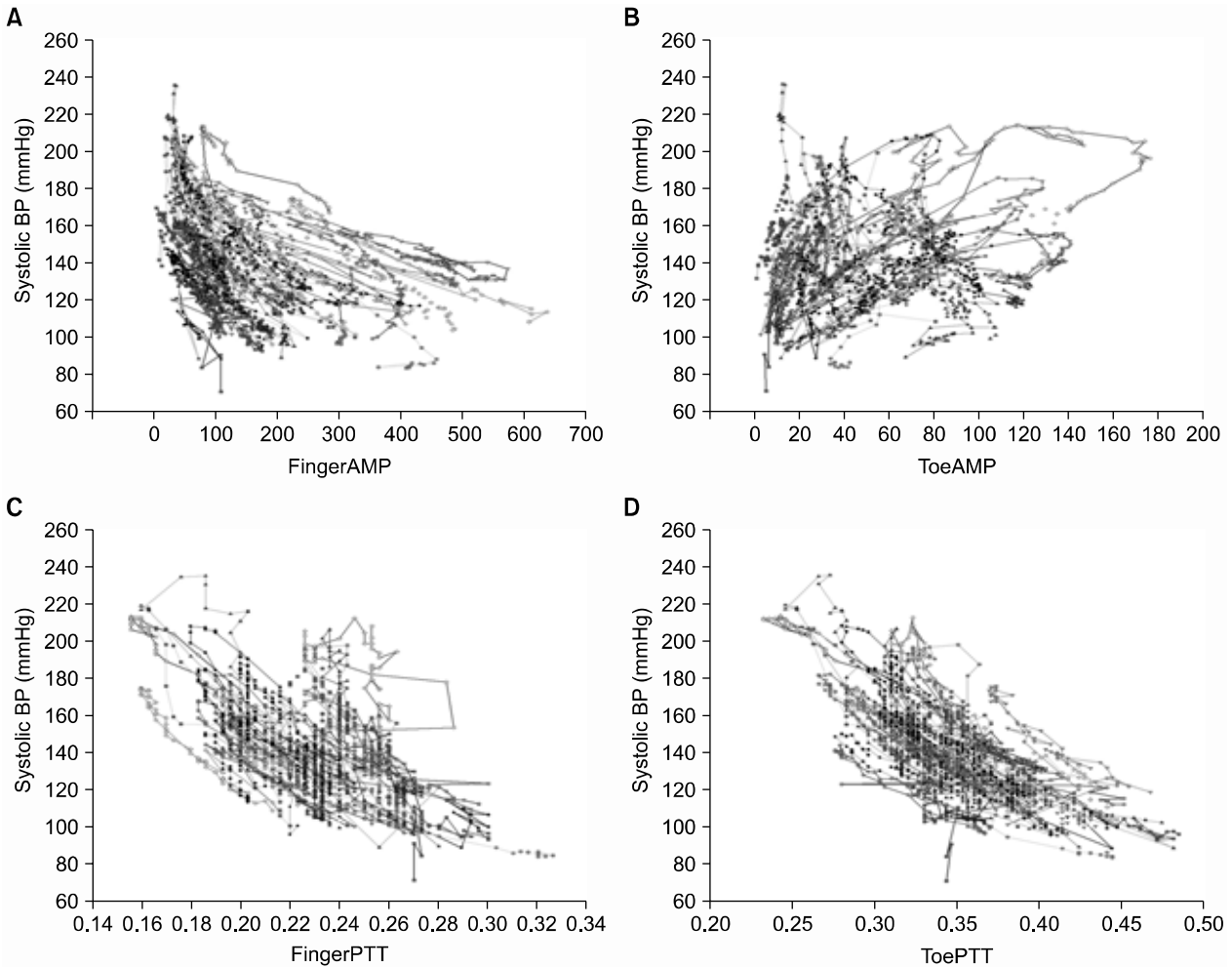
모델이 만들어지는가 비교 분석하였는데, 상관관계가 높은 인자를 선택한 후 혈압 변화를 추정할 회귀식을 작성하였다. 특히, PTT만을 이용하여 회귀식을 만들었을 때와 진폭을 이용하여 회귀식을 만든 경우 더 나은 모델이 만들어질 수 있는지 분석하였다. 통계용 프로그램 R (version 2.2.1, free software, <http://www.r-project.org>)의 MFP (multivariable fractional polynomials) 라이브러리를 이용하여 회귀식에 포함될 변수들의 다항식 구조를 분석한 후 환자의 기본 자료인 나이, 키, 몸무게, 성별 자료를 포함하여 SAS 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, USA)의 PROC GENMOD를 이용하여 generalized estimating equations (GEE) 분석방법으로 추정혈압 값을 계산하는 회귀식을 유도하였다.<sup>10)</sup>

