

열응력에 의한 친환경 고체 절연체의 기계적 특성에 관한 연구

변정무*, 이재걸*, 김영근**, 이석원**
LS 산전

Study on the Mechanical Characteristics of the Eco-Solid Insulator due to the thermal stress

Jeong-Mu Byeon*, Jea-Gul Lee*, Young-Geun Kim**, Seog-Won Lee**
LSIS*

Abstract - 본 논문은 가스 절연 차단기를 대체하는 고체 절연체의 성형 시 발생하는 집중 열응력에 의한 고체 절연체의 기계적 특성에 관한 연구 결과이다. 친환경 문제가 대두되고 전기 산업에서 고객은 좀 더 안정적이고 안전한 전기 공급이 필요시 됨에 따라서 고체 절연 개폐기 및 차단기의 수요가 늘어남에 따라 고체 절연체의 생산 불량률이 이슈화되고 있다. 특히 성형 시 발생하는 열응력 및 거동으로 인하여 절연체의 균열 및 내부 진공 인터럽터의 파손 등으로 경제적 비용 손실의 문제가 발생하게 되어 집중 응력을 피할 수 있는 합리화 구조에 대한 연구가 진행되었다.

서 발생한 크랙으로 예상되며 절연체에서 그 부위는 실컵과 세라믹, 예폭시 세 가지 다른 재질이 마주하는 삼중점 부근으로 그림2와 같다.



<그림 1> 진공 인터럽터 세라믹 결합 검출

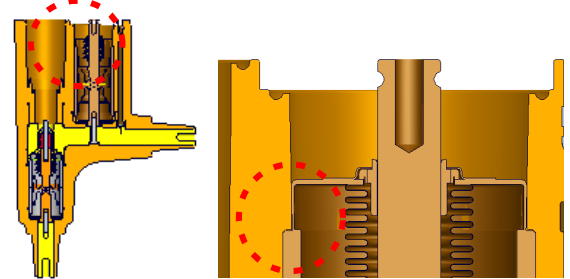
1. 서 론

친환경 다회로 차단기 및 개폐기 절연체의 몰딩 재료인 예폭시 수지는 상온 또는 가열에 의해 수지 전체가 경화되는 열경화성 수지로 내전압성이 우수하며 내마모성, 내수성, 내화화성이 뛰어나 절연재료로 폭넓게 이용되고 있다. 따라서 국내에서는 예폭시 절연물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

하지만 친환경 고체 절연체(Eco-Solid Insulator) 생산에 있어 산발적으로 예폭시 균열이나 내부 세라믹 균열 등의 문제가 발생하고 있다. 친환경 다회로 개폐기 및 차단기의 경우 예폭시 절연체 내부에 진공 인터럽터를 도체와 함께 삽입하여 성형하는 경우가 많은데 불량이 발생할 경우 예폭시 수지 뿐만 아니라 진공 인터럽터, 도체까지 폐기하므로 경제적 손실 비용이 기존 가스 절연체의 불량 손실 비용보다 월등히 커지게 된다.

서로 접촉되는 상이한 재료간의 열팽창률 차이로 인하여 열응력이 진공 인터럽터 및 예폭시 절연체의 균열에 큰 원인으로 지적[1]되고 있으나 성형 시 온도 조건, 경화 조건 등이 절연체 내부 구조와 긴밀한 관계를 갖고 있어 제작단계 및 설계 단계에서 내재된 불량 요소를 찾아 검증하는 것은 쉬운 일이 아니다.

이에 실험적으로 진공 인터럽터의 균열 부위를 찾고 해석을 통하여 최대한 응력 집중을 회피할 수 있는 구조로 설계하고자 하였다.



<그림 2> 절연체 결합 부위

2. 본 론

2.1 성형 결함 절연체 검사

고체 절연체 성형 후 불량 유무를 판단할 수 있는 방법은 여러 가지가 있다. 기본적으로 균열이 크게 발생한 경우에는 X-ray 및 직접 육안 검사를 통하여 판단 가능하며, 진공 인터럽터(Vacuum Interruptor)의 절연 성능으로 절연체의 성형 불량 유무를 판단할 수 있다. 먼저 세라믹(Ceramic) 크랙(Crack)으로 진공이 사라진 진공 인터럽터는 자폐력 유무로 판단이 되며 미세 균열로 서서히 진공이 빠지는 경우에는 단계적 내전압 시험을 통하여 불량유무를 파악할 수 있다.

