

6.6kV 케이블 사고분석

송길목, 김영석, 김향곤, 최충석
한국전기안전공사 전기안전연구원

The Accident Analysis of 6.6kV CV Cable

Kil-Mok Shong, Young-Seok Kim, Hyang-Kon Kim, Chung-Seog Choi
Electrical Safety Research Institute

Abstract - In this paper, the accidents of 6.6kV CV cable using many analysis methods such as a pattern analysis were analyzed; the inner structure analysis; cross section analysis; SEM; EDX, etc. With the analysis and the accident reconstruction, it was possible to analyze the accident causes. For more correct assessment, another accident reconstruction and simulation with a software were required.

1. 서 론

전기에너지의 이용은 전기에너지를 생산하는 발전, 전력의 변환 및 운반을 담당하는 송·변전, 그리고 부하설비 등으로 나눌 수 있다. 전기에너지는 전선을 통해 흘러 이동하며, 전선의 열화 등에 의해 전기에너지가 외부로 유출될 경우, 전기재해로 진전되기도 한다. 일반적으로 전압레벨이 높아질수록 사고범위가 확대되고 이에 따라 경제적 손실도 증가된다[1].

고전압용으로 널리 사용되는 케이블은 절연을 확보함과 동시에 원활한 전기에너지의 이동을 확보하는데 있다. 절연이 확보되지 못하면 설비사고나 기기의 피로누적에 의한 사고로 진전된다. 단락사고에 의한 과급효과는 매우 커서 정전상태는 물론, 화재로 진전하거나 인명 피해를 입히는 등 다양한 형태의 손실을 발생시킨다. 국내 전기안전 시장은 매우 협소하며 이에 대한 국민적 인식이 부족하여 사생하기 어려운 산업구조를 가지고 있다.

따라서, 사고 분석은 전기재해의 재발방지를 위한 중요자료로서 열화의 조건 또는 주변 환경을 개선하는 효과 이용될 수 있다.

본 논문은 사고 케이블의 열화원인을 분석한 것으로 일반적인 시스템 분석에서 벗어나 재료분석을 중심으로 하였으며, 이러한 분석기법은 전기화재가 원인이 되어 설비의 많은 부분이 소실된 경우 매우 유리한 분석방법이다. 연구의 결과를 토대로 도전재료의 열적 특성과 더불어 전기화재 원인분석에 중요한 자료가 될 것으로 판단된다[2],[3].

2. 이 론

구리(copper)의 경우 용융온도가 1,083℃로서 일반화재의 온도보다 훨씬 높은 온도에서 용융되는 특징을 가진다. 아크의 온도는 문헌에 의하면 적게는 2,000℃에서 3,000℃ 이상의 고온이 발생하며, 재질에 따라 5,000℃ 이상 나타나기도 하며, 아크 플라즈마에서는 약 10,000℃의 온도로 나타내기도 한다. 따라서 전기에너지의 양에 의해 달라지기는 하나 매우 높은 온도에서 아크가 발생하는 것으로 되어 있으며, 이로 인해 구리는 수직상 및 주상조직이 생성되거나 입자가 성장하는 형태로 열에 대한 특성을 보인다. 이는 에너지량과 시간에 따라 밀접한 관계를 가진다[4][5].

전기화재의 원인을 판정하는 경우 전선의 단면조직을 확대하여 분석하는데 과냉 조건에 따른 금속단면의 상변

화를 분석하여 결과로 해석하게 된다. 단락의 경우 전선과 전선 혹은 충전부에 고열의 아크흔이 남게 되는데 이때 1,000℃ 이상의 온도 차이가 짧은 시간동안 이루어진 경우 주상조직이 온도가 낮은 금속경계면을 중심으로 형성된 것으로 판별한다. 과전류에 의한 경우 수직상 조직이 형성되는데 이는 조직이 핵생성과 그를 중심으로 하여 산화동(Cu_2O)이 재결합하는 과정에서 형성된다[6][7].

