

1 MJ SMES 마그네트 제작 및 특성시험

성기철*, 김해종*, 조전욱*, 이언용*, 권영길*, 류강식*, 류 경우**, 김봉태***, 유인근***
 *한국전기연구원, **전남대학교, ***창원대학교

Test and Fabrication of the 1 MJ Superconducting Magnet for a Superconducting Magnetic Energy Storage System

K.C. Seong*, H.J. Kim*, J.W. Cho*, E.Y. Lee*, Y.K. Kwon*, K.S. Ryu*, K. Ryu**,
 B.T. Kim***, I.K. Yu***
 KERI*, Chonnam National Univ.***, Changwon National Univ.***

koseong@keri.re.kr

Abstract - For the development of a SMES system we fabricated and tested the 1 MJ superconducting magnet. The test results show that the magnet is excellent in comparison with previously fabricated magnets outside. The recovery current of the conductor plays an important role in the fabrication of the stable magnets for a SMES system.

1. 서 론

최근 수 MJ급의 저장용량을 가진 SMES시스템이 개발되어 상용화되고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 시스템의 개발에서 중추적 기능을 하는 초전도 마그네트를 설계·제작하여 그 퀘치 특성을 평가하였으며, 평가 결과를 기존에 제작된 동일 기능의 마그네트와 비교·분석을 하였다.

2. 제작 및 특성시험

2.1 제작

마그네트 제작에 사용된 대 전류용량 초전도도체에 대한 단면을 그림1에 나타내었고, 초전도선재 및 대 전류용량 초전도도체에 대한 중요 사양을 표1에 나타내었으며, 동시에 본 연구의 전 단계에서 개발된 SMES용 마그네트 설계코드를 이용해 설계된 1 MJ 마그네트에 대한 상세 사양을 표1에 나타내었다[1].

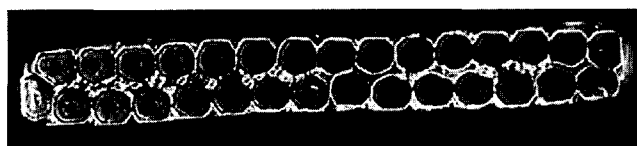


Fig.1. Cross-section of the conductor.

Table 1. Parameters of wire, conductor and magnet

Wire	NbTi/CuNi/Cu ratio	1/0/1.8
	Diameter	0.65 mm
	Filament diameter	6 μ m
	Filament twist pitch	13 mm
	RRR	50
Conductor	No. of wires	30
	Dimension	1.25 mm \times 10.2 mm
	Wire transposition pitch	55 mm
	Insulator (Kapton)	25 μ m \times 10 mm
Magnet	Inner diameter	535 mm
	Outer diameter	749 mm
	Length	512 mm
	Total number of turns	2400
	Inductance	2.48 H
	Nominal current at B_{max}	900 A at 3.9 T
Stored energy	1 MJ	

2.2 특성시험

초전도마그네트의 성능을 평가하기 위해 사용된 시험장치의 구성도는 그림2와 같다. 초전도마그네트에 퀘치가 발생할 때 외부전원(PS)으로부터 마그네트에 공급되는 전류를 차단하여 주지 않으면 발생된 상전도부가 마그네트 전체로 전파되어 다량의 액체헬륨을 증발시킬 뿐만 아니라

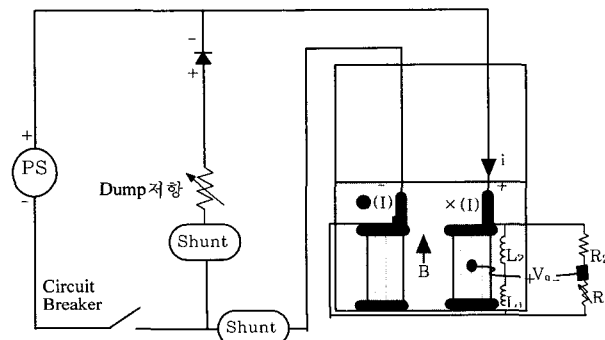


Fig.2. Schematic arrangement of the test apparatus.

