

Digital Blood Pressure Estimation with the Differential Value of the Arterial Pulse Waveform

Kim Boyeon[†] · Chang Yunseok^{††}

ABSTRACT

We proposed the new method to estimate the blood pressure with the differential value of the digital arterial pulse waveform and BP relation equation. To get the digital arterial pulse waveform, we use the arterial pulse waveform measurement system that has digital air-pressure sensor device and smart phone. The acquired digital arterial pulse waveforms are classified as hypertension group, normal group, and hypotension group, and we can derive the average differential value between the highest point and lowest point of a single waveform of individuals along with the group. In this study, we found the functional correlation between the blood pressure and differential value as a form of BP relation equation through the regression process on the average of differential value and blood pressure value from a tonometer. The Experimental results show the BP relation equation can give easy blood pressure estimation method with a high accuracy. Although this estimation method has over 66 % error rate and does not give the high level of the accuracy for the diastolic compares to the commercial tonometer, the estimation results for the systolic show the high accuracy that has less than 10 % error rate.

Keywords : Digital Arterial Pulse Waveform, Blood Pressure Measurement, Differential Value, BP Relation Equation, Non-Kortokoff Method

맥파의 차동값에 의한 디지털 방식의 혈압 추정 기법

김보연[†] · 장윤석^{††}

요 약

본 연구에서는 디지털 방식으로 측정된 맥파의 파형으로부터 최대 높기와 최소 높기의 차이, 즉 맥파의 차동값을 이용하여 혈압을 측정하는 측정 기법을 제시한다. 이를 위하여 본 연구에서는 적분 방식의 디지털 압력 센서와 블루투스, 스마트폰으로 구성되는 맥파 측정 시스템을 이용하여 맥파 데이터를 수집하였다. 수집된 맥파 데이터들은 고혈압, 정상, 저혈압의 군으로 분류되고, 각 맥파 파형의 최고 값과 최저 값의 개인별 차동값 평균을 도출한다. 맥파 측정시 동시에 혈압계로 측정된 최고혈압과 최저혈압의 값과 맥파 데이터로부터 도출된 차동값의 평균값들을 회귀 분석하면 맥파 차동값과 혈압과의 상관관계인 혈압상관관계식을 도출할 수 있다. 이 혈압상관관계식을 이용하여 임의의 실험자의 맥파 측정을 통한 혈압 추정 실험을 수행한 결과 실험자들의 혈압값들을 용이하게 추정할 수 있었다. 기존의 혈압계를 사용한 측정치에 대하여 제안된 기법은 최저혈압의 경우는 최대 66%의 오차를 보이므로 그다지 높은 정확성을 보이지 못하지만, 최고혈압의 경우에는 10% 이하의 오차로 혈압값을 추정할 수 있었다.

키워드 : 디지털 맥파, 혈압 측정, 맥파 차동값, 혈압상관관계식, 비압박방식

1. 서 론

혈압의 측정은 가장 기초적인 의료 행위임과 동시에 가장 중요한 신체 상태의 지표이기도 하다. 병원에서 환자를 진

료할 때에 가장 먼저 수행하는 일 중의 하나는 환자의 혈압을 측정하고 혈압에 따른 신체의 건강 상태를 파악하는 일이다. 혈압을 측정하는 방법은 전통적인 Kortokoff 방식과 이를 응용한 Oscillometric 방법이 매우 오랫동안 사용되어 왔고, 이는 현재의 전자식 또는 진동식 혈압계에서도 그대로 적용하고 있다[1]. 그러나 이러한 Kortokoff 방식의 혈압계들은 혈관에 높은 압력을 가함으로써 혈관벽을 손상시킬 위험성이 높기 때문에 연속적이고 반복적인 혈압 측정이 불가능하다는 약점을 가지고 있다[2]. 따라서 연속적인 혈압

[†] 비 회 원 : 대전대학교 컴퓨터공학과 초빙교수
^{††} 중 심 회 원 : 대전대학교 컴퓨터공학과 교수
Manuscript Received : April 4, 2016
First Revision : May 31, 2016
Second Revision : June 3, 2016
Accepted : June 8, 2016
* Corresponding Author : Chang Yunseok(cosmos@daejin.ac.kr)

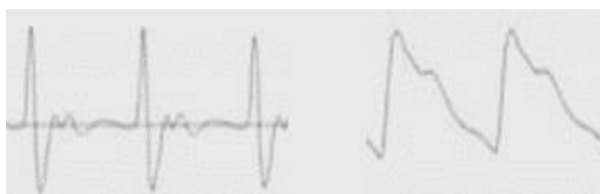
측정이 필요한 경우에는 지속적이고 반복적으로 혈압을 측정할 수 있는 새로운 비압박식 혈압 측정 방식, 즉 Non-Kortokoff 방식의 혈압 측정 방법이 필요하다.

