Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 14, No. 7, pp. 578~583, 2001.

논 문 14-7-9

카본 도포에 따른 Cu-Epoxy 접촉면에서 발생하는 크랙방지에 관한 연구

A Study on the Prevention of Crack Generated in Interface Cu and Epoxy with Painting of Carbon

송재주*, 김성홍*, 황종선**, 박종광***, 한병성***
(Jae-Joo Song*, Sung-Hong Kim*, Jong-Sun Hwang**, Jong-Kwang Park***, Byung-Sung Han***)

Abstract

The bushing for high voltage and large power should endure weight of itself and force of pushing from contact with circuit breaker. Like this, epoxy mold bushing has to be strong without fault. However, the external circumstances and internal factors was caused by partial discharge, flashover and dielectric breakdown. Therefore, to remove external factor of defect and to prevent the internal cracks and cavity generated from the contraction on interface of Cu-Epoxy, we should form semi-conductive layer on Cu bar by carbon. Then, the PD properties and the insulation qualities of epoxy mold type bushing was able to improved by roles of cushions for the direction of diameter and by effects of natural sliding like as separated from conductor for the direction of length. So, in this work, we could prove the method of semi-conductive layer in making the long conductor.

Key Words: interface, semi-conductive layer, Partial Discharge, epoxy mold bushing, cavity, effects of natural sliding

1. 서 론

전력설비들은 고전압, 대전류, 대전력의 안정적인 공급을 위해 기기의 절연성능 향상과 우수한 절연재료의 개발을 필요로 하고 있다. 이러한 절연재료들 중 에폭시 수지는 열경화성으로 절연저항이 크며, 내아크성, 내트래킹성 등 우수한 전기적 특성을 가지고 있다[1]. 이러한 에폭시 수지의 양호한 특성을 이용해 계기용 변압기, 절연체, 변류기(CT, Current Transformer)내장형 붓싱 등의 몰드형 재료로 많이 사용하고 있다. 에폭시 몰드형 고전압 기기 중에서, 붓싱은 별도의 관통형 CT를 외부에서 삽입시켜 사용하는 접촉 고정형으로 대전력용 배전반의 MCSG(Metal clad SwitchGear)에 부착되어 사용되고 있다. 그런데, 이러한 붓싱은 높은 습도나 차단기(VCB, Vacuum Circuit Breaker)와의 접촉 시 발생하는 충격이나 부분방전, 코로나 등 외부의 환경요소에 따라 절연내력이 저하되기도 한다. 또한 붓싱 내부적인 결함요소로서 제작공정에 문제점이 있는 경우, 에폭시 절연물 내부에 크랙이나 공동을 발생

* : 순천청암대학 컴퓨터정보과학부 전기통신과
(전남 순천시 덕월동 224-9
Fax : 061-740-7312
E-mail : jjsong@scjc.ac.kr)
** : 담양대학 전기전자공학부
*** : 전북대학교 전기공학과
2001년 3월 28일 접수, 2001년 4월 16일 1차심사완료
2001년 5월 24일 2차심사완료, 2001년 6월 1일 3차심사완료