고전압 케이블은 일반적으로 한국산업규격에서 명시하고 있는 KS C 3004, KS C 3101, KS C 3131의 기준에 의하고 있다. 그 중 가교 폴리에틸렌 절연 비닐 시스 케이블(CV; crosslinked polyethylene polyvinyl chloride sheath cable)의 특징은 상시 90℃에서 이용되며, 비상 과부하시에는 130℃, 단락시 250℃ 이하의 도체온도 상태에서 사용 가능한 것으로 알려져 있다. 표면의 폴리염화비닐(PVC) 시스(sheath)는 한국산업규격(KS C 3004)의 난연 특성을 만족하여야 한다.

일반적으로 사용되는 용도는 6,600V의 비집지 또는 편단집지의 전력용 회로에 사용되며, 직대 판로 덕트 및 트레이 등의 장소에 적합하다. 케이블의 구성을 보면 도체(conductor)는 한국산업규격(KS C 3101)에 적합한 연동선들을 사용하여 원형연선 또는 원형 압축연선으로 한다. 격리층(separator)은 접속 또는 단말 처리할 때 도체에서 절연체를 용이하게 벗겨내기 위하여 필요시 폴리에스터(polyester) 테이프를 절연체와 도체 사이에서 두고 사용된다. 절연(insulator)은 도체와 중심원사를 가교 폴리에틸렌(XLPE)을 압출성형한 것을 이용하며, 외부 반도체층(semi-conductor)는 반도체성 테이프 또는 컴파운드(compound)를 절연체 위에 적용한다. 반도체성 컴파운드의 경우 압출 성형하고 절연체와는 분리 가능하다. 차폐층(shield)은 외부 반도체층 위에 연동테이프를 감아준다. 시스(sheath)는 폴리염화비닐(PVC) 컴파운드를 압출 성형한 것이다. 그림 1은 CV 케이블의 외형을 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 전선의 표면에서부터 폴리염화비닐 시스, 마인더 테이프, 동테이프, 차폐층, 반도체층, 절연층, 격리층, 전선의 순으로 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 이는 단심 케이블로서 60mm의 단면적, 2.0mm의 소선 19가닥이 조합된 것이다. 표준 절연두께는 4.0mm, 시스두께 2.1mm, 완성품 외경의 경우 24mm를 나타내며, 케이블에 흐르는 허용전류는 261A이다.

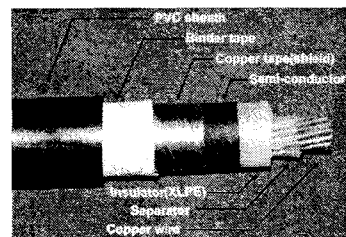


그림 1. 6.6kV CV의 해부도

CV 케이블에서 발생할 수 있는 사고 원인으로는 수분이 침투하여 발생할 수 있는 절연파괴, 제조할 때 절연층에 기포(void)가 있거나 흡습에 의한 절연파괴가 발생한다. 또한, 차폐층으로 있는 동테이프가 외부의 충격에 의해 주름지거나 왜곡이 진 경우 전선에 흐르는 전류의 피로에 의해 발열되는 경우도 있다. 그 외에도 다양한 조건에 의해 사고가 발생할 수 있다.

3. 실험방법

분석대상은 사고현장에서 수거한 것으로 다양한 재료 분석과 실험을 통한 검증으로 사고원인을 입증하였다. 분석대상물은 1.5m 길이의 소손된 고전압 케이블 4점이다. 분석대상물의 객관성을 확보하기 위하여 소손된 대상물 이외에 기존 사용 중인 정상 시료를 일부 채취하여 비교분석하였다. 또한, 분석대상과 동일한 정상시료를 재연하여 입증함으로써 분석결과와 객관성을 확보할 수 있도록 하였다.

