

22.9kV/630A 저항형 초전도 한류기용 전도-냉각 황동 전류인입선 제작 및 특성 실험

Fabrication and Characteristic Test of Conduction-Cooled Brass Current Leads for a 22.9kV/630A Resistive Superconducting Fault Current Limiter System

송정빈¹, 김주형¹, 권나영¹, 김용우¹, 김호민³, 심정욱⁴, 이방욱⁴, 김혜림⁵, 현옥배⁵, 이해근^{2,*}

J. B. Song¹, J. H. Kim¹, N. Y. Kwon¹, Y. W. Kim¹, H. M. Kim³, J. Sim⁴,
B. W. Lee⁴, H-R Kim⁵, O. B. Hyun⁵, H. G. Lee^{2,*}

Abstract: The 22.9kV/630A superconducting fault current limiter (SFCL) is developed by the KEPRI-LSIS collaboration group. This resistive SFCL uses three pairs of conduction-cooled current leads. When the SFCL system is in the fault mode, the current flows 20 times more than the steady state. Therefore, it is important that the current lead is designed to have the thermal stability in order to minimize the heat input of the cold-end. This paper presents the design and performance results of a pair of conduction-cooled brass current leads considering both cases that the SFCL system operates at the steady state and the fault current.

Key Words: Brass current leads, superconducting fault current limiter (SFCL).

1. 서 론

전력계통에서의 사고전류를 제한하는 초전도 한류기는 상용화의 가능성이 매우 높기 때문에 전 세계적으로 연구가 활발히 진행 중이다. 한국의 경우, 22.9kV/630A 저항형 초전도 한류기는 과학기술부에서 지원하여 진행되고 있는 21세기 프론티어 사업의 일환으로 한국전력연구원(KEPRI)과 LS산전(LSIS)의 공동 연구로 개발되었다.

한류기에 사용될 전류인입선은 특히 극저온 용기로의 열침입과 초전도 소자의 사고시에 한류기 자체에서 방출되는 열 에너지와 더불어 액체질소의 소모량에 밀접한 관계가 있으므로 한류기 시스템에 이용될 전류인입선을 통한 열침입을 최소화 하는 적절한 재료 선택과 디자인 및 제작이 매우 중요하다.

일반적으로 전도-냉각 전류인입선 제작에 사용하는 재료로 구리 혹은 황동을 선택하는데, 황동의 열전도도가 구리보다 작음으로 인하여 인입선에 침입되는 열량이 작기

때문에 초전도 한류기용 전류인입선에는 황동이 더 효율적이다. 또한 최근에 황동으로 제작된 전류인입선이 과전류모드에서 안정하게 작동되었다는 것을 분석, 증명하였다[1]. 본 논문에서는 저항형 초전도 한류기용으로 제작한 전도-냉각 방식 황동(commercial brass, 90% 구리 + 10%아연) 전류인입선의 설계에 대해 알아보고, 설계 값과 실제 측정 결과 값을 비교한다.

2. 전류인입선 제작

2.1. 전도-냉각 전류인입선

전도-냉각 전류인입선을 이용할 경우, 정상 상태의 power density differential equation은 다음과 같다[2].

$$A\bar{k} \frac{d^2T}{dz^2} + \frac{\bar{\rho}I_t^2}{A} = 0 \quad (1)$$

(A는 전류인입선의 단면적, z는 전류인입선의 길이에 대한 position, \bar{k} 는 평균 열전도도, $\bar{\rho}$ 는 평균 전기비저항, I_t 는 통전전류)

식 (1)의 양변을 전류인입선의 길이 z에 대하여 두 번 적분하고 그 결과를 $A\bar{k}$ 로 나누어준 뒤에 적절한 경계 조건, 즉 $T(z=0) = T_0$ 과 $T(z=\ell) = T_\ell$ 을 이용하여 구해진 식 (1)의 해, 즉 전류인입선의 길이 함수에 대한 온도방정식은 다음과 같다.

$$T(z) = -\frac{\bar{\rho}I_t^2}{2A^2\bar{k}}z^2 + \left[\frac{(T_\ell - T_0)}{\ell} + \frac{\bar{\rho}\ell I_t^2}{2A^2\bar{k}}\right]z + T_0 \quad (2)$$

냉각 시스템 안에 있는 전류인입선의 하단 끝부분에서 발생하는 열침입 Q_{in} 은 다음과 같다.

$$Q_{in} = A\bar{k} \frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = \bar{k}(T_\ell - T_0) \left(\frac{A}{\ell}\right) + \frac{\bar{\rho}I_t^2}{2} \left(\frac{\ell}{A}\right) \quad (3)$$

식 (3)을 ℓ/A 에 대하여 미분하고 그 결과를 0으로 놓으면 정상상태에서의 열 침입이 최소화되는 운전전류(I_{op})와 전류인입선의 길이(ℓ) 및 단면적(A)과의 상관 관계식(ξ , shape factor)을 다음과 같이 얻을 수 있다.

