

중재적 시술을 위한 개방형 MRI 시스템

Open MRI System for Interventional Operation

조 민 형

경희 대학교 동서 의학대학원 의료공학 전공

I. 서론

1970년대 말, MRI가 시작된 이래로 수없이 많은 기술적 진보가 이루어져 초창기에 우려되었던 많은 문제점들은 해결되었고 더 나아가 새로운 기능이 계속적으로 개발되어 그 진단 영역을 확장하고 있으며 앞으로도 이 추세는 계속될 것으로 전망된다. 이러한 최근의 노력 중 괄목할 만한 한가지는 중재적(interventional) 시술을 위한 MRI 시스템의 개발이라고 할 수 있다. 영상 진단 장치 중에서 내시경, 조영술 등은 촬영과 동시에 외과적 시술이 이루어져 정확한 시술에 이미 많은 도움을 주고 있지만 단층 촬영을 통하여 인체의 내부 단면을 수술과 동시에 실시간으로 관찰할 수 있다면 수술의 최소침습도(minimal invasion)와 정확도 등에 획기적인 발전을 가져올 수 있게 될 것이다.

MRI 기술의 발전은 이 중재적 시술을 단지 꿈으로만이 아니라 현실적으로 가능함을 확인해 주고 있다. 특히, MRI는 기존에 알려진 바대로 해부학적 영상 뿐 아니라 화학적 특성을 영상화 할 수 있기 때문에 육안으로는 확인하기 어려운 병변을 정확히 파악하도록 해줄 수 있어서 더욱 그 가치를 높이고 있다. 이 아이디어는 80년대 후반부터 시작되었으나 90년대 중반에 들어서서 실용적인 시스템의 개발이 이루어졌고 일부 임상적 시도가 활발히 진행되어 2000년대에 들어서서 상용 MRI 시스템의 커다란 줄기가 될 것을 부인하는 사람은 아무도 없다. 당연히 GE, Siemens, 히다치 등, 세계 유수의 MRI 시스템 메이커들은 앞을 다투어 이를 개발하고 있으며 국내에서도 이를 위한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 이 중재적 시술용 MRI 시스템은 기존의 시스템에서는 고려할 필요가 없는 여러 가지 새로운 기술적 난제들이 있어서 이를 해결하여야 하기 때문에 상용화 및 범용화를 위해서는 좀더 많은 연구를 요구하고 있다.

본 고에서는 중재적 시술용 MRI 시스템에서 고려되어야 할 기술적인 난제와 그 해결을 위한 접근 방법 등에 대하여 고찰하고자 한다.

II. 중재적 시술용 MRI 시스템

중재적 시술을 위한 MRI 시스템은 수술을 행하는 외과의가 환자에게 접근해야 하고 그와 동시에 촬영 스캔이 진행되어야 하기 때문에 환자 공간의 개방성이 무엇보다도 중요하다. 모든 시스템의 설계가 이를 최대한 확보하는 것을 첫번째 과제로 취급하지만 그렇다고 해서 영상의 질을 현저히 훼손해서는 안되기 때문에 기술적 어려움이 있게 된다. 각 부분별로 고려되어야 할 사항과 해결을 위한 접근 방법들에 대하여 서술하기로 한다.

주자석

MRI 시스템에서 가장 중심이 되는 부분으로 주자석은 세기와 균일도, 촬영 공간 등으로 그 성능을 결정한다. 물론, 원가 면에서도 가장 많은 비중을 차지하는 부분이다. 중재적 시술용 MRI 시스템은 환자를 외과의에게 노출시키고 수술이 용이하도록 공간을 확보해야 하기 때문에 기존의 폐쇄적인 원통형 초전도 주자석은 사용이 불가능하다. 그래서 다양한 형태의 자석 설계가 시도되고 있는데 미국 GE사의 경우, 그림 1처럼 두 개의 도넛형 0.5T 초전도 자석을 나란히 배열하고 도넛 사이에 의사가 환자에게 접근할 공간을 제공하는 MRT 모델을 출시하였고 많은 임상적 실험을 수행하였다. 이 형태는 기존의 MRI 시스템과 아주 유사하고 균일한 주자장을 보장하면서도 도넛 사이가 58 cm로서 의사에게 접근 공간을 충분히 제공하는 장점을 가지고 있으나 가격이 매우 비싸 일반적이지 못하다.

