

# 내열성 실리콘 수지의 전기적 특성에 관한 연구

곽영순, 조정수, 박정후, 김순태, 김두환\*  
부산대학교 전기공학과

## A study on the electric properties of heat resistant silicone resin.

Young-Soon Kwak, Jung-Soo Cho, Chung-Hoo park, Soon-Tae Kim, Doo-Hwan Kim\*  
Pusan National University Dept. of Electrical Eng.

### Abstract

Silicone resin which is made from silicone(Si) is well known by its heat-resistant property. Its good heat-resistant enables silicone resin being used in high temperature ( up to 200°C) heavy-duty environment for electric insulation. This paper has dealt with the electrical properties of silicone resin such as dielectric constant and  $\tan\delta$  with heat treatment temperature (200°C~450°C). To investigate the electrical insulation of silicone resin, dielectric strength by A.C and anti-tracking properties under both AC and D.C have been performed.

### 1. 서론

최근의 산업에서 요구하는 전기, 전자기기는 고신뢰성을 갖는 대용량화된 기기를 요구할 뿐만아니라 경량, 소형화 추세에 있다. 따라서 이와같은 전기기기의 성능을 좌우하는 우수한 절연물의 요구가 증대되고 있다. 특히 고속전철의 구동전동기, 초전도를 이용한 기기, 핵융합 장치 및 초고압 기기등에 이용되는 절연물은 고내열성, 고내한성, 고내충격성등을 요구할 뿐만아니라 내후성, 내약품성, 내수성 및 적용성이 뛰어난 것을 요구하게된다. 이상과 같은 요구조건을 수용할 수 있는 절연물의 일종인 실리콘 수지는 일반 유기 수지들에 비해 내열성, 내한성, 내후성, 내수성 및 전기적 특성이 우수하여 건식 변압기, 전동기등과 같은 코일의 합침 처리나 유리섬유, 마이카등과 같은 고온 절연 재료의 표면처리 및 절착재료 등에 사용되고 있다.<sup>(1~4)</sup>

실리콘 수지는 일반 유기 수지들에 비해 내열성 및 열적 안정도가 높아 고온의 사용시에도 탄화와 같은 절연물의 파괴가 일어나지 않고 열분해 되어 실리콘(Si)이 남아 전기적으로 절연성을 유지하고 있다. 실리콘 수지의 열분해는 200°C 근처에서 부터 일어나는 것으로 알려져 있으며 열분해가 일어나면 실리콘 수지의 중량 및 두께가 감소하고 전기적 특성도 변할 것이다.<sup>(3,4)</sup>

본 연구에서는 실리콘 수지의 고온 열처리 시에 전기적 특성을 알아보기 위해 200°C 부터 450°C 범위의 온도까지 실리콘 수지를 열처리 하였을 때 실리콘 수지의 유전율 및  $\tan\delta$  등의 온도 및 전압 의존성과 내트래킹 특성 및 교류절연 파괴 특성 등에 관한 연구를 하고자 하는 데 목적이 있다.

### 2. 시료제작 및 실험장치 및 방법

#### 가) 시료제작

시료제작에 사용된 소재는 페닐 메칠실리콘수지(TSR-117, Toshiba)로써 가열 경화 수지이다.

시료의 제작과정은 그림 1과 같으며, 스텐레스 기판(12x12cm, t=0.5mm)에 가이드링(guide ring 10x10 t=2mm)을 붙여 실리콘판상 제작용 기판을 준비하고, 역상의 실리콘 수지와 크실텐의 최적 혼합비비인 100:15로 혼합하여 진공에서 20분간 탈기한 후 준비된 기판에 붓는다. 이와 같이 제작된 시료를 경화시키기 위하여 항온조에 넣어 초기온도 30°C에서 80°C까지는 매 2시간 단위로 10°C씩 온도를 상승시켰고, 80°C에서 200°C까지는 매 2시간 단위로 20°C씩 온도를 상승시켜 경화한 후 조내에서 서냉하였다.

