

30 T 이상 급 고자기장 발생기술 현황

김 동 락
한국기초과학지원연구원

1. 서 론

고자기장 연구장비는 현대 물질과학 연구분야에서 방사광가속기, 중성자산란 실험 장치와 더불어 3대 핵심 대형실험장치 중의 하나이다. 자기장의 이용은 자성, 초전도, 반도체 등의 물성과학과 재료과학을 위시하여 화학, 생물, 의학 등 과학기술의 광범위한 분야에 미치고 있으며, 고자기장 발생장치는 과학기술을 지지하는 기반 장치 중의 하나이다.

“고자기장”이라는 용어는 자기장을 활용하는 분야에 따라 각각 다른 자기장의 크기를 의미하는 상대적 개념이며, 목적에 따라 상용화된 다양한 크기와 자기장의 세기를 가진 자석이 있으며, 물성연구 및 분석용으로는 자기장의 세기가 20 T 이상의 자석을 고자기장이라고 부르기도 한다. 여기에서 자기장 세기의 단위는 T (테슬라, Tesla), G (가우스, gauss)를 사용하며 1 T = 10,000 G 이다. 참고로 우리 주위에서의 지구 자기장의 세기는 약 0.5 G 이다.

자기장 발생과 관련한 용어로서 영어로 static field는 continuous field, D.C. field 등으로도 사용되고 번역하면 정(靜)자기장이나 여기에서는 연속자기장으로 표현하였으며, magnet은 자석으로 하였다.

고자기장을 발생하는 자석은 자기장을 유지하는 시간에 따라 나누어서, 연속적으로 자기장을 발생시키는 전자석과 순간적으로 매우 짧은 시간에 ~100 T(테슬라) 이상의 큰 자기장도 발생시킬 수 있는 펄스자석이 있다. 두 가지의 자석은 실험 목적 및 용도, 그리고 자기장의 세기 등에 있어서 각각 특징이 있으며 과학기술의 발전에 큰 기여를 하고 있다. 그림 1에 자기장 지속시간과 자기장 세기와의 관계를 보인다.

연속자기장 자석의 종류에는 영구자석, 전자석, 초전도자석 그리고 초전도자석과 전자석을 조합한 하이브리드 자석으로 나눌 수

있다. 영구자석과 상용화된 전자석으로는 대체로 ~2 T 정도의 자기장을 얻을 수 있다.

우리가 자기장의 세기를 말할 때 일반적으로 전자석에서 가운데에 뚫려 있는 원통형구멍인 상온내경(room temp. bore) 내의 자속밀도의 크기를 일컫는다. 전자석에 흘리는 전류를 크게 하면 자속밀도를 높일 수 있다. 그러나 동일한 전류를 흘리더라도 직경을 크게 하면 자속밀도가 작아지므로 자기장의 세기가 작아진다.

일반적으로 고자기장 자석에서는 물성연구를 위한 공간인 상온내경이 25~50 mm 정도이며, 이 안에서 40 T 전후의 고자기장을 얻고 있다.

초전도자석으로는 1 GHz 핵자기공명분광기(NMR spectrometer)용으로 23.5 T 초전도자석이 Bruker사에서 개발되어 상용화되어 있다[1]. NbTi와 Nb3Sn 등 저온 초전도선재로 제작된 1 GHz NMR용 초전도자석은 프랑스 Lyon에 있는 CRMN에 설치되어 있으며, cryostat를 포함하여 무게 12톤, 높이 5.2 m의 대형 침단장비이다

연속자기장 전자석은 구리 또는 구리합금 등의 전기전도도가 좋은 재료로 제작되며, 30 T 이상의 자기장을 얻을 수 있다.

