

# MRI: Magnetism and Electricity

동국대학교 의과대학 서경진

rad@chol.com

영상진단분야에서 자기공명영상 (MRI)은 일반적인 검사가 되었다. 과학자들이 연구한 물질의 성상을 이용하여, 인간의 질병을 진단하고 치료방침을 결정하고 있는 것이다. 자기공명영상기기의 기본인 자석과 전자기파에 대해 상식적인 면에서 알아보고자 한다.

자기공명영상(MRI)의 원리를 전체적으로 본다면 “M”의 자석 (magnet)과 “R”의 공명 (resonance)으로 신호를 만들어 “I” 영상 (imaging)을 구성하는 것이다. 즉 물 분자의 수소원자 핵은 양전하를 띠고 있고 이것이 회전하여 전자기력을 갖게 되면 핵이 작은 막대자석처럼 된다. 이것이 강한 자장 속에 들어가면 자력의 크기가 커지면서 정렬하고, 축이 흔들리는 세차 운동은 계속한다. 이것의 주파수와 같은 전자기파인 RF(radiofrequency)를 주면 공명하게 되어 회전이 커진다. 그 후 RF를 끊은 상태에서 원래의 방향으로 서서히 회전하면서 재정렬하는 동안 전자기파를 발생하게 되고(FID), 이 신호는 너무 약해 강한 신호 (signal)를 얻기 위해 에코방식을 택한다. x, y, z, 의 3 방향의 경사자장을 걸어 위치 별로 다른 공명 주파수를 갖게 하여 각 위치 에서 각각 다른 주파수의 에코가 발생하고, 이것을 주파수 별로 분리하여 영상을 얻는다.

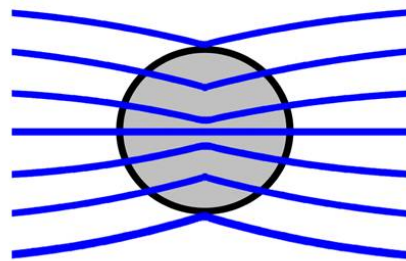
## 자성(Magnetism)

자성은 원자 궤도를 선회하는 전자에 의해 생긴 물질의 성질이다. 궤도를 선회하는 전자는 원자가 ‘자전(spin)’ 과 관련된 자성운동을 만든다. 자장의 세기는 가우스(G)와 테스라(T)로 측정되고, 1T는 10,000 G이다. 아직까지 때로는 자장력 단위로 가우스(G)를 쓰지만 테스라(T)로 사용하여야 한다. 지구의 자장은 약 0.5 G 이고, 폐차장에서 자동차를 들어 올리는데 쓰이는 전자석의 힘은 1.5-2.0 T로 자기공명영상기기의 자장력과 비슷하다. 자성은 4가지로 분류하고, 이것은 강자성, 상자성, 초상자성 그리고 반자성이다. MRI 검사에서 우리 몸의 여러 가지 성분 들과 조영제 그리고 수술 후의 기구들의 자성체의 성질에 의해 영상에 영향을 준다.

### 강자성(Ferromagnetism)

강자성 물질에는 일반적으로 철, 니켈 또는 코발트 등이 있다. 이들 물질은 자석을 포함하고, 환자에게서 동맥류클립, 심박동조율기, 유탄 등의 여러 형태로 발견된다. 이들 물질은 강양성의 자화율을 갖는다. 즉 자기장 안에 놓여졌을 때, 자장세기는 그

