

관상동맥의 기하학적 형상변화에 따른 동맥경화 위험도

서상호^{*†} · 박준길^{*} · 노형운^{**} · 이병권^{***} · 권혁문^{***}

^{*} 숭실대학교 기계공학과, ^{**} (주)아이베이디지털, ^{***} 연세대학교 강남세브란스병원 심장내과

Atherogenic Risk Stratification According to Changes in the Geometrical Shape of the Coronary Artery

Sang-Ho Suh^{*†}, Jun-Gil Park^{*}, Hyung-Woon Roh^{**},
Byung-Kwon Lee^{***} and Hyuck-Moon Kwon^{***}

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.,

^{**} IVAI GD3,

^{***} Cardiology Division, Dept. of Internal Medicine Gangnam Severance Hospital, Yonsei Univ.

(Received October 30, 2009 ; Revised August 18, 2010 ; Accepted August 24, 2010)

Key Words: Coronary Artery(관상동맥), Geometrical Shape Change(기하학적 형상 변화), Oscillatory Shear Index(OSI; 맥동진단지수), Time-averaged Wall Shear Stress(시간평균 벽전단응력), Hemodynamic Wall Parameter(HWP; 혈류역학적 인자)

초록: 박동유동조건에서 관상동맥 내의 유동특성과 혈류역학적 인자 분포를 선행연구에서 수행하여 혈류역학이 관상동맥 내의 협착현상과 연관관계가 있음을 밝혔다. 동맥경화증의 호발부위인 관상동맥 분지부에서 혈류역학적 변수를 분석하여 동맥경화증의 발생기전을 규명하는 것이 본 연구의 목적이다. 동맥경화증에 의한 협착현상은 혈액과 혈관벽 사이의 생화학 반응뿐 아니라 유동박리나 벽전단응력과 같은 혈류역학적 인자와도 관계 있음을 확인하였다. 관상동맥 분지부의 분지각이 증가할수록 분지부 단면에서의 재순환영역의 크기가 증가하고 교란유동이 발생하게 된다. 이 재순환영역이 관상동맥에서 동맥경화의 시작점으로 의심되는 영역이라 할 수 있다.

Abstract: A previous study showed that hemodynamics is correlated with stenosis in the coronary artery. The flow characteristics and the distributions of the hemodynamic wall parameters in the coronary artery are investigated under physiological flow condition. The present study also aims to establish the mechanism of the generation of atherosclerosis by analyzing the hemodynamic variables in the coronary artery where atherosclerosis frequently occurs. The stenosis phenomena due to atherosclerosis are related to not only the biochemical reaction between blood and blood vessels but also the hemodynamic factors such as flow separation and oscillatory wall shear stress. As the bifurcated angle increases, the size of the recirculation area that appears in the cross section increases and disturbed flow is observed in this area. We speculate that this area is the starting point of atherosclerosis in the coronary artery.

1. 서론

관상동맥의 협착 혹은 폐색에 의한 허혈성 심장질환은 암질환과 함께 가장 중요한 사망원인 중 하나이다. 비침습적인 약물치료를 비롯하여 침습적 치료인 관상동맥 성형술(percutaneous intervention)의 발전에 힘입어 치료에 상당한 진전이 있었지만 아직 해결해야 할 과제들이 남아 있

다. 그 이유는 분지부에 발생한 협착의 치료에 대해서는 아직 뚜렷한 해결책이 없는 형편이기 때문이다.

분지부 병변은 관동맥성형술 대상의 약 15%에서 발견되며, 시술후에도 분지부가 아닌 병변보다 재협착율이 높고 시술에 따른 합병증과 실패의 확률이 높다. 분지부 혈관의 기하학적 형태 변화가 동맥경화나 재협착의 발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되나 이 부분에 대한 연구는 없었다. 따라서 본 논문에서는 관상동맥의 기하

† Corresponding Author, suhsh@ssu.ac.kr

학적 형상 변화에 따른 유동특성과 혈류역학적 인자의 분포를 연구하였다. 그리고 이 연구결과를 바탕으로 관동맥 성형술 시술 시 치료방법을 제공하고자 한다.

