

100마력 고온초전도 모터 제작과 평가(II)

손명환\*, 백승규\*, 이연용\*, 권영길\*, 권운식\*, 문태선\*\*, 박희주\*\*, 김영춘\*\*, 조창호\*\*  
 \* 한국전기연구원 초전도응용연구그룹, \*\* 두산중공업(주) 기술연구원

Fabrication and test of 100 hp High Tc Superconducting Motor

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

\*Korea Electrotechnology Research Institute, \*\*Doosan Heavy Industries & Construction Co.

**Abstract** - For the first time in Korea, a 100hp high Tc superconducting(HTS) motor has been designed, developed and successfully tested recently. The design was based on 2-dimensional electromagnetic field analysis of cylindrical coordinate. The field winding of rotor was wound with Bi-2223 tapes and tested after assembled with other rotor components. The stator had air-gap type armature windings which allow higher terminal voltage and more sinusoidal voltage waveform than conventional iron cored machines. Steady state open & short-circuit test and resistive load test were conducted also in generator mode. The fabrication and test results of this machine were discussed in this paper.

로 나타내었다.

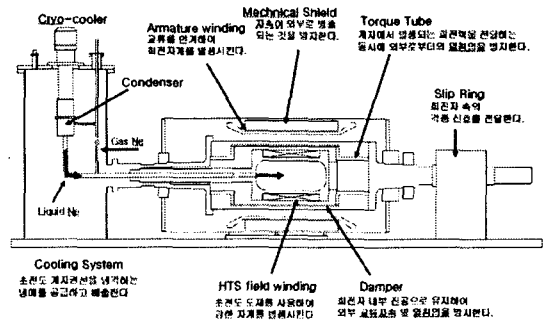


그림 1. 고온초전도 모터의 구조

1. 서 론

초전도 모터의 산업적 활용 가능성은 BSCCO와 같은 고온초전도 장선 도체가 개발되면서 대두되었다. 고온초전도 선재를 사용하면 저온초전도 선재를 이용할 때보다 훨씬 더 초전도 코일의 동작온도를 높일 수 있으므로 요구되는 냉동기의 크기와 용량이 액체헬륨을 사용할 때와 비교할 수 없을 정도로 작아져 100마력 정도의 모터에서도 기존기에 대해 경쟁력을 가질 것으로 보고 있다 [1-2]. 따라서 일부 선진국에서는 수천~수만 마력급의 선박추진용 모터를 초전도 기기로 대체하려고 하고 있다.

또한, 현재 미국에서 개발 완료한 5000마력급의 고온초전도 동기모터의 경우에 기기의 중량과 크기, 효율면에서 모두 기존의 유도전동기보다 우수한 성능을 나타내었다[3]. 그러므로 향후 대량 생산체제 도입으로 기기의 가격 경쟁력만 확보된다면 상업화될 가능성이 상당히 높다고 할 수 있다.

우리나라에서도 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 지원을 받아 상용화급 산업용 고온초전도 모터 시스템 개발을 시도하고 있으며, 본 논문은 1단계 시제품으로 최근 국내에서 개발한 100마력 고온초전도 모터 제작과 지금까지의 특성평가 결과에 관한 것이다.

2. 고온초전도 모터의 구조

2.1 개략적인 구조

고온초전도 모터는 구리선대신에 고온초전도도체를 사용하여 계자코일을 만들었기 때문에 냉매를 사용하여 계자코일을 초전도상태로 만드는 냉각구조를 가지고 있다. 냉매는 운전온도에 따라 헬륨, 네온, 질소, 공기 등을 액화하여 사용할 수 있다. 초전도 상태로 냉각된 계자를 계속 극저온으로 유지하기 위해서 외부로부터의 열침입을 최소로 하는 고진공단열 구조가 필수적이다. 그림 1에 개발한 100마력 고온초전도 모터의 구조를 개략적으로

2.2 회전자의 냉각구조

본 연구에서의 운전 온도범위는 30~35K이고 냉매는 GM 냉동기로 액화한 네온을 사용하였다. 그림 1에서처럼 냉동기의 콜드헤드(cold head)에 부착된 용축기에서 액화된 네온은 계자코일을 고정하고 있는 샤프트의 내부로 이동되어 계자 및 샤프트를 냉각시키면서 기체 상태로 된다. 이 기화된 네온은 회전자 외부로 배출되어 다시 용축기에서 액체로 된다. 이 경우 회전자 내부는 외부로부터 회전자 내부로 열침입이 적도록 하기 위해서는 고진공 단열 상태를 유지하는데, 네온 액화 시스템은 정지해 있고 회전자는 1800rpm으로 회전하기 때문에 특별한 결합장치가 요구된다. 본 모터에서는 자성유체를 사용한 페로실을 이용하여 결합구조를 만들었다. 이 페로실의 정상 작동온도 범위는 0~80℃ 사이이다.

