핵자기공명장비용 무냉매 고온초전도 자석 개발

DOI: 10.3938/PhiT.28.022

황영진·이상갑·장재영·한승용·방제석·염한길·인세환·홍용주·이헌주·김재민·안민철

Development of a Cryogen-Free High-Temperature Superconducting Magnet for Use in Nuclear Magnetic Resonance

Young Jin HWANG, SangGap LEE, Jae Young JANG,

Seungyong HAHN, Jeseok BANG, Hankil YEOM, Sehwan IN, Yong-Ju HONG, Hunju LEE, Jaemin KIM and Mincheol AHN

저자약력

황영진 박사는 2014년 연세대학교 전기전자공학과에서 공학 박사를 취득하였으며 한국산업기술시험원을 거쳐 2015년부터 한국기초과학지원연구원에 선임연구원으로 재직 중이다.(yjhwan@kbsi.re.kr)

이상갑 박사는 2003년 서울대 물리학과에서 이학박사 학위를 취득하고 한국과학기술원 물리학과에서 연구교수, 미국 코넬대학교 화학과에서 Postdoc.으로 근무한 후 2010년부터 한국기초과학지원연구원에 재직 중이다.(sgl757@kbsi.re.kr)

장재영 박사는 2013년 연세대학교 전기전자공학과에서 공학 박사를 취득하였으며 두산중공업 초전도발전기개발팀을 거쳐 2015년부터 한국기초과학지원연구원에 선임연구원으로 재직 중이다.(gangaji2080@kbsi.re.kr)

한승용 교수는 2003년 서울대학교 전기정보공학부에서 공학 박사를 취득하였으며 미국 매사추세츠 공과대학(MIT) 연구원, 미국 고자장연구소(NHMFLL)와 플로리다 주립대 교수직을 거쳐 2017년부터 서울대학교 전기정보공학부 교수로 재직 중이다.(hahnsy@snu.ac.kr)

방제석 연구원은 2017년 연세대학교 전기전자공학과에서 공학 학사를 취득하였으며 현재 서울대학교 전기정보공학부 초전도응용 연구실에서 석·박사통합과정에 재학 중이다.(jeseoknim@snu.ac.kr)

염한길 박사는 1992년 한국기계연구원에 입소하였고, 2008년 인하대학교 기계공학과에서 공학 박사를 취득하고 2009년부터 한국기계연구원에 책임연구원으로 재직 중이다.(hkyeom@kimm.re.kr)

인세환 박사는 2010년 KAIST 기계공학과에서 공학 박사를 취득하고 삼성중공업 연구소를 거쳐 2013년부터 한국기계연구원에 선임연구원으로 재직 중이다.(insh@kimm.re.kr)

홍용주 박사는 1992년 한국기계연구원에 입소하였고, 2010년 고려대학교 기계공학과에서 공학 박사를 취득하고 2011년부터 한국기계연구원에 책임연구원으로 재직 중이다.(yjhong@kimm.re.kr)

이헌주 박사는 1999년 서울대 물리학과에서 이학박사 학위를 받고 LG전자기술원에서 근무하다가 2005년부터 (주)서남에서 연구소장으로 근무하고 있다.(hlee@i-sunam.com)

김재민 연구원은 2009년 포항공과대학교 물리학과에서 이학 석사를 취득하였으며 2013년부터 (주)서남에서 연구원으로 근무 중이며 동시에 현재 서울대학교 전기정보공학부 박사과정에 재학 중이다.(jmkim@i-sunam.com)

안민철 교수는 2006년 연세대학교 전기전자공학과에서 공학박사를 취득하였으며 MIT FBML에서 post-doc.을 마치고, 2009년부터 군산대학교 전기공학과에 재직 중이다.(mcahn@kunsan.ac.kr)

