

## 염수 및 분진에 의한 고분자 절연물의 표면누설전류 특성과 사고 위험성

(The Accident Hazards and Properties of the Surface Leakage Current on the Polymer Insulation caused by Salt-water and Dust)

김영석\* · 송길목 · 정진수 · 정종욱 · 김선구

(Young-Seok Kim · Kil-Mok Shong · Jin-Su Jung · Jong-Wook Jung · Sun-Gu Kim)

### 요 약

환경오염이 심한 분진 발생지역에서는 전기 사고가 자주 발생하기 때문에 전기설비에 대한 유지관리와 예방에 대한 연구가 필요하다. 특히 외부에 전기절연물이 장기간 노출되면, 쉽게 분진이 축적되고 수분, 습기 등에 의한 누설전류의 발생으로 전기사고에 이르게 된다. 따라서 본 연구에서는 분진, 염수 등에 의한 전기설비 절연재료 표면 변화와 표면 누설전류를 측정하였다. 측정결과로부터 베이클라이트의 표면이 다른 재료보다 염수에 대한 영향이 심하였다. 또한 베이클라이트 표면 누설전류는 반복되는 염수 오염에 의해 증가하고 재료표면은 미소아크가 발생하고 탄화되었다. 따라서 절연물에서의 누설전류를 억제하기 위해서는 재료의 형태 및 표면 코팅 등이 변화가 필요하다.

### Abstract

It is necessary to study on the prevention and the management of electrical facilities because the electrical fault took place at the dust occurrence area due to environmental pollution. In particular, the dust accumulates easily on insulation material which is exposed an external long time. Therefore, we measured surface leakage current and surface variation of insulation material due to the dust and salt-water. From the results, the surface of bakelite is bad effect for salt-water than other material. The surface leakage current increases by repeated salt-water pollution and the surface of material is carbonized with arc occurrence. Also, it is need to variation of surface coating and shape of material to repress a leakage current on electrical material.

Key Words : Dust, Pollution, Electrical Fault, Leakage Current, Prevention

### 1. 서 론

국내에서 생산하는 발전량과 1인당 소비하는 전력량은 매년 증가하는 추세이며, 이에 따라 전기설비가 대형화 되고, 기기의 고효율화가 요구된다. 또는

\* 주저자 : 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원

Tel : 031-580-3064, Fax : 031-580-3111

E-mail : athens9@naver.com

접수일자 : 2007년 7월 9일

1차심사 : 2007년 7월 16일

심사완료 : 2007년 8월 1일

## 염수 및 분진에 의한 고분자 절연물의 표면누설전류 특성과 사고 위험성

유비쿼터스화 된 산업사회는 각종 정보기술의 발달로 국민 삶의 질이 향상되었다. 그러나 아직까지 전기설비 취약지역인 해안지역, 재래시장, 제재소, 섬유공장 단지에서는 염분과 분진 등의 환경적 열화요인에 의해 전기설비사고는 줄어들지 않는 실정이다 [1-3]. 통계자료에 의하면, 분진 등의 부착이나 침적으로 발생되었을 것이라 추정되는 누전화재 및 트래킹 화재가 총 507건으로 전체 5.9[%]를 점유하고 있다. 또한 부하설비에 대한 설비사고가 전체사고(5,076건)중 3,905건을 차지하고, 그 중 저압설비에서 76.6[%]가 발생하므로 전기사고 예방을 위한 연구가 필요하다 하겠다[4].

전기설비 사고의 원인이 되는 것은 여러 가지가 있지만, 특히 분진 섬유, 금속, 목재 등에 의해 발생하고 정전기, 누설전류, 스위칭 아크등의 미소한 전기에너지에 의해 사고로 이어지거나 폭발의 위험성이 있다. 저압의 전기설비에서 누전 및 배선용 차단기의 1차측 노출충전부는 분진 축적에 따른 사고 위험성과 보호 장치가 구축되어 있지 않아 정전 및 대형 화재사고로 이어지게 된다[5]. 이 부분에서의 전기사고 유형을 살펴보면, 절연물 표면이 분진, 염해 등의 오염 환경이 형성되어 습기 등에 의해 전도피막이 형성되고 누설전류가 흐르고 아크가 발생하여 건조대를 형성하게 된다. 결국 누설전류에 의한 아크 발생으로 절연물의 표면은 트래킹 열화에 의해 전기사고로 이어진다.

