

Salt fog 시험법에 의한 실리콘 고무의 표면 열화 및 발수성 회복 특성

Surface aging and hydrophobicity recovery of silicone rubber by salt fog method

김정호*, 서광석*, 문중섭*, 송우창*, 이재형*, 양계준**, 유명식***, 박용관*

J. H. Kim, K. S. Seo, J. S. Moon, W. C. Song, J. H. Lee, K. J. Yang, Y. S. Yoo, Y. K. Park

Abstract

The purpose of this study is assessing the characteristics of surface aging and recovery of hydrophobicity for silicone rubber, which takes a great interest as outdoor insulation recently, subjected to the combined stressed of salt fog and AC power. The methods for assessing are contact angle, ATR-FTIR, AFM and XRD. In addition, salt fog method is adopted as the artificial contamination experiment, and AC power is applied 24 hour on and 24 hour off, repeatedly, for 5 cycles.

The results suggest that degraded surface was more rough than virgin, but was restored water repellency through the off cycle. It was due to not only the formation of fractal surface but also maintenance of hydrophobic surface by diffusion of low molecular oil.

Although surface recovers initial hydrophobicity, there are possibilities of decreasing electrical performance due to irreversable changes such as depolymerization of surface and loss of filler particles. This fact is confirmed by surface conductivity measurement showing that the degradation is significant and the recovery of hydrophobicity is imperfect as the energized cycle increases.

Key Words(중요용어) : aging, recovery of hydrophobicity, ATR-FTIR, AFM, fractal surface, surface conductivity.

1. 서 론

절연물의 오손은 전력 시스템에서 일반적인 문제로 알려져 있다. 이러한 문제의 발생 빈도와 심각성은 이미 잘 알려져 있으며, 많은 관련 문헌에 기술되어 있다¹⁾. 절연물이 오손되어 전력 시스템에 고장을 일으키는 데에는 수분이 크게 기여한다. 수분은 절연물 표면에 수막을 형성하고, 오염물질과 결합하여 표면의 절연성능을 감소시키므로, 고압 환경에서 누설전류에 의한 섬락을 초래할 수 있다. 최근에는

이러한 수분 및 오손에 의한 섬락 사고에 대처하기 위해 충전제를 보강한 고분자 절연물의 옥외 사용이 증가하고 있다. 특히, 실리콘 고무는 초기 발수 표면으로서 누설전류를 제한할 뿐만 아니라, 습윤시의 건조대 아크에 의해 발수성을 일시적으로 잃게 되더라도 저분자 실리콘 오일이 표면으로 확산하여 발수성을 다시 회복하기 때문에 옥외 환경에서 초기의 발수성을 유지할 수 있다. 실리콘 고무의 옥외 경험은 이러한 현상을 잘 설명해 주고 있다²⁾.

Fog chamber 내에서 절연물의 시험은 고분자 절연물 및 자기 절연물의 전기적인 성능을 연구하는 데에 널리 사용되고 있다. 이 방법은 완제품의 성능 및 절연 재료의 등급을 평가하기 위하여 주로 salt fog 상태에서 가속 열화 환경을 만들어 주는 것이다. 인공 salt fog에서의 고분자 절연에 대한 열화와 손

* 성균관대학교 전전컴공학부

** 충주대학교 전자공학과

*** 여주대학 전기과

(수원시 장안구 천천동 300, FAX: 0331-290-7159

E-mail: kimjh@nature.skku.ac.kr)

2000년 3월 30일 접수, 2000년 6월 9일 심사완료

상 메카니즘은 옥외 조건 특히 염해 및 안개 상태에서의 열화특성과 유사하다. 서비스에 설치된 옥외 절연물들은 수많은 것들과 건조 사이클에 영향을 받기 때문에, 이러한 실리콘 고무의 열화 과정을 이해하여 서비스에서 절연물의 만족한 성능을 확립하는 것은 매우 중요한 일이다³⁾. 따라서, 본 논문에서는 salt fog 분위기에서 실리콘 고무를 가속 열화시키고, 열화된 표면에서 발수성의 회복 특성을 조사하였으며, 이를 위해 ATR-FTIR, 접촉각 등을 회복 시간에 따라 측정하여 비교하였다. 또한, 열화된 표면의 거칠기, XRD 및 표면 전도도를 측정하여 salt fog 법에서의 표면 열화 특성을 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 Salt fog chamber에서의 열화

