

### 변압기유의 전기적인 특성 (III)

## Electrical Properties of Transformer Oils (III)

이 용우	광운대학교 전기공학과
조 돈찬	광운대학교 전기공학과
신 성권	광운대학교 전기공학과
이 재호	광운대학교 전기공학과
김 왕곤	서울산업대학교 전기공학과
홍 진용	광운대학교 전기공학과

YongWoo LEE	Dept. of Electrical Engineering, KwangWoon Univ.
DonChan CHO	Dept. of Electrical Engineering, KwangWoon Univ.
SungKwon SHIN	Dept. of Electrical Engineering, KwangWoon Univ.
JaeHo LEE	Dept. of Electrical Engineering, KwangWoon Univ.
WangKon KIM	Dept. of Electrical Engineering, Seoul Nat'l Polytechnic Univ.
JinWoong HONG	Dept. of Electrical Engineering, KwangWoon Univ.

### Abstract

In order to investigate the electrical properties of Transformer Oils, Volume Resistivity for transformer oils was made researches. in this paper, the specimen was produced by irradiation of electron beam, which is divided by the dose, 12[Mrad], 24[Mrad], 36[Mrad]. By investigating the electrical properties of dielectric liquid due to the difference of electron beam irradiation, the effect of electron beam irradiation was studied.

To measure the physcial properties of transformer Oils, Fourier transfer infrared spectroscopy was investigated. And the study for the electrical properties of dielectric liquid was made by measuring volume resistivity of specimen. the Electrode for the measuring Volume resistivity is formed coaxial cylindrical shape, and its geometric capacitance is confirmed to 16[pF].

In this experiments, Highmegohm meter which is model VMG-1000, was used for the measuring volume resistivity. the applying voltages were DC 100, 250, 500, 1000[V] in the temperature range of 20~120[°C].

By means of the result from this experiment, the movement of carrier and the physcial constants to contribute dielectric properties is introduced.

게 될 전망이므로 우리나라도 곧 초고압송전화가 이루어져야 할 단계에 이르렀다. 이에 부응하여 전력계통의 변성기기는 거대화 되고, 이로 인해 변성기기의 절연 및 냉각의 역할을 담당하는 액체 절연체에 대한 관심이 높아지고 있다.

변성기기의 절연과 냉각에 이용되는 액체 절연체는 주로 변압기유가 사용되고 있으며, 변압기유의 체적 고유저항 측정은 절연시험중 비파괴 시험으로써 변압기유의 절연성을 나타내며 신뢰성을 판단하는 요소로 알려져 있다. 본 실험에서는 전력기기에 사용되고 있는 변압기유를 시료로 선택하여 전자선을 조사함으로써 야기되는 변형된 변압기유의 가교나 분해반응으로 인한 열화가 변압기유의 체적 저항에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 순수한 변압기유뿐만 아니라 변압기유에 전자선 조사를 이용한 가공을 통하여 물성적, 전기적인 특성의 변화를 조사하므로써 변압기유의 절연성에 영향을 미치는 요인들을 분석하였다.

본 실험에서는 <sup>1</sup>H-NMR과 FTIR을 이용하여 순수한 시료와 전자선 조사된 시료의 물성을 분석하였고, 전기적인 특성 실험은 변압기유의 체적 고유저항을 측정하였다. 그리고 실험결과를 바탕으로 변압기유의 체적 고유저항의 변화와 온도, 전압 변화와의 상관관계에 대하여 보고한다.

### 1. 서론

현대 사회에서 전기에너지는 경제적인 면에서나 환경적인 면에서 상당히 중요한 역할을 담당하고 있다고 해도 과언은 아니다. 더욱이 산업사회의 발달과 고도의 경제발전으로 인한 전기에너지 수요 증가로 현재 154[kV]와 345[kV]의 송전전압 계통으로는 전력 공급의 한계에 이르

### 2. 사용시료및 실험방법

#### (1) 사용 시료

실험에 사용된 변압기유는 나프텐계 원유에서 제조된 것으로 일체의 첨가제는 넣지 않았다. 시료는 순수 국산으로 동남석유공업(주) DNI-1 4호로 탄화수소로 조성된 것을 선택하였으며, 시료의 기초물성은 표 1과 같다.

