

녹색광을 이용한 반사형 광용적맥파측정기의 주변광 간섭시 신호측정

장기영 · 고현철 · 이정직 · 윤영로

연세대학교 대학원 의공학부

The Verification of Photoplethysmography Using Green Light that Influenced by Ambient Light

K.Y. Chang, H.C. Ko, J.J. Lee and Y.R. Yoon

Department of Biomedical Engineering, Graduate School of Yonsei University
(Manuscript received 9 July 2014; revised 20 August 2014; accepted 7 October 2014)

Abstract: The purpose of this study is to verify the utility of reflected photoplethysmography sensor using two green light emitting diodes that influenced by ambient light. Recently it has been studied that green light emitting diode is suitable for light source of reflected photoplethysmography sensor at low temperature and high temperature. Another study showed that, green light is better for monitoring heart rate during motion than led light. However, it has a bad characteristic about ambient light noise. To verify the utility of reflected photoplethysmography sensor using green light emitting diode, this study measures the photoplethysmography signal that is distorted by ambient light and will propose a solution. This study has two parts of research method. One is measurement system that composed sensor and board. The sensor is made up PE-foam and Non-woven fabric for flexible sensor. The photoplethysmography signal is measured by measurement board that composed high-pass filter, low-pass filter and amplifier. Ambient light source is light bulb and white light emitting diode that has three steps brightness. Photoplethysmography signal is measured with lead II electrocardiography signal at the same time and it is measured at the finger and radial artery for 1 minute, 1000 Hz sampling rate. The lead II electrocardiography signal is a standard signal for heart rate and photoplethysmography signal that measured at the finger is a standard signal for waveform. The test is repeated 3 times using three sensor. The data is processed by MATLAB to verify the utility by comparing the correlation coefficient score and heart rate. The photoplethysmography sensor using two green light emitting diodes is shown better utility than using one green light emitting diode and red light emitting diode at the ambient light. The waveform and heart rate that measured by two green light emitting diodes are more identical than others. The amount of electricity used is less than red light emitting diode and error peak detectability factor is the lowest.

Key words: photoplethysmography, lead II electrocardiography, ambient light, two light source green light emitting diode, radial artery, heart rate, correlation coefficient

125

I. 서 론

Corresponding Author : Young Ro Yoon
220-842, Medical Industry Techno Tower #201, Yonsei University, Maeji, Heungup, Wonju, Gangwon, Korea
TEL: +82-33-760-2809 / FAX: +82-33-763-1953
E-mail : yoon@yonsei.ac.kr

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 기술료사업자와 참여기관간의 기술료사업의 일환으로 수행하였음 [1004-6376, 만성질환자 급심정지 대응을 위한 가정용 자동제세동기 시스템 개발].

세계보건기구가 2011년 1월 발표한 자료에 따르면[1], 심혈관계 질환으로 사망한 인구수는 약 1700만명으로 전체 사망률의 29%를 차지하고 있으며, 2030년에 30%이상 증가하여 약 2300만명에 이를 것으로 예상되고 있다. 심혈관계 질환에 대한 의학적 중요성과 관심이 증가하고 있는 가운데, u-Health의 발달과 개인 건강 관리에 대한 관심 증가로 현대

용 광용적맥파 측정 장비가 연구 및 개발되고 있다. 생체 신호 중 하나인 광용적맥파 신호는 비침습적인 방법으로 혈관 내 혈액 양의 변화를 측정함으로써 얻을 수 있다[2]. 이는 비교적 간단한 회로를 통해 측정 할 수 있으며 혈중 산소 농도, 심박수, 혈압, 심박출량, 동맥 질환 등 의학적으로 널리 응용되는 심혈관계 시스템에 관련된 중요한 정보를 가지고 있는 생체 신호다[3].

