

1.5T MRI용 Ferro-magnetic shimming 장치 개발

심기덕, 배준한, 고락길, 진홍범, 권영길
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Development of Ferro-magnetic Shimming System for 1.5T MRI Magnet

K.D.Sim.

Korea Electrotechnology Research Institute.

skedy@keri.re.kr

Abstract - Two methods can be used to correct the undesirable magnetic field of MRI. One is active shimming method and the other is ferro-magnetic shimming. Ferro-magnetic shimming method is more inexpensive, more convenient in operation and more effective on correcting magnetic field. So, nowadays, it is the general method for shimming the commercialized MRI magnet. We have developed a 1.5T MRI magnet and its ferromagnetic shimming system. Using the ferro-magnetic shimming system, we have improved the field homogeneity of the 1.5T MRI magnet.

1. 서 론

MRI와 같은 고균등 자장을 요구하는 기기는 제작오차 및 주변환경에 의한 자장 불균일을 보정해 주는 장치와 그에 관련된 과정이 필수적이다. 수동보정(ferro-magnetic shimming)은 마그넷의 자장에 의해 수동적으로 자화된 shim (철편)들이 만들어내는 2차 자계의 중첩에 의해 불균일성을 제거하는 방식이며, 초기 자장의 획득 과정, shim의 개수와 배치될 위치를 예측하는 과정, 그리고 실제로 shim을 배치하는 과정으로 이루어진다.

자장의 균일도는 MRI의 성능을 판단하는 지표로서 이의 향상은 결국 MRI의 성능향상의 중요한 부분이다. 한국전기연구원에서 1.5T MRI의 국산화에 성공하였으며 이 과정에서 필연적으로 수동보정장치가 연구되었다. 연구결과 자장균일도가 획기적으로 향상되는 결과를 얻었다. 본 논문에서는 이 수동 보정시스템의 제작과정과 원리 그리고, 성능평가 결과를 소개한다.

2. 본 론

2.1 수동보정의 원리 및 구조

2.1.1 원리

Fig. 1과 같이 상온 bore 상에 shim이 놓이면, 외부자장에 의해 철편들이 자화되고 자화된 철편들은 shim field(B_s)를 만들어 낸다. 이 B_s 가 field points에서 불균일한 외부자장 B_f 와 합산된다. shim의 위치와 개수를 잘 조정하여 각 field point에서의 불균일한 자장을 제거하는 것이 수동보정(passive shimming)이다.

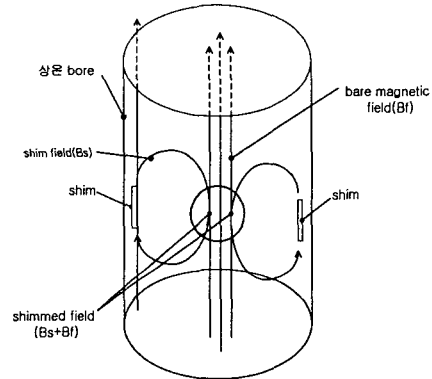


Fig. 1. Basic concept of passive shimming

2.1.2 하드웨어 구성

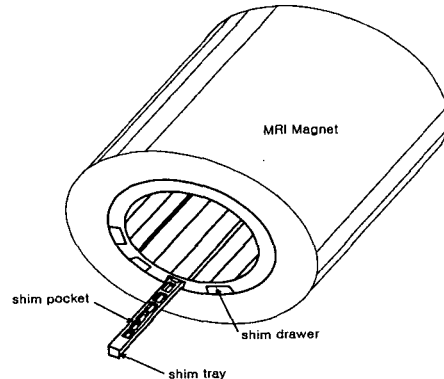


Fig. 2. Hardware of passive shimming

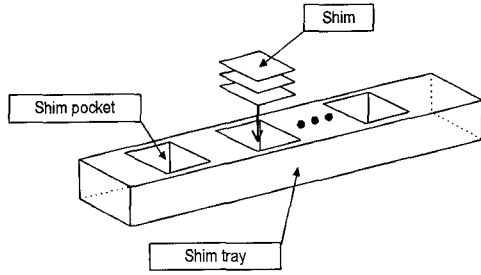


Fig. 3. Shim trays, pockets and shims.

