

조화해석 기반의 맵핑을 위한 솔레노이드 코일의 중심위치 추론 알고리즘

An algorithm to infer the central location of a solenoid coil for the mapping process based on harmonic analysis

이우승¹, 안민철^{2,*}, 한승용³, 고태국⁴

Woo Seung Lee¹, Min Cheol Ahn^{2,*}, Seung-yong Hahn³, Tae Kuk Ko⁴

Abstract: Shimming, active and/or passive, is indispensable for most MR (magnetic resonance) magnets where homogeneous magnetic fields are required within target spaces. Generally, shimming consists of two steps, field mapping and correcting of fields, and they are recursively repeated until the target field homogeneity is reached. Thus, accuracy of the field mapping is crucial for fast and efficient shimming of MR magnets. For an accurate shimming, a "magnetic" center, which is a mathematical origin for harmonic analysis, must be carefully defined. Although the magnetic center is in general identical to the physical center of a magnet, it is not rare that both centers are different particularly in HTS (high temperature superconducting) magnets of which harmonic field errors, especially high orders, are significantly dependent on a location of the magnetic center. This paper presents a new algorithm, based on a field mapping theory with harmonic analysis, to define the best magnetic center of an MR magnet in terms of minimization of pre-shimming field errors. And the proposed algorithm is tested with simulation under gaussian noise environment.

Key Words: algorithm, central location, harmonic analysis, magnet homogeneity, mapping.

1. 서 론

NMR, MRI에 대한 응용을 중심으로 초전도 코일을 이용하여 높은 크기와 높은 균일도의 자장 분포를 만들 수 있는 방법에 관한 연구가 여러 연구자에 의하여 진행되어왔다[1-3].

일반적으로 NMR에 사용되는 코일의 자장 분포는 3 cm DSV(Diameter of Spherical Volume)에서 0.1 ppm, MRI의 경우 45 cm DSV에 1 ppm수준의 자장 균일도

를 요구하며 이와 같이 높은 균일도의 자장 분포를 만들 수 있는 코일의 제작은 코일의 형상 설계에서부터 시작된다. 하지만 설계가 아무리 잘 되었다고 하더라도 코일의 제작, 운전 과정에서 설계에 포함되지 않은 오차 요인에 의해 자장 분포의 균일도가 깨질 수 있고 NMR, MRI 응용에 있어 오류를 가져올 수 있다. 따라서 제작된 코일의 자장 분포를 측정하고 본래의 목적에 맞도록 자장의 분포를 수정하는 작업이 반드시 필요하다[2]. 이 때 자장의 분포를 측정하는 과정을 맵핑(Mapping), 자장 분포를 수정하는 작업을 보정(Correcting), 두 과정을 통칭하여 쉬밍(Shimming)이라고 한다.

올바른 보정 작업을 진행하기 위해서는 정확한 맵핑이 진행되어야 하고, 맵핑의 결과를 보정에 이용하기 위해서는 측정된 자장 분포를 서로 독립적으로 보정할 수 있는 성분으로 분리하여 표현하는 것이 일반적이다. 이 때 맵핑의 과정을 통하여 자장의 분포를 표현하는 방법 중 하나로 널리 사용되는 것이 조화해석(Harmonic Analysis)이다[3].

맵핑을 수행할 경우 자장 측정 센서를 코일의 중심을 기준으로 하여 중심 근처의 여러 점으로 움직여 자장을 측정하고, 이 측정된 값을 토대로 조화해석을 수행한다. 이와 같은 작업을 수행할 수 있도록 센서와 센서를 움직이는 장치를 합하여 맵퍼(Mapper)라 한다. 예를 들어 3축 맵퍼의 경우 x 축, y 축, z 축의 세 축을 따라 센서를 움직이며 자장을 측정하게 된다[4].

