고자장 NMR용 마그네트 개발 동향

김 우 석
한국산업기술대학교 에너지전기공학과

1. 서 론

NMR (Nuclear Magnetic Resonance)이란 일군의 원자들이 균일한 자기장 하에 놓여져 있는 상태에서 2차적으로 oscillating 자기장이 인가되는 경우 발생하는 공진현상을 의미한다. 이러한 물리현상을 이용해서 물질의 물리적, 화학적, 생물학적 특성들을 분석하는 학문을 NMR Spectroscopy (NMRS)라 하며, 물질의 화학구조 해석을 위해 간단한 경우에는 1차원, 복잡한 경우는 2차원 기법들을 활용하여 분자 (Molecule)들의 구조를 해석한다. NMRS는 최근 신약 개발 등을 위한 단백질의 구조분석을 위하여 주로 많이 사용되며 기존의 어떠한 분석 장비로도 해석하지 못하는 복잡한 구조분석과 더 나은 해상도를 확보하기 위하여 NMR의 필요성은 더욱 증대되고 있으며 필요로 하는 직류 자기장의 크기가 계속적으로 증가되고 있는 실정이다.

NMR용으로 사용되기 위한 직류자기장 발생용 마그네트는 매우 큰 자기장을 발생시켜야 할 뿐 아니라, 공간적으로 매우 균일하며 시간적으로도 극도로 안정적인 자기장을 요구하기 때문에 최근 실질적 분석장비로 활용되는 NMR용 마그네트는 초전도체를 사용하여 극저온에서 운영되는 것이 가장 일반적이다. 1960년대에 저온 초전도체를 사용하여 최초의 NMR 마그네트가 개발된 이래, 세계 여러 기관에서 보다 높은 자기장과 해상도를 위하여 지속적인 연구개발이 이루어져 왔으나, 일반적으로 사용되는 저온 초전도선재의 재료인 NbTi 와 Nb_3Sn의 자기장 특성에 의하여 1 GHz (약 23.5 T) 이상의 자기장을 발생시키는 NMR용 마그네트는 개발이 불가능한 것으로 알려져 왔다.

그러나 1986년의 산화물 고온초전도체의 발견과 이를 활용한 고온 초전도 선재의 제조기술의 비약적인 발전은 최근 NMR용 마그네트 개발자들에게 매우 희망적인 방향을 제시하고 있다. 특히 최근에 개발되고 있는 ReBCO계열의 고온 초전도선재의 임계자기장 특성이 저온 초전도선재의 특성에 비교하여 매우 뛰어나기 때문이다. 이에 따라, 최근 NMR용 마그네트의 개발 방향은 주로 고온 초전도체를 사용하는 마그네트와 기존의 저온 초전도체 마그네트를 하이브리드 형태로 결합하여 저온 초전도만으로는 도달하지 못했던 NMR급 자기장의 영역을 달성하기 위한 노력이 대부분이라 할 수 있다.

이러한 고온초전도를 활용한 고자장 NMR 마그네트의 개발은 MIT, NHMFL, NIMS 등 많은 연구기관들에 의해서 최근 지속적으로 개발이 진행되고 있으며, 주목할 만한 성과를 제시한 연구 사례도 발표되고 있다. 물론, 고온초전도 선재가 근본적으로 가지고 있는 여러 가지 문제점들이 아직 완벽하게 해결되고 있지 않고 있으나, 이에 대한 해결책 역시 다양한 방면으로 제시되고 있는 상황이므로 조만간 1 GHz 이상의 고온 초전도 하이브리드 NMR용 마그네트의 완성품이 나오기를 기대해도 문제없을 것으로 보인다. 본 기사에서는 고온 초전도를 활용한 NMR용 마그네트 개발의 대표적인 사례를 몇 가지 분석하고, 최근에 국내에서도 시작된 고온 초전도 NMR 마그네트의 개발과제에 대해 간략하게 기술하고자 한다.

2. NIMS 1.03 GHz NMR Magnet

2014년 10월 일본의 NIMS (National Institute for Materials Science)에서는 NMR용 마그네트의 세계 최고 기록으로 1001 MHz (23.5 T)의 자기장을 발생시키는데 성공하였다고 발표했다. 그림 1에 성공 당시의 NMR마그네트 시스템의 모습을 보였다. 본 과제는 일본 과학기술 진흥기구 (JST) 첨단 계측 분석기술 및 기기 개발 프

그림 1. NIMS 1030 NMR 마그네트의 1001 MHz (23.5 T) 달성 후.