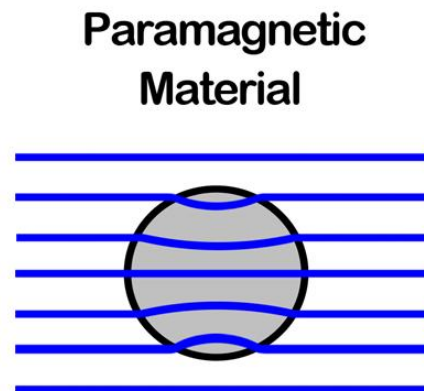
**Ferromagnetic Material**



물질의 밖보다 안에서 더 크다. 또한 강자성 물질은 자기영역(magnetic domain)으로 불리는  $10^{17}$ 에서  $10^{21}$  원자의 군집으로 이루어진 것이 특징으로, 모두는 같은 방향으로 향하는 자기모멘트를 갖는다. 그 영역의 모멘트는 비자성 물질에서는 무작위이지만, 자성 물질에서는 같은 방향이다. 자장 유도라인(flux lines)은 강자성 물질에 의해 심한 굴곡 현상을 보인다. 외부의 자장이 제거되었을 때 자화를 유지하는 힘을 가지는데 이것은 상자성, 초상자성 그리고 반자성 물질과 구별되는 성질이다. MR 영상에서 이들 물질은 신호의 소실과 공간왜곡을 보이는 자화율인공물(susceptibility artifacts)을 만든다.

### 상자성(Paramagnetism)

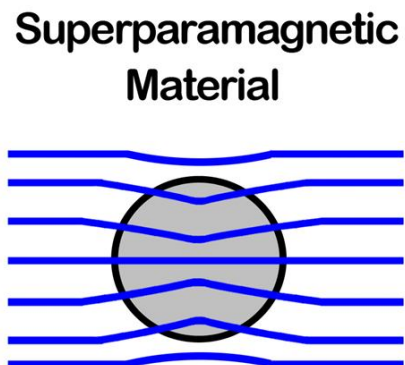
상자성 물질은 산소와 철 (Fe), 망간 (Mg) 그리고 가돌리움(Gd) 등과 같은 다양한 금속 이온이 있다. 이들 이온은 짝이 없는 전자를 가지고 있고, 양성자화율을 일으킨다. 이 자화율의 크기는 강자성 물질의 1/1000 이하이다. MR영상에서 나타는 효과는 T1과 T2 시간의 감소로 T1과 T2



이완율의 증가이다. 자장유동라인은 상자성물질에 의해 약한 굴곡 현상을 보인다. Gd은 MR 조영제로 쓰이며, 적절한 농도에서 Gd 조영제는 선택적인 T1 이완 증강을 유발하여 T1강조영상에서 신호 증가를 일으킨다.

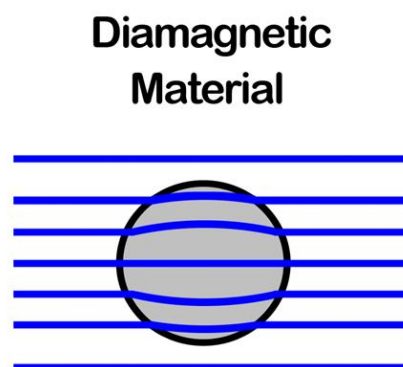
### 초상자성(Superparamanetsm)

초상자성 물질은 벌크로 강자성을 가지는 요소의 개개 영역으로 구성된다. 그들의 자화율은 강자성과 상자성 물질의 중간 정도이다. 초상자성 물질에는 장, 간 그리고 림프절 영상을 위한 조영제를 포함하는 철이 있다.



### 반자성(Diamagnetism)

반자성 물질은 내재성 원자의 자기 모멘트를 가지지 않는다. 그러나 자기장에 놓이게 될 때, 약음성 자기율을 일으키며, 약하게 그 영역에 반발한다. 물, 구리, 질소, 바륨 그리고 대부분의 조직은 반자성 물질이다. 반자성의 예로 바륨 헥사플루오아이드 투여 후 약음성 자기율은 MR영상의 장관에서



신호 소실을 만든다.

## 자기공명영상기기

자석의 종류에는 영구자석(permanent magnet), 저항자석 (resistive magnet) 그리고 초전도자석 (superconducting magnet)의 형태가 있다.

세상 모든 일과 마찬가지로 MR 기계도 일반적으로 자장의 세기에 따라서 나눈다.

자장의 세기에 따라 초소형, 소형, 중형, 대형, 초대형으로 나누고 MR 기기에서는 ultralow, low, medium, high 그리고 ultrahigh 자장 기기 등이다.

Ultralow 자장기계는 0.1 T 이하의 자장력이며, low는 0.1-0.5 T, medium은 0.5-1 T, high는 1-2 T 그리고 ultrahigh 자장 기계는 2 T 이상을 말한다.

