

# 스마트폰 탈착형 혈관 탄성 모니터링 모듈

## Smartphone-Attachable Vascular Compliance Monitoring Module

양 세 환, 엄 지 용\*

Se-Hwan Yang, and Ji-Yong Um\*

### Abstract

This paper presents a smartphone-attachable vascular compliance monitoring module. The proposed sensor module measures photoplethysmogram (PPG) and reconstructs an accelerated PPG waveform. The feature points are extracted from the accelerated PPG waves, and vascular compliance is estimated using these extracted features. The module is powered via the smartphone's USB terminal and transmits the acquired waveforms along with vascular compliance values through Bluetooth. The transmitted waveforms and vascular compliance value are displayed through the smartphone application. This work proposes an assessment method for consistency of PPG instrumentation, and it was implemented in a processor of sensor module. The proposed sensor module can be easily attached to smartphone that does not support PPG instrumentation, providing simple measurement and numerical analysis of vascular compliance. To verify the performance of the implemented sensor module, we acquired vascular compliance and pulse pressure data from 29 subjects. Pulse pressure, which serves as a representative indicator of vascular compliance, was obtained using a commercial blood pressure monitor. The analysis results showed that the Pearson coefficient between vascular compliance and pulse pressure was 0.778, confirming a relatively high correlation between two metrics.

### 요 약

본 논문은 스마트폰 탈착형 혈관 탄성 모니터링 모듈을 제안한다. 제안하는 센서 모듈은 광용적맥파(photoplethysmogram, PPG)를 계측하고 가속도 맥파를 복원한다. 복원된 가속도 맥파로부터 특징점을 추출하며, 해당 특징점을 이용하여 혈관 탄성 수치를 추정한다. 해당 모듈은 스마트폰의 USB 단자를 통해 전원을 공급 받으며, 블루투스 방식으로 가속도 맥파 파형과 혈관 탄성 수치를 스마트폰으로 전송한다. 스마트폰으로 전송된 파형과 혈관 탄성 수치는 안드로이드 어플리케이션을 통해 화면에 디스플레이 된다. 본 연구는 PPG 계측의 일관성을 평가하는 기법을 제안하며, 해당 기법은 모듈의 프로세서 내에 구현되었다. 본 연구에서 개발한 혈관 탄성 모니터링 모듈은 PPG 신호의 계측 및 분석을 지원하지 않는 스마트폰에 쉽게 탈착이 가능한 형태로 적용이 가능하며, 혈관 탄성의 손쉬운 계측 및 수치 분석을 제공하는 특징을 지닌다. 구현된 혈관 탄성 모니터링 모듈의 성능 검증을 위해, 29명의 피험자를 대상으로 혈관 탄성 수치와 맥압을 측정하였다. 맥압은 상용 혈압계를 이용하여 획득하였으며, 해당 지표는 혈관 탄성을 나타내는 대표적 지표에 해당한다. 분석 결과, 제작된 혈관 탄성 모니터링 모듈로부터 획득한 혈관 탄성 수치와 맥압 간의 피어슨 상관계수는 0.778이며, 두 수치 간의 비교적 높은 상관 관계를 확인하였다.

*Key words : Photoplethysmogram(PPG), arterial compliance, accelerated plethysmogram, portable device*

\* Associate Professor, Dept. of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology

★ Corresponding author

E-mail : jyum@kumoh.ac.kr, Tel : +82-54-478-7783

※ Acknowledgment

This research was supported by Kumoh National Institute of Technology(2022).

Manuscript received Jun. 11, 2024; revised Jun. 22, 2024; accepted Jun. 27, 2024.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서론

최근 스마트폰 및 스마트워치와 같은 스마트 기기를 이용한 다양한 생체신호계측 및 실시간 분석에 대한 많은 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 특히, 심전도, 심박, 산소포화도, 혈압 등 다양한 생체정보의 획득이 가능해지고 있으며, 해당 기능의 정확도도 점차 증가하는 추세에 있다.