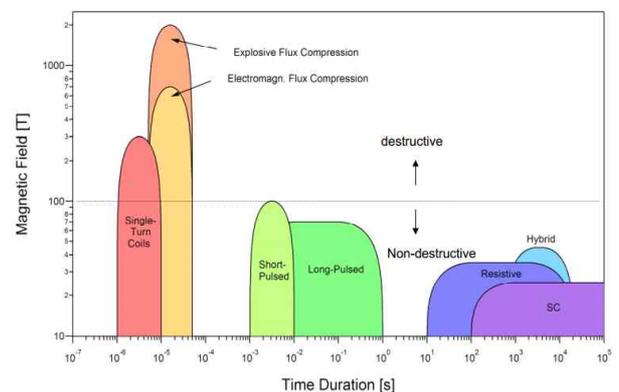


그림 1. Relation of time duration and magnetic field.

전자석과 초전도자석을 조합한 하이브리드 자석으로는 40 T 이상의 고자기장을 발생시킬 수 있다. 현재 연속 자기장 발생장치로서는 미국 고자기장연구소의 45 T 하이브리드 자석이 세계 최고기록이다.

세계적으로 30 T 이상의 연속 고자기장 발생시설을 가진 나라는 미국, 프랑스, 네덜란드, 일본과 중국이 있다.[2][표 1]

2. 고자기장 발생

일반적으로 솔레노이드 자석에서 자기장은 흐르는 전류의 크기에 비례하며, 구리선이나 초전도선을 감아서 전류를 흘려 원하는 자기장을 얻는다.

$$B \propto N \cdot I$$

(B: 자기장 세기, N: 권선 수, I: 통전전류)

고자기장 자석은 전기전도도가 좋고 구조적으로 강한 자기력에 견딜 수 있는 재료로서 얻을 수 있다. 고자기장을 얻기 위해서는 일반적으로 선재 또는 판재에 전류를 흘려서 자기장을 발생시키므로 전자석(electro-magnet)이라고 부른다. 초전도자석도 전자석의 한 종류라고 할 수 있으며, 다만 사용되는 선재가 구리 등 일반 도체가 아닌 저항이

“0”인 초전도 도체를 사용하는 점에서 구별하여 초전도자석으로 부른다. 구리 등의 선재로 만든 전자석은 전기저항을 가지므로 영어로는 resistive magnet 이라고 쓰기도 한다. 여기에서 전자석 = resistive magnet 으로 하겠다.

3. 수냉식 자석 (water-cooled resistive magnet)

전자석(resistive magnet)으로 고자기장을 발생하기 위해서는 대전류를 흘릴 때 막대한 양의 열이 발생하며, 대량의 물을 흘려서 발생한 열을 제거하며 이를 수냉식 전자석(water-cooled resistive magnet)이라고 한다. 수냉식 전자석은 초전도자석에서와 같은 자기장 크기의 제한은 없으며 원리적으로는 얼마든지 큰 자기장 발생이 가능하나 전력 요구량이 과도하게 커지고 장치가 거대하게 되면 제작 및 운영 등 경제적인 점에서 문제가 되므로 한계가 있다.

고자기장 연구실에서는 20 MW 전후의 전력으로서 30 T 이상의 고자기장을 발생시키고 있다. 수냉식 전자석은 가운데가 비어 있는 원통형 또는 사각형 구리도선에 냉각수를 흘려서 자기장을 얻었으나, 수 천 A의 전류를 흘리는 고자

표 1. Present Status of High Magnetic Field Facilities in the World.

Magnet Lab	Electric Power (MW)	Magnetic Field		
		Resistive mag. (WM)	Hybrid mag. / R.T.Bore(mm)	
NHMFL (Tallahassee, USA)	56 (*)	36 T / \varnothing 40	45 T(HM)-30 MW 60 T(HM), Plan	\varnothing 32
GHMFL (Grenoble, France)	24	35 T / \varnothing 34	43 T(HM)-24 MW 건설 중 (2017)	\varnothing 34
HFML (Nijmegen, Netherland)	20	38 T / \varnothing 32	45 T(HM)-20 MW 건설 중 (2015)	\varnothing 32
TML (Tsukuba, Japan)	24	25 T / \varnothing 32	38 T(HM)-18 MW 47 T(CHM)-15MW, 계획 (**)	\varnothing 32
HFLSM (Sendai, Japan)	8 -	25T(CSM), 건설중(2015)	29 T(CHM)-5 MW	\varnothing 32
HFML (Hefei, China)	20	33 T / \varnothing 32	40 T(HM)-20 MW 건설 중 (2015)	\varnothing 32

