

고온초전도 동기모터의 계자코일 제작과 특성

손명환, 이연용, 백승규, 조영식, 권운식, 권영길
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Fabrication and Characteristics of Field Coils for HTS Motor

M.H. Sohn, E.Y. Lee, S.K. Baik, Y.S. Jo, W.S. Kwon, Y.K. Kwon
KERI Applied Superconductivity Research Group

Abstract - A superconducting motor consisting of high temperature superconducting (HTS) rotor and air-core stator is under development in Korea Electrotechnology Research Institute. HTS motor was designed for having the rated power of 100hp at 1800 rpm. HTS field winding is composed of sixteen HTS race track shaped coils wound with stainless steel-reinforced Bi-2223 tape conductor by react and wind fabrication method. Nomex paper was used for electrical insulation. Each of four magnet pole assemblies was constructed with four double pancake sub-coils, mechanically stacked and electrically in series. Four magnet assemblies were fixed on an aluminum support structure to make effective heat transfer. Critical current (I_c) of HTS field winding was 41A but minimum I_c of sub-coils was 35A at 77K and self field. Joule heat generated in HTS field winding was 2.11W at 77K and 35A.

1. 서 론

초전도현상을 발견한 이후로 초전도기술을 전력분야에 응용하고자하는 노력들이 선진국을 비롯한 세계 곳곳에서 오늘날까지 계속되고 있으며, 고온초전도(HTS)의 발견으로 액체헬륨을 이용하는 기존의 극저온 냉각방식에서 액체질소나 냉동기를 사용한 냉각방식을 채택하게 함으로써, 냉동기부분의 부피와 유지비용 등을 대폭적으로 절감하는 것이 가능하게 되었다. 고온초전도동기모터 분야에서는 미국의 AMSC사와 독일의 Siemens사가 가장 활발히 연구하고 있다[1-3]. 우리나라에서도 2001년 9월부터 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 지원을 받아 고온초전도모터 개발연구를 진행 중인데 1단계 목표가 100마력급 동기모터의 개발이다. 일반적으로 HTS 도체는 HTS 재료가 부서지기 쉬운 금속산화물 세라믹의 고유한 특성을 가지기 때문에 금속피복재를 가진 테이프 형상을 가지는데, 이 때문에 대부분의 초전도동기발전기나 초전도동기모터에 적용되는 계자코일은 레이스트랙형 팬케이크 코일형태이다.

본 연구에서도 100마력급 고온초전도모터에 사용될 계자코일을 레이스트랙형 더블팬케이크 코일로 설계 및 제작하였으며, 액체질소 온도(77K)에서 성능평가를 한 후 고온초전도코일과 코일들 사이의 열결선에서 발생하는 Joule열을 계산하고 검토하였다. 제작방법에 대해서도 자세히 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 계자코일 및 보빈의 설계

초전도모터의 계자코일에 사용될 코일은 테이프 모양을 갖는 고온초전도도체의 특성상 더블팬케이크 코일모양으로 권선된다. 계자코일에 사용한 도체는 AMSC사의 고강도 Bi-2223 도체로 운전온도 30K에서 운전전류를 100A로 정하고 1차년도에 설계한 2차원 평면 설계결과를 기초로 하여 더블팬케이크 코일을 배치하였으며, 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 계자코일 한국은 4개의 더블팬케이크 코일로 구성되고, 총 권선 턴수는 500턴이다. 사용도체의 단면적에 따라 같은 위치에 있는 팬케이크 코일이라도 턴수는 조금씩 달랐다. 그림 2와 표 1에 각각의 턴수 및 배치를 나타내었다.

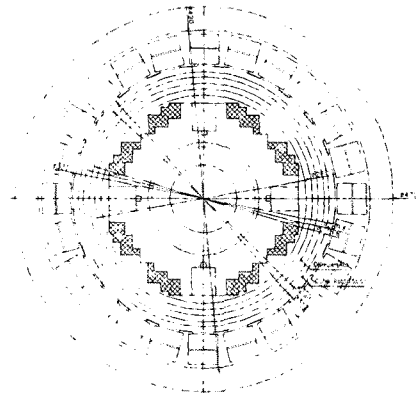


그림 1 100마력급 고온초전도 모터의 횡단면도



그림 2 계자 한국의 단면도

표 1 100마력급 고온초전도모터용 각 코일의 턴수

		Pole A	Pole B	Pole C	Pole D
DP #1	Coil #1	22	22	23	21
	Coil #2	22	22	23	21
DP #2	Coil #3	68	72	74	71
	Coil #4	68	72	74	71
DP #3	Coil #5	121	123	117	122
	Coil #6	77	75	71	76
DP #4	Coil #7	77	71	73	74
	Coil #8	45	43	45	44
Total		500	500	500	500

