

## 지침용적맥파의 파형분석과 주파수분석에 대한 문헌적 연구

남동현 · 박영배 · 박영재 · 신상훈\*

경희대학교 한의과대학 진단·생기능의학과학교실, \*상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과

### [ Abstract ]

### A Systemic Review of Pulse Contour Analysis and Fourier Spectrum Analysis on the Photoplethysmography of Digit

Tong-Hyun Nam, Young-Bae Park, Young-Jae Park, Sang-Hoon Shin\*

*Dept. of Biofunctional Medicine and Diagnosis, College of Oriental Medicine, Kyunghee University*

*\*Dept. of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University*

Palpation of the pulse has been used in Korean traditional medicine since ancient times to assess physical health. Pulse wave contour may be obtained by measuring arterial pressure or blood volume change of skin. The latter is called as photoplethysmography(PPG) or digital volume pulse(DVP). The PPG signal is measured by a device comprising an infrared light source and a photodetector. Although less widely used, this technique deserves further consideration because of its simplicity and ease of use.

The contour of the PPG is formed as a result of a complex interaction between the left ventricle and the systemic circulation. It usually exhibits an early systolic peak and an early diastolic peak. The first peak is formed mainly by pressure transmitted along a direct path from the left ventricle to the finger. The second peak is formed in part by pressure transmitted along the aorta and large arteries to sites of impedance mismatch in the lower body.

The contour of the PPG is sensitive to changes in arterial tone and is influenced by ageing and large artery stiffness. Measurements taken directly from the PPG or from its second derivative can be used to assess these properties. In some mathematical approaches, the extraction of periodic components using frequency analysis was tried to analysis of the PPG. But we don't understand yet what kind of factor in the cardiovascular system or human body is related with the respective specific Fourier components of PPG.

This review describes the background to measurement principles, representative contour, contour analysis and frequency domain analysis of PPG, and current and future.

**Key Words:** pulse, photoplethysmography, contour analysis, Power spectrum

\* 교신저자 : 박영배 / 소속 : 경희대학교 한의과대학 진단·생기능의학과학교실

TEL : 02-958-9195 / E-mail : bmppark@khu.ac.kr

## I. 서론

고대로부터 인체의 건강상태나 각종 질병의 상태를 평가하기 위해 말초에서 측정한 맥파는 널리 사용되어 왔다. 한의학에서도 맥진은 촉각으로 환자의 질병을 판단하는 방법인 절진(切診) 중에서도 가장 중요한 부분으로 간주되어 왔으며, 맥진을 통해 전신 십이경락(十二經絡)의 부조(不調), 오장육부의 상태와 그 증후의 음양허실(陰陽虛實), 표리한열(表裏寒熱) 등을 판단하였다.

맥파는 동맥내부의 압력변화를 측정하는 압력맥파와 혈액용적의 변화를 측정하는 용적맥파로

크게 나눌 수 있다.<sup>1)</sup> 지침용적맥파(photoplethysmography or digital volume pulse of digit; PPG or DVP)는 광학기술을 기반으로 하여 미세순환계의 혈액용적 변화를 측정하는 기술 중의 하나이다. 1937년 Alrick Hertzman<sup>2,3)</sup>은 Lambert-Beer 법칙에 기초하여 혈액 속에 포함된 조직의 변화에 의해 발생하는 광흡수의 차이를 측정하는 photoelectric phethysmograph를 개발하였다. 이후 Robert Goetz<sup>4)</sup>는 photocell을 이용하여 손끝에서 광투과성을 측정하여 보고함으로써 현재 사용하고 있는 지침용적맥파의 기본 형태를 확립하였다(Figure 1). 이후 Morikawa<sup>5)</sup>는 반사형 광전식

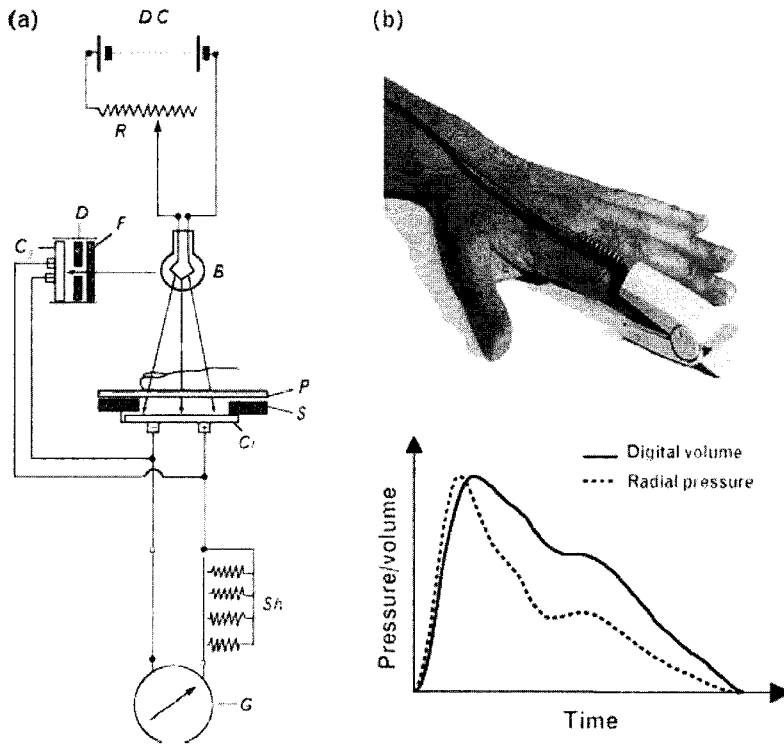


Figure 1. (a) An early photoplethysmograph device for measuring light transmission through the finger. (b) A modern photoplethysmograph incorporating a lightemitting diode and sensor within a finger clip. A typical waveform (solid line) is shown, together with a radial pressure waveform in the same individual.

