

Magnetism

가톨릭의대 안국진

자기(magnetism)란 자석이 갖는 특유한 물리적인 성질로서 철조각이 막대자석에 달라붙는 현상을 들 수 있는데, 이는 자기에 의한 대표적인 물리현상이다. 최근 자기공명영상(magnetic resonance imaging)에서 이용되는 자기장은 1.0~3Tesla (1T = 10000 G)의 강한 자장을 이용한다. 주로 자기공명영상에 이용되는 양성자(hydrogen nucleus)는 이러한 강한 자기장 내에서 두 가지 상태의 에너지 상태를 가지면서 독특한 자기공명현상을 나타내게 되고 이를 이용하여 영상을 얻게 된다.

강한 외부 주자기장 내에서 특정 원자들은 핵 및 전자 주변에 고유 국소자기장을 형성함으로써 독특한 영상신호를 얻을 수 있다. 따라서 강한 외부자기장과 핵을 구성하는 양성자 및 중성자, 그리고 전자와의 관계를 파악함으로써 자기공명영상의 기본원리를 이해할 수 있게 되고 인체 내 출혈의 자기공명영상 소견 및 상자성 물질이 조영제로 쓰일 수 있는 원리 등을 이해하는데 도움이 될 수 있다.

1. Nuclear Angular Momentum and Magnetic Dipole Moment (MDM)

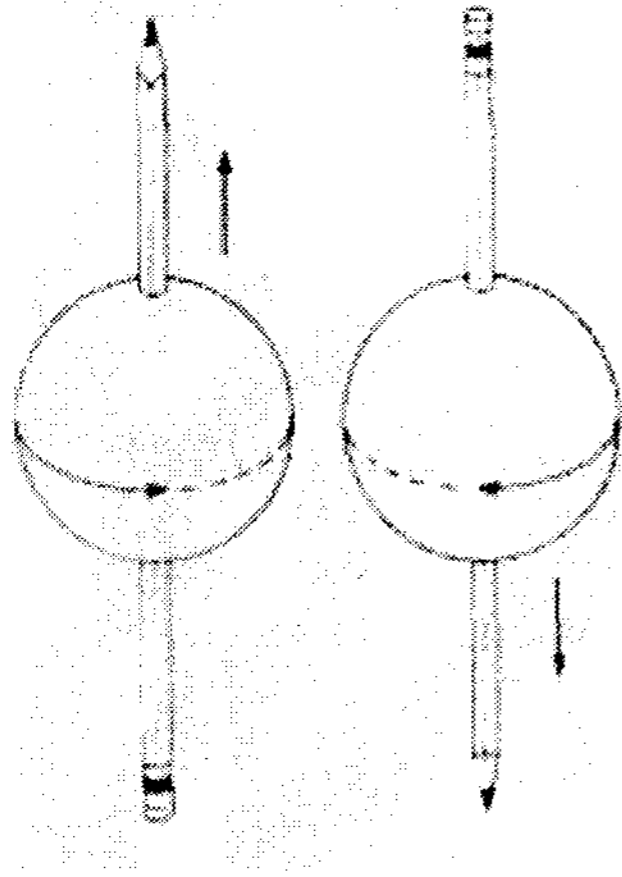


Figure 1. 핵자(nucleon)는 핵의 중심부 주변을 돌며 궤도 각운동량을 갖게 되지만 양성자는 양성자끼리 중성자는 중성자끼리 서로 스핀 쌍을 형성 (spin pairing)하여 각각의 스핀 각운동량을 상쇄시킨다.

원자는 핵(nucleus)과 전자(electron)로 구성되어있다. 핵은 양성자(proton), 중성자(neutron), 중간자(neutrino)와 미세 소립자 등으로 구성되어있고 양성자는 전자가 갖는 음전하만큼 양전하를 갖고 있는데 반해 중성자는 양성자와 같은 정도의 중량만을 가질 뿐 전하를 갖지는 않는다.

