

층간단락에 의해 소손된 PT의 특성해석에 관한 연구

송길목, 김향곤, 김동욱, 최충석
전기안전시험연구원

A Study on the Characteristics Analysis of the Burned-Out PT According to Layer Short-Circuit.

Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Chung-Seog Choi
Electrical Safety Laboratory Research Institute(KESCO ESLRI)

1. 서론

산업시설의 확충과 대용량화로 전기는 중추적인 역할을 담당하며 급속한 발달을 보이고 있다. 이러한 발달에 힘입어 많은 산업시설이 양적으로 팽창되고 질적으로 성장하고 있지만, 그로 인한 전기재해도 대형화되어 가고 있는 실정이다.

'98년 전기관련 통계자료를 인용하면 전기설비사고의 경우 사고설비조사대상 4,632건 중 고압설비사고가 1,507건으로 컷아웃스위치(COS)가 24.2%로 가장 많이 차지하고 다음으로 수배전용 개폐기, 변압기, 계기용 변성기함 등으로 나타났다. 또한 계기용 변압기의 사고는 9건이 발생하여 0.6%의 사고발생률을 보였다.[1]

계기용 변압기(PT; Potential Transformer)는 전력설비의 고전압을 저압으로 변성하여 안전하게 측정하여 효율적인 설비운동을 목적으로 하는 기기로써 일반 수·변전설비에 설치되어 있다.[2] 그런데 사용중 전기적, 환경적, 기계적 요인 등에 의해 기능이 저하되어 대형사고로 이어지는 경우가 있다. 일반 전기기기 권선이 단락에 의해 설비사고로 이어지면 도체의 용융흔이 발생하는데 이를 해석함으로써 그 원인 판정이 가능하다.[3] 또한, 절연재료의 열적 변화를 해석하는 것도 기기의 특성 진단에 대단히 중요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 사고현장에서 수집한 PT를 해석함으로써 전기화재 감정의 과학화를 정립하고자 한다. 즉 사고의 원인을 정확히 감정함으로써 향후 유사사고에 대한 해석의 객관성을 확보함과 동시에 사고로 발생한 PT 권선의 용융흔 및 절연재료의 열특성을 해석하는데 있다.

2. 실험

층간단락에 의해서 소손된 PT(22.9kV/190V, 200VA)의 특성 분석을 위해서 권선과 절연재로 분류하여 해석을 하였다. 사고현장에서 수집한 PT의 권선과 단락장치(그림 1)를 이용해서 재현한 권선의 용융흔 분석은 금속현미경(Metallurgical microscope, Nikon, Japan), 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope, JEOL JSM-6400, Japan) 및 에너지분산분석기(EDX: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, Oxford, England)를 이용하여 해석하였다.

그리고 PT의 절연재료의 열특성을 해석하기 위해 정상시료와 비교하였다. 열중량 분석은 TGA(TA Instrument, USA)를 이용했으며, 열량분석은 DSC(TA Instrument, USA)를 적용하였다. 또한, 전기로(Electric Muffle Furnace, Shin Sung Co.)를 이용하여 정상시료를 100℃, 300℃, 350, 400℃, 500℃에서 각각 3시간 동안 열열화 시킴으로써 온도 의존성을 비교하였다.(그림 2)

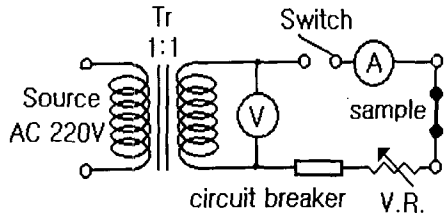


그림 1. PT 권선의 단락실험을 위한 개략도

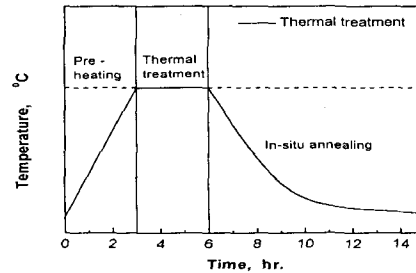


그림 2. PT 절연재료의 열열화 과정

3. 결과 및 고찰

사진 1은 층간단락에 의해 소손된 PT의 외형을 나타낸 것이다. 몰딩(molding)된 에폭시 수지에 균열(crack)이 심하게 발생하였으며, 화재로 인한 열의 영향으로 심부가 심하게 소손된 흔적이 있으며 금속프레임(metal frame)의 외부까지 겹겹이 그을린 흔적이 선명하게 남아 있다. 또한, 수지의 내부에 감겨있는 권선의 일부에서 약 1~3mm 정도의 용융흔(molten mark) 들이 있는 것으로 보아 금속조직의 분석을 통해서 원인 규명이 가능할 것이다.

