

## 가속기에서의 극저온 기술의 응용

김 경 렬

포항가속기연구소, 포항공과대학교

### 1. 서 론

저온 (Cryogenic Temperature) 범위는  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-123\text{ K}$ )으로부터 분자운동이 이론적으로 완전히 정지하게 되는 절대 온도  $0\text{ K}$  ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ )로써 정의되고 있다[1]. 저온 공학의 정의는 연구자에 따라 다소 차이가 있으나, 액체수소 온도  $20\text{ K}$ 로부터  $1\text{ K}$  정도를 극저온으로 그 이하의 온도를 초저온으로 구분하는 것이 일반적이다. 또한, 극저온에서의 초전도성과 구분하여 액체질소 온도 ( $77.35\text{ K}$ ) 이상의 범위에서 초전도성을 나타내는 경우를 고온 초전도 (HTS)라고 정의하고 있다. 저온공학의 응용 분야를 크게 나누어 보면, 액화 천연가스 (LNG)와 같이 가스의 액화 및 분리, 저장 및 수송, 재료 및 유체의 물성 연구, 생체 및 의료, 초전도 분야 등으로 나누어 볼 수 있으며, 저온공학은 기본적으로 다른 기술과의 상호 접목을 통하여 주어진 기능 및 응용을 가능하게 하는 원천적인 유틸리티 개념으로 발전을 거듭하여 오고 있다.

일반적으로 고에너지 입자 가속기 (Particle Accelerator)에서의 극저온 기술은 초전도 전자석, 고주파 공동 (Radio-frequency Cavity) 및 검출기 (Detector) 등, 가속장치 및 실험장치의 초전도 운전을 가능하게 하는 일종의 보조 기술로써, 극저온 시스템의 선택은 사용하고자 하는 초전도 가속 장치의 특성에 따라 결정되고 있다. 최근, CERN에서 2007년 완공을 목표로 건설중인 LHC (Large Hadron Collider)는 약  $27\text{ km}$ 의 대형 충돌형 입자가속기로서, 총 1800여개의 초전도 전자석 및 288개의 초전도 공동 ( $350\text{ MHz}$ )의 8개의  $3.3\text{ km}$ 의 섹터로 구성되어 있으며,  $1.9\text{ K}$ 의 운전 온도를 유지하기 위하여  $1.8\text{ K}$ 의 극저온 냉각 능력을 가진 초유동 헬륨 (Superfluid Helium, He II)을 이용한 대규모의 극저온 냉동시스템을 구축하고 있다[2]. 또한, 미국 ORNL의

SNS (Spallation Neutron Source)는 세계 최초로 선형양성자가속기에 초전도 기술을 접목한  $1\text{ GeV}$  양성자 가속장치로써, 초전도 RF 공동의 설계 운전온도는 초유동 헬륨 영역의  $2\text{ K}$ 이며, 2006년 6월, 빔에너지의 운전을 목표로 건설이 진행되고 있다. 독일을 중심으로 한 유럽 국가에서 공동으로 계획중인 TESLA (Tera-eV Energy Superconducting Linear Collider)는 약  $33\text{ km}$ 의 양전자/전자 충돌형가속기로서 9-셀 Nb 초전도 공동 (L-band,  $1.3\text{ GHz}$ )을 채택하고 있으며, 각 가속공동의 운전 온도는 He II의  $2\text{ K}$ 로 설정하고 있다. 또한 독일 DESY 연구소에서는 TESLA의 각종 초전도 가속장치의 시험을 위한 시험설비 (TTF)를 구축하여 가속 공동의 가속성능 및 극저온 설비의 운전 특성 등을 연구하고 있으며, 2012년 빔운전을 목표로 초전도 가속공동을 이용한 TESLA XFEL 건설도 계획 중에 있다[3-5]. 최근, 국제 미래 가속기위원회 (ICFA) 산하 ITRP에서는  $1\text{ TeV}$  급의 국제 선형충돌형가속기 (International Linear Collider, ILC)의 RF 가속 기술로써, 소위 Cold Technology로 인식되고 있는 초전도 기술을 추천하고 있으며[6,7], 이를 계기로 고에너지 입자가속기의 초전도 RF, 극저온 기술의 획기적인 개발 및 응용이 기대되고 있다.