2.1.1 절연체 결함 부위

절연체의 불량 유무를 판단한 경우라도 응력 집중 부위 즉 균열 부위를 찾는 방법은 간단하지 않다. 절연체의 경우 내부 부속품들이 삽입되어 있기 때문에 내부 결함을 찾는 것이 중요하다. 외부 결함 이외에는 파괴하지 않고는 결함 부위를 발견하기 쉽지 않으며 파괴를 하게 되면 그 과정 중 다른 부위에 크랙이 발생할 수 있으므로 비파괴 검사를 하여야 한다. 그 중 본 연구에서는 침투탐상 검사(Liquid penetrant testing) 방법을 이용하였다. 즉 침투성이 강한 침투액을 뿌리면 결함이 있는 곳으로 스며들며 표면의 침투액을 닦아내고 현상액을 뿌리면 침투액이 배어 나와 결함 유무를 알려주는 비파괴 검사 방법을 활용하였다.

그림 1은 침투탐상검사 결과 삽입된 진공 인터럽터의 내부에 침투액을 뿌려 표면 결함을 확인한 결과이다. 진공 인터럽터와 세라믹, 실컵(SealCup)이 즉 세 종류의 물질이 마주하는 삼중점 부근에

2.2 절연체 열응력

열응력(Thermal stress)은 물질이 온도 변화를 받음으로써 물질 내에 형성되는 응력으로 집중응력으로 인하여 하우징 및 세라믹의 파괴를 유발하였다. 절연체에 열구배로 인하여 발생하는 응력은 탄성계수(Modulus of elasticity), 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion), 열전도계수(Coefficient thermal conductivity) 등의 영향을 받으며, 특히 열팽창계수의 차이로 인하여 재료 사이에 열응력을 유발시킨다. 이때 발생하는 열응력(σ)은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.[2] 이 때 식에서 알 수 있듯이 열팽창계수의 차이가 클수록 열응력의 값이 크게 된다.

$$\sigma_s(T, t) = \int_{T_{mold}}^{T_o} \frac{(\alpha_s - \alpha_c - \alpha_e)}{(1/E_s + 1/E_c + 1/E_e)} dT \quad (1)$$

여기서

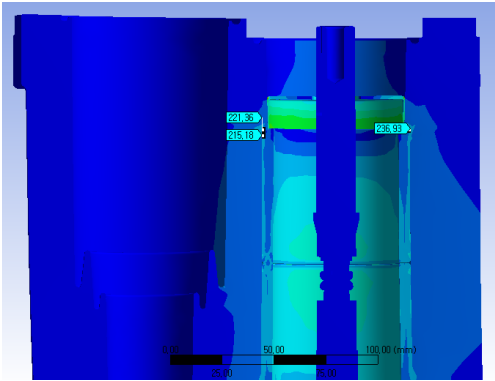
- t : 시간, T : 온도,
- T_{mold} : 몰딩온도, T_o : 특정온도
- s : 세라믹, c : 실컵, 하첨자 e : 예폭시 재료
- α : 열팽창계수
- E : 탄성 계수

2.2.1 절연체 결함 부위 열응력 해석

진공 인터럽터 크랙 부위의 열응력 분포 정도를 파악하기 절연체를 단순화 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다. 진공 인터럽터의 세라믹 부위의 크랙은 성형하는 동안에도 발생가능하며, 또한 경화로와 상온에서 경화하는 중에도 발생 가능성이 있어 두 경우에 대한 유한 요소 해석을 모두 수행하였다. 보통 절연체 성형 온도는 130~150℃이다.

그림 3은 절연체의 열응력 해석 결과이다. 성형, 경화 중 발생하는 응력 분포는 유사한 형태였으며, 비파괴 검사의 세라믹 부

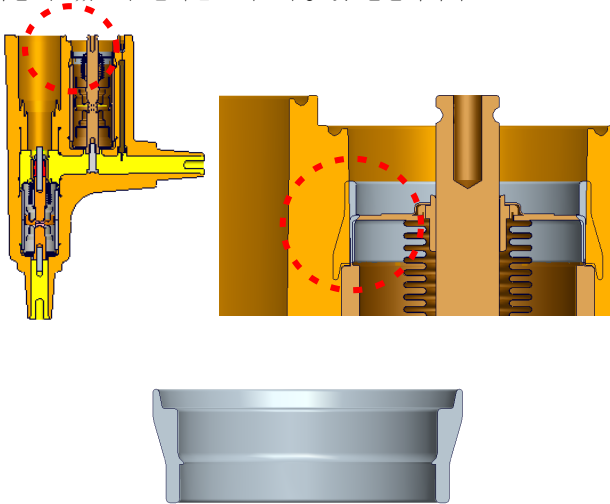
근에서 크랙이 발생하였던 결과와 유사하게 해석 결과 역시 세라믹 부근에서 집중응력이 분포하는 것을 볼 수 있다.



