

초전도 특성평가장치용 고온 초전도 마그네트의 개념 설계

The Conceptual Design of High-Tc superconducting Magnet for a Superconducting Property Measurement System

최석진¹, 이세연¹, 배준환², 손명환³, 김우석⁴, 박찬⁵, 이지광⁶, 이상진⁷, 최경달^{8,*}

S.J. Choi¹, S.Y. Lee¹, J.H. Bae², M.H. Sohn³, W.S. Kim⁴,
C. Park⁵, J.K. Lee⁶, S.J. Lee⁷, K. Choi^{8,*}

Abstract: The superconducting property measurement system is used to acquire electrical and thermal properties on short HTS tape samples and the system is composed of specimen holder for mounting HTS tape and a magnet for applying magnetic fields externally. The magnet consists of two split racetrack windings and is designed to produce maximum 3T of center field. The temperature of specimen holder can be varied in range from 10K to 77K. The field homogeneity is required less than 300 gauss stray field contour within 20cm axially and 3cm radially from origin. We have worked on the conceptual designs of the conduction-cooled magnet for the superconducting characteristic measurement system. The measurement system will be fabricated in near future based on the design parameters presented in this paper.

Key Words: superconducting property measurement system, magnetic field, racetrack winding, field homogeneity.

꼬여 감긴 형태로 응용이 된다. 시스템으로 제작하는 경우 초전도 선재에 기계적인 응력과 자재 및 외부 자장이 발생하여 임계 전류가 저하된다.

또한 고온초전도 선재에 수평 자장에 비하여 수직 자장이 인가되면 임계전류가 급격하게 감소하여 고온초전도 선재 및 코일의 안정성을 저하 시킬 수 있다. 따라서 보다 최적화된 초전도 전력기기의 개발을 위해서는 고온초전도 선재 및 코일의 특성평가 특히 고온초전도 선재의 자장 의존성에 대한 연구가 체계적으로 연구될 필요가 있다.

초전도 전력기기가 응용될 수 있는 온도범위인 10K ~ 77K 온도범위에서 초전도 선재의 특성을 평가하기 위해서는 현재 상업화되어 있는 물성 측정용 평가장치와는 달리 약 20cm 정도 길이의 초전도 선재를 평가할 수 있는 시편이 차지하는 공간이 필요하고 이 공간에 1% 이하의 자장균일도와 최소 3T 이상을 가지는 마그네트가 필요하다[1].

본 논문에서는 초전도 특성평가장치용 마그네트의 개념설계를 하였다. 선재량과 수직 최대 자장, 운전 전류 등을 고려하여 초전도 특성평가장치에 적합한 마그네트의 사양을 결정할 수 있도록 설계를 진행하였다.

1. 서 론

고온초전도 선재가 발견된 지도 20여년이 지났다. 초기의 기초 물성 및 새로운 고온초전선재 개발에서 오늘 날에는 가장 파급효과가 큰 전력기기응用に 많은 연구가 집중되고 있다. 초전도발전기/모터나 초전도 에너지 저장장치(SMES), 환류기, 변압기 등의 고온초전도 전력응용기기의 대부분은 코일형태로 만들어져 응용되거나 혹은 케이블처럼 여러 가닥의 초전도 선재가

2. 설 계

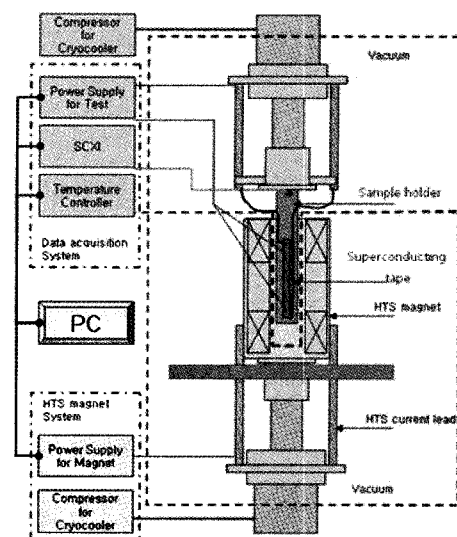


Fig. 1. The schematic diagram of a superconducting property measurement system.

