

## 고분자 절연재료의 트래킹 열화에 미치는 오손액의 영향

논문  
10-8-3

### The Effect of Contaminants on Tracking Aging in Polymer Insulating Materials

조한구\*, 박용관\*\*

( Han-Goo, Cho, Yong kwan, Park)

#### Abstract

Some polymer materials, including epoxy resin, are being used instead of porcelain for outdoor insulating materials such as insulators, bushings, cable terminators and surge arrester housing. And, the largest problem to be overcome is the tracking and erosion of the outdoor polymer material brought about by dry band arcing during prolonged exposure to contaminations.

In this paper, the effect of surface tension, wettability, flow rate of contaminants with varying surfactant content and frequency of applied voltage on the tracking breakdown of epoxy insulating materials were investigated. As the flow rate of contaminant is increased, the surface resistivity is decreased, and the leakage current is increased, the time to tracking breakdown is decreased. It is found that time to tracking breakdown depends on the surface tension of contaminant, that is difference of wettability. And as the frequency of applied voltage is increased, time to tracking breakdown decreased.

**Key Words(중요용어)** : Surface tension(표면장력), Tracking resistance(내트래킹성), Wettability(젖음성), Surfactant(계면활성제), Flow rate(유량), Surface roughness(표면 거칠기), Contact angle(접촉각)

#### 1. 서 론

최근 산업의 발달로 인한 전력수요 증가로 전력계통의 초고압화가 진행되고 있으며 절연물의 경량화, 소형화가 요구되므로써 이에 수반한 절연재료의 개발과 성능 개선이 요구되고 있다. 전기재료로서의 고분자 재료는 절연성, 가공성 및 기계적강도가 우수할 뿐만 아니라 대량생산과 경량화가 가능하여 수요와 용도는 여러방면에 활용되고 있다. 그리고, 고분자 재료를 이용한 절연물은 자기(porcelain)에 비하여 표면의 발수성이 우수하기 때문에 오손 및 습윤시에도 누설전류가 작으며, 오손내전압도 크다. 이와 같이 표면 특성인 발수성이 오손조건하에서 장기간 유지, 회복될 뿐 아니라 내트래킹성이 우수하

로 절연물의 누설거리(leakage distance)가 단축되어 소형화가 가능하다<sup>1,2)</sup>. 따라서 애자, 붓싱 및 피뢰기와 같은 절연물이 고분자 재료로 적용되기 시작함에 따라<sup>3,4)</sup>, 내트래킹성<sup>5,6)</sup>, 옥외폭로에 따른 신뢰성<sup>7)</sup>에 대한 연구가 진행되고 있으며, 최근 옥외용으로 고분자 절연물의 용도 확대에 따라 이에 대한 연구도 가속화되고 있는 실정이다.

그러나, 고분자 재료의 대부분은 표면에 표면방전이 발생하면 국부적인 탄화열화(트래킹 열화)가 일어나고 이것이 진전하여 최종적으로 트래킹파괴에 이른다. 즉, 옥외의 가혹한 자연환경에 노출되면 태양광, 공업분진 등의 오손물질과 수분이 복합적으로 작용하여 경년열화를 피할 수 없다. 특히 자외선에 의해 표면이 열화<sup>8)</sup>되어 오손물질과 수분이 부착하면 젖음성이 좋아져 절연성은 급격하게 저하된다<sup>9)</sup>. 이러한 현상은 주로 표면에 나타나므로 고분자 절연재료를 옥외용 절연물로 사용할 경우 오손과 더불어 큰 문제점으로 대두되고 있다.

이와 같이 표면의 열화와 오손은 트래킹파괴를 일

\* : 한국전기연구소 전기재료연구부

\*\* : 성균관대학교 공대 전기공학과

접수일자 : 1997년 3월 26일

심사완료 : 1997년 8월 21일

오픈은 기본요인으로 습윤조건과 재료의 젖음성(wettability)에 따라 그 상태가 다르다. 습윤조건을 고려하는 경우 재료의 젖음성, 즉 접촉각이 중요해 지는데<sup>2,10)</sup> 젖음성은 재료 표면의 발수성(hydrophobicity)과 액체의 상호작용이므로 재료의 종류와 그 표면 상태만으로는 결정할 수 없다.

