# HTS 케이블 냉각용 역브레이튼 사이클 극저온 냉동기 설계에 관한 연구

# Design of Reverse Brayton Cycle Cryocooler System for HTS Cable Cooling

박재홍*, 권용하*, 김영수**, 박성출***

Jae-Hong Park*, Yong-Ha Kwon*, Young-Soo Kim**, Sung-Chool Park***

**Abstract**: The high temperature superconductivity(HTS) cable must be cooled below the nitrogen liquefaction temperature to applicate the cable in power generation and transmi- ssion system under the superconducting state. 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 and the results were applied to construct in house HTS cable cooling system.

**Key Words**: Reverse brayton cycle, Cryocooler, Coldbox, MLI

### 기 호 설 명

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

### 그리스문자

$\mu$ : 점성계수 [$N \cdot s/m^2$]

### 아래첨자

$i,o$ : 입 · 출구
$Ne$ : 네온
$N_2$ : 질소

* 학생회원 : 부경대 대학원 냉동공학과 박사과정
** 정 회 원 : 부경대 기계공학부 교수
*** 정 회 원 : CVECM
원고접수 : 2003년 5월 23일
심사완료 : 2003년 7월 2일

## 1. 서 론

초전도 기술의 산업적 응용을 위한 연구가 1960년대 초반부터 세계 각국에서 활발히 진행되어 왔으며, 이러한 꾸준한 연구개발로서 21세기에서는 초전도 혁명이 그 모습을 서서히 드러낼 것으로 예측된다. 초전도체의 응용분야는 전력기기부터 전자 디바이스까지 모든 분야에 걸쳐 응용이 가능할 정도로 넓다.

전력응용 측면에서 볼 때 초전도 기술의 적용은 현재 구리로 되어있는 선재들의 낮은 효율을 높여 열로 발생되어 아무 소용없이 소모되는 전력을 실제로 쓸 수 있는 전력으로 돌릴 수 있다. 따라서 상당한 전력의 절약이 가능하게 된다. 그리고 상전도로 제작되는 기기들에 초전도체가 상전도체를 대체하게 되면 기기들의 효율에서도 상당한 발전을 얻을 수 있을 것이며, SMES(Superconducting Magnet Energy Storage)나 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter : SFCL) 등의 기기 개발로 인한 전력의 원활한 공급 및 기기 보호에서도 현재에는 기대할 수 없는 효과를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

전자 디바이스에의 적용으로 현재 반도체를 대신하여 초전도로 제작된 칩을 쓰게 되면 현재의 컴퓨터보다 월등히 빠른 컴퓨터의 제작이 가능하다.

의료기기의 응용도 현재 전망이 밝다. 초전도 MRI(Superconducting Magnetic Resonance Instrument)나 SQUID(Superconducting QUantum Interface Device) 등의 기기 개발로 인체의 진단에 있어 현재보다 월등히 정확해지게 되어 오진의 방지 및 발병의 초기진단 가능으로 인간의 수명을 보다 길게 연장시킬 수 있을 것이다.

수송분야의 혁명도 기대되는데 일본, 독일, 미국 등에서 개발중인 초전도 자기부상열차(Superconducting Magnetic Levitation Vehicle)는 현재 고속철도차량에 비해 훨씬 빠른 속도를 갖게 되어 육상수송에서의 혁명이 기대된다. 그리고 환경오염 등의 중요한 문제가 해결될 경우 초전도 전자추진선(Superconducting

Electromagnetic Propulsion Ship)도 전망이 밝아질 것이다. 그러나 이러한 초전도 기술의 폭넓은 산업적 응용을 위한 기반 기술로써 무엇보다도 저온공학의 기술이 뒷받침되어야 하며, 특히 초전도 기술의 산업적 응용을 위한 기반 기술로써 이러한 기기들을 극저온 상태에서 안정적으로 운전할 수 있는 극저온 생성 및 유지기술의 개발이 초전도 기기의 성능 및 경제성을 좌우하는 중요한 관건이라고 할 수 있다.[1]

앞서 언급한 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 고온초전도 케이블 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 필립 연구소에서 내구성 시험중에 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 있으나 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 이러한 고온초전도 케이블 냉각용 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, 희석냉동기, 핵의 소자화 냉동기 그리고 레이저 냉동기 등이 있다.

