대한방사선의학회지 1999;41:869-877

경동맥 조영증강 자기공명혈관조영술 때 경동맥 분지부에서 보이는 신호 불균질의 원인은 무엇인가?: 임상 및 실험적 연구[1]

정 기 웅·정 태 섭·주 진 양[2]

목적: 경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영(CEMRA) 때 경동맥구에서 흔히 병적인 신호결손으로 오인될 수 있는 신호 불균일이 관찰된다. 그 원인을 임상 및 실험적 연구를 통하여 혈류 역학적인 관점에서 알아보고자 하였다.

대상 및 방법: 임상적 연구를 위하여 15명 환자의 28예 경동맥에서 조영증강 자기공명혈관촬영의 영상을 같은 환자의 고속 디지탈감산촬영의 영상과 비교 분석하였다. 자기공명혈관촬영은 1.5T 초전도 자기공명촬영기계를 이용하였으며, Turbo-FLASH(TR/TE/FA = 3.2ms/1.3ms/35°) 펄스열을 사용하였다. 실험적 연구를 위하여, 경동맥 분지부의 실리콘 모형을 자체 제작하고 이를 박동성의 폐쇄순환 시스템에 연결한 후 CEMRA 및 DSA를 반복 촬영하여 영상을 혈류역학적인 관점에서 분석하였다.

결과: 28예 경동맥의 조영증강 자기공명혈관촬영상 12예에서 경동맥구에 다양한 형태의 신호 불균일이 관찰되었다. 디지탈감산촬영의 영상과 비교하였을 때, 와류로 인한 조영제의 불균일 혼합이 조영증강 자기공명혈관촬영에서 경동맥구의 신호 불균일을 일으키는 것으로 생각되었다. 모의 DSA 실험에서 경동맥구에 심한 와류를 보였던 경동맥 분지부 모형에서 조영증강 자기공명혈관 촬영을 하여, 경동맥구에서 DSA와 같은 유형의 불균일 신호를 재현해 냄으로써 임상실험의 결과를 실험적으로 뒷받침할 수 있었다.

결론: 와류로 인한 조영제의 국소적 불완전 혼합이 경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영에서 경동맥구의 신호 불균일을 초래하는 것으로 추정된다.

고도 이상의 경동맥 협착증에 대한 예방적 동맥내막절제술의 유용성이 알려지면서, 경동맥 협착을 스크리닝 하기 위한 다양한 방법들이 보고되고 있다(1). 고식적 혈관촬영술이 표준적인 방법이지만 침습적인 검사여서 스크리닝 검사로서의 한계점을 가지고 있다. 자기공명혈관촬영술은 경동맥 협착 정도를 판정하는 비침습적 검사로서, 최근 2D-TOF, 3D-TOF, 3D-PC 등과 같은 다양한 방법이 시도되었다(2-8). 하지만 이런 방법들은 혈류변화에 민감하여 혈관 모양에 따른 신호감소가 심하고, 협착 정도를 흔히 과대평가 하는 문제를 가지고 있다(9,10). 최근 개발된 경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영술은 정맥으로 주입된 상자성 조영제가 혈관 내 T1 이완 시간을 단축시켜 혈관의 영상을 얻는 방법으로, 기존의 방법에 비해 혈류 변화에 덜 민감하고 혈관 축 방향으로 단면을 얻는 것이 가능하므로, 영상 획득 시간을 월등히 단축시킬 수 있다. 이러한 장점들로 인하여, 최근에는 경동맥 협착의 진단에 있어서 그 정확도가 기존의 디지탈감산혈관촬영술에 비견된다는 보고가 발표되기도 하였다(11,12)

조영증강 자기공명혈관촬영술 시 혈관 내 신호강도는 조영제 농도에 많은 영향을 받는다(13). 경동맥 분지부는 심장의 박동, 혈액의 점도 및 해부학적 변이로 인하여 다양한 형태의 와류와 역류가 발생하는 것으로 알려져 있다(14,15). 따라서, 와류로 인하여 조영제가 경동맥 분지부에 고르게 분포되지 않은 상태에서 촬영 된다면, 조영제 농도의 불균일로 인하여, 경동맥 분지부에서는 다양한 신호 불균일(signal inhomogeneity) 이 나타날 수 있을 것으로 예상된다.

조영증강 자기공명혈관촬영상, 이러한 신호 불균일이 경동맥 분지부에서 흔히 관찰되어 정확한 진단에 지장을 주거나 병변으로 오인될 수 있었다. 현재까지는 경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영술의 이러한 문제점이 제대로 파악되어 있지 않은 실정이다. 따라서 경동맥 분지부의 신호 불균일의 원인을 정확히 규명한다면, 보다 정확한 영상을 만들기 위한 개선책이 마련되리라 예상된다.

본 저자들은 자체 제작한 경동맥 분지부 실리콘 모형을 이용한 조영증강 자기공명혈관촬영(CEMRA)과 고속 디지탈감

[1]연세대학교 의과대학 진단방사선과학교실, 연세대학교 방사선의과학연구소
[2]연세대학교 의과대학 신경외과학교실
본 논문은 1998년 연세대학교 의과대학 교수연구비 보조로 이루어졌음
이 논문은 1999년 7월 7일 접수하여 1999년 8월 9일에 채택되었음.

산혈관촬영(DSA) 실험 및 임상적 연구를 통하여, CEMRA상 경동맥 분지부 특히 경동맥구에서 신호 불균일의 원인을 혈류역학적인 관점에서 해석하고자 했다.

