

## RTV 실리콘 고무의 표면열화와 내오손 특성과의 상관관계

### Relation between Surface degradation and Anti-pollution Characteristics in RTV Silicone Rubber

연복희\* · 이상엽\*\* · 이태호\* · 허창수\*

(Bok-Hee Youn\* · Sang-Youb Lee\*\* · Tae-Ho Lee\* · Chang-Su Huh\*)

#### Abstract

In this paper, we investigated the relation between the surface degradations and anti-pollution characteristics of Room Temperature Vulcanized(RTV) silicone rubber coating that has different roughness through immersing into saline water. We utilized several analytic techniques, such as atomic force microscopy(AFM), scanning electron microscopy(SEM), contact angle, Salt Deposit Density(SDD) and average leakage current under the condition of salt fog. It is found that the surface roughness of treated RTV silicone rubber increased and the hydrophobicity of sample surface decreased with increasing the duration of immersion into water due to the erosion of base polymer, the melting down alumina trihydrate(ATH) and the diffusion of Low Molecular weight(LMW) fluid. Despite the roughness of surface had been increased by water immersion, excellent anti-pollution and recovery characteristics were maintained and SDD saturated to 0.1~0.14mg/cm<sup>2</sup>. The average leakage current under salt fog increased with surface roughness. Measurement of average leakage current will be helpful to investigate surface degradation and lifetime expectation of RTV silicone coating.

**Key Words(중요용어)** : SDD(염분부착밀도), Hydrophobicity(발수성), LMW silicone fluid(저분자량 실리콘유)

#### 1. 서론

실리콘 고무는 옥외용 애자, 피뢰기, 케이블 종단 접속제, 부싱, 및 각종 절연체의 외관 뿐만 아니라 옥외용 절연재료의 보수재료로 사용 범위가 증가하고 있다. 현재 사용 중인 실리콘 고무는 크게 고온 경화형(HTV)과 상온 경화형(RTV)으로 경화방법에 의한 분류를 할 수 있는데, 고온 경화형 실리콘 고무는 애자의 애관으로 사용되고 있고, 상온 경화형 실리콘 고무는 기존 사용 중인 자기제 애자에 표면 코팅을 통한 자기제 애자의 내오손 특성을 향상 시키는 목적으로 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 실리콘 고무는 적용

이 간편할 뿐 아니라 높은 발수성 유지 특성으로 표면 오손 물질의 부착을 저감시키고, 수막 방지도 크게 기여함으로써, 표면 누설 전류를 저감시키는 우수한 특성을 장시간 유지시켜 표면을 통한 섬락사고 방지에 큰 기여를 하고 있다.<sup>[2]</sup> 하지만, 고분자 특성 상, 옥외사용에 따른 건조대 아크(Dry band arc)에 의한 발열과 자외선, 수분 등 환경적인 요인으로 인하여 표면이 손상되어 거칠기가 상승되고, 발수성 저하 및 오손 물질의 부착율이 증가되는 현상이 나타나 높은 누설전류를 나타내어 섬락으로 이어지게 된다.<sup>[5]</sup> 그러나 실리콘 고무는 열화 인자가 소멸되면 원래의 절연특성과 발수성을 회복한다. 이러한 발수성 회복특성은 절연재 내부로부터 분자량이 작은 실리콘 고분자 성분의 확산에 기인하는 것으로 알려져 있다.<sup>[3],[4]</sup> 즉 각종 오염물질이 표면에 부착되어 방전을 일으키고, 연속적인 환경에 따라 표면의 저분자량 성분이 없어지면 벌크에서 서서히

\* 인하대학교 전기공학과

\*\* LG 산전 전력연구소

Fax: 032-863-5822

E-mail : g1991139@inhavision.inha.ac.kr)

1999년 10월 18일 접수, 2000년 6월 8일 심사완료

확산되어 오손물을 감싸기 때문에 발수성을 회복하는 것이다. 이러한 회복특성도 장기간의 사용에 따라 서서히 감소되며, 이로 인해 절연체 전체의 성능을 파악하기 위해서는 이러한 오손특성과 전기적 특성간의 상관관계를 보다 정확히 알아볼 필요가 있다.

RTV 실리콘 고무의 경우, 좀 더 정확한 열화특성을 파악하게 되면 자기질 애자 표면에 RTV 실리콘 고무의 재시공 주기결정 및 수명예측에 상당한 도움이 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 우선 상온 경화형 실리콘 고무를 수분 처리하여 표면의 거칠기 및 특성변화를 조사한 후, 이러한 표면 열화로 인한 오손 물질의 부착밀도(SDD)의 변화와 염무 분위기에서 평균 누설 전류를 관찰하여, RTV 실리콘 고무의 표면 열화와 내오손 특성의 상관관계를 살펴보았다.

## 2. 실험 및 장치

시료는 내트래킹성 및 내침식 특성을 향상 시키기 위해  $5\mu\text{m}$  입자 크기의 ATH 충전제를 40wt% 포함한 일액형 RTV 실리콘 고무(D사)를 사용하였다. 시료의 코팅을 용이하게 하기 위해 분산제 용매로 톨루엔을 사용하여  $127 \times 127 \text{ mm}^2$  의 FRP 기판에  $0.5 \pm 0.05 \text{ mm}$  두께로 코팅한 후, 상온에서 최대 100시간 경화시켰다. 그리고 표면열화 특성분석용 시료로 SEM, AFM, 및 접촉각 측정을 위해 별도로  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  크기의 시편을 제작하여 시험하였다.

