

액체 He중 고분자 Film의 연면 및 부분방전 연구

논문
9-9-9

Surface Flashover Discharge and Partial Discharge of Polymer Film in Liquid Helium

김 상 현, 김 현 희, 정 순 용, 최 효 상*

(Sang-Hyun Kim, Hyun-Hee Kim, Soon-Yong Chung, Hyo-Sang Choi, Kwang-Wook Cho)

Abstract

Electrical properties such as surface flashover discharge and discharge degradations of insulating materials for superconducting cable have been investigated. It is found that the surface voltage is proportional to $l^{0.7}$ (l : discharge length) in liquid helium (LHe). $V-t$ characteristic in LHe was a $n=5.5$ that was less than liquid nitrogen (LN₂). After applied AC voltage, the surface condition of polymer films was observed non eroded areas and eroded areas. The eroded area is depending on the applied voltage. In case of LHe, the crack was observed.

Key words(중요용어) : Surface flashover discharge (연면방전), Lichtenberg's figure(리히텐베르크 도형), $V-t$ characteristics($V-t$ 수명특성)

1. 서 론

향후 대용량 전력 송전시 시중방식으로 채택 가능한 초전도 전력케이블^{1,2)}은 1960년대 영국의 BICC, 미국의 UCC에서 개발을 시작으로 연구가 진행중에 있다. 초전도 케이블의 전기적 절연은 시스템의 안정성과 신뢰성 확보에 핵심적인 기술로서 특히 케이블 운용시에 quench의 발생으로 인한 문제의 심각성은 더욱 중요하다. 이러한 문제점 극복을 위해서는 극저온하에서의 전기적 절연에 관한 연구가 절실히 요구되어진다.

초전도 케이블의 절연체로서는 냉매로 이용되는 액체헬륨(LHe, 4.2K)과 고분자 필름의 복합절연체로 구성되어지며³⁾, 현재 검토되어지는 초전도 케이블의 절연방식으로는 초전도체에 고분자 필름을 감는 tape권 방식이 유력하다.⁴⁾ 그러나 극저온하에서(4.2K) 고분자필름의 전기적 절연내력과 기계적 특성은 매우 취약하며, 극저온으로 인한 축적상의 문제점으로 연구결과가 매우 부족하며 국내에서는

기의 진부한 실정이다. 또한 그 이론의 완전한 확립을 보여 주지 못하고 있어 초전도 응용 시스템의 기술 개발은 어려운 실정이다. 이러한 절연문제 중 실용상에 있어서는 절연물의 계면을 따라서 진행되는 연면방전⁵⁾에 의한 절연내력의 약화가 문제시 되고 있으며, 연면방전 혹은 부분방전에 의한 열화는 quench의 주요요인으로 검토되고 있다. 고분자필름과 LHe의 복합절연구성 내에서 부분방전이 발생하며 특히 비유전율이 적은 LHe에서의 절연과파가 먼저 발생하게 되며, 그 이후에 고분자 필름에 streamer가 도달하여 절연과파가 됨으로서 부분방전에 의한 절연과파는 시스템의 수명특성을 결정하는 중요한 요인으로 간주된다.

본 연구는 실용적인 측면을 고려하여 초전도 기기의 절연 및 냉매로 사용되는 LHe 중에서 가장 문제시 되는 연면방전 특성 및 방전계직을 관측할 수 있는 Lichtenberg 도형과 부분방전에 의한 고분자필름의 열화에 의한 절연과파 특성을 실험적으로 검토 하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1에 본실험에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 내 외조로 구성된 cryostat는 이중구

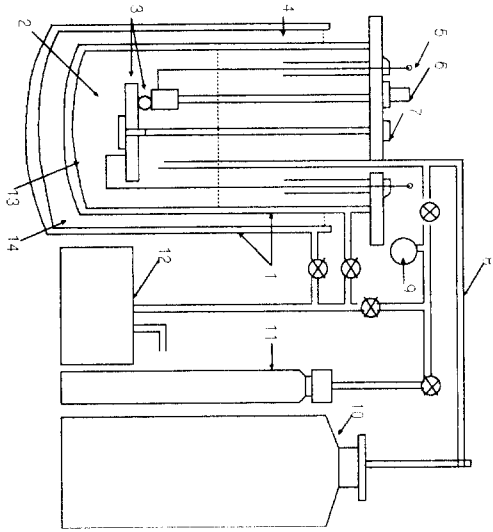
* : 경상대 공대 전기공학과(자동화 및 컴퓨터응용기술연구소)

** : 전력연구원 에너지 환경 고등연구소

접수일자 : 1996년 6월 5일

심사완료 : 1996년 9월 21일

조로 구성되어 각 벽면사이에는 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Torr의 진공상태를 유지하여 외부로의 열침입을 차단하였다.