¹정 회 원 : 한국산업기술대 연구원
²정 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원
³정 회 원 : 한국전기연구원 책임연구원
⁴정 회 원 : 서울대학교 재료공학부 계약교수
⁵정 회 원 : 서울대학교 재료공학부 부교수
⁶정 회 원 : 우석대학교 전기전자공학부 부교수
⁷정 회 원 : 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수
⁸정 회 원 : 산업기술대학교 에너지대학원 교수

*교신저자 : choidal@kpu.ac.kr
 원고접수 : 2008년 10월 01일
 심사완료 : 2009년 03월 11일
 게재확정 : 2009년 03월 11일

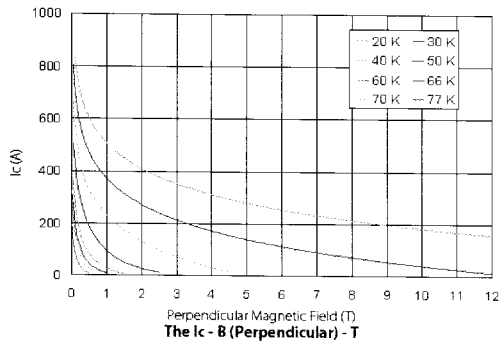


Fig. 2. Variation of critical current of the superconducting tapes with respect to magnetic field.

Table 1. Magnet parameter and specifications.

파라미터	설계조건
선재	DI BSCCO(Ic=180A @77K)
선재크기	4.7(폭)*0.3(두께) mm
최소굽힘반경(r)	25mm 이상
마그네트길이(h)	100mm
마그네트간격(d)	52mm
소요길이/DPC	< 500m, < 1000m, < 1500mm
중심자장	3T 이상
Io(운전전류)	Ic(B_수직최대자장)*0.7
운전온도	30K

초전도 특성평가장치의 개략도는 그림 1과 같다. 특성평가용 초전도 마그네트 코일을 설계하려면 코일의 저장에너지, 코일의 누설자속, 도체에 걸리는 수직 및 수평자장 분포, 중심자장 등을 정확히 계산할 수 있어야 하며, 냉동기의 냉각용량을 고려하여 코일에서 초전도 선재의 전압-전류 특성에 의해 발생하는 정상 운전 시 손실과 교류손실에 관한 연구도 병행 되어야 한다[2]. 특성평가용 초전도 마그네트 코일 설계를 위하여 전자장 상용해석프로그램인 MagNet을 사용하여 전자장 해석을 수행하였다. 초전도 특성평가장치용 마그네트는 스미토모사의 DI-BSCCO 선재를 사용하였으며, 선재의 자장에 따른 임계전류 변화는 그림 2와 같다. 전자장 해석은 최소 굽힘 반경과 코일의 직선부 길이, 그리고 코일간 간격을 고정시킨 다음, 모델링을 하였다. Io(운전전류)는 Ic(B_수직최대자장)/0.7로 정하였다. 액체질소로 냉각하는 경우와 달리, 전도냉각형 마그네트의 경우 냉동기의 효율을 고려하여 임계전류에 따른 마진을 주도록 하였다. 전자장 해석 결과와 선재의 사양에 따라 운전전류가 달라진다.

특성평가장치용 초전도 마그네트 설계에 필요한 제한조건은 선재의 최소굽힘반경, 마그네트의 직선부 길이, 마그네트간 간격, SPC 혹은 DPC 한 모듈당 선재의 소요길이, 중심자장, 운전온도에 따른 운전전류 등이다. 제한조건을 정리하면 표1과 같다.

