

극저온중의 고분자 절연재료의 열화연구

A Study on Deterioration in Polymer Insulating Material at Cryogenic Temperature

^o김 현희*, 김 영석*, 김 상현*,
최 효상**, 조 광욱**

* 경상대학교 공과대학 전기공학과
** 한국전력연구원 에너지 환경고등 연구소
초전도 연구팀

^oH.H.Kim*, Y.S.Kim*, S.H.Kim*,
H.S.Choi**, K.W.Cho**

* Dept. of Electrical Engineering,
Gyeongsang Natl. Univ.

** Dept. Superconducting Reaserch
Team, Center for Advanced Study
in Energy and Evironment, KEPRI.

Abstarct

This Paper is to discribe the ac treeing deterioration in Polyethylenetherphthalate (PET) at various temperature. The AC tree was investigated at 77K using LN₂. The experimental results show that V-t characteristics was an inverse proportion to temperature. The progress of tree initiation and growth were also to temperature.

1. 서 론

최근의 전력기술은 급속한 전력망의 초고압화를 추진하여 전기에너지의 생산, 수송과 효율적인 관리를 위해 가혹한 환경을 요구하고 있는 실정에 있다. 특히 대용량 시스템의 안정적인 운전과 수명특성을 위하여 전기적 절연에 대한 선행연구가 필연적이라 할 수 있다[1].

최근 고분자 공학의 발달에 따라 뛰어난 고분자 절연재료가 개발되어 수많은 전력용 기기, cable에 적용 되고 있으나 전력 cable에 사용되는 고분자 절연재료의 절연파괴시에 전기 tree라고 불리우는 수지상의 균열이 발생한다.[2],[3] Tree는 발생, 진전되는 환경에 따라 그 형태가

다양하며, 절연재료 내부에 발생한 tree는 교류 전압을 인가하면 방전을 동반하고 성장하여 전극간을 교락하여 전로파괴(flashover)에 이른다. 일단 tree가 발생하면 절연계의 신뢰성 및 수명은 극히 저하하기 때문에 cable의 신뢰성 향상을 위해서는 초기결함의 제거는 물론 tree 발생기구를 해명하고 이것을 억제하는 것이 중요하다.

일반적으로 고분자 cable의 절연파괴 사고는 수년 내지 수10년 경과 후에 일어나는 일이 많고 그 주요인은 treeing에 의한 파괴라고 생각되고 있다. 이와같은 장기간 수명에 의한 각종 고분자재료의 내 treeing을 선별하기 위해서는 가속시험이 요구된다. 이를 위해서는 침-평판전극 구성에 의한 시험법이 개발되고[4], 고분자 재료의 선별시험에 이용되고 있다. 침-평판전극 구성을 주로하는 treeing시험에서는, tree의 발생은 tree가지(枝) 내의 기압 및 기체의 종류 등에 크게 영향을 받는다 [5],[6]. 그러나 한정된 조건, 예를들면 비교적 큰 void 체적을 갖는 시료내에서는 tree진전의 가속성을 얻을 수 있다 [7]. 이들의 것으로도 가속시험결과를 실용조건에 외삽하는 경우에는 그 한계에 대하여 충분히 검토하여 둘 필요가 있다.

또한 초고압에 대응하는 송전기술로서 극저온에서 도전율이 무한대가 되는($\sigma = \infty$) 초전도 송전 기술개발이 고온초전도[8] 개발로 더욱 가속화 되고 있는 실정에 있다. 초전도 cable, 변압기 등의 초전도 전력기에 있어서는 냉매 내의 기포가 전기절연에 주는 나쁜 영향을 제거하는 방법으로서 냉매를 전기절연에 관여시키지 않는 고체절연방식이 검토되고 있으며, 이러한 시스템의 안정성과 수명을 위해서는 극저온하에서의 전기적 절연연구가 선행되어야 한다. 따라서 고체전기절연 시스템의 장기적인 신뢰성은 전기 tree라고 불리는 절연 파괴 전구현상에 결정되며, 극저온하에서의 전기절연에 대한 국내실정은 전무한상태이다.