최근의 개방형 자석은 그림 2와 같이 영구 자석을 이용하여 C형으로 제작하고 한쪽을 제외한 세면을 개방하는 형태가 일반적이다. 이러한 형태는 폐쇄 공포증 환자를 위하여 비교적 일찍이 개발되기 시작하였는데 히다치, Siemens 등 대부분의 메이커들이 채택하고 있으며 GE도 최근에는 제품을 내놓고 있다. 국내에서도 삼성 종합 기술원에서 이러한 형태의 주자석을 독자적인 설계로 제작하여 시도하고 있다. 영구 자석은 희토류 재료의 개발로 0.3 T세기의 전신용 자석을 어렵지 않게 제작할 수 있게 되었고, 전자 회로 기술의 발달로 SNR 역시 강자장의 초전도 시스템 못지않게 확보할 수 있게 되었다. 또한, 원통형 자석과 달리 자계 방향이 수직이어서 고주파 코일의 감도가 우수하고 개방형의 고주파 코일의 설계가 용이하다.

그러나, C 형태의 자석 설계가 Iron Yoke로 인해서 본질적으로 비대칭이기 때문에 자계의 불균일성을 가져오게 되고, 환자 공간을 넓히기 위해서는 자장 세기의 저하 내지는 고가의 희토류 자석 재료의 추가 부담을 감수해야 하는 어려움이 있어서 고도의 설계 기술을 요구한다. 또, 와전류(eddy current) 문제와 10t 가까운 무게, 온도에 따른 자장의 변화도 역시 고려되어야 할 사항이다.

이 외에도 다양한 형태의 개방형 주자석이 시도되고 있는데 C형의

변형인 그림 3과 같은 Y 형 그리고 4면 접근을 위한 H형도 있으며 미국 FONAR 사의 경우는 그림 4와 같이 아예 방 전체에 설치하여 모든 방향을 개방한 극한적인 모델도 시도하고 있다.

하지만 아무리 자석 기술이 발전하여 개방성을 높인다 하더라도 공간이 제한될 수 밖에 없기 때문에 모든 부위, 모든 방식의 수술을 수행하기는 어려울 것이다. 따라서 biopsy와 같은 비교적 적은 공간으로 가능한 것부터 시도되고 있으며 또, 환자를 자석으로부터 꺼내어 수술을 하고 수술 도중 촬영을 하기 위해 다시 자석 내부로 밀어 넣을 수 있도록 환자 침대의 움직임이 정확하고 용이한 방식을 채택한 절충안도 나오고 있다.

경사 자계 코일 및 고주파 코일

경사 자계 코일(Gradient Coil)은 영상의 공간적 왜곡을 억제하기 위하여 그 선형성이 매우 중요하고 경사 자계의 세기, 역시 성능을 결정하는 요소이다. 기존의 MRI 시스템에서는 대칭적인 원통형에 X, Y, Z 세 가지 코일을 장착하는 방식으로 비교적 선형성을 확보하기 쉬운 구조였다. 개방형 주자석에 장착되어야 하는 경사 자계 코일은 주자석의 모양과 똑 같은 형태로 제작되어야 개방성이 보장되기 때문에 설계상의 어려움이 있게 된다. 가장 일반적인 형태의 개방형 주자석인 C형의 경우, 경사 자계 코일도 C형의 프레임에 제작되어야 하고 상하면이 공히 평면인 구조를 가지게 된다. 평면에 코일을 감아 X, Y, Z 세가지 직교하는 선형 경사 자계를 만들어야 하기 때문에 기존의 코일과는 완전히 다른 설계 방식을 사용하여야 한다. 이러한 방식의 경사 자계 코일은 마치 손의 지문과 같은 모양을 가지면 가능하다는 것이 이론적 고찰과 컴퓨터 모의 실험을 통하여 밝혀져 있다. 그림 5가 이러한 경사 자계 코일의 한 예를 보여 주고 있다. 복잡한 수식으로 이러한 형태를 유도할 수 있는데 컴퓨터 수치 제어 기계를 이용하여 제작된다.

그러나 아무리 우수한 설계라 하더라도 기존 MRI 시스템과 마찬가지로 선형성이 완벽하지 않기 때문에 영상과 실제 위치에 있어서는 미세한 차이가 있게 마련이며 영상 인도(Image-guided) 수술과 같이 아주 정확한 위치가 문제되는 수술의 경우 실시간 보정 작업이 필요하다. 이 보정은 미리 위치 좌표 기준 팬텀을 이용하여 영상과 실제 위치 차이의 map을 준비해 두고 이를 기준으로 하여 영상을 보정함으로써 이루어진다.

