

절연 바니시의 전기적 특성

Electrical Properties of Insulating Varnish

김정훈*, 신종열*, 변두균*, 이종필*, 조경순*, 김왕곤**, 홍진웅*
(J. H. Kim*, J. Y. Shin*, D. G. Byun*, J. P. Lee*, K. S. Cho*, W. G. Kim**, J. W. Hong*)

Abstract

In this study, we are studied the electrical conduction and dielectric breakdown properties of insulating varnish. In order to analyze the molecular structure and physical properties of insulating varnishes, FT-IR was used. As the result, it can be confirmed that the peak of alcoholic group appeared in wavenumbers 3452[cm⁻¹], the peak of =CH appeared in 3080[cm⁻¹] and the peak of -CH appeared in 2919[cm⁻¹] respectively. The following results were obtained from electrical properties of insulating varnish. The amplitude of current density was decreased by thickness increasing and the current density was effected by the thermal energy from external due to temperature increasing. In study temperature dependence of dielectric strength, the specimen of 10[μm] thickness was measurement from room temperature to 180[°C]. It is confirmed that the temperature regions below 60[°C] is due to electron avalanche breakdown and the temperature regions over 60[°C] is due to free volume breakdown which makes electron movements easy.

Key Words : electrical conduction, dielectric breakdown, insulating varnish , current density, electron avalanche

1. 서 론

국내·외 차량용 견인전동기는 직류직권 전동기에서 유도전동기로 변화되고 있으나, 그러나 아직도 국내에서는 속도제어가 용이한 직류 직권 전동기가 주로 사용되고 있다. 전기 기기의 수명은 최고사용 온도의 상승에 따라 크게 좌우되며, 전기 기기의 손실은 전부 열로 변하여 기기의 온도를 상승시키므로 절연물은 빠른 열노화로 인하여 제수명을 발휘하지 못하고 고장의 원인이 된다. 기기의 구성재료 중에서 내열성이 가장 약한 것은 절연재료이고 사용온도가 높을 수록, 열화가 빠르게 진행되어 사용온도가

10[°C] 상승하면 수명은 반으로 줄어들기 때문에 연 속정격을 초과하여 운행하면, 과전류로 인한 계자 부분은 온도 상승에 가장 큰 약점을 가지고 있다.

본 실험에서는 현재 견인전동기의 함침용 절연재료로 사용하고 있는 폴리부타디엔 수지를 시료로 선정하여 KS규정에 따라 시료를 제작하고 절연과피강도와 전도전류를 측정하였다.

절연과피특성은 상온부터 180[°C]에서 실험을 하였는데, 측정온도 60[°C]미만 영역에서는 전자사태과피에 따른 과피와 60[°C] 이상에서는 전자의 이동이 용이한 자유체적과피임을 확인하였다. 전도특성은 상온에서 180[°C]까지 온도를 변화시켜가면서 측정하였는데, 전류밀도의 온도의존성에서 두께가 두꺼워짐에 따라 전류밀도의 크기가 감소하고, 온도 상승에 따라 열에너지가 전류밀도의 변화에 영향을 주고 있음을 확인하였다.

* : 광운대학교 전기공학과
(서울시 노원구 월계동 광운대학교,
Fax: 02-915-4630
E-mail : ealab@daisy.gwu.ac.kr)

** : 서울산업대학교 전기공학과

2. 실험

시료의 절연성 평가를 위하여 절연파괴 실험은 0~50[kV]까지를 가할 수 있는 내전압 시험기와 자동 온도 조절기(HANYOUNG Co.)를 사용하여 제작된 시료에 교류 전압을 인가하여 절연 파괴 강도를 측정하였다. 그림 1은 실험에 사용된 전극의 구조를 나타낸다. 전극을 입힌 시료는 연면 방전 등의 불필요한 효과를 제거하기 위하여 silicone oil을 담은 용기 내에서 교류전압을 3[kV/sec]의 승압속도로 시료에 인가하여 측정하였다. 또한, 자동 온도 조절기를 사용하여 온도를 25[°C], 50[°C], 75[°C], 100[°C], 120[°C], 140[°C], 160[°C], 180[°C]로 승온 후 온도 오차를 줄이기 위하여 온도계로 확인하였다. 한 종류의 시료에 대하여 수십 회 이상의 실험을 통하여 측정된 절연 파괴강도의 평균값을 실험 값으로 채택하였다.