Nuclear magnetic resonance (NMR) is a non-destructive technique for learning how molecules function and relate to each other by determining their structure and dynamics at a molecular level. High-performance NMR equipment and, in particular, the magnet, has a very high technical entry barrier to development and is currently being supplied to a near-monopoly market by the leading company Bruker BioSpin, and the NMR market size in Korea is about \$10 million for annual gross installation of high-performance NMR equipment at public institutions. Because of this, an international collaboration project, with the main goal of developing a 400-MHz solid-state NMR magnet, was launched in 2014 in collaboration with the Korea Basic Science Institute, the Korea Institute of Machinery and Materials, SuNAM Co. Ltd, Korea, and the National High Magnetic Field Laboratory of USA. The approach being pursued by the development project differs from existing approaches in that an all-ReBCO NMR magnet is developed using 2nd-generation high-temperature ReBCO (ReBa₂Cu₃O_{7-x}) superconducting conductors in consideration of the future development of ultra-high field NMR magnets. In this article, we briefly introduce that project and its main technical focus, which is the development of a cryogen-free high-temperature superconducting magnet for use in high-resolution solid-state NMR.

들어가면서

분자들은 너무나 작아서 우리가 이를 직접 관찰하고 연구하는 것에는 많은 어려움이 있다. 그러므로 이를 관찰하기 위해 오래전부터 여러 가지 간접적인 방법들이 사용되어 왔다. 분자들 내에 있는 전자들의 전이를 이용하는 자외선 분광법과 분

자 내에서 결합을 이루고 있는 원자들 간의 진동과 회전을 이용하는 적외선 분광법은 그 대표적인 예라고 할 수 있다. 핵자기공명(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)은 또 다른 대표적인 예로써 분자를 이루고 있는 원자핵들의 자기적인 성질(magnetism)을 이용하는 방법이다.^[1] 이는 분자들을 공간적인 균일도(spatial homogeneity)와 시간적 안정도(temporal stability)가 확보된 정자기장(static field) 환경에 놓은 상태에서 RF 전자기 파동 대역의 교류 자기장을 인가할 때 발생하는 자기적 공명현상을 관찰함으로써 원자마다 미세하게 다른 주변 자기장 환경을 구분해 내는 것이다. 이러한 현상을 이용해서 특정 물질의 물리/화학적, 생물학적 특성 및 분자구조 분석이 가능하도록 구현된 장비를 핵자기공명분광기 또는 핵자기공명장비(NMR spectrometer)라고 한다. 핵자기공명장비는 화학/생물 분야의 표준분석장비로써 다양한 분자분광기 중에서도 그 활용도가 매우 높으며, 보다 정밀한 분자구조 분석을 위해서 고분해능 고자기장 NMR 분광기에 대한 필요성과 개발 경쟁이 증대되고 있다.^[2] 하지만 고성능 NMR 분광기 시장은 Bruker, JEOL 등 해외 선도업체들에 의해 독과점되어 있으며, 정자기장 발생용 자석 등의 핵심부품에 있어 기술 진입장벽이 매우 높아 새로운 업체들의 시장진입이 매우 어려운 실정이다. 이에 따라 국내에 설치 및 운영되고 있는 고성능 NMR 분광기는 전량 수입(공공기관 구축 기준 연 약 100억 이상 규모)에 의존하여 왔으며, 국산화를 위한 기술 개발이 가장 필요한 연구장비 분야 중 하나라고 할 수 있다. 이와 같은 상황에서 한국기초과학연구원(Korea Basic Science Institute, KBSI)은 2014년 8월에 (주)서남, 한국기계연구원, 미국립고자기장연구소 등과 함께 국내에서 양산에 성공한 2세대 고온초전도($\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: ReBCO, Re: Rare earth 계열 원소) 선재를 이용하여 400 MHz급 고체 NMR용 초전도 자석을 개발하기 위한 프로젝트에 착수하였고 이후 2017년부터 한국기초과학지원연구원의 분석과학 연구장비 개발 사업의 세부 과제로 연구개발을 수행하고 있다. 본 자석은 고분해능 고체 NMR 장비 구현을 위해 0.2 ppm @ 10 mm DSV(Diameter Spherical Volume)의 공간 균일도와 ± 0.2 ppm/day의 시간 안정도를 갖는 자기장 성능을 목표로 한다. 이는 현재까지 국내에서 시도된 초전도 자석 개발 연구 중 최초로 상용 고체 NMR급의 성능을 최종목표로 한다는 점에서 의의가 있으며, MIT FBML, NHMFL, RIKEN 등의 해외 우수연구기관들에서 채택하고 있는 하이브리드 자석(저온초전도 자석+고온초전도 인서트 코일) 방식이 아닌 2세대 고온초전도 선재를 이용한 쏘고온초전도(all-ReBCO) 자석 방식으로 개발되고 있다는 점에서 차별성을 가진다. 본 프로젝트는 저온초전도 선재와 달리 초고자기장에서도 초전도 상태를 유지하는 2세대 고온초전도 선재로 제작된 자석을 기반으로 400 MHz