광용적맥파 신호는 Lambert-Beer의 법칙에 의해 검출되며 측정에 이용되는 센서는 투과형 센서와 반사형 센서가 있다[4,5]. 센서에 사용되는 광원을 선택 함에 있어 세포의 영향을 고려하여 파장대를 선택해야 한다. 적색 light emitting diode(LED)와 적외선 LED는 세포 투과 깊이가 깊고 세포 구성 요소인 물과 멜라닌에 의한 흡수가 적어 투과형 광용적맥파 신호 측정에 적합하다[6]. 하지만 최근 연구에서는 휴대성이 높은 반사형 광용적맥파 측정 센서의 경우 적색 LED와 적외선 LED보다 녹색 LED가 더 적합하다는 결과를 보였다[7]. 그리고 녹색 LED와 적외선 LED를 이용한 반사형 광용적맥파 측정 센서를 여러 온도 상태에 노출시키며 신호를 검출한 결과 녹색 LED를 이용 할 경우 더 좋은 신호가 측정됐다[8]. 또한, 다양한 파장대(적색 LED, 녹색 LED, 청색 LED)에 대한 동잡음 실험에서는 녹색 LED가 동잡음에 가장 효과가 크다는 연구 결과를 보였다[9]. 하지만 녹색 LED와 같은 단파장 광원은 굴절률이 높으며, 주변광(ambient light)에 의한 간섭 및 회절에 의해 영향을 받는 단점을 가지고 있다[10].

본 연구에서는 녹색 LED를 이용한 반사형 광용적맥파 측정 센서의 문제점을 확인하기 위해, 주변광을 이용한 실험을 설계하였다. 주변광에 의해 발생하는 신호 변화에 대한 해결 방안으로 광원의 수를 증가시키는 방법을 선택했다. 광원의 수를 증가시킴으로써, 센서의 크기는 커지지만 동일한 소비전력으로 센서를 구동시키며 주변광으로 인해 발생하는 간섭을 줄여 한 개의 광원을 사용할 때 보다 정확한 광용적맥파 신호를 얻을 수 있었다.

II. 연구 방법

본 연구에서는 녹색 LED와 적색 LED를 이용한 반사형 광용적맥파 측정 센서를 제작하고, 이를 이용한 시스템을 구성했다. 구성된 측정 시스템을 통해 주변광에 의한 광용적맥파 신호의 변화를 계측하고, 회절 및 간섭에 대한 해결방안을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 광원의 수를 증가시키는 방법이다. 녹색 LED를 이용한 광용적맥파 측정 센서는 2개의 광원을 사용하며, 2개의 광원은 개별 제어가 가능하다. 녹색 LED와 적색 LED는 각각 0.15 mW의 밝기를 유지한다. 이때 각 LED의 전류소비량은 적

색 LED는 6 mA, 녹색 LED는 1.7 mA이며, 녹색 LED 2개를 동작시킬 때에도 1.7 mA의 전류소비량을 유지 할 수 있도록 설정 하였다.

제작된 센서를 이용하여 피시험자의 오른팔 요골동맥에서 광용적맥파 신호를 측정했으며, 광용적맥파 신호의 파형에 대한 기준신호는 의료용센서 제작업체인 (주)휴레브에서 제작된 투과형 광용적맥파 측정 센서로 오른손 검지에서 측정했다. 그리고 ECG100 (Biopac Co, USA) 모듈을 통해 측정된 Lead II 심전도 신호는 광용적맥파 신호의 심박수 기준신호로 사용했다.

실험은 선택된 주변광을 제외한 외부 빛은 모두 차단된 환경에서 진행하였다. 또한 백열등과 백색 LED를 주변광으로 사용했으며, 주변광의 밝기는 각각 3단계로 구성했다. 각각의 광용적맥파 신호는 1분간 측정했으며, 샘플링 주파수는 1000 Hz로 Biopac MP-150(Biopac Co, USA)과 전용 프로그램인 acqknowledge 4.1을 이용하였다.