¹학생회원 : 고려대 신소재공학과

²정 회 원 : 고려대 신소재공학과

³정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

⁴정 회 원 : LS 산전 전력연구소

⁵정 회 원 : 한국전력연구원 초전도그룹

*교신저자 : haigunlee@korea.ac.kr

원고접수 : 2007년 8월 9일

심사완료 : 2007년 9월 7일

$$\xi = \left(\frac{I_{op} \ell}{A} \right) = \frac{\sqrt{2\tilde{k}(T_\ell - T_0)}}{\tilde{\rho}} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로부터 전류인입선의 길이와 단면적에 독립적인 다음과 같은 열침입 식을 얻을 수 있다.

$$Q_{in} = I_n \sqrt{2\tilde{k}\tilde{\rho}(T_\ell - T_0)} \quad (5)$$

$$\frac{Q_{in}}{I_{op}} = \sqrt{2\tilde{k}\tilde{\rho}(T_\ell - T_0)} \quad (6)$$

위의 (5)식과 (6)식을 이용하면 정해진 운전전류와 제작될 재료의 종류에 따라 전류인입선의 길이 및 단면적을 설계 할 수 있다. 결론적으로 시스템으로 들어오는 열침입은 운전전류 및 온도 구간에 따라서 \tilde{k} 와 $\tilde{\rho}$ 에 직접적으로 관계된다는 것을 알 수 있다.

2.2. 구리 및 황동 전류인입선의 비교

전류인입선에 사용할 재료를 선택할 때 보편적으로 구리 혹은 황동을 고려한다. 전류인입선을 통하여 시스템으로 들어오는 열침입은 식 (5)에서 알 수 있듯이 운전전류 및 온도구배에 따라 \tilde{k} 와 $\tilde{\rho}$ 의 곱에 직접 비례하기 때문에 적은 열침입을 얻기 위해서는 \tilde{k} 와 $\tilde{\rho}$ 의 값이 작은 재료를 선택하여야 한다. 구리(RRR=30)와 황동(commercial brass, 10% Zn)의 특성에 대한 비교 분석을 위해 두 가지 온도 구간 (A) 65-293K 와 (B) 77-293K의 경우를 예로 들어 Table 1에 요약하였다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 구리를 사용할 경우 77-293K의 온도 구간에서는 단위 운전전류당 열침입(Q_{in}/I_{op})이 43W/kA가 된다. 즉 630A 전류인입선일 경우 전류인입선 한 개당 27.37W의 열침입이 있다고 본다. 그러나 황동을 사용할 경우 운전전류당 열침입(Q_{in}/I_{op})이 29.72W/kA로, 630A 전류인입선일 경우 전류인입선 한 개의 열침입은 18.73W정도이다. 즉, 구리를 사용하였을 때에 비하여 열침입이 약 60%수준에 머물게 된다. 따라서 열침입을 고려하여 재료를 선택할 경우에는 황동이 구리보다 비교우위에 있다고 본다.

Fig. 1은 77-298K의 온도 구간에서 운전전류에 따라 최적화된 한 개의 구리 인입선과 황동 인입선의 열침입 그래프를 보여준다. 이 때 그래프의 기울기가 바로 Q_{in}/I_{op} 를 의미하며 구리의 기울기가 황동의 기울기보다 더 큰 것을 볼 수 있고 이로써 황동을 전류인입선의 재료로 사용할 경우 동일한 운전전류에서 구리를 사용할 때 보다 적은 열침입을 얻는다는 것을 알 수 있다.

