

점도증가에 따른 절연용 실리콘유의 유전손실

논문
8-5-7

Dielectric loss of Silicone oils for Insulation due to the increase of viscosity

이 용우*, 조 경순, 김 왕근**, 홍 진웅***

(Yong-Woo Lee, Kyong-Sun Cho, Wang-Kon Kim, Jin-Woong Hong)

Abstract

Silicone oils used insulating substances exhibit the both of organic and inorganic properties, and it has many superior characteristics such as the high thermal resistance and low thermal oxidation level when compared to other insulation oils.

In order to investigate the dielectric loss due to the increase of viscosity, silicone oils of viscosity 1, 2, 5[cSt] had been chosen as the specimen and experiment has been performed in the temperature range of $-70[^\circ\text{C}] \sim 65[^\circ\text{C}]$ and frequency range of $30 \sim 1 \times 10^5[\text{Hz}]$.

As a result, the linear decrease of loss at low frequency region in high temperature was due to the influence of applying frequency, whereas the increase of loss at high frequency region was contributed by electrode's resistance.

And increasing viscosity, the activation energy increased from 3.77[kcal/mole] to 7.21[kcal/mole]. The dipole moment of specimen was become clear 1.48 ~ 2.26[debye] in high temperature region($5 \sim 65[^\circ\text{C}]$) and 1.05 ~ 1.80[debye] in low temperature region ($-70 \sim -25[^\circ\text{C}]$) respectively.

Key words(중요용어) : silicone oils(실리콘유) dielectric loss(유전손실) activation energy(활성화에너지) dipole moment(쌍극자모멘트)

1. 서 론

최근 전기에너지 수요의 증가와 산업사회의 발달로 고전압화, 대용량화, 초소형화 및 선로의 장거리화로 변전설비에 많은 부품이 사용되고 있다. 이들 설비에서 전기절연특성과 냉각효율 및 제특성을 향상시키기 위해 액체절연재료가 폭 넓게 사용되고 있으나 유전손실에 관한 연구는 초보단계에 있다.^{1)~3)}

액체절연체로 주로 전기기기의 절연유는 거의 팜유가 많이 사용되고 있으나, 열적특성과 화학적특성이 합성유보다 낮아 최근의 온도변화가 심한 부하의 설비와 이동용기기나 정밀기기 및 신뢰성이 요구되는 변전설비의 절연유에 무기적 특성과 유

기적 특성을 공유하여 전기적 특성이 우수하고 난연성과 내열성 및 탄성을 갖는 Silicone oil이 많이 사용되고 있다.³⁾⁴⁾

본 실험에서는 저점도 1, 2, 5 [cSt] Silicone의 유전특성을 조사하기 위해 주파수의존성과 온도의존성을 실험하여 점도의 변화가 유전손실에 미치는 영향을 조사하여 손실의 기원과 하전입자의 거동에 관한 유전적 제정수를 고찰한다.

2. 사용시료 및 실험장치.

2-1. 사용시료^{2),4)}

실리콘유의 분자구조는 주쇄에 규소와 산소의 결합이 반복되어 있고, 측쇄에 두개의 유기기가 결합되어 있는 직쇄형(quadrature)의 형태를 하고, 실리콘유의 분자량은 중합도에 따라 다르고, 분자량이 증가함에 따라 점도가 증가하며, 사용목적에 따라 적당한 점도를 선택할 수 있는 장점이 있어 전기, 전자, 화학등 여러 분야에서 넓게 사용되고 있다.

* : 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** : 서울산업대학교 전기공학과

*** : 광운대학교 공대 전기공학과(신기술연구소)

접수일자 : 1995년 4월 12일

심사완료 : 1995년 8월 14일

일반 유기고분자의 구조와 비교하여 볼때, 실리콘유의 경우 탄소함량이 상대적으로 적으므로 비교적 난연성(flame resisting)이며, 무기물(Si)와 유기물(-CH₃, -H)의 결합이기 때문에 무기물의 특성인 내열성(heat proof)과 유기물의 특성인 탄성(elasticity)도 겸비하고, 그리고 유동점이 낮아 저온에서도 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 실험에서는 Shin Etsu Co.(Japan) KF-96L 중 저점도 1, 2, 5 [cSt] (Poly)methyl Siloxane을 시료로 사용하였으며, 시료의 물리적 성질은 표 2-1과 같다.

