

# Eicosamethyl Eneasiloxane의 유전특성

조경순<sup>o</sup>, 김재환, 홍진웅  
 광운대학교 전기공학과

## Dielectric Properties of Eicosamethyl Eneasiloxane

Kyung-Soon Cho<sup>o</sup>, Jae-Hwan Kim, Jin-Woong Hong  
 Dept. Electrical Eng. Kwangwoon Univ.

### ABSTRACT

A study has been carried out on the characteristics of dielectric constant and the dissipation factor of Eicosamethyl Eneasiloxane as a function of frequency (30 ~ 10<sup>5</sup> [Hz]) and temperature (-70 [°C] to 65 [°C]).

The result shows that a well-defined maxima of the absorption curves characterized by a dipole loss mechanism at a low temperature range. For temperatures in the vicinity of room temperature and higher, the loss in the range of power frequencies are predominantly of ionic nature. The increase of ionic conduction is attributed to the presence of ionizable oxidation products and their increased dissociation feature. The effect of viscosity upon the dipole loss intensity appeared to be considerably less pronounced than that upon ionic conduction loss.

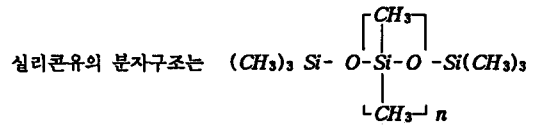
### 1. 서 론

액체 유전체는 케이블, 변압기등 전력용 기기의 전기절연과 냉각제로도 폭넓게 사용되고 있다. 액체 유전체로는 보통 광유가 사용되지만, 광유는 열적·화학적 특성이 나쁘기 때문에 높은 신뢰성이 요구되는 경우 실리콘유가 사용되고 있다. 최근 전력 수요의 증가로 전압의 초고압화, 기기의 대용량화가 요구되기 때문에 전기절연성, 내방사선성, 윤활성, 내열성, 내한성, 열전도성 등이 우수한 실리콘유의 사용이 증가하고 있지만 이들의 물성 해석에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 Eicosamethyl Eneasiloxane을 시료로 선택하여 유전특성과 적외선 스펙트럼을 측정함으로써 실리콘유의 유전손실에 원인이 되는 분자 결합 상태와 열운동 상태의 변화 및 하전입자의 기원과 거동을 해석하고자 한다.

### 2. 사용 시료

본 연구에서는 Shin Etsu(Japan) KF-96L Eicosamethyl Enneasiloxane을 시료로 사용하였다.



이다. 분자구조에서 알 수 있듯이 주쇄(main chain)에 규소와 산소의 결합이 반복되어 있고, 측쇄(side chain)에 두개의 유기기가 결합되어 있는 직쇄형(quadrature)의 형태를 하고 있다. 일반 유기 고분자(organic polymer)의 구조와 비교하여 볼때, 실리콘유는 탄소함량이 상대적으로 적으므로 비교적 난연성(flame resisting)이며, 무기물인 Si와 유기물인 -CH<sub>3</sub>의 결합이기 때문에 무기물의 특성이 내열성(heat proof)과 유기물의 특성이 탄성(elasticity)을 겸비하고 있다. 또한 유동점이 낮아 저온에서도 사용할 수 있다. 시료의 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 물리적 성질  
 Table 1. Physical Properties

명 칭	Eicosamethyl Eneasiloxane	굴 절 율 20°C	1.395
점 도 cSt	5	용 용 점 °C	- 70
중 합 도	7	인 화 점 °C	198.8 (16 mmHg)
비 중	0.915~0.919	분 자 량	681.50

그림 1은 시료의 적외선 스펙트럼이다. 분석 결과 파수 2962 [cm<sup>-1</sup>]에서 CH<sub>3</sub>: C-H의 asymmetric stretching vibration, 파수 2890 [cm<sup>-1</sup>]에서 CH<sub>3</sub>: C-H의 symmetric stretching vibration, 파수 1475 ~ 1375 [cm<sup>-1</sup>]에서 CH<sub>3</sub>의 banding, 파수 1300 ~ 1225 [cm<sup>-1</sup>]에서 Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>의 vibration, 파수 900 ~ 770 [cm<sup>-1</sup>]에서 Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>의 banding을 확인할 수 있었으며, 파수 755 [cm<sup>-1</sup>]

에서 말단기  $-\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ 의 흡수를 관측하였고 주파수는 파수 1200 ~ 950  $[\text{cm}^{-1}]$ 의 Si-O-Si stretching vibration임을 파악 하였다.

