

## Toughened 에폭시와 실리콘고무 계면의 교류 절연파괴 현상에 관한 연구

### Study on the AC Interfacial Breakdown Properties in the Interface between Toughened Epoxy and Silicone Rubber

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

#### Abstract

Because complex insulation method is used in EHV(extra high voltage) insulation systems, macro interfaces between two different bulk materials which affect the stability of insulation system exist inevitably. Interface between toughened epoxy and silicone rubber was selected as a interface in EHV insulation systems and tested AC interfacial breakdown properties with variation of many conditions to influence on electrical properties, such as interfacial pressure, roughness and oil. Specimen was designed to reduce the effect of charge transport from electrode in the process of breakdown and to have the tangential electrical potential with the direction of the interface between epoxy and silicone rubber by using FEM(finite elements method). It could control the interfacial pressure, roughness and viscosity of oil. From the result of this study, it was shown that the interfacial breakdown voltage is improved by increasing interfacial pressure and oil. In particular, the dielectric strength saturates at certain interfacial pressure level. The decreasing ratio of the interfacial breakdown voltage in non-oiled specimen was increased by the temperature rising, while oiled specimen was not affected by temperature.

**Key Words** : Macro Interface, Interfacial breakdown, Toughened epoxy, Interfacial breakdown

#### 1. 서론

전력계통의 초고압, 대용량화에 따라 전력기기의 절연시스템은 단일절연에서 복합절연시스템으로 바뀌어가고 있다. 복합절연시스템에는 재료사이의 계면이 필연적으로 존재하며 이들 계면은 절연시스템의 취약점이 될 수 있다[1].

전력 케이블은 그 길이의 유한성으로 인한 접속

단국대학교 전기공학과  
(서울특별시 한남동 산 8번지 전기공학과)  
Fax : 02-514-3062  
E-mail : narapwh@hotmail.com  
2002년 7월 4일 접수, 2002년 7월 31일 1차 심사완료,  
2002년 9월 16일 최종 심사완료

방식이 불가피한데 지중 송전선로의 고장원인을 분석하여 보면 30~50%정도가 접속재와 같은 케이블 부속재에서 일어났음을 알 수 있다[1] 직선 케이블 접속방식으로는 TJs(Taped Joints), PJs(Prefabricated Joints), EMJs(Extrusion Molded Joints) 등의 방식이 있다. 성능은 EMJs가 가장 우수하나 고도로 숙련된 시공자가 필요하고 연속적인 긴 시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 PJs는 부품을 공장에서 미리 생산하기 때문에 일정수준의 품질을 유지할 수 있고 EMJs 보다 짧은 작업시간의 장점을 가지고 있다. 최근에는 기술이 발달함에 따라 EHV(Extra-High Voltage)에서도 PJs 방식이 사용되고 있다[2].

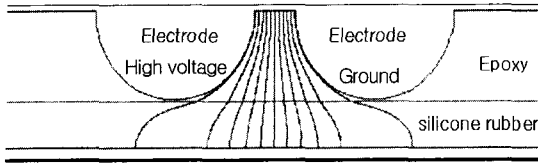


그림 1. 전극사이의 등전위 분포.  
Fig. 1. Equipotentials between electrodes.

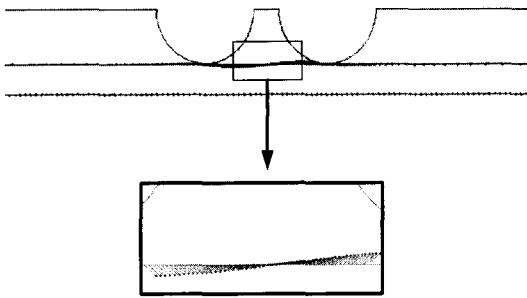


그림 2. 계면의 전계 벡터도.  
Fig. 2. Boundary vector diagram of interface.

