

점도변화에 따른 실리콘유의 전기전도특성

대림
10-9-12

The Electrical Conduction Characteristics of Silicone oils due to Viscosity Variation

조경순*, 신종열**, 이충호***, 이수원\$, 홍진웅*

(Kyung-Soon Cho, Jong-Yeol Shin, Chung-Ho Lee, Soo-Won Lee, Jin-Woong Hong)

Abstract

In order to investigate electrical conduction characteristics of silicone oils due to viscosity variation, we studied the electrical conduction properties at temperature range of 10~110[°C] and electrical field from 1 to 1.33×10^4 [V/cm].

The viscosity of used specimens was low viscous(1, 2, 5[cSt]) silicone oils. It was shown the ohmic conduction characteristics in low temperature and low field by Ion, dipole and humidity included specimen.

And, we known the conduction mechanism due to electron injection by Schottky's effect in the high temperature and high field region.

Key Word(중요 용어) : Electrical conduction characteristics(전기전도특성), Silicone oils(실리콘유), Ohmic conduction(옴믹전도), Conduction mechanism(전도기구), Electron injection(전자 주입)

1. 서론

최근 산업사회의 발달과 도시 집중화로 전력수요는 급격히 증가하기 때문에 고전압·대용량 변전설비는 안정성이 높고 절연과 냉각효과가 공기보다 우수한 절연유가 요구되고 있다.

지금까지 케이블, 정전용량기기 및 변압기등 중요한 전력용 변성기기의 액체 유전체는 절연 및 냉각 효율을 높이기위해 오래전부터 광유가 주로 사용되어 왔으나, 광유의 인화점 등이 문제되어 안전성이 우수한 실리콘유에 대한 연구는 매우 중요하나 초보적 단계이다.¹⁻³⁾

실리콘유는 광유와 같은정도의 전기적 특성과 열

전도 특성을 갖고 있으며, 또한 도전성도 낮고, 취급이 안전하기 때문에 전력 변성기기의 안전도와 신뢰성을 향상시키기 위해 최근 수변전용 변압기와 차량용 변성기기 등에 사용되고 있다.⁴⁾

지금까지의 연구는 고순도와 간단한 분자구조를 갖는 액체에 대한 연구가 많이 보고 되고 있다. 그러나 액체 절연체는 고체재료와 달리 시료의 종류, 순도, 성분에 따라 전기적 특성이 다르고 또한 각종 기체, 불순물 및 수분등이 쉽게 혼입되기 때문에 재현성이 낮아 물성적 해석에 많은 어려움이 동반되고 있다.^{5,6)}

본 실험에서는 점도가 1[cSt], 2[cSt], 5[cSt]로 증가시 전기전도 기구(mechanism)에 미치는 영향을 조사한 결과를 보고한다.

2. 사용시료 및 실험

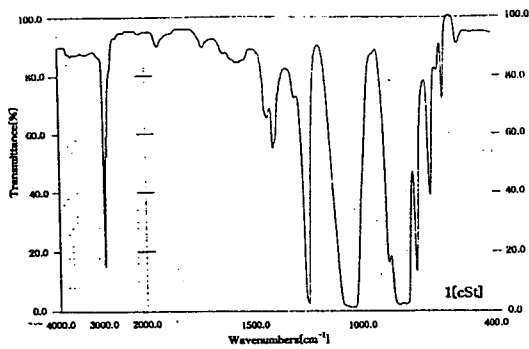
2-1. 사용시료

실리콘유는 silicone tetrachloridide와 dimethylzinc의 반응으로 생성된 화합물로 내열성이 우수한

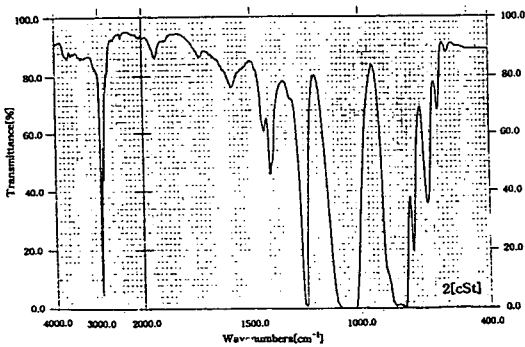
* : 광운대학교 공대 전기공학과
** : 삼육전문대학 자동차정비과
*** : 충주산업대학교 전기공학과
\$: 철도전문대학 철도전기제어과
접수일자 : 1997년 10월 14일
심사완료 : 1997년 11월 20일

