

협착이 발생한 관상동맥에 대한 이식우회로술의 효과분석[§]

김형호* · 서상호*[†] · 이정상**

* 숭실대학교 기계공학과, ** 서울대학교 보라매병원 흉부외과

Analysis of Bypass Grafting Effects in Stenosed Coronary Arteries

Hyoung-Ho Kim*, Sang-Ho Suh*[†] and Jeong-Sang Lee**

* Mechanical Engineering, Soongsil Univ.,

** Thoracic & Cardiovascular Surgery, Seoul Nat'l Univ. Borame Hospital

(Received June 17, 2011; Revised October 18, 2011; Accepted October 26, 2011)

Key Words : Stenosed Coronary Artery(협착된 관상동맥), Bypass Grafting Effects(이식우회로술의 효과), Numerical Analyses(수치해석)

초록: 협착이 발생한 관상동맥의 치료를 위해 외과적인 수술방법으로는 이식우회로술이 많이 사용된다. 이식우회로술 시술 시 개존율 향상을 위해서는 최적의 혈관 문합 시술에 대한 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 Y-grafting bypass 와 T-grafting bypass 시술의 효과와 분지각도 및 문합각도 변화에 따른 문합효과를 분석하였다. 이를 위해 기하학적 형상을 최적화하고 각각의 기하학적 형상에 대해 혈류역학적 특성을 비교분석하였다. 이식혈관의 분지각도와 문합각도가 각각 30°와 15°일 경우에 LAD 와 LCX 쪽 모두 혈류량이 고르게 분배됨을 확인하였다.

Abstract: Bypass anastomosis is frequently adopted for surgical treatments of stenosed coronary arteries. Optimal coronary bypass grafting should be investigated to improve the patency in arterial bypass techniques. The objective of this study is to analyze the effects of Y-grafting bypasses and T-grafting bypasses for various bifurcation and anastomotic angles. In order to find the optimal geometric configuration, the hemodynamic characteristics are obtained and compared with each other for different geometries. We found that both the left anterior descending artery (LAD) and left circumflex artery (LCX) blood flows were distributed evenly when the bypass grafting angle and bifurcated angle were 30° and 15°, respectively.

1. 서론

동맥경화증 환자의 치료에는 동맥을 재개통 시켜주는 풍선확장 성형술, stent 시술법 등과 같은 중재적 시술과 외과적인 이식우회로술이 있다.

임상적으로는 협착이 발생하여 좌주관상동맥(LAD)의 내경이 50% 이상 감소하는 경우 또는 좌회선지(LCX)나 대각분지(D1)의 내경이 75% 이상 감소하는 경우에 외과적인 시술방법인 이식우회로술을 시술하는 것으로 알려져있다.

특히, 관상동맥 분지관 여러 곳에 협착이 발생되었을 경우에는 Sequential bypass 또는 Y-grafting

bypass 시술을 한다. Sequential bypass 와 Y-grafting bypass 는 혈관 이식우회로술로 Fig. 1 과 같이 자가혈관이나 인조혈관과 같은 우회혈관을 이용하여 협착부에 대체하거나 원위부에 삽입하여 부족한 혈류량을 늘리는 외과적 수술이다.

Y-grafting bypass 는 LAD 와 LCX 모두 협착이 발생한 경우와 같이 비교적 멀리 떨어진 두 혈관에 연속으로 문합시술을 할 때 사용되는 시술이고,

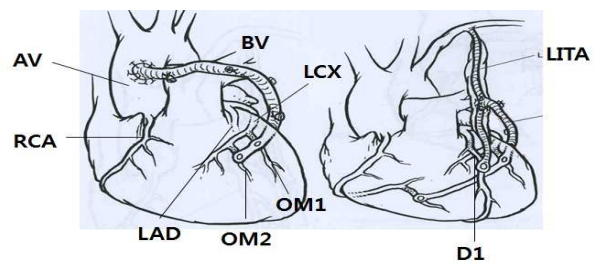


Fig. 1 Bypass grafting in the stenosed coronary artery

[§] 이 논문은 2011년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계 학술대회(2011. 4. 15.-16., 포항공대) 발표논문임

[†] Corresponding Author, suhsh@ssu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

Sequential bypass는 LAD와 D1 또는 LCX와 OM1 (First Obtuse Marginal; 좌회선지의 첫번째 분지혈관) 과 같이 인접한 두 혈관에 연속으로 문합시술을 할 경우에 사용된다. 또는 Fig. 1에 나타난 것처럼 경우에 따라 Y-grafting bypass와 Sequential bypass를 함께 시술하기도 한다. 개존을 향상을 위해 Y-grafting bypass 시술 시 이식혈관의 분지각도와 문합각도 변화에 따른 영향분석이 필요하다.

