

유한요소법에 의한 자기공명영상시스템에서의 와전류 영향 분석

이정환*·강현수*·조민형**·문치웅***·이강석***·이수열*

건국대학교 의과대학 의공학과*, 수원대학교 공과대학 전기공학과**
삼성종합기술원 의료기기실***

(1998년 9월 30일 접수, 1999년 2월 4일 채택)

Analysis of Eddy Current Effect in Magnetic Resonance Imaging Using the Finite Element Method

J.H. Yi*, H.S. Khang*, M.H. Cho**, C.W. Mun***, K.S. Lee***, S.Y. Lee*

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

**Dept. of Electrical Eng., College of Engineering, The Univ. of Suwon

*** Medical Equipment Lab., Samsung Advanced Institute of Technology

(Received September 30, 1999, Accepted February 4, 1999)

요 약 : 자기공명영상시스템에서 경사자계코일에 전류 펄스를 인가할 때 코일 주변의 도전성 구조물에 유도되는 와전류는 경사자계의 선형성을 열화시킬 뿐만 아니라 경사자계의 파형을 왜곡시킨다. 특히 경사자계 파형의 왜곡 정도가 공간 위치에 따라 다를 경우 고속촬영법과 같은 고성능의 자기공명영상법을 실현하는 것이 어려워진다. 본 연구에서는 촬영 공간 내 임의의 지점에서 와전류에 의해 경사자계 파형이 변형되는 정도를 알 수 있는 방법을 유한요소법을 이용해 구하였다. 경사자계코일에 정현파를 인가했을 때 임의의 지점에서 자계의 진폭 및 위상 특성이 주파수에 따라 어떻게 변하는지를 나타내는 와전류 영향 전달함수를 구하였고, 이 전달함수를 이용해 임의의 입력 전류 파형에 대한 출력 경사자계 파형을 예측하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 실제로 측정된 경사자계 파형을 예측한 파형과 비교하여 제시하였다.

Abstract : Eddy current in MRI systems degrades gradient field linearity and distorts gradient waveform. When the waveform distortion is spatially variant, it is very difficult to perform special imaging techniques such as the echo planar imaging technique or the fast spin echo imaging technique. In this study, we have developed a new technique to estimate the distorted gradient waveforms at any points inside the imaging region using the finite element method. After obtaining the eddy-current-effect transfer function, which represents magnitude and phase characteristics of the gradient field at a particular point, we have used the transfer function to estimate the actual gradient waveforms at the point. To verify the proposed technique, we have compared the estimated gradient waveforms with the measured ones.

Key words : Eddy current, finite element method, magnetic resonance imaging, eddy current effect transfer function, induced-current impedance tomography

서 론

자기공명영상은 1970년대 말 최초로 개발된 이래로 비약적인

(속보논문)

본 논문은 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호 : 971-0913-077-2) 지원으로 이루어졌음.

통신저자 : 이수열, (380-701) 충북 충주시 단월동 322

건국대학교 의과대학 의공학과,

Tel. (0441)840-3764, Fax. (0441)851-0620

발전을 거듭하여 최근에는 고속영상법, 기능영상법(functional imaging), 분광영상법(spectroscopic imaging) 등 각종 고기능 촬영법들이 상용화되는 수준에 이르렀다. 이러한 고기능 촬영법을 구현하기 위해서는 일반적으로 고성능 경사자계시스템을 사용해야 하는데, 이를 구현하는데 가장 큰 장애물은 경사자계코일에 전류 펄스를 인가할 때 주변의 도전체에 유도되는 와전류(eddy current)라 할 것이다. 경사자계코일 주변에 있는 도전체는 주자석, 고주파코일 등 다양한 것이 있을 수 있으나, 그 중