상기 스마트 기기의 생체신호처리는 대부분 광용적맥파(photoplethysmogram, PPG)의 계측을 통해 이루어진다. PPG 신호의 계측은 가시광선 또는 적외선 파장 대역의 발광 다이오드(light emitting diode, LED)와 유사 파장 대역의 빛을 전기신호로 변환하는 수광 다이오드(photodiode, PD)를 사용한다[1-2]. PPG 신호는 수광부 및 발광부의 회로 구현이 비교적 용이하며, 별도의 추가 전극 없이 계측이 가능하여 웨어러블 기기에서 널리 사용되고 있다.

특히, 삼성 갤럭시 시리즈 스마트폰은 PPG 신호의 계측 및 심박 분석 기능을 지원하고 있다. 그러나 해당 기능은 PPG 계측 모듈이 스마트폰에 내장되어 있어야 사용이 가능하며, 대부분의 일반 스마트폰은 PPG 계측 및 분석 기능을 지원하지 않는다. 제품화 된 스마트워치는 비교적 다양한 생체 신호의 계측 및 실시간 분석 기능을 제공하지만, 스마트폰의 생체신호의 모니터링 기능은 여전히 제한적이다[3, 4].

한국 궤협이 2023년 7월에 실시한 스마트 기기 관련 설문에 의하면, 한국 성인의 스마트워치 사용률은 26% 수준에 해당하는 반면, 스마트폰의 사용률은 97% 수준에 해당한다[5]. 스마트워치의 기술 집적도는 거듭 발전하고 있으나, 스마트 기기의 사용률을 고려할 때, 스마트폰에 적용 가능한 생활 건강 모니터링 기기의 개발이 필요하다라고도 볼 수 있다.

본 연구는 스마트폰에 탈착이 가능한 혈관 탄성 모니터링 모듈을 제안한다. 제안하는 모듈은 임의의 스마트폰에 연결 가능한 혈관 건강 모니터링 기기의 개념 검증(proof-of-concept)을 목적으로 설계되었다. 본 연구의 센서 모듈은 PPG 신호의 계측 및 신호처리를 실시간으로 수행하며, 가속도 맥파로부터 혈관 탄성 수치( $b/a$ )를 획득한다. 상기 모듈은 스마트폰의 USB 단자를 통해 전원을 공급받으며, 계측된 파형과 혈관 탄성 수치는 스마트폰으로 전송된다. 자체 제작한 스마트폰 어플리케이션은 프로세서로부터 전송된 파형 및 수치를 화면에 디스플레이한다.

본 연구의 혈관 탄성 모니터링 모듈은 전원을 스마트폰으로부터 공급받기 때문에, 별도의 배터리를 필요로 하지 않는다. 추후 알고리즘의 고도화가 진행될 경우, 해당 모듈은 혈압 추정 기능도 지원이 가능한 플랫폼에 해당한다.

## II. 본론

### 1. 가속도 맥파 기반의 혈관 탄성도 지표

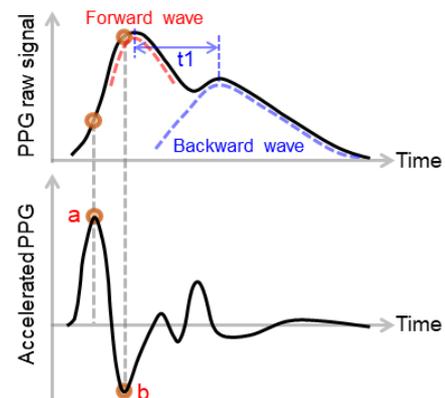


Fig. 1. Conceptual waveform of PPG raw signal and acceleration PPG.

그림 1. PPG 신호와 가속도 맥파 신호의 개념적인 파형

그림 1은 PPG 신호와 가속도 맥파의 개념적인 파형을 나타낸다[6, 7]. 개념적으로, PPG 파형 형태는 심장 수축에 의해 동맥을 따라 전파되는 진행파(forward wave)와 동맥의 분기점에 의한 반사파(backward wave)의 중첩에 의해 결정된다.

