

NMR CT의 원리

조 장 희 · 김 흥 석

=Abstract=

The Principle of the NMR Image

Zang-Hee Cho, Hong-Suk Kim

This paper presents the principles of image formation in NMR(Nuclear Magnetic Resonance) tomography. NMR tomographic imaging is a newly emerging, noninvasive, three-dimensional imaging technique.

This new technique is an interdisciplinary science which encompasses the latest technologies in electrical, electronics, computers, physics, chemistry, mathematics, and medical sciences.

1. 서 론

인체 내부를 투시하려고 하는 의학적 필요성은 인체에서의 X-선 흡수를 조사함으로써 수십년 동안 충족되어 왔다.

그러나 이 방사선 사진술(radiography)의 가장 큰 단점은 중첩된 구조물을 구별해 낼 수 없다는데 있다.

이 단점은 최근에 X-선 단층촬영술(X-ray computerized tomography) 즉 CT가 개발됨에 따라 해결되었다. CT는 여러 방향에서 수집된 데이터들을 이용하여 인체의 임의의 부분의 단면을 수학적으로 재구성한다. 그러나 CT가 유용한 진단 장치임이 인정되긴 하였지만 CT가 얻어낸 정보는 근본적으로 해부학적 영상이다. 즉 그 영상으로는 내부기관의 기능적 또는 생리적인 장애는 알아낼 수 없다. 더구나 일부 병리학적 장애는 주위 조직과 X-선 흡수 성질이 같아서 기관의 크기나 모양을 변화시킬 정도로 심하지 않고는 CT 영상에 나타나지 않는다. 그외에 X-선은 생리학적 장애를 일으킬 위험성을 내포하고 있다.

방사선을 사용하지 않고 인체 내부의 단면의 영상을 얻는 새로운 방법이 의학적으로 응용될 단계에 있다.

이 새로운 핵자기공명(NMR: nuclear magnetic resonance) 영상법은 CT와 비교될 수 있는 해부학적 영상 이외에도 정상 조직과 비정상 조직을 더욱 민감하게 구별할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 여러해 동안 생화학자들은 동물과 인체의 신진대사 반응을 모니터링하기 위해 NMR 방법을 사용해 왔는데 최근에 NMR 정보를 영상의 형태로 나타낼 수 있게 되어 의사들에게 강력한 새로운 진단도구를 제공할 수 있게 되었다.

여기서는 NMR CT의 원리 및 그 응용에 대해 살펴보기로 한다.

2. NMR의 원리

NMR 분광학은 30여년 전에 Bloch와 Purcell에 의해 실험적으로 입증되었고 이로 인해 두 사람은 1952년도에 Nobel상을 받았다. 여러 종류의 핵들은 스핀(Spin)에 의한 각 운동량을 가지며 이에 의해 쌍극자기 능률(dipole magnetic moment)를 가진다. 그림 1에 자기 능률들의 상태가 표시돼 있다. 외부에서 자장을 가해 주기 전에는 자기 능률들은 부질서하게 여러 방향을 가리킨다. 따라서 물질의 자화도(magnetization)는 0이 된다. 그러나 외부 자장이 가해지면 자기