표 2-1. 시료의 물리적 성질

Table 2-1. Physical properties of specimen

Designation	Unit	Octamethyl Trisiloxane	Dodecamethyl Pentasiloxane	Eicosamethyl Enneasiloxane
Viscosity	[cSt]	1	2	5
Polymerization Degree		1	3	7
Specific Gravity	[g/cc]	0.816 ~ 0.820	0.870 ~ 0.875	0.915 ~ 0.919
Refractive ind.	20 [°C]	1.382	1.390	1.395
Flash Point	[°C]	35	50	75
Molecular weight		236.6	384.86	681.50

후편 그림 2-1은 시료의 분자구조를 조사하기 위해 SHIMADZU IR-435 기기를 사용, 파수 4000 ~ 400 [cm⁻¹]범위에서 infrared spectrum을 측정 한 것으로⁽⁶⁾ 파수 2962[cm⁻¹]에서 CH₃ asymmetric stretching vibration 기여와 파수 1475 ~ 1395 [cm⁻¹]에서 CH₃ asymmetric stretching vibration은 점도의 증가에 따라 커지며, 파수 1250[cm⁻¹]와 파수 900 ~ 770[cm⁻¹]에서 Si(CH₃)₂의 흡수도 점도가 증가함에 따라 커지는 것을 확인할 수 있으며, 점도 증가에 따른 특이한점은 미반응 CH₃는 점도가 증가하면 반응으로 피크의 수가 감소된 것으로 사료된다.

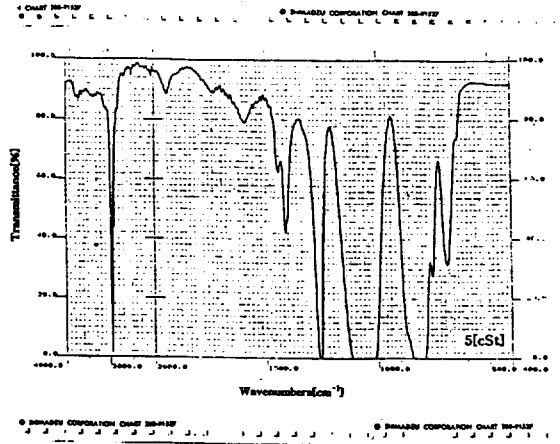
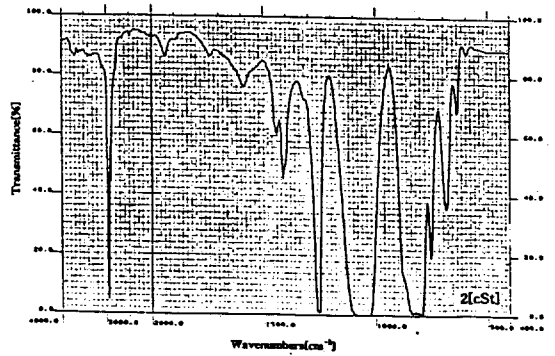
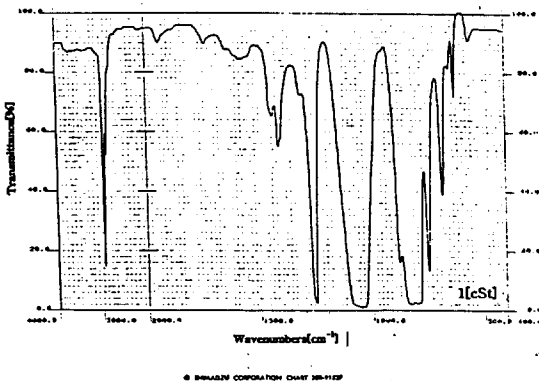


