

다중 응력 변화에 따른 에폭시 복합체의 내크랙성 및 절연 파괴 특성

The Crack Resistance and the Dielectric Breakdown properties of Epoxy Composites due to the Multi Stresses Variation

송봉철*, 김상걸*, 안준호*, 김충혁*, 이준웅**.

*광운대학교 전기공학과

**한국전기전자재료학회장

(Bong-Cheol Song*, Sang-Gul Kim*, Jun-Ho An*, Chung-Hyeok Kim*, Joon-Ung Lee**)

Abstract

Epoxy materials are used as insulation material for electric power cables. In the case of a flow of excess current, due to the temperature difference which occurs between the heat of the conductor and the atmosphere, heat degrades connection point of the cables. Also, the mechanical stress, which occurs due to the thermal expansion coefficient of cable connection electrode system and epoxy insulation materials along with the gap between thermal conduction based on the extra high voltage of transmitted voltage, increases possibility of cracks to occur.

The relationship between mechanical stress and electrical breakdown mechanism is verified for the epoxy materials such as high toughness epoxy materials, which comes to be used contemporarily, and for the breakdown mechanism of epoxy materials on the multi-stresses (mechanical and electrical) due to the variation of the temperature.

1. 서론

최근 전력 기기의 고용량화와 소형화 그리고 절연 성능의 고기능화 및 전력 용량의 증대에 따른 절연 성능의 향상을 위해서 전력 계통은 대형화하여 왔으며 또한 전력 계통이 수송하는 전력량에 따라서 전력 기기의 온도가 변하고 그로 인하여 접속함의 매입 금구와 절연 재료간의 열팽창을 및 열전도도 차이에 의해 계면에 발생하는 전기, 기계적인 응력이 증대하여 크랙 발생 가능성이 높아지고 있다. 따라서 전극의 재료인 금속과 절연 재료의 열전도도와 열팽창을 차이에 기인하는 기계적인 응력을 완전히 제거하지 않으면 필연적으로 온도 변화에 따라서 전기, 기계적인 다중 응력에 의한 절연 파괴 전압의 변화가 나타나게 된다. 시편 제조 공정에서 전극과 에폭시간의 계면에 남는 잔류 응력과 시편의 온도가 변화할 때 전극과 에폭시 사이의 계면에 발생하는 전기/기계적인 다중 응력의 변화 과정을 이해하고, Conventional Bisphenol-A type epoxy resin와 High Toughness epoxy resin를 최적화한

배합비와 경화조건으로 제작하고 정상 상태일 경우 절연 파괴 실험을 하여 파괴 특성을 이해하고, 전기/기계적으로 다중 응력을 가한 상태에서 절연 파괴 실험을 하여 다중 응력의 변화에 따른 절연 파괴 메카니즘의 관계를 규명하였다.

2. 실험

2.1. 사용시료

본 실험에 사용된 에폭시 수지는 고온 경화용 주형 수지로 다음 두가지 시편으로 제작하였다.

- (1) Bisphenol-A type Epoxy Resin(CIBA-GEIGY CO.)(100phr] + Methly tetra Hydro Phthalic Anhydride[100phr] + SiO₂[300phr]
- (2) High Toughness Epoxy Resin(XB5995)[100phr] + XB5996[87phr] + SiO₂[280phr]

2.2. 시편제작

가로, 세로 각각 30[mm]인 테프론 몰더를 제작한

후 에폭시, 유연제, 충전제, 계면 결합제, 가소성 부
 여제를 최적화된 배합비로 혼합하여 100[°C]에서 4
 시간 1차 경화시킨 후 다시 140[°C]에서 10시간 동
 안 2차 경화 시켜 시편을 제작하였다. 시편은
 3.95[mm]인 외경을 가진 스테인레스 강구를 초음파
 세척후 두께 3[mm]인 에폭시에 상부전극으로 매입
 하여 제작하였다. 전극간 거리는 200[μm]로 하여
 구대 평판 전극계를 구성하였다.

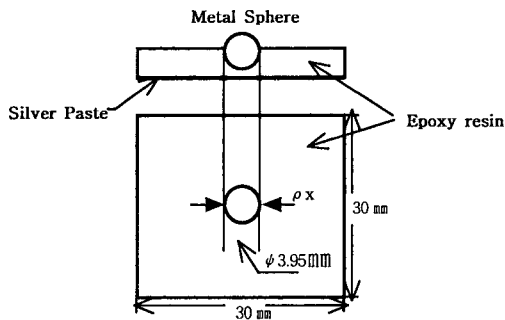


그림 2-1. 시편 형상

2.3. 교류절연 파괴실험

연면 방전을 방지하기 위하여 탈기 처리한 실리
 콘 오일 중에서 온도범위 10~150[°C], 전압의 승압
 속도를 1[kV/sec]로 절연 파괴가 일어날 때까지 승
 압하면서 측정하였다. 가열 조건일 경우에는 10[°C]
 로 유지시킨 시편을 150[°C]로 유지한 실리콘 유
 중 에 넣고 1분 후에 교류전압을 인가하여 시편의 과
 도적 열변화시에 대한 파괴 실험을 하였다.

