

## 혈관질환과 혈류역학

이 계 한 · 명지대학교 기계공학부, 교수

\_e-mail : khanrhee@mju.ac.kr

이 글에서는 혈관에서 발생하는 혈관질환과 진단 및 치료 방법을 소개하고, 이와 관련된 혈류 유동의 연구 동향에 대해 소개하고자 한다.

### 혈관질환

혈관에서 발생하는 혈관계 질환은 동맥경화, 동맥류, 동정맥 기형 등이 있으며, 이러한 질병의 발생에 혈류의 유동이 영향을 미칠 수 있다. 동맥경화(atherosclerosis)는 동맥벽이 딱딱해지며 두꺼워져서 혈관 내부가 막히는 혈관계 질환이다. 동맥경화는 초기에는 혈액의 저밀도지질(LDL)이 혈관 벽에 축적되고, 혈관 벽이 두꺼워진다. 혈관 벽이 두꺼워지면서 혈관 내부가 막히게 되어, 조직 및 기관에 혈액의 공급이 부족하게 되어 조직이 손상을 입는 경색(ischemia)이 발

생한다. 또한 질병의 진행에 따라 혈관 벽에 축적된 죽상병변(atheroma)이 터지면서 혈관 속으로 유출되면서 응고된 피덩어리(혈전)가 형성된다. 혈전은 혈관의 내부를 막으면 혈액 공급이 차단되어 조직이 사망(괴사)하며, 특별히 심장 또는 뇌 조직에 혈관이 막히게 될 경우, 심근경색 또는 뇌경색이 발생하여 돌연사의 원인이 된다. 동맥경화의 원인으로서는 고혈압, 유전, 흡연 등의 다양한 원인이 있으나, 혈관 내부의 혈류의 유동도 동맥경화의 발생에 영향을 미친다고 알려져 있다. 동맥류(aneurysm)는 혈관의 일부가 악화되어 풍선처럼 부풀

어나는 혈관계 질환이다. 동맥류는 복부동맥, 신동맥 및 뇌동맥에서 주로 발생하며, 동맥류가 성장해서 파열이 발생하면 출혈성 뇌졸중으로 심각한 장애를 야기한다. 뇌동맥류의 발생과 파열에 미치는 혈류역학적 요인은 아직은 규명되지 않았으나, 혈류의 혈관벽 부딪힘 등이 뇌동맥류의 발생 기전으로 의심되고 있다. 뇌동맥류의 파열은 혈류에 의한 전단력이 직접적 원인이 되지 않으나, 혈류 유동에 의해 혈관 벽의 일부가 얇아지는 구조 변화가 발생하며, 얇아진 혈관 벽의 일부는 혈압에 의해 파열된다.

## 혈관질환의 진단

동맥경화는 혈관의 탄성도의 변화를 측정하거나, 혈관 벽 두께의 변화나 혈관 내부의 막힘(협착)을 영상화하여 진단하고, 동맥류는 혈관의 형상 변화를 영상화하여 진단한다. 혈관의 탄성도의 변화는 혈압파의 속도를 측정하는 방법이 이용된다. 심장의 박동에 의해 발생된 혈압파는 혈관을 통하여 하부 혈관으로 전달되며, 혈관의 탄성도는 압력파의 형태 변화 및 전달 속도(PWV : Pulse Wave Velocity)에 영향을 미친다. 일반적으로 혈관이 딱딱해지면 PWV가 증가한다. 따라서 여러 위치의 혈관에서 혈압을 측정하여 혈압파의 위상차를 이용하여 혈관의 탄성도를 측정하게 된다. 많이 사용되는 혈관 질환법은 의료영상을 이용하는 방법이다. CT 혈관조영술, 자기공명영상(MRI), 초음파 등을 이용하여 혈관 내부를 영상화하여, 혈관 벽의 협착이나 동맥류를 진단하고 있다. 혈관 벽의 단면은 혈관 내 초음파(IVUS : intravascular ultrasound)를 이용하여 측정이 가능하나, 측정 프로브를 혈관 내부에 삽입해야 하는 어려움이 있다. 최근에는 OCT(Optical Coherent Tomography)를 이용하여, 측정 프로브를 혈관 내부에 삽입하여 혈관 벽의 구조를 측정하는 시도가 수행되고 있다. 기존의 의료영상은 혈관의 해