Table 1. Physical Properties of specimen

Transformer	Olis
Specific gravity	0.898
Viscosity [cSt]	40[°C] 10.5
	100[°C] 2.5
Pour point	-35[°C]
Flash point	150[°C]
Corrosive sulfur	None
Dielectric strength (2.5[mm])	6.0 [kV]
Volume resistivity	Over $1 \times 10^{14} [\Omega \text{cm}]$

시료에 대한 전자선 조사는 전자선 가속기를 사용하였고, 전자선 조사 장치의 개략도는 그림 1과 같으며, 직경 12[cm] Pyrex schale에 시료의 높이가 4[mm]가 되도록 넣은 후, 전자선 조사 장치의 윈도우로부터 18[cm] 거리의 Conveyor에 올려 놓고 전자선을 조사하였다.

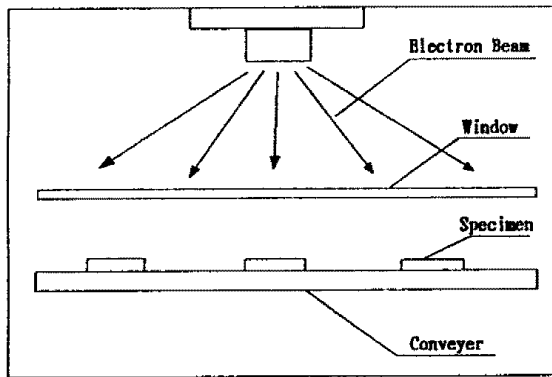


Fig. 1 Schematic drawing of Electron beam Irradiation

전자선 조사량에 따른 시료의 구분은 CTA선량계를 사용하여 전자선 조사 조건상수  $k$ 를 미리 구해 놓고, 인가 전류  $I$ 와 컨베이어 속도  $v$ 를 조절하여 전자선 조사량을 구분하므로써 시료를 분류, 제작하였다. 조사량에 따른 시료의 구분은 표 2와 같다.

Table 2. Classification of specimen

시료	인가에너지(E), 전류(I) conveyor speed(V)	양복 횟수	조사량 [Mrad]
No.1	Original	-	-
No.2	E=1[MeV], I=20[mA], V=5[m/min]	2	12[Mrad]
No.3	E=1[MeV], I=20[mA], V=5[m/min]	4	24[Mrad]
No.4	E=1[MeV], I=20[mA], V=5[m/min]	6	36[Mrad]

그리고 전자선 조사량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$D = k \frac{I}{v} \quad [\text{Mrad}]$$

여기서,  $D$ 는 전자선 조사량,  $I$ 는 인가전류,  $v$ 는 컨베이어 속도를 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

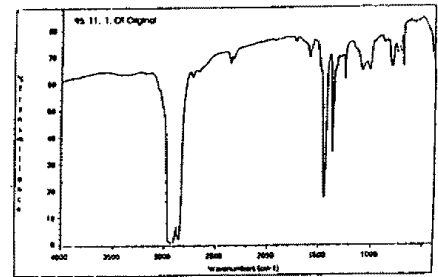
#### (1) 시료의 물성 분석

본 실험의 시료로 사용된 변압기유는 광유계 절연유로서 이속에 포함된 탄화수소는 매우 복잡하고 많은 이성체로

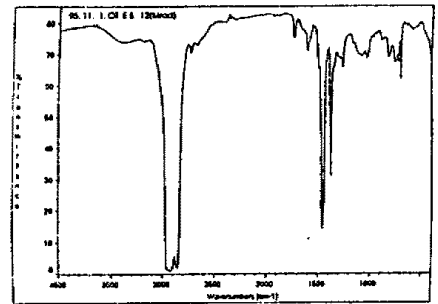
구성되어 있어 화학구조를 아는 것은 불가능하고, Type으로 분류하고 있다.

시료의  $^1\text{H-NMR}$  분석에서,  $\text{CDCl}_3$  용제를 사용하여 0~10[ppm]사이의 spectrum을 조사한 결과, 7.188[ppm]에서 피크는 내부 기준이며 Shift  $\delta = 0$  이고, 2.296[ppm]에서 피크는 용제를 제외한 최소값이며, 이것을 기준으로 H의 수량을 적산하였다.

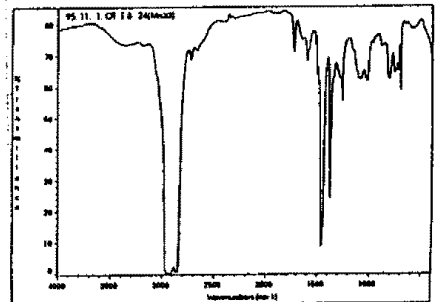
또한 변압기유의 전자선 조사량 변화에 따른 화학구조 변화를 조사하기 위해 FTIR spectrometer(MIDAC Co. model PRS)를 사용하여 분석한 결과, 원시료는 그림 2의 (a)와 같고, 12[Mrad], 24[Mrad], 36[Mrad] 조사된 시료는 각각 그림 2의 (b), (c), (d)와 같다.



