

PVC와 페놀수지의 표면열화에 따른 접촉각 측정과 위험성 평가

(Risk Assessment and Contact Angle Measure According to Surface Deterioration of PVC and Phenolic Resin)

송길목* · 한운기 · 김영석 · 정진수 · 정종욱 · 김선구

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

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

(Electrical Safety Research Institute, Subsidiary of Korea Electrical Safety Corporation)

Abstract

It is necessary to study a conductive characteristics of electrical facilities covered with particulate for the analysis of electrical accidents in vulnerable area where are included market place, a sawmill and so on. Therefore, there are studied on risk assessment and contact angle measure(CAM) according to surface deterioration of PVC and phenolic resin. Through the contact angle measure of samples, there are ascertain whether hydrophobicity or not. These data would used to be judged by the causes of electrical accidents.

1. 서론

국내의 경제성장이 가속화 되면서 대다수의 국민은 전기안전에 대한 고품질의 서비스를 요구하고 있다. 전력소비의 안전한 이용과 시장의 건전성을 위해 앞으로 이에 대한 욕구가 증가할 것으로 판단된다. 전기안전에 대한 서비스의 충족을 바라는 전반적인 분위기에 불구하고 전기화재의 경우 전체화재의 약 30% 범위를 유지하고 있으며, 연간 약 500억 정도의 손실을 초래하고 있다. 전기화재의 원인으로는 단락사고가 주를 이루고 있으며, 과부하, 누전, 트래킹 등이 뒤를 이어 많은 점유율을 보이고 있다. 환경적 원인으로는 사계가 뚜렷하여 온도나 습도의 변화가 심하고, 황사피해가 심한 환경을 가지고 있으며, 삼면이 바다로 둘러싸여 염해에 대한 영향을 가지고 있다는 것이다. 최근에는 도시화 공업화가 촉진되면서 집약적이고 산업화된 지역이 개발되어 공해에 대한 영향이 심각한 수준에 이르고 있다.

절연재료의 표면에 부유분진이 자중에 의해 가라앉으면서 온도 및 습도의 영향에 의해 누설전류가 흐르고 표면이 탄화된다. 분진의 종류에 따라 사고의 과정은 빠르거나 오랫동안 지속되었다가 발생되어진다. 최근 전기설비에 있어서 노출충전부(exposed live part)에 분진에 의한 오염이 상존된 상태에서 습도의 변화에 의해 화재로 이어지는 경우가 다수 발견되었다. 따라서 이러한 사고메커니

즘을 규명하고 원인에 대한 실험적 검증이 우선 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 저전압 절연재료로 이용되는 폴리염화비닐과 페놀수지의 표면열화를 통해 전기안전 평가를 실시하였다. 표면 열화는 IEC60068-2-11에 준하였으며, 표면열화 상태는 접촉각을 측정하여 비교하였다. 현미경을 이용하여 표면의 거칠기 등을 확인하였다. 실험조건은 대기조건(surrounding conditions)으로 압력이 1,013 mbar 및 온도 20℃의 기준을 가진다.

2. 분진과 전기안전

그림 1에 본 실험에 사용된 PVC, 베이클라이트, 아크릴의 3종류를 나타낸다. 3종류 모두 두께 3mm, 직경 7mmφ로 동일하게 제작하였다. 그림 2는 IEC 60068-2-11에 의한 염수분무 시험장치 및 시료 세팅 사진을 나타낸다.

IEC 61241-10에서 보면, 분진(particulate)은 일정시간 공기 중에 떠 있다가 자중에 의해 가라앉는 섬유 또는 먼지 등을 포함하는 아주 작은 고체 입자로 정의하고 있다. 일반적으로 분진은 먼지(dust), 증기(fume), 연무(mist) 등을 포함한 총칭을 말한다.

전기설비에 위해한 영향을 미칠 수 있는 도전성 분진은 산업안전기준에서 전기저항율이 $10^3 \Omega \cdot m$ 이하인 분진으로 정의하고 있다. 그러나 현장에서

발생되는 전기사고의 경우 수분과 결합하여 누설 전류가 흐르는 과정에서 사고로 진전된다.

