

SI-93-09

액체절연체(실리콘유) 유전정접의 온도 및 주파수의존성

The Dependence of Temperature and Frequency for the Dissipation Factor in Liquid Dielectrics

이 돈 회,* 소 병 문,*** 이수 원,** 김 왕 곤,* 홍 진 용***

*서울산업대학 전기공학과 **철도전문대학 전기신호과 ***광운대학교 전기공학과

Lee Don Hee,* So Byung Moon,*** Lee Soo Won,** Kim Wang Kon,* Hong Jin Woong***

* Seoul Nat'l Polytechnic Univ. ** Nat'l Railroad Junior College *** Kwangwoon Univ.

Abstract - Silicone oil exhibits the properties of both organic and inorganic substances and, thus, it has many superior properties such as higher thermal resistance and lower thermal oxidation level when compared to other dielectric liquids. In order to investigate the dielectric characteristics, dielectric liquids of viscosity 1 [cSt] is chosen as the specimen and experiment is performed in the temperature range of 20 ~ 65 [°C] and frequency range of 30 ~ 1×10⁶ [Hz] respectively. As a result, the observed linear decrease in dissipation factor at the frequency range below 3 [kHz] is due to the influence of frequency, whereas the increase in dissipation factor at higher frequency range is contributed by electrode's resistance. At a fixed frequency of 30 [kHz], increasing temperature results in higher peak value and wide width of the absorption curve. This is due to the increase in dipole and viscosity. As temperature increases, dipole moment is decreased from 0.98 to 0.64 [debye]. The activation energy which causes the relaxation and loss of dielectric is obtained about 15 [kcal/mole].

되고, 또한 절연 및 냉각효과가 공기보다 우수하고 만약의 사고 발생시 안전한 절연유가 요구되고 있다. 지금까지 액체 유전체는 케이블, 정전용량기 및 변압기 등 중요한 전력용 전기기기의 절연 및 냉각효율을 높이기 위하여 매우 중요하기 때문에 오래전부터 광유가 주로 사용되어 왔고, 이들의 전기전도특성과 절연파괴특성에 관한 많은 연구가 보고 되고 있다.

그런데 실리콘유는 광유와 같은 정도의 전기적 특성과 열전도 특성을 갖고 있으며, 또한 독성도 없어 취급이 안전하기 때문에 전기기기의 신뢰성을 향상시키기 위해 최근 수변전용 변압기와 철도용 변압기 등에 사용되고 있다. Silicone Oil은 무기적 특성과 유기적 특성을 겸비하고 있어 다른 액체절연체보다 내열성 및 열산화의 안정성등 많은 우수한 특성을 갖고 있으나, 고체절연체에 비해서는 각종 불순물, 기체 및 수분등 주위의 영향을 받기 쉬어 물성연구에 많은 어려움이 따른다. 본실험에서는 점도 1 [cSt]의 실리콘 액체유전체의 유전정접 특성을 온도 및 주파수를 파라미터로 연구하여 유전특성에 기여하는 하전입자의 거동을 조사하고자 한다.

I. 서론

최근 전기에너지의 급격한 증가로 고전압화, 대용량화

II. 실험장치 및 사용시료

2-1. 실험장치

액체유전체의 유전특성을 측정하기 위하여 용량 8 [ml]

의 동축원통형 액체전극을 사용했으며, 기하학적 정전용량은 16 [pF] 임을 확인하였다. 실험조건은 온도범위 20 ~ 65 [°C], 주파수범위 30 ~ 1×10⁶ [Hz]에서 인가전압을 1 ~ 11 [V_{eff}]로 변화 시키면서 인가하였다. 측정장치는, 유전정점의 크기가 1×10⁻⁵ ~ 1×10⁻¹까지 측정 가능한 본체 TR-10C ①와 Oscillator WBG-9 ②, 평형검출기 BDA-9 ③ 및 온도 -70 ~ 200[°C] 범위에서 일정한 온도 유지가 가능한 TO-9B Oven ④으로 되어있고 block diagram은 그림 1과 같다. 또한 정확한 전압을 인가하기 위하여 전압을 인가하기전에 반드시 Oscilloscope (HC 5504) ⑤로 전압의 크기를 측정하였고, 앞으로 전압의 크기는 최대값으로 표시한다.

