

초전도코일 냉각용 액체헬륨 저온조의 해석적 열유동 계산

Analytical calculation of heat flow in liquid helium cryostats for superconducting coils

이 호 진
H. J. Lee

한국원자력연구소
초전도재료 응용기술개발팀



- 1958년생
- 초전도 코일 냉각시스템개발에 관심을 가지고 있다.

홍 계 원
G. W. Hong

한국원자력연구소
초전도재료 응용기술개발팀



- 1956년생
- 고온 초전도 플라이 휠 시스템 개발에 관심을 가지고 있다.

1. 초전도자석 냉각용 저온조

산업기술이 가속적으로 발전되면서, 효율적이며 부가가치가 높은 상품개발에 대한 필요성이 점점 증가하고 있다. 1960년대 초부터 시작된 초전도체 응용의 급속한 발전은 기존 전력케이블이나 자석에 사용되던 구리와 같은 상전도체의 기능을 효율있게 대체함으로써 핵융합을 비롯한 에너지 관련 분야는 물론, MRI(magnetic resonance imaging)와 같은 고품질의 장치 제작을 가능하게 하였다⁽¹⁾. 더우기 1980년대 말부터 시작된 고온 임계온도를 갖는 초전도체의 연구는 지금까지 발전되어 오던 초전도체의 응용분야를 더욱 확대시키는 계기가 되었다.

초전도체는 임계온도 이하에서 저항이 거의 없어지며, 반 자성체의 성질을 나타낸다. 지금까지

발견된 급속계 초전도체의 경우 임계온도는 거의 액체헬륨의 비등온도(4.2K) 근처로서 매우 낮은 온도이다. 최근 발견된 고온초전도체의 경우는 임계온도가 액체질소의 비등온도(77K) 이상의 비교적 높은 온도이나, 효율적인 응용을 위해서는 운전 온도를 저온초전도체와 같이 낮게하는 것이 유리하다고 알려져 있다⁽²⁾. 따라서 초전도체의 발전은 필연적으로 효율적인 저온장치 및 냉각방법을 요구하게 된다. 초전도체를 이용하는 자석시스템의 경우, 교류손실이나 코일과 저온조 벽사이에서 발생하는 와전류손실 혹은 current lead에 의한 열손실과 같이 코일시스템에서 발생하는 열 손실과, 외부와의 온도구배에 의해 발생하는 저온조 자체의 열손실로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 저온조 외부온도와 액체헬륨 온도 구배에서 발생하는 열손실과, 그때의 액체헬륨 손

실량을 해석해를 이용하여 계산하는 방법을 제시하였다. 상품성을 갖는 초전도체의 응용을 위해서는 저온조의 구조가 열손실을 최소화하는 동시에 작고 단순하여야 한다. 이와 같이 상반된 개념을 갖는 저온조를 제작하기 위해서는 수학적 해석을 통한 설계가 필요함을 쉽게 예상할 수 있다⁽³⁾.

초전도체를 냉각하는 방식은 대상이나 사용 목적에 따라 다르다. 길이가 긴 케이블과 같은 경우, 케이블 둘레에 냉매를 순환시키고 외부를 단열시키는 방법이 고려되고 있으며, 코일과 같은 형태로 응용하는 경우는 크기에 따라 케이블과 같은 방법을 사용하거나 혹은 냉매속에 코일을 담귀 냉각시키는 방법을 사용한다. MRI나 실험용 코일과 같이 비교적 크기가 작은 경우는 거의가 냉매에 담귀 냉각하는 방법을 사용한다. 현재 초전도 코일은 대부분 사용목적에 따라 주문제작의 형태로 제작되므로, 코일의 효율적인 운전을 위해서는 코일에 적합하도록 설계 및 제작된 저온조를 사용하고 있다.

본 연구에서는 액체헬륨을 담아 코일을 냉각하는 일반적인 형태의 저온조에 대한 열유동 현상을, 해석적인 방법을 통해 계산하는 방법을 제시하고, personal computer를 이용하는 전산 알고리즘에 대하여 언급하였다. 또한 실제 저온조에 적용하여 계산한 후 그 결과를 분석하는 방법에 대하여 서술하였다.

