

저조사량 전자선에 대한 변압기유의 체적고유저항 특성  
 The Characteristics of Volume Resistivity for the Transformer Oil  
 irradiated with the Electron Beam of Low Dose.

이 용우\*, 이 우영\*\*, 조 돈찬, 김 왕곤\*\*, 홍 진웅  
 \*Yong Woo LEE, \*\*Woo Yong LEE, Don Chan CHO, \*\*Wang Kon KIM, Jin Woong HONG

광운대학교 전기공학과  
 Dept. of Electrical Eng., KwangWoong University  
 \* : 충남전문대학 전기과  
 \* : Dept. of Electrical Eng., ChungNam Junior College  
 \*\* : 서울 산업대학교 전기공학과  
 \*\* : Dept. of Electrical Eng., Seoul Nat'l Polytechnic University

Abstract

In this paper, the volume resistivity of transformer oil is made researches so that the electrical properties for transformer oil is investigated.

The specimen is produced by the irradiation of electron beam classified into the low dose, such as 0.5[Mrad], 1[Mrad], 2[Mrad]. The effect of electron beam irradiation is studied by investigating the electrical properties of dielectric liquid due to the difference of electron beam dose.

To measure the physical properties of transformer oil, Fourier Transform-Infrared Spectroscopy is investigated. And the study for the electrical properties is made by measuring the volume resistivity of each specimen.

By means of the result from this experiments, it is introduced that the movement of carrier to contribute to the volume resistivity on the electrical properties.

이에 본 실험에서는 최근 고분자 물질의 개질에 이용되고 있는 전자선 조사에 의한 방법을 이용하여 액체 절연유인 변압기유에 대한 개질을 유도하고, 전기적 특성 연구방법으로 비파괴 검사의 일종인 체적고유저항을 측정하여 분자구조 변화에 따른 전기적 특성의 변화를 연구하였다.

2. 실험방법 및 시료제작

(1) 시료제작

실험에 사용된 시료는 실제로 변압기에 사용되고 있으며 순수 국산 제품으로 순수하게 탄화수소로만 조성된 것을 선택하였다. 전자선 조사를 하기 전의 변압기유는 동남 석유공업 (주) DNI-4호이며 나프텐계 광유로부터 얻어낸 것이 고 아무런 첨가제는 포함되어 있지 않다.

이와같은 시료에 전자선 조사량이 각각 0.5[Mrad], 1[Mrad], 2[Mrad]인 전자선을 조사하므로써 실험에 사용될 시료를 제작하였다. 시료의 구분은 표 2-1에 나타내었다.

표 2-1. 시료의 구분

Table 2-1. The classification of specimen

시료	인가에너지(E), 전류(I) conveyer speed(v)	왕복 횟수	조사량 [Mrad]
1	Original	-	-
2	E=1[MeV], I=5[mA], v=10[m/min]	2	0.5[Mrad]
3	E=1[MeV], I=5[mA], v=10[m/min]	4	1 [Mrad]
4	E=1[MeV], I=5[mA], v=10[m/min]	6	2 [Mrad]

1. 서 론

최근 전력수요의 증가에 따른 송압 송전에 대비하여 기존의 차단기나 전력용 스위치들은 이미 절연 및 냉각 재료로 SF<sub>6</sub>가스를 사용하고 있지만 송배전 계통의 구성요소 중 변성기기의 핵심적인 역할을 수행하고 있는 변압기는 절연과 냉각용 재료로 액체 절연유인 변압기유를 사용하고 있다.

따라서 액체 절연유에 대한 새로운 관심이 요구되며 특히 송배전 계통을 구성하고 있는 요소들 중 하나인 변성기기에 서 중추적 역할을 담당하는 변압기유에 사용되는 액체 절연 유로써 변압기유에 대한 새로운 연구가 필요하다고 판단된다.

