

복부대동맥류의 확장에 따른 유동 및 벽면전단응력 해석

신상철*·김경우*·이건휘**·모정하**·김동현**

Analysis for the Flow and Wall Shear Stress with a Dilatation of an Abdominal Aortic Aneurysm

Sang Chul Shin, Kyong Woo Kim, Gun Hye Lee, Jeong Hah Moh, Dong Hyun Kim

Key Words: Abdominal Aortic Aneurysm(복부대동맥류), Wall Shear Stress(벽면전단응력), Blood Flow(혈류유동), Secondary Recirculating Flow(2차 재순환유동)

Abstract

The objective of the present study is to investigate the characteristics for flow and wall shear stress in the aneurysm which is a local dilatation of the blood vessel. The numerical simulation using the commercial software for the laminar and steady flow were carried out over the diameter ratios(ratio of maximum diameter of aneurysm to the diameter of blood vessel) ranging from 1.5 to 2.5 and Reynolds number ranging from 900 to 1800. It was shown that a recirculating vortex occupied the entire bulge with its core located closer to the distal end of the bulge and the strength of vortex increased with increase of the Reynolds number and diameter ratio. Especially, for the Reynolds number of 1800 and diameter ratio of 2.5, the very weak secondary recirculating flow was produced at the left upper of the aneurysm. The position of a maximum wall shear stress was the distal end of the aneurysm($z=18\text{mm}$) regardless of the Reynolds number and diameter ratios. But the maximum values of the wall shear stress increased in proportion to the increase of Reynolds number and diameter ratio.

1. 서론

최근에 동맥경화증의 진행에 따른 혈관의 약화로 복부나 흉부의 대동맥이 풍선처럼 늘어나는 동맥류 질환이 증가하고 있다. 동맥류성 질환은 혈류직경이 6cm 이상이 되면 동맥류가 파열되며 심한 경우 사망을 야기시킨다. 이러한 동맥류가 자주 나타나는 곳은 복부 대동맥, 신동맥, 뇌동맥이며 그 위치에 따라 형상이 다르다.

복부대동맥에서는 주로 복부동맥 분지 전에 풍선 모양으로 동맥류가 발생한다. 복부대동맥류(abdominal aortic aneurysm)는 대동맥 직경의

1.5배에서 4배까지 자라며, 직경이 5cm 이상이면 동맥류 제거 수술이 시행되나 동맥류의 크기가 작더라도 파열이 발생하는 경우가 가끔 있다.

동맥류의 파열은 동맥류내의 압력과 혈류의 유동에 의한 전단응력이 혈관벽에 작용함으로써 관벽의 구조변화에 따라 혈관벽이 약화되기 때문으로 알려지고 있다. 전단응력은 동맥류의 성장과 파열에 상당한 영향을 미치며 동맥류의 파열은 높은 사망률을 일으키므로 파열의 예측은 동맥류의 치료 및 수술에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

복부대동맥류에 대한 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Budwig 등⁽¹⁾은 층류유동이 고려된 유리모델에 대하여 열선유속계의 원리를 이용하여 전단응력을 측정하였으며, 이를 유한요소법에 의한 수치해와 비교하였다. Schrader 등⁽²⁾ 및 Peattie 등⁽³⁾은 CDFI(color Doppler flow imaging)법을 이용하여 동맥류내에서 난류 천이에 관한 연구를 하