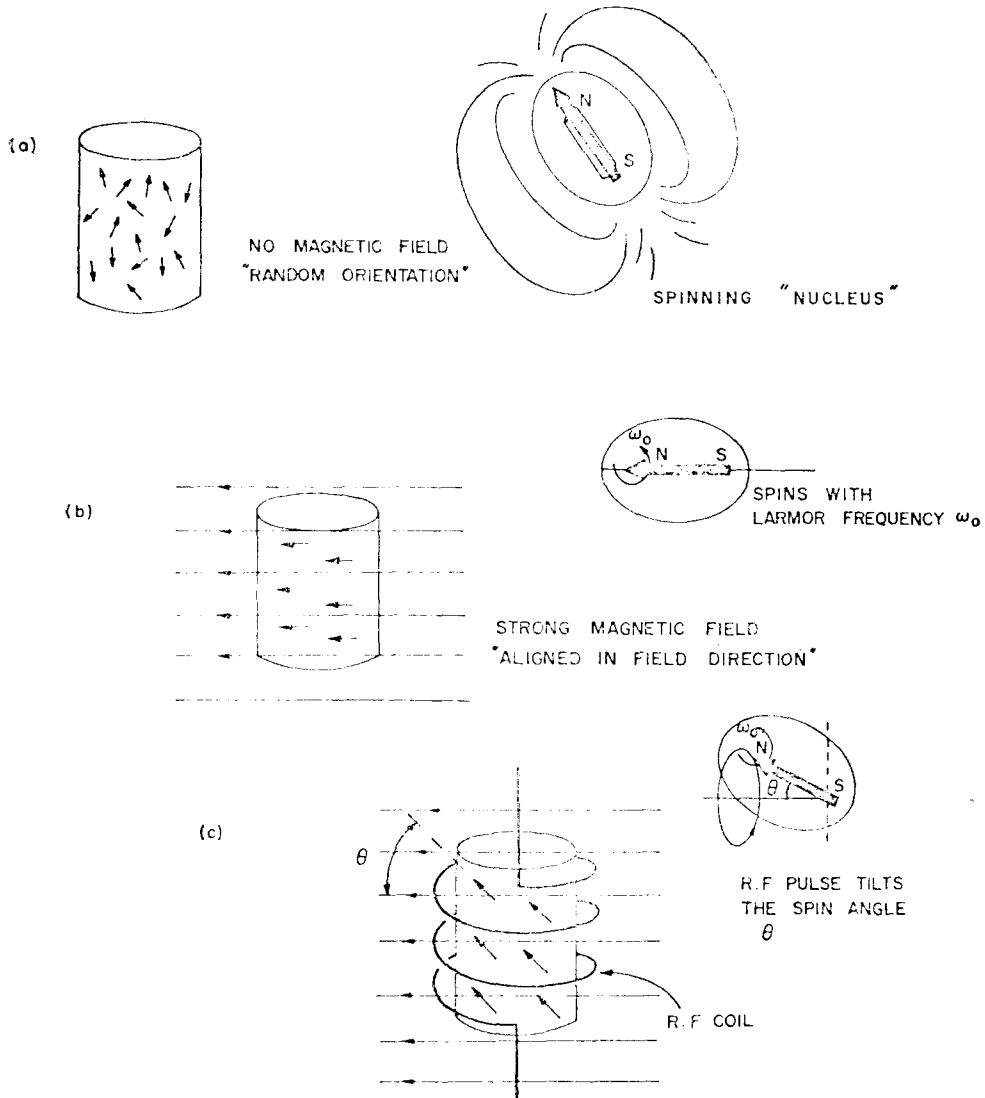


그림 1. 자화도의 상태 : (a) 자장이 없을 때 (b) 자장이 가해졌을 때 (c) Rf Pulse가 가해졌을 때

Fig. 1. Magnetized state

(a) State without magnetic field (b) State with magnetic field (c) When Rf Pulse applied

능물들이 자장의 방향으로 향해 자화도가 생긴다.

자장의 방향과 수직으로 어떤 특정한 주파수의 RF 펄스를 가하면 자화도는 자장의 방향에서 멀어지게 된다. 자장과 자화도 사이의 각은 RF 펄스의 크기와 길이의 곱에 비례한다. 자장의 방향에서 멀어진 자화도는 자장의 방향을 축으로 하여 세차운동(precession)을 하면서 다시 자장의 방향으로 되돌아 가는데 이때 유도기전력이 RF 코일에 생기는데 이것을 자유유도감쇠(free induction decay) 즉 FID라고 부르며 NMR

에서의 기본적인 데이터가 된다.

RF 펄스의 주파수는 자장의 크기 및 핵종에 따라 결정된다. 수소 원자핵의 경우 자장이 10K Gauss일 때 42.57MHz이고 ^{31}P 의 경우는 17.24MHz, ^{23}Na 의 경우는 11.26MHz이다. 따라서 적절한 주파수를 선택함으로써 특정한 핵만을 공진시킬 수 있다. 그러나 다른 핵들은 수소 원자핵보다 감도가 낮고 생체내의 농도가 낮기 때문에 이제까지의 의학에서의 NMR 영상은 주로 수소 원자핵에 대한 것이다. 분자당 수소 원

자핵 2개를 포함하는 물이 인체의 75%를 차지하고 있으며 여러 질병에 따라 물의 분포가 달라지므로 수소 원자핵의 NMR 영상은 매우 큰 의미를 가진다.

RF 펄스가 끝나면 자화도는 자장의 방향으로 돌아가는데 그 특성은 T_1 과 T_2 의 두 완화시간에 의해 결정된다. 그림 2에 자화도의 완화현상이 표시되어 있다. T_2 는 스핀-스핀 완화시간 혹은 횡완화시간이라고 불리며 각각의 자기 능률들의 위상이 흩어지지 않은채 남아 있는 기간의 시간 정수이다. 반면 T_1 은 스핀-격자 완화 시간 혹은 종완화시간이라고 불리며 자화도가 원래의 열평형 상태로 되돌아가는 시간 정수인데 이 과정에서 스핀 시스템으로부터 주위 격자로의 에너지 전환이 일어난다. 따라서 에너지 전환이 없는 T_2 보다 T_1 은 일반적으로 길다. 그림 2(c)에서 보듯이 T_1 이나 T_2 는 조직의 상태에 따라 차이가 심하므로 인체진단에 있어서 매우 중요하며 수소 원자핵 밀도와 함께 NMR 영상법에 있어서 가장 중요한 파라미터가 된다.