### 2.1 수분침투시험

일정 시간의 옥외 환경 적용상태에서 수분에 의한 장기적인 표면 열화 상태를 모의하기 위해서, 염수 침적 시험을 하여 강제 열화시켰다. 실리콘 고무와 같은 고분자의 경우, 구조적으로 물 또는 수증기의 침투에 의한 가수분해현상을 일으켜 전기적 또는 기계적 열화를 야기할 수 있기 때문에 수분침투는 중요한 열화인자로 인식되고 있다. 보통 0.1% NaCl을 섞은 탈이온수에 넣고 100시간 가열하여 각종 평가를 하지만, 본 시험에서는 최대 300시간까지 수분 침적 열화시키면서 50시간 단위로 꺼내어 초음파 세척기로 표면에 이물질을 제거한 후, 깨끗한 건포로 닦아내고 벨크 안으로 침투한 수분의 영향을 없애기 위해서 진공오븐에 최대 24시간 건조시켰다.

### 2.2 표면 형태의 변화

표면발수성에 영향을 미치는 인자로는 표면의 오염물, 온도, 표면의 거칠기 등을 들 수 있겠지만, 그 중 표면의 거칠기는 많은 연구자들의 보고에 따르면 열화의 여부에 따라 상당히 다른 특성을 보이는 것으로 보고되고 있다.<sup>[15]</sup> 염수 침적에 의한 표면 형태 변화를 알아보기 위해서, SEM(Hitachi, S-4300)을 이용하여 표면 구조적 변화를 관찰하였으며, 또한 AFM (Topo-Metrix ACCUREX)를 이용하여 표면의 거칠기를 정량적으로 측정하였으며, 거칠기 변화를 레쉬 이미지화하여 나타내었다.

### 2.3 중량 및 저분자량 실리콘 성분의 변화

수분 침투에 의한 코팅 시료의 중량 변화율을 측정하기 위해 제작된 시편을 동일한 조건의 염수 침적 열화를 시킨 후 전자 저울을 이용하여 열화 시간에 따른 중량 변화를 관찰하였다. 또한 실리콘 고무 특유의 발수성회복에 중요한 역할을 하는 저분자량 실리콘 성분이 수분침투에 의한 변화를 알아보기 위해서 처리된 후 처리된 시료를 헥산에 100시간 침적한 후 추출하여 12시간 상온에서 건조 시킨 후 중량 변화를 관찰하여 저분자량 실리콘 유의 중량비 변화를 알아보았다. 이러한 저분자량 헥산추출법은 헥산중으로 확산된 저분자량이 모두 회복특성에 중요한 역할을 하는 것은 아니지만 저분자량의 정량적인 측정에 많이 사용된다.<sup>[8]</sup>

### 2.4 표면 열화에 의한 XRD 패턴 변화

염수 침적에 의한 표면 열화로 인해 발생하는 변화를 살펴보기 위해서 XRD 패턴을 관찰하였다.<sup>[6][7]</sup> 시료 중에 결정성을 가진 것은 첨가된 충전제 이외에는 존재하지 않으므로, 수분 침투에 의한 표면에서의 ATH 결정 변화를 알아보기 위해서 XRD(Philips X'pert MPD)를 사용하였으며,  $2\theta$ 의 값은  $10 \sim 70^\circ$  범위에서 측정하였다. 입사각은  $0.1^\circ$  로 고정된 상태로 측정하였고, 사용된 X선은  $\text{CuK}\alpha$ 이며 파장은  $1.5405 \text{ \AA}$ 였다.

### 2.5 접촉각의 측정

옥외용 절연물에서 미소방전은 오손과 흡습 상태에서 발생하기 때문에 외피재료의 발수성은 절연 성능 및 장기성능에 크게 영향을 주므로 매우 중요하다. 보통 발수성의 정량적 평가를 위해 접촉각을 측정하는데, 고체 표면에 물방울이 부착할 때 접촉하는 각도를 말하며, 기체의 표면 자유 에너지가 일정하다고 하면 고체의 표면장력과 액체와의 계면장력으로

결정된다.<sup>18)</sup>

수분침적 시간에 따라 가속 열화 시킨 후 표면 열화에 의한 표면 에너지 변화와 발수성 변화를 정량적으로 관찰하기 위해서 접촉각을 측정하였다. 본 실험에서는 정적 접촉각 측정 장치를 이용하여 각기 다른 열화 시간마다 접촉각을 측정하였다. 본 실험에서는 표면의 임의의 10곳에 2 $\mu$ l의 탈이온수를 떨어뜨려 그 평균값을 나타내었다.

### 2.6 유전특성의 변화

수분 침적에 의한 실리콘 고무의 전기적 특성변화를 알아보기 위해서 침적시간에 따른 비유전율의 변화를 측정하였다. 비유전율의 측정을 위해, 시료와 전극사이의 일정한 접촉을 위해 유전을 측정을 위한 Test fixture(HP 16451B)를 임피던스 어날라이저(HP 4192A)에 연결하여 주파수 가변에 따른 유전상수의 변화를 관찰하였다.

