

## 극저온중 고분자 Film의 부분방전 연구

### A Study on Partial Discharge of Polymer Film at Cryogenic Temperature

김 상 현\*, 마 대 영\*, \* 경상대학교 공과대학 전기공학과  
 °김 현 희\*, 김 영 석\*, (자동화 및 컴퓨터 응용기술 연구소)  
 조 강 옥\*\*, 최 호 상\*\* \*\*한국전력연구원 에너지 환경고등 연구소  
 초전도 연구팀

Sanghyun KIM\*, Deayoung Ma\*, \* Dept. of Electrical Eng. Gyeong-Sang Univ. (RIACE)  
 °Hyunhee KIM\*\*, Youngseok KIM\*\* Dept. Superconducting Research Team, Center  
 Kangwook CHO\*\*, Hyosang CHOI\*\* for Advanced Study in Energy and Environment,  
 KEPRI

#### 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 LHe( Liquid Helium ).  $V-t$  characteristic LHe were a  $n=5.5$  that was less than liquid  $N_2$ . After applied AC voltage, the surface condition of polymer films were observed non-eroded area and eroded area. The eroded area is depending on the applied voltage. In case of LHe, the crack was observed.

#### 1. 서 론

초전도 전력케이블[1]-[3]은 향후 고전압 송전시 지중방식으로 채택될 수 있는 유력한 전

력수송 기술로서 1967 영국의 BNL에서 개발을 시작으로 선진국을 중심으로 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 절연계로서는 냉매로 이용되는 액체helium(LHe)과 고분자 film의 복합절연계로 구성되어지며[4] 현재 검토되어지는 초전도 케이블의 절연방식으로는 초전도체에 고분자 film을 감는 tape권 방식이 유력하다. 따라서 극저온하에서(4.2K) 고분자film의 전기적 절연내력과 기계적 특성이 매우 취약하며, 그 중 극저온 전기 절연만을 고려하면 극저온에서의 절연 파괴, 극저온에서의 연면방전, 극저온에서의 corona 현상, Treeing, 극저온에서의 고체에 대한 기계적 성질의 열화 등이 있다. 그러나 극저온으로 인한 측정상의 문제점으로 연구결과가 매우 부족하며 국내에서는 거의 전무한 실정이

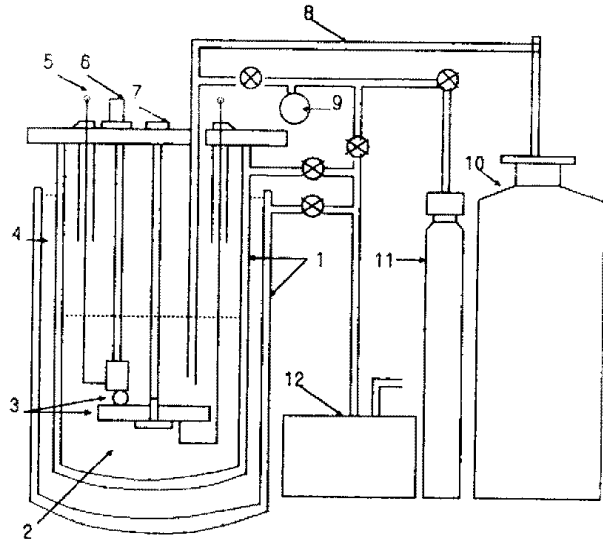
며, 그 이론 또한 완전한 확립을 보여 주지 못하고 있어 초전도 응용 시스템의 기술 개발은 어려운 실정이다. 이러한 절연문제 중 실용상에 있어서는 절연물의 계면을 따라서 진전하는 연면방전[5]에 의한 절연내력의 약화가 문제시 되고 있으며, 연면방전 혹은 부분방전에 의한 열화는 quench의 주요요인으로 검토되고 있다. 고분자필름과 LHe의 복합절연구성 내에서 부분방전이 발생하며 특히 비유전율이 적은 LHe에서의 절연파괴가 먼저 발생하게 되며, 그 이후에 고분자 필름에 streamer가 도달하여 절연파괴가 됨으로서 부분방전에 의한 절연파괴는 시스템의 수명특성을 결정하는 중요한 요인으로 간주된다.

