

초전도 전력케이블 제조관련 기술

장현만, 김동욱
LG전선 전력연구소

1. 서 론

초전도체의 실용화 연구는 세계적으로 1980년대 말부터 집중적으로 이루어지고 있으며, 현재는 고온초전도 선재 측면에서 선재의 기계적 특성 개량, 장선화(1km이상) 및 염가화(low cost)에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, 전력 응용 분야의 개발 중에서는 고온초전도 전력케이블이 상용화 가능성 및 시장 진입시기가 가장 큰 분야로 대두되고 있다[1].

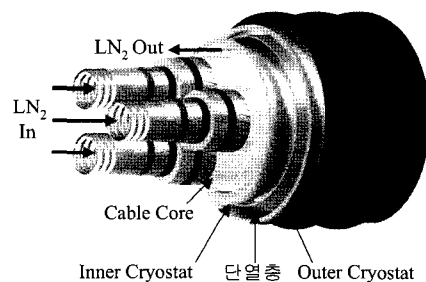
고온초전도 케이블은 액체질소 온도(77K)에서 약 50~100A/mm² 전류를 흘릴 수 있어 기존의 전력케이블과 비교할 때 동일 전압으로 전력수송용량을 3배 이상 비약적으로 증가시킬 수 있다. 이로 인해 전력케이블의 소형화 및 대용량화가 가능하여 전력수요 증가에 따른 기술적 한계를 극복할 수 있다. 또한 초전도 케이블은 초전도 상태로 운전하기 때문에 전기저항에 의한 손실이 적어 송전손실의 저감할 수 있어 송전 비용절감효과도 가져올 수 있다. 이러한 초전도 케이블은 차세대 전력송전 시스템용으로서 그 활용가치가 높을 것으로 기대되고 있으며, 현재 미국, 일본을 비롯해 유럽에서 초전도 케이블의 실용화에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

이 글에서는 21C 프론티어 연구개발사업 중 초전도응용연구개발사업(DAPAS)의 일환으로 수행하고 있는 배전급 초전도 케이블 개발에 있어서, LG전선의 전력케이블 생산기술에 근거한 초전도 케이블의 제조기술에 대해서 간략하게 알아본다.

2. 초전도 케이블 구조

초전도 케이블은 크게 초전도 도체층, 절연층 및 냉각구조로 구성되어 있는데, 절연은 크게 전기절연(electrical insulation)과 열절연(thermal insulation)으로 구분된다. 케이블의 종류는 전기절연의 냉각방식에 따라 상온절연

(WD=Warm Dielectric 또는 RTD)과 저온절연(CD, Cold Dielectric)으로 구분되고 있으며, 각각의 설치 환경에 따라 선호하는 방식이 다르다. 현재 전력 케이블에서 채택되고 있는 전기절연 방식은 사용되는 재료에 따라 polymeric insulation (rubber, XLPE, PE, PVC 등)과 paper insulation (kraft paper, laminated PP paper 등)으로 대별할 수 있다. 초전도 케이블의 전기절연방식 선정에 있어서는 초전도 케이블 시스템의 기술적, 경제적인 면을 고려해야 하는데(feasibility study), 특히 경제성 검토에 있어서는 전력회사의 입장에서 케이블 시스템에 소요되는 자재가격뿐만 아니라 송전손실을 고려하여 설계 목표수명(예, 30년)까지의 운전비용 또한 반드시 고려해야 한다. 한국의 경우, 서울을 비롯한 대도시를 중심으로 송배전선로에 부하가 60~70% 이상 집중되어 운영되므로, 대도시 부지 확보난을 고려했을 때 이러한 부하 운전 pattern(대용량/저 손실)에 대응되는 형태로서는 CD 방식이 보다 적합할 것으로 보이므로, 이 글에서는 CD 방식의 초전도 케이블 구조와 그 제조기술에 대해서 알아보기로 한다.



a) 3상 초전도 케이블



b) 단상 초전도 케이블

그림 1. 초전도 케이블 구조 a) 3상, b) 단상

고온초전도 전력케이블 특집

보다 구체적으로 살펴보면, 현재 한국에서 개발 중인 22.9kV 초전도 케이블 type은 laminated PP paper 또는 kraft paper를 전기 절연체로 하고 액체질소(LN₂)를 이용하여, 코어의 내/외부를 극저온 상태로 유지시키는 CD 방식이며, 케이블 선심수는 22.9kV라는 배전전압과 송전용량 및 설치작업 용이성을 배려하여 compact한 삼심 케이블(three core cable)로 하였다. 그림 1은 CD 방식의 초전도 케이블의 구조를 나타내고 있으며 표 1에 초전도 케이블 core 및 cryostat의 구성재료 및 제조공정에 대하여 개략적으로 소개하였다.

