

特輯

超電導
時代를
연다

超電導應用機器의 絶緣

Electrical Insulation of
Superconducting Machines

극저온재료실장 金 相 賢
한국전기연구소 전기재료부

1. 머리말

最近의 高温超電導體 開發의 세계 신기록 갱신의 경쟁과 더불어 인류는 새로운 超電導時代의 章을 열게 되었다. 電氣抵抗이 零이 되는 超電導현상의 應用은 용이하게 强磁界가 얻어지는 것, 大電流密度가 얻어지는 것 등의 특징을 활용하여 超電導 에너지 貯藏(Superconducting Magnetic Storage), 초전도 Cable, 超電導發電機, 同機期 등의 電力機器, System의 초전도화에 의한 에너지 절약, 核融合, MHD發電 등의 새로운 에너지 개발 및 磁氣浮上列車, 高에너지 加速器, 선박推進, Josephson素子, 宇宙科學 등에 이르기까지 다양하다^{1)~5)} 그러나 이들의 超電導機器의 Cost 절감, 容量增大, 설계 및 제조의 합리화, 수명보증과 운전상의 절대적인 신뢰도의 확립을 위해서는 構造에서 가장 약

점인 전기절연기술의 확립 및 그것을 지지하는 재료의 開發이 절실히 要求되고 있다. 특히 초전도가 常電導로 전이할 때는 예상외의 고전압이 발생하므로 전기절연은 중요한 과제라 하겠다. 그러나 電氣機器의 심장인 絶緣(Electric Insulation)은 적극적인 機能이 아니기 때문에 공기와 마찬가지로 그 고마움을 느끼지 못하는 技術이기도 하다.

먼저 絶緣기술의 이해를 돕기 위해 超電導應用機器와 絶緣기술의 背景을 간단히 소개하기로 하자.

絶緣이라는 内容으로 강의를 처음 開講한 것은 서독의 Darmstadt공과대학의 Peterzen 교수였다⁶⁾. 1912년의 일이고 당시 低温 物理學의 선봉자였던 베를란드의 K. Onnes 교수가 水銀의 순도와 잔유저항과의 관계를 연구하고 超電導현상을 發見한 다음 해인 것이다. 그후 약 50年間

물리적인 흥미와 순수한 조건하에서의 실험을 할 목적으로 低溫에서의 방전의 실험이 몇차례 행해졌지만⁷⁾ 絶緣과 초전도 응용기기와의 연관성은 적었다.

1961年 Bell연구소의 Kunzler씨가 硬超電導體(Hard Superconductor)를 사용해, 超電導 Magnet의 제작에 성공하자⁸⁾ 超電導현상을 전력기 및 송전용 Cable에 應用하려는 검토가 시작되었고 絶緣의 문제도 대두되었다. 바로 이 시기는 超高压 送電時代가 시작되어 약 10年을 경과하고 都市에의 전력수요의 집중과 발전소의 대용량화를 위하여 종래의 송전방식 특히 OF Cable 방식에 한계가 나타나기 시작하여 새로운 에너지의 송전方式이 바람직한 시기였기 때문에 超電導와 絶緣은 급속히 접근하기 시작했다. 그러나 초기 일부에서는 초전도 응용기기에는 절연기술은 그다지 필요하지 않다고 생각되었기 때문에 論文⁹⁾은 적었지만 경제성의 문제로 본격적인 연구가 진행되었다. 그 발단이 된 論文은 GE社의 Mathes氏의 論文¹⁰⁾(1967)이라고 생각된다. 따라서 초전도 응용기기의 절연연구의 역사는 불과 20여년에 불과하여今後 연구개발의 문제는 수 없이 남아있다고 하겠다. 한편 현재 가장 널리 사용되는 초전도체는 Nb-Ti, Nb₃Sn 등이므로 임계온도(T_c) 때문에 액체 He(4.2k), 액체 N₂(77k) 등의 極低溫의 사용은 불가피하다. 따라서 極低溫이라는 특수환경에서

사용되는 재료에 있어서는 測定을 물론 열적, 기계적, 전기적으로 실온과 달리 검토해야 하는 많은 문제가 있는 것도 사실이다. 극저온 絶緣만을 고려한다면 다음과 같다.