본 보고에서는 최근 거대 입자가속기의 기반 요소기술로써 그 중요성이 한층 증대되고 있는 극저온 기술의 동향을 살펴보고, 극저온 용기의 설계, 열부하 계산 및 냉각능력의 분배를 위한 액화냉동 시스템의 구성과 국내의 입자 가속기에의 극저온 기술의 응용을 포함한 향후 전망을 논하고자 한다.

### 2. 가속기의 극저온 냉동시스템의 활용 현황 및 특징

고에너지, 고출력의 대형 입자가속기에서 요구되는 액화냉동기의 냉동능력은 표 1에서

표 1 초전도 입자가속기와 대형 He 액화냉동기의 냉동능력

초전도 입자가속기	온도 (K)	냉동능력 (kW)	액화용량 (g/sec)	부하전력 (MW)	He 저장용량 (kg)
TEVATRON (미국, FNAL)	4.65 76.0 <sup>1)</sup>	14 230	48.6	12	14,400
HERA (독일, DESY)	4.4 40/80	20.2 60	61.5	8.1	15,000
LHC (스위스, CERN)	1.8 4.5/10 50/70	14.4 68 240	240	40	53,000
CEBAF (미국, JLab)	2 4.5 40/80	4.8 12	10	6.3	15,000
TESLA (독일, DESY)	1.8 4.5 40/80	80 32.4 230	-	129	76,000
SNS (미국, ORNL)	2.1 4.5	2.4 20	-	-	7,000

<sup>1)</sup> 열차폐 및 He 냉동기의 예비냉각으로 LN<sub>2</sub> 사용

기술한 바와 같이, 대형 액화냉동기가 널리 사용되고 있으며, 냉동능력은 4.2 K의 온도를 기준으로 환산한 경우, 수 kW에서 수십 kW 로써 현재 산업용으로 생산되고 있는 개별 액화냉동기의 용량을 크게 초과하고 있다[8,9]. 극저온 헬륨 냉동기는 일반적으로 Cold Box 및 열교환기, 압축기, He 액체, 가스 저장 및 정제기, 진공 및 분배 장치 등으로 구성 되어 있으나, 유동 면적 등의 한정된 크기로 인하여 개별 액화냉동기의 규모의 증대에 실제적인 제약이 존재하고 있다. 입자가속기에서의 냉동시스템은 그림 1에서 도시한 바와 같이 (SNS 냉동시스템) 여러 개의 개별 냉동기의 조합과 냉각능력의 부하 분산이 용이하도록 구성되고 있으며, 이의 일반적인 요구사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 서로 상이한 온도에서 충분한 냉동 출력 및 전송의 확보
- (2) 분산 시스템으로부터 개별 부품 또는 조합 부품의 공급
- (3) 다양한 운전 모드의 취급
  - 냉각 (Cool down)
  - 가열 (Warm up)

- 과도상태 (액체의 충전, 가속운전에 서의 동적 손실 등)
  - 정상 운전
  - 켄칭 (Quenching)
- (4) 가스의 회수 및 저장
  - (5) 프로세스 제어
  - (6) 인명 및 장비의 보호 시스템

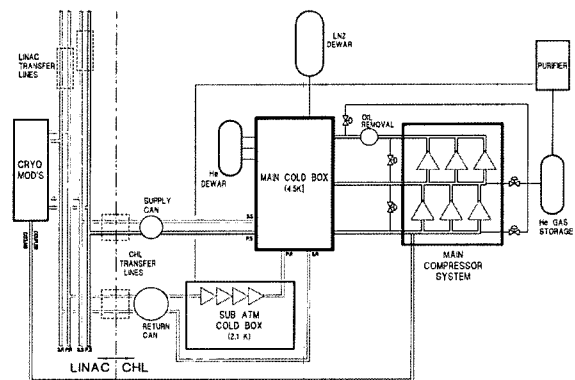


그림 1. ORNL-SNS 양성자가속기의 초전도 가속공동의 액화 냉동시스템 배치도[10].

