Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 15, No. 11, p. 1003, November 2002.

논 문 15-11-14

에폭시/고무 거시계면에서 장시간 절연파괴전압에 대한 연구

Study on the Long Time Breakdown Voltage in the Macro Interface between Epoxy and Rubber

박우현, 이기식
(Woo-Heon Park and Ki-Sik Lee)

Abstract

In this paper, the estimation of lifetime with the various conditions of the interface between toughened epoxy and rubber which are consisting materials of underground power delivery system has been studied. After the measurement of the short time AC interfacial breakdown strength on macro interfaces at room temperature, the breakdown time at several voltages were measured under the constant voltages lower than the short time breakdown voltage. The long time breakdown voltage was calculated by using Inverse Power Law. Two types of interfaces was studied. One was the interface between toughened epoxy and EPDM(Ethylene Prorylene Diene Terpolymer). The other was the interface between toughened epoxy and silicon rubber. Interfacial pressure and roughness of interfaces was determined through the characteristic of short time AC interfacial breakdown strength. Oil condition was no oiled, low viscosity oiled and high viscosity oiled. High viscosity oiled interface between toughened epoxy and silicon rubber had the best lifetime exponent, 20.69. and the breakdown voltage of this interface after 30 years was evaluated 19.27kV.

Key Words : Macro interface, Interfacial breakdown, V-t characteristic, Inverse Power Law

1. 서 론

최근 전력 수요가 급증함에 따른 송전 전압의 초고압화가 급속히 진행되고 있다. 그러나 이러한 전력 송전 시스템은 시간의 경과에 따라 절연재료의 기능이 떨어지는데 이러한 현상은 기기의 기능을 저하시켜 사고를 유발하므로 안정된 시스템을 구축하기 위해서는 구성 재료의 열적, 기계적, 화학적 및 경년(經年) 열화에 대한 방안 및 열화 진단에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다[1,3]. 이에 따른 절연 재료의 수명 예측이 필요하게 되었다.

초고압 케이블용 접속함은 케이블의 초고압화와 고분자 절연재료의 발전과 함께 지속적으로 발전해 왔으며, 최근에는 시공성의 편리함을 주목적으로 하는 조립형 접속함의 개발이 지속적으로 이루어져 왔다. 초고압 케이블용 접속함은 크게, 현장에서 절연부품을 성형하여 시공하는 방식인 Tape Molded Joints(TMJs)와 공장에서 성형, 검사된 부품을 현장에서 조립하는 접속함인 Pre-fabricated Joints(PJs)와 Pre-Mold Joints(PMJs)로 나눌 수 있다. TMJs는 뛰어난 신뢰성에도 불구하고 현장 성형방식으로 시공되기 때문에 고도의 조립기술이 요구되고 시공시간이 과다하게 소요되는 단점이 있다. 이 때문에 케이블 접속함은 현장 조립이 간편한 조립형 접속함(PJs, PMJs)으로 전환되고 있는 추세이다[4].

단국대학교 전기공학과
(서울특별시 한남동 산 8번지 전기공학과
Fax : 02-514-3062
E-mail : narapwh@hotmail.com)
2002년 7월 4일 접수, 2002년 8월 14일 1차 심사완료
2002년 9월 2일 최종 심사완료

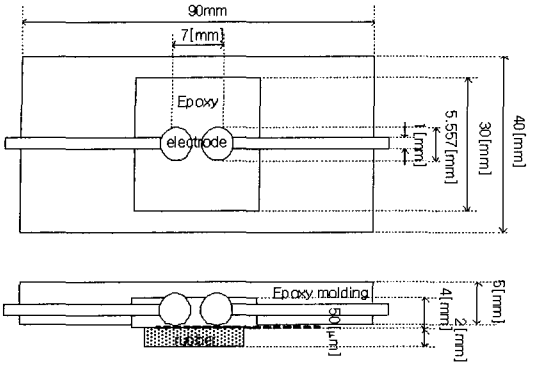

그림 1. 시편의 구조.
Fig. 1. Structure of specimen.

