

자기공명영상촬영용 경사자계코일의 3차원설계

3-Dimensional Design of Gradient Coils for Magnetic Resonance Imaging

류연철*, 현정호*, 이흥규**, 오창현*

Yeun-chul Ryu*, Jung-ho Hyun*, Heung K. Lee**, Chang-Hyun Oh*

Abstract - In this paper, the previous 2-D gradient coil design method using loop current elements is extended to 3-D or multi-layer structures which is useful for various MRI applications including MR microscopic imaging where relatively large space may be available for the implementation of the gradient coils. Either the power consumption or the stored energy (thus, inductance), or the combination of the two can be minimized with a set of chosen target field constraints. Complete 3-D design equations for the optimization as well as inductance or resistance calculation are derived. An effective coil shape correction method for a curved current pattern is also developed. The design method can also be easily extended to the active shielding structure.

Key Words : 자기공명영상촬영, 경사자계코일, 환전류소

3차원 구조를 가진 MRI 용 경사자계코일을 환전류소를 사용하여 설계하여 그 설계법의 유용성을 보였다. 과거에 개발되었던 2차원설계 또는 선전류소를 사용한 경우보다 쉽게 3차원적으로 분포되어 있는 전류패턴의 최적화가 가능했으며 특히 MR 미세영상촬영을 위해 효과적으로 사용될 수 있었다. 촬영대상의 크기에 따른 최적의 코일 크기를 구하여 최소전력사용을 기준으로 전류패턴을 구하기 위한 설계가 가능했다.

1 장 최소전력과 최소 인덕턴스 설계법

1.1 최소전력 설계

환전류소를 이용하여 최소전력 경사자계 코일의 설계는 코일표면에 흐르는 전류소들의 곱으로 표현할 수 있다.

$$e^2 = i^T i$$

코일의 환전류소들의 세기를 column vector, c , 이에 의한 target position의 세기를 구하는 matrix를 G , target position에서 field의 세기를 l , 환전류소 성분을 line current 성분으로 변환시키는 matrix를 K , 코일에 흐르게 되는 line current 성분을 i 라 하면 $l = Gc$, $i = Kc$, $l = GK^{-1}i$, $N = GK^{-1}$ 로 되며 constrained least square minimization을 이용하여 코일의 분포를 다음과 같은 Lagrange multiplier를 사용하여 식으로 얻을

수 있다.

$$f(i) = i^T i + \lambda^T (Ni - l)$$

결국 코일에 의한 target position에서의 분포를 가진 전류 분포 중 최소전력을 가진 패턴을 얻을 수 있게 된다.

1.2 최소인덕턴스 설계법

최소의 inductance 값을 갖게 하기 위해서는 각 전류소들을 두 개의 line current로 가정하고 두 line의 mutual inductance를 구하여 계산한다. 그렇게 하여 구해진 각 환전류소들의 에너지의 합이 경사자계 코일에 저장된 에너지가 된다. 이것을 각각의 loop의 inductance와 mutual inductance를 이용하여 matrix로도 표시 할 수 있다.

2 장 코일크기의 최적화

2.1 코일의 크기와 경사자계 세기의 비교

중심에서 같은 거리에 전류방향이 반대방향으로 돌고 있는 두 코일이 있다고 하고 단면이 전류량에 비례한다고 가정하고 $R_0 = 1$ 이라 하면

$$G \propto \int_{R_0}^R \frac{1}{r} dr \text{ 이 되므로}$$

R 이 2가 될 경우 ($R=2$) maximum gradient의 75%가 되며 3 이 될 경우 ($R=3$) maximum gradient의 89%가 된다. 즉 코일을 어느 크기 이상으로 늘어도 gradient는 크게 늘지 않는다는 사실을 알 수 있다.

저자 소개

- * 류연철: 고려대학교 대학원 전자정보학과 博士課程
- * 현정호: 고려대학교 대학원 의학학협동과정 博士課程
- * 오창현: 고려대학교 전자및정보공학부 教授
- ** 이흥규: (주)아이슬테크놀로지

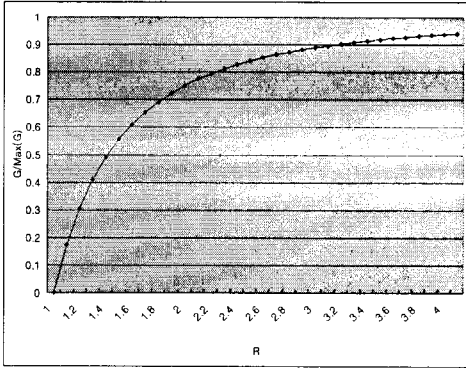


그림 1 코일크기에 따른 Gradient 크기

2.2 코일의 효율성과 코일의 크기

코일의 면적과 그래디언트의 세기의 비율로 코일의 효율성을 확인해 보았다. 코일의 열발산은 표면적에 비례한다면 이는 R^2 에 비례하고 소모되는 power의 양은 (R^3-1) 에 비례한다. 이를 이용하여 코일 내부표면적까지 고려한 코일 효율 코일효율 ef 는 $R=1.614$ 에서 최대값을 나타냈다.