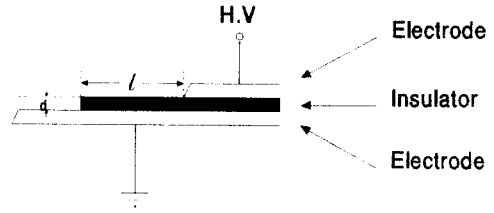
| | | | |
|--------------------|------------------|----------------|-----------------------------|
| 1.Vacuum | 5. H.V. | 9. Balloon | 13. LHe Chamber |
| 2. LHe | 6. Micrometer | 10.LHe Dewer | 14. LN ₂ Chamber |
| 3. Electrodes | 7. Rotator | 11.GHe Bombe | |
| 4. LN ₂ | 8. Transfer Tube | 12.Vacuum Pump | |

그림 1. 실험장치의 개략도

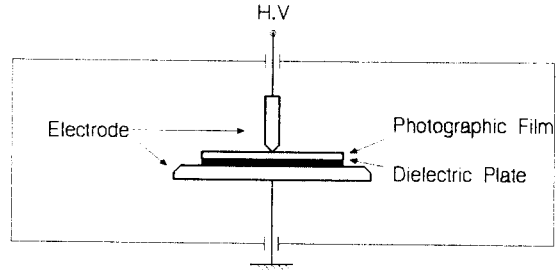
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

cryostat의 내조에는 고순도(99.99%)의 LHe (또는 LN₂)를 외조에는 열전용용 LN₂를 충전하였다. 특히 LHe 주입시에는 불순물의 영향으로 백색고체의 부유물에 의한 실험오차를 막기위해, 전극 및 시료의 setting을 완료하고 내조의 진공을 10^{-7} Torr 유지한 후 GHe를 주입하여 대기압 이상의 압력을 유지하였으며, 3회이상의 반복작업을 한 후 외조에 LN₂를 주입하였다. cryostat의 냉각을 위해 일정시간을 유지한후 내조에 LHe을 주입하였다.

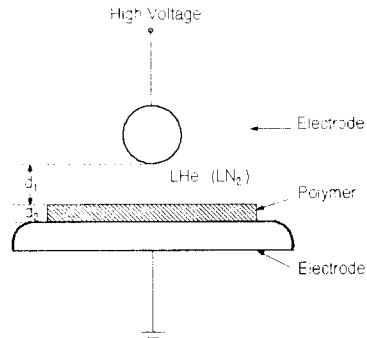
그림 2-a에 연면방전용 전극계를 표시한다. 폭 1[mm], 두께 150[μ m]의 Al foil을 선단각도 15° 로 절단한 상부전극을 평판 절연재료에 부착하였고, 접지전위의 배후전극 (back side electrode)으로서 두께 1[mm]의 Cu판을 사용하였다. 절연재료로서는 2축연신 Oriented Polypropylene(OPP), Polytetrafluoroethylene (PTFE), 등의 고분자 절연 재료를 에틸알콜에 침적시킨 후 약 5분간 초음파



a) Electrodes for surface flashover discharge



b) Electrodes for Lichtenberg's figure



c) Electrodes for V-t characteristics

그림 2. 전극계

a) 연면방전용 전극계, b) Lichtenberg 도형 전극계, c) V-t 특성용 전극계

Fig. 2. Electrodes

a) Electrodes for surface b) Electrodes for Lichtenberg c) Electrodes for flash-over discharge's figure V t characteristics

세척하고 건조시켜 시료로 사용하였다. Lichtenberg 도형의 관측은 그림 2 b와 같은 전극을 배치하고 상부에 선단각도 15° 의 Al 침전극, Cu 평판 전극간에 필름의 관통과피를 막기위해 두께 100 [μ m]의 Kapton을 접착시킨 후 사진 필름(TMAX 100, Kodak사)을 삽입하여 광원이 완전 차단된 암실에서 측정하였으며, 사진 필름의 감광면과 상

부 칩전극의 접촉을 flange상의 micrometer(오차: $\pm 1[\mu\text{m}]$)에 의해 조정하였다.