* 원광대학교 대학원 기계공학과

** 원광대학교 공과대학 기계공학과

였으며 Asbury 등⁽⁴⁾은 LDV를 이용하여 평균전단 응력, 난동도를 측정하였다. 그리고 Bluestein 등⁽⁵⁾은 상용코드인 FIDAP 프로그램을 사용하여 복부 대동맥내의 정상유동에 대한 수치해석을 수행하여 벽에 대한 전단응력의 변화를 고찰하였다. 한편 Yu⁽⁶⁾는 PIV(particle image velocimetry)를 이용하여 정상유동 및 맥동유동에 대한 유동특성을 실험적으로 조사하였으며 오성은 및 이계한⁽⁷⁾은 광색성 염료를 사용하여 복부대동맥류내의 맥동 유동에 대한 전단응력을 측정하였다. 지금까지의 연구는 주로 층류 및 난류유동 그리고 맥동유동에 대한 전단응력의 변화에 대하여 이루어졌기 때문에 복부대동맥의 확장의 정도(혈관직경에 대한 동맥류 최대직경의 비)에 따른 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 층류유동에 대하여 확장의 정도에 따른 복부대동맥류내의 유동 및 벽면에서의 전단응력 변화를 수치적으로 해석하였다. 상용되고 있는 전산유체역학 프로그램을 이용하여 수치 해석을 수행하였으며 해석 결과를 바탕으로 대동맥류의 파열 지점을 예측하였다.

2. 모 델

2.1 복부대동맥류 모델 및 경계조건

복부대동맥류의 해석 모델은 Bluestein 등⁽⁵⁾이 제시한 모델로서 Fig. 1과 같은 형상으로 표현할 수 있다. 동맥류의 반경 $r(z)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$r(z) = \frac{D}{2} + \frac{(D_{\max} - D)}{4} \left(1 + \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \quad (1)$$

여기서 $D(=10\text{mm})$ 는 혈관직경을, $D_{\max}(=15, 20, 25\text{mm})$ 는 동맥류 최대직경을, z 는 축방향 좌표를 나타내며, $L(=40\text{mm})$ 은 동맥류 길이를 나타낸다. 따라서 혈관직경에 대한 최대직경의 비, r_D 를 $r_D = D_{\max}/D$ 로 정의하면 r_D 는 1.5, 2.0 및 2.5의 값을 갖는다.

예비 수치실험 결과, 후류의 길이를 직경의 5배 이상으로 하였을 경우 상류 유동은 후류의 유동에 영향을 미치지 않았다. 따라서 모델의 총

길이는 직경의 10배로, 후류의 길이는 직경의 5배로 정하였다.

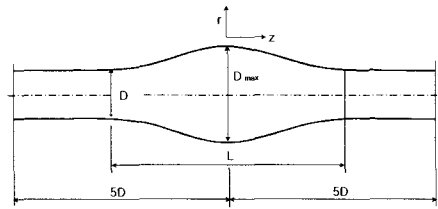


Fig. 1 Geometry of the aneurysm model

복부대동맥류는 z 방향의 축에 대하여 대칭이므로, z 축의 상단부를 수치계산의 영역으로 정하였다. 벽에는 점착조건(no slip condition)이 적용되며, 입구에는 다음과 같은 식으로 주어지는 완전발달조건을 적용하였다.

$$u(r) = 2u_m \left\{ 1 - 4 \left(\frac{r}{D} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

여기서 u_m 은 입구에서 혈액의 평균속도를 나타낸다. 본 연구에서는 Reynolds 수($Re = u_m D / \nu$)로 900과 1800을 사용하였으며, 이에 대응하는 평균속도는 각각 0.315m/s 및 0.63m/s이다.

2.2 혈액

혈액은 전단응력의 감소에 따라 점도가 증가하는 비뉴턴유체, 즉 밀도 및 점도가 일정하지 않은 유체이나, 본 연구에서는 일정한 값으로 가정하여 해석을 수행하였다. 평균적으로 혈액의 밀도(ρ)는 1056 kg/m^3 이며, 점도(μ)는 $0.003696 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 이다⁽⁵⁾.

3. 해 석

3.1 지배방정식

해석하고자 하는 모델은 2차원, 정상상태 및 비압축성유체이며 점도는 일정하다. 이러한 가정하에 연속방정식과 운동량방정식을 텐서형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

3.2 격자계 구성

사용된 모델은 주유동방향(z 방향)으로의 속도 변화가 수직방향(r 방향)의 속도변화보다 매우 작기 때문에 수직방향의 격자수가 주유동방향의 격자수보다 상대적으로 많도록 “200×40”의 격자계를 선택하였다. 주유동방향에서 입구 및 출구부분은 $z=0$ 쪽을 향하여 조밀하게 격자계를 구성하였고 대동맥류 부분(풍선모양 부분)에서는 일정한 간격의 격자계를 사용하였다. 그리고 수직방향으로는 0.96의 공비를 갖는 등비수열을 이용하여 벽면 방향으로 조밀하게 격자가 배치되도록 하였다.

