

극저온 저항 케이블 개발을 위한 통과전시험 연구

안우희, 조연옥, 류강식, 류희석, 류경우

한국전기연구소

A Loading Test for the Development of a Cryogenic Cable

W.H.Ahn, Y.O.Cho, K.S.Ryoo, H.S.Ryoo, K.W.Ryoo

Korea Electrotechnology Research Institute

This report the loading test results of OF cable core in LN2 testing chamber for the development of a cryogenic cable

1. 서 론

대용량 전력수송수단으로서의 극저온 케이블은 현재로서 경제성이 문제시 되고 있으나 2000년대에는 실용화가 예상되고 있으며 고온 초전도체의 발견이 기대됨에 따라 초전도케이블 개발을 위한 기초, 실용화기술을 완성한다는 점에 있어서도 큰 의미가 있다.

극저온 저항케이블 개발 및 실용화를 위해 필요한 요소기술로서 극저온 절연설계 및 제작기술, 도체설계 및 제작기술, 냉각System기술등이 있으며 최종으로는 실제의 극저온 저항케이블 System을 시험 또는 측정하는 극저온 고전압 측정기술등이 필요하다.

본 보고는 극저온에서의 고전압절연 System을 설계 제작하고 시험하기 위한 최초의 시도로서 단척 극저온 저항케이블을 시험하기 위한 시험용 Chamber의 제작 및 통과전시험 결과를 정리한 것이다.

2. 시험용 Chamber의 설계 및 제작

극저온 저항케이블 개발을 위한 시험용 Chamber의 제작 목적을 정리하면 다음과 같다.

- 1) OF케이블 및 개발예정 극저온 저항 케이블의 LN2 온도분위기에서의 열적, 전기적, 기계적 특성검토
- 2) 극저온 저항케이블 부대설비의 실용화를 대비한 문제점 검토 및 보안방안 검토
- 3) 극저온 저항케이블 실증시험설비 설계를 위한 예비시험

4) 극저온 저항케이블의 절연특성연구

- AC Breakdown특성
- Impulse Breakdown특성
- Tan δ 및 부분방전특성

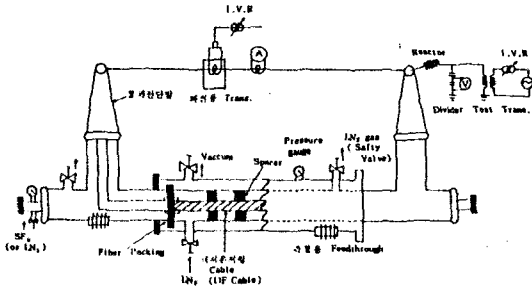
이상과 같은 시험용 Chamber의 목적을 달성하기 위한 설계의 기본과정으로서 OF케이블을 시험대상으로하는 설계기준을 다음 표1과 같이 결정하였다.

<표1> 극저온 Chamber의 설계기준

항 목	규 격	설 비 용 용 량 안	비 고	
시험 용량	공칭전압	교류 88kV 단상	시험용연압기에 의한 도체-절연간 단상	총진용량 3상 800 MVA (최 대 1.07 GW)
	시험전류	교류 3000 A 최대 4000 A	LOADING CURRENT TRANSFORMER 에 의한 단상 LOOP 형인	기준
시험 대상 기준케이블	구조 및 형식	LPOF 지일인 CABLE CORE, COPPER CUND- UCTOR 1200 mm <sup>2</sup>	사제류 케이블 교체 시험	기준 LPOF를 사용으로 AF 도체 형태 검토
	길이	2 m	시험대상 케이블 도체길이	연장 가능 조 위
	내 상	255 mm	SPACER 사용 중앙부 고정가능	
시험 조 방 가	절연연속	171 mm	원형단면 1φ TORR	
	제 질	SUS 304		
	사용인어	15 kg/cm <sup>2</sup>	LN <sub>2</sub> 사용 일체	
사용온도	77°K	LN <sub>2</sub> 에 의한 온도 유지		

