

HTS 케이블 냉각을 위한 COLDBOX 설계에 관한 연구

박재홍, 권용하, 김영수, 박성출*, 김진욱**
부경대학교 기계공학부
*씨브이이씨엠, **경남정보대학

A Study on Coldbox Design for Cooling HTS Cable

Jae-Hong Park, Yong-Ha Kwon, Young-Soo Kim, Sung-Chool Park*, Jin-Wook Kim**
School of Mechanical Engineering, PuKyong National University
*CVECM, **Kyung Nam College of Info. & Tech.

parksonforever@hanmail.net

Abstract - The coldbox operating with reverse brayton system for cooling HTS cable has been designed. This coldbox consists of heat exchangers, liquid-gas separator, liquified nitrogen chamber and pump. The design was discussed in this paper. These results will be applied to commercial HTS cable in near future.

기호설명

A : 전열면적 [m^2]
 c_p : 비열 [$J/kg \cdot K$]
 h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 k : 열전도도 [$W/m \cdot K$]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 Nu : Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 q : 열량 [W]
 Re : Reynolds 수
 T : 온도 [K]
 U : 총괄열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]

그리스문자

μ : 점성계수 [$N \cdot s/m^2$]

아래첨자

i, o : 입 · 출구
 Ne : 네온
 N_2 : 질소

1. 서 론

초전도 기술의 산업적 응용을 위한 연구가 1960년대 초반부터 세계 각국에서 활발히 진행되어 왔고, 이러한 꾸준한 연구결과로서 자기부상열차, 전자추진 선박 등을 중심으로 한 교통수송

분야, 초전도 핵융합장치, 초전도 에너지 저장장치, 초전도 발전기, 초전도 송전케이블 등을 중심으로 한 전력 에너지 분야 등 산업전반에 걸쳐 폭넓은 응용 및 실용화가 이루어질 것으로 전망되고 있다. 이러한 초전도 기술의 폭넓은 산업적 응용을 위한 기반 기술로서 무엇보다도 저온공학의 기술이 뒷받침되어야 하며, 특히 초전도 기술의 산업적 응용을 위한 기반기술로서 이러한 기기들을 극저온 상태에서 안정적으로 운전할 수 있는 극저온 생성 및 유지기술의 개발이 초전도 기기의 성능 및 경제성을 좌우하는 중요한 분야라고 할 수 있다.

위에서 언급한 전력 에너지 분야 중 고온초전도 케이블을 최적화된 상태에서 운용하기 위해서는 액체질소의 온도 및 압력을 적절한 조건으로 순환시키며 또한 열부하 변동 등에 대하여 안정적으로 냉각할 수 있고 케이블의 상태를 감시 및 제어할 수 있는 신뢰성이 있는 냉각시스템을 구축하여야 한다.

본 연구에서는 고온초전도 케이블 냉각을 위한 coldbox의 설계에 필요한 각종 핵심 요소기술에 관하여 살펴보기로 한다.

2. Coldbox의 구조설계

2.1 Coldbox의 구조

Figure 1에 고온초전도 케이블의 액체질소 냉각용 coldbox의 측면도를 나타내었다. Coldbox의 크기는 1400 mm(직경)×2000 mm(높이)이며, 재질은 SUS 316L이다. Coldbox의 구성은 크게 열교환기, 질소기액분리장치, 액체질소 순환펌프, 액화질소챔버, 지지대 그리고 각종 밸브류들로 되어있다.

Coldbox의 운전은 cooldown 운전과 정상상태 운전으로 나뉘어진다.

Cooldown 운전을 살펴보면 액체질소는 액체질소탱크로부터 coldbox 내로 들어온다. Coldbox 내로 들어온 액체질소는 질소기액분리장치를 통과하여 액화질소챔버에 모인다. 일정량 이상이 모이면 순환펌프에 의해 부하(load, 실제로는 고

온초전도 케이블 내의 부하)측으로 이송된다. 그러나 cool down 운전시에는 부하가 없기 때문에 열량 처리없이 coldbox 내 열교환기로 이동한다. 열교환기를 통과한 액체질소는 다시 액화질소챔버에 모여 앞의 순환과정을 반복한다. Cooldown 과정에서 생기는 질소가스는 vent line을 통해 대기로 방출된다. 또한 냉각시 생길 수 있는 열응력 문제를 해결하기 위하여 서서히 시간을 두고 냉각한다.

