

# 동맥 맥파속도 진단의 생리학적 중요성과 과제

동맥에서의 맥파전달 속도는 동맥 혈류와 혈관벽의 상호작용에서 유발되며, 동맥경화, 당뇨합병증 등의 진단 등에 널리 사용되고 있다. 증가된 맥파전달속도는 혈관 노화 및 여러 병리학적 상황과 연관된 것으로 보고되고 있다. 따라서 이 글에서는 이러한 동맥 맥파전달속도의 생체유체역학적 발생 기전 및 의학적 중요성에 대하여 논의하며, PWV진단의 문제점 및 향후 발전방향에 대해서도 기술한다.

심은보 강원대학교 기계·의용공학과, 교수

e-mail : ebshim@kangwon.ac.kr

손목의 맥을 측정하여 병을 진단하는 것은 동서양을 막론하고 오래부터 존재한 전통이었던 것으로 추측된다(그림 1). 잘 알려져 있듯이 동양의학에서는 진맥을 하여 환자의 상태를 진단한다. 의사가 환자 손목의 맥을 살피고 이로부터 내부 장기의 상태를 진단하는 것이다. 이러한 진단의 과학적인 근거는 아직도 완전히 밝혀지지 않고 있지만, 유용성은 널리 알려진 상태이다.

이러한 맥진의 전통은 동양의학에서는 지속된 반면에, 서양에서는 분자생물학과 세균의학의 발달과 함께 자취를 감추게 된다. 그러나 최근 들어 이러한 맥진과 유사한 진단 방법이 서양의학에서도 확립되기 시작했다. 그것이 바로 동맥 맥파 전파속도 측정법이다. 이것은 동맥경화와 당뇨병, 말기신장질환의 예지인자로 알려지면서, 많은 관심을 끌고 있다. 이 글에서

는 이러한 맥파 전파속도의 생체 유체역학적 원리, 의미 그리고 그 중요성과 과제 등 대하여 논의할 것이다.

## 동맥 맥파 생성에 대한 생체 유체역학적 기전

인체에서 동맥의 역할은 심장에서 나온 혈액을 말초혈관으로 전달해 준다. 이때 심장에서 나온 혈류는 최소압력(이완 시)이 약 5~10mmHg, 최대압력(수축 시)이 약 120mmHg에 이르는 매우 큰 펄스를 가진 파동이다. 심장 수축 시에는 큰 혈류 운동에너지로 인하여 탄성적인 대동맥 벽이 확장된다. 그리고 이 확장된 대동맥 벽이 심장 이완기에 복원되면서 마치 제2의 펌프처럼 작용해 혈액을 말초 동맥 쪽으로 밀어내는 셈이다(그림 2). 이 과정에서 대동맥 벽의 확장/이완 운동은

파동의 형태로 동맥들의 벽으로 전달되는데, 그 전파속도가 바로 PWV(Pulse Wave Velocity; 동맥 맥파전달속도)이다. 이것은 혈류 자체보다는 훨씬 빠른 속도로 전파된다. 심장에서 대동맥, 그리고 동맥에 이르는 압력파의 전달 및 이에 따른 맥파 형성에는 여러 가지 심혈관 관련 정보가 내포되어 있다. 이때 맥파에서 심장 혈류로부터 나온 진행파(forward wave)는 하류의 분지혈

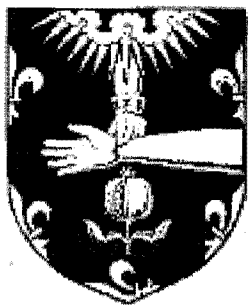


그림 1 동서양에서 맥진의 중요성을 보여주는 그림들 (좌측: crest of the Royal College of Physicians of London, 우측: 맥진을 하고 있는 한의사-TV사극)