그림 1은 Salt fog chamber의 구조를 나타낸다. 노즐은 spraying system의 입경 10 μm 이하의 가습 용도의 압축 공기 분무식으로 최대한 자연 상태의 안개를 구현할 수 있도록 설치하였다. Salt fog chamber는 10 mm 두께의 아크릴로서 500 mm \times 500 mm \times 500 mm 규격으로 제작하였고, 부싱은 각 시료당 고압, 저압 측에 각각 1 개씩 설치하였다. 분무된 염수의 순환을 위하여 chamber 자체를 약 3° 정도 경사를 주었으며, 분사 노즐 전면에 편향판을 설치하여 fog 분사의 영향이 직접적으로 시료에 영향을 미치지 않도록 하였다. 유량은 시편에 부착되는 양이 5 ml/m²·min이 되도록 조절하였고, air compressor의 압력은 0.2 MPa로 맞추었다.

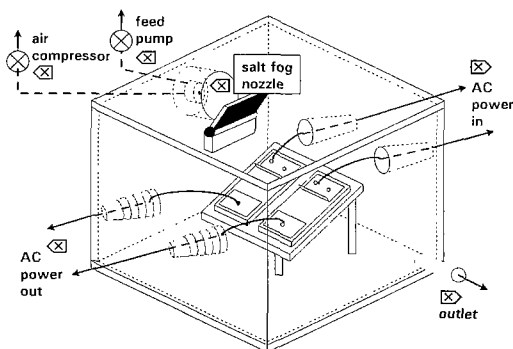


그림 1. 염수 분무 챔버의 구성도

Fig. 1. Schematic diagram of salt fog chamber

실험에 사용한 시편은 50 mm \times 120 mm \times 6 mm 크기로 잘라서 사용하였다. 시편은 ATH 함량 80

pph의 실리콘 고무를 180 °C에서 10 분간 경화하여 제작하였다. 전극은 염수로 인한 산화를 방지하기 위해 스테인레스강을 사용하였다. 시편은 salt fog chamber 내에서 20°의 기울기를 갖도록 설치하였으며, 전극 간 거리는 30 mm로 하였다. 인가된 전압은 2.5 kV로 하여 전계 강도 83 V/mm로 다소 가혹하게 설정하였다. 염수의 용액 전도도는 4,000 $\mu\text{S/cm}$ 로서 light pollution의 오손 수위로 설정하였다.

또한, 발수성 회복에 따른 영향을 검토하기 위하여 전압은 24 시간 on, 24 시간 off의 5 cycle을 인가하였다. 실리콘 고무는 24 시간 이내에 발수성을 거의 초기 상태로 회복한다고 알려져 있기 때문에 24 시간의 off time은 발수성 회복에 충분한 시간으로 생각한다. 각 5 cycle의 실험이 끝난 후 표면의 열화 수위 및 발수성 회복 특성을 조사하기 위해 표면분석 장비를 사용하는 한편, 표면전도도를 측정하였다.

2.2 표면 특성 분석

실리콘 고무의 열화 특성 및 발수성 회복을 찾아내기 위해 사용된 기술은:

ATR-FTIR Spectroscopy: 이 기술은 열화와 더불어 표면의 탈고분자화가 증가함과 발수성 회복에 따라 저분자 실리콘 오일의 표면 확산을 밝히기 위한 것이다.

사용되는 기술은 KRS-5 crystal을 이용한 Attenuated Total Internal Reflection (ATR) 법이다. 얻어지는 스펙트럼은 시료를 관통한 IR light의 투과율(%)을 물질 내 다양한 화학그룹에 대해 파장별(파수(wave number)의 형태로 표현)로 도시한 것이다. 물질내 각 화학그룹은 성분형태나 결합형태에 따라 독특한 주파수의 IR 신호를 투과(또는 흡수)한다. 투과된 신호의 세기는 물질 내 화학그룹의 농도에 대한 지표이다. 특정파장의 투과율이 0 이라는 것은 모든 빛이 흡수되었고, 물질 내에 특정그룹이 풍부함을 의미한다. 분석되는 표면깊이는 실리콘 고무의 경우, 파수가 4,000 cm^{-1} 일 때 4,000 Å에서부터 400 cm^{-1} 일 때 40,000 Å까지의 범위에 있다 (파수 = 1/파장 [cm])⁴⁾.