본 연구는 실용적인 측면을 고려하여 초전도 기기의 절연 및 냉매로 사용되는 LHe과 최근들어 고온초전도체[6]의 개발로 향후냉각 재료로 가능성이 검토되는 액체 Nitrogen (LN<sub>2</sub>)중에서 가장 문제시 되는 연면방전 특성 및 방전 궤적을 관측할 수 있는 Lichtenberg 도형과 부분방전에 의한 고분자film의 열화에 의한 절연파괴 특징을 실험적으로 검토 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

그림 1에 본실험에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 내 외조로 구성된 cryostat는 이중구조로 구성되어 각 벽면사이에는 10<sup>-6</sup>-10<sup>-7</sup>Torr의 진공상태를 유지하여 외부로의 열침입을 차단하였으며, 진공도 유지를 위해 상부에 밸브를 부착하였다.

cryostat의 내조에는 고순도(99.99%)의 LHe 또는 LN<sub>2</sub>를 외조에는 열절연용 LN<sub>2</sub>를 충전하였다. 특히 LHe 주입시에는 불순물(공기)의 영향으로 백색고체(얼음)의 부유물에 의한 실험오차를 막기위해, 전극 및 시료의 setting을 완료하고 내조의 진공을 10<sup>-3</sup>Torr 유지한 후 GHe를



- |                         |                  |                 |
|-------------------------|------------------|-----------------|
| 1. Cryostat             | 5. H.V.          | 9. Balloon      |
| 2. LHe, LN <sub>2</sub> | 6. Micrometer    | 10. LHe Dewer   |
| 3. Electrodes           | 7. Rotator       | 11. GHe         |
| 4. LN <sub>2</sub>      | 8. Transfer Tube | 12. Vacuum Pump |

그림 1 실험장치의 개략도

Fig. 1 Schematics of Experimental apparatus

주입하여 대기압 이상의 압력을 유지하였으며, 3회이상의 반복작업을 한 후 외조에 LN<sub>2</sub>를 주입하였다. Cryostat의 냉각을 위해 일정시간을 유지한후 내조에 LHe을 주입하였다.

그림 2-a에 연면방전을 위한 전극계로를 표시한다. 폭 1[mm], 두께 150[ $\mu$ m]의 Al foil을 선단 각도 15<sup>0</sup>로 절단한 상부전극을 평판 절연재료에 부착하였고, 접지전위의 배후전극( back side electrode )으로서는 두께 1[mm]의 Cu판을 사용하였다. 절연재료로서는 2축연신 Polypropyrene (OPP), Polytetrafluoroethylene (PTFE), 등의 고분자 절연재료를 에틸알콜에 침적시킨 후 약 5분간 초음파 세척하고 건조시켜 시료로 사용하였다. Lichtenberg 도형의 관측은 그림2-b와 같은 전극을 배치하고 상부에 선단각도 15<sup>0</sup>의 Al 침전극, Cu 평판전극간에 film의 관통파괴를 막기위해 두께 100[ $\mu$ m]의 Kapton을 접착시킨 후 사진 film(TMAX 100, Kodak 사)을 삽입하여 광원이 완전 차단된 암실에서 측정하였으며, 사진 film의 감광면과 상부 침전극의 접촉을

plang상의 micrometer(오차:  $\pm 1(\mu\text{m})$ )에 의해 조정하였다.