양성자와 중성자가 합쳐진 핵자(nucleon)는 핵의 중심부 주변을 돌며 궤도 각운동량(angular momentum: 방향과 크기를 갖는 특정 물체의 회전운동을 말한다. 회전속도 x 관성으로 표현할 수 있다)을 갖게 되는데 양성자는 양성자끼리 중성자는 중성자끼리 서로 스핀 쌍을 형성 (spin-up, spin-down)하여 각각의 스핀 각운동량을 상쇄시킨다(Figure 1).

그러나 쌍을 형성하지 않은 양성자(unpaired proton)이나 중성자(unpaired neutron)가 있을 때에는 각운동량을 갖게 되는데 이렇게 핵 각운동량을 갖는 핵은 자기공명현상을 일으킬 수 있어 자기공명영상에 이용될 수 있다. 핵 각운동량 유무는 스핀번호(spin number)를 보면 알 수 있다. 스핀번호가 0인 핵자는 정지 상태로 회전이 없고 0이 아니면 스스로 회전하여 각운동량을 갖는다. 스핀번호는 양성자수 혹은 원자번호와 질량수에 의해 결정된다(Table 1).

이렇게 각운동량을 갖게 된 핵자는 양성자의 수만큼 전하를 띄고 있으므로 패러데이 오른손 법칙(오른손 주먹을 쥐면 엄지손가락이 가리키는 방향이 양전하의 방향이고 그 주변 즉, 나머지 손가락이 가리키는 방향이 자장의 방향이 된다(Figure 2). 전자의 경우에는 음전하의 흐름이므로 왼손법칙이 된다)에 의하여 자기장을 형성하게 되어 결국 아주 작은 막대자석과 같이 행동하게

Table 1.

1. If the mass number A (protons + neutrons) is odd, the nuclear spin, I, is a multiple of 1/2 (1/2, 3/2, 5/2, 7/2)
2. If the mass number A and the atomic number Z (protons) are both even, I is 0
3. If the mass number A is even but the atomic number Z is odd, I is a whole number (1, 2, 3, 4, or 5)

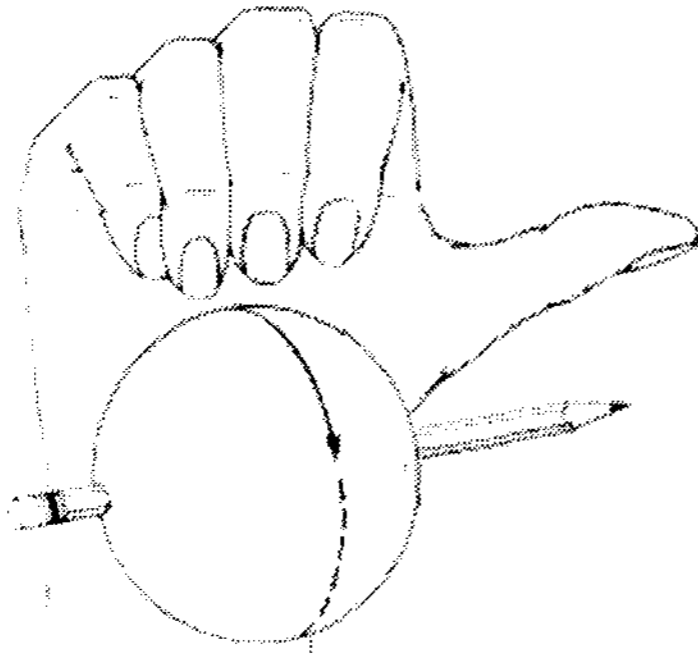


Figure 2. 패러데이 오른손 법칙에 의하면 오른손 주먹을 쥐었을 경우 엄지손가락이 가리키는 방향이 양전하의 방향이고, 그 주변, 즉 나머지 손가락이 가리키는 방향이 자장의 방향이 된다.

되므로 자기쌍극자 (magnetic dipole moment)를 형성하게 된다. 자기쌍극자를 다른 말로 설명하면 외부자장 안에서 외부자장의 방향을 따라 정렬하게 되는 성질이라고 말할 수 있다.

