

◎ 논문

관상동맥 우회로 관의 문합각도의 변화가 유동과 벽 전단력에 미치는 영향

김 형 민*

Influence of the Anastomosis Angle Variation on Flow Features and Wall Shear Stress of an Artery

H. M. Kim

It is known that the non-planar model of bypass is more profitable to suppress the development of intimal hyperplasia that tends to occur preferentially in regions of low time averaged shear stress and rapid temporal changes in wall shear stress. In this study it was numerically simulated the blood flow in an coronary artery grafted by artificial bypass to determine the flow characteristic variations due to the anastomosis angle changing. 5 different non-planar anastomosis angle models such as 45°, 60°, 90°, 120° and 135° were considered. When the anastomosis angle is higher, the backward flow region is spatially extended near the downstream region of the anastomosis because of the development of horseshoes vortex. For the case of the nan-planar 45° and 60° of anastomosis, the area of low-OSI zone was decreased by 26% and 13% respectively and the time averaged wall shear stress was increased by more than 55% as compared with 45° of planar model. However, both of the area of the low-OSI zone and the time averaged wall shear stress of 90°, 120° model were significantly increased.

Key Words: 관상동맥 (Coronary Artery), 우회관 (Bypass Graft), 교변전단지수(Oscillatory Shear Index), 맥동류(Plusatile flow), 전산유체역학(CFD)

기호설명

- D : 주혈관의 지름 [m]
- $\overline{n_m}$: 평균 응력 방향 벡터
- Q : 유량 [m³/s]
- T : 주기 [rad]
- t : 시간 [s]
- v_i : 속도벡터 [m/s]
- x_i : 좌표 [m]
- α : $\vec{\tau}$ 와 $\overline{n_m}$ 의 사이 각도
- ρ : 밀도 [kg/m³]

- $\vec{\tau}$: 전단응력 [N/m²]
- τ_{wa} : 평균 벽전단응력 [N/m²]
- ν : 점도 [m²/s]
- Ω : 주파수 [1/s]
- w : 가중계수

1. 서 론

동맥경화는 동맥 혈관 자체의 신축성이 떨어지거나 혈관이 경화되어 원활한 혈류를 방해하여 발생하는 병으로 노화로 인하여 혈관이 좁아지는 것으로 시작하여 협착에 이르러서는 심각한 혈류장애를 일으키게 된다. 일반적으로 협착증은 혈관의 50%이

