

회전윤법에 의한 에폭시 몰드 절연재료의 내트래킹성 평가

조한구 · 윤문수 · 박용관*
한국전기연구소 · 성균관대학교*

Tracking Resistance of Epoxy Mold Insulating Materials
by the Rotating Wheel Dip Test

Cho, Han Goo · Yun, Mun Su · Park, Yong Kwan
Korea Electrictechnology Research Institute · Sungkyunkwan Uni.

Abstract - The time to tracking breakdown of treated filled specimen is longer than untreated filled specimen. And, after the RWDT, the surface of specimen by adding untreated filler appeared heavy erosion. It was found that the addition to surface treated filler, the better tracking resistance. In the RWDT, the breakdown specimen is not affected by the dry flashover voltage, despite the fact that the surface degradation of tracking test has different state on each specimen. This suggests that wet flashover voltage play an important role in evaluating of tracking and erosion on the surface degradation in tracking test. And, the flashover voltage of specimen under wet conditions are greatly affected by the salt concentration and degree of degradation by the RWDT. Because of hydrophobicity and degree of degradation by the RWDT, the flashover voltage of treated filled specimen is higher than that of untreated filled specimen. Different types of specimen may have different hydrophobicity and their surface state under contaminated conditions may not be the same. It is assumed that this phenomenon is related to the decrease in hydrophobicity of the surface of the materials.

1. 서 론

고분자 복합재료는 절연성, 가공성 및 기계적 강도가 우수 할 뿐만 아니라 대량생산과 경량화가 가능하여 전기재료로서의 용도와 수요는 날로 증가하고 있으며, 최근 옥외용으로 고분자 절연물의 용도 확대에 따라 이에 대한 연구도 가속화되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 옥외에서 실용적으로 사용 가능한 에폭시수지에 충전재의 표면처리 유무에 따라 2종류의 시료를 제조하여 RWDT(rotating wheel dip test)에 의한 트래킹 실험으로 누설전류, 중량손실, 트래킹 파괴시간을 측정하여 내트래킹성을 비교하였다.

그리고 옥외용 절연물의 표면이 열화되어 영해와 오손물질에 의해 오손되면 습윤조건에서 도전성 수막(water film)이 형성되어 성락이 발생하기 쉽다. 이러한 오손에 의한 성락은 절연물 표면에 형성되는 도전성의 수막과 밀접한 관계가 있지만, 트래킹 열화에 따라 표면의 젖음성(wettability)이 서로 다르기 때문에 발수성(hydrophobicity)에서 친수성(hydrophilicity)으로 표면전기가 일어나 열화되는 정도도 다르다. 그러므로 발수성의 관점에서 건조, 주수성락전압 및 영분의 부착농도를 측정하였으며, 트래킹에 의한 열화를 전자현미경으로 관찰하였다.

2. 실험

2.1 시료제조

본 연구의 에폭시수지는 F종 절연, 내마모성, 내트래킹성이 우수하고, 산무수물(acid anhydride)계와 혼합한 후 80~100°C에서 경화가 시작되며, 경화물의 구조도 에스테르(ester)결합을 이루고 있어 열적, 화학적으로 안정하여 열변형온도가 클 뿐 아니라 전기적, 기계적 특성도 우수하다.

경화는 160°C에서 15분간 1차 경화시켜 탈형한 후, 140°C에서 2시간 2차 경화하여 ø23mm의 봉 형상으로 제조하였다. 표 1에 시료의 배합조성과 기호를 나타내었다.

표 1. 시료의 배합 조성표 기호.

Raw materials		Symbols	
		ER-1	ER-2
Epoxy resin		100 pbw	100 pbw
Curing agent		90 pbw	90 pbw
Accelerator		3 pbw	3 pbw
SiO ₂	Untreated	300 pbw	
	Treated		300 pbw
Color		Heavy gray	Gray

2.2. 트래킹 파괴 실험

트래킹파괴 실험과 원판(wheel)의 회전조건은 표 2에 나타난 조건으로 실험하였다. 직경 1 m의 원판의 바깥부분에 표 2와 같이 봉(rod)형상의 시료를 설치하고, 수평에 대해 15° 기울인 상태에서 원판을 1 rpm의 속도로 회전시킨다. 시료를 그림 3과 같이 1/3(150°) 회전만큼 오손액에 잠기게(dipping)한 후, 1/2(180°) 회전하는 동안 상용주파수 10kV 전압이 인가되어 시료 표면에 방전을 발생시켰다. 이것은 오손액에 의한 영수오손과 고전압을 반복적으로 인가하므로써 인공적으로 가혹한 조건에서 표면방전 등에 의한 시료 표면의 트래킹에 의한 경시적인 변화를 볼 수 있다. 그리고, 이 실험은 시료가 오손액을 이동함에 따른 세정효과(cleaning effect)와 30초마다 과전과 습윤을 주기적으로 반복함에 따른 옥외의 강우 상황을 모의할 수 있다.