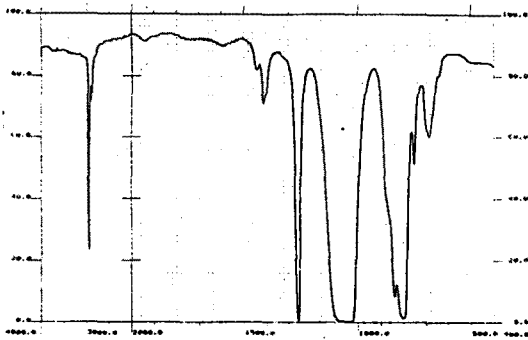


그림 1. 시료의 적외선 스펙트럼  
Fig. 1. Infrared Spectra of Specimen

### 3. 실험

실험은 주파수범위 30 [Hz] ~ 100 [KHz], 온도범위 -70 ~ 65 [°C]에서 주파수와 온도를 변화시키며 측정하였다. 실리콘유 유전특성을 측정하기 위하여 용량 8 [mF] 등축원통형의 액체 전극을 사용했으며, 기하학적 정전용량은 16 [pF] 임을 확인하였다.

### 4. 실험 결과

그림 2는 -70 ~ -25 [°C]에서 측정한 시료의 유전율과 유전 손실의 주파수 특성을 나타낸 것이다. -70 [°C]에서 유전손실은 3 [kHz]부근에서 손실의 피크가 나타나고 온도를 상승시킴에 따라, 피크가 10 [kHz]로 이동하였으며, 이때 유전손실은 주파수가 증가할수록 그 크기가 작아지는데 이것은 Debye 식의 주파수 의존성과 잘 일치하고 있다.

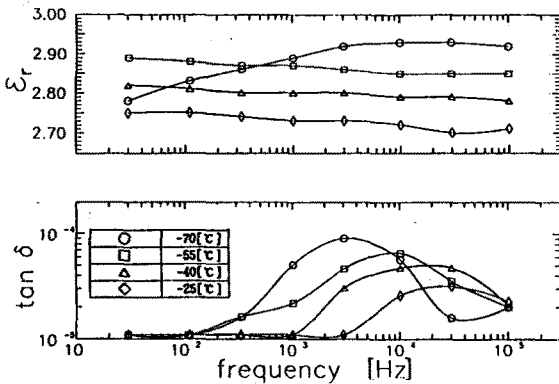


그림 2. -70 ~ -25 [°C]에서 유전특성의 주파수 의존성  
Fig. 2. Frequency Dependence of Dielectric Properties between -70 and -25 [°C]

실리콘유의 분자구조에서 주쇄를 이루고 있는 Si-O-Si는 그 결합각이 약 143°로 유극성이지만 Si-O의 결합거리가 약 1.64 [Å]으로 비교적 길기 때문에 각 결합이 자유회전성을 가지고 있으며(freely-jointed chain), 분자의 굽곡성(flexure)이 좋기 때문에 분자 전체가 강체로서 운동하는 것이 아니라 일정 길이의 세그먼트를 단위로 해서 운동한다. Wilcock는 실리콘유의 증발열과 점성유동의 활성화 에너지를 비교하여 세그먼트의 단위를 분자에 속해있는 Si의 원자수를 기준으로 6 ~ 7개로 추정하였다.

이상의 내용을 종합할때 저온 영역에서 발생하는 유전손실은 Si-O-Si 유극성분자의 점성회전(viscous rotating)에 의한 것으로 생각된다.

유전손실이 최대가 되는 주파수에 대한 온도 의존성은  $\Delta H$ , R이 활성화 에너지, 기체정수 일때

$$f_{\max} = A \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$$

가 되는데( $\Delta H$ : 활성화 에너지, R: 기체정수) 이 관계로부터 활성화 에너지를 구할 수 있다. 실험 결과에서  $\ln f_{\max}$ 와  $T^{-1}$ 의 기울기를 구해 활성화 에너지 15.88 [kcal/mol]을 얻었다.

