

MIT FBML 고자기장 자석 연구 현황

이지호

Francis Bitter Magnet Laboratory, Massachusetts Institute of Technology

1. 서 론

초전도 자석은 초전도체 선재로 만들어진 코일로 구성된 전자석을 의미한다. 철심의 포화자기장인 2 T 이상의 고자기장 자석 응용에 있어서, 높은 전류 밀도와 전기저항이 없는 초전도 자석은 MRI, NMR 분광기, 질량분석기, 핵융합 연구, 가속기 등 오늘날 과학과 공학의 많은 분야에서 사용되고 있다.

NMR은 자기장 속에 놓인 원자핵이 특정 주파수의 전자기파를 흡수하고 재방출하는 물리적 현상을 의미한다. 이 현상을 이용하여 분자의 물리, 화학 및 전기적 성질 등을 알아내기 위한 NMR 분광 분석기에 사용된다. NMR의 주요 특징은 특정 물질의 공진 주파수가 인가된 자기장의 강도에 비례한다는 것이다. 따라서 NMR 분광 분석의 해상도는 자기장의 세기에 비례하며, 이를 위하여 높은 자기장과 정밀한 자기장 영역 및 시간적 안정성은 필수적이다. 물질의 분자구조 해석을 위하여, 물리, 화학 및 생물학 등 기초과학 분야에서 고해상도 NMR 분광기에 대한 필요성이 증대하고 있다. 1960년대 저온 초전도체 (Low temperature superconductor, LTS)를 사용한 최초의 NMR 자석이 개발된 이래, 세계 여러 기관에서 지속적인 연구개발이 이루어지고 있으나, 저온 초전도체 선재의 재료인 NbTi과 Nb₃Sn의 물리적 특성인 자기장 하에서의 임계전류 밀도의 제한으로 인해서, 저온 초전도체만으로 1 GHz (23.5 T) 이상의 자기장을 발생시키는 NMR 자석은 거의 불가능하다 [1, 2]. 그러나 1986년 IBM 연구소의 Georg Bednorz와 K. Alex Müller의 산화물 고온 초전도체 (High temperature superconductor, HTS)의 발견 이후, 높은 자기장에서 공학적으로 사용이 가능한 전류밀도를 갖는 BSCCO 및 REBCO 계열의 고온 초전도 선재의 제조기술의 발전은 기존의 1 GHz (23.5 T)의 한

계를 넘어서는 고해상도 NMR 자석의 개발이 기대되고 있다 [2].

글쓴이가 현재 소속된 MIT, Francis Bitter Magnet Laboratory (FBML) 산하의 Magnet Technology Division (MTD)은 NMR용 고자기장 자석에 대한 연구를 주로 진행하고 있다. 이 글에서는 MIT FBML MTD의 고자기장 연구현황과 전망에 관하여 기술하고자 한다.

2. MIT FBML의 고자기장 자석 개발

1960년 MIT에서 설립된 National Magnet Laboratory는, 1967년에 작고하신, Bitter 전자석으로 유명한 고자기장 발생 연구의 선구자, Francis Bitter 교수에 대한 경의의 표현으로 Francis Bitter National Magnet Laboratory (FBNML)가 되었으며, 1995년에 FBML로 이름이 바뀌게 되었다 [3, 4]. 이후 FBML은 주로 Nuclear Magnetic Resonance (NMR)에 관한 연구를 진행 중이다.



그림 2. MIT/FBML 3단계 NMR 자석 모형도

MIT FBML에서는 2000년부터 현재까지 미국 국립보건원 (National Institutes of Health, NIH)의 지원 하에, 저온 및 고온 초전도 선재를 함께 사용하는 1.3-GHz NMR 자석 (1.3G) 개발을 3단계에 걸쳐 진행 중이다. 최종 개발 목표인 1.3-GHz (30.4 T) NMR 자석은 현재 개발 중인