것이 특징이다. 실험에 사용된 시료는 SHIN-ETSU CO. 제품으로 KF-96중 1, 2, 5[cSt] 3종류를 선택하였다. 실리콘유는 열에 강한 유리나 석영과 같은 무기질의 실록산 결합 $[-Si-O-Si-]$ 과 유기질의 메틸기(CH₃)로 구성되어 있다.

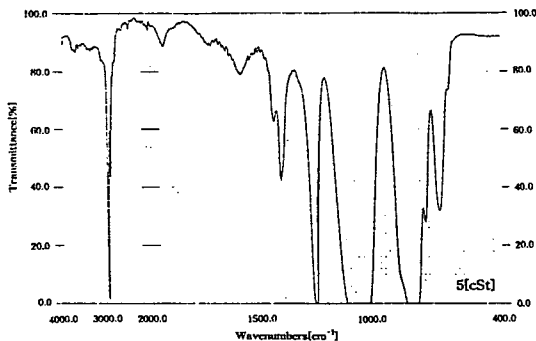
따라서 실리콘유는 유기질과 무기질의 성질을 겸비하고 있어, 점도가 같은 일반 유기질기름보다 여



(a) 1[cSt]



(b) 2[cSt]



(c) 5[cSt]

그림 2-1. 시료의 적외선 스펙트라
Fig. 2-1. Infra-red spectra of specimen

러가지 우수한 특성을 나타내고 있다.

고온에서 열화는 분위기가 공기중과 불활성가스내 가 다른데, 공기중에서 산화에 의한 경우 Si - C 결합이 절단되고 실리콘유 분자간의 가교가 발생하여 점도가 상승하나 불활성 가스내에서는 열분해로 인하여 점도가 반대로 저하한다.

시료의 물성연구는 적외선 분광기 (IR SHIMADZU, CO. Model IR-435)를 이용하여 IR을 측정된 결과 점도 1, 2, 5[cSt]의 것이 각각 그림 2-1 (a)(b)(c)와 같으며 주흡수밴드는 1100 ~ 1000[cm⁻¹]범위의 Si - O - Si의 stretching vibration과 874 ~ 740[cm⁻¹]범위의 CH₃ rocking과 1270 ~ 1250[cm⁻¹]범위에서 CH₃의 symmetrical stretching vibration 및 2900[cm⁻¹]에서 C-H₃의 stretching vibration을 확인 할 수 있었다.

그림 2-1에서 특징적인 것은 파수 800[cm⁻¹]이하 범위에서 점도 증가시 피크가 5개 에서 3개로 줄어들며 위에서 언급한 부분의 진폭이 증가함을 알 수 있다.

그리고 온도 및 전계에너지에 의하여 전기전도에 기여할 수 있는 쌍극자의 발생 가능성은 SiO가 가장 높은 것으로 사료되며, 이 쌍극자가 발생시 정·부 극성을 띤 이온이 발생되고 이것이 전기전도에 기여한다.

2-2. 실험

액체 유전체의 전기전도특성 실험은 가드링 방법을 이용하였으며, 실험장치는 온도를 -70 ~ 200[°C] 까지 변화시킬 수 있고, 일정한 온도를 유지할 수 있는 TO-9B(ANDO Electric CO.) OVEN을 이용하였고, 전극은 주전극과 가드링 전극으로 구성된 동축 원통형을 사용하였다.

