

<<한국방사선학회논문지>> 2026년 2월 제20권 1호 별채본

Simulation Study of Spiral and Double-Plate RF Receive Coils for Multi-Sample Histo-MRI

Yeunchul Ryu*

Department of Radiological Science, Gachon University

Simulation Study of Spiral and Double-Plate RF Receive Coils for Multi-Sample Histo-MRI

Yeunchul Ryu*

Department of Radiological Science, Gachon University

Received: February 06, 2026. Revised: February 26, 2026. Accepted: February 28, 2026.

ABSTRACT

Histological magnetic resonance imaging (histo-MRI) is a high-resolution imaging technique capable of providing microstructural information approaching the level of conventional histopathological analysis and has primarily been applied to ex vivo tissue samples. While MRI in general offers the advantage of in vivo image acquisition, histo-MRI in an ex vivo environment provides high image contrast for a wide range of biologically derived substances, including metabolites, and enables quantitative signal analysis. These characteristics distinguish histo-MRI from conventional optical microscopy-based histological methods and make it a valuable tool for detailed structural and functional tissue analysis in pathological and preclinical research. However, conventional histo-MRI implementations relying on single-channel transmit/receive coils require long acquisition times, which limits their practical use, particularly in studies involving multiple samples. Conventional double-plate radio-frequency (RF) receive coils used in histo-MRI can significantly disturb the transmitted RF magnetic field ($B1^+$) when operated in conjunction with an external transmit coil, resulting in reduced excitation efficiency within the sample regions. In this study, a spiral-shaped RF receive coil is proposed to minimize transmit field shielding while maintaining high receive sensitivity. Electromagnetic simulations were performed at 500 MHz using a birdcage coil as a single transmit source, together with a 16-channel receive coil array. The $B1^+$ and $B1^-$ field distributions of the two coil configurations were compared within a rectangular phantom ($20 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$). In the double-plate configuration, the mean $B1^+$ inside the samples was approximately $0.56 \mu\text{T}$ with a mean $B1^-$ of about $2.02 \mu\text{T}$. In contrast, the spiral configuration increased the mean $B1^+$ to approximately $3.98 \mu\text{T}$ and improved the mean $B1^-$ to approximately $4.44 \mu\text{T}$, indicating enhanced excitation efficiency and receive sensitivity. These findings indicate that spiral RF receive coils represent a promising alternative for efficient multi-sample histo-MRI under a single transmit-channel configuration.

Keywords: Histological MRI, Multi-channel Spiral RF Coil, Electromagnetic Simulation, $B1$ field homogeneity, Multi-sample MRI

I. INTRODUCTION

Histological Magnetic Resonance Imaging (histo-MRI)는 기존의 병리학적 조직 검사 수준에 근접하는 미세 구조적 정보를 제공할 수 있는 고해상도 자기공명영상 기법이다. 조직의 미세한 해부학적 구조와 조직학적 특징을 비침습적으로 관찰할 수 있다는 점에서, histo-MRI는 병리학적 변화의 이해와 분석

에 중요한 정보를 제공한다. 특히 광학 현미경 기반의 전통적인 조직학적 검사 방법과 달리, histo-MRI는 in vivo 상태에서 영상 획득이 가능하다는 장점을 가지며, 이러한 특성으로 인해 전임상 및 병리학적 연구 분야에서 활용도가 점차 증가하고 있다.

최근에는 조직 슬라이스 기반 Histo-MRI의 해상도와 신호대잡음비(SNR)를 향상시키기 위한 전용

* Corresponding Author: Yeunchul Ryu

E-mail: yeunchul.ryu@gachon.ac.kr

Tel: +82-032-820-4410

RF 코일 설계 연구가 활발히 보고되고 있다^[1-6]. 특히 얇은 조직 절편에 최적화된 평면형 또는 multi-turn 구조의 수신 코일이 제안되었으며, 임상용 및 전임상용 고자장 MRI 시스템에서 microscopic 수준의 공간 해상도를 구현한 사례들이 보고되고 있다^[4,7-10]. 이러한 접근은 조직 절편과 코일 간의 거리를 최소화하여 민감도 분포를 국소화함으로써, 기존 볼륨 코일 대비 높은 SNR을 확보하는 것을 목표로 한다.

Histo-MRI는 미세 구조를 분해하기 위해 매우 높은 공간 해상도를 요구하므로, 영상 획득 시간이 길다는 한계를 가지며 이러한 시간적 제약은 여러 개의 조직 샘플을 영상화해야 하는 경우 더욱 두드러진다. 기존의 histo-MRI 시스템에서는 단일 또는 매우 제한된 수의 조직 샘플에 대해 영상을 획득하였으며 단일 채널의 송신/수신(Tx/Rx) 코일을 이용한 순차적 영상 획득 방식이 일반적이었다. 그 결과, 샘플 수가 증가할수록 전체 스캔 시간 또한 선형적으로 증가하여 실험의 시간적 효율성을 크게 저하시켰다.

최근 연구에서는 ex vivo 뇌 조직 및 고정 조직 샘플을 대상으로 다채널 수신 어레이 코일을 적용하여, 병리학적 분석과 직접적으로 연계 가능한 고해상도 확산 및 구조 영상을 획득하는 시도가 이루어지고 있다. 고밀도 수신 배열은 병렬영상 기법을 통한 가속과 g-factor 감소뿐 아니라, 장시간 스캔 조건에서의 안정성과 신호 균일성 향상 측면에서도 장점을 보이고 있다^[11,12]. 이러한 기술적 진보는 Histo-MRI를 단순한 고해상도 영상 기법을 넘어, 조직학적 검증(histological validation)과 정량적 미세 구조 분석을 연결하는 정밀 영상 플랫폼으로 확장시키는 기반을 마련하고 있다.

