

초전도 케이블용 절연재료의 절연파괴 특성과 기구에 관한 연구
(Study on the Breakdown Characteristics and Mechanisms of
Insulating Material for Superconducting Cable)

○ 김 현희*, 권 영환**, 마 대영*, 김 상현*

* 경상대학교 전기공학과 ** 효성중공업

○ H.H. Kim*, Y.H. Kwon**, D.Y. Ma*, S.H. Kim*

* Dept. of Electrical Engineering, Gyeong-Sang Univ.

** Hyosung Industries Co. Ltd

Abstract

Recently, superconducting cable has attracted a great deal of interest from the viewpoint of energy saving, one of the most important and difficult problems to be solved to assure the high reliability, safety and economy of cable is breakdown in cryogenic temperature.

In this paper, we will report on the characteristics and mechanisms of the breakdown and creeping discharge in cryogenic liquids, dual role of those as the cooling and insulating material, and composite system of cryogenic liquid - gas taking into consideration for application.

1. 서 론

액체는 전기절연 재료로서 지극히 중요하기 때문에 전기전도 및 절연파괴 기구에 대해 수많은 연구¹⁾가 발표 되었지만 통일적인 이론은 아직 정립되지 않으며 고체, 기체에 비해 연구가 상당히 뒤떨어져 있다. 그

원인 으로는 액체의 구조가 기체와 같이 완전히 불규칙적인 구조 이거나, 고체와 같이 규칙성도 없어 물성론적으로 취급하기 어려운 점이다. 또한 액체는 여러가지의 불순물을 함유하기 쉽고, 절연 파괴가 불순물, 미립자, 용해가스, 절연파괴시의 분해물, 전극 등의 2차적 인자의 영향을 받기쉬워 실험적 연구를 어렵게 하고있다. 따라서 이와같은 상태를 극복하고 액체 유전체의 전기전도, 절연파괴의 기초 과정을 이해하기 위해서는 최근 단일 원자구조의 액체 He(4.2K), 액체 Ar(87K), 혹은 2원자 구조를 갖는 액체 N₂(77K), 액체 O₂(90K) 등의 극저온 액체(Cryogenic Liquid)를 사용하는 연구^{2),3)}가 활발하다.

한편 실용적으로 극저온 액체는 초전도 응용기기의 냉각재료로서도 대단히 중요하다. 초전도 응용기기로서는 초전도 에너지 저장, MHD 발전, 초전도 발전기, 변압기, 초전도 자기 부상열차, 초전도 케이블 등이 있으나 특히 초전도 케이블 (Superconducting Cable)⁴⁾은 최근의 심각한 전력 수요의 문제와 관련하여 주목되고 있다. 초전도 케이블의 구조는 기존의 OF케이블과 유사하며 다만 Nb, Nb-Ti 등의 초전도 재료를 사용하기 때문에 임계온도(T_c)의 문제로 액체 He 등의 극저온 액체의 사용은 불가피하여 극저온의 극한 기술의 확립이 필요하다.

초전도 케이블의 냉각 재료로 사용되는 극저온 액체는 절연재료로서도 검하여 사용되기 때문에 케이블의 콤팩트화, 운전상의 안전을 위해서는 시스템에서 가장 약점인 전기절연 특히 Quench가 발생할 경우 예상외의 고전압이 발생하므로 극저온 전기 절연기술의 확립이 시급히 요구되고 있다. 그러나 극저온 액체에서의 저온 방전에 관한 연구가 매우 적어 초전도 케이블의 기술 개발은 어려운 실정이다. 전기적인 절연 파괴만은 검토해 보아도 극저온 액체 He, N₂ 등의 극저온 액체의 절연파괴 그리고 극저온 액체는 증발잠열이 지극히 작기 때문에 (예를들면 액체 He의 경우 :0.62 cal/m³) 극저온 기체와의 관련은 불가피하여 극저온 기체의 절연파괴, 극저온에서의 고체의 관통파괴, 연면방전, Corona, Treeing 등 많은 문제가 있다.

본연구는 이와같은 관점에서 초전도 케이블의 절연설계를 위한 기초 연구로서 여러가지 극저온 액체 및 복합계를 중심으로 전기적인 절연파괴 특성과 기구에 관하여 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1 은 본 실험에 사용한 실험장치의 개략도이며 액체의 압력에 대한 절연파괴특성의 조사에는 별도의 스테인레스강 압력조를 사용하였다.