본 연구에서는 Polyethylenetherphthalate (PET)를 사용하여 액체 N₂온도(77K)에서의 tree발생전압, V-t특성, tree길이, 부분방전에 의한 발광 등을 조사하고 다른 온도에서의 결과와 비교 검토를 하였다. 또한 전압에 따른 tree 형태의 변화 등을 현상적으로 검토하고 그 결과를 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 장치의 개략도를 그림1에 나타낸다. 그림2와 같이 제작된 시료를 glass dewar의 시료 holder에 고정시켰으며, 액체N₂를 침적하고 30분이 경과한 후 전원을 인가 하였다.

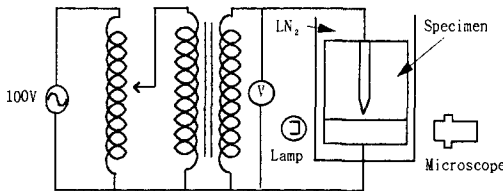


그림 1 실험장치
Fig. 1 Experimental Apparatus

또한 온도 실험을 위한 방법으로는 메틸알콜에 dryice 첨가하여 194.5K의 온도를 유지시켰으며, 고온영역에서는 hot Plate를 이용하여 변압기유를 가열한 뒤 일정한온도로 안정시킨 후 소정의 전압을 인가하였다. 전원으로서는 최대출력전압이 90kV인 교류전원(Baur사 A-6832)을

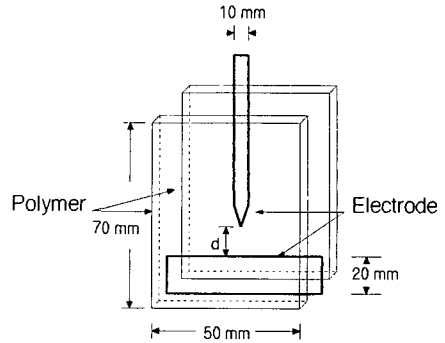


그림 2 전극계
Fig. 2 Electrodes

사용했으며, 전압인가법으로는 1[kV/sec] 상승 속도로 목표치의 전압을 설정 하였다. 또한 전극부와 lead선의 접촉저항에 의한 부분방전을 억제하기 위해 silver paste를 도포하였다. Tree진전의 관측사항을 용이하게 하기 위하여 광학현미경내에 CCD카메라(Olympus사 CS330)를 부착하여 전압에 대한 tree진전상황을 직접 관측할 수 있었다. Tree 진전시 작용하는 여러 가지 요인중 고분자절연재료의 불순물 및 void에 의한 영향과 상부침전극의 곡률반경에 대한 요인이 커므로 Tree 실험을 위한 시편제작은 이들 요인을 고려하여 제작하였다. 두께 100[μ m]의 절연성 고분자 PET필름 2장을 고분자 재료로 사용하였으며, 두께 10[μ m]의 Al-foil을 절단하여 상부침전극과 하부전극으로 사용하였다. 시료로 구성되어진 PET 및 전극은 메틸알콜 침적하에서 5분간 세척한후 건조한 뒤 전극계를 고분자 시료에 고정하였으며, PET필름의 접착을 위해 PET의 glass 전이온도 근처인 90°C에서 10[mm/sec]의 속도와 200[Kg/cm²]으로 압연하여 실온까지 서냉하였다. 제작된 상부전극의 침선단각은 20°, 곡률반경은 10[μ m] 였으며 제작된 시편의 최종두께는 190[μ m]였다. 기계적 요인에 의한 침선단부의 void 또는 crack의 발생을 극력억제 하였고, void의 유무를 확인하기 위하여 광학현미경으로 확인 하였으며, 동일한 조건하에서의 연면방전전압의 실험결과 void는 관측되지 않았다. 침전극근방의 결정구조가 명료하게 관측될 수 있는 시료와 대향전극간 거리가 일정한 것만을 선별하여 tree 발생 전압, V-t특성, 인가전압에 대한

tree 길이를 구했다.

