

# 1 kW급 역브레이튼 극저온 냉동기 개발에 관한 연구

권용하, 박재홍, 정종환, 김영수  
부경대학교 기계공학부

## A Study on 1 kW Development of Reverse Brayton Cycle Cryocooler System

Yong-Ha Kwon, Jae-Hong Park, Jong-Hwan Jeung, Young-Soo Kim  
School of Mechanical Engineering, PuKyong National University

bepy@hotmail.com

**Abstract-** To obtain superconducting state, a reliable cryocooler system is required. Structural and thermal design have been performed to design cryocooler system operated with reverse Brayton cycle using gas neon as refrigerant. This cryocooler system consists of compressor, recuperator, coldbox, control valves and has 1 kW cooling capacity. Heat loss calculation was conducted for the given cryocooler system by considering the conduction and radiation through the multi-layer insulation (MLI) and high vacuum. The results can be summarized as; conduction heat loss is 7 W in valves and access port and radiation heat loss is 18 W through the surface of cryocooler. The full design specifications were discussed.

### 1. 서 론

초전도의 전력응용 분야의 하나인 고온초전도 케이블을 최적화된 상태에서 운용하기 위해서는 액체질소의 온도 및 압력을 적절한 조건으로 유지시키며 또한 열부하 변동 등에 대하여 안정적으로 대응할 수 있고 케이블의 상태를 감시 및 제어할 수 있는 신뢰성이 있는 냉각시스템을 구축하여야 한다.[1-3]

본 연구는 이러한 냉각시스템의 일환으로 역브레이튼 극저온 냉동기를 선택하였다. 국외의 경우 역브레이튼 사이클을 이용한 극저온 냉동기로는 1987년 NASA/GSFC의 지원으로 미국의 Creare Inc.에서 냉각용량 5 W@65K의 극저온 냉동기를 개발하여 현재 미 공군의 필립연구소에서 내구성 시험 중에 있다. 초전도 전력기기용으로는 미국의 PSI社에서 11.5 kW @80K 용량의 브레이튼 냉동기 및 250 W@100K의 브레이튼 냉동기의 시제품이 출시되었으며, 냉동 효율은 6~18% Carnot 정도로 추산되고 있다. 또한 미국의 American Superconductor Corp社의

Pirelli Cables System Team에서 미국 DOE의 지원 아래 2000년 9월에 파일럿 시험에서 밀폐형 역브레이튼 사이클을 채용하여 Cable 냉각시스템을 구성하였다.

국내의 경우 현재까지는 주로 G-M 또는 맥동관 냉동기를 중심으로 연구가 진행되고 있으며 현재까지 역브레이튼 사이클을 사용한 turbo Brayton cryocooler의 개발 시도는 없었다. 단지 한국전기연구원 주도로 수행된 초전도 케이블 개발에 관련하여 극저온 용기(cryostat)를 제작한 바 있으며, cryostat의 독자설계 기술확보를 위하여 기계연구원 중심으로 연구를 진행하고 있으나, 이는 모두 한시적으로 냉각하는 목적으로 쓰이고 있어 초전도 케이블 등의 지속적인 냉각을 요하는 시스템에 대해서는 좀더 연구개발이 필요하다.

본 연구는 1 kW급 역브레이튼 극저온 냉동기에 대하여 냉동사이클 및 그 제작에 필요한 각종 핵심 요소기술의 개발과 데이터 베이스 확보를 목적으로 수행되었다.

### 2. 극저온 냉동기의 종류

일반적으로 극저온 냉동기로는 크게 recuperator type 냉동기, regenerator type 냉동기, 자기냉동기, 회석냉동기, 핵의 소자화 냉동기 그리고 레이저 냉동기 등이 있다.

Recuperator 타입에는, 역브레이튼(reverse-Brayton) 냉동기, 줄-톰슨(Joule-Thomson) 팽창 냉동기 등이 있으며, regenerator 타입에는 G-M 냉동기, Stirling 냉동기, 맥동관 냉동기 등이 있다.

Table. 1은 각종 극저온 냉동시스템을 정리한 것이다. 역브레이튼 냉동기는 앞서 언급한 것과 같이 recuperator 타입으로 유동이 안정적이고, 가스 배어링 및 터보 시스템의 적용으로 인하여 장시간 운전이 가능하다. 또한 원거리 이송이 가능하며, 대용량으로 작은 사이즈를 제외하고는 높은 효율을 발휘할 수 있다. 반면에 소형으로 제작하는 것이 어렵고, 크기가 큰 열교환기가 필요하며 제작비용이 고가이다.