1. 측정 센서

구성된 광용적맥파 측정 시스템의 센서는, 파형의 기준 신호 측정을 위한 투과형 광용적맥파 측정 센서와 요골동맥에서의 신호 측정을 위한 반사형 광용적맥파 측정 센서를 사용했다. 투과형 센서의 광원은 적색 LED(660 nm)를 사용했으며, 반사형 센서의 경우 적색 LED(660 nm)와 녹색 LED(520 nm)을 이용한 센서를 각각 제작했다. 반사형 광용적맥파 측정 센서는 그림 1과 같은 형태로, PE-foam과 부직포로 구성된 소재로 유연성이 있으며 주변광에 대한 차폐를 최소한으로 했다. 반사형 센서의 LED와 포토다이오드의 거리는 5 mm이며, 포토다이오드는 투과형 센서와 동일한 소자를 사용했다.

2. 신호 측정

광용적맥파 신호 측정을 위해 2채널 측정 보드를 제작했으며, 제작된 보드의 개략도는 그림 2와 같다. 보드는 투과형 센서를 이용한 기준 신호와, 반사형 센서를 이용한 요골

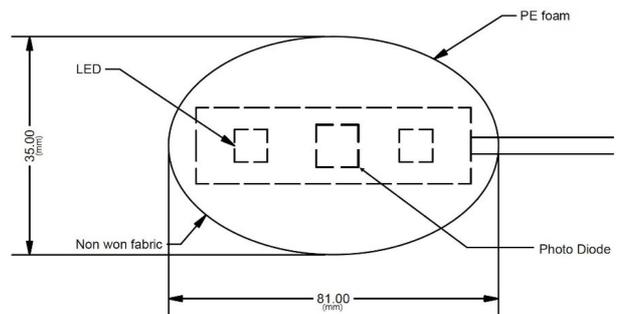


그림 1. 반사형 광용적맥파측정 센서 설계도.
Fig 1. Reflected photoplethysmography sensor design drawing.

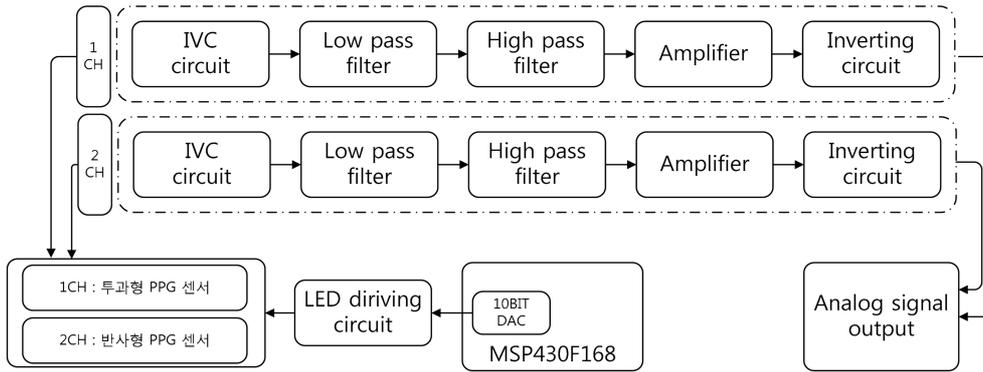


그림 2. 광용적맥파 측정 개략도.

Fig 2. Schematic diagram of photoplethysmography measurement.

동맥에서의 측정 신호를 동시에 받을 수 있도록 2채널로 제작했으며, 마이크로컨트롤러(MSP430F168)를 통해 LED의 밝기 제어가 가능하도록 설계했다. 광용적맥파 신호 측정회로는 inverting voltage to current회로, 저주파 통과 필터(0.2 Hz), 고주파 통과 필터(5.6 Hz)와 증폭회로로 구성되며 두 개의 채널은 동일하게 설계됐다. 포토다이오드를 통해 측정된 전류신호를 전압신호로 전환하기 위해 inverting voltage to current회로를 거친 뒤, 필터와 증폭기를 거쳐 출력 단자를 통해 MP150로 전송한다. 측정에 사용된 MP150은 광용적맥파 신호를 측정함과 동시에 ECG100 모듈을 이용해 Lead II 심전도 신호를 측정했다. 측정된 심전도 신호와 광용적맥파 신호는 전용프로그램인 acqknowledge 4.1을 이용해 실시간으로 관찰하고 저장하였다.