그림 2-1. 시료의 적외선 스펙트럼

Fig. 2-1. Infrared spectrum of specimen

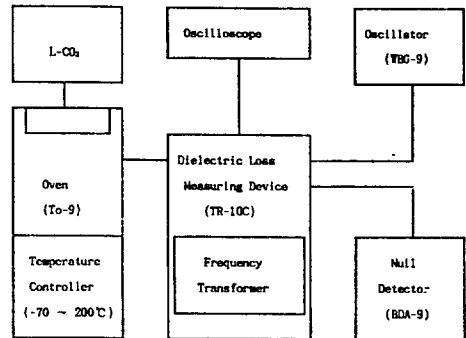


그림 2-2. 실험장치의 블럭선도

Fig. 2-2. Block diagram of experimental equipment

2-2. 실험장치

실리콘유의 유전손실을 측정하기 위하여 액체용 용량 8[ml] 동축원통형 전극을 사용했으며, 기하학적 정전용량은 16 [pF] 임을 확인하였다. 측정장치는 유전정점의 크기 10⁻⁵ ~ 10⁻¹까지 측정할 수 있

는 TR-10C와 Oscillator WBG-9, Null detector BDA-9 및 온도 -70 ~ 200 [°C] 범위에서 일정한 온도 유지가 가능한 Oven TO9B로 구성되었다.¹⁾

저온으로 낮추는 냉매는 Liquid CO₂를 사용하였으며, 실험장치의 블록선도는 그림 2-2와 같다.

3. 실험결과 및 검토

3-1. 저온영역의 유전특성

저온영역에서 유전특성을 조사하기 위해 온도 범위 -70 ~ -25 [°C]에서 측정된 점도 1 [cSt]의 주파수 의존성을 나타낸 것이 그림 3-1이다.

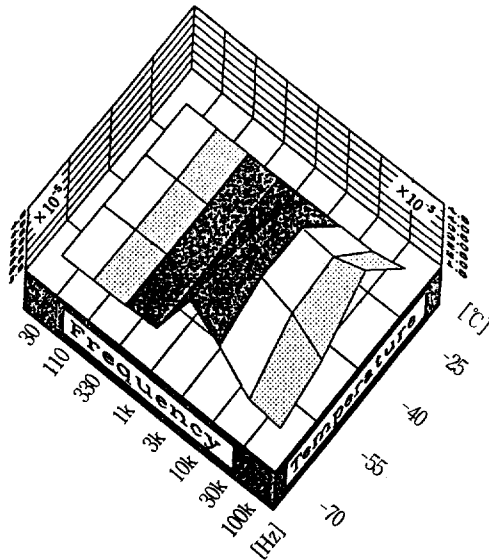


그림 3-1. 저온영역에서 유전특성의 주파수 의존성 (1[cSt])

Fig. 3-1. Frequency dependence of dielectric properties at low temperature region (1[cSt])

온도 -70 [°C]에서 유전손실은 약 3 [kHz]부근에서 흡수피크가 나타나고 측정 온도를 -55 [°C], -40 [°C] 및 -25 [°C]로 상승시키에 따라 피크는 고주파 영역으로 이동하고, 유전손실의 진폭도 온도가 높아질수록 그 크기가 약간 작아지는 것을 확인하였다.

실리콘유의 분자구조에서 주쇄를 이루고 있는 Si-O-Si는 그 결합각이 약 140°로 유극성이지만 Si-O의 결합거리가 비교적 길기 때문에 각 결합이 자유회전성을 가지고 있고, 분자의 굴곡성도 좋기 때문에 분자 전체가 강체로서 운동하는 것이

아니라 일정 길이의 세그먼트를 단위로 해서 운동하는 것으로 생각된다.⁸⁾

그림 3-2와 3-3은 같은 조건에서 점도 2 [cSt], 5 [cSt]시료에 대하여 유전특성의 주파수 의존성을 나타낸 것으로, 1 [cSt](그림 3-1)와 비교할때 특성의 경향은 비슷하나 유전손실의 진폭은 점도에 비례하여 증가됨을 확인하였다.