맵핑의 주요 목적은 보정 작업이므로 맵퍼 구동축의 중심은 보정 코일의 중심을 기준점으로 한다. 하지만 기존에 설치된 코일 내부에 추가되는 형태의 HTS (high temperature superconducting) 인서트 코일의 경우, 따로 보정 코일을 가지지 않는다[5]. 이렇게 보정 코일이 없는 경우 기존의 방법으로는 기준점을 정의할 수 없다. 이런 경우 흔히 물리적 중심이 기준점이 되지만 자장분포의 중심이 실제 코일의 물리적 중심과 일치하지 않음에도 물리적 중심을 기준으로 삼을 경우 보정이 어려운 자장분포 특성이 나타날 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 자장분포의 중심을 기준으로 하여 조립을 진행하는 방법이 제안될 수 있지만, 이 방법을 사용하기 위해서는 보정 코일이 없는 형태의 코일에서 맵핑을 진행하고, 자장분포를 확인하여 그 중심을 찾을 수 있는 기법이 필요하다.

본 논문에서는 이상적인 형태의 보정 코일이 존재하지 않는 코일을 가정하고, 자장분포의 중심에 초점을 맞추어 맵퍼 구동축과 자장 분포의 중심점을 일치시킬 수 있는 두 알고리즘을 제안하였다. 기본 알고리즘은 각 축 상의 중심을 찾는 알고리즘이다. 확장 알고리즘은 기본 알고리즘을 바탕으로 개선한 알고리즘으로 적은 수의 맵핑을 통해 자장분포를 예측하고 중심을 찾

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기공학과 석사과정

²정 회원 : 군산대 전기공학과 조교수

³정 회원 : MIT, Research Staff

⁴정 회원 : 연세대 전기전자공학과 교수

*교신저자 : mcahn@kunsan.ac.kr

원고접수 : 2012년 01월 27일

심사완료 : 2012년 03월 13일

게재확정 : 2012년 03월 13일

는다. 제안된 각각의 알고리즘에 대하여 가우시언 노이즈를 모델링하여 이에 의한 영향을 고려한 시뮬레이션을 진행함으로써 알고리즘에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1. 기본 알고리즘의 설계

코일 내부의 전류가 흐르지 않는 공간에서 축 방향의 자장은 구면좌표계를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$B_z(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+m+1)r^m P_n^m(\cos \theta) \times [A_{n+1}^m \cos m\phi + B_{n+1}^m \sin m\phi] \quad (1)$$

식 (1) 에서 $P_n^m(\cos \theta)$ 는 버금 르장드르 다항식 (Associated Legendre Polynomials)이며 A_{n+1}^m, B_{n+1}^m 은 코일의 배치에 따라 결정되는 상수다.

이론 전개의 편의를 위하여 축 대칭성을 가지는 이상적인 솔레노이드 코일을 가정한다. 이 경우 코일의 내부에서 축 방향의 자장은 ϕ 에 대한 변화를 가지지 않기 때문에 식(1)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$B_z(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)A_{n+1}^0 r^n P_n^0(\cos \theta) \quad (2)$$

또한 상하 대칭의 솔레노이드 코일을 가정할 경우 식 (2)에서 축 방향 성분은 홀수 차수의 항을 가질 수 없게 된다. 이를 이용하여 식을 더 간략화 할 수 있고 최초의 4차 항 까지를 직교좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$B_z(x, y, z) = A_1^0 + 3A_3^0(z^2 - (1/2)(x^2 + y^2)) + 5A_5^0(z^4 - 3z^2(x^2 + y^2) + (3/8)(x^2 + y^2)^2) \quad (3)$$

이상의 사실을 이용하여 기본 알고리즘을 설계하기 위해 축 대칭, 상하 대칭을 가지는 코일의 y 축, z 축은 맵퍼의 해당 구동축과 일치했지만 x 축의 위치가 x_1 만큼 벗어나 있는 맵퍼 시스템을 가정한다.

기본 알고리즘에서는 x 축 방향을 따라 맵핑을 진행하고 이를 분석하여 x_1 을 추론하여 코일을 기준으로 한 x 축의 중심을 맵퍼의 구동축의 중심과 일치시키는 작업을 수행한다.

이 때 자장의 분포를 높은 차수만큼 표기할수록 맵핑 영역 내에서 실제에 더욱 가까운 자장의 분포를 나타낼 수 있지만 높은 차수의 항은 노이즈에 많은 영향을 받는 문제가 있다[6]. 따라서 실제 자장의 분포에 상대적으로 더 가깝지만 노이즈에 의한 영향을 많이 받는 4차 항까지의 전개를 이용한 경우와, 실제 자장의 분포와 다소 차이가 있으나 노이즈에 대한 면역성이 높은 2차 항까지의 전개를 이용한 경우에 대하여 각각 중심을 추론하는 알고리즘을 구현하고 결과를 비교하였다.

