

FMEA에 근거한 LV URD 케이블의 고장분석

(Failure Analysis of LV URD Cable based on FMEA)

송길목* · 한운기 · 김영석 · 김선구 · 곽희로**

(Kil-Mok Shong · Woon-Ki Han · Young-Seok Kim · Sun-Gu Kim · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 연구의 목적은 고장 케이블(LV URD(low voltage underground) cable)의 원인을 밝히는데 있다. 분석방법은 외형패턴, 열패턴, 표면구조 분석, 열분석, 성분분포 등 다양한 분석기기를 이용하여 분석되었다. 국제기준과 사고케이블 제작회사가 제시하고 있는 규정이 일치하는지의 여부를 분석하였으며, 국내산 케이블과의 비교분석하였다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사고케이블 자체의 절연성능을 저하시키는 요인으로 IEC 60502-1과 IEC 60811-1-1에 의한 절연피복의 최소 두께가 시방(specification)과 일치하지 않음을 확인하였다.
- (2) 적외선분광기에 의해 적외선흡광피크가 동일 재료에서 일치하지 않는 것으로 나타났다.
- (3) PVC bedding 부분이 열적으로 취약하여 장시간 현장에 노출되어 사용되는 경우 이와 유사한 패턴의 사고를 유발할 것으로 판단된다.

Abstract

The objective of this investigation was to reveal the cause of the faulted cable(LV URD(low voltage underground) cable). For the analysis, various types or equipments such as external pattern, thermal pattern, surface structure, thermal analysis, and property distribution were deployed. The international standards and the specification provided by the manufacturer of faulted cable were examined whether it fit the standards. The summary is as follows.

- (1) Discovered as a factor lowering insulation performance of the faulted cable: minimum thickness of the insulation layer specified by IEC 60502-1 and IEC 60811-1-1 was not fit.
- (2) Infrared absorption peaks measured by FT-IR spectrometer revealed that the measurements made for the same material did not conform and it is an important basis for proving heterogeneous composition of the insulation material.
- (3) It was found that PVC bedding was thermally fragile and therefore long term exposure at the site could cause similar fault pattern.

Key Words : FMEA(Failure modes and effects analysis), Faulted cable, PVC Bedding, Thermal Analysis, IEC 60502-1, IEC 60811-1-1, FT-IR Spectrometer

* 주저자 : 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원

** 교신저자 : 송실대학교 전기제어시스템 공학과 교수

Tel : 031-580-3065, Fax : 031-580-3111, E-mail : natasder@kesco.or.kr

접수일자 : 2007년 1월 12일, 1차심사 : 2007년 1월 17일, 심사완료 : 2007년 1월 30일

1. 개요

편리하고 윤택한 사회기반 시설의 대부분은 전기 에너지를 이용한 것으로 과학발달과 더불어 매우 중요한 에너지로 인식되고 있다. 최근 전기에너지를 이용한 다양한 신제품과 설비가 출시되면서 이에 대한 안전 확보가 중요하게 되었다. 이에 전력공급과 수요의 대용량에 따른 안정성에 대한 신뢰성 및 평가가 중요한 기술로 자리매김하고 있다. 신뢰성 공학(reliability engineering)은 20세기 중반에 군사적 목적으로 인해 신뢰성의 개념이 적용되면서 시작되었으나 현재에는 사회전반에 걸쳐 전력품질의 향상과 안정성 향상을 위한 신뢰성 관련기술로 거듭나고 있다. 전기에너지의 안전한 이용을 위한 전기안전기술은 전력기반 산업 또는 설비의 안정성을 확보하기 위한 중요기술 중 하나로서 전력설비 모니터링과 분석을 통한 다양한 설비의 사고예측을 통해 미연에 재해를 방지하는 시스템 구축에 그 목적이 있다.

따라서 전력품질의 개선을 위해선 그 원인을 분석할 수 있는 전반적인 시스템 해석기술이 필요하다. 본 논문은 신뢰성 향상을 위한 방법 중 하나로서 사고원인을 규명하고 2002년 7월 1일부로 국내에서 시행되고 있는 제조물 책임법에 대응하기 위한 분석기법을 적용한 것으로 케이블 사고의 원인을 다양한 분석기기를 이용하여 분석한 사례이다. 본 내용은 사고 케이블의 기본 사양에 대한 자료 수집과 사고 케이블에 대한 외형패턴을 분석하여 국내 케이블과의 비교, 현장에서 제공된 사고 및 정상 케이블의 재료 분석과 사고 패턴 비교 등을 수행하여 고장원인 규명을 위한 메커니즘 해석 등이 가능하였다.