표 1. CD 방식 초전도 케이블 구조 및 제조 공정

주요 구성요소		재료	제조 공정
Core	Former	STS / Cu	지권 / 건조 / 3심 연합
	초전도 도체/차폐	Bi-2223/Ag tape	
	절연지	Laminated PP Paper, Kraft paper	
Cryostat	Inner Cryostat	Al / STS	Inner corrugated pipe, MLI 및 Spacer TP, Outer corrugated pipe
	단열층	Mylar tape, Polyester Mesh (MLI), Teflon (Spacer)	
	Outer Cryostat	Al / STS	

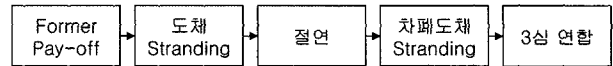
3. 초전도 케이블 Core 제조

초전도 케이블 코어는 그림 1과 표 1에서 설명한 것처럼 초전도 도체 및 차폐층과 절연층으로 구성되어 있으며, 초전도 선재 연선기술, 절연기술이 필요하다.

초전도 도체 및 차폐층은 각각 수분의 초전도 선재가 n층(도체)과 m층(차폐)으로 이루어져 있는데, 초전도 케이블 core 구조의 전기적 동가 모델 해석결과를 이용하여 각층에 흐르는 전류의 偏流現象을 억제하기 위한 조건으로서 각 층 최적의 pitch와 연방향의 설정이 우선시 요구된다[2].

초전도 케이블의 절연층은 유전손실 저감을 위해 기계적 강도가 상대적으로 낮은 저 손실 절연지를 사용하는데, 케이블 굴곡에 따른 절연지의 구김현상, 테이핑 장력이 불균일하여 느슨해지는 부분 등의 결함이 발생되지 않게 하는 재료 구조의 선정이 매우 중요하다. LG전선은 초고압 OF 케이블의 개발을 위한 한국전력공사(KEPCO)용 개발 과정을 통하여 절연구조 설정에 대한 기본 기술을 확보한 상태이다.

그림 2는 LG전선이 22.9kV 초전도 케이블 core 제조용으로 사용한 초고압 지절연 케이블 제조 장치인 지권기의 사진을 나타내고 있다. CD 방식 초전도 케이블의 주요한 core 제조공정은 아래의 flow chart로 요약되며, 그림 2의 설비를 이용하여 3심 연합 이전 공정까지 제조 할 수 있다.



초전도 도체 연선에 있어서 주요 핵심기술로서는 설계상에 도출된 초전도 도체의 pitch 유지를 위해 core 선속 및 장력 제어기술이라 할 수 있다. 또한, 절연 taping 기술에 있어서는 도체 제조기술과 마찬가지로 선속 및 장력 제어기술 외에도, 고전압 절연성능에 치명적인 악영향을 끼칠 수 있는 이물에 대한 관리가 특히 중요한 관점이 된다. 그림 3은 그림 2의 지권기를 이용한 절연 taping과정은 나타내는 사진이다.