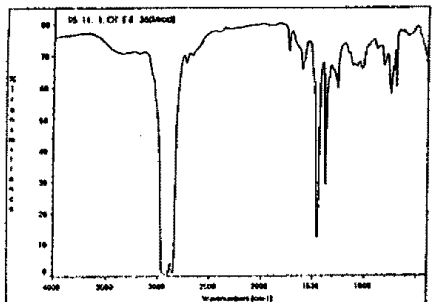
(a) Original specimen



(b) a specimen irradiated with 12[Mrad]



(c) a specimen irradiated with 24[Mrad]



(d) a specimen irradiated with 36[Mrad]

Fig. 2 Infrared spectrum of each specimen

원시료와 조사된 시료와의 차이점은 파수 2350[cm<sup>-1</sup>]에서 나타나는 질소계 화합물이 전자선을 조사시키면 모두 없어진다는 것으로 확인하였다. 일반적으로 질소계 화합물은 나프텐계 절연유에서 극히 미량이 첨가되는데, 이들은 전자선 조사로 인한 조사 에너지에 의하여 약한 결합이 분해되기 때문에 없어지는 것으로 사료된다.

그리고 파수 1725[cm<sup>-1</sup>]밴드에서 원시료의 피크보다 조사된 시료의 피크가 매우 증가됨을 확인할 수 있는데, 이것으로써 전자선 조사로 인하여 co= 기가 증가된 것을 확인할 수 있다.

## (2) 시료의 체적 고유저항

변성기기의 대용량화 및 고전압화로 절연유의 절연특성이 우수해야 신뢰성이 확보된다. 따라서 절연유의 절연성을 간접적으로 평가하는 방법 중 체적고유저항 측정법을 사용하여 시료에 직류전압을 인가하고 일정시간(본 실험에서는 5분으로 통일)이 지나서 온도 의존성과 전압의존성을 측정하였다. 시료를 전극에 넣고 진공 데시케이터 내에 설치 후 진공 pump로 10<sup>-2</sup>[Torr] 이상 되게 진공도를 유지하면서 2시간 이상 방치하여 전극내 기포의 영향을 최소화 하였다. 시료의 체적 저항을 조사하기 위한 실험 조건으로 측정온도 20~120[°C] 범위와 인가전압 100~1000[V] 범위에서 각각의 시료에 온도 의존성을 실험하였다.

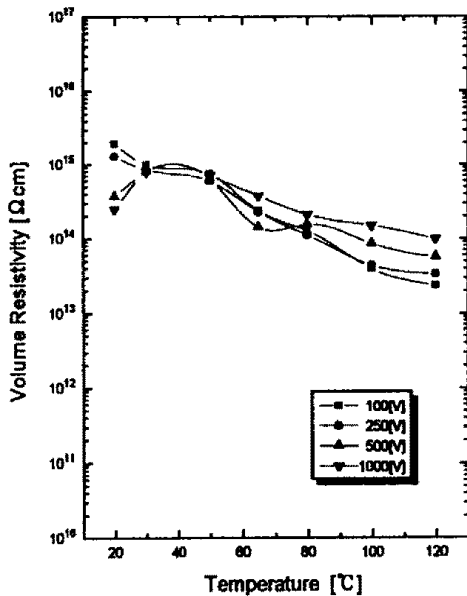


Fig. 3 Temperature dependence of Volume Resistivity (Original specimen)

그림 3은 원시료에 대한 체적저항의 온도 의존 특성이고 그림 4, 5, 6은 전자선 조사량이 12, 24, 36[Mrad]로 조사된 시료에 대한 체적저항의 온도 의존성을 나타낸 그림들이다.

그림 3에서 원시료의 경우는 인가전압 250[V] 이하에서는 실험온도 범위에서 체적저항이 2×10<sup>15</sup>[Ωcm]에서 2×10<sup>13</sup>[Ωcm]로 선형으로 감소되지만, 인가전압 500[V] 이상, 측정온도 40[°C] 이하의 영역에서는 체적저항이 2×10<sup>14</sup>[Ωcm]에서 1×10<sup>15</sup>[Ωcm]로 증가하다가 측정온도가 40[°C]를 초과하면 선형으로 감소된다. 하지만 80[°C] 이상 온도에서는 낮은 전압보다 높은 전압 인가시 체적저항이 큰 값을 나타냄을 확인할 수 있다.

