

## 옥내용 에폭시 수지의 열화 특성

### Degradation Properties of Epoxy Resin Used in Indoor

남기동\*, 정중일\*, 연복희\*, 허창수\*, 박영두\*\*  
( K. D. Nam\*, C. I. Jung\*, B. H. Yeon\*, C. S. Huh\*, Y. D. Park\*\* )

#### Abstract

In this paper, study on the properties of the thermal degraded epoxy resin which is used in indoor insulation apparatus is performed to investigate the problems of the decreasing insulation characteristics and crack in the indoor insulation apparatus. As a parameter of variation, SEM, contact angle, surface resistivity, relative dielectric constant and weight loss are measured. As the results of the above measurements, the contact angle and surface resistivity of the epoxy resin has increased to 200°C in but at the above 200°C the values have decreased.

The relative dielectric constants the thermal treated samples have increased on with the temperature increase. We find the volatile components of the epoxy resin compound has disappeared during thermal degradation by SEM. The insulation properties of the epoxy resin have increased by the 200°C but decreased in the above 200°C.

**Key Words(중요용어) :** Degradation, Epoxy Resin, Cast Resin Transformer

#### 1. 서론

급속한 경제성장과 도시화가 진행됨에 따라서 국부적 전력수요가 증대되었고, 그에 따른 대용량 전력시설이 요구되고 전력설비의 고압화 및 소형·경량화가 요구되고 있다. 특히 옥내절연기기로 사용되고 있는 전력기기중에서 중요한 역할을 하고 있는 것이 몰드변압기이다. 사고 발생시 2차 재해로 인한 화재 및 폭발의 위험성을 내재하고 있는 유입식 변압기에 비하여 안정성이 높은 장점 때문에 대체기기로의 사용이 증대하고 있다.

또한 몰드변압기는 건식변압기의 특징을 갖고 있으

며, 에폭시 수지로 코일을 몰딩시킴으로써 외부로부터의 흡습으로 인한 절연성능의 저하를 억제하고 기계적 충격 및 진동에 강하며 내진성이 높고, 유입변압기에서의 절연유 노화에 대한 보수가 불필요하고 유지관리가 편리한 장점을 갖추고 있다. 또한 난연성이 우수하고 화재사고의 위험성이 경감되는 장점도 있다. 그러나 이러한 몰드변압기는 몰딩후 권선부 발열에 따른 에폭시 수지의 열화와 열팽창으로 인한 내부 균열 및 절연성능의 저하가 문제점으로 대두되고 있으며 이에 대한 연구는 아직도 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 몰드변압기의 장기 신뢰성 검토와 사고의 위험성 저감을 목적으로 옥내용 몰드변압기에 사용되고 있는 에폭시 수지의 열 열화에 따른 특성을 SEM, 접촉각, 표면저항률, 비유전율, 질량변화를 분석함으로써 몰드변압기의 장기신뢰성 검토와 기기의 수명을 예측하는데 기초자료를 제공하기 위해서 수행되었다.

\* 인하대학교 전기공학과  
(인천광역시 남구 용현동 253 인하대학교,  
Fax: 032-863-5822  
E-mail : g1991144@inhavision.inha.ac.kr)

\*\* 동미전기공업(주)

## 2. 실험

### 2.1 시료 제작

본 연구에서 사용된 에폭시 수지는 고온경화용 주형 수지로서 비스페놀-A형수지를 사용하였고 경화제로는 산무수물계를 사용하였다. 또한 경화물의 충격강도와 인장강도를 개선시키기 위해서 가소제를 첨가하였다.

열처리를 위한 시료는 직경 100[mm], 두께 2[mm]로 일정하게 제작하였다.