부분방전 열화 실험을 위해 그림 2-c와 같은 전극계를 구성하고 고분자 시료로서는 두께 $15\mu\text{m}$ 의 OPP 필름을 사용하였으며, 평판전극과 시료간에 기포발생을 억제하기 위하여 silicon grease를 얇게 도포한 후 부착하여 전극간에 삽입하고 전압을 인가하였다. 또한 시료가 부착된 평판전극은 회전이동이 가능하여 1장의 시료에서 5-8점의 실험이 가능하며 실험치는 10-20점의 결과를 취하였다. 인가전압은 교류전압(60Hz, 최대 실효치 전압 20kV)을 사용하였으며, 수명실험은 동조식 부분방전 측정기(Tettex Instruments사, Type 9124 ow)로 부분방전 개시전압(V_i)을 측정한후, 일정 전압으로 승압하고 정상적인 부분방전 발생하에서 절연과괴까지의 시간을 측정하여 전압인가에 따른 수명특성을 조사하였다. 또한 부분방전 열화현상을 관찰하기 위해 실험후 시료표면을 광학현미경, 주사전자현미경(SEM)으로 열화영역, 열화크기, 표면상태, 절연과괴 흔적등을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실용상의 전기적절연 구성에 있어서 연면방전 전압은 절연재료의 관통과괴 전압에 비해 현저하게 낮기 때문에 절연설계상 특히 주의를 요한다. 그림 3은 PTFE의 절연재료에 연면거리 l 과 두께 d 를 가변하여 LHe에 칩적시킨 후 교류연면방전 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 연면방전 전압은 l 과 d 에 비례함을 알 수 있었다.

연면방전 전압과 연면거리, 구계의 관계는 이미 기체중에서 Toepler의 연구⁷⁾에서 확립되어 있어 LHe 중에서의 경우도 이것에 준하여 이론적 검토를 행했다.

$$\text{즉 } \frac{V}{l} = K \frac{1}{m \sqrt{\frac{l^2}{d}}}$$

이다. 단, V 는 연면방전 전압, l 은 연면거리, d 는 절연체의 두께, K 는 계수, m 은 정수이다.

실험치를 그림 4와 같이 V/l 의 l^2/d 의 의존성으로 정리하여 LHe를 m 을 구하면 $l/m \approx 1/4.3$ 이다. 따라서 연면방전 전압은 $l^{0.7}$ 에 비례함을 알 수 있으며, 이는 Toepler씨의 대기중의 실험($1/m \approx 1/2.5$)에 비해 연면전압에 대한 연면거리의 의존성이 높으나 LN_2 결과⁷⁾인 $1/m \approx 1/6 \sim 3.65$ 보다는 약간 낮은 것을 알 수 있다. 연면방전시 방전경로 및 현상을 검토하기 위해서는 방전도형⁸⁾이 필요하며, 재료의 절

