

MR Safety and Biologic Effects

전북의대 영상의학과 이 상 용

강 의 목 표

1. MRI 과정의 위험성의 원인을 파악한다.
2. MRI 과정에서 일어나는 자장과 전기장이 미치는 영향을 이해한다.
3. MRI 검사와 관련된 주의사항을 기억한다.

요즘 MRI는 다양한 병의 진단, 치료 과정의 관찰, 분자영상의학(molecular imaging) 연구 등에서 널리 쓰이고 있으며 이들 분야에서 꼭 필요한 검사방법으로 자리잡았다. MRI가 많이 퍼져 있고 또한 자주 쓰이고 있지만 안전한가? MRI 검사를 이용하는 의사나 연구자들은 MRI는 정말 안전한지에 대해 의문을 가져야 하며 또한 안전에 대해 확신을 갖고 있어야 한다.

MRI 안전에 관한 관심은 MR 기계 자체보다는 주로 검사를 받는 분의 몸 안에 설치된 금속 물질(biomedical implants)이나 질병의 조절을 위해 설치한 장치(medical device)에 대해서다. 왜냐 하면 MRI 검사방법이 1977년 소개된 지 약 30년 동안 1억 5천만 건이 넘는 검사에서 MR 기계 자체와 관련된 치명적인 사고는 없었다. 즉 MRI 검사 도중 발생하는 자장이나 전기장 때문에 사망에 이른 사건은 없었다. 그동안 있었던 심각한 사고들은 MR 기계 자체의 문제는 아니었고 주로 안전규칙을 지키지 않았거나 인체 내에 들어있는 금속물질이나 장치 때문에 일어났다. 이로

인하여 MRI 분야에서 일하는 사람들은 금속물질이나 장치에 대한 안전규칙에 대해 잘 알고 있다 (1).

그러나 그동안 발표된 연구 자료나 MRI실에 들러 검사받은 사람들이 말하는 불편사항을 들어 보면 MRI와 관련하여 생기는 문제가 단지 금속물질이나 장치 때문만은 아님을 쉽게 알 수 있다. '찌릿찌릿한 신경자극증상', '뜨거운 느낌', '시끄러움'과 같은 검사받는 사람들이 느끼는 증상도 있고, 한편 환자를 검사하는 사람들이 느끼는 불편함은 열 발생을 낮추기 위해 MR 기계 자체에서 MR sequence 구성을 제한하거나 바꾸도록 요구하는 일들이 자주 있다. 또한 MRI 기술도 계속 발전하여 3.0 - 8.0 T의 MR 기종이 병원에서 이용되고 있어 이와 관계된 새로운 촬영기법, 높아진 자장, 경사자장, RF 펄스의 생물학적 영향이나 안전에 대해서도 새로운 기준이 필요하다.

이 글은 금속물질이나 장치에 관련된 안전문제뿐만 아니라 MRI의 안전과 관련하여 생각해야 할 요소를 정자장(static magnetic field), 경사자장(gradient magnetic field), RF field 세 요소로 나누고 이들 각각의 생물학적 효과와 안전성 문제를 함께 다루고자 하였다(2).

1. 정자장(Static Magnetic Fields) 효과

(1) 정자장 자체가 인체에 미치는 효과

환자 검사에 이용되는 MR의 정자장은 1977년 처음 소개된 후 0.05T에서 계속 증가하여 1998년 8.0T까지 증가하였다. 지구자장의 세기가 0.5G인 점을 고려할 때 8.0T MR 기계는 지구자장의 160,000배나 높은 정자장을 사용하고 있는 것이다. 이러한 강한 자장 속에서 인체는 안전한가? 미국 식품안전청에 의하면 정자장이 8.0T인 기계에서도 '환자에게 심각한 위험은 없다(non significant risk for patients)'고 밝히고 있으며 8.0T 이상의 자장에서 환자를 대상으로 연구하고자 하는 경우 허가를 얻도록 권고하고 있다. 인체의 구성 성분 대부분이 자력에 대해 민감하지 않으므로(diamagnetic) 직접적인 손상을 일으키지 않음을 알 수 있다(3).

그러나 강한 정자장이 인체 조직에 미치는 영향에 대한 다양한 연구들이 있어왔다. 내이에서 반고리관(semicircular canals) 내 endolymph에 영향을 미쳐 어지러움증 발생문제, 세포 성장과 형태변화, 세포재생이나 기형문제, 유전자 구조에 대한 영향, 출생 전후 아이에 미치는 영향, 뇌안의 영향, 혈액학적 변화, 체온이나 신체리듬 변화, 면역체계에 대한 변화 등 여러 분야에 대한 다양한 결과들을 보고하고 있다. 대부분 특별한 영향이 없다고 보고하고 있으나 일부에서 문제점

을 제기하기도 하였다. 그러나 반복성 (reproducibility)이 없거나 현재 MRI가 이용되는 조건과 다른 상황을 설정하는 등 확실한 결과는 없다(2, 3). 현재 사용하고 있는 상황에서는 대부분 안전한 것으로 알려져 있다.