한편 최근 고분자 물질의 개질에 전자선을 조사하는 방법이 이용되고 있으며, 실제로 보고된 실험에 따르면 폴리에틸렌의 경우 전자선 조사로 인해 그 특성이 상당히 우수해진 사례가 있다. 또한 난연성 전선의 제조에도 매우 좋은 효과를 나타내는 것으로 보고되어 있다.

(3) 실험방법

1) 물성분석

모든 시료는 고유한 전자파 spectrum을 갖고 있으며 그 spectrum은 물질의 분자구조에 대응하여 나타나고 있다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 액체 절연체로써 변압기유의

물성을 조사하기 위해 광학적인 분석을 이용하며 본 실험에서는 FTIR을 이용한 결과를 분석하였다.

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

## 2) 체적고유저항의 측정

미조사된 원시료와 전자선 조사된 시료에 대한 전기적 특성을 연구하기 위하여 비파괴 검사의 하나인 체적고유저항을 측정하였다.

실험에 사용하기 위해 제작된 시료는 기하학적 정전용량이 16[pF]인 액체전극에 주입되는데, 이과정에서 원하지 않게 발생된 기포가 실험중 시료의 특성에 영향을 주는 또다른 요인으로 작용하는 것을 방지하기 위하여 시료가 주입된 전극을 진공 데시게이터에 넣고 진공펌프를 이용하여  $10^{-3}$ [Torr]정도의 진공도를 유지한 상태에서 2시간동안 방치하였다.

이와같은 처리과정을 마친 후, 시료가 주입된 액체 전극을 일정한 온도 조건을 유지해 주는 자동 온도조절 장치가 내장된 오븐(ANDO, TO-9B Oven)에 장착하여 실험중 시료에 가해지는 분위기를 조정하였다.

체적고유저항의 측정에는 미소전류계인 VMG-1000 Highmegohm meter를 사용하여 직류전압 100[V], 250[V], 500[V], 1000[V]를 step 인가법에 따라 인가하여 각 시료의 체적 고유저항을 측정하였다. IEC 등의 국제규정에서는 step 인가법을 이용할 경우 직류전압 인가 1분 후의 체적고유저항을 측정하도록 되어 있으나 본 실험에서는 전압인가 5분 후에 체적 고유저항을 측정하여 기록하였다.

그림 2-1에 체적 고유저항을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 표시하였다.

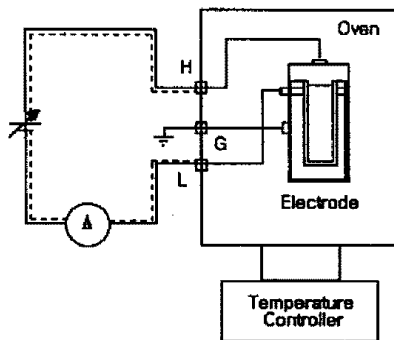


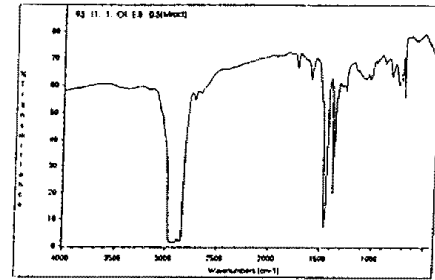
그림 2-1. 실험장치의 개략도

Fig. 2-1. Schematic drawing of experimental device

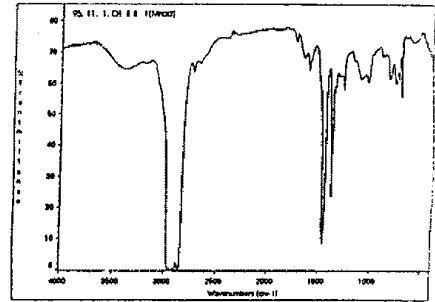
## 3. 실험결과 및 검토

### (1) 물성 분석

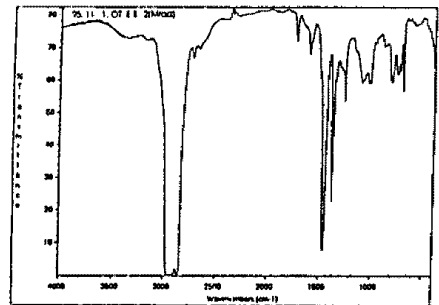
시료의 물성 분석을 하기 위한 광학적 분석 방법으로 FTIR을 이용한 시료의 적외선 흡수 spectra를 분석한 결과를 그림 3-1에 나타내었다.