* 2004년 7월 31일 접수
* 정회원, 경기대, 기계시스템디자인공학부

상이 좁아진 경우를 이야기하며, 이를 치료하기 위한 시술로는 좁아진 혈관에 보조 장치를 삽입하여 인위적으로 관을 확장시키는 혈관 확장술과 협착된 부위에 인공 우회관을 삽입하여 혈류를 우회시켜 원활한 혈류를 유도하는 우회관 삽입술이 있다. 하지만 이 우회관 시술의 경우 시술자의 25%는 1년 안에, 50%는 10년 안에 재협착으로 인하여 사망에 이르게 된다고 알려져 있다. 이 같은 사망이나 재협착의 원인은 혈관내의 내막비후증식(Intimal Hyperplasia)에 기인한다고 알려져 있지만 이 증상의 근본적인 발생원인은 아직 정확하게 밝혀지지 않았다. 하지만 혈류 현상의 측면에서 볼 때, 이 내막비후증식은 주로 낮은 시간평균 전단력 영역과 전단력의 방향이 빠르게 변화하는 곳에서 발생한다고 알려져 있다. 이와 관련된 연구는 현재 여러 가지 측면으로 수행되고 있으며 이들은 주로 동맥류의 유동 현상과 혈관질환과의 관계를 규명하기 위한 것과 우회관의 형상의 변화에 따른 동맥 혈관 내의 혈류와 혈관 벽면에 발생하는 전단력의 변화에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 동맥류와 혈관질환과의 관계에 관한 연구로는 Ojha[1]과 Asakura[2]의 연구가 대표적이라고 할 수 있다. 이들의 연구는 모두 혈류에 의해서 혈관 벽면에 나타나는 전단력과 벽면 전단력 방향의 변화와 내막비후증식과의 상관관계를 규명한 것으로 전단력의 방향이 빈번하게 교번하는 영역과 시간 평균 전단력의 크기가 작은 영역은 일치하며 또한 이 영역에서 내막비후증식이 주로 일어난다고 있는 것을 밝혔다. 우회관의 형상에 따른 동맥의 혈류 유동의 변화에 관한 대표적인 연구로는 Moore[3], Sherwin[4] 그리고 Papaharilaou[5]의 연구가 있다. 이들은 모두 관상동맥과 우회관이 평면적으로 문합된 경우와 공간적으로 문합된 두 가지 경우에 대하여 관상동맥의 혈류의 변화에 따라 나타나는 혈관 벽면의 전단력과 벽면 전단력의 교번에 대하여 연구를 하였다. Ojha[1]의 연구 결과에 따르면 벽면 전단력이 작은 영역과 교번이 빈번하게 발생하는 영역에서 내막비후증식이 발생하므로 교번이 빈번하게 발생하는 영역을 감소시키고 또한 그 영역의 시간 평균 전단력의 크기를 증가시킬 수 있는 우회관의 형상과 문합이 동맥경화의 재발과 재협착을 줄일 수 있다고 판단하였으며 이런 관점에서 공간적 문합이 유리하다는 결론을 얻었다.

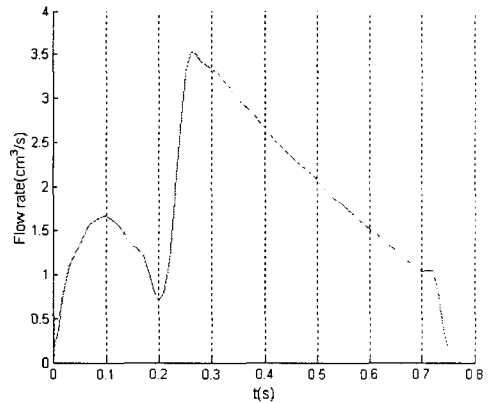


Fig. 1 Physiological flow rate at the inflow boundary (extracted from Choi[6])

본 연구는 기존 연구의 연장으로 공간적 문합에 있어서 문합각도를 예각, 둔각, 직각을 포함한 다섯 개의 문합각도를 선정하고, 각각의 문합각도를 갖는 우회관과 주 동맥 내의 유동을 수치적으로 해석, 그 해석 결과로부터 혈관 벽면에 발생하는 벽면 전단력과 교번전단지수를 계산하였다. 문합각도의 변화에 따라 주 동맥관에 나타나는 유동 현상의 변화를 비교하고, 낮은 교번전단지수를 갖는 영역의 넓이와 그 영역에서의 시간 평균 전단력의 크기를 비교하여 내막비후증식 현상을 감소시킬 수 있는 문합각을 예측하는 것이다. 동맥에서의 혈류를 수치적으로 해석하기 위하여 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법과 SIMPLE법을 이용하였으며, 심장의 맥동에 의한 유량을 우회관의 입구경계조건으로 적용하였으므로 비정상 상태의 해석을 수행하였다.

2. 수치해석 방법

관상동맥 내의 혈류를 비압축성 유동으로 가정하여 비정상 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식의 수치해를 구하여 동맥내의 속도분포와 압력분포를 구하였다. 일반적으로 혈액은 비뉴턴유체로 이를 고려하여 해석하여야만 동맥 내의 혈류를 정확하게 해석할 수 있다. 하지만 본 연구는 우회관의 문합각도의 변화에 따른 유동의 변화에만 중점을 두고 있어 혈액을 뉴턴유체로 가정하여 해석하였다. 본 연구에서 적용된 지배방정식은 다음과 같다.