실제로 제작의 용이성 때문에 전도-냉각 전류인입선의 경우 주로 원통형 막대 모양이 널리 사용된다. 앞서 언급한 식 (4), 즉 정상상태에서 최소한의 열침입을 위한 운전전류와 전류인입선의 길이 및 단면적과의 상관관계식(shape factor)을 이용하여 적합한 전류인입선의 사이즈를 계산할 수 있다. 예를 들면 황동 전류인입선의 경우 온도구배가 77K에서 298K라고 하면 식 (4)의 우측항의 값, 즉 shape factor $\xi = \left(\frac{I_{op} \ell}{A} \right)$ 는 Table 1에서 볼 수 있듯이 $9.327 \times 10^3 \text{A/cm}$ 가 된다. 이 때 인입선의 길이가 100cm이고 동작전류가 630A 라고 가정하면 인입선의 단면적 $A = \pi R^2 = \frac{I_{op} \ell}{9.327 \times 10^3} = 6.754 \text{cm}^2$ 가 되며 인입선의 반경은 1.467cm가 요구됨을

Table 1. Design parameters of copper leads and brass leads: (1) 65K-298K (2) 77K-298K.

설계 요소	구리(RRR=30)	황동(10%Zn)
$\tilde{\rho}$ [Ωcm]	(1) 1.002×10^{-6} (2) 1.049×10^{-6}	(1) 3.146×10^{-6} (2) 3.186×10^{-6}
\tilde{k} [W/cmK]	(1) 4.043 (2) 3.986	(1) 0.613 (2) 0.627
$(I_\ell \ell / A)_{op}$ [A/cm]	(1) 4.337×10^4 (2) 4.099×10^4	(1) 9.529×10^3 (2) 9.327×10^3
Q_{in}/I_ℓ [W/kA]	(1) 43.44 (2) 42.98	(1) 29.98 (2) 29.72

알 수 있다. 동일한 조건에서 구리 인입선의 경우 요구되는 단면적과 반경은 각각 1.537cm^2 , 0.623cm 로 구리 인입선이 황동 인입선에 비하여 단면적은 4배, 반경은 2배 이상으로 줄일 수 있다. 그러므로 인입선의 크기측면에서 인입선의 재료를 선택한다면 구리가 황동보다 비교우위에 있다고 할 수 있다.

Fig. 2는 인입선의 길이가 100cm라는 가정 하에 온도구배가 77K(LN₂)에서 298K(상온)일 경우의 동작온도에 따른 구리 인입선과 황동 인입선의 제작 시 요구되는 반경과 단면적의 그래프를 보여준다. 또한 제작 시 편의를 위해서 운전전류가 630A이고 온도구배가 77K에서 298K일 경우 전류인입선의 길이에 따른 단면적 크기의 그래프도 Fig. 3에 나타내었다.

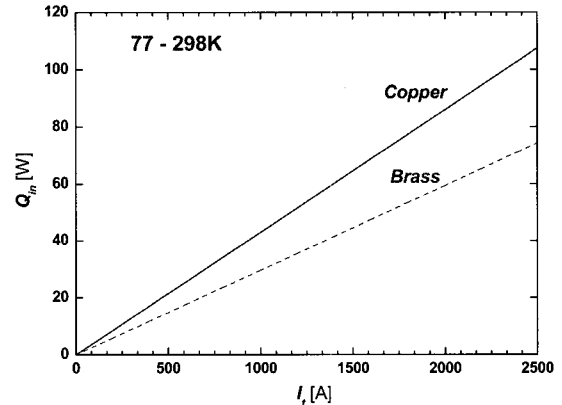


Fig. 1. Q_{in} vs. I_t plot for copper and brass leads in 77-298K.

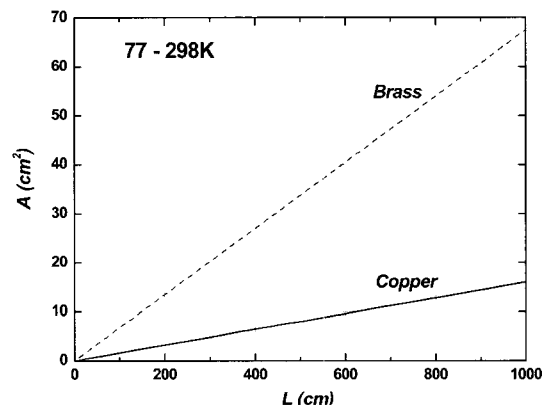


Fig. 2. Lead radius and cross sectional area vs. I_t plot for optimum copper and brass leads having 100cm of lead active length (77-298K).