와전류가 가장 많이 유도되는 곳은 주자석 내라 할 수 있다. 주자석에서도 와전류가 가장 많이 유도되는 곳은 초전도전자석의 경우, 알루미늄 합금으로 만들어진 원통형 냉각통, 그리고 영구자석의 경우, 철 합금으로 만들어진 평면형 자극편(pole piece)이다. 경사자계코일에 유입되는 전류 펄스에 의해 유도되는 와전류도 경사자계코일을 흐르는 전류와 마찬가지로 자계를 만들게 되고, 이 자계는 경사자계코일이 만드는 자계와 합해지게 된다. 와전류에 의해서 만들어지는 자계의 공간 분포는 도전체 구조물의 형상에 의해서 정해지게 되는데, 도전체 구조물의 형상은 경사자계코일의 형상과 많이 다르므로 와전류에 의해 형성되는 자계의 공간적 분포는 경사자계코일이 만드는 자계의 공간적 분포와 다를 수 있다. 이런 경우, 와전류에 의해 경사자계의 선형성이 저하될 뿐만 아니라 도전체의 전기전도도 및 형상에 의해 결정되는 와전류의 시간 파형도 경사자계코일에 유입되는 입력 전류 파형과 다를 수 밖에 없게 된다. 더구나 촬영 영역 내에서 공간 위치에 따라 자계의 시간 파형이 서로 달라지게 되면 와전류 보상 방법으로 일반적으로 많이 쓰이고 있는 입력 전류 선강조(pre-emphasis) 기법으로는 와전류를 완전하게 보상할 수 없게 된다. 이와 같은 와전류의 비선형성 및 공간의존성을 보다 완전하게 보상하고자 도전체 구조물에 경사자계가 도달하지 못하게 하여 와전류 발생을 원초적으로 봉쇄하는 능동차폐(active shield)기법이 최근에 많이 쓰이고 있다[1-5]. 그러나 이 방법으로도 와전류를 완전히 없애지는 못하기 때문에 와전류 영향을 정량적으로 분석해서 실제로 영상에 작용하는 경사자계 파형이 입력 전류 파형과 얼마나 다른지를 정확히 예측해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 경사자계코일 주변에 있는 도전체 구조물에 발생하는 와전류에 의해 경사자계가 어떻게 영향을 받는지를 유한요소법을 이용하여 알아 보았다. 경사자계코일에 정현파를 인가했을 때 임의의 지점에서 자계의 진폭 및 위상 특성이 주파수에 따라 어떻게 변하는지를 나타내는 와전류 영향 전달함수를 구하였고, 이 전달함수를 이용해 임의의 입력 전류 파형에 대한 출력 경사자계 파형을 예측하였다. 출력 경사자계 파형을 예측할 수 있는 와전류 영향 전달 함수는 자기공명영상에서 여러 가지로 응용될 수 있다. 첫째는 영구자석을 설계하는 경우 와전류 영향을 정확히 예측할 수 있기 때문에 영구자석 자극편의 모양이나 재질을 결정하는데 응용될 수 있다는 점이다. 자기공명영상용 영구자석은 주로 순철을 이용하여 자계회로를 만드는데, 순철의 자계 특성이 비선형적일 뿐만 아니라 모양도 복잡하기 때문에 와전류가 어떻게 발생하는지를 해석적으로 알기는 어렵다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법으로 와전류 영향을 분석하면, 영구자석 설계 단계에서 와전류 영향을 극소화하는 것을 추구할 수 있다. 둘째로는 와전류 영향 전달함수는 와전류 영향을 모든 주파수 대역에서 보여주기에 임의의 입력파형에 대한 실제 경사자계 파형을 예측하는데 사용될 수 있다. 따라서, EPI(Echo Planar Imaging)나 SEPI(Spiral Echo Planar Imag-

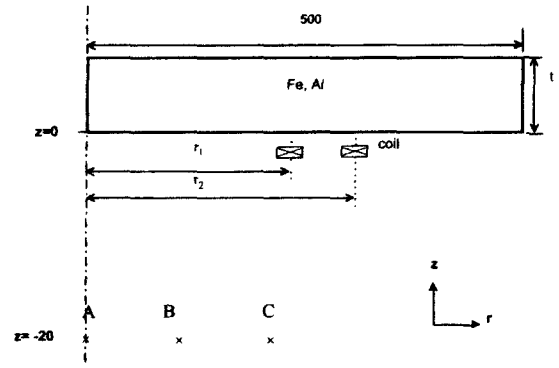


그림 1. 유한요소법으로 와전류 영향 전달함수를 구하기 위해 사용한 모델

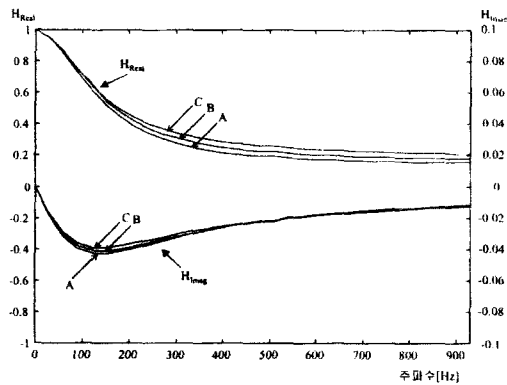
Fig. 1. The model used in the FEM analysis to obtain the eddy-current-effect transfer function

ing)와 같이 실제로 인가되는 경사자계 파형 정보가 중요한 경우에 와전류 영향을 보상하거나 와전류 효과를 예측하는데 사용될 수 있을 것이다[6,7]. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 실제로 측정된 경사자계 파형을 예측한 파형과 비교하여 제시하였다.