1.1 연속적인 혈압 측정의 목표

고혈압 환자나 임신부와 같은 경우에는, 상시적이고 연속적으로 혈압을 측정할 필요가 있다. 그러나 혈압을 측정하는 전통적인 방식인 Kortokoff 방식은 혈관에 압박을 가하여 혈류를 일시적으로 막은 다음에, 혈류를 통과시키면서 측정하는 방법을 사용하기 때문에 일정 횟수 이상 측정을 반복하면 혈관벽에 손상을 입혀서 출혈을 일으킬 수 있는 위험성을 가지고 있다. 따라서 연속적인 혈압 측정을 수행하기 위해서는 혈관을 누르지 않는 비압박식의 혈압 측정 방법이 필요하다. 만약 혈관에 압력을 가하지 않고도 혈압을 측정할 수 있다면 24시간 연속적으로 혈압을 측정하는 것이 가능해진다[3]. 따라서 본 연구에서는 디지털 압력 센서와 스마트기기를 이용하여 혈관을 흐르는 혈류의 연속적인 압력 변화를 나타내는 파형, 즉 맥파를 측정하고 측정값으로부터 혈압을 추정할 수 있는 혈압 측정 알고리즘을 도출한다. 혈관을 누르면 연속적인 혈류의 파형을 얻을 수 없으므로 혈관벽에 압력을 가하지 않고도 연속적인 혈압 측정이 가능하게 된다.

1.2 맥파의 측정

디지털 압력 센서는 출력하는 데이터의 파형에 따라서 미분파(Differential waveform)를 출력하는 센서와 적분파(Integral waveform)의 형태로 출력하는 센서로 나누어진다. 미분파 출력은 단위 시간당 압력의 변화량을 나타내고 적분파 출력은 압력값 자체의 변화를 나타낸다. Fig. 1은 혈압을 측정하는 압력 센서의 출력값을 미분파형과 적분파형으로 나타내고 있다.



a) Differential waveform b) Integral waveform

Fig. 1. Arterial Pulse Waveform

혈압은 혈관벽에 직접적으로 가해지는 혈류의 압력 값이기 때문에, a)와 같은 미분파형보다는 b)와 같은 적분파형이 혈류의 압력 변화와 맥파와의 관계를 파악하기에 더 용이하다. 따라서 본 연구에서는 압력의 변화를 적분파형을 출력하는 디지털 압력 센서 유닛을 사용하였으며 센서에서 발생하는 적분파형 데이터를 분석하여 혈압을 추정하는 연구를 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 혈압 측정 방법과, 혈압계의 활용에 대한 관련 연구를 서술하고, 3장에서는 맥파와 혈압과의 상관관계를 설명하고 혈압 추정 알고리즘을 제시하였다. 제4장에서는 맥파 측정 실험 환경과 조건을 기술하였고, 제5장에서는 실험 결과의 분석을 통하여 맥파 차동값을 이용한 혈압 추정 알고리즘의 정확성을 상용의 혈압계 측정치와 비교, 분석하였으며 제6장을 통하여 결론과 향후 연구 방향을 기술하였다.

2. 관련 연구

혈압을 측정하는 방법에 대한 연구는 매우 다양하게 발전하여 왔다. 그러나 그 대부분은 새로운 혈압 측정 방법에 대한 연구이기보다는 기존의 Kortokoff 방식이나 Oscillometric 방식을 응용한 연구에 집중되어왔다. 일반적인 혈압 측정 방법은 혈관의 외부에서 혈관내 압력을 측정하는 방법이다. 이와는 다르게, 일본의 경우 혈관내에 존재하는 혈압값을 비침습 방법을 사용하여 측정하는 기법이 연구되기도 하였고[4], 손목에 차는 밴드나 센서 장치를 이용하여 원격에서 혈압과 건강상태를 모니터링하는 기법들이 연구되기도 하였다[5]. 기존의 Oscillometric 방법을 이용한 손목형 혈압계는 여전히 손목의 혈관에 압력을 가하는 방법으로 혈압을 측정하지만 비침습 방법이나 센서 방식의 기법들은 센서 장치에서 출력되는 압력값으로 혈압을 측정하는 방법을 사용한다[6]. 그러나 비침습 방법은 오차 허용범위 내에서 정확하게 측정하기 어렵기 때문에 Oscillometric 방법을 응용한 디지털 기술을 이용하는 전자식 혈압계들이 많이 사용되고 있다. 디지털 방식으로 설계된 혈압계들은 대부분 다른 디지털 기기와 조합하여 사용할 수 있다. 따라서 최근에 주요 디지털 기술분야로 각광을 받고 있는 u-Healthcare 분야에서도 전자 혈압계를 스마트폰과 같은 무선 장치와 연결하여 Zigbee나 WiFi LAN 환경에서 활용하는 연구들도 많이 수행되고 있다[7-9]. 그러나 이들 연구들은 대부분 혈압을 압력 센서로 직접 측정하고자 하는 방법으로 접근하였으며, 압력 변수 외에 다른 요소들의 측정에 의한 혈압 측정은 고려하지 않고 있는 방법론상의 한계를 가지고 있다. 본 연구는 혈관속의 압력을 직접 측정하는 대신에 혈류가 흐르면서 만들어내는 맥파를 측정하고, 이를 통하여 혈압을 추정하는 방법론을 제시하여 그 유효성을 검증하는 데 초점을 맞추고 있다.

