전자기 물성측정 장비 개발

DOI: 10.3938/PhiT.28.025

최 연 석

Development of an Electro-Magnetic Property Measurement System

Yeon Suk CHOI

An electro-magnetic property measurement system is a powerful tool for investigating the electric and the magnetic properties of a specimen under various magnetic fields and temperatures. Development of an electro-magnetic property measurement system has been underway at the Korea Basic Science Institute (KBSI) as one of the Big Issue programs, since 2017. The key technologies of this program are magnetic field generation, a property measuring probe, and cryogenic helium liquefaction. In this program, the magnetic field is generated using an electro-magnet and a superconducting magnet. The electro-magnet provides low magnetic fields while the superconducting magnet provides high magnetic fields. The design optimization, analysis, and manufacturing have been investigated and some of the elementary technologies have been technically transferred to small- and medium-sized enterprises. The probe can measure the Hall coefficient, the magnetic moment, and the heat capacity, so the temperature range from low temperature to room temperature should be controlled very precisely. Therefore, the probe technology includes an electric and magnetic properties measuring stage, as well as variable temperature insert. The superconducting magnet is cooled by liquid helium, so a liquid helium cryostat was developed after thermal and structural optimization. The purpose of cryostat optimization was to achieve a very low

Fig. 1. Electro-magnetic property measurement system.

boil-off rate by minimizing the cryogenic load and providing efficient thermal insulation. The helium liquefier using a small cryocooler collects helium vapor and supplies liquefied helium after the phase change at the heat exchanger. The status of the development program, including detailed key technologies, is presented in this manuscript.

들어가는 말

자기장 및 온도 가변 환경에서 물질의 특성을 연구하는 것이 반드시 필요함에도 불구하고 국내 연구자들은 장비의 가격이 높아 쉽게 구입할 수 없으며 이로 인하여 다양한 선택사항 제품을 구비하기 어려운 것이 현실이다. 따라서 국내 연구자들은 물질의 특성 분석을 위하여 자기적, 전기적 및 열적 물성 측정을 개별 장비에서 수행해 왔으며, 이로 인하여 각각의 물성측정 장비를 구입해야 하는 경제적 부담이 가중되어 왔다. 이러한 연구환경 개선 및 국내 물질연구 진흥을 위해서는 물

저자약력

최연석 박사는 플로리다주립대에서 기계공학 박사를 취득하였으며, (미) 국립고자기장연구소(NHMF) 박사후 연구원을 거쳐 한국기초과학지원연구원에 재직 중이다. 자기장 및 극저온 환경에서 물성 분석장비 개발연구 및 열물성 측정 분석을 진행하고 있다.(ychoi@kbsi.re.kr)

Fig. 2. Fabricated electro-magnet and performance curve.

성 측정 연구장비의 국산화가 필수적이며 다목적 물성 측정장비가 개발되어야 한다.

한국기초과학지원연구원 스핀공학물리연구팀에서는 전자기 물성측정 장비 개발 사업을 연구원 내 Big Issue 사업의 세부 사업으로 2017년부터 진행해 오고 있다. 전자기 물성측정 장비는 자기장 및 온도 가변 환경에서 물성을 측정하는 장비이다(그림 1 참조). 전자석 및 초전도자석으로 자기장을 발생시키고, 소형 냉동기로 극저온 환경을 조성하여 물질의 다양한 물리적 변수의 자기장 및 온도 의존성을 측정하는 수단으로 사용된다. 정밀한 자기장 및 온도제어로 자기적 성질과 관련된 스핀트로닉스 또는 홀 효과를 분석할 수 있으며, 다양한 프로브 연결로 전기 및 열 물성 특성분석으로 확장이 가능하다.