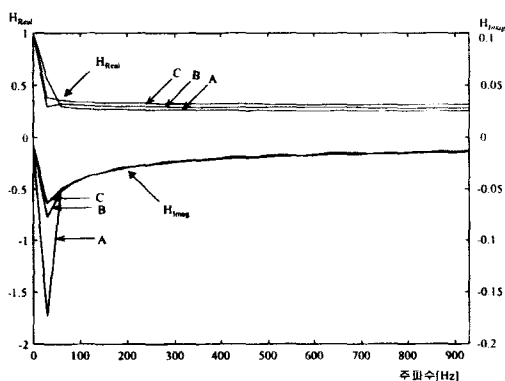
유한요소법을 이용한 와전류 영향 전달함수의 계산

와전류에 의해 경사자계 파형이 왜곡되는 정도를 알아보기 위해 자기공명영상시스템에서 와전류가 실제로 발생하는 상황과 유사한 모델을 만들어서 유한요소법을 적용해 보았다. 유한요소법은 전자기 문제를 푸는데 널리 이용되고 있는데, 자기공명영상 분야에서도 특히 주자석을 설계하는데 많이 이용되고 있다[8,9]. 또한 최근에는 인체 내 조직들의 자화율(susceptibility)이 미세하게 차이가 나는 현상 때문에 인체 내의 주자계 분포가 원래 값으로부터 미세하게 변동되는 정도를 유한요소법을 이용해 예측하여 분광영상법에 응용하는 발표도 있었다. 유한요소법을 이용해 전자기 문제를 푸는 해법으로는 정전자기(static electromagnetics) 해법, 시변 전자기(time varying electromagnetics) 해법, 정상 상태(steady state) 해법 등이 있는데, 해법에 따라 적용되는 미분 방정식이 다를 뿐 유한요소법으로 문제를 푸는 근본 원리는 같다고 할 수 있다. 본 연구에서는 유한요소법 프로그램으로 Infolytica사의 Magnet 5.0을 사용하였다.

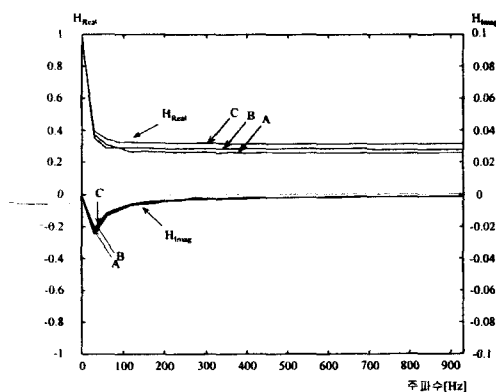
본 논문에서 와전류 영향 분석을 위해 사용한 유한요소법 모델을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 보인 모델은 z-축을 중심으로 원통형 대칭성을 가지고 있다. 원통형 대칭성을 택한 이유는 3차원 문제를 2차원으로 완전하게 해석할 수 있어 시간이 오래 걸리는 3차원 해석을 하지 않아도 되기 때문이다. 경사자계코일로는 자기공명영상에서 z-방향 경사자계를 형성하기 위해 많이 쓰이는 환형 코일을 택하였다. 그림 1의 모델에서는 경사자계코일의 선형성을 향상시키기 위해 환형 코일 수를 2개로 하



a



b



c

그림 2. 유한요소법을 이용해 구한 와전류 영향 전달함수

- (a) 구조물이 철인 경우 (Case I, $t=100\text{mm}$)
- (b) 구조물이 알루미늄인 경우 (Case II, $t=100\text{mm}$)
- (c) 구조물이 알루미늄인 경우 (Case III, $t=5\text{mm}$)

