

자화 철편을 이용한 초전도 마그넷의 자장 보정

심기덕, 배준한, 진홍범, 고락길, 권영길, 류강식
한국전기연구소 초전도 응용연구 그룹

Magnetic Field Correction Using Magnetized Shims

Kideok Sim, Joon Han Bae, Hon Beam Jin, Rock Kil Ko, Young Kil Kwon
Korea Electrotechnology Research Institute, ASL

skedy@keri.re.kr

Abstract - Generally, two methods can be used to correct the undesirable magnetic field of MRI. One is active shimming method and the other is passive shimming. Passive shimming method uses many magnetized shims to correct the field. And it involves hardwares for supporting shim trays and a software to calculate a field map and optimize the locations of the shims[1]. The software is the most important part of the passive shimming system. We made a prototype of the software and tested it in a virtual situation.

1. 서 론

MRI와 같은 고균등 자장을 요구하는 기기에 는 제작오차 및 주변환경에 의한 자장 불균일을 보정해 주는 장치와 그에 관련된 과정이 필수적이다. 자장의 보정 방식에는 초전도 보정 코일들을 사용하는 능동보정(active shimming)과 여러 개의 철편을 마그넷 외부 혹은 bore에 설치하는 수동보정(passive shimming)의 두 가지 방법이 있다. 수동보정은 마그넷의 자장에 의해 수동적으로 자화된 shim(철편)들이 만들어내는 2차 자계의 중첩에 의해 불균일성을 제거하는 방식이다. 수동보정은 능동보정에 비해 적은 경비로 구현이 가능하고, 신뢰도 또한 비교적 높은 편이다. 이러한 수동보정은 초기 자장의 획득 과정, shim 개수와 배치될 위치를 예측하는 과정, 그리고 실제로 shim을 배치하는 과정으로 나눌 수 있다. 이 세 과정 중 두 번째 과정이 가장 중요하며, 이 과정을 수행하는 프로그램의 정확도에 따라 자장 균일도의 개선 정도가 결정된다. 그러나, 수백 개에 이르는 shim들의 조합이 만들어내는 자장패턴의 경우의 수가 무수히 많은 관계로, 자장의 불균일성을 정확히 제거하도록 하는 shim의 위치와 두께에 대한 수식적인 해를 찾는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 최적화 기법이 이 과정에 관여하게 된다. 본 논문에서는

수동보정 시스템의 제작에 앞서 예비실험의 성격을 갖는 간단한 형태의 수동보정 프로그램을 제작하여 가상실험을 수행하였다. 그 결과 자장 균일도가 크게 향상되는 결과를 얻었다.

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.

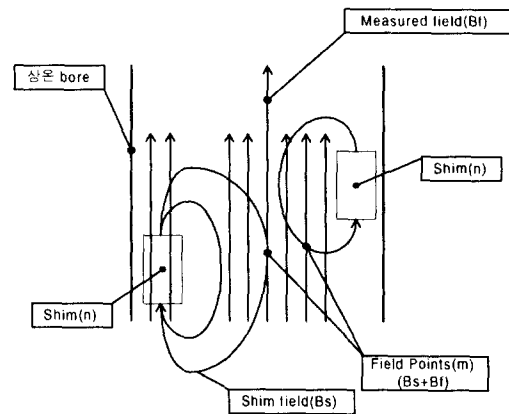


Fig. 1. Basic concept of passive shimming

2.1.2 하드웨어 구성

수동보정의 하드웨어는 shim drawer, shim tray, shim pocket, shim 등으로 구성된다. 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.2는 수동보정용 하드웨어에 대한 개략도이다.

