

색혈류영상을 이용한 두개강내 동맥류 Phantom 상 혈류양상에 대한 실험연구*

연세대학교 의과대학 진단방사선과, 연세대학교 공과대학 기계공학과¹,
연세대학교 공과대학 금속공학과², 배재대학교 물리학과³

정 태 섭 · 정 은 기 · 임 윤 철¹ · 김 성 빈² · 이 동 훈³ · 김 대 인

= 초 록 =

목적: 인체내 동맥류의 생성, 성장, 혈전의 발생 및 파열 등은 내부의 혈류양상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 현실적으로 생체의 동맥류내 혈류역학을 정밀히 파악하기가 힘들므로 실제와 유사한 각종의 phantom을 제작하여 색혈류영상을 이용 내부의 혈류양상을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법: 기저동맥분지부(basilar artery tip), 내경동맥분지부(internal carotid artery bifurcation), 내경동맥만곡부(curved area of an internal carotid artery) 등에서 발생하는 유형의 동맥류를 대상으로 phantom을 자체 제작하였다. 또한 항속순환 system을 자체 개발 이용하였으며, 순환액에 자체 조제한 메아리반향 증강제를 첨가하였다. 색혈류영상기기는 Acuson 128 XP/10과 Dasonics VST MASTER을 이용하였다. Phantom의 내부 순환모형을 이론적으로 computer 모의실험(simulation)을 하여 실제의 색혈류영상과 비교관찰하였다.

결과: 내경동맥만곡부 측면에서 발생하는 유형의 측면 동맥류 phantom에서는 크게 1) 동맥류 입구의 먼곳 쪽을 통해서 유입이 생기며, 2) 입구의 가까운 쪽을 통해서 유출이 생기며, 3) 중심부위에 느린 와류가 기본적으로 생기며 동맥류의 형태에 따라서 다양하게 변화할 수 있었다. 그러나 기저동맥분지부와 내경동맥분지부에서 생기는 유형의 동맥류 phantom에서는 주 유입혈류가 동맥류의 천정에 직접 부딪히나 대칭성에 따라서 약간의 방향이동이 있을 수 있었다.

결론: 색혈류영상을 이용하여 자체 제작한 동맥류 phantom에서 동맥류 내부의 혈류역학적 변화를 잘 관찰할 수 있었으며 computer 모의실험과 거의 일치하였다.

색인단어: Aneurysm, artery, Phantoms, Doppler, Blood, flow dynamics

논문접수: 1994년 8월 13일, 수정제의: 1994년 8월 25일, 수정논문접수: 1994년 9월 5일, 논문게재결정: 1994년 9월 6일
통신저자: 정태섭, (135-270) 서울시 강남구 도곡동 146-92, 연세대학교 의과대학 영동세브란스병원 진단방사선과. Tel. (02) 3450-3514,
Fax. (02) 562-5472

* 이 연구논문은 대한초음파학회 메디슨 연구비의 지원으로 이루어졌음.

서 론

고혈압 및 교원질질환(connective tissue disorders) 등이 기질적 원인이 되어 선천적 배경으로 두개강내 동맥류가 발생한다는 이론이 오랫동안 널리 알려져 왔으나, 최근에 이러한 동맥류가 혈류역학적 변화와 긴장에 따른 후천적 또는 퇴행성병변으로 인정되고 있다[1]. 낭상동맥류(saccular aneurysm)의 생성, 성장, 혈전생성 및 파열은 혈류역학적 힘의 균형과 아주 밀접한 관계가 있다[2]. 일반적으로 동맥류내부의 혈류양상은 동맥류와 그 발생된 혈관과의 형태적 연관 관계에 가장 많이 좌우된다[1, 2].

이러한 연관관계에 대하여 다수의 보고가 있었으나[3-5] 실제로 정확한 인과 관계를 확인할 검사방법이 다양하지 못하다. 일부 저자들이 고정된 동맥류 모형에 대한 수식적 접근[1], 동물실험때 색혈류영상의 이용[2, 6] 및 유리관내 물감 유동[3]에 대해서 보고하였으나, 현실적으로 다양한 형태의 동맥류에 대해서 쉽게 해석하기가 힘들었다. 아직까지 색혈류영상을 이용하여 phantom내의 혈류양상에 대해 발표된 적이 없으며, 이러한 방법이 다양한 형태의 동맥류내 층류(laminar flow)에서 와류(turbulence)까지 사이에서 발생할 수 있는 무질서 상태의 혈류 비균일 상황을 유효 적절히 평가할 수 있는 방법이 될 수 있을 것으로 생각하였다.