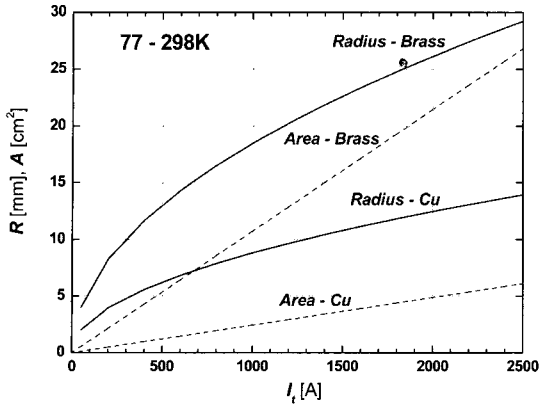


Fig. 3. Cross sectional area vs. active length plot for optimum copper and brass leads.

2.3. 한류기용 황동 전류인입선의 설계 및 제작

앞서 언급했듯이 황동이 열침입이라는 관점에서 볼 경우 구리 보다는 훨씬 우수하므로 전류인입선으로 인한 열침입을 최소화하기 위해 본 연구에서는 황동(commmercial brass, 10% Zn)을 사용하기로 결정하였다. 한류기의 정상상태 운전전류는 630A 이지만 사고 전류가 발생할 경우 생기는 줄열의 영향을 고려하여 정상상태의 운전전류 ($I_{op}=630A$)보다 큰 전류를 통전할 수 있는 정격전류 ($I_t=667A$)를 갖는 전도-냉각형 전류인입선을 설계하였다.

Table 2는 77K와 298K사이의 온도에서 사용된 황동 인입선의 설계 요소이다[3]. 설계 초기에 계획했던 1k A 급의 황동 인입선의 길이 및 직경은 각기 100cm 와 3.7cm 이었다. 그러나 제작에 필요한 직경이 큰 황동 로드를 구하기 어려워 실제 구입 가능한 직경 1.1cm 의 원형 로드 7개를 한 묶음으로 사용하여 Fig. 4에 보이는 것과 같은 형태의 전류인입선을 제작하였다. 전기적인 절연을 위하여 FRP 튜브로 전류인입선 표면에 에폭시를 사용하여 커버하였다.

실제로 사용된 황동 원형로드 한 개의 단면적은 0.95cm² 이므로 전류인입선 한 개의 총 단면적은 6.65 (=7×0.95)cm² 이며 전류인입선의 active length는 93cm 였다. 식 (5)에 의하여 운전전류 즉 630A 에서의 전류인입선 한 개 당 열침입은 18.72W 로 계산되었다.

Table 2. Parameters of conduction-cooled brass leads.

Parameters	Value
Rated current, I_t [A]	667
Operating current, I_{op} [A]	630
Diameter of brass circular rod [cm]	1.1
Active cross sectional area of brass circular rod, A_{br} [cm ²]	0.95
Total active cross sectional area of brass lead, A_{tot} [cm ²]	6.65
Active length, ℓ [cm]	93
Operating temperature range [K]	77-298
(77~298 K) [W/cmK]	0.627
(77~298 K) [Wcm]	3.186×10^{-6}
Shape factor ξ	9.327×10^3
Q_{in} / I_{op} [W/kA]	29.72
Q_{in} (667 A), Q_{in} (630A) [W]	19.82, 18.72

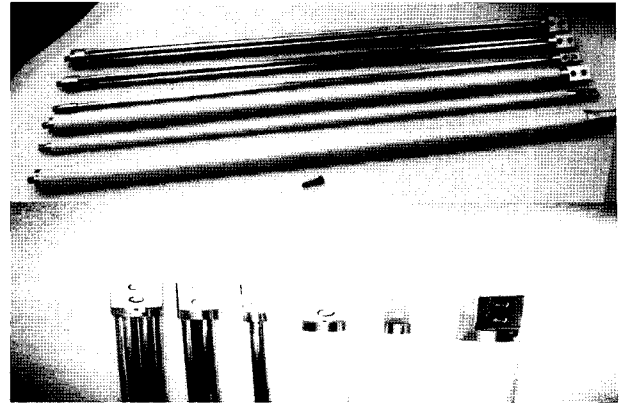


Fig. 4. Photograph of optimal brass leads having the rated current of 154A, 312A, 667A.

