pISSN 1229-3008 eISSN 2287-6251
Progress in Superconductivity and Cryogenics
Vol.23, No.4, (2021), pp.39~43 https://doi.org/10.9714/psac.2021.23.4.039

Design of ferromagnetic shims for an HTS NMR magnet using sequential search method

Hongmin Yang [a,b], SangGap Lee[b], and Minchul Ahn[a,*]

[a] *Kunsan National University, Jeonbuk, Gunsan, Korea*
[b] *Korea Basic Science Institute, Chungbuk, Cheongju, Korea*

(Received 8 December 2021; revised or reviewed 22 December 2021; accepted 23 December 2021)

Abstract

This study deals with the ferromagnetic shims design based on the spherical harmonic coefficient reduction method. The design method using the sequential search method is an intuitive method and has the advantage of quickly reaching the optimal result. The study was conducted for a 400 MHz all-REBCO magnet, which had difficulty in shimming due to the problem of SCF (screening current induced field). The initial field homogeneity of the magnet was measured to be 233.76 ppm at 20 mm DSV (Diameter Spherical Volume). In order to improve the field homogeneity of the magnet, the ferromagnetic shim with a thickness of 1 mil to 11 mil was constructed by a design method in which sequential search algorithm was applied. As a result, the field homogeneity of the magnet could be significantly improved to 0.24 ppm at 20 mm DSV and 0.05 ppm at 10 mm DSV.

Keywords: ferromagnetic shimming, NMR magnet, sequential search method, shimming design

1. INTRODUCTION

상업적으로 이용되고 있는 대부분의 고해상도 NMR (Nuclear Magnetic Resonance) 자석은 저온초전도체 사용에 의존하고 있다. 그러나 일반적으로 사용되고 있는 NbTi, Nb_3Sn 등의 저온초전도체는 약 21 T 이상의 자기장에서 임계전류가 급격하게 감소하기 때문에 기존의 NMR 자석은 1 GHz(23.5 T)를 초과할 수 없다[1, 2]. 또한, 헬륨자원의 고갈문제로 인한 급격한 가격 상승도 고려해야 할 사항이다. 따라서, 고온초전도자석에 대한 기술 개발이 필요하다. 고온초전도자석은 충전 중 발생되는 차폐전류 유도자기장의 영향으로 자기장의 공간 균일도가 크게 저하되는 점과 기존의 능동 보정코일에 의한 자기장마저 차폐되기 때문에 능동 보정기법을 적용하기 까다로운 문제가 생기는 점으로 인해 자기장의 공간 균일도를 보정하는 난이도가 높다[3−6]. 본 연구에서는 2세대 고온초전도자석에 적용할 수 있는 수동보정기법에 대해 연구하였다. NMR 자석의 자기장 균일도를 개선하여 고해상도 품질을 달성하기 위해 자기적 중심으로부터 특정 좌표에 대한 자기장의 세기를 측정 또는 시뮬레이션을 진행하여 구형 고조파 계수 상쇄기법을 적용한다[7−11]. 강자성체 수동보정세트는 총 960개의 요소로 구성되어 있으며, 설계는 요소의 두께에 따른 배열을 의미한다. 상업적으로 수동보정기법용 강자성체가 1 mil(=0.0254 mm) 단위로 판매되고 있기 때문에 모든 요소는 정수의 값으로 구성해야 한다. 기존의 설계방식은 비선형 제약조건 최적화 알고리즘 중 하나인 SQP(Sequential Quadratic Programming)을 주로 이용하여, 보정용 강자성체의 최적 위치와 두께를 계산한다. 그러나 이러한 방식의 설계 결과는 소수점을 포함하고 있으며, 이를 제작이 가능하도록 정수로 변환하는 과정이 필수적이다. 정수화 과정은 목적함수의 손실을 동반하기 때문에, 목적함수의 손실을 최소화 하면서 정수화 하는 것이 복잡하고 시간이 많이 소요된다. 반면에 본 연구에서 제안하는 순차탐색법을 이용한 설계방법은 정수로 탐색이 가능하기 때문에 정수화로 인한 손실이 발생하지 않고, 직관적이며 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다[12]. 본 연구에서는 순차탐색법을 통해 보정세트의 각 요소별 부착 여부 및 두께를 선정하여 수동보정기법을 적용하고 시뮬레이션을 통해 설계방법을 검증한다.