시스템 관점에서 보면, 현대 MRI 장비는 다수의 수신 채널을 제공하는 반면, 송신 채널의 수는 제한적인 경우가 많으며 이러한 구조적 특성은 단일 송신 코일과 다채널 수신 코일을 결합한 형태의 다중 샘플 histo-MRI 구성이 이론적으로 가능함을 시사한다. 그러나 이러한 구성을 실제로 구현하기 위해서는 송신 코일과 수신 코일 간의 전자기적 상호작용을 고려한 RF 코일 구조 설계가 필수적이다.

기존의 histo-MRI에서는 국소적인 수신 감도를 높은 수준으로 확보하기 위해 판구조의 금속판을 이용하는 이중 판형(double-plate) RF (DP RF) 수신 코일이 널리 사용되어 왔다. 하지만 이러한 구조는 평면 전도체를 포함하고 있어, 새장형(birdcage) 코일과 같은 외부 송신 코일과 함께 사용될 경우 DP RF 코일의 금속면이 송신 RF 자기장(B_1^+)의 형성을 방해하는 차폐(shielding) 효과를 유발할 수 있다. 이로 인해 샘플 내부에서 충분한 여기 필드가 형성되지 않으며, 영상 신호의 품질 저하로 이어질 수 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 나선형의 RF 수신 코일 구조를 제안한다. 나선형 코일은 비교적 개방된 기하학적 구조를 가지며, 송신 RF 필드의 투과를 유지하면서도 국소적인 수신 감도를 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 단일 새장형 송신 코일과 다채널 수신 코일 구성을 가정한 500 MHz 전자기 시뮬레이션을 통해, 기존 DP RF 수신 코일과 제안된 나선형(spiral) RF (Spr RF) 수신 코일의 RF 필드 특성을 정량적으로 비교 분석하고, 다중 샘플 histo-MRI에 대한 적용 가능성을 평가하고자 한다.

II. MATERIALS AND METHODS

1. 송신용 새장형 RF 코일

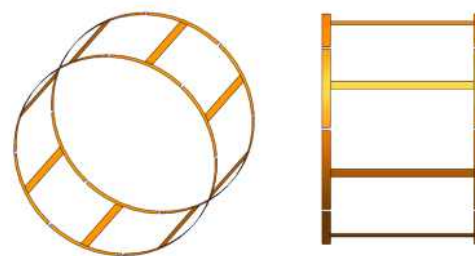


Fig. 1. 8-leg high-pass type birdcage RF coil for generating transmit B_1^+ field.

송신 코일로는 500 MHz에서 동작하는 고대역 통과형 새장형 (high-pass birdcage) 코일을 사용하였다. 새장형 코일은 Fig. 1에서 보여지는 것과 같이 8개의 leg를 가지며, 반지름은 80 mm, 길이는 100 mm, 도체 폭은 6 mm로 설정되었다.

2. 수신용 다채널 RF 코일

수신 코일은 총 16개의 채널로 구성하여, 16개의 샘플을 동시에 영상화하는 시나리오를 가정하였다. 샘플은 RF 코일 비교의 일관성을 확보하기 위해 공통적으로 직사각형 형태를 사용하였으며, 각 샘플의 크기는 $20 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$ 로 실제 histological imaging에 사용되는 샘플 글라스 (sample glass)의 규격을 사용하여 설정되었다. 샘플번호는 Y축의 값이 높을수록 X축의 값이 낮을수록 낮은 번호가 부여되었고 같은 Y 축으로 배열된 샘플들이 인접한 번호를 가지는 형태로 배열되었다.

2.1. DP RF 코일

DP RF 수신 코일은 Fig. 2에서와 같이 500 MHz 공진조건을 만족하도록 파라미터를 조정하였다. Fig. 3은 DP RF 코일의 구조를, Fig. 4는 다채널 구조에서의 코일 배치를 보여준다. 확정된 DP RF 코일은 최종적으로 $30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 직사각형 구조의 도판이 2 mm 간격을 갖도록 하고 다채널 구성에서는 DP RF 코일 간 각격을 X축 5 mm, Y축 10 mm가 되도록 설정하였다.

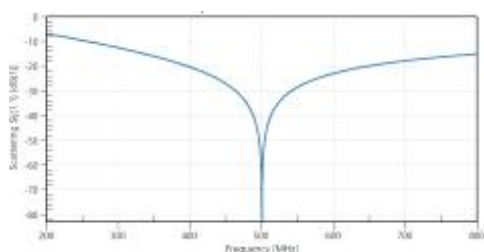


Fig. 2. Coil tune feature of each DP RF coil element in the simulation.

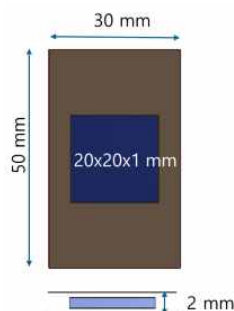


Fig. 3. Structure of single DP RF coil element.