Fig. 1. KBSI's Cryogen-free HTS magnet system for 400 MHz solid-state NMR.

고분해능 고체 NMR 분광기를 개발함으로써 향후 초고자기장 NMR 분광기 개발을 위한 기반 기술을 확보하는데 연구개발의 최종 목적이 있다.

본 글에서는 고성능 NMR 분광기 국산화를 위해 한국기초과학연구원(KBSI)에서 개발 중인 무냉매 고온초전도 자석 개발 기술의 특징을 3T 데모자석 내용을 중심으로 핵심 개발 기술에 주안점을 두고 소개하고자 한다.

핵심개발 기술

1. 고온초전도 자석 기술

NMR 분광기의 감도(sensitivity)와 분해능(resolution)은 자석의 자기장 세기와 균일도(homogeneity)에 의존한다. 자석에서 발생하는 자기장의 세기는 감도를 증가시키고, 자기장의 공간 균일도가 좋을수록 신호의 분해능은 증가한다. 자기장을 발생시키는 자석은 사용되는 재료에 따라 영구자석, 전자석, 초전도 자석 등으로 나눌 수 있다. 영구자석과 상용화된 전자석으로는 일반적으로 최대 2 T 수준의 자기장을 얻을 수 있다. 전자석은 전기전도도가 높은 도체로 제작되며, 초전도 자석 또한 넓은 범주에서 전자석의 한 종류라고 할 수 있다. 다만 초전도 자석은 전기저항이 “0”인 초전도체를 사용한다는 점에서 차이가 있다. 초전도 선재는 초전도체를 테이프(tape) 또는 선(wire) 형태로 제작한 것으로 저항이 없기 때문에 열손실이 거의 발생하지 않아 동일한 단면적에서 일반 구리선보다 수십 배의 전류를 더 흘릴 수 있다. 따라서 고성능 NMR 분광기에 적용되는 자기장 발생 장치에는 초전도 선재로 제작된 초전도 자

REFERENCES

- [1] Sueg-Geun Lee, *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* (Freedom Academy Inc., 2016).
- [2] SangGap Lee, *Superconductivity and Cryogenics* 20(2), 2 (2018).

Fig. 2. Protection mechanism of no-insulation winding.