Table 1. The kinds of cryocooler system

구분	극저온 냉동시스템
대형	Recuperator type (J-T expansion, Reverse-Brayton)
소형	Regenerator type (G-M, Stirling, Pulse tube)
	Magnetic refrigerator
	Dilution refrigerator
	Nuclear cooling, Laser cooling

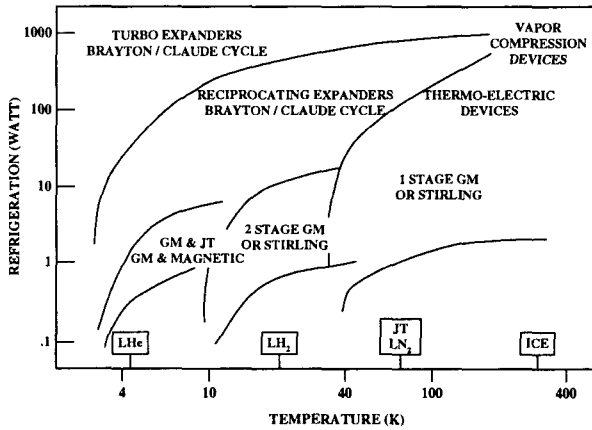


Fig. 1. Cooling capacity based on temperature range of commercial cryocoolers

Fig. 1은 온도대별로 사용 가능한 상업용 극저온 냉동기의 종류를 나타내고 있다.[2]

### 3. 극저온 냉동기의 개발규격 및 구조

역브레이튼 사이클을 이용한 극저온 냉동기의 개발규격은 Table. 2에 나타나 있는 것과 같이 77K에서 1 kW의 냉동능력을 가지는 것이다.

Fig. 2의 온도에 따른 각종 극저온 냉동기의 효율을 보면 본 연구에서 개발하고자 하는 역브레이튼 극저온 냉동기의 12% Carnot 효율은 비슷한 온도대의 Stirling 냉동기와 Gifford-McMahon 냉동기의 효율과 비슷하다.

역브레이튼 극저온 냉동기의 냉동사이클 및 구조, 각 구성요소는 Fig. 3과 4, Table. 3에 나타나 있다. 핵심 구성요소로는 냉매압축기, 열교환기(recuperator), 팽창기(turbo alternator), coldbox 및 각종 control valve 등이 있으며, 냉매로는 네온을 사용한다.

냉매인 네온은 냉매압축기에서 고온고압으로 되어 After cooler에서 일정 수준으로 냉각된다. 냉매압축기는 PMSM(permanent magnetic synchronous motor) 직결방식의 원심압축기로 회전수는 약 100,000 rpm 이다. 냉매압축기에서 발생하는 열은 냉매압축기를 덮고 있는 water-jacket과 After cooler를 지난 네온가스의 바이패

Table 2. Configuration of reverse Brayton cryocooler

냉동사이클	역브레이튼 사이클
작동유체	네온
냉동용량 및 온도	1 kW @77K
COP	>0.04 (>12% Carnot@300K)
수명	30,000 hrs

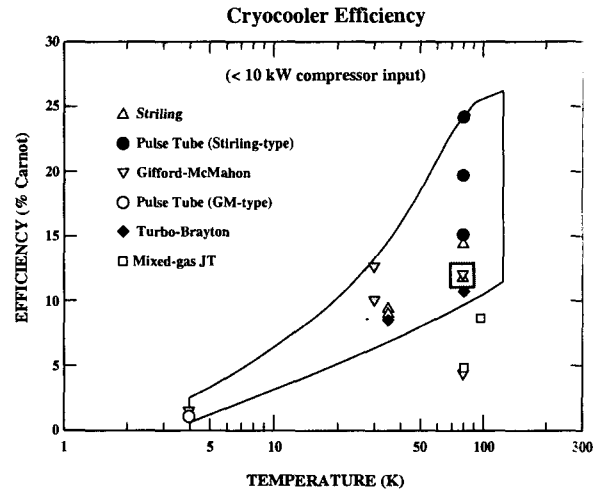


Fig. 2. Various cryocoolers efficiency

스를 이용하여 제거한다. After cooler를 통과한 네온가스는 열교환기(recuperator)를 통과하면서 약 82K로 냉각된다.