따라서 본 연구에서는 저전압 절연재료로 많이 사용되고 있는 아크릴 수지, 폴리염화비닐(이하 PVC), 베이클라이트를 염수 분무 환경 하에서 수분에 의한 절연물 표면 상태를 관측하고 인위적인 열화에 따른 절연재료의 표면 누설전류 측정과 사고 위험성에 대해 연구하였다.

## 2. 시료제작 및 실험방법

### 2.1 시료제작

본 실험에는 PVC, 베이클라이트, 아크릴의 3종류를 사용하였으며, 두께 3[mm], 직경 70[mmφ]로 동일하게 제작하였다. 그림 1은 IEC 60068-2-11에 의한 염

수분무 시험 장치 내부를 나타낸다[6]. 염수분무 장치의 시험조는 내부의 난기류를 최소화 할 수 있고, 물방울이 시료에 떨어지지 않는 구조로서, 내 부식성의 특성을 가지며, 온도는  $35\pm 2[^\circ\text{C}]$ 로 유지하였다.

시험조 내의 분무장치는 미세하고 습한 안개를 균일하게 발생하는 구조로서 염용 액이 반응하지 않는 재료로 되어있다. 염수분무는  $5\pm 1[\%]$  염화나트륨(이하 NaCl) 수용액(pH6.5~7.2)를 사용하였으며, 수온  $35[^\circ\text{C}]$  이상, 수평채취면적 80[cm<sup>2</sup>], 16시간 이상 동작되도록 되어 있다. 재료의 가속열화는 총 5단계로 나누어 수행하였으며, 100시간, 200시간, 300시간, 400시간, 500시간으로 시간적 변화를 주어 가속열화를 시켰다.

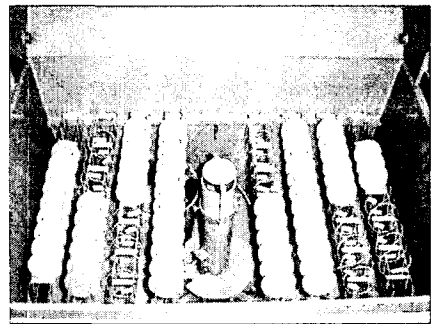


그림 1. 가속열화를 위한 염수분무 장치  
Fig. 1. The instrument of salt water atomizing for an acceleration deterioration

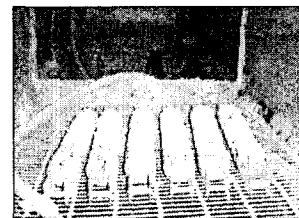


그림 2. 염수 및 분진에 의해 열화 된 시료  
Fig. 2. The deteriorated sample caused by salt water and dust

그림 2는 염수분무 및 분진에 의해 열화 된 시료를 나타낸다. 염수분무에 의한 시료는 청결한 표면 상태에서 염수 등의 불순물이 부착 된 상태를 확인한 후, 세척하여 1시간 이상 2시간 미만으로 그대로 방치하였으며, 동일 시료에 분진을 일정량으로 분사하여 분진에 의한 시료를 만들었다.

## 2.2 표면 누설전류 측정 실험방법

염수 등에 의한 환경상태에서의 절연물의 표면 누설전류를 측정하기 위한 개략도를 그림 3에 나타낸다. 절연물의 표면 누설전류를 측정하기 위해 인위적인 가속열화를 모의하였다. 본 실험의 재료 중 염수에 의한 특성이 좋지 않은 베이클라이트를 사용하였다. 베이클라이트 절연물에 10[mmφ]의 전극을 설치하고 두 전극 사이의 거리를 50[mm]로 유지하였다. 가속열화를 모의하기 위해 챔버(Chamber) 내에는 다른 이물질의 영향이 없도록 하였으며, 5[%]의 NaCl 수용액 1[mL]를 두 전극 사이에 투입하였다. IEC 60112[7]에서는 염화암모늄(NH<sub>4</sub>Cl) 0.1±0.002[%]를 오염농도로 사용하지만, 본 실험에서는 가속열화조건을 설정하기 위해 위와 같은 방법을 사용하였다. 전원은 220[V], 60[Hz]의 상용전원을 절연물 표면에 일정하게 인가하고 수용액에 따른 누설전류를 측정하였다. 이때 누설전류의 측정은 CT(100[mV]/1[A])를 통해 정밀전력 분석기(Data