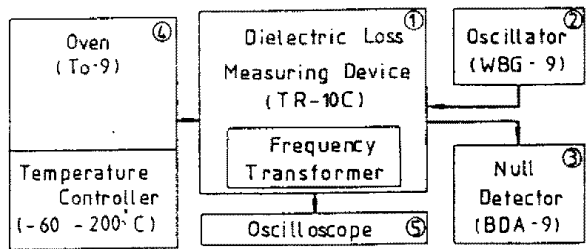
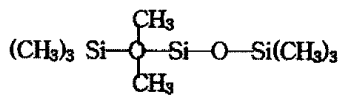


Fig 1. Block diagram of experimental device

2-2. 사용 시료

실험에 사용된 시료는 Silicone Oil중 점도가 낮은 1.0 [cSt]의 일본 신월(주)에서 제작 시판되고 있는 것을 사용하였다.

시료의 화학구조는



와 같으며, 분자량은 236.6 이고 인화점은 35 [°C] 이며 유동점은 -86 [°C] 로 보고되고 있다. Silicone Oil은 직쇄상 분자구조로 유기질과 무기질의 성질을 겸비하고 있어 일반 유기질의 액체절연유 보다 많은 우수한 특성을 가지고 있다.

시료의 구조를 알아보기 위해서 적외선 스펙트라 (SHIMADAZU co Model IR 435)를 파수 4000 ~ 400 [cm⁻¹]범위에서 측정하였는데, "OH"기의 흡수대(band)인 높은 파수에서 흡수피크는 미약하게 나타났으나, 주흡수피크는 1200 ~ 1000 [cm⁻¹]에서 SiO의 Stretching Vibration 기여임을 확인하였다.

III. 실험결과 및 검토

3-1. 유전정점의 주파수 의존특성

그림 2는 점도 1 [cSt] Silicone Oil을 측정전압 1 [V]에서 측정된 유전정점(tan δ)의 주파수 특성을 온도 파라미터로 나타낸 것이다. 그림 3, 4, 5는 같은 실험조건에서 측정전압을 3, 7, 11 [V]인가한 경우 tan δ의 주파수 의존특성을 나타내고 있다.

그림 2에서 주파수 의존특성중 낮은 주파수 (약 3 [kHz] 이하)에서는 주파수가 증가함에 따라 일정하게 감소하면서 피크는 나타나지 않으나, 같은 조건에서 높은 온도의 tan δ 값은 낮은 온도의 크기보다 약 10배정도 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 이보다 높은 주파수 영역에서는 주파수의 증가에 따라 유전정점의 크기는 증가하면서 피크가 나타나는것을 확인할 수 있다. 특히 주파수가 1 [MHz]의 경우 유전정점의 값은 측정온도에 무관하고 거의 일정하게 나타나고 있다.

이상과 같이 감소하는 현상은 낮은 주파수 영역에서 다음 식으로 $\tan \delta = 1 / \omega CR$ 에서 주파수가 증가 하므로 유전정점은 거의 직선적으로 감소하고 그러나 높은 주파수 영역에서 tan δ가 증가하는 현상은 전극저항의 기여로 사료된다.

또한 저주파수 영역에서 측정온도가 높을수록 tan δ 값이 커지는데, 이것은 시료가 공기중에서 온도의 증가로 인한 산화가 발생시 이때 Si-C 결합이 끊어지고 Silicone Oil의 분자간 가교가 발생하여 점도가 높아지므로 인하여 유전손실이 증가될것으로 사료되며, 주파수 1 [MHz]에서 나타남 유전 특성은 물질의 특성과 구조에 의한 것으로 생각된다.

그림 3, 4 에서 주파수 30 [kHz]에서 나타나는 유전정점의 피크는 온도가 20 [°C] 에서 50 [°C] 로 높아짐에 따라 피크값이 커지면서 흡수곡선의 폭은 넓어지는것을 확인할 수 있는데 이것은 저점도 Silicone Oil에서 온도의 상승으로 인하여 쌍극자수와 점도가 증가 때문으로 생각된다.

그림 5와 그림 2에서 낮은 주파수 영역에서 온도 20, 35, 50 [°C] 때, 전압 1 [V]일때의 tan δ 가 11 [V]보다 적고 65 [°C] 에서는 거의 일정함을 확인하였는데 이것은 전압이 높아지면 전극으로부터 전자방출, Pool-Frenkel 효과 및 Onsager가 제창한 field enhanced dissociation 등에 의해 液層에서 새로운 캐리어가 발생되기 때문에 tan δ가 증가한다.

