

광전용적맥파를 이용한 요골동맥 맥파 검출

정동근* · 김광년² · 연규선¹ · 최병철² · 서덕준¹

동아대학교 의과대학 의공학교실
¹동아대학교 생리학교실
²동아대학교 의과학연구소

Detection of Radial Pulse Wave by Photoplethysmogram

Dong-Keun Jung, Kwang-Nyeon Kim², Kyu-Seon Yeon¹, Byung-Cheol Choi² and Duk-Joon Suh¹

Department of Medical Engineering, College of Medicine, Dong-A University, Busan 602-714, Korea

¹Department of Medical Engineering, Physiology, Dong-A University, Busan 602-714, Korea

²Department of Medical Engineering, Institute of Medical Science, Dong-A University, Busan 602-714, Korea

Abstract

Photoplethysmogram is widely used to measure heart rate and arterial blood oxygen saturation in human. This paper describes radial pulse waves recorded by photoplethysmogram with 940 nm wavelength infra red light. Radial pulse waves were varied according to the recording site. When recorded on the skin over radial artery, the radial pulse wave was inverted, comparing to the photoplethysmogram at fingertip. The mechanism of inverted pulse wave seemed to be caused by the change of the blood volume in the subcutaneous tissue between radial artery and the skin, which was reduced during systolic period and increased during diastolic period of the cardiac cycle. These results suggest that radial arterial wall may reflect infra red ray.

Key words – photoplethysmogram, radial pulse, infra red ray

서 · 론

인체에서 맥파를 획득하는 방법은 침습적인 방법과 비 침습적인 방법으로 나눌 수 있으며, 비침습적인 방법은 피 검자에게 고통을 주지 않고 간편하게 사용할 수 있으므로 널리 사용되고 있다. 비침습적 맥파 기록 방법으로는 광학적 검출, 기계적 변환, 전기적 검출방법으로 분류된다. 광학적 검출방법은 생체 투과성 빔을 사용하는 방식으로 적

외선의 광도변화를 이용하는 광전용적맥파가 가장 널리 사용되고 있다[1]. 전기적 방법은 조직의 전기적 임피던스 [4,6] 또는 어드미턴스[3,7]의 변화를 측정하는 것이다.

가시광선 또는 적외선을 이용한 광전용적맥파는 손가락 또는 귓볼 등에서 기록하고 있으며 광선을 조직에 입사시킨 후 반사 또는 투과되는 광도를 측정하여 조직의 혈액량 변화를 검출하는 방법이다. 이때 Lambert-Beer의 법칙이 성립되며 아래의 식을 만족한다.

$$I_t = I_0 \times 10^{-\alpha dc}$$

이때 I_t 는 투과 또는 반사되는 빛의 강도이며 I_0 는 입사

*To whom all correspondence should be addressed
Tel : 051-240-2868, Fax : 051-246-6481
E-mail : dkjung@daunet.donga.ac.kr

되는 빛의 강도이다. a 는 조직의 광학적 흡수계수이며, d 는 광학적 경로, c 는 조직의 농도이다. 고정된 자세에서 일정량의 빛을 조직에 입사시키는 경우 심장의 활동에 따라 a 와 c 는 대개 일정하며 d 는 변하는 특성이 있다. d 를 변화시키는 요인은 말초 부위의 혈류량의 변화이며, 광전소자를 이용하여 말초에서 맥파를 검출하게 된다.

