

PPG 맥파 분석의 PTT 측정변화에 따른 SBP, DBP 추정 융합 알고리즘 변화율 분석

김선철
계명대학교 의용공학과 교수

Analysis of Change Rate of SBP and DBP Estimation Fusion Algorithm According to PTT Measurement change PPG Pulse Wave Analysis

Seon-Chil Kim
Professor, Department of Biomedical Engineering, Keimyung University

요약 최근 초소형 생체신호를 측정할 수 있는 스마트 워치 등의 장비들이 출시됨에 따라, 체성분, 혈압, 심박동수, 산소포화도 등 다양한 정보를 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 사용자에게 신뢰를 얻지 못하는 부분이 바로 정확성이다. 이러한 생체신호는 외부 환경에 대해 민감하며, 대상자 신체 내부의 조건에 따라 변동값이 크다. 특히 혈압 측정은 아직 신체 내부의 조건들의 처리에 따라 결과값이 다르다. 따라서 실험에서는 PPG 알고리즘에서 혈관 상태를 정의하는 인자를 특징값으로 처리하고 PPG를 분석하였으며, PTT 측정에 있어서 최고점 80%, 100%의 두 지점 PTT 측정값이 SBP와 DBP에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 정확도를 높이기 위한 방안 중 하나를 제시하고자 하였다. 연구결과 PPG 최고점 80%에서 측정값 PTT값이 100%에서 측정된 값보다 SBP, DBP 혈압추정에 효과적이며, 변화율 혈압추정의 회귀분석에서 SBP(80%)의 결정계수가 0.6946, DBP(100%)는 0.547로 나타났다. 결론적으로 ECG와 PPG를 통해 PTT를 측정할 경우 PPG 80% 지점의 측정값이 혈압추정의 정확도를 향상시킬 수 있다.

주제어 : 혈압, 심전도, 수축기 혈압, 이완기 혈압, 맥파전달시간, 광전용적맥파

Abstract Recently, devices such as smart watches capable of measuring small biosignals have been released. Body composition, blood pressure, heart rate, and oxygen saturation can be easily obtained. However, the part that is not trusted by the user is accuracy. These biosignals are sensitive to the external environment and have large fluctuations depending on the conditions inside the subject's body. Blood pressure measurements, in particular, still give different results, depending on how the conditions in the body are handled. Therefore, in this study, PPG was analyzed to measure PTT at two points of 80% and 100%, the highest in PTT measurement. The effect of the measured value on SBP and DBP was analyzed and a method was proposed to increase the accuracy. As a result of the study, the measured value of PTT at 80% of the peak PPG is more effective in estimating blood pressure of SBP and DBP than the value measured at 100%. In the regression analysis of the rate of change blood pressure estimation, the coefficient of determination of SBP (80%) was 0.6946, and DBP (100%) was 0.547.

Key Words : Blood Pressure, Electrocardiogram, Systolic Blood Pressure, Diastolic Blood Pressure, Pulse Transit Time, Photoplethysmography

*Corresponding Author : Seon-Chil Kim(chil@kmu.ac.kr)

Received May 1, 2020
Accepted July 20, 2020

Revised May 29, 2020
Published July 28, 2020

1. 서론

혈압은 심뇌혈관 질환과 직접적인 관계가 있으며, 건강관리를 위해서는 혈압의 지속적인 관리와 모니터링이 필요하다[1]. 혈압을 관찰하는 방법에는 커프를 이용한 공기 가압방식이 가장 일반적으로 전해오는 방법이며, 사용자의 접근성과 사용성을 높이기 위해 최근에는 무구속(Non-instructive), 무자극(Non-stimulated) 상태로 측정할 수 있는 방법을 지속적으로 연구하고 있다[2,3].

