

## 혈관 삽입형 초소형 작동형 내시경의 개발(I) - 도뇨관 삽입시 혈관 내부의 윤활 특성 분석 -

장준근 · 김종경\*

서울대학교 정밀기계설계공동연구소  
\*서울대학교 대학원 협동과정 의용생체공학전공

## Development of Intravascular Micro Active Endoscope (I) - Analysis of Lubrication Characteristics of Small Arteries with Micro Catheter Insertion -

Jun Keun Chang and Jung Kyung Kim\*

Seoul National University, Institute of Advanced Machinery and Design  
\*Seoul National University, Graduate School,  
Interdisciplinary Program in Medical and Biological Engineering Major

**Abstract** - The objective of this investigation is to examine the influence of the micro catheters, which mimic the intravascular micro active endoscopes, on local pressure changes and flow rate in an arterial branch model similar to the femoral artery of human. The effects of branch to main lumen flow rate ratios and the locations of a catheter tip were found to be significant on the local pressure changes. Relatively large pressure drops and an increase in shear stress due to the obstruction effects may induce an endothelial cell damage and a change in arterial wall permeability, which have been reported to be the primary cause of the initiation of the atherosclerosis and other major vascular diseases.

**Key words** - catheter, intravascular micro active endoscope, obstruction effect, endothelial cell damage, arterial wall permeability, atherosclerosis.

### 1. 서 론

초소형 작동형 내시경 시스템은 능동 굽힘(active bending) 기술을 사용하여 혈관을 따라 원하는 곳에 도착하게 한 뒤, 내부 소형 통로(instrument channel)를 통해 삽입된 기능성 도뇨관(catheter) 시스템이나 초소형 작동형 내시경 자체 시스템에 장착된 기능성 요소들을 이용하여 인체 내부에 있는 국소 부위의 병변을 진단하고 처치할 수 있도록 하는 전체 시스템을 의미한다. 이러한 내시경 시스템에 사용되는 기능성 요소 혹은 기능성 도뇨관 시스템으로는 초소형 초음파 영상 시스템이나 마이크로 주사기(micro syringe) 시스템, 외과 시술을 위한 가위나 흡입(suction) 시스템, 혈관 확장을 위한 풍선 도뇨관(balloon catheter), 혈관경(angios-

copy), 레이저 처치기구, 스텐트(stent) 등을 들 수 있다.

초소형 작동형 내시경 시스템을 이용한 진단과 수술은 혈관 내부의 진단 및 수술(intravascular/endovascular diagnosis and surgery), 내시경 영역의 진단 및 수술(endoscopic diagnosis and surgery), 복강경 영역의 진단 및 수술(laparoscopic diagnosis and surgery) 등의 분야에 적용될 수 있다. 현재까지 상품화되어 있는 대부분의 전자 내시경은 상대적으로 큰 크기를 갖는 내시경 및 복강경으로 주로 사용되고 있으며, 혈관 내부에는 제한적으로 적용되고 있다. 이처럼 혈관 내부에 삽입하는 내시경 개발 기술은 아직 초보적인 수준에 머물러 있는 상태이다.

혈관 내부에 내시경을 사용하려면 삽입된 초소형 작동형 내시경이 혈관에 미치는 영향에 관한 연구가

필요하다. 일반적으로 혈관내에 삽입하는 내시경과 같은 도뇨관은 주위 혈액유동에 영향을 미치고, 국부적인 유동장의 변화를 초래한다. 이러한 유동장의 변화는 혈관벽에 작용하는 압력 및 응력 분포를 변화시켜 혈관내피세포를 손상시킬 가능성이 있으며 이로 인해 혈관 벽의 투과성이 증가하면 리포단백질(lipoprotein)과 같은 물질전달이 활발하게 이루어져 동맥경화가 유발될 수 있다는 연구결과가 있다[1-3]. 특히 인체의 동맥혈관은 많은 분지관과 곡관의 형태로 이루어져 있는데, 분지점 부근에서는 유동이 분리되면서 전단층이 형성되게 되며, 이 전단층이 얇아지면서 벽면에 작용하는 전단응력이 증가하게 된다. 게다가 분지점에서는 벽의 기하학적 형상이 급격하게 바뀌게 되므로 유동의 박리 현상이 일어날 수 있다. 이러한 유동 특성의 변화는 혈관내피세포의 손상이나 협착의 원인이 될 수 있기 때문에 현재 인체 동맥혈관 분지부의 혈류역학적 특성을 파악하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있으며, 실제 혈관의 기하학적 형상을 고려한 모델 실험을 통해 분지각, 유량비, 레이놀즈 수에 따른 분지점 부근의 압력변화와 유선의 형태를 측정하는 연구[4,7]와 최근에는 전산유체역학을 이용한 분지관 유동의 연구[8]가 진행되고 있다.