본 연구에서는 오손액의 표면장력과 재료와의 상관관계에 대한 영향을 평가하기 위하여 음이온계 및 비이온계 계면활성제의 농도를 변화시켜 오손액의 표면장력, 젖음성, 유량이 재료의 내트랙킹성에 미치는 요인들에 대한 특성을 검토하였다. 그리고, 표면장력에 따른 방전의 발생과 재료의 접촉각이 트래킹 파괴에 미치는 영향을 경사평면실험으로 확인하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시료 제조

본 연구의 에폭시수지(CY-184, CIBA-GEIGY)는 F중 절연, 내마모성, 내트랙킹성이 우수하고, 산무수물(acid anhydride)계 경화제와 혼합한 후 80~100℃에서 경화가 시작되며 열변형온도가 높다.

충전재는 경화발열로 인한 경화수축(cure shrinkage) 및 열응력(thermal stresses)을 줄이게 되어 균열(crack)이 생기는 것을 억제할 수 있고, 열팽창 계수 등을 변화시킬 뿐 아니라<sup>11)</sup> 내트랙킹성을 향상시킬 수 있다. 충전재의 표면처리는 기계적 강도, 접착성, 내수성, 내후성을 개선할 수 있으며<sup>12)</sup>, 2~30[ $\mu$ m]의 입도분포를 가지고 있다.

수지와 충전재는 혼합하기 전에 80[℃]에서 건조하여 전처리하였으며, 경화제를 35~40[℃]에서 용해시켜 수지와 혼합 후 80[℃]의 진공건조기에서 미리 건조된 충전재를 진공교반기를 이용하여 혼합하였다. 이 혼합물에 촉진제를 첨가하고 진공하에서 다시 교반하여 기포를 완전히 제거하였다. 에폭시수지는 접

표 1. 에폭시수지의 배합조성과 기호.

Table 1. Symbols and compositions of epoxy resin(phr).

Raw materials	Symbols	ER-1	ER-2
Epoxy resin		100	100
Curing agent		90	90
Accelerator		3	3
SiO <sub>2</sub>		300	
Surface treated SiO <sub>2</sub>			300

착력이 강해 금형과의 탈형이 곤란하므로 내열성이 뛰어난 이형제(QZ-13)를 상, 하부 금형에 도포하여 140~160[℃] 정도로 예열시킨 다음 가압주형하였다. 경화는 160[℃]에서 15분간 1차 경화시켜 탈형한 후, 140[℃]에서 2시간 2차 경화하였다. 표 1에 시료의 배합조성과 기호를 나타내었다.

### 2.2. 트래킹 파괴 실험

교류 고전압 전원은  $\pm 2[\%]$ 이내에서 4.5[kV], 60~1000[Hz]까지 주파수를 변화시키면서 오손액 경사평면법<sup>13)</sup>으로 실험하였다. 그림 1(a), (b), (c)는 상, 하부전극 및 시료와 전극의 구성도를 나타내었다. 상부 및 하부전극을 시료에 부착하고, 상부전극과 시

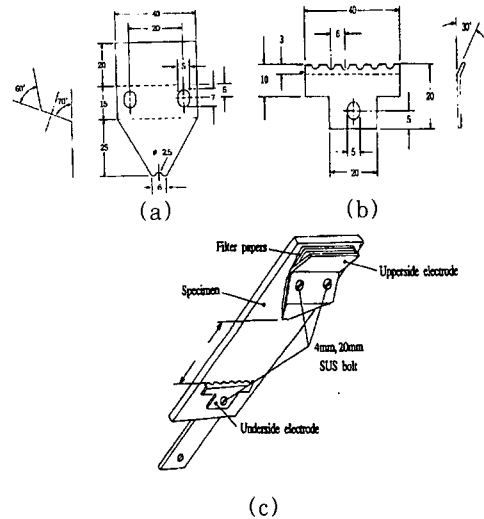
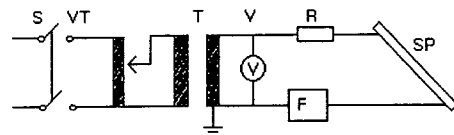


그림 1. 전극 및 시료와 전극의 구성도 (a)상부, (b)하부, (c)시료와 전극의 구성.