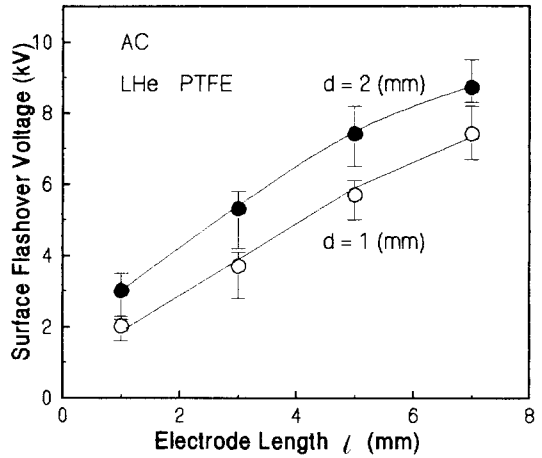


그림 3. LHe 내에서 연면선타전압

Fig. 3. Surface flashover voltage in LHe

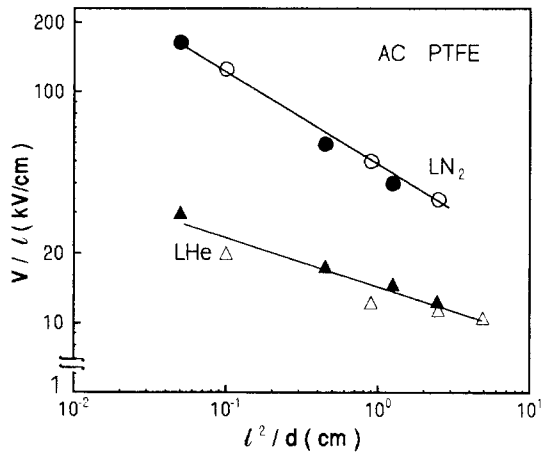


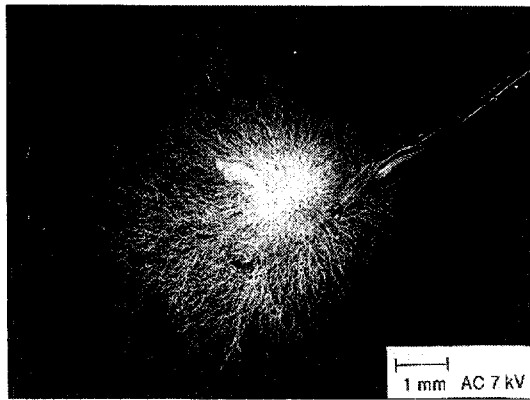
그림 4. V/l 과 l^2/d 의 관계

Fig. 4. Relationship between V/l and l^2/d

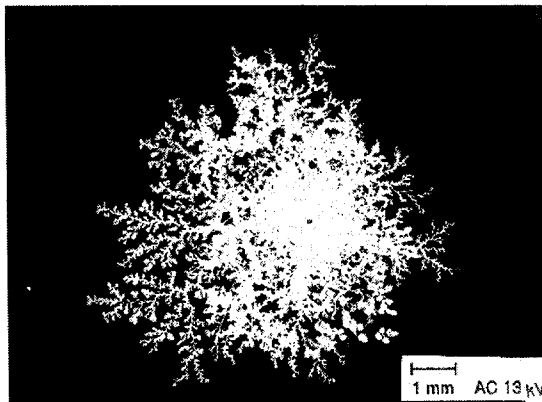
연과괴기구를 추정하기 위한 단서가 된다. 방전도형에는 분말도형, Lichtenberg 도형, 안개도형 등이 있으나 본 연구에서는 사진 필름을 연면방전의 매개물로 사용하는 Lichtenberg 도형으로 측정하였다. 그림 5 a)에 LHe중의 Lichtenberg 도형의 Gleitbüschel 영역을 나타내며, 비교를 위하여 그림 5 b)에 LN_2 중의 결과를 표시한다.

교류전원을 인가하여 Gleitbüschel 영역을 관측해 본 결과 tree상으로 관측되었으며, LHe중의 경우는 streamer의 진전이 가늘며 연속적이었으며, LN_2 의 경우에는 굵고 더디게 진전됨을 알 수 있었다.

부분방전에 의한 절연재료의 열화는 시스템의 안전성확보 및 수명에 주요한 요인으로 작용한다.



a) LHe



b) LN₂

그림 5. LHe 및 LN₂의 리히텐베르크 도형
Fig. 5. Lichtenberg figures in LHe and LN₂

수명특성을 위해 다음과 같은 식을 이용하여 Weibull 분포를 취하였다.

$$\text{즉, } F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{t_s}\right)^m\right] \quad (t \geq t_0)$$

$$= 0 \quad (t < t_0)$$

여기서 t 는 확률변수, t_0 는 위치 매개변수, m 은 형상 매개변수이다. 그림 6에 각전압에 대한 Weibull 분포의 50% 누적과파확률인 값을 취하여 그림 7의 흑점으로 표시한다. 또한 그림 2-c의 전극계를 구성하여 OPP의 전압-수명특성(V-t특성)을 LHe 및 LN₂에서 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 화살표는 동조식 부분방전 측정기로 측정된 부분방전 개시 전압(V_1)을 의미한다.

LHe중의 V-t 곡선은 LN₂에 비해 저전압측에 있으며, 역n승의 법칙 $Vn \cdot t = C$ (V :인가전압, t :수명, C :정수)에서 구한 LHe의 n 값은 $n=4.6$ 로서 LN₂의 8-10의 경우보다 낮다. OPP에 대한 V-t 특

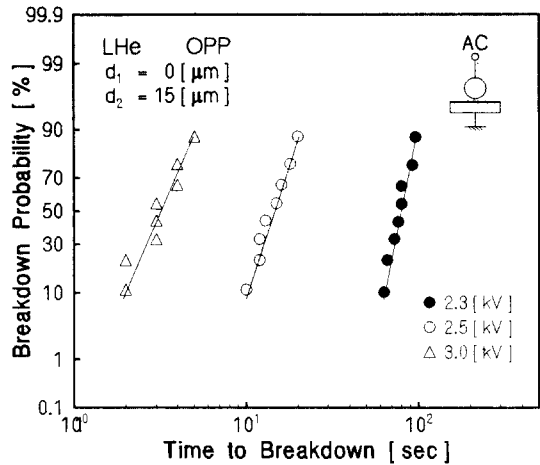


그림 6. V-t Weibull 확률
Fig. 6. V-t Weibull probability.