저자들은 자체 제작한 여러가지의 두개강내 동맥류 모형내의 혈류양상을 색혈류영상(color Doppler imaging)을 이용하여 관찰하였으며 동일한 형태의 동맥류 환경을 computer에 입력하여 혈류형태를 모의실험(simulation)함으로써 상호자료의 신뢰성을 재검토하며 computer 모의실험의 유용도를 확인하고자 본 연구를 진행하였다.

재료 및 방법

두개강내 흔히 발생할 수 있는 대표적인 3가지 유형의 동맥류 모형을 자체 제작하였다. 크게 1) Type 1: 기저동맥분지부(basilar artery tip) 같이 135도 각도인 "T" 자형 동맥분지부에서 생기는 유형의 동맥류(Fig. 1A), 2) Type 2: 내경동맥분지부(internal carotid artery bifurcation) 등과 같이 70도의 각도로 측분지(side branch)가 나오는 부위에서 생기는 유형의 동맥류(Fig. 2A)와 3) Type 3: 135도 정도 각도로 휘는 내경동맥 만곡부(curved area of an internal carotid artery)에서 생길 수 있는 유형의 동맥류(Fig. 3A)를 기본 모델로 설정하였다. 동맥류의 모형은 두께가 2mm이며 내구경이 11mm인 polyethylene tube에

재구성이 가능한 고무조각을 이용하여 Epoxy 접착제로 접착하였다(Fig. 1-3). 제작된 모형은 쉽게 색혈류영상을 할 수 있도록 물이 들어있는 plastic 용기내에 삽입 고정하였다. 자동 항속 순환장치는 순환물통을 높이 매달아서 중력의 차이로 물이 관으로 순환되게 하였으며 높이에 따른 중력의 차이만으로도 충분히 안정된 속도로 순환이 가능하였다. 순환액을 수도물만 사용하는 경우 메아리반향이 적음으로 자체제작한 메아리반향 증강제를 순환액에 첨가하였다. 이때 사용한 메아리반향 증강제는 식물성 식용유와 계면활성제(Tween 80)를 혼합하여 고속 진탕시켜서 만든 교질형의 액상첨가제를 이용하였다.

자체 제작한 phantom을 각각 다른 회사의 다른 기종인 2대의 색혈류영상기기를 이용하여 같은 결과가 나타나는지 확인하기 위하여 동일한 조건에서 반복 검사하여 비교하였다. 이때 색혈류영상기기는 Acuson 128 XP/10과 Dasonics VST MASTER를 이용하였다. 각각 7MHz와 10MHz의 선형트랜듀스를 이용하였다. 이때 manual로 PRF를 4500~6500에서 조정하였고 filtering을 가장 낮은 수준(50~100Hz)으로 설정하였다. Color gain은 background artifact가 발생하기 직전에 고정하였다. Scanning 방향은 phantom의 제작구조상 동맥류모형의 천정(dome)쪽에서 시행하였다. 이로인해 Type 1과 2의 phantom에서는 scanning 방향이 유입관과 같은 방향인 반면 Type 3의 phantom에서는 유입, 유출관과 직각으로 되었다. 이들의 색혈류 측정영역에 각도를 주지 않았다. 1차 실험시에는 각각의 phantom에서 15cm/sec, 50cm/sec와 100cm/sec의 3가지 속도로 모두 촬영하여 각각의 결과가 큰 차이가 없는 것을 확인하고 2차 실험시에는 50cm/sec의 혈류속도를 기준 혈류속도로 이용하였다.

색혈류영상실험을 실시한 후 결과를 모르는 상황에서 유체역학담당조에게 Computer 모의실험(simulation)을 진행하도록하였다. Computer 모의실험은 유체역학 전용 software인 FIDAP 7.05 Version을 이용하여 동맥류 모형내에 mesh network를 설정한 후 혈류유형을 속도에 따른 색깔 흐름으로 표현하였다(Fig. 1-3). 속도는 Type 1, 2, 3의 phantom에서 각각 15cm/sec, 50cm/sec와 100cm/sec의 정보를 입력하여 결과를 얻었다. 두가지의 실험결과를 비교분석하기 위하여 실험완료후 색혈류영상실험조와 Computer 모의실험조가 동시 참여하여 비교평가를 가졌다.

