

* 김 상 현 윤 문 수
한 국 전 기 연 구 소

The Technology Development of Superconducting Cable

S.H. Kim

M.S. Yun

KARI

1. 서 론

최근 전기에너지만이 갖는 유일한 특징과 생활양식의 변화 등으로 도시권의 전력소비의 내용이 다양화 해지고 더우기 지식집약의 고도산업으로의 변천 등으로 전기에너지의 수요는 비약적인 증대를 하고 있다. 한편 도시집중화에 따른 환경조건의 제약으로 발전소는 원적지에 설치되고 전력의 공급도 안정된 질적인 고도화가 요구되는 실정이다. 이에 따라 전력회사는 전원개발, 계통안정화 등의 검토와 더불어 극저온기술을 이용한 극저온 및 초전도 Cable 에 의한 새로운 송전방식에 큰 관심을 갖게 되었다.

극저온 및 초전도 Cable 의 개발연구는 1960년대 부터 미국, 소련, 일본을 중심으로 세계 각국에서 개발 중이며 국내에서는 한국전력공사 기술연구원과 한국전기연구소가 공동으로 개발연구에 착수할 단계에 있다. 한편 최근의 고온초전도체의 세계 신기록 경신의 경쟁과 더불어 그 기술개발^{1),2)}은 가속화되어 가까운 장래에 값싸고 양질의 전력을 공급하게 될 것이며 더 나아가 국가간의 전력수송에 의한 전력무역이 실현되리라 믿는다.

본 보고에서는 이러한 의미에서 주로 초전도 Cable (Superconducting Cable) 에 초점을 두고 기본개념 및 기술적인 문제점을 간단히 기술하기로 한다.

2. 초전도 Cable

2-1 초전도의 성질과 응용

초전도 기술은 초전도 현상이라는 특징으로부터 출발하고 있다.³⁾ 초전도 현상이란 어떤 종류의 재료(초전도체)를 냉각하면 어떤 온도(임계온도)에서 갑자기 전기저항이 없어져 단위면적당 대단히 큰 전류를 흘릴 수 있는 현상이라 하겠다. 초전도 현상의 또 하나의 특징은 완전 反磁性 즉 Messner 효과를 표시하는 점이다. 한편 초전도체는 그림 1과 같이 3

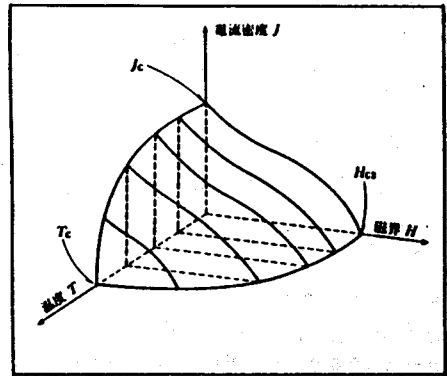


그림 1 T-H-J 특성

가지의 임계치 즉 임계온도 (T_c), 상부임계자장 (H_{c2}) 및 임계전류밀도 (J_c)가 존재하며 초전도 상태는 臨界値보다 작은 영역에서만 얻어져 초전도응용에서는 임계치가 클 필요가 있다. 또한 T_c , H_{c2} , J_c 의 균형도 중요하다. 현재까지의 응용 가능한 초전도체(저온 초전도체)는 20종류 이상의 금속 및 비금속 단위원소, 합금계 ($Nb-Ti$, $Nb-Zr$, $Nb-Zr-Ti$ 등) 및 화합물계 (Nb_3Sn , Nb_3Ge , Nb_3Al 등)이나 $Nb-Ti$, Nb_3Sn 이 주류를 이뤄 極細多芯型 복합도체로 응용 분야에 사용되었다. 그러나 최고의 T_c 를 갖는 Nb_3Ge 가 23K이므로 액체 He의 사용은 불가피하다. 액체 He은 4.2K (1기압)의 극저온이므로 취급이 어렵고 비열이 작으며 He 액화기도 극저온을 달성해야 하므로 대규모이고 에너지 소비가 크며 장치가 복잡한 것도 사실이다.

