전기화재의 발생 원인을 과학적으로 분석하고 향후 예방을 위한 자료로 활용하기 위해 계기용 변성기(계기용 변압변류기 ; MOF)의 화재 확산 패턴 및 조직 분석, 성분 해석, 적외선 분광분석 등을 통해 사고의 원인을 분석해 보고자 한다.

22.9kV 수변전실에 설치된 계기용변성기(MOF)의 소손 원인 판정(下)

글 | 최충석 한국전기안전공사 전기안전연구원
재해예방연구그룹장, 공학박사

(지난 호에 이어서)

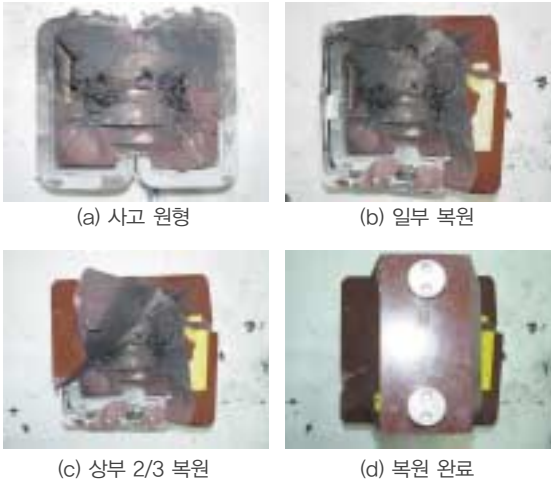
4. 분석 결과

가. 화재 확산 패턴 해석

사고 현장에서 수거한 분석품의 외형 전체를 보면 [그림 3]과 같이 나타나 있는 것을 확인할 수 있으며 이때 주요 사고 원인이 되는 계기용변성기를 중심으로 분석을 실시하였다.

■ 그림 3. 사고 물품의 실체 사진

[그림 4]는 사고 계기용변성기의 상부를 복원한 것으로 각각의 과정을 나열하였다. 복원의 목적은 절연 재료의 탄화 조직이 어떻게 확산되었는지 그 확대 범위 등을 알 수 있는 중요한 자료가 된다. 그림에서도 알 수 있듯이 (a)는 복원 전의 상태를 보여주는 것으로 권선 전체에서 검게 탄화된 것을 확인할 수 있고, 사방으로 크랙(crack)이 권선을 중심으로 방사 형태로 나타난 것으로 보아 열적인 팽창이 있었음을 확인할 수 있다. (b)는 일부 복원된 것으로 절연 재료의 두께에 대한 강도가 크나 열적 팽창이 기계적 강도보다 더 강했던 것으로 나타났다. 즉 열적 팽창이 이루어지기 위해 상당히 시간이 흘렀음을 알 수 있다. 이는 탄화된 정도와 검게 그을린 정도에서 확인할 수 있다. (c)는 2/3 정도 복원된 형태를 보여주는 것으로 최초의 권선에서 방사 형태로 균열이 되었음을 확인해 주는 것이다. (d)는 상부의 복원이 완료된 것으로 위쪽에 위치한 변류기는 소손이 없었음을 알 수 있다. 따라서 본 변성기의 사고는 계기용변압기 내부에서 진전된 것으로 판단된다.



(a) 사고 원형 (b) 일부 복원

(c) 상부 2/3 복원 (d) 복원 완료

■ 그림 4. 상부 복원 과정

[그림 5]는 계기용변성기 하부를 복원한 것이다. 표면에 그을음(soot)이 많고, 균열 정도가 상부와 비슷한 것을 확인할 수 있다. 이는 최초의 발화 지점이 상부와 하부 등 전체적으로 동시에 발생한 것으로 권선을 중심으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 조직의 균열이 기계적

강도가 약한 부분에서 시작되어 강도가 강한 부분으로 진전된 것을 알 수 있고 내부에서 외부로 진전된 것을 볼 수 있다.

