

# 실리콘 고무의 트래킹에 미치는 충전재의 영향

논문  
9-4-2

## The Influence of Filler for Silicone Rubber Tracking

허창수\*, 장기순\*, 조한구\*\*

(Huh Chang Su, Cho Han Goo, Jang Ki Soon)

### Abstract

Tracking is one of the biggest problems to be overcome in polymeric materials for outdoor insulators. But It can be decreased with the addition of filler such as alumina trihydrate (ATH). In this paper, the tracking of surface and evaluation of insulating ability at silicone rubber is investigated, using the salt fog test. At initial state, the peak leakage current and numbers by dry band arcing is increasing with increasing the filler level, but at aged state decreasing at high concentration filler samples. This is because the roughness of the surface may contribute to the increase in peak leakage current and numbers. As increasing the filler level, the insulating ability of materials is higher and weight loss is decreased. The mechanism of insulating failure is occurred by the erosion than the tracking and the erosion caused weight loss of 2 g.

**Key Words (중요용어)** : Tracking(트래킹), Dry band arcing(건조대 아크), Filler(충전재), Erosion(침식)

### 1. 서 론

지금까지 옥외 전기 절연체로써 사용되어온 세라믹은 전기적 절연이 우수하고 외부적 오염 조건에서도 강하여 내오손 및 내후성 측면에서 장점을 지니고 있으나 무거운 중량과 누설 거리가 길다는 단점을 가지고 있다.<sup>1,2)</sup> 전력 전송이 초고압화함에 따라 절연체의 중량은 지지물의 하중을 가중시켜 더 부가적인 장비를 갖추게 하고 또한 절연물의 누설거리가 길어짐에 따라 절압의 높이가 올라가게 되어 송전선의 이도, 대지와외 절연 등과 같은 문제점이 생긴다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 세라믹을 실리콘 고무나 EPDM(ethylene propylene diene monomer), EPR(ethylene propylene rubber), Epoxy 수지 등과 같은 고분자로 대체함으로써 중량을 가볍게 하고 누설거리를 짧게 할 수 있으며 경제적으로도 이익을 볼 수가 있게 된다.

비가 오거나 안개가 낄때 전기 절연체의 표면에서 나타나는 건조대 아크<sup>3)</sup>은 열을 수반하고 있는데 특히 표면이 먼지나 염분 등으로 오염되었을 때에 발생되는 열은 고분자 표면을 손상시키기에 충분한 온도를 발생시키게 된다.<sup>4)</sup> 손상된 고분자 표면은 초기의 배

수<sup>5)</sup> (hydrophobic) 상태를 잃어 친수 (hydrophilic) 상태로 전이하게 되고 수분 침투의 증가는 건조대 아크의 지속 시간을 길게하여 표면의 열화를 촉진시키게 되고 점점 열화된 표면은 트래킹과 침식(Erosion)이라는 형태의 절연 파괴 상태를 초래하게 된다. 결국 건조대 아크에 의한 열은 고분자 재료가 옥외에서 전기적 절연을 수행하는데 있어 가장 치명적인 손상을 주는 주 요인이 된다. 이러한 재료의 트래킹 현상을 방지하기 위하여 고분자에 실리콘이나 ATH(alumina trihydrate)와 같은 충전재를 첨가함으로써 열화를 줄일수 있다.

본 논문에서는 옥외용 고분자 전기 절연체로서 주로 연구되고 있는 실리콘 고무 재료의 열화 형태를 고찰하고 또한 충전재인 ATH(alumina trihydrate)의 함량을 변화시킨 시료를 염수 분무 시험하여 건조대 아크의 열에 의한 표면의 열화 현상과 표면에서의 충전재 영향을 고찰하고자 한다.

### 2. 실험

#### 2-1 시료

시료는 120 × 120 × 2 [mm]의 기본 고분자인 실리콘 고무에 충전재의 함량을 달리한 것으로서 이의 사양을 표 1에 나타내었다.