그림 2는 분석과 재연실험에 관한 내용의 순서에 관한 것이다. 패턴분석(pattern analysis)은 사고 분석 방향을 정하는 데 있어서 가장 기본이 되는 것으로 화염의 진행 방향, 전류의 흐름에 따른 역학적 해석, 재료의 변형 등을 종합적으로 판단하여야 한다. 내부구조 분석(the inner structure analysis)은 재료의 변형을 최소화하고 구조물의 특성을 원형 그대로 판단할 수 있는 비파괴 검사법으로 엑스선(X-ray)을 이용하여 일정 가속전압에 의해 발생하는 엑스선을 이용한 분석으로 내부구조를 판단하는 근거가 된다. 단면분석(cross section analysis)은 전기의 이용에 있어서 도전성을 가지는 구리(copper)의 단면분석을 통해 단락, 과부하, 외부화염에서 나타나는 특징을 해석할 수 있으며, 특히 외부화염에 의한 단락 조건과 단락에 의한 화재 진전 등을 비교할 수 있다. 표면구조 분석(surface structure analysis)은 적외선분광기(FT-IR)를 이용하여 절연재료의 화학적 변화를 분석하는 것으로 전기적 요인에 의한 표면구조 변화와 순수 열적 요인에 의한 표면구조의 변화 등을 비교 분석할 수 있다. 성분분포(the ingredient distribution)는 전기적 요인에 의한 사고 발생에 있어서 주사전자현미경(SEM)에 의한 미세 확대와 더불어 열적 요인에 의한 도전재료의 조성변화를 에너지 분산형 X-선 분광분석기(EDX)를 이용하여 분석한다. 또한, 다양한 분석기법에 의해 구축된 자료를 중심으로 사고재연(incident reconstruction)을 실시하여 검증이 이루어질 수 있도록 한다[8],[9].

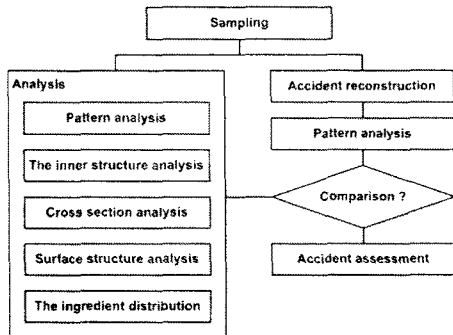


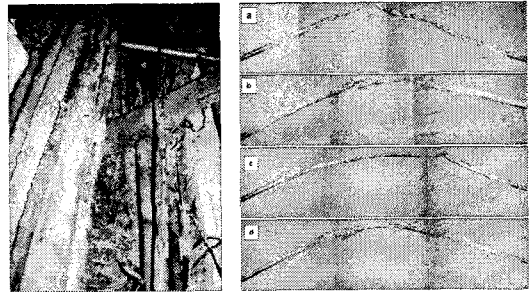
그림 2. 사고분석 순서도

4. 실험결과 및 고찰

4.1 패턴분석

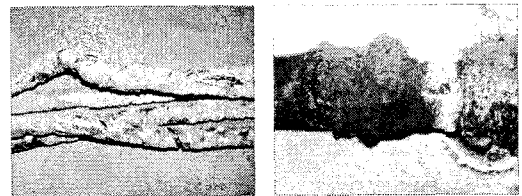
그림 3은 사고현장에 포설되었던 케이블로서 (a)는 사고 현장 상태로써 절연부분이 탄화되면서 주변에 그을음이 많고 소실된 형태를 알 수 있다. (b)는 사고원인으로 나

타난 케이블을 수거하여 촬영한 것이다. 절연부분이 탄화되었으며, 내부의 시스층이 변형된 것을 확인할 수 있다.



