



# 22.9kV 수 · 변전설비에서의 감전 위험성 연구 ①

## 절연커버 재질의 안전성 평가

한운기 전기안전연구원 재해연구팀 (031)580-3111



### 목 차

#### 1. 서론

#### 2. 실험방법

#### 3. 실험결과 및 고찰

##### 가. 절연커버 소손 메커니즘 해석

##### 나. 소손된 절연커버의 구조적 문제점 분석

#### 4. 결론

#### 1. 서론

22.9kV 수 · 변전설비의 노출충전부로부터 감전 재해를 예방하기 위하여 사용되는 절연커버 및 OC전선은 각각의 제조회사마다 상이한 절연재료를 사용하고 있다. 이러한 절연커버 및 OC전선은 사용 여건상 한번 설치하면 소손 및 파괴가 일어날 때까지 사용하기 때문에 염해, 분진 등 이물질이 항상 존재하는 열악한 환경에 장기간 노출되더라도 내아크성, 내후성 및 내열성 등에 우수한 특성을 갖도록 설계될 필요성이 있다. 특히, 전력계통의 급격한 증가로 인한 전력수급지역의 팽창으로 해안가, 공장지대 등 열악한 환경지역에는 염진해, 산성우, 자외선, 열적, 기계적 열화 등의 점진적인 특성변화에 대해서도 안정된 특성을 갖도록 재질적으로 보완할 필요성이 있다. 절연커버 및 OC전선의 감전위험성 및 대책(안)만으로도 탁월한 예방 효과를 발휘할 수 있으나 이물질이 많은 지역내에서는 보다 근본적인 해결책이 필요하다. 이를 위해 본 절에서는 22.9kV 수변전설비에서 발생하는 감전위험성을 줄일 수 있는 예방 대책(안)을 도출해내기 위하여 현재 사용되고 있는 절연커버류의 구조적 결함에 의해 발생하는 소손 메커니즘을 해석하고 그 위험성을 분석하고자 한다. 우선, 절연커버의 감전사고 위해요인을 분석하기 위해 설비사

고가 발생했던 수용가 및 제작업체를 직접 방문하여 수거한 절연커버는 그림 1과 같다. 그림 1에 나타난 절연커버는 분석결과 분진에 의해 장기간 노출된 상태로 지속적인 전계 스트레스에 의해 내·외부적으로 트래킹으로 진전되고 있음을 확인할 수 있었고, 이 상태가 지속될 경우 아크열에 의해 화재로 소손될 위험성이 높다. 물론 절연커버류가 단기간에 트래킹에 의하여 화재로 이어질 가능성은 희박하지만 환경적 영향이 심한 경우 장기간 표면에 수분, 이온성 물질 및 분진 등의 이물질이 절연커버 내·외부에 부착됨으로 트래킹으로 진전되고 최종적으로 불꽃방전에 의하여 화재로 이어질 가능성을 배제할 수 없다. 다음절에서는 이러한 절연커버의 소손 메커니즘을 실험을 통하여 분석 및 해석하고자 하며 실험 결과를 토대로 절연커버의 재질적 문제점을 개선하는데 중요한 기초자료로 활용하고자 한다.



(a) 변압기용 절연커버



(b) MOF용 절연커버

그림 1. 사고현장에서 수거한 소손된 절연커버

## 2. 실험방법

열악한 현장과 비슷한 조건하에서 불꽃방전에 의한 절연커버의 소손 위험성을 재현실험 함으로써, 그 진행과정 및 위험 요인을 분석하고 또한 화재 및 이로 인한 설비사고로의 파급 가능성을 입증하고자 한다. 본 실험을 위해 고무재질의 변압기용 절연커버와 아크릴재질의 MOF용 절연커버를 부싱위에 설치한후 절연커버의 소손이 쉽게 발생하도록 수용액(3%의 염화나트륨)을 주사하였고, 이때 현장설비의 조건과 동일한 13.2kV를 OC전선상단 동선과 부싱의 그라운드(대지) 단자 사이에 전압을 인가하였다. 트래킹에 의한 절연커버의 소손 현상은 절연커버 표면에 습기나 침전물인 수분, 염분, 무기질 및 섬유질 먼지 등의 분진이 부착된 후, 오염된 표면을 타고 누설전류가 흘러 불꽃방전에 의해 일부 오염물질이 탄화되면서 서서히 트래킹 또는 화재로 진전되는데, 그 변수가 다양하여 재현실험을 하는데 많은 제약이 따른다. 그림 2에서는 현장설비에서 변압기와 MOF의 부싱에 절연커버를 사용하였을 때 절연커버에서 발생할 수 있는 일반적인 트래킹 과정을 나타낸 것으로서 ①표면누설전류 증가⇒②표면 누설전류에 의한 수분의 증발과 이로 인한 도전전류의 분단으로 일어나는 미소 발광방전의 발생⇒③미소 발광방전에 의한 방전열로 절연커버의 화재발생 등으로 소손 메커니즘을 요약할 수 있다.

