

대용량 변압기유의 전기적특성에 관한 연구

A Study on the Electrical Properties of Transformer Oils for Large Power

이 용 우* · 김 왕 곤** · 홍 진 응***

Yong-Woo LEE · Wang-Kon KIM · Jin-Woong HONG

(1996년 3월 16일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

ABSTRACT

In order to investigate the electrical properties of transformer oils for large power, the characteristics of AC and Impulse breakdown in gap length of 1.0~2.5mm and that of volume resistivity were researched in temperature range of 20~100°C. An geometrical capacitance of electrode with coaxial cylindrical shape for measuring the volume resistivity was 16pF, and highmegohm meter with model no. VMG-1000 was used, and also the applied voltage were DC 100, 250 and 500V.

In the dependance of breakdown characteristics due to electrode gap length, it was confirmed that breakdown voltage was nearly uniform by volume effect according to the increase of gap. In the characteristics for AC breakdown, the dielectric strength was increased to 90°C but decreased over 90°C, and also in case of impulse breakdown, it was increased to 70°C and decreased over 70°C in temperature range.

The calculated mobility of oils in the characteristics for impulse breakdown were about $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$, and the value of volume resistivity was almost invariable in low temperature range, regardless of voltage by the stable thermal properties, and it indicated a peak at 50°C and had a sudden change to decrease over that temperature, and also the value of volume resistivity in 250V/mm at 80°C is suitable for the international electrical standards, it was confirmed.

* 충남전문대학 전기과

** 서울산업대학 전기공학과

*** 광운대학교 공대 전기공학과, 신기술연구소

1. 서 론

산업사회의 발달과 경제성장으로 전력수요는 매년 지속적인 증가로 현재의 154kV와 345kV 계통으로는 전력수송에 한계에 도달되므로 우리나라도 멀지 않아 송전전압이 765kV로 초고압화되고, 전력계통의 변성기기는 거대화 되므로 인하여 변성기기의 절연 및 냉각용 액체 절연유의 역할이 중요하여 최근 관심이 매우 높아지고 있다^{1,2)}.

일반적으로 액체 절연체중 유입 전력기기에 주로 사용되고 있는 것은 원유를 정제하여 얻은 탄화수소를 주성분으로 한 광유를 사용하고 있는데, 액체 절연체의 전기적 특성은 dust particle, 용해가스, 수분, 전해성 물질 등 불순물의 영향을 쉽게 받으므로 절연 특성이 나빠지면 사고의 원인이 되어 안정성은 물론 계통의 신뢰도가 낮아진다^{1,3)}.

특히 액체의 절연과피 실험은 최근 계측기술의 발달로 정확도가 높은 정보 수집을 직접적으로 얻을 수 있어 급속히 발달하고 있다. 그리고 절연유의 체적고유저항 측정은 절연성 시험의 비파괴 측정 방법중 하나로 절연성을 나타내는 척도인데 액체의 특수성 때문에 실제 측정에서 많은 어려움을 동반한다^{1,4,5)}.

본 실험에서는 전력변성기에서 주종을 이루는 나프텐계 변압기유를 선택하여 시료로 사용하였는데, 실제 실용상에서 이용되고 있으므로 약간의 불순물이 자연적으로 포함될 수 있다.

그리고 실험은 기초 물성 실험과 전기적 특성 실험을 실온부터 100℃ 온도 범위에서 교류 및 Impulse 전압의 절연과피 특성과 절연유의 전기 절연성을 표시하는 체적 고유저항특성을 측정온도 20~120℃ 범위에서 직류전압 100, 250, 500V를 인가하며 조사하였다. 이상의 실험으로부터 실용 변압기유의 전기적 성질을 조사하여 절연특성에 미치는 하전 입자의 거동에 대하여 보고한다.

2. 사용시료 및 실험

2.1 사용시료

광유는 원유의 종류와 제조방법에 따라 조성이 다르며, 현재 절연유를 크게 대별하면 나프텐계, 파라핀계, 방향족계로 나누어지고 있는데, 좋은

등급의 나프텐계 원유의 생산은 점점 줄어들고 있으므로 파라핀계에 대하여 새로운 관심을 갖는다.