Aquisition System)에서 측정하였다. 실험총 5회를 수행하였으며, 수용액이 존재한 상태에서 건조되는 과정의 누설전류를 측정하였다. 또한 표면 누설전류의 비교를 위해 분진이 많은 경우와 분진이 없는 경우로 나누어 실험하였으며, 분진량은 분진포집기(HV-500F)을 이용하여 대기 중의 분진 포집량을 기준(2시간 기준)으로 0.2[g]으로 설정하였다. 분진 및 NaCl 수용액에 의한 절연물의 변화는 디지털 카메라로 촬영하여 확인하였다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 가속열화에 의한 시료표면의 변화

가속열화에 의한 시료의 변화를 살펴보기 위해 재료의 표면 변화에 따른 접촉각을 그림 4와 같이 측정하였다. 방법은 Sessile drop method을 사용하였으며[8], 이 방법은 고체표면에 액체방울을 떨어뜨리면 표면에너지(surface energy) 및 계면장력(interface energy)의 균형에 의해 액체방울은 특정한 형태(곡면)을 나타낸다. 이때 액체의 표면 접선과 액체-고체 간에 계면이 이루는 각을 접촉각(contact angle)이라 하며, 다음의 식으로 주어진다.

$$\text{Young's Equation } \cos \theta = \frac{\sigma_s - \sigma_{Ls}}{\sigma_L} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_L$  : Surface tension of liquid,  $\sigma_s$  : Surface free energy of solid,  $\sigma_{Ls}$  : Interfacial tension between liquid and solid,  $\theta$  : Contact angle  
 여기서 접촉각( $\theta$ )의 젖음 정도에 있어서  $\theta=0[^\circ]$ 일 때는 액체는 고체표면에 완전히 퍼지고  $0[^\circ]<\theta<90[^\circ]$ 일 때는 젖으며,  $90[^\circ]<\theta<180[^\circ]$ 일 때는 젖지 않는다. 그리고  $\theta=180[^\circ]$ 일 때는 완전히 젖지 않는다. 저전압 절연재료의 경우는  $0[^\circ]<\theta<90[^\circ]$ 의 젖음(wetting)의 상태를 가진다.

그림 5는 PVC, 베이클라이트와 아크릴수지의 접촉각을 비교한 것을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 3종류 시료 모두 가속열화 시간이 증가함에 따라 접촉각이 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 베이클라

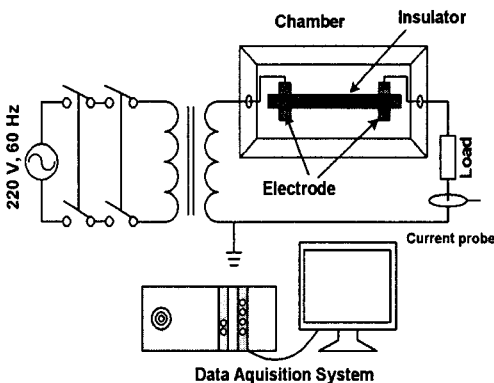


그림 3. 표면 누설전류 측정 실험장치  
 Fig. 3. The experiment setup for surface leakage current

염수 및 분진에 의한 고분자 절연물의 표면누설전류 특성과 사고 위험성

이트의 접촉각은 초기 67[°]에서 500시간이 지난 후 45[°]로 크게 작아졌으며, 그 기울기가 PVC나 아크릴 수지에 비해 더 큰 것으로 보아 염수에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 염수에 의한 표면안정성은 폴리염화비닐이 우수하며, 기울기가 완만한 아크릴수지는 안정지속성인 것을 알 수 있다.