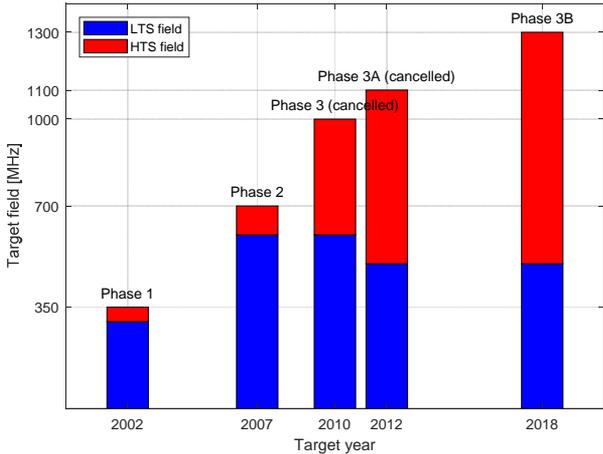


그림 1. MIT FBML의 3단계 LTS/HTS NMR 자석의 연도에 따른 목표 자기장

LTS/HTS NMR 자석 시스템 중에서는 가장 높은 자기장 세기로 알려져 있다. 그림 1은 MIT FBML의 3단계 LTS/HTS NMR 자석의 연도에 따른 목표 자기장이다. 1단계 350 MHz 자석과 2단계 700 MHz 자석은 각각 성공적으로 개발이 끝난바 있다. 3단계의 경우 초기 계획으로는 1 GHz (L600, H400)이었으나 두 차례의 개발 목표 변경 이후, 현재 1.3 GHz를 목표로 개발이 진행 중이다. 그림 2는 과제의 각 단계별 자석의 모형도이다.

3. 1.3-GHz NMR 자석 연구

그림 3은 1.3G 자석의 단면도이며, 중요 구성요소들이 표기되어 있다 [5]. 1.3G 자석은 연구소에서 보유한 500 MHz의 저온 초전도 백그라운드 자석(L500)과 현재 개발 중인 800 MHz의 고온 초전도 인서트 자석(H800) 및 향후 개발 될 HTS shim 코일(Z1, Z2, X 및 Y) 등으로 구성된다. L500은 4.2-6 K에서 persistent-mode로 구동이 가능한 500 MHz (11.74 T) MRI 자석이며, H800은 REBCO로 권선된 무절연(No-insulation, NI) 코일 3개로 구성되어 있다 [5]. 표 1과 2는 L500과 H800의 주요 특징을 나타낸다. 1.3G의 특징으로는, H800이 전체 자기장의 61.3%를 담당한다는 점과, H800을 위한 코일에 REBCO를 사용한 NI 권선 기술, inside-notch 설계구조

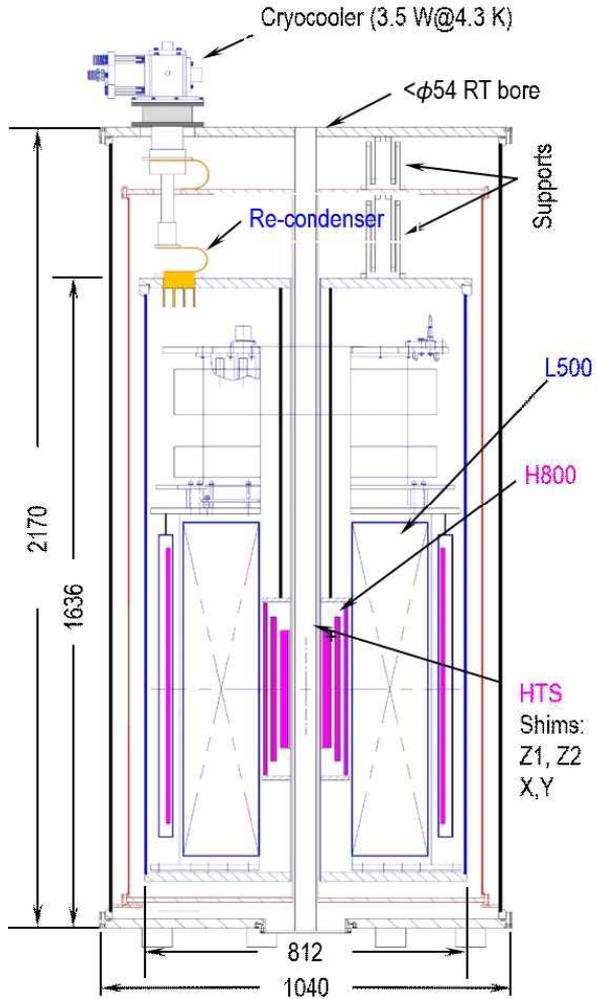


그림 3. 1.3G 자석의 단면도.

표 1. L500의 주요 특징.