강한 정자장과 인체의 반응 중 몇 가지를 구체적으로 예를 들어본다(3).

1) 화학반응에 대한 자장의 영향(Magnetic Effects on Chemical Reactions): oxyhemoglobin은 반자성체이며 deoxyhemoglobin 상태는 상자성체여서 강자장 내에서는 산소가 떨어질 것을 예상할 수 있지만 실제로는 그 효과가 매우 적다.

2) 인체 내 강자성체에 대한 효과(Possible Ferromagnetic Tissue Components): 철(iron)을 생각할 수 있으나(인체 내에는 3.7g/70kg 있음) 철이 인체 내에서 모여 있지(bulky distribution) 않기 때문에 자장의 효과가 거의 없다. 그러나 문신이나 그린 눈썹 등에 포함된 산화철이 자장 내에서 힘을 받아 움직여 주변 조직을 자극하여 부종이 생기거나 영상을 왜곡 시킬 수 있다.

3) Magnetohydrodynamic Forces and Pressures: 강한 자장 때문에 인체 내에서 흐르는 혈류나 내이의 endolymph에 전류가 발생하여 혈류나 endolymph를 밀 수 있다. 혈류 내에서 생긴 힘은 매우 적어서 혈류에 거의 영향을 주지 않으나 endolymph에 영향을 미쳐 어지러움을 일으킬 수 있다.

(2) 정자장이 금속물질이나 장치에 미치는 효과

MRI 검사와 관련되어 일어난 치명적인 사건은 대부분 강한 자장이 자성을 띄는 금속물질을 뒤틀거나(torque) 빠르게 움직여(translation force) 발생하였다. 예를 들어 뇌 안에 설치한 뇌동맥류 클립의 경우 자장 안에 놓이면 자기장의 방향과 같은 배열을 하고자 클립이 방향을 틀어 재출혈이나 주변 뇌조직을 찢어 사고가 발생한다(4, 5). 심장박동조절기 또한 강한 자장의 영향으로 작동이 잘못되어 사고가 발생하기도 하였다(6). 또한 MR 기계 주변에서는 자장의 변화가 매우 급격하므로(static magnetic field with spatial gradient 설명 참조) 자성을 띄는 물체를 가까이하면 총알처럼 안쪽으로 들어간다. 가위, 산소통, 환자용 침대 등이 환자를 쳐서 사망에 이르는 사고들이 있었다. 이러한 사고들은 환자에게 이용되는 MR 기계만의 문제라기보다는 강한 자장을 형성하는 모든 기계에서 발생할 수 있는 문제이다. 또한 최근에는 클립이나 심장박동조절기 등을 MR 기계에서 사용하도록 만들고 있어 새로운 많은 경우 실제 MRI 촬영이 이루어지고 있으며(7-9) 아무런 해가 없다고 보고하고 있다.

(3) MRI에 관련된 직업에 종사하는 사람들의 문제

지금까지 오랫동안 강한 자장에 노출된다 하여 생기는 해로운 점은 증명되지 않았다. 그러나 가능하면 강한 자장에 노출되지 않는 것이 현명하며 계속해서 추적하고 관찰할 필요가 있다(3).

2. 경사자장이나 RF 펄스에 의한 영향 (Oscillating Magnetic Fields)

MRI 촬영 중 사용되는 전자파(electromagnetic wave)도 최근 논의가 활발한 전자파에 의한 인체의 유, 무해 논쟁과 맥을 같이한다. 이동전화에서 발생하는 전자파, 컴퓨터 모니터에서 나오는 전자파, 전화기나 전자레인지에서 사용되는 전자파, 고압선 주변 전자파, 전자파를 내보내거나 받는 송수신소 주변에서 발생하는 전자파 등 사용되는 전자파의 주파수는 다르나 이들 전자파가 인체에 해를 주지는 않는지 현재도 많은 관심과 연구가 진행 중이다. MRI 검사의 특징은 단기간의 노출로 끝난다는 장점이 있으나 MRI에 관련된 종사자나 연구자들에게는 장기간 노출되기 때문에 장기적인 추적 관찰이 필요하다.