비 침습적 혈압 측정방법에는 심전도(ECG: Electrocardiogram)와 광전용적맥파(PPG: Photoplethysmography)와 같은 생체신호를 분석하여 맥파의 상관관계를 추출하여 혈압을 측정하는 방법을 적용하고 있으며, 이 방법은 측정디바이스를 소형으로 할 수 있는 장점을 지니고 있다[4]. 혈류 흐름의 특성 중 맥파전달시간(PTT: Pulse Transit Time)은 ECG의 심실수축 QRS Complex의 최고점과 신체의 말초 부위인 손가락 끝에서 측정한 PPG 파형의 일정한 기준점까지의 시간을 의미함에 따라 심장에서 말초부위의 혈관 측정부분까지 전달되는 시간으로 해석할 수 있다[5,6].

손가락 끝 등의 말초혈관에서 혈류량의 변화에 따른 광전용적맥파 측정 장치의 광량 변화로 추적하여 PPG를 얻을 수 있는데 불필요한 노이즈 영역을 잘 제거하면 PTT를 이용하여 혈압의 유추가 가능하다. 그러나 PPG 파형의 해석 차이에 따라 PTT의 정량적 수치 분석이 어렵고, 특히, PTT는 혈관 유순도에 비례하고 혈관의 길이, 크기, 혈관벽의 특성에 의존하는 특수성으로 인해 실제 측정값을 정량화하기 위해서는 여러 가지 고려해야 할 내용들이 있어 추정 혈압값 정확성에 문제가 발생되고 있다[7]. 기존 연구에서는 일반적으로 PTT값이 낮다는 것은 혈관 내에서 혈류의 흐름이 빠른 것을 의미하여 혈압이 높아지면 PTT는 감소하는 반비례관계로 설명할 수 있다[8]. 이는 혈관 경직 등 여러 상태를 간접적으로 예측할 수 있어 혈압 추정 알고리즘에 있어서 PTT는 중요한 혈관 상태의 지표가 될 수 있다는 것을 의미할 수 있다.

수축기 혈압(SBP: Systolic Blood Pressure) 및 이완기 혈압(DBP: Diastolic Blood Pressure)의 추정을 위한 ECG와 PPG의 분석과 혈관의 상태를 정량화 할 수 있는 알고리즘 적용이 필요하다. 또한 ECG와 PPG분석을 통한 맥파전달속도(PWV: Pulse Wave Velocity)에 영향을 주는 인자 즉, 혈관의 상태를 추정할 수 있는 정량적 지표를 계산해야 실제 공기가압방식의 커프 자동혈압기의 측정값과 유사한 혈압 추정값으로 측정 장치의

정확도를 높일 수 있다[9]. 본 연구에서는 PTT를 중심으로 한 알고리즘을 이용하여 SBP와 DBP를 추정하기 위해서 먼저 ECG와 PPG에서 얻은 파형 특성을 분석하였다. 이를 통해 가장 근접한 PPG의 지점값을 추출하고자 하였다. 또한 PPG 측정 장치에서 추출한 PTT 측정값과 공기 가압방식의 SBP, DBP 측정값의 회귀분석을 통해 알고리즘을 검증하고자 한다.

이를 위해 기본적으로 ECG와 PPG의 시작점인 맥파 분석하여 적절한 PTT 측정값을 제시하고자 한다. 기존 연구에서는 일반적으로 ECG R파와 PPG 최고점을 연결하는데 본 실험에서는 심장에서 전달되는 수축기 최고지점을 R2 100%하고 수축이 시작되는 지점을 80%대를 R1으로 구분하였다. PTT를 측정하여 회귀분석을 통해 SBP와 DBP의 혈압 추정 변동값을 비교 분석하였다. 이를 통해 PTT의 측정방법에 따른 SBP, DBP의 상관관계를 추정할 수 있으며, PPG 맥파 분석 시 PTT의 측정 시점에 따른 혈압 추정 알고리즘에 미치는 영향을 분석하고 PPG의 PTT 측정에 더 정확도를 높이는 방안을 실험을 통해 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

PPG의 측정지점을 찾기 위해 초기에 ECG와 말초 혈관인 손가락 끝에서 PPG를 동시에 측정하였다.

