

적외선을 사용한 반사형 PPG 측정 장치에서의 주변광의 영향에 대한 연구

김남섭*

A Study on the Effects of Ambient Light on the Reflective PPG Measurement Device using Infrared

Namsub Kim*

요약 본 논문에서는 주변광으로 인한 잡음이 적외선을 사용한 반사형 PPG 측정 장치에 미치는 영향을 고찰하였다. 주변광으로 인한 잡음은 일반적인 상황과 특수한 상황으로 나누어 고찰하였으며, 일반적인 상황은 시간과 주변 광원의 변화로 인한 잡음을 무작위로 관찰하였고, 특수한 상황은 할로겐램프를 사용하여 측정 장치와 광원과의 거리에 따른 잡음 변화를 관찰하였다. 실험은 각각의 상황에 따라 PPG 신호를 실시간으로 측정하고 데이터를 획득하였으며, 측정된 데이터는 시간 영역과 주파수 영역에서 분석하였다. 먼저 일반적인 상황 실험을 통해 주변광의 밝기에 따라 잡음이 커짐을 육안으로 확인하였고, 주파수 분석을 통해 백색잡음, 전력선 잡음, 회로 내부 잡음이 발생함을 확인하였다. 또한 할로겐램프를 사용하여 주변광과의 거리 변화에 따른 잡음의 변화를 실험하고 SNR을 계산하였다. 실험 결과, 278.3W/m²의 복사조도를 갖는 50cm 거리에서는 3.2dB의 SNR을 나타내었고 그 이하의 SNR에서는 정상적인 측정이 어려움을 확인하였으며, 27.7W/m²의 복사조도를 갖는 2m의 거리에서 18.2dB 값을 나타내었고 그 이상 값에서 필터를 통해 정상적인 PPG 측정이 가능함을 확인하였다.

Abstract In this paper, we studied the effect of noise caused by ambient light on a reflective PPG measurement device using infrared light. Noise caused by ambient light was examined by dividing it into general situations and special situations. In the general situation, noise due to changes in time and ambient light sources was randomly observed, and in the special situation, a halogen lamp was used to observe the effect of noise variations. In the experiment, PPG signals were measured and data acquired in real-time depending on each situation, and the measured data was analyzed in the time domain and frequency domain. First, through a general situation experiments, it was visually observed that noise increases with the brightness of ambient light, and through frequency analysis, it was observed that the noise sources were white noise, power line noise, and internal noise of the circuit. Furthermore, using a halogen lamp, we experimented with the change in noise depending on the change in distance from the ambient light and calculated the SNR. As a result of the experiment, an SNR of 3.2 dB was shown at a distance of 50 cm with an irradiance of 278.3 W/m². It was observed that normal measurement was difficult at SNRs below that, and an irradiance of 27.7 W/m² was obtained. It showed a value of 18.2 dB at a distance of 2 m, and it was observed that normal PPG measurement was possible through a filter at values above that.

Key Words : Ambient Light, Noise, Photoplethysmography, Reflective PPG, SNR

1. 서론

심장 박동으로 인한 혈류의 변화를 측정할 수 있는

PPG(Photoplethysmography)는 1938년에 Alrick B. Hertzman의 연구를 토대로 현재 의료분야에 널리 사용되고 있다[1]. PPG는 빛이 매질을 투과할 때 매질

The present research has been conducted by the Research Grant of Seoul University in 2023.

* Department of Computer Electronics, Seoul University (kns@seoil.ac.kr)

Received November 20, 2023

Revised November 27, 2023

Accepted December 02, 2023

의 성질에 따라 빛이 감쇠되는 현상을 이용한 것으로, 식 (1)과 같은 비어-람베르트 법칙(Beer-Lambert Law)에 따라 빛이 피부를 통과할 때 혈류의 양이 변화함으로써 감쇠되는 빛의 양을 그래프로 표현한 것이다.

$$I = I_0 e^{-\sum A_k}, A_k = -\epsilon_k c_k l_k \quad (1)$$

여기서, I 는 통과한 빛의 강도, I_0 는 입력된 빛의 강도, ϵ 는 흡수율, c 는 매질의 농도, l 는 매질 내에서의 빛의 이동 거리를 나타낸다[2].

