

# Effects of Blood Flow Characteristics with Variation of Blood Viscosity in the Coronary Artery

노형운\*, 서상호\*, 권혁문\*\*, 이병권\*\*\*

## 1. 서론

혈액은 혈장(plasma)과 혈구(cells)로 구성되어 있고, 혈액 체적의 약 50%는 혈구인 적혈구와 백혈구 그리고 혈소판이 차지한다. 뉴턴유체의 특성을 나타내는 혈장내에 이 혈구들과 혈소판이 존재하여 혈액은 비뉴턴유체의 특성을 가지게 된다. 뉴턴유체의 특성을 갖는 혈장과는 달리 혈액의 점도는 전단율이 증가함에 따라 높아진다. 이 현상을 일컬어 전단박화특성이라고 한다.

이런 혈액의 특성과 심근경색증자와 혈관폐색증 환자의 상관관계를 규명하기 위하여 혈액 점도와 정상인의 혈액 점도를 비교하였다. 혈액의 점도가 혈전증이 있는 환자의 혈액 점도는 정상인의 혈액 점도보다 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 정상인의 혈액 점도는 1.6 poise 밖에 되지 않지만 혈전증 환자의 혈액 점도는 이보다 300%나 높은 5.0 poise나 됨을 확인할 수 있다. 또한 여러 연구자들에 의하여 발표

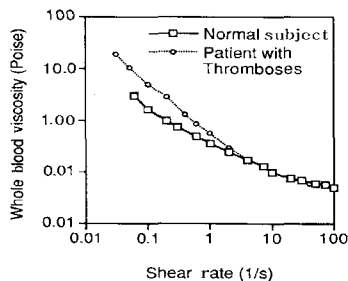


Fig. 1 Whole blood viscosity of normal subject and Patient with thrombos

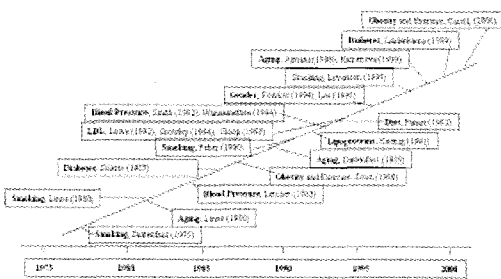


Fig. 2 Publications Linking WBV With Cardiovascular Risk Factors

된 바와 같이, 혈액의 점도와 고혈압, 과지혈증, 당

\* 숭실대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 의과대학 내과학교실,

\*\*\* 인제대학교 의과대학 내과학교실

노(diabetes), 흡연과 비만 등과 같은 혈관질환(arterial occlusive diseases)은 매우 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다 (Fig. 2). 따라서 관상동맥이나 경동맥과 같은 동맥경화 호발부위에서 혈액의 점도에 대한 동맥경화 진단의 유용성에 대해 연구하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에 적용된 지배방정식은 식 (1)과 (2)와 같은 연속방정식과 운동량방정식이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

### 2.2 혈액점도 변화

혈액점도의 변화가 인체혈관에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 혈액의 점도를 shear rate에 따라 인위적으로 변화시켜주었다.

### 2.3 관상동맥의 모델

혈액점도의 변화가 인체혈관에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 두 번째 중점을 두어야 하는 것은 인체혈관의 모델화이다. 본 연구에서는 Fig. 3와 같이 관상동맥과 경동맥을 중심으로 혈액 점도변화에 따른 혈류특성을 해석하였다.



Fig. 3 Spatial three-dimensional meshes for the left coronary artery

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 저전단율 영역에서 점성계수가 높은 경우

그림 4와 같이 혈액점도 변화에 따른 관상동맥내 혈류특성 중 벽면전단응력을 살펴보았다. 특히 그림 5의 경우는 혈액의 점도가 저전단율 영역에서 기준 모델(case1)보다 2배(case2)와 4배(case3) 높은 경우이다. 그림에서 보듯이 3가지의 경우는 가속시와

감속시의 차이가 있음을 알 수 있다. 감속시의 경우는 가속시보다는 감속의 영향으로 인하여 전단율 범위가 가속시보다 작기 때문에 관상동맥이나 경동맥내의 전단응력분포가 기존의 경우보다 좀 더 증가했음을 알 수 있다.