3. 실험결과 및 고찰

부분방전에 의한 절연재료의 열화는 시스템의 안전성확보 및 수명에 주요한 요인으로 작용한다

액체 N₂중에서의 고분자 절연재료의 전기적 특성을 파악하는 것이 주요한 목적이지만 기초적 입장에서 고온 영역의 실험도 행했다. 그림 3은 각온도에 대한 수명특성을 나타낸 그림이며, 수명특성을 위해 다음과 같은 식을 이용하여 weibull분포를 취하였다.

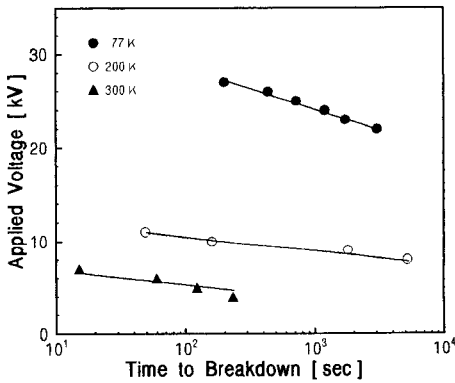


그림3. 온도변화에 대한 V-t 수명특성
Fig.3 V-t characteristics in various temperature

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

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

여기서 t 는 확률변수, t_i 는 위치 매개변수, m 은 형상 매개변수이다. 각전압에 대한 Weibull 분포의 50% 누적파괴확률인 값을 취하여 흑점으로 표시했다. 수명특성 인가전압은 절연파괴 근처인 고전계영역으로 각종 온도에 대해 검토 되었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 LN₂ 중의 경우 Dryice 및 유종의 경우에 비해 고전압영역에 있으며 내부분방전 특성도 저온영역으로 갈수록 유리함을 알 수 있었다.

전기 tree는 불평등 전계내의 국부적인 부분방전에 의해 절연재에 내재된 void, 불순물 구정경계 등의 취약점부를 뚫고 계속 진전되는 열화현상으로 장시간 이후 단락사고로 이어진다. 그림 4는 각 온도에서 인가전압 대한 트리성장 길이를 나타낸 그림이다. 또한 그림5에 LN₂에서의 인가전압에 대한 트리형태의 사진을 나타내고 있다.

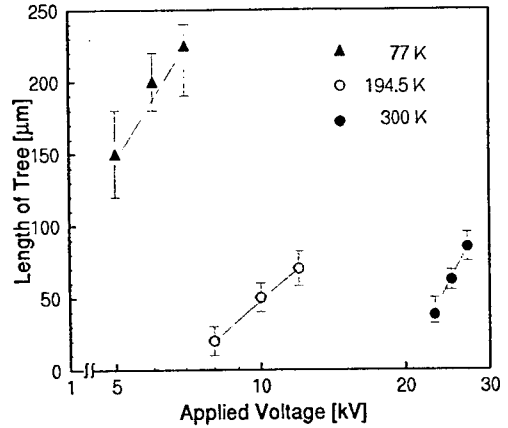
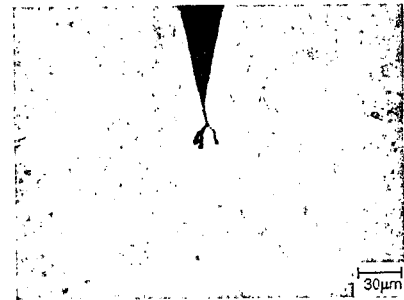
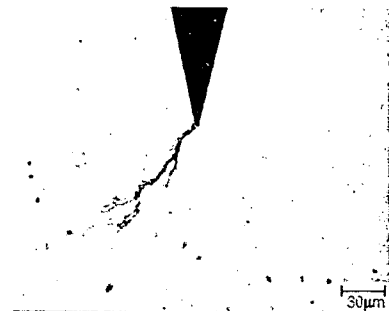