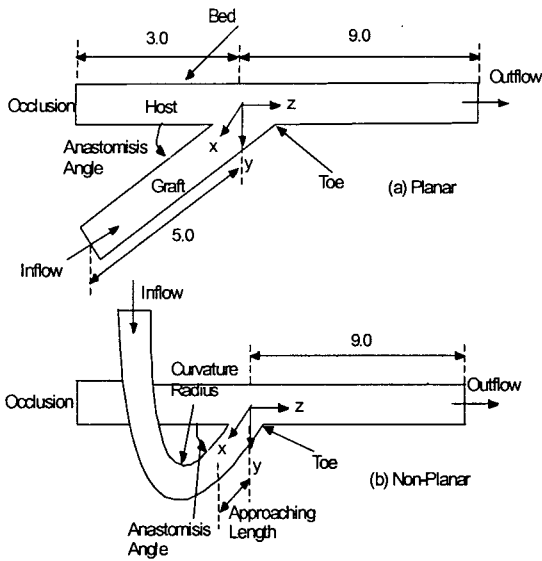


Fig. 2 Basic model geometries of planar and non-planar bypass grafts

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{2}$$

위 지배방정식 (1)과 (2)의 수치해는 유한체적법을 이용하여 이산화방정식을 유도하고 각 격자점에 대한 선형행렬식을 Conjugate Gradient 법(CGM)으로 그 이산화해를 구하였다. 계산 영역에서의 압력분포를 구하기 위해 Patankar[7]가 제시한 SIMPLE법을 적용하였으며, 이를 통해서 연속방정식을 만족시켰다. 관상동맥의 경우 혈류는 심장으로부터 분출된 것으로 그 흐름 속도는 심장의 맥동과 깊은 관련이 있다. 따라서 기존의 실험에 의해서 얻어진 심장 맥동에 의한 혈액의 유량을 우회관의 입구경계조건으로 적용하였으며, 시간에 따른 유량의 변화는 Fig. 1과 같다. 이 실험결과에 의하면 최대 유량은 $3.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ 이고 일반적으로 관상 동맥의 지름이 1~5mm 정도이며, 혈의 평균 밀도와 점도는 각각 1050kg/m^3 , $3.675 \times 10^{-3} \text{kg/m s}$ 로 동맥을 흐르는 혈류의 최대 레이놀즈 수는 250~1250이다. 본 연구에서는 동맥의 지름을 1mm로 작은 동맥을 고려하였으며, 이때 최대 레이놀즈 수는 1250이다. 우회관의 문합형상은 두 가지를 고려하였다. Fig. 2(a)는

관상동맥에 우회관이 평면적으로 문합된 상태를 나타내며 우회관이 공간적 문합은 Fig. 2(b)와 같다. 각 경계, 입구, 출구 그리고 벽에서의 경계조건으로 벽면에서는 점착조건을, 출구에는 Neumann조건을 적용하였으며, 입구에는 앞에서 설명 했듯이 심장 맥동에 의해서 분출되는 유량을 경계조건으로 적용하였다. 본 연구는 우회관의 문합각도 변화에 따라 동맥에서의 혈류의 변화에 관한 것으로 공간적 문합의 경우만을 고려하였으며, 평면적 문합과 공간적 문합에 관한 기존의 비교 연구 결과와 본 연구에서 제시한 방법의 해석결과를 간접적으로 비교하기 위하여 같은 문합 각도를 갖는 평면적 문합과 공간적 문합의 경우를 비교하였다.