혈관 벽을 따라 전파되는 기계적인 파동의 속도를 펄스파 속도(pulse wave velocity, PWV)라 하며, 혈관의 경직도(stiffness)가 높을수록 PWV가 높아진다. 혈관의 경직도에 따라 그림 1의 진행파와 반사파 간의 시간 간격  $t_1$ 은 달라지며, 이에 따라 두 파동 간의 중첩의 정도도 달라진다. 탄성도가 높은 혈관은 진행파와 반사파간의 구분이 비교적 명확하며, 시간 간격  $t_1$ 은 비교적 길다. 반면, 경화된 혈관은 진행파와 반사파가 비교적 많이 중첩되며, PPG의 최대값이 상대적으로 크고, 두 파동 사이의 변곡점(discretic notch)의 구분이 상대적으로 모호하다[8].

PPG 원본 신호의 미묘한 변화를 강조하여 특징점을 추출하기 위해, PPG 신호의 가속도 맥파 신호를 주로 사용한다[6-12]. 가속도 맥파 신호는 PPG 신호의 2차 미분을 통해 획득 가능하다. 가속도 맥파의 대표적인 특

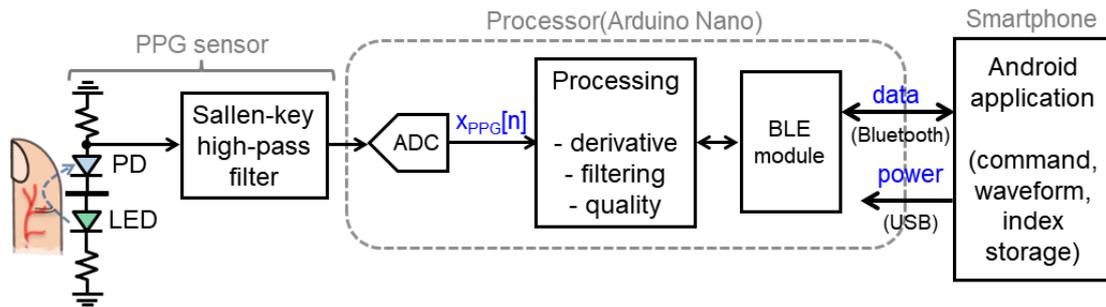


Fig. 2. Block diagram of smartphone-attachable vascular compliance monitoring module.

그림 2. 스마트폰 탈착형 혈관 탄성 모니터링 모듈의 블록도

징점은 변곡점 a, b, c, d, e이며 그림 1에서는 변곡점 a와 b만 표시하였다[6-12]. 변곡점 a와 b는 PPG 원본 신호의 급격히 증가하는 구간에 대한 가속도 성분을 나타내며, 두 변곡점의 비율  $b/a$ 는 혈관의 탄성 정도를 반영한다[8]. 혈관의 탄성도가 높은 사람의 경우, b 피크의 절대값이 상대적으로 크며,  $b/a$ 의 절대값은 증가한다. 반면에, 혈관이 경화될수록, b 피크의 절대값이 비교적 작아지며,  $b/a$ 의 절대값은 상대적으로 작아진다[8]. 수치  $b/a$ 는 Framingham의 심혈관 위험도 평가(score)와 높은 상관관계를 지니며,  $b/a$  수치를 혈관의 탄성도(vascular compliance)를 대변하는 지표로 사용 가능하다[8].

## 2. 제안하는 탈착형 혈관 탄성 모니터링 모듈

그림 2는 본 논문에서 제안하는 혈관 탄성 모니터링 모듈의 블록도를 나타낸다. 해당 블록도는 PPG 센서, 연산부, 스마트폰 어플리케이션으로 구성된다. 손가락의 단순 접촉을 통해 PPG 신호를 계측하기 위해, 반사 타입의 PPG 센싱부를 설계하였다. 프로세서의 신호처리부는 PPG 품질 평가부, 미분 연산부, 무한 임펄스 응답(infinite impulse response, IIR) 필터, 혈관 탄성도 추정 연산부, 블루투스 통신부(HC-06)로 구성된다. 연산의 복잡도가 비교적 낮기 때문에, 상기 신호처리부는 아두이노 나노(Arduino Nano, Arduino) 디바이스에 구현되었다.

