

아크사고 조사기술

미국 Svare Professional Engineering사의 Robert Svare 박사가 고안한 발화장소 판단 방법인 아크사고 사상분석에 대하여 간략하게 소개한다.

1. 개요

아크사고 사상분석(寫像分析, Mapping Analysis)은 미국, Svare Professional Engineering 회사의 Robert Svare 박사가 고안한 발화장소를 판단하는 방법이다.

이 분석방법은 전기적 아크에 의한 케이블 화재로 손상된 지역을 조사하는 방법이 포함되어 있다. 전기적 아크에 의해 동선이 녹음으로서 나타나는 구슬형태(Bead)는 발화지점과 연소확대 방향의 판단에 중요한 정보이다. 전기 배선에 형성되는 구슬형태의 위치는 최초로 화재에 영향을 받은 통전 중인 전기배선의 위치를 설정하는데 이용할 수 있다.

아크로 인한 손상형태인 동 구슬(Copper Beads)은 전기적인 사고가 화재 전이나 화재 중에 발생하였다는 것을 나타낸다. 이러한 구슬형태를 발견하는 순간, 대부분 아크는 연소에 의해 피복이 벗겨져서 도체가 단락되는 화재에 의한 것으로 인식하지 않고 많은 화재조사관은 전기적인 발화원인의 증거로 삼으려고 한다. 그러나, 아크는 보통 발화원인이 되는 것보다 화재에 의해 나타나는 결과이다.

2. 아크사고 사상법

영국에서 아크사고 사상법은 노출(고정시키지만 헐거운 배선 포함)되거나 전선관과 케이블 트랜치에 가설된 케이블 화재를 분석할 때 이용할 수 있다. 이 방법은 다음과 같은 장소에도 이용할 수 있다.

- ◆ 전기기계기구용 코드/케이블 및 연장 배선이 화재에 노출된 장소
- ◆ 주택에서 노출배선이 헐거운(또는 들보에 고정된) 상태이고 전체적으로 피복되지 않은 지붕 공간
- ◆ 노출 배선한 소매상점, 공장

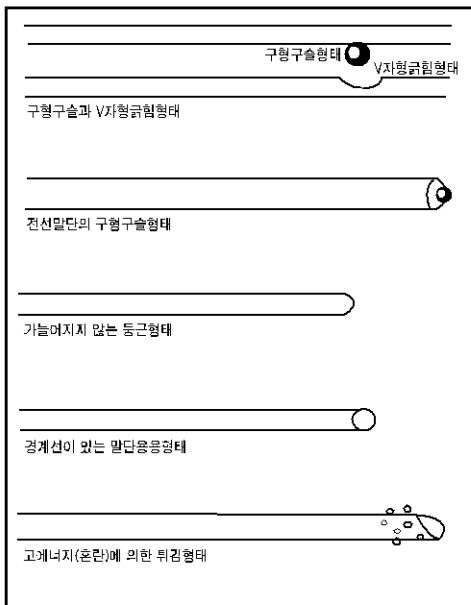
아크사고 사상법은 석고보드와 석고판 뒤에 매입된 배선을 분석할 때에도 사용될 수 있다. 그러나, 이러한 상황에서는 배선이 손상되기 전에 추가 절연재(석고판과 석고보드)를 손상시켜야 하기 때문에 오차범위가 증가할 수 있다. 따라서, 화재조사관은 발화장소를 판단하기 위해 천장 조명기구용 배선을 조사할 필요가 있다.

구조물이나 구획실의 연소형태, 화재로 인한 광범위한 손상과 건물 붕괴로 발화장소가 명백하지 않은 경우 아크사고 사상법은 발화장소의

판단에 대한 매우 유익한 도구가 될 수 있다. 그러나, 대규모 건물에서 이 분석방법을 이용하면 많은 조사비용과 시간이 필요하다. 왜냐하면 화재시 배선이 통전상태 인가를 조사하는 것은 화재조사관에게 기본사항이기 때문이다.

