

오손액의 표면장력이 폴리머 복합재의 트래킹 열화에 미치는 영향

The Effect of the Surface Tension of Contaminants on Tracking Ageing of Polymeric Composites

조한구, 천종욱, 이운용, 한동희
(Cho, Han Goo, Chun Jong Uk, Lee Un Yong, Han Dong Hee)

Abstract

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 : Surface tension, Tracking resistance, Wettability, Surfactant, Flow rate, Surface roughness, Contact angle, Polymeric insulating material

1. 서 론¹⁾

고분자 재료를 이용한 절연물은 자기에 비하여 표면의 발수성(hydrophobicity)이 우수하기 때문에 오손 및 습윤시에도 누설전류가 작고, 오손내전압도 크다. 이와 같이 표면 특성인 발수성이 오손 조건하에서 장기간 유지, 회복될 뿐 아니라 내트래킹성이 우수하므로 절연물의 누설거리(leakage distance)가 단축되어 소형화가 가능하다[1, 2].

그러나, 고분자 재료의 대부분은 표면에 표면방전이 발생하면 국부적인 탄화열화(트래킹 열화)가 일어나고 이것이 진전하여 최종적으로 트래킹 파괴에 이른다. 즉, 옥외의 가혹한 자연환경에 노출되면 태양광, 공업분진 등의 오손물질과 수분이 복합적으로 작용하여 경년 열화를 피할 수 없다. 특히, 자외선에 의해 표면이 열화되어[3] 오손물질과 수분이 부착하면 젖음성이 좋아져 절연성은 급격

하게 저하된다[4].

이와 같이 표면의 열화와 오손은 트래킹 파괴를 일으키는 기본요인으로 습윤조건과 재료의 젖음성(wettability)에 따라 그 상태가 다르다. 습윤조건을 고려하는 경우 재료의 젖음성, 즉 접촉각이 중요한데, 젖음성은 재료 표면의 발수성과 액체의 상호작용이므로 재료의 종류와 그 표면 상태만으로는 결정할 수 없다[5].

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

2. 실험

2.1 실험조건

트래킹 파괴는 회로에 60[mA]이상의 전류가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간으로 평가하였고,

한국전기연구원 전략기술연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
Fax: 055-280-1673
E-mail : hgcho@keri.re.kr

표 1은 실험조건을 나타내었다. 오손액은 0.1[%] NH₄Cl 수용액에 표 2와 같은 음이온계 및 비이온계 계면활성제를 첨가하였다. 표 3에 NH₄Cl과 비이온계 및 음이온계 첨가에 따른 오손액의 조성과 기호를 나타내었다.

표 1. 트래킹 실험조건.

Table 1. Experimental conditions of tracking.

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

표 2. 계면활성제의 종류와 구조

Table 2. 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 3. 오손액의 조성과 기호와의 관계.

Table 3. 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
C	0.1[%] NH ₄ Cl + 0.02[%] anionic
D	0.1[%] NH ₄ Cl + 0.5[%] nonionic
E	0.1[%] NH ₄ Cl + 0.02[%] nonionic

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

3. 결과 및 고찰

3.1. 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 그림 1에 나타내었다.

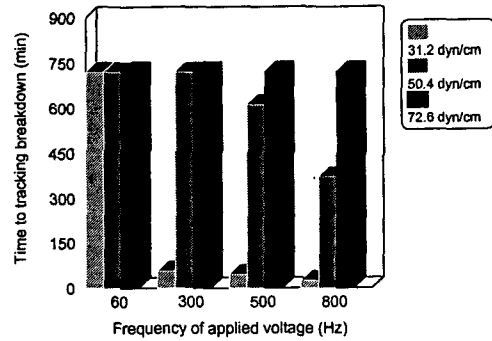


그림 1. 트래킹 파괴시간의 인가전압의 주파수와 표면장력 의존성.

Fig. 1. Frequency of applied voltage and surface tension dependence of time to tracking breakdown (ER-2).

오손액의 표면장력이 낮을수록 트래킹 파괴시간이 짧아, 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 발열효과는 감소한다. 그러므로 방전이 일정한 장소에 집중되지 않고 시료 표면 전체에 넓게 발생하므로 불안정해진다. 그 결과 건조대의 형성이 어려워져 트래킹 파괴가 일어나기 어렵게 되어 트래킹 파괴시간이 길어진다. 따라서 오손액의 표면장력은 방전의 발생개시 및 탄화점이 발생하기까지의 시간에 영향을 미치며, 내트래킹성의 평가에

변화를 가져오는 요인으로서 작용한다는 것을 알 수 있다.