3.3 수치해석 방법

수치해석을 위해 열·유체분야에서 전세계적으로 널리 사용되고 있는 상용코드, Fluent를 사용하였다. 운동량에 대해서는 1계 상류도식을, 연계된 속도 및 압력에 대해서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 그리고 모든 변수에 대하여 허용오차의 범위가 1×10^{-4} 이내이면 수렴한 것으로 판단하여 계산을 종료하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유동장

Fig. 2는 Reynolds 수 900에 대하여 혈관직경에 대한 동맥류 최대직경의 비(r_D)가 1.5, 2.0 및 2.5인 경우에 대한 유동장을 나타낸 그림이다. 해석한 모든 범위의 r_D 값에 대하여 동맥류내의 확장된 부분에서 재순환유동이 관찰되고 있다. r_D 의 증가에 비례하여 재순환유동의 세기가 증가하고 있으며, 중심부가 하류쪽으로 이동하는 현상을 나타내고 있다. 그 결과로 유선은 동맥류 말단부에서는 축소되고 상단부에서는 확대되는 모양을 보인다. r_D 가 1.5인 경우 매우 약한 재순환유동이 발생하지만 r_D 가 증가할수록 동맥류 말단부

에서 주유동이 부풀어오르는 듯한 약간 뒤틀리는 현상을 보이고 있다.

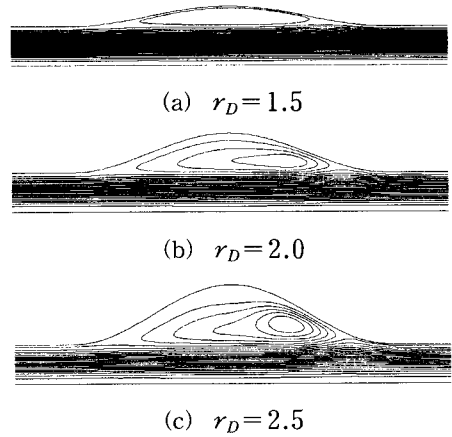


Fig. 2 Streamline contour plots in the aneurysm for Re=900

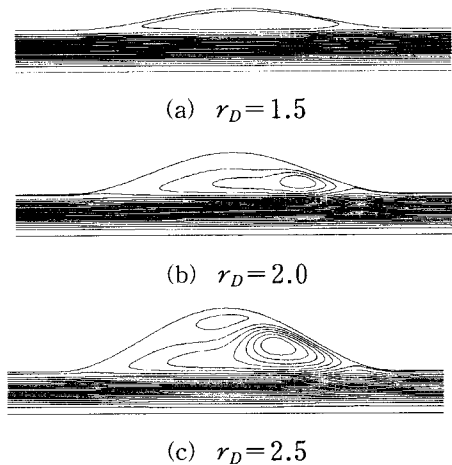


Fig. 3 Streamline contour plots in the aneurysm for Re=1800

이러한 현상은 Reynolds수가 증가하여도 비슷하게 나타난다. Fig. 3은 Reynolds수 1800에 대하여 각각의 r_D 에 대한 동맥류내의 유동장을 나타낸 것이다. Reynolds 수 900인 경우와 마찬가지로 r_D 가 증가할수록 동맥류 하단부에서 주유동이 휘는 현상이 나타나며 재순환유동도 주유동의 진행방향 쪽으로 약간 찌그러지는 형태를 보이고 있다. r_D 가 2.5인 경우 앞의 경우와는 상이한 유

동이 관찰되는데 동맥류 중앙 상단부에서 매우 약한 2차 재순환유동이 나타나고 있다. 이러한 사실로부터 Reynolds수 및 r_D 가 증가할수록 동맥류 상단부에서 2차 재순환유동이 발생할 확률이 높다는 것을 예상할 수 있다.