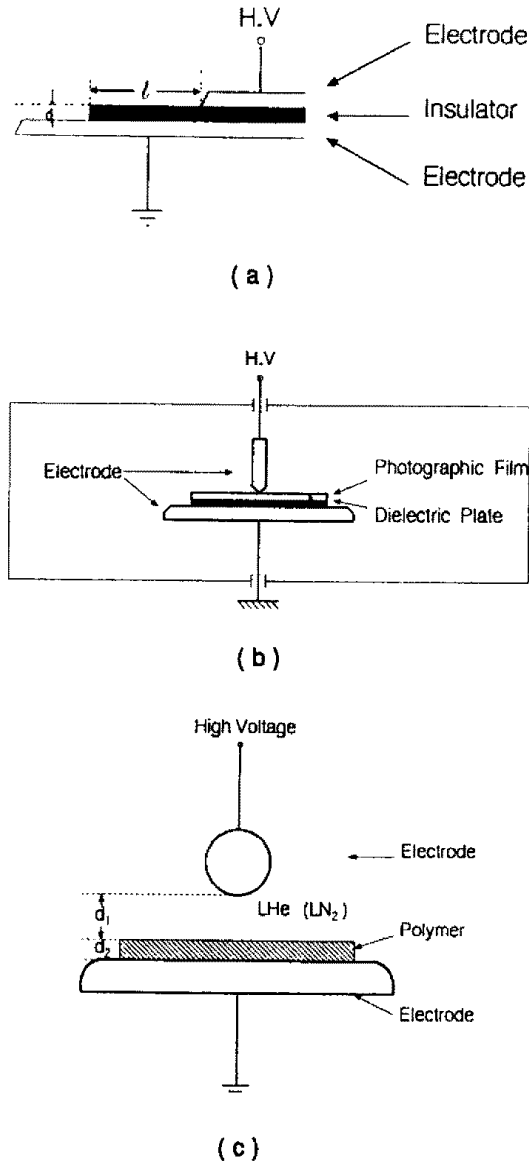


그림 2 전극구성 장치  
Fig. 2 Electrodes

부분방전 열화 실험을 위해 그림 2-c와 같은 전극계를 구성하고 고분자 시료로서는 두께 15  $\mu\text{m}$ 의 OPP film을 사용하였으며, 평판전극과 시료간에 기포발생을 억제하기 위하여 silicon grease를 얇게 도포한 후 부착하여 전극간에 삽입하고 전압을 인가 하였다. 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 Instruments 사, Type 9124 ow)로 부분방전 개시전압(V)을 측정후, 일정 전압으로 승압하고 정상적인 부분방전 발생하에서 절연 파괴까지의 시간을 측정하여 전압인가에 따른 수명특성을 조사하였다. 또한 부분방전 열화현상을 관찰하기 위해 실험후 시료표면을 광학현미경, 주사전자 현미경(SEM)으로 열화영역, 열화크기, 표면상태, 절연파괴 흔적등을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

실용상의 전기적절연 구성에 있어서 연면방전 전압은 절연재료의 관통파괴 전압에 비해 현저하게 낮기 때문에 절연설계상 특히 주의를 요한다. 그림 3은 PTFE의 절연재료에 연면거리와 두께  $d$ 를 가변하여 LHe 및 LN<sub>2</sub>에 침적시킨

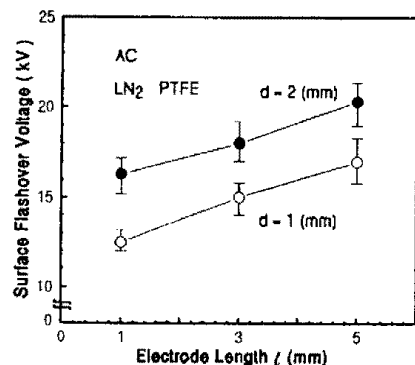
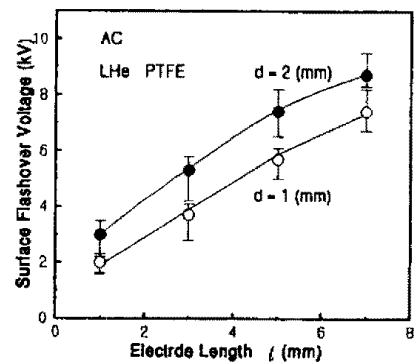


그림 3 LHe 및 LN<sub>2</sub> 내에서 연면섬락전압  
Fig. 3 Surface flashover voltage in LHe, LN<sub>2</sub>

후 교류연면방전 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 연면방전 전압은  $l$  과  $d$ 에 비례함을 알 수 있으며 LHe중의 연면방전 전압이 현저이 낮음을 알 수 있었다. 연면방전 전압과 연면거리, 두께의 관계는 이미 기체중에서 Toepler의 연구에서 확립되어 있어 LHe 및 LN<sub>2</sub> 중에서의 경우도 이것에 준하여 이론적 검토를 행했다.