입자가속기의 초전도 장치는 주로 Nb-Ti 합금의 초전도 전자석, 순수 Nb의 가속 공동이 주류를 이루고 있으며, Nb계열의 재료는

초전도성을 위한 임계천이온도가 10 K 범위  
로써, 가속기 초전도 장치의 열부하 냉각을  
위한 냉각재로써는 액체 헬륨 (비등점: 4.2 K,  
임계점: 5.2 K)이 유일한 냉각 매체라고 할 수  
있다. 헬륨은 현재 천연가스의 부산물로써 추  
출되고 있으며, 세계에서 소비되고 있는 헬륨  
의 90% 이상이 미국에서 생산되고 있다. 헬륨  
은 단원자 분자의 불활성 및 무독성의 가스로  
써  $^4\text{He}$ 과  $^3\text{He}$ 의 동위원소가 있으며,  $^3\text{He}$ 은  
0.00014% 밖에 존재하지 않아 가격이 비싼 반  
면,  $^4\text{He}$ 는 비교적 가격이 저렴 (약 17 \$/kg)하  
여 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다[11].

그림 2에 도시한 바와 같이, He의 액상은 2  
가지의 상 (Phase)으로 존재하고, 고온 측의  
액상을 He I, 저온 측의 액상을 He II로 구분  
하고 있다. He의 액상이 변화하는 온도를  $\lambda$ 점  
이라 하며, 대기압에서의  $\lambda$ 는 2.17 K이다.  $\lambda$   
선 이하에서는 초유동 헬륨 (Superfluid  
Helium)과 일반적인 헬륨이 공존하는 He II  
상태가 된다. 초유동 상태에서는 점성이 극히  
작게 되어 매체의 유동에 따라 열을 전달할  
수 있으며, 미소한 간격 등을 투과할 수 있는  
성질을 가지고 있다. 그림 3은 액체 헬륨의 온  
도변화에 따른 포화증기압 선도로써, 4.2 K에  
서 1 atm, 0.031 atm으로써 이때, 최소 압축  
비가 약 32 정도이다.

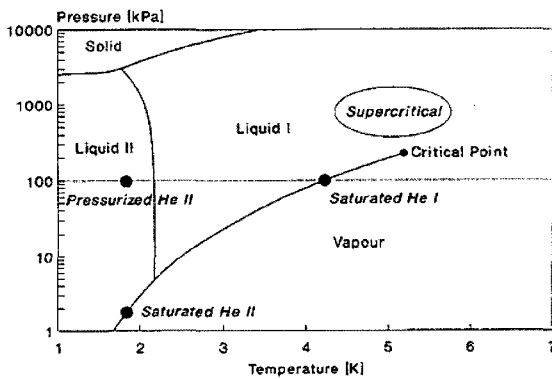


그림 2. 초전도 가속장치의 냉각을 위한 헬륨의 상태도[11]

특히, 2 K에서의 초유동 액체 헬륨 (He II)  
을 이용한 초전도 전자석의 냉각은 다음과 같  
은 특징을 가지고 있다[9].

- (1) 정상상태에서의 열유속이 크며, 이는  
포화초유동 헬륨 (Saturated Helium

II)보다도 가압초유동 헬륨(Pressurized  
Helium II)의 경우가 크다.

- (2)  $\lambda$ 점에서의 액체 헬륨의 비열이 최대로  
되기 때문에 초전도 전자석 등으로부터  
방출되는 에너지를 흡수할 수 있다.  
1.8 K로부터  $\lambda$ 점까지의 흡수가능 에너  
지는 약 290 J/l이며, 4.2 K의 경우에는  
90 J/l의 에너지를 흡수할 수 있다. 따  
라서, 초전도전자석이 켜칭이 일어나는  
경우에도 액체 헬륨은 비등 (Boiling)하  
지 않게 된다.
- (3) 초유동 헬륨이 가지고 있는 엔탈피에  
의하여 초전도전자석의 온도 상승을 억  
제할 수 있다 ( $10^{-3}\text{cc}$ 에서 0.3 mJ).
- (4) 가압초유동 상태에서는 비등에 의한 가  
스의 발생이 억제되어 절연과괴 전압을  
높일 수 있다.