심장의 수축기에 심장의 좌심실에서 박출되는 혈액은 말초로 이동되며 동맥측의 혈액부피가 증가하게 된다. 이완기에는 말초 조직으로부터 심장쪽으로 부분적인 혈액의 흡입이 있다. 조직에서 심장 주기에 따른 혈액량의 미소한 변화는 전기적, 기계적, 광학적방법 및 기타 방법으로 기록할 수 있다[2]. 광전용적맥파(photoplethysmography, PPG)는 조직에서 광흡수도의 변화를 측정하는 것이다. 피부에 발광부와 광검출기를 부착하여 피부를 투과하는 빛의 강도를 측정하면, 광검출기의 출력에 나타나는 신호는 심장 박동 주기에 따라 요동한다. 광전용적맥파는 수축기에 조직에서 빛의 감쇠가 증가하여 신호가 감소하며 이완기에 증가한다. 이러한 광전용적맥파 신호를 일반적으로는 반전시켜 표시하고 있다. 조직내 혈액량의 맥동성 변화는 압력의 변화가 맥동성으로 나타나는 동맥에서만 일어난다. 본 연구에서는 광전소자를 이용하여 요골동맥이 주행하는 손목 부위에서 맥파를 검출하였으며 이 때 기록되는 맥파가 손가락 끝에서 기록되는 맥파에 비하여 반전된 모양의 맥파를 관찰하였다. 그 기전을 밝히기 위하여 센서의 위치를 변화시키면서 기록되는 맥파의 모양을 관찰하였으며 위치에 따른 다양한 맥파의 모양을 관찰할 수 있었다.

재료 및 방법

광전용적맥파 센서는 반사형 포토 인터럽터 2개를 이용하여 직접 제작하여 사용하였다. 사용한 포토 인터럽트는 SG-2BC(Korea Kodenshi, Korea)이며 940 nm의 적외선을 이용하는 방식이다. 발광측은 GaAs 적외발광다이오드이며 수광측은 실리콘 포토트랜지스터로 구성되어 있다. 제작한 센서의 외관을 Fig. 1에 제시하였다. 센서의 크기는 가로 14mm, 세로 22mm이며 포토 인터럽트 소자의 직경은 외경이 4mm이며 광학적으로 작용하는 부부는 직경 3 mm에 해당한다. 포토 인터럽트 2개를 고무판에 함몰 설치하여 제작하였다. 두 개의 포토 인터럽트는 센서의 중심선을 기

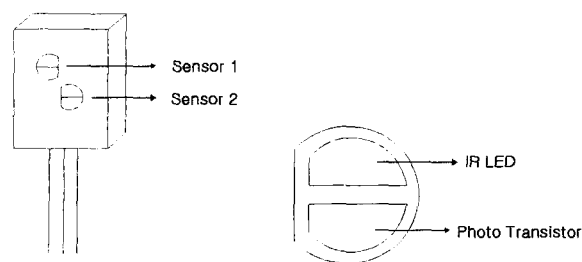


Fig. 1. Photoplethysmography sensor. Left, whole sensor; Right, photo interrupter component.

준으로 좌우로 배치되어 있으며 길이 방향으로 간격을 두어 혈관의 주행방향으로 설치가 가능하도록 하였다.

맥파 신호증폭기는 2개의 PhysioLab Pulse-amp (Sarotech, Seoul)를 이용하였으며, PhysioLab P400(Sarotech, Seoul)을 이용하여 12 bit 1 kHz로 A/D 변환하여 PC에서 기록하였다. Pulse-Amp의 저역차단주파수는 0.1 Hz이며 고역차단주파수는 10 Hz로 설정하여 신호를 기록하였다.

본 연구에 참여한 피검자는 순환기계 질환이 없는 건강한 성인 5명(32~41세)을 대상으로 하였다. 광전용적파 센서를 요골동맥이 지나가는 손목의 내측면에 부착하여 고정된 자세로 신호를 기록하였으며, 요골동맥의 맥박을 촉진하여 피부 부위에 주행 경로를 표시한 후 센서의 위치를 옮겨가며 맥파를 기록하였다. 피검자마다 4회 이상 반복 측정하여 일관성이 있는 실험결과들을 대상으로 각 측정에서 대표성이 있는 기록의 10초간 광전용적맥파 신호를 그림으로 제시하였다. 결과에 제시한 광전용적맥파의 진폭은 Pulse-Amp의 동일한 증폭도에서 기록한 것이며, 크기는 임의적이므로 상대적인 크기를 제시한 것이다.