이러한 의미에서 초전도체의 T_c 를 높이는 것은 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 지난해(1986년) 4월 스위스의 IBM사 취리히연구소의 J. Bednorz와 K. Müller 박사는 금속이 아닌 절연체인 $La-Fa-Cu-O$

제의 Ceramic 제 ($T_c = 30K$) 초전도체 (고온초전도체)를 발견¹⁾하고 연이은 연구성과로 액체 H₂, 온도 (77K)의 벽을 깨고 맡았다. 그러나 Ceramic계 초전도체는 전고성과 부러지기 쉬운 치명적인 약점으로 纖維化, 薄膜化 등의 Process 기술과 안정성, 낮은 Jc (1100A/cm² 정도)의 향상등 실용화에 따른 기술적인 문제점이 남아 있으나 부분적인 소규모의 용용은 가까운 장래에 실현되리라 기대된다.

앞에서도 설명한 바와 같이 초전도 현상이 1911년에 발견되고 이미 70여년이 경과하고 있으나 실제로 초전도의 응용이 시작된 것은 불과 20년 이내라 할 수 있다. 원인은 현재까지의 초전도의 용용에는 액체 He(4.2K)의 극저온을 사용해야만 하는 극한기술인 점이며 그로인한 기술축적이 적었으며 더우기 초전도체의 개발이 부진했던 탓이라 하겠다.

초전도의 용용은 대전류와 強磁界 발생의 특징을 이용하여 표1에 표시한 바와 같이 주로 전기적인

표1 초전도 용용

분 야	용 도
전 력	발전기, 포터 송전케이블, 변압기, 전력저장
에너지	핵융합, MHD 발전
고에너지 물리실험장치	가속기, 입자검출기
수송기기	자기부상열차, 선박
의료장치	NMR-CT, 중간자 발생장치
반도체 제조장치	단결정 증세기
통신 Cable	광섬유 증세기
Device	고속동작 LSI, Josephson 소자, SQUID

용용과 전자적인 용용으로 추진되고 있으며 소형의 용용에는 이미 실용단계에 들어간 것이 많다. 가까운 장래에 최근의 고온초전도체를 대형으로 용용할 수 있는 첫걸음이 시작될 것이다. 여기에서는 전기적인 용용중 초전도 Cable 만을 다루기로 한다.

2-2 초전도 Cable

초전도 Cable 의 기본개념을 이해하기 위하여 먼저 종래의 대표적인 전력 Cable 인 OF Cable (Oil Filled Cable) 을 살펴 본다.

그림 2 에 500kV OF Cable 의 단면사진을 표시한다. 전력 Cable 은 기본적으로는 도체와 그것을 둘러싼 절연체 그리고 절연체에 걸리는 전위를 균일하게 한 절연차폐층으로 구성된다. 재료로서는 油, Cu, Kraft 紙, Carbon 紙, Al 등으로 구성된다.

극저온 및 초전도 Cable 의 기본적인 구조는 거의 비슷하며 다만 열절연만이 다른 점이라 하겠다. 원리

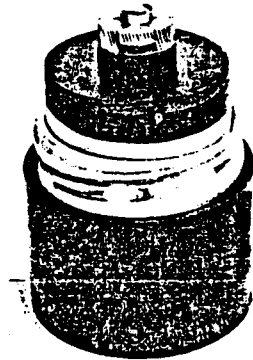


그림 2 OF Cable 의 단면사진

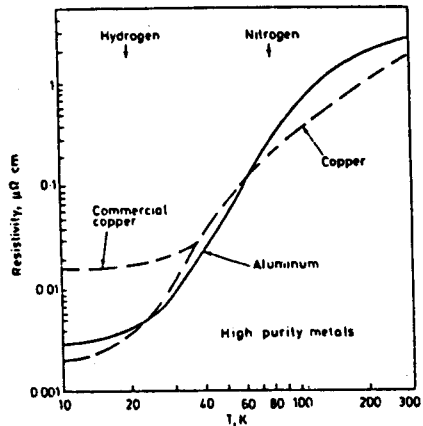


그림 3 Cu, Al 의 전기저항의 변화

는 극저온저항 Cable (Cryogenic Resistance Cable) 은 그림 3 에 표시한 바와 도체인 Al, Cu 의 저항이 액체 N₂(77K)의 극저온에서 급속의 도전율이 크게 증가하는 것을 이용⁴⁾한 것이며, 초전도 Cable 은 도체를 초전도체로 대체한 것으로 앞에서 설명한 초전도 현상을 이용한 것이다. 다만 초전도 Cable 에 의한 초전도 송전에서는 전기저항 "0"인 무손실이 되지 않는다는 것은 주의해야 한다.