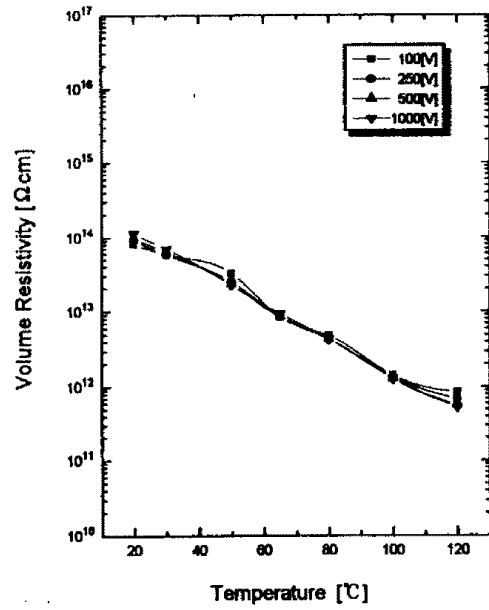


Fig. 4 Temperature dependence of Volume Resistivity (irradiated with 12[Mrad])

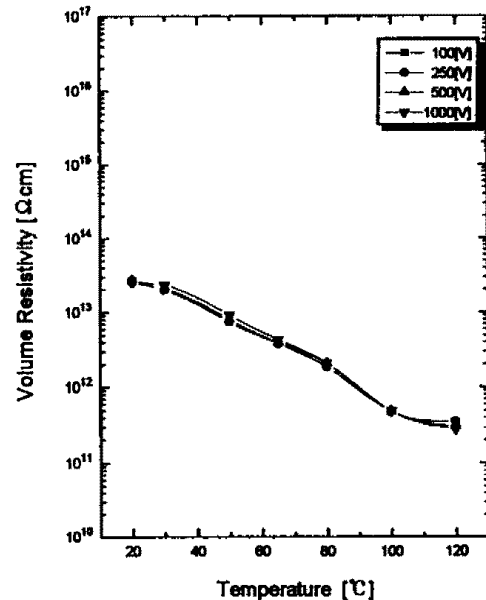


Fig. 5 Temperature dependence of Volume Resistivity (irradiated with 24[Mrad])

저은 저전계에서는 시료내에 존재하는 이온 및 쌍극자 등이 전기전도에 기여하기 때문에 선형으로 감소되지만, 저은 고전계에서 저항율의 상승은 변압기유의 물성의 특이성으로 사료된다. 그러나, 측정온도가 높아지면 체적저항은 감소된다. 여러 연구자들은 최대점이 나타나는 온도를 40~50[°C]로 보고하고 있으며, 이것은 절연유의 종류와 시료의 처리 방법에 따라 다르다. 그러나 IEC, KS, JIS 등에서는 80[°C]에서 전계 250[V/mm] 인가시 체적저항의 크기를 5×10<sup>13</sup>[Ωcm] 이상으로 규정되어 있는데, 실험에서 1×10<sup>14</sup>[Ωcm] 이상의 크기를 얻었으므로 시료의 체적저항은 적합하다고 사료된다.

그림 4는 12[Mrad] 조사된 시료의 체적저항으로 시료의 전자선 조사시 공기중에서 제작되기 때문에 FTIR에서 확인된 것과 같은 co= 기등이 생성되므로 인하여 10배 이상 절연성이 낮아진다.

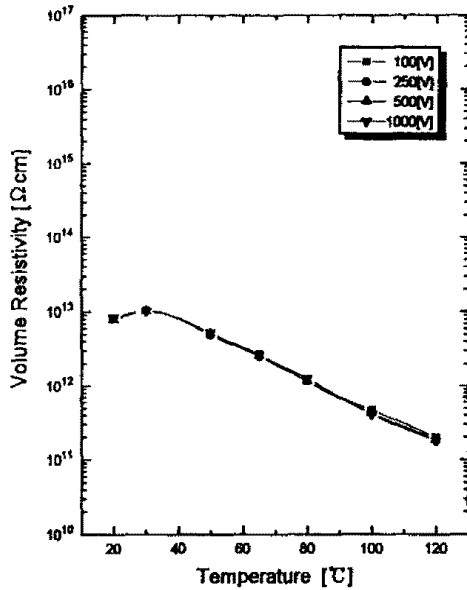


Fig. 6 Temperature dependence of Volume Resistivity (irradiated with 36[Mrad])

그림 5는 24[Mrad] 조사된 시료에 대한 체적저항의 온도 의존성으로 원시료와 같은 조건에서 얻은 그림이며, 원시료에 비해 절연성이 30배이상 낮아짐을 확인할 수 있다.

