

# Dodecyl Alcohol이 첨가된 P.E에서 온도변화에 따른 Treeing에 관한 연구

\* 이창희, 이계안, 김상준, 김정수

홍익대학교 대학원 전기공학과

(The Study on Treeing under the Temperature Variation in Low Density Polyethylene Mixed with Dodecyl Alcohol)

\* Lee, Chang Hee Lee, Kye An Kim, Sang Jun Kim, Jung Soo

Gradu. Dept. of Electrical Eng. Hoon Ik Univ.

## Abstract

Insulation of P.E insulated cable under the field of high-voltage will be breakdown ultimately due to the degradation process called 'Treeing' which is generated in the insulation, so long as any counter-measure suppressing or eliminating it could not be provided. In this paper as a counter-measure Dodecyl Alcohol is mixed with P.E and Treeing under the temperature variation has been observed.

Results show that the larger weight ratio of Dodecyl Alcohol is stronger the effect of suppressing Treeing in the range from room temperature to 40°C and generated Treeing has been soon eliminated and it never again generated.

## 1. 서론

절연재료로 사용되어온 유기절연재료의 하나로서 저밀도 폴리에틸렌(Low Density Polyethylene 이하 P.E라 함, [CH<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub>])은 반결정 조직수직으로 절연저항이 높고 저유전율, 저유전체 손등 여러가지 우수한 전기적 특성 및 경제성이 안정되어 전력 cable의 절연 및 전기기기의 절연기술에 많은 기여를 하여왔다. 그러나 비교적 낮은 용점과 과전시 트리잉열화의 문제점에 대해서는 실용적 전지에서 아직 완벽한 해결책을 얻지 못하고 있는 실정이다. 또한 그동안의 수많은 연구 결과 보고에서도 트리잉이 일단 발생되면 절연체는 최종적으로 파괴에 이르게 된다고 지적되어 왔다. 그러므로 이 문제를 해결하기 위한 기초적인 계획은 트리잉에 의해 유발된 절연파괴 개소를 제거하거나 트리잉 성장전압을 상승시키는 첨가제를 찾는 것이다. 이러한 기술은 단시간 파괴강도를 상승시키는 것에는 가능하였으나 표준 구동전압(상시전압), 상시전압의 2배나 3배에서 케이플의 수명을 연장시키지는 못하였다. 최근 이러한 결점을 보완하기 위하여 무기질 충전분을 섞은 P.E 복합재료와 방사선으로 가교시킨 P.E 재료로 어느정도 트리잉 억제효과와 파괴전압을 높였으나 아직 미비한 단계로 초기트리잉을 완전히 억제할수는 없으며, 특히 전력케이블이 번개나 스위칭서지(switching surge)로부터 높은 임펄스가 가해졌을 때는 트리잉을 억제할수 없었다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 E.J. McMahon 씨는 상온에서 P.E에 도데실알콜(Dodecyl Alcohol, 일명 Lauryl Alcohol로 이하 D-A 이라함, [C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>OH=186.34])을 혼합한 복합 재료로 트리잉 성장에 상당한 억제효과가 있음을 1981년 발표한 바있다. 따라서 본 논문은 P.E에 D-A를 첨가하여 복합시료를 만들고 D-A의 첨가비 2, 5, 8, 10[%]에 따른 트리잉 억제효과를 구하고 최적의 첨가비를 찾아서 순수 P.E에 중량비 10[%]의 D-A를 첨가한 복합시료를 제작하여 D-A의 상변이점(고상, 고상-액상, 액상)에 있어서의 온도 의존성과, 온도에 따른 트리잉 현상을 집중 관측하여 고찰하였다.

## 2. 관계이론

### 2-1. 트리잉 발생의 메카니즘

절연체에 국부적으로 교류 고전계가 인가될때 수지상의 절연파괴로가 형성되고, 다음에 진행된다. 트리잉 현상은 잠복기간, 발생과정(유도기간), 진전과정등이 있으며 트리잉발생에 관한 메카니즘은 다음과 같이

- i) 기계적 피로
- ii) 미소 부분 방전 열화
- iii) 전하 주입 후출에 의한 열화 등이 있다.