3. NMR CT의 원리

위에서 설명한 방법들은 NMR CT와 NMR 분광학에 공동으로 적용된다. 그러나 NMR 분광학에서는 물체내부의 신호를 동시에 받아서 그 스펙트럼을 조사하는 반면 NMR 영상법에서는 물체의 각부분의 신호를 구별해야 하기 때문에 자장 경도(gradient field)를 가하게 된다. 이렇게 하여 얻어진 영상을 최초로 발표한 사람이 New York 주립대학의 P. Lauterbur이다.

NMR 영상 시스템에서는 시스템 구성에 따라 신호가 물체의 한 점(point)에서 나올 수도 있고 한 선(line) 혹은 한 평면(plane)에서 나올 수도 있으며 또는 3차원 체적(volume) 전체에서 나올 수도 있다.

점 혹은 선 주사법에서는 점이나 선을 전자 회로를 이용하여 영상을 얻는다. 반면 2차원 혹은 3차원 영상법에서는 자장 경도를 가하여 그 방향의 정보를 얻은 후 자장 경도의 방향을 바꾸어서 다른 방향의 정보를 얻는데 여기에는 여러가지 방법들이 있다.

Lauterbur에 의해 처음 발표된 영상은 X-선 CT에서 사용된 영상 재구성법을 사용하였다. 물로 된 샘플이 균일 자장내에 있다면 물 분자의 수소 원자핵의 NMR 주파수 스펙트럼은 단일선일 것이다. 여기에 선형 자장 경도(linear gradient field)가 가해지면 물체의 어느 부분의 핵들은 다른 부분의 핵들보다 약한 자장내에 있게 된다. 따라서 물체에서 나오는 신호의 주파수가 선형으로 분포하게 된다. 이 때 Fourier 변환을 하여 시간에 대한 신호를 주파수에 대한 신호로 바

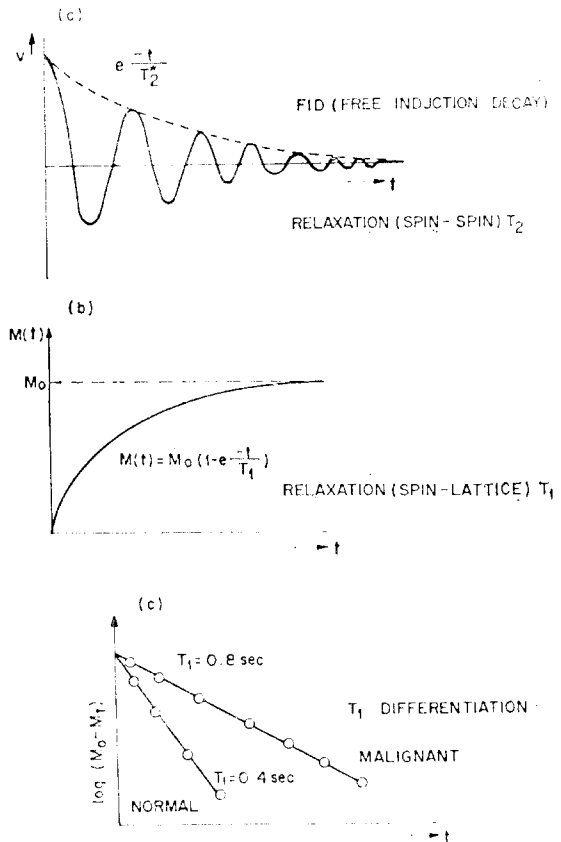


그림 2. 두가지 형태의 완화현상
 (a) 스핀-스핀 완화현상
 (b) 스핀-격자 완화현상
 (c) 정상세포와 비정상세포의 완화시간
Fig. 2. Two differents relaxation.
 (a) Spin-Spin (b) Spin-Lattice
 (c) Normal and Abnormal cells

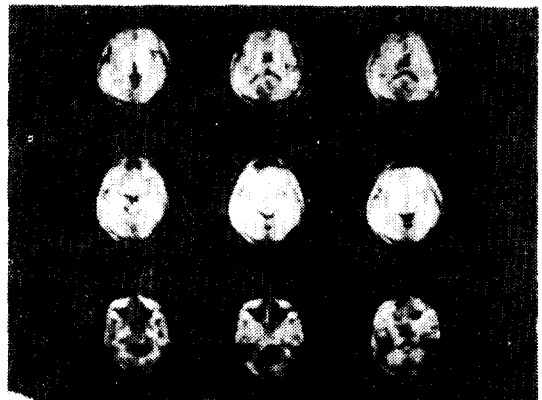


그림 3. 3차원 영상법에 의한 NMR 영상
Fig. 3. Image of obtained by the image reconstruction.