광용적맥파측정기라 불리는 PPG 측정 장치는 빛이 인체를 통과할 때 피부, 뼈, 정맥, 동맥 등과 같은 조직을 거치게 되는데, 심장박동으로 인해 동맥을 통과하는 혈류의 흐름 변화로 인한 투과 또는 반사되는 빛의 강도 차이를 측정하는 장치이며, 투과형과 반사형으로 구분된다. 투과형은 일반적으로 손가락 등에 프로브(probe)와 같은 틀을 고정하여 사용되며 고정된 상태에서 측정이 이루어지기 때문에 동잡음(motion artifact)에 강인하고, 프로브가 주변광(ambient light)을 차단하는 역할을 해주기 때문에 주변광으로 인한 간섭에 영향이 적다. 그러나 틀을 사용하는 투과형 장치는 틀의 압박(compression)으로 인해 측정 신호가 달라질 수 있다는 연구 결과가 있다[3]. 반면에 반사형은 고정되지 않은 상태에서 측정이 이루어지기 때문에 동잡음에 영향을 많이 받지만 자유도가 높다는 큰 장점이 있고 주변광에 노출된 상태에서 측정이 이루어지게 된다. 따라서 주변광으로 인한 영향을 고찰할 필요성이 있으며, 본 연구에서는 사전 연구로 적외선을 사용한 측정 장치를 구현한 바 있고[4], 주변 환경에 따라 측정 결과에 차이가 있는 점에 착안하여 다양한 환경에서 측정 장치에 영향을 미치는 잡음(noise)을 관찰하고 분석하였다.

2. 관련 연구

논문 [5]에서는 녹색광을 이용한 광용적맥파측정기를 사용하여 주변광에 대한 효율성을 검증하였다. 이 논문은 주변광의 영향으로 인한 PPG 신호의 변화를 실험하였고, 적외선을 이용한 측정기와 비교하였다. 그러나 적외선을 이용한 PPG 신호의 변화를 관찰하는 연구는 진행되지 않았다. 논문 [6]에서는 주변광으로부터의 영향에 대한 개선에 관하여 연구하였으나 PPG신

호가 아닌 카메라를 사용한 vPPG(video-based PPG)에 관하여 다루었기 때문에 본 연구와는 차별성이 있다. 논문 [7]에서는 주변광을 사용한 PPG 측정장치를 구현하였으나 자체 발광원을 사용하지 않고 주변광만을 사용하였기 때문에 자체 발광과 주변광 사이에 대한 고찰이 없었다.

논문 [8]에서는 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 PPG신호의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 이 논문에서는 심장병 환자의 스펙트럼과 정상인의 스펙트럼을 비교하였고 주파수 분석이 유용함을 확인할 수 있다. 논문 [9]에서는 잡음을 제거하는 방법에 대한 새로운 접근 방법을 제시하였으나 주변광으로 인한 잡음이 아닌 동잡음에 국한하여 연구하였다. 위에서 언급한 논문들로 미루어 볼 때 주변광과 잡음으로 인한 연구 및 관찰이 필요하다는 것을 알 수 있다.