이들 각운동량을 갖는 핵자들은 외부자기장 내에서 정렬(alignment)하게 되는데 막대자석과 같이 커다란 자기물체는 정확히 외부자기장과 일치하는 정렬을 보이지만 전자, 핵자 등의 아주 작은 단위는 양자물리에 따라 제한된, 뒤틀린 정렬을 보인다. 그러나 이렇게 뒤틀렸지만 강력한 외부자기장은 계속해서 정확한 정렬을 만들려고 하므로 토크가 걸리게 되고 힘 빠진 팽이가 도는 것처럼 약간 기울인 상태로 회전운동을 하게 된다. 이러한 운동이 세차운동(precession)이다. 따라서 세차운동은 근본적으로 각운동량을 갖는 핵자의 스핀운동에서 기인한 것이라 볼 수 있다.

스핀번호 I 인 핵자는 $2I+1$ 개의 에너지 상태를 가지므로 스핀번호(I)가 $1/2$ 인 양성자는 스핀축이 외부자기장과 같은 방향인 $1/2$ 상태 (parallel, upper state), 반대방향인 $-1/2$ 상태(antiparallel, lower state)로 배열하여 $1/2$, parallel state의 스핀이 약간 많은 상태로 배열하게 된다. 이 약간의 차이가 순자기장 (net magnetization)이며 자기공명영상 신호를 얻을 때 가용할 수 있는 실제 스핀의 합이다. 이 상태에서 90° 펄스 라디오파를 맞으면 $1/2$, parallel state의 스핀과 $-1/2$ antiparallel state의 스핀의 수가 같아져 90° 횡자화 (transverse magnetization)를 갖게 된다.

2. Electron Angular Momentum and Paramagnetism

전자의 경우에도 양성자, 중성자가 함께 있는 핵자와 같이 스핀 및 궤도 각운동에 의해 각운동을 갖게 된다. 두 개의 서로 연관된 전자들끼리는 서로 상반된 방향을 갖는 각운동을 가지면서 (spin-up, spin-down) 가능한 가장 낮은 에너지 상태를 갖게 된다 (spin-pairing). 그러나 예외적으로 스핀 쌍이 형성되지 않는 물질의 경우(unpaired electron) 자화감수성 (magnetic

susceptibility: paramagnetism 상자성, ferromagnetism 철자성)을 갖게 되어 외부자기장 내에서 매우 강한 국소자기장을 형성하게 된다.

이러한 상자성 현상을 대표적으로 볼 수 있는 경우가 헤모글로빈 내 철의 전자상태 변화에 따라 신호강도가 다양하게 나타나는 출혈 그리고 다양한 자기공명영상 조영제에 의한 조영증강 효과 등에서 볼 수 있다.

모든 물질은 자기장 내에서 각기 다른 정도의 자화감수성을 갖게 된다. 반자성(diamagnetic)의 물질은 외부에서 걸어준 주자기장과 반대되는 매우 약한 자기장을 만드는데 이로 인해 주자기장의 세기는 약간 감소될 수 있다. 그러나 실제적으로는 자장을 만들지 않는다고 생각하면 된다. 소수의 상자성, 철자성 물질을 제외하고는 자연계의 많은 물질이 여기에 속한다.

상자성 물질은 쌍을 이루지 않은 전자(unpaired electron)를 갖고 있고 자기장 내에서는 국소 자기장을 형성하지만 자기장이 꺼지거나 바깥으로 나왔을 때는 국소자기장이 없어지는 물질로, 형성되는 자기장은 외부 주자기장과 같은 방향을 갖는다.

생체조직에서 일반적인 T1, T2 이완의 주된 기전은 가장 많은 성분을 차지하는 물 성분 내의 양성자-양성자 쌍극자-쌍극자(proton-proton dipole-dipole) 관계에서 출발하게 된다. 상자성 물질이 물과 같은 용매에 퍼지게 되면 기존에 양성자만 있는 양성자-양성자 쌍극자-쌍극자 관계에서 양성자 사이에 전자가 끼어들어가는 전자-양성자 쌍극자-쌍극자(electron-proton dipole-dipole)로 바뀌게 된다.