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

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

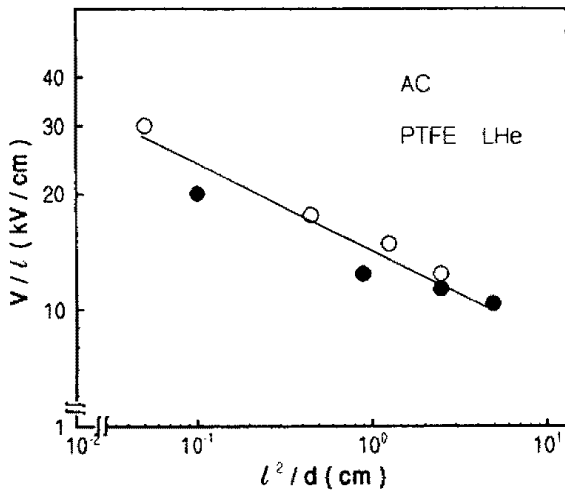


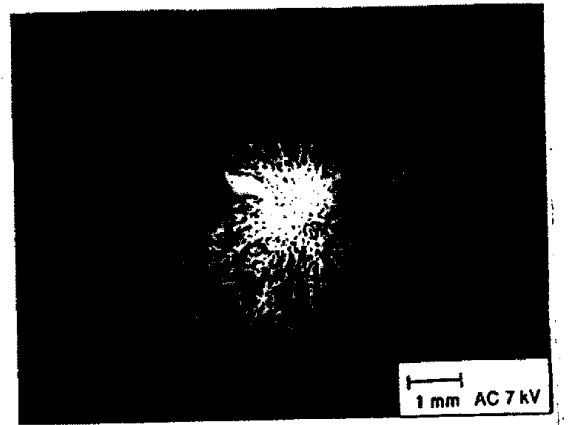
그림 4  $V/l$  과  $l^2/d$  의 관계

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

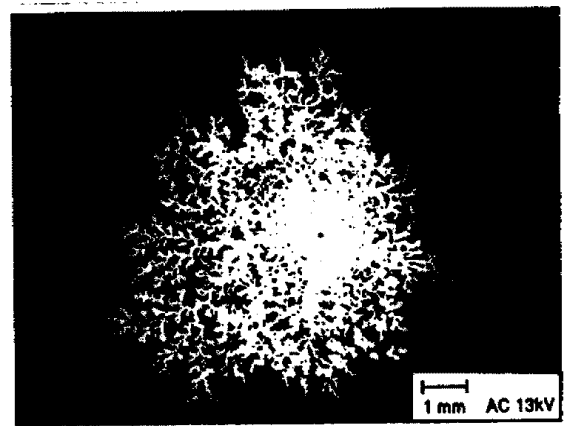
실험치를 그림 4와 같이  $V/l$  의  $l^2/d$  의존성으로 정리하여 LHe를  $m$ 을 구하면  $1/m \approx 1/4.3$ 이다. 따라서 연면방전 전압은  $l^{0.7}$ 에 비례함을 알 수 있으며, 이는 Toepler씨의 대기중의 실험 ( $1/m \approx 1/2.5$ )에 비해 연면전압에 대한 연면거리의 의존성이 높으나 유중 결과[7]인  $1/m \approx 1/6 \sim 3.65$  보다는 약간 낮은 것을 알 수 있다.

연면방전시 방전경로 및 현상을 검토하기 위해서는 방전도형[8]이 필요하며, 재료의 절연 파괴기구를 추정하기 위한 단서가 된다. 방전도형에는 분말도형, Lichtenberg 도형, 안개도형 등이 있으나 본 연구에서는 사진 film을 연면방전의 매개물로 사용하는 Lichtenberg 도형으로 측정하였다. 그림 5에 LHe, LN<sub>2</sub>, 그리고 LSi 중 에서 Lichtenberg 도형의 Gleitbüschel 영역을

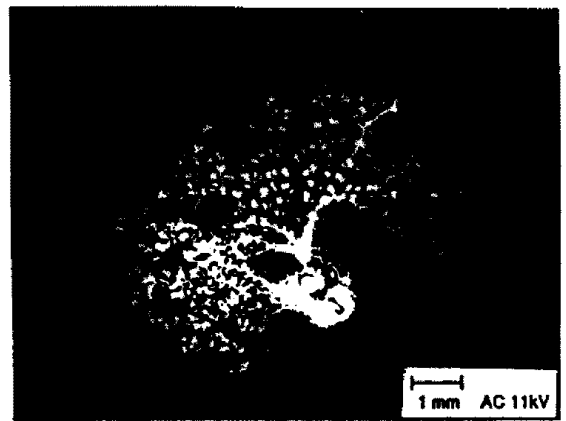
나타낸 사진이다.



(a) LHe



(b) LN<sub>2</sub>



(c) LSi

그림 5 LHe, LN<sub>2</sub> 및 LSi 의 리히텐베르그 도형의 사진

Fig. 5 Lichtenberg figures in LHe, LN<sub>2</sub>, LSi.

교류전원을 인가하여 Gleitbüschel영역을 관측해 본 결과 Tree상으로 관측되었으며, LHe중의 경우는 streamer의 진전이 가늘며 연속적이었으며, LN<sub>2</sub> 의 경우에는 굵고 더디게 진전됨을 알 수 있었다.

