

핵자기공명 신호 향상을 위한 저온 고주파코일 연구

김송희, 이동훈

배재대학교 자연과학대학 자연과학부 전산전자물리학 전공

Study on Low Temperature Radiofrequency Coils for the Signal-to-Noise Ratio Improvement of Nuclear Magnetic Resonance

Song Hee Kim and Dong Hoon Lee

Department of Applied Physics, Pai Chai University

초 록

본 연구에서는 코일의 온도를 액체질소 온도 정도의 저온으로 냉각시켜 핵자기공명 신호 및 영상의 신호대잡음비를 향상시키는데 그 목적을 두었다. 핵자기공명 신호의 신호대잡음비에 대한 이론적인 분석을 토대로 다양한 형태의 고주파코일을 제작했고, 저온의 표면고주파코일로 획득된 신호를 상온의 일반 구리코일로 획득된 신호와 비교하였다. 본 연구에서 제작된 저온코일의 경우, 상온코일에 비해서 신호대잡음비의 향상을 얻을 수 있었다. 이러한 신호대잡음비의 향상을 통하여 핵자기공명영상 시간을 단축할 수 있으며, 이를 통한 진단의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

서 론

핵자기공명분광법 및 핵자기공명영상법을 통해서 획득되는 신호의 잡음의 근원을 분류하면, 고주파코일, 시료 (혹은 인체) 및 신호획득시스템의 애벌증폭기(preamplifier)로 크게 나눌 수 있다. 고주파코일의 경우, 금속재질의 전기전도도가 코일 잡음의 주

요한 원인이 된다. 시료의 크기가 작은 경우, 전체 잡음 중에서 코일잡음이 차지하는 비중이 커지게 되는데, 시료잡음과 코일잡음이 동일해지는 임계크기를 아는 것은 핵자기공명의 신호대잡음비를 제어하는데, 매우 중요한 요인이 될 수 있다. 이때, 임계크기는 공명주파수, 코일의 종류와 시료의 형태에 따라 차이를 갖는다.

시료에 의한 잡음의 원인은 크게 유전손실(dielectric loss)과 유도손실(inductive loss)로 구분될 수 있다. 유전손실은 코일에 감긴 도선 사이에서 분산된 정전용량에 관계되는데, 이러한 정정전용량에 연관된 전기력선이 시료를 통과하게 되고, 이는 시료의 손실인자에 따라 변화하는 저항을 유발하게 된다. 이때, 유전손실에 의한 저항의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$R_c = \tau \omega_0^2 L^2 C_d \quad (1)$$

여기서, τ 는 시료의 손실인자 (loss factor), ω_0 는 공명각진동수, L 은 코일의 인덕턴스, C_d 는 정전용량이다. 유전손실을 줄이기 위해서, 코일 선재를 구리선 대신 구리 테이프나 얇은 구리판과 같이 넓은 면적을 가진 것을 이용하여 인덕턴스를 줄이는 방법을 이용할 수 있다. 더불어 식(1)이 기술하는 바와 같이 공명주파수가 증가할수록 유전손실로 인한 유효저항 효과는 급격하게 증가하게 된다.

유도손실 (inductive loss)는 전도성이 있는 시료에서 발생하는 손실로서, 실험자가 제어할 수 없는 손실이며 주로 시료의 기하학적인 형태에 의존한다. 이때, 유도손실에 의한 유효저항 R_m 을 계산할 수 있다. 시료가 구형[2]과 원통형[3]인 경우의 유효저항은 각각

$$\frac{2\pi \omega_0^2 B_1^2 b}{15\rho}, \frac{\pi \omega_0^2 B_1^2 r_0^4 l}{8\rho}$$

이다. 이때, b 는 구의 반경, ρ 는 시료의

비저항, B_1 은 코일에서 발생하는 RF 자기장의 세기, r_0 는 원통형 시료의 반경, l 은 원통형 시료의 길이이다. 유도손실은 시료의 형태와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 시료가 커질수록 유도손실도 급격한 증가를 보인다. 그리고, RF 자기장의 세기의 제곱에 비례하기 때문에 코일 종류에 따라서 손실의 변화가 예상됨을 알 수 있다.