Bluestein 등^[5]의 결과에 의하면 재부착점의 길이는 층류유동인 경우 Reynolds수의 증가에 비례하여 약간 증가하는 것으로 보고되었다. 본 연구에서도 박리점 및 재부착점의 길이는 Reynolds수의 증가에 비례하여 확대되는 것으로 나타났다. Table 1은 동맥류내의 박리점 및 재부착점의 위치를 Reynolds수 및 r_D 의 각각에 대하여 표시한 것이다. Reynolds수 900인 경우 박리점 및 재부착점은 r_D 의 증가에 비례하여 확대되었으나 r_D 가 2.0 이상인 경우에는 거의 일정하였다. 이러한 현상은 Reynolds수가 증가하여도 비슷하게 나타났다. Reynolds수가 1800인 경우 박리점과 재부착점 간의 거리는 r_D 의 증가에 비례하여 확대되었다. 특기할만한 사실은 $r_D=2.5$ 인 경우 박리점 및 재부착점이 두 번 나타난 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 $Re=1800$ 및 $r_D=2.5$ 인 경우 동맥류 상단 왼쪽 부분에서 매우 약한 2차 재순환유동이 발생하였으며 이의 결과로 박리점이 두 번 나타났다.

Table 1 Position of separation point and reattachment point in the aneurysm

r_D	separation point [mm]	reattachment point [mm]
Re=900		
1.5	-13.5	11.1
2.0	-16.1	14.0
2.5	-16.9	14.9
Re=1800		
1.5	-14.6	12.9
2.0	-16.6	14.7
2.5	-17.3 and 5.4	-6.4 and 15.3

동맥류내의 유동특성을 알아보기 위하여 z 축을 중심으로 -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30mm가 되는 위치에서의 단면에 대하여 속도분포를 관찰하

였다. Fig. 4는 Reynolds수 900에 대하여 r_D 의 변화에 따른 속도장을 각각의 단면에서 도시한 것이다. 입구 및 출구에서의 속도분포는 r_D 의 변화에 관계없이 완전발달유동의 입구조건에 따른 영향으로 비슷한 모양을 보이고 있다. 그러나 동맥류 입구에서는 역압력구배에 의한 운동량 감소로 인하여 유동의 박리가 발생하는 것을 볼 수 있다. 동맥류 내부를 따라 이러한 현상이 계속되다가 동맥류 하단부에 이르면 압력구배의 회복에 따른 운동량 증가로 원래의 속도구배를 나타낸다. r_D 가 증가하면 재순환유동의 영역이 확대됨에 따라 역속도구배가 증가하다가 동맥류 하류에 이르러 최초의 속도구배로 회복되었다.

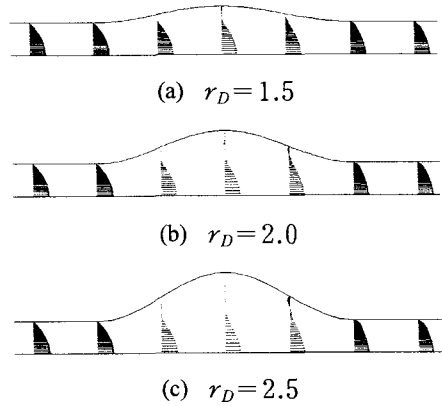


Fig. 4 Velocity fields in the aneurysm for $Re=900$

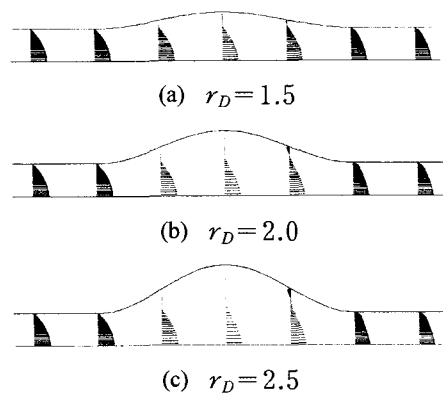


Fig. 5 Velocity fields in the aneurysm for $Re=1800$

Fig. 5는 Reynolds수 1800에 대한 속도분포를

나타낸 것이다. 속도구배의 형태는 Reynolds수 900인 경우와 유사하게 나타났으며 동맥류 하단부에서 역속도구배가 약간 크게 되었음을 알 수 있었다.