영상의학에 이용되는 MR장비는 0.06 T의 소형 기기에서부터 4 T의 큰 기기가 있다. 임상 이용은 영국국립방사선보호위원회(NRPB)에서 2.0-3.0 T 정도의 기계를 허용하고 있으며, 이 자장보다 높은 기기는 잠재적으로 위험한 것으로 간주되기 때문에 연구기관에서만 사용한다.

## Electricity

자기공명영상을 얻는 데는 “자석”과 “영상을 얻을 환자”가 필요하다. 그리고 에너지를 주는 전자기파가 필요하다. “자기공명영상”의 “공명”에 필요한 에너지 공급에 전자기파를 이용한다.

전자기파는 흔히 전자파라고 하고, 전자기파와 비슷한 말로 전파가 있다. 이들은 보통 별 차이 없이 사용되지만 엄밀히 말하면 차이가 있다.

전자기파를 명확하게 표현하면 전자장의 주기적인 변화가 진공 중이나 물질 속을 전파해 가는 횡파이며, 진동수 혹은 파장의 차이에 따라 X-선, 자외선, 가시광선, 적외선 등으로 불린다 (Fig. 1-2).

다시 말하면 전자기파는 전기장과 자기장의 두 가지 성분으로 구성된 파동으로, 공간을 광속으로 전파한다. 전자기파는 가시광선을 포함하는, 넓은 의미에서의 빛이다. 일반적인 파동과는 달리 전자기파는 매질이 없이 진행할 수 있다. 상대적으로 종파인 음파는 전달되기 위해 매질을 필요로 한다. 다시 말해 우리가

서로 대화할 때 공기가 없다면 서로의 소리가 전달되지 못한다. 하지만 횡파인 전자기파는 공기 없이도 전달이 가능하고 따라서 화성 탐사선이 수집한 정보를 횡파인 전자기파의 형태로 지구에 송신하면 공기가 없는 우주공간을 진행하여 지구에 도달할 수 있고 우리는 화성 표면 사진 등을 받아볼 수 있는 것이다.

전파는 눈으로 볼 수도, 귀로 들을 수도, 손으로 만져 보고 확인할 수도 없는 인간의 5감으로 감지할 수 없는 존재이다. 그러나 그와 같이 실체를 잡을 수 없는 전하이지만 현대 사회에서는 없어서는 안 되는 것으로서 단 하루라도 떼어 놓을 수 없다. 전파는 라디오나 텔레비전을 위시하여 택시 무선, 방재 무선, 선박, 항공기, 열차 무선, 휴대 전화 등에 사용되고 있다. 전파는 서로 떨어진 지점으로부터 연락하기 위해 쓰이거나, 안전 주행의 수단으로 사용되며, 또는 전선을 매설하지 않은 먼 지점에 정보를 전달하는 수단 등으로도 사용되고 있다. 그렇다면 전파란 도대체 무엇인가? 그것은 단어가 뜻하는 바와 같이 전기의 파를 말한다. 국어 대사전에 의하면 전파란 "전자기파 중 적외선 이상의 파장을 갖는 것"으로 정의하고 있다. 또 공업 용어 사전에서는 전자파 중 3,000[GHz] 이하의 주파수 부분으로 되어 있다. 즉 전파는 전자파의 일부이며 그 진동수가 적외선보다 하측 부분을 이야기 한다.

