

전도냉각방식을 이용한 고온초전도 코일의 웨치전류 측정

손명환*, 김석호*, 백승규*, 이언용*, 이재득*, 권영길*, 권운식**, 박희주**, 문태선**, 김영준**

* 한국전기연구원 초전도응용연구그룹, ** 두산중공업(주) 기술연구원

Quench Current Measurement of High Temperature Superconducting Coils Cooled by Conduction

M.H. Sohn*, S.H. Kim,*, S.K. Baik*, E.Y. Lee*, J.D. Lee, Y.K. Kwon*,
W.S. Kwon**, H.J. Park**, T.S. Moon**, Y.C. Kim**

Abstract - High Tc superconducting(HTS) model coil was prepared. Current-voltage(I-V) characteristic curves of model coil, sub-coils and joints were investigated at 77K and other some temperatures. Cooling system for characteristics measurement was made by using G-M cryocooler. At 77K, quench current(Iq) of model coil was 43.9A and the lowest Iq of sub-coils was 38.8A. At 55K, sub coil SP #06 was 106A. So, 100A was chosen as the operating current at 55K with margin. Joule heat of model coil was 0.65W at 100A, operating current and 58K. Joint resistances between sub-coils were about 70nΩ at 77K and about 30nΩ at 55K.

1. 서 론

전력기기에 응용되는 고온초전도 도체는 대부분 코일의 형태를 가지고, 초전도 상태가 되는 극저온에서 사용된다[1-3]. 이 경우 코일의 운전전류는 유지되는 온도에 따라 다르다. 온도에 따른 코일의 웨치전류(Iq)를 측정하고 냉각조건을 고려한 안정성을 검토하여 운전전류를 정하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 특성평가용 전도냉각장치를 개발하고, 이 장치를 이용하여 1MW급 고온초전도모터에 사용될 계자코일을 설계 제작하기 전에 모델 코일을 설계 및 제작하여 온도에 따른 I-V 곡선을 측정하였으며, 모델 코일 및 각 서버 코일들의 Iq계산하였다. 접합에서 발생하는 Joule열을 고려하여 가능한 운전전류를 검토하였다.

2. 본 론

2.1 특성평가용 전도냉각 장치

일반적으로 고온초전도 코일의 웨치전류(Iq) 등의 특성평가를 위해서는 냉매로 액체질소나 액체헬륨을 사용하고 있다. 이 방법의 경우 액체질소 온도(77K)나 액체헬륨온도(4.2K)에서만 특성평가가 가능하다. 그리고 고온초전도 코일의 응용측면에서 볼 때 액체질소온도에서 고온초전도 코일의 임계전류가 낮아 실용성이 없고 액체헬륨을 사용할 경우 냉매가 비싸고 취급하기 어렵다. 따라서 액체질소온도와 액체헬륨온도 사이에서 고온초전도 코일의 특성을 평가할 수 있는 장치를 그림 1과 같이 만들었다. GM 냉동기와 이 냉동기의 Cold Head에 감은 히터 그리고 온도조절장치 등이 결합된 대용량 극저온 냉각장치를 이용하여 일정 온도까지 냉각하여 특성평가가 가능하도록 하였다. 조립이 완료된 모델 코일을 특성평 가하기 위해 GM 냉동기의 cold head에 부착하였다.

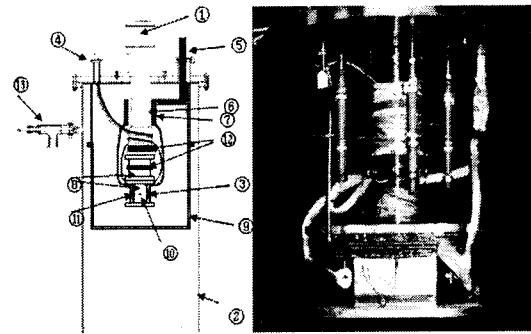


그림 1 특성평가용 냉각장치 ① G-M 냉동기, ② 진공챔버, ③ 초전도 코일, ④ feed-through (센서신호선, 전압선 연결), ⑤ Current lead, ⑥ FRP 절연, ⑦ 중간 냉각부, ⑧ 코일과 냉동기 연결 블락, ⑨ 복사 실드, ⑩ 홀센서, ⑪ 온도센서, ⑫ heater, ⑬ 진공배기 포트

2.2 모델 코일 및 보빈 설계

초전도 모터의 계자코일에 사용될 코일은 테이프 모양을 갖는 고온초전도 코일의 특성상 더블 혹은 싱글 팬케이크 코일 모양으로 권선된다. 1MW 고온초전도 모터용 계자코일을 개발하기 전에 먼저 모델 코일을 설계 제작하여 위해서 액체질소 및 전도 냉각 상태에서 성능평가를 해 보기로 하였는데, 모델 코일은 2개의 싱글 팬케이크 코일과 2개의 더블 팬케이크 코일로 구성하였다. 모델 코일에 사용한 도체는 AMSC사의 고강도 Bi-2223 도체로 임계전류가 120A이었다. 그림 2와 표 1에 각 서버코일의 턴 수, 길이 및 배치를 나타내었다.