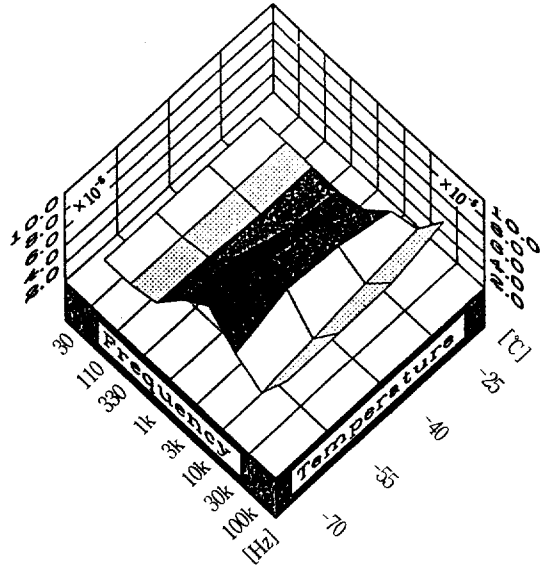


그림 3-2. 저온영역에서 유전특성의 주파수 의존성 (2[cSt])

Fig. 3-2. Frequency dependence of dielectric properties at low temperature region (2[cSt])

특히 저온영역에서 유전특성의 주파수 의존성은 Debye 식과 매우 잘 일치하고 있다. 이상의 결과들을 고려해 볼때 저온 영역에서 발생하는 유전손실은 Si-O-Si 유극성분자와 점성회전에 의한 것으로 점도가 높아지면 분자의 운동이 방해되기 때문으로 사료된다. 유전특성의 주파수 의존특성에서 유전손실에 기여하는 활성화 에너지 ΔH 는 R을 기체정수 T를 절대온도라면 식(1)과 같다.

$$f_m = A \exp(-\Delta H/RT) \quad (1)$$

윗 식에서 유전손실의 최대 주파수와 온도의 관계로부터 활성화 에너지를 구할 수 있다.^{1),5)} 따라서 활성화 에너지를 구하기 위해 $\ln f_m$ 과 $1/T$ 의 관계를 도시하면 그림 3-4와 같고, 그림의 기울기로부터 점도 1, 2, 5 [cSt]의 활성화 에너지를 구하면 3.77, 4.07, 7.21[kcal/mole]를 각각 얻었는데, 즉 점도가 높아지면 유전손실에 기여하는 에너지는 커짐을 확인할 수 있다.

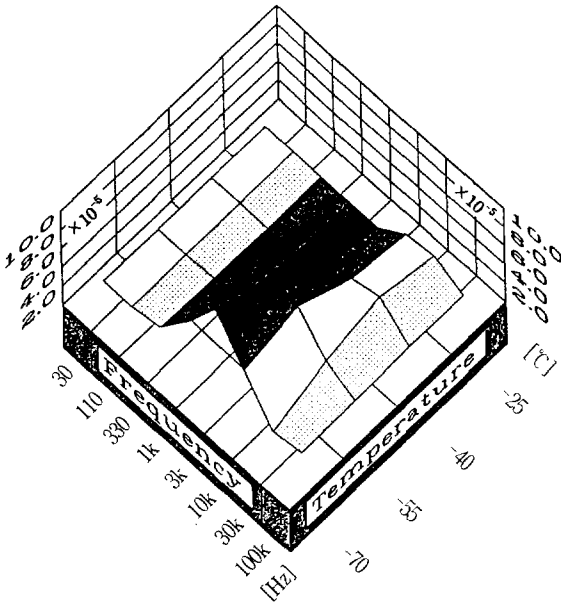


그림 3-3. 저온영역에서 유전특성의 주파수 의존성 (5[cSt])
 Fig. 3-3. Frequency dependence of dielectric properties at low temperature region (5[cSt])

