

설계 민감도법을 이용한 유도 전기장 분포 제어를 위한 철심구조 최적화 연구

論 文
55D-8-7

Optimization of Iron Core Structure for Controlling Induced Electric Field Distribution Using the Continuum Design Sensitivity Analysis (CDSA)

朴 俊 枸[†]
(Park, Joon Goo)

Abstract - An optimized iron core structure of stimulating coil are presented in order to control the induced electric field distribution using the Continuum Design Sensitivity Analysis (CDSA) combined with a commercially available generalized finite element code (OPERA). The results show that a Figure-Of-Eight (FOE) coil as well as a circular coil with the proposed iron core structure can increase induced electric field intensity by more than two times and make better field localization, compared with those of existing stimulation coil with a air core. After considering manufacturing constraints, a practical iron core structure based on the proposed optimized one is proposed and its performance is analyzed

Key words : Design Sensitivity Analysis, Finite Element Code (OPERA), Induced Electric Field, Optimized Iron Core

1. 도 입

최근 생체 자기 자극(Magnetic Stimulation) 시스템 연구의 대부분은 심저 자극(Deep Stimulation)과 생체의 특정부위에 만 집중적으로 자기 자극을 전달할 수 있는 자기 자극기 코일의 설계에 집중되어 왔다.

기존 공심(air core) 형태의 권선형(wire wound) 코일 구조는 원형이거나 특수한 경우 8자형 (Figure-Of-Eight)인데, 이러한 공심구조의 자극기는 생체 내에 전달되는 에너지 효율이 낮고 인가되는 자기장(magnetic field)을 집약시키기엔 구조적인 한계를 지니고 있다 [1-5].

일반적으로 50-200 s 정도의 짧은 자기 자극 시간과 특정 부위의 생체 세포 주위에 50-70 V/m의 강한 전기장(electric field)을 유도하기 위해서는 공심구조의 자극기 보다 철심을 갖는 자극기 구조가 유리하다는 사실은 몇몇 논문 및 특허를 통하여 알려져 있다 [6].

본 논문에서는 생체 내 유도되는 전기장의 세기를 강화시킬 수 있을 뿐 아니라, 전기장 분포의 집약도도 또한 개선할 수 있도록 하기 위하여, 기존 공심 구조의 자극기 코일에 삽입되는 철심 구조를 최적화하는 기법 및 이에 대한 결과를 제시한다.

2. 해석적 민감도 공식

본 논문에서는 자기 자극기 코일에 사용되는 철심구조에

대한 최적설계를 수행하기 위하여 일반적인 와류전류(eddy current) 문제에 적용할 수 있는 해석적 민감도 공식을 이용하였다 [6, 7]. 그림 1은 CDSA의 핵심적인 내용을 구성하는 주 시스템(primary system)과 보조 시스템(adjoint system)으로 구성된 듀얼 시스템(dual system)에 대한 개념도를 나타내고 있다.