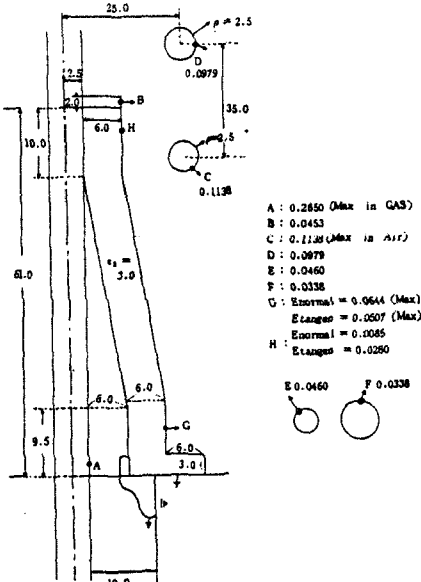
표1과 같은 기준에 따라 기본적인 구조를 설정하고 각 부분에 사용할 자재를 선정하였다. 전압, 전류 인입부는 예산상의 문제로 국내생산되는 154KV OF Cable 단말용 Bushing을 이용하여 GIS구조를 형성하여 시험조와 독립시켰으며 시험조와 인입부를 격리하기 위하여 FRP spacer를 설계제작하였다. 또한 시험조내부에 시료케이블의 처짐 방지를 위한 지지용 FRP spacer를 사용 하였다. 이와같이 설계된 극저온 chamber의 구조를 개략한 것이 그림1이다.

실시설계 과정에서 가장 어려웠던 작업과정은 상용 OF Cable 단말용 Bushing을 사용하기 위해서 Bushing



<그림 1> 극저온 Chamber의 기초설계형태

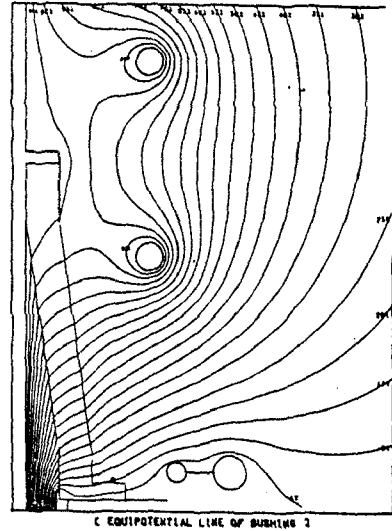
하단부에서의 전계집중현상을 완화하기 위한 구조를 설계하는 과정이었다. Bushing 하단부의 내경이 작기 때문에 접지 전위가 되는 금속구조물의 돌출부가 나타남으로써 전체 구조물중 가장 취약한 전계 집중지점이 되었다. 이 취약부분을 보강하기 위해서 그림 2와 같은 형태로 Bushing 하단부에 내부Shield를 설치하였다. 그림 2는 Bushing 부분에 내외부 Shield를 설치한 상태에서 각 지점의 전계강도를 단위법으로 계산한 것이고 그림 3은 이부분의 등전위선 분포를 그린 것이다.



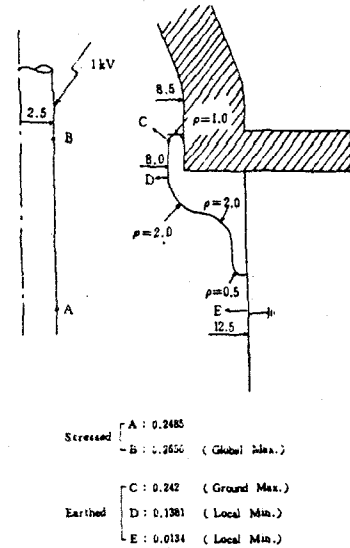
<그림 2> Bushing부분의 구조 및 전계강도

그림 4는 가장 전계강도가 높은 내부Shield주위를 확대 해석한 결과로서 C지점은 접지부중 전계강도가 가장 높은 지점으로 0.242 p.u 즉 충격전압인가시 18.15 KV/mm, 교류전압인가시 2.15KVrms/mm이며, B지점은 고압부 최대전계지점으로 0.2650 p.u 즉 충격전압인가시 19.5KV/mm, 교류전압인가시 2.35KVrms/mm로 나타났다.

통상적인 전력기기 설계시 1기압의 SF6가스 중에서 충격내전압 20KV/mm, 교류내전압 4KVrms/mm을 얻을수



<그림 3> Bushing부분의 등전위선 분포형태



<그림 4> Bushing하단부 내부Shield 주위의 전계강도

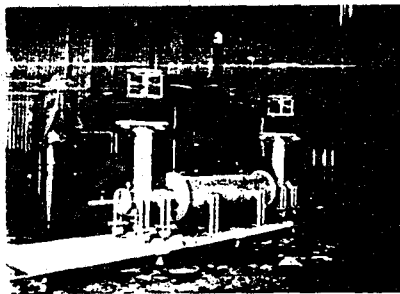
있으므로 실용상 문제가 없다고 판단되었다.