광유는 나프텐계 원유로부터 고도 정제하여 제조된 변압기유로 변압기 내에서 발생하는 gas 흡수성이 양호하며 미세입자가 적어 절연과피전압이 높고, 체적고유저항이 우수하며 그리고 열 안정성 및 산화 안정도가 높아 변압기의 수명연장, 유동점이 낮아 혹한지역에서도 우수한 성능을 발휘하는 저점도이며 유동성이 좋고 냉각성도 탁월한 특징을 갖고 있어야 한다고 KS, IEC, JIS, ASTM 등 국내의 규정에 품질규격에 정하고 있다.

시료는 순수 국산으로 D사 탄화수소로 조성된 절연유로 일체 첨가제를 넣지 않은 것을 선택하였으며, 기초 물성은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of oil for test

Transformer Oils		
Specific gravity		0.898
Viscosity (cSt)	40℃	11.4
	75℃	4.33
Pour point		-35℃
Cloud point		-30℃
Flash point		150℃
Evaporation loss (98℃×5H)		0.18
Corrosive sulfur		None
Dielectric strength (2.5mm)		min. 40kV
Oxidation stability	Sludge %	0.24
	Acid No.	0.26
Water constant(ppm)		18
Color(ASTM)		L 0.5
Volume resistivity (80℃)		$1 \times 10^{11} \Omega \text{cm}$

광유계 절연유 속에 포함된 탄화수소는 매우 복잡한 이성체로 구성되어 화학구조를 아는 것은 불가능하고 Type으로 분류하고 있다.

2.2 실험

2.2.1 실험 방법

절연유의 전기적 특성을 조사하기 위하여 절연과피특성은 gap변화와 온도변화에 따른 절연과피 강도 및 전압 의존성을 실험하였고, 체적 고유저항은 전압 변화에 따라 실험하였다.

1) 절연파괴실험

절연유 절연파괴 실험법에는 여러방법이 있는데, 교류 절연파괴 실험은 KS, IEC, JIS, ASTM 등에 명기되어 있고, Impulse 절연파괴 실험은 ASTM에만 규정되어 있어서, 본 실험에서도 AC 와 Imp. 절연파괴 특성에 대하여만 조사 하였다.

AC 절연파괴 실험은 전극의 간격을 마이크로메터를 이용하여 조절하고, 직경은 12.5mm의 구전극을 사용했으며, 전압 상승율은 매초 약 3000V 비율로 전압을 높이면서 절연파괴 될때까지 전압을 인가하고서 절연파괴 강도를 측정하였다.

AC 절연파괴 실험은 MUSASI Co. Ltd. Model IP-5005s type의 기기를 사용했으며, 양극간 출력 전압은 50kV까지 사용이 가능하고, 전극장치의 온도 조절장치는 연구실에서 자체 제작하였다. 한편, Imp. 절연파괴 측정은 Pulse Electronic Engineering Co. Ltd. Model IVG-600을 사용했으며 인가 최대전압은 480kV이다. 실험에 사용된 전극의 구성은 12.5mm ϕ의 구대구 전극을 사용했으며, 시료의 온도조절은 디지털 온도조절계를 이용한 히터로 측정온도 20℃~200℃를 유지할 수 있도록 자체 제작 하였고, 전극간 간격은 마이크로메터를 사용하여 조절하였으며, AC절연파괴 측정장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

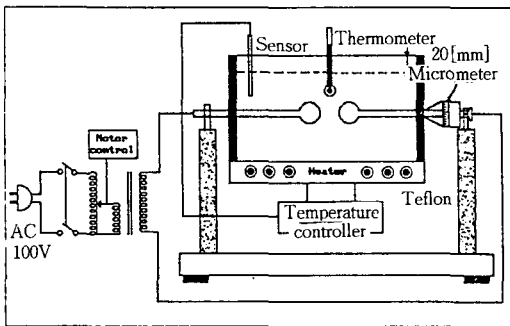


Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus (AC)

2) 체적고유저항 실험방법

시료의 체적저항 측정은 비파괴적인 전기 절연성을 평가하는 방법으로 전기 절연유의 체적 고유저항 측정은 직류전계 250V/mm를 인가하고 1분후 전류값을 측정하여 체적 저항율을 구하는 방법을 사용한다.