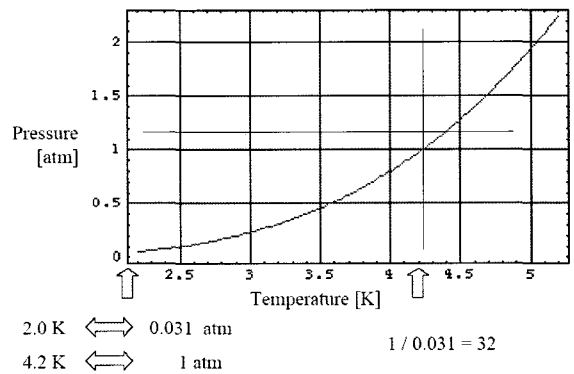


그림 3. 액체헬륨의 온도-포화증기압의 관계

또한, 초전도 전자석 및 가속 공동과 같은  
초전도 장치의 예비냉각을 위한 냉각재로써  
액체 질소 ( $\text{LN}_2$ )가 널리 사용되고 있다. 액체  
질소는 누설의 경우, 가속기 터널과 같은 구  
획된 공간에서는 심각한 산소결핍의 위험성이  
있으므로 주로 지상에 위치한 증발기 또는 열  
교환기의 헬륨 가스의 예비 냉각 등으로 사용  
하는 것이 편리하다. 그림 4는 초유동 He II  
냉동기의 프로세스 선도의 일례를 도시하고  
있다. 초유동 He II 냉동기는 일반적으로 헬륨  
액화기와 액체 헬륨을 배기하여 초유동 He II  
를 생성하는 냉동부분과, 포화 초유동 He II와  
열교환을 통하여 가압 초유동 He II을 생산하  
는 열교환기부로 구성되어 있다. 특히 대용량  
의 냉동능력을 가지고 있는 냉동기는 진공 배

기 펌프가 대형으로 되어 배기된 증발 헬륨가스의 현열 (Latent Heat)을 이용할 수 없기 때문에 저압 압축기 (Cold Compressor)로 압축하여 Cold Box로 회수하는 방법을 일반적으로 채택하고 있다.

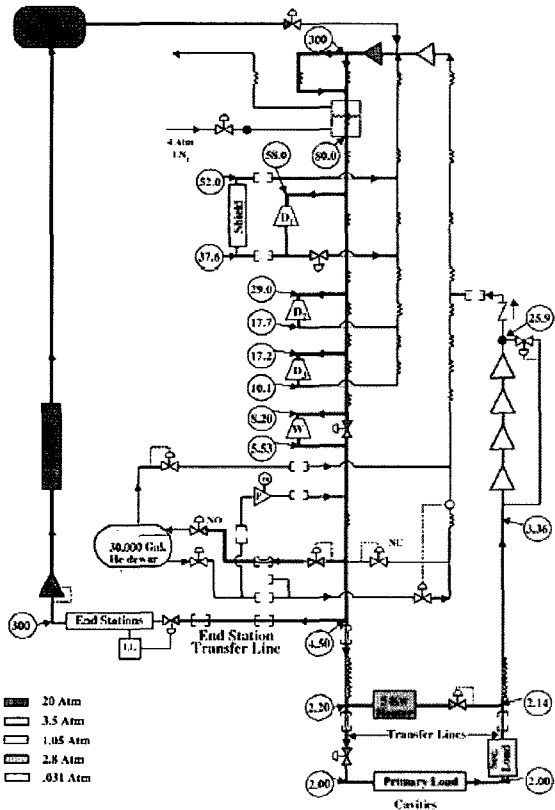


그림 4. JLab의 CEBAF 4.8 kW 초유동 He II (2 K) 냉동기의 프로세스 선도[12]