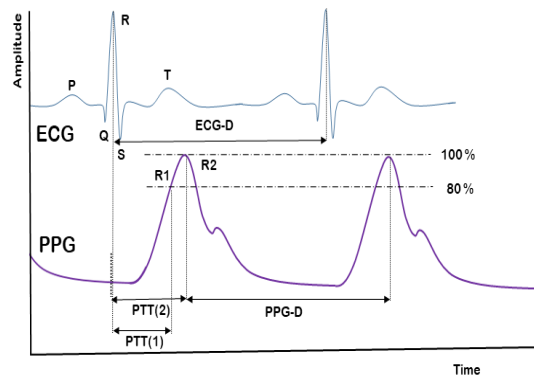


Fig. 1. Analyzing with ECG and PPG

Fig. 1과 같이 ECG와 PPG 맥파의 시간적 변이를 기반으로 먼저 PPG를 분석하면 PPG 최고점 80%에 해당하는 지점을 R1, 최고점인 100%의 R2로 정의하여 PTT(1), PTT(2)를 각각 측정하였다.

PTT를 통한 혈압 추정 알고리즘을 추출하기 위해

PPG의 연속 측정센서 간의 거리를 L로 두고, PWV는 혈관의 탄성률(e), 혈관 직경(D), 혈관 벽의 두께(T), 혈액 밀도(ρ)로 표현하여 속도(PWV), 시간(PTT), 거리(L)의 Moens-Korteweg 방정식으로 표현하면 Eq.1과 같이 된다[10].

$$PWV = \frac{L}{PTT} = \sqrt{\frac{eT}{\rho D}} \dots \text{Eq.1}$$

PTT(80%)와 PTT(100%)는 구간별 PPG 파형에 대응하는 동일 지점까지를 시간으로 보고 PTT의 누적 함수로 시간을 산정할 수 있다. 따라서 혈관 탄성률(e)과 혈관 벽 두께(T)는 비선형 관계로, 혈압의 변화인 ΔP는 Pulse Pressures로 ΔV는 SBP, DBP의 차이로 두고 동맥혈류와 맥파속도와 관계를 Bramwell-Hill 모델로 계산하면 Eq. 2와 같은 관계를 얻을 수 있다[11,12].

$$PWV = \sqrt{\frac{eT}{\rho D}} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \Delta V}} \dots \text{Eq.2}$$

Eq. 2와 같이 맥파 속도는 혈류의 흐름과 관계 있는 혈관 체적의 변화에 영향을 받고 있으며, 혈관 체적은 개인별 영향 인자로 추정할 수 있다[13].

따라서 Eq. 1과, Eq. 2에서 개인별 영향인자를 상수로 처리하면 ΔP는 Eq. 3과 같이 PTT와 선형적인 관계를 유추할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{\Delta V \cdot \rho L^2}{V \cdot PTT(n)^2} = \frac{a}{PTT(n)^2} \dots \text{Eq.3}$$

이때 얻은 관계식을 기반으로 혈압의 변화인 ΔP의 변화를 SBP와 DBP의 변화로 설명할 수 있으며, 결과적으로 PTT의 변화로 ΔP의 관계를 유추할 수 있다. 따라서 PTT의 선형적인 관계를 SBP와 DBP에서 어떤 상관관계가 있는지 회귀분석을 통해 ECG의 어떤 지점이 PPG 측정에 정확도에 영향을 주는지 PTT로 통해 실험하고자 한다. 먼저 혈압의 변화와 PTT의 선형적인 관계를 실험을 통해 알아보기 위해 PPG 측정 디바이스는 적외선 발광(940nm)다이오드를 이용한 광전용적맥파 측정회로를 구성하여 적용하였다. 측정된 광신호(660nm)는 증폭을 통해 샘플링하였으며, 반복 측정을 적용하여 정확성을 높이고자 하였다. 측정 데이터의 노이즈를 최소화하기 위해 주파수 영역은 0.5 ~ 5Hz 을 사용하였으며, 측정 영역을 제외한 저주파와 고주파 영역은 필터링하였다. 따라서 동일한 대상자 PTT를 연속으로 측정(120~150초)하여 평균값을 추출하였다. 평소 혈압이 정상범위에 있는 20대 남, 여 10명을 대상으로 공기가압 방식의 자동혈압기(BP210, ACCUNI, Korea)로 측정된 후 실험에서 제작된 PPG의 측정 디바이스를 이용하여 동일한 조건에서