3. 맥파와 혈압

맥파는 심장의 박동에 의하여 발생하는 충격파의 일종이기 때문에 혈관 벽에 부딪치는 혈류의 압력, 즉 혈압과 밀접한 관계를 가지고 있다[10]. 만약 대기압이나 피부의 압력

등의 혈관 외부 압력이 동일하게 가해진다고 가정하면, 혈압이 높을수록 맥파의 진폭은 커지고, 혈압이 낮을수록 맥파의 진폭은 작아지게 된다. 따라서 맥파의 진폭과 실제 혈압과의 관계를 파악할 수 있다면 맥파의 크기를 측정하여 혈압을 구할 수 있게 된다.

3.1 맥파 차동값(Differential value)

맥파 차동값이란 연속적인 맥파 W 의 각 파형 W_i 에서 파형의 최고치와 최저치의 차이이다. 이는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 S점과 P점 사이의 차이 ΔP_i 와 동일한 값으로 표현될 수 있다. 연속적으로 맥파를 측정할 경우, 맥파 데이터 내에는 많은 수의 맥파(Arterial Pulse Waveform)들을 포함하고 있기 때문에 각 맥파 수만큼의 차동값들을 구할 수 있다.

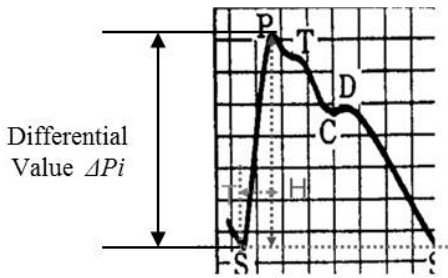


Fig. 2. Differential Value ΔP_i from an Arterial Pulse Waveform W_i

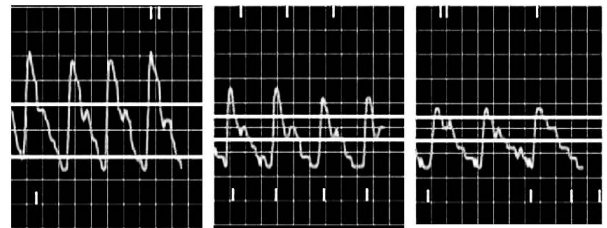
맥파는 사람마다 혈압과 상태에 따라서 크기도 다르고 세부적인 파형의 형태도 조금씩 다르다. 따라서 맥파 차동값도 측정 대상에 따라서 다양하게 나타난다. 본 연구에서는 이 맥파 차동값과 혈압과의 관계를 분석하고, 맥파 차동값을 통하여 혈압을 추정할 수 있는 방법을 연구하였다.

3.2 맥파와 혈압과의 상관관계

맥파는 대부분 유사한 형태를 가지지만 세부적인 형태는 측정 대상과 측정 조건에 따라서 약간씩 다르다. 맥파의 주요 특성은 맥파의 주기, 맥파의 선형 그리고 맥파의 차동값이다. 이 중에서 맥파의 주기는 맥박수에 해당되고[11], 맥파의 선형은 심장의 동작 및 혈관 상태와 관련이 있다[12]. 맥파의 차동값은 혈압과 관계가 있다고 생각될 수 있지만, 정확한 상관관계가 연구된 바는 없다. 그러나 다양한 실험자들을 대상으로 맥파를 측정해 보면 Fig. 3과 같은 전형적인 패턴을 볼 수 있다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 고혈압(Hypertension) 증상을 가지는 실험대상자와 정상(Normal)인 실험대상자, 그리고 저혈압(Hypotention) 증상을 가지는 실험대상자들의 맥파 차동값 사이에는 뚜렷한 차이가 있다. 임상에서 혈압은 최저혈압(Diastolic)에 비하여 최고혈압(Systolic)의 중요도가

더 높다. 일반적으로 고혈압 환자는 최고혈압이 정상인의 평균 혈압보다 높고, 저혈압 환자의 최고혈압은 정상인의 평균 혈압보다 낮은 경향을 보인다[13]. 따라서 맥파의 차동값과 최고혈압 및 최저혈압 사이에 상관관계가 있다면, 맥파의 차동값을 측정하여 대략적인 혈압을 추정할 수 있다.



a) Hypertension b) Normal c) Hypotention

Fig. 3. 3-types of Typical Arterial Pulse Waveform

3.3 혈압 상관관계의 도출

맥파의 차동값과 혈압과의 상관관계 여부를 판단하기 위해서는 맥파의 차동값이 혈압계로 측정된 실제 혈압과 어떤 관계가 있는가를 조사하여야 한다. 이를 위하여 다수의 실험자들을 대상으로 하여 혈압과 맥파 크기를 측정하고, 회귀 분석(Regression)을 통하여 관계식을 도출한다. 회귀 분석의 결과로 차동값과 혈압 사이에 전형적인 함수관계가 도출될 수 있다면 이를 이용하여 맥파 차동값 ΔP 에 대한 혈압상관관계식(BP relation equation)을 다음 Equation (1), (2)와 같이 도출할 수 있다.