시키게 되고, 사용 중에는 이 부분에서 지속적인 부분방전 현상이 일어나 절연이 파괴되어 섬락과 같은 치명적인 사고위험에 이르게 하기도 한다. 따라서 절연내력 저하의 원인 중에서 잘못된 공정으로 인해 발생되는 내부적인 원인을 줄이기 위해 동봉 표면의 일부분에 카본블랙(Carbon Black)을 도포하여 반도전 층을 만들어 성형함으로서 경화 시 동봉주위로 발생하는 내부의 크랙 발생을 방지하고자 하였다. 또, 경화 시 크랙발생에 많은 영향을 주는 동봉과 금형의 온도, 가열 지속시간, 또 두 물질간 접촉면에서의 온도변화는 복합적인 다중응력을 작용하게 한다[2]. 이는 내부크랙의 원인이 될 수 있으므로 충분한 예열과 2차 경화가 필수적이다. 한편, 본 실험에 사용된 시료는 전장이 1[m]정도로서 동봉의 표면과 에폭시 수지의 직접 접촉면이 1/2이상 되는 긴 절연체이다. 시료에 대한 실험은 열 싸이클 시험과 부분방전 시험 등을 통해 현상적인 절연특성을 파악하였다. 또한, 반도전성 카본을 동봉 일부분에 도포하여 경화 시에 에폭시와 동봉의 접촉면에서의 자연스런 밀림 효과가 나타나도록 하여, 이를 이용해 에폭시 몰드형 붓싱의 제조과정에서 생길 수 있는 크랙이나 공동의 생성을 막을 수 있었으며, 시료들에 대한 부분방전 실험 등을 통해 확인해 보았다.

2. 실 험

2.1 시료제작

시료에 사용되는 동봉은 MCSG용으로 몰드형 붓싱일 때 온도상승 한도는 최고온도 55[℃]이고, 97[%]이상의 도전율을 가진 구리로서 열적 과전류강도에 견딜 수 있도록 도체의 단면적 기준은 IEC 185-5에 따라 189[A/mm^2]로 하였다. 한편, 에폭시 수지는 CIBA-GEIGI의 LSH-A(bisphenol)계로 붉은 색을 띄며 점도가 높고 솔벤트 성분이 없는 무기물 충진재와 함께 제조되었으며, 경화제는 LSH-B로 낮은 점도를 갖는 무수물 경화 촉진제이다. 표 1에서는 시료에 사용된 에폭시 수지의 주요 물리적 성질을 나타내었다. 또한, 동봉 주위의 절연물의 두께[3]는 에폭시 수지의 절연내력이 1[mm]당 수 [kV]이나 고전압용 기기에 실제로 적용할 때에는 부분방전 특성이나 응력 그리고 수축력과 같은 물리적인 힘을 고려하여 경험적 수치인 0.8[mm/kV] 정도의 두께로 하였다. 한편, 시료의 형태는 동봉의 표면모양과 카본 층의 유무에 따라 그림 2와 같은 부분적인 형상을 보이고 있다. 금형의 온도와 시간, 에폭시 수지의 배합 등 많은 경우가 있으나 크게 3가지 형상에 대해서 실험하여 보았다

표 1. 에폭시 수지의 물리적 특성.
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	2~3[mm]	
Heat distortion temperature	70~80[°C]	
Water absorption	0.1~0.2 [%]	23[°C]
Flash point	168°C	
Electrical strength	17~20[kV/mm]	
Arc resistance	4 grade	
Tracking resistance	KA 2 grade	

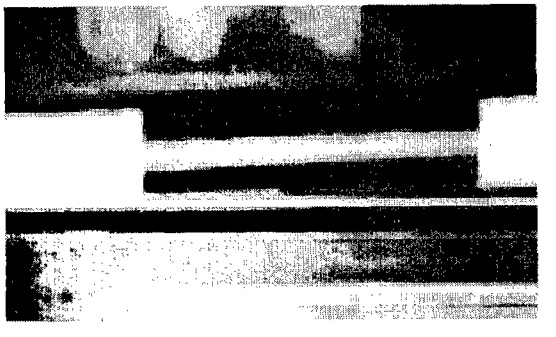

그림 1. 카본이 도포된 동봉.
Fig. 1. Specimen of Cu Bar painted carbon.

특히 주의한 점은 1차 성형후 금형 틀에서 무게가 약 40[Kg], 전장이 약 1[m] 정도로 무겁고 크므로 무리한 힘이 가해지지 않도록 하였다.