코일저항과 시료에 의한 저항을 토대로 공명진동수의 크기에 따른 시료의 임계크기를 결정할 수 있다. 솔레노이드코일에 대한 임계크기의 결정의 경우, 고자장을 지향하는 핵자기공명현미영상법에서 일반구리코일[4]을 이용하거나, 초전도 선재를 이용한 코일[5]을 이용하여 연구되어 왔다. 시료의 임계크기보다 작은 경우, 구리 코일을 매우 낮은 온도로 유지시킴으로써, 코일 잡음을 감소시키는 노력도 함께 되어왔다[6].

본 연구에서는 표면코일에 대하여, 공명진동수의 변화에 따른 시료의 임계크기를

결정하였고, 이를 토대로 하여 임계크기 이내의 작은 시료 혹은 작은 관심영역에 대한 핵자기공명신호에 대한 분석을 하였다. 이론적인 분석을 토대로 임계크기 이내의 경우, 코일잡음이 시료잡음보다 크다는 점을 이용하여, 코일 선재의 온도를 액체질소 온도까지 낮춤으로써 신호대잡음비의 향상을 꾀하였다.

실험방법

표면코일의 선재로 Bi-2223 Ag 고온초전도 테이프를 이용하였다. 본 연구에서 이용된 Bi-2223 Ag 고온초전도 테이프는 전이온도(transition temperature) T_c 가 약 110K 되는 37개의 고온초전도 필라멘트를 은으로 감싸는 형태로 되어있으며, 테이프의 폭과 두께는 각각 3.5 mm, 0.4 mm이었다[7,8]. Bi-2223 고온초전도 테이프를 이용하여 직경이 5 cm 인 표면코일을 제작하였다. 64 MHz에서 공명이 일어날 수 있도록 테이프 양쪽 끝에 TICS(teflon insulated copper sheet)를 이용하여 5.1 pF되는 고정축전기(fixed capacitor)를 제조하여 연결하였다(그림1 참조).

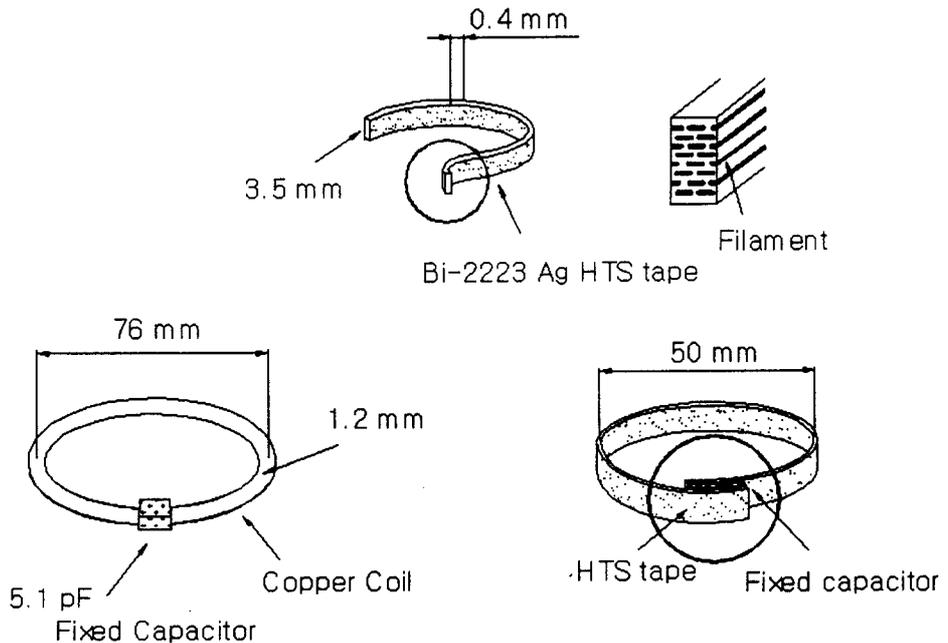


그림 1. 고온초전도 테이프를 이용한 표면코일의 제작 및 일반 구리재질의 표면코일

이때, TICS는 얇은 구리판 사이에 테플론이 붙여진 판으로서 면적에 비례하는 정전용량을 가지는 물질이다. 신호대잡음비의 비교를 위해서 일반 구리선재를 이용하여 동일한 크기의 표면코일도 함께 제작하였다. 더불어, 고온초전도 테이프 재질의 표면코일의 특성을 조사하거나, 실제 핵자기공명영상실험에서 코일을 액체질소 온도 상태로 하되, 시료는 상온을 유지하게 할 수 있는 저온장치(cryogen)를 그림2와 같이 제작하였다.