* Corresponding author: mcahn@kunsan.ac.kr

2. FERROMAGNETIC SHIMS DESIGN

2.1. Spherical harmonics and field mapping

자석의 중심 근처 특정 좌표에서의 자기 포텐셜 Φ는 자석의 중심 부피에서 라플라스 방정식의 해로 표현될 수 있다[10]. 자석의 자속밀도의 축성분은 자기 포텐셜 Φ를 미분하여 (1)과 같이 계산할 수 있다. 일반적으로 z축을 따라 핵 스핀이 정렬되기 때문에 z 축 자기장 성분이 무한계열 항의 합으로 표현될 수 있고, 구형 고조파 계수는 n과 m이 증가함에 따라 영향력이 감소한다.

$$B_z(r,\theta,\Phi) = \frac{\partial \Phi(r,\theta,\Phi)}{\partial z} \approx \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}(n+m+1)r^n P_n^m(cos\theta) \times (A_{n+1}^m \cos m\Phi + B_{n+1}^m \sin m\Phi) \quad (1)$$

(1)의 r,θ,Φ 는 자기장 측정 좌표이고 n의 크기, 즉 차수에 따라 충분한 수의 위치에 따른 측정 또는 계산 값이 요구된다. 측정된 자기장의 값을 (1)에 대입하여 A_{n+1}^m,

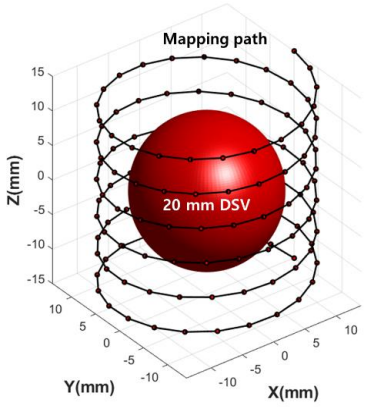

Fig. 1. Mapping path and 20 mm DSV.

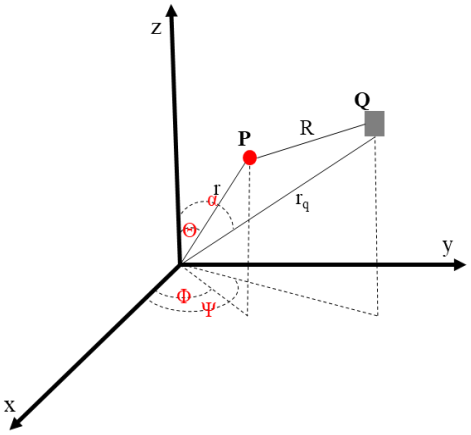

Fig. 2. The magnetic field at P generated by the shim element located at Q.

B_{n+1}^{m}을 계산할 수 있고 이러한 계수들을 구면 고조파 계수 또는 자기장 기울기라고 한다. 자기장 기울기를 계산하기 위해 자석의 내부 공간에 지름 28 mm, 높이 30 mm의 실린더 형태를 나선형으로 6회전하며 128점을 측정 또는 계산할 수 있도록 좌표를 구성한다. 구성된 좌표에 대한 측정 또는 계산된 자기장 세기를 (1)에 대입하여 측정 공간의 자기장 기울기를 근사 과결정 방식으로 계산하며, 내부 영역의 자기장 기울기는 종속되는 것으로 가정한다. 그림 1은 자석 내부의 자기장 측정 경로와 그 중심을 기준으로 20 mm DSV 영역의 표면을 나타냈다. 측정 위치에 따른 자기장의 세기로 20 mm DSV 표면의 자기장 분포를 계산하여 최대값과 최소값의 차이를 통해 자기장의 균일도를 추정한다.

2.2. Ferromagnetic shimming

본 연구에서 사용하게 될 강철과 같은 강자성체는 약 2.1 T의 자기장 세기에서 포화되는 것으로 가정하였으며, 자기 쌍극자와 같은 자기장 분포를 생성한다[10]. 그림 2는 Q점의 강자성체가 P점에 생성하는 자기장의 영향을 나타냈으며 (2)에 대입하여 자화된 강자성체에 의해 생성되는 자기장의 크기를 계산할 수 있다.

$$\boldsymbol{B_z} \approx \mu_0 \frac{\chi dV H_z}{4\pi} \frac{1}{{r_q}^2} \sum_{n=1}^{7} \sum_{m=0}^{n-1} \varepsilon_m \frac{1}{{r_q}^n} \frac{(n-m+1)!}{(n+m)!} \times P_{n+1}^{m}(cos\alpha) r^{n-1} (n+m) P_{n-1}^{m}(cos\theta) \times \cos m(\Phi - \psi)\,\mathbf{z} \quad (2)$$