부분방전에 의한 절연재료의 열화는 시스템의 안전성 확보 및 수명에 주요한 요인으로 작용한다. 그림 6에 그림 2-c의 전극계를 구성하여 OPP의 전압-수명특성(V-t특성)을 LHe 및 LN<sub>2</sub>에서 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 수명은 각 전압마다 Weibull 분포의 50% 누적파괴확률인 값을 표시한다. 또한 화살표는 동조식 부분방전 측정기로 측정된 부분방전 개시 전압(V<sub>i</sub>)을 의미한다.

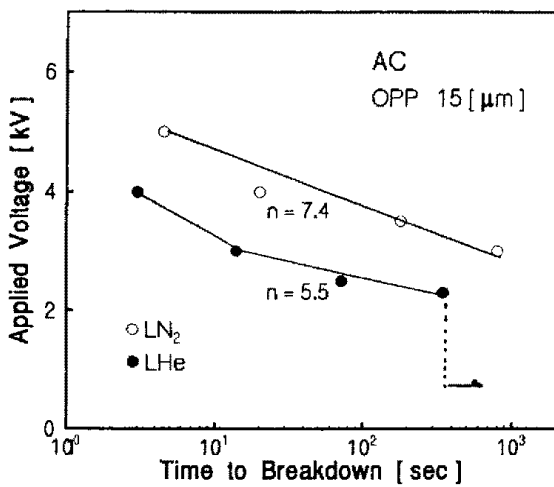
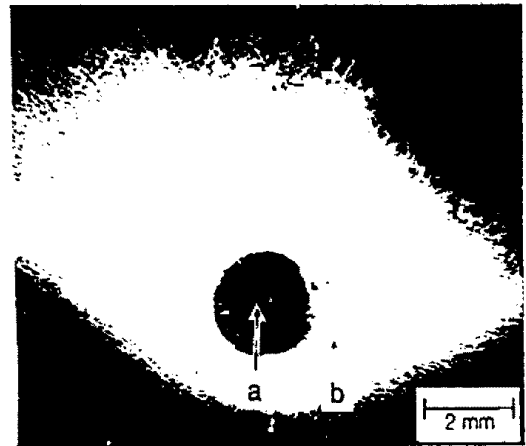


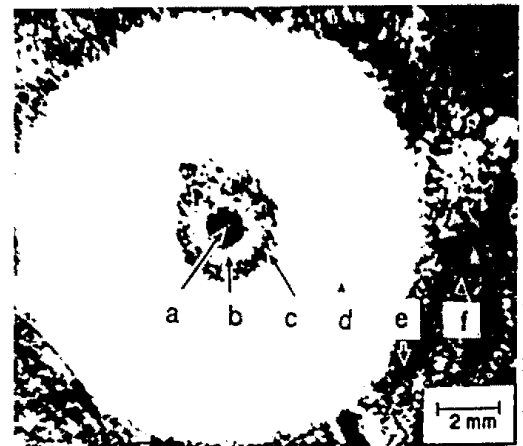
그림 6 V-t 특성  
Fig. 6 V-t Characteristics

LHe중의 V-t 곡선은 LN<sub>2</sub>에 비해 저전압측에 있으며, 역n승의 법칙에서 구한 LHe의 n값은 n=4-6로서 LN<sub>2</sub>의 8-10의 경우보다 낮다. OPP에 대한 V-t 특성연구는 매우적으며, Ishihara[9] 연구보고에서 LHe중의 n값은 3-7로서 본 실험결과와 거의 일치한다. 일반적으로 n이 적을수록 내부분방전 특성이 나쁘고, 동일한 수명을 주는 인가 전압도 낮은 사실로부터 LHe 중의 OPP 필름은 LN<sub>2</sub>의 경우에 비해 취약함을 알 수 있었다. 전압인가 후 일정시간이 경과된 후 부분방전열화에 의한 전로파괴가 발생한다. 열화된 시편을 검은색 판상위에 놓고 광학현미경으로 조사한 결과를 그림 7에 표시한다. 그림에서 나타난 검은 영역은 열화되지 않는 미열화영역이며, 흰부분은 부분방전에 의한 열화영역이다. LHe에서의 표면열화 영역은 중앙