역브레이튼 냉동사이클에서 열교환기는 Carnot 효율에 직접적인 영향을 미치기 때문에 고효율의 열교환기를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 98%의 열교환 효율을 가지는 열교환기를 사용하였으며, 열교환 효율 1%의 차이에 의해서  $\pm 4\%$ 의 Carnot 효율의 증감이 발생한다. 열교환기를 통과한 네온가스는 팽창기를 통과하여 약 65K로 냉각된다. 본 연구에서 팽창기의 형식은 고속발전기 직결식 구심 터빈이다. 65K로 냉각된 네온가스는 coldbox로 유입되어 고온초전도 케이블을 순환하고 있는 액체질소를 과냉시킨 후 다시 열교환기로 유입된다. 이 때 액체질소와 열교환을 한 네온가스의 온도는 약 77K 정도로 상승한다. 저온(77K)의 네온가스는 열교환기(recuperator)를 통과하면서 After cooler를 통과한 고온의 네온가스와 열교환을 한 후 냉매압축기로 유입되어 전체 사이클을 재순환하게 된다.

앞에서 언급된 구성요소 중 coldbox는 실제적으로 저온의 네온가스와 고온의 액체질소가 열교환을 하는 곳으로 그 구성은 다음과 같다.

Coldbox의 크기는 1400 mm(직경) $\times$ 2000 mm(높이)이며, 재질은 SUS 316L이다.

Coldbox의 구성은 크게 열교환기, 질소기액분리장치, 액체질소 순환펌프, 액화질소챔버, 지지대 그리고 각종 밸브류 등으로 되어 있다.

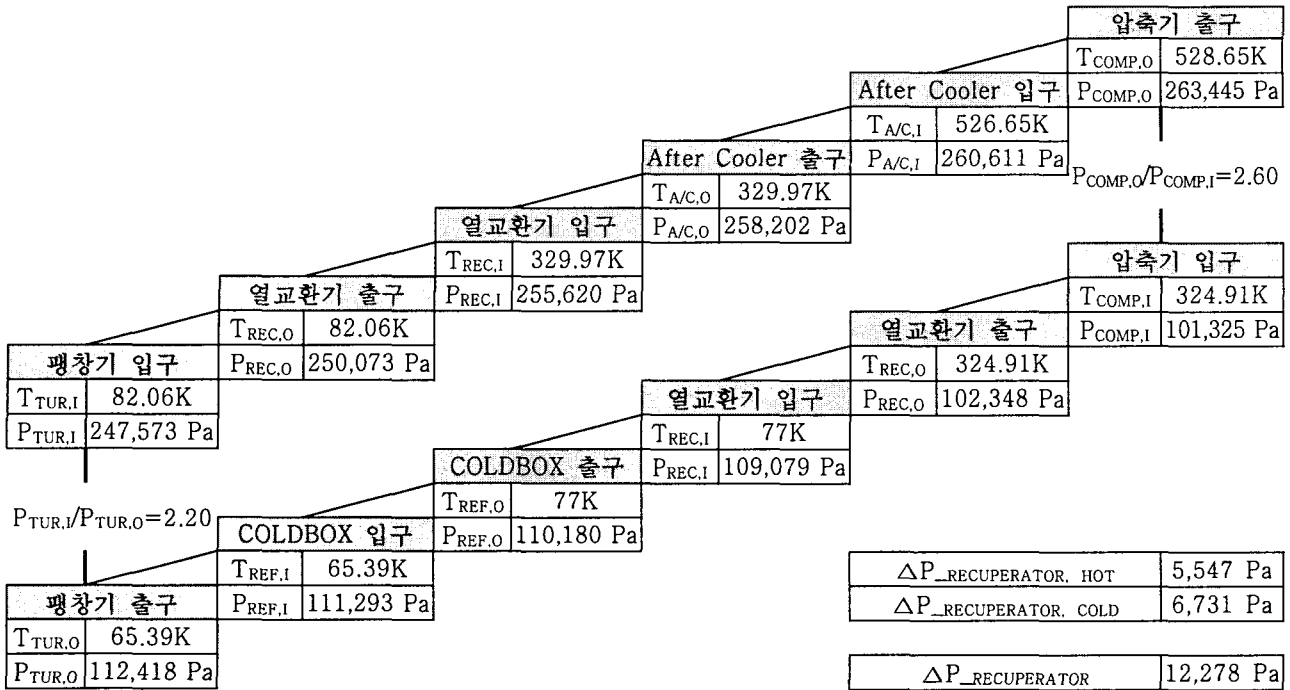


Fig. 3. Reverse Brayton cryocooler cycle

#### 4. Coldbox의 단열방법

Coldbox의 단열은 다층단열(MLI) 방법을 사용한다. 진공단열보다 우수한 단열특성을 나타내는 MLI는 진공 공간에 여러 층의 복사 반사용 금속 박막을 넣고, 층간에 polynet(또는 glass-wool sheet), nylon 등을 넣어 금속간의 열접촉을 방지하는 구조로 되어 있다. 또한 polynet, mylar막 등의 표면에 알루미늄을 증착 피막한 박막을 저온체의 표면에 여러 층 감는 방법도 있다.