시료 표면이 열화됨에 따라 절연성능의 저하에 의해서 최종적으로 트래킹파괴되어 성락이 일어나는 시간을 트래킹 파괴시간으로 설정하였다. 또한 100시간마다 시료에 대한 중량손실(weight loss)과 누설전류를 측정하였으며, 오손액의 저장량은 항상 일정하게 되도록 100시간마다 규정치로 보정하고, 전극과 오손액은 500시간마다 교환하였다.

2.3. 성락 특성과 표면 분석

트래킹에 의해 파괴된 시료와 트래킹 실험전의 시료에 대해 건조 및 주수시의 상용주파수성락전압을 측정하였다. 주수성락전압은 습윤조건에서 절연물의 절연내력을 검증하기 위한 수단으로서

주수량은 수직 및 수평성분으로 각각 2mm/min, 1.5mm/min이며, 주수각도는 시료의 중앙에서 수직방향에 대해 45°이고, 주수의 저항률은 10,000Ω·cm(±5%)로 하였다. 성장전압치는 전압상승법에 의해 5회이상 측정된 평균치이며, 시료의 전극간의 거리는 트래킹 실험에서와 동일한 120mm로 하였다.

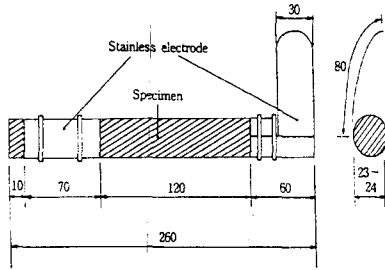


그림 2. 시료와 전극의 형상

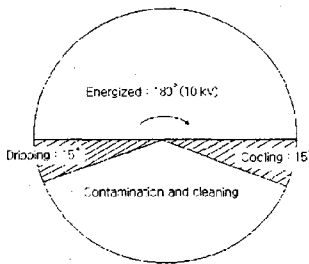


그림 3. Rotating wheel dip test 원판의 회전조건

표 2. Rotating wheel dip test의 실험조건

Test conditions	Contents
Applied voltage	AC 10 kV
Specimen	Rod of $\phi 23 \times 250$ mm
Electrode material	0.2 mm stainless steel (SUS 316)
Distance between electrode	120 mm
Electrical stress	83 V/mm
Resistivity of contaminant	NaCl solution ($750 \pm 30 \Omega \cdot \text{cm}$, 23°C)
Rotating speed	1.0 rpm
Setting angle of specimen	15°

3. 결과 및 고찰

3.1. 트래킹파괴와 중량손실

그림 4는 트래킹 실험시간에 따른 중량손실을 나타낸 것으로 트래킹 실험시간에 따라 중량손실은 증가하였다. 트래킹 실험시간에 따라 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 ER-1은 트래킹에 의해 595시간에서 파괴되었을 때 2.2g의 중량손실을 가져오는 반면 표면 처리된 충전재를 첨가한 ER-2는 1200시간에서 파괴되었을 때 0.9g의 중량손실이 발생하였다. 그리고, 400시간까지의 중량손실은 거의 같지만, 그 이후 실험시간에서는 ER-1의 중량손실이 급격히 증가하며 파괴되었을 때의 시료 표면에도 현저하게 침식된 부분을 볼 수 있다. 따라서 ER-1은 400시간 부근에서 균열(crazing)에 의한 중량손실이 급격하게 증가하기 시작하는 것으로 보아 이 시간영역에서 표면에 충전재의 노출에 의해 거칠기가 증가하면서 침식에 의한 국부적인 형상변화를 가져온다고 생각된다.

이와 같이 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 시료가 파괴 시간이 짧았음에도 불구하고 중량손실이 더 큰 것은 수지와 충전재 계면사이의 불완전한 접촉으로 인한 계면열화로 수분의 침투 및 충전재의 탈리가 쉬워 표면에 깊게 침식된 부분이 발생하게 되는 반면 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료는 접착이 좋기 때문에 방전열에 의해 단순히 에폭시수지만이 열 분해되는 것으로 생각된다. 따라서 ER-1은 트래킹에 의한 열화가 큰 반면에 ER-2는 무기물의 표면처리 효과로 열화의 진행이 느린 것으로 보아 충전재는 표면 처리된 것을 첨가하는 것이 트래킹에 의한 열화를 억제할 수 있음을 알 수 있다.