(a) 복원 전 (b) 복원 후

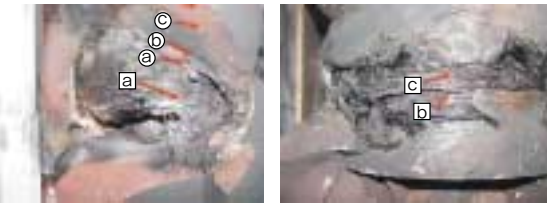
■ 그림 5. 하부 복원 과정

[그림 6]은 복원된 분석품과 정상품의 외형을 비교한 것이다. (a)는 정상품으로 단자대로 구성된 저압부와 상부의 고압부가 정렬된 것을 확인할 수 있으며, (b)는 복원된 분석품으로 권선과 권철심이 위치한 부분에서 심한 균열과 탄화된 흔적이 나타나 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 분석품은 계기용변압기를 중심으로 권선 내부의 이상 유무와 단락 상태, 절연 성능 상태 등 다양한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

(a) 정상 (b) 수거물 복원

■ 그림 6. 몰드형 변성기의 외형 비교

계기용변압기의 하부 측 코일과 상부 측 코일의 외형을 보면 [그림 7]과 같다. (a)는 하부 측 코일의 소손 형태를 보여주는 것으로 권선 전체가 고루 탄화된 것으로 확인할 수 있다. (b)에서도 (a)와 마찬가지로 고루 탄화된 것으로 보아 권선의 코일 전체가 어떠한 이상 발생으로 사고가 난 것으로 판단된다. 따라서 (a)의 ⓐ와 (b)에서의 ⓑ, ⓒ부분을 채취하여 금속 특성 변화를 분석하였고, (a)에서 ⓐ, ⓑ, ⓒ의 조직을 채취하여 절연 재료의 열 확산 특성을 분석하였다.



(a) 하부 코일 (b) 상부 코일

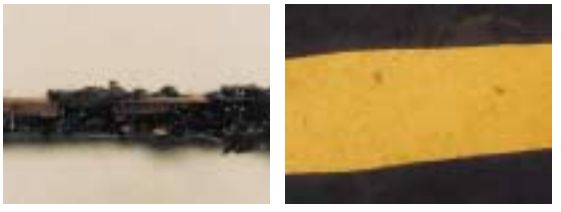
■ 그림 7. 코일의 소손 상태

나. 실체 및 금속 단면 조직 분석

[그림 8]의 (a)는 [그림 7]의 ⓐ부분을 25배 확대한 것으로 코일 표면에 절연 재료가 탄화되어 달라붙어 있는 것을 확인할 수 있다. 코일 외형의 변화는 거의 이루어지지 않은 상태로 금속 단면을 분석하기 위해 성형과 연마를 하여 단면을 에칭(etching)한 다음 현미경으로 촬영하였다.

(b)는 금속 단면 조직을 보여주는 것으로 100배 확대했을 때의 형태를 나타낸 것이다. 단면은 열에 의해 입자가 일부 성장된 형태를 보이나 1,000℃ 이상의 높은 고

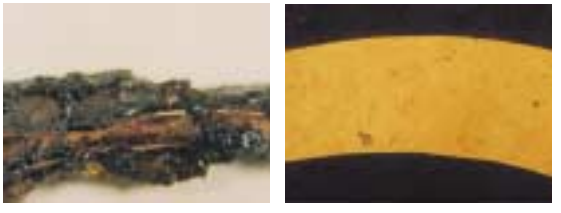
열에서 혹은 순간 열에 의한 주상 혹은 수지상 조직이나 결정립계 균열과 같은 형태는 확인할 수 없었다. 따라서 내부에서 발생한 열의 범위는 절연 재료를 연화 및 탄화시킬 수 있는 온도인 300℃ 이상에서 800℃ 미만의 열이 발생한 것으로 추정된다.



(a) 실체 확대(25배) (b) 금속 단면 조직(100배)

■ **그림 8. 광학 현미경에 의한 ⓐ의 확대 및 단면 분석**

[그림 9]는 [그림 7]의 ⓑ부분을 분석한 것으로 (a)는 실체를 25배 확대한 것이다. 코일의 표면에는 높은 열에 의해 절연 재료가 탄화 및 변형된 것을 확인할 수 있고, (b)는 금속 단면 조직을 분석한 것으로 금속 단면을 100배 확대한 것이다. 이때 단면 조직은 [그림 8]과 같이 열에 의해 입자가 성장한 것을 확인할 수 있으나 순간 고열이나 전체적으로 높은 고열이 발생하지는 않은 것으로 판단된다.