본 사업을 수행하기 전에 본 연구팀은 국내 최초로 저온초전도선재를 이용하여 자기분리장치에 활용하기 위한 전도냉각형 저온초전도자석 시스템 개발에 성공하였으며,^[1] 또한 소형 극저온 냉동기를 흡열원(Heat sink)으로 사용하여 초전도자석 및 시편 스테이지를 동시에 냉각할 수 있는 전도냉각형 극저온 프로브스테이션(Probe Station)을 개발하여 국내 업체에 기술이전하였다.^[2] 아울러 전자석을 이용한 프로브스테이션 제작 기술을 상용화하여 현재 국내 시장에서 프로브스테이션이 판매되고 있다.

Fig. 3. Design optimization process (Patent ID: 10-1956062).

본 사업은 자기장 발생 플랫폼, 프로브 및 밀폐순환 냉각장치를 이용하여 자기장 및 온도 가변 환경에서 전기 및 자기 물성을 측정하는 장비를 개발하고 기술이전하여 상용화하는 것이다. 또한 관련기업이 개발 초기부터 참여하여 상용화 이후 국내 기술로 유지보수할 수 있는 인력을 동시에 양성하고 있다. 본 글에서는 2017년부터 진행되고 있는 전자기 물성측정 장비 개발의 핵심 기술을 소개하고, 현재까지 장비개발을 위해 추진해온 과정을 소개한다.

핵심기술

1. 자기장 발생 기술

앞에서 설명한 바와 같이 전자기 물성측정 장비는 자기장 환경에서 물질의 성질을 측정하는 장비이다. 따라서 자기장 발생기술은 본 장비의 핵심기술 중 하나이다. 자기장은 전자석 및 초전도자석에 의하여 발생하는데, 2-3 테슬라(T) 미만의 저자기장은 전자석을 이용하면 발생 가능하며, 그 이상의 자기장은 초전도자석을 이용하면 발생할 수 있다. 전자석을 이용하여 자기장을 발생하는 기술은 이미 상용화되어 국내에서도 몇몇 기업에 의하여 진행되고 있다. 따라서 본 사업에서는 전자

REFERENCES

- [1] Y. S. Choi, D. L. Kim, H. S. Yang and J. H. Kim, IEEE Trans Appl. Supercon. 20, 620 (2010).
- [2] Y. S. Choi and M. S. Kim, IEEE Trans Appl. Supercon. 26, 0606004 (2016).

Fig. 4. Design optimization and winding of low temperature superconducting coil.

석 최적화 및 자기장 발생 효율에 연구의 초점을 맞추었고, 이와 더불어 고효율 전자석에 전류를 공급하는 전력공급장치 (power supply)를 개발하고 있다. 그림 2는 본 연구에서 개발한 고효율 전자석의 형상 및 성능평가(자기장 vs. 공급전류) 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 상용 전자석보다 높은 자기장을 발생시키며, 20 mm 공간에서 단위전류당 발생자기장은 40 mT/A에 도달하였다.

초전도자석을 이용한 자기장 발생 기술은 저온초전도 선재를 이용하여 충분히 큰 시편공간에서 고자기장을 발생하는 기술을 포함한다. NbTi와 같은 저온초전도 선재는 약 9 K 이하에서 초전도 성질을 나타내므로 일반적으로 액체헬륨을 이용하여 냉각한다. 본 사업에서는 기존의 장비에 비해 시편이 설치되는 공간이 두 배 이상 큰 대구경 초전도자석을 개발하고 있으며, 이를 위해서 저온초전도자석 최적 설계기법을 개발하였으며 특허등록을 완료하였다. 설계기법을 이용하면 요구하는 자기장 및 자기장 분포를 만족하는 초전도코일의 형상을 결정할 수 있으며, 필요한 선재길이를 구할 수 있다.^[3]

본 기술을 검증하기 위하여 테스트용 저온초전도자석(2테슬라)

Fig. 5. Magnet excitation using low temperature superconducting coil.