PJs는 기 생산한 재료들 사이의 거시 계면이 필연적으로 형성된다. 그러므로 이들 계면의 전기적 특성에 관한 연구가 전력전송 시스템의 신뢰성을 위해 필요하다.

본 논문에서는 케이블 부속재 등에 형성되는 여러 이종 계면 중 Epoxy/실리콘고무 계면을 선택, 모델링한 시편을 설계·제작하여 이 계면의 전기적 특성을 연구하였다.

## 2. 시편설계 및 제작

### 2.1 전극구조의 설계

계면의 전기적 특성을 조사하기 위한 시편은 1) 계면에 전극이 접촉하여서는 안되고, 2) 계면압을 인가할 수 있는 구조이어야 하며, 3) 계면 거칠기에 따른 효과를 확인할 수 있어야 하며, 4) 계면 접촉 표면에 오일과 같은 액체를 도포하고 이에 의한 효과를 확인할 수 있어야 한다[3]. 이 조건을 만족시키기 위하여 계면을 이루는 두 시편을 따로 준비하며, 두 시편 중 하나의 시편 속에 전극을 삽입하여야 한다. 본 연구에서는 따로 준비한 에폭시와 실리콘 고무 시편을 결합하여 거시계면을 구성하였으며, 에폭시 시편 속에 전극을 삽입하였다.

이전의 연구[3,4]에서는 4개의 전극을 사용하여 거시계면 시편을 제작하였다. 이들 시편의 문제점은 등전위를 이루는 상·하 전극을 동일한 부분에 위치시키는 것이 힘들다는 점이었다. 동일한 지점에 위치시키더라도 계면압을 인가하는 과정에서 상·하 전극의 위치가 변할 수 있는 가능성이 있었다. 상하전극을 동일한 위치에 위치시키지 못하면 계면전계에 차이가 생겨 절연과피값의 오차가 커진다. 본 연구에서는 2개의 전극을 사용하여 전극시스템을 구성함으로써 이러한 문제를 해결하였다. 2개의 전극을 사용하여도 계면전계의 차이가 없음을 FEM을 통한 전계해석으로 확인하였다.

그림 1은 설계한 전극구조 사이의 등전위선 분포를 나타낸다. 양쪽 전극 가운데 부분의 등전위선 간격이 가장 조밀하면서 그 간격이 일정하므로 이 부분에서 가장 높은 평등전계가 형성된다는 것을 알 수 있다. 그림 2는 계면의 전계벡터 분포를 나타낸다. 전극의 중앙 부분에 계면전계가 수평방향과 일치하므로 이 부분에서의 수평 성분 전계가 가장 클 것이다. 그림 3은 전극구조 설계를 바탕으로 제작한 거시계면 시편의 구조이다.

### 2.2 시편의 제작

본 실험에 사용된 에폭시는 CIBA사에서 개발한 열적, 기계적으로 우수한 터프드 에폭시(Toughened epoxy resin, 상품명: XB5995, 점도: 4500~7000 mpas, 에폭시당량: 4.7~5.0 g/equiv, 밀도: 1.12~1.16 g/cm<sup>3</sup> at 25°C, 인화점: >200°C, 유리전이온도 Tg: 140~155°C)이며 경화제로는 XB5996이 사용되었다. 실리콘 고무는 실제 초고압절연용으로 사용되는 제품을 사용하였다. 고무는 상온에서 탄성이

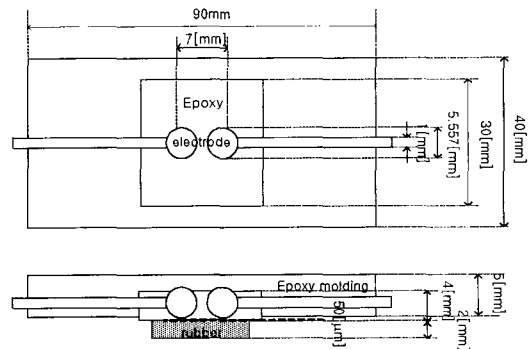


그림 3. 시편의 구조.  
Fig. 3. Structure of specimen.