3. 고온초전도 모터의 제작

본 절에서는 각 부분에 대한 제작방법과 실험결과에 대해 설명하고자 한다.

3.1 계자

초전도모터의 계자코일의 서버코일들은 레이스트랙형 더블팬케이크 코일로 권선된다. 계자코일 한국은 4개의 더블팬케이크 코일로 구성되고, 총 권선 턴수는 500턴이다. 100마력급 고온초전도모터에 사용할 팬케이크 코일을 AMSC사의 고강도 Bi-2223 도체를 사용하여 표 1에 나타난 턴수에 접합의 여유를 고려하여 제작하였으며 제작한 각 팬케이크 코일을 그림 2 (a)에 나타내었다. 도체의 두께가 도체마다 달라서 각 코일의 턴수도 약간씩 차이가 있다. 테이프 사이의 절연은 Nomex paper type 400을 사용하고 층간 절연은 GFRP 천을 사용하였으며 wet winding method를 사용하였다.

계자는 액체네온을 이용한 전도로 냉각되기 때문에 코일의 효과적인 냉각을 위해 액체네온이 증발하는 기화기

(evaporator)가 내부에 설치된 주구조물에 보빈이 붙어 있는 보빈일체형 샤프트를 설계하게 되었다. 그림 2 (b)와 (c)에는 제작된 보빈일체형 샤프트와 코일들이 부착된 계자권선 전체를 나타낸다.

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

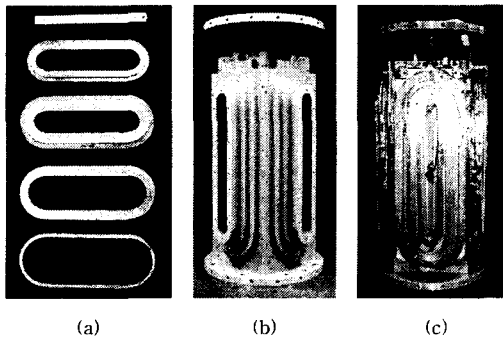


그림 2 제작한 더블팬케이크 코일들(a)과 보빈일체형 샤프트(b) 그리고 코일들이 부착된 계자권선 전체(c)

### 3.2 다중 원통 회전자

계자를 포함한 회전자는 다중 원통형 구조를 가진다. 계자 바깥쪽에는 외부의 교란 자장을 차폐하고 복사열도 차단하는 역할을 하는 댐퍼가 설치된다. 댐퍼의 재료는 전기전도도가 높을수록 좋는데 알루미늄 합금을 사용하였다. 물론 복사열 차단을 하기 위해 댐퍼의 바깥쪽에는 super-insulation 처리를 하였다.

전기자에서 발생하는 시변자장과 계자에서 발생하는 직류 자장이 만들어 내는 회전력을 샤프트에 전달하기 위해서는 계자와 샤프트 사이에 토크튜브가 존재한다. 이 토크튜브를 따라 외부의 열이 회전자 내부로 침입할 수 있기 때문에 기계적 강도를 견디는 동시에 열전도가 좋지 않은 재료를 선택하는데 본 연구에서는 GFRP 튜브를 사용하였다.

각종 온도센서, 자장 감지용 홀센서 등에서 나오는 신호선을 처리하고 최외각 회전자 용기를 조립하였다.

또한 발란싱을 댐퍼와 토크튜브를 연전한 후와 회전자 조립이 끝난 후 2회에 걸쳐 실시하였다. 터보발전기 회전자의 발란싱 조건 G2.5를 충분히 만족 시켰다.

### 3.3 고정자

고정자는 전기자와 기계실드 두 부분으로 나누어진다. 초전도 모터의 경우 전기자는 코일을 지지하는 슬롯부의 지지체가 철이 아닌 비자성체를 사용하기 때문에 공심형이다. 본 연구에서는 고정자 코일의 지지 슬롯부는 전기 절연물로서 그 특성이 양호한 두께 5[mm]의 GFRP 적층판을 이용하였다. 고정자에서 발생하는 열을 효과적으로 기기 밖으로 배출시키기 위해서 GFRP 슬롯부에 축 방향으로 공기 duct를 폭 5[mm]으로 하여 총 27개를 두었다. GFRP 슬롯부는 두께 10[mm]로 28개가 배치되도록 하였다.