결과 및 토의

Fig. 2는 손가락과 손바닥에서 광전용적맥파를 시간 간격을 두고 기록한 것이다. 각 부위에서 기록되는 한 쌍의 광전용적맥파 신호는 동일 부위에서는 유사한 진폭의 신호를 보이고 있다. 동맥에서 기록되는 압력맥파와 동일한 특성이며, 심장 주기에 따라 빠르게 증가하는 신호와 정점에 도달하였다가 서서히 감소하는 과정에 절흔을 보인다. 피부에서 측정되는 이러한 광전용적맥파 모양은 신체의 대부분 부위에서 관찰할 수 있으나 피부의 혈류가 풍부한 부위

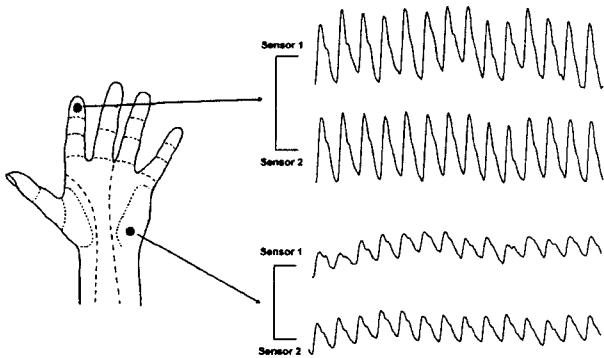


Fig. 2. Pulse waves recorded from fingertip and palm. Recording duration of photoplethysmogram is 10 seconds.

에서 진폭이 크게 관찰된다. 본 연구에서 손가락 부위가 손바닥 부위에 비하여 광전용적맥파의 진폭이 크게 나타났다.

Fig. 3은 손목의 내측면에서 요골동맥이 주행하는 부위에서 관찰한 광전용적맥파이다. Fig. 3의 위쪽 파형은 요골동맥 바로 위에서 검출한 신호이며 아래쪽은 요골동맥으로부터 옆으로 2 mm 벗어난 위치에서 검출한 신호이다. 요골동맥이 위치하지 않는 피부 부위에서 기록한 신호는 손가락에서 기록한 Fig. 2의 파형과 동일한 파형을 보이지만, 요골동맥이 주행하는 위치의 피부에서 기록한 광전용적맥파는 신호의 진폭이 낮으며 반전되어 있는 특성을 보였다.

Fig. 3에서 제시한 결과의 기전을 밝히기 위하여 센서의 위치를 다르게 하여 요골동맥의 경계부에서 광전용적맥파를 관찰하였다. Fig. 4는 요골동맥 바로 위의 피부와 요골동맥의 경계부 피부에서 맥파신호를 관찰한 것이다. Fig. 4의 위쪽 파형은 요골동맥 위에서 기록한 파형이며 아래쪽

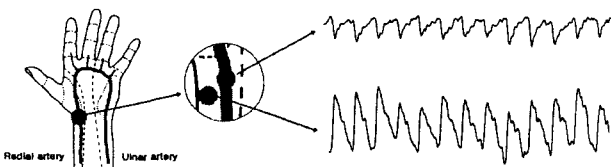


Fig. 3. Typical pulse waves on the skin over the radial artery in wrist. Upper, the position of sensor is just over the radial artery. Lower, the position of sensor is 2 mm aside to the radial artery. Recording duration of photoplethysmogram is 10 seconds.

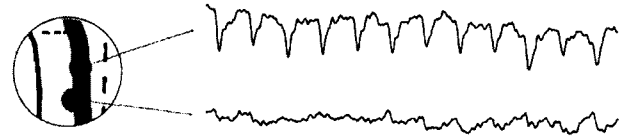


Fig. 4. Comparison of pulse waves by the position of sensor on wrist. Upper, a wave from the skin over the radial artery. Lower, a wave from the skin over the boundary region of that. Recording duration of photoplethysmogram is 10 seconds.

