

경사평면법에 의한 실리콘 고무 침식의 진전 과정과 누설전류 변화와의 상관성에 대한 연구

논문
12-11-10

The Relation between Erosion Process and Leakage Current Change of Silicone Rubber by Inclined-Plane Method

유영식*, 김정호**, 서광석**, 조한구***, 박용관**

(Yeong-Sik Yoo*, Jeong-Ho Kim**, Kwang-Seok Seo**, Han-Goo Cho***, Yong-Kwan Park**)

Abstract

In this study, the relation between erosion process and leakage current of the silicone rubber was investigated in Inclined-Plane Method. So, the change of the leakage current waveform with the oscilloscope through the elapsed time of experiment and erosion depth were measured. From the results, it was observed that the typical leakage current waveform was the mixed figure of sinusoidal wave and arc wave. And, it is considered that the former is due to conductivity of the contaminant when the surface is wet, and the latter is due to the arc discharge of dry band. And, as the surface erosion is accelerated, the proportion of the arc wave increases. And, the discharge duration changes with the elapsed time and can be divided into three regions, which is similar to the changes of erosion depth. It is obvious that increased duration and intensity of arcing on the surface should increase the erosion rate, so when the arc having larger energy appears continuously, the erosion rate increases rapidly. Therefore, it can be known that the erosion process has some correlation with the change of leakage current, it is needed for the ageing diagnosis that extracting arc from leakage current components and integrating it.

Key Words(중요용어) : erosion(침식), Inclined-Plane Method(경사평면법), sinusoidal wave(sine파), arc wave(아크파), discharge duration(방전지속 시간), leakage current(누설전류)

1. 서 론

최근 전력사용량의 급격한 증가 및 전력계통의 초고압화로 인해 선로절연물은 소형·경량화가 요구되고 있으며, 절연성능 또한 고도화가 요구되고 있다. 따라서, 종래에 사용되던 자기절연물은 가공성 및 절연성이 우수한 고분자절연물로 대체되고 있는 실정이다. 고분자절연물은 자기절연물에 비해 표면 에너지(surface energy)가 낮으므로 표면에 수분이 존재

할 때 퍼지지 않고 방울로 뭉쳐 쉽게 굴러 떨어지며 오염된 환경에서 표면 누설전류값을 낮게 유지시켜 주므로 강우 및 염해에 의한 옥외환경 하에서 뛰어난 특성을 나타내고 있다.

고분자절연물 중에서 특히 실리콘고무는 옥외용 절연물로 더욱 선호되고 있다. 그 이유는 실리콘 고분자가 유기 및 무기화학 결합을 공히 가지고 있고 분자사슬이 유연하여 온도변화에 따른 물성변화가 적을 뿐만 아니라, 아크나 UV 에너지에 의해 화학결합이 쉽게 열화되지 않는다는 장점을 가지고 있기 때문이다. 이러한 점은 비단 오손 지역에서의 부분 아크 및 환경적인 영향에 의한 열화 뿐만 아니라, 연속적인 전기적 스트레스에 의한 국부적 코로나 진전 등에도 강한 특성을 보이기 때문에 옥외용 절연재료로서 광범위하게 이용될 수 있다^[1].

그러나, 대부분의 고분자절연물과 마찬가지로 옥외의 가혹한 자연환경에 노출되면, 태양광, 환경오염,

* : 여주대학 전기과 교수
(경기도 여주군 여주읍 교리 산 6-16, Fax : 0337-885-9451 E-mail : steelman@yeojoo.ac.kr)

** : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부

*** : 한국전기연구소 절연·파괴기 기술연구팀
1999년 10월 2일 접수, 1999년 10월 18일 심사완료

수분흡수, 및 전기적·열적·기계적 스트레스 등에 의한 열화로 인한 절연파괴를 피할 수 없게 된다. 옥외용 절연물에 있어서 주된 절연파괴의 요인으로는 표면의 오손 및 장기간의 열화를 들 수 있다^[2]. 특히, 장기간 옥외에서 사용함에 따라 강우나 먼지 등에 의해 재료표면에 오염물질이 축적되고, 이 오염된 표면이 젖게 되면 전기적 스트레스에 의한 누설전류 및 주열의 발생으로 표면이 불균일하게 건조된다. 이에 따라 건조대의 전압 분담률이 높아지게 되므로 미세한 방전이 발생하여 재료 표면이 국부적으로 탄화하거나 침식되게 된다^[3]. 표면 아크의 지속시간 및 강도의 증가에 의해 침식률이 증가하며^[4], 이러한 방전의 반복에 의해 트레이킹 및 침식이 진전되어 최종적으로는 절연파괴에 도달하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 아크에 의한 영향을 정량화하기 위해 시간에 따른 침식깊이를 측정하였고, 몇가지 성분의 전류 측정에 의해 침식률과의 연관성을 분석함으로써 열화의 전이과정을 밝혀내고자 하였다. 한편, 접촉각을 측정하여 표면의 열화에 의한 발수성의 변화를 관찰하였다.

2. 관련 이론 및 원리

2.1 고분자 절연재료의 파괴 메카니즘

일반적으로, 절연재료 표면에서의 방전에 의한 재료 파괴는 열적인 파괴에 속해 있음이 알려져 있다. 그 과정은 두 개의 단계로 나누어진다 : 첫 번째는 완만한 파괴 단계이고, 두 번째는 급격한 파괴 단계이다^[5].

완만한 파괴의 단계에서는 건조대에서의 일련의 미세 방전들이 재료의 파괴를 야기시킨다. 일단 시료 표면의 오손액이 상부 전극에서 아래로 흘러 내려서 하부 전극 근처에 닿게 되면, 방전이 개시된다. 방전의 위쪽 끝 부분(상단)과 아래쪽 끝 부분(하단)은 각각 오손액과 하부 전극에 닿아 있다. 방전의 발생으로 오손액이 증발함에 따라 방전의 상단은 위쪽으로 이동하게 되고, 방전은 점차적으로 길어지게 된다. 그것이 일정한 길이에 도달하게 되면, 방전을 유지하기 위한 전압의 공급이 충분하지 않게 되므로, 방전은 소멸하게 된다. 따라서, 인가전압과 오손액의 흐름이 일정하게 유지되면, 이러한 방전의 개시 및 소멸의 과정이 계속 반복되게 된다.