Fig. 2. Eddy-current-effect transfer functions calculated by the FEM

- (a) In the case of iron structure (Case I, $t=100\text{mm}$)
- (b) In the case of Al structure (Case II, $t=100\text{mm}$)
- (c) In the case of Al structure (Case III, $t=5\text{mm}$)

였고, 이들 코일에 서로 같은 방향으로 전류가 흐르도록 두 코일은 직렬 연결이 되어 있다. 권선의 단면은 직사각형으로 했는데, 이는 코일을 이루는 각기 권선의 단면이 원형일지라도 권선

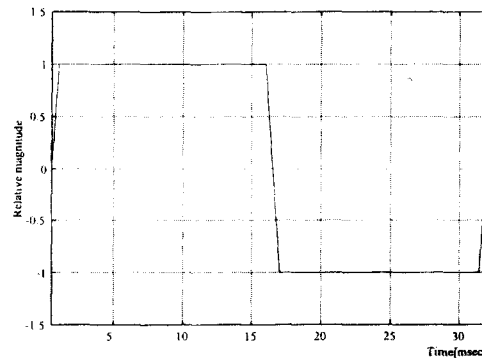


그림 3. 경사자계 코일 구동 전류 파형. 상승시간 및 하강시간은 모두 0.5msec이고 평탄구간은 15msec이다.

Fig. 3. Gradient coil driving current waveform. Rising time, falling time, and plateau duration are 0.5msec, 0.5msec, and 15msec, respectively.

수를 복수로 하면 전체적인 권선의 단면은 직사각형과 가까워지기 때문이다. 그림 1의 모델에서 권선의 단면은 $12\text{mm} \times 3\text{mm}$ 로 하였고 두 코일의 직경 r_1 과 r_2 는 각기 240mm 와 280mm 로 하였다. 경사자계코일 주변에 있는 도전체 구조물로 그림 1에 보인 것처럼 원판 모양의 것을 택하였다. 일반적으로 영구자석의 자극편은 모델에서와 같이 원판 모양의 철 합금으로 이루어진 경우가 대부분이기 때문이다. 도전체 구조물의 직경은 일반적인 자기공명 영상용 영구자석의 자극편 크기인 1000mm 로 하였으며, 두께는 t 로 하였다. 경사자계코일과 도전체 구조물 사이의 간격은 실제와 유사한 상황을 상정하기 위해 20mm 로 하였다.

그림 1의 경사자계코일에 시변성 전류를 인가할 때 와전류 영향이 어떻게 나타나는지를 해석하기 위해 유한요소법을 적용하였다. 임의의 입력 전류 파형에 대해 와전류 영향을 분석할 수 있기 위해서는 입력 전류의 모든 주파수 성분에 대한 와전류 영향을 구해야 한다. 이를 위해 정현파 전류를 경사자계코일에 인가해서 정상 상태에 도달했을 때 임의의 점에서 자계가 어떻게 형성되는지를 구했다. 사용한 유한요소법 프로그램에서는 초기에 메쉬(mesh)를 자동 생성한 뒤 해를 구해가면서 해가 공간적으로 급하게 변하는 부분의 메쉬를 작게 분할해가는 자동 메쉬 적용 기능이 있어, 유한요소법 해의 정확도를 보다 높일 수가 있었다. 그림 1의 모델을 가지고 유한요소법을 적용했을 경우 노드(node) 수는 일반적으로 $20,000$ 개 정도였으며, 해의 정확도를 높이기 위해 3차 보간법을 사용하였다. 경계 조건을 주기 위해 그림 1의 모델 보다 약 10배 정도 큰 반원 모양의 외곽 경계를 설정하였으며, 이 외곽 경계에서 자계의 크기가 0이 되도록 경계조건을 주었다. 그리고 원통형 대칭성을 주기 위해 z -축 상에서도 자계의 수직 성분이 0이 되도록 경계조건을 주었다.

