

## 자기장 감소 없이 발열을 최소화한 경두개 자기 자극용 중공 코일의 설계

### Novel Design of Hollow Coils for TMS to Minimize the Heat without Reducing Magnetic Field Intensity

소흠 바타차지 · 조 춘 식

Sohom Bhattacharjee · Choon Sik Cho

#### 요 약

경두개 자기자극 (TMS)은 주요 우울증을 포함한 다양한 신경 장애를 치료하는 데 사용되는 비침습적 신경 조절 기술이다. 소뇌는 거의 중추신경계 전체에 연결되어 있는 복잡한 구조이기 때문에 정확한 자극이 필요하다. TMS는 소뇌 신경 자극 분야에서 크게 발전하였고, 비침습적으로 소뇌 활동을 자극하는 것을 보증한다. TMS 코일의 구조와 코일의 재질이 코일의 집속을 달성하는 데 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 그러나 코일의 집속도를 증가시키기 위해 나비 모양인 FOE (figure-of-eight)와 같은 경화 코일의 다양한 구조에 관한 연구는 거의 없다. 또한 코일의 자기장 세기와 온도 사이에는 항상 절충이 있는 것으로 관찰된다. 본 논문에서는 자기장 세기를 크게 줄이지 않으면서 코일의 온도를 낮추기 위한 새로운 TMS 코일 설계를 제안한다. 자기장 세기 및 열 해석을 모사하기 위해 ANSYS Maxwell® 및 FEMTET®과 같은 유한 요소 모사 도구를 사용하였으며, 중공 코일, 이중층 중공 코일 및 에나멜 적층 중공 코일을 본 논문에서 제안한다.

#### Abstract

Transcranial magnetic stimulation (TMS) is a non-invasive neuromodulation technique used to treat various neurological disorders, including major depression. Since the cerebellum is a complex structure connected almost throughout the central nervous system, TMS has gained popularity in the field of cerebellar neurostimulation and promises to stimulate cerebellar activity non-invasively. The TMS coil structure and material play significant roles in achieving the focality of the coil. However, few studies have proposed various structures of solid coils, such as figure-of-eight (FOE) and butterfly-shaped coils to increase the focality of the coil. However, it is observed that there is always a trade-off between the field intensity and the temperature of the coil. In this study, new designs of TMS coils were proposed to reduce the temperature of the coil without significantly reducing the magnetic field intensity. Finite-element simulation tools such as ANSYS Maxwell® and FEMTET® were used to simulate the field intensity and thermal analysis. The proposed design included hollow coils, double-layered hollow coils, and enamel-layered hollow coils.

Key words: Focality, Cerebellar Neurostimulation, TMS Coils, Temperature Analysis, Hollow Coil

한국항공대학교 항공전자정보공학부 및 스마트항공모빌리티학과(School of Electronic and Information Engineering, and Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University)

· Manuscript received November 15, 2022 ; Revised December 13, 2022 ; Accepted March 23, 2023. (ID No. 20221115-092)

· Corresponding Author: Choon Sik Cho (e-mail: cscho@kau.ac.kr)

## I. 서 론

경두개 자기 자극(transcranial magnetic stimulation, TMS)은 두개골 외부에서 시변 자기장을 적용하는 비침습적 신경 자극 기술이다. TMS에서 사용하는 코일은 대뇌 피질의 표적 영역에 도달할 때까지 두개골, 두피 및 뇌척수액(cerebrospinal fluid, CSF)을 포함한 생물학적 조직의 다양한 하위 전도층을 통해 와류전류 및 관련한 전기장을 유도한다<sup>[1]</sup>. TMS의 기본 원리는 교류 자기장이 뇌에 전기장을 유도하는 데 있다. 그러나 충분한 크기의 전기장을 유도하려면 초당 수 킬로 테슬라(kilo Tesla)의 자기장 변화율이 필요하므로 복잡하고 정교한 전자 장치가 필요하다<sup>[2]</sup>. 충분한 크기의 자기장을 생성하고, 집속을 유지하기 위하여서는 높은 전류가 코일을 통과시켜야 하는데, 기계적 및 열적 불안정성을 초래한다<sup>[3]</sup>. 대부분 TMS 연구는 전기장 유도, 자기장 집속 및 침투 깊이에 초점을 맞추고 있으나 열적 및 기계적 불안정성은 간과하고 있다. 한편 코일을 통과하는 고전류는 사람의 머리에 위험을 초래하는 높은 수준의 줄 열(joule heat)을 생성한다.