그림 4 에 현재 개발중인 초전도 Cable 의 구조를 표시한다.⁵⁾ 도체구조는 Cu 판 (외경 30mm, 두께 1.5mm)

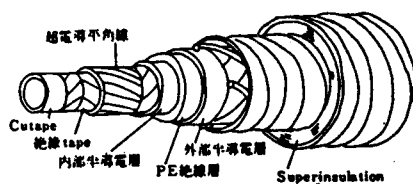


그림 4 초전도 Cable

초전도 케이블의 기술개발

에 Nb의 磁氣차폐 Tape (20 μ m)을 나선형으로 감고, Polyethylene-telephthalate (PET) 절연 Tape (50 μ m)와 초전도경각선 (Cu線에 Nb 피복하여 인발하여 제조)을 감은 구조이다. 한편 절연체는 架橋劑의 잔류 등의 영향을 제거하기 위하여 미가교 Polyethylene (PE)을 내부, 외부 半導電層과 3층동시 압출한 것이다. 문제점으로는 室溫으로부터 액체 He 온도 (4.2K)까지의 열수축이 금속의 약 8배가 되기 때문에 냉각에 의해 PE 중에 잔류응력이 생겨 자체의 저온취성과 겹쳐 부서지기 쉬운 점이다.

이상은 CV Cable 과 같은 압출가교 PE의 초전도 Cable 의 예이지만 그의 여러가지 방식이 개발중 6),7)이다. 예를 들면 미국의 Brookhaven 연구소에서는 Tc가 높은 Nb₃Sn Tape를 도체구조로 하고 94층의 Polypropylene (PP) 및 PE가 절연구조로 되어 있다.

초전도 Cable 의 구조는 Rigid형, Flexible형, Semi-Flexible형으로 크게 구분된다. 첫째로 Rigid형 초전도 Cable 은 영국 CERL, 미국 UCC사 등에서 개발중인 방식으로 中空導體인 Cu관 또는 Al관에 초전도체를 피복 (교류용), 또는 매설 (직류)한 것이 일반적이다. 초전도 중공도체의 제조가 비교적 용이하고 Rigid관이기 때문에 耐壓, 단열의 설계에서 유리하나 도체접속기술, 열수축대책 등의 문제가 있다. 둘째로 Flexible형 초전도 Cable (그림 5 참조)

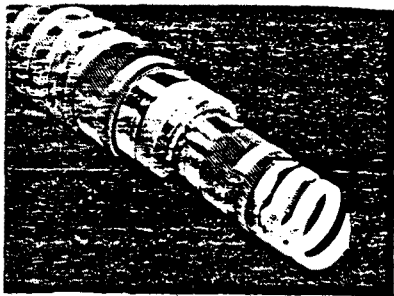


그림 5 Flexible형 초전도 Cable

은 서독 AEG사에서 개발중인 방식으로 도체는 Nb₃Sn와 Cu, 절연은 초임계 He 含浸紙絶緣이다. 공장에서 단열판까지 포함시켜 생산되므로 신뢰성이 좋고 가격도 적게드나 단열의 문제점이 있다. 셋째로 Semi-Flexible형 초전도 Cable 은 Rigid형의 단열관과 Flexible Cable Core을 인입한 것으로 서독 Siemens사, 프랑스 CGE사 등에서 개발중이다. Rigid형과 Flexible형의 혼합으로 단열판로는 Rigid형으로 Cable Core는 Flexible형으로 하여 절충한

것이다. 각국의 개발현황을 표 2에 표시한다.

