

트래킹 열화에 미치는 오손액과 표면거칠기의 영향

°조한구·김인성·강동필·안명상·박용관”
한국전기연구소 전기재료연구부, °성균관대학교 전기공학부

The Effect of Contaminants and Surface Roughness on Tracking Aging

°H.G. Cho·I.S. Kim·M.S. Ahn·T.P. Kang·Y.K. Park
Div. of Electrical Materials, KERI·°Dept. of Electrical Eng., Sung Kyun Kawn Univ.

Abstract

We have studied the effect of surface tension and flow rate of contaminants, wettability, frequency of applied voltage dependence of tracking breakdown.

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.

1. 서 론

최근 산업의 발달로 인한 전력수요 증가로 전력계통의 초고압화가 진행되고 있으며 절연물의 경량화, 소형화가 요구되므로 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⁽¹⁾.

그러나, 고분자 재료의 대부분은 표면에 표면방전이 발생하면 국부적인 탄화열화(트래킹 열화)가 일어나고 이것이 진전하여 최종적으로 트래킹파괴에 이른다. 즉, 옥외의 가혹한 자연환경에 노출되면 태양광, 공기분진 등의 오손물질과 수분이 복합적으로 작용하여 경년열화를 피할 수 없다. 특히 자외선에 의해 표면이 열화되어⁽²⁾ 오손물질과 수분이 부착하면 젖음성이 좋아져 절연성은 급격하게 저하된다⁽³⁾. 이러한 현상은 주로 표면에 나타나므로 고분자 절연재료를 옥외용 절연물로 사용할 경우 오손과 더불어 큰 문제점으로 대두되고 있다.

이와 같이 표면의 열화와 오손은 트래킹파괴를 일으키는 기본요인으로 습윤조건과 재료의 젖음성(wettability)에 따라 그 상태가 다르다. 습윤조건을 고려하는 경우 재료의 젖음성, 즉 접촉각(contact angle)이 중요해지는데⁽⁴⁾ 젖음성은 재료 표면의 발수성(hydrophobicity)과 액체의 상호작용의 결과이므로 재료의 종류와 그 표면 상태만으로는 결정할 수 없다.

본 연구에서는 오손액의 표면장력과 재료와의 상관관계에 대한 영향을 평가하기 위하여 음이온계 및 비이온계 계면활성제(surfactant)의 농도를 변화시켜 오손액의 표면장력, 젖음성, 유량이 재료의 내트래킹성에 미치는 요인들에 대한 특성을 검토하였다. 그리고, 표면장력에 따른 방전의 발생과 재료의 접촉각이 트래킹파괴에 미치는 영향을 경사평면실험으로 확인하였다.

2. 실 험

2.1. 시료 제조

본 연구의 에폭시수지는 F종 절연, 내마모성, 내트래킹성이 우수하고, 경화물도 열적, 화학적으로 안정할 뿐 아니라 전기적, 기계적 특성이 우수하므로 옥외의 절연재료로 사용할 수 있다.

수지와 충전제는 혼합하기 전에 80(°C)에서 건조하여 전처리하였으며, 경화제를 35~40(°C)에서 용해시켜 수지와 혼합 후 80(°C)의 진공건조기에서 미리 건조된 충전제를 진공교반기를 이용하여 혼합하였다. 이 혼합물에 촉진제를 첨가하고 진공하에서 다시 교반하여 기포를 완전히 제거하였다. 경화는 160(°C)에서 15분간 1차 경화시켜 탈형한 후, 140(°C)에서 2시간 2차 경화하였다. 시료의 배합조성은 에폭시수지 100에 대해서 경화제, 촉진제, SiO₂(무처리, 처리)를 각각 90, 3, 300(wt%) 첨가하여 무처리(ER-1), 처리(ER-2)로 나타내었다.

2.2. 트래킹 파괴 실험

상, 하부전극 및 시료와 전극의 구성은 상부 및 하부전극을 시료에 부착하고, 상부전극과 시료 사이에 오손액이 균일하게 흐르도록 8매의 여과지(filter paper)를 겹쳐 상부전극과 시료사이에 끼워 정량펌프(peristaltic pump)로 오손액을 공급한다. 트래킹파괴는 회로에 60(mA)이상의 전류가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간으로 평가하였고, 표 1은 실험조건을 나타내었다.