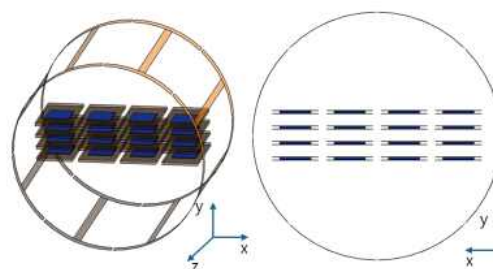


Fig. 4. 16-channel DP RF receive array placed in birdcage transmit RF coil.

2.2. Spr RF 코일

Spr RF 수신 코일은 DP RF 코일과 같이 500 MHz 공진을 만족하도록 설계하였으며 시뮬레이션된 코일의 동작 특성은 Fig. 5와 같이 비대칭형 다이폴안테나가 접힌 구조를 가질 때의 전형적인 형태와 같이 나타난다. 단일 Spr RF 코일은 Fig. 6에서와 같이 2턴의 회전수를 가지며 좌우 길이의 비가 다른 변형된 비대칭형 다이폴안테나 구조로 설계되었고 내부 간격은 19 mm, 15 mm를 갖도록 하였다. 다채널 구성은 Fig. 7과 같이 코일 간 분리되는 X축 방향으로 7 mm, Y축 방향으로 10 mm로 설정하였다.

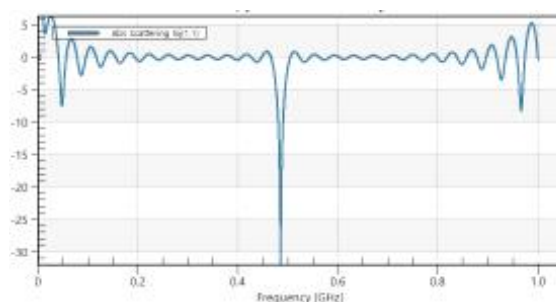


Fig. 5. Coil tune feature of each Spr RF coil element.

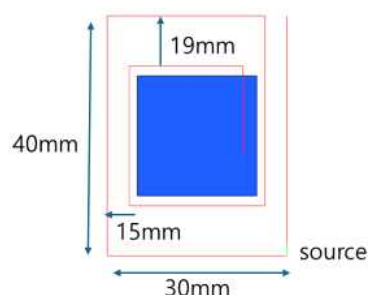


Fig. 6. Structure of single Spr RF coil element.

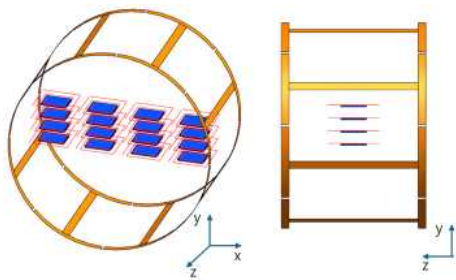


Fig. 7. 16-channel Spr RF receive array placed in birdcage transmit RF coil.

3. 전자기장 시뮬레이션

본 연구에서 RF 코일의 전자기 시뮬레이션은 상용 전자기 해석 소프트웨어인 Sim4Life (ZMT Zurich MedTech AG, 스위스)를 사용하여 수행하였다. 모든 RF 코일 모델은 500 MHz에서의 동작을 기준으로 3차원 모델링되었으며, 송신 및 수신 RF 자기장 (B_1^+ 및 B_1^-) 분포를 계산하였다. 송신 코일로는 고주파 통과 새장형 코일을 사용하였고, 수신 코일로는 DP RF 코일 및 Spr RF 코일 구조를 각각 구현하여 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과는 동일한 조건과 스케일에서 비교하여, 코일 구조에 따른 RF 필드 특성 차이를 정량적으로 평가하였다.

III. RESULTS

1. DP RF 코일의 필드 특성

DP RF 코일의 수신 B_1^- 필드 분포를 시뮬레이션하여 얻은 값을 Fig. 8에 보였다. DP 코일 내부에서 Z 방향으로 신호의 강도가 변하는 형태의 불균일성이 관찰되었으며 이러한 낮은 신호강도는 전압이 인가되는 위치와 연관이 있고 인가시 DP 구조의 전도성 평면으로 전파되기 위한 불활성 구역이 발생하는 데 원인이 있는 것으로 보인다. 각 샘플에서 관찰된 자장세기의 평균값과 최대, 최소, 표준편차는 Table 1에서 보였다.

관형 수신 코일을 새장형 송신 코일과 함께 배치한 형태에서 샘플 내부에 형성되는 송신 B_1^+ 필드는 Fig. 9에서 나타내었다. 각 샘플에서의 필드 값은 Table 2에 표시하였다. B_1^+ 필드의 크기는 최대값 기준 $0.7 \mu\text{T}$ 이하로 관찰되었다.

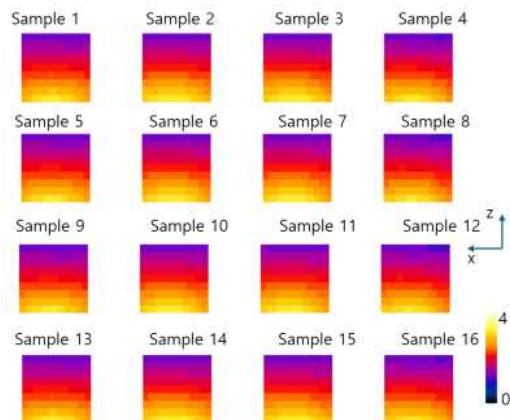


Fig. 8. B_1^- Field from DP RF coil array.

