

# 옥외에 설치한 계기용변성기의 화재원인 분석과 판정

## The Fire Cause Analysis and Judgement of Metering Out Fit(MOF) Installed Outdoors

한국전기안전공사 전기안전연구원 송길목 · 김영석 · 김선구

YESCO-ESRI Kil-Mok, Shong · Young-Seog, Kim · Sun-Gu, Kim

### 요 약

본 논문에서는 국내에서 옥외에 설치한 계기용변성기의 화재원인을 분석한 것이다. 이는 KS C IEC와 같은 공인된 규정에 의해 준수되었고, 현장에서 입증 가능하도록 전개되었다. 결과적으로, 공정의 마무리가 불량한 계기용변성기의 개스킷 부분에서 화재 원인을 찾아내었다. 화재 과정을 추정하면, 미체결 개스킷에 기인한 계기용변성기에 수분이 침투한 것이다.

### Abstract

In this paper, we analyzed on the fire cause of the metering out fit(MOF) installed the outdoors in domestic. There are observed by the rule is approved officially such as KS C IEC. and developed into the judgement can be in site. As the results, there founded out the fire cause on the gasket parts of MOF as the process of work which finish is bad. It's estimated the fire process that water percolates through on the MOF according to the un-airtight

gasket.

**Keyword** : Fire cause analysis, Judgement, Outdoors, Metering Out Fit(MOF), Gasket, Electrical equipment

### 1. 서 론

전기에너지는 산업발달에 있어서 없어서는 안 될 매우 유용한 자원임에도 불구하고, 남용 또는 오용에 의해 재해가 발생하게 되면 인간생활에 큰 피해를 안겨준다. 전기안전을 위한 연구 개발은 이러한 전기재해를 줄이기 위한 방안으로 국내에 발생되고 있는 다양한 전기화재 메커니즘을 입증하고 예방대책을 제시하고 있다. 국내의 전기설비 통계자료에 의하면, 전기설비사고 중 고전압 설비인 계기용변성기의 사고가 차지하는 비중이 약 11.1%로 보고되어 있다. 이는 컷아웃

스위치(COS) 20.0%, 수배전용 개폐기 17.5%, 변압기 11.6%에 이어 많은 점유율을 나타내는 것으로 고장 또는 사고위험성이 잠재되어 있다.

전기설비의 사고형태를 분류한 자료에 의하면, 가장 많은 점유율을 차지하는 것이 보호장치 미동작에 의한 것으로 조사되었으며, 다음으로는 기기소손, 결상 또는 단선, 지락의 순으로 나타났다. 전기설비에 있어서 사고원인분류를 통해 보면, 절연불량(22.5%)이 가장 많은 부분을 차지하고 과부하(12.4%), 제품의 노후(11.1%), 오동작(7.3%), 수분(6.7%), 부식이나 진동(6.7%) 등의 순으로 나타나는 것이 일반적이었다. 따라서 옥외에 시설된 전기시설물의 경우 이에 대한 철저한 점검과 관리가 요구되고 있다. 1년 중 사고빈도가 높은 달은 6월, 7월, 8월의 순으로 나타났으며, 이는 옥외 전기시설물의 관리에 있어서 수분, 강우 등의 환경적 조건에 의해 고장 또는 사고빈도가 높아진다는 것을 의미한다.

따라서 본 논문은 국내에서 발생한 전기설비의 사고 중 하나로서 사고당시 설치되었던 계기용변성기(MOF; Metering Out Fit)를 수거하여 다양한 분석기법으로 사고발생지점을 발견하고, 전기적 원인을 규명하는 데 목적이 있다. 분석은 크게 외형패턴, 특고압부상의 상태, 갓의 흡습시험, 접속함 내부의 전선 상태, 개스킷 분석, 권선의 열화특성 등으로 구분하였으며, 결과를 토대로 사고발생 유형을 추정하고, 총괄적인 의견을 제시하였다.

## 2. 계기용변성기의 용도와 사고위험성

계기용변성기는 전류측정 또는 전압측정에 사

용되는 변성기로서 크게 변류기와 변압기로 구분한다. 한국산업규격에서는 KS C 1707(계기용 변성기(전력수급용), 2002)에서 규정하고 있다. 본 규격에서는 전기계기 또는 측정 장치와 함께 사용되는 전류 및 전압의 변성용 기기로서, 변류기, 계기용변압기 및 계기용 변압 변류기의 총칭으로 정의하고 있다. 적용범위는 전력량계, 무효전량계 및 최대 수요 전력계와 그 조합으로 사용하는 전력 수급용의 계기용변성기에 대해 규정하고 있다.

구조일반에 있어서 계기용변성기는 양질의 재료를 사용하여, 전기적 특성이 내구적일 것이며, 사용 상태에서 외부 코로나 발생이 적고, 기계적으로 튼튼하고, 취급이 편리하여야 한다고 정의하고 있다. 구성은 철심, 권선 등의 재료로 되어 있으며, 볼트, 너트가 풀리지 않도록 되어 있어야 한다. 외함은 균열, 기타의 흠이 없는 철판, 주물, 자기 등의 적당한 재료를 사용하여, 튼튼한 구조로 제작되어야 하며, 기름이 샌다거나 축 또는 부식의 염려가 없어야 한다. 또한, 인출단자, 접지단자 등의 부품이 확실하게 부착되어야 하며, 기밀을 유지할 수 있는 구조여야 한다. 설치에 대한 규정은 산업자원부고시제2001-40호에 근거하여 전기사업법 제19조제2항에 의한 전력량계의허용오차등에관한규정 중 제23(용어의 정의) 3항에 정의하여 규정하고 있다. 쉽게 말하여 고전압 대전류를 저전압, 소전류로 변환하여 계측이 가능하도록 되어 있는 설비이다. 이를 통해 전압변동, 지락 등과 같은 사고를 감지할 수 있으며, 수전전력을 계산하는 역할을 한다.

전력설비 중 계기용변성기는 고전압, 대전류의 양을 계측하여 나타내는 장비로서 전압이상이나 전류의 과다사용 등에 대해 적절하게 대처할 수 있는 역할을 수행한다. 그림 1은 계기용변성기의

외형을 나타낸 것이다. 그림에서 고전압부분과 연결되는 클램프 단자, 절연을 위한 애관 등을 통틀어 부싱이라 하며, 권선과 절연유를 담아둔 외함 등을 확인할 수 있다.

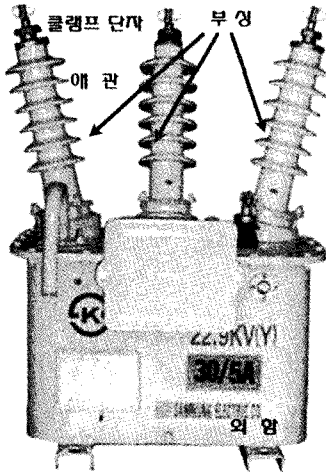


그림 1. 계기용변성기 외함 형태.