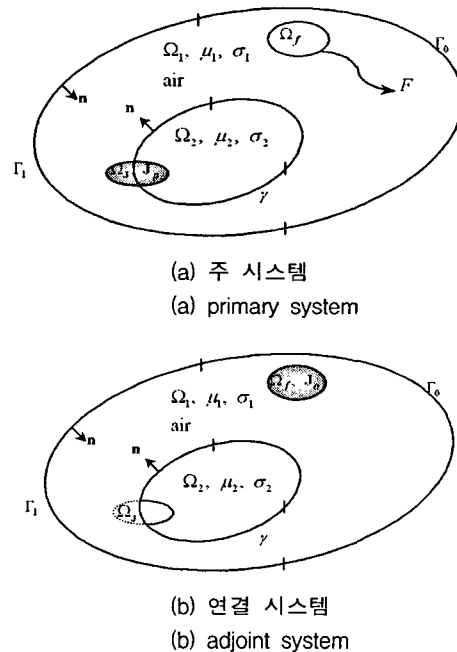


그림 1 CDSA 시스템
Fig. 1 Dual system of the CDSA

[†] 교신저자, 正會員 : 경북대학교전자전기컴퓨터학부 조교수
E-mail : jgpark@knu.ac.kr

接受日字 : 2006年 6月 2日
最終完了 : 2006年 7月 18日

지금까지 CDSA의 해석적인 민감도 공식 유도 및 이를 이용한 다양한 전기기기 및 소자에 대한 성공적인 연구결과가 여러 논문을 통하여 기 발표되었으므로 여기서는 이에 대한 자세한 설명은 생략하고 결과 식만을 사용하기로 한다 [6, 7]. 따라서, 주어진 설계대상 시스템의 해석적인 설계민감도 공식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$dF/dp = \int_V [v_1 - v_2] \nabla \times A_1 \cdot \nabla \times \lambda_2 + j\omega(\sigma_1 - \sigma_2) A_1 \cdot \lambda_2 - (J_1 - J_2) \cdot \lambda_1] nd\Gamma \quad (1)$$

여기서 F 는 목적함수, v 자기저항률, A 자기벡터포텐셜, λ 보조변수, σ 전기전도도, ω 각 주파수, J 전류밀도를 의미한다. 또한 위식에서 p 는 설계 변수 벡터를 나타내고 n 은 p 가 정의되는 매질의 경계면에 수직인 단위 벡터를 의미한다. 식 (1)을 사용하면 임의의 형상에 정의된 설계변수의 변화에 대한 목적함수의 일차(1st order) 미분정보를 전자기 해석 결과로 알 수 있는 자기벡터포텐셜, 전류밀도, 보조변수 및 물질상수 등을 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

3. 표준 EM 소프트웨어 구현

설계 민감도를 계산하기 위하여 앞서 기술한 민감도 공식 (1)과 상용 전자장 FEM 소프트웨어를 결합을 시도하였다. 본 논문에서는 OPERA가 전자장 해석도구로 사용되었다. 설계 민감도를 계산하는 프로그램의 구조는 그림 2에서와 같이 두 개의 독립적 모듈 구성을 갖고 있다. 최적화 모듈(Optimization Module)은 전체 설계 절차를 제어하고 설계 민감도와 같은 주요한 값을 계산하는 기능을 갖는다. 또한 최적화 모듈은 매 설계단계에서 설계 변수와 보조 시스템의 구동항에 대한 정보를 저장하는 기능을 담당한다. 해석 모듈(Analysis Module)은 설계 단계 별 듀얼 시스템의 성능을 계산하여 변화된 설계 모델에 대한 공간적인 전자기장 분포 특성치를 파일형태로 출력하게 된다. 실제 각 반복적 설계 단계에서 설계 변수 및 보조 시스템의 구동항에 대한 갱신된 데이터 정보들은 유한요소 해석도구에서 제공되는 입·출력 명령어들에 의해 제어된다. 구성된 최적화 모듈과 해석 모듈간에는 지속적인 정보교환이 이루어지고 데이터 입·출력을 통하여 설계 변수, 관심 영역에 대한 전자기장 분포 및 상태변수에 대한 정보 교환이 항시 수행된다.

설계민감도 계수는 식 (1)과 듀얼 시스템의 전자기장 분포 값들을 이용하여 계산된다. 최적화 알고리즘에 의한 프로그램의 수행은 다음과 같이 요약된다.

- (I) 주 시스템의 형상정보인 설계변수에 대한 최신 정보를 데이터 파일을 통해 얻는다.
- (II) 해석 모듈을 이용하여 주 시스템의 상태변수 A 를 구한다.
- (III) 주 시스템에 대한 전자기장 해석 데이터를 저장하고 최적화 모듈의 목적 함수 F 와 보조시스템의 구동항 f_0 을 계산한다.
- (V) 해석 모듈을 이용하여 보조 시스템을 해석하여 보조변수를 구한다.
- (VI) 듀얼 시스템에 대한 전자기장 해석 데이터와 민감도

공식 식 (1)을 이용하여 설계민감도 계수를 계산한다. 상기 설계 프로세스를 목적 함수가 최적 해에 수렴할 때까지 계속반복 수행한다.