2.4. 사고 모드시 황동 전류인입선의 열 분석

줄열과 전도열로 인하여 전류인입선에 열침입이 발생하는데, 이상적인 인입선은 냉각조와의 열교환이 완벽하게 이루어져서 열적 평형을 이루게 된다. 즉, 인입선과 냉각조의 온도가 항상 같다고 가정 할 수 있게 된다. 그러나 사고 상태에서는 인입선의 온도가 순간적으로 증가할 수 있다. 운전전류 ($I_{op}=630A$)가 흐르는 초기에는 황동 인입선과 차가운 질소가스, 그리고 그 주변이 모두 열적 평형 상태에 있다. 이 평형상태는 사고전류 I_{fault} 가 0.1초라는 짧은 시간 안에 황동 인입선을 통해 흐르면서 깨지게 된다.

전기저항 때문에 발생하는 에너지 $E_{generated}$ 는 황동의 전기저항 $R=(\tilde{\rho} \ell)/A_{tot}=(3.1 \times 10^{-6} \Omega cm)(93cm)/(6.65cm^2)=4.3 \times 10^{-5} \Omega$ 이고 지속 시간이 0.1초일 때 $(I_{fault})^2 Rt$ 와 같다. 만약 사고 전류 I_{fault} 가 10kA 라면 $E_{generated}=(1 \times 10^4 A)^2(4.3 \times 10^{-5} \Omega)(0.1s)=430J$ 이다. 인입선의 온도가 변함으로써 에너지의 저장용량 E_{stored} 도 변하게 되는데, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$E_{stored} = \tilde{C}_p m \Delta T = \tilde{C}_p \delta V \Delta T = \tilde{C}_p \delta A_{tot} \ell \Delta T \quad (7)$$

(\tilde{C}_p 는 평균 비열, m은 질량, δ 는 황동의 밀도, V는 황동 인입선의 부피)

단열상태라고 가정하고 식 (7)에 $\tilde{c}_p=0.38J/gK$, $\delta=8.8g/cm^3$, $V=A_{tot} \ell=618.45cm^3$ 를 대입하면 줄열은 값은 0.2K 정도로, 이것은 10kA의 사고 전류가 0.1초 안에 흘러 들어간다고 가정하더라도 황동 인입선의 온도는 거의 증가하지 않는다는 것을 보여준다.

3. 실험 방법

Fig. 5는 열침입 테스트를 위한 황동 전류인입선 실험장치에 관한 사진이다. 황동 인입선에 일정한 전류가 흐를 때의 열침입 (Q_{in})은 레벨 센서로 측정된 LN_2 의 시간에 따른 레벨 변화 dZ_{LN2}/dt 에 관한 식으로 나타난다 [방법1]. 유입되는 총 열량 Q_{total} 은 한 쌍의 황동 인입선에서 발생하는 열침입 $2Q_{in}$ 과 외부에서 유입되는 열침입 Q_{extra} 의 두 성분을 포함한다. LN_2 의 증발량 \dot{m}_{LN2} 는 다음 식들로 결정할 수 있다.

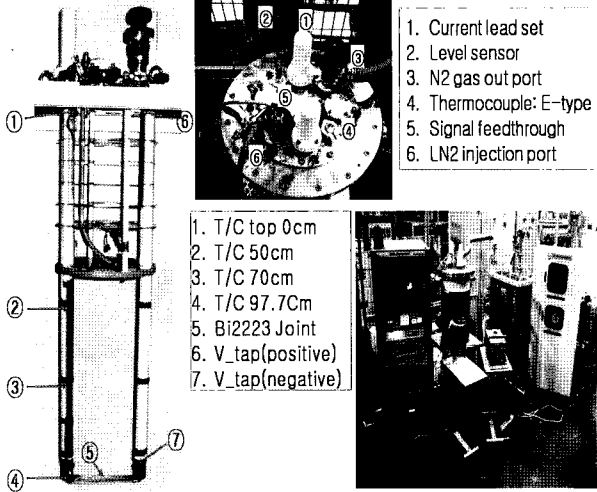


Fig. 5. Test setup of brass current leads for heat input measurement.

$$Q_{total} = \dot{m}_{LN_2} h_L \quad (8)$$

$$\dot{m}_{LN_2} = -A_{cryostat} \rho_{LN_2} \frac{dz_{LN_2}}{dt} = \frac{Q_{total}}{h_L} = \frac{2Q_{in} + Q_{extra}}{h_L} \quad (9)$$