그림 3, 4에서는 절연커버의 소손 재현 실험장치 및 회로 구성도를 각각 나타냈다.

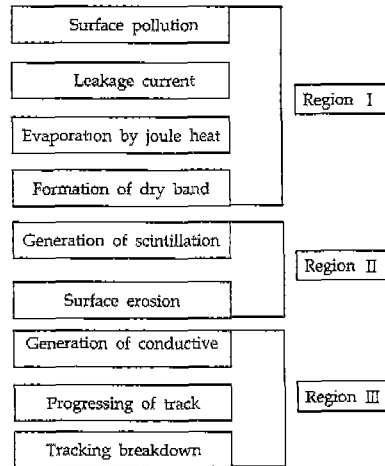


그림 2. 절연커버의 트래킹 진전 과정

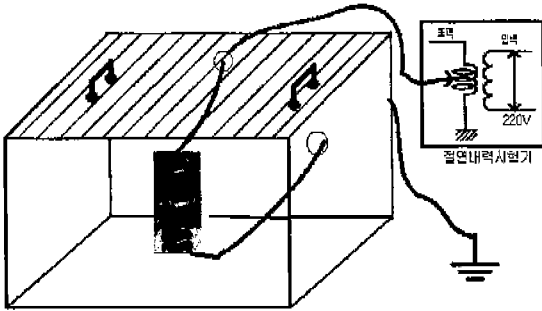
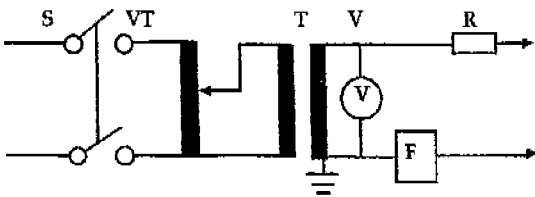


그림 3. 절연커버 소손 재현 실험장치



- S : Power supply switch
- VT : Variable ratio transformer
- T : High-voltage transformer
- R : Series resistor
- V : Voltmeter
- F : Over current device, fuse or relay

그림 4. 재현실험장치의 회로구성

로 지적된 온 절연커버 상단과 하단부분으로서 초기 불꽃방전이 발생하지 않도록 절연커버 상단의 방수처리(안)과 크기 규정(안)이 반드시 필요함을 확인할 수 있다.



(a) 초기상태



(b) 미소발광방전 발생  
(절연커버 상단과 하단부위)



(c) 극부적인 발광방전 진행

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 가. 절연커버 소손 메커니즘 해석

##### 1) 변압기용 절연커버

그림 5에서는 절연커버 외부에서 지속적인 트래킹 과정을 반복하다가 일정시간이 지속된 후 절연커버가 화재로 이어지는 과정을 순차적으로 나타냈다. 변압기용 절연커버는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 절연커버의 상단과 하단에서 초기 미소 발광방전이 시작되고 일정시간이 지속된 후 절연커버 상단과 하단사이에 그림 5(e)과 같이 도전로가 형성되어 화재로 이어짐을 확인할 수 있다. 이 실험을 통하여 초기 불꽃방전의 진원지는 문제점으



(d) 절연커버의 직위



(c) 두신로 형성



(f) 절연커버의 손상

그림 5. 절연커버의 화재 발생과정(변입기)