\* : 인하대학교 전기공학과

\*\* : 한국전기연구소 절연재료팀

접수일자 : 1995년 9월 22일

심사완료 : 1996년 3월 8일

표 1. 시료의 사양

Table 1. Specication of specimen

시료 분류	기본 고분자	충진제 (pph)	실리콘 오일 (parts)
SR90	실리콘고분자	90	1
SR110	"	110	1
SR130	"	130	1
SR160	"	160	1

2-2 실험장치

본 실험에 사용된 장치는 ASTM D 2132<sup>9)</sup>를 기본으로 하고 있는데 이 기준은 옥외 전기 절연 재료의 열화 특성을 염수 안개 오염 조건속에서 평가하는 실험장치이다. 전극의 종류에는 상부 전극과 하부 전극으로 나눌 수 있는데 상부 전극은 염수에 부식성이 없는 탄소로서 크기는 13 × 51 × 22 [mm]로 하고 모서리는 반경 3.2 [mm]로 둥글게하여 국부적 전계의 집중을 방지 하였고 시편위 전극의 간격은 25 [mm]로 유지 시켰다. 그리고 아래 전극은 스테인레스로 하고 형태는 시료와 같은 크기와 두께로 준비하였다. 시료가 놓인 절연 지지대의 형상은 아래 전극과 같은 크기의 아크릴 판을 경사 15° 로 기울여 지지대를 통해 전기적 절연을 하였다. 다음 그림 1은 전극의 형태이다.

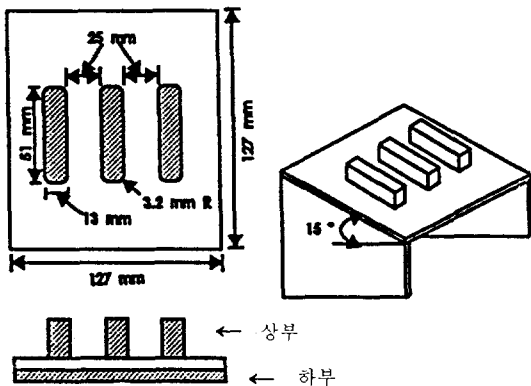


그림 1. 전극  
Fig. 1. Electrode

챔버는 460 × 710 × 510 [mm]의 아크릴로 제작하였다. 염수를 분무하는 노즐은 높이가 410 [mm]가 되는 곳에 위치시키고 노즐 앞에 전향 장치를 설치하여 염수가 시료에 직접적으로 분무되지 않게 하였다. 그리고 전압 인가 장치는 세라믹 부싱으로 챔버의 벽면과 절연하였는데 이와 같은 상황을 그림 2에 나타내었다. 그리고 그림 3은 본 실험 장치의 회로도를 나타내었다.