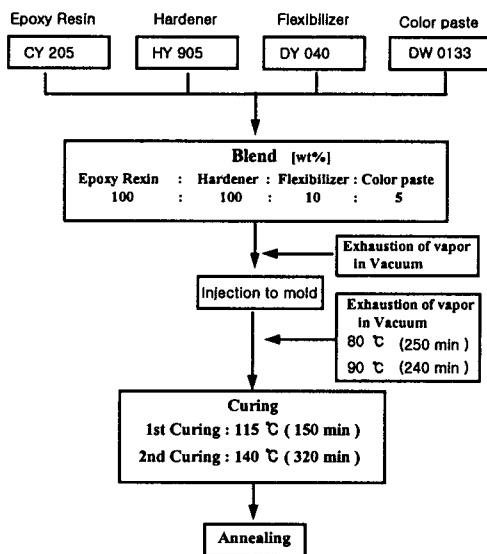


그림 1 시편 제조공정도

Fig. 1 The diagram of sample manufacture process

시료의 경화처리는 그림 1에 나타낸 것과 같이 각각의 조성비로 배합된 혼합물을 사용하여 교반장치로 10분간 교반한 후 80°C에서 250분, 90°C에서 240분간 진공탈포시켜 미소기포를 제거하였으며 미리 예열된 주형에 주입시킨 후, 115°C에서 150분간 1차 경화시켰고, 열적 안정도를 높이기 위해서 140°C에서 420분간 2차 경화를 시켰다. 경화시킨 후에는 시료 내부의 열응력을 줄이기 위해서 서냉시켰다. 시료의 제작과정은 그림 1에 나타낸다.

### 2.2 실험 방법

육내용 몰드변압기에 사용되고 있는 에폭시 수지의

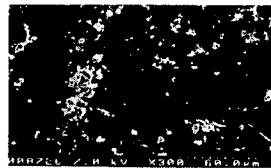
열화특성을 조사하기 위한 가속 열처리 시간을 30시간으로 일정하게 유지시키고, 처리온도를 각각 100°C, 150°C, 200°C로 변화시키면서, 전기로(Electrical Heater)에서 처리한 후 열화특성변화를 측정하였다.

열화정도에 따른 특성 분석으로 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, Hitach S-4300)을 사용하여 가로 5[mm], 세로 5[mm]시료의 표면근처의 파단면을 촬영하였다. 접촉각은 시료표면에 달아온 증류수 5[μm]를 Sessile Drop 형태로 시료표면에 하적시켜 접촉각 측정기(ERMA INC. Contact Angle Meter)를 이용하여 10회 반복측정하여 평균값으로 나타내었다. 또한 열처리에 따른 전기적 특성변화를 측정하기 위하여 JIS. K-6911규정에 의해서 원형의 마스크를 제작하여 Al으로 진공증착한 후 3단자 전극을 형성하여 표면저항률과 비유전율을 측정하였다. 표면저항률은 가속 열처리한 시료를 항온조에 설치하고 미소전류계(Picoammeter 487, Keithley Co.)를 이용하여 직류전압 500[V]를 인가하여 30분이 경과된 후 누설전류값을 측정하여 표면저항률을 구하였고, 유전특성은 임피던스 어날라이저(4192A, Hewlett Packard)에 연결하여 60[Hz]~13[MHz]에 이르는 주파수영역에 걸쳐 유전특성을 조사하였다. 질량변화량(전자저울, Sartorius, 10<sup>-4</sup>g)은 [%]단위로 중량감소율을 나타내었다.

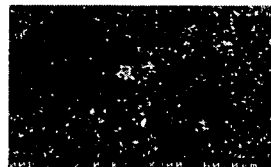
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 가속 열처리에 따른 SEM 형상

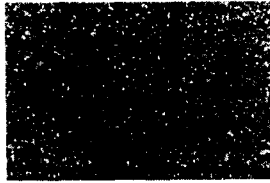
그림 2는 열화 미처리 시료와 30시간동안 각각의 온도에서 가속 열처리한 시료의 SEM 형상이다. 열처리 온도가 증가함에 따라서 표면에는 휘발성분이 아닌 충전제의 잔여물이 존재하게 됨을 알 수 있다.



