

Computational Fluid Dynamics in Three Dimensional Angiography: Preliminary Hemodynamic Results of Various Proximal Geometry

3차원 혈관촬영을 이용한 전산유체분석: 여러 가지 근위부 혈관 형상에 따른 결과 비교, 예비 보고

Ha Youn Kim, MD, Sung Tae Park, MD, Won Kyoung Bae, MD, Dong Erk Goo, MD

Department of Radiology, Soonchunhyang University Hospital, Seoul, Korea

We studied the influence of proximal geometry on the results of computational fluid dynamics (CFD). We made five models of different proximal geometry from three dimensional angiography of 63-year-old women with intracranial aneurysm. CFD results were analyzed as peak systolic velocity (PSV) at inlet and outlet as well as flow velocity profile at proximal level of internal carotid artery (ICA) aneurysm. Modified model of cavernous one with proximal tubing showed faster PSV at outlet than that at inlet. The PSV of outlets of other models were slower than that of inlets. The flow velocity profiles at immediate proximal to ICA aneurysm showed similar patterns in all models, suggesting that proximal vessel geometries could affect CFD results.

Index terms

Computational Fluid Dynamics
Internal Carotid Artery Aneurysm
Peak Systolic Velocity

서론

근래에 비침습적인 혈관영상진단 기술이 발달함에 따라 평소 에 아무런 자각 증상이 없던 비파열성 뇌동맥류나 뇌동맥 협착 등 두개내 혈관 질환이 우연히 발견되는 경우가 증가하고 있다. 이처럼 우연히 발견되는 두개내 혈관 질환의 경우 환자가 증상이 없기 때문에 치료 여부를 결정하기가 쉽지 않으며, 특히 비파열성 뇌동맥류의 경우에는 시간이 지날수록 임상적으로 어떻게 변화할 것인지를 예측할 수 있는 과학적인 근거가 충분하지 않다. 최근에 영상처리 기법의 발달과 혈관내 혈류 측정을 재현성 있게 할 수 있는 위상대조혈관조영술(phase contrast magnetic resonance angiography)의 활용 기법 개발에 따라 전산유체역학(computational fluid dynamics; 이하 CFD)이 혈관 질환 연구에서 두드러지는 역할을 보이고 있다. 임상 의사들은 객관적인 그림과 숫자로 표현되는 CFD로 비파열성 뇌동맥류의 파열 위험성 여부와 파열성 뇌동맥류의 취약부위를 예측할 수 있기를 기대하고 있다.

Received June 5, 2014; Accepted September 29, 2014
Corresponding author: Sung Tae Park, MD
Department of Radiology, Soonchunhyang University Hospital, 59 Daesagwan-ro, Yongsan-gu, Seoul 140-743, Korea.
Tel. 82-2-709-9396 Fax. 82-2-709-9066
E-mail: stpark@schmc.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그러나 현재까지 발표된 CFD 관련 의학 연구들은 실제 임상에서 쉽게 얻을 수 없는 여러 가지 조건을 일정한 가정 아래에서 분석하였다. 대표적으로 여러 환자의 질병 모델에 개별값이 아닌 대표 혈류값을 바탕으로 하였고, 혈관벽은 움직임이 없는 딱딱한 벽으로 가정하였다. 더욱이 사용된 질병 모델이 CT 혹은 고식적 혈관조영술(conventional angiography) 중 어느 것을 이용하느냐에 따라 CFD 측정값이 최대 50%까지 차이를 보이는 등 제한점이 있었다(1). 혈관 벽의 전단응력(wall shear stress)은 뇌동맥류 파열의 잠재적인 위험인자로 여겨지고 있지만 이에 대한 정의는 아직까지 정립된 바 없고 매우 다양하다(1). 또한 실제 임상에서 사용할 수 있는 CFD의 적절한 경계조건에 대한 평가 없이, 단지 CFD 결과에 대한 학술적인 분석이 대부분이다.