3. 실험 방법

실험은 사전 설문조사를 통해 선발된 성인 남성 18명(평균연령 26.6세)을 대상으로 진행했다. 설문조사를 통해 심혈관계 및 신경학적 질환이 없고 실험 진행에 있어 무리가 없는 인원을 선발했으며, 실험 전 금주 및 금연 상태를 확인

했다. 선발된 피시험자에게 실험에 관한 사전설명을 했으며 사전동의를 얻은 후 실험을 진행했다. 실험은 생체 측정에 적합한 환경으로 설정된 실험실에서 진행됐으며, 안정된 신호 측정을 위해 그림 3과 같은 자세를 유지했다. 피험자는 모두 오른손잡이로, 광용적맥파 신호는 우측 요골동맥과 오른손 검지에서 측정했다. 피험자는 그림 4와 같이 오른손에 센서를 착용한 뒤, 제작된 암실에 손을 넣고 신호 측정을 시작했다. 암실 내부에 설치된 광원(백열등, 백색 LED)을 주변광으로 사용했으며, 각각 3단계의 밝기로 설계했다. 주변광원의 위치는 오른손목 요골동맥 위에 위치하고 있으며, 신호 측정 시 피험자의 손목은 광원을 향하도록 했다. 동시에 측정된 심전도 신호는 표준사지유도(standard limb



그림 3. 신호 측정 자세.

Fig 3. The signal measurement position.



그림 4. 암실 내부의 센서위치와 주변광원.

Fig 4. Measurement sensor position and ambient light in the darkroom.

표 1. 주변광원의 밝기.

Table 1. The brightness of ambient light sources.

	1 단계	2 단계	3 단계
암실	-	-	-
백열등	1Lux	10Lux	100Lux
백색 LED	250Lux	450Lux	650Lux

leads)에 따라 측정했다.

광용적맥파 신호 측정 실험은 3종류 센서를 이용해 반복 실험했으며, 실험에 사용된 주변광은 표 1과 같이 암실, 백열등 3단계, 백색 LED 3단계로 구성했다. 각 실험간 1분간의 휴식 후 진행했으며, 실험이 종료된 뒤 10분간 휴식 후 다음 센서를 이용한 실험을 진행했다. 광량측정장비를 이용해 LED의 밝기(0.15 mW)를 확인 했으며, 마이크로컨트롤러와 LED 구동회로를 이용해 광원의 밝기를 유지시켰다. 녹색 LED 2개를 구동시킬 때에는, 밝기와 상관없이 녹색 LED 1개를 구동시킬 때와 동일한 전류 소비량인 1.7 mA를 유지했다.

4. 신호 처리

입력된 신호는 Acqknowledge v4.1을 통해 PC에서 실시간으로 관찰 및 저장했다. 광용적맥파 신호를 구성하는 AC성분과 DC성분 중 심장박동의 맥동형태를 나타내는 AC성분을 분석했다[11]. 광용적맥파 신호는 샘플링 주파수 1000 Hz로 측정했으며 60 Hz 전원 노이즈를 제거 한 뒤, 측정 회로와 동일한 차단주파수(BW:0.2 Hz~5.6 Hz)로 필터링을 실시했다. 심전도 신호는 샘플링 주파수 1000 Hz로 측정했으며 60 Hz 전원 노이즈를 제거 했다. 각 실험을 통

해 요골동맥에서 측정된 광용적맥파 신호와 기준 신호간의 상관관계 및 심박수 일치 분석은 MATLAB(MathWorks Co. USA)을 이용했다. 기준 신호와의 상관관계 분석 및 심박수 일치 분석을 통해 측정된 광용적맥파 신호의 효용성을 검증했다.