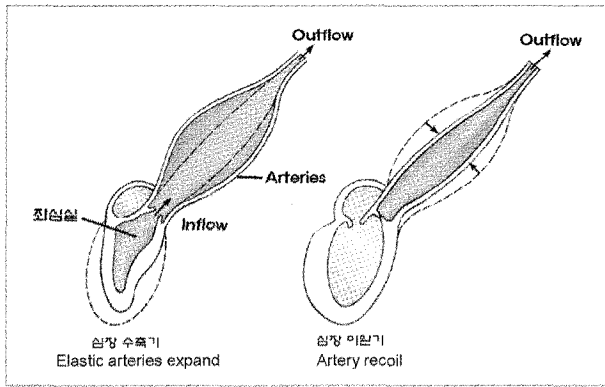


그림 2 동맥분포 및 심장과 동맥벽의 움직임

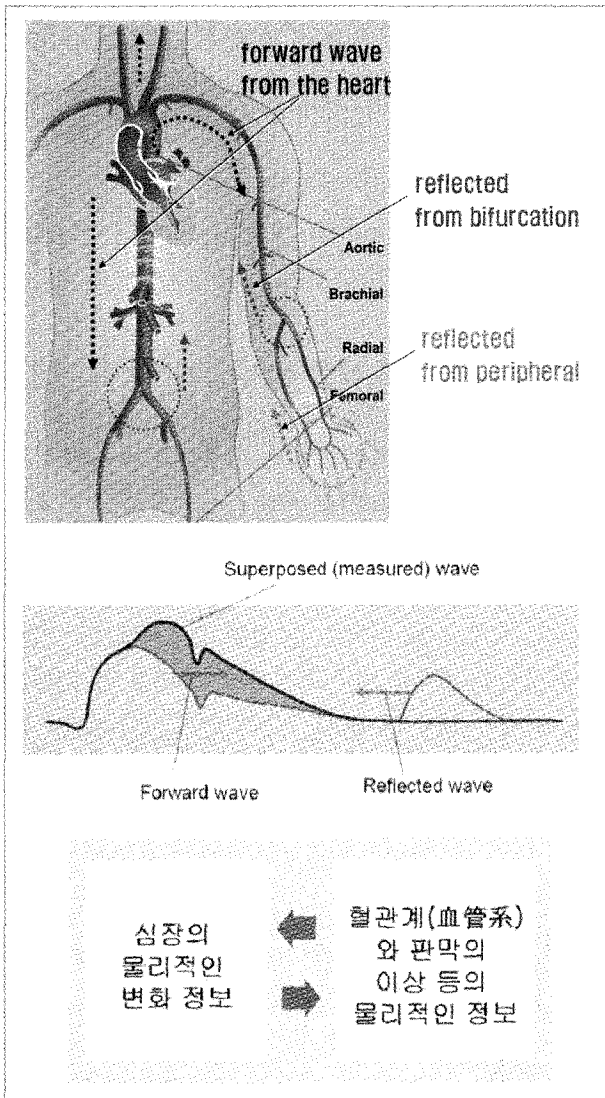


그림 3 대동맥에서의 진행파(forward wave)와 분지혈관/말초혈관에서 반사파에 의한 간섭현상

관 또는 말초동맥에서 반사된 파동(reflected wave)과 간섭되어 매우 복잡한 형태를 보인다.(그림 3)

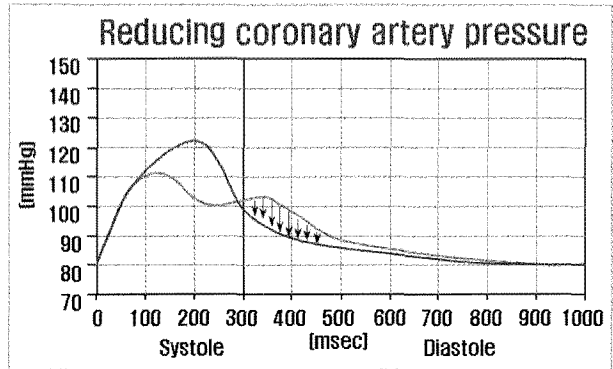
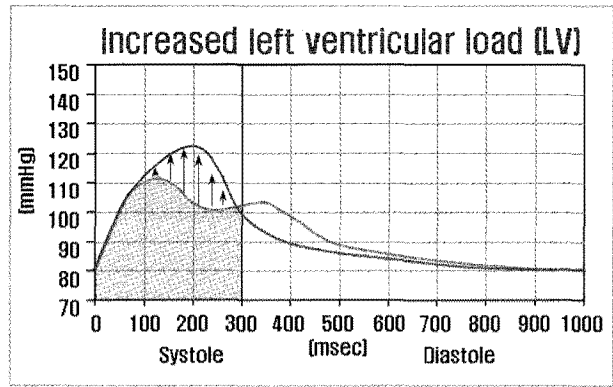


