

대퇴골 동맥 모델내에 카테터 삽입시 유량 및 압력 변화 측정

김중경*, 박찬영*, 정찬일*, 장준근[†]°, 한동철^{††}, 유정열#, 민병구*°

*서울대학교 의공학과, [†]기계설계학과, [#]기계공학과, ^{††}정밀기계설계연구소, °의공학연구소

Measurements of Flow Rate and Pressure Changes in Femoral Artery Model during Catheterization

J. K. Kim*, C. Y. Park*, C. Chung*, J. K. Chang[†]°, D. C. Han^{††}, J. Y. Yoo#, and B. G. Min*°

*Department of Biomedical Engineering, [†]Department of Mechanical Design and Production Engineering, [#]Department of Mechanical Engineering, ^{††}Institute of Advanced Machinery and Design, °Institute of Biomedical Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

The purpose of this experimental investigation is to examine the influence of the catheter on local pressure changes and flow rate in an arterial branch model similar to the femoral artery of man. Effects of branch to main lumen flow rate ratios and the locations of catheter tip were found to be significant on the local pressure changes. Relatively large pressure drops due to obstruction effects may induce endothelial cell damage, which have been reported to be the primary cause of the initiation of the atherosclerosis.

서 론

카테터를 혈관내에 삽입하였을 경우, 카테터로 인해 주위의 혈액유동은 방해를 받게 되고 따라서 국부적인 유동장의 변화가 생기게 된다. 이러한 유동장의 변화는 혈관벽에 걸리는 압력장을 변화시키고 혈관벽의 물질전달을 왜곡시켜 혈관내피세포의 손상을 초래할 가능성이 있다. 많은 연구 결과들에 의하여 혈관내피세포의 손상은 동맥경화를 유발시키는 원인이 된다는 사실이 증명되었다. 실제로 임상에서 intravascular ultrasound, angioplasty와 같은 기법을 사용할 때, 카테터를 혈관내에 삽입하게 된다. 그런데 이러한 경우에 카테터 주위의 혈관내피세포들이 손상을 입게 되고 결국 동맥경화와 같은 혈관 질환을 유발하게 된다는 연구 결과들이 있다.

인체의 동맥혈관은 많은 분지관과 곡관의 형태로 이루어져 있다. 분지점 부근에서는 유동이 나뉘어 지면서 전단층이 형성되며, 이 전단층이 얇아지면서 벽면에 작용하는 전단응력이 증가하게 된다. 또한 분지점에서는 벽의 기하학적 형상이 급격하게 바뀌게 되므로 유동의 박리 현상이 일어날 수 있다. 이러한 유동 특성의 변화는 혈관내피세포의 손상이나 협착의 원인이 될 수 있다. 따라서 인체 동맥혈관 분지부의 혈류역학적 특성을 파악하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 대부분 실제 혈관의 기하학적 형상을 고려한 모델을 제작하여 실험을 통해 여러가지 분지각, 유량비, 레이놀즈 수에 따른 분지점 부근의 압력변화와 유선의 형태를 측정하였다 [1, 2, 3, 7]. 또한 최근에는 전산유체역학을 이용한 분지

관 유동의 연구도 진행되고 있다 [10].

Back 등은 angioplasty 기법의 이용시에, 병변 주위의 압력 강하를 측정하기 위한 카테터의 유동 방해로 인해 유량 측정이 부정확해 전다는 문제점을 인식하고, 협착이 있는 사람의 관상동맥의 압력 강하와 유량간의 관계가 카테터의 존재로 인해 받는 영향을 이론적으로 고찰해 보았다 [4, 5]. 그러나 카테터와 같은 유동을 방해하는 물체가 분지부를 갖는 혈관내에 삽입되었을 경우에 대하여 주위 유동장의 변화를 실험적으로 관찰한 연구 결과는 아직 보고된 바 없다.

본 연구에서는 사람의 대퇴골 동맥을 모델로 한 분지관을 제작하여 카테터의 삽입으로 인한 유량과 압력의 변화를 측정하였다.

실험 장치 및 방법

그림 1과 같이 대퇴골 동맥을 모사한 분지관 모델을 아크릴로 제작하여 유량비, 레이놀즈 수, 카테터의 위치 등의 변화에 따른 주관의 압력변화를 실험적으로 측정하였다. 압력 측정을 위하여 분지부의 반대편에 9개의 압력 탭을 설치하였고 이들과 직각 방향으로 9개의 압력 탭을 설치하여 반경 방향의 압력 변화를 관찰하였다. 각 압력 탭의 위치는 그림 1에 나와 있다. 실험에 사용된 지름 2 mm의 카테터는 역시 아크릴로 제작되었으며, 그림 1에 표시된 2, 3, 4와 같이 카테터의 선단이 위치한 경우에 대하여 유량을 변화시켜 압력을 측정하였다.