(a) 0.5[Mrad]



(b) 1 [Mrad]



(c) 2 [Mrad]

그림 3-1. 전자선 조사된 시료의 적외선 스펙트럼  
Fig. 3-1. FTIR spectrum of the specimen irradiated with electron beam

그림 3-1 (a)는 전자선 조사량이 0.5[Mrad]인 시료, (b)는 전자선 조사량이 1[Mrad]인 시료, 그리고 (c)는 전자선 조사량이 2[Mrad]인 시료에 대한 적외선 흡수 스펙트럼 결과를 나타낸다.

파수  $1742.6[\text{cm}^{-1}]$ 에서 나타나는 피크의 크기가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 CO=기의 증가에 기인한 것으로 carbonyl 기의 증가는 도전성의 증가를 암시한다고 볼 수 있다.

또한 질소계 화합물이 전자선 조사량의 증가와 더불어 점차 사라지는 것을 확인할 수 있었다.

### (2) 체적고유저항 특성

실험시료인 변압기유 원시료와 전자선 조사된 시료 3가지에 대한 전기적 특성을 연구하기 위해 각 시료들의 체적 고유저항을 측정하였다.

그림 3-2는 원시료에 대한 체적 고유저항의 온도 의존성을 나타낸 그림이다.

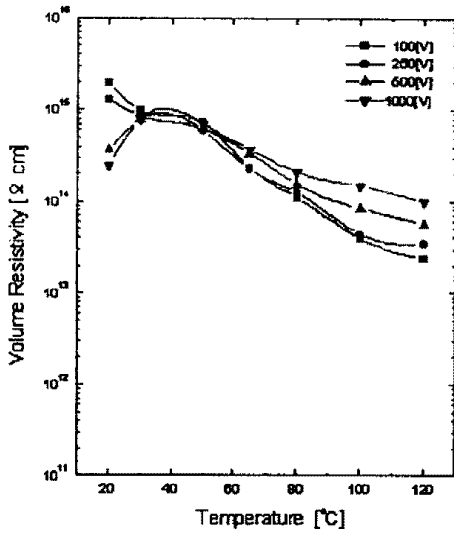


그림 3-2. 체적 고유저항의 온도 의존성 (원시료)  
Fig. 3-2. Temperature dependence of volume resistivity (Original specimen)

인가전압 250[V]이하에서는 실험온도 범위에서 측정된 체적고유저항 값은  $2 \times 10^{15} [\Omega \text{cm}]$ 에서  $2 \times 10^{13} [\Omega \text{cm}]$ 으로 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 인가전압 500[V]이상, 온도 범위 40[°C] 이하에서는 체적 고유저항 측정치가  $2 \times 10^{14} [\Omega \text{cm}]$ 에서  $1 \times 10^{15} [\Omega \text{cm}]$ 으로 증가하며, 온도범위가 40[°C]를 넘으면 선형적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다.

또한 80[°C]이상의 온도영역에서는 인가전압이 높아질수록 체적고유저항은 커지는 것을 볼 수 있다.

저전계에서는 원시료 내에 존재하는 이온 및 쌍극자 등이 전기전도에 기여하므로 선형적으로 감소하지만, 저온·고전계에서는 변압기유 물성의 특이성으로 인해 저항율이 상승하는 것으로 생각된다.

일반적으로 액체 절연유에서 체적고유저항 값의 최대점이 나타나는 온도영역은 40[°C]~50[°C]로 보고되어 있으며, 액체 절연유에 대한 IEC 등의 국제규정에는 인가전계 250[V/mm], 온도 80[°C]에서 체적 고유저항 값이  $5 \times 10^{13} [\Omega \text{cm}]$  이상이 되도록 요구하고 있다.