3. PPG 측정과 주변광

3.1 PPG 측정과 주변광으로 인한 잡음

반사형 측정 장치의 측정 예를 아래 그림 1에 나타내었다. 예측되는 잡음은 측정 장치 내부로부터 발생하는 내부 잡음과 외부로부터 발생하는 외부 잡음으로 구분할 수 있으며, 내부 잡음은 A. Caizzoner가 논문 [10]에서 Shot, Thermal, Flicker, Quantization 잡음으로 구분하였고, 외부 잡음은 주변광과 태양광으로부터의 잡음으로 볼 수 있다. 따라서 측정 장치를 거처 나오는 최종 신호의 크기를 v 라 하면 태양광을 시불변으로 가정하여 식 (2)와 같이 모델링할 수 있다.

$$v(t) = v_P(t) + v_I(t) + v_A(t) + v_S \quad (2)$$

여기서, $v_P(t)$ 가 우리가 원하는 IR LED로부터 반사된 신호이며, $v_I(t)$ 는 내부 잡음, $v_A(t)$ 는 주변광으로 인한 잡음, v_S 는 태양광으로부터 발생한 잡음을 나타낸다. 주변광으로 인한 잡음은 그림 1에 나타낸 바와 같이 다음과 같은 잡음 성분으로 구성되게 된다.

- (a) 주변광이 동맥을 통과
- (b) 주변광이 동맥을 반사
- (c) 주변광이 다른 신체조직을 통과
- (d) 주변광이 다른 신체조직을 반사

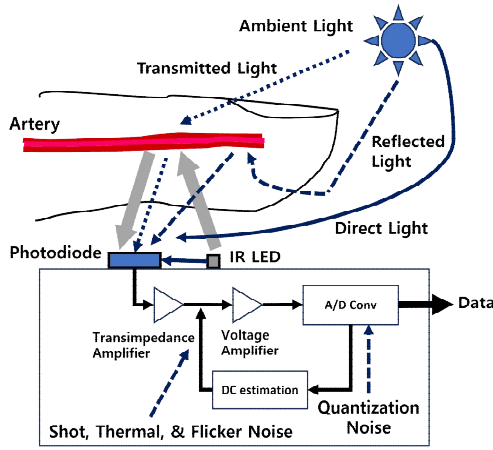


그림 1. 반사형 장치의 측정과 잡음
Fig. 1. Measurement and noise of reflective-type.

(e) 주변광이 직접 인식 (c),(d)를 통해 발생한 신호는 정맥을 통한 신호의 변화가 없다고 가정하면 태양광과 같이 직류 성분으로 모델링이 가능하다. 따라서 주변광으로 인한 잡음은 식 (3)과 같이 모델링될 수 있다.

$$v_A(t) = v_a(t) + v_b(t) + v_c + v_d + v_e \quad (3)$$

v_e 는 하우징(housing)을 통해 차단이 가능하고 신호 처리를 통해 직류 성분을 제거하게 되면 v_c, v_d, v_s 는 0이 되기 때문에 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 아래 식 (4)와 같이 PPG 신호 성분을 얻게 된다.

$$v_{ppg}(t) = v(t) - v_I(t) + v_a(t) + v_b(t) \quad (4)$$

실제 $v(t)$ 만을 통해 정확한 PPG 결과를 알아내기는 어렵기 때문에 본 연구에서는 다양한 실험을 통해 반사형 측정 장치의 PPG 신호의 변화를 관찰하여 잡음 성분을 파악하고 이를 분석하고자 한다.

3.2 분석

PPG 신호는 변곡점의 형태에 따라 연령을 예측할 수 있기 때문에 1차 또는 2차 미분을 통해 나온 신호를 육안으로 판별하여 분석할 수 있다[11]. 그러나 잡음이 포함된 경우에는 잡음으로 인한 신호의 왜곡(distortion)으로 인해 정확한 판별이 어려울 수 있으며, 이를 해결하기 위해 필터(filter)를 사용하여 잡음

을 제거할 때 잘못된 필터의 사용으로 인한 원 신호 복원이 달라질 수 있으므로 다른 방법의 잡음에 대한 고찰이 필요하다.

