

계면활성제가 첨가된 염수용액에 따른 폴리머 애자의 트래킹 성능 평가

Tracking Performance Test of Polymer Insulator with Salt Solution which is added Surface Active Agent

조한구^{1,a}, 이운용¹, 한동희¹, 강성화², 최인혁³, 임기조⁴
(Han-Goo Cho^{1,a}, Un-Yong Lee¹, Dong-Hee Han¹, Sung-Hwa Kang², In-Hyuk Choi³, and Kee-Joe Lim⁴)

Abstract

Recently, polymer insulators that are used for high voltage applications have some advantages such as light weight, small size, vandalism resistance, hydrophobicity and easy making process. During outdoor service of polymer insulators, the surface of the insulating material is frequently subjected to moisture and contamination that lead to dry band arcing. Their tracking resistance, erosion resistance, end sealing and shed design are very important because dry band arcing causes degradation of polymer surface. Aging test to estimate life property of polymer insulator is executed through several international standard such as IEC 61109 and CEA tracking wheel test, but is not getting clear conclusion yet. There are two methods in the diagnosis method of polymer insulator such as off-line and on-line. The diagnosis methods in off-line are external condition analysis by the eye, contaminant analysis on surface, surface analysis, pollution withstand voltage test, power frequency flashover voltage test, lightning impulse flashover test, tensile fracture load test and flexural load test. Polymer material is also investigated it's tracking resistance by adding surface active agent in IEC 587.

In this paper, the tracking performance of polymer insulator with salt solution which is added surface active agent. The diagnosis of insulator sample has been analyzed by leakage current and visual examination, STRI guide and thermal image camera.

Key Words : Tracking wheel test, Polymer insulator, Leakage current, Hydrophobicity, Surface tension, Surfactant, Leakage current

1. 서론

최근 고전압 절연기기에 대한 폴리머 재료의 적

용은 계속적으로 증가하고 있으며, 특히 기존의 자기계 절연물로 구성된 피뢰기 하우스, 애자류, 부싱류 등이 실리콘 고무, EPDM, 에폭시 수지와 같은 폴리머 절연물로 대체되고 있다.

그러나, 폴리머 재료의 대부분은 표면에 표면방전이 발생하면 국부적인 탄화 열화(트래킹 열화)가 일어나고 이것이 진전하여 최종적으로 트래킹 파괴에 이른다. 즉, 옥외의 가혹한 자연환경에 노출되면 태양광, 공업분진 등의 오손물질과 수분이 복합적으로 작용하여 경년열화를 피할 수 없다. 특히 자외선에 의해 표면이 열화되어 오손물질과 수분이 부착하면 젖음성이 좋아져 절연성은 급격하게

1. 한국전기연구원 신소재응용연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 충청대학교 산업안전과
3. 전력연구원 전력계통연구실
4. 충북대학교 전기전자공학부
a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr
접수일자 : 2004. 9. 9
1차 심사 : 2004. 11. 9
2차 심사 : 2004. 11. 15
심사완료 : 2004. 12. 13

저하된다[1,2].

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 중요해 지는데[3,4] 젖음성은 재료 표면의 발수성과 액체의 상호작용이므로 재료의 종류와 그 표면 상태만으로는 결정할 수 없다. 또한 폴리머 재료의 내트래킹 성능을 평가하는 IEC 587에서는 계면활성제를 첨가하여 표면방진을 유도시켜 트래킹을 검토한다. 계면활성제를 첨가하게 되면 오손액의 표면장력이 저하되어 재료의 표면에 오손액이 퍼지게 된다.

본 논문에서는 오손액의 표면장력과 재료와의 상관 관계를 평가하기 위하여 CEA LWIWG에서 권장하는 트래킹 휠 시험법에 사용된 오손액에 비이온계 계면활성제를 첨가하였을 때 이것이 내트래킹성에 미치는 영향을 특성을 검토하였다. 이에 대한 특성을 평가하기 위해 표면누설전류 측정 및 열화상 카메라에 의한 온도분포를 측정하였다. 또한 표면의 발수성 변화를 평가하기 위해 접촉각을 측정하였다.

