

핵자기공명 및 물성연구용 고자기장 자석 개발

이 상 갑
한국기초과학지원연구원

1. 서 론

핵자기공명 (NMR) 장비는 현재까지 그 구조가 알려진 10만 종의 단백질 가운데 약 1만 종의 구조를 밝혀내는 연구에 크게 기여하였다. 고자기장 NMR 장비는 신호의 감도와 스펙트럼의 분해능이 향상되어 거대단백질, 막단백질에 대한 구조를 밝히는 것을 가능하게 함으로써 구조기반 신약개발에 필수 장비가 되었다. 특히 1.2 GHz 이상급의 초고자기장 NMR 장비는 100 kDa 수준까지 분자구조 분석을 가능하게 할 것으로 예상되어 생체분자 간 상호작용의 분자구조적 연구가 가능해져서 생체분자의 기능 등 생명현상의 근원적 이해를 위해 더욱 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 또 고자기장은 정수의 1/2을 갖는 사중극 핵스핀 (예를 들면 ^{17}O)의 NMR 신호 감도를 극단적으로 증가시켜 그런 산소 원자가 중요한 역할을 하는 금속산화물 물성 (예를 들면 고온초전도 현상)에 대한 NMR 연구, 또는 옥살레이트 및 활성산소가 노화 등의 생명현상에 미치는 영향에 대한 NMR 연구를 가능하게 한다.

미국립고자기장연구소, Bruker BioSpin, MIT, RIKEN 등 세계유수 연구기관들은 이상과 같은 기준에 불가능했던 연구를 가능케 하는 초고자기장 NMR 장비를 개발하기 위해서 매진 중이다. 한국기초과학지원연구원은 무절연 REBCO 한국형 고온초전도자석 기술로 이룩한 최근 성과를 바탕으로 이런 유수기관과 대등한 경쟁을 하기 위해 노력 중이다.

2. 해외의 핵자기공명 고자기장 자석 개발 동향

21 T 이상 고자기장에서 동작하는 고분해능 NMR 장비는 독일 Bruker BioSpin社와 미국 Agilent社 (舊 Varian社)에 의해

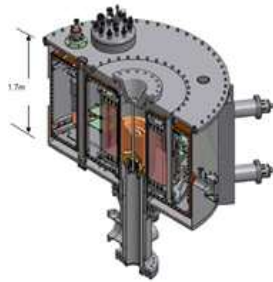
처음 상용화되었다. 900 MHz (21.1 T) NMR 장비는 전 세계적으로 최소 30대 이상이 설치되었고 한국에도 한국기초과학지원연구원 오창센터에 Bruker BioSpin社 제품 1대가 설치되어 국가적 선도장비로 활용되고 있다. 30대 중 최소 4대는 Oxford社에서 제작한 초전도자석을 사용한 Agilent社 제품이고 나머지는 모두 Bruker BioSpin社 제품이다. 1 GHz (23.5 T) NMR 장비는 현재까지 설치된 총 3대 모두가 Bruker BioSpin社 제품인데 2009년 프랑스 CNRS Lyon에 최초로 설치되었다. NMR 장비는 콘솔 및 운영소프트웨어, 프로브, 초전도자석으로 구성되며 고자기장 NMR 장비의 경우 각 구성요소의 가격은 대략 10%, 5%, 85% 정도를 차지한다. 따라서 고자기장 초전도자석의 기술안정성 및 가격경쟁력이 NMR 장비 상용화의 성패를 가른다. 21 T 이상급 고자기장 NMR 초전도자석의 안정적 자기장 특성 확보에 Oxford社가 실패함으로써 Agilent社는 NMR 장비 시장에서 철수하게 된다.

이외에도 연구개발용 고분해능 NMR 자석으로 초대구경 (105 mm) 900 MHz 자석이 2004년에 미국립고자기장연구소에서 개발되었으며 930 MHz 자석이 2004년에 일본 재료연구소 주도로 개발되었다. 이상에서 소개된 모든 NMR 자석은 저온초전도 자석이다. 일본의 930 MHz 자석은 920 MHz 저온초전도 아웃서트 코일과 100 MHz Bi-2223 고온초전도 인서트 코일의 하이브리드 자석으로 2011년에 업그레이드개발에 성공하여 1.02 GHz (24 T) 세계최고 세기 자기장의 고분해능 NMR 자석이 되었다. 2017년에 미국립고자기장연구소에서는 23 T Bitter 수냉식 전자석과 13 T 저온초전도 자석을 직렬로 연결한, 10 mmDSV 내에서 1 ppm 이하 자기장 균일도를 갖는, 36 T 하이브리드 자석 개발에 성공하였다. 이 자석은 20 MW

의 전력이 요구되어 전원 및 냉각 장치 등 부대시설 구축을 포함하여 1기 설치에만도 5백억 원 이상이 필요한 자석으로 한국과 같이 Bitter 수냉식 전자석 기술이 없는 나라에서는 천문학적 개발비용으로도 아예 개발이 불가능하다.