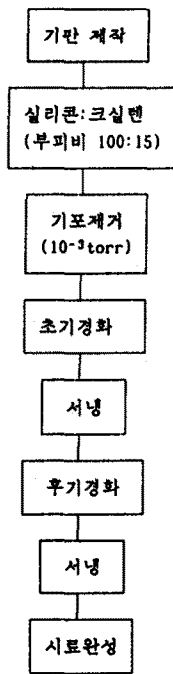


그림 1. 시료제작의 순서도  
Fig 1. Flow chart of sample fabrication

초기 경화된 시료를 후기 고온 경화를 하기 위하여 전기로 속에 넣어 매 20분당 10℃씩 온도를 상승시켜 최종 설정 온도에서 3시간씩 경화하였다. 최종 설정온도는 250℃, 300℃, 350℃, 400℃ 및 450℃로 하였다.

나) 실험장치 및 방법

이상과 같이 제작된 시료의 유전손실, 유전율, 체적저항율, 교류절연파괴 및 직교류 트래킹 특성을 알아보기 위해 다음과 같은 실험방법으로 행하였다.

유전손실 및 유전율 특성은 테팅브릿지(TETTEX AG 2821HB)로 측정하였고, 측정시 시료의 온도는 20℃에서 150℃까지 변화시켰다.

체적저항율특성은 체적저항을 측정기(High Resistance meter type 4329A HP 10<sup>6</sup> - 10<sup>15</sup>Ωcm)로 측정하였다.

교류절연파괴 특성은 구-구 전극을 사용하여 실리콘유내에서 구하였다.

직교류 트래킹 파괴실험은 IEC 112에 의거 저전압(300 - 600V) 시험법으로 행하였다. 그림 2와 그림 3은 트래킹 실험용 전극 및 실험회로를 나타내고 있다. 전극은 탱스편을 그림 2와 같이 제작하여 사용하였다. 그림 3의 트래킹 실험

장치 회로구성은 AC, DC가변전원, 전류제한용 가변저항, 전극 및 전압전류 측정시스템(Oscilloscope, FFT)으로 하였다.

트래킹 실험방법은 일정전압을 트래킹 전극에 인가하고 염화암모늄 용액(0.1%)을 전극과 전극사이의 중심부 상부에서 적하장치를 통하여 매 30초당 20μl씩 적하하면서 시료를 트래킹 시켰다. 트래킹 전류가 1(A)일 때를 트래킹 파괴로 하였다.

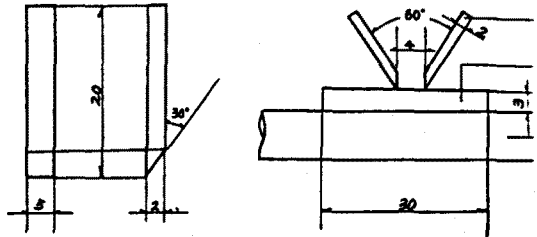


Fig. 2. Tracking electrodes.  
그림 2. 트래킹용 전극.

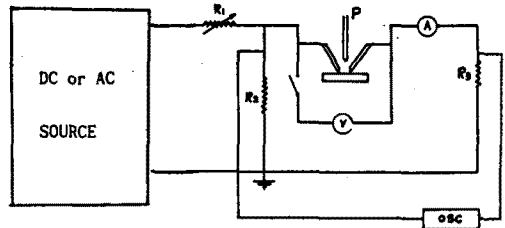


Fig. 3. Tracking test circuit.  
그림 3. 트래킹 실험 회로도.

3. 실험결과 및 고찰

그림 4와 그림 5는 각온도에서 열처리된 시료들의 온도변화에 따른 유전율 및 유전손실변화 특성을 나타내고 있다. 여기서 a/b 로 나타내는 숫자는 열처리 온도(℃)/열처리 시간(hr)를 표시하고 있다.

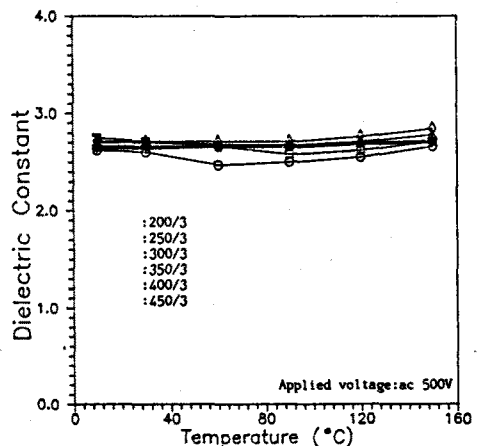


Fig. 4. Characteristics of dielectric constant versus temperature.