혈류와 혈관질환 특히 동맥경화 또는 협착증은 내막비후증식에 기인한다고 볼 때, 이는 혈관 벽면에 분포하는 전단력과 전단력 방향의 변화와 깊은 관련이 있다. 따라서 혈관 벽면에 분포하는 벽면 전단응력과 교번전단지수(Oscillatory Shear Index)의 비교를 통해서 간접적으로 이상적인 문합각도를 예측할 수 있다. 전단응력 분포와 교번전단지수는 해석된 속도 분포와 전단응력으로부터 계산되며 계산식은 다음과 같다.

$$\tau_i = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \cdot n_j \tag{3}$$

$$OSI = \frac{\int_0^T w |\vec{\tau} \cdot \vec{n}_m| dt}{\int_0^T |\vec{\tau} \cdot \vec{n}_m| dt} \tag{4}$$

$$\vec{n}_m = \int_0^T \frac{\vec{\tau}}{|\vec{\tau}|} dt \tag{5}$$

여기서 \vec{n}_m 은 벽면 전단응력의 평균 단위 방향 벡터이며, w 는 가중계수로 $w = 0.5(1 - \cos \alpha)$ 로 나타난다. 또한 α 는 벽면의 전단력 방향과 평균 전단력의 단위 방향 벡터가 이루는 각도를 나타낸다. 식 (4)에서 교번전단지수는 Ku[8]과 Moore[3]에 의해서 제시된 것을 수정한 것으로 $0.0 < OSI < 0.5$ 사이의 값을 가지며, 0.0은 전단응력의 방향이 한 방향으로 고정된 것을 의미하며 0.5의 경우는 전단응력의 방향이 순수하게 진동하고 있음을 나타낸다.

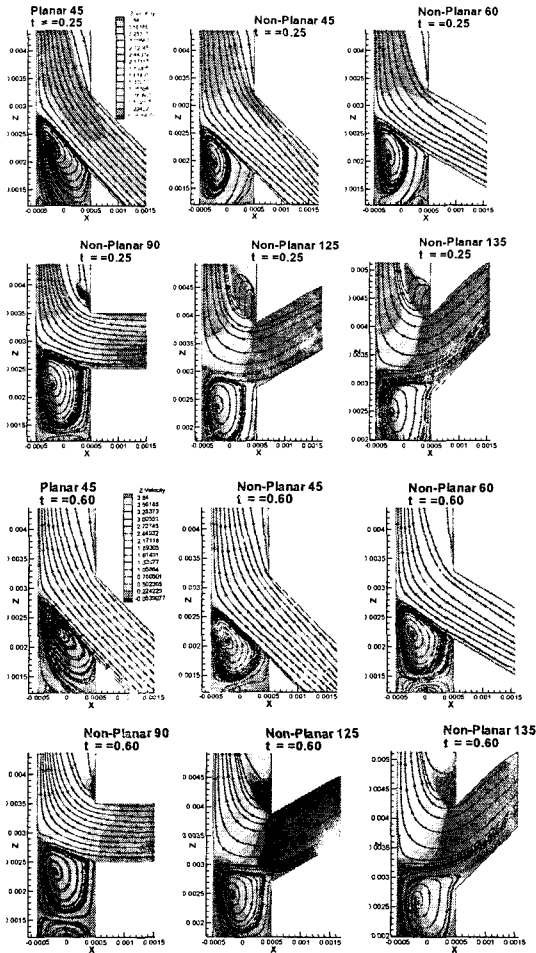


Fig. 3 Contour plots of z-direction velocity and streamlines for the anastomosis models on $y = 0.0$ (Center plane)

3. 결 과

우회관의 문합각도의 변화에 따라 동맥을 흐르는 혈류의 변화를 살펴보기 위하여 문합각도를 45°, 60°, 90°, 120°, 135°를 갖는 5개의 형상을 고려하였다. 45°와 60°는 혈액 흐름의 순방향 각도를 갖는 반면에 90°보다 큰 120°와 135°는 우회관으로부터 협착된 곳으로 혈액을 유입시키는 역류 형상이다. 심장의 맥동에 의한 혈류의 유입으로 유동은 비정상상태이며 주기적인 정상상태에 이르는 3주기 이후의 해석결과를 비교하였다. Fig. 3은 가속구간, $t = 0.25s$ 와 감속구간, $t = 0.6s$ 일 때 주 동맥의 중심면에서 혈류의 z-방향 속도와 유선을 나타낸 것으

