

초음파를 이용한 미세 혈류 측정 기술

한국전기연구원 SOI-KOREA
배영민 박사

미세순환 이상 및 질환

혈액은 심장의 박동을 통해 대동맥으로 주입되며, 세동맥을 거쳐서 모세혈관까지 점점 더 작은 혈관으로 흐른다. 모세혈관의 네트워크에서는 혈액에 포함되어 있는 적혈구 등을 통해 인체 조직에 산소 및 각종 영양분들을 공급한다. 또한, 기능을 다한 혈액은 다시 세정맥 및 정맥을 통해 심장으로 돌아간다. 미세순환은 세동맥과 세정맥 그리고, 모세혈관 네트워크에서의 혈액순환을 의미하며, 주로 피부 조직 아래에 존재한다. 미세순환의 적절한 기능 수행은 인체의 정상 상태 유지를 위해서 필수적이다. 바꿔서 얘기하면, 질환 등의 인체의 비정상적 상태로 인해 미세순환의 기능이 적절히 이루어지지 않을 수 있다. 한 예로서, 당뇨병 환자에게서는 미세순환을 구성하는 혈관들이 구부러지거나, 경화되는 등의 형태적인 변화가 발생한다. 또한, 암 환자에게서는 종양 부위의 미세순환에서 형태적인 변화가 발생한다. 이러한 형태적인 변화는 미세순환에 영향을 미치며, 혈류속도를 변화시킨다. 미세순환의 혈류속도는 미세순환의 기능 이상을 확인하는 중요한 파라미터이며, 이를 통해 각종 질환의 진단에 필요한 정보를 제공할 수 있다.

비침습적 미세순환 혈류속도 측정 방법

혈관 내 혈류속도를 인체 외부에서 비침습적으로 측정하기 위한 방법으로 도플러효과를 이용한 측정 방법이 널리

활용되고 있다. 도플러효과는 움직이는 물체에 파동을 입사시킬때, 산란된 파동의 주파수 이동은 물체의 속도에 비례한다는 물리적 현상이다. 실질적으로 혈류속도를 측정하기 위해서는 혈액에 포함되어 있는 적혈구의 이동속도를 검출한다.

미세순환에서 나타나는 낮은 혈류속도를 측정하기 위해서, 기존에는 레이저의 도플러 효과를 이용한 측정 방법이 개발되었다. 인체에 레이저를 입사시키고 산란된 레이저의 주파수 변화를 검출하여 혈류속도를 측정한다. 레이저 도플러 기술은 아주 미세한 혈류속도를 실시간에 측정할 수 있는 장점이 있으나, 인체 조직의 레이저 빛의 강한 흡수로 인해, 측정 범위가 인체의 피부 조직 아래 100 μ m 정도로 제한된다. 이러한 특성으로 인해, 그 응용이 모세혈관과 조직 간에 이루어지는 영양분의 이동 평가에만 활용되고 있다.

그 밖에 전자기적 측정 기술, 광학현미경 기술 등이 개발되었으나, 각 기술의 원리적 측면 및 시스템 구현에서 가지는 단점들로 인해서 실제 병원에서의 임상적 활용에는 한계를 가지고 있다.

초음파를 이용한 혈류속도 측정 기술

초음파는 가청 주파수 대역의 이상의 주파수 (20KHz \angle)를 가지는 음파로써, 초음파가 가지는 물리적 특성으로 인해서, 초음파 영상 기술, 초음파 도플러 기술 등의 의료

진단 기술로 각광받고 있다. 특히, 초음파 도플러 기술은 초음파의 도플러효과를 이용함으로써, 혈류속도를 비침습적이며, 실시간에 측정할 수 있다. 레이저 도플러 기술에 비해 초음파 도플러 기술의 장점으로는, 혈류속도가 사용자가 실제로 인식할 수 있는 속도 단위로 출력되며, 혈류속도와 함께 혈류속도의 음향도 제공한다는 점이다. 따라서, 임상 의사와 같은 사용자가 혈류속도의 변화를 소리로도 감지할 수 있으며, 이러한 정보는 실제 환자의 진단에 활용할 수 있다.