### 2.7 Salt-Fog 시험을 이용한 등가염분부착밀도 및 평균누설전류의 변화

Salt-Fog 시험은 염수 분무에 의한 시료의 염분 부착 밀도(SDD)의 변화 및 부착 염분 밀도에 따른 평균 누설 전류를 측정하기 위해서 사용하였다. 그림 1에서 나타난 실험장치는 ASTM D2132<sup>19)</sup>에 의해 제작하였으며, 분무되는 염수의 전도도는 5000  $\mu$ S/cm, 10,000  $\mu$ S/cm으로 하여 가속 열화 환경을 유지하며, 시간을 달리하여 SDD의 변화특성을 알아보았다. Salt-Fog 시험 후 표면에 부착된 염분 부착밀도를 측정하기 위해서 전도도 10  $\mu$ S/cm 이하의 탈이온수 400ml를 사용하여 코팅 시료 표면을 세척한 후 세정수 전도도의 변화를 Conductivity Meter(CM-7B, TOA)를 이용하여 측정을 한 후 전도도 변화에 따른 염분 부착 밀도를 계산하였다. 또한 전도도의 온도 보정을 위하여 IEC 507에 따른 보정상수를 사용하여 계산하였다.<sup>10)</sup>

염수 분사 실험의 평균 누설전류를 측정하는 경우 염수에 의한 침식을 방지하기 위해서 상부 전극은 탄소전극을 사용했고, 하부 전극은 스테인레스 강으로 하여 시료의 크기와 동일한 크기의 전극으로 사용하였으며, 상부 전극간의 거리 25.4mm에 1.5kV를 인가하였다. 그림 2는 평균 누설 전류 측정을 위한 데이터 취득 시스템으로 PCL-818 분해능 12bit, 변환속도 100kHz의 성능을 가진 8Channel A/D Converter를 사용하였으며, 일정한 주기를 가지고 표면에 흐르는 누설 전류를 검출하여 그 평균치를 계산하도록 하였다.

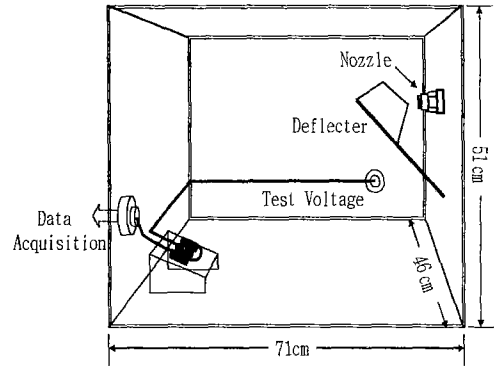


그림 1. 염수 분무 시험장치  
Fig. 1. The setup of salt-fog test chamber

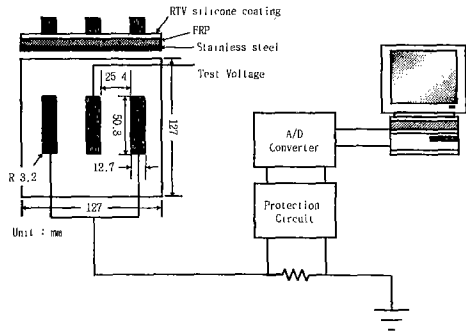


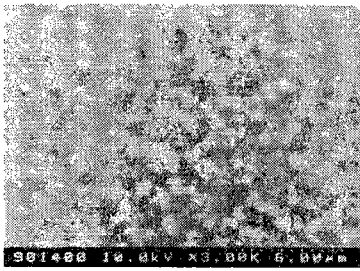
그림 2. 데이터 취득 장치  
Fig. 2. Circuit of data acquisition system

## 3. 실험 결과 및 고찰

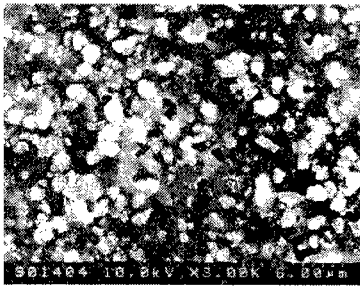
### 3.1 표면 형태의 변화

표면의 거칠기 변화를 알아보기 위해서, SEM과 AFM을 이용하여 표면 관찰 및 정량화 하였다. 그림 3에는 수분 침적 시간에 따른 표면 구조 변화를 SEM을 이용한 측정결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 염수 침적에 의한 기저 고분자(base polymer)의 침식으로 충전된 ATH 충전제가 시료 표면에서 더욱 선명한 모양을 관찰할 수 있었다. 이는 수분침투로 인해 충전제 표면과 기저 고분자 간의 결합력이 약해지고 표면에 존재하고 있던 고분자가 떨어져 나간 것으로 생각할 수 있다. 또한 내트래킹성 및 내침식성 향상을 위해 첨가된 ATH도 수중에 노출되면 어느정도 용해될 수 있다. 이러한 성분은 중량손실로 이어졌다.

