

비침습적 혈관기능 평가

임재중 · 전북대학교 전자정보공학부, 교수

_e-mail : jjim@chonbuk.ac.kr

이 글에서는, 증상이 나타났을 때에는 이미 70% 이상 진행되어 치료가 어려우며, 사망원인 1위인 혈관질환을 간편한 방법으로 조기 검진할 수 있는 비침습적 혈관기능 평가 방법을 소개한다.

현 대 사회의 발전과 더불어 환경오염과 스트레스 등으로 인한 사망률이 크게 증가하고 있으며, 그 중에서도 높은 비율을 차지하고 있는 질환 중의 하나가 심혈관 질환으로, 특히 대동맥과 관련된 질환은 심혈관 질환에 의한 사망률 증가의 큰 요인으로 작용한다. 이러한 심혈관 위험 요소들은 잠재적 형태로 존재하고, 질환의 초기단계에서는 자각증상이 나타나지 않으며 질환의 발생에 따른 예후가 좋지 않기 때문에 심혈관 질환에 대한 조기진단은 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 동맥경화나 고혈압 등과 같은 대동맥에서의 병인

에 대한 기능적, 구조적 변화의 발생 및 진행에 관련된 기전은 완전히 설명되지 못하고 있다. 과거에는 대동맥의 기능은 혈액을 수동적으로 전도하는 통로의 역할을 수행할 뿐만 아니라 혈액 맥동의 완충 기능을 가진 매우 복잡하고 다양한 역할을 수행하는 기관으로 알려져 있다. 대동맥의 전도기능은 인체의 기관과 조직에 요구되는 혈액을 평균 관류 압력의 손실을 최소화하여 배달하는 것이고, 대동맥의 완충기능은 간헐적으로 수축된 심장에 의해 강요된 맥동의 흐름을 부드럽게 하여 혈액을 항상 안정된 흐름을 유지하여 인체의 기관과 조

직에 전달하는 것이다. 즉, 맥파 흐름의 수축기 동안에 탄성적으로 에너지를 흡수하여 주어진 심박출을 위해 요구되는 심장의 부하를 감소시키는 대동맥의 기계적인 특성들은 건강상태와 질환 상태에서의 순환생리를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 따라서 심혈관 질환에서 동맥 손상에 대한 병인학적 기전의 완전한 이해와 조기 검진을 위한 활용 가능성에 대한 연구는 심혈관 질환의 발생으로 인한 임상적 합병증 및 사망률을 줄이는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

동맥은 나이가 들수록 탄력섬유의 감소 등으로 인해 경직도가



증가하는데 고혈압, 관상동맥 질환, 동맥경화 등의 혈관질환은 혈관 경직도의 증가와 매우 밀접한 연관을 갖고 있다. 모든 혈관에서도 마찬가지이지만 그 중에서도 특히 대동맥의 탄력성은 심혈관의 상태를 반영하는 지표로서 중요한 의미를 갖고 있다. 이러한 동맥의 경직도를 간접적으로 평가하는 방법으로는 혈관의 탄력성이 감소하면 맥파의 전달 속도가 빨라지게 되는 원리를 토대로한 PWV(Pulse Wave Velocity, 맥파전달속도)가 있으며 이는 혈관의 탄력성을 반영하는 좋은 지표로 인정받고 있다. 또한, 심장 수축기의 진행파에 혈관 분지부(bifurcation)나 말초에서 반사되어 돌아오는 반사파가 합쳐져서 나타나는 파형을 분석하여 혈관의 탄력성을 나타내는 지표로 사용하는 PWA(Pulse Wave Analysis, 맥파파형분석)도 널리 사용되고 있다. 이들 방법들은 비침습적이고 간편할 뿐만 아니라 증상이 나타나기 이전에 예후를 판단할 수 있다는 장점으로 그 활용도가 점차 증가하고 있는 추세이다.