### 3. 초전도 장치의 극저온 용기 설계, 열부하 계산 및 냉각 능력

대형 입자가속기의 초전도 전자석 및 가속 공동 등의 초전도 장치에 액체 냉매를 공급하는 저온용기 (Cryostat)는 극저온 냉동시스템의 총 투자비용의 많은 부분을 차지하고 있다. 또한, 시스템의 열부하를 결정하게 되는 단열 성능에 따라 극저온 시스템의 운전비용이 크게 영향을 받고 있다. 저온용기의 기술적 중요성은 극저온 기술뿐 만 아니라 초전도 장치의 지지 및 정확한 위치 조정, 정상 및 과도 운전 상태에서의 냉각재의 오염, 단열을 위한 진공 누설의 방지 및 초전도 전자석 저

용기의 경우, 떠돌이 자장 (Stray Field)의 자기장 스크리닝 (Magnetic Screening) 등의 다양한 기본적인 기능을 가지고 있다.

극저온 용기는 일반적으로 저온 취성이 작은 스테인리스 강 (SUS316 또는 SUS316L)의 금속 재료로 제작되고 있으며, 액체 헬륨 저장조, 액체 질소 온도로 열을 차폐하기 위한 액체 질소 저장부, 열차폐 다층 단열막 (Multilyer Reflective Insulation, MLI, Superinsulation), 극저온부의 진공 단열을 위한 진공조 등으로 구성된다. 또한, 초전도 전자석 등의 피냉각물의 인입을 위한 나사 조립 형식의 플랜지와 외부로 부터의 공기의 흡입과 같은 기밀을 유지하기 위한 밀봉 장치, 액체 헬륨의 주입, 증발 헬륨가스의 배기, 전류 인입을 위한 리드선, 각종 신호의 인출을 위한 포트 및 헬륨 저장조의 압력 상승을 방지하기 위한 안전밸브, 외부로 부터의 복사열을 차단하기 위한 열차단판, 부대 장치로서 액체 헬륨 액면계, 온도계, 압력계, 유량계 등이 부착되어 있다.

극저온 용기의 액체 헬륨 저장조의 기밀성이 악화되는 경우, 냉각운전 중에 외부로부터 공기가 흡입되어 공기 중의 산소 또는 질소가 고체화 되는 현상이 발생할 수 있다. 극저온 용기에 액체 헬륨을 주입하기 위한 이송용 튜브 (Transfer Tube) 등을 삽입하는 경우, 튜브의 온도차가 발생하게 되고 수 Hz 정도의 진동이 발생하게 된다. 이와 같은 진동은 열의 발생을 초래하게 됨으로써, 액체 헬륨의 이송 도중에 급격한 증발을 일으킬 수 있으므로 튜브 삽입부의 길이 또는 형상을 변화시키는 등의 대책이 필요하다. 그림 5는 CERN의 LHC에서의 초전도 가속공동 (4.5 K에서 최대 냉동능력 12 kW (4대), 8 대의 250 m 초전도 가속공동의 헬륨 공급, 9,600 kg의 헬륨 저장)의 설치 예를 도시하고 있다.

극저온에서의 저온 용기의 열유동 설계를 위한 열유속의 대표적인 내용을 살펴보면 표 2와 같다. 극저온 용기는 잔류 가스에 의한 열전도를 최소화하기 위하여 분자 영역의 잔류 압력 (헬륨의 경우, 10<sup>-1</sup> Pa 이하)이 유지될 수 있도록 진공 배기 단열 공간을 유지하여야 한다. 이때, 극저온 용기의 열부하의 주요 요인은 고온면 으로부터 가속장치의 냉각매체로의 열복사 (Thermal Radiation)이며, 이는 표면의 방사율 (Emissivity) 및 온도의 4승에 비

례하게 된다. 최근, 초전도 가속기의 주요 극저온 장치는 열복사에 의한 열부하를 최소화하기 위하여 다층 단열막을 주로 사용하여 극저온 용기를 설계하고 있다. 이때, 가스에 의한 열전도 및 열복사의 차폐와 더불어 저온용기 구조체의 고체 열전도에 의한 열전달이 존재하는 경우, 항복강도 대비 열전도도가 낮은 복합재 (G-10 Glass-epoxy Composite)등을 사용하여 열전도 경로를 차단할 필요가 있다. 더욱이, 초전도 전자석 및 가속 공동 등의 극저온 용기의 열침입에 의한 열부하는 가속장치의 전체 열부하의 일부에 국한하고 있으나, 가속장치의 저항 및 입자 손실, 고조파의 생성 등에 의한 열부하를 동시에 생각할 수 있는 구조로 설계되고 있다.