III. 실험 결과 및 분석

그림 5는 피험자 1의 측정결과로, 제작 센서(적색 LED)를 통해 오른손 요골동맥에서 측정된 광용적맥파 신호와 투과형 센서를 이용해 오른손 검지에서 측정된 광용적맥파 신호 그리고 Lead II 심전도 신호를 동시에 측정했다. 측정된 광용적맥파 신호의 peak와 Lead II 심전도 신호의 R peak가 일치 되도록 위상이동 시켰다.

요골동맥에서 측정된 광용적맥파 신호는 Lead II 심전도와 비교해 정상 peak와 오류 peak를 확인했다. 심전도 신호의 R peak를 기준으로 25 ms 이내 검출된 광용적맥파 신호의 peak 이외의 검출 peak는 오류 peak로 분리하였다. Peak 검출 방법은 acqknowledge v4.1을 이용한 positive peak검출을 이용했다. 측정결과에 따른 피험자 18명의 평균 심박 수와 손목에서의 peak 검출 수는 표 2와 같다.

오른손 요골 동맥에서 측정된 광용적맥파 신호의 전체 peak수를 기준으로 측정된 오류 peak 검출 수를 이용해 오류 peak 검출률을 구했다. 주변광 간섭을 받지 않은 투과형 센서를 통해 손 끝에서 측정된 신호와 제작된 반사형 센서를 통해 요골 동맥에서 측정된 신호의 상관계수 비교를 통해 파형의 상관관계를 분석했다. 두 신호의 분석은 MATLAB을 이용했으며, 피어슨 상관관계 분석법을 통해 두 신호간

128

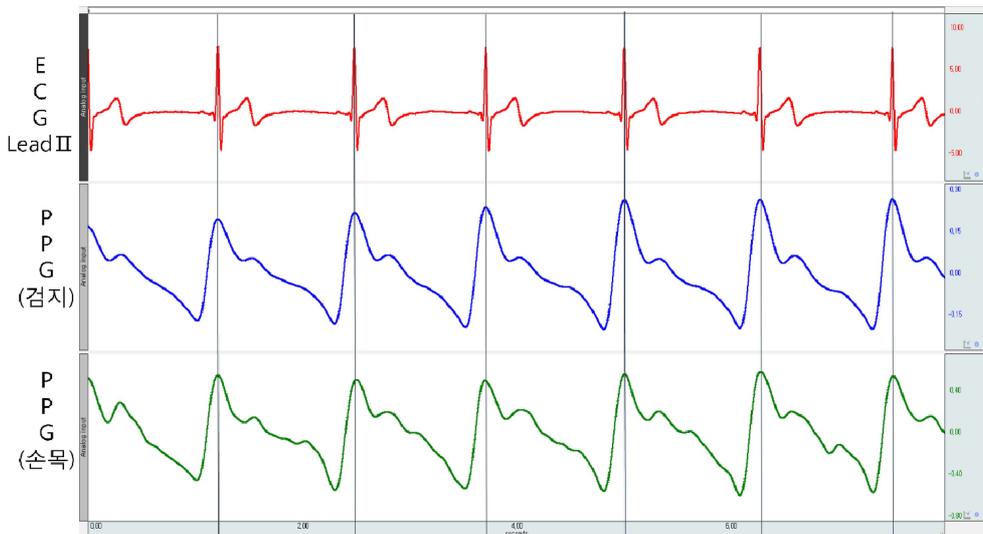


그림 5. 측정신호: Lead II 심전도, 광용적맥파 신호(검지), 광용적맥파 신호(손목, 적색 LED).