그러나 고온이 되면 점성이 증가로 인하여 캐리어의 증가율이 둔화되므로 tan δ 가 일정한 것으로 사료된다. 특히 주파수 의존성 중 일정한 온도에서 전압을 1 [V]에서 11

[V]로 높일 때 유전 정점의 특성을 그림 6 에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 증가시 유전정점이 직선적으로 감소하는 주파수 영역 10^3 [Hz]과 주파수가 1×10^6 [Hz]보다 커지면 유전정점의 크기는 증가하면서 피크를 나타낸다. 이 현상은 측정온도의 증가로 인하여 공기중에서 산화로 Si-C 결합이 끊겨 쌍극자 발생 및 이온동이 증가하기 때문으로 사료된다. 또한 50 [°C]의 경우 그림 6에서 전압이 3~11 [V]로 증가시 $\tan \delta$ 의 피크는 줄어들면서 흡수곡선의 폭이 커지는데 이것은 인가전압의 증가로 인하여 액체의 특이한 물질 구조상 내부에 트랩된 캐리어의 탈트랩이나 생성된 하전입자들이 넓은 주파수대에 걸쳐서 공명 흡수되기 때문으로 생각되며 $\tan \delta$ 의 피크가 줄어드는 것은, Garton의 이론에 의하면 $\tan \delta$ 의 크기는 전압의 약 -1.5승에 비례하여 감소하는 것으로 보고하는데, 본 실험에서도 같은 결과를 얻을 수 있었다.

3-2. 유전정점의 온도 의존특성

그림 7은 절도 1 [cSt]의 Silicone Oil을 측정전압 1 [V_{pp}]에서 $\tan \delta$ 의 온도의존성을 주파수 파라미터로 나타낸 것이다. 그림 8, 9, 10은 같은 실험조건에서 측정전압을 5, 7, 11 [V] 인가시 유전특성의 온도의존성을 도시하고 있다.

온도의존특성중 그림 7에서 낮은 주파수영역(3 [kHz]이하)에서는 측정온도가 20 [°C]에서 65 [°C]로 증가함에 따라 측정온도 범위에서 지수함수적으로 일정하게 증가하는것을 확인할 수 있다. 또한 주파수가 30 [Hz] ~ 3 [kHz]까지는 유전흡수 진폭이 적어지나 100 [kHz]이상 고주파수 영역에서는 주파수의 증가에 따라 유전흡수 진폭은 커진다.

Bartnikas는 광유를 시료로 사용하여 연구한 결과 고온 저주파수영역에서 공간전하분극의 기여에 의한 $\tan \delta$ 의 피크를 보고하고 있는데 본 실험에서도 측정온도가 50 [°C]이상 이 되면 시료내의 자유이온과 전극에 의해 생성된 전하 등의 기여로 고온에서 나타날 것으로 사료된다. 특히 그림 8, 9에서 30 [kHz]의 경우 전압이 5 [V]에서 7 [V]로 높아짐에 따라 $\tan \delta$ 의 분산의 크기는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이같은 현상은 $\tan \delta$ 의 감소는 교류 전계하에서 교류도전율의 저하로 사료된다. 또한 Clausis-Mosotti의 식을 이용하여 계산된 쌍극자 모멘트는 주파수 110 [Hz]에서 온도 20, 35, 50 [°C]때 0.98, 0.95, 0.63 [debye]로 계산되는데 이 값은 E.S.Gould와 L.Pauling등이 보고한 여러가지 액체 유전체에서의 값과 비교시 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 그러나 그림 10에서 30 [kHz]의 경우 $\tan \delta$ 의 peak값은 낮은 전압에서의 현상과는 반대로 저온쪽으로 이동되는데

이것은 인가전압이 높아짐으로 인하여 구속된 캐리어들이 전계에너지에 의하여 이동이 용이해짐에 따라 적은 열에너지에 의해서도 유전분산에 기여되기 때문에 낮은 온도로 이동될것으로 사료된다.