미열화영역과 열화영역으로 선명하게 나타나며,



AC 7 [ kV ], LHe



AC 10 [ kV ], LN<sub>2</sub>

그림 7. OPP의 열화흔적

Fig.7 Trace of partial discharge erosion on oriented polypropylene

중앙미열화영역의 형태는 원형에 가까우며 열화영역은 타원형 또는 찌그러진 원형에 가깝다. 미열화 영역의 직경과 열화영역의 직경은 LN<sub>2</sub>에 비해 크며 열화영역의 단부에 streamer의 tree상이 관측된다. 이에 반해 LN<sub>2</sub>의 경우에는 열화영역의 형상이 원형에 가깝고 그 형태는 영역이 교번하여 a, b, c, d, e, f 영역을 이루고 있으며, 직경의 크기도 LHe에 비해 적음을 알 수 있다. 이러한 열화표면을 SEM으로 관측한 결과 LHe중의 열화영역의 표면은 corona 방전에 의한 손상으로凹凸형태와 더불어 그물형 균열을 관측할 수 있었음에 비해 LN<sub>2</sub>중의 표면

은 균열상을 관측할 수 없었으며, 단지凹凸형의 열화만을 관측할 수 있었다. 또한 파괴홀의 위치는 중앙미열화 영역의 경계부근의 열화영역에 거의 위치하며 인가전압 및 주위매질에 따라 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 그림 8은 LHe중 인가전압에 대한 절연파괴 홀의 위치 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 절연파괴 홀의 위치는 인가전압이 상승함에 따라 미열화영역으로 분포되는 확률이 높으며 LN<sub>2</sub>의 경우에는 전압과는 무관하다.

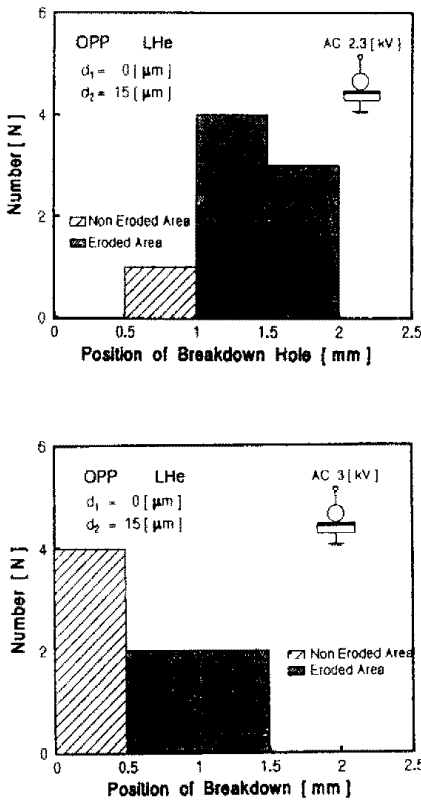


그림 8. 절연파괴홀의 위치분포  
Fig. 8. Position of breakdown hole

#### 4. 결론

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

- 1) 극저온에서의 연면방전 전압의 크기는 방전 거리와 절연체의 두께에 의존하며 LHe의 경우는  $d^0.7$ 에 비례함을 알 수 있었다.
- 2) LHe중의 Lichtenberg도형은 streamer의 진전이 가늘며 연속적이었으며, LN<sub>2</sub>의 경우는 굵고 더디게 진전됨을 알 수 있었다.
- 3) LHe 중의 수명특성 곡선은 LN<sub>2</sub>중의 경우보다 저전압 측에 존재하며 n=5.5로서 LN<sub>2</sub> 중의 8.8에 비해 작다.
- 4) 절연파괴 홀의 위치는 LHe의 경우에는 전압이 상승함에 따라 미열화영역으로 분포되는 확률이 높으며 LN<sub>2</sub>의 경우에는 전압과 무관하다.

#### 참고문헌

- [1] 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.
- [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] H.C.Miller, "Surface Flashover of Insulators",  
IEEE. Trans. Elect. Insul., EI-5, pp.765-782,  
1989.
- [6] J.G.Bednorz, K.A.Müller, "Possible High  $T_c$   
Superconductivity in the Ba-La-Cu-O  
System", Z.Phys.B64, pp. 189-193, 1986
- [7] 岩田, "液體窒素中の沿面放電",日本電氣學會  
絶縁材料研究會資料, IM-72-40, pp 1-7,  
1972
- [8] 堀井 河野, "極低温液體の沿面放電",日本電氣  
學會絶縁材料研究會資料, pp22-35, 1975
- [9] 水野・石植・清水, "液體中の部分放電を介し  
たフィルム絶縁破壊の研究",日本電學論  
59-A21, pp. 159-165, 1982.