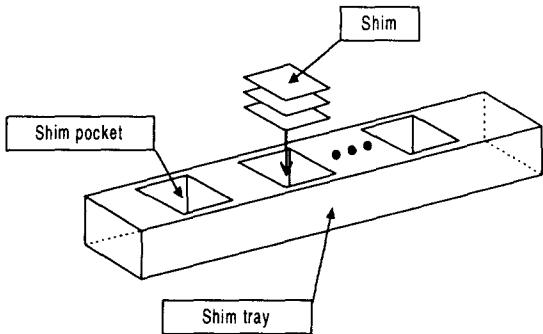


Fig. 2. Hardware of passive shimming

2.2 수동보정의 구현

2.2.1 알고리즘

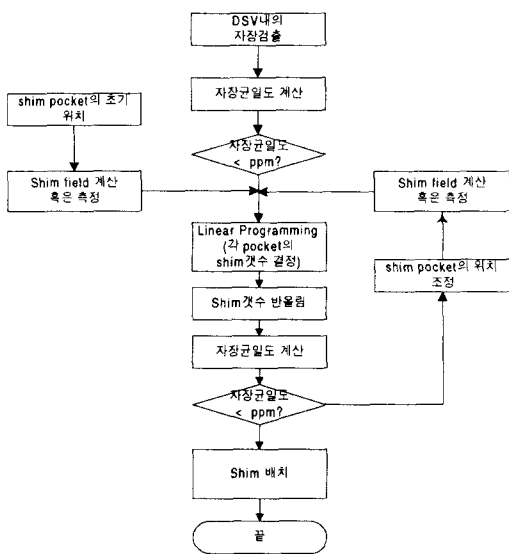


Fig. 3. Algorithm of passive shimming

수동보정 과정에 대한 개략적인 알고리즘은 Fig. 3과 같다. 우선, DSV 내부 혹은 표면 위에서 임의의 점(field point)을 선정하여 자장을 측정한다. 측정된 자장의 균일도가 목표값 이하이면 shimming과정을 종료한다. 균일도가 목표값 이상이면, 측정점의 좌표와 자장값으로 field map을 구성하여 최적화 tool에 넘겨주고 최적화 과정을 수행한다. 최적화 과정에서 필요한 또 하나의 field map은 각각의 shim이 발생시키는 자장이 각 field point 미치는 영향을 나타내는

shim field map이다. 이 shim field map은 하나의 shim(철판)을 모든 shim pocket에 번갈아 넣으면서, 각 field point에서의 자장을 측정하는 방법으로 만들기도 하고, 혹은 수치해석적인 방법(FEM)을 사용하여 계산하기도 한다. Shim field map이 정밀하게 작성될수록 프로그램상에서 계산된 균일도와 실제 shim을 배치한 상태에서의 균일도가 잘 일치하게 된다. 전체 shim의 개수를 최소화하는 것을 목적으로, 그리고 각 field point에서의 균일도가 목표 균일도 이하가 되는 것을 제한조건으로 하여 최적화 과정을 수행한다. 초기상태에서는 shim pocket을 넓은 간격으로 배치하며, 최적화 과정을 거쳐서 균일도가 향상되지 않을 경우 shim pocket 간의 간격을 줄여 가면서 최적화 과정을 반복한다. 균일도가 목표한 값에 도달하면 최적화 결과에 따라 실제 shim을 배치한다.

2.2.2 최적화 기법

수동보정에는 linear programming 혹은, least square method가 최적화 기법으로 주로 사용된다. 여기에서는 linear programming을 사용하여 최적화 과정을 수행하였다. Linear programming의 목적은 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 각각의 passive shim들이 field point에 미치는 영향의 선형적인 합산이므로, passive shimming에 linear program을 적용할 수 있다. 그러나, linear programming의 경우 자장균일도 자체를 목적함수로 두는 것에는 어려움이 따른다. 실제로 자장균일도는 제한조건들에 의해 최소화되며, 목적함수로는 전체 shim의 개수를 설정하는 것이 일반적이다.

· 목적함수

Linear Programming의 목적함수(Objective function, $f(X)$)는 식 (1)과 같이 n 개의 변수(x)들(variables)의 선형적인 합으로 주어진다.

$$f(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad \text{식(1)}$$

$$= \sum_{k=1}^n C_k x_k$$

수동보정 과정에서는 각 shim pocket에 위치시킬 shim의 개수가 변수로 설정된다. 그리고 n 은 shim pocket의 개수를 의미한다. 목적함수로는 전체 shim 개수의 합을 설정하므로, 계수(C_n)은 모두 1로 설정해야 한다. Passive shimming 과정의 목적함수를 다시 쓰면 식 (2)와 같다.

$$\min \sum_{k=1}^n x_k \quad \text{식(2)}$$

• 제한조건

각 field point의 자장값과 평균자장 (B_{mean})의 차이가 특정값(tolerance, T)이내에 머물도록 제한 조건을 설정한다. 각 field point에서의 자장값은 shimming 이전에 측정된 자장값 (B_f)과 shim들에 의해 추가된 자장 (B_s)의 합으로 구성된다. tolerance는 field point의 자장값과 중심자장과 차이로, 자장균일도를 좌우하는 값이다. 식 (3)은 임의의 field point m에 대한 제한 조건을 표현한 식이다.