CFD를 이용한 혈류분석에서 완전 발달 층류(fully developed flow)가 관심영역의 혈관, 즉 뇌동맥류나 협착 부위 전, 후 부위에서 만들어져야 한다. 혈관 모델 입구에서 혈관의 중심부와 가장자리에서 같은 속도의 층류(laminar flow)를 입력 조

건으로 사용할 때는 직선 파이프의 경우 직경의 20배 정도가 필요하다고 알려져 있다(2). 그러나 두개내 혈관 질환에서 만들 수 있는 3차원 혈관조영술 모델은 기술한 근위부 길이를 확보하지 못한 경우가 많다. 또한 두개내 혈관은 직경이 작기 때문에 고해상도의 혈관 모델이 필요하며 대개 혈관조영술을 이용하여 원천영상을 얻는다(3). 그러나 혈관조영술의 특성상 카테터 끝(tip)의 위치, 조영제 주입속도, 삼차원 영상 획득 방법 등에 따라서 적합하지 못한 영상이 얻어질 수 있다. 2차원 평면 영상에는 없던 혈관의 협착이 3차원 영상에 표현될 수도 있고, 두개골 기저부에서 추체부 내경동맥 그리고 추체골에 가까이 있는 중뇌동맥 등에서 디지털 감산(digital subtraction)을 하더라도 부적절한 영상이 얻어지기도 한다. 또한 매우 큰 뇌동맥류가 기저동맥 침부에 있을 경우에는 카테터 반대쪽에서 오는 조영제를 포함하지 않은 혈류에 의한 층류 효과(laminar flow effect)로 인해 왜곡된 3차원 모델이 얻어질 수 있다(Fig. 1). 이러한 이유로 많은 CFD 연구에서는 임상 분석 모델에서 근위부 조건에 대한 기술이 거의 없으며, 대부분이 쉽게 얻을 수 있는 두개내 부위 혈관 모델만을 분석하였다.

이에 저자는 3차원 혈관조영술에서 목 부위가 충분한 길이로 얻어졌으며, 오래된 고혈압 환자에서 볼 수 있는 사행성 주행을 하는 원형 모델과 다양한 근위부의 변형을 시킨 모델을 비교 분석하여 CFD 결과에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

증례 보고

임상 모델 및 변형 모델 제작

이 연구는 약 1 cm 크기의 뇌동맥류가 있는 63세 여자 환자

혈관을 모델로 하여 이루어졌다. 특이한 과거력이 없는 환자로 어지럼을 주소로 내원하였으며 내원 당시 혈압은 179/103 mm Hg로 측정되었다. 환자 내경동맥은 목 부위에서 180° 가까운 각도로 두 번의 굴곡이 있는 심한 사행성 주행을 하였고, 충분한 조영제를 포함하지 않은 혈류의 층류 효과로 인한 왜곡된 이미지 혹은 디지털 감산 허상(digital subtraction artifact) 등이 없어 근위부 혈관 파생 모델 제작에 이상적이라고 판단하였다(Fig. 2Aa, Ab).

혈관 근위부 편집은 다음의 총 5개 모델로 제작했다: 원형 모델(original model; 이하 Mo), 원형 근위부 연장 모델(original with proximal tubing model; 이하 Mop), 해면동 모델(carvenous model; 이하 Mc), 해면동 근위부 연장 모델(carvenous with proximal tubing model; 이하 Mp), 그리고 경부 편집 모델(edited neck model; 이하 Mn)이다(Fig. 2Ac). Mop와 Mp는 각각 Mo와 Mc의 proximal portion을 200 mm 연장하여 얻었다.