전기설비의 안전을 위해 전기설비점검이 실시되며, 점검은 일상점검 외에 정기적으로 설비의 주요기능이 제대로 동작하는지 판단할 수 있는 정기점검과 특수목적의 점검 등이 있다.

부싱의 애관을 구성하는 자기는 질이 좋은 소재로서 기포를 포함하지 않고, 이의 질은 견고 치밀하여 수분을 흡수함이 없이 온도의 급변과 기계적인 충격에 충분히 견디어야 한다. 지지쇠 붙이는 부싱을 계기용변성기의 외함에 부착하는데 필요한 것으로 고정환 고정볼트 및 스프링환 등으로 구성된다. 이 재질은 부싱과 계기용변성기 외함에 대한 어떠한 외부 충격에 충분히 견디고 확실하게 부착할 수 있는 것이어야 한다. 애관의 균열이나 내부 이상이 있을 시 판별할 수 있는 방법으로는 KS C 4307에 규정하고 있는 애관의 흡습시험을 통해 확인할 수 있다. 애관에

이상유무를 판단하는 매우 유용한 시험법이다.

### 3. 고장원인 분석

#### 3.1 계기용변성기의 일반적인 분석형태

계기용변성기의 고장원인분석은 고장을 인지할 수 있는 패턴을 분류하여 본 의뢰 건에 맞도록 재구성하여 분석이 가능한 방법을 채택하였다.

가장 우선적으로 분석이 가능한 방법으로 계기용변성기 외함에서의 소손패턴을 분석하는 방법이다. 외관상 보이는 부싱에서의 용융부분, 애관의 파손상태, 외함에서의 변형, 산화된 형태, 접속함에서의 단락흔적 발견, 접속부부에서의 용융흔적, 기타 외관상 추정이 가능한 변형상태 분석을 들 수 있다. 이후 외함뚜껑을 열어 내부의 상태를 관찰하는 방법이다. 이는 내부의 절연유가 존재한다면, 절연유의 변질상태, 내부 기기상태의 변형상태 등을 종합 분석한다. 외관의 소손패턴을 분석한 후 추정이 가능한 방법으로 분석기법을 적용한다. 절연유가 있는 계기용변성기는 내부와 외부를 격리하고 절연유의 상태를 지속적으로 유지하기 위해 패킹(packaging)을 이용하여 부싱과 외함, 외함뚜껑과 외함 사이에 설치하고 있다. 패킹의 상태가 양호한지의 여부를 판단하는 것은 내부의 절연유가 고열에 의해 밖으로 나오거나 외부의 수분이 내부에 침투하여 발생할 수 있는 절연열화 상태를 확인하는 데 매우 유용하다. 부싱에서의 이상상태를 확인하기 위해 본 분석방법에서는 애관에서의 파손원인을 분석하기 위해 흡습시험(porosity test)을 채택하였다. 이는 애관이 제작, 설치 당시의 이상유무를 확인할 수 있는 가장 중요한 시험방법으로 이용되고

있다. 내부의 권선 상태는 외관상 나타나는 특징을 보고 분석이 가능한 부분을 추정하였다. 특히 층간단락이 발생하였는지의 여부를 판단할 수 있는 용융흔적을 확인하였다.

### 3.2 분석방법

#### 3.2.1 소손패턴 분석방법

외관이 변형된 상태를 순차적으로 분석하고자 다음과 같은 분석절차에 의해 진행되었다. 그림 2는 소손패턴분석의 절차를 나타낸 것이다. 우선 계기용변성기의 원형자료와 변형상태를 비교분석하였다. 다음으로 외함의 산화상태를 비교하고, 부싱의 파손상태를 확인하였다. 추가 분석이 필요한 부분을 언급하였다. 내부의 소손상태를 비교분석하였다. 부싱의 패킹, 외함에서의 개스킷의 설치상태를 확인하였으며, 이러한 외형 소손상태를 비교하여 열화원인 추정과 추가적으로 필요한 분석방법을 제안하였다.

계기용변성기의 원형비교
외함의 산화, 탄화상태 분석
부싱의 파손상태 분석
내부의 소손상태 분석
패킹, 개스킷의 설치상태 분석
열화원인 추정과 분석방법 제안

그림 2. 소손패턴분석 순서도.

#### 3.2.2 흡습시험 방법

흡습시험은 한국산업규격에서 규정하고 있는 방법을 채택하였으며, 현장에서 수거한 계기용변성기의 부싱에 있는 애관을 이용하였다. 현장에

서 파손된 애관을 채취한 시험편에 대하여 흡습시험을 하였을 경우 시료의 내부에 액의 침투가 없어야 제작 또는 설치당시 이상이 없었음을 입증할 수 있다. 이 시험에 사용하는 시험액은 메틸알코올 1000에 대하여 약 5의 비율로 용해한 혹신(fuchsin)액을 이용하였다. 시험편은 깨끗한 파쇄면이 노출되도록 한다. 이를 시험액에 침지하고, 이에 100kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압력을 가하여 4시간 이상 방치한 후 끄집어내어 건조 후 파괴하여 액의 침투를 확인하여 판별하게 된다. 그림 3은 흡습시험에 이용된 가압챔버의 외형을 나타낸 것이다.

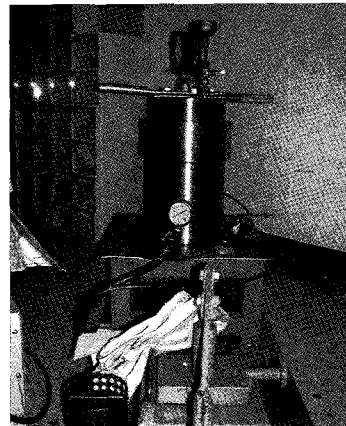


그림 3. 흡습시험을 위한 가압장치.

#### 3.2.3 현미경에 의한 확대 관찰

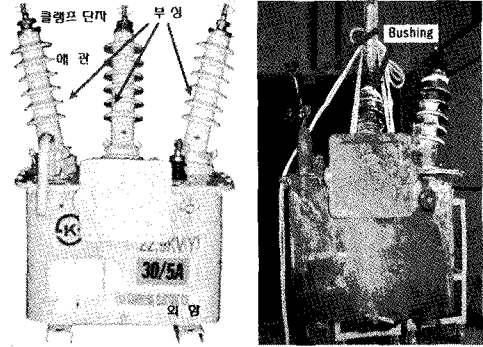
화염의 진행되었던 탄화흔적이나 열화의 정도를 확대관찰하기 위한 것으로 현미경을 이용한다. 특히 열에 약한 재료의 경우 탄화진행 상태를 확대하여 그 단계를 분석함으로써 소손패턴을 정확히 판단할 수 있는 근거가 된다. 본 현미경 장비는 최근 아날로그 시스템에서 디지털 시스템으로 변환되는 과정에서 분석이 용이하도록

구성되어 있어서 더욱 정밀하여진 게 특징이다. 대상물의 길이나 탄화특징은 물론 이미지의 저장 등이 큰 특징이라 할 수 있다.