용적맥파를 연구에 활용함으로써 용적맥파의 측정부위를 광투과가 불가능했던 피부 다른 부위로 까지 확대함으로써 용적맥파의 응용범위를 확대 하는데 크게 이바지 하였다.

말초에서 측정한 용적맥파는 압력맥파에 비해 그 파형의 변화가 뚜렷하지 않고 심장의 상태를 직접적으로 반영하지 않아 상대적으로 체계적인 연구가 부족하였다.<sup>6)</sup> 한의학 분야에서도 압력맥파의 파형분석은 전통적인 맥진연구에 있어서 중요한 이론적 배경을 제공하므로 중국을 포함하여 우리나라에서도 70년대부터 다양한 연구가 이루어져 왔으나,<sup>7)</sup> 용적맥파 파형분석에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다. 그러나 지침용적맥파는 압력맥파에 비해 측정방법이 간편하고 비침습적이며, 측정 시스템의 구성이 간단하고 저렴하여,<sup>8)</sup> 그 활용범위가 점차 확대되고 있으며, 이에 따라서 관련 연구들도 점차 늘어나고 있는 실정이다. 이에 본 저자는 지침용적맥파에 대한 측정원리, 일반적인 파형특성 그리고 주파수 영역분석을 포함한 파형분석에 관하여 현재까지 연구된 바를 간략하게 기술하고, 향후 연구방향에 대해 제시하고자 한다.

## II. 본 론

### 1. 지침용적맥파의 측정원리

요골동맥 등에서 내압이 올라가거나 내려가면 손끝의 세동맥은 매우 작은 변화이기는 하지만 내경이 팽창하거나 줄어들거나 하면서 변화가 발생한다. 이 용적의 변화는 약 10mm 용적에 대해 0.04mm 정도에 불과하기 때문에 육안으로 관찰하거나 촉지를 통해 인지하는 것은 불가능하다. 광전식 지침용적맥파는 이러한 미세한 변화를 측정

하기 위해 세동맥이 풍부하게 발달되어 있는 손 끝 부위에 일정량의 빛을 조사하여 동맥혈 중 산화 헤모글로빈(HbO<sub>2</sub>)에 의한 광흡수량을 측정하는 광전관 방식에 의해 측정한 후 이를 500배에서 1,000배로 증폭 기록한 것이다.<sup>9)</sup>

용적맥파는 주로 손끝에서 측정하는 방식이 가장 일반적으로 사용되고 있으나, 측정 목적에 따라 발끝, 귀에서도 측정하기도 한다. Allen 등<sup>10,11)</sup>의 연구에 따르면 각각 다른 위치에서 측정한 용적맥파도 충격파, 절흔, 중복파로 이루어져있어 파형의 기본적인 파형의 구성요소는 모두 동일하다.

### 2. 파형의 기본형태

지침용적맥파의 파형은 대동맥과 동맥의 압력맥파에서 나타나는 반사파와 맥파전달속도(pulse wave velocity; PWV)를 포함한 인체 전체의 순환계 특성에 의해 대부분 결정된다.<sup>12)</sup> 지침용적맥파의 파고(amplitude)는 호흡, 교감신경계의 활동성을 포함한 국소 혈류량을 영향을 주는 여러 요인에 영향을 받는다.<sup>13)</sup> 그러나 파고의 불안정성에도 불구하고 파형의 형태는 비교적 잘 유지되는 것으로 알려져 있다. 상완동맥에 소량의 혈관확장제를 주입한 후 측정한 양측 지침용적맥파에 대한 비교실험에서, 혈관확장제를 주입한 쪽의 파고는 증가하였으나 양측 용적맥파의 파형은 큰 차이가 없음이 관찰됨으로써, 지침용적맥파의 파형이 근본적으로 전체 순환계 특성에 의해 결정됨이 밝혀졌다.<sup>12)</sup>

지침용적맥파의 파형은 좌심실과 체순환계의 복잡한 상호작용에 의해서 결정되는데, 파형의 차이는 있지만 일반적으로 수축기의 전반부에서 나타나는 충격파(early systolic peak), 절흔(incisura), 중복파(early diastolic peak)로 이루어지는 기본적인 맥파의 구성요소는 측정부위에 상관없이 모두

동일하다.<sup>10,11)</sup>(Figure 2) 충격파는 좌심실에서 손끝으로 바로 전달되는 압력파에 의해 주로 형성된다. 중복파는 부분적으로는 대동맥을 따라 전달되는 압력에 의해서 또 일부는 인체 하부의 큰 동맥계 분지점과 같은 저항의 불균형이 일어나는 부분에서 형성된 반사파가 다시 대동맥에 전달되어 형성된다.<sup>14)</sup> 즉 중복파는 동맥의 분지점에서 형성된 반사파들이 동맥계를 통해 중첩되면서 나타나는 것이다.<sup>15)</sup> 따라서 중복파는 인체 순환계에서 반사가 잘 일어나는 특정부위 동맥의 경도나 저항이 큰 세동맥 부위의 상태에 의해 변화한다.<sup>16)</sup>

### 3. 지침용적맥파의 파형분석

지침용적맥파의 파형분석(contour analysis)은 John Dillon과 Alrick Hertzman에 의해 최초로 시도되었는데, 그들은 고혈압과 동맥경화증 환자에게서 승각시간이 연장되고, 절흔의 높이가 증가함을 관찰하고 보고하였다.<sup>17)</sup> 또 Shimokata 등<sup>18)</sup>은 1,827명을 대상으로 지침용적맥파를 측정하여 승각시간이 연령이 증가함에 따라 남여 모두에게서 연장되며, 고연령군에서보다 저연령군에서 보다 빠르게 연장됨을 관찰하고 보고하였다.