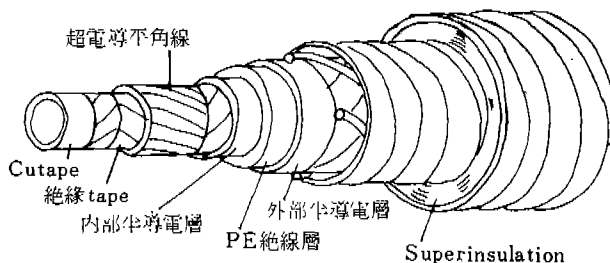
- (1) 極低溫액체의 절연과피
- (2) 극저온에서의 기체절연과피
- (3) 극저온에서의 고체절연과피
- (4) 극저온액체 및 고체표면의 연면방전
- (5) 극저온에서의 Corona 현상
- (6) Treeing
- (7) 극저온에서의 고체의 기계적 성질의 열화

2. 極低溫 絶緣方式

일반적으로 極低溫에서는 材料固有의 절연특성, 유전특성은 양호하다. 그러나 기계적 특성의 저하, 열 수축, 열 응력이 크기 때문에 실제의 극저온 Cable의 전기절연은 반드시 樂觀的이라고 할 수 없다.

여기에서는 극저온 및 초전도 Cable(그림1)을 대상으로 실제로 검토되고 있는 絶緣方式을 소개한다.

極低溫 Cable의 絶緣方式은 보통의 電力 Cable과 크게 다른 것은 아니다. 다만 냉각제에 의해 도체가 잘 냉각되는 構造가 필요하고 특히 초전도 Cable에 있어서는 절연체를 통하여 熱을 방출시킬 필요가 없는 점이 다르다고 할 수



〈그림 1〉 초전도 Cable

있다. 공업적으로 가능하다고 생각되는 절연방식을 분류하면(표 1)

(1) Spacer 방식 : 극저온 액체, 기체 또는 진공을 주절연으로 하고 Epoxy와 같은 고체 Spacer로 지지하는 방식

(2) Tap 捲 방식 : 도체에 Tape狀의 고분자 또는 紙를 감고 여기에 극저온 액체나 기체를 함침시키든가 아니면 眞空으로 하는 방식

(3) 고체절연방식 : 도체를 Epoxy나 FRP로 절연시키는 방식

이 그것인데 이중 어느 방식이 좋은가는 각 방식의 장점과 문제들이 다르고 이에 대한 연구가 각각 진행중이므로 아직 결론을 지을 수는 없다. 즉 Spacer 방식은 냉각제와 절연체 그리고 열절연과 전기절연을 결합할 수 있다는 利點은 있으나 Spacer의 연면방전 발생전압이 낮고 구성 각부의 열수축 차이 등에 따른 Spacer 설계에 큰 어려움이 따른다. 내전압, 유연성의 관점에서는 극저온액체를 함침한 Tape 捲 방식이 현재 연구개발의 가장 일반적인 경향이 되고 있으나 극저온에서의 기계적 특성이나 유전손의 측면에서 확실한 재료가 없다는 문제점을 갖고 있다. 그

〈표 1〉 절연방식

방식	절연	응용	개발 연구	전압	
Spacer 방식	진공	CR	미국 Underground Power Corp	AC	
	기체	—	—	—	
	액체	SC	미국 U. C. C., 영국 CERL	AC	
Tape 捲 방식		SC	서독 AEG, 오스트리아	DC	
		CR	프랑스 CGE	DC	
	기체	CR	미국 G. E., 일본의 전선업체	AC	
	액체	SC	미국 AEC	영국 BICC, 서독 Siemens, 일본의 전선업체 (검토중)	AC or AC
고체절연	고체	—	—	—	

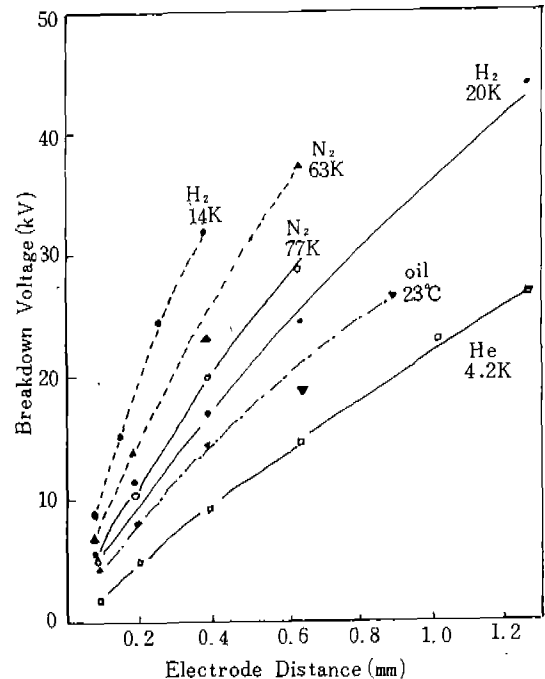
* CR : 극저온저항 Cable, SC : 초전도 Cable

리고 절연재가 구조재를 겸할 수 있는 고체 절연방식은 초전도 Magnet나 극저온 Cable의 단말부에 이용될 수 있다.