그림 4. 디지털현미경 시스템의 구성.

형태와 좌측 부싱이 소손된 상태 등으로 추정이 가능하였다.



(a) 원형 (b) 수거

그림 5. 계기용변성기의 외형.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 외형 소손패턴 분석

#### 4.1.1 계기용변성기 외함 및 부싱

그림 5는 계기용변성기의 원형과 사고현장에서 수거한 계기용변성기의 외형을 비교한 것이다. 그림 5(a)는 계기용변성기의 원형 상태를 보여주는 것으로 (b)와 비교하여 원래의 색이 나타나 있고, 클램프 단자, 애관이 상태가 잘 정렬되어 있음을 확인할 수 있다. 이에 비해 (b)는 그림에서 좌측 부싱이 파손되어 있으며, 전체적으로 그을음이 있는 것을 확인할 수 있다. 외함에서도 열에 의한 산화가 급속하게 진행된 상태를 알 수 있다. 철제 외함은 부풀어오른 형태로서 밑부분이 개방되어 있는 상태를 확인하였다. 따라서 많은 열에 의해 소손이 진행되었으며, 전반적으로는 정면을 중심으로 좌측하단에서 상단으로 열 패턴이 진행된 것으로 판단된다. 이는 산화된

그림 6은 현장에서 수거한 계기용변성기의 외관 상태를 분석하기 위해 각각의 위치에서 촬영한 이미지를 나타냈다. 윗부분에서 보면, 그림에서 좌측 부싱이 파손되어 있으며, 중앙에 위치한 부싱과 우측 부싱은 외부에서 열에 의해 연화된 플라스틱이 녹아 흘러내린 흔적을 확인할 수 있다. 정면에서 촬영된 이미지에서 좌측 하단에서 우측 상단의 방향으로 산화되어 있는 흔적이 있는 것으로 보아 열의 진행은 좌측 하단이었을 가능성이 높은 것으로 나타났다.

좌측면에서 촬영된 이미지에서 보면, 전체적으로 산화된 외함을 확인할 수 있으며, 부싱이 인입되는 부분까지 파손된 것을 확인할 수 있다. 반면, 우측면에서 촬영된 이미지는 그을음이 일부 있으며, 산화된 흔적은 발견되지 않았다. 바닥면을 촬영한 계기용변성기를 보면, 정면부 하단이 개방되어 있는 것으로 나타났으며, 이로 인해 내부에 있던 절연유가 밖으로 배출되었을 것으로 판단된다.

소손의 정도가 비교적 한 방향에서 시작되어

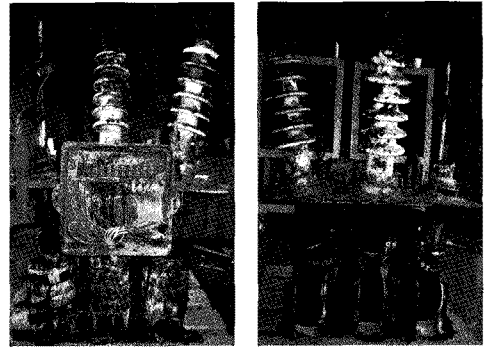
있으므로 열의 진행이 시작되는 부분에서 사고가 진행되었을 가능성이 높다. 따라서 외관의 손상된 패턴을 중심으로 부상부분에서의 열화패턴과, 외함상태 등을 명확히 분석할 필요가 있다.



그림 6. 각 위치에서의 손상된 계기용변성기 상태.

#### 4.1.2 계기용변성기 내부 상태

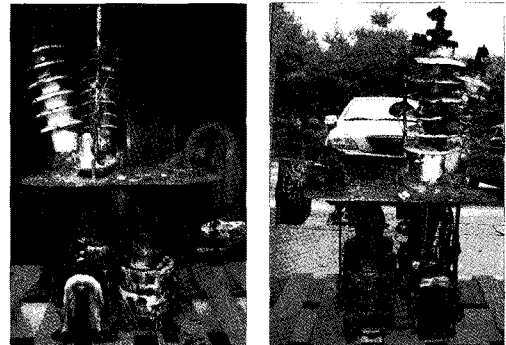
그림 7은 손상된 계기용변성기의 내부 정면과 후면을 촬영한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 그림 7(a)는 접속함과 내부의 권선에 있는 절연재료 부분이 열에 의해 용융된 형태를 확인할 수 있다. 내부 대부분은 그을음에 의해 검게 되어 있으며, 그림에서 좌측부분의 권선이 변형이 큰 것을 알 수 있다. 후면의 경우 전체적으로 그을음이 있으며, 유기절연재료가 연화되어 흘러내린 흔적을 확인할 수 있다.



(a) 정면 (b) 후면

그림 7. 손상된 계기용변성기의 내부 정면과 후면.

그림 8은 손상된 계기용변성기의 내부 좌측면과 우측면을 촬영한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (a)는 외함에서 보았을 때 산화된 부분으로 CT 또는 VT가 탄화 또는 산화된 특성을 확인할 수 있다. (b)는 우측면으로 플라스틱이 연화된 흔적이 있으며, 좌측면과 비교하여 탄화 진행이 덜 된 것으로 알 수 있다.



(a) 좌측면 (b) 우측면

그림 8. 손상된 계기용변성기의 측면 내부.

외함내부의 경우 충전되어 있어야 할 절연유가 전체 누유 또는 탄화된 상태에서 분석할 만한 자료가 없었다. 그림 9는 외함의 내부를 촬영한 것이다.

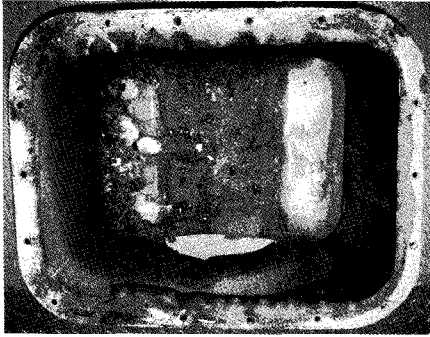
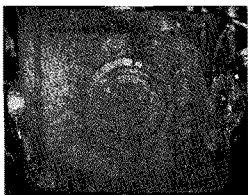


그림 9. 계기용변성기 외함 내부.

