

Characteristics of Wrist Wearable Spatial Peripheral Blood Flow Velocity Meter Using Photoplethysmogram

Il-Ho Son^{1,†}, Gyu-Il Kim^{1,†}, YongChan Kim^{2,†}, Hajung Lee^{2,†}, and Sang-Suk Lee^{1,2,*}

¹Department of Oriental-Western Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

²Department of Digital Healthcare, Sangji University, Wonju 26339, Korea

(Received 2 April 2025, Received in final form 23 April 2025, Accepted 23 April 2025)

The increasing number of patients with cardiovascular and cerebrovascular diseases necessitates accurate monitoring of cardiac output by measuring and managing various hemodynamic biological parameters such as pulse wave velocity and peripheral blood flow velocity. The spatial peripheral blood flow velocity (SPBFV) was developed to enhance spatial efficiency by utilizing a compact arduino board and a magnetoplethysmogram (MPG) and photoplethysmogram (PPG) sensors. Measurement results obtained from the developed device showed that the median SPBFV for a 49-year-old subject was 25.91 cm/s, approximately 3.01 cm/s lower than the 28.92 cm/s for a 26-year-old female subject, and about 5.59 cm/s lower than the 31.50 cm/s for a 26-year-old male subject. We developed a wrist-worn SPBFV device that measures novel hemodynamic biomarkers, enabling continuous vascular health monitoring in daily life.

Keywords : spatial peripheral blood flow velocity (SPBFV), magnetoplethysmogram (MPG) photoplethysmogram (PPG), spatial pulse wave velocity (SPWV), cardiovascular system, pulse rate

광용적맥파계를 이용한 손목착용형 공간말초혈류속도 측정기 특성 연구

손일호^{1,†} · 김규일^{1,†} · 김용찬^{2,†} · 이하정^{2,†} · 이상석^{1,2,*}

¹상지대학교 일반대학원 동서의료공학과, 강원특별자치도 원주시 상지대길 83, 26339

²상지대학교 디지털헬스케어학과, 강원특별자치도 원주시 상지대길 83, 26339

(2025년 4월 2일 받음, 2025년 4월 23일 최종수정본 받음, 2025년 4월 23일 게재확정)

심혈관 및 뇌혈관 질환 환자가 증가함에 따라 맥파전달속도, 말초혈류속도 등 다양한 혈액학적 생물학적 지표를 측정하고 관리하여 심박출량을 정확하게 모니터링하는 것이 필요하다. 공간말초혈류속도(SPBFV, spatial peripheral blood flow velocity) 장치가 소형 아두이노(arduino) 보드와 자기용적맥파계(magnetoplethysmogram, MPG)와 광용적맥파계(photoplethysmogram, PPG) 센서를 활용하여 공간 효율성을 높이도록 개발되었다. 개발된 장치로 측정 결과, 49세 대상자의 SPBFV 중앙값은 25.91 cm/s로 26세 여성 대상자의 측정값 28.92 cm/s 보다 약 3.01 cm/s 만큼, 26세 남성 피험자의 측정값 31.50 cm/s 보다 약 5.59 cm/s 만큼 낮게 나타났다. 새로운 혈액학적 바이오정보를 측정하는 손목 착용형 SPBFV 장치를 개발하여 일상생활에서 지속적인 혈관 건강 모니터링이 가능함을 보였다.

주제어 : 공간말초혈류속도, 자기용적맥파계, 광용적맥파계, 공간맥파전달속도, 심혈관, 맥박수

I. 서 론

현재 고령화와 함께 당뇨, 동맥경화 등 다양한 요인으로 인한 심뇌혈관 질환이 꾸준히 증가하고 있다. 이 질환은 초기에 이상 증상이 잘 나타나지 않아 체계적인 관리가 필수이며 이에 따라 다양한 혈액학적 생체정보로 심박출량 모니터링이 필요하다[1,2]. 심뇌혈관질환의 위험군에 속하는 심혈관 위험 환자의 판별을 위한 진단 범위가 실시간 측정으로 뚜렷하게 나타나야만 비대면 진료 환경에서도 유용하게 활용할 수 있다. 기존의 혈류속도 측정기와 차별화된 간편하고 심혈관 질환을 조기에 관리하여 예방하고자 상시측정이 가능한 손목 착용 형태이어야 한다[3,4]. 개인의 일상생활에서 혈관 건강을 지속적으로 모니터링할 수 있어야 대규모 데이터 수집 및 추가적인 알고리즘 고도화를 통해 다양한 인구 집단과 건강 상태에 대한 정밀 분석이 이루어질 수 있다. 이로써 오늘날 디지털 헬스케어 시대에 맞춘 혁신적인 심뇌혈관 건강관리 솔루션으로 발전해 나갈 수 있을 것으로 보인다. 이는 의료가 기 분야뿐만 아니라 웨어러블 헬스케어 디바이스 시장에서도 크게 기여할 것으로 보인다[5].