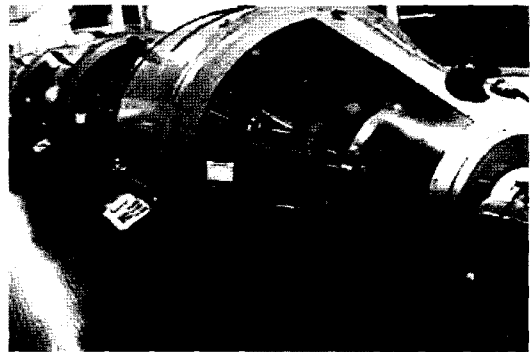


그림 2. 초전도 케이블 Core 제조용 지권기

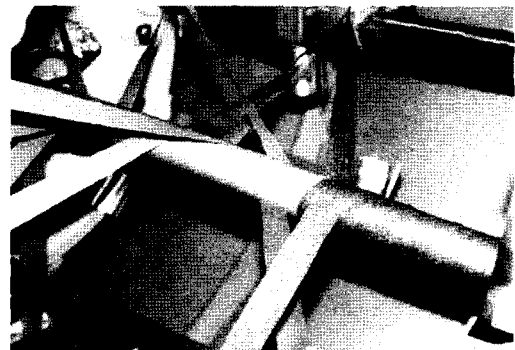


그림 3. 초전도 케이블 절연

4. 초전도 케이블 Cryostat 제조

초전도 케이블은 영하 196℃ 이하의 극저온에서 전력을 전송하기 때문에 도체부의 온도를 극저온 상태로 유지할 위해서는 2중 금속관과 단열재로 구성된 극저온 관로(Cryostat)가 반드시 있어야 한다. 2중 금속관 사이에는 열전달을 최소화하기 위해 진공상태로 유지시켜 전도 및 대류에 의한 열전달을 차단하며, 단열재를 이용해 복사열을 차단함으로써 열손실을 감소시킨다. 초전도 케이블 cryostat는 단열 특성과 기계적 특성을 고려하였을 때, Al과 stainless steel(STS) 두 재료가 적합하며[3], 초전도 케이블 포설 및 운전 시 수축에 의한 기계적 응력 완화를 위해 주름관(corrugated pipe) 형태로 제조하여 유연성을 확보하게 된다. 두 가지 재료 모두 장기간 고진공상태를 유지하기 때문에 제조 시 각 재료의 기체 방출량(out-gassing) 제어를 위한 청정한 제조환경이 요구된다.

우선 STS를 이용한 cryostat의 제조기술을 살펴보면, 일반적으로 STS 판을 케이블 core 외부에 원형으로 성형시키고 양쪽 모서리를 케이블의 길이 방향으로 용접하여 pipe 형태로 제조된다. 이렇게 제조된 STS pipe는 주름가공을 거쳐 내부 cryostat가 되며, 단열재(MLI=Multi Layer Insulation) 테이핑과 내부 cryostat와 동일한 공정으로 외부 cryostat를 제조하여 완성된다. 그림 4에 Nexans社에서 초전도 케이블용으로 제조된 cryostat를 나타내고 있다.

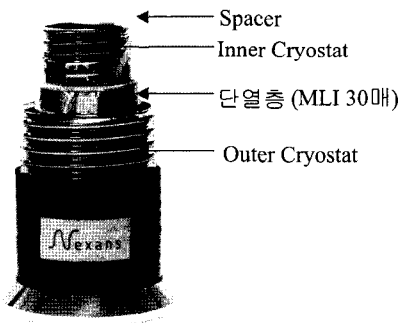


그림 4. 초전도 케이블용 cryostat(Nexans社)

한편, Al을 이용하는 경우 상전도 케이블용 sheath 제조기인 Al 압출기를 이용하여 초전도 케이블 cryostat를 제조할 수 있다. Al

cryostat는 주조된 Al ingot을 압출기에 장착한 후 pre-heating된 압출 다이스를 통하여 케이블 코어 또는 MLI 층 외부에 튜브 형태로 압출하여 제조된다. 그림 5는 Al cryostat 제조공정을 도식화하여 나타낸 것이다.

상기 두 가지의 재료 중 STS cryostat의 경우, 케이블 제조과정 및 포설 시 굽힘이나 인장 등의 기계적 응력이 가해질 경우 용접부의 결함으로 인해 누설의 위험이 있으며, Al의 경우는 기계적 강도 확보를 위해 STS보다 pipe 두께를 증가시켜야 하므로 compact화 측면에서 단점이 있다.

그림 6은 상기의 cryostat 제조과정을 거쳐 드럼에 권취되고 있는 초전도 케이블을 나타내고 있다.

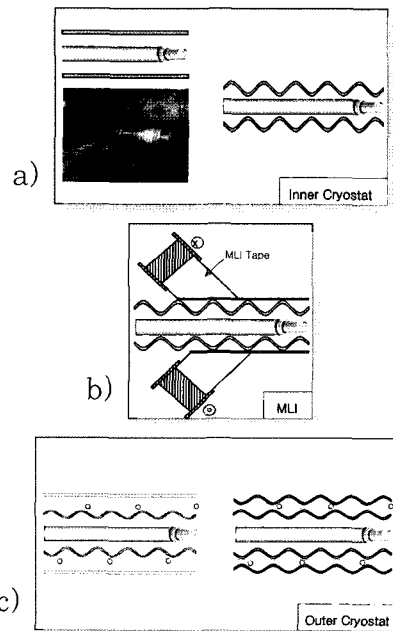


그림 5. 초전도 케이블 Cryostat 제조 공정. a) Inner Cryostat, b)Thermal Insulation, c) Outer cryostat