Table 1. Features of simulated B_1^- field of DP RF coil array in the sample

Sample Number	Mean Value (μT)	Maximum Value (μT)	Minimum Value (μT)	Standard Deviation
1	2.005	3.061	1.155	0.476
2	2.058	3.122	1.195	0.481
3	2.058	3.122	1.191	0.482
4	1.979	3.041	1.123	0.479
5	1.992	3.033	1.158	0.468
6	2.054	3.104	1.204	0.475
7	2.053	3.105	1.199	0.476
8	1.965	3.013	1.121	0.473
9	1.992	3.033	1.158	0.468
10	2.055	3.105	1.204	0.475
11	2.053	3.104	1.200	0.476
12	1.965	3.014	1.121	0.473
13	2.004	3.061	1.156	0.476
14	2.059	3.122	1.194	0.482
15	2.058	3.123	1.192	0.482
16	1.979	3.041	1.123	0.479

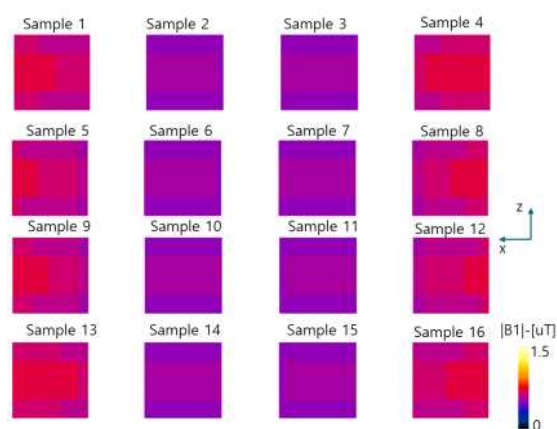


Fig. 9. B_1^+ Field from birdcage transmit RF coil with 16 channel DP RF coil array.

Table 2. Features of simulated $B1^+$ field of birdcage RF coil with DP RF coil array

Sample Number	Mean Value (μ T)	Maximum Value (μ T)	Minimum Value (μ T)	Standard Deviation
1	0.624	0.672	0.567	0.026
2	0.515	0.550	0.477	0.018
3	0.513	0.543	0.484	0.015
4	0.645	0.690	0.590	0.025
5	0.612	0.661	0.553	0.027
6	0.514	0.547	0.478	0.017
7	0.515	0.547	0.481	0.017
8	0.621	0.670	0.562	0.027
9	0.619	0.668	0.561	0.027
10	0.515	0.547	0.481	0.017
11	0.514	0.548	0.478	0.017
12	0.611	0.660	0.553	0.027
13	0.645	0.692	0.590	0.026
14	0.513	0.543	0.484	0.015
15	0.515	0.549	0.477	0.018
16	0.624	0.672	0.567	0.026

2. Spr RF 코일의 필드 특성

나선형 수신 코일을 적용한 경우, 수신 $B1^-$ 필드는 높은 신호 강도를 보였으며 그 결과는 자기장 세기값을 색으로 변환하여 Fig. 10에 나타내었다. 각 샘플에서의 평균/최대/최소값과 표준편차를 Table 3에 수치로 표기하였다.

Spr RF 코일이 새장형 RF 코일의 송신시에 미치는 영향을 자기장의 세기로 Fig. 11과 Table 4에 나타내었다. 새장형 송신 코일에 의해 형성된 $B1^+$ 필드는 샘플 내부로 효과적으로 전달되었으며, 최대 약 11.54 μ T 수준의 필드 강도가 관찰되었으며 16개 샘플 영역에서 평균 3.98 μ T의 $B1^+$ 필드가 형성되었다. 일부 Spr RF 코일 채널에서는 수신 코일 간의 자장 결합 현상이 관찰되었으며, 이 경우 국소적으로 $B1$ 필드 강도가 증가하거나 감소하는 양상을 보였다.

또한 나선형 수신 코일과 새장형 송신 코일 간의 전자기적 상호 간섭(Tx-Rx coupling)이 발생함에 따라, 송신 $B1^+$ 필드 분포가 공간적으로 왜곡되는 현상도 확인되었다.

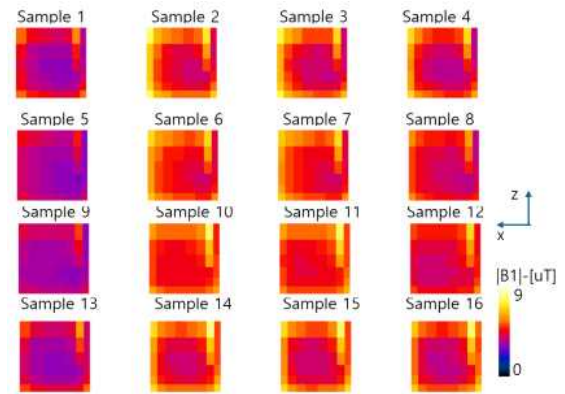


Fig. 10. $B1^-$ Field from Spr RF coil array.