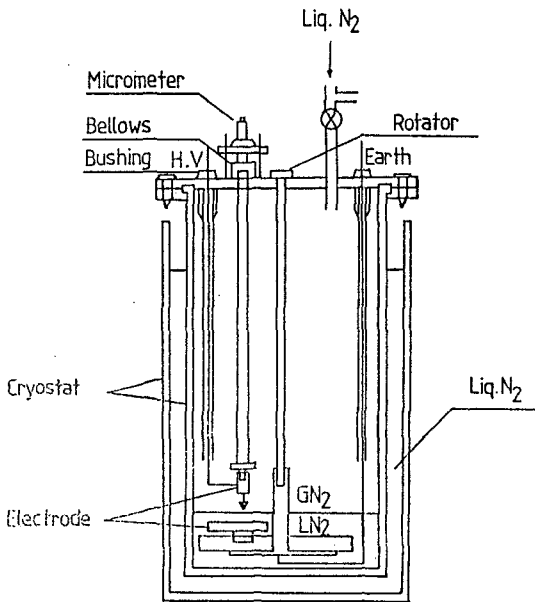


그림 1. 실험 장치

시료로서 사용되는 액체 N₂(77K), Ar(87K), Kr(120K) 등의 극저온 액체중의 공기등의 불순물이 혼입되면 백색의 고체 불순물이 전극간에 존재하여 절연파괴 전압을 현저하게 저하 시키는 현상이 있기 때문에 우선 내부 Cryostat를 10⁻³Toor 이하의 압력으로 배기후 외부 Cryostat에 사전냉각 및 열 절연용으로 상용 액체를 그리고 내부 Cryostat에는 시료용의 고순도 극저온 액체 (순도 99.99%)를 각각 도입하였다.

시료용 극저온 액체중에 침적되어 사용되는 전극계는 스테인레스강(SUS 304)의 평판(28mmφ)-구(6.3mm φ), 평판-침(극돌반경:2μm, 선단각:33°)전극을 Al₂O₃분말(1.0, 0.3, 0.5μm), 다이아몬드 페스트(3, 1μm) 등으로 연마후 아세톤에 넣어 초음파 세척, 건조시켜 각각 평등전계 및 불평등 전계용으로 사용하였다.

전극 배치는 극저온 기체와 극저온 액체의 2층 유전체에 침전극을 상부 또는 하부인 두가지 방식의 수평 전극 배치로 구분하여 복합계의 절연파괴 특성을 조사 하였다.

전극계에 전압을 인가한 경우 극저온 액체의 액면의 변화, 전류파형, Corona방전 현상 등의 관측은 관측창(폭 20mm의 Slit)을 통하여 정지 Camera로 관측하고 동시에 Storage Oscilloscope(Tektronic 2221, Tektronic사)을 사용하여 측정 하였다. 전극간의 조정은 프란지상에 부착된 마이크로미터(Micro-meter)(오차:±1μm)에 의하여 영점을 구한후 전극간격을 일정한 거리로 유지 시켰다.

연면 방전은 PP절연판에 알루미늄 호일을 접촉시켜 극저온 액체중에서 측정 하였다. 전원으로는 직류전압(최대출력 직류전압:32.5KV) 및 교류전압(최대출력 교류전압:40KV, 동승 전자사)을 사용 하였으며, 전압 인가법은 상승법에 의해 절연파괴 시켰다. 전압 인가는 한가지 조건에 대하여 6-10회 반복 측정 하였으며 방전직후 1분 이상이 경과된 후에 재차 전압을 인가 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

비등점이 87K인 액체 Ar의 파괴 전압의 극성 효과를 직류 전압에서 조사하고 그 결과를 그림 2에 표시 한다. 동일한 전극 간격에서는 파괴전압 평등 전계가 가장 높고 정침, 부침의 순서로 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 6의 액체 N₂의 경우보다 파괴 전압은 낮으나 액체 N₂의 특성과 유사함을 알 수 있다.

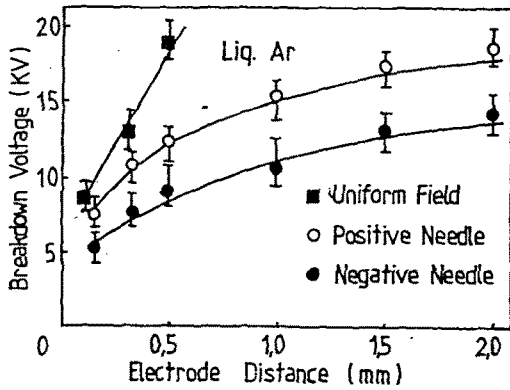


그림 2. 액체 Ar의 극성 효과

그림 3에 평등전계에서 액체 Ar의 파괴 전압의 압력의 의존성을 표시한다. 절연 파괴전압의 압력의 의존성이 없이 일정한 사실로부터 기포(bubble)의 영향이 없음을 알 수 있다.