분당 60회의 심박 수(heart rate)를 갖는 휴식기 성인의 PPG신호는 주기적이기 때문에 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 살펴보면 1Hz 대역에서 가장 큰 진폭을 나타내며 주파수 스펙트럼을 통해 잡음을 판단할 수 있다. 본 연구에서는 샘플링된 신호를 식 (5)와 같은 DFT(Discrete Fourier Transform) 변환을 수행한 후 식 (6)과 같이 파워 스펙트럼(power spectrum)으로 결과를 분석하였다.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, k = 0, \dots, N-1 \quad (5)$$

$$P_k = \frac{|X_k|^2}{N^2} \quad (6)$$

여기서 x_n 는 n번째 샘플링(sampling)된 시간영역의 신호, N 는 샘플 수를 나타낸다. 만약 측정자가 부정맥과 같은 심혈관 질환을 앓고 있는 경우에는 심박수의 주기가 일정하지 않은 HRV(Heart Rate Variability)의 변동이 발생할 수 있다[12]. 이때는 식 (6)의 결과가 부정확할 수 있기 때문에 본 연구에서는 시간 영역에서의 분석을 함께 병행하여 주변광으로 인한 잡음을 고찰하고자 한다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험 환경 및 방법

실험은 햇빛이 잘 들어오는 실내 연구실에서 진행하였다. 실험을 위한 적외선을 사용한 반사형 PPG 측정 장치는 논문 [4]에서 사용되었던 게이트웨이 장치에 측정이 가능한 반사형 모듈을 추가하고 펌웨어를 변경하여 사용하였다. 주변광으로는 그림 2와 같이 300W의 할로겐램프를 사용하였고 측정된 데이터는 무선으로 게이트웨이를 통해 PC로 전송되어 실시간으로 데이터를 획득한 후 Labview를 사용하여 분석을 수행하였다. 주파수 분석을 위해 512Hz의 샘플링 레이트(sampling rate)로 데이터를 샘플링한 후 2048개의 샘플 수를 사용하여 주파수 변환을 수행하였다. 피측정

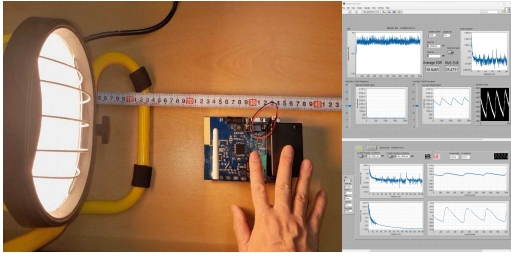


그림 2. 실험 환경

Fig. 2. Experimental environment.

자는 50대 중반의 남자이며 전체적인 실험 환경을 그림 2에 나타내었다. 실제 잡음의 발생 요인을 정확히 예측하기는 어렵기 때문에 실험은 임상시험에서 사용되는 무작위 배정 시험(RCT, Randomized Controlled Trial)과 같이 무작위 환경에서의 잡음과 인위적으로 할로겐램프를 사용하여 잡음이 발생하는 상황을 휴리스틱(heuristic)한 방법으로 실험하였고 각각의 측정 상황은 아래와 같다.

- 무작위 환경 상황:

- (1) 해가 진 저녁 LED조명 아래서 측정
- (2) 해가 진 저녁 조명 없이 암흑에서 측정
- (3) 구름 많은 날씨(대한민국 기상청 예보 기준)에 햇빛이 창문을 통해 직접 들어오는 실내에서 창문으로부터 1.5m 거리에서 오후 1시에 측정
- (4) 구름 많은 날씨에 반투명 커튼을 통해 햇빛이 실내에 간접적으로 들어오는 실내에서 창문으로부터 1.5m 거리에서 오후 3시에 측정
- (5) 햇빛이 간접적으로 들어오는 실내에서 LED 조명과 할로겐램프의 빛이 공존한 상태에서 측정

- 인위적인 주변광 발생 상황:

- (1) 할로겐램프와의 거리를 50cm, 75cm, 100cm, 150cm, 200cm로 변화시켜 가며 측정
- (2) 할로겐램프를 벽에 반사하여 측정