계산된 회귀식의 진단은 실제 동맥혈압과 추정혈압과의 pearson의 상관계수를 구하여 분석하였다. 회귀식 분석에서

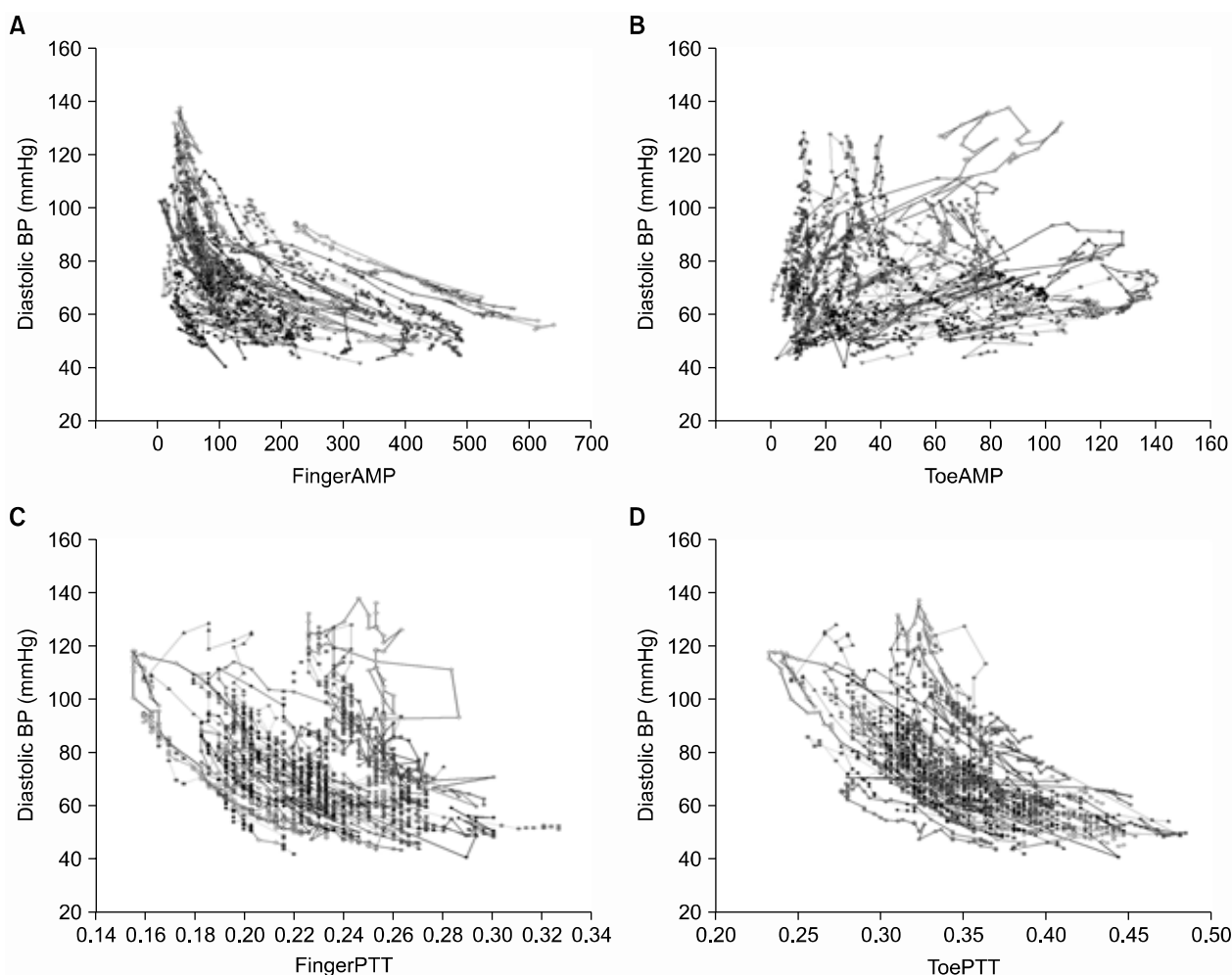
유의수준은 0.05를 기준으로 판단하였으며, 최종 회귀식은 stepwise deletion method를 이용하여 최적화 하였다.