PPG 센서는 발광부, 수광부, 고역통과 필터로 구성된다. 계측 과정에서 손가락의 미세한 움직임에 의해 동적 잡음이 발생할 수 있으며, 이를 제거하기 위해 Sallen-Key 고역통과 필터를 사용한다. 프로세서의 신호처리부는 가속도 맥파 획득을 위해 2차 미분을 수행하며, 미분 연산은 잡음을 증폭하는 효과가 있기 때문에 저역통과 필터의 효과적인 적용이 필수적이다. 미분 및 필터링에 의해

컨디셔닝이 완료된 가속도 맥파는 혈관 탄성도 추정 연산부에 의해 후처리 연산된다.

스마트폰 어플리케이션은 안드로이드 스튜디오를 이용하여 제작되었다. 스마트폰 어플리케이션은 블루투스 통신, 생체신호 획득 명령, 데이터 및 파형의 디스플레이 기능을 지원하는 유저 인터페이스(user interface, UI)를 제공한다. 스마트폰은 USB 포트를 통해 5V의 전원을 센서 모듈에 공급한다.

그림 2의 PPG 센서부는 약 550 nm 파장의 LED와 수광부 소자(APDS-9008, Avago)를 사용하여 설계되었다. LED 구동부와 PD 수광부에 사용된 저항 값은 각각  $470\Omega$ 과  $12k\Omega$ 이다. 계측된 PPG의 증폭 및 필터링을 위해 연산증폭기(MCP6001, Microchip)를 이용하여 Sallen-Key 고역 통과 필터를 설계하였다.

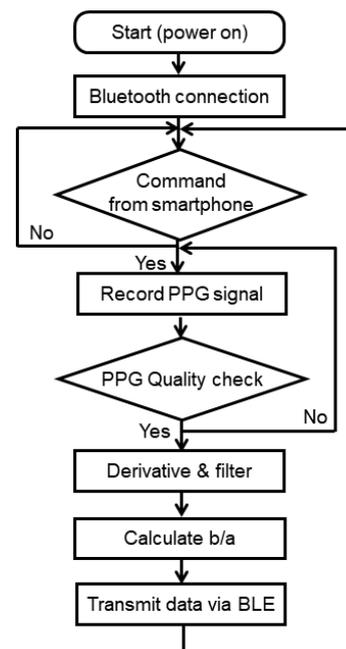


Fig. 3. Flow chart of processor.

그림 3. 프로세서 순서도

그림 3은 프로세서의 순서도를 나타낸다. 전원이 인가된 후, 스마트폰과 블루투스 연결을 수행한다. 스마트폰의 UI에 의해 생체신호 계측 실행에 대한 명령이 프로세서에 인가될 경우, 프로세서는 PPG 신호의 계측을 수행하며, 내부의 아날로그-디지털 변환기(analog-to-digital converter, ADC)에 의해 PPG 신호는 디지털 신호로 변환된다. 해당 디지털 신호는 연산부로 전달하며, 연산부는 PPG 신호의 품질 평가를 수행한다.

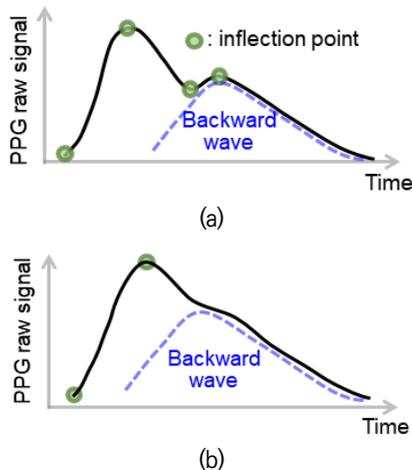


Fig. 4. (a) PPG waveform from compliant artery (b) PPG waveform from stiff artery.