PTT를 10회 측정하여 평균값을 적용하였다.

3. 결과

측정된 PPG 디바이스의 결과는 Fig. 2의 PPG 모니터링 화면과 같이 추출하였다. ECG 파형을 기준으로 PPG에서 PTT를 측정하였으며, 이를 통해 ECG간격을 통한 심박수와 PPG 정점들의 간격을 통해 수치적으로 검증하였으나, 화면과 같이 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 PTT(1), PTT(2)의 측정값은 정확히 추출되었음을 확인하였다.

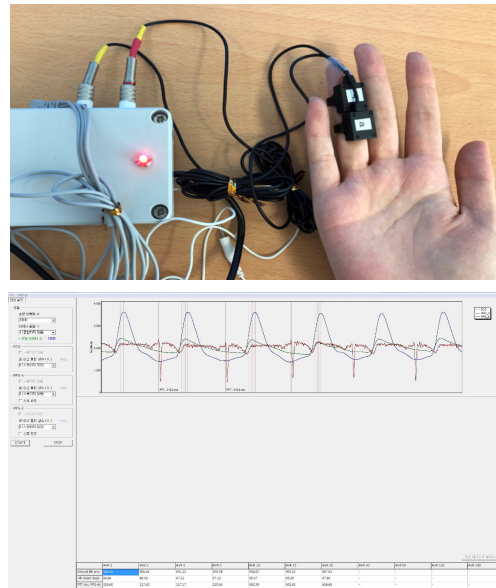


Fig. 2. PPG measurement method and screen

Table 1에서는 공기가압방식 자동혈압기로 측정된 SBP, DBP와 PPG 측정 디바이스로 추출된 PTT(80%), PTT(100%) 값을 제시하였다. SBP와 DBP가 높을수록 PTT는 낮게 나타났으며, PTT 80% 지점이 PTT 100%인 최고점보다 더 낮게 정의되고 있음을 알 수 있다. PTT의 측정 지점에서 오차의 범위는 약 25~35ms의 차이가 있으며, 이는 전체 PPG로 볼 때 10~20%정도의 측정값 오차로 추정할 수 있다. PPG 혈압추정은 PPG 파형 분석을 통한 PTT의 측정 지점 간 시간 차이로 혈관의 특성을 분석하므로 실험에서 나타난 오차는 매우 크게 적용할 것으로 예상되어 혈압 추정값의 오차로 표현될 수 있다.

Table 1. SBP, DBP and PTT measurement results

Variable Sub (N)	Electronic Blood Pressure Measurement BP(mmHg)		PPG Estimation(ms)	
	SBP	DBP	PTT (80%)	PTT (100%)
1	124	84	354.25	390.12
2	120	79	364.87	395.54
3	119	80	378.56	398.41
4	115	78	382.98	400.23
5	114	80	370.89	399.12
6	112	74	372.12	402.85
7	112	75	378.85	412.63
8	110	78	398.26	420.54
9	110	75	408.41	450.86
10	108	72	412.52	460.64
Mean	114.4	77.5	382.17	413.09

Fig. 3, Fig. 4와 같이 선형회귀분석 결과 추정 회귀식 (Estimated regression equation)과 결정계수 (Coefficient of determination) R2를 얻을 수 있다. 결정계수는 수축기 혈압의 PTT 80%지점에서는 0.6946, PTT 100%지점에서는 0.6032로 나타났다.