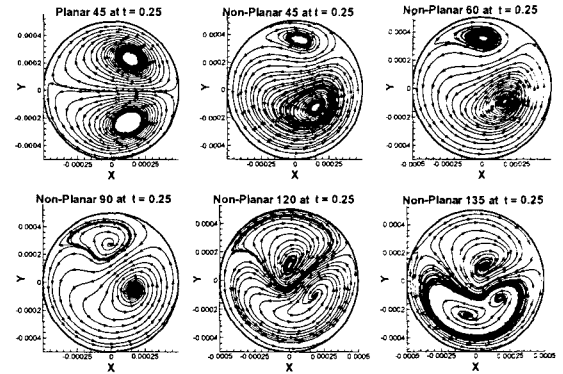


Fig. 4 Streamline plots on the cross section of host artery at $z=0.005$

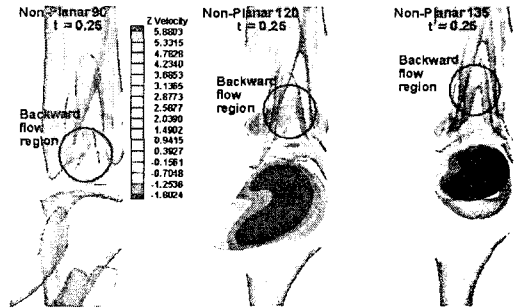


Fig. 5 3D Iso-Value plot of z-direction velocity of non-planar model with 90°, 120° and 135° of anastomosis angle

로 45°의 문합각도를 갖는 평면적 문합의 경우 우회관에서 유입되는 혈류의 각도 역시 45°를 유지하며 주 동맥류와 합류하고 있다. 또한 협착과 우회관 문합 부분 사이의 영역에는 캐비티가 형성되어 캐비티 영역에 1차, 2차 와류가 형성된다. 이 1, 2차 와류는 감속과 가속구간에서 모두 나타났으며 감속구간에서 1차 와류의 중심이 그림의 우측으로 이동하며 와류는 그림의 좌우 영역으로 확장되는 것을 볼 수 있다. 반면에 45°와 60° 문합각을 갖는 공간문합의 경우도 같은 위치에서 와류가 형성되지만 그 와류는 평면적 문합과 비교하여 문합 부의 앞면 상류에 집중적으로 형성되고 감속구간에서는 평면적 문합과 마찬가지로 중심이 그림의 우측으로 이동하고 와류도 그림의 좌우영역으로 확장되고 있다. 90°이상의 문합각도를 갖는 공간적 문합의 경우, 캐비티 영역에서의 와류는 각도가 커질수록 캐비티 전