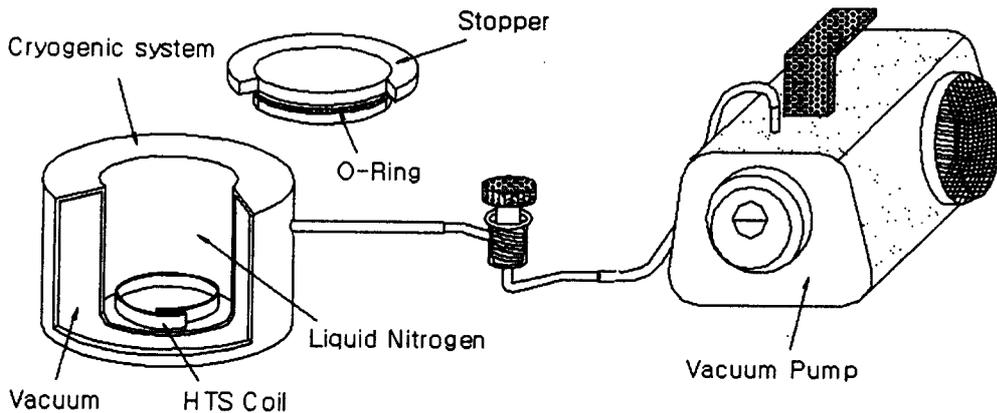


그림 2. 고온초전도 테이프 표면코일을 위한 저온시스템

영상의 획득을 위해서 1.5 T의 전신 핵자기공명영상기 (whole body MRI system)을 이용하였고, 시료로는 10 mM의 CuSO_4 와 11.1 mM의 NaCl이 섞인 증류수를 플라스틱 백에 채워 넣었다. 그림3에서는 핵자기공명영상기의 자석 공간(magnet bore)내에 위치한 저온장치와 코일의 배치를 보이고 있다. 영상획득 과정에서 고온초전도체 코일의 경우, 저온장치의 내벽과 외벽 사이의 진공 공간이 필요하기 때문에 코일에서 시료의 표면까지는 약 13 mm 정도의 간격(hot-to-cold distance)가 늘 유지되었다.

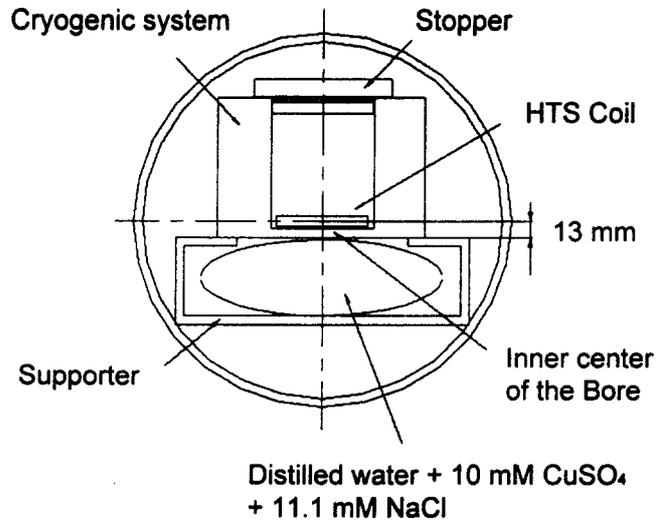


그림 3. 자석 내부에 위치한 고온초전도 표면코일, 저온장치 및 시험시료

결과 및 논의

시료의 임계크기를 결정하기 위해서 서론에서 기술된 유도손실을 분석했고, 표면코일이 64 MHz에서 이용되는 경우, 코일잡음과 시료잡음을 비교하였다. 그림 4에서 보이는 바와 같이, 시료의 임계크기는 반경이 약 25 mm 가 되었다.