2. 액체헬륨 저온조에서의 열유동

액체헬륨을 저장하는 저온조의 일반적인 형태는 그림 1에서와 같이 액체헬륨용기, 중간단열층, 액체질소용기 그리고 외벽으로 구성되어 있으며, 외벽과 액체헬륨용기 사이는 진공상태를 유지시킴으로써 단열효과를 높이게 된다. 액체질소용기는 경우에 따라 용기의 부피를 감소시키고 사용상의 편리함을 위해 생략하는 경우가 있으나, 이 경우 중간 단열층의 수를 늘여 단열효과를 높이는 방법을 사용한다. 액체질소용기 층은 단순한 단열층 효과외에 외부로 부터 침입된 열을 흡수하여 제거하는 heat sink의 역할을 하게

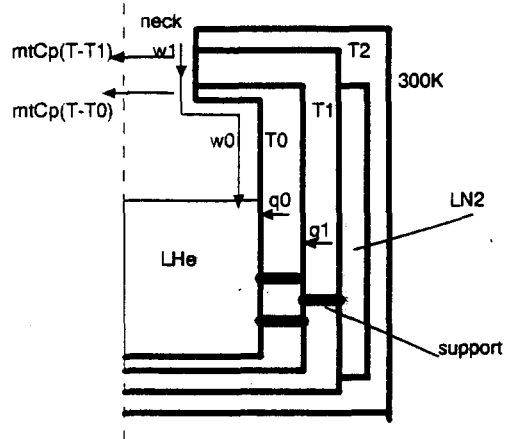


그림 1 액체헬륨 저온조의 일반적인 구조 및 열유동 형태 개략도

되므로 설치 효과는 매우 큰것으로 알려져 있다. 저온조에서의 열유동은 저온조가 충분한 시간 냉각되어 열적으로 정적 상태를 유지하고 있다는 가정하에 계산이 수행된다. 저온조의 크기에 비해 단열층간의 거리가 매우 적으므로 평판에서의 두께 방향 1차원 열유동으로 가정한 후, 열전달 해석해를 이용하여 열유동 계산을 수행하였다. 그림 1과 같은 저온조의 경우 외부로의 열손실은 코일시스템에 의한 열손실을 고려하지 않는 경우 다음과 같은 4가지 형태로 분류할 수 있다⁽³⁾. 처음으로 생각할 수 있는 열전달 방법은 벽면에서의 복사 열전달(Q_{i1})로서 각층에 대하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{i1} = A_i \epsilon_i \sigma (T_i - T_j) \tag{1}$$

여기서 A_i 은 벽면의 넓이, T 는 온도, ϵ 은 coefficient of reflection, σ 는 Boltzman 상수이며, i 및 j 는 각각의 단열층에 대한 index를 나타낸다. 일반적으로 진공상태에서는 복사에 의한 열손실이 상대적으로 큰 것으로 알려져 있다. 위 식에서 보듯이 복사 열전달량은 표면 온도의 4승에 비례하므로, 중간 단열층이 많을 수록 복사 손실이 적게 될 수 있음을 예상할 수 있다.

두번째로 고려할 수 있는 열전달 방법은 단열층이나 용기를 고정하기 위해 설치하는 벽면 지지대를 통한 전도에 의한 열전달(Q_{i2})이다. 지지

대를 통한 전도 열전달은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{02} = A_i \frac{k_s}{l_s} (T_i - T_j) \quad (2)$$

여기서 k_s 는 지지대의 열전도계수이며, l_s 는 지지대의 길이이다.

그 다음으로 고려할 수 있는 열전달 방법은 벽과 벽사이의 진공 공간에 잔류하는 기체를 통한 열전도(Q_{03})이다. 이 공간에서의 열전달은 저밀도 열전달방법으로 기체의 mean-free path가 열전달하는 고체 표면의 면적에 비해 매우 작다고 가정할 수 없는 경우를 말한다. 이 경우 고체 표면 온도와, 이 표면에 접한 기체사이에서는 온도의 jump가 발생하여 온도의 기울기가 줄어들게 되고, 따라서 열전달량이 감소하게 된다. 이 방법에 의해 전달되는 열량은 다음식들로 부터 계산되어 질 수 있다⁽⁴⁾.

$$\Delta T = \frac{2 - \alpha_c}{\alpha_c} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{(T_i - T_j - 2\Delta T)}{l_g} \quad (3-1)$$

여기서 $\lambda = 2.27 \times 10^{-5} \frac{T}{p}$

$$Q_{03} = k_g A_i \frac{(T_i - T_j - 2\Delta T)}{l_g} \quad (3-2)$$

여기서 ΔT 는 기체와 고체표면사이의 온도 jump이며, α_c 는 accommodation coefficient, γ 는 isentropci exponent(C_p/C_v), Pr은 Prandtl number, l_g 는 벽과 벽사이의 거리, k_g 는 저밀도 기체의 열전도계수를 나타낸다. p는 압력으로 단위 N/m^2 이며, 이때 λ 는 mean-free path로서 단위는 m이다.