비유전율  $\epsilon_r$ 의 변화를 살펴보면 온도 -70 [°C]에서는 주파수가 커짐에 따라 비유전율이 오히려 증가하는 현상이 나타났는데 이 온도는 점도 1 [cS]인 실리콘유의 유동점으로서 시료내 분자들의 결정화가 시작되는 점이다. 만일 온도를 더욱 내리면 분자운동의 동결로 인하여 결정화가 이루어질 것이다. 한편 비유전율  $\epsilon_r$ 은 온도 T의 증가에 따라 감소하는데, 이것은 열산란에 의한 쌍극자 배열의 방해와 세그먼트 운동에 소요되는 최소한의 자유체적 형성이 조밀하게 되어 분극율  $\alpha$ 의 증가가 억제되기 때문이다.

그림 3은 저온영역 유전특성의 온도 의존성을 나타낸 것으로 주파수의 증가에 따라 손실곡선의 최대점이 고온측으로 이동하고 있다. 이것은 WLF(Williams-Landel-Ferry) 식

$$\text{Log} \frac{\tau(T)}{\tau(T_g)} = \frac{C_1(T-T_g)}{C_2+(T-T_g)}$$

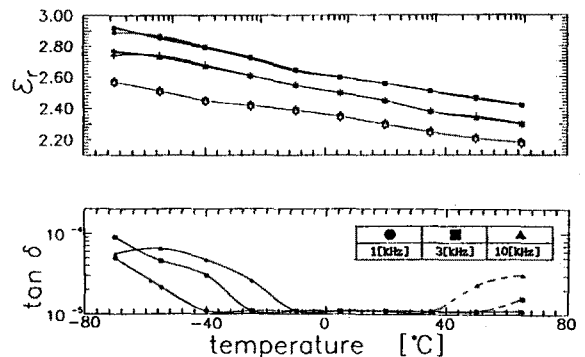


그림 3. -70 ~ -25 [°C]에서 유전특성의 온도 의존성  
Fig. 3. Temperature Dependence of Dielectric Properties between -70 and -25 [°C]

으로 설명되는데, 온도 T가 상승하면 최대손실점이 나타나는 주파수는 커지게 된다.

그림 4는 -10 ~ 65 [°C]에서 측정한 시료의 유전율과 유전손실의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 측정 결과 5 [°C] 이상 고온 영역에서의 손실곡선은 온도의 증가와 함께 그 값이 커지고 있는데, 실리콘유의 유전특성에서 고온 저주파 영역에서 발생하는 유전손실은 이온성 전도에 의한 것으로 알려져 있다. 그림 4에서 1 [kHz] 이하의 저주파 영역에서 나타난 손실은 공기의 주입으로 인한 산화의 영향으로 평가된다. 이것은 인가 온도가 상승됨에 따라 Si-C결합이 끊어지고, 공기중의 O<sub>2</sub>와 반응하여 Si-O

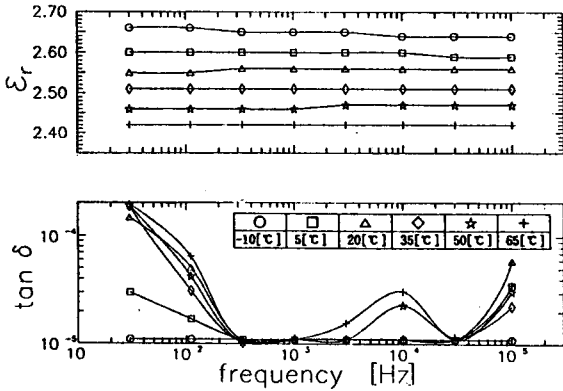


그림 4. -10 ~ 65 [°C]에서 유전특성의 주파수 의존성  
Fig. 4. Frequency Dependence of Dielectric Properties between -10 and 65 [°C]