본 연구의 목적은 Y-grafting bypass 시술 후 유동특성을 파악하고, 시술 시 적합한 이식 혈관의 분지각도와 문합방법 분석을 찾고, Y-grafting bypass 동맥경화 발생 가능성을 예측하며, 개존을 향상을 위해 문합시술을 효과적으로 수행하기 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 혈관모델링

Fig. 2는 Y-grafting bypass의 개략도를 나타낸다. Y-grafting bypass는 분지 형태의 우회혈관으로 LAD와 LCX의 협착 원위부에 end-to-side 문합술로 우회술을 하는 시술 방법이다. 우회혈관의 분지각도가 90°인 경우에는 T-grafting bypass로 부르기도 한다.

본 연구에서는 혈액유동을 수치해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 혈관형상을 Fig. 3과 같이 3차원 모델로 구현하였다. LAD와 LCX는 원위부에서 근위부로 갈수록 직경이 줄어들도록 하였고, 이식혈관은 직경이 동일한 것으로 가정하였다. 또한 관상동맥의 관 모양이 되게 하였다.

먼저 우회혈관의 분지각도에 따른 영향을 알아보기 위해 Fig. 3의 (a)와 같이 이식혈관의 분지 각도를 30°, 60°, 90°로 나누었다. 그 후에 효과적인 문합 각도를

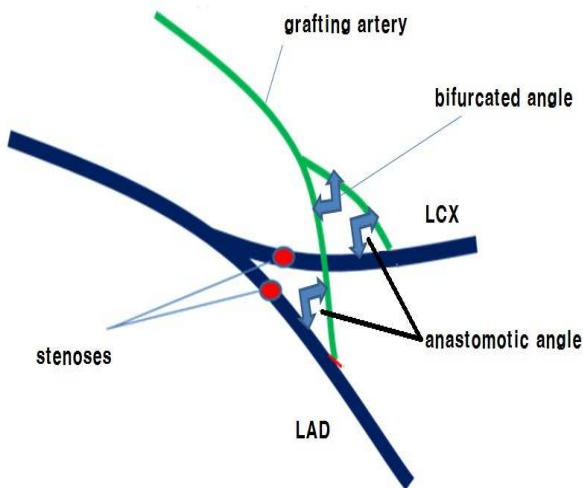


Fig. 2 The schematic of the y-grafting bypass for the stenosed coronary artery

알아보기 위해 Fig. 3(a)의 3 가지 모델에 대해 (b)와 같이 문합각도를 15°와 30°로 나누어 모델링을 수행하였다.

3. 수치해석

관상동맥 문합부에서 혈액유동 특성을 수치해석하기 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

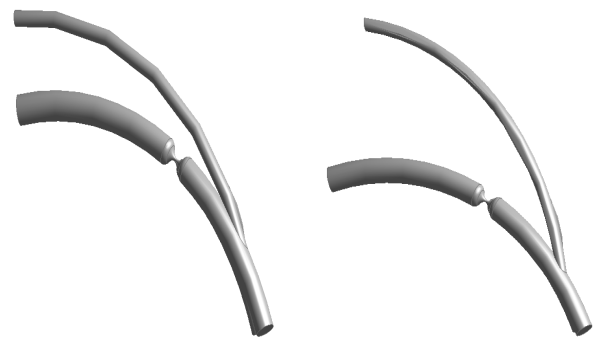
$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)는 각각 연속방정식과 운동량방정식이고 혈액의 점성계수는 식 (3)과 같은 Carreau 모델을 이용하였다.

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \tag{3}$$



(a) The angle of bifurcation changes of the bypass artery



(b) Grafting angle changes of the bypass artery

Fig. 3 Y-grafting bypass geometrics for the stenosed coronary artery

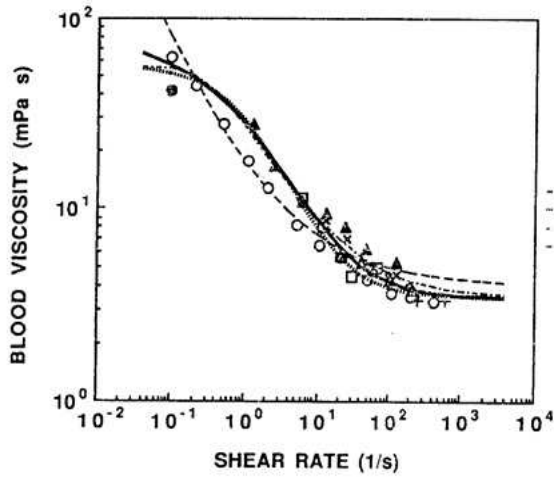


Fig. 4 Blood viscosities versus shear rates

식 (3)에서 η_0 는 영전단률점성계수이고, η_∞ 는 무한 전단률점성계수이며, λ 와 n 은 각각 특성시간과 상수이다.