마지막으로 고려할 수 있는 열전달 방법은 저온조의 neck 부분을 통하여 외부에서 전도되어 들어오는 침입열(w_0)과, 액체헬륨이 기화되어 neck 부위로 흘러나가면서 저온조 neck로 부터 열을 흡수하는 복잡한 형태의 열유동 방법이다. 열의 평형식을 세우면 식 (4-1)과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있으며, 이 방정식을 그림 1

과 같은 경계조건으로 계산하면 식 (4-2)와 같은 열전달 해를 얻을 수 있다⁽⁵⁾.

$$k(T) A_{nek} \frac{dT}{dx} = A_{nek} [k_0 + \alpha(T - T_0)] \frac{dT}{dx} = w_0 + m_i C_p (T - T_0) \quad (4-1)$$

$$\frac{l_{nek}}{A_{nek}} = \frac{1}{m_i C_p} [\alpha(T - T_0) + (k_0 - w_0) \frac{\alpha}{m_i C_p}] \ln \frac{w_0 + m_i C_p (T - T_0)}{w_0} \quad (4-2)$$

여기서 $k(T)$ 는 온도함수인 열전도계수이며, m_i 는 LHe의 시간 당 손실량, A_{nek} 는 neck의 벽 단면적, l_{nek} 는 저온조 neck 부분의 높이, C_p 는 헬륨기체의 정압비열, α 는 온도 함수인 열전도계수의 온도에 따른 기울기, w_0 는 중간단열층의 연결위치에서 부터 저온조의 neck를 따라 전도되어 액체헬륨 용기안으로 전달되는 열량이며, 하첨자 zero는 액체헬륨에 관한 물성치를 나타낸다.

이상과 같이 언급한 열전달 방법을 이용하여, 액체헬륨용기 벽면과 인접한 단열층사이에서의 열 평형방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_0 = m_i L \quad (5-1)$$

$$q_0 + m_i C_p (T_1 - T_0) = q_1 \quad (5-2)$$

$$q_0 = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03} + w_0 \quad (5-3)$$

$$w = w_0 + m_i C_p (T_1 - T_0) \quad (5-4)$$

여기서 L은 액체헬륨의 기화 잠열을 나타낸다.

이렇게 각각의 단열층 사이에서 얻어진 열평형 방정식들을 그림 1과 같은 저온조에 적용하는 경우, 각층사이에서 세워진 열평형식들을 모아 저온조 전체에 대한 열유동현상을 나타내는 연립 방정식을 만들어 계산해야 한다. 그림 1의 경우 정적상태에서 액체헬륨용기와 액체질소용기 혹은 외벽의 온도가 주위 냉매에 의해 결정되므로, 구하고자 하는 미지수가 그만큼 줄어들게 된다. 여기서 구하고자 하는 값들은 implicit하게 서로 비독립적인 관계를 가지고 있으므로 iteration에 의한 계산방법을 이용해야 한다. 이와같이 해석

적인 방법을 이용하는 열손실 계산을 러시아에서 저온조 설계과정에 사용하는 방법으로서, 저온조의 특성을 예상하는데 유용하게 쓰이고 있다.

3. 열손실 계산을 위한 알고리즘

그림 1에서와 같이 액체헬륨용기 벽과 액체질소용기 벽 사이에 1개의 중간단열층이 있는 경우 다음과 같은 알고리즘에 의해 계산할 수 있다.

(1) 중간단열층의 온도(T_{lem})를 양쪽 용기의 중간 온도로 가정하여 초기화 한다.

(2) 액체헬륨용기 벽(4K)과 중간 단열층과의 열 유동량을 계산한다.

(2.1) $Q_0 = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03}$ 를 식 (1), (2), (3)를 통해 계산한다.

