

논문 21-6-7

## Rotating Wheel Dip Test에 의한 에폭시 절연재료의 내트래킹성과 열화 특성

### Tracking Resistance and Aging Characteristics of Epoxy Insulating Materials by the Rotating Wheel Dip Test

조한구<sup>1,a</sup>  
(Han-Goo Cho<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

This paper describes the results of a study on the tracking performance of outdoor insulating materials based on the rotating wheel dip test(RWDT). And, the influence of surface degradation was evaluated through such as measurement of the flashover voltage after and before tracking test, also aspects of surface degradation using scanning electron microscopy. 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.

**Key Words** : Rotating wheel dip test, Tracking resistance, Hydrophobicity, Wettability, Salt deposit density

#### 1. 서론

폴리머 복합재료는 절연성, 가공성 및 기계적강도가 우수 할뿐만 아니라 대량생산과 경량화가 가능하여 전기재료로서의 용도와 수요는 날로 증가하고 있으며, 최근 옥외용으로 폴리머 절연물의 용도 확대에 따라 이에 대한 연구도 가속화되고 있는 실정이다. 또한 폴리머 복합재료를 이용한 절연물은 표면의 발수성이 우수하기 때문에 오손 및

습윤 시에도 누설전류(leakage current)가 작으며, 오손내전압도 크다[1]. 그리고, 표면 특성인 발수성이 옥외의 오손조건에서 장기간 유지, 회복될 뿐 아니라 내트래킹성이 우수하다면 절연물의 누설거리가 단축되어 소형화가 가능하며 내오손성능도 개선된다[2].

그러나, 폴리머 절연물은 옥외의 가혹한 자연 환경에 노출되면 태양광에 의한 자외선, 공업분진 등의 오손물질과 수분이 복합적으로 작용하여 경년열화를 피할 수 없기 때문에 우수한 내후성과 내트래킹성이 요구된다. 이와 같은 경년열화에 의해 표면이 열화되어 오손물질과 수분이 부착하면 젖음성이 좋아져 절연성은 급격하게 저하되고, 표면에 부분방전이 발생하여 트래킹을 발생시킨다.

1. 한국전기연구원 재료응용연구단  
(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr  
접수일자 : 2007. 10. 17  
1차 심사 : 2008. 3. 18  
심사완료 : 2008. 5. 23

이러한 현상은 주로 표면에 나타나므로 폴리머 절연물을 옥외용으로 사용할 경우 오손과 더불어 큰 문제점으로 대두되고 있다[2]. 그러므로 옥외에서 사용하는 경우 치명적인 절연 열화를 가져오는 내트래킹성에 대한 평가는 그 무엇보다도 중요하므로 재료의 내트래킹성 및 그의 열화 특성을 평가하지 않으면 안 된다.

본 연구에서는 옥외에서 사용하고 있는 에폭시 수지에 충전재의 표면처리 유무에 따라 2종류의 시료를 제조하여 RWDT(rotating wheel dip test, 이하 RWDT)에 의한 트래킹 실험으로 누설전류, 중량손실, 트래킹 파괴시간을 측정하여 내트래킹성을 비교하였다.

그리고 옥외용 절연물의 표면 열화로 염해와 오손물질에 의해 오손되면 습윤조건에서 도전성 수막(water film)이 형성되어 섬락이 발생하기 쉽다. 이러한 오손에 의한 섬락은 절연물 표면에 형성되는 도전성의 수막과 밀접한 관계가 있지만, 트래킹 열화에 따라 표면의 젖음성(wettability)이 서로 다르기 때문에 발수성(hydrophobicity)에서 친수성(hydrophilicity)으로 표면전이가 일어나 열화되는 정도도 다르다. 그러므로 발수성의 관점에서 건조, 주수섬락전압 및 염분의 부착농도를 측정하였으며, 트래킹에 의한 열화를 전자현미경으로 관찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료 제조

본 연구의 에폭시수지(CY-184, Ciba-Geigy)는 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.

폴리머 재료에 충전재를 첨가하면 경화발열로 인한 경화수축(cure shrinkage) 및 열응력(thermal stress)을 줄이게 되어 균열(crack)이 생기는 것을 억제할 수 있고, 열팽창 계수 등을 변화시킬 뿐 아니라[3] 내트래킹성을 향상시킬 수 있다.