Fig. 4 는 전단율의 변화에 따른 혈액 점성의 실험결과이다. 혈액의 점성모델은 전단율의 변화에 따른 혈액 점성의 변화를 실험적으로 얻은 실험결과이다.

관상동맥 문합부의 혈류역학적 특성을 살펴보기 위해 혈액에 대한 3 차원 비정상해석을 수행하였으며, 해석을 위한 경계조건으로 LAD 의 입구와 이식혈관의 입구에는 Fig. 5 와 같은 관상동맥의 압력파형을 적용하였다. 입구의 압력 파형은 AV(Aortic Valve)와 LV(Left Ventricle)의 압력파형으로부터 5 차의 Fourier 급수를 이용하여 압력파형을 구하였다. 수치계산에서는 LAD 입구와 이식혈관 입구는 동일한 압력파형을 적용하였다.

지배방정식과 구성방정식을 풀기 위한 해석 프로그램으로 ANSYS-CFX 12 를 사용하였다. CFX 코드는 Pressure Based AMG Coupled Solver 를 사용한다. 지배방정식은 유한체적법으로 이산화되며, 대류항과 확산항의 이산화방법으로는 각각 수정된 상류차분 기법과 중심차분법이 사용되었다. 비정상항의 이산화에는 Fully Implicit Scheme 을 사용하여 정확성과 안정성을 확보하였으며 비선형 방정식에 대한 반복 계산을 수행하였고 속도와 압력에 대한 Residual 을 10^{-6} 이하로 하여 해를 수렴시켰다.

4. 결과 및 검토

4.1 유동특성

Fig. 6 는 Fig. 5 의 경계조건을 적용하여 얻어진 LAD 와 이식혈관 입구에서의 속도파형이다.

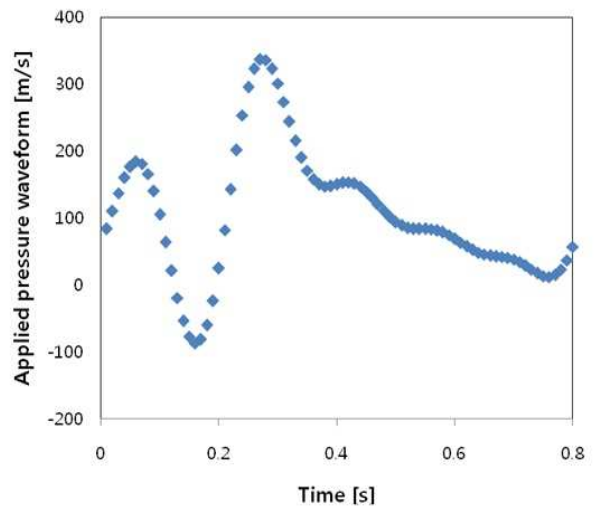
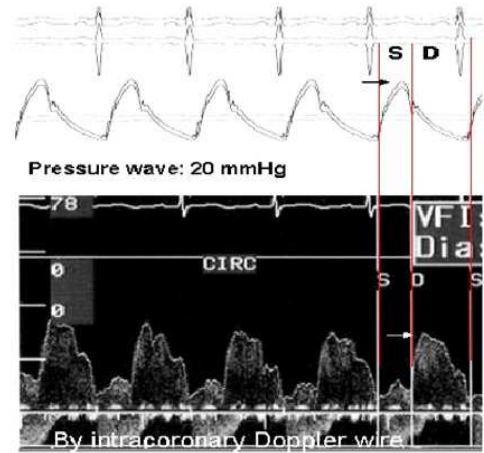


