

자동혈압계 점검을 위한 액추에이터 기반의 혈압 시뮬레이터 개발

김수홍¹ · 이승준¹ · 임문혁¹ · 박혜민¹ · 강민석¹ · 김건호^{1*} · 남경원^{1,2,3*}

¹양산부산대학교병원 의공학과, ²양산부산대학교병원 의생명융합연구원,
³부산대학교 의과대학 의공학교실

Development of An Actuator-Based Blood Pressure Simulator for Automatic Blood Pressure Monitor

Soo Hong Kim¹, Seung Jun Lee¹, Mun Hyeok Lim¹, Hye Min Park¹, Min Seok Gang¹,
Gun Ho Kim^{1*} and Kyoung Won Nam^{1,2,3*}

¹Department of Biomedical Engineering, Pusan National University Yangsan Hospital, Yangsan, Korea

²Research Institute for Convergence of Biomedical Science and Technology,
Pusan National University Yangsan Hospital, Yangsan, Korea

³Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Pusan National University, Yangsan, Korea
(Manuscript received 8 January 2024 ; revised 27 February 2024 ; accepted 28 February 2024)

Abstract: Accurate measurement of blood pressure is essential for classifying an individual's disease, identifying blood pressure-related risks, and managing health. Due to the environmental and health hazards of mercury sphygmomanometers, automatic sphygmomanometers using the oscillometric method are widely used in hospitals as well as in general homes, and have established themselves as a practical standard sphygmomanometer. In this study, we developed a blood pressure simulator using an actuator that provides simulated pressure to an automatic blood pressure cuff. The developed blood pressure simulator adopts an arm-shaped cylindrical shape similar to the situation in which a person measures blood pressure with an automatic blood pressure monitor, and implements a method of transmitting pressure to the cuff using a pressure plate. Accuracy was evaluated through the mean and standard deviation of the difference with the commercialized blood pressure simulator BP PUMP 2, and reproducibility was confirmed using two automatic blood pressure monitors. The developed blood pressure simulator enables automatic blood pressure monitoring in a simple manner and also meets the evaluation standards for accuracy and reproducibility. In the future, as a standardized blood pressure simulator, it is expected to be of great help in evaluating and verifying the performance of automatic blood pressure monitors by supplementing precise hardware and software and building a blood pressure database.

Key words: Blood pressure, Automatic blood pressure monitors, Actuator-based, Simulator

1. 서 론

*Corresponding Author : Gun Ho Kim
Department of Biomedical Engineering, Pusan National University
Yangsan Hospital, Yangsan, Korea
Tel: +82-51-510-8119
E-mail: kgh0383@naver.com

**Corresponding Author: Kyoung Won Nam
207, College of Medicine, 49, Pusandaehak-ro, Mulgeum-eup,
Yangsan-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea
Tel: +82-51-510-8119
E-mail: marmara@gmail.com

본 연구는 2023년 양산부산대학교병원 직무개발연구 과제 연구비의 지원으로 이루어졌음.

임상적으로 혈압(blood pressure, BP)은 혈관 내에서 혈액이 흐를 때 동맥벽에 가해지는 압력을 뜻하며, 심장 수축 시 최고치인 수축기 혈압(systolic blood pressure, SBP)과 이완 시 최저치인 이완기 혈압(diastolic blood pressure, DBP) 사이를 넘나들며 변한다. 혈압 측정은 개인의 질병을 분류하고 혈압과 관련된 위험을 평가하며, 건강관리에 매우 중요한 지표 역할을 한다[1].

혈압을 정확하게 측정하는 방법의 하나는 바늘 또는 카테

터형 혈압 센서를 동맥 내에 삽입하여 직접 동맥 내압을 측정하는 침습적인 방법(invasive blood pressure, IBP)이다. 그러나, 이 방법은 준비과정과 시술이 번거롭고 감염으로 인한 합병증을 유발할 수 있어 외래 환자나 무증상의 사람들, 대규모의 보건 스크리닝에는 적합하지 않다. 그 외, 혈압 측정 방법은 청진법, 촉진법, 초음파, 그리고 오실로메트릭법과 같은 비침습적인 방법(noninvasive blood pressure, NIBP)이 있다[2-4]. 비침습적 방법은 침습적 혈압 측정 방법보다 정확성과 재현성은 낮을 수 있지만, 사용이 간편하며 사용자에게 가해지는 통증이 적어 많은 연구에서 사용됐으며, 임상적으로 신뢰할만한 결과들이 보고되고 있다. 현재 임상 현장에서는 비침습적 혈압 측정 방식이 침습적 방법보다 널리 사용되고 있다[5]. 비침습적 혈압 측정 방법으로 과거에는 수은혈압계를 이용한 청진법이 주로 사용되었으나, 2020년부터 의료기관에서는 미나마타 협약(the minamata convention on mercury)에 근거하여 수은혈압계의 사용이 금지되었다. 이에 오늘날에는 잡음에 의한 오차가 적고 센서를 정확한 위치에 배치해야 하는 번거로움이 적은 오실로메트릭법을 이용한 자동혈압계를 병원은 물론 일반 가정에서도 많이 사용하고 있다. 오실로메트릭법은 일정한 특성 비율을 활용하여 혈압을 산출하는 방식으로, 먼저 팔을 감싼 자동혈압계의 커프(cuff)에 압력을 인가하여 동맥을 폐쇄한 후 커프에 가해진 압력이 감소할 때, 폐쇄된 동맥에서 흐르는 혈압으로 인한 압력 진동을 감지하여 수축기 혈압을 산출한다. 그리고, 커프의 압력이 점점 감소함에 따라 동맥 혈압 압력 진동이 멈출 때 이완기 혈압을 산출한다[6,7].