부학적 구조의 진단이므로, 발생한 질환에 의한 혈관의 구조의 변화를 이용하여 진단한다. 최근에는 질환의 발생에 따른 세포 수준의 다양한 기능적 변화를 영상화하려는 시도가 이루어지고 있다. 분자영상(molecular imaging) 기술은 세포 및 조직의 생리병리학적 기능 변화를 분자 수준에서 영상화하는 기술이다. 분자영상기술은 2005년 MIT가 선정한 세계를 변화시킬 10대 기술로 선정된 바 있다. 질병의 발생에 따라 복잡한 세포 기능의 변화가 발생하는데, 이러한 기능의 변화를 다양한 영상 방법을 통하여 영상화함으로써 질병의 조기진단이 가능하다. PET를 이

용한 암진단이 기능영상의 대표적인 예이다. 암조직은 증식에 필요한 많은 영양분을 요구하므로 FDG(F-18 동위원소가 표지된 포도당)를 혈관에 주입하여, PET를 이용하여 FDG를 영상화함으로써 암조직을 진단하는 방법이다. 동맥경화의 경우, 발생 초기의 염증반응에 의해 혈관내피세포가 활성화되어 다양한 부착분자(adhesion molecule)들이 나타나는데, 이러한 분자에 특이하게 결합하는 항체나 펩타이드를 이용하여 부착분자의 발현을 영상화하므로 동맥경화의 조기 발견이 가능하며, 이에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다.