$$ef = \frac{(1 - \frac{1}{R^2})^2}{(R^3 - 1)/(R^2 + 1)}$$

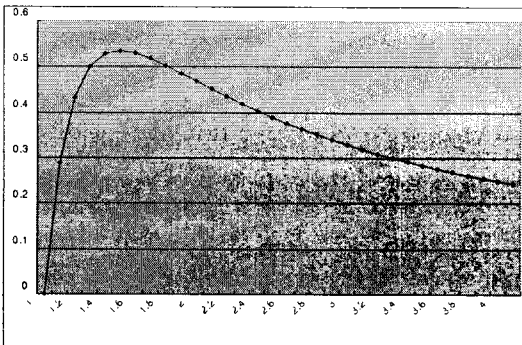


그림 2 Coil 크기에 따른 Gradient Coil 효율

3 장 코일의 설계결과

경사자계 코일은 고해상도 미세영상 이미지를 얻기 위하여 아래의 그림과 같이 여러 경사자계 코일을 겹쳐 크기가 5cm*5cm*5cm인 X-Y 경사자계 코일을 제작하도록 하였다. 각 코일마다 10개의 레이어를 붙여 만들 수 있도록 하였고 관심 영역의 직경은 5 mm로 설계하였다. Target position은 image region 내에 많은 point를 정하면 linearity향상은 있으나 current pattern이 복잡하게 되므로 코일 제작 시에 효율이 떨어질 수 있다. 그래서 target position은 두 곳으로 하였고 환전류소를 21*21로 하였다. 각 플레인에서 target position에 미치는 전류의 세기를 구하는 matrix를 구하였다.

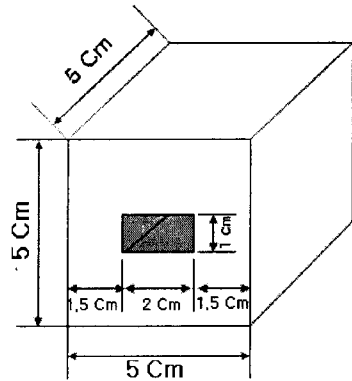


그림 1 설계할 Multi-layer 경사자계 코일의 모양

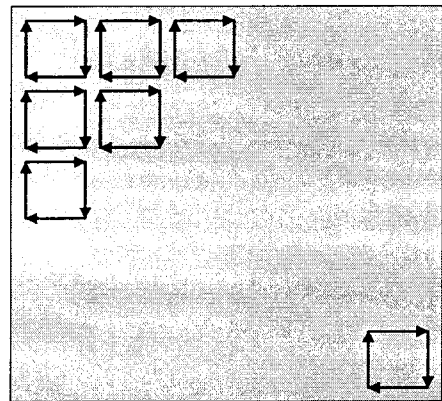


그림 4 환전류소를 이용한 current pattern

각각의 전류선소에서 하나의 target point 까지의 field 세기를 Biot-savart's law를 이용하여 B(z)성분을 구하여 matrix에 채워 넣는다.

loop current element를 line current element로 변환하기 위한 K-matrix를 구하여 다음과 같은 Lagrange Multiplier 식을 이용하여 Current distribution을 구하게 된다.

$$c = W^{-1}G^T[GW^{-1}G^T]^{-1}l$$

$$W = K^TK$$

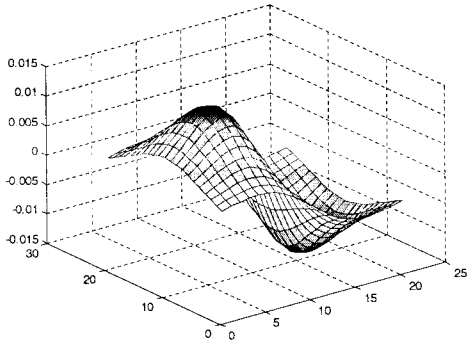


그림 5 하나의 target position과 환전류소를 이용하여 구한 field intensity matrix

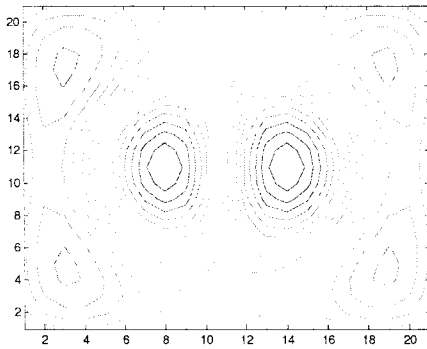


그림 6 Discrete current pattern
(한 개의 레이어만 보였음)

4 장 결 론

Multi-plane 구조를 가진 경사자계코일을 최소 전력 / 최소 인덕턴스 방법으로 설계하여 그 설계법의 유용성을 보였다. 과거에 개발되었던 선전류소를 사용한 경우보다 쉽게 전류패턴의 최적화가 가능했으며 촬영대상의 크기에 따른 최적의 코일 크기를 구하여 전류패턴을 구할 수 있었다..

참 고 문 헌

- [1] C.H. Oh, D.R. Lee, C.B. Ahn, H.K. Lee, "Minimum-power and/or minimum-inductance gradient coil design scheme of arbitrarily-selected shapes using loop-current elements," *Proc. ISMRM V*, p. 1469, 1997.
- [2] C.H. Oh, D.R. Lee, Y.J. Yang, H.J. Choi, Y.C. Ryu, J.H. Hyun, K.K. Park, "Complete Design Equation for Gradient Coil Design Using Loop-Current Elements", *Proc. ISMRM VIII*, p. 330, 2000.

감사의 글: 본 연구는 보건복지부 특정연구센터 연구과제의 지원을 받았음 (MOHW, 02-PJ3-PG6-EV07-0002).