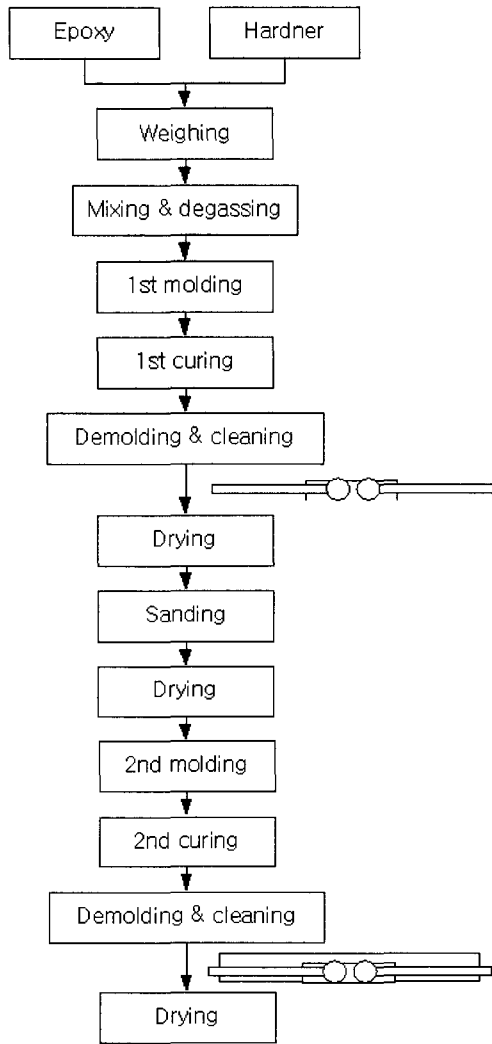


그림 4. 에폭시 시편의 제작 공정.  
Fig. 4. Manufacturing process of epoxy specimen.

있는 물질이므로 계면압 등에 의하여 계면에 생성된 보이드, 공공 등의 결합이 탄성이 없는 에폭시보다 쉽게 제거될 수 있다. Toughened 에폭시는 기본 에폭시에 실리콘 고무를 첨가하여 탄성도를 향상시킨 것으로 유리질인 일반 에폭시보다는 계면형성 재료로 적합하다. 그러나 그 탄성도는 실리콘고무보다 훨씬 작으므로 에폭시 표면의 상태가 계면의 전기적 특성에 보다 많은 영향을 미칠 것이다.

그림 4는 에폭시 시편의 제작공정을 나타낸다.

전극과 계면간격의 재현성과 전극 삽입을 위하여 2중 몰딩법을 사용하였다. 먼저 에폭시에 전극을 넣어 1차 경화시킨 후 전극과 계면사이의 거리를 50  $\mu\text{m}$ 로 처리하고, 돌출된 전극 부분을 에폭시로 몰딩한 후 시편을 2차 경화 시켰다. 1차 경화조건은 100 $^{\circ}\text{C}$ , 4시간이었고 2차 경화조건은 100 $^{\circ}\text{C}$ , 10시간이었다. 측정 시 그림 3의 에폭시 몰딩 부분과 에폭시 부분 사이의 계면에서 발생하는 연면절연 파괴는 없었다. 완성된 에폭시 시편과 실리콘고무를 결합시켜 거시계면시편을 완성하였다. 이 때 에폭시와 실리콘고무 사이에 오일을 도포하여 오일에 따른 계면의 전기적 특성변화를 측정할 수 있었다. 계면에 도포한 오일은 실리콘오일이며 저점도 실리콘오일은 점도 350 cSt, 고점도 실리콘오일로는 점도는 12500 cSt를 사용하였다.

### 3. 실험방법

계면 절연 내력 측정은 Pulse Electronic Engineering Co., LTD.의 IVG-600A로 전압을 인가하였으며, 인가 전압으로는 AC를 사용하였다.