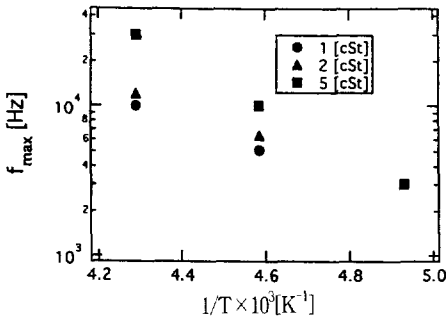


그림 3-4. 시료의 활성화 에너지
 Fig. 3-4. Activation energy of specimen

그리고, 저온영역 유전특성중 주파수의 증가에 따라 손실곡선의 최대점이 고온측으로 이동하는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 WLF³⁾ 식(2)로 설명할 수 있다.

$$\text{Log} \frac{\tau(T)}{\tau(T_g)} = \frac{C_1(T - T_g)}{C_2 + (T - T_g)} \quad (2)$$

온도 T가 상승하면 최대손실점이 나타나는 주파수는 고온측으로 이동하게 된다. 또한 유전손실 곡선은 같은 주파수일때 시료의 점도 η 에 비례하여

넓어지는데, 이것은 점도 η 의 증가가 완화시간 τ 의 분포를 넓게하기 때문이다. 쌍극자를 형성하는 분자를 반경 a의 공도양이라 하면 이것이 점성이 η 인 물질내에서 일정한 각속도로 회전운동 이라면 Stokes의 법칙에 따라 마찰저항 $\zeta = 8\pi a^3 \eta$ 로 ζ 는 η 에 비례하며, 쌍극자가 회전할때 주위로 부터 받는 마찰저항의 크기를 ζ , k를 Boltzmann 정수, T를 절대온도라고 하면 $\tau = \zeta/2kT$ 가 되기 때문에 완화시간 τ 는 점도 η 에 비례한다.⁹⁾

3-2. 고온영역의 유전특성

그림 3-5는 고온영역에서 점도 1[cSt] Silicone oil의 유전특성에 대한 주파수 의존성을 온도 parameter로 도시한 것이다.

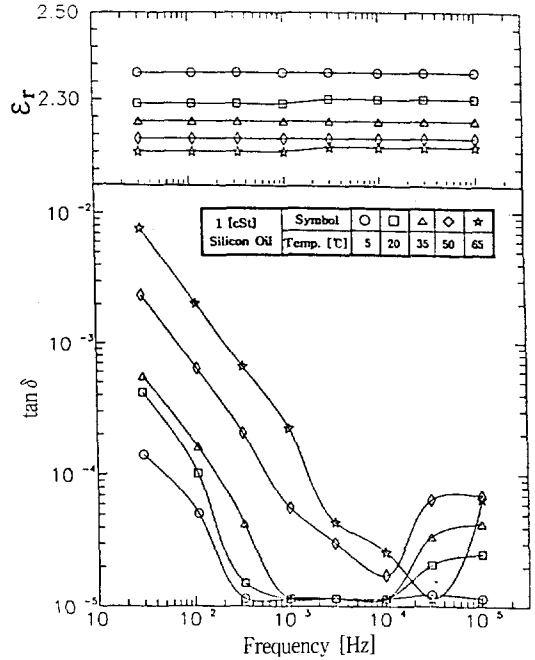


그림 3-5. 고온영역에서 유전특성의 주파수 의존성 (1[cSt])

Fig. 3-5. Frequency dependence of dielectric properties at high temperature region (1[cSt])

그림에서 저주파수 영역(3[kHz]이하)에서는 주파수의 증가에 따라 손실의 진폭은 감소한다. 그러나 고주파수 영역(10^4 [Hz]이상)에서는 증가하는 것을 확인할 수 있고, 그리고 측정온도가 5[°C]에서 65[°C]로 높아지면 손실의 크기는 약 50배 정도 커지는 것을 확인할 수 있다.