(2.2) $w_{01} = 0.001$, $w_{02} = 0.01$ 과 같이 한 자리수 차이가 나도록 초기치를 잡아 각각의 초기치에 대한 다음식과 같이 액체헬륨손실량을 계산한다.

$$m_{n1} = \frac{q_0}{L} = \frac{Q_0 + w_{01}}{L}, \quad m_{n2} = \frac{q_0}{L} = \frac{Q_0 + w_{02}}{L}$$

(2.3) 이렇게 계산된 각각의 값을 식 (4)를 변형한 다음식에 넣어 그 값들의 부호를 조사하여 초기에 잡은 w_{01} , w_{02} 의 값사이에서 원하는 액체헬륨손실량이 존재하는지 확인한다. 만일 이 조건을 만족하지 않으며 w_{01} , w_{02} 의 크기를 다시 조정하여 같은 과정을 반복한다.

$$Res = \frac{1}{m_i C_p} [\alpha(T - T_0) + (k_0 - w_0) \frac{\alpha}{m_i C_p} \ln \frac{w_0 + m_i C_p (T - T_0)}{w_0}] - \frac{l_{nct}}{A_{nct}}$$

(2.4) (2.3)항을 만족하는 w_{01} , w_{02} 사이에서 2분법을 사용하여 정확한 w_0 , m_i 값을 찾는다.

(3) 이렇게 얻어진 T_{lem} , q_0 , m_n , w_0 를 가지고, 중간 단열층과 액체질소용기 벽과의 열전

달량을 계산하여 얻어진 열전달량 q_1 과의 관계를 비교하여 열전달 평형식을 만족하지 못하는 경우 새로운 T_{lem} 을 선정한 후 (1)번 항부터 다시 반복수행한다.

(3.1) $Q_1 = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13}$ 를 식 (1), (2), (3)를 통해 계산한다.

(3.2) w_1 을 (2.2), (2.3), (2.4)항의 방법으로 구한다. 단 여기서 m_i 는 (2)항에서 얻어진 값으로 고정하여 계산한다. 이는 그림에서 보듯이 증발되는 헬륨량은 양쪽 계산영역에서 같게 작용하기 때문이다. 중간 단열층으로 전달된 총 열량 q_1 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_1 = Q_1 + w_1$$

(3.3) 중간단열층에서 열평형방정식을 만족하는지를 조사한다.

$$dq = q_1 - [q_0 + m_i C_p (T_{lem} - T_0)]$$

(3.4) dq 가 허용치 이상의 값을 나타내는 경우, 2분법에 의해 새로운 T_{lem} 결정한다. 이 경우 dq 의 부호를 조사하여 T_{lem} 의 증감을 결정한 후 (1)항부터 같은 과정을 반복한다.

4. Wide-neck 액체헬륨 저온조의 열손실 계산

초전도코일의 응용분야가 넓어지고 그 용량과 크기가 점차 커짐에 따라 neck 부분이 넓은 액체헬륨 저온조가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 저온조는 사용기간이 짧고 간단한 실험용으로는 적합하나 장시간 운전에는 헬륨의 손실량이 많아 부적합한 경우가 대부분이다. 저온조의 neck 부분이 넓어지면 전도되는 단면적이 커지고, 또한 neck 벽면으로부터 기체화된 헬륨으로의 열전달이 나빠지기 때문이다⁽⁶⁾. 지금까지 제시한 해석 방법 알고리즘에 의해 P.C.용 프로그램을 만든 후, 그림 2와 같이 wide-neck을 갖는 SMES (superconducting magnetic energy storage)

용 저온조에 대한 열해석을 수행하였다. 이 저온조는 한국전력에서 수행한 SMES 코일의 냉각에 사용된 장비로서 러시아에서 제작된 장비이다⁽⁷⁾. 그림에서 보듯이 이 저온조는 중간단열층을 사용하지 않고 액체헬륨용기와 액체질소용기와 외벽으로 구성되어 있다. 저온조의 neck 부분은 코일을 저온조 안에 넣기 위해 충분히 넓은 구조를 가지고 있으며, 이 neck와 연결된 상단 flange 부분은 상온의 외기와 접해 있다. 이와 같은 구조로 볼때 저온조 neck을 통한 열 손실은 다른 열전달 방법에 의한 열손실보다 클 것으로 예상할 수 있다.