Operating temperature	4.2-6.0 K
Cold bore for H800	237 mm
Overall diameter; height	780 mm; 1422 mm
Magnet mass	1200 kg
Magnet energy @ $I_{op}=246$ A	4.6 MJ
Temporal stability	<0.01 ppm/hr
Measured field homogeneity (17-mm diameter & 30-mm length)	0.45 ppm

및 4.2 K 액체헬륨 재충족 운전 등이 있다 [5, 6]. H800의 Inside-notch 구조는 짧은 길이의 자석으로도 균질한 자기장을 낼 수 있는 구조이다. NMR 측정 영역에서의 균질한 자기장과 자기장의 시간적 안정성을 위하여, 고온초전도 선재로 제작된 shim 코일이 사용

될 예정이다.

H800의 가장 큰 특징은 위에서 언급된 NI 권선 기술이다. 고온초전도 선재의 NI 권선은 2009년 MIT에서 제안되었으며 초전도 선재를 전기 절연이 없는 상태에서 권선하는 방식이다 [6]. 초전도 상태에서는 코일의 턴

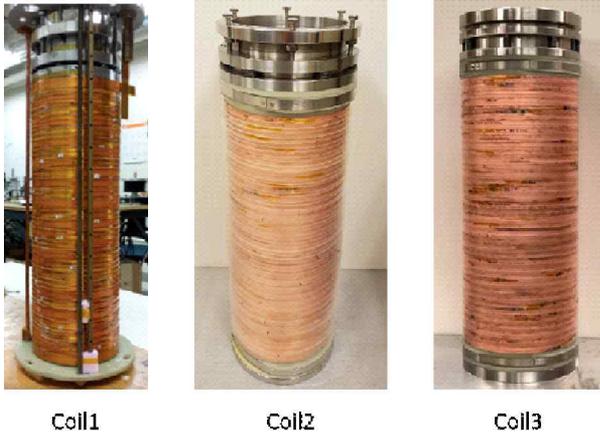


그림 4. 제작된 H800 코일.

표 2. H800의 주요 특징 @4.2 K, $I_{op}=251.3$ A.

Parameter	Coil1	Coil2	Coil3
Field contribution [MHz]; [T]	369; 8.67	240; 5.64	189; 4.44
$B_{\square,max}$ at 1.3-GHz [T]	4.8	4.6	3.8
Total # DP coils	26	32	36
# Inside-Notched DP coils	6	8	8
ID average (regular DPs) [mm]	91.0	150.79	196.90
ID average (notched DPs) [mm]	92.35	151.41	197.20
OD average [mm]	119.12	169.23	211.30
Winding overall height [mm]	323.65	393.93	465.65
SS overband radial build [mm]	7	5	3
Inductance [H]	2.43	3.04	3.77
(Charging delay) Time constant [s]	570	1030	1640
Peak total hoop strain [%]	0.47	0.39	0.35

과 턴 사이의 금속 안정화재의 접촉 저항이 절연재와 같이 동작하여 전자적으로 동작이 가능하며, 이 턴 사이의 안정화재 접촉저항이 초전도 코일에 병렬로 연결된 저항의 역할을 함으로, 초전도 자석에 상변이 현상이 발생하였을 때 고온초전도 권선을 보호할 수 있음이 연구 및 보고되어 있다 [6-8]. 또한, NI 권선은 절연체가 없어서, 작은 공간에 높은 전류밀도를 필요로 하는 고자기장 자석의 HTS 자석 권선기법으로 많은 관심을 받고 있다. 물론 안정화재 접촉 저항 (병렬 저항)의 존재로 NI 자석은 충·방전 등 전류 변화에 의한 유기기전력의 발생에 의해, 자기장의 지연현상이 발생하므로 자석의 충·방전 및 결과 분석 시 이에 대한 고려가 필요하다.

한편, NMR 자석에 필수적인 고온초전도 자석의 시간적 안정성을 저해하는 요소인 Screening-current-induced magnetic field (SCF)을 감소 혹은 제거하기 위하여 field-shaking을 적용될 예정이다. SCF는 초전도체의 자화에 비례하기에 1.3G와 같이 고자기장 NMR 자석에서 SCF는 가장 큰 자기장 에러 요인이다. Field-shaking은 자석의 수직방향 (REBCO 선재에 평행한 방향)으로 시변 자기장 (field)을 반복적 (shake)으로 인가하여, 초전도 선재의 가장자리에 유기된 전류밀도 flux에 의한 SCF를 제거하는 방법이다. 일반적으로 field-shaking의 효과는 반복횟수 및 자기장 크기에 비례한다. 1.3G 프로젝트에서는 H800의 SCF 제거를 위하여, 초기에는 field-shaking을 위한 초전도 전자석을 외부에 설치할 예정이었으나, 현재는 L500을 이용하여 field-shaking을 수행할 계획이다 [10-12].