라급)의 설계 및 해석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 설계결과를 이용하여 최적의 초전도선재를 선정하였으며, 자체 개발한 초전도코일 권선기를 활용하여 테스트용 저온초전도자석을 권선하였다. 초전도자석 권선 과정을 거쳐 액체헬륨을 이용하여 설계한 자기장을 안전하게 발생시키는 것을 확인하였다. 이후, 5테슬라 자기장 발생을 위하여 최적설계 기법을 이용하여 3단 저온초전도자석 설계를 완료하였고, 충전 실험을 거쳐 목표한 자기장을 발생하는데 성공하였다. 그림 5는 5테슬라 저온초전도자석을 충방전 실험하는 사진이며, 저온초전도자석을 냉각하기 위한 액체헬륨 Cryostat 개발내용은 다음 장에서 자세히 기술할 예정이다.

초전도코일에서 자기장을 안정적으로 발생하고 초전도코일을 보호하기 위한 쉐치보호회로^[4] 및 영구전류모드에 대한 설계가

REFERENCES

- [3] J. Y. Jang, Y. J. Hwang, S. Lee and Y. S. Choi, IEEE Trans Appl. Supercon. **28**, 4900605 (2018).
- [4] J. Y. Jang, Y. J. Hwang, M. C. Ahn and Y. S. Choi, Physica C **550**, 99 (2018).

Fig. 6. (a) Hall coefficient measuring system and (b) magnetic moment measuring system.

완료되었으며, 향후 제작하는 초전도코일에 적용할 예정이다. 2020년부터 시작하는 2단계에서는 발생하는 자기장을 더 높일 예정이며, 물성측정을 위한 시편 공간을 기존의 장비 대비 2배 늘리기 위한 대구경 초전도코일 설계 및 제작을 위한 추가 연구가 진행되고 있다.

2. 프로브 기술

본 사업에서는 자체 개발한 전자석을 이용하여 자기장을 발

Fig. 7. Drawing of liquid helium cryostat.

생하고 홀 저항 및 자력측정을 위한 프로브를 개발하고 있다. 개발 초기에는 자체 개발한 벤치탑형 전자석을 이용하여 홀 계수를 측정하는 프로브를 개발하였으며, 이때 시편이 2축을 기준으로 정밀하게 이동할 수 있는 로테이터를 포함한 프로그램을 개발하여 기술이전하였다. 그림 6의 (a)는 본 사업에서 개발한 벤치탑형 전자석을 이용한 홀계수 측정 시스템이며, (b)는 C형 전자석을 이용한 자력 측정 시스템이다. 자력측정을 위한 저진동 발생기를 국산화하였으며, 자력측정 이외에도 FORC 분석법 등 다양한 분석법에 대한 연구가 진행되고 있다.

초전도자석을 이용한 자기장 환경에서는 액체헬륨을 이용한 저온 프로브보다 넓은 온도영역에서 홀 계수 및 자력을 측정할 수 있다. 국내에서 극저온 환경을 형성할 수 있는 프로브 상용품은 주문 제작형으로 간헐적으로 등장했다가 시장에 정착하지 못하고 사라지고 있는 실정이다. 잠시 등장하는 대부분의 제품은 외국 부품을 수입하여 조립하는 수준으로써, 전문 개발 업체보다는 수입상에서 주로 판매되고 있으며, 사후 서비스의 한계에 봉착하여 시장 정착에는 어려움이 있었다. 본 연구팀은 극저온 환경 조성 기술을 확보하고 있으며, 액체질소를 냉매로 하여 극저온 환경을 구현하는데 성공한 바 있다. 액체질소를 이용하여 프로브 내 측정시편의 온도를 제어하기에는 한계가 있어 액체헬륨 또는 소형 극저온 냉동기를 이용하는 VTI(Variable Temperature Insert) 개발이 진행 중에 있다. 그러나 최근 헬륨 수급 차질 및 가격의 급등이 사회적으로 심각한 문제로 대두되고 있는 헬륨 위기 상황에서 헬륨을 사용하지 않는 무냉매 기술 또는 액체헬륨 재응축 밀폐순환 기술 수요가 증가하고 있다.