현재 이러한 간접적인 방법들을 적용하는 다양한 혈관 평가 기기들이 제품화되어 활용되고 있는데 PWV와 PWA의 적용을 위해서 꼭 고려되어야 할 사항들이 있다. 첫째, 맥파를 검출하는 센서의 선정으로부터 그 센서를 적용하여 원하는 위치에서 정확하

정확한 맥파의 검출을 위해서는 압력박동에 의해 나타나는 파형을 토노메트리 센서를 이용하여 검출해야 한다

고 재현성 있는 맥파를 검출하는데 주의를 기하여야 한다. 둘째, 검출된 맥파 파형을 전처리하는 과정에서 파형이 왜곡되지 않도록 적절한 필터와 변환 과정을 거쳐야 하며, 특히 PWA를 위하여 검출한 요골동맥 맥파로부터 대동맥 압력파형을 추정하기 위한 전달함수의 구현에 신중을 기하여야 한다. 마지막으로, 구해진 파형들로부터 의미 있는 변수들을 추출하는 신호처리 과정에서 파형의 정확한 지점을 찾기 위한 알고리즘의 수립이 매우 중요하다. 인체에서 발생하는 신호는 개 인차가 많고 건강 상태에 따라서 검출되는 파형의 형태가 다양하므로 혈관기능 평가 기기들에서 적용하는 센서 및 알고리즘들을 파악하여 임상에서 한 차원 높은 진단을 수행하는 데 활용할 수 있는 혈관질환의 평가를 위한 기기들이 갖추어야 할 중요한 부분들에 대해서 알아보기로 한다.

맥파 검출 센서

다양한 동맥 부위에서는 심장 수축 시 혈액이 박출하여 동맥을 따라 이동하면서 나타나는 혈류 박동(flow pulsation), 압력박동(pressure pulsation), 그리고 용적박동(diameter pulsation)

등의 현상이 검출될 수 있다. 그 중에서 혈류박동은 전자기 혈류량 측정계(electromagnetic flow meter)를 이용하거나 초음파 도플러를 이용하여 측정할 수 있는데 수축기에서 삼각형 모양을 갖고 이완기에서는 흐름이 없으며 말초로 갈수록 말초 동맥 전체 단면적의 증가와 동맥의 완충효과에 의해 악화된다. 맥파라 일컫는 압력박동은 말초로 갈수록 커지는데 이러한 압력 박동이 전달되는 속도는 혈류속도보다는 훨씬 빠르고, 나이가 들어 동맥이 더욱 경직되면 맥파의 속도는 더욱 빨라진다. 그리고 용적박동은 혈관이 압력의 변화에 의해 용적의 변화를 일으키기 때문에 발생하며 박동 형상은 압력박동과 거의 유사하게 나타난다.

간접적인 혈관질환 평가에 활용되는 PWV와 PWA를 적용하기 위해서 사용되는 파형은 압력박동인 맥파이며 이를 검출하기 위한 다양한 종류의 센서들이 활용되고 있다. 그 중 하나인 오실로메트릭(oscillometric) 방법은 커프(cuff)를 활용하므로 커프의 크기 및 가압방법에 의해 오차가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 커프가 적용되는 전체 부위에서의 맥파가 검출되므로 정확성이 떨어진다 할 수 있다. 그리고 혈류

흐름 양의 변화를 측정하는 방법은 압력박동이 아닌 용적박동을 검출하는 원리일 뿐만 아니라 심장에서 가장 먼 거리인 손가락에서 측정하므로 PWA의 적용에는 부적합한 것이다. 따라서 토노메트리(tonometry) 방법이 압력박동인 맥파를 검출하는 데 가장 적절한 센싱 방법이며 실제로도 가장 많이 활용되고 있는 추세이다. 그러나 센서가 맥파를 검출하고자 하는 정확한 동맥부위에 위치하지 않았을 경우에는 왜곡된 파형이 검출될 수도 있으므로 주의할 기하여야 하는데, PWV의 분석에 있어서는 파형의 시작점을 정확하게 검출하는 것이 중요하지만 PWA의 분석을 위해서는 전체적인 파형의 형태를 왜곡 없이 검출할 수 있어야 정확한 진단 정보를 제공할 수 있으므로 다중(multi-array) 토노메트리 센서를 활용하는 경우가 많다.