이 경우에 대하여 표 1 및 표 2와 같은 입력

표 1 0.5MJ SMES 코일 냉각용실험용 액체 헬륨 저온조의 치수

재 질	스테인레스 스틸
LHe vessel 직경	640mm
높 이	2,365mm
Cryostat outside 직경	800mm
높 이	2,518mm
LN2 vessel 폭	40mm

표 2 계산에 사용된 저온조의 물성 및 치수 데이터⁽³⁾

LHe latent heat	20.6J/g
Cp	6.0J/gK
LHe area	4.14m ²
LN2 area	4.49m ²
Black factor	0.3
Support area/length	0.012
He accomodation factor	0.6
N2 accomodation factor	0.6
Plandtle coefficient	0.78
Vacuum gas pressure	1.0E-6N/m ²
Vacuum heat transfer	0.009W/mk
Vacuum layer thickness	0.025m
Neck area	0.0045m ²
Neck length	0.5m

자료를 이용하여 계산한 결과 표 3과 같은 열손실 결과를 얻을 수 있었다. 이 경우 중간단열층이 없으므로 액체헬륨용기와 액체질소용기사이의 열유동과, neck를 통한 열손실량만을 고려하면 된다. 계산된 액체헬륨 손실량은 저온조 제작자가 제공한 기술 사양서에 제시한 값 5리터/hour에 근접하고 있다. 계산된 결과를 보면 열손실의 대부분은 조온조 neck을 통한 전도 열손실을 알 수 있다. 이와 같이 입구가 큰 구조를 갖는 저온조의 경우, neck을 통한 열손실을 줄일수 있는 방법을 찾는 것이 중요한 열 설계항목을 알 수 있다.

제시된 액체헬륨 손실량은 비교적 큰 값으로 생각되며 이 저온조는 장치에 부착하여 계속 사용하기 위한 목적이라기 보다는, 코일에 대한 특성을 파악하기 위한 실험용 측정 장비임을 알 수 있다. 운전 중 액체헬륨의 손실이 계속되어 액체헬륨의 수위가 떨어지는 경우 neck의 길이가 상대적으로 증가하고, 반경방향으로의 열전달 벽면적도 감소하게 되어 점차 열손실이 감소하게 되는 것이 일반적인 현상이다⁽⁶⁾. 따라서 해석적 방법을 사용하는 경우 같은 저온조라도 neck의 길이를 비롯한 여러 입력자료들이 운전 조건이나 저온조 가공조건에 따라 적절히 선택되어야 하며, 많은 운전 경험 및 설계 경험은 정확한 결과 예측에 도움을 줄것으로 생각할 수 있다. 본 해석방법은 유한요소법과 같이 정확한 해를 구하는 것이 아니라, 비교적 많은 가정을 통한 간단한 해석해를 이용하는 engineering 개념의 해석 방법으로서, 사용하고자 하는 저온조에서 어떠한 열전달요소가 전체 열손실에 크게 영향을 주는지

표 3 0.5MJ SMES 코일 냉각용 저온조의 계산된 열유동 양

복사 열손실	0.25W
지지물 전도손실	0.039W
저밀도가스층 전도	0.0004W
Neck 통한 전도손실	3.2W
총손실	3.49W
LHe 손실율	4.88liter/hour

표 4 0.5MJ SMES 코일 냉각용 저온조에서 중간단열층과 액체헬륨용기사이의 계산 열유동 양

	중간단열층설치 경우 (그림 1 구조)	A_{neck}/l_{neck} 값을 1/10 감소시키는 경우 (그림 1 구조)
복사 열손실	0.0075W	0.0086W
지지물 전도손실	0.058W	0.061W
저밀도가스층 전도	0.00035W	0.00036W
Neck 통한 전도손실	0.62W	0.036W
총 손실량	0.69W	0.11W
LHe 손실율	0.96liter/hour	0.15liter/hour

확인할 수 있으며, 그 결과를 설계에 직접 반영할 수 있다.

구조변경에 따른 단열효과의 변화를 예상하기 위해 표 1 및 2와 같은 저온조에 그림 1과 같이 중간 단열층을 설치하고, 액체질소용기의 벽을 연장하여 액체헬륨용기에 접합연결 시키는 경우에 대한 열손실을 계산하였다. 그 결과 표 4에서 보듯이 액체헬륨 손실량은 약 1/5로 줄어 들고 있다. 액체질소용기 벽이 연결된 부분에서부터 시작된 neck을 통한 열침입은 중간 단열층으로 흐르며, 액체헬륨으로 전달되는 열 침입은 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 볼때 중간 단열층의 설치와, 외부열을 차단할 수 있는 액체질소용기와 같은 열흡수 층을 액체헬륨용기 neck에 열적으로 연결시키는 작업은 저온조의 상품성을 높이는데 매우 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 물론 이와 같은 작업은 그림 2의 저온조와 같이 간단한 구조에 비해 높은 제작기술과 비용이 요구될 것이다. 저온조 neck 부분으로의 열 손실을 막기 위해 A_{neck}/l_{neck} 값을 1/10로 줄이는 경우 표 4와 같이 액체헬륨 손실량을 줄일 수 있다. 이 경우는 저온조의 입구를 작게하거나, 두께가 얇은 스테인레스 스틸을 사용하거나, neck 부분의 높이를 윗쪽으로 길게 연장시키거나, 혹은 neck 부분을 상부 flange에 연결하지 않고 중간단열 층에 열적 연결시키는 경우에 해당된다고 가정할 수 있다. 물론 이 경우 코일을 저온조 내부로 넣을 수 없거나, 혹은 충분한 강성으로 저온조의 형태를 유지할 수 없거나, 매우 길이가 긴 저온조 형태가 되

