

초전도 특성평가장치용 전도냉각 마그네트의 개념설계

최석진*, 배준한**, 손명환**, 심기덕**, 김우석***, 이지광****, 박찬****, 이상진*****, 최경달*
 한국산업기술대*, 한국전기연구원**, 우석대***, 서울대****, 위덕대*****

A conceptual design of a conduction-cooled magnet for a superconducting property measurement system

Sukjin Choi*, Junhan Bae**, Myunghwan Sohn**, Kideok Sim**, Wooseok Kim***, Jikwang Lee***, Chan Park****, Sangjin Lee*****, Kyeongdal Choi*

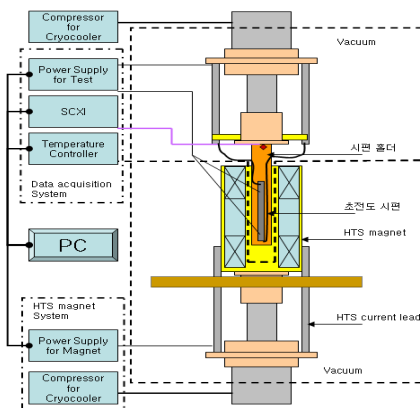
Korea Polytechnic Univ*, Electrotechnology Research Institute**, Woosuk Univ***, Seoul National Univ****, Uiduk Univ*****

Abstract - 본 연구에서는 외부 인가 자장을 위한 초전도 특성평가장치용 레이스트랙형 초전도 마그네트의 개념설계를 하였다. 초전도 특성평가장치는 외부 인가 자장과 온도를 변화시켜가며 고온 초전도 선재의 특성을 측정할 수 있는 장치이다. 초전도 전력기기가 응용될 수 있는 온도범위인 10 K ~ 77 K 온도범위에서 초전도 선재의 특성을 평가하기 위해서 약 20cm 정도 길이의 시편이 차지하는 공간이 필요하고 이 공간에 1% 이하의 자장균일도와 최소 3T 이상을 가지는 마그네트가 필요하다. 이러한 조건을 만족시키는 초전도 마그네트는 필연적으로 레이스트랙형 마그네트를 가지는 split형이어야 한다. DI-BSCCO H type과 HT type 두 가지 선재에 대한 전자장 해석을 통하여 제한조건을 만족시키는 마그네트 설계를 하였다. 이렇게 설계된 초전도 마그네트는 초전도 특성평가장치 제작에 활용될 것이다.

1. 서 론

고온초전도 선재가 발견된 지도 20여년이 지났다. 초기에는 기초 물성 및 새로운 고온초전도체 개발의 연구가 주로 이루어졌으나, 오늘 날에는 파급효과가 큰 전력기기응용에 많은 연구가 집중되고 있다. 초전도발전기/모터나 초전도 에너지 저장장치(SMES), 한류기, 변압기 등의 고온초전도 전력응용기기의 대부분은 코일형태로 만들어져 응용되거나 혹은 케이블처럼 여러 가닥의 초전도 선재가 꼬여 감긴 형태로 응용이 된다. 제품화 되는 경우 기계적인 응력뿐만 아니라 자장 및 외부 자장을 경험하는데 이 경우 고온초전도 선재의 중요한 특성인 임계전류가 달라진다. 또한 고온초전도 선재의 고유특성상 선재의 넓은 면에 수직인 자장의 세기에 가장 민감하게 임계전류가 감소하고 사용하는 온도에 따라 임계전류가 다르기 때문에 고온초전도 선재 및 코일의 안정성이 달라진다. 따라서 보다 최적화된 초전도 전력기기의 개발을 위해서는 고온초전도 선재 및 코일의 특성평가 특히 고온초전도 선재의 자장 의존성에 대한 연구가 체계적으로 연구될 필요가 있다[1],[2].

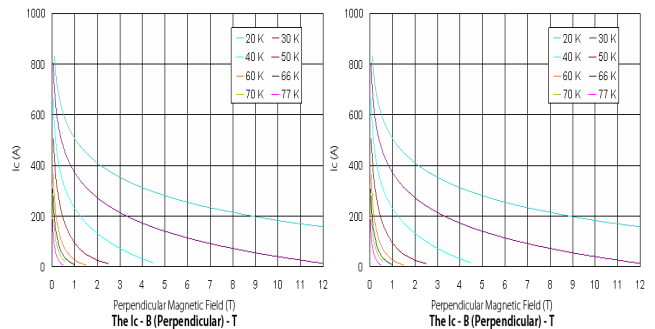
본 연구에서는 외부 인가 자장에 따라 고온초전도 선재의 임계전류를 측정할 수 있는 초전도 특성평가장치용 마그네트를 설계하였다. 특성평가장치용 초전도 마그네트 설계에 필요한 제한조건에 따라 전자장 해석을 수행하였고, 전자장 해석 결과를 토대로 최적의 마그네트 형상 및 사양을 결정하였다. 이렇게 설계된 초전도 마그네트 설계 결과를 이용하여 초전도 특성평가장치 제작을 할 계획이다. <그림 1>은 초전도 전력기기용 특성평가장치의 모습이다.