Table 1. 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 SUS 316
Flow of contaminants		0.6 ml/min
Series resistivity		33 kΩ

표 2에 NH₄Cl과 비이온계 및 음이온계 첨가에 따른 오손액의 조성을 나타낸 것으로 오손액은 0.1[%] NH₄Cl 수용액외에 음이온계 및 비이온계 계면활성제인 alkyl naphthalene sulfonate, Isooctylphenoxy polyethoxy ethanol을 각각 첨가하였다. 표면장력은 face surface meter로, 접촉각은 액적법 (sessile drop)^{5, 6)}에 의해 contact angle meter, 저항률은 conductivity meter로 측정하였다.

Table 2. Relation between composition of contaminants and types.

Symbols	Compositions of contaminant
A	0.1% NH ₄ Cl
B	0.1% NH ₄ Cl + 5.0% anionic surfactant
C	0.1% NH ₄ Cl + 0.02% anionic surfactant
D	0.1% NH ₄ Cl + 0.5% nonionic surfactant
E	0.1% NH ₄ Cl + 0.02% nonionic surfactant

3. 결과 및 고찰

3.1. 오손액의 표면장력

그림 1, 그림 2는 0.1[%] NH₄Cl에 비이온계와 음이온계 계면활성제의 농도 변화에 따른 오손액의 표면장력과 저항률을 나타낸 것으로 계면활성제의 농도가 증가할 수록 오손액의 표면장력은 저하하며, 비이온계 및 음이온계의 경우 각각 0.02[%], 0.3[%] 농도에서 부터는 포화되었다. 이와 같이 계면활성제의 첨가에 따라 표면장력이 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 흡착(absorption)이 일어나기 때문이다. 저항률은 비이온계의 경우에는 거의 일정하고 음이온계는 계면활성제의 농도 증가에 따라 저하하였다.

그림 3은 비이온계 계면활성제를 첨가한 오손액의 표면장력(surface tension)에 따른 시료와의 접촉각으로 오손액의 표면장력이 상승함에 따라 시료의 접촉각도 상승하여 비례관계에 있음을 알 수 있다. 이것은 오손액의 표면장력의 변화하면 시료 표면의 젖음성(wettability)도 변화함을 의미하는데 오손액의 표면장력이 작을수록 시료와의 젖음성은 좋아지며, 음이온계에서도 같은 결과를 나타내었다.

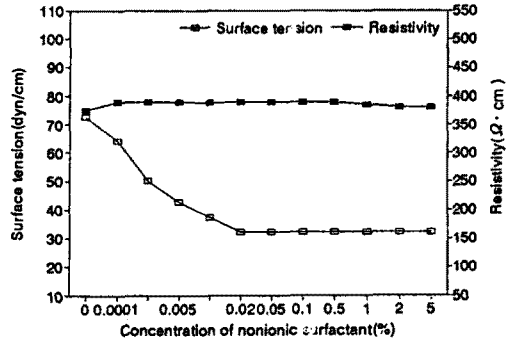


Fig. 1. Effect of contaminants after adding to nonionic surfactant on the surface tension and resistivity.

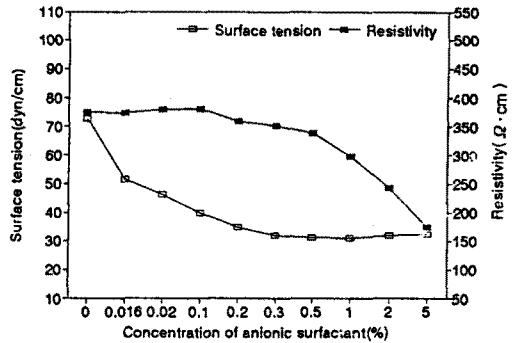


Fig. 2. Effect of contaminants after adding to anionic surfactant on the surface tension and resistivity.

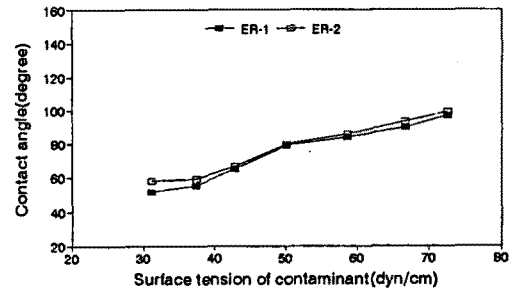


Fig. 3. Dependence of contact angle on the surface tension of contaminants (nonionic surfactant).

3.2. 트래킹 파괴와 오손액의 표면장력

표면장력이 31.2(dyn/cm), 50.4(dyn/cm), 72.6(dyn/cm)인 오손액에 대한 트래킹 파괴시간을 측정하여 습윤조건에서 젖음성의 정도가 트래킹 파괴에 미치는 영향을 확인하였다.