$$\begin{aligned} B_{fm} + B_{sm} - B_{mean} &\leq \frac{T}{2}, \\ B_{fm} + B_{sm} - B_{mean} &\geq -\frac{T}{2} \\ \Leftrightarrow B_{sm} &\leq B_{mean} - B_{fm} + \frac{T}{2}, \\ -B_{sm} &\leq -B_{mean} + B_{fm} + \frac{T}{2} \end{aligned} \quad \text{식(3)}$$

$$B_{sm} = a_{1m}x_1 + a_{2m}x_2 + \dots + a_{n-1m}x_{n-1} + a_{nm}x_n \quad \text{식(4)}$$

식(4)는 n 개의 shim pocket 각각에 x_n 개의 shim이 배치되었을 때, field point m에 추가되는 자장을 의미한다. 즉 shim field map을 의미하는 식이다. m 개의 field point에 대해 모두 2m개의 제한 조건이 필요하며, 이 제한 조건들은 행렬식의 형태로 프로그램에 입력된다.

• 변수제한

각 shim pocket에 위치할 shim의 개수(X)가 최적화 과정의 변수가 된다. pocket에 shim이 위치할 필요가 없을 경우 X값은 0이 되며, 이 값이 변수 X의 하한값으로 설정된다. 그리고, pocket이 수용할 수 있는 최대 shim의 개수가 변수 X의 상한값이 된다. 최적화과정의 결과로 도출된 X값들은 모두 이 상한과 하한 사이의 값을 갖게 된다.

2.3 수동보정 결과

2.3.1 Shim field map의 구성

각 shim이 field point에 미치는 영향을 나타내는 shim field map을 구성하기 위해서는 실제로 shim을 배치하여 자장을 측정하거나, shim에 대한 전자장해석을 수행해야 한다. 여기에서는 두 번째 방법을 적용하여 shim field map을 구성하였다.

shim들이 강한 외부자장에 노출되면 이들은 완전히 포화되어 Fig. 4와 같이 철편의 끝(P)에 N극을 형성하게 되고 철편은 마치 자기쌍극자처럼 행동하게 된다. 이 때 P지점의 자극강도는 식 (5)와 같다.[2]

$$P = \frac{B_s A}{\mu_0} \quad \text{식(5)}$$

$$B_z(\rho, \phi, z) = \frac{\mu_0 P(Z_s - Z)}{4\pi [(Z_s - Z)^2 + \rho^2 + \rho^2 - 2\rho \cdot \rho_s \cdot \cos(\phi - \phi_s)]^{3/2}} \quad \text{식(6)}$$

여기에서 B_s 는 철편의 포화유도자계이고, A는 철편의 단면적이다.

위의 식 (5)를 이용하여 철편의 N극이 외부에 발생시키는 자장을 계산하면 식 (6)과 같다. 이 식은 N극에 대해 계산된 것이며, S극에 대해서는 부호만 달리하여 계산하면 된다. 하나의 철편이 외부에 발생시키는 실제 자장은 N극과 S극에 의한 자장값을 합산하면 계산할 수 있다. Fig. 4는 원통좌표계에서 shim과 field point와의 관계를 나타낸 그림이다.

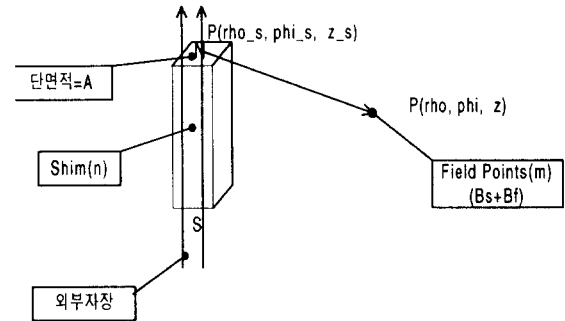


Fig. 4. Magnetic field produced by magnetized shims

2.3.2 입력값

Shim pocket은 Z=-0.9m에서 Z=0.9m 사이에 10cm 마다 하나씩 총 19를 배치하였으며, Phi 방향(원주방향)으로는 60도 마다 하나씩, 총 6개의 shim tray를 배치하여 전체 shim pocket의 개수가 144가 되게 하였다. Z축에서 shim pocket까지의 거리는 30cm로 가정하였다. 각 shim의 Z방향 길이는 3cm, 단면적은 1 cm^2 , 포화 자장은 2.15T로 설정하였다. Field point로는 Z축상의 11개의 점을 선정하여 각 지점에서의 자장값을 임의로 입력하였으며, 이 자장값으로 계산된 균일도는 1301.88 ppm이었다. 각 field point에서의 자장값은 Fig. 5와 같다. 목적하는 peak to peak 자장값은 0.1gauss로 설정하였다. 최적화 과정에서 사용된 제한 조건의 개수는 총 22개이며, 변수의 개수는 144개이고, 변수의 하한은 0 상한은 10으로 설정하였다

