

# 전자선 조사에 따른 변압기유의 전기적 특성

10-8-1

## Electrical Properties of Transformer Oils due to Electron Beam Irradiation

이용우\*, 조돈찬\*\*, 홍진웅\*

(Yong-Woo Lee, Don-Chan Cho, Jin-Woong Hong)

### Abstract

In this paper, the change of electrical properties of transformer oil due to electron beam irradiation is investigated. The specimens are produced with a some different dose of 0.5[Mrad], 1[Mrad] and 2[Mrad] except for original specimen.

The physical properties of each specimen is analyzed by using the FT-IR spectrum. So, it is confirmed that carbonyl groups are increased according to the increase of electron beam dose, and also that the nitric compounds are disappeared.

The magnitude of dielectric dissipation factor appears maximum value by the contribution of dipoles and ions in the low temperature, low voltage region, and it is stable due to the saturation of carriers in the high temperature, high voltage region in the electric conduction characteristics.

Volume resistivity is also measured, one of original specimen is larger than irradiated specimen.

**Key Words(중요용어)** : Transformer Oils(변환기유), Electron Beam Irradiation(전자선조사), Dose(조사량), Dielectric Dissipation Factor(유전손실계수), Volume Resistivity(최적고유저항)

### 1. 서 론

우리나라의 송전전압은 이제 초특고압 시대로 접어들면서 각종 전력 기기의 절연성 향상과 냉각에 대한 고신뢰도가 절실히 요구되는 시점에서, 전력 계통의 변성기기중 변압기의 역할은 지대하기 때문에 변압기의 절연과 냉각용 재료인 변압기유의 신뢰성 확보를 위한 연구가 절실하다.<sup>1),2)</sup>

특히 전력수요의 지속적인 급증으로 인해 향후 송전전압의 상승에 따른 변압기내의 충전 전압의 상승이 액체 절연 재료의 절연 성능에 장애를 줄 수 있으므로 고에너지에 노출된 변압기유의 물성 및 전기적 특성에 대한 영향을 고찰할 필요가 있다고 판단된다.<sup>3),4)</sup>

본 연구에서는 최근들어 환경분야에 많이 응용되고 또한 전선 절연 재료의 특성 개선을 유발시키는

등 전기 절연재료 개발에 많이 사용되고 있는 전자선 조사에 의한 개질법을 이용하여, 전력용 변압기의 액체 절연체인 변압기유가 초고압에서 사용될 때 충전전압의 상승으로 인해 전자선에 노출되므로 전력용 변압기유에 실제 방사선의 일종인 전자선을 0.5, 1, 2 [Mrad] 조사하여 열화 시킨 후, 이 변압기유의 전기적, 물성적 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다.<sup>5)~7)</sup>

### 2. 실험 방법

#### 2.1 실험시료의 제작 및 구분

실험에 사용된 변압기유는 나프텐계 광유에서 제조된 것으로 일체의 첨가제를 넣지 않았다. 시료 주입시 전극에 발생하는 기포의 영향을 최소화 하기 위하여 진공 데시게이터 내에서  $10^{-2}$  [Torr] 정도의 진공도에서 2시간동안 진공탈기 과정을 마친 후에 실험하였다.

실험에 사용한 시료는 전자선 가속기를 이용하여 변압기유를 조사한 시료로써 제작된 각 시료의 전자

\* : 충남전문대학 전기과  
\*\* : 광운대학교 전기공학과  
접수일자 : 1997년 6월 2일  
심사완료 : 1997년 8월 19일

선 조사량은 표 1과 같다.

