

# 고온초전도 케이블 단말용 cryostat 설계

양형석, 김승현, 김동락, 조승연, 김도형, 류희석\*, 성기철\*  
한국기초과학지원연구원, 한국전기연구원\*

## Design of Termination Cryostat for HTS Power Cable

H.S. Yang, S.H. Kim, D.L. Kim, S.Y. Cho, D.H. Kim, H.S. Ryoo\*, K.C. Seong\*  
Korea Basic Science Institute, Korea Electrotechnology Research Institute\*

yanghs@kbsi.re.kr

**Abstract** - Termination cryostat for 22.9kV, 1.26kA-class HTS power cable has been designed. The cryostat consists of vacuum vessel, liquid nitrogen vessel, current lead and HTS power cable. The current lead and the HTS power cable are connected in liquid nitrogen vessel cooled by forced-circulation subcooled liquid nitrogen. The maximum total heat load of this cryostat is expected to be 150W. In this paper, the detailed design of the termination cryostat is mentioned.

### 1. 서 론

대도시의 전력공급은 지하관로를 통해 주로 이루어지며, 전력수요의 증가로 인해 지하관로의 확장이 요구되고 있다. 그러나, 대도시에서는 지하공간의 과밀화로 신규 지하관로의 건설은 어렵게 될 것으로 예상된다. 이와 관련하여 대전류 통전이 가능한 초전도케이블은 냉각을 위한 설비 및 공간이 필요하다는 제약은 있으나, 동일한 크기로 대전류를 통전할 수 있고, 신규 관로설치에 따른 공사비용 절감, 지하공간의 효율적 이용이 가능하므로 새로운 개념의 전력수송용 케이블로 기대되고 있다. 특히, 고온초전도체의 발견으로 종래의 고가인 액체헬륨을 이용하는 저온초전도체를 이용한 저온초전도케이블 보다 유지 및 보수 측면에서도 경제적인 초전도케이블전력시스템을 구축할 수 있게 되었다. 이 시스템에는 냉각 시스템이 필요하며, 그 구성은 크게 나누어 단말 cryostat, 케이블 cryostat, 액체질소순환계로 나누어진다. 그 중 단말 cryostat은 고온초전도 케이블에 전류도입선을 통하여 전력을 공급하는 연결부로, 그 설계에는 열 및 기계적설계와 전기적 설계 부분이 필요하다. 특히, 열적 설계부분에는 전체시스템의 안정적 이용을 위해, 침입열의 감소 및 냉각효율의 증대 등을 고려한 설계가 요구된다. 본 연구에서는 설계된 단말cryostat의 구조 및 특징 중 냉각 및 구조적 측면에서 소개한다.