Fig 5. Measurement signal: Lead II ECG, photoplethysmography(index finger) photoplethysmography(wrist, red LED).

표 2. 심전도 신호 측정을 통한 평균심박 수, 손목에서 측정된 신호의 정상/오류 peak 검출 결과.

Table 2. The average heart rate using ECG measurement, normal/error peak of photoplethysmography (wrist).

센서	광원	Lead II 심전도 평균 심박수	손목 광용적맥파 신호의 평균 정상 Peak 검출 수	손목 광용적맥파 신호의 평균 오류 Peak 검출 수
적색 LED (1 개)	암실	70.21	70.21	0.50
	백열등 (1 단계)	69.64	69.64	2.83
	백열등 (2 단계)	69.50	69.00	6.33
	백열등 (3 단계)	69.00	68.14	12.88
	백색 LED(1 단계)	70.64	70.14	3.77
	백색 LED(2 단계)	72.00	72.00	1.54
	백색 LED(3 단계)	71.57	71.50	0.94
녹색 LED (1 개)	암실	68.36	68.21	0.41
	백열등 (1 단계)	71.36	71.07	1.67
	백열등 (2 단계)	68.79	67.79	3.79
	백열등 (3 단계)	68.00	66.36	18.17
	백색 LED(1 단계)	66.79	66.57	3.43
	백색 LED(2 단계)	69.14	66.07	5.28
	백색 LED(3 단계)	68.36	68.00	3.13
녹색 LED (2 개)	암실	73.21	73.21	0.89
	백열등 (1 단계)	68.21	68.21	1.18
	백열등 (2 단계)	68.79	68.57	3.91
	백열등 (3 단계)	66.29	63.29	9.62
	백색 LED(1 단계)	70.50	70.36	1.36
	백색 LED(2 단계)	68.86	68.71	1.19
	백색 LED(3 단계)	68.07	67.93	1.81

표 3. 오류 peak 검출결과 및 기준신호와의 상관계수.

Table 3. Error peak detectability factor and correlation coefficient with standard signal.

센서	광원	오류 peak 검출률	상관계수	센서	광원	오류 peak 검출률	상관계수
적색 LED (1 개)	암실	0.70%	0.91	녹색 LED (1 개)	암실	0.60%	0.94
	백열등 (1 단계)	3.90%	0.88		백열등 (1 단계)	2.30%	0.93
	백열등 (2 단계)	8.40%	0.88		백열등 (2 단계)	5.30%	0.84
	백열등 (3 단계)	15.90%	0.74		백열등 (3 단계)	21.50%	0.63
	백색 LED(1 단계)	5.10%	0.85		백색 LED(1 단계)	4.90%	0.89
	백색 LED(2 단계)	2.10%	0.82		백색 LED(2 단계)	7.40%	0.83
	백색 LED(3 단계)	1.30%	0.85		백색 LED(3 단계)	4.40%	0.86
녹색 LED (2 개)	암실	1.20%	0.94				
	백열등 (1 단계)	1.70%	0.93				
	백열등 (2 단계)	5.40%	0.84				
	백열등 (3 단계)	13.20%	0.73				
	백색 LED(1 단계)	1.90%	0.92				
	백색 LED(2 단계)	1.70%	0.89				
	백색 LED(3 단계)	2.60%	0.88				

의 상관계수를 구했다. 오류 peak 검출률과 파형의 상관관계 분석결과는 표 3과 같다.