기계적 피로도는 맥스웰 응력(Maxwell Stress)을 반함에 의해 재료가 기계적으로 피로해서, 전극부근의 크랙(Crack)이나 보이드(Void)가 형성된다. 미소 부분방전에 의한 것은 현재 본 연구팀들이 사용한 펄스회로로 방전펄스를 계수하여 발생여부를 확인할 수 있는 방법이 있으나 아직도 정량적으로 측정하기에는 미비한 점이 있다. 전하 주입 후출모델로는 전계로부터 에너지를 얻은 전자와 재료와의 상호작용으로 생각되고 있다.

### 2-2. Mason 공식

가속화 시험에 요구되는 목적을 실험하기 위한 침대 평판 전극 구조에 있어서 전계강도 E는 다음의 식으로 부터 구할수있다.

$$E = \frac{2V}{R \ln(1+4X/R)} \quad (2-1)$$

- 여기서
- R: 침판 곡률반경
  - X: 전극 갭(gap)의 길이
  - V: 전극간의 전위차
  - E: 전계강도

## 3. 실험

### 3-1. 시편제작 및 방법

시편제작은 저밀도 폴리에틸렌(한양화학, 밀도 0.925g/cm<sup>3</sup>)에 소립형 원료를 그림(3-1)과 같은 심주름(50×30×2mm)에 침대평판 전극을 삽입하여 압착 가열기(Heating Press)로, 온도 135°C에서 20분간 가열하고 압력 2000psi - 2500psi 로 10분간 서서히 열 압착하여 선종기로 서서히 식혀 제작하였다.

전극은 기하학적으로 침대 평판 전극 형태를 갖추었으며 평판전극으로 대화제침 No.2, 침전극으로 NO.2 중에서 침 선단부에 의한 초기 tree의 영향을 줄이고자 극

를 반경이 10 [ $\mu\text{m}$ ] 인 것을 선별하였고 극간거리는 현미경으로 관측하여 2[mm]가 되는 것을 선택하였다.

3-2 실험 장치

온도 조절장치(CA Thermo-Coupling)을 사용하여 유온을  $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 오차범위로 조절할 수 있도록 하였으며 실리콘 오일의 대류를 촉진 시키고 균일한 유온을 얻기 위하여 가열판과 스티러(Heat & Stirrer)를 사용하여 대류를 촉진시켰다. 전원으로서는 송압속도 조절이 가능한 60(Hz) 오일시험기(Oil Tester)를 사용하여 1[KV/sec]의 송압속도로 시편에 전원을 공급할 수 있게 하였으며 방전 pulse 를 감지하기 위하여 그림 (3-2)와 같은 측정회로를 이용하였다.

4. 실험결과 및 검토

4-1 실험 결과

다음의 실험결과에 대한 Data 는 12 개의 시료를 실험한 것 중에서 6 개의공중 본표를 도식화 한것이다. 또한,  $V_T$  는 (트리이 유도전압),  $V_0$  는 (초기 트리이 발생 후 연속 인가 전압),  $T$  는(온도 ( $^\circ\text{C}$ ))를 나타내며 최초의  $\text{Treeing}$ 이 발생은 (20  $\mu\text{m}$ ), 초기 Tree 발생은 (0.3 mm)로 명명한다.

복합 시료는 순수 시료와는 달리 트리이 억제 효과가 나타났으며 발생하더라도 즉시 소멸되는 양상이므로 이것은 온도에 크게 의존함을 알 수 있었다.  $T = 15^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  에서는  $V_T$  에서 발생한 트리이 가  $V_0$  로 온전시 즉시 소멸하였으며  $T = 70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  에서는 침수본 지체후 즉시 관통파괴에 이르게 됨을 알 수 있었다. 그러나 도데실 알콜이 고상, 고상+액상, 액상인 부분에서는 온도 변화에 의하여  $V_T$  에서 발생한 트리이가  $V_0$  로 하강 연속 인가 하였을때 트리이 소멸속도의 변화가 있어 도데실 알콜이 P.E 내부로의 확산 속도에 영향을 주어 트리이 소멸 시간에 상당한 영향을 주었다.

