

Epoxy-Cu간 접촉면에서의 절연특성 개선

Reformation of Dielectric Property in interface between epoxy and Cu

송재주*, 김성홍*, 정남성**, 황종선**, 한병성***

(* 순천청암대학. ** 담양대학. *** 전북대학교)

(Jae-Joo Song, Sung-Hong Kim, Nam-Sung Chung, Chong-Sun Hwang, Byung-Sung Han)
(sunchon chongam college, [Http://www.chongam.ac.kr](http://www.chongam.ac.kr))

Abstract

Insulators for high-voltage and large-power should be endured mechanically the weight of mold bushing itself and the force of pushed from contact with circuit breaker and conductor. But dielectric breakdown cloud be occurred result from the external circumstances and internal factors such as chemical reaction, partial discharge, change of temperature and the relation of temperature-time in process of casting. Therefore, to get rid of external and internal factors of dielectric breakdown, Furthermore, to prevent the internal cracks, void, cavity which resulted from the contraction originated on the interface between copper and epoxy resin, formed semi-conductive layer with partially carbon painted on copper bar. The PD properties and the insulation qualities of epoxy molded insulators were improved by roles of cushions for the direction of diameter and natural sliding effects as like separated from conductor for the direction of length.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 전력사용량의 급속한 증대는 고전압, 대 전류를 안정적으로 공급을 하기 위해 전력용 기기의 절연성능을 향상시키고 또 소형화에 따른 우수한 절연재료의 개발을 필요로 하게 되었다. 그중 전력용 기기의 절연에 많이 이용하고 있는 에폭시 수지는 상온 또는 가열에 의해 부산물을 만들지 않고 완전히 반응하여 고체화되는 열 경화성으로 경화시의 수축이 적고 전기적 특성이 양호하며 집착성이 커 배합 및 경화 조건에 따라 다양한 물리적, 화학적 성질을 지닌 절연 재료로서 절연저항이 크고 내 아크성, 내 트래킹성 등 우수한 특성을 가지고 있어 변류기, 계기용 변압기, 절연체, 변류기 내장형 붓싱 등에 많이 사용하고 있다. 이러한 에폭시 물드형 고전압 대전력용 기기는 사용 중 외부 환경적 요소에 따라 절연열화가 급격하게 진전되기도 하며, 제조과정 중에는 급형이나 혼합수지의 온도와 수분 함유, 공기 등 내부적 원인에 의해서 절연체내에 크랙, 보이드, 공동 등이 발생하여 있을 때, 사용 중에 지속적으로 부분방전이 일어나 오존과 가스등이 발생하고 급속의 표면이 화학적으로 변화하여 에폭시 절연체의 절연내력이 열화 되어 절연과피에 이르게 된다. 이러한 절연열화의 내, 외부적 원인을 제거하기 위해 에폭시 수지의 혼합과 탈포, 주입을 진공상

대에서 행하고, 도체인 구리와 절연물인 에폭시 수지간의 열 팽창율과 열 전도도 차이에 의해서 두 물질의 접촉면에서 크랙발생 가능성이 높으므로 전극과 에폭시공간에서 발생하는 응력을 완전히 제거하고 온도변화에 의해서 발생하는 기계적인 다중응력에 의한 크랙 발생을 방지하여야 한다. 그러므로 도체와 에폭시 수지간 접촉면에 남는 잔류응력과 사용중 온도가 변화할 때 접촉면에서의 전기적, 기계적인 다중응력의 변화를 이해하여야 한다²⁾. 이를 위해 본 연구에서는 epoxy-Cu 접촉면에서 나타나는 내부 크랙 등을 방지하기 위해서 도전성 카본을 동봉에 부분적으로 페인팅하여 성형하였으며 실험적 접근방법으로 시료제작 및 실험을 하여 구리와 에폭시간 접촉면에서의 부분방전등 절연특성을 개선하여 길고 큰 도체를 갖는 대용량 절연체에 적용시킬 수 있었다.