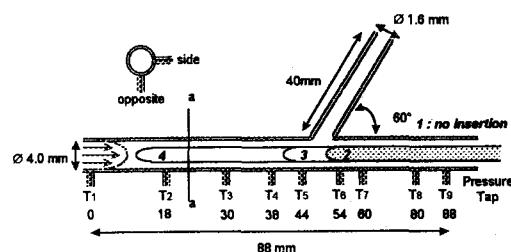


그림 1. 분지관 모델의 모식도 .

유동은 상부 저수조와 하부 저수조 사이의 정수 압차에 의하여 흘러가게 된다. 일정한 압력차를 유지하도록 상부 저수조에서 넘치는 유체는 관을 통해

하부 저수조로 흘러가도록 만들었다. 모든 연결관들은 실리콘 튜브를 사용하였다. 작동 유체로는 33% 글리세린 수용액을 이용하였으며, 유량은 일정한 시간동안 출구로 흘러나오는 물을 비커에 받아 저울로 질량을 측정하여 구할 수 있었다.

유동이 층류인 경우에 주관에 카테터를 삽입하지 않은 경우와 삽입한 경우에 대하여 그림 1에서 opposite라고 표시된 분지관의 반대편 지점의 압력과 이와는 직각 방향으로 side라고 표시된 지점의 압력을 측정하였다. 분지관 출구 유량(\dot{m}_3)과 주관의 출구 유량(\dot{m}_2)을 측정하여 주관 입구 유량(\dot{m}_1)을 구할 수 있었다. 우선 분지관으로 배출되는 유량이 없는 경우에 대하여 압력을 측정하고 카테터의 삽입위치를 바꿔가며 유량변화와 압력 변화를 측정한다. 점차 \dot{m}_3 를 증가시켜 가며 위의 작업을 반복하였다.

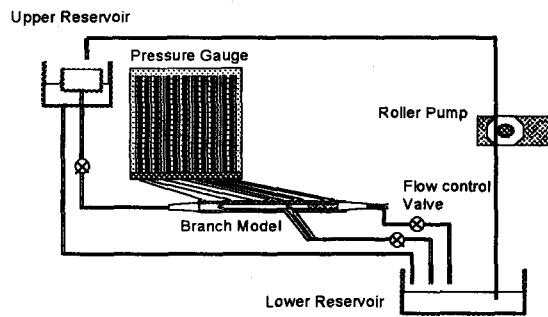


그림 2. 실험 장치의 모식도

실험 결과 및 고찰

길이가 l 인 원관에서 카테터의 삽입으로 인한 유동의 평균 압력강하는 Navier-Stokes 방정식으로부터 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\Delta P = \frac{128}{\pi} \frac{\rho v}{d_o^4} l Q F \quad (1)$$

여기서 F 는 카테터의 존재로 인한 유동 저항의 증가를 나타내는 함수이며 오직 카테터와 관의 반경비에만 의존한다.

$$F = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2 - \frac{1 - \left(r_i/r_o\right)^2}{\ln r_o/r_i}\right]} \quad (2)$$

카테터가 없는 경우는 $r_i \rightarrow 0$, $r_o/r_i \rightarrow \infty$, $F \rightarrow 1$ 가 되어 일반적인 Poiseuille 유동의 해가 얻어진다. 카테터의 반경이 관의 반경과 거의 같은 경우는 $r_i \approx r_o$, $F \rightarrow \frac{1}{\frac{4}{3}(1 - r_i/r_o)}$ 이 됨을 알 수 있다.

본 연구의 실험 조건에서는 $r_i = 1$, $r_o = 2$ mm 이므로 $F = 7.9$ 가 된다. 따라서 카테터를 삽입한 경우 관에서의 압력강하는 삽입하지 않은 경우의 약

8배가 됨을 알 수 있다.

또한 카테터로 인해 생기는 평균전단응력의 증가는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\tau_{wo} = \frac{32}{\pi} \frac{\mu Q}{d_o^3} H \quad (3)$$

여기서 H 는 역시 카테터와 관의 반경비에만 의존하는 함수이다.

$$H = \left[1 - \frac{\frac{1}{2} [1 - (r_i/r_o)^2]}{\ln r_o/r_i} \right] F \quad (4)$$

본 실험 조건에서는 $H = 3.6$ 이 된다. 따라서 카테터의 삽입으로 인해 전단응력은 약 4배 증가하게 됨을 알 수 있다. 서론에서 언급했듯이 이러한 전단응력의 급격한 증가는 혈관내피세포의 손상을 초래할 수 있다.