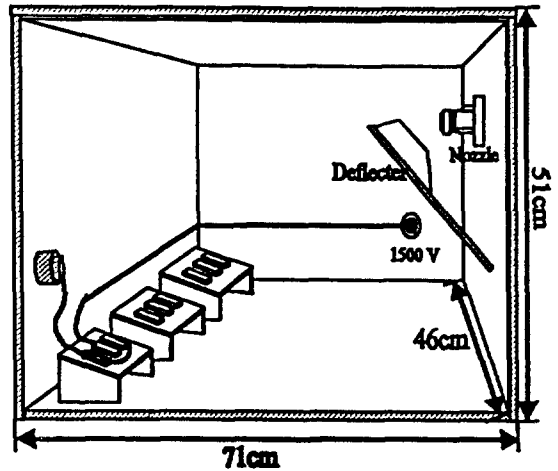


그림 2. 챔버  
Fig. 2. chamber

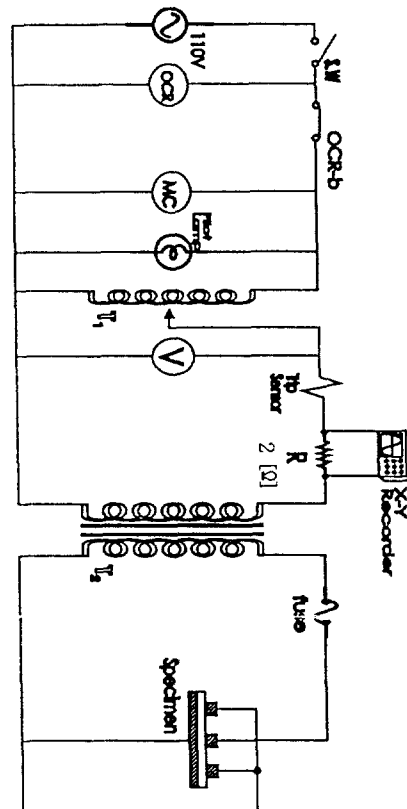


그림 3. 전압 인가 회로와 제어 회로  
Fig. 3. Power supply and control circuit

2-3 실험방법

ASTM D-2132 규정에 의하면 재료의 failure 전

류는 피크 전류의 값이 100-150 [mA]일 때 재료의 열화시점을 정의하였다.<sup>16)</sup> 본 실험에서는 130 [mA]를 failure 전류로써 재료의 열화시점으로 규정하여 130 [mA]의 피크전류가 흐를 때 그림 3의 회로가 자동으로 차단되어 열화 판정을 내릴수 있도록 하였다. 시료의 인가 전압은 1 차 정격 전압 105 [V], 2 차 정격 전압 3150 [V], 권수비 30인 변압기를 사용하였으며, 변압기 T<sub>1</sub>은 보조 변압기로서 주 변압기 T<sub>2</sub>의 전압을 제어하고 2 차회로에 OCR의 trip 장치를 설치하여 재료의 피크 전류가 130 [mA]가 되었을때의 1차 트립전류 4 [A]를 검출하도록 하였고 또한 저항 2 [Ω]을 삽입하여 피크 전류를 X-Y 기록계가 읽을 수 있도록 하였다. 염분 안개 챔버안에서 분무되는 용액의 전도도는 NaCl로 조절하여 1000 [μS/cm]가 되도록 유지하였는데 이때 전도도의 측정은 TOA사 전도계(model CM-7B)로 측정하였고, 분무량은 공기압 장치로 조절하여 시료의 수직 방향 10 × 10 [cm<sup>2</sup>] 평면에 1.02 [ml/h]가 되도록 유지하였다. 염수를 분무하여 시료의 표면이 충분히 젖게 하고 서서히 전압을 1500 [V]까지 인가한 후 피크 전류 변화는 X-Y 기록계로 측정하였다. 염무 분무 실험 전·후의 재료의 표면상태는 전자주사현미경(SEM)을 사용하여 측정하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3-1 초기 상태에서의 충전재의 영향

안개가 분무되면서 발생한 건조대 아크는 시료 위 가운데 전극의 밑 부분에서 점점 시간이 지남에 따라 가운데 전극을 중심으로 둥글게 띠를 형성하였고 이에 따른 침식 현상은 양 옆의 전극으로 tree형태로 전진하였다. 이러한 건조대 아크에 의한 시료 표면의 침식 현상으로 발생하는 피크 누설 전류를 X-Y 기록계로서 측정하여 그 결과를 그림 4, 그림 5에 나타내었다.

다음 그림 4는 실험 시작후 30시간 동안의 각각의 시료들에 대한 피크 누설전류의 크기를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 누설전류의 크기는 시간이 경과하면서 점점 더 커지고, 또한 충전재를 많이 함유한 시료에서 충전재를 적게 함유한 시료보다도 피크 누설 전류의 크기가 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있으며, 또한 그림 5에서도 충전재를 많이 포함한 시료가 피크 누설 전류가 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 충전재를 많이 함유한 시료가 더 큰 누설 전류를 보이는 것은 시료의 초기 표면 상태가 더욱 거칠다는 것으로써 설명할 수 있다. 다음 사진 1은