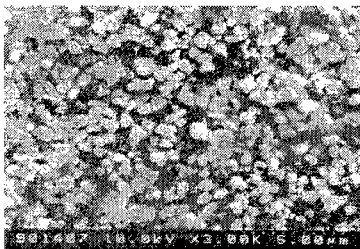
이렇게 표면에 충전제의 노출로 인한 표면 거칠기



(a)



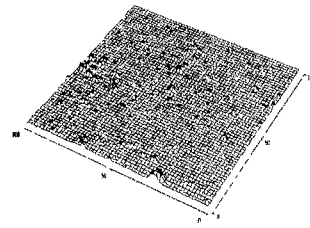
(b)



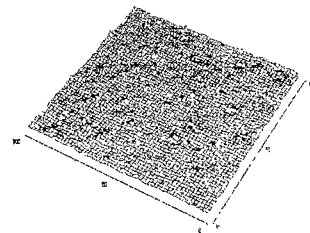
(c)

그림 3. 수분 침적시간에 따른 표면양상  
(a) 초기시료 (b) 150시간 (c) 300시간  
Fig. 3. Surface appearance of RTV silicone rubber as a function of immersing time into saline water (SEM)  
(a) Unaged sample (b) 150 hours (c) 300 hours

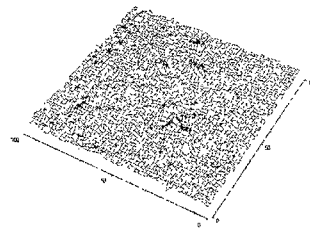
의 변화를 알아보기 위해서 AFM을 이용하였다. 그림 4는 열화 처리 시간에 따른 AFM 이미지를 메쉬를 이용한 결과이다. 표면 거칠기의 실효값(rms)은 초기시료의 경우 137nm, 150시간 처리된 시료는 172nm, 그리고 300시간 처리시료는 402.5nm를 나타내었다. 또한 평균 높이는 초기시료 491.2nm, 150시간 처리 시료 864nm, 그리고 300시간 처리시료는 1440.1nm를 나타내었다. AFM 이미지를 통하여 열



(a)



(b)



(c)

그림 4. 수분 침적시간에 따른 AFM Mesh 이미지  
(100×100 μm) (a) 초기시료 (b) 150시간 (c) 300시간  
Fig. 4. AFM mesh image of sample surface by immersing in water(100×100 μm)  
(a) Unaged sample (b) 150 hours (c) 300 hours

화시간에 따라 표면의 거칠기가 상당히 증가된 것을 볼 수 있는데, 이는 SEM 결과와 함께 고려하였을 때 충전재의 표면 노출과 표면에 존재하는 기체 고분자의 침식으로 인해 표면 거칠기에 영향을 준 결과이다.

### 3.2 코팅 중량 및 저분자량 실리콘 유의 변화

그림 5는 수분 침투로 인하여 발생한 시료의 중량 변화를 초기시료에 대비하여 나타낸 것이다. 수분침투로 인한 중량감소가 최대 300시간 침적한 시료의 경우 최대 5%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

이는 SEM이나 AFM에서 살펴본 것과 같이 기저 고분자의 침식과 ATH 충전재의 용해로 인한 중량감소로 예상된다. 또한, 이렇게 수분 침적 처리된 RTV 실리콘 고무 코팅시료 내에 존재하는 저분자량의 양적변화를 살펴보기 위해 처리 전과 후의 시료를 헥산에 침적하여 유동성 저분자량의 양을 측정하였다. 이러한 유동성 저분자량은 표면의 발수성 유지에 상당히 중요한 영향을 나타낸다. 헥산 침적 시간은 더 이상의 중량 변화가 없는 약 100시간으로 정하였다. 헥산 추출법에 의한 저분자량 성분의 중량 변화를 관찰한 결과, 그림 6에서 보는 바와 같이 수분 침적으로 인하여 저분자량 실리콘 성분이 줄어들어 초기시료의 경우 전체 중량의 약 2%에 달하는 성분이 300시간 수분침적 처리한 시료의 경우 약 1%까지 저하하였다. 이는 시료가 수분침투로 인한 기저고분자의 중량감소 때문일 수 있지만, 중량감소 성분이 초기 중량 대비 5%정도라고 생각할 때, 시료 체적내에 존재하는 저분자량이 상당량 감소한 것을 알 수 있었다. 이러한 감소성분은 시료에 존재하는 저분자량이 수분에 침적된 시간 동안 시료에 침투된 수분으로 인하여 시료 체적이 증가되어 수분 증으로 확산되어 빠져 나간 것으로 생각된다. 이 때문에 휴지기간에 발수성의 회복에 영향을 주게되고, 결과적으로 내오손 특성에 영향을 미칠 것으로 생각되었다.