Fig. 1. Electrode, arrangement of electrodes and specimen (a)upperside, (b)underside, (c)arrangement of specimen and electrodes.



S = POWER SUPPLY SWITCH  
 VT = VARIABLE RATIO TRANSFORMER  
 T = HIGH-VOLTAGE TRANSFORMER  
 R = SERIES RESISTOR  
 V = VOLTMETER  
 SP = SPECIMEN  
 F = OVERCURRENT DEVICE, FUSE OF RELAY

그림 2. 실험회로의 개략도.

Fig. 2. Schematic diagram of experimental circuit.

료 사이에 오손액이 균일하게 흐르도록 8매의 여과지를 겹쳐 상부전극과 시료사이에 끼워 정량펌프로 오손액을 공급한다. 트래킹과피는 회로에 60[mA]이상의 전류가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간으로 평가하였고, 그림 2, 표 2는 트래킹 실험회로와 실험조건을 각각 나타내었다.

표 2. 트래킹과피 실험조건.

Table 2. Experimental conditions of tracking breakdown.

Items	Standards	Contents
Applied voltage		AC 4.5 [kV]
Specimen		50×120×6 [mm]
Setting angle of specimen		45 [°]
Distance between electrode		50±0.5 [mm]
Electrode material		0.1[mm] stainless steel (SUS 316)
Flow of contaminants		0.6 [ml/min]
Series resistivity		33 [kΩ]

표 3. 계면활성제의 종류와 구조.

Table 3. Chemical structure and kind of surfactant.

Surfactants (Polarity)	Trade mark	Chemical structure
Alkyl naphthalene sulfonate (Anionic)	EKARU BX	
Isooctylphenoxy polyethoxy ethanol (Nonionic)	TRITON X-100	

표 4. 오손액의 조성구와 기호와의 관계.

Table 4. Relation between composition of contaminants and types.

Symbols	Compositions of contaminant
A	0.1[%] NH <sub>4</sub> Cl
B	0.1[%] NH <sub>4</sub> Cl + 5.0[%] anionic
C	0.1[%] NH <sub>4</sub> Cl + 0.02[%] anionic
D	0.1[%] NH <sub>4</sub> Cl + 0.5[%] nonionic
E	0.1[%] NH <sub>4</sub> Cl + 0.02[%] nonionic
F	0.23[%] NH <sub>4</sub> Cl

오손액은 0.1[%] NH<sub>4</sub>Cl 수용액외에 표 3과 같은 음이온계 및 비이온계 계면활성제를 첨가하였다. 표 4에 NH<sub>4</sub>Cl과 비이온계 및 음이온계 첨가에 따른 오손액의 조성구와 기호를 나타내었다.

오손액의 표면장력은 face surface meter (CBVP-A3, KYOWA)로, 접촉각은 액적법(sessile drop)으로 접촉각계(contact angle meter, CA-A, KYOWA), 저항률은 도전율계(conductivity meter, CM-30V, TOA)로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 오손액의 표면장력

그림 3, 그림 4는 0.1[%] NH<sub>4</sub>Cl에 비이온계와 음이온계 계면활성제의 농도 변화에 따른 오손액의 표면장력과 저항률을 나타낸 것으로 계면활성제의 농도가 증가할 수록 오손액의 표면장력은 저하하며, 비이온계 및 음이온계의 경우 각각의 농도가 0.02[%], 0.3[%]에서 부터는 더 이상의 흡착(absorption)이 될 수 없으므로 포화됨을 볼 수 있다.

이와 같이 계면활성제의 첨가에 따라 표면장력(surface tension)이 저하되는 것은 긴 발수기(hydrophobic group)와 짧은 친수기(hydrophilic group)를 가지는 계면활성제가 물과 같은 수용성 매질에 존재시 물과 친화성이 없는 발수기가 물 표면으로 이동하여 배향(orientation)되므로 흡착이 일어나기 때문이다. 저항률은 비이온계의 경우에는 거의 일정하고 음이온계는 계면활성제의 농도 증가에 따라 저하하였다.