시료는 약 10 mm \times 50 mm \times 0.5 mm 크기이다. 시료는 측정 전 5%의 아세톤으로 표면을 세척하고, 탈이온수로 헹군 후 건조하여 사용하였다.

표면 거칠기: 이 측정은 열화시료표면이 새 시료보다 훨씬 거칠다는 것을 입증하기 위해 사용되었다. 측정은 AFM 장비를 사용하여 표면 거칠기의 profile을 나타내었다.

X-Ray Diffraction (XRD): 이 기술은 고분자가 열화와 더불어 물리적 구조에서 변화가 있음을 입증하기 위한 것이다. 양극이 X-Ray 관을 막고, 50 kV/30 mA 가 정격이다. 불꽃 계수기가 탐촉자이다. 2θ는 10~25° 이다. 샘플링주기는 0.01° 이고 scan 속도는 1 분당 2° 이다. 제조사의 소프트웨어로 데이터를 축소한다. 이 과정은 peak 확인에 앞서 구리 방사선인 K-alpha 성분을 제거하는 것이다.

시료는 10 mm×10 mm×0.5 mm이다. 회절형태는 2θ와 세기의 관계로 나타난다. 측정세기는 약 10,000에서 60,000 Å 까지에서 증가하고, 깊이는 2θ값과 더불어 증가한다.

2.3 표면 전도도 측정.

건조대 아크에 의한 표면의 열화 및 회복기의 발수성 회복 특성을 관찰하기 위해 표면전도도를 IEC publ. 60507⁵⁾에 의거하여 측정하였다. 표면전도도는 절연물 표면에서 측정된 layer conductance에 form factor를 곱함으로써 계산한다. Layer conductance의 측정은 절연물에 전체 누설거리의 단위 미터 당 700 Vr.m.s. 이상의 전압을 인가하고, wet layer를 통해 흐르는 전류를 측정하는 것이다.

측정시 표면에 존재하는 saline 용액에 의한 오차를 제거하기 위해, 각 cycle의 열화가 끝나면, 곧바로 시료를 salt fog chamber에서 제거하였다. 다시 준비된 시료를 탈이온수에서 5 분간 함침시켜 표면에 묻은 salt deposit을 제거하고, oven에 건조한 후 표면전도도를 측정하였다. 표면전도도 측정에 사용한 증류수는 0.01 μS/cm의 전도도를 가진다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 표면 발수성 회복 특성

그림 2는 2 cycle 동안 salt fog에 노출시킨 후 24 시간의 건조기를 가지는 시편의 IR 스펙트럼을 보여준다. 측정을 위한 시편은 5% 아세톤으로 세척하여 표면의 오손물을 제거하고, 탈이온수로 헹군 후 건조하여 사용하였다. 또한, 아세톤 처리의 영향을 검토하기 위해 표면 처리하지 않은 시료에 대해 ATR-FTIR을 측정한 결과, 흡수 세기가 전반적으로 감소하는 것 외에는 유사한 회복 특성이 나타남을 확인할 수 있었다. 표 1은 그림 2에 표시되어 있는 실리콘 고무의 특정피크에 대한 IR 스펙트럼의 파수를 나타낸다. 1번 밴드의 넓은 범위의 3700-3200 cm⁻¹ 흡수스펙트럼은 ATH 내에 있는 OH로 인한 것이다. 2964 cm⁻¹의 2번 밴드, 1270-1255 cm⁻¹의 4번 밴드, 1100-1000 cm⁻¹의 5번 밴드는 각각 CH₃ 내

의 CH, Si-CH₃, Si-O-Si를 나타낸다. 6번 밴드는 Si-CH₃이며, 그 주위의 피크들은 메틸기를 가진 Si와 관련된 것들이다⁶⁾.