테프론, 아세탈 등의 절연 재료로 계면압을 가할 수 있는 계면 절연 내력 시험 장치를 구성하였다. 공기압축 시스템으로 계면압을 인가하였으며 공압실린더 앞쪽에 압력조정기를 두어 설정값을 유지할 수 있도록 하였다.

교류 계면 절연 내력 측정은 ASTM D 149-95a의 Method A, 단시간 측정법을 따랐으며 트립전류는 10 mA, 전압상승률은 1 kV/s로 하였다.

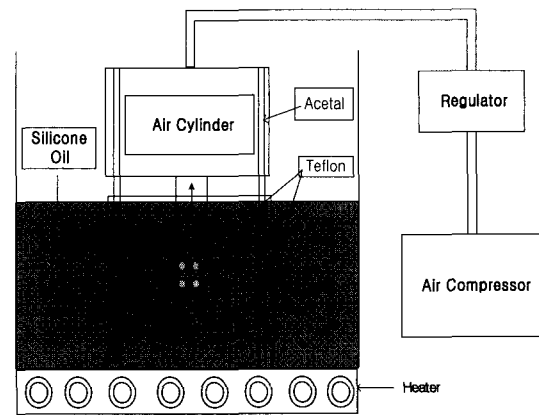


그림 5. 계면 절연 파괴전압 시험장치.  
Fig. 5. Interfacial breakdown voltage tester.

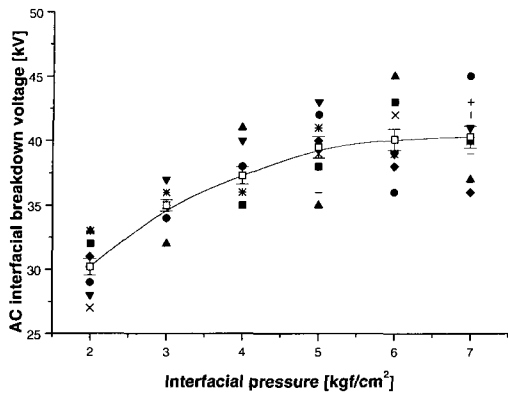


그림 6. 오일을 도포하지 않은 시편의 계면압에 따른 교류 계면 절연파괴전압의 변화.

Fig. 6. Variation of the AC interfacial break down voltage according to interfacial pressure.

온도변화에 의한 절연내력 측정 시를 제외한 모든 실험은 상온에서 행하였고, 실험결과는 모두 10 회 측정의 평균값이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 오일을 도포하지 않은 시편의 계면압에 따른 교류 계면 절연파괴 전압의 변화

그림 6은 상온에서 측정된 오일을 도포하지 않은 시편의 계면압 변화에 따른 교류 계면 절연파괴전압의 변화를 나타내었다. #1200의 비도전성 사포로 접촉표면을 처리하였다. 계면은 그 표면의 거칠기에 의해 보이드, 공공 등이 생기게 되는데 이 부분은 기체로 채워져 있으므로 높은 전압이 인가되면 이 부분에서 부분방전이 발생하고 이 현상의 누적으로 계면의 절연파괴가 일어나게 된다. 계면에 압력을 주게되면 이 압력으로 인해 계면 내부의 보이드, 공동 등의 수와 전체 체적이 감소하게 되므로 압력이 증가함에 따라 절연 내력이 향상되었다고 생각된다. 특히 계면압 5 kgf/cm<sup>2</sup> 이후에서는 절연내력이 포화되는 경향을 나타내었다.

##### 4.2 350 cSt 실리콘오일을 도포한 시편의 계면압 변화에 따른 교류 계면 절연파괴 전압의 변화

그림 7은 350 cSt의 실리콘오일을 도포한 시편

의 계면압 변화에 따른 교류 계면 절연파괴전압의 변화를 나타내었다. 오일은 계면 내부의 보이드, 공공 등을 채우는 작용을 하는데 기체보다 높은 부분 방전개시전압을 가지므로 오일을 도포하지 않은 시편보다 높은 절연내력을 가지는 것으로 생각된다. 오일을 도포한 시편도 마찬가지로 압력이 증가함에 따라 절연내력이 증가하였는데 오일을 도포하지 않은 시편보다 낮은 압력인 4 kgf/cm<sup>2</sup> 이후에서 포화되는 경향을 나타내었다.