전산혈류역학 3단계

CFD를 진행하기 위해서는 3단계의 처리가 필요하며 각 단계를 설명하면 다음과 같다. 첫 번째 단계인 분할(segmentation)은 CFD 해석에 필요한 3차원 영상을 생성하는 과정이다. 이는 CT, MRI, 그리고 혈관조영술에서 얻은 원천절편영상(source images)을 다음 단계에서 인식하고 편집할 수 있는 standard template library (이하 STL) 파일형태로 추출하는 단계이다. 최근까지 의료용 소프트웨어에서 STL 파일 추출은 불가능하여 많은 연구에서 상용 또는 개별 연구소의 프로그램을 공학자들의 도움을 받아 사용하였다. 저자들은 본원에 도입된 혈관촬영

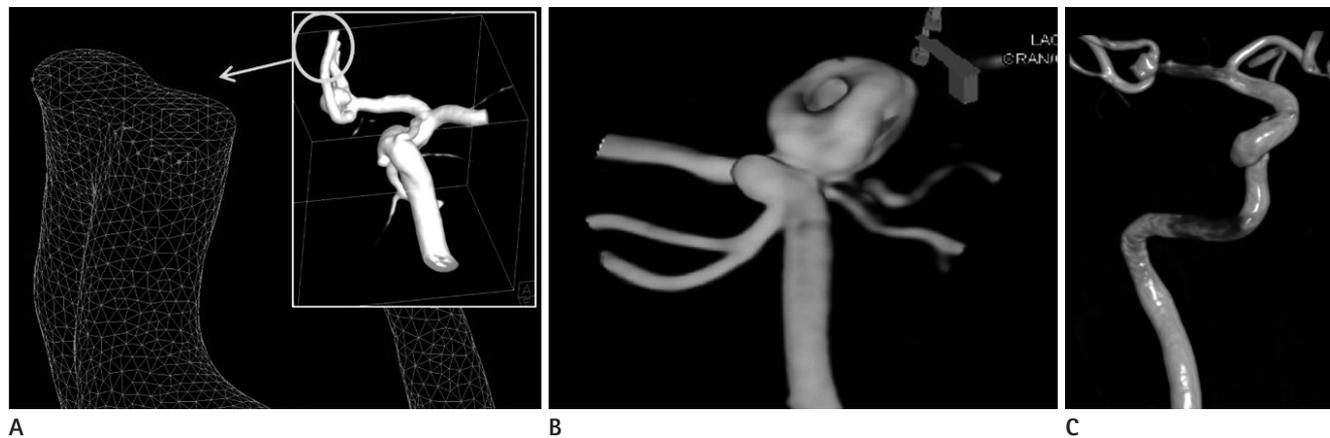


Fig. 1. Limitations of 3 dimensional surface modeling.
A. Approximated A2 segment of anterior communicating artery (circle) looks like bi-lobulated single vessel lumen on surface mesh model.
B. Basilar tip aneurysm shows donut-shaped filling defect due to non-opacified blood.
C. Three dimensional angiography from non-subtracted distal radiography shows stenotic lesion in middle cerebral artery and petrous carotid artery due to subtraction artifact by dense bone of skull base.