표 1. 시료의 구분

Table 1. Classification of specimen

시료	인가에너지(E), 전류(I) conveyer speed(v)	왕복 횟수	조사량 [Mrad]
No. 1	Original	-	-
No. 2	E=1[MeV]	2	0.5
No. 3	I=5[mA], v=5[m/min]	4	1
No. 4	E=1[MeV] I=10[mA], v=5[m/min]	4	2

시료에 동일선량의 전자선을 조사하기 위하여는 전하량이 많은 만큼 피조사물의 반응속도를 크게 할 필요가 있고, 처리량은 이것에 비례하여 많아지는 것이며, 실제 조사에 있어서는 CTA 선량계를 이용해서 상수 K 값을 미리 구해 놓고 전자선 조사량 D를 식(1)에서 구한다. 즉, 인가전류와 왕복횟수를 조절하여 전자선 조사량을 변화시켰다.

$$D = k \frac{I}{v} \quad [\text{Mrad}] \quad (1)$$

시료 제작은 공기 중에서 변압기유를 PYREX 사례를 이용하여 전자선 조사 장치의 윈도우로부터 18[cm] 떨어진 곳의 conveyer에 올려 놓고 전자선을 조사 하였다.

전자선 조사 장치의 윈도우 부에 대한 개략도는 그림 1과 같다.

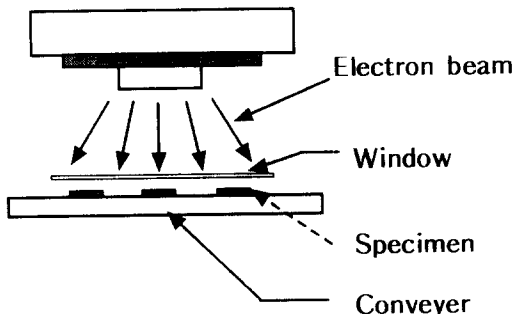


그림 1. 전자선 조사 장치의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of the device for electron beam irradiation

### 2.2 실험장치의 구성

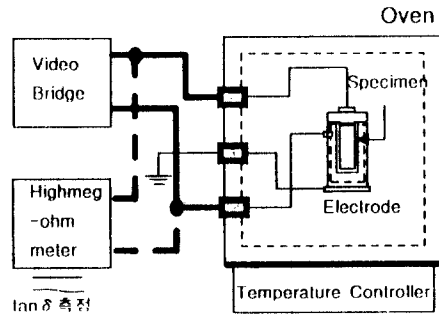
전자선 조사에 의한 변압기유의 열화가 유전특성

에 미치는 영향을 조사하기 위해 조사량에 따른 유전정접의 주파수 의존성, 온도 의존성, 그리고 전압 의존성을 실험하였다.

본 실험에 사용된 전극은 기하학적 정전용량 16.0[pF]인 동축 원통형 전극을 사용하였고, 온도조절은 자동 온도 조절기를 내장하여 일정한 온도를 유지할 수 있는 오븐(TO-9B, ANDO)을 사용하였다.

유전정접 측정에는 주파수를 30[Hz]에서 150[kHz]까지 변화할 수 있고, 인가전압은 300[mV]에서 1500[mV]까지 변화 가능한 측정기기(Video Bridge 2150, Electro Scientific Industries Inc.)를 사용하였다. 그리고 전자선 조사된 시료는 오븐내에서 20[°C]~120[°C]까지 변화 시키면서 온도 변화에 따른 특성도 측정했다.

또한 국제규격에 명시된 변압기의 시험온도 80[°C]에서, 전자선 조사된 시료의 체적고유저항을 측정하였다. 미소 전류계인 VMG-1000 Highmegohm meter를 사용하여 직류전압 100[V], 250[V], 500[V], 1000[V]를 step인가법에 따라 인가하여 각 시료의 체적고유저항을 측정하였다. 실험에 사용된 전극장치 및 실험 장치의 개략도는 그림 2와 같으며 유전 특성실험(실선)과 체적고유저항실험(점선)은 각각 분리하여 실험한다.