그림 (4-1)은 도데실알콜이 고상인  $15^\circ\text{C}$ 에서 전압을 0 으로부터 1(KV/S)의 송압속도로 변화시키며 그때 트리이가 유도되는 트리이 유도 전압을 도데실알콜 중량비(0, 2, 5, 8, 10 %)에 대하여 실험한 결과로 중량비 5(%)의 도데실알콜이 첨가된 시료로 부터 차차 포화상태에 이르게 됨을 나타내고 있고 도데실알콜의 함량비가 많으면 많을수록 트리이 유도전압이 높아지게 되는 것을 보여주고 있다. 그림 (4-2)는  $V_T$ (트리이를 유도하기 위한 전압, 1.5KV)를 주고  $T=15^\circ\text{C}$ 에서 최초 트리이를 20 $\mu\text{m}$ 로 보고 최초 트리이가 발생할 때까지의 시간을 관측한 것이다. 여기서는 도데실알콜 함량비가 증가하면 초기 트리이 발생 시간은 지체되며 중량비가 5(%)의 도데실 시료로 부터 포화상태도 이르는 속선을 보여주고 있다.

4-2. 검토

4-2.1 온도 변화에 따른 트리이 현상에 대한 고찰

그림 (4-3) 는 D-A 시료의 트리이에서 I(트리이 발생 후 소멸하는 구간), II(트리이가 발생하지 않는 구간), III(트리이유도가 지체되다 파괴하는 구간)으로 크게 나눌 수 있으며 방전펄스수는 변동이 없이 일정하였으므로 언급하지 않는다.

I구간은 그림의 ①, ②, ③, ④로서 ①, ②, ④, ③의 관계를 보여주며 특히 ③인 온도  $30^\circ\text{C}$ 에서 트리이 소멸속도는 5분으로 발생한 트리이가 빠르게 없어짐을 관측하였다. II 구간은  $V_T=15$ [KV]에서도 트리이가 발생하지 않는 구간으로 이는 초기 트리이(0.3mm)의 주위에 있는 보이드의 체적이 온도가  $50^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ 로 높아짐에 따라 D-A 은 보이드 내부로 확산 침투되어 전체 보이드의 체적은 감소하고 트리이 진행 압력은 지체되어 4시간까지는 평형을 유지하는 것으로 생각되나 4시간 이후 장시간 경과하면 시료 내부의 평형이 깨지며 전하주입과 수

출, 미소부분방전, 기계적 피로 등의 복합적인 요인에 의하여 트리이 발생하며 순식간에 관통파괴로 이를 가이라 사료된다. I구간은 어느정도 지연시간 (침수본-수입본)이 경과한후 맥스웰응력에 의한 기계적 파괴와 비정부분에 고전계에 의한 전성파괴가 동시에 복합적으로 형성되는 구간으로 간주할 수 있다.

III의 구간에서 고온  $80^\circ\text{C}$ 에서 순수P.E의 인장강도는  $18\sim 20$ [kg/cm $^2$ ]이고  $80^\circ\text{C}$ 에서의 10%도데실 시료의 복합유전율은 실험실에서 Q-meter에 의한 측정치로 2.74를 얻었다. Mason의 공식에서 첨단전계 E는 식 (2-1)에서  $R=1.0\mu\text{m}$ ,  $N=2\text{mm}$ ,  $V=15\text{KV}$  라하면  $E = 4.487\text{MV/cm}$  이다. 또한

$$P = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad [\text{N/m}^2] \text{에서}$$

$$\begin{cases} E : 4.487[\text{MV/cm}] \\ \epsilon_r : 2.74 \\ \epsilon_0 : 8.854 \times 10^{-12}[\text{F/m}] \end{cases}$$

를 대입하여 계산하면  $P = 244$ [N/cm $^2$ ] 이고 이는 인장강도 25[kg/cm $^2$ ]이 된다. 이 값은 P.E이  $80^\circ\text{C}$ 에서의 인장강도  $18\sim 20$ [kg/cm $^2$ ]을 훨씬 넘고 P.E이 결정질에서 비 결정질로 바뀌게 되는 구간 이므로  $20^\circ\text{C}$ 에서 P.E의 전성파괴강도인 7[MV/cm]보다 적고 트리이 발생까지의 침수본의 시간이 소모됨으로보아서 전성파괴로 보기는 어렵다. 따라서 순수 P.E에서 인장강도가  $0^\circ\text{C}$ 에서 200[kg/cm $^2$ ]정도이며 온도가 높아질수록 그 값은 점점적어져서  $20^\circ\text{C}$ 에서 90[kg/cm $^2$ ],  $80\sim 90^\circ\text{C}$ 에서 약  $18\sim 20$ [kg/cm $^2$ ]로 되므로 이렇게 보아도 타당할 것으로 사료된다.