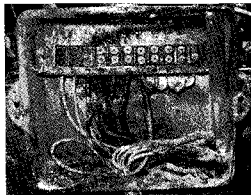
바닥면 부분에 외함이 찌그러져 개방된 상태를 알 수 있다. 이 부분은 변형된 패턴이 외부의 물리적 힘이나 영향 등에 의해 된 것이 아니라 내부에서 외부로 밀려난 형태로 진행된 것으로 보아 유압이 높아 가장 약한 부분으로 누유되었을 가능성이 높다. 좌측면에 검은 그을음이 존재하는 것에 있어서 일반적으로 절연유가 충전되어 있었다면, 나타나지 않았을 부분으로 절연유가 다 빠져 나간 후에도 지속적으로 전기가 흐르고 있으면서, 열화시킨 것으로 판단된다.

#### 4.1.3 접속함 내부

그림 10은 계기용변성기 접속함으로서 (a)는 접속함이 산화된 형태를 확인할 수 있다.



(a) 접속함



(b) 내부

그림 10. 계기용변성기 접속함.

(b)는 내부의 결선상태와 접속된 형태를 확인할 수 있는 것으로 접속부에서 접촉 불량에 의

해 나타날 수 있는 아산화동 증식 등의 흔적이 없으며, 전선의 절연피복이 탄화되고 전선 일부가 발청된 것을 확인하였으며 이는 주변 열에 의한 것으로 전기적 열화를 일으킬 만한 요인이 발견되지 않았다. 따라서 단자나사의 조임 상태와 전선 등은 양호했던 것으로 판단된다.

#### 4.1.4 부식의 파손상태 분석

그림 11은 계기용변성기의 부식은 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 좌측에 있는 부식은 애관이 거의 파손된 형태를 보여준다. 중앙부분과 우측 부분의 애관은 정상인 상태로 표면에 외부 이물질이 녹아 탄화된 부분이 붙어 있는 상태인 것을 알 수 있다. 좌측 애관은 접속부 일부가 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 중심도체의 경우 열에 의해 발청된 상태를 알 수 있다. 애관의 내부와 외부는 그을음에 의해 표면이 탄화 이물질이 부착되어 있으며, 중심도체부분이 용단되거나 용융된 흔적은 발견되지 않았다. 따라서 중심도체의 접촉 불량이나 단락, 지락 등에 의한 영향은 없었던 것으로 판단된다.

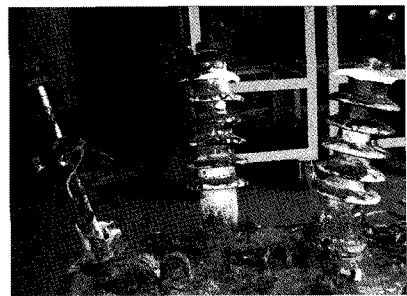


그림 11. 소손된 계기용변성기의 부식.

그림 12는 부식의 외함 접속부분을 확대하여 나타낸 것이다. 접속부에서는 패킹과 고정환, 고정 볼트의 상태 등이 이상이 없는 것을 확인하였다. 따라서 기밀이 유지되어 있어서 이로 인

한 이상은 발생하지 않았을 것으로 판단된다.

좌측의 애관인 경우 흡습시험을 통해 제작 이상유무를 판별할 필요가 있는 것으로 나타났다.



(a) 좌측 (b) 중앙 (c) 우측

그림 12. 부상의 접촉부 확대.

#### 4.1.5 권선의 소손상태

그림 13은 계기용변성기 내부의 권선 중 좌측에 위치하여 가장 소손이 심한 부분을 촬영한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 권선에 있던 유기절연재료는 열에 의해 녹았으며, 일부 탄화된 상태를 보여준다. 바닥면에는 슬러지(sludge)가 쌓여 있는 것을 확인하였다. 일반적으로 절연유에 의해 외함은 부식이 되지 않으나 외부의 수분이 침투되었을 경우 외함 내부를 부식시킬 가능성이 높다.



그림 13. 소손된 권선의 확대.

#### 4.1.6 개스킷의 상태 분석

본 분석에서 소손된 계기용변성기는 외함과

외함뚜껑의 기밀을 유지하기 위해 코르크 성분의 개스킷이 이용되었다. 그림 14는 소손된 계기용변성기의 외함과 외함뚜껑 사이에 위치한 개스킷을 촬영한 것이다. 화살표에서 표시된 것과 같이 좌측 부분과 우측부분으로 나누어 보았을 경우 좌측 부분은 외함이 산화되었으며, 기밀이 유지되었을 경우 보존되어야 할 부분이 탄화되었으며, 우측 부분은 거의 탄화되지 않고 남아 있는 것으로 알 수 있다. 또한, 상하의 중앙부분에서는 개스킷이 내부로 밀려들어간 형태를 확인할 수 있다. 이는 우측 부분은 정상적인 기밀 상태가 유지되었다 하더라도 좌측부분은 외기의 영향을 받았을 것으로 판단된다.

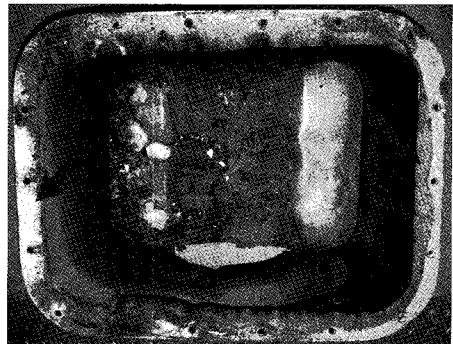
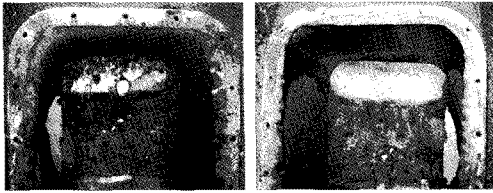


그림 14. 개스킷의 소손상태.

그림 15는 좌측부분과 우측 부분으로 나누어 각기 촬영한 계기용변성기의 개스킷이다. 그림에서도 알 수 있듯이 좌측 부분은 탄화되어 거의 남아 있지 않은 개스킷을 확인할 수 있다. 반면, 우측 부분은 원형인 상태를 유지하여 있는 것을 알 수 있다.





(a) 좌측 (b) 우측  
그림 15. 외함 접속부분의 개스킷 열화 상태 구분.