이들의 절연방식에는 構成材料로서 액체, 기체 및 固体絶緣材料가 사용되고 있으므로 각각의 絶緣의 특징을 살펴 보기로 하자.

3. 液体 및 氣體絶緣

냉각제인 극저온 액체를 전기절연재료로 동시에 利用한다는 것은 절연설계에 매우 바람직하고 흥미있는 일이기도 하다. 極低溫應用에서 사용되는 액체절연재료는 상온에서는 기체인 N₂, H₂, He이 液化한 액화기체이다. 超電導應用에서는 현재 초전도재료의 임계온도 때문에 액체



〈그림 2〉 극저온액체의 절연파괴특성 (60Hz, AC 실험치)

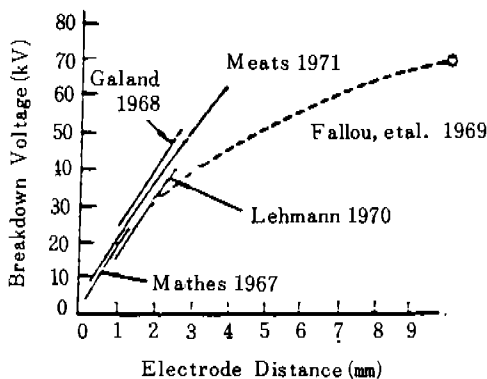
He만이 사용이 가능하지만 장래 고온 초전도체가 개발되면 1차단계로 액체 N₂ (77k)가 사용이 가능토록 될 것이라 생각된다. 極低溫液体的大氣壓, 비등점상태에서의 절연파괴 특성은 그림2와 같이 액체 He은 조금 낮지만 액체 H₂, 액체 N₂는 絶緣油보다 높은 특성을 갖는 뛰어난 절연재료이다¹¹⁾. 또한 AC, DC 파괴전압과 전극간격 d의 관계는 액체 He, 액체 N₂ 모두 (3.1)식의 관계식이 성립한다(그림 3).

$$V = Ad^n \quad (3.1)$$

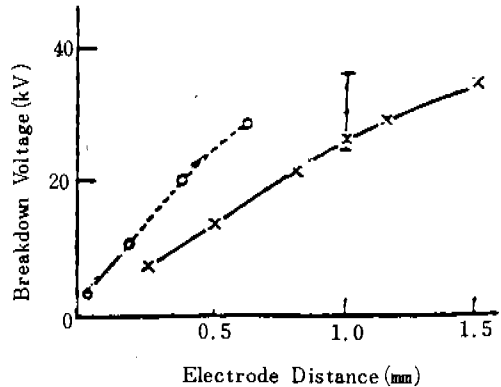
단, A: 정수

이때 n의 값은 전극간격이 4mm 정도까지는 n=1, 10mm 정도까지는 n=0.5가 된다¹²⁾. 그러나 그림4에 표시한 바와 같이 파괴전압이 측정자에 따라 어느 정도 차이가 있는 것을 알 수 있으며¹²⁾ 그 요인을 표2와 같이 정리할 수 있으나^{13)~15)}今後 검토가 필요하다. 極低溫 액체는 冷却媒体로서의 요구로부터 過冷却 또는 超臨界의 加壓상태로 사용되지만 加壓에 의해 파괴전압은 上昇한다.