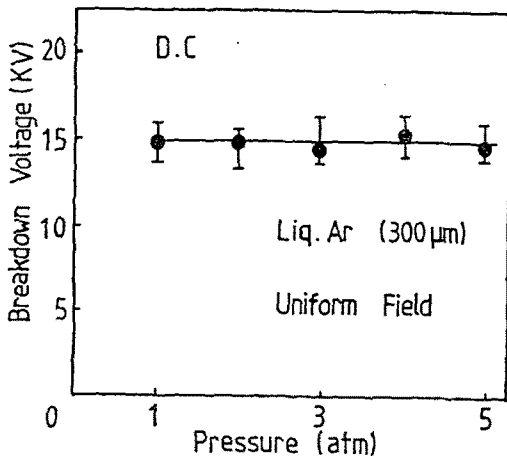


그림 3. 액체 Ar 파괴전압의 압력 의존성

그림 4에 고순도 액체 Ar 및 고순도 Ar을 공기중에 2분간 노출시킨 경우의 파괴 전압의 전극간격 의존성을 표시한다. 불순물을 혼입시킨 경우에 파괴 전압이 상승 하는것을 알 수 있다. Sletten⁶⁾는 동일한 실험을 n-hexane에서 실험하고 특히 공기가 혼입한 경우 파괴 전압이 상승 하는것은 산소에 의한 것으로 설명했다. 본 실험의 결과는 Sletten에게서 보고 되고 있는 산소의 영향과 전자 과정에 의한 액체 Ar의 파괴 기구를 생각하는 것에 대해 설명 할 수 있다. 즉 공기 중에 포함되어 있는 산소는 부정 기체로 강한 전자 부착이 있기 때문에 액체중의 자유전자를 포획하고 절연파괴의 α 계수를 억제하기 때문 이라고 생각된다.

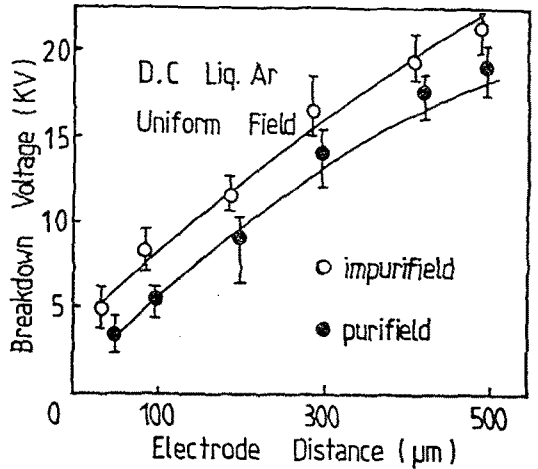


그림 4. 액체 Ar 파괴전압의 불순물 효과

그림 5에 평등전계 조건에서 액체 Kr(120K) 파괴 전압의 전극간격 의존성을 표시한다. 또한 비교 검토를 위해 그림 2에 평등전계 조건에서의 액체 Ar의 결과를 함께 표시한다. 액체 Kr의 파괴 전압은 액체 Ar의 경우보다 낮고 더우기 액체 N₂의 경우보다 훨씬 낮다. 이것은 전자 이동도와 관련하고 있는 것으로 예상된다. 즉, 액체 He, Ne 등의 전자 이동도는 $10^{-3} - 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 정도의 작은 값에 대해 액체 Ar, Kr 등의 원자량이 큰 기체로 되는 액체의 저전계 전자 이동도는 각각 $400 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ (87K), $1200 \pm 150 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ (120K)로 절연파괴 근처에서는 상당히 큰 이동도 인것이 알려져 있다. 즉, 이동도가 큰 액체 Ar, Kr등에서는 파괴 전압이 낮고 또한 액체 Ar과 Kr을 비