마그네트를 손상시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 먼저 마그네트의 퀘치를 검출할 수 있는 장치가 필요하며, 퀘치 검출방식으로는 일반적으로 사용되고 있는 브리지방식을 사용하였으며, 특히 동일한 퀘치검출 감도를 유지하기 위하여 중간 전압탭의 위치를 파악하기 위하여 개발된 설계코드를 사용하여 동일한 인덕턴스가 되도록 정하였다[2]. 그리고, 상기의 퀘치검출기를 이용하여 마그네트의 특성시험 시 퀘치가 검출되면 마그네트의 최대 온도상승 및 액체헬륨의 증발량을 작게 하기 위해서는 가능한 한 마그네트의 전류를 빨리 영이 되도록 해야한다. 이를 위해서는 퀘치검출기로부터 마그네트의 퀘치가 검출되는 즉시 그림2의 차단기를 동작시켜 마그네트를 외부전원으로부터 분리시킴과 동시에 덤프저항을 통하여 마그네트에 축적된 자계에너지를 주울 열로 방출시켜야한다. 이 때 덤프저항을 크게 할수록 마그네트의 전류는 급격히 작아짐으로 최대 온도상승 및 액체헬륨 증발량은 작아지지만 마그네트의 전기절연에 손상이 발생할 수 있기 때문에 마그네트의 전기절연 한계 내에서 덤프저항을 적절히 조정해야한다.

외부전원은 5000 A, ± 50 V를 사용하였고, 표1의 1 MJ 마그네트의 정격전류를 고려하여 전류 측정용 shunt, 덤프저항과 직렬로 연결된 다이오드 및 차단기의 용량은 3000 A로 하였다. 또한 표1에서 마그네트의 인덕턴스가 약 2.5 H, 액체헬륨 냉각 마그네트에서 일반적으로 잘 알려진 절연내력이 3 kV임을 고려하면 1 MJ 마그네트 특성시험에는 시정수가 약 1초 정도가 적당하다. 이를 위해서는 2.5 Ω 인 덤프저항이 요구되지만, 마그네트의 정격전류정도의 대전류를 수초간 안전하게 흘릴 수 있는 현재 보유하고 있는 덤프저항의 최대치가 0.5 Ω 으로, 이를 사용하면 최대 덤프저항에서 마그네트와 덤프저항으로 구성되는 회로의 시정수는 약 5초 정도로 다소 긴 것을 알 수 있고, 실제 1 MJ 마그네트의 퀘치시험 시 초전도도체의 회복전류부근의 전류에서 마그네트가 퀘치 될 때는 액체헬륨의 증발량이 거의 없는 반면 training효과에 의해 퀘치 전류가 증가함에 따라 시정수(5 초)가 너무 큰 결과 액체헬륨의 증발량이 현저히 증가하는 것이 관찰되었다.

1 MJ 마그네트의 직류 퀘치시험에서는 마그네트의 전류상승률을 4 A/s(20 mT/s)로 대단히 천천히 충전하였다. 또한 마그네트 퀘치시험 시 퀘치검출기의 전압을 분석한 결과 뚜렷한 전압스파이크가 마그네트를 충전하는 중 주기적으로 관찰되었으며, 이는 일반적으로 초전도 마그네트를 불안정하게 만드는 주요 원인으로 알려진 초전도선의 운동(wire motion)이 충전 중에 발생되고 있음을 의미한다.

3. 시험 결과 및 고찰

그림3에는 SMES용 마그네트 설계 코드부터

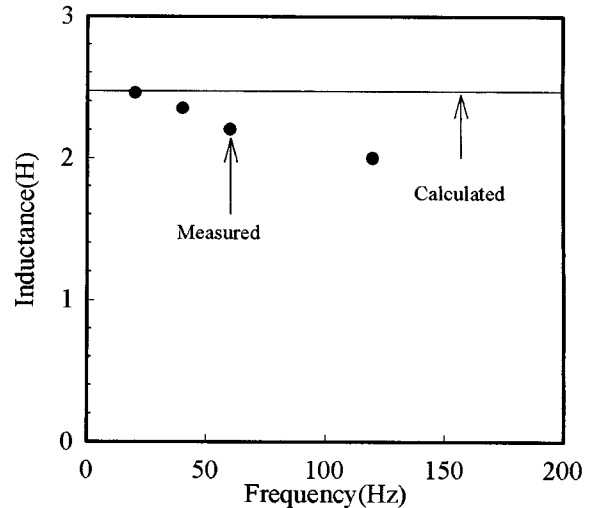


Fig.3. Inductance vs. frequency of the 1 MJ magnet.