로그램인 'Super 1 GHz NMR 시스템 개발'로 2006년도에 시작되어 1.03 GHz (24.2 T)를 달성하는 것을 목표로 시작된 과제이다. 본 초전도 마그네트 역시 20 T 이상의 안정적인 자기장을 얻기 위해서 1세대 고온초전도 선재로 알려져 있는 BSCCO계열의 선재를 사용하였다. 본 마그네트는 기존에 제작되어 설치 운영되고 있던 920 MHz (21.6 T)급 NMR 마그네트의 구성에서 가장 안쪽에 위치하고 있는 Nb_3Sn선재로 구성된 인서트 마그네트를 Bi-2223 선재를 사용한 인서트 마그네트로 교체하여 구성하였다. 그림 2에 고온 초전도 마그네트의 구성 및 설치 위치에 대해 나타내었다[1].

알려진 바와 같이 BSCCO계열의 고온초전도 선재는 저온 초전도선재에 비하여 낮은 index 및 초전도 접합기술의 어려움으로 인하여 영구전류모드(persistent current mode)의 운전이 거의 불가능하였기 때문에 본 마그네트에서는 외부 직류전류원을 사용하여 고온 초전도 인서트 마그네트에 전류를 인가하였다(driven mode). 그러나 이러한 외부 전류원으로 구동되는 마그네트는 필연적으로 자기장의 시간적 변화를 유발하게 되며, 이

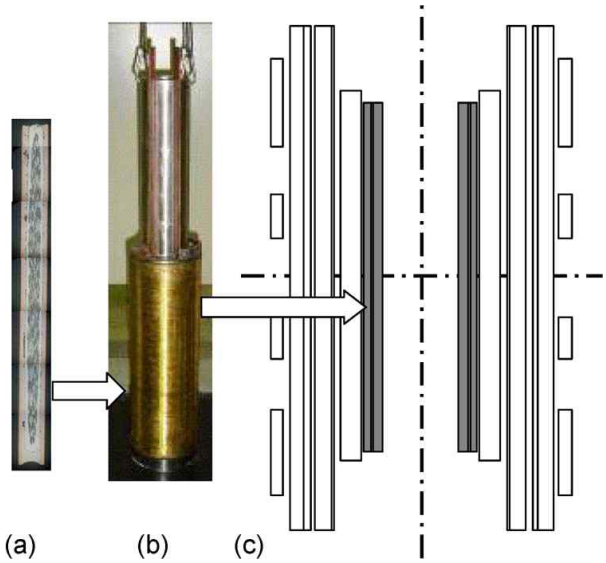


그림 2. NIMS 1030 NMR 마그네트의 HTS coil (a) Bronze reinforced Bi-2223 HTS tape, (b) innermost HTS coil (c) HTS coil의 설치 위치.

는 NMR신호의 해상도를 감소시키는 요인이 되므로 이를 보상할 필요가 있다. 본 과제에서 제안한 방법은 소위 field-frequency locking 기술이라 불리는 방법을 제안하였다. 이는 NMR 마그네트에서 발생하는 자기장의 공간적 불균일성의 보상을 위해 필연적으로 설치해야 하는 shim 코일 중 Z0 shim 코일의 전류를 컨트롤 하는 방법이며, 본 NMR 마그네트 시스템에 이 기술이 적용된 것으로 보고되었다. 그림 3에 Z0 shim coil 조정으로 개선된 필드 매핑 결과를 나타내었다 [1].

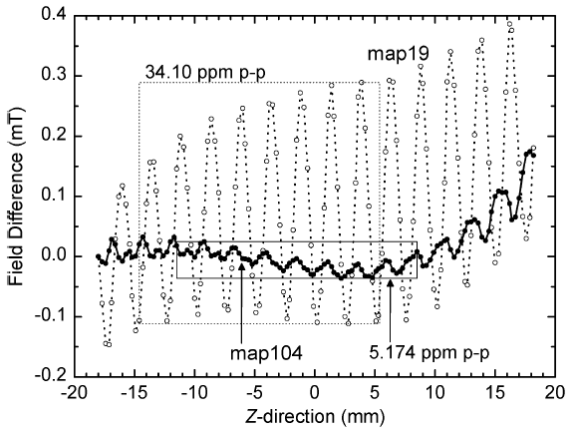
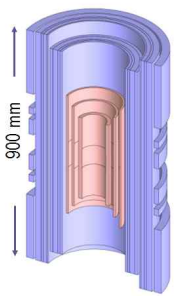


그림 3. Shim coil 전류 조정에 의한 자장 균일도 향상을 나타내는 자장 매핑 결과.