그림 1의 모델에서 코일에 정현파를 인가할 때, 정상상태의 자계는 와전류 영향으로 인해 실수부 뿐만 아니라 허수부도 나타나게 된다. 즉 와전류로 인해 파형의 위상 지연이 나타나게

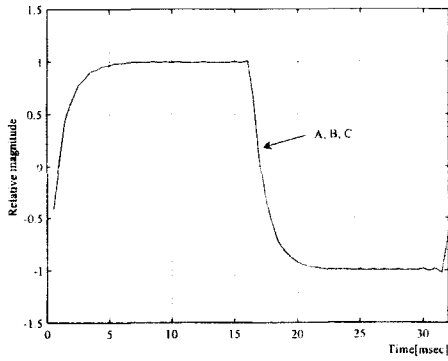


그림 4. 유한요소법을 이용하여 구한 와전류 영향 전달함수로 예측한 점 A, B, C에서의 자기 파형 (Case I).
 Fig. 4. Estimated magnetic field waveforms using eddy-current-effect transfer functions calculated by the FEM. The lines represent the waveforms at the points A, B, and C in the case I

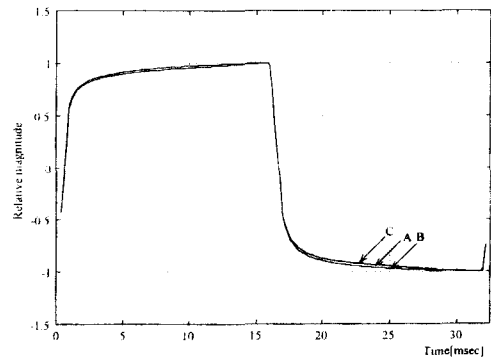


그림 7. A, B, C에서 픽업코일의 전압을 적분하여 실측한 자기 파형 (Case I)
 Fig. 7. Magnetic field waveforms measured at the points A, B, and C in the case I using a small pick-up coil and an integrator.

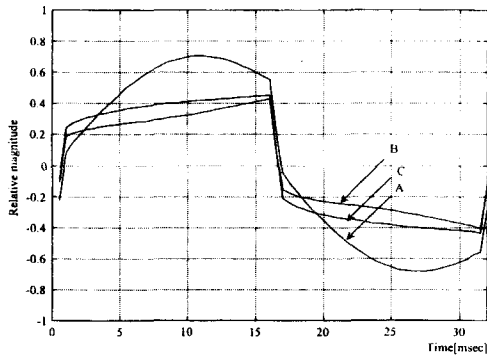


그림 5. 유한요소법을 이용하여 구한 와전류 영향 전달함수로 예측한 점 A, B, C에서의 자기 파형 (Case II)
 Fig. 5. Estimated magnetic field waveforms using eddy-current-effect transfer functions calculated by the FEM. The lines represent the waveforms at the points A, B, and C in the case II

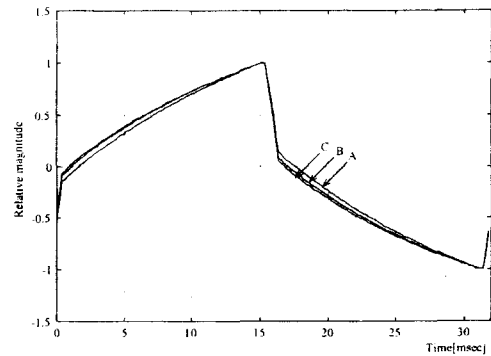


그림 8. 점 A, B, C에서 픽업코일의 전압을 적분하여 실측한 자기 파형 (Case III)
 Fig. 8. Magnetic field waveforms measured at the points A, B, and C in the case III using a small pick-up coil and an integrator

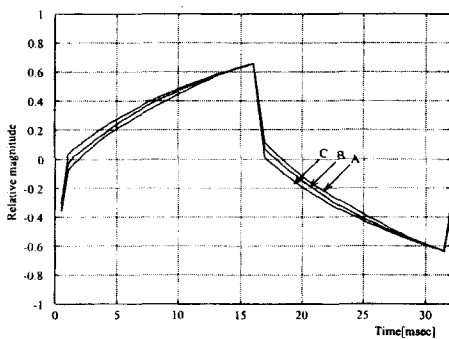


그림 6. 유한요소법을 이용하여 구한 와전류 영향 전달함수로 예측한 점 A, B, C에서의 자기 파형 (Case III)
 Fig. 6. Estimated magnetic field waveforms using eddy-current-effect transfer functions calculated by the FEM. The lines represent the waveforms at the points A, B, and C in the case III