본 연구는 아두이노(arduino)와 광용적맥파계(photoplethysmogram, PPG) 센서, 영구자석과 홀센서로 구성된 자기용적맥파계(magnetoplethysmogram, MPG)를 활용한 상시 측정 스마트 혈류속도 측정기 개발을 목표로 두었다. 개발된 기기를 사용하여 공간말초혈류속도(spatial peripheral blood flow velocity, SPBFV)라는 혈액학적 바이오 정보를 측정하고 계산, 전송, 보안 등의 알고리즘을 바탕으로 디지털헬스케어 플랫폼을 구축하여 개인 혈관 건강관리 서비스를 제공한다[3-5]. 이로써 심혈관계의 새로운 생체정보로 대두되고 있는 SPBFV는 손목의 요골동맥과 손가락 모세혈관에 PPG 센서를 착용한 손길이에다 동시에 측정된 두 맥파의 피크시간 차이를 나누어 정의한다. 손목의 첫 번째 피크시간과 손가락의 두번째 피크시간의 차이를 계산하며 5번 연속으로 차이를 계산하여 보고 하였다. 측정된 5개 피크 시간차이의 평균값을 나눔으로써 얻은 SPBFV 계산방식은 아두이노의 코딩으로 계산 알고리즘을 적용하였다.

PPG 센서 2개와 아두이노 보드를 사용하여 손가락과 손목의 맥파를 분석한 뒤, SPBFV를 측정하고 와이.파이(Wi-Fi)를 연동하여 플랫폼을 모바일 웹상에서 개인 혈관관리가 가능하였다. 2개의 PPG 센서와 아두이노 보드로 측정 알고리즘을 구축하였고 개발한 UI 서버에 실시간 맥파를 디스플레이 하였다. 센서와 아두이노로 측정된 맥파를 파이썬(python) 알고리즘을 통해 3명 피실험자들을 대상으로 SPBFV를 측정하였다. SPBFV 측정기 연동과정에서 프로그램 동작 문제를 해결하여 아두이노 알고리즘을 통해 측정 및 계산한 것을 분석하

였다.

II. 영구자석과 홀소자로 구성된 MPG 기기 구조와 시제품

손목의 요골동맥파를 A/D 변환기(converter)로 전달하기 위해 손목에 착용할 집게형 맥진기인 MPG 기기를 제작하였다[5,6]. 기기는 손목에 탈부착이 쉽고 간편하고 측정 시에 일정한 압력을 유지하는 집게형 맥진기로 설계하였다. 요골동맥과 밀착시키기 위해 손목의 피부와 접촉 부분은 곡선 형태로 안쪽으로 휘어져 있다. 기구의 실제 모습을 Fig. 1에 나타냈다[7,8].

Fig. 1(a)에서 보이는 집게형 맥진기의 안쪽에는 맥파신호를 수집할 수 있는 측정부가 부착되어 있다. Fig. 1(b) 처럼 영구자석과 홀센서 고정과 일정한 간격을 유지시켜 주는 실리콘 장치로 구성되어 있다. 실리콘의 두께는 자석과 센서간 거리를 결정하므로 앞에서 언급한 것과 같이 자석과 센서의

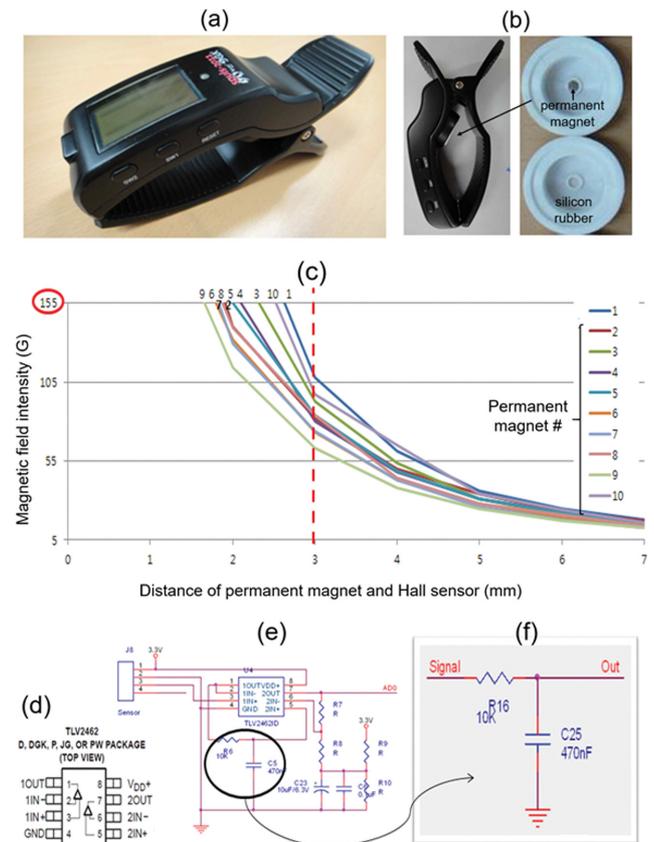


Fig. 1. (Color online) (a) Real feature of the wearable clip type MPG apparatus. (b) Real feature for contact silicon of measuring part. (c) Magnetic field intensity depending on kinds of permanent magnet in sensing area. (d) Inside part of dual op amp, (e) circuit diagram of amplifying circuit, and (f) circuit diagram of analog filter.