Recuperator 타입에는 줄-톰슨(Joule-Thomson) 팽창 냉동기, 역브레이튼(reverse-Brayton) 냉동기 등이 있으며, regenerator 타입에 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 베어링 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.

표 1. 극저온 냉동시스템의 종류
Table 1. The kinds of cryocooler system

| 구 분 | 극저온 냉동시스템 |
|---|---|
| 대 형 | Recuperator type<br>(J-T expansion, Reverse-Brayton) |
| 소 형 | Regenerator type<br>(G-M, Stirling, Pulse tube) |
| | Magnetic refrigerator |
| | Dilution refrigerator |
| | Nuclear cooling, Laser cooling |

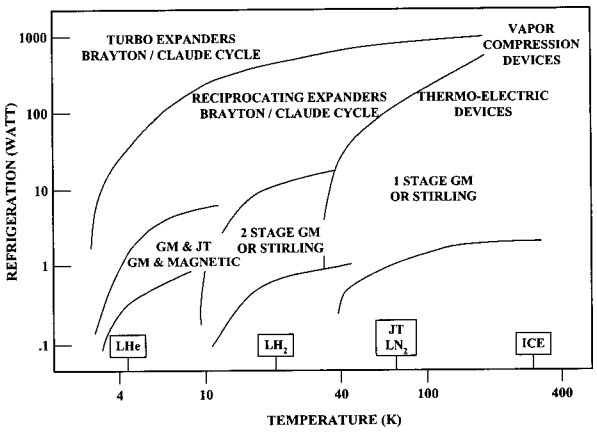


그림 1. 상업용 극저온 냉동기의 온도범위에 따른 냉동능력
Fig. 1. Cooling capacity based on temperature range of commercial cryocoolers

Figure 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.

Figure 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 구조는 Fig. 3과 4에 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 바이패스를 이용하여 제거한다.

표 2. 역브레이튼 극저온 냉동기의 개발규격
Table 2. Configurations 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 |

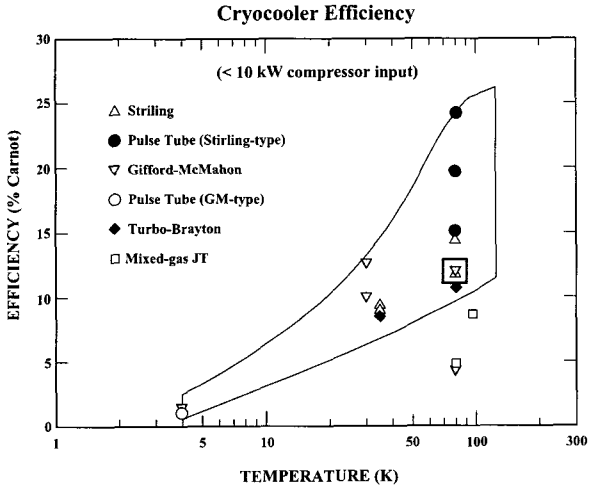


그림 2. 각종 극저온 냉동기의 냉동효율
Fig. 2. Various cryocoolers efficiency

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 ±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)×2000 mm(높이)이며, 재질은 SUS 316L이다. Coldbox의 구성은 크게 열교환기, 질소기액분리장치, 액체질소 순환펌프, 액화질소챔버, 지지대 그리고 각종 밸브류 등으로 되어있다.

Coldbox의 운전은 cooldown 운전과 정상상태 운전으로 나뉘어진다.

Cooldown 운전을 살펴보면 액체질소는 액체질소탱크로부터 coldbox 내로 들어간다. Coldbox 내로 들어온 액체질소는 질소기액 분리장치를 통과하여 액화질소챔버에 모인다. 일정량 이상이 모이면 순환펌프에 의해 부하(load, 실제로는 고온초전도 케이블 내의 부하)측으로 이송된다. 그러나 cooldown 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 4에서 ④와 ⑤는 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.