수동보정의 하드웨어는 shim drawer, shim tray, shim pocket, shim 등으로 구성된다. [1] shim drawer는 상온 bore상에 원주방향으로 고정, 배열되며 여기에 shim tray를 삽입한다. shim tray 상에는 여러 개의 shim pocket이 설치되며 이 shim pocket에 shim들을 삽입 고정한다. shim은 얇은 판형의 철판으로 외부자장에 의해 자화되어 이차 자계를 만들어 내는 부분이다. Fig.2과 Fig3은 수동보정용 하드웨어에 대한 개략도이다.

2.2 수동보정 장치의 제작

본 수동보정 장치에는 원주방향으로 15도 간격으로 shim tray가 삽입될 24개의 shim drawer가 설치된다. shim drawer의 재질은 비자성 물질인 알루미늄으로 제작되며 마그네트 내벽에 steel epoxy 개열의 비자성 접착제를 사용하여 접합된다. 접합 응고 시간동안 형태를 유지하기 위해 강철 jig를 사용한다. 아래의 Fig.4는 마그네트 내벽에 접착되어 응고를 기다리고 있는 shim drawer의 모습이다.

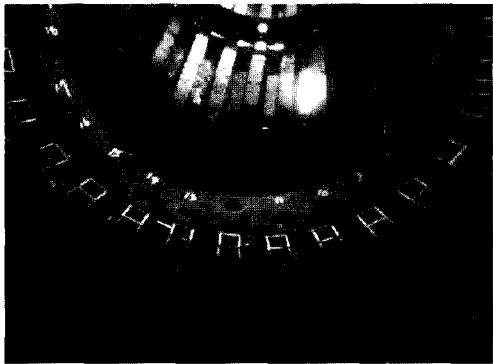


Fig. 4. Shim drawers

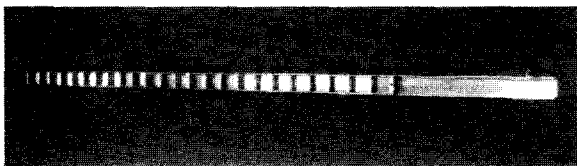


Fig. 5. Shim tray

shim drawer에 삽입될 shim tray 역시 알루미늄으로 제작되며, 축방향으로 24개의

pocket을 가지고 있다. 아래 Fig. 5는 완성된 shim tray의 모습이다.

Shim(자화 철판)들은 폭 3cm, 높이 4cm, 두께 0.25mm의 규소강판으로 제작되며, 동일한 자화 특성을 유지하도록 동일한 철판에서 잘려진 철판들을 사용한다. 사용된 규소강판의 포화 자장강도는 2.15T이다.

수동보정 장치는 일반적으로 gradient coil과 마그네트의 내벽 사이에 설치된다. 아래 Fig. 6은 제작이 완료되어 gradient coil, RF coil을 모두 설치한 상태의 MRI 상온 bore의 모습이다.

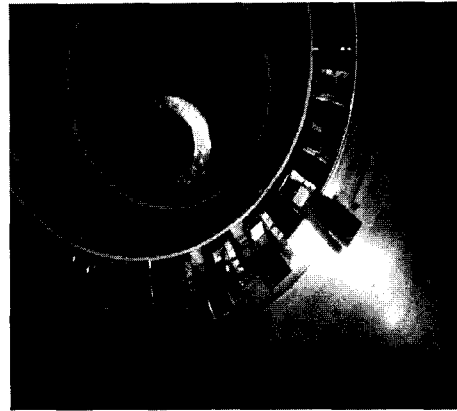


Fig. 6. Ferro-magnetic shimming system, gradient coil and RF coil

2.3 수동보정의 구현

2.3.1 Shim field map의 구성

수동보정의 첫 단계는 각 shim들이 field points에 미치는 영향을 나타내는 값들의 모임인 shim field map을 구성하는 것이다. 만약 shim들 강한 외부자장에 노출되어 완전히 포화된다고 가정하면 Fig. 7과 같이 철판의 끝(P)에 N극을 형성하게 되고, 철판은 마치 자기쌍극자처럼 행동하게 된다. 이 때 P지점의 자극강도는 식 (1)와 같다. [2]

$$P = \frac{B_s A}{\mu_0} \quad \text{식(1)}$$

$$B_z(\rho, \phi, z) = \frac{\mu_0 P (Z_s - Z)}{4\pi [(Z_s - Z)^2 + \rho^2 + \rho^2 - 2\rho_s \cdot \rho \cdot \cos(\phi - \phi_s)]^{3/2}} \quad \text{식(2)}$$