(a) 24 T 세계 최고 자기장 고분해능 초전도 NMR 자석 (NIMS-RIKEN)



(b) 36 T 세계 최고 자기장 고분해능 NMR 자석 (미국립고자기장연)

그림 1. 세계 초고자기장 NMR 자석 개발 현황

개발 중인 고분해능 NMR 초전도자석의 예를 보자. 1 GHz (23.5 T)를 넘어서는 자기장 발생을 목표로 하는 NMR 자석은 저온초전도 임계전류의 급격한 감소로 인해 저온초전도 배경자기장 자석에 고온초전도 인서트 코일의 추가 적용을 필요로 한다. 우선, 스위스 ETH에 2019년 설치를 목표로 Bruker BioSpin社에 의해 개발 중이던 대구경 (89 mm) 1.1 GHz (25.85 T) NMR 자석은 현재 개발에 성공한 것으로 보인다. 9 대의 1.2 GHz (28.2 T) NMR 자석이 同社에 의해 구매계약을 맺고 개발에 착수되었거나 착수될 예정이다. 이들 1.1-1.2 GHz NMR 자석은 절연 레이어 권선 방식의 솔레노이드 REBCO 고온초전도 인서트 코일과 저온초전도 아웃서트 코일의 하이브리드 자석으로 개발되고 있고 자석부는 2 K 이하로 냉각된다. 10 대 중 7 대는 Bruker BioSpin社 본사가 있는 독일과 자석개발 사이트가 있는 스위스의 대학이나 연구소에서 발주하였다. 첫 발주가 2009년에 있었고 그 한 대가 성공적으로 설치되는 것을 확인한 후 순차적으로 발주하는 것이 아니고 7 대를 선발주해 주었다 (이들 장비의 대당 가격은 150-200 억원에 이른다). 이는 성공담보가 없는 F-35 5세대

스텔스 전투기 개발 사업에서 미국정부가 한 역할과 유사하다. 이런 개발실패의 위험을 분담하는 역할을 연구장비 상용화개발에서도 선진국정부가 똑같이 보여주고 있는 것이 놀랍다. 이는 지금까지의 한국정부에게는 기대하기 어려운 것으로 선진국 정부가 초전도자석 제조와 같이 의료기기 등 타분야 산업으로 파급력이 큰 플랫폼기술의 경우 연구개발산업이 그 자체로 중요함을 확실히 인식하고 있다는 방증이다. 제조사 자국정부의 전폭적 지원 아래 연구개발이 뒷받침될 때만이 화려한 기술의 상용화 또한 가능한 일이며, 상용화보다 더 중요한 것은 파급력 큰 플랫폼기술 개발 확보, 고급기술 인력 양성, 연구개발 고급일자리 창출 및 두뇌유출 방지, 국부유출 방지 그 자체임을 보여준다는 점에서 커다란 시사점을 제공하는 사례이다.

또 다른 개발 중인 1 GHz (23.5 T)를 넘어서는 고자기장 고분해능 NMR 자석으로 NHMFL에서 개발 중인 1.1 GHz NMR 자석, 그리고 MIT의 Francis Bitter Magnet Lab과 일본 이화학연구소에서 각각 개발 중인 1.3 GHz (30.55 T) NMR 자석이 있다. NHMFL의 1.1 GHz NMR 자석은 미세 다중 필라멘트 구조의 Bi-2212 고온초전도 인서트 코일과 저온초전도 아웃서트 코일의 하이브리드 자석으로 개발되고 있다. 이 자석은, Bi-2212 선재가 최근 초전도 접합에 성공하여, 영구전류 운전이 가능한 자석으로 개발될 예정이다. Francis Bitter Magnet Lab의 1.3 GHz NMR 자석은 800 MHz 무절연 REBCO 고온초전도 인서트 코일과 500 MHz 저온초전도 아웃서트 코일의 하이브리드 자석으로 개발 중이다. 영구전류모드 고온초전도 shim 기술이 개발 접목될 계획이다. 또 금년 3월에는 일본 이화학연구소에서 1.3 GHz NMR 자석 개발에 착수하였다. 이 자석은 REBCO 고온초전도 인서트 코일, Bi-2223 고온초전도 미드서트 코일, 저온초전도 아웃서트 코일의 하이브리드 자석으로 개발될 예정이다.