<그림 1> 초전도 전력기기용 전도냉각형 특성평가장치

2. 설 계

2.1 선재 사양 및 마그네트 제한 조건



<그림 2> 선재의 수직 자장에 따른 임계전류 변화 (a) H type (b) HT type

초전도 특성평가장치용 마그네트에 사용되는 선재는 DI-BSCCO H type과 HT type 두 가지이다. 고온초전도 선재의 임계전류는 자장의 세기, 방향 및 온도에 의존하며, 수평자장 보다는 수직자장에 더욱 크게 의존한다. 따라서 외부 수직자장에 따른 임계전류의 변화를 고려하여 고온 초전도 마그네트의 운전전류를 결정하여야 한다. H type 선재와 HT type 선재의 수직자장에 따른 임계전류 변화는 <그림 2>와 같다.

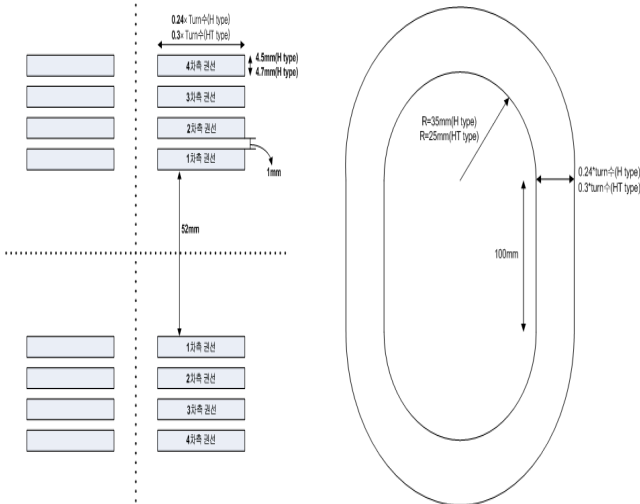
특성평가용 초전도 마그네트 설계에 필요한 제한조건은 선재의 최소굽힘반경, 코일의 직선부 길이, split 간격, SPC(single pancake coil) 혹은 DPC(double pancake coil) 한 모듈당 선재의 소요길이, 중심자장, 운전 온도에 따른 운전전류 등이다. 제한조건을 정리하면 <표 1>과 같으며, 코일의 제한 조건을 고려한 마그네트의 개략도는 <그림 3>과 같다.

특성평가용 초전도 마그네트 코일을 설계하려면 코일의 저장에너지, 코일의 누설자속, 도체에 걸리는 수직 및 수평자장 분포, 중심자장 등을 정확히 계산할 수 있어야 한다. 전자장 상용해석프로그램인 MagNet을 사용하여, 특성평가용 초전도 마그네트 코일 설계를 위한 전자장 해석을 수행하였다.

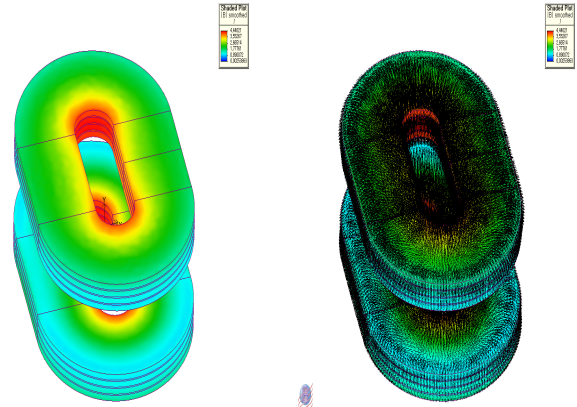
최소 굽힘 반경과 코일의 직선부 길이, 코일 제작에 필요한 선재량, 그리고 코일간 간격을 고정시킨 다음, 모델링을 하였다. 전자장 해석을 통하여 코일이 받는 최대 수직자장을 알아내고, 이 수직자장과 선재의 자장에 따른 임계전류를 비교하여 운전전류 등을 정하게 된다.

<표 1> 특성평가용 마그네트의 제한조건

파라미터	설계조건
선재	DI-BSCCO(Ic=180A @77K)
선재크기	4.5(폭)*0.24(두께) mm (H type) 4.7(폭)*0.3(두께) mm (HT type)
최소굽힘반경(r)	25mm 이상(HT type) 35mm 이상(H type)
코일 직선부 길이(h)	100mm
split 간격(d)	52mm
소요길이	1.2km
중심자장	3T