2. 혈류역학적 인자

일반적으로 벽면전단응력(Wall Shear Stress)은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_{wall} \quad (1)$$

박동유동(Physiological flow)에 의하여 혈관의 분지부 근처에서 유동박리/재부착, 보텍스와 이차 유동과 같은 교란유동(Disturbed flows)이 발생되고, 이로 인하여 전단응력은 낮은 전단응력과 높은 전단응력이 교차하게 되는 교번전단응력이 발생한다.

박동유동의 전단응력을 평가하기 위하여 Steinman과 Malek 등을 비롯한 여러 연구자들은 식 (2)와 같은 맥동전단지수인 OSI로부터 맥동유동에서 발생하는 혈류역학적 위험성 및 동맥경화의 발생 부위를 예측하였다.⁽¹⁻³⁾ OSI는 국부적인 위치에서의 벽전단응력의 순간적인 변화를 정량적으로 나타내며 식 (3)과 같이 시간평균화된 전단응력($\overline{\tau_w}$)으로부터 구해지게 된다.

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

$$\overline{\tau_w} = \frac{1}{T} \int_0^T |\tau_w| dt \quad (3)$$

OSI값은 0에서 0.5 사이의 값을 가지며 주로 분지부 근처의 표면에서 크게 나타나고 재순환 유동이 없는 곳에서는 작게 나타난다.

3. 수치해석

공간상의 3차원 관상동맥내 혈류의 박동유동특성을 컴퓨터시뮬레이션 하기 위하여 유한체적법(FVM)을 이용하였다. 컴퓨터시뮬레이션에 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식이며,

이 방정식들을 일반적인 보존형태로 표현하면 식 (4)와 같다.

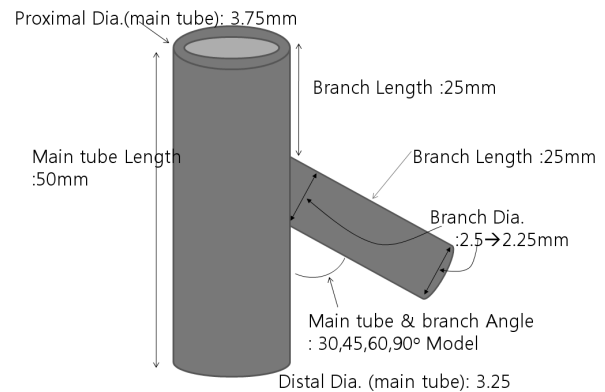
$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\phi) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) = S \quad (4)$$

식 (4)에서 ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도 벡터, Γ 는 확산 계수, ϕ 는 종속변수를 나타내고 우변의 S는 source term 이다.

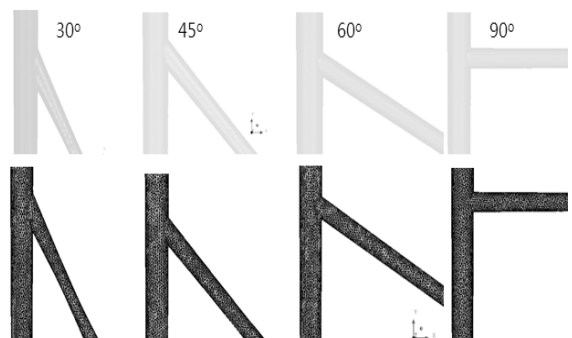
혈액유동에 관한 컴퓨터 시뮬레이션에서 지배 방정식을 해석하기 위해서는 비뉴턴유체 성질을 나타내는 구성방정식을 이용하여야 한다. 본 연구에서는 혈액의 유변학적 성질을 잘 나타내는 것으로 알려진 식 (5)와 같은 Carreau model을 이용하여 혈액의 구성방정식을 나타내었다.⁽⁴⁾

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (5)$$

식 (5)에서 η_0 는 영전단률점성계수이고, η_∞ 는 무한전단률점성계수이며 λ 와 n 은 각각 특성시간과 상수이다.