Table 3. Features of simulated $B1^-$ field of Spr RF array in the sample

Sample Number	Mean Value (μ T)	Maximum Value (μ T)	Minimum Value (μ T)	Standard Deviation
1	3.812	5.587	2.956	0.657
2	4.908	7.335	3.744	0.897
3	4.757	7.116	3.634	0.870
4	4.495	6.644	3.500	0.786
5	3.477	4.633	2.780	0.463
6	4.876	6.663	3.881	0.695
7	4.833	6.697	3.886	0.702
8	4.296	5.905	3.536	0.592
9	3.472	4.900	2.942	0.489
10	4.893	7.321	4.264	0.764
11	4.877	7.440	4.180	0.815
12	4.375	6.607	3.771	0.709
13	3.738	5.806	2.934	0.718
14	4.867	7.630	3.785	0.961
15	4.794	7.588	3.709	0.969
16	4.643	7.448	3.542	0.976

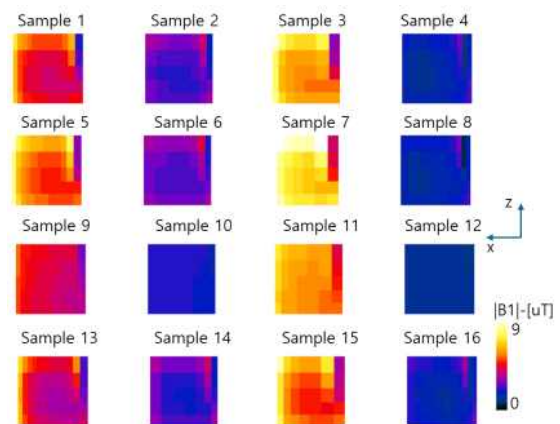
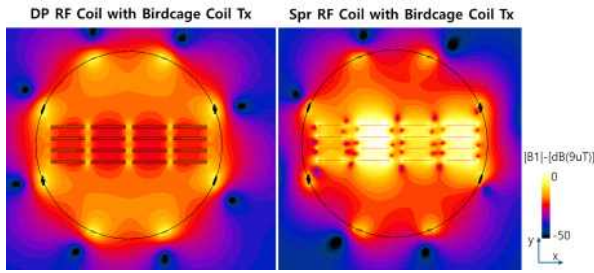


Fig. 11. $B1^+$ Field from birdcage transmit RF coil with 16 channel Spr RF coil array.

Table 4. Features of simulated $B1^+$ field of birdcage RF coil with Spr RF coil array

Sample Number	Mean Value (μT)	Maximum Value (μT)	Minimum Value (μT)	Standard Deviation
1	4.908	7.531	2.294	1.309
2	2.823	4.230	2.082	0.537
3	6.517	9.475	3.209	1.567
4	1.803	2.988	0.989	0.500
5	5.986	9.578	3.150	1.607
6	2.996	4.409	2.231	0.545
7	7.835	11.54	4.124	1.855
8	1.798	3.015	0.865	0.537
9	4.411	5.815	3.046	0.692
10	2.215	2.454	1.547	0.227
11	6.118	7.600	4.406	0.799
12	1.410	1.526	1.029	0.124
13	4.346	7.269	2.527	1.186
14	2.697	4.290	2.092	0.550
15	5.846	8.799	3.576	1.306
16	1.992	3.568	1.321	0.562

Fig. 12. $B1^+$ Field comparison between DP RF coil and Spr RF coil when birdcage RF coil used Tx.

이는 송신 시 수신 코일 요소에 유도된 전류가 재복사되어, 일부 샘플 영역에서 $B1^+$ 필드가 증폭되거나 반대로 상쇄되는 결과로 해석된다. 이러한 현상은 나선형 코일이 특정 조건에서 무선 국소 코일과 유사하게 동작할 수 있음을 시사한다. Fig. 12에서 두 코일에서 송신신호에 어떤 영향을 보여주는지 같은 스케일로 비교하였다.

IV. DISCUSSIONS

본 연구에서는 단일 채널 새장형 송신 코일과 다 채널 수신 코일 구성을 기반으로, 기존 DP 형태의 RF 수신 코일과 나선형의 Spr RF 수신 코일을 전자기 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 전자기 시뮬레이션을 기반으로 RF 수신 코일 구조에 따른 송신 $B1^+$ 차폐 특성과 수신 $B1^-$ 민감도 분포를 비교하는 연구로 코일의 절대적인 SNR 값을 정량적

으로 산출하는 연구가 아니라, 동일한 시뮬레이션 조건 하에서 구조적 차이에 따른 상대적 수신 성능 변화를 평가하는 연구이다. 일반적으로 MRI에서 수신 신호의 크기는 여기 효율과 수신 민감도의 곱에 비례하며, 작은 flip angle 근사에서 다음의 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$SNR \propto \frac{M_0 B1^+ B1^-}{\sqrt{R_{coil} + R_{sample}}} \quad (1)$$

여기서 R_{coil} 은 코일 저항, R_{sample} 은 샘플에 의한 손실을 의미한다. 절대적인 SNR 값을 계산하기 위해서는 Q factor, 도체 손실, 샘플 로딩 조건, 열 잡음 모델링 등이 포함되어야 한다. 그러나 본 연구는 동일한 주파수, 동일한 샘플 모델, 동일한 재질 조건에서 코일 기하학적 구조만을 변경하여 비교한 전자기 시뮬레이션 기반 연구로, 손실 조건은 동일하게 설정하였다. 따라서 본 연구에서 관찰된 $B1^+$ 차폐 감소와 $B1^-$ 증가의 동시 개선은 상대적인 여기 효율 및 수신 민감도 향상 가능성을 동시에 시사하며, 이는 동일 조건 하에서 구조적 차이에 따른 SNR 개선 가능성을 평가하는 데 충분한 공학적 근거를 제공한다. 본 논문에서 언급한 SNR 향상은 절대값의 직접 계산이 아니라, $B1^+$ 와 $B1^-$ 의 상대적 개선에 기반한 성능 향상 가능성을 의미한다.