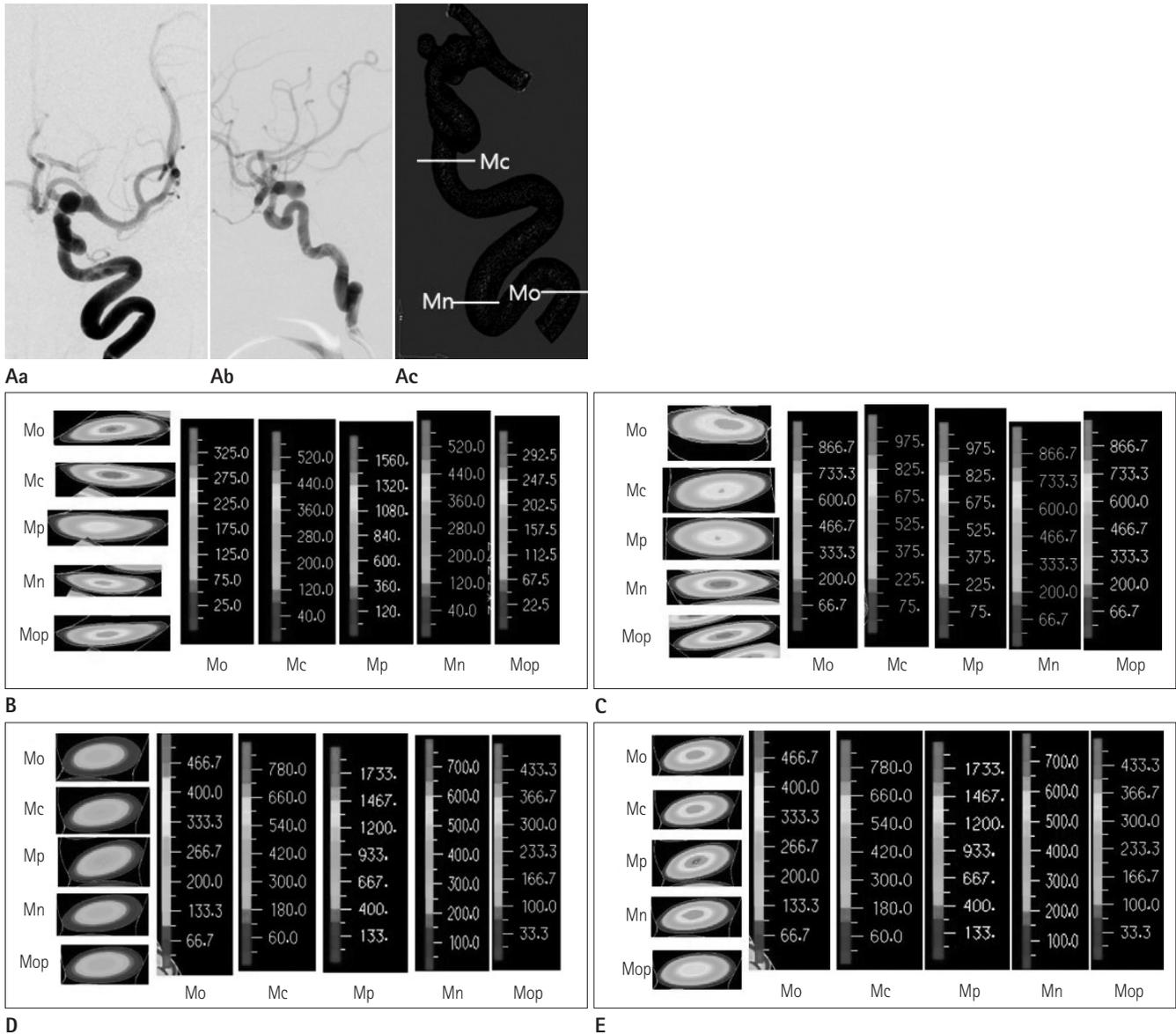


Fig. 2. Illustration of computational fluid dynamics of aneurysm models with variable geometry and length of proximal segment.

A. a, b: Left internal carotid angiogram shows almost 180° curve twice on a 54-year-old women. c: Edited level of each models.
B. Peak systolic velocity of inlet in each models.
C. Peak systolic velocity of middle cerebral artery, outlet in each models.
D. Flow velocity profile at just proximal level of internal carotid artery aneurysm (diastolic phase).
E. Flow velocity profile at just proximal level of internal carotid artery aneurysm (systolic phase).
 Note.—Mc = carvenous model, Mn = edited neck model, Mo = original model, Mop = original with proximal tubing model, Mp = cavenuous with proximal tubing model

장비의 부속장비인 Syngo Workstation (Siemens AG, Erlangen, Germany) 및 연구용 장비(Prototype, not commercial available, Siemens AG, Erlangen, Germany)를 사용하여 추출하였으며 이로써 가장 시간이 많이 소요되는 첫 단계를 용이하게 할 수 있었다. Syngo Workstation에서는 중간 관심영역 (medium field of view)을 사용하여 3차원 영상을 재구성하였으며, 원천절편영상을 prototype 워크스테이션으로 옮긴 후, 편

집 도구(editing tool)를 이용해서 해석을 원치 않는 중뇌동맥이나 전뇌동맥의 2차분지 원위부 등을 제거한 후 STL 파일로 저장하였다.