충전재는 혼합하기 전에 80 °C에서 건조하였으며, 경화제를 35~40 °C에서 용해시켜 에폭시수지와 혼합 후 80 °C의 진공건조기에서 미리 건조된 충전재를 진공교반기를 이용하여 혼합하였다. 이 혼합물에 축진제를 첨가하고 진공하에서 다시 교

반하여 기포를 완전히 제거하였다. 에폭시수지는 접착력이 강해 금형과의 탈형이 곤란하므로 내열성이 뛰어난 이형제를 상, 하부 금형에 도포하여 140~160 °C 정도로 예열시킨 다음 가압 주형하였다. 경화는 160 °C에서 15분간 1차 경화시켜 탈형한 후, 140 °C에서 2시간 2차 경화하여 ø23mm의 봉 형상으로 제조하였다. 표 1에 시료의 배합조성과 기호를 나타내었다.

### 2.2 트래킹 파괴 실험

그림 1은 트래킹파괴 실험장치와 원판(wheel)의 회전조건을 나타내었으며, 표 2에 나타낸 조건[4]으로 실험하였다. 직경 1 m의 원판의 바깥부분에 그림 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 10 kV 전압이 인가되어 시료 표면에 방전을 발생시켰다. 이는 오손액에 오손과 고전압이 반복적으로 가해지므로 표면방전 등에 의해 시료 표면의 변화를 볼 수 있다. 그리고, 이 실험은 시료가 오손액속을 이동함에 따른 세정효과(cleaning effect)와 30초마다 과전과 습윤을 주기적으로 반복함에 따른 옥외의 경우 상황을 모의할 수 있다.

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

표 1. 시료의 배합 조성과 기호.

Table 1. Symbols and compositions of the starting materials for specimens.

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



하였으며, 실험 후에도 동일한 순서로 측정하였다. 또한 트래킹 파괴된 시료의 표면 변화는 전자현미경에 의해 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 트래킹 파괴와 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 2.2 g의 중량손실을 가져오는 반면 표면 처리된 충전재를 첨가한 ER-2는 1200시간에서 파괴되었을 때 0.9 g의 중량손실이 발생하였다. 그리고, 400시간까지의 중량손실은 거의 같지만, 그 이후 실험시간에 따라서는 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 파괴시간이 짧았음에도 불구하고 중량손실이 더 큰 것은 수지와 충전재 계면사이의 불완전한 접촉으로 인한 계면열화로 수분의 침투[5,6] 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 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 담구어지므로 냉각요인의 반복에 의한 열응력(thermal stress)에 의해 발생한 것이라고 사료되는 반면 ER-2는 충전재의 표면처리에 의해 계면의 접착력이 향상되므로[7,8], 수지와 충전재 계면의 화학적 결합이 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.

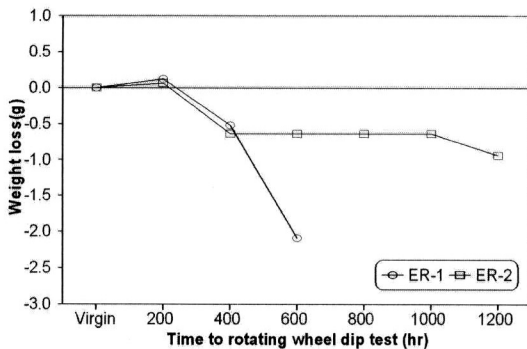


그림 4. RWDT에서 중량손실의 시간 의존성.  
Fig. 4. Time dependence on weight loss in RWDT for types of specimen.

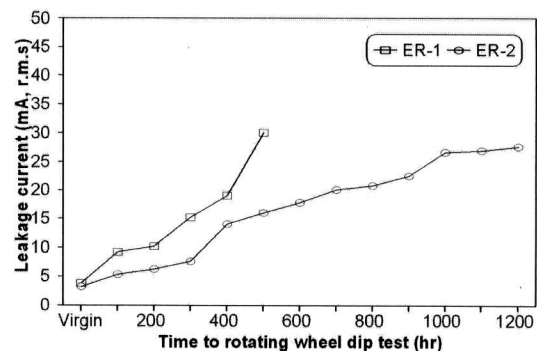


그림 5. RWDT에서 누설전류의 시간 의존성.  
Fig. 5. Time dependence on leakage current in RWDT for types of specimen.