본 논문에서는 전력 송전 시스템에서 사고의 많은 비중을 차지하고 있는 케이블의 접속재의 수명을 예측하기 위하여 최근 많이 사용되고 있는 PJs의 터폰드 에폭시와 고무 계면을 모델링한 시편을 통해 V-t 특성을 측정하였다. 수명 시간 및 절연파괴의 데이터는 일반적으로 산만하고 흐트러져 있기 때문에 일정한 통계 처리를 하여 정량적으로 평가해야 한다. 따라서 본 논문에서는 절연체의 수명특성에 많이 이용되는 역승모델에 적용함으로써 에폭시와 고무 계면의 장시간 교류절연파괴전압을 예측하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

2.1 시편제작

본 실험에 사용된 재료는 CIBA사에서 개발한 열적, 기계적으로 우수한 터폰드 에폭시(Toughned epoxy resin, 상품명: XB5995, 점도: 4500~7000 mpas, 에폭시당량: 4.7~5.0 g/equiv, 밀도: 1.12~1.16 g/cm^3 at 25℃, 인화점: >200℃, 유리전이온도 Tg: 140~155℃)이며 경화제로는 XB5996가 사용되었다. 또한 시편 제작 시 사용한 고무로는 실제 초고압용 응력완화용으로 사용되고 있는 EPDM 및 실리콘고무를 사용하였다.

에폭시의 유리 전이 온도는 140℃ 이상인 반면 고무의 유리전이온도는 빙점보다 훨씬 낮다. 즉, 상온에서 탄성이 있는 물질은 고무이며 에폭시는 탄성이 거의 없다. 그러므로 에폭시의 표면 상태가 계면의 전기적 특성에 보다 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

CIBA에서 제시한 배합비에 의해 에폭시와 경화제를 혼합하여 진공 가열 교반 장치에 넣고 80℃에서 10^{-1} Torr의 진공 상태로 30분 동안 교반하였다. 교반으로 탈기 및 각 첨가제들을 균일하게 혼합시킨 후, 에폭시를 몰더에 넣고 1차경화시켰다. 시편의 계면 조건과 전극과 계면 간격의 재현성을 위해 에폭시 속에 전극을 삽입한 채로 경화시켰다. 삽입된 전극은 직경 5.557 mm의 스테인레스 구와 지름 1 mm인 원통 구리가 결합된 것이었다. 경화된 시편으로 전극과 고무가 접할 부분의 두께를 50 ㎛로 처리한 후, 에폭시로 한번 더 몰딩하는 이중 몰딩 방법을 채택하였다. 이중몰딩으로 완성된 에폭시 시편과 고무를 결합시켜 절연파괴 실험용 시편을 완성하였다. 제작된 시편의 구조는 그림 1과 같다.

2.2 실험방법

그림 2와 같이 절연 파괴 실험 장치를 구성하였다. 연면 방전을 방지하기 위하여 탈기·탈습 처리한 실리콘 오일 중에 시편을 두었으며, 상용주파수의 전압을 승압 속도 1 kV/sec로 시편이 파괴될 때까지 승압하여 단시간 절연 파괴 전압을 우선 측정하였다. 그 다음, 단시간 평균 파괴 전압보다 낮은 전압을 일정하게 인가하여 얻어지는 각각의 파괴 시간들을 구하였다. 동일 조건 하에서 얻은 10개 시편에 대한 결과의 평균값을 파괴 전압 및 파괴 시간으로 하였다. 절연 파괴 시험장치는 테프

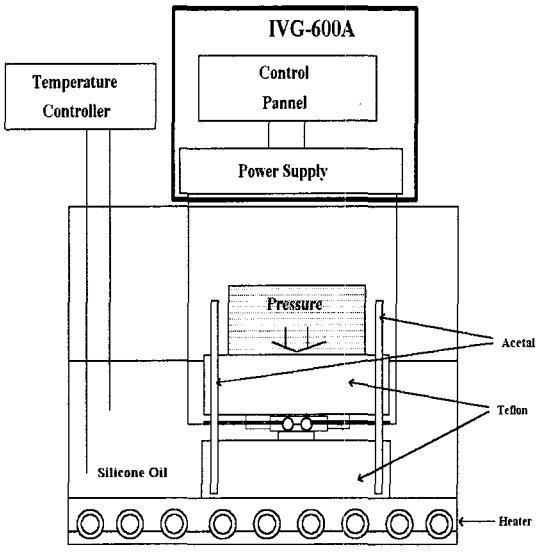

그림 2. 절연 파괴 실험 장치.
Fig. 2. Experimental apparatus for testing dielectric breakdown.

프론, 아세탈 등의 재료를 사용하였고 계면압 인가를 위한 에어 컴프레스 시스템을 제작하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 계면압 변화에 따른 교류 계면 파괴 전압

계면 절연 파괴를 일으키는 가장 중요한 원인 중 한가지는 계면에서 발생되는 부분방전 현상의 누적에 의한 트래킹 성장이다. 계면에 존재하는 공극이나 보이드속의 물질은 고체 유전체보다 낮은 절연 강도를 가지면서, 유전율도 고체보다 낮으므로 이곳으로의 전계 집중에 의해 보이드나 공극의 절연 파괴가 일어나면서 열화가 진행되어 결국은 계면의 절연 파괴를 일으키게 된다.