Back 등은 angioplasty 기법을 적용할 때, 병변 주위의 압력 강하를 측정하기 위한 도뇨관의 유동 방해로 인해 유량 측정이 부정확해진다는 문제점을 인식하고, 협착이 있는 사람의 관상동맥에서 압력 강하와 유량간의 관계가 도뇨관 때문에 받는 영향을 이론적으로 고찰하였다[9,10]. 그러나 도뇨관과 같은 유동을 방해하는 물체가 분지부를 갖는 혈관 내에 삽입되었을 경우에 대하여 주위 유동장의 변화를 실험적으로 관찰한 연구 결과는 아직 보고된 바 없다.

본 연구에서는 혈관형 초소형 내시경의 삽입이 혈관내피세포에 미치는 영향을 고찰해 보기 위하여, 일차적으로 혈관의 대퇴동맥(femoral artery)을 모델로 한 분지관을 제작하여 내시경을 삽입하지 않은 경우와 삽입한 경우의 유동장의 변화에 대한 기초적인 자료를 얻었다. 이러한 실험 결과는 초소형 작동형 내시경의 피복재 및 구조의 설계와 제작에 응용되었다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 분지관 모델

내시경과 같은 도뇨관이 혈관내의 유동특성에 미

치는 영향을 실험적으로 측정해 보기 위해 다음 Fig. 1과 같이 대퇴동맥을 모사한 분지관 모델을 아크릴로 제작하여 유량비, 레이놀즈 수, 도뇨관의 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 압력변화를 관찰하였다. 각 압력 탭의 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 지름 2.0 mm의 도뇨관은 역시 아크릴로 제작되었으며, 도뇨관의 선단이 Fig. 1에 표시된 2, 3, 4와 같이 위치한 경우에 대하여 유량을 변화시켜가며 압력을 측정하였다.

### 2-2. 유동순환장치

실험 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 유동은 상부 탱크와 하부 탱크 사이의 정수압차에 의하여 흘러가게 되는데, 일정한 압력차를 유지하도록 상부 탱크에서 넘치는 유체가 관을 통해 하부 탱크로 흘러가도록 하였다. 모든 연결관들은 실리콘 튜브를 사용하였으며, 혈액과 점도가 비슷한 36% 글리세린 수용액을 이용하여 실험을 수행하였다. 유량은 일정한 시간동안 출구로 흘러나오는 유체의 질량을 저울로

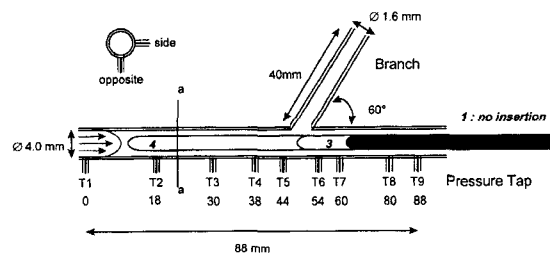


Fig. 1. Schematic of femoral artery branch model.

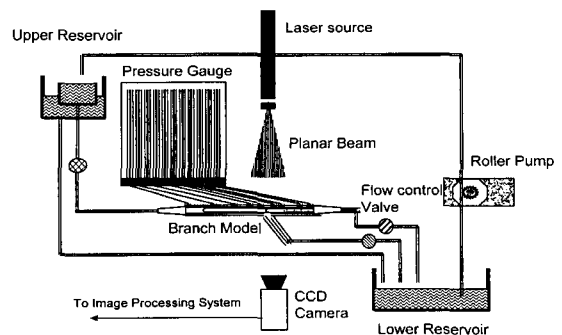


Fig. 2. Schematic of steady flow loop system.

측정하여 구하였다. 압력을 측정하기 위해 액주계를 이용하였다.

### 2-3. 압력변화와 유량변화 측정

유동이 층류인 경우에 주관에 도뇨관을 삽입하지 않은 경우와 삽입한 경우에 대해서 주관에서 측방향 압력을 측정하였다. Fig. 1에서 opposite라고 표시된 분지부 반대편 압력과 이와 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 도뇨관의 삽입위치를 바꿔가며 유량변화와 압력변화를 측정하였으며, 점차  $\dot{m}_3$ 를 증가시켜 가면서 위의 작업을 반복하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3-1. 이론적 고찰

길이가  $l$ 인 관에 도뇨관의 삽입으로 인한 유동의 평균 압력강하는 Navier-Stokes 방정식으로부터 다음 식 (1)과 같이 구해진다.

$$\Delta p = \frac{128\rho\nu}{\pi d_o^3} l Q F \quad (1)$$

여기서  $F$ 는 도뇨관 때문에 발생하는 유동저항의 증가를 나타내는 함수이며, 식 (2)에 나타나 있듯이 오직 도뇨관과 관의 반경비에만 영향을 받는다.