그림 1은 구현된 기본 알고리즘의 흐름도를 정리한

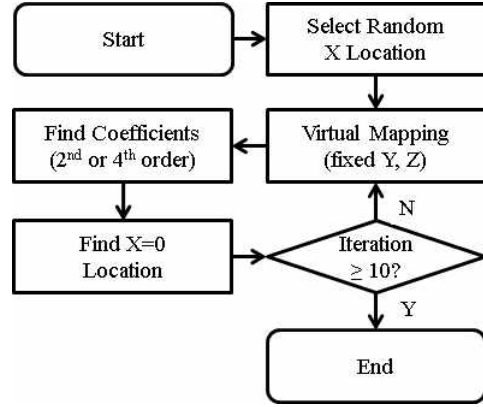


Fig. 1. Flowchart for basic central location finding algorithm.

것이다. 그림 1에서 알고리즘은 4차 항까지의 전개를 이용할 수도 있으며 2차 항까지의 전개를 이용할 수도 있다. 4차 항까지의 전개를 이용하는 경우 알고리즘은 다음과 같다. 우선 y, z 값이 고정되어 있으므로 가상의 맵퍼를 통해 측정되는 z 축 방향 자장은 오직 x 에 대한 함수로만 나타나게 된다. 또한 대칭의 가정에 의하여 구동축의 중심과 코일의 중심이 일치한 경우에는 짝수 차수의 항만을 가지게 되나 위치가 이동되어 있으므로 짝수 차수의 함수가 평행 이동한 함수로 표현이 되어야 한다. 이 함수를 새로운 계수를 도입하여 맵퍼 구동축의 좌표계를 기준으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$B_{z,(x_1,0,0)}(x') = a_1 + a_2(x' + x_1)^2 + a_3(x' + x_1)^4 \quad (4)$$

하지만 실제로 맵핑 과정에서는 대칭축에서 얼마나 벗어나 있는지 알 수 없기 때문에, 맵핑을 통해 추정되는 자장의 분포는 식 (5)와 같다.

$$B_{z,(x_1,0,0)}(x') = b_1 + b_2x' + b_3x'^2 + b_4x'^3 + b_5x'^4 \quad (5)$$

식 (5)의 계수는 서로 다른 5개의 x 위치에 대한 자장 값을 알게 되면 연립방정식의 해로써 구해질 수 있다.

식 (4)와 식 (5)는 같은 함수를 표현하고 있으므로 각 항의 계수는 모두 같아야 하며 이를 이용하여 x_1 을 추론하면 식 (6)을 얻는다.

$$x_1 = \frac{b_4}{4b_5} \quad (6)$$

2차 항까지 전개를 이용한 알고리즘도 이상의 방법과 동일한 방법을 이용하되, 식 (4)와 식 (5)의 전개식을 각각 2차 항까지만 사용하면 식 (7)의 결과를 얻게 된다.

$$x_1 = \frac{b_2}{2b_3} \quad (7)$$

4차식이나 2차식이 원하는 자장분포를 완벽히 나타내지 못하기 때문에 오차가 발생하지만 개형에 있어서 중심점은 일치하기 때문에 상기의 추론 과정을 수 회 반복함으로써 오차를 줄일 수 있다.

Table 1. Specification of virtual solenoid coil.

변수	값
내경	0.04 m
외경	0.06 m
높이	0.30 m
전류밀도	$25 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

2.2. 기본 알고리즘에 대한 시뮬레이션

MATLAB프로그램을 이용하여 기본 알고리즘의 타당성을 검토하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션 진행을 위하여 모델링한 코일의 자세한 사양은 표 1에 나타나 있다. 모델링 된 코일의 설계치는 실제 물리적으로 제작이 가능한 수준에서 임의로 결정하였다.

시뮬레이션을 시작하면 x 축을 따라 코일의 중심근처 0.01 m 구간에서 임의의 x_1 좌표를 설정한다. 이 점을 가상 맵퍼의 중심 x 좌표라고 가정하고 가상의 맵핑을 진행한다.