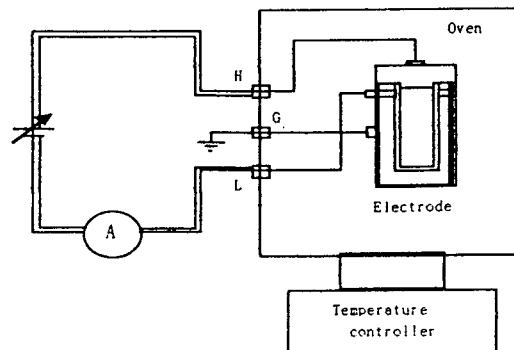


그림 2-2. 실험장치의 브럭선도
Fig. 2-2. Block diagram of experimental device

전도특성 실험시 저온 저전압 영역에서는 전류값을 측정하기 위하여 수시간이 걸렸고, 일정온도 이상이 되면 전압인가후 일정하게 수십분 경과후 누설 전류를 측정하였다.

인가전압은 정전압원(DRP-K202, DAE DO Elec.)을 이용하였고 전류측정은 미소전류계(KEITHLEY 614, ANDO VMG 1000)를 사용 하였으며, 실험장치의 불력전도는 그림 2-2와 같다.

3. 실험결과 및 검토

3-1. 전기전도의 전계의존성

(1) 1[cSt]의 전기전도

그림 3-1은 점도 1[cSt] Silicon Oil의 전압-전류 특성으로 온도를 증가 시킬때 낮은 전압에서는 전류 증가율이 폭이 적으나, 측정온도와 인가전압이 높아지면 전류증가율은 커지다가 서서히 포화되는 경향을 나타내고 있다.

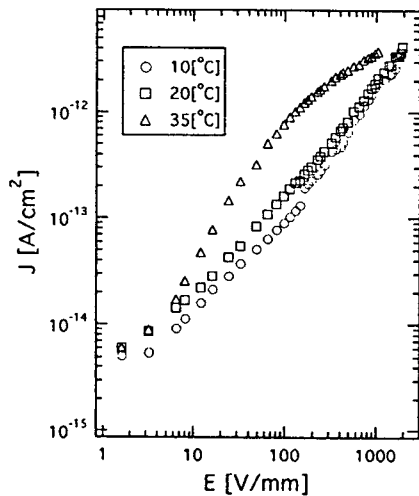


그림 3-1. 점도 1[cSt]의 전기전도
Fig. 3-1. Electrical conduction in viscosity 1 cSt

일반적으로 액체절연체의 전형적인 전도특성에서 전류는 인가전압(전계)크기에 따라 증가하는 오음영역과 포화 특성을 나타내는 영역 그리고 전계 증가에 따라 매우 강하게 전류가 증가하는 파괴 전구영역으로 구분 된다고 보고 하고 있다.

그러나 위에서 구분한 전도특성은 아주 이상적으로 정제되어 불순물의 영향이 없는 이상적인 액체의 전도특성이고, 3개의 경계영역 전계의 크기는 시료

의 종류, 순도, 실험조건 등에 따라 다르다. 또한 K. Sugita, T. Sato, Y. Toriyama⁷⁾등 많은 연구자들은 전도특성중 포화영역은 확인되지 않은 경우도 많다고 보고하고 있으며, 또 다른 연구자들은 3개의 경계영역을 구분하기 어려울때가 있다고 보고하고 있다.

본 실험에서도 포화영역의 경우는 높은 온도에서 나타남을 확인할 수가 있었다. 그림 3-1에서 6[V/mm]이하 영역(제1영역)에서는 인가 전압이 증가하여도 전류의 증가는 상당히 적은 것을 확인할 수 있다. 그러나 100[V/mm]이하 영역(제2영역)에서는 전류증가특성이 2로 나누어지는데, 측정온도 10, 20[°C]의 경우는 거의 일치하고 있으나 35[°C]의 경우는 매우 급하게 증가한다.

이것은 1[cSt]의 경우 인화점이 35[°C]로 보고되어 있으므로, 측정 온도에서 silicone oil의 유동(流動)이 매우 활발해지고, 따라서 carrier의 이동도 용이해지기 때문에 약 10배의 큰 전류가 흐른 것으로 사료된다.