표 2 초전도 Cable 의 각국의 개발현황

회사명	SIMENS (서독)	BICC (영국)	CGE (프랑스)	BNL (미국)	UCC (미국)	古河 (일본)
송전방식	AC	AC	AC DC	AC	AC	AC DC
목표전압 (KV)	110	35	125±100	138	138/230/345	154±75
목표전류 (KA)	10	13	14 20	4	7.1/11.8/17.75	3 33
송전용량 (MW)	2000	750	3000 4000	1000	1690/4710/ 10590	1000 5000
초전도체 + 안정화재	Nb와이어 Al, Cu	Nb 튜브 Al	Nb ₃ Sn- Ti ₃ Al Al	Nb Sn코 Al	Nb 튜브 Cu	Nb Nb-Ti Cu Cu
실 상 황	35일외모 일제작완료 110KV, 10KA 단상송전 1973년	3m의단상 케이블 2080A 동 전	18m의 용기제작 1975년완	삼상 100m 의 테스트 장치 350A의 용전교류 손실측정 계속중	7m의실험 장치 교류 손실측정	7m의 케이블 동 전테스트

이상 초전도 Cable 의 기본개념을 간단히 소개하였지만 문제가 되는 것은 재료의 물성변화 특히 전기 절연 재료에서 현저하며 또하나의 문제는 액체 N₂, 액체 He 등의 극저온을 사용하므로 냉각단열이 곤란하며 더우기 장거리 송전을 생각하면 그 문제는 심각하다 하겠다.

2-3 냉각단열

초전도 송전에 꼭 필요한 기술에 냉각단열이 있다. 외부로부터의 누설열을 되도록 줄이는 것은 냉동기의 부하를 경감하기 위해 필요하여 지금까지 여러가지의 단열방식이 개발되고 있다.⁸⁾

He 의 열용량은 액체 N₂ 보다 작고 냉동기 효율도 나쁘기 때문에 열절연은 특히 진공다층단열이 이용될 뿐만 아니라 열차폐용으로서 외부에 액체 N₂를 둘러 외부로부터의 누설열 등을 생각한다. 이로 인해 종래의 Cable 보다 복잡한 구조이지만 전체의 구조는 OF Cable 과 같은 자장형, Pipe Cable 과 같이 Pipe 중에 3상용 Cable 을 넣은 형, 管路氣中 Type 등이 있다. 각각 장점과 단점이 있지만 어느 것이 바람직 한가는 적용장소 등과 함께 변하기 때문에 신중한 검토가 필요하다.

3. 전기 절연

초전도 Cable 의 심장인 전기절연 (Electric Insulation) 기술은 Cable 의 Cost 절감, 용량증대, 설계 및 제조의 합리화, 수명보증과 운전상의 절대적인 신뢰도의 확립을 위하여 재료기술과 더불어 반드시 필요한 기술이나 적극적인 기능이 아니기 때문에 공

와 마찬가지로 그 고마움을 느끼지 못하는 기술이기도 하다. 특히 초전도가 常溫導로 전이할 때는 예상외의 고전압이 발생하므로 전기절연은 중요한 과제라 하겠다.

GE사의 Mathes 씨의 논문⁹⁾ (1967년)을 발단으로 초전도와 절연은 급속히 접근하기 시작하였으므로 불과 20여년에 불과하여 급후 연구개발의 문제는 수없이 남아 있다고 하겠다. 현재 가장 널리 사용되는 초전도체는 앞에서 설명한 바와 같이 극저온의 사용은 불가피하므로 재료에 있어서는 측정은 물론 열적, 기계적, 전기적으로 실온과 달리 검토해야 하는 많은 문제가 있는 것도 사실이다. 극저온에서는 일반적으로 재료 고유의 절연특성, 유전특성은 좋다고 하지만 기계적 특성의 저하, 열수축, 열응력이 크므로 실제의 저온 Cable의 전기절연은 낙관할 수 없다.

여기에서는 절연방법을 중심으로 기체, 액체, 고체 및 복합절연으로 나누어 소개한다.

3-1 액체 및 기체절연

냉각제인 극저온 액체를 전기절연 재료로 동시에 이용한다는 것은 절연설계에 매우 바람직하고 흥미있는 일이기도 하다. 극저온응용에서 사용되는 액체절연 재료는 常溫에서는 기체인 N₂, He, H₂ 등이 액화한 액화기체이다. 초전도응용에서는 현재 초전도 재료에서의 Tc 때문에 액체 He만이 사용이 가능하지만 장래 고온 초전도체가 개발되면 1차단계로 액체 N₂의 사용이 가능토록 될 것이다. 극저온 액체의 대기압, 비등점 상태에서의 절연파괴 특성은 그림 6과 같이