사진 2는 PT 권선의 용융부분으로 금속현미경 사진이다. 금속현미경을 이용한 단면 구조분석은 절단기(Cutting machine, Struers, Denmark)를 이용하여 절단하였으며, 절단된 전선은 성형기(Mounting press, Struers, Denmark)로 성형시킨 후 연마기(Polisher machine, Struers, Denmark)를 이용하여 연마하였다. 연마가 끝난 시료는 크로머지로 에칭(etching)한 후 분석하였다. 이 사진에서 알 수 있듯이 경계면을 중심으로 주상조직(columnar structure)이 발달하였으며 보이드(void)의 성장도 왕성한 것으로 미루어 보아 층간단락에 의한 것으로 판정된다. 즉 권선의 층간단락에 의해 동선 고유의 연신구조(elongation structure)가 없어졌으며, 대전류가 흐를 때 동시에 고열이 발생하여 용융과 재결합(recombination)이 이루어진 것이다.[4]

사진 3은 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope)을 이용하여 단면을 분석한 사진이다. 사진 (a)는 정상시료의 단면으로 전선을 가공할 때 연신된 고유의 특성을 잘 나타내고 있다. 사진 (b)는 층간단락에 의해 생성된 용융부분을 촬영한 것으로 연신구조가 완전히 없어졌으며 보이드의 성장도 왕성한 것을 알 수 있다. 사진 (c)는 단락장치[5]를 이용하여 재현한 단락흔으로 연신구조가 없어졌고 보이드가 성장되었음을 알 수 있다. 즉 단면구조 분석을 통해서도 변형된 특징을 인지할 수 있었으며 이를 통해서 원인 판정의 중요한 자료가 될 것으로 생각된다.

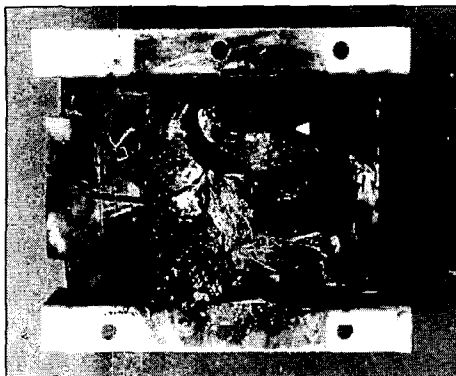


사진 1. 현장 수집한 PT의 실체사진

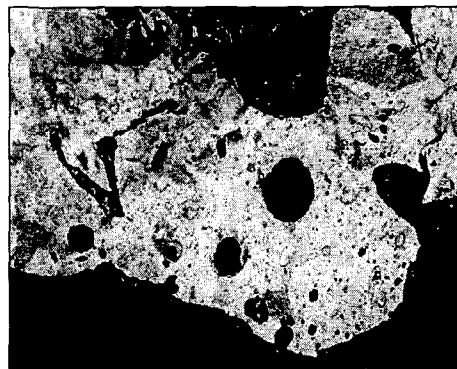


사진 2. 층간단락된 PT 권선의 금속현미경 분석 사진

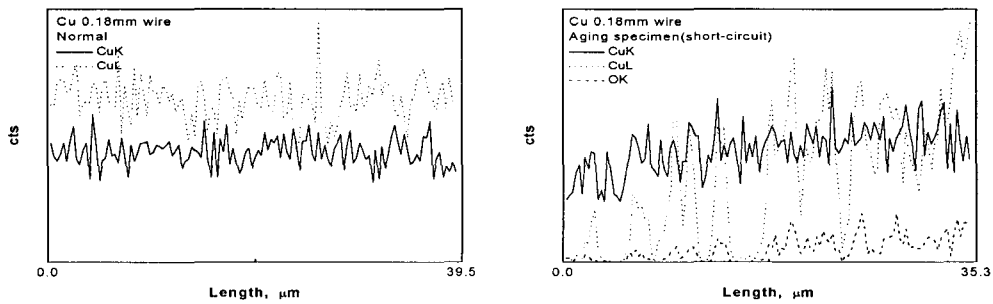


(a) 정상시료

(b) 수집한 시료

(c) 재현한 시료

사진 3. SEM을 이용한 PT 동선의 단면구조 분석(mag.×1,000)



(a) 정상시료

(b) 재현한 시료

그림 3. EDX를 이용한 권선의 spectra 분석

그림 3은 PT 권선의 정상시료와 재현한 시료를 나타낸 것이다. 단락에 의해 형성된 용융흔은 EDX로 line scanning하여 나타냈다. 그림 (a)는 CuK 및 CuL line이 비교적 일정하게 나타나고 있다. 즉 연동선의 주피크(main peak)인 K 및 L line을 확인할 수 있다. 그림 (b)는 그림 (a)와 같은 line 외에도 OK line이 전체에 걸쳐 고르게 관측되었다. 이것은 용융과 재결합 과정에서 산소가 반응에 적극적으로 참여한 것으로 판단된다.