거리가 3 mm 이상이면서 155 G 이하의 범위에서 움직일 수 있도록 설계했다. Fig. 1(c)와 같이 모든 자석의 자기장 세기가 155 G 이하로 떨어지는 거리는 2.6 mm이다. 그리고 맥동의 최대 변위는 1.13 mm이므로 측정을 시작하기 전에 4.34 mm 이상으로 초기화해야 한다[9]. 그 외에 고려할 사항이 있는데 자석과 센서의 높이가 각각 1 mm, 착용할 때 피부에 의해 들어가는 거리 1 mm를 고려하여 실리콘은 평상시에 자석과 센서 사이 거리를 약 7 mm로 유지시켰다[7,8].

실리콘에 부착되어 요골동맥의 맥동 변위로 같이 움직이는 영구자석에서 나오는 자기력선 세기의 변화가 홀센서로 통과하면서 변환되는 전압 크기는 매우 작으므로 홀센서로부터 나온 신호를 증폭할 필요가 있다. 증폭신호를 얻기 위해 TLV2462ID 듀얼 op-amp를 사용하였다. Fig. 1(d)와 같은 2개의 op-amp를 하나의 패키지로 제작되어 있다. 연결은 Fig. 1(e)와 같이 하여 1차적으로 버퍼(buffer)의 역할을 하고 2차로 들어가기 전 높은 주파수의 노이즈까지 증폭되는 것을 방지하기 위해 아날로그 필터링을 사용하였다. 아날로그 필터링은 센서에서 나온 신호 가운데 맥파신호 외의 높은 주파수의 잡음을 없애기 위한 부분이다. 맥파신호의 주성분은 0.1~100 Hz 사이 대역에 존재한다. 그중에 맥파를 구성하는 큰 신호 성분은 30 Hz 이하에 있으므로 10 kΩ의 저항과 470 nF의 커패시터를 사용하여 약 33 Hz의 통과 대역을 갖는 저역통과필터 회로를 Fig. 1(f)와 같이 구성하였다[7,8].

아날로그 필터회로를 거친 신호는 두 번째 op-amp에서 비반전 증폭을 통해 신호가 증폭되어진다. 증폭된 신호는 아날로그 신호를 디지털신호로 변환시켜주는 역할을 하는 프로세서의 입력 A/D 변환기로 들어가게 된다. 변환된 신호는 DSPIC33FJ256GP710-I/PF 마이크로프로세서에 내장된 펌웨어에 의해 동작하게 된다. 아날로그 신호와 최대한 유사성을 가지기 위해 샘플링처리 속도(sampling rate)는 1 kHz로 설정하였고 데이터의 크기는 0~3.3 V 범위신호를 12 bit 분해능 4,096 단계로 나누었다[7,8].

III. 2개 PPG를 이용한 착용형 공간말초혈류속도 측정기

1. 부품

Fig. 2는 손가락 모세혈관의 맥파를 측정하는 클램프형 PPG 센서와 손목의 요골동맥의 맥파를 측정하는 PPG 센서, 손목에 착용한 측정부 케이스와 측정장치의 전원 ON/OFF 스위치, 실제로 착용한 프로토타입 SPBFV 기기를 손바닥과 손등 쪽의 모습을 각각 나타냈다. Fig. 2에서 보여주는 시계(watch)형의 SPBFV 측정기 제작을 위하여 손목에 부착하는 케이스(case)에는 손목의 요골동맥과 손가락 모세혈관의 아날

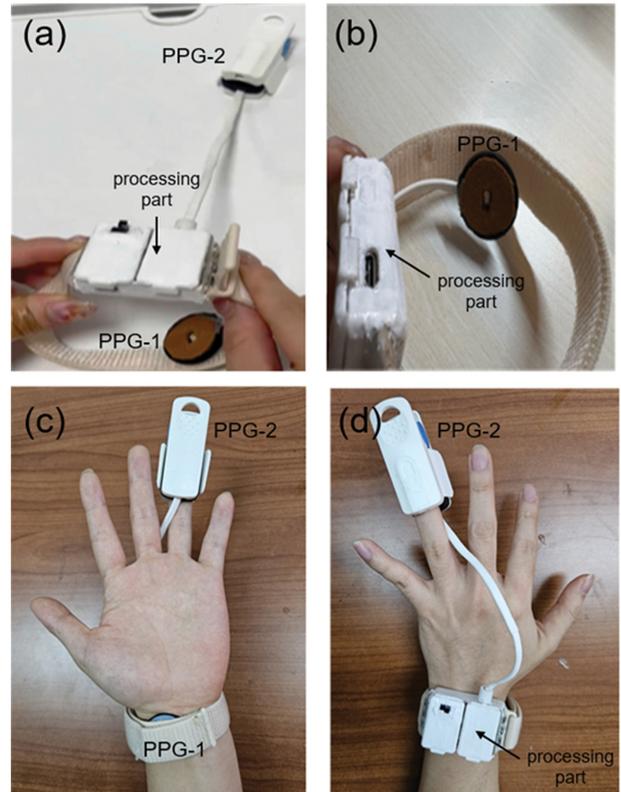


Fig. 2. (Color online) (a) Clamp-type PPG sensor that measures the pulse wave of the finger capillaries. (b) PPG sensor that measures the pulse wave of the radial artery in the wrist with type C charging of the case worn on the wrist and power ON/OFF switch of the measuring device. Actual prototype SPBFV device worn on the side (c) palm and (d) back of hand.