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

도뇨관이 없는 경우는  $r_i \rightarrow 0$ ,  $r_i/r_o \rightarrow \infty$ ,  $F \rightarrow 1$ 가 되어 일반적인 Poiseuille 유동의 해가 얻어지며, 도뇨관의 반경이 관의 반경과 거의 같은 경우는  $r_i \rightarrow r_o$ ,  $F \rightarrow 1/[4/3(1 - (r_i/r_o))]$ 가 되는 것을 알 수 있다.

본 연구의 실험 조건에서는  $r_i = 1$  mm,  $r_o = 2$  mm 이므로  $F = 7.9$ 가 된다. 따라서 도뇨관을 삽입한 경우 관에서의 압력강하는 삽입하지 않은 경우의 약 8 배 정도가 된다.

도뇨관으로 인해 생기는 평균 전단응력의 증가는 다음 식 (3)과 같이 표현되며,

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

여기서  $H$ 는 식 (4)에 나타나 있듯이, 역시 도뇨관과 관의 반경비에만 의존하는 함수이다.

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

본 실험 조건에서는  $H = 3.6$ 이 된다. 따라서 도뇨관의 영향으로 전단응력은 약 4배 증가하는 것을 알 수 있다.

### 3-2. 압력 및 유량변화 측정

우선 도뇨관을 삽입하지 않은 상태에서 유량을 변화시켜가며 압력을 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 분지관을 완전히 막았을 때 압력 탭 1번과 9번의 압력차를 측정한 결과이다. 이 경우에 주관에는 Poiseuille 유동이 형성되어 압력 강하와 입구 유량 사이에는 다음 식 (5)와 같은 선형적인 관계가 성립함을 알 수 있다.

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

Fig. 4는 도뇨관을 삽입하지 않은 경우에 분지관과 주관의 유량비에 따른 압력 변화를 주관의 각 압력 탭에서 측정한 결과이다. Fig. 4(a)는 분지관을 막은 경우인데, 이론적으로는 식 (6)과 같이 압력 강하는 거리에 따라 선형적으로 증가해야 하나 약간의 오차

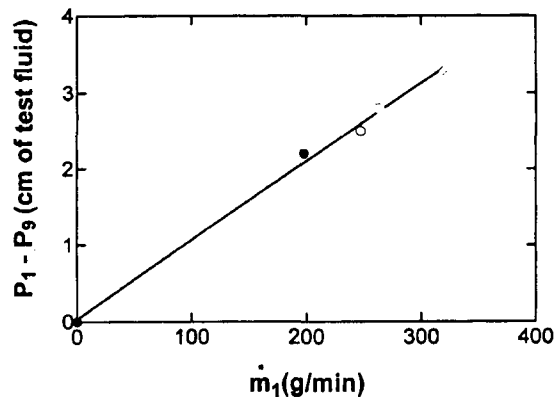


Fig. 3. Pressure drop-flow rate relations in the main branch without catheter.

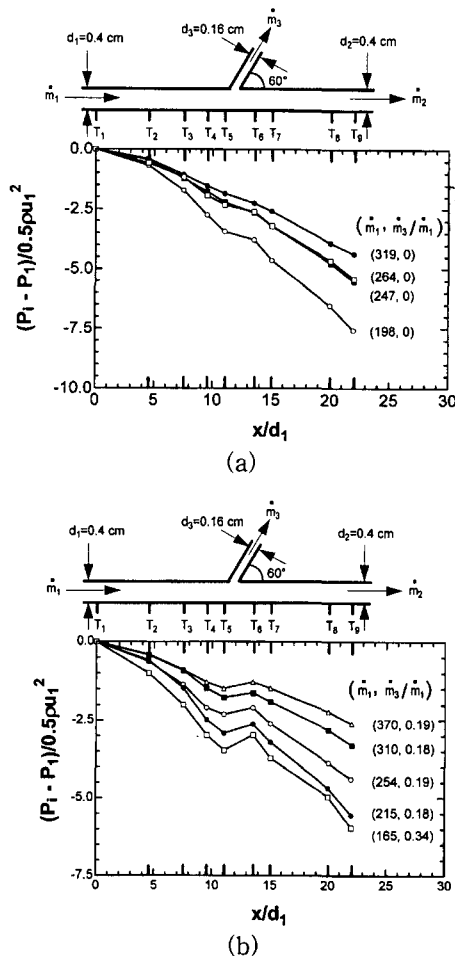


Fig. 4. (a) streamwise pressure distributions in the main branch at  $\dot{m}_3 = 0$  without catheter and (b) streamwise pressure distributions in the main branch at the various  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$  without catheter.