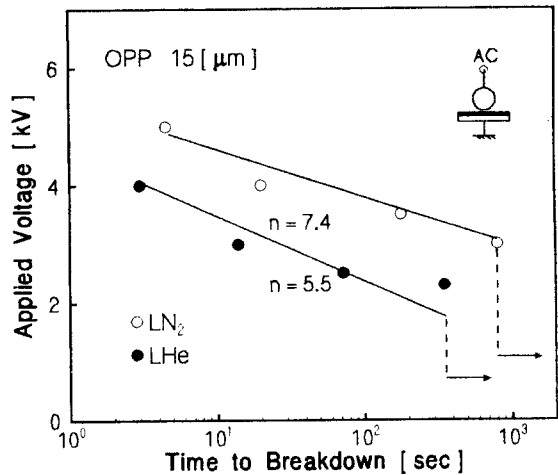
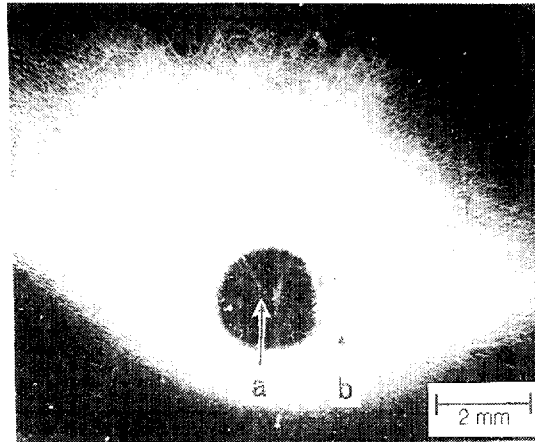


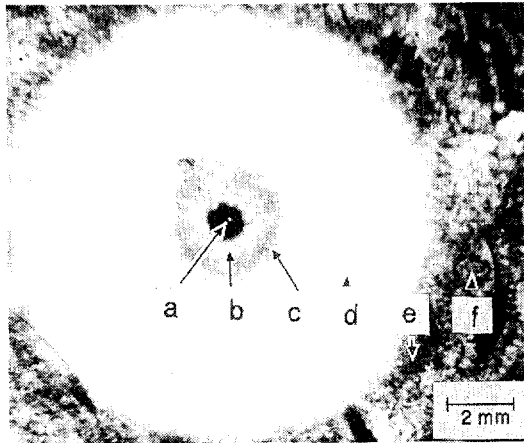
그림 7. V-t 특성
Fig. 7. V-t Characteristics.

성연구는 매우 적으며, Ishihara⁹⁾ 연구보고에서 LHe중의 n 값은 3-7로서 본 실험결과와 거의 일치한다. 일반적으로 n 이 적을수록 내부분방전 특성이 나쁘고, 동일한 수명을 주는 인가 전압도 낮은 사실로부터 LHe중의 OPP 필름은 LN₂의 경우에 비해 취약함을 알 수 있었다. 전압인가 후 일정시간이 경과된 후 부분방전열화에 의한 전로과파가 발생한다. 열화된 시편을 검은색 판상위에 놓고 광학현미경으로 조사한 결과를 그림 8에 표시한다.