로그 맥파를 측정하기 위해 Fig. 3의 ESP32-C3 소형 아두이노 보드와 리튬폴리머 배터리, DFRobot PPG 센서, 충전을 위한 C-타입 충전 모듈, 전원 ON/OFF 역할의 슬라이드 스위치 부품을 사용하였다. PPG 센서는 SEN0203(DFRobot heart rate monitor sensor)를 사용하였고 연결부는 케이스와 결합된 유선형태로 손가락과 손목에 PPG 센서 착용이 가능하였다.

2. 계산 알고리즘

측정기로 측정할 수 있는 맥박수와 SPBFV는 C++(아두이노)로 계산 알고리즘을 구축하였다. PPG 센서로 측정하여 얻은 아날로그 데이터의 피크지점을 감지한 뒤 요골동맥과, 모세혈관에서의 맥박수(BPM)를 계산한다. SPBFV는 손목과 손가락 맥파 피크 시간 차이 5개의 평균값을 손 길이로 나눠 SPBFV 값을 측정한다. 측정결과값은 측정시간 동안의 BPM과 SPBFV의 최종 평균값을 계산한다[10,11].

3. 데이터 전송 및 시각화

계산된 데이터들은 Fig. 4와 같이 Wi-Fi를 통해 IOT 통신

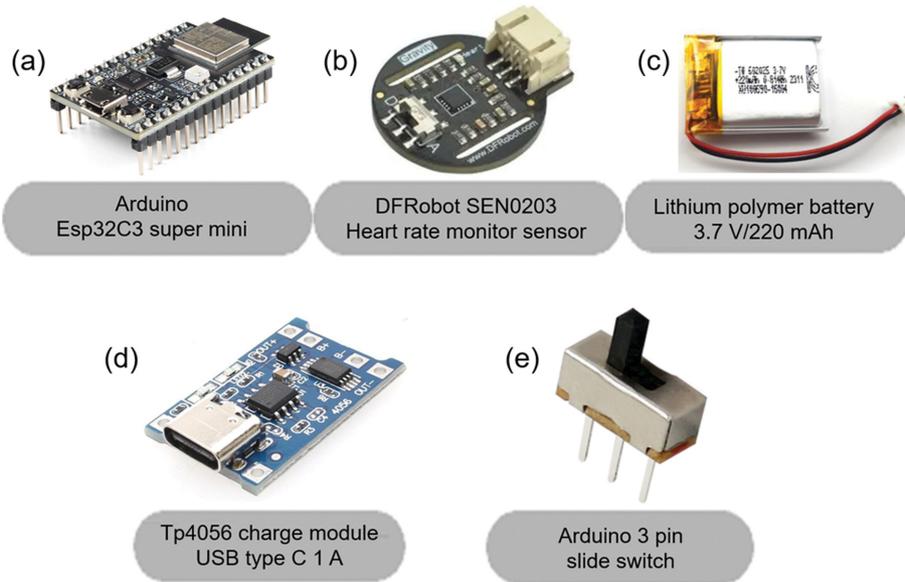


Fig. 3. (Color online) (a) The ESP 32C3 small arduino board and (b) DF Robot pulse sensor, and (c) lithium polymer battery that make up the watch-type SPBFV meter, (d) Tp4056 charge module C-type for charging, and (e) slide switch parts for power ON/OFF.

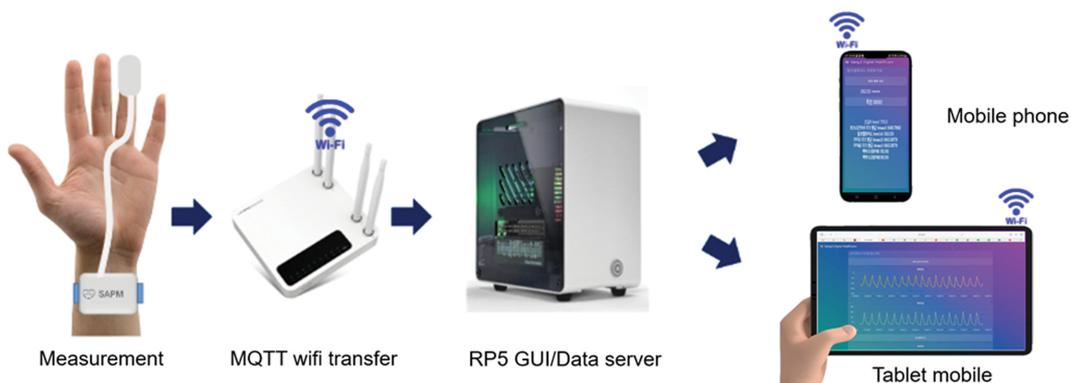


Fig. 4. (Color online) A schematic diagram of the data being transmitted to the Raspberry Pi 5 server via Wi-Fi using MQTT communication, an IOT communication method, and displayed on a mobile device.

방식인 MQTT 통신을 사용하여 라즈베리 파이(Raspberry Pi) 5서버로 전송된다. 전송된 데이터는 노드레드(Node-RED)에서 구축한 측정 및 결과분석 GUI를 통해 스마트폰 상에서도 사용이 가능하다. 사용자의 입력정보와 측정결과는 MySQL로 구축한 데이터베이스를 통하여 확인하고 데이터 활용이 가능하게 하였다.