한편 온도의존성에 대한 활성화에너지를 얻기 위해 Arrhenius plot에서 활성화 에너지를 찾기위하여 ln I와 1/T의 관계로 부터 각 영역별로 계산하면 제1영역의 활성화에너지는 0.052[eV] 제2영역에서 활성화에너지는 0.53[eV] 제3영역(100[V/mm]초과)에서 활성화 에너지는 0.528[eV]를 각각 얻었다.

이 값은 R. Guizonnier 등⁸⁾이 같은 시료에서 얻은 값(200 [V/mm]때 약 0.41[eV])과 매우 잘 일치하고 있으며, 이 정도의 전계에서 전기전도는 액체속에 포함된 수분과 불순물에 의한 영향이 크다고 보고하고 있다. 또한 P. Prabhakara Rao, Radu Govinda 및 A. M Sletten 등⁽⁸⁾은 전계 2,00[V/mm]이하에서의 전기전도는 수분에 의하여 큰 지배를 받는다고 보고 했다.

따라서 본 연구에 사용된 실리콘유에서 "OH기"의 포함정도를 확인하기 위하여 IR을 측정한 결과 파수 3700[cm⁻¹]에서 점도가 1, 2, 5[cSt]로 증가함에 따라 흡수값도 커지는 것을 확인 할 수 있는데, 이것으로부터 점도가 증가하면 수분의 함량이 큰 것을 확인할 수 있었다.

한편 액체 유전체의 경우 20[°C]에서 전계 10³[V/mm]정도면 열전자 방출이 충분하다고 D. Blanc, J. Mathiey, J. Boyer와 Z. Croitory 그리고 M. J. Morant등이 보고하고 있다. 본 실험에서도 1500[V/mm] 이상 에서는 매우 급하게 전류가 증가하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이것도 온도가 높아 전극으로부터의 전자주입이 용이하기 때문으

로 사료된다.

(2) 2[cSt]의 전기전도

그림 3-2는 점도 2[cSt] 전기전도특성으로 측정온도 20 ~ 80[°C]범위에서 측정한 결과이다.

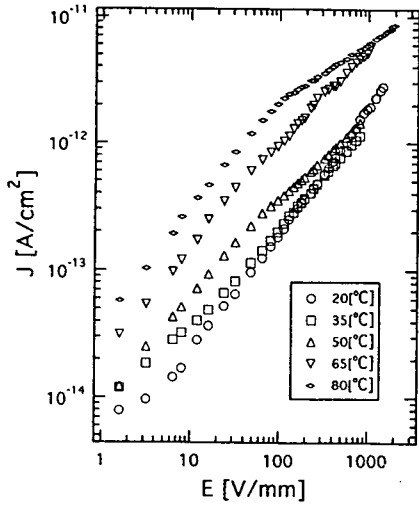


그림 3-2. 점도 2[cSt]의 전기전도
Fig. 3-2. Electrical conduction in viscosity 2[cSt]

20[°C]의 경우에는 점도 1[cSt]와 유사함을 확인하였고, 측정온도가 35[°C]에서 80[°C]로 증가함에 따라 전류의 증가율은 거의 일정하나 제1영역(20 [V/mm]이하)과 제2영역(30~300[V/mm])의 경계영역에서는 매우 급하게 전류가 증가하였고, 이 경계영역의 밴드폭은 거의 일정하며 온도의 증가에 따라 전압은 일정하게 낮아짐을 확인할 수 있었다. 특히 제3영역(300[V/mm]이상)에서 고온의 경우 액체절연체의 전압-전류특성중 포화영역을 관측할 수 있었다. 일반적으로 액체의 전기전도는 캐리어의 밀도수와 이동도의 곱으로 결정되는데, 액체의 경우 이 포화영역은 금지대내 다수에 국재화된 에너지 준위가 존재하고 또한 원자의 공공(空孔)이 많이 포함되어 있어서 주입된 전자들이 이곳에 포획되어 전하 주입량은 증가하여도 전류가 포화되는 포화영역이 발생되고, 온도가 높아지면 Schottky효과에 의해서 주입 전하량이 더욱 많아지기 때문에 발생하는 영역은 온도의 증가에 따라 전압은 낮아져야만 된다. 즉 경계영역이 낮은 쪽으로 이동 되어야만 한다.