2. 실험

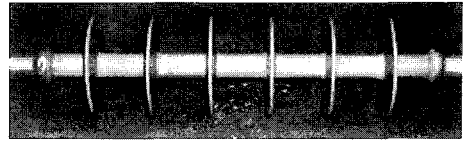
2.1 시험시료

폴리머 애자의 하우징 재료의 열화에 따른 특성을 검토하기 위하여 표 1과 같은 시험 시료를 준비하였다. 시료들의 누설거리는 동일한 누설거리를 갖도록 각각 650 mm로 하였으며, 실리콘 고무 및 EPDM 등의 2가지 하우징 재료들로 구성하였다. 그림 1은 시료 1, 2의 외관사진을 나타낸다.

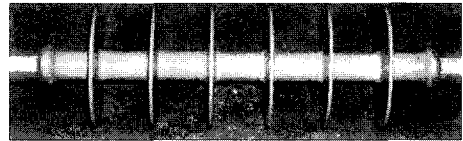
표 1. 시험 시료의 특성.

Table 1. Properties of experimental samples.

	하우징 재료	누설거리	갓의 형태
시료 1	실리콘 고무	650 mm	Regular
시료 2	EPDM	650 mm	Regular



(a) 시료 1



(b) 시료 2

그림 1. 시험 시료.

Fig. 1. Experimental samples.

2.2 트래킹 휠 시험

트래킹 휠 시험장치의 구성은 그림 2와 같이 4개의 각 위치에서 정지된 상태로 40초간 머물게 한 위치에서 다음 위치로 이동하는 시간은 8초이다[5].

시료가 회전하여 처음 인가되는 위치까지 오는 데는 3분 12초가 걸리며 이를 1사이클이라 하며 총 시험시간은 30000 사이클이다. 시험 시의 인가 전계는 35 V/mm, 염수농도는 1.4 g/l이며, 시험 최종 규격에서 시험 시에 4일 시험 후 1일(24시간) 휴지시간을 갖도록 규정하고 있다.

CEA 트래킹 휠 시험에서는 계면활성제를 넣지 않고 NaCl을 첨가하여 오손액으로 사용하고 있다. 본 실험에서는 IEC 60587 내트래킹성 시험에서 첨가되는 비이온 계면활성제(Triton X-100)를 염수에 0.02 % 첨가시킨 것과 시키지 않은 것에 대해서 트래킹 휠 시험 특성을 비교 분석하였다[6].

계면활성제의 농도가 증가할수록 염수의 표면장력(surface tension)은 저하한다. 계면활성제의 첨가에 따라 표면장력이 저하되는 것은 긴 발수기와 짧은 친수기를 가지는 계면활성제가 물과 같은 수용성 매질에 존재 시에 물과 친화성이 없는 발수기가 물 표면으로 이동하여 배향되므로 흡착이 일어나기 때문이다. 트래킹 휠 시험에서는 염수 이외의 다른 성분을 넣지 않지만, 열화 변수를 보다 가혹하게 하기 위해 계면활성제를 첨가하여 시험하였다. 비이온 계면활성제가 첨가된 염수액의 표면장력은 32 dyn/cm, 염수액 만의 오손액의 표면장력은 72 dyn/cm로 측정되었다.

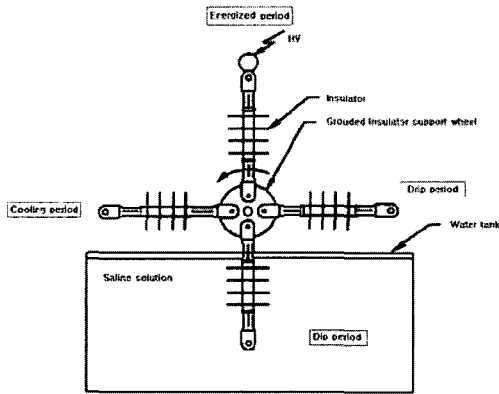


그림 2. 트래킹 휠 실험장치.
Fig. 2. The schematic of Experimental apparatus for tracking wheel.