MRI 촬영 과정에서 시간에 따라 자장의 변화는 필수적인 과정이다. 즉 영상의 위치 결정을 위한 경사자장(gradient magnetic field), 검사하는 조직 내부 핵의 활성화(excitation)를 위한 RF 펄스가 여기에 해당된다. 시간에 따라 변화하는 자장은 조직 내에서 전기장(Electric fields)을 형성하고 전류가 형성되어 인체에 영향을 미치게 된다. 조직 내 핵의 활성화를 위해 사용하는 RF 펄스는 Larmor frequency에 의해 결정되며 MHz 수준의 높은 주파수가 필요하여 주로 열(heat)이 생기고, 경사자장의 경우의 주파수는 경사자장이 0에서 원하는 수준만큼 올라가는데 걸리는 시간(ramp time)에 따라 결정되는데 주파수가 비교적 낮아 수백에서 수천 Hz 정도의 낮은 주파수가 형성되고 주로 신경의 자극 증상이 생긴다(1, 2, 10-14). 현재 사용되고 있는 MR 기계에서는 MR sequence의 조건에 따라 인체에 손상을 줄 수 있는 범위를 정하고 MR sequence에 변화를 시도할 경우 자동으로 제한점을 넘지 않도록 규제하고 있다. 논의의 편리함을 위하여 경사자장의 영향과 RF pulse에 의한 영향을 나누어 기술하고자 하나 인체에 미치는 영향의 원인을 뚜렷이 구분할 수 없는 경우도 있다.

(1) 경사자장의 영향(Gradient Magnetic Fields)