대상 및 방법

임상 연구

대상

1997년 11월부터 1999년 1월 까지 뇌혈관질환이 의심되어 본원에서 경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영술과 경동맥 고속 디지탈감산혈관촬영술을 모두 시행 받은 15명의, 28예 경동맥을 대상으로 전향적으로 분석 하였다. 남자가 6명, 여자가 9명이었다. 대상군은 34세에서 71세까지의 분포를 보였고, 평균연령은 55세였다. 경동맥협착증 2예, 고혈압성 뇌증 1예, 뇌종양 1예 였고, 나머지 11예는 뇌동맥류가 있거나 의심되는 환자였다. 모든 환자들은 자기공명혈관촬영을 먼저 시행 받았으며, 검사 결과상 뇌혈관질환이 의심되어 디지탈감산혈관촬영을 시행 받았다. 두 검사 사이의 시간 간격은 최단 1일에서 최장 67일 이었으며, 평균 27일 이었다. 총 15명의 대상환자 중 2명은 디지탈감산혈관촬영을 한 쪽 경동맥만 시행 받았기 때문에 전체 대상이 된 경동맥은 2예가 제외 된 총 28예였다.

디지탈감산혈관촬영

대퇴동맥으로 천자 된 도관의 끝을 총경동맥 근위부에 위치시킨 다음, Iodine 조영제 5ml를 5ml/sec의 속도로 급속 자동 주입 후, 디지탈감산촬영기(Multistar T.O.P., Siemens, Erlangen, Germany)를 이용하여 초당 6프레임의 속도로 경동맥 분지부 측면 영상을 4내지 5초간 연속적으로 얻었다. 이렇게 얻어진 영상을 경동맥 분지부에서의 조영제 분포에 따른 조영도의 차이를 시간적 변화와 위치적 차이를 중심으로 동일한 환자의 자기공명혈관촬영상의 영상과 비교하였다.

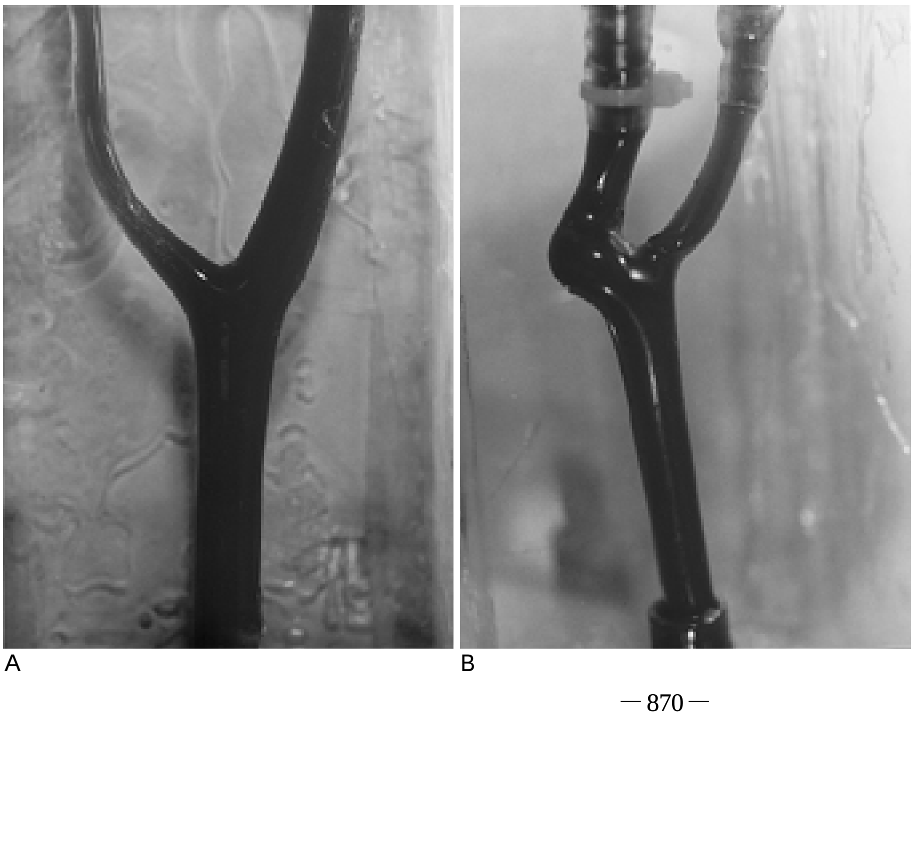
자기공명혈관촬영

전주정맥으로 체중 1kg 당 0.2mmol의 조영제(Magnevist, Schering, Germany) 및 후속으로 15ml의 식염수를 18G 도관을 통하여 3ml/sec 의 속도로 기계주입(Medrad, Pitts-burg, U.S.A.) 한 후 조영증강 자기공명혈관촬영을 시행하였다. 자기공명혈관촬영은 1.5T 초전도형 자기공명영상기계(Vision, Siemens, Erlangen, Germany)를 이용하였다. 경동맥 영상을 주로 얻기 위하여 Neck CP array 코일을 사용하였으며, 영상기법으로는 3D-FLASH기법(TR/TE/FA/ = 3.2/1.3/35°)을 이용하였다. 64.4mm 관상면 두께로, 행렬(matrix) 80×160, 관찰시야 175×280mm, 영상획득시간 7초로 정하였고, 조영제 주입 7초 뒤부터, 각 sequence 사이의 시간 간격 없이4회 연속 촬영하였다. 제 2기는 동맥기로서 조영제 주입 17.5초 후에 케이 공간 중심부 자료획득이 되도록 하였으며, 이 보다 7초 뒤에 영상획득이 이루어지는 시기를 정맥기로서 제 3기로 정하였다. 각 단계에서 얻은 데이터를 조영제 사용전의 데이터와 감산처리 하였으며, 경동맥 분지부가 선택적으로 포함된 구역을 정한 후 10°간격으로 18개의 최대강도투사(MIP) 영상을 얻었다. 이렇게 얻어진 경동맥 분지부의 신호 양상과 동일한 환자의 자기공명혈관촬영상 동맥기 영상인 제 2기와 정맥기 영상인 제3기의 경동맥 분지부의 신호 분포의 변화양상을 2명의 방사선과 의사가 합의하에 분석하였다.

