

복부대동맥 동맥류의 유동특성에 관한 *in vitro* 실험적 연구

이진평* · 김두상** · 이상준***

In vitro experimental study on flow characteristics of abdominal aorta aneurysm

J. P. Lee *, D. S. Kim ** and S. J. Lee ***

Key Words : Abdominal Aorta Aneurysm(복부대동맥 동맥류), Rapid Prototyping(쾌속조형), PIV(입자영상유속계)

Abstract

Hemodynamic features of blood flow in the abdominal aorta aneurysm (AAA) are very important, because they are closely related with the rupture of aneurysm to death. It has been considered that the wall shear stress of blood flows influences the formation, growth, and rupture of AAA. On this account, it is important to understand the flow structure of blood in the aneurysm. In this study, the whole velocity field information inside a typical AAA was measured using an *in vitro* AAA model under the pulsatile flow condition. The vessel geometry was reconstructed based on the computerized tomography (CT) data of a patient. The AAA model was made by using a rapid prototyping (RP) method, based on the reconstructed vessel geometry. Velocity fields in the AAA model were measured at different pulsatile phases using a PIV (particle image velocimetry) system. As experimental results, a large-scale vortex is formed inside the AAA model and the vortices located near the AAA wall are supposed to increase the local pressure and wall shear stress. In this study, the AAA wall stress found to be was one of the most important governing parameters giving rise to the ruptured aneurysm.

1. 서론

지난 30년간 우리나라의 급속한 경제성장과 이에 따른 생활양식의 변화로 인해 고지혈증, 당뇨병, 비만, 고혈압 등이 늘어나면서 혈관이나 심장과 관련된 순환기 질환이 늘어나는 서구화 현상이 점점 심화되고 있다. 순환기 질환은 우리나라에서는 암에 이어 사망원인 2위를 차지하고 있으며, 미국에서는 사망원인 1위에 올라 있다. 이런 중요성으로 인해 심혈관계 질환에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 이를 통하여 심혈관계 질환이 자주 발생하는 혈관 부위에서 전단응력의 변화로 인한 내피세포의 변형 혹은 파괴가 질환의 발병 기전 중 하나임이 밝혀졌다. 이에 따라 심혈관계 질환의 발병원인과 내피세포 그리고 혈액유동 사이의 상관관계를 보다 명확히 규명하기 위한 다양한 혈류역학적 연구가 진행되고 있다⁽¹⁾.

특히 뇌와 복부대동맥에서 나타나는 동맥류의 발

생과 성장 그리고 파열에는 내피세포에서의 전단응력과 같은 혈류역학적 문제가 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 혈액유동에 대한 유체역학적 정보를 얻기 위한 임상용 진단기기로 도플러 효과를 이용한 초음파 조영술이나 혈관조영술 등이 많이 사용되고 있다. 그러나 이들은 혈관 내부의 정량적인 유동 정보를 제공해주지는 못하고 있는 실정이다⁽²⁾. 최근에는 MRI (magnetic resonance imager)나 CT (computerized tomography)를 이용하여 실제 임상 환자의 혈관 형상과 혈류유동에 대한 기본적인 정보를 얻고 이로부터 수학적 모델을 만들고, CFD (computational fluid dynamics) 기법으로 해석하여 유동정보를 구하려는 시도가 이루어지고 있다⁽³⁾.

본 논문에서는 복부대동맥 동맥류(AAA)에 대한 유동정보를 구하기 위해 실험모델을 만들고 *in vitro* 실험을 수행하였다. 실험모델은 실제 복부대동맥 동맥류를 가진 환자의 CT 정보와 RP (rapid prototyping) 장비를 이용하여 동맥류 발생 부위와 같은 scale의 투명모델을 만들고, 이를 맥동 펌프와 연결하여 동맥류가 발생한 부위의 유동을 PIV 기법을 사용하여 정량적으로 가시화하고 유동특성을 분석하기 위한 기초 연구를 수행 하였다.