Cooldown 운전으로 coldbox의 온도가 일정 이하로 내려가면 부하측에 실제 부하를 걸어준다. 또한 열교환기 내로 네온가스를 유입시키며, 이때 열교환기 내로 유입되는 네온가스의 온도는 65K 정도가 된다. 액체질소는 순환 과정 중 부하측에서 실제로 열을 받아 온도가 상승하게 된다. 온도가 상승된 질소는 열교환기에서 네온가스와 열교환을 하여 과냉되어 순환펌프에 의해 재순환된다.

Figure 1에서 ①과 ②는 열교환기 부분으로 실제 부하를 처리하여 온도가 상승된 질소와 네온가스가 직교류 형태로 열교환을 하게 된다. 이때 열교환기의 형태는 한 유체(질소)가 액인 상태이고, 다른 유체(네온)가 가스인 상태이므로 여기에 적합한 핀-관형 열교환기를 채택하였다.

③은 질소기액분리장치로 coldbox 내에서 생기는 질소가스를 액과 분리시키는 역할을 한다. 여기에서 분리된 질소가스는 부하측에서 부하를 처리하고 들어오는 질소와 혼합되어 열교환기로 들어가 응축된다.

④는 cooldown 운전시 액체질소탱크로부터 들어오는 액체질소와 정상운전시 열교환기를 통과하여 과냉된 액체질소를 저장하는 액화질소챔버이다. 액화질소챔버는 순환펌프를 담고 있는 챔버와 연결되어 있으며, 일정량 이상의 액이 차면 순환펌프에 의해 액체질소는 부하측으로 이송된다.

⑤는 부하의 변동에 능동적으로 대체하기 위하여 설치한 유량 조절 밸브이다.

⑥은 coldbox 내에 설치되는 각종 기기들의 하중을 지탱하는 지지대로서 이 지지대는 coldbox의 단열성능을 좌우하는 중요한 부분 중의 하나이다. 이 지지대는 coldbox 내의 기기뿐만 아니라 각 기기에 충전되는 액체질소의 무게도 지지할 수 있도록 설계되어야 한다. 뿐만 아니라 상온과 직접 연결되는 부분이기 때문에 무엇보다도 효과적으로 단열시킬 수 있는 구조와 재질을 선택해야 한다. 여기서는 FRP 파이프 양측에 SUS 316L을 접착하여 하중에 충분히 견디면서도 전도 열전달을 억제할 수 있는 구조로 하였다.

Coldbox 외부에 설치되는 각종 밸브류들의 연결부위는 bayonet vacuum connector를 사용하여 전도 열전달을 억제하였다.

2.2 Coldbox의 단열방법

Coldbox의 단열은 다층단열(MLI) 방법을 사용한다. 다층단열은 진공단열보다 우수한 단열특성을 나타내는데, 이는 진공 공간에 여러 층의 복사 반사용 금속박막을 넣고, 층간에 polynet(또는 glass-wool sheet), nylon 등을 넣어 금속간의 열