$$Systolic(\Delta P) = Reg(Systolic_{avg}, \Delta P_{avg}) \quad (1)$$

$$Diastolic(\Delta P) = Reg(Diastolic_{avg}, \Delta P_{avg}) \quad (2)$$

ΔP_{avg} : Average of $\Delta P_i, i = 0, \dots, n$

(n : number of peaks W_i in W)

$Systolic_{avg}$: Average systolic value of a volunteer

$Diastolic_{avg}$: Average diastolic value of a volunteer

P_{avg} 와 $Systolic_{avg}$ 를 도출하기 위해서는 다수의 실험자들에 대한 최고혈압과 맥파를 동시에 측정하는 실험이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 혈압과 맥파 측정을 수행하는 환경을 구성하고, 고혈압, 정상, 저혈압의 다양한 샘플을 포함하는 다수의 실험자들을 대상으로 하여 최고혈압 값과 맥파를 동시에 측정하는 실험들을 수행하였다.

4. 실험 환경

4.1 맥파 측정 환경

맥파 측정 장치는 디지털 맥파 센서 모듈과 블루투스 네

트위크 그리고 스마트폰 앱으로 Fig. 4와 같이 구성된다. 디지털 맥파 센서 모듈은 혈관 외벽의 압력 변화를 감지하여 적분과로 출력하는 압력 센서(MS5803-01BA)와 CSR사의 BC4-ext 블루투스 MPU, 그리고 배터리를 내장하고 비압박식으로 손목을 감싸도록 설계된 팔찌 형태의 구조물로 구현되어 손목의 혈관에 압력을 거의 가하지 않고도 연속적으로 맥파 측정이 가능하도록 설계되어 있다. 또한 스마트폰 앱은 블루투스로 전송된 디지털 맥파 데이터를 화면에 출력함과 동시에 메모리에 저장하여 맥파 분석에 사용될 수 있도록 Java와 eclips 환경에서 Abdroid 앱으로 구현되었다[14].

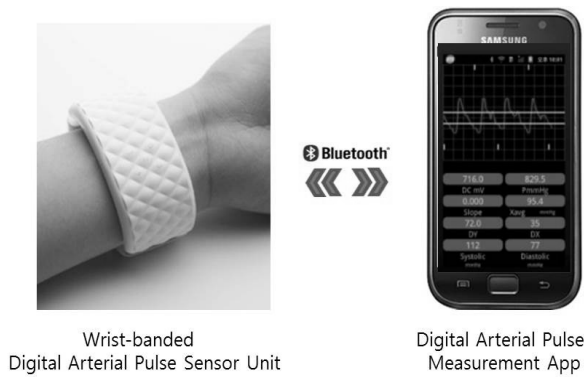


Fig. 4. The Implemented Arterial Pulse Measurement System(Sensor Module and Smartphone App)

압력 센서는 요골동맥 바로 위 피부에서 전달되는 압력의 변화를 적분값으로 출력하여 맥파를 측정한다. 팔찌 구조물은 압력 센서와 센서에서 측정된 압력 변화의 디지털 출력값을 임베디드 프로그램을 통하여 스마트폰으로 전송하는 블루투스 통신 모듈, 그리고 배터리 모듈로 구성되어 있다. 요골동맥으로부터 디지털 센서를 통하여 측정된 맥파 데이터는 팔찌의 블루투스 모듈을 통하여 스마트폰으로 전송되고, 스마트폰의 앱을 통하여 맥파 데이터가 파형으로 그려지면서 데이터가 연속적으로 저장된다. Table 1은 맥파 측정 시스템에서 설정된 환경 변수들을 나타내고 있다.

Table 1. Environment Parameters for Arterial Pulse Measurement

System Parameters	Value
Sampling Rate	120 Hz
ADC Resolution	20 bit (8 bit downsampling)
Sensor Type	Integral Output
Initial Sensor Pressure	852 mmHg
Bluetooth Protocol	2.1+EDR

디지털 맥파 센서는 최대 120 Hz로 샘플링이 가능하고 20 bit의 최대 디지털 해상도로 맥파를 샘플링할 수 있다. 그러나 블루투스 통신 모듈의 최대 데이터 전송 대역폭의

제한으로 실제로 스마트폰으로 전송되는 맥파 데이터는 8bit로 다운 샘플링하여 전송하도록 되어 있다. 센서가 혈관을 누르는 압력, 즉 센서 압력은 측정 중에 항상 센서 초기 압력(Sensor Initial Pressure)과 동일하게 유지하여야만 한다. 따라서 본 연구에서는 모든 측정에서 센서가 혈관 위의 피부를 누르는 센서 초기 압력을 세밀하게 조절하여 거의 동일한 압력으로 측정하였다.

4.2 맥파 차동치의 측정

맥파 측정 시스템을 통하여 측정된 맥파 데이터는 Fig. 5와 같이 맥파 측정 앱에서 차동값 ΔP_k 로 변환되고, 최종적으로 차동치의 평균값 ΔP_{avg} 으로 변환된다. 각 실험자로부터 측정된 맥파 데이터들의 차동값 ΔP_k 들에 대한 평균값 ΔP_{avg} 는 혈압 상관관계식의 입력으로 사용되고, 이를 통하여 혈압 상관관계 그래프를 도출하거나, 실제 혈압 측정에서 최고혈압 값을 추정하는 데에 사용한다.