본 실험에서는 VMG-1000 Highmegohm meter를 사용하였으며, 전압은 직류 100, 250, 500V를 인가하였고, 온도 20℃~120℃ 범위에서 저항을 측정하였으며, 체적 고유저항은 식(1)로 부터 얻었다.

$$\rho = \frac{S}{t} \cdot R_v [\Omega \cdot \text{cm}] \dots\dots\dots (1)$$

여기서, R_v =절연체의 지시[Ω], S =주전극의 면적[cm²], t =시료의 두께[cm]이고, 그리고 측정 장치의 구성은 Fig. 2와 같으며, 사용전극은 16pF의 동축 원통형 전극을 사용하였다.

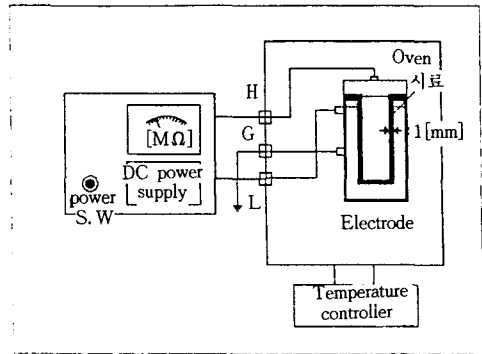


Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus for volume resistivity

3. 실험결과 및 검토

3.1 시료의 물성

변압기유의 물성 조사는 광학적 분석을 이용해서 적외선 Spectrum 및 Nuclear Magnetic Resonance(NMR) spectrum을 측정 절연유의 종류를 구분하였다.

적외선 흡수 Spectra를 사용한 절연유의 식별은 파수 1600cm⁻¹에서 흡수가 없으면 3종이나 6종이다. 그러나 흡수가 있고 파수 1700cm⁻¹~2000cm⁻¹에 4개의 흡수가 있으면 2종이나 5종이 되고 흡수가 없고 파수 1630cm⁻¹에서 흡수가 있으면 4종, 없으면 1종으로 구분된다.

본 실험에서 시료의 IR 특성도는 Fig. 3과 같으며, 사용전후의 큰 차이는 파수 1742.6cm⁻¹에서 피크 진폭이 커짐을 확인할 수 있었는데, 이 피크

는 C=O기의 기여로 원시료를 실온에서 120°C 범위의 공기중에서 실험한 시료이므로 산소와 접촉으로 인하여 열노화가 진행되어 카보닐기가 증가된 것으로 사료된다.

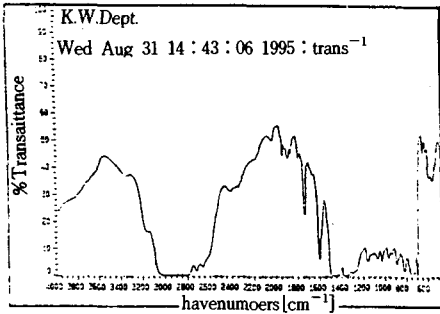


Fig. 3 Infra-red spectrum of specimen

Fig. 4는 ¹H-NMR을 이용 0~10ppm사이에서 시료의 spectrum이다.

광유계 절연유 속에 포함된 탄화수소는 매우 복잡하고 많은 이성체로 이루어져 있어 화학구조를 아는 것은 불가능하고 Type으로 분류하고 있다. 따라서 사용 절연유의 형태를 구분하기 위해 NMR spectrum을 조사하였다.

용제는 CDCl₃를 사용했으며 7.188ppm에서 용제의 피크가 나타나고, 그리고 내부기준으로 Shift δ=0이다.

한편 2.295ppm에서 피크를 제외한 최소값으로 이것을 기준으로 하여 H의 수량을 정산하여 그래프 위에 표시하였다.

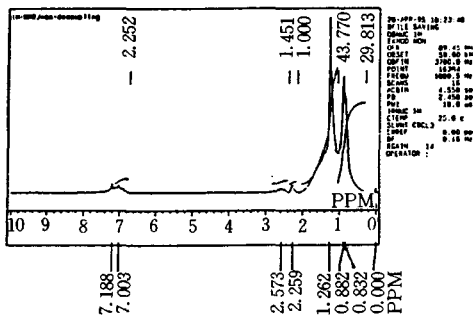


Fig. 4 Nuclear magnetic resonance spectra of specimen

한편 시료의 물성연구로 IR과 NMR를 이용하였는데, 이들의 결과를 응용하여 시료의 형태를 구분하기 위해 두가지 방법을 이용한 Flow-Chart를 작성하여 분석한 결과 시료의 구분은 제1종 절연유임을 확인하였다.