표 1. 실리콘 고무의 IR 특성 피크

Table 1. Characteristic IR bands for silicone rubber

	Wave number (cm ⁻¹)	bond
1	3700-3200	OH
2	2962-2960	CH in CH ₃
3	2360	CO ₂
4	1270-1255	Si-CH ₃
5	1100-1000	Si-O-Si
6	700	Si(CH ₃) ₃

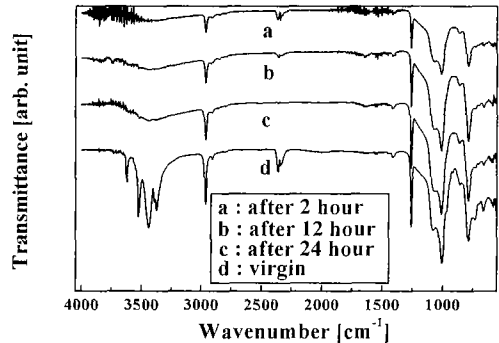


그림 2. 2 cycle salt fog 실험 후 시료의 IR 스펙트럼 (5% 아세톤 용액으로 세정)

Fig. 2. IR spectra of specimens after 2 cycles energized (dealt with 5% acetate solution)

그림에서 열화된 시편의 표면은 ATH의 OH기의 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 크게 두 가지의 원인이 있는 것으로 생각된다. 첫째, 내부 산화기구가 활발하게 작용하여 표면의 트래킹을 억제하는 것이고, 둘째는, 고분자 체인의 절단 및 분해로 인하여 ATH와의 물리적 결합력이 약화되어 표면으로 노출된 ATH가 saline 용액에 의해 세정되는 것이다. ATH의 감소는 실리콘 고무의 내트래킹성이 감소함을 의미한다. 따라서, salt fog에 의한 열화는 실리콘 고무의 전기적 성능에 영향을 미침을 알 수 있다.

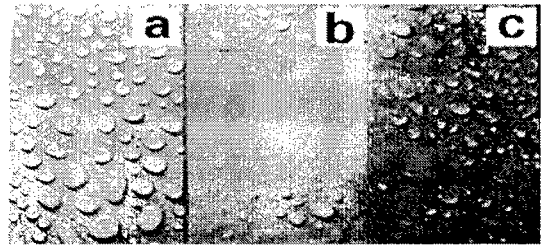
밴드 2번, 4번, 6번과 같은 메틸기(CH₃)의 감소는 PDMS의 측쇄로부터 건조대 아크열로 인하여 잘려나간 것이며, 이것은 cross-linking과 같이 PDMS의 분자구조를 변형시킨다. 또한, 밴드 5 (Si-O-Si) 내에서 1020-1010 cm⁻¹의 영역은 PDMS cyclic trimer를 나타내고, 1090-1050 cm⁻¹는 PDMS에서 tetramer

나 larger ring을 나타낸다. 다른 분자와 결합한 cyclic trimer는 trifunctional siloxane unit인데, 일반적으로 three dimension에서 불규칙하게 cross-linking된 분자와 결합하려는 성질이 있다⁶⁾. 결국 건조대 아크열로 인하여 잘려나간 PDMS의 측쇄는 저분자로 되어 벌크 내에 존재하고 있을 것이다. 곡선 b와 c는 각각 12시간과 24시간의 건조기를 가진 표본의 IR 스펙트럼이다. 시간 경과에 따라 결합 밴드의 흡수 세기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 상대적으로 저분자 중량을 가지는 실리콘 오일이 벌크내에서 표면으로 시간이 지남에 따라서 확산되어 간다는 것을 의미한다.

그림 3은 분무기를 이용하여 시편에 물방울을 떨어뜨려 10분 경과한 후 촬영한 사진이다. a는 미열화 시료로 표면에 존재하는 수분이 방울의 형태로 묻치는 것을 알 수 있다. b는 2 cycle 동안 salt-fog chamber에서 실험을 한 시료이다. 전극간의 건조대 아크에 노출된 부분은 film 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다. c는 2 cycle의 실험 후에 24 시간의 회복시간을 준 시료이다. 미열화 시료에 비하여 물방울이 많이 퍼져 있지만, b보다 발수성이 우수함을 나타내고 있다. ATR-FTIR과 표면 발수성의 육안 관찰로 실리콘 고무는 휴지시간을 가지면 발수성이 회복되는 것을 알 수 있으며, 이는 IR 스펙트럼 결과와도 잘 일치한다.