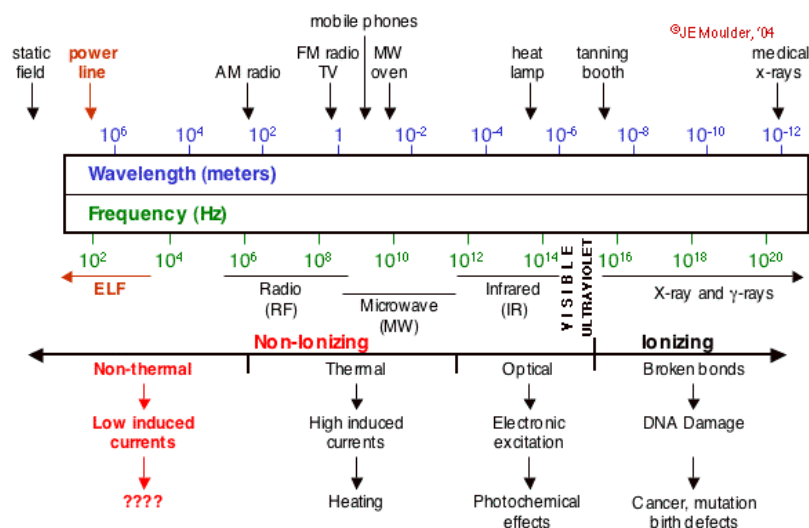


Fig. 1 Schematic diagram of the Electromagnetic Spectrum

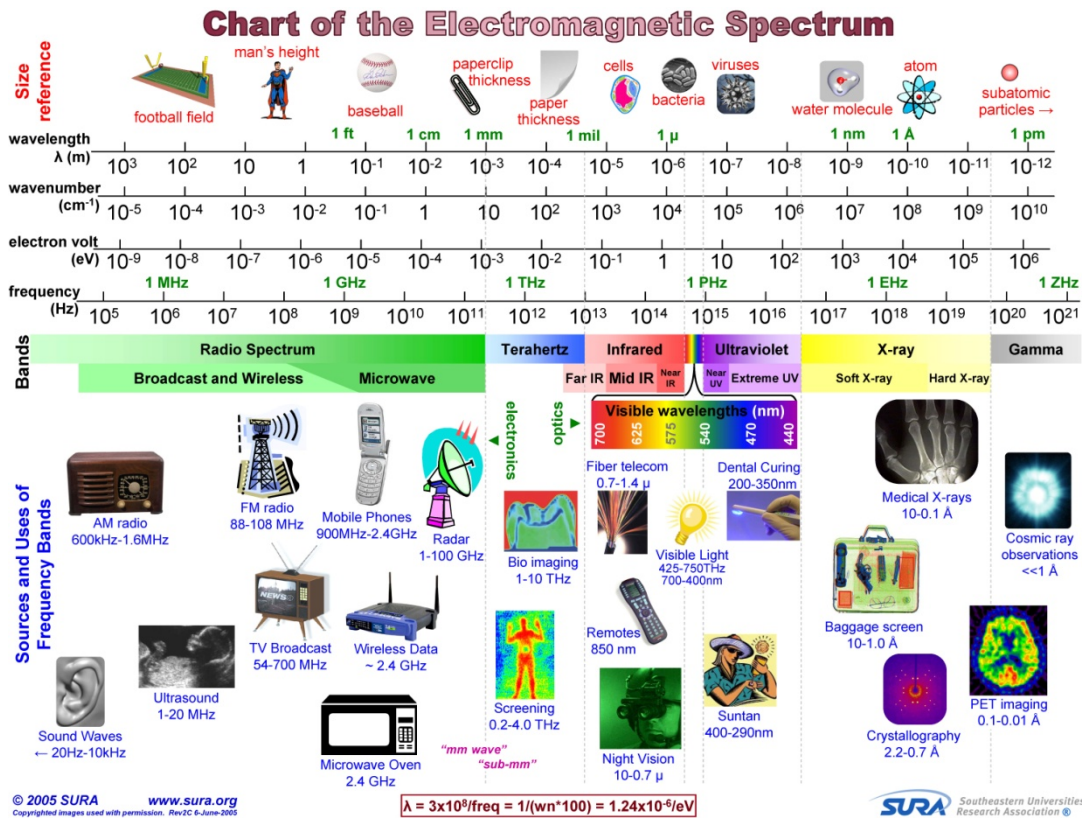


Fig. 2 Chart of the Electromagnetic Spectrum

자기공명영상에서 영상을 얻는 기본적인 개념은 공명을 일으키기 위해 외부에서 에너지를 제공하여야 하는데 이때 에너지공급을 전자기파인 라디오파를 이용한다. 강한 외부 자장에 의해 배열되어 있는 수소는 팽이가 중력을 축으로 하여 돌듯이 외부 자장을 축으로 하여 돌고 있는데, 에너지를 주기 위해 사용되는 라디오파는 외부 자장을 축으로 하여 돌고 있는 수소와 같은 주파수로 주어야 공명이 일어난다. 이 주파수는 라모(Larmor) 공식 (Table 1)으로 알아 낼 수 있고 1.0 Tesla에서는 42.57 MHz 이고, 진단용으로 가장 많이 사용되고 있는 1.5T 영상기기에서는 약 64 MHz 이다. 자기공명영상에서 물체에 에너지를 주는 것은 전자기파인 라디오파를 이용하고 그 주파수는 우리가 일상에서 흔히 접하는 FM 라디오 주파수 대역이다. 자기공명영상기기가 설치된 방에 비싼 돈을 들여 전자기파를 막을 수 있는 재질로 단장 하는 것은 공간을 날라 다니는 라디오파가 영상검사에 오염을 막기 위해서이다.

자기공명영상은 방사선을 사용하지 않고 영상을 얻기 때문에 안전한

검사방법이다. 그러나 MRI는 전자기파를 사용하기 때문에 자기공명영상을 이용할 때 전자과인체흡수율(specific absorption rate: SAR)에 대하여 생각하여야 한다. 생체조직에 장기간 전자기파를 주면 에너지가 흡수되어 조직이 가열이 되고, 인체의 발열은 관리하지 않으면 신경이나 심장기능에 장애를 준다. 우리 몸이 1<sup>o</sup> C 이하로 증가되면 아무런 문제가 없다. 왜냐하면 세포의 죽음은 42<sup>o</sup> C가 되어야 일어난다. 그러나 금속으로 된 물질이 몸 속에 있을 때 주의하여야 하는데, 금속 물질은 가열이 보통 조직 보다 훨씬 잘 되기 때문이다.

자기공명영상검사에서 라디오파로 에너지를 주므로, 이 에너지가 환자에게 침착된다. 전자과인체흡수율은 전자기파가 단위조직 당 소산되는 율을 측정하는 것이고 W/Kg 으로 표시한다. 전자과인체흡수율은 외부자장의 세기의 제곱, 라디오파 세기의 제곱 그리고 라디오파를 주는 주기에 비례한다. 따라서 3.0 T의 기기는 1.5 T의 기기에 비해 전자과인체흡수율은 4배이다.

그러나 임상에서 사용되는 자기공명영상기기는 미국 FDA의 기준 (Table 2) 인 인체에 허용되는 전자과인체흡수율의 안전한 범위에서 이용하도록 만들어져 있어 걱정 할 필요가 없다.