그리고 시료의 분자량을 조사하기 위해 Shimadzu Co. Gas Chromatograph-Mass spectrometer를 사용 측정된 시료의 분자량은 약 260 정도이고, 비중은 0.88~0.9 정도임을 확인하였다.

3.2 절연파괴 특성

액체 절연체는 불순물과 주위의 영향을 쉽게 받으므로 전기적 특성에 큰 영향을 미친다. 이론적으로 액체 절연체의 절연파괴나 전기전도의 연구를 하기 위해서는 액체 시료를 매우 순수하게 정제하여 실험에 이용하고 있으나, 본 실험에서는 실용성을 확보하기 위해서 현장에서 사용되고 있는 동질의 변압기유를 시료로 선택하여 절연파괴 특성을 조사하였다.

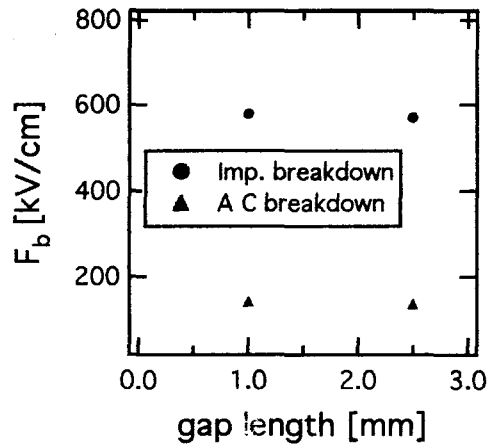


Fig. 5 Gap length dependence of dielectric strength (AC. Imp.)

3.2.1 절연파괴 강도의 갭길이 의존성

순수 액체 유전체의 파괴전압에 관한 많은 data가 발표되고 있지만, 본 실험에서는 오히려 자연

적으로 불순물이 포함된 상태에서 사용되고 있는 절연유의 data가 필요하다. Fig. 5는 실온에서 gap 변화에 따른 교류 및 Impulse 절연파괴 강도를 도시한 것이다.

일반적으로 gap길이가 커지면 절연파괴강도는 변화하는데, 갭길이가 증대되면 절연파괴강도는 저하한다.

Goodwin, Edwards, Sharbaugh, Crowe, Liewis 등은 gap길이와 절연파괴강도 1mm 이하의 작은 gap에 있어서 구형파 펄스전압 인가시 gap길이가 적어짐에 따라 절연파괴강도가 급격히 증가됨을 보고 하고 있다⁶⁾.

그러나 본 실험의 gap길이가 의존특성에서 AC의 경우 gap을 1.0mm에서 2.5mm로 커짐에 따라 절연파괴 강도는 약간 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

본 실험에서도 체적 효과의 영향으로 절연파괴 강도는 적어지는 것으로 사료된다. 그리고 절연파괴 강도 F_b 는 AC보다 Impulse가 4배이상 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 절연파괴 실험시 전압 인가 시간이 길어짐에 따라 F_b 와 t (인가시간)의 관계에서 F_b 는 t 의 $-1/4$ 승에 비례하므로 AC 절연파괴 강도는 Imp 절연파괴 강도보다 매우 적어짐을 확인할 수 있다⁸⁾.

그리고 AC의 절연파괴 시간은 Imp.의 절연파괴 시간보다 긴시간이 요구되므로 앞에서 논한 전도 및 파괴기구가 작용하여 공간전하가 작용하기 때문으로 생각된다³⁾.

3.2.2 절연파괴 강도의 온도 의존성

1) 교류전압의 절연파괴 특성

상용 주파수 교류전압을 전극에 인가하면 불순물에 의한 영향으로 파괴전압이 변동하기 쉬우나, Impulse의 경우는 이와 같은 영향이 비교적 적어 절연파괴의 본질을 연구하는데 많이 이용되고 있다.

Fig. 6은 탈기하지 않은 자연상태 신유의 절연파괴 특성을 전극 간격 1mm에서 AC 전압의 절연파괴 특성을 도시한 것이다.