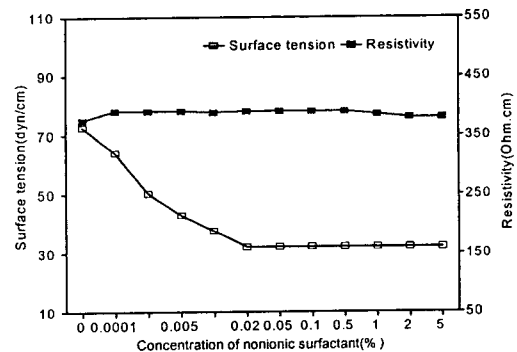


그림 3. 비이온계 계면활성제 첨가에 따른 오손액의 표면장력과 저항률의 영향.

Fig. 3. Effect of contaminants after adding to nonionic surfactant on the surface tension and resistivity.

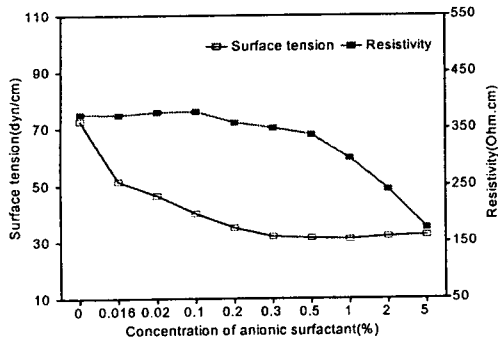


그림 4. 음이온계 계면활성제 첨가에 따른 오손액의 표면장력과 저항률의 영향.

Fig. 4. Effect of contaminants after adding to anionic surfactant on the surface tension and resistivity.

그림 5, 그림 6은 두 종류의 계면활성제를 각각 첨가한 오손액의 표면장력에 따른 시료와의 접촉각으로 오손액의 표면장력이 상승함에 따라 시료의 접촉각도 상승하여 서로 비례관계에 있음을 알 수 있다. 이 결과는 오손액의 표면장력의 변화하면 시료 표면의 젖음성도 변화함을 의미하는데 오손액의 표면장력이 작을 수록 시료와의 젖음성은 좋아진다.

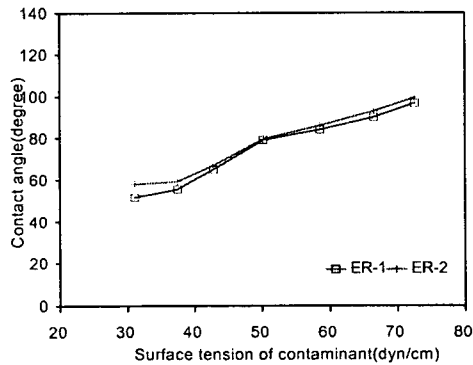


그림 5. 표면장력에 따른 접촉각의 변화 (비이온계 계면활성제).

Fig. 5. Dependence of contact angle on the surface tension of contaminants (nonionic surfactant).

### 3.2. 트래킹파괴와 오손액의 표면장력

표면장력이 31.2[dyn/cm], 50.4[dyn/cm], 72.6[dyn/cm]인 오손액에 대한 트래킹 파괴시간을

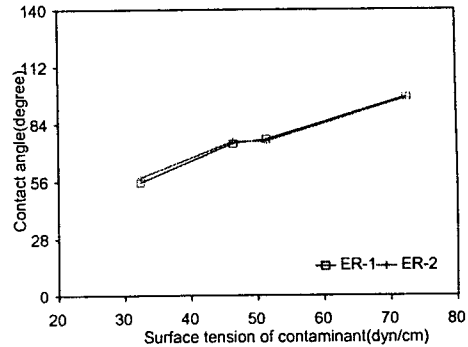


그림 6. 표면장력에 따른 접촉각의 변화 (음이온계 계면활성제).

Fig. 6. Dependence of contact angle on the surface tension of contaminants (anionic surfactant).

측정하여 습윤조건에서 젖음성의 정도가 트래킹 파괴에 미치는 영향을 그림 7에 나타내었다.