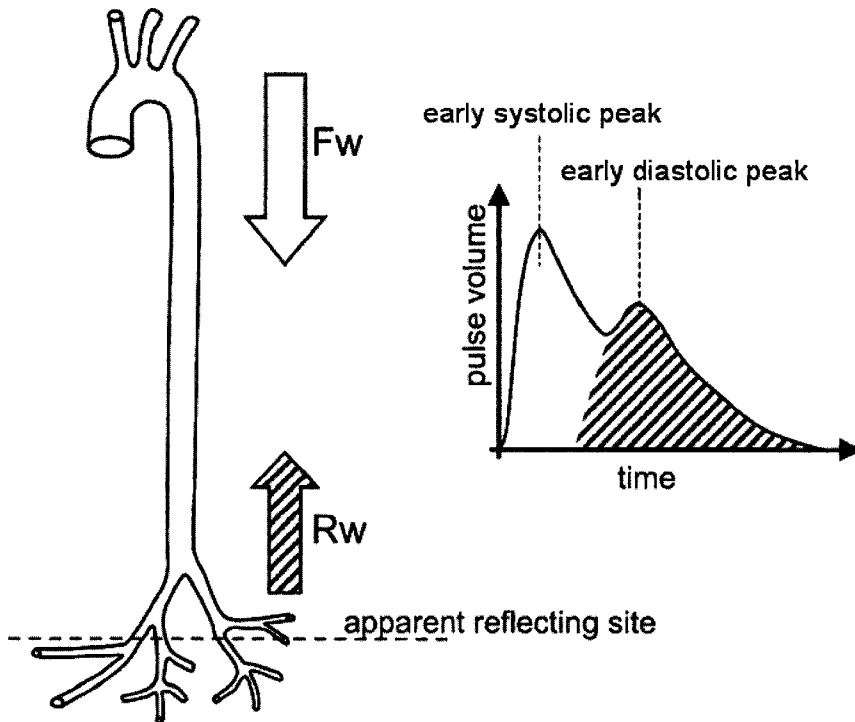


Figure 2. Photoplethysmography recorded by measuring the transmission of IR light through the finger pulp. The systolic component of the waveform (open arrow/area) arises mainly from a forward-going pressure wave(Fw) transmitted along a direct path from the left ventricle to the finger. The diastolic component(hatched arrow/area) arises mainly from pressure waves transmitted along the aorta to small arteries in the lower body, from where they are then reflected back along the aorta as a reflected wave(Rw) which then travels to the finger.





Morikawa 등<sup>19)</sup>은 alcohol을 투여한 후 지침용적맥파에서 절흔 높이의 감소를 관찰하고 절흔 높이의 감소가 혈관확장에 기인한다고 주장하였다. 이후 충격파 파고에 대한 절흔의 높이를 나타내는 "절흔지수(dicrotic index)"는 혈관확장제의 효과를 평가하는 지표로서 널리 사용되어 왔다.<sup>20-22)</sup> Dawbert 등<sup>23)</sup>은 절흔을 잘 나타내기 위해 고안된 용적맥파인 "vasculograph"를 이용하여 1778명의 지침용적맥파를 측정하고, 용적맥파의 절흔 형태에 따라 4가지 패턴으로 분류하였는데 (Table 1), Class 4에 속하는 경우 Class 1에 비해 심근경색의 유병률이 4배가량 더 높음을 관찰하고 보고하였다.

(1) 노화에 따른 변화

요골동맥 압력맥파와 지침용적맥파의 파형의 노화에 따른 변화는 여러 연구자들에 의해 연구되어 왔다.<sup>24-26)</sup> 노화에 따른 맥파 파형의 변화는 크게 승각시간의 연장, 충격파와 중복파 사이의 시간축 간격 감소, 중복파와 절흔의 높이 상승으로 특징지어지며, 이러한 변화는 주로 큰 동맥이 경화성 변화에서 기인한다.