한편 1,2영역의 활성화에너지를 구하기 위해 Arrhenius로 도시하여 계산된 활성화에너지 1영역 0.297[eV], 2영역 0.64[eV], 3영역 0.507[eV]를 각각

얻었다.

(3) 점도 5[cSt]의 전기전도

그림 3-3은 점도 5[cSt] silicone oil의 전도특성으로 낮은 온도 (15~30[°C])의 경우 1, 2[cSt]에서 볼 수 없는 특이한 현상인 전류의 jumping을 관찰할 수 있었고, 전계 10[V/mm]이하에서는 전류의 증가율이 매우 낮으나 10[V/mm]이상 전압에서는 거의 비슷한 증가율을 나타내고 있다.

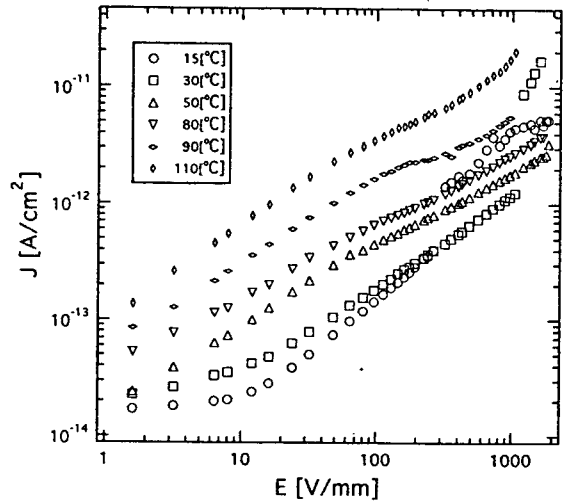


그림 3-3. 점도 5[cSt]의 전기전도
Fig. 3-3. Electrical conduction in viscosity 5[cSt]

특히 150[V/mm]이하 영역에서는 이온 및 쌍극자의 기여에 의한 거의 일정한 Ohmic 전도가 나타나고, 활성화에너지는 0.35[eV]임을 확인하였다.

낮은 온도에서 전류의 jumping 현상은 점도 5[cSt]의 경우 낮은 점도의 시료보다 금지대폭 내에서 많은 trap준위와 원자의 결합이 상대적으로 많이 존재하기 때문에 낮은 전압에서는 여기에 carrier가 채워져야 함으로 전류의 증가율은 적을 것으로 사료된다.

그런데 이 현상이 낮은 온도에서만 나타나는 이유는 온도가 50[°C] 이상이 되면 열에너지에 의한 캐리어 수수현상이 매우 빨라지므로 고분자의 경우에서와 같이 이 현상이 빨리 지나감으로 인하여 측정이 어려울 것으로 사료된다.

또한 90[°C] 이상에서는 액체 유전체의 포화특성을 확인하였는데, 이 영역은 온도의 증가로 인하여 포화영역이 90[°C]때 300[V/mm]에서 110[°C]때 200

[V/mm]로 저전계 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

3-2. 전기전도의 온도의존성

(1) 저온영역의 전기전도

그림 3-4, 5는 측정온도 20, 35[°C]에서 점도 1,

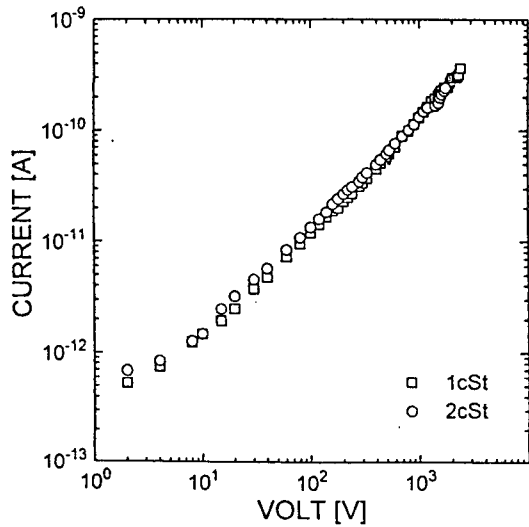


그림 3-4. 20[°C]때 전기전도특성
Fig. 3-4. Electrical conduction characteristics at 20[°C]