Fig. 5 Applied pressure waveform for the inlet boundary condition

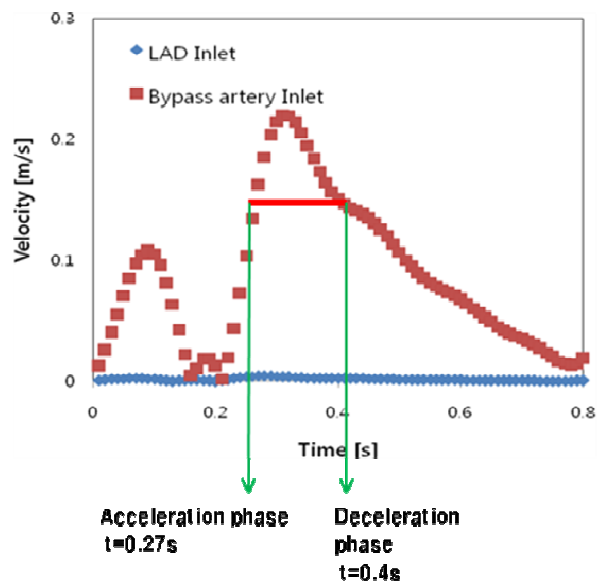


Fig. 6 Obtained velocity waveforms for the inlet of Bypass artery and LAD

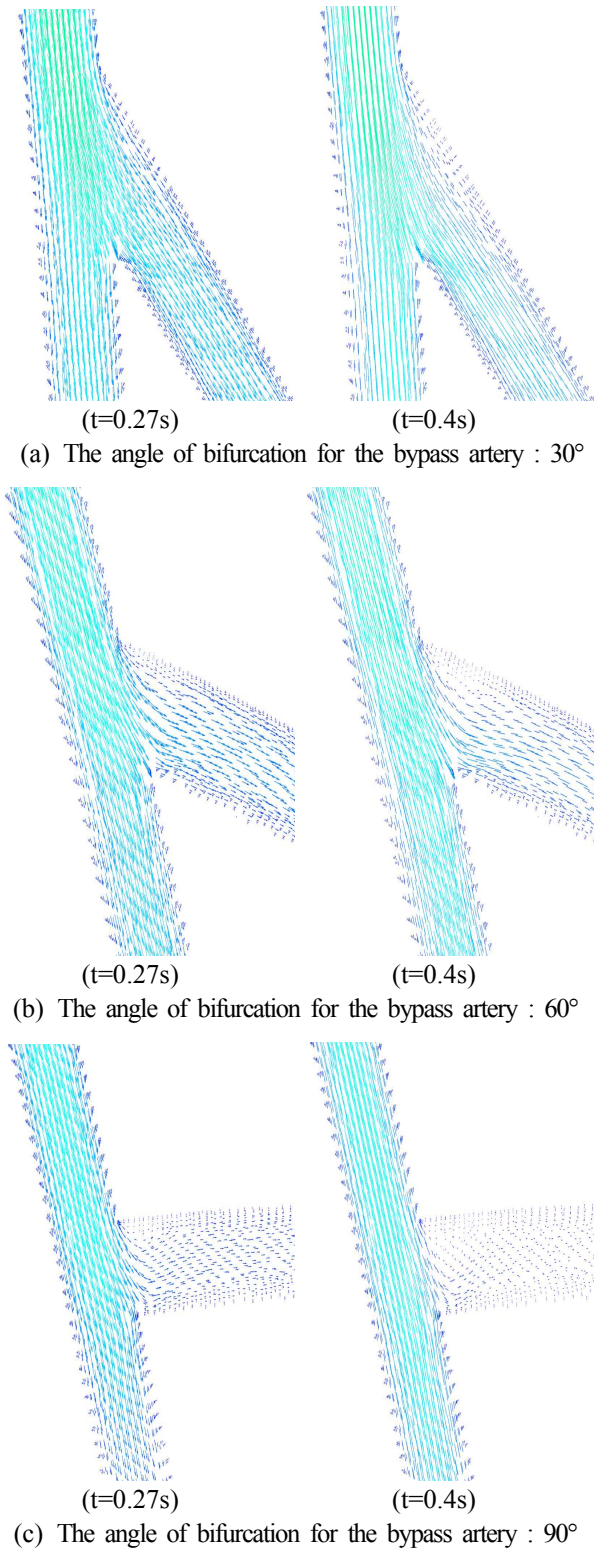


Fig. 7 Velocity vector distributions for the bifurcated region of the bypass artery

Fig. 7 을 보면 협착이 발생하여 90% 이상 직경이 좁아진 LAD 의 입구에서는 속도가 매우 낮은 분포를 보이고 있고 이식혈관으로 대부분의 혈류가