파형은 요골동맥의 경계부에서 기록한 것이다. 요골동맥 바로 위에서 관찰한 신호는 손가락에서 기록되는 맥파에 비하여 반전되어 있는 주기성의 파형을 관찰할 수 있지만, 요골동맥의 가장자리에서 검출한 맥파신호는 진폭이 낮은 특성을 보였다.

요골동맥에서 관찰한 결과가 다른 표피 동맥에서도 관찰되는지 확인하기 위하여 척골동맥(ulnar artery)과 두부의 측두동맥(temporal artery)에서 광전용적맥파를 기록하였다. Fig. 5의 A는 척골동맥이 주행하는 피부 부위에서 검출한 광전용적맥파이며 B는 측두동맥 부위의 피부에서 검출한 광전용적맥파 신호이다. 이들 맥파 신호는 요골동맥과 마찬가지로 손가락에서 관찰되는 맥파에 비하여 반전되어 있는 맥파 특성을 보였다.

일반적인 광전용적맥파는 조직내 투과성이 있는 빛을 조직으로 입사시키고 적절한 감쇠가 일어나는 조건에서 반사 또는 투과되는 빛의 강도를 측정하는 방법이다. 손가락 끝부분과 같은 말초 부위 맥파는 심장의 수축기에 동맥측 혈관이 확장되며 조직의 혈액량이 증가하여 조직의 부피가

A. Ulnar artery



B. Temporal artery



Fig. 5. Typical pulse waves recorded from the skin over the ulnar artery (A) and temporal artery (B). Recording duration of photoplethysmogram is 10 seconds.

증가한다. 이때 심장 주기에 따라 소동맥 및 모세혈관에서 혈액의 부피 변화에 반비례하는 빛의 강도를 이용하여 전기신호로 검출한다. 수축기에 혈액의 부피가 증가하면 반사되는 빛의 강도는 약해지며 이완기에서 혈액의 부피가 감소하면 반사되는 빛의 강도는 증가하는 특성을 갖는다. 이러한 원리는 조직의 혈액 관류량이 비교적 풍부한 조직에서 손쉽게 측정되며 피부로부터 일정거리에 빛을 반사할 수 있는 반사체가 존재하는 경우 반사광의 신호가 더 크게 기록되는 특성이 있다. 손가락과 발가락의 경우 말초 혈류가 풍부하므로 광전용적맥파의 검출에 최적 부위이다.

일반적으로 광전용적맥파는 조직에서 Lambert-Beer 법칙에 따라 광학적 경로의 광흡수도에 의하여 반사광의 신호가 결정된다. 적외선은 가시광선에 비하여 조직 투과도가 높아 조직 심부로 투과하는 특성이 있으며 뼈의 표면에서 반사되는 것으로 알려져 있다[5]. 발광소자로부터 나오는 빛이 조직으로 입사하여 투과하면서 감쇠가 진행되며 조직의 광흡수율이 균일하다면 경로의 길이에 반비례하여 반사광의 세기가 결정된다. 일반적으로 손가락 끝의 경우 심장 수축기에 모세혈관을 통한 혈류가 증가되면 반사광의 세기는 약해지며, 심장 이완기에 혈류가 감소하면 반사광의 세기가 증가한다.

Fig. 2에서 관찰한 바와 같이 심장 수축기에는 피부내의 혈액량이 증가하므로 반사광의 강도가 작아지며 이완기에는 혈액량의 감소로 반사광의 강도가 커진다. 일반적으로 말초 맥파의 파형은 빛의 강도에 따른 변화를 반전시켜 증폭한 것이다. Fig. 3에서 요골동맥 부위의 피부에서 기록한 맥파가 피부 부위에 따라 반전되어 있는 특성을 보이는 것은 심장 주기에 따라 빛의 경로 내에 혈액량의 변화가 다르게 나타남을 의미한다. 요골동맥이 주행하는 부위로부터 벗어난 위치에 있는 피부는 손가락 끝과 동일한 패턴의 맥파를 보이지만 요골동맥 바로 위에서는 신호가 반전되는 특성을 보였다. 요골동맥은 심장 수축기에 확장되며 이완기에는 수축되는 특성을 지니고 있다. 요골동맥과 피부 사이의 조직은 심장 수축기에 혈액량이 작아지며 심장 이완기에 혈액량이 증가하는 특성을 가지고 있다. 따라서 조직의 광흡수도가 일정하다고 가정하여도 빛의 경로 변화가 심장 주기에 따라 발생할 수 있다. 그러나 피부와 요골동맥 사이의 변화는 오히려 반대로 진행될 수 있다. 요골동맥 위에서 일반적인 맥파신호와 반전된 맥파 신호가 검출