5. 결 론

1. 혼합된 도데실 함유량이 증가하면 증가할수록 최초 트리이 유도전압은 높아지나 8[%]부터 포화됨은 알 수 있었으며 일단 트리이가 발생한 최초 트리이 발생시간에서 부터 초기 트리이 발생(3mm)까지 발생시간은 순수 폴리 에틸렌 시료는 트리이가 계속 전전하고 방전 펄스가 증가하며 관통파괴에 이르게 되나, 도데실알콜 복합시료는 방전펄스수는 초기에서만 발생하고 초기 트리이가 유도되는 기간에서만 계속되며 그후부터는 변화가 없다. 이와 같이 계속되지 않는 이유는 발생한 트리이 관통도에 도데실 알콜이 확산 침투되어 들어가므로 방전료가 점차 메꾸어져 트리이 관로가 소멸되는 효과가 아닌가 사료된다. 또한 시료에 도데실알콜의 혼합비율은 10(%)가 최적임을 확인하였다.
2. 도데실알콜의 상변이 (고상, 고상+액상, 액상) 상태에서의 트리이 소멸효과는 (고상) < (고상+액상) < (액상) 관계가 있으며 특히 액상 중에서도 상온부근인  $30^\circ\text{C}$  부근에서는 가장 좋은 소멸효과가 있음을 알 수 있었다. 그러나, 도데실 알콜은 폴리에틸렌과 단지 혼합물로만 존재하여 시간이 경과함에 따라 도데실 알콜은 대기밖으로 소량씩 확산되어 나오게 되어 약 1,000시간에는 전체의 25[%] 밖에 남아있지 않았다(실험실의 측정치). 그러므로 앞으로 트리이 억제와 발생트리의 소멸에 상당한 효과가 있는 도데실 알콜이 대기중으로 확산유출되지 않는 연구가 더욱요망되며 최근 연구되고 있는 초전도체의 연구에 맞춰 트리이의 억제와 발생 트리이 소멸에 상당한 효과가 있는 도데실 알콜을 극저온에서 P.E + D-A 복합시료의 트리이 현상에 관한 연구가 필요하다.

### 참고 문헌

- (1) 電氣學會雜誌 ; 金子隆治 "絶縁の信頼性と壽命推定" 95권5호, P384, 昭和 50-5
- (2) 광영순 ; " 合成樹脂絶緣材料의 TREERING 파괴에 대한 소고 ", 대한전기학회지, 25권6호, pp 203-210, 1976
- (3) 임기조 ; " 저밀도 PE에서 Treeing 구조와 내Treeing 성 향상에 관한 연구", 박사학위논문, p 33, 1986
- (4) 松葉博則 ; " 有機絶緣體의 Treeing現象 ", 일본전기학회잡지, vol 89-5, p 985
- (5) 石田政義 외 3인 ; " PE의 고차구조와 전기트리의 발생현황", 전기학회A, 108권12호, p335
- (6) D.W.Kitchin, U.S.Pratti ; "Treeing in Polyethylene As a Prelude to Breakdown", Trans Am Inst, Electrical Engineer, vol 77, pt 3, pp 180-186, 1958
- (7) E.J.Mcmahon ; "A Tree Growth Inhibition Insulation for Power Cable", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-16, No. 4, pp. 304-305, August, 1981
- (8) 김경수 ; " L.D.P.E 에서 방사선 조사량이 열적, 유전적 및 기계적 특성과 tree 전전에 미치는 영향 ", pp. 1-3, 1985.
- (9) 川端昭, 大森豊明共編 ; " 電子, 電氣 材料學 ", 培風館, pp. 244-260, 1987
- (10) H. MATSUBA, Member & S. Hoh Member ; " Treeing in Organic Insulating Material", JIEEJ, Vol. 89-5, No. 968, pp. 985-994, 1980.
- (11) 전기학회 통신교육회 ; " 유전체 현상론 ", pp. 106-125, 1976.
- (12) 大石嘉雄 외 3 人 ; " 誘電體現象論 ", 電氣學會大學講座, pp. 327-329, 昭和 51.
- (13) C.W. Bunn & Alock ; " chemically crystallography 2nd edition ", Oxford University Press, London, 1961.
- (14) A Keller ; " A note on single crystal in Polymers Evidence for a Folded chain Configuration ", Pil May(8), pp. 1171-1175, 1957.
- (15) J. Nuccigrosso, P.J. Phillips ; IEE Trans, Vol. EI-13, pp. 3-4, 1978