2006년부터 시작된 과제의 최종 목표는 아직 달성되지 않았지만, 본 과제의 책임연구원이었던 Tsukasa Kiyoshi 박사가 과제 수행 도중 안타깝게 유명을 달리하였으며, 동일본 대지진에 의해 일부 시스템이 손상되는 등 우여곡절을 겪은 끝에 나름 상징적인 1001 MHz를 달성한 성과를 내었으며, 본 목표인 1.03 GHz에 도달하기 위해 자기장을 올리는 작업이 계속되고 있다.

3. MIT/FBML 1.3 GHz NMR Magnet

NMR급의 마그네트의 개발 목표로 현재 목표 자기장이 가장 상향 조정되어 있는 연구개발과제는 MIT의 FBML (Francis Bitter Magnet Lab.)에서 제안하는 1.3 GHz (30.5 T) 저온/고온 초전도 하이브리드 NMR 마그네트 시스템으로 보인다. FBML에서는 2000년부터 미국 NIH로부터 펀딩을 받아서 3단계로 구성된 1 GHz이상의 고해상도를 가지는 고자장 하이브리드 NMR 마그네트의 개발과제를 시작하여 현재까지 진행하고 있다. 1단계에서는 350 MHz NMR용 마그네트를 저온 초전도 코일(L300 MHz)과 고온 초전도 코일(H50 MHz)의 결합 형태로 제작하여 하이브리드 NMR 마그네트를 성공적으로 개발하였으며, 2단계에서는 700 MHz (L600 MHz, H100 MHz) 하이브리드형 마그네트를 개발하여 특성측정을 완료하였다. 2단계가 끝날 무렵인 2006년 경, 과제의 최종 목표가 변경이 되어 현재의 1.3 GHz로 상향조



Parameters		Insert1	Insert2	Insert3
Frequency	[MHz]	369	242	189
Field at Center	[T]	8.66	5.65	4.42
HTS tape width; thickness	[mm]		6.0; 0.07	
Operating current	[A]		251.3	
Overall current density	[A/mm^2]		547	
Total double pancake (DP) coils		26	32	38
Winding inner diameter	[mm]	91.0	150.8	196.9
Winding outer diameter	[mm]	119.1	168.9	211.2
HTS tape per DP	[m]		122	
Total inductance	[H]		20.8	

그림 4. FBML 의 1.3 GHz NMR용 마그네트의 구성 및 고온초전도 마그네트의 사양 (출처: FBML-KPU seminar, Dr. Hahn).

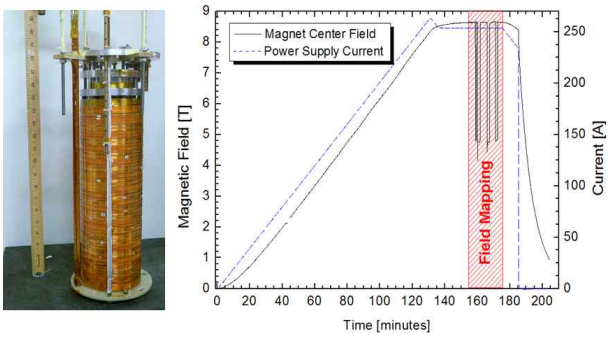


그림 5. FBML 1.3 GHz NMR 마그네트의 Insert 1 coil 의 제작 완료 모습 및 테스트 (출처: FBML-KPU seminar, Dr. Hahn).

정되었으며, 저온 초전도 마그네트로 500 MHz를 감당하고, 고온 초전도 마그네트로 나머지 800 MHz를 개발하여 결합할 예정으로 알려져 있다. 그림 4에 1.3 GHz NMR 마그네트의 구성도 및 고온 초전도 코일의 사양을 나타내었으며 상온 보어의 직경은 54 mm로 예정되어 있다.