Phantom을 이용한 모의 실험

경동맥 분지부 실리콘 모형 및 박동성 혈류

2개의 모양이 다른 경동맥 분지부 모형을 제작하여 실험에



A B

Fig. 1. Transparent silicon phantom carotid bifurcations filled with blood mimicking fluid.
A. Model of normal carotid bifurcation that has smooth branching pattern.
B. Model of tortuous carotid bifurcation that might be expected to show turbulent flow at the carotid bulb.

이용하였다. 하나는 비교적 경동맥구의 만곡 및 팽대가 심하지 않아서 와류가 심하지 않으리라고 기대되는 매끈한 모양의 정상형 경동맥 분지부 모형이며, 다른 하나는 경동맥 분지부, 특히 경동맥구에서 와류가 잘 발생하도록 만곡이 크고 경동맥구를 팽대 시킨 경동맥 분지부 모형이었다(Fig. 1A,B). 모형의 제작은 파라핀 주형 및 실리콘을 이용하여 탄성이 있는 모형을 제작하였다(16). 이렇게 제작한 모형을 아크릴로 만든 사각용기에 고정시킨 후 한천 젤(agar gel)을 채워 24시간동안 굳힌 후 실험에 이용하였다. 경동맥 분지부 모형 내를 순환하는 박동성 혈류는 80386 micro-processor가 내장되어 있는 전방이동 유출형(positive-displacement) 펌프가 장착된 UHDC flow system(Quest Image Co., London, Canada)를 이용하였으며 관류량은 평균 9.2 ml/초, 수축기 최대 30 ml/초로 조절하였다. 순환액은 혈액과 점도가 비슷하도록 증류수와 glycerine을 1.4:1의 비율로 혼합한 용액을 사용하였다.

디지탈감산촬영술

경동맥 분지부 실리콘 모형을 박동성 순환펌프 시스템에 연결 후 디지탈감산촬영기(Multistar T.O.P., Siemens, Erlangen, Germany)를 이용하여 초당 6 frame의 속도로 고속 촬영하였다. Iodine 제재의 조영제를 초당 5 ml의 속력으로 유입관 기시부 쪽에서 5 ml를 수동 주입한 후, 초기 조영제가 유입되는 시기부터 조영제가 완전히 희석되어 나오는 시기까지 촬영하였다. 조영제가 모형을 통과하는 동안의 혈류변화 및 분포양상을 확인하기 위해서 전체의 영상을 모두 비교 검토하였다.

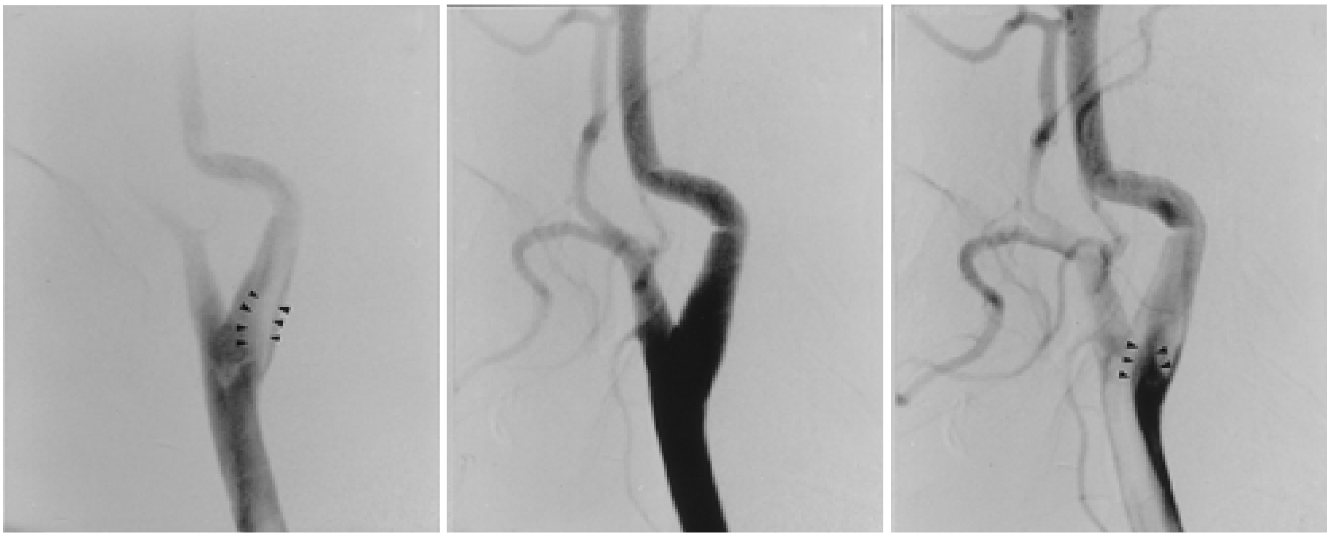
자기공명혈관촬영술

디지탈감산촬영과 마찬가지로 모형들을 박동성 순환 펌프 시스템에 연결한 후, 조영증강 자기공명혈관촬영을 시행하였다. 1.5T 초전도 자기공명영상장치(Vision, Siemens, Erlangen, Germany)를 이용하였다. 관류 시스템에 연결된 경동맥 분지부 모형을 head coil의 중앙에 위치시킨 후, 3D Turbo-FLASH sequence를 이용하여 촬영 하였다. 촬영시 조정 변수는 TR/TE/FA/ = 3.2/1.3/35°, 행렬(matrix) 80×160, 관찰시야 175×280 mm였으며, 0.5 mol/L Gd-DTPA 1 ml를 증류수로 10배 희석 시킨 용액 10 ml를 초당 약 3 ml의 속도로 수동 주입 후 5초의 지연시간 후에, 3.34초의 영상획득 시간으로 시간간격 없이 5개의 phase를 얻었다. 이렇게 얻어진 영상들을 모두MIP 처리하였다.