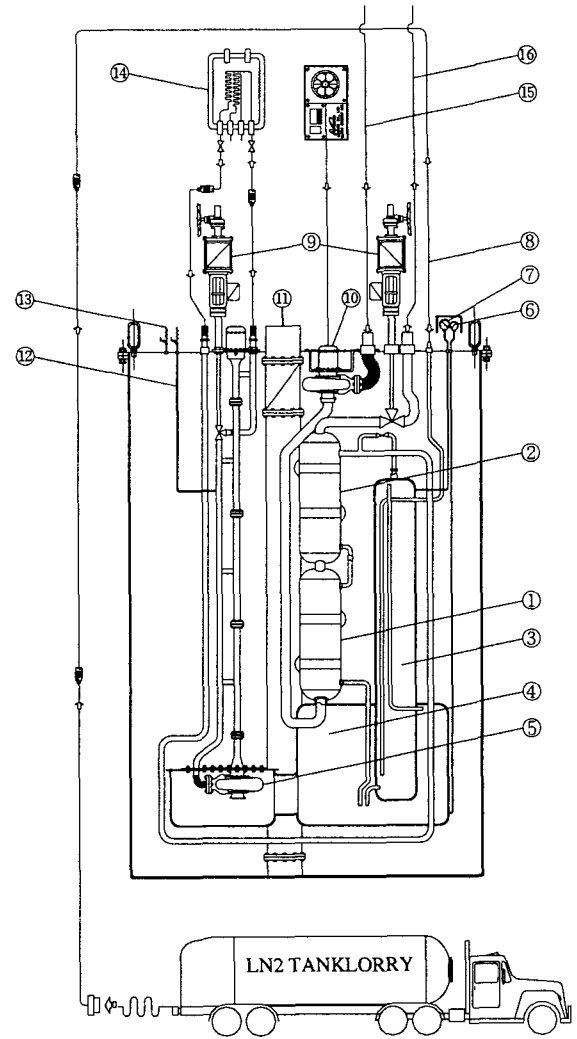


Fig. 1. Schematic diagram of coldbox for HTS cable

Table 1. Configuration of coldbox

No.	Spec.
①	1st heat exchanger
②	2nd heat exchanger
③	Nitrogen liquid-gas separator
④	Liquid nitrogen chamber
⑤	Liquid nitrogen circulation pump
⑥	Pressure gauge
⑦	Liquid level gauge
⑧	Liquid nitrogen inlet line
⑨	Load flow control valve
⑩	Turbo alternator
⑪	Support pipe
⑫	Safety valve
⑬	Vacuum safety valve
⑭	Load(HTS cable)
⑮	Gas Ne inlet line
⑯	Gas Ne outlet line

접촉을 방지하거나, polynet, myler막 등의 표면에 알루미늄을 증착 피막한 박막을 저온체의 표면에 여러 층 감는 방법도 있다. Figure 2는 각 단열층의 단열효과를 도식적으로 나타내고 있다.

다층단열의 층수를 많이 하면 통상 단열층의 면적이 증가하고 이에 따라 고체 열전달이 증가하게 된다. 단열재의 배치가 결정되면 이 때의 열침입량을 극소치로 하는 다층단열의 층수가 결정되게 된다. Figure 3은 단열층의 두께가 일정할 때 층수의 증가에 따라 고체 단열층 면에서의 전도 열전달의 증가와 복사 열전달의 감소 경향을 나타내고 있다.

2.3 Coldbox 내 열교환기

일반적으로 입구와 출구에서의 고온 및 저온 유체의 온도들을 안다면, ΔT_{lm} 이 쉽게 계산되므로 LMTD법을 사용할 수 있다. 이러한 온도들이 알려진 문제를 열교환기 설계 문제로 분류한다. 전형적으로 원하는 고온유체 또는 저온유체의 출구온도와 함께 유체의 입구온도와 유량들이 주어진다. 따라서 설계문제는 적절한 열교환기의 형식을 선택하고, 치수를 결정하는 문제, 즉 원하는 출구온도를 이루는데 요구되는 열전달 표면면적 A 를 결정하는 문제이다. Coldbox내 질소와 네온의 열교환을 위한 열교환기의 형태는 전술한 것과 같이 핀-관형 열교환기를 채택하였다.

본 연구에서는 coldbox내 열교환기의 설계를 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 주변으로의 열손실과 운동에너지와 위치에너지의 변화는 무시
- (2) 관벽의 열저항과 오염계수 무시
- (3) 일정 물성치(내부압력 5 bar인 Liquid N_2 의 평균온도(가정)인 78K에서 구함)

$$\begin{aligned}
 c_p &: 2041 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \\
 \mu &: 0.1472 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\
 k &: 0.1324 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 Pr &: c_p \cdot \mu / k = 2.27
 \end{aligned}$$

네온의 흡수열량(q_{Ne})은 1000 W이다. 따라서 액체질소의 출구온도는 다음 식으로부터 구해진다.

$$q_{Ne} = \dot{m}_{N_2} c_{p, N_2} (T_{N_2, i} - T_{N_2, o}) \quad (1)$$

액체질소의 출구온도 $T_{N_2, o}$ 는 75.88K가 된다. 따라서 액체질소의 물성치를 평가하기 위한 78K의 가정은 타당한 것이다. 액체질소의 과냉에 요구되는 관의 길이는 다음 식으로 구해질 수 있다.

