

누설전류 모니터링에 의한 옥외용 실리콘 고무의 열화 특성 평가

論 文

50C-2-3

The Evaluation of Degradation Characteristics of Silicone Rubber for Outdoor by Leakage Current Monitoring

金正浩* · 宋禹昌** · 趙漢九*** · 朴鏞寬[§]

(Jeong-Ho Kim · Woo-Chang Song · Han-Goo Cho · Yong-Kwan Park)

Abstract - The degradation process of silicone rubber was investigated by leakage current monitoring in Inclined-Plane method. DAS (Data Acquisition System) with 12-bit, 8-channel A/D converter was prepared. Average current, cumulative charge, current waveform and the number of peak pulses were measured on-line. And, FFT (Fast Fourier Transform) analysis was performed with stored current waveform. Besides, maximum erosion depth was measured in order to use as the indicator of the degradation process. So, the results of leakage current components and maximum erosion depth measurements were compared to find one or more components which have trends of changing similarly to that of erosion process. The result suggests that the ratio of peak current to r.m.s. current, harmonic contents and the number of peak pulses are well corresponding with the degradation process.

Key Words : degradation process, DAS, leakage current monitoring, FFT analysis, peak pulse, maximum erosion depth.

1. 서 론

HV 옥외 절연물은 전통적으로 무기 절연물로 만들어졌는데, 주로 자기나 유리였다. 그러나, 최근에는 자기/유리와 비슷하거나 더 나은 성능, 경량, 파괴자에 대한 개선된 저항성, 쉬운 설치, 및 취급, 그리고 경쟁력 있는 가격 등과 같은 몇 가지 인자들의 결합으로 복합 절연물이 널리 사용되고 있다. 그러나, 서비스에서 주기적으로 몇 가지 문제가 발생하며, 이를 해결하기 위한 주된 관심영역은 장기간의 전기적 성능으로 절연물 weathershed 재료 및 설계와 관계가 있다.

전체적인 전기적 성능을 표시하는 지표로는 섬락 (flash over)과 열화 (degradation)의 두 가지가 있다[1]. 이 두 가지는 서로 관련이 있는 경우도 있고, 없는 경우도 있다. 서비스 경험에 의하면, 복합 절연물은 몇몇 경우 심각한 열화 (트래킹 및 침식)를 수반하지 않고 섬락이 발생함을 보여주고 있다. 또한 절연물의 침식에 의해 섬락이 발생하지 않은 경우도 있다. 그러나, 일반적으로 재료의 열화는 섬락으로 이어진다는 것이 알려져 있으며, 최근에 보고된 고분자 절연물의 선로사고 원인 조사에 따르면, 전기적, 기계적 요인에 의한 사고가 35 %를 차지하고 있는데 반해, 64 %는 장기적 열화에 의한 사고임을 나타내었다[2]. 열화의 직접적 원인은 오손

및 습윤에 의한 방전이 주된 요인이다.

열화진단 기술은 이러한 열화의 진전과정을 평가하여 언제 어떻게 절연물의 사고가 발생할 것인지를 결정함으로써 사고를 막기 위한 기술이다. 열화 진단 기술로는 표면 전도도, 발수성, ESDD, FOV, 누설전류 분석 등 여러 가지가 있으며, 이 중 누설전류 분석은 on-line 상태에서 실시간으로 수행할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구의 목적은 열화의 진전과 누설전류 성분 변화의 관련성에 대한 기본적인 정보를 제공하고, 열화 진단 기술로서의 누설전류 모니터링의 가능성을 평가하기 위한 것이다. 누설전류를 모니터링하기 위해 12-bit, 8-channel의 A/D converter로 구성된 데이터 취득 시스템을 준비하였으며, 가속 열화 실험인 경사평판 오손액 시험법 (IPM)을 통해 재료의 침식 깊이 및 누설전류 성분을 측정하였다. 누설전류 모니터링의 결과들과 정량적 침식 결과를 비교하여 열화의 진전과 관련성을 가진 전류 성분을 밝혀내고자 하였다.