시뮬레이션 결과, Spr RF 수신 코일은 DP 코일 대비 송신 RF 자기장($B1^+$)의 차폐 효과를 효과적으로 감소시키는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 나선형 구조가 단일 송신 채널 환경에서 다중 샘플 histo-MRI를 구현하기 위한 유망한 대안임을 시사한다^[6,9,10]. 그러나 동시에, 본 연구에서 사용된 코일 구조와 구성 방식에는 몇 가지 중요한 한계점이 존재한다.

본 연구에서 제안된 Spr RF 코일은 좌우 길이가 서로 다른 비대칭형 다이폴 구조를 기반으로 설계되었다. 이러한 비대칭 구조는 제한된 공간 내에서 500 MHz 공진 조건을 만족시키는 데에는 효과적이었지만, 전류 분포의 비대칭성을 유발하여 RF 필드의 공간적 균일성을 저하시킬 수 있다. 실제 시뮬레이션 결과에서도 일부 수신 코일 채널에서는 국소적으로 높은 $B1$ 필드가 형성되는 반면, 인접 영

역에서는 상대적으로 낮은 필드 강도가 관찰되었다. 이는 비대칭 다이폴 구조가 가지는 본질적인 설계적 한계로 해석될 수 있다.

Spr RF 수신 코일과 새장형 송신 코일과의 전자기적 결합 현상으로 인해 국소적인 B1 필드 변화가 관찰되었으며, 이는 Spr RF 코일이 특정 조건에서 무선 국소 코일과 유사하게 동작할 가능성을 시사한다. 이러한 결합 효과는 수신 감도 향상이라는 측면에서는 유리할 수 있으나, 송신 필드의 균일성을 저해하고 샘플 간 신호 일관성을 감소시킬 가능성 또한 내포하고 있다. 이와 같은 Tx-Rx 결합 현상은 전자기 시뮬레이션 기반 연구에서 공진 조건이 이상적으로 설정될 경우 비교적 쉽게 관찰될 수 있는 현상이며^[3,9], 실제 코일 제작 환경에서는 송신 시 수신 코일의 공진을 억제하기 위해 decoupling 회로, detuning 회로 또는 PIN 다이오드 기반의 능동 detuning 기법과 같은 회로적 요소를 추가하여 이를 효과적으로 제어할 수 있다. 본 연구에서는 코일 구조 자체의 전자기적 특성 비교에 초점을 두었기 때문에 이러한 회로적 detuning 요소를 포함하지 않았으며, 그 결과 송신 시 수신 코일에 유도 전류가 형성되어 일부 공간적 B1+ 왜곡이 나타난 것으로 해석된다.

그럼에도 불구하고 Fig. 9의 DP RF 코일 구성과 비교할 때, Spr RF 코일 배열에서 형성된 B1+ 필드의 상대적 크기는 현저히 높게 유지되었으며, 이는 단순한 결합 효과를 넘어 나선형 구조가 송신 필드 차폐를 구조적으로 감소시킨 결과로 판단된다. 따라서 본 연구에서 관찰된 B1+ 증가는 결합에 의한 국소적 변동과는 구분되는 구조적 이점으로 해석할 수 있으며, 이는 나선형 수신 코일이 단일 송신 채널 환경에서 보다 효율적인 RF 필드 형성을 가능하게 하는 잠재적 우수성을 보여주는 결과로 판단된다.

따라서 실제 시스템 적용을 위해서는 송신-수신 간 결합을 제어하기 위한 추가적인 decoupling 최적화 전략이 필요하며, 향후 연구에서는 이러한 회로적 보완 요소를 포함한 실험적 검증이 수행될 예정이다.

본 연구에서는 수신 코일을 XY 평면 상에서만

배열하여 총 16채널의 다중 샘플 구성을 고려하였다. 향후 더 많은 샘플을 동시에 영상화하기 위해서는 Z 방향으로의 배열 확장 또한 고려되어야 한다. 그러나 수신 코일 요소의 개수가 증가하고 배열 간격이 감소할수록, 수신코일 요소 간 상호 결합(mutual coupling)은 더욱 심화될 수 있다^[11,12]. 본 연구에서는 코일 요소 간 간격을 X축 방향으로 7 mm, Y축 방향으로 10 mm로 설정하였으나, 16채널 이상의 고채널 구성을 위한 최적의 배열 구조 및 간섭 억제 기법에 대한 체계적인 최적화는 수행되지 않았다. 이는 본 연구의 중요한 한계점 중 하나이다.

