한국전기전자재료학회
'99 추계학술대회 논문집

Salt-fog 분무에 따른 실리콘 고무 애자의 표면열화

Surface Degradation of Silicone Rubber Insulator by Salt-fog Test

장동욱, 박영국, 강성화*, 이용희, 임기조
Dong-Uk Jang, Young-Guk Park, Seong-Hwa Kang*, Yong-Heuy Lee, Kee-Joe Lim
Chungbuk Nat'l Univ. *Chungcheong College.

The main problem in porcelain as a high voltage insulator is that the water film is formed on the insulator surface due to rain, fog, and dew. In the presence of contamination, leakage current increases which may lead to flashover that could be followed by an outage of the power system. These days, high voltage polymer outdoor insulators have been studied and widely used, because they have excellent electrical and mechanical properties, superior performance of flashover for contamination, light weight, easy installation or handling, no maintenance during service, competitive price, and so on. First of all, the excellent performance of the silicone rubber in polluted and wet conditions is attributed to the ability of the material to maintain the hydrophobicity of the surface in the presence of severe contaminants and wet conditions. This is due to a low surface energy of the silicone rubber. But, the leakage current and some surface discharge occurs on the surface of insulator when the insulator is used for a long time. So the leakage current and the surface discharge current are important to estimate the condition of the silicone rubber surface.

In this paper, the average leakage current, the surface discharge current as pulse magnitudes were studied to investigate electrical conduction of silicone rubber surface with the salt fog condition for the first stage.

1. 서론

옥외용 애자는 장기간의 운전에 의하여 불순물이 애자 표면에 부착하게 되고, 불순물에 의한 누설거리와 절연저항의 감소로 인하여[1] 건조시 보다 큰 누설전류가 흐르게 되고, 누설전류에 의한 Joule 열의 발생에 의한 국부적인 건조대의 형성과 이에 따른 미소방전의 발생, 부식, 침식 등이 발생하여 트래킹, 아크 등의 열화과정을 거쳐 결국 절연파괴를 유발하게 된다[2,3].

이와 같이 누설전류는 옥외용 애자의 절연열화와 절연파괴에 근본적인 원인이 되므로 옥외용 애자의 설계시 애자재료 표면의 오손에 따른 전기전도성의 변화특성, 특히 누설전류의 변화에 대한 고려가 반드시 행해져야 한다[4,5]. 국외에서는 특히 고분자 애자 재료의 내오손성이 20년 전부터 연구되어 왔으나[5,6], 국내에서는 비교적 최근에 연구되기 시작하여 근본적인 연구가 부족한 실정이다.

본 논문에서는 오손에 대한 옥외용 고분자 애자의 표면 열화 특성을 검토하기 위해서 옥외용 고분자 애자로 전기적·내오손 특성이 우수한 실리콘 고무에 대해서 전도도의 변화에 따른 오손 특성을 검토하였다. 전도도는 8 mS/㎝와 2 mS/㎝이며, salt-fog 분무에 따른 평균누설전류, 표면방전 펄스 크기에 따른 변화, SEM, IR분석을 실시하였다.

2. 실험

시편은 지름이 88.5 ㎜이고, 22.9 kV에 사용되는 고분자 애자를 절단하여 사용하였다. 사용한 고분자 애자 갓의 재료는 HTV(High Temperature Vulcanized)실리콘 고무이며, 표면에서 발생하는 트래킹이나 침식 등의 열화를 억제하기 위해서 ATH(Alumina trihydrate)충진재가 포함되어 있다. 전극은 Brass를 사용하였고, 에폭시 수지로 절단한 HTV 실리콘 고무 애자에 접착하였다.

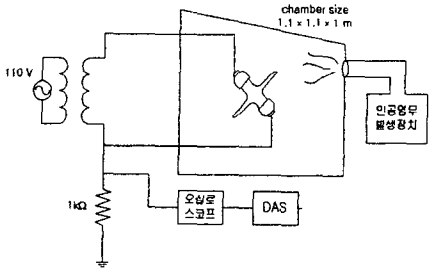


Fig. 1 The experimental system

실험에 사용된 전원은 입력전압 100[V], 출력전압 AC 0~50[kV], 출력용량 0.3[kVA]인 동경정전주식회사의 절연유내압시험기를 사용하였다. 챔버의 재료는 PMMA이며, 크기는 1.1×1.1×1이며, 지붕은 기울기를 주어서 물방울이 직접 시편에 떨어지는

것을 방지하였다. Salt-fog는 초음파 발생장치를 이용하여 salt-fog를 챔버로 분무하였고, salt-fog의 전도도는 Horiba U-7를 사용하였다. 시편은 salt-fog가 직접 분무되도록 위치 시켰으며, 45° 기울여서 애자의 아랫부분도 salt-fog가 분무되도록 하였다.