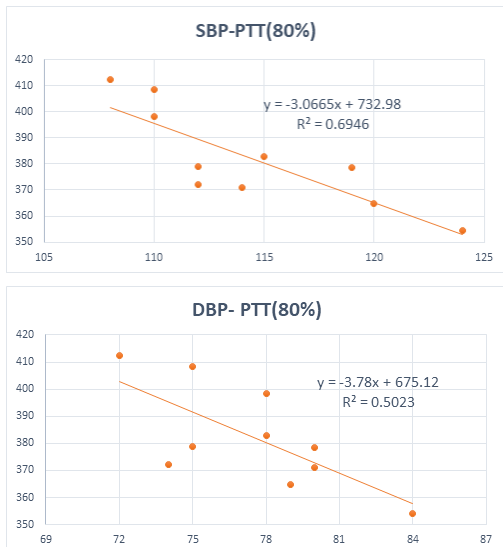


Fig. 3. Correlation of SBP and DBP at PTT (80%)

따라서 결정계수는 PTT를 추출하기 위한 PPG의 측정 지점에 따른 SBP와 DBP의 변화를 추정할 수 있는 유의미함 결과로 보여지며, 이는 혈압추정 알고리즘에 있어서 PTT추출의 중요성을 나타낸다고 할 수 있다. 혈압 추정값으로 이용되는 PTT의 지점의 추정값은 큰 차이는 없는 선형 추정선을 통해 예측할 수 있지만, 결과값으로 보면 PTT 80% 측정값이 오차를 조금 더 줄일 수 있는

관계를 제시하고 있다. 특히 Fig. 4에서와 같이 수축기 혈압인 SBP에서는 선형적인 차이를 보이고 있으며, DBP는 오히려 PTT 100%일때 더 근접한 선형 추정선을 나타내고 있다. 이는 PPG가 SBP인 수축기 상태의 의존이 높을 것을 의미한다.

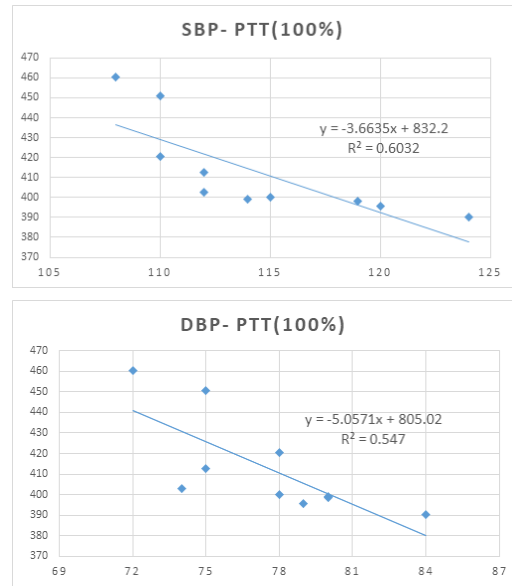


Fig. 4. Correlation of SBP and DBP at PTT (100%)

4. 고찰

PTT는 심실의 수축 신호가 신체 말초 부위까지 전달 되는데 걸리는 시간을 의미하며, PWV와는 반대의 개념으로 혈관 상태인 단면적과 혈관벽에 크게 영향을 받는 것으로 예측할 수 있다[14]. 또한 PTT는 ECG의 R 값과 PPG의 최대값 사이의 시간을 의미하기도 하지만, 본 연구에서는 PPG의 시작점(Fiducial Value)을 심실의 수축지점과 맞추기 위해 PPG 최고점의 80%, 100% 두 지점을 두고 혈압 추정의 오차를 줄이는 방안을 제시하고자 실험하였다. 심장 가까이 압력파를 측정하면 PTT의 측정오차를 줄여 정확도는 높아질 것이다. 하지만, 혈압 측정의 접근성을 높이기 위해 손가락 끝점에서 측정하는 방식(Figure PPG)으로 측정하기 위해서는 알고리즘에 제시되는 개별 특정값 차이를 표현하는 맥파의 시간차이를 잘 고려하여 계산하여야한다. 이때 측정지점을 ECG와 연계해야 하는데 PPG의 100%보다는 PPG의 80%에 해당되는 연동점이 혈압 추정 오차를 줄일 수 있는데, 이