맥파의 전처리 및 전달 함수 수립

센서를 통해 검출되는 맥파는 적절한 아날로그 회로를 사용하여 필터링 및 증폭 등의 전처리 과정을 거쳐서 실제 인체에서 발생하는 미약한 압력박동인 맥파를 왜곡 없이 재현한 후 디지털 신호로 변환된다. PWV분석을 위해서는 맥파의 시작점을 검출하는 것으로 충분하지만 PWA 분

요골동맥에서 간편하게 검출한 맥파에 전달함수를 적용하여 대동맥 압력파형을 추정한다.

석을 위해서는 추가의 파형의 변환 과정을 필요로 한다. 맥파의 가장 기본적인 생리적 특징 중의 하나는 동맥 가지를 따라 심장에서 멀어질수록 진폭은 증가하고 맥파의 모양도 변한다는 것이다. 동맥의 경직도가 증가하게 되면 분지부에서의 반사파가 대동맥으로 일찍 되돌아와 수축기의 진행파 파형에 더 해져서 전체적으로 수축기 혈압이 상승하는 결과를 초래하며 이러한 혈압의 상승은 곧 좌심실에 대한 부하로 연결된다. PWA 분석이 바로 이러한 현상을 파악하는 방법이며 진행파와 반사파의 분석은 대동맥에서의 압력파에 대한 것이므로 이를 구하기 위해서는 요골동맥(radial artery)으로부터 비침습적으로 검출한 맥파에 전달함수(transfer function)를 적용하여 대동맥 맥파를 추정하는 과정이 필요하다.

시스템의 입력과 출력의 관계를 대수적으로 정의한 함수를 의미하는 전달함수를 구하는 데는 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용한 스펙트럼 분석 및 선형 다항식 모델을 이용하는 방법이 있다. 그리고 전달함수 구현의 흐름에 있어서도 크게 두 가지 방법이 있다. 그 하나는 생리적 진행 방향으로 전달함수를

구하기 위해 대동맥 압력파를 입력으로 놓고 요골동맥 맥파를 출력으로 설정하여 전달함수를 구한 후 이 전달함수를 역변환하여 요골동맥 맥파로부터 대동맥 압력파가 추정 가능한 전달함수로 이용하는 방법이다. 다른 한 방법으로는 요골동맥 맥파를 입력으로 놓고 대동맥 압력파를 출력으로 설정하여 직접적으로 전달함수를 구하는 방법이 있다. 첫째 방법은 역변환 하는 과정에서 전달함수의 안정성을 위해 비정상적인 극점의 존재와 추가적인 필터링 과정 등이 요구되는 단점이 있다. 그리고 두 번째 방법은 전달함수를 구현하기가 상대적으로 간단하며 성능이 전반적으로 우수하지만 비교적 높은 주파수에 의존적인 변수들에 대해서는 추정 능력이 다소 떨어지는 것으로 보고되고 있어 개선이 요구되고 있다.

맥파 변수 추출

일단 다양한 부위에서의 맥파가 검출되고 대동맥 압력파형도 추정되면 이들 파형으로부터 의미 있는 변수들을 추출하는 과정이 필요하다. 대동맥 판막이 열림과 동시에 혈액이 대동맥으로 유출되며 압력이 상승되는 시점을