3. 결과 및 고찰

트래킹 휠 시험 사이클 진행에 따라 시료의 열화 정도를 누설전류, 육안검사, STRI guide, 열화상 등을 비교분석하였다[7-9].

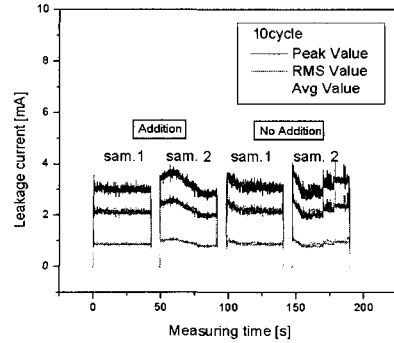
3.1 누설전류

트래킹 휠 시험장치 회전축에 각 시료들을 구분할 수 있도록 센서를 장착하여 어느 한 시료가 과전되었을 때 그 시료의 누설전류를 측정 가능토록 하였다. 또한, 회로상에 100 Ω의 무유도저항을 직렬로 연결하여 저항 양단에 걸리는 전압을 측정하여 전류로 산출하였다.

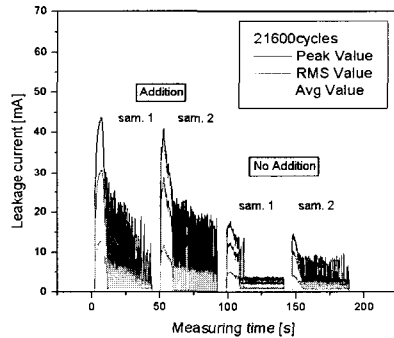
그림 3은 시험 초기 10 사이클, 21600 사이클을, 그림 4는 21600 사이클 휴지시간, 30000 사이클 일때의 누설전류를 각각 나타내었다. 초기의 누설전류 값을 보면 시료 1보다 시료 2가 약간 더 크며 계면활성제 첨가된 것과 첨가되지 않은 것의 차이는 거의 나타나지 않았다.

21600 사이클일 때의 누설전류를 비교해보면, 계면활성제가 첨가된 것과 첨가되지 않은 것의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 피크값을 보면 첨가된 것은 시료 1이 45 mA, 시료 2는 42 mA, 첨가되지 않은 시료 1은 약 18 mA, 시료 2는 14 mA였다. 휴지시간 후의 누설전류를 보면, 첨가되지 않은 시료는 현저히 누설전류가 감소되지만, 첨가된 시료는 약 20 mA 정도의 값이 유지되고 있

다. 전에 보고한 논문에서도 실리콘 고무 애자의 경우, 24시간 휴지시간 후 3 mA - 4 mA로 낮은 누설전류 값을 보였으며 본 연구에서도 계면활성제가 첨가되지 않은 상태에서의 시료 1의 누설전류가 약 5 mA 정도로 나타났다[7].



(a) 10 사이클

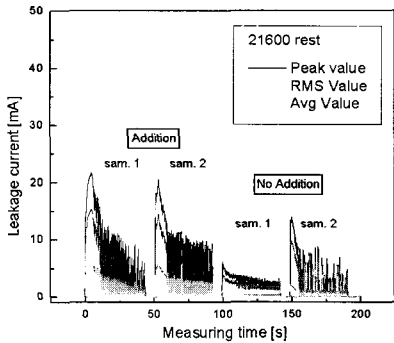


(b) 21600 사이클

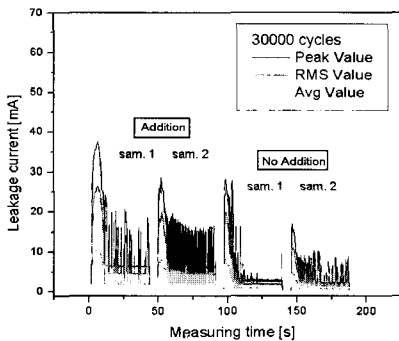
그림 3. 사이클 진행에 따른 누설전류.
Fig. 3. Leakage current with cycles.