⑤은 질소기액분리장치로 coldbox 내에서 생기는 질소가스를 액과 분리시키는 역할을 한다. 여기에서 분리된 질소가스는 부하측에서 부하를 처리하고 들어오는 질소와 혼합되어 열교환기로 들어가 재응축된다.

⑦은 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.

⑫는 부하의 변동에 능동적으로 대처하기 위하여 설치한 유량 조절 밸브이다.

⑭는 coldbox 내에 설치되는 각종 기기들의 하중을 지탱하는 지지대로서 이 지지대는 coldbox의 단열성능을 좌우하는 중요한 부분 중의 하나이다. 이 지지대는 coldbox 내의 기기뿐만 아니라 각 기기들에 충진되는 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.

## 4. Coldbox

### 4.1. Coldbox의 단열방법

Coldbox의 단열은 다층단열(MLI) 방법을 사용한

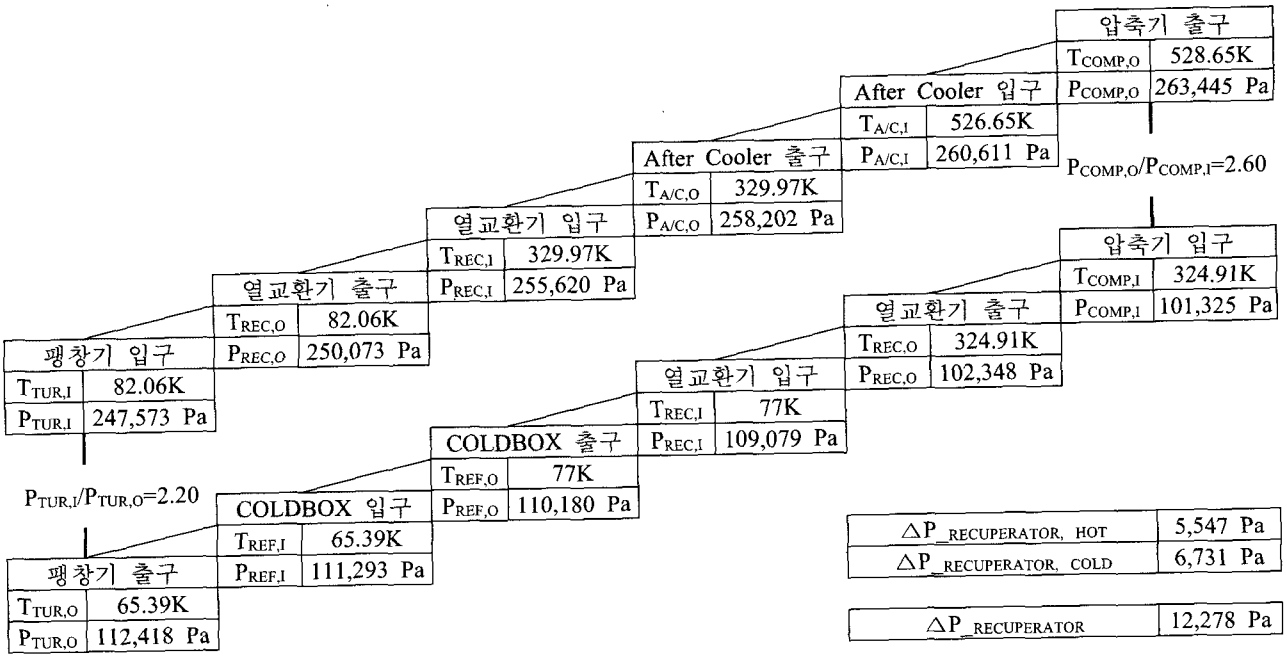


그림 3. 역브레이튼 극저온 냉동기 사이클
Fig. 3. Reverse Brayton cryocooler cycle