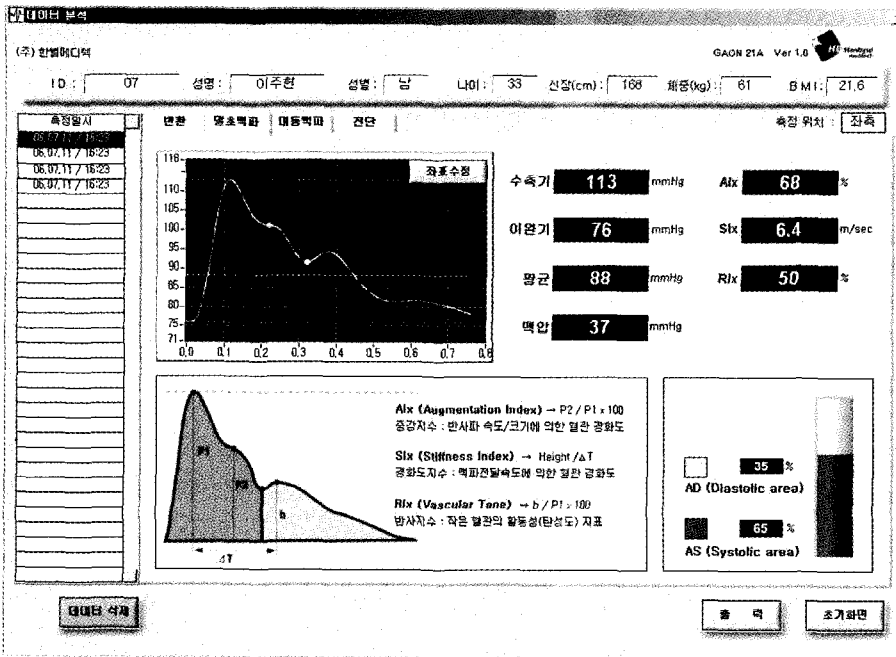


그림 1 요골동맥 맥파의 분석으로부터 제공되는 변수(말초동맥경화도, 맥파반사지수)

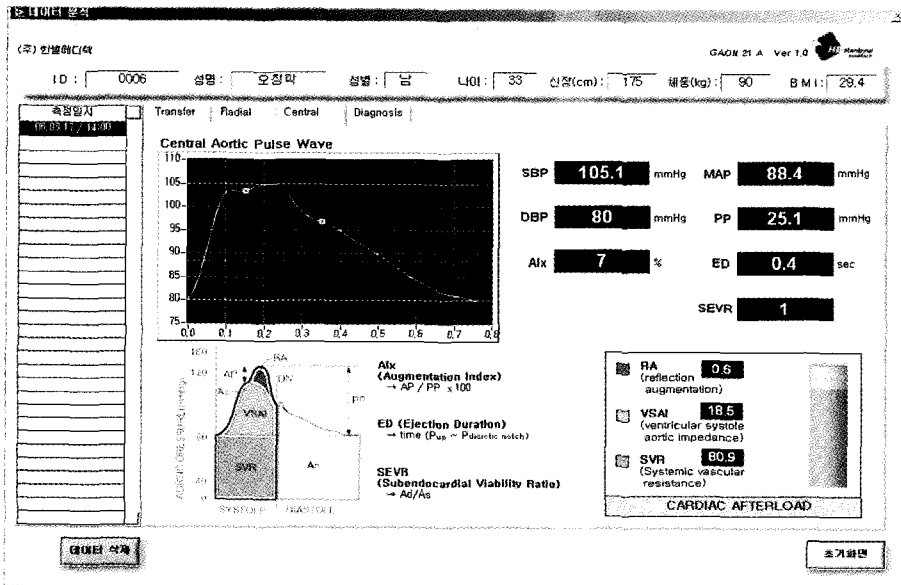


그림 2 요골동맥파를 이용하여 전달함수를 거쳐 생성된 대동맥 압력파형 분석을 통해 제공되는 변수(대동맥 최고/최저/평균혈압, 대동맥경화도, 구출시간, 심장후부하)

맥파의 시작점(upstroke)으로 정의하며 PWV 분석에 이용된다. 맥파의 시작점 검출에 이용되는

알고리즘으로는 2차 미분의 최고점 및 1차 미분의 최고점에서 발생한 접선과 최저점을 통과하는

수평선과의 교점을 이용하는 접선-교점방법(intersecting tangent method)이 널리 이용되고 있다. PWA의 적용에 있어서는 전달함수를 이용하여 추정된 대동맥 압력파형으로부터 다양한 특징점을 검출하는 것이 중요하며, 반사파에 의한 수축기 혈압의 증가분인 증강지수(Alx, augmentation index) 값을 계산하는 데 있어서 무엇보다 중요한 부분은 정확한 증강점(augmentation point)을 검출하는 것이다. 증강점은 반사파가 진행파에 더해지는 시점을 의미하며, 증강점 검출 방식은 평균 맥파 파형을 4차 미분한 맥파 신호에서 맥파의 시작점을 기준으로 일정 시간 이후에 음의 기울기를 가지면서 기준선과 만나는 영점교차 지점을 검출함으로써 증강점을 검출하는 방법을 이용한다. 여기에서 말하는 일정 시간