2. 실험

2.1 내트래킹성 및 내침식성

내침식성 평가 실험은 IPM으로서 IEC publ. 587에 따른다 [3]. 인가전압은 4.0 kV로 고정하였으며, 실험은 시편이 절연 파괴될 때까지 수행하였으며, 또한 최대 침식 깊이가 시편 두께인 6 mm에 이르면 실험을 종료하였다. 오손액은 0.1% NH₄Cl 과 0.02% iso-octylphenoxypolyethoxyethanol (non-ionic surfactant)를 증류수와 혼합하여 사용하였다. 또한, 오손액의 전도도는 약 2500 μS/cm (23°C)가 되도록 하였다. 시

* 正 會 員 : 成均館大 電氣電子및컴퓨터工學部 · 工博

** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子및컴퓨터工學部 · 博士修了

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新素材應用研究그룹 先任研究員

[§] 正 會 員 : 成均館大 電氣電子및컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 11月 16日

最終完了 : 2001年 1月 18日

편은 제조사가 다른 두 종류의 실리콘 고무를 180 °C에서 10 분간 경화시켜 제작하였다. 제작된 실리콘 고무의 사양으로 베이스 고무분자 및 충전제의 양을 표 1에 나타내었다. 실험을 위해 시료는 50mm×120mm×6mm 의 규격으로 잘라서 45° 각도의 경사를 가진 홀더에 부착하였다.

표 1. 실리콘 고무 시료의 세부 사양.

Table 1. Details of silicone rubber samples evaluated.

Sample ID	Base gum (pph)	Treated ATH (pph)
SR-1	100	80
SR-2	100	120

2.2 누설전류 모니터링

누설전류 성분을 측정하기 위해 데이터 취득 시스템을 준비하였다. 그림 1에 실험의 회로도 및 데이터 취득을 위한 구성도를 나타내었다. 데이터 취득 시스템은 12-bit, 8-channel의 A/D converter (PCL-818HD, advantech)를 사용하였고, 연속적으로 4 개의 시료에 대한 누설전류를 샘플링하였으며, 샘플링 속도는 하나의 시료 당 12.5 kHz로 설정하였다. 누설전류의 측정은 100Ω의 shunt resistor를 시료에 직렬로 연결하고 양단의 전압강하를 통해 누설전류를 계산하는 방법을 사용하였다. 측정된 누설전류 성분은 실효전류와 피크전류의 평균, 최대 피크전류, 축적전하량, 누설전류 펄스의 횟수 및 누설전류의 파형이다. 누설전류 펄스는 1~10, 10~30, 30~50, >50 mA의 4 단계로 나누어 측정하였다. 측정된 성분은 설정된 시간 간격으로 파일로 저장하였다. 또한, 고조파 분석을 위하여 저장된 누설전류 파형으로 FFT 분석을 수행하였다. 또한, 방전 지속 시간의 변화, SEM-EDX 및 접촉각 측정 결과 등은 이전의 논문에 발표한 바 있다 [4].

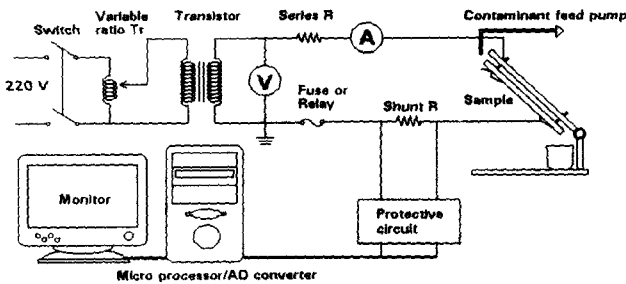


그림 1. 내트래킹성 및 내침식성과 누설전류 파형을 측정하기 위한 IEC publ. 587 실험의 회로도.

Fig. 1. Schematic circuit diagram of IEC publ. 587 for measuring tracking and erosion resistance and leakage current waveform.

3. 결과 및 고찰

3.1 내트래킹성 및 내침식성

그림 2에 전압인가시간에 따른 최대 침식 깊이의 변화를

나타내었다. 내트래킹성 및 내침식성 시험은 시간의 각 점에 대해 6 개 이상의 시편으로 수행하였다. 침식은 일정시간까지는 직선적으로 증가하고, 그 이후에 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 3에 나타난 방전형상의 변화를 관찰하면, (a) 초기의 방전이 자주색 "curtain" type scintillation (minute arc) 형태를 띠고; (b) 하부전극 근처에 고정되면서 밝은 노란색 scintillation으로 진전하며; (c) scintillation의 길이가 점점 길어지면서 arc 방전으로 변화하여; (d) 마침내 연속적인 아크 방전이 발생한다. 또한, "curtain" type scintillation은 오손액 film 사이의 이동성 gap을 통해 발생하기 때문에 국부적 영역의 방전지속시간이 짧아서 침식을 일으키지 못한다. 그러나, 약 20-40 분이 경과하면, 방전은 국부적 영역에 고정하여 같은 장소에서 방전의 점멸이 반복된다.