##### 4.3 12500 cSt 실리콘오일을 도포한 시편의 계면압 변화에 따른 교류 계면 절연파괴 전압의 변화

그림 8에 나타난 것처럼 12500 cSt의 실리콘오일을 도포한 시편은 350 cSt의 실리콘오일을 도포한 시편보다 조금 높은 절연파괴전압을 가진다. 절연파괴전압이 포화되는 것은 마찬가지로 4 kgf/cm<sup>2</sup> 이후에서 포화되었다. Toughened 에폭시와 실리콘고무 계면에 실리콘오일을 도포한 경우의 절연내력을 측정본 연구의 결과를 이폭시/EPDM 계면의 결과 [4]와 비교해보면 절연내력이 포화되는 시점이 1 kgf/cm<sup>2</sup> 줄어들었고 그 포화되는 정도도 훨씬 뚜렷하였으며 절연파괴전압 또한 5 kV 정도 상승하였다. 또한 에폭시/EPDM 계면에서는 높은 점도의 실리콘오일의 흐름특성이 나쁘기 때문에 상온에서의 절연내력은 낮은 점도의

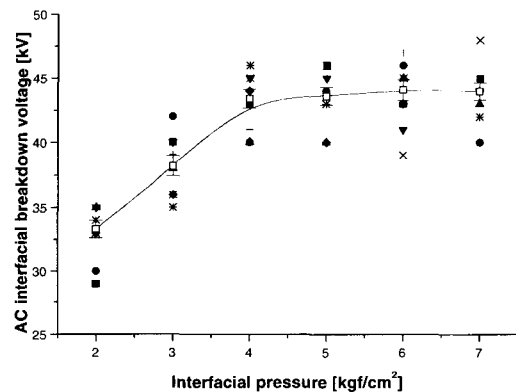


그림 7. 350 cSt 실리콘오일을 도포한 시편의 계면압 따른 교류 계면 파괴 전압의 변화.

Fig. 7. Variation of the AC interfacial break down voltage of 350 cSt silicon oiled Specimen according to interfacial pressure.

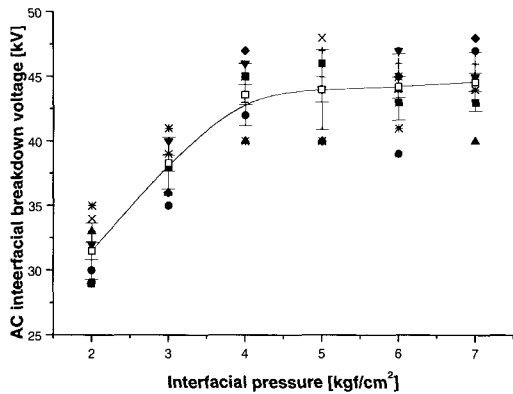


그림 8. 12500 cSt 실리콘오일을 도포한 시편의 계면압 따른 교류 계면 파괴 전압의 변화.

Fig. 8. Variation of the AC interfacial breakdown voltage of 12500 cSt silicon oiled Specimen according to interfacial pressure.

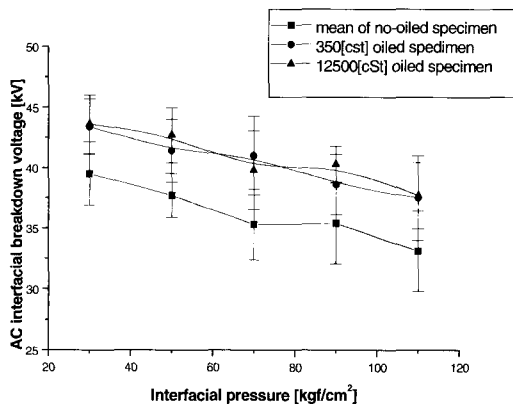


그림 9. 온도변화에 따른 교류계면파괴전압의 변화.

