개방형 자기공명영상시스템을 위한 평면형 경사자계코일

이 수열, 박 부식, 이 정한*, 이 완*

건국대학교 의과대학 의학공학과

*삼성종합기술원 의료기기실

Planar Gradient Coils for an Open MRI System

Soo Yeol Lee, Bu Sik Park, Jeong Han Yi*, and Wan Yi*

Dept. of Biomedical Eng., College of Medicine, Konkuk University

* Medical Equipment Lab., Samsung Advanced Institute of Technology

Abstract

Though the planar gradient coils, designed by the magnetic energy minimization procedure, have smaller inductance than conventional gradient coils, the planar gradient coils often suffer from their poor magnetic field linearity. Scaling the spatial frequencies of the current density function designed by the magnetic energy minimization procedure, magnetic field linearity of the planar gradient coils can be greatly improved with small sacrifice of gradient coil inductance.

서 론

자기공명영상시스템의 중재의학적 응용을 위해서는 자기공명영상시스템의 형상이 기존의 원통형, 혹은 사각통형의 폐쇄형에서 개방형으로 바뀌어야만 한다. 자기공명영상시스템의 개방화를 위해서는 경사자계코일의 형상 또한 개방형이 되어야 하는데 이에 가장 적합한 형태의 경사자계코일은 두 개의 평행한 평면으로 구성된 평면형 경사자계코일이다. 최근 경사자계코일의 인덕턴스를 공간주파수 영역에서 최소화시키는 기법이 개발되었다[1-4]. 기존 경사자계코일의 경우 원하는 경사자계 강도를 얻기 위해 경사자계코일의 권선수를 늘려 전선의 배치가 한 곳에 집중되어 있는 반면 공간주파수 영역에서 인덕턴스를 최소화시키는 기법으로 설계된 경사자계코일의 권선은 공간적으로 분산되어 있다[5]. 이 분산된 권선 모양이 마치 지문과 같아 이 기법으로 설계된 경사자계코일을 지문형 경사자계코일이라고도 부른다. 지문형 경사자계코일은 전선의 배치가 집중되어 있는 코일에 비해 인덕턴스가 상당히 작아질 수 있음이 밝혀졌으나 인덕턴스를 최소화하는 과정과 경사자계의 선형성을 향상시키는 과정은 서로 상충적인 관계여서 지문형 경사자계코일의 경사자계 선형성은 만족스럽지 못한 경우가 많다. 본 논문에서는 지문형 경사자계코일의 인덕턴스를 다소 희생하면서 경사자계의 선형성을 대폭 향상시킬 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

방 법

그림 1 에 개방형 자기공명영상시스템에서 요구되는 평면형 경사자계코일의 구조를 나타내었다. 이 평면형 경사자계코일은 촬영 도중 환자에의 접근이 최대한 용이하도록 두 개의 평행한 평면으로 이루어져 있으며, 각기 평면 위에는 경사자계 형성을 위한 권선이 배치되어 있다. 그림 1 에서 주자계(main magnetic field)의 방향은 y-방향이고 두 평

면 사이의 거리는 2a이다. 주자계와 같은 방향인 자속 밀도의 y-성분을 구하면

$$B_y(\vec{r}) = \frac{j\mu_0}{8\pi^2}\iint d\alpha d\beta e^{j\alpha x} e^{j\beta z} \frac{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}{\beta}\{e^{-\sqrt{\alpha^2+\beta^2}(a-y)} j_x^a(\alpha,\beta) + e^{-\sqrt{\alpha^2+\beta^2}(a+y)} j_x^{-a}(\alpha,\beta)\} \quad (1)$$

이다. 위 식에서 α, β는 x- 및 z-방향으로의 공간주파수를 나타내고 j_x^a는 y=a 평면에서의 x-방향의 전류밀도함수를, 그리고 j_x^{-a}는 y=-a 평면에서의 x-방향의 전류밀도함수를 나타낸다. 경사자계코일의 인덕턴스를 최소화 하기 위해서는 경사자계코일이 생성하는 자계에너지를 최소화 해야 한다. 정해진 위치에서 원하는 크기의 자속 밀도를 만들도록 하는 제한 조건을 부과한 상태에서 자계에너지를 최소화 하는 전류밀도함수를 찾는다면 이 전류밀도함수로 구성된 경사자계코일의 인덕턴스는 최소화 될 것이다. x-방향 경사자계코일에 대해 자계에너지가 최소가 되는 전류밀도함수를 구해보면

$$j_x^a(\alpha,\beta) = -\frac{j\beta}{2\cosh(a\sqrt{\alpha^2+\beta^2})}\sum_{j=1}^{N}\lambda_j e^{-j\alpha x_j} e^{-j\beta z_j} \times \cosh(y_j\sqrt{\alpha^2+\beta^2}) \quad (2)$$