오손액의 표면장력이 낮을수록 트래킹 파괴시간이 짧은데, 이것은 오손액의 표면장력의 차이, 즉 시료와의 젖음성과 접촉각의 차이가 트래킹 파괴시간에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 표면장력이 72.6[dyn/cm]인 A 오손액은 시료와의 젖음성이 좋지 않기 때문에 오손액이 분산되어 흐르므로 오손액이 흐르는 장소의 전류밀도를 감소시켜 발열 효과는 감소한다. 그러므로 방전이 일정한 장소에 집중되지 않고 시료 표면 전체에 넓게 발생하므로 불안정해진다. 그 결과 건조대의 형성이 어려워져 트래킹파괴가 일어나기 어렵게 되어 트래킹 파괴시

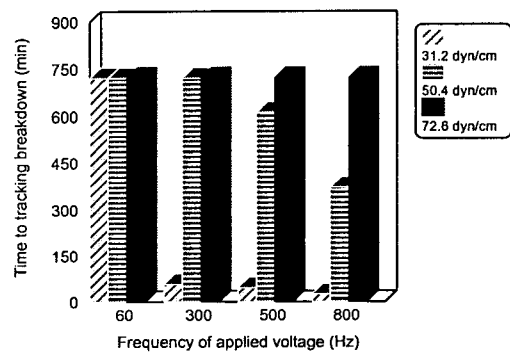


그림 7. 트래킹 파괴시간의 인가전압의 주파수와 표면장력 의존성.

Fig. 7. Frequency of applied voltage and surface tension dependence of time to tracking breakdown (ER-2).

간이 길어진다. 따라서 오손액의 표면장력은 방전의 발생개시 및 탄화점이 발생하기까지의 시간에 영향을 미치며, 내트래킹성의 평가에 변화를 가져오는 하나의 요인으로서 작용한다는 것을 알 수 있다.

오손액의 표면장력이 작으면 오손액 표면의 분자간 인력이 작아져 표면에 확산되기 쉬워 3~6[mm] 정도의 선상으로 흐르고 코로나방전도 상부전극에서 하부전극 방향으로 직선으로 고정된 위치에서 발생하였다. 그러나, 오손액의 표면장력이 큰 경우에는 불연속적으로 흐르게되어 방전이 시료 표면 전체에 넓게 분산되어 발생한다. 따라서 표면장력이 큰 경우에는 코로나방전의 발생이 억제되므로 시료 표면의 열화는 지연된다. 그리고 코로나방전과 표면방전이 복합적으로 일어날 때는 표면장력이 작은 경우 코로나방전과 표면방전이 하부전극 부근에서 집중적으로 발생하므로 하부전극에서 가까운 부근에 탄화물을 석출하고 탄화점을 형성하기 쉬운 반면에 표면장력이 크면 코로나방전과 표면방전이 시료 표면 전체에 발생하므로 탄화물이 고정되기 어렵다. 따라서 탄화물이 고정된 위치에 생성되기 어려우므로 탄화점을 형성하는 데는 매우 긴 시간이 필요하게 된다고 사료된다.

표 5는 NH<sub>4</sub>Cl과 음이온계 및 비이온계 계면활성제의 첨가량을 변화시킨 오손액의 저항률과 각각의 오손액에 대해서 ER-2의 접촉각을 나타낸 것으로 계면활성제를 첨가하지 않은 오손액이 시료와의 젖음성이 가장 나쁨을 알 수 있다.

표 5. 음이온계 및 비이온계가 첨가된 오손액의 저항률과 접촉각과의 관계.

Table 5. Relation between contact angle, resistivity and contaminants added to nonionic, anionic surfactant.

Contaminants	Resistivity (( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) at 23( $^{\circ}\text{C}$ ))	Contact angle (degree)
A	390 $\pm$ 10	99.3
B	170 $\pm$ 10	58.0
C	390 $\pm$ 10	75.5
D	390 $\pm$ 10	57.3
E	390 $\pm$ 10	57.9
F	170 $\pm$ 10	99.3

그림 8, 그림 9는 오손액의 종류에 따른 트래킹 파괴시간과 오손액의 저항률 및 접촉각의 관계를 각각 나타낸 것으로 계면활성제의 종류와 첨가량에 따

라 파괴시간은 서로 다르며, 비이온계 계면활성제를 첨가한 오손액보다 음이온계 계면활성제를 첨가한 오손액의 경우가 파괴시간이 짧다. 또한, 음이온계 계면활성제를 첨가한 C 오손액은 비이온계 계면활성제를 첨가한 E 오손액과 저항률이 같지만, 접촉각이 크기때문에 젖음성이 더 나쁨에도 불구하고 파괴시간이 짧는데 이것은 음이온계 계면활성제의 측쇄(side chain)의 분해(cleavage)에 의해서 생성된 이온종(이온화가 가능한 물질)이 내트래킹성의 저하에 기여하는 것으로 사료된다.