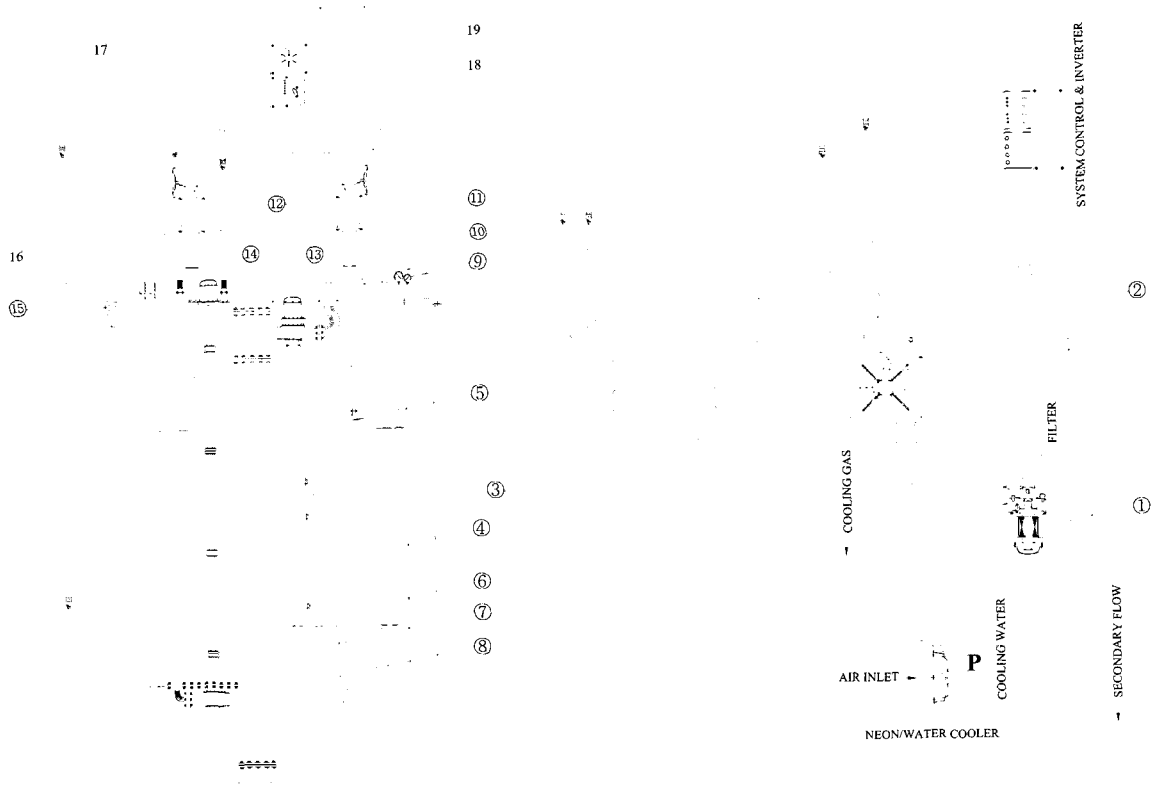


그림 4. 역브레이튼 극저온 냉동기의 개략도
Fig. 4. Schematic diagram of reverse Brayton cryocooler

다. 진공단열보다 우수한 단열특성을 나타내는 MLI는 진공 공간에 여러 층의 복사 반사용 금속박막을 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. Figure 5는 각 단열층의 단열효과를 도식적으로 나타내고 있다. 다층단열의 층수를 많이 하면 통상 단열층의 면압이 증가하고 이에 따라 고체 열전달이 증가하게 된다.

단열재의 배치가 결정되면 이 때의 열침입량을 극소치로 하는 다층단열의 층수가 결정되게 된다. Figure

표 3. 역브레이튼 극저온 냉동기의 구성요소
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 | Liquified 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 |