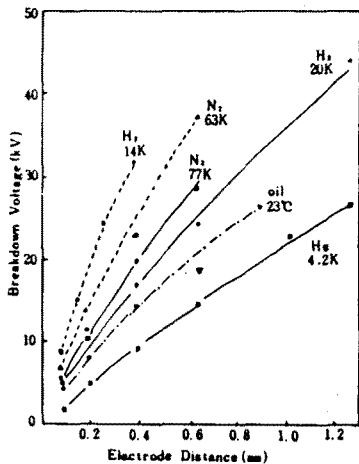


그림 6 절연파괴 특성 (60Hz, AC 실험치)

액체 He은 조금 낮지만 액체 H₂, 액체 N₂는 절연油보다 높은 특성을 갖는 뛰어난 절연재료이다.¹⁰⁾

또한 AC, DC 파괴전압과 전극간격 d의 관계는 액체 He, N₂ 모두 (3.1)식의 관계식이 성립한다(그림 7 참조).

$$V = Ad^n \tag{3.1}$$

단, A : 정수

이때 n의 값은 전극간격이 4mm 정도까지는 n ≈ 1, 10mm 정도까지는 n ≈ 0.5가 된다.¹¹⁾ 그러나 그림 7에 표시한 바와 같이 파괴전압이 측정자에 따라 어

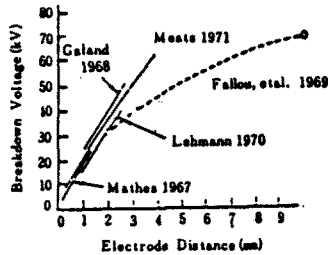


그림 7 액체 He의 절연파괴 특성

는 정도 차이가 있는 것을 알 수 있으며 그 요인을 표 3과 같이 정리할 수 있으나 급후 검토가 필

표 3 절연파괴에 영향을 미치는 요인

요 인	영 향
액체속의 불순물	액체헬륨에서 절빙공기 입자의 영향은 작지만 기름은 미량이라도 그 영향이 크고, 산소에 의한 전자친화력도 고려될 수 있다.
액체의 압력	과냉각 혹은 초임계 상태에서 압력의 1/2 승에 비례하여 파괴전압 증가
전극표면의 오손 (산화)	산화하면 파괴전압은 증가, 헬륨에서 나오므로 미복 동전극에서는 작고, 동전극에서는 크다.
전극의 Conditioning	질소에서는 크다.
전극재료의 Work Function	확실히 않다.

표 4 극저온 액체의 유전 특성

	액체 He	액체 H ₂	액체 N ₂
비 등 점	4.2K	20.4K	77.3K
액상의범위	5.2K	14-33K	63-126K
비 유 전 율	1.05	1.226	1.433
tan δ	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
	(단, 고전계하에서는 증대)		
체 적 저항 율	10 ¹⁶ Ω-m	10 ¹⁶ Ω-m	10 ¹⁶ Ω-m

초전도 케이블의 기술개발

요하다.^{12),13)} 극저온액체는 냉각매체로서의 요구로부터 과냉각 또는 초임계의 가장상태로 사용되지만 가압에 의해 파괴전압은 상승한다. 유전 특성은 표 4에 표시하지만 유전율은 절연유에 비해 작아 Cable의 저장 전용량화가 기대되지만 고체와의 복합절연구조에서는 액체중의 전위분담이 커져 주의해야 한다.

한편 초전도 Cable에 사용되는 극저온액체는 열침입에 의해 기화하고 특히 大量이 기화하면 전기특성의 변화가 문제가 된다. 상온과 수기압 이하의 저온기체에서는 Paschen의 법칙이 알려지고 있다.¹¹⁾ 또한 4.2K 근처의 온도에는 Paschen의 법칙이 성립하며 저온기체의 절연파괴치는 액체의 대략 $1/2 \sim 1/3$ 로 저하하며 파괴치 $V = f(\frac{1}{p})$ 의 관계이므로 설계시에는 절연거리를 충분히 고려해야 하는 것이 중요하다.

3-2 고체절연

극저온액체 재료의 대상은 불과 몇가지 뿐인데 반해 고체재료는 그 종류가 아주 다양하나 최근 주목을 끌고 있는 고분자의 일반적인 경향만을 살펴보기로 하겠다.