계면활성제가 첨가된 시료들의 휴지시간 후에도 높은 누설전류 값을 보이는 것은 계면활성제 첨가에 따라 표면방전의 발생 확률이 보다 높아졌기 때문인 것으로 사료된다. 시료 2는 사이클 진행에 따라 시료 1에 비해서 다소 낮게 나타나는 경향을 보이는 나타나는데 이는 계속적으로 표면에 오손이 축적되는 실리콘 고무에 비해 EPDM은 오손물이 표면의 젖음성 때문에 씻겨 내려갔기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 계면활성제가 첨가되지 않은 시료의 휴지시간 후의 누설전류를 보면 실리콘 고무 시료보다 다소 높게 흐르는데, 이는 실리콘

큰 고무는 발수성의 회복 특성이 우수한 반면에 EPDM은 이의 특성이 나타나지 않았기 때문이다. 30000 사이클(시험 종료 시점)일 때도 계면활성제를 첨가한 것과 첨가되지 않은 것의 차이는 시료 1의 경우, 첨가된 것이 약 1.3배 정도 보다 높은 값을 보였다.



(a) 21600 사이클 휴지타임



(b) 30000 사이클

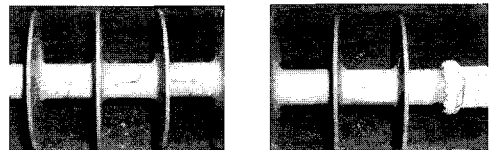
그림 4. 사이클 진행에 따른 누설전류.
Fig. 4. Leakage current with cycles.

3.2 육안검사

계면활성제가 첨가된 상태에서 시험한 시료 1은 갓 끝부분에 침식(erosion)이 발생하였으며, 애자 동부에 트래킹 및 침식이 발생하였다. 동부에 발생한 트래킹과 침식은 모두 파팅 라인(parting line)을 따라 발생하였다. 시료 2는 동부에 가벼운 침식이 발생하였고 다른 시료와 마찬가지로 갓 끝부분에 침식이 발생하였다. 시료 2의 열화 특징은 그림 5와 같이 변색과 균구와 애자의 계면부근에도 가벼운 침식이 발생하였다는 점이다.

계면활성제가 첨가되지 않은 시료에 대한 육안 검사는 그림 6에 나타난다. 시료 1은 애자 동부에 트래킹이 발생하였지만, 갓 끝부분에 침식은 발생치 않았다. 시료 2도 애자 동부에 가벼운 트래킹 흔적이 발생하였지만 갓 끝부분의 침식까지는 발생치 않았다. 그러나 변색현상은 마찬가지로 나타났다.

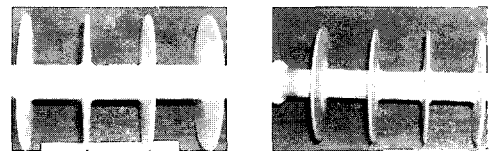
이러한 EPDM의 변색현상은 방전에 의해 오존, 질소가스 발생에 의해 EPDM 내의 이중결합 및 자유라디칼이 생성되어 황색으로 변한 것으로 사료된다. 계면활성제의 첨가와 미첨가의 가장 큰 시료의 열화는 갓 끝부분의 침식 유무로 나타났다. 이러한 결과는 계면활성제 첨가에 따라 애자의 표면 방전이 보다 많이 유도되어 갓 끝부분까지 침식이 발생한 것으로 사료된다.



(a) 시료 1

(b) 시료 2

그림 5. 시험 종료 후의 외관(계면활성제 첨가).
Fig. 5. Surface condition after test (Addition).



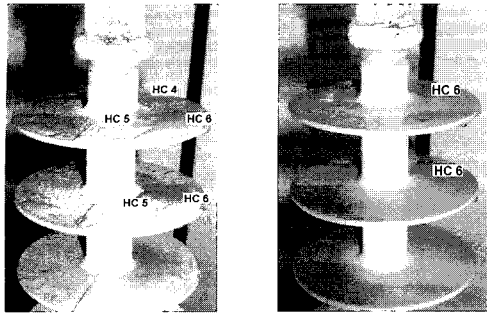
(a) 시료 1

(b) 시료 2

그림 6. 시험 종료 후의 외관(계면활성제 미첨가).
Fig. 6. Surface condition after test (No addition).