결　　과

임상적 연구

고속으로 연속 촬영한 경동맥 디지탈감산촬영(DSA)의 영상은 혈관의 해부학적 변이 뿐만 아니라, 경동맥 분지부의 시간에 따르는 조영제 분포의 변화를 잘 보여주었다(Fig. 2A, B, C). 경동맥 분지부, 특히 경동맥구(carotid bulb)에서 다양한 형태의 와류 및 역류가 관찰되었다. 이 부위에서는 초기 동맥기에서 조영제가 국소적으로 잘 혼합되지 않아서 결손상(Fig. 2A)으로 보이며 중기 동맥기에서는 조영제가 골고루 혼합되어 적절한 조영도로 관찰되나(Fig. 2B), 후기 동맥기에서는 와류에 혼합된 조영제가 늦게 유출되어 국소적으로 조영도가 높게 보였다(Fig. 2C).



A B C

Fig. 2. Sequential images of DSA on 62-year-old man's Rt. carotid artery shows dynamic changes of contrast distribution at the carotid bulb.
A. Early arterial phase shows filling defect(black arrowheads) due to delayed filling of contrast at the vortex flow area of carotid bulb.
B. Mid arterial phase. Filling defect disappears and is replaced by homogeneous filling pattern at carotid bulb.
C. Late arterial phase shows delayed washout of contrast(black arrowheads) probably due to turbulent flow at the carotid bulb.

경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영(CEMRA) 시 경동맥구의 신호 양상은 크게 3개의 그룹으로 나눌 수 있었다(Table 1). 28예 중 12예에서 경동맥영상을 표현하는데 지장을 줄 정도의 불균일 신호가 경동맥 분지부에서 관찰되었다. 이중 8예는 내경동맥 기시부 외측 벽에 기저를 둔 쐐기형 신호결손 부위가 관찰되었으며, 디지털감산촬영의 영상과 비교하였을 때, 초기동맥기의 영상과 일치하였다(Fig. 3A, B). 4예에서는 경동맥구 부위에 신호증가 영역과 신호결손 영역이 이중적으로

Table 1. Signal Patterns of Carotid Bulb in CEMRA and Correlation with DSA.

Group	Signal pattern	Corresponding phase in DSA	Number
Group 1	Focal signal defect at carotid bulb	Early arterial phase	8
Group 2	High and low signal area at carotid bulb	Early arterial phase	4
Group 3	Homogenous enhancement	Mid-arterial phase	16
			Total 28

Fig. 3. Rt. carotid arterial images of 42-year-old man.
A. Early arterial phase DSA shows incomplete mixing of contrast agent and secondary filling defect(white arrowheads).
B. Arterial phase CEMRA shows inhomogeneous low signal intensity at the carotid bulb(black arrowheads). Signal pattern at the carotid bulb is nearly identical with (A). In this case, central k-space is targeted to the early arterial phase.

Fig. 4. Rt. carotid arterial images of 47 year-old woman.
A. Early arterial phase DSA clearly shows flow pattern at the carotid bifurcation. Whirl-like shadow at the carotid bulb reflects turbulent flow (white arrows). Note wedge shaped filling defect at the internal carotid bifurcation (white arrowheads).
B. Arterial phase image of CEMRA shows wedge shaped low signal area is noted at the internal carotid bifurcation (black arrowheads). Also noted focal high signal area at the carotid bulb (black arrows). Turbulent and reversed flow at the carotid bifurcation is responsible for this complex signal.

관찰 되었는데 디지탈감산촬영상 역시 초기 동맥기에 역류 및 와류에 의해 조영제의 국소적 저농도로 인한 신호결손과 또 다른 고농도로 인한 고신호 영역이 공존하는 경동맥구의 이중혈류 패턴과 일치하였다(Fig. 4A, B). 나머지 16예에서는 비교적 균일한 신호강도로 경동맥 분지부가 잘 표현되었으며, 디지털감산촬영상의 중간동맥기와 일치하였다

동맥기에 촬영된 CEMRA는 28예 모두 경동맥이 선택적으로 잘 조영 되었다. 정맥기 영상 중 9예는 경동맥의 신호 강도가 너무 약하거나, 정맥과 심하게 중첩되어 경동맥의 영상을 표현하기가 어려웠다. 이 경우를 제외한 19예에서 경동맥 분지부의 신호강도 유형의 분석이 가능하였으므로 경동맥 분지부에서의 동맥기와 정맥기 신호강도 패턴을 비교하였다. 19예 중 9예에서 경동맥 분지부에서의 동맥기와 정맥기 신호강도 패턴이 달랐는데, 동맥기에 경동맥 분지부에 신호 결손이 정맥기에서는 균일한 신호 패턴으로 변하였다(Fig. 5A, B). 나머지 10예 에서는 동맥기와 정맥기의 경동맥 분지부의 신호 패턴에 특별한 차이를 보이지 않았다. 따라서, 경동맥 분지부의 신호 양상은 케이 공간 중심부 조준 타이밍에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