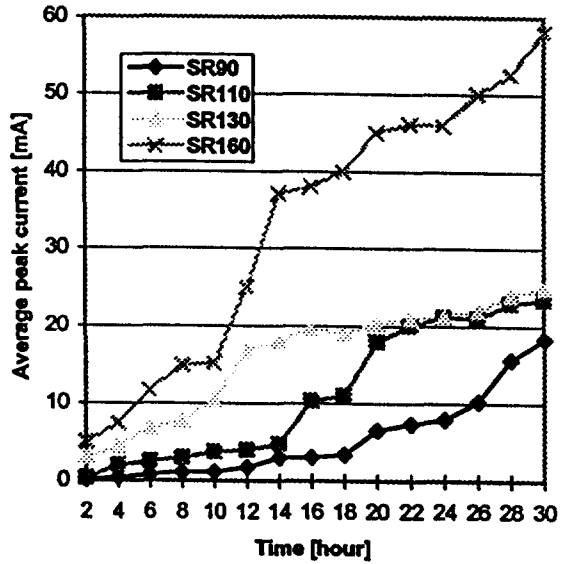


그림 4. 초기 평균 피크 누설 전류

Fig. 4. Average peak leakage current for fresh

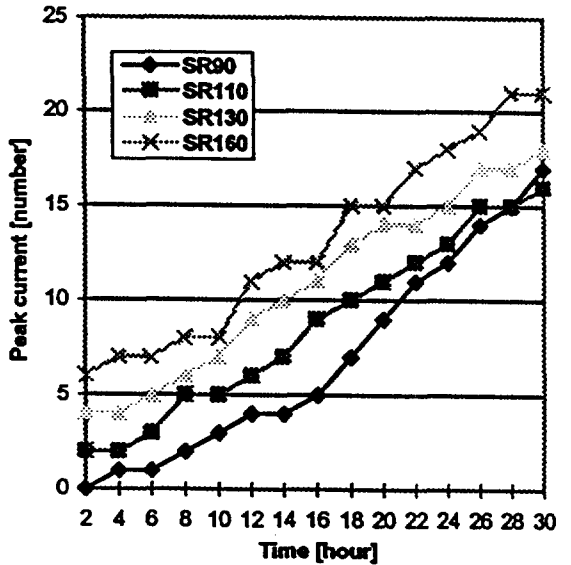
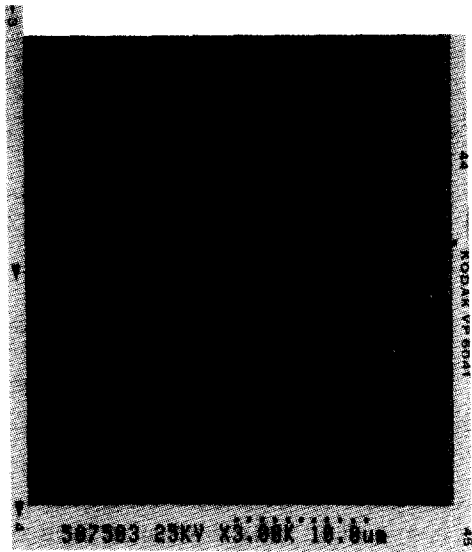