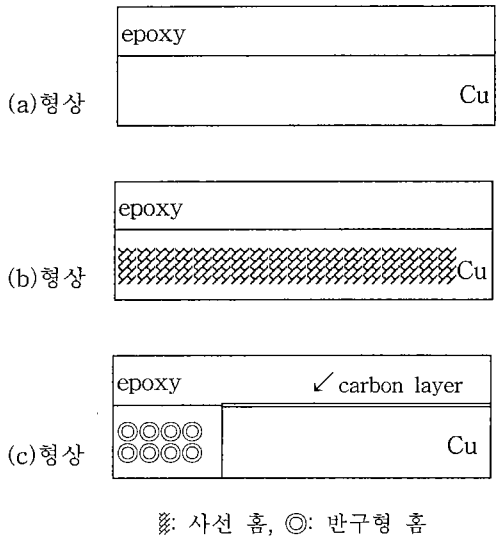

그림 2. 동봉과 에폭시 수지의 접합면 형태.
Fig. 2. A shape of interface Cu bar and epoxy resin.

또한, 시료의 탈형이 쉽도록 금형 내부에 화학적 반응을 수반하지 않는 염화 에틸렌과 같은 이형제를 금형 내부표면에 소량 뿌려주게 되는데, 이것으로 인한 절연체 표면에 기포나 홈이 생기지 않게 하였다. 그림 2에서 (a)형상은 동봉의 표면을 매끄럽게 가공 처리하여 성형 시 에폭시 수지와 동봉의 표면이 전 부분에 걸쳐 접착되도록 한 형태이다. (b)형상은 표면에 사선 홈을 만들어 경화 시 에폭시와 동봉의 접착력을 더욱 높인 형태이다. (c)형상은 동봉 전체 접촉면 길이의 약 1/3에 지름 5[㎜], 깊이 2[㎜] 정도의 반구형 형태의 매끄러운 홈을 파고 나머지 2/3길이는 저항율이 10^7~10^8[Ω-cm]인 반도전성 카본을 도포하였으므로 1/3길이 만큼에만 동봉과 에폭시 수지가 직접 접착되고 2/3정도는 카본 층을 사이에 두고 에폭시와 동봉이 간접 접촉한 형태를 띄게 된다. 한편, 시료의 제작은 그림 2의 (a), (b), (c)형상 모두 동일하게 그림 3과 같은 공정으로 제작하였다. 만약, 진공 탈포가 미비하면 혼합된 재료에 공기가 포함될 수 있으며, 생산량을 높이기 위해 금형의 설정온도를 너무 높이거나, 혼합된 수지를 너무 오랜 시간 동안 용기에 담아 두게 되면, 이 때 수지 덩어리가 굳은 상태로 유입되어 절연 특성을 나쁘게 한다.

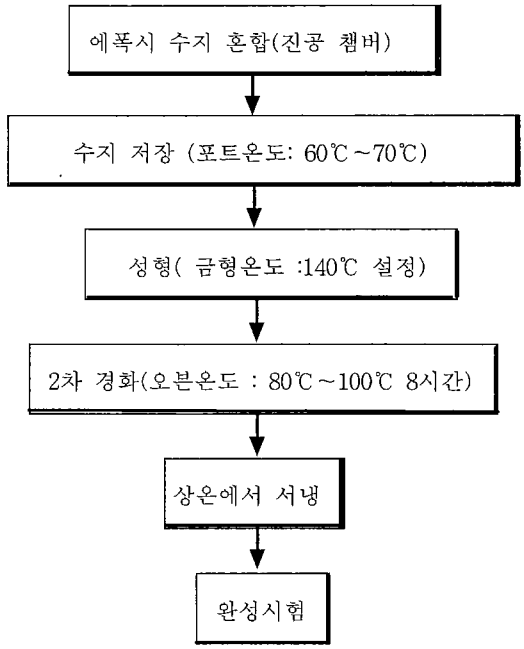

그림 3. 금형 제조공정 흐름도.
Fig. 3. Block diagram of casting process.