를 보이고 있음을 알 수 있다.

$$\frac{P_i - P_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} = \frac{64}{Re_1} \left( \frac{x}{d_1} \right) \quad (6)$$

Fig. 4(b)를 보면 분지점 전과 후에는 Poiseuille 유동의 경향을 보이고 있으나 분지점을 지나가면서 압력강하가 갑자기 감소함을 알 수 있다. 이는 분지관으로 유입되는 유동으로 인해 주관에서 운동량 손실이 생기기 때문이며,  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ 의 값이 클수록 압력강하는 증가하게 된다.

도뇨관을 삽입했을 때, Fig. 1에 표시된 2, 3, 4의

각 경우에 대하여 유량 변화를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 도뇨관을 삽입하면 주관의 입구 유량은 급격하게 감소하나 분지관의 출구 유량은 증가하여 유량비  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ 의 값이 증가하는 것을 볼 수 있으며,  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ 의 값은 도뇨관 선단의 위치에 관계없이 거의 일정하게 유지된다는 사실을 알 수 있다.

주관과 분지관의 유량비  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ 에 따른 압력변화를 알아보기 위하여 도뇨관 선단의 각 위치별로 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 선단을 지나면서 압력강하가 급격하게 증가함을 알 수 있으며, Fig. 6(a)를 보면 알 수 있듯이 도뇨관이 2의 위치에 있을 때 유량비  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ 의 값이 커지면 압력상승 현상이 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 내시경을 삽입하는 경우에 있어 주의를 기울여야 할 것이다.

위의 결과들을 통해 알 수 있듯이 내시경을 삽입하게 되면, 분지관쪽으로는 유량이 증가되게 된다. 특히, 내시경 삽입 전에 나타나는 분지부의 약한 압력변화가 내시경의 선단이 분지점 부근에 존재할 때 가장 크게 나타나고 완전 삽입 시에는 압력변화가 다시 적어짐을 알 수 있었다. 따라서, 내시경을 삽입하는 과정에서 혈관 벽에 큰 저항이 발생될 것이며, 이러한 저항의 변화는 내시경이 혈관 벽을 직접 마찰하여 생기는 직접적인 혈관손상과는 달리, 혈관 내 피 세포층의 물질전달을 왜곡할 가능성이 있을 것으로 생각된다.

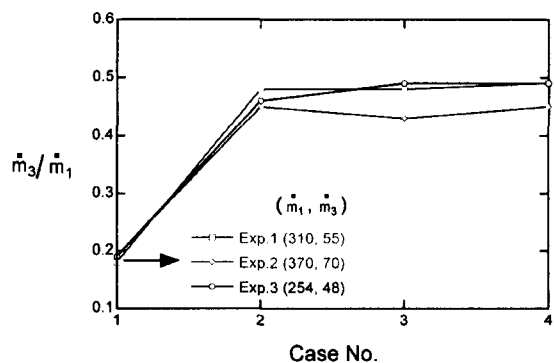


Fig. 5. The changes of flow rate ratios ( $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ ) with the existence of catheter.

### 4. 결 론

혈관삽입형 내시경이 유발할 가능성이 있는 혈관벽 손상에 대한 기초 연구로서 내시경의 삽입으로 인한 혈액유동의 변화를 고찰하였다. 본 연구를 통하여 내시경의 형상에 대한 보다 엄밀한 고려가 이루어져야 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 내시경 삽입에 의한 혈관벽 손상을 최소화하는 방향으로 내시경 선단부의 형상을 설계하였고, 내시경 표면 피복재와 전체 코팅 재료를 선정하였다.

본 연구진은 지금까지의 기초 실험을 바탕으로 맥동유동(pulsatile flow) 조건에서 실험을 진행하고 있다. 또한, 복부 대동맥(abdominal aorta)의 모델을 제작하여 개발된 초소형 작동형 내시경에 대한 평가를 수행하였다[11].