결 과

Type 1형의 동맥류에서는 유입된 주혈류가 동맥류의 중앙부를 관통하여 천장 중앙부에 바로 부딪히고 이곳에

서 양측으로 퍼진 부채형의 흐름을 보이며 양측면 동맥류의 벽을 따라서 유출되고 이때 동맥류 중앙 양측에 느린 속도인 두개의 와류 중심이 형성되었다(Fig. 1). Computer 모의실험상 동맥류 내부에서는 전반적으로 유입혈류의 속도가 매우 늦어져서 거의 정체에 가까운 정도였지만 느린 유입혈류가 동맥류의 중앙부를 관통하여 천장 중앙부에 바로 부딪히고 이곳에서 양측으로 퍼진 부채형의

흐름을 보이고 양측면 동맥류의 벽을 따라서 양쪽 유출혈관을 따라 유출되어 색혈류영상은 computer 모의실험과 잘 일치되었다.

Type 2형의 동맥류에서는 유입된 주혈류가 측분지 쪽으로 향해 중심을 벗어난 동맥류 천장에 부딪히며 이에 따른 비대칭적 와류가 발생되었으며 측분지 쪽의 와류가 주혈관 쪽의 와류보다 크기가 작았다(Fig. 2). Computer

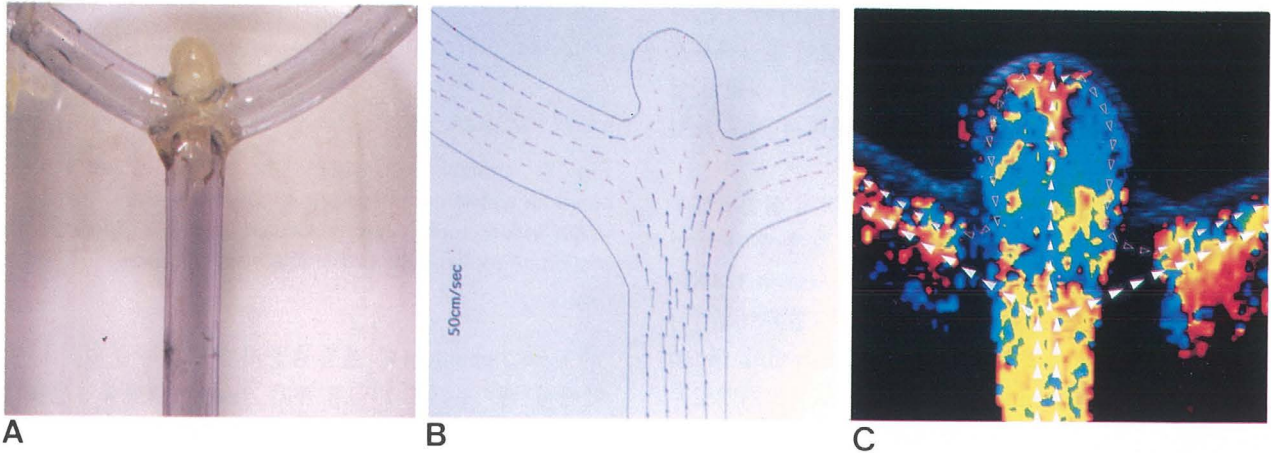


Fig. 1. Type 1 phantom which is designed as a basilar artery tip aneurysm. **A.** Polyethylene-rubber phantom (Type 1). **B.** Stream-arrow contour plot in the Type 1 phantom with continuous flow velocity (50 cm/sec). **C.** Color Doppler image shows that the very slow central flow (smaller closed arrowheads) entering aneurysm reaches the mid portion of aneurysm dome. Then, the reversed flow makes a slow vortex at both lateral sides of aneurysm (open arrowheads). Larger open arrowheads represent the flows through the native branches.