### 3.3 XRD 패턴의 변화

수분 침적에 의한 표면 기저고분자와 저분자량 성분의 확산으로 인한 감소, 그리고 더불어 발생하는

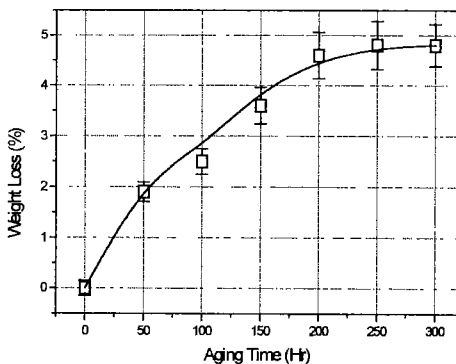


그림 5. 수분 침적에 의한 실리콘 고무의 중량변화  
Fig. 5. Weight loss as a function of immersing time into water

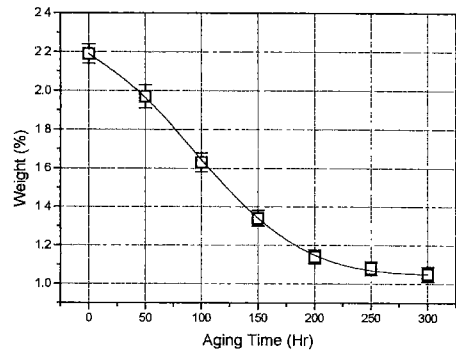


그림 6. 수분 침적에 따른 저분자량 성분의 변화  
Fig. 6. LMW content as a function of immersion time into water

소량의 충전재 ATH( $Al(OH)_3$ )의 용해에 따른 변화를 알아보기 위해서 XRD를 사용하였다. ATH의 Bragg Angle은 JCPDS 데이터 베이스에서 알아보면 ATH의 피크의  $2\theta$ 는  $18.507^\circ$ ,  $20.675^\circ$ ,  $23.752^\circ$ ,  $26.837^\circ$  등에서 나타난다. 그림 7에서 알 수 있듯이 초기 시료에서는  $18.507^\circ$ ,  $20.675^\circ$  에서 나타나는 매우 큰 강도의 피크가 나타났지만, 표면 열화로 인한 ATH 결정의 용해 및 변화로 인하여 피크의 세기가 점차 감소하는 것으로 사료된다. 이는 기저 고분자의 침식과 동시에 소량의 ATH의 용해로 인한 현상으로 판단된다.

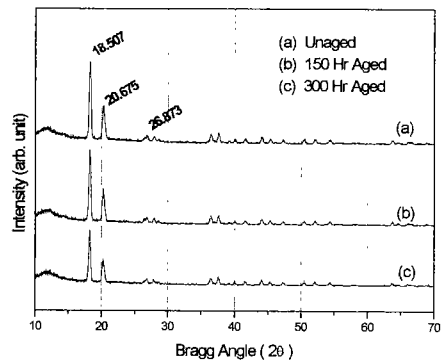


그림 7. 표면 열화에 의한 XRD 패턴의 변화  
Fig. 7. XRD pattern in the surface of sample treated water immersion

### 3.4 표면 접촉각의 변화

옥의 절연물의 표면 발수성은 장기 성능에 영향을 미친다. 이는 표면 발수성을 유지하여 표면의 부착 오손 물질을 저감하여, 표면 미소 방전을 저감시킬 수 있기 때문이다. 물의 표면에너지는 73dyne/cm이며, 실리콘 고무의 표면에너지는 22dyne/cm이기 때문에 커다란 표면에너지의 차이로 인한 계면특성으로 높은 접촉각을 나타낸다. 특히 실리콘 고무는 다른 고분자 재료(EPDM : 34dyne/cm)보다도 낮은 표면에너지로 인하여 다른 고분자 재료에 비해서도 접촉각이 높게 나타낸다.

또한 실리콘 고무 제조시 내부에 존재하는 저분자량 실리콘 성분이 표면 열화 이후 확산 현상이 일어나 코팅의 표면에너지가 다시 낮아지게 되어 발수성 회복이 가능하게 된다. 하지만 실리콘 고무내의 저분자량 성분의 차이로 열화 정도에 따라서 회복되는 접촉각의 차이가 나타나게 된다.<sup>[12]</sup>

그림 8은 시료에 수분 침투에 의한 접촉각의 측정결과를 나타내었다. 초기시료의 경우 약 135°를 나타내던 접촉각이 300시간 열화 후 약 85°까지 저하되었다. 이는 앞에서 살펴본 결과에 비추어 보면 충전제 노출로 인하여 거칠기 증가 및 친수성 충전제와의 표면 접촉으로 인하여 표면 접촉각이 저하한 것으로 사료된다. 앞에서 측정된 저분자량 성분의 양적 변화가 표면의 발수성 회복특성에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해, 처리 후 완전히 건조시킨 상태에서 접촉각을 측정 후 대기 중에 노출시켜 회복시간에 따른 표면 발수성의 변화 추이를 측정하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이 염수 침적으로 이하 내부 저분자량 성분의 저하가 고무 내부로부터 표면으로의 확산량 감소로 이어져 발수성 회복에 차이가 난 것을 확인할 수 있었다.

### 3.5 비유전율 변화

유전특성은 절연체의 특성을 평가하는 여러 가지 수단중의 하나로서 절연체의 화학적, 구조적 상태나, 표면 및 내부의 열화상태에 따라 다른 정보를 얻을 수 있다. 그림 10은 수분침적 처리 시간에 따른 RTV 실리콘 고무 시료에서 측정된 비유전율의 변화를 나타낸 것이다. RTV 실리콘 고무의 비유전율은 처리 전 4.7정도의 값을 나타내었으나, 처리시간이 증가함에 따라서 점차로 증가하여 처리시간 300시간에서는 9 정도로 급격히 증가되었다. 처리시간이 증가함에 걸보기 제적이 증가하였고, 두께도 상당히 증가한 것으로 보아 체적 증으로도 수분이 상당히 침투되었음을 알 수 있다. 따라서 비유전율의