$$q = UAF\Delta T_{lm} \quad (2)$$

여기에서

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3)$$

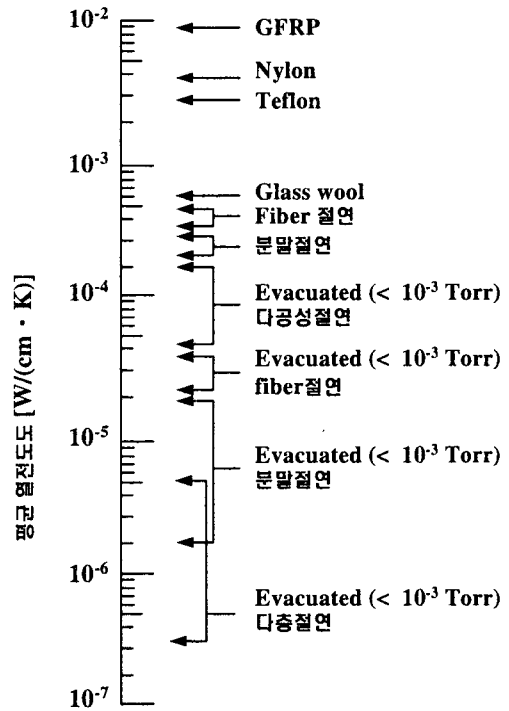


Fig. 2. Thermal conductivity of each insulation method (Both ends 300K and 80K)

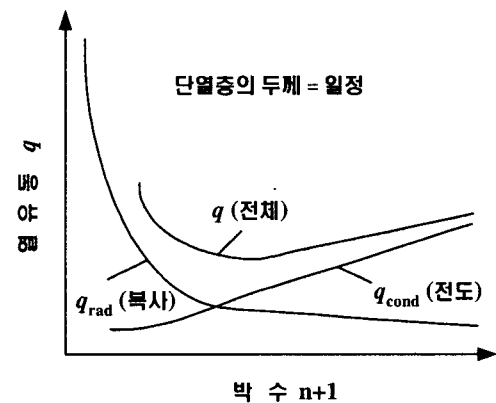


Fig. 3. Heat transfer of MLI

$$\begin{aligned}
 \Delta T_1 &= T_{N_2, i} - T_{Ne, o} \\
 \Delta T_2 &= T_{N_2, o} - T_{Ne, i}
 \end{aligned} \quad (4)$$

ΔT_{lm} 은 6°C가 나온다.

또한 총괄열저항 U 는 아래와 같다.

$$U = \frac{1}{1/h_{Ne} + 1/h_{N_2}} \quad (5)$$

여기서 h_{Ne} 는 $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 가정하였고, h_{N_2} 는 관 당 액체질소의 유량을 이용하면 된다. 이 때 관은 외경 9.52 mm, 내경 (D) 7.74 mm인 것을 사용한다(3/8"). 관을 흐르는 액체질소 유동에 대하여 Re 수는 다음과 같다.

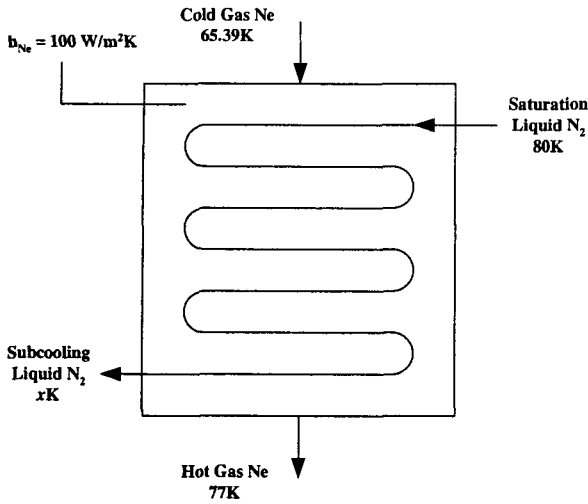


Fig. 4. Schematic diagram of a single-pass, cross-flow heat exchanger with both fluids unmixed