D, E 오손액의 저항률은 A 오손액과 같지만 파괴시간은 상당히 짧은 것으로 보아 오손액의 저항률이

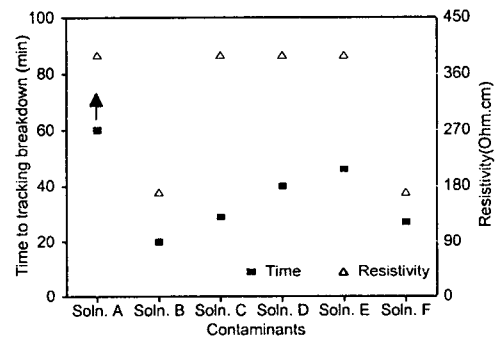


그림 8. 오손액에 따른 트래킹 파괴시간과 저항률과의 관계(4.5[kV], 500[Hz]).

Fig. 8. Relation between time to tracking breakdown and resistivity according to contaminants at 4.5[kV], 500[Hz] for ER-2.

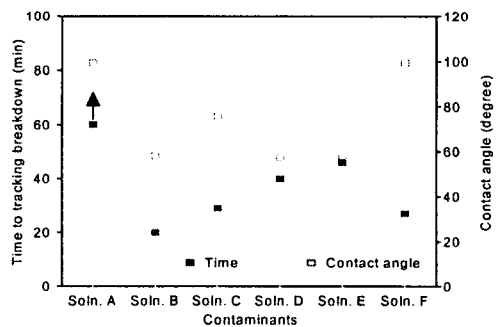


그림 9. 오손액에 따른 트래킹 파괴시간과 접촉각과의 관계 (4.5[kV], 500[Hz]).

Fig. 9. Relation between contact angle and time to tracking breakdown according to contaminants at 4.5[kV], 500[Hz] for ER-2.

같아도 오손액의 성질에 따라 파괴시간은 서로 다를 수 있다<sup>14)</sup>. 따라서 트래킹 파괴시간은 오손액의 저항률보다 시료 표면의 젖음성이 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, 내트래킹성에 미치는 계면활성제의 영향은 저항률에 의한 전해 특성보다 오손액의 표면장력과 시료의 표면 특성에 보다 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

A, D 오손액에 대한 ER-2의 접촉각은 각각 99.3 [°], 57.3[°]로 표면장력이 큰 A 오손액이 시료와의 젖음성이 나쁘기 때문에 파괴시간이 길다. 이와 같이 오손액에 의한 시료의 젖음성은 방전의 발생개시 및 건조대의 형성에서 탄화로의 진전시간에 영향을 미치고, 방전의 상태도 상당히 다르기 때문에 트래킹 파괴시간이 다르다고 사료된다. B 오손액과 저항률이 같은 F 오손액에서도 비이온계와 같은 특성을 얻을 수 있었다.

**3.3. 트래킹파괴의 오손액 유량과 인가전압**

인가전압(3.5[kV], 4.5[kV], 5.5[kV])의 상승에 따라 오손액의 유량을 0.3[ml/min], 0.6[ml/min] 및 0.9[ml/min]로 증가시키나, 인가전압 4.5[kV]에서 오손액의 유량을 변화시킨 경우 인가전압의 주파수에 따른 파괴시간을 그림 10에 나타내었다.