되는 것은 요골동맥과 피부 사이의 빛의 경로의 변화와 일치하며 이러한 결과는 입사되는 940 nm의 적외선이 혈관의 외벽에서 반사 및 산란되며, 광원으로부터의 거리가 짧아져서 검출되는 빛의 양이 많아지는 것으로 해석할 수 있다. 요골동맥이 확장되면서 빛의 경로가 짧아진다는 것은 입사되는 적외선이 요골동맥의 표면에서 반사가 일어날 경우에 가능하다. 즉 피부와 요골동맥 사이의 경로는 심장의 수축기에 경로가 짧아지며 이완기에는 증가하고 있다. 본 연구에서 요골동맥의 바로 위에서는 맥파의 모양이 주변조직과 반대 방향의 변화 특성을 보이는 이유는 동맥의 벽이 피부에 가하는 힘에 의하여 조직의 혈액량 변화가 다른 부위와는 다르게 진행됨을 의미한다. 요골동맥과 주변 조직 모두는 요골 바깥에 위치하고 있으므로 입사되는 적외선들은 요골동맥에서 반사된다. 그러나 요골동맥의 표면에서 적외선을 반사하는 특성이 있다면 실제적인 적외선의 경로는 다르며 피부부위에 따라 맥파의 모양이 다르게 나타날 수 있다. 이러한 특성은 광전용적맥파의 기전이 피부 부위에 따라 다르며 표재성 동맥이 주행하는 피부 부위에서는 맥파의 모양이 모두 반전되어 있다고 할 수 있다. 이러한 기전을 Fig. 6에 모형으로 제시하였다. 광경로 A와 B는 심장 박동에 따른 동맥의 수축과 확장에서 광경로의 변화가 다르게 나타나며 광도 변화의 모양이 반전될 것이라고 추측할 수 있다.

Fig. 4에서 요골동맥의 가장자리에서 검출한 광전용적맥파는 진폭이 낮으며 특징적인 맥파를 기록할 수 없었다. 이러한 결과는 정상적인 맥파와 반전된 맥파 신호가 상쇄

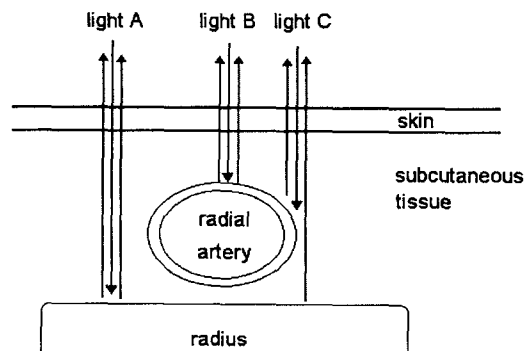


Fig. 6. Model of transcutaneous light pathways around radial artery.

되어 나타나는 특성으로 추측된다. 요골동맥 부위에서 관찰된 맥파의 특성은 다른 동맥에서도 관찰되었다. Fig. 5는 척골동맥과 측두동맥 부위의 피부에서 관찰한 맥파이다. 모두 요골동맥 부위 피부와 마찬가지로 반전되어 있는 맥파 모양을 취하고 있다.