(1) 카테터를 삽입하지 않은 경우

우선 카테터를 삽입하지 않은 상태에서 유량을 변화시켜가며 압력을 측정한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 분지관을 완전히 막았을 때 텁1번과 9번의 압력차를 측정한 결과이다. 이 경우에 주관에는 Poiseuille 유동이 형성되어 압력 강하와 입구 유량 간에는 다음과 같은 선형적인 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{128}{\pi} \frac{\rho v}{d_1^4} \dot{m}_1 \quad (5)$$

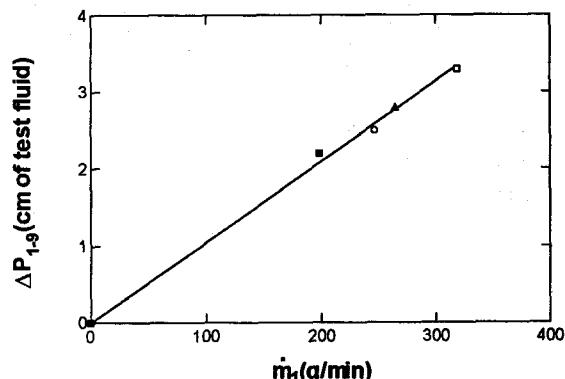
그림 3. 카테터를 삽입하지 않은 경우, $\dot{m}_3=0$ 일 때 주관에서의 압력과 유량간의 관계

그림 4는 카테터를 삽입하지 않은 경우에 분지관과 주관의 유량비에 따른 압력 변화를 주관의 각 압력텝에서 측정한 결과이다. 그림 4(a)는 분지관을 막았을 경우인데, 이론적으로는 식 (6)과 같이 압력 강하는 거리에 따라 선형적으로 증가해야 하나 약간의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

$$\frac{P_i - P_1}{0.5 \rho u_1^2} = \frac{64}{Re_1} \left(\frac{x}{d_1} \right) \quad (6)$$

대퇴골 동맥 모델내에서 카테터 삽입시 유량 및 압력 변화 측정

그림 4(b)를 보면 분지점 전과 후에서는 식 (6)으로 표현되는 Poiseuille 유동의 경향을 보이고 있으나 분지점을 지나면서 압력강하가 갑자기 감소함을 알 수 있다. 이는 분지관으로 유입되는 유동으로 인해 주관에서 운동량 손실이 생기기 때문이라고 볼 수 있다. \dot{m}_3 / \dot{m}_1 의 값이 클수록 압력강하는 증가함을 확인할 수 있다.

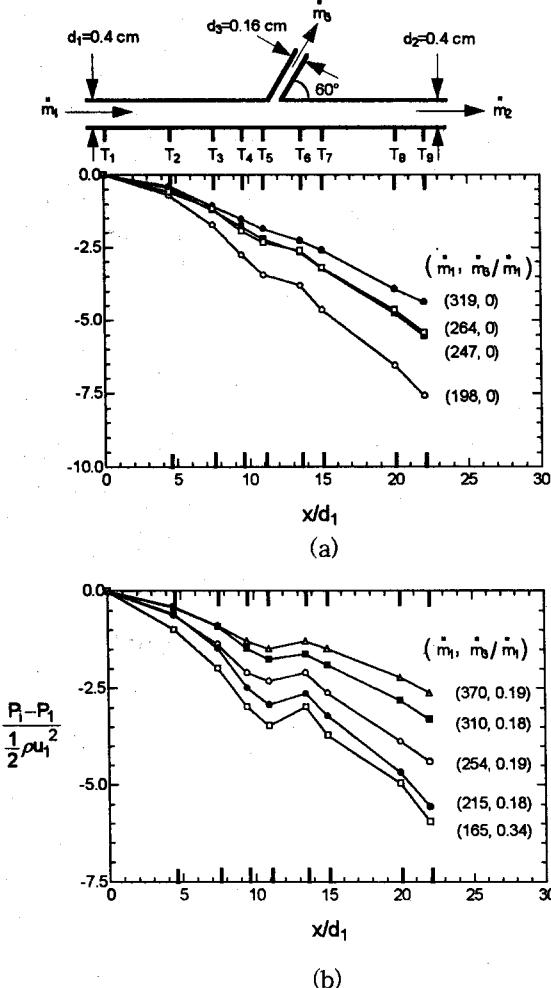


그림 4. 카테터를 삽입하지 않은 경우, (a) $\dot{m}_3 = 0$ 일 때 주관에서의 압력 변화 (b) 여러 가지 유량비 \dot{m}_3 / \dot{m}_1 에 대한 주관에서의 압력 변화