원시료의 경우 국제규정에 명시된 조건에서  $1 \times 10^{14} [\Omega \text{cm}]$  이상의 체적 고유저항을 얻었으므로 국제규격에 적합한 것을 알았다.

그림 3-3, 그림 3-4, 그림 3-5는 각각 0.5[Mrad], 1[Mrad], 2[Mrad] 전자선 조사된 시료에 대한 체적 고유저항의 온도 의존성을 나타낸 그림들이다.

전자선 조사량이 0.5[Mrad]인 시료에 대한 온도 의존성을 보여주는 그림에서 측정온도 전영역에서 체적 고유저항 값이 선형적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 원시료에 비해 약 10배정도 작은 체적 고유저항 결과치를 나타낼 수 있다. 이와같은 현상은 전자선 조사로 가교가 발생되기는 했으나 완전한 가교상태가 형성되지 못하여 불안정한 상태로 유지됨으로 인해 체적 고유저항이 낮은 결과치로 나타나는 것으로 생각된다.

그리고 인가전압이 높을수록 체적 고유저항은 큰 값으로 나타나는데, 이것은 온도가 상승 시료내에 열 에너지가 증가되어 전도에 기여하는 Carrier의 이동이 용이해져 체적 고유저항은 감소되는 것으로 생각된다.

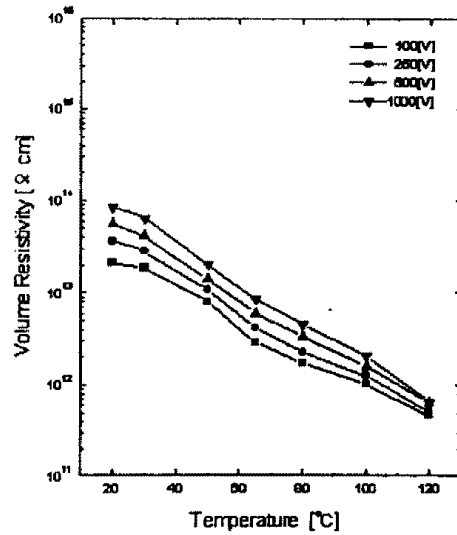


그림 3-3. 체적 고유저항의 온도 의존성 (0.5[Mrad])  
Fig. 3-3. Temperature dependence of volume resistivity (0.5[Mrad])

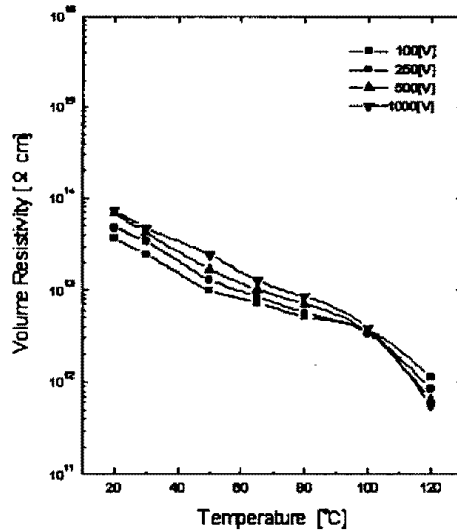


그림 3-4. 체적 고유저항의 온도 의존성 (1[Mrad])  
Fig. 3-4. Temperature dependence of volume resistivity (1[Mrad])

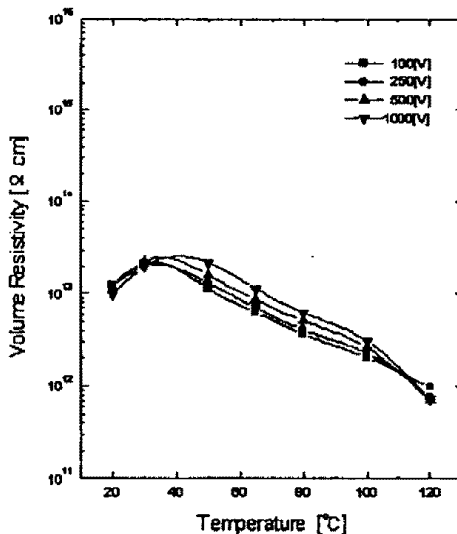


그림 3-5. 체적 고유저항의 온도 의존성 (2[Mrad])  
Fig. 3-5. Temperature dependence of volume resistivity (2[Mrad])