(2)의 χ와 dV는 강자성 요소의 고유특성과 부피를 의미하며 H_z는 자화된 요소에 의해 생성되는 수평 자기장의 세기를 의미한다. 좌표를 나타내는 변수들은 그림 2에 표현하였다. 자석의 내부에 수동보정기법을 적용하기 위해 자기적 중심위치로부터 축의 방향 3 mm 간격으로 24줄, 방위방향 9도 간격으로 40칸을 구성하였다. 한 개의 요소가 측정 지점들에 생성하는 자기장을 (2)로 계산한 후 (1)을 통해 자기장 기울기를 계산한다. 자석 내부의 관심영역에서 발생되는 자기장 기울기를 상쇄시키기 위해 반대 방향으로 자기장 기울기를 생성하는 보정요소들을 배치하여 균일도를 개선한다.

2.3. Ferro-shims design with sequential search method

순차탐색법은 n개의 변수 중 하나의 변수를 제외한 n−1개의 변수는 고정하여 시작점부터 차례대로 최소 근사점을 개선하는 방법이다. 요소의 영향력에 따라 탐색 방향이 정해지며 각각의 위치에서 최적의 값을 찾는다. n개의 요소와 목적함수의 값을 비교하여 가장 영향력이 강한 요소부터 시작하여 탐색을 진행한다. 시작점으로부터 n번째까지 과정을 진행하는 동안 탐색점을 제외한 n−1개의 변수는 고정한 상태로 최적의 값을 찾는다. 예를 들면, 시작점에서 n−1개의 값을 고정하고 적합한 값을 찾은 후, 두 번째 탐색 지점의 최적을 결정할 때 갱신된 시작점의 값을 포함하여 n−1개의 값을 고정한다. 즉, n번째 과정까지 계속 갱신된 값을 반영하면서 최소 근사점을 개선해가며 진행된다. n번째 과정까지 1회의 반복진행을 마치면 다시 각각의 요소들과 목적함수의 영향력을 비교하고 우선순위를 평가하여 새로운 탐색방향을 설정한 후 n 번의 과정을 반복한다. 순차탐색법을 적용한 수동보정기법의 설계방법은 방향성을 지니고 있기 때문에 시작점과 탐색방향에 영향을 받고, 변수의 개수와 한계치에 의해

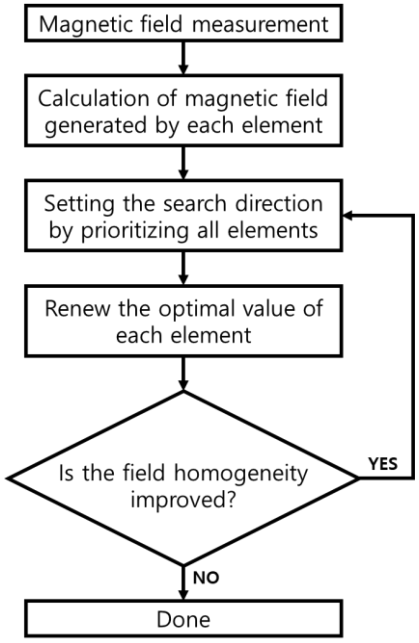

Fig. 3. Flowchart for the ferromagnetic shimming design with sequential search method.

계산 횟수가 결정된다. 그림 3은 설계 과정의 흐름도를 나타냈다. 본 연구의 수동보정기법은 960개의 변수를 이용하기 때문에 상당히 많은 계산이 필요하다. 1회의 진행은 960개의 요소들과 목적함수의 관계에 의한 우선순위를 통해 탐색방향을 결정하고 각 요소들을 1 mil 단위로 조정하며 최적의 값을 찾는 과정으로 이루어 진다. 자세한 과정은 다음과 같다. 1) 보정하기 전의 자기장 분포를 측정을 통해 얻는다. 2) 자화된 철편으로 인해 생성되는 자기장을 각 요소의 위치마다 계산한다. 3) 1 mil 두께의 철편이 요소의 위치마다 균일도에 미치는 영향력을 비교하여 탐색방향을 설정한다. 4) 탐색 방향 순서에 따라 각 요소의 최적값을 갱신하며 균일도를 개선하는 과정을 거친다. 1회 진행을 마치면 이전의 균일도와 비교하여 개선되었다면 다시 3)번 과정으로 돌아와서 새로운 탐색 방향을 설정하는 과정부터 진행한다. 설계코드는 균일도의 개선 정도에 따라 각 요소의 두께를 결정하기 때문에 균일도가 개선되지 않는다면 각 요소의 두께는 이전 회차의 결과와 동일하게 유지된다. 모든 요소가 이전의 진행 결과와 같다면 설계를 종료한다.