* 포항공과대학교 환경공학과, jplee@postech.ac.kr

** 서울보훈병원 흉부외과, mdksr@paran.com

*** 포항공과대학교 기계공학과, sjlee@postech.ac.kr.

Glycerol(%)	Water(%)	Viscosity(mPa·s)	Temp.(°C)
100	0	1006	20.5
50	50	35	20
30	70	4.4	21.6
20	80	2.6	21.5

Table 1. Variation of viscosity according to glycerol concentration

2. 실험 방법 및 결과

Fig. 1은 AAA 모델 제작과정을 보여주고 있다. 우선 모델 제작을 위하여 CT 장비를 사용하여 복부 대동맥 동맥류 환자의 내부 장기들의 3차원 정보를 얻는다. 이를 이용하여 각 단면을 재구성하고, 동맥류 부분만을 선택하여 이를 RP 장치의 입력 데이터로 이용해 중간모형을 만들게 된다. 이렇게 만들어진 RP 모델을 다시 투명 실리콘 레진 속에 넣어 굳히고 중간 모형을 제거하게 되면 최종적인 투명모델이 완성되어진다. 제작된 모델은 맥동펌프와의 연결하였으며 유량과 압력을 조절하기 위해 제어 밸브를 유로에 부착하였다. 실험에 사용된 환자의 CT 정보는 서울보훈병원의 김두상 박사님의 환자 중 동맥류의 크기가 5.5 cm에 이르러 실제 동맥류 수술을 받은 남자 환자의 정보가 사용되었으며, 동맥류 부분 중 실제 혈액이 흘러가는 혈관의 안쪽 부분의 형상 정보 데이터를 사용하여 RP모델을 만들었다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용되어진 실험장치를 찍은 사진으로 RP 실험 모형과 PIV 속도장 측정 시스템의 구성을 보여주고 있다. 제작된 모델을 틀에 고정하고 이를 맥동펌프와 연결하였다. 펌프에서 나오는 맥동신호를 oscilloscope로 볼 수 있게 하고, 이 맥동신호를 기준으로 delay generator를 사용하여

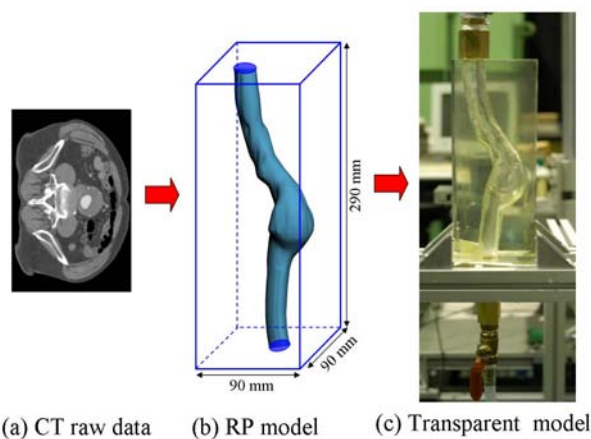


Fig. 1 Fabrication of a transparent experimental model

수축기 혹은 이완기 등 일정한 위상각도에서 레이저와 카메라를 동기시켜 혈류의 유동영상을 찍도록 하였다. 이렇게 얻어진 유동영상은 카메라와 연결된 PC에 저장되게 된다.