본 논문에서는 자기장 강도를 감소시키지 않고 집속을 유지하면서 코일의 열 안정성에 중점을 둔 중공 코일(hollow coil) 설계를 수행하였다. TMS용 중공 코일 설계를 도입하면 열을 감소시킬 뿐만 아니라 TMS 코일 장착기(applicator)의 무게를 줄여 휴대가 간편하고 다루기 쉽다.

## II. 설계 방법론

### 2-1 인간 Head 모델링

인간 Head를 모델링하기 위하여 MRI 데이터를 300 mT/m 최대 구배(gradient) 강도와 맞춤형 64채널 Head 코일이 장착된 MGH-USC 3T Connectome 스캐너를 이용하여 포괄적인 확산 MRI 데이터 세트에서 획득하였다<sup>[4]</sup>. 인간 Head의 MRI 데이터와 전기적 특성을 인간 Head 모델에 입력하여 그림 1과 같이 모델을 생성하였고, 모델은 두피, 피부, 뇌 전두엽 및 소뇌를 포함한다.

정확한 모사 결과를 얻기 위하여 인간 Head의 전기적 특성을 입력하였는데, 사용한 전기적 특성은 표 1에 나타내었다. 여기에서 인간의 Head 속 조직은 자성을 띠지 않

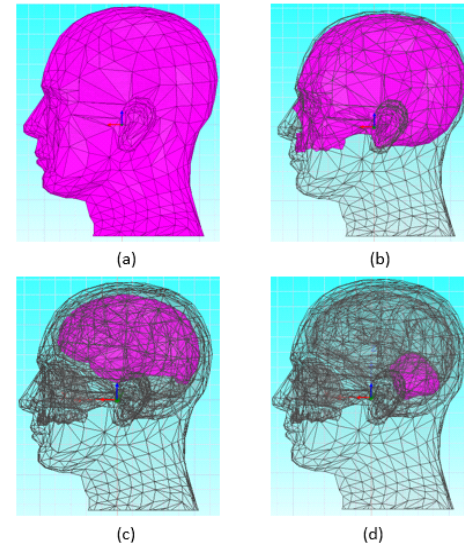


그림 1. 강조 표시된 영역이 (a) 피부, (b) 두개골, (c) 뇌 전두엽 및 (d) 소뇌인 인간 Head의 가상 모델

Fig. 1. Virtual models of human head where the highlighted areas are (a) skin, (b) skull, (c) brain frontal, and (d) cerebellum.

표 1. 인간 Head의 전기적 특성

Table 1. Electrical properties of the human head.

Tissue	Relative permeability ( $\epsilon_r$ )	Conductivity ( $\sigma$ ) (Unit: S)
Skin	41.40	0.87
Skull	11.27	0.23
Brain	45.80	0.76
Cerebellum	44.13	0.96

으므로 상대 투자율( $\mu_r$ )은 1로 설정하였다.

### 2-2 TMS 코일 이론

TMS 코일에 특정한 주파수의 전압과 전류 신호를 인가하면 Head에 자기장이 유도되고 결국 이 자기장이 신경 세포를 자극한다. 시간 고조파계(time harmonic)를 이용하여 자기장에 대한 Maxwell 방정식을 주파수 영역에서 기술하면 식 (1)과 같다<sup>[2]</sup>.

$$\nabla \times \left[ \frac{\nabla \times H}{\sigma + j\omega\epsilon} \right] = j\omega\mu H \quad (1)$$

여기에서 유한 요소법(finite element method, FEM) 등을 사용하여 자기장을 구하기 위하여 식 (1)의 방정식을 풀 수 있는데, 표 1의 인간 Head가 나타내는 상대유전 상수와 전도도를 사용하고 상대투자율은 1로 설정한다<sup>[5]</sup>. 본 고에서는 ANSYS Maxwell®을 사용하여 뇌 속의 자기장 분포를 분석하였다.

### III. 모 사

#### 3-1 코일 설계

본 논문에서는 중공 코일의 세 가지 다른 변형을 설계하고 기존의 8자형(figure of eight) 코일과 비교하였다.