그림 4. 온도변화에 따른 비유전율 특성.

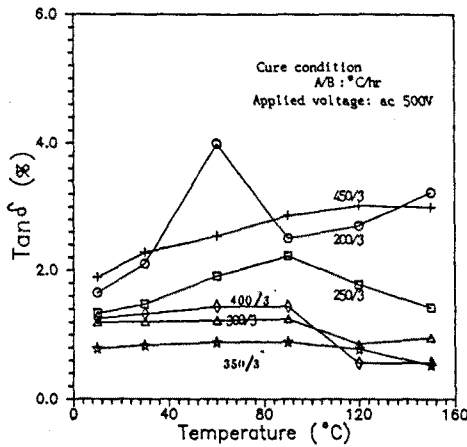


Fig. 5. Characteristics of  $\tan\delta$  versus temperature.

그림 5. 온도변화에 따른  $\tan\delta$  특성.

그림4에서 모든 시료가 온도변화에 따라 비유전율은 일정한 값을 나타내고 있다.

그림 5에서 후기 열처리를 하지 않은 시료의 유전손실은 온도 증가에 따라 60°C에서 피크(peak)치를 보이고 그 이상의 온도에서는 감소하여 90°C에서 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 후기 열처리된 시료에서 450/3시료를 제외한 것들의 유전손실은 90°C까지 증가하거나 일정한 값을 유지하다가 그 이상의 온도에서는 감소하였다. 450/3시료는 시료온도 150°C까지 계속적으로 증가하였다.

열처리에 따른 유전손실 특성은 90°C이하의 온도에서 후기 열처리 온도가 350/3 까지는 감소하여 최소치를 나타냈고 그 이상의 열처리 온도에서는 증가하여 450/3 시료에서 최대치를 나타냈다.

이상과 같이 측정시 시료의 온도변화에 따라 유전손실이 변하는 것은 온도변화에 따른 분자들의 운동의 특성에 기인하는 것으로 생각하고, 열처리온도의 변화에 따른 유전손실의 변화는 저분자 성분들의 휘발과 고분자화 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

그림6과 그림 7은 후기 열처리하지 않은 시료와 350/3으로 열처리 된 각 시료의비유전율과 유전손실의 인가 전압변화에 따른 변화 특성을 나타내고 있다. 후기 열처리하지 않은 시료와 350/3시료의 비유전율은 일정한 값을 보여주고 있는데 후기 열처리하지 않은 시료의 비유전율 값은 2.03정

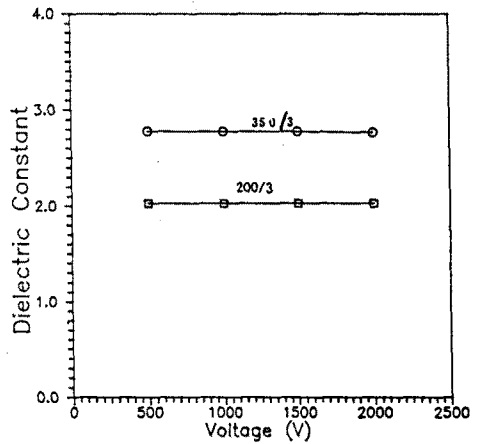


Fig. 6. Characteristics of dielectric constant versus applied voltage.

그림 6. 인가된 전압변화에 따른 비유전율 특성.

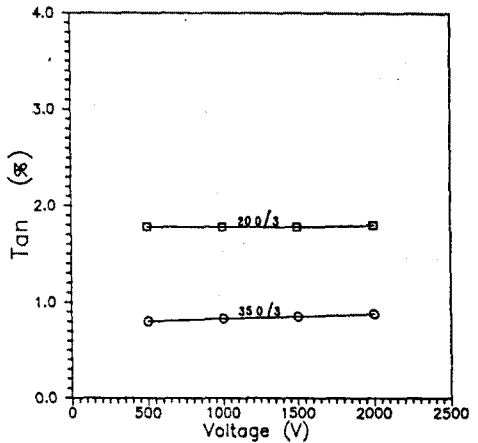


Fig. 7. Characteristics of  $\tan\delta$  versus applied voltage.