고분자 재료는 열분해 온도인 T_d 를 가지고 있고, 재료의 온도가 T_d 보다 작지 않으면, 재료는 연소하게 된다^[6]. 방전지속 시간 동안 방전 하단에서는 시료가

타고 있고 이 온도는 T_d 보다도 상당히 높다. 그러나, 시료는 스스로 방전을 소멸시키려는 특성을 가지고 있기 때문에 재료의 연소는 외부에서의 에너지 입력이 없으면, 유지될 수 없다. 따라서, 방전이 소멸되면 곧 재료도 연소를 멈추게 된다. 한편, 시료의 미세한 연소 영역 주위의 넓은 면적에 있어서는 방전에 의한 온도 상승이 발생하긴 하지만, 방전지속 시간 동안에도 T_d 보다는 작다. 따라서, 그 영역에서는 재료의 연소는 발생하지 않는다. 방전소멸 시간 동안에 연소 영역과 그 주위의 온도는 서서히 감소하지만, 여전히 연소가 발생하기 전보다는 높다. 이러한 과정이 계속 반복되고, 각각의 방전은 방전 하단 영역 내에서 미세한 침식 영역을 형성할 뿐만 아니라, 침식 영역 주위의 넓은 면적에까지 온도를 증가시키게 된다. 하부 전극 근처의 전체 영역이 T_d 에 이르게 되면, 다음의 방전은 재료의 연소를 야기하게 되고, 재료는 급격한 파괴의 단계로 접어들게 된다.

방전지속 시간 동안, 외부 전력에 의해서 공급되는 에너지의 일부는 오손액에 의해서 소비되고, 나머지는 방전에 의해서 소비된다. 오손액의 온도는 그 포화 증발 온도인 T_s 보다 낮다. 따라서, 오손액에 의해서 소비되는 에너지의 경우, 시료에 전달되는 에너지의 크기는 매우 한정되어 있다. 방전의 상단은 이 오손액에 접해 있으며, 이는 에너지를 오손액의 수막을 통해서 시료로 전달한다. 따라서, 이 에너지도 역시 T_s 로 인해 아주 제한된 양만큼 시료에 전달되게 된다. 방전의 중간 부분은 시료의 표면과 그다지 가깝게 접해 있지 않다. 따라서, 이 방전이 시료의 표면에 전달하는 에너지도 마찬가지로 제한되어 있다. 방전의 하단은 하부 전극과 인접해 있거나, 하부 전극에 직접 연결되어 있거나, 또는 시료의 표면과 직접 연결되어 있다. 따라서, 그 에너지는 시료의 표면에 직접 전달될 수 있다.

요약하면, 완만한 파괴의 단계에서는 외부의 전력에 의해서 공급되어 방전의 하단에서 소비되는 에너지는 시료의 파괴를 유발하는 직접적인 원인이다. 급격한 파괴의 단계에서는 시료의 연소에 의해 방출되는 에너지가 파괴를 일으키는 주된 원인이 된다^[5].

2.2 고분자 절연재료의 침식 현상 및 표면 누설 전류

고분자 절연재료의 침식과정은 다음 네 개의 단계로 나눌 수 있다^[7].

1 단계 : 상부전극에 인가된 전압이 전도성의 오손액을 따라 전류를 발생하고, 오손액은 부분적으로

증발하며, 이 때 건조대가 형성되어 전기적 방전이 발생한다.

2 단계 : 하부전극에 아크가 안정되면 이 단계가 시작된다. 하부전극과 오손액 사이의 방전에 의해 시료 표면이 어둡게 변색되며 온도가 서서히 올라가고 재료의 손실은 아주 적다.

3 단계 : 1~2 mm 직경의 밝은 불꽃 영역에 의해 하부전극에서 인접한 부분에서 고온영역이 발생한다. 이것이 destruction phase의 시작이다.

4 단계 : 실리콘 고무의 경우, 불꽃 영역이 점점 확대되고, 깊이 방향으로 국부적인 침식점이 구멍이름 형성하게 된다. 파괴된 재료는 타면서 표면에 새로운 층을 형성하게 된다. 3 단계에서 4 단계로의 진전은 점진적으로 발생하게 된다.

한편, 표면 누설전류는 다음과 같은 특징을 나타낸다. 시료 표면을 흐르는 전류의 실효치는 오손액이 증발하기 직전에 최고를 나타낸다. 전류는 건조대의 형성에 의해 매우 다양하게 변화한다. 건조대에서 scintillation이 나타날 때에도 전류의 크기는 연속적인 수막 생성시와 크게 다르지 않는데, 두 경우 모두 오손액막의 저항에 의해 주도되기 때문이다. scintillation 시 전류의 파형은 다양하게 변하지만, 변압기의 출력전압과 동위상이다.

연속적인 수막을 통한 전류의 파형은 찌그러지지 않은 sine 곡선을 나타내지만, scintillation이 발생하면 파형은 찌그러진다. 전압의 극성이 바뀌면 건조대는 파괴되고 찌그러진 파형의 폭이 변하면서 power arc와 같은 양상을 나타낸다⁽⁴⁾.

일반적으로, 재료의 파괴를 유발하는 침식 및 트래킹의 발생은 표면 방전 및 국부적인 아크에 의한 열적 열화임이 알려져 있다⁽²⁾⁽⁶⁾. 또한, 아크는 표면 누설전류 성분에도 포함된 형태로 나타나게 되므로, 표면 열화를 진단하기 위해서는 표면 누설전류 성분 중에서 아크 에너지와 직접적인 관련이 있는 성분을 추출하는 것이 중요하다. 따라서, 실리콘 고무 열화의 주된 형태인 침식의 진전과정과 누설전류 성분과의 상관성을 조사하는 방법으로 열화 진단의 응용 가능성을 타진할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 시편 제작 및 실험

내트래킹 및 내침식성 평가 실험은 IEC publ. 60587에 따른다⁽⁶⁾. 그림 1에 실험의 회로도를 나타내었다. 고전압 측에서 시편을 통해 60 mA 이상의 전류가 2 초간 연속적으로 흐르는 경우, 과전류 차단기가 작동하여 회로를 차단한다.

그림 1. 내트래킹성 및 내침식성과 누설전류 파형을 측정하기 위한 IEC publ. 60587 실험의 회로도.

Fig. 1. Schematic circuit diagram of IEC publ. 60587 for measuring tracking and erosion resistance and leakage current waveform.

인가전압은 4.0 kV로 고정하였으며, 실험 시간은 6 mm 두께의 시편이 완전히 침식되어 시편의 뒷면에 구멍이 뚫릴 때까지 계속하였다. 오손액은 표 1에 보이는 것과 같이 0.1% NH₄Cl과 0.02% iso-octyl-phenoxypolyethoxyethanol(non-ionic surfactant)를 증류수와 혼합하여 사용하였다. 또한, 오손액의 전도도는 약 2500 S/cm(23℃)가 되도록 하였다. 시편은 제조사가 다른 두 종류의 실리콘 고무를 180℃에서 10 분간 일정한 압력 하에서 경화시켜 제작하였으며, 시료의 두께는 6 mm로 하였다. 제작된 실리콘 고무의 사양으로 베이스 고분자와 충전제 성분을 표 2에 나타내었다. 실험을 위해 시료는 50mm×120mm×6mm의 규격으로 잘라서 45°각도의 경사를 가진 홀더에 부착하였다.