본 개발과제는 현재 마그네트 설계가 완료되었으며, 3개로 구성될 예정인 고온 초전도 인서트 마그네트 중 가장 안쪽에 위치하게 될 고온초전도 Insert 1 마그네트가 최근 제작이 완료되어 충전 및 자장 매핑 시험을 마친 상태이다. 그림 5에 제작된 고온초전도 마그네트의 모습과 시험과정을 나타내었다. 시험과정에 나타난 마그네트 전류와 중심자기장의 변화에 의해 알 수 있듯이, 본 인서트 마그네트는 무절연(NI, No Insulation) 코일의 형태로 권선되어 있는 것으로 알려져 있다. 무절연 코일이란 말 그대로 초전도 선재에 전기적인 절연이 없는 상태에서 권선하여 제작하는 방식의 권선을 의미한다. 이렇게 권선하면 코일을 구성하는 턴과 턴 사이에 전기적인 절연이 없기 때문에 초전도가 아닌 기존 코일의 경우에는 마그네트로 동작할 수 없으나, 초전도 권선의 경우에는 초전도 선재 내부의 초전도체 부분과 다음 턴을 구성하는 초전도 선재 내부의 초전도체 부분이 금속 안정화재로 구분되어 있으며, 초전도체 부분의 전기저항이 없기 때문에 금속부분이 절연층처럼 동작하여 마그네트의 구성이 가능해 진다. 그러나 이는 안정적인 직류전류가 인가되는 상태에서 가능하며, 충전시나 방전시 기타 전류의 변화가 있는 상태에

서는 자장 변화에 의한 유기기전력이 발생하여 금속 안정화재 부분에 전류가 흐르게 되어 그림 5에서 볼 수 있는 것과 같이 자기장 변화의 지연 현상이 발생할 수 있다. 그러나 이러한 권선을 구성하면 Premature quench를 포함하는 마그네트의 전체적/국부적인 상변이 현상이 발생하였을 때 고온초전도 권선의 보호 측면에서 매우 유리하게 작동할 수 있음이 보고되어 있다. 뿐만 아니라 절연을 제거함으로 compact한 마그네트 구성이 가능해 지며 따라서 전류밀도의 확보에도 도움이 되므로, 본 과제에서 고온 초전도 인서트 마그네트로 무절연 기법을 도입한 것으로 판단되며, 전 절에서 기술한 NIMS의 경우 마찬가지로 본 고온 초전도 인서트 마그네트는 외부 전류원을 사용한 Driven mode로 운전될 예정이다.

또한 본 과제에서 제시하고 있는 Field shaking 기술에 대해 관심을 가질 필요가 있을 것이다. 현재 주로 사용되고 있는 테이프형 고온초전도 선재는 형상에 의한 히스테리시스 특성이 매우 강하여, 마그네트로 제작하는 경우 충방전 과정에 의한 잔류자속밀도가 남는 고질적인 문제를 가지고 있다. 이는 초전도체 특유의 screening current에 의한 것으로 원하지 않는 자기장일 뿐만 아니라 조정하기도 어려워서 특히 고온초전도 선재를 NMR에 적용하고자 할 때 가장 먼저 문제를 삼는 부분이기도 하다. FBML에서는 이를 제어하기 위해서 고온초전도 마그네트의 외부에 추가 코일을 설치한 후 적당한 크기와 주파수를 가지는 교번자장을 인가함으로 잔류자속을 줄이고자 하는 연구를 진행 중이며, 실험적으로도 그 가능성이 제시된 바 있다.

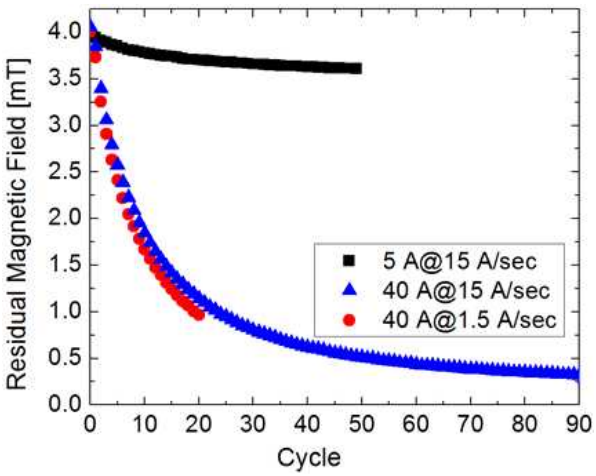


그림 6. Shaking coil에 의한 고온초전도 마그네트의 잔류자속 밀도 변화 측정 시험 결과 (출처: FBML-KPU seminar, Dr. Hahn)