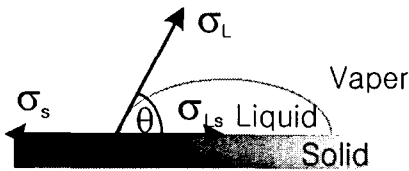


그림 4. 접촉각 측정에 대한 개략도  
Fig. 4. Schematics for contact angle measure

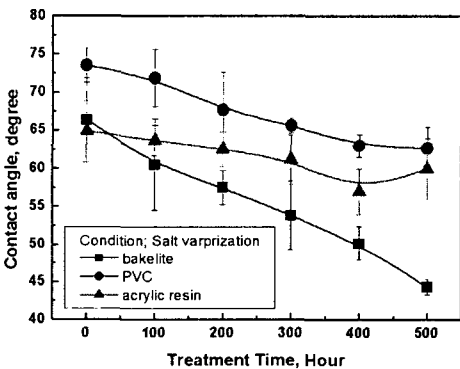


그림 5. PVC, 베이클라이트, 아크릴수지의 접촉각 비교  
Fig. 5. Contact angle comparison of acryl, bakelite and PVC

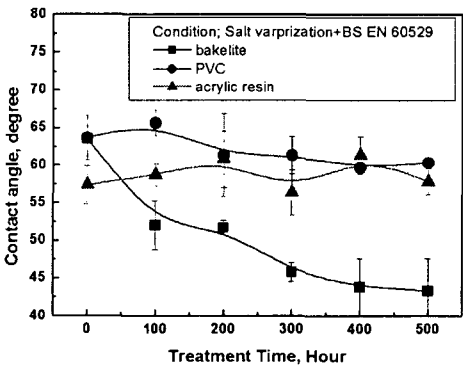


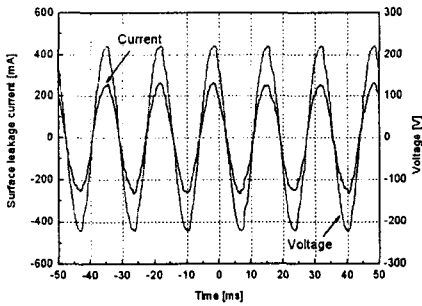
그림 6. 분진 처리한 PVC, 베이클라이트와 아크릴수지의 접촉각 비교  
Fig. 6. Contact angle comparison of acryl, bakelite and PVC after these

처리를 한 후 PVC, 베이클라이트와 아크릴수지의 각각의 단계에서 접촉각을 비교한 것이다. 분진처리에 의한 경우에서도 기울기가 폴리염화비닐보다 베이클라이트가 큰 것으로 나타났다. 그림 5와 비교해보면 0시간에서 분진처리 한 후의 접촉각이 작아지는 것을 알 수 있으며, 분진에 의해 절연물의 표면의 친수성이 좋아지는 것을 알 수 있다. 즉 분진에 의해 전기사고의 위험이 그만큼 증가하는 것으로 재료의 표면개질 평가가 가능한 것을 알 수 있으며, 재료의 개선이 필요하다고 판단된다.