고분자재료의 진성파괴의 강도는 일반적으로 有極性 재료에서는 極性基가 전자의 산란 중심이 되기 때문에 저온으로 될수록 상승하고, 무극성 재료에서는 그다지 큰 변화가 없다고 한다.¹⁴⁾(그림 8 참조). 필자들은 액체 He 온도(4.2K)에 주목하여 조사해 본 즉 그림 9의 점선과 같이 액체 He 온도에서의 파괴전계 E_B 는 4 MV/cm 이하로 급격히 저하하는 것을 관측하고 극성, 무극성 재료에 관계없이 매질효과가

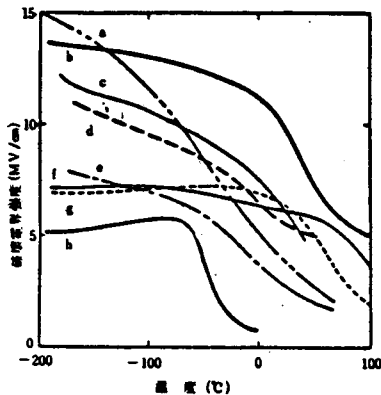


그림 8 절연파괴 전계의 온도의존성

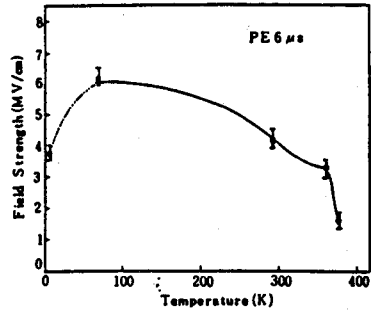


그림 9 LDPE의 파괴전계의 온도의존성

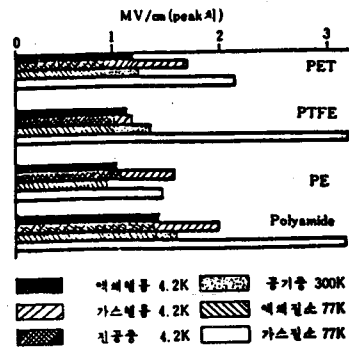


그림 10 온도와 매질

큰 것을 확증했다. 그림 10에 각종 고분자재료의 재료의 온도와 매질에 따른 교류절연파괴전계의 비교를 표시하지만 동일 온도에서도 기체중에서의 E_B 가 액체중의 E_B 보다 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 고분자재료가 매질과의 복합절연의 형태로 사용되는 경우는 매질중에서의 방전의 영향을 받으므로¹¹⁾ 설계상 충분히 주의해야 할 점이다. 이의 해결책의 한가지 방법으로서 압력을 가하여 부분방전을 억제하는 수단이 있다.

고체의 절연耐力는 MV/cm로 표시하지만 이 값은 시료의 두께에 밀접하며 일반적으로 절연재료층의 두께가 두꺼워질수록 절연파괴전계는 현저하게 감소한다. 그 관계식은

$$U = Ke^n \quad (3.2)$$

단, K:정수, e:두께

로 표시되며 유극성 고분자에서는 $n \approx 0.4 \sim 0.45$, 무극성 고분자에서는 $n \approx 0.6$ 이다.

그림 11에 각종의 매질중에서 PE의 파괴전압에 미치는 두께효과를 표시한다. 두께효과가 있기 때문에 같은 두께인 경우 한장으로 된 경우보다 얇은 것을

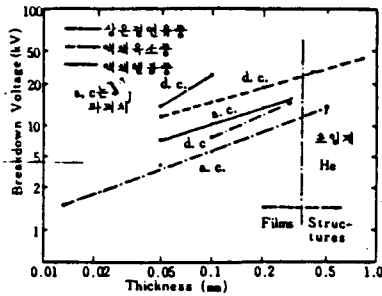


그림 11 EDPE의 절연파괴전계의 두께효과

몇장 겹친 경우가 유리하다. 이러한 방식은 고체절연 재료가 극저온에서 사용될 때 열수축 응력, 인장강도, 연신 등의 열적, 기계적인 문제가 동반되므로 응력의 극부집중을 막는 데도 유리하다.