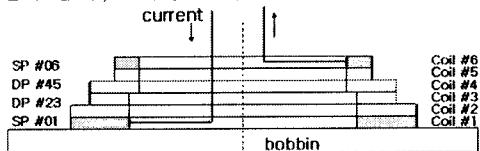


그림 2 모델 코일의 단면도

표 1 모델 코일의 각 서버 코일의 턴수

		턴 수		길이[m]
		Coil #6	Coil #5	
SP #06	Coil #6	28		16.3
	Coil #5	28	84	16.3
DP #45	Coil #4	56		34.3
	Coil #3	44		27.5
DP #23	Coil #2	66		42.9
	Coil #1	66		42.9
Total		288		180.2

2.3 모델 코일 제작

팬케이크 코일을 AMSC사의 고강도 Bi-2223 도체를 사용하여 표 1에 나타낸 턴 수로 권선하였으며, 제작한 각 팬케이크 서버 코일을 그림 3에 나타내었다. 권선장력은 400gf로 하였다. 도체의 두께가 테이프 사이의 절연은 Nomex paper type 400을 사용하고 충간 절연은 FRP천을 사용하였으며 wet winding method를 사용하였다. 최종적으로 조립이 될 때는 접합을 고려하면서 총 턴 수가 288턴이 되도록 한다. 각 서버 코일들 사이의 접합은 고온초전도 테이프 조각을 다리를 놓듯이 연결하는 접합방법을 사용하였다[4].

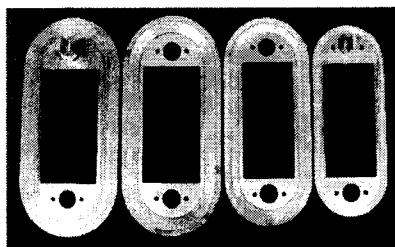


그림 3 모델 코일의 서버 코일들

2.4 특성평가

그림 2와 같이 더블팬케이크 코일 2개와 싱글 팬케이크 코일 2개를 제작하고, 각 서버 코일의 퀸치전류(I_q)를 먼저 액체질소 속에서 얻은 I-V 특성 곡선으로부터 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준으로 구하였다. 서버 코일의 I_q 는 코일의 배치 및 턴 수 그리고 권선의 각 부분에서 경험하는 self field의 도체면에 수직한 자장의 세기에 따라 크게 다르다. 서버코일들을 결합하여 모델 코일을 만든 다음 역시 액체 질소 속에서 I_q 를 측정하였다. 이 실험결과를 표 2에 정리하였다. 조립 전에는 턴 수가 많을수록 I_q 가 낮지만, 조립이 완료된 후의 결과는 달랐다. 이것은 조립 후에는 도체 면에 수직한 자장의 세기 분포가 달라졌음을 의미한다. 상대적으로 큰 수직자장이 위치한 코일은 상하단의 싱글 팬케이크 코일들이었다. 그림 4에 OPERA로 해석한 운전전류 150A일 때 수직자장의 세기 분포를 나타내었다.

모델 코일에서 가장 낮은 I_q 는 38.8A로 coil #6 즉 SP #06의 I_q 이고, 가장 높은 I_q 는 56.4A로 DP #23이다. 모든 코일의 I_q 를 측정하기 위해서는 약 60A 이상의 전류를 흘리면서 각 부분의 전압을 감지해야 했다. 측정한 I-V 곡선을 그림 5에 나타내었다. 코일 전체에 50A의 전류를 흘리면, 서버 코일 DP #23은 퀸치가 나지 않지만 나머지 서버 코일은 퀸치가 난 상태이며, 특히 SP #01, SP #06 코일의 양단의 전압은 점점 높아지고, 이것은 Joule 열의 발생을 의미한다. 액체 질소 속에서의 측정에서는 발열이 쉽게 그리고 빠르게 외부로 방출되지만 전도냉각의 경우는 열이 계속 누적된다. 따라서 전도냉각으로 코일을 평가할 때는 제작한 코일의 파손이 우려되기 때문에 전류의 한계를 설정하는 것이 매우 중요하다.