전자선 조사량이 1[Mrad]인 시료에 대한 온도 의존성을 나타내는 그림을 보면, 100[°C]이하의 온도영역에서는 체적 고유저항 값은 선형적으로 감소하며 인가전압이 높을수록 체적 고유저항은 크게 나타난다. 그러나 온도 100[°C]이상으로 되면 체적 고유저항은 급격히 감소하며, 인가전압이 높을수록 체적 고유저항은 작게 나타나는 것을 볼 수 있다.

온도가 높아짐에 따라 시료 내부의 열 에너지 증가로 전기 전도에 기여하는 Carrier의 이동이 용이해지기 때문에 체적 고유저항은 선형적으로 감소되는 것으로 생각되며, 온도 100[°C] 이상의 영역에서 볼 수 있는 인가전압이 높을수록 체적 고유저항이 작게 나타나는 것은 인가전압이 높을수록 전극으로부터 주입되는 전도성 Carrier의 증가로 인해 나타나는 현상으로 생각된다.

특히 전자선 조사량이 0.5[Mrad]인 시료와 비교해 보면 체적 고유저항이 크게 나타나는데, 이것은 완전한 가교상태로 되기에 충분한 에너지가 전자선 조사에 의해 공급되어 0.5[Mrad] 조사된 시료보다 안정한 상태로 되었기 때문으로 추정된다.

전자선 조사량이 2[Mrad]인 시료에 대한 온도 의존성을 나타내는 그림에서는 온도 40[°C]이하의 영역에서는 체적 고유저항이 증가하다가 40[°C]이상의 온도영역에서는 선형적으로 감소되는 것을 볼 수 있다.

특히, 1[Mrad] 조사된 시료의 경우에 100[°C]이상에서 나타났던 현상이 2[Mrad] 조사된 시료에서는 110[°C]이상으로 체적 고유저항의 변화현상이 나타나는 온도가 증가되었는데, 이는 전자선 조사로 가교 뿐만 아니라 내부 구조적인 결합등이 발생하여 전극으로부터 주입되던 전도성 Carrier를 포획하게 되고 실제로 전도에 기여할 수 있는 Carrier의 밀도가 작아지고 결합에 의해 포획된 Carrier가 열적으로 여기하기 위해서 더 높은 열 에너지를 필요로 하기 때문으로 추정된다.

체적 고유저항의 전압 의존성에 대해 20[°C], 50[°C], 80[°C], 120[°C] 온도영역으로 세분한 그림을 각각 그림 3-6, 그림 3-7, 그림 3-8, 그림 3-9에 나타내었다.

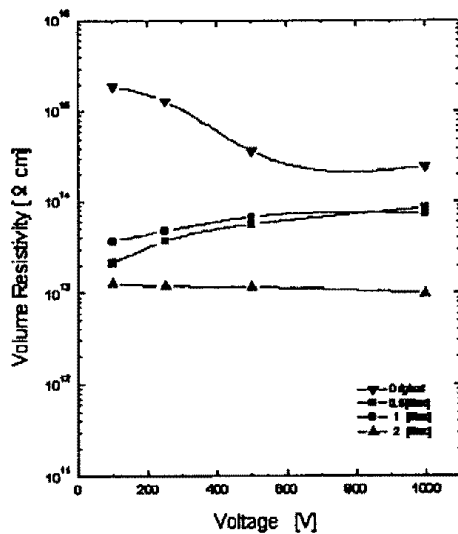


그림 3-6. 체적 고유저항의 전압 의존성 (20[°C])  
Fig. 3-6. Voltage dependence of volume resistivity (20[°C])