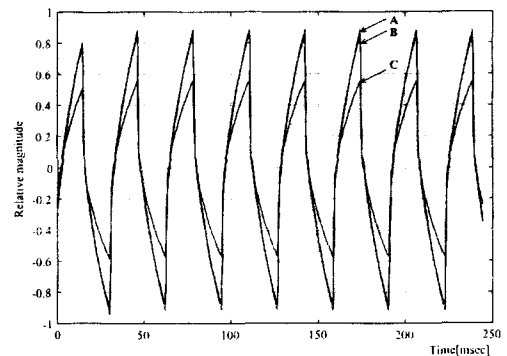


그림 9. 점 A, B, C에서 픽업코일의 전압을 적분하여 실측한 전 구간 자기 파형 (Case III)
 Fig. 9. Magnetic field waveforms measured at entire time interval at the points A, B, and C in the case III

되는 것이다. 경사자계코일에 $I = I_0 \sin \omega t$ 의 정현파 전류를 인가할 때, 임의의 점 (x, y) 에서 정현파 전류에 의해 형성되는 자계의 실수부를 $B_{real}(x, y, \omega)$, 허수부를 $B_{imag}(x, y, \omega)$ 라 하자. 여기서 자계는 자기공명현상에 영향을 주는 z-방향 성분을 나타낸다. 자계의 실수부와 허수부를 모든 주파수에서 구하면 와전류에 의해 파형이 어떻게 바뀌는지를 나타내는 와전류 영향 전달함수를 구할 수 있다. 와전류 영향 전달함수 $H(x, y, \omega)$ 의 실수부 $H_{real}(x, y, \omega)$ 과, 허수부 $H_{imag}(x, y, \omega)$ 를 아래의 식으로 구하였다.

$$H_{real}(x, y, \omega) = B_{real}(x, y, \omega) / B_{real}(x, y, 0) \quad (1-a)$$

$$H_{imag}(x, y, \omega) = B_{imag}(x, y, \omega) / B_{real}(x, y, 0) \quad (1-b)$$

와전류 영향 전달함수를 구하기 위해 정현파의 주파수는 DC에서 30Hz 간격으로 930Hz까지 변화 시켰다. 식(1)에서 와전류 영향 전달함수는 정현파 전류를 인가했을 때의 자계 $B_{real}(x, y, \omega)$ 를 직류 전류를 인가했을 때의 자계 $B_{real}(x, y, 0)$ 로 나누어서 구했기 때문에, 식(1)은 임의의 점 (x, y) 에서 경사자계의 파형이 어떻게 바뀌는지를 나타내는 전달함수라고 할 수 있다.

그림 2(a)에 도전체 구조물이 철이고 도전체의 두께 t 가 100mm인 경우(Case I), 점 A($r=0\text{cm}$, $\phi=0$, $z=-20\text{cm}$), B(10cm, 0, -20cm), 그리고 C(20cm, 0, -20cm)에서의 전달함수 $H(x, y, \omega)$ 를 보였다. 점 A, B, C의 상대적인 위치는 그림 1에 표시하였다. 유한요소법을 이용한 해석에서 철의 전기전도도는 1.03×10^7 mho/m로 하였으며, 자기특성은 순철과 동일하다고 가정하였다. 순철의 포화자속밀도는 약 2.4 Tesla 정도이며, 자속밀도가 2.0 Tesla 보다 작을 경우 순철의 상대투자율은 약 10,000 정도이다. 철의 자기이력 특성은 고려하지 않았다. 그림 2(a)의 결과에서 와전류 영향 때문에 저주파 통과 특성으로 나타남을 알 수 있고, 세 점 A, B, C에서 전달함수의 주파수 특성은 거의 유사함을 알 수 있다. 전달함수의 주파수 특성이 유사함은 와전류에 의한 경사자계 파형의 변형이 유사함을 의미한다. 그림 2(b)에 도전체 구조물이 알루미늄이고 도전체 두께가 100mm인 경우(Case II), 점 A, B, C에서의 전달함수를 보였다. 알루미늄의 전기전도도는 3.8×10^7 mho/m로 가정하였다. 그림 2(b)에서 도전체가 알루미늄인 경우 철인 경우보다 저주파 통과 대역폭이 훨씬 작음을 알 수 있고, 주파수 특성 또한 공간 위치에 따라 상당한 차이가 남을 알 수 있다. 도전체가 철인 경우 통과 대역폭이 더 넓은 것은 철의 투자율이 알루미늄에 비해 매우 커서 표면깊이(skin depth)가 작고, 따라서 와전류가 흐르는 통로가 좁아져 와전류의 발생이 상대적으로 억제되기 때문일 것이다. 그림 2(c)에는 도전체가 알루미늄이고 도전체의 두께가 5mm인 경우(Case III), 점 A, B, C에서의 전달함수를 보였다. 알루미늄의 두께가 얇아지면서 세 점에서의 전달함수 모양이 상당히 유사해짐을 알 수 있다.