3. 아크에 의한 손상 확인

전기적인 아크로 인한 손상은 구형 구슬형태(Bead), V자형 굽힘형태(Notch), 경계선, 튀김형태, 높은 에너지와 혼란에 의한 기타 형태(그림 1)가 있다. 2가지 구형 구슬형태는 외형이 비슷하기는 하지만 똑같지는 않다. 화재조사관, 공학자 및 기술자는 이들의 특성을 분류하기 위하여 시험실에서 아크에 의한 구형 구슬



[그림 1] 전기적 아크에 의한 대표적인 손상형태

형태를 생성시킨다. 또한, 아크에 의한 동선의 구형 구슬형태와 기타 손상형태는 구조적 시험 화재로 재생성시킬 수 있다. 그러나, 불명확한 경우에는 아크에 의한 동선의 손상에 대한 전

문가인 야금학자에게 문의할 수 있다.

아크 잔류물은 연기 또는 그을음 손상보다 시간적으로 더 안정적이다. 예를 들면, 석고보드 위에 연기로 인한 손상부분은 물로 화재를 소화한 후 빠르게 열화될 수 있다.

화재 자체는 아크 표시장소를 은폐하거나 모방할 수 있는 용융작용이나 화학작용을 일으킬 수 있어서 이러한 손상형태는 쓸모없거나 의심스럽다. 화재조사관은 조사중에 배선을 손상시킬 수도 있다. 이러한 손상형태는 아크사고에 의한 것과 다르다. 그림 2는 소화 후에 나타나는 대표적인 열적, 화학적, 기계적인 손상형태이다.

◆ 열적 손상

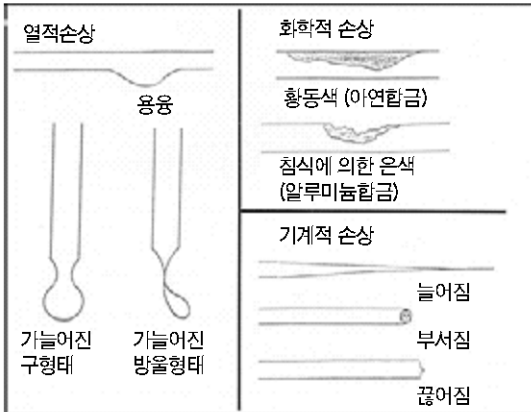
도체에는 보통 역청과 같은 물질이 있기 때문에 연소열로 인한 용융은 매우 높은 연료하중에 의한 결과이다. 이러한 용융은 아크보다 무분별한 활동이 적고, 일반적으로 도체가 늘 어지거나 얇아진다. 녹은 동선이 흐름에 따라 날카로운 경계선은 거의 나타나지 않지만 일부 구형 구슬형태는 기공(Gas Pocket)에 형성될 수 있다.

◆ 화학적 손상

알루미늄 전선이나 아연합금 전선은 은색이나 황동색으로 변색된다. 화재조사관은 전선에 나타난 변색이 아크에 의한 것이 아니라 합금 금속의 용융온도가 감소된 결과일 수도 있다는 것을 인식하여야 한다. 이러한 합금 전선은 자체 손상이 나타나거나 아크를 은폐시킬 수도 있다. 따라서, 합금 전선은 아크사고 사상법이 거의 적용되지 않는다.

◆ 기계적 손상

화재현상이 어지럽혀짐에 따른 전선의 부서짐, 건축물의 도피에 따른 배선의 굽힘현상, 또는 화재조사관에 의한 절단은 아크사고에 의한 흔적으로 가장될 수 있다.



[그림 2] 도체의 열적, 화학적, 기계적 손상

4. 전기설비의 검사

전기설비는 발화지점을 확인하기 위해 검사하여야 한다. 구형 구슬형태가 나타난 동선으로 화재시 온도를 추정할 수 있다. 화재시 용융 및 화학적 효과는 전기적 아크지점을 일부 변화시킬 수 있지만 이러한 효과는 화재조사 중 고려할 수 있다. 아크에 의한 손상(구형 구슬형태 등)은 '아크사고'라고 하며 다음 도체 사이에 흐르는 전류로 인한 것이다.

- ◆ 3상 설비에서 상전선과 상전선 사이
- ◆ 상전선과 중성선
- ◆ 상전선과 접지선

5. 화재시험

화재시험은 North Carolina에 위치하고 거실이 4개인 목조 주택에서 실시되었다. 이 위치는 장기적인 홍수로 인하여 700세대 이상 주택을 미국정부가 폐기처분한 곳이다. 따라

서, 이 지역은 실제 화재훈련과 여러 가지 화재 조사를 위해 지역 소방서와 미국 재무성에서 이용하고 있다.