4.2 실험 결과 및 고찰

먼저 상황 (1)부터 (5)까지 상황을 변화시켜가며 PPG 측정을 수행하였고 그림 3(a)와 같은 결과를 얻어내었다. 가장 어두운 환경인 상황 (2)에서 측정된 PPG 신호가 육안으로도 판명할 수 있을 정도로 잡음

의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있으며, 주변에 강한 광원이 있는 상황 (5)에서는 신호 자체를 분간하기 어려울 정도의 간섭을 받는 것을 확인하였다. 잡음의 주파수 성분을 파악하기 위해 주파수 변환을 한 결과를 그림 3(b)에 나타내었다. 전체 상황에서 백색잡음(white noise)이 관찰 되었으며 이 잡음은 상황 (2)에서도 동일하게 관찰이 되었기 때문에 주변광과 상관없는 회로 내부의 열잡음으로 판단된다. 또한 모든 상황에서 전력선 잡음(power line interference)이 관찰 되었는데 이 잡음은 백색잡음과 다르게 주변광에 따라 그 크기가 다르게 나타났기 때문에 주변광의 영향을 받는 것으로 확인되었다. 특이한 점은 150Hz 근처의 대역에서 잡음이 관찰되었는데 실제 측정할 때 모니터 앞에서 측정을 하였기 때문에 모니터 광원으로 인한 잡음으로 추측된다. 빛은 광원으로부터의 거리에 따라 그 밝기(illuminance)가 줄어들기 때문에 주변광원의 밝기가 측정 장치에 미치는 영향을 실험하기 위해 할로겐램프로부터 거리를 변화시켜 가며 PPG 측정을 하였고 그 결과를 그림 4(a)에 나타내었다. 이때 측정 장치가 받는 복사조도(irradiance)를 측정하였고 논문 [13]에서 제안한 식 (7)과 같은 밝기 변환을 통해 표 1에 나타내었으며, 추가로 무작위 상황에서의 결과를 표 2에 나타내었다.

$$Illuminance = k \int_{380}^{780} V(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (7)$$

여기서 $V(\lambda)$ 와 $E(\lambda)$ 는 AM1.5와 CIE(Commission Internationale de l'Eclairage)의 데이터를 나타낸다. 실험 결과는 육안으로 확실히 구분이 가능하였으며 2m 거리 이상인 3650(lux) 이하의 밝기에서부터 정상파형의 형태가 나타남을 관찰하였다. 거리에 따라 측정된 신호는 필터를 거치지 않은 원 신호이기 때문에 실시간으로 PPG 파형의 획득 및 관찰을 위해 6Hz 차단주파수의 저역통과 특성을 갖는 FIR(Finite Impulse Response) 필터를 사용하여 실시간으로 잡음을 제거하면서 관찰하였고, 그 결과를 그림 4(b)에 나타내었다. 50cm, 75m의 거리에서는 필터링 된 PPG 신호가 측정 결과를 활용하기 어려울 정도의 왜곡이 심하게 나타났음을 관측하였고 2m의 거리에서부터 안정적인 PPG 신호를 확인할 수 있었다.

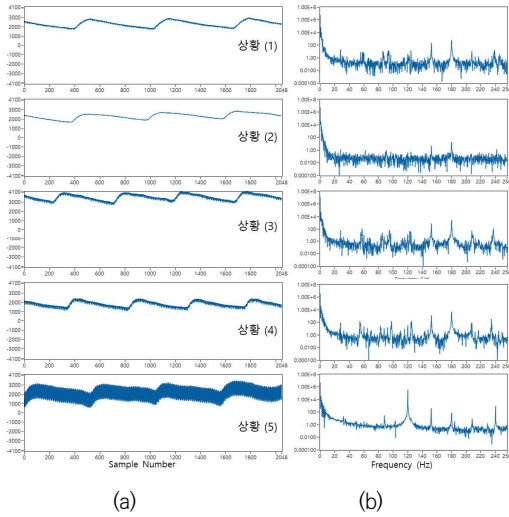


그림 3. 각 상황에 대한 측정 결과 (a) 무작위 상황별 PPG 신호 (b) 무작위 상황별 파워 스펙트럼
 Fig. 3. Measurement results of each situation: (a) PPG signals of each random environment (b) Power spectra of each random environment.