특히 고온 저주파수에서 공간전하 분극을 보다 정확히 알아보기 위하여 주파수 30, 1×10^6 [Hz]때 유전특성의 온도의존성을 도시한 것이 그림 11, 12이다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라 유전정점의 크기가 감소하는 것을 알 수 있었고, 저주파 영역(1 [kHz]이하)에서는 온도의 증가에 따라 지수함수적으로 증가되나, 이보다 높은 주파수 영역에서 측정온도 범위내에서는 거의 일정한 유전정점의 크기를 나타내면서 유전분산이 나타나지 않았다. 그림 11과 12에서 저온 영역의 유전정점의 크기는 3×10^4 으로 거의 같으나 65 [°C]의 고온영역은 이보다 약 20배 정도 큰 7×10^3 임을 확인되었다.

또한 Silicone Oil의 유전특성중 유전정점이 증가하는 고주파수 영역에서 $\tan \delta$ 가 최대로 되는 주파수가 f_m 이라면 Eyring의 완화식 $f_m = A \exp(-H/RT)$ 에 적용하여 온도의존성의 손실원인이 되는 활성화 에너지(H)를 구할 수 있다. (여기서 R:기체 상수, T:절대 온도) $\ln f_m$ 과 T^{-1} 의 관계에서 기울기를 구해 이것으로 부터 얻은 활성화 에너지는 전압 1 [V]때 14.47 [kcal/mole], 3 [V]이상에서는 15.88 [kcal/mole]를 각각 얻었는데 이 값의 크기는 여러 연구자들에 의하여 얻어진 값과 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

전기적특성과 화학적 및 열적 특성이 우수한 Silicone Oil을 시료로 선택 유전특성을 조사하기 위하여 측정온도 범위 20~65 [°C], 주파수 30~ 1×10^6 [Hz] 범위에서 연구한 결과, 3 [kHz]이하 주파수 영역에서 $\tan \delta$ 의 선형 감소는 주파수의 영향이며 높은 주파수에서 $\tan \delta$ 의 증가는 전극저항의 기여로 사료되며, 주파수 30 [kHz]때 온도가 증가시 피크값은 커지면서 흡수곡선의 폭은 넓어지는데 이것은 쌍극자의 증가와 절도의 증가 때문으로 확인되었다. 또한 고온 고주파수의 유전정점의 크기는 공간전하분극의 기여로 저온저주파의 유전정점보다 수십배 큰것을 확인하였다.

REFERENCES

1. A. Ohashi and M. Ueda ; Dielectric characteristics of Silicone oil film, Jap., J.I.E.E 97, 4, pp 213 - 219, 1977
2. M. Yasuda et al ; A Method of suppression for

streaming Electrification in Large power Transformer, Jap, J.I.E.E., 105, 3, pp 265 - 272, 1985

3. A. Mansingh and D. B. McIay ; Dielectric relaxation of Dihalobenzenes. III. Pure Liquids, J., of, Chemical Physics, 54, 8, pp 3322 - 3325, 1971

4. J. Huck, A. Bondeau ; Transport and Relaxation Phenomena in Highly Viscous Liquids, IEEE, trans, 23, 4, pp 615 - 625, 1988

5. T. J. Lewis ; Electronic Process in Dielectric Liquids underIncipient Breakdown Stress, IEEE, Trans, 20, 2, pp 123 - 132, 1985

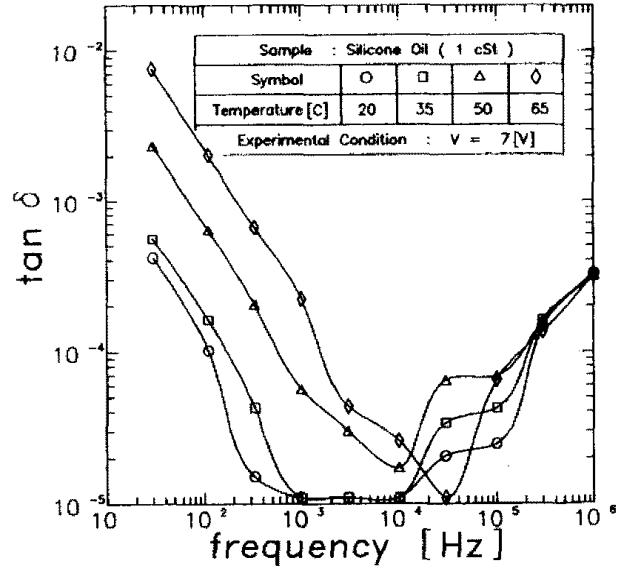


Fig 4. Frequency dependence of tan δ at 7[V]