그림 4. (a) 탄성있는 동맥으로부터 획득한 PPG 파형 (b) 경화된 동맥으로부터 획득한 PPG 파형

본 연구는 PPG 신호의 일관성 있는 계측 여부를 평가하기 위해, PPG 신호의 품질을 평가(PPG quality check)하는 단계를 제안한다. 본 연구는 PPG 신호의 1차 미분 파형의 영점 교차(zero crossing) 개수를 주기적으로 모니터링하는 것을 기반으로 PPG 신호의 품질을 평가한다.

그림 4는 탄성있는 동맥과 경화된 동맥에 의한 PPG 파형의 개념도를 나타낸다. PPG 신호가 일관성 있게 측정될 경우, 심박 주기 동안의 변곡점은 2개 또는 4개가 발생 가능하다. 본 연구는 1차 미분 파형에서 16개 주기 연속으로 동일한 개수의 영점 교차가 발생할 경우, 계측의 일관성이 유지되는 것으로 판정한다.

PPG 품질 평가가 통과될 경우, 혈관 탄성 수치 획득을 위해 2차 미분 연산이 수행된다. 미분 연산은 원본 신호의 잡음에 민감하며, 이를 고려한 전처리 및 샘플링 주파수 선정이 필요하다. 본 연구는 124 Hz의 샘플링 주파수를 사용하며, 미분 연산에 의한 잡음 제거를 위해 1차 대역통과 IIR 필터를 사용한다.

혈관 탄성 수치  $b/a$ 는 가속도 맥파의 매 주기마다 측정이 가능하다. 본 연구는 잡음에 의한 계측 오차를 줄이기 위해, 특징점(b, a) 계측을 16번 연속으로 시행한 후, 평균값의 비율을 이용하여 혈관 탄성도 수치의 최종 값을 획득한다. 프로세서는 블루투스를 통해 혈관 탄성도 수치와 가속도 맥파 파형을 스마트폰으로 전송한다.

### III. 구현 결과

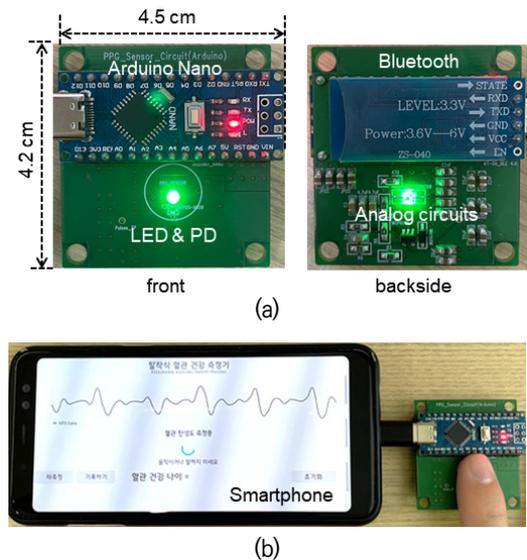


Fig. 5. (a) Implemented vascular compliance monitoring module (b) vascular compliance instrumentation using smartphone attached with sensor module.

그림 5. (a) 구현된 혈관 탄성 모니터링 모듈 (b) 센서 모듈이 연결된 스마트폰을 이용한 혈관 탄성 계측

그림 5(a)는 혈관 탄성 모니터링 모듈의 구현 결과를 나타낸다. 혈관 탄성 모니터링 모듈은 18.9 cm<sup>2</sup> 면적의 인쇄 회로 기판(printed circuit board, PCB)을 기반으로 구현되었으며, 그림 2의 PPG 센서부, 프로세서, 블루투스 모듈을 포함한다. PCB 상에 구현된 PPG 센서부의 주파수 대역폭은 [0.6, 15] Hz이다. 구현된 모듈은 총 24 mA의 전류를 소모한다. 본 연구는 간헐적으로 센서 모듈이 사용되는 것을 가정하며, 스마트폰의 일반적인 배터리 용량을 고려할 때, 적용 가능한 수준의 전력소모로 여겨진다. 추후, 시작품의 고도화를 통해 웨어러블 형태의 상시 모니터링 모듈로 개발될 경우, 모듈 크기 및 전력소모의 감소는 필수적일 것으로 예상된다.