연령이 증가함에 따라 절흔이 소실되는 주요한 원인은 맥파전달속도의 증가로 인해 반사파가 보다 빨리 지침부위에 도달하여 충격파와 융합되기 때문이다. 이러한 현상은 절흔과 중복파가 연령이 증가함에 따라 충격파 방향으로 점차 이동하는

Table 1, Dawbert's Classification of the Contour of Photoplethysmographic Waveform

Pattern	Contour	Criteria
Class 1		A distinct notch is seen on the downward slope of the pulse wave
Class 2		No notch develops but the line of descent becomes horizontal
Class 3		No notch develops but there is a well-defined change in the angle of the descent
Class 4		No notch develops or no change in angle of descent

것과 관련이 있다.<sup>14)</sup> 연령이 증가함에 따라 심장의 수축기의 후부하는 증가하고, 말초저항, 반사파를 포함하는 동맥계 부하도 함께 증가하게 된다.<sup>27,28)</sup> 노화와 관련한 좌심실 압력부하의 증가는 우선 증가된 대동맥의 경화성 변화에 의해서 발생하게 되는데, 증가된 대동맥의 경도가 충격파 시점에서 대동맥과 좌심실의 압력을 증가시키기 때문이다. 그리고 이차적으로는 전기 수축기에서의 반사가 증가됨으로서 승각기 중반부터 후기 수축기에서 압력을 증가시키기 때문에 노화와 관련한 좌심실 압력부하의 증가는 더욱더 분명하게 나타나게 된다.<sup>29)</sup>

지침용적맥파에서 젊은 피검자에게서는 충격파 이후에 조랑파와 절흔을 비교적 분명하게 관찰할 수 있지만, 고연령군에서는 승각기가 길어지고 절흔은 소실된다. 승각기가 길어지는 원인은 일반적으로 연령이 증가함에 따라 동맥계 저항이 증가하고 순응도(compliance)가 감소하기 때문으로 설명되어진다. 따라서 연령이 증가함에 따라 지침용적맥파의 파형은 보다 단순해지고 굴곡이 없어지게 된다.<sup>10)</sup>

(2) 평가지표

지침용적맥파 파형특성에 대한 평가지표로는 여러 가지 지수들이 사용되어 왔지만, 최근에는

임상적 의의가 큰 반사지수(reflection index; RI)와 경화지수(stiffness index; SI)가 주로 사용되고 있다.<sup>8)</sup>(Table 2) 반사지수는 충격파 파고에 대한 중복파 파고의 비로 정의된다. 이는 충격파 파고에 대한 절흔의 높이를 나타내는 절흔지수<sup>5)</sup>와 유사한 개념으로서, Dawbert의 분류에서 class 1을 제외하면 절흔과 중복파의 구분이 분명하지 않기 때문에 반사지수와 절흔지수는 같은 값을 가진다. 반사파의 파고는 중첩되는 반사파의 총량에 의해 나타나기 때문에 비교적 작은 동맥의 근육 긴장도와 반사파가 형성되는 인체 하부의 큰 동맥계 분지점의 특성을 반영하는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup> 경화지수는 키를 충격파와 중복파 사이의 시간차로 나누어 준 값으로 정의된다. 대동맥과 같은 탄성동맥의 경화성 변화는 맥파전달속도를 증가시키고, 증가된 맥파전달속도에 의해 반사파가 보다 빨리 지침부위에 도달함으로써 충격파와 중복파 사이의 거리는 보다 가까워진다. 따라서 경화지수는 동맥의 경화성 변화를 측정하는 지표로서 활용된다.<sup>14)</sup>

4. 가속도맥파

가속도맥파(the second derivative of photoplethysmography)는 지침용적맥파를 시간축에

Table 2. Parameters for Contour Analysis of the Photoplethysmographic Waveform

Parameter	definition	formula
Reflection index	the ratio of amplitude of the early systolic peak to that of the early diastolic peak	$RI = \frac{A_d}{A_s}$
Stiffness index	height divided by time between the early systolic peak and the early diastolic peak	$SI = \frac{h}{PPT}$

Ad indicates amplitude of early diastolic peak; As, amplitude of early systolic peak; h, height of subject; PPT, time between the early systolic peak and the early diastolic peak

대해 2차 미분하여 얻어지는 파형( $d^2PPG/dt^2$ )으로서, 1972년 일본의 Ozawa에 의해 최초로 기록되었다.<sup>9)</sup> 1970년대 가속도맥파는 1차 미분과 분석을 위한 보조적인 목적으로 주로 사용되었으나 1978년 Ozawa<sup>30)</sup>가 가속도맥파가 연령증가에 따라 일정한 패턴으로 변화함을 관찰하고 심수축기의 여러 측정지표들과의 상관성을 연구하여 가속도맥파와 연령지수가 혈관노화의 지표로 이용할 수 있음을 보고하였다. 이후 Takazawa 등<sup>31)</sup>이 600명을 대상으로 한 가속도맥파 표준화 연구에서 연령에 따른 가속도맥파 측정지표들의 변화정도를 제시하고, 가속도맥파가 혈관의 경화도에 큰 영향을 받음을 보고하면서 관심을 모으게 되었다. 가속도맥파는 a, b, c, d, e라고 명명되어진 5개

의 특징점 파고에 대한 상대적인 비율을 평가지표로서 활용한다(Figure 3). 일반적으로 가장 많이 활용되고 있는 가속도맥파의 평가지표는 가속도맥파와 연령지수(SDPTG AI; Aging index of the second derivative of photoplethysmography)라고 불리는 a, b, c, d, e를 복합적으로 활용한 지수로서, 혈관노화정도를 평가하는데 활용된다.<sup>31,32)</sup> 가속도맥파와 평가지표들 중에서 특히 d/a비는 나이<sup>31-33)</sup>, 혈압<sup>34)</sup>, 대형 동맥의 경화정도<sup>35)</sup>와 높은 상관관계를 나타내고, b/a비는 노화, 경동맥의 순응도<sup>36)</sup>와 높은 상관관계를 나타내는 것으로 알려져 있다.