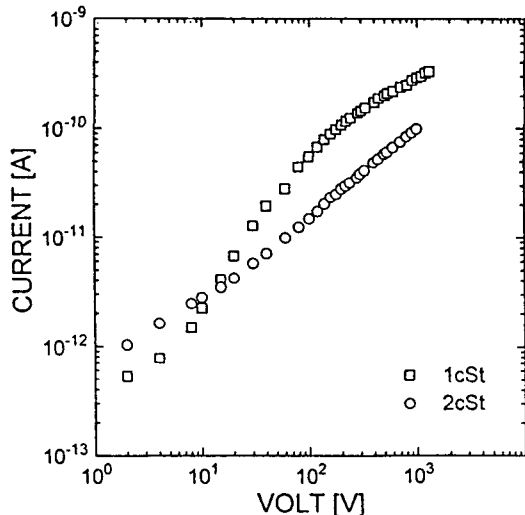


그림 3-5. 35[°C]때 전기전도특성
Fig. 3-5. Electrical conduction characteristics at 35[°C]

2[cSt]의 전기전도 온도의존특성을 나타내고 있다.

그림3-4의 저전압영역의 전도전류값은 점도가 2[cSt]의 경우가 1[cSt]보다 약간 크지만, 증가 현상은 거의 비슷하고 700[V]이상에서는 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

이것은 온도 20[°C]의 경우 전도전류의 주 기여가 이온 및 불순물에 의한 것이므로 점도 1[cSt]보다 많은 이온과 수분등을 포함하고 있는 2[cSt]에 큰 전류가 흐른 것으로 생각된다.

그러나 그림 3-5은 그림 3-4와는 다른 전압 - 전류특성을 나타내는데, 이것은 silicone oil의 구조식 $[-CH_3-SiO-CH_2-]_n$ 에서 n이 증가하면 분자의 길이도 길어지고 점도도 증가하게 된다.

일반적으로 이온의 이동도는 분자량 증가에 따라 감소 하는데, 특히 직쇄상 지방족 알콜의 이동도는 분자량에 반비례 한다고 보고하고 있다. 그러나 silicone oil의 경우 분자량의 의존성은 크지않고 분자량에 $-(1/3)$ 승에 비례한다고 보고 하고 있다. 그런데 점도 1[cSt]의 분자량은 236.6 이고 점도 2[cSt]의 분자량은 384.86이므로 크게 영향을 미치지 못한다.

특히 액체 유전체의 저온 저전계 전도특성은 주로 이온 및 쌍극자 그리고 불순물에 의한 기여로 15[V] 이하에서는 캐리어의 밀도가 높은 2[cSt]의 전도전류가 1[cSt]보다 크지만, 15[V]이상 전계에서는 점도 1[cSt]의 인화점이 35[°C]임을 고려할때 열에너지에 의하여 캐리어의 이동이 용이해져 안정된 2[cSt]보다 큰 전도전류가 흐를 것으로 사료된다. 또한 200[V]에서는 약 4배정도 큰데, 이것은 고온 고전계에 의한 캐리어의 밀도와 이동도가 증가되었기 때문으로 사료된다.

(2) 고온영역의 전기전도

그림 3-6, 7은 온도 50, 80[°C]에서 점도 2, 5[cSt]의 전압 - 전류특성을 나타내고 있다.

그림 3-6에서 낮은 전압의 경우 점도 5[cSt]가 2[cSt]보다 큰 전도전류값을 갖지만 전압의 증가에 따라 차이가 적어지면서 약 1,000[V]정도가 되면 일치하고 있다.

