

경동맥에서 혈액유동의 수치해석 및 실험적 관찰

유 상신, 서 상호*, 정 태섭**, 조 민태*

한국항공대 기계설계학과, *승실대 기계공학과, **연세대 의대 진단방사선과

Numerical Simulation and Experimental Observation of Blood Flows in the Carotid Artery

S. S. Yoo, S. H. Suh*, T. S. Chung**, M. T. Cho*

Dept. of Mech. Eng. & Design, Hankuk Aviation Univ.,

*Dept. of Mech. Eng. Soongsil Univ.,

**Dept. of Diagnostic Radiology, College of Medicine, Yonsei Univ.

Abstract

A numerical technique is employed to simulate the flow patterns in the human carotid artery and a phantom of the carotid artery made of acrylic material is used to observe the flow phenomena in the carotid artery. For numerical analysis the idealized geometric shape of the carotid artery is constructed to portray the phantom. Steady momentum equation is solved by the finite element method and the numerical results are compared with the results of MRA and color Doppler images.

Key words : Carotid Artery Bifurcation(경동맥분지관), Numerical Simulation(수치해석적 모사), Experimental Observation(실험적 관찰), Phantom, Steady Flow Pattern(정상유동양상)

서론

인체혈관내 경동맥, 관상동맥분지관, 만곡부등을 통한 혈액유동에서 유동방향 및 면적의 급격한 변화로 인하여 분지관과 곡관의 내·외벽쪽에 재순환영역이 형성되고, 이 부위에 혈구, 콜레스테롤(cholesterol)등과 같은 부유물질이 작용하여 동맥경화증(atherosclerosis)이나 심근경색(myocardial ischemia)의 원인이 되는 협착(stenosis)현상이 발생되는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 동맥경화증의 발생기전을 규명하기 위하여 in vivo 및 in vitro 실험과 수치해석적 모사방법 등이 이용되고 있다^(2,3).

최근에 자기공명영상술의 발전과 더불어 자기공명혈관촬영술이 급속도로 발전하고 있는데 공교롭게도 동맥 분지부 주위에서 혈류의 역류가 영상신호의 감소를 일으키는 현상이 관찰되고 있으므로 혈류의 역류에 대한 연구가 더욱 중요시 되고 있다^(4,5). 따라서 동맥분지부에서의 혈류특성을 잘 파악하여야 자기공명혈관촬영술을 이용한 검사시 표현성(representation)을 좋게 할 수 있을 뿐 만 아니라(6) 죽종의 발생 및 동맥경화증의 국소적 발생 요인을 이해할 수 있을 것으로 사료된다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 동맥경화성 죽종의 발생원인이 되는 역류

현상을 예측하기 위하여 정상운동량방정식을 수치해석적 방법으로 해석하여 정량적인 결과를 도출하고, 경동맥분지형 모형을 제작한 뒤 자기공명혈관촬영영상과 색혈류영상을 이용하여 경동맥분지부내 혈류유동의 정성적인 관찰결과를 분석하였다. 본 연구의 결과는 방사선학적 측면의 자기공명혈관 촬영영상의 질을 향상시키는데 기여하고, 동맥혈관계 질환의 발생기전에 대한 기초연구자료로 활용될 수 있을 것이다.

수치해석적 모사방법

동맥혈관계에서 혈류의 유동양상을 수치적으로 해석하기 위한 지배방정식을 텐서형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 ρ , u_i , p , μ 는 각각 밀도, 속도벡터, 압력, 그리고 점성계수이다.

본 연구에서 선택한 작동유체는 4 w% 설탕수용액과 혈액대용유체로 많이 이용되는 33 w% 설탕수용액이다. 4 w% 설탕수용액의 유변학적 성질은 물과 거의 동일하므로 물의 점성계수와 밀도를 이용하였다. 33 w% 설탕수용액의 점성계수와 밀도는 각각 4 cp와 1142 kg/m³이다. 이때 33 w% 설탕수용액의 점성계수는 혈액의 무한전단율 겔보기 점성계수와 같게 하였다.

경동맥분지관내 유동에 관한 지배방정식은 Galerkin방법에 의한 유한요소법을 적용하여 비선형대수방정식으로 바꾸고, 연속대입법(successive substitution)으로 선형화시킨 후 Gauss소거법으로 풀었다. 압력항의 처리는 연속방정식을 penalty parameter로써 운동량방정식에 직접 대입하는 penalty방법⁽⁸⁾을 이용하고 지배방정식은 FDI사의 FIDAP-code를 사용하여 해석하였다.