2. LV URD 케이블의 특성과 사고추정

2.1 저전압 지중케이블의 특성

그림 1은 사고케이블의 외형을 발췌한 3×6[mm] 케이블로서 외형과 실제 사고현장에서 수거한 케이블을 나타낸 것이다. 그림 1에서 연선도체(stranded shaped conductor), 폴리염화비닐 절연(PVC insulation), 폴리염화비닐 사출층(extruded PVC

bedding), 아연도금 강철선 외장(galvanized steel wire armour), 폴리염화비닐 외장(PVC sheathing) 등으로 구성되어 있다. 5개의 층으로 구성된 케이블의 표기는 Cu/PVC/Bd/SWA/PVC로 표현된다. 최고도체온도는 70[°C]이다. 일반적으로 저전압에 사용되며, 도체전선으로 구리를 사용한다.

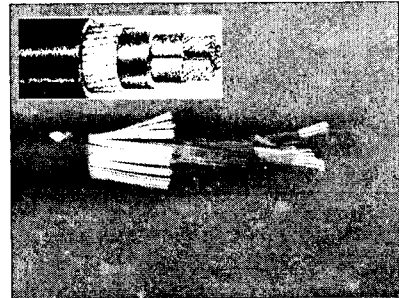


그림 1. 사고 케이블의 외형
Fig. 1. External forms of faulted cable

그림 2는 그림 1에서 나타낸 명칭을 근거로 하여 케이블 단면의 명칭과 재료에 대해 각각 나타낸 것이다.

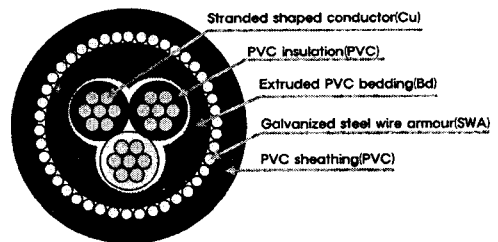


그림 2. LV URD 케이블의 개략도
Fig. 2. Schematics of LV URD cable

2.2 일반적인 케이블의 사고원인 분류와 동향

일반적인 케이블 사고의 특성을 보면, 고전압 이상의 케이블에서는 보이드, 이물질 침투, 절연물의 함량미달에 의한 제작 불량, 수분침투, 외피손상, 산화 부식에 의한 관리 소홀이나 경년열화에 의한 경우, 물리적 스트레스에 의한 설치 불량 등이 있다. 저전압 케이블은 대부분 자외선, 화학물질 등에 의해

외피의 손상이 발생하여 절연이 파괴되는 과정을 거친다. 특히 외부환경에 의해 노출이 심하게 되면 절연피복에 균열이 발생하여 누설전류가 흐르게 되고 이 영향으로 사고가 발생한다. 국내의 경우 저전압에서는 사고가 많지 않으나 고전압(배전계통)에서는 흔히 발생하는 사고 중 하나인 것으로 알려져 있다. 본 논문에서 분석한 케이블의 사고 메커니즘을 과거의 사례를 통해 단계별로 나타내면 그림 3과 같다. [1]에서와 같이 기포(void) 또는 불순물(impurities)에 의하여 절연성능이 저하된 상태에서 주변 환경 또는 전기적 영향에 의해 [2]의 이미지에서와 같이 절연성능이 저하되면서 도전로를 형성하게 되어 전류가 흐르게 될 것으로 추정된다. [3]에서는 누설전류에 의한 줄열로 의해 아크로 진전되었을 것으로 추정되며, 열에 의한 영향으로는 절연재료의 탄화와 도전재료를 녹게 하여, [4]에서와 같이 확산되는 과정을 가질 것으로 추정된다.