Fig. 5. Differential Values ΔP_1 and ΔP_4 from Arterial Pulse Waveform ① and ④

본 측정 실험에서는 3개의 서로 다른 실험대상자 그룹을 설정하였다. 그룹 1은 혈압상관관계식을 도출하는 실험에 참여하였고, 그룹 2와 3은 도출된 혈압 상관 관계식을 이용하여 혈압을 추정하는 실험에 참여하였다. 각 그룹의 실험 대상자들에 대한 구성 인원은 Table 2와 같다. 그룹 1은 임의의 한 클래스를 수강하는 대학생 집단에서 표본을 추출하였다. 그룹 2는 또 다른 클래스를 수강하는 남학생들 중에서, 그룹 3은 그룹 2와 동일한 클래스를 수강하는 여학생들을 대상으로 표본을 추출하였다. 여기서 Hypertension은 최고혈압이 130 mmHg 이상인 경우로, Hypotension은 최고혈압이 105 mmHg 이하인 경우로, 그리고 Normal은 최고혈압이 105~130 mmHg 범위인 경우로 구분하였다. 각 표본의

Table 2. Samples in volunteer groups

	Hypertension	Normal	Hypotension	Total Volunteers
Group #1	11	32	11	54
Group #2	4	12	10	26
Group #3	8	17	4	29

혈압 범위는 임상적으로 구분한 것이 아니라 표본의 집단 분포에 따라서 구분한 것이다.

각 실험 대상자들에 대하여 맥파 측정은 각 5회, 혈압 측정은 각 3회를 실시하였다. 맥파 측정과 혈압 측정은 각각 번갈아 수행하였으며 각각의 맥파 측정과 혈압 측정 실험 사이에는 5분의 간격을 두고 실험을 수행하였다. 혈압계는 시중에서 구입할 수 있는 2가지 종류를 사용하였다. 하나는 OMRON101 손목형 혈압계를 사용하였고 다른 하나는 MEDITEC의 탁상용 혈압계를 사용하였다. 각 실험 대상자에 대하여 OMRON을 이용한 혈압 측정을 2회 수행하고, MEDITEC에 의한 측정을 1회 실행하여 총 3회의 혈압계 측정 데이터를 도출하였다.

실제 맥파 측정 실험에서 중요한 사항은, 센서가 혈관을 누르는 압력이 모든 측정에 걸쳐서 일정하여야 한다는 것이다. 그러나 측정 과정에서 정확하게 일정한 센서 초기 압력을 유지하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 측정 데이터 중, Table 1의 기준 센서 초기 압력에서 10 % 이상 압력값이 벗어나는 측정 실험은 제외하고 압력 오차 범위 내의 실험 결과만 1인당 5회씩 생성하여 혈압 상관관계 그래프의 도출과 혈압 추정 실험에 적용하였다. 이와 동시에 좀 더 정밀한 혈압 추정 실험을 위하여 기준 센서 초기 압력에서 5 % 이내의 압력 오차만을 가지는 실험 데이터들을 별도로 선별하여 혈압 상관관계 그래프를 도출하고, 이 그래프가 혈압 추정의 정확도를 높일 수 있는가의 여부를 확인하는 실험을 별도로 수행하였다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 혈압상관관계식의 도출

혈압상관관계식을 도출하기 위해서는 그룹 1에 대하여 실험 대상자별 맥파 차동치의 평균값 ΔP_{avg} 들과 혈압계로 측정된 최고혈압 값의 평균값 $Systolic_{avg}$ 들을 측정하고 이를 회귀 분석을 통해 분석하여 (3), (4)와 같은 1차함수관계의 회귀식을 도출하였다. Fig. 6은 최고혈압에 대한 회귀 분석 결과 그래프를 나타낸다.

$$Sys(\Delta P_{avg}) = Systolic_angle * \Delta P_{avg} + Systolic_offset \quad (3)$$

$$Dias(\Delta P_{avg}) = Diastolic_angle * \Delta P_{avg} + Diastolic_offset \quad (4)$$

그룹 1의 실험대상자들에 대한 회귀 분석의 결과로 $Systolic_angle$, $Diastolic_angle$ 의 값과 $Systolic_offset$, $Diastolic_offset$ 의 값은 Table 3과 같이 도출되었다. $Systolic_angle$ 과 $Systolic_offset$ 의 값은 초기 센서 압력의 오차가 10 % 이내인 경우와 5 % 이내인 경우 모두 다 거의 동일한 값을 나타내고 있으며 결과값의 표준편차가 0.05 이내의 값으로 도출되었기 때문에 회귀식에 의한 최고혈압 값을 신뢰도 95 % 이내로 추정할 수 있다. 반면에 최저혈압

의 경우는 편차가 상대적으로 크게 도출되어, 신뢰도가 낮게 추정될 가능성이 매우 높다.