이 과제에서는, 기존 NbTi와 같은 LTS shim 코일의 재료적 한계를 극복하고자, HTS inner shim 코일 기술을 연구한다. 기존의 NbTi shim 코일의 경우 자석의 바깥쪽에 위치하여, 더 높은 운전 전류와 코일 턴 수를 필요로 하며, H800의 diamagnetic wall effect에 의하여 shim 자기장이 상당수 약화된다. 반면, HTS inner shim 코일은 12 T 이상의 환경에서도 사용 가능하고, 선의 두께가 얇고 전류밀도가 높아 수 mm 이내에서 제작이 가능하므로, 1.3G와 같은 고자기장 자석에서 사용이 가능할 것으로 기대된다 [13].

4. 결 론

이 글에서는 MIT FBML에서 3단계를 통해 수행 중인 1.3-GHz LTS/HTS NMR 자석 개발 과제를 소개하였다. 물성적인 특징 및 한계로 인해, 1.3 GHz (30.5 T) 이상의 고자기장 자석 연구에서 HTS의 선택은 필수이다. 본 연구는 HTS의 자기장 기여 비율이 61.5%에 달하는 만큼, HTS의 특성 및 중요성이 강조되는 중요한 프로젝트이다. 개발될 자석은 고자기장 HTS insert에 적용될 NI 권선 기술, inside-notch 코일, persistent-mode HTS shim 코일 및 field-shaking 등의 다양한 혁신 요소를 적용한 자석이 될 것이다. 본 과제가 성공적으로 마무리되고 그 연구결과가 NMR 및 고자기장 자석의 발전에 기여하기를 기대한다.

참고문헌

- [1] 김우석, 고자기장 NMR용 마그네트 개발 동향, 초전도와 저온공학, 17권 1호, 2015년 1월
- [2] P. J. Lee, Engineering Critical Current Density vs. Applied Field, April 11, 2018.
- [3] I. I. Rabi, "Francis Bitter, Authority on Magnetism, Was MIT Physicist," Phys. Today, vol. 20, no. 9, pp. 127 - 129, Sep. 1967.
- [4] Oral History: Yukikazu Iwasa, http://ethw.org/Oral-History:Yukikazu_Iwasa.
- [5] Y. Iwasa et al., "A High-Resolution 1.3-GHz/54-mm LTS/HTS NMR Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, Art. no. 4301205, Jun. 2015.
- [6] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan, and Y. Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp. 1592 - 1595, Jun. 2011.
- [7] S. Choi, H. C. Jo, Y. J. Hwang, S. Hahn, and T. K. Ko, "A Study on the No Insulation Winding Method of the HTS Coil," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, no. 3, Art. no. 4904004, Jun. 2012.
- [8] T. S. Lee et al., "The effects of co-wound Kapton, stainless steel and copper, in comparison with no insulation, on the time constant and stability of GdBCO pancake coils," Supercond. Sci. Technol., vol. 27, no. 6, Art. no. 065018, Jun. 2014.
- [9] D. Park, "A Progress on MIT 1.3-GHz LTS/HTS High-Resolution NMR Magnet", 제3회 고자기장기술국제포럼, Oct 23, 2017.
- [10] D. Miyagi et al., "An experimental study on 'field-shaking' technique to reduce screening-current fields in a noninsulated REBCO magnet of double-pancake coils," presented at Appl. Supercond.Conf., Denver, CO, USA, Sep. 4 - 9, 2016.
- [11] J. Lee, D. Park, P. C. Michael, S. Noguchi, J. Bascunan, and Y. Iwasa, "A Field-Shaking System to Reduce the Screening-Current-Induced Field in the 800-MHz HTS Insert of the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet: A Small-Model Study," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 3, Apr. 2018, Art. no. 4301405.
- [12] J. Bascunan et al., "An 800-MHz all-REBCO insert for the 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet program - A progress report," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 4, Jun. 2016, Art. no. 4300205.
- [13] D. Park, J. Lee, J. Bascunan, P. C. Michael, and Y. Iwasa, "HTS Shim Coils Energized by a Flux Pump for the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet: Design, Construction, and Results of a Proof-of-Concept Prototype," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 3, Apr. 2018, Art. no. 4301105.

저자이력



이지호

2006-2010년 연세대학교 전기전자공학부 (공학학사), 2010-2015년 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사), 2015-2016년 한국기초과학지원연구원 (박사후연수원), 2016년-현재 Massachusetts Institute of Technology, Francis Bitter Magnet Laboratory (Postdoctoral Associate).