표 1. 트래킹 시험을 위한 오손액의 조성 (g/l).
Table 1. Ingredient of the contaminant for the tracking test (g/l).

NH ₄ Cl	1.0
Nonionic surfactant (TRITON X-100)	0.2

또한, 레코더와 100Ω의 shunt resistor를 직렬

로 연결하고, 오실로스코프 probe를 shunt resistor의 양단에 연결하여 누설전류의 파형을 측정하였다. 그리고, 평균실효전류, 방전지속 시간 및 누설전류의 파형을 측정하여 실험의 경과 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 또한, 표면 방전과 침식 양상을 육안으로 관찰하여 누설전류 파형과 침식의 진전과정과의 연관성을 파악하고자 하였으며, 이러한 연관성을 확인하기 위해 침식 깊이를 측정하였다. 마지막으로 표면 열화의 세부적인 양상 및 발수성의 변화를 관찰하기 위해 접촉각을 측정하였다.

표 2. 실리콘 고무 시료의 세부 항목.
Table 2. Details of silicone rubber samples evaluated.

Sample ID	Base gum (pph)	Treated ATH (pph)
SR-1	100	100
SR-2	100	120

4. 실험결과 및 고찰

그림 2에 시간에 따른 침식 깊이의 변화를 나타내었다. 침식은 초기부터 일정시간까지는 직선적으로 증가하는 경향을 나타내지만, 표면의 열화가 상당히 진전된 후부터는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 방전형상의 변화에 비추어 볼 때, 초기의 방전이 자주색의 글로우 방전 형태를 띠고, 그 이후 국부적인 침식점에서 밝은 불꽃 영역(미소발광방전)이 나타나게 되는데, 이 때의 침식은 2 단계와 3 단계, 즉 급격한 파괴단계로의 전이점에 해당함을 알 수 있다. 마지막으로, 침식의 기울기가 급격하게 증가하는 4 단계에서는 불꽃 방전이 연속적으로 발생함을 관찰할 수 있었다.

일반적으로, 침식률은 표면에서의 국부적 아크에너지 밀도와 그 지속 시간에 따라서 변화한다. 아크 에너지는 국부적 아크와 전체 인가전압에 의해 결정되는 전류에 따라 변한다. 아크 지속 시간은 아크가 형성되기 전이나 형성되는 중에 표면으로 떨어지는 오손액의 증발 속도에 따라 다르게 나타난다^[10]. 따라서, 침식률은 아크 방전이 긴 지속시간 계속될 때 크게 증가하며, 아크의 지속 시간이 긴 영역 4 단계에서 대부분의 침식이 발생하게 됨을 알 수 있다. 즉, 이 영역에서는 아크 방전이 연속적으로 발생하기 때문에

방전에 의한 시료의 표면 온도가 급격히 증가하여, 재료의 분해를 가속화시킨다.

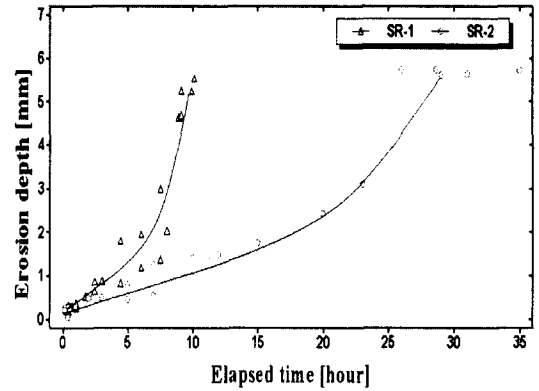


그림 2. 시간에 따른 침식 깊이의 변화.
Fig. 2. The change of erosion depth with elapsed time.

그림 3에 SR-1 및 SR-2 시료에 대해 경과 시간에 따른 실효치의 평균 누설전류 크기를 나타내었다. 누설전류의 크기는 실험 시작 초기부터 급격히 증가하고 실험의 종료시까지 거의 일정하게 유지되는 경향을 보인다. 실험시간이 증가하게 되면, 방전의 반복에 의해 표면의 열화가 점점 증가하게 되어 표면 침식의 증가 및 탄화로의 진전이 육안으로도 쉽게 관찰되었음에도 그림과 같이 누설전류의 크기는 거의 증가하지 않는 이유는 실리콘 고무가 가진 양호한 발수성의 동적 회복 능력 때문으로 생각된다^[11]. 일반적으로, 발수성은 누설전류와 밀접한 관계가 있고, 고분자 절연물은 표면 에너지가 낮아서 양호한 발수성을 가지고 있는데, 특히 실리콘 고무의 경우 표면의 열화가 진전되면, 밀도가 낮은 저분자 오일이 벌크에서 표면으로 확산하여 표면 에너지를 낮게 유지시키는 발수성의 회복능력이 뛰어나다. 이렇게 발수성이 뛰어난 재료는 누설전류의 증가를 억제하는 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다^{[12][13][14]}. 위의 결과를 통해, 실리콘 고무에 있어서 누설전류 실효치의 크기는 열화의 진전을 나타내는 지표로는 사용할 수 없음을 알 수 있다.

그림 4에 오실로스코프로 측정된 전형적인 방전 파형의 변화를 5 초 범위로 나타내었다. 그림으로부터, 실험 시간이 경과함에 따라 방전소멸 시간이 점점 감소하여, 단위 시간당의 방전 횟수가 증가함을 알 수

있다. 그림 3의 (a)의 경우는 방전이 하부전극 근처에 고정되는 시간으로써, 방전이 발생하는 국부적 영역에서 침식점의 형성이 관찰되었다. 이 때부터 방전은 주황색의 미소발광 방전(scintillation, minute arc) 형태를 띠게 되며, 시간에 따라 방전 길이가 상부전극 쪽으로 점점 증가하였다. 결과적으로, 표면의 열화가 증가함에 따라 방전소멸 시간은 점점 감소하게 되고, 인가전압과 오손액 유량이 일정하게 유지되는 상태에서 방전은 결국 연속적으로 발생하게 됨을 알 수 있었다.