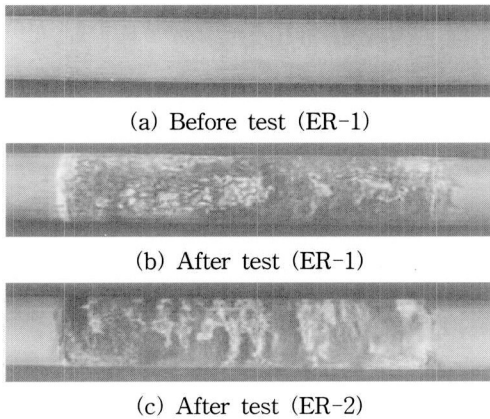
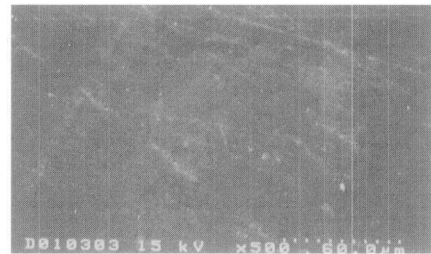


그림 6. RWDT 전, 후 표면의 열화상태.  
Fig. 6. Different erosion and tracking of surface before add after RWDT.

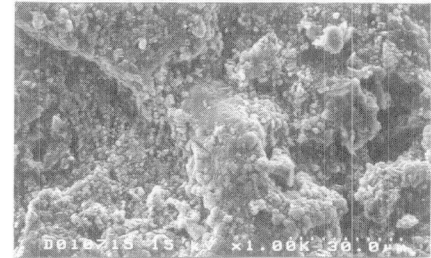
### 3.3 표면 구조의 변화

그림 6은 각각의 시료에 대한 트래킹 실험전, 후의 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 원관의 회전축이 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 결합과 탄화점을 형성한 부분이 국부적으로 반복 열화되어 균열과 침식을 가져온다고 생각된다.

그림 7은 트래킹에 의해 파괴되어 열화된 시료 ER-1의 표면조직을 나타낸 것으로 부분적으로 침식된 부분과 충전재가 완전히 탈리되어 동굴 같은 침식형상을 보여준다. 이것은 ER-1의 경우 수지와 무기물 계면사이의 불완전한 접착으로 수분의 침투가 용이하게 되어 충전재가 탈리되므로 표면이 깊게 침식된 부분이 발생하게 되는 반면 ER-2는 계면 접착력이 양호하여 시료 표면 전체에 균일하게 침식되는 것으로 생각된다.



(a) 실험 전



(b) 실험 후

그림 7. RWDT 실험전, 후 표면 변화(ER-1).

Fig. 7. SEM( $\times 1000$ ) pictures of ER-1 surface change before and after RWDT.

### 3.4 표면 열화와 섬락전압

폴리머 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 열화정도를 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 열화정도 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 표면 형상 변화는 건조섬락전압에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 주수섬락전압은 건조섬락전압과는 상당히 다르며,

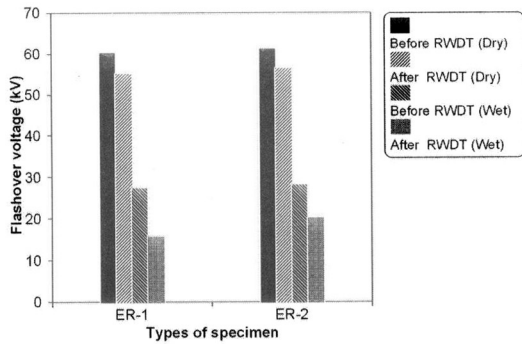


그림 8. RWDT 전, 후 시료와 건조, 주수섬락 전압과의 관계.

Fig. 8. Relation between dry, wet flashover voltage and types of specimen before and after RWDT.