실험에서 온도가 높아지면 절연파괴 강도 F_b 는 온도 80℃까지는 서서히 증가되다가 80℃ 이상이 되면 갑자기 커지면서 Peak를 나타낸 후 감소하는 특성을 나타낸다.

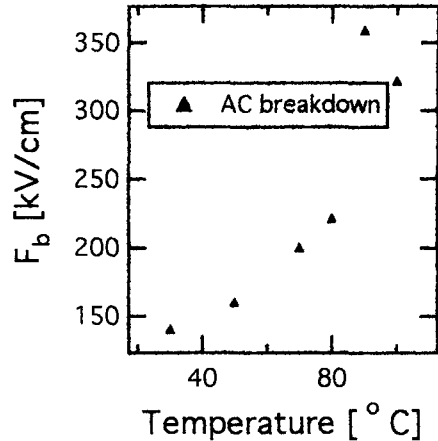


Fig. 6 Temperature dependence of AC dielectric strength

HEINO는 절연유의 온도의존성에서 절연유와 전극을 충분히 탈기시키면 절연파괴 전압은 온도의 영향을 받지 않는다고 보고했는데, 크기는 약 10% 정도이다⁶⁾.

그러나 실험시 탈기하지 않고 절연파괴 실험을 하였고, 또한 온도상승시 시료의 유동성이 좋아지므로 90℃까지는 절연파괴 강도가 증가됨을 확인할 수 있었다.

鳥山은 변압기유에 대하여 상용주파수의 전압 인가시 절연파괴 특성을 연구하였는데, 80℃~90℃에서 파괴전압이 극대로 됨을 보고하고 있다⁶⁾.

본 실험의 경우 시료내 용해된 공기가 측정온도가 높아짐에 따라 외부로 방출되기 쉬워져, 약간의 탈기현상과 대류현상으로 불순물의 영향을 적게하므로 인하여 절연파괴 강도는 증가된 것으로 생각된다.

그러나, 90℃이상에서 절연파괴 강도의 감소는 액체 분자가 해리 되거나 전극으로부터 전자주입이 용이해져 시료내 캐리어가 증가되어 급격히 감소하는 전자적 파괴가 발생하기 때문에 절연파괴 강도는 감소된 것으로 사료된다.

2) 임펄스 전압의 절연파괴 특성

Fig. 7은 인가전압이 Imp.로 절연파괴 강도의 온도의존성으로 그림에서 상온이상 70℃까지는 매우 급하게 증가되어 파괴강도 1400kV/cm에서 거

의 일정한 포화특성을 나타내고 있다. 또한, 절연 파괴 강도도 AC 절연파괴 강도보다 매우 높음도 확인할 수 있다.

Impulse 절연파괴 강도는 온도 90°C 이하 영역에서 AC 절연파괴 강도보다 약 4배정도 큰데, 이것은 절연파괴에 이르는 시간이 AC의 경우 십수초 걸리지만 Imp.의 경우는 μsec 정도로 매우 짧기 때문에 AC의 경우는 불순물이 전기전도의 증가를 촉진시키고 또한 긴 절연파괴의 시간으로 전극으로부터 공간전하가 시료 내부에 존재하기 때문에 절연파괴 강도는 Imp. 보다 낮다.

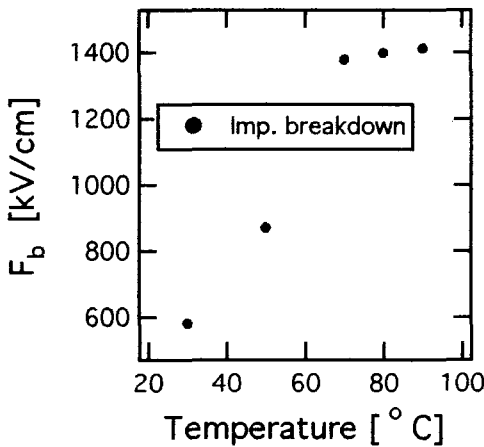


Fig. 7 Temperature dependence of impulse dielectric strength

그러나 Imp.의 경우는 gap 길이가 2.5mm인 경우 파괴시간이 수십 μsec 이고 1.0mm의 경우는 수 μsec 로 AC보다 매우 짧기 때문에 이들의 영향을 무시할 수 있어 순수한 전기절연성을 연구하는데 중요시 한다.