### 2. 단말 cryostat설계

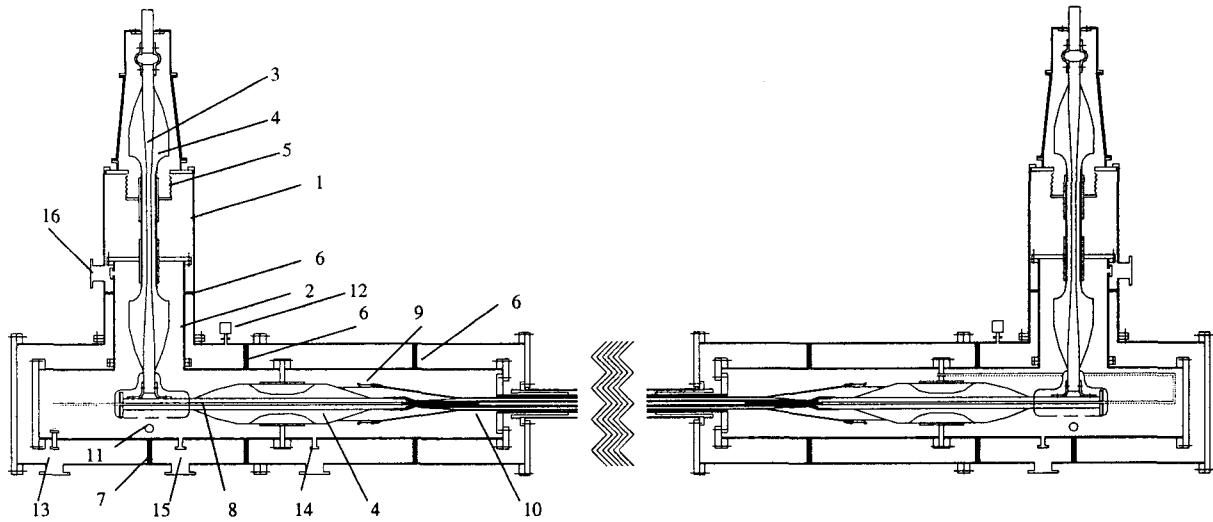
#### 2.1 단말 cryostat의 설계개요

본 단말 cryostat은 고온초전도 전력케이블 (22.9kV, 1.26kA급)을 구동하기 위한 단말용 cryostat으로 그 구성은 진공단열용기와 액체질소저장용기, 구조를 지지하기 위한 기계적 지지대 그리고 전류도입선으로 크게 나누어진다. 이하에 본 cryostat의 설계사양을 간단히 정리한다.

- 1) 열침입량 : 150W 이내
- 2) 액체질소저장용기
  - a. 기계적/구조적 조건 : 설계압력 10bar
  - b. 냉각조건 : 과냉각 액체질소 순환 (70K, 5~6bar 과냉각 액체질소 공급)
- 3) 진공용기 : 10<sup>-4</sup> torr 이하의 압력유지

이상과 같은 설계요구사항을 만족시키기 위해 설계에는 단열설계, 구조/기계적설계, 진공설계, 절연설계, 열유체적 설계 등이 고려되어야 한다.

단말cryostat의 개략도를 Fig.1에 나타낸다. Fig.1의 (a)는 초전도케이블을 냉각하기위해 액체질소를 공급하는 cryostat이고, (b)는 초전도케이블을 냉각시킨 액체질소가 순환되어 돌아오는 cryostat이다. 이하에 간단히 냉각방식에 대해 설명한다. 냉각시스템에서 단말cryostat과 초전도케이블을 냉각하기 위한 단말cryostat으로 각각 과냉각 액체질소를 공급한다. 단말 cryostat냉각용 액체질소는 액체질소용기의 액체질소포트를 통하여 전류도입선과 버스바(전류도입선에서 초전도케이블로의 전력전송용)를 냉각시키고 온도가 상승한 액체질소는 배출구를 통해 냉각시스템으로 순환된다. 한편, 초전도케이블 냉각용 액체질소는 단말cryostat의 케이블 냉각용 액체질소포트를 통하여 액체질소용기에 공급되어, 절연액체질소 공급 라인을 통하여 중공형의 버스바로 공급된다. 공급된 액체질소는 버스바를 통과하여 초전도케이블의 포머(former)속을 유동하는 것에 의해 초전도케이블을 냉각시킨다. 포머를 유동한



(a) Supply termination cryostat

(b) Return termination cryostat

Fig. 1. Schematic illustration of termination cryostat for HTS power cable system  
 1. Vacuum vessel, 2. LN2 vessel, 3. current lead, 4. GFRP adapter, 5. bellows welded oil stopper, 6. spacer, 7. support, 8. bus bar, 9. shield ring, 10. HTS cable, 11. vacuum port, 12. vacuum gauge, 13. LN2 inlet for cable cooling, 14. LN2 outlet for cable cooling, 15. LN2 inlet for termination cryostat cooling, 16. LN2 outlet for termination cryostat cooling.

액체질소 순환용 단말 cryostat(Fig.1-b)에서 버스바와 연결된 절연 액체질소라인을 통해 순환되어 접합부(버스바와 초전도케이블)액체질소용기에 배출되어 액체질소를 충전시킨다. 충전된 액체질소는 초전도케이블 cryostat(초전도선재의 외부)을 통하여 공급용 액체질소용기의 접합부로 배출된다. 배출된 액체질소는 접합부 액체질소용기에서 냉각계로 순환된다. 이와 같은, 과냉각 액체질소 강제순환 방식 단말 cryostat의 설계에 있어서 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