서로 다른 값을 나타내므로 트래킹에 의한 열화정도를 판정할 수 있다. 특히 ER-1, ER-2는 트래킹에 의한 침식의 정도가 상당히 다르기 때문에 트래킹 실험 후의 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 9는 오손섬락전압특성을 나타낸 것으로 실험 전 ER-1, ER-2 및 실험 후 ER-2의 섬락전압은 오손액의 염분부착밀도 0.02~0.15 mg/cm<sup>2</sup>에서는 큰 차이가 없으나, 실험 후 ER-1의 섬락전압은 염분부착밀도에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 트래킹 실험으로 파괴된 ER-2는 ER-1에 비해 오손액의 염분부착밀도가 0.02, 0.04, 0.06 mg/cm<sup>2</sup>로 증가함에 따라 각각 1.5~2.0, 2.0~2.3, 3.8~4.0 배로 섬락전압이 증가하는 반면에 실험전의 섬락전압에는 차이가 없었다. 일반적으로 폴리머 절연물의 섬락전압은 옥외에서의 과전폭로에 의해 20%정도 저하하지만[9], ER-2는 오손액의 농도 0.02~0.15 mg/cm<sup>2</sup>에서 양호한 오손섬락 특성을 가지고 있음을 알 수 있으며, 이것으로 오손액에 의한 염분부착밀도보다는 재료 표면의 젖음성이 오손섬락 특성에 요인으로 작용하며, ER-1과 같이 표면의 발수성이 저하된 경우에는 재료의 절연성능보다도 염분의 부착량, 즉 표면특성이 섬락전압에 결정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

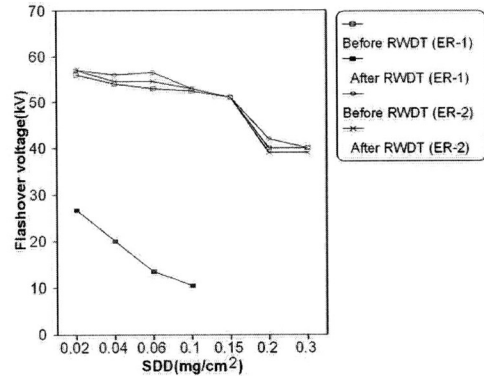


그림 9. 염분부착밀도와 건조섬락전압과의 관계 (ER-1, ER-2).

Fig. 9. Relation between salt deposit density and dry flashover voltage for ER-1, ER-2.

이와 같이 ER-1은 표면 열화로 충전제가 노출되어 거칠기가 증가하고 발수성이 저하하여 염수막(electrolytic film)의 형성이 용이하므로 표면저항이 급격하게 감소하고 침식된 부분에 염분이 쉽게 침투하여 염분의 부착량이 증가하므로 섬락전압이 저하된다고 생각된다[10]. 이와 같은 결과에 따라 염분의 부착농도를 측정하기 위하여 트래킹 실험전후의 시료를 오손액에 30분 담근 후 꺼내서 30분 건조한 후 이온교환수에서 세정하여 이온성분을 용출시켜 이 액의 전도도를 측정하여 그림 10에서 각각의 오손액에 대해서 구하였다. 여기서 시료가 트래킹과 침식으로 열화되면 염분이 시료 내부까지 침투하므로 초음파로 2분간 세정하였고, 오손액은 물 1 ℓ에 대해 kaolin 40 g과 NaCl을 24, 60, 80, 120 g 첨가하였다.

그림 11은 오손액의 염분부착밀도와 NaCl 농도의 관계를 나타낸 것으로 오손액의 염분부착밀도가 증가함에 따라 시료에 부착되는 NaCl 농도는 증가하였다. 오손액의 염분부착밀도에 따라 ER-1의 NaCl 농도는 실험전에 비해 크게 증가하였고, ER-2는 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 염분부착밀도 0.3 mg/cm<sup>2</sup>인 오손액에 대해서 트래킹 실험전후의 ER-1에 부착되어 있는 NaCl의 전도도는 100% 이상의 증가를 보인 반면 ER-2는 3%정도 증가하며 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 이것으로 보아 ER-2는 ER-1에 비하여 트래킹에 의한 열화에 의해서도 발수성이 우수하며, 표면 처리된 무기물을 첨가한 ER-2가 ER-1보다 트래킹에 의한 표면 열화가 작음을 알 수 있다.

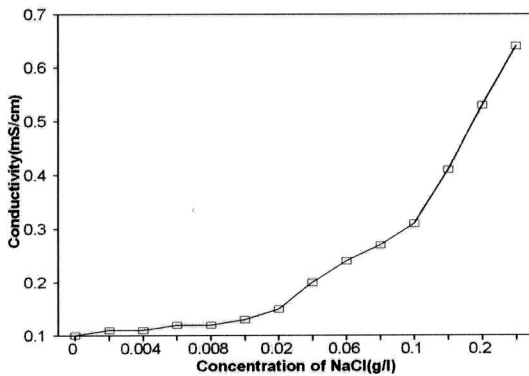


그림 10. NaCl 용액의 농도와 전도도의 의존성.  
 Fig. 10. Dependence of conductivity on concentration of NaCl solutions.