경사 자계 코일과 더불어 고주파 코일도 주자석 내의 환자 주위에 장착되는 부분으로 영상의 SNR에 결정적인 역할을 한다. 주어진 MR 신호를 최대한 검출해 내기 위해서는 고주파 코일은 인체에 좀더 가까이에서 감긴 형태가 되어야 한다. 하지만 이 역시 개방형이라는 현재의 목표에는 어긋나기 때문에 일부 타협 점을 찾아야 한다. 기존의 원통형 고주파 코일의 한쪽

면을 개방한 형태로 설계하거나 단지 1회만을 가늘게 감아 환자의 부위가 노출되도록 하는 방법을 사용한다. 또, surface 코일의 형태나 혹은 환자의 내부에 삽입하는 형태도 이용된다. 당연히 일부 SNR의 손실은 감수되어야 할 것이다.

고속 영상법과 스캔 제어

MRI는 초기부터 긴 영상 촬영 시간이 타 영상 진단기에 비하여 결정적인 단점이었다. 이를 위해 다양한 방법들이 시도되었고 많은 진보가 있었다. 임상적으로 널리 사용되는 영상법 중에서도 비교적 시간이 10여분이 걸리던 T2 가중 영상도 고속 스핀 에코 영상법의 개발로 인하여 1분밖에 걸리지 않을 정도로 단축되었다. 실시간 영상법도 오래 전에 개발된 EPI 영상법이 실용화되어 제한된 범위 내에서 임상적으로 가치를 인정 받고 있다.

중재적 수술을 위한 MRI 시스템은 수술 중에 부위를 관측하고자 하는 것이 목적이므로 촬영 시간이 길어지면 사실상 사용이 어려워진다. 그리고 영상의 질도 병변 혹은 수술 과정을 충분히 관측할 수 있을 정도로 보장되어야 하기 때문에 더욱 어려움이 있다. 여러 영상법들 중에서 비교적 실용적인 고속 영상법은 고속 gradient echo 영상법일 것으로 기대된다. 빠른 TR로 인하여 1초 이내에 촬영이 가능하면서도 어느 정도의 화질을 쉽게 제공할 수 있기 때문이며 고주파 펄스의 flip angle과 sequence의 변형으로 영상의 성질도 조정할 수 있는 장점도 있다. 또, 수술 도중에 정밀한 영상이 필요할 경우 1분 남짓의 시간은 잠깐 기다릴 수 있다면 고속 스핀 에코 영상법도 효과적일 것이다. 가장 폭 넓게 사용되면서 그 임상적 가치가 인정되는 영상법이기 때문이다.

이러한 영상법들을 적절히 적용하기 위해서 수술 도중, 연속적으로 영상이 촬영되고 도시 되면서도 의사의 지시에 따라 파라미터를 즉각적으로 바꿀 수 있는 강력한 스캔 컨트롤러의 기능이 요구된다. 의사는 필요에 따라 해상도와 영상이 바뀌는 속도, 단면의 방향, 기타 영상 파라미터를 interactive 하게 바꿀 수 있어야 한다.

호환성(수술기구, 디스플레이, 환자보조장치)

MRI의 주자석은 워낙 강한 자기장을 일으키므로 환자 주위에 쇠붙이와 같은 자성체를 가까이 하지 못하는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 자성체는 자기장에 의한 강한 인력 때문에 위험하기도 하지만 또한 주자기장의 균일성을 깨뜨려 MR 영상의 화질에도 영향을 주기 때문에 매우 조심하여야 한다. 하지만 중재적 수술을 위한 MRI 시스템에서는 단지 촬영만이 이

루어지는 것이 아니고 수술이 병행하여 진행되므로 여러 보조 장비 및 수술 도구가 환자 가까이 있을 수 밖에 없다. 수술용 가위 및 칼과 같이 작은 것부터 생명 유지 장치 및 모니터링 장비들이 사용되어야 하는데 기존 수술용은 상당히 철과 같은 자성체가 많이 포함되어 있다. 또, 강한 자기장이 장비들의 동작에 이상을 일으킬 수도 있다. 이러한 장비들은 중재용 MRI를 위해서는 당연히 비자성체로 이루어진 MR 호환 장비로 대체되어야 하며 이미 장비 및 도구 업체들로부터 대부분 개발되어 상용되고 있다.