그림 5(b)는 센서 모듈과 스마트폰의 연결 및 혈관 탄성 계측의 예시를 나타낸다. 스마트폰 어플리케이션은 java 언어를 이용하여 제작되었으며, 블루투스 연결, 계측 시작 메뉴, 계측된 파형 및 수치의 디스플레이를 지원

한다. 혈관 탄성도 측정은 약 30초의 시간이 소요되며, 일관성 있는 PPG 신호가 획득될 경우, 가속도 맥파 파형과 혈관 탄성도 수치를 화면으로 디스플레이 한다.

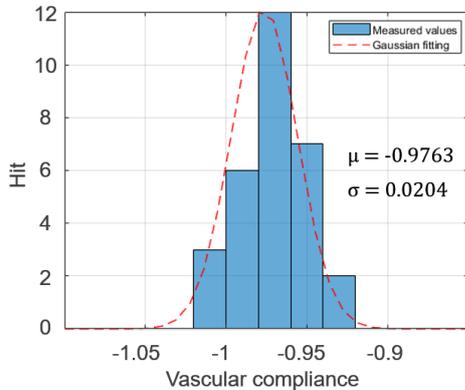


Fig. 6. Histogram of repetitively estimated vascular compliance index.

그림 6. 반복 계측을 통해 획득한 혈관 탄성도 수치 히스토그램

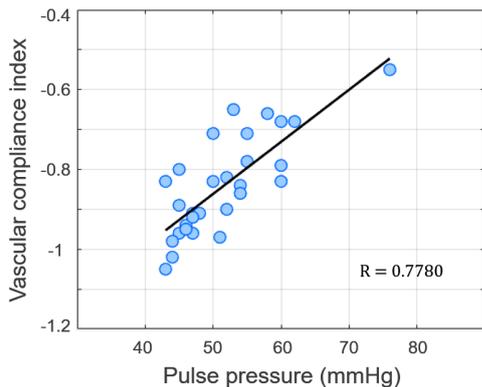


Fig. 7. Relationship between pulse pressure and vascular compliance index.

그림 7. 맥압과 혈관 탄성도 간의 관계

구현된 혈관 탄성 모니터링 모듈의 계측의 일관성을 검증하기 위해, 본 논문은 혈관 탄성도 수치 연산을 반복적으로 수행하였으며, 해당 결과는 그림 6에서 제시한다. 한 명의 피험자를 대상으로 총 30번 혈관 탄성도 수치를 획득하였다. 획득된 혈관 탄성도 히스토그램의 평균과 표준편차는 각각  $-0.976$ 과  $0.0204$ 이다. 해당 히스토그램의 산포는 충분히 작은 수치이며, 혈관 탄성도 수치 연산의 일관성이 비교적 높음을 나타낸다.

기존에, 혈관 탄성도 수치(b/a)는 혈관의 탄성도, 노화 등의 관점에서 다양하게 연구되었다[6-13]. 참고문헌 [13] 연구의 경우, 피험자의 나이와 혈관 탄성도 수치(b/a) 간의 상관관계를 통계적으로 해석하였다. 본 논문은 모듈로부터 추정된 혈관 탄성도 수치(b/a)와 맥압

(pulse pressure) 간의 상관관계를 분석하고자 한다. 맥압은 수축기 혈압과 이완기 혈압 간의 차이 값을 나타낸다. 해당 수치는 심수축기 동안의 좌심실의 혈액 박출량에 비례하며, 대동맥의 탄성도에 반비례한다[14].