침식의 진전과정을 육안으로 관찰한 결과에 의하면, 초기 열화는 표면의 변색 및 침식점의 형성으로 나타나고, 전압인가 시간이 증가함에 따라 침식점에서 깊이 방향으로 재료의 소실이 발생하며, 오손액이 흘러내리는 path 주위에 트래킹의 흔적이 나타난다. 또한, 열화가 심각하게 진전되면 침식 영역은 길이 및 폭 방향으로도 확장한다.

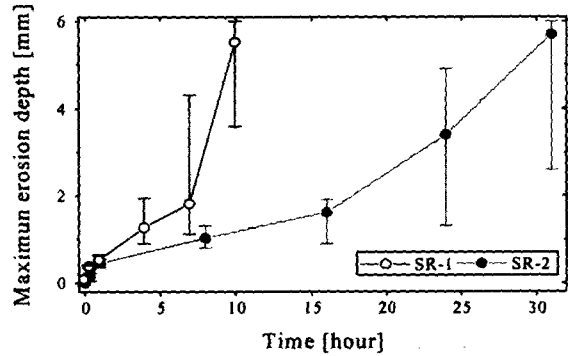


그림 2. 전압 인가 시간에 따른 최대 침식 깊이의 변화.

Fig. 2. The change of maximum erosion depth with energized time.



(a) after 30 minutes, (b) after 1 hour, (c) after 15 hours, (d) after 30 hours.

그림 3. 전압 인가 시간에 따른 방전 형상의 변화 (SR-2). Fig. 3. The change of discharge appearance with energized time (SR-2).

그림 4에 SR-2 재료에서의 실효전류와 피크전류의 평균치 및 최대 피크전류를 나타내었다. 누설전류의 크기는 실험 시작 초기부터 급격히 증가하고 실험의 종료시까지 거의 일정하게 유지되는 경향을 보이는데, 이는 실리콘 고무가 가진 양호한 발수성의 동적 회복 능력 때문으로 생각된다[5]. 이러한 발수성의 회복은 누설전류의 증가를 억제하는 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다[6,7,8]. 위의 결과를 통해, 실리콘 고무에 있어서 누설전류 실효치의 크기는 열화의 진전을 나타내는 지표로는 사용할 수 없음을 알 수 있다.

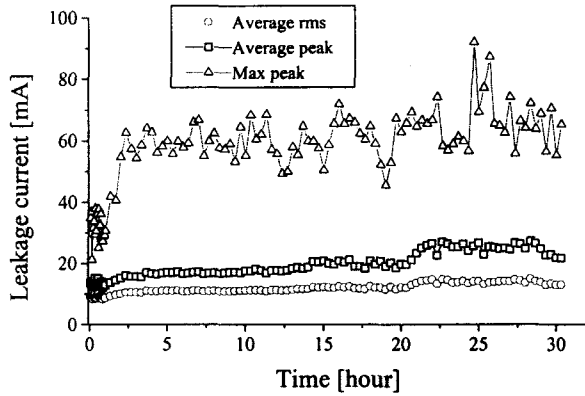


그림 4. 전압인가 시간에 따른 누설전류의 크기 변화 (SR-2).
Fig. 4. The changes of the magnitudes of leakage current with energized time (SR-2).

저전압하에서 표면의 오손액에 의한 수막은 이상적인 경우 일종의 액체 저항으로 작용하기 때문에 실효전류 $I_{r.m.s.}$ 에 대한 피크전류 I_{peak} 의 비는 정현파 교류전압의 인가시 $I_{peak} = \sqrt{2}I_{r.m.s.}$ 의 관계로 나타난다. 그러나, 실제적으로 시편 표면에서 수막의 흐름이 약간씩 변하면 그 값은 다소 증가한다. 전압이 증가하면 오손액의 수막은 온도가 상승하기 때문에 저항이 감소하여, 오손액 수막의 일부를 증발시킬 정도로 충분한 에너지가 공급되므로 건조대가 형성된다. 이와 동시에 전류의 파형은 찌그러지게 되고, 이에 따라 실효전류에 대한 피크전류의 비는 증가하며[9], 파형의 찌그러짐이 증가하면, 실효전류에 대한 피크전류의 비는 더욱 증가한다.