그림 7. 인가된 전압변화에 따른  $\tan\delta$  특성.

도이고 350/3시료의 비유전율값은 2.78이다. 또한 후기 열처리하지 않은 시료와 350/3시료 등의 유전손실은 2000(V)까지 일정하였다.

그림 8은 후기 열처리하지 않은 시료와 350/3시료의 체적저항을 특성이다. 350/3시료의 체적저항 값이 후기 열처리하지 않은 시료의 체적저항값보다도 훨씬 높다는 것을 알 수 있는데 이는 열처리 과정에서 350/3시료가 후기 열처리하지 않은 시료보다도 축중함반응을 더욱 활발히 하여 높은 가교밀도를 가지게 되고 이로 인해 이온의 이동이 억제되어서 생긴 결과라고 생각된다.

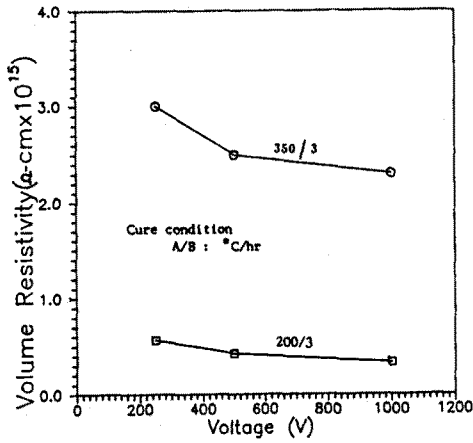


Fig. 8. Characteristics of volume resistivity versus applied voltage.

그림 8. 인가전압에 따른 체적 저항률 특성.

그림 9는 열처리에 따른 교류 절연 파괴 특성 곡선이다.

후기 열처리하지 않은 시료가 가장 높은 절연파괴 강도를 나타냈고, 후기 열처리 온도가 증가할수록 절연 파괴강도가 감소하였다. 특히 450/3 시료는 급격히 절연 파괴강도가 감소하였다. 이것은 고온 열처리로 열분해가 발생되어 분자간의 결합력의 약화로 절연파괴강도가 저하하는 것으로 생각된다.

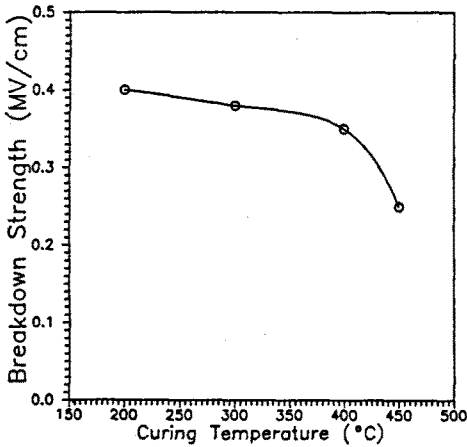


Fig. 9. Characteristics of dielectric breakdown strength versus post curing temperature.

그림 9. 후기 경화온도에 따른 절연파괴 강도 특성.

그림 10은 350/3 시료에 직, 교류 전압 400, 500, 600(V)를 전극에 인가했을 때 트래킹 파괴가 일어날 때까지의 소요시간을 나타낸 것이다. 교류전압이 인가 되었을 때보다 직류 전압이 인가되었을 때 트래킹 파괴가 짧은 시간안에 이루어지고 있음을 알 수 있다. 직류전압이 인가된 경우는 교류

전압과는 달리 전류 소호점이 존재하지 않으므로 트래킹 전류가 지속적으로 흐르게 되어 짧은 파괴 시간 특성을 나타 내는 것으로 사료된다.