각 시편들의 계면압 변화에 따른 교류 계면 파괴 전압을 그림 3에 나타내었다. 비도전성 사포(#1200)로 전극과 계면이 접하는 부분을 가공하였다. 계면압이 증가함에 따라 교류 절연 파괴 전압이 높아짐을 알 수 있었고, 특정 계면압 이후에서 포화되는 경향이 나타남을 알 수 있었다. 에폭시와 EPDM의 계면은 5 kgf/cm^{2}에서 포화되며, 에폭시와 실리콘고무의 계면은 오일을 도포하지 않았을 때는 5 kgf/cm^2 이후에서 포화되었으나, 실리콘오일을 도포하였을 때에는 계면압 4 kgf/cm^2 이후에서 포화되었다.

각 조건에서 절연파괴전압이 포화되는 시점의 교류 절연 파괴 전압을 살펴보면 에폭시와 EPDM 계면은 오일을 도포하지 않았을 경우 38.3 kV, 350 cSt를 도포하였을 경우 42.1 kV, 12500 cSt를 도포하였을 경우 43 kV였다. 그리고 에폭시와 실리콘고무의 계면은 오일을 도포하지 않았을 경우, 350 cSt를 도포하였을 경우, 12500 cSt를 도포하였을 경우에서 각각 39.4, 43.4, 43.6 kV인 것으로 측정되었다.

본 연구에서 조사한 두 가지 계면의 교류절연내력 측정 결과 터픈드 에폭시와 실리콘고무 계면의 절연내력이 EPDM과의 계면보다 우수한 것으로 나타났다.

3.2 장시간 파괴전압 예측

인가 전압과 파괴 시간 사이에는 역승 법칙(power inverse law)[5]

$$V_1^n t_1 = V_2^n t_2 \tag{1}$$

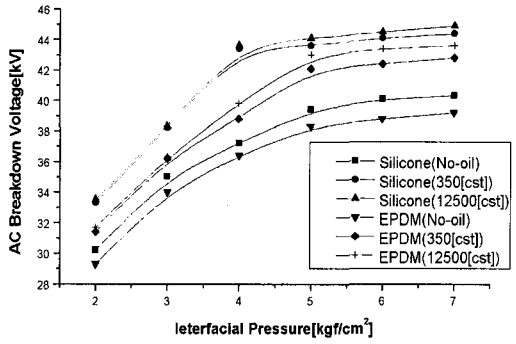

그림 3. 계면압 변화에 따른 교류 계면 파괴 전압의 변화.

Fig. 3. Variation of AC interfacial breakdown voltage due to interfacial pressure.

가 성립하고, 이 식으로부터

$$n = \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{\ln V_1 - \ln V_2} \tag{2}$$

를 얻을 수 있다.

식(2)에 그림 4, 5의 좌표점들을 대입하여 각각의 n값을 구한다. 이때에 구한 수명 지수들의 n값을 식 1에 대입하여 각각의 인가전압에 대한 장시간 절연파괴전압값을 구할 수 있다.

3.3 터픈드 에폭시 와 실리콘고무 계면의 장시간 파괴전압 예측

그림 4는 오일을 도포하지 않았을 때와 저점도 실리콘오일을 도포하였을 때, 고점도실리콘오일을 도포하였을 때의 터픈드 에폭시와 실리콘고무 계면에 대한 V-t 특성이다. 시편에 인가한 전압은 오일미도포 시편, 저점도실리콘오일 도포 시편, 고점도실리콘오일 도포 시편에 각각, 29, 33, 34 kV의 상용주파수 전압을 인가하였으며, 계면압은 3.1에서 구한 절연파괴전압 포화조건인 4 kgf/cm^{2}을 인가하였다. 각 조건별 10회의 실험을 통하여 파괴시까지의 시간을 측정하였다. ANSI/IEEE Std 930-1987에 의해 추세선은 각 조건별 평균치를 연결하였다[5].