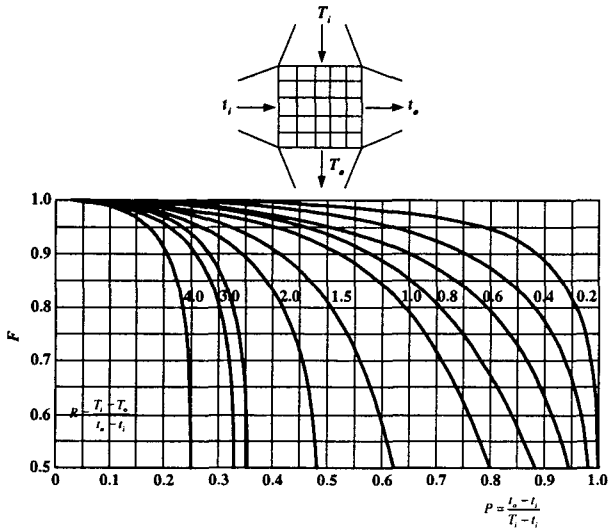


Fig. 5. Correction factor for cross-flow heat exchanger

$$Re_{N_2} = \frac{4 \dot{m}_{N_2}}{\pi D \mu} = 132,987$$

따라서, 액체질소의 유동은 난류이며, Dittus-Boelter식을 사용하여 액체질소측의 열전달계수를 구할 수 있다.

$$Nu_{N_2} = 0.023 Re_{N_2}^{0.8} Pr^{0.3} \approx 370$$

$$h_{N_2} = \frac{k}{D} \times Nu_{N_2} = 6329 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

따라서 총괄열저항 U 는 다음과 같다.

$$U = 1 / (1/100 + 1/6329) = 98.44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

수정계수 F 는 Fig. 5로부터 구할 수 있으며,

여기서

$$R = (65.39 - 77) / (75.88 - 80) = 2.820$$

$$P = (75.88 - 80) / (65.39 - 80) = 0.282$$

이며, $F \approx 0.88$ 이다.

그러므로 $A = \pi DL$ 이므로, 다음과 같다.

$$L = \frac{q}{U \pi D F \Delta T_{lm}} \approx 79 \text{ m}$$

3. Coldbox 열설계

3.1 전도에 의한 열전달

단면 A 가 일정한 고체를 통한 전도 열전달은 다음 식으로 표현된다.

$$Q_s = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (6)$$

여기서 T_1, T_2 는 길이 L 인 고체 양단의 온도, $\lambda(T)$ 는 온도가 T 인 고체의 열전도도이다. λ 는 일반적으로 온도에 따라서 큰 폭으로 변하기 때문에 위 식의 적분은 $\lambda-T$ 곡선의 면적으로부터 구해진다.

3.2 대류에 의한 열전달

Coldbox의 단열진공부에서는 압력이 10^{-2} Pa 이하로 되어있다면 잔류가스는 자유분자기체로 볼 수 있기 때문에 이것에 의한 열전달은 압력에 비례한다. 다른 열전달 기구에 비하여 잔류가스에 의한 대류열전달을 무시할 수 있는 정도로 되는 것은 10^{-3} Pa 이하의 압력영역이기 때문에 이하로 진공도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 단열진공부를 설치하여 사용하는 coldbox에서는 표면에 흡착되는 가스를 탈착하기 위하여 충분한 시간동안 진공 배기시키거나 단열진공부를 가열하여 진공시키는 것이 필요하다. 특히 진공 다층단열을 행하는 경우는 다층단열층사이의 좁은 부위에서의 진공배기가 더욱 어려움으로 인해 보다 세심한 주의가 필요하다.

표면에 흡착되기 쉬운 것은 물, 공기, 탄화수소계의 가스 등이 있으나, 수분의 양이 가장 많고 제거하기도 어렵다. 수분의 탈착에는 250°C 까지 가열할 필요가 있다. 또한 금속 중에 흡착되기 쉬운 수소, 산소는 이것을 제거하기 위하여 보다 높은 온도에서 장시간 배기시켜야 한다. 단 다층단열의 경우는 고온에 약한 알루미늄 박판 등에 미치는 영향을 고려해야 한다.

위에서 언급한 잔류가스의 탈착방법을 사용하여도 잔류가스를 완전히 제거하기는 어렵고, 또 하나의 방법으로는 진공단열부의 저온면에 활성탄을 부착하여 저온액화가스를 충전할 시 냉각되어진 활성탄의 흡착작용에 의하여 단열진공부의 진공도를 향상시키는 방법이 사용되고 있다.