4. 측정 및 결과분석 GUI

개발된 손목착용형 SPBFV 측정기기를 이용하여 Node-RED로 구현된 웹 기반 대시보드를 통해 손목과 손가락의 BPM 및 SPBFV를 실시간으로 측정하고 분석하는 4단계 과정을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 4단계인 사용자 정보와 손 길이 입력창, 실시간 심박수와 SPBFV 측정, 심박수와

SPBFV에 따른 분석지, 사용자 정보와 측정 데이터 테이블 과정을 나타내었다. 사용자 정보 입력창을 통해 이름, 생년월일, 휴대전화 번호, 이메일, 손 길이 정보를 받아 데이터베이스에 저장 가능한다. 이 정보들은 정확한 측정 결과와 데이터 관리에 필수적으로 활용된다. 사용자가 정보를 입력한 뒤 측정시작 버튼을 클릭하면, 실시간으로 측정되고 있는 맥박수와 SPBFV를 디스플레이 한다. 측정이 끝나면 측정 시간 동안의 BPM과 SPBFV의 최종 평균값을 보여준다. 최종적으로 계산된 BPM과 SPBFV 데이터를 바탕으로 분석된 결과를 확인할 수 있다. SPBFV 값에 따라 신체활동, 스트레스 관리, 식습관 등에 대한 분석이 달라지며 맥박수도 빈맥, 서맥에 따라 다르게 보여준다. 데이터베이스 창에서는 사용자의 정보와 측정된 결과가 자동으로 저장된 것을 확인할 수 있다. 저장

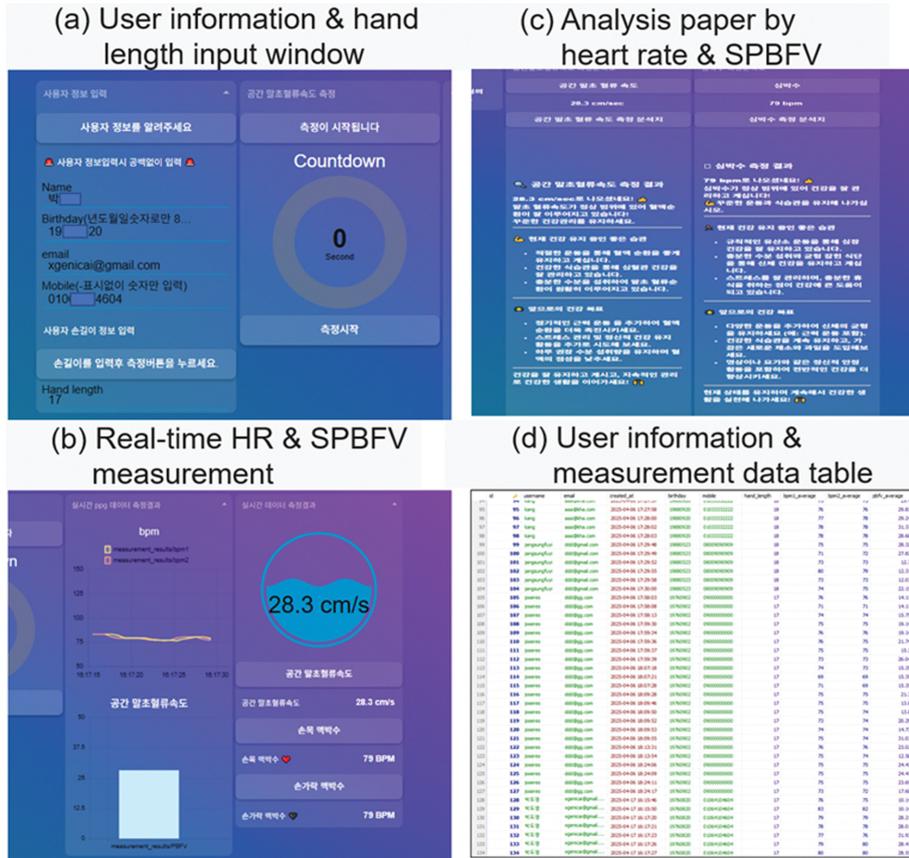


Fig. 5. (Color online) Using a wrist-worn spatial peripheral blood flow velocity measurement device (SPBFV), wrist and finger pulse rate (BPM) and SPBFV are measured in real time through a web-based dashboard implemented in Node-RED, and analysis table example is provided. The 4 step process: (a) User information and hand length input window, (b) real-time HR and SPBFV measurement, (c) analysis paper by BPM and SPBFV, and (d) user information and measurement data table.

된 데이터는 향후 건강 모니터링 및 기록 관리를 위해 재확인할 수 있으며, 필요시 데이터 다운로드도 가능하다.

IV. 측정 데이터 분석 및 비교

개발하는 SPBFV 측정기에는 Esp32 소형 아두이노 보드와 PPG 센서, 폴리머 배터리, C-타입 충전 모듈, 스위치 부품을 사용하였고 작동 SW는 아두이노와 Node-RED를 사용한다. 여기서 사용하는 Node-RED는 하드웨어 장치인 IOT 통신을 통해 시각 프로그래밍을 하는 개발도구이다. 먼저 개발될 측정기 내부에는 아두이노에서 측정된 데이터를 IOT 통신을 위해 Wi-Fi와 MQTT(Message Queuing Telemetry transport) 서버 연결을 한다. 그 다음 두 개의 PPG를 각각 손가락과 손목 두 맥파의 피크를 검출하여 심박수와 SPBFV를 얻게 된다. 계산된 데이터들을 MQTT 통신으로 라즈베리파이 서버에 전송한다. 라즈베리파이 서버에 전송된 데이터는 Node-RED를 통해 다음과 같이 4가지의 기능을 시각화하여 제공하도록 설계하였다. 즉, 실시간 측정, 최종결과 확인, 결과에 따

른 분석지 그리고 측정 데이터 테이블을 확인할 수 있도록 하였다. 서버주소만 알면 PC와 모바일에서 측정이 가능하다.

