

3MJ급 SMES용 HTS 전류리드부의 제작 및 성능평가

심기덕, 조전욱, 김해중, 배준한, 김해준, 성기철
한국전기연구원

Fabrication and Performance test of HTS current lead part of 3MJ SMES

K.D. Sim, J.W. Cho, H.J. Kim, J.H. Bae, H.J. Kim, K.C. Seong
Korea Electrotechnology Research Institute

skedy@keri.re.kr

Abstract - A 3MJ class SMES was fabricated last year. And 1000A class current part for the SMES also was designed, fabricated and tested. The current lead was made of metal part(brass) and HTS lead part. The lead is located in vacuum vessel and cooled down to belows the HTS lead's operating temperature. We made three types of current lead part and tested their performance. In this paper, the basic and conceptual type of current lead will be introduced. The lead was expected to have 1000A current capacity. But the test results was only 480A. After this test, based on the results, we revised the shape of the lead and improved the connectivity between cryocooler and lead. In this paper, the design procedure and the results of performance test will be introduced.

1. 서 론

최근 들어 헬륨재응축방식의 저온초전도 마그네트 제품들이 선을 보이고 있으며, 본 논문에서 소개되는 3MJ급 SMES 역시 헬륨재응축형의 저온용기를 채택하고 있다. 헬륨재응축형 저온용기 기술의 핵심은 헬륨조로 침투하는 전체적인 열침입을 시스템에 설치된 재응축 냉동기의 용량 이내로 최소화하는 것이다. 특히 3MJ급 SMES와 같이 1000A 이상의 고전류를 상시 통전하는 시스템의 경우 열침입의 대부분을 차지하는 전류리드 부분에서의 열침입 및 joule heating을 최소화함과 동시에 극저온냉동기를 사용하여 침입열을 효과적으로 제거하는 것이 기술의 관건이라 할 수 있다. 본 3MJ급 SMES에는 Brass 전류리드와 HTS 전류리드를 series로 연결한 hybrid형 전류리드가 사용되었으며, 이를 진공조에 위치시켜 강제 전도냉각 방식으로 침입열을 제거하는 구조가 적용되었다. 본 논문에서는 3MJ급 SMES용 1000A급 전류리드의 설계와 제작 그리고 성능평가에 대해 다루었다.

2. 본 론

2.1 전류리드부의 설계

2.1.1 설계 조건

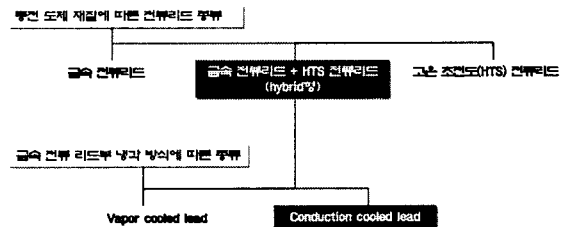


Fig.1. Selection of current lead type

전류리드부의 형태는 그것이 적용될 시스템의 형태 및 운전방법에 따라 결정된다. 액체헬륨 재응축형의 저온용기를 채택하고 있는 시스템에서는 액체헬륨의 증발이 없으므로 conduction cooled 방식이 채택되는 것이 일반적이며, 동시에 열침입량을 최소화할 수 있는 hybrid형의 전류리드가 적합하다.

3MJ급 SMES의 운전에 적합한 전류리드가 가져야할 조건을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 1000A 연속 통전시, HTS 전류리드 상부(warm part)의 온도가 HTS의 최대 운전온도를 넘지 않을 것
- 2) 1000A 연속 통전시, 전류리드를 통한 열침입량이 시스템의 잉여재응축 용량을 넘지 않을 것

2.1.2 Metal lead부의 설계

금속재료로 이루어진 전류도입선의 열유동 변화는 위의 그림?에 나타난 것처럼 발생된 열에 의해 지배를 받는다. 미소검사 체적에서 에너지 균형식을 적용하면 $dQ = -dQ_{gen}$ 로 (gen=joule heating) 표현되고

$$Q_{gen} = I^2 R = I^2 \rho (L/A) \quad \text{과} \quad Q = -kA (dT/dL)$$

을 조합하면 $dQ_{gen} = \frac{\rho k I^2}{Q} dT$ 로 표현할 수 있다.