이렇게 전환된 전자-양성자 쌍극자-쌍극자 관계에서는 앞서 언급된 쌍을 갖지 않는 전자의 flipping up, down에 의해 형성된 강한 국소자기장(양성자가 만드는 자기장에 비해 700-1000배 이상 강하다)이 양성자의 Larmor frequency와 비슷한 속도로 매우 빠르게 요동(fluctuation)치므로 양성자의 T1, T2-이완시간이 매우 짧아져 T1-강조영상에서 매우 강한 신호를 나타내게 된다. 이러한 현상을 이용한 것이 바로 gadolinium(5 unpaired electrons)과 같은 자기공명영상 조영제의 기본원리이다.

유념해야 할 사항으로는 T1-shortening의 주체가 상자성 물질 자체가 아닌 상자성 물질 주변의 양성자들이라는 점과 전자-양성자 쌍극자-쌍극자(electron-proton dipole-dipole) 관계 반응은 쌍을 이루지 않은 전자와 실제 신호를 낼 양성자 간의 거리 10⁶승에 반비례하기 때문에 3Å 이내에 있어야 한다는 점이다. 이는 출혈의 자기공명영상 소견 이해에 매우 중요한 사항이다.

일반적으로 생체조직에서 T1-이완시간이 T2-이완시간에 비해 5-10 배 이상 오래 걸리기 때문에 낮은 상자성 물질 농도에서는 T1-이완이 주로 일어나게 되고 높은 농도에서는 T2-이완이 주로 일어나게 된다. 이러한 상자성 물질에 의한 T1, T2-이완시간이 짧아지는 현상 (T1, T2 -

shortening)은 쌍을 이루지 않은 전자가 많을수록, 상자성 물질의 농도가 높을수록 더욱 강하게 나타나게 된다.

한편 자화감수성 효과(magnetic susceptibility effect)는 상자성 물질이나 철자성 물질이 외부 자기장 내에 있을 경우 역시 쌍을 이루지 않은 전자들에 의해 T1-shortening없이 선택적으로 T2-shortening이 발생하는 현상을 일컫는다. 이는 상자성, 철자성 물질에 의한 자장의 비균질화(magnetic field inhomogeneity, nonuniformity)에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 상자성 물질이나 철자성 물질에 의해 강력히 자장이 비균질해지면 그 범위에 속한 양성자들에 급격한 탈위상(loss of coherence, dephasing)이 일어나 T2-, T2*- 신호강도가 급격히 감소하게 된다.

이러한 탈위상의 정도는 재위상(rephasing)시키는 180° 펄스와 그 다음 180° 펄스 간격의 길이에 비례하게 되므로 간격이 짧은 fast spin echo (FSE) imaging에 비해 간격이 상대적으로 긴 conventional spin echo (CSE) imaging에서 더욱 강한 탈위상이 일어나 T2-, T2*- 신호강도의 감소가 심하게 된다. 또한 외부자기장의 세기가 셀수록 국소자장의 비균질화가 커지므로 강한 탈위상이 발생되어 자화감수성 효과가 커지게 된다.

헤모글로빈의 산물인 deoxyhemoglobin의 경우에는 4개, methemoglobin의 경우에는 5개, 그리고 hemosiderin의 경우에는 10,000개 이상의 쌍을 이루지 않은 전자들을 가져 강력한 상자성을 나타낸다. 특히 hemosiderin의 경우에는 상자성 물질에 비해 100배에서 1000배의 강한 자화감수성을 보이므로 초상자성(superparamagnetic)이라고 불린다. 이러한 상자성 물질로 인해 인체 내 출혈이 다양한 신호강도를 보이게 된다.

철자성(ferromagnetic) 물질은 자기장에 대해 매우 강하게 끌리게 되고 한번 자기장을 경험하게 되면 자기장이 끊기더라도 영원히 지속되는 특성을 갖는다. 이들은 초상자성 물질에 비해서도 더욱 강한 자화감수성을 보인다. 여기에 속하는 물질로는 철, 코발트, 니켈 등이 있다.

참 고 문 헌

1. Christensen's Physics of Diagnostic Radiology Thomas S., III Curry, James E. Dowdey, and Robert C., Jr. Murry 1990
2. Magnetic Resonance Imaging David D. Stark and William G., Jr. Bradley 1999
3. Clinical Magnetic Resonance Imaging Robert R. Edelman, John R. Hesselink, Michael B. Zlatkin, and John V. Crues 2005