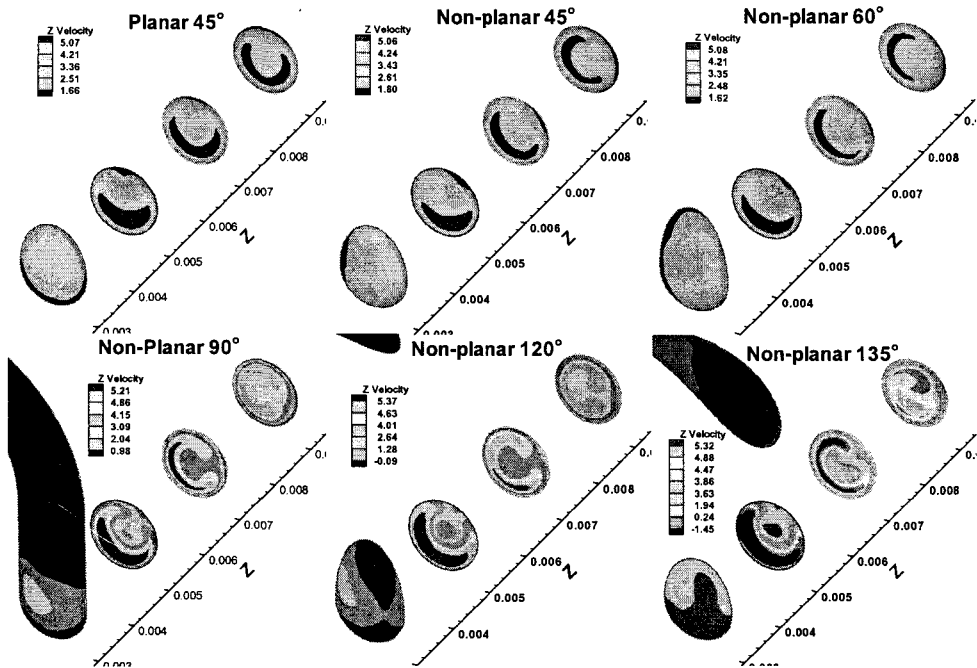


Fig. 6 Contour plots of z-direction velocity of host arteries with different anastomosis angles at 4 positions of downstream

역에 걸친 큰 1, 2차 와류가 형성되고 이 와류는 감속구간에서도 그 형상에 큰 차이는 보이지 않는다. 또한 우회관 문합부 하류(Fig. 1에서 Toe 부분)에서 혈류의 역류에 의한 와류가 형성되며, 이는 각도가 커질수록 그 크기도 비례적으로 커지는 것으로 나타났다. 이는 우회관에서 분출된 혈류가 문합부의 앞면에 도달한 후 주 동맥관의 벽면을 따라 유동하며, 하류 방향으로 진행하면서 두개의 나선형 유동의 형성에 기인한 것으로 문합 하류부에서는 두개의 나선형 유동이 만나 말굽형상의 와류가 형성되고, 이 말굽와류의 안쪽에 역류영역이 형성된다. Fig. 4는 주 동맥관 $z = 0.005$ 단면에서 유선을 나타낸 그림으로 문합각도의 변화에 따라 두개의 말굽와류의 형상의 변화를 보여주고 있다. 평면적 문합의 경우 말굽와류는 중심축을 중심으로 크기가 같은 두개의 와류가 대칭을 이루며 형성되어 있다. 하지만 공간적 문합의 경우는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 두개의 와류가 형성되기는 하지만 두개 와류 중 윗부분에 형성된 와류가 아랫부분에서 형성된 와류에 비하여 그 크기가 작으며, 이 윗부분 와류는

문합각도가 커질수록 그 크기가 커지고 형상도 역삼각형 모양으로 변화되는 것을 볼 수 있다. 특히 문합각도가 135°인 경우에는 윗부분의 와류 영역이 확장되고, 아랫부분의 와류는 또 다른 두개의 와류로 분리되기 위한 초기 상태의 형상을 보이고 있다. 90°이상의 문합각에서는 주 동맥관의 주 흐름의 역방향 문합으로 우회관에서 분출된 혈류는 협착된 캐비티 영역으로 유입된 후, 주 동맥의 하류로 빠져나가게 되어 그 유동의 구조가 문합 각도가 90°미만의 각도를 갖는 유동의 구조와 비교하여 복잡한 구조를 갖는다.