(a) Schematic diagram



(b) Geometry models and meshes

Fig. 1 Idealized geometries of the coronary artery

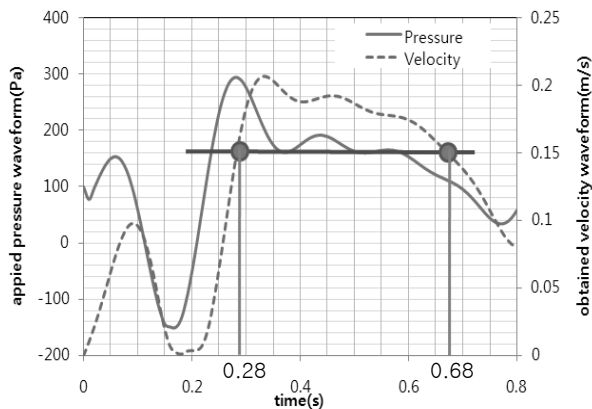


Fig. 2 Applied pressure and velocity waveforms for the inlet boundary condition

지배방정식과 구성방정식을 풀기 위한 해석 프로그램으로 ANSYS-CFX 11을 사용하였다. High Resolution Scheme을 이용하여 이산화하였으며, 비정상항의 이산화에는 Fully Implicit Scheme을 사용하여 정확성과 안정성을 확보하였다. 비선형 방정식에 대한 반복계산을 수행하였고 속도와 압력에 대한 Residual을 10^{-5} 이하로 하여 해를 수렴시켰다.

해석을 통하여 분지각도 변화에 따른 유동현상과 이차유동을 파악하였으며 혈류역학에서의 정량적인 인자인 시간평균화된 벽전단응력과 OSI값을 계산하였다. 관상동맥의 기하학적 형상에 따른 동맥경화 위험도를 수치해석하기 위하여 3차원 모델링한 혈관모델은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1은 관상동맥의 입구에서 첫 번째 분지가 있는 영역을 모델링하였으며 테이퍼져 있는 구조를 가지고 있다. 컴퓨터시뮬레이션을 수행하기 위한 경계조건으로 Fig. 2와 같이 AV와 LV 사이의 차압을 측정하여 5차 푸리에 급수식을 생성하였고 이 5차 푸리에 급수를 수치해석에서 경계조건으로 이용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 유동특성

분지부에서의 유동특성을 파악하기 위해 평균 유속이 같은 시간대 즉, 가속시($t=0.28s$)와 감속시($t=0.68s$)에서의 유동을 관찰하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 가속시 관상동맥 입구에서 유입된 혈류는 좌전하행지(LCD)와 회선지

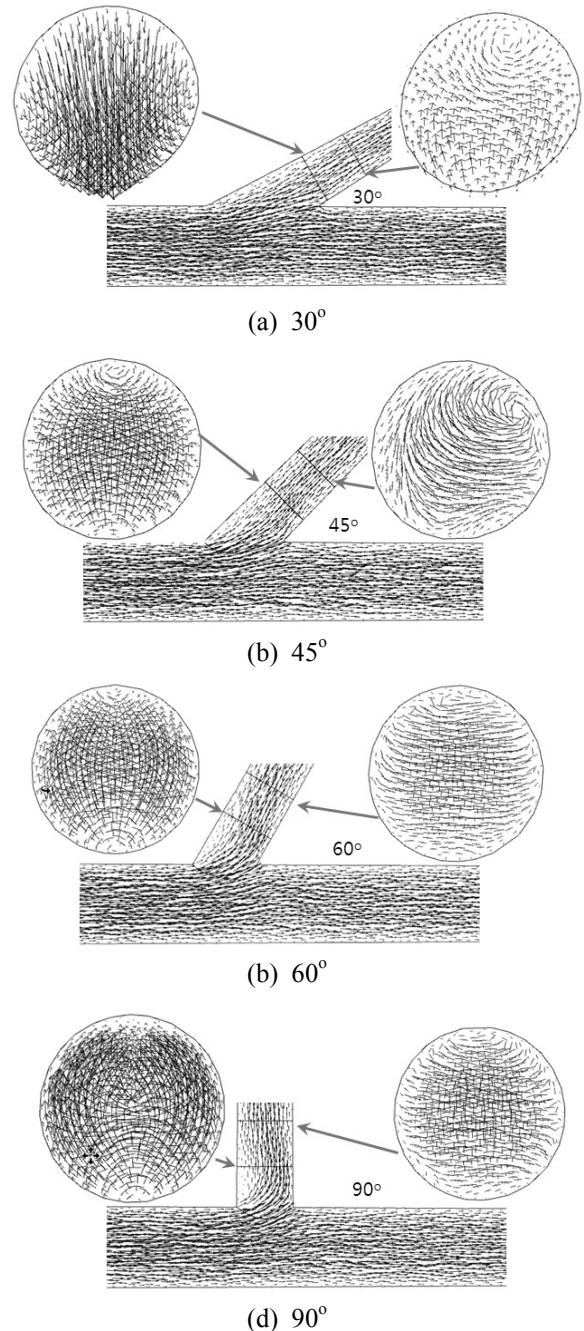


Fig. 3 Secondary flows in the bifurcated regions (acceleration phase, $t=0.28s$)