한편, 파괴전압은 전압 인가와 동시에 발생하는 것이 아니고, 절연파괴까지 시간지연이 관측되는데, 같은 전극에서 액체의 종류에 관계없이 유사한 특성을 나타내고 파괴전압은 필스폭에 관계없는 한계의 지연시간은 약 1 μsec 되며 절연유의 경우 15 μs , n-헥산은 5~15ns의 크기를 갖는다고 보고하고, Rudenko는 필스폭이 $10^{-8} \sim 10^{-7}\text{sec}$ 의 구형파 전압을 이용한 실험에서 지연시간은 0.1~10 μs 를 얻었다⁶⁾.

그리고 여기서 지연시간 τ [sec], 전극간격 l [cm], 파괴전계 E [V/m]라면 전하의 이동도 μ [cm^2/VS]는 다음 식(2)에서 구할 수 있다¹¹⁾.

$$\mu = \frac{l}{E} \cdot \tau \dots\dots\dots (2)$$

실험에서 전극간격 1mm때 온도 30°C, 50°C, 90°C로 높아짐에 따라 이동도 μ 는 $2.36 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{VS}$, $6.95 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{VS}$, $7.2 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{VS}$ 를 각각 얻었다.

그리고 전극간격 2.5mm때 $8.03 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{VS}$ 를 얻었다.

3.2.3 체적 저항 특성

시료의 유동대전등 변압기유의 절연성 평가방법 중 체적저항 또는 체적고유저항을 평가하는 방법이 있다. 체적저항의 측정방법은 직류전압을 인가하고 그때 흐르는 전류를 측정하여 저항값을 구하고 저항값으로부터 체적저항의 크기를 찾는다. 이때 온도 의존성과 전압 의존성을 조사하기 위해서 일정한 온도에서 전압을 인가한다. 직류전압을 절연유에 인가하면 충전전류와 흡수전류가 흐르다 음 누설전류를 측정해야 되므로 본 실험에서는 전압 인가후 약 10분 정도의 일정한 시간이 경과한 후 값을 취하였다.

Fig. 8은 직류전압 100, 250, 500V인까지 측정온도 20~120°C 범위에서 체적저항을 도시한 그림이고, 이때 사용한 전극은 가드링이 있는 동심원통형 전극을 사용하였고 전극간 간격은 1.0mm 정도이다.

그림에서 40°C 이하 저온영역에서는 인가전압이 100V에서 500V로 높아져도 일정한 크기를 나타내고, 측정온도가 50°C까지는 증가하나, 그 이상 온도영역에서는 급격히 감소하고, 100°C 이상이 되면 체적 저항은 최저값을 나타내면서 일정한 크기를 나타낸다.

저온(40°C 이하) 영역에서 전압이 높아져도 체적저항이 일정한 것은 변압기 절연유의 안정성을 나타내는 것으로 측정온도의 영향을 받지 않는 영역으로 사료된다. 그러나 온도가 높아지면 50°C에서 체적저항 값이 최대로 나타난 후 감소하는데, 이것은 변압기유의 물성특성에서 온도의 증가로 시료내의 미결합 부분이 열에너지의 영향으로 결합되거나 또는 절연유의 유동성등이 증가되고 시

료내부에 존재하는 가스가 쉽게 외부로 방출될 수 있으므로 절연성이 향상되나, 이보다 온도가 더욱 높아지면 유동성은 더욱 좋아지지만 시료내부에 있는 쌍극자나 이온 및 액체내 trap된 전자들이 열 여기 및 배향이 용이해지므로 캐리어의 밀도가 커져 도전율이 급격히 상승되고 동시에 전극으로부터 전자주입이 매우 활발해져서 더욱 도전율이 증가되므로 고유저항 값은 적어진다. 그러나 100°C 이상이 되면 이들의 모든 현상이 포화되므로 인하여 최저값을 나타내고 포화특성을 나타낸다.