전도도에 따른 변화를 살펴보기 위해서 salt-fog의 전도도는 2 mS/㎝와 8 mS/㎝로 나누어서 실험하였고, 인가전계는 0.5 kV_{rms}/㎝로 하였다.

평균누설전류를 측정하기 위해서 시편과 직렬로 1[kΩ]의 저항을 삽입하였으며, 표면방전펄스를 측정하기 위해서 전류 probe를 이용하였다. 평균누설전류는 1초에 하나의 데이터를 읽어들여서 5분간 평균을 내었다. 그리고 표면방전펄스는 오실로스코프를 통하여 1주기(60 Hz)를 PC로 읽어 들여서 방전펄스의 크기별로 데이터를 처리하였다. 각각의 데이터들은 GPIB카드로 컴퓨터와 연결하여 데이터를 취득하였다.

사용한 HTV 실리콘 고무 표면의 화학적 구조 변화를 알아보기 위해서 FTIR(Fourier Transform Infrared)을 이용하였다. 불투명한 실리콘 고무 표면의 화학구조를 분석하기 위해서 ATR (Attenuated Total Reflection)을 사용하였다. ATR에 사용한 결정은 KRS-5(Thallium bromoiodide)이며, 하나의 시편을 KRS-5결정위에 놓고 일정한 압력을 가하여 측정하였다.

실리콘 고무의 표면이 열화 됨에 따른 표면의 미세한 물리적 구조 변화를 알아보기 위해서 SEM(Scanning electron microscope, Hitachi S-2500C)촬영을 실시하였다. SEM에 사용한 X선의 가속전압은 15 kV이며, 배율은 2000배이다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 전도도의 크기에 따른 평균누설전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 전도도가 8 mS/㎝인 경우에 2 mS/㎝에 비해서 증가율이 더 큰 것을 볼 수가 있고, 시간이 지나면 각각 약 2 ㎃와 1.7 ㎃로 일정하게 된다. 이것은 전도도가 크기 때문에 초기의 누설전류의 증가율이 8 mS/㎝인 경우가 더 크게 나타났고, 수렴하는 평균누설전류의 값에 있어서도 전도도가 높은 경우가 더 크게 나타났다.

그림 3과 4는 표면방전펄스를 크기별로 나누어서 나타낸 것이다. 그림 3은 표면방전펄스의 크기가 0~5 ㎃인 것이며, 그림 4는 표면방전펄스의 크기가 5 ㎃이상의 것을 도시한 것이다. 그림 3을 보면 2 mS/㎝은 전도도가 작기 때문에 8 mS/㎝에 비해서 펄스의 발생율이 초기에 더 작게 나타났다. 그리고 2 mS/㎝은 약 40분부터 발생율이 증가를 하였고, 8 mS/㎝은 처음부터 표면에서 방전이 발생하기 시작했다. 360분 이후에는 2mS/㎝의 경우가 더 큰 발생율을 나타내고 있다. 이것은 낮은 전도도이기 때문에 표면방전펄스의 크기가 작은 것이 계속해서 더 많이 발생한 것으로 생각된다. 그림 4도 마찬가지로 8 mS/㎝인 경우가 발생율이 더 크

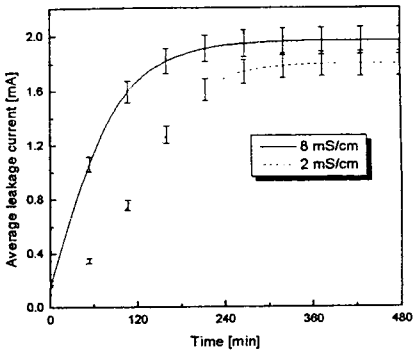


Fig. 2 Average leakage current with aging time

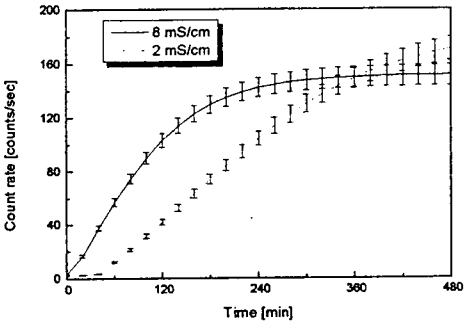


Fig. 3 The surface discharge current pulse (0~5 ㎃)