3. CASE STUDY ON SHIMMING DESIGN FOR 400 MHz NMR MAGNET

3.1. Field mapping results of the HTS NMR magnet

순차탐색법을 적용한 수동보정기법의 설계방법을 검증하기 위해 400 MHz all-REBCO NMR 자석을 활용하였다[13]. 수동보정기법을 적용하기 위해 앞에서 언급한 방법으로 자기장 분포를 측정하였으며, 측정 경로는 지름 28 mm, 높이 30 mm의 가상 실린더 공간을 나선형으로 6회전하며 128점으로 설정하였다. 측정된 데이터를 (1)에 적용하여 자기장 기울기를 계산하였고, 그 결과 1차 성분 *Z1, X, Y*와 2차 성분 *Z2*가 각각 34331.52 Hz/cm, −12291.33 Hz/cm, −4745.30 Hz/cm, −26750.07 Hz/cm^{2}으로 나타났다. 자기장 기울기를 근거로 자석 내부 20 mm DSV 영역의 균일도를 계산한 결과 약 233.76 ppm으로 추정할 수 있었다. 일반적으로 NMR 기기는 10 mm DSV를 기준으로 0.1 ppm 이내의 공간 균일도를 요구하기 때문에 고온초전도자석에 효과적인 보정 방법 중 하나인 강자성체를 이용한 수동보정기법을 순차탐색법을 통해 설계하는 연구를 진행하였다.

3.2. Process of the ferromagnetic shims design

강자성체 수동보정세트는 직경 62 mm의 알루미늄 실린더에 설치하는 것으로 가정하여 설계를 진행하며, 축방향으로 3 mm 간격으로 24줄, 방위방향으로 9도씩 40칸으로 총 960개의 높이 3 mm 폭 4.87 mm의 강자성체 요소로 구성할 수 있다. 각 요소에 의해 생성되는 자기장을 계산할 때 각 요소마다 4행 9열로 36개의 영역으로 분할하여 (2)를 통해 계산한 후 합하여 한 개의 요소로 만든다. 즉, 34,560개의 요소로 분할하여 계산 후, 960개의 요소로 다시 결합한다. 순차탐색법을 이용하여 설계를 진행하기 위해 각 요소에 의해 발생하는 균일도의 영향을 계산하고 그 영향이 큰 순서대로 배열하여 탐색방향을 정한다. 각 요소의 최초의 값은 0으로 설정하며 탐색방향에 따라 탐색위치를 제외한 나머지 위치의 값을 고정하여 최적값을 찾는다. 이전의 탐색위치의 최적값을 반영하여 960번째 순위까지 탐색을 진행한다. 960회의 1회 진행과정을 마친 후 자기장의 공간 균일도가 이전의 진행과정 이후보다 개선되었다면 갱신된 자기장 기울기를 기준으로 960개 요소의 영향력을 평가하여 탐색방향을 재설정한 후 탐색을 지속한다. 이 과정은 요소들의 값이 이전단계와 완전히 동일하여 더 이상의 균일도 개선이 되지 않을 때까지 반복된다. 자기장의 측정을 시작으로 (1)과 (2)를 이용하여 자기장의 기울기 및 강자성체가 생성하는 자기장의 세기를 계산하여 기울기 성분을 상쇄시키는 반복과정을 통해 설계를 완성한다.

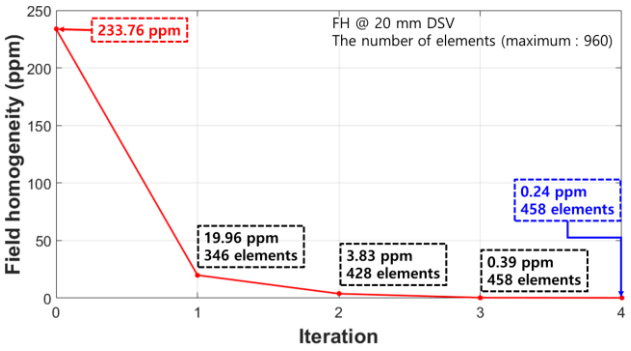

Fig. 4. The design process of improving field homogeneity from 233.76 ppm to 0.24 ppm at 20 mm DSV.