이다. y-방향 경사자계코일에 대한 전류밀도함수에 대해서도 같은 과정으로 구할 수 있는데 그 결과식은 식(1) 및 (2)의 모든 cosh 함수를 sinh 함수로 대체한 것과 같다. 지문형 경사자계코일은 권선이 집중되어 있는 일반 경사자계 코일에 비해 인덕턴스가 작은 장점이 있으나 인덕턴스를 최소화시키는 것에 중점을 두는 설계 때문에 경사자계의 선형도가 저하되는 문제점이 있다. 이것은 지문형 경사자계코일을 인덕턴스가 최소화 되는 방향으로 설계를 했기 때문에 영상 영역의 중심 부근에서는 자계의 선형성이 보장되나 영상 영역의 외곽 부근에서는 자계가 급격하게 감쇠하는 경향이 있기 때문이다. 지문형 경사자계코일의 설계 과정에 있어 경사자계의 선형성을 유지하기 위해 자계에너지 최소화 과정에서 제한 조건을 부과하지만 제한 조건에 사용되는 공간 위치의 수가 작을 경우에는 선형성이 열악해지고 공간 위치의 수가 많을 경우에는 경사자계코일의 권선 모양이 너무 복잡해져 실제로 구현하기가 어려워진다. 그래서 일반적으로 사용되는 제한 조건의 공간 위치 수는 대개 4에서 8 사이의 수를 선택하는 것이 일반적이다[5]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전류밀도함수의 공간주파수 축을 스케일링하는 방법을 고안하였다.

x-, 혹은 z-방향의 경사자계를 형성하는 전류밀도함수를 공간주파수 영역에서 나타내는 식(2)에서 공간주파수 축 α 및 β를 각기 k_α, k_β배 만큼 스케일링을 한 전류밀도함수 j'을 구하면

$$j_x'^a(\alpha,\beta) = -\frac{j(\beta/k_\beta)}{2\cosh[a\sqrt{(\alpha/k_\alpha)^2+(\beta/k_\beta)^2}]} \times \sum_{j=1}^{N}\lambda_j' e^{-j(\alpha/k_\alpha)x_j} e^{-j(\beta/k\beta)zj} \times \cosh(y_j\sqrt{(\alpha/k_\alpha)^2+(\beta/k_\beta)^2}) \quad (3)$$

이다.

결 과

제안한 공간주파수 스케일링 기법을 이용하여 x-방향 및 y-방향의 경사자계코일을 설계하였다. z-방향의 경사자계코일은 x-방향의 경사자계코일을 90° 회전한 것과 동일하므로 논의를 생략하겠다. 설계한 경사자계코일은 양면으로 이루어져 있으며 양면 사이의 간격은 50cm이고 경사자계코일을 영구자석의 극면에 부착하기 용이하도록 각 면의 크기는 직경이 100cm인 원으로 제한하였다. 그림 2의

(a),(b)에 각기 $k_\alpha=k_\beta=1$, 0.6 인 경우의 x-방향 경사자계코일의 권선 형태를 나타내었다. 다른 면의 권선 형태와 전류 방향도 이와 동일하다. 이 경사자계코일을 설계했을 때 사용한 제한 조건의 수는 4 로 하였으며 이 제한 조건은 표 1 에 나타나 있다.

표 1. x-방향 경사자계코일 설계 시 사용한 제한 조건

번호	위치 좌표(cm) x	y	z	자속 밀도 (Gauss)
1	1.0	1.0	1.0	4
2	1.0	12.5	1.0	4
3	12.5	1.0	1.0	50
4	1.0	1.0	12.5	4

이 제한조건에서 점 1 과 3 은 x-방향으로 4 Gauss/cm 의 경사자계를 만들도록 하고 있으며 점 1,2,4 는 같은 x-값을 갖는 위치들에서 균일한 자속밀도 값을 갖도록 제한하고 있다. 권선 형태는 x-방향의 전류밀도함수를 z-방향으로 적분한 뒤 이 적분된 값을 등간격으로 등고선으로 분할하여 얻은 것이다. 즉 권선 형태는 연속적인 분포를 갖는 전류밀도함수를 이산적인 권선으로 근사시킨 것이라 할 수 있다. 전류밀도의 분포는 1 차적으로 크기가 3m × 3m 인 사각면 안에서 구한 뒤 직경 1m 원 밖으로 나간 권선을 강제적으로 직경 1m 원주 위로 이동을 시켰다. 이렇게 권선의 위치를 직경이 1m 인 원 안으로 제한하여도 제한하지 않은 경우와 비교하여 경사자계의 선형성이 크게 차이가 나지 않았다. 권선 수는 연속 분포 전류밀도함수가 만드는 경사자계의 선형성 오차와 크게 차이가 나지 않는 선형성 오차를 만드는 수준인 16 으로 하였다. 그림 2 에서 알 수 있듯이 $k_\alpha=k_\beta$ 을 작게 할 수록 권선은 원의 외곽 쪽으로 향하게 되고 이 현상은 경사자계의 선형성을 향상시키는 결과를 낳는다. 표 2 에 설계한 경사자계코일의 성능지수를 나타내었다.