그림 4 PWV의 증가에 따른 심혈관계 영향(x축 : 시간, y축 : 혈압, 빨간 선: 정상인의 파형, 푸른 선: 동맥경화가 있는 경우의 파형, 좌측: 수축기 시 심실의 후부하에 미치는 영향, 우측: 이완기 시 관상동맥 혈류에 미치는 영향)

PWV는 동맥의 팽창성과 경화(硬化) 정도와 밀접한 상관관계를 가지며 노화에 따라 증가하는 속성을 지닌다. 동맥경화가 진행될수록 PWV는 빨라지는 반면에 젊고 건강한 사람의 경우, PWV가 상대적으로 느리다.

PWV가 커지면 심혈관계에는 매우 좋지 않은 결과가 초래된다. 그림 4에서 보듯이 수축기 때의 최고 압력은 증가하고 그 때문에 심실의 출구 압력을 크게 한다. 즉 심실의 후부하(afterload)를 증가시켜 심장이 힘들게 일하도록 만드는 셈이다. 이와 함께 이완기 시의 혈압은 정상보다 떨어진다. 이것은 이완기 때 혈액을 공급받는 심장조직에서 산소가 부족해지는 허혈현상을 초래한다.

### PWV 측정의 의학적 중요성

동맥경화는 주로 동맥의 벽이 두꺼워지거나, 콜레스테롤을 포함하는 플라그가 동맥벽에 침착됨으로써

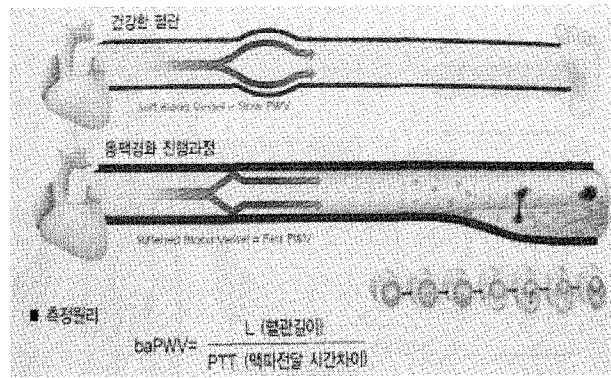


그림 5 동맥경화의 위험 요인 및 동맥경화 시 PWV

발생하며(Atherosclerosis), 생활의 서구화와 더불어 우리나라에서도 환자수가 급격히 증대되고 있다. 이에 대한 주요 원인들로는 고혈압, 당뇨병, 흡연, 고지혈증 등을 들 수가 있다(그림 5). 동맥경화는 돌연사와 뇌졸중의 주된 원인 질환으로 알려져 있어, 조기진단의 필요성이 절실하다.

지금까지 동맥의 경화정도를 측정하기 위한 방법에는 다음 표 1에 나타난 여러 방법들이 있는데, 가장 대표적인 방법이 바로 PWV 측정이다. 이것은 동맥의 두 지점에서의 파동을 비교하여 맥파 속도를 결정하는 방법으로서 동맥의 나이와 경화정도를 판별하는 중요한 수단을 제공한다.

PWV는 의학적으로 매우 중요한데, 구체적인 임상 연구 결과는 다음과 같다.