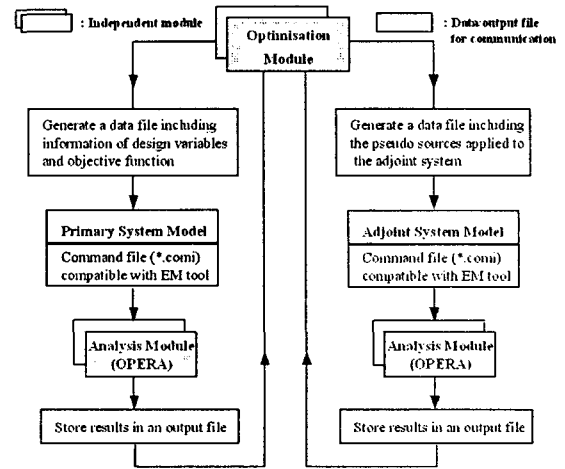


그림 2 설계 최적화를 위한 프로그램 구성
Fig. 2 Program architecture for design optimisation

4. 철심 구조의 최적화

자극기 코일 내에 철심을 삽입하게 되면 유도된 전기장의 집중도 향상 및 전기장의 세기를 강화시킬 수 있어 기존 공심형태의 자극기 코일구조에 비해 우수한 성능을 얻을 수 있다. 즉 제안된 최적화된 철심을 사용하는 자극기 코일 구조는 기존 공심 원형코일의 자극기 구조에 비해 유도전기장의 세기를 증가시키고 두뇌 내부에 유도되는 전기장의 분포를 집중할 수 있는 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 제안한 자극기 구조의 성능을 검증하기 위하여 그림 3에서와 같이 간단한 구형 머리모델(Head Model)을 채택하였다. 자극기 코일 구조의 성능 비교평가는 전자기장 유한요소 해석법을 이용하여 각 자극기 코일이 형성하는 전기장 분포에 대한 분석을 통하여 수행하였다. 그림 3에서와 같은 단순한 실린더 형태의 철심이 중앙에 배치된 자극기 코일 구조는 기존 공심형태의 코일 구조에 비해 2배 이상의 강한 전기장을 생성한다. 이러한 현상은 코일을 통과하는 자속량의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 생체 내에 유도되는 전기장의 투과력을 높이고 유도된 전기장의 분포를 집약하기 위해서는 초기 실린더 형태의 철심구조에 대한 최적 설계가 필요하다. 그림 3과 같이 머리위쪽 4.0 cm 지점에 코일의 중심을 배치하고 반경 10 cm의 머리모델을 대상으로 앞서 제안된 최적화 알고리즘을 적용하였다. 설계 시 사용한 자극기 코일은 단면적 1.0 cm × 1.0 cm로 30회 감긴 원형 구조로 10 kHz, 1 A의 전류가 인가된다고 가정하였다.

설계목적은 초기 실린더 형태의 철심구조를 갖는 자극기 성능에 대비하여 특정 구역에서 유도되는 전기장 분포의 집약도를 향상시키고 또한 유도된 전기장의 세기를 강화시키는 것이다. 이를 위하여 그림 3에서와 같이 신체 내의 특정 부위를 15개 세부영역으로 분할하였고, 이 분할된 영역에서 유도전기장의 세기 및 분포가 계산된다. 이러한 설계목적은 수

학적으로 구현하기 위하여 목적함수를 15개 세부 영역에서 발생하는 와류전류 손실(loss)로 설정하게 되면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F = \sum_{j=1}^{15} (P_j - P_{j0})^2 \Omega_{ej}, \quad P_j = \int_{\Omega_{ej}} \frac{1}{\sigma} \mathbf{J}_e \cdot \mathbf{J}_e^* d\Omega \quad (2)$$

여기서 P_j 와 P_{j0} 는 각각 j번째 세부 영역에서 발생하는 와류전류 손실과 목표치를 나타낸다. Ω_{ej} 는 j번째 세부 영역, \mathbf{J}_e 는 와류전류 벡터, 윗첨자 *는 쥘레(conjugate) 복소수를 각각 의미한다.

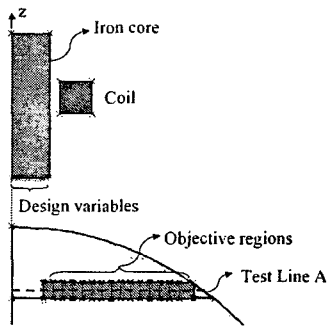


그림 3 초기 철심 구조
Fig. 3 Initial iron core design model

철심의 하단부를 형성하는 13개 절점을 설계 변수로 선정하고 제약조건으로는 각 절점들이 현재 z축 상의 위치보다 항상 양의 방향으로 즉 머리에서 멀어지는 방향으로 움직이게 부여하였다. 제안된 설계최적화 프로그램을 11번 반복하여 계산한 철심의 최적 형태는 그림 4(a)와 같고 이의 실제 구현을 고려하여 그림 4(b)와 같이 단순화 시켰다. 그림 4에서와 같이 최적화된 철심 구조는 일반 실린더 형태의 철심 구조에 비해 철심의 사용량이 감소되었음을 알 수 있다.