(2) 카테터를 삽입한 경우

카테터를 삽입했을 때, 그림 1에 표시된 2, 3, 4의 각 경우에 대하여 유량 변화를 측정한 결과를 그림 5에 나타내었다. 카테터를 삽입하면 주관의 입구 유량은 급격하게 감소하나 분지관의 출구 유량은 증가하여 유량비 \dot{m}_3 / \dot{m}_1 의 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. \dot{m}_3 / \dot{m}_1 의 값은 카테터 선단의 위치에 관계없이 거의 일정하게 유지된다는 사실을 알 수 있다.

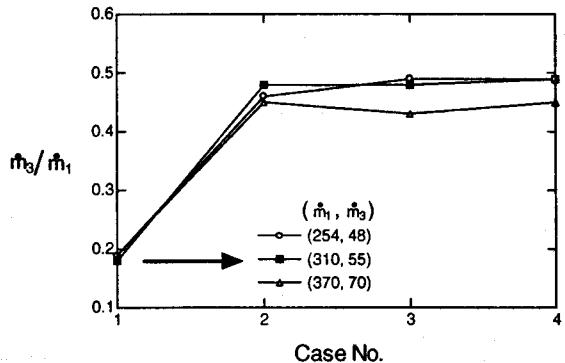
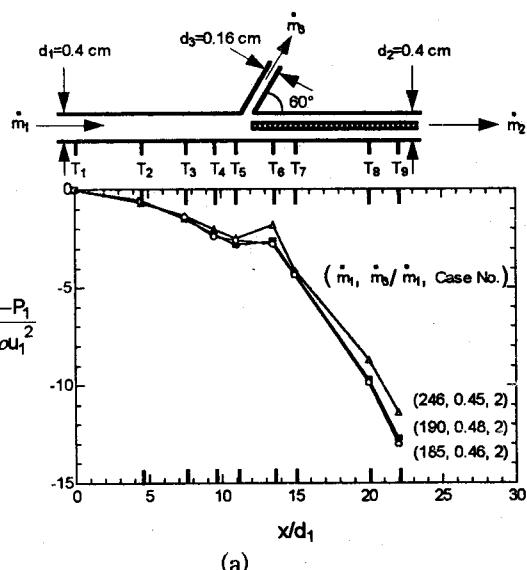


그림 5. 카테터의 삽입에 따른 유량의 변화

주관과 분지관의 유량비 \dot{m}_3 / \dot{m}_1 에 따른 압력변화를 알아보기 위하여 카테터 선단의 각 위치별로 측정한 결과를 그림 6에 나타내었다. 선단을 지나면서 압력강하가 급격하게 증가함을 알 수 있으며, 그림 6(a)를 보면 알 수 있듯이 카테터의 선단이 2의 위치에 있을 때 유량비 \dot{m}_3 / \dot{m}_1 의 값이 커지면 압력상승이 일어나게 된다. 따라서 역 압력구배가 형성되고 결과적으로 유동의 박리 현상이 일어날 가능성이 높아지게 된다. 박리가 일어난 영역에서는 리포단백질의 거주 시간이 길어지므로 병변이 발생할 수 있다는 연구 결과들이 보고된 바 있으므로 실제로 카테터를 삽입하는 경우에 있어 주의를 기울여야 할 것이다.

위의 결과들을 통해 알 수 있듯이 카테터를 삽입함에 따라 분지관 쪽으로의 유량이 증가되고 있다. 특히, 카테터 삽입전에 약했던 분지부의 압력변화가 카테터의 선단이 분지점 부근에 존재할 때 가장 크게 나타나고 완전 삽입시에는 다시 작아짐을 알 수 있다. 따라서, 카테터를 삽입하는 과정에서 혈관벽에 큰 저항이 발생됨을 알 수 있다. 이러한 저항의 변화는 카테터가 혈관벽을 직접 마찰하여 생기는 직접적인 혈관손상과는 달리, 혈관내피세포층의 물질전달을 왜곡할 가능성이 있을 것으로 생각된다.