차적으로 나타냈다. 그림 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 초기 화재 발생처가 시작된 부분은 MOF용 절연커버(OC전선 2차측 인입부분 및 2차측 인출부분)이며, 하단부분임을 알 수 있다. 이 중에서 절연커버의 미소 방광방전에 의한 착화부위는 절연커버의 OC전선 2차측 인출부분으로서, 이 부분은 볼트 단자대와 절연커버간의 이격거리가 다른 부위에 비해 짧을 뿐만 아니라 볼트 단자대위에 절연커버가 항상 접촉되어 있는 부분으로서 구조적으로도 이물질의 축적가능성이 높은 부분이다. 이 실험을 통하여 감전보호 측면뿐만 아니라 설비보호 측면에서도 MOF용 절연커버의 구조보완이 중요함을 확인할 수 있었다.



(a) 초기상대



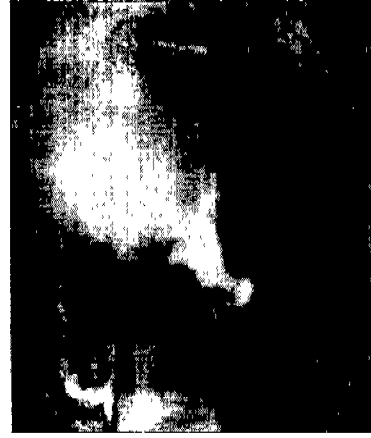
(b) 미소 방광방선 발생

## 2) MOF용 절연커버

그림 6에 MOF용 절연커버의 화재 발생과정을 순

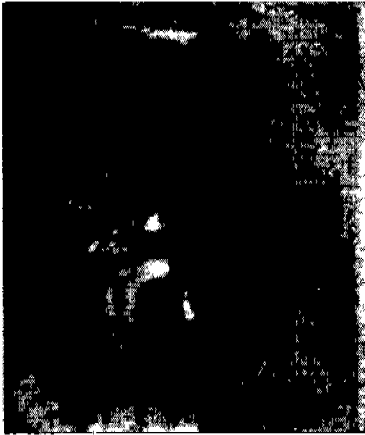


(c) 미스 발광방전 발생



(f) 절연커버의 소손

그림 6 절연커버의 화재 발생과정(MOF)



(d) 절연커버의 착화부위



(e) 이물질표의 착화

### 나. 소손된 절연커버의 구조적 문제점 분석

절연커버의 표면에 소손이 자주 발생하는 장소는 안개가 자주 끼거나, 해안가 염분으로 오염이 많은 지역, 무기질 섬유질의 먼지, 화학약품에 따른 분진이 절연커버의 구조적 결함에 의해 표면에 부착되면 오염된 표면을 타고 표면에 습기나 침전물로 인해 절연저항이 저하하게 된다. 본 실험결과 이물질의 축적이 어렵도록 절연커버의 표면을 균일하게 곡선 처리하면, 절연커버의 절연성능을 향상시켜 소손을 예방하는데 효과가 있음을 확인하였다.

또한, 트래킹 열화에 의한 절연커버의 소손은 장기간, 지속적인 환경인자에 의한 영향으로 발생하므로 애자와 절연커버의 절연저하를 지속적으로 관리하면 급진적인 트래킹에 의한 파괴를 예방할 수 있음을 확인시켜 준다. 본 실험결과는 절연커버의 구조적인 문제점에 의하여 소손 가능성이 높은 부분을 확인하였으며 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

#### 1) 변압기용 절연커버

그림 7(a)에서 보는 것처럼 절연커버 상단과 하단에 이물질의 축적이 쉬운 형태로 구성되어 있다. 표면의 균일성을 유지하고 절연커버가 구조적으로 상부와 하부가 곡선 처리될 경우 이물질의 축적을 줄여 이로 인한 절연성능의 저하를 감소시킬 수 있음을 확인 할 수 있었다. 그리고, 절연커버 외부가

곡선 처리되면 트레이킹 열화의 국부적인 전계 집중 부위를 감소시킬 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 습기가 많은 지역(해안가) 이거나 우수기에 절연커버상단을 방수처리 하지 않았을 경우 누설전류가 부상충전부분 → 절연커버상단 → 절연커버 외부표면 → 부상 → 대지로 회로가 구성되므로 절연커버 상단을 방수 처리할 필요성을 확인할 수 있었다. 그리고 절연커버의 하단부 크기가 작아 OC 전선 접속부 충전부와 절연커버 사이에 이격 거리가 충분하지 않으면 절연내력 저하로 절연커버 하단부의 지속적인 스트레스로 절연커버 하단부의 지속적인 소손 가능성을 알 수 있었다.