### 결 과

각 환자별로 수축기 혈압과 이완기 혈압에서 fingerAMP, toeAMP, fingerPTT, toePTT 인자와 산포도를 Fig. 5, Fig. 6에 표시하였다. toeAMP는 혈압의 상승에 전반적으로 값이 증가하는 양상을 보이거나 불규칙한 모습을 보였다. FingerAMP, fingerPTT, toePTT에서는 환자 별로 혈압이 증가할 때 값이 감소하는 형태의 상관성을 보였고, 혈압과 높은 상관계수를 보였다(Table 2). 그러나 40명 환자 전체를 통합하여 상관계수를 분석하면 환자별로 차이가 많은 것을 보여주는 데 특히 임의적인 단위를 가지는 fingerAMP의 경우는  $-0.773$ 에서



**Fig. 5.** Correlation scatter plot of systolic blood pressure (SBP) and photoplethysmogram (PPG) parameters. FingerAMP (A), fingerPPT (C), toePPT (D) presented high negative correlation with SBP in each patients. However toeAMP showed irregular pattern or weak positive correlation (B). When all patients conjoined together the inter-patient difference was high in fingerAMP (A). AMP: amplitude, PTT: pulse transit time.

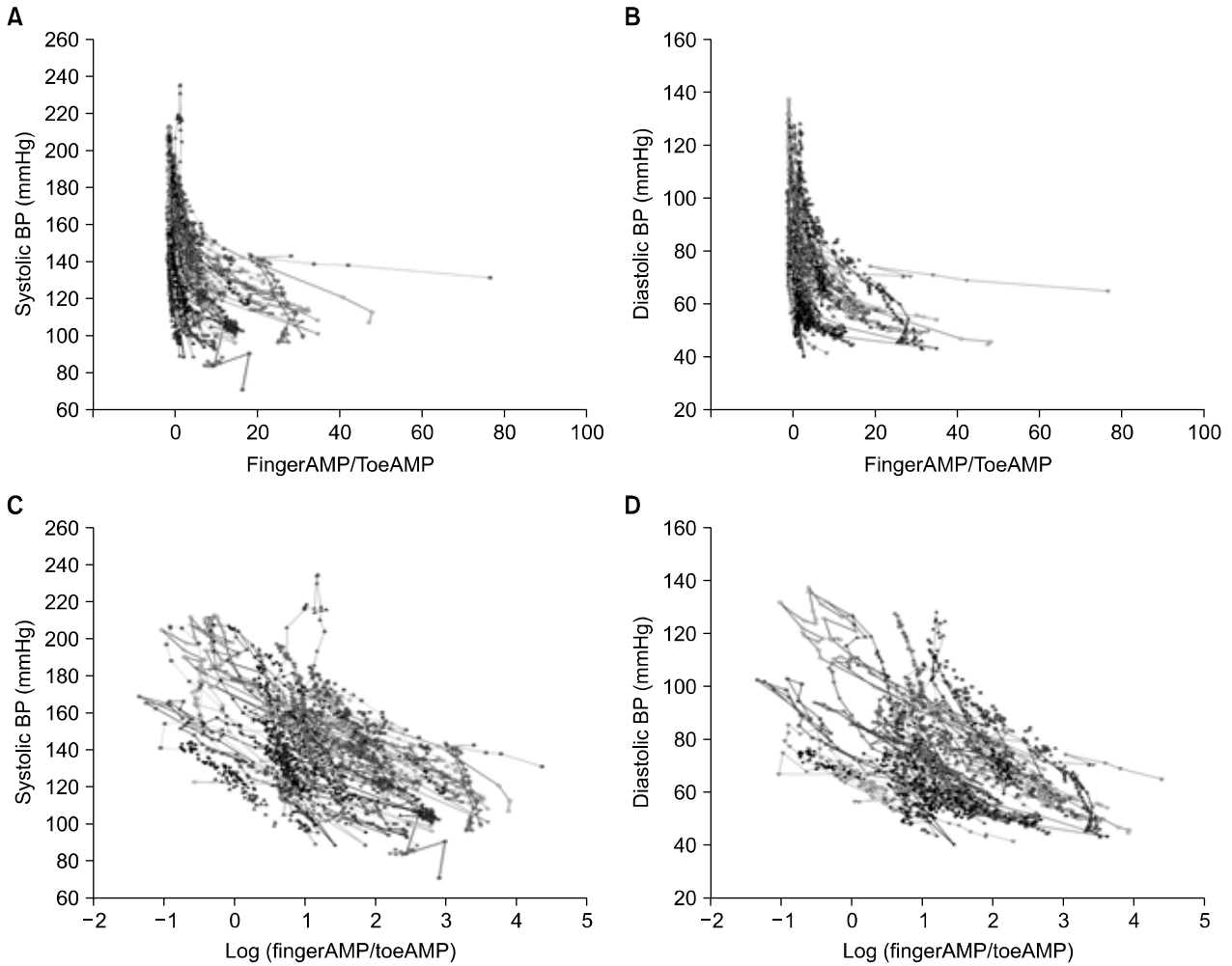


**Fig. 6.** Correlation scatter plot of diastolic blood pressure (DBP) and photoplethysmogram (PPG) parameters. FingerAMP (A), fingerPPT (C), toePPT (D) presented high negative correlation with DBP in each patients. However toeAMP showed irregular pattern or weak positive correlation (B). When all patients conjoined together the inter-patient difference was high in fingerAMP (A). AMP: amplitude, PTT: pulse transit time.