2.4. 다중응력 메카니즘

에폭시 복합 재료는 제조 과정 중에 화학적인 경
 화와 이 공정중에 발생하는 화학적인 수축을 거치
 게 된다. 화학적 수축이 끝나면 경화 온도로부터 상
 온까지 냉각하면서 선형적인 열팽창율에 따른 열적
 인 수축 과정을 거치게 되고, 이 두 과정중에 전극
 과 에폭시 수지 사이에 기계적인 응력이 남게 된다

2.4.1 시편제조공정시 잔류응력

에폭시 수지는 경화시 액체 상태에서 젤상(gel)을
 거쳐 고무상(유리상)으로 되며 최종 경화 온도에서
 상온까지 냉각될 때 유리상(glass)으로 된다. 에폭시
 수지에서 에폭시 혼합물의 유리전이온도가 반응 온
 도보다 낮고 젤이 되기 전에는 분자의 운동성이 좋
 기 때문에 내부 응력이 발생될 수 없다고 가정할

수 있다. 따라서 에폭시 수지의 경화시 발생하는 잔
 류 응력은 겔화점부터 고려한다. 시편이 경화하게
 되면 전극의 열팽창율에 의한 팽창과 에폭시의 경
 화 반응시 화학적 수축에 의하여 전극과 에폭시 사
 이의 계면에서 기계적인 응력 ρ_1 이 발생한다. 여기
 서 $\rho_n(n=1\sim7)$ 은 응력의 단계를 의미한다. 경화 반
 응이 끝난 후 상온까지 냉각하는 과정에서 에폭시
 와 전극의 열전도율 및 열팽창율 차이에 의해서 잔
 류 응력이 발생하게 된다. 우선 시편이 상온으로 냉
 각하면 에폭시와 전극의 열전도율의 차이에 의해
 전극의 외경이 감소한다. 이 경우 경화 공정 중에
 발생한 응력 ρ_1 은 ρ_2 로 감소하게 된다. 또한 전극
 과 에폭시가 모두 상온까지 냉각하게 되면 에폭시
 가 전극에 기계적인 응력을 증가시킬 정도로 수축
 하여 응력이 ρ_3 로 다시 증가한다. 이 과정을 그림
 2-2에 나타내었다.

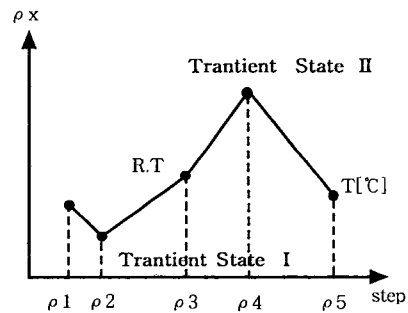


그림 2-2. 가열 조건에 따른 기계적 응력 변화 패턴

2.4.2. 시편 가열시 응력 변화

시편이 상온에서 가열하기 시작하면 에폭시와 전
 극의 열전도율 차이에 의해 전극만 충분히 가열되
 는 과도 상태가 된다. 따라서 전극과 에폭시간 기계
 적 응력이 ρ_4 로 증가한다. 시간이 경과하여 에폭시
 온도도 충분히 증가하면 에폭시와 전극의 열팽창율
 차이에 의해 응력은 ρ_5 로 감소한다. 주위 시편의
 온도가 다시 경화 온도가 되면 응력은 다른 요인에
 의해 감소되지 않는 한 ρ_1 으로 되돌아간다. 그림
 2-2에 시편을 상온에서 경화 온도까지 가열하는 조
 건에 따른 기계적 응력의 변화를 나타내었다.

2.4.3 시편 냉각시 응력 변화

시편을 상온에서 저온으로 냉각하게 되면 에폭시
 온도가 충분히 변하지 않는 과도 상태가 되어 전극
 과 에폭시간에 응력이 완화되는 상태(ρ_6)가 된다.
 시간이 경과하여 에폭시 온도도 충분히 감소하게

되면 전극과 에폭시의 열팽창을 차이에 의해 응력은 $\rho 7$ 로 다시 증가한다. 그림 2-3에 시편의 냉각 조건에 따른 기계적 응력의 변화를 나타내었다.