(Table 1) **Larmor equation,  $\omega_0 = B_0 \times \gamma$** , where  $\omega_0$  is the precessional frequency,  $B_0$  is the external magnetic field strength (measured in teslas), and  $\gamma$  is the gyromagnetic ratio (measured in megahertz per tesla), which is a constant for every atom at a particular magnetic field strength.

(Table 2) The FDA limit for a permissible increase in body core temperature during MR imaging is 1<sup>o</sup>C. In addition, the FDA considers a significant risk to be incurred if the specific absorption rate exceeds 3 W/kg averaged over the head for 10 minutes, 4 W/kg averaged over the whole body for 15 minutes, 8 W/kg per gram of tissue averaged over the head or torso for 5 minutes, or 12 W/kg averaged over the extremities for 15 minutes.

## References

Jacobs MA, Ibrahim TS, Ouwerkerk R. AAPM/RSNA physics tutorials for residents: MR imaging: brief overview and emerging applications. *Radiographics* 2007; 27(4):1213-1229.

Bitar R, Leung G, Perng R, Tadros S, et al. MR pulse sequences: what every radiologist wants to know but is afraid to ask. *Radiographics*. 2006; 26(2):513-537

Pooley RA. AAPM/RSNA Physics Tutorial for Residents: Fundamental Physics of MR Imaging. *RadioGraphics* 2005; 25: 1087-1099

Hendrick RE. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents. Basic physics of MR imaging: an introduction. *Radiographics*.1994;14(4):829-846

Patton JA. MR imaging instrumentation and image artifacts. *RadioGraphics* 1994; 14: 1083-1096