제품의 전체적인 모습과 센서 및 하드웨어 구성 디자인을 보면, 손가락 모세혈관 측정 부분은 집게형 맥파센서 제품을 개조하여 PPG 센서를 삽입하였고, 요골동맥 측정 센서는 손목 스트랩 부분에 부착하였다. HW 부품은 케이스 안에 넣어 손목 착용 시계 형태로 제작하였다. 먼저 스위치를 통해 센서를 켜 손목 쪽 센서는 요골동맥에 집게형 센서는 손가락에 끼운 후 UI 상에서는 사용자 정보(이름, 생년월일, 이메일, 전화번호)를 기입하고, 길이를 잴 손가락의 길이를 입력을 하여 측정시작 버튼을 누른다. 약 20초간 측정되며, 측정하는 동안에는 실시간 맥박수와 SPBFV를 볼 수 있다. 측정이 끝난 후에는 평균 SPBFV와 심박수가 나타나게 되고, 왼쪽 상단 데이터베이스 메뉴를 클릭하면, 방금 기입한 사용자의 정보와 측정된 심박수와 SPBFV의 데이터를 볼 수 있다. 이외에도 이전까지 누적된 데이터들도 함께 볼 수 있다. 또한 SPBFV 분석지 메뉴를 클릭하면 사용자의 이름과 측정한 시간과 함께 측정된 심박수, SPBFV 값에 따른 맞춤 조언 분

석지를 볼 수 있다.

본 연구는 MPG 또는 PPG-1 및 PPG-2를 동시에 손쉽게 손목과 손가락에 착용하여 불편함 없이 지속적, 객관적으로 말초혈류속도와 관련된 새로운 SPBFV 라는 생체신호를 제안하며, SPBFV는 2개의 PPG를 손목과 손가락에 각각 착용하고 동시에 측정하여 두 맥파형의 피크치 시간차를 비교하여 얻은 생체신호라 정의한다[10]. 또한 PPG 센서는 소형화가 가능하며, 빠르고 비침습적으로 측정할 수 있는 장점이 있어 이러한 장점을 통합한 손목착용형 SPBFV 측정기와 플랫폼을 개발하였다. 측정기는 누구나 시간과 장소에 제약 없이 편안하게 착용 및 측정할 수 있고 지속적인 데이터 축적 및 분석이 가능하여 심뇌혈관 관리 솔루션으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

실시간 맥파 신호의 피크값을 검출하여 SPBFV를 계산하기 위해서 피크 감지 조건을 1차 미분과 동잡음을 고려해 적응형 임계값을 사용하였다. 감지된 데이터를 배열로 저장하여 심박수, SPBFV 값을 계산하도록 하였다. 측정신호를 보았을 때 전보다 읽어 들이는 데이터를 증가시키고 이동평균 필터를 추가 전처리를 하여 노이즈가 없는 신호를 얻었다. 하지만 측정이 끝난 뒤 결과값을 보았을 때, 손가락과 손목에서의 심박수가 다르게 계산된 것을 볼 수 있다. 이에 따라 손가락과 손목에서 검출한 피크 개수 차이도 맞지 않은 것을 확인하였고 SPBFV 계산에도 옳지 않는 결과였다. 또한 실시간 맥파 신호를 UI 상에 전송했을 때 신호가 깨져서 나오는 문제가 발생하였다. 문제점을 보완하기 위해서 먼저 실시간 맥파 신호를 측정하는 동안 계속해서 변화하는 심박수와 SPBFV를 시각화하여 보여주는 아이디어로 바꾸었다.

SPBFV 계산을 다른 방법으로 구현하였다. 피크 검출 파라미터를 직접 조정하여 측정시간 동안에 검출된 모든 피크 데이터를 배열에 저장한 뒤 모든 배열데이터를 활용하여 평균 맥박수와 평균 SPBFV를 도출했다. 이는 피크 검출이 하나라도 어긋날 시 잘못된 계산의 결과 나오기 때문에 결과 오류가 빈번하였던 것을 수정하였다. 하지만 보완한 방식에서는 빠르게 변화하는 심박수와 혈류속도 특성을 고려하였다. 먼저 맥파신호의 피크를 정확하게 검출하기 위해서 측정하고 있는 PPG 센서의 라이브러리를 가져와 피크를 검출하여 심박수를 측정하는 기능 일부를 사용하였다. 검출한 피크 데이터가 6개씩 쌓일 때 마다 손목과 손가락의 시간 차이를 계산하여 SPBFV를 계속해서 계산한다. 측정이 끝난 뒤에는 최종적인 평균 심박수와 평균 SPBFV를 보였다. 배열 사이즈를 6개로 맞추고 순환버퍼 방식을 활용하여 변화하는 공간말초혈류속도를 측정한다. 측정결과를 보았을 때, 손목 손가락의 맥박수를 계속해서 측정해나가고 있고 측정이 끝난 뒤에 최종 SPBFV 값과 맥박수를 계산한다. 이러한 데이터들을 서버에 전송하여 시각화를 보여주게 된다. 추가적으로 아두이노에서 측정된 결과를 데이터베이스에 저장하는 작업을 하였다. 데이터 베이스는 MySQL을 사용하였고 사용자 정보와 함께 저장하게 제작하였다.