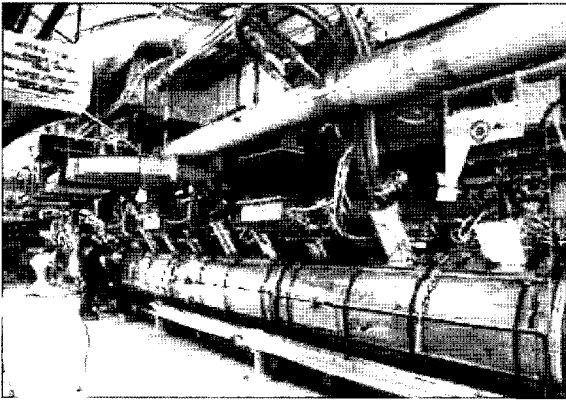


그림 5. CERN-LHC의 터널에서의 가속 공동의 극저온 용기 설치 현황[2]

표2. 저온에서의 열유속 분포(W/m<sup>2</sup>)[11]

290 K 으로부터의 흑체 열복사	401
80 K 으로부터의 흑체 열복사	2.3
290 K 으로부터의 잔류 가스의 열전도 (100 mPa He)	19
290 K 으로부터의 잔류 가스의 열전도 (1 mPa He)	0.19
290 K 으로부터의 다층 단열막 (30층) (잔류 압력 1 mPa 이하)	1.5
80 K 으로부터의 다층 단열막 (10층) (잔류 압력 1 mPa 이하)	0.05
80 K 으로부터의 다층 단열막 (10층) (잔류 압력 100 mPa 이하)	~2

초전도 가속기는 가속 장치 터널 내의 초전

도 장치로부터 열을 추출하여 극저온 냉동설비까지 수백 미터 또는 수 킬로미터에 걸쳐 헬륨을 전송을 하고 있다. 이때, 냉동기의 냉동능력은 원거리의 극저온 저온용기의 온도보다도 더 낮은 온도를 유지하지 하여야 하기 때문에, 이로 인하여 각 초전도 장치의 모듈 별로 온도의 불균일성이 발생하게 되고, 냉동기의 냉동부하의 증가에 따른 운전비용이 상승하게 된다. 즉,  $W$ 를 냉동 소요동력,  $Q$ 를 온도  $T$ 에서의 초전도 장치의 열부하 (냉동능력),  $T_a$ 를 외기 온도,  $\eta$ 를 극저온 냉동기의 Carnot 효율이라고 하면, 이때,  $W$ 는  $Q$ 와의 관계식은 다음과 같다.

$$W = \frac{Q(T_a - T)}{\eta T}$$

또한, 극저온 용기로부터 냉동기까지 열이 전송되는 경우,  $\Delta T$ 의 온도 저하가 나타나게 되면  $T - \Delta T$ 에서의 추가적인 냉동 소요동력,  $W + \Delta W$ 이 발생하게 된다. 즉,

$$\Delta W = \frac{Q T_a \Delta T}{\eta T (T - \Delta T)}$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{T_a \Delta T}{(T_a - T)(T - \Delta T)}$$

즉, 극저온 상태에서의 미소한 온도 기울기는 냉동기에 상당한 정도의 소요 동력의 증가를 유발하게 되어 극저온 설비의 설비 투자 및 운전비용을 증가시키게 된다. 따라서, 입자가속기의 초전도 장치의 극저온 환경하의 냉동기 소요 동력의 최소화를 위한 온도 기울기는 1 K이하로 유지하는 것이 바람직하다 [11]. 특히, 가속기의 초전도 장치의 구성은 유효 열부하 전송거리를 감소시키기 위하여 각 초전도 장치의 구획화 (Sectorizing), 초전도 장치와 액체 헬륨의 젖음 구간의 증가를 통한 열전달의 상승, 가속기 터널에서의 극저온 배관의 단열 및 적정 크기 선정을 통한 열손실, 마찰 압력 및 정수 압력의 차이에 기인하는 배관계의 온도 기울기의 최소화, 열교환기의 고전도성 재료의 사용 등을 통하여 온도 기울기를 적정 범위로 유지하고 있다. 또한, 가속기의 초전도 장치는 대형 진공 용기 내에 극저온 배관 및 극저온 용기를 포함하는 집합체

