

Advanced Neuroimaging : 3D Imaging

건국대학교 의과대학 영상의학과

문 원 진

최근 10년간 MDCT(multidetector CT)와 SENSE (sensitivity encoding) 기법의 발달과 3.0T 이상의 MRI의 임상적용으로 인하여 영상진단영역은 비약적인 발전을 이루게 되었다. 특히 뇌신경계영역에서는 고해상도의 CTA, MRA를 이용한 보다 정밀한 3차원 영상진단이 가능하게 되어 각종 뇌혈관질환의 screening study로 이용되고 있다. 한편, 고전적인 DSA(digital subtraction angiography)영역에서는 rotation기법을 도입한 rotational DSA를 개발하게 되어, 3차원영상을 자유롭게 얻을 수 있게 되어 특히 중재적 시술에 많은 도움이 되고 있다. 그 밖에 확산강조영상을 이용한 텐서 영상(diffusion tensor imaging)의 발달로 뇌신경로를 3차원적으로 나타낼 수 있게 되어 임상에 적용하고 있다.

이 강좌에서는 뇌신경계영상의 선진기법 중에서도 3차원 영상이 주된 CTA, MRA 그리고 확산텐서 영상에 대하여 알아보려고 한다.

I. CTA at MDCT(multidetector CT)

1991년에 volume imaging이 가능한 spiral CT가 처음 개발된 이후 더 나은 temporal resolution과 spatial resolution을 구현하기 위하여 더 빠른 MDCT(multidetector row CT)가 1998년 개발되어 vascular imaging에서 탁월한 성능을 보여주게 되었다. 종래의 SDCT(single detector CT)에 비하여 MDCT는 다음과 같은 장점이 있다.

1) Temporal resolution의 향상: scan의 속도가 빠를수록 운동성 artifact가 줄어들게 된다. 특히 cardiac imaging에 큰 역할을 하며 breath holding time도 줄어들게 된다.

2) Z axis에서 spatial resolution의 향상: Z축에 따른 thin slice 영상이 가능하므로 partial artifact가 줄고 더 선명한 영상을 얻을 수 있다.

3) Contrast media의 용량감소: 조영제 주입 후 필요한 짧은 시간에 촬영이 가능하므로 조영증강의 정확성과 효율성을 높일 수 있다.

4) Longer anatomic coverage: gantry가 1회 회전 때 4~8영상을 얻을 수 있으며 gantry 회전속도가 0.5초 정도로 빨라져 상대적으로 같은 시간대에 더 넓은 부위를 검사할 수 있어 MDCT의 가장 큰 장점이 될 수 있다.

5) Efficient X-ray tube use: 전체 촬영시간이 짧아지면 상대적으로 X-ray tube의 heating이 줄어들고 scan 도중에 X-tube를 식히기 위한 delay time이 줄어들어 multiphase examination 또는 short time examination에 아주 중요하며 tube의 수명이 더 길어질 수 있다.

MDCT의 경우, 영상의 화질 및 thickness는 주로 detector configuration, collimation과 reconstruction algorithm에 따라 결정된다. 특히 raw data에 해당되는 cone beam data를 처리하는 단계에서 noise filter의 일종인 Kernel값과 FOV range가 매우 중요한 영상변수가 될 수 있겠다. 통상적인 FOV 200 mm과 Kernel값 20인 경우에는 2 mm 이하의 small aneurysm이나 vascular deformity는 제대로 표현되기 힘들므로 small 또는 focal lesion인 경우는 FOV를 80~200 mm 내에서 조절하며 Kernel값을 20~60 내에서 변경하며 정밀한 영상이 원하는 정도 나오는지 확인하여야 하겠다.

또한, CTA의 화질을 향상시키기 위해서는 적은 양의 조영제를 고농도(400 mg I/ml)로 최적의 조영제 주입속도(4 mL/s)를 유지하면서 saline flushing을 하고 적절한 timing에 영상획득을 하는 것이 반드시 필수적이다. 비침

습적이며 혈관의 석회화를 나타낼 수 있고 혈류역학에 관계없이 혈관을 보여준다는 점에서 DSA를 대체할 뿐 아니라 때로는 MRA보다 선호된다. 특히 acute stroke환자에서는 CT검사와 연계하여 신속하게 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다.

II. MRA at 1.5T and 3.0T

최근에는 3T의 임상응용이 시작됨에 따라 MRA의 해상도가 더욱 증가하게 되었다. 특히 1.5T에 비하여 3T는 이론적으로 SNR이 2배 이상 증가된다고 알려져 본격적으로 1024화소의 고화질 MRA가 가능하게 되었다.