가상의 맵핑 과정에서는 4차식을 이용하는 알고리즘은 5회, 2차 항을 이용하는 알고리즘은 3회의 서로 다른 x 값에 대한 자장 값을 계산하여 식 (5)에서 나타난 계수를 구하게 된다. 이 때 x 값은 등 간격으로 축을 따라 이동하는 값을 선택한다. 이 때 이동 간격은 코일의 내경에 비하여 충분히 작아 충돌이 일어나지 않는 범위 내에서 임의로 5 mm로 설정하였다. 또한 자장 값을 계산하는 과정에서는 노이즈에 의한 영향을 알아보기 위하여 0.1 G의 표준편차를 가지고 평균이 0인 가우시언 노이즈를 추가하였다.

계수를 구한 다음에는 식 (6), 식 (7)에 의하여 중심 위치를 추론하고 맵퍼의 구동축을 이동한다. 이 때 오차를 줄이기 위하여 추론 과정을 반복하며, 매 반복 수행에서 이전 반복 수행까지 얻은 자장 값은 버리지 않고 위치 변동의 정보를 포함하여 다음 추론 과정에서 이용한다. 따라서 추론 과정이 반복되면 연립방정식은 새로 측정되는 자장 정보에 추가로 이전 위치에서의 자장 정보를 가지고 있기 때문에 과결정 시스템이 된다. 10회의 반복이 끝나면 중심점을 찾은 것으로 간주하여 시뮬레이션을 마친다.

그림 2는 노이즈가 포함되지 않았을 때 시뮬레이션 결과다. 2차식을 이용하는 알고리즘이나 4차식을 이용하는 알고리즘은 큰 차이 없이 중심을 추론하는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 0.1 G의 표준편차를 가지는 노이즈를 포함하였을 때의 결과다. 노이즈가 없는 상황과는 달리 2차식을 이용하는 알고리즘의 경우는 첫 번째 추론이 잘못되었으나 이후에 교정되어 중심을 추론해 나가는 모습을 볼 수 있다. 반면에 4차식을 이용하는 알고리즘의 경우에는 알고리즘이 반복되어도 중심점을 올바르게 추정하지 못하였다.

이상의 시뮬레이션 결과에 따르면, 비록 자장의 분포를 정확히 표현하지는 못하나 중심점을 찾는 알고리즘에 적용할 경우에 한하여 2차식의 전개를 이용하는 알고리즘이 유리하다는 결론을 낼 수 있다.

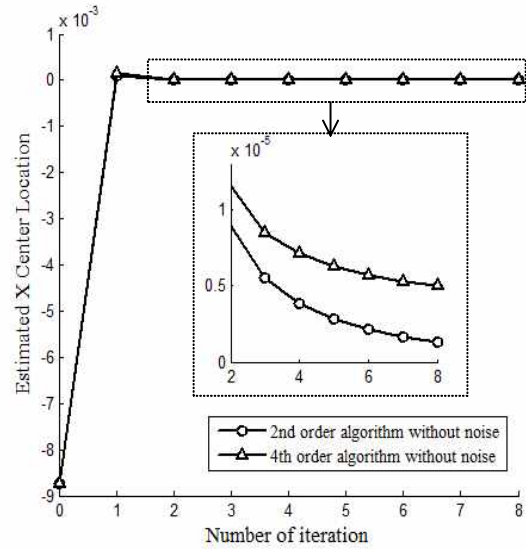


Fig. 2. Estimated center location without noise consideration.

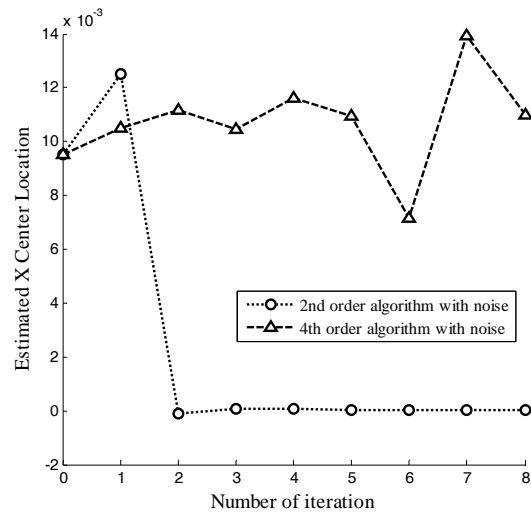


Fig. 3. Estimated center location with noise consideration.