표 2. 경사자계코일들의 성능지수 η

	$k_\alpha=k_\beta$ 1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
x-경사자계코일의 η	1.00	1.42	2.44	2.99	2.49
y-경사자계코일의 η	1.00	1.36	1.25	0.43	-

* Maxwell 경사자계코일

성능지수 η 은 아래의 식으로 정의하였다.

$$\eta = \frac{G_o}{\bar{E}L} \tag{4}$$

위 식에서 G_o 는 원점에서의 경사자계강도를, $\bar{E}$ 는 평균 선형성 오차를, 그리고 L 은 경사자계코일의 인덕턴스를 나타낸다. 선형성 오차는 인체 몸통과 유사한 장축길이가 40cm, 단축길이가 30cm, 그리고 통길이가 30cm 인 타원통 내에서 100 개의 점을 등간격으로 표본한 뒤 이 점들에서의 자속밀도를 계산해 구하였다. 자속밀도 값은 곡선 모양의 권선을 3,000~5,000 개 정도의 짧은 선분으로 분할한 뒤 이에 대해 Bio-Savart 법칙을 적용하여 구하였다. 경사자계코일의 인덕턴스는 설계한 경사자계코일을 1/4 크기로 축소 제작하여 측정하였다. 표 2 에서 x-방향 경사자계코일의 성능지수는 $k_\alpha=k_\beta=0.5$ 부근에서, 그리고 y-방향 경사자계코일의 성능지수는 $k_\alpha=k_\beta=0.8$ 부근에서 최대가 됨을 알 수 있다.

결 론

인덕턴스를 최소화하여 설계한 평면형 경사자계코일은 선형성 오차가 큰 문제점이 있었는데 이를 공간주파수 스케일링 기법으로 해결하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법으로 설계된 경사자계코일들은 인덕턴스를 최소화하여 설계된 평면형 코일에 비해 인덕턴스는 다소 증가하지만 선형성 오차가 크게 줄어 경사자계코일의 전체적인 성능지수는 향상됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] R. Turner, "A traget field approach to optimal coil design," J. Phys. D:Appl. Phys., vol.19, pp.L147-L151, 1986.

[2] M. Engelsberg, R. E. de Souza, and C. M. Dias Pazos, "The limitations of a target field approach to coil design," J. Phys. D:Appl. Phys., vol.21, pp.1062-1066, 1988.

[3] M. A. Martens, L. S. Petropoulos, R. W. Brown, J. H. Andrews, M. A. Morich, and J. L. Patrick, "Insertable biplanar gradient coils for magnetic resonance imaging," Rev. Sci. Instrum., vol.62, no.11, pp.2639-2645, 1991.

[4] R. Turner, "Minimum inductance coils," J. Phys. E:Sci. Instrum., vol.21, pp.948-952, 1988.

[5] R. Turner, "Gradient coil design: A review of methds," Magn. Reson. Imag., vol.11, pp.903-920, 1993.

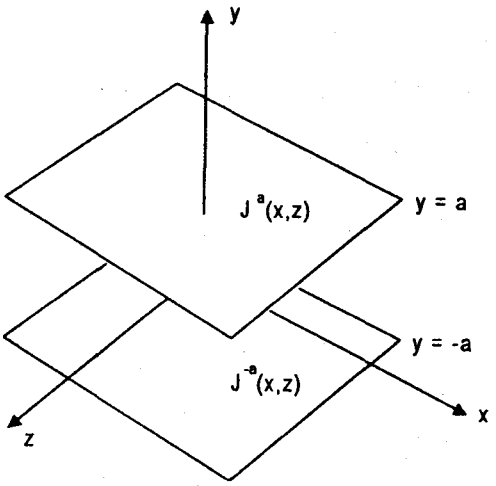
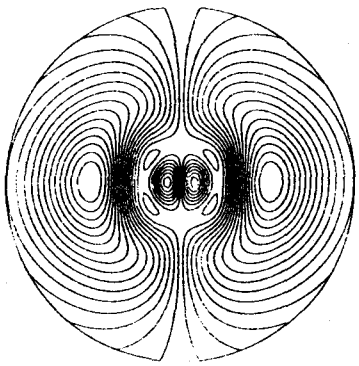
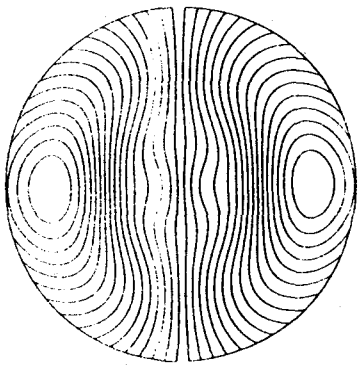


그림 1. 평면형 경사자계코일의 구조.



(a)



(b)

그림 2. 공간주파수 스케일링 기법으로 설계한 x-방향 경사자계코일 한 면 위의 권선 모양.
(a) $k_\alpha=k_\beta=1.0$ (b) $k_\alpha=k_\beta=0.6$