그러나 아직까지 Hashimoto 등<sup>35)</sup>은 294명의 고혈압 환자들을 대상으로 한 가속도맥파와 맥파

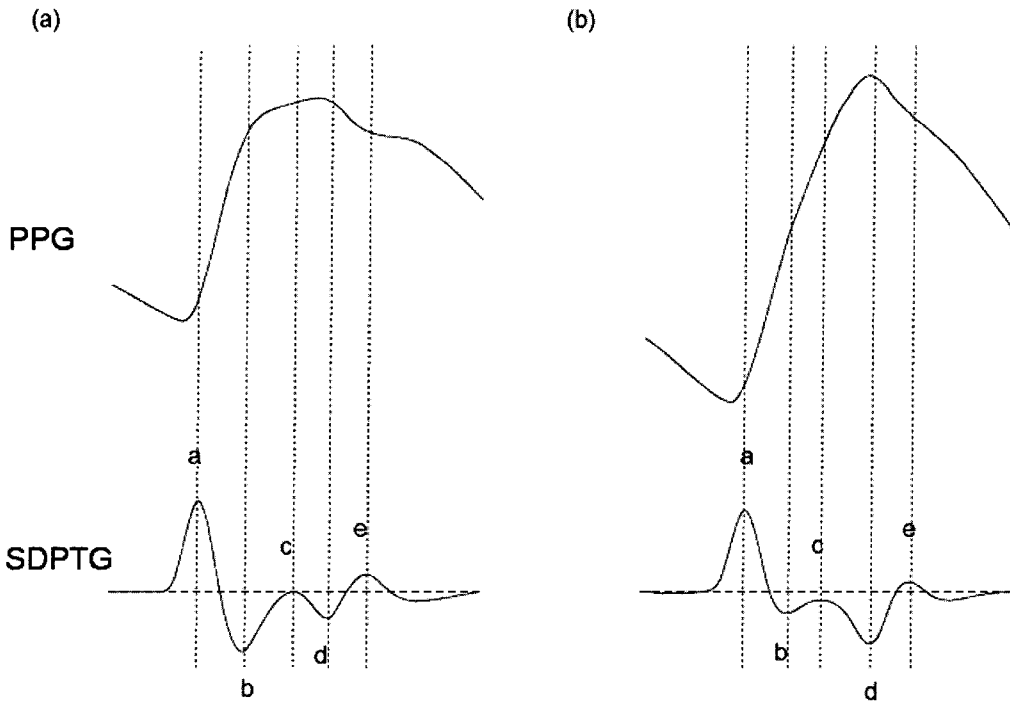


Figure 3. Representative recordings of finger photoplethysmogram(PPG) and the second derivative of photoplethysmogram(SDPTG). (a) shows a recording in a young male subject, (b) shows a recording in an old male subject.

전달속도와의 상관성 연구에서 낮은 상관관계를 관찰하고, 가속도맥파와 맥파전달속도는 다른 기전에 의해 조절되며 따라서 이들 지표가 제공하는 정보에 있어서도 차이가 있음을 주장하여, 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요함을 제시하였다.

## 5. 지침용적맥파의 주파수 영역의 분석

심혈관계 신호에 대한 주파수 분석은 1940년 Aperia<sup>37)</sup>에 의해 최초로 시도되었다. 이후 McDonald 등이 순환계의 맥동성 신호에 대한 연구에서 푸리에 분석이 유효한 기술이 될 수 있음을 밝힌 이래로 혈압과 혈류량에 대한 주파수 분석은 다양한 측면에서 이루어져 왔다.<sup>38)</sup>

맥파 연구에 있어서도 맥파의 특성을 이해하기 위한 새로운 시도로서 일정한 시간동안 측정된 맥파 신호를 푸리에 변환을 통해 다양한 주파수 성분을 분리해내는 연구들이 진행되어 왔다.<sup>39,40)</sup> 맥파신호를 고속 푸리에 변환(fast Fourier transformation; FFT)을 이용하여 주파수 분석을 하면 심박수에 해당하는 주파수에서 기준주파수가 나타나고, 기준주파수의 배수가 되는 주파수에서 고조파가 나타남을 관찰할 수 있는데, 상행 대동맥에서 측정된 압력맥파의 경우 주파수 power는 0.8~4Hz 사이에 약 96% 정도가 포함되어 있다.<sup>41)</sup> Patel 등<sup>42)</sup>은 맥파신호 중에서 0~20Hz 사이의 신호에서 유의미한 정보가 나오며, 이 주파수 대역의 주파수 강도와 위상에 대한 정보가 여러 가지 목적을 위해 활용될 수 있음을 제안하였다. Stergiopoulos 등<sup>43,44)</sup>은 압력맥파에 있어서 기준주파수를 포함한 첫 몇 개의 고조파에 수축기와 이완기 혈압에 대한 중요한 정보가 대부분 포함되어 있다고 보고하였다.

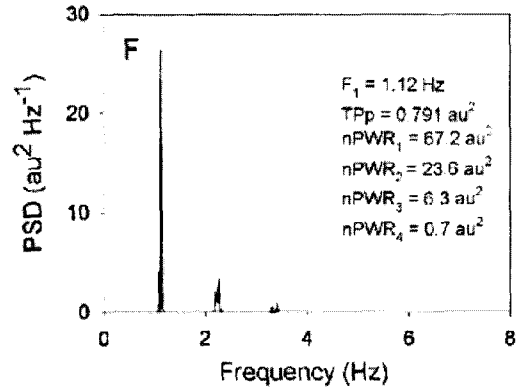


Figure 4. Plethysmographic waveforms and power spectra of pulse waveforms recorded from the left index finger of coronary artery bypass graft patients; au, arbitrary unit; PSD, power spectral density; Hz, Hertz; F1, frequency of the 1st harmonic; Tpp, total power of pulse; nPWR, normalized power of harmonics.