## 2) MOF용 절연커버

그림 7(b)에서 보는 것처럼 절연커버 상단과 2차측 접속단자단에 2단의 구조로 만들어져 있어 이물질의 축적이 쉽게 되도록 만들어져 있다. 이러한 구조를 표면의 균일성을 유지하면서 절연커버가 구조적으로 상부와 하부가 곡선 처리될 경우 이물질의 축적을 줄여 이로 인하여 절연성능의 저하를 줄일 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 변압기용 절연커버와 마찬가지로 습기가 많은 지역(해안가) 이거나, 우수기에 절연커버상단을 방수처리 하지 않았을 경우 누설전류가 부상충전부분 → 절연커버상단 → 절연커버 외부표면 → 부상 → 대지로 회로가 구성되고, 특히 2차측 부분은 절연커버와 충전부분이 거의 접촉되어 있어 소량의 이물질이 축적되거나, 습기 및 물기가 있을 경우에 쉽게 절연이 파괴되어 화재로 이어질 수 있음을 확인하였다.

따라서 절연커버 상단과 2차측의 부상 충전부분과 어느 정도의 이격거리를 유지시키고, 1차 및 2차 인입 · 인출부분을 방수처리할 경우 사고 예방에 효과적임을 알 수 있었다. 또한 절연커버의 하단부 크기가 작아 하단부에도 초기 미소 발광방전이 발생하였다.

## 다) 아크 및 화염에 의한 부상의 애관소손

트레이킹 소손에 의한 화재가 발생후 변압기 및 MOF용 부상의 모습은 그림 8에서 보는 바와 같이 절연커버의 소손시 발생하는 아크 및 열로 인한 부상 애관의 소손을 확인할 수 있었고, 그에 따른 영향으로 부상의 절연내력 저하로 애자의 안전성에

도 영향을 미침을 확인할 수 있었다.



(a) 변압기용



(b) MOF용

그림 7. 트레이킹에 의해 소손된 절연커버



(a) 변압기용



(b) MOF용

그림 8. 트래킹에 의해 소손된 부싱



(b) MOF용

그림 9. 화재로 진전한 절연커버의 비산범위

#### 라) 비산범위

트래킹 소손에 의한 절연파괴 후 절연커버에 화재가 발생하였을 때 순간화염은 그림 9(a)와 같이 변압기용의 경우 절연커버를 중심으로 좌우 방향으로 최소 55mm에서 길게는 최대 70mm 발생되었고, 상방향 쪽으로 360mm까지 불꽃이 올라가는 것을 확인할 수 있었다. MOF용 절연커버의 경우에는 그림 9(b)와 같이 불꽃의 길이는 절연커버를 중심으로 좌우 방향으로 최소 100mm에서 길게는 최대 180mm 발생되었고, 상방향 쪽으로 280mm까지 불꽃이 올라가는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 변압기용

#### 4. 결론

실험 결과, 주변에 가연물이 존재할 경우 특히, 패키지형 수·변전설비의 경우 설비와 설비 간 이격거리가 적기 때문에 설비사고로 이어질 가능성이 매우 높음을 확인시켜 주었다. 그리고 절연커버가 화재로 인하여 소손 되었음에도 불구하고, 회로 보호용 차단기가 동작하지 않아 누설전류가 지속적으로 흐르고 있음을 확인하였다. 따라서, 감전보호 측면뿐만 아니라 설비보호 측면에서도 패키지형 수·변전설비 또는 분전 등 이물질이 항상 존재하는 열악한 장소에 사용되는 절연커버 및 OC전선은 난연성재질의 기능 추가와 외형의 구조적 개선이 선행되어야 할 것이다. <끝>

Only the person who has faith in himself is able to be faithful to others.

스스로를 신뢰하는 사람만이 다른 사람들에게 성실할 수 있다.

Erich Fromm(에릭 프롬)  
[미국 정신분석학자, 1900-1980]