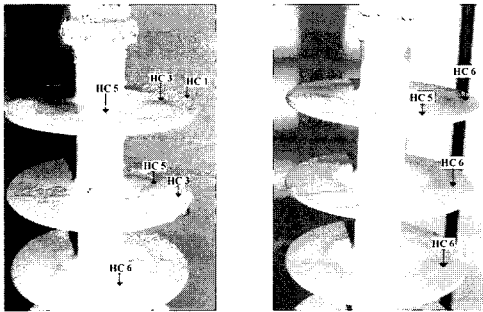
3.3 발수성 평가

시험 종료시점에서 각 시료의 발수성을 STRI Guide법으로 평가하였다. 그림 7과 같이 계면활성제 첨가된 시료 1은 주로 HC 4, HC 5, HC 6 등급을, 시료 2는 HC 6 등급을 보였다. 특히 애자 바깥쪽 부분은 모든 시료가 모두 HC 6 등급을 보였다. 실리콘 고무 시료의 경우, 일반적으로 EPDM 시료보다 발수성이 양호한데 본 실험에서는 계면활성제에 따른 발수성 저하가 보다 크게 나타난 것으로 사료된다.



(a) 시료 1 (b) 시료 2

그림 7. 시험 후의 발수성(계면활성제 첨가).
Fig. 7. Hydrophobicity after test(Addition).



(a) 시료 1 (b) 시료 2

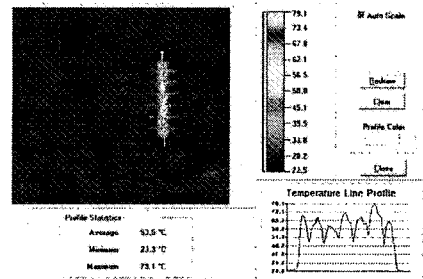
그림 8. 시험 후의 발수성.
Fig. 8. Hydrophobicity after test(No addition).

그림 8과 같이 계면활성제가 첨가되지 않은 시료 1은 시험 후의 발수등급이 HC 1, HC 3, HC 5, HC 6 등이 나타났으며 최종시점까지도 HC 1, HC 3 등급이 존재하였다. 시료 2는 HC 5, HC 6 등급을 보였다. 계면활성제가 첨가된 경우와는 달리 시험 후의 발수등급을 보면 시료 1의 경우 HC 1과 같은 우수한 발수 특성을 보이는 표면도 있었다. 시료 2의 경우도 HC 6 등급만 나타났던 계면활성제 첨가 시료와 달리 HC 5등급도 보였다.

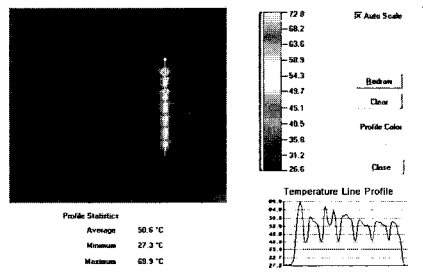
3.4 열화상 촬영에 의한 온도분포 특성

각 시료들의 주요 온도분포를 분석하기 위해 적외선 카메라로 촬영을 하였으며, 계면활성제 첨가 시료와 미첨가 시료 1, 시료 2의 주요 온도분포 특성을 표 2에 나타내었다. 시료 1에 대한 열화상을 그림 9에 나타낸다. 열화상은 전압인가 후 전류가

가장 높게 흐르는 시점인 전압인가 후 5초 후에 촬영하였다. 계면활성제 첨가된 시료의 최고온도, 평균온도는 미첨가된 시료보다 다소 높음을 알 수 있으며, 이는 계면활성제 첨가에 따른 표면방전이 보다 더 발생했기 때문인 것으로 사료된다.



(a) 계면활성제 첨가



(b) 계면활성제 미첨가

그림 9. 시료 1의 열화상(30000 사이클).
Fig. 9. Thermal image of sample 1(30000 cycles).

표 2. 온도 분포 특성.

Table 2. Characteristics of temperature distribution.