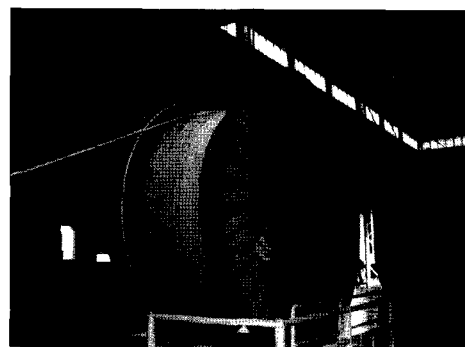


그림 6. 초전도 케이블 권취 과정

5. 단말 제작 및 조립

일반적으로 지중송전 케이블의 접속함은 전력송전을 위하여 지중 케이블과 가공선로 간, 지중 케이블과 차단기간 또는 변압기간, 지중 케이블 상호간을 전기적으로 서로 연결하여 주는 접속장치를 말하며, 종단 접속함(단말)과 직선 접속함(중간접속함)으로 구분된다. 접속함의 일반적인 성능은 케이블과 동등 이상의 특성을 유지하여야 하며, 케이블 구성재료에 악영향을 미치지 않아야 하므로, 전기적, 기계적, 열적 요구 특성을 만족하여야 한다[4].

초전도 케이블용 단말 설계에 있어서는 초전도 케이블에 유입되는 열량을 최소로 하기 위해 액체질소 냉각방식의 단말 구조를 채택하였으며, 그 구조를 바탕으로 열설계와 전기적 설계를 병행하여 단말을 설계 및 제작된다.

그림 7은 LG전선이 DAPAS 사업의 일환으로 추진 중인 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블 시스템의 개발 중간단계의 시제품으로서, 22.9kV 단상 초전도 케이블과 단말 시제품의 특성평가를 위해 설치된 초전도 케이블 시스템 사진이며, 현재 평가가 진행되고 있다.



그림 7. 초전도 케이블 시험장

6. 맺음말

차세대의 환경친화적인 대용량 전력전송수단의 하나로서 그 실용화 연구가 진행 중인 초전도 케이블의 제조기술에 대하여 살펴보았다. 국내 최초로 개발되고 있는 22.9kV 고온초전도 케이블은 국내 송배전선로의 수도권 집중현상을 고려하여 저온절연방식을 채

택 하였다. 초전도 도체는 Bi-2223를 적용하여 전기적 해석결과를 토대로 전류의 偏流現象을 억제하기 위한 조건으로서 최적의 pitch와 연방향을 도출하여 제조한다. 전기절연은 최적의 절연 설계결과를 바탕으로 OF 케이블 제조기술을 보완하여 초전도 케이블 core의 제조가 가능함을 확인하였다.

또한 초전도 케이블의 열절연을 위한 cryostat로서는 단일 특성과 기계적 특성을 고려하였을 때, AI과 STS가 적합하며 각각에 대한 제조기술도 함께 살펴보았다.

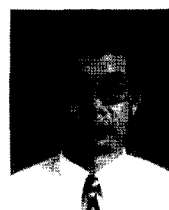
참고문헌

- [1] Haruhito Taniguchi, "Expectation of Superconductivity Application to Power system", 平成 11년 電氣學生全國大會, 1999
- [2] 주진홍, 김석환 외 7인, "균일 전류분포 및 교류손실을 고려한 다층 고온초전도 전력 케이블 설계", Proceedings of the KIEE Summer Annual Conference 2002.
- [3] Randall F. Brron, "Cryogenic systems 2nd Edition, Chapter 7 Cryogenic-fluid storage and transfer systems", 1985
- [4] "지중송전 케이블 시스템" 한국전력공사 송변전건설처, p147, 2002.

저자이력



장현만(張鉉萬)
1971년 5월 21일생, 1997년 경상대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 2001년 동대학 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 LG전선 전력연구소 선임연구원.



김동욱(金東郁)
1961년 12월 11일생, 1984년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1999년 오사카 대학 전자공학과 졸업(공학박사), 현재 LG전선 전력연구소 책임연구원/그룹장