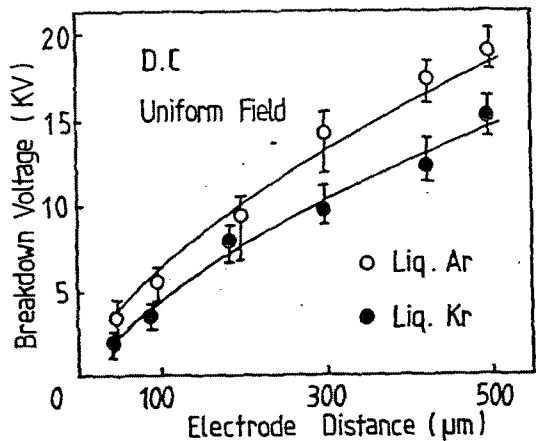


그림 5. 액체 Kr 파괴전압의 전극간격 의존성

교해도 이동도가 큰 Kr의 파괴전압이 낮은것을 알수있다. 이상의 파괴 전압의 압력 의존성이 없는일과 불순물 효과, 전자 이동도가 큰 사실로부터 액체 Ar, Kr 등의 절연파괴는 전자사태등의 전자 과정이 중요한 역할을 한다고 생각된다.

한편 최근의 산화물계 고온 초전도체의 개발과 더불어 관심이 높아지고 있는 액체 N₂(77K)의 직류 파괴 전압의 구성 효과를 평등 전계하에서 측정하고 그 결과를 그림 6에 나타낸다. 이 그림으로부터 전극간격이 짧은 경우에는 파괴 전압이 평등전계 > 정침 > 부침의 순서이나 전극간격이 긴 경우에는 역전됨을 볼수 있다. 이러한 결과는 이미 보고⁶⁾한바 있으나 정 Streamer의 기포파괴 기구로 설명된다.

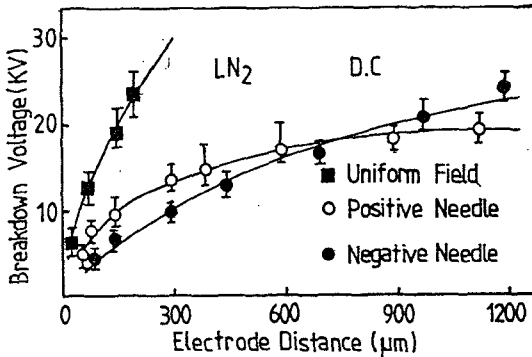


그림 6. 액체 N₂ 절연파괴 전압의 구성별 전극간 거리 의존성

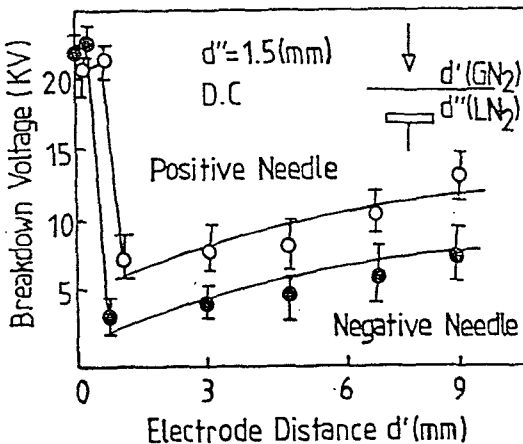


그림 7. 액체 N₂-기체 N₂ 복합계의 직류 절연파괴의 d'의존성

그림 7은 실용상을 고려하여 불평등 전계중에서 액체 N₂층의 두께를 d'', 기체 N₂층의 두께를 d'로 하고 d''=1.5(mm)로 일정히 유지하고 d'만을 변화시킨 경우의 직류 절연파괴 특성을 표시한다. 그림에서 나타난

바와같이 d'가 극히 짧은 영역에서는 (수백 μm) d'의 증가로 절연파괴 전압은 상승하나 (I영역), 어느 임계치의 d'이상 부터는 갑자기 절연파괴 전압이 급격히 감소하고 (II영역), 다시 d'의 증가와 더불어 절연파괴 전압이 상승하는 (III영역) N형의 곡선이 되는것을 알수 있다.