**Table 2.** Correlation Coefficient between Blood Pressure and PPG Amplitude or PTT in Each Patient and Conjoined Data (n = 40)

PPG parameter	In each patient (50 samples in each patient)		Conjoined 40 patient data (Total 2,000 samples)	
	Systolic BP	Diastolic BP	Systolic BP	Diastolic BP
fingerAMP	-0.773 ± 0.276	-0.836 ± 0.231	-0.363	-0.494
toeAMP	0.382 ± 0.655	0.327 ± 0.674	0.212	0.069
fingerPTT	-0.764 ± 0.305	-0.649 ± 0.353	-0.589	-0.324
toePTT	-0.842 ± 0.214	-0.766 ± 0.252	-0.726	-0.646
fingerAMP/toeAMP	-0.811 ± 0.161	-0.817 ± 0.172	-0.396	-0.378
log (fingerAMP/toeAMP)	-0.846 ± 0.166	-0.858 ± 0.183	-0.495	-0.455

Values are number or mean ± SD. BP: blood pressure, PPG: photoplethysmogram, AMP: amplitude, PTT: pulse transit time. All correlation parameter were significant (P < 0.05).



**Fig. 7.** Correlation scatter plot of blood pressure (BP) and new amplitude parameter of photoplethysmogram (PPG). The fingerAMP/toeAMP showed less inter-patient variation. However, it showed logarithmic pattern (A, B). Logarithmic transformation of fingerAMP/toeAMP showed linear correlation with BP (C, D). AMP: amplitude.