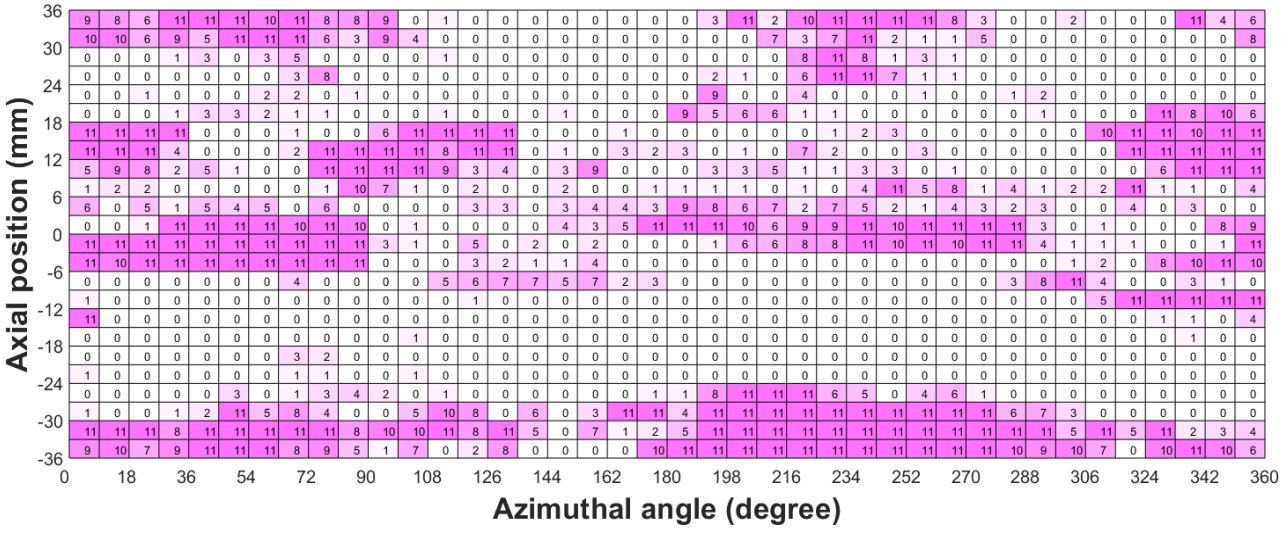

Fig. 5. The ferromagnetic shimming design result consisting of thickness ranging 1 ~ 11 mil.

3.3. Design result and virtual mapping

400 MHz all-REBCO NMR 자석의 균일도는 20 mm DSV 기준으로 233.76 ppm으로 *Z1, X, Y, Z2* 등의 저차 성분들이 큰 값을 나타냈다. 1 mil 두께의 강자성체로 한 요소를 만들었을 때 적용할 수 있는 최선의 *Z1* 기울기는 약 −74 Hz/cm로 34,332 Hz/cm인 초기 상태를 개선하는 것이 불가능하기 때문에 사용할 수 있는 강자성체 중 절삭이 원활한 최대 두께인 20 mil의 강자성체까지 사용할 수 있는 것으로 가정하여 설계하였다. 최대치의 제한에 따라 탐색 방향이 변하게 되어 설계 결과가 달라질 수 있기 때문에 5 mil부터 20 mil까지 제한조건을 변경하여 16 가지의 설계를 진행하였다. 상온 능동보정 방식까지 적용한 NMR 자석의 최종 균일도 목표인 0.1 ppm을 위해 수동보정기법에서의 목표를 1 ppm 이내로 설정하였으며, 4 mil 이하의 요소만으로는 1 ppm 이내의 설계가 불가능하였고 5 mil부터 1 ppm 이내의 설계 결과를 얻을 수 있었다. 5 mil ~ 20 mil까지 제한하여 설계한 결과는 모두 1 ppm 이내에 도달하였으나, 11 mil의 두께로 보정요소를 제한하였을 때 가장 균일도를 크게 개선할 수 있었다. 본 설계를 통해 960번의 과정을 1회 진행한 결과 공간 균일도가 19.96 ppm으로 개선되었고, 2회와 3회를 진행한 결과 각각 3.83 ppm, 0.39 ppm으로 개선되었다. 4회를 진행한 결과 0.24 ppm의 결과를 얻을 수 있었으며, 5회의 결과는 4회차와 동일하게 유지되어 설계를 종료하였다. 반복 과정에 따른 진행 과정 및 20 mm DSV 기준으로 환산한 균일도를 그림 4에 나타냈고 최종 설계안을 평면도로 그림 5에 표현하였다. 설계 결과는 강자성체의 두께에 따라 각각 1 mill 77개, 2 mil 33개, 3 mil 40개, 4 mil 24개, 5 mil 25개, 6 mil 22개, 7 mil 15개, 8 mil 26개, 9 mil 17개, 10 mil 26개, 11 mil 153개로 총 458개의 요소로 구성되어 있다. 표 1은 초기 400 MHz NMR 자석의 자기장 분포를 측정한 결과와 설계 결과를 반영한 시뮬레이션 결과를 나타냈으며, 20 mm DSV의 표면을 축