MRI 기계 내부에는 영상의 위치 정보를 파악하기 위해 세 방향(x, y, z)의 경사자장코일이 있

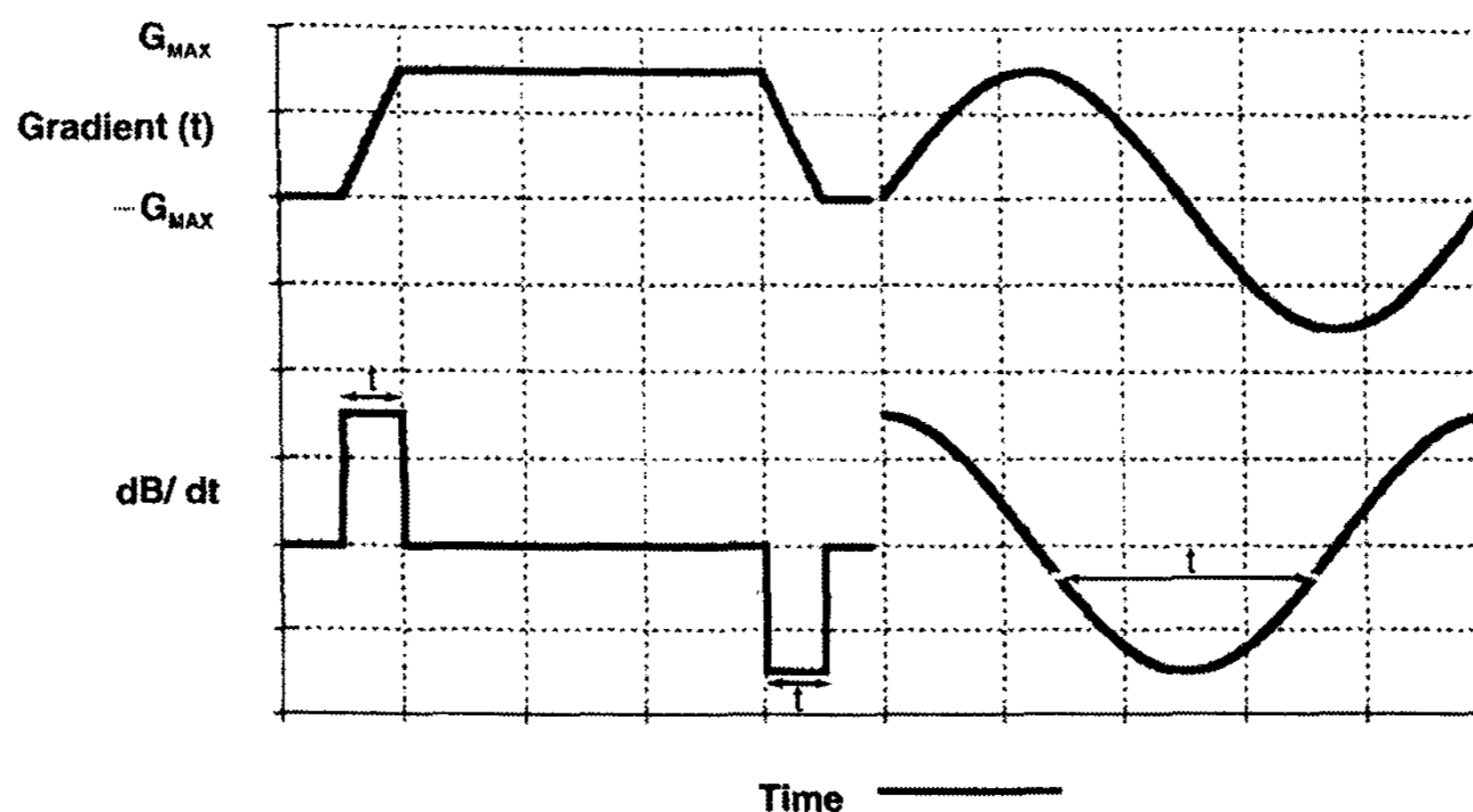


Figure 1. Definition of gradient ramp duration, t. Gradient current waveforms are shown at the top. dB/dt waveforms are shown at the bottom.

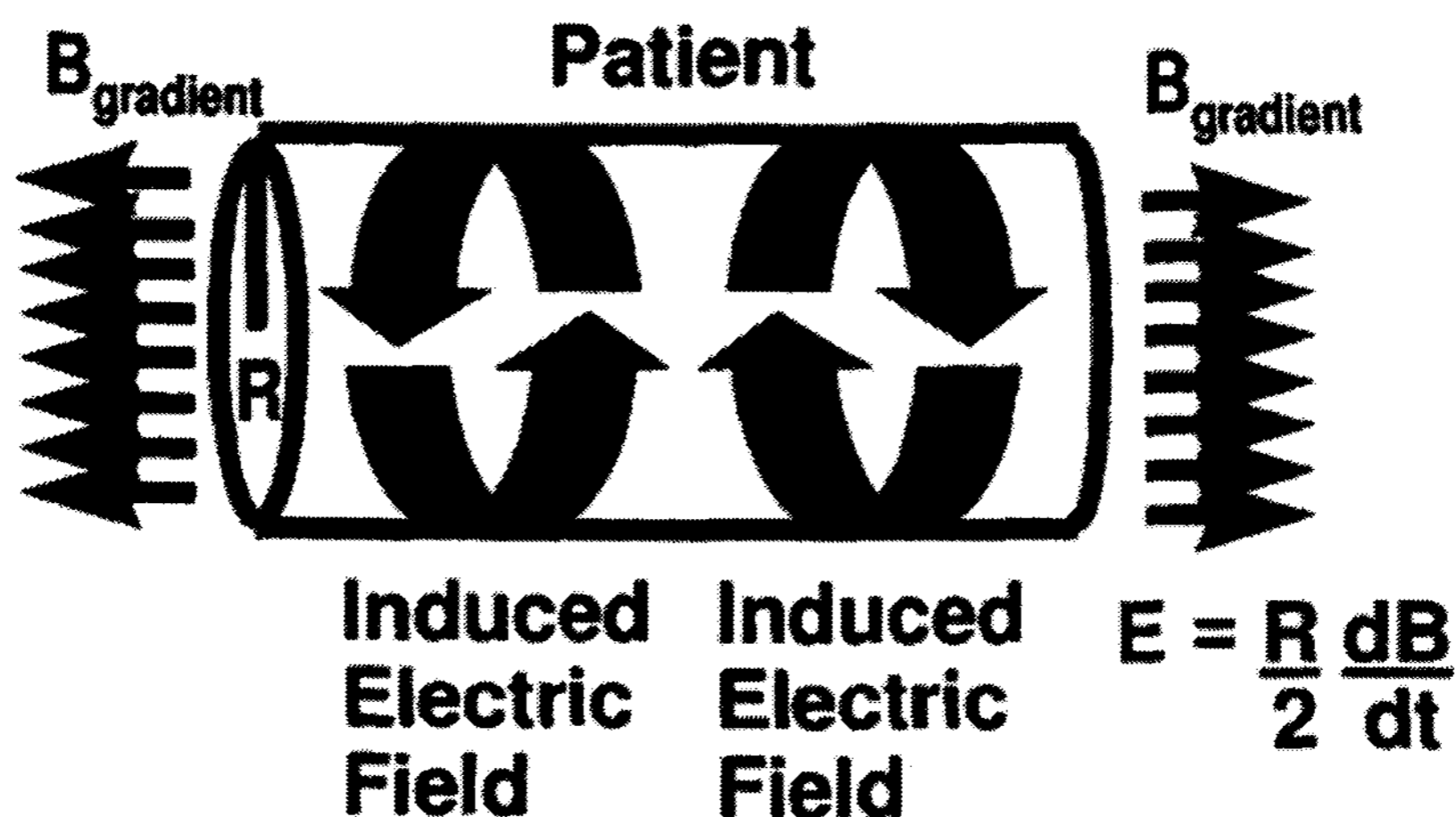


Figure 2. Cylindrical human model used by Reilly to estimate dB/dt stimulation thresholds. The patient is oriented along the static magnetic field and assumed to have a radius of 0.2 m. Peak electric fields are induced on the cylinder surface (13).