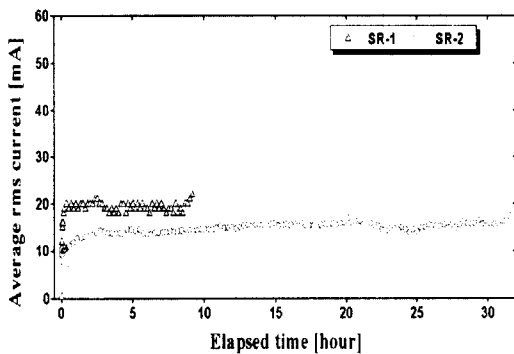
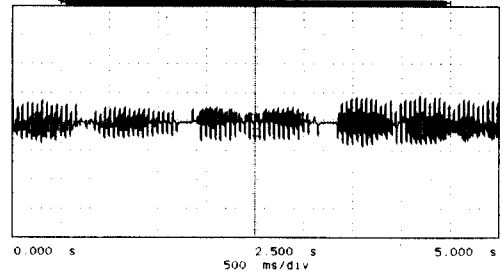


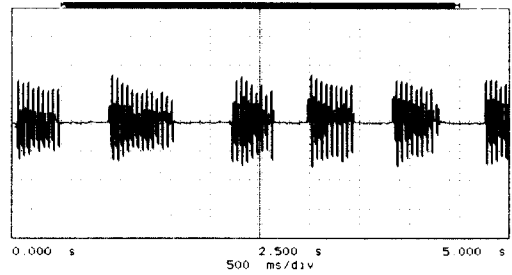
그림 3. 시간에 따른 실효치 평균 누설전류 크기의 변화.

Fig. 3. The change of the average rms current with elapsed time.

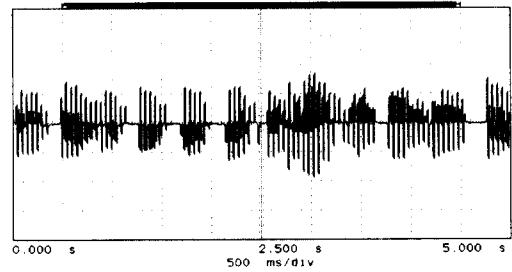
이렇게 방전이 연속적으로 나타나는 현상은 재료의 표면 거칠음으로 인한 확장 젖음성 증가와 일정한 영역으로 고정된 건조대의 전체적인 온도상승 및 방전을 소멸시키려는 재료의 특성 소실 등이 원인이 되는 것으로 생각된다. 즉, 표면의 거칠음은 재료의 흡습성을 증가시켜 수막의 두께를 두껍게 하므로, 누설전류의 흐름을 용이하게 한다. 또한, 재료의 온도가 상승하면 절연파괴의 세기가 감소하므로^[15], 그만큼 방전의 발생이 용이해지기 때문으로 생각된다. 온도상승과 연속 방전의 발생과의 관계를 조사하기 위해 연속 방전이 발생한 시점에서 전압인가를 멈추고 표면이 충분히 식을 때까지 기다린 후 다시 전압을 인가한 결과, 다음 연속 방전의 발생은 일정 시간 이상이 경과하여 침식 영역의 온도가 증가한 후에 발생함을 관찰할 수 있었다. 따라서, 방전 영역의 온도에 의한 영향 및 연속 방전의 발생에 필요한 임계 온도의 존재 등에 대한 차후의 연구가 필요한 것으로 보인다.



(a) Initial stage of discharge



(b) When discharge settles down the lower electrode



(c) Before discharge becomes continuous

그림 4. 5 초 범위로 측정된 방전파형의 전형적인 변화.

Fig. 4. Typical changes of the discharge waveform in the range of 5-second scan.

그림 5에서는 각각 시간에 따른 방전지속 시간을 그림 6에서는 방전지속 시간 그래프를 세 영역으로 나누어 나타내었다. 그림으로부터, 방전지속 시간을 나타내는 곡선의 기울기는 시간축 상의 두 임계점을

기준으로 변화하여, 곡선을 세 영역으로 나누는 것을 알 수 있다. 방전의 형상을 육안으로 관찰한 결과, 첫 번째 점은 자주빛을 띠는 코로나 및 글로우 방전이 붉은색 및 흰색의 미소발광 방전으로 변화하여 하부 전극 근처의 국부적 영역에 고정되는 시간과 일치함을 확인할 수 있었다. 두 번째 점은 방전소멸 시간의 점진적인 증가의 결과 마침내 연속적인 방전이 발생하는 점과 일치하였다. 또한, 이 곡선의 영역 II에서 영역 III으로의 전이 단계는 침식깊이의 전이 단계와 유사한 형태를 나타내고 있다. 그 이유는 반복되는 방전에 의한 열 에너지가 침식을 일으키는 주된 성분이기 때문으로 생각된다. 코로나 및 글로우 방전은 시료 표면을 열화시켜서 표면의 발수성을 떨어뜨린다. 그리고, 반복되는 미소발광 방전에 의해 하부전극 근처에서 도전성 탄화점 및 침식점이 발생하게 되며, 이 때의 열에너지에 의해 재료는 침식 및 트래킹 열화가 발생하게 된다. 또한, 미소발광 방전 지속시간의 증가는 대기에 의한 재료의 cooling을 방해하기 때문에 결국 열의 축적에 의해 재료의 침식은 가속되게 된다. 그림 2와 그림 5로부터 침식에 의한 열화의 진전과정 중 완만한 침식 단계에서 급격한 단계로의 전이점을 방전지속 시간의 관찰을 통해 짐작해 낼 수 있을 것으로 생각된다.

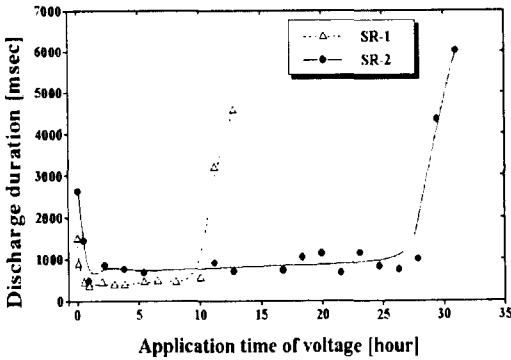


그림 5. 경과 시간에 따른 방전지속 시간의 변화.
Fig. 5. Discharge duration times with the elapsed time.

한편, 발표된 자료에 의하면, 가시광 센서 및 적외선 센서에 의해 방전의 광펄스를 계수한 결과, 경과 시간에 따른 광펄스 수의 곡선이 그림 5와 유사한 경향을 나타내고, 두 임계점은 각각 미소발광 방전의 개시 및 도전성 탄화로의 진전 시간과 일치한다고 보고하였다^[16].