TABLE I
MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION BEFORE AND AFTER SHIMMING.

FGs	Order	Unit	Measured data	Ferro-shim	After shimming
Z0	0	MHz	400.41	-0.07	400.34
Z1			**34331.52**	-34346.36	**-14.85**
X	1	Hz/cm	**-12291.33**	12289.23	**-2.1**
Y			**-4745.30**	4743.11	**-2.19**
Z2			**-26750.07**	26741.49	**-8.58**
ZX			-2357.74	2352.55	-5.19
ZY	2	Hz/cm^2	-2887.79	2883.85	-3.94
C2			1201.82	-1193.07	8.74
S2			-1633.43	1604.84	-28.59
Z3			2335.07	-2323.65	11.41
Z2X			-2884.93	2901.74	16.81
Z2Y			-4153.34	4135.31	-18.02
ZC2	3	Hz/cm^3	288.56	-310.95	-22.4
ZS2			973.63	-966.59	7.04
C3			-155.24	153.03	-2.21
S3			-201.92	220.31	18.4
Field homogeneity*		ppm	**233.76**	N/A	**0.24**

* The field homogeneity is based on 20 mm DSV. The value converted into the 10 mm DSV is 0.05 ppm after correction at the initial 86.07 ppm.

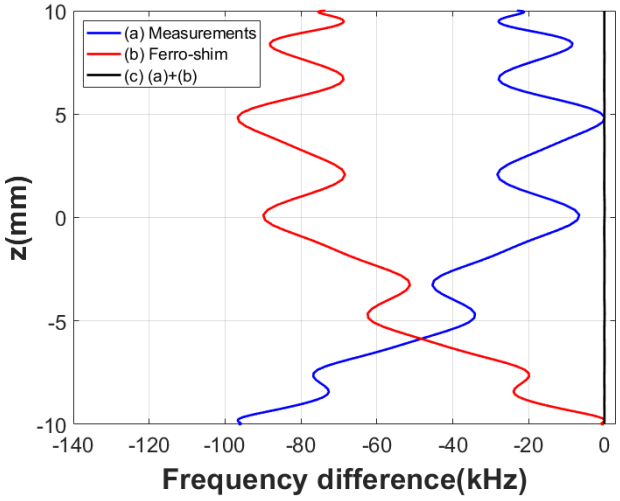

Fig. 6. Frequency difference analysis at 20 mm DSV; (a) measured data before shimming, (b) Calculated magnetic field by ferromagnetic shim, (c) Virtual mapping results after shimming.

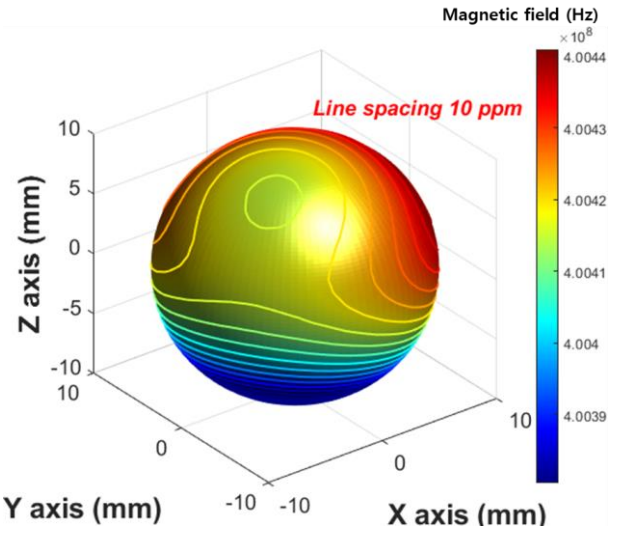

Fig. 7. The magnetic field distribution at 20 mm DSV measured before shimming.