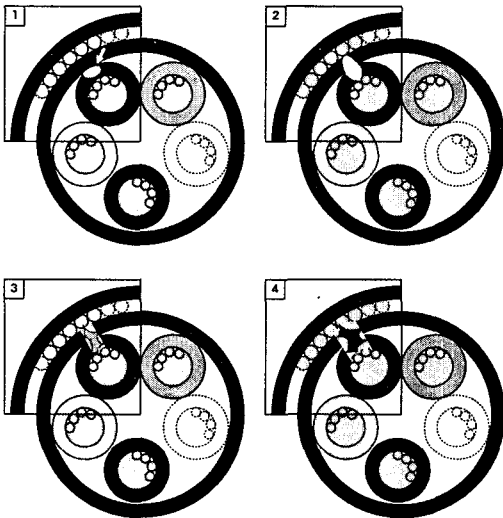


그림 3. 케이블의 사고 메커니즘
Fig. 3. Faulted mechanism of cable

3. 분석방법

사고케이블의 원인규명에 있어서 객관적인 자료를 확보하기 위한 방법으로 다양한 분석기기를 이용하여 정상 케이블과 비교하였다. 분석방법은 그림 5와 같다. 사고현장에서의 케이블 채취와 주변사항을

분석한 후, 분석실에서 외형패턴에 대한 분석을 통해 과거의 사고 이력과 비교하였다. 주사전자현미경과 에너지 분산형 X선 분광분석기 등을 이용하여 케이블의 성분변화와 특성을 분석하였다. 열분석을 통해 절연재료의 흡열 또는 발열반응을 분석하였으며, 화학적 표면구조 분석은 적외선 분광기를 이용하였다. 외형구조의 적합성 여부를 판단하기 위해 절연재료의 두께를 측정하여 규격에 준한 상태를 비교분석하였다. 이러한 자료를 종합적으로 분석하여 케이블 사고원인을 상호 검증하였다.

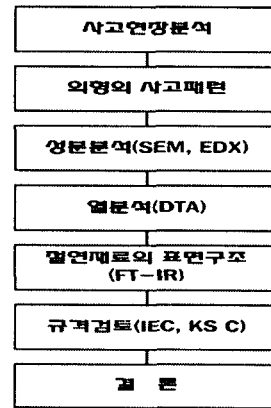


그림 4. 분석방법의 개략도
Fig. 4. Schematics of analysis method

4. 열저리에 의한 특성 변화

4.1 실험결과 및 분석

4.1.1 현장분석

그림 5는 사고현장에서 촬영된 케이블의 외형을 나타낸 것으로, 사고 패턴이 유사하고 다발적으로 발생한 것을 확인하였다. 화살 표시된 부분은 아크 흔적으로 추정된다. 그림 5 (a)의 화살표시는 내부 전선이 방전되어 외피에 구리가 비산된 흔적(scattered marks)이 확인되었으며, 외피 둘레에 있는 아연도금된 철선에서도 용융 흔적(molten marks)이 확인되었다. 그림 5 (b)는 내부전선과 아연도금된 철선사이에 지락 또는 단락으로 의심되는 아크 흔적이 발견되었다. 아크범위로 보아 사고확대는 되지 않은 것을 확인하였다. 일반적인 경우 사고

외형 패턴은 도전재료를 둘러싼 절연재료의 생산당시 보이드 또는 불순물에 의해 발생한 것으로 추정된다. 사진에서 확인되는 사항으로 절연피복이 용융된 부분을 중심 화살표 방향으로 확산되는 형태의 방전이 진전되었음을 알 수 있다. 이때 전선(copper)은 줄열(Joule's heat)에 의한 용융된 흔적을 확인할 수 있다. 대부분 사고 흔적이 일반적인 아크방전에서 보면 매우 미약한 것으로 사고를 발견하기까지는 오랜 시간이 소요되었을 것으로 추정되었다.