액체 N₂에서는 壓力의 거의 평방근에 비례하여 上昇하며 이를 기포파괴의 억제 효과로 생각한다¹⁶⁾. 필자는 액체 He, Ar의 極性효과(그림



〈그림 3〉 액체 He의 절연파괴특성



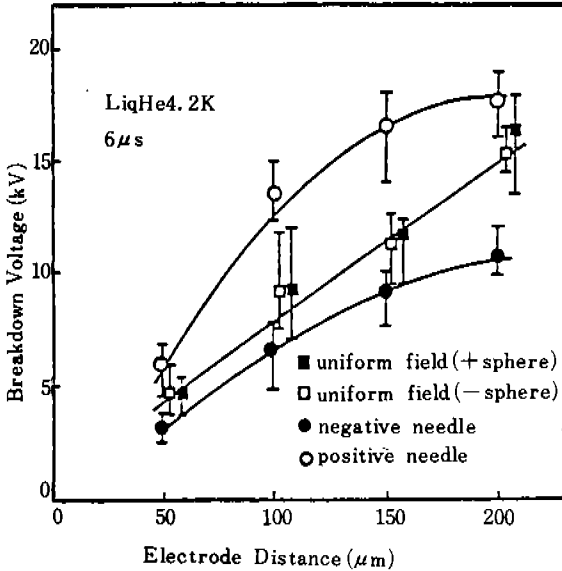
〈그림 4〉 액체 N₂의 파괴특성

〈표 2〉 극저온액체의 절연파괴에 영향을 미치는 요인

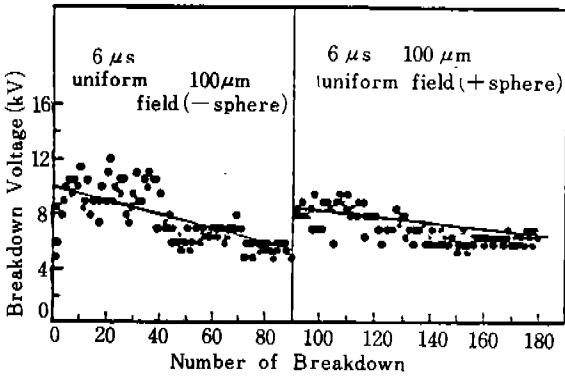
요 인	영 향
액체속의 불순물	액체헬륨에서 결빙공기입자의 영향은 작지만 기름은 미량이라도 그 영향이 크고, 산소에 의한 전자전화력도 고려될 수 있다.
액체의 압력	과냉각 혹은 초임계상태에서 압력의 1/2승에 비례하여 파괴전압 증가
전극표면의 오손 (산화)	산화하면 파괴전압은증가, 헬륨에서 니오브 피복 동전극에서는 작고 동전극에서는 크다.
전극의 Conditioning	질소에서는 크다.
전극재료의 Work Function	확실치 않다.

5), Conditioning 효과(그림 6), 전극재료효과 등을 측정하고 액체 He는 음극의 초기전자 放出 그리고 액체 Ar, N₂ 등은 Streamer에 의한 파괴기구를 판명했다.

誘電特性은 표 3에 표시하지만 유전율은 절연유에 비해 작아 Cable의 低靜電容量化가 기대되지만 固体와의 복합절연 구조에서는 액체중의



〈그림 5〉 액체 He의 극성효과



〈그림 6〉 액체 He의 절연파괴의 Conditioning 효과

〈표 3〉 극저온액체의 유전특성

	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 유전율	1.05	1.226	1.433
tan	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ (단 고전계하에서는 증대)	10 ⁻⁶
체적저항률	10 ¹⁴ Ω-m	10 ⁻⁶ Ω-m	10 ¹⁴ Ω-m

전위분담이 커져 注意해야 한다. 또한 유전율과 밀도와의 관계는 Clausius - Mossotti의 식¹⁷⁾

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{N_0 \alpha}{3 \epsilon_0 M} = \text{const} \quad (3.2)$$

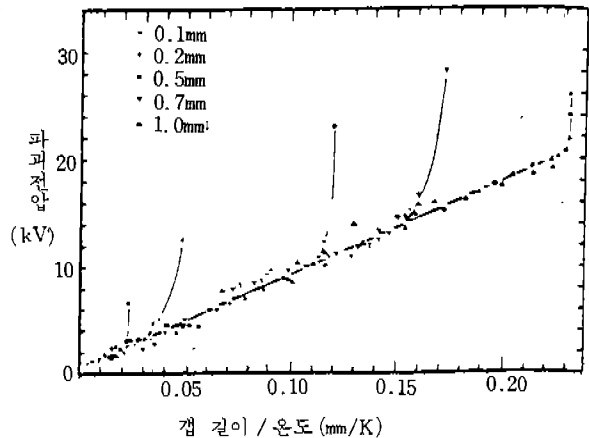
단, ϵ' : 유전율, ρ : 밀도, N_0 : Avogadro수
 α : 분극률, M : 분자량

을 적용한다. 誘電正接 ($\tan \delta$)은 주파수, 전계강도 특히 (3.3)식에 표시한 바와 전계의존성이 현저하다¹⁸⁾.

$$\tan \delta = A \cdot \exp(bE) \quad (3.3)$$

단, E : 전계강도, A, b : 定數이다. $\tan \delta$ 는 2 kV/mm이하의 電界에서는 10⁻⁶로 상당히 작지만 高電界가 되면 10⁻³ 정도까지 증대하며 粒子의 이동, 전계하에서 발생한 작은 기포中の 방전과 관련하여 생각하고 있다¹⁸⁾.