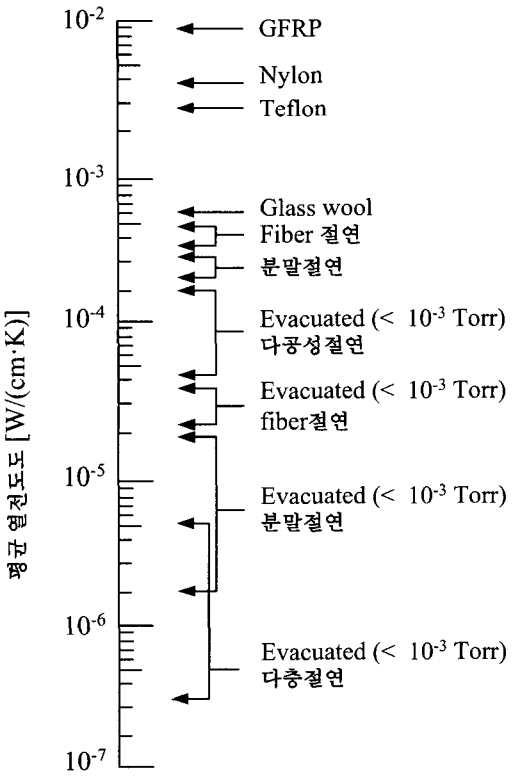


그림 5. 절연방법에 따른 열전도도 (양 끝단 온도 300K, 80K)
Fig. 5. Thermal conductivity of each insulation method (Both ends 300K and 80K)

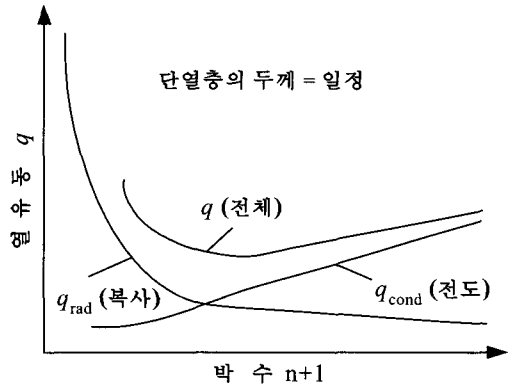


그림 6. MLI의 박수에 따른 열침입량
Fig. 6. Heat transfer rate of MLI

6은 단열층의 두께가 일정할 때 층수의 증가에 따라 고체 단열층 면에서의 전도 열전달의 증가와 복사 열전달의 감소 경향을 나타내고 있다.[4]

### 4.2. Coldbox 내 열교환기 설계

일반적으로 입구와 출구에서의 고온 및 저온유체의 온도들을 안다면, $\Delta T_{lm}$이 쉽게 계산되므로 LMTD법을 사용할 수 있다. 이러한 온도들이 알려진 문제를 열교환기 설계 문제로 분류한다. 전형적으로 원하는 고온유체 또는 저온유체의 출구온도와 함께 유체의 입구온도들과 유량들이 주어진다. 따라서 설계문제는 적절한 열교환기의 형식을 선택하고, 치수를 결정하는 문제, 즉 원하는 출구온도를 이루는데 요구되는 열전달 표면면적 A를 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(평균온도 가정)

$q_{Ne}$은 네온의 흡수열량이다. 따라서 액체질소의 출구온도는 다음 식으로부터 구해진다.

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

구해진 액체질소의 출구온도 $T_{N2,o}$를 이용하여 액체질소의 물성치를 평가하기 위한 평균온도 가정의 타당성을 검증한다.

액체질소의 과냉에 요구되는 관의 길이는 다음 식으로 구해질 수 있다.

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

여기에서 $\Delta T_{lm}$는 대수평균온도차로 다음과 같다.

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

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

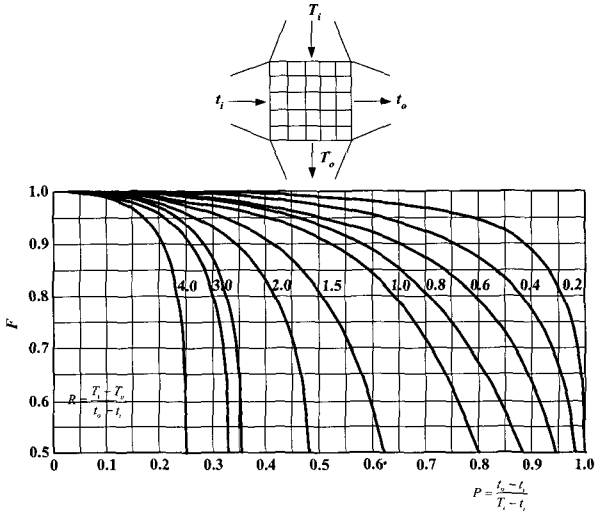


그림 7. 직교유동 열교환기에 대한 수정계수
Fig. 7. Correction factor for cross flow heat exchanger

또한 $F$는 양 유체들이 혼합되지 않는 단일통로, 직교유동 열교환기에 대한 수정계수로써 Fig. 7에서 구할 수 있다.[5]

총괄열전달계수 $U$는 다음과 같다.