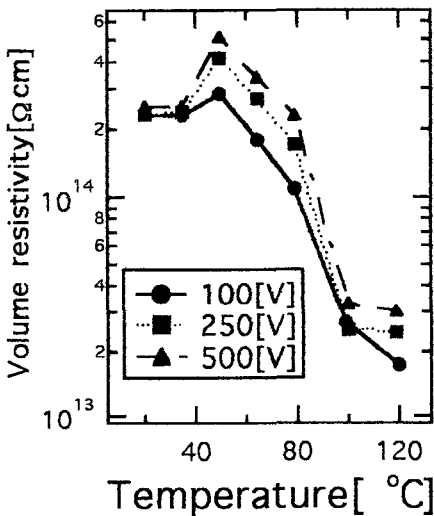


Fig. 8 Temperature dependance of volume resistivity

특히, 규정에 따른 체적고유저항 측정은 80°C에서 인가전계 250V/mm로 되어 있고, 이때 체적저항값은 $5 \times 10^{13} \Omega \text{cm}$ 이상이 되어야 한다.

본 실험에서 얻은 시료의 측정값은 Fig. 8에서 알 수 있듯이 80°C 전계 100V/mm때 체적저항 $1 \times 10^{14} \Omega \text{cm}$, 250V/mm때 $1.7 \times 10^{14} \Omega \text{cm}$, 500V/mm때 $2.2 \times 10^{14} \Omega \text{cm}$ 로 모두 규정값 이상임을 확인하였다.

4. 결 론

대용량 전력 변성기기의 절연 및 냉각용으로 사용되고 있는 변압기유의 전기적특성에 관한 실험한 결과

- 1) $^1\text{H-NMR}$ 과 IR로부터 절연유를 구분한 결과 제 1종 절연유임을 확인하였다.
- 2) gap 길이의 절연파괴 의존성에서 길이가 커짐에 따라 체적효과로 거의 일정하거나 약간 감소하는 경향을 확인하였다.
- 3) AC 절연파괴 특성에서 90°C까지는 증가하고, 90°C이상 온도영역에서는 감소됨을 확인하였다.
- 4) Imp. 절연파괴 특성에서는 70°C까지는 증가되고, 70°C이상 영역에서는 포화됨을 확인하였다.
- 5) Imp. 절연파괴 특성에서 계산된 이동도의 크기는 약 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{cm}^2/\text{VS}$ 정도 얻었다.
- 6) 체적저항특성에서 저온영역은 안정된 열특성으로 체적저항은 전압에 무관하고 일정하며, 온도 50°C에서 최대값을 나타낸후 급격히 감소됨을 확인하였으며, 80°C 250V/mm에서 체적저항은 국제규격에 적합함도 확인하였다.

본 연구는 1994년도 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1) A Sierota and J. Rungis : Electrical Insulating Oils, Part I Characterization and Pre-treatment of New Transformer Oils, IEEE. Elec. Insul. Magazine, 11, 1, pp. 8~20, 1995.
- 2) M. Pompili, C. Mazzetti and R. Bartnikas ; Early Staages of Negative PD Development in Dielectric Liquids, IEEE. Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 2, 4, pp. 602~613, 1995.
- 3) 大久保 仁, 寺西 常治 ; 油中絶縁における破壊と空間 電荷, 静電気學會誌, 14.1. pp. 16~24, 1990.
- 4) 大橋 朝夫, 渡邊茂男 ; 液體の電気傳導および絶縁破壊, 静電気學會誌, 13, 2, pp. 126~131, 1989.
- 5) M. IKEDA et al ; Breakdown Characteristics of Moving Transformer Oil, IEEE Trans. on Power Appa. and Sys., Vol. PAS-100, 2,

- pp. 921~928, 1981.
- 6) 電氣學會放電 ハント“フ”ック 出版委員會 ; “放電ハント“フ”ック”, 電氣學會, pp. 551~581, 1973.
 - 7) T. Miyamoto and M. Tsuchie; Electrical Conduction in Insulating Oil, Jpn. JIEE., 98, 1, pp. 17~22, 1978.
 - 8) M. Ikeda, S. Menju, H. Murano; Break-down Probability Distribution and V-t characteristics of Transformer, Jpn. JIEE 95, 11, pp. 555~562, 1975.
 - 9) R. M. HAKIM; The Properties of an Insulating Oil and Its Fractions at low Temperatures, IEEE. Trans. Electr. Insul., EI-10, 4, pp. 124~134, 1975.
 - 10) F. M. Clark; Insulating materials for Design and Engineering Practice; New York, John & Wiley, pp. 169~180, 1962.
 - 11) 石油學會; 電氣絶縁油ハンドブック, 講談社, pp. 78~89, 1987.
-