그림 16은 개스킷의 일부를 확대한 것으로 외함 바깥부분에 위치한 개스킷의 일부가 압력에 의해 변형된 형태를 하고 있으며, 하중에 의하지 않은 외함 내부 부분의 개스킷은 탄화된 것을 확인할 수 있다. 이는 탄화된 정도를 비교함으로써 외함 내부에 존재하였는지 또는 외함과 외함 뚜껑 사이에 존재하였는지 밝힐 수 있다.

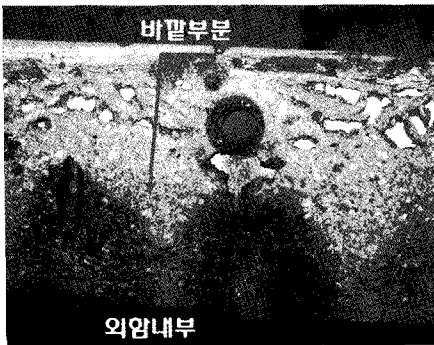


그림 16. 소손된 개스킷부분의 확대.

따라서 계기용변성기 외함 체결에 있어서 개스킷이 원위치에 존재하지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.1.7 열화원인 추정과 분석기법

계기용변성기의 소손패턴을 분석하여 고장원인이 되는 열화가능성을 확보하였다. 이를 통해 각각의 시험법과 분석기법이 이용될 수 있다.

첫째, 부상에서의 고장발생 원인을 분석하기 위해 특고압 부상의 애관을 일정한 시편으로 쪼개어 흡습시험을 실시하였다. 또한 중심도체에서

발생할 수 있는 용단 흔적을 발견하기 위해 현미경을 이용하여 확대 관찰하였다. 이를 통해 부상에서의 이상 유무를 판별할 수 있으며, 부상에서의 고장 또는 사고의 진전은 절연파괴, 방전, 접촉 불량 등이 있을 수 있다. 부상에서의 고장 또는 사고는 계기용변성기에 있어서 발생할 수 있는 고장원인 중의 하나로서 정면에서 좌측에 위치한 절연부상의 분석을 통해 그 원인을 분석할 필요가 있다.

둘째, 외함 및 개스킷에 대한 원인분석을 실시하였다. 이는 주변 환경과 내부 권선을 격리하기 위해 설치된 외함의 역할에 있어서 절연을 현저하게 저하시킬 수 있는 요인을 발견하기 위한 목적이 있다. 특히, 외관상 개스킷의 탄화된 형태가 기밀을 유지하기 위한 역할을 제대로 수행하지 못해 내부에 수분이 침투하고 이로 인해 권선간 또는 권선과 외함 사이에서 절연파괴가 진행되었을 가능성이 있기 때문이다.

셋째, 권선의 층간단락 여부를 현미경을 통해 관찰하였다. 이는 제작 당시 권선간에 절연이 열화된 부분에서 흔히 발생하는 사고로서 층간단락이 발생하였다면, 이로 인한 아크흔적을 발견할 수 있기 때문이다.

소손된 계기용변성기의 내부를 분석함에 있어서 각각의 부분으로 나누어 다양한 분석방법에 의해 수행함으로써 고장 및 사고과정을 추정할 수 있는 중요한 근거를 마련할 수 있을 것이다.

## 5. 특고압 절연부상 분석

### 5.1 22.9kV Y용 절연부상

특고압 절연부상은 KS C 4307 등에서 잘 설명

하고 있다. 그림 17은 특고압 절연부상에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 크게 클램프 단자와 애관, 패킹, 중심도체로 구분이 가능하다. 소손된 계기용변성기의 경우 그 소손 원인을 발견하기 위해 클램프 단자의 단락, 지락, 접촉 불량에 의한 용융흔적이 있는지 여부를 확인하였으며, 이상 상태는 발견되지 않았다. 애관은 그을음 등에 의해 주변 탄화물이 부착되어 있으며, 일부 균열과 파손 상태를 확인하였다. 또한, 중심도체의 변형상태를 확인한 결과 용융 흔적은 발견되지 않았다.

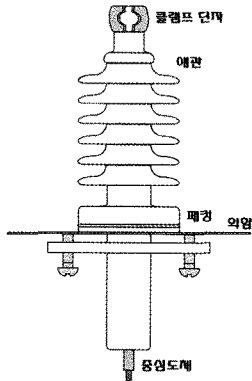


그림 17. 절연부상의 간략도.

## 5.2 애관에서의 흡습시험

그림 18은 소손된 계기용변성기의 부상 중 정면에서 좌측에 해당되는 애관의 파편으로 파손이 가장 심한 애관을 선택하여 시험하였다.



그림 18. 파손된 애관의 단면.

그림 19는 흑신액에 넣고 가압한 후의 외관을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 보라색으로 약물이 표면에 있는 것을 확인할 수 있다.



그림 19. 흡습시험에 의해 표면이 변색된 애관.

그림 20은 시험을 마친 후 건조 상태에서 애관의 이상 유무를 확인하기 위해 절개한 것이다. 애관 파편의 내부는 흑신액이 침투되지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 애관의 제작상태와 설치는 정상이었음을 알 수 있다.

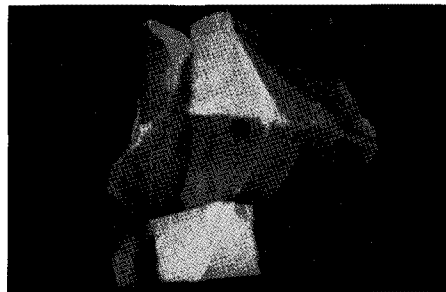


그림 20. 흡습시험 후 애관파편의 내부 상태.

## 5.3 패킹의 상태분석

그림 21은 각 상의 절연부상과 외함 사이의 기밀을 유지하기 위해 설치된 패킹을 촬영한 것이다. 그림에서 그림 21(a)는 외함이 닿는 면을

촬영한 것으로 화살표시 된 부분이 중앙 부분과 우측 부분의 부상에 위치한 패킹보다 많은 탄화가 진행된 것을 확인하였다.

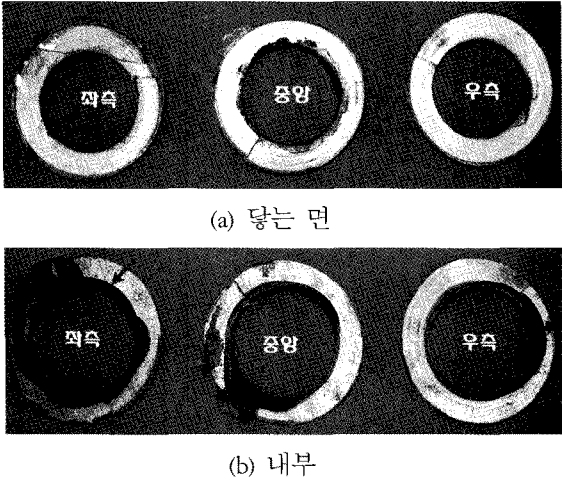


그림 21. 패킹의 탄화상태 비교.