부유분진의 농도 측정방법은 한국산업규격에서도 자세히 설명되어 있다. KS A 0079(2004)에서 확인할 수 있듯이 부유측정방법과 포집측정방법에 의해 구분하고 있다. 부유측정방법으로는 광도계식, 광도 비색계식, 광량 적산계식, 입자계수계식, 흡광 광도계식 등으로 나누어지고, 포집측정방법으로는 온도구배식, 충돌식, 침강식, 정전식, 여과식 등으로 구분하고 있다.

농도측정방법으로 쓰이는 것으로 계수법(개/m³)과 칭량법(mg/m³) 등이 있다. 본 연구에서는 포집측정방법의 여과식으로 칭량법에 의해 농도를 측정하는 방법을 채택하였다. 이는 현장에서 짧은 시간동안 다량의 분진을 포집하여 실험실 조건에서 분진의 특성을 분석하는데 용이하다. 분진에 대한 위험구분에 있어서 분진발생에 따라 위험장소를 구분하고 있으며, KS C IEC 61241-10과 KOSHA E-18-2006에 나와 있듯이 Zone 20, Zone 21, Zone 22로 구분된다. Zone 20은 분진운의 연속존재지역이다. Zone 21은 1차 누출원으로 정상작동 중에 빈번하게 가연성 분진이 누출될 수 있는 지역을 의미한다. Zone 22는 2차 누출원으로서 정상작동 중에 누출 우려가 없는 장소이거나 만약 누출된다면 아주 드물거나 아주 짧은 시간 동안만 누출되는 지역을 말한다. 일반적인 분진의 점화온도는 약 230℃에서 250℃의 범위이고, 분진운에 대한 점화온도 범위는 약 410℃에서 450℃까지이다. IEC 60721과 KOSHA E-25-2000에 의하면, 외부고형물의 존재를 6단계로 구분하고 있다. 표 1은 외부고형물에 대한 구분을 정리한 것이다[1].

표 1. 외부고형물의 분류

Table 1. Classification of external suspended solids

등급	먼지의 특성	크 기
AE1	무시	양 또는 성질 모름
AE2	작은 물체	min. 2.5mm ≤
AE3	미세한 물체	min. 1mm ≤
AE4	가벼운 먼지	10 < P _a < 35 mg/(m ² · D)
AE5	중간 먼지	35 < P _a < 350 mg/(m ² · D)
AE6	무거운 먼지	350 < P _a < 1000 mg/(m ² · D)

분진에 의해 발생되는 전기재해로서는 누설전류에 의한 감전사고 또는 전기화재, 설비사고, 절연파괴에 의한 악영향 등이 나타날 수 있다. 따라서

이를 효과적으로 차단하고 관리하기 위해서는 철저한 점검과 검사만이 가능하고 분진이 다수 발생하는 지역에 대해서는 분진을 전기설비에 침적되지 않도록 하는 것이 중요하다. 본 실험에서 의도하고자 하는 전기사고는 절연재료의 표면에 분진이 존재하고 주변 환경에 의해 습도가 높아졌을 경우 절연재료 표면의 열화를 분석한 것이다. 저전압 절연재료로 흔히 쓰고 있는 폴리염화비닐 계열의 재료와 폐놀수지계열의 재료를 이용하여 전기안전성을 평가하였다[2]. 그림 1은 전극 사이에 분진이 침적되었을 경우 수분 또는 염수를 떨어뜨려 누설전류가 흐르고 화재로 이어지는 과정을 개략화 한 것이다.

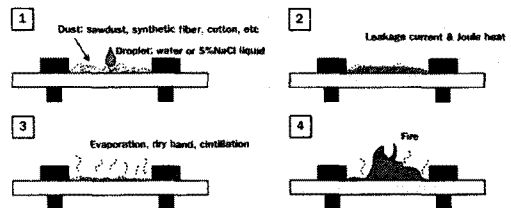


그림 1. 분진과 수분에 의한 탄화도전로 형성 과정

Fig. 1. Formative process of carbonization conductive path by dust and mist

3. 실험구성 및 방법

직경 70mm에 두께 3mm인 크기의 폴리염화비닐계의 PVC 패널과 폐놀수지계의 베이클라이트(bakelite) 시료를 이용하였다. 염수분무는 IEC 60068-2-11에 준한 방법으로 100시간마다 처리한 후 접촉각을 측정하였다. 500시간까지 총 6단계로 나누어 열화시켰다. 염수분무에 의해 열화된 시료는 BS EN 60529에 준한 분진시험을 통해 접촉각을 측정하였다. 각각의 시료는 발수성 및 친수성에 대해 평가하였다. 그림 2는 실험방법에 대한 개략적 흐름도를 나타낸 것이다[3].