암실에서의 실험 결과 세 종류의 센서 모두 높은 효율성을 보였다. 세 센서 모두 기준 신호와 상관계수 0.91 이상의

상관관계를 보였으며, 1.2% 이하의 오류 peak 검출률을 보였다. 백열등 1단계 실험에서도 세 센서 모두 0.87이상의 높은 상관관계를 보였으며, 백열등 2단계부터 상관관계도가 조금씩 낮아졌고, 오류 peak 검출률도 높아졌다. 백열등 3

단계에서는 모두 10% 이상의 오류 peak가 검출됐으며, 상관계수도 0.74이하로 나타났다. 백열등 3단계를 사용한 광용적맥파 신호 측정 실험에서 적색 LED 1개를 이용한 센서와 녹색 LED 2개를 이용한 센서는 비슷한 수치의 상관관계를 보였으며, 녹색 LED 1개를 사용한 센서는 0.63의 낮은 상관관계를 보였다. 오류 peak검출 결과를 보면, 녹색 LED 2개를 이용해 검출된 신호가 13.20%로 가장 적은 오류 peak 검출률을 보였다. 주변광으로 백색 LED를 사용한 실험 결과에서도 녹색 LED 2개를 사용한 센서의 결과가 가장 높은 상관관계와 가장 낮은 오류 peak 검출률을 보였다. 녹색 LED 2개를 사용한 센서는 백색 LED의 모든 단계에서 0.88 이상의 높은 상관관계를 보였으며, 2.6%이하의 오류 peak검출률을 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 녹색 LED를 이용한 광용적맥파 측정 센서의 효용성을 높이기 위해 광원을 2개로 늘린 센서를 제작하여 실험을 진행했다. 실험의 대조군으로는 적색 LED(1개)를 사용한 센서와 녹색 LED 1개 사용한 센서를 선택하였으며, 투과형 센서를 통해 얻은 신호와 상관계수를 비교함으로써 신호의 일치도를 확인했다. 그리고 Lead II 심전도 신호의 R peak와 측정된 광용적맥파 신호의 peak를 비교함으로써 신호의 효용성을 판단했다. 주변광의 종류와 빛의 세기를 실험의 독립변수로 선택하였으며, 주변광을 제외한 외부 빛은 차단한 뒤 실험을 진행했다.

연구 결과 안정 상태에서 반사형 센서를 이용해 요골동맥에서 측정된 신호는 세 센서 모두 상관계수 0.91 이상의 상관관계를 보였으며, 오류 peak 검출률도 1.2% 이하로 유의미한 신호임을 확인했다. 백열등을 주변광으로 사용한 실험을 통해 녹색 LED는 같은 밝기의 적색 LED보다 주변광에 의한 간섭을 더 크게 받는 것을 확인했다. 백열등 3단계 실험결과 적색 LED 1개를 이용한 센서는 상관계수 0.74의 상관관계와 15.9%의 오류 peak 검출률을 보였으며, 녹색 LED 1개를 이용한 센서는 상관계수 0.63의 상관관계와 21.50% 오류 peak 검출률을 보였다. 녹색 LED 2개를 광원으로 사용한 센서의 실험결과 상관계수 0.73의 상관관계를 보였으며 13.20%의 오류 peak 검출률을 보였다. 동일한 소비전력에서 광원 수를 늘림으로써 오류피크 검출률은 8.3% 감소했으며, 상관관계는 0.1 증가한 수치를 보였다.

백색 LED를 주변광으로 사용한 실험 결과, 백색 LED는 백열등과는 달리 광용적맥파 신호 측정에 큰 영향을 주지 않았다. 모든 단계의 밝기에서 상관계수 0.82이상의 값을 보였으며 오류 peak 검출률은 5.1%이하로 낮게 나타났다. 하지만 백색 LED를 주변광으로 사용한 실험에서도 광원을 2

개로 늘림으로써 높은 상관관계를 보이며, 오류 peak 검출률이 낮은 신호를 얻을 수 있었다. 녹색 LED 2개를 사용한 결과 1개를 사용 했을 경우보다 상관계수는 0.02 증가했으며 오류 peak 검출률은 1.8% 감소했다.