<그림 3> 절연체 크랙 예상 부위 열응력 해석(Mpa)

2.3 절연체 구조 설계

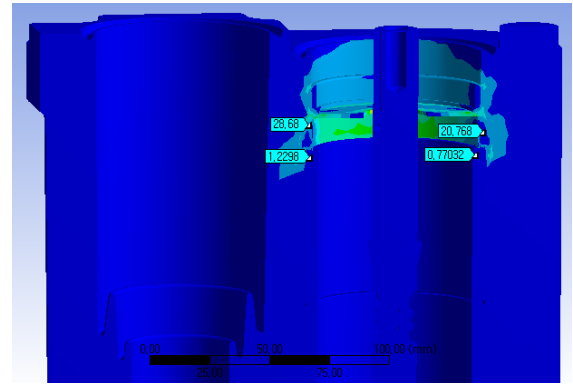
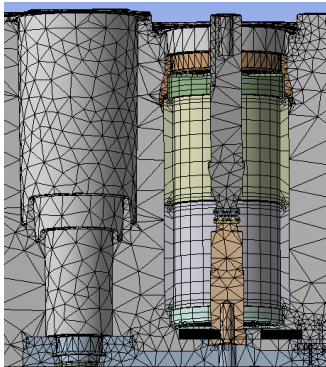
해석 결과를 토대로 집중응력을 회피할 수 있는 구조를 설계하고 세라믹의 구조적 강도를 보강하였다. 그림4는 집중응력을 피할 수 있도록 설계된 고무 패킹 및 절연체이다.



<그림 4> 절연체 및 고무 패킹 설계

2.3.1 설계된 절연체 열응력 해석

성형 시 에폭시 누설을 방지하고 내열성, 내유성, 내화학성에 우수한 불소고무를 사용한 패키징을 제작하여 세라믹 외부 응력이 집중되는 곳에 장착한 결과 집중응력을 분배시켜 절연체의 성형 결함 요인을 제거할 수 있었다. 그림5는 설계된 절연체의 기존 크랙 범위에 대한 열응력 해석 결과이다. 고무 패킹의 효과로 집중 열응력이 감소하였으며 응력분포 역시 기존 절연체와는 다른 형태를 띠고 있다. 해석결과 세라믹 부근 응력이 설계전과 비교하였을 때 약 200Mpa에서 10Mpa 이내로 줄어들었음을 알 수 있다. 또한 실제 성형 후 절연체의 불량률도 확연히 감소하였다.



<그림 5> 설계된 절연체 열응력 해석 결과

3. 결 론

본 논문에서는 에폭시 절연체의 성형 시 발생하는 결함을 해소하여 경제적 손실을 줄이기 위해서 연구가 진행되었다.

실험을 통하여 응력이 집중되는 곳을 찾아 유한요소법으로 해석하였다. 해석 결과와 식1에서 상이한 재료간의 열팽창계수 차이로 인하여 열응력이 진공 인터럽터 및 에폭시 절연체의 균열에 큰 원인으로 검증되었다. 검증 후 응력 집중을 막는 저렴한 방법 중에 하나인 불소 고무의 사용 및 절연체의 구조를 바꾸어 해석을 통하여 신뢰성을 충분히 검증하였다. 검증한 설계를 바탕으로 고무 패킹을 이용하여 절연체 성형 결과 불량률이 현저하게 줄어들었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pecht.M.G Nguyen L.T and Hakim. F.B "Plastic-encapsulated micromechanics" Jonh Wiley & Sons. Inc. 1995.
- [2] Steiner.t.o. Suhl.O "Investigation of Large PLCC Package cracking during surface mount exposure". IEEE Trans. on Components, Hybrid and Manufacturing Technology. Vol 10,pp. 209-216
- [3] JIS K 7115,"Plastics-Determination of creep behaviour-Part1 : Tensile creep"
- [4] IEC 62271-100, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 100:High-voltage alternating-current circuit-breakers