최근 오실로메트릭법 자동혈압계의 보급이 확대되면서 혈압 측정의 정확도 평가와 점검의 중요성이 강조되고 있으며 이를 위한 혈압 시뮬레이터의 필요성이 증가하고 있다[8]. 그러나, 현재 상용화되어 있는 혈압 시뮬레이터들은 고가의 장비로 일반인이나 일부 의료기관에서는 보유하기가 어려운 상황이다. 또한, 시뮬레이터가 자동혈압계 커프에 모의 압력을 인가하기 위해서는 자동혈압계와의 연결이 필요하다. 이 과정에는 전문적인 기술이 필요하며 시뮬레이터를 준비하고 작동시키는데 상당한 시간이 소요되어 지역병원이나 가정에서의 사용은 힘든 실정이다.

이에 본 연구에서는 대중적으로 보급되고 있는 오실로메트릭법을 사용한 자동혈압계의 점검과 평가를 쉽게 수행하고, 간편한 조작으로 모의 압력을 시뮬레이션할 수 있는 액추에이터 기반 혈압 시뮬레이터(actuator-based blood pressure simulator, ABPS)를 개발하였다. 팔 모양과 유사한 원통형 외형을 가지도록 디자인하여, 실제 혈관 벽과 피부를 통해 상완동맥 압력 진동이 자동혈압계의 커프 표면으로 전달되는 것과 유사한 구조로 설계하였다. 이를 위해 아두이노(arduino)와 액추에이터를 이용하여 압력판에 압력 진동을

발생시켜 커프 표면에 직접 전달하도록 하였으며 압력 파형의 진폭과 진동수를 조절하고 최대 및 최소압력, 압력빈도를 아두이노 프로그램을 통해 제어할 수 있도록 하였다. 안정적인 압력 조절을 위해 압력 센서를 활용하여 실시간으로 측정된 압력 값으로 피드백 제어를 수행하도록 구현하였다.

ABPS의 정확도를 평가하기 위해 자동혈압계 점검 시 사용되는 FLUKE사의 BP PUMP 2(non-invasive blood pressure simulator, fluke biomedical)에서 시뮬레이션 된 압력을 기준값(reference value)으로 하여 일치정도를 확인하는 실험을 수행하였다. 재현성 평가는 식품의약품안전처의 자동전자혈압계 안전성 및 성능 시험방법 정보자료집의 재현성 시험 방법으로 조건에 충족하는지 평가하였다. 이를 통해 ABPS가 실제 사람이 혈압을 측정하는 방식을 모사한 액추에이터 기반의 혈압 시뮬레이터로서 유효한지를 확인하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 시스템 개요

일반적으로 혈압은 mmHg(밀리미터 수은) 단위로 표시한다. 2018 ESH(European Society of Hypertension)/ESC(European Society of Cardiology) Guidelines for the management of arterial hypertension에서는 정상적인 성인의 BP는 수축기 시 120~129 mmHg, 이완기 시 80~84 mmHg 로 보고하고 있다[9].

본 논문의 ABPS는 서보모터(servo motor)를 포함한 액추에이터의 각(angular) 회전을 통해 압력판의 상하 운동을 조절함으로써 사람 팔의 상완동맥 압력 진동을 모방한다. 그리고, 상완동맥 압력 진동이 자동혈압계 커프에 전달되는 형태와 유사하게 ABPS의 압력판에서 커프 표면에 압력 진동을 전달하게 된다. 압력판에서는 정상적인 성인의 수