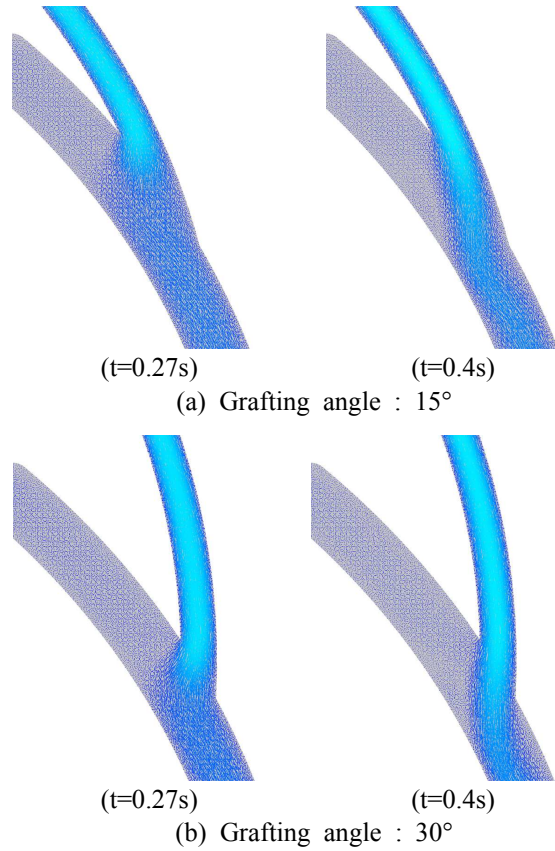


Fig. 8 Velocity vector distributions in the anastomosis region

공급됨을 알 수 있다.

이식혈관의 분지부에서의 유동특성을 파악하기 위해서 평균유속이 동일한 시간대에서 가속 시($t=0.27s$)와 감속 시($t=0.4s$)에 나타나는 유동특성을 관찰하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 이식혈관 분지부와 문합부에서의 속도벡터를 가속시와 감속시로 나누어서 나타낸 것이다.

Fig. 6 을 보면 공통적으로 감속 시에 가속 시보다 재순환영역이 크게 나타난다. 이식혈관의 분지각도가 커질수록 한쪽으로 치우치게 속도분포가 나타나고 있으며 분지각도가 30 도인 경우에는 속도분포가 주 이식혈관과 분지된 이식혈관의 경우와 비교하여 균일하게 분포한다.

Fig. 8 에서도 감속 시에 가속 시보다 재순환영역이 더 크게 발생함을 알 수 있다. 가속 시에는 분지각도 변화에 따른 유동 변화가 거의 나타나지 않지만 감속 시에는 분지각도가 커지게 되면 유동박리가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