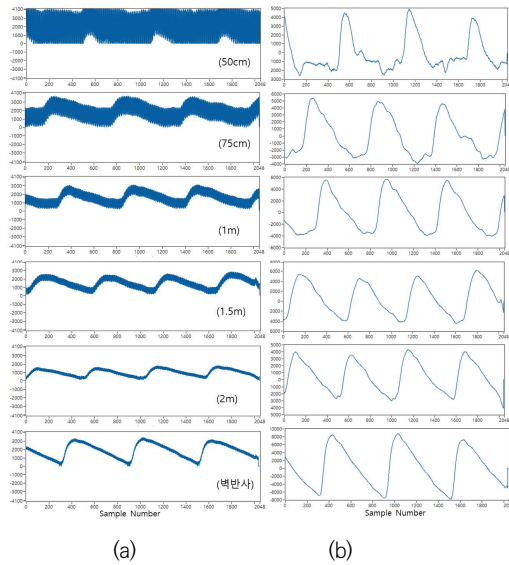


그림 4. 주변광과의 거리 변화에 대한 측정 결과 (a) 거리별 측정된 PPG 신호 (b) 측정된 PPG 신호의 필터링 결과
 Fig. 4. Measurement results on changes in distance from ambient light: (a) PPG signals measured at different distances (b) Filtering results of the signals.

표 1. 주변광의 거리 변화에 따른 빛에너지

Table 1. Light energy depending on distances.

거리(cm)	Irradiance (W/m ²)	Illuminance (lux)
50	278.3	34300
75	183.2	22600
100	120.4	16000
150	50.3	6470
200	27.7	3650
벽반사	23.6	2880

표 2. 무작위 상황에 대한 빛에너지

Table 2. Light energy of each random situation.

상황	Irradiance (W/m ²)	Illuminance (lux)
(1)	1.3	117
(2)	0.1	10
(3)	3.4	442
(4)	1.8	257
(5)	142.4	17700

실험을 시작하기 전에 사전 실험으로 직접적인 태양 광 아래에서 측정을 시도하였으나 강한 태양광으로 인하여 측정 결과를 분간할 수 없었다. 이와 같은 결과는 거리 실험에서도 확인할 수 있었으며, 주변광과의 거리가 50cm 이하가 될 경우 측정 결과를 분간할 수 없었고, 하우징이 없는 반사형 측정 장치는 주변광의 밝기에 직접적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 실제 거리 실험을 통해 발생하는 잡음을 육안으로도 관찰할 수 있었으나 발생하는 잡음의 성분을 파악하기 위해 그림 5(a)와 같이 거리에 따라 주파수 변환을 수행하였고 그 결과 전력선 잡음 성분이 가장 크게 나타남을 확인하였다. 실험에 사용된 측정 장치는 배터리를 사용하기 때문에 측정된 전력선 잡음은 주변광으로부터 발생된 것으로 파악할 수 있으며 주변광으로 사용된 할로겐램프가 60Hz의 교류 전원을 사용하기 때문이란 것을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)에 가장 가까운 거리와 먼 거리 사이의 차이를 나타내었으며, 거리가 2m 이상이 될 경우 전력선 잡음 성분을 제외하면 대낮의 실내에서 측정되는 신호와 근접하게 됨을 확인하였다. 실제 측정된 신호에서는 잡음 성분을 모르기 때문에 잡음에 대한 수치 표현이 어려우나, 논문 [14]에서는 15Hz의 주파수를 기준으로 고역통과필터(high pass filter)를 통과시킨 후 통과된 데이터를 잡음으로 예측하여 신호대잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)를 계산하였고, 본 연구에서도 같은 방식으로 신호대잡음비를 계산

하였다.