- 증가된 PWV는 아테롬성 동맥경화와 관상동맥의 위험을 암시함.

- 대동맥 PWV는 당뇨 합병증의 심각성과 밀접한 관계가 있음.
- 대동맥 PWV는 고혈압 환자들의 심혈관질환 위험성과 밀접한 관계가 있음.
- 대동맥 PWV는 심장혈관질환과 말기신장질환 환자의 사망률을 알려주는 유효한 예지인자임.
- PWV는 저비용으로 환자들에게 부담이 없으며 보다 빠르고 예방적인 치료법을 제공할 수 있음.

제2형 당뇨병 환자의 경우, 정상인에 비해 PWV가 상대적으로 높아져 있다. 특히 당뇨병의 발현 이전에 전조현상으로서 PWV 증가가 동반된다. 따라서 PWV는 당뇨병의 조기진단 지표로서 인정받고 있는 실정이다.

표 1 동맥경화의 측정방법들(from Cardiovascular Physiology, Berne et al., 2006)

Term	Definition	Formula(units)	Method of measurement	comments
Arterial compliance	Arterial segment volume/diameter increase( $\Delta V/\Delta D$ ) with increase in pressure( $\Delta P$ )	$\Delta D/\Delta P(\text{ml/mmHg})$	Vessel wall echo-tracking ultrasonography	Each provides a measure of local arterial stiffness i.e. specific to the artery being examined. Young's elastic modulus controls for wall(intima-media) thickness. $\beta$ -index considered to be relatively independent of blood pressure
Distensibility	Expresses compliance relative to the initial volume or diameter(D)	$\Delta D/(\Delta P \times D)(\text{mmHg}^{-1})$		
Elastic modulus $E_p$	The reciprocal of distensibility	$\Delta P \times D/(\Delta D)(\text{mmHg})$		
Young's elastic modulus $E$	The Peterson elastic modulus per initial arterial wall thickness	$\Delta P \times D/(h \times \Delta D)(\text{mmHg/cm})$		
Pulse wave velocity (PWV)	The speed of the pressure wave travelling along an artery of length (l) over a time ( $\Delta t$ )	$PWV=l/\Delta t(\text{m/s})$	Pressure or blood volume waveform	