경동맥분지혈관의 모형제작

파라핀(paraffin)을 이용하여 표준 경동맥분지혈관의 모

형을 수작업으로 만들었다. 파라핀으로 만든 모형의 표면에 실리콘(silicon)을 덮어 굳힌 후 파라핀을 녹여냄으로 외부 조형틀을 만들었다. 음형(depressed model)으로 파진 모형내에 치과용 stone block 재질을 넣어 굳힘으로 양각(elevated model)의 견고한 경동맥분지혈관 모형을 만들었다. 이와 같이 만들어진 모형에 치과용 bioacryl(열성형이 가능한 acryl)을 열처리 가공하면서 모형에 밀착시켜 두쪽의 투명한 tube 모양의 모형을 만들고, 모형을 acryl 접착제를 이용하여 붙여서 Fig. 1과 같은 실험용 경동맥 분지혈관의 모형으로 완성시켰다. 완성된 모형은 CT 촬영하여 내부 모양이 균일한지 확인하였으며 내부에 조영제를 넣어 충만시킨 후 X-선으로 촬영하여 전체적으로 모양이 매끄러운지 확인한 후 실험에 이용하였다. 경동맥입구의 직경은 16mm, 내경동맥 부위의 직경은 12mm, 외경동맥 부위의 직경은 8mm로써 직경비율이 4:3:2가 되도록 하였다.

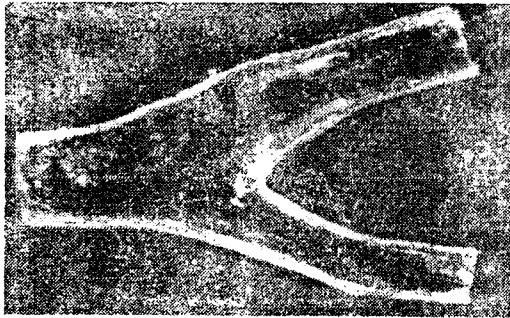


Fig. 1 Photo of the carotid artery bifurcation phantom manufactured with transparent acrylic materials.

Fig. 2는 Fig. 1의 경동맥분지혈관모형에 대하여 횡단면을 6 mm간격으로 CT촬영한 것이다. CT촬영하여 얻어진 횡단면의 자료를 이용하여 수치해석적 모사를 위한 3차원 모델을 만들었다. 그림에서 보는 바와 같이 불균일한 단면의 형상을 갖는 입구부분에서부터 외경동맥과 내경동맥으로 분지되는 곳까지는 단면적을 증가시켰고 분지부를 지나면서 단면적은 차차 감소되게 하여 실제 인체의 경동맥분지혈관의 형상과 같게 하였다. 이와 같이 하여 만들어진 수치해석모델은 Fig. 3과 같다.

결과 및 검토

Fig. 4는 수치해석적모사에 의하여 계산된 경동맥분지혈관에서 유동방향에 수직한 단면에서의 속도형상을 나타낸 것이다. 입구단면 A에서 뉴턴유체인 33 w% 설탕수용액이 완전히 발달된 유동상태로 유입되게 하였다. 이때 유동속도는 평균속도가 15 cm/s이고, 관 중앙에서의 최대속도는 30 cm/s이다. 완전히 발달된 유동이므로 단면 B에서도 속도형상은 같음을 알 수 있다. 분기부쪽으로 유동이 진행함에 따라 단면적이 확대되므로 속도는 감소하고 있다. 단면 C에서는 벽면근방의 속도는 낮게 나타나지만 역류는 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 단면 D에서는 분지부로 인해 유동이 양분되는데, 분지점이 유동의 중심보다 외경동맥(ECA)쪽으로 치우쳐 있으므로 내경동맥(IEA)에서는 외경동맥에 비하여 유동방향이 급격히 변화하지 않고 있다.