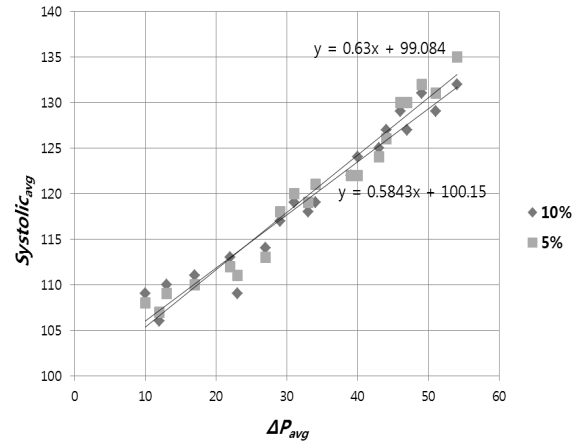


Fig. 6. Regression graphs for systolic vs ΔP_{avg} at 10 % and 5 % initial sensor pressure error range

Table 3. Results of regression for BP relation function for 10 % and 5 % initial sensor pressure error range

Factors	Value		St. deviation	
	10 %	5 %	10 %	5 %
Systolic_angle	0.5843	0.6300	0.046	0.043
Systolic_offset	100.150	99.084		
Diastolic_angle	0.3617	0.4414	0.264	0.221
Diastolic_offset	71.380	63.224		

5.2 혈압 상관관계식을 이용한 혈압 추정

혈압 상관관계식 (3), (4)가 실제적인 혈압 측정의 지표로 사용될 수 있기 위해서는 혈압상관관계식의 정밀도와 신뢰도를 혈압 추정 실험을 통하여 검증하여야 한다. 이를 위하여 그룹 2의 실험대상자들에 대하여 맥파 데이터를 측정하고, 이를 통하여 혈압을 추정하는 실험들을 수행하였다. 각 실험에서는 실험대상자별로 맥파 데이터를 추출하여 차동값 ΔP_i 들을 도출하고, 차동값의 평균 ΔP_{avg} 을 구한 다음 이를 혈압 상관관계식에 대입하여 최고혈압 값과 최저혈압 값을 추정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 그룹 2와 그룹 3의 실험 대상자들로부터 추출된 ΔP_{avg} 를 초기 센서 압력 오차 10 %의 혈압 상관관계식에 대입하여 추정된 혈압 값과, 혈압계를 사용하여 측정된 혈압 값과의 차이를 분석한 결과이다.

혈압 추정 실험 결과, 그룹 2와 그룹 3의 최고혈압 추정값은 모두 혈압계를 사용한 측정치에 대하여 10 % 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면에 최저혈압 추정값은 최대 66 %의 오차를 보이고 있다. 이는 회귀 분석의 결과에서 예상된 것으로, 회귀식 자체가 최고혈압에 대해서는 높은 신뢰도를 가지고 도출되었지만 최저혈압에 대해서는

매우 큰 편차를 나타내었기 때문에 추정 실험의 결과에서도 높은 오차가 예상되었기 때문이다.

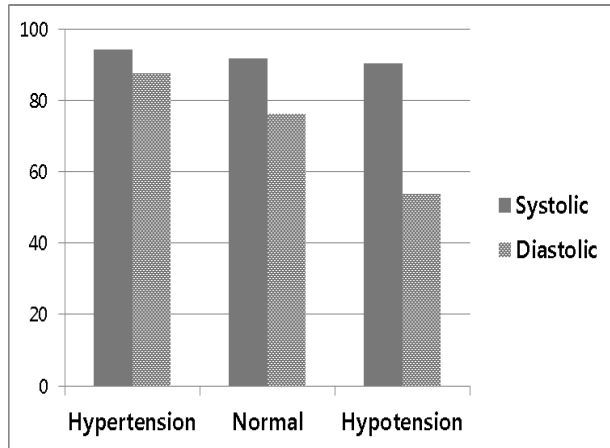


Fig. 7. Analysis results for Group #2 with 10% initial sensor pressure variation range

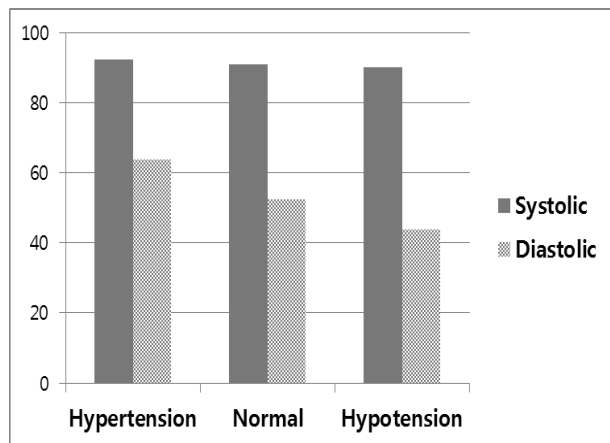


Fig. 8. Analysis results for Group #3 with 10% initial sensor pressure variation range

Fig. 8은 그룹 2에 비하여 그룹 3의 혈압 추정값의 정확도가 더 낮은 사실을 보이고 있다. 이는 여학생들의 혈압이 남학생들에 비하여 비교적 낮고, 실험대상자들의 전체적인 혈압 분포가 저혈압군 쪽으로 치우쳐 있기 때문이다. 따라서 최저혈압의 추정치에 대한 오차는 그룹 3이 그룹 2에 비하여 현저히 높게 나타나고 있다.