(LCX)로 분지되어 유동하고, 분지부 지나 회선지 상단부 영역에서 정체가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 분지각도가 바뀌어도 변함이 없음을 알 수 있다. 분지각도가 증가함에 따라 회선지의 첫 번째 단면에서 발생하는 재순환 영역의 크기는 점점 더 커짐을 알 수 있다.

분지점(apex)을 지나 회선지 하단부에서는 재순환영역이 크지 않지만 이차유동은 회선지 첫 번

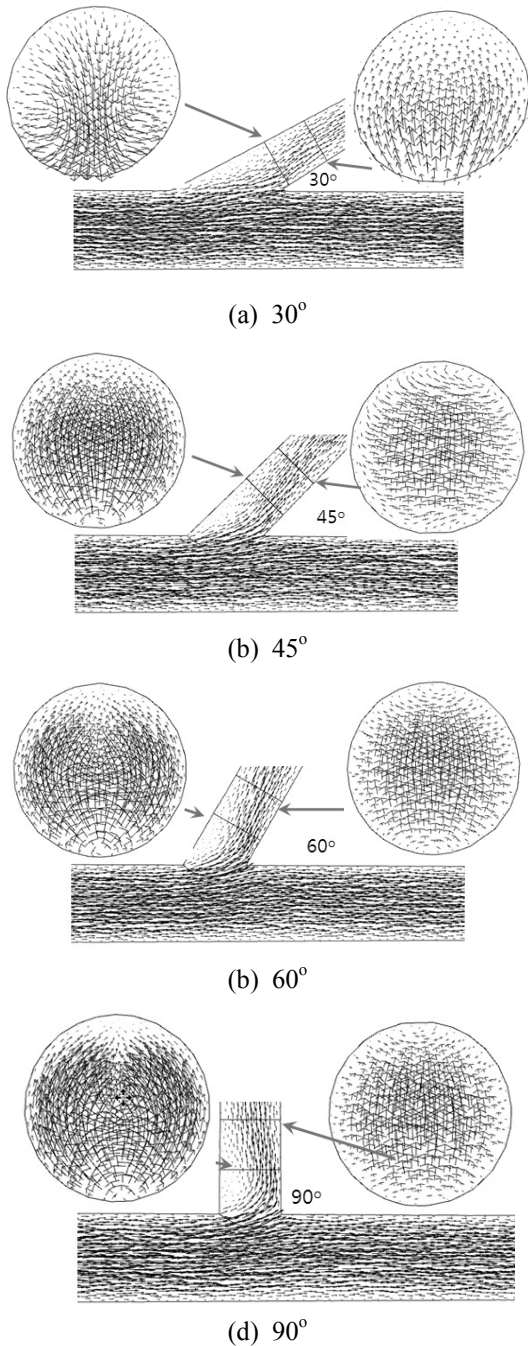


Fig. 4 Secondary flows in the bifurcated regions (deceleration phase, $t=0.68s$)

재 단면의 경우보다 커짐을 알 수 있다. 즉 분지관 원위부인 회선지 하단부에 헬리컬유동이 발생함을 알 수 있다.

이러한 경향을 자세히 살펴보기 위하여 평균유속이 같은 감속기 $t=0.68s$ 일 때의 속도분포를 Fig. 4와 같이 제시하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 유동박리 현상 및 재순환현상은 하단부 쪽으로

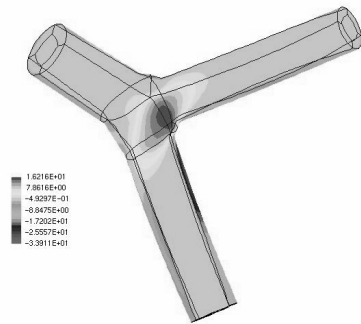


Fig. 5 Wall shear stress distributions in the coronary artery

확장됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 혈류량을 감소시키려는 감속력에 의하여 주관으로 유동이 역류하기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 이러한 경향은 분지각도가 90°로 증가하면서 점점 심해짐을 알 수 있다.

