

액체 N₂ 중 절연재료의 부분방전 열화 연구

°김 현희*, 김 상현*, 마 대영*, 장 종근**, 남궁 도*** 조 전욱***

* 경상대학교 공과대학 전기공학과

** 한전기술연구원 전력연구실

*** 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Study of Partial Discharge Degradation of Insulating Materials in Liquid Nitrogen

(°H.H.Kim*, S.H.Kim*, D.Y.Ma*, J.K.Chang**, D.Namgung**, J.W.Cho***)

* Dept. of Electrical Eng., GyungSang National University

** Research Center, KEPCO

*** Applied Superconductivity Lab, KERI

Abstract

A superconducting cable is one of the promising methods of underground transmission of high electric power in the future. It is very important that composite insulation system of LN₂ and polymer films takes into consideration for application high T_c superconductor.

This study is about both the partial discharge and properties V-t in LN₂. As result, applied voltage doesn't depend on the radius of non-eroded area but eroded area. And eroded area is observed the formation such as the ring of a tree.

1. 서 론

최근 전력수요의 급증으로 도심지역의 인구 과밀화에 따른 전력 수급상의 문제로 1회선당의 송전용량을 증대하는 대용량 송전의 필요성이 강하게 대두되고 있다. 따라서 기존 케이블의 송전방식으로는 용지확보문제, 환경문제, 경제성 등의 여러 가지 문제점으로 극저온에서 도전율이 무한대가 되는 초전도 현상을 이용한 초전도 케이블[1]-[3]에 의한 지중 송전방식이 유력하게 검토되고 있다.

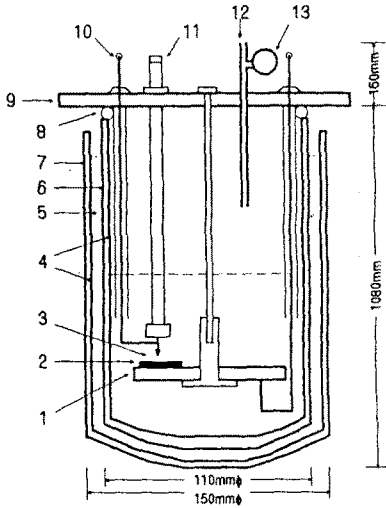
한편 초전도 케이블의 일반적인 구조는 기존의 OF 케이블과 유사하며 구성요소는 크게 나누어 초전도체, 냉각부, 절연체로 구성된다. 현재용용가능한 초전도체는 NbTi, Nb₃Sn 등 2000종류에 달하고 있으나, 임계온도(T_c)의 문제로 액체He(비등점:4.2K)의 사용은 불가피하다. 따라서 He 액화기 및 냉각 system 등의 부속설비가 필요하므로 기술적, 경제적인 부담을 가중시켜 연구개발 속도가 지연되고 있으나, T_c가 상승한 Ba-La-Cu-O의 ceramic계 고온초전도체[4]가 1986년에 발견됨에 따라서 냉매 및 절연체재료로서는 경제적이고 취급이 용이한 액체 N₂ (비등점:77K)가 냉각 및 절연체재료로 사용될 전망에 있다. 따라서 극저온에서의 초전도케이블 운전시 quench에 의한 이상 고전압과 냉각재료의 기화로 심각한 문제가 발생되고 있다. 이러한 system의 안정성과 수명을 위해서는 반드시 극저온하