2.1.2 Metal lead부의 설계

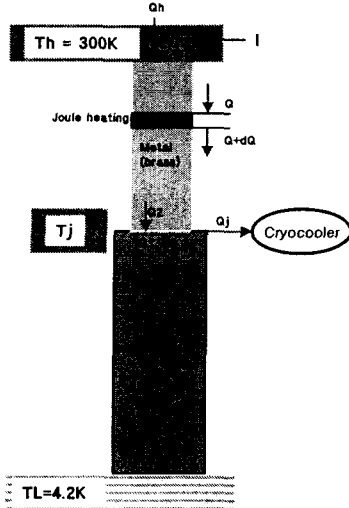


Fig. 2. Concept of heat flow of current lead

위 식의 양변에 Q 를 곱하고 이중전류도입선의 금속부에 대해 적분한 후 Q_2 에 대해 정리하면

$$Q_2 = \sqrt{Q_H^2 + 2I^2 \int_{T_j}^{T_h} \rho k \cdot dT}$$

로 표현된다. Q_2 가 최소가 되기 위해서는 Q_H 가 0이 되어야 한다. 이때 금속부와 초전도 lead에서의 최소 열유동은

$$(Q_2)_{\min} = I \cdot \sqrt{2 \int_T^{T_h} \rho(\tau) k(\tau) \cdot d\tau}$$

로 얻어진다. 여기에 fourier 1차원 열전달 방정식을 적용하면, 초전도 전류리드로의 열침입을 최소화 하는 금속전류리드부의 길이대 단면적의 비를 아래 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{L}{A}\right)_{\text{opt}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot I} \int_{T_j}^{T_h} \frac{k(\tau)}{\sqrt{\int_T^{T_h} \rho(\tau) k(\tau) \cdot d\tau}}$$

만약 전기전도와 열전도도를 상수로 가정할 경우

$$(Q_2)_{\min} = I \cdot \sqrt{2\rho k(T_H - T_j)}$$

$$\left(\frac{L}{A}\right)_{\text{opt}} = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{2k}{\rho}} (T_H - T_j)$$

로 식을 간단히 할 수 있다. 또한,

$$\rho(T) \cdot k(T) = L_0 T \quad \text{where, } L_0 = 2.45 \times 10^{-8} [\text{W}\Omega/\text{K}^2]$$

이라는 Weidemann-Franz의 법칙을 사용하면,

$$(Q_2)_{\min} = I \cdot \sqrt{L_0(T_H^2 - T_j^2)}$$

$$\left(\frac{L}{A}\right)_{\text{opt}} = \frac{1}{I} \int_{T_j}^{T_h} \frac{k}{\sqrt{L_0(T_H^2 - T_j^2)}} dT$$

로 나타낼 수도 있다

Metal lead부는 brass로 제작되며, 300K에서 80K block에 이르는 구간과 80K block에 20K block(HTS lead 상단)에 이르는 두 부분으로 구성된다. 이는 두개의 stage를 가진 냉동기를 이용하여 metal lead부를 중간 냉각함으로써 냉각 효율을 높이기 위한 것이다.

Metal lead 부의 최적형상과 이때의 최소 열유동량은 table. 1과 같다.

Table 1. Optimized shapes of metal current lead

	상부 metal lead	하부 metal lead
단면적	3.1 cm ²	1.95 cm ²
길이	250 mm	50 mm
상부온도	300 K	80 K
하부온도	80 K	20 K

2.2 전류리드부의 제작

설계 결과를 바탕으로 전류리드부를 제작하였다. 제작에 사용된 HTS 전류리드와 극저온 냉동기의 사양을 table 2에 정리하였다. 그리고, Fig 3은 제작된 전류리드부의 개략도이다.