본 연구진은 국립금오공과대학교 생명윤리심의위원회로부터 인체 데이터 획득에 대한 승인을 받았으며(202305-HR-003-01), 총 29명의 피험자를 대상으로 맥압과 혈관 탄성도 수치를 각각 획득하였다. 맥압은 전자혈압계(HCR-1602, 오므론)를 이용하여 계측하였으며, 혈관 탄성도는 구현된 모듈을 이용하여 획득하였다. 상기 두 수치의 scatter plot을 그림 7에서 제시한다. 그림 7의 결과를 살펴보면, 맥압이 높은 피험자일수록 혈관 탄성도 수치의 절대값이 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 회귀 분석을 적용한 결과, 피어슨 상관 계수(R 수치)는  $0.778$ 이며, 두 지표 간의 유의미한 상관관계가 존재함으로 알 수 있다. 또한, 혈관 탄성도 수치에 회귀 분석을 정교하게 적용할 경우, 맥압을 역 추정할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 기존의 초음파 기반 혈관 탄성도 추정 시스템은 동맥의 내경 계측을 기반으로 경화 지수(stiffness index)를 추정하며,  $0.83$  수준의 결정 계수를 지닌다 [15]. 유사 연구와 비교할 때, 본 연구는 계측이 비교적 용이하며, 준수한 추정 정확도를 지니는 것으로 평가된다.

#### IV. 결론

본 논문은 스마트폰에 탈착이 가능한 혈관 탄성 모니터링 모듈을 제안한다. 제안하는 센서 모듈은 안드로이드 어플리케이션을 지원하는 임의의 스마트폰에 연결이 가능하며, 일정한 시간 간격으로 혈관 건강 상태를 체크하는 응용을 고려한 개념 검증 시작품에 해당한다. 본 연구의 센서 모듈은 PPG 신호의 실시간 계측 및 신호처리를 수행하며, PPG 신호의 일관성 있는 계측 여부를 평가한다. PPG 계측의 일관성 평가가 완료되면, 미분 및 필터링 과정을 통해 가속도 맥파를 복원하며, 해당 맥파로부터 a 및 b 파형 특징점을 추출하여, 최종적으로 혈관 탄성 수치(b/a)를 획득한다. 상기 연산은 센서 모듈의 프로세서(아두이노 나노)를 이용하여 수행되며, 연산이 완료된 후에는 계측된 가속도 맥파와 혈관 탄성 수치를 블루투스를 통해 스마트폰으로 전송한다.

제안하는 센서 모듈은 PCB 기반의 회로 설계를 통해 설계되었으며, PPG 센싱부, 프로세서, 블루투스 모듈을 포함한다. 별도의 배터리를 사용하지 않으며, 스마트폰의 USB 단자를 통해 전원을 공급받는다.

안드로이드 어플리케이션은 UI를 통해 PPG 계측 실행 명령을 인식하고, 해당 명령을 블루투스를 통해 센서 모듈로 전송한다. 센서 모듈이 계측 및 연산을 완료할 경우, 가속도 맥파 파형과 혈관 탄성 수치를 안드로이드 어플리케이션으로 전송하며, 해당 파형과 수치는 스마트폰의 화면으로 디스플레이 된다.

구현된 혈관 탄성 모니터링 모듈의 성능을 검증하기 위해, 계측의 일관성 평가와 맥압과 혈관 탄성도 간의 상관관계를 분석하였다. 단일 피험자를 대상으로 혈관 탄성도를 반복 계측한 결과, 비교적 작은 표준편차(0.0204)가 획득된 것을 확인할 수 있었다. 29명의 피험자를 대상으로 맥압과 혈관 탄성도 수치를 획득하였으며, 맥압은 상용 전자혈압계를 이용하여 계측하였다. 맥압과 혈관 탄성도 수치 간의 피어슨 상관계수는 0.778이며, 비교적 높은 상관관계가 확인된다.

