에폭시 매입금구 표면거칠기에 따른 전기적, 기계적 특성 연구

A Study on Mechanical and Electrical Properties at Interfaces Between Epoxy and its Molded Metal

*김수연, *하영길, *이상진, *김영성, *박완기, **김성진
*LG전선(주) 전력연구소, **금오공과대학교

*Su-Youn Kim, *Young-Gil Ha, *Sang-Jin Lee, *Young-Seong Kim, *Wan-Ki Park, **Seong-Jin Kim
*LG Cable Ltd., **Kumoh National University of Technology.

ABSTRACT

Epoxy compound has been used as insulation material in electrical equipment for a long time because of its excellent electrical, mechanical and chemical properties. Nowadays, becoming higher voltage system, the properties of interface between epoxy and metal insert become more important. The breakdown voltage of epoxy compound for electric material is variable according to the surface roughness of metal insert. Generally, with metal insert sanding, the adhesion strength is enhanced and the breakdown strength is reduced. But in this study, we knew that the adhesion strength became enhanced but the breakdown strength didn't reduced with metal insert sanding. So in this study, we suggest the optimum interface condition by adjusting the surface roughness.

Key Words(중요용어) : surface roughness, epoxy compound, metal insert, breakdown voltage, adhesion strength

1. 서 론

에폭시 수지는 우수한 전기적, 기계적, 화학적 특성 때문에 중전기 분야에서 50년 이상 사용되어 왔다.[1] 이러한 에폭시 수지의 특성으로는 경화중에 휘발성 부산물을 생성하지 않으므로 기포가 발생하지 않으며 낮은 수축율을 나타내기 때문에 잔류 응력이 작고 치수 안정성이 높다. 또한 금속을 포함한 대부분의 물질에 높은 접착 강도를 가지고 있으며 가교 구조 때문에 기계적 강도가 높다.[2,3] 이러한 우수한 특성 때문에 전력 케이블의 연결부인 접속함의 주요 재료로 사용되어지고 있다. 특히 접속함의 각종 부품은 높은 신뢰성을 요구하고 있는데 과통전시에 발생하는 도체의 열과 외기의 온도차이에 의해 열충격이 발생한다. 이때 접속함의 매입금구와 에폭시 절연체는 열팽창율과 열전도도 차이에 의해 수축율과 온도구배가 달라지게 되어 응력이 발생하며 이에 따라 에폭시 절연체의 크랙발생 가능성이 높아지므로 매입금구와 에폭시 절연체의 계면 특성을 향상시킬 필요성이 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 에폭시 매입금구의 표면 거칠기를 통하여 매입금구와 에폭시 절연체 사이에서 최적의 계면 특성을 선정하였다.

2. 실 험

2.1 시편 제작

실험에 사용된 시편은 그림 1의 기계적 접착특성 시험을 위한 시편과 그림 2의 전기적 특성 시험을 위한 시편으로 나누어진다. 기계적 특성 시험을 위한 시편은 매입금구의 수직방향에 세가지의 표면 거칠기를 주어서 수직방향의 기계적 인장특성 시험을 하였다. 전기적 특성 시험을 위한 시편의 경우

매입형 전극을 사용하였으며 전극 부위에 sanding 처리하여 거칠기를 주었다. 상, 하부 전극사이의 절연 두께는 1mm로 하였으며 시편의 하부에는 은분을 도포하여 하부 전극과 연결하였다.

표면의 거칠기는 미세 거칠기, 중간 거칠기, 조밀 거칠기로 분류하였다. 미세 거칠기는 10~20㎛, 중간 거칠기는20~30㎛, 조밀 거칠기는 40~50㎛의 영역으로 하였으며 매입금구에 sanding 처리한 부분은 그림1, 2에서 점선부분으로 표시하였다. 시편의 제작에 사용된 에폭시 수지는 비스페놀 A type의 에폭시 수지이며 산무수물계 경화제와 무기질 충전제를 혼합하여 주형작업을 통하여 제작되었다.

2.2 표면 조도 측정 방법

표면의 기복은 기계적인 접착력에서 중요한 의미를 가지기 때문에 피측정면의 직각 방향으로 절단하였을 때 나타나는 면을 의미하는 단면곡선을 적용하였고 측정 방법으로는 표면 거칠기의 산과 골의 깊이를 모두 계산하는 10점 평균 거칠기(Rz)를 사용하였다. 이는 접착강도 시험에서 영향을 미치는 골의 깊이와 절연파괴강도 시험에서 영향을 미치는 산의 높이를 모두 고려하기 위함이다. 그리고 표면 거칠기의 평가 길이는 2.5mm로 하였다. 그림 3은 각 표면 거칠기별 측정한 거칠기 분포을 나타낸 그림이다.