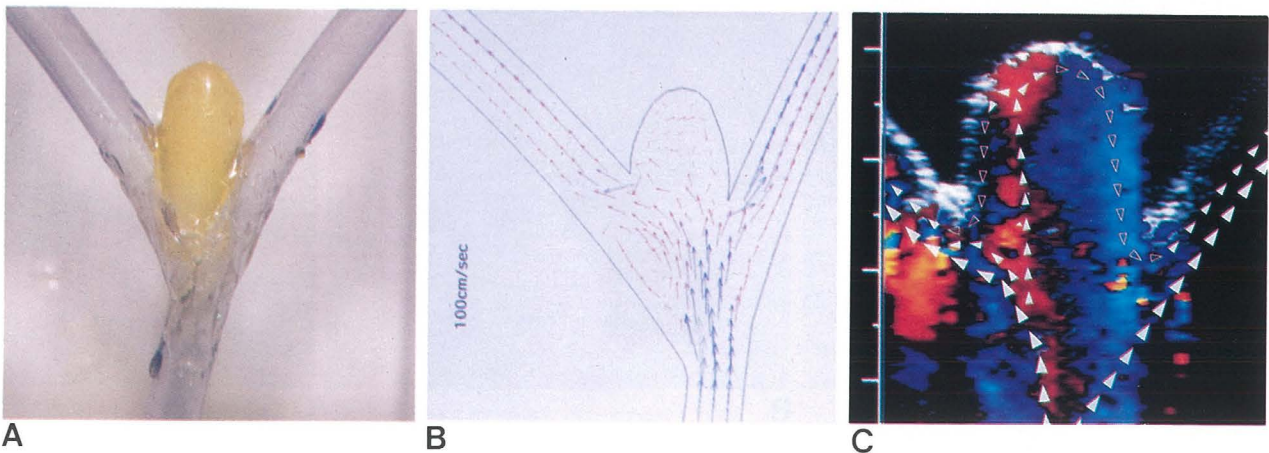


Fig. 2. Type 2 phantom which is designed as an aneurysm of internal carotid artery bifurcation. **A.** Polyethylene-rubber phantom (Type 2). **B.** Stream-arrow contour plot in the Type 2 phantom with continuous flow velocity (100 cm/sec). **C.** Color Doppler image shows that the slow and eccentric flow (smaller closed arrowheads) entering the aneurysm reaches the eccentric portion of aneurysmal dome. Asymmetric vortices noted at each lateral side of the inner portion of an aneurysm (open arrowheads). Larger open arrowheads represent the flows through the native branches.

모의실험상 측분지가 나오는 부위에서는 바깥쪽으로 제 2의 와류와 역류가 생기는 것을 알 수 있었으나 색혈류영상에서는 edge shadow 등으로 인해 잘 확인이 되지 않았다.

Type 3 형의 동맥류는 혈류에서 먼곳의 동맥류입구가 턱이 지도록 제작되었으며 주혈류가 혈류의 먼쪽의 턱에 부딪히며 동맥류내로 돌아 들어가며 이때 동맥류의 턱의 가까운 곳에 크기는 작지만 속도가 빠른 주 와류가 발생하고 속도가 늦어지며 폭이 넓어진 유입 혈류가 부채처럼 퍼지며 동맥류 전체에 걸쳐 속도가 느린 2차 와류를 형성하였다. 실제 제작된 phantom은 유입부위 입구쪽에는 작은 턱이 있으며 유출부위 입구쪽에 턱이 없이 밋밋하므로 주유출혈류가 나가는 부위와 혈류 가까운 쪽의 밋밋한 입구사이에 주흐름의 공백대가 생기며 이곳에서 작고 느린 이차 와류가 형성되었다(Fig. 3).

두가지의 실험결과를 비교분석하기 위하여 실험완료후 색혈류영상실험조와 Computer 모의실험조가 동시 참여하여 결과를 교환한 후 비교평가하였다. Acuson 128 XP/10 과 Diasonics VST MASTER 의 2대의 색혈류영상기기를 이용하여 Type 1, 2, 3 의 3가지 phantom에서 15cm/sec, 50cm/sec와 100cm/sec의 순환속도로 각 기계별로 시행한 색혈류영상의 결과와, 각각의 phantom에서 3가지 순환속도로 시행한 computer 모의실험의 결과를 비교한바 서로 거의 일치되는 결과를 보였다. 그러나 일부 phantom과 색혈류영상기기의 제약점 등으로 인해 색혈류영상에서 충분히 확인이 되지 않는 부위가 있었다. 특