실험을 통해 녹색 LED를 이용한 광용적맥파 측정 시스템을 이용한 측정신호를 확인했다. 0.15 mW의 밝기를 내기 위한 녹색 LED의 소비전력은 1.7 mA로 6 mA가 필요한 적색 LED보다 적은 소비 전력으로 유의미한 신호 측정이 가능했다. 녹색 LED의 수를 2개로 증가시켜 실험한 결과 1.7 mA의 소비 전력으로 6 mA를 소비하는 적색 LED를 이용한 실험결과 보다 적은 오류 peak검출률을 보였으며, 파형의 상관관계도 더 높게 나타났다.

녹색 LED를 광원으로 사용한 광용적맥파 신호 측정 결과 동일한 전력을 사용할 때, 광원 수를 1개에서 2개로 늘림으로써 주변광에 의한 오류 peak 발생률이 줄고, 파형 일치도가 높아짐으로써 광용적맥파 측정 시스템의 광원으로 적합함을 확인했다. 녹색 LED의 경우 적색 LED보다 적은 전력으로 동일한 밝기의 구동이 가능하며, 본 연구 결과에 따라 주변광에 의한 문제점을 해결하면 휴대용 광용적맥파 측정 시스템에 적색 LED보다 녹색 LED가 적합하다고 생각된다.

실험에 사용된 센서는 940 nm의 Peak sensing wavelength와 450 nm ~ 1100 nm의 분광감도와 이다. 광용적맥파 신호 측정에 있어서 광원의 파장대와 일치하는 광감도를 갖는 포토다이오드를 사용하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에 사용된 660 nm의 적색 LED와 520 nm의 녹색 LED와 광감도가 일치하는 포토다이오드가 사용된다면 더 좋은 결과를 보일 것이라 예측된다. 그리고 5 mm로 설계된 포토다이오드와 LED의 간격에 따른 추후 연구가 필요하다. 광원과 포토다이오드 간의 거리에 따라 신호의 크기가 달라질 수 있으며, 광원의 밝기에 따른 소비전력 또한 달라 질 수 있다. 특히 두 개의 광원을 사용하는 광용적맥파 측정 시스템의 경우, 광원과 포토다이오드 간의 간격에 따라 주변광의 영향을 얼마나 줄일 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

Reference

- [1] WHO, "http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/en/index.html," 2011.
- [2] Challoner AVJ, "Photoelectric plethysmography for estimating cutaneous blood flow Non-Invasive Physiological Measurements," Academic Press London, vol. 1, pp. 125-151, 1979.
- [3] John Allen, "Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement," PHYSIOLOGICAL MEASUREMENT, Physiol. Meas.28 R1-R39, (2007).

- [4] A. Reisner, "Utility of the photoplethysmogram in circulatory monitoring." *Anesthesiology*, vol. 108, pp. 950-958, May 2008.
- [5] Huang, F.-H., "Analysis of reflectance photoplethysmograph sensors," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59, pp. 1266-1269. 2011.
- [6] Jones D P, "Medical electro-optics: measurements in the human microcirculation" *Phys. Technol.* 18 79-85, 1987.
- [7] Cui W J, Ostrander L E and Lee B Y, "In vivo reflectance of blood and tissue as a function of light wavelength" *IEEE Trans. BME* 37 632-9. 1990.
- [8] Yuka Maeda & Masaki Sekine & Toshiyo Tamura, "The Advantages of Wearable Green Reflected Photoplethysmography", *Journal of medical systems*, Springer (35:829-834), 2011.
- [9] Jihyoung Lee, "Comparison Between Red, Green and Blue Light Reflection Photoplethysmography for Heart Rate Monitoring During Motion", 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS Osaka, Japan, 3-7 July, 2013[10] Eugene Hecht, *Optics 4th*, United States, Press, 2008, pp. 109-127, 344-375.
- [11] Asada, H. H., Shaltis, P., Asada, H. H., Shaltis, P., Reisner, A., Rhee, S., and Hutchinson, R. C., "Mobile monitoring with wearable photoplethysmographic biosensors," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 22:28-40, 2003.