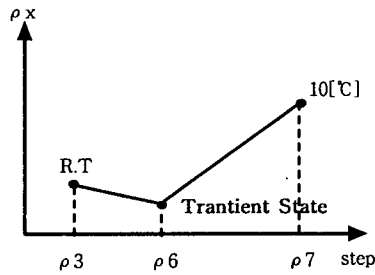


그림 2-3. 냉각 조건에 따른 기계적 응력 변화 패턴

3. 실험결과 및 검토

3.1. 정상상태시 파괴 특성

그림 3-1은 기존 에폭시와 터프드 에폭시의 무충진 시편에 대한 교류 절연 파괴 강도의 온도 의존성을 나타낸다. 기존 시편의 90[°C] 부근과 터프드 시편의 140[°C] 부근에서 급격히 파괴 강도가 저하하는 것으로 보아 이 온도 부근이 T_g 근처이기 때문이라 사료된다. 또한 고온에서 기존 시편보다 터프드 시편이 더 양호한 파괴 강도를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그림 3-2는 충진제를 첨가한 기존 시편과 터프드 시편에 대한 교류 절연 파괴 강도의 온도 의존성을 나타내고 있다. 충진제의 첨가로 전체적인 파괴 강도는 저하하면서, 온도에 따른 급격한 파괴 강도는 둔화되어 전반적으로 온도 의존성이 무충진 시편의 경우보다 약하게 나타나고 있다.

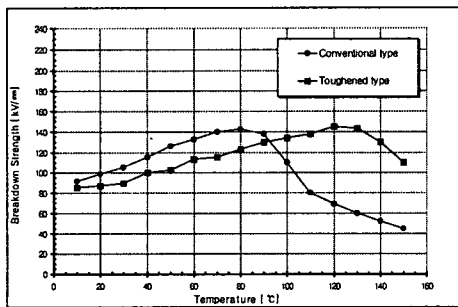


그림 3.1 무충진 시편의 절연파괴강도

이는 충진제의 첨가로 에폭시와 실리카 사이에 접합 계면이 형성되어 계면에 전계가 집중되는 현상으로 인하여 전자의 가속과 전자 사태의 성장이 빨

라져 파괴 강도가 저하한 것이라 사료된다.

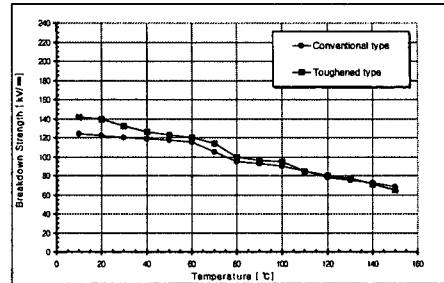


그림 3-2. 충진 시편의 절연파괴강도

그림 3-3은 실란 처리한 기존 시편과 터프드 시편의 교류 절연 파괴 강도로서 실란 처리를 통해 계면의 결합 상태가 개선되고 전계 집중을 완화하여 전체적으로 파괴 강도가 크게 향상되었다.

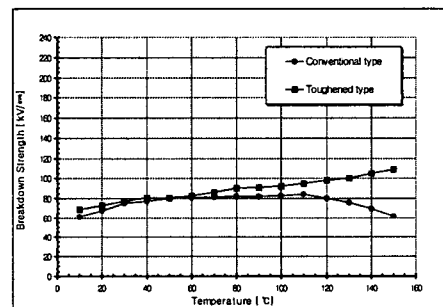


그림 3-3. 실란처리시편의 절연파괴강도

3.2. 과도상태시 파괴 특성

그림 3-4는 가열 조건에 따른 기존 에폭시와 터프드 에폭시 시편의 절연 파괴 강도를 나타낸다. 터프드 시편이 기계적 응력이 감소하는 온도 조건에서 기존 시편에 비해 양호한 파괴 강도를 나타내고 있다.

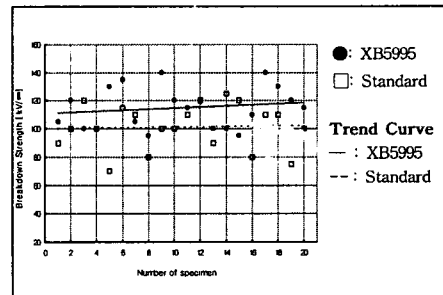


그림 3-4. 가열조건에 따른 절연파괴강도

그림 3-5는 냉각 조건에 따른 기존 시편과 터폰드 시편의 절연 파괴 강도를 나타내고 있다. 가열 조건과 마찬가지로 터폰드 시편이 기계적 응력이 증가하는 온도 조건에서 기존 시편에 비해 더 양호한 절연 파괴 강도를 보이고 있다. 이는 터폰드 에폭시 수지 내의 Rubber가 팽창과 수축시에 응력을 흡수하기 때문이라 사료된다.