체적고유저항

그림 2. 전극 장치의 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of experimental device

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시료의 물성분석

전자선 조사된 시료의 물성을 분석하기 위하여 FT-IR spectrum을 조사하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

변압기유의 전자선 조사량 변화에 따른 화학구조 변화를 조사하기 위해 FTIR spectroscopy을 사용하여 분석한 결과, 원시료와 전자선 조사된 시료와의

차이점으로는 원시료의 경우 파수  $2350[\text{cm}^{-1}]$ 에서 나타나는 질소계 화합물이 전자선을 조사한 시료들에서는 전자선 조사량과 관계없이 모두 없어진다는 것을 확인할 수 있다.

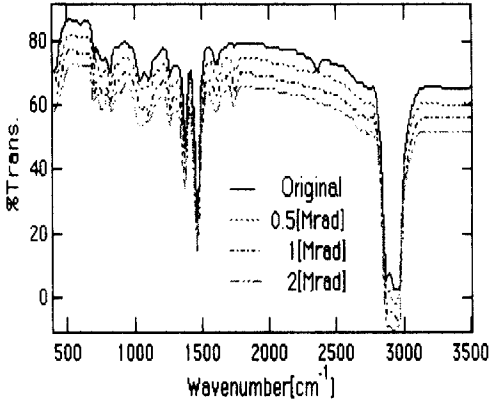


그림 3. 실험시료의 적외선 스펙트럼  
Fig. 3. FT-IR spectra of experimental specimen

일반적으로 질소계 화합물은 나프텐계 절연유 내에 극히 미량이 첨가되는데, 이들은 약한 결합을 하고 있어서 전자선으로 인한 조사 에너지에 의하여 결합이 약한 부분의 분해로 인해 피크가 사라지는 것임을 알 수 있다.

그리고 파수  $1725[\text{cm}^{-1}]$ 밴드에서 원시료의 피크보다 전자선 조사된 시료의 피크가 매우 증가됨을 확인할 수 있는데, 이것은 전자선 조사량이 증가함에 따라 변압기유가 산화되어 변압기유 내에 Carbonyl기가 증가하기 때문에 나타난 것임을 확인할 수 있다.

또한 육안의 관찰로도 전자선 조사된 변압기유의 열화를 식별할 수 있는데, 전자선 조사량의 증가에 따라 변압기유의 색이 점차 진하고 불투명한 색으로 변화됨을 확인할 수 있었으며 변압기유의 점도 역시 전자선 조사량의 증가에 따라 커짐을 확인하였다.

### 3.2. 유전특성

#### (1) 주파수 의존성

액체 절연유 중에서 변압기유 원시료와 전자선을 각각  $0.5[\text{Mrad}]$ ,  $1[\text{Mrad}]$ ,  $2[\text{Mrad}]$ 로 조사한 시료에 대한 전기적 특성을 연구하기 위해 유전특성을 실험하였다.

인가전압  $500[\text{mV}]$ , 온도  $35[^\circ\text{C}]$ 와  $80[^\circ\text{C}]$ 인 경우의 시료에 대한 유전특성의 주파수 의존성을 각각 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

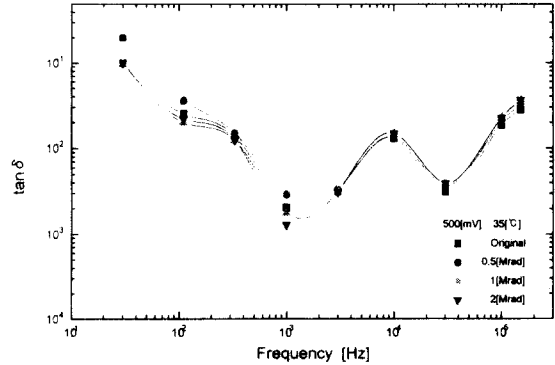


그림 4. 인가전압  $500[\text{mV}]$ , 온도  $35[^\circ\text{C}]$ 에서 유전특성의 주파수 의존성

Fig. 4. Frequency dependence of dielectric characteristics in the applied voltage  $500[\text{mV}]$  at  $35[^\circ\text{C}]$