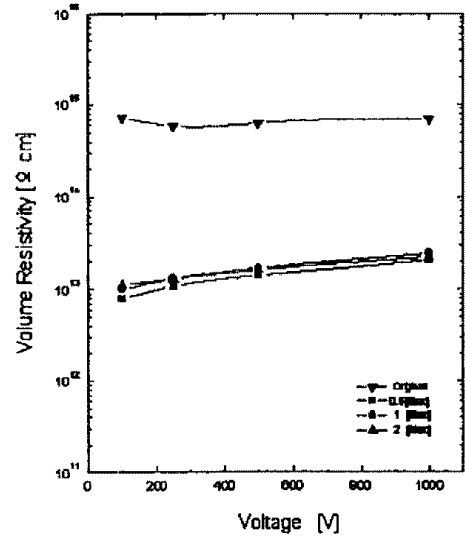


그림 3-7. 체적 고유저항의 전압 의존성 (50[°C])  
Fig. 3-7. Voltage dependence of volume resistivity (50[°C])

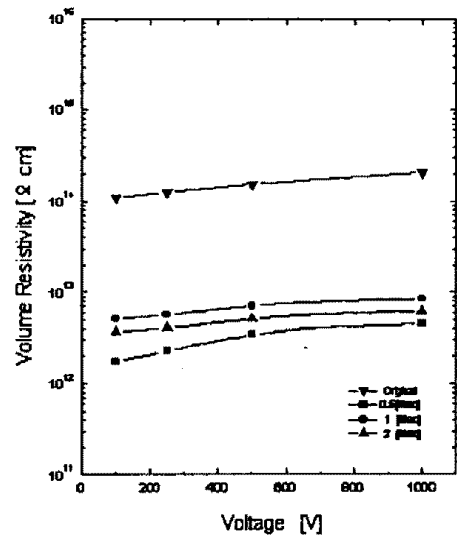


그림 3-8. 체적 고유저항의 전압 의존성 (80[°C])  
Fig. 3-8. Voltage dependence of volume resistivity (80[°C])

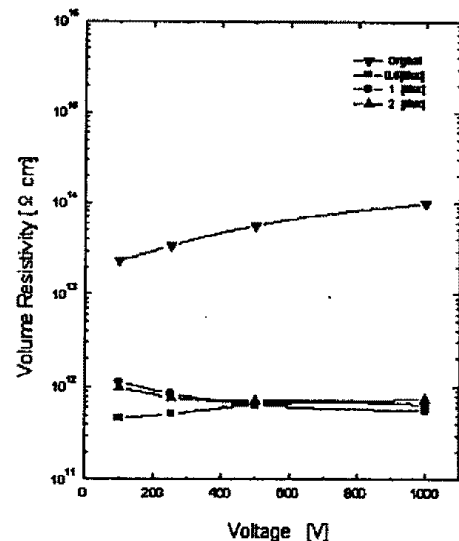


그림 3-9. 체적 고유저항의 전압 의존성 (120[°C])  
Fig. 3-9. Voltage dependence of volume resistivity (120[°C])

온도 20[°C] 영역에서는 원시료의 경우 인가전압 300[V]~500[V] 사이에서 체적 고유저항이 급격히 감소되다가 포화되어 일정하게 나타나는데, 이와같은 현상은 공간전하를 형성하던 Carrier와 전극으로부터 주입된 전도성 Carrier들이 인가전압 상승으로 인해 전기전도에 기여하기 때문으로 생각된다.

전자선 조사량이 0.5[Mrad], 1[Mrad]인 시료는 체적 고유저항이 인가전압 500[V]까지는 증가하다가 인가전압 500[V] 이후 포화되어 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 전자선 조사량이 2[Mrad]인 시료는 온도변화에 대해 체적 고유저항의 변화는 거의 없고 일정하게 나타난다.