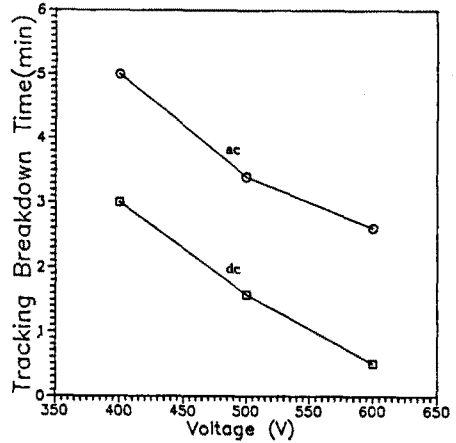
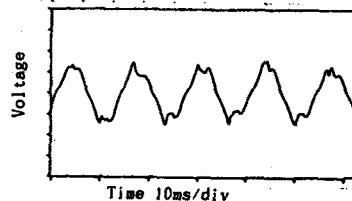
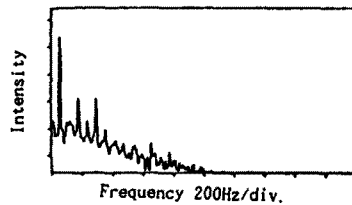


Fig. 10. Characteristics of tracking breakdown time versus applied voltage.

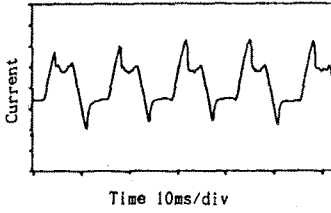
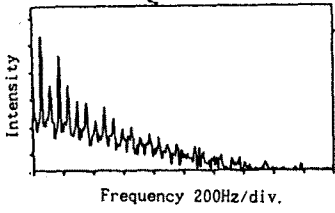
그림 10. 인가전압에 따른 트래킹 절연파괴특성.

그림 11은 교류 전압 400(V)를 전극에 인가하고 트래킹시의 전압 및 전류에 함유되는 주파수를 FFT로써 해석한 것이다.

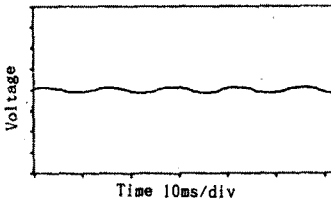
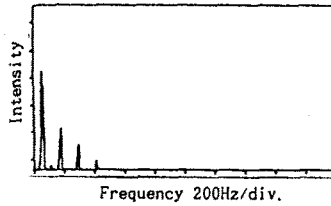
그림 a는 전조대에서 미소 스파크 방전이 일어나는 경우의 전압에 대한 주파수 특성으로 기본파인 60Hz의 강도가 가장 크게 나타나고 180Hz 인 제 3고조파와 300Hz인 제 5고조파의 강도가 크게 나타났다. 전류에서는 기본파를 중심으로 제 3고조파 제 5고조파 및 제 2고조파와 같은 우고조파 성분의 강도도 크게 나타났다. 그림 b는 트래킹 파괴가 일어났을 때의 경우의 전압전류 특성으로 기본파 및 기수 고조파성분 만 나타났다.



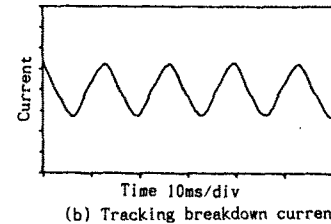
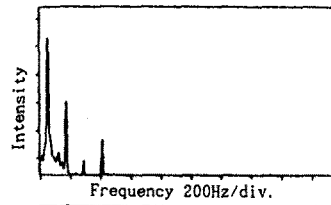
(a) Spark discharge voltage  
(a) 스파크 방전 전압



(a) Spark discharge current  
(a) 스파크 방전 전류



(b) Tracking breakdown voltage  
(b) 트래킹 파괴 전압.