형식을 취함으로써 극저온 장치의 설치 및 정렬, 부품의 교체를 다소 어렵게 하는 측면도 있으나, 가속 터널의 공간 활용도를 제고할 수 있는 구조를 채택하고 있다. 그림 6은 CERN-LHC의 극저온 용기의 구조 및 헬륨의 공급, 회수를 위한 분배계통을 포함한 Cryomodule의 일례를 도시하고 있다.

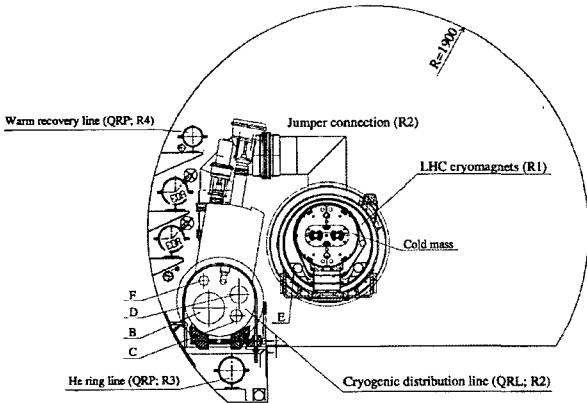


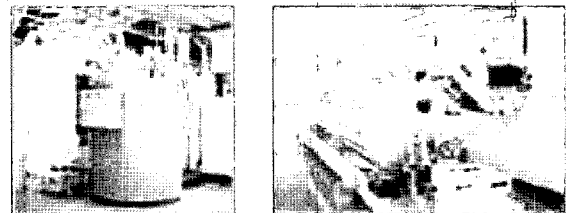
그림 6. CERN-LHC 터널의 초전도 전자석의 극저온 용기 및 헬륨 분배계통을 포함한 Cryomodule 단면도

#### 4. 극저온 기술의 전망

고에너지 입자가속기에서의 대형 극저온 냉동설비는 CERN-LHC 건설과 병행하여 초유동 He II (1.8 K) 운전을 위한 무윤활 (Oil-Free Lubrication) 회전 기구를 채택한 저압 압축기 (Cold Compressor)의 개발, DESY-TESLA 및 ILC 대형 극저온 냉각시스템의 연구 등이 국제적으로 활발하게 진행되고 있다. 또한, 나사 압축기 (Screw Compressor) 및 4단 저압 압축기를 조합한 혼합 압축 사이클 (Mixed Compression Cycle)을 이용하여 압축비의 상승 및 성적계수의 개선 등을 도모하고 있다[13,14]. 특히, ILC 연구그룹에서는 극저온 냉동시스템의 구현을 위하여 단일 냉동기의 냉각능력을 2 K에서 5.2 kW까지 개선함으로써 건설비용 및 운전비용의 절감하기 위한 개념을 검토하고 있다[15]. 최근, 일본 고에너지연구소 (KEK)에서는 2004년도부터 3개년 계획으로 극저온 냉동

설비의 공정제어기의 CPU 기억장치의 방사 환경에 의한 소손을 계기로, 국제적으로 가동종료, 운전 및 향후 계획 중인 초전도 전자석용 극저온 설비의 장비사양 정보 및 소손 정보를 종합적으로 검토하여 세계적인 극저온 설비의 데이터베이스를 구축하고, 관련 자료를 공개함으로써 고에너지 입자가속기용 극저온 냉동시스템 연구의 활성화를 목표로 하고 있다[16].