터 1 MJ 마그네트에 대하여 계산된 인덕턴스와 발전기 주파수가 20 Hz - 1 MHz인 LCR미터로 측정된 인덕턴스를 나타내었다. 그림3에서 인덕턴스 측정은 SMES용 마그네트의 운전모드가 거의 직류에 가까운 점을 고려하여 LCR미터의 최소 발전기 주파수인 20 Hz에서부터 측정하였다.

그림3의 결과로부터 일반적인 인덕턴스의 주파수 의존성과 같이 발전기 주파수가 감소함에 따라 인덕턴스는 증가하여 최소 발전기 주파수에서는 계산된 인덕턴스와 측정치가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림4에는 1 MJ 마그네트에 대해 직류 퀘치 특성시험을 한 결과를 나타내었다. 그림4에서 점선은 마그네트 운전전류 및 SMES용 마그네트 설계 코드로부터 계산된 마그네트의 최대 자계관계를 나타낸 부하선(load line)을, ●는 퀘치 특성시험으로부터 측정된 1 MJ 마그네트의 퀘치 전류를, ()안의 숫자는 마그네트에 저장된 자계에너지를 각각 나타낸다.

그림4의 결과에서 1 MJ 마그네트의 퀘치는 표1의 정격운전전류(900 A)보다 약 40 %가 높은 1250 A에서 최초로 발생하였으며, 퀘치시험 회수를 증가시킴에 따라 권선장력이 작은 마그네트에서 일반적으로 나타나는 training효과에 의해 퀘치전류가 증가하였으며 수회의 training에도 불구하고 정격운전전류보다 65 %가 높은 약 1500 A까지 도달하였다.

그림5에는 본 연구에서 설계·제작되어 평가된 1 MJ 마그네트의 성능을 비교·분석하기 위하여 현재까지 제작·평가된 몇몇 SMES용 마그네트의 운전전류밀도를 1 MJ 마그네트에 대한 결과와 함께 나타내었다. 그림5에서 Hitach(4MJ)은 일본 히타치에서 제작한 에너지저장용량이 4 MJ인 마그네트의 정격운전 전류밀도를, ETL(3MJ)은 일본 전자총합연구소에서 제작한 3 MJ인 마그네트의 정격운전 전류밀도를,

Kyushu(0.6MJ)은 일본 규슈전력에서 제작한 0.6 MJ인 마그네트의 정격운전 전류밀도를, Jungbu(1MJ)은 일본 중부전력에서 제작한 1 MJ의 마그네트의 정격운전 전류밀도를, Russia (0.5MJ)은 러시아에서 제작된 0.5 MJ인 마그네트의 정격운전 전류밀도를, 그리고 KERI (1MJ) 및 KERI(1MJ, first quench)는 본 연구에서 제작·평가된 1 MJ 마그네트의 정격운전 전류밀도 및 최초 켄치 전류밀도를 각각 나타내고, 마지막으로 실선은 표1의 초전도선을 절연물(Kapton)로 절연한 상태에서 측정된 회복전류 나타내고 있다(3). 또한 그림5에서 히타치 4MJ과 ETL 3 MJ 마그네트의 권선 구조는 팬케이크형인 반면 그 외의 모든 마그네트는 본 연구의 1 MJ 마그네트의 권선 구조인 솔레노이드형이다.