이외에 수술하는 의사가 MR 영상을 수술 중에 가까이 볼 수 있는 영상 디스플레이 모니터가 시스템에 부착되어 있어야 하는데 LCD와 같이 자계에 영향 받지 않는 모니터가 사용된다.

III. 결론

중재적 시술을 위한 MRI 시스템은 최소 침습을 통한 수술을 가능하게 하면서도 시술의 정확도를 향상시키는 많은 장점을 보여주게 될 것이므로 MRI 시스템의 새로운 지평을 열게 될 것이다. 이를 구현하기 위해서는 여러 기술적 난제를 해결하여야 하는데 무엇보다도 외과의가 최대한 환자에 접근할 수 있는 개방성이 제일 중요하다. 이를 위해 기존의 폐쇄적인 원통형 주자석보다는 C 형의 영구 자석이 보편적으로 사용되고 있으며 자석의 균일성을 확보하면서도 최대한 환자를 노출시킬 수 있는 형태로 설계되어야 한다. 이 주자석의 설계가 가장 핵심적인 기술적 노하우라 할 수 있다. 뿐만 아니라 개방형 경사 자계 코일과 고주파 코일도 기존 형태와는 전혀 다른 새로운 설계를 요구한다. 소프트웨어적으로는 비교적 실시간 영상 촬영 및 도시가 연속으로 이루어질 수 있는 고속 영상법의 개발이 화질을 보장하면서 이루어져야 한다. 마지막으로 수술용 장비와 환자 생명 연장 장치 및 계측기가 자석에 영향을 주지도 받지도 않는 MR 호환성을 가져야 한다. 이러한 기술적 난제들은 이미 상당히 해결되어 가고 있으며 조만간 임상적 응용에 폭 넓게 활용할 수 있을 정도로 발전할 것으로 전망한다.

이상과 같이 중재적 시술을 위한 개방형 MRI 시스템을 위하여 필요한 여러 가지 기술적 사항들에 대하여 서술하였다. 중재적 시술용 MRI 시스템은 분명 차세대 MRI 시스템으로서 각광을 받게 될 것이고 고자장 초전도 시스템과 더불어 새로운 시장을 형성하게 될 것이다. 또 아직은 개발이 완료되지 않아 시장이 성숙되지 않았으므로 MRI 기술이 이미 많이 확보되어 있는 국내 현실에서 기술적인 연구와 임상적 연구가 병행된다면 충분히 경쟁력 있는 분야로 평가된다.

참고 문헌

1. R.B. Lufkin, *Interventional MRI*, Mosby, 1999.
2. F.A. Jolesz and I.R. Young, *Interventional MR: Techniques and clinical experience*, Mosby, 1998.