-0.363으로 매우 감소하게 되어 fingerAMP 단독으로 혈압을 추정하는 데는 상대적으로 많은 오차를 수반한다(Table 2). 한편 발가락과 손가락의 진폭이 혈압 상승에 대해 서로 반대로 반응하므로 fingerAMP와 toeAMP를 동시에 이용하여 fingerAMP/toeAMP를 계산한 후 산포도로 나타낸 결과 비교적 좋은 상관성을 보였으나 로그함수의 형태를 나타내었다(Table 2, Fig. 7A, B). 이것을 로그변환한 log (fingerAMP/toeAMP) 경우 Fig. 7C, D에서와 같이 직선적인 상관관계를 보이고 개별 환자에서 혈압변동과의 상관계수가 -0.846 그리고 통합한 경우에도 수축기에서 -0.495, 이완기에서 -0.455로 진폭 단독 보다 높은 상관계수를 보였다.

수축기 혈압과 이완기 혈압에서 fingerPTT, toePTT 단독으로 만든 회귀식과 log (fingerAMP/toeAMP)를 포함한 회귀식을 만들고 그 식으로 추정혈압을 계산한 후 실제 동맥혈압

과 상관관계를 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 나이, 성별 등 인적사항을 포함하고 분석한 결과 수축기 혈압과 이완기 혈압 모두에서, toePTT와 log (fingerAMP/toeAMP)을 포함한 회귀식이 제일 높은 상관계수를 보였다.

### 고 찰

수술 중 동맥혈압은 혈액순환이 적절하게 이루어지고 있음을 나타내는 중요한 감시 중 하나이며 지속적으로 혈압을 측정하는 것은 마취 중 환자감시의 중요한 부분이 된다. 미국마취과의사협회에서는 모든 환자의 마취 중 적어도 5분 마다 동맥혈압을 측정하도록 하고 있다.<sup>11)</sup> 그러나 고혈압 질환을 가지고 있거나 혈관에 작용하는 약제 투여 등으로 혈압변동이 심하거나 심장수술이나 유도저혈압, 중요한

**Table 3.** Regression Equations Using PPG Parameters to Estimate Blood Pressure and Correlation Coefficient between Actual Blood Pressure and Calculated Blood Pressure

PPG parameters	Regression equation (calculated BP = )	Correlation coefficient
<b>Systolic BP</b>		
FingerPTT	203 - 617 fingerPTT + 2.2 age - 0.0004 age <sup>3</sup> + 0.5 weight	0.67
ToePTT	-181 + 186 toePTT <sup>-1/2</sup>	0.76
LogAMP	144 - 12 logAMP + 12 sex	0.54
ToePTT, logAMP	-33 - 7.8 logAMP + 159 toePTT <sup>-1/2</sup> - 2.8 weight + 0.02 weight <sup>2</sup>	0.82
<b>Diastolic BP</b>		
FingerPTT	78 - 265 fingerPTT + 8 sex + 1.9 age - 0.0003 age <sup>3</sup>	0.61
ToePTT	250 - 315 toePTT <sup>1/2</sup> + 1.5 age - 0.7 weight - 0.0003 age <sup>3</sup> + 0.0001 weight <sup>3</sup>	0.75
LogAMP	34 - 8.8 logAMP + 13 sex + 0.52 height - 1.3 weight + 0.0001 weight <sup>3</sup>	0.60
ToePTT, logAMP	184 - 5.3 logAMP - 270 toePTT <sup>1/2</sup> + 8 sex + 0.4 age + 0.5 height - 1.1 weight + 0.0001 weight <sup>3</sup>	0.78

The regression equations had the highest correlation coefficient when toePTT and logAMP were included with demographic information. BP: blood pressure, PPG: photoplethysmogram, AMP: amplitude (arbitrary unit), PTT: pulse transit time (sec), logAMP: log (fingerAMP/toeAMP) (no unit) weight (kg), age (yr), height (cm), sex (M = 0, F = 1).

혈관수술 등에서는 더욱 안전한 마취관리를 위해 지속적인 실시간 혈압측정이 요구된다.