3. 국내의 핵자기공명 고자기장 자석 개발 동향

국내에서는 2014년 8월 한국기초과학지원

연구원 (KBSI)의 주도로, ㈜서남, 한국기계연구원, 미국립고자기장연구소가 참여하는, 400 MHz (9.4 T) 66 mm 상온 보어를 갖는 “금속막” 무절연 쉘 REBCO 고온초전도 고분해능 NMR 자석을 개발하는 과제가 착수되었고, 2019년 완성을 목표로 개발이 진행 중이다. 이 고분해능 자석의 자기장 균일도와 안정도 목표치는 각각 0.2 ppm @10mm DSV와 0.2 ppm/day 이하로 설정되었다. 이는 현재까지 저온초전도 고온초전도 자석을 통틀어 국내에서 시도된 유일한 고분해능 NMR 자석 개발이다. KBSI의 NMR 개발은 장기적으로 2025년 전후로 1.5 GHz (35.25 T) 초고자기장으로의 확장을 목표로 하고 있기 때문에 저온초전도 자석과 달리 24 T 이상에서 임계전류가 급격히 감소하지 않는 REBCO 고온초전도 자석 기반으로 개발되고 있다.

“금속막” 무절연 2세대 고온초전도 자석 기술은 과제 기간 동안 KBSI가 협력기관과 처음 고안하여 KBSI NMR 자석에 세계최초로 적용한 한국 고유 NMR 자석 기술로서 무절연 자석의 장점인 쿼치에 따른 자기보호 등 자석 전자기적 안정성을 유지하면서도 1 um 두께의 스테레스 스틸 금속막으로 인한 지름방향 저항을 키워 차폐전류자기장의 효율적 저감을 가능케 하여 자기장의 시간 안정도와 공간 균일도를 크게 향상시킨 혁신적인 자석 기술이다 [1]. “금속막” REBCO 선재는 국내 REBCO 고온초전도선재 양산 기업인 ㈜서남의 선재를 바탕으로 제조되었다. 현재까지 이 기술이 적용된 3 T 데모자석과 9.4 T 자석을 개발하여 모두 NMR 신호 검출에 성공하였다. 2016년에 개발된 3 T 데모자석의 경우 쿼치에 강한 것을 확인했을 뿐만 아니라 우수한 자기장 균일도와 안정도를 달성함으로써 차폐전류로 인한 자기장 드리프트 문제 해결의 길을 제시함으로써 쉘 REBCO 자석 기술이 기존 고분해능 NMR 자석의 대안기술이 될 수 있음을 처음으로 보여주었다 [2]. 또한 9.4 T 자석도 차폐전류자기장이 적으며 안정적인 NMR 신호 측정에 2018년 5월 4일에 성공하여 쉘 REBCO 자석이 고분해능 NMR 자석으로 성공할 가능성을 더욱 높였다. 이상의 모든 결과는 세계적으로 초유의 업적이다.



(a) 9.4 T “금속막” 무절연 REBCO NMR 자석 (KBSI 고유 모델) (b) 3 T “금속막” 무절연 REBCO NMR 자석 (KBSI 고유 모델)

그림 2. KBSI 한국형 NMR 자석 개발 현황

이 고온초전도 자석들은 고온초전도-저온초전도 하이브리드 자석까지 포함하여 고온초전도 자석이 감당하는 자기장 portion 기준으로 이미 NMR 신호 검출에 성공한 세계최고 자기장 자석들이다. KBSI는 고유 “금속막” 무절연 고온초전도 자석 기술의 이런 좋은 결과를 바탕으로 장기적인 과업인 35 T NMR 초전도 자석 (현재 최고 24T, NIMS-RIKEN) 개발에서도 세계 우수기관과 성공적인 경쟁체제 구축을 기대하고 있다.

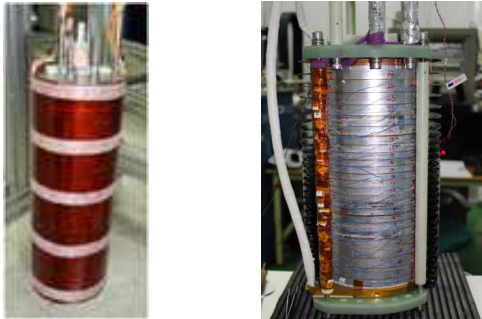
그리고 이 고온초전도 NMR 자석 기술을 이루는 본질적인 요소기술인 고온초전도 선재 기술, 전자기적 자석설계 기술, 자기장 균일도 및 안정도 기술은 고자기장 MRI 자석 개발에도 그대로 적용될 수 있어 현재 세계 최고인 7 T MRI를 넘어서 15 T 혹은 21 T MRI 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 이 경우 뇌과학과 진단의학에 있어 새로운 지평을 열 수 있으며 독일 Siemens 社, 네덜란드 Philips 社, 미국 GE 社가 분할하여 점하고 있는 50억 달러 규모(2015년 기준)의 MRI 장비 시장에 국내 업체가 진출할 수 있는 발판 마련의 전기가 될 수도 있을 것이다.