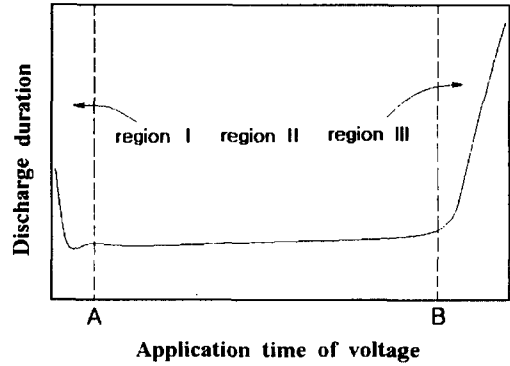


그림 6. 경과 시간에 따른 방전소멸 시간 변화의 영역 분할.
Fig. 6. The division of discharge duration into regions with elapsed time.

그림 7에 방전을 개시했을 때부터 각 세 영역이 끝날 때까지 소요된 시간을 나타내었다. 영역 I에서 소요된 시간은 1 시간 이하로써 두 재료 모두 같은 특성을 나타내었고, 영역 II와 III은 SR-1과 SR-2의 시간 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 이 때의 방전은 미소발광방전으로 밝은 불꽃이 나타나는 국부적 영역에서 재료의 온도는 고분자의 분해 온도 이상이 되는 것으로 생각된다. 이 단계에서는 충전제 ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$)의 물리적 효과, 즉 결정수 분해에 의한 자기세정 작용인 내부산화기구와 부피 효과가 작용하는 단계에 해당하는 것으로 생각된다. 충전제의 부피효과는 밀도 및 분포에 의해 내침식성을 향상시키는 작용인데, 높은 충전제 밀도에서 보다 적은 유기 분자가 표면 아크에 의한 열에 노출되고, 또한 충전제의 높은 열전도도로 인해 국부적 열점의 진전을 방지하게 되는 것이다^[17]. 따라서, 충전제의 함유량이 많은 SR-2에서는 내부산화기구 및 충전제의 부피효과가 유효하게 작용하지만, SR-1에서는 충전제의 함유량이 재료의 온도상승을 억제할 수 있을만큼 충분하지 않아 열의 축적이 가속되기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 영역 III의 경우, 방전의 연속에 의해 침식의 가속 및 시료 자체의 burning이 야기되는 단계인데, SR-1에 비해 SR-2의 경우는 시료가 완전히 파괴될 때까지 15 시간의 긴 시간이 소요되었다. SR-1의 경우 이 단계에서는 시료의 연소가 발생함이 관찰되었고, 반면 SR-2 재료의 경우에는 물리적 작용에 의한 내부산화기구 및 부피효과에 의한 cooling이 더욱 활발하게 발생하여, 재료의 연소는 발생하지 않음을 관찰할 수 있었다. 내부산화기구의 물리적

작용은 다음과 같이 정의된다. 열적 열화에 의해 ATH의 결정수가 해리하여 수증기의 형태로 비산하면서 이 때의 급격한 팽창작용에 의해 표면에 분해의 부산물 및 탄화물을 발생시키지 않는 현상을 나타내는데^[17]. 이는 실험중에 미세한 파편이 되는 형태로 나타나므로 육안으로도 관찰이 가능하다^[18]. 즉, 두 시료의 파괴시간까지의 차이는 충전제 함량의 차이에 기인하기 때문으로 생각된다.

일반적으로, 누설전류는 두 가지 성분으로 나누어 진다고 알려져 있다 : 그 하나는 아크에 의한 전류로서 표면의 열화에 기여하고, 나머지 하나는 오손액의 전도도에 의한 것으로 표면의 열화에 기여하지 않는다^[7]. 따라서, 고분자 절연재료의 표면 열화의 가속 단계는 표면의 국부적 영역에 자리잡은 아크가 장시간 지속될 때 발생한다.

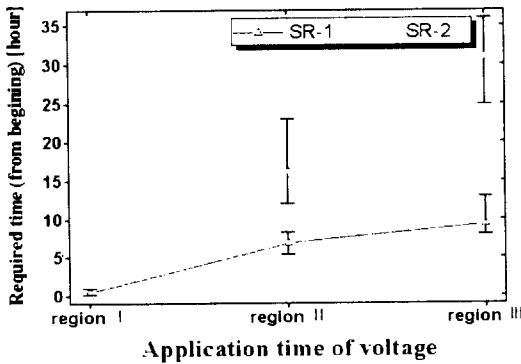


그림 7. 방전 시작부터 세 영역의 각 끝점까지 소요된 시간.

Fig. 7. Required time from beginning to each end point of three region.

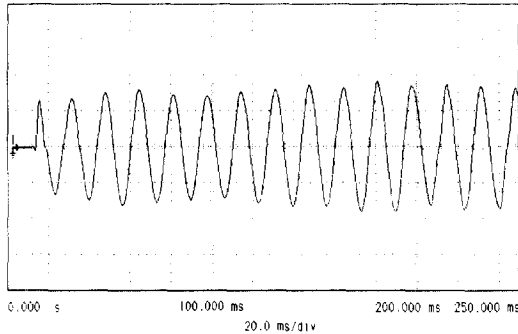
급격한 파괴의 단계에 해당하는 영역 III은 침식이 강하게 나타나는 단계로서, 단위 시간당 재료의 손실이 가장 크다. 또한, 재료의 표면에 하얀 색의 침적물도 나타나게 되는데, 이는 젖음성이 나빠기 때문에 오손액이 흘러내리는 것을 도와주는 일종의 통로 역할을 한다. 그러나, 열화의 진전에 따라 방전의 길이가 길어지게 되면 고온 영역이 확장하게 되고, 연소된 재가 층을 형성하게 되는데, 이러한 시간에 있어서는 시료 표면의 온도가 감소한다. 온도의 감소는 일정한 인가전압 하에서 시험하는 경우에 대하여 단위 시간당 재료의 손실을 감소시키는 작용을 한다. 따라서, 재료 표면의 침식되는 면적을 확장하는 데에

는 침식의 영역에 대하여 일정한 온도를 유지해 주어야 하기 때문에 외부에서의 더 많은 에너지 입력을 필요로 하게 된다. 결과적으로, 남아 있는 에너지에 의한 침식의량은 줄어들게 되는 것이다^[7].