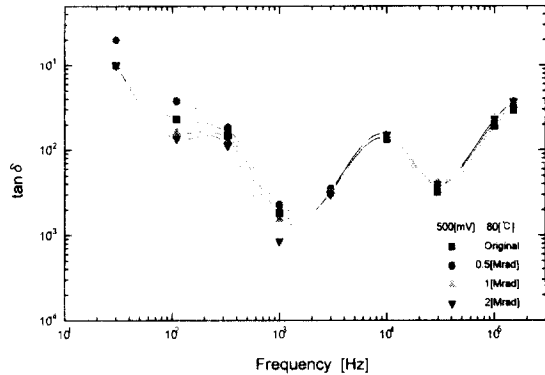


그림 5. 인가전압  $500[\text{mV}]$ , 온도  $80[^\circ\text{C}]$ 에서 유전특성의 주파수 의존성

Fig. 5. Frequency dependence of dielectric characteristics in the applied voltage  $500[\text{mV}]$  at  $80[^\circ\text{C}]$

그림 4에서 보면 저주파수 영역에서 전자선 조사량이  $0.5[\text{Mrad}]$ 인 시료는 유전정점의 크기가 선형적으로 감소되는 것을 볼 수 있으나, 원시료와 전자선 조사량이  $1[\text{Mrad}]$ ,  $2[\text{Mrad}]$ 인 시료는 서로 유전정점의 크기가 거의 차이를 나타내지 않고 약  $250[\text{Hz}]$  부근에서 저주파수 영역에서의 피크인  $\beta$ 피크가 나타남을 알 수 있다.

그러나  $3[\text{kHz}]$  이상 영역에서는 시료 모두 유사한 유전정점의 크기와 주파수 의존성을 나타냄을 확인할 수 있다. 전자선 조사량이  $0.5[\text{Mrad}]$ 인 시료는 저주파수 영역에서 이온의 도전성 기여로 인해 다른 시료보다 유전정점의 크기가 크게 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 고주파수 영역에서의 피크인  $\alpha$ 피

크는 약 10[kHz] 영역에서 일정하게 나타나는 것으로 보아 주쇄의 기여에 의한 피크로 생각된다.

그러나 온도가 80[°C]로 높아지면  $\beta$ 피크가 나타나는 주파수 영역이 약 200[Hz] 영역으로 이동됨을 그림 5에서 확인할 수 있으며, 유전정점의 크기도 200[Hz]~2[kHz] 영역에서 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한 전자선 조사량 증가에 따라 저주파수 영역의 유전정점의 크기는 작아지지만,  $\alpha$ 피크 낮은 온도에서와 같은 경향이 나타났다.

인가전압 1500[mV], 온도 35[°C]인 경우 유전특성의 주파수 의존성을 나타낸 그림 6에서 인가전압 500[mV]인 경우보다 저주파수 영역에서 유전정점의 크기가 작아지며  $\beta$ 피크는 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

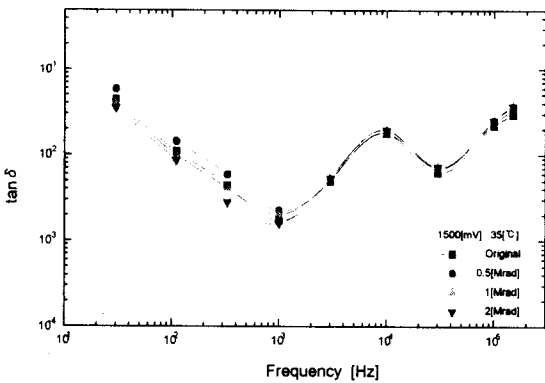


그림 6. 인가전압 1500[mV], 온도 35[°C]에서 유전 특성의 주파수 의존성

Fig. 6. Frequency dependence of dielectric characteristics in the applied voltage 1500[mV] at 35[°C]

이것은 인가전압이 높아질수록 유전정점의 크기가 오히려 작아지는 것은 Garton의 이론에 따라 인가전압의 -1.5승 배만큼 유전정점의 크기가 작아지는 것으로 이해할 수 있다.