단열재의 배치가 결정되면 이 때의 열침입량을 극소치로 하는 다층단열의 층수를 결정하게 되는데, 단열층의 두께가 일정할 때 층수의 증가에 따라 고체 단열층 면에서는 면압의 증가에 따라 전도 열전달이 증가하는 반면, 복사 열전달은 감소 경향을 보인다.

#### 5. 극저온 냉동기의 열설계

##### 5.1 전도에 의한 열전달

단면 A가 일정한 고체를 통한 전도 열전달은 다음 식으로 표현된다.

$$Q_s = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (1)$$

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

##### 5.2 대류에 의한 열전달

다른 열전달 기구에 비하여 잔류가스에 의한 대류열전달을 무시할 수 있는 정도로 되는 것은  $10^{-3}$  Pa 이하의 압력영역이기 때문에 이 이하로 진공도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 다층단열은 통상  $10^{-5} \sim 10^{-7}$  torr 정도의 영역이므로 대류열전달은 무시 가능하다.

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 어려우므로 보다 세심한 주의가 필요하다.

표면에 흡착되기 쉬운 것은 물, 공기, 탄화수소계의 가스 등이 있으나, 수분의 양이 가장 많고 제거하기도 어렵다. 수분의 탈착에는 250℃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.

##### 5.3 복사에 의한 열전달

Coldbox에 많이 사용되어지고 있는 동심원통의 복사열전달 기구에 의한 저온면의 단위 면적당 열전달량은 다음 식으로 표현되어질 수 있다.[7]