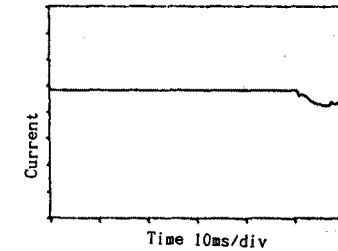
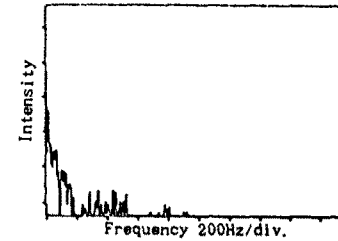
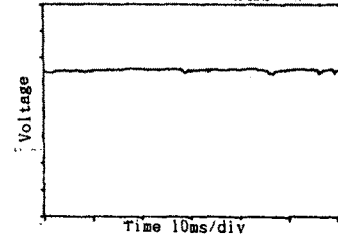
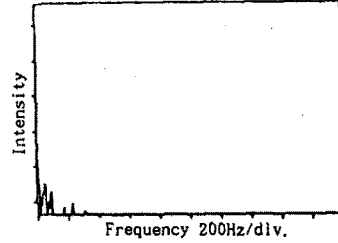


(b) Tracking breakdown current.  
(b) 트래킹 파괴 전류.

Fig. 11. Characteristic of voltage and current in the AC tracking test.

그림 11. 교류 트래킹 시험에서 전압-전류 특성.

그림 12는 직류 트래킹 시험시 전압전류 특성이다. 직류전류에서 주파수가 증가할수록 거의 지수함수적으로 주파수 성분에 대한 강도의 크기가 감소하는 것으로 알 수 있다.



(a) Spark discharge current  
(a) 스파크 방전 전류

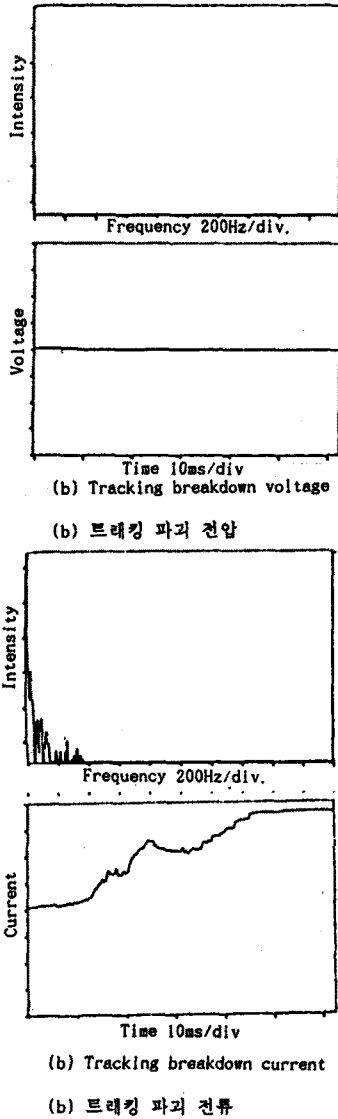


Fig. 12. Characteristic of voltage and current in the DC tracking test.  
 그림 12. 직류 트래킹 시험에서 전압-전류 특성.

4. 결론

이상과 같은 실험 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 시료에서 유전율은 거의 비슷하였고 측정온도의 변화에 관계없이 거의 일정하였다.

2. 열처리 온도가 350°C 까지 증가하면 유전손실은 감소하였고 그 이상온도로 열처리 하면 유전손실은 증가하였다.

3. 열처리 하지 않은 시료보다 350(°C)/3(Hr)으로 열처리 한 시료의 체적저항율이 증가하였다.

4. 교류절연파괴강도특성에서 열처리 온도가 증가할 수록 절연파괴강도는 감소하였다.

5. 트래킹 파괴시간에서 교류보다 직류의 파괴시간이 짧은 파괴시간을 나타내었다.

6. 트래킹시 전압전류의 주파수특성에서 교류에서는 주로 기본파와 기수조파들이 크게 나타났고, 직류에서는 직류전류에서 주파수가 증가함에 따라 주파수에 따른 성분들의 크기가 거의 지수함수적으로 감소하였다.

참 고 문 헌

1. Rob Roy McGregor : "Silicone and their uses"  
 McGraw-Hill Inc. pp108 149 pp222 285 1954
2. Eugene G. Rochow : "Silicon and Silicones"  
 Springer-verlag ppl 14 pp40 53 pp94 107 1987
3. Mitsuo Ishizaka et al "Silicone vanish for smokeless Mica plates"  
 Toshiba Review , Vol.37 No.7 pp611 614 1977
4. 林野 公男 : "シリエソ"  
 フラスチック스 Vol.42 No.1 pp34 39 1991