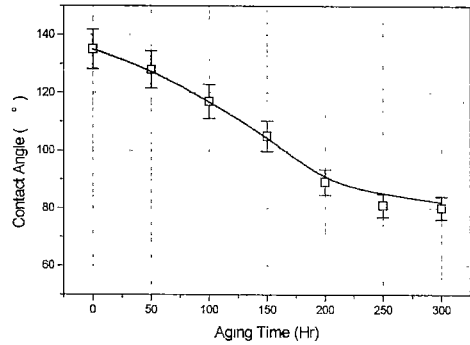


그림 8. 표면열화에 의한 접촉각의 변화  
Fig. 8. Contact angle as a function of immersion time into water

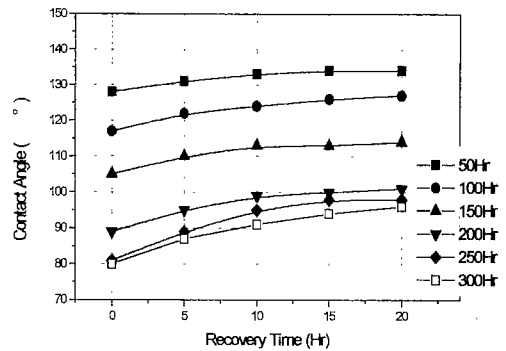


그림 9. 저분자량 성분의 확산에 의한 접촉각 회복  
Fig. 9. Recovery of contact angle by diffusion LMW

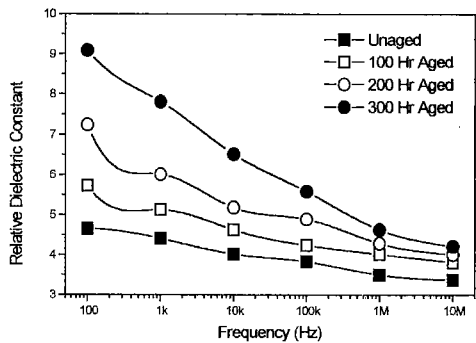


그림 10. 처리시간에 따른 주파수-비유전율 특성  
Fig. 10. Relative dielectric constant as a function of immersion time

값이 증가하는 것은 고무 내로 침투된 수분으로 인해 자유체적의 변화와 구조의 변화가 발생하고 표면뿐만 아니라 체적 내에서도 가수화 반응이 일어나며, 각종 수산기의 부착으로 인해 발생하는 것으로 사료된다. 이러한 비유전율의 증가는 절연재료로서의 바람직하지 못한 것으로 절연성능이 저하되었음을 뜻한다.

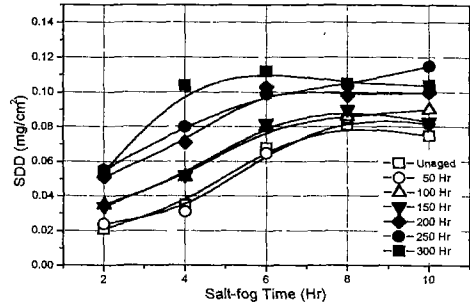
**3.6 Salt-fog에 의한 SDD와 평균누설전류의 변화**

보통 전도성의 물질에 오염되어 있는 시료 표면에 흐르는 누설전류 평균치의 변화는 시료 표면 위의 건조대 아크에 관련되어 있다. 건조대가 형성되면 전체가 그곳에 집중되고 아크가 발생한다. 아크방전이 표면에서 반복되게 되면 재료 표면이 열화되어 표면 절연성능이 저하되고 절연물 전체의 성능을 떨어뜨려 심각한 사고로 이어진다. 따라서 표면 누설전류를 장단기 적으로 측정하여 절연재 표면의 열화 진행도와 잔류 수명을 평가할 수 있는 시도되고 있다.<sup>14)</sup>

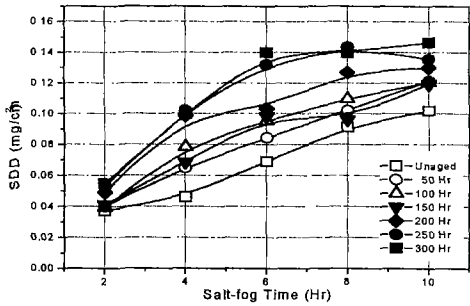
본 실험에서는 표면 열화에 의한 거칠기 차이로 나타나는 SDD(Salt Deposit Density) 변화를 알아보기 위해서, 약 10시간동안 Salt-fog를 분사시켜 SDD를 측정하였다. 평균누설전류의 변화를 관측하여 표면 열화와 SDD, 그리고 누설전류의 관계를 살펴보았다. SDD를 측정하기 위해서, 전압을 인가하지 않고, 시험 전도도를 5000 μS/cm와 10,000 μS/cm으로 가혹한 환경을 유지하였으며, 각 Salt-fog 시험시간 후 꺼내어 실리카겔을 봉입한 데시케이터에서 약 12시간 건조시킨 후 SDD를 측정하였다.