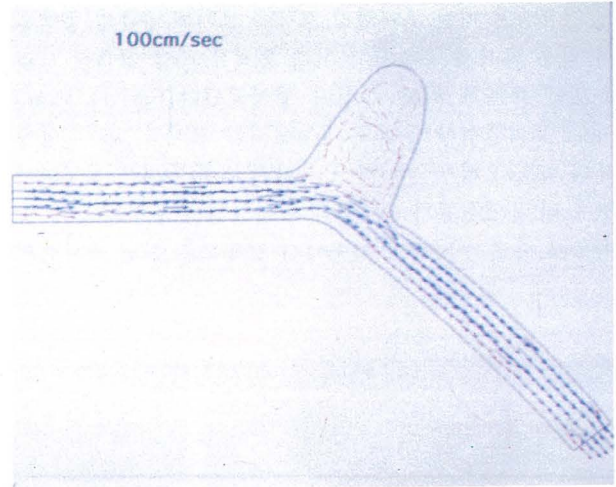


Fig. 4. Computer simulated flow pattern in the Type 3 phantom with larger orifice but without distal edge. There is a single inflow vortex that is located centrally. There is no secondary vortex at the proximal portion of orifice.

히 Type 2 phantom의 경우 측분지가 나오는 부위의 바깥쪽에서 생기는 제 2의 와류와 역류가 색혈류영상에서 edge shadow 등으로 인해 잘 확인이 되지 않았다.

고 찰

최근 두개강내 동맥류의 수술방법과 진단방법이 급속

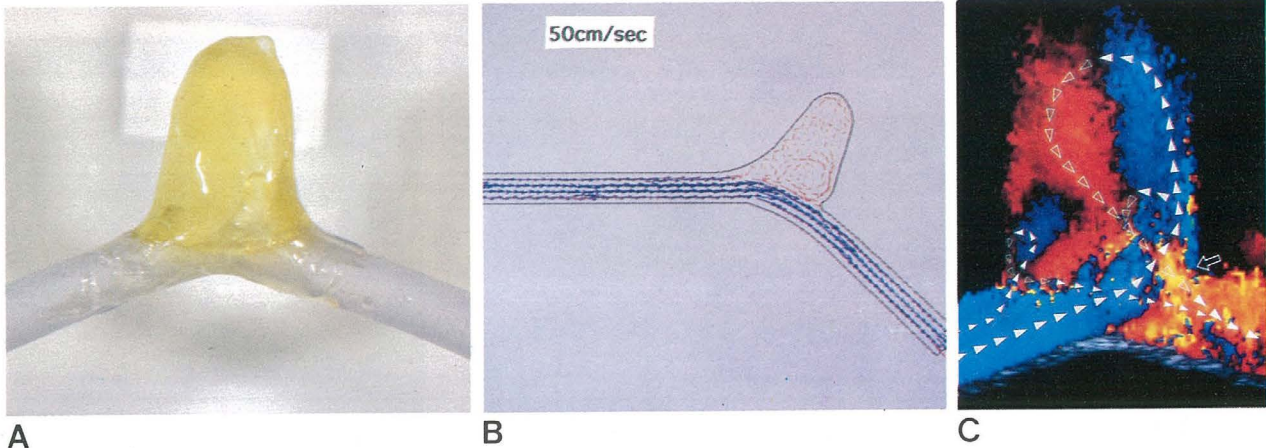


Fig. 3. Type 3 phantom which is designed as an aneurysm at the curved area of internal carotid artery. There is a small edge (open arrow on Fig. 3C) at the distal portion of the aneurysmal orifice. **A.** Polyethylene-rubber phantom (Type 3). **B.** Stream-arrow contour plot in the Type 3 phantom with continuous flow velocity (50cm/sec). **C.** Color Doppler image shows a larger inflow (larger closed arrowheads) at the distal portion of the aneurysmal orifice and another smaller inflow (smaller closed arrowheads) at the second slow vortex area of proximal portion of orifice. Main outflow (larger open arrowheads) passes between the two inflow streams.

도로 발전되고 있으며 특히 낭상동맥류(saccular aneurysm) 등에 발생할 수 있는 혈류역학적 변화에 대한 연구가 매우 중요시 되고 있다[1, 2, 6, 7]. 특히 혈류의 속도, 혈류의 방향 및 혈류벽에 발생하는 혈류에 의한 절삭력(shear stress) 등의 동맥류에서 생길 수 있는 여러가지 정보를 알 수 있다면 치료방침을 결정하는데 많은 도움이 될 수 있다.