으며 MRI 촬영 과정에서는 세 방향 경사자장 코일 모두가 매우 빠르게 자장의 변화를 일으킨다. 즉 켜기 전 0에서 원하는 수준의 자장을 유도한 후 일정 시간 후 꺼지게 된다(Figure 1). 자장이 시간에 따라 변하면 자장의 안에 놓여있는 전도체에 전기장이 발생하여 전류가 흐르게 된다(Figure 2). 유도된 전기장의 주파수는 그림에서 알 수 있듯이 경사자장이 0에서 일정 수준까지 올라가는 시간(gradient ramp duration, rise time)에 따라 결정되며, 또한 전기장의 변화(dB/dt)가 결정된다.

1.5T MR 기계에서 경사자장코일은 20~50 mT/m가 이용되고 있다. 경사자장은 정자장(1.5~3.0T)에 견주어 보면 300배 내지 600배의 적은 자장을 사용한다. 예를 들어 계산해보면, 경사자장을 0에서 10mT/m까지 올리고, ramp time이 200 μ s (통상적인 MR sequence에서 ramp time은 수백 μ s이다) 이면 dB/dt 은 50T/s, 이때 생기는 전기장(electronic field)는 40 cm 복강 둘레에서 5V/m가 생긴다. 복강 둘레에 5V/m의 전류가 흐르게 되며 이렇게 생긴 전류가 말초 신경이나 심장의 전기신호를 자극하게 된다.

알려진 말초신경자극의 한계점은 6 V/m 이다. 말초신경을 자극할 수 있는 전기장의 크기와 검사 받는 사람이 느끼는 통증을 느끼는 크기에는 차이가 있는데, 통증의 한계점이 말초신경 자극점보다 약 28% 더 높다고 알려져 있다(13). 심장의 자극 효과는 이보다 더 높은 수준에서 일어나며 말초신경 자극점보다 약 36%가 높은 점에서 일어난다고 알려져 있다.

검사 받는 사람들은 말초신경이 자극되면 "tingling" or "tapping" 감각을 호소한다. x, y, z 방향에 따라 다르나 뼈에 의해 튀어 나온 부위에서 흔히 호소한다. 그외 시간에 따라 변하는 자장의 효과는 조직 내 온도를 올리거나 화상을 일으킬 수 있으나 이런 효과는 RF 펄스에 의한 효과가 약 8배정도 더 높다. 또한 망막의 시신경(retinal cones)에 작용하여 안내섬광(magnetophosphenes)이 생기기도 하고, 심장 내에서 흐르는 혈류에 전기장이 발생하여 ECG의 T 파를 변화 시키나 이는 정자장에 의해서도 일부 발생한다.

MR 기계가 쓰이기 시작한 초기에는 20 T/s로 제한하였으나 그 후 지속적인 sequence 발전으로 특히, echoplanar imaging (EPI) techniques이 이용되면서 경사자장의 제한점에 대한 조정의 필요성이 제기되었다. FDA에서 제한하고 있는 기준은 'the levels which do not result in painful peripheral nerve stimulation'와 같이 모호한 규정을 두고 있다. 지나친 규제는 매우 유용한 영상 기법(sequence)의 개발을 방해할 수 있기 때문에 지속적인 논의가 필요하며 객관적인 자료가 필요하다. Vogt 등은(11) 말초신경 자극 수준보다 120% 높은 수준에서 영상을 얻었어도 대상 환자의 2.7%에서만 불편을 호소한 점을 들어 새로운 MR sequence 들이 매우 안전하다고 주장하고 있다. 현재 사용되고 있는 MRI sequence 들은 대부분 이러한 말초신경 자극이나 심장자극과 같은 일이 생기지 않도록 제한점을 두고 있다. 환자의 자세도 전기장의 유도에 영향을 미칠 수 있는데 팔이나 다리를 서로 겹치게 놓아 고리모양(conducting loop)을 만들지 말아야 한다. 둥근 고리모양은 빠른 자장의 변화에 의하여 고리 내부로 전류가 쉽게 발생하기 때문이다.