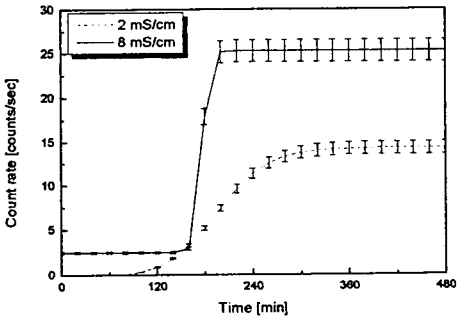


Fig. 4 The surface discharge current pulse (5 ㎃ 이상)

게 나타났다. 2 mS/㎝의 경우를 보면 약 80분 이후부터 펄스가 발생하기 시작하였고, 8 mS/㎝은 초기부터 펄스가 발생을 하였다.

표면방전은 실리콘 고무 표면의 열화를 더욱 촉진한다. 표면방전에 의한 열에 의해서 실리콘 고무의 분자구조를 절단하고, 계속되는 방전에 의해서 열화는 계속해서 진전이 된다. 그리고 실리콘 고무의 CH_3기가 표면방전에 의해서 감소를 하게 되고, 산화반응과 가교반응에 의해서 Si-O결합에 있어서 산소의 증가를 일으킨다. 이러한 과정은 실리콘 고무와 수분사이의 수소결합을 더 강하게 하여 실리콘 고무 표면의 수막 형성이 촉진되고 누설전류의 증가를 일으킨다.

IR 분석법으로는 표면의 소수성 특성을 나타내는 CH_3기의 변화와 실리콘고무의 분자구조 변화를 쉽게 판별을 할 수가 있다. 그림 5는 본 실험에 사용한 실리콘 고무의 IR 스펙트럼을 나타낸다. CH_3기의 C-H결합은 약 2962cm^{-1} 부근에서 흡수를 나타내고, 1280-1240 cm^{-1} 의 피크는 Si-CH_3에 해당한다. 1100-1000 cm^{-1} 은 Si-O-Si로 실리콘 고무의 주쇄인 Si-O결합을 나타낸다.

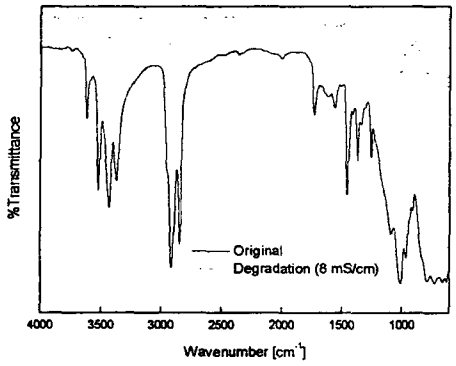
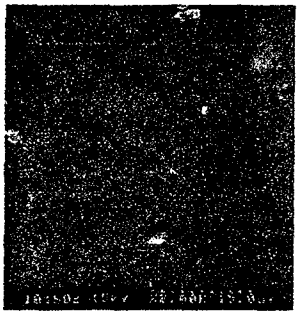


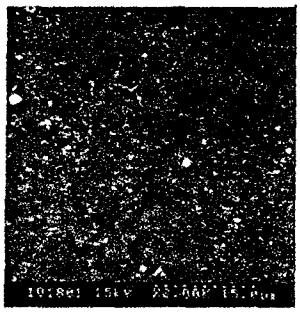
Fig. 5 FTIR-ATR spectra of slice of silicone rubber

여기서 FTIR-ATR에 의해서 실리콘 고무 표면의 열화 후에 PDMS측쇄에 있는 CH_3기가 감소를 하였고, 주쇄인 실록산 결합(-Si-O-)도 많이 감소를 하였다. 이러한 감소는 실리콘 고무 표면에서 일어나는 방전에 의한 열에 의해서 발생한 것이다. CH_3기의 감소는 또한 소수성의 감소를 일으켜서 수막형성을 가속시켜 누설전류의 증가를 일으킨다.