그림 3에 고정자 슬롯부의 횡단면을 나타내었는데, 전기자코일 도체는 직경 1.6[mm]의 소선을 16가닥으로 하

였다. 이 때 도체의 전류밀도는 3.7[A/mm<sup>2</sup>]가 되며, 이는 기존의 회전축에 팬(Fan)이 달리는 공랭식 발전기에서의 안정적 전류밀도인 6[A/mm<sup>2</sup>]보다도 작은 값이다. 기계실드에 사용되는 규소강판은 두께 0.5[mm]인 S-23을 사용하였다.

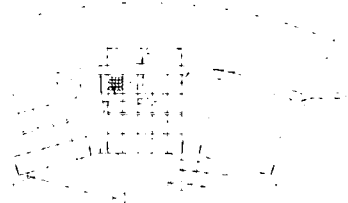


그림 3 고정자 슬롯부의 횡단면

### 3.4 조립 및 설치

각기 제작된 부분품들을 대략 다음과 같은 순서로 조립하였다.

- ① 베드(방진판 8개) 설치 → ② 계자코일 및 샤프트 → ③ 댐퍼 및 토오크 튜브(슈퍼 인슐레이션 포함) → ④ 발란싱(I) → ⑤ 전류도입선, 진공조 및 양쪽 샤프트 → ⑥ 발란싱(II) → ⑦ 고정자(전기자코일) → ⑧ 슬립링 및 지지 베어링 → ⑨ 페로실 → ⑩ 냉각시스템 → ⑪ 신호선 처리, 진공배기 및 구동장치 연결

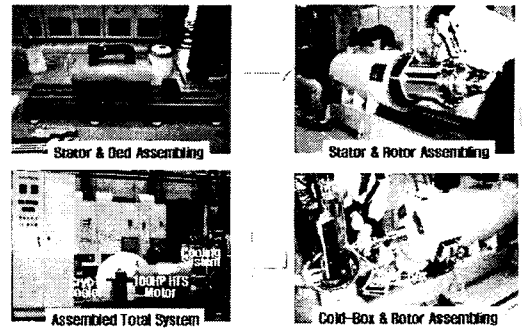


그림 4 100마력 고온초전도 모터 조립 과정

## 4. 특성 평가 및 결과

### 4.1 계자코일의 특성

최종 조립된 계자의 Ic는 77K 차폐자장에서 약 41A 이었고, 30K으로 냉각한 후 계자에 120A까지 인가하여 안정적인 것을 확인할 수 있었다. 이 값은 100마력 고온초전도 모터를 설계할 때 계자의 운전전류 값으로 입력한 것보다 높다. 계자권선이 냉매에 잠긴 경우와는 달리 전도냉각이기 때문에 서버 코일 들 사이의 접합, 각 계자코일들 사이의 접합들에서 접합저항에 의한 Joule 열 발생을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 모터가 조립된 후에는 Ic 측정은 하지 않았다.

### 4.2 냉각 특성

회전자의 냉각은 GM 냉동기로 액화한 액체네온을 이용하였다. 냉동기의 쿨드헤드의 온도를 네온의 액체온도 범위인 25~27K이 유지되도록 히터를 사용하였다. 냉동기 동작 30분이 지나 쿨드헤드는 이 온도에 도달하였고, 계자코일이 30K에 도달하는 데는 총 66시간이 경과하였다. 계자코일의 온도가 안정된 후 토크튜브의 온도도 약 260K을 유지하였다. 이 때 계자에는 120A를 안정적으로 흘릴 수 있었다.

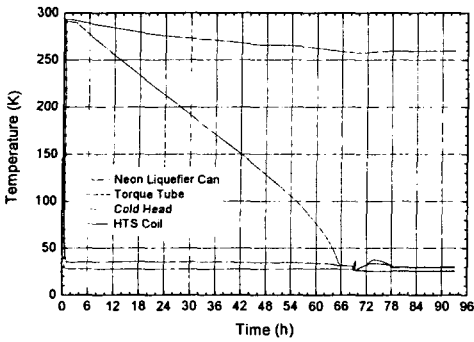


그림 5 100마력 고온초전도 모터의 냉각특성 곡선

### 4.3 전기적 특성

#### 4.3.1 무부하 특성

개발한 100마력 고온초전도 모터를 무부하에서 V 특성 곡선 시험을 하고 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 역률이 1이 되는 계자의 전류는 약 93A이었다.