표 1은 그림 4와 식(1)을 바탕으로 산출한 오일 도포조건에 따른 시간경과에 따른 절연파괴전압의

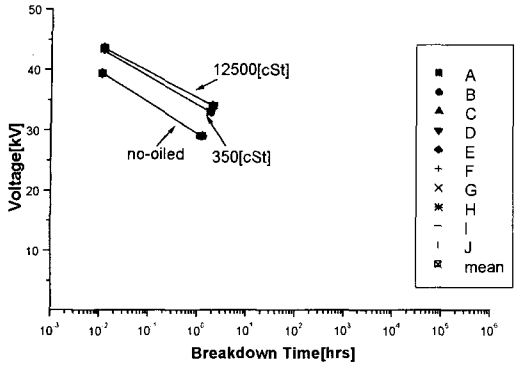

그림 4. 터폰드 에폭시와 실리콘고무 계면의 V-t 특성.

Fig. 4. V-t Characteristic of the interface between toughened epoxy and silicone rubber.

표 1. 오일도포 조건과 시간 경과에 따른 파괴 전압.

Table 1. Breakdown voltage with time and spread oil conditions.

조건	수명 지수 n	1,000 시간	10,000 시간	262,800시간 (30년)
오일 미도포	15.45	18.81 kV	16.21 kV	13.12 kV
저점도 실리콘 오일 도포	18.38	23.43 kV	20.67 kV	17.31 kV
고점도 실리콘 오일 도포	20.69	25.23 kV	22.57 kV	19.27 kV

분포를 나타낸다. 오일을 도포하지 않은 시편의 수명지수는 15.45이며 30년 이후의 파괴전압은 13.12 kV로 30년동안 66% 정도의 파괴전압 감소가 나타날 것으로 계산되었다. 저점도실리콘오일(350 cSt)을 도포한 시편의 수명지수는 18.8이며 고점도실리콘오일(12500 cSt)을 도포한 계면의 수명지수는 20.69로 계산되었으며 30년 이후의 파괴전압은 각각 17.31, 19.27 kV로 30년 동안 각각 60, 56%의 절연내력 감소를 나타낼 것으로 계산되었다.

오일을 도포한 시편의 수명지수가 오일을 도포하지 않은 시편의 수명지수보다 높게 계산되었다. 계면의 절연 파괴는 일종의 부분방전의 누적에 의한 파괴로써 계면의 부분방전 누적 등에 의한 트래킹의 성장 과정으로 이해되고 있다. 오일을 계면에 도포할 경우 이 오일은 계면에 존재하는 보이드 등을 제거해 주고, 부분방전 개시전압을 공동이나 보이드 내부에 존재하는 물질이 가스일 때보다 높여줌으로써 순간 파괴 전압 뿐 아니라 V-t 특성도 향상된 결과를 보여주고 있다.

계면의 장시간 절연내력 특성은 고점도실리콘오일을 도포한 시편이 가장 우수한 것으로 나타났으므로 점도가 높을수록 계면의 절연내력이 좋아진다고 할 수 있다. 그러나 점도가 높을수록 실리콘오일의 흐름특성이 나빠지므로 계면결합 시 계면에 기포나 공동이 생성될 가능성이 높아서 이들에 의한 절연내력 감소를 가져올 수도 있으므로 계면결합 시 기포 등이 생성되지 않도록 세심한 주의가 필요하다.

3.4 터폰드 에폭시와 EPDM 계면의 장시간 파괴전압 예측

그림 5는 오일을 도포하지 않은 경우와 저점도 및 고점도실리콘오일을 도포한 상태에서 측정한 터폰드 에폭시와 EPDM 계면의 V-t 특성이다. 각 시편의 조건 즉, 오일미도포, 저점도실리콘오일 도포, 고점도실리콘오일 도포에 따라 인가한 전압은 각각 28, 32, 33 kV였다. 각 조건 별 10회의 측정을 통하여 계면의 V-t 특성을 구하였다. 계면압은 3.1에서 구한 포화시작 계면압인 5 kgf/cm^{2}을 인가하였다. 고점도실리콘오일을 도포한 시편의 기울기가 가장 완만하게 나타났다. 실선의 기울기가 완만할수록 시간에 따른 파괴전압의 감소가 작음을 나타내므로 터폰드 에폭시와 EPDM 계면에서도 고점도실리콘오일을 도포한 시편의 V-t 특성이 가장 좋다고 할 수 있다.

표 2는 그림 5와 식 (1)을 사용하여 구한 계면의 수명지수 및 임의의 장시간에 대한 예상 절연파괴전압을 나타낸다.

각 조건에 대한 수명지수는 오일미도포, 저점도실리콘오일 도포, 고점도실리콘오일 도포 조건에서 각각 14.72, 18.13, 19.13이었다.