향후 실제 압력과 유동장의 변화가 혈관에 미치는 영향에 관한 심도 있는 연구를 위해서는 생체모델이 필요하다. 이를 위해 혈관내피세포를 배양하여 실험을 통해 얻은 전단응력 조건을 배양된 세포에 부가함으로써, 내시경삽입에 의한 혈관내피세포의 생리연구를 수행할 예정이며, 맥동유동 특성을 실질적으로 반영하기 위한 점탄성 특성을 지니는 혈관모델의 개발도 진행하고 있다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 “초소형 작동형 내시경 기술개발” 과제의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Anderson, H. V., Roubin, G. S., Leimgruber, P. P., Cox, W. R., Douglas, J. S., King III, S. B. and Gruentzig, A. R.I. Anderson, H. V., "Measurement of Transstenotic Pressure Gradient During Percutaneous Transluminal Coronary Angioplasty," *Circulation*, Vol.73, No.6, pp.1223-1230, 1986
2. Redd, D. C. B., Roubin, G. S., Leimgruber, P. P., Abi-Mansour, P., Douglas, J. S. and King III, S. B., "The Transstenotic Pressure Gradient Trend as a Predictor of Acute Complications After Percutaneous Transluminal Coronary Angioplasty," *Circulation*, Vol. 76, No.4, pp.792-801, 1987
3. Karahalios, C. B., "Some Possible Effects of a

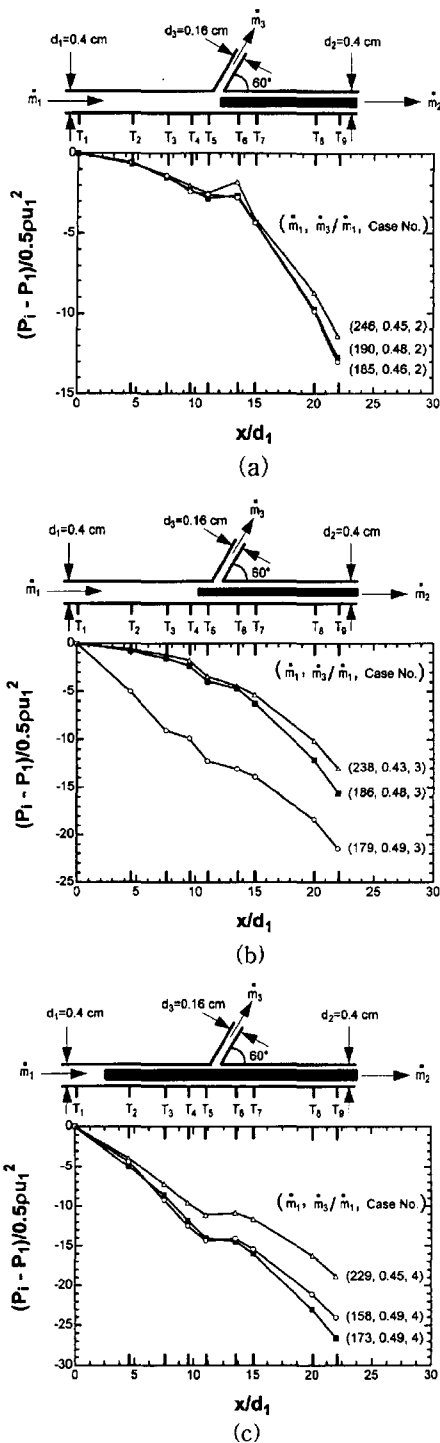


Fig. 6. streamwise pressure distributions in the main branch at the various  $\dot{m}_3/\dot{m}_1$  with the existence of catheter.

- Catheter on the Arterial Wall," *Med. Phys.*, Vol.17, No.5, pp.922-925, 1990.
4. 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.*, Vol.107, No. 3, pp.257-267, 1985.
  5. 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.*, Vol.107, No.3, pp.258-262, 1983.
  6. 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.*, Vol.16, No.11, pp.933-946, 1983.
  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.*, Vol.109, No.1, pp.94-101, 1987.
  8. 서상호, 유상신, 노형운, "뉴턴유체와 비뉴턴유체에 대한 분자관 유동의 수치해석," *대한기계학회논문집*, 제18권, 제10호, pp.2762-2772, 1994.
  9. Back, L. H., "Estimated Mean Flow Resistance Increase During Coronary Artery Catheterization," *J. Biomech.*, Vol.27, No.2, pp.169-175, 1994.
  10. Back, L. H., Kwack, E. Y. and Back, M. R., "Flow Rate-Pressure Drop Relation in Coronary Angioplasty : Catheter Obstruction Effect," *J. Biomech. Eng.*, Vol. 118, No.1, pp.83-89, 1996.
  11. 장준근, 정 석, 이용구, "혈관 삽입용 초소형 작동형 내시경의 개발(II)-시스템 설계, 제작 및 체외성능 분석," *윤활학회지*, 제15권, 제3호, pp.278-286, 1999..