모든 MRA(bright blood MRA)의 원리는 기본적으로 정지된 조직에서 나오는 신호는 억제하고 움직이는 혈류 신호는 강조하여 양자의 차이를 극대화시키는 영상을 만들고 이를 혈관이 잘 보이게 3차원적으로 재구성하는 것이다. 혈류신호가 주변정지조직보다 밝게 보이는 bright blood MRA기법으로는 time of flight(TOF), phase contrast(PC), contrast enhanced(CE) MRA기법이 주로 쓰인다.

1. Time of flight(TOF) MRA

두개강내 뇌동맥을 영상화 하는데 가장 널리 이용되는 기법으로 보통 3D TOF(gradient echo pulse sequence)에서 TR 25~30 msec, TE 4~6 msec, flip angle 25~30도로 하여 짧은 TR값을 가지는 T1WI 영상으로 촬영하면 짧은 TR에 의해 정지조직의 신호는 포화(saturation)되어 감소하는 반면 혈관신호는 영상단면으로 계속 유입되는 혈류에 의해 쉽게 포화되지 않고 상대적으로 강한 신호를 내게 된다(flow related enhancement). 조영제를 사용하지 않고도 고해상도(512 matrix, 0.5 mm isotropic voxel) 혈관영상을 5~6분 내에 얻는다. 기본적으로 T1WI이므로 배경조직에 T1이 짧은 지방이나 혈종(hematoma)이 있으면 MIP영상에서 같이 투사되어 보인다. 일반적으로 혈관이 좁아진 경우 이를 과장되게 보여주는 경향이 있으며 혈관 주위에 air-filled space(sinus or air cell)이 있으면 susceptibility artifact로 인한 pseudostenosis를 만들기도 한다(petrous or cavernous portion of distal ICA). 이런 경우는 axial source image나 T2WI에서 해부학적 구조를 확인하면 구분된다.

2. Phase Contrast(PC) MRA

위상대조 혈관조영술의 기본원리는 한쌍의 반대극성을 가진 경사자계(bipolar gradient)와 평행한 방향으로 주행하는 유체의 스핀은 위상의 변화를 일으키고 그 크기는 유체의 속도와 경사자계의 크기, 시간, 간격등과 비례한다는 것이다.

혈관영상의 형성은 보통 먼저 flow-compensated image를 얻고 나서 x, y, z축 방향으로 velocity-encoding gradient가 있는 펄스파형으로 영상을 얻는다. 이렇게 총 4쌍의 영상을 얻은 후 각 축방향 영상과 flow-compensate image를 감산(subtraction)하면 배경조직은 완전히 제거되고 순수한 혈류의 위상변화(net phase shift)만 얻을 수 있다. 양의 위상변화를 보이는 혈관은 밝게, 음의 위상변화를 보이는 혈관은 검게 표시하면 혈류의 방향을 알 수 있고(flow direction imaging), 음양과 관계없이 위상변화의 크기는 혈류의 속도와 비례하므로 혈류속도나 혈류량을 계산할 수도 있다(flow velocity quantification). 또한 심전도와 연결하여(EKG triggering) 심장박동에 따른 영상을 얻으면 혈류나 뇌척수액의 맥동성 속도 또는 위상변화를 cine영상으로 나타낼 수도 있다.

임상적으로 2D PC MRA는 비교적 두터운 절편을 선택하고 나서 절편안에 포함된 혈관의 윤곽을 빠른 시간 안에 보고자할 때 주로 이용되고, 3D PC MRA는 시간이 오래 걸려 잘 사용되지 않았으나, 최근에는 multi-channel head coil과 parallel imaging(SENSE)기법을 이용하여 영상획득시간을 현저히 줄일 수 있게 되었다(약 5~6분). 주로 혈류속도가 느린 두개강내 정맥을 영상화하는데 TOF기법보다 우수한 점이 있다.

3. Contrast enhanced(CE) MRA

이 기법 역시 gradient pulse sequence를 사용하거나 TR/TE를 매우 짧게 하여 보통 TR은 4~6 msec, TE는 1~2 msec를 사용한다. 이런 상태에서 촬영하면 모든 조직이 포화되어 조영제 주입전 촬영한 영상의 기본신호강도는 매우 낮아지게 된다. 그러나 조영제를 초당 2 cc, 총 20 cc를 정맥내 주입하면 혈관내 혈액의 T1 relaxation time이 매우 짧아져 혈액만 고신호 강도로 보이게 된다. 따라서 혈관과 주위조직의 대조도가 매우 높아져 좋은 영상을 얻게 된다. 그러나 정상인에서 두개강내 동맥에서 정맥으로 통과하는 시간이 약 4초 정도로 매우 짧으므로 영상획득시간이 길면 동맥과 정맥이 혼합된 영상을 얻게 되기 쉽다. 순수한 동맥 영상만을 얻기 위해서는 조영제

가 경동맥에 도달하는 시간에 맞추어 영상데이터를 획득하기 시작하며 순수 동맥기에 얻은 데이터가 k-space의 중심부에 위치하는 기법을 이용하여 영상의 대조도가 주로 arterial phase에 의해서 결정되도록 한다. 이를 위해서 MR fluoroscopic triggering 등의 방법을 이용한다. CE-MRA는 짧은 시간에 고해상도의 혈관영상을 만들 수 있고 영상범위가 넓으며 TOF 기법에 비하여 flow-related artifact가 적어서 supraaortic vessels부터 intracranial vessel까지를 한번에 촬영하는데 적합한 기법이다. 따라서 이 부위의 atherosclerotic or stenocclusive disease를 평가하는데 유용하다. 또한 적절한 parameter를 이용하여 dynamic contrast enhanced MRA를 얻어 종래의 혈관조영술을 대체할 수 있는 효과를 얻을 수도 있다.