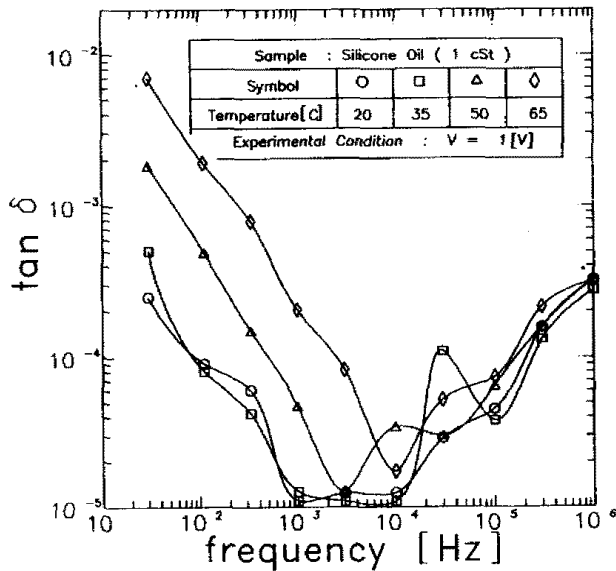


Fig 2. Frequency dependence of tan δ at 1[V]

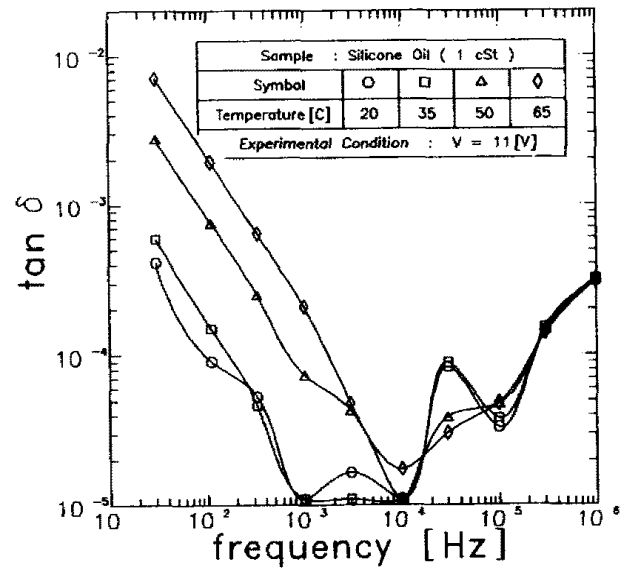


Fig 5. Frequency dependence of tan δ at 11[V]

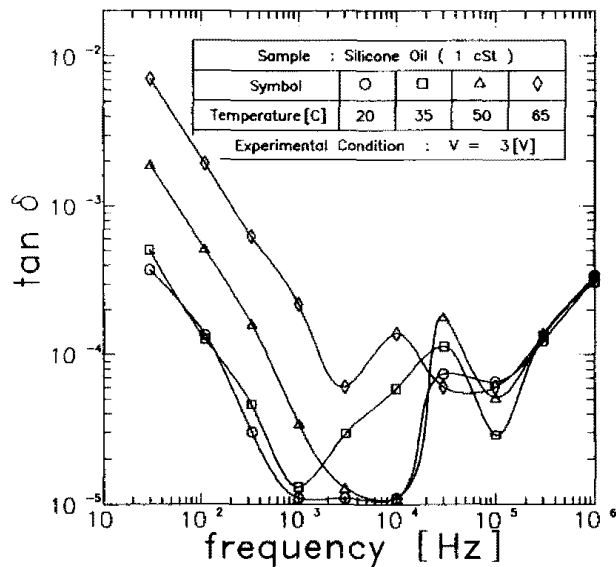


Fig 3. Frequency dependence of tan δ at 3[V]