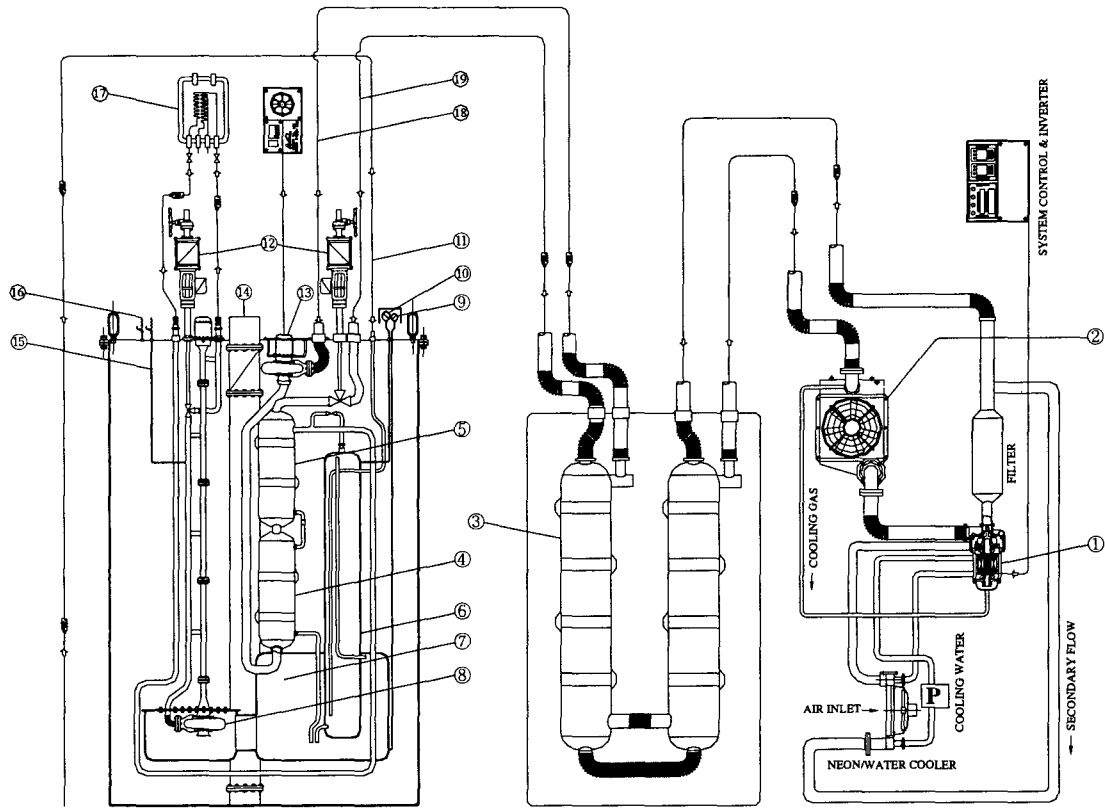


Fig. 4. Schematic diagram of reverse Brayton cryocooler

Table 3. Components of reverse Brayton cryocooler

No.	Spec.
①	Compressor
②	After cooler
③	Recuperator
④	1st heat exchanger
⑤	2nd heat exchanger
⑥	Nitrogen liquid-gas separator
⑦	Liquid nitrogen chamber
⑧	Liquid nitrogen circulation pump
⑨	Pressure gauge
⑩	Liquid level gauge
⑪	Liquid nitrogen inlet line
⑫	Load flow control valve
⑬	Turbo alternator
⑭	Support pipe
⑮	Safety valve
⑯	Vacuum safety valve
⑰	Load(HTS cable)
⑱	Gas Ne inlet line
⑲	Gas Ne outlet line

$$Q_R = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)} \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 방사율,  $A$ 는 표면적,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann상수 ( $5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$ ), 첨자 1, 2는 각각 저온면과 고온면을 나타낸다.

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

#### 5.4 유효 열전도율

MLI 방법을 사용하여 단열할 경우 실험적인 데이터가 확보된 몇몇 경우에 대해 다음과 같은 유효열전도율  $k_t$ 를 이용하여 열손실을 구할 수 있다.

$$k_t = \frac{\left[ \frac{h_c + \sigma \epsilon (T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{(2 - \epsilon)} \right]}{(N / \Delta x)} \quad (3)$$

여기서  $h_c$ 는 MLI의 spacer에 대한 컨덕턴스로 소재의 열전도도, 두께, 기타 소재별 실험적 상수 등과 관련된 값으로 상용되는 주요 소재들에 대해 선 쉽게 구할 수 있다.  $\epsilon$ 는 복사차단 박막의 방사율,  $N/\Delta x$ 는 단위길이당 단열층수,  $T_2$ ,  $T_1$ 은 각각 고·저온 경계면의 온도이다.

식 (3)은 전술한 바와 같이 실험적인 항( $h_c$ )이 포함된다는 단점이 있으나 Dacron 등 널리 사용되는 소재에 대해서는 관련 식과 값들이 공개되어 있으므로 계산이 용이하다. 그리고 총열전달에 대한 전도( $h_c$ )와 복사(기타 항)의 기여 정도를 쉽게 파악할 수 있어 단열시스템 설계, 평가에도 도움이 된다.

MLI의 경우 표면을 따라 평행한 방향으로의 열전도율은 이상에서 살펴본 수직 방향의 열

전도율에 비해  $10^3$  배 정도 크다.[4-6] 이러한 열 전달의 이방성에 의해 구조물의 지지부(support), 부득이하게 단열층을 관통해야 하는 vent line이나 접합·연결부 등에서 심각한 열손실의 우려가 있으므로 설계, 제작시 각별한 주의가 필요하다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 1 kW급 역브레이튼 사이클 극저온 냉동기에 대하여 냉동사이클 및 그 설계에 필요한 각종 핵심 요소기술에 관하여 살펴보았다.

핵심 구성요소로는 PMSM 직결방식의 원심 냉매압축기, 고효율의 열교환기(recuperator), 팽창기(turbo alternator), 실제 부하(고온초전도 케이블 내의 액체질소)를 처리하는 coldbox 그리고 극저온 냉동기로서의 신뢰성 확보를 위한 control valve 등이 있다.

본 연구에서는 구성요소들의 구조적 설계뿐만 아니라 열설계에 대해서도 살펴보았다. 열설계에서 고려해야 할 열전달 현상을 세 가지로 구분하였으며, 이로 인한 coldbox 내로의 열침입량은 다음과 같다. 여기에서 대류에 의한 열침입은 무시하였으며, 또한 Fig. 4의 ㉓인 팽창기에서의 방열량은 제외되어 있다. 이는 팽창기가 현재 개발 중이기 때문이며, 앞으로 여기에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

향후 안정적인 극저온 냉동기로서의 신뢰성을 확보하기 위하여 우선 구성품들의 단품시험을 행한 후 이를 바탕으로 완성품의 성능시험을 할 예정이다.

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

### (참 고 문 헌)

- [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] Randall F. Barron, "Cryogenic Heat Transfer", Taylor & Francis, USA, 1999
- [5] J. G. Weisend, "Handbook of Cryogenic engineering", Taylor & Francis, USA, 1998
- [6] B. A. Hands, "Cryogenic Engineering", Academic Press, London, 1986
- [7] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 582~755, 1996.

구 분		계산침입열량 (W)
전도열전달	각종 밸브류	4
	Access port	3
복사열전달	MLI 단열 (방사율 0.04)	18