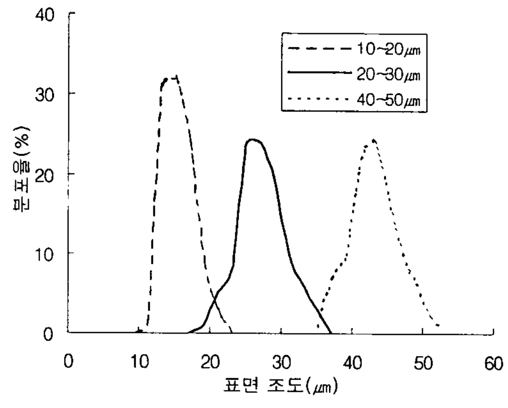

그림 1 표면거칠기별 분포 현황

2.3 실험 방법

기계적 접착강도의 시험 방법으로 에폭시 매입금구와 에폭시와의 수직방향 접착강도 측정을 위하여 만능인장 시험기(UTM)를 사용하여 기계적 인장특성 시험을 하였다. 매입금구의 조도 처리가 되지 않은 부분은 이형제를 도포하였고 이형제 부분의 접착강도는 영으로 간주하였다.

전기적 절연파괴전압 측정은 ASTM D 149의 Method A에 의해 실험하였으며 연면방전을 방지하기 위해 절연유 중에서 실험하였다.

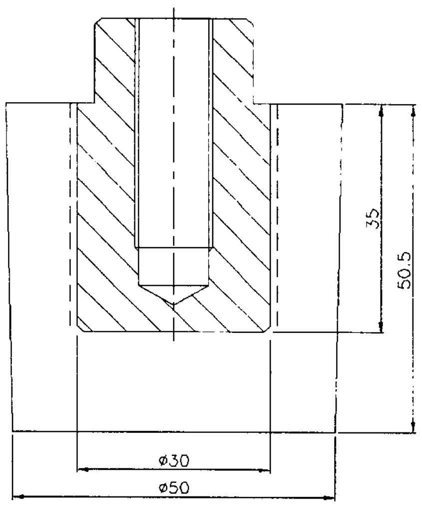

그림 2 접착력 시편

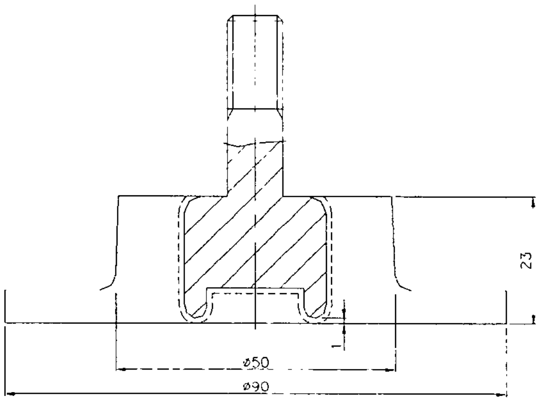

그림 3 절연파괴강도 시편

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 접착강도 시험

접착강도 시험의 결과에서는 표면 거칠기가 클수록 접착력이 높게 나타났다. 즉 미세 거칠기와 중간 거칠기의 경우 중간 거칠기 영역이 6% 정도 높은 접착강도를 보여주고 있으나 이는 동일 영역의 접착강도 편차와 비슷하므로 접착강도의 차이는 크지 않다고 판단되나 중간 거칠기 영역과 조밀 거칠기 영역의 접착력 비교에서는 22% 이상 상당한 차이를 보이면서 조밀 거칠기 영역의 접착강도가 높음을 알 수 있다. 이것은 접착강도는 계면의 접촉면적에 비례하므로 접촉면적이 큰 조밀 거칠기 영역의 접착강도가 높음을 알 수 있었다. 시험 결과는 그림 4에 나타내었으며 접착면적과 접착강도에 대한 관계식은 σ를 단위면적당 힘, P를 작용하중, A를 단면적이라 하면, P = σ×A 로 표기할 수 있다.

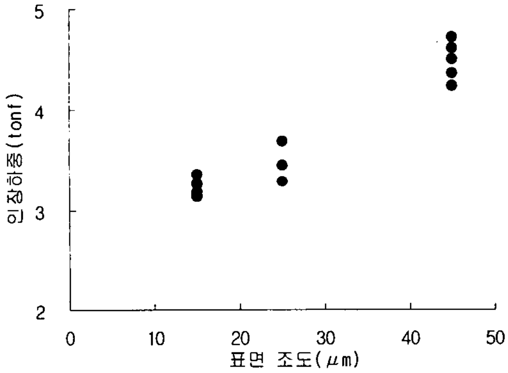

그림 4 접착강도 시험 결과

3.2 절연파괴강도 특성 시험

일반적으로 고압부 매입금구를 sanding 처리하여 계면이 거칠어질수록 기계적인 접착력은 향상되지만 절연파괴강도는 낮아진다. 본 연구에서도 접착력 시험의 경우 표면 거칠기가 클수록 접착력은 증가하는 것을 알 수 있었으나 절연파괴강도 특성은 상이함을 보여주고 있다.