한편, 초전도 Magnet에 사용되는 極低温液体는 熱侵入에 의해 氣化하고, 특히 大量氣化하면 전기특성의 變化가 문제가 된다. 상온과 수기압 이하의 저온기체에서는 Paschen의 법칙이 알려져 있다. 저온기체 He의 破壞電壓을 온도(T)의 逆數(거의 密度에 비례)와 전극간격과의 곱을 횡축으로 표시한 것이 그림7이다. 4.2K 근



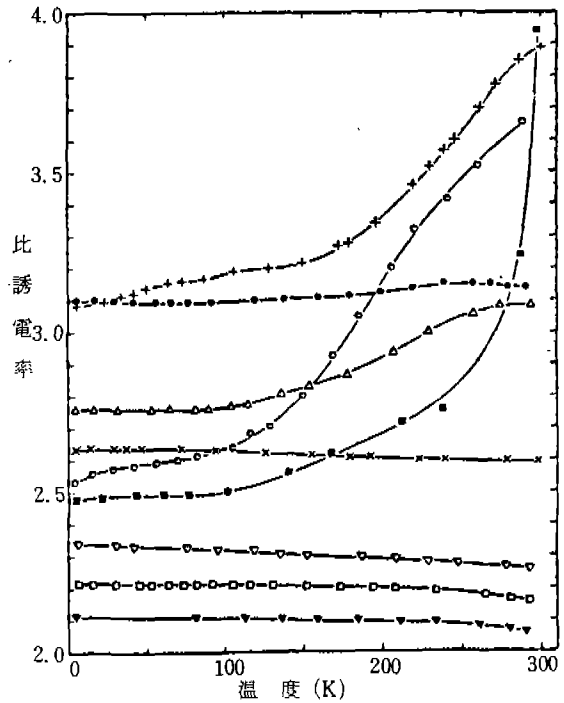
〈그림 7〉 저온기체 He의 절연파괴특성

처의 온도 이외에는 Paschen의 법칙이 成立함을 알 수 있다. 그러나 常溫에 있어서도 전극간격과 기체밀도가 커지면 Paschen의 법칙은 성립하지 않는데 전극간격이 0.5~5mm, 밀도 20kg/m^2 이내 그리고 온도 7~30K 이내가 그 성립범위인 것으로 알려져 있으며 기체 He의 경우 전극간격을 0.5~3mm로 하여 실험하면 그 불꽃전계강도가 15°kV/cm 이상이 되면 성립하지 않는다는 보고도 있다¹²⁾. 저온기체의 절연파괴치는 액체의 대략 $1/2\sim 1/3$ 로 저하하며 破壞值 $V=f(\frac{1}{T})$ 의 관계이므로 설계시에는 絶緣距離를 충분히 고려해야 하는 것이 중요하다.

4. 固体絶緣

極低温液体材料의 대상은 불과 수가지 뿐인데 반해 고체재료는 그 종류가 아주 다양하나 최근 주목을 끌고 있는 高分子의 일반적인 傾向 만을 살펴 보기로 하겠다.

Polyethylene (PE), Polyp ropylene (PP), Polytetrafluoro Ethylene (PTFE, 상품명 Teflo) 등은 永久双極子를 갖지 않는 無極性高分子로 상온에서 비교적 작은 誘電率을 가지며 極低温에서도 原子分極, 電子分極의 영향이 거의 없기 때문에 유전율의 변화는 적다. 이에 대하여 Polyethylene - Terephthalate (상품명 Mylar), Polyimide (상품명 Kapton), Polyamide 등의 有極性 高分子의 유전율의 溫度依存性은 복잡하지만 일반적으로 冷却에 따라 双極子 配向의 凍結이 일어나 상온에서의 비교적 큰 유전율치로부터 감소하고 액체 N₂ 온도 이하에서는 거의 일정치를 표시한다(그림 8). tan δ는 주로 交流電界에 의한 双極子の 回轉과 ion전도에 기인하고 極低温下에서는 이들이 減少하기 때문에 常溫보다 낮다. 그림 9는 tape재료의 액체 N₂와 액체 He온도에서의 tan δ를 표시하지만 4.2K 온도