그림 4는 PT 절연재료의 수지부분을 일정량 채취하여 열중량분석(TGA)한 것이다. 열열화에 따른 중량변화를 해석하기 위해 정상시료와 비교하였으며, 열열화 온도는 100℃, 300℃, 350℃, 400℃, 500℃를 각각 설정하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 300℃에서 열열화된 경우 열중량 감소가 급격히 일어남을 알 수 있으며, 350℃ 이상에서 열열화되면 약 85% 이상 소실됨을 알 수 있었다. 즉 수지의 열반응 온도가 약 300℃인 것을 고려하면 PT 운용 중 방열에 각별한 주의가 요망된다.

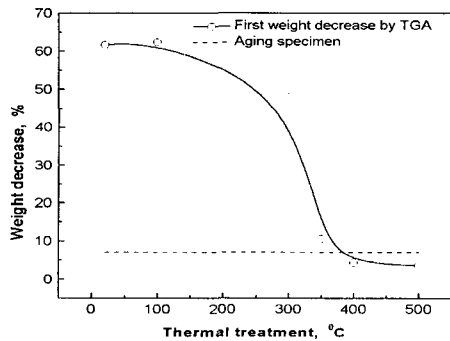


그림 4. PT 절연재료의 TGA 곡선

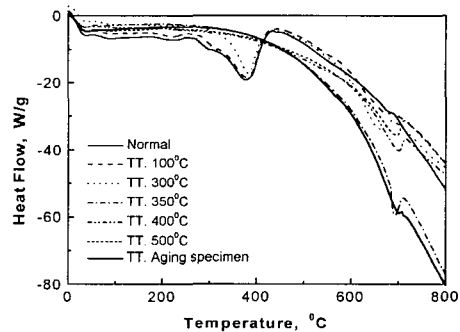


그림 5. DSC에 의한 특성 비교

그림 5는 PT 절연재료를 일정량 채취하여 시차주사열량분석(DSC)한 것이다. 300℃ 이상에서 열처리한 시료는 열열화 과정에 열량이 소모되어 약 320℃ 근처에서 피크변화를 관측할 수 없었다. 즉 열량분포의 경향으로 보아 PT 절연재료의 열반응 극한값은 약 300℃인 것으로 판단되며, 이에 따른 설비운용이 이루어져야 할 것이다.

4. 결론

전력설비에 사용되는 PT의 특성을 해석하기 위해 사고현장에서 수집한 시료와 정상 시료를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 금속현미경 분석에서 경계면을 중심으로 주상조직(columnar structure)이 발달하였으며 보이드(void)의 성장도 왕성한 것으로 보아 층간단락에 의한 것으로 판단된다.
- 2) SEM 사진 분석 결과 정상시료의 단면에서는 연신된 고유 특성이 잘 나타났으나, 층간단락에 의해 생성된 용융부분을 촬영한 것에서 연신구조가 완전히 없어졌으며 보이드의 성장도 왕성함을 알 수 있다. 즉 단면구조 분석을 통해서도 변형된 특징을 인지할 수 있었으며, 사고원인 판정의 중요한 자료가 될 것으로 생각된다.
- 3) 용융된 권선을 line scanning한 결과 CuK, CuL 및 OK lines이 전체에 걸쳐 고르게 관측되었다. 이것은 용융과 재결합 과정에서 산소가 반응에 적극적으로 참여한 것으로 판단된다.
- 4) TGA를 이용하여 PT의 절연재료를 분석한 결과 300℃에서 열열화된 경우 열중량 감소가 급격히 일어남을 알 수 있으며, DSC에 의한 열량분포 분석에서 PT 절연재료의 열반응 극한값은 약 300℃인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 韓國電氣安全公社, 電氣火災 統計分析, pp.51-56, 1999.
2. KS C 1706, 1707, 계기용 변성기, 한국표준협회, 1992.
3. 최충석 외 5, 전기화재공학, 東和技術, pp.98-105, 165-212, 1999.
4. 최충석 외 3, “저압용 HIV의 열열화에 따른 조성변화”, 대한전기학회춘계학술대회논문집, pp. 8~11, 1999.
5. 최충석, 김향곤, “상용전압을 이용한 단락 및 과부하 검출 실험장치”, 특허출원번호: 10-1999-0064910, 1999.