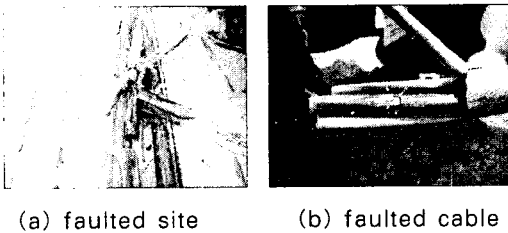


그림 5. 사고현장에서 촬영된 이미지
Fig. 5. Images were taken at faulted site

4.1.2 외형패턴

그림 6은 사고가 발생한 전선(적색 절연피복)의 케이블과 정상상태의 것을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 6 (a)는 정상상태의 것을 확대하였고, 그림 6 (b)는 사고 상태의 외형을 확대한 것이다. 그림 6 (b)에서 보면, 사고 중심부로부터 도전재료가 용융된 것을 확인할 수 있으며, 절연피복이 용융 탄화된 것을 알 수 있다. 절연피복이 용융된 부분에는 검게 탄화된 부분이 넓게 퍼져 있는 것을 확인하였다. 이는 내부적으로 밀폐되어 용융 탄화된 부분에서 발생한 가스와 연기 등이 빈 공간으로 퍼져 진전되었던 것으로 판단된다. 사고케이블의 절연피복 주변에는 불규칙한 기포가 있는 것을 확인하였다. 일반적으로 절연재료의 문제로 인해 사고가 발생되었을 때, 사고 케이블은 사고지점 주위의 절연피복 일부에서 열화패턴이 나타날 수 있다. 따라서 다수의 사고 케이블을 분석하여 입증할 필요가 있다.

그림 7은 사고케이블의 절연피복으로 각각의 정상상태에서의 단면을 일정하게 확대하여 두께가 최소인 부분을 촬영한 것이다. 사고 전선의 경우 대부분 적색 절연피복의 것으로 그림에서도 알 수 있듯이

절연피복이 상대적으로 얇은 것을 확인할 수 있다. 그림 7 (a)는 1.1[mm], (b)는 0.54[mm], (c)는 0.55[mm]인 것으로 나타났다. 근소한 차이가 있으나 적색전선의 경우 0.54[mm]의 두께를 가지고 있어서 동일 재료에서 절연성능, 기계적 강도 등이 대체적으로 다른 전선에 비해 낮을 것으로 판단된다.

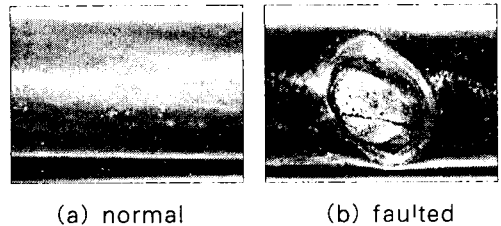


그림 6. 정상과 사고 케이블의 비교(mag.×6)
Fig. 6. Comparison between normal and faulted cable

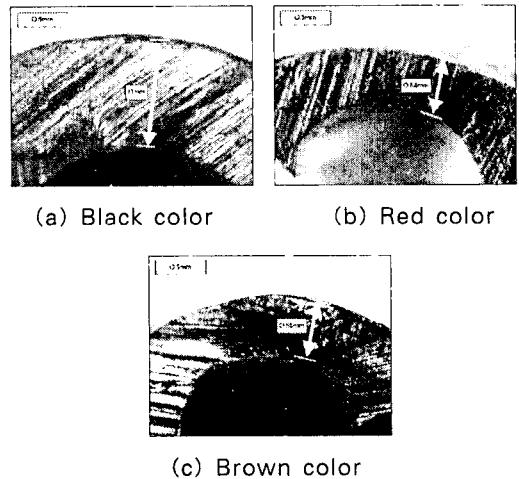


그림 7. 피복의 단면(mag.×25)
Fig. 7. Cross-section of covering wires

그림 8은 전선의 절연피복과 아연도금 철선사이에서 있는 폴리염화비닐 사출층의 사고 부분을 확대한 것이다. 그림 8 (a)는 아연도금 철선과 닿은 부분으로 좌우측으로 탄화된 경계가 있는 것을 확인하였다. 그림 8 (b)는 전선의 절연피복과 닿은 부분으로 표면이 검은 그늘음이 있는 것을 알 수 있고, 경계 부분으로 탄화된 조직을 확인할 수 있다.