2.2 시 험

1) 열 싸이클 시험

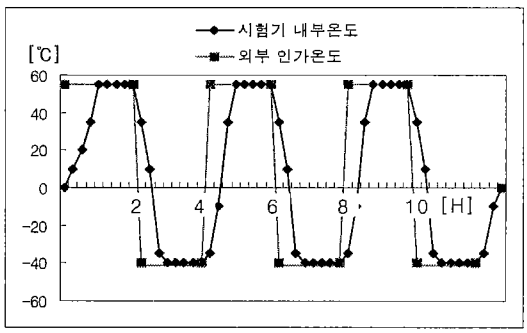

그림 4. 열 싸이클 시험과 온도 변화.
Fig. 4. Heat cycle test and change of temperature.

그림 4는 열 사이클 실험을 나타내는 것으로서 항온항습 시험기 속에 시료를 넣고 -30 [℃]~ +55[℃] 범위의 온도를 유지할 수 있도록 설정하여 2시간 간

격으로 가열과 냉각을 하며 4시간을 1싸이클로 하여 3 싸이클 동안 실시하였다. 이 열 싸이클 시험은 KSC-3835의 저온(-20℃) 및 고온(+90℃)실험과 JEC-190의 냉열 냉각시험의 기준을 약간 임의적으로 적용시켜 온도의 변화에 따른 내, 외부의 크랙 발생과 절연파괴 여부를 알고자 이용하였다.

2) 부분방전 시험

그림 5는 부분방전 시험회로[4]이며 전원이나 접지를 통한 외부의 노이즈를 차단한 쉴드 룸 내에서 시험을 수행하였다.

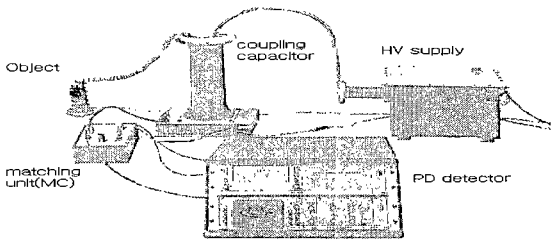

그림 5. 부분방전 시험을 위한 측정회로.
Fig. 5. The circuit of Partial Discharge test.

외부잡음을 제거하기 위해 전원 측에는 2개의 스크린을 설치한 절연변압기를 사용하고, 특별 고압용 변압기 전원 측에도 필터를 사용하여 노이즈 침입을 막았다. 한편, 시험장비는 TETTEX Instruments 9120 Series이고, 구성은 Z_d(detection impedance), C_k(Coupling capacitor), dd(discharge detectetor)이다. 적용기준은 IEC 137에 따르며 적용될 계통의 최고 회로 전압이 36[kV]급이므로 부분방전 시험 전압은 1.05 Um/$\sqrt{3}$배인 전압 21.8[kV]에서 1분 이내에 실측하며, 부분방전 기준 값은 10[pC] 이내로 규정에 따라 제한하였다. 시험은 붓싱의 도체인 동봉에 전압을 인가하고 고정용 너트에 접지하여 서서히 전압을 높이면 스코프의 CRT화면상에 나타나는 펄스 신호로서 방전량의 크기와 형태를 알 수 있다. 불량품의 경우는 펄스의 변화가 더욱 뚜렷하여 PD 발생량을 알 수 있어서 양, 부의 판정이 가능하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 시험 결과

1) 열 싸이클 시험 결과

열 싸이클 시험 결과는 표 2와 같이 각 형상에 따라 많은 차이가 있으나 실험은 동일하게 행해졌다.

한편, 그림 2의 (a)형상은 30% 정도만이 양호하였는데, 이는 불완전한 에폭시와 동봉의 접촉면 특성을 나타낸 것이다. 또 (b)형상은 외관으로도 확인이 가능한 크랙이 100% 발생되어 불량으로 나타났으며 (c)형상은 전체적으로 90% 이상이 양호한 특성을 나타내었다.

표 2. 열 싸이클 시험 결과.
Table 2. Results of heat cycle test.