(2) 경사자장코일 때문에 생기는 소음(Acoustic Noise)

MRI 검사 도중 매우 큰 소리를 들을 수 있다. 이는 경사자장 코일 때문에 나는 소리이다. 스

피커의 원리를 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 스피커 내부는 자석을 가운데 놓고 주변을 코일로 감아 놓은 구조로 이 코일에 전류를 흘려주면 코일 주변으로 자장을 일으키고, 발생한 자장은 코일 안쪽 자석의 자장과 충돌을 일으켜 전류가 흐르고 있는 코일이 떨게 된다. 이 떨림을 스피커의 얇은 막에 전달하여 소리가 나게 된다. 마찬가지로 경사자장 내부에 전류를 흘려주면 경사자장 주변에 생긴 자장이 주변 정자장과 충돌을 일으켜 경사자장의 코일이 심하게 떨게 되고 떨면서 주변에 부딪혀 소리가 난다. 매우 빠른 경사자장을 일으키는 MR sequence에서 더 심한 소음을 들을 수 있다.

FDA에서의 권장 사항은 140 dB이하로 줄일 것을 권하고 있지만 99 dB 이상이면 귀를 보호해야 한다. Earplug를 사용하면 10-30 dB 정도의 소음을 줄일 수 있지만 가능하면 headphone 과 같은 보호 장구를 사용하는 것이 필요하다. 소음에 의한 장애는 소음의 정도도 중요하지만 노출 시간이 특히 문제가 된다. MRI 관련된 직업에 종사하는 분들은 소음을 줄이는 방법에 주의를 기울일 필요가 있다.

(3) RF 펄스에 의한 영향(RF Fields)

검사하고자 하는 조직의 원자를 활성화 시키고자 원자핵의 공명주파수 Larmor frequency에 (42~57 MHz/T) 해당하는 자장을 주게 되는데 이때 조직 내로 들어가는 자장이 내부에서 열을 발생시키며 인체에 해를 줄 수 있다. 공명주파수는 정자장(static magnetic field)의 크기에 따라 달라진다. 전자파에 의한 열 발생은 전자레인지로 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 전자레인지는 물 분자를 활성화시키기 위해 2450 MHz 정도의 전자파를 내보내며 데우는 조직의 내부에서 매우 뜨거운 열이 발생하여 음식물을 데우게 된다. 이때 필요한 에너지의 양을 Watts라는 단위를 사용하며 전자레인지의 경우 700~800 W의 에너지를 사용한다.

MRI에서는 대상이 되는 원자에 따라 공명주파수가 다르며 또한 정자장의 세기에 따라서도 주파수가 다르다. 조직 내에 도달한 RF 펄스는 원자핵의 세차운동(precession)과 공명을 일으켜 원자핵에 에너지가 전달된다. 실제 전달되는 에너지를 측정하기 위해 SAR(specific absorption rate, watts/kilogram)라는 개념을 사용한다. 예를 들면 동물 실험에서 2 W/kg으로 60분 정도 노출시키면 조직내부 온도가 0.76도 정도 상승하는 것으로 알려져 있다. 이때 동반하여 피부 온도도 약간 더 높은 온도로 상승하게 된다. 실제 촬영을 마친 환자가 특정 부위가 매우 뜨거워졌다고 호소하거나 피부가 붉게 변하며 불편을 호소하는 것을 볼 수 있다.

SAR가 높아지는 경우는 RF pulse를 많이 사용하는 MR sequences(예, fast spin echo)에서 더 많은 에너지가 흡수되며 검사 받는 분의 체중도 하나의 요소이다. RF 에너지에 의한 불편함을

줄이기 위해서는 검사 시작 전 프로그램에 체중을 정확하게 입력해야한다. 또한 MRI 실 내부 온도나, 옷 등도 온도 상승에 영향을 미친다. FDA 권고는 정상인에서는 4.0 W/kg, 환자에 대해서는 1.5 W/kg으로 하고 있다. 그러나 위의 권고대로 검사했을 때 30분간의 노출에 내부 온도는 거의 올라가지 않고 피부 온도만 약 4도 상승하였다. 현재 이용되고 있는 MRI sequence를 들여다 보면 FDA의 권고 사항과 약간씩 차이가 있음을 알 수 있다.

1) 화상(Burn)

RF 코일이 내는 자장 때문에 인체나 고리를 만든 전선이나 부착물(ECG electrodes, wires, skull plates, hip prostheses) 등에 전류가 유도되어 화상을 일으킬 수 있다. 피부가 코일의 표면에 닿지 않도록 주의해야하며 또한 전선 등과 같은 물질은 절연체로 감싸 검사 받은 사람의 몸에 닿지 않도록 하고 고리 모양을 형성하지 않도록 해야 한다.