그러나 압력맥파에 비해 용적맥파의 경우 주파수 영역에 관한 연구는 부분적으로만 이루어졌다. 지침용적맥파의 경우에도 FFT를 이용하여 주파수 분석을 하면 기준주파수와 고조파를 관찰할 수 있다(Figure 4). Sherebrin 등<sup>45)</sup>은 지침용적맥파에 대한 FFT 분석에서 맥파의 파형에 대한 고조파 성분이 연령증가와 함께 감소하며, 특히 2번째와 3번째 주파수에서 고조파 성분의 감소가 두드러짐을 관찰하고 보고하였다. Leon Bennett 등<sup>46)</sup>은 엄지발가락에서 측정된 용적맥파에 대해 스펙트럼 분석을 실시하여 고조파 성분을 얻고, 2번째 고조파가 파형의 특성을 결정하는 주요한 인자이며, 2번째 고조파와 resting ankle pressure ratio가 강한 양의 상관관계를 나타낸다고 보고하였다. Chuang 등<sup>47)</sup>은 건강인과 허혈성 심장질환 환자의 지침용적맥파에 대한 고조파 비교 연구에서, 허혈성 심장질환이 심혈관계의 주파수별 에너지



분포를 고주파 성분은 감소시키고 저주파 성분을 증가시키는 방향으로 변화시킨다고 보고하였다. 그러나 노화나 심혈관계 질환들이 말초에서 측정된 맥파의 특정 주파수 성분을 어떤 과정을 통해 영향을 미치는지를 설명할 수 있는 충분한 참고자료가 없기 때문에, 맥파의 특정한 고조파 성분들이 맥파의 어떤 특성들과 관련이 있는지 우리는 아직 정확하게 이해하지 못하고 있다.

Chen 등<sup>48)</sup>은 건강인과 심근경색 환자들을 대상으로 한 지침용적맥파의 주파수 성분 연구에서 심근경색 환자들의 경우 3번째와 4번째 고조파 성분의 강도가 건강인에 비해 낮은 것을 관찰하고, 경피적 경혈관 관상동맥 확장술(percutaneous transluminal coronary angioplasty; PTCA)나 경피적 중혈관 승모판 성형술(percutaneous transluminal mitral valvuloplasty; PTMV)를 실시하기 전과 실시한 후의 3번째와 4번째 고조파의 강도에 변화가 없는 것으로 보아 심근경색 환자들에게서 관찰되는 3번째와 4번째 고조파의 강도의 변화가 심장특성에 기인한 것은 아닌 것 같다고 추정하였다.

이러한 노화나 허혈성 심장질환 환자들에게서 관찰되는 고조파의 특성을 설명하기 위해 Wang 등<sup>49)</sup>은 심혈관계의 공명현상(resonance)을 제시하였다. 신장이나 이와 유사한 구조를 가지는 어떠한 세동맥의 집합은 풍선과 같은 역할을 하기 때문에, 신장동맥이나 세동맥 집합을 들어가는 혈관의 길이가 짧아지면, 기준주파수의 강도는 증가하고 기준주파수 이상의 고조파는 감소한다는 것이다.

### Ⅲ. 고찰 및 결론

지침용적맥파는 광학기술을 기반으로 하여 미세순환계의 혈액용적 변화를 측정하는 것으로서,

측정된 지침용적맥파의 파형 분석을 통해 전신 순화계의 특성과 혈관의 노화, 동맥의 경화정도 등을 파악할 수 있다. 지침용적맥파는 압력맥파에 비해 측정방법이 간편하고 비침습적이며, 측정 시스템의 구성이 간단하고 저렴하여 향후 임상에서의 활용도도 증가할 것으로 예상된다. 특히 최근에는 지침용적맥파 신호를 시간축에 대해 2차 미분하여 얻어지는 가속도맥파가 혈관노화의 지표로 이용할 수 있음이 알려지면서 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

그러나 현재까지의 연구는 대부분 시간영역에서 이루어지거나 파형분석에 치중되어 왔으며, 주파수영역에 대한 연구는 몇몇 선진적인 연구자들에 의해서만 이루어져 왔다. 이는 압력맥파 연구에 있어서는 연구초기 단계부터 시간영역과 주파수영역에서의 연구가 동시에 이루어졌던 것과 비교해 볼 때 이래적인 현상이라 할 수 있겠다.