Cryostat의 관측창을 통하여 I영역의 액체 N₂ - 기체 N₂ 복합계에 절연파괴전압 근처의 고전계를 인가한 경우의 액체 N₂의 액면의 변화를 관측하면 액면이 상승하여 침전극을 Climbing하는 효과가 있으며 인가 전압(V)를 상승 시키면 더욱 상부의 침전극을 Climbing하는 효과가 크다. 이상의 결과로부터 I영역에서는 Sumoto효과로 인하여 액체 N₂가 상부의 전극을 Climbing하기 때문에 액체 - 기체 N₂층의 복합계이지만 기체 N₂층이 되기 때문에 액체 N₂층의 두께 d'가 커진 효과가 되어 절연파괴 전압이 d'의 증가와 더불어 상승한다고 생각된다. d'가 큰 II영역과 III영역에서 액체 N₂ - 기체 N₂ 복합계의 고전계를 인가한 경우 액체 N₂의 액면의 변화는 인가 전압의 상승과 더불어 액체 N₂의 액면의 EHD(electrohydrodynamic) 움직임이 활발해지고 더욱이 절연파괴 근처의 고전계에서는 상부의 침전극에서 강한힘이 하부의 액체 N₂층에 원추형(d'가 큰 경우) 또는 원기둥(d'가 작은 경우)으로 작용하여 평판 전극이 기체 N₂층에 완전 노출되는 현상이 있다. 이상의 사실로부터 II영역에서는 Corona바람으로 인하여 액체 N₂층의 두께 d'가 기체 N₂층의 d'로 전환되기 때문에 갑자기 절연파괴 전압이 감소 하였으나, d'가 증가한 III영역에서는 기체 N₂층만의 경우로 d'의 증가와 더불어 절연파괴 전압이 상승된다고 생각된다. 따라서 실용상의 초전도 케이블의 냉매인 액체 N₂가 기화하여 전극에 노출되는 경우는 특히 주의해야 한다.

그림 8에 액체 N₂의 절연파괴 전계, 액체 N₂중의 Poly - Propylene (PP) 고분자의 관통 및 언면방전 전계를 각각 표시 하지만 액체 N₂중의 고분자의 언면방전 전계는 액체 N₂의 파괴전계 및 액체 N₂중의 고분자의 관통파괴 전계보다 대단히 낮은 결과가 얻어졌다. 따라서 실용상 초전도 기기 절연 설계상 주의 해야할 중요한 문제 인것을 알수있다.

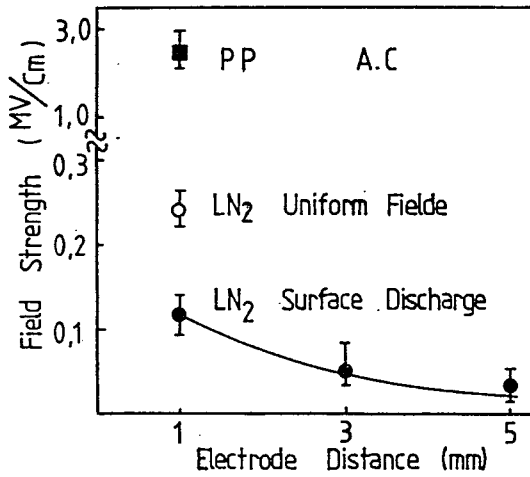


그림 8. 액체 N₂ 중의 고분자의 연면방전 전계

4. 결 론

본연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 극저온 Ar, Kr 의 절연파괴는 압력 의존성, 불순물 효과 전자 이동도가 큰 사실로부터 액체 N₂와 큰 달리 전자 사태등의 전자과정이 중요한 역할을 한다
- 2) 액체 N₂-기체 N₂인 복합계의 교류 절연파괴전압은 기체 N₂층의 두께 d'의 증가와 더불어 상승(I 영역), 감소(II 영역)하고 다시 상승(III 영역)한다.
- 3) 고분자의 연면방전 전계는 대단히 낮기 때문에 실용상의 초전도 케이블의 절연 설계시 주의를 요한다.

참 고 문 헌

- 1) 日本 電氣學會編：“放電 Handbook”，日本電氣學會 1982
- 2) C.Blank and M.H.Edwards：“Dielectric Breakdown in Liquid Helium”，Phys.Rev, Vol.119, pp 50-52, 1960
- 3) J.Gerhold：“Dielectric Breakdown of Cryogenic Gases and Liquid Cryogenics, Vol.119, pp 571-584, 1979
- 4) 류강식：“초전도 케이블의 기술현황 및전망”，대한전기학회 기술조사보고, pp. 61-84, 1992
- 5) A.M.Sletten：Nature, vol.183,pp 311-320, 1951
- 6) 김 상현, 김 정호, 윤문수, 권 영한：“액체 질소의 절연특성에 미치는 전극 효과에 관한 연구”，한국 전기전자 재료학회지, Vol.4,pp 74-122, 1991