Table 2. Specifications of HTS-lead & Cryocooler

	HTS 전류리드	냉동기 1	냉동기 2
제조사	AMSC	CTI	SUMITOMO
모델명	CS100030 (modified)	CTI1050	400B
용량	통전전류 : 1200A @ 64K 열침입량 : 0.45W/pair (cold part = 4.2K)	1st stage : 65W @ 80K 2nd stage : 7 W @ 20K	200W @ 80K (only one stage)

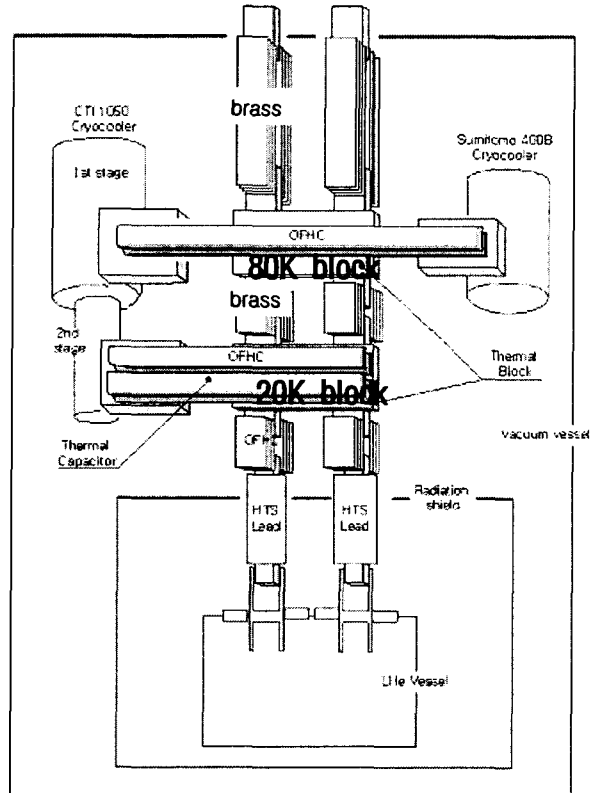


Fig. 3. Current lead part & its cooling part

냉동기와 전류리드간의 열접촉이 불충분할 것을 고려하여, 열유동량의 최소치를 두 배 이상 상회하도록 냉동기 용량이 결정되었다.

냉동기와 전류리드간의 열적결합을 위한 금구들은 모두 OFHC로 제작되었으며, lead의 전기적

절연에는 극저온에서 열전달특성이 뛰어난 것으로 알려진 AlN(aluminium nitride)을 사용하였다. 열수축에 의한 응력을 완충하고, 동시에 조립을 용이하게 하기 위해서, 냉동기와 전류리드간의 열전달 경로는 0.2mm 두께의 OFHC sheet를 적층하여 구성하였다.

2.3 전류리드부의 성능시험

2.3.1 통전시 냉각특성

특성평가를 위해 test용 저온용기가 제작되었으며, 전류리드의 양쪽 하단을 NbTi 초전도 선재를 사용하여 헬륨조 속에서 전기적으로 short 시킨 상태에서 특성평가가 이루어졌다.

아래 Fig. 4는 500A까지 0.1A/sec로 서서히 전류를 증가시키면서 전류리드 각 부분의 온도를 측정할 결과이다. 500A 이상의 전류에서는 HTS 상단의 온도가 급격히 증가하기 시작했으며, table 3에서 보는 바와 같이 800A 통전 시에 전류리드 상단의 온도는 53.3K에 이르렀다. 1000A의 전류에서는 HTS 전류리드의 운전가능 온도인 64K을 상회하여 소손될 위험이 있어, 실험을 더 이상 수행하지 않았다.