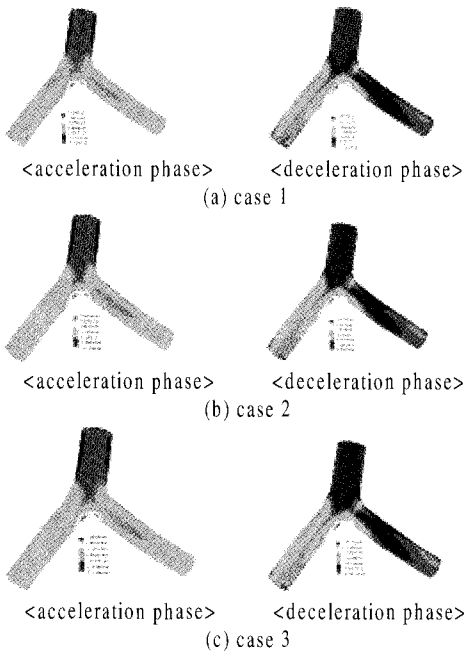


Fig. 4 Wall shear stress distributions in the coronary artery at the acceleration and deceleration phases

### 3.2 저-고전단을 영역에서 점성계수가 높은 경우

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 저-고전단을 영역에서 점성계수가 높은 경우의 결과는 3.1절에서 설명한 것과 달리 혈액의 점성계수가 커졌기 때문에 상대적으로 최대 피크치의 범위는 줄어들었다. 그러나 전체적으로 관상동맥 apex부분이나 좌전하행지로부터 분기되는 부분에서 넓게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경우는 가속시나 감속시 모두 같은 경우를 나타내고 있다.

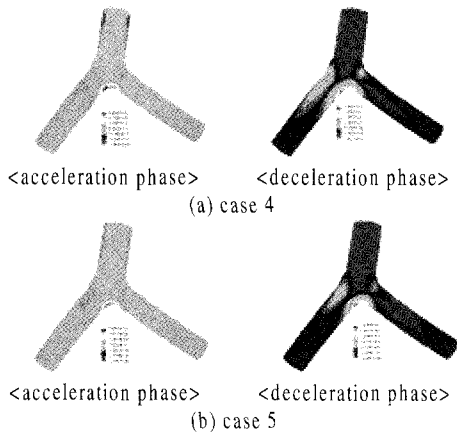


Fig. 5 Wall shear stress distributions in the coronary artery at the acceleration and deceleration phase

### 3.3 고전단을 영역에서 점성계수가 높은 경우

고전단을 영역에서 점성계수가 높은 경우의 결과는 유동장 범위가 고전단을( $1000s^{-1}$ )에 해당되기 때문에 의 전단응력분포가 Fig. 5과 비슷함을 알 수 있다. 이러한 이유는 고전단율의 영역이 유동장에서 대부분 차지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 점성계수가 커지는 case 7의 경우가 다른 모델경우보다 전단응력이 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

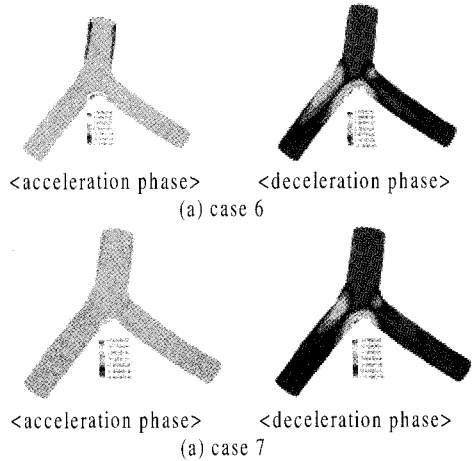


Fig. 6 Wall shear stress distributions in the coronary and carotid artery at the acceleration and deceleration

## 4. 결 론

혈액점도의 변화가 인체혈관에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 혈액의 점도를 인위적으로 변화시켜 관상동맥과 경동맥내 혈류특성을 살펴보았다. 저전단율에서 점성계수가 높은 경우는 가속시의 경우보다는 감속시의 경우가 감속의 영향으로 인하여 관상동맥이나 경동맥내의 전단응력분포가 기존의 경우보다 좀 더 커졌음을 알 수 있다. 또한 저-고전단을 영역에서 점성계수가 높은 경우의 결과는 혈액의 점성계수가 모두 전단율 범위에서 커졌기 때문에 상대적으로 최대 피크치의 범위는 줄어들었지만 전체적으로 심첨부 관상동맥부분이나 좌전하행지로부터 분기되는 부분내에서 전단응력이 넓게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 점도가 증가함에 따라 전단응력이 증가하고, 전단응력이 증가하면서 경동맥의 만곡부와 관상동맥의 좌전하행지 만곡부에서는 혈류의 정체시간이 좀 더 증가됨을 확인하였다.

이런 혈액점도의 증가로 인한 전단응력증가는 혈관내피세포의 방어체제를 붕괴시키고 이는 EC의 기능을 상실케 하게 된다. 또한 저전단응력 영역의 증가는 국부적으로 콜레스테롤의 축적을 일으키게 되면서, RBC와 WBC의 부착을 촉진시켜 결론적으로 동맥경화를 일으키게 된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00561-0)지원으로 수행되었음.