<그림 3> 특성평가용 마그네트의 개략도

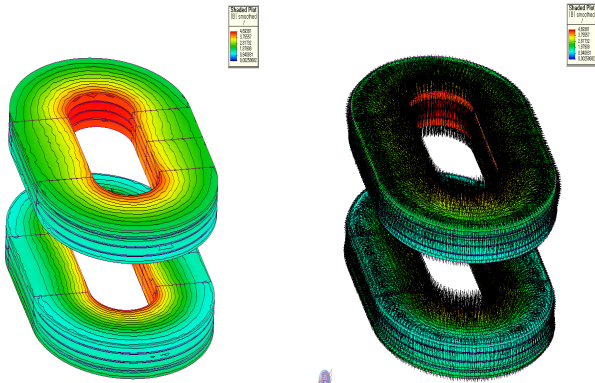


<그림 5> HT type 선재의 전자장 해석

<표 3> HT type 선재의 전자장 해석 결과

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

2.2 H type 선재의 전자장 해석 및 결과



<그림 4> H type 선재의 전자장 해석

H type 선재의 전자장 해석 그림은 <그림 4>와 같다. 2.1에서 언급한 전자장 해석 제한조건을 사용하여 전자장 해석을 하였고, 각 SPC당 코일의 권선수는 일정하게 유지하고, 코일의 SPC 수를 늘려가면서 전자장 해석을 수행하였다. 코일에 사용되는 선재량이 1.2km이며, 중심자장이 3T인 마그네트를 설계하였고, 그에 대한 전자장 해석 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> H type 선재의 전자장 해석 결과

DPC	1SPC 당 권선 수	운전 전류 [A]	중심 자장 [T]	최대 자장 [T]	수직 최대 자장 [T]	수평 최대 자장 [T]
1pair	656	400	2.42	3.92	1.63	3.70
2pair	411	345	3.012	4.69	2.289	4.50
4pair	247	275	3.02	4.69	2.605	4.63
6pair	180	265	3.001	4.889	2.751	4.766
8pair	142	273	3.010	4.957	2.814	4.878

1pair 코일의 경우 운전전류를 400A로 올려도 중심자장이 3T를 만들어 내지 못하는 것을 알 수 있다. 운전전류를 400A 이상으로 올리게 된다면, 3T의 중심자장을 만들어 낼 수는 있겠지만, 수직 자장에 따른 임계전류 변화를 고려할 때, 운전전류를 400A 이상으로 올리는 것이 불가능함을 알 수 있다. 2pair 이상 코일의 경우 DPC 수를 늘려감에 따라 수직 최대 자장이 커짐을 알 수 있다. 수직 최대 자장, 수직 자장에 따른 임계전류 변화 그리고 운전전류를 고려할 때, 특성평가용 마그네트는 4pair 혹은 6pair로 제작되어야 함을 알 수 있다.

2.3 HT type 선재의 전자장 해석 및 결과

HT type 선재의 전자장 해석 그림은 <그림 5>와 같다. H type 선재의 전자장 해석과 마찬가지로 각 SPC당 코일의 turn수는 일정하게 유지하고, 코일의 SPC 수를 늘려가면서 전자장 해석을 수행하였다. 코일에 사용되는 선재량이 1.2km이며, 중심자장이 3T인 마그네트를 설계하였고, 그에 대한 전자장 해석 결과는 <표 3>과 같다.

1pair 코일의 경우 운전전류를 450A로 올려도 중심자장이 3T를 만들어 내지 못하는 것을 알 수 있다. H type 선재의 전자장 해석 결과와 마찬가지로 운전전류를 450A 이상으로 올리는 것이 불가능함을 알 수 있다. 2pair 이상 코일의 경우 DPC 수를 늘려감에 따라 수직 최대 자장이 커짐을 알 수 있었으며, 수직 최대 자장, 수직 자장에 따른 임계전류 변화 그리고 운전전류를 고려할 때, HT type 선재를 사용하여 특성평가용 마그네트를 제작하여야 할 경우에는 4pair 혹은 6pair로 제작되어야 함을 알 수 있다.

3. 결 론

DI-BSCCO H type과 HT type 두 가지 선재에 대한 전자장 해석을 통하여 제한조건을 만족시키는 마그네트 설계를 하였다. 사용되는 선재량이 1.2km, 중심 자장이 3T인 레이스트랙형 split 마그네트를 설계하였으며, 전자장 해석 결과를 볼 때 H type과 HT type 마그네트 두 가지 모두 4pair나 6pair로 마그네트 제작이 이루어져야 할 것이다. 본 논문에서는 최대 자장과 자장에 따른 선재의 임계전류 변화만을 고려하여 전자장 해석을 수행하였지만, 향후 마그네트가 받는 힘과 마그네트 주변에 철심을 설치하였을 때의 해석을 수행할 예정이다. 이렇게 설계된 초전도 마그네트는 초전도 특성평가장치 제작에 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

[1] L'ubomir Kopera, "Compact Design of Cryogen-Free HTS Magnet for Laboratory Use", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL 16, NO.2, JUNE 2006
 [2] M.Ono, "Development of a 1MJ Cryocooler-cooled Split Magnet with Ag-Sheathed Bi2223 Tapes for Si Single-Crystal Growth Applications", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL 10, NO.1, MARCH 2000