분지각도가 증가할수록 유동박리가 많이 발생하고 재순환영역이 커지고 있다. 유동박리와 재순환영역은 가속 시 보다 감속 시에 더 잘 발생하고 있다.

일반적으로 분지관 근위부와 원위부에서는 유동박리/재부착, 보텍스와 이차유동과 같은 교란유동이 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 나타났다. 선행연구결과(5)에서도 이미 확인하였듯이 이러한 영역을 혈류역학적 관점에서 볼 때 동맥경화의 시작점으로 가장 의심이 되는 영역이라 할 수 있다. 회선지의 상단부와 하단부 영역에서는 보통 낮은 전단응력과 높은 전단응력이 교차로 나타내면서 맥동전단응력(oscillatory shear stress) 즉 고-저 전단응력과 저-고 전단응력이 나타난다.

4.2 혈류역학적 인자

혈류역학적 특성에 따라 분지부의 특성을 자세히 살펴보고 이를 평가하기 위하여 식 (2)와 같은 OSI와 식 (3)와 같은 $\overline{\tau_w}$ 의 혈류역학적 인자를 구함으로써 맥동유동에서 발생하는 혈류역학적 위험성 및 동맥경화의 발생 부위를 Fig. 6과 같이 예측하였다.

Fig. 6에서 분지각도 변화에 따른 각각의 결과값을 확인할 수 있으며 그림의 왼쪽과 오른쪽의 보는 각도를 달리하여 분지 주관의 바닥 부분에서도 혈류역학 인자들을 살펴볼 수 있게 하였다. $\overline{\tau_w}$ 와 OSI 값은 한 주기를 시간평균하여 본 결