2.3. 확장 알고리즘의 설계

이상을 통해 제안된 기본 알고리즘을 x, y, z 축에 각각 적용하면 코일의 중심과 맵퍼 구동축의 중심을 일치시킬 수 있으나, 이러한 방법은 추론 과정이 늘어나므로 보다 간결한 확장 알고리즘을 설계하였다.

기본 알고리즘의 경우와 마찬가지로 축 대칭, 상하 대칭을 가지는 코일을 가정하되 이번에는 구동축의 중심이 코일의 중심으로부터 (x_1, y_1, z_1) 의 위치만큼 떨어진 위치에 있다고 하자. 이 경우 구동축의 중심을 기준으로 한 축 방향 자장을 타나내면 식 (3)을 $(-x_1, -y_1, -z_1)$ 만큼 이동한 것으로 표현된다. 2차항 까지만 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B_{z,(x_1,y_1,z_1)}(x,y,z) = & A_1^0 + 3A_3^0(z^2 + 2zz_1 + z_1^2) \\
 & - (3/2)A_3^0(x^2 + 2x_1x + x_1^2) \\
 & - (3/2)A_3^0(y^2 + 2y_1y + y_1^2) \quad (8)
 \end{aligned}$$

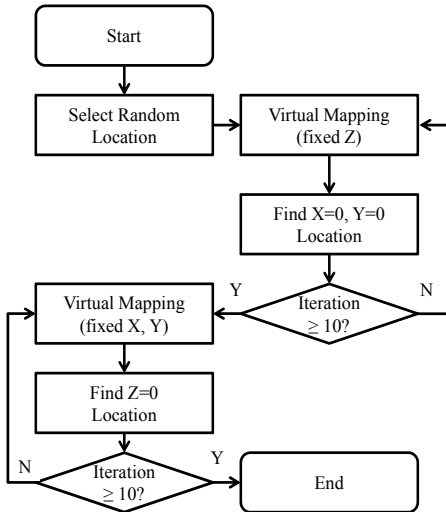


Fig. 4. Flowchart for expanded central location finding algorithm.

그림 4는 확장 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것으로 확장 알고리즘에서는 축대칭, 상하대칭의 두 대칭의 특징을 기준으로 우선 x_1, y_1 을 동시에 추론하여 대칭축을 찾고, z_1 을 기본 알고리즘의 방법을 적용하여 추론하여 구동축의 중심과 코일의 중심을 일치시키는 작업을 수행한다.

센서의 z 방향 위치가 고정되어 있다고 할 때, 새로운 계수를 도입하여 x, y 에 대한 축 방향 자장을 다시 표현하면 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{z,(x_1,y_1,z_1)}(x,y,0) = C_1 + C_2x + C_3y + C_4(x^2 + y^2) \quad (9)$$

여기서 식 (8)과 식 (9)는 같은 식이기 때문에, 각 항의 계수는 서로 같다. 이 때, $C_1 \sim C_4$ 는 가상의 맵핑을 이용하여 구할 수 있다. 이를 이용하여 x_1 과 y_1 을 구하면 다음과 같다.

$$x_1 = C_2/2C_4, y_1 = C_3/2C_4 \quad (10)$$

확장 알고리즘에 의하여 중심축을 찾는 알고리즘은 기본 알고리즘과 비교할 때 축대칭성에 의하여 x^2 항과 y^2 항의 계수가 같다는 사실을 이용하므로 계수가 적어졌으며 필요한 맵핑 횟수를 줄일 수 있다. 이후에 z 축의 중심을 찾는 과정은 기본 알고리즘과 동일하다.

2.4. 확장 알고리즘에 대한 시뮬레이션

우선 확장 알고리즘의 타당성을 검토하기 위하여 노이즈가 없는 경우, 표준편차가 0.1 G인 경우에 대하여 각각 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 5는 알고리즘 타당성 검토 시뮬레이션 과정에서, 표준편차가 0.1 G인 수준의 자장 측정 노이즈를 가정한 상황에서 대칭축을 찾는 과정의 그림이다. 예측된 대칭축을 기준으로 하여 타원 궤도를 따라 4개의 맵핑 위치를 선택했으며, 해당 위치는 모두 다른 $x, y, x^2 + y^2$ 값을 가지게 된다. 시뮬레이션이 진행되면서, 초기에 선택된 임의의 위치에서 대칭축의 위치를 추정해 나가는 것을 볼 수 있다.