본 연구에서 관찰한 결과를 토대로 일반적인 광전용적맥파 측정법을 이용하여 요골동맥의 심장주기에 따른 피부에서의 광전용적맥파를 검출할 수 있으며, 요골동맥의 위치를 피부에서 정확하게 찾을 수 있음을 제시하였다. 광전용적맥파의 부위에 따른 파형의 반전 특성은 혈관벽에서 적외선이 반사되는 특성을 고려함으로써 설명이 가능하다. 향후 시험관내에서 골막과 혈관벽의 적외선 반사 특성을 직접적으로 측정하여 비교함으로써 피부에서 위치에 따른 맥파의 발생 기전을 명확히 구분할 수 있다. 요골동맥의 맥파 기록은 맥파를 이용한 혈관질환의 진단에 이용되며, 요골동맥과 경동맥에서 맥파도달시간 차이를 이용하는 맥파전달속도 측정에 널리 이용되고 있다. 본 연구 결과의 응용 분야로는 표재성 동맥 부위의 피부에서 적외선 반사를 분석하여 동맥의 위치를 파악할 수 있으며 심장 주기에 따른 표재성 동맥벽의 운동성을 측정하는 것이 가능하다. 아울러 광전용적맥파 측정법이 손가락, 발가락, 컷볼뿐만 아니라 일반적인 피부에서도 측정 가능함을 시사한다.

요 약

광전용적맥파는 인체의 말초 부위에서 맥파를 검출하는데 널리 이용되고 있으며 심박동수 측정 및 혈액산소포화도 측정에 이용되고 있다. 본 연구는 940 nm의 적외선을 이용한 광전용적맥파를 이용하여 손목에서 요골동맥의 맥파를 기록하였으며 센서의 측정 위치에 따라 맥파의 모양이 다르게 나타나는 것을 관찰하였다. 요골동맥 바로 위의 피부부위에서 기록되는 광전용적맥파는 손가락 끝에서 기록되는 맥파에 비하여 반전되어있는 특성을 보였다. 반전된 맥파의 발생기전은 센서의 발광부에서 나오는 940 nm의 적외선이 조직에 입사하여 반사되어 나오는 경로의 용적

변화가 심장주기에 따라 일어나지만 손가락 끝부분에 비하여 반대 작용이 있음을 나타낸다. 요골동맥의 바로 위 피하 조직은 심장주기에 따라 동맥의 확장 또는 수축이 발생하면 동맥외벽과 피부 사이 조직에 혈류량의 변화가 일어나며 동맥의 확장 시에는 혈류량이 감소하고 이완시에는 증가되는 특성으로 인하여 반전맥파를 형성하는 것으로 추측된다. 이러한 결과는 요골동맥의 벽에서 적외선 반사가 있음을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 1998학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모 과제)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Drzewiecki, G. 2000. Noninvasive arterial blood pressure and mechanics, pp. 1-16, In Bronzino, J.D. (eds.), *The Biomedical Engineering Handbook*, Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, Florida.
2. Fronek, A. 1989. *Noninvasive diagnosis in vascular disease*. McGraw Hill, New York.
3. Ito, H., K. Yamakoshi, and T. Togawa. 1976. Transthoracic admittance plethysmography for measuring cardiac output. *J. Appl. Physiol.* 40, 451-454.
4. Kubicek, W.G., R.P. Patterson and D.A. Witsoe. 1970. Impedance cardiography as a noninvasive method of monitoring cardiac function and other parameters of the cardiovascular system. *Ann. NY Acad. Sci.* 170, 724-732.
5. Marjanovic, M.A. 1997. Optical assessment of recovery of tissue blood supply after removal of externally applied pressure. *Medical & Biological Engineering & Computing* 35, 425-427.
6. Nyboer, J. 1970. *Electrical impedance plethysmography*. Thomas C.C. (eds). Springfield, Illinois.
7. Yamakoshi, K., H. Shimazu, T. Togawa and H. Ito. 1978. Admittance plethysmography for accurate measurement of human limb blood flow. *Am. J. Physiol.* 235, 821-829.

(Received November 26, 2002; Accepted February 4, 2003)