2. 절연과피 특성

절연체에 전압을 인가하면 전류가 직선적으로 증가하다가 지수 함수적 증가를 보이게 되는데, 이때 급격히 증대되는 전압에서 절연과피가 발생하게 되는데 이것은 절연체가 절연성질을 잃고 도체화 되어 양전극 사이가 단락상태가 되기 때문이다. 1차적 요소에 의한 절연과피 현상³⁾은 물질이 갖는 본질적인

진성 절연파괴이고 2차적 요소인 온도와 시료두께 등에 의존하거나, 맥스웰 응력이 작용하는 단시간 파괴와, 방전이나 코로나의 영향으로 절연열화가 진전되어 파괴에 이르는 장시간 절연파괴가 있다. 절연체는 온도와 시간의 관계에 따라 경화와 수축을 거치게 되는 과정에서 선형적인 열팽창률에 따른 열적인 수축으로 전극인 동봉과 에폭시 수지 사이의 접촉면에 기계적인 응력이 남게 되는데 이것이 접촉면에서의 절연파괴를 일으키는 다중응력⁴⁾의 메카니즘이 된다. 한편, 시료가 경화하게 되면 전극의 열팽창률에 의한 팽창과 에폭시의 경화 반응시 화학적 수축에 의해 전극과 에폭시 사이의 접촉면에서 겔상(gel)을 거쳐 유리상으로 될 때 기계적 응력이 발생하며, 또 상온까지 냉각하는 과정에서 에폭시와 전극의 전도를 및 열팽창률 차이에 의해서도 잔류응력이 발생하게 된다. 시료가 상온으로 냉각하면 에폭시와 전극의 열전도율 차이에 의해서 전극의 외경이 감소고, 또 전극과 에폭시가 모두 상온까지 냉각하게 되면 에폭시가 전극에 기계적인 응력을 증가시키는데 이 과정이 가열 조건에 따른 온도의존성⁵⁾으로 여러 단계의 기계적 응력 변화 패턴이 존재한다. 한편, 절연체 내부 공동이나 절연내력이 낮은 함유물에 의해 발생하는 부분방전은 금속이나 카본층과 에폭시 유전체층 사이에 공동이 존재할 때 발생하는 부분방전으로서 Fig 1 형태의 내부방전이다.

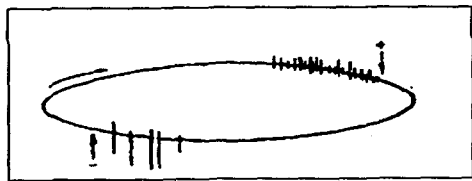


Fig 1. the response type of internal discharge between metal and dielectric

3. 실험 및 분석

3.1 시료제작

시료에 사용되는 동봉의 MCSG 내장형에서 온도상승 한도는 건식 모울드형일때 최고온도 55[°C]이고 97[%]이상의 도전율을 가진 구리(Cu)로서 열적 파괴 강도에 견딜 수 있도록 도체의 단면적을 충분히 크게 하였으며, 기준은 IEC 185-5(180 A/mm²)와 ANSI C-57.13(142.6 A/mm²) 규격에 맞도록 하였다. 한편, 에폭시는 CIBA-GEIGI 제품으로 수분이 없는 경화제와 비스페놀(bisphenol) A형 에폭시 수지로 무기물 충전재이며 높은 점도를 가지고 솔벤트 성분이 없도록 조제된 것으로서 주요 물리적 성질은 표 1과 같다. 전기적 성질로서는 내 아크성, 내 크래킹성을 가지며 절연내력은 1[mm]당 수[kV]이나 고전압용 기기에 실제 적용은 부분방전 특성이나 절연열화와 물리적인 힘을 고려하여 경험적 수치인

0.8[kV/mm]로 절연하게 되며, 절연체의 오손정도에

Table 1. Physical properties of epoxy resin

specific gravity	2.0 [g/cm ³]	25[°C]
tensile strength	60 ~ 80 [N/mm ²]	
flexural strength	110 ~ 130 [N/mm ²]	
deflection	아주 미세하다	
thermal temperature	70 ~ 80[°C]	
water absorption	0.1 ~ 0.2 [%]	23[°C]

따라 흐르는 누설전류의 흐름을 억제하고 표면방전을 저감하기 위해서는 절연체 표면의 연면거리를 IEC-185에서 규정한 대기의 오염도에 따른다. 한편, 시료 제작시 주의할 점은 금형에서 이탈이 쉽도록 금형 내부에 화학적 반응을 수반하지 않는 염소에 킬렌과 같은 이형제를 소량 도포하여 표면에 기포나 흠이 없이 깨끗하게 하고 무리한 힘이 가해지지 않도록 한다. 경화시 일어나는 화학적 변화와 휘발성 물질의 기체화에 따른 수축에 의한 응력과 도체의 온도상승으로 인한 팽창에 견딜 수 있는 쿠션역할과 길이 방향으로 일어나는 수축에 효과적으로 대응하기 위해 절연체 내부에 크랙이나 공동이 생기지 않도록 자연스럽게 밀리며, 도체에 대한 반도체성 부분층을 형성할 수 있는 카본을 동봉의 일부분에 일정두께로 도포 또는 페인팅하여 준다. 이때 카본이 완전히 마르고 굳을 수 있도록 금형의 온도와 같게 예열하여 시료 제작시 에폭시 수지를 주입하여도 묻거나 떨어져서 절연체 내부의 불순물이 되어 절연열화의 원인이 되지 않도록 한다. 한편 시료의 형상은 Fig 2에서 부분적인 형태를 보이고 있는데 금형의 온도와 시간, 에폭시 수지의 배합 등 많은 경우가 있으나 대표적인 3가지만 소개하기로 한다.