여기에서 B_s 는 철판의 포화유도자계(본 철판은 2.15T)이고, A는 철판의 단면적이다. 위의 식 (1)를 이용하여 철판의 N극이 외부에 발생시키는 자장을 계산하면 식 (2)과 같다. 이 식은 N극에 대해 계산된 것이며, S극에 대해서는 부호만 달리하여 계산하고 이를 합산하면 실제 field map을 구성할 수 있다. Fig. 7은 원통좌

표계에서 shim과 field point와의 관계를 나타낸 그림이다.

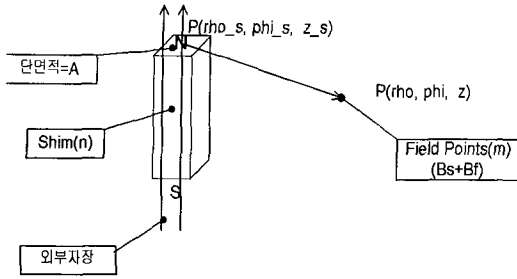


Fig. 7. Magnetic field produced by magnetized shims

식(2)는 단면적이 철판의 길이에 비해 매우 작을 경우에만 그 정확도를 신뢰할 수 있다. 실제 시스템에서 이 식이 사용될 수 있는지를 검증하기 위해, 전자장 해석 프로그램인 OPERA 3D를 사용하여 철판에 의한 자장 패턴을 계산하였다. z축의 중심을 기준으로 좌우 24개의 pocket에 철판이 각각 하나씩 들어 있다고 가정하였다. 그리고 철판의 두께는 $7.50E-6m^2$ 이고 폭은 3cm, 높이는 4cm, 포화 자장값은 2.15T로 설정하였으며, pocket은 상온보아의 중심축에서 반경 39.25cm 떨어진 위치에 환형으로 배열하고 있는 것으로 가정하였다. 이는 본 연구에서 실제 사용할 철판의 특성과 동일한 값이다. 철판의 중심이 z축의 중심에서 2.5cm 떨어진 경우에서 시작하여 철판의 중심을 4.5cm씩 증가시키면서 (0.1m, 0.1m, 0.1m)의 field point에의 자장강도를 위의 식과 OPERA-3d를 이용하여 각각 계산하였다. 결과 두 경우의 계산 값이 아주 잘 일치함을 알 수 있었다.

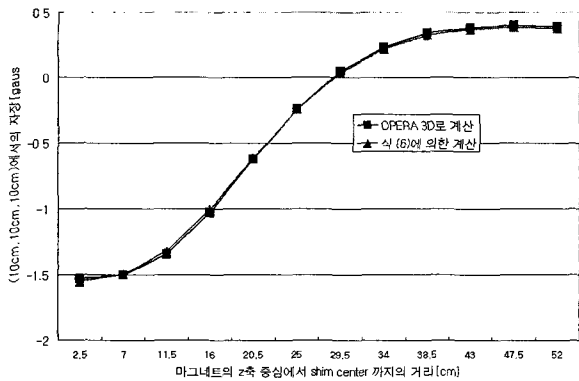


Fig.8. Magnetic fields calculated with OPERA-3d and equation(2) at (10cm,10cm,10cm)

2.3.2 초기 자장 값 측정

자장보정전의 초기자장은 DSV 표면을 따라 측정된다. 이때 NMR probe가 장착된 field mapping system이 사용된다. 0.1ppm 이내의 오차 범위에서 측정된 자장값들을 이용하여 초기 자장 패턴인 'field map'을 구성한다.