그림4. 인가전압에 대한 tree진전 길이
Fig.4. Tree length vs. applied voltage



77 K, 25 [kV]



77 K, 27 [kV]

그림5. LN₂에서의 tree 형상 사진
Fig. 5 Photograph of the tree formation in LN₂

tree발생 직후 직선상의 1개의 미소한 초기 tree는 침전극 선단에서 전계방향으로 5-20 μ m 정도 직선상으로 진전하여 일단 정지한다. 그 후 분기하여 진전을 다시하는 형태를 표시하는 것이 특징이며 온도변화에 의한 초기 tree길이는 5 μ m 정도로 온도의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 tree 전체의 진전거리는 그림에서 나타낸바와 같이 저온영역의 경우 진전이 더딘 것으로 관측되었으며, 트리형상의 경우 진전 tree가지의 형성이 단순한 형태로 진전됨을 알 수 있었다. LN₂의 경우 tree 형상은 침선단으로 부터 초기 tree의 진전이후 단순한 형태의 tree로 관측되어 졌으며 고전계영역임에도 불구하고 tree의 전체 길이는 짧은 것으로 관측되어졌다. Dryice의 경우 인가전압에 대한 tree 길이는 LN₂ 길이에 비해 길어졌지만 유중의 경우보다는 짧다. 인가전압이 낮은 8kV에서는 단순한 tree형에 가까운 bush-type tree에서 12 kV에서는 잔가지상이 많이 분포된 bush-type tree형태로 진전됨을 알 수 있었다. 온도가 높은 유중실험의 경우 branch-type tree의 형태로 진전되며 인가전압이 상승함에 따라 전체 tree길이의 증가와 더불어 잔tree 상이 더욱 증대하였다. 특히 LN₂의 경우에서는 간헐적으로 냉각중에 받는 기계적인 응력 때문에 침선단이 아니고 응력이 큰 상부전극 주변에서 tree가 진전되는 경우가 관측되었다.

이러한 tree는 부분방전이 개시된 이후 초기 tree가 발생하며 시간이 경과한 이후 또는 인가전압이 높은 경우 관로파괴로 진행된다. 따라서

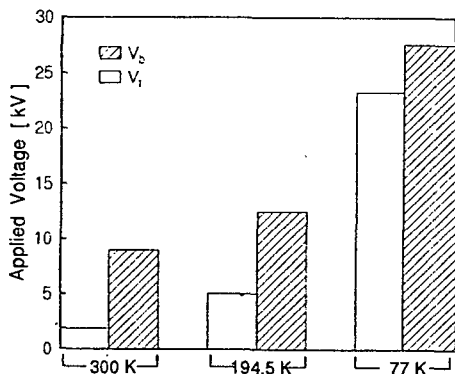


그림6. 초기 Tree전압과 관로파괴전압의 비교
Fig.6 Initial tree voltage vs. breakdown voltage

tree시작 전압과 절연파괴전압에 대한 분포를 온도영역별로 검토한 결과를 그림 6에 나타내며 그림 7에 온도의 역수에 대한 tree길이를 측정 한 결과 저온 갈수록 초기 tree전압은 관로파괴전압의 근처영역에 이르러 진행되었으며, tree 길이

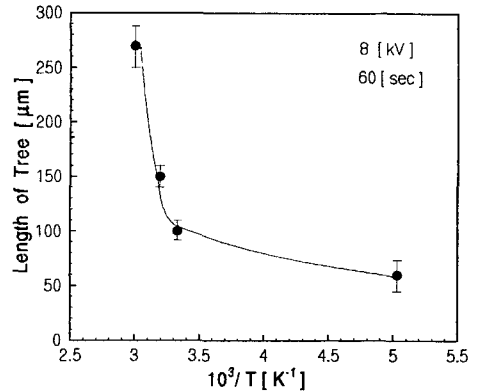
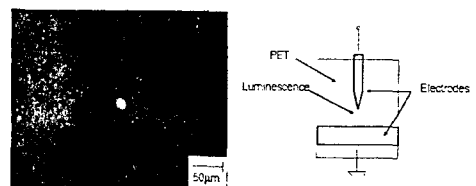