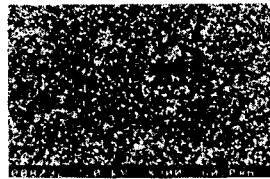
a) 무처리 시료



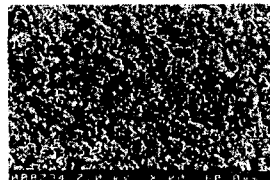
b) 100°C처리 시료



c) 150°C 처리 시료



d) 200°C 처리 시료



e) 250°C 처리 시료

그림 2. 시료의 주사전자현미경사진  
Fig. 2 SEM micrographs of samples

### 3.2 가속 열처리에 따른 접촉각 특성

그림 3은 가속 열처리에 따른 시편의 접촉각 변화를 나타낸다. 미처리된 시료는 68° 정도의 접촉각을 나타내다가 200°C에서는 약 80°로 증가하였으며 그 이상의 처리 온도에서는 점차 감소하여 250°C 처리에서는 62°로 크게 감소하였다. 이는 200°C까지는 시료 표면의 저분자 극성물질의 증발과 표면에서의 재가교로 인하여 접촉각이 증가하였고 200°C 이상의 온도에서는 표면의 결합쇄가 파괴됨으로써 접촉각이 급격히 감소하였다고 생각된다.[5]

### 3.3 가속 열처리에 따른 표면저항률

열처리에 따른 표면저항률을 그림 4에 나타낸다. 표면저항률은 열처리 온도가 증가함에 따라 200°C까지는 증가하며 그 이상의 온도에서는 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 접촉각 측정 결과에서 나타나고 있는 현상과 일치하고 있다. 열처리된 시료는 표면저항률이 약  $2.175 \times 10^{13} [\Omega]$

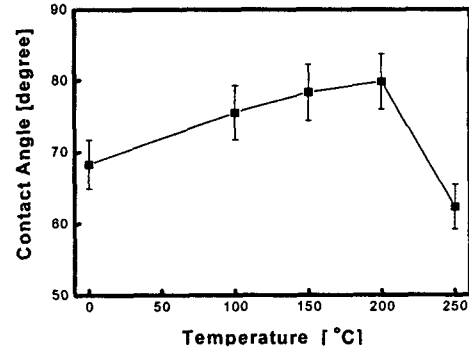


그림 3 열처리에 따른 접촉각  
Fig. 3 Contact Angles according to the degradation temperature

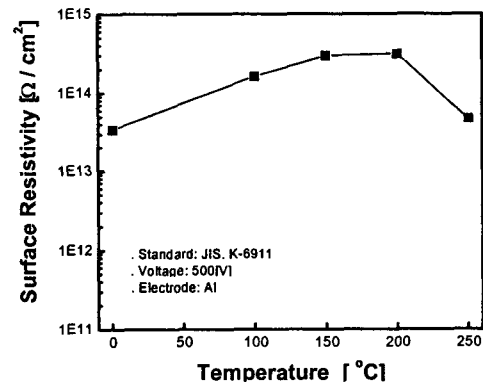


그림 4 열처리 온도에 따른 표면저항률  
Fig. 4 Surface resistivity according to the thermal degradation temperature

/square] 정도의 값을 나타내었으나 열처리 온도를 증가시킨 200°C 시료에서는 약  $3.33 \times 10^{14} [\Omega/\text{square}]$  정도로 증가하고 그 이상의 온도에서는 감소한다.

### 3.4 가속 열처리에 따른 비유전율

열처리된 시료의 유전특성을 그림 5에 나타낸다. 열처리된 시료와 비교하여 볼 때, 처리 온도가 증가함에 따라서 비유전율이 증가함을 알 수 있다. 이는 열처리가 진행되면서 강한 열에너지가 시료 내부에 작용하여 경화제나 충전제 등이 불완전한 성분과의

결합을 파괴하고, 크랙의 발생과 온도가 증가함에 따라 에폭시 수지내에서 분자운동에 변화가 일어나기 시작하여 쌍극자가 배향하기 쉽게 되기 때문에 비유전율이 온도에 비례하여 증가하게 된다.