본 과제가 실질적으로 종료되는 시점은 약 3년 후가 될 예정이다. 본 과제가 성공적으로 마무리되면 본격적으로 고온초전도체가 NMR 마그네트용으로 적용이 가능함을 증명하게 되며, 실질적인 한계로 여겨졌던 1 GHz를 훌쩍 뛰어넘어 더 높은 해상도를 구현할 수 있는 NMRS 분석장비가 신약개발 등에 본격적으로 활용될 수 있기를 기대해 본다.

4. 국내 NMR 개발현황 및 전망

초전도 응용기기의 연구 개발에 대한 국내의 역사는 그리 길지 않으며, 주로 초전도 전력기기에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 이는 지난 21세기 프론티어사업을 통해 정점을 이루었으며, 몇 가지 전력기기의 분야에 있어서는 세계적으로 결코 뒤지지 않는 기술력을 확보한 분야도 존재한다. 그러나, 상대적으로 초전도 마그네트 분야에 대해서는 미국, 유럽, 일본 등의 국가에서 진행되어왔던 연구개발 성과에 미치지 못하였음 역시 사실이다. 이러한 중, 최근 한국기초과학연구원에서 400 MHz급 고온초전도 NMRS 장비의 개발 및 구축 과제가 시작되었다. 이는 단순히 장비 구축의 의미만 있는 것이 아니라, 향후 국내 업체에 기술이전을 통한 상용화까지 염두에 두고 있으므로 NMR 마그네트 개발에 대한 국내 기술확보라는 큰 의미를 가지고 있다고 볼 수 있다. 비록 본 과제의 목표 자기장 값은 상대적으로 작지만, 저온초전도를 사용하지 않고 고온초전도만 사용하여 상용화급 NMRS 장비를 개발하겠다는 점에 많은 의미가 있을 것이다.

NMRS의 분석능력을 높이기 위해서 고온초전도를 적용하는 것은 현재로서는 필연적인 것으로 판단된다. 특히 극저온, 고자장하에서 ReBCO 계열의 2세대 고온초전도 선재가 가지는 높은 임계전류 특성은 일견 NMR 마그네트 성능 향상의 비약적인 발전의 가능성을 보여준다. 국내의 (주)서남에서

현재 제조되고 있는 2세대 고온초전도 선재의 양질의 고자장 특성을 보면 이러한 가능성을 더욱 확고하게 해 주는 듯하다. 그러나, 현실적으로 2세대 고온초전도 선재를 NMR용 마그네트에 적용하기 위해서는 반드시 해결해야 하는 여러 가지 문제점들이 존재한다. 고온초전도 마그네트의 보호기술, 안정적인 초전도 접합기술, 영구전류 스위치 기술, screening current 문제 해결, shimming 기술, 기계적인 응력 해소 방안, 냉각기술 경제성 확보 등 해결해야 할 문제들이 산적해 있다. 하지만, 이러한 문제점들의 해결 방안들이 여러 가지 방향으로 지속적으로 연구되고 있으며, 최근 어느 정도 해결책을 제시하고 실험적으로 검증한 사례들도 하나씩 등장하는 것으로 보인다. 또한 고온초전도 NMR 마그네트 개발과 관련된 과제가 국내에서 시작되는 바, 우리나라가 고온초전도 NMR의 실용화, 상용화에 부분적으로나마 기여할 수 있는 기회가 생겼음은 매우 환영할 만한 일이라 할 수 있으며, 나아가 고자장 NMR 마그네트의 국내 순수 기술력을 독자적으로 확보할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

〔1〕T.sukasa Kiyoshi et al., "HTS-NMR: Present Status and Future Plan," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp.714-717, June 2010

저자이력

김우석(金佑錫)
1990-1996년 서울대학교 전기공학과(학사),1996-1998년 서울대학교 전기공학부 (석사), 1998-2002년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(박사), 2005-2007년 MIT/FBML (Post Doc.), 현재 한국산업기술대학교 에너지전기공학과 조교수.