(a) 실체 확대(25배) (b) 금속 단면 조직(100배)

■ **그림 9. 광학 현미경에 의한 ⓑ의 확대 및 단면 분석**

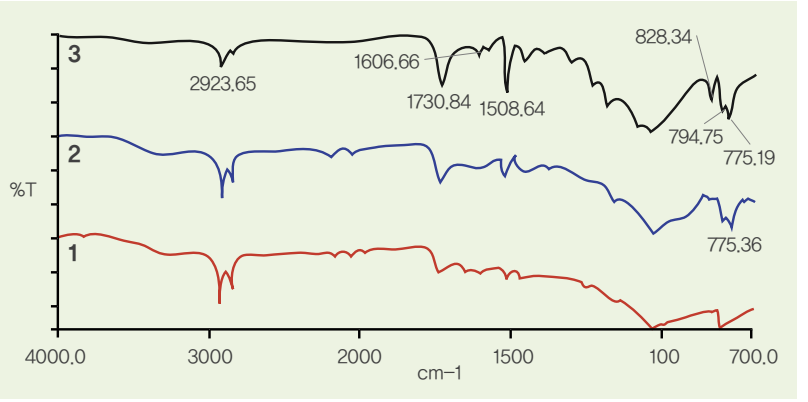
[그림 10]은 [그림 7]의 ⓒ부분을 분석한 것이다. (a)는 실체를 25배 확대한 것으로 코일 대부분이 열에 의해 소손된 것을 확인할 수 있으며, 표면에는 탄화된 절연 재료가 붙어 있는 것을 확인할 수 있다. (b)는 (a)의 금속 단면 조직을 분석하기 위해 금속 단면을 100배 확대한 것으로 코일의 표면 이외에 열적으로 거의 소손이 없는 것으로 나타났다.

(a) 실체 확대(25배) (b) 금속 단면 조직(100배)

■ **그림 10. 광학 현미경에 의한 ⓒ의 확대 및 단면 분석**

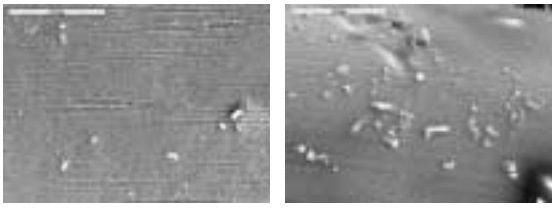
따라서 권선 전체에서 열이 발생하였으며 단락이나 과부하로 의심되는 조직은 발견되지 않았고 실체 확대 및 단면 조직 분석을 통해 약 300℃에서 800℃ 미만에서 열적 소손이 이루어진 것으로 판단된다.

■ 그래프. 적외선 흡광 스펙트럼 분석



다. 미세 구조 및 성분 분포 해석

미세 구조 및 성분 분포 해석을 위해 1,000배까지 금속 조직을 확대할 수 있으며 탄화 및 용융시의 열적 피로에 대한 상황을 분석하였다. [그림 11]은 [그림 7]에서의 코일 일부를 채취하여 분석한 것으로 ⓐ, ⓒ 부분의 것이다. (a)와 (b) 모두에서 외형적으로는 열적인 소손이 거의 없음을 확인할 수 있었다. 에너지 분산형 분광 분석에 의해 성분분포는 크게 세 가지의 물질로 구성된 것을 확인하였다.



(a) ⓐ (b) ⓒ

■ 그림 11. 금속 표면의 2차 전자 이미지

(a)에서는 탄소(C) 32.8[%], 산소(O) 13.2[%], 구리(Cu) 54.0[%]의 함량비를 나타내었다. 이는 절연 재료의 탄화된 부분이 표면에 부착된 것으로 공기 중의 산소와 결합한 형태로 보인다. (b)는 탄소(C) 40.1[%], 산소(O) 21.4[%], 구리(Cu) 38.5[%]의 함량비를 나타냈다. 이는 (a)와 거의 비슷한 비율이며 탄소나 산소의 비가 높은 것은 코일의 직경이 (a)보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 미세 확대와 성분 분포를 통해 금속의 대부분은 열적 소손이 작은 것을 알 수 있다.

라. 절연재의 적외선 분광 분석

[그래프]는 적외선 분광 분석을 이용한 적외선 흡광 스펙트럼으로 절연 재료 표면의 화학적 구조를 분석한 것이다. 권선에서 가장 가까운 부분은 1([그림 7]의 ⓐ 부분)로서 약 1500[cm^{-1}]과 1730[cm^{-1}]에서 나타나는 흡광 피크가 매우 작아진 것을 알 수 있다. 이는 유기질 절연 재료를 구성하는 기본적인 화학 결합으로 탄소와 산소의 이중 결합 구조를 가지고 있다. 따라서 열적 피로에 의해 권선과 근접한 절연 재료가 많이 탄화되었음을 확인할 수 있다.