전달함수에 의한 경사자계 파형의 예측

식 (1)로 표현되는 전달함수를 이용하면 경사자계코일에 임의의 전류 파형 $i(t)$ 를 인가했을 때 임의의 점 (x, y) 의 경사자계 파형 $a(x, y, t)$ 를 예측할 수 있다. 즉, $i(t)$ 와 $a(x, y, t)$ 의 시간축에 대한 푸리에 변환을 각기 $I(\omega)$, $A(x, y, \omega)$ 라 하면,

$$A(x, y, \omega) = H(x, y, \omega) I(\omega) \quad (2)$$

로 표현되고, $a(x, y, t)$ 는 아래의 역푸리에 변환에 의해 구할 수 있다.

$$a(x, y, t) = F^{-1}[A(x, y, \omega)] \quad (3)$$

전절에서 구한 전달함수에 의해 경사자계 파형이 어떻게 변형되는지를 살펴보기 위해 그림 3에 보인 전류 파형을 경사자계코일에 인가했을 때의 자계 파형을 구해 보았다. 그림 3에 보인 전류 파형은 상승시간 및 하강시간이 모두 0.5msec이고 평탄구간이 15msec인 바이폴라(bipolar) 사다리꼴 파형으로 일반적인 자기공명영상에서 많이 쓰이고 있다. 전절의 Case I에서 그림 3의 전류 파형을 코일에 인가했을 때 점 A, B, C에서의 경사자계 파형을 그림 4에 나타내었다. 경사자계 파형은 모두 같은 면적을 갖도록 정규화 하였다. 세 점에서 모두 와전류에 의해 경사자계 파형이 왜곡됨을 알 수 있는데, 왜곡되는 정도는 세 점에서 거의 동일하다. 그림 5는 Case II에서 그림 3의 전류 파형을 코일에 인가한 경우, 점 A, B, C에서의 자계 파형이다. 이 경우, 도전체 구조물이 전기전도도가 큰 알루미늄이어서 그림 4의 경우보다 자계 파형이 왜곡되는 정도가 훨씬 심함을 알 수 있고, 또한 세 점 사이의 파형 편차도 매우 큰 것을 알 수 있다. 그림 6은 Case III에서 그림 3의 전류 파형을 코일에 인가한 경우, 점 A, B, C에서의 자계 파형이다. 구조물이 얇아져서 그림 5의 경우보다 파형이 왜곡되는 정도가 완화된 것을 알 수 있으나 세 점 사이의 파형 편차는 여전히 심각함을 알 수 있다.

실험 및 결과

본 논문에서 제안한 경사자계 파형 예측 방법의 타당성을 검증하기 위해 Case I과 Case III에 해당하는 환경을 만들어 실제 경사자계 파형을 측정하였다. Case I에 대해서는 Gap이 530mm이고 주자계 강도가 0.3Tesla인 전신촬영용 영구자석의 자극편 위에서 실험을 시행하였고, Case III에 대해서는 두께가 5mm인 알루미늄 판 위에 실험을 시행하였다. 사용한 경사자계코일은 유한요소법에서 사용한 모델과 동일한 형상을 가지고 있다. 즉 직경이 각기 240mm, 280mm이고 권선수가 4인 이중 환형 코일을 사용하였다. 경사자계코일을 이루는 권선의 직경은 3mm이며, 권선의 배치는 그림 1의 유한요소법 모델과 최대한 유사하게 하였다. 그림 7과 그림 8에 Case I과 case III에 대응