그림 4는 미열화 시료에 대해 10분 동안 확장 젖음성의 변화를 나타내는 접촉각 그래프이며, 그림 5는 2 cycle의 반복 실험 후에 발수성 회복시간 경과에 따라 측정된 접촉각의 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, 회복시간에 따라 발수성은 완전히 회복하였고, 12시간이 경과한 시점에서 미열화 시료의 접촉각(약 102~106°)보다 더 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 표면이 거칠어지면 발수성이 떨어지는 것으로 알려져 있지만, 실리콘 고무와 같이 양호한 발수성을 가지는 표면은 표면이 거칠어지면 오히려 발수성이 더 좋아진다. 이러한 성향은 불규칙한 기하 구조를 가지는 표면에서의 프랙탈 이론을 적용하여 설명할 수 있다⁷⁾.

거친 표면의 발수성과 젖음성에 대하여 프랙탈 이론을 적용하기 위해서는 우선, 프랙탈의 최대 길이가 액적의 직경보다 훨씬 작아야 하며, 최소 길이는 액체 및 기체 분자보다 커야 한다. 위의 이론에 따르면, 과도하게 거친 표면과 극히 매끈한 표면이 발수성을 증가시키지 못한다라는 것을 알 수 있다. 또한, 접촉각이 90° 보다 클 때(작을 때), 프랙탈 표면은 더욱 더 발수성(친수성)을 가진다. 그러므로, 미



a. virgin sample
b. specimen after 2 cycles energized
c. 24 h recovery time after 2 cycles energized

그림 3. 표면에서의 발수성 사진

Fig. 3. Photograph of water repellency on the surface

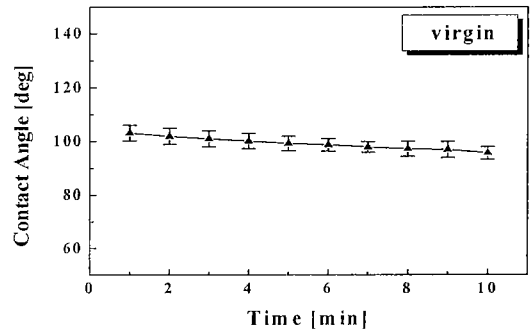


그림 4. 미열화 시료의 확장 젖음성에 대한 접촉각
Fig. 4. Contact angle for expanded wettability of virgin specimen

열화 시료보다 더 높은 발수성을 지니는 것은 이러한 사실로 뒷받침된다. 즉, 친수성이 지배적인 매끄러운 표면이 거칠어지면, 발수성은 떨어지고, 양호한 발수성을 가지는 표면이 더욱 거칠어지면, 발수성이 좋아진다⁷⁾.

그러나, 10분 경과 뒤에 측정된 확장 젖음성을 고려하여 볼 때, 미열화 시료 및 열화된 시료의 접촉각은 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 우선, 미열화 시료의 경우, 시간이 경과하여도 접촉각의 감소는 약 7~12° 정도로서 크지 않은데 비해, 열화된 시료의 경우, 발수성이 회복된 후에도 접촉각의 편차가 크고, 1분 후에 측정된 값과 10분 후에 측정된 값의 차이가 약 14~24° 정도로서 표면의 확장 젖음성이 증가함을 알 수 있다. 이는 표면 거칠기의 증가 및 흡습성의 부산물 생성 등에 의한 표면의 열화에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서, 표면의 발수성이 회복되었다 하더라도, 그 원인이 되

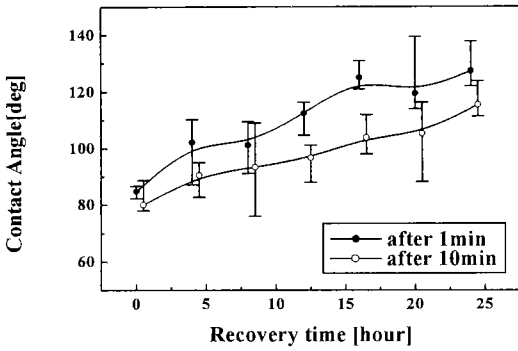


그림 5. 2 cycle 후, 발수성 회복시간에 따른 접촉각
 Fig. 5. Contact angle with the recovery time after 2cycle

는 저분자 실리콘 오일 성분이 제거되면 쉽게 친수성의 표면으로 전이할 수 있다. 따라서, 이러한 확장 젖음성의 증가는 초기 누설전류를 억제하는 능력을 미열화 시료보다 상실시키게 된다.