실제 시나리오를 설정하기 위해 중고 가구와 전기기계기구가 설치되었고 9세대에 전력을 공급하였다. 화재시험하는 주택은 PVC 전선관에 PVC외장 PVC절연 케이블을 노출 배선하였다. 소형 회로차단기와 퓨즈가 달린 신행 분전반이 화재실의 전력을 제어하기 위해 설치되었다.

노출배선하는 것은 화재 후 아크로 인한 손상위치를 관찰하는 것이 주목적이고, 환형 주회로의 아크로 인한 구형 구슬형태 잔류물이 발화지점과 가까운 곳에 있는가를 조사하기 위한 것이다.

미국과 영국의 전기배선은 기본적으로 몇 가지 차이가 있다. 영국은 50Hz, 3상 400V, 단상 230V를 이용한다. 분전반으로부터 분기회로는 개별 조명기구(5/6A)용과 가열기, 욕실, 조리실 회로가 연결되어 있는 콘센트(30/32A)용으로 환형 주회로에 접속되어 있다. 반면에, 미국은 60Hz, 3상 240V, 단상 120V를 이용한다. 미국 전기기준에서는 영국과 같은 환형 주회로를 인정하지 않는다. 미국에서 배전반으로부터 가장 멀리 위치한 콘센트나 조명기구까지 전원회로는 가지형태이고 보통 15A 회로차단기로 회로를 보호한다. 또한, 전용 조명회로는 없으며 조명기구는 가장 가까운 실내 콘센트에서 분기하여 배선한다.

5.1 시험

2개 지역에서 각각 발화하였고 화재실은 플래쉬오버가 발생한 후 소방대가 소화하였다. 첫 번째 화재실은 배선이 신행 플라스틱 분전

아크사고 조사기술

반에 접촉되어 있었다. 가구류는 나화로 발화 시켰고 화재실은 연소가 신속하게 확대되었다. 2개 분기회로용 배선용차단기는 4분 후에 동작하였다.

아크에 의한 손상은 환형 주회로 중 2개 위치에서 발견되었다. 그 위치는 주발화지역 위와 발화지점에서 3m 떨어진 창문 위이었다. 창문 위에서 손상이 발견된 케이블은 정밀 조사한 결과 중성선 지락으로 인한 2번째 아크에 의한 손상이었다. 조명용 분기회로에서 아크로 인한 손상은 천장로젝트 아래에 위치한 현수형 가요선에 발생하였다.

케이블 피복이 소손되거나 2개의 도체가 접촉하면서 새빨갳게 단 탄소의 생성으로 인하여 중성선과 접지선 사이에는 전도성 경로가 이루어진다. 영국 분전반과 미국 계량기를 상호 연결할 때에는 120V 전위차가 허용된다. 그러므로, 이러한 일부 배선설비는 보호되지 않고 사고전류는 화재실 밖에 위치한 케이블도 손상을 입힐 수 있다. 이 경우에는 시험 후 영국 분전반과 가까운 위치에 있는 변압기에서 재배선할 수 있기를 기대할 수 밖에 없다.

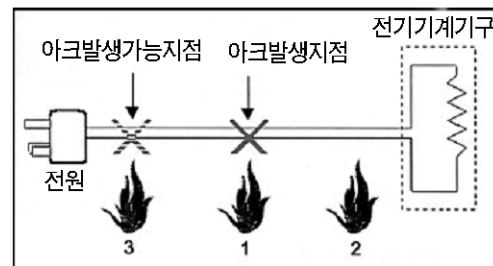
2번째 화재실의 배선은 재배선 할 수 있는 퓨즈함에 연결되어 있다. 이 화재에서는 연소 확대시간이 더 길었고, 통전 중인 전선과 접지선에 사고가 발생하였을 때 재배선할 수 있는 퓨즈가 동작하지 않았다. 그러나, 중성선과 접지선에 사고가 발생하였을 때에는 접지선이 녹아서 과부하에 의한 손상을 방지할 수 있었다.

그림 3으로 제1지점에서 전기기계기구의 가요케이블 피복이 화재에 노출된 것을 알 수 있다. 전원은 케이블의 왼쪽에 위치하고 있다. 화

재로 인하여 전선 피복을 연소시킬 때 전선이 서로 접촉되면 아크사고가 발생한다. 탄소 잔류물에 전도성이 있는 경우, 도체에는 구슬형태 손상이 나타난다.