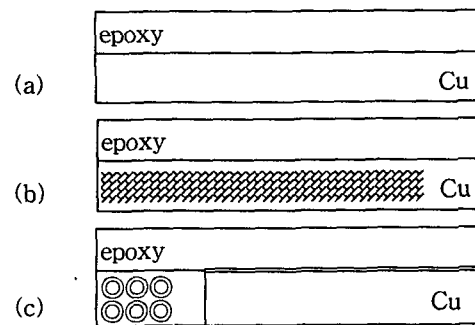


Fig 2. A shape of insulator for test

(a)는 동봉의 길이 750[mm]에 표면을 매끄럽게 가공 처리하여 금형의 온도와 같게 예열한 후 약 100[°C]에서 140[°C]정도의 높은 온도에서 30여분에서 1시간 정도 까지 가열하여 가장 적당한 온도와 시간에서

성형하며, 이때 에폭시 두께는 약 28[mm] 정도로 한다. 1차 경화 후 오븐에서 온도 80[°C]~100[°C]로 2차 경화를 한 다음 건조시켜 서서히 상온으로 하여 시료를 만들었다. 시료(b)는 (a)와 동일하게 적당한 온도를 일정시간 지속하여 가해 동봉과 에폭시 혼합물과의 접착을 좋게 하기 위해 동봉에 그물망 형태의 사선 홈을 가공처리 하였다. 한편, 시료 형상(c)는 동봉의 둥근 면에다 도체의 길이 1/3정도에 뒤틀림을 방지하고, 한쪽 길이방향으로 동봉의 움직임을 유도하기 위해 넓이 5[mm], 깊이 2[mm]정도의 반구형 형태의 홈을 만들어 에폭시 수지와의 접착을 매끄럽게 하기 위해, 각지고 모서리 진 부분이 없도록 하였으며, 2/3정도의 길이에는 카본으로 페인팅하여 에폭시 수지가 실제로 동봉에서 떠 있는 것과 같은 부동층을 유지하였으며 크랙발생을 억제하고 공동이 발생하지 않도록 하는 기능과 $10^0 \sim 10^4 [\Omega]$ 정도의 고유저항을 갖는 반도체성 카본층을 한 구조이다.

3.2 실험결과 및 분석

Fig 3과 같이 항온항습 시험기 -40[°C] ~ +55[°C]를 2시간 간격으로 4시간씩 3사이클 동안 인가하여 외관검사와 절연파괴여부를 확인하게 되는데, 이는 실제 사용 중 일어날 수 있는 절연체의 온도에 의한 절연파괴 특성을 알 수 있다. 실험분석 결과, 시료(a)의 30~40[%]가량은 결모양은 정상이지만 부분방전이 많이 발생하여 절연특성이 좋지 않았으며, 60~70[%]는 둥근 원 형상으로 동봉주위에 외부크랙이 발생하거나 절연체 내부에 미세한 크랙이나 동봉주위로 공동이 여러개 형성되어 있었으며, 부분방전 발생이 심하고 절연특성이 아주 좋지 않았다. 이는 그림 3에서 알 수 있듯이 긴 절연체가 경화과정에서 굳어질 때 길이 방향으로 1[m]길이 당 2~3[mm]정도의 수축(Δx_1)이 부피가 많고 두꺼운 쪽으로 응력을 받아 끌려가며 일어났고, 또 원형모양에서는 지름 1[mm]정도 수축이 일어났다. 이는 길이나 둘레에서 수축될 때 동봉주위와 급형의 표면쪽의 에폭시 수지는 높은 온도와 직접 접촉하여 빨리 굳어져 완전히 정착되어 있고, 중간층은 완전히 굳지 않은 겔(gel)상태에서 절연체 전체의 에폭시 수지가 굳으면서 발생하는 응력에 의해 밀려오면서 굳어버려 내부 크랙발생이 일어나고 또, 내부 공동, 동봉주위 둘레로 원형모양의 크랙이 생긴 것으로 보인다. 이것은 급형의 온도와 지속시간, 수지의 온도, 압력, 후 경화와 밀접한 관계가 있었다. 시료 (b)는 거의 다 나사모양의 형태로 즉 동봉의 나선모양을 따라 굵이 가거나 깨졌는데 이는 접착이 너무 좋아 경화될 때 다같이 밀려가지 못해서 더 많은 크랙발생이 되었으며, 또 절연체 내부에는 경화시 응력에 의해 수축이 Δx_2 만큼 있을 때 공동이 형성된 것으로 보인다. 이 또한 성형과정에서 온도와 시간의 영향을 많이 받으며, 시료 (a)와 동일하게 중심의 동봉과 외부의 높은 급형온도에서 먼저 굳어지는데 중간 절연층에서는 겔상태가 잠시동안 유지된 상태에서 응력에 의한 내부 크랙이 발생되어 있었던 것이