▶ 참고자료 1 ; MR 안전과 관련된 원인별로 정리하였다(Table 1).

(출처: <http://www.fda.gov/cdrh/ode/primerf6.html>)

Table 1. MR Environment Medical Device Concerns

Static Magnetic Field (always on)
Rotational force (torque) on object
Tearing of tissues Rotation of object in order to align with field
Static Magnetic Field Spatial Gradient (always on)
Translational force on object
Tearing of tissues Acceleration of object into bore of magnet "missile effect"
Gradient Magnetic Field (pulsed during imaging)
Induced currents due to dB/dt
Device malfunction or failure
Radio Frequency Field (pulsed during imaging)
RF induced currents resulting in heating
Patient burns (thermal and electrical)
Radio Frequency Field (pulsed during imaging)
Electromagnetic Interference- active device
Device malfunctions Induced noise (monitoring devices)

3. 검사 받은 사람과 관련된 문제(Patient-related Devices)(10)

- 1) Implants(뇌동맥류 클립, cochlear implant, stapedial replacement): 자장 내에서 이동하거나 회전할 수 있어 손상을 일으킬 수 있다. 검사 전 충분한 implants에 대한 사전 지식과 함께 자성에 대한 검사가 필요하다. 사용하는 임플란트의 개선에 대한 지속적인 관심과 정보가 필요하여 불필요하게 검사를 제안할 필요는 없다.
- 2) 이물질(Foreign bodies): 안구 내에 들어간 이물질의 경우 철저한 확인이 필요하며 가능하면 다른 검사를 이용하여야 한다.
- 3) 심장박동조절기(Pacemakers), 인슐린 펌프 등: 앞의 논의 참조
- 4) 심장판막: 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다.
- 5) CSF shunts: 거의 영향을 받지 않는다.
- 6) Wires, other metallic objects and skin contact: pacemaker lead wires, ECG and plethysmographic cables and surface -coil connections 등은 경사자장이나 RF 자장에 의해 전류가 유도될 수 있으므로 피부에 직접 닿지 않도록 해야 한다. 금속 줄이 들어가 있는 옷, 안경, 보석, 머리핀, 단추, 시계, 보조기 등도 가지고 들어가지 않도록 해야 한다.
- 7) IUDs: 안전한 것으로 알려져 있다.
- 8) Joint and limb prostheses: 위험하지는 않으나 영상의 왜곡이 심하다.
- 9) Skin patches: RF energy 흡수로 인하여 화상을 입을 수 있다.
- 10) 임신: 태아에게 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다(15). 그러나 가능하면 임신 초기에는 삼가도록 권하고 있다.

▶ 참고자료 2 ; Operational safety rules(10)

- 1) Magnet room 안으로 들어가는 것은 훈련된 종사자와 환자, 종사자가 대동한 방문자에 한함
- 2) MR 방은 잠글 수 있어야 하며 열쇠는 훈련된 종사자에게만 주어야 함
- 3) 방의 출입관계는 운영자에 의하여 감시되어야 함
- 4) 적절한 경고 안내문이 붙어 있어야 함.

▶ 참고자료 3 ; Absolute contraindications(10)

- 1) Electronically, magnetically, and mechanically activated implants: cardiac pacemakers
- 2) Ferromagnetic or electronically operated stapedial implants
- 3) Hemostatic clips (CNS)
- 4) Metallic splinters in the orbit(눈에 이물질이 들어간 경우)

▶ 참고자료 4 ; Relative contraindications (10)

- 1) Electronically, magnetically, and mechanically activated implants: other pacemakers for the carotid sinus, insulin pumps and nerve stimulators; lead wires or similar wires
- 2) Non-ferromagnetic stapedial implants
- 3) Cochlear implants
- 4) Prosthetic heart valves(in high fields, if dehiscence is suspected)
- 5) Hemostatic clips in body
- 6) Makeup and tattoos
- 7) Congestive heart failure
- 8) Pregnancy
- 9) Claustrophobia

▶ 참고자료 5 ; 관련 용어 정리

- 1) Ferromagnetic materials(강자성체)
 - the "normal" form of magnetism which most people are familiar with, as exhibited in horseshoe magnets and refrigerator magnets
- 2) Ferrimagnetism(준강자성)
 - ferrimagnetic material is one in which the magnetic moment of the atoms on different sublattices are opposed, as in antiferromagnetism
- 3) Paramagnetism(상(항상)자성)
 - paramagnetism is a form of magnetism which only occurs in the presence of an externally applied magnetic field.
- 4) Magnetic susceptibility

- the degree of magnetization of a material in response to an applied magnetic field.