단말 cryostat의 가장 바깥쪽에 위치한, 진공단열용기는, 외부의 실온과 접하고 있는 부분으로, 설계에는 진공단열설계 및 복사열에 의한 열침입을 최소화하는 설계가 필요하다. 특히 단말cryostat의 경우는 초전도케이블의 접합 및 포트의 연결 등 외부의 상온부분과 연결부분이 많으므로 열침입을 줄이기 위한 접합방식이 고려되어야 한다. 또한, 진공용기의 낮은 압력(10<sup>-4</sup> torr이하)유지 및 적층단열재(MLI)의 최적적층방식, 실링(sealing)방식 등을 고려해야 한다. 진공용기 안쪽에 위치하는 액체질소용기 안에는 전류도입선, 전류를 초전도 케이블에 전송하기 위한 버스바(Bus bar), 초전도케이블 등이 설치되며 버스바와 초전도케이블의 접합부는 조립 및 냉각측면에서 분리하였다. 본 액체질소용기는 과냉각 액체질소를 강제순환시키는 방식으로 냉각되므로, 액체질소용기 설계에는, 액체질소 최적순환냉각조건 (온도, 압력, 유량 등)을 고려한 설계가 필요하다. 초전도전력케이블에 전류를 공급하는 역할을 하는 전류도입선의 상부는 상온에 노출되어 있으므로 이를 통한 열침입은 단말 cryostat에서

많은 부분을 차지하므로, 전류도입선의 열적설계에는 침입열을 최소화한 최적화설계가 대단히 중요하다. 전류도입선의 열적 최적화 설계에 대해서는 참고문헌 [1]에 자세하기 때문에 본고에서는 생략한다. 지지대 및 스페이서(spacer)의 설계에는 지지하중을 고려한 최소 열침입 설계가 이루어져야 하고, 또한 온도변화에 의한 용기수축도 반드시 고려되어야 한다. table 1에 단말 cryostat에 대한 예상 열침입량을 정리한다.

Table 1. Heat loads for a termination cryostat

구성요소	예상열침입량(W)
전류도입선	90
복사열	10
지지대 및 스페이서	30
액체질소순환포트	10
버스바	5
cable 접합	3
계측라인	2
총열침입량	150

## 2.2 단말 cryostat의 구성요소

### 2.2.1 진공용기(Vacuum vessel)

단말 cryostat의 구조를 설명하기 위해 Fig. 1-(a)에 보인 액체질소 공급부 단말 cryostat의 단면도를 Fig. 2에 보인다. 스테인레스(SUS 304) 재질의 진공용기는 크게 나누어 수직부, 수평부의 2부분으로 나누어진다. 진공용기의 최상단에 위치하는 수직부는 내경 400mm, 길이 775mm의 실린더형으로, 그 상부에는 전류도입선이 부착된 상판이 결합된다. 상판에

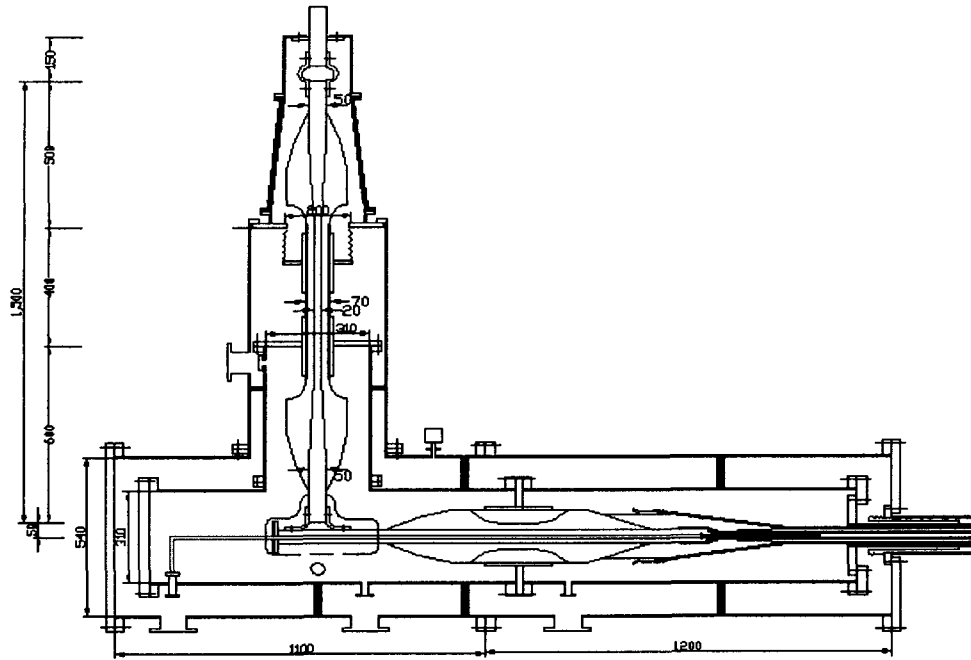


Fig. 2. Cross-sectional diagram of the supply termination cryostat shown at fig. 1-(a).