2.2. 팬케이크 코일의 제작

100마력급 고온초전도모터에 사용할 팬케이크 코일을 AMSC사의 고강도 Bi-2223 도체를 사용하여 표 1에 나타난 턴수에 접합의 여유를 고려하여 제작하였으며 제작한 각 팬케이크 코일을 그림 3에 나타낸다. 권선시에 턴수가 작은 것은 장력을 400gf로 하였고 턴수가 많은 것은 10턴 혹은 20턴씩 줄때 20gf를 줄이면서 권선을 하였다. 도체의 두께가 도체마다 달라서 각 코일의 턴수도 약간씩 차이가 있다. 테이프 사이의 절연은 Nomex paper type 400을 사용하고 층간 절연은 FRP 천을 사용하였으며 wet winding method를 사용하였다. 최종적으로 조립이 될 때는 접합을 고려하면서 총 턴수가 500턴이 되도록 한다.

2.3. 보빈설계 및 제작

그림 2에 나타나 있듯이 계자코일은 4개의 더블팬케이크가 적층된 모양을 가진다. 이 팬케이크 코일들을 계단모양의 보빈에 직접 권선할 수가 있고 그렇지 않으면 코일을 권선틀에 권선한 후에 코일만 분리하여서 보빈에 적층하는 방법이 있다. 이 두 가지 경우 모두 계자코일의 형상에 따라 코일이 닿는 부분의 보빈 모양이 결정되기 때문에 같은 형상을 가진다. 본 연구에서는 각 더블팬케이크 코일을 권선한 후 보빈에 적층하는 방식을 채택하였다. 또한 100마력급 초전도모터의 냉각방식을 액체네온을 이용한 전도냉각으로 구상하였기 때문에 코일의 효과적인 냉각을 위해 액체네온이 증발하는 기화기(evaporator)가 내부에 설치된 주구조물에 보빈이 붙어 있는 보빈일체형 샤프트를 설계하게 되었다. 그림 4는 제작된 보빈일체형 샤프트와 코일들이 부착된 계자코일을 나타낸다.

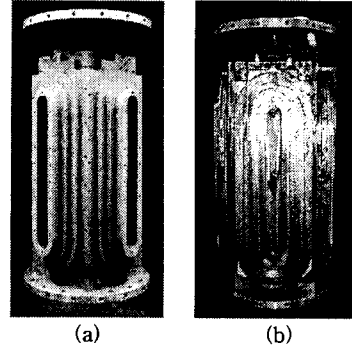


그림 4 보빈일체형 샤프트(a)와 코일들이 부착된 계자코일 전체(b)

2.4. 특성평가

그림 3과 같이 16개의 더블팬케이크 코일들을 제작하고 각 코일들의 I_c 를 I-V 특성곡선으로부터 $1\mu V/cm$ 의 기준으로 구하였다. 코일에 사용한 도체의 I_c (임계전류)와 제작한 더블팬케이크 코일의 I_c 를 그림 5에 나타내었다. I_c 가 대체로 높은 선재를 수직자장의 세기가 가장 큰 영역에 위치할 것으로 예상되는 DP #4용으로 사용하였다. 코일 각각의 I_c 는 자체발생자장 때문에 권선수가 가장 많은 DP #3에서 가장 낮게 나타났다.

그림 4 (b)에 나타난 계자코일 전체와 각 극의 계자코일들의 I-V 곡선을 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다. 계자코일 전체의 I_c 는 41A였으며 각 계자코일도 비슷한 값을 가짐을 확인하였다.