3.2 표면의 열화 특성

열화된 표면이 거칠어진다는 것을 증명하기 위하여 AFM 측정기기를 이용하였다. 그림 6은 미열화 시료 (위) 과 5 cycle 후 열화된 (아래) 시료의 거칠기를 나타낸 것으로, 표면에서 임의의 두 점을 정하여 두 점간의 단면을 도시한 것이다. 열화된 시편의 rms 값 234.65 nm으로 미열화 시료의 rms 값 105.20 nm보다 더 높은 수치를 나타내었다. 더 높은 rms 값은 표면이 더 거칠다는 것을 의미한다.

그림 7에 미열화 시료 및 5 cycle 열화된 시료의 XRD 사진을 나타내었다. 10~25° 에서 나타나는 hump는 고분자에 기인하는 성분이며, 18° 근처에서 나타나는 피크는 ATH filler 입자에 기인하는 성분이다⁴⁾. 그림에서 나타나는 커다란 변화는 열화에 의해 ATH filler 성분이 감소하는 것이다. filler 성분의 감소는 건조대 아크에 의해 실리콘 고무의 고분자 결합이 끊어짐에 따라 고분자와 filler와의 물리적 결합이 약화되어 표면으로 노출된 filler 입자가 saline 용액 등에 의해 세정됨으로써 나타나는 현상으로 생각된다. 이러한 경향은 이미 ATR-FTIR 및 표면 거칠기의 결과에서 나타난 OH 결합의 감소 및 표면 거칠기의 증가와 일치하는 것이다.

이상의 결과로부터 실리콘 고무는 심각하게 열화된 경우에도 회복기를 가지게 되면 벌크 내에 존재하는 저분자 실리콘 오일의 확산에 의해 발수성을 회복함을 알 수 있다. 또한, 이 때의 발수성은 미열

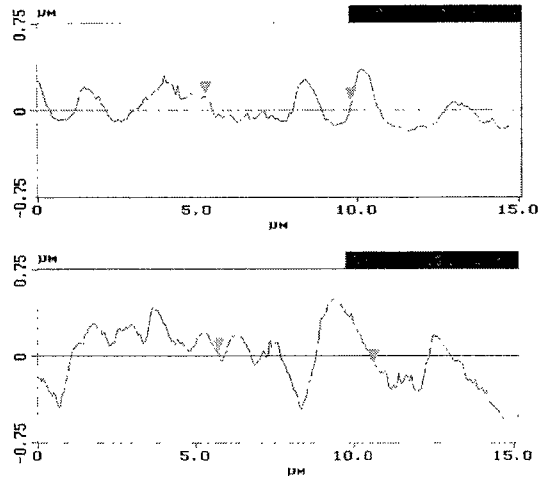


그림 6. 미열화시편과 열화 시편의 AFM profile (위 : 미열화 시편, 아래 : 열화된 시편)
 Fig. 6. AFM profiles of virgin and aged sample (top : virgin, bottom : aged)

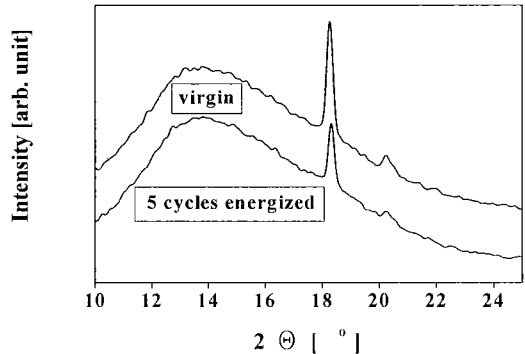


그림 7. 미열화시편과 5 cycle 동안 열화된 시편의 XRD 피크 변화
 Fig. 7. The change of XRD pattern between virgin and 5 cycles energized specimens

화 시료의 표면보다 더 양호함을 나타낸다. 그러나, 표면 고분자의 분해 및 내트래킹성 증가를 위해 충전된 ATH filler의 감소 등은 비가역적인 변화이므로 다시 회복할 수 없다. 따라서, 발수성을 부여하는 저분자 실리콘 오일이 건조대 아크에 의해 소실되면, 표면의 열화는 더욱 더 진전됨을 알 수 있다.