화재가 느리게 성장하면 과전류보호장치(퓨즈, 회로차단기)는 회로를 개방하는 시간이 필요하기 때문에 아크사고는 화재발생장소인 제1지점 주위에서 국부적으로 발생한다. 아크의 국부적인 에너지가 동선을 녹일 수 있을 정도로 큰 경우, 교류 50Hz에서 아크를 소호하면 냉각된 동선 끝에는 구형 구슬이 형성된다. 구형 구슬은 퓨즈가 파열되면서(회로차단기가 트립되거나) 도체가 서로 붙거나 분리되면서 형성될 것이다. 전원측으로부터 2차측인 제2지점에서 화재가 발생하면 회로는 이미 전력공급이 차단된 상태이므로 아크사고가 발생하지 않는다.

첫 번째 아크사고지점으로부터 전원측인 제3지점에서 화재가 발생하면, 배선이 통전상태인 경우 아크사고가 발생할 수 있다. 이러한 이



[그림 3] 전기기계기구용 케이블 피복의 화재

유는 퓨즈와 같은 회로차단기의 고장 또는 까맣게 탄 부분에 의해 전류가 흐르기 때문이다. 그러므로, 전원측(분전반)으로부터 가장 먼 사고지점을 찾음으로써 단일 배선에서 최초 발화지점을 판단할 수 있다.

5.2 시험관찰

아크에 의한 손상은 화재실에 플레시오버가 발생한 경우에도 발견된다. 2번의 화재시험에서 도체의 아크에 의한 손상은 각각 발화지역 윗부분으로 V형 연소형태의 끝부분에서 발생되었다.

미국과 영국의 케이블 및 회로보호장치는 화재에 노출되었을 때 유사한 현상이 나타났다. 전선의 절연재와 구조는 약간 다르지만, 화재 후 남는 손상형태는 동일하였다.

6. 영국의 화재조사

여러 동으로 이루어진 시장에 위치한 런던 에완동물 상점 뒤의 보관창고에서 2001년 화재가 발생하였다. 화재로 상점 지붕이 심하게 소손되었으며 다른 부분도 열과 연기에 의해 손상을 입었다.

보관창고는 선반에 3개의 냉동장치가 설치되어 있었다. 보관창고는 소화활동을 위한 접근이 용이하도록 소방대원이 지붕을 파손시켰다.

6.1 관찰

화재에 의한 손상부분은 주로 연기와 연소형태에 의한 경계선이 나타나는 천장으로부터 밑으로 약 0.5m 까지 높은 곳이다. 파충류 진열장에 공급하는 공기펌프는 천장으로부터 0.5m 아래에 위치한 목재 선반 위에 설치되어 있었다. 공기펌프는 화재시 전원이 공급되고 있었고 상점은 천장 반자를 설치하지 않아서 평지붕용 목판의 밑부분과 목재 들보가 노출되어 있었다. 배선(PVC 외장 PVC 절연 케이블)은 목재 들보에 고정되어 있었기 때문에 연소 중 화재에 직접 노출되었다.

기다란 'V' 연소형태는 공기펌프의 오른쪽 벽면에서 발견되었다. V 형태의 아래 부분 위치는 왼쪽 냉동장치용 컴프레셔와 제어함 뒤였다. 냉동장치도 공기펌프와 동일한 2구용 콘센트에 연결되어 있었고 화재시 운전 중이었다.

화재조사관은 조사 중 다음과 같은 몇 가지 의문이 있었다.

- ◆ 'V'연소형태가 발화원으로부터 발생하였거나 연소 잔류물의 도괴 및 2차발화에 의해 발생하였는가?

- ◆ 공기펌프는 화재시 운전 중이었고 화재조사관은 이러한 종류의 기기가 관련된 화재를 알고 있었다. 이 장치가 발화원인이 될 수 있는가?

- ◆ 전기배선은 연소 중 노출되어 있었기 때문에 전기설비의 아크사상이 화재조사에 유용한가?