두 번째 단계인 체적그물[three dimensional (3D) volume mesh] 형성은 Hypermesh (Altair Engineering, Inc., Auck-land, New Zealand)를 사용하여 원본 및 편집 파일에서 발생한 불규칙한 삼각그물(triangular mesh)의 편집, 자유변(free edge)

의 제거, 중복된 삼각그물 제거와 삼각그물 내외면의 정상화(normalization) 등의 점진적 과정 후 3차원 사면체 요소망(3D tetrahedral mesh)을 만들어 nastran 파일형태로 저장하였다. 이 과정에서 첫 단계에서 만들어진 원형 혈관 모델의 사전 편집의 적정성을 평가하기 위해서 원위부 혈관은 편집 없이 앞서 설명한대로 근위부 내경동맥을 여러 레벨에서 인위적으로 잘라내어 근위부 변형 모델을 추가하였다.

세 번째 과정은 분석과정이다. 유체현상을 분석하는 편미분 방정식(partial differential equation)인 3D 나비에르 스토크스 방정식(Navier-Stokes equation)을 사용하여 유한요소법(finite element method)과 유한체적법(finite volume method) 같은 여러 수치기법으로 분할(discretization) 연상을 하는 상용 프로그램인 ADINA ver. 8.9(ADINA R & D, Inc., Lebanon, MA, USA)를 사용하였다. 혈류는 점도가 있는 층류(laminar flow) 형태의 뉴턴 유체(Newtonian flow)로 가정하였다. 혈관 벽과 혈류 사이에서 발생하는 유동점성(flow viscosity)은 비슬립경계조건(non-slip boundary condition)으로 가정하였다. 시뮬레이션에서 혈액의 밀도는 1100 kg/m³, 혈액의 동점성 계수(dynamic viscosity)는 0.004 Poiseulle로 하였다. 내경동맥에서 입구의 경계조건은 부정류(unsteady flow) 형태의 규칙적인 맥동유동(pulsatile periodic flow rate)으로 3번의 심장주기(cardiac cycle) 동안 주었으며 0.05초 간격으로 60회 전산분석 하였다. 각각의 모델의 입구는 전체좌표에서 기울어진 경사면에 있어서 ADINA의 skew system을 이용하여 입구에 수직인 혈류를 사용하였다.

분석 화일의 후처리 가공(post-processing)은 ADINA 자체의 모듈에서 시행하였다. 최대수축혈류속도(peak systolic velocity)는 입구와 중뇌동맥 출구에서 측정하였다. 또한 뇌동맥류 직전 내경동맥의 혈관 절단면(cut surface)에서 혈류 속도와 편심성(eccentricity) 정도를 분석하였다. 또한 ADINA 분석 기법시, 각 모델별 3차원 사면체 요소망의 수를 계산하였고 워크스테이션에서 총 해석시간을 측정하였다.

CFD 해석 결과

입구와 출구에서 최대수축혈류속도의 중간값은 해면동 근위부 연장 모델에서 입구는 약 800 mm/sec, 출구는 1440 mm/sec로 나타났다. 나머지 모델들은 출구쪽 최대혈류속도가 입구쪽에 비하여 감소된 1/2에서 1/3의 값으로 나타났다(Table 1, Fig. 2B, C).

그러나 관심영역인 뇌동맥류 직전의 내경동맥 단면에서 혈류 속도 도면(flow velocity profile)은 이완기(diastolic phase)와 수축기(systolic phase)에서 등고선 모양의 분포가 각 모델별로

비슷하였다(Fig. 2D, E). 그리고 뇌동맥류 직전의 내경동맥 단면에서 이완말기(end diastolic phase)와 최대수축기(peak systolic phase)에 각 모델별 혈류속도는 Table 2와 같다.