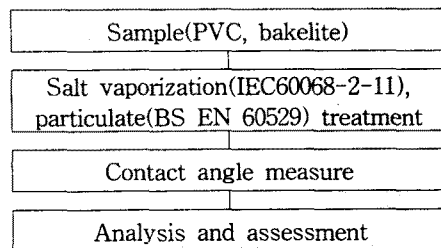


그림 2. 실험 및 분석 흐름도

Fig. 2. Flowchart of experiment and analysis

염수분무에 있어서 미세 습한 안개를 균일하게 발생하는 구조로 되어 있으며, 농도는 5±1% NaCl 수용액으로 수온이 35°C 이상을 유지하였다. 시편은 표면상태가 청결하도록 하였으며, 후처리로서 세척 후 1시간 이상 방치한 후 접촉각을 측정하였다. 본 실험은 액체방울이 고체에 붙을 때의 부착젖음을 이용한 것이다. 그림 3은 절연재료 표면에 액체방울을 떨어뜨려 측정하는 방법 중 sessile drop method을 나타낸 것이다. 고체표면에 액체방울을 떨어뜨리면 표면에너지(surface energy) 및 계면장력(interface energy)의 균형에 의해 액체방울은 특정한 형태(곡면)를 나타낸다. 이때 액체의 표면 접선과 액체-고체간에 계면이 이루는 각을 접촉각(contact angle)이라 한다.

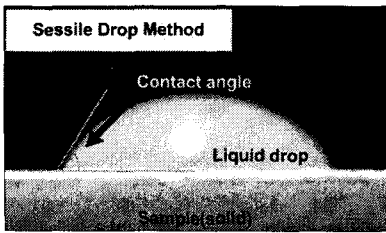


그림 3. 접촉각 측정에 대한 개략도
Fig. 3. Schematics for contact angle measure

여기서 접촉각(θ)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.

4. 실험결과 및 분석

4.1 PVC 절연재료 표면에서의 발수특성

그림 4는 폴리염화비닐의 염수분무에 따른 접촉각을 측정된 것이다.

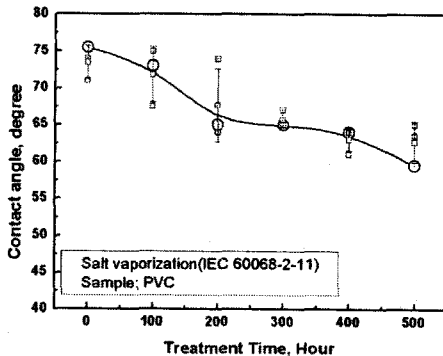


그림 4. 염수처리한 PVC의 접촉각 측정 곡선
Fig. 4. CAM curve of salt vaporized PVC

그림에서 염수처리하지 않은 경우 약 75°의 접촉각이 측정되는 것을 알 수 있으며, 500시간 염수처리한 시료는 약 63°인 것으로 나타났다. 염수처리하는 동안 젖음특성은 친수성에 가깝게 변하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 5는 PVC가 각각의 염수처리하는 과정에서 분진처리를 하였을 경우 측정된 접촉각 곡선에 대해 나타낸 것이다. 염수처리하지 않고 분진처리한 시료의 경우 약 63°가 측정되고, 염수분무를 500시간 하고 분진처리한 경우 약 60°인 것으로 나타났다. 따라서 대부분의 측정치가 염수처리에 관계하지 않는 것으로 볼 수 있다.