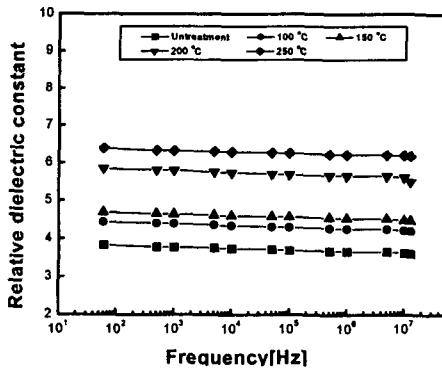


그림 5 열처리 온도에 따른 비유전상수  
Fig. 5 Relative dielectric constant according to the thermal degradation temperature

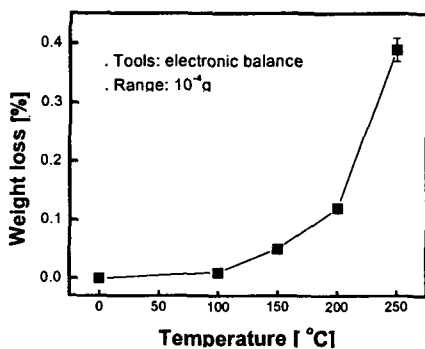


그림 6 열처리에 따른 중량손실  
Fig. 6 Weight loss according to the degradation temperature

### 3.5 가속 열처리에 따른 중량 손실비 특성

열처리에 따른 시료의 질량변화를 그림 6에 나타낸다. 처리온도가 증가함에 따라 선형적인 감소를 보이다가 250°C 이상의 처리에서는 급격한 중량손실을 보이고 있다.

이러한 결과는 시료의 표면 및 내부에 존재하는 저분자 물질의 증발로 인하여, 결국 200°C를 기점으로

로하여 그 이상에서는 급격한 열화가 진행됨을 나타내고 있다. 즉 250°C 이상에서는 과도한 열에너지로 인하여 결합체의 절단 및 크랙의 진전으로 급격한 질량 감소를 보이는 것으로 생각된다.

## 4. 결론

옥내용 전기기기의 절연재료로 사용되고 있는 에폭시수지의 가속 열 열화에 따른 열화특성을 조사한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 몰드변압기용 에폭시수지는 열 열화에 따라 충전제와 레진의 결합이 파괴되고 200°C에서는 붉은색의 표면이 검게 변색되었다.
2. 몰드변압기용 에폭시 수지를 열처리하면 표면에 강한 소수성을 나타내어 접촉각 및 표면저항률을 증가시킨다.
3. 열처리에 따른 유전특성은 강한 열에너지에 노출됨으로써 크랙의 진전과 쌍극자 배향분극에 의해 비유전율이 온도에 비례하여 증가한다.
4. 열처리에 따른 에폭시수지는 200°C까지는 선형적인 질량변화 감소를 나타내다가 그 이상의 온도에서는 급격한 감소를 나타내었다.

## 참고 문헌

- [1] 김준현, "몰드 변압기", 전기학회지, Vol.32, No.1, pp.19-26, 1983
- [2] Linden W. Pierce, "An Investigation of the Temperature Distribution in Cast-Resin Transformer Windings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.2, April, pp. 920-926, 1992
- [3] K. Fukushi, H. Tadasaki, T. Koyama, T. Fujimori, "Development of a Mold Resin for Molded Transformers and Its Mechanical and Insulating Characteristics", Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 8-12, Tokyo, Japan, pp.452-455, 1991
- [4] Clayton A. May, "Epoxy Resins Chemistry and Technology", Marcel Dekker, Inc. 1988
- [5] K. Matsushita, N. Suzuki, S. Okuyama, and K. Okuyama, "Hydrophobicity of a hydrochloric-treated GaAs surface analyzed by contact angle measurement", J. Electrochem. Soc., Vol.145, No.4, pp.1381~1384, 1998