유량이 0.6[ml/min]인 경우가 0.3[ml/min]보다 주파수 상승에 따라서 파괴시간이 짧아지며, 0.9[ml/min]는 0.6[ml/min]의 경우와 비슷한 경향을 가지고 있다. 이와 같이 시료 표면의 탄화상태는 탄화점의 발생에서 탄화로의 진전에 따라 트래킹파괴가 오손액의 유량에 의한 누설전류 크기와 인가전압의 주파수 상승에 따른 방전의 반복횟수에 의존하므로 오손액의 유량이 증가함에 따라 누설전류는 그림 11과 같이 증가하게 된다. 즉, 전압인가 15~20분의 전류는 유량 0.3[ml/min]에서 인가전압의 주파수에 따라 5~7[mA]정도이지만, 유량 0.6[ml/min]에서는 12~18[mA] 정도로 2배이상 누설전류가 크므로 시료의 표면에 큰 에너지를 주게된다. 따라서 0.6[ml/min]의 경우가 0.3[ml/min]에 비해 누설전류의 증가에 의한 건조대의 형성이 쉽다. 이와 같이 오손액의 유량이 크면 시료의 표면저항이 감소하여 누설전류가 증가하게 되므로 건조대의 형성과 방전의 발생이 활발하게 되어 탄화점이 쉽게 발생하여 결국에는 트래킹파괴를 빠르게한다. 또한 인가전압의 주파수 상승에 따라서도 시료 표면에 흐르는 누설전류의 반복횟수는 증가하므로 누설전류의 줄열에 의해 건조대의 형성이 쉬우며 방전이 활발하게 발생하여 방전에너지는 증가하므로 시료 표면에 탄화점이 빠른 시간 이내에 고정된다. 일단 탄화점이 형성되면 탄화로는 빠

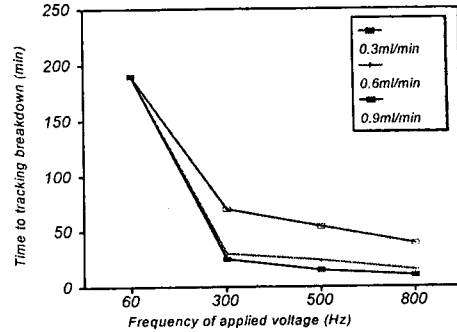


그림 10. 오손액의 유량에 따른 인가전압의 주파수와 트래킹 파괴시간.

Fig. 10. Time to tracking breakdown of flow rate of contaminant on ER-1 vs frequency of applied voltage (4.5[kV]).

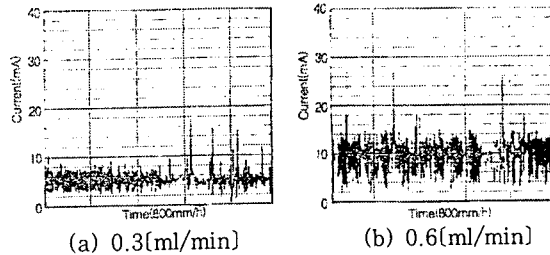


그림 11. 0.3[ml/min], 0.6[ml/min]인 오손액의 유량에 따른 전류 (4.5[kV],300[Hz]).

Fig. 11. Current according to flow rate of contaminant of 0.3[ml/min] and 0.6[ml/min] at 4.5[kV].

른 속도로 진전하며, 탄화로의 방향도 인가전압의 주파수 상승에 따라 상부전극으로 진전한다.

인가전압 4.5[kV]에서는 누설전류가 크므로 유량이 작은 경우 오손액은 대부분 증발하여 안정적인 방전을 발생시킬 수 없기 때문에 파괴시간이 길다고 생각되지만, 유량이 큰 경우에는 건조대의 형성과 탄화로의 진전이 쉽기 때문에 파괴시간은 짧아진다. 그러나, 유량이 크면 오손액의 증발도 크므로 누설전류에 의한 주열열이 소모된다고 생각할 수 있다. 그리고 각각의 유량에서 인가전압의 주파수가 상승함에 따라 파괴시간이 짧아지지만, 유량간의 차이도 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 탄화개시가 시작되어 트래킹파괴가 발생하기까지의 시간은 유량보다는 인가전압의 주파수, 즉 누설전류의 반복 횟수가 더욱 더 큰 영향을 주기 때문이라고 생각된다. 이와 같은 결과에서 파괴시간은 인가전압의 크기 뿐만 아

나라 유량에 의해서도 차이가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제의 종류와 농도를 변화시켜 오손액의 표면장력, 젖음성, 유량 그리고 인가 전압의 주파수 변화가 트래킹 파괴에 미치는 영향에 대해 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 음이온계 계면활성제는 표면장력과 저항률을 저하시키지만, 비이온계 계면활성제는 표면장력은 저하시키나 저항률은 변화시키지 않았다. 그리고, 계면활성제의 농도가 증가할 수록 오손액의 표면장력이 저하함에 따라 접촉각도 저하하여 표면장력과 접촉각은 비례함을 알 수 있으며, 오손액의 표면장력에 따라 시료 표면의 젖음성의 상태가 변화하는 것을 알 수 있다.