표 2 조립전과 후의 각 서버 코일들의 퀸치전류(I_q)

		$I_q(\text{A})$	
		before	after
SP #06	Coil #6	70.5	38.8
DP #45	Coil #5	62.7	47.5
	Coil #4		
DP #23	Coil #3	60.0	56.4
	Coil #2		
SP #01	Coil #1	69.4	40.7
Total			43.9

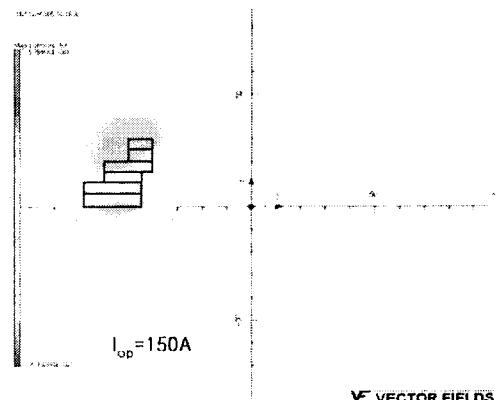


그림 4 수직자장 세기의 분포(운전전류 $I_{loo}=150\text{A}$)

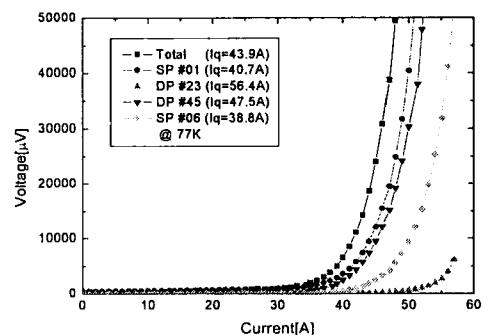


그림 5 모델코일과 각 서버 코일들의 77K에서 측정한 I-V 특성곡선.

그림 6에 전도냉각시스템을 이용하여 각 온도별로 측정한 모델 코일 전체의 I-V 특성곡선을 나타내었다. 77K에서 43.9A인 I_q 가 66K, 58K에서는 85A, 109A로 각각 증가하였다. 이 값은 SP #06 서버 코일의 I_q 값보다 높다. SP #06 서버 코일의 I-V 특성곡선을 측정하였고, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 6과 7에서 I-V 곡선은 전류가 증가함에 따라 기준선이 점차 선형적으로 증가하는데, 이것은 전압단자 사이에 초전도 코일 외에 전류도입선인 구리가 존재하기 때문이고 이 기울기 값은 구리의 저항이다. 모델 코일 전체의 길이에 비해 서버 코일 SP #06의 길이는 매우 작기 때문에 구리에서 발생하는 전압의 크기를 무시할 수 없다. 따라서, 그림 7에서와 같이 구리의 저항에 의한 발생 전압을 빼면 순순하게 초전도코일에서 발생하는 전압을 읽을 수 있고, 이것으로 구한 I_q 값은 55K에서 106A이었다.

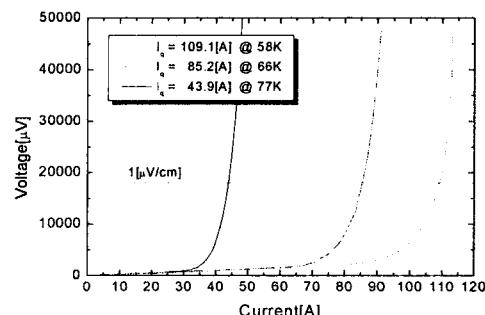


그림 6 모델 코일 전체의 I-V 특성곡선

또한 J.-T. Eriksson 등의 연구결과[5]에서 레이스트랙 형 고온초전도코일의 경우 20.4K에서의 I_q 는 77K 값의 약 4.8배이고 이 결과를 참고하면 30K에서의 전류값은 적어도 4배 이상이 됨을 예상할 수 있다. 따라서 모델 코일의 30K에서의 I_q 값은 155A로 예상되고, 이 경우 여유를 고려하여 150A를 운전전류로 예상할 수 있다.

각 서브코일 사이를 연결하는 Joint들의 I-V 특성곡선을 액체질소 속(77K)에서 측정하고 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 각 Joint의 I_q 는 역시 수직자자의 세기가 큰 Joint #56이 가장 낮았고, 약 39A이었는데 이 값은 서버 코일 SP #06과 거의 같은 값이다.