즉, 미세 거칠기 영역와 중간 거칠기 영역인 경우 미세 거칠기 영역이 높은 절연파괴특성을 보이는 것이 아니라 중간 거칠기 영역과 동일한 수준의 절연파괴강도 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림 5에서 절연파괴강도 시험의 결과를 나타내었으며 결과에서 보듯이 미세 거칠기 영역과 중간 거칠기 영역에서 절연파괴강도의 최대 절연파괴강도와 최소 절연파괴강도의 값은 거의 동일 수준이며 절연파괴전압의 평균값에서도 6% 정도의 미세한 차이를 보여주고 있어 동일 수준이라 판단된다. 반면, 조밀 거칠기 영역의 경우 중간 거칠기 영역에 비해 42%의 매우 낮은 절연파괴강도 특성을 보여주고 있다. 그리고 절연파괴강도 시험을 실시한 시편에 대해 파괴된 부위를 절단하여 상, 하부 전극 사이의 절연거리를 현미경 사진을 통해 관측 후 절연거리를 측정하여 전계강도를 계산하였으며 이에 대한 결과 역시 절연파괴강도 시험의 결과와 동일한 결과를 나타내었다. 그림 6은 절연파괴 후 시편의 단면을 현미경 사진으로 나타낸 그림이다.

여기서 실험 결과에 대한 분석은 Mason 등에 의해 계산되어진 전기적 스트레스에 관한 식[4]으로 표현될 수 있다.

$$E_{\max} = \frac{2V}{r ln(1+\frac{4d}{r})}$$

r : 고압부 침전극의 선단 반경

d : 상, 하부 극간 거리

즉, 조밀 거칠기 영역의 경우 40~50μm의 거친 표면 거칠기에 의하여 산의 선단 반경이 매우 작게 되고 이로 인하여 전계의 집중이 커지면서 낮은 절연파괴강도를 보였으며 미세 거칠기와 중간 거칠기의 경우 작은 표면 거칠기로 인하여 산의 선단반경은 거의 동일하며 완만한 선단반경으로 전계의 집중이 완화되면서 높은 절연파괴강도를 보였다고 판단된다.

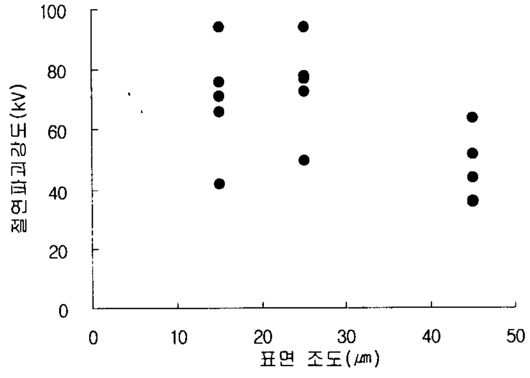

그림 5 절연파괴강도 시험 결과

그림 6 절연파괴 시편의 현미경 사진

4. 결 론

이상과 같이 본 연구에서는 에폭시 매입금구 표면 거칠기에 따른 전기적, 기계적 특성 시험을 통하여 최적의 매입금구 표면 거칠기 선정을 위한 연구를 하였다. 시험결과 에폭시 매입금구 표면 거칠기에 따른 기계적 접착특성 시험의 경우 에폭시 매입금구 표면 거칠기가 클수록 높은 접착강도를 나타내었다. 그리고 전기적 특성 시험에서 절연파괴강도는 중간 거칠기 영역과 미세 거칠기 영역의 절연파괴강도가 편차 범위내의 동일한 수준을 보였으며 따라서 중간 거칠기인 20~30㎛ 이하의 영역에서는 절연파괴강도는 크게 중요하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 전기적, 기계적 특성 시험에서 에폭시와 에폭시 매입금구 계면에서 최적의 매입금구 표면 거칠기는 접착력 및 절연파괴강도에서 양호한 결과를 보이고 있는 중간 거칠기 영역임을 알 수 있었다.

그리고 매입금구 표면거칠기에 의한 조건은 최적의 에폭시 매입금구 계면 조건이라 할 수 없으며 향후에는 매입금구에 반도전 코팅을 하여 기계적, 전기적 특성 시험을 한 후 표면 거칠기에 의한 기계적, 전기적 특성과의 비교를 통한 최적의 계면특성 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] H.Lee and K.Neville. " Handbook of Epoxy Resins", Ch. 12, MaGraw-Hill, Inc, New York, 1982 .

[2] Y.Sato, H.Murasumi, Y.Shiiba, "Crack Resis-tant Epoxy Casting Material for High Tem-perature Use", vol 117. 住友電氣, 昭55年 9月

[3] S.Menju, H.Aoyagi, Y.Okamoto, Y.Yamagiwa, "Electrical and Thermal Properties of Mold-ings", 東芝 レビュ. vol 26, No 7, pp 835-840.

[4] J.H. Mason, "Breakdown of solid Dielectrics in Divergent Field", Proc. IEEE, Vol. 102-C, pp. 254-263, 1995