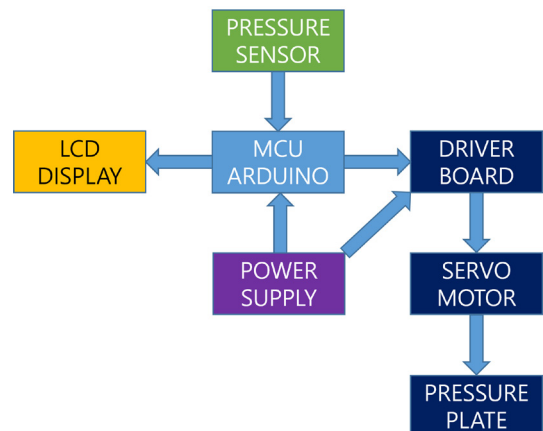


그림 1. ABPS의 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of ABPS

축기 압력(systolic pressure, SYSP)과 이완기 압력(diastolic pressure, DIAP)을 포함하는 0~250 mmHg 범위의 안정적인 압력을 발생시키고 서보모터의 회전주기를 조절하여 심박동수(heart rate, HR)를 0~100 bpm(beats per minute) 범위에서 조절할 수 있게 하여 압력진동을 발생시킨다. 그림 1은 본 연구에서 개발한 ABPS의 전체적인 블록다이어그램을 보여준다.

2. 시스템 설계

(1) 하드웨어 설계

그림 2의 형태로 설계된 ABPS 외형은 사람의 팔이 실제 자동혈압계 컵에 감길 때의 환경을 모방한다. 컵이 팔을 감쌀 때 국부적인 물리적 압력이 가해짐으로 인해 발생하는 상대적 압력 측정을 고려하여 컵의 압력을 균일하게 받을 수 있도록 원통형으로 설계하였다. 그리고, 오실로메트릭법을 이용하는 상용 자동혈압계가 측정 가능한 팔 지름 범위 내에 들어가면서도 실제 팔을 자동혈압계에 넣어 혈압을 재는 것과 유사한 상황을 재현할 수 있도록 평균 체형의 사람 팔 지름인 25 cm 둘레의 아크릴 재질의 원통으로 구현하여 실제 혈압 측정 조건과 동일한 환경을 제공할 수 있도록 하였다 [10,11].

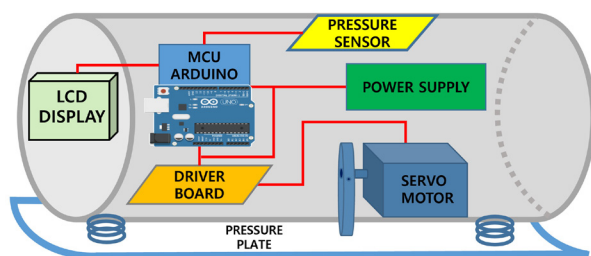


그림 2. ABPS의 외형과 내부 구성도

Fig. 2. The external appearance and internal configuration of ABPS

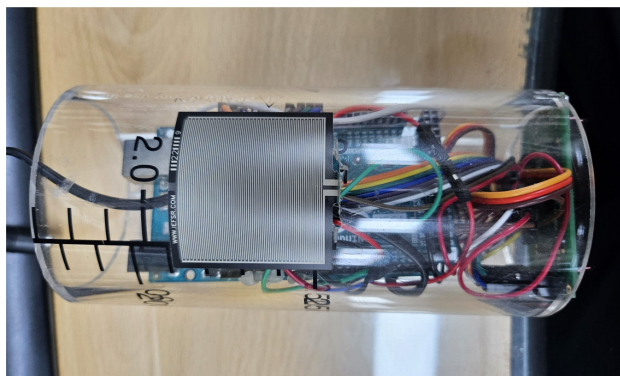


그림 3. 40 mm × 40 mm Active Area를 가진 SEN-09376 압력센서
Fig. 3. A pressure sensor, SEN-09376, with a 40 mm × 40 mm active area

그림 3과 같이 ABPS 상단에 위치한 압력 센서는 ABPS가 컵으로부터 받는 압력을 측정하여 설정된 압력 값에서 액추에이터의 동작 및 정지 시점을 결정하며 컵의 압력을 받는 동안 실시간으로 압력을 측정하여, 컵 표면에 압력진동을 인가하는 압력판의 압력세기를 조절한다. 컵의 제한된 사이즈와 측정 시 발생하는 컵 압력의 범위인 10~300 mHg (약 0.4 kgf/cm²(단위면적당 압력))를 고려하여, 40 mm × 40 mm 면적의 측정범위(Active Area)를 가지고 있으며 100 gf/cm²~10 kgf/cm² 범위에서 10 gf/cm² 분해능으로 측정이 가능한 SEN-09376(NANOSENTECH Co.) 압력 센서를 사용하였다. 상용 자동혈압계 컵가 발생시키는 압력 범위의 값을 측정하기 위해 1 kΩ의 저항을 압력 센서에 직렬 연결하여 10 gf/cm²g~1 kgf/cm² 범위의 10 gf/cm² 분해능으로 변환하여 설계하였다.