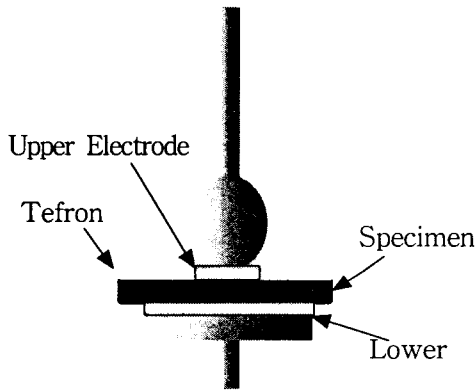


그림 1. 절연파괴용 전극 구성.

Fig. 1. The configuration of electrode for dielectric breakdown.

3. 결과 및 검토

3.1 절연파괴의 온도 의존성

시료의 절연특성을 조사하기 위하여 두께 10[μ m] 바니쉬로 시료를 제작하고 절연파괴의 온도의존성을 실험하였다. 실험에서 온도의 균일성을 확보하기 위하여 실리콘유 내에 삽입 후 10분 이상 경과한 뒤에 교류전압을 인가하였다.

그림 2는 시료의 교류절연파괴의 온도의존성을 나타낸 그림으로 온도 변화에 따른 절연파괴강도 F_b 는 60[°C]을 경계로 2개의 온도영역으로 구분됨을 확인

할 수 있다.

1) 저온영역

일반적으로 저온영역에서는 절연파괴강도 F_b 는 온도상승에 따라 상승하든지 또는 거의 변화하지 않는 데, 그림 2에서 측정온도 60[°C]미만 영역에서는 $\partial F_b / \partial T \approx 0$ 로 거의 변화하지 않음을 확인할 수 있으며, 이 영역은 관련이론을 참고로 하면 전자사태 기여로 사료된다. 따라서 교류전압인가에 따른 절연 파괴 기구는 유전체 내부손실에 의한 열적파괴기구보다는 전자사태의 기여로 절연파괴가 지배적인 것으로 사료된다. AC절연파괴는 극성이 계속 반전되기 때문에 공간전하가 발생되고 이것이 파괴에 일부 기여한다. 전자사태파괴 전계는 전자의 평균자유행정에 역비례 하기 때문에 온도가 증가할수록 그 파괴 전계는 증가하거나 일정하게 된다. 전자사태파괴로 생각되는 저온영역에서는 이러한 현상이 미약한 것을 감안할 때, 전자의 평균자유행정이 길어지는 시편 내부의 결함이 많은 것으로 추측된다.

2) 고온영역

그림 2에서 측정온도가 60[°C]을 초과하면 측정온도의 증가에 따라 절연파괴강도 F_b 는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 많은 고분자들의 절연파괴 강도는 유리전이온도 부근에서 매우 급하게 감소하는데, 본 시료의 경우는 측정온도가 유리 전이온도 보다 낮지만 바니쉬도 열경화성 수지로 온도가 높아지면 전자가 이동시 구조의 변형을 유발시키고 따라서 온도의 증가에 따라 절연파괴 강도도 급하게 저하한다. 그리고 고온영역에서는 $\partial F_b / \partial T < 0$ 되고 F_b 가 급격히 저하되므로 따라서 자유체적의 증가와 관련이 있다는 Nelson과 Sabuni의 보고를 근거로 하면 이 영역에서는 자유체적파괴이론이 지배적인 것으로 사료된다.

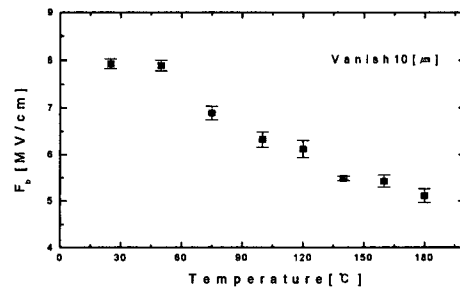


그림 2. 시료에 대한 절연파괴 강도의 온도 의존성.
Fig. 2. Temperature dependence of dielectric breakdown strength for specimen.