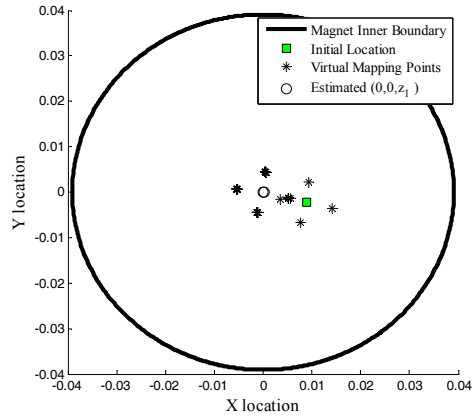


Fig. 5. Virtual mapping process with fixed Z component.

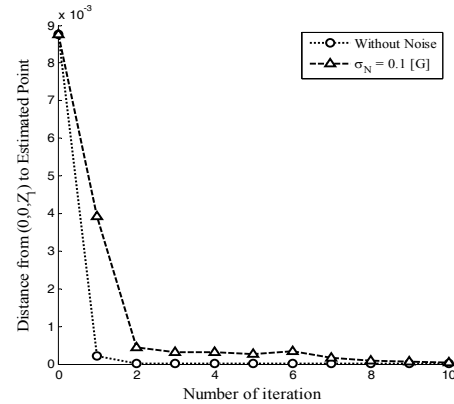


Fig. 6. Estimated X, Y center location with repetitive virtual mapping process.

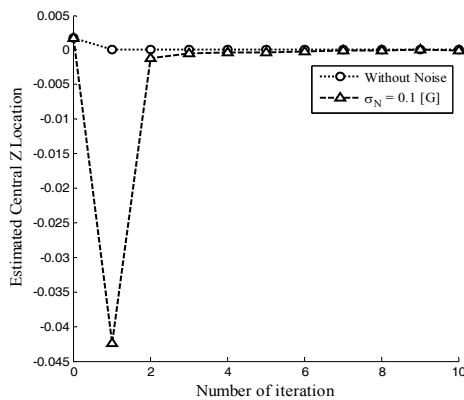


Fig. 7. Estimated Z center location with repetitive virtual mapping process.

그림 6은 시뮬레이션의 대칭축을 찾는 알고리즘이 반복 수행됨에 따라 추론된 대칭축의 x 좌표, y 좌표 위치를 각각 나타낸 그래프다.

노이즈가 없는 경우에는 1번 수행 내지는 2번의 반복 수행 이후 매우 적은 오차로 대칭축의 위치를 추론하였고 노이즈의 표준편차가 0.1 G수준인 경우에도 약간의 오차가 있으나 일관성 있게 중심을 추론하는 것을 확인할 수 있다.

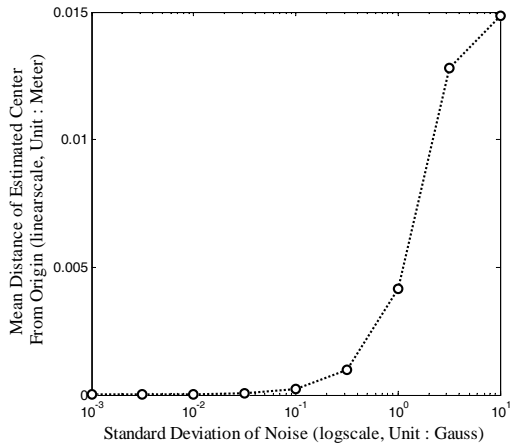


Fig. 8. Estimation error with respect to the noise level variation.

그림 7은 대칭축을 추론한 이후, 추론된 축 상에서 다시 중심점을 찾는 과정을 나타낸 그래프다. 그림 3, 4에서 나타난 경향과 마찬가지로 노이즈가 없는 경우 1번의 수행 이후 안정적으로 중심을 추론했고, 표준편차가 0.1 G 수준인 노이즈가 포함된 경우에도 수차례 반복 수행 이후에는 안정적으로 중심을 추론하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과만으로는 현재 구현된 알고리즘이 어느 정도 수준의 노이즈 면역성을 가지는지 판단할 수 없다. 따라서 노이즈 면역성에 대한 추가적인 시뮬레이션 진행하였다.