Fig. 8. Radiation heat load as a function of number of MLI.

3. 극저온 냉각 기술

극저온 냉각기술은 다양한 분야에서 활용되고 있으며 국내에서는 여러 관련업체가 각종 형태의 극저온 냉각관련 장비를 수입하여 공급하고 있다. 초전도자석과 극저온 유체의 냉각 및 저장기술 관련하여 연구 선진국에서는 이미 하나의 장비로써 시장이 형성되어 있으며, 이들을 냉각하는데 필수적인 극저온 냉각기술은 매우 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 대표적으로 극저온용기(Cryostat)는 극저온 유체(대표적인 극저온 유체로는 액체헬륨, 액체질소 등이 있음)의 증발량을 최소화하여 가능한 오랜 시간 동안 저장하기 위한 연구를 수행해 왔으며, 증발된 극저온 유체를 재액화하여 극저온용기에 공급하는 소형 액화기 연구가 최근 액체헬륨 공급이 제한을 받으면서 많은 각광을 받고 있다.

본 사업에서는 9테슬라급 초전도코일을 극저온 냉각하기 위한 Cryostat 개발을 목표로 하고 있으며, 이에 앞서 1단계에서 개발 중인 5테슬라급 초전도자석 Cryostat을 개발하고 있다. Cryostat은 그림 7에서 보는 바와 같이 초전도코일을 냉각하는 헬륨용기, 헬륨용기로 침입하는 복사열을 차단하기 위한 질소용기 및 진공용기로 구성되어 있다. 헬륨용기의 크기는 5테슬라급 초전도코일의 크기를 고려하여 액체헬륨의 최대 재충전 설계 시간을 이용하면 결정할 수 있다.

액체헬륨의 소비량을 최소화하기 위해서는 헬륨용기로 침입하는 열을 차단시켜 주어야 한다. 대표적인 열침입 경로는 용기벽을 통한 전도열전달, 복사열전달 그리고 초전도코일에 전류를 공급하는 전류도입선을 통한 열전달 등이 있다. 전도열전달을 줄이기 위해서는 전도가 발생하는 부분의 단면적을 줄이거나 길이를 늘리는 방법이 있으며, 복사열전달을 줄이기 위해서는 진공층을 만들고 MLI(Multi-layer insulation)를 설치한다. 그림 8은 MLI 수량에 따른 복사열전달량을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 MLI 수량이 증가함에 따라 복사

Fig. 9. (a) Superconducting magnet insert and (b) current lead optimization.

열전달량은 줄어드는 것을 알 수 있으며, 일정수 이상 증가하면 복사열전달량이 줄어드는 영향이 감소함을 알 수 있다.^[5]

전류도입선을 통한 열전달량은 다른 열전달량에 비해 상대적으로 크며, 이를 줄이면 액체헬륨 소모량에 큰 영향을 줄 수 있다. 액체헬륨을 이용한 Cryostat에서 가장 일반적인 전류도입선은 금속재료를 이용한 Vapor-cooled 타입이다. 이는 액체헬륨의 증발잠열을 이용하여 전류도입선을 냉각하는 방식이며 초전도코일 충전 시 발생하는 발열량과 금속재료의 전도열량을 함께 고려한 최적화 방법을 이용하여 설계 및 제작한다. 초전도코일 충전 시 발생하는 발열량을 제거하기 위하여 일부분을 고온초전도선재로 대체하며, 이때 금속재료와 고온초전도선재의 조인트 제작이 매우 중요하다. 그림 9는 금속과 고온초전도선재 길이 변화에 따른 전류도입선을 통한 열침입량을 분석한

REFERENCES

- [5] M. S. Kim, Y. S. Choi and D. L. Kim, Superconductivity and Cryogenics **14**, 46 (2012).