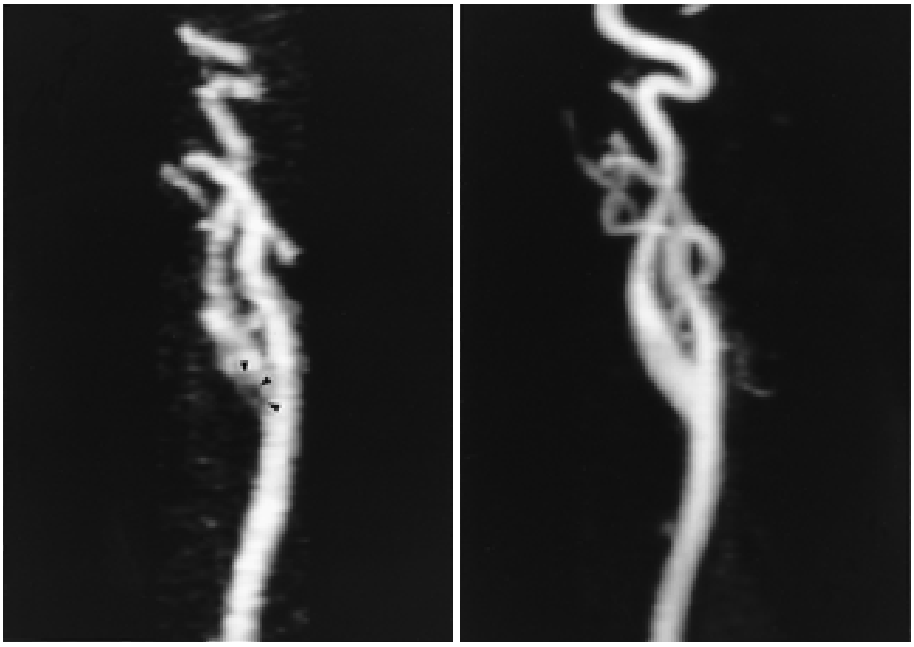

A B

Fig. 5. Comparison with arterial (A) and venous (B) phase selective arterial MIP images of 42-year-old man in CEMRA. Low signal at the carotid bifurcation (black arrowheads) in the arterial phase disappears in the venous phase.

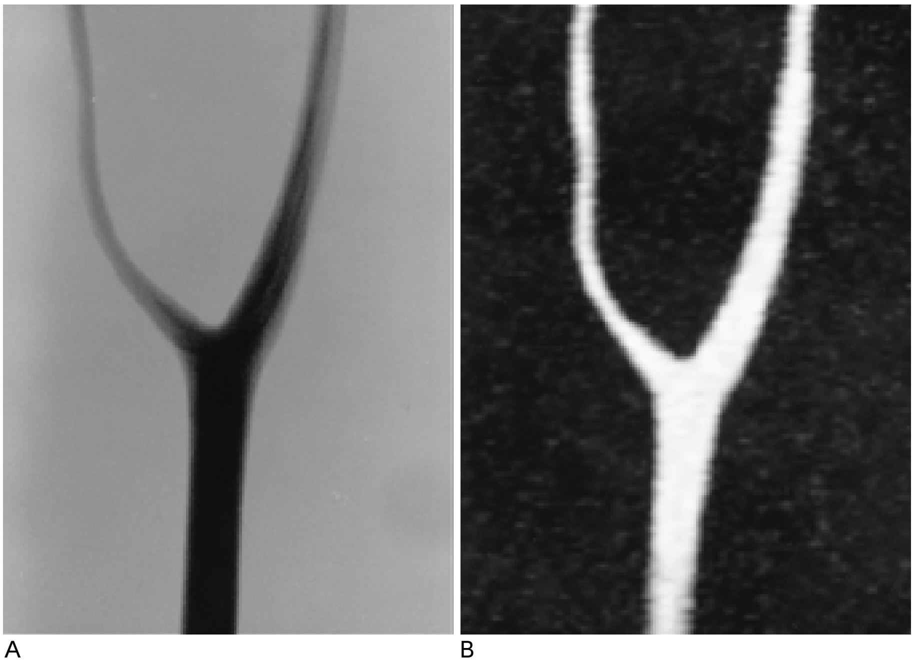

A B

Fig. 6. DSA and CEMRA images of smoothly branching phantom carotid bifucation.
A. Early phase of DSA shows no significant turbulent flow at the carotid bifurcation. Contrast is homogeneously mixed in the carotid bulb.
B. Early phase of CEMRA shows homogeneous signal pattern at the carotid bulb as (A).

Phantom을 이용한 모의 실험

고속으로 연속 촬영한 모형의 디지탈감산촬영 영상은 경동맥구에서 시간에 따른 조영제의 혼합및 저류의 양상을 잘 보여 주었다. 경동맥 분지부가 비교적 매끈한 모양을 가지고 있는 모형의 디지탈감산촬영에서 조영제 유입 시에 소용돌이류나 조영제의 불균일 혼합은 거의 관찰되지 않았으며, 자기공명혈관촬영상에서 모든 Phase에 걸쳐서 특별히 경동맥구에 불균일 신호를 보이지 않았다(Fig. 6A, B).

경동맥 분지부가 매우 팽대되고 굴곡이 심한 모형에 있어서는 조영제 유입 초기에 심한 와류가 관찰되었으며, 와류로 인하여 조영제가 경동맥구에서 불균일하게 혼합되는 양상을 관찰하였다(Fig. 7A). 자기공명혈관촬영에서도 역시 조영제 유입 초기에 DSA와 같은 모양의 신호감소 영역을 관찰할 수 있었다(Fig. 7B). DSA상 유입되는 조영제가 많아지면서 조영제가 경동맥구에 균일하게 분포되는 양상으로 변하였는데 (Fig. 7C). 조영증강 혈관촬영에서도 역시 초기의 불균일 신호가 사라지고 비교적 균일한 신호를 보임으로써, 전반적으로 디지탈감산촬영과 같은 패턴의 영상을 보였다(Fig. 7D).