30년 이후의 절연내력 감소를 살펴보면 각 조건에서 69, 61, 58%로 모든 조건에서 실리콘고무와의

계면보다 높은 절연내력 감소를 나타내었다.

에폭시와 실리콘 고무, 에폭시와 EPDM 계면에서 측정된 가장 높은 수명지수는 각각 20.69와 19.13으로 실리콘고무와의 계면의 수명지수가 1.56 더 높다.

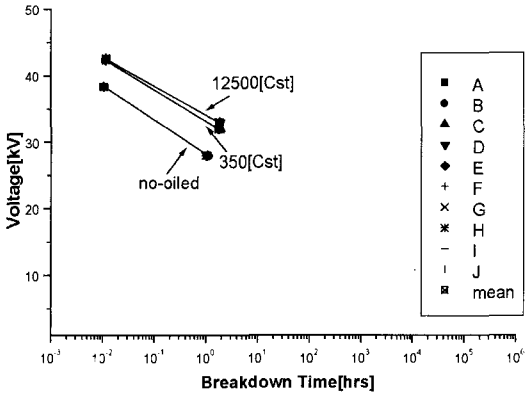

그림 5. 터폰드 에폭시와 EPDM 계면의 V-t 특성.

Fig. 5. V-t Characteristic of the interface between toughened epoxy and EPDM.

표 2. 오일도포 조건과 시간 경과에 따른 파괴 전압.

Table 2. Breakdown voltage with time and spread oil conditions.

조건	수명 지수 n	1,000 시간	10,000 시간	262,800시간 (30년)
오일 미도포	14.72	17.59 kV	15.05 kV	12.05 kV
저점도 실리콘 오일 도포	18.13	22.60 kV	19.91 kV	16.62 kV
고점도 실리콘 오일 도포	19.91	24.08 kV	21.45 kV	18.20 kV

5. 결 론

역승법칙에 의해 터폰드 에폭시와 고무 계면의 장시간 절연파괴특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정 전압 인가시의 파괴 수명은 순간 파괴 전압 실험에서의 파괴특성에 비례하여 나타남을 알 수 있었다.
2. 터폰드 에폭시와 실리콘고무 계면이 터폰드 에폭시와 EPDM 계면보다 더 우수한 절연 내력 및 V-t특성을 나타냈는데 이는 실리콘고무의 탄성이 EPDM의 탄성보다 좋기 때문이다.
3. 12500 cSt실리콘 오일을 도포하였을 때 가장 우수한 특성을 나타냈는데 점도에 따라 절연특성은 좋아지나 점도가 높으면 계면에 실리콘 오일을 도포할 때 기포 등이 생성될 가능성이 높다. 따라서 실제 사용에 있어서는 오일을 도포할 때 기포 등이 생성되지 않도록 주의가 필요하다.
4. 역승 법칙에 의해 터폰드 에폭시와 실리콘고무 시편에 12500 cSt실리콘 오일을 도포하였을 때의 계면의 전기적 특성이 가장 우수하였으며, 30년 이후의 파괴 전압은 19.27 kV로 나타났다.
5. 본 연구에서는 파괴 시간에 따른 수명 진단을 통해서 산업 현장에서 부품이나 시스템의 장기적인 성능을 평가할 수 있었으며, 기기나 설비의 고장이나 앞으로의 기기·설비에 발생할 수 있는 사고를 미리 예측해 볼 수 있는 모델을 제시하였다.

참고 문헌

[1] Yutaka Nakamishi, Akiharu Fukunaga, Sadao Fukunaga, Teruyoshi Tanabe, Masayuki, Kobayashi, Nobio Shiseki, and Ken'ichi Ando, "Development of prefabricated joint for 275-kV XLPE cable" , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, p. 1139, 1995.

[2] Katsumi Uchida, Shin'ichi Kobayashi, Takao Kawashima, Hideo Tanaka, Susumu Sakuma, Ken'ichi Hirotsu, and Hitoshi Inoue, "Study on detection for the defects of XLPE cable lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, p. 663, 1996.

[3] D. Fournier and L. Lamarre, "Effect of presure and length on interfacial breakdown between two dielectric surfaces", Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD, USA, p. 270, 1992

[4] S. K. Lee, E. K. Ko, Y. H. Kim, S. Y. Baik, K. S. Kim, G. D. Hun, and W. K. Park, "Development of pre-mold joints for high voltage cable system", Proc. 1999 Autumn Conf. KIEE, p. 1031, 1999.

[5] H. Rosen, "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data", ANSI/IEEE. Std. 930-1987, p. 24, 1987.