설계된 코일의 매개변수를 최적화하기 위하여 다중 권선으로 구성된 코일의 자기장 세기에 대한 관계식을 식 (2)와 같이 유도하였다. 이를 사용하여 자기장 세기의 이론값을 계산하였고 이를 바탕으로 코일의 초기 설계를 수행하였다. 코일의 초기 설계를 바탕으로 컴퓨터 모사 프로그램을 사용하여 실제 목표로 한 물리적 치수를 최적화하였다.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2(R_o - R_i)} \ln \frac{R_o}{R_i} \quad (2)$$

여기서  $I$ 는 코일의 입력 전류,  $N$ 은 총 권선 수,  $R_i$ 는 코일의 안쪽 반지름,  $R_o$ 는 코일의 안쪽 반지름, 그리고  $\mu_0$ 는 공기 중의 투자율이다.

단층 중공 코일의 자기장 세기를 계산하면  $R_i=10$  mm,  $R_o=60$  mm,  $I=4,000$  A일 때  $B=0.391$  T이며, 뉴런을 자극하는 데 필요한 자기장의 세기가 0.4 T임을 고려하면 적당한 값이라 할 수 있겠다.

단층 중공 코일, 이중 층 중공 코일 및 에나멜 적층 코일을 설계하였으며, 단층 중공 코일은 그림 2에 나타난 것과 같이 구리를 식각(etching)하여 중공 폭  $D_h$ 가 생성된 구조를 보인다. 구리 두께는  $w$ 로 표시되고, 자세한 물리적 치수는 표 2에 나타내었다. 그림 2에는 중공 코일의 평면도와 권선 한 가닥의 단면도를 보인다. 실제 제작을 고려하여 구리의 두께는 1 mm, 권선 수는 10으로 하였고, 전체 코일 지름은 120 mm로 설정하여 설계하였다.

이중 층 중공 코일은 단층 중공 코일을 그림 3과 같이

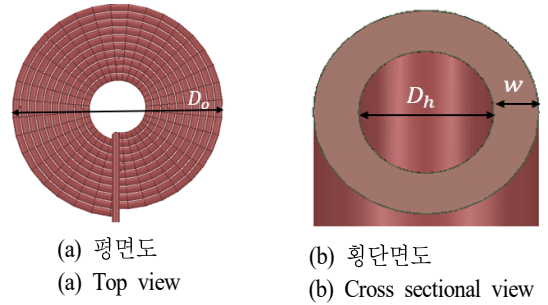


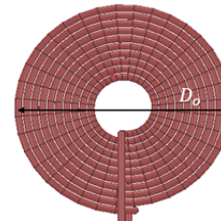
그림 2. 단층 중공 코일

Fig. 2. Single layered hollow coil.

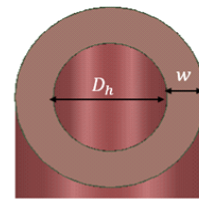
표 2. 단층 중공 코일의 물리적 치수

Table 2. Physical dimensions of single layered hollow coil.

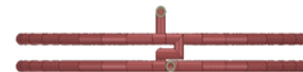
Number of turns	Outer diameter ( $D_o$ )	Hollow width ( $D_h$ )	Copper thickness ( $w$ )
10	120 mm	3 mm	1 mm



(a) 평면도  
(a) Top view



(b) 단면도  
(b) Cross sectional view



(c) 측면도  
(c) Side view

그림 3. 이중 층 중공 코일

Fig. 3. Double layered hollow coil.

이 층으로 쌓아 올려서 자기장 집속도와 자기장 강도를 증가시키도록 설계하였다. 다른 매개변수는 단층 중공 코일과 동일하게 유지하였다. 이 층 구조는 전류가 두 층에서 유사한 형태로 흐를 수 있는 방식으로 연결하였으며, 물리적 치수는 표 3에 나타내었다. 이 층으로 쌓은 구조이므로 권선 수는 단층 중공 코일의 두 배가 된다.