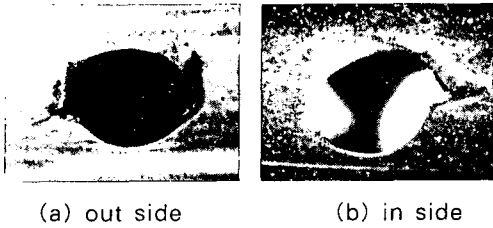


그림 8. PVC 베딩의 사고부분(mag.×6)
Fig. 8. Faulted parts of PVC bedding

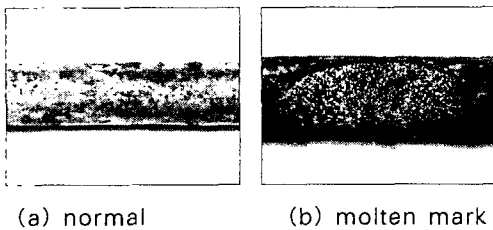


그림 9. 아연도금 강철선 외장(mag.×10)
Fig. 9. Galvanized steel wire armour

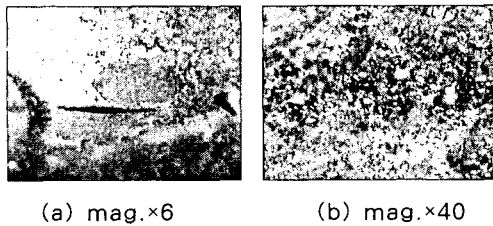


그림 10. PVC sheathing의 사고부분
Fig. 10. Faulted part of PVC sheathing

그림 9는 아연도금 철선(galvanized steel wire)으로 그림 9 (a)는 정상상태의 것을 나타낸 것이고, 그림 9 (b)는 사고부위의 중심부분으로 용융된 형태를 확인할 수 있다. 따라서 구리의 용융점은 1,083[°C]이고, 철이 녹을 수 있는 용융점까지의 온도는 일반적으로 1,539[°C]이며, 아연의 경우는 419.5[°C]이다. 전기에너지에 의해 용융된 부분으로 추정하여 보면 약 1,500[°C]이상의 국부가열이 있었던 것으로 추정할 수 있다. 이러한 용융패턴은 전기에너지에 의해 서만 나타날 수 있는 조건으로 아연도금 철선과 전선 사이에서 절연파괴 되었음을 확인할 수 있다.

그림 10은 아연도금 철선을 감싸고 있는 부분의 사고지점을 확대한 것으로 탄화조직이 침식되는 중

이었음을 확인할 수 있다. 또한 탄화조직 주변으로 적갈색의 이물질이 넓게 분포되어 있다. 그림 10 (b)는 이물질 부분을 확대하여 촬영한 것이다.

4.1.3 사고케이블의 성분변화 비교

주사전자현미경을 이용하여 전선부분과 아연도금 철선 부분을 분석하였다. 그림 11 (a)는 정상전선의 표면을 촬영한 것으로 제조시 형성되는 연신 (elongation)구조의 형태를 볼 수 있다. 그림 11 (b)는 전선의 용융부분을 분석한 것으로 크고 작은 기포가 생성되어 있고, 표면이 불규칙하게 형성되어 열의 영향이 컸던 것으로 나타났다.

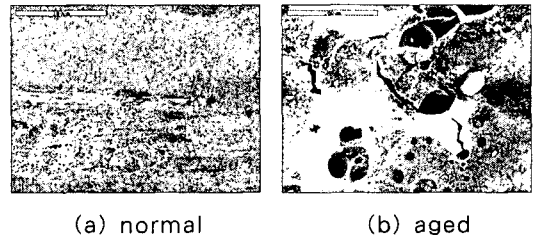


그림 11. 전선의 2차전자이미지
Fig. 11. Secondary electron images of wire

그림 11에서 나타난 부분을 에너지 분산형 분광분석기(EDX)로 분석 비교한 결과 표 1과 같았다. 전선의 표면에서 일부 산소가 있는 것으로 보아 장시간 노출 등에 의한 산화가 표면에 진행되었던 것으로 보인다. 일부 아연도금 철선에서 비산된 철 성분이 검출되었으며, 열에 의한 산화부식이 진행되었음을 확인할 수 있다.

표 1. 케이블의 성분율(동선)
Table 1. Ingredient rates(copper wire) of cables

classification		Element line, [%]			
		CuK	CK	OK	FeK
Normal	surface	88.8	6.5	4.7	0.0
	inner	95.0	5.0	0.0	0.0
Damage		81.9	10.6	6.4	1.1

그림 12는 아연도금 철선을 분석한 것이다. 그림

에서 (a)는 정상상태에서의 표면을 보여주는 것이고, (b)는 소손부분을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 소손부분은 균열이 있는 것을 확인하였다.