후경화 과정이나 또는 항온항습시험에서 다시 급작스런 온도변화로 인해 수축과 팽창에 따른 절연파괴로 생각된다.

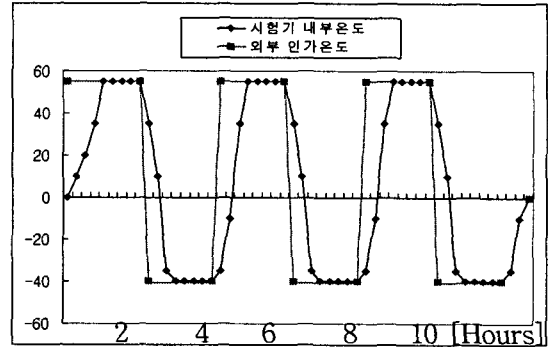


Fig 3. Heat cycle test for property of insulation

한편, 시료 (c)는 (a)와 (b)에서의 결점을 보완하여 성형과정에서 길이방향으로 일어나는 응력에 의한 수축(Δx_3 와 Δx_1)을 자연스럽게 동봉과 에폭시 수지가 직접 접촉한 1/3지점의 홈이 패인 접착면 쪽으로 전체적으로 밀려오도록 한다. 이때 원 중심방향으로의 수축은 카본이 페인팅된 반도체층이 쿠션 역할을 하여 약간의 신축성을 가지므로서 내부크랙이나 공동을 없앨 수 있었으며 항온항습 시험에서도 크랙발생이나 절연파괴가 일어나지 않았다. 따라서 절연체의 제작은 (c)모델의 표준을 따라 급형의 온도와 시간을 적용시켰다. 한편, Fig 4의 (d)는 도체가 한쪽으로 치우쳐서 에폭시수지의 두께가 서로 다를 때 두꺼운 쪽으로 많은 응력이 발생하여 두께가 얇은 쪽에서 크랙발생이 일어난다.(e)는 전체적인 부피에 따라 에폭시 수지 덩어리가 큰 즉, 도체의 형태가 불규칙해 두께가 얇은 곳에서 크랙 발생이 일어나는 형태를 나타내었다. 시료를 제작하여 온도 변화에 따른 크랙이나 공동이 발생되면 부분방전의 원인이 되므로 이를 알기 위해 일정한 온도로 주기적으로 반복하는 항온항습 시험을 실시하고 난 후 외부잡음의 영향을 받지 않는 쉴드룸 내에서 실험을 하였다. 시료에 대한 시험방법은 국제 표준규격(IEC-185)에서 규정한 값을 적용하여 최고 회로전압으로 설정하였고, $1.3 U_m/\sqrt{3}$ 에서 10초간 유지한 후 규정 전압에서 측정된 부분방전량을 50[pC]이하 일 때 양호한 값으로 제한하여 측정된 결과 시료의 형태별 부분방전 측정값은 표 2와 같다.