(*) 복수의 수냉식 전자석을 동시에 사용할 수 있음

(**) TML과 HFLSM 공동개발

WM : Water-cooled Magnet, HM : Hybrid Magnet

CHM : Cryogen-free Hybrid Magnet (전도냉각형 초전도자석을 가진 하이브리드 자석)

CSM : Cryogen-free SC Magnet

기장 자석은 발생된 줄 열(Joule heat)을 효과적으로 제거할 수 있는 구조의 도선이 요구돼 Bitter 자석이 개발되었다. 고자기장 수냉식 자석의 시조 격인 Bitter 자석으로부터 더 효율적이고 경제적인 수냉식 전자석의 개발을 통하여, 현재의 수냉식 전자석으로 발전하여 오기까지 역사적으로 strip magnet, radially cooled Bitter 자석, Polyhelix 자석, Monohelix 자석, poly-Bitter 자석, 그리고 Florida-Bitter 자석(그림 2) 등 다양한 형태의 구조와 적합한 재질이 개발되었으며, 자석의 냉각시스템과 전류를 공급하는 전원 기술들이 함께 발전하여 왔다.

Bitter 자석은 원형의 금속판과 이 금속판 사이를 절연층을 삽입하여 나선형으로 연결하여 적층하여 만든다.[그림 2] 이 설계는 1933년 물리학자인 Francis Bitter에 의해 발명되었으며[3], 그의 이름을 따서 Bitter plate 또는 Bitter magnet 으로 불린다. 금속판을 적층시킨 이유는 전류를 흘릴 때 자기장 세기의 제곱으로 증가하는 매우 큰 Lorentz force를 견디기 위하여 적층함으로써 양 쪽에서 단단하게 고정할 수 있기 때문이다. 또한 금속판에 발생하는 막대한 양의 줄 열(Joule heating)을 효율적으로 제거하기 위해 판에 구멍을 뚫고 물(deionized water)을 강제순환시켜 냉각한다.

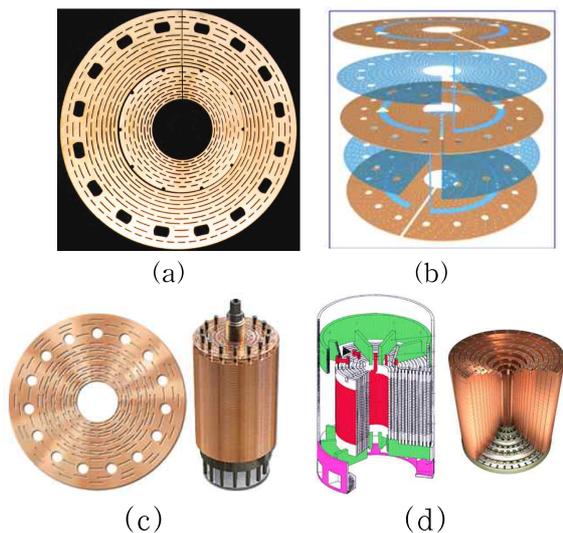
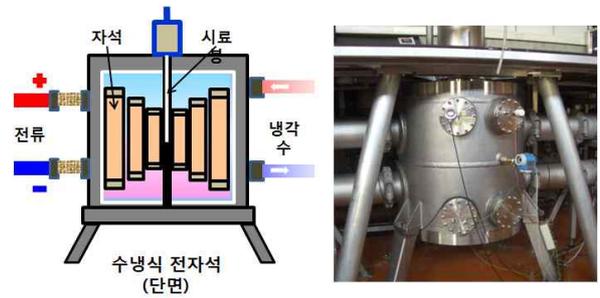


그림 2. (a) Florida-Bitter type magnet plate. The small slots are for the circulation of cooling water. (b) connected Bitter plate, (c) Bitter magnet, (d) Poly-helix magnet.



(a) cross-section (b) Resistive magnet

그림 3. Water-cooling resistive magnet.