	양호[%]	불량[%]	
(a) 형상	30	70	동일 LOT당 10개 시료 채택
(b) 형상	0	100	
(c) 형상	90	10	

2) 부분방전시험 결과

표 3. 부분방전(PD) 시험 결과.
Table 3. Results of Partial Discharge test.

	방전량[pC]	
(a) 형상	100 ~ 1000	기준: IEC 137 전압: 21.8[kV] 기준 PD값: 10[pC]
(c) 형상	5 ~ 10	

부분방전 시험은 표 3에서 보듯이 그림 2의 (a),(c)형상 중에서 양호한 시료를 가지고 시험하였다. 시험결과 (a)형상은 겉모양은 이상이 없으나 절연물 내부에는 공동과 크랙이 다수 발생되어 있었다. (c) 형상은 90(%)이상이 PD 기준 값인 10[pC] 이하로 양호한 특성을 나타내었다.

3.2 결과 분석

1) 시료의 형상별 열 싸이클 시험 분석

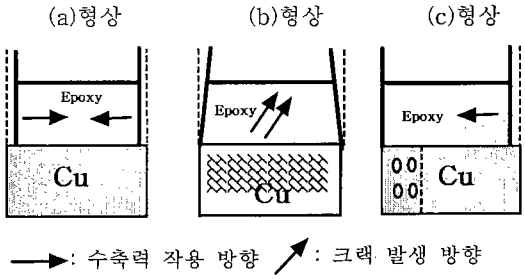

그림 6. 시료의 형상별 수축과 크랙의 형태.
Fig. 6. A type of crack and shrinking in specimen.

그림 6은 열싸이클 시험 후에 시료의 형상별 수축과 크랙의 방향을 나타내 보인 것이다 그림 2의 형상(a)는 시료의 70[%] 정도가 그림 6의 형상(a)에서 보는 바와 같이 둥글게 동봉주위에 외부크랙이 발생하고, 30[%] 정도는 외견상 이상이 없어 보이지만 부분방전이 많이 발생하였다. 시료를 절단하여 분석한 결과 절연체 내부에 미세한 크랙발생과 공동이 다수 형성되어 있었으며, 동봉의 말단에는 양쪽에서 약 1~2[mm]정도로 길이 방향의 수축이 있었다. 그 이유는 성형 시 너무 높은 온도설정 때문에 공동이 형성되고, 동봉과 에폭시의 접촉부위가 너무 길어서 성형 중에 에폭시의 부피가 많은 쪽으로 이끌리는 수축력이 작용하여 동봉 주위에 미세한 크랙이 발생된 것으로 보인다. 그림 2의 형상(b)는 그림 6의 형상(b)와 같이 에폭시 수지가 경화 시 수축력에 의해 밀리지 않도록 동봉의 주위에 사선으로 홈을 내어 접촉력을 좋게 하였던 것으로, 접촉면에서의 밀림은 없고 중간두께 부분에서만 사선형태로 수축된 형상을 보였다. 이로 인해 열 싸이클 시험 후에는 모두 다 외관상 크랙이 사선방향으로 발생하였다. 이는 온도변화[5]에 의한 수축력과 열전도율의 차이, 외경의 열 팽창율에 따른 응력 발생에 의해 크랙이 발생된 것으로 보인다. 그림 2의 형상(c)는 그림 6의 형상(c)와 같이 전체 접촉면 1/3길이에서 동봉과 에폭시 수지가 직접 접촉하여 붙잡고 있는 형태이다. 2/3길이 만큼에 도포한 카본은 반 도전층을 형성해 도체인 동봉과 에폭시 접촉면상에 작용하는 수축력과 성형 시나 가열조건에 따라 존재하는 여러 단계의 기계적인 응력의 변화패턴[5]에도 신축적으로 흡수하거나 자연스럽게 밀리는 효과로 인해 내부크랙이나 공동이 발생되지 않았다고 생각된다. 이것은 시험 후 접합 면을 절개하면 동봉에 페인팅한 카본이 에폭시 쪽으로 달라붙어 있는 것을 볼 수 있었다. 따라서 에폭시 몰드형 붓싱 제작은 형상(c)를 표준으로 하여 금형의 인가온도와 시간을 적용시켰다.