그림에서 나타난 검은 영역은 열화되지 않는 비열화영역이며, 흰부분은 부분방전에 의한 열화영역이다. LHe 중에서의 부분방전에 의한 표면열화는 중앙미열화의 a영역과 열화의 b영역으로 선명하게



a) AC 7 [kV], LHe



b) AC 10 [kV], LN₂

그림 8. OPP의 열화흔적

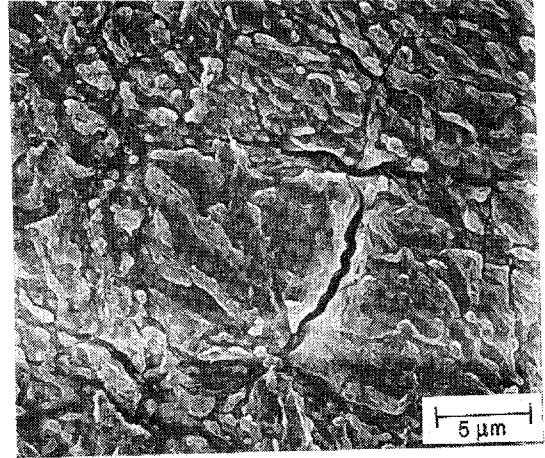
Fig. 8. Trace of partial discharge erosion on oriented polypropylene.

a) AC 7[kV], LHe b) AC 10[kV], LN₂

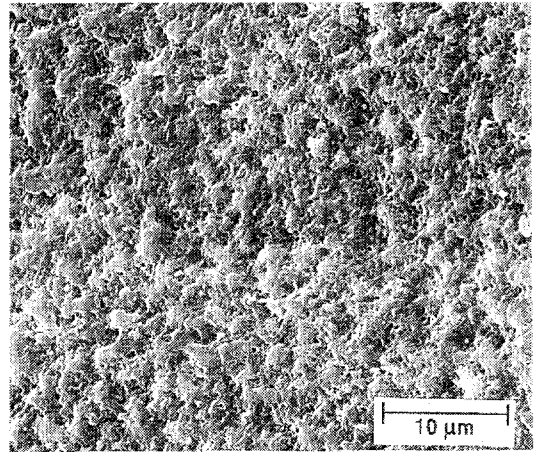
나타나며, 중앙미열화영역의 형태는 원형에 가까우며 열화영역은 타원형 또는 찌그러진 원형에 가깝다. 미열화 영역의 직경과 열화영역의 직경은 LN₂에 비해 크며 열화영역의 단부에 streamer의 tree상이 관측된다. 이에 반해 LN₂의 경우에는 열화영역의 형상이 원형에 가깝고 그 형태는 열화와 미열화 영역이 교번하는 a, b, c, d, e, f 영역을 이루고 있으며, 직경의 크기도 LHe에 비해 적음을 알 수 있다. 이러한 심하게 열화된 표면을 SEM으로 관측한 결과를 그림 9에 표시한다.

LHe중의 열화영역의 표면은 corona 방전에 의한 손상으로 **凹凸**형태와 더불어 그물형 균열을 관측할 수 있었음에 비해 LN₂중의 표면은 균열상을

관측할 수 없었으며, 단지 **凹凸**형의 열화만을 관측할 수 있었다. 특히 절연파괴홀 부근의 심한열화영역



a) AC 7 [kV], LHe



b) AC 10[kV], LN₂

그림 9. 부분방전열화 영역의 주사현미경 관측사진

Fig. 9. SEM photographs of partial discharge erosion.

에서 균열의 폭과 빈도수는 증가했지만 IR 투과스펙트럼으로 관측한 결과 고분자 필름의 결정구조에는 변화가 없었다. 그림 10은 LHe중 인가전압에 대한 절연파괴 홀의 위치 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 절연파괴 홀의 위치는 그림 a)와 같이 전압이 낮은 2.3[kV]에서는 열화영역에 대부분 절연파괴 홀이 위치하나, 인가전압이 상승함에 따라 그림 b)와 같이 미열화영역으로 분포되는 확률이 높았으며, LN₂의 경우에는 전압과는 거의 무관하다.