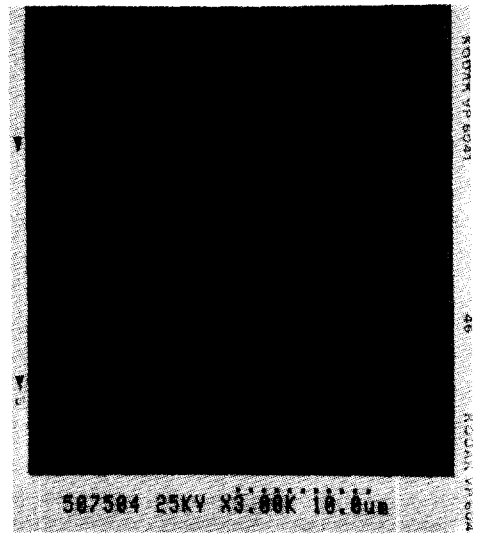
그림 5. 초기 피크 누설 전류의 빈도수

Fig. 5. Numbers of peak leakage current for fresh

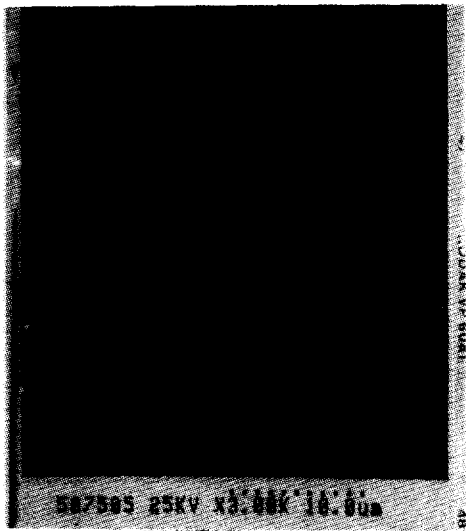
초기상태에 있어서의 시료의 표면을 전자 주사 현미경(SEM) 촬영한 것인데 이 사진에서 초기상태에서의 표면의 거칠기가 충전재를 많이 함유한 시료에서 더욱 거칠다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 실험초기에 있어서 충전재는 시료표면의 거칠기를 증가시키게 되므로 더 큰 누설전류를 야기하는 것으로서 이해할 수 있다.



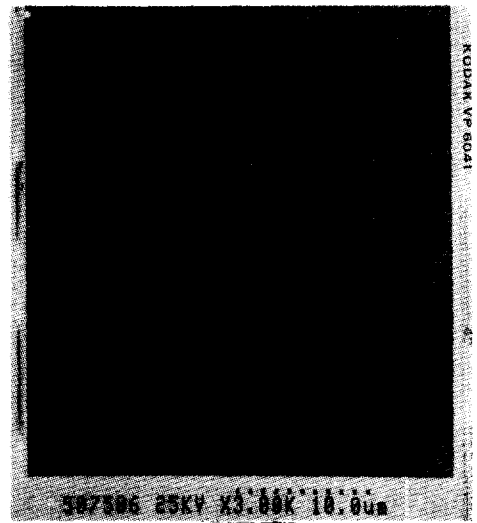
(a) SR90



(b) SR110



(c) SR130



(d) SR160

사진 1. 초기 시료들의 SEM 사진

Photo. 1. SEM photographs of samples at initial state

### 3-2 열화 상태에서의 충전제의 영향

본 실험에서는 ASTM D 2132 규정에 따라 피크 누설 전류의 크기 130 [mA]를 재료의 열화시점으로 규정하여 재료의 열화여부를 판정하였다. 다음 그림 6은 열화상태에서의 피크 누설 전류의 크기를 나타낸 것으로, 시료가 열화되면서 초기 때보다는 큰 피크 누설 전류를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 상태와 열화 상태에서의 표면의 상태는 두 시료 모두 배수성(hydro-

phobicity)을 띠는 상태임에도 불구하고 낮은 표면의 지향성 때문에 초기 상태보다는 열화된 재료의 피크 누설 전류가 더 높게 나타나는 것으로 설명할 수 있다. 즉, 이러한 낮은 표면의 지향성은 건조대 아크에 의해 긴 고분자 체인들<sup>7)</sup>(분자량이 1000 이상)이 짧은 고분자 체인으로 변화하여 표면위에 낮은 분자량 (low molecular weight)을 가진 고분자 체인들을 형성하기 때문에 나타나며, 이러한 낮은 분자량 체인은 오염물

질과 실리콘 고무 재료의 충전제 입자들을 감싸고 있어 건조대 아크에 의해 표면위 낮은 분자량 체인 안에 depletion을 일으키고 hygroscopic 오염 물질들은 물을 흡수하여 물막의 두께를 더 두껍게 형성시키게 된다. 따라서 더 낮은 표면 저항을 초래하여 초기의 재료와 비교할 때 열화

된 재료가 더 높은 누설 전류를 흐르는 것이라 사료된다.