그림 4의 액추에이터는 자동혈압계 컵에 전달할 0~250 mmHg 범위의 압력을 구현하기 위해 정밀제어 서보모터와 압력판으로 구성하였다. 정밀제어 서보모터는 정격 전압 3.0~7.2 V로 제어되며 최대 900 mA의 전류를 사용하여 11 kgf·cm의 토크를 발생시킬 수 있는 MG996R(High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo motor(OEM))를 사용하였다. 해당 서보모터는 6 V인가 시 0.13초/60도의 빠른 회전 속도로 사람의 심장 박동 수를 구현할 수 있으며 서보모터에서 구현된 토크와 회전은 압력판에 전달, 상하 직선 운동으로 변환되어 컵 표면에 사람의 동맥압과 같은 압력진동을 컵표면에 전달하게 된다. 압력판은 아크릴 재질로 ABPS와 동일한 곡률반경을 가지도록 제작하였다.

(2) 시스템 제어

ABPS는 PC를 통해 아두이노 통합개발환경(arduino integrated development environment, IDE) 소프트웨어를 사용하여 설정값을 입력하고 조정할 수 있다. 사용자는 IDE 편집기를 통해 시뮬레이터에서 구현하고 싶은 SYSP와

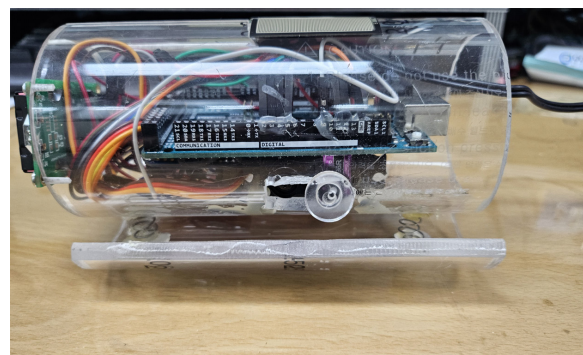


그림 4. 서보모터와 압력판으로 이루어진 액추에이터
Fig. 4. An actuator consisting of a servo motor and a pressure plate

DIAP, HR의 설정값을 입력할 수 있다. IDE를 통해 입력된 값들은 PC 모니터를 통해 사용자가 확인할 수 있으며, 컴퓨터를 통해 USB-UART 변환을 하여 MCU(micro controller unit)의 부트로더(bootloader)가 동작, ABPS 내부 아두이노 MCU에 기계어 코드로 업로드되며 이후에는 설정된 값을 가지고 ABPS 단독으로 운영이 된다. Atmega2560(ATMEL, USA) MCU를 사용하는 아두이노 UNO board는 오픈 소스 기반의 단일 보드 마이크로 컨트롤러로 IDE를 통해 입력된 SYSP와 DIAP, HR등의 파라미터값 들을 처리하고, 자동혈압계 컵 표면에 압력을 인가하기 위해 서보모터의 회전 방향과 각도를 계산, 액추에이터를 제어하게 된다.

3. 시스템 평가

(1) 혈압 시뮬레이션의 정확도

현재 혈압 시뮬레이터에 대한 공인된 표준 규격이 없어 자동전자혈압계의 안정성 및 성능시험 방법 정보자료집에서 혈압 정확도 시험방법을 참고하여 실험하였다[7]. 실험은 외래 환자들이 혈압을 측정하는 환경과 동일한 상황에서 시뮬레이션 되도록 온도 26℃, 습도 40% 장소에서 수행하였으며 기준값 혈압 시뮬레이터는 KOLAS 지정 공인교정기관에서 검교정을 받은 BP PUMP 2를 사용하고 자동혈압계는 양산부산대학교병원의 외래진료부에서 운영되고 정기적인 점검을 받은 TM-2655P(A&D company, japan)를 사용하였다. 그림 5의 (a)와 같이 BP PUMP 2는 자동혈압계 외부에 설치되어 자동혈압계 컵 내부와 연결된 포트를 통해 설정된 공기압을 컵내부에 주입하여 압력 진동을 인가하는 방식으로, ABPS는 그림 5의 (b)와 같이 자동혈압계 컵상에 놓여지고 액추에이터가 압력판을 통해 컵 표면에 압력 진동을 인가하는 방식으로 구현하였다.

자동혈압계의 정확도 실험에는 85명의 성인을 대상으로

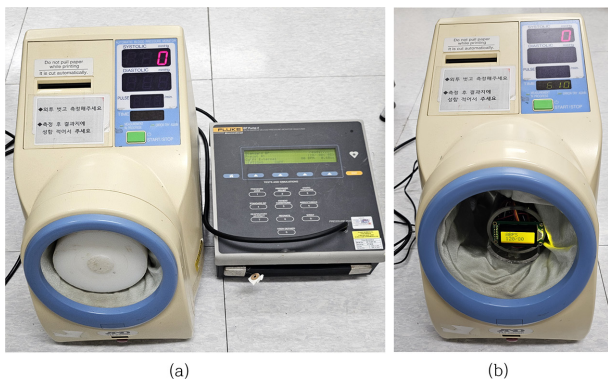


그림 5. BP PUMP 2 (a)와 ABPS (b)가 자동혈압계에서 시뮬레이션 되는 모습

Fig. 5. The simulation of BP PUMP 2 (a) and ABPS (b) within an automatic blood pressure monitor