3.3 표면전도도 측정에 의한 표면 열화 및 발수성 회복 특성 관찰

그림 8에 각 5 cycle의 salt fog 열화가 끝난 후

회복 시간에 따른 표면전도도의 변화를 나타내었다. 미열화 시료의 표면전도도는 0.06 μS 를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 회복 시간이 증가함에 따라 표면전도도는 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한, 최초 1 cycle의 전압인가 후 제거한 시료의 표면전도도는 미열화 시료와 같은 크기의 0.06 μS 까지 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나, cycle이 증가함에 따라 발수성이 회복된 후의 표면전도도 값이 점점 증가하게 되는데, 이는 비가역적 표면 열화에 의한 영향으로 볼 수 있다. 한편, 5 cycle 열화 후의 시료는 표면 전도도 값이 크게 증가하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 표면전도도의 측정은 발수성의 회복 및 열화 특성을 관찰하는데 유효한 수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

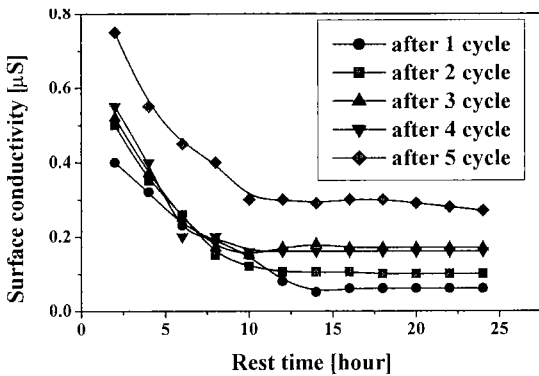


그림 8. cycle 열화 및 회복 시간에 따른 표면전도도 변화 (미열화 시료의 표면전도도 : 0.06 μS)
 Fig. 8. The change of surface conductivity depending on cycle of energization and recovery time (virgin : 0.06 μS)

4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 고무 표면의 열화 특성 및 발수성 회복 특성을 평가하였다. 이를 위해 salt fog 시험법으로 5 cycle 동안 인공 열화시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1]. 실리콘 고무의 열화된 표면은 미열화 표면보다 거칠어졌지만, 건조기를 통하여 발수성을 회복하였으며, 회복된 발수성은 미열화 시료보다 더 높게 나타났다. 이것은 저분자 성분의 확산으로 인한 발수 표면의 유지와 더불어 프랙탈 표면으로 인한 것이다.

[2]. 표면이 초기의 발수성을 회복하더라도, 표면 형상의 변화로 말미암아 전기 스트레스의 영향에 반복 노출되면, 표면이 친수성으로 되기가 쉽고, 표면

고분자의 분해 및 filler 소실 등의 비가역적 열화로 인해 전기적 성능이 나빠질 수 있다.

[3]. 표면의 발수성 회복 및 열화 특성을 평가하기 위해 표면전도도를 측정한 결과, 양호한 상관관계를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서, 표면전도도의 측정은 표면 열화 진단에 유효한 수단이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서 얻어진 결과들은 실험실 내의 인공 오손 시험으로 한정된 것이다. 따라서, 실지 옥외 환경에서의 장기적인 고분자 절연물의 오손 성능과 열화 진단에 적용하는 데에는 더 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1]. 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.
- [2]. S. H. Kim, E. A. Cherney R. Hackam, "The Loss and Recovery of Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Insulator Coatings", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1491-1499, July 1990
- [3]. X. Wang, S. Kumagai, M. Sato and N. Yoshimura, "Contaminant Properties of Silicone Rubber Insulator in the Acceleration Aging of Acid Rain", 1998 Annual Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Vol. 1, pp. 48-51, Oct 25-28, 1998
- [4]. R. S. Gorur et al, "Aging in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No. 2, pp.525-532, 1992.
- [5]. "Artificial pollution test on high-voltage insulators to be used on a.c. systems", IEC 60507, Second edition, April, 1991.
- [6]. S. H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam, "Suppression Mechanism of Leakage Current on RTV Coated Porcelain and Silicone Rubber Insulators", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 6 No. 6, pp. 1549-1556 October 1991.
- [7]. X. Wang, S. Kumagai, N. Yoshimura, "Relation between Hydrophobicity and Surface Roughness of Silicone Rubber Insulator before and after Aging in Acid Rain", 電學論 A, 119卷 2号, pp. 216-223 平成 11年