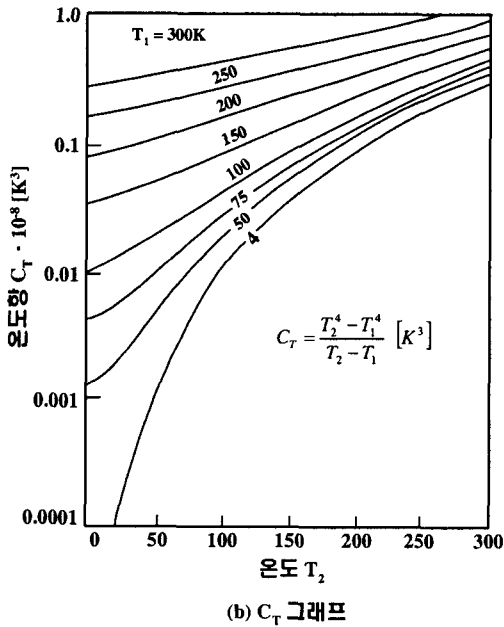
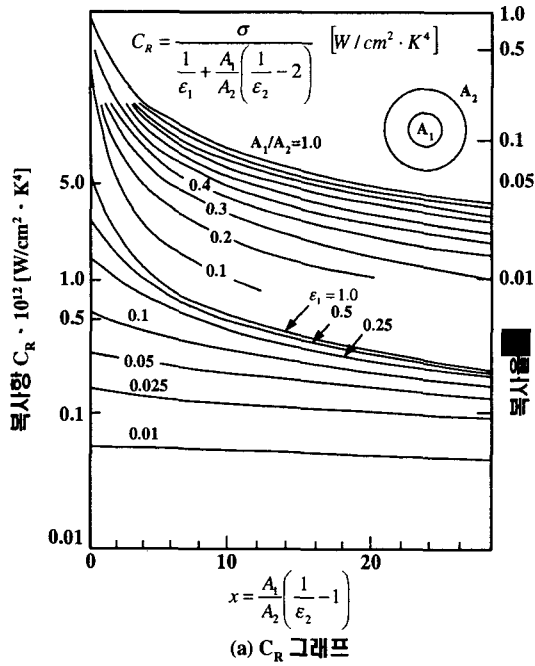


Fig. 6. Graph for calculating radiation heat loss

3.3 복사에 의한 열전달

Coldbox에 많이 사용되어지고 있는 긴 동심 원통의 복사열전달 기구에 의한 저온면의 단위 면적당 열전달량은 다음 식으로 표현되어질 수 있다.

$$Q_R = C_R \cdot C_T \cdot (T_2 - T_1) \text{ [W/cm}^2 \text{]} \quad (7)$$

$$C_R = \frac{\sigma}{1/\epsilon_1 + (A_1/A_2) \cdot (1/\epsilon_2 - 1)} \text{ [W/cm}^2 \cdot \text{K}^4 \text{]} \quad (8)$$

$$C_T = (T_2^4 - T_1^4)/(T_2 - T_1) \text{ [K}^3 \text{]} \quad (9)$$

여기서, ϵ 는 복사율, A 는 각각의 면의 표면적, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수 ($5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$), 첨자 1은 저온면, 첨자 2는 고온면을 각각 나타낸다. Figure 6에 위 식에서 C_R 과 C_T 를 쉽게 구할 수 있는 그래프를 나타내었다.

진공 다층단열은 복사열전달의 저감에 매우 효과적이거나, 이 방법은 정상상태에 도달하는데 수 일의 시간이 걸리기 때문에 본 연구에서처럼 장기간에 걸쳐 사용하는 coldbox나 저온 액화가스의 저장용기에 대해 효과적으로 적용되고 있다.

4. 향후계획

지금까지의 설계자료를 바탕으로 실제 coldbox를 제작하여 다양한 조건(액체질소의 온도 및 압력, 열부하 변동)별로 실험을 수행하여 고온초전도 케이블의 냉각시스템으로서의 신뢰성을 확보하고자 한다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고문헌]

- [1] 김성래 외, "전신촬영용 MRI cryostat 개발", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.39-42, 2000
- [2] 정상권, "저온공학의 기초", 2002
- [3] 권영길, "초전도 응용을 위한 극저온 기술", 극저온 냉동 WORKSHOP, pp.135-157, 1995
- [4] Radebaugh and Nakagome, "Cryogenic Refrigeration Rechnology", 1996
- [5] Air-Liquide Company's homepage