극저온에서는 일반적으로 도체에 비해 고체절연재료의 열수축율이 훨씬 크기 때문에 (예를 들면 300K에서 4.2K로 냉각시 구리의 수축율은 0.3% 일 반면 PTFE나 PE는 2~2.5%) 이러한 열수축차에 의해 상당한 인장응력이 동반된다. 따라서 절연설계시 이러한 점의 고려가 뒤따라야 할 것이다.

3-3 극저온 절연방식

표 5에 공업적으로 가능하다고 생각되는 절연방식을

표 5 절연방식

방식	절연	응용	개발 연구	전압
Spacer 방식	진공	CR	미국 Underground Power Corp	AC
	기체	-	-	-
	액체	SC	미국 U.C.C., 영국 CERN	AC
Tape 권 방식		SC	서독 AGE, 오스트리아 프랑스 CGE	DC DC
	기체	CR	미국 G.E., 일본의 전선업체	AC
	액체	SC	미국 AEC 영국 BICC, 서독 Siemens 일본의 전선업체 (경토중)	AC AC
고체절연	고체	-	-	-

* CR: 극저온저항 Cable, SC: 초전도 Cable

표시한다. 이중 어느 방식이 좋은가는 각 방식의 장점과 문제점들이 다르고 이에 대한 연구가 자각 진행중¹⁵⁾이므로 아직 결론을 지을 수는 없다. 즉 Spacer 방식은 냉각제와 절연체 그리고 열절연과 전기절연을 결합할 수 있다는 이점은 있으나 Spacer의 沿面放電 발생전압이 낮고 구성 각부의 열수축 차이에 따른 Spacer 설계에 큰 어려움이 따른다. 내전

압, 유연성의 관점에서는 극저온액체를 함침한 Tape 권 방식이 현재 연구개발의 가장 일반적인 경향이 되고 있으나 극저온에서의 기계적인 특성이나 誘電損의 측면에서 확실한 재료가 없다는 문제점을 갖고 있다.

4. 결 론

이상 초전도 Cable의 기술개발에 대해 간단히 소개하였지만 최근의 고온초전도 재료의 개발은 물론 재료기술, 냉각기술, 절연기술 등 향후 해결되어져야 할 과제는 산적해 있다고 하겠다.

세계 각국에 있어서의 초전도 Cable의 기술개발은 아직 연구단계를 벗어나지 못하고 있는 것도 사실이나 21세기를 전망하면 급후의 대도시의 전력수요의 증대는 피할 수 없기 때문에 초전도 Cable의 기술개발은 확립해야 할 역사적인 사용이라 하겠다.

최근의 고온초전도체의 개발 더 나아가 상온초전도체의 개발과 더불어 이것을 활용한 초전도 Cable이 실현되리라 기대한다. 이를 위해 한국전력공사 기술연구원의 계통연구실과 한국전기연구소 전기재료부 여러 분은 오늘도 본격적인 연구개발에 착수하고 있다.

참 고 문 헌

- 1) J.E. Bednorz and K.A. Müller: Z. Phys. B. Condensed Matter 64(1986), 189.
- 2) C.W. Chu: Phys. Rev. Lett. 58(1987), 911.
- 3) 山村, 菅原: 超電導工學 (日本電氣學會), (1978).
- 4) S.H. Minnich and G.R. Fox: Cryogenics 9(1969), 165.
- 5) 小崎, 長尾, 堀井, 清水: 第18回電氣絶緣材料シンポジウム豫稿集, (1985).
- 6) 朴鍾根: 大韓電氣學會誌, 32(1983), 29.
- 7) E.B. Forth: IEEE Trans. on PAS, PAS-103(1984) 2023.
- 8) 富山: 應用物理, 43(1974), 1144.
- 9) K.N. Mathes: IEEE Trans. Elect. Insulation EI-2(1964), 1..
- 10) K.N. Mathes: 上同 EI-5(1970), 3.
- 11) R.J. Meats: Proc. IEE 119(1972), 6.
- 12) D.W. Swan and T.J. Lewis: J. Electrochem Soc. 107(1960), 180.
- 13) J.M. Goldschvartz and B.S. Blaisse: Brit. J. Appl. Phys. 17(1966), 1083.
- 14) I.D.L. Ball: Proc. IEE 98(1951), 84.
- 15) 超電導電磁機器專門委員會: 日本電氣學會技術報告, 93號, (1980), 31.