그림 6은 36[Mrad] 조사된 시료의 체적저항의 온도 의존성으로 절연성은 원시료에 비해 100배이상 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

특히 저온영역에서는 상승되다가 30[°C] 이상에서는 감소되는데, 전자선 조사로 발생된 결합등이 열에너지로 결합되거나, 또는 유동성의 향상으로 절연성이 우수해지나 측정온도가 상승함에 따라 캐리어의 이동이 용이해져 절연성이 감소되는 것으로 사료된다. 또한, 전자선 조사량이 12, 24, 36[Mrad]로 증가되면 규정에 적합한 시료의 측정온도는 각각 40[°C], 20[°C], 측정범위 이하로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

다음은 측정온도 30, 80, 120[°C] 때 체적저항의 전압 의존성을 조사한 것으로 그림 7은 30[°C]에서 전압 상승에 따른 체적저항의 전압 의존 특성으로 원시료의 경우는 전압의 상승에 따라 체적저항은 감소하다가 포화되는 특성을 나타내지만, 조사된 시료의 경우는 조사량에 증가에 따라 감소되면서 전압이 높아짐에 따라 거의 일정한 특성을 확인할 수 있다.

이같은 현상은 미조사 시료의 경우 전압상승에 따라 캐리어의 밀도가 증가되기 때문에 체적저항은 감소되지만 조사된 시료의 경우는 전자선 조사로 시료가 이미 가교나 분자구조의 변화를 일으켜 캐리어의 밀도는 증가되었지만, 전압의 상승에 따른 캐리어 밀도는 변화되지 않기 때문에 전압 상승에 의한 체적저항의 크기는 일정한 것으로 사료된다.

그림 8은 측정온도를 80[°C]로 상승시켰을때의 체적저항 특성으로 미조사 시료는 30[°C] 때와 달리 전압이 높아져도 거의 일정하다. 이것은 측정온도가 80[°C] 정도 되면 시료내 미결합 부분이 열에너지의 영향으로 결합되고, 또한 유동성이 증가되므로 인하여 절연성이 안정되기 때문으로 사료된다. 한편, 조사된 시료의 경우는 전자선 조사로 인

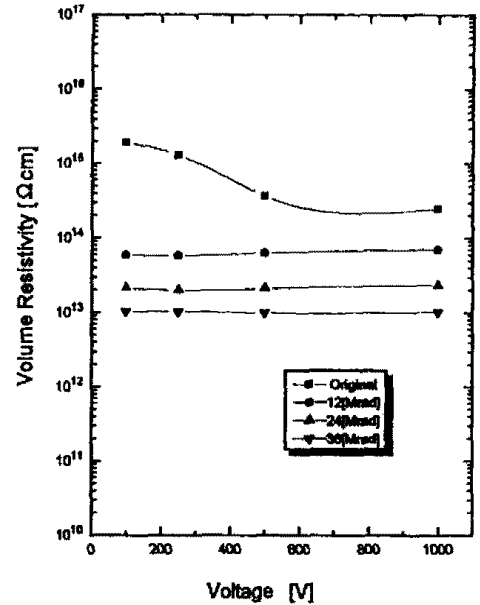


Fig. 7 Voltage dependence of Volume Resistivity (at 30[°C])

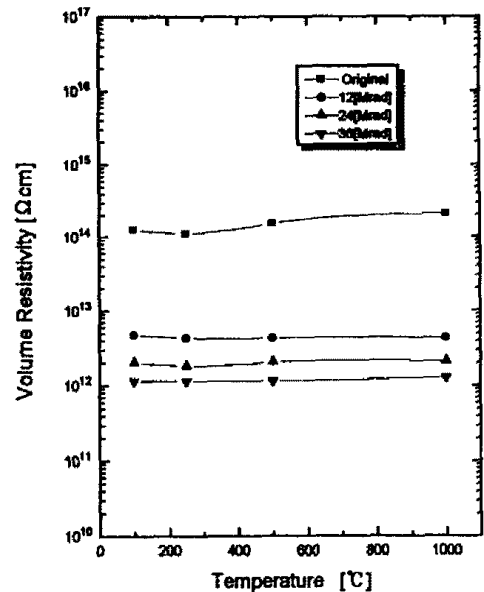


Fig. 8 Voltage dependence of Volume Resistivity (at 80[°C])

하여 시료가 열화되면서 안정성을 갖으므로 인가전압에 무관하고 일정한 특성을 나타내는 것으로 사료된다.