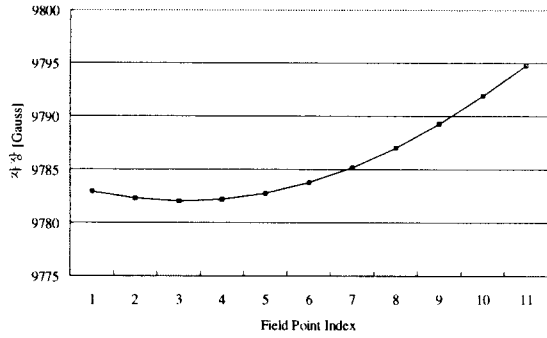


Fig. 5. Bare magnetic field (not shimmed)

2.3.3 보정결과

자장 균일도를 목적하는 값까지 향상시키기 위해 필요한 shim의 총 개수는 66개로 계산되었다. 최적화 과정에서 계산되는 shim의 개수는 실수(real number)로 계산되며, 실제 shim을 배치하기 위해서는 반올림 과정을 거쳐야 한다. 총 66개의 shim을 배치하였을 때 예측되는 자장 분포는 Fig. 6과 같다.

반올림 이전의 자장균일도는 10.22ppm으로 보정 이전의 자장균일도 1301.88의 1/130정도로 상당히 개선된다. 그러나 반올림된 shim의 개수를 사용하여 shim을 배치한 결과 자장균일도는 264.78ppm으로, 반올림 이전 상태에 비해 상당히 악화되는 것을 확인 할 수 있다. 이런 문제는 마그넷 중심에 가장 가까이 위치한 shim의 개수를 반올림하여 설치한 후, 이 때의 자장을 획득하여 shimming 과정을 다시 수행하고, 이미 설치된 shim을 제외한 나머지 shim중 마그넷 중심에 가장 가까운 shim을 반올림하여 설치하는 과정 일련의 과정을 반복하는 방식으로 해결할 수 있다.

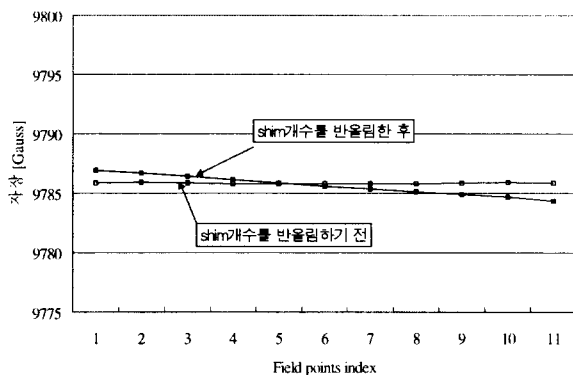


Fig. 6. Magnetic field after shimming

3. 결론

수동보정 방법에 대한 일반적인 이론과 실제 적용방법에 대해 연구하였으며, 이를 기초로 최적화 과정을 포함하는 수동보정용 프로그램을 제작하였다. 프로그램은 수정 및 다른 기능의 추가

를 용이하게 하기 위하여 다수의 sub-routine들이 조합되어 있는 형태로 제작되었다. 그리고, 사용자의 편의를 위해 GUI기능을 채택하였다. 제작된 프로그램을 사용하여 가상으로 설정된 상황에서 보정 작업을 수행한 결과 자장균일도가 향상됨을 확인하였다. 그리고 프로그램자체의 정상적인 작동여부를 확인하였다. 연구과정과 프로그램의 적용과정에서 몇 가지 개선이 필요한 부분이 발견되었다. 이 예비실험용 프로그램을 실제 full system에 적용하기 위해서는 다음과 같은 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

- 착탈식 passive shim 구조물의 설계 및 제작
- shim pocket의 위치를 가변할 수 있는 passive shim 구조물의 설계 및 제작
- mapper와의 interface 구축
- 3차원 FEM을 이용한 shim field의 계산
- 최적화 과정의 속도향상을 위한 방법 모색
- least square method를 이용하거나 혹은, linear programming 기법을 수정하여 multi objective function 최적화 기법 개발
- shim의 반올림에 의한 오차발생의 최소화 방법 연구

본 연구는 보건복지부의 선도기술·의료공학 기술개발사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

[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