그리고 온도를 낮추어 열 안정성을 향상시키기 위하여 그림 4와 같이 단층 중공 코일에 에나멜 적층을 적용하였다. 에나멜은 고온을 견딜 수 있는 특성이 있으므로 입자 사이에 열을 균등하게 분배하여 코일의 온도를 낮추는데 일조를 한다. 또한 높은 경도, 내식성 및 내마모성의 장점이 있으며 이의 물리적 특성은 표 4에 나타낸 것과 같다<sup>[6]</sup>.

또한 에나멜은 자기장 세기를 감소시키지 않고 코일에서 생성된 열을 흡수하는 특징이 있다. 물리적 치수는 표 5에 나타내었다. 여기에서 에나멜 두께는 구리 두께의

표 3. 이중 층 중공 코일의 물리적 치수

Table 3. Physical dimensions of double layered hollow coil.

Number of turns	Outer diameter ( $D_o$ )	Hollow width ( $D_h$ )	Copper thickness ( $w$ )
20	120 mm	3 mm	1 mm

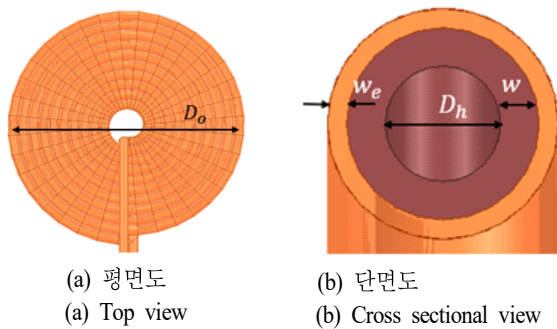


그림 4. 에나멜 적층 중공 코일

Fig. 4. Enamel layered hollow coil.

표 4. 에나멜의 물리적 특성

Table 4. Physical properties of enamel.

Properties	Thermal conductivity	Volume resistivity
Enamel	0.26~0.54 W/(m · K)	10.13~10.16 Ω·cm

표 5. 단층 에나멜 적층 중공 코일의 물리적 치수

Table 5. Physical dimensions of enamel single layered hollow coil.

Number of turns	Outer diameter ( $D_o$ )	Hollow width ( $D_h$ )	Copper thickness ( $w$ )	Enamel thickness ( $w_e$ )
10	140 mm	3 mm	1 mm	0.5 mm

1/2을 사용하였다.

또한 그림 5와 같이 코일의 열적 안정성을 해석하기 위하여 이중 층 중공 코일에 에나멜을 적층하였다. 설계 매개변수는 단층 에나멜 적층 중공 코일과 동일하게 유지하였으며 자세한 물리적 치수는 표 6에 나타내었다.

마지막으로 그림 6에 기존의 8자형 코일의 설계를 나타내었고, 물리적 치수는 표 7에 나타내어 비교를 하였다.

지금까지 설계한 다양한 코일의 형태와 물리적 치수를 비교하여 표 8에 요약하였으며 층수, 권선 수, 전체 지름

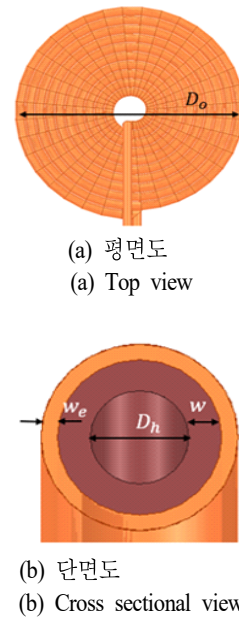


그림 5. 이중 층 에나멜 적층 중공 코일

Fig. 5. Enamel coated double layered hollow coil.

표 6. 이중 층 에나멜 적층 중공 코일의 물리적 치수

Table 6. Physical dimensions of enamel coated double layered hollow coil.

Number of turns	Outer diameter ( $D_o$ )	Hollow width ( $D_h$ )	Copper thickness ( $w$ )	Enamel thickness ( $w_e$ )
20	140 mm	3 mm	1 mm	0.5 mm

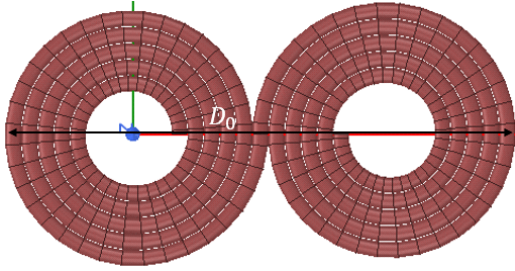


그림 6. 8자형 코일의 설계

Fig. 6. Design of existing figure 8 coil.