또한 교류전압인가시 유전손실에 따른 시료내부에 존재하는 주쇄의 마이크로 브라운 운동의 개시로 인하여 전자의 이동이 용이한 자유체적이 증가되기 시작하여 F_b 가 급격하게 감소되는 이 영역은 자유체적 파괴가 지배적이면서 유전손실에 따른 열파괴도 중복되는 파괴기구로 사료된다. 한편 고온영역에서 절연 파괴강도의 감소 비율은 25[%]임을 확인하였다.

3.2 전도특성의 온도의존성

시료의 전기전도특성을 조사하기 위하여 측정온도에 따른 전류밀도를 두께별로 실험하였다. 그림 3은 인가전압 100[V]때 두께변화에 따른 전류밀도의 온도의존성을 나타낸 그림이다. 전류밀도는 측정온도가 상온에서 130[°C]로 높아지면 전류밀도의 크기는 매우 급하게 증가하다가 130[°C]이상일수록 초과하면 전류밀도의 증가율은 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 시료의 두께가 두꺼워 짐에 따라서 전류밀도의 크기도 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이같은 현상은 온도가 상승함에 따라 외부에서 공급되는 열 에너지가 전류밀도의 변화에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있으며, 따라서 온도가 상승되면 전극으로부터의 도전성 캐리어의 주입이 용이해져 전류밀도가 증가하기 때문으로 생각된다.

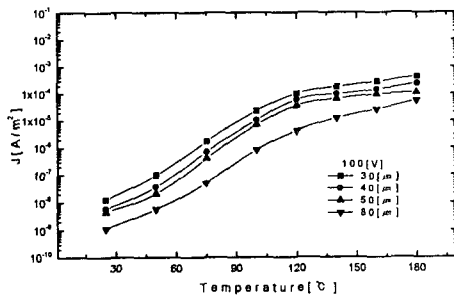


그림 3. 전류밀도의 온도의존성(100[V]).

Fig. 3. Temperature dependence of current density(100[V]).

그림 4는 인가전압 250[V]일때 전류밀도의 온도의존성을 나타낸 그림으로서 인가전압이 100[V]에서 250[V]로 증가됨에 따라 전류밀도는 36[%]증가 되고 경향은 거의 유사하다. 특히, 고온영역에서 전류밀도가 포화되는 것을 확인 할 수 있는데, 절연용 바니시는 여러 가지 물질이 혼합된 액체절연물질로 많은 불순물이 존재 할 수 있으므로 130[°C]까지는 모든

캐리어가 불순물 준위에서 여기(excitation)되어 전기 전도에 기여한 후 130[°C]이상에서는 포화되는 경향을 나타내는 것으로 사료된다.

그림 5는 인가전압 500[V]때 시료의 두께별로 전류밀도의 온도의존성을 나타낸 그림으로 인가전압 250[V]때와 경향은 비슷하나, 전류밀도는 48[%]증가 되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 인가 전계가 높아지므로 캐리어의 밀도가 증가되므로 전도전류밀도도 상승된 것으로 사료된다.

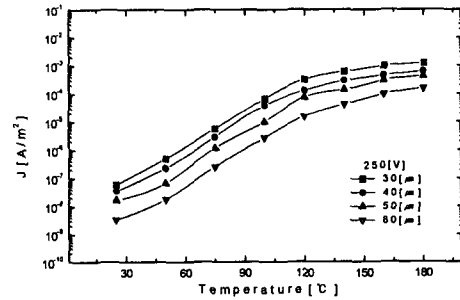


그림 4. 전류밀도의 온도의존성(250[V]).

Fig. 4. Temperature dependence of current density(250[V]).

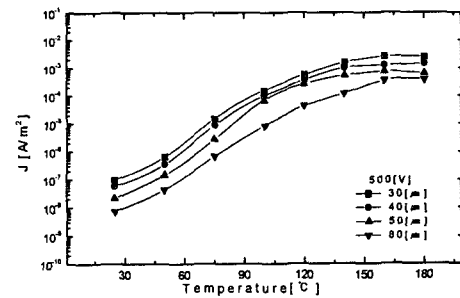


그림 5. 전류밀도의 온도의존성(500[V]).

Fig. 5. Temperature dependence of current density(500[V]).

그림 6은 인가전압 1,000[V]때 시료두께별로 전류밀도의 온도 의존성을 도시한 것으로 전류밀도는 매우 크다. 전압이 높아짐에 따라 시료의 캐리어밀도가 상승하기 때문이다. 그리고 온도 130[°C]부터 전류밀도의 변화의 증가율이 적어짐을 확인할 수 있다.