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

여기서 $h_{Ne}$는 네온의 열전달계수이고, $h_{N2}$는 액체질소의 열전달계수이다. 네온의 열전달계수는 100 W/m$^2$·K로 가정하였으며, 액체질소의 열전달계수는 관 당 액체질소의 유량을 이용하면 된다.

관을 흐르는 액체질소 유동에 대하여 Re 수는 다음과 같다.

$$Re_{N_2} = \frac{4\,\dot{m}_{N_2}}{\pi D \mu} \quad (6)$$

따라서, 액체질소의 유동형태가 층류일 경우에는 식 (7)을, 난류일 경우에는 식 (8)인 *Dittus-Boelter*식[6]을 사용하여 액체질소측의 열전달계수를 구할 수 있다.

$$Nu_{N_2} = 4.36 \quad (7)$$

$$Nu_{N_2} = 0.023\, Re_{N_2}^{0.8}\, \mathrm{Pr}^{0.3} \quad (8)$$

$$h_{N_2} = \frac{k}{D} \times Nu_{N_2} \quad (9)$$

각각의 열전달계수를 식 (5)에 대입하여 총괄열저항 $U$를 구한 후 식 (2)를 사용하면 요구되는 관의 길이를 구할 수 있다. 여기에서 $A = \pi DL$이므로 구하고자 하는 관의 길이 $L$은 다음과 같다.

$$L = \frac{q}{U\pi DF\Delta T_{lm}} \quad (10)$$

## 5. 극저온 냉동기의 열설계

### 5.1. 전도에 의한 열전달

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

$$Q_s = \frac{A}{L}\int_{T_1}^{T_2} \lambda(T)\, dT \quad (11)$$

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

### 5.2. 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 이 이하로 진공도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 다층단열은 통상 $10^{-5}$ ~ $10^{-7}$ 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 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℃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 충진할 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.

$$Q_R = C_R \cdot C_T \cdot (T_2 - T_1)\ [\mathrm{W/cm^2}] \quad (12)$$

$$C_R = \frac{\sigma}{1/\varepsilon_1 + (A_1/A_2)\cdot(1/\varepsilon_2 - 1)} \quad (13)$$
$$[\mathrm{W/cm^2 \cdot K^4}]$$

$$C_T = (T_2^4 - T_1^4)/(T_2 - T_1)\ [K^3] \quad (14)$$

여기서, $\varepsilon$는 방사율, $A$는 각각의 면의 표면적, σ는 Stefan-Boltzmann상수($5.67\times10^{-12}$ W/cm$^2\cdot$K$^4$), 첨자 1은 저온면, 첨자 2는 고온면을 각각 나타낸다.