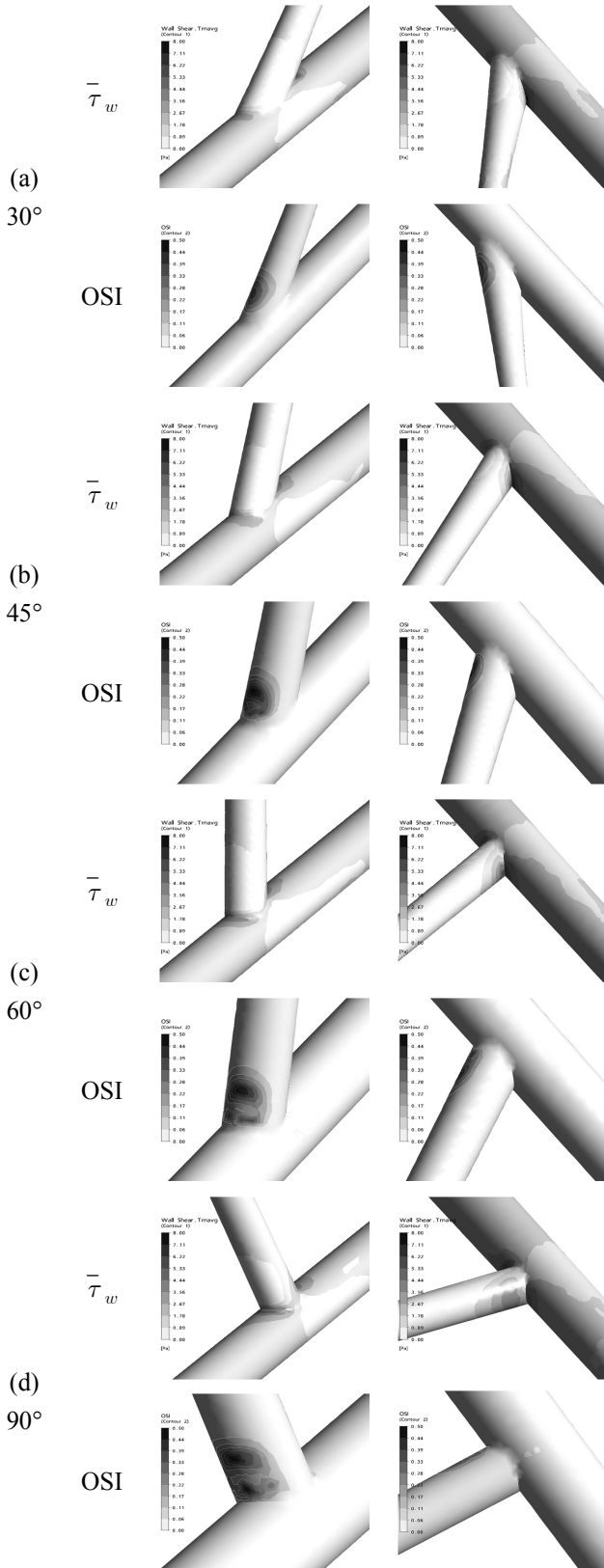


Fig. 6 Comparison of $\overline{\tau_w}$ and OSI for different geometric models

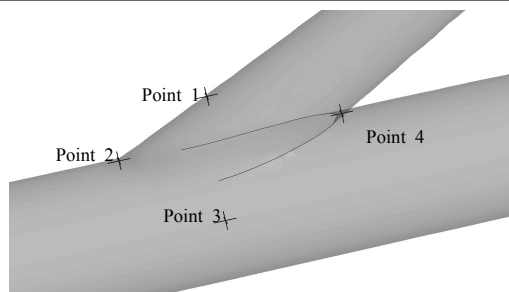
과를 바탕으로 나타내었다. 먼저 Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 30°인 경우의 $\overline{\tau_w}$ 의 값은 회선지의 외벽 즉 분지부 상단부 영역부터 시작해서 재순환 영역이 발생되었던 부분에서 평균값이 0을 나타내었으며 좌전하행지인 주관 바닥부분에서도 작은 값을 나타내었다. 가장 큰 전단응력값은 회선지의 하단부 영역에서 7.88 Pa의 큰 값을 나타내었다. 이러한 경향은 각도가 증가함에 따라 회선지 외벽쪽으로 $\overline{\tau_w}$ 가 작고, 분지점 영역에서는 큰 값을 갖는 동일한 경향을 나타내고 있다. 그러나 분지점 영역에서 큰 값을 갖는 경향은 각도가 커짐에 따라 점점 줄어들고 있음을 알 수 있고, 분지점 영역뿐만 아니라 회선지 외벽 분지부 영역에서도 큰 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 즉 유동박리는 각도가 커짐에 따라 회선지 외벽 부분에서 발생된다는 것을 알 수 있다.

$\overline{\tau_w}$ 는 한주기 동안 작용했던 전단응력을 시간 평균한 것이다. 즉 식 (3)에서 볼 수 있듯이 구해진 전단응력의 절대값을 취하여 스무딩(smoothing)한 값이다. OSI는 식 (2)에서 볼 수 있듯이 맥동하는 전단응력의 진정한 평균값이라 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 모든 각도에서 OSI의 최대값은 0.3에서 0.45의 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 가장 분지각도가 작은 30°의 경우에는 OSI의 최대값이 0.308임을 알 수 있으나 나머지 3가지 분지각도의 경우는 평균 0.45의 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 서론에서 설명하였듯이 OSI값은 0에서 0.5 사이의 값을 가지며 주로 분지부 근처의 표면에서 크게 나타나고 재순환 유동이 없는 곳에서는 작게 나타난다.

$\overline{\tau_w}$ 와 OSI의 관계를 살펴보면 1주기 동안 구해진 $\overline{\tau_w}$ 가 큰 부분에서는 OSI값이 적게 나타나고 반대로 $\overline{\tau_w}$ 가 작은 부분에서는 OSI 값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4를 고려해 보면 유동박리와 재순환 영역이 발생하는 지점에서 OSI 값이 크게 나타나고 있다. 분지 직후 외벽 표면에서 OSI가 크게 나타나는 것을 Fig. 6에서 알 수 있다. 또한 특이한 점은 OSI 값은 분지각도가 적은 30°나 45°의 경우에는 넓게 퍼져 있지만 분지 각도가 큰 60°나 90°의 경우에는 최대점이 2개가 됨을 알 수 있다. 이를 보면 OSI가 높게 측정되는 90° 분지관의 분지 직후의 외벽 표면에서 동맥경화의