석이 주로 이용되고 있다. 초전도 선재는 임계온도(초전도 상태를 유지할 수 있는 최대온도)에 따라 액체헬륨 온도에서 초전도성을 나타내는 저온초전도(low temperature superconductor, LTS) 선재와 액체질소 온도에서도 초전도성을 나타내는 고온초전도(high temperature superconductor, HTS) 선재 등으로 나뉜다. 고온초전도 선재는 임계온도가 액체질소 온도보다 높기 때문에 용도에 따라서 저렴한 액체질소로 냉각할 수 있어 냉각비용을 절감할 수 있다는 장점 외에도 저온초전도 선재에 비해 임계자기장(초전도 상태를 유지할 수 있는 최대 자기장)과 임계전류 밀도(초전도 상태를 유지하면서 흘릴 수 있는 최대 전류 밀도)가 크다는 장점이 있다. 특히, 고온초전도 선재의 한 종류인 2세대 고온초전도 선재(2G HTS wire)의 경우 기계적인 인장 강도가 높아 초고자기장 응용에 가장 적합한 선재로 평가되고 있다. 하지만 2세대 고온초전도 선재는 앞서 서술한 고자기장 조건에서의 우수한 성질에도 불구하고 낮은 상전도 전파속도(normal zone propagation velocity, NZPV)와 차폐전류 유도자기장(screening current-induced field, SCF) 문제로 인해 NMR 분광기용 자석으로 적용되는데 어려움이 있었다. 이에 따라, 한국기초과학지원연구원, 미국립고자기장연구소, 서울대, (주)서남, 한국기계연구원, 군산대 등으로 구성된 KBSI 연구그룹에서는 2세대 고온초전도 자석의 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 프로젝트의 기획단계 및 기술 개발 단계에서 “금속막(metal-clad) 무절연(no-insulation)” 기술을 기반으로 고온초전도 자석을 설계^[3] 및 제작하였다. 무절연 권선기술은 고온초전도 자석의 운전 안정성을 획기적으로 높이기 위해 채택된 기술로써, 고온초전도 선재의 낮은 상전도 전파속도로 인해 고온초전도 자석 내에 국부적인 열이 발생하여 상전도 영역이 만들어질 경우 온도가 치솟아 자석 보호 실패 및 이로 인해 자석의 손상 가능성이 높다는 점을 극복하기 위한 기술이라고 할 수 있다.^[4,5] 그림 2는 무절연 권선기술의 자석 보호 기본 메커니즘을 나타내며, 본 기술은 고온초전도 선재를 권선할 때 턴간 절연물질을 삽입하지 않고 권선하여, 고온초전도 자석에 국부적인 열이 발생할 경우 전류 및 열이 자동적으로 인접 턴으로 우회 및 전파되도록 해서 자석의 자

Fig. 3. Fabricated all-ReBCO magnet.

Fig. 4. Charging test results of all-ReBCO magnet.

기보호(self-protection)가 가능하도록 할 수 있다. 하지만 무절연 권선기술로 제작된 고온초전도 자석은 이런 인접 턴으로 전류가 흐르고자 하는 경향으로 인해 자기장 총방전시 자기장 지연 현상이 발생하게 되는데 이를 해결하기 위해 2세대 고온초전도 선재에 1 μm 두께의 스테인리스 스틸 금속막을 입히는 기술을 채택하였다.^[6] 금속막 기술을 통해 무절연 고온초전도 자석의 턴간 접촉저항을 높임으로써 자기장 지연 현상을 개선할 수 있고, 이에 따라 차폐전류유도자기장을 저감시키기 위한 전류충전시퀀스 개발 또한 가능하게 되었다.^[7] 그림 3은 상술한 금속막 무절연 기술로 제작된 3T 소고온초전도 자석

REFERENCES

- [3] K. L. Kim *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 4302604 (2016).
- [4] S. Hahn *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 1592 (2011).
- [5] J. B. Song *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **28**, 114001 (2015).
- [6] J. Y. Jang *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **30**, 105012 (2017).
- [7] Y. J. Hwang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4701605 (2017).

Fig. 5. Conduction-cooling system for cryogen-free HTS magnet.

Fig. 6. Temperature variations of the cooling system during cool-down.

을 나타내며,^[6] 그림 4는 최종 조립 완료된 고온초전도 자석의 자기장 충전 실험 결과를 보여준다.

2. 무냉매 냉각 기술

고성능 NMR 분광기에 적용되는 저온초전도 자석은 일반적으로 액체 또는 초유체 헬륨과 같은 냉매를 사용하여 냉각된다. 그러나 최근 고온초전도 선재를 이용한 NMR 자석이 개발되면서 NMR 자석 냉각에 극저온 냉동기를 사용하는 전도냉각 방식이 적용되기 시작하였다.^[8,9] 국내에서는 극저온 냉동기를 이용한 초전도 자석용 전도냉각시스템에 대한 설계 기반 기술이 많이 축적되어 있었으나, NMR 자석의 요구조건에 부합하는 냉각시스템을 개발하기 위한 연구는 미흡한 실정이었다. 이에 따라 KBSI 연구그룹에서는 한국기계연구원과 (주)서남을 중심으로 NMR 자석 응용을 위한 저진동 무냉매 냉각 시스템 개

Fig. 7. Bellows assembly of the conduction cooling system.