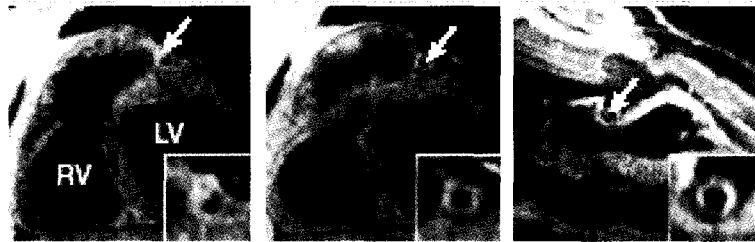


그림 1 MRI로 진단된 심장 관상동맥의 협착

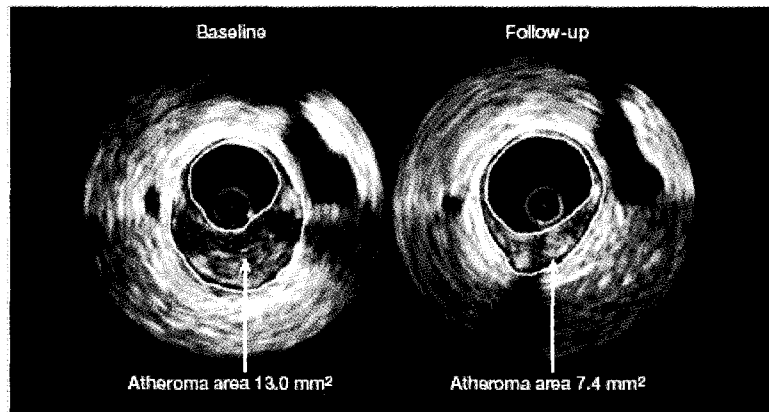


그림 2 혈관 내 초음파로 진단된 혈관 벽 단면 구조

## 혈관질환의 치료

동맥경화의 치료법으로는 좁아진 혈관을 인조혈관으로 치환하거나, 기구를 이용하여 혈관 내부를 넓히는 방법이 사용된다. 혈전으로 혈관이 막힌 경우에는 약물이나 기구를 이용하여 혈전을 제거하는 방법이 수행된다. 직경이 3mm 이상인 중대형 혈관의 경우, 수술로 협착된 혈관을 제거하고, 환자의 정맥이나 데크론(Dacron) 등으로 만든 인조혈관을 대체하는 시술이 수행된다. 소형 혈관의 경우 인조혈관을 오래 사용하기 어렵고, 수술로 인한 합병증의 우려가 있으므로 혈관을 통해 그물망(stent) 또는 풍선을 협착 부위에 삽입하고, 이를 이용하여 혈관 내부를 확장하는 중재적 시술(interventional therapy)이 사용된다. 이 방법은 심장에 혈액을 공급하는 관상동맥이 협착되었을 경우 많이 사용되며, 대퇴동맥이나 경동맥을 통해 가는 도관(catheter)을 삽입하고, 이 도관을 이용하여 협착 부위에 접힌 스텐트를 삽입한 후 풍선을 이용하여 스텐트를 확장하여 혈관을 넓혀주는 혈관성형술(balloon angioplasty)이다. 혈전에 의해 혈관이 막힐 경우, 기구를 사용하여 혈전을 제거하거나, 혈전용해제(PA : Plasminogen Activator)를 정맥 투약하거나 도관을 통해 혈전에 직접 주입하는 방법이 시술되고 있다.

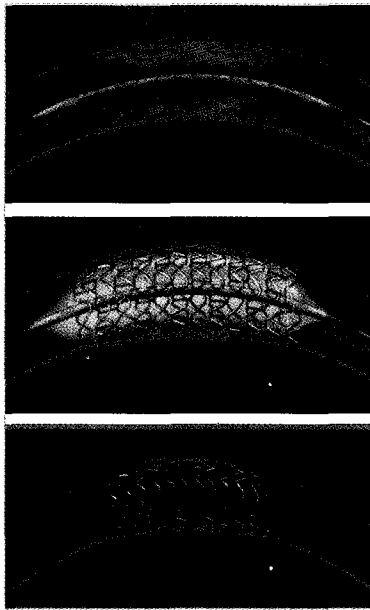


그림 3 스텐트와 풍선을 이용한 혈관성형술



그림 4 인조혈관을 이용한 복부동맥류 치료

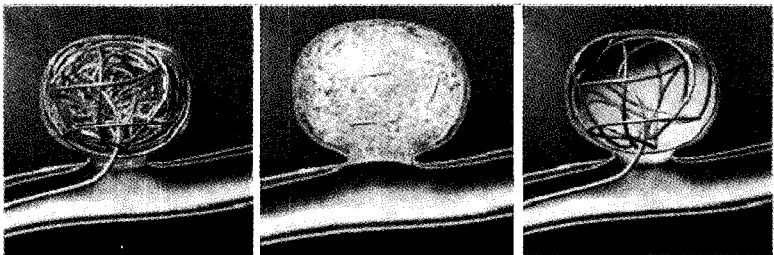


그림 5 코일을 이용한 뇌동맥류 치료

뇌혈관은 1~2mm 이하의 소형 혈관이므로, 혈전 용해술이 유일한 방법이며, 4시간 이내에 혈관이 개통되지 않으면 뇌조직의 괴사로 심각한 후유장애가 발생한다.

동맥류의 경우 풍선처럼 확장된 혈관이 터지면 심각한 출혈이 발생한다. 따라서 동맥류가 파열되기 전에 확장된 혈관을 제거하거나, 확장된 혈관 부분의 혈전형성을 유도하여 폐색시켜야 한다. 수술에 의해 확장부위를 제거하

고 인조혈관으로 대체하는 방법은 수술의 위험과 합병증이 문제가 되므로, 최근에는 도관을 이용한 중재적 시술이 사용되고 있다. 도관을 이용하여 접혀진 인조혈관이나 스텐트를 혈관 확장부에 위치시키고, 풍선을 이용하여 확장함으로써 혈류 통로가 넓어지고, 기존 확장부위는 혈류의 유입이 차단되므로 혈액이 응고되어 폐색된다. 뇌혈관에서 발생한 파리형의 동맥류는 도관을 통해 가는 백금코일을 채워 넣어 파리

모양으로 부푼 동맥류를 폐색하는 방법이 사용된다.