ADINA 해석 기법에서 각 모델별 3차원 사면체 요소망의 수는 다음과 같다: 해면동 모델은 약 42만 개, 경부 편집 모델은 약 67만 개, 원형 모델은 약 90만 개, 해면동 근위부 연장 모델은 약 126만 개, 그리고 원형 근위부 연장 모델은 약 182만 개였다. 또한 해석 시간은 가장 작은 모델인 해면동 모델의 경우 약 3시간 30분, 경부 편집 모델은 약 6시간, 그리고 원형 모델은 약 10시간이 소요되었다. 해면동 근위부 연장 모델은 약 12시간이 소요되었으며 마지막으로 원형 근위부 연장 모델은 약 38시간이 소요되었다.

고찰

이 연구에서는 두개내 혈관 중 특히 내경동맥 동맥류 CFD의 재현성을 알아보기 위해 목 부위의 내경동맥이 심한 사행성을 보이는 원형 모델의 근위부 편집을 통하여 병변내의 CFD 결과 차이를 분석해 보았다. 이전 교과서나 논문에서는 두개내 혈관과 내경동맥 정상 혈류 및 협착의 기준에 대한 동일한 참고값이 없었으며, 경동맥의 경우 도플러 검사에서는 최대수축혈류속도를, 2차원 영상으로 도플러 측정 범위를 구체화 할 수 없는 경우 두개 도플러에서는 평균혈류속도(mean flow velocity)가 사용되었다(4).

이번 증례에서는 전체 모델 중에서 해면동 근위부 연장 모델

Table 1. Peak Systolic Velocity of Inlet and Outlet in Each Models

	Peak Systolic Velocity (mm/sec)	
	Inlet	Outlet
Cavernous model	825	480
Edited neck model	775	470
Original model	770	300
Cavernous with proximal tubing model	800	1440
Original with proximal tubing model	775	270

Table 2. Peak Systolic Velocity and End Diastolic Velocity at Just Proximal Level of Internal Carotid Artery Aneurysm

	Velocity (mm/sec)	
	End Diastolic	Peak Systolic
Cavernous model	420	700
Edited neck model	450	625
Original model	300	415
Cavernous with proximal tubing model	1050	1600
Original with proximal tubing model	260	380

에서만 최대수축혈류속도가 입구쪽보다 출구쪽에서 더 빠르게 나타났다. 이는 위상대조혈관조영술(phase contrast magnetic resonance angiography)을 이용한 우리의 초기 임상경험에서 정상 내경동맥, 중뇌동맥의 최대혈류속도 결과와 유사했다. 즉 위상대조혈관조영술 도구인 NOVA (VasSol, Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 두개내 혈관의 협착이 없는 내경동맥과 중뇌동맥의 최대수축혈류속도를 비교하였을 때 대부분의 경우 중뇌동맥이 내경동맥보다 약 1.3배에서 2배 빠른 것으로 나타났다. 이런 경험을 비추어 볼 때 해면동 근위부 연장 모델만이 실제 혈류 상태를 모사할 수 있는 간략한 방법일 것으로 판단된다. 이번 연구에서는 출구쪽 모델의 조건을 줄 수 있는 임상적, 기술적인 제한이 있으며, 이는 지금까지 발표된 CFD에서도 거의 마찬가지였다. 그러나 임상적으로 위상대조혈관조영술의 효용성은 현재 시행되는 경두개 초음파를 대체할 만한 비용 대비 실용성도 낮고, 응급 질환인 뇌경색이나 출혈성 질환의 경우 13개 혈관을 검사하는 데 30분 내외의 추가적인 시간이 소요되어 비현실적이다. 따라서 많은 경우에는 충분한 실제 목부위의 내경동맥이 포함된 두개내 질병 모델을 만들 수 없어서 두개내 모델을 근위부로 연장시킨 변형 모델만이 실제 혈류 상황에 가장 근접하게 모사할 수 있는 조건이 될 수 있으리라는 추정을 하게 한다. 이번 연구에서 해면동 모델은 병변까지 근위부 길이가 짧으며 바로 이어진 90° 그리고 180° 정도의 혈관굴곡으로 인하여 충분한 속도의 혈류가 발생하지 않은 것으로 보인다. 또한 목 부위가 포함된 원형 모델이나 원형 근위부 연장 모델 등 충분한 근위부 길이가 포함된 다른 모델에서도 최대수축혈류속도가 중뇌동맥이 내경동맥보다 느린 결과를 얻었다. 이는 아마도 CFD가 혈류굴곡 부위마다 혈류 속도가 감소하여 충분한 실제 혈류상태를 반영하지 않았을 가능성이 크다.