수냉식 자석은 ultra-pure(99.99%) 구리 또는 구리-은(Cu-Ag) 합금 등의 구리 합금으로서 1 mm 두께의 판재(Bitter 자석) 또는 수 mm 두께의 원통형 재질(Poly-helix 자석)로 제작된다. 물성연구를 위해 요구되는 상온 내경(room temperature bore)은 일반적으로 실험 목적과 자기장의 세기 등에 따라 25 ~ 50 mm 이며, 상온내경 200 mm의 대형 공간과 18 T 자기장 하에서 물질 개발, 초전도자석 평가 등의 실험이 가능한 수냉식 자석도 있다. 2014년 Nijmegen에서는 수냉식 자석으로서는 최고 자기장인 38 T를 달성하였다.

수냉식 자석은 자기장 발생을 위한 전력 사용량이 매우 크지만 실험 내용에 따라서 최고 자기장까지의 도달시간을 수 초 ~ 수 시간 사이에 임의로 선택가능하여 매우 유연하게 운전할 수 있어서 초전도자석으로서는 얻을 수 없는 장점이 있으며, 설비구성이 비교적 단순하기 때문에 편리성과 실험능률이 높은 연구가 가능하다. 그러나 대용량의 전류를 흘려야 하고 매우 많은 열이 발생하는 단점이 있다. 대용량 전원과 냉각수의 효율적인 공급이 가능한 대용량 냉각설비가 필요하다

4. 하이브리드 자석

수냉식 전자석(water cooled resistive magnet)의 한계를 넘는 40 T 이상의 자기장 발생을 위해서는 초전도 자석을 배경 자석(background magnet)으로 사용하여 안쪽에 수냉식 자석을 삽입한 형태의 하이브리드자석이 있다. 1966년 Wood와 Montgomery[4]는 당시 20 T 이상의 고자기장 발생을 위하

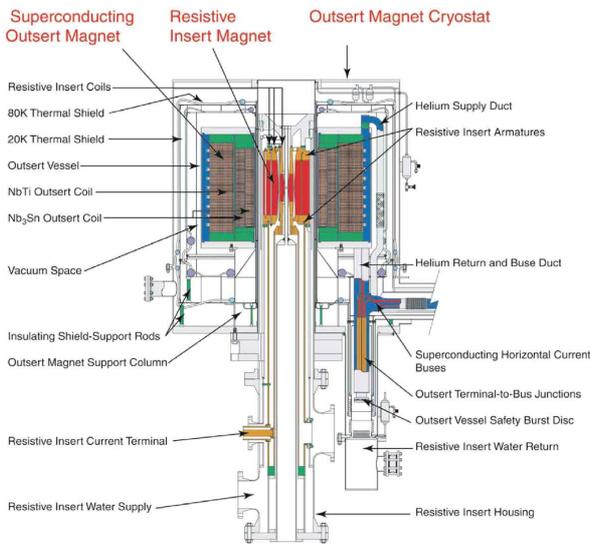


그림 4. A 45 T Hybrid Magnet, NHMFL.

여 수냉식 전자석과 그 바깥 쪽에 초전도자석을 둔 하이브리드 자석(hybrid magnet)을 제안하였으며, 미국 NHMFL에서는 1999년에 하이브리드 자석으로 연속자기장으로서 세계최고인 45 T를 발생하였다.(그림 4)

4.1 초전도자석

고자기장으로 가면 자기장의 크기가 저온초전도자석으로서는 임계자기장 이상으로 커지므로 임계자기장이란 한계가 없는 수냉식 자석을 안쪽에 두고 바깥 쪽에 초전도자석을 설치한다. 초전도자석은 초전도 재료가 가진 기계적인 특성과 더불어서 임계전류밀도, 임계온도 및 임계자기장에 의해서 자석의 크기 및 발생 자기장의 제한을 받는다. 이럴 경우 선재의 종류, 자기장, 전자기력의 크기에 따른 구조적 면을 고려하여야 한다. 세계의 5대 고자기장연구소에서 하이브리드 자석에 설치된 초전도자석들은 자기장의 세기 9 ~ 12 T, 초전도자석의 내경 400 ~ 1,100 mm를 가진다. 초전도선재는 CICC (cable-in-conduit conductor) 형태로 coil을 제작한다.