2.1. split 마그네트와 un-split 마그네트의 비교

전도냉각형 마그네트를 split 마그네트로 정한 이유는 시편을 설치할 공간이 필요하고, 마그네트와 시편부의 냉각을 고려하여 냉동기와의 연결을 고려하여서였다. 그러나, split 마그네트로 전도냉각 마그네트를 제작하는 경우, 중심 자장 3T을 만들기 위하여 운전전류가 높아져서 마그네트를 운전하는 데 쿨치가 날 가능성이 높다. 전도냉각형 마그네트가 un-split로 제작

될 수 있다면, split 마그네트보다 낮은 운전전류로 운전이 가능하기 때문에 마그네트를 좀더 안정적으로 운전할 수 있게 된다. 이에 대한 전자장 해석 사양과 결과는 그림 3, 표 2와 같다.

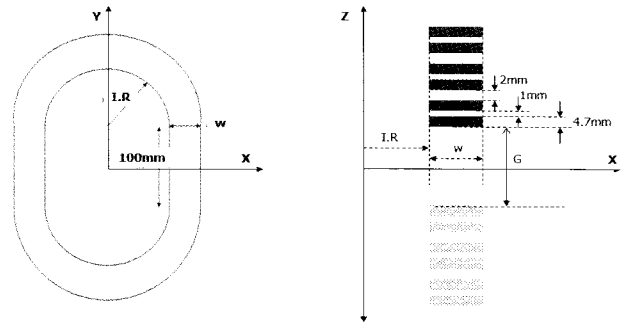


Fig. 3. The structure and specification of the conducting-cooled magnet.

Table 2. Specifications of Split magnet and un-split magnet.

CASE (I.R) (G)	I.R	G	Turns /SP	Coil Ic at 20K	Io for 3T
25R 26G (split)	25mm	26mm	186	296A	268A
25R 2G (un-split)	25mm	2mm	186	277A	173A
30R 2G (un-split)	30mm	2mm	179	277A	188A
40R 2G (un-split)	40mm	2mm	165	278A	224A
50R 2G (un-split)	50mm	2mm	152	279A	265A

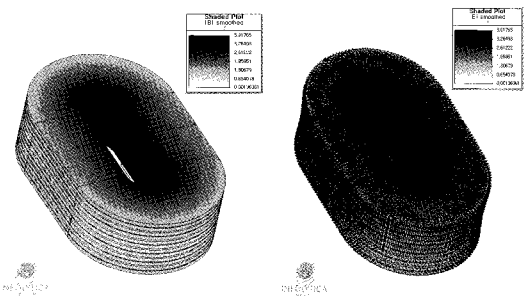


Fig. 4. Magnetic field distribution of the un-split magnet.

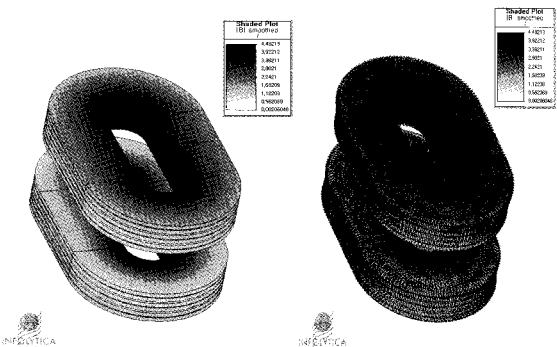


Fig. 5. Magnetic field distribution of the split magnet.

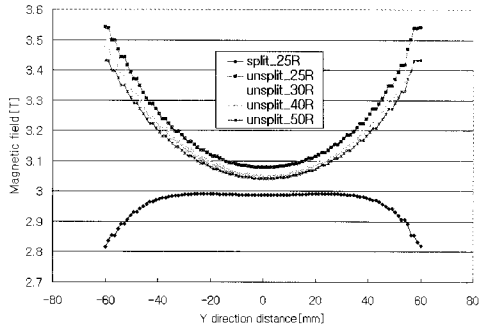


Fig. 6. Magnetic fields according Y direction distance.