다음으로 알미늄봉을 중심에 고정된 30mm두께의 FRP 원판형 spacer와 Cable도체연결부분을 shield처리하고 케이블의 손쉬운 고체를 위해 154KV급 GIS등에서 사용하는 접점연결금구를 사용하여 제작하였다.

이상과 같은 설계과정을 거쳐 확정된 시험용 chamber의 각부분 특성을 표 2에 종합하였다. 그림 5는 제작된 극저온 chamber의 외형이다.

<표 2> 시험용 chamber의 각 부분 설계특성

부품명	설계기준	설계사양	설계내역	비고
MAIN CHAMBER	25kV/mm (1) 8.5kVrms/mm (2) 15기압	- 내부판소 (SUS304) 267.4φ×6.3T×2000L - 외부판소 (SUS41) 310φ×9T×2380L	25kV/mm 2.9kVrms/mm 15기압	제작
SPACER	20kV/mm 4kVrms/mm 15기압	- FRP 500φ×30 T - 세부 Ad. BAR 80φ×130L	16.1kV/mm 1.9kVrms/mm 20기압	제작
BUSHING	750 kV BIL	- 길이 : 600 - 내경 : 70 (상), 115 (하)	BIL 750kV	기성품
INNER SHIELD	20 kV/mm	- 155φ×54 L	18 kV/mm	제작
인입관포 (SF <sub>6</sub> GAS)	20kV/mm 15기압	- SUS304 267.4φ×6.3 T	10.05kV/mm 20기압	제작
CONDUCTOR	20kV/mm 3000 A	- Cu : 50φ	20kV/mm 4000 A	제작
OUTER SHIELD	1.5kVrms/mm	- 상부 : 500φ×50φ Ring 350 H - 하부 : 800φ×50φ Ring	상부 : 1.0kV/mm 하부 : 0.4kV/mm	기성품
CABLE	OF 154kV 1φ 1200mm <sup>2</sup>			기성품



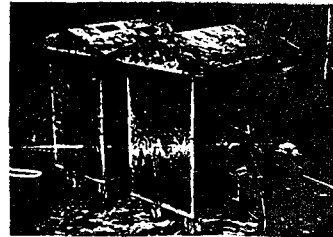
<그림 5> 제작된 시험용 chamber

3. 시험용 chamber의 통과전시험

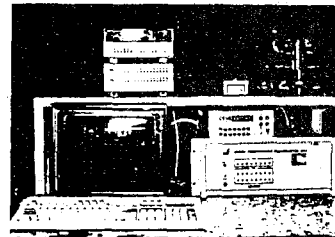
앞서 설명한 과정을 거쳐 제작된 시험용 chamber의 시험을 위해서 내부케이블은 개발 예정인 극저온 저항 케이블의 형태와 유사한 OF케이블에 동 Adapter를 연봉 취부하여 사용하였고, 각 Flange 및 도전부, Spacer 표면 등을 재가공하여 조립하였다. 최초에는 각 Flange의 기밀부에 고무 O-ring을 사용하였으나 LN2 주입시 최상단부를 제외한 모든 Flange의 O-ring이 경화파단되는 현상이 발생하여 3.2t의 Teflon Gasket으로 교체하였다. 조립시 통전시험시의 온도변화 측정을 위해 케이블 표면에 3개소, 내조상부 1개소, 하부 1개소 및 기타 도전부 3개소 등 총 8개의 Copper-constantan 형 thermocouple wire를 설치하였다.

LN2 주입에 앞서 필요한 열절연특성을 얻기 위하여 외조부와 인입단말부의 진공을 측정하였는데 Pirani Gauge로 측정한 결과 외조 5x10 Torr 양단 인입부 각각 10, 6x10 Torr를 얻었다. 열절연을 위해서는 외조부분이 10 정도의 진공이 필요하다. 그러나 구조물이 매우 크고 Flange가 많기 때문에 목표치에

도달하지 못하였다. 이 외조부의 진공특성개선은 차기년도에 보완키로 하고 그림 6 및 7과 같은 부하용 CT 및 Data Acquisition System을 설치하고 LN2 투입 및 통과전시험을 실시하였다.