국내에서는 그림 8 및 9에 각각 도시한 바와 같이, 원자력연구소의 전자빔 조사용 가속기 (최대 빔 에너지: 10 MeV)의 극저온 헬륨 냉각시스템 및 포항가속기연구소의 최대 47 l/hr (70 W급)의 냉동능력을 가지는 액화냉동기 등이 운영 중에 있다. 우리나라에서는 현재, 원자력연구소의 100 MeV급 이상의 양성자가속기 및 의료용 중이온 가속기 등이 일부 개발 또는 계획 중에 있으며, ILC의 국내 연구진의 참여를 통한 초전도 가속장치 개발과 병행하여 극저온 냉동시스템의 연구개발이 활발하게 진행될 것으로 예상된다.



(a) (b)

그림 7. 한국원자력연구소의 전자빔 조사용 가속기 (a) LHe 냉동기, (b) 초전도 가속모듈

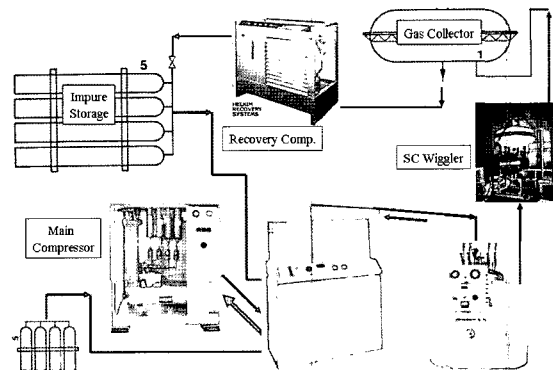


그림 8. 포항가속기연구소의 액화냉동설비

참고문헌

- [1] “cryogenics” Encyclopædia Britannica  
<http://search.eb.com/eb/article-9028071>
- [2] Giorgio Passardi and Laurent Taviani, “How CERN keeps its cool,” CERN Courier, Vol. 45, No. 10, pp. 28 (2005)
- [3] TESLA Technical Design Report, Part II-The Accelerator, TESLA Report 2001-23, March (2001)
- [4] TESLA XFEL Technical Design Report-Supplement, DESY 2002-167, TESLA-FEL 2002-09, October (2002)
- [5] Yu Xiang, et. al., “An Experimental and Numerical Study of He II Two-Phase Flow in the TESLA Test Facility,” Cryogenics 42, pp. 719-731 (2002)
- [6] ITRP Final Report, Sept. (2004),  
<http://www.linearcollider.org>
- [7] Alexander Gamp, “On the Preference of Cold Technology for the International Linear Collider,” TESLA Report 2005-23 (2005)
- [8] G. Horlitz, “Review of Large Scale Cryogenic System for Accelerators,” Proc. of EPAC1992, pp. 297 (1992)
- [9] KEK Professional Training Course, “Cryogenic Temperature and Superconductivity Technologies”, KEK Proceedings 98-13, pp 64 (1999)
- [10] F. Casagrande, et. al., “Status of the Cryogenic System Commissioning at SNS,” Proc. of PAC2005, pp. 970 (2005)
- [11] Philippe Lebrun, “Cryogenic Systems for Accelerators,” CERN AT/95-98 (CR), (1995)
- [12] Claus H. Rode, “History of JLab Cryogenics,” Presented at Cryogenic Operation 2004, March 30, Jefferson Lab. USA (2004)
- [13] S. Claudet, “Recent Progress in Power Refrigeration Below 2 K for Superconducting Accelerators,” Presented at PAC05 (2005)
- [14] S. Yoshinaga, et. al., “Development of 1.8 K Helium Refrigeration System for CERN,” IHI Engineering Review, Vol. 38, No. 1, February (2005)
- [15] M. Sanmarti, et. al., “Issues Concerning the Reliability of The LHC Cryogenic System,” LHC Project Workshop-Chamonix XIV, pp. 115 (2005)
- [16] K. Aoki, et. al., “Development of A Database of The Cryogenic System for The Superconducting Magnet,” Proc. of PAC2005, pp. 970 (2005)

저자이력



김경렬(金景烈)  
 1980-1984년 전북대학교 기계공학과, 1984-1986년 전북대학교 기계공학과(석사), 1990- 1992년 한양대학교 기계공학과(박사과정), 1993-1999년 경북대학교 기계공학과(박사), 1987-1989년, 한국원자력연구소 연구원, 현재 포항공과대학교 포항가속기연구소 책임연구원