Table 2. Results of PD test according to insulators model

(a)형상 [pC]	(b)형상 [pC]	(c)형상 [pC]
100 ~ 1000	측정불가	5 ~ 10

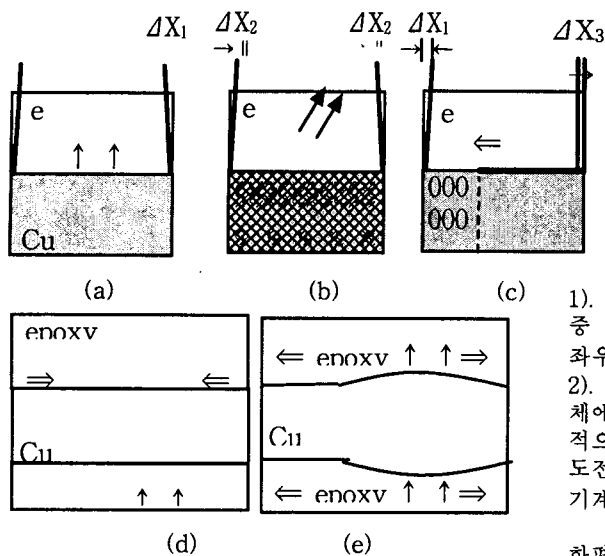


Fig 4. A type of crack in epoxy molded insulator

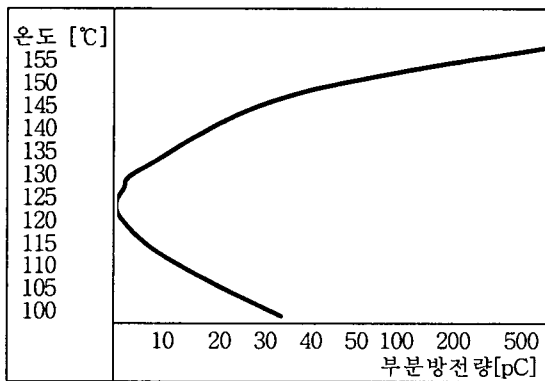


Fig 5. Variation of partial discharge as temperature in epoxy insulator

한편, Fig 5는 에폭시 모울드형 절연체의 부분방전의 시험결과를 나타낸 것으로서, 금형의 온도가 낮으면 시료 제작시간이 너무 많이 걸리고 부분방전량도 약간 많은 편이며, 온도가 높으면 시료 제작시간은 짧아지나 내부크랙이나 공동의 발생이 많고 부분방전 특성 또한 좋지 않았다. 따라서 실험적 접근에 의해 에폭시 수지가 차지하는 부피의 비율, 길이, 체적의 변화 등에 따라 금형의 온도와 경화시간은 달라진다.

4. 결론

대 전력용 기기에 응용되는 에폭시 몰드형 절연체들은 성형과정에서 온도의존특성과 응력의 변화를 절연체의 부피와 체적, 길이에 따라 다르게 적용하고, 사용 중에는 전압의 인가에 따른 부분방전 현상, 오존의 발생 등 전기, 화학적 변화와 차단기나 단락

전류와 같은 기계적인 힘을 전달 수 있도록 절연체의 두께와 견고함을 갖도록 하며 연면거리의 충분한 확보와 누설 전류로 인한 섬락을 방지하기 위해 환경에 의한 오염도를 줄여야 안정된 전력 공급이 이루어 질 것이다. 이를 위해 에폭시 수지를 이용한 모울드형 절연체는 다음 사항들이 절연특성을 개선하는데 큰 도움이 될 것이라 사료된다.

- 1). 절연체의 길이가 크고 체적이 클 때는 기계적 다중 응력에 의한 절연파괴가 두께와 체적의 영향에 좌우됨으로 적당한 체적의 분배를 하여야 한다.
- 2). 에폭시와 구리의 접합면을 가진 길이가 긴 절연체에서는 수축을 고려하여 응력에 의한 수축이 전체적으로 일어날 수 있도록 카본블랙을 페인팅하여 반도체층인 부동층을 만들어 주는 것이 응력에 의한 기계적인 내부크랙을 막을수 있다.

한편, 향후에는 154[kV]와 같은 높은 전압에도 적용 가능하고, SF₆ 가스등과 같이 사용하여도 화학적으로 변화하거나 용해되지 않으며 악조건의 환경에서나 옥내외에 사용 가능한 에폭시 모울드형 절연체가 개발되리라 본다.

REFERENCE

- 1). T. Candra, A. K. Dhingra, "Advanced Composites" 93 International Conference on Advanced Composites Materials, Australia, A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 771-941, 1993.
- 2). B. C. Song, etal, "The Crack Resistance and Dielectric Breakdown properties of Epoxy Composites due to the Multi Stresses Variation" KIEEME, vol. 1. No, 1. pp. 136-139, 2000.
- 3). 家田正之, "誘電體 現象論", 日本電氣學會, pp. 259-299, 1972
- 4). L. H. Sperling, "Introduction to Physical Polymer Science", John Wiely, pp398-403, 1986.M. Ieda,
- 5). "Dielectric Breakdown Process of Polymers", IEEE Trans. on Elec. Insul. EI-15, No.3, pp.206-224, 1980
- 6). J. J. Song, " A Study on the reduction of PD generated in the PT for 25.8 kV" KIEEME, vol.1. No.2. pp.631-635, 2000.