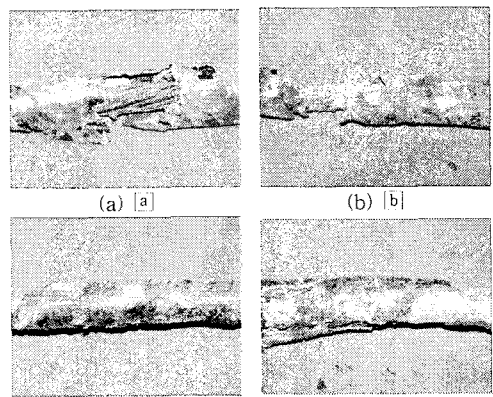
(a) 사고현장 (b) sampling
그림 3. 사고현장에 포설된 케이블

고전압 케이블(CV cable)의 용융된 외형과 실험을 통해 얻은 시료의 탄화된 형태는 그림 4에서와 같이 나타낼 수 있다. 케이블 겉면에 위치하였던 흑색 폴리염화비닐(PVC)은 열에 의해 탄화되었고 양쪽 끝부분으로 잔존물이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. (b)는 용융된 부분이 일부 확대한 것으로 차폐층을 형성하는 구리박막 일부와 전선 일부가 높은 열에 의해 용융된 흔적을 발견하였다. 따라서 단면분석을 통해 정확한 원인을 규명할 필요가 있다.



(a) 사고 케이블 (b) 실험 케이블
그림 4. 고전압 케이블의 용융된 부분 확대

그림 5는 사고 케이블의 용융된 부분을 촬영한 것이다. 차폐층이 용융되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전선의 일부도 절연재료가 완전히 탄화되어 검게 그을렸으며, 용융된 흔적을 발견할 수 있었다. 따라서 용융된 부분에서의 확대와 단면분석을 통해 그 원인을 규명할 필요가 있다. 절연재료의 열화에 의해 진행되는 과정을 분석하기 위해 엑스선 정밀시스템에 의해 도전재료의 구조적 분석이 필요하다.



(a) |a| (b) |b| (c) |c| (d) |d|
그림 5. 사고 케이블의 용융 흔적

그림 6은 실험을 통해 변형된 케이블의 외형을 촬영한 것이다. 그림 5에서 보여주는 만큼의 절연재가 탄화 소실되었으며, 차폐층과 전선에 용융흔적을 발견하였다.

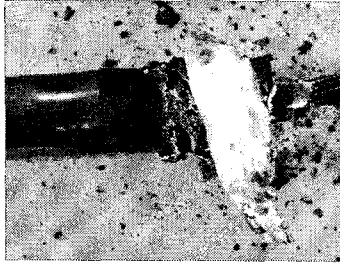


그림 6. 실험에 의해 소손된 케이블

4.2 내부구조 분석

그림 7은 엑스선 촬영에 의해 케이블의 내부구조를 분석한 것으로 (a)는 정상상태의 내부구조를 확인할 수 있으며, (b)와 (c)에서는 용융 망울이 차폐층에 맺혀 있는 것을 확인할 수 있으며 전선도 조밀하지 않음을 확인할 수 있다. 실험에 의해 모의된 (d)에서도 (b)와 (c)에서 나타나는 용융 흔적이 있음을 확인하였다.

따라서 엑스선 정밀시스템을 이용하여 케이블의 내부구조를 분석한 결과 열적인 요소에 의해 진행되는 상태는 시스템이 가장 먼저 탄화되고, 내부의 절연재료(XLPE)가 용융되면서 열팽창에 의해 차폐층을 부풀리게 한 후 차폐층이 절단되면서 절연재료가 소실되는 것으로 추정된다. 절연재료 소실 후에는 차폐층과 전선이 닿아 아크가 발생하고 화재로 이어질 수 있는 메커니즘을 알 수 있었다. 또한 외부의 습기 또는 물 등에 의해 절연능력이 저하된 경우 절연파괴가 발생하게 되면서 차폐층과 전선 사이에서 장시간 지속적으로 열적 요소가 존재하게 되고 이로 인해 절연재료가 용융되는 과정을 거친다. 절연재료가 소실된 후 차폐층과 전선이 닿아 아크가 발생하면서 화재로 진행되는 것으로 추정된다.