4.2 혈류량과 개존율

Fig. 9~11 은 1 회 박동 시의 유량변화를 나타낸다. 그림의 범례에서 첫 번째와 두 번째 수치는 각각

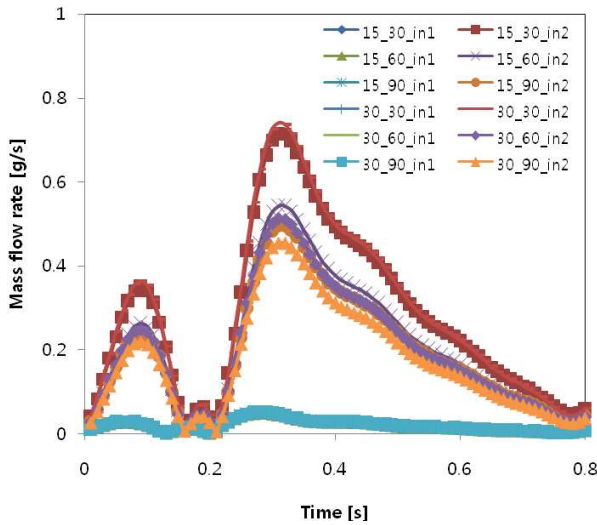


Fig. 9 Mass flow rates for the LAD and bypass artery

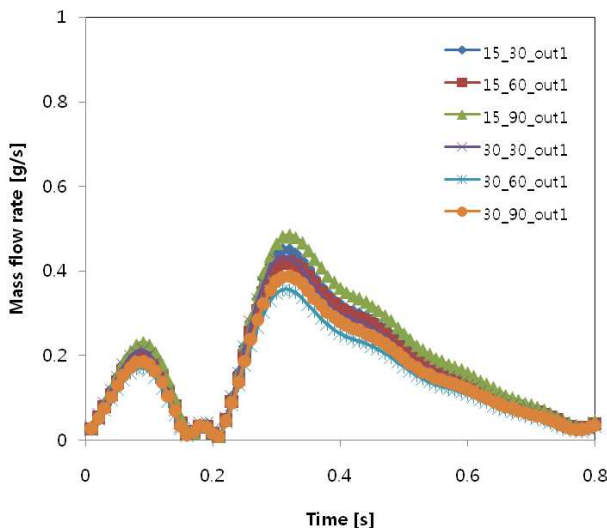


Fig. 10 Mass flow rates for the downstream of the LAD

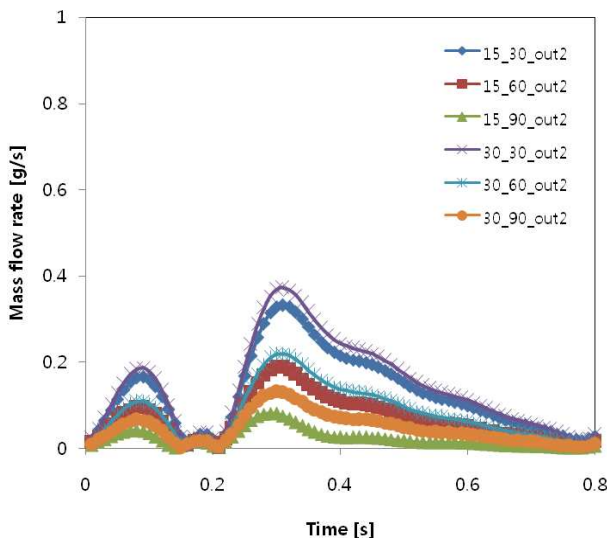


Fig. 11 Mass flow rates for the downstream of the bypass artery

문합각도와 이식혈관의 분지각도를 의미한다.

Fig. 9은 LAD와 이식혈관 입구로 유입되는 혈류량을 나타낸다. LAD 입구에서는 협착이 발생하여 혈류가 거의 흐르지 않고 대부분의 혈액이 이식혈관을 통해 LAD와 LCX의 원위부로 공급되고 있다.

이식혈관의 입구로 공급되는 혈액은 분지각도가 작을수록 더 큰 수치를 보여준다. 이는 심장이 동일한 일을 한다고 볼 때 이식혈관의 분지각도가 작아지면 손실이 줄어들게 되어 더 많은 혈류량을 보낼 수 있음을 의미한다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 LAD와 LCX의 원위부로 공급되는 유량을 나타낸다. Fig. 10에서는 이식혈관의 분지각도가 커짐에 따라 혈류량이 증가하지만 Fig. 11에서는 이식혈관의 분지각도가 커짐에 따라 혈류량이 감소하는 것으로 나타난다. 이는 이식혈관의 분지각도가 커질수록 혈류의 분배 차이가 커지기 때문이다. 즉, 이식혈관의 분지각도가 90도가 되면 LAD로 많은 혈류량이 가기 때문에 LCX로는 적은 양의 혈액을 보내게 된다.

그래프에서 이식혈관의 분지각도 변화에 따른 유량의 변화는 명확하게 나타나지만 문합각도에 따른 차이는 구별하기 어렵다. Table 1은 이식혈관의 분지각도와 문합각도에 따른 혈류량을 정량적으로 보여준다.

Table 1을 보면 문합각도가 30도인 경우가 15도일 때보다 상대적으로 많은 혈류량을 공급하고 있음을 알 수 있다.

Table 1에 나타난 이식혈관의 분지각도 변화에 따른 유량 변화를 보면 LAD로는 이식혈관의 분지각도에 관계없이 충분한 혈류량을 공급하고 있으나 이식혈관의 분지각도가 커질수록 LCX로는 혈류량이 거의 공급되지 않음을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of the time averaged mass flow rates(g/s) for the y-grafting bypass models

Bifurcated angle and grafting angle	Inlet		Outlet		Total	
	LAD	Bypass artery	LAD	LCX		
30	15	0.0188	0.2808	0.1794	0.1279	0.3072
	30	0.0191	0.2778	0.1701	0.1341	0.3043
60	15	0.0188	0.2129	0.1687	0.0686	0.2373
	30	0.0194	0.1984	0.1403	0.0827	0.2230
90	15	0.0189	0.1950	0.1963	0.0231	0.2195
	30	0.0192	0.1759	0.1539	0.0458	0.1996

임상적으로는 보통 LAD를 주 대상으로 하여 시술을 실시 하는데 LCX의 협착 정도를 파악한 후 이식혈관의 분지각도를 조절하면 LAD와 LCX로의 혈류량을 상황에 따라 적절히 조절할 수 있을 것으로 생각된다.