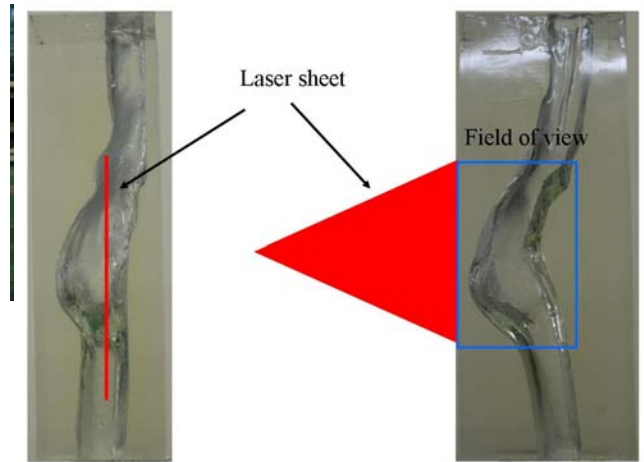


Fig. 3 Measurement plane

광원으로는 125mJ Nd:YAG 펄스 레이저를 사용하고, 유동영상 획득에는 1280 x 1024 pixels의 cooled CCD 카메라가 사용되었다. 실험에 사용된 맥동펌프는 실제 임상용으로 사용되고 있는 Newheart Bio사의 T-PLS (SL-1000) 모델을 사용하였다. 작동 조건은 박동수 20 bpm, 유량 1.4L/min 이었다. 작동유체로는 실험모델과의 굴절율, 레이저의 투과 정도, 추적입자의 가시화 등을 고려하여 물과 글리세린을 일정 비율로 섞어서 사용하였다. 가시화용으로 사용된 추적입자로는 평균 14 μ m 직경의 silver-coated hollow glass sphere를 사용하였다.

Fig. 3은 관측영역(field of view)의 크기와 위치를 나타내고 있다. 전체 모델 중 동맥류가 일어나 부풀어진 부위를 포함하여 입구 부분과 출구 부분을 볼 수 있도록 관측영역을 설정하였다.

Fig. 4는 실험에서 얻은 전형적인 입자영상을 보여주고 있다. 모델의 굴곡 변화가 심함에도 전체 관측영역에 걸쳐 추적입자가 잘 퍼져 있음을 알 수 있

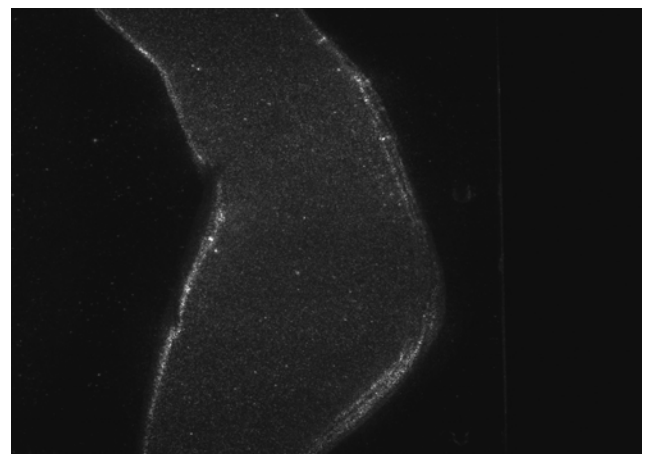


Fig. 4 A typical particle image of flow inside the AAA model

다. 본 실험에서 사용된 작동유체는 실험모델과의 굴절율 차이가 적은 글리세린이다. 하지만, 실제 혈액의 점도는 45 사이인데 반해 글리세린의 점도는 약 1000으로 그 점도차가 수백 배로 커서 단순히 글

리세린만을 사용할 경우 동맥류 내부의 유동특성을 제대로 모사할 수 없게 된다. 이런 문제를 해결하고자 글리세린과 물을 일정 비율로 섞어 점도를 맞추었다. Table 1은 물과 글리세린의 비율에 따른 점도 변화를 보여준다.

Fig. 5는 글리세린이 50% (점도 35 mPa·s) 일 때, 맥동 상태에 따른 속도장 변화를 보여주고 있다. 우선 수축기(systole stage)에서는 가장 큰 속도값을 가지면서 나아가다가, 점점 속도가 감소하면서(transition stage), 이완기(diastole stage) 상태에서 유동 모멘텀을 거의 잃고 벽면 근처에서 와류가 형성 됨을 알 수 있다. 이러한 유동 변화는 정상 유동(steady flow)에서는 나타나지 않고 맥동유동(pulsatile flow)에서만 나타나는 특성으로 Yu(2000)와 Yip(2001)도 비슷한 결과를 발표하였다.

Fig. 6는 점도 변화에 따른 유동 특성을 보여 준다. 이완기에서 생겨난 와류만을 비교한 것으로 점도에 따라 와류의 형성 위치와 크기가 다름을 알 수 있다.