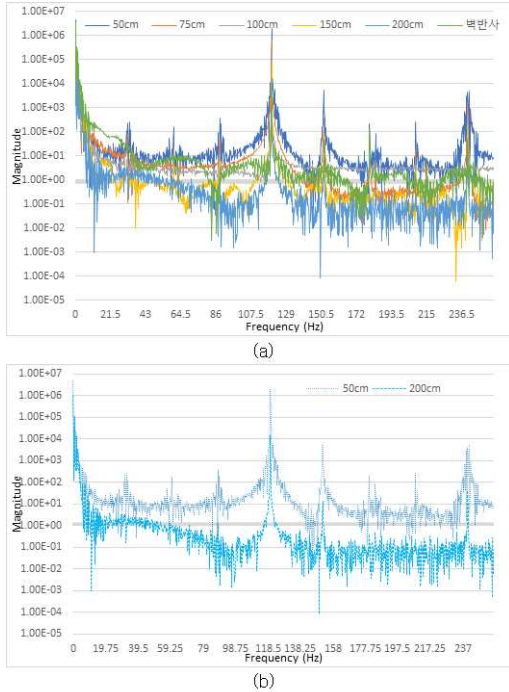


그림 5. 거리 변화에 대한 PPG 신호의 파워 스펙트럼 (a) 전체 (b) 50cm, 200cm
Fig. 5. Power spectra of distance variations: (a) Overall (b) 50cm, 200cm.

논문 [14]에서의 측정 장치와 본 연구에서 사용된 측정 장치가 다르기 때문에 신호대잡음비를 평균값과 함께 RMS(Root Mean Square) 값을 추가하여 계산하였고 표 3과 표 4와 같은 결과를 얻었다. 278.3W/m²의 복사조도를 갖는 50cm 거리에서는 3.2dB의 SNR을 나타내었고 그 이하의 SNR에서는 정상적인 측정이 어려움 확인하였으며, 27.7W/m²의 복사조도를 갖는 2m의 거리에서 18.2dB 값을 나타내었고 그 이상 값의 SNR에서 필터를 통해 정상적인 PPG 측정이 가능함을 확인하였다. 실험 과정에서 측정된 신호 사이에 약간의 차이가 발생하는 경우가 있었으며, 이러한 차이는 실시간으로 데이터를 획득할 때 모든 신호를 동일한 위상으로 측정하는 것이 불가능해서 발생된 것으로 판단할 수 있었으며 시간에 따른 측

정자의 상태 변화로 인해 측정 결과에 변화가 생길 수도 있음을 확인하였다.

표 3. 무작위 상황에 대한 신호대잡음비
Table 3. SNR of random situations.

상황	Average SNR[14] (dB)	RMS SNR (dB)
(1)	38.8465	28.4731
(2)	51.5832	29.9840
(3)	35.7662	27.9009
(4)	28.1694	23.3231
(5)	13.8488	11.0762

표 4. 거리 변화에 대한 신호대잡음비
Table 4. SNR depending on distance variations.

거리(cm)	Average SNR[14] (dB)	RMS SNR (dB)
50	5.6500	3.1850
75	9.5371	7.2319
100	13.5055	11.6364
150	16.4158	14.8404
200	19.7739	18.2182
백반사	24.4447	22.5271

5. 결론

본 논문에서는 적외선을 사용한 반사형 PPG 측정 장치에서 주변광으로 인한 잡음이 측정 장치에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 먼저 일반적인 무작위 실험을 통해 주변광의 밝기에 따라 잡음이 커짐을 확인하였고, 주파수 분석을 통해 백색잡음, 전력선 잡음, 회로의 내부 잡음이 발생함을 확인하였다. 할로겐램프와의 거리 변화에 대한 잡음의 변화를 실험하고 SNR을 계산하였고 빛의 밝기에 따라 잡음의 크기가 변화함을 실험적으로 확인하였으며, 일정한 밝기 이하에서 필터를 통해 정상적인 PPG 측정이 가능함을 확인하였다.