에서의 전기적 절연이 전실히 요구 되어지고 있다. 지금까지 공업적으로 가능한 초전도 케이블의 절연방식으로는 진공 절연방식, 액체 절연방식, 고체 절연방식 및 Tape권 방식 등이 있다. 실용적인 초전도Cable의 전기절연 구성으로는 고분자 Tape를 감고, 극저온 액체에 함침하는 고체-액체의 복합절연구성[5]이 검토되고 있다. 일반적으로 고분자와 액체와의 복합절연구성의 전기절연과피는 먼저 절연과피가 낮은 액체중에서 절연과피가 일어나고, 그것이 streamer가 되어 고분자에 도달하여 고분자를 절연과피시킨다.[6] 따라서 고분자 절연재료의 열화 및 최종적인 절연과피에 영향을 미치는 액체의 부분방전에 관한 연구는 cable의 장기적인 수명 및 운전상의 신뢰성을 결정하기 때문에 지극히 중요한 과제가 되고 있다. 그러나 절연재료의 열화요인중 전기적 열화인 부분방전열화에 대한 특성 및 그 열화기구에 대한 연구는 적으며, 특히 액체N₂중에서의 연구는 전무한 실정이다. 본 논문에서는 이와같은 관점에서 액체N₂와 고분자의 복합절연계를 구성하고 구-평판전극에 의한 부분방전특성, 수명특성 등을 검토하였으며 상온의 변압기유와 비교하고, 부분방전 열화의 특징을 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림1에 Cryostat의 개략도를 표시한다. Cryostat는 원래 액체He용으로 제작된 Pyrex 유리 제품으로 내조(액체 He조), 외조(액체N₂조), 단열진공층으로 구성된다. 부분방전 열화의 측정은 그림2에 표시한 전극계를 사용하였다. 절연액체 자체의 절연과피 특성은 구(8, mmφ)-평판(80 mmφ)의 스테인레스강 전극을 사용하였으며 시료는 두께 40[μm]의 Poly-propyrene (미연선, 2축연선), Poly-ethyleneterephtilite (PET), Kapton등의 고분자 필름을 전극간에 삽입하고, 액체N₂ 또는 변압기유 중에 침적하여 전압을 인가하였다. 평판전극은 연마제 (Al₂O₃) 로 연마한 후 아세톤 (99.9%)중에서 5분간 초음파 세척하여 건조시켜 표면거칠기를 R_{max}=0.1[μm] 정도로 유지 시켰다. 하부전극과

시료간의 기포발생을 억제하기 위하여 silicon grease를 얇게 도포한 후 시료용 고분자 필름을 부착하였다. 또한 시료가 부착된 평판전극은 회전이동이 가능하며, 1장의 시료에서 5-8점의 실험이 가능하며 실험치는 20-50점의 결과를 취했다. 인가전압은 교류전원(60[Hz], 최대실효치전압 20[kV])을 사용하였다.



1. Electrode (Plane)	6. Inner Cryostat	11. Micrometer
2. Insulator	7. Outer Cryostat	12. Injector (LHe, LN ₂)
3. Electrode (Needle)	8. O-Ring	13. Rubber bag
4. Vacuum	9. Flange	
5. LN ₂	10. H.V.	

그림 1 실험장치
Fig. 1 Experimental apparatus

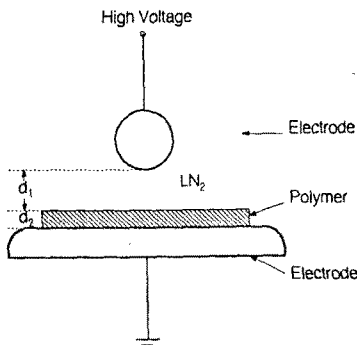


그림 2 전극계
Fig. 2 Electrode

시료간의 기포발생을 억제하기 위하여 silicon grease를 얇게 도포한 후 시료용 고분자 필름을 부착하였다. 또한 시료가 부착된 평판전극은 회전이동이 가능하며, 1장의 시료에서 5-8점의 실험이 가능하며 실험치는 20-50점의 결과를 취했다. 인가전압은 교류전원(60[Hz], 최대실효치전압 20[kV])을 사용하였다.

3. 실험결과 및 검토

그림3에 2축연신 Poly-propyrene(OPP)의 전압-수명특성(V-t특성)을 액체N₂(LN₂) 및 변압기유(LM)에서 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 수명은 각 전압마다 Weibull 분포의 50% 누적과파확률인 값이다. 또한 화살표는 동조식 부분방전 측정기로 측정된 부분방전 개시 전압(V_i)을 표시한다.

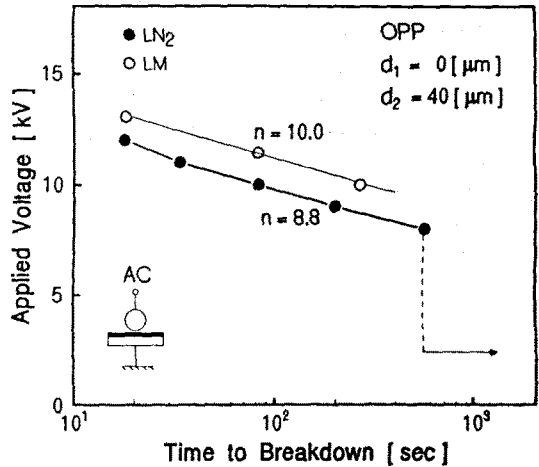
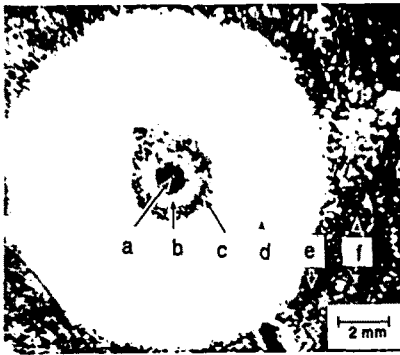