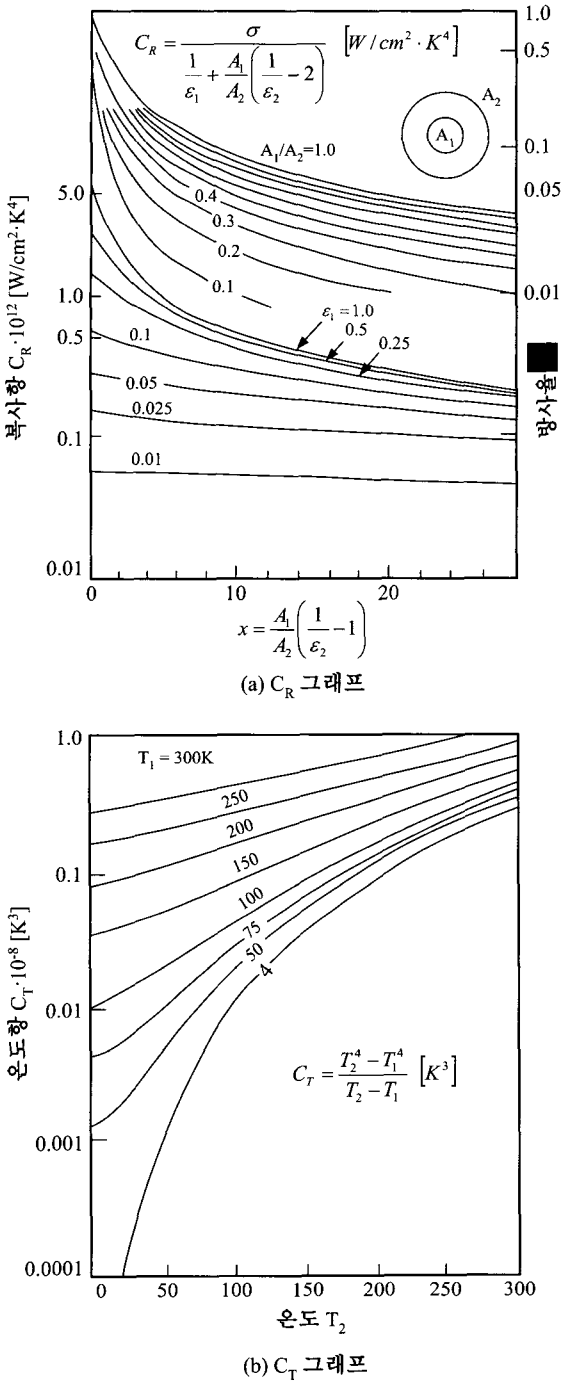


그림 8. 복사열손실 계산 그래프
Fig. 8. Graph for calculating radiation heat loss

Figure 8에 위 식에서 $C_R$과 $C_T$를 쉽게 구할 수 있는 그래프를 나타내었다.

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

### 5.4. 유효 열전도율

대류의 영향을 무시할 수 있는 경우에 대하여 MLI 방법을 사용하여 단열할 경우 실험적인 데이터가 확보된 몇몇 경우에 대해 다음과 같은 유효열전도율 $k_t$를 이용하여 열손실을 구할 수 있다.[4]

$$k_t = \frac{\left[\frac{h_c + \sigma\varepsilon(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{(2 - \varepsilon)}\right]}{(N/\Delta x)} \quad (15)$$

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

식 15는 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 수직한 방향으로의 열전도율에 비해 $10^3$ 배 정도 크다.[4-6] 이러한 열전달의 이방성에 의해 구조물의 지지부(support)나 부득이하게 단열층을 관통해야 하는 vent line이나 접합·연결부 등에서 심각한 열손실의 우려가 있으므로 설계, 제작시 각별한 주의가 필요하다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 고온초전도 케이블 냉각용 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 냉동기로써의 신뢰성 확보를 위한 control valve 등이 있다. 이들 중 냉매압축기의 제작이 현재 진행 중에 있으며, 그 외 구성품들 또한 제작완료 내지는 진행 중에 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 ⑬인 팽창기에서의 방열량도 제외되어 있다. 이는 팽창기가 현재 개발 중이기 때문이며, 앞으로 여기에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

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

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

## 감사의 글

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, pp. 34~38, 1999
[5] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 582~755, 1996
[6] Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., "University of California, Berkeley", Publications on Engineering, Vol. 2, p.443, 1930
[7] J. G. Weisend, "Handbook of Cryogenic engineering", Taylor & Francis, USA, 1998
[8] B. A. Hands, "Cryogenic Engineering", Academic Press. London. 1986

## 저 자 소 개

**박재흥(朴載弘)**
1975년 2월 22일생, 1999년 부경대 냉동공학과 졸업, 2001년 동 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 냉동공학과 박사과정

**권용하(權容廈)**
1978년 1월 14일생, 2002년 부경대 냉동공학과 졸업, 현재 동대학원 냉동공학과 석사과정

**김영수(金永守)**
1957년 11월 16일생, 1979년 부산대 기계공학과 졸업, 1994년 Canada Concordia Univ. 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대 기계공학부 교수

**박성출(朴成出)**
1965년 12월 22일생,
이일테크 대표이사,
고려엔지니어링 대표이사,
CVECM 대표이사