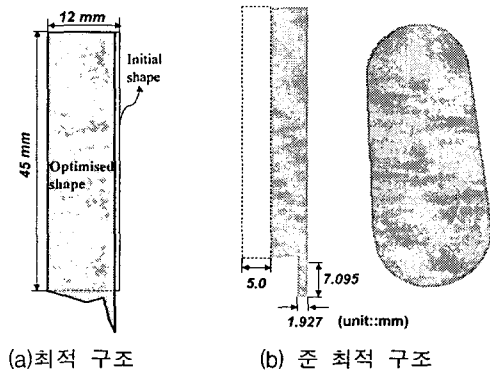


그림 4 제안된 철심 구조
Fig. 4 Optimized core shape

본 논문에서 제안된 최적화된 철심구조의 성능은 그림 5에서 일반 실린더 형태의 철심 구조의 성능과 비교 하였다. 최적화된 철심 구조를 사용한 자극기는 일반 실린더 형태의 자극기에 비해 생체 내에 30%이상의 강한 전기장을 생성하면

서 설계자가 원하는 특정한 유도 전기장 분포와 3mm 이내의 최대 오차 범위 내에서 만족함을 알 수 있다.

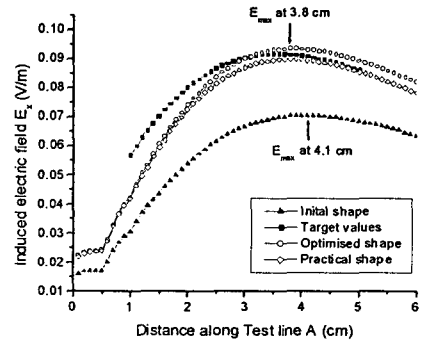
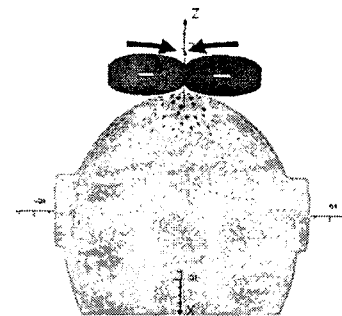
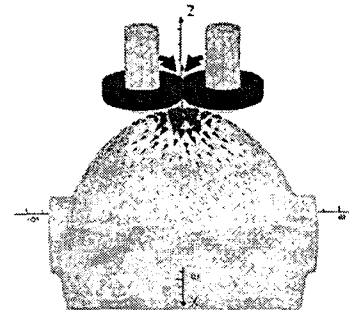


그림 5 철심 구조 성능평가 결과
Fig. 5 Comparison of the induced electric field

실제 최적화된 철심 구조물의 유용성을 검증하기 위하여 그림 6에서와 같이 단순한 구 형태의 두뇌 모델 보다 다소 복잡한 새로운 두뇌 모델을 선정하였다. 그리고 기존 공심형태의 8자형 코일과 이 코일에 최적화된 철심구조를 삽입한 코일에 대한 두뇌 표면에서 유도되는 전기장의 분포를 그림 6에 비교하였다. 최적화 된 철심구조를 사용한 8자형 코일에 의한 유도 전기장의 세기가 강화됨을 그림 6에서 쉽게 확인할 수 있다.