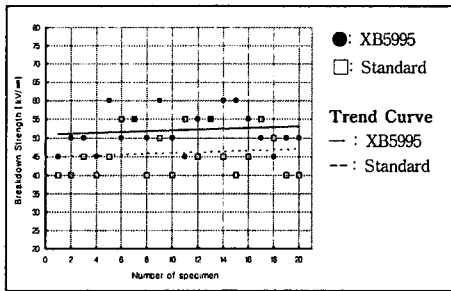


그림 3-5. 냉각조건에 따른 절연파괴강도

그림 3-6은 각 시편별로 기존 시편과 터폰드 시편의 가열할 때와 냉각할 때의 평균 절연 파괴 강도를 비교한 것이다. 터폰드 시편의 파괴 강도가 기존 시편에 비해 더 양호한 파괴 강도를 나타내고 있다.

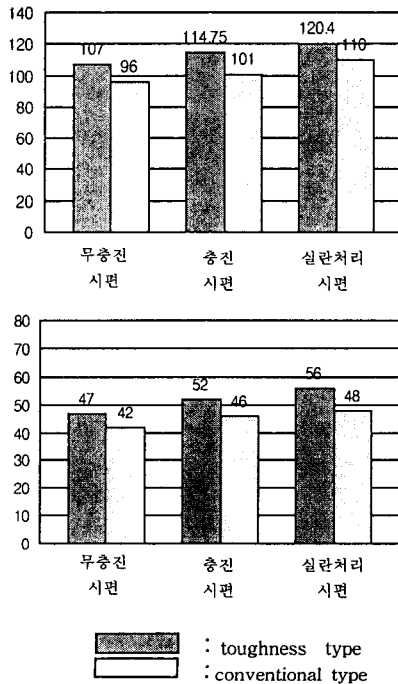


그림 3-6. 가열과 냉각시 평균절연파괴강도

4. 결론

1. 정상상태의 온도 조건시 파괴 실험 결과

충진제를 첨가한 경우 에폭시와 실리카 사이에 접합 계면이 형성되어 전계가 계면으로 집중되기 때문에 전자가 가속되어 전반적인 파괴 강도는 무충진 시편에 비해서 전체적으로 낮게 나타났고, 실란 처리를 한 경우 계면 결합 상태가 개선되어 충전 시편보다 더 양호한 절연 파괴 강도를 나타내었다. 또한 터폰드 에폭시가 기존 에폭시에 비하여 고온에서 더 양호한 파괴 강도를 나타내었다.

2. 과도상태의 온도 조건시 파괴 실험 결과

냉각 조건에서는 에폭시와 전극간의 기계적 응력이 증가하기 때문에 절연 파괴 강도가 약 50%정도 수준으로 저하하였고, 가열 조건에서는 에폭시와 전극간의 기계적 응력의 완화로 인하여 절연 파괴 강도가 높게 나타났다. 또한 시편의 온도가 급격히 변화하는 온도조건에서 터폰드 에폭시가 기존 에폭시에 비해 더 양호한 절연 파괴 강도를 보임으로서 내크랙성의 우수함을 확인하였다.

3. 시료를 가열하고 냉각하면서 실시한 절연 파괴 시험 결과에 따라서 에폭시와 같은 고체 절연물의 절연 성능은 기계적인 응력이 존재하는 여부에 따라서 급격히 바뀔 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

[1] Y. Watanabe, "Development of Outdoor Epoxy Resin Mold Apparatus for Distribution Systems", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.5, No.1, pp.204-211, 1990

[2] "Internal Stress of Epoxy Resin Modified with Acrylic Core-shell Particles Containing Functional Groups Prepared by Seeded Emulsion Polymerization", Journal of Applied Polymer Science, vol.33, pp.885-897, 1987

[3] Dr. R. Peyer, E. Hubler, R. Aus der Au, M. Rrajadhyaksha, "New Innovative Toughened Epoxy Casting Systems", CIBA POLYMERS, 1995

[4] J.M.Braun et. al., "Reliability of GIS EHV Epoxy Insulators", IEEE PES T&D Conference, pp.2149-2152, 1991

[5] "Araldite Casting Resin System", CIBA - GEIGY, 1994, 1995