종래에는 고혈압 또는 교원질 질환 등에 따른 선천적 배경으로 두개강내 동맥류가 발생한다고 하였으나 최근 낭상동맥류의 성장과 파열에 혈류역학적 요소가 관련한다고 보고되고 있다[1, 2]. 더우기 혈류의 저류(stagnation)는 동맥류내막을 따라 혈소판과 백혈구의 침착을 유도하게 되며 혈관내막에 대한 산소공급과 대사의 장애가 생긴다. 동맥류내막의 손상에 따른 혈전의 발생과 동맥류벽의 비후가 생기게 되며 이들이 동맥류의 성장에 큰 역할을 하게 된다[7-9].

혈액은 점도가 있는 non-Newtonian 액체이며[10], 내부에 적혈구 등의 입자를 포함하고 있고, 맥동(pulse)을 가지고 있을뿐만 아니라[1, 10, 11] 혈관의 탄력성, 저항성 등의 수많은 요인이 있다. 실제로 실험을 하기 위하여 이들 모든 요인을 수식화하여 요인으로 표현화한다는 것은 현실적으로 지극히 어렵기 때문에 추구하고자 하는 연구 목적에 따라서 일부의 요인만을 선택하여 혈류 역학적 연구를 진행하는 것이 바람직하겠다. 저자들은 동맥류내부의 주 혈류방향, 와류와 주위혈관들과의 연관관계에 본 연구의 초점을 두었기 때문에 맥동이 없이 연속순환하는 Newtonian 액체를 대상으로 하였으며 phantom 자체의 탄력성과 저항성 등은 일단 고려하지 않았다.

저자에 따라서 혈류의 맥동이 동맥류 내에서 순간적으로 높은 수축기속도(systolic velocity)에서 낮은 이완기속도(diastolic velocity)로 변하게 되며 이때 원칙적으로 높은 속도에서 생기는 소용돌이가 그 낮은 속도에서 역회전을 하게 되고 이로 인한 난류가 생기며 그 영향으로 동맥류의 파열 등이 발생할 수 있다고 하였다[1]. 이들 저자는 3cm/sec에서 95cm/sec의 다양한 속도의 범위를 이용하였으나 15cm/sec 이상의 속도에서는 전반적인 혈류양상의 변화가 없었다고 보고하였다. 그러나 이완기시 혈류속도가 3cm~15cm/sec 정도인 저속혈류는 대동맥이나 아주 큰 동맥 이외에는 거의 나타나지 않으며, 두개강내의 중뇌동맥에서는 수축기시 94 ± 2 cm/sec 이완기시 48 ± 10 cm/sec 정도의 혈류 속도를 보인다[12]. 이에 저자들은 15cm/sec, 50cm/sec, 100cm/sec의 세가지 속도를 이용하였으며 이들 세가지 혈류속도간에서 큰 혈류양상의 변화가 없는 것을 색혈류영상과 computer 모의실험 모두에

서 확인하였다. 1차 실험시에는 각각의 phantom에서 3가지의 속도로 모두 촬영 확인하였으며 2차 실험시에는 각기 큰 혈류양상의 변화가 없었기 때문에 50cm/sec의 혈류속도를 기준 혈류속도로 이용하였다.

Type 1형의 동맥류 phantom에서는 실제적으로 거의 저류에 가까울 정도로 유속이 감소하였으며 비교적 대칭적인 모형이었으므로 주유입혈류는 천정중앙에 부딪히게 되고 그후 양편으로 소용돌이가 생겼다. Type 2형의 동맥류 phantom에서는 측부가지 쪽으로 휘는 유입혈류가 생겨 동맥류천정의 중앙에서 옆으로 비껴난 주유입혈류가 형성되었다. 이러한 Type 1과 Type 2형의 혈류양상은 다른 저자들의 유리관 model 실험의 결과와 잘 일치되었다[3].