준다.

이렇게 하여 얻어진 신호는 물체의 1차원 투영데이터(projection data)가 된다. 자장 경도의 방향을 전자 회로를 이용하여 회전시킴으로써 다른 방향에서의 투영 데이터가 얻어진다. 이렇게 하여 얻어진 데이터를 사용하여 물체의 영상을 재구성한다. 2차원 영상에서는 자장 경도의 방향이 한 평면내에서만 회전하며 3차원 영상에서는 3차원 모든 방향으로 회전한다.

핵자기 공명 현상은 근본적으로 3차원 현상이다. NMR 신호는 RF 코일내부의 물체의 3차원 체적 전체에서 나오기 때문에 점, 선 혹은 한 평면에서만 나오는 신호를 얻기 위해서는 여러가지 방법이 필요하다. 그 중의 한 방법인 선택조사(selective irradiation)에서는 RF 펄스의 모양을 적절히 조절하여 좁은 대역의 주파수만을 갖게 한다. 그러면 그 주파수 성분에 해당하는 한 평면의 핵들만 공명을 일으켜서 그 부분에서만 신호가 나온다. 평면의 위치나 두께는 RF 펄스의 길이나 주파수에 의해 조절된다.

전체적 영상법(whole volume method)은 신호가 전체적에서 나오기 때문에 신호가 커서 영상의 질이 매우 좋으나 또한 여러가지 단점도 있다. 즉 처리해야될 데이터가 많기 때문에 대량의 데이터 처리 및 저장 능력을 가진 컴퓨터가 요구된다. 또한 3차원 물체를 공간적으로 분해하기 위해서는 여러 방향으로 자장 경도를 회전시켜야 하므로 데이터 수집 시간이 길어진다. 그러나 3차원 영상은 여러 평면 영상으로 분해할수 있으므로 평면당 데이터 수집시간은 2차원 영상법보다 길지 않다. 또 3차원 영상의 공간 분해능은 등방성을 띤다. 즉 각 방향마다 균일하므로 어느 위치, 어느 방향에서든지 임의의 두께의 평면 영상을 얻을 수 있다. 그림 3에 최근 한국과학기술원의 KAIS NMR TOMOGRAPH를 이용하여 인체 머리를 3차원 영상법을 사용하여 얻은 사진이 나와 있다.

4. 결 론

NMR CT의 의학계의 응용은 아직 초기 단계이다. 조직적인 인체 데이터를 축적하여 인체 각 부분의 병리학적인 증양의 측정에 대한 효과적인 방법이 정립되어야 한다. Massachusetts 종합병원에서의 초기 결과에 의하면 NMR은 죽은 조직, 또는 여러 종류의 장애에 대해 매우 민감한 것으로 나타났다. 또한 연조직(soft tissue)에 대해서는 X선 보다 더욱 민감하며 종양에 대해서도 더욱 민감한 것으로 나타났다.

앞에서도 언급한대로 NMR은 X선과는 달리 인체에 아무런 장애를 주지 않는다. 또한 NMR의 큰 잠재력 중의 하나로는 수소 원자핵 이외에도 다른 여러 가지 핵을 검출할 수 있다는 점이다. 원자핵들의 공간적 분포 이외에도 T_1 , T_2 의 분포 측정, 혈액의 흐름 및 속도 측정등 NMR의 가능성은 매우 크다고 여겨진다. 앞으로 몇년 후에는 틀림없이 NMR의 영상의 질에서 큰 향상이 있을 것으로 기대되며 NMR의 의학적인 응용의 다양화가 이루어질 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) I. Pykett, "NMR imaging in medicine". *Science Vol. 216, 78, 1982*
- 2) T. Farrar and Becker, "Pulse and Fourier Transform in NMR Academic press, New York, 1971.
- 3) Z.H. Cho, H.S. Kim, H.B. Song and D. Cumming, "Fourier transform nuclear magnetic resonance tomographic imaging." *IEEE Proc. Vol. 70, 1137, 1982(Invited paper).*