(h_L 은 증발할 때의 증발열, ρ_{LN_2} 는 77K에서 액체 질소의 밀도, $A_{cryostat}$ 은 저온조의 단면적)

식 (9)에서 보이는 음수 부호는 시간에 따라 액체 질소가 증발되어 감에 따라 레벨이 떨어짐을 고려하여 붙여준 것이다. Q_{extra} 는 저온조에 황동 인입선이 부착되고 전류가 흐르지 않았을 경우에 저온조에 유입되는 열침입이므로 Q_{extra} 는 저온조로 인한 열 손실 뿐 아니라 전류가 흐르지 않는 전류인입선의 전도성 때문에 손실되는 열침입도 포함하고 있다. 실험적으로 Q_{extra} 를 측정하고 식 (9)을 이용하면 다음과 같이 Q_{in} 을 결정할 수 있다(4-5).

$$Q_{in} = \frac{Q_{total[level]} - Q_{extra}}{2} = -\frac{1}{2} h_L A_{cryostat} \rho_{LN_2} \frac{dz_{LN_2}}{dt} - \frac{Q_{extra}}{2} \quad (10)$$

Q_{in} 을 결정하는 또 다른 방법은 증발되는 질소 가스 부피의 양을 측정하고 다음 관계식을 이용해서 측정하는 것이다(방법2).

$$Q_{total} = \frac{\Delta GN_2(\ell) \times 161(J/cm^3) \times 1000(cm^3/\ell)}{\Delta t(s) \times 690} \quad (11)$$

여기서 주의해야 할 점은 77K에서 액체 질소의 부피와 298K에서 기체 질소의 부피 차이가 약 690배 정도 난다는 것이다.

4. 결과 및 토의

전류를 흘려주지 않을 경우 한 쌍의 전류인입선의 전도성으로 인해 발생하는 열 Q_{in} 은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{in} = 2A\tilde{k} \frac{dT}{dz} = 2 \times 6.65 \times 0.627 \times \frac{298 - 77}{93} = 19.82 \text{ W} \quad (12)$$

Fig. 6은 전류가 흐르지 않을 때 한 쌍의 전류인입선의 전도성으로 인해 발생하는 열침입 $Q_{in}(t)$ 을 나타낸 것이다. 측정된 $Q_{in}(24\text{kW})$ 값은 $Q_{in}(\ell=0)$ 과 Q_{extra} 를 포함하고 있다. Q_{extra} 의 측정치가 6.5W이므로 $Q_{in}(\ell=0)$ 값은 $17.5\text{W}(=24\text{W}-6.5\text{W})$ 로 생각할 수 있는데, 이 값은 설계 식 (12)을 이용하여 예측한 값(19.82W)의 90%정도이다. 측정된 $Q_{in}(\ell=0)$ 값이 설계된 $Q_{in}(\ell=0)$ 보다 작은 이유로는 \tilde{k} 값의 불확실성과 측정 시 오류 등을 생각해 볼 수 있다(6).

Fig. 7은 최대 1kA의 통전전류를 흘렸을 경우 측정된 황동 인입선의 $Q_{total}(I)$ 값을 나타낸 것이다. 열린 사각형으로 표시된 $Q_{total[level]}$ 의 측정값은 레벨 미터나 식 (10)으로(즉, 방법1) 계산된 액체 질소 레벨의 시간에 따른 변화량 (dz_{LN_2}/dt)값으로부터 결정된 $Q_{total[level]}$ 에 부합된다. 검은 점으로 표시된 $Q_{total[vap]}$ 값은 증발된 질소 가스의 유량을 측정하고 식 (11)을 이용하여(즉, 방법2) 계산된 $Q_{total[vap]}$ 값과 일치한다. 저온조의 상판 플랜지 근처에서는 $Q_{total[level]}$ 과 $Q_{total[vap]}$ 모두 거의 정확하게 일치하고 이 값은 $2Q_{in}(I)$ 와 $Q_{extra}(6.5\text{W})$ 를 포함하고 있다. Fig. 7의 $Q_{in}(\ell=0)$ 그래프에는 실험값 (17.5W)과 이론값(19.82W)을 모두 표시하고 있다. 파선은 설계 시 계산된 Q_{total} 값으로 $Q_{total[level]}$ 과 $Q_{total[vap]}$ 의 실험값이 이론적으로 계산된 값과 잘 일치한다는 것을 명확하게 보여준다. 예를 들어, $I_{op}=630\text{A}$ 일 때 계산된 Q_{total} 값의 총 합이 44.0W이고 $Q_{total[level]}$ 값은 41.2W, $Q_{total[vap]}$ 값은 43.3W로 신뢰할 수 있다.