은 최저 55msec부터 161msec 까지 연구별로 다양하게 존재하는데, 이는 증강점이 사람별, 질

환별 등 여러 측정 조건에 따라 수축기 최고점 이전 혹은 수축기 최고점 이후에 나타날 수도 있으며, 그 크기도 다양하게 나타날 수 있기 때문이다. 그림 1과 2에 요골동맥 맥파와 대동맥 압력파 형에서 추출되어 임상적으로 적용할 수 있는 변수들이 설명되어 있다.

혈관 평가 기기의 미래

현재 활용이 가능한 비침습적이며 간접적으로 혈관 기능을 평가할 수 있는 대표적인 기기는 PWV 및 PWA 분석이 주를 이루고 있지만 보완되어야 할 부분들이 있는 것이 사실이다. 즉, 커프를 이용하는 상완 혈압을 별도로 측정해야 할 뿐만 아니라 기본적인 임상 지식을 가진 전문가들에 의해서 해석될 수 있다는 단점이 있다. 또한, 아직까지는 간접적인 방법의 혈관 기능 평가가 보편화되어 있지 않은 상황이므로 더욱 깊이 있고 다양한 임상 평가가 이루어져서 정확한 임상적 의의가 부여되어야 한다는 문제점을 안고 있는 것이 사실이다. 그럼에도 불구하고 이러한 방

법은 앞으로 혈관 평가를 통한 혈관질환의 일상적인 조기 진단이 가능하다는 무한한 가능성을 가지고 있다는 것도 부인할 수 없는 사실이다.

심혈관계의 기능을 평가하는 기본적인고도 관습적인 임상 징후 중의 하나인 동맥 혈압은 현재는 상완 혈압 값으로 판단하고 있다. 그러나 손목에서 커프를 사용하지 않고 상완 혈압 및 요골동맥 맥파를 검출할 수 있는 기기가 현실화 된다면 임상적으로 큰 의미를 지닌 대동맥 중심 혈압 값을 비침습적이며 연속적으로 제공할 수도 있을 것이다. 더구나 기존의 상완 혈압 값만으로는 나타나지 않을 수 있는 대동맥 탄성도의 정량적인 제공도 동시에 가능하다는 측면에서 임상적인 가치는 물론이고 기존의 혈압 측정 장치를 대체할 수 있는 산업적인 가치를 가지고 있다. 그 외에도 추정 혈관나이, 혈관 노화도, 심혈관계 관련 특정질환의 조기진단 및 향후 발병 가능성 추정 등에 대한 정량적인 값을 나타낼 수 있는 기기로 발전한다면 다양한 심혈관계 질환의 조기 진단에 적극적으로 활용될 수 있을

것이다.

생활 습관의 변화에 따른 대표적인 질환인 비만, 당뇨, 고혈압, 고지혈증 등은 동맥경화를 유발하는 혈관 질환과 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있다. 혈관 질환은 발병 초기에 자각 증상이 거의 나타나지 않을 뿐만 아니라 이러한 질환을 측정할 수 있는 장비들은 질환이 심각히 의심되는 환자들에게만 적용되기 때문에 대부분 방치하게 되고 결국에는 심각한 질환으로 발전되어 개인적으로나 사회적으로 막대한 손실을 초래하게 된다. 따라서 혈관 질환을 조기에 진단할 수 있으면서 동시에 측정이 용이하고 경제적으로 부담이 되지 않는 장비의 개발이 요구되는 실정이다. 현재 임상적으로 많은 관심을 불러일으키고 있는 PWV 및 PWA의 분석에 있어서 앞서 언급한 센서, 신호의 처리, 의미 있는 변수의 추출 등이 보다 정확하고 재현성 있게 개발된다면 임상에서 간편하게 비침습적으로 측정된 맥파 신호를 통하여 혈관 질환을 조기에 진단하는 데 활용될 수 있을 것이다.