(a) 공심 8자형 코일
(a) a butterfly-shaped coil of two loops without the core



(b) 철심 8자형 코일
(b) a butterfly-shaped coil of two loops with the practical core

그림 6 공심 8자형 코일과 최적화된 철심 구조를 채택한 8자 코일에 의한 두뇌 표면의 유도 전기장 분포 특성비교
Fig. 6 Comparison of the induced current density distributions on the surface between two different coil assemblies

그림 7은 그림 6에 제시한 새로운 두뇌 모형의 정수리로부터 2 cm 이하의 내부에서 y축 방향으로 발생하는 유도 전기장의 분포 특성을 제시하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 최적화된 철심구조를 채용한 8자형 코일은 기존 공심구조의 8자형 코일에 비해 유도되는 전기장의 세기가 두 배 이상 강화되었음을 알 수 있다. 또한 전기장 분포의 집약도를 비교하기 위하여 y 축 방향으로 각 유도되는 전기장의 최대 세기의 70%가 되는 범위(HPRy)를 비교한 결과 최적화된 철심구조를 채용한 8자형 코일의 기존 코일에 비해 1.2 mm 정도 전기장의 집약도가 향상되었음을 확인 하였다.

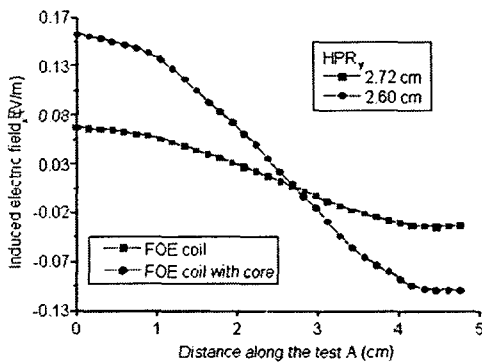


그림 7 공심 8자형 코일 및 최적화된 철심구조를 사용한 코일에 의한 유도 전기장 분포 특성비교

Fig. 7 Comparison of the induced current density distributions and localization between two different coil assemblies

5. 결 론

본 논문에서는 생체 자기 자극기 시스템에 적용 가능한 최적 철심 구조와 실제 구현을 고려한 철심의 최적구조를 제안하였다. 제시한 해석결과들로부터 제안된 최적화된 철심구조를 갖는 자극기 구조는 단순한 실린더 형태의 철심 및 공심구조를 갖는 코일들에 비해 생체 내에서 유도되는 전기장의 세기를 강화시킬 수 있을 뿐 아니라, 유도된 전기장 분포의 집약도를 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

따라서 제안된 최적화된 철심구조는 자기 자극을 인가하여 생체 내의 특정 세포 부위의 자극 하는 응용 분야에서 유도 전기장 세기 강화 및 분포의 집약도 향상을 위해 기여할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 경북대학교 학술진흥연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. Starzynski, B. Sawicki, S. Wincenciak, A. Krawczyk and T. Zyss, *Simulation of magnetic stimulation of the brain*, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, 2002, pp. 1237-1240.
- [2] K. R. Davey, C. H. Cheng and C. M. Epstein, *Prediction of magnetically induced electric fields in biological tissue*, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 38, 1991, pp. 418-422.
- [3] Chunye Ren, Peter P. Tarjan and Dejan B. Popovic, *A novel electric design for electromagnetic stimulation-The slinky coil*, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 42, 1995, pp. 918-925.
- [4] Kai-Hsiung Hsu and Dominique M. Durand, *A 3-D differential coil design for localized magnetic stimulation*, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 48, 2001, pp. 1162-1168.
- [5] A. Thielscher and T. Kammer, *Electric field properties of two commercial figure-8 coils in TMS: calculation of focality and efficiency*, *Clinical Neurophysiology*, vol. 115, 2004, pp1697-1708.
- [6] Dong-Hun Kim, K. S. Ship and J. K. Sykulski, *Applying continuum design sensitivity analysis combined with standard EM software to shape optimisation in magnetostatic problems*, *IEEE Trans. Magn.*, vol 40, 2004, pp. 1156-1159
- [7] Dong-Hun Kim, N. Loucaides, J. K. Sykulski and G. E. Georghiou, *Numerical investigation of the electric field distribution induced in the brain by TMS*, *IEE Proc. Science Measurement and Technology*, vol. 151, 2004, pp 479-483.

저 자 소 개



박준구 (朴俊枸)

1970년 4월 5일생. 1994년 서울대 제어계측학과 학사. 1994년~1996년 서울대학교 제어계측 석사. 1996년~2001년 서울대학교 전기컴퓨터학부 박사. 2001년~2005년 삼성전자 통신연구소 책임연구원. 2005년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수

Tel : 017-254-6580

Fax : 053-950-5505

E-mail : jgpark@knu.ac.kr