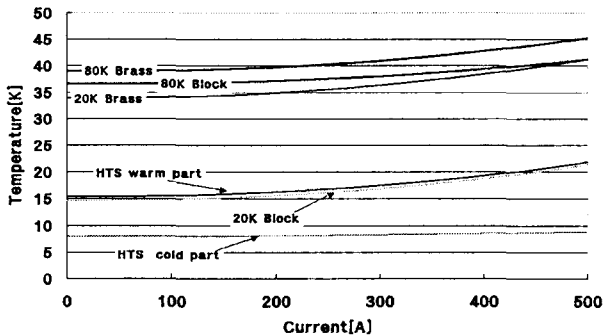


Fig.4. Temperature of current lead during ramp up

아래 table 3은 HTS 전류리드 하단과 상단의 온도상승을 정리한 표이다. HTS 상단의 온도는 600A까지는 점진적으로 상승하다가, 800A를 넘어서면서 급격히 증가한다. 그러나 HTS 하단의 온도는 크게 변화하지 않았다.

Table 3. Temperature rise of HTS lead

Current [A]	Temperature of HTS cold part [K]	Temperature of HTS warm part [K]	(Warm part Temp ~ cold part temp) [K]
0	7.80	15.3	7.5
200	8.00	16.3	8.3
400	8.43	19.4	11.0
600	9.07	28.1	19.0
800	10.0	53.3	43.3

2.3.1 통전 시 열 침입량

전류리드를 통한 열침입량은 저온용기의 헬륨 재응축용량을 측정함으로써 간접적으로 측정된다. 초기 test용 저온용기의 잉여 재응축용량은 1.2W 수준이었으며 480A 통전 시 0W로 감소하였다. 이는 480A 통전시 1.2W의 추가 열침입이 발생하는 것을 의미한다. 전류를 증가시키면서 측정된 재응축 용량을 Fig. 5에 나타내었다.

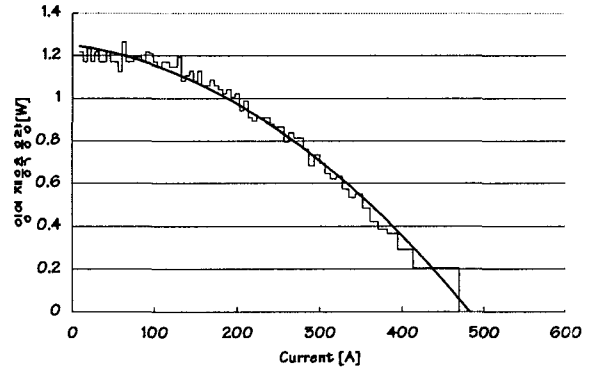


Fig.5. LHe recondensing capacity during ramp up

2.4 시험 결과

1000A 통전을 목표로 전류리드부가 설계 제작되었으나, 800A 이후 HTS 상부의 온도상승이 급격히 증가하여 HTS 전류리드의 운전온도 범위를 초과할 것으로 예측되었다. 이는 CTI냉동기 2nd stage의 냉동용량이 하부 metal lead의 발열을 흡수하기에 불충분하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 480A 이상의 전류 통전 시 전류리드를 통한 열침입량이 test용 저온용기의 잉여 재응축용량인 1.2W를 초과하는 것으로 측정되었다. 결국 본 전류리드의 최대 운전 전류는 480A로 평가 되었다.

3. 결 론

1000A급 전류리드부가 설계 제작되었으나 목표한 성능에는 이르지 못했다. 실제 SMES에 적용하기 위해서는 전류리드의 제작에 개선이 필요할 것으로 판단되며, 개선점은 다음과 같다.

- 1) HTS 전류리드 상단의 냉각용량을 증가시켜야 함
- 2) 전류리드와 냉동기간의 열접촉도를 향상시켜야 함
- 3) 20K Brass 부분을 생략하는 것이 바람직함
- 4) 각 전기적 접촉부의 접촉저항을 개선해야 함