2.3.3 최적화 기법

Passive shimming에는 linear programming 혹은, least square method가 최적화 기법으로 주로 사용된다. 여기에서는 linear programming을 사용하여 최적화 과정을 수행하였다. Linear programming은 제한 (constraints)조건 내에서 목적함수를 최소화 (minimize)시키는 변수값들(x's)을 찾는 것이며, 목적함수와 제한조건들이 변수들에 대한 선형적인 합의 형태로 주어지는 경우의 문제에 적용된다. 각 field point에서의 자장의 증감은 각 철판들이 만들어내는 자장값의 선형적인 합산이므로, passive shimming에 linear program을 적용할 수 있다. 본 연구에 사용된 최적화 방법을 목적함수, 제한조건, 변수제한 등의 순서로 설명한다.

(가) 목적함수

passive shimming 과정에서는 각 shim pocket에 위치시킬 shim(철판)의 개수가 변수로 설정되는 것이 일반적이다. 여기에 자장 허용 오차(T)를 추가한다. 본 passive shimming과정의 목적함수는 식 (3)과 같다.

$$\min \sum_{k=1}^n x_k + aT \quad \text{식 (3)}$$

여기에서 n은 전체 pocket의 개수이고, a는 weighting factor로서 최적화 과정에서 shim들의 총 개수(x_k)를 최소화하는 데에 비중을 둘 것인지 아니면, 자장오차(T)를 최소화하는데 비중을 둘 것인지를 결정하는 값이다. n은 전체 pocket의 개수와 일치한다. 최적화 과정의 결과 얻어지는 변수값 x_k 는 각 pocket에 위치해야 할 철판의 개수를 의미한다. 실제 사용될 철판이 설치 불가능할 정도의 무게는 아니므로 x_k 보다는 T에 비중을 두어 목적함수를 설정한다.

(나) 제한조건

자장균일도를 향상시키기 위해서, 각 field point의 자장값과 평균자장(B_{mean})의 차이가 특정값(tolerance) 이내에 머물도록 제한 조건을 설정한다. 각 field point에서의 자장값은 shimming 이전에 측정된 자장값(B_j)과 shim들에 의해 더해진 자장값(B_s)의 합이다.

Tolerance는 field point의 자장값과 평균자장값과의 차이로, 자장균일도를 좌우하는 값이다. 이 값은 자장허용 오차(T)와 수용가능 오차(E)의 합으로 주어진다. 수용가능 오차(E)는 목적하는 자장균일도에 관련되는 상수로 자장의 단위로 입력한다. 평균자장으로 표현된 B_{mean} 은 초기자장의 평균값이 아니라, 최적화과정의 수행 중에 자동으로 계산되는 값으로 하나의 변수 역할을 한다. 그러나, 목적함수에 포함되지는 않는다. 일반적으로 보정 이후의 평균자장값은 초기

자장값 보다 작아지는 특징을 보이는데, 이는 철판들이 초기자장과 반대 방향의 자장을 DSV 영역 내에 발생시키기 때문이다. 만약, 평균자장값을 초기자장의 평균 혹은, 중심 자장값으로 고정시킬 경우, 본 최적화 tool은 수렴하지 않거나 수렴하더라도 잘못된 해를 구해낸다. 위에서 언급된 T와 마찬가지로 B_{mean} 역시 수렴을 돕는 역할을 보조하게 된다. 아래의 식 (4)는 임의의 field point m에 대한 제한조건을 표현한 식이다. 본 최적화 과정에서 기본적인 제한조건은 아래와 같이 m개이다. 이는 field points의 개수와 일치한다. 식 (5)는 n 개의 shim pocket 각각에 x_n 개의 shim이 배치되었을 때, field point m에 추가되는 자장을 의미하며, 이 식에서 a_1, a_2, \dots, a_n 들은 위에서 계산된, 각 shim이 field point에 미치는 영향 즉, shim field map을 의미하는 값이다

$$\begin{aligned} -\frac{T}{2} - \frac{E}{2} &\leq B_{f1} + B_{s1} - B_{mean} \leq \frac{T}{2} + \frac{E}{2}, \\ -\frac{T}{2} - \frac{E}{2} &\leq B_{f2} + B_{s2} - B_{mean} \leq \frac{T}{2} + \frac{E}{2}, \\ &\vdots \\ -\frac{T}{2} - \frac{E}{2} &\leq B_{fm} + B_{sm} - B_{mean} \leq \frac{T}{2} + \frac{E}{2}, \end{aligned} \quad \text{식 (4)}$$

$$B_{sm} = a_{1m}x_1 + a_{2m}x_2 + \dots + a_{n-1m}x_{n-1} + a_{nm}x_n \quad \text{식 (5)}$$