또한 외함 내부에 위치한 패킹의 외형은 그림 21(b)로서 그림에서 좌측 부분의 패킹이 탄화정도가 다른 두 개의 부상에서 채취한 패킹보다 심한 것으로 나타났다.

패킹의 탄화정도는 좌측, 중앙, 우측의 순서인 것을 알 수 있으며, 이는 내부의 열이 크고 그 진행상태가 좌측에서 우측으로 진행되었음을 반증하는 것이다. 또한 닿는 면의 경우 모두 기밀을 유지하기 좋은 상태의 것으로 보아 고무패킹의 상태가 원위치에 있었던 것으로 판단된다. 고무패킹의 설치 위치나 열화 또는 기밀상태의 이상 등으로 인한 원인이 되어 전기사고로 진행된 흔적은 발견되지 않았다.

그림 22, 그림 23, 그림 24는 소손된 계기용변성기의 절연부싱 부분 중 외함과 애관 사이에 기밀을 유지하기 위해 설치되는 고무패킹을 나타낸 것이다.

그림 24는 소손된 계기용변성기 절연부싱 중 좌측에 해당되는 것으로 (a)는 함과 부싱이 닿는 부분으로 일부 변색이 되어 있으며, 기포가 가장자리 부분에서부터 형성된 것을 확인할 수 있다. (b)는 가장자리 일부에서 기포가 형성된 것을 알 수 있다. (c)인 경우에는 전반적으로 변형이 되어 있으며, 특히 표면의 탄화가 심한 것으로 나타났다.

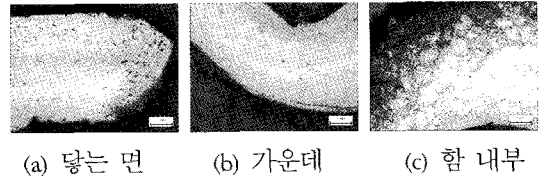


그림 22. 변성기 좌측 부싱에 있는 패킹의 단면.

그림 23은 그림 21의 중앙에 해당되는 패킹으로 닿는 면과 가운데, 함 내부로 구분하였다. 그림에서 알 수 있듯이 (a)는 비교적 정상상태를 유지하는 것을 확인할 수 있으며, 가장자리 부분에 일부 탄화된 흔적을 알 수 있다. (c)는 내부가 변색 및 변형이 진행된 형태로서 장시간 열에 노출된 것으로 판단된다.

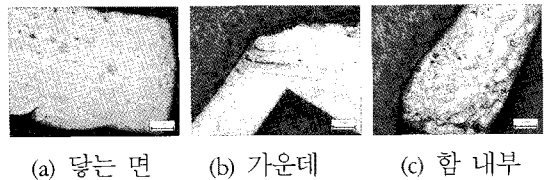
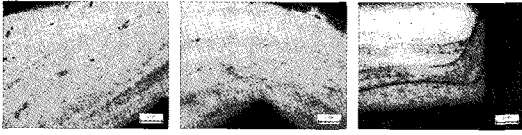


그림 23. 변성기 중앙 부싱에 있는 패킹의 단면.

그림 24는 그림 21의 우측에 해당되는 패킹을 나타낸 것이다. 그림에서 좌측 또는 중앙 부분의 패킹과 비교하여 원형이 보존되어 있는 것을 알 수 있다.



(a) 닿는 면 (b) 가운데 (c) 함 내부  
그림 24. 변성기 우측 부상에 있는 패킹의 단면.

따라서 패킹의 변형상태로 보아 소손된 계기용변성기의 함 내부의 좌측 부분에서 열이 진행된 것으로 판단된다. 고무의 탄화된 특징으로 보아 열이 서서히 높아지면서 주변기기를 탄화시킨 것으로 추정된다. 이를 통해 고장 또는 사고의 진행이 계기용변성기 좌측 절연부상의 하부에서 진행되었으며, 최초에는 서서히 진행되다가 사고로 이어진 것으로 판단된다.

## 5.4 중심도체의 확대

그림 25는 소손된 계기용변성기의 좌측 절연부상부분을 촬영한 것으로서 에관부분은 거의 파손된 상태이며, 내부 중심도체 부분은 열에 의한 산화가 진행 중인 상태인 것으로 나타났다. 화살표 표시된 부분의 용융흔적을 확인하기 위해 전선만 채취하였다.

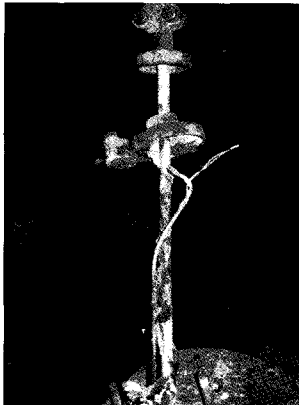


그림 25. 계기용변성기 좌측 부상의 소손상태.

그림 26은 중심도체 전선부분의 일부를 채취한 것으로 전체적으로 산화되었으며, 절연피복이 탄화되어 있고 대부분 소실된 것을 확인하였다. [라]와 [마] 부분을 선택하여 용융 흔적이 있는지의 여부를 현미경으로 관찰하였다. 이는 단락 또는 지락 등의 전기적 사고가 있었는지를 판별하기 위한 것으로 아크 흔적이 될 만한 용융지점을 발견하는데 그 목적이 있다.

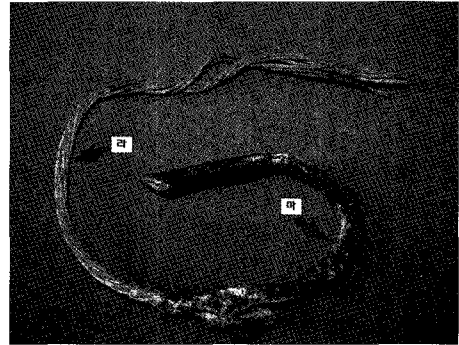
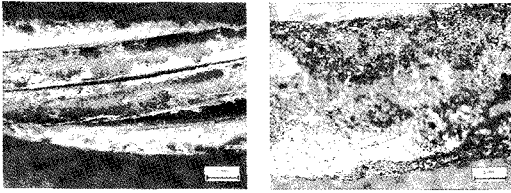


그림 26. 중심도체의 전선 채취 부분.