는 심장의 수축하는 시점에 더 큰 의미가 있음을 알 수 있고 100% 지점은 이완이 시작되는 시점이라 영향력이 부족한 것 같다. 특히 PPG의 측정방식에서 PTT의 선형적인 관계를 이용하여 혈압을 예측할 수 있다[15].

기존 연구에서는 혈류 속도를 통해 혈관의 질환상태를 파악하는 연구가 많으며, 이 과정에서는 광전용적맥파측정의 기준으로 추출할 경우 PTT는 주요한 지표로 이용할 수 있다. 따라서 비 접촉식 혈압측정방식은 PWV와 PTT의 측정 플랫폼 기반에서 혈압 추정이 가능하다고 할 수 있다. 수축기 혈압에서 직접적인 압력과 신호로 측정하고 계산하기가 쉬워 이를 기반으로 혈압추정 알고리즘과 모형을 제시할 수 있으며, 개인의 혈관 상태를 나타내는 특정값이 혈류의 특성을 반영한다면 PPG 맥파의 형태에도 영향을 줄 것이다. 이 가정은 실험결과를 통해 확인하였으며 수축기 상태의 PPG 압력파를 PTT 80% 지점 특정값과 일치하여 ECG R파와의 시간 차이를 반복적으로 측정한다면 PPG 최고점의 차이보다 선형적인 관계에서 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 제안점으로 대상자수가 10명으로 부족하며, 심혈관계 질환자를 제외한 일반인을 대상으로 실험하여 연구결과의 한계점으로 제안될 수 있다. 그러나 혈압 추정의 알고리즘의 재현성과 정확성을 높이기 위한 경향 평가에는 문제가 없다고 사료된다. 동맥혈관의 경직도의 정도를 반영하는 PWV는 비침습적 방법으로 혈관의 상태를 평가할 수 있는 유일한 지표 중에 하나이며[16], 수축기 혈압을 비 침습적인 방법으로 추정할 수 있는 방법 역시 PTT를 적용하고 있다. 아직도 이러한 비 침습적 혈압 추정 방식은 검사방식의 반복성, 재현성 등의 해결해야 할 문제들이 있어 향후 혈관 질환자를 대상으로 한 임상검사 결과의 데이터를 바탕으로 더 정확성이 높은 알고리즘들이 연구되어야 한다고 사료된다.

5. 결론

비 접촉식 방법으로 혈압을 추정하기 위해 ECG와 PPG를 이용한 알고리즘을 이용하였다. 이때 혈압추정의 플랫폼 요소인 PTT의 기준점을 PPG에서 어떻게 정해야 하는지 측정값 오차를 줄이기 위한 방법으로 PTT 80% 측정값과 PTT의 100% 측정값을 SBP와 DBP의 상관관계를 통해 분석하였다. 연구 결과 PTT 100% 보다 PTT 80%의 PPG를 대응했을 경우 혈압 추정에 더 정확한 데이터를 얻을 수 있는 결과를 얻을 수 있었다.