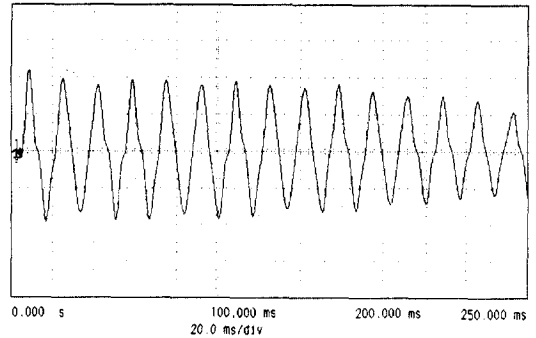
이러한 관점으로 볼 때, SR-2 재료의 경우 영역 III에서 방전이 연속적으로 발생함에도 불구하고, 재료의 완전 연소가 발생하지 않는 이유는 방전 영역의 확장에 의한 자체적 온도 감소와 높은 충전제 밀도에 의한 자기세정 및 cooling 효과 등이 상호 synergy 작용하여 재료의 연소를 적절하게 억제하기 때문으로 생각된다.

그림 8, 9, 및 10에 영역 I, II, III에서의 누설전류 파형을 나타내었다. 이 파형은 500 mili-second 범위로 scan한 것이다. 전형적인 누설전류 파형은 sine파와 아크파가 혼합된 형상이다. 영역 I에서는 방전 파형의 대부분이 sine파로 구성되어 있음을 알 수 있고, 영역 II에서는 아크파형의 비율이 점점 증가하였으며, 마지막으로 영역 III에서는 대부분의 파형이 아크파형을 나타내었다. 이 때의 sine 파형은 표면이 젖어 있는 상태에서 오손액의 전도도에 기인하는 성분으로 표면열화에 크게 영향을 미치지 못하는 성분이므로 건조대의 형성에 소요되고, 아크파형은 재료의 분해에 의한 침식의 가속에 기여하는 성분이다. 또한, 이 때의 아크파형은 전력 주파수보다 시간 축으로 폭이 좁은 성분 즉 증가된 주파수 성분을 띠게 되는데, 일반적으로 제 3 고조파의 형태로 나타나게 된다고 보고되고 있다^[19]. 즉, 표면 열화의 직접적 요인인 아크 파형을 분리해 낸다는 의미에서 이러한 고조파 성분의 분리, 검출은 표면 열화의 진단을 위해 더욱 더 유효한 수단이 될 수 있을 것으로 생각되며, 앞으로의 지속적인 연구가 요망된다.

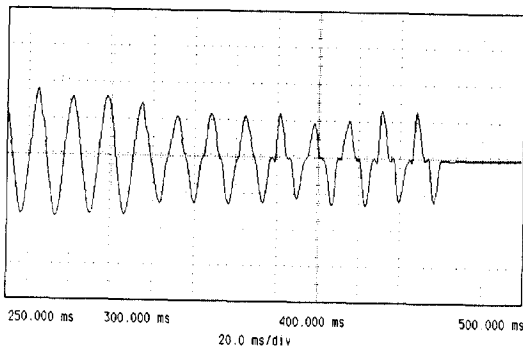
그림 11에는 SR-2 재료에 대해 미열화 시료 및 열화된 시료의 접촉각이 시간에 따라 변화해 가는 과정을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 미열화 시료에 비해 열화된 시료의 접촉각이 현저히 낮아진 것을 알 수 있고, 또한 시간이 경과함에 따라 접촉각이 낮아지는 속도도 크게 나타남을 알 수 있다. 평면 시료에 대한 접촉각의 시간적인 변화는 주로 확장 젖음 현상에 의해서 나타나게 되는데, 이 때의 접촉각에 영향을 미치는 인자로는 표면의 거칠기를 들 수 있다. 즉, 표면의 거칠기가 증가하는 경우, 물방울이 거칠어진 표면으로 스며들어서 높이가 감소하게 된다. 그러나, 물방울의 밀면 지름은 일정하게 유지하려는 경향이 있으므로, 결과적으로 접촉각을 감소시키게 되는 것이다. 접촉각의 시간적인 변화는 낮은 접촉각, 즉 표면의 거칠기가 더욱 큰 경우에 더 크게 나타나는 경향이 있다^[20]. 따라서, 열화된 시료에서



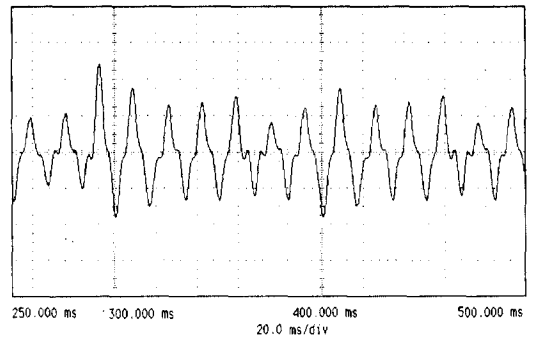
(a) 0 ms에서 250 ms까지



(a) 0 ms에서 250 ms까지



(b) 250 ms에서 500 ms까지



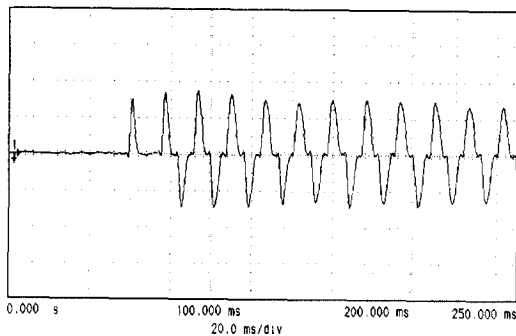
(b) 250 ms에서 500 ms까지

그림 8. 영역 I에서 500 ms 범위로 scan한 누설전류 파형.

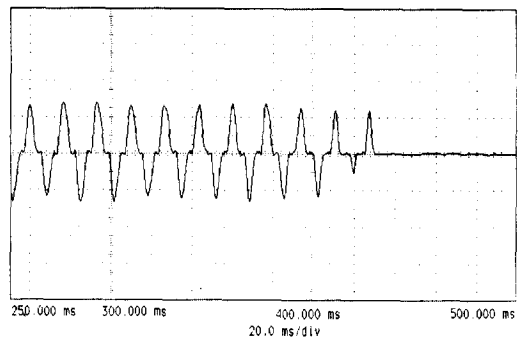
Fig. 8. The leakage current waveforms of 500 ms scan in region I.

그림 9. 영역 II에서 500 ms 범위로 scan한 누설전류 파형.

Fig. 9. The leakage current waveforms of 500 ms scan in regions II.



(a) 0 ms에서 250 ms까지



(b) 250 ms에서 500 ms까지

그림 10. 영역 III에서 500 ms 범위로 scan한 누설전류 파형.

Fig. 10. The leakage current waveforms of 500 ms scan in region III.