4.3 벽면전단응력

Fig. 6은 Reynolds수 900인 경우에 대하여 동맥류의 내부 벽면에 따른 전단응력을 나타낸 것이다. 벽면전단응력은 박리점(Table 1) 부근에서 급격히 감소하여 영에 가까운 음의 값(재순환유동에 의한 역속도구배로 인하여)을 유지하다가 재부착점에서 급속히 증가한 후 최고점에 도달하였다. 그리고 이 후에 서서히 감소하다가 상류의 값에 근접하였다. 벽면전단응력이 재부착점 근처에서 최대 값을 갖는 것은 유동이 동맥류 말단부에서 제트를 형성하며 벽면에 부딪히기 때문이다.

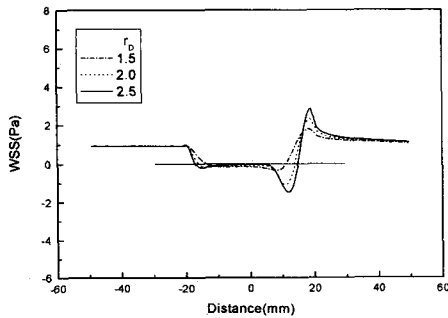


Fig. 6 Wall shear stress distribution along the aneurysm for Re=900

r_D 의 변화에 따른 벽면전단응력의 분포를 살펴보면 다음과 같다. 변화 형태는 r_D 값에 관계없이 비슷한 모양을 보이고 있으며, 전단응력은 r_D 값이 클수록 동맥류 중간부분에서 영에 가까운 값을 나타내고 말단부에서 큰 값을 보이고 있다. 최대 벽면전단응력 값은 r_D 가 커지게 되면 재부착점 근처를 지나가는 유량의 상대적인 증가로 인하여 속도구배가 증가하기 때문에 높은 값을 나타낸다. 그러나 r_D 가 증가하여도 최대 전단응력이 발생하는 지점은 거의 변화를 보이지 않았다.

Fig. 7은 Reynolds수 1800인 경우에 대하여 동

맥류의 내부 벽면에 따른 전단응력을 나타낸 것이다. 변화 형태는 Reynolds수 900인 경우와 유사하였지만 동맥류 말단부에서 변화가 심하였다. 유량이 두 배 증가한 것에 비하여 말단부에서 전단응력의 변화정도 및 값은 훨씬 크게 나타났으며, 이러한 현상은 r_D 가 커질수록 더욱 현저하게 나타났다. $r_D=2.5$ 인 경우 최대 전단응력은 6.7Pa 값으로서 Reynolds수 900인 경우의 값 2.7Pa에 비하여 약 2.5배가 높았다. 따라서 벽면전단응력은 혈관내를 흐르는 유량의 증가보다 동맥류 확장(r_D 값 증가)에 따른 영향을 더 받는 것으로 추측할 수 있었다. $r_D=2.5$ 인 경우 전단응력은 동맥류 중간부에서 매우 작은 양(+)의 값을 보이는데, 이는 전술한 바와 같이 이 부근에서 2차 재순환유동이 발생함에 따라 양의 속도구배를 나타내기 때문이다.

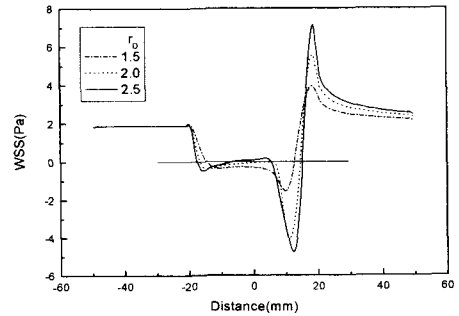


Fig. 7 Wall shear stress distribution along the aneurysm for Re=1800

Table 2는 Reynolds수 및 r_D 의 변화에 따른 최대 벽면전단응력의 위치 및 값을 나타낸 것이다.