초전도 선재는 저항이 없으므로 열이 나지 않아 전류의 손실이 거의 없어 구리선보다 수백 배의 전류를 흘릴 수 있으나 초전도 특성을 얻기 위해서는 극저온 용기 내에서 액체헬륨 등의 냉매를 사용하거나 극저온 냉동기로 냉각하여야 한다. 고자기장 하이브리드 자석 제작을 위한 초전도 선재의 종류에는 액체헬륨 온

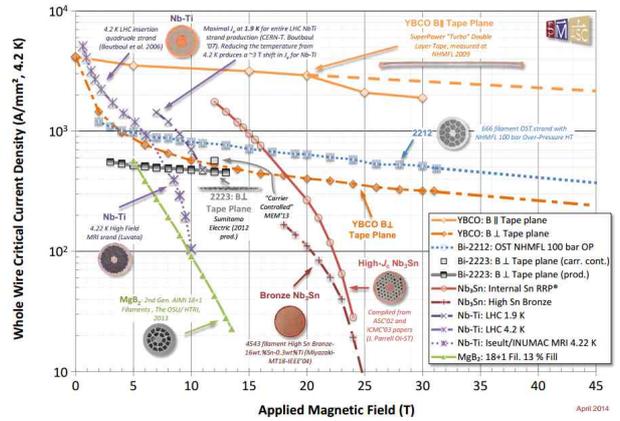


그림 5. 초전도선재의 자기장에 따른 임계전류밀도.

도에서 사용되는 저온 초전도선재로서 NbTi, Nb3Sn 등이 있으며, 최근에는 임계자기장이 높고 고자기장 하에서도 임계전류가 높은 YBCO 등의 고온 초전도 선재를 도입하여 고자기장 영역을 확장하기 위한 노력을 하고 있다. 참고로 초전도선재의 임계전류와 자기장과의 상관관계를 [그림 5]에 보인다.

하이브리드자석에서 초전도자석은 가운데에 수냉식 자석이 들어가므로 내경이 크며 액체헬륨 온도까지 냉각을 용이하게 하기 위해 중량 및 cryostat의 냉각중량을 가능한 한 경감하여야 한다. 수냉식 자석의 전류를 흘릴 때나 자석의 켄치로 인한 교류손실에 의한 초전도자석의 온도상승이나 여자전류의 증가 등에 대한 고려가 있어야 한다. 도체에 걸리는 응력이나 자석에 걸리는 전자기력을 충분히 견딜 수 있어야 하며, 켄치보호를 확실히 하여 안전한 운전이 될 수 있도록 하여야 한다.

저온초전도자석(LTS magnet)이 가진 한계를 넘어서는 임계자기장과 임계전류값을 가진 고온초전도자석(HTS magnet)을 도입하게 되면 45 T 이상의 자기장 발생이 가능하게 될 것이다. 현재 고온 초전도자석을 부분적으로 도입하는 것으로 일본 Tsukuba의 NIMS와 Tohoku 대학에서는 공동으로 최대자기장 47 T하이브리드 자석을 기획하고 있으며, 미국의 NHMFL에서도 50 T 이상의 자기장 발생을 계획 중에 있다. 일본의 새로운 하이브리드 자석시스템은 15 MW 급의 전원을 가진 수냉식자석과 고온 및 저온 초전도자석으로 구성되며, 고자기장의 달성과 효율적 운영을 위하여 자석의 구성을 20 T, 내경 400 mm 액체헬륨 침지냉각형 초전도자석의 설계를 고

려하는 한편, 액체헬륨을 사용하지 않는 무냉매 전도냉각형 초전도자석의 채용도 고려하고 있다. 이 전도냉각형 초전도자석은 대형 초전도자석 운전시의 안정성을 고려하고 온도마진을 크게 하기 위해 NbTi 선재를 사용하지 않으며, Nb₃Sn과 YBCO 선재로 자석을 제작하는 것을 고려하고 있다. 초전도자석의 자기장 배분은 바깥쪽의 4 개의 Nb₃Sn 자석이 내경 705 mm로서 13 T, 안쪽의 2 개의 YBCO 자석 내경이 440 mm로 7 T 로서 합계 20 T 를 발생한다. 일본 Tohoku 대학의 HFLSM 에서는 기존에 28 T 무냉매 전도냉각형 하이브리드 자석을 개발하여 운영 중에 있다. [그림 6]