		최고 온도[°C]	평균 온도[°C]	주요온도분포
계면활성제 첨가	시료 1	79.1	53.5	전반적으로 고르게 분포
	시료 2	68.2	42.4	2-3, 3-4
계면활성제 미첨가	시료 1	69.9	50.6	전반적으로 고르게 분포
	시료 2	60	44.2	전반적으로 고르게 분포

3. 결론

본 논문에서는 폴리머 애자의 대표적인 가속열화 시험으로 알려져 있는 트래킹 휠 시험을 염수에 계면활성제를 첨가하여 그 특성이 어떻게 나타나는지 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 초기의 사이클에서의 누설전류는 실리콘 고무 시료보다 EPDM 시료가 약간 더 크며 계면활성제 첨가된 것과 첨가되지 않은 것의 차이는 거의 나타나지 않았다.
- [2] 21600 사이클일 때 실리콘 고무의 경우 누설전류의 피크값은 계면활성제가 첨가된 것은 45 mA, 첨가되지 않은 것은 18 mA로 첨가에 따라 누설전류는 증가하였다.
- [3] 휴지시간 후의 누설전류를 보면, 첨가되지 않은 시료는 현저히 누설전류가 감소되지만, 첨가된 시료는 약 20 mA 정도의 값이 유지되고 있다. 이는 계면활성제 첨가에 따라 애자의 표면방전 발생 확률이 보다 높아졌기 때문인 것으로 사료된다.
- [4] 시험 종료된 후의 애자 상태는 계면활성제가 첨가된 실리콘 고무는 갓 끝면에 침식이 발생하였으며, 동경에 트래킹과 침식이 발생하였다. 또한, 동경에 발생한 트래킹과 침식은 모두 파팅 라인(parting line)을 따라 발생하므로써 사출 성형시의 고무 흐름성 개선에 검토가 요구된다.
- [5] 시험 종료 후의 시료의 발수성을 STRI Guide 법으로 평가한 결과, 계면활성제 첨가된 시료는 주로 HC 4, HC 5, HC 6 등급을 나타내는 반면에 계면활성제가 첨가되지 않은 시료는 HC 1, HC 3, HC 5, HC 6 등이 나타났다.
- [6] 계면활성제 첨가된 시료의 최고온도, 평균온도는 계면활성제를 첨가되지 않은 시료보다 다소 높음을 알 수 있으며, 이는 계면활성제 첨가에 따라 젖음성으로 인하여 표면방전이 보다 더 활발하게 발생했기 때문인 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] I. Gutman, R. Hartings, R. Matsuoka, and K. Kondo, "Experience with IEC 1109 1000h salt fog ageing test for composite insulators", IEEE EI Magazine, Vol. 13, No. 3, p. 12, 1997.

[2] A. H. El-Hag, S. Jayaram, and E. A. Cherney, "Effect of Shed Design on Aging Performance of Silicone Rubber Insulators", 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 363, 2002.

[3] N. Yoshimura and M. Nishida, "Influence of the electrolyte on tracking breakdown of organic insulating materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-16, No. 6, p. 510, 1981.

[4] E. M. Sherif and A. E. Vlastos, "Influence of Aging on the Electrical Properties of Composite Insulators", 5th ISH, 51.01, p. 1, 1987.

[5] CEA LWIWG-01, "Dead-end/suspension Composite Insulator for Overhead Distribution Lines", 1996.

[6] IEC 60587, "Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials Used under Severe Ambient Conditions", 1992.

[7] 조한구, 이운용, 임기조, 최인혁, "IEC 61109와 CEA LWIWG 01 시험에 의한 폴리머 애자의 성능비교", 대한전기학회 전기재료연구회 춘계학술대회논문집, p. 70, 2004.

[8] 조한구, 한동희, 이운용, 임기조, 최인혁, "계면활성제가 첨가된 염수용액에 따른 폴리머 애자의 트래킹 성능 평가" 전기전자재료학회 춘계학술대회논문집, p. 11231, 2004.

[9] 조한구, 이운용, 강성화, 임기조, 여학규, 지원영, "갓 형상에 따른 폴리머 현수애자의 열화 특성", 전기전자재료학회 추계학술대회논문집, p. 539, 2003.