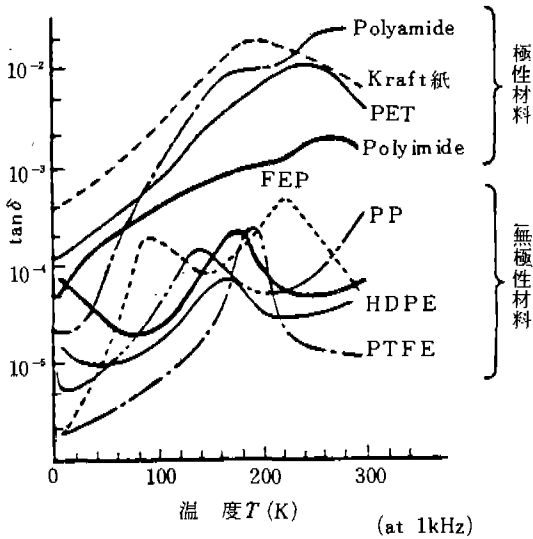


- Cellulose
- Polyimide
- Polyethylene
- Rubber hydrochloride
- △ Polyethylene - terephthalate
- ▽ Polypropylene
- ▼ Polytetrafluoroethylene
- × Polystyrene
- + Aromatic Polyamide

〈그림 8〉 비유전율의 온도의존성

에서 tan δ를 값은 $10^{-6}\sim 10^{-4}$ 이므로 이들의 절연재료는 전기적 설계에서 문제가 되는 것은 없다.

高分子材料의 眞性破壞의 強度는 일반적으로 有極性材料에서는 極性基가 電子의 散亂中心이 되기 때문에 低温으로 될수록 상승하고, 無極性材料에서는 그다지 큰 變化가 없다고 한다¹⁹⁾(그림 10). 筆者는 액체 He온도(4.2K)에 주목하여



〈그림 9〉 각종 Tape 재료의 tan δ - 온도특성

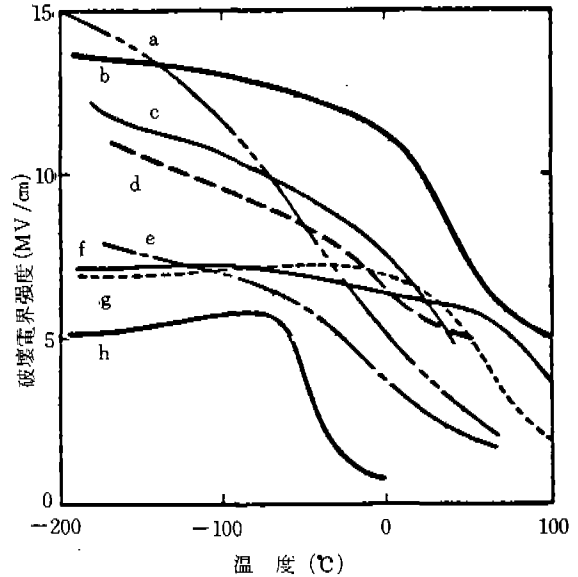
조사해 본, 즉 그림11의 點線과 같이 액체 He 온도에서의 파괴전계 E_B 는 4 MV/cm 이하로 급격히 저하하는 것을 관측하고 극성, 무극성 재료에 관계없이 媒質효과가 큰 것을 확증했다. 그림12에 각종 高分子材料의 温度와 媒質에 따른 交流絶緣破壊電界의 比較를 표시하지만 同一温度에서도 氣體中에서의 E_B 가 액체중의 E_B 보다 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 高分子材料가 媒質과의 複合絶緣의 형태로 사용되는 경우는 媒質中에서의 放電의 영향을 받으므로¹²⁾ 설계상 충분히 주의해야할 점이다. 이의 해결책의 한가지 방법으로서 壓力을 가하여 部分 放電을 抑制하는 手段이 있다.