동맥내 도관을 설치하여 지속적으로 혈압을 측정하는 것이 일반적인 방법이나 간단한 소수술이나 혈압변화가 많지 않을 것으로 예상되는 환자에서 모두 동맥내 도관을 설치하기는 쉽지 않다. 물론 전신마취 중 혈압변동이 심한 환자에서 커프를 이용하는 비침습적 혈압을 자주 측정하여 환자의 혈압변화를 감시하는 방법이 있을 수 있으나, 커프가 팽창되어 있는 상태가 지속되는 경우 수술 후 혈압 측정 부위에 통증, 점출혈(petechiae)이나 반상출혈(ecchymosis) 등이 발생할 수 있고, 팔의 부종, 정맥저류 및 혈전 형성, 말초신경 손상, 또는 구획증후군이 발생할 수도 있다.<sup>12-14)</sup> 따라서 커프를 이용한 경우 3-5분간의 혈압 측정이 일반적으로 이루어지는 데, 이러한 간헐적 혈압 측정으로는 예측하지 못하게 변화한 혈압을 뒤늦게 발견하고 환자의 적절한 처치가 늦어질 수 있으므로 비침습적이면서도 지속적인 혈압을 측정하는 방법에 대한 연구가 이루어져 왔다. 그래서 손가락에 작은 커프와 적외선을 이용하여 혈압을 측정하는 Finapres unit, 동맥이 위치하는 피부를 눌러 아래의 뼈 사이에서 발생하는 동맥의 박동으로 지속적으로 혈압을 측정하는 arterial tonometry 등이 생산되었으나 아직 동맥 내 혈압과 비교하여 불안정적이고 믿을 수 없는 경우가 많이 발생하고, 값이 비싸 일상적인 임상 진료에 활용되지 못하고 있다.<sup>15-19)</sup>

수술 중 산소포화도 측정을 감시하는 기구인 맥박산소포화도 측정기는 비침습적이며 실시간으로 환자를 감시할 뿐 아니라, 동맥 맥박을 PPG 파형으로 나타낼 수 있으므로 산

소포화도 장치의 개발 초기부터 혈압 측정에 이용 가능성에 대한 연구가 시도되었는데, 특히 심전도와 PPG를 이용한 PTT가 혈압과 의미 있는 상관관계를 보임에 따라 이에 관련된 연구가 많이 이루어져 왔다.<sup>20)</sup> 심전도를 이용하여 측정되는 PTT는 두 개의 부분으로 나뉘어지는데 심장에 전기신호가 도달한 후 심근이 수축하여 대동맥관이 열릴 때까지의 시간인 심장의 등부피수축시간(isovolumetric contraction time, IVCT)과 혈관내에서 맥파가 전도되는 순수한 PTT로 나누어 진다. IVCT는 혈압보다 교감신경의 활성도와 관련이 많다고 알려져 있다. 그래서 교감신경 흥분억제인 salbutamol, epinephrine 등은 이러한 IVCT를 줄인다고 알려져 있으며 이러한 약제 투여가 혈압 추정에 영향을 줄 수 있다.<sup>21)</sup> 순수한 PTT는 대동맥관이 열리는 순간부터 말초 혈관에 맥파가 도달하는 시간인데, 이것은 맥파전도속도가 빠르면 짧아진다. 보통 혈압이 오르면 혈관이 수축하여 PTT가 짧아지는 데, 심전도를 이용한 PTT 측정 시 IVCT의 영향으로 항상 혈압과 높은 상관관계를 보이는 것은 아니다. 상관관계가 높지 않기 때문에 맥박전도시간 단독으로 임상에서 사용 가능한 혈압감시 장치를 개발하지는 못하였다. 하지만 다른 방법에 비해 저렴하고, 임상에서 이미 적용되고 있는 감시장치를 이용한다는 장점이 있어 많이 연구되고 있다. 예를 들어, 기관내삽관과 같은 강한 통증자극 시 PPG의 진폭이 혈압 및 맥박수의 변화에 대해 반비례하는데, 그 변화 정도가 마취의 깊이에 따라 변한다는 보고와,<sup>22)</sup> 심장 수술을 받은 환자의 혈압이 컷바퀴에서 측정된 PPG 파형의 넓이와 비례한다는 연구가 있다.<sup>6)</sup> 그러나 PPG 파형의 다른 부분을 이용하여 혈압을 추정하는 연구가 PTT 만큼 다양하