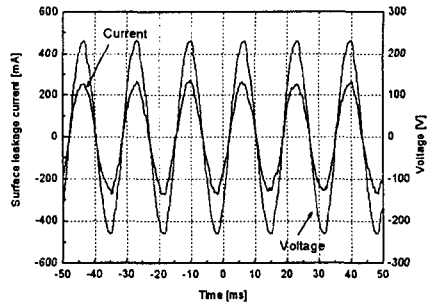
3.2 표면 누설전류 특성

가속열화에 의한 시료의 변화를 살펴보기 위해 재료표면의 누설전류를 측정하였다. 그림 7은 분진이 없는 경우의 베이클라이트 표면 누설전류 파형을 나타낸다. 그림 7 (a)는 정상상태인 베이클라이트 표면에 NaCl 수용액 1[mℓ]를 떨어뜨린 후, 수용액이 건조될 때까지의 누설전류를 측정한 것으로 누설전류가 가장 많이 흘렀을 때의 값(I<sub>ms</sub>)은 190[mA]였다. 그림 7 (b)는 (a)의 시료가 건조되어 누설전류가 0[mA]일 때 다시 NaCl 수용액 1[mℓ]를 떨어뜨린 후의 누설전류 파형을 나타낸다. 그림 (a)와 비교해 볼 때 전극양단의 전압값은 줄어들고 누설전류값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 누설전류값(I<sub>ms</sub>)은 280[mA]였다. 그림 7 (c)는 건조된 후, 세 번째로 NaCl 수용액을 떨어뜨렸을 때의 누설전류값을 380[mA]가 흘렀으며, 그림 7 (d)는 네 번째로 수용액을 떨어뜨렸을 때의 누설전류 값은 378[mA]였다. 따라서 누설전류는 NaCl 수용액에 따른 염분농도의 축적에 의해 값이 증가하는 것으로 판단되며, 누설전류에 의해 베이클라이트 표면의 탄화되는 것을 확인할 수 있었다.

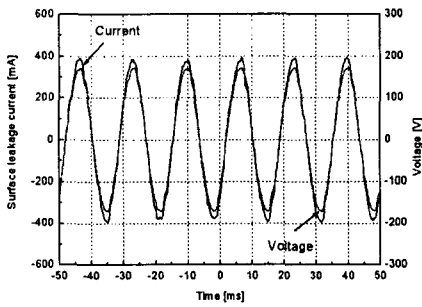
그림 8은 분진이 있는 경우의 베이클라이트 표면 누설전류 파형을 나타낸다. 그림 8 (a)는 분진 2[g]이 존재하는 상태에서 베이클라이트 표면에 NaCl 수용액 1[mℓ]를 떨어뜨린 후, 수용액이 건조될 때까지의 누설전류를 측정한 것이다. 누설전류가 가장 많이 흘렀을 때의 값(I<sub>ms</sub>)은 194[mA]였으며, 그림 7 (a)와 큰 차이는 나타나지 않았다. 그림 8 (b)는 그림 8 (a)



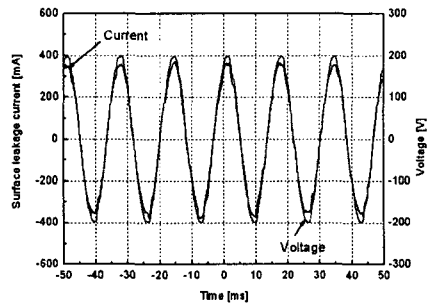
(a) 1st



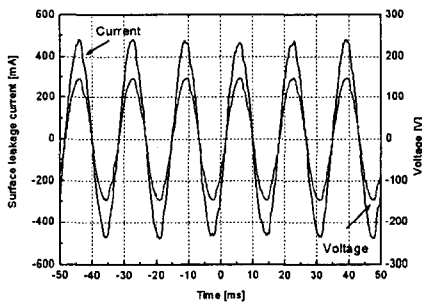
(a) 1st



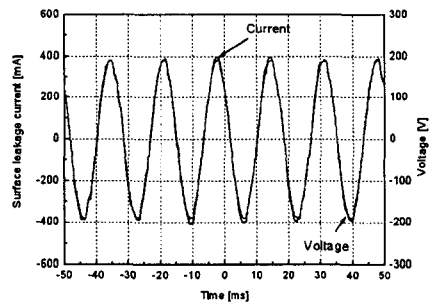
(b) 2nd



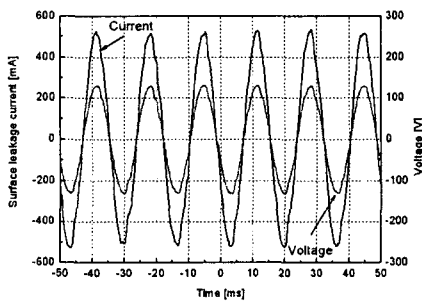
(b) 2nd



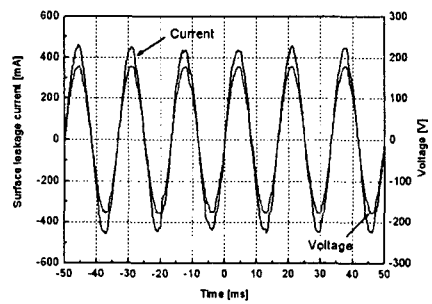
(c) 3rd



(c) 3rd



(d) 4rd



(d) 4rd

그림 7. 분진이 없는 경우 베이클라이트 표면누설전류  
Fig. 7. The surface leakage current of bakelite without dust