Fig. 9. Variation of the AC interfacial breakdown voltage according to temperature.

실리콘오일을 도포한 계면이 우수하였다[4]. 그러나, 오일의 종류에 따른 절연내력 사이에 큰 차이는 없지만, 본 연구에서 반대의 결과가 나온 것은 EPDM과 실리콘 고무의 특성 차이에서 기인한 것일 수도 있으나 이전의 연구에서 사용한 시편의 경우 상·하 두 전극의 위치를 맞추기 위한 과정에서 계면에 보이드 등이 생성되었을 가능성 또한 그 이유가 될 수 있다. 그러나 보다 정확한 원인규명은 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다. 본 실

험에서 오일차이에 의한 절연내력의 차이는 계면압 4 kgf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 0.4 kV이다.

#### 4.4 온도 변화에 따른 교류 계면 절연파괴 전압의 변화

그림 9는 온도 변화에 따른 교류 계면 절연파괴 전압의 변화를 나타낸 것이다. 오일을 도포하지 않은 시편은 5 kgf/cm<sup>2</sup>의 계면압을 인가하였고 오일을 도포한 시편은 4 kgf/cm<sup>2</sup>의 계면압을 인가하였다. 온도는 상온에서부터 110℃까지 상승시켰으며 20℃간격으로 계면의 절연내력을 측정하였다. 110℃에서의 절연내력은 오일 미도포 시편, 저점도 실리콘오일 도포 시편, 고점도 실리콘오일 도포 시편에 대하여 각각 상온에서 측정된 절연내력의 55, 68, 68%였다. 오일을 도포한 시편에서는 그 감소율에 차이가 없었으며 오일을 도포하지 않은 시편의 경우 보다 큰 감소가 있었다.

### 5. 결론

1. 계면압이 상승함에 따라 거시 계면의 절연내력이 상승하였다.
2. 12500 cSt의 실리콘오일을 도포하였을 경우가 가장 높은 절연내력을 나타내었다.
3. 오일을 도포하지 않은 계면은 계면압 5 kgf/cm<sup>2</sup>이후에서 계면의 절연내력이 포화되는 경향을 나타내었다.
4. 오일을 도포한 계면인 경우에는 계면압 4 kgf/cm<sup>2</sup>이후에서 계면의 절연내력이 포화되는 경향을 나타냈다.
5. 오일을 도포한 에폭시와 실리콘고무 계면의 온도에 따른 절연내력의 감소율은 차이가 없었다.

### 참고 문헌

- [1] 1997 workshop lecture book, "A short course on power cable", KEWIC, KERI, p. 143, p. 193, 1997.
- [2] Yutaka Nakanishi, Akiharu Fukunaga, Sadao Fukunaga, Teruyoshi Tanabe, Masayuki Kobayashi, Nobio Shiseki, and Ken'ichi Ando, "Development of pre-fabricated joint for 275-kV XLPE cable", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10,

No. 3, p. 1139, 1995.

- [3] M. Nagao, S. Ka, T. Suzuki, C. Y. Muramoto, N. Hozumi, and T. Tanaka, "Model specimens for testing interfacial electrical insulating properties in EHV Extruded Cable Splices and Preliminary Results - Specimen with sphere electrode (EPR-XLPE Interface)", WG. 15-10, CIGRE 1999 Session, 1999.
- [4] Duck-Kweon Bae, Sang-Keol Kim, Su-Kil Lee, Il-Hyung Jung, and Joon-Ung Lee "Dielectric breakdown phenomenon of the interface between epoxy/EPDM", 전기전자재료학회논문지, 12권, 12호, p. 1164, 1999.