그림 5에는 재료의 분해에 영향을 미치는 건조대 아크 성분의 정량적 평가를 위해 전압인가 시간에 따른 $I_{peak}/I_{r.m.s.}$ 를 측정하여 그 결과를 나타내었다. 그림으로부터 $I_{peak}/I_{r.m.s.}$ 는 실험 시작 이후 약 1 시간까지는 미세하게 감소하고, 그 이후에 서서히 증가하여 실험의 종료 단계에서는 증가 추세가 거의 포화상태에 이르는 경향을 띠고 있다. 또한, 초기에 나타나는 파형은 정현파에 가까운 형태가 주를 이루고 있으며, 전압 인가 시간이 증가할수록 찌그러진 형태의 건조대 아크가 주된 성분을 이루고 있음을 알 수 있으며, 문헌을 통해 이를 확인할 수 있다[10].

또한, 작은 그래프에 나타나는 초기 $I_{peak}/I_{r.m.s.}$ 의 감소는 실리콘 고무의 발수성 감소로 인해 표면 수막의 두께가 두꺼워져서 저항성 전류 성분이 증가하기 때문으로 생각된다.

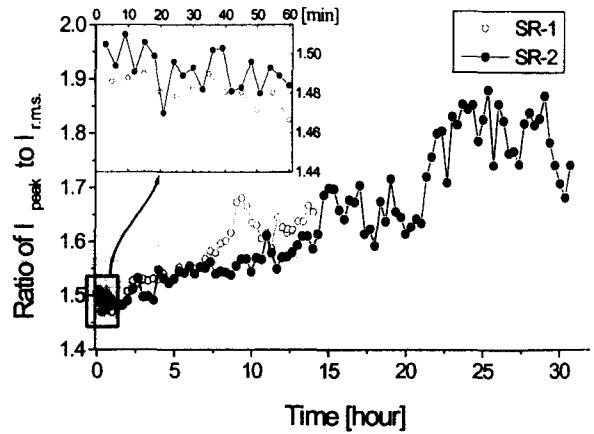


그림 5. 실효전류 ($I_{r.m.s.}$)에 대한 피크전류 (I_{peak})의 비율.
Fig. 5. The ratio of peak current (I_{peak}) to r.m.s. current ($I_{r.m.s.}$)

건조대 아크에 의한 누설전류는 고조파 성분이 포함된 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다[10,11]. 따라서, 표면 열화의 직접적 요인인 아크 파형을 분리해 낸다는 의미에서 고조파 성분의 분리, 검출은 표면 열화의 진단에 유효한 수단이 될 수 있으며, 이러한 고조파 성분의 분석을 위해 일정시간 간격으로 저장된 파형을 FFT 처리하였다.

그림 6에는 FFT 처리 결과로부터 계산된 3 고조파/기본파의 비를 나타내었다. 그림 6의 작은 그림은 하부 전극 근처에서 침식이 관찰되는 초기 열화를 관찰하기 위해 1 시간 동안 5 분 간격으로 저장된 12 초 길이의 파형을 통해 계산한 결과이다. 실리콘 고무의 초기 열화가 나타나는 시간은 약 20-40 분 가량으로 하부전극 근처에서 침식이 형성된다. 이 시간 동안 I_3/I_1 은 점점 감소하고, 그 후 침식이 진전함에 따라 다시 증가하여 급격한 침식의 단계에서 급증하는 경향을 알 수 있다.

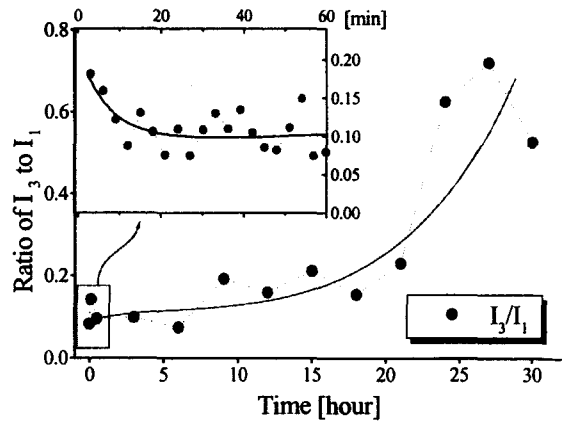


그림 6. 전압 인가 시간에 따른 고조파 성분의 비 I_3/I_1 .
Fig. 6. Harmonic content I_3/I_1 with energized time.