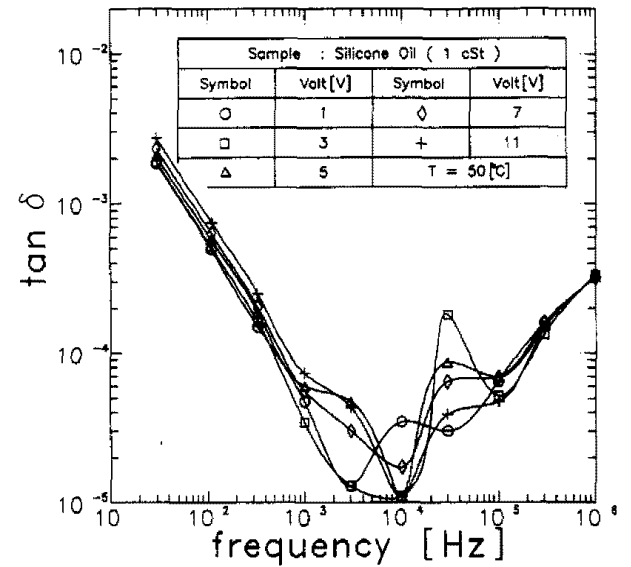


Fig 6. Frequency dependence of tan δ at 50[C]

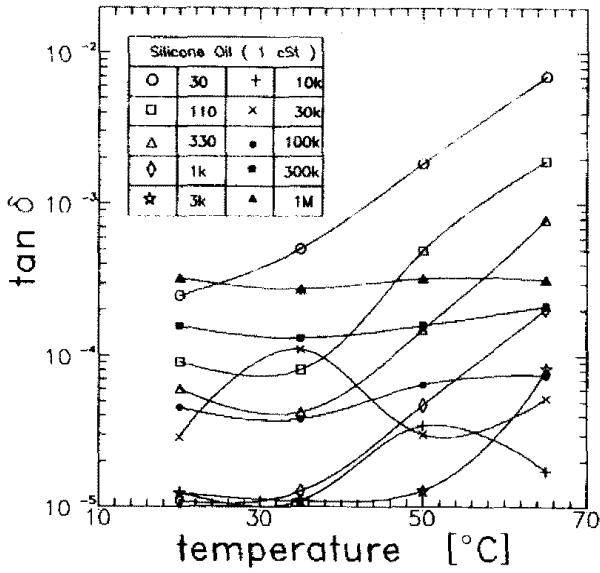


Fig 7. Temperature dependence of $\tan \delta$ at 1[V]

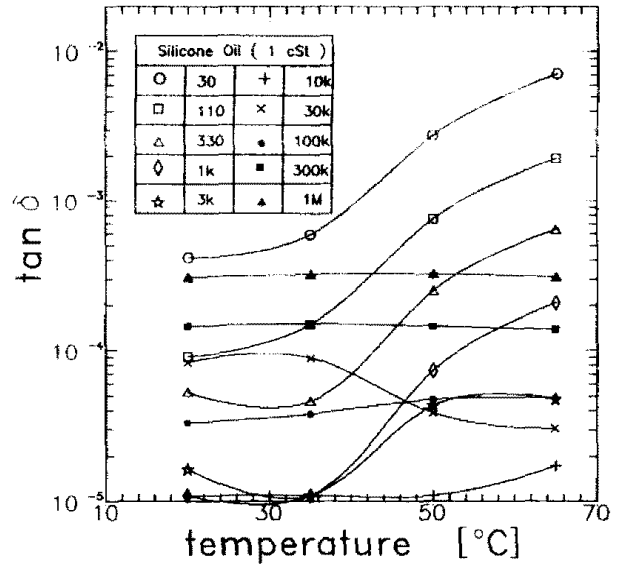


Fig 10. Temperature dependence of $\tan \delta$ at 11[V]

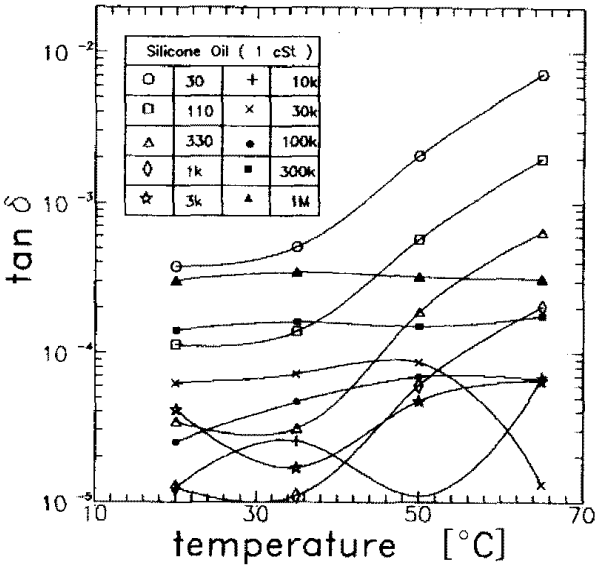


Fig 8. Temperature dependence of $\tan \delta$ at 5[V]