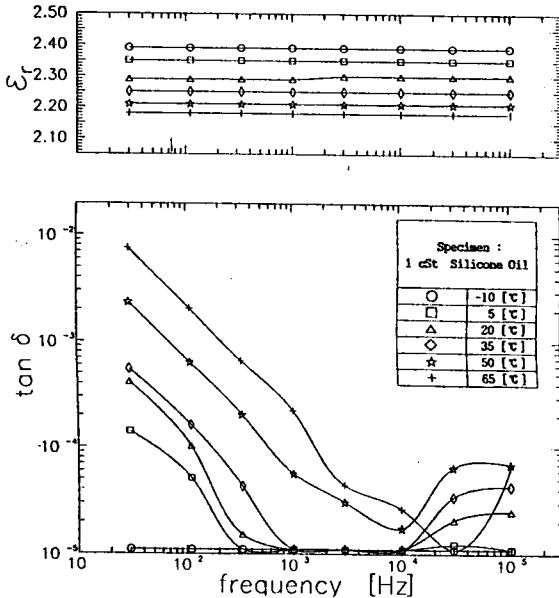


그림 5. -10 ~ 65 [°C]에서 점도 1 [cSt]인 실리콘유 유전특성의 주파수 의존성  
Fig. 5. Frequency Dependence of Dielectric Properties of 1 [cSt] Silicone Oil between -10 and 65 [°C]

의 함량이 늘어나면서 이온성 분자가 생성되었기 때문이다. 이것을 실리콘유의 분자구조와 연관지어 생각하면 주입된 산소의 일부가 CH<sub>3</sub>와 반응하여 RH + O<sub>2</sub> → ROOH 즉 수산화물을 생성하게 되는 것이다. 이로 인해 실리콘유의 도전을 σ가 커져서 유전손실의 피크가 커진 것으로 생각된다. Si-C가 열에 의해 해리되는 것은 그 결합거리가 1.90 [Å]으로 가장 취약하기 때문이다. 즉, 산화에 영향으로 Si-O-Si 가교(cross linking)의 밀도가 증가한 것이다.

한편 유전체내의 전류밀도 J는

$$J = \sum n e i \mu_1 E' = \sigma E$$

이므로 이동도 μ<sub>1</sub> 그리고 전계의 세기 E에 비례한다. E가 일정하다면 J는 도전을 σ에 비례하는 관계가 된다. 액체 유전체의 도전을 σ는 보통 온도 T [K]의 상승에 따라 증가되며 σ = σ<sub>0</sub> exp(-U/kT) 이다. 반응속도론에 의하면 액체의 점도 η는 μ·η = Constant 로 유도되므로 점도 η의 증가는 이동도 μ의 감소를 가져오고, 결국 전류밀도 J가 감소하게 된다. 그림 5는 -10 ~ 65 [°C]에서 측정된 점도 1 [cSt]인 실리콘유의 유전율과 유전손실의 주파수 특성을 나타낸 것이다.

## 5. 결 론

- 1) 저온에서 발생하는 유전손실은 Si-O-Si 유극성 분자의 점성회전에 의한 것이며, 활성화에너지는 15.88 [kcal/mol] 이었다.
- 2) 점도의 증가에 비례하여 Si-O-Si 함량과 분자간 결합력은 증가하였다.
- 3) 측정온도의 상승에 따라 주파수 1 [kHz] 이하에서 발생하는 손실은 주입된 산소와 결합하여 생성된 이온성 산화물에 의한 것이다.
- 4) 점도는 이온성 전도에 의한 손실에 지배적인 영향을 주는 것으로 파악되었다.

## REFERENCES

- [1] N. Grassie, and I.G. Macfarlane, "The Thermal Degradation of Polysiloxanes- I", Euro. Polym. J., 14, 875-884, 1978.
- [2] J.P. Crine, et al., "Influence of Water and Silanol Contents on Some Electrical Properties of Silicone Oil", IEEE Trans. Elect. Insul., 21, 233-237, 1986.
- [3] H. Shimokawa, A. Ohashi, and M. Ueda, "Dielectric Behaviour in Non-Pure Dielectric Liquid Films", J. Phys. D : Appl. Phys., 13, 107-115, 1980.
- [4] 寺西常治, 大橋朝夫, 上田 夫, "シリコン油の低温領域における誘電特性", 電氣學會論文集 A, 95卷 3號, 24-30, 1975.
- [5] T. Mechlia, et al., "Electrophoretic Determination of the Charge at the Solid-Liquid Interface: Relation with Conduction Phenomena", IEEE Trans. Elect. Insul., 20, 365-370, 1985.