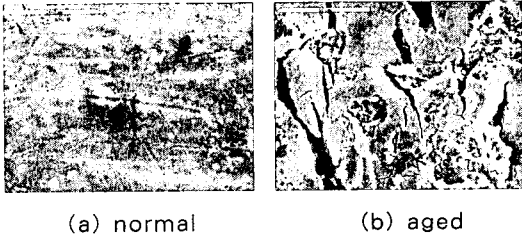


그림 12. 아연도금 철선의 2차전자이미지
Fig. 12. Secondary electron images of galvanized steel wire armour

표 2는 그림 12에 나타낸 아연도금 철선에 대해 성분분석을 실시한 것으로 비교 정리하였다. 표에서 확인된 것과 같이 정상상태의 아연도금 철선은 표면에 아연도금이 되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 공기 중에 노출되어 일부 산화된 형태를 확인하였다. 철선의 내부는 대부분 철(Fe)로 구성되어 있다. 손상된 철선인 경우에는 표면에 FeK line 72.5[%], OK line 20.2[%], CK line 7.3[%]가 점유되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 표면에 아연 성분이 높은 열에 의해 비산되었거나 증발된 것으로 판단된다.

표 2. 정상과 열화 케이블의 성분비교(철선)
Table 2. Ingredient rates(galvanized steel wire) of cables

classification		Element line, [%]			
		FeK	ZnK	OK	CK
Normal	surface	0.0	52.2	27.0	20.8
	inner	97.7	2.3	0.0	0.0
Damage		72.5	0.0	20.2	7.3

4.1.4 사고케이블의 열특성 분석

절연전선의 피복으로 이용되는 유기재료의 열특성을 분석하기 위해 열분석기(thermal analyzer)를 이용하였다. 전기로 내부의 분위기는 질소 79[%], 산소 21[%]의 표준공기혼합가스(99.995[%])를 이용하여 분당 100[ml]로 흐르게 하였다. 백금(Pt) 샘플컵

(sample cup)에 시료를 담아 상온에서 900[°C]까지 분당 10[°C]씩 증가시키며 이때의 변화를 측정하였다.

그림 13은 현장에서 수거한 케이블의 적색 전선에 씌워진 절연피복을 분석한 것으로 그림 13 (a)는 정상, (b)는 사고케이블을 나타낸 것이다.

그림 13 (a)에서 알 수 있듯이 132.8[°C]에서 흡열 반응에 의한 흡열피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 268.0[°C]에서 1차 발열피크가 나타났으며, 약 435.2[°C]에서 강한 발열피크가 나타났다. 발열피크의 형태로 보아 재료부분에서 강한 불꽃이 동반되어 온도상승 되었다가 재료가 열에 의한 탄화된 후 전기로의 온도에 따라 낮아지는 현상을 보였다. 그림 13 (b)는 약 132.8[°C]에서 흡열반응에 의한 흡열피크가 나타났다. 또한 255.9[°C]에서 발열반응에 의한 발열피크가 1차로 나타났으며, 약 419.1[°C]에서 강한 발열피크가 나타나는 것을 확인하였다. 그림 13 (a)와 비교하여 2차 발열피크에 대해 일부 변화가 있는 것을 확인하였다.