그림 4와 그림 5는 전자장 분포를 나타내며, 그림 6은 전자장 해석 결과이다. un-split 마그네트의 경우 최대 자장이 3.91T였으며, split 마그네트의 경우 최대 자장이 4.48T였다. 예상한 대로 split 마그네트보다 un-split 마그네트가 Ic/Io를 볼 때 더 안정적으로 운전할 수 있었다. 그러나, 마그네트의 중심공간에서의 자장 분포를 볼 때, 균일도에서 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. split 마그네트가 un-split 마그네트보다 좋은 균일도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 전도냉각 마그네트의 경우 약 10cm 정도 길이의 초전도 선재를 평가할 수 있는 시편이 차지하는 공간이 필요하고 이 공간에 1% 이하의 자장균일도가 필요하기 때문에, 초전도 특성평가장치용 split 마그네트가 un-split 마그네트보다 불안정한 운전조건이지만, split 형태로 제작되어야 할 것이다.

2.2. 선재량을 고정시킨 상태에서의 전자장 해석

전체 마그네트에 사용되는 선재량을 1.2km로 고정시킨 상태에서의 전자장 해석을 수행하였다. 전체 마그네트에 사용되는 선재량은 고정시키고 해석한 이유는, 마그네트의 수에 따른 전자장 분포를 확인하고, 가장 적합한 마그네트 수를 정하기 위해서이다. 전체 마그네트에 사용되는 선재량을 고정시켰기 때문에, 마그네트의 권선 turn 수는 정해지며, Ic/Io를 고려하지 않은 상태에서, 중심자장 3T를 만들어내도록 운전전류를 정하였다. 그 결과는 표 3과 같다. 마그네트의 임계전류와 비교할 때 마그네트의 운전전류가 매우 높았으며, 안정적으로 마그네트를 운전하기 위해서는 더 많은 선재량이 필요할 것으로 판단되었다.

2.3. iron(투자율 1000)을 설치하였을 때의 전자장 해석

선재량은 1.2km로 고정시킨 상태에서, 운전전류를 높이는 경우 중심자장이 3T인 마그네트를 제작하는 것이 가능하나, 운전전류를 높이는 경우 임계전류와 비교할 때 마진이 줄어서 마그네트를 운전하는 데 쿼치가 날 가능성이 높게 된다. 마그네트에 iron 구조물을 설치하는 경우, 마그네트에 걸리는 자장도 높아지지만 중심자장도 커지는 효과가 올 수 있다. 이러한 효과를 알아보기 위하여 전자장 해석을 수행하였다. iron에 대한 해석은 운전전류는 275A, HT type의 4pair 마그네트로 고정하였다. 마그네트의 양쪽에 마그네트와 같은 형태의 iron의 구조물을 설치하였으며, iron의 두께를 1t부터 4t까지 늘려가며 전자장 해석을 수행하였고, 그 결과는 표 4와 같다. 그리고, iron의 두께를 1t로 고정시키고 iron 구조물과 마그네트와의 간격을 늘려가면서 전자장 해석을 수행하였다. 그 결과는 표 5와 같다. 그림 7은 1t 두께의 iron 구조물을 설

Table 3. The result of the magnetic analysis.

	권선 turn 수 (SPC)	중심 자장 [T]	최대 자장 [T]	수직 최대자장 [T]	수평 최대 자장 [T]	운전전류 [A]
1pair	630	2.582	3.945	1.507	3.779	450
2pair	406	3.001	4.369	1.952	4.275	351
4pair	252	3.007	4.440	2.202	4.364	270
6pair	186	3.016	4.635	2.365	4.584	260
8pair	150	3.011	4.807	2.481	4.785	265

Table 4. The result of the electromagnetic analysis according to iron width.

DPC	Iron 두께	운전전류 [A]	중심 자장 [T]	최대 자장 [T]	수직 최대자장 [T]	수평 최대 자장 [T]
4pair	0mm	275	3.02	4.69	2.605	4.63
	1mm		3.06	4.86	2.50	4.68
	2mm		3.07	5.14	2.46	4.73
	3mm		3.08	5.14	2.43	4.75
	4mm		3.09	5.09	2.42	4.779

Table 5. The result of the electromagnetic analysis according to iron gap.