그림 3. V-t 특성
Fig. 3. V-t Characteristics

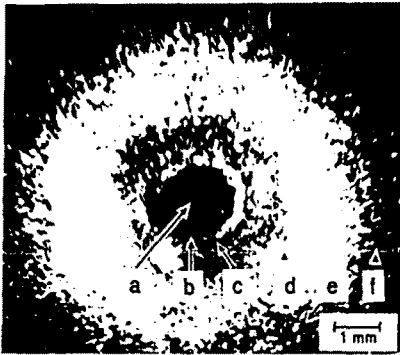
그림에서 나타낸 바와 같이, LN₂에서의 V-t 곡선은 LM의 경우보다 저전압측에 있으며, 역 n승 법칙 $V^n \cdot t = C$ (V: 인가전압, t: 수명, C: 정수)에서 구한 LN₂ 중에서의 n 값은 8-10으로, LM 중의 10-12에 비해 낮다. Ishihara의 보고[7]에서는 n = 11로 본 실험의 결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 LN₂ 중에서는 LM의 경우에 비해 n이 작고, 또한 동일한 수명을 주는 인가전압도 낮은 사실로부터 LM보다도 나쁘다는 것을 알 수 있다.

V_i 이상의 전압을 인가한 후 OPP 표면을 관찰하면 열화흔적이 보인다. 그림4는 OPP 열화시료를 흑색판상에 놓고 촬영한 사진을 나타낸다. 흑색 부분은 열화되지 않은 미열화영역이며, 흰부분은 부분방전에 의한 열화영역이다. LN₂ 중의 열화형태는 영역이 교번하여 a, b, c, d, e, f 영역을 이루고 있다. 이와 같은 열화 형태는 CPP, PET, Kapton 등의 다른 고분자에서도 나타내고 있으며 LM 중에서도 유사하며, Ishihara도 LN₂ 중에서도 연구하고 구전

극 점점을 중심으로 동심 원형상의 중앙 미열화 영역과 그것을 둘러싼 열화영역인 a, b 영역만을 보고하고 있으나,



a) AC 10 [kV], LN₂



b) AC 10 [kV], LM

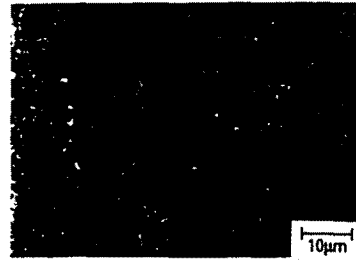
그림 4. OPP의 열화흔적

Fig. 4. Trace of Partial discharge erosion on oriented polypropylene

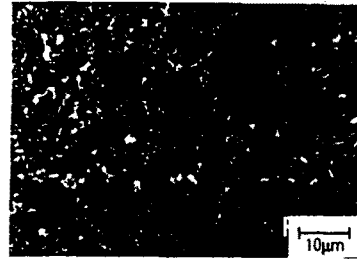
본 연구와 같이 열화흔적의 나이테 상의 열화 흔적에 대한 보고는 없다. LN₂ 내의 인가전압 10 [kV]인 경우 각 영역의 반경은 R_a=0.5[mm], R_b=1.1 [mm], R_c=1.6[mm], R_d=6.0[mm], R_e=6.2[mm] 및 R_f=8.0[mm] 이나 R_a영역을 제외한 나머지 영역은 인가전압에 따라 변한다.

그림 5에 각각의 열화흔적을 주사전자 현미경 (SEM)으로 관측한 결과를 나타낸다. LN₂ 중의 미열화영역의 표면은 완만하나, 열화가 심한 열화영역의 표면은 corona 방전에 의해 손상되어 심하게凹凸이 생긴 것을 관측할 있음에 비해 LM중의 경우는 LN₂ 중의 경우와 유사하나 표면의凹凸이 심하지 않고 짧은 tree 상의 흔적이 보인다.