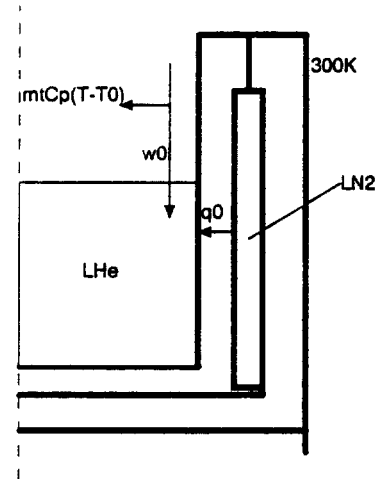


그림 2 Wide-neck을 갖는 0.5MJ SMES 시험용 저온조 개략도

어 사용하기에 불편하거나, 제작기술이 어렵고 제작비가 많이 드는 문제가 발생할 수 있을 것이다. 초전도코일의 영구사용 목적 저온조의 경우 운전상의 경제성을 고려하여 위에서 언급한 복잡한 형태의 단열기법을 사용하여 설계하는 것이 보통이며, 설치 후 분해 및 재조립이 어려운 경우도 많다. 지금까지 설명한 해석해를 이용하는 열손실 계산방법은 그 자체로서의 의미 보다는 전자기적 설계 및 기계적 강도설계 그리고 제작 기술 수준을 고려하여 최적의 저온조를 설계하는데 중요한 수단으로 사용될 수 있을 것이다.

5. 맺음말

국내의 경우 초전도체에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있으며, 응용에 대한 관심도 매우 높다. 고온초전도체는 물론 저온초전도체를 대규모 이용하는 분야로서 SMES 산업화연구, MRI 용 초전도선재 제조 및 고 균질 자기장의 코일 제조 연구, 고 자기장코일에 대한 연구가 수행되었거나 되고 있으며, 핵융합용 코일과 같은 미래 기술 응용에 까지도 관심을 가지고 연구를 수행하고 있다. 그러나 국내 산업체의 경우 초 저온 장치 및 냉각기술 개발에 대한 역사가 짧고, 초전도체를 산업화하기 위해 필요한 코일 냉각기술 수준이 상대적으로 낮아 산학 협동 연구에 불균형을 이루고 있다. 더우기 다양한 저온조 특성상 중소기업에 의해 설계 제작이 이루어져야 하므로, 여건에 맞는 기술 및 설계 방법이 개발되어야 한다. 본 연구에서 제시한 해석해를 이용한 저온조 열손실 계산방법은 비교적 손쉽게 설계단계에 적용하여 높은 상품성을 갖는 저온조를 설계 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 방법은 러시아에서 저온조 설계에 많이 사용하는 방법으로 그 효용성은 충분히 가지고 있는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. S. Foner and B. B. Schwartz, 1974, Superconducting machines and device, Nato advanced study institutes series, pp. 1~85.
2. Y. Tanaka, 1992, "High-Tc superconducting wires and tapes for electric applications", International workshop on superconductivity(ISTEC), pp. 220~223.
3. 増田正美 외, 1992, 超電導에너지 入門, オム社, pp. 59~65.
4. J. P. Holman, 1976, Heat transfer, pp. 453~461.
5. M. N. Wilson, 1983, Superconducting magnets, Clarendon press oxford, pp. 257~260.
6. V. E. Keilin, 1967, "Cryostats of a new type for superconducting coils", Cryogenics, pp. 3~6. Feb.
7. 한국전력공사기술연구원, 1994, A study on 0.5MJ-class SMES for stabilizing power system(II), pp. 97~107.