Fig. 5는 우회관 문합부 근처의 z-방향 3차원 등속도 면도로 문합부의 하류 영역에 역류영역의 형성과 형상을 정확하게 보여주고 있다. 이 역류영역은 문합각도가 90°이상에서 각도가 커질수록 그 형상이 하류 방향으로 길어지며, 영역의 넓이가 확장되고 있음을 알 수 있다. 이처럼 역류 영역의 확장은 역류 영역과 근접한 주 동맥관의 벽면에 벽면 전단응력에 영향을 주어 주기적으로 그 방향이 전환될 가능성이 커지게 되며, 이는 상대적으로 시간

Table 1 Comparison of computed results for anastomotic angle variations (* denote reference)

Model	Anastomotic Angle	Area of zone x 10 ⁶ [m ²] (OSI>0.01)	τ_{wa} [N/m ²] (OSI>0.01)
Planar*	45°	2.430	15.70
Non-Planar	45°	1.973 (-26%)	24.34 (+55%)
Non-Planar	60°	2.110 (-13%)	25.64 (+63%)
Non-Planar	90°	3.114 (+28%)	30.19 (+92%)
Non-Planar	120°	3.723 (+53%)	36.88 (+135%)

에 대한 평균 전단응력이 낮아져 내막비후증식이 발달할 가능성이 높아지게 됨을 예측할 수 있다. Fig. 6은 주 동맥관의 하류 4개의 위치의 단면에 분포하는 z-방향 속도분포를 나타낸 것이다. 이 z-방향의 속도 분포는 말굽와류의 형상과 일치한다. 공간적 문합의 경우 하류로 진행함에 따라 z-방향의 속도는 반지름 방향으로 확장되고, 이와 동시에 그 형상이 시계방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 반면에 평면적 문합의 경우 말굽모양의 z-방향 속도 분포는 하류로 진행되더라도 그 형상을 그대로 유지하고 있으며 형상자체의 회전도 없다.

협착증의 발병과 재발은 모두 혈관 벽면에 발생하는 질병으로 혈류유동에 기인한 벽면의 전단력과 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 이런 관점에서 교번전단지수는 전단력 방향의 변화를 나타내는 척도로 이 값이 작은 경우 전단력의 방향은 일정하게 유지됨을 의미하고, 이와 반대로 높은 경우는 전단력의 방향이 진동함을 의미 한다. 따라서 교번전단지수가 높은 영역의 시간평균 전단응력은 작아지게 된다. 낮은 교번전단지수 영역이 좁고, 그 영역에서의 시간 평균 전단응력이 큰 경우, 내막비후증식을 감소시켜 협착증의 재발을 방지할 수 있다고 예측된다. 각 문합각도에 대한 낮은 교번전단지수를 갖는 영역의 넓이와 그 영역에서의 시간평균 전단응력을 Table 1에 나타내었다. 평면적 문합을 기준으로 각 문합모델의 낮은 교번전단지수 영역의 넓이는 공간적 문합 45°일 때 축소율은 26%로 가장 많이 축소되고, 이 때 이 영역에서의 전단응력은 55% 상승하게 된다. 60°일 때 역시 정도의 차이는 있지만 같은 양상을 보이고 있다. 문합각도가 90°이상인 경우는 시간 평균전단응력이 90%이상 증가하

게 되지만 낮은 교번전단지수 영역의 넓이 역시 큰 폭으로 증가됨을 알 수 있다.

4. 결 론

혈관 협착증의 재발과 이로 인한 사망의 원인을 혈관내의 혈류의 변화에 관한 측면으로 고려해 볼 때, 그 원인을 정확하게 밝혀지지는 않았지만 내막 비후증식은 주로 낮은 시간평균 전단력 영역과 전단력의 방향이 빠르게 변화하는 곳에서 발생한다는 기존의 연구결과로부터 주 동맥관의 유동 변화를 야기 시킬 수 있는 우회관의 형상과 주 동맥관과의 문합각도는 주 동맥관의 유동 변화에 큰 영향을 미치며 이는 벽면 전단응력에 직접적인 영향을 주게 된다. 우회관의 형상에 있어서 평면적 문합과 공간적 문합 형상에서 주 동맥관에 나타나는 유동현상을 비교해 보면 평면적 문합의 경우 문합 하류에서 형성된 말굽와류는 그 크기와 형상이 대칭을 이루고 있으며, 하류로 진행하더라도 그 대칭성은 그대로 유지된 반면에 공간적 문합의 경우에도 말굽와류가 형성되지만 대칭성은 파괴되고, 하류로 진행됨에 따라 와류가 소멸되어 감을 예측할 수 있었다. 또한 혈관 벽면에 나타나는 낮은 교번전단지수의 면적이 감소하고, 그 영역에서의 시간 평균 벽면 전단응력은 증가하는 것으로 나타났으며 이는 기존의 연구결과와도 일치하는 결과이다.