임상 비교 평가 방법을 제시하고 있는데 본 연구의 실험은 혈압 시뮬레이터에 대한 평가로 상용화되어 있는 혈압 시뮬레이터 BP PUMP 2의 측정값을 기준값으로 사용하였다. 임상 상황과 유사한 상황의 실험을 위해 혈압 관련 임상의 대표적인 3가지 기준인 혈압과 휴식 심박동 수를 고려하여 실험하였다. 일반적으로 사람의 혈압에서 SYSP와 DIAP는 저혈압(low blood pressure) : SYSP 100 mmHg~DIAP 60 mmHg, 정상혈압(normal blood pressure): SYSP 120 mmHg~DIAP 80 mmHg, 고혈압(high blood pressure): SYSP 140 mmHg~DIAP 100 mmHg의 기준을 가진다 [12,13]. 실험에서 각 시뮬레이터가 앞서 언급한 세가지 범위에 해당하는 압력 값을 구현하도록 설정하였으며, 임상시험에서 혈압을 측정할 때 안정을 취하는 시간을 가진 뒤 측정하게 됨으로 HR값은 모든 범위에서 성인의 휴식 심박동수인 75bpm으로 설정하였다[14]. 각 범위에서 20회의 시뮬레이션을 실시하고, BP PUMP 2의 측정된 값과 ABPS의 측정값과의 차이의 평균(mean of difference)과 차이의 표준편차(standard deviation of difference)를 구하여 ABPS의 정확도를 평가하고자 하였다.

(2) 혈압 시뮬레이터의 재현성

개발된 ABPS의 재현성을 평가하기 위해 자동전자혈압계의 안전성 및 성능시험 방법 정보자료집의 혈압측정의 재현성에서 IEC 80601-2-30:2018의 규격을 참고하여 실험하였다. 정확도 실험을 수행한 TM-2655P 모델의 자동혈압계를 포함해 동일한 조건의 자동혈압계 두대로 실험하였으며 시험 환경은 정확도 실험과 동일한 장소에서 수행하였다.

실험순서를 살펴보면 먼저 자동혈압계 두 개를 준비하여 A, B로 정하고 임의로 선택한 한 개의 자동혈압계에서 ABPS로 SYSP : 120 mmHg와 DIAP : 80 mmHg, HR : 80 bpm 으로 설정 후 20회 연속 측정을 수행하여 계산된 평균(mean)과 표준편차(standard of deviation, SD)를 자동혈압계 B의 시작값(start value)으로 설정한다. 다음으로 자동혈압계 B의 시작값의 경우, SYSP와 DIAP의 표준편차의 표준편차가 ≤ 2.0 mmHg 인지 확인하여 기준에 충족 여부를 확인한다. 기준을 충족하면 자동혈압계 A에도 시작값으로 설정하고 20번의 측정을 수행 후 SYSP와 DIAP의 평균을 계산하여 결과를 끝값(end value)으로 기록한다. 자동혈압계 B로도 20번 측정 수행 후 SYSP와 DIAP의 평균을 계산하여 끝값으로 기록한다. 이때 자동혈압계 B의 끝값의 경우, SYSP와 DIAP의 표준편차가 ≤ 2.0 mmHg 인지 확인하고 평균 시작값과 끝값 차이의 절대값이 ≤ 2.0 mmHg인지 확인한다. 자동혈압계 A는 평균 시작값과 끝값 차이의 절대값이 ≤ 5.0 mmHg 인지 확인하고 결과적으로 혈압 측정의 재현성이 ≤ 3 mmHg 인지 확인한다.