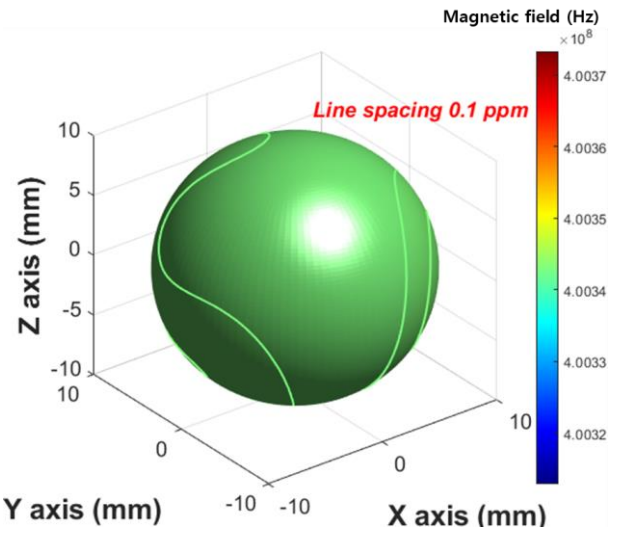

Fig. 8. The magnetic field distribution at 20 mm DSV estimated after shimming.

방향을 기준으로 자기장 세기를 추정한 결과를 그림 6에 나타냈다. 초기 상태의 자기장 기울기 중 다른 성분에 비해 10배 이상 큰 *Z1, X, Y* 성분들이 각각 −14.85 Hz/cm, −2.1 Hz/cm, −2.19 Hz/cm으로 대폭 개선되어 20 mm DSV를 기준으로 최대값과 최소값의 차이로 0.24 ppm, 10 mm DSV를 기준으로 0.05 ppm의 결과를 얻었다. 400 MHz all−REBCO NMR 자석 내부 20 mm DSV영역의 초기 자기장 분포와 설계를 적용한 후 자기장 분포를 그림 7과 8에 각각 나타냈다. 그림 7의 20 mm DSV 표면은 10 ppm 간격으로 구간을 나누어 선으로 표현하였고, 그림 8은 0.1 ppm 간격으로 나누어 표현하였으며, 자기장의 세기는 동일한 범위를 기준으로 표현하였다.

4. CONCLUSION

본 연구는 NMR용 고온초전도자석의 공간 균일도를 개선하기 위한 강자성체 수동보정세트를 순차탐색 알고리즘으로 설계하는 방법에 대해 다루었다. 설계방법의 유효성을 검증하기 위해 400 MHz all−REBCO NMR 자석에 수동보정기법을 적용하여 자기장 분포를 계산하는 시뮬레이션을 진행하였다. 수동보정기법을 적용하기 전의 자기장 측정 결과는 *Z1, X, Y, Z2* 등 저차 성분의 값이 다른 성분들에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, 이로 인한 공간 균일도는 20 mm DSV를 기준으로 233.76 ppm으로 나타났다. 강자성체 수동보정세트의 설계결과는 1 mil ~ 11 mil 두께의 강자성체로 구성되었으며, 24행 40열로 이루어진 960개의 요소 중 458개를 사용하였다. 시뮬레이션을 통해 균일도를 계산한 결과는 20 mm DSV를 기준으로 0.24 ppm, 10 mm DSV 기준 0.05 ppm이었다. 따라서, 본 설계방법을 적용한 수동보정기법만으로 NMR용 고온초전도자석의 공간 균일도를 1 ppm 이내로 개선하는 것이 가능할 것으로 추정되었다. 향후 한 가지 두께의 강자성체 요소로 수동보정세트를 구성하고, 군집화를 진행하여 요소의 크기 및 위치에 대한 제작 오차를 반영하는 설계 방법에 대한 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This works was supported by both the Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety) (Project Number: 1711138068, KMDF_PR_20200901_0063) and KBSI grant C140210. It is partially supported by Institute of Engineering Research of KSNU.

REFERENCES

[1] D. C. Larbalestier, J. Jiang, U. P. Trociewitz, F. Kametani, C. Scheuerlein, M. Dalban-Canassy, M. Matras, P. Chen, N. C. Craig, P. J. Lee, E. E. Hellstrom, "Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields abobe 30 T," *Nature materials*, vol.13, no. 4, pp. 375-381, Mar 2014.