그림 27은 그림 26의 [라]와 [마] 부분을 확대한 것으로서 절연피복이 소실된 [라] 부분은 표면이 산화 부식 진행이 이루어지고 있으며, 표면에는 일부 탄화 부분이 남아 있는 것을 확인하였다. 또한 용융흔적은 발견되지 않았으며, 과전류에 의해 나타날 수 있는 흑갈색의 변화와 변형도 나타나지 않은 것으로 보아 정상상태로 동작하였을 것으로 판단된다. (b)는 탄화된 절연피복이 일부 남아 있는 것으로 외부의 높은 열에 의해 탄화되었을 것으로 추정되는 변형된 탄화조직이 발견되었다. 따라서 중심도체에서는 전기적 이상으로 인한 사고원인은 발견되지 않았다.



(가) ㉠ (나) ㉡

그림 27. ㉠, ㉡ 부분의 확대 이미지.

## 5.5 접속함 내부 전선의 특성

### 5.5.1 외형분석

그림 28은 그림 9(b)에서 나타난 접속함 내부 전선을 채취하여 나타낸 것이다. ㉠은 절연피복이 탄화되다가 일부 전선에 남아 있는 것으로 표면이 윤기가 흐르고 단면의 크기가 수축된 상태를 확인할 수 있다. 일반적으로 외부열에 의한 경우 절연피복이 광택이 있으며, 수축되면서 탄화되는 특징을 가진다. ㉡는 단자 부분에 접속되었던 전선으로 절연피복이 없었던 부분으로 산화된 흔적이 적으며, 접촉 불량에 의한 용융 흔적은 발견되지 않은 것으로 나타났다. ㉢는 절연피복이 탄화되어 소실된 전선의 부분으로 산화 부식의 진행이 열에 의해 매우 빨리 진행되었음을 알 수 있다.

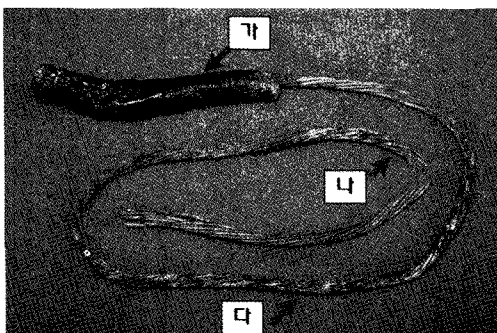


그림 28. 접속함 내부 전선의 상태.

### 5.5.2 현미경에 의한 확대

그림 29는 그림 28의 ㉠부분을 현미경에 의해 확대한 것이다.

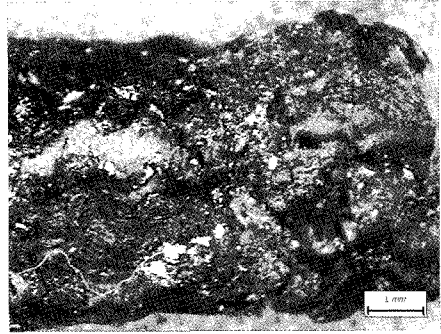


그림 29. ㉠ 부분의 확대이미지.

그림에서 절연피복이 탄화된 흔적이 일부 남아있으며, 탄화된 절연피복의 특징으로 보아 장시간 열에 노출되어 있었던 것으로 판단된다. 일반적으로 급격한 열에 의한 표면이 탄화되어 심하게 변형된다. 본 시료의 경우에는 전체적으로 열에 노출되었을 경우 나타나는 형태인 것으로 나타났다. 그림 30은 그림 28의 ㉡ 부분으로서 접속단자와 체결되었던 부분을 확대한 것이다.

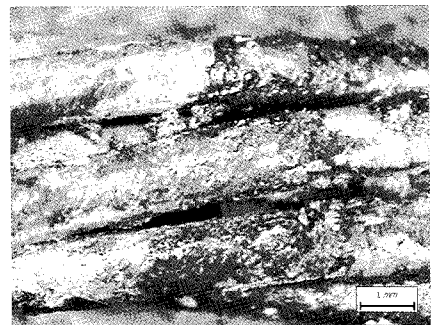


그림 30. ㉡ 부분의 확대 이미지.

탄화된 흔적이 있으며, 전반적으로 열에 노출되어 있었으나 접촉 불량, 단락 등과 같은 전기

적 이상에 의해 변형된 흔적은 발견되지 않았다. 따라서 전선과 접속단자 사이에서는 정상적인 체결이 유지되었던 것으로 판단된다.

그림 31은 그림 28의 **㉔** 부분을 확대한 것이다. 절연피복은 열에 의해 소실되었으며, 표면은 산화 부식이 진행 중인 것을 확인할 수 있다. 단락이나 지락에 의해 발생하였을 것으로 추정되는 용융흔적은 발견되지 않았다. 따라서 접속함에서 전기적 이상으로 인한 사고의 진전은 없었던 것으로 판단된다.

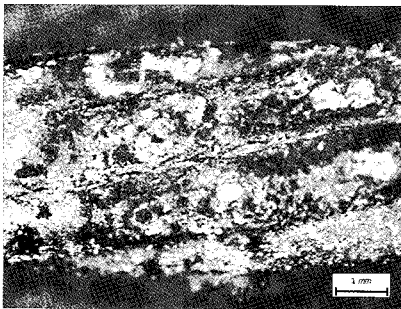
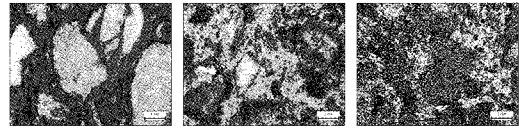


그림 31. **㉔** 부분의 확대 이미지.

### 5.6 외함에 있는 코르크 개스킷 분석

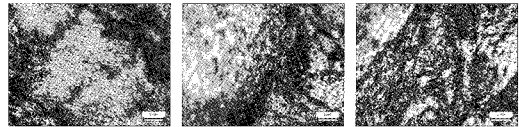
앞에서 언급한 사항으로써 개스킷에 대한 외형 소손패턴에서 알 수 있듯이 개스킷은 의도하는 상태의 위치가 아니라 좌측부분이 안으로 밀려들어 간 형태인 것을 확인하였다. 이를 정밀분석하기 위해현미경에 의해 확대하여 관찰하였다. 그림 32는 그림 13의 우측 화살 표시된 부분을 외함 외부에서 내부방향으로 단계별로 촬영한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 코르크가 열을 받았을 때 휘어지는 특성이 없는 것을 확인할 수 있다.



(a) 외부 (b) 중앙 (c) 내부

그림 32. 정상체결 된 개스킷의 확대.

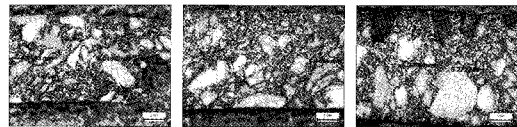
그림 33은 비정상 체결 된 개스킷으로서 열을 받아 휘어진 정도가 심하고 탄화된 부분이 넓게 분포되어 있다.