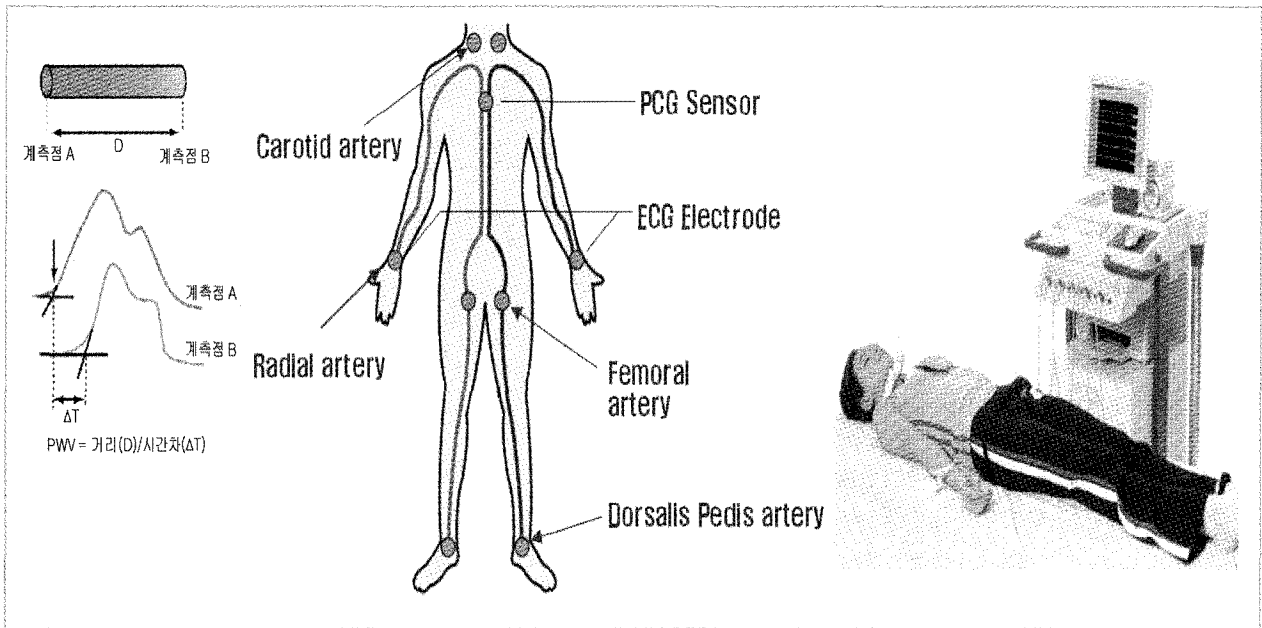


그림 6 PWV기기의 측정방법

### PWV기기의 측정원리 및 기기 개발현황

PWV기기는 각 주요 동맥들에서 혈압파형을 측정하고 이로부터 PWV를 계산한다(그림 6 참조). 이때 목의 경동맥(carotid artery), 손목의 요골동맥(radial artery) 등 센서 부착이 용이한 부위에 Photoplethysmography(PPG)를 설치하여 혈압 파형을 직접 측정한다. 맥파 파동의 시작점인 심장에서 맥파 파형은 ECG(심전도) 신호로서 추론된다. 이외에도 센서부착이 힘든 대동맥궁(aortic arch)에서는 다른 동맥에서 읽은 신호를 기반으로 추정된다. 이때 속도계산에 활용되는 동맥 사이의 길이는 표준적인 인체 데이터를 사용하여 결정된다.

현재 PWV기기는 미국, 일본 등의 선진국 회사들에 의해서 생산되고 있으며, 우리나라에서는 한별메디텍(주)이 관련기술 및 제품생산을 주도하고 있다(그림 7). 국내 제품은 외국 제품과 비교할 때, 가격 대비 성능은 우수하다. 그러나 기존 선진국들의 제품과 차별화될 수 있는 핵심기술이 부족한 실정이다. 따라서 국내 관련제품이 타국 제품과 차별성을 확보하고 업그레이드된 기기로서 발전하기 위해서는 기존 하드웨어 개선노력과 더불어 PWV의 소프트웨어 기술 및 실용화 DB 확보가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 특히

한국인의 PWV 관련 생리적 지표들은 서양인의 것과는 다르므로, 국내 환자들을 위한 자료들이 확보되어야 한다.

### PWV기기의 임상적용 상의 문제점과 과제

PWV는 동맥경화의 진단지표로서 가능성과 중요성을 가지고 있으며 실제 임상에서도 다양하게 활용되고 있다. 그러나 PWV가 의사들이 신뢰하는 필수적인 진단지표가 되기 위해서는 해결되어야 할 많은 문제들도 있는 실정이다. 현재까지 보고된 문제점으로는 다음과 같은 두 가지를 들 수 있다.

- 앞에서 언급된 것처럼 대동맥 PWV(심장에서 대동맥궁(aortic arch) 사이에서 측정한 PWV)는 여러 질병들의 징후를 보여주는 임상적으로 매우 중요한 지표이다. 그러나 심장 근처에 깊숙이 위치한 대동맥궁에는 센서를 부착할 수가 없기 때문에, 센서 부착이 가능한 손목(요골동맥)이나, 목(경동맥)에서의 동맥파를 측정하여 역으로 대동맥궁의 맥파를 추론하는 전달함수 방법(transfer function method)을 쓰고 있다. 그러나 이것은 여러 병리적 상황에서는 매우 부정확한 것으로 보고되고 있어 이에 대한 보완이 절실한 실정이다.