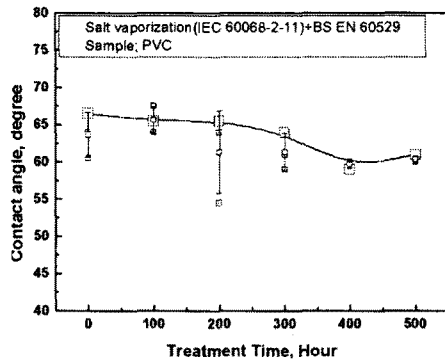


그림 5. 염수 및 분진처리한 PVC의 접촉각 측정 곡선
Fig. 5. CAM curve of salt vaporized and dust treated PVC

그림 6은 염수처리한 PVC와 염수 및 분진처리한 PVC에 대한 접촉각 측정자료를 비교한 것이다.

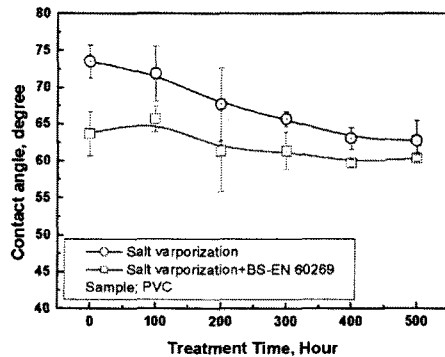


그림 6. 염수처리 vs. 염수 및 분진처리한 PVC의 접촉각 비교
Fig. 6. Comparison with CAM curves of salt vaporized vs. salt vaporized and dust treated PVC

그림에서 알 수 있듯이 염수만 처리한 PVC는 기술키가 75°에서 63°로 하강하는 경향을 보였으나, 염수 및 분진처리한 PVC는 63°에서 60°로 기

기가 거의 없는 경향을 보였다. 초기에는 접촉각의 차이가 약 12° 정도였으나 500시간 염수처리한 경우 약 3°의 차이가 나는 것으로 확인되었다. 따라서 염수 및 분진처리한 시료가 염수처리한 시료보다 친수성에 가까우며, 분진에 의한 젖음 정도가 지배적인 것으로 나타났다.

4.2 폐놀수지계 절연재료 표면에서의 발수특성

그림 7은 베이클라이트를 이용하여 염수처리 정도에 따른 접촉각 측정을 통해 표면발수성 평가를 나타낸 그래프이다. 염수처리하지 않은 시료는 약 66°인 것으로 나타났으나 500시간 염수처리한 경우의 시료는 접촉각이 약 44°인 것으로 나타났다. 따라서 염수에 의한 표면 영향이 지배적인 것으로 판단된다.

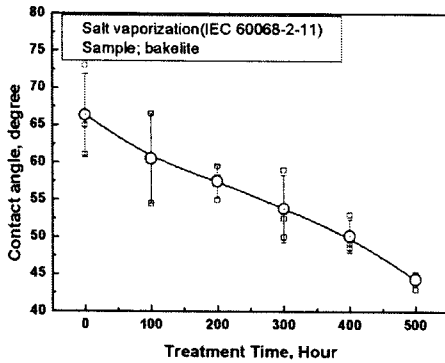


그림 7. 염수처리한 베이클라이트의 접촉각 측정 곡선
Fig. 7. CAM curve of salt vaporized bakelite

그림 8은 각각의 단계에서 염수처리한 베이클라이트를 분진처리하여 접촉각을 측정한 자료이다. 그림에서 알 수 있듯이 접촉각은 약 63.5°에서 약 43°로 접촉각이 작아지는 경향을 보였다.

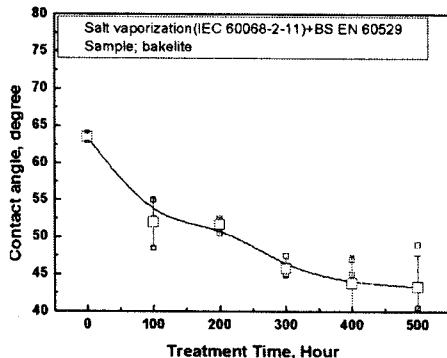


그림 8. 베이클라이트의 염수 및 분진처리에 의한 접촉각 측정 곡선
Fig. 8. CAM curve of salt vaporized and dust treated bakelite

그림 9는 염수처리한 베이클라이트와 염수 및 분진처리한 시료의 접촉각을 비교한 것이다. 분진처리한 경우의 시료가 같은 처리조건에서 접촉각이 대체로 작아지는 경향을 확인할 수 있다.