초음파 도플러 기술의 개발을 위해서는 초음파를 발생시키고 검출할 수 있는 초음파 변환기 및 이를 구동하기 위한 전기 회로 기술의 개발이 뒷받침되어야 한다. 구체적으로 초음파 변환기는 초음파를 발생시키기 위해서 일정한 주파수를 가지는 교류 전원에 의해서 안정적으로 구동되어야 한다. 현재 병원에 널리 보급되고 있는 초음파 도플러 시스템의 주파수는 1 ~ 10MHz 이다. 이들 주파수 대역의 초음파는 인체 조직의 40 ~ 80mm 깊이까지 침투할 수 있으며, 이러한 특성으로 인해, 주로 두개골 안쪽에 존재하는 뇌혈관의 혈류속도를 측정하거나, 심장 근처의 비교적 큰 동맥의 혈류속도를 측정하는데 활용되고 있다. 이들 혈관에서의 혈류속도는 초속 수십 cm 정도로서, 미세순환의 혈류 속도에 비해서 매우 높다. 따라서, 미세순환의 혈류속도를 측정하기 위해서는 기존의 도플러 시스템보다 낮은 혈류속도를 높은 분해능을 가지고 측정할 수 있는 시스템이 개발되어야 한다. 도플러효과의 원리적인 측면에서, 측정 가능한 혈류속도의 분해능은 초음파의 주파수를 증가시킴으로써 향상시킬 수 있다. 이에 따라, 한국전기연구원에는 미세순환의 혈류속도를 측정할 수 있는 고대역 초음파 도플러 시스템 기술을 개발하고 있다. 이를 위해서, 고대역 초음파를 발진하고 검출하기에 적합한 초음파 변환기와 이를 구동하기 위한 주파수의 교류 전원 기술을 개발하였다. 또한, 초음파 변환기를 통해 검출된 초음파 신호를 도플러그램으로 출력할 수 있는 도플러 신호 처리 기술을 개발하고 있다. 도플러그램에서는

시간의 변화에 따른 혈류속도의 변화를 시각적으로 인식할 수 있는 방법을 제공한다. 아래 그림들은 개발된 초음파 도플러 시스템을 이용하여 측정한 동맥과 미세순환의 도플러그램을 보여준다. 동맥 부분에서의 도플러그램에서는 심장의 수축 및 이완에 따른 혈류속도의 변이가 크고 명확하게 나타났다(그림 1). 또한, 동맥의 혈류음향은 심장의 박동과 유사한 소리 형태로 제공되었다. 미세순환의 도플러그램은 인체에 외부 자극을 가하면서 미세순환의 변화를 측정한 것으로(그림 2), 동맥 부분의 도플러그램에 비해, 심장 박동에 따른 혈류속도의 변동이 매우 작음을 확인할 수 있다. 이러한 미세순환의 특성은 혈류음향의 패턴을 통해서도 쉽게 확인된다. 또한 미세순환은 외부 자극에 의해서 신속하게 변화하였다. 손 부분의 국소적인 온도 변화를 외부 자극으로 가하였을 때, 혈관의 수축이 발생하였으며, 이로 인한 혈류속도의 감소를 그림에 나와 있는 바와 같이 시각적으로 확인할 수 있다.

이와 같이, 새롭게 개발된 고대역 초음파 도플러 시스템 기술을 이용하여 미세순환은 동맥 부분에서의 혈류형태

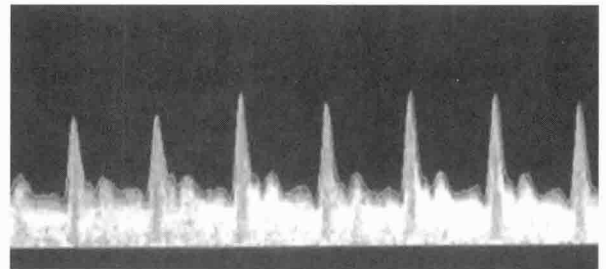


그림 1. 동맥의 도플러그램

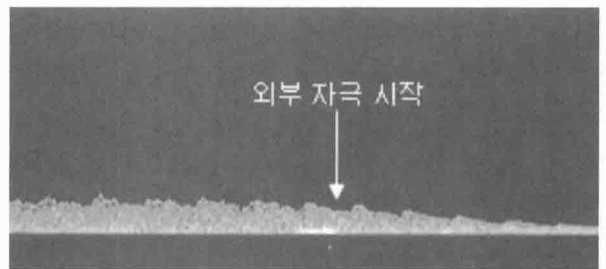


그림 2. 미세순환의 도플러그램 (외부 자극에 의한 변화)