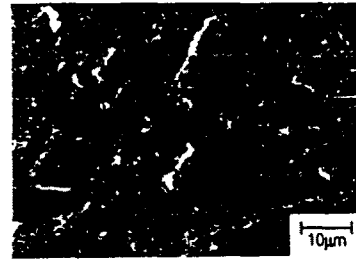
LN₂와 LM의 대표적인 미열화 영역인 R_a와 열화영역인 R_f의 반경에 대한 인가전압 의존성을 그림 6에 나타낸다. 인가전압의 상승에 따라 열화영역 R_f는 상승하나 미열화 영역 R_a의 경우는 인가전압에 의존하지 않고 거의 일정하다. 그러나 LM의 경우는 R_a와 R_f의 크기는 LN₂의 경우보다 크다.



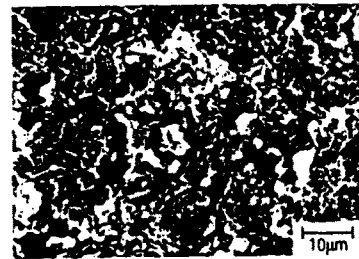
a)



b)



c)



d)

그림 5. 열화영역의 주사전자현미경 (SEM) 사진
Fig. 5. SEM photographs of eroded area..

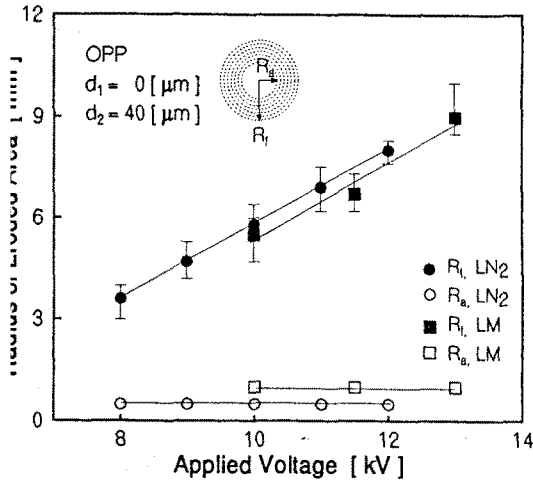


그림 6. 열화영역(R_i)과 미열화영역(R_e)의 인가 전압 의존성
Fig. 6. Dependence of eroded area (R_i) and non-eroded area (R_e) on applied voltage.

이상의 결과에서 나이테상의 열화영역의 발생은 부분방전에 의한 Streamer가 고분자 표면에 도달하나, 고분자 내부의 전계는 전계가 높은 미열화영역과 전계가 불평등인 열화영역이 생기기 때문이라 생각된다. 즉 열화영역에 있어서, 불평등성은 곡률반경이 다른 침전극과 대응하며, 미열화영역은 평등침전극을 설치한 경우에 대응한다.

LN₂ 중의 부분방전 열화는 LM 중의 경우에 비해 심하다. 그러나 절연파괴공(breakdown hole)의 위치를 조사하면 반드시 열화영역에 한정되지 않고, 중앙 미열화 영역 근처에도 분포된다. 그림 7에 구전극과 고분자 필름 접점에서부터 거리에 대한 절연파괴공의 갯수의 분포를 나타낸다.

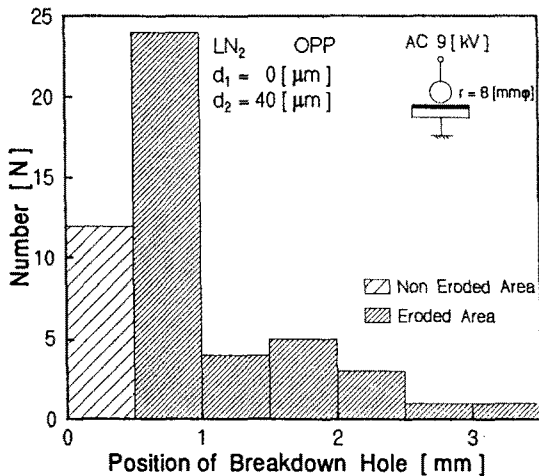


그림 7. 절연파괴공의 분포

Fig. 7. Distribution of breakdown holes.