그림 8. 분진이 있는 경우 베이클라이트 표면누설전류  
Fig. 8. The surface leakage current of bakelite with dust

염수 및 분진에 의한 고분자 절연물의 표면누설전류 특성과 사고 위험성

의 시료가 건조되어 누설전류가 0[mA]일 때 다시 NaCl 수용액 1[mL]를 떨어뜨린 후의 누설전류 파형을 나타낸 것으로 누설전류값( $I_{rms}$ )은 266[mA]였으며, 그림 7 (b)와 비교해서 약간 작은 값이 측정되었다. 또한 그림 8 (c)와 (d)에서도 누설전류값( $I_{rms}$ )은 각각 289[mA]와 324[mA]였으며, 그림 7과 비교해서 누설전류의 값은 크지 않았다. 따라서 전기설비 노출부가 수분이 있는 상태와 건조 상태가 반복적으로 이루어지게 되면 노출부 양단의 염분 농도는 증가하게 되고 전기사고로 일어날 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

그림 9는 4번째 수용액을 떨어뜨렸을 때의 양단전압과 누설전류파형을 나타낸다. 그림 9 (a)의 분진이 없는 경우에는 누설전류가 약 2분간 흐르고 난 뒤 건조대를 형성하였으며 이후에는 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 9 (b)의 분진이 있는 경우에는 누설전류가 약 4분간 지속적으로 흐르고 난 뒤 건조대를 형성하였으며, 누설전류는 초기에 크게 흐르고 난 뒤 비례적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

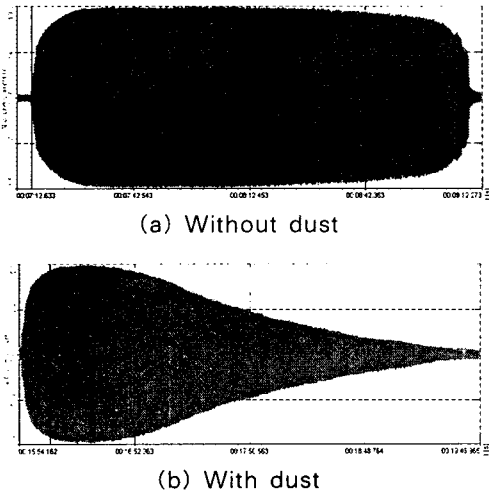


그림 9. 4단계에서의 베이클라이트 표면누설전류  
Fig. 9. The surface leakage current of bakelite at 4 step

이는 분진이 없는 NaCl 수용액만이 존재할 때에는 누설전류값이 크므로 빠르게 건조대를 형성하며, 분진이 있는 경우는 분진이 NaCl 수용액을 흡수하

여 누설전류가 상대적으로 작기 때문에 건조대를 형성할 때까지 시간이 많이 소요되는 것을 알 수 있다. 따라서 두 가지 경우 전기사고의 위험성이 높은 것을 알 수 있다.

그림 10은 4단계의 과정이 끝난 후 건조된 베이클라이트 표면의 모습을 나타낸다. 그림 10 (a)의 분진이 없는 경우에서의 베이클라이트 표면은 전극사이의 가운데 부분에서 크랙과 탄화의 흔적이 발견되었으며, 이는 NaCl 수용액이 가운데 부분에서 먼저 건조되면서 아크방전에 의해 탄화와 크랙이 발생한 것으로 판단된다. 그림 10 (b)의 분진이 있는 경우에는 전극주변으로 탄화흔적이 발견되었으며, 이는 상대적으로 분진이 적은 즉, 수용액이 많은 부분이 먼저 건조되면서 전극주변에 아크방전에 의한 탄화흔적이 집중된 것으로 판단된다.