4. 국내의 물성연구용 고자기장 자석 개발 동향

KBSI는 2011년에 REBCO 고온초전도 선재를 사용하여 5 T 급 인서트 코일을 자석 개발에 성공하였다. 이 자석은 당시 세계 최고 자기장의 무절연 자석이었다. 2013년에 이 인서트 코일을 15 T 상용 저온초전도자석

에 삽입하여 16.83 T의 자기장 발생에 성공하였다. 이 자석시스템은 초전도선재의 고자기장 임계물성 측정장치로 활용되고 있다.

(주)서남은 REBCO 고온초전도 선재를 사용하여 2015년 4월에 26.4 T의 자기장 발생에 성공하였다. 이 자석은 당시 세계 최고 자기장의 초전도 자석이였다. 26.4 T 자석은 multi-width 기법을 적용한 무절연 자석이였다. 이 자석은 대전 IBS CAPP에서 구리의 자기저항 측정 연구에 활용되였다. 또 IBS CAPP에서는 7cm 구경의 18 T 자석을 (주)서남을 통해 제작하여 axion 검출 연구에 적용하고 있다.



(a) 16.83 T 자석에 사용된 5 T 급 무절연 REBCO 인서트 코일 (KBSI) (b) 26.4 T 무절연 REBCO 자석 (주)서남)

그림 3. 한국 물성연구용 고자기장 자석

5. 맺음말

KBSI는, 장기적으로 1 GHz 이상급 초고 자기장 NMR 자석 개발로 가는 도상에서, 한국 고유의 “금속막” 무절연 REBCO 고온초전도 자석 기술을 처음 고안 적용함으로써 켈치와 자기장 드리프트에 강한 3 T NMR 자석을 성공적으로 개발하였고 9.4 T NMR 자석도 차폐전류자기장이 적으며 안정적인 NMR 신호 측정에 세계 초유로 성공하여 한국 고유 자석기술이 기존 고분해능 NMR 자석의 대안기술로 성공할 가능성을 높임으로써 한국이 이 분야에서 미국립고자기장연구소, MIT FBML, RIKEN, Bruker BioSpin 등 세계 우수기관과 대등한 경쟁을 할 수 있는 토대를 마련하였다.

독일과 스위스 정부의 Bruker BioSpin社의 1.1-1.2 GHz NMR 자석 (대당 장비가 150-200 억원) 7 대 선발주 허가 사례는 선

진국정부가 연구개발산업 그 자체를 중요하게 인식하고 있다는 확실한 방증으로서 화려한 기술의 상용화는 제조사 자국정부의 전폭적 지원 아래 연구개발이 뒷받침될 때만이 가능한 일임을 배우게 해준다. 한국정부도 이제부터라도 연구개발산업 활성화 차원에서 대형선도 연구장비 한 대를 선진국에서 구입하면 그런 장비 한 대 이상을 반드시 국내 개발케 하는 것을 정책적으로 추진하기를 권해본다.

정부의 이런 접근은 특히 고온초전도자석 제조와 같이 의료기기 제조산업 등 타분야 산업으로 파급력이 큰 플랫폼기술일수록 더욱 큰 경제적 효과가 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] J. Y. Jang et al., “Design, Construction and 13 K Conduction-Cooled Operation of a 3 T 100 mm Stainless Steel Cladding All-REBCO Magnet,” Supercond. Sci. Technol., vol 30, 105012, 2017.

[2] SangGap Lee et al., “Development Progress of Metal-Clad No-Insulation All-REBCO Magnet for 400 MHz High-Resolution NMR,” MEM18, June 17 - 20, 2018, Andong, Korea.

저자이력



이상갑(李相甲)
1991-1995년 서울대학교 물리학과, 1995-1997년 서울대학교 대학원 물리학과 (이학석사), 1997-2003년 서울대학교 대학원 물리학과 (이학박사), 2003-2006년 한국과학기술원 물리학과 (Post Doc.), 2006-2007년 한국과학기술원 물리학과 (연구교수), 2007-2010년 Cornell 대학교 화학과 (Post Doc.), 2010-현재 한국기초과학지원연구원 선임연구원