6.2 실무 적용

아크에 의한 손상은 냉동장치에 전력을 공급하는 가요성 케이블에 있었다. 2개의 연선은 서로 붙어있었으며 플러그에 끼워있던 13A 통형 퓨즈는 파열된 것으로 밝혀졌다. 그러나, 공기펌프의 전력용 케이블에는 아크에 의한 손상이 없었으며 플러그 퓨즈도 고장이 발생하지 않았다.

아크에 의한 손상은 'V'형태 화재지역내에 있던 2개의 PVC외장 PVC절연 케이블과 접지용 케이블에도 있었다. 하나의 케이블은 화재지역의 조명회로용이었고, 재배선할 수 있는 분전반 내 5A 퓨즈는 고장난 상태이었다. 다른 케이블은 상점(인접 화재실 포함) 내 콘센트에 전력을 공급하는 환형 주회로 중 일부이었다. 2개의 도체는 서로 붙어있었고, 회로를 보호하고 재배선할 수 있는 30A 퓨즈는 고장난 상태이었다.

아크사상법을 이용하여 화재에 의한 연소는 다음과 같이 판단할 수 있다. 화재는 최초 냉동 장치의 가요성 케이블에 착화하였고 이로 인하여 단락이 발생하면서 플러그 퓨즈가 파열되면서 냉동장치로 공급하는 전력이 차단되었다. 화재로 인한 연소는 계속 확대되어 조명용 배선과 환형 주회로 배선을 손상시켰으며, 단락이 발생하고 분전반에서 부하에 공급하는 전력이 차단되었다. 공기펌프의 내부와 배선에 아크로 인한 손상이 없는 것은 공기펌프에 공급하는 환형 주회로가 화재로 인한 초기 손상으로 인하여 통전하지 않았다는 것을 입증하는 것이다.

6.3 화재 원인

냉동장치를 정밀하게 조사한 결과, 압축기는 화재로 심하게 손상되었고 제어함은 완전 소손된 것으로 밝혀졌다. 제어함의 금속부분은 공간 아래에서 발견되었고, 모든 전선은 부스러기 지 쉬워졌다. 점점(압축기용 제어반에 있었을 것으로 추정되는)은 전기적인 영향으로 서

로 붙어있었다. 스위치 접점에서 발생하는 아크는 접점이 서로 용융되기 전에 플라스틱 압축기를 발화시켰을 것이다.

6.4 적용가능성

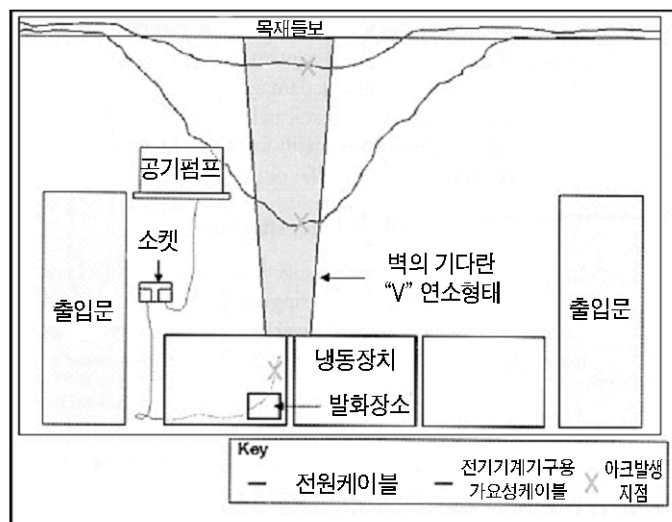
초기 연구와 영국에서 사례연구로 아크에 의한 구슬형태는 영국의 환형 주배선에서 발견되었으며 가지형 회로배선은 Svare 박사의 아크 사고 사상분석과 동일한 결과가 나타났다.

아크사고 사상분석은 화재조사관을 위한 도구이다. 이 방법은 배선이나 전기장치가 화재에 노출된 경우에만 이용하여야 한다. 이 때 정상적인 보호장치(퓨즈와 배선용 차단기)는 전기배설에 설치되었고 정격 이상이거나 임의로 설치하지 않았다는 것을 확인하여야 한다.

아크사고 사상분석은 대규모 화재현장에서 발화실을 판단하기 위해서도 사용할 수 있다.㉞

— Fire Prevention & Fire Engineers
Journal(2002,3)

— 번역: 총무부 과장 이상현



[그림 4] 보관창고의 입면도