

# 협착부가 있는 동맥내부에서의 맥동유동

손정락\* · 주상우\*\* · 서상호\*\*\* · 심은보\*\*\*\*

## 1. 서론

동맥경화로 인한 혈관 벽세포의 생리학적 변형은 혈관벽을 두껍게 만들고, 그로 인하여 혈관내부의 혈액이송 통로를 막는 협착부를 형성하게 된다. 이러한 협착부는 생리학적 요인과 혈류역학적 요인에 의하여 점점 두꺼워져서 결국에는 혈관 전체를 막게 되는 심각한 상황으로 발전하게 된다. 혈관이 협착 되는 원인은 우선적으로 혈액내의 지방질 등과 혈관 벽면을 구성하고 있는 세포들과의 생리학적 상호 관계에서 찾을 수 있다. 이와 함께 생체 해부학자들은 혈관의 협착이 관상동맥, 경동맥, 복부대동맥 등과 같이 혈관 분지 지점이나 곡면부위 등과 같이 특정 부위에서만 발생함을 발견하게 되었는데, 이러한 부위들은 유체역학적 관점에서 보면 유동이 불안정하거나 재순환되는 영역임을 알 수 있다. 따라서, 특정 혈관부위 형상이 동맥경화 발생의 필요 조건중의 하나일 것으로 판단되고 있다.

이러한 관점에서 보면 혈관내의 혈액의 흐름을 방해하는 협착부위도 혈류유동에 영향을 미치는 기하학적 요인이 될 수 있으며, 그에 따른 혈류유동의 특성이 협착부의 성장여부에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 동맥 혈관내부 협착부위가 맥동 상태의 혈류유동에 미치는 영향을 유한 요소법을 이용하여 해석적으로 고찰함으로써 협착부로 인한 혈관 내부 유동의 거동을 분석하고, 특히 혈관 협착부에 있어서 병리학적으로 중요한 변수인 벽면 전단 응력의 거동에 대해서 분석하고자 한다.

## 2. 해석 모델

동맥내부에서의 혈액은 심장에서 공급되는 압력에너지와 동맥 벽면의 탄성 수축에 의한 탄성에너지에 의해서 흐르게 된다. 그러나 본 연구에서는 심장에서 공급되는 압력에너지의 영향만을 고찰하기 위하여 탄성 에너지의 효과는 무시하기로 한다.

심장은 수축(systole)과 팽창(diastole)을 반복하면서 산소와 신진대사에 필요한 각종 영양소가 포함된 신선한 혈액을 동맥으로 분출하고, 정맥으로부터 인체 각 부위를 순환한 혈액을 받아들이기도 하며, 동시에 폐순환기를 통하여 이를 정화시키는 기능을 갖고 있다. 이와 같은 심장의 수축 및 팽창 과정은 동맥 내 혈액의 흐름이 맥동 유동의 특성을 갖게 한다. 본 연구에서는 맥동 유동의 특성을 보다 쉽게 파악하기 위하여 동맥 유입 혈액 유량을 Deplano와 Siouffi<sup>(1)</sup>가 제안한 sine파 형태로 단순화 시켜 실제 생리학적 모델이 갖는 복잡성을 제거 시켰다.

협착부가 있는 동맥내부의 혈류유동을 고찰하기 위하여 협착부 형상은 식(1)과 같이 Gauss형으로 가정하였으며, 협착부가 포함된 해석대상 동맥의 기하학적 형상은 Fig.1과 같다.

$$\frac{r(x)}{r_0} = 1 - \left( \frac{S}{100} \right) \exp\left( -\frac{4x^2}{r_0^2} \right) \quad (1)$$

여기서, S는 협착부의 크기를 나타내는 변수인 협착 비율(percent of stenosis)로서 다음과 같이 정의된다.