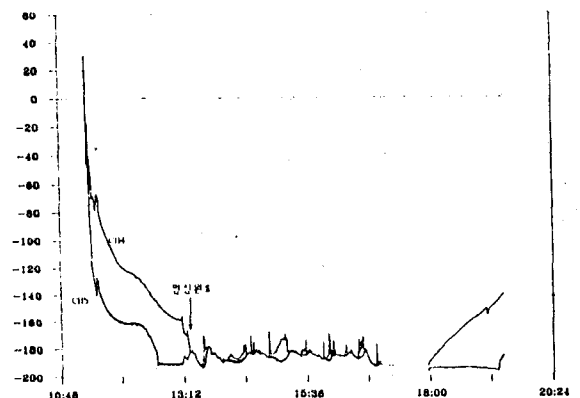


<그림 6> 부하전류 인가용 변류기



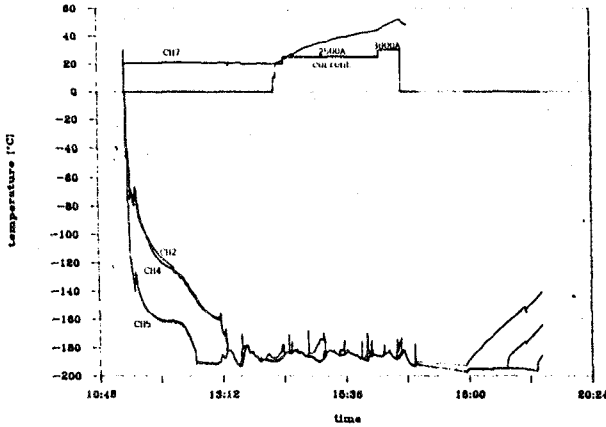
<그림 7> 온도측정용 Data Acquisition System

LN2 투입시 외조부분의 진공에 완전히 파괴되어 열절연이 악화되는 현상이 발생하였으며 열절연불량으로 인하여 내조의 온도가 상승하면서 매우 높은 압력이 발생하였다. 이에따라 시험용 chamber내에 투입된 LN2 온도가 압력변동에 따라 급격히 변하는 특성을 보였고 따라서 LN2의 level판정이 어려웠다. Level의 판정을 위해서 그림 8에서와 같이 OF케이블 상하부 CH#4, #5의 온도가 같아지는 순간에 LN2에 케이블이 침침된것으로 판정하고 통전시험을 실시하였다.



<그림 8> LN2 level판정을 위한 온도기록 결과

통전시험시 연속적인 LN2 투입이 필요하였고 따라서 LN2 용기고체시의 압력변동에 따라 내조의 LN2온도도 연동하였다. 이러한 변동폭이 매우 커서 10 °K 이상이 되기 때문에 그림9에서 볼 수 있듯이 열발생에 따른 LN2의 온도변화를 판정하기가 매우 어려웠다. 따라서 극저온 저항케이블의 시험시 전류에 의한 열적특성은 LN2 투입량의 조절, 측정 및 압력변화등을 측정해야 할 필요가 있음을 알수 있었다.



<그림9> 전류인가 시험결과

이상과 같은 시험과정상 나타난 문제점을 정리하자면 다음과 같다.

- 1) 진공단열층의 Sealing구조 불가
- 2) spacer 절연재료 및 구조
- 3) LN2 투입량및 압력, 조절 및 측정설비
- 4) pressure와 LN2온도의 연동 변화 측정

#### 4. 결 론

본 연구에서는 극저온저항케이블개발을 위한 극저온 저항케이블 시험용 chamber를 설계제작하였으며 통과전 시험을 실시하였다. 시험결과 여러가지 문제점이 발견되었으며 이러한 문제점을 해결하기 위한 자기 연구진 행예정사항은 다음과 같다.

- 1) 완전밀폐형 진공단열구조 제작
- 2) Spacer소재 및 구조, 검토 및 제작
- 3) LN2투입량 조절설비, Gas압 조절및 측정설비보완
- 4) 2차 통과전시험 실시 및 필요특성측정