표 7. 기존의 8자형 코일의 물리적 치수

Table 7. Physical dimensions of conventional figure of 8 coil.

Number of turns	Outer diameter ( $D_o$ )	Copper thickness ( $w$ )
10 (5 on each side)	160 mm	5 mm

및 높이를 비교할 수 있도록 정리하였다.

### 3-2 모사 매개변수

설계한 세 가지 코일은 FEM 기반 모사 도구인 ANSYS Maxwell®을 사용하여 모사를 수행하였으며 FEMTET®을 사용하여 열분석을 수행하였다. 여기에서 코일에 여기한 전기적인 펄스의 매개변수는 표 9에 나타내었듯이 4,000 A의 전류, 1,750 V의 전압으로 3 kHz의 주파수를 사용하였다.

## IV. 결 과

### 4-1 자기장 분석

설계한 세 개의 서로 다른 코일을 뇌 모델을 사용하여 모사하였으며, 코일은 Head 모델에서 5 mm 떨어진 곳에

표 8. 코일 설계 및 물리적 치수의 비교

Table 8. Comparison of design and physical details of the coil.

Coil type	Design	La-yers	Turns	Outer diameter ( $D_o$ )	Height
Hollow coil		1	10	120 mm	5 mm
Double hollow coil		2	20	120 mm	15 mm
Single layer enamel hollow coil		1	10	140 mm	6 mm
Double layer enamel hollow coil		2	20	140 mm	17 mm
Figure 8 coil		1	10	160 mm	5 mm

표 9. 모사를 위한 여기 매개변수

Table 9. Excitation parameters for simulation.

Current	Voltage	Frequency
4,000 A	1,750 V	3 kHz

배치하였고 뇌와 소뇌에서 자기장 강도를 조사하였다.

모사를 위하여 그림 7에 나타난 것과 같이 인간 Head의 표면(두피)은 코일에서 5 mm 떨어져 있고, 뇌 상부 정면과 코일 사이의 거리는 21 mm, 소뇌와 코일 사이의 거리는 100 mm를 유지시켰다.

우선 첫 번째로 단층 중공 코일을 모사하여 그림 8에



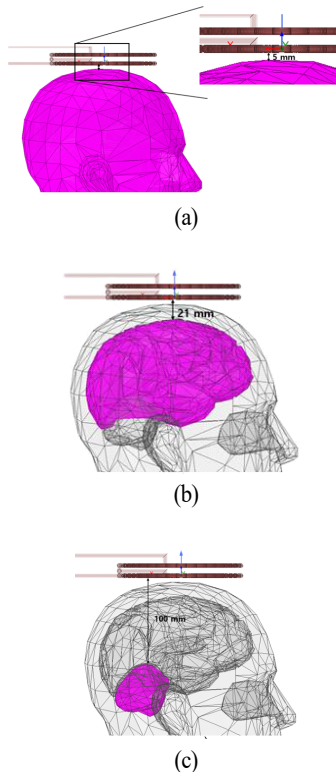


그림 7. 코일과 (a) 두피, (b) 뇌 상부 정면, (c) 소뇌 사이의 거리

Fig. 7. Distance between coil and (a) human head skin, (b) human brain, and (c) cerebellum.

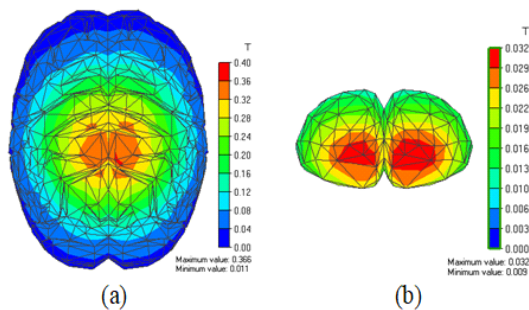


그림 8. 단층 중공 코일에 의한 (a) 전두엽 및 (b) 소뇌의 자기장 강도

Fig. 8. H-field intensity of the single layered hollow coil on (a) frontal brain, and (b) cerebellum.

자기장의 분포를 나타내었는데, 단층 중공 코일의 집속 초점이 작게 형성되어 비교적 정확하고 효율적으로 신경 세포를 자극하기에 적합하다.