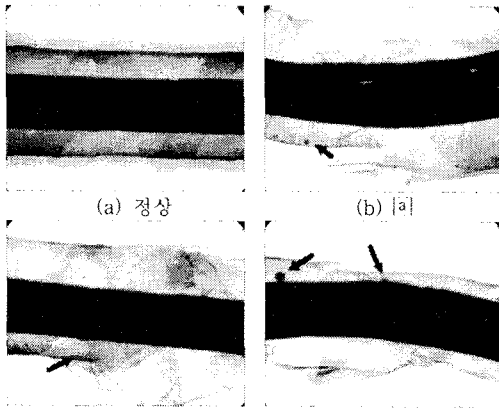


그림 7. X-선에 의한 내부구조 이미지

4.3 단면분석

그림 8은 용융된 전선의 단면분석을 위해 용융망울 확대와 단면 촬영한 부분을 나타낸 것이다. (a)는 정상상태로서 케이블의 단면을 가공하여 확대한 것으로 바깥부분에서부터 시스부분, 바인드 테이프, 차폐층, 반도체층, 절연재료(XLPE), 분리층(separator), 전선 순으로 배열된 것을 확인할 수 있다. 전선의 단면을 금속현미경에 의해 보면, 입자가 조밀한 형태의 정상상태를 확인할 수 있으며 전선 곡면을 따라 분리층이 있음을 확인할 수 있다.

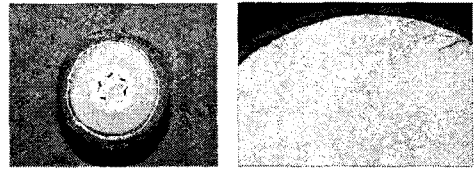


그림 8. CV 케이블 단면

그림 9는 사고 케이블 [a]와 [b]의 용융망울을 각각 현미경에 의해 확대하였으며 가공 후 단면조직을 나타낸 것이다. 또한 실험을 통한 시료의 용융망울과 단면조직을 비교하였다. 전체적으로 절연파괴에 의해 극간단락이 형성되면서 경계선을 중심으로 일정한 방향성을 가진 주상조직이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

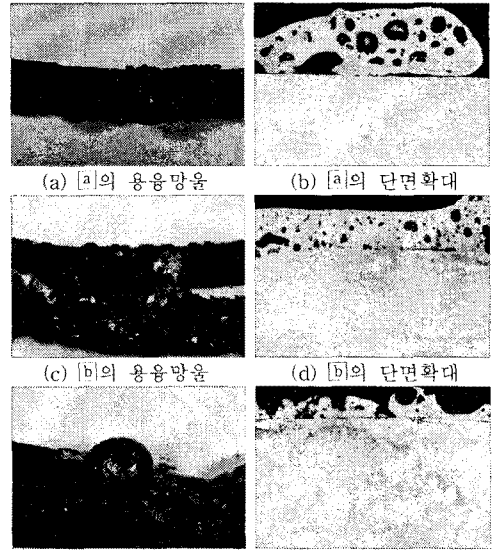


그림 9. 단면분석 이미지

4.4 성분분포 분석

케이블 도전재료의 성분분포 변화를 분석하여 열적 열화 특성을 해석하고자 하였다. 케이블 내의 구성물질로서 차폐 역할(shield)을 담당하는 구리박막의 열화에 의해 용융된 부분케이블의 표면을 주사전자현미경에 의해 1,000배 확대하였다. 또한, 차폐층은 에너지 분산형 분광분석기를 이용하여 성분분포 특성을 분석함으로써 열 영향을 해석하였다.

그림 10의 (a)는 2차전자이미지로서 정상상태의 차폐층을 나타낸 것이다. 표면의 성분은 Cu K line이 약 99.9%로서 구리로 구성된 것임을 확인할 수 있었다.