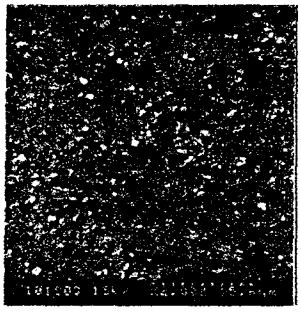
그림 6은 실리콘 고무 표면의 SEM사진이다. 그림 6b는 2 mS/㎝의 SEM 사진이며, 6c는 8 mS/㎝이고, 2 mS/㎝와 8 mS/㎝을 비교해 보면, 8 mS/㎝인 경우가 SEM 사진에서 볼 수 있듯이 실리콘 고무의 표면에 salt-fog와 전계에 의한 아킹으로 더 많은 구멍이나, ATH성분의 노출을 확인할 수 가 있다. 이러한 표면의 변화는 애자의 누설전류를 증가시키는 요인이 된다. 표면이 거칠어지면 접촉각이 감소하고, 또 ATH성분의 과다한 노출은 표면에너지 증가를 일으키므로 또한 누설전류의 증가를 가져온다.



(a) Origin



(b) 2 mS/㎝

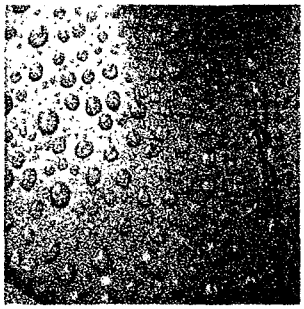


(c) 8 mS/㎝

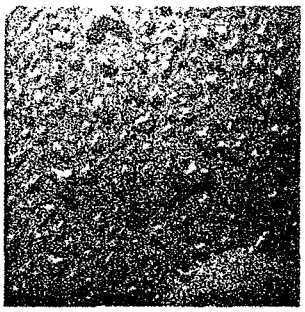
Fig. 6 SEM photographs of silicone rubber

그림 7에서 보면 원시편은 방울로 맺혀 있는 반면에, 열화된 후에는 물방울이 퍼져서 있는 것을 볼 수가 있다. 이것은 실리콘 고무의 표면에서 발생한 방전에 의해서 실리콘 고무의 표면이 열화되어, 표면이 소수성을 상실했기 때문이다. IR스펙트럼과 SEM에서 확인할 수 있듯이 실리콘 고무의 소수성을 유지하게 하는 메틸기의 감소에 의해서

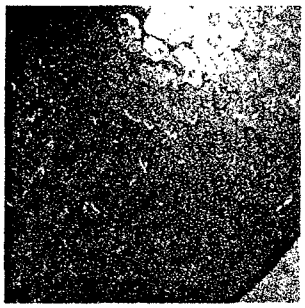
표면의 소수성이 상실된 것이다. 또한 아크에 의해서 충진제인 ATH성분이 밖으로 노출이 되면서 수막의 형성이 더욱 촉진된다.



(a) Origin



(b) 2 mS/㎝



(c) 8 mS/㎝

Fig. 7 SEMs to compare surface hydrophobicity of silicone rubber surface

4. 결론

실리콘 고무 애자의 표면열화를 검토하기 위하여 Silicone rubber 시편을 이용하여 Salt-fog 분위기에서 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평균누설전류는 염무의 전도도가 클수록 큰 값을 나타냈고, 전류의 증가율도 또한 8 mS/㎝인 경우가 더 크게 나타났다.

2. 표면방전펄스는 전도도의 차이에 의해서 8 mS/㎝이 더 큰 펄스가 발생을 했으며, 발생율도 또한 많았다. 이러한 표면방전펄스의 증가는 실리콘 고무 애자의 열화를 더욱 촉진 시켰다.

3. IR 스펙트럼 분석으로 실리콘 고무가 소수성을 상실하게 되는 것은 CH_3기의 감소로 인한 것이고, SEM 사진을 통해서 표면에 많은 동공, 크랙, ATH의 노출을 확인하였다.

Reference

[1] J. S. T. Looms, "Insulators for High Voltages", Peter Peregrinus Ltd, pp118-131, 1990.

[2] R. S. Gorur, E. A. Cherney and R. Hackam, "A Comparative Study of Polymer Insulating Materials under Salt-Fog Condition", IEEE Trans., EI-21 N0.2, pp175-186, 1986.

[3] S.H. Kim, R. Hackam, "Effects of saline-water flow rate and air speed n leakage current in RTV coatings", IEEE Trans. On Power Delivery Vo. 10, pp1956-1964, 1995

[4] N. Naito, S. Kunieda, Y. Hasegawa and S. Ito, "DC Contamination Performance of Station Insulators", IEEE Trans. EI, Vol. 23, No. 6, pp 1015-1023, 1988.

[5] L. Sanche, "Nanoscopic aspects of electronic aging in dielectrics", IEEE, Trans., EI, Vol. 4, pp. 507-543, 1997

[6] R. S. Gorur, G. G. Karady, A. Jagota, M. Shah and A. M. Yates, "Aging in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April, pp 525-538, 1997.