## References

- [1] M. Elgendi *et al.*, "The use of photoplethysmography for assessing hypertension," *npj Dig. Med.*, vol.2, no.60, 2019.  
DOI: 10.1038/s41746-019-0136-7
- [2] X. Ding *et al.*, "Pulse transit time based continuous cuffless blood pressure estimation: a new extension and a comprehensive evaluation," *Sci. Rep.*, vol.7, pp.11554-11564, 2017.  
DOI: 10.1038/s41598-017-11507-3
- [3] F. Sarhaddi *et al.*, "A comprehensive accuracy assessment of Samsung smartwatch heart rate and heart rate variability," *PLoS One*, vol.17, no.12, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0268361
- [4] H. Y. Lee *et al.*, "Smartphone / smartwatch-based cuffless blood pressure measurement : a position paper from the Korean Society of Hypertension," *Clin. Hypertens.* vol.27, no.4, 2021.  
DOI: 10.1186/s40885-020-00158-8
- [5] Gallup Korea (2023, July 13). 2012-2023 Smartphone Usage & Brand Survey.
- [6] M. Elgendi *et al.*, "Detection of a and b waves in the acceleration photoplethysmogram," *Biomed. Eng. Online*, vol.13, no.1, 2014.  
DOI: 10.1186/1475-925X-13-139
- [7] L. Wang *et al.*, "Multi-Gaussian fitting for pulse waveform using weighted least squares and multi-criteria decision making method," *Computers in Biology and Medicine*, vol.43, no.11, 2013.  
DOI: 10.1016/j.compbiomed.2013.08.004
- [8] A. Chirinos *et al.*, "Large-artery stiffness in health and disease: JACC state-of-the-art review," *Journal of the American College of Cardiology*, vol.74, no.9, 2019.  
DOI: 10.1016/j.jacc.2019.07.012
- [9] E. Wowern *et al.*, "Digital photoplethysmography for assessment of arterial stiffness: repeatability and comparison with applanation tonometry," *PLoS One*, vol.10, no.8, Aug. 2015.  
DOI: 10.1371/journal.pone.0135659
- [10] S.-W. Kim *et al.*, "Comparison of peripheral vascular compliance between normal and diabetic group using second derivative of photoplethysmogram," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea. SC*, vol.44, no.4, pp.15-20, 2007.
- [11] M. Theodor *et al.*, "Implantable acceleration plethysmography for blood pressure determination," *IEEE EMBS*, pp.4038-4041, 2013.  
DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610431
- [12] Chung-Luy Lee, and Kyung-Ho Kim, "A study on estimate vascular compliance using acceleration photoplethysmogram," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.62, no.6, pp.840-844, 2013.
- [13] K. Takazawa *et al.*, "Assessment of vasoactive agents and vascular aging by the second derivative of photoplethysmogram waveform," *Hypertension*, vol.32, no.2, pp.365-370, 1998.  
DOI: 10.1161/01.hyp.32.2.365
- [14] R. E. Klabunde, *Cardiovascular Physiology Concepts*. Indianapolis, IN, USA, Wolters Kluwer Health, 2020.
- [15] J. Joseph *et al.*, "Technical validation of ARTSENS - an image free device for evaluation of vascular stiffness," *IEEE J. Transl., Eng., Health Med.*, vol.3, Art. no.1900213, 2015.  
DOI: 10.1109/JTEHM.2015.2431471

---

**BIOGRAPHY**


---

**Se-Hwan Yang** (Member)

2024: BS degree in Department of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology  
 2024~Now : MS degree candidate in Department of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**Ji-Yong Um** (Member)

2006 : BS degree in Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH).  
 2008 : MS degree in Electrical Engineering, POSTECH.  
 2013 : PhD degree in Electrical Engineering, POSTECH.  
 2013~2014 : Post Doctoral Researcher, POSTECH.  
 2014~2016 : Senior Engineer, SK Hynix.  
 2016~2021 : Assistant Professor in Department of Electronic Engineering, Hannam University.  
 2021~Now : Associate Professor in Department of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology.  
 <Main Interest> Medical Ultrasound, Biomedical Circuits and Systems