그림5의 결과로부터 SMES용 마그네트에서 팬케이크형 권선 구조가 솔레노이드형보다 운전 전류밀도가 높은 것을 볼 수 있고, 이는 팬케이크형 권선 구조에서는 층간뿐만 아니라 턴간에도 냉각채널을 확보할 수 있는 구조적 특징 때문에 동일한 크기의 초전도선의 운동 등에 의한 외란에 대하여 초전도도체의 안정성이 향상된 결과로 사려된다. 그리고 동일한 솔레노이드형으로 제작된 Kyushu(0.6MJ), Russia(0.5MJ) 및 Jungbu(1MJ)의 경우보다 본 연구에서 제작된 1 MJ 마그네트의 정격운전 전류밀도가 약 20% 정도 높은 것을 볼 수 있고, 이는 본 연구에서 제작된 마그네트가 외국의 제작 사례와 비교하여 성능이 우수함을 의미한다. 또한 1 MJ 마그네트는 마그네트 제작에 사용된 초전도선의 회복전류보다 다소 큰 전류에서 최초로 켄치가 발생하였으며, 이는 SMES용 마그네트처럼 직경이 크고 대 전류인 마그네트의 설계·제작에서 마그네트에 사용될 초전도도체의 회복전류가 중요한 설계 데이터로 됨을 알 수 있다.

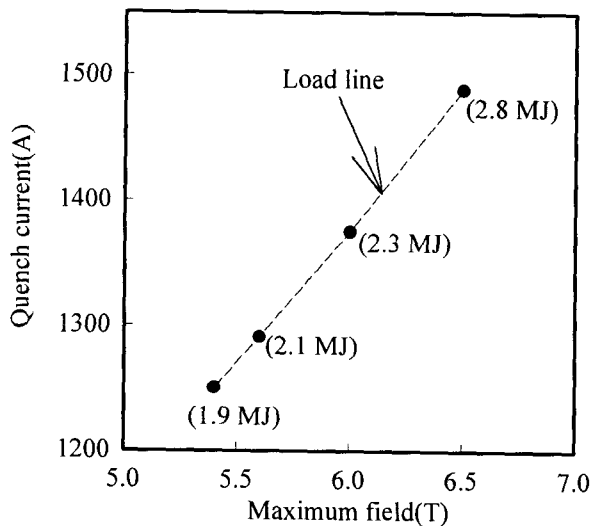


Fig.4. Quench current vs. magnetic field of the 1 MJ magnet.

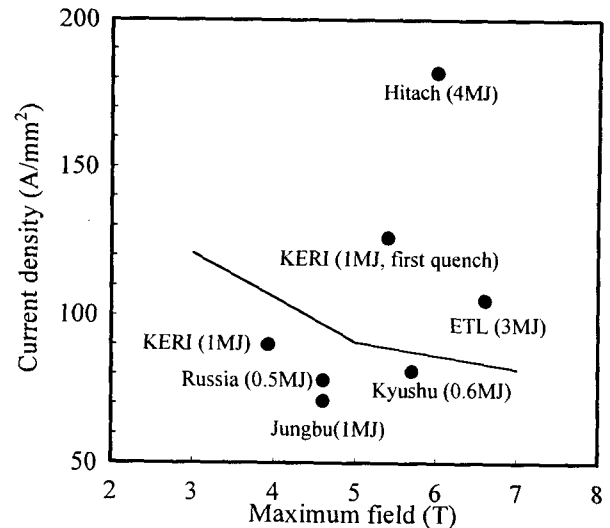


Fig.5. Current density vs. maximum magnetic field of the 1 MJ magnet for the comparison of other SMES magnets.

4. 결론

본 연구에서 제작된 1 MJ SMES용 마그네트에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제작된 1 MJ SMES용 마그네트는 외국사례와 비교하여 그 성능이 우수하였다.
- 2) 대형 및 대 전류용량 초전도 마그네트를 설계·제작하는데는 초전도도체의 회복전류가 중요한 역할을 한다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었다.

[참고 문헌]

- [1] K. Ryu, H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, E.Y. Lee, H.B. Jin, and K.S. Ryu, "Test results of the small model coil for a small-sized superconducting magnetic energy storage device," *IEEE Trans. Magn.*, vol.35, pp.4103 - 4105, 1999.
- [2] 류경우, 김해중, 성기철, 류강식, "0.7 MJ μ SMES코일 제작을 위한 소형 초전도코일의 특성," *전기학회논문지*, 48B권, 1호, pp.13 - 18, 1999.
- [3] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, " μ SMES용 초전도도체의 회복전류 특성," 2000년도대한전기학회학술대회논문집, pp.807 - 809, 2000.