그리고 이중 층 중공 코일을 모사하여 자기장을 분석하였는데, 예상대로 그림 9와 같이 이중 층 중공 코일에 의한 자기장 강도가 눈에 띄게 증가한 결과를 볼 수 있다. 권선 수는 단지 두 배로 증가하였지만 자기장의 강도는 세 배로 증가하여 권선의 증가로 인하여 집속 정도가 획기적으로 증가함을 확인하였다.

마지막으로 에나멜 적층 중공 코일을 모사하였으며 에나멜 적층 중공 코일의 자기장 강도는 그림 10의 단층 에나멜 중공 코일은 일반 중공 코일과 크게 차이가 나지 않았다. 그리고 일반적인 8 자형 코일과 비교하여 설계한 코일의 자기장 강도는 10 mm 떨어진 소뇌에서 다소 높게 나타났다<sup>[7]</sup>. 그림 11의 이중 층 에나멜 중공 코일의 자기장 세기 또한 일반 이중 층 중공 코일과 크게 차이가 나

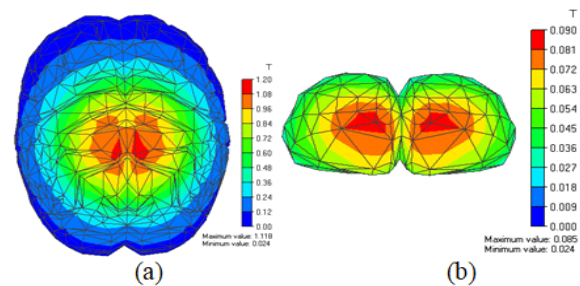


그림 9. 이중 층 중공 코일에 의한 (a) 전두엽 및 (b) 소뇌의 자기장 강도

Fig. 9. H-field intensity of the double layered hollow coil on (a) frontal brain, and (b) cerebellum.

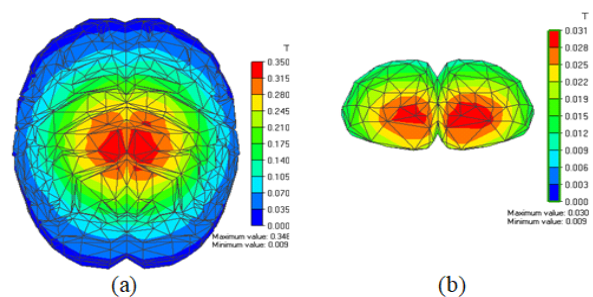


그림 10. 단층 에나멜 적층 중공 코일에 의한 (a) 전두엽 및 (b) 소뇌의 자기장 강도

Fig. 10. H-field intensity of the enamel coated single layered hollow coil on (a) frontal brain, and (b) cerebellum.

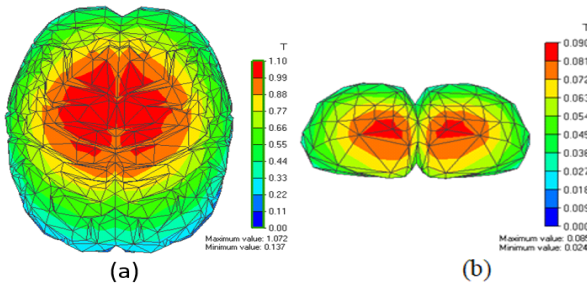


그림 11. 이중 층 에나멜 적층 중공 코일에 의한 (a) 전두엽 및 (b) 소뇌의 자기장 강도

Fig. 11. H-field intensity of enamel coated double layered hollow coil on (a) frontal brain, and (b) cerebellum.

표 10. 설계한 코일의 자기장 세기 비교(기발표된 8 자형 코일 포함)

Table 10. Comparison of H-field intensity of designed coils with figure of eight (FOE) coil from other's work.

Coil	Turns	Magnetic field (brain)	Magnetic field (cerebellum)
Single layer hollow coil	10	0.40 T	0.032 T
Double layer hollow coil	20	1.20 T	0.090 T
Single layer enamel hollow coil	10	0.35 T	0.031 T
Double layer enamel hollow coil	20	1.07 T	0.090 T
Figure 8 coil <sup>[7]</sup>	10	0.42 T	0.030 T

지 않으므로 에나멜 적층으로 인한 자기장 세기는 유지된다고 볼 수 있다.