그림 8은 노이즈 면역성 시뮬레이션 결과다. 노이즈의 표준편차를 변화시켜 가며 각각에서 중심 추론 과정을 100회씩 반복한 뒤 각 결과에서 나타난 중심 위치와 실제 중심 위치까지의 거리를 평균을 낸 것이다.

시뮬레이션 상의 추론 과정에서 노이즈가 큰 영향을 미치는 경우는 추론된 중심의 위치가 코일 밖으로 벗어나는 경우도 있었으며, 이 경우는 코일 내벽을 중심으로 인지한 것으로 두었다.

노이즈의 표준편차가 0.1~1 G 사이의 구간에서 오차가 급격히 증가하기 시작하는 모습을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문을 통하여 축 대칭성 및 상하 대칭성을 가지는 경우 솔레노이드 코일 중심 근처의 자장을 측정하고 분석하여 코일의 중심을 찾는 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 이를 검증하였다.

알고리즘은 기본 알고리즘과 확장 알고리즘 두 가지의 알고리즘이 제시되었으며, 확장 알고리즘을 사용하면 기본 알고리즘에 비하여 보다 적은 횟수의 맵핑 과정을 통하여 중심을 추론하는 것이 가능하였다.

제안된 확장 알고리즘은 가상의 모델에서 표준편차가 0.1 G 수준에 미치지 못하는 노이즈를 가정할 때 문제없이 동작하며 표준편차가 1 G 이상의 노이즈를 가질 경우 급격히 오차가 증가하는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 축 대칭성과 상하 대칭성을 가정하고 있으나 실제 코일을 제작함에 있어서 대칭성이 보존되지 않는 경우가 있다. 따라서 실제 제작된 코일에서도 본 알고리즘을 적용할 수 있는지에 대한 실험적 연구가 차후 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0005852).

참 고 문 헌

- [1] 진홍범, “능동 차폐형 초전도 MRI 마그네트의 설계 및 제작에 관한 연구”, 성균관대학교 박사학위논문, 1996.
- [2] E. S. Bobrov, W. F. B. Punchard, “A General Method of Design of Axial And Radial Shim Coils for NMR and MRI Magnets”, IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 1, pp. 533-536, 1988.
- [3] R. Turner, “Gradient Coil Design: A Reveiw of Methods”, Magnetic Resonance Imaging, vol. 11, pp. 903-920, 1993.
- [4] E. Hirose, K. H. Tanaka, T. Takahashi, Y. Sato, K. Agari, M. Ieiri, Y. Kato, M. Minakawa, H. Noumi, Y. Sato, Y. Suzuki, H. Takahashi, M. Takasaki, A. Toyoda, Y. Yamada, Y. Yamanoi, “A New 3-Axis Magnetic Field Measurement System Based on Hall Elements”, IEEE Trans. Appl. Supercon., vol. 14, no. 2, pp. 1814-1817, 2004.
- [5] J. Bascuñán, W. S. Kim, S. Hahn, E. S. Bobrov, H. Lee, Y. Iwasa, “An LTS/HTS NMR Magnet Operated in the Range 600 - 700 MHz”, IEEE Trans. Appl. Supercon., vol. 17, no. 2, pp. 1446-1449, 2007.
- [6] 손권, 최윤호, 김철 공역, “응용수치해석”, Chapter 15, 한국맥그로힐, 2005.

저 자 소 개



이우승(李愚丞)

1987년 2월 19일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 2011년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정.



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 공학석사, 2006년 동 대학원 공학박사, 2007-2009년 MIT FBML Post-doc., 현재 군산대학교 조교수.



한승용(韓昇龍)

1975년 7월 1일생, 1998년 서울대학교 공과대학 전기 컴퓨터 공학부 졸업, 2000년 동 대학원 공학석사, 2003년 동 대학원 공학박사, 2004-2005년 MIT Francis Bitter Magnet Laboratory Post-doctor, 2006년- 현재 동 연구소 Research Staff.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph.D). 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년 ~ 2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.