발을 진행하였다.^[10] 그림 5는 고온초전도자석의 냉각시스템을 나타낸다. 본 냉각시스템은 크게 극저온 냉동기, 진공챔버, 열차폐 챔버, 냉동기 1단/2단부 thermal link, 냉각판 등으로 구성되며, 고온초전도 자석의 운전온도를 20 K 이하로 유지하기 위해 1단부와 2단부의 열부하를 산정하고 이를 바탕으로 자석과 냉동기의 주요 thermal link에 대한 설계가 수행되었다. 극저온 냉동기로는 20 K에서 22 W, 80 K에서 100 W의 냉동용량을 갖는 2단 맥동관 냉동기(Cryomech, PT815)가 적용되었다. 그림 6은 개발된 냉각시스템에 대한 냉각실험 결과를 나타내며, 외부에서 들어오는 열을 잘 차단하여 고온초전도 자석의 온도가 10 K 근방에서 0.6 K 이내의 온도편차로 유지됨을 확인하였다.

극저온 냉동기가 적용되는 무냉매 NMR 장비에서 극저온 냉동기는 시스템의 진동원으로 작용한다. 따라서 무냉매 NMR 장비의 성능 확보를 위해서는 진동해석을 통한 진동저감기술 개발이 필수적이다. 무냉매 NMR용 고온초전도 자석 시스템에서는 냉동기의 진동을 저감하기 위하여 스프링이 장착된 벨로우즈 어셈블리를 냉동기와 저온조 사이에 적용하였으며, 벨로우즈 어셈블리의 스프링 상수는 극저온 냉동기의 진동저감을

REFERENCES

- [8] B. D. Nguyen *et al.*, "A compact portable 4.7 T driven NMR system for reaction monitoring," presented at the Exp. Nuclear Magn. Resonance Conf., (ENC), Pacific Grove, CA, USA, Apr. 14-19 (2013).
- [9] M. Mallett, D. Pooke and T. Husheer, "Cryogen-free, high resolution NMR magnets using high temperature superconductors," presented at the Appl. Supercond. Conf., Charlotte, NC, USA, Aug. 10-15 (2014).
- [10] S. In *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4602605 (2017).

위해서 일반적으로 적용되고 있는 23 kgf/mm를 사용하였다. 진동저감 시스템의 성능을 평가하기 위하여 데모자석의 냉각시스템을 동작시키는 동안 데모자석 저온용기(진공챔버)의 상부와 극저온 냉동기의 진동을 측정하고 진동저감 수준을 평가하였다. 진동은 레이저 변위센서(Keyence, LK-010, 0.1 μ m resolution, 7.8 kHz sampling)를 이용하여 측정하였다. 진동측정 결과를 살펴보면 벨로우즈 어셈블리에 의해서 냉동기의 진동에 의한 변위가 저온조 상판과 상온보어 상판에서는 1/5 이하로 감소하였다. 그래서 데모자석이 내부에 위치하는 저온조 상판과 상온보어 상판에서의 진동변위 진폭은 1 μ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 이하 수준을 나타내었다. 변위에 대한 주파수 분석결과를 살펴보면 저온조 상판, 상온보어 상판, 벨로우즈 어셈블리 상판 모두 냉동기 작동 주파수(~ 1.5 Hz)를 주성분으로 하는 변위가 측정되었고 벨로우즈 어셈블리에 의해서 그 크기가 크게 감소하였다.