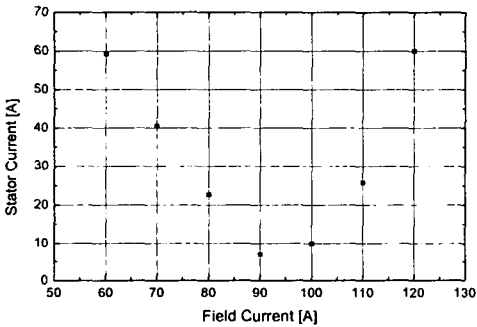


그림 6 100마력 고온초전도 모터의 V-특성 곡선

다이나모미터(Dynamometer)의 동축에 연결된 유도 전동기를 정격속도인 1800[rpm]으로 회전시키는 발전기 운전모드에서 고정자 단자를 개방시킨 상태에서 계자 코일의 전류를 변화시키면서 전기자의 전압을 측정하였다. 또 고정자 단자를 단락시킨 상태에서 계자코일의 전류에 따른 전기자의 전류값을 측정하였다. 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

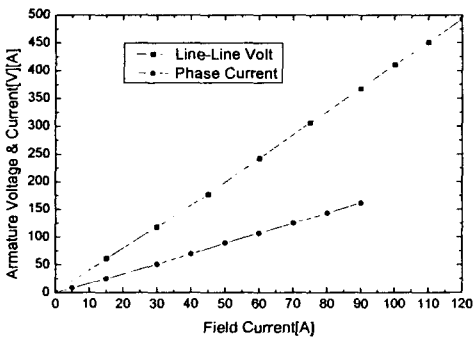


그림 7 개방 및 단락 회로 특성 곡선

#### 4.3.2 부하 특성

발전기 모드에서 고정자 단자에 연결된 저항부하를 가변시키면서 기기의 입력과 출력을 측정하여 효율을 계산하였다. 기존의 발전기나 전동기는 부하의 증감에 따라서 기기의 효율이 크게 변동하지만, 공심형의 초전도모터는 그림 9와 같이 부하의 크기에 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다.

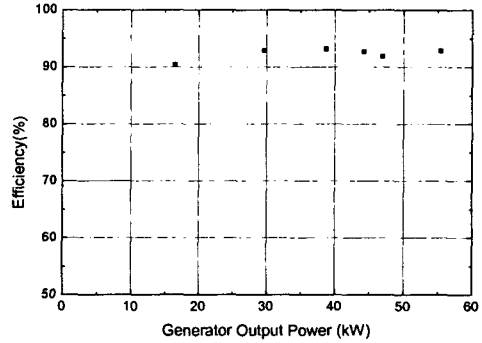


그림 8 발전기 모드에서의 출력에 대한 효율

## 5. 결 론

100마력 고온초전도 모터를 설계 제작하고 성능평가를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 내온을 액화하여 회전자 내부에 주입하여 계자코일을 30K로 냉각하는데 성공하였으며, 퀵치발생 없이 120A까지 인가할 수 있었고, 운전전류 100A, 무부하에서 1800rpm으로 구동할 수 있었다.
2. 무부하상태에서 V-곡선을 측정할 수 있었으며, 역률이 1이 되는 계자의 전류는 약 93A이었다.
3. 부하시험은 발전기 모드에서 행하였는데, 효율은 약 93% 정도이었다.

본 연구는 현재 계속 진행 중이며, 100마력 고온초전도 모터의 설계, 제작 및 성능평가 기술들은 향후 개발하고자 하는 수 MW급 고온초전도 모터 개발에 가치 있는 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

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

### [참 고 문 헌]

- [1] [http://www.eere.energy.gov/superconductivity/pdfs/supercon\\_products.pdf](http://www.eere.energy.gov/superconductivity/pdfs/supercon_products.pdf), "Selected High-Temperature Superconducting Electric Power Products- UNLEASHING HTS HORSEPOWER"
- [2] D. Driscoll, V. Dombrovski, B. Zhang, "Development Status of Superconducting Motors", IEEE Power Engineering Review, Vol. 20, No. 5, 12 15, 2000
- [3] D. Madura, M. Richardson, D. Bushko, G. Snitchler, P. Winn, S. Kalsi, and B. Gamble, "Test Results of a 5000HP HTS Motor", presented at the 2002 Applied Superconductivity Conference August 2002, Houston, Texas