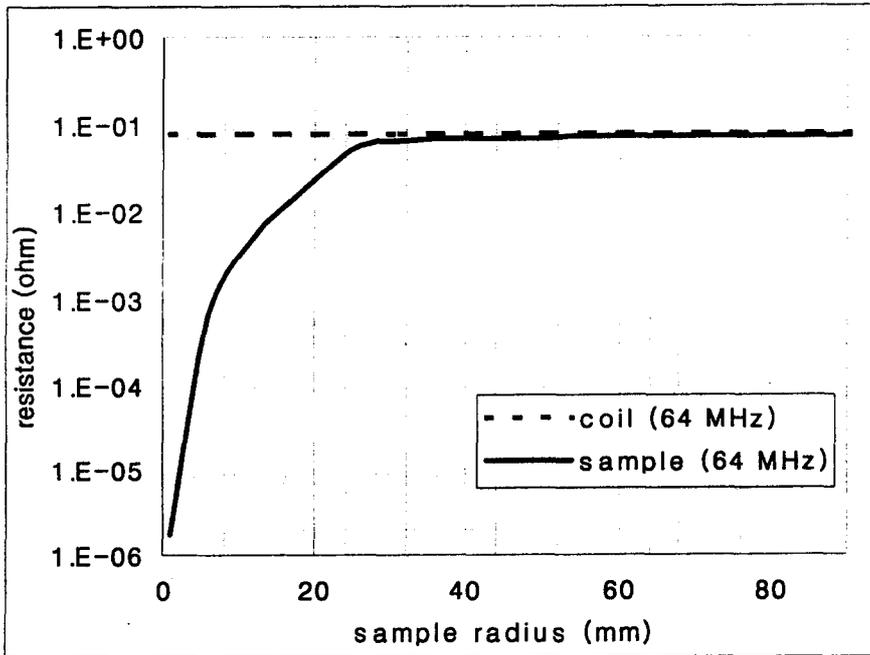


그림 4. 코일잡임과 시료잡음의 비교

그림 5에서는 본 연구에서 제작된 고온초전도체 테이프 표면코일과 일반 상용의 구리표면 코일을 이용하여 획득한 영상을 서로 비교해서 보이고 있다. 고온초전도체 표면코일의 경우, 코일과 시료표면 사이에 13 mm의 간격이 있음에도 불구하고, 구리 코일에 비해 영상과 신호의 윤곽이 더 선명함을 볼 수 있다(그림 5a). 구리 재질의 상용 표면코일의 경우, 코일과 시료표면 간에는 간격이 없으므로 표면코일은 최적의 신호를 획득할 수 있으며, 영상에서 보이고 있는 신호대잡음비는 최대값을 가질 수 있음을 알 수 있다(그림 5b). 신호대잡음비가 구리코일에서 최적임에도 불구하고, 고온초전도 표면 코일에 의해 획득된 영상과 비교할 때, 전반적으로 신호대잡음비가 저하되었음을 볼 수 있다. 이는 코일 직경이 상용코일의 경우 76 mm이므로 고온초전도체 표면코일에 비해 같은 시료에 대한 영상획득 시에 더 넓은 영역으로부터 신호 획득이 가능할 수 있으나, 구리코일로부터 획득된 영상에서는 코일 잡음의 영향이 매우 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

그림 5. 고온초전도 테이프 표면코일(a)과 상용의 구리표면코일(b)을 이용하여 획득한 시료 영상의 비교.

신호대잡음비의 향상정도를 알아보기 위해서 표면코일 중심과 중심의 좌, 우측으로 각각 2.5, 5 mm 떨어진 지점에서의 T_1 , T_2 그리고 수소밀도(proton density) 가중영상을 총 5면의 2차원 영상을 얻은 이후 동일한 위치에서의 신호대잡음비를 비교하였다(그림 6). 신호대잡음비는 고온초전도체 표면코일의 경우 약 1.5 - 2.5 배 정도의 향상을 보이고 있다. 두 표면코일의 직경이 다르기 때문에 동일한 경우로 환산했을 때, 신호대잡음비의 향상 정도는 1 - 1.7 배가 되었다. 이는 고온초전도체 표면코일과 시료와의 거리 차이가 13 mm로서 실제 직경 50 mm 표면코일의 경우 신호대잡음비가 최대값의 1/3 정도로 감소된 상태에서 영상이 획득된 것으로 볼 수 있다. 실제, 이러한 유격 거리를 줄이는 경우, 약 2.0 - 3.7 배 정도의 신호대잡음비 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 신호대잡음비의 향상을 통하여, 영상시간은 신호대잡음비의 제곱에 비례하기 때문에 영상시간의 획기적인 단축이 예상된다. 즉, 동일한 크기 및 형태의 일반 구리코일을 이용하여 소요되는 영상시간의 7 ~ 25 % 정도의 시간에 동일한 신호대잡음비를 본 연구에서 제안하는 저온코일을 이용하여 획득할 수 있다.