게 이루어져 있지 않은 데, 아마도 PTT 이외에는 피험자간 차이가 너무 많이 발생하여 일반적인 추정이 어렵기 때문인 것도 한 원인일 것이다. 피험자간 차이가 발생하게 되는 원인을 추정해 보면, 의식이 있는 환자에서는 자율신경계의 활성도가 환자의 긴장도에 따라 달라지고, 마취를 받고 있는 환자에서는 약제 투여 등에 의해 혈관 수축 정도가 서로 다를 뿐 아니라 나이에 따른 차이도 많이 나기 때문에<sup>23)</sup> 이에 대한 표준화를 이루기 쉽지 않기 때문일 것으로 추정된다.

이번 연구의 목적은 상지와 하지 두 개의 PPG 센서에서 구한 진폭을 이용하여 혈압을 추정하는 것이 PTT만을 이용하는 기존의 방법에 비해 더 상관도를 높이는 가를 알아보기 위함이었다. 연구 결과 혈압 증가에 따라 상지 PPG 진폭은 증가하는 추세가 많았고, 하지 PPG 진폭은 감소하는 추세가 대부분이어서 서로 반대되는 경향을 보인다는 것을 발견하였다. 또한, 이러한 특성을 이용하여 혈압의 변동과 강한 상관관계를 보이는 상지와 하지의 진폭을 나누어 계산한  $\log(\text{fingerAMP}/\text{toeAMP})$  인자가 개개인의 혈압 변화와 높은 상관관계를 보인다는 것을 밝혀내었다. 그리고 toePTT와 상지의  $\log(\text{fingerAMP}/\text{toeAMP})$ 를 이용한 혈압을 추정하는 회귀식이 다른 인자들로 만든 회귀식 보다 높은 상관관계를 보여 실제혈압 추정을 더 잘 한다고 판단된다. 하지만, 이러한 PTT와 진폭을 이용하여 혈압을 추정하는 연구에서 한 환자에서 구한 추정식을 다른 환자에게도 적용시킬 때에는 오차가 크게 발생하는 경우가 있다. 오차 발생 원인으로서는 개개인 마다 진폭 및 PTT 변화의 분포가 차이가 나는 것을 생각할 수 있는데, 이러한 오차를 줄여 모든 환자에게 적용할 수 있는 혈압 추정식을 구하는 것은 추가 연구가 필요하겠다.

결론적으로 비침습적이고 연속적인 혈압 추정을 위해 손가락과 발가락에서 구한 PPG의 진폭 변화를 이용하는 것이 PTT 단독으로 혈압 변화를 추정하는 것보다 효율적이었다. 하지만, 아직 일반적인 환자에게 적용하기에는 미흡한 점이 있어 추가적인 연구가 필요한 상태이다.

### 감사의 글

이 연구를 위해 자료 받는 프로그램을 제작해 주고, 모니터의 analog output과 A/D converter를 연결해 주는 하드웨어를 제작해 주었으며, 각종 오류를 시정해 준 강원대학교 최성욱 교수, EZAD를 경제적인 가격으로 제작해 준 서울대학교 김희찬 교수, 자료 받기에 도움을 준 송남경 연구원, 자료 저장에 도움을 준 한국 생체신호 은행(Korea Biosignal Bank)에 감사의 뜻을 전한다.