일반적으로 동맥류 입구에서 부터 동맥류 천정까지의 깊이와 동맥류 폭의 비율이 1:1 인 내경동맥 측면 동맥류(lateral internal carotid artery aneurysm)에서는 다음과 같은 3유형의 명백한 혈류 유역이 나타날 수 있다[6]. 이들은 1) 주혈류의 방향에서 먼 곳의 동맥류 입구쪽을 통해 유입되는 혈류유역, 2) 주혈류의 방향에서 가까운 곳의 동맥류 입구쪽을 통해 유출되는 혈류유역, 3) 중앙부위의 저속 소용돌이 유역으로 크게 나뉘게 된다. 이러한 전형적인 혈류 유형은 동맥류의 폭과 깊이가 1:1로 비교적 원형이며 입구 양측에 턱을 가질때 잘 생긴다. 본 저자들의 경우 동맥류 phantom을 자체 제작하는 과정에서 폭과 깊이가 1:1.5로 약간 길쭉하며 주혈류의 먼곳 입구쪽에 턱이 있는 형으로 만들어졌다. 모든 동맥류에서 같은 모양은 거의 없으며 각각의 형태적 특징을 가지고 있으므로 type 3형의 phantom으로 이용하였다(Fig. 3). 이에 대한 상대적 평가를 하기 위하여 폭과 깊이를 1:1.5로 길쭉하게 하며 입구의 양측의 턱을 제거하여 넓은 입구를 가진 동맥류를 computer 모의실험(Fig. 4)하여 비교하였다. Graves[6] 등의 보고와 저자들의 실험결과를 종합하면 동맥류의 입구에 양측 모두 턱이 없거나 또는 있어서 대칭인 경우는 소용돌이의 중심이 중앙쪽에 위치하나(Fig. 4) 주혈류의 먼쪽 동맥류의 입구쪽에 턱이 있다면 소용돌이의 중심이 턱쪽으로 가까이 위치하였다(Fig. 3). 또한 턱이 있는 경우(Fig. 3)는 소용돌이의 중심이 턱쪽으로 가까이 위치하며 이때 작은 소용돌이가 생기고 또 하나의 속도가 느리지만 큰 소용돌이가 2차로 형성되지만 양측에 턱을 없앤 경우는 역회전방향의 작은 2차 소용돌이가 동맥류의 깊은 곳에 형성되는 것을 알 수 있었다(Fig. 4).

쉽게 사용할 수 있는 상용화된 동맥류 phantom이 없기 때문에 phantom을 자체 제작하였다. 주로 polyethylene tube에 고무조각을 epoxy 수지를 이용하여 접합시키는 방

법을 이용하였는데 쉽게 제작은 가능하였으나 견고성이 약해 실험도중에 수차 터져서 실험실이 침수되는 등하여 실험을 중지해야 하는 사태도 있었다. 또한 원래 기대하는 정도로 정교하게 만들어지지 않으므로 computer 모의 실험을 먼저할 수 없는 어려운 점이 있었다. 금형을 이용하여 기계적으로 정교하게 만들 수도 있으나 적은 수량에서는 너무 고가이며 제작기간이 오래 걸려 각종의 phantom을 개별적으로 비치하기에는 무리가 있었다. 앞으로 간단하며 정교하게 phantom을 만드는 방법의 개발이 이러한 연구의 중요한 관건이 될 것으로 사료된다. Computer 모의실험은 Fluid dynamic international, Inc 회사의 FIDAP (fluid dynamic analysis package) 7.05 version을 IBM workstation을 이용하여 시행하였다. 아직 100 cm/sec 이상의 고속순환속도의 자료를 처리할때 드물게 오류가 생기는 현상이외는 실제적으로 문제가 없이 잘 작동되었다. 그러나 주로 Newtonian 유체를 위한 유체역학용 software이기 때문에 혈액과 같은 non-Newtonian 유체를 위한 다양한 변수가 부족한 아쉬움이 있다.