설계한 네 가지의 코일과 기발표된 8자형 코일의 자기장 세기를 분석하여 표 10에 자세히 나타내었다.

#### 4.2 열 분석

한편 설계한 세 가지 코일을 열 모사 도구인 FEMTET®을 사용하여 모사하였다. 여기에서 코일은 TMS의 주로 사용하는 조건으로 배치하였고 실내 온도는 25°C로 설정하였으며, 온도 분포는 그림 12에 나타내었다.

열 모사 후 코일의 온도 및 자기장 세기 분포를 표 11

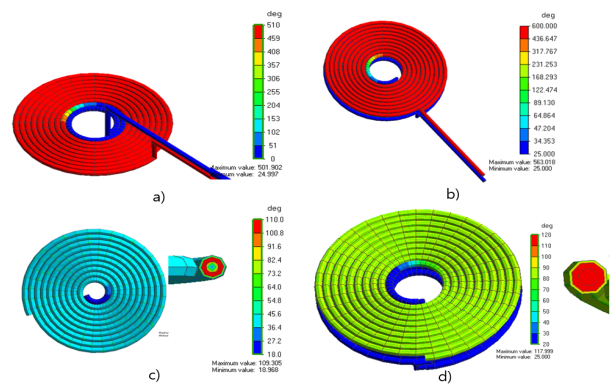


그림 12. (a) 단층 중공 코일, (b) 이중 중공 코일, (c) 단층 에나멜 적층 중공 코일, (d) 이중 층 에나멜 적층 중공 코일 단면의 온도 분석

Fig. 12. Temperature analysis of (a) single layered hollow coil, (b) double layered hollow coil, (c) enamel coated single layered hollow coil and (d) enamel coated double layered hollow coil.

표 11. 설계한 코일과 8 자형 코일의 열 및 자기장 세기 분석 비교

Table 11. Comparison of thermal and H-field intensity analyses of designed coils with figure of eight (FOE) coil.

Coil	Turns	Magnetic field (brain)	Magnetic field (cerebellum)	Temperature
Single layer hollow coil	10	0.40 T	0.032 T	501.9 °C
Double layer hollow coil	20	1.20 T	0.090 T	563.0 °C
Single layer enamel hollow coil	10	0.35 T	0.031 T	109.3 °C
Double layer enamel hollow coil	20	1.07 T	0.090 T	117.9 °C
Figure 8 coil <sup>[7]</sup>	10	0.42 T	0.030 T	793.5 °C

에 나타내었는데, 자기장 세기를 유지하면서 에나멜 적층 중공 코일의 온도가 획기적으로 낮게 나타남을 알 수 있고, 단층 중공 코일 및 이중 층 중공 코일 모두 기발표된 8 자형 코일의 온도보다 상당히 낮음을 알 수 있다. 표 11에 따르면 속이 빈 중공 코일이 일반적인 8 자형 코일보

다 열 안정성이 훨씬 높음을 알 수 있다. 그중에서 가장 안정적인 코일은 단층 에나멜 적층 코일로서 코일에서 발생하는 막대한 양의 열을 성공적으로 흡수하여 표면을 냉각시키기 때문이다.

코일의 열 안정성을 검증하기 위하여 모든 코일을 배치하여 인간 Head 모델에서 온도를 관독하였다. 그림 13에서 중공 코일이 사용될 때 사람 Head의 온도 관독값을 표시하였으며 온도가 임계값 미만임을 확인하였다.

다양한 코일에 대한 인간 Head 모델의 온도는 표 12에 요약하였으며, 모든 중공 코일이 8자형 코일의 온도보다 인간 Head에서 대부분 낮음을 알 수 있다.

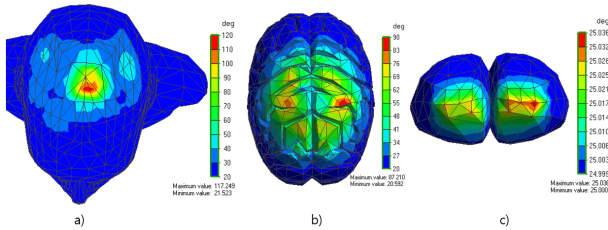


그림 13. 중공 코일의 (a) 두피, (b) 뇌 상부 정면, (c) 소뇌에서의 온도 분포

Fig. 13. Temperature distribution of hollow coil on (a) human head skin, (b) brain frontal, (c) cerebellum.