개발한 손목착용형 SPBFV 측정기로 심뇌혈관질환 비위험군의 남49세 한명과, 남 26세, 여 26세 2명을 대상으로 2024년 10월1일부터 2024년 11월30일까지 임상 실험을 하였다. 기기를 착용한 상태로 손가락과 손목의 센서 사이의 거리인 손 길이 L_{HF} 는 남 49세는 18 cm, 남 26세는 17.5 cm, 여 26세는 16.5 cm였다. 한 사람당 80개 정도의 SPBFV 데이

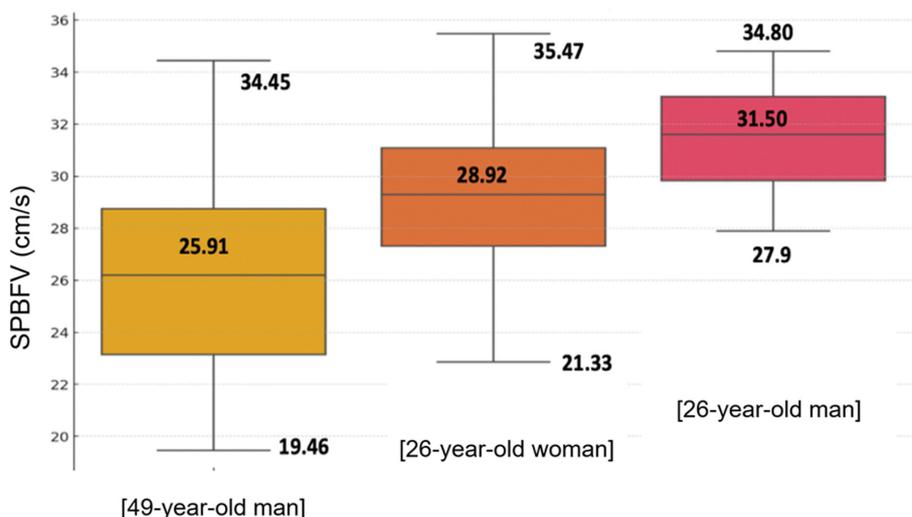


Fig. 6. (Color online) Analysis results of SPBFV data measured with a wrist-worn SPBFV measuring device for one 49-year-old man in the non-risk group for cardiovascular disease and 26-year-old woman and 26-year-old man in the normal group. Number of data: #80 per person, Measurement period: 10-1-2024 to 11-30-2024.

터를 분석하였다. Fig. 6을 보았을 때, 49세 대상자는 변화폭이 14.99 cm/s로 변화폭이 넓고 중앙값이 25.91 cm/s로 26세 그룹에 비해 낮게 나타났다. 이는 혈관 경직성과 심혈관 기능이 26세 그룹에 비해 저하가 진행되고 있기 때문이라 생각된다[12,13]. 26세 여 대상자는 변화폭이 14.41 cm/s로 측정기 동잡음이나 혈류속도의 다양한 변화요인으로 여전히 높게 나타났다. 중앙값은 28.92 cm/s로 49세 대상자에 비해 높게 높게 나왔다. 26세 남 대상자는 변화폭이 세사람 중 가장 작으며 중앙값이 가장 높게 나타났다. 이는 말초혈관의 탄성과 심혈관계 건강이 매우 양호함을 보여주며, 안정적인 혈류조절이 이루어지고 있기 때문이라고 생각된다. 49세 대상자의 중앙값은 25.91 cm/s로, 여 26세 대상자의 중앙값 28.92 cm/s 보다 약 3.01 cm/s 낮았으며, 남 26세 대상자의 중앙값 31.50 cm/s과 비교했을 때 약 5.59 cm/s 낮게 나타났다. 이는 나이가 들수록 혈관 탄성이 감소하고, 혈류속도를 조절하는 능력이 점진적으로 저하되는 경향을 반영한다. 26세 대상자들의 높은 중앙값은 젊은 연령대에서 혈관 탄성과 심혈관계 기능이 잘 유지되고 있음을 보여준다.

본 연구의 측정기로 측정된 비위험군 세 사람의 데이터 각각 보았을 때, SPBFV의 다양한 변화 요인으로 최대 최소 변화가 꽤 큰 것을 알 수 있었다. 또한 중앙값들을 비교해 보았을 때, 나이가 들수록 SPBFV가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 나이가 들수록 혈관이 경직되거나 심혈관 기능의 저하 때문이라 사료된다. SPBFV는 현재 위험군에 대한 측정 분석이 필요하며, 그에 따라 비위험군의 SPBFV의 범위가 뚜렷해질 것으로 보인다. 새로운 생체정보인 SPBFV를 제공함으로써 실시간 측정으로 비대면 진료 환경에서도 유용하게 활용할 수 있으며, 디지털 헬스케어 시대에 맞춘 혁신적인 심뇌혈관 관리 솔루션으로 발전해 나갈 수 있을 것이다.