4.2 수냉식 자석

하이브리드 자석에서 초전도자석의 안쪽에 삽입되는 수냉식 자석은, 초전도자석의 제작성 등을 고려하여서 수냉식 자석이 단독으로 사용될 때 보다 자석 외경의 제한이 있으며 따라서 자석의 크기와 냉각용 용기의 크기도 작아진다. 또한 바깥 쪽의 대구경 초전도자석에 의한 자기장 및 자기력의 영향을 받게 된다.

하이브리드 자석에서 자기장을 발생할 때에는 우선 초전도자석에 통전하여 자기장을 발생시키고 다음으로 수냉식 자석에 전류를 흘려 최종적으로 자기장을 얻는다. 이것은 초전도 자석보다 수냉식 자석이 여자 속도를 빨리 할 수 있기 때문이다. 그러나 수냉식 자석의

의 여자속도도 단독 운전할 때와 같이 빨리 할 수는 없다. 이유는 전자기 유도로 인하여 초전도자석에 악영향을 미치기 때문이다.

5. 초전도 하이브리드 자석

(수냉식자석 초전도자석) 조합 형태의 하이브리드 자석은 수냉식 전자석을 사용하므로 전원과 냉각설비의 설치비용이 매우 크며 또한 전력 소비량이 커서 운전비용이 많이 소요된다. 최근에는 2G 고온초전도 선재의 등장과 제조기술의 발전으로 높은 전류밀도와 50 T 이상의 임계 자기장 특성을 가진 점에 주목하여, 초전도 자석만으로 50 T 이상의 고자기장 발생에 큰 관심을 가지고 있다.

미국의 NHMFL에서는 저온초전도자석과 고온초전도자석을 조합하여 32 T 초전도자석을 개발 중에 있다. [그림 7] 32 T 초전도 자석의 구성은 안쪽의 YBCO 고온초전도자석이 17 T, 바깥쪽의 저온초전도자석이 15 T 를 발생하는 구조이며, 자석 내경이 32 mm, 운전전류 186 A, 자석의 높이 720 mm, 직경 530 mm 이다. 일종의 초전도 하이브리드 형태이며 2015년에 제작완료 예정이다. 자기장 균일도는 10 mm DSV에서 500 ppm 이며 최고 자기장까지 도달하는데 1 시간을 목표로 하고 있다. NHMFL에서는 향후 초전도 자석으로 고자기장 자석을 대체하는 방안을 고려하고 있다.

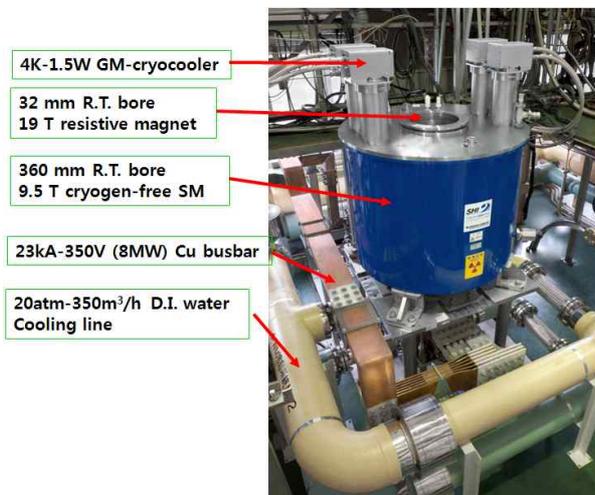


그림 6. Cryogen-Free 28 T Hybrid Magnet at HFLSM, Tohoku Univ. Japan.