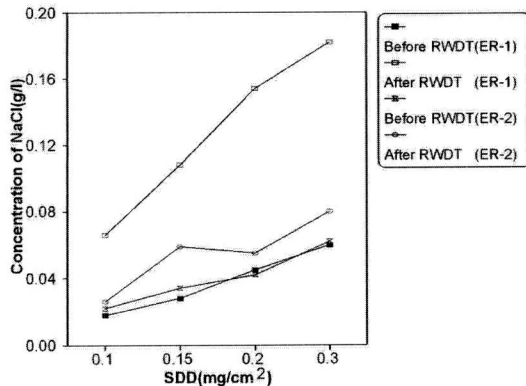


그림 11. RWDT 전, 후 SDD와 NaCl 농도와의 관계.  
 Fig. 11. Relation between concentration of NaCl and salt deposit density before and after RWDT.

#### 4. 결론

본 논문에서는 옥외용 절연물로 사용 가능한 에폭시수지에 혼합할 충전재의 표면처리 유무에 따른 트래킹 열화 특성을 평가하였고, 또한 트래킹에 의한 표면 열화의 영향을 섬락전압, 염분부착밀도 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] 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 시료는 트래킹 파괴로 595시간에서 섬락되었을 때 2.2 g의 중량손실을 가져오는 반면에 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료는 1200시간에서 섬락되었을 때 0.9 g의 중량손실이 발생하였다. 이와 같이 섬락시간이 짧았음에도 불구하고 ER-1의 중량손실이 증가하는 것은 수지와 무기물과의 접착불량으로 인한 계면 열화로 인한 것을 알 수 있었다.
- [3] 트래킹에 의한 섬락시간은 시료마다 큰 차이가 있음에도 불구하고 건조섬락전압은 미소한 차이로 나타났다. 그러나, 주수섬락전압은 시료마다 상당히 다른 값을 나타내며, 특히 트래킹 파괴에 의해 가장 큰 중량손실을 나타낸 시료가 낮은 주수섬락전압을 나타내므로 트래킹 열화가 큼을 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.
- [4] 트래킹으로 섬락된 시료에 대해 각각의 염분부착밀도에서 부착되는 NaCl의 농도는 표면 처리되지 않은 충전재를 첨가한 시료가 크다. 이것은 표면 처리된 충전재를 첨가한 시료가 발수성이 우수함을 의미하며, ER-2가 ER-1보다 표면 열화가 작아 젖음성이 나쁨을 알 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] R. Kishida, "The Consideration about the Aging Test on the Composite Hollow Insulators", Annual Meeting Record I.E.E. Japan, 2002.
- [2] Urabe S., Yoshikura S., Shirakasthi T., and Hotoda Y., "Study on Aging Property of Hydrophobic Epoxy System for Outdoor Insulation", IEEE/PES T&D Asia Pacific Conference, p. 2181, 2002.
- [3] J. W. Weton, "Engineers' Guide to Composite Materials", American Society for metals, p. 6, 1987.
- [4] S. M. Gubanski, "Experience with the merry-go-round test", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 2, p. 331, 1990.
- [5] N. Yoshimura, "Tracking resistance of organic insulating materials by merry-go-round

- method", Proc. of the 2nd ICDPADM, p. 45, 1988.
- [6] Kaltenborn U. and Meier P., "Loss and Recovery of Hydrophobicity of Novel Hydrophobic Epoxy Resins, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena", Mexico, 2002.
- [7] Beisele, C., "Hydrophobic Cycloaliphatic Epoxy Latest Findings and Future Developments", 2001 World Insulator Congress, Shanghai, p. 141, 2001.
- [8] A. Kramer, E. Hubler, and K. A. Munk, "Improvement of Aging Resistivity of Cycloaliphatic Epoxy Resin", 5th ISH, p. 1, 1987.
- [9] R. S. Gorur, E. A. Cherney, and R. Hackam, "Performance of Polymeric Insulating Materials in Salt-Fog", IEEE 86 SM 426-4, p. 1, 1986.
- [10] H. G. Cho, "Surface and Tracking Performance of Polymer Suspension Insulator for Power Transmission Line", ISH, 2007.