표 12. 인간 Head 모델의 온도 해석

Table 12. Thermal analysis on human head model.

Coil type	Average temperature on human skin (°C)	Average temperature on brain frontal (°C)	Average temperature on cerebellum (°C)
Single layer hollow coil	52.2	41.2	25.0
Double layer hollow coil	43.1	32.3	25.0
Single layer enamel hollow coil	67.5	52.1	27.2
Double layer enamel hollow coil	51.0	40.5	25.0
Figure 8 coil	75.6	52.3	27.1

## V. 결 론

TMS는 신경 자극을 필요로 하는 분야에 비침습적 치료 선택지를 제공하고 있으며 그 효과는 현재까지 부분적으로만 연구되고 있다. 본 논문에서는 혁신적인 코일 설계를 열적 안정성을 목표로 수행하였다. 자기장의 강도를 유지하면서 TMS의 가장 큰 문제인 발열을 해결한 중공 코일을 설계하였으며 그중에서도 에나멜 적층 코일은 효율적인 열 흡수를 바탕으로 획기적인 열 저감 특성을 보인다. 설계한 코일을 제작하여 TMS에 적용한다면 비침습적인 뇌 신경 자극 치료 기술의 획기적인 발전을 이룰 것으로 믿어 의심치 않는다.

## References

- [1] I. C. Carmona, O. F. Afuwape, D. C. Jiles, and R. L. Hadimani, "Estimation of the focality of coils and quality of stimulation of biological tissues during transcranial magnetic stimulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 2, pp. 1-6, Feb. 2022.
- [2] L. M. Koponen, "Large thin overlapping coils, a novel approach for multichannel transcranial magnetic stimulation," M.S. thesis, Aalto University, 2013.
- [3] S. D. March, S. J. Stark, R. L. Hadimani, D. R. Stiner, M. J. Senter, and K. K. Spoth, et al., "Thermal and mechanical analysis of novel transcranial magnetic stimulation coil for mice," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 9, pp. 1-5, Sep. 2014.
- [4] Q. Tian, Q. Fan, T. Witzel, M. N. Polackal, N. A. Ohringer, and C. Ngamsombat, et al., "Comprehensive diffusion MRI dataset for *in vivo* human brain microstructure mapping using 300 mT/m gradients," *Scientific Data*, vol. 9, p. 7, Jan. 2022.
- [5] Z. D. Deng, S. H. Lisanby, and A. V. Peterchev, "Electric field depth-focality tradeoff in transcranial magnetic stimulation: Simulation comparison of 50 coil designs," *Brain Stimulation*, vol. 6, no. 1, pp. 1-13, Jan. 2013.



- [6] D. Song, R. Tang, F. Yang, Y. Qiao, J. Sun, and J. Jiang, et al., "Development of high-performance enamel coating on grey iron by low-temperature sintering," *Materials*, vol. 11, no. 11, p. 2183, Nov. 2018.
- [7] M. Schecklmann, M. Schmauß, F. Klinger, P. M.

Kreuzer, L. Krenkel, and B. Langguth, "Resting motor threshold and magnetic field output of the figure-of-8 and the double-cone coil," *Scientific Reports*, vol. 10, p. 1644, Feb. 2020.

소흙 바타차지 [한국항공대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-8705-1473>



2018년 9월: 인도 Maulana Abul Kalam Azad 기술대학교 전기공학과 (기술 학사).

2020년 9월~현재: 한국항공대학교 항공 전자정보공학부 박사과정

[주 관심분야] Bio Magnetism, Radio Medical Device, Non Invasive Medical Device

Design, Antenna Design

조 춘 식 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0833-5254>



1887년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)

1998년 12월: 미국 Colorado 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

1987년~1993년: LG 정보통신

1999년~2003년: 팬택앤큐리텔

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공

전자정보공학부 교수

[주 관심분야] RFIC 및 Millimeter-Wave IC 설계, Analog IC 설계, 전파의료기기, 레이더 시스템