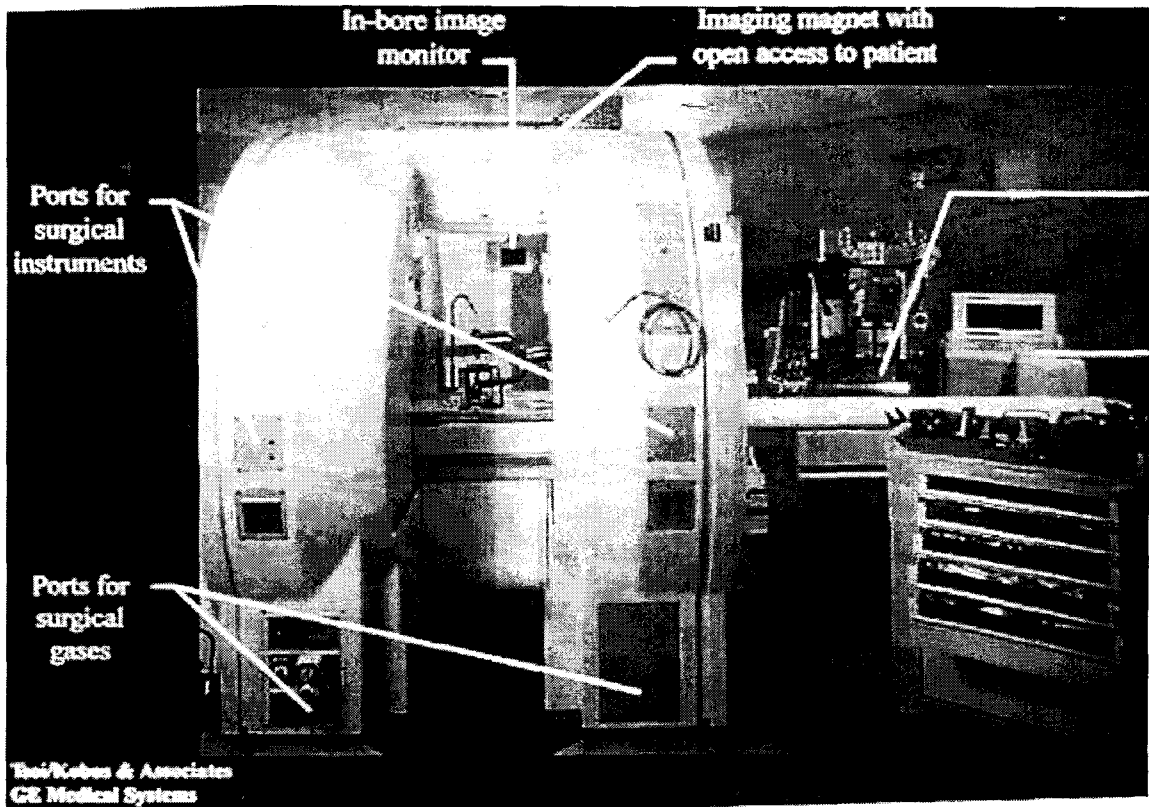


그림 1. GE사의 이중 도넛형 Open Magnet

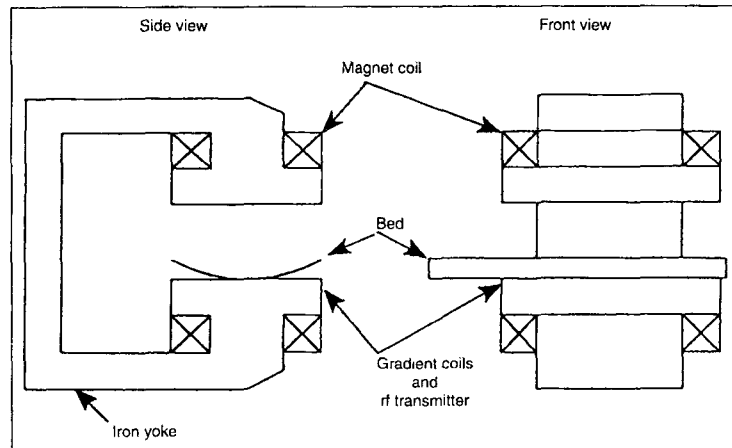


그림 2. C형 Open Magnet

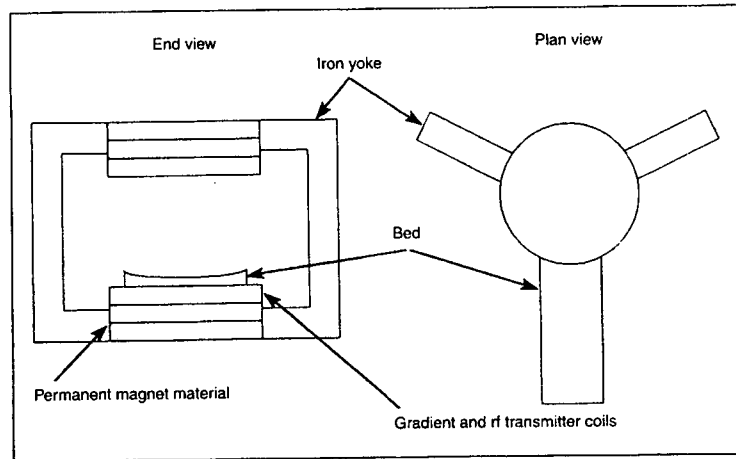