저주파 영역에서 유전손실의 감소는 주파수에 반비례하기 때문이고 고주파 영역에서의 증가는 전극저항의 영향으로 사료된다. 또한 측정온도가 높아지면 유전손실의 값이 커지는데, 이것은 열에 의한 해리로 인해 결합거리가 1.9[Å]으로 취약한 Si-C결합이 끊어지고, 그리고 Si-O가 발생되기 때문으로 사료된다.

그림 3-6과 3-7은 같은 조건에서 점도 2[cSt]와 5[cSt]의 유전특성을 나타낸 것으로 1[cSt](그림 3-5)에 비해 점도가 2, 5[cSt]로 증가시 유전손실이 감소하는 저주파 영역은 3[kHz]에서 1[kHz] 그리고 330[Hz]영역으로 줄어들고, 그리고 점도 증가시 손실 진폭은 측정온도 65[°C]때가 5[°C]보다 10배와 2배로 커지는 것도 확인할 수 있었다.

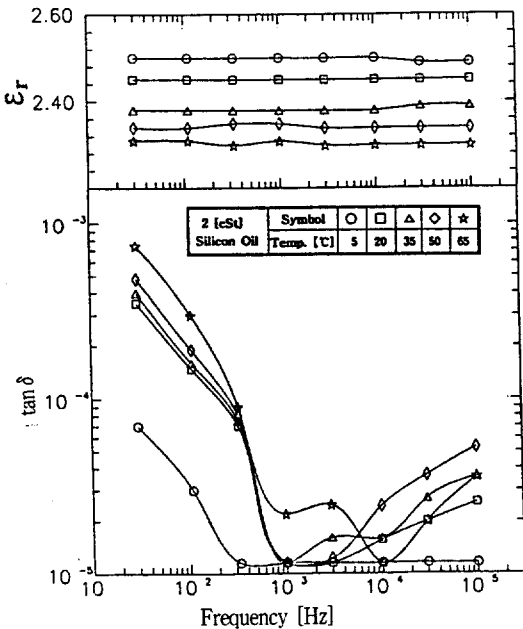


그림 3-6. 고온영역에서 유전특성의 주파수 의존성 (2[cSt])

Fig. 3-6. Frequency dependence of dielectric properties at high temperature region (2[cSt])

그림 3-5 ~ 3-7은 고온영역에서 손실곡선으로 온도의 증가에 따라 유전손실의 진폭은 커지고 있는데, 실리콘유의 유전특성에서 고온 저주파 영역에서 발생하는 유전손실은 전기전도에 의한 것으로 보고하고 있다.^{1),3)}

유전체내 전류밀도 J는 캐리어 밀도 n와 이동도 μ , 그리고 전기장의 세기 E에 의해 결정되고, E가 일정하다면 J는 도전율 σ 에 비례하는 관계로 된

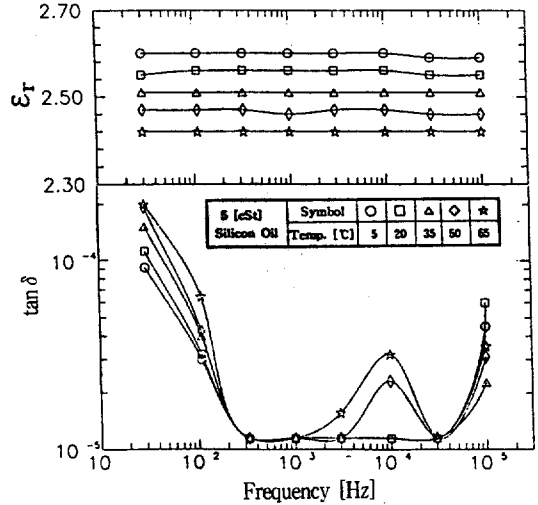


그림 3-7. 고온영역에서 유전특성의 주파수 의존성 (5[cSt])

Fig. 3-7. Frequency dependence of dielectric properties at high temperature region (5[cSt])

다.