접촉각이 낮게 나타나고, 시간에 따른 접촉각의 저하도 크게 나타나는 것은 방전에 의해 표면의 거칠기가 증가한 때문으로 생각된다.

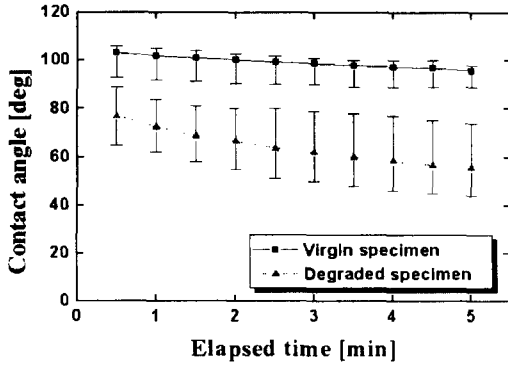


그림 11. 미열화 및 열화된 시료의 상부 및 하부전극 사이 중간점에서 측정된 접촉각의 시간적 변화.

Fig. 11. The changes of contact angle of the virgin and degraded specimens at the middle point between top and bottom electrode.

그림 12에는 SR-2 재료에서 실험 시간에 따라 상부에서 하부전극까지 오손액의 통로를 따라 접촉각을 측정하여 그 변화를 나타내었다. 그림에서 하부전극에 가까워질수록 접촉각이 증가하고, 열화가 진전됨에 따라 접촉각이 증가하는 지점이 상부전극 쪽으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 하부전극 근처의 영역에서는 방전에 의한 표면의 분해가 발생하고, 이로 인한 침식 및 충전제의 노출이 나타나게 된다. 또한, 재료 표면에 하얀색의 침적물도 나타나게 되는데, 이러한 영역은 표면의 젖음성을 떨어뜨리기 때문에^[7], 오손액에 의해 표면이 젖은 상태로 되지 않고, 건조 상태를 유지하게 되어 방전이 이 영역에 집중하게 되는 결과를 초래하게 되는 것이다.

그림에서 나타난 침식 영역의 극단적인 발수성에 대한 원인을 조사하기 위해 EDX에 의해 성분을 분석한 결과 열화된 시료에서 Al의 비율이 증가함을 관찰할 수 있었다. Al은 ATH의 구성성분이므로, ATH 분말 위에 액적을 떨어뜨린 결과 수분과 심하게 반발하는 현상을 관찰하였으며, 이를 통해 침식 영역의 발수 특성이 ATH에 의한 영향임을 확인할 수 있었으며, 이에 대한 차후의 연구가 필요한 것으로 생각된다. 또한, 열화가 가속됨에 따라 이 침식 영역이 상부전극

방향, 두께 방향, 및 넓이 방향으로 확장하게 되며, 이러한 결과 방전의 길이도 더욱 길어지게 되고, 방전도 시료의 넓이 방향으로 불규칙하게 이동하는 경향을 띠게 된다. 따라서, 시료의 표면에서 젖음성이 나쁜 영역이 상부전극 쪽으로 확장하게 됨을 알 수 있다. 그러나, 방전의 길이가 일정 정도 이상 상부전극 쪽으로 길어지게 되면, 일정한 외부 전압 입력이 주어지는 경우, 방전은 소멸하게 되므로, 방전 길이의 증가는 멈추게 된다. 따라서, 이 시점부터 시료의 침식은 두께 방향 및 넓이 방향으로만 진전하게 된다.

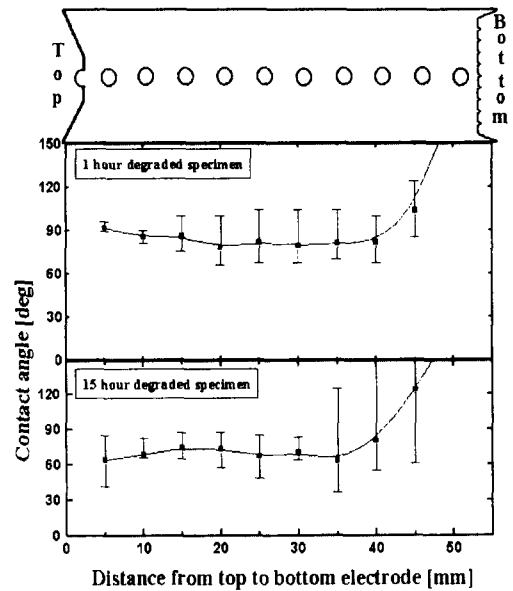


그림 12. 열화된 시료에 대한 상부전극에서 하부전극까지의 접촉각 변화.

Fig. 12. Contact angle profile from top to bottom electrode of the degraded specimens.

표 3. EDX 측정에 의한 미열화 시료 및 열화 시료의 침식 영역에서의 Al/Si 비.

Table 3. The ratio of Al to Si of virgin and degraded specimens at the erosion area measured with EDX.

Sample ID	Al/Si	
	Virgin	Degraded
SR-1	1/2	1/1.2
SR-2	1/1.5	1/0.8

하부전극 근처 침식 영역의 성분에 대한 EDX 분석 결과를 표 3에 나타내었다. 미열화 시료에서 Si의 비율이 높은 것은 저분자 실리콘의 표면 확산에 기인하는 것으로 생각되며, 열화된 시료에서 Al 성분 비율의 현저한 증가는 방전에 의한 표면 저분자 실리콘 소실 및 충전제 노출 때문으로 생각된다.

그림 13에 SR-1 시료에 대해 미열화 및 열화된 시료의 침식 영역에서의 SEM 사진을 나타내었다. 그림 (a)의 미열화 시료는 표면이 매끄러운 유기물의 형태를 나타내었으나, (b)와 같이 열화된 침식 영역은 유기물이 거의 남아 있지 않고, 입자 형태의 무기물로 덮여 있으며, 표면 거칠기의 증가 및 pin hole들의 존재를 관찰할 수 있었다. 즉, 방전에 의한 연소 작용으로 유기물이 산화하여 표면에 무기물의 층을 형성함을 관찰할 수 있었다. 이러한 무기물의 층이 방전에 의한 열에너지를 차폐하여 재료의 연소를 일정정도 늦추는 작용을 하기도 하지만, 거칠어진 표면 및 pin hole 등의 내부로 방전열이 전달되는 경우, cooling 효과를 기대할 수 없게 되므로 방전 에너지에 의한 열이 축적되어 재료의 연소가 더욱 가속될 가능성이 있을 것으로 생각된다.