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 큰 72.6(dyn/cm)인 A 오손액은 시료와의 젖음성이 좋지 않기에 오손액이 분산되어 흐르므로 오손액이 흐르는 장소의 전류밀도를 감소시켜 발열효과는 감소한다. 그러므로 방전이 일정한 장소에 집중되지 않고 시료 표면 전체에 넓게 발생하므로 불안정해진다. 그 결과 건조대의 형성이 어려워져 트래킹 파괴가 일어나

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

표 3은 NH_4Cl 과 음이온계 및 비이온계 계면활성제의 첨가량을 변화시킨 오손액의 저항률과 각각의 오손액에 대해서 ER-2의 접촉각을 나타낸 것으로 계면활성제를 첨가하지 않은 A 오손액이 시료와의 젖음성이 가장 나쁨을 알 수 있다.

Table 3. Relation between contact angle, resistivity and contaminants added to nonionic, anionic surfactant.

Contaminants	Concentration (%)		Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$ at 23°C)	Contact angle (degree)
	NH_4Cl	Surfactants		
A	0.1	0	390 ± 10	99.3
B	0.1	5.0	170 ± 10	58.0
C	0.1	0.02	390 ± 10	75.5
D	0.1	0.5	390 ± 10	57.3
E	0.1	0.02	390 ± 10	57.9
F	0.23	0	170 ± 10	99.3

그림 4, 그림 5에 트래킹 파괴시간에 미치는 오손액의 저항률과 접촉각의 영향으로 계면활성제의 종류와 첨가량에 따라 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, 젖음성이 더 나쁨에도 불구하고 트래킹 파괴시간이 짧다.

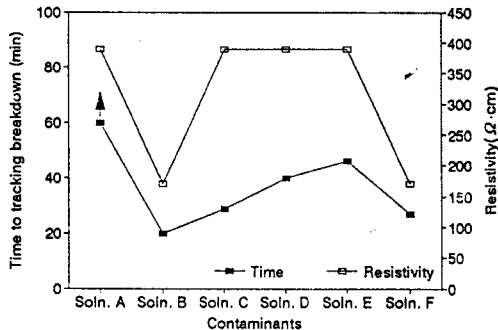


Fig. 4. Relation between resistivity, time to tracking breakdown and contaminants at 4.5kV, 500Hz for ER-2.

D, E 오손액의 저항률은 A 오손액과 같지만 파괴시간은 상당히 짧은 것으로 보아 오손액의 저항률이 같아도 오손액의 성질에 따라 파괴시간은 서로 다르다. 따라서 트래킹 파괴시간은 오손액의 저항률보다 시료 표면의 젖음성이 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, 내트래킹성에 미치는 계면활성제의 영향은 저항률에 의한 전해특성보다 오손액의 표면장력과 시료의 표면특성에 보다 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

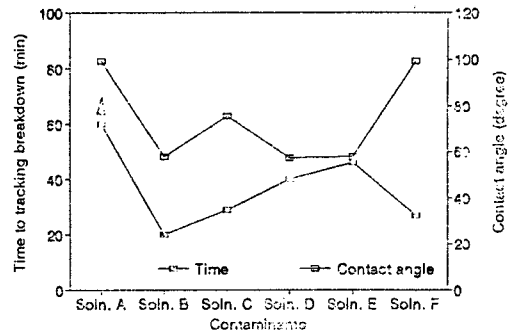


Fig. 5. Relation between contact angle, time to tracking breakdown and contaminants at 4.5kV, 500Hz for ER-2.

4. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 계면활성제의 농도가 증가할수록 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 파괴시간이 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.

참고 문헌

- (1) Y. Watanabe, "Development of Outdoor Epoxy Resin Mold Apparatus for Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 204-211, 1990.
- (2) H. C. Karner, "Evaluation of Polymeric Insulating Materials for HV Outdoor Application", 6th ISH, 30.02, pp. 1-4, 1989.
- (3) T. Tanaka, "A Basic Study on Outdoor Insulator of Organic Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13, No. 3, pp. 184-193, 1978.
- (4) N. Yoshimura, "Influence of the Electrolyte on Tracking Breakdown of Organic Insulating Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-16, No. 6, pp. 510-520, 1981.
- (5) F. Carbassi, "Polymer Surface", pp. 161-182.
- (6) 趙學彰, "콜로이드와 界面活性劑", pp. 28-75, 大光齋 1995.