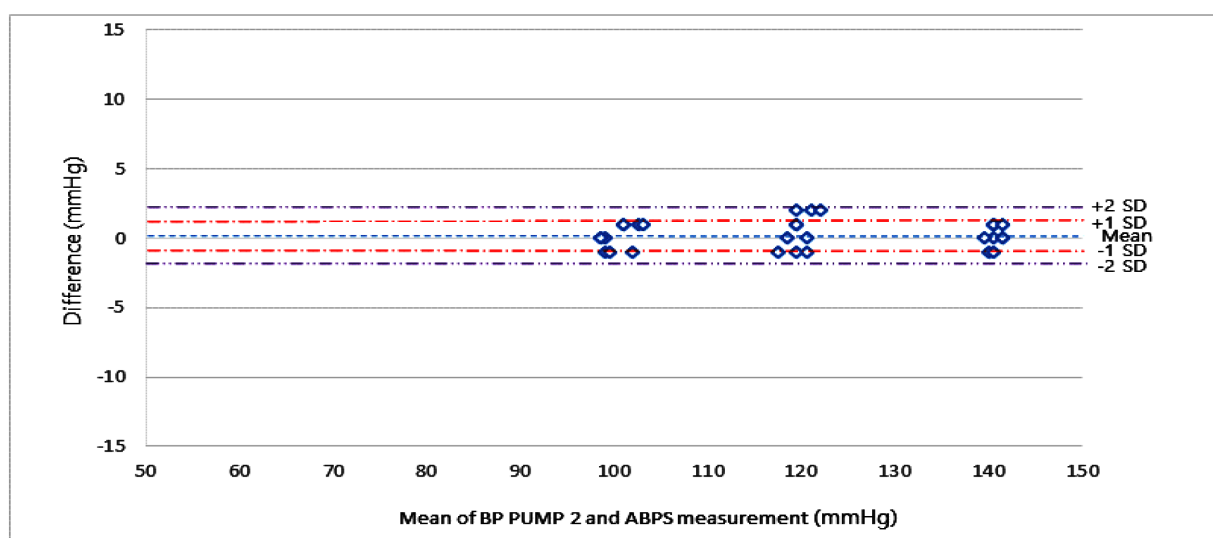
III. 연구 결과

자동혈압계에서 측정된 BP PUMP 2와 ABPS의 혈압 시뮬레이션 차이의 평균과 차이의 표준편차를 통해 정확도 검증 수행하였으며 SYSP와 DIAP 각각 0.3 ± 1.0 mmHg, 4.0 ± 5.2 mmHg 인 것으로 나타났다. 그림 6은 실험 결과 데이터를 바탕으로 BP PUMP 2와 ABPS의 시뮬레이션 결과값의 일치정도를 확인할 수 있는 산점도를 나타낸다. 그림 6에서 각각의 점은 BP PUMP 2와 ABPS의 측정치 평균 (mean of BP PUMP 2 and ABPS measurement)을 보이며, 차이는 각각의 점에서 BP PUMP 2와 ABPS의 혈압 측

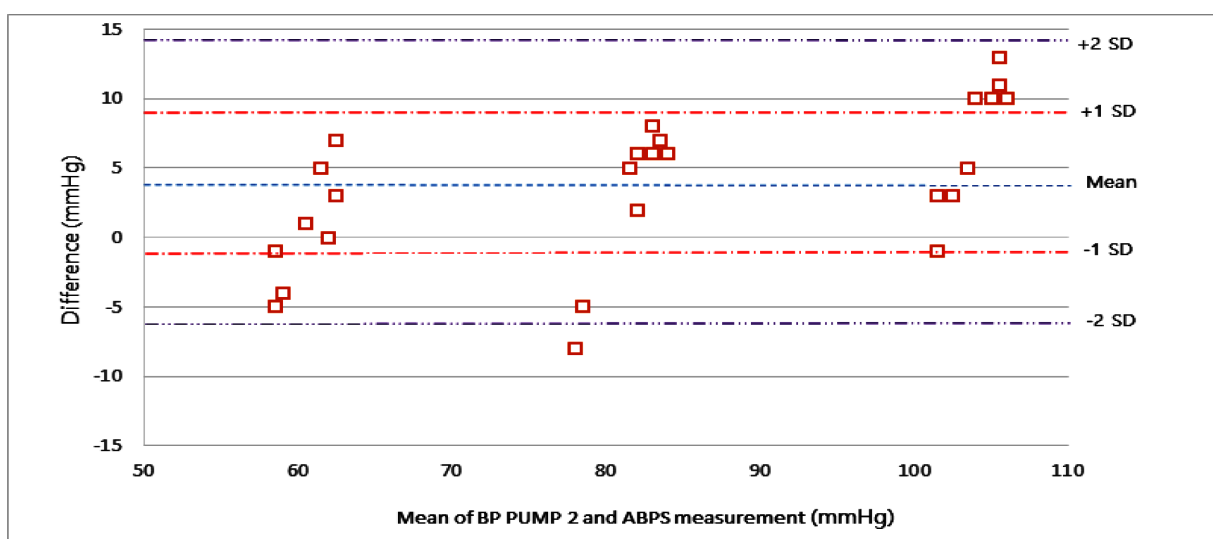
정치의 차이를 보인다. 각 산점도에는 수평선으로 평균과 표준편차를 파악할 수 있도록 표시하였으며 그림 6의 (a)는 SYSP에 대한 산점도, 그림 6의 (b)는 DIAP에 대한 산점도를 보여주고 있다. ABPS의 정확도 검증결과에서 차이의 평균 $\leq \pm 5$ mmHg, 차이의 표준편차 ≤ 8 mmHg 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

다음으로 두 개의 자동혈압계로 ABPS의 재현성 검증을 수행하였다. 자동혈압계 A, B에서 각각의 자동혈압계가 측정된 결과값들의 평균과 표준편차를 구하여 표 1의 시작값과 끝값, 두 측정치간의 차이값을 구하였다.