인가전압 1500[mV]에서 온도가 80[°C]로 높아지면 그림 7에 나타난 바와 같이 전자선 조사량이 0.5[Mrad]인 시료에 대해 고주파수 영역에서 새로운 피크가 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 전자선 조사에 의해 주쇄의 일부 절단과 새로운 가교의 발생으로 이들이 유전손실에 기여하기 때문에 두 개의 피크가 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 저주파수 영역에서는 측정온도가 높아질수록 (그림 4, 5, 6, 7) 유전정점의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 온도증가에 따라 시료의 유동성이 증가하여 전

도에 기여하는 Carrier의 밀도가 상대적으로 낮아져 전기전도에 기여하지 못하기 때문으로 생각된다.

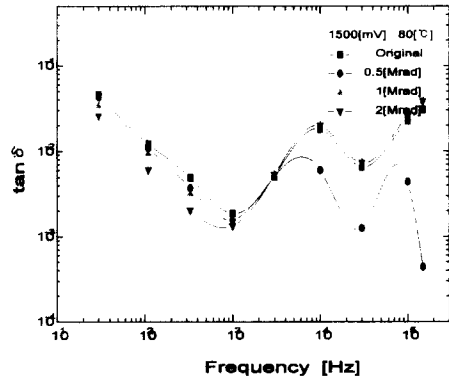


그림 7. 인가전압 1500[mV], 온도 80[°C]에서 유전 특성의 주파수 의존성

Fig. 7. Frequency dependence of dielectric characteristics in the applied voltage 1500[mV] at 80[°C]

(2) 전압 의존성

인가전압 변화에 따른 유전특성의 변화를 조사하기 위하여 변압기유에 대해 국제 규격에 명시된 최고 운전 온도인 80[°C]에서 주파수 330[Hz], 1[kHz], 10[kHz]인 경우 유전특성의 전압 의존성을 각각 그림 8, 그림 9, 그림 10,에 나타내었다.

그림 8에서 인가전압이 높아질수록 유전정점의 크기는 작아지는데, 이는 쌍극자나 이온의 기여에 따른 손실이 나타나는 주파수 영역이 인가전압이 높아

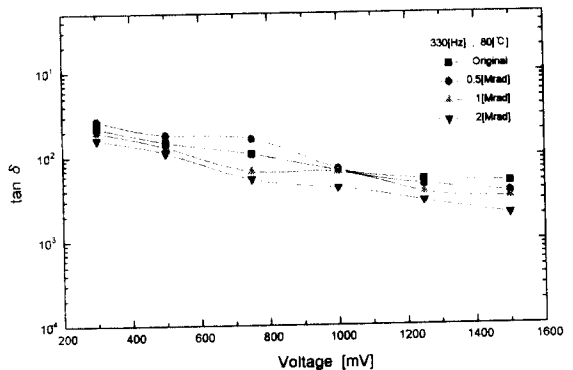


그림 8. 주파수 330[Hz], 온도 80[°C]에서 유전특성의 전압 의존성

Fig. 8. Voltage dependence of dielectric characteristics in the frequency 330[Hz] at 80[°C]

짐에 따라 저주파수 영역으로 이동되기 때문에 이온이나 쌍극자에 의한 손실이 점차 줄어들기 때문으로 생각된다.

주파수 1[kHz]인 경우, 유전정점의 크기가 주파수 330[Hz]인 경우의 유전정점의 값보다 작아진 것을 알 수 있으며, 인가전압이 높아질수록 감소되는 정도는 작아지지만, 인가전압 1000[mV] 이상이 되면 일정하게 됨을 확인할 수 있다.