온도 50[°C]에서는 원시료는 거의 변화를 보이지 않으며, 전자선 조사된 시료들은 체적 고유저항이 선형적으로 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 온도 80[°C]에서는 온도 50[°C]에서와 유사한 경향을 보이지만 각 시료들의 체적 고유저항의 크기가 뚜렷하게 구분된다.

이같은 현상은 전도성 Carrier는 수적으로 늘어났으나 온도 증가와 함께 시료의 유동성도 증가하여 전체적으로 보면 전도성 Carrier의 밀도가 낮아져 전도에 기여하지 못하므로 선형적으로 증가하는 것으로 생각된다.

또한 1[Mrad] 조사된 시료에 대한 체적 고유저항이 오히려 0.5[Mrad], 2[Mrad] 조사된 시료의 체적 고유저항보다 크게 나타나 절연성이 더 우수한 것으로 분석된다.

온도 120[°C]에서는 전자선 조사된 시료의 경우, 인가전압 500[V]이하에서는 체적 고유저항이 감소되며 인가전압 500[V]이상으로 되면 포화되어 일정하게 나타난다. 그러나 원시료의 경우는 인가전압 상승에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것도 앞서 설명한 바와 같이 온도가 높아지면서 시료의 유동성이 증가하여 상대적으로 Carrier 밀도가 낮아져 전도에 기여하지 못하기 때문에 체적 고유저항이 상승하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

저조사량의 전자선을 액체 절연체인 변압기유에 조사하므로써 변압기유의 개질을 유도하기 위해 제작된 시료에 대하여 물성실험과 전기적 특성 실험으로 비파괴 검사의 하나인 체적 고유저항을 측정된 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

물성 분석을 통해 carbonyl 기의 증가를 확인할 수 있었으며, 이는 시료의 도전성 증가에 기여하는 것으로 생각된다. 또한 전자선 조사량이 증가할수록 질소계 화합물이 점차 감소되어 사라지는 것을 확인할 수 있었다.

전기적 특성을 조사하기 위한 체적 고유저항 특성 실험에서는 원시료의 경우 IEC 등의 국제 규정에서 제시한 인가전계 250[V/mm], 온도 80[°C]에서 체적 고유저항이  $5 \times 10^{13}$  [Ωcm] 이상임을 요구하는 것에 대해 본실험에서는  $1 \times 10^{14}$  [Ωcm] 이상을 얻었으므로 국제규정에 적합함을 확인할 수 있었다.

전자선 조사된 시료의 경우는 원시료에 비해 낮은 체적 고유저항 값을 나타내며 전자선 조사로 인해 증가된 carbonyl 기의 기여로 도전성이 증가되었기 때문으로 분석된다.

그러나, 전자선 조사량이 0.5[Mrad], 2[Mrad]인 시료보다 조사량이 1[Mrad]인 시료가 높은 체적 고유저항 값을 갖는 것은 적당한 전자선 조사량에 의해 안정적인 분자구조적 변화를 유발했기 때문으로 생각된다.

특히 온도가 증가되면서 체적 고유저항이 오히려 증가되는 것은 온도 증가로 인해 액체의 특이성인 유동성이 증가하여 전도성 carrier의 밀도가 상대적으로 낮아져 전기전도에 기여하기 못하기 때문으로 생각된다. 그러나 일정한 온도영역을 넘어서면 외부로부터 공급되는 열 에너지의 증가로 도전성이 증가하여 시료의 체적 고유저항 값이 급격히 낮아짐을 확인할 수 있었다.

본 연구는 1996년 한국전력공사의 연구 지원에 의해 수행 되었음.

#### 5. 참 고 문 헌

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] A. C. M. Willson ; INSULATING LIQUIDS : Their uses, manufacture and properties, pp. 3-85 (1980)
- [4] 家田 正之 外 3人; “誘電體 現象論”, 電氣學會, pp. 242-258 (1985)
- [5] S, Yasufuku, J. Ise amd S. Kobayashi ; Radiation-Induced Degradation Phenomena In Electrical Insulation Oils, IEEE Trans. Electr. Insul., EI-13, 1, pp. 45-50 (1978)