또한 이번 연구에서 뇌동맥류 직전의 내경동맥 단면에서 혈류 속도 도면은 이완기와 수축기에서 등고선 모양의 분포가 각 모델별로 비슷하였다. 이로 미루어 보아 동맥류 내부 또는 입구에서 혈류속도의 분포나 유선형 등은 실제 상황과 유사하게 모사할 수 있을 것으로 생각한다. 또한 절대치의 차이는 있으나 혈관벽의 전단응력 분포도 유사할 것으로 추정한다.

새로운 두개내 혈관의 협착 그리고 동맥류 평가 기준을 위해서 CFD 분석이 최근 10여 년에 걸쳐 활발히 이루어지고 있다. 특히 두개내 혈관의 CFD 분석은 외국의 일부 센터를 중심으로 이루어져 왔으며 국내에서도 조금씩 연구가 시도되고 있다. 의학이나 공학에서는 유체 분석 모델이 단순하거나 움직이지 않는 고정된 상태에서 이루어지며(5), 또한 컴퓨터 지원 설계(computer aided design)로 모델 자체가 CFD 해석에 적합하며, 경계 조건 또한 정확히 줄 수 있는 장점이 있다. 그러나 임상

분석에 사용되는 MR이나 CT 모델은 해상도, 그리고 여러 가지 해부학적 문제가 더해져서 부적합한 분석 모델이 만들어진다. 더구나 대부분의 임상 CFD 분석 논문에서조차도 경계조건으로 출구쪽의 혈류속도 등에 대한 언급이 없어 저자들의 경우도 대기압 조건을 주었을 뿐이다. ADINA 해석기법에서 각 모델마다 3차원 사면체 요소망 수의 차이가 컸으며 이에 따라 해석 시간에도 큰 차이가 있었으며 이는 향후 보완되어야 할 점이라 생각된다.

이번 연구에서 원천절편영상을 prototype 워크스테이션에서 편집을 함으로써 불규칙 삼각각물(inequilateral triangle)을 해결할 수 있었고 절단면(cutting surface)도 비교적 고르게 meshing 할 수 있었다. 또한 출구를 전뇌동맥과 중뇌동맥의 근위분지에 고정된 상태로 여러 가지 변형 모델생성이 가능해져서 중심선(center line)에 수직인 평면으로 입구와 출구를 만들 수 있었다. 이 연구에서 ADINA의 skew system의 사용으로 전체좌표(global geometry)에서 직각의 좌표축(orthogonal x, y, z-axis)에서만 혈류를 줄 수 있었던 한계를 극복하고 입구에 수직으로 혈류 입력이 가능해짐으로써 실제 혈류 상태에 좀 더 근접해진 결과를 얻을 수 있었던 것으로 본다. 이 연구의 제한점으로는 단 하나의 증례만으로 두개내 혈관의 근위부 연장 모델이 충분한 혈류 조건을 병변 부위에 줄 수 있다고 가정하기에는 무리가 있다는 점이다. 특히 분석의 절대적인 기준으로 위상대조혈관조영술을 제시하였으나 이 또한 모든 환자 또는 질병 모델에 적용할 수 있는 것에 대한 의문점이다. 그러나 이 증례의 경우처럼 목부위에서 심한 굴곡이 있는 경우에도 출구쪽의 혈류 상태는 크게 다르지 않을 것으로 생각된다. 두 번째로는 CFD 분석프로그램뿐 아니라 전 편집에 사용된 프로그램 모두 고가의 상용 공학프로그램이고 데이터용량이 방대하여 시스템에 오류도 종종 있어 이를 연구소에 의뢰 혹은 자문을 구하여 공동 작업을 하였던 점이다. 이 과정에서 의학자와 공학자 간의 협업이라는 쉽지 않은 상호 관계 및 회의가 필수적이었고, 시간과 공간적인 제약이 있었으나 이는 프로그램의 보완을 통해서 추후 개선될 것으로 본다. 또한 세 번째로 ADINA 분석 기법시, 각 모델에서 3차원 요소인 사면체 망(tetrahedral mesh)의 수가 증가할수록, 해석 시간이 산술급수적으로 늘어나 가장 데이터 양이 많은 원형 근위부 연장 모델은 예상 시간의 2배가 해석에 소요되었다. 이는 방대한 데이터 용량을 처리하는 데 워크스테이션의 한계가 작용한 것으로 보이며 추후 병렬 연산 등의 처리능력이 향상된 컴퓨터로 보완되어야 할 것으로 생각된다.