(a)

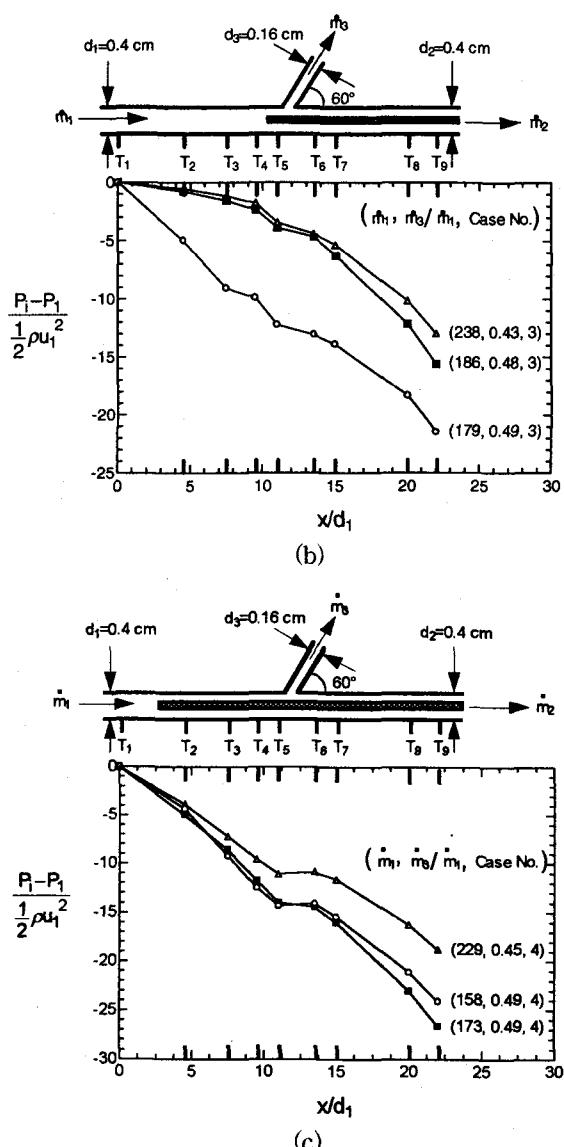


그림 6. 카테터를 삽입한 경우, 여러 가지 유량 비 \dot{m}_3 / \dot{m}_1 에 대한 카테터의 각 위치별 주관에서의 압력 변화. (a) 2의 경우 (b) 3의 경우 (c) 4의 경우

4. Back, L. H., Estimated mean flow resistance increase during coronary artery catheterization, *J. Biomech.*, 27(2), 1994, 169-175
5. Back, L. H., Kwack, E. Y., and Back, M. R., Flow rate-pressure drop relation in coronary angioplasty: catheter obstruction effect, *J. Biomech. Eng.*, 118, 1996, 83-89
6. Robert F. W., et al, The effect of coronary angioplasty on coronary flow reserve, *Circulation*, 77(4), 1988, 873-885
7. Back, M. R., Cho, Y. I., Crawford, D. W., and Back, L. H., Fluid particle motion and Lagrangian velocities for pulsatile flow through a femoral artery branch model, *J. Biomech. Eng.*, 109, 1987, 94-101
8. Anderson, H. V., et al, Measurement of transstenotic pressure gradient during percutaneous transluminal coronary angioplasty, *Circulation*, 73(6), 1986, 1223-1230
9. Douglas C. B., et al, The transstenotic pressure gradient trend as a predictor of acute complications after percutaneous transluminal coronary angioplasty, *Circulation*, 76(4), 1987, 792-801
10. 서상호, 유상신, 노형운, 뉴턴유체와 비뉴턴유체에 대한 분자관 유동의 수치해석, 대한기계학회논문집, 제10호, 1994, 2762-2772

참고 문헌

1. Cho, Y. I., Back, L. H., and Crawford, D. W., Experimental investigation of branch flow ratio, angle, and Reynolds number effects on the pressure and flow fields in arterial branch models, *J. Biomech. Eng.*, 107, 1985, 257-267
2. Cho, Y. I., Back, L. H., and Crawford, D. W., Pressure difference flow rate variation in a femoral artery branch casting of man for steady flow, *J. Biomech. Eng.*, 105, 1983, 258-262
3. Cho, Y. I., Back, L. H., Crawford, D. W., and Cuffel, R. F., Experimental study of pulsatile and steady flow through a smooth tube and an atherosclerotic coronary artery casting of man, *J. Biomech.*, 16, 1983, 933-946