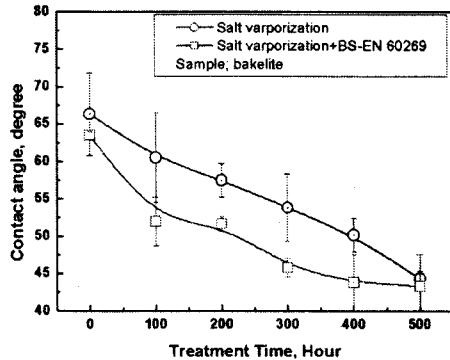


그림 9. 베이클라이트의 염수처리 vs. 염수 및 분진처리 시료의 접촉각 비교

Fig. 9. Comparison with CAM curves of salt vaporized vs. salt vaporized and dust treated bakelite

4.3 PVC와 베이클라이트의 접촉각 측정비교

그림 10은 PVC와 베이클라이트의 접촉각을 측정비교한 것으로 베이클라이트의 접촉각 측정에 의한 기울기가 PVC에 비해 더 큰 것으로 보아 염수에 의한 영향이 비교적 큰 것을 알 수 있다. 따라서 염수에 의한 표면안정성은 PVC가 우수하며, 발수성 또한 우수한 것으로 나타났다.

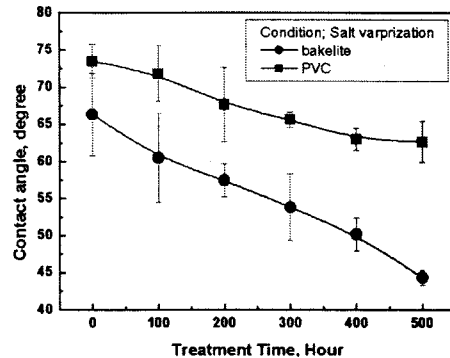


그림 10. PVC와 베이클라이트의 접촉각 측정 비교

Fig. 10. CAM Comparison with PVC and bakelite

그림 11은 분진처리한 PVC와 베이클라이트의 각각의 단계에서 접촉각을 측정하여 비교한 것이다. 분진처리에 의한 경우에서도 기울기가 PVC보다 베이클라이트가 큰 것으로 나타났다. 따라서 접촉각에 의한 측정으로 상대적인 재료의 표면개질 평가가 가능한 것을 알 수 있다.

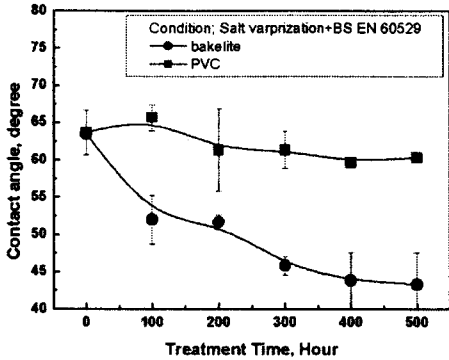


그림 11. 분진처리한 PVC와 베이클라이트의 접촉각 측정 비교
 Fig. 11. CAM Comparison with dust treated PVC and bakelite

5. 결론

저전압 절연재료에서 나타나는 전기사고 위험성을 평가하기 위해 실시한 염수 및 분진처리에 의한 시료의 접촉각 측정을 통해 염수에 의한 경우와 분진처리에 의한 경우 PVC의 표면안정성이 베이클라이트보다 우수한 것으로 평가되었다. 본 실험은 초기 단계로서 저전압 절연재료로 많이 이용되는 아크릴수지와 더불어 평가를 실시하고 열화된 시료의 트래킹 실험과 재료분석 등을 실시하여 열화단계를 정량화하고 비교평가하는 자료로 활용할 예정이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] IEC 61241-10, "Classification of areas where combustible dusts are or may be present - electrical apparatus for use in the presence of combustible dust", 2006
- [2] KS C 0223, "환경시험방법(전기·전자) 염수분무시험방법_2005", 기술표준원, 2005
- [3] 한국전기연구소, "초고압 LSP 개발 및 절연물의 복합열화 진단 기술 연구", 과기부보고서, pp.55~58, 1999