이것은 5[cSt]가 2[cSt]보다 이온 및 불순물 등 캐리어의 밀도가 높기 때문에 낮은 전압에서는 차이가 크지만 전압이 높아지면 2[cSt]가 열에너지와 전계에 의하여 불순물 준위에 포획된 캐리어들이 쉽게 해방 됨으로 전도전류 차이는 줄어든다.

그림 3-7은 온도 80[°C]에서 점도 2[cSt]와 5[cSt]

의 전압 - 전류특성으로 2[cSt]가 5[cSt]보다 큰 전류가 흐르는 것을 확인 할 수 있다.

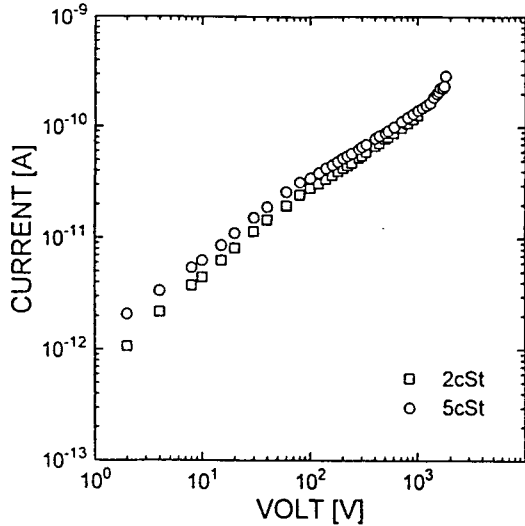


그림 3-6. 50[°C]때 전기전도특성
Fig. 3-6. Electrical conduction characteristics at 50[°C]

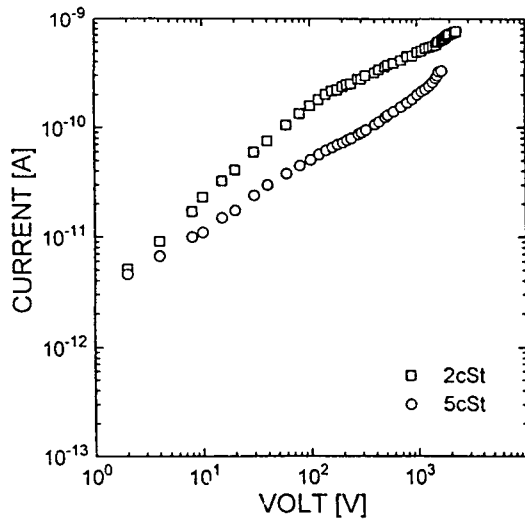


그림 3-7. 80[°C]때 전기전도특성
Fig. 3-7. Electrical conduction characteristics at 80[°C]

일반적으로 저온 저전계에서는 silicone oil의 경우 이온 및 쌍극자에 의한 전류가 흐르는 것으로 보고 되고 있다. 한편 전도전류 $J = env$ 로 만약 n 이 일

정하다면 캐리어 속도 v 에 의해 결정된다. 그리고 carrier의 이동속도 $v = \mu E$ 로 점도에 반비례 하며, 점도는 분자량에 비례 한다. 따라서 J 는 분자량에 반 비례하나 저온에서는 이동도 보다 밀도에 의한 기여가, 고온 고전계에서는 밀도 보다는 이동도의 기여가 클것으로 사료된다.

그런데 점도 2[cSt]의 인화점은 75[°C]임을 생각할 때 측정온도 80[°C]는 2[cSt] 액체 유전체의 인화점 보다 높게 됨으로 열에너지와 전계에너지에 의한 이온의 이동이 용이해지고 또한 트랩이나 구속으로부터 캐리어가 해방되어 밀도가 높아지고 이동도가 증가됨으로 인하여 전도전류는 큰 것으로 사료된다.