그림 3. Y형의 Open Magnet

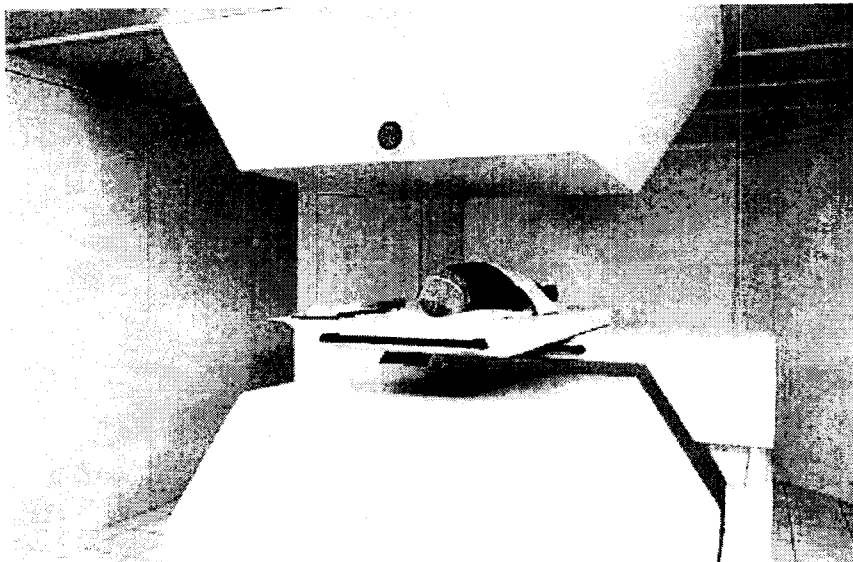


그림 4. FORNA사의 Open Magnet

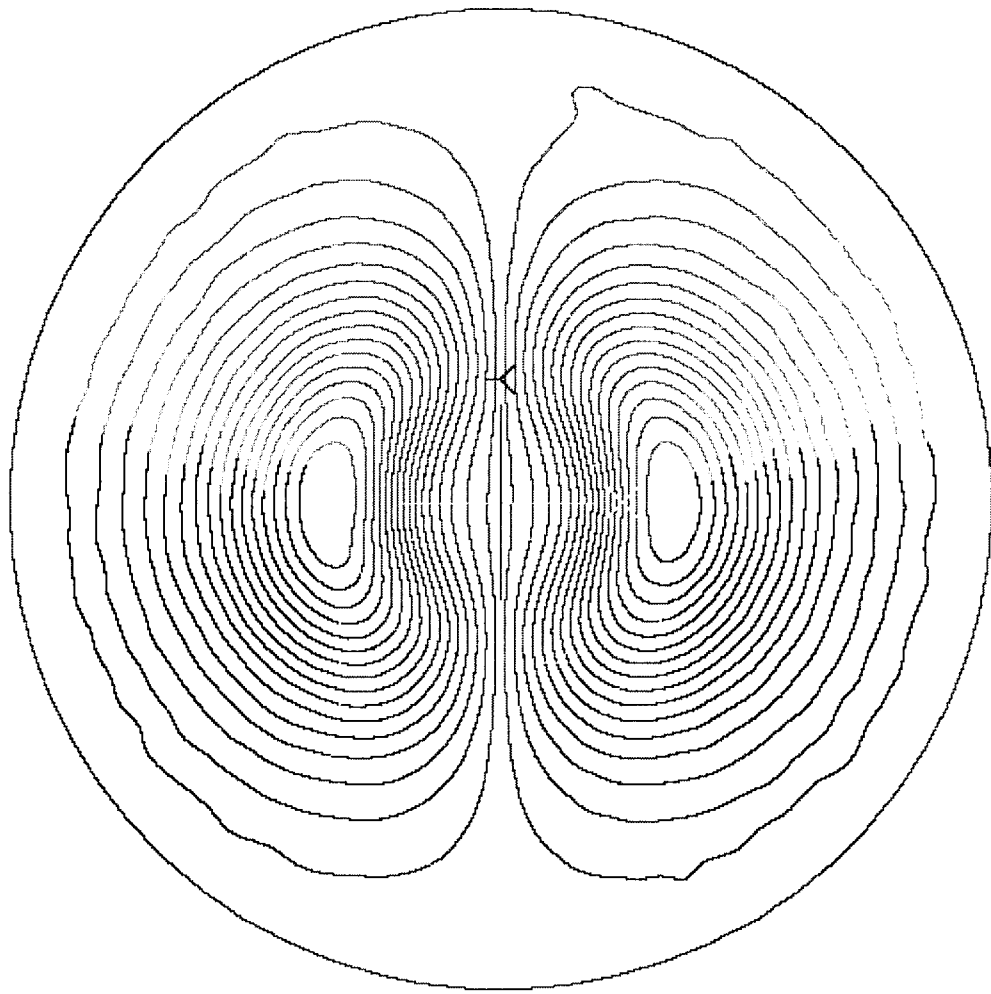


그림5 . 개방형 MRI 시스템을 위한 평면형 경사자계 코일의 예