이는 시료에 존재하는 불순물들이 여기되어 전도

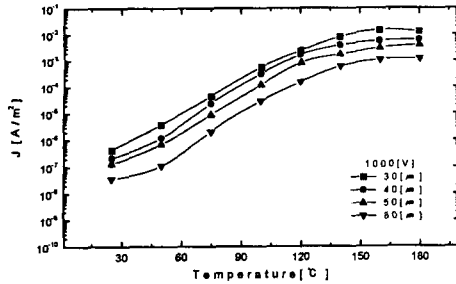


그림 6. 전류밀도의 온도의존성(1,000[V]).
Fig. 6. Temperature dependence of current density(1,000[V]).

에 기여한 후 고온에서는 포화되는 경향을 보이는 것으로 사료되며, 인가전압 100[V]때 보다 저온영역에서는 30배정도 커지고, 고온영역에서는 27배 증가됨을 확인하였다.

3.3 활성화 에너지

전기전도 특성에 미치는 요소를 조사하기 위하여 저온영역에서 활성화에너지를 조사하였다. 그림 7은 식 $J_s \approx ena\nu (eEa/kT) e^{-u/kT}$ 를 참고로 전압 100[V], 250[V], 500[V] 및 1,000[V]에서 활성화 에너지를 얻

표 1. 활성화 에너지.

voltage [V]	activation energy [eV]
100	0.30
250	0.31
500	0.27
1,000	0.32

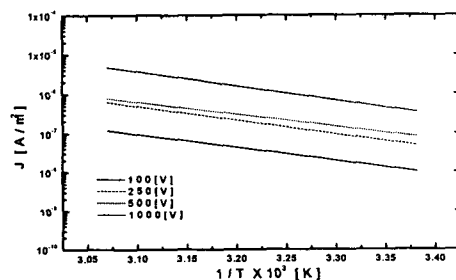


그림 7. Arrhenius 플롯트.
Fig. 7. Arrhenius plot.

기 위한 Arrhenius Plot로 도시한 것들이다. 그림으로부터 활성화 에너지 U는 0.27~0.32[eV] 사이의 값으로 정리하면 표 1과 같다.

4. 결론

전인 전동기용 절연바니쉬의 전기적특성을 조사하기 위하여 KS 규정의 제작 방법에 따라 시료를 제작하고 절연파괴특성과 전도특성을 조사한 결과 절연파괴특성에서는 60[°C]을 경계로 절연파괴기구가 구분됨을 확인하였는데, 60[°C]이하의 저온영역에서 절연파괴강도는 온도의 증가에 따라 거의 변화하지 않는 특성을 확인하였다. 그러나, 60[°C]의 이상의 고온영역은 자유체적파괴의 기여로 온도상승에 따라 절연파괴 강도는 크게 감소함을 확인하였다. 전류밀도의 온도의존성에서 상온에서 130[°C]까지는 열에너지의 기여로 전류밀도가 급하게 증가하다가 130[°C] 이상에서는 캐리어의 증가가 포화되므로 전류밀도의 증가율이 감소하는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] N.G. McCrum, B.E. Read, G. Williams, "Anelastic and Dielectric effects in Polymeric Solids", John Wiley & Sons, New York, pp. 34-35, 1967.
- [2] 한국산업규격, "전기절연용 바니쉬 시험방법", KSC 2312, 1987.
- [3] 家田 正之 外 3人, "誘電體 現象論", 電氣學會, pp. 242-258, 1980.
- [4] A. Von Hippel, "Electrical Breakdown of Solid and Liquid Insulators", J. Appl. Phys, Vol.8, pp. 815-832, 1937.
- [5] M.Ieda et al, "Dielectric Breakdown of High Temperature Polymers", The 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 2, pp. 1-5, 1979.
- [6] T. Yamakita, "Relation between the superstructure and the Dielectric Breakdown in semi-crystalline Polymer", T. IEE Japan, Vol.117-A, No.12, pp. 1182-1187, 1997.
- [7] T. Okamoto, H. Suzuki, N. Hozumi and M. Ieda, "Partial Discharge Endurance Life of Polymer Insulating Materials at High Temperature", T. IEE Japan Vol. 117-A, No.6, pp. 558-563, 1997.