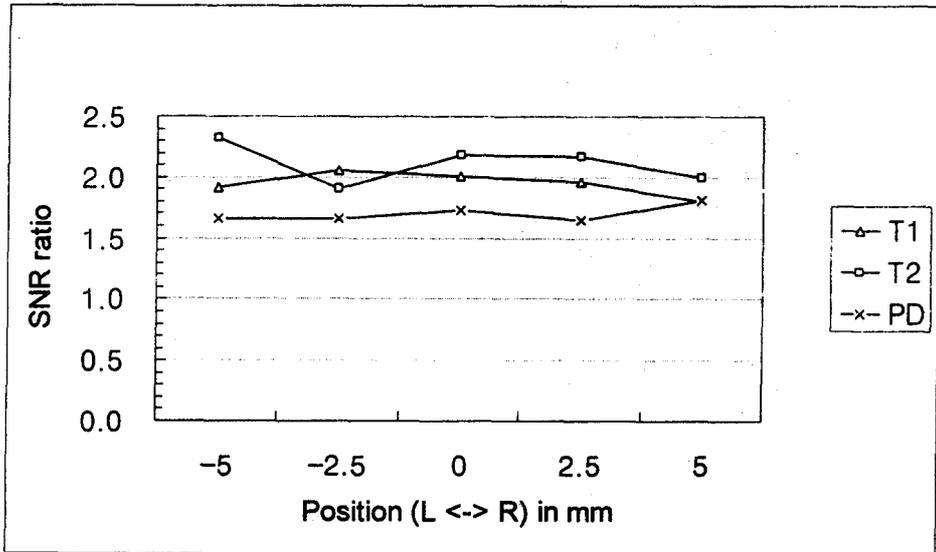


그림 6. 액체시료의 각 동일위치에서의 상대적인 신호대잡음비의 비교

결 론

본 연구에서는 시료가 임계크기보다 작은 경우, 코일의 온도를 낮춤으로써 코일의 잡음을 감소 시키고, 전체적인 신호대잡음비의 향상을 꾀 할 수 있었다. 이를 토대로 영상의 신뢰도를 높일 수 있으며, 영상시간의 단축도 함께 기대된다. 또한, 저온장치를 개선하여 진공 공간으로 인한 코일과 시료 표면 간의 격리 거리를 감소시킴으로써, 더욱 더 향상된 신호대잡음비를 획득할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 배재대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드린다.

참고문헌

1. Terman F E. Radio Engineer's Handbook. 1st ed., pp. 85, McGraw-Hill, New York, 1943.
2. Macovski V. Noise in MRI. Magn. Reson. Med. 1996, 36:494-497.
3. Hoult D I, Lauterbur. P C. The Sensitivity of the Zeugmatographic Experiment Involving Human Samples. J. Magn. Reson. 1979, 34:425-433.
4. Cho Z H, Ahn C B, Juh S C, Lee H K, Jacobs R E, Lee S, Yi J H, Jo J M. Nuclear magnetic resonance microscopy with 4-um resolution: theoretical study and experimental results. Med. Phys. 1988, 15:815-824.
5. Black R D, Early T A, Roemer P B, Mueller O M, Mogro-Campero A, Turner L G, Johnson G A. A high-temperature superconducting receiver for nuclear magnetic resonance microscopy. 1993, 259:793-795.
6. Wright A C, Song H K, Wehrli F W. In vivo MR micro imaging with conventional radiofrequency coils cooled to 77 K. Magn. Reson. Med. 2000, 43:163-169.
7. Lehtonen J, Paasi J. Computation of losses in a HTS tape carrying AC transport current in external AC magnetic field. IEEE Tran. Appl. Superconductivity 2000;10:1200-1203.
8. Daeumling M, Jeremie A, Fluekiger R. Ag-sheathed tapes produced with prereacted Bi2223 powder: critical currents and impurity phase development. Supercond. Sci. Technol. 1993;6:721-724.