자동혈압계 B에서 측정된 시작값의 경우, SYSP와 DIAP



(a)



(b)

그림 6. 자동혈압계 TM-2655P에서 측정된 BP PUMP 2와 ABPS의 산점도 : (a) SYSP 산점도, (b) DIAP 산점도

Fig. 6. Scatter plot of BP PUMP 2 and ABPS measured by automatic blood pressure monitor TM-2655P: (a) SYSP scatter plot, (b) DIAP scatter plot

표 1. 자동혈압계 A, B에서 측정된 ABPS의 시작값과 끝값, 차이값

Table 1. Starting and ending values and difference values of ABPS measured by automatic blood pressure monitors A and B

Set value (120/80 mmHg, 80 bpm)	Automatic Blood Pressure Monitor(TM-2655P)			
	A		B	
	SYSP (n=20)	DIAP (n=20)	SYSP (n=20)	DIAP (n=20)
	Mean SD	Mean SD	Mean SD	Mean SD
Start value	118.9 ±2.02	83.3 ±4.12	118.9 ±2.02	83.3 ±4.12
End value	117.5 ±1.36	85 ±3.81	118.7 ±2.11	85.9 ±4.09
Difference	1.4 0.66	1.7 0.31	0.2 0.09	2.6 0.03

의 표준편차의 표준편차가 ≤ 2.0 mmHg를 만족하고 있으며 끝값의 경우도 SYSP와 DIAP 표준편차가 ≤ 2.0 mmHg를 만족하고 있어 ABPS와 자동혈압계의 조합이 시험절차를 수행할 수 있는 안전성이 확보됐음을 확인하였다. 최종적으로 자동혈압계 A의 경우 평균 시작값과 계산된 끝값 차이의 절댓값이 ≤ 5.0 mmHg임을 확인할 수 있으며 결과는 재현성의 기준으로 3.0 mmHg 이하를 만족하고 있음을 확인하였다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 액추에이터와 압력판을 이용하여 커프 표면에 모사 압력 진동을 전달하는 방식으로 빠르고 간편하게 자동혈압계를 점검할 수 있는 ABPS를 구현하였고 정확도와 재현성 두가지 실험을 통해 실험에서 제시하는 기준을 만족하는 혈압 시뮬레이션임을 확인하였다. 다만, 자동혈압계의 정확도 실험결과에서 그림 6의 (b) DIAP 산점도를 살펴보면, SYSP 산점도에 비해 값이 퍼져있고 크기는 차이가 13 mmHg 까지 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 재현성 실험결과에서도 DIAP의 측정값이 SYSP보다 상대적으로 모두 높게 나타남을 볼 수 있었다. 이는 임상시험을 통한 자동혈압계 평가 연구에서 나타난 측정값들의 산점도에서도 유사한 결과를 보여주고 있다[15,16]. 이러한 결과는 커프에 측정되는 파형의 형상으로부터 수학적인 알고리즘에 의해 압력을 추정하는 오실로메트릭법의 자동혈압계와 같은 간접측정 방식 혈압계의 특성으로 DIAP가 SYSP보다 상대적으로 약한 신호로 커프를 통해 전달되기 때문이다[16,17]. 실험을 통해 임상시험과 유사한 결과의 양상을 보여주면서 정확도와 재현성에서 만족하는 결과값을 보여주는 ABPS는 단독으로 자동혈압계 커프에 올려 놓고 바로 측정을 시작할 수 있어 시뮬레이터 설정 및 연결과정 없이 신속한 혈압계 점검 및 평가가 가능하다는 것도 알 수 있었다. 이는 자동혈압계의 평가를 위한 임상시험이 필요한 제조사나 의료기관의 인증평가를 위한 예방점검 시 시간과 비용을 절약하며 평가 및 점검을 진행할

수 있게 해준다. 또한, 상용화 되어 있는 공기압을 이용한 혈압 시뮬레이터에서 액추에이터와 압력판을 이용한 방식의 혈압 시뮬레이터는 기존의 혈압 시뮬레이션 방식과는 다른 접근법을 제시하여 새로운 시각의 혈압 시뮬레이터 개발을 촉진할 것으로 기대된다.