고 찰

경동맥 조영증강 자기공명혈관촬영시에 경동맥 분지부에서

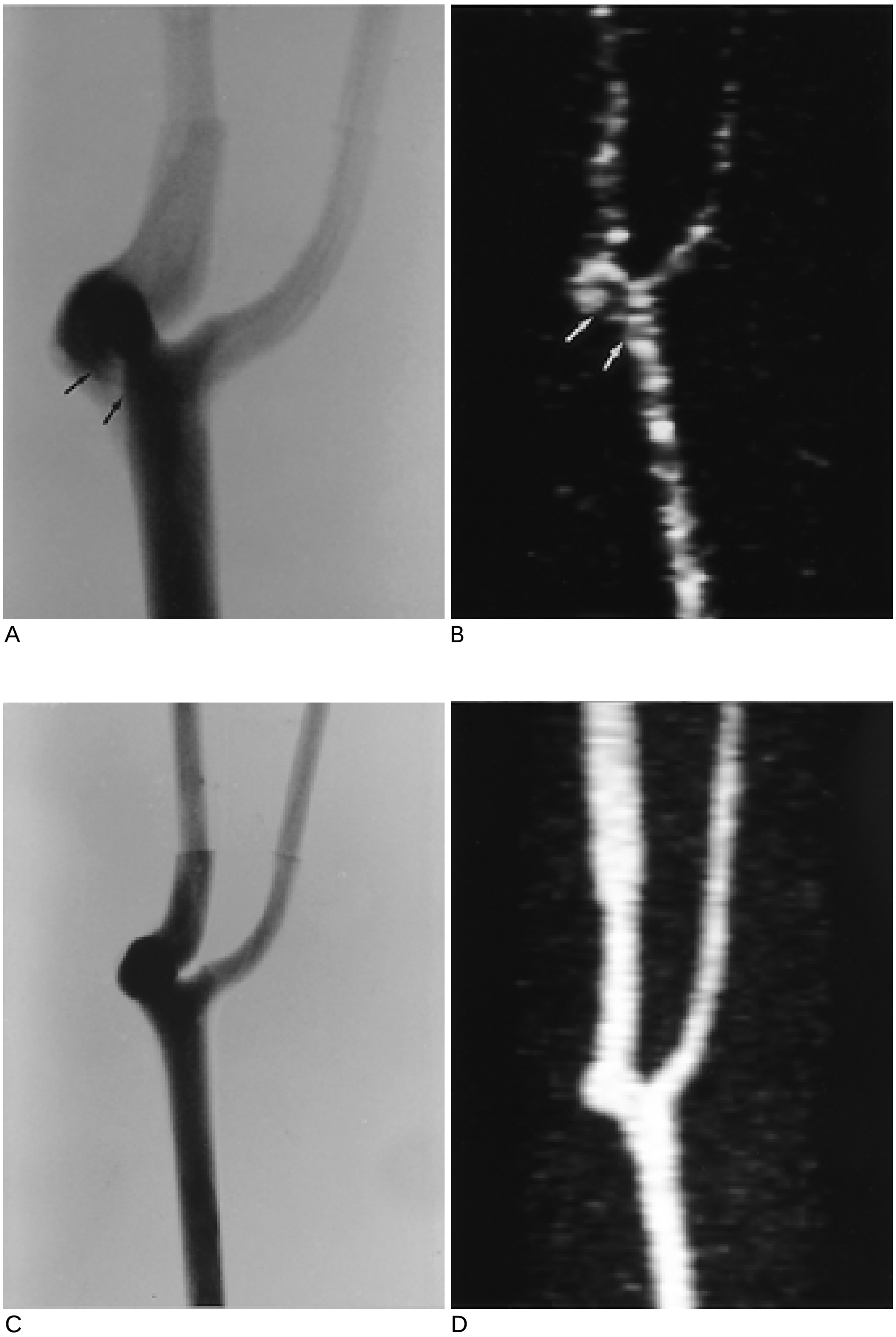


Fig. 7. DSA and CEMRA of tortuous phantom carotid bifurcation.
A. Early phase of sequential DSA image shows turbulent flow and incomplete filling of contrast at the carotid bulb leaving wedge shaped filling defect (black arrows).
B. Corresponding phase of CEMRA image with (A) shows inhomogeneous signal intensity at the carotid bulb. Signal pattern is similar to (A) (white arrows).
C. Mid-arterial phase of DSA image shows homogeneous filling of contrast without any filling defect in the carotid bulb.
D. Corresponding phase of CEMRA with(C) shows homogeneous signal pattern instead of inhomogeneous signal pattern in the early arterial phase(B).

나타나는 신호 불균일은 혈류 양태에 연관된 일종의 인공물이라고 할 수 있겠다. 하지만, 그 형태나 기전이 기존의 흐름시간강조 기법에서 발생하는 그것과는 다를 수 있다. 흐름시간강조(TOF) 기법에서 경동맥 분지부에서 나타날 수 있는 인공물의 양태는 주로 난류 및 위상변화에 의한 신호 결손이다(10). 촬영시간이 8-10분 정도로서 조영증강 자기공명혈관촬영의 약 30초보다 긴 시간이 걸리므로, 시간 변수는 인공물의 형태에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 추측된다. 반면 조영증강 자기공명혈관촬영에서는 주입된 조영제 bolus가 목표 혈관 내를 지날 때의 역동적 과정을 비교적 짧은 시간 해상력(time resolution)으로 촬영하는 방법으로서, 촬영 시간이 인공물의 발생 및 형태에 큰 영향을 미치리라 생각된다. 즉, 조영제의 분포가 혈류변화에 의해서 시간에 따라 달라지기 때문에 인공물의 양태도 일정하지 않고 시간에 따라서 변화하게 되며, 신호결손 뿐만 아니라 조영제 분포에 따라 신호증가 혹은 신호증가와 신호결손이 혼합된 양상과 같은 다양한 형태의 인공물이 발생할 수 있다. 또한 기존의 흐름시간강조법(TOF)과의 또 하나의 중요한 차이점중의 하나는 조영증강 자기공명혈관촬영법에서는 경동맥구의 신호 불균일과 같은 인공물이 고정된 것이 아니라 조영제 bolus가 목표혈관을 통과하는 도중 어떠한 시점에서 촬영되었느냐에 따라 변하기 때문에, 영상획득 타이밍을 조절함으로써 조정이 가능하다는데 있다.