(b) 부분은 균열이 보이고 크고 작은 기포(void)가 형성된 것을 볼 수 있다. 성분분포의 경우 Cu K line이 약 89.9%이고, C K line이 약 9.1%이며 기타가 2% 정도로 나타났다.

(c)는 차폐층의 바깥 쪽 부분으로 Cu K line이 약 8.8%, C K line이 약 50.7%, O K line이 약 31.8%이었으며, 기타 염소 등이 있는 것으로 나타났다.

(d)는 실험에 의한 것으로 Cu K line이 약 18.7%, C K line이 약 45.2%, O K line이 약 27.0%인 것으로 나타났으며, 기타 염소(Cl)가 일부 존재하는 것을 확인하였다.

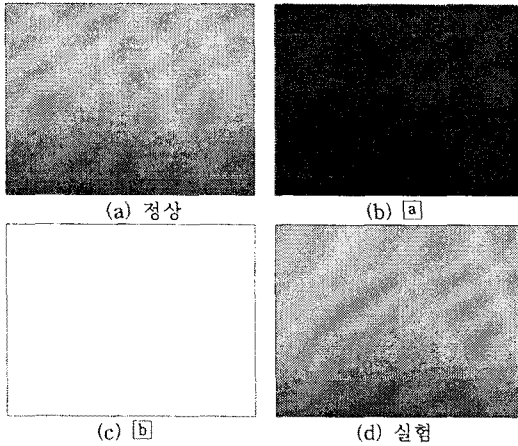


그림 10. 주사전자현미경에 의한 2차전자이미지

그림 11은 성분분포에 대한 비교그래프를 나타낸 것이다. 그림에서 실험의 유사한 패턴을 가지는 것은 [b]의 부분으로서 실험재연을 통해 입증 가능성이 가능할 것으로 판단된다.

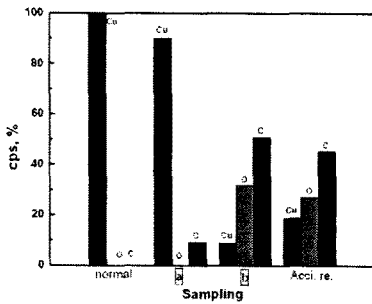


그림 11. 성분분포 비교 그래프

5. 결 론

고전압 케이블의 사고분석을 통해 다양한 분석기법을 이용하여 사고당시의 패턴을 재연하였으며, 이는 향후 제조물 책임법과 같은 법적 분쟁이 야기되었을 경우 연구와 실험을 통해 입증하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

본 논문은 사고 케이블을 중심으로 사고와 근접한 재연실험을 통해 사후 재료분석의 매칭율과 좀 더 정밀한 해석을 위해 프로그램을 통한 시뮬레이션 기법 등이 이용될 것으로 전망되며, 사고의 과학적 접근을 통해 예방 대책을 수립하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyang Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong Woo Kim, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003J-K JointSymp. on ED&HVE, pp.145~148, 2003.
- [2] Babrauskas, V., "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?", Fire and Materials, pp.189~201, 2003

- [3] 김정근 외 2, "금속현미경 조직학", 도서출판 골드 초판, pp.14~183, 1999
- [4] EUGENE LOH, "Physical Analysis of Data on Fused -Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT 6, NO. 2, 1983
- [5] Sheera Knechi, Bill Gonzalez, Kimberley Sieber, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 InterSociety Conf. on TP, pp.329~333, 1996
- [6] Atila Metrol Member, "Estimation of Aluminium and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time", IEEE Trans. on CP & MT, VOL. 18, NO. 1, pp.210~214, 1995
- [7] William D. Callister, Jr., "Materials Science and Engineering an Introduction", Wiley 6th edition, pp.594~636, 2003
- [8] Eugene Loh, "Physical Analysis of Data on Fused -Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT-6, NO. 2, 1983
- [9] W. H. Preece, "On the heating effects of electric currents", Proc.Royal Soc., vol. 36, pp.464~471, 1884