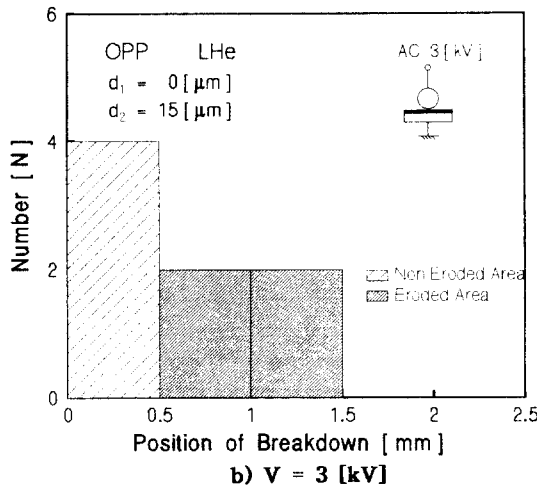
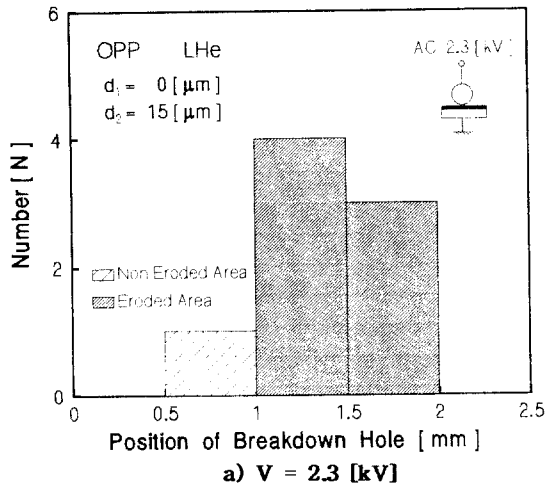


그림 10. 절연과파 홀의 위치분포
 Fig. 10. Position of breakdown hole.

4. 결 론

초전도기기의 대용량화에 의한 극저온영역에서의 절연의 중요성과 특히 실용상에서 문제시되는 연면방전 및 부분방전열화의 결과는 다음과 같다.

- 1) 극저온에서의 연면방전 전압의 크기는 방전거리와 절연체의 두께에 의존하며 LHe의 경우는 방전거리의 0.7승에 비례하였다.

- 2) LHe중의 Lichtenberg도형은 streamer의 진전이 가늘며 연속적이었으며, LN₂의 경우는 굵고 더디게 진전되었다.
- 3) LHe 중의 수명특성 곡선은 LN₂중의 경우보다 저전압 측에 존재한다.
- 4) 절연과파 홀의 위치는 LHe의 경우에는 전압이 상승함에 따라 미연화영역으로 분포되는 확률이 높으며 LN₂의 경우에는 전압과 무관하다.
- 5) LHe의 미연화영역의 반경 R₀ [1.1[mm] 정도이며, LN₂의 경우는 0.4[mm] 이다.

* 본 연구는 전기연구원의 "초전도 케이블 및 송전 시스템 개발" 과제에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. R.G.Surrlock, A Brief History of Cryogenic, Cryogenics, Vol. 30, pp.483-500, 1990.
2. 日本電氣學會, 超傳導電氣機器의開發動向, 電氣學會技術報告 1部, 192號, 1985.
3. 一柳, 岩田, "極低溫大容量送電技術의可能性", 絶緣材料研究會資料, EIM 85-102, pp.1-12, 1985.
4. T.Ohe, Y.Mizuno, M.Nagao, and M.Kosaki, "Mechanical Properties of Polymers for Electrical Insulating Materials of Superconducting Power Cable", Cryogenic Engineering, Vol. 25, pp.65-171, 1990.
5. M.Kosaki and K.Horii, "A Design of Polyethylene Insulated Sub GVA Superconducting Cable", 9th Int. Cryo. Eng.Conf., Kobe, Japan pp. 146-149, 1982.
6. H.C.Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE. Trans. Elect. Insul., EI-5, pp.765-782, 1989.
7. 岩田, "液體窒素中の沿面放電", 日本電氣學會絶緣材料研究會資料, IM-72-40, pp.1-7, 1972.
8. 堀井 河野, "極低溫液體의沿面放電", 日本電氣學會絶緣材料研究會資料, pp.22-35, 1975.
9. 水野·石植·清水, "液體中の部分放電を介したフェルム絶緣破壊の研究", 日本電學論A Vol. 104, No.3, pp.159-165, 1982.

저자소개



김상현
1950년 2월 7일생. 1974년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 2월 인하대 전기공학과 석사. 1986년 3월 일본 오오사카대학 전기공학과(공박). 1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장. 현재 경상대 전기공학과 부교수.



정순용
1947년 7월 11일생. 1974년 3월 인하대학교 전기과 졸업. 1983년 2월 인하대학교 대학원 석사. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 부산전문대학 전기공학과 부교수.



김현희
1966년 9월 5일생. 1990년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 2월 경상대학교 대학원 전기전자공학과 석사. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 진주전문대학 소방안전관리과 전임강사.



최효상
1967년 2월 21일생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 전북대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 에너지·환경고등연구소 초전도 분야 일반연구원. 주관심분야 : 초전도 재료 및 응용분야.