이 연구는 국내 최초로 편집된 두개내 혈관 특히 내경동맥의 동맥류에서 병변 전 근위부 길이 변화에 따른 CFD 재현성을 알아보았다. 두개내 근위부 변형 모델 중 해면동 근위부 연장

모델이 실제 혈류를 가장 유사하게 표현할 가능성이 있다. 이는 향후 증상이 없는 뇌동맥류 환자의 치료에 있어서 임상근거와 신뢰성 있는 독립된 예측인자를 제시하는 방법이 될 수 있을 것이다. 그러나 이번 연구는 변형된 근위부 혈관 모델에 따른 혈류상태 평가의 기술적 접근 방법에 대한 예비보고서로서 추후 많은 연구가 필요할 것으로 생각한다.

참고문헌

1. Kallmes DF. Point: CFD--computational fluid dynamics or confounding factor dissemination. *AJNR Am J Neuroradiol* 2012;33:395-396
2. Milnor WR. *Hemodynamics, 2nd ed.* Baltimore: Williams & Wilkins, 1982:13-17
3. Cebral JR, Mut F, Weir J, Putman CM. Association of hemodynamic characteristics and cerebral aneurysm rupture. *AJNR Am J Neuroradiol* 2011;32:264-270
4. Korean Society of Stroke. *Stroke, 1st ed.* Seoul: Epublic, 2009:261-276
5. Nakatani H, Hashimoto N, Kang Y, Yamazoe N, Kikuchi H, Yamaguchi S, et al. Cerebral blood flow patterns at major vessel bifurcations and aneurysms in rats. *J Neurosurg* 1991; 74:258-262

3차원 혈관촬영을 이용한 전산유체분석: 여러 가지 근위부 혈관 형상에 따른 결과 비교, 예비 보고

김하연 · 박성태 · 배원경 · 구동익

근위부 혈관 형상이 전산유체역학(computational fluid dynamics; 이하 CFD) 결과에 미치는 영향을 알아보았다. 뇌동맥류가 있는 63세 여자 환자의 혈관을 기초로 5개의 편집된 혈관 모델로 CFD 분석을 하였다. 해면동 근위부 연장 모델만이 출구쪽 최대수축혈류속도가 입구쪽에 비하여 빠른 값을 가지고, 나머지 모델은 오히려 느렸다. 뇌동맥류 직전의 관심영역에서 혈류속도 도면(flow velocity profile)은 등고선의 분포가 모든 모델에서 비슷하였고, 혈류속도는 해면동 근위부 연장 모델에서 가장 높은 값을 보였다. CFD 연구에서 근위부 길이와 모양이 해석 결과에 영향을 미칠 수 있을 것이라고 생각한다.

순천향대학교병원 영상학과