문합각도에 따른 주 동맥관의 혈류의 변화에 있어서 주 동맥과 우회관이 직교하는 90°를 기준으로 예각과 둔각 문합각도를 갖는 5가지 모델을 선정하여 해석을 수행한 결과로부터 문합각도가 커질수록 문합부의 근접한 하류영역에 말굽와류의 형성에 따른 역류영역이 확대되며 문합 각도가 45°, 60°인 경우 45°의 문합각도를 갖는 평면적 문합과 비교하여 두 경우 모두 낮은 교번전단지수를 갖는 영역의 넓이는 감소하고, 그 영역에서의 시간평균전단응력은 증가 하는 것으로 나타났다. 특히 45°의 경우 낮은 교번전단지수를 갖는 영역의 축소율은 26%로 가장 크게 감소하였고, 60°의 경우는 시간평균 전단응력이 45°의 경우보다 8%정도 더 증가한 것으로 나타났다. 하지만 문합 각도가 90°, 120°의 경우는 시간 평균전단응력과 낮은 교번전단지수를 갖는 영역의

넓이가 모두 큰 폭으로 증가하여 내막비후증식 현상이 발달할 것으로 예측되어 둔각 문합은 우회관 문합각도로는 부적합한 것으로 판단된다. 본 연구의 해석은 혈관 내부에 형성되는 압력 변화에 의한 혈관의 변형은 없다는 가정에서 수행된 결과로 보다 정확한 문합각도 예측을 위해서 혈관 변형을 포함한 해석이 요구된다.

후 기

본 연구는 2003학년도 경기대학교 학술연구비 지원(2003-004)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Ohja, M., "Spatial and temporal variations of wall shear stress within an end-to-side arterial anastomosis model", *Journal of Biomechanics*, Vol. 26, (1993) p.1377.
- [2] Asakura, T., Karino, T., "Flow patterns and spatial distribution of atherosclerotic lesions in human coronary arteries", *Circulation Research*, Vol. 66, (1990), p.1045.
- [3] Moore, J.A., Steinman, D.A., Prakash, S., Johnston, K.W., Ethier, C.R. "A numerical study of blood flow patterns in anatomically realistic and simplified end-to-side anastomoses", *J of Biomechanical Engineering*, Vol. 121, (1999), pp.265.
- [4] Sherwin, S., Shah, O., Doorly, D.J., Peiro, J., Papaharilaou, Y., Watkins, N., Caro, C.G., Dumoulin, C.L., 2000, "The influence of out-of-plane geometry on the flow within a distal end-to-side anastomosis", *J of Biomechanical Engineering*, Vol. 122, (2000), p.86.
- [5] Papaharilaou, Y., Doorly, D.J., Sherwin, S.J., 2002, "The influence of out-of-plane geometry on pulsatile flow within a distal end-to-side anastomosis", *J of Biomechanics*, Vol. 35, (2002), p.1225.
- [6] Choi, Ju Hwan, Lee, Chong Sun, Kim, Charn Jung, "Wall shear stress between compliant plates under oscillatory flow conditions: Influence of wall motion, impedance phase angle and non-newtonian fluid", *KSME*, Vol. 25, (1999), p.18.
- [7] Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Pub. Co. (1980)
- [8] Ku, D.N., Giddens, D.P., Zarins, C.K., Glagov, S., "Pulsatile flow and atherosclerosis in the human carotid bifurcation", *Arteriosclerosis*, Vol. 5, (1985), p.293.