한편, 최근 MRI 시스템에서는 경사자장 코일의 성능이 크게 향상되어, 100 mT/m 이상의 경사자장을 제공하며, 일부 시스템에서는 수백 mT/m 수준의 성능을 구현하고 있다. 이러한 고성능 경사자장 코일은 고해상도 histo-MRI에서 매우 중요한 요소로 작용하며^[7,8], 본 연구에서 제안한 다중 샘플 수신 코일 구조는 이러한 환경에서 더욱 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 고해상도 영상을 구현하기 위해서는 경사자장 코일의 성능 뿐만 아니라, 데이터의 획득 절차를 수행하는 spectrometer 성능 고도화 또한 필수적이다. 가천대 길병원의 11.74T MRI 시스템에서는 AD converting 시 사용되는 sampling memory를 대폭 확장함으로써, 이론적으로 무한대까지의 image matrix size를 지원할 수 있는 spectrometer 환경을 구축하였다. 이러한 시스템적 장점은 고성능 경사자장 코일과 결합하여 사용할 때 초고해상도의 histo-MRI 영상을 안정적으로 획득할 수 있는 기반을 제공한다. 향후 연구에서는 본 연구에서 제안한 Spr RF 수신 코일 구조를 기반으로, Z 방향 확장을 포함한 고채널 다중 샘플 수신 배열을 설계하고, 고성능 경사자장 코일 및 spectrometer를 결합한 다중 샘플 고해상도 histo-MRI 연구를 단계적으로 진행할 계획이다. 본 논문의 연구결과는 가천대 길병원의 11.74T MRI의 적용을 고려하여 설계된 것으로 현재 1H를 대상으로 500 MHz의 8채널 송신 채널을 지원하는 RF 앰프와 8채널의 수신기 가능하며 32채널의 다핵종 송신이 가능한 broadband 앰프와 128채널의 수신기 가능한 시스템으로 개선작업이 진행 중이다. 경사자

계는 100 mT/m의 성능을 갖는 경사자장 코일과 13 채널의 3차 경사자계 보정 증폭기(3rd order gradient shim amplifier)를 이용하여 형성한다.

이러한 후속 연구를 통해 Spr RF 수신 코일은 단일 송신 채널 환경에서도 확장 가능하고 효율적인 다중 샘플 histo-MRI 솔루션으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

V. CONCLUSIONS

본 연구에서는 단일 새장형 송신 코일과 다채널 수신 코일 구성을 기반으로, 기존 DP 형태의 histo-RF 수신 코일과 나선형의 새로운 수신 코일을 전자기 시뮬레이션을 통해 정량적으로 비교하였다. 그 결과, DP RF 코일은 구조적 차폐 효과로 인해 송신 B1⁺ 필드가 샘플 내부로 충분히 전달되지 않아 약 0.56 μ T 수준을 유지하였지만 Spr RF 코일은 약 3.98 μ T로 약 7배 수준의 B1⁺ 필드를 유지하였고 수신감도(약 4.44 μ T) 역시 DP RF(약 2.02 μ T) 대비 약 2배 높은 수치를 가지는 것을 확인하였다.

제안된 Spr RF 코일 구조는 제한된 송신 채널 환경에서도 다중 샘플을 동시에 영상화할 수 있는 가능성을 제시하며, 기존 DP RF 코일 대비 더 향상된 SNR과 효율적인 RF 필드 형성을 기대할 수 있다. 다만 Spr RF 코일의 공진 주파수는 기하학적 파라미터에 민감하며, 새장형 코일 코일과의 간섭 현상은 추가적인 decoupling 또는 RF 스위치 기법을 통해 제어할 필요가 있다.

본 연구의 결과는 다중 샘플 histo-MRI를 위한 RF 코일 설계에 있어 Spr RF 코일 구조가 유망한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

Acknowledgments

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술 연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (과제고유번호 : RS-2025-245363 97)

References

- [1] M. D. Meadowcroft, Z. Shutong, B. S. Park, J. R. Connor, C. M. Collins, M. B. Smith, Q. X. Yang, "Direct Magnetic Resonance Imaging of Histological Tissue Samples at 3.0T", *Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 57, No. 5, pp. 835-841, 2007. <http://doi.org/10.1002/mrm.21213>
- [2] D. M. Hoang, E. B. Voura, C. Zhang, L. Fakri-Bouchet, Y. X. Wadghiri, "Evaluation of Coils for Imaging Histological Slides: Signal-to-Noise Ratio and Filling Factor", *Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 71, No. 5, pp. 1932-1943, 2014. <http://doi.org/10.1002/mrm.24841>
- [3] R. J. A. Nabuurs, I. Hegeman, R. Natte, S. G. van Duinen, M. A. van Buchem, L. van der Weerd, A. G. Webb, "High-field MRI of single histological slices using an inductively coupled, self-resonant microcoil: application to ex-vivo samples of patients with Alzheimer's disease", *NMR in Biomedicine*, Vol. 24, No. 4, pp. 351-357, 2010. <http://doi.org/10.1002/nbm.1598>
- [4] B. P. Song, H. S. Kim, "Inductively Coupled RF Coil for Imaging a 40 μ m-Thick Histology Sample in a Clinical MRI Scanner", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 77, No. 1, pp. 87-93, 2020. <http://doi.org/10.3938/jkps.77.87>
- [5] B. P. Song, H. S. Kim, S. J. Yoon, D. Hernandez, K. N. Kim, S. K. Lee, "Multiturn Planar Inductor for the Improvement of Signal-to-Noise Ratio Response in Magnetic Resonance Microscopy", *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 78643-78649, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189992>
- [6] T. Wang, L. Ciobanu, X. Zhang, A. Webb, "Inductively Coupled RF Coil Design for Simultaneous Microimaging of Multiple Samples", *Concepts in Magnetic Resonance Part B*, Vol. 33, No. 4, pp. 236-243, 2008. <http://doi.org/10.1002/cmr.b.20122>
- [7] B. Dhakal, B. M. Hardy, A. W. Anderson, M. D. Does, J. Xu, J. C. Gore, "A practical prescription for magnetic resonance microscopy in a horizontal bore magnet", *njp Imaging*, Vol. 3, pp. 64, 2025. <http://doi.org/10.1038/s44303-025-00129-4>
- [8] T. Hüfken, T. Lobmeyer, B. Gahr, F. Bschorr, T.