REFERENCES

- [1] Ezzati M, Lopez AD, Rodgers A. & Murray CJL. (2006). Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors by Majid Ezzati. *Canadian Journal of Public Health*, 97(4), 319.
- [2] Asada, H., Reisner, A. & Shaltis, P. (2005). Towards the Development of Wearable Blood Pressure Sensors : A Photo-Plethysmograph Approach Using Conducting Polymer Actuators. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1-4. DOI : 10.1109/IEMBS.2005.1615379
- [3] D. C. Zheng & Y. T. Zhang. (2003). A ring-type Device for the Noninvasive Measurement of Arterial Blood Pressure. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 17-21. DOI: 10.1109/IEMBS.2003.1280819
- [4] W. Wu, J. T. Lee & H. Chen. (2009). Estimation of Heart Rate Variability Changes during Different Visual Stimulations Using Non-invasive Continuous ECG Monitoring System. *International Joint Conference on Bioinformatics*, 344-347. DOI : 10.1109/IJCBS.2009.75
- [5] L. A. Geddes et al. (1981). Pulse Transit Time as an Indicator of Arterial Blood Pressure. *Psychophysiology*, 18(1), 71-74. DOI : 10.1111/j.1469-8986.1981.tb01545.x
- [6] M Nitzan, B Khanokh & Y. Slovik. (2002). The difference in pulse transit time to the toe and finger measured by photoplethysmography. *Physiol. Meas.*, 23, 85-93. DOI : 10.1088/0967-3334/23/1/308
- [7] C. Z. Myint, K. H. Lim & K. I. Wong. (2014). Alpha Agape Gopalai, Blood Pressure Measurement from Photo-plethysmography to Pulse Transit Time. *IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences*. DOI : 10.1109/IECBES.2014.7047550
- [8] Mase M., Mattei W., Cucino R., Faes L. & Nollo G. (2011). Feasibility of cuff-free measurement of systolic and diastolic arterial blood pressure. *Journal of electrocardiology*, 44(2), 201-207. DOI : 10.1016/j.jelectrocard.2010.11.019
- [9] Geddes L., Voelz M., James S. & Reiner D. (1981). Pulse arrival time as a method of obtaining systolic and diastolic blood pressure indirectly. *Biomedical Engineering and Computer*, 19(5), 671-672. DOI : 10.1007/BF02442787
- [10] Pernot Mathieu, Fujikura Kana & Fung-Kee-Fung Simon D. (2007). ECG-gated, Mechanical and Electromechanical Wave Imaging of Cardiovascular Tissues In Vivo. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 33(7), 1075-1085. DOI : 10.1016/j.ultrasmedbio.2007.02.003

- [11] Mohamed EL. (2012). On the Analysis of Fingertip Photoplethysmogram Signals. *Current Cardiology Reviews*, 8, 14-25.
DOI : 10.2174/157340312801215782
- [12] J. Pan & W. J. Tompkins. (1985). A Real-Time QRS Detection Algorithm. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 32(3), 230-236.
DOI : 10.1109/TBME.1985.325532
- [13] S. C. Kim & S. H. Cho. (2019). Analysis of the Convergence Algorithm Model for Estimating Systolic and Diastolic Blood Pressure Based on Two Photoplethysmography, *Journal of The Korea Convergence Society*, 10(8), 53-58.
DOI : 10.15207/JKCS.2019.10.8.053
- [14] Brock J., Pitson D. & Stradling J. (1993). Use of pulse transit time as a measure of changes in respiratory effort. *Journal of Ambul Monit*, 6, 295-302.
DOI: 10.1183/09031936.95.08101669
- [15] D. Lemogoum et al. (2004). Validity of pulse pressure and augmentation index as surrogate measures of arterial stiffness during beta-adrenergic stimulation. *Journal of Hypertens*, 22, 511-517.
DOI: 10.1097/00004872-200403000-00013
- [16] J. Y. A. Foo, C. S. Lim & P. Wang. (2006). Evaluation of blood pressure changes using vascular transit time. *Physiological Measurement*, 27(8), 685-694.
DOI: 10.1088/0967-3334/27/8/003

김 선 칠(Seon-Chil Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 의료정보기
기학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경북대학교 의료정보학
과 (의료정보학박사)
- 2003년 3월 ~ 2015년 8월 : 대구보
건대학교 방사선과 교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 의

용공학과 교수

- 관심분야 : 방사선 차폐, 의료기기, 의료정보
- E-Mail : chil@kmu.ac.kr