연속적 고속 디지탈감산촬영을 통하여, 조영제가 경동맥 분지부를 통과할 때의 시간에 따른 조영제 분포의 변화를 관찰할 수 있었다. 경동맥의 해부학적 모양에 따라 정도의 차이는 있지만, 경동맥구에서 다양한 크기의 와류 및 역류가 관찰되었으며, 이에 따라 조영제의 유입이 지연되고 불완전한 혼합이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 조영제의 유출이 지연되어 상대적인 저류현상이 관찰되었다. 경동맥의 모양에 따라서, 때로는 경동맥구에 조영제 유입 속도가 서로 다른 두 개의 구역이 관찰되었는데, 이는 Motomiya 등이 보고한 경동맥 분지부의 이중 나선형 혈류양태와 거의 일치하였다(14).

경동맥 분지부에서의 난류로 인한 조영제 유입 및 유출의 지연은 혈액의 국소 교환율의 개념으로 설명될 수 있겠다. 즉 경동맥구에서는 해부학적 구조와 이로 인한 혈류의 변형으로 인하여 혈관 내에서 국소적으로 혈액의 교환율이 늦어질 수 있다. 혈관의 해부학적 변이에 의한 교환율의 차이가 조영증강 자기공명영상촬영에 미치는 영향에 대해서는 이미 뇌동맥류의 연구를 통하여 보고 된 바가 있다. 조영증강 자기공명혈관촬영상 초기 동맥기에서는 동맥류 내로의 조영제의 채움이 늦어 신호결손으로 보일 수 있다고 정 등이 보고하였다(17).

경동맥구의 신호 불균일도 같은 이론으로 설명될 수 있겠다. 즉 경동맥구의 난류 발생 부위에서는 혈액 및 조영제의 교환율이 상대적으로 늦으며, 이는 새로 충전되는 조영제의 불균일 혼합에 의한 농도 차이를 유발 함으로써 다양한 양상의 불균일 신호를 보일 것으로 예측된다. 이러한 국소적 조영제의 농도 차이는 시간에 따라 양상이 변하게 됨으로, 케이 공간 중심부 자료획득 시간에 따라 경동맥 분지부의 신호 패턴도 달라질 수 있겠다. 즉 조영제가 경동맥에 도착하는 초기에 케이공간 중심부 자료획득이 된 경우에는 경동맥 분지부에 국소적으로 신호 감소 혹은 신호 감소와 신호 증가가 혼합된 패턴을 보일 수 있으며, 조영제가 경동맥구부에서 균일하게 혼합되는 중기에 자료획득이 된 경우에는 균일한 조영증강을 보일 것으로 예상된다. 7초의 영상획득시간으로 연속 촬영한 동, 정맥기 영상의 비교를 통하여도 이를 확인할 수 있었다.

Phantom을 이용한 모의 실험은 신체의 차이에 따른 다양한 변수의 영향을 줄일 수 있고, 직접 여러 가지 중요한 조정 변수들을 바꿀 수 있으며, 반복 실험이 가능하기 때문에 혈류패턴에 따르는 자기공명혈관촬영시의 신호변화를 연구하는데 필수적이다. 경동맥 분지부의 국소적 신호불균일을 실험적으로 재현하고 그 원인이 난류에 의한 조영제의 불완전 혼합이라는 것을 객관적으로 밝히기 위하여 모의 실험을 하게 되었으며, 그 결과는 임상 연구의 결과와 매우 잘 일치하였다.

자기공명혈관촬영이 경동맥협착증 진단 및 수술적 기준을 정하는 표준적 검사로 자리잡기에는 더욱 많은 연구와 기술의 발전이 필요할 것으로 생각된다. 본 연구에서 강조하는 경동맥 분지부의 신호 불균일은 협착 정도의 정확한 진단에 있어서 악 영향을 미칠 것으로 생각되며, 이를 피하기 위하여는 보다 세밀히 케이 공간 영점조준을 할 수 있는 방법이 모색되어야 할 것이다(18, 19).

최근, 현재사용 되고 있는 Gadolinium 제재보다 T-1 이완시간 단축 효과가 큰 조영제가 개발되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(20). 또한 앞으로 현재보다 더욱 짧은 영상획득시간에 영상을 얻을 수 있는 기술이 개발되고, 더불어 T-1 효과가 큰 조영제를 소량으로 급속 주입하는 방법이 사용된다면, 케이 공간 영점조준시간의 정확성이 더욱 요구될 것으로 생각되며, 오조준 되었을 경우에는 혈류유동에 따른 조영제의 불균등 분포가 더욱 큰 영상의 왜곡을 가져 올 수도 있을 것이다. 따라서 향후 경동맥 자기공명혈관촬영술의 기술 개발이나 조영제 사용에 있어서, 이러한 혈류유동에 따른 조영제 불균등 분포 문제를 심각히 고려해 보아야 할 것이다.

결론적으로 조영증강 자기공명혈관촬영상 경동맥 분지부의 신호 불균일은 혈류 유동에 따르는 조영제의 불완전한 혼합 및 분포의 차이에 기인한다. 이러한 신호 불균일은 주로 조영제가 유입되는 초기 동맥기에 발생하며, 조영제가 균일하게 혼합되는 중간동맥기에는 나타날 가능성이 떨어진다. 따라서, 경동맥 분지부의 이러한 신호 불균일을 방지하기 위해서는, 케이공간 영점을 조영제가 균일하게 혼합되는 중간 동맥기에 조준 되도록 하는 것이 영상의 적정화를 위해 매우 중요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. *N Eng J Med* 1991; 325:445-453
2. Polak JF. Role of Duplex US as a screening test for carotid atherosclerotic disease: benefit without cost? *Radiology* 1995;197:581-582
3. Masaryk AM, Ross JS, DiCello MC, Paranandi L, Masaryk TJ. 3DFT MR Angiography of the Carotid Bifurcation : potential and