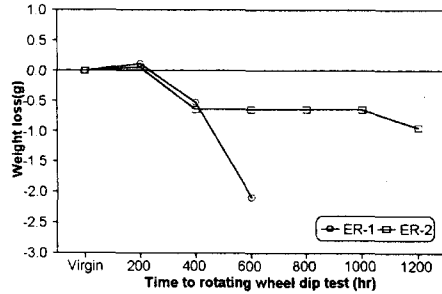


그림 4. Rotating wheel dip test에서 중량손실의 시간 따른 의존성

이와 같이 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 시료가 파괴 시간이 짧았음에도 불구하고 중량손실이 더 큰 것은 수지와 충전재 계면사이의 불완전한 접촉으로 인한 계면열화로 수분의 침투 및 충전재의 탈리가 쉬워 표면에 깊게 침식된 부분이 발생하게 되는 반면 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료는 접착이 좋기 때문에 방전열에 의해 단순히 에폭시수지만이 열 분해되는 것으로 생각된다. 따라서 ER-1은 트래킹에 의한 열화가 큰 반면에 ER-2는 무기물의 표면처리 효과로 열화의 진행이 느린 것으로 보아 충전재는 표면 처리된 것을 첨가하는 것이 트래킹에 의한 열화를 억제할 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 트래킹 파괴시간과 누설전류

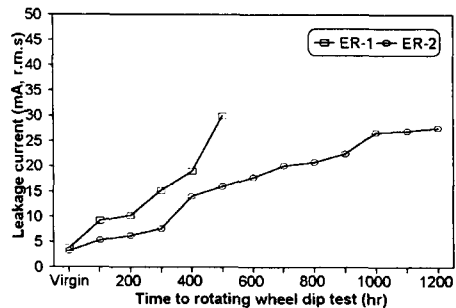


그림 5. Rotating wheel dip test에서 누설전류의 시간 의존성

그림 5는 원판에 1개의 시료를 설치하여 1 rpm의 회전속도로 1 회전하는 중 30초 동안의 누설전류를 100시간마다 측정하여 나타낸 것으로 트래킹 실험시간에 따라 누설전류는 초기에 비슷한 값을 나타내지만, ER-1은 300시간이 경과한 시점에서 균열이 발생하여 침식과 더불어 누설전류가 급격히 증가하고, ER-2는 전류가 급증하지 않고 시간에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

이와 같이 누설전류의 급격한 증가를 가져오는 ER-1의 균열은 국부적인 방전에 의한 시료의 온도 상승요인과 오손액에 당구 어지므로 냉각요인의 반복에 의한 열응력(thermal stress)에 의해 발생하는 것이라고 사료되는 반면 ER-2는 충전재의 표면처리에 의해 계면의 접촉력이 향상되므로, 수지와 충전재 계면의 화학적 결

합이 강하게 되어 내수성이 향상되기 때문에 계면에서 수분에 의한 충전재의 탈리가 억제되기 때문이라고 사료된다. 그러므로 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 ER-1의 트래킹 파괴시간은 595시간인 반면에 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료는 1200시간으로 2배 이상 길어진다.

3.3. 표면 구조의 변화

그림 6은 각각의 시료에 대한 트래킹 실험전후의 표면 상태의 변화를 나타낸 것으로 각각의 시료에 대한 표면 열화 정도는 상당히 다른 것을 알 수 있다. ER-1은 트래킹 파괴시간이 ER-2보다 짧음에도 불구하고 트래킹에 의한 열화는 중량손실의 결과에서와 같이 상당히 큼을 알 수 있다. 전압이 인가된 초기의 아크는 상부전극 부근에서 발생하여 하부전극으로 진전하는데 이는 원판의 회전속이 15° 기울어져 있으므로 상부전극 부근에서 건조대가 형성되기 쉽기 때문이다. 이러한 아크는 시료의 표면 특성과 관계있는 누설전류에 따라 다르며, 지속적인 아크의 발생은 시료 표면의 발수성을 1차적으로 저하시키게 된다. 그러므로 시료 표면이 일정하게 열화되지 않고 1차적으로 발수성이 친수성으로 전이되어 아크가 발생하기 쉬운 부분, 즉 시료의 표면에 결함과 탄화점을 형성한 부분이 국부적으로 반복 열화되어 균열과 침식을 가져온다고 생각된다.