2) 부분방전시험 결과 분석

표 3에서 보는 바와 같이 형상(a)의 시료는 시험결과 100~1000[pC]정도로 많은 방전량을 나타내었다. 또한, 부분방전 개시전압도 10[kV] 정도에서 발생하였으며, 전압을 더욱 높이면 다시 방전량이 커짐을 볼 수 있었다. 이는 또 다른 공동에서 발생되는 것으로 보이며, 동봉과 에폭시 접촉면에는 많은 공동의 발생이 있음을 말한다. 한편, 형상(c) 에서는 방전개시 전압이 21[kV]정도이고, 측정전압 21.8[kV]에서도 5~10[pC] 이내로 양호한 특성을 보였다. 조금씩 발생되는 부분방전은 동봉과 카본층 및 에폭시 사이에서 발생하는 내부방전[6]으로 높은 전압에서도 방전량은 아주 적게 변화하였고, 소멸전압은 개시전압보다 조금 낮게 발생하였다.

3) 성형온도에 따른 부분방전 변화 분석

예열 온도는 110[℃]~120[℃]정도에서 이루어지며 금형의 온도는 140[℃] 설정온도에서 최적의 성형상태를 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 온도가 낮으면 부분방전 량이 조금 증가하고, 시간이 너무 오래 걸려 생산성이 떨어지고, 온도가 너무 높으면 부분방전 발생 량이 훨씬 많아짐을 알 수 있었다.

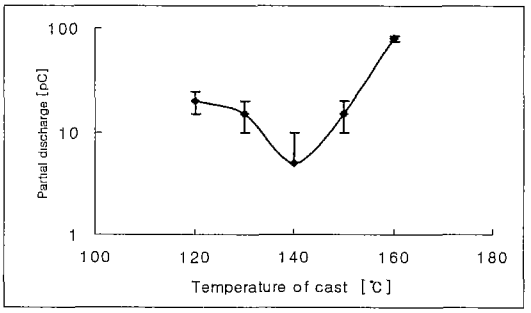

그림 7. 성형 온도에 따른 부분방전 량의 변화.
Fig. 7. Changing of Partial Discharge with cast temperature.

4) 경화시간과 부분 방전량의 변화

그림 8은 부분방전의 시험결과와 시료제작 시간과의 관계를 나타낸 것으로서, 시료 제작시간이 길어지게 되면 부분 방전량도 약간 많아지며, 온도가 높아 시료 제작시간이 짧아지면 내부크랙이나 공동의 발생이 많고 부분방전 특성 또한 좋지 않았다.

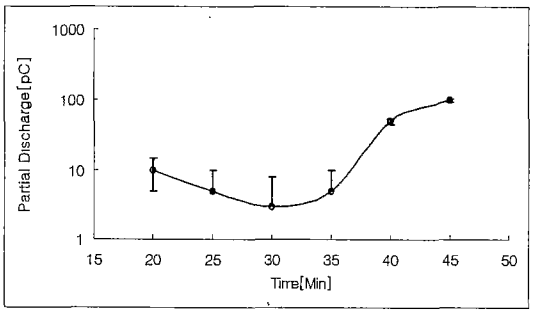

그림 8. 경화시간에 따른 부분방전의 변화.
Fig. 8. The changing of PD with curing time.