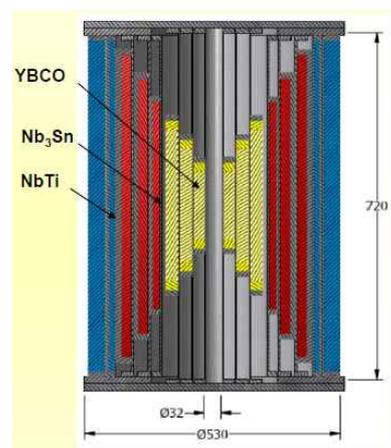


그림 7. Cross section of Superconducting 32 T Magnet With REBCO High Field Coils, NHMFL.

6. 연구동향

고자기장 자석의 최근 이슈는 자기장의 질을 높이기 위하여 고균일 전류를 공급할 수 있는 고성능 전원과 고자기장 발생을 위한 수냉식 자석의 냉각성능 개선을 통한 전력 절약을 통하여 고자기장 하에서 정밀한 분석실험이 가능한 고급 자기장을 얻기 위하여 시설 및 자석의 개선을 추진 중에 있다.

고자기장 발생을 위하여 저온초전도자석과 고온초전도 자석을 조합하여 기존의 고자기장 자석보다 자기장을 가능한 한 높이 발생시키고, 액체헬륨 등 냉매를 사용하지 않고 전도냉각방식으로 냉각하여 고가이며 희귀 가스인 헬륨을 절약하고 최근의 액체헬륨 공급 불안정 사태에도 영향을 받지 않는 안정적 운전을 지향하고 있다.

국내에서는 ㈜서남에서 최근 2G GdBCO 고온초전도 선재만으로 초전도자석을 개발하여 21 T 고자기장을 달성하였으며, 고온초전도선재의 높은 임계전류와 임계자기장을 고려한 100 T 급의 고자기장 초전도자석도 MIT에서 이미 제안되어 있는 등 고자기장 발생 기술개발에 향후 큰 진전이 있을 것이다.

2012년에는 정부에서 시행한 국가대형연구시설 구축지도에서 국가고자기장센터가 최상위에 오를 정도로 고자기장자석과 고자기장을 이용한 연구에 대한 중요성을 주목받고 있으며, 향후 국내에서도 기초과학 연구와 재료과학, NT, BT 분야의 연구를 위해 고자기장 자석이 큰 기여를 하게 되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Bruker Biospin, 1 GHz NMR system. 23.5 T. 2009.
- [2] 주요 고자기장연구소의 web-site :
NHMFL: 미국. National High Magnetic Field lab.,
<https://nationalmaglab.org>
Genoble: 프랑스. Grenoble High Magnetic Field Lab.
<http://lncmi-g.grenoble.cnrs.fr/>
Nijmegen: 네덜란드. Nijmegen High Field Magnet laboratory,

<http://www.ru.nl/hfml/>

Tsukuba: 일본. NIMS, Tsukuba Magnet Lab.,

<http://www.nims.go.jp/TML/>

Sendai: 일본. Tohoku University, High Field Laboratory for Superconducting Materials,
<http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/cgi-bin/index-e.cgi>

Hefei: 중국. Hefei Institute of Physical Science, High Magnetic Field Laboratory of the Chinese Academy of Sciences (CHMFL).
<http://english.hmfl.cas.cn/>

- [3] F. Bitter, Rev. Sci. Instrum. 7 (1936) 236.
- [4] W.D. Wood and D.B. Montgomery, Les Champs Magnetiques Intense, Grenoble, 1966. Colloques Int. (CNRS Paries, 1967) 91.
- [5] Superconducting 32 T Magnet with REBCO High Field Coils. H. W. Weijers, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24 (5), (2014).
- [6] A 40 T Hybrid Magnet Under Construction in China. Guangli Kuang IEEE Trans. Appl. Supercond. 20 (3), p.680. (2010).

저자이력



김동락(金東洛)

1972-1976년, 경북대학교 물리학과. 1976-1978년, 경북대학교 대학원 실험물리학. 1987-1993년, 일본 오사카시립대학 대학원 저온물리학(이학박사), 1993-2014년, 한국기초과학지원연구원 책임연구원. 2015년 현재 한국기초과학지원연구원 전문위원.