현재 본 연구진을 통하여 얻어진 노하우를 바탕

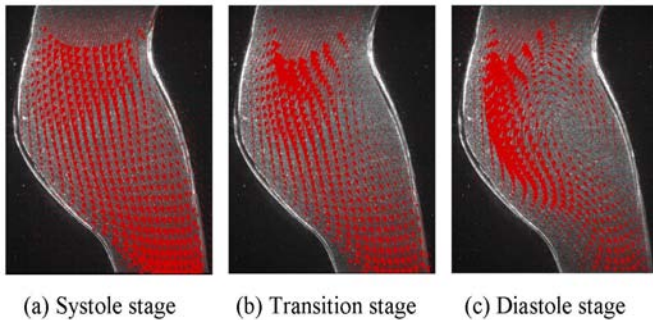


Fig. 5. Flow patterns at each pulsatile stage

으로 실험장치 및 RP 모형을 개선 중에 있으며, 모델 실험을 통하여 동맥류가 일어난 부분에서 안정된 입자영상을 얻고 이로부터 동맥류의 속도장과 혈관 벽면에서의 전단응력을 구하는 연구를 수행 중에 있다.

3. 결론

본 연구에서는 동맥류 환자의 CT 정보와 RP 장비를 이용하여 복부대동맥 동맥류의 in vitro 실험모

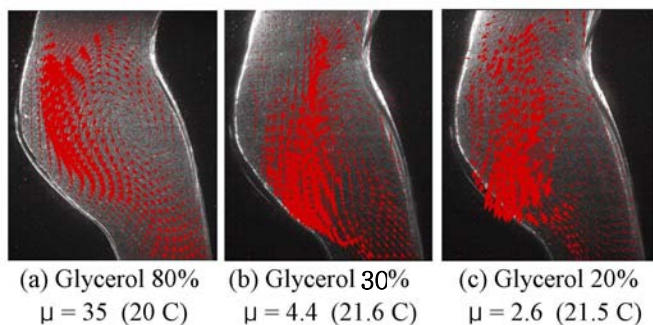


Fig. 6. Flow patterns in abdominal aorta aneurysm

형을 만들고, 이를 이용하여 동맥류 내부 유동을 정량적으로 가시화하였다. 실험 결과를 보면 기존 연구와 유사하게 맥동유동으로 인해 동맥류 내부에 와류가 형성되었다. 그러나, 기존 연구와는 달리 본 연구에서는 실제 혈관 모델을 사용함으로써 임상환자의 혈류 유동특성을 보다 정확하게 보여주는 결과라 할 수 있다. 또한 점도 변화에 따른 혈액의 유동변화를 살펴 보았다. 이러한 연구결과는 향후 고지혈증이나 빈혈 같은 환자 상태에 따른 혈류역학적 특성 변화의 연구를 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 동맥류에 관한 in vitro 연구 수행의 가능성을 확인하였으며, 앞으로 동맥류 내부에서 혈류의 속도장과 전단응력 분포 등을 가시화하고 유동특성을 분석할 예정이다. 이러한 연구를 통하여 동맥류의 발생과 성장, 과열 등에 관한 이해를 증진시킬 수 있을 것이며, 실제 임상에서의 진단과 치료에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대하고 있다.

후기

본 연구는 2007년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 국가지정연구실(ROA-2006-000-10276-0)와 시스템바이오다이나믹스 국가핵심연구센터(R15-2004-033-06002-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Bonert, B., et al., The relationship between wall shear stress distributions and intimal thickening in the human abdominal aorta, Biomed. Eng. Online, Vol.2(2003),18.
- [2] Pahemik, S. *etal.*, "Quantitative imaging of tumour blood flow by contrast-enhanced magnetic resonance imaging", Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism, Vol. 85(2001), pp.1655-1663.
- [3] Stuhne, G.R. and Steinman, "Finite-element modeling of the hemodynamics of stented aneurysm", J. Biomech. Eng., Vol. 126(2004), pp.382-387.
- [4] Yu, S.C.M., "Steady and pulsatile flow studies in abdominal aortic aneurysm models using particle image velocimetry", Int.J. Heat Fluid Flow, Vol. 21(2000), pp. 74-83.
- [5] Yip, T. H. and Yu, S. C. M., "Cyclic transition to turbulence in rigid abdominal aortic aneurysm models", Fluid Dynamics Research, Vol. 29(2001), pp. 81-113.