하는 환경에서 계속한 자계 파형을 나타내었다. 자계 파형은 유한요소법 모델에서와 같이 A,B,C 세 점에서 측정하였다. 자계 파형의 계측은 직경이 20mm이고 권선 수가 100인 픽업 코일로 하였으며, 픽업 코일에 감지된 신호를 아날로그 적분기로 적분하여 자계 파형을 얻었다. 경사자계 코일 전류의 최대값은 50A 이고, 반복주기는 10초로 하여 각 주기 사이에 와전류의 간섭이 일어나지 않도록 하였다. 그림 7과 8에 보인 자계 파형은 그림 3의 파형 10개를 연속하여 인가했을 때 8번째 파형을 나타낸다. 여러 개의 파형을 인가한 것은 파형을 예측할 때 사용한 DFT (Discrete Fourier Transform)의 주기적인 특성을 고려한 것이다. 그림에 보인 8번째 파형은 거의 정상 상태로 들어가서 DFT의 주기적인 특성을 만족한다고 할 수 있다. 그림 9에 그림 8에 보인 파형을 얻었을 때 사용한 실제 계측 파형을 보였다. 실제 계측은 10개 파형 중 가운데 8개에 대해서 이루어졌다. 그림 7과 그림 4, 그리고 그림 8과 그림 6을 서로 비교하여 보면 실측한 자계 파형이 와전류 영향 전달함수로 예측한 자계 파형과 거의 일치함을 알 수 있다.

결 론

본 논문에서는 공간적으로 편차가 있는 와전류 영향을 정량적으로 예측할 수 있는 전달함수를 구하는 방법과 이를 이용해 경사자계 파형을 예측하는 방법을 제시하였다. 자기공명영상에서 보다 완전하게 와전류를 제거하기 위해 능동 차폐 등 여러 가지 방법이 개발되었으나 와전류를 완전하게 제거하는 것은 불가능하다고 할 수 있다. 특히 고속영상법, 분광영상법 등 고성능 자기공명영상법을 구현하기 위해서는 와전류의 영향을 보다 완전하게 보상해 주어야 하는데, 이를 위해서는 와전류 영향을 보다 완전하게 분석하는 것이 필요하다 하겠다. 본 논문에서 제안한 와전류 영향 전달함수를 이용하면 임의의 입력 전류 파형에 대해 출력 경사자계 파형을 예측할 수 있으므로 와전류 영향 전달함수는 와전류 영향을 보상하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 막대한 계산 시간이 소요되는 유한요소법의 성격 상 모든 계산을 원형 대칭성을 갖는 2차원 모델로 했으나, 본 논문에서 제안한 방법은 3차원 유한요소법을 이용하는 경우에도 똑 같이 적용될 수 있을 것이다. 즉, 원통형 경사자계 코일, 지문형 경사자계 코일 등 실제 MRI에서 널리 쓰이고 있는 각종 경사자계 코일에 대해서도 3차원 유한요소법을 적용하

여 와전류 영향 전달함수를 구하면 실제로 인가되는 경사자계 파형을 정확히 예측할 수 있을 것이다. 본 논문에서 제안한 방법은 와전류 영향을 최소화 하는 주자석 구조의 설계에 이용할 수 있을 것으로 생각되며, EPI나 SEPI 등 고속 자기공명영상법에서 k-공간 채적을 정확하게 추론하는 데에도 사용될 수 있을 것이다. 또한 본 논문에서 제안한 방법은 3차원 경사자계코일을 이용한 유도전류 임피던스단층촬영법(induced-current impedance tomography)에서 와전류 영향을 분석하는데도 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. R. Bowtell and P. Mansfield, "Screened coil designs for NMR imaging in magnets with transverse field geometry", Meas. Sci. Technol., Vol.1, pp431-439, 1990
2. P. Mansfield and R. Bowtell, "Active magnetic screening of coils for static and time-dependent magnetic field generation in NMR imaging", J. Phys. E:Sci. Instrum., Vol. 19, pp540-554, 1986
3. P. Mansfield and B. Chapman, "Active magnetic screening of gradient coils in NMR imaging", J. of Magn. Reson., Vol.66, pp573-576, 1986
4. K.Yoda, "Analytical method of self-shielded planar coils", J. Appl. Phys., Vol. 67, No.9, pp.4349-4353, 1990
5. R. Turner, "Gradient coil design: A review of methods", Magn. Reson. Imag., Vol.11, pp.903-920, 1993
6. 안창범, 김휴정, 오창현, 김치영, "DC offset을 보정한 나선 주사 초고속 자기공명 영상의 재구성 알고리즘", 의공학회지, 제19권, 제3호, pp. 243-250, 1998
7. P. Mansfield, "Multi-planar image formation using NMR spin echoes", J. Phys. C, Vol.10, pp. 155-158, 1977
8. E. Potenzianni II and H.A. Leupold, "Permanent magnets for magnetic resonance imaging", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.Mag-22, No.5, pp.1078-1080, 1986
9. M.G. Abele and H. Rusinek, "Field computation in permanent magnets", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.28, No.1, pp.932-934, 1992