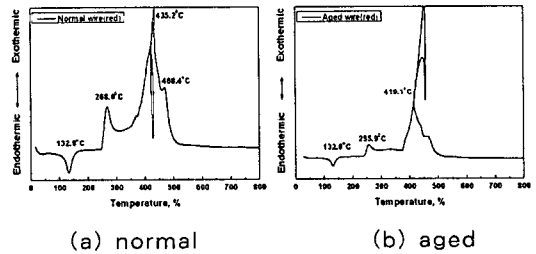


그림 13. 케이블의 시차열(DTA) 곡선
Fig. 13. DTA curves of cables

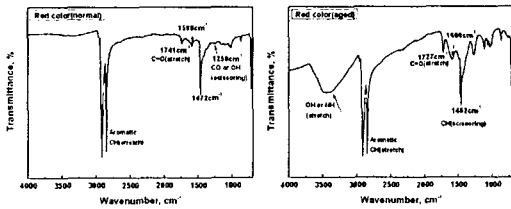
4.1.5 절연재료의 표면구조 분석

절연재료의 특성분석 중 화학적 구조변화를 분석하고 외부 영향에 민감한 재료를 확인하기 위해 적외선분광기(FT-IR spectrometer)를 이용한 분석이 요구된다. 일반적으로 일정한 결과를 도출하기 위해 시료당 100회 이상의 주사(scan)를 실시하여 얻은 값으로 분석하였다. 시료분석방법은 Diamond ATR 법에 의해 분석되었다.

그림 14는 정상상태의 적색 절연피복과 사고지점에서의 절연피복을 비교한 것이다. 그림 14 (a)는 정

FMEA에 근거한 LV URD 케이블의 고장분석

상상태의 적색 절연피복으로 1,741[cm⁻¹]에서 탄소와 산소의 이중결합구조를 가진 분자의 신축진동이 나타났다. 또한, 1,472[cm⁻¹]에서 탄소와 수소의 가위질 진동이 있는 것을 확인하였다. 그림 14 (b)의 경우 약 3,500[cm⁻¹]에서 공기 중의 수분, 산소 또는 질소와 단일결합한 형태의 신축진동이 나타나는 것을 확인하였다.



(a) normal (b) aged

그림 14. 케이블의 IR 흡광스펙트럼
Fig. 14. IR absorption spectrum of cables

4.1.6 IEC 규격검토와 사고케이블의 비교

국제전기위원회(IEC 60502-1)에 의한 검토를 실시하여 케이블의 사양을 검토하고 문제점이 있는지의 여부를 판단하였다. IEC 60502-1(Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1[kV](Um=1, 2[kV]) up to 30[kV](Um=36[kV]), Part 1: Cables for rated voltages of 1[kV](Um=1, 2[kV]) and 3[kV](Um=3, 6[kV]))의 기준을 적용하는 것으로 알려져 있다. IEC 60502-1의 주요내용에 대한 범위는 규격 7쪽에 잘 설명하고 있다.

국제전기위원회에 준하여 각각의 치수를 측정한 결과 다음과 같았다. Cu/PVC/Bd/SWA/PVC의 순서대로 측정내용을 서술하면, 1.0/0.40(Red), 0.75(Brown), 0.50(Black)/0.87/0.8/1.80이었으며, 치수의 최소치를 나열한 것이다. 이때의 측정단위는 [mm]였다. 제작회사에서 제시하고 있는 치수와 비교하여 정상적인 제작이 이루어졌는지 확인하였다.

IEC 60502-1의 17쪽에 절연재료의 공칭 두께(nominal thickness)에 대해 잘 설명하고 있다. 그 내용 중 일부를 보면 표 3과 같다. 모델케이블의 경우 내선규정에 의하면, 공칭단면적은 1.0[mm²] 소선이 7가닥으로 5.5[mm²]인 것으로 나타났다.

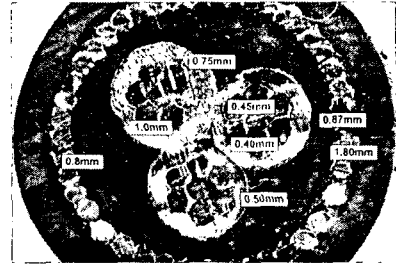


그림 15. 사고 케이블의 두께
Fig. 15. Thickness of faulted cable

국내 케이블의 경우 공칭단면적이 5.5[mm²]인 전선의 경우 허용전류는 49[A]인 것으로 나타나 있으며, 내부에 3심(3 core)인 케이블(절연물의 최고허용온도가 60[°C]인 캡타이어케이블)의 경우에는 36[A]가 허용전류인 것으로 조사되었다. 절연물이 부틸고무 혼합물 및 에틸렌프로필렌고무 혼합물인 캡타이어 케이블(절연물의 최고허용온도 80[°C])의 허용전류는 3심의 경우 46[A]인 것으로 되어있다. 국내산 케이블의 경우 600[V] VV 케이블로서 허용전류는 34[A]로 되어 있다. 이때 국제전기위원회와 비교하여 절연피복의 공칭두께는 1.0[mm] 이상이 되어야 하는 것을 확인하였다.