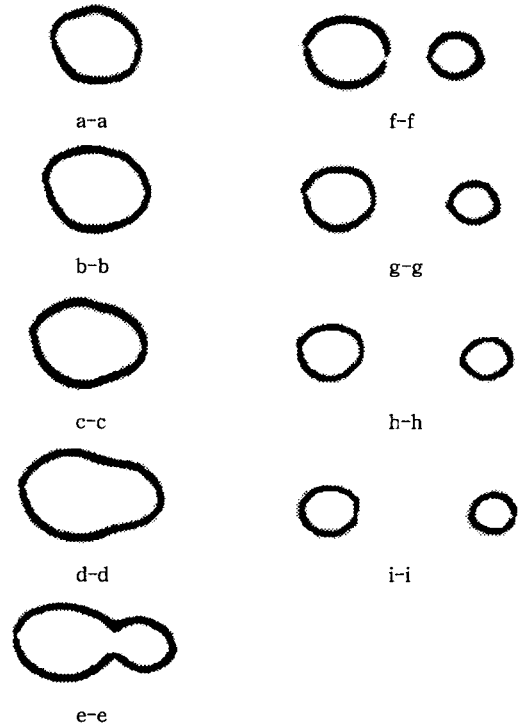
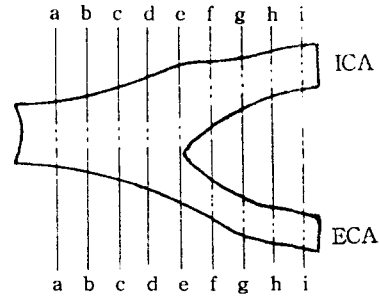


Fig. 2 Cross sections of the carotid artery bifurcation phantom

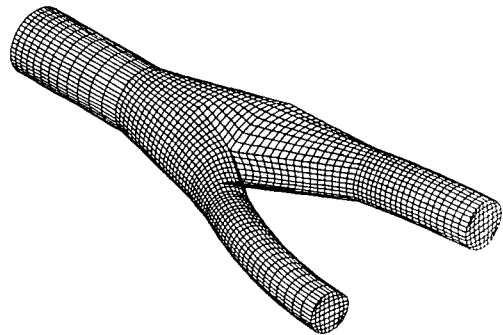


Fig. 3 Three dimensional mesh of the carotid artery bifurcation model

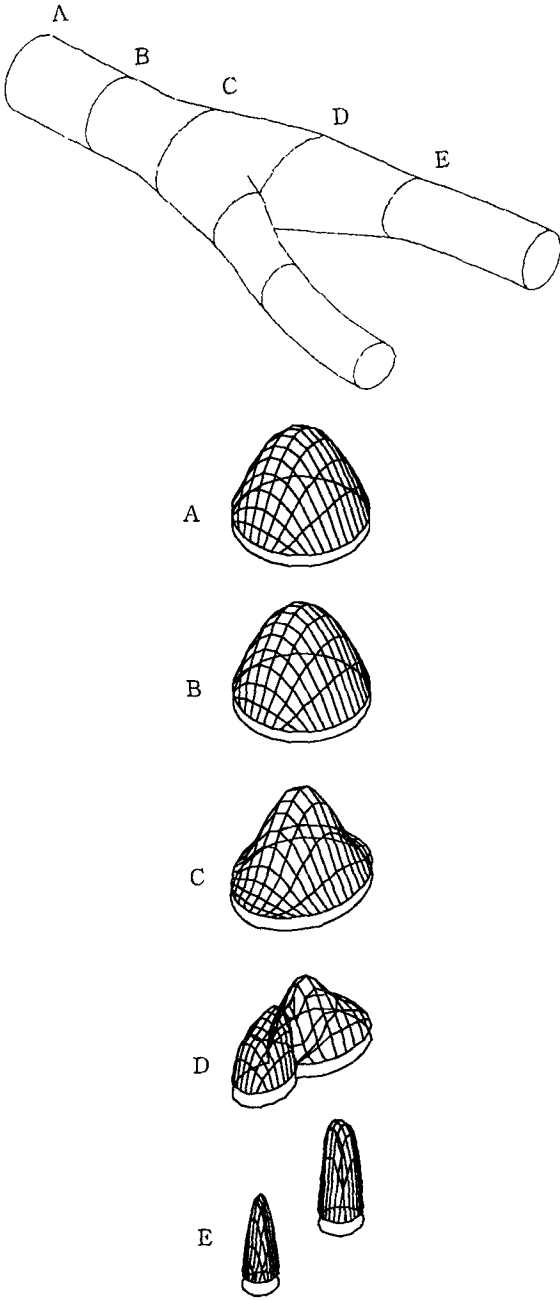


Fig. 4 Velocity profiles along the carotid artery bifurcation

분지부를 지난 단면 E에서의 속도는 직경이 큰 내경동맥에서 더 빠름을 알 수 있으며, 분지부의 영향으로 유동이 내·외경동맥의 외측으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 주어진 입구속도형상에 대하여 경동맥의 단면형상과 면적의 변화로 인하여 3차원 유동현상이 나타나므로 역류로 인한 재순환영역은 3차원 형태로 결정되어야 한다.