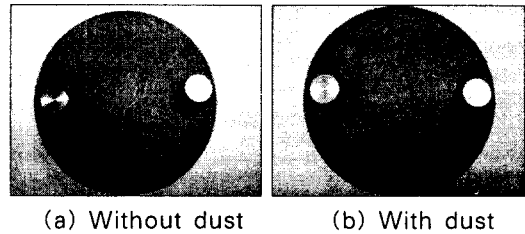


그림 10. 실험 후의 베이클라이트 표면  
Fig. 10. The bakelite surface after experiment

6. 결 론

본 연구에서는 분진 환경조건을 모의하기 위해 저전압 절연재료로 많이 사용되고 있는 아크릴 수지, PVC, 베이클라이트에 인위적인 열화 즉, 염수분무 시험을 통한 재료의 표면변화를 시켰으며, 오염된 절연재료에 대한 표면 누설전류 측정과 사고 위험성에 대해 연구하였다.

가속열화에 의한 시료의 표면 변화에 따른 접촉각을 측정한 결과 베이클라이트에서 가장 낮은 접촉각을 나타내었으며, 이는 염분 등의 오염에 의해 재료의 침수성이 증가한 것으로 누설전류 등에 의한 사고 위험성이 높다는 것을 알 수 있었다.

분진이 없는 경우의 베이클라이트 표면 누설전류는 떨어뜨린 수용액에 염분농도에 의해서 증가하는

경향을 나타내었으며, 누설전류에 의해 베이클라이트 표면의 탄화되는 것을 확인할 수 있었다. 분진이 존재하는 경우에는 분진이 없는 경우와 비교해 볼 때 상대적으로 누설전류는 크게 증가하지 않았지만, 누설전류가 지속적으로 흐르는 경로를 형성해주었다. 따라서 전기설비 노출부가 수분이 있는 상태와 건조 상태가 반복적으로 이루어지게 되면 노출부 양단의 염분 농도는 증가하게 되고 전기사고로 일어날 가능성이 높은 것을 알 수 있었다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] S.Kumagai and N. Yoshimura, "Impact of Thermal Aging and Water Absorption on the Surface Electrical and Chemical Properties of Cycloaliphatic Epoxy Resin", IEEE Trans. DEI Vol. 7, No. 3, pp.424-431, 2000.
- [2] 박재준, 최인혁, 이동일, "여러 환경조건에 대한 고분자 에자의 누설전류 특성 변화", Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 2, pp.169-175, 2006.
- [3] 김천영, 송일근, 김주용, 한재홍, 김동명, 이병성, "비용해성 산업용 분진이 배전용 자기제 현수애자의 전기적 특성에 미치는 영향", Trans. KIEE, Vol. 50C, No. 4, pp. 182-189, 2001.
- [4] 한국전기안전공사, "2005년도 통계자료", pp.4-30, 2005.
- [5] 송길목 외 2, "누전차단기 외함 전원측 단자사이의 트래킹에 의한 탄화특성 분석", 한국화재소방학회 논문지, Vol. 17, No. 4, pp.13-19, 2003.
- [6] KS C IEC 60068-2-68, "환경시험-제2부:시험-시험 L:분진 및 모래", 기술표준원, 2003 제정.
- [7] IEC 60112 Ed. 4.0 b, "Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials", 2003.
- [8] 한국전기연구원, "초고압 LSR 개발 및 절연물의 복합 열화 진단기술 연구, 최종보고서, pp.55-58, 1999.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김영석 (金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원.  
Tel : (031)580-3064  
Fax : (031)580-3111  
E-mail : athens9@naver.com

### 송길목 (宋信穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원.  
Tel : (031)580-3065  
Fax : (031)580-3111  
E-mail : natasder@kesco.or.kr

### 정진수 (鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생, 2003년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원.  
Tel : (031)580-3067  
Fax : (031)580-3111  
E-mail : mirmir0822@hanmail.net

### 정종욱 (鄭鍾旭)

1969년 2월 17일생, 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원.  
Tel : (031)580-3063  
Fax : (031)580-3111  
E-mail : phdjung@korea.com

### 김선구 (金善球)

1961년 2월 25일생. 1985년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991~2002년 한국전기안전공사 재직. 2002년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 그룹장(책임연구원).  
Tel : (031)580-3071  
Fax : (031)580-3111  
E-mail : ksk@kesco.or.kr