그림 11은 열화처리에 따라서 SDD의 변화를 측정한 결과이다. 시험 전도도 5000 μS/cm일 경우 초기 시료의 SDD는 염수 분무 시간 10시간 동안 최고 0.06mg/cm<sup>2</sup>를 넘지 않으나 염수 침적으로 인한 표면 열화가 심한 300시간 침적 시료는 약 10시간 분무에 0.11mg/cm<sup>2</sup>정도의 오손 부착물을 나타내었으며, 특히 각기 다른 열화 상태에서도 약 0.1mg/cm<sup>2</sup>의 SDD에서 포화되는 현상을 나타내고 있다. 그리고, 시험 전도도 10,000 μS/cm 일 경우에는 초기시료는 0.09mg/cm<sup>2</sup>를 나타내었고, 300시간 표면열화 시에도 약 0.14mg/cm<sup>2</sup>에서 포화되며 우수한 내오손 특성을 보여주고 있다.

일반적으로 알려진 국내 해안 지역의 등가 염분 부착 밀도는 해안공업지역에서 최고 0.6mg/cm<sup>2</sup>이며, 해안 최단 거리 약 20km까지의 평균 SDD 측정값 0.063mg/cm<sup>2</sup>이다. 국내 해안가에서의 등가염분부착



(a)



(b)

그림 11. 표면 열화에 의한 SDD의 변화

(a) 5,000 μS/cm (b) 10,000 μS/cm

Fig. 11. SDD as a function of immersion time into saline water

(a) 5,000 μS/cm (b) 10,000 μS/cm

밀도는 평균 0.12mg/cm<sup>2</sup>~0.25mg/cm<sup>2</sup>으로 알려져 있다. 이를 기준으로 누설전류의 변화를 알아보기 위해서 6시간 염수 분무 후 시험 전압을 인가하여 평균누설전류를 4시간 동안 측정하였다. 표 1은 Salt-fog 시험 6시간 후의 전도도와 표면열화정도에 따른 SDD값을 나타내었다. 평균누설전류 측정결과를 그림 12에서 나타내었으며, 초기의 시료에서는 전도도에 따라서 약 1.1배의 평균누설전류의 차이가 나타나지만, 침적 열화 시간 150시간 이상의 시료에서 평균누설전류가 급격히 증가되어 최고 약 2.5배까지 상승됨을 알 수 있었다. 이로써 수분침투에 의해 열화되면, 표면의 오염물 부착밀도는 포화되어 어느정도는 오손특성을 유지할 수 있지만 평균누설전류는 시료 내부 자체의 변화로 인하여 상당히 증

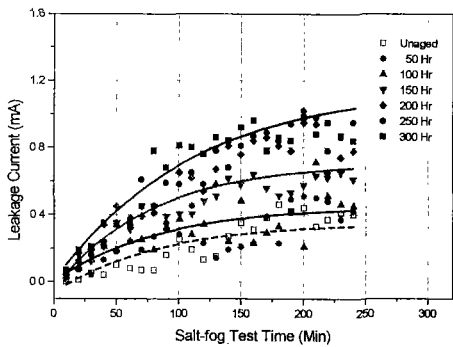
표 1. Salt-fog 6시간 후의 SDD(mg/cm<sup>2</sup>)  
 Table 1. Variation of SDD after salt-fog test time for 6 hours

시간	0	50	100	150	200	250	300
5000 $\mu$ S/cm	0.068	0.065	0.08	0.082	0.103	0.099	0.112
10,000 $\mu$ S/cm	0.069	0.084	0.095	0.098	0.114	0.132	0.145

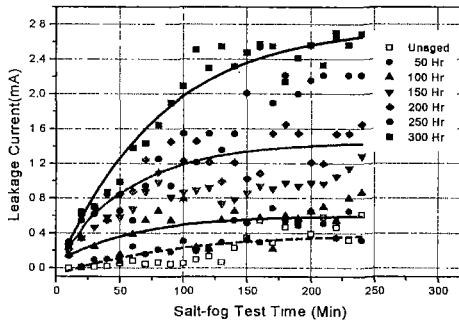
4. 결 론

본 연구에서는 국외은 물론, 국내에서도 적용이 시작된 상온경화형(RTV) 실리콘 고무의 표면 열화에 의한 내오손 특성 변화를 알아보기 위하여 가속열화로 염수침적처리를 한 후 접촉각 및 salt-fog 테스트를 이용한 SDD, 평균 누설 전류 측정 등을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수분 침적에 의한 표면 열화로 인하여 총 시료 중량의 약 5% 정도의 중 량 감소가 발생되었다. 이는 기저 고분자인 실리콘 고무의 침식과 충전재인 ATH의 용해 그리고 저분자량 성분의 확산으로 중량감소가 발생한 것으로 생각된다.
2. 표면 열화로 인한 접촉각은 초기시료의 접촉각 약 135° 에서 300시간 열화시 80° 까지 저하되었으며, 이는 기저 고분자의 침식으로 표면에 노출된 ATH 충전재와 거칠기의 증가로 발수성 저하가 초래되었다고 생각된다. 또한 표면 열화 후 회복시간을 부여했을 경우 열화 정도에 따라 내부 잔류 저분자량 성분의 양적 변화가 발생하여 발수성 회복 및 속도의 차이를 확인하였다.
3. 염수 침적에 의한 내부 구조의 변화로 인해 실리콘 고무의 자체 절연 특성의 저하가 나타나는 것을 비유전율 측정을 통해서 알 수 있었다. 초기시료보다 열화시간에 따라서 최고 2배 정도까지 비유전율이 변화하였는데, 이는 표면 발수성 유지와는 별개로 수분 침적에 의한 내부구조의 변화가 발생하여 절연 성능의 저하가 있음을 알 수 있었다.
4. Salt-fog를 이용한 SDD의 변화는 표면 열화 정도에 따라서 차이는 있지만, 5000  $\mu$  S/cm에서는 약 0.1mg/cm<sup>2</sup>에서, 10000  $\mu$  S/cm에서는 약 0.14mg/cm<sup>2</sup>에서 포화되는 현상을 나타내어 표면 열화에도 우수한 내오손 특성을 유지하는 것으로 나타났지만, 평균누설전류는 초기시료에서는 약 1.1배, 300시간 열화시료에서는 최고 약 2.5배의 차이를 나타내며 전기적 특성의 저하가 발생됨을 알 수 있었다. 그리하여 중전의 발수성 측정 및 오손도 측정만으로 열화 판정하는 것은 오류를 범할 수 있으며, 누설전류를 측정함으로써 보다 신뢰성을 갖춘 열화 평가와 실리콘 재시공 주기에측이 가능하리라 본다.