固體의 絶緣耐力은 MV/cm로 표시하지만 이 값은 시료의 두께에 밀접하며 일반적으로 절연 재료층의 두께가 두꺼워질수록 절연파괴전계는 현격하게 감소한다. 그 관계식은

$$U = Ke^n \quad (4.1)$$

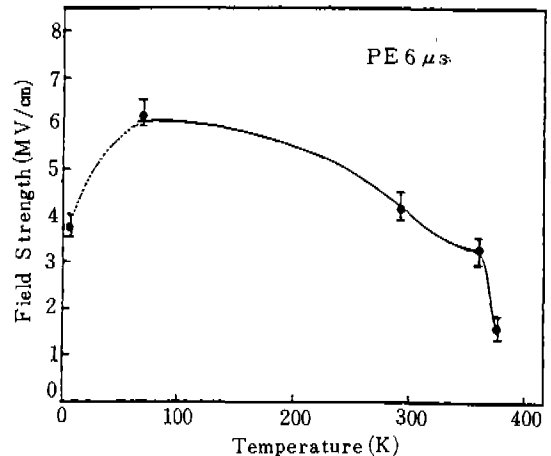
단, K: 定數, e: 두께

로 표시되며 有極性高分子에서는 $n \approx 0.4 \sim 0.45$,

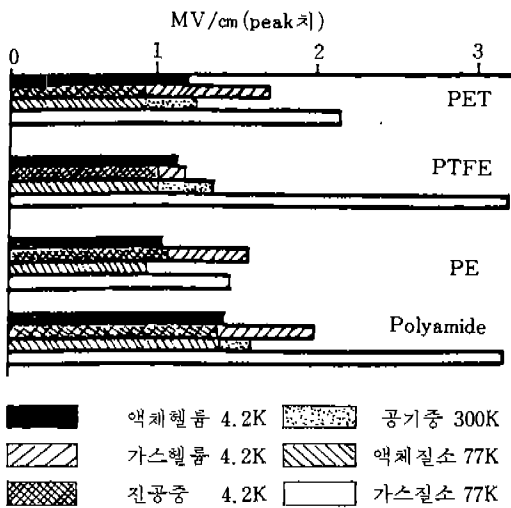


- a. polyvinyle alcohol
- b. polymethyle methacrylate
- c. polyvinyle chloride-acetate
- d. chlorinated polyethylene (55% chlorine)
- e. clear baking oil-vanish
- f. polystyrene
- g. polyethylene
- h. polyisobutylene

〈그림 10〉 절연파괴전계의 온도의존성

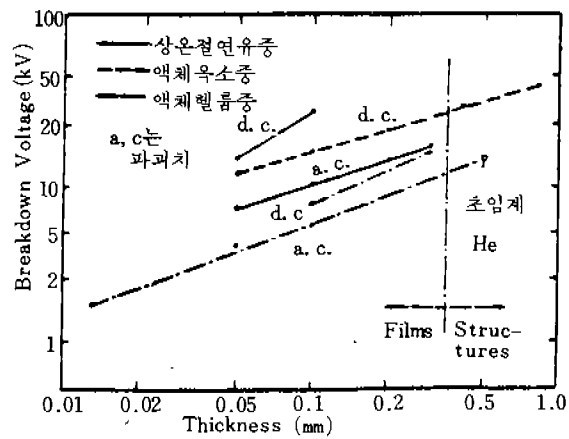


〈그림 11〉 LDPE의 파괴전계의 온도의존성



〈그림 12〉 온도와 매질효과

無極性 高分子에서는 $n \approx 0.6$ 이다²⁰⁾.
 그림 13에 각종의 매질중에서 PE의 파괴전압에 미치는 두께효과를 표시한다. 두께효과가



〈그림 13〉 LDPE의 절계파괴전계의 두께효과

있기 때문에 같은 두께인 경우 한장으로 된 경우보다 얇은 것을 몇장 겹친 경우가 유리하다²¹⁾. 이러한 방식은 고체절연재료가 극저온에서 사용될 때 열수축 應力, 인장강도, 연신 등의 열적 기계적 문제가 동반되므로 應力의 局部集中을

포토 리포트

蘇生한 英國의 에로스

세계에서 가장 유명한 彫像 중의 하나인 이 에로스상은 1893년 조각가인 알프레드 길버트경이 제작한 오리지널 석고형에서 만든 10개의 최선 조상 중의 하나이다.
 복구작업을 끝낸 에로스상이 런던의 피카딜리 서커스 변화가로 돌아온 것은 1985년. 이 복구작업 과정에 빅토리아 알버트 박물관 지하실에서 에로스상으로 판명된 한 세트의 석고형이 발견되었다. 따라서 1919년 이래 길버트경의 작품 代理商이자 오늘날 런던의 주요 화랑 중 하나인 Fine Art Society는 판매 목적으로 10개의 조상을 이 석고형으로 떠나기로 결정했다.
 원형과 마찬가지로 알루미늄 캐스팅을 하기로 했는데, 이는 영국 남부 베이신스토크의 Marris Singer 주조소에서 제작할 예정이며, 1893년의 원형 제조법과 같이 진흙 대신 밀랍을 사용할 것이다.
 오리지널 조상은 유명한 박애주의자인 셰프츠 7세를 기념하기 위해 피카딜리 서커스가에 세워졌다. 에로스의 이타적인 사랑에 근본을 둔 이 셰프츠버리 기념상(고유의 이름)은 박애주의의 관용을 상징해 주고 있다.