자기공명영상장치(Magnetom 42SP, Siemens)를 이용하

여 구한 자기공명혈관촬영영상에서는 역류의 발생으로 인한 신호소실이 관찰되고 있다. 실험에 사용된 작동유체는 4w% 설탕수용액인데, Fig. 1의 모형을 가지고 자기공명혈관촬영술과 색혈류영상을 이용하여 실험한 경우는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 분지부를 지난 뒤의 유동양상이 외경동맥분지부외측과 내경동맥분지부외측 모두 역류와 와류로 인한 신호소실이 발생하므로 어두운 부위가 나타난다. 자기공명혈관촬영에서 역류와 와류로 인해 신호감소를 보였던 부분이 색혈류영상에서 청색인 역류로 표현되었다. 그러나, 순수한 물을 동작유체로 사용하여 실험한 자기공명혈관촬영영상에서는 역류의 발생으로 인한 신호소실대비가 낮게 나오고 있는 것으로 확인되었다. 수치해석의 결과가 색혈류영상이나 자기공명혈관촬영으로 정성적으로 관측한 결과와 다른 이유는 수치모사에 사용된 기하학적 형상과 phantom 형상의 차이와 4w% 설탕수용액과 33w% 수용액의 레이놀즈수가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

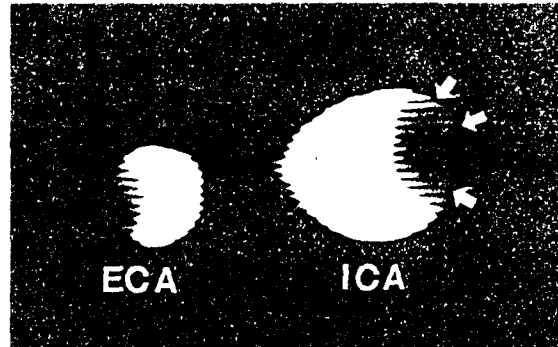


Fig. 5 Axial source image of carotid MR angiogram

결론

1. Phantom의 CT촬영결과를 이용하여 경동맥분지관의 수치해석을 위한 grid생성이 가능하다.
2. 주어진 입구속도형상에 대하여 경동맥의 단면형상과 면적의 변화로 인하여 3차원 유동현상이 나타나므로 역류로 인한 재순환영역은 3차원 형태로 결정되어야 한다.
3. 수치해석결과의 검증은 위해서는 유동의 특성치가 동일한 조건하에서 실험을 수행한 자기공명혈관촬영영상과 색혈류영상으로 분석해야 한다.

후기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- (1) 홍석근, 1993, "Mechanical Factors in the Pathogenesis, Localization and Evolution Atherosclerosis", Workshop on Biomedical Fluid Dynamics, AFERC, POSTECH, pp. 21~22.
- (2) Siegel, J. M., Markou, C. P., Ku, D. N. and Hanson, S. R., 1994, "A Scaling Law for Wall Shear Rate

- Through an Arterial Stenosis", Trans. of ASME, Vol. 116, pp. 446~451.
- (3) Perry, M. A. and Granger, D. N., 1991, "Role of CD11/CD18 in Shear Rate-dependent Leukocyte-Endothelial Cell Interactions in Cat Mesenteric Venules", Vol. 87, pp. 1798~1804.
- (4) Edelman, R. R, Mattle, H. P, Waller, B, et al. 1990, Extracranial carotid arteries: Evaluation with "Black Blood" MR angiography, Radiology, Vol. 177, pp. 45 ~ 40.
- (5) Masaryk, T. J., Ross, J. S., Modic, M. T., Lenz, G. W. and Haacke, E. M., 1988, Carotid bifurcation: MR imaging. Radiology, Vol. 166, pp. 461~466.
- (6) Masaryk, A. M., Ross, J. S., DiCello, M. C., Modic, M. T., Paranandi, L. and Masaryk, T. J., 1991, 3DFT MR angiography of the carotid bifurcation: Potential and limitations as a screening examination, Radiology, Vol. 179, pp. 797~804
- (7) Middleton, W. D., Foley, W. D. and Lawson, T. L., 1988, Flow reversal in the normal carotid bifurcation: Color Doppler flow imaging analysis, Radiology, Vol. 167, pp. 207~210.
- (8) Pak, B. C., 1989, Heat Transfer and Flow Studies in an Abrupt Expansion Pipe with Non-Newtonian Fluids, Ph. D. Thesis, Drexel University.