하지만, 표준화된 혈압 시뮬레이터로서의 성능을 갖추려면 추가적인 연구와 개발이 더 필요할 것으로 사료된다. 우선, 지금보다 정확도를 높이기 위한 압력 측정과 액추에이터 제어를 위해 고사양의 하드웨어와 함께 PID(proportional-integral-differential controller)와 같은 소프트웨어적 개선이 필요하다. 뛰어난 분해능을 갖춘 압력 센서와 정밀한 회전을 제공하는 정교한 서보모터, PID 프로그램을 통한 제어는 액추에이터 기반 혈압 시뮬레이터의 오차율을 확연히 줄여 줄 수 있을 것으로 사료된다. 그리고, 다양한 자동혈압계 모델에 대한 혈압 시뮬레이션 측정 결과의 데이터를 수집하고 분석하여 데이터베이스를 구축하고 검증하는 과정이 필요하다. 메모리화 된 데이터 베이스를 이용하여 각 모델별로 시뮬레이션에 대한 보정 값을 설정하여 측정한다면 각 모델의 고유한 특성을 고려한 정밀한 점검을 수행할 수 있게 되어 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 사항들이 개선 및 적용되고 연구된다면 ABPS는 높은 정확도와 재현성의 사양으로 임상과 유사한 시뮬레이션을 구현하는 표준화된 혈압 시뮬레이터로서 가정뿐만 아니라 의료 및 제조업계에서 활용되어 자동혈압계의 점검 및 성능평가, 검증에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

References

[1] Asada H, Reisner A, Shaltis P, McCombie D. Towards the development of wearable blood pressure sensors: a photo-plethysmograph approach using conducting polymer actuators. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2005;2005:4156-59.
 [2] Drzewiecki GM, Melbin J, Noordergraaf A. The Korotkoff-sound. Ann Biomed Eng. 1989;17(4):325-59.

- [3] Roh DK, Lee YS, Jie JH, Park SB, Lee KH, Kim HK. Design of the blood pressure measurement system using the inflatable oscillometric method. *J Biomed Eng Res.* 2003;24(4):281-86.
- [4] Moraes JCTB, Cerulli M, Ng PS. A strategy for determination of systolic, mean and diastolic blood pressures from oscillometric pulse profiles. *IEEE Comput Cardiol.* 2000;27:211-14.
- [5] Perloff D, Grim C, Flack J, Frohlich ED, Hill M, McDonald M, Morgenstern BZ. Human blood pressure determination by sphygmomanometry. *Circulation.* 1993; 88:2460-70.
- [6] Geddes LA, Voelz M, Combs C, Reiner D, Babbs CF. Characterization of the oscillometric methods for measuring indirect blood pressure. *Ann Biomed Eng.* 1982;10(6):271-80.
- [7] Lee DH. Information Compilation on Safety and Performance Testing Methods for Automated Electronic Blood Pressure Monitors. Cheongju: National Institute of Food and Drug Safety Evaluation; 2020. pp. 17-24.
- [8] Cho EJ, Yeon HW, Kim HJ, Kang SJ, Lee JW. A Study on development of a guideline for performance evaluation of automatic sphygmomanometer. *Regulatory Research on Food, Drug and Cosmetic.* 2014;9(1):33-43.
- [9] Williams B, Mancia G, Spiering W, Rosei EA, Azizi M, Burnier M, Clement DL, Coca A, de Simone G, Dominiczak A, Kahan T, Mahfoud F, Redon J, Ruilope L, Zanchetti A, Kerins M, Kjeldsen SE, Kreutz R, Laurent S, Lip GYH, McManus R, Narkiewicz K, Ruschitzka F, Schmieder RE, Shlyakhto E, Tsioufis C, Aboyans V, Desormais I. 2018 ESC/ESH guidelines for the management of arterial hypertension. *Eur Heart J.* 2018;39(33):3021-3104.
- [10] Kim JE, Kim EK. A Study on MZ generation (2030s) male body shape comparison and body shape change. *J Korea Fashion Costume Design Assoc.* 2023;25(1):33-47.
- [11] Kim JE, Kim EK. A study on changes in body shape of MZ generation (2030s) women for clothing construction. *J Korea Fashion Costume Design Assoc.* 2022;24(3):111-25.
- [12] Kim SY, Jung SP. A study of relation between symptoms and low blood pressure. *J Yeongnam Med Sci.* 1994;11(1):94-100.
- [13] Lee HY. New definition for hypertension. *J Korea Med Assoc.* 2018;61(8):485-92.
- [14] Park DH, Jeon JY. The prognostic value of resting heart rate for health status. *Exerc Sci.* 2020;29(1):24-33.
- [15] Kobalava ZD, Kotovskaya YV, Babaeva LA, Moiseev VS. Validation of TM-2655 oscillometric device for blood pressure measurement. *Blood Press Monit.* 2006;11(2):87-90.
- [16] Kim WK, Shin KY, Mun JH. The development of a cuff for the accuracy enhancement of sphygmomanometer. *J Korean Soc Precis Eng.* 2005;22(5):181-88.
- [17] Doh I, Lim HK, Ahn BY, Chee YJ, Lee JS, OH JH. A simulator for the validation of non-invasive blood pressure (NIBP) monitoring devices. *J Biomed Eng Res.* 2017;38(3):111-115.