그림 9는 120[°C] 때 체적저항 특성으로 원시료의 경우 측정전압이 높아지면 체적저항은 상승되지만 저전압 (250[V] 이하) 영역에서는  $3 \times 10^{13} [\Omega \text{cm}]$ 로 규정치 이하로 된다. 그러나, 500[V] 이상이 되면 규정값 이상이 되면서 상승된다. 또 조사된 시료는  $1 \times 10^{12} [\Omega \text{cm}]$  이하로 절연성은 나빠지면서 전압에 의한 영향은 없어진다. 원시료의 경우, 전압상승에 따라 저항률 상승은 시료의 유동성 상승으로 인한 주입 전자등 캐리어들이 전기전도에 기여하지 못하기 때문으로 사료된다.

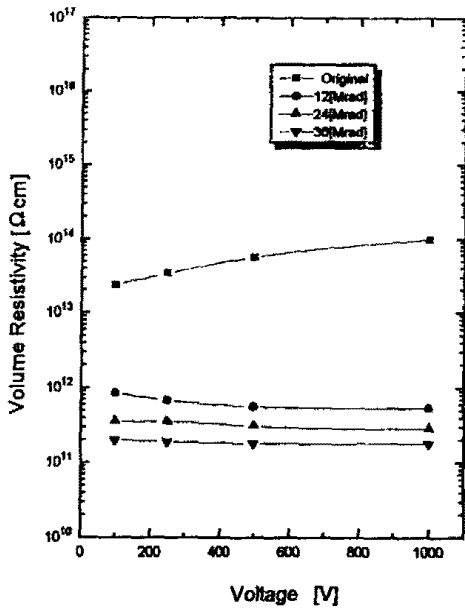


Fig. 9 Voltage dependance of Volume Resistivity (at 120[°C])

#### 4. 결 론

변압기용 절연유의 열화 특성이 유동대전에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전자선 조사에 따른 변압기유의 절연 특성을 조사하기 위하여 원시료, 12, 24, 36[Mrad] 조사된 시료의 체적 저항 특성을 온도 20~120[°C] 범위에서 실험한 결과, 조사된 시료의 Carbonyl기는 미조사 시료에 비하여 크게 증가됨을 확인하였고, 미조사된 시료의 경우는 IEC, KS 규정에 정해진 온도 80[°C], 인가전계 250[V/mm]에서 체적 저항의 크기가  $5 \times 10^{13}$ [Ωcm] 이상임을 확인하였다.

또, 조사된 시료의 경우 조사량의 증가에 따라 변압기유의 색이 진한 색으로 변화됨을 육안으로 식별할 수 있으며, 조사량이 12, 24, 36[Mrad]로 커짐에 따라 체적저항은 각각 10배, 30배, 100배 이상 낮아짐을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. R. M. HARKIM ; The Properties of an Insulating Oils and Its Fractions at low Temperature, IEEE Trans. Electr. Insul, EI-10, 4, pp 124-134 (1975)
2. Von Robert Strigel, Heinrich Winkelkemper ; Über electrische verfahren zur bestimmung der Ölalterung, Electrotech Bd, 86, PP 85-91 (1965)
3. R. Tamura, Y. Miura et al ; STATIC ELECTIFI-CATION BY FORCED OIL FLOW IN LARGE TRANSFORMER, IEEE TRANS. on Power Apparatas and Systems, PAS-99, 1, PP 335-343 (1980)

4. S. Yasufuku, J. Ise and S. Kobayashi ; RadiationInduced Degradation Phenomena In Electrical Insulation Oils, IEEE Trans. Electr. Insul., EI-13, 1, PP 45-50 (1978)
5. C. Lamarre, J. P. Crine and M. Duval ; Influence of Oxidation on the Electrical Properties of Inhibited Naphthenic and Paraffinic Transformer Oils, IEEE Trans. Electr. Insul., EI-22, 1, PP 57-62 (1987)

본 연구는 1995년도 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.