(다) 변수제한

각 shim pocket에 위치할 shim의 개수 즉, 최적화 과정의 변수 x는 pocket에 설치할 수 있는 shim의 개수가 한정됨에 따라 특정값 이하로 제한되어야 한다. 따라서, 변수 x는 '최대 위치 가능한 shim의 개수' 이하로 제한된다.

2.4 수동 보정 결과

실제 MRI 마그네트에 제작된 수동보정 시스템을 설치하고, shim field map 계산, 초기자장 획득, 최적화 과정, shim의 실제 배치, 보정된 자장패턴 측정의 순차적인 과정을 거쳐, 개발된 수동 보정 시스템에 대한 성능을 평가하였다.

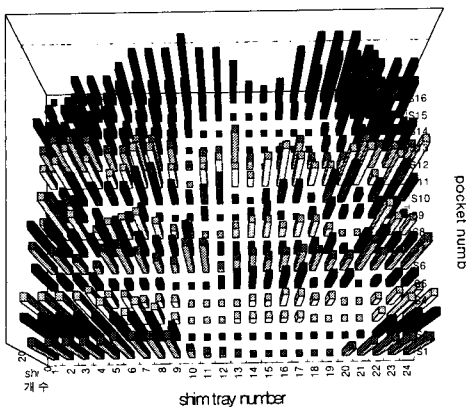


Fig. 9. Number of shims in each shim pocket

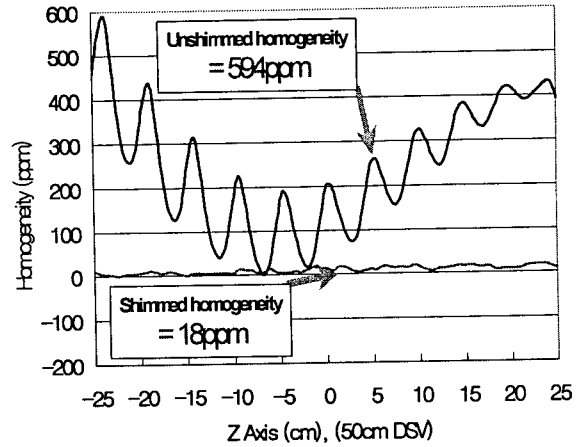


Fig. 10. Shimmed Magnetic field

50cm DSV위의 162개의 점에서 초기자장을 측정하였으며, 동일점에 대한 자장보정을 수행하였다. 초기자장의 균일도는 594ppm이었으며 이때의 자장 패턴은 Fig. 10에 표시되어 있다. 이 데이터를 출발점으로 수동보정을 실시하여 영상촬영이 가능한 수준인 18ppm까지 향상시키는데 성공하였다. 24개의 pocket중 16개만 사용하였으며, 각 pocket의 최대 철판수는 25개로 제한하였다. Fig. 9는 철판의 배치를 보여주는 그래프이다. 총 소비된 철판의 개수는 약 3800여 개이다.

3. 결 론

본 연구를 통해 상용화급 초전도 MRI에 적용될 수 있는 수준의 수동 보정장치(ferro-magnetic shimming)장치를 개발하였다. 이 장치의 적용을 통해 MRI 마그네트의 자장균일도를 크게 향상시킬 수 있는 간편하고 신뢰성 있는 방법에 대한 기술을 습득하였다. 이 기술은 차세대 MRI인 3.0T급 이상의 장치에도 약간의 수정을 거쳐 적용될 수 있을 것이며, 또 다른 보정방법인 '상전도보정' 기술의 개발에도 기여 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술·의료공학 기술개발 사업(HMP-98-G-1-015)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. Dorri and M.E.Vermilyea, "Passive shimming of MR magnets: Algorithm, hardware, and Results", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol 3, No1, March 1993
- [2] A.Belov, V.Bushuev, "Passive shimming of Superconducting Magnet for MRI", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol 5, No2, June 1995