3. 자기장 성능 개선 기술

NMR 신호의 감도와 분해능을 높이기 위해서는 NMR 신호 검출 코일의 위치에 놓여 있는 시료의 모든 부분에 동일한 자기장이 인가되어야 하며, 이에 따라 자석 공간 내의 자기장 균일도와 안정도 확보가 매우 중요하다. 2세대 고온초전도 선재로 제작된 고온초전도 자석은 차폐전류 유도자기장 발생과 장기간에 걸친 소멸로 인해 자기장 균일도와 안정도 악화 문제가 심각하게 발생한다. 그림 8은 차폐전류 유도자기장의 발생 메커니즘을 나타내는데 이는 일반 도체에 시변(time-varying) 자기장이 인가될 때 발생하는 와전류 효과와 매우 유사하다. 고온초전도 자석에 전류가 총방전될 때 테이프 형태의 고온초전도 선재에는 시변 자기장이 인가되고 이때 고온초전도 선재에서는 시변 자기장을 줄이기 위한 방향으로 국소적인 전류가 유기된다. 이렇게 유도된 전류를 차폐전류(screening current)라고 하고 이 차폐전류에 의해 유도되는 자기장을 차폐전류 유도자기장이라고 한다. 고온초전도 선재에 유기된 차폐전류 유도자기장은 저항이 "0"인 초전도층에 반영구적으로 흐르면서 자석에 발생하는 자기장을 왜곡시키게 된다. 한편 이중팬케이크 코일 형태로 권선되는 2세대 고온초전도 자석은 제작 오차 및 냉각 시 변형 등의 다양한 원인에 의해서도 공간상에서 자기장 불균일도를 가져오게 된다. 이러한 불균일도를 최소로 줄이기 위한 자기장 보정 기술을 시밍(shimming)이라고 한다. Shimming은 크게 분류하면 별도의 도전 코일에 전류를 통전하여 균일도를 개선하는 active shimming과 포화된 철편을 이용하는 passive shimming으로 나뉜다. 본 프로젝트에서는 군산대학교와 공동연구를 통해 passive shimming의 대표적 방법인 ferro shimming과, 이후 상온(room-temperature, RT) active shimming을 통해 고온초전도 자석의 자기장 균일도를

Fig. 8. Screening current induced field in HTS magnet.

< ferro-shim 디자인 >

< ferro-shim 제품 >

Fig. 9. Design and real product of ferro-shims for all-REBCO magnet.

개선하고 있다.

고온초전도 자석의 shimming을 위해서는 자석 공간 내의 자기장 분포를 정밀하게 측정하는 것이 필수적이다. 이를 위해 3축 자유도를 가진 3차원 field mapper를 사용하여 고온초전도 자석에 대한 자기장 mapping 작업을 수행하였다. 이때 mapping 경로는 자석 중심을 주위로 16 mm 지름과 30 mm 높이의 가상 실린더의 표면을 따라 6바퀴의 나선(helix)을 따라 움직이면서 $\phi = 16.92^\circ$ 마다 자기장 값을 측정하였다. 측정점을 선택함에 있어서 고려된 점은 좌표의 직교성(orthogonality)이다. 자기장 센서의 경우 측정의 정확도를 높이기 위해 KBSI에서 직접 개발한 NMR 자력계를 사용하였다.^[11]

Ferro-shimming 단계에서는 약 60 mm 직경의 실린더 상에 배치된 각 철편이 만들어내는 자기장 성분의 결과를 가지고 상술한 초기 매핑 결과와 합산하였을 때 가장 균일한 결과를 갖는 철편의 두께와 공간배열의 조합을 찾는 방식으로 설계가 진행되었다. 즉, 매핑 결과와 반대되는 성분을 생성하는 자화시킨 철편의 최적 두께와 공간 배열의 조합을 찾는 방법이 적용되었다. 그림 9에서 ferro-shim의 설계와 알루미늄 실린더를

REFERENCES

- [11] J. Y. Jang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, 9001005 (2018).

Fig. 10. Exemplified ferro-shimming results of all-ReBCO magnet.