## 혈관질환과 혈류역학

혈류 유동이 영향을 미치는 혈관계 질환 중 동맥경화에 관한 연구가 가장 심도 깊게 진행되어 왔다. 동맥경화는 중대형 동맥에서 발생하는 혈관 질환으로 심근경색이나 뇌경색을 초래하는 중요한 심혈관계 질환이다. 동맥경화에 혈류 유동이 영향을 미친다고 의심받는 이유는 동맥경화의 발생 위치가 모든 혈관에서 나타나지 않고, 휘어지거나 분지된 혈관에서만 관찰되기 때문이다. 이러한 혈관 부위에서는 혈류 유동 양상이 복잡하므로 1960년과 1970년대에는 컴퓨터를 이용한 수치해석이나 혈관 모델 내부의 혈류 유동의 실험적 측정을 이용하여 동맥경화의 발생 부위와 이 지역의 혈류 유동 양상을 비교하여 동맥경화에 영향을 미치는 혈류역학 인자를 규명하는 연구가 수행되었다. 동맥경화에 영향을 미치는 혈류역학적 인자로는 혈관 벽의 전단응력, 전단변형률, 난류, 부차적 유동 등이 의심되고 있다. 혈류유동에 의한 전단변형률과 그에 따른 혈액과 혈관 벽 사이의 질량전달이 동맥경화의 발생에 중요한 영향을 미칠 수 있으며, 혈류에 의해 혈관 벽에 가해지는 응력은 혈관 내피 세포의 기능에 영향을 미친다. 전단응

력은 혈관내피세포의 구조 및 다양한 효소의 분비, 단백질의 발현 등에 영향을 미치므로, 동맥경화의 발생 및 진행에 영향을 준다. 일반적으로 전단력이 낮고 시간에 따른 전단력 방향의 변화가 심한 지역에서 동맥경화가 주로 발생한다. 난류의 발생에 따른 압력 변화는 내피세포의 기능에 영향을 미칠 수 있으며, 혈소판의 활성화로 인한 혈전 형성을 촉진하므로 동맥경화의 말기에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

혈류의 유동 양상과 동맥경화의 발생을 연관하여 동맥경화의 발생에 미치는 혈류 역학적 인자를 규명하는 연구는 1980년 중반 이후 혈류 유동이 구체적으로 어떠한 경로를 거쳐 동맥경화를 야기하는지에 대한 연구로 방향이 전환되었다. 혈류의 유동에 의한 응력은 혈관 벽 세포의 기능 및 각종 효소나 단백질의 혈관 벽으로의 전달현상에 영향을 주며 이에 따라 동맥경화의 발생 및 진행이 변한다. 따라서 혈류 유동은 동맥경화의 발생 및 진행에 영향을 미치는 혈관 벽 세포의 기능 및 각종 혈액 인자의 전달에 관여하는 환경적 요인으로 작용한다. 1980년대에는 콜레스테롤의 혈관 벽 축적이 동맥경화의 중요한 원인으로 의심되었다. 동맥경화의 초기에는 혈액 내의 저밀도 지질(LDL)이 혈관 내피세포를 투과하여 내막으로 전달되고 산화되어 내막에 지질이 축적

된다. 혈관 내막으로 침투한 백혈구는 산화된 LDL과 결합하여 거품세포(form cell)로 변화하며 혈관 벽에 축적되며 동맥경화가 진행된다. 이 과정에서 혈류의 유동과 그에 의한 응력은 LDL의 혈관 벽 투과에 영향을 주는 환경적 요인을 제공하여 동맥경화의 발생에 영향을 미치게 된다. 따라서 혈관의 LDL 이동 및 축적에 관한 연구가 수행되었으며, 이에 미치는 혈류역학적 영향이 연구되었다. 혈관 벽의 전단 응력이 큰 지역에서 내피세포는 혈류 유동 방향으로 길게 늘어난 모양을 띄나, 전단응력이 작은 지역에는 둥근 모양을 갖는다. 혈관내피세포가 둥근 모양을 띄는 지역은 동맥경화 발생하는 지역과 일치하며 염료(Evans blue dye)에 의해 푸른색으로 염색되는 지역이다. 이 지역은 내피세포의 당단백질층(glycocalyx)이 얇고, 단백질 및 지질의 투과성 및 침적이 크며, 백혈구가 붙기 쉽다. 따라서 낮은 전단 응력은 내피세포의 LDL 등의 투과 및 백혈구 정착을 촉진하여 동맥경화를 발생하기 쉬운 환경적 요인을 제공한다. 1990년대 이후에는 동맥경화가 염증성 질환이라는 이론이 보편화되면서, 염증 반응에 관계되는 백혈구의 이동 및 혈관 벽에서 분비되는 면역단백(cytokine)의 분비에 미치는 혈류 유동의 역할에 대한 연구가 진행 중이다.