액체 유전체의 도전율 σ 는 온도 T [K]의 상승에 따라 증가되고 $\sigma = \sigma_0 \exp(-U/kT)$ 로 표현된다. 여기서 U, k는 전도의 활성화 에너지와 Boltzmann 정수이고 σ_0 는 물질정수이다.

이때 이동도 μ 는 $\mu = \mu_0 \exp(-U/kT)$ 로 되고, 이동도 μ 와 온도 T의 실험적 관계를 잘 설명하고 있는데 이온이동에 따른 포텐셜 장벽 또는 활성화 에너지는 많은 액체 유전체가 고체 절연체보다 작으나, 이동도는 액체 유전체가 크다.⁵⁾

그리고 저주파 영역에서의 손실 기원은 공기와 접촉으로 인한 산화의 영향으로 측정온도가 상승됨에 따라 Si-C결합이 끊어지고, 공기중의 O₂와 반응하여 Si-O의 함량이 늘어나면서 이온성 캐리어가 생성되었기 때문이다.

이것은 실리콘유의 분자구조와 연결지어 생각해 보면 더욱 명확해지는데 주입된 산소의 일부가 CH₃와 반응하여 수산화물을 생성하는 것으로 보고하고 있다. 이로 인해 실리콘유의 도전율 σ 가 커지므로 유전손실의 피크가 커진 것으로 사료된다.

또, 산화에 영향으로 말단기(terminating group)가 끊어지고 Si-O-Si cross linking로 밀도가 증가한것을 확인할 수 있는데 점도 η 의 변화에 따른 실리콘유의 열적·화학적특성이 다른것은 결합력의 차이에 의한것으로 생각된다.

인접한 분자 사이에 작용되는 힘은 분자량이 증가함에 따라 커지게 되며 화학적인 해리와 열화는 결합길이와 결합력도 관계되고 한편 반응속도론에 의하면 액체의 점도 η 는 $\mu \cdot \eta = \text{Constant}$ 로 되므로 점도 η 의 증가는 이동도 μ 가 감소 되므로, 같은 시료에서 온도가 증가되면 손실피크는 적어지면서 고주파수쪽으로 이동하게 된다.¹⁰⁾

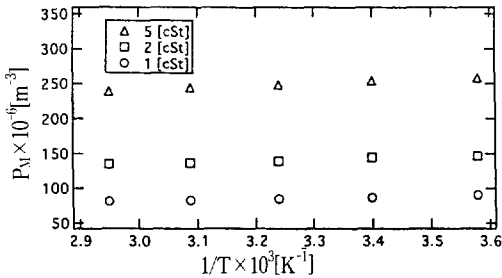


그림 3-8. 고온영역의 쌍극자 모멘트
Fig. 3-8. Dipole moment at high temperature region

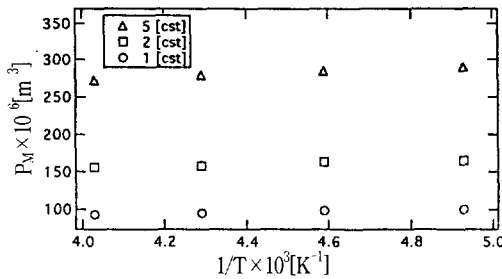


그림 3-9. 저온영역의 쌍극자 모멘트
Fig. 3-9. Dipole moment at low temperature region

한편 저점도 실리콘유의 쌍극자 모멘트를 조사하기 위해 분자분극을 절대온도의 함수로 나타낼 수 있는데, 시료의 경우 온도를 변화시키면서 비유전율을 측정하고 Clausis-Mosotti식을 이용하여 분극과 온도의 관계를 영역별로 도시하면 고온영역은 그림 3-8, 저온영역은 그림 3-9와 같다.