이러한 결과는 실리콘 고무의 양호한 초기 발수성에 기인하는 것으로, 최초에는 표면의 젖음이 완전하지 않기 때문에 표면 누설전류는 완전한 정현파 형태가 되지 않고, 찌그러진 파형이 섞이게 된다. 그러나, 초기 열화에 의해 실리콘 고무 표면은 발수성에서 친수성으로 전이하게 되며, 이 때의 누설전류 성분은 오손액의 전도도에 의한 저항성 성분, 즉 정현파 성분이 증가한 형태로 나타난다. 따라서, 3 고조파의 감소가 나타나게 된다. 또한, 표면 열화가 누적되면, 건조대 아크에 의한 전류가 주된 성분이 되므로, 누설전류 파형은 점점 찌그러진 형태가 되고, 고조파 성분이 증가하게 된다. 자료에 의하면, 누설전류 크기와 고조파 성분, 방전지속시간의 변화를 통한 옥외 절연의 조기 사고 감지용으로서 사용 가능성을 보고한 바 있다 [12].

축적전하량은 누설전류를 시간에 대해 적분한 값으로서 전류의 크기 및 지속시간에 의존한다. 그림 7에는 축적전하량의 변화를 나타내었는데, 시간에 대해 선형적으로 증가하며 기울기에 큰 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 실리콘 고무의 누설전류 억제능력에 의해 표면이 심하게 열화되더라도 일정한 누설전류를 유지하기 때문으로 생각된다. 즉, 축적전하량은 실리콘 고무의 열화 진전을 나타내는 지표가 될 수 없음을 알 수 있다.

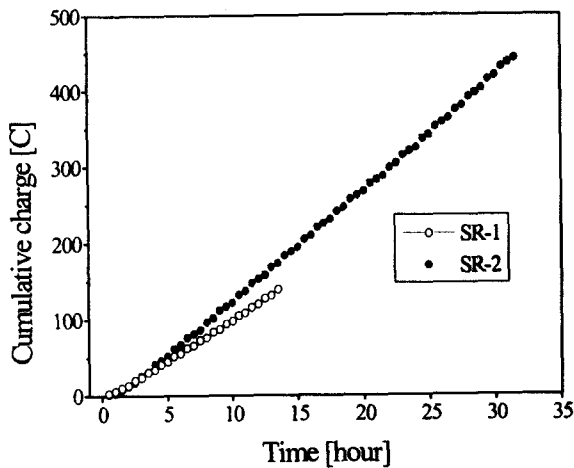
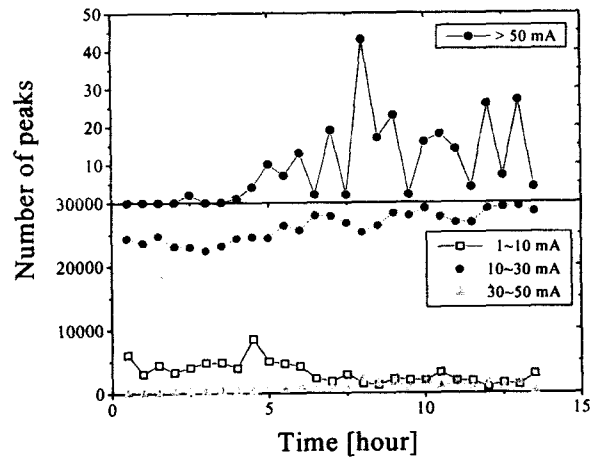
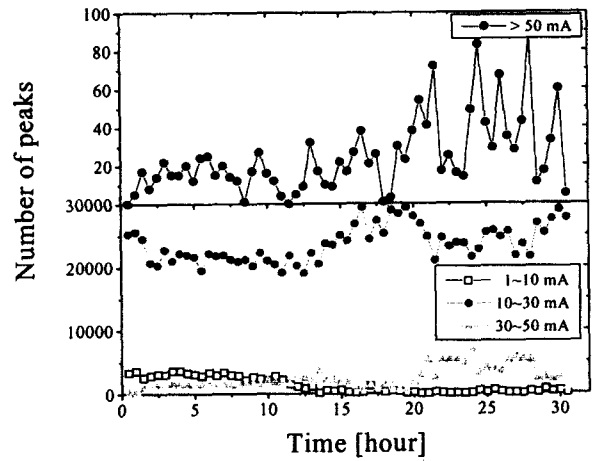


그림 7. 전압 인가 시간에 따른 축적 전하량.
Fig. 7. Cumulative charge with energized time.