와는 원연히 다른 형태를 가짐을 확인하였다. 또한, 외부 자극에 대한 미세순환의 실시간 반응 테스트를 수분 내에 진행할 수 있으며, 이를 통해 미세순환의 상태를 평가할 수 있다. 이러한 미세순환에 대한 새로운 정보는 각종 질환 및 건강 상태 등의 진단에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

고대역 초음파 도플러 시스템 기술의 임상 적용 예

개발된 고대역 도플러 시스템 기술은 미세순환의 기능에 영향을 주는 각종 질환들의 임상적 진단에 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 미세순환에 장애가 발생하면 이는 인체 일부에 제한적인 것이 아니기 때문에, 미세순환의 이상 유무 진단을 통해, 혈관계 질환의 단계 평가와 혈관 합병증 예방을 할 수 있을 것으로 사료된다.

한 예로서, 레이노병은 외부 온도에 대한 혈관의 이완 수축 기능의 이상이 원인인 질환으로 미세순환의 혈류속도에 영향을 미친다. 따라서, 온도 변화 자극에 의한 미세순환의 혈류속도 변화 양상을 파악함으로써 레이노병을 진단할 수 있다. 또 다른 예로서, 특발성안면마비는 안면 부분의 근육 이상이 원인이며, 한방 영역에서 주로 다루어지고 있다. 근육의 변형에 의해서 안면 부위에 혈액을 공급하는 혈관의 물리적인 변형이 발생하며, 이로 인해 혈류속도의 변화가 발생한다. 치료 경과를 확인하는 과정에서는 기존에는 열화상을 이용하기도 하지만, 고가 장비가 요구되며, 체온이 외부 영향을 많이 받는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 고대역 초음파 도플러 시스템 기술을 이용하여 안면 부위의 미세순환을 측정함으로써 손쉽게 진단할 수 있다. 치과 영역에서는 치아의 우식과 관련하여 치아 내 존재하는 치수의 생활력 평가가 중요한 진단 정보를 제공한다. 기존의 진단방법은 외부 전기자극에 대한 치아신경의 통증 반응을 통해 간접적으로 진단하고 있으나, 정확한 치수의 생활력 평가가 이루어지지지는 못하고

있다. 고대역 도플러 시스템 기술을 이용하여 치수 내에 있는 미세순환을 직접적으로 측정함으로써, 정확하게 치수 생활력을 평가할 수 있다. 치수 생활력의 정밀한 진단을 통해 치아의 보존 치료 가능성을 증가시킬 수 있으며, 환자의 입장에서는 경제적, 정신적 부담을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

고대역 초음파 도플러 시스템 기술의 임상 활용 방향

최근 사회 고령화가 급속히 진행됨에 따라, 노인 인구의 주요 사망 원인인 혈관계 질환의 진단 및 치료의 중요성이 대두되고 있다. 한 예로서, 고혈압은 70대 인구의 70%에서 유병률을 보이고 있다. 또한, 국민들의 식생활이 패스트푸드나 패밀리레스토랑 등의 외식 등으로 많이 전환되고 있으며, 이러한 서구화된 식생활 역시 혈관계 질환을 일으키는 주요 원인으로 대두되고 있다. 이로 인해, 뇌혈관 질환과 심장 질환 국민의 주요 사망 원인되고 있다. 한편 미세순환은 인체 순환기 계통의 말단에 존재하면서 인체 조직 등에 영양분을 공급하는 역할을 하며, 혈관계 질환의 발병 초기부터 민감하게 변화하는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라, 미세순환의 진단 및 정기적인 체크는 혈관계 질환의 조기 진단을 위한 지표로 활용될 수 있다.

한국전기연구원에서는 미세순환의 평가를 위한 의료 기술로서, 고대역 초음파 도플러 시스템 기술을 구현한 시제품을 완료하였으며, 임상연구를 통해 병원에서 활용될 수 있다. 이를 위해서, 임상 의사의 사용을 위한 프로토콜의 개발과 임상 적용 영역의 확대 및 정확한 진단을 위한 데이터베이스의 구축 등이 선행되어야 한다. 이를 위해서, 국내 병원들과의 협력을 통해, 지속적인 연구 개발을 진행할 계획이다.