는 전류도입선의 열수축에 의한 응력증가를 완화하기 위해 벨로우즈타입의 오일스토퍼가 설치되어 있다. 벽면에는 액체질소용기에 액체질소를 순환시키기 위한 액체질소 배출구가 부착되어 액체질소용기 속을 냉각시킨 과냉각질소가 이곳을 통하여 배출되어 냉각시스템을 통하여 순환된다.

수평부는 내경 540mm, 전체길이 2300mm의 실린더형태로 초전도케이블과 상전도부분의 연결을 위해 2부분으로 나누었다. 본 케이블시스템의 냉각은 단말 cryostat을 통하여 액체질소용기와 초전도케이블에 냉각용 액체질소를 공급하는 방식이므로, 액체질소공급을 위해 벽면에는 단말 cryostat용 액체질소 공급포트와 초전도케이블용 액체질소공급포트가 각각 부착되어, 외부의 냉각시스템의 액체질소 공급라인과 연결된다 또한 초전도케이블을 순환냉각시킨 액체질소 배출라인이 냉각시스템과 연결된다.

### 2.2.2 액체질소용기 (LN2 vessel)

Fig. 2에 보인 스테인레스(SUS 304) 재질의 액체질소용기는 크게 나누어 수직부, 수평부, 버스바와 초전도 케이블을 접합하는 접합부의 3부분으로 나누어진다. 내경 310mm, 길이 495mm의 수직부 상부에는 전류도입선에 부착된 상판이 결합되고, 벽면에 부착된 액체질소 배출구(직경 20mm)를 통해 액체질소는 배출되어 진공용기에 부착된 액체질소 배출포트를 통해 냉각시스템에 배출된다. 내경 310mm, 길이 1090mm의 수평부는 전류도입선과 초전도케이블을 연결하기 위한 버스바(Bus bar)가 결합되는 곳으로, 그 벽면에는 액체질소 공급포트 2개가 부착되어 있다. 각각의 액체질소공급포트를 통해 공급된 액체질소는 액체질소용기와 초전도케이블을 냉각시킨다. 내경 310mm, 길이 990mm의 접합부에서는 버스바와 초

전도케이블이 접합되며 벽면에 부착된 액체질소 배출구를 통해 초전도케이블을 순환냉각한 액체질소가 배출되고 진공용기에 부착된 액체질소 배출라인을 통해 액체질소가 순환된다. 액체질소용기내의 액체질소 공급포트 위치 결정, 유량, 입출구직경 등의 액체질소 강제유동 순환 냉각조건의 결정은 참고문헌 [2]에서 자세하게 논의된다. 액체질소용기 외부에는 용기의 진동을 제어하기 위한 GFRP재질의 스페이서가 부착되며, 질소용기 하부에 부착된 지지대로 액체질소용기는 지지된다.

### 3. 정리

22.9kV, 1.26kA급 초전도 전력케이블용 단말 cryostat을 소개하였다. 단말 cryostat의 냉각은 과냉각 액체질소의 강제순환 방식을 채택하였다. 설계된 단말 cryostat은 제작, 냉각성능 평가실험, 초전도케이블 전력시스템 전체통합실험을 순차적으로 실시할 예정이다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### (참고 문헌)

- [1] 조승연, 사정우, 김도형, 김동락, 김승현, 양형석, "고온초전도 케이블 전류도입선 설계를 위한 변수고찰", 2003 한국 초전도 저온공학회 논문집
- [2] 김도형, 조승연, 양형석, 김동락, 김승현 "고온 초전도케이블 단말 저온조의 열유동해석", 2003 한국 초전도 저온공학회 논문집