혈관 질환의 진단 및 치료는

혈액 유동 환경에서 이루어지므로, 혈액의 유동은 혈관 질환의 발생 규명뿐 아니라, 진단 및 치료에도 응용될 수 있다. 최근 특정한 병변에만 결합하는 기능성 입자를 이용한 진단 및 표적 치료 방법이 개발되고 있으며, 혈관 내부의 입자의 유동 및 부착은 혈류 유동에 큰 영향을 받는다. 따라서 혈류유동에 의한 입자의

이동, 혈관 내 부착 및 투과 등은 혈관 질환의 진단 및 치료 방법의 개발에 다양한 응용이 가능하다. 혈전 용해제의 분사에 따른 혈전 용해 특성 해석, 스텐트 및 코일의 삽입에 따른 혈류 정체 특성, 인조혈관 수술 방법에 따른 혈류 유동 변화 등도 혈관 질환 치료 방법의 개발에 기여하리라 예상된다. 혈관 질환은 혈액이 유

동하는 혈관계 내에서 발생하므로, 혈액 유동은 질병의 발생을 규명하고, 진단 및 치료에 응용할 수 있는 큰 잠재력을 갖고 있다. 혈류 역학을 기존의 거시적 유체 역학 관점을 벗어나, 세포 및 분자 수준에서의 해석 및 다양한 생화학 및 병리적 관점에서의 관찰은 새로운 혈류역학의 응용분야를 열어주리라 예상된다.

## 기계용어해설

### 아랄다이트(Araldite)

아랄다이트. 두랄루민이나 헬리콥터 날개 등을 접착하는 데 쓰이는 것으로, 에폭시 수지로 만든 접착제.

### 배열치(Arrangement)

공장 등에서 사용목적과 사용효율을 높일 수 있도록 기계나 설비 등을 장치하거나 배열하는 것.

### 아크 방전(Arc Discharge)

탄소나 텅스텐의 두 전극을 기체 속에서 수평으로 마주보게 하여 저항을 거쳐 전원을 접속시킨 다음, 일단 전극을 접속시켰다가 떨어뜨릴 때 일어나는 방전.

### 균형통풍(Balanced Draft)

보일러에서 노 속의 압력이 대기압과 같아지도록 노 입구에 압입 송풍기, 굴뚝 아래쪽에 흡출 송풍기를 설치하는 것.

### 배플 보드(Baffle Board)

(1) 수직형 증발기 등에서 증기 분출구의 수분을 취해 증기를 달아나게 할 목적으로 설치한 장애판. (2) 펄턴 수차 등에서 노즐로부터의 분류를 가감하기 위하여 노즐 입구에 고정시킨 판. (3) 버너와 마주보는 위치에 설치하여 완전 연소를 돕는 총돌판

### 백 성형(Bag Molding)

일반적으로 형틀의 위를 대신에 고무와 같은 탄성체의 자루에 공기압, 액압을 가하여 형틀 속의 수지를 굳게 하는 성형법.

### 베이나이트(Bainite)

스프링재에 적합한 조직으로, 담금질 온도 500~300℃까지 급랭시킨 강(鋼)을 동일한 온도에서 항온도 변태시켰을 때 생기는 침상 트루스타이트.