III. CTA와 MRA를 위한 Image processing

영상처리는 CTA와 MRA를 conventional angiography와 비슷하게 만들고 해부학적 구조와 관련하여 혈관이상을 알기 쉽게 한다. 기법은 Multiplanar reconstruction (MPR), Maximum intensity projection(MIP), Shaded surface display(SSD), Volume rendering technique (VRT), Virtual endoscopy(Fly-through) 등이 있다.

1. Multiplanar reconstructions(MRP)

MRP는 원하는 어떠한 plane으로도 raw data를 볼 수 있어 혈관주행을 따라 oblique course를 영상화할 수도 있다. 경동맥과 같이 상대적으로 직선주행을 하는 혈관에는 효과적이며 Circle of willis나 혈관기형과 같은 복잡한 해부학적 구조에는 부적합하다.

2. Maximal intensity projection(MIP)

영상 data에 가상적인 광선을 투사하여 투영되는 maximum attenuation value를 회색조 영상으로 나타내는 방법이다. 이러한 투사영상은 어느 plane으로도 얻을 수 있다. MIP는 bone이나 calcium같은 구조와 조영제로 차 있는 혈관을 구분할 수 있어 혈관 내경, 석회화 및 혈전의 구별이 쉽다. MIP는 또한 SSD에 비하여 협착의 정도를 정확히 계산할 수 있다. 단점은 MIP에서는 중첩되어 있는 혈관을 구분하기가 어렵다.

3. Shaded surface display(SSD)

SSD는 사전에 정해진 threshold 이상의 pixel들을 연결하여 혈관 surface를 계산하여 영상화하는 방법이다. SSD는 혈관이 중첩되어 있거나 tortuosity가 심한 부위에서 복잡한 해부학적 구조를 잘 나타내어 준다. SSD의 단점은 조영제로 채워진 혈관내부와 혈관벽석회화를 구분할 수 없고, 협착이 underestimation되고 혈전을 잘 볼 수 없다는 점 등이다.

4. Volume rendering(VR)

VR는 모든 정보를 이용하여 3D영상을 구현하는 3D rendering 알고리즘의 하나로 고성능의 컴퓨터 소프트웨어 작업을 필요로 하나 MIP와 SSD의 문제점을 극복하므로써 정확도가 높아져서 최근에는 많이 이용되고 있다.

5. Virtual endoscopy(Fly-through)

VE는 원 영상에서 원하는 구조만을 추출해낸 후 혈관, 기도 및 소화기관 등의 내시경 영상과 비슷하게 만들어내는 것이다.

IV. 확산텐서영상(Diffusion Tensor Imaging)

확산 텐서 영상은 확산 경사자장을 최소한 여섯방향 이상(일반적인 확산영상은 3방향의 확산경사자장만 있으면 된다) 서로 평행하지 않게 걸어준 후 텐서 행렬을 계산해내어 스핀의 확산 정도 뿐 아니라 확산의 방향성까지 표현할 수 있도록 한 기법이다. 확산텐서 영상으로는 ADC(apparent diffusion coefficient), FA(fractional anisotropy) map을 얻을 수 있으며, FA값을 이용하여 원하는 white matter tract의 모양과 integrity를 3차원적으로 구현하는 것이 fiber tractography이다. Fiber tractography는 현재 종양에 의한 주요 신경로의 침범 유무를 판단하고 수술계획을 세우거나 생검 방향을 설정하는데 유용하게 이용되고 그 밖에도 CNS developmental anomaly, infarction 등에 임상적용 되고 있으며, 생체 내 뇌백질 신경로를 그려낼 수 있는 유일한 방법이라는 점에서 그 활용범위가 무궁무진하다.

참 고 문 헌

1. 정태섭: Current role of multi-detector CTA and MRA for neurovascular diseases, 대한방사선의학 회 범주별 연수강좌, 2003
2. 최충곤. Basic concept of MRA, MR in medicine update, 서울아산병원, 2004
3. 문원진: Clinical application of DTI in adults, 대한자기공명과학회, 2004
4. Schuhknecht B.: Latest technique in head and neck CT angiography, 46, s208-s213, Neuroradiology, 2004