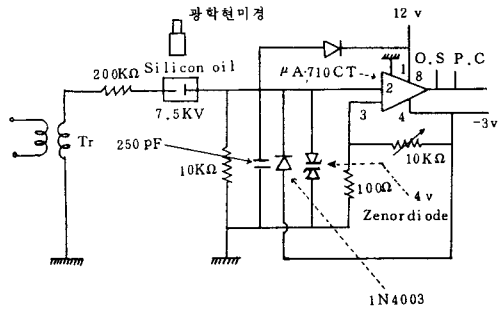


그림 3-2 트리어 관측회로

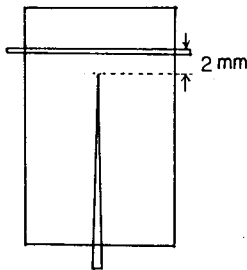


그림 3-1 트리어 관측용 시편과 전극형태

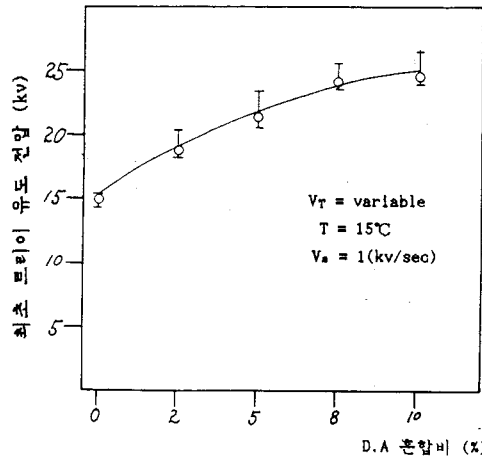


그림 4-1 PE에 D.A혼합비에 대한 최소 트리어 유도 전압

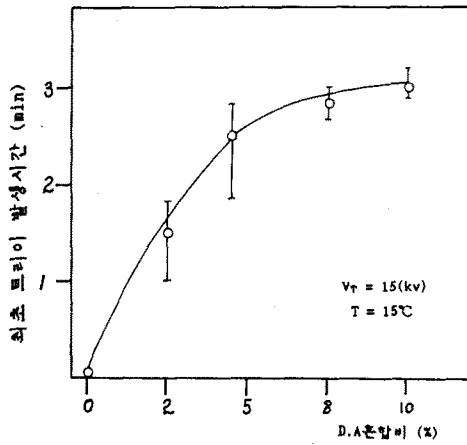


그림 4-2 PE의 D.A혼합비에 대한 최초 트리어 유도시간

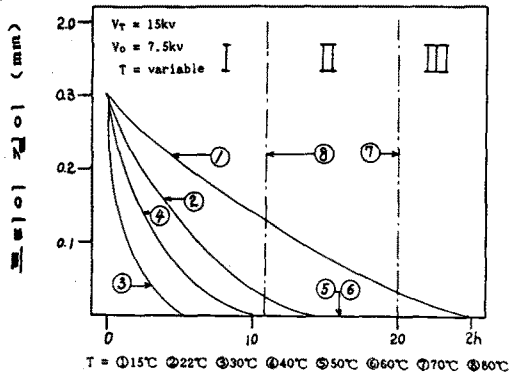


그림 4-3 PE+10% D.A에서 온도와 트리어와의 관계