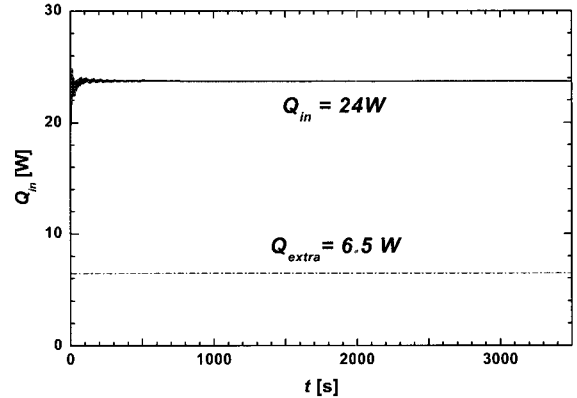


Fig. 6. Q_{in} plot due to test cryostat and conductive heat contribution of two current leads with no current.

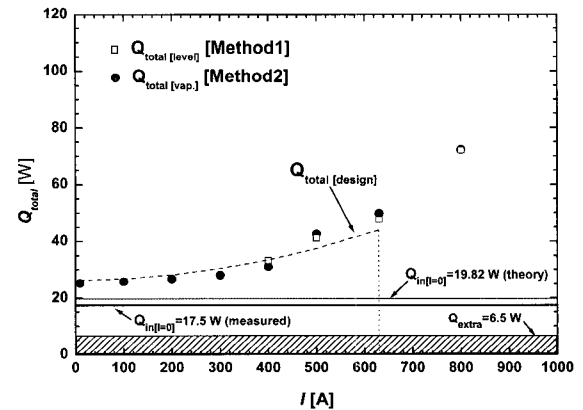


Fig. 7. $Q_{total}(I)$ plots obtained with the brass leads tested up to I_t of 1kA. The open squares and closed circles correspond to $Q_{total[level]}$ and $Q_{total[vap]}$, respectively.

Fig. 8은 또 두 전류인입선에서 측정된 $V_{lead} \times I$ 곡선으로서 계산한 Q_{total} 값은 43.4W로 역시 설계 시 계산된 Q_{total} 값과 거의 일치함을 알 수 있다(6). Fig. 9는 0부터 1kA까지의 전류범위에서 (+)인입선과 (-)인입선의 $V - I$ 그래프이다. 두 인입선의 끝부분에는 약 10개 정도의 AMSC HTS 선재 조각으로 연결하였다. 그림에서 보여 지는 바와 같이 (+)인입선과 (-)인입선의 $V - I$ curve는 거의 같고, Ohmic 특성을 보이므로 기울기는 바로 인입선의 저항 성분으로 볼 수 있으며 이론 값($4.46 \times 10^{-5} \Omega$)보다 약간 큰 저항값 $R=5.24 \times 10^{-5} \Omega$ 가진다. R 값이 이론 값 보다 크게 측정 되는 이유는 7개의 황동 원통형 막대의 termination을 위한 황동 section의 접합 저항 때문이라고 사료된다(6).

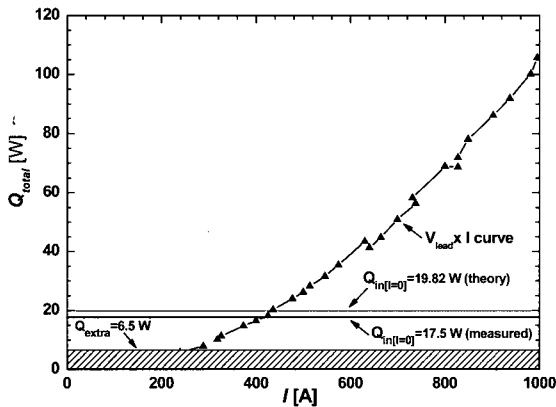


Fig. 8. $Q_{total}(I)$ plots obtained with the brass leads tested up to I_t of 1kA. Q_{total} obtained from the $V_{lead} \times I_t$ of two leads.