### 참 고 문 헌

1. Mark JB, Slaughter TF: Cardiovascular monitoring. In: Miller's Anesthesia. 6th ed. Edited by Miller RD: Philadelphia, Elsevier Churchill Livingstone. 2005, pp 1265-362.
2. Scheer B, Perel A, Pfeiffer UJ Clinical review: complications and risk factors of peripheral arterial catheters used for haemodynamic monitoring in anaesthesia and intensive care medicine. Crit Care 2002; 6: 199-204.
3. Wippermann CF, Schranz D, Huth RG: Evaluation of the pulse wave arrival time as a marker for blood pressure changes in critically ill infants and children. J Clin Monit 1995; 11: 324-8.
4. Chen W, Kobayashi T, Ichikawa S, Takeuchi Y, Togawa T: Continuous estimation of systolic blood pressure using the pulse arrival time and intermittent calibration. Med Biol Eng Comput 2000; 38: 569-74.
5. Awad AA, Ghobashy MA, Stout RG, Silverman DG, Shelley KH: How does the plethysmogram derived from the pulse oximeter relate to arterial blood pressure in coronary artery bypass graft patients? Anesth Analg 2001; 93: 1466-71.
6. Gribbin B, Steptoe A, Sleight P: Pulse wave velocity as a measure of blood pressure change. Psychophysiology 1976; 13: 86-90.
7. Nitzan M, Khanokh B, Slovik Y: The difference in pulse transit time to the toe and finger measured by photoplethysmography. Physiol Meas 2002; 23: 85-93.
8. Friesen GM, Jannett TC, Jadallah MA, Yates SL, Quint SR, Nagle HT: A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms. IEEE Trans Biomed Eng 1990; 37: 85-98.
9. Chiu YC, Arand PW, Shroff SG, Feldman T, Carroll JD: Determination of pulse wave velocities with computerized algorithms. Am Heart J 1991; 121: 1460-70.
10. Ballinger GA: Using generalized estimating equations for longitudinal data analysis. Organizational Research Methods 2004; 7: 127-50.
11. American Society of Anesthesiologists: Standards for basic anesthetic monitoring, ASA standards, guidelines and statements. Park Ridge, IL, American Society of Anesthesiologists. 2005, p 5.
12. Sutin KM, Longaker MT, Wahlander S, Kasabian AK, Capan LM: Acute biceps compartment syndrome associated with the use of a noninvasive blood pressure monitor. Anesth Analg 1996; 83: 1345-6.
13. Bickler PE, Schapera A, Bainton CR: Acute radial nerve injury from use of an automatic blood pressure monitor. Anesthesiology 1990; 73: 186-8.
14. Gardner RM, Hollingsworth KW: Optimizing the electrocardiogram and pressure monitoring. Crit Care Med 1986; 14: 651-8.
15. Weiss BM, Spahn DR, Rahmig H, Rohling R, Pasch T: Radial artery tonometry: moderately accurate but unpredictable technique of continuous non-invasive arterial pressure measurement. Br J Anaesth 1996; 76: 405-11.
16. Birch AA, Morris SL: Do the Finapres and Colin radial artery tonometer measure the same blood pressure changes following deflation of thigh cuffs? Physiol Meas 2003; 24: 653-60.

17. Epstein RH, Huffnagle S, Bartkowski RR: Comparative accuracies of a finger blood pressure monitor and an oscillometric blood pressure monitor. *J Clin Monit* 1991; 7: 161-7.
  18. Gibbs NM, Larach DR, Derr JA: The accuracy of Finapres noninvasive mean arterial pressure measurements in anesthetized patients. *Anesthesiology* 1991; 74: 647-52.
  19. Kemmotsu O, Ueda M, Otsuka H, Yamamura T, Winter DC, Eckerle JS: Arterial tonometry for noninvasive, continuous blood pressure monitoring during anesthesia. *Anesthesiology* 1991; 75: 333-40.
  20. Shelley KH, Murray WB, Chang D: Arterial-pulse oximetry loops: a new method of monitoring vascular tone. *J Clin Monit* 1997; 13: 223-8.
  21. Payne RA, Symeonides CN, Webb DJ, Maxwell SR: Pulse transit time measured from the ECG: an unreliable marker of beat-to-beat blood pressure. *J Appl Physiol* 2006; 100: 136-41.
  22. Luginbuhl M, Reichlin F, Sigurdsson GH, Zbinden AM, Petersen-Felix S: Prediction of the haemodynamic response to tracheal intubation: comparison of laser-Doppler skin vasomotor reflex and pulse wave reflex. *Br J Anaesth* 2002; 89: 389-97.
  23. Baik SW, Park YS, Yae SY, Jeon GR, Choi BC, Jung DK: Effects of enflurane on pulse transit time. *Korean J Anesthesiol* 2004; 47: 17-22.
-