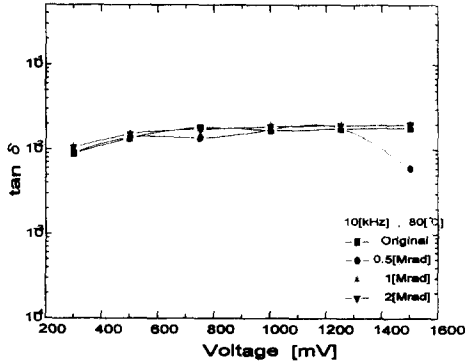


그림 9. 주파수 1[kHz], 온도 80[°C]에서 유전특성의 전압 의존성

Fig. 9. Voltage dependence of dielectric characteristics in the frequency 1[kHz] at 80[°C]

그러나 주파수가 10[kHz]로 높아지면 지금까지와는 달리 인가전압이 높아질수록 유전정점의 크기가 조금씩 커지는 것을 볼 수 있다. 인가전압 1500[mV]에서 조사량 0.5[Mrad]인 시료는 새로운 가교가 발생되기는 했으나 완전한 가교에 필요한 에너지의 공

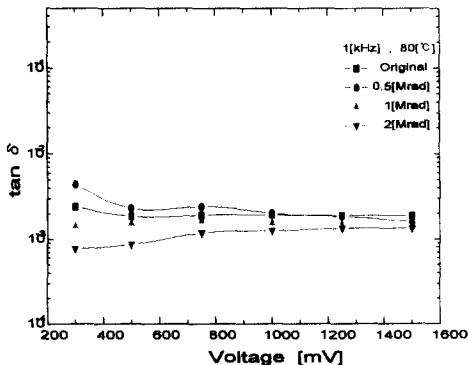


그림 10. 주파수 10[kHz], 온도 80[°C]에서 유전특성의 전압 의존성

Fig. 10. Voltage dependence of dielectric characteristics in the frequency 10[kHz] at 80[°C]

급이 이루어지지 않은 것으로 생각되며, 이와 더불어 분해 등의 결합이 발생하여 주쇄의 기여에 의한 손실이 분산되어 나타나기 때문에 주쇄만의 기여로 나타나던 손실이 크게 줄어든 것으로 생각된다.

그러나 원시료, 조사량 1[Mrad], 2[Mrad]인 시료는 새로운 가교 발생에 충분한 에너지가 공급되어 주쇄에 의한 손실이 나타나기 때문에 인가전압이 증가함에 따라 Carrier 양이 증가하여 유전정점의 크기가 조금씩 증가하는 것으로 생각된다.

### 3.3 체적고유저항특성

절연유의 절연성을 간접적으로 평가하기 위해 체적 고유저항법을 사용하여 시료에 직류전압을 인가하고 일정시간(300[sec])이 지나서 전압 의존성을 측정하였다.

그림 11은 측정온도 80[°C]에서 체적고유저항의 전압 의존성으로서 시료들은 전압이 올라가면 체적 고유저항이 선형적으로 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있으며 각 시료들의 체적 고유저항의 크기가 뚜렷하게 구분된다. 이같은 현상은 전도성 Carrier는 숫적으로 늘어났으나 온도 증가와 함께 시료의 유동성도 증가하여 전체적으로 보면 전도성 Carrier의 밀도가 낮아져 전도에 기여하지 못하므로 선형적으로 증가하는 것으로 생각된다.

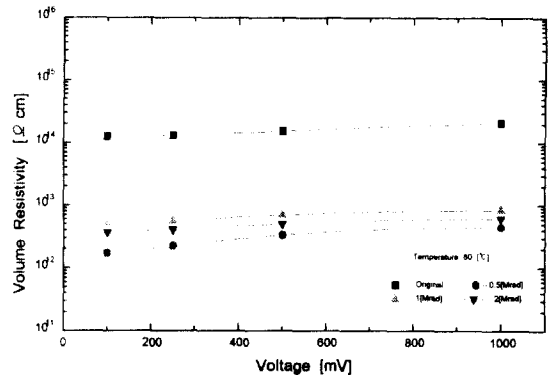


그림 11. 체적 고유저항의 전압 의존성 (80[°C])

Fig. 11. Voltage dependence of volume resistivity (80[°C])

그러나 전자선 조사된 시료는 가교는 발생하긴 했으나 불안정한 상태로 유지됨으로 인해 체적고유저항값이 원시료에 비해 1/10 이하로 되어 IEC 등의 국제규격에 온도 80[°C]에서  $5 \times 10^{13}$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] 이상이 되도록 요구하는바 그 규정에 미흡한 것으로 분석된다.