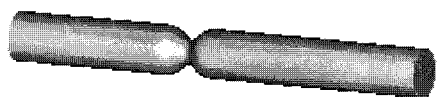


Fig. 1 Solid modeling of an artery with the Gaussian stenosis

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 영남대학교 기계공학부

\*\*\* 숭실대학교 기계공학과

\*\*\*\* 금오공과대학교 기계공학부

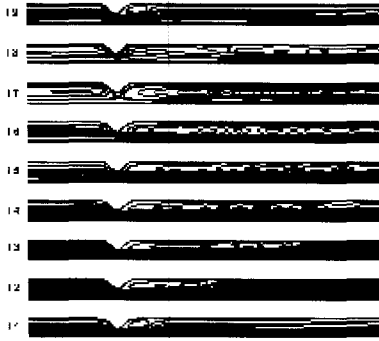


Fig. 2 Instantaneous streamline patterns at different temporal points in the pulsatile flow, 50% of stenosis

$$S = (D_2 - D_1) / D_1 \times 100\% \quad (2)$$

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig. 2는 협착부가 있는 혈관 내 맥동유동 상태에서의 해석결과로서 시간에 따른 순간 유선의 분포특성을 보여주고 있다. 동일한 유량이 공급되는 순간이라 하더라도 가속상태(T1)와 감속상태(T5)는 완전히 다른 특성을 나타내고 있으며, 심장의 팽창 주기에 해당하는 T3-T7 영역에서는 협착부 후방 영역에서의 유동이 매우 불안정하여 와류 발산(vortex shedding)과 같은 상태를 보여주고 있다. 특히, 팽창 상태에서 혈관으로 유입되는 혈류유량이 평균유량보다 낮은 경우(T6-T7)에는 재순환 영역이 협착부 전방에도 나타남을 관찰할 수 있는데, 이러한 전방 재순환 유동은 수축 상태로 바뀌면서(T8) 유입되는 유량의 증가로 인한 운동량의 증가의 영향으로 소멸된다.

Fig. 3은 혈류 유동장내에서의 순간 전단응력 분포를 3차원적으로 나타낸 것이다. 최대 전단응력은 협착부 목부위 혈관 벽면에서 발생하며, 그 크기는 유입 혈류유량의 크기에 비례함을 알 수 있다. 재순환 영역에서의 전단응력은 매우 복잡한 거동을 보이고 있는데, 생리학적으로 혈관 내피세포에 부정적인 영향을 미치는 벽면 전단응력은 유입 혈류유량이 평균 유량보다 큰 영역(T1-T5)에서 비교적 크고 복잡한 거동을 보이고 있다. 반면에, 유입 혈류유량이 평균 유량보다 작은 영역(T5-T9)에서는 재순환 영역에서 와류 등으로 인한 복잡한 유동장이 형성됨에도 불구하고 전단응력의 크기는 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다.

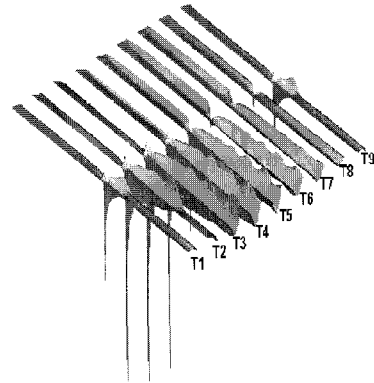


Fig. 3 Instantaneous shear stress distributions at different temporal points in the pulsatile flow, 50% of stenosis

### 4. 결 론

본 연구에서는 심장의 운동에 의한 맥동유동이 동맥경화 등으로 인한 동맥 혈관 협착부에 미치는 영향을 유한 요소법을 이용한 유동해석을 통하여 고찰하였으며, 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

- (1) 맥동유동 상황에서의 협착부 후방 재순환 영역은 가속 상태인 수축 시보다는 감속 상태인 팽창 시에서 더욱 불안정하다.
- (2) 혈류역학에 있어서 생리학적으로 가장 중요한 변수인 벽면 전단응력은 협착부목 부위 혈관벽면에서 최대의 값을 가지며, 협착부 후방에서 주유동 반대방향으로 작용하는 벽면 전단응력의 크기는 팽창 영역보다는 수축 영역에서 더 크다.

### 후 기

이 연구는 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

### 참고 문헌

- (1) Deplano, V. and Siouffi, M., 1999, "Experimental and Numerical Study of Pulsatile Flows through Stenosis : Wall Shear Stress Analysis", *Journal of Biomechanics*, Vol. 32, pp.1081-1090.