그림에서 직선의 기울기로부터 쌍극자 모멘트를 구하면 고온영역은 1.48 ~ 2.26[debye], 저온영역은 1.05 ~ 1.80[debye]를 각각 얻었다.

4. 결 론

전기적 특성과 열적·화학적 특성이 우수한 Silicone oil 중 저점도 1, 2, 5 [cSt]를 시료로 선택

하여 유전손실에 원인이 되는 하전입자의 기원 및 거동을 파악하기 위하여, 주파수범위 30 [Hz] ~ 100 [kHz], 온도범위 -70 ~ 65 [°C]에서 유전특성을 실험한 결과

- 1) 저온영역에서 점도가 높아지면 유전손실의 진폭은 줄어들면서 높은 주파수 영역으로 이동하고, 유전손실에 기여하는 활성화에너지는 3.77 ~ 7.21 [kcal/mole]을 얻었다.
- 2) 시료의 쌍극자 모멘트는 고온영역 1.48 ~ 2.26[debye], 저온영역은 1.05 ~ 1.80[debye]를 얻었다.
- 3) 고온 저주파수 영역에서 측정온도의 상승에 따라 유전손실의 증가는 공기중 산화로 생성된 이온성 산화물에 의한 것으로 생각된다.
- 4) 적외선 흡수에서 파수 800[cm⁻¹]이하 피크 수의 감소는 점도의 증가로 분자간 결합력이 커지기 때문으로 사료된다.

References

1. Wang Kon KIM et al : The Temperature and Frequency dependance of tan δ of Dielectric Liquids, Processing of The 1992 KOREA - JAPAN Joint Conf. on Electrical and Electronic Materials, pp. 67-72, 1992
2. U.S. Dept. of Energy : Study to Determine the Potential Use of Silicone Oil in Transformers, Report No. HCP/T-2115, Feb. 1979.
3. R. Hakim, R.G. Olivier, and H.S. Onge., "Dielectric Properties of Silicone Fluids", IEEE Trans. Elect. Insul., 12, pp. 360-370, 1977.
4. A.R. Von Hippel : Dielectric Materials and Applications, M.I.T Press, pp. 18-63, 1966.
5. 大石嘉雄, 中島達二 : 誘電體現象論, 電氣學會, pp. 64-143, 1973.
6. R.T. Conley : Infra-Red Spectroscopy, Allyn & Bacon, Boston, 1966.
7. R. Bartnikas, "Dipole Orientation in Cable-Insulating Oils", IEEE Trans. Elect. Insul., 5, pp. 36-41, 1970.
8. H.J.M. Brown, and L.E. Sutton : Tables of Interatomic Distance and Configurations in Molecules and Ions, The Chem. Soc., London, 1958.
9. R. Bartnikas, Dielectric Loss in Insulating

Liquids, IEEE Trans. Elect. Insul., 2, pp. 34-54, 1967.

10. R.M. Hakim, "Distribution of Relaxation Times in an Insulating Oil", IEEE Trans. Elect. Insul., 6, pp. 158-164, 1971.

저자소개



이용우

1957년 8월 24일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한양대학교 산업대학원 전기공학과 석사. 1995년 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 1982-1994년 선진엔지니어링 이사대우. 1995년 현재 충남전문대학 전기과 전임강사.



조경순

1968년 6월 14일생. 1991년 광운대학교 공대 전기공학과 졸업. 1993년 광운대학교 대학원 전기공학과 석사. 1994년 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



김왕곤

1940년 10월 5일생. 1963년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1970년 한양대학교 대학원 전기공학과 석사. 1987년 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정 졸업. 1995년 현재 서울 산업대학교 전기공학과 교수.



홍진웅

1955년 2월 23일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대학교 대학원 전기공학과 석사. 1987년 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정 졸업. 1992년-93년名古屋大學 객원연구원. 1995년 현재 광운대학교 전기공학과 부교수.