(a)



(b)

그림 12. 염무 분위기에서 평균 누설 전류의 변화  
 (a) 5,000  $\mu$  S/cm (b) 10,000  $\mu$  S/cm

Fig. 12. Variation of average leakage current under salt fog (a) 5,000  $\mu$  S/cm (b) 10,000  $\mu$  S/cm

가하는 것을 알 수 있었다. 그리하여 중전의 발수성 및 오손도 측정으로만 열화 판정을 하는 것은 오류를 범할 수 있으며, 누설전류를 측정하므로써 보다 신뢰성을 갖춘 열화평가를 할 수 있을 것으로 생각된다.



### 감사의 글

본 결과는 정보통신 우수시범학교(대학원) 지원사업에 의하여 1999년 인하대학교 교내 연구비 지원으로 수행하였음.

### 참고문헌

- [1]. S.H. Kim, E.A. Cherney, R.Hackam, "The Loss and Recovery of Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Insulator Coating", IEEE. Trans. Pow. Del., Vol.5, No.3, pp 1491-1499, Jul. 1990.
- [2]. S.H. Kim, E.A. Cherney, "Artificial Testing and Evaluation of RTV Coatings in a Salt-fog Chamber", IEEE Trans. Die. and E.I., Vol.26, No.4, pp 797-805, Aug. 1991
- [3]. J.W. Chang, R.S Gorur, "Surface Recovery of Silicone Rubber Used for HV Out door Insulation", IEEE Trans. Die. and E.I., Vol.1, No.6, Dec., 1994
- [4]. S.Kumagai, N.Yoshimura, "Hydrophobicity Recovery of Silicone Rubber and LMW Behaviour" , AICDEI Symp. Proceeding, pp. 457 - 460, Sept. 1998.
- [5]. R.S.Gorur, J.Mishra, R. Tay, R.McAfee, "Electrical Performance of RTV Silicone Rubber Coatings", IEEE Trans. Die. and E.I., Vol. 3, No. 2, pp. 299-306 Apr. 1996.
- [6]. T. Zhao, R.A. Bernstorf, "Ageing Tests of Polymeric Hosuing Materials for Non-Ceramic Insulators ", IEEE Electrical Insualtion Maga., Vol. 14., No. 2., Mar., 1998.
- [7]. R.S. Gorur, G.G. Karady, A. Jagota, M. Shah, B.C. Furumasu "Comparision of RTV Silicone Rubber Coatings under Artificial Contamination in a Fog Chamber", IEEE. Trans. Pow. Del., Vol.7, No.2, pp. 713-719, Apr. 1992
- [8]. 허창수, "HTV 실리콘 고무에서 열화인자에 따른 저분자량 성분과 표면발수성의 변화", 전기전자재료학회지, Vol.12, No.1, pp 1-10, Jan. 1999
- [9]. ASTM D 2132-91, "Standard Test Method For Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulation Material"
- [10]. IEC Publication 507, "Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be used on A.C. Systems"
- [11]. H. Den, R. Hackam, "Electrical Performance of RTV Silicone Rubber Coating of Different Ticknesses on Porcelain", IEEE Trans. PD, Vol.12, No.2, pp 857-866 1997.
- [12]. 허창수, "RTV 실리콘 고무의 열화 및 발수성 회복 특성에 미치는 환경인 자의 영향" 대한전기학회지 Vol.48C, No.6, pp 462-468Jun. 1999
- [13]. 堂山昌男, 山本良一, "ポリマー材料" 東京大學出版會, pp. 60-63, 1984
- [14]. H. Matsuo, T.Fujishima, T.Yamashita, K. Hatase, "Relation between Leakage Impedance and Equivalent Salt Deposit Density on an Insulator under a Saltwater Spray", IEEE Trans. Die. and E.I., Vol. 6, No.1, Feb. 1999.
- [15]. X. Wang, N. Yoshimura, "Fractal Phenomena. Dependence of Hydrophobicity on Surface Appearance and Structural Features of SIR insulators", IEEE Trans. Die. and EI., Vol. 6, No. 6, Dec. 1999.