차후 논문에서는 연구된 결과를 바탕으로 최적화된 필터 설계에 대하여 연구할 예정이다.

REFERENCES

[1] Hertzman, A. B. "The blood supply of various skin areas as estimated by the photoelectric plethysmograph.", American Journal of Physiology-Legacy Content, Vol. 124, No. 2, pp. 328-340, Jul. 1938.

- [2] Park, J., Seok, H. S., Kim, S. S., & Shin, H., "Photoplethysmogram analysis and applications: An integrative review.", *Frontiers in Physiology*, Vol. 12, Article 808451, Mar. 2022.
- [3] Moço, A. V., Stuijk, S., & de Haan, G., "New insights into the origin of remote PPG signals in visible light and infrared.", *Scientific reports*, 8(1), 8501, May. 2018.
- [4] Namsub Kim, "A Study on the Implementation of Transmission type PPG Measurement Device in a Wrist Watch", *Journal of KIIECT*, Vol. 10, No. 2, pp. 161-167, Apr. 2017.
- [5] Chagn Kiyoung, "The Verification of Reflected Photoplethysmography Using Green Light that Influenced by Ambient Light", Master's thesis, Yonsei University, 2014.
- [6] Dongseok Lee, "Performance Enhancement of video-based Photoplethysmography under Dynamic Light Variation", Master's thesis, Seoul University, 2015.
- [7] Han, D., Khan, Y., Ting, J., Zhu, J., Combe, C., Wadsworth, A., and Arias, A. C., "Pulse oximetry using organic optoelectronics under ambient light.", *Advanced Materials Technologies*, Vol. 5, No. 5, May 2020.
- [8] Aisuwarya, R., Hendrick, H., & Meitiza, M., "Analysis of cardiac frequency on photoplethysmograph (ppg) synthesis for detecting heart rate using fast fourier transform (fft).", In *2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, pp. 391-395, Oct. 2019.
- [9] Ram, M. R., Madhav, K. V., Krishna, E. H., Komalla, N. R., & Reddy, K. A., "A novel approach for motion artifact reduction in PPG signals based on AS-LMS adaptive filter.", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 5, pp.1445-1457, May 2012.
- [10] Caizzone, A., Boukhayma, A., & Enz, C. , "Comprehensive noise analysis in PPG read-out chains.", In *2017 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)*, pp. 1-4, Jun. 2017.
- [11] Dae-Geun Jang, Umar Farooq, Seung-Hun Park, & Minsoo Hahn, "A Study on the Quantitative Pulse Type Classification of the Photoplethysmography", *Journal of Biomedical Engineering Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 328-334, Aug. 2010.
- [12] Malik, M., & Camm, A. J., "Heart rate variability.", *Clinical cardiology*, Vol. 13, No. 8, pp.570-576. Jun. 1990.
- [13] Michael, P. R., Johnston, D. E., & Moreno, W., "A conversion guide: Solar irradiance and lux illuminance.", *Journal of Measurements in Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 153-166, Dec. 2020.
- [14] Yamakoshi, T., Lee, J., Matsumura, K., Yamakoshi, Y., Rolfe, P., Kiyohara, D., & Yamakoshi, K. I., "Integrating sphere finger-photoplethysmography: preliminary investigation towards practical non-invasive measurement of blood constituents.", *PLoS one*, Vol. 10, No. 12, e0143506, Dec. 2015.

저자약력

김 남 섭 (Namsub Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 경희대학교 일반대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 경희대학교 일반대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 서일대학교 컴퓨터전자공학과 부교수

〈관심분야〉 IoT 헬스케어, SoC 설계 및 검증, 저전력 회로 설계