[2] 오손액의 유량이 증가함에 따라 시료의 표면저항이 감소하여 누설전류가 증가하게 되어 트래킹 파괴 시간이 짧아졌다. 이는 건조대의 형성과 탄화점이 쉽게 발생하기 때문이다.

[3] 오손액의 표면장력에 따라 트래킹 파괴시간은 다르게 나타났다. 이것은 표면방전의 발생개시와 탄화점의 발생 및 탄화로의 진전시간이 다르며, 표면장력이 클수록 탄화점 및 탄화로의 진전이 느리기 때문이다. 따라서 표면장력, 즉 젖음성의 차이가 트래킹 파괴시간에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

[4] 인가전압의 주파수가 상승함에 따라 시료 표면에 흐르는 누설전류의 횡수가 증가하기 때문에 건조대의 형성 확률이 증가하여 방전이 활발하게 되므로 탄화로의 빠른 진전에 의해 트래킹 파괴시간이 짧아졌다.

#### 참 고 문 헌

1. T. Motoyama, "Hydrophobicity of Shedded Cover and Flashover Voltage of Composite Insulator", T. IEE. Japan, 395, pp. 580-581, 1994.
2. E. M. Sherif, A. E. Vlastos, "Influence of Aging on the Electrical Properties of Composite Insulators", 5th ISH, 51.01, pp. 1-5, 1987.
3. H. M. Schneider, "Nonceramic Insulator for Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2215-2221, 1989.
4. Y. Watanabe, T. Takahashi, T. Higashihara, "Development of Outdoor Epoxy Resin Molded Apparatus for Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 204-211, 1990.
5. G. B. Rackliffe, R. E. Lee, D. E. Fritz, "Performance Evaluation of 15kV Polymeric Insulators for Dead-End Type Applications on Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1223-1231, 1989.
6. C. D. Tourreil, P. Bourdon, "Aging of Composite Insulators Caused by Service and Simulated Service Conditions", CIGRE 15-01, pp. 1-11, 1986.
7. D. Baumann, K. Munk, H. Rembold, "New laboratory Results about the Erosion Resistance of Epoxy Casting Systems and their Significance for the Outdoor Weathering Resistance", IEEE Inter. Symp. on High Voltage Engineering, Vol. 23, No. 19, pp. 1-5, 1979.
8. H. C. Karner, "Evaluation of Polymeric Insulating Materials for HV Outdoor Application", 6th ISH, 30.02, pp. 1-4, 1989.
9. T. Tanaka, K. Naito, "A Basic Study on Outdoor Insulator of Organic Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13, No. 3, pp. 184-193, 1978.
10. N. Yoshimura, M. Nishida, F. Noto, "Influence of the Electrolyte on Tracking Breakdown of Organic Insulating Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-16 No. 6, pp. 510-520, 1981.
11. J. W. Weton, D. M. Peters, "Engineers' Guide to Composite Materials", American Society for metals, pp. 6-47, 1987.
12. 角田, 小石, "複合材料と界面", pp. 137-145, 綜合技術出版, 1986.
13. IEC Publ. 587, "Test Method for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials Used Under Severe Ambient Conditions", 2nd Edition, 1984.
14. M. Ieda, M. Kahle, I. H. Mason, T. Orbeck, "

Testing of High Voltage Insulation for Outdoor Application Review, 'Analysis and

Development", CIGRE, Paper 15-11, pp. 1-10, 1986.

**저자소개**



**조한구**

1959년 4월 14일생. 1984년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 전기기기 기술사, 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 한국전기연구소 전기재료연구부 애자·피뢰기기술연구팀장



**박용관**

1935년 9월 16일생. 1958년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 성균관대 공대 전기공학과 교수