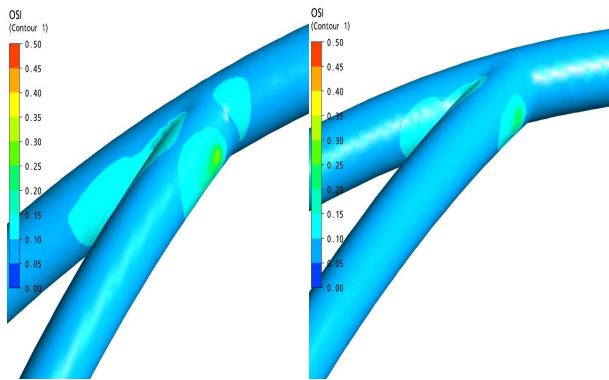
4.3 동맥경화의 재발생 예측

Suh와 Malek 등^(4,6)을 비롯한 여러 연구자들은 맥동진단지수인 OSI로부터 맥동유동에서 발생하는 혈류역학적 위험성 및 동맥경화의 발생 부위를 예측 하였다. 이식혈관의 분지부와 문합부에서의 동맥경화 발생을 예측하기 위해서 혈류역학적 인자인OSI 분포

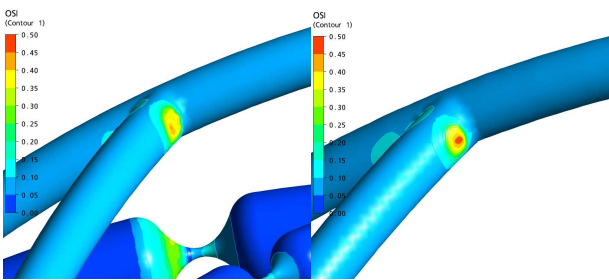
를 살펴보았다. OSI는 국부적인 위치에서의 벽전단응력의 순간적인 변화를 정량적으로 나타내며 식 (4)과 같이 시간평균화된 전단응력으로부터 구해지게 된다.

$$OSI = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\left| \int_0^T \tau_w dt \right|}{\int_0^T |\tau_w| dt} \right) \tag{4}$$

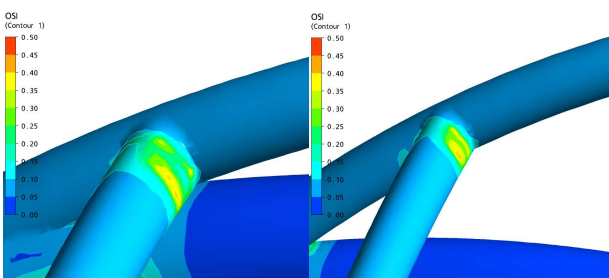
Fig. 12 을 보면 문합각도에 따른 OSI 값의 차이는 크지 않지만 이식혈관의 분지각도가 작을수록 OSI



(Grafting angle : 15°) (Grafting angle : 30°)
(a) The angle of bifurcation for the bypass artery : 30°

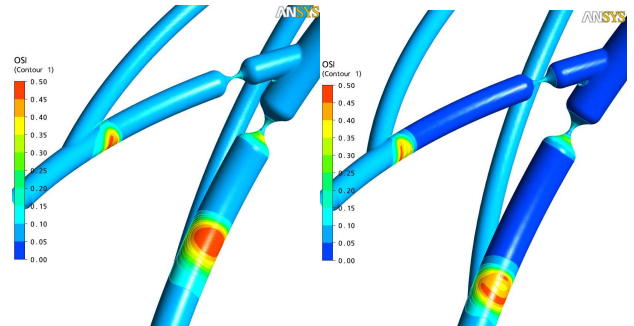


(Grafting angle : 15°) (Grafting angle : 30°)
(b) The angle of bifurcation for the bypass artery : 60°

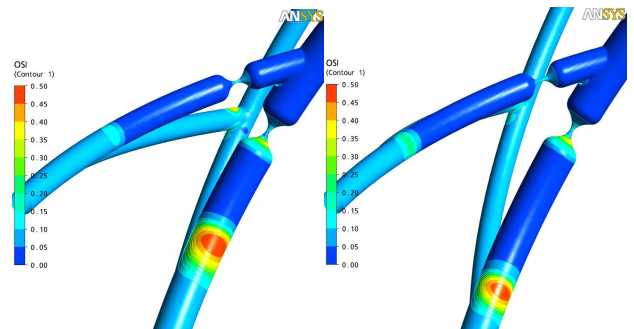


(Grafting angle : 15°) (Grafting angle : 30°)
(c) The angle of bifurcation for the bypass artery : 90°