Fig. 9는 그룹 2와 그룹 3에서 측정한 실험값들 중, 측정 중의 센서 압력의 변화 범위를 10% 이내로 한정한 실험값과 5% 이내로 한정한 실험값을 이용하여 추정된 최고 혈압값의 정확도를 비교한 결과를 나타낸다. 두 경우에서 혈압 상관관계식은 거의 동일하지만, 추정된 혈압값의 정확성은 큰 차이를 보이고 있다. 이는 혈압값의 정확성은 얼마나 정밀하게 초기 센서 압력을 유지할 수 있는가에 달려 있음을 보이고 있다. 따라서 혈압값 추정의 정확성을 높이기 위해

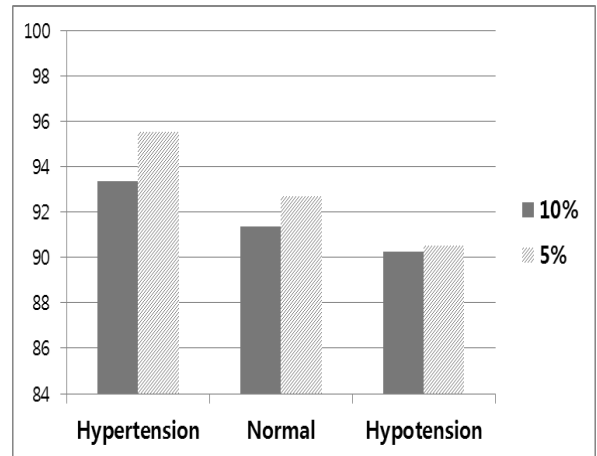


Fig. 9. Systolic pressure estimation accuracies for 10% and 5% initial sensor pressure variation range

서는 맥파 측정 중의 초기 센서 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 하여 주는 기계적인, 또는 기술적인 문제의 해결이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

혈압 추정 실험 결과에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제시한 맥파 차동값과 혈압상관관계식을 이용한 혈압 추정 방법은 최고혈압 값의 추정에 대해서는 비교적 높은 정확도를 나타내지만 최저혈압 값의 추정에 대해서는 정확성이 상대적으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 혈압 상관관계식의 도출에 더 많은 실험대상자들을 적용한다면 보다 정확한 회귀식이 도출될 가능성은 매우 높다. 그러나 이는 최고혈압에 대한 회귀식에 대해서만 기대할 수 있고, 최저혈압에 대한 회귀식의 정밀도 향상은 기대하기 어렵다. 있다. 따라서 본 연구에서 제시하는 혈압 추정 방법은 최고혈압의 추정에만 유효하게 사용될 수 있다. 또한 정확한 혈압 추정을 위해서는 초기 센서 압력을 매우 일정하게 유지하여야 하는데, 실제 실험에서 센서를 일정한 압력으로 피부에 접촉시키는 것은 매우 어려운 일이었다. 그러나 측정중의 센서 압력의 변동을 최소화할 수 있는 기계적, 기술적 방법론이 개발된다면 혈압계로 측정된 측정치와의 오차를 줄일 수 있으므로 보다 정확한 혈압 추정이 가능하고 할 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 맥파로부터 추출된 차동값과 혈압상관관계식을 이용한 혈압 추정 기법을 제시하였다. 혈압상관관계식을 도출하기 위하여 본 연구에서는 고혈압, 정상혈압, 저혈압의 3가지 유형의 실험자들로부터 디지털 압력 센서를 사용하여 맥파를 연속적으로 측정하고, 측정치의 차동값 평균과 혈압계를 사용하여 측정된 측정치와의 관계를 회귀 분석을 통하여 그래프화함으로써 혈압 상관관계 회귀식을 도출하였다. 도출된 혈압상관관계식을 사용하여 혈압 측정 실험

을 수행한 결과, 최저혈압 값은 그다지 정확히 추정할 수 없지만 최고혈압 값의 경우에는 10 % 이하의 오차 혈압을 추정할 수 있었다.

본 연구는 디지털 측정 시스템을 사용하여 Non-Kortokoff 방식으로 연속적인 혈압 측정을 할 수 있는 새로운 가능성을 높였다고 할 수 있다. 그러나 이 방법이 실제로 혈압 측정에 적용되기 위해서는 기존 혈압계 대비 5 % 이하의 오차율을 가질 수 있어야만 한다. 이를 위해서는 매우 정밀한 혈압상관관계식이 도출될 수 있어야 할 뿐 아니라, 일정한 초기 센서 압력을 일관되게 유지하여 안정적으로 맥파를 측정함으로써 정확한 맥파 차동값이 도출될 수 있는 기술적인 문제의 개선이 필요하다. 따라서 차후 연구에서는 더 많은 실험을 통하여 혈압상관관계식을 보정하고, 보다 안정적으로 측정할 수 있는 비압박식 디지털 맥파 센서의 측정 메커니즘을 구현할 예정이다.