그림 8에는 SR-2에 대해 1~10, 10~30, 30~50, 및 >50 mA의 단계별로 측정된 누설전류 펄스의 횟수를 나타내었다. 1~10 mA 성분은 초기부터 나타나고, 열화의 진전에 따라 서서히 감소한다. 또한, 가장 주도적인 펄스는 10~30 mA 성분으로 30 분의 시간동안 20,000 번 이상이 기록되었다. 이는 평균 실효전류가 10 mA 정도로 일정하게 유지되기 때문으로 이 때의 펄스 크기는 14 mA 정도이다. 따라서, 열화에 기여하는 주도적인 피크 전류는 10~30 mA임을 알 수 있다. 한편, 재료의 열화가 가속됨에 따라 30 mA 이상의 펄스 성분들이 크게 증가하며, 이들 성분이 급증하는 시간은 침식 깊이의 급증 시간과 거의 일치함을 관찰할 수 있었다. 따라서, 피크 펄스의 회수는 열화의 진단에 유용한 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.



(a) SR-1



(b) SR-2

그림 8. 전압 인가 시간에 따른 피크 펄스 횟수.
Fig. 8. Number of peak pulses with energized time.

4. 결 론

본 연구에서 IEC publ. 587법으로 표면아크의 지속시간 및 강도에 의해 재료가 침식되어 가는 과정을 조사하고, DAS를 통해 누설전류 성분을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 실험 시간의 경과에 따라 최대 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] 건조대 아크는 표면 침식의 직접적인 인자이기 때문에 누설전류 성분에서 이러한 건조대 아크 성분을 분리하여 정량적으로 평가하는 것이 중요하므로, 이를 위해 평균 피크전류 (I_{peak})와 실효전류 ($I_{r.m.s.}$)의 비를 측정하였고, 또한 누설전류 파형의 FFT 처리에 의해 60 Hz의 기본파와 이에 대해 건조대 아크 성분에 의해 나타나는 제 3 고조파를 측정하여 그 비율을 계산한 결과, 열화와 밀접한 관련성을 가지

고 변하는 것을 확인하였으며, 이들의 분석은 열화 진단에 유효한 수단이 될 수 있을 것으로 생각된다

[3]. 축전하량은 실리콘 고무와 같이 누설전류 억제 능력을 가진 재료의 열화 진전과는 큰 관련을 나타내지 않았고, 30 mA 이상의 피크 펄스 횟수는 열화의 진전과 유사하게 증가함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었으며 감사드립니다. (과제관리번호 : C-E98172)

참 고 문 헌

[1] R. S. Gorur, "Status Assessment of Composite Insulators For Outdoor HV Applications", Proc. of 5th ICPADM, Vol. 1, pp. 35-38, 1997.

[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] "Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials Used Under Severe Ambient Conditions", IEC publ. 587, 2nd edition, 1984.

[4] 유영식, 김정호, 서광석, 조한구, 박용관, "경사평면법에 의한 실리콘 고무 침식의 진전과정과 누설전류 변화와의 상관성에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, Vol. 12, No. 11, pp. 1052-1063, 1999.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] D. C. Jolly, "A Quantitative Method for Determining the Resistance of Polymers to Surface Discharge", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-17, No. 4, pp. 293-299, 1982.

[10] 김정호, "가속열화에 의한 실리콘 복합 절연물의 열화 특성 평가 기법에 관한 연구", 박사학위 논문, 2000년 12월.

[11] 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, p. 157-161, 1973.

[12] R. S. Gorur, J. Montesinos, L. Varadadesikan, S. Simons and M. Shah, "A Laboratory Test for Tracking and Erosion Resistance of HV Outdoor Insulation, IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 6, pp. 767-774, 1997.

저 자 소 개



김 정 호 (金正浩)

1971년 3월 19일 생. 1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 성균관대 부설 과학기술연구소 연구원.

Tel : 031-290-7176 Fax : 031-290-7159
E-mail : kimjh@nature.skku.ac.kr



송 우 창 (宋禹昌)

1966년 6월 15일 생. 1990년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 수료(박사).

Tel : 031-290-7176 Fax : 031-290-7159
E-mail : swc8384@hanmail.net



조 한 구 (趙漢九)

1959년 4월 14일 생. 1984년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 전략기술연구단 신소재 응용연구그룹 선임연구원. 전기기기 기술사.

Tel : 055-280-1670 Fax : 055-280-1673
E-mail : hgcho@keri.re.kr



박 용 관 (朴鏞寬)

1935년 9월 16일 생. 1958년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 졸업(석사). 1987년 동 대학원 졸업(공학박사). 현재 성균관대 공대 전기전자및컴퓨터공학부 교수.

Tel : 031-290-7102 Fax : 031-290-7159
E-mail : ykpark@yurim.skku.ac.kr