그림에서 나타낸바와 같이 LN₂에서는 열화영역 c와 가장 열화가 심한 영역인 d 영역의 경계에 절연파괴공이 대부분 분포되나 LM에서는 c, d의 경계영역에 한정되지 않고 조금 더 떨어진 d영역에 분포된다. 그러나 구전극 접점에서 조금 떨어진 b 영역에서 극히 일부 분포되고 있어 고분자 필름의 전성 절연파괴는 없다. 또한 LN₂ 중에서는 인가전압에 의존하지 않으나, LM 중에서는 인가전압이 상승하면 c 영역에서의 파괴가 증가한다.

지금까지 두께 40[μm]의 OPP고분자 필름에 곡률반경 $r = 8$ [mm ϕ]의 구전극을 접촉시킨, 즉 $d_1=0[\mu\text{m}]$, $d_2=40[\mu\text{m}]$ 경우의 열화영역만을 조사 하였으나 구전극과 고분자 표면과 전극간격 d_2 을 변화시켜 $d_1=40[\mu\text{m}]$, $d_2=200[\mu\text{m}]$ 경우의 인가전압에 따른 열화 영역을 그림 8에 나타낸다.

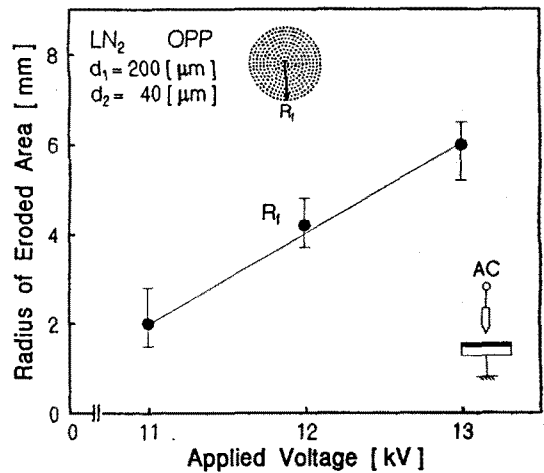


그림 8. 열화영역의 인가전압의존성

Fig. 8. Dependence of applied voltage on eroded area(R_i).

열화형태는 미열화 영역의 존재없이 열화영역만이 존재하며, 그 반경 R 은 인가전압에 따라 커진다. 그러나 d_2 가 짧은 경우는 $d_2=0[\mu\text{m}]$ 인 경우와 같이 열화영역, 미열화영역의 나이테상이 존재한다. 이러한 결과는, d_2 가 커짐에 따라미열화영역의 전계가 높은 영역이 없어지고 불평등성이 높은 전극계를 설치한 경우에 대응되기 때문이라 생각된다.

4. 결론

LN₂ 중에서 OPP 고분자 절연재료를 중심으로 부분방전열화의 실험을 행하고 변압기유와 비교 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) LN₂ 중의 V-t 곡선은 LM 중의 경우보다 저전압측에 존재한다. 또한 LN₂ 중의 n 은 8-10으로 LM 중의 경우인 10-12보다 작다.
- 2) 열화형태는 LN₂ 중과 LM 중의 경우와 유사하며, 미열화 영역과 열화 영역이 교번하는 나이테상이고, 특히 LN₂ 중에서 현저하다
- 3) 열화영역은 인가전압에 따라 증가하나 미열화영역은 항상 일정하다. LN₂ 중보다 LM 중의 경우가 미열화 영역의 반경과 열화 영역의 반경이 크다.
- 4) 상부전극과 고분자 시료와 간격(d₁)이 증가하면 나이테상의 열화형태는 사라지고, 열화 영역만의 단일 영역으로 존재한다.

참고문헌

- [1] R.G.Surrlock, A Brief History of Cryogenic, Cryogenic, Vol. 30, pp.483-500, 1990.
- [2] E.B.Forsyth, "The High Voltage Desine of Superconducting Power transmission System", IEEE Trans. Elect. Insul., EI-6, pp.7-16, 1990.
- [3] 日本電氣學會, "超傳導電力機器の開發動向", 電氣學會技術報告 I 部, 192 號, 1985.
- [4] J.G.Bednorz and K.A.Muller, "Possible High-Tc Superconductivity in the La-Ba-Cu-O Sysytem", Z.Physics, B-Condensed Material, Vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [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] 石原・拓植・水野・清水・小崎, "液体ヘリウム浸漬高分子フルムの V-t 特性と部分放電劣化", 電學論 58-A53, pp 429-436, 1981.
- [7] 水野・拓植・清水, "液體中の部分放電したフルム絶縁破壊の研究", 電學論 59-A21, pp 159-165, 1982.