[그래프]의 2는 [그림 7]의 ⓑ부분으로 열적 스트레스에 의해 피크의 결합구조가 변형을 일으켰고 세기도 약한 것을 알 수 있다. [그래프]의 3은 [그림 7]의 ⓒ 부분으로 1730[cm^{-1}], 1606[cm^{-1}], 1508[cm^{-1}] 등 정상적인 에폭시 수지의 특성과 유사한 형태를 보이고 있다.

5. 맺음말

22.9kV 수변전설비에 설치된 계기용변성기(MOF) 사고의 원인 분석 "에폭시 성형 전력수급용 계기용 변압변류기"의 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

가. 외형 및 열흔 패턴 분석을 통해 변류기에는 열적으로 혹은 기계적 원인에 의해 소손된 형태는 발견되지 않은 것을 확인하였다. 사고 계기용변성기의 권선 전체에서 검게 탄화된 것을 확인할 수 있고, 사방으로 크랙(crack)이 권선을 중심으로 방사 형태로 나타난 것으로 보아 열 팽창이 있었다. 이는 계기용변압기 내부에서 진전된 것으로 판단된다. 코일 표면에는 절연 재료가 탄화되어 달라붙어 있고, 코일 외형의 변화는 거의 이루어지지 않은 상태로 나타났다.

나. 금속 단면은 열에 의해 입자가 일부 성장된 형태를 보이나 1,000℃ 이상의 높은 고열, 혹은 순간 열에 의한 주상 혹은 수지상 조직이나 결정립계 균열과 같은 형태는 없었으며, 이로써 내부에서 발생한 열의 범위는 절연 재료를 연화 및 탄화시킬 수 있는 온도인 300℃ 이상에서 800℃ 미만의 열이 발생한 것으로 판단된다.

다. 미세 확대와 성분 분포 특성을 통해 탄소(C) 32.8[%], 산소(O) 13.2[%], 구리(Cu) 54.0[%] 및 탄소(C) 40.1[%], 산소(O) 21.4[%], 구리(Cu) 38.5[%]의 함량비로서 절연 재료의 탄화된 부분이 표면에 부착된 것으로 공기 중의 산소와 결합한 형태로 금속의 대부분은 열적 소손이 적은 것으로 판단된다.

라. 적외선 흡광 스펙트럼을 통해 권선과 근접한 절연 재료가 열적인 영향에 의해 많은 탄화가 진행되었음을 확인하였다. 열 분석을 통해 권선을 중심으로 가장 근접한 부근에서 발열 피크의 낮은 온도에서 발생하였고, 멀수록 발열 피크가 큰 것으로 나타나 열적으로 변형된 절연 재료는 권선 부분에서 가장 많은 열적 피로를 받은 것으로 판단된다.

위의 종합적인 분석을 통해 계기용변성기의 내부에 계기용변압기의 권선에서 최초의 발열이 시작되었고, 이 발열에 의한 열 축적 등으로 균열되어 사고가 난 것으로 판단된다. 권선의 발열은 전체적으로 확산되는 경향을 보여 과전류에 의한 사고 원인으로 추정할 수 있으며, 또한 '철공진 회로'에 의한 것으로 추정할 수 있다.

과전류의 경우 나타나는 금속 단면의 수지상 조직이 나타나지 않는 것으로 보아 주파수의 변화 없이 내부에 존재하는 철심, 코일, 내부 저항 등이 직렬 공진하여 권선에 열적 피로를 가하여 사고를 유발한 것으로 판단된다. 철공진의 일반적인 대책으로는 철심의 자속 밀도를 낮추기 위해 단면적이 큰 철심을 사용하는 방법, 2차 측에 저항을 상시 접속하는 방법, 차단기의 동작에 의해 저항을 계기용변압기 2차 측에 착탈하는 방법 등이 있으며 기성품인 경우 대부분 가포화 리액터와 저항으로 되는 억제 부담에 의한 방법이 채택되고 있다.

발생 원인으로는 일반적으로 차단기의 극간에 차단 특성을 개선하기 위하여 콘덴서가 설치되어 있는데 이 극간 정전 용량과 모선의 대지간 정전 용량 및 권선 사이에서 철공진 발생 가능성이 있다.