이상의 결과에서 침식의 진전에 따라 방전이 연속적인 형태를 띠게 됨과, 전류 파형이 sine파 성분에서 찌그러진 arc 파형으로 변하게 됨을 관찰할 수 있었다. 그러나, 누설전류의 평균 실효값은 침식과 관계없이 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 또한, 재료의 침식은 반복적인 방전에 의한 열에너지의 축적과 관계가 있으므로, 누설전류의 성분에서 아크 성분을 분리해 내고 그것을 시간에 따라 적분하는 기술이 열화 진단에서 필요한 차후의 과제인 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서 표면아크의 지속시간 및 강도에 의해 재료가 침식되어가는 과정을 조사하기 위해 IEC publ. 60587법으로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다 :

[1] 실험 시간의 경과에 따라 침식깊이는 시간상의 한 점을 기준으로 그래프의 기울기가 급격하게 증가하였다. 반면, 누설전류의 실효치는 실험시간 동안 거의 일정하게 유지되었다. 따라서, 누설전류의 실효치는 침식 단계의 지표가 되지 못함을 알 수 있다.

[2] 시간에 따른 방전지속 시간 변화 그래프에서, 곡선의 기울기가 세 영역으로 나누어짐을 알 수 있었는데, 세 영역으로 나누는 시간축 상의 두 점은 각각 방전이 하부전극에 안정될 때 및 방전이 연속적으로 발생할 때와 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, 이는 침식깊이의 그래프와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서, 방전지속 시간의 측정을 통해 침식 열화의 전이과정을 밝혀 낼 수 있을 것으로 생각된다.

[3] 또한, 각각의 세 영역에서는 방전 파형의 형태도 다르게 나타났는데, 영역 I에서는 파형이 거의 sine파의 형태를 나타내고, 영역 II에서는 아크파형의 비율이 높아졌으며, 영역 III에서는 모두 아크파형의 형태를 띠고 있음을 알 수 있었다. 이는 아크방전이 연속적으로 발생하는 영역 III에서 재료의 대부분이 침식되는 결과와 잘 일치한다.

[4] 접촉각의 측정을 통해 재료의 침식이 진행되는 영역 및 흰 색의 침적물이 생성되는 부분에서는 젖음성이 나쁨을 확인하였고, 이러한 영역은 재료의 열화

그림 13. 미열화 및 열화 시료의 침식 영역에서의 SEM 사진.

Fig. 13. SEM photographs of virgin and degraded specimens at the erosion area.

가 가속됨에 따라 상부전극 쪽으로 점점 확장됨을 관찰할 수 있었다.

이상의 결과에서 방전지속시간 및 아크파형이 침식 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서, 신뢰성 있는 열화진단을 위해서는 누설전류 성분에서 아크성분을 분리하여 시간에 따라 적분하는 기술이 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Bauer E., H. Karner, K. H. Muller, P. Verma, "Service Experience with the German Long Rod Insulator with Silicone Rubber Sheds Since 1967", Paper 22-11, CIGRE, 1980.
- [2] G. G. Karady, H. M. Schneider, F. A. Rizk, "Review of Cigre and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators : Field Aging Effects and Laboratory Test Techniques", paper 33-103, Cigre, 1994.
- [3] T. Tanaka, K. Naito, J. Kitagawa, "A Basic Study on Outdoor Insulators of Organic Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13, No. 3, pp. 184-193, 1978.
- [4] M. G. Weller, "Variation in the Results of Inclined Plane Tracking Tests : Some Factors Controlling the Surface Tracking Activity", IEEE Conf. Publ., No. 177, pp. 282-286, 1979.
- [5] Chen Yuan, Liang Xidong, Guan Zhicheng, and Zhang Renyu, "Some New Understanding about Erosion Resistance of Silicone Rubber Material under HVDC", 9th Int. Symp. on High Voltage Eng., Graz, paper No. 1014, 1995.
- [6] Xu Ying ling, et al, "The Antiburining Technique for Polymeric Materials", in Chinese, Published by the Chemistry Publishing House, 1987. 10.
- [7] H. Kräner and D. Schulte, "Erosion Phenomena of Polymeric Insulating Materials for High Voltage Outdoor Application", 4th Int. Symp. on High Voltage Eng., Athens, paper No. 45.08, 1983.
- [8] A. Kräner, H. C. K rner, E. Hubler, K. A. Munk, "Improvement of Ageing Resistivity of Cycloaliphatic Epoxy Resin", 5th Int. Symp. on High Voltage Eng., Braunschweig, Paper No. 52.03, pp. 1-4, 1987.
- [9] "Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials Used Under Severe Ambient Conditions", IEC publ. 60587, 2nd edition, 1984.
- [10] G. A. Mullen and T. W. Dakin, "Wet Tracking and Erosion Evaluation of Non-Ceramic Insulation for Outdoor Use", IEEE Conf. paper CH1780-4, pp. 238-241, 1982.
- [11] A. E. Dickson and J. P. Reynders, "The Effect of Corona on the Surface Properties and Chemical Composition of Silicone Rubber Insulators", 9th Int. Symp. on High Voltage Eng., Graz, paper No. 3231, 1995.
- [12] R. S. Gorur et al., "Aging in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7 [2], 1992, pp. 525-532.
- [13] A. E. Vlastos and E. M. Sherif, "Experience from Insulators with Silicone Rubber Sheds and Shed Coatings", IEEE Trans. on Power Delivery, Paper Number 89 WM 121-5 PWRD, 1989.
- [14] R. S. Gorur, E. A. Cherney, R. Hackam and T. Orbeck, "The Electrical Performance of Polymeric Insulating Materials Under Accelerated Aging in a Fog Chamber", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 1157-1163, 1988.
- [15] 大木正路, "高電壓工學", 橫書店, p. 175, 1989.
- [16] M. Nishida, N. Yoshimura, and F. Noto, "Light Sensors As Detectors of Tracking Deterioration", IEEE Trans. on Electrical Insulation Vol. EI-22, No. 4, pp. 509-516, 1987.
- [17] R. S. Gorur, E. A. Cherney, R. Hackam, "Performance of Polymeric Insulating Materials in Salt-Fog", IEEE Trans. on

- Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, pp. 486-492, 1987.
- [18] Tatsuo Motoyama, Kenji Ichikawa, Kenzo Kadotani, "Self-Cleaning Effect of Alumina-Trihydrate Filled EVA", 1995 National Convention Record IEE Japan, No. 2, pp. 188-189, 1995.
- [19] T. W. Dakin, G. A. Mullen, T. E. Chenoweth, "Outdoor Insulator Surface Conductance and Surface Arcing", Proc. 11th IEEE-NEMA Electrical Electronics Insulation Conference, Chicago, pp. 157-161, 1973.
- [20] Stanislaw M. Gubanski, Antonios E. Vlastós, "Wettability of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1527-1533, 1990.