지침용적맥파에 대한 FFT 분석에서 맥파의 파형에 대한 고조파 성분이 연령증가와 함께 감소한다는 Sherebrin<sup>45)</sup>의 연구 결과나 심근경색 환자들에게서 3번째와 4번째 고조파 성분의 강도가 건강인에 비해 낮다는 Chen<sup>48)</sup>의 연구결과들을 고려했을 때, 이에 대한 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 보여진다. 이러한 현상을 설명하기 위해 최근에 제안된 공명이론은 널리 받아들여지지 못하고 있다. 지침용적맥파에서 노화에 따른 파형변화를 유발하는 가장 큰 요인이 되는 반사파에 대한 영향을 공명이론은 배제하고 있으며, 실제로 공명이론의 객관적 근거로 제시하고 있는 모델실험<sup>49)</sup>, 동물실험<sup>50,51)</sup>에서는 반사파에 대한 영향을 고려하지 않은 결과이다. 공명이론이 노화에 따른 맥파 주파수성분의 변화를 설명하는 이론으로서 받아들여지기 위해서는 반사파와 고조파와의 관계가 먼저 규명되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 이봉교, 박영배, 김태희. 한방진단학. 서울, 성보사, 1992, 320-321.
2. Hertzman AB. The blood supply of various skin areas as estimated by the photoelectric plethysmograph. *Am J Physiol.* 1939; 124: 328-340.
3. Hertzman AB, Spealman CR. Observation of the finger volume pulse recorded photo-electrically. *Am J Physiol.* 1937; 119: 334-335.
4. Goetz RH. Plethysmography of the skin in the investigation of peripheral vascular diseases. *Br J Surg.* 1940; 27: 506-520.
5. Morikawa Y. Characteristic pulse wave caused by organic nitrates. *Nature.* 1967; 213(5078): 841-842.
6. Allen J, Murray A. Modelling the relationship between peripheral blood pressure and blood volume pulses using linear and neural network system identification techniques. *Physiol Meas.* 1999; 20(3): 287-301.
7. 이봉교, 김정제. 미분변환기에 의한 대동맥 맥파속도 측정방법에 관한 연구. 대한한의학회지. 1978; 47: 11-16.
8. Millasseau SC, Ritter JM, Takazawa K, Chowienczyk PJ. Contour analysis of the photoplethysmographic pulse measured at the finger. *J Hypertens.* 2006 24(8):1449-1456.
9. 三上正俊, 鍵谷昭文. 脈波の多彩な魅力. 東京, 近代文藝社, 1999, 44-48.
10. Allen J, Murray A. Age-related changes in the characteristics of the photoplethysmographic pulse shape at various body sites. *Physiol Meas.* 2003; 24(2): 297-307.
11. Allen J, Murray A. Age-related changes in peripheral pulse timing characteristics at the ears, fingers and toes. *J Hum Hypertens.* 2002; 16(10): 711-717.
12. Chowienczyk PJ, Kelly RP, MacCallum H, Millasseau SC, Andersson TL, Gosling RG, Ritter JM, Anggard EE. Photoplethysmographic assessment of pulse wave reflection: blunted response to endothelium-dependent beta2-adrenergic vasodilation in type II diabetes mellitus. *J Am Coll Cardiol.* 1999; 34(7): 2007-2014.
13. Johansson A, Oberg PA. Estimation of respiratory volumes from the photoplethysmographic signal. Part 2: A model study. *Med Biol Eng Comput.* 1999; 37(1): 48-53.
14. Millasseau SC, Kelly RP, Ritter JM, Chowienczyk PJ. Determination of age-related increases in large artery stiffness by digital pulse contour analysis. *Clin Sci (Lond).* 2002; 103(4): 371-377.
15. Latham RD, Westerhof N, Sipkema P, Rubal BJ, Reuderink P, Murgu JP. Regional wave travel and reflections along the human aorta: a study with six simultaneous micro-manometric pressures. *Circulation.* 1985; 72(6): 1257-1269.
16. Woodman RJ, Watts GF. Measurement and application of arterial stiffness in clinical research: focus on new methodologies and diabetes mellitus. *Med Sci Monit.* 2003; 9(5): RA81-89.
17. Dillon JB, Hertzman AB. The form of the volume pulse in the finger pad in health,

- arteriosclerosis, and hypertension. *Am Heart J.* 1941; 21: 172-190.
18. Shimokata H, Shibata K, Kuzuya F. The digital plethysmogram as an index of ageing grade. *Age Ageing.* 1986; 15(6): 369-373.
  19. Morikawa Y, Matsuzaka J, Kuratsune M, Tsukamoto S, Makisumi S. Plethysmographic study of effects of alcohol. *Nature.* 1968; 220(5163): 186-187.
  20. Bass A, Walden R, Hirshberg A, Schneiderman J. Pharmacokinetic activity of nitrites evaluated by digital pulse volume recording. *J Cardiovasc Surg (Torino).* 1989; 30(3): 395-397.
  21. Stengele E, Winkler F, Trenk D, Jahnchen E, Petersen J, Roskamm H. Digital pulse plethysmography as a non-invasive method for predicting drug-induced changes in left ventricular preload. *Eur J Clin Pharmacol.* 1996; 50(4): 279-282.
  22. Klemsdal TO, Andersson TL, Matz J, Ferns GA, Gjesdal K, Anggard EE. Vitamin E restores endothelium dependent vasodilatation in cholesterol fed rabbits: in vivo measurements by photoplethysmography. *Cardiovasc Res.* 1994; 28(9): 1397-1402.
  23. Dawber TR, Thomas HE Jr, McNamara PM. Characteristics of the dicrotic notch of the arterial pulse wave in coronary heart disease. *Angiology.* 1973; 24(4): 244-255.
  24. Nichols WW, O'Rourke MF. McDonald's blood flow in arteries. Theoretical, experimental and clinical principles. London: Edward Arnold; 1999.
  25. Kelly R, Hayward C, Avolio A, O'Rourke M. Noninvasive determination of age-related changes in the human arterial pulse. *Circulation.* 1989; 80(6): 1652-1659.
  26. Kannel WB, Dawber TR, McGee DL. Perspectives on systolic hypertension. The Framingham study. *Circulation.* 1980; 61(6): 1179-1182.
  27. Nichols W, O'Rourke M, Avolio A, Yaginuma T, Murgo J, Pepine CJ, Conti CR: Effects of age on ventricular-vascular coupling. *Am J Cardiol.* 1985; 55: 1179-1184
  28. Yin FCP: Aging and vascular impedance, in Yin FCP (ed): *Ventricular/Vascular Coupling.* New York, Springer-Verlag, 1988, 115-137.
  29. Murgo JP, Westerhof N, Giolma JP, Altobelli SA: Aortic input impedance in normal man: Relationship to pressure waveforms. *Circulation.* 1980; 62: 105-116.
  30. Ozawa T. Relationship between accelerated plethysmogram and systolic time intervals. *Sphygmology.* 1978; 8: 22-231. (in Japanese)
  31. Takazawa K, Tanaka N, Fujita M, Matsuoka O, Saiki T, Aikawa M, Tamura S, Ibukiyama C. Assessment of vasoactive agents and vascular aging by the second derivative of photoplethysmogram waveform. *Hypertension.* 1998; 32(2): 365-370.
  32. 남동현, 박영재, 박영배. 30대 성인남녀의 성별에 따른 가속도맥파 차이에 관한 연구. *대한한의학회지.* 2002; 23(3): 1-10.
  33. Takada H, Washino K, Harrell JS, Iwata H. Acceleration plethysmography to evaluate aging effect in cardiovascular system. *Med Progress Technol.* 1997; 21: 205-210.
  34. Bortolotto LA, Blacher J, Kondo T, Takazawa