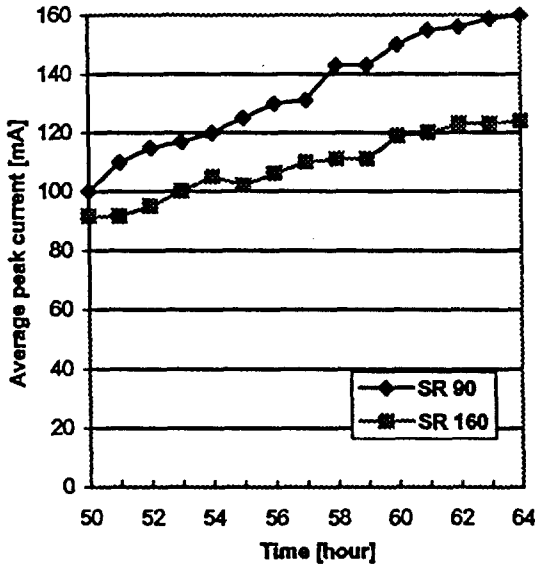


그림 6. 열화시 평균 피크 누설 전류  
Fig. 6. Average peak leakage current for aging

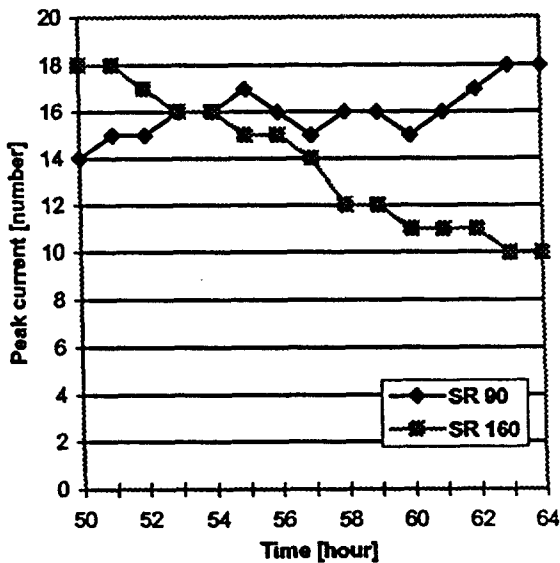
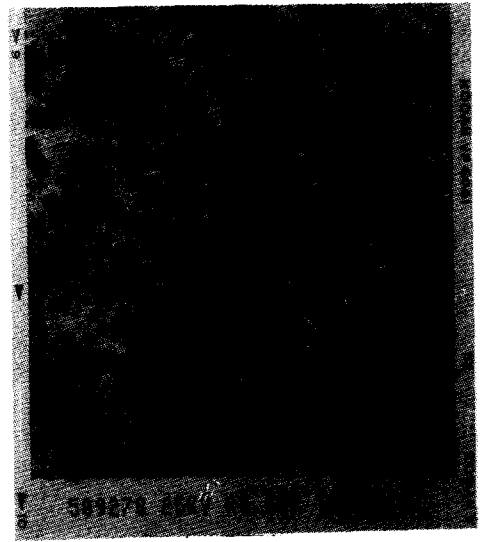
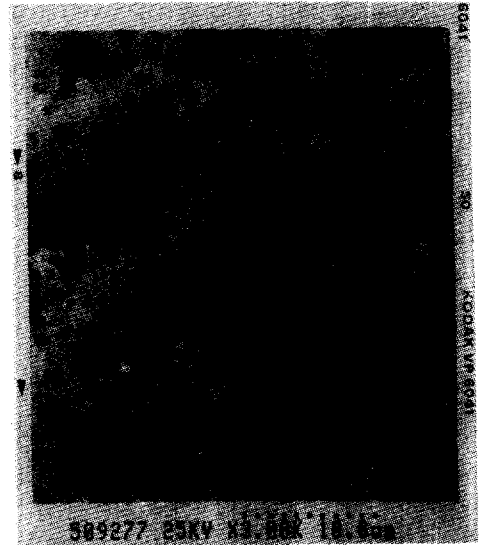


그림 7. 열화시 피크 누설 전류의 빈도수  
Fig. 7. Number of peak leakage current for aging



(a) SR90



(b) SR160

사진 2. 열화시 시료들의 SEM 사진

Photo. 2. SEM photographs of samples at aging state

열화 이후의 충전제의 영향은 그림 6에서 나타난 것과 같이 피크 누설 전류의 크기가 충전제를 많이 함유한 시료에서 적게 함유한 시료보다도 작은 것으로 나타나고 있다. 또한 그림 7에서는 피크 누설 전류의 빈도수를 보여 주고 있는데 이 그래프에서는 충전제를 많이 함유한 시료에서 오히려 감소하는 것을 볼 수가 있다.