[2] Y. Yanagisawa, R. Piao, S. Iguchi, H. Nakagome, T. Takao, K. Kominato, M. Hamada, S. Matsumoto, H. Suematsu, X. Jin, M. Takahashi, T. Yamazaki, H. Maed, "Operation of a 400 MHz NMR magnet using a (RE:Rare Earth)$Ba_2Cu_3O_{7-x}$ high-temperature superconducting coil: Towards an ultra-compact super-high field NMR spectrometer operated beyond 1 GHz," *J. Magn. Reson.* vol.249, pp.38-48, Dec. 2014.

[3] Seung-yong Hahn, Juan Bascuñán, Woo-Seok Kim, Emanuel S. Bobrov, Haigun Lee, and Yukikazu Iwasa, "Field Mapping, NMR Lineshape, and Screening Currents Induced Field Analyses for Homogeneity Improvement in LTS/HTS NMR Magnets," *IEEE Trans. on Appl. Superconduct*., vol.18, no.2, pp.856-859, Jun. 2008.

[4] Min Cheol Ahn, Tsuyoshi Yagai, Seungyong Hahn, Ryuya Ando, Juan Bascuñán, and Yukikazu Iwasa, "Spatial and Temporal Variations of a Screening Current Induced Magnetic Field in a Double-Pancake HTS Insert of an LTS/HTS NMR magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond*., vol.19, no.3, pp.2269-2272, Jun. 2008.

[5] Seungyong Hahn, Min Cheol Ahn, Juan Bascuñán, Weijun Yao, and Yukikazu Iwasa, "Nonlinear Behavior of a Shim Coil an LTS/HTS NMR Magnet With an HTS Insert Comprising Double-Pancake HTS-Tape Coils," *IEEE Trans. on Appl. Superconduct*., vol.19, no.3, pp.2285-2288, Jun. 2009.

[6] Y. Yanagisawa, Y. Kominato, H. Nakagome, R. Hu, T. Takematsu, T. Takao, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, "Magnitude of the Screening Field for YBCO Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond*., vol.21, no.3, pp.1640-1643, Jun. 2011.

[7] D. I. Hoult, D. Lee, "Shimming a superconducting nuclear-magnetic-resonance imaging magnet with steel," *Rev. of Sci. Inst.*, vol.1, no.56, pp.131-135, Aug. 1984.

[8] Frank X. Li, John P. Voccio, Min Cheol Ahn, Seungyong Hahn, Juan Bascuñán and Yukikazu Iwasa, "An analytical approach towards passive ferromagnetic shimming design for a high-resolution NMR magnet," *Supercond. Sci. Techol.*, vol.28, no.7, p.075006, May 2015.

[9] S. Iguchi, R. Piao, H. Hamada, S. Matsumoto, H. Suematsu, T. Takao, A. T. Saito, J. Li, H. Nakagome, X. Jin, M. Takahashi, H. Maeda, and Y. Yanagisawa, "Advanced field shimming technology to reduce the influence of screening current in a REBCO coil for a high-resolution NMR magnet," *Supercond. Sci. Techol.*, vol.29, no.4, p.045013, Mar. 2016.

[10] Min Cheol Ahn, "Passive shimming design with commercially available rectangular shim sheets on a cylinder for HTS NMR magnets," *Prog. Supercond. Cryogen.*, vol.20, no.2, pp.29-33, jun. 2018.

[11] Jae Young Jang, Young Jin Hwang, Jun Hee Han, Minchul Ahn, Hongmin Yang, Seungyong Hahn, Jeseok Bang, and SangGap Lee, "Reproducibility of the field homogeneity of a metal-clad no-insulation all-REBCO magnet with a multi-layer ferromagnetic shim," *Supercond. Sci. Techol.*, vol.33, no.2, p.025005, Jan. 2020.

[12] H. Glass, and L. Cooper, "Sequential Search: A Method for Solving Constrained Optimization Problems," *Jour. of the ACM*, vol. 12, no.1, pp. 71-82, Jan. 1965.

[13] Kwang Lok Kim, Sangwon yoon, Kyekun Cheon, Jaemin Kim, Hunju Lee, SangGap Lee, Dong Lak Kim, and Seungyong Hahn, "400-MHz/60-mm All REBCO Nuclear Magnetic Resonance Magnet: Magnet Design," *IEEE Trans. Appl. Supercond*., vol.26, no.4, p.4302604, Dec. 2015.