- K, Safar ME. Assessment of vascular aging and atherosclerosis in hypertensive subjects: second derivative of photoplethysmogram versus pulse wave velocity. *Am J Hypertens.* 2000; 13: 165-171.
35. Hashimoto J, Chonan K, Aoki Y, Nishimura T, Ohkubo T, Hozawa A, Suzuki M, Matsubara M, Michimata M, Araki T, Imai Y. Pulse wave velocity and the second derivative of the finger photoplethysmogram in treated hypertensive patients: their relationship and associating factors. *J Hypertens.* 2002; 20(12): 2415-2422.
  36. Imanaga I, Hara H, Koyanagi S, Tanaka K. Correlation between wave components of the second derivative of plethysmogram and arterial distensibility. *Jpn Heart J.* 1998; 39: 775-784.
  37. Aperia A: Hemodynamic studies. *Scan Arch Physiol.* 83 (suppl 1):1. 1940.
  38. Attinger EO, Anne A, McDonald DA. Use of Fourier series for the analysis of biological systems. *Biophys J.* 1966; 6(3): 291-304.
  39. McDonald DA. The relation of pulsatile pressure to flow in arteries. *J Physiol.* 1955; 127(3): 533-552.
  40. Attinger EO, Anne A, McDonald DA. Use of Fourier series for the analysis of biological systems. *Biophys J.* 1966; 6(3): 291-304.
  41. Nichols WW, O'Rourke MF. McDonald's Blood Flow in Arteries: Theoretical, Experimental and Clinical Principles. London, United Kingdom: Edward Arnold, 1998.
  42. Patel DJ, Mason DT, Ross J Jr, Braunwald E. Harmonic analysis of pressure pulses obtained from the heart and great vessels of man. *Am Heart J.* 1965; 69: 785-794.
  43. Stergiopoulos N, Meister J-J, Westerhof N. Determinants of stroke volume and systolic and diastolic aortic pressure. *Am J Physiol.* 1996; 270: H2050-2059.
  44. Stergiopoulos N, Meister J-J, Westerhof N. Simple and accurate way for estimating total and segmental arterial compliance: the pulse pressure method. *Ann Biomed Eng.* 1994; 22: 392-397.
  45. Sherebrin MH, Sherebrin RZ. Frequency analysis of the peripheral pulse wave detected in the finger with a photoplethysmograph. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1990; 37(3): 313-317.
  46. Bennett L, Fischer AA. Spectrum analysis of large toe plethysmographic waveshape. *Arch Phys Med Rehabil.* 1985; 66(5): 280-285.
  47. Chuang SS, Shih CC, Yang JL, Lee SY, Kuo CD. Power spectral analysis of finger plethysmographic waveform in patients with coronary artery disease and after coronary artery bypass graft surgery. *Circ J.* 2006; 70(10): 1337-1343.
  48. Chen CY, Wang WK, Kao T, Yu BC, Chiang BC. Spectral analysis of radial pulse in patients with acute, uncomplicated myocardial infarction. *Jpn Heart J.* 1993; 34(2): 131-143.
  49. Wang YY, Chang SL, Wu YE, Hsu TL, Wang WK. Resonance. The missing phenomenon in hemodynamics. *Circ Res.* 1991; 69(1): 246-249.
  50. Young ST, Wang WK, Chang LS, Kuo TS. Specific frequency properties of renal and

superior mesenteric arterial beds in rats.  
*Cardiovasc Res.* 1989; 23(6): 465-467.

51. Young ST, Wang WK, Chang LS, Kuo TS.  
The filter properties of the arterial beds of  
organs in rats. *Acta Physiol Scand.* 1992;  
145(4): 401-406.