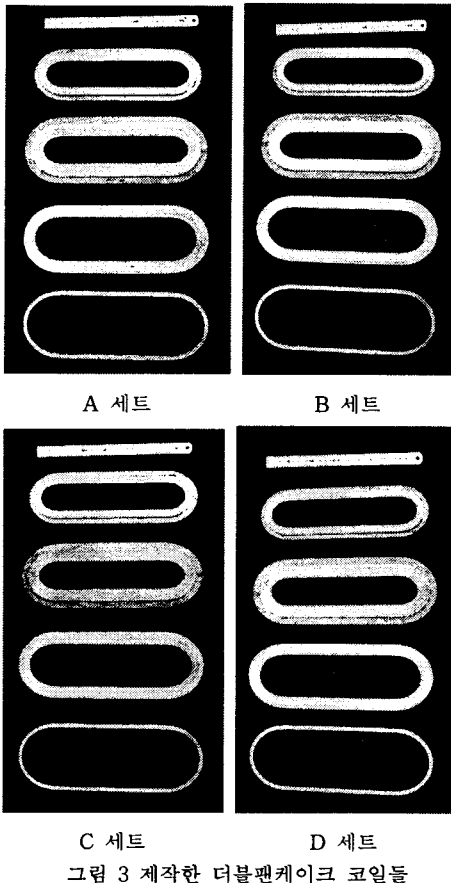


그림 3 제작한 더블팬케이크 코일들

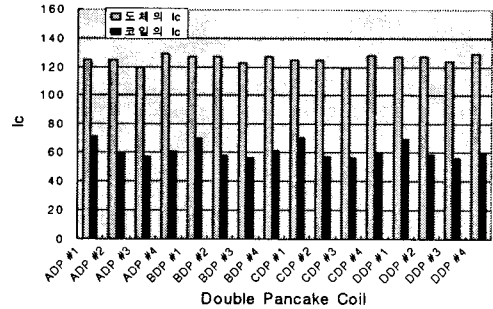


그림 5 도체와 더블팬케이크 코일들의 I_c 비교

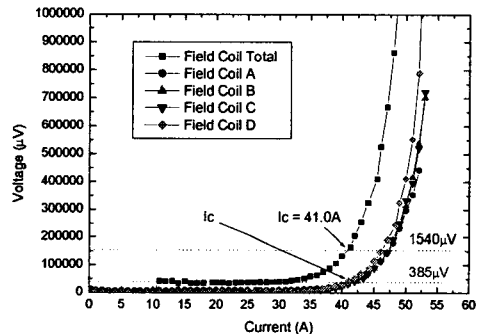


그림 6 계자코일과 각 계자코일들의 I-V 특성곡선

각 계자코일의 Ic값과 계자코일을 구성하는 각 더블팬케이크 코일들의 Ic를 서로 비교하여 그림7에 나타내었다. 계자코일 A, B, C, D 모두 더블팬케이크 코일 DP #4의 Ic가 가장 작았다. 그림 8에 나타낸 계자코일 D의 I-V 특성곡선을 보면 DDP #4의 I-V 곡선은 코일 전체의 I-V 곡선과 거의 일치한다. 즉, 초기의 전압발생은 대부분 DDP #4에서 일어나고 이것은 Ic에 가장 크게 영향을 미치는 수직자장의 세기가 DP #4가 위치한 곳에서 가장 크기 때문이다.

인가전류에 대한 발생자장의 세기를 Hall 소자를 이용하여 측정하였으며, DP #1의 바닥면 중심에서의 발생자장은 4극 모두 40.4 (± 0.5%) [G/A]의 범위에 있음을 확인하였다.

2.5 Joule 열

77K에서만 특성평가가 이루어졌기 때문에 77K에서의 운전전류에 따른 Joule열발생을 계자코일 전체, 계자코일 D, 더블팬케이크 코일 DDP #4에 대해 I-V 특성곡선으로부터 계산하고 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 계자코일 D의 Joule 발생은 대부분 DDP #4에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 77K에서의 운전전류를 DDP #4의 Ic 값인 35A가 가장하면 전체 Joule열은 2.11W이고 이 값은 계자코일 D에서 35A일 때 발생하는 Joule열 0.29W의 4배보다도 0.95W가 큰 값이다. 이것은 계자코일 A, B, C, D 사이에 연결되어 있는 열결선에서 발생하는 Joule열로서 35A에서 이 열결선 전체의 저항은 0.775mΩ이다. 이 열결선은 고온 초전도도체가 부착된 구리선을 사용하였기 때문에 구리처럼 30K에서는 77K 값의 약 1/10로 작아진다. 또한 J.-T. Eriksson 등의 연구결과[4]에서 레이스트랙형 고온초전도코일의 경우 20.4K에서의 Ic는 77K 값의 약 4.8배이고 이 결과를 참고하면 30K에서의 전류값은 적어도 4배 이상이 됨을 예상할 수 있다.