References

[1] K. Barbe and W. V. Moer, "An Innovative Oscillometric Blood Pressure Measurement: Getting Rid of the Traditional Envelope," in *Proceedings of the 2012 Medical Measurements and Applications (MeMeA), IEEE Conference Publications*, 2012.

[2] B. Williams, "Achieving Blood Pressure Control in Clinical Practice," *Journal of the American Society of Hypertension*, Vol.2, No.4, pp.10-15, 2008.

[3] Y. Gen, O. Nariaki, S. Gaku, A. Daisaku, S. Shibata, U. Satoshi, and T. Osamu, "Effects of Perindopril on 24-H Blood Pressure in Hypertensive Patients with Diabetic Nephropathy," *American Journal of Hypertension*, Vol.17, No.5, 2004.

[4] T. Osamu, K. Yoshihiro, Y. Youji, and T. Ikuo, "Noninvasive Measurement of Baroreflex Sensitivity Index using an Indirect and Continuous Blood-Pressure Recorder," *Japanese Heart Journal*, Vol.27, No.6, pp.849-857, 2008.

[5] J. M. Kang, T. Yo, and H. C. Kim, "A Wrist-Worn Integrated Health Monitoring Instrument with a Tele-Reporting Device for Telemedicine and Telecare," *IEEE Transactions on Instrument and Measurement*, Vol.55, No.5, 2006.

[6] M. C. Ahn, J. G. Choi, I. H. Son, S. S. Lee, and K. H. Kim, "Estimated Blood Pressure Algorithm of Wrist Wearable Pulsimeter using by Hall Device," *Journal of the Korean Magnetics Society*, Vol.20, No.3, pp.106-113, 2010.

[7] W. Ryu, E. Kim, K. An, S. Woo, and Y. Chang, "A Bluetooth based 5-HD Measurement System for u-Healthcare," *International Journal of Control and Automation*, Vol.6, No.1, pp.141-150, 2013.

[8] Y. D. Cha and G. Yoon, "Ubiquitous Health Monitoring System for Multiple Users using a Zigbee and WLAN Dual-Network," *Telemedicine and e-Health*, Vol.15 No.9, pp.891-897, Nov., 2009.

[9] Y. Chang and B. Kim, "A Wireless ECG Measurement System based on Zigbee USN," *The Korea Information Processing Society Transactions: Part C*, Vol.18-C, No.3, pp.195-198, 2011.

[10] D. Nair, S-Y. Tan, H-W. Gan, S-F. Lim, J. Tan, M. Zhu, H. Gao, N-H Chua, W-L. Peh, and K-H. Mak, "The Use of Ambulatory Tonometric Radial Arterial Wave Capture to Measure Ambulatory Blood Pressure: The Validation of a Novel Wrist-Bound Device in Adults," *Journal of Human Hypertension*, Vol.22, No.3, pp.220-222, 2008.

[11] Y. Yoon, J. H. Choi, and G. Yoon, "Non-Constrained Blood Pressure Monitoring using ECG and PPG for Personal Healthcare," *Journal of Medical Systems*, Vol.33, No.4, pp. 261-266, 2009.

[12] W. Shin, Y. Cha, and G. Yoon, "ECG/PPG Integer Signal Processing for a Ubiquitous Health Monitoring System," *Journal of Medical Systems*, Vol.34, No.5, pp.891-898, 2010.

[13] G. Ray, J. Nawarskas, and J. Anderson, "Blood Pressure Monitoring Technique Impacts Hypertension Treatment," *Journal of General Internal Medicine*, Vol.27, No.6, pp. 623-629, 2012.

[14] B. Kim, W. Jin, S. H. Woo, and Y. Chang, "A New Approach on Digital Blood Pressure Measurement Method for u-Healthcare Systems," *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, Vol.7, No.1, pp.169-178, 2015.



김보연

e-mail : viki139@naver.com

1990년 이화여자대학교 전자계산학과 (이학사)

1991년 서울대학교 전자계산기공학과 (공학석사)

1998년 서울대학교 협동과정 의용생체 공학전공(공학박사)

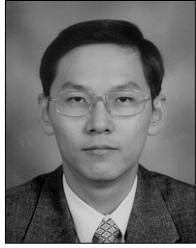
2000년~2006년 강원대학교 전기전자정보통신공학부 조교수

2006년~2010년 한양대학교 정보시스템학과 겸임교수

2014년~2015년 한양대학교 컴퓨터공학부 연구교수

2015년~현 재 대전대학교 컴퓨터공학과 초빙교수

관심분야 : 인공지능, 의사결정시스템, 의료정보시스템, 생체신호 계측 및 분석 등



장 윤 석

e-mail : cosmos@daejin.ac.kr

1988년 서울대학교 물리학과(이학사)

1990년 서울대학교 전자계산기공학과
(공학석사)

1998년 서울대학교 컴퓨터공학과(공학박사)

1994년~현 재 대진대학교 컴퓨터공학과
교수

2000년~2001년 University of Southern California, Dept. of
EE-Systems, Visiting Scholar

관심분야: 컴퓨터시스템 설계, 마이크로 임베디드 시스템, RFID,
스마트 모바일 시스템 등