또한 2[cSt]에서 약 300[V]의 경우는 액체 유전체의 포화영역이 나타나는데, 이 전계의 크기는 이미 E.Gray와 T.J.Lewis 등이 보고한⁽⁶⁾ 전계값과 매우 잘 일치하고 있다. 이것은 캐리어의 주입에 의해 유기되는 액체의 유동속도가 전계상승으로 인하여 포화되기 때문에 상대적으로 이동도가 감소하여 포화영역이 나타나는 것으로 사료된다.

4. 결 론

열적특성과 전기적특성 및 안전성이 우수하여 이동용 변성기기에 사용되고 있는 실리콘유의 전기전도특성에 미치는 점도의 영향을 조사한 결과

1. 점도의 증가에 따라 절연용 실리콘유는 시료내에 포함된 이온, 수분 및 쌍극자 등이 증가함에 따라 전도성이 커짐을 확인하였다.
2. 점도가 1[cSt]는 저온저전계에서 낮은 전도율을 나타내는데, 이것은 캐리어의 밀도가 낮기 때문인 것으로 사료된다.
3. 점도 2, 5[cSt]에서 고온에서 측정한 경우 포화영역이 관측되는데, 이것은 액체유전체의 특수성 때문으로 생각된다.
4. 인화점 이하에서는 큰 점도 시료의 전도전류가 크고, 인화점 이상에서는 반대현상이 나타남을 확인할 수 있었다.

References

1. A. C. M. Wilson : "Insulating liquid their used, manufacture and properties", PEREGRINUS LTD, pp 4 - 18 (1980)
2. 犬石嘉雄 外; "誘電體現象論", 日本電氣學會, pp

- 242 - 255, (1990)
3. N. YOSHITAKA, A. YOSHINORI ; Polarity Effect on Breakdown Voltage in Organic Liquids, IEEE, trans. EI - 11, 3, pp 91 - 94 (1976)
 4. T. Okayama, M. Sone, H. Mitsui and S. Itaharashi ; Effects of Dissolved Water in Insulator Silicon Oil on Electrical conduction, proceedings of the 3rd International conf. on properties and Applications of Dielectric Materials , 1, pp 249 - 252 (1991)
 5. Werner F. Schmidt ; Electrons in Non - polar Dielectric Liquids, IEEE, trans. 26, 4, pp 560 - 567 (1991)
 6. H. Borsi ; Dielectric Behavior of Silicone and Ester Fluids for Use in Distribution Transformers, IEEE Trans. Elect. Insul., Vol 26, 4, pp 755 - 762 (1991)
 7. T. SATO and S. SAKAMOTO ; Measurement of dielectric liquid motion under electrostatic stress by a laser-Doppler method, J. Phys. D ; Appl. Phys., 4, pp 138 - 140 (1971)
 - 8.) 電氣學會 : “放電ハンドブック”, 電氣學會出版部 , pp 505 - 550 (1978)
 - 9.. N. Tsuchida, M. Ueda ; Measurement of carrier mobility in Silicone Oil by thin film, trans. of IEE Japan 54 - A69 pp 535 - 542 (1979)
 10. M. SILVER and D. G. ONN ; Steady-state ad Transient current in Organic Liquids by Injection form a tunnel cathode, J. Appl. Phys., 40, 5, pp 2222 - 2226 (1969)

저자 소개



조경순
1968년 6월 14일생. 1991년 광운대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

신종열



1957년 11월 19일생. 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1997년 광운대학교 산업정보대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년-현재 삼육대학교 병설 전문대학 자동차정비과 전임강사.

이충호



1944년 4월 27일생. 1972년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1980년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 강원대학교 대학원 박사과정. 1974-현재 충주산업대학교 전기공학과 교수. 1983- 1984년 미국 조지아공대 직업교육 연수.

이수원



1940년 9월 1일생. 1963년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1978년 동국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 1978년-현재 철도전문대학 전기제어과 교수. 1984년 미국 조지아주 Atlanta G.I.T. Technology of Computer Application 과정 수료.

홍진웅



1955년 2월 23일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대학교 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과(박사). 1992년-93년名古屋대학 객원 연구원. 1997년 현재 광운대학교 전기공학과 부교수(신기술연구소). 당 학회 재무이사.