- Speidel, S. Just, V. Rasche, "Magnetic resonance microscopy for submillimeter samples in a horizontal MR scanner", *Nature Scientific Report*, Vol. 14, pp. 23583, 2024.
<http://doi.org/10.1038/s41598-024-73271-5>
- [9] T. Okada, S. Handa, B. Ding, S. Urayama, K. Fujimota, A. Ahima, D. Yoshii, T. Ayaki, N. Sawamoto, R. Takahashi, H. Onoe, T. Isa, L. Petropoulos, "Insertable inductively coupled volumetric coils for MR microscopy in a human 7T MR system", *Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 87, No. 3, pp. 1613-1620, 2022.
<http://doi.org/10.1002/mrm.29062>
- [10] D. Papoti, D. Szczupak, L. G. C. Santos, K. T. Chaim, M. C. G. Otaduy, D. J. Schaeffer, E. L. G. Vidoto, A. Tannus, A. C. Silva, "Segmented solenoid RF coils for MRI of ex vivo brain samples at ultra-high field preclinical and clinical scanners", *Journal of Magnetic Resonance Open*, Vol. 16-17, pp. 100103, 2023.
<http://doi.org/10.1016/j.jmro.2023.100103>
- [11] A. Müller M. Mahmutovic, M. Alem, G. Ramos-Llordén, D. Sung, M. Shrestha, S. J. D. Hansen, C. Chemlali, A. Ghotra, J. Stockmann, C. Mekkaoui, L. L. Wald, A. Yendiki, S. Y. Huang, B. Keil, "Strong gradients, cool performance: A 64-channel array coil with concurrent field monitoring and thermal control for ex vivo diffusion-weighted brain imaging using the 3T connectome 2.0 MRI scanner", *Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 94, No. 5, pp. 2268-2285, 2025.
<http://doi.org/10.1002/mrm.30599>
- [12] A. Scholz, R. Etzel, M. W. May, M. Mahmutovic, Q. Tian, G. Ramos-Llordén, C. Maffei, B. Bilgiç, T. Witzel, J. P. Stockmann, C. Mekkaoui, L. L. Wald, S. Y. Huang, A. Yendiki, B. Keil, "A 48-channel receive array coil for mesoscopic diffusion-weighted MRI of ex vivo human brain on the 3 T connectome scanner", *NeuroImage*, Vol. 238, 118256, 2021.
<http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118256>

다중 샘플 조직학적 자기공명영상을 위한 나선형 RF 수신 코일 구조의 제안 및 판형 코일과의 비교 시뮬레이션

류연철*

가천대학교 방사선학과

요 약

Histological 자기공명영상(histo-MRI)은 병리학적 조직 분석 수준에 근접하는 미세 구조적 정보를 제공할 수 있는 고해상도 영상 기법으로, 주로 *ex vivo* 상태의 조직 샘플을 대상으로 활용되어 왔다. MRI 영상은 일반적으로 *in vivo* 영상 획득이 가능하다는 점이 큰 장점이지만, *ex vivo* 환경에서의 histo-MRI는 대사 물질을 포함한 다양한 생체유래 물질에 대해 높은 영상 대조도를 제공하며, 신호의 정량적 분석이 가능하다는 점에서 기존의 광학 기반 조직학적 검사와 차별화된 장점을 가진다. 이러한 특성으로 인해 histo-MRI는 병리학적 연구 및 전임상 연구에서 조직의 구조적·기능적 특성을 정밀하게 분석하는 도구로 활용되고 있다. 그러나 단일 채널 송신/수신 코일에 의존하는 기존의 histo-MRI 방식은 영상 획득 시간이 길어, 특히 다수의 샘플을 대상으로 하는 연구에서는 활용에 제한이 있다. 기존 histo-MRI에서 사용되어 온 판형의 RF 수신 코일은 외부 송신 코일과 함께 사용될 경우 송신 RF 자기장(B_1^+)을 크게 교란시켜 샘플 영역 내 여기 효율을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 송신 필드 차폐 효과를 최소화하면서 높은 수신 감도를 유지하기 위한 나선형의 RF 수신 코일을 제안한다. 전자기 시뮬레이션은 단일 송신원으로 새장형 코일을 사용하여 500 MHz에서 수행하였으며, 16채널 수신 코일 배열을 구성하였다. 직사각형 팬텀($20 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$) 내에서 두 코일 사이의 B_1^+ 및 B_1^- 필드 분포를 비교 분석하였다. 그 결과, 판형 코일 구성에서는 샘플 내부 평균 B_1^+ 가 약 $0.56 \mu\text{T}$, 평균 B_1^- 가 약 $2.02 \mu\text{T}$ 수준으로 나타난 반면, 나선형 코일 구성에서는 평균 B_1^+ 가 약 $3.98 \mu\text{T}$ 로 증가하고 평균 B_1^- 도 약 $4.44 \mu\text{T}$ 로 향상되어, 보다 효율적인 여기 특성과 향상된 수신 민감도를 보였다. 이러한 결과는 나선형 RF 수신 코일이 단일 송신 채널 환경에서 다중 샘플 histo-MRI를 효율적으로 구현하기 위한 유망한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

중심단어: 조직학적 자기공명영상, 다채널 나선형 RF 코일, 전자기 시뮬레이션, B_1 자기장 균일성, 다중샘플 자기공명영상

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	류연철	가천대학교 방사선학과	부교수