또한 1[Mrad] 조사된 시료에 대한 체적 고유저항이 오히려 0.5[Mrad], 2[Mrad] 조사된 시료의 체적 고유저항보다 크게 나타나 절연성이 더 우수한 바이는 적당한 전자선의 조사로 인해 안정적인 분자구조적 변화를 유발했기 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

(1) 시료의 FT-IR Spectrum으로 부터 전자선 조사의 증가에 따라 Carbonyl기가 증가되며, 또한 원 시료에서 나타나는 질소계 화합물이 전자선 조사에 의해 없어짐을 확인할 수 있었다.

(2) 유전정점의 측정에 있어서는 온도가 증가함에 따라 시료의 유동성 증가의 영향으로 손실의 크기가 작아지며, 조사량 0.5[Mrad]인 시료는 저전압, 저주파수 영역에서 큰 손실의 크기를 나타내었다. 고주파수 영역에서는 주쇄의 기여에 의한 손실로 생각되며 온도 의존성은 거의 없는 것으로 확인하였다.

(3) 인가전압 변화에 따른 유전특성은 저주파수 영역에서는 인가전압이 증가하면 인가전압의 -1.5승 배만큼 감소하는 것으로 생각된다. 고주파수 영역의 유전손실은 인가전압이 높아지면 손실의 크기도 조금씩 증가하는 것을 확인하였다.

(4) 전자선 조사된 시료의 체적 고유저항은 원 시료의 1/10로 감소하며, 조사된 시료중 1[Mrad]의 절연특성이 가장 양호하였으나 국제규격에는 미흡한 것으로 분석된다.

※ 본 연구는 1996년 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 수행 되었음.

#### 참 고 문 헌

1. A. C. M. Willson, *Insulating Liquids, Their uses, manufacture and properties*, pp. 3-85, 1980.

2. R. Bartnikas, "Dielectric Loss in Insulating Liquids", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, EI-2, 1, pp. 33-54, 1967.

3. 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.

4. R. Tamura, Y. Miura et al ; "Static Electrification by Forced Oil Flow in Large Transformer", *IEEE Trans. on Power Appa. and Sys.*, Vol PAS-99, 1, pp. 335-343, 1980.

5. S. Yasufuku, J. Ise and S. Kobayashi ; "Radiation-Induced Degradation Phenomena in Electrical Insulation oils", *IEEE Trans. Electr. Insul.* EI-13, 1, pp. 45-50, 1978.

6. M. Pompili, C. Mazzetti and R. Bartnikas, "Early Stages of Negative PD Development in Dielectric Liquids", *IEEE. Trans. on Dielectric and Electrical Insulation*, 2, 4, pp. 602-613, 1995.

7. 大久保 仁, 寺西 常治, "油中絶縁における破壊と空間電荷", *静電氣學會誌*, 14.1. pp. 16-24, 1990.

8. Behrouz Abedin ; "Electrostatic Charge Relaxation in Tank Filling Operations", *J. of Electrostatics*, 14, pp 35-57, 1983.

9. 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.

10. R. Musil, M. Baur, W. Pfister, "Testing Practices for the AC Breakdown Voltage Testing of Insulation Liquids" *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 11, No. 1, pp. 21-26, 1995.

시사 소개



이용우

1957년 8월 24일생. 1982년 2월 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1986년 2월 한양대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 현재 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1994년 3월-현재 충남전문대학 전기과 교수 재직.



홍진웅

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



조돈찬

1970년 4월 15일생. 1995년 2월 광운대학교 공대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 현재 일본 나고야대학 대학원 전기공학과 박사과정 연구생.