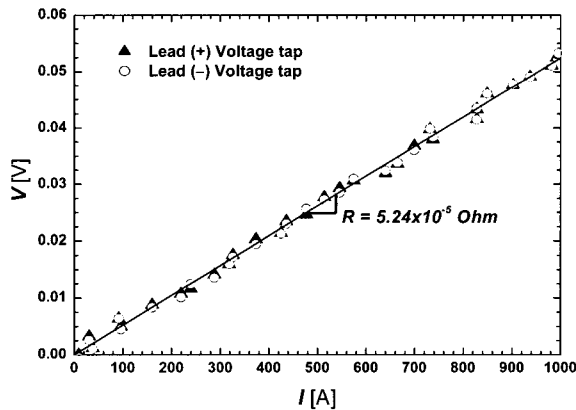


Fig. 9. V vs. I_t plot of 0-1kA range across both brass leads.

5. 결 론

초전도 한류기용 전도-냉각 황동 인입선에 관한 실제 제작 및 특성테스트 결과를 통해 설계 시 예상했던 값과 신뢰할 만 한 정도로 일치하는 것을 알 수 있었다. 황동 중에서도 commercial brass (10% Zn)는 낮은 열전도도로 인하여 열침입 면으로 볼 경우 구리 보다는 훨씬 우수하고, 특히 과전류(overload current) 시에 전기적 및 열적 안정성 면에서도 탁월하므로 초전도

한류기 같은 사고전류가 생기는 전력기기 시스템의 전류 인입선으로의 사용이 아주 적합하다는 결론을 내릴 수 있었다. 또한, 21세기 프론티어 연구개발 사업 3단계에서는 훨씬 큰 운전전류를 흘려주기 때문에 전류 인입선으로 부터의 열침입이 매우 높아진다는 점을 고려 할 때, 열전도도가 낮은 황동 전류인입선의 사용은 매우 유용 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업단인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] H. G. Lee, P. Arakawa, K. Efferson, and Y. Iwasa, "Helium Vapor-cooled Brass Current leads Experimental and Analytical Results," *Cryogenics* 41, pp. 485-489, 2001.
- [2] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets*, New York: Plenum Press, 1994, ch.4.
- [3] A. F. Clark, G. E. Wallace, "Electrical resistivity of some engineering alloys at low temperatures," *Cryogenics* 41, pp. 295-305, 1970.
- [4] H. G. Lee, P. Arakawa, K. Efferson, R. Fielden, and Y. Iwasa, "AMI-MIT 1-kA leads with High Temperature Superconducting Section-Design Concept and Key Parameters," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, pp. 2539-2542, March, 2001.
- [5] H. G. Lee, H. Kim, Y. Iwasa, K. Kim, P. Arakawa and G. Laughon, "Development of Vapor-cooled HTS-Copper 6-kA Current Lead Incorporating Operation in the Current-Sharing Mode," *Cryogenics* 44, pp. 7-14, 2004.
- [6] H. G. Lee, H. M. Kim, B. W. Lee, I. S. Oh, H.-R. Kim, O. B. Hyun, J. Sim, H. M. Chang, J. Ba scunan, and Y. Iwasa, "Conduction-Cooled Brass Current Leads for a Resistive Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) System," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, pp. 2247-2251, June, 2007.

저 자 소 개



송정빈(宋廷彬)

1978년 11월 12일생, 2005년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 2007년 동대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 신소재공학과 박사과정.



김주형(金周亨)
1979년 10월 30일생, 2006년 인천대 공대 신소재공학과 졸업, 현재 고려대 대학원 신소재공학과 석사과정.



권나영(權羅瑩)
1982년 4월 21일생, 2007년 서울산업대 공대 신소재공학과 졸업, 현재 고려대 대학원 신소재공학과 석사과정.



김용우(金容佑)
1985년 2월 18일생, 현재 고려대 신소재공학부 학사과정.



김호민(金鎬民)
1970년 8월 23일생, 1995년 제주대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 현재 한국 전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원.



심정욱(沈政煜)
1970년 10월 19일생, 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원.



이방욱(李防昱)
1968년 6월 20일생, 1991년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 LS산전 전력연구소 수석연구원.



김혜림(金蕙林)
1957년 3월 15일생, 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 초전도그룹 책임연구원.



현옥배(玄鈺培)
1953년 2월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 초전도그룹 수석연구원.



이해근(李海根)
1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.