이용하여 제작한 실물을 확인할 수 있다. 동심을 갖는 다중 실린더 세트를 이용해, 여러 번에 걸쳐 ferro-shimming을 진행하였으며, 매회 점차적으로 자기장 균일도가 개선되었다. 그림 10은 데모 자석에서의 Ferro-shimming 작업 전 초기 균일도 결과와, 이를 바탕으로 최초로 부착한 1차 shimming 이후의 결과, 그리고 이를 기본으로 2차 shimming을 순차적으로 진행한 결과를 통해 자기장 균일도가 점진적으로 개선됨을 나타낸다. Shimming 전에 수백 ppm이었던 자기장 균일도는 3중 ferro-shimming을 통해 최종적으로 10 ppm 수준에 도달하였다. 데모자석에서 공간 균일도를 개선한 본 기술은 400 MHz 본 자석에도 적용 중에 있다. 데모자석에서 확보한 ferro-shimming 설계/제작 기술과 실험과정에서 발견한 개선할 점 등을 고려하여 적용 및 발전시키면서 이 기술은 400 MHz 자석의 ferro-shimming에서도 큰 효과를 가져 오고 있다.

고체 NMR에 적용할 수준의 공간균일도를 얻기 위해서는 앞서 언급한 ferro-shimming 이외에 RT active shimming도 적용되어야 한다. 구리로 제작된 RT shim coil은 수십 개의 채널을 갖고 있고, 각 채널은 기저함수가 구면조화함수(spherical harmonics)인 각 harmonics별 경사자기장 성분에 대응된다. 따라서 수십 개 채널에 인가하는 전류 값을 적절히 제어하여, 각각의 harmonics 성분을 제거하면 균일한 공간 자기장을 얻을 수 있다. KBSI에서는 자체적으로 RT shim 코일 제어기법을 개발하고 있고, 최적화 기술을 이용하여 수 분 이내에 자기장의 공간균일도를 개선하는 알고리즘을 구현하였다. 수십 채널의 고정밀 전류전원장치, NMR 스펙트로미터 및 제어 PC를 이용해 시스템을 구성하였으며, 유전알고리즘을 이용해 NMR 스펙트럼의 선폭을 협소하게 만드는데 성공하였다. 그림 11은 RT shimming 시스템의 구조도이다. 본 기술은 상용 600 MHz LTS NMR 자석에 적용되어, 균일도 개선효과를 검증하였고

Fig. 11. RT shimming system for all-ReBCO magnet.

KBSI에서 개발 중인 400 MHz 초고온초전도 본 자석에도 적용된다.

맺음말

지금까지 핵자기공명장비 국산화를 위한 한국기초과학지원연구원 무냉매 고온초전도 자석 기술의 의의와 개발 노력을 살펴보았다. 한국기초과학지원연구원은 현재 국내외 유관기관들과의 협력을 통해 ReBCO 고온초전도 자석의 설계 및 제작 기술 개발에서부터 자기장 성능 개선을 위한 시스템 개발 연구를 수행하고 있다. 이를 통해 고온초전도 자석의 자기장 균일도/안정도 성능의 완성도를 향상시켜 가고 있으며, 완성도 높은 기술의 축적을 통해 초고분해능 초고자기장 핵자기공명장비 구현을 위한 기술 기반을 구축해 나가고 있다. 출연연은 기초연구를 하는 대학, 제품을 생산하는 기업과는 차별적인 연구를 진행하여, 국가과학의 미래 비전을 제시하고 산업을 성장시킬 수 있는 기반기술을 확보해야 한다. 그런 의미에서 한국기초과학지원연구원의 초고자기장 핵자기공명장비 개발을 위한 고온초전도 자석 기술은, 뇌질환 진단의학에 있어 새로운 지평을 열 수 있는, 고자기장 MRI 자석 개발에도 그대로 적용될 수 있어 현재 세계 최고인 7 T MRI를 넘어서 초고분해능 MRI 개발에 기여할 수 있는 플랫폼 기술이다. 한국기초과학지원연구원은 이런 미래기술 분야에서 한국고유 접근법으로 세계유수기관과 대등한 경쟁을 할 수 있는 토대를 마련하고, 국내 산학연 기관들로부터 필요한 연구수요가 있을 때 적극적인 도움을 줄 수 있도록 선도적 역할을 다해 나갈 것이다.