그림 7. 온도역수에 대한 tree 길이

Fig.7 Tree length dependence of inverse temperature

역시 짧게 진전되었다. 침선단으로 부터 발생하는 tree의 진전은 부분방전에 의해 진행됨에 따라 부분방전에 의한 발광을 그림 8에 표시하며 그림9에 인가전압에 대한 발광의 직경을 표시한다. 인가전압의 증가와 더불어 발광은 더욱 커지며 관로파괴에 이른다. 또한 발광개시전압은 초기 tree전압 이하에서 진행됨에 따라 부분방전개시 이후에 tree가 진전함을 알 수 있었다. 또한 PET에 대한 이러한 온도의존성을 종합적으로 고려해 볼 경우 tree 진전은 저온영역일수록 진전이 더디게 됨을 알 수 있었다.



77 K; 21 [kV]

그림8. 부분방전에 의한 발광사진
Fig. 8 Luminescence for partial discharge

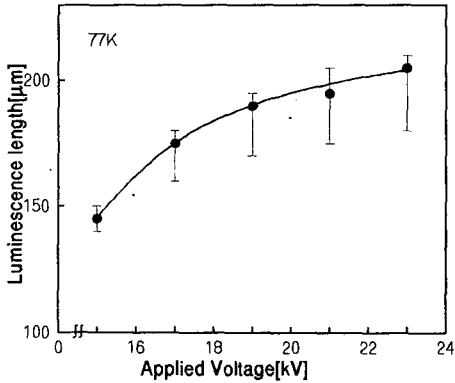


그림9. 인가전압에 대한 발광의 직경
Fig.9 Diameter of Luminescence vs. applied voltage

4. 결 론

본 실험에 대한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 절연파괴전압 및 수명특성은 저온일수록 높으며, 고온의 경우보다 고전압측에 존재한다.
2. 저온일수록 초기 tree전압은 관로파괴 전압 근처에서 발생되어지며, tree의 진전이 잘 안 된다.
3. 저온에서의 tree형상은 고온과 달리 단순한 형태의 모양으로 관측되며, 높은 전압영역에서도 성장길이만 증가할 뿐 형태의 변화는 거의 없었다.
4. 부분방전에 의한 발광은 초기 tree전압 이하에서 시작되며, 인가전압에 비례하여 커진다.

참 고 문 헌

[1] 家田正之: "高分子의 電氣物性과 그 應用", pp. 27-52 일본고분자학회, 1972.

[2] R.m.Eichhorn: "Treeing in solid extruded insulation", IEEE Trans. EI. Vol. EI-12, No.1, 1976.

[3] J.H. Mason: "The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharge", proc. Inst. Elect. Engrs. Vol 98, No.1,1951

[4] 福澤·岩本·日野: [針-平板電極系による低密度ポリエチレンの熱電流と空間電荷の測定], 同上 A, 106, 70 (昭61-2)

[5] M.Nawata, H.Kawamura and M. Ieda, "Voltage and temperature dependence of treeing breakdown in plastic insulators", International symposium on High Voltage Technology, Tech. Univ. Munich, pp 428-434, 1972.

[6] Y. Ito, "Temperature dependence of gas and vapor permeation in polyethylene (in Japanese)", Kobunshi-Kagaku, Vol.18, p.1(1961), (for only oxygen A. S. Michaels and R.B.Parker, Jr., "Sorption and flow of gases in polyethylene" J. Polymer Sci., Vol. 41, p.53 (1959).

[7] N.Shimizu, K.Horii : "The Effect of Absorbed Oxygen on Electrical Treeing in Polymers", IEEE, Vol. EI-20 No.3, 1985.

[8] J.G.Bednorz and K.A.Muller, "Possible High-Tc Superconductivity in the La-Ba-Cu-O Sysytem", Physics, B-Condensed Material, Vol. 64, pp.189-193, 1986.