막는 데도 유리하다.

極低溫에서는 일반적으로 導體에 비해 固体絶緣材料의 열 수축률이 훨씬 크기 때문에 (예를 들면, 300K에서 4.2K로 냉각시 구리의 수축률은 0.3%임에 반해 PTFE나 PE는 2~2.5%) 이러한 열수축차에 의해 상당한 인장應力이 동반된다. 따라서 절연설계시 이러한 점의 고려가 뒤따라야 할 것이다.

이상 固体絶緣材料를 간단히 소개하였지만 현재 가장 일반적으로 사용되는 재료는 熱硬化性樹脂를 사용하는 것이 일반적이며 이는 도체재료와의 接着性이 重要한 因子가 되었기 때문이라고 생각한다. 大型 Magnet에는 充填材 첨가한 Epoxy, GFRP 등이 사용되고 있다.

5. 맺는 말

이상 極低溫을 中心으로 한 超電導 應用機器

의 絶緣에 대하여 간단히 소개하였지만 超電導機器의 운전시 요구되는 장시간의 신뢰성을 놓고 볼 때 향후 해결되어야 할 과제는 산적해 있다고 하겠다. 電氣絶緣에 관해서는 超電導現象과 같이 極低溫에서 飛躍的으로 常溫과 다른 特性을 표시하는 것은 유감스럽게도 현단계에서는 發見되고 있지 않지만 常溫에 비해 有利한 점이 다소 발견되어 今後의 연구에 의해 이들의 特性을 살린 새로운 絶緣方式과 이것을 活用한 超電導機器가 實現되리라 期待한다. 이를 위해 韓國電氣研究所 電氣材料部 여러분은 오늘도 본격적인 研究開發에 착수하고 있다.

最近의 高溫 超電導體의 發見으로 현재 액체 He만을 사용해야 하는 超電導 應用技術은 머지않은 장래에 액체 N₂를 사용하는 應用技術로 탈바꿈하리라 생각하며 특히 액체 N₂의 극저온을 中心한 結果는 독자 여러분의 좋은 參考가 되었으면 다행이라 생각한다.

〈참고문헌〉

1. E. B. Forsyth : Cryogenics 17 (1977) 3
2. 電氣學會編 : 超電導工學 (電氣學會) (1978)
3. I. N. Sviatlaslavsky : Advances in Cryogenic Engineering 21 (1976) 78
4. 超電導電磁機器專門委員會 : 電氣學會技術報告 88號 (1969) 37
5. 超電導電磁機器專門委員會 : 上同 93號 (1980) 31
6. D. Kind : Elerotech. Z. (ETZ-B) 21 (1969) 3
7. D. R. Young ; J. Appl. Phys. 21 (1950) 222
8. 菅原 : 日本物理學會誌 35 (1980) 820
9. K. N. Mathes : Electro-Tech. 72 (1963) 72
10. K. N. Mathes : IEEE Trans. Elect. Insulation EI - 2 (1967) 1, 24
11. K. N. Mathes : 上同 EI - 5 (1970) 3
12. R. J. Meats : Proc. IEE119 (1972) 6
13. D. W. Swan and T. J. Lewis : J. Electrochem Soc. 107 (1960) 180
14. J. M. Goldschvartz and B. S. Blaisse : Brit. J. Appl. Phys. 17 (1966) 1083
15. J. Gerhold : Cryogenics 12 (1972) 370
16. 河野 : 第3回電氣絶緣材料シンポジウム IV - I (1974)
17. 電氣學會編 : 誘電體現象論 (電氣學會) (1973)
18. M. J. Jefferies and K. N. Mathes : IEEE Trans. Elect. Insulation EI - 5 (1970) 83
19. I. D. L. Ball : Prod. IEE98 (1951) 84
20. 岩田, 菊地 : 第34回絶緣劣化懇談會 (1975)
21. F. T. Stone and R. McFee : The Review of Scientific Instrument 32 (1961) NO. 12