Table 2 Maximum values of wall shear stress in the aneurysm

Dmax/D	position [mm]	values [Pa]
Re=900		
1.5	17.8	1.78
2.0	18.1	2.27
2.5	18.4	2.70
Re=1800		
1.5	18.1	3.91
2.0	18.1	5.39
2.5	18.4	6.70

최대 전단응력이 나타나는 지점은 Reynolds수 및 r_D 값에 관계없이 거의 일정하였다. 그러나 최대 전단응력값은 유량이 증가할수록 그리고 동맥류의 확장정도가 심할수록(r_D 가 클수록) 크게 나타났다. 특히 유량의 증가에 비하여 r_D 의 증가에 따른 상승 정도가 현저하였다.

5. 결론

본 연구에서는 혈관이 확장될 때 나타나는 동맥류 내부에서의 유동 및 벽면전단응력의 특성을 수치적으로 해석하였다. Reynolds수 900 및 1800 그리고 r_D 값 1.5, 2.0 및 2.5인 경우에 대하여 동맥류 내부의 유동 및 벽면전단응력을 고찰한 결과 동맥류의 파열위치를 예측할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 재순환유동의 영역은 Reynolds수 및 r_D 의 증가에 비례하여 확대되었으며, $Re=1800$ 및 $r_D=2.5$ 인 경우 동맥류 상단부에서 매우 약한 2차 재순환유동이 발생하였다.

(2) 최대 벽면전단응력은 Re 및 r_D 의 증가에 관계없이 동맥류 말단부근($z=18\text{mm}$ 부근)에서 발생하였다.

(3) 최대 벽면전단응력은 Re 및 r_D 의 증가에 비례하여 높은 값을 나타냈으며, Re 의 증가보다는 r_D 의 증가에 따른 영향이 더욱 두드러지게 나타났다.

(4) 동맥류의 파열위치 및 최대 전단응력값의 예측으로부터 동맥류의 확장정도가 심할수록(r_D 값이 클수록) 환자에게 발생할 위험이 증대될 것으로 예상되었다.

참고문헌

- (1) Budwig, R.D., Elger, D., Hooper, H. and Slippy, J., 1993, "Steady Flow in Abdominal Aortic Aneurysm Models", J. of Biomechanical Eng., Vol. 115, pp. 418-423.
- (2) Schrader, T., Peattie, R.A., Bluth, E.I. and Comstock, C.E., 1992, "A Qualitative Investigation of Turbulence in the Flow Through a Model of an Abdominal Aortic Aneurysm", Invest. Radiol., Vol. 27, pp. 515-519.
- (3) Peattie, R.A., Schrader, T., Bluth, E.I. and C.E. Comstock, 1994, "Development of Turbulent in Steady Flow Through Models of Abdominal Aortic Aneurysms", J. of Ultrasound Med., Vol. 13, pp. 467-472.
- (4) Asbury, C.L., Ruberti, J.W., Bluth, E.I. and Peattie, R.A., 1995, "Experimental Investigation of Steady Flow in Rigid Models of Abdominal Aortic Aneurysms", Annals of Biomedical Eng., Vol. 23, pp. 29-39.
- (5) Bluestein, D., Niu, L., Schoepfoerster, R.T. and Dewanjee, M.K., 1996, "Steady Flow in an Aneurysm Model: Correlation Between Fluid Dynamics and Blood Platelet Deposition", J. of Biomechanical Eng., Vol. 118, pp. 280-286.
- (6) Yu, S.C.M., 2000, "Steady and Pulsatile Flow Studies in Abdominal Aortic Aneurysm Models Using Particle Image Velocimetry", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp. 74-83.
- (7) 오성은, 이계한, 2000, "복부대동맥류 벽전단 변형을 측정에 관한 연구", 대한의용생체공학 회지, Vol. 21, No. 2, pp. 181-187.