- PWV는 환자 개인별로 매우 편차가 심하기 때문에 이에 대한 표준적인 DB가 많이 필요하나, 이를 확립하기는 쉽지 않은 상태이다.

다른 의학연구와는 달리, PWV 연구에서는 동물실험 결과의 활용이 힘든데, 직립보행/수명/키 등 인간에 고유한 생리적 특성들이 PWV 형성에 결정적인 영향을 끼치기 때문이다. 따라서 개인차에 따른 PWV 값 보정을 위한 신뢰성 있는 임상 DB의 확보가 필수적이다. 특히 아래 요인들과 PWV간의 상관성에 대한 집중적인 연구가 요구된다.

- 심박동수(Heart rate, HR): 기존 임상연구에 따르면 PWV는 HR에 따라서 상당히 변하며, 이에 대한 임상적 고려가 필요한 것으로 평가된다. 그러나 현재로는 이에 대한 임상적 DB 또는 관련 자료가 부족하다.
- 키(Height): 개인별 키의 차이는 동맥의 길이 차이를 유발하게 되며 이것은 PWV의 변화를 가져온다. 일반적으로 키가 작을 경우, 상대적으로 PWV가 커지는 등 서로 역으로 변하는 특징을 가지고 있지만, 구체적인 상관성은 매우 추적하기 힘들다.
- 성별(Sex): 성별의 차이에 따라서 혈류저항이 상당히 달라진다. 폐경 이전 여성의 경우, 혈중 혈구의 비율을 나타내는 Hematocrit가 남성에 비해서 작

으며, 이는 혈류의 점성계수를 저하시켜 혈류저항을 작게 한다.

- 나이(Age): 나이에 따라서 PWV는 일반적으로 증가하는 특성을 가지고 있다. 그러나 나이의 증가에 따른 혈압 상승효과와 동맥벽이 경화됨으로써 생기는 효과가 혼재하여 독립된 인자로서 측정이 어렵다.
- PWV를 측정할 때 자세: supine, prone, lateral, sitting, upright 등 다양한 자세에 따른 PWV변화는 사람에 따라서 변화가 많다.

위에서 언급한 심혈관 변수들은 서로가 매우 복잡하게 얽혀있기 때문에 임상적으로 변수를 고립화시켜서 관찰하는 것이 매우 힘들며, 이는 임상적 DB 구축의 큰 난제가 되고 있는 실정이다. 즉 심박동수, 키, 성별, 나이 등 모든 변수들이 서로 연계되어 있고 이것들의 종합적 결과로서 특정인의 PWV가 나온다. 이로 인하여 하나의 변수 변화에 따른 PWV값을 독립적으로 관찰할 수 있는 임상실험 대상자들을 구하기는 거의 불가능하다. 따라서 특정 변수의 영향만을 산정할 수 있는 신뢰성 있는 데이터 확보가 쉽지 않은 실정이다. 향후 PWV가 동맥경화 또는 당뇨병의 진단인자로 널리 사용되기 위해서는 이와 같은 문제점들이 해결되어야 할 것이다.

## 기계용어해설

### 포화곡선(Saturation Curve)

열역학에서 증기의 압력체적선도, Ts 선도에서의 포화액선 및 포화증기선, 습공의 온도, 절대습도선도에서의 포화공기에 대한 곡선.

### 포화온도(Saturation Temperature)

액체를 가열하여 액체의 종류와 액체에 가해지는 압력에 따라 증기를 발생하고 끓음이 시작되는 온도.

### 스캐브(Scab)

강괴의 표피가 거칠거나 압연 때 표면에 불로 흠이 생기는 것이 원인이 되어, 강판 가장자리에 나타난 흠집 일부가 이지러진 채 딱지가 붙어있는 것.

### 스칼롭(Scallop)

용접이음이 한 곳에 집중되거나 근접하면 용접에 의한 잔류응력이 커지거나 용접금속이 여러 번 용접열을 받게 되어 열화하는 것을 막기 위하여 용접선이 교차하지 않도록 설계하는 부채꼴 노치.