Fig. 10. Helium liquefier using a GM (Gifford-McMahon)-type cryo-cooler.

결과이다. 본 연구에서는 액체헬륨의 수위변화를 고려하여 고온초전도선재 및 금속리드 길이를 선정하여 적용할 예정이다.

초전도자석 냉각을 위한 액체헬륨은 시간이 지남에 따라 증발하게 되며, 소형 극저온 냉동기를 이용하면 증발하는 헬륨증기를 재액화시킬 수 있다. 본 사업에서는 초전도자석 초기 냉각을 위해 공급한 액체헬륨으로 물성측정을 위한 자기장 환경을 반영구적으로 발생시키기 위하여 이동식 소형액화기를 개발하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 소형 헬륨액화기는 최근 헬륨 수급이 어려워지면서 그 중요성을 다시 한번 인식하게 되었으며, 액체헬륨을 사용하는 분석장비의 필수 요소가 되었다. 그림 10은 본 사업에서 개발하고 있는 소형 극저온 냉동기를 이용한 헬륨액화 실험장비이다. 2단 극저온 냉동기를 적용하여, 1단부에서는 헬륨가스를 예냉각시키며, 2단부에서 가스를 액화시킨다. 이때, 효율적인 액화를 위하여 열교환기를 극저온 냉동기 냉동부에 열적으로 접촉시킨다.

극저온에서 대부분 물질의 열전도도는 감소한다. 본 사업에서는 초전도 코일의 함침을 위하여 에폭시를 사용하는데, 이

물질의 열전도도는 초전도코일의 켄치시 열을 방출하는 속도를 결정한다. 일반적으로 극저온에서 사용하는 에폭시는 한정되어 있으며, 본 사업에서도 일반적인 에폭시를 초전도 코일 함침에 사용하였다. 하지만 자기장이 커짐에 따라 초전도 코일의 크기도 커지며 따라서 내부 에너지가 증가하여 켄치시 온도 상승 폭이 커진다. 그러므로 일반적인 에폭시의 기본적인 성질을 유지하면서 열적 성질을 개선하는 연구가 필요하며, 본 사업에서는 에폭시에 파우더를 혼합하여 전기적, 기계적 성질을 유지하면서 열적 성질(특히 열전도도)을 높이는 연구를 수행하고 있다. 상용 에폭시에 BN 파우더를 혼합하여 상용에폭시 대비 열전도도를 약 50% 이상 개선하였으며, 이를 초전도 코일에 적용 가능한지에 대한 예비테스트를 진행 중이다.

맺음말

본 글에서는 전기 및 자기 물성을 측정하는 장비의 핵심 기술에 대한 소개 및 KBSI에서 전자기 물성측정 장비를 개발하고 있는 현황에 대한 소개를 하였다. 자기장 및 온도가 변하는 환경에서 물질의 물리적 성질을 측정하는 장비에 대하여 자세하게 기술하지 못한 면도 있으나, 핵심이 되는 자기장 발생, 프로브 및 극저온 냉각기술에 대하여 초점을 맞추어 작성하였다. 현재까지 장비를 개발하면서 일부 요소기술들을 기술이전하여 상용화하였으며, 수입에만 의존해 왔던 물성측정 장비가 작은 부분부터 하나씩 국산화되는 것을 보면서 연구에 보람을 느낀다. 전자기 물성측정 장비 개발은 아직 초기 단계이다. 물성측정 장비가 국산화되려면 많은 시간이 필요할 것으로 생각되며, 또한 국내 연구자들의 국산 측정장비에 대한 생각도 바뀌어야 한다. 본 장비를 개발하는 사업의 책임자로서 장비개발뿐만 아니라 개발 후에 장비의 성능을 검증하는 일까지 책임져야 하는 막중한 사명감을 느끼며, 향후 기회가 된다면 초전도자석 기반 물성측정 장비 그리고 물성 측정결과 및 분석기법 등을 소개할 예정이다.