비록 non-Newtonian 유체를 이용하여 phantom상 이차원적 영상법과 computer 모의실험을 시행하였지만 이들 모두의 결과가 잘 일치하는 것을 비교확인할 수 있었다. 앞으로 이러한 phantom제조법 및 computer 모의실험법을 보다 더 개발 진전시킨다면 동맥류 내부 뿐만 아니라 전반적인 인체내 혈류 역학적 이해에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Gonzalez CF, Cho YI, Ortega HV, Moret J. Intracranial aneurysms: Flow analysis of their origin and progression. *AJNR* **1992**;13:181-188
2. Strother CM, Graves VB, Rappe A. Aneurysm hemodynamics: An experimental study. *AJNR* **1992**;13:1089-1095
3. Keber W, Heilman CB. Flow in experimental berry aneurysms: method and model. *AJNR* **1983**;4:374-377
4. Miimi H, Kawano Y, Sugiyama I. Structure of blood flow through a curved vessel with an aneurysm. *Biorheology* **1984**;21:603-615
5. Liepsch DW, Steiger HJ, Poll A, Reulen HJ. Hemodynamic stress in lateral saccular aneurysms. *Biorheology* **1987**;24:689-710
6. Graves VB, Strother CM, Rappe A. Flow dynamics of lateral carotid artery aneurysms and their effects on coils and balloons: an experimental study in dogs. *AJNR* **1992**;13:186-196
7. Nakatani H, Hashimoto N, Kang Y, et al. Cerebral blood flow patterns at major vessel bifurcations and aneurysms in rats. *J Neurosurg* **1991**;74:258-262
8. Crompton MR. The pathogenesis of cerebral infarction following the rupture of cerebral berry aneurysms. *Brain* **1964**;87:491-510
9. Artmann H, Vonofakos D, Muller H, Grau H. Neuroradiologic and neuropathologic findings with growing giant intracranial aneurysm: review of the literature. *Surg Neurol* **1984**;21:391-401
10. Perktold K, Kenner T, Hilbert D, Spork B, Florian H. Numerical blood flow analysis: arterial bifurcation with a saccular aneurysm. *Basic Res Cardiol* **1988**;83:24-31
11. Perktold K. On the paths of fluid particles in an axisymmetrical aneurysm. *J Biomech* **1987**;20:311-317
12. Arnolds BJ, von Reutern G-M. Transcranial Doppler sonography. Examination technique and normal reference values. *Ultrasound Med Biol* **1986**;12:115-123
1. Gonzalez CF, Cho YI, Ortega HV, Moret J. Intracranial aneurysms: Flow analysis of their origin and

=Abstract=

**Experimental Study on Blood Flow Patterns through the
Phantoms of the Intracranial Arterial Aneurysms
Using Color Doppler Imaging**

Tae Sub Chung, M.D., Eun Kee Jeong, Ph.D., Yoon Chul Rhim, Ph.D.¹, Sung Bin Kim, Msc.²,
Dong Hoon Lee, Ph.D.³, Dae In Kim, R.T.

Department of Diagnostic Radiology, College of Medicine, Yonsei University,
YongDong Severance Hospital,

Department of Mechanical Engineering, Yonsei University¹,

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University²,

Department of Physics, Paichai University³

PURPOSE: The occurrence, growth, thrombosis, and rupture of intracranial saccular aneurysms can be directly related to the effect of hemodynamic forces. We developed the phantom flow models and compared with the computer simulation program to analyse the flow pattern and hemodynamics that might be responsible for the intracranial arterial aneurysms.

MATERIALS AND METHODS: We designed the arterial phantoms of three major sites of intracranial arterial aneurysms; 1) basilar artery tip, 2) internal carotid artery bifurcation, 3) curved area of internal carotid artery. Flow patterns in the aneurysmal portion of phantoms were evaluated with color Doppler system on the connection with automatic closed type of circulation system. Then, we compared the results with computer simulation. The hemodynamic characteristics of the phantoms were identical with those obtained by computer simulations.

RESULTS: Three distinct zones of flow were identified by color Doppler studies on the aneurysm of the curved area of an internal carotid artery: 1) an inflow zone entering the aneurysm at the distal aspect of its orifice, 2) an outflow zone exiting the aneurysm at the proximal aspect of its orifice, 3) a central slow vortex. However, the phantoms of basilar artery tip and artery bifurcation showed a direct inflow stream at the dome of an aneurysm.

CONCLUSION: Flow dynamics in the various phantoms of the aneurysms can be successfully evaluated with color Doppler imaging, and were consistent with those predicted by computer simulations.

Address for reprints: Tae Sub Chung, Department of Diagnostic Radiology, YongDong Severance Hospital of the Yonsei University 146-92, Dokokdong Kangnamku, Seoul 135-270, Korea. Tel. (82-2) 3450-3514, Fax. (82-2) 562-5472