DPC	Iron gap	운전전류 [A]	중심 자장 [T]	최대 자장 [T]	수직 최대자장 [T]	수평 최대 자장 [T]
4pair	0mm	275	3.02	4.69	2.605	4.63
	1mm		3.06	4.86	2.50	4.68
	2mm		3.06	4.81	2.50	4.68
	3mm		3.06	4.75	2.50	4.68

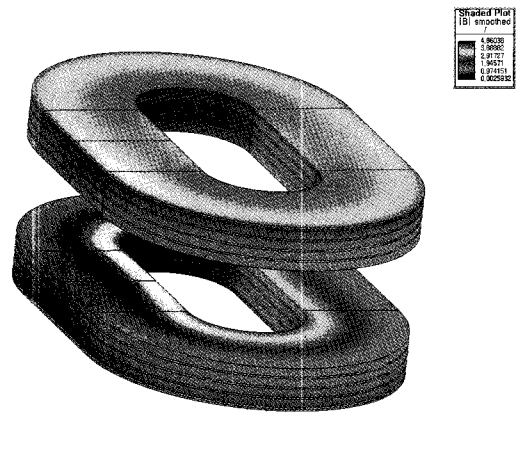


Fig. 7. Magnetic field distribution with iron structure.

치하였을 때의 전자장 해석 분포를 나타낸 것이다. iron 구조물에 대부분의 자장이 분포하며, 최대 자장은

4.86T였다. 중심자장과 마그네트에 걸리는 최대 자장이 예상대로 증가하고, 마그네트에 걸리는 수직최대 자장은 오히려 작아지는 효과가 있었지만, iron 구조물을 설치한 효과는 미비하였다. 향후 iron의 구조물 형태를 변화시켜 전자장 해석을 수행할 계획이다.

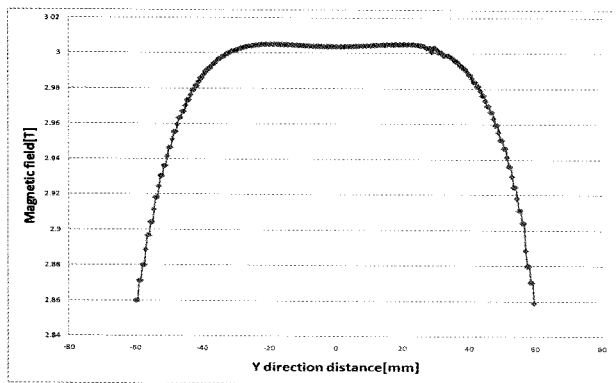


Fig. 8. Magnetic fields according to Y direction distance.

Table 6. The result of the electromagnetic analysis according to line distance.

직선부 길이 [mm]	권선 수 (SPC)	중심 자장 [T]	최대 자장 [T]	수직 최대 자장 [T]	운전 전류 [A]	Io/Ic	균일도 유지 길이
100	180	3.003	4.4	4.23	220	0.70	-45 ~ 46 (91mm)
105	177	2.999	4.44	4.26	224	0.71	-47.5 ~ 47.5 (95mm)
110	175	2.997	4.46	4.28	227	0.72	-51.5 ~ 52.5 (104mm)

2.4. 특성평가장치에 적합한 마그네트 사양 결정

앞의 결과를 토대로 특성평가장치에 적합한 마그네트의 사양을 결정하기 위한 전자장 해석을 수행하였다. 선재의 제작상 DPC당 마그네트의 선재량은 200m 이하이며, 마그네트가 안정적으로 운전이 가능하도록 Io/Ic=0.7로 마진을 주며, 5mm x 100mm 중심공간에서 균일도가 1%가 유지되는 마그네트를 설계하도록 전자장 해석을 수행하였다.