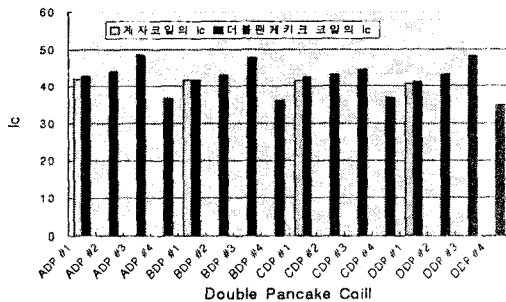


그림 7 계자코일과 각 더블팬케이크 코일들의 Ic 비교

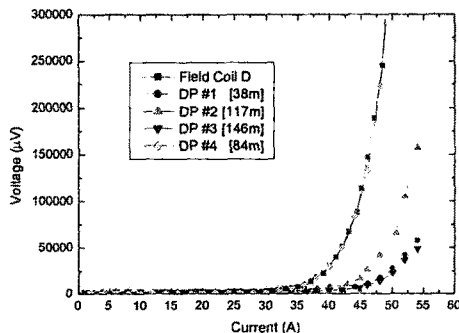


그림 8 계자코일 D의 I-V 특성곡선

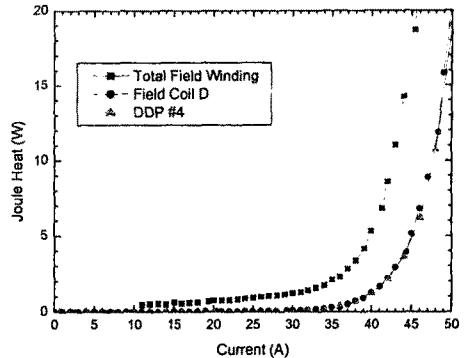


그림 9 I-V 곡선으로부터 계산한 각 코일의 Joule 열

따라서 계자코일에 흘리는 전류가 140A일때 더블팬케이크 코일의 Ic 기준 전압인 8.4mV가 발생한다고 가정하면 4개의 계자코일에서는 33.6mV가 발생한다. 이때 연결선까지 고려하여 예상되는 총발열량은 6.22W가 되는데 이 값은 49A에서 발열량이 5W인 Siemens사의 400kW 고온초전도 동기기의 계자코일의 성능[3]보다 우수하다.

3. 결 론

100마력급 고온초전도모터용 계자코일을 고강도 Bi-2223 도체를 사용하여 wet winding method로 제작하고 특성평가를 하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 77K에서 계자코일 전체의 Ic는 41A이었지만 더블팬케이크 코일 중 가장 낮은 Ic는 35A이었다. 그리고 30K에서의 운전전류 100A를 충분히 만족 시킬 것으로 예상된다.
2. 77K 35A에서 계자코일 전체의 Joule 발열은 2.11W이었으며, 30K 140A에서는 6.22W 이하가 될 것으로 예상된다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] J.P. Voccio, B.B. Gamble, C.B. Prum, H.J. Picard, "125 HP HTS Motor Field Winding Development", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, 519-522, 1997
 [2] G. Papst, B.B. Gamble, A.J. Rodenbush and R. Schottler, "Development of synchronous motors and generators with HTS field windings", Supercon. Sci. Technol. Vol. 10, 924-926, 1997
 [3] M. Frank, J. Frauenhofer, H. U. Haefner, P. van Hasselt, W. Nick, G. Thummes, G. Nerowski and H. W. Neumueller, "Cooling System for Siemens 400 kW HTS Synchronous Machine", Houston, August 4-9, 2002
 [4] J. T. Eriksson, R. Mikkonen, J. Paasi and L. Soderlund, "A 1.5 kW HT superconducting synchronous machine", paper presented at Applied Superconductivity, Edinburg, July 3-6, 1995