이러한 결과는 충전재를 많이 함유한 시료가 충전재를 적게 함유한 시료보다 상대적으로 안정하여 더 작은 누설전류의 크기를 나타낸다고 생각된다. 즉, 충전재가 적게 함유된 시료에서는 건조대 아크에 의해 표면위에 낮은 분자량을 가진 고분자 체인들이 충전재를 많이 함유하고 있는 시료보다 상대적으로 많이 감소함에 따라 표면이 계속 거칠어지게 되는 반면에 충전재를 많이 함유된 시료에서는 열에 강한 충전재 입자들이 주로 표면에 나타나 열에 대한 저항력을 가지게 되어 표면의 상태가 상대적으로 안정한 상태로 남게 되는 것으로 사료된다.

이는 사진 2에서 열화시 시료의 표면 SEM사진을 통해서도 확인할 수 있다. 사진 2에서 시료의 표면이 충전재가 적게 함유한 것이 충전재를 많이 함유한 것보다 더욱 거칠다는 것을 알 수 있다.

### 3-3 시료의 무게 손실 및 절연 파괴

건조대 아크에 의한 침식 현상으로 실험 전 후에서 시료의 무게 손실이 나타난다. 그림 8은 각각의 시료의 무게 손실을 비교한 그래프인데 실험 전 후의 무게 손실이 평균적인 값인 2 g으로 나타났다. 이것을 100 시간 당 시료의 무게 손실로 환산하였을 때 그림 9와 같이 되는데 이 그래프에서 충전재 함유도가 130 이상 부터 가장 적은 무게 손실이 나타남을 알 수 있었다.

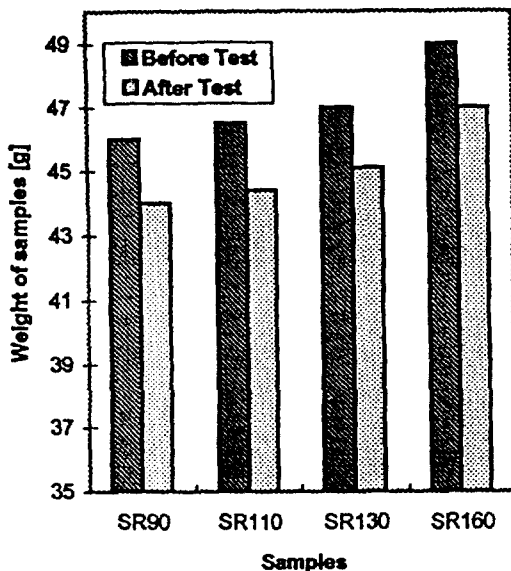


그림 8. 시료들의 무게 손실  
Fig. 8. Weight loss for samples

이렇게 점진적으로 진행되어진 침식 작용은 비교적 충전재를 적게 포함한 시료에 대해 더 손상을 주어 결국 시료의 두께를 통해 구멍이 생김으로써 절연 파괴에 이르게 되었다. 그림 10은 각 시료의 최종 절연 파괴까지의 시간을 보여주고 있는데 시료 SR90과 SR110에서 175시간과 350시간에