V. 결 론

손목착용형 SPBFV 측정기를 설계 및 개발하고, 이를 활용하여 새로운 혈액학 생체정보인 BPM와 SPBFV를 측정할 수 있는 실시간 분석 시스템을 구축하였다. 기기의 핵심 구성요소인 ESP32C3 소형 보드, DFRobot Gravity PPG 센서, 리튬폴리머 배터리, Wi-Fi 기반 MQTT 통신 기술을 결합하여 손목과 손가락의 말초혈류 변화를 정밀하게 측정하고 이를 시각화하였다. 개발된 시스템은 사용자 편의를 극대화하는 Node-RED 기반 웹 대시보드를 통해 측정 데이터를 실시간으로 확인할 수 있었다. MySQL 데이터베이스를 활용한 데이터 저장 및 관리 기능을 통해 장기적인 건강 모니터링과 기록 관리의 가능성을 제시하였다. 특히 BPM와 SPBFV 값

의 실시간 분석을 기반으로 개인 맞춤형 건강 상태 평가를 제공함으로써, 심뇌혈관계 질환 예방 및 건강 증진을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 측정 결과, 기기는 연령별 및 건강 상태에 따라 SPBFV 값의 유의미한 차이를 성공적으로 감지하였다. 49세 남성 대상자의 경우, 혈류속도의 변화폭과 중앙값이 26세 대상자 그룹에 비해 낮게 나타났으며, 이는 혈관 경직성과 심혈관 기능 저하의 징후를 반영하였다. 반면, 26세 남성의 경우 변화폭이 가장 작고 중앙값이 가장 높아 말초혈관의 탄성과 심혈관계 건강이 매우 양호함을 시사하였다. 이는 기기가 개인의 공간말초혈류속도 특성을 반영하여 신뢰성 있는 데이터를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업의 결과입니다(2022RIS-005). 피실험자 3명에 대한 실험은 상지대학교 디지털헬스케어학과 생명윤리심의위원회 규정에 따라 승인을 받았습니다(승인 번호: 제2024-4호).

References

- [1] J. P. Mynard, A. Kondiboyina, R. Kowalski, M. M. H. Cheung, and J. J. Smolich, *Front. Physiol.* **11**, 1085 (2020).
- [2] O. Pichot, A. Diard, J. Y. Bosc, F. Abbadie, G. Franco, G. Mahé, N. Sadaghianloo, AV Access Network Investigators on behalf of the Société Française de Médecine Vasculaire and the Société Francophone de l'Abord Vasculaire, *Ultrasound Med. Biol.* **49**, 2213 (2023).
- [3] J. S. Lim, J. I. Lee, Y. E. Lim, H. S. Lee, C. H. Jeon, S. S. Lee, and B. Jung, *J. Kor. Magn. Soc.* **32**, 264 (2022).
- [4] R. G. Choi, W. T. Kim, S. S. Lee, D. Sunwoo, and B. Jung, *J. Kor. Magn. Soc.* **33**, 69 (2023).
- [5] S. S. Lee, R. G. Choi, W. T. Kim, M. W. Shin, J. G. Choi, M. Hasan, and B. Jung, *AIP Adv.* **14**, 025009 (2024).
- [6] K. H. Kim and S. S. Lee, *New Phys.: Sae Mulli* **63**, 1135 (2013).
- [7] I. H. Son and S. S. Lee, *J. Kor. Magn. Soc.* **21**, 104 (2011).
- [8] I. H. Son, Development and property of the wearable pulsimeter for acquiring pulse wave information by using Hall sensor, Sangji University, MS Thesis, pp. 11-19 (2012).
- [9] G. I. Kim, Y. C. Kim, H. J. Lee, Y. H. Kim, S. H. Baek, J. G. Choi, D. Y. Park, B. Jung, and S. S. Lee, *J. Magn.* **29**, 441 (2024).
- [10] D. H. Nam, W. B. Lee, Y. S. Hong, and S. S. Lee, *Sensors* **13**, 4714 (2013).
- [11] G. I. Kim, J. G. Choi, B. Jung, and S. S. Lee, *New Physics: Sae Mulli*, **74**, 1210 (2024).
- [12] J. Schmidli, M. K. Widmer, C. Basile, G. de Donato, M. Gal-

lieni, C. P. Gibbons, P. Haage, G. Hamilton, U. Hedin, L. Kamper, M. K. Lazarides, B. Lindsey, G. Mestres, M. Pegoraro, J. Roy, C. Setacci, D. Shemesh, J. H. M. Tordoir, M. van Loon, Esvs Guidelines Committee, P. Kolh, G. J. de Borst, N. Chakfe, S. Debus, R. Hinchliffe, S. Kakkos, I. Koncar, J. Lind-

holt, R. Naylor, M. Vega de Ceniga, F. Vermassen, F. Verzini, Esvs Guidelines Reviewers, M. Mohaupt, J.-B. Ricco, and R. Roca-Tey, *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* **55**, 757 (2018).
[13] F. S. Apple, C. A. Parvin, K. F. Buechler, R. H. Christenson, A. H. B. Wu, and A. S. Jaffe, *Clin. Chem.* **51**, 2198 (2005).