(a) 외부 (b) 중앙 (c) 내부

그림 33. 비정상 체결 된 개스킷의 확대.

이를 확인하기 위해 개스킷의 단면을 절개하여 확대한 결과 그림 34와 그림 35에서 나타낸 것과 같다. 그림 34는 정상 체결된 부분의 개스킷 단면으로 그 두께를 측정된 결과를 보면, (a)는 약 4.0~4.1mm의 범위이며, (b)는 중앙부분으로 약 4.5~4.7mm의 범위에 있다. 또한 외함 안쪽 부분에 위치한 개스킷인 경우 그 두께는 약 5.3~5.4mm인 것으로 나타났다. 이는 외부와 내부의 외함과 외함 뚜껑 사이에 약간의 편차가 있어서 나타나는 두께 차이인 것으로 판단된다.



(a) 외부 (b) 중앙 (c) 내부

그림 34. 정상체결 된 개스킷의 단면 확대.

그림 35인 경우 (a)의 두께는 약 3.1~3.6mm

또는 그 이하인 것으로 나타났으며, (b)의 두께는 약 5.4~5.6mm의 범위이다. (c)는 내부의 것으로 약 4.3~4.7mm의 범위에 있는 것으로 조사되었다. 따라서 압력을 받았을 범위와 비정상 체결되어 압력을 받지 않았을 경우의 두께에 대한 편차가 그림 34보다는 큰 것으로 나타났다.



(a) 외부 (b) 중앙 (c) 내부

그림 35. 비정상 체결된 개스킷의 단면 확대.

## 5.7 권선에서의 열화특성

### 5.7.1 소손된 계기용변성기 좌측 권선 외형

그림 36은 계기용변성기 권선의 일부를 확대한 것으로서 그림 6(a)에서 좌측에 위치한 권선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 화살표가 표시된 부분에서 권선의 일부가 용단된 형태인 것을 확인할 수 있다. 에나멜 코팅 부분은 검게 탄화되어 있으며, 절연재로 쓰이는 플라스틱이 연화되어 흘러내린 것을 알 수 있다. 따라서 층간 단락 여부를 확인하기 위해 용단된 부분을 현미경에 의해 확대하였다. 용융된 흔적을 ㉠과 ㉡로 구분하여 그 형태를 비교분석하였다.

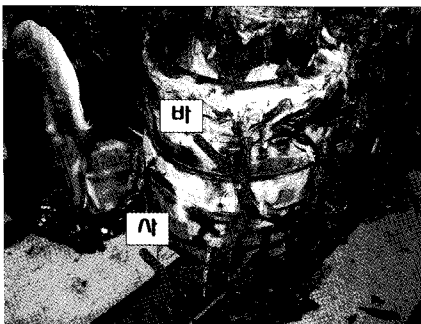
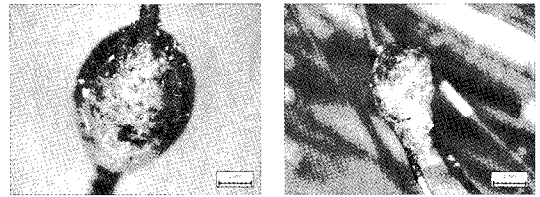


그림 36. 권선의 용단된 부분.

### 5.7.2 용융된 내부 권선의 확대

그림 37은 권선의 용융된 부분을 채취하여 현미경에 확대한 이미지를 나타낸 것이다. 그림 37(a)는 소선을 중심으로 용융망울이 형성된 것으로 보아 외부 열에 의해 용융된 것으로 판단된다. 일반적으로 용융된 부분이 흘러내리거나 전선의 단면이 줄어드는 형태로 용융이 진행된 것은 외부 열에 의한 것이므로 본 용융흔적에 있어서 층간단락 보다는 외부 열에 의해 용융될 가능성이 많은 것으로 판단된다.



(가) ㉠ (나) ㉡

그림 37. ㉠, ㉡ 부분의 확대 이미지.

## 6. 결 론

계기용변성기(MOF; Metering Out Fit)의 사고원인을 규명을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

### [절연부상]

- (1) 애관부분은 계기용변성기의 정면을 중심으로 좌측 부분이 가장 심한 소손이 있으며, 흡습시험에 의한 결과 제작 또는 설치시 발생할 수 있는 결함은 나타나지 않았다.
- (2) 중심도체 부분의 결함원인을 발견하기 위하여 전선을 채취하고 확대한 결과, 용융 흔적은 발견되지 않았다.
- (3) 고무패킹에서의 이상 유무를 분석한 결과

사고당시 기밀 유지가 지속적으로 이루어졌으며, 정상상태였음을 확인하였다.

따라서, 절연부상에 의한 사고원인은 발견되지 않았다.

#### [계기용변성기 외함]

- (1) 외함의 산화된 특성으로 보아 내부의 압력이 팽창하여 허부 접합부에서 개방된 형태를 확인하였다.
- (2) 외함 내부는 슬러지가 많고 장시간 수분과 열에 노출되어 산화된 흔적을 발견하였다.
- (3) 개스킷 부분에서 수분이 함 내부로 침투할 수 있을 가능성이 있는 일부 체결이 정상적으로 되지 않은 부분을 발견하였다.

#### [내부 권선]

- (1) 절연재료 부분과 권선이 높은 열에 의해 용융된 것을 확인하였다.
- (2) 권선의 일부 소손이 용융된 부분이 있으며, 이는 외부 열에 의해 용단된 것으로 나타났다.

#### 4. 계기용변성기 접속함

접속함의 경우 산화되어 있으며, 내부 접속선과 단자에서는 용융흔적이 발견되지 않았다.

따라서, 사고원인 분석자료를 근거로 하여 계기용변성기의 사고과정을 추정하면, 계기용변성기의 개스킷 부분의 불완전 체결로 인해 수분이나 이물질이 침투할 수 있는 여지가 발생하였으며, 장시간 사용 중 절연유와 수분이 섞이면서 함 내부의 절연이 열화되어 사고로 이어진 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국표준심의회, "KS C 4307 : 주상변압기 부상", 한국표준협회, 2002
2. 한국표준심의회, "KS C 3800 : 애자 및 부상용어", 한국표준협회, 2002
3. 한국표준심의회, "KS C 3802 : 전기용 자기류의 겉모양 검사", 한국표준협회, 2005
4. 한국표준심의회, "KS C 4315 : 내압형 일단 접지 주상 변압기 부상", 한국표준협회, 2003
5. 한국표준심의회, "KS C 1707 : 계기용변성기(전력 수급용)", 한국표준협회, 2002
6. 정만영, 지철근, "최신 전기용어사전", 전기용어사전편찬위원회, 검지사, 1984