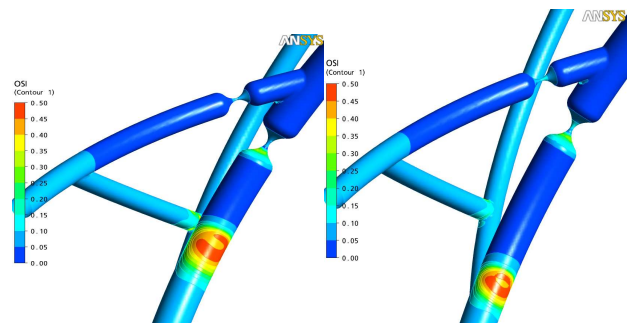
Fig. 12 OSI distribution of bifurcated region of the bypass artery



(Grafting angle : 15°) (Grafting angle : 30°)
(a) The angle of bifurcation for the bypass artery : 30°



(Grafting angle : 15°) (Grafting angle : 30°)
(b) The angle of bifurcation for the bypass artery : 60°



(Grafting angle : 15°) (Grafting angle : 30°)
(c) The angle of bifurcation for the bypass artery : 90°

Fig. 13 OSI distributions of the grafting artery

가 작게 나타나고 그 범위도 작음을 알 수 있다. Y-grafting bypass 시술 이후에 이식혈관에서의 동맥경화를 예방하기 위해서는 이식혈관의 분지각도를 작게 할 필요가 있다.

Fig. 13 은 문합 부위의 OSI 분포를 나타내었고 이를 통해 재순환 영역의 크기와 강도를 알 수 있다. 90 도일 경우에 LCX 문합부에서는 재순환 영역이 작게 나타나고 있는데 이는 혈류량이 적음으로 인해 발생하는 현상이다.

5. 결 론

본 연구에서는 LAD 와 LCX 에 동시에 협착이 발생했을 경우에 효과적으로 연속적인 이식혈관 시술을 하기 위한 자료를 구하기 위해 혈관모델을 가정하여 연구를 수행하였다. 이식혈관 시술 후에는 이식혈관의 분지각도나 문합각도에 관계없이 충분한 혈류량을 공급할 수 있음이 확인되었다. 문합각도가 큰 경우에 재순환영역이 더 크게 발생하였는데 이 재순환영역은 감속시 보다 가속시에 더 크게 나타났다. LCX 의 협착 정도를 파악한 후 이식혈관의 분지각도를 조절하면 LAD 와 LCX 로의 혈류량을 조절 가능함을 확인하였다. Y-grafting bypass 시술 시 이식혈관의 분지각도와 문합각도를 작게 하면 혈류량이 고르게 분배될 수 있었다. 그리고, 이식혈관의 분지각도가 작을수록 OSI 가 작게 나타났으나 문합각도에 따른 OSI 값의 차이는 크지 않았다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(20100025377).

참고문헌

- (1) Park, J. G., Suh, S. H., Roh, H. W. and Lee, J. S 2010, "A Study on Hemodynamic Characteristics for Sequential Anstomosis Bypass in Stenosed Coronary Artery," *Proceeding of the KSME Fluids Engineering Division Spring Meeting*, pp. 1~2.
- (2) Kim, H. M., 2004, "Influence of the Anastomosis Angle Variation on Flow Features Wall Shear Stress of an Artery," *Journal of computational fluids engineering.*, Vol. 9, No. 4, pp. 34~40.
- (3) Roh, H. W., Suh, S. H. and Kwon H. M. 2003, "Se uential Bypass Effects in the Stenosed Coronary Artery," *Proceeding of the KSME Fluids Engineering Division Spring Meeting*, pp. 1919~1922
- (4) Malek, A. M., Alper, S. L. and Izumo, S., 1999, "Hemo Dynamic Shear Stress and Its Role in Atherosclerosis," *JAMA*. pp.2035~2042.
- (5) Roh, H. W., Suh, S. H., Yoo S. S., Kwon, H. M. and Kim, D. S., 1997, "Investigation on the Optimal Anastomosis for the Human Coronary Artery Bypass," *Proceeding of the KSME Fluids Engineering Division Spring Meeting.*, pp. 198~203.
- (6) Yoo, S. S., Suh, S. H. and Kim D. S. 1997, "Blood Flow Analysis in the End-to-Side Anastomosis Models of the Aorto-Coronary Bypass," *The 10th Int. Symp. on Trans. Phenomena in the Thermal -Fluids Eng.*, pp. 67~72.