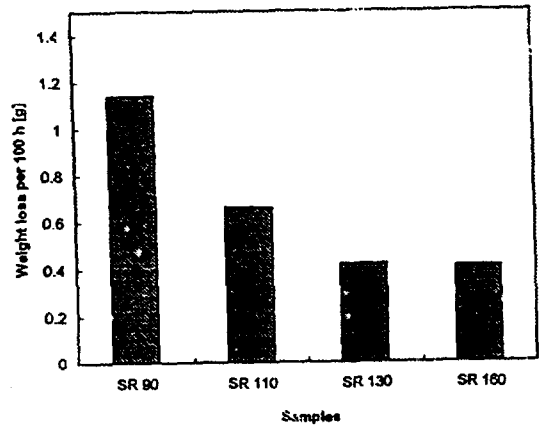


그림 9. 100 시간 당 시료의 무게 손실  
Fig. 9. Weight loss per 100 h for specimen

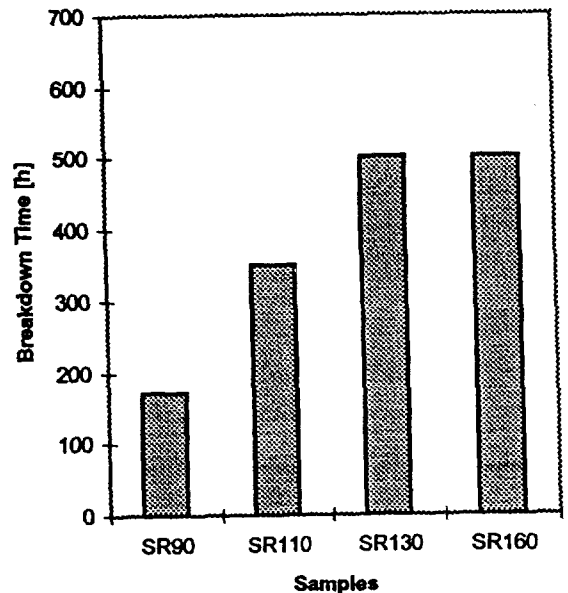


그림 10. 시료에 대한 절연 파괴 시간  
Fig. 10. Failure time for samples

서 절연 파괴가 나타났고 시료 SR130과 SR160에서는 500시간 이상 견디는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 고무에 충전재의 함량을 변화시킨 시료에 대해 열화 시험을하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면의 거칠기의 증가는 물막의 두께를 증가시켜 건조대 아크 지속 시간을 길게 함으로써 표면의 열화를 촉진시킨다.
- (2) 건조대 아크에 의한 표면의 열화는 충전재가 적게 함유된 시료에서 상대적으로 더 빠르게 일어난 것을 SEM으로 확인할 수 있었다.
- (3) 실리콘 고무에서 절연 파괴는 SR 90은 175 시간, SR 110에서는 300시간에서 일어났고 130 이상에서는 500 시간이상을 견디는 것으로 나타났다.
- (4) 실리콘 고무에서 절연 파괴 형태는 트래킹 현상이 아닌 침식 작용에 의한 것이었고 이에 따른 무게 손실이 나타났는데 충전재의 함유도가 130 이상에서 가장 적은 무게 손실이 나타났다.

※ 본 연구는 1995년도 인하대학교 교내 연구비 지원으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. R. S. Gorur, S. Sundhara Rajan, " Contamination Performance of Polymeric Insulating

Materials used for Outdoor Insulation Applications " IEEE EI vol. 24 No. 4 pp 713-716 1989

2. R. S. Gorur, E. A. Cherney and R. Hackam, " Polymer Insulator Profiles Evaluated in a Fog Chamber " IEEE PWRD vol. 5 No. 5 pp 1078-1083 1990

3. K. C. Holte, D. E. Alexander and D. M. Baker et al, " Application of Insulators in a Contaminated Environment " IEEE Vol. PAS-98 No. 5 pp 1676-1689 1979

4. 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 PWRD vol. 3 No. 3 pp 1157-1163 1988

5. Antonios E Vlastos, Elbadri Sherif, " Natural Aging of EPDM Composite Insulators" IEEE PWRD vol. 5 No. 1 pp 406-413 1990

6. ASTM " Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials " D 2132-89 vol. 10-01 pp 172-177 1991

7. R. S. Gorur, G. G. Karady, and A. Jagota et al, " Aging in Silicone Rubber used for Outdoor Insulation " IEEE PWRD vol. 7 No. 2 pp 525-532 1992

#### 저자소개



허창수

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대학교 대학원(석사). 1987년 동 대학원 졸업(공학박). 1983년 1993년 한국전기연구소 기술재료연구소 실장. 1995년 현재 인하대학교 조교수.



장기순

1968년 10월 10일생. 1989년 2월 인하공업전문대학 전기과 졸업. 1992년 2월 경원대학교 전기공학과 졸업. 1995년 8월 현재 인하대학교 전기공학과 대학원 석사과정 재학중.



조한구

1959년 4월 14일생. 1984년 성균관대학교 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과(박사). 1984년 한국화학(그룹) 한양화학 입사. 1987년 한국전기연구소 전기재료연구부 선임연구원. 현재 한국전기연구소 전기재료연구부 절연재료연구팀 선임연구원.