그 이유는 포트 속의 혼합된 에폭시 수지가 압력을 받아 금형 속으로 유입되어 성형될 때 금형과 동봉의 온도가 높기 때문에 접촉 부분에서부터 굳어지게 된다. 즉, 높은 온도와 직접 닿는 표면은 먼저 완전하게 굳고 중간층은 굳지 않는 겔 상태에서 밀려가면서 경화되어 공동이나 크랙이 발생된 것으로 보인다. 경화 시간은 몰드 붓싱의 부피와 크기에 따라 다르지만 30분 정도가 최적으로 시료의 부분방전 발생이 가장 적었다.

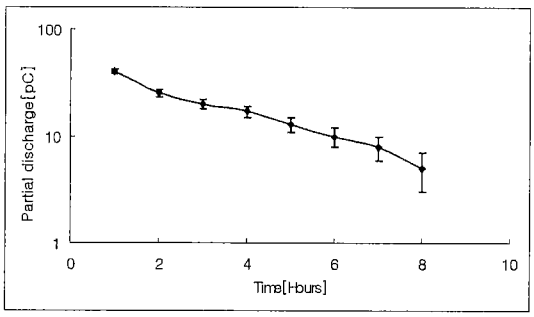

그림 9. 2차 경화에 따른 부분방전의 변화.
Fig. 9. Changing of PD with 2nd curing.

한편, 2차 경화는 탈형 후 오븐에서 온도 80[℃]~100[℃]로 8시간이상 하고 서서히 자연냉각을 시켰을 때 에폭시의 물리적 특성을 회복하여 부분방전 발생이 그림 9와 같이 적어짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에 사용된 시료는 에폭시 몰드형 붓싱으로 고전압, 대전류에 적용하는 중요한 전력설비이다. 사용 중 MCSG 내부의 온도와 습도의 영향으로 발생되는 부분방전이나 코로나의 발생을 방지하고, 절연파괴와 같은 사고를 예방하기 위해서는, 제작 시부터 철저한 절연특성 시험을 통한 공정관리와 절연체의 직접 절연거리, 사용 중 표면의 오손정도에 따른 연면거리 확보도 중요하다. 특히, 부분방전[7]시험이나 열 싸이클 시험은 필수적이다. 이를 위해 대 전력용 에폭시 몰드형 붓싱의 공동이나 내부크랙을 막아 절연특성을 개선시키는데는 다음의 제안이 도움이 되리라 사료된다.

1) 전장이 긴 동봉과 에폭시 접촉면에서 크랙이나 공동의 발생을 막기 위해 반도전성 카본 층을 만들어 수축을 한쪽 방향으로 유도하여 자연스럽게 밀리는 효과를 이용한다.

2) 붓싱과 같은 에폭시 절연체들은 성형 시 절연특성을 좌우하는 것이 금형의 온도와 경화시간이므로 체적에 따른 적절한 설정이 중요하다.

3) 2차 경화와 자연냉각은 에폭시 고유의 물성인 절연능력을 회복하는데 필요하다.

4) 사용전압에 적당한 에폭시 절연거리는 사용 환경에 따른 최소 연면거리를 IEC-185에서 제시한 대로 오염도가 심한 경우를 적용하여 25(mm/kV)이상을 확보한다.

5) 단락전류와 같은 기계적인 힘과 열적 과전류에 견딜 수 있도록 IEC 185-5 기준에 따라 동봉의 단면적을 189[A/mm^2] 이상으로 설계한다.

한편, 향후에는 SF_6 가스 내에서 사용하여도 화학적으로 변화되거나 용해되지 않고, 또 악조건의 환경에서나 옥외에서 사용 가능한 에폭시 절연체의 개발을 기대해본다.

참고 문헌

[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, et al., "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] U. Bammert, et al.,"Partial Discharge Measured with an Automatic System in Epoxy Resin and PE", IEEE Trans, cn Elec. Insul. vol.23, No.2, 1988.

[5] M. Ieda,"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.

[7] 김성홍 외 2명, "부분방전 전하와 음향방출 펄스의 동시 측정에 의한 트리잉 파괴 진단", 전기전자재료학회지, Vol.10, No.3, pp247-254, 1997.