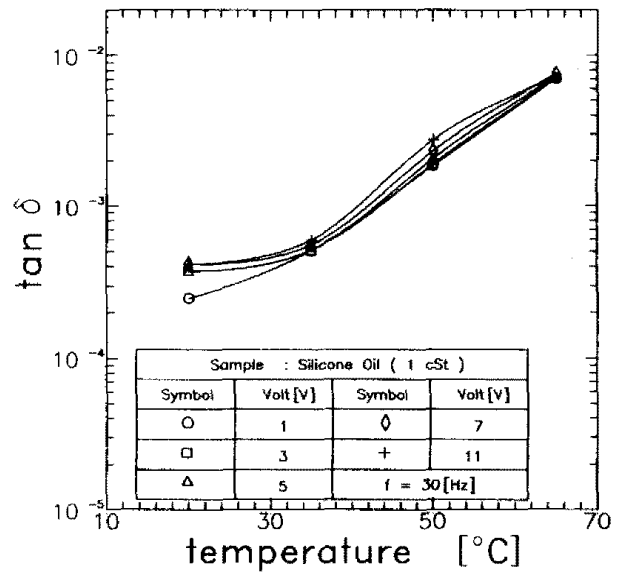


Fig 11. Temperature dependence of $\tan \delta$ at frequency 30[Hz]

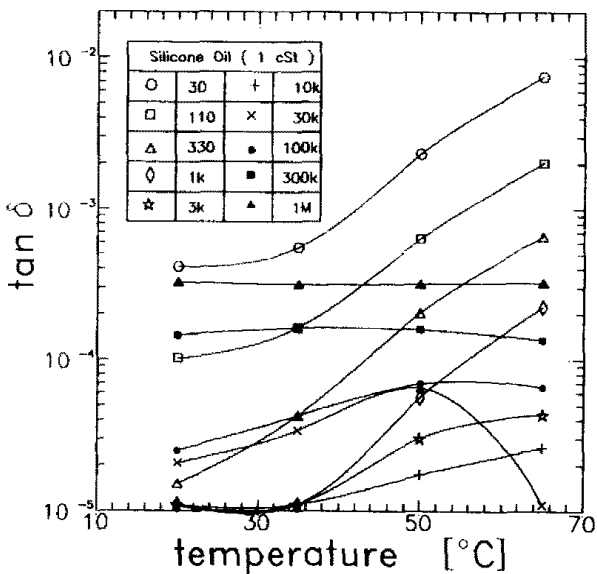


Fig 9. Temperature dependence of $\tan \delta$ at 7[V]

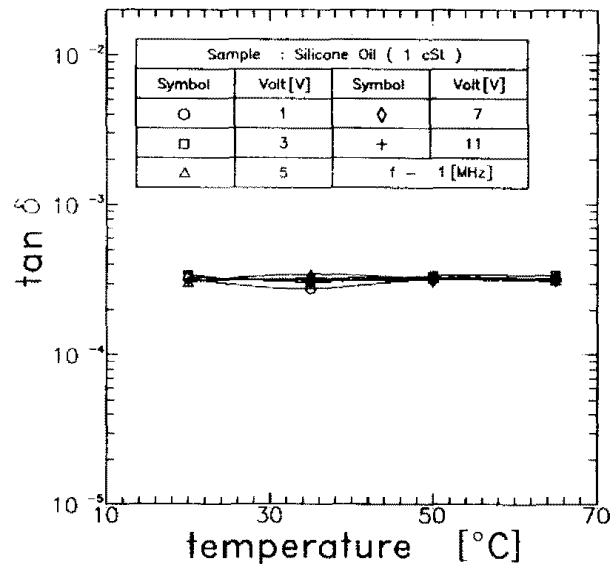


Fig 12. Temperature dependence of $\tan \delta$ at frequency 1[MHz]