오손액의 표면장력이 작으면 오손액 표면의 분자간 인력이 작아져 표면에 확산되기 쉬워 3~6[mm]정도의 선상으로 흐르고 코로나방전도 상부 전극에서 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[6].

표 4. 음이온계 및 비이온계가 첨가된 오손액의 저항률과 접촉각과의 관계.

Table 4. Relation between contact angle, resistivity and contaminants added to nonionic, anionic surfactant.

Contaminants	Concentration[%]		Resistivity ([$\Omega \cdot \text{cm}$] at 23[$^{\circ}\text{C}$])	Contact angle [degree]
	NH_4Cl	Surfactants		
A	0.1		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		170 ± 10	99.3

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 4는 NH_4Cl 과 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.

3.2. 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 2에 나타내었다.

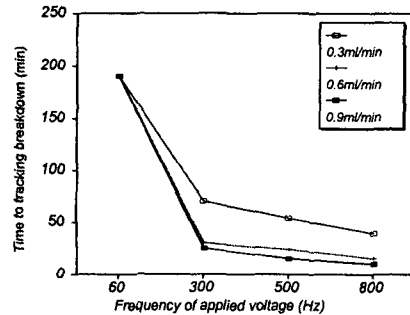


그림 2. 오손액의 유량에 따른 인가전압의 주파수와 트래킹 파괴시간 (4.5[kV]).

Fig. 2. Time to tracking breakdown of flow rate of contaminant on ER-1 vs frequency of applied voltage (4.5[kV]).

유량이 0.6[ml/min]인 경우가 0.3[ml/min]보다 주파수 상승에 따라서 파괴시간이 짧아지며, 0.9[ml/min]은 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 3과 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 주게 된다. 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 빠르게 한다.

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 빠른 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 주열이 소모된다고 생각할 수 있다. 그리고 각각의 유량에서 인가전압의 주파수가 상승함에 따라 파괴시간이 짧아지지만, 유량간의 차이도 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 탄화개시가 시작되어 영향을 주기 때문이라고 생각된다. 이와 같은 결과에서 파괴시간은 인가전압의 크기 뿐만 아니라 유량에 의해서도 차이가 있음을 알 수 있다.

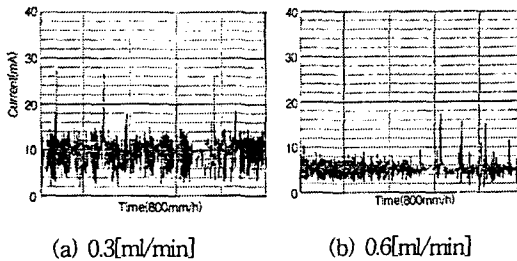


그림 3. 0.3[ml/min](a), 0.6[ml/min](b)에서의 전류 (4.5[kV], 300[Hz]).
Fig. 3. Current plot of 0.3[ml/min] and 0.6[ml/min] at 4.5[kV], 300[Hz].

4. 결론

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

- 1] 오손액의 유량이 증가함에 따라 시료의 표면저항이 감소하여 누설전류가 증가하게 되어 트래킹 파괴시간이 짧아졌다. 이는 건조대의 형성과 탄화점이 쉽게 발생하기 때문이다.
- 2] 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 파괴시간에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.
- 3] 인가전압의 주파수가 상승함에 따라 시료 표면에 흐르는 누설전류의 횟수가 증가하기 때문에 건조대의 형성 확률이 증가하여 방전이 활발하게 되므로 탄화로의 빠른 진전에 의해 트래킹 파괴시간이 짧아졌다.

참고 문헌

- [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. C. Kerner, "Evaluation of Polymeric Insulating Materials for HV Outdoor Application", 6th ISH, 30.02, pp. 1-4, 1989.
- [4] 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.
- [5] N. Yoshimura, M. Nishida, "Influence of the Electrolyte on Tracking Breakdown of Organic Insulating Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-16, No. 6, pp. 510-520, 1981.
- [6] J. W. Weton, "Engineers' Guide to Composite Materials", American Society for metals, pp. 6-47, 1987.