limitations as a screening examination. *Radiology* 1991;179:797-804
4. Heiserman JE, Drayer BP, Fram EK, et al. Carotid artery stenosis : clinical efficacy of two-dimensional Time-of-Flight MR angiography. *Radiology* 1992;182:761-768
5. De Marco JK, Nesbit GM, Wesbey GE, Richardson D. Prospective evaluation of extracranial carotid stenosis : MR angiography with maximum-intensity projection and multiplanar reformation compared with conventional angiography. *AJR* 1994;163:1205-1212
6. Vanninen RL, Manninen HI, Partanen PLK, Vainio PA, Soimakallio S. Carotid artery stenosis: clinical efficacy of MR-contrast flow quantification as an adjunct to MR angiography. *Radiology* 1995; 194:459-467
7. Polak JF, Bajakian RL, O'Leary DH, Anderson MR, Donaldson MC, Jolesz FA. Detection of internal carotid artery stenosis : comparison of MR angiography, color doppler sonography and arteriography. *Radiology* 1992;182:35-40
8. Patel MR, Kuntz KM, Klufas RA, et al. Preoperative assessment of the carotid bifurcation : can magnetic resonance angiography and duplex ultrasonography replace contrast arteriography? *Stroke* 1995;26:1753-1758
9. Urchuk SN, Plewes DB. Mechanism of flow-induced signal loss in MR angiography. *JMRI* 1992;2:453-462
10. Anderson CM, Saloner D, Tsurada JS, Shapeero LG, Lee RE. Artifacts in maximum-intensity -projection display of MR angiograms. *AJR* 1990;154:623-629
11. Prince MR, Narasimham DL, Stanley JC, et al. Gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology* 1994;191:155-164
12. Remonda L, Heid O, Schroth S. Carotid artery stenosis, occlusion, and pseudo-occlusion : first-pass, Gadolinium-enhanced, three-dimensional MR angiography-preliminary study. *Radiology* 1998; 209:95-102
13. Chung T-S, Lee DH, Hong KS, et al. What is optimal dose of Gd-DTPA in aortic blood during breath-hold 3D-TOF MRA? In Oudkerk M, Edelman RR. High-power gradient MR-imaging. Berlin : Blackwell Science, 1997:313-315
14. Motomiya M, Karino T. Flow patterns in the human carotid artery bifurcation. *Stroke* 1984;15:50-56
15. Kerber CW, Heilman CB. Flow dynamics in the human carotid artery: preliminary observations using a transparent elastic model. *AJNR* 1992;13:173-180
16. 정태섭, 임윤철, 김은호, 이동훈, 노준헌. Phantom상내경동맥기시부협착에따른혈류변화 : 자기공명혈관촬영술, 디지탈감산혈관촬영술, 전산유체역학과의비교. *대한방사선의학회지* 1996;34 :737-744
17. Chung T-S, Joo JY, Chien D, Laub G. Potential pitfalls of first pass contrast enhanced magnetic resonance angiography : delayed visualization of narrow neck aneurysm in phantom studies. *ISMRM proceedings* 1998;1288
18. 권우철, 정태섭, 주진양, Chien D, Laub G. 경동맥의조영증강자기공명혈관조영술: 경동맥과경정맥의식판별에대한시간조정변수의최적화. *대한방사선의학회지* 1998; 39:825-830
19. Lee Y-J, Chung T-S, Joo J-Y, Chien D, Laub G. Suboptimal contrast-enhanced carotid MR angiography from the left brachiocephalic venous stasis. *JMRI* 1999;10:503-509
20. Jo BJ, Chung T-S, Joo JY, et al. In vitro comparative flow phantom study about the difference of relaxivity between Gadomer-17 and Gd-DTPA using high resolution 3D-TOF MRA with slice interpolation technique. *ISMRM proceedings* 1998;1299

J Korean Radiol Soc 1999;41:869-877

What is the Cause of Signal Inhomogeneity at the Carotid Bifurcation During Contrast Enhanced Carotid MRA?: In Vivo and in Vitro Studies[1]

Ki-Woong Chung M.D., Tae-Sub Chung M.D., Jin-Yang Joo M.D.[2]

[1]Department of Diagnostic Radiology, Yonsei University College of Medicine,
Research Institute of Radiological Science, Yonsei University
[2]Department of Neurosurgery, Yonsei University College of Medicine

Purpose: To evaluate the hemodynamic causes of signal inhomogeneity at the carotid bulb that might be misinterpreted as pathologic signal defect in carotid contrast enhanced MRA(CEMRA).

Materials and Methods: Both carotid CEMRA and fast digital subtraction angiography(DSA) were conducted on 15 patients (28 carotid arteries) and arterial phase CEMRA images were compared with fast DSA images of the same patients. A 1.5T MR imager was used. The Turbo-FLASH sequence emplayed was TR/TE/FA = 3.2 ms/1.3 ms/35°. For experimental study, we utilized hand-made silicon phantoms of the tortuous carotid bifurcation; these might be expected to clearly demonstrate turbulent flow at the carotid bulb. In a closed circulatory system, both CEMRA and fast DSA involved the use of these phantoms.

Results: During CEMRA, inhomogeneous signals of varying degrees were found at the carotid bulb in 12/28 carotid arteries. When compared with sequential DSA images, incomplete mixing of contrast agent due to turbulent flow at the carotid bulb might be responsible for this inhomogeneity. This hypothesis was reinforced by successfully reproducing signal defects at the carotid bulb from the experimental CEMRA study using carotid phantoms that showed marked turbulent flow in the same area during DSA.

Conclusion: Incomplete mixing of contrast agent caused by turbulent flow at the carotid bulb might be responsible for the signal inhomogeneity seen on carotid CEMRA.

Index words : Carotid arteries, MR
Carotid arteries, angiography
Magnetic resonance (MR), contrast enhancement
Magnetic resonance (MR), vascular studies

Address reprint requests to : Tae-Sub Chung, M.D., Department of Diagnostic Radiology, Yonsei University,
College of Medicine, Yongdong Sevrance Hospial, #146-92, Dogok-Dong, Kangnam-Ku, Seoul 135-270, Korea.
Tel. 82-2-3497-3514 Fax. 82-2-3462-5472 E-mail : tschung@yumc.yonsei.ac.kr