이상과 같이 모델 코일 전체에 대한 전압 발생과 각 부분에서의 전압발생을 측정하여 보았다. 운전전류는 반드시 코일 전체의 I_q 보다 작아야 하고, 각 서버 코일과 각 Joint 부분도 $1\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 넘지 않는지를 확인하여 정하여야 한다. 즉, Joule 열 발생이 한 곳에 집중되면 그 부분의 온도는 올라가고 이 때 그 부분의 임계전류 값이 이상이 되면 국부적인 펜치 발생이 된다. 냉각 열전달이 원활이 이루어 지지 않으면 도체의 온도는 계속 증가하여 결국 타버리게 된다. 그럼 9에 운전전류에 따른 Joule 열을 나타내었다. 코일 전체는 58K이고, 서버 코일의 온도는 55K이다. 측정 시 온도가 다른 이유는 직전 측정 시에 발생한 열 때문에 코일의 온도가 약간 증가하였기 때문이다. 55K에서 서버 코일 SP #06의 I_q 는 106A이고, 여유를 고려하여 100A를 운전전류로 정할 수 있다. 이 때 모델 코일 전체는 운전전류 100A일 때 약 0.65W의 Joule 열이 발생하고 이 중 0.15W가 서버 코일 SP #06에 집중된다고 추정할 수 있다.

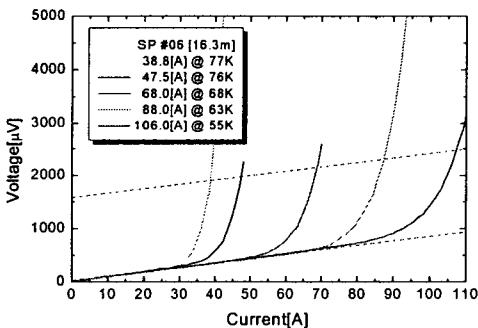


그림 7 서버 코일 SP #06의 온도에 따른 I-V 특성곡선

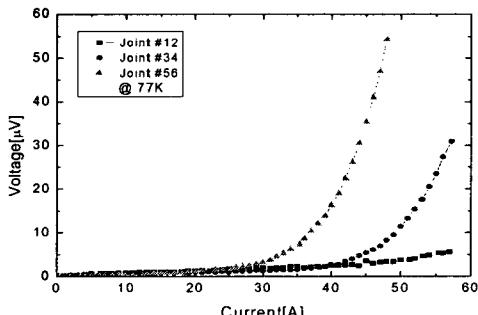


그림 8 액체질소 온도에서의 각 접합의 I-V특성 곡선.

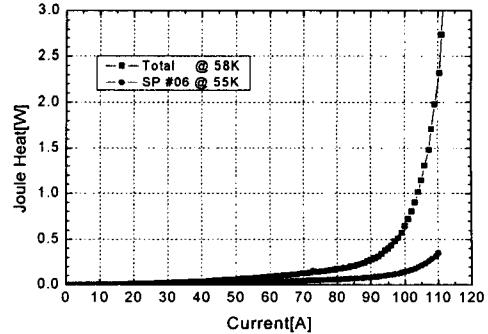


그림 9 모델 코일 전체와 서버 코일 SP #06의 운전전류에 따른 Joule 열.

3. 결 론

고온초전도 코일을 특성평가용 온도 가변형 냉각시스템을 설계·제작하였으며, 실제 모델 코일을 제작하여 I-V 특성곡선을 측정할 수 있었다. 제작한 모델 코일의 I_q 는 77K에서 43.9A이지만 상대적으로 강한 수직자장에 노출된 코일의 I_q 는 38.8A로 더 낮았다. 이 경우 운전전류는 38.8A 이하가 되어야 한다. 액체질소 속에서는 발열이 냉매로 통해 제거될 수 있지만 전도 냉각의 경우 다르다. 55K에서 가장 작은 서버 코일의 I_q 가 106A였고, 여유를 고려하면 운전전류를 100A로 정할 수 있다. 냉각온도 58K에서 운전전류가 100A일 때 모델 코일 전체에서 발생하는 Joule 열은 0.65W가 된다.

[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] M.H. Sohn, S.W. Kim, S.K. Baik, Y.S. Jo, M.G. Stae, E.Y. Lee, and Y.K. Kwon, "Joint Resistances Between Two Parallel High Tc Superconducting Tapes", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 13, No. 2, 1764-1767, 2003
- [5] 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