Table 1 $\bar{\tau}_w$ and OSI for different positions



		$\bar{\tau}_w$ [Pa]	OSI
30°	Point 1	0.13287	0.30896
	Point 2	2.75023	0.06544
	Point 3	1.51152	0.05915
	Point 4	6.01929	0.08173
45°	Point 1	0.02011	0.47166
	Point 2	3.29246	0.06574
	Point 3	1.49009	0.05991
	Point 4	6.27971	0.08077
60°	Point 1	0.04546	0.44192
	Point 2	3.62585	0.06863
	Point 3	1.38275	0.05892
	Point 4	5.45529	0.07739
90°	Point 1	0.06040	0.46943
	Point 2	2.96764	0.07869
	Point 3	1.42950	0.05968
	Point 4	2.86631	0.08241

가능성이 높을 것으로 판단된다. 이에 대한 경향을 좀 더 세밀히 살펴보기 위하여 Table 1과 같이 4개점에서의 HWP를 정량적으로 비교하였다.

Fig. 7은 Table 1의 Point 1에 대한 결과만 비교하여 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 $\bar{\tau}_w$ 가 낮은 곳에서 OSI가 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 7에서 보면 Point 1의 경우 30°인 경우는 다른 각도와는 달리 $\bar{\tau}_w$ 가 비교적 크며 OSI도 훨씬 작게 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 혈류유동에서도 관찰을 하였지만 Point 1 부분에서 저전단응력이 작용하고 있고 이는 내피세포에 좋지 않은 영향을 미치므로 혈관질환의 발생 가능성이 높음을 알 수 있다. Point 2와 Point 3에서는 대체로 각도변화에 대해 $\bar{\tau}_w$ 와 OSI의 변화가 크지 않다. Point 4 지점에서는 각도가 커질수록 $\bar{\tau}_w$ 값

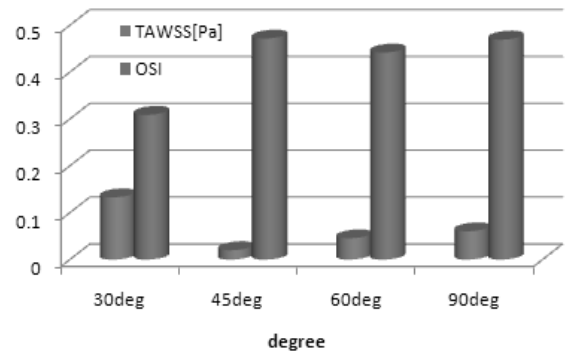


Fig. 7 $\bar{\tau}_w$ and OSI at Point 1

이 작게 나타난다. 이를 보면 90° 관에서는 Point 1 지점 뿐만 아니라 Point 4 지점에서도 상대적으로 혈관질환의 가능성이 있음을 알 수 있다.

5. 결론

분지부 근위부와 원위부에서는 유동박리/재부착, 보텍스와 이차유동과 같은 교란유동이 발생하는 영역이 혈류역학적 관점에서 볼 때 동맥경화의 시작점으로 가장 의심이 되는 영역이라 할 수 있다. 이러한 영역에서 OSI값은 크게 나타났으며 반대로 $\bar{\tau}_w$ 가 적게 나타났음을 알 수 있다. 즉 이를 보면 OSI가 높게 측정되는 분지부의 분지부 직후의 외벽 표면에서 혈관질환의 가능성이 높을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No. 00042700)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Malek, A. M., Alper, S. L. and Izumo, S., 1999, "Hemodynamic Shear Stress and Its Role in Atherosclerosis," *JAMA*, Vol. 282, pp. 2035~2042.
- (2) Friedman, M. H., Deters, O. J., Mark, F. F., Bargeron, C. B., Hutchins, G. M., 1983, "Arterial Geometry Affects Hemodynamics. a Potential Risk Factor for Atherosclerosis," *Atherosclerosis*,

- Vol. 46, pp. 225~231.
- (3) Lee, S.-W., Antiga, L., Spence, J. D. and Steinman, D. A., 2008, Geometry of the Carotid Bifurcation Predicts Its Exposure to Disturbed Flow, *J. of Stroke*.
- (4) Roh, H.-W., 1999, Pulsatile Flow Analysis of Non-Newtonian Fluids in the Circular and the Bifurcated Tubes, SoongSil University
- (5) Suh, S. H., et al., 2005, "Significance of Hemodynamic Effects on the Generation of Atherosclerosis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 836-845
- (6) Suh, S. H., et al., 2002, "Pulsatile Flow in the Artery with Stenosis," *Transactions of the KSME B*, Vol. 26, No. 1, pp. 39~44.