DPC당 마그네트의 선재량을 최대로 하여, DPC 4pair의 전자장 해석을 수행하였고, 중심자장을 3T로 만들기 위한 운전전류는 220A였으며, 마그네트에 수직으로 걸리는 최대 자장은 4.23T였다. 수직으로 걸리는 최대 자장을 고려할 때, Io/Ic=0.7을 만족하였다. 마그네트에 사용된 마그네트의 선재량은 약 1.51km였다. 이 모델에 대한 자장 분포는 그림 8과 같다. 특성평가장치는 중심공간에서 Y 방향 100mm에서 1%의 균일도가 요구된다. 직선부 길이가 100mm인 모델에서 1%의 균일도를 만족하는 공간은 -45~46mm로 약 91mm에서 1%의 균일도를 유지할 수 있었다. 균일도가 유지되는 공간을 100mm로 만들기 위하여, 마그네트의 직선부 길이를 크게 하며 전자장 해석을 수행하였다. 마그네트

의 직선부 길이가 커지면 균일도가 유지되는 공간이 늘어나는 장점이 있다. 그러나, DPC당 소요되는 선재량이 제한적이기 때문에, 직선부 길이가 커짐에 따라 마그네트의 turn수가 줄어들게 되어, 원하는 중심자장을 만족시키기 위하여 운전전류가 커지는 단점이 있다. 마그네트의 직선부를 크게 하며 전자장 해석을 수행한 결과는 표 6과 같다. 예상한 바와 같이, 직선부 길이가 커짐에 따라 균일도 유지 길이가 증가하지만, Io/Ic값도 증가하였다. 그러나, Io/Ic값의 증가가 그리 크지 않으며, 특성평가장치에서 균일도 유지 길이가 100mm를 반드시 넘어야 하므로, 특성평가장치용 마그네트는 직선부 길이 110mm의 형태로 제작하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 초전도 특성평가장치용 마그네트 설계 기술을 개발하였으며, 이 설계 기술을 이용하며, 특성평가장치에 적합한 마그네트 사양을 결정하였다. 균일도를 고려할 때, 마그네트는 split 형태이어야 하며, 직선부 길이가 110mm 이상이 되어야 함을 확인하였다. 향후 마그네트가 받는 힘 등을 상세 설계할 예정이고, 이렇게 설계된 마그네트는 초전도 특성평가장치 제작에 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다

참 고 문 헌

- [1] Lubomir Kopera, "Compact Design of Cryogen-Free HTS Magnet for Laboratory Use," IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 16, No.2, pp. 1415, June, 2006.
- [2] A. Ishiyama and H. Asai, "A Stability Criterion for Cryocooler-cooled HTS COILS," IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 11, No.1, pp. 1832, March, 2001.

저 자 소 개



최석진(崔錫鎭)
1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 위덕대학교 산학협력단 연구원.



이세연(李世淵)
1979년 02월 25일생, 2005년 대전대 전기공학과 졸업, 2007년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국산업기술대학교 위촉연구원.



배준한(裴俊漢)

1966년 4월 30일생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 선임연구원.



손명환(孫明煥)

1963년 4월 21일생, 1986년 부산대 자연대 물리학과 졸업, 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 1998년 동 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 1988년 한국전기연구소 입소, 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원.



김우석(金佑錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과공학사, 1998년 서울대학교 공과대학 대학원 공학석사, 2002년 서울대학교 공과대학 대학원 공학박사.



박찬(朴燦)

1964년 4월 30일생 1986년 서울대학교 무기재료 공학과 졸업, 1988년 동 대학원 졸업 (공학 석사), 1996년 New York State College of Ceramics at Alfred University 졸업 (공학박사), 1996~2000년, 미국 Oak Ridge 국립연구소 Research Associate, 2000~2001 미국 IGC-SuperPower senior materials scientist, 2001~2005 한국전기연구원 선임연구원, 2005~ 서울대학교 재료공학부 부교수.



이지광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학석사) 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 우석대학교 전기전자공학과 부교수.



이상진(李相鎭)

1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.



최경달(崔景達)

1962년 2월 12일생. 1984년 서울대학교 공과대학 전자공학과 공학사, 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사, 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학박사, 1993년-1997년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원, 1998년-현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수.