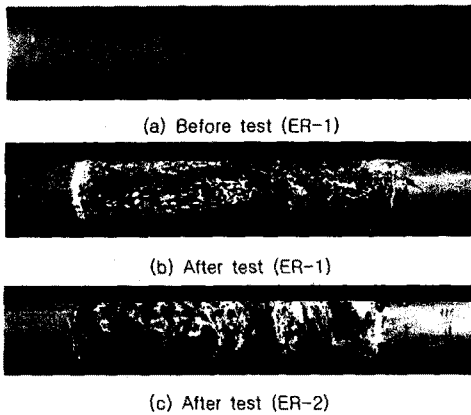


그림 6. Rotating wheel dip test 전, 후 표면의 열화 상태

3.4. 표면 열화와 섬락전압

고분자 절연물은 옥외 환경조건에서 장기간 사용될 때 표면이 열화되어 표면 거칠기 및 표면적(surface area)이 증가하고 젖음성이 좋아짐에 따라 내오손능력의 저하가 예상된다. 따라서 젖음성 관점에서 트래킹에 의한 열화 정도를 평가하기 위하여 건조 및 주수섬락전압을 측정하였다.

그림 8은 트래킹 실험전후의 건조, 주수섬락전압을 나타낸 것으로 건조섬락전압은 실험 전보다는 실험 후에 미소한 차이를 나타내고 있으나, 주수섬락전압은 실험전후에 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 트래킹 실험 후 주수섬락전압은 파괴시간이 가장 짧았던 시료 ER-1의 경우가 낮은 값을 나타내며, ER-2가 큰 값을 보인다.

이와 같이 실험 후에 시료 표면의 열화 정도 및 트래킹 파괴시간은 상당히 차이가 있음에도 불구하고 건조섬락전압은 미소한 차이를 나타내었다. 이것은 표면에 탄화물이 형성되는 트래킹 및 침식 등의 커다란 열화가 일어나지 않는 한 건조섬락전압은 같은 값을 나타내는 것을 알 수 있으며, 미소한 표면 거칠기 등의 표면형상 변화는 건조섬락전압에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

그러나, 주수섬락전압은 건조섬락전압과는 상당히 다르며, 서로 다른 값을 나타내므로 트래킹에 의한 열화 정도를 판정할 수 있다. 특히 ER-1, ER-2는 트래킹에 의한 침식의 정도가 상당히 다르기 때문에 트래킹 실험후의 주수섬락전압도 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 표면이 동일하게 젖는다 할지라도 침식과 트래킹 등의 커다란 열화가 발생한 경우에는 낮은 전압에서 섬락에 이르게 되기 때문이다. 따라서 트래킹 및 침식 등 큰 열화가 일어나지 않는 표면 변화는 건조섬락전압에 영향을 미치지 않지만 주수섬락전압에는 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

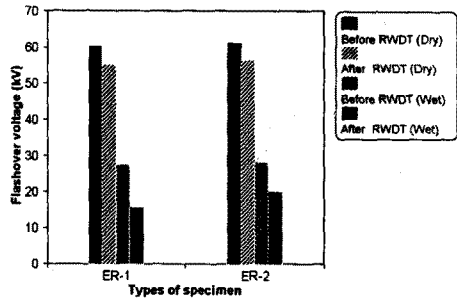


그림 8. RWDT 전, 후 시료와 건조, 주수섬락전압과의 관계

4. 결 론

본 논문에서는 옥외용 절연물로 사용 가능한 에폭시수지에 혼합할 충전재의 표면처리 유무에 따른 트래킹 열화 특성을 평가하였고, 또한 트래킹에 의한 표면 열화의 영향을 섬락전압, 영분부착일도 및 표면의 미세구조 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충전재의 표면처리 유무에 따라 섬락시간은 큰 차이가 있었다. 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 시료의 섬락시간은 595시간인 반면에 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료는 1200시간으로 2배 이상 길어진다.
- 2) 표면처리되지 않은 충전재를 첨가한 시료는 트래킹파괴로 595시간에서 섬락되었을 때 2.2g의 중량손실을 가져오는 반면에 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료는 1200시간에서 섬락되었을 때 0.9g의 중량손실이 발생하였다.
- 3) 트래킹실험에 의한 섬락시간은 시료마다 큰 차이가 있음에도 불구하고 건조섬락전압은 미소한 차이로 나타났다. 그러나, 주수섬락전압은 시료마다 상당히 다른 값을 나타내며, 특히 트래킹파괴에 의해 가장 큰 중량손실을 나타낸 시료가 낮은 주수섬락전압을 나타내므로 트래킹에 의한 열화 크음을 알 수 있었다. 따라서 트래킹 및 침식 등의 큰 열화가 일어나지 않는 표면은 건조섬락전압에 영향을 미치지 않지만, 주수섬락전압에는 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. Matsuoka, "Investigation Results of Silicone Rubber Insulators Under Wet and Contaminated Condition", Proc. of the 4th ICDPADM, 1994.
- [2] J. W. Weton, et al., "Engineers' Guide to Composite Materials", American Society for metals, pp. 6-47, 1987.