5) Diamagnetism(반자성)

- a form of magnetism that is only exhibited by a substance in the presence of an externally applied magnetic field.
- the result of changes in the orbital motion of electrons
- Materials that are said to be diamagnetic are those which are usually considered by non-physicists as "non magnetic",
- include water, DNA, most organic compounds such as oil and plastic, and many metals such as mercury, gold and bismuth.

6) Static magnetic field and spatial gradient

- magnetic bore의 자장은 0.2~4.0 T까지 다양하며 주변 자장의 감소가 매우 급격하게 일어나며 bore 주변에서 일어난 자장의 변화를 spatial gradient라 함
- spatial gradient 때문에 자화될 수 있는 물질은 magnetic bore에 가까이 가져가면 총알처럼(projectile) 당겨지게 됨
- 당기는 힘 즉 translation force가 작용한다
- * static magnetic field는 device의 배열에 따라 다르나 자장과 같은 방향을 취하려는 변형 Torque가 작용한다(뒤틀리게 된다).

7) Five gauss line

- MR scanner 주변으로 5 gauss 이하 구역
- 일반 사람들에게 안전하다고 여기고 있음

8) MR compatible

- 어떤 device가 MR 기계 주변에서 사용되었을 때 영상을 왜곡시키거나 자체 기능이 떨어지지 않는 경우

9) MR safe

- no additional risk to the patient, but may affect the quality of the diagnostic information

10) MR environment

- MR scanner 주변, 5 gauss line 안쪽
- Static magnetic field (0.2~1.5 T), associated spatial gradients
- Rapidly changing magnetic fields(imaging gradients~kHz)

- Radiofrequency magnetic field pulses(MHz)

11) Active device

- medical device that can only serve its intended use with the supply of power

12) Passive device

- Medical device that serves its function without the supply of power

- Aneurysm clips, shunts, scapels, IV poles, oxygen bottles

13) Specific absorption rate (SAR)

- Measure of the absorption of electromagnetic energy in the body (watts per kilogram W/kg)

14) Time rate of change of magnetic field dB/dt

- Rate of change of the magnetic flux density with time (tesla/second)

참 고 문 헌

1. Budinger TF. MR safety: past, present, and future from a historical perspective. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 1998; 6:701-714
2. Shellock FG, Crues JV. MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. *Radiology* 2004; 232:635-652
3. Schenck JF. Safety of strong, static magnetic fields. *J Magn Reson Imaging* 2000; 12:2-19
4. Lanners DM, Amrami KK, Jonsgaard RS, Gisvold JJ, Felmlee JP. Safety and MRI artifact evaluation at 1.5 T of metallic mounting sheath of a marking clip inadvertently deployed at stereotactic biopsy. *AJR Am J Roentgenol* 2004; 183:825-829
5. Klucznik RP, Carrier DA, Pyka R, Haid RW. Placement of a ferromagnetic intracerebral aneurysm clip in a magnetic field with a fatal outcome. *Radiology* 1993; 187:855-856
6. Prato FS, Nicholson RL, Smith M, Drost DJ. Hazards and associated recommendations for Canadian MR imaging sites. *Can Assoc Radiol J* 1986; 37:233-237
7. Sommer T, Naehle CP, Yang A, et al. Strategy for safe performance of extrathoracic magnetic resonance imaging at 1.5 tesla in the presence of cardiac pacemakers in non-pacemaker-dependent patients: a prospective study with 115 examinations. *Circulation* 2006; 114:1285-1292
8. Shellock FG, Fieno DS, Thomson LJ, Talavage TM, Berman DS. Cardiac pacemaker: in vitro assessment at 1.5 T. *Am Heart J* 2006; 151:436-443
9. Buecker A. Safety of MRI-guided vascular interventions. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2006; 15:65-70
10. Rinck P. Safety of Patients and Personnel in: *Magnetic Resonance in Medicine*. 4th ed. Berlin Vienna: Blackwell Science 2001:213-224
11. Vogt FM, Ladd ME, Hunold P, et al. Increased time rate of change of gradient fields: effect on peripheral nerve stimulation at clinical MR imaging. *Radiology* 2004; 233:548-554
12. Schaefer DJ, Bourland JD, Nyenhuis JA. Review of patient safety in time-varying gradient fields. *J Magn Reson Imaging* 2000; 12:20-29
13. Schaefer DJ. Safety aspects of switched gradient fields. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 1998; 6:731-748
14. Schaefer DJ. Safety aspects of radiofrequency power deposition in magnetic resonance. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 1998; 6:775-789
15. Kanal E, Gillen J, Evans JA, Savitz DA, Shellock FG. Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiology* 1993; 187:395-399