표 3. PVC/A 절연피복의 공칭두께
Table 3. Nominal thickness of insulation at rated voltage

Nominal cross-sectional area of conductor, [mm ²]	Nominal thickness of insulation at rated voltage U0/U(Um)	
	0, 6/1(1, 2) [kV] [mm]	1, 8/3(3, 6) [kV] [mm]
1,5 and 2,5	0, 8	-
4 and 6	1, 0	-
10 and 16	1, 0	2, 2

NOTE - Any smaller conductor cross-section than those given in this is not recommended.

표 3에 의해 나타난 절연피복의 두께에 대한 기준은 IEC 60811-1-1에 의해 명기되어 있으며, 국내 KS C IEC 60811-1-1에 의해 부합화하였다. 이에 “전기케이블의 절연체 및 시스재료의 공통 시험 방

법-제1부 : 시험 방법 총칙- 제1절 : 두께 및 완성품 바깥지름 측정- 기계적인 특성 시험(Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables-Part 1 : Methods for general application-Section 1 : Measurement of thickness and overall dimensions-Tests for determining the mechanical properties)”에 대해 상세히 기술하고 있다. 이 규격의 2쪽에서 3쪽에 기술된 내용에는 절연체 두께 측정에 대한 방법으로 측정기구와 시험편 준비에 대해 나타나 있다. 9쪽과 10쪽에는 절연체 두께를 측정하는 방법에 대해 나와 있으며, 최소두께를 원칙으로 한다. 실체현미경(stereoscope)을 이용하여 20배 확대한 상태에서 촬영하여 측정하였다. 시료는 old(사고 케이블), new(비포설케이블) 등 2개 군으로 하여 전선에 위치한 각각의 절연피복 두께에 대해 측정하였다.

현장에 포설되지 않은 새로운 케이블인 “new”의 흑색 절연피복의 두께를 측정하면 그림 16에서와 같이 다양한 결과가 나타남을 확인하였다. 측정값은 평균 0.48[mm]에서 0.65[mm]의 두께를 가지는 것으로 나타났다.

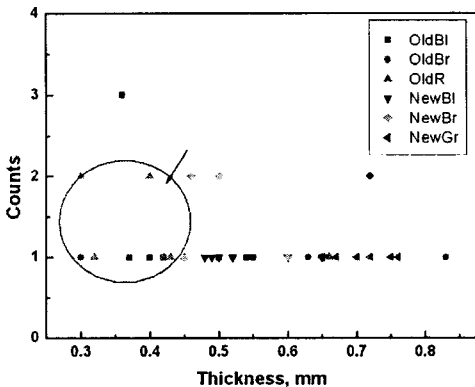


그림 16. 절연피복의 두께 측정
Fig. 16. Thickness measurement of insulation

그래프 내에 있는 원 안의 분포는 적색의 절연피복으로 절연피복의 두께가 비교적 얇은 편에 속하는 것을 확인하였다.

5. 결 론

사고 과정은 과거의 상태를 보존하고 있는 사고 현장에서의 케이블을 다양한 분석기법을 통해 입증할 수 있었다. 본 사고 과정은 케이블 자체의 결합 요소에 의해 발생하였을 가능성 등을 인지하여 분석하였다.

- (1) 사고케이블 자체의 절연성능을 저하시키는 요인으로 IEC 60502-1과 IEC 60811-1-1에 의한 절연피복의 최소두께가 시방(specification)과 일치하지 않음을 확인하였다
- (2) 적외선분광기에 의해 적외선흡광피크가 동일 재료에서 일치하지 않는 것으로 나타났다.
- (3) PVC bedding 부분이 열적으로 취약하여 장시간 현장에 노출되어 사용되는 경우 이와 유사한 패턴의 사고를 유발할 것으로 판단된다.

따라서 기존의 사고케이블에서 지속적으로 동일 사고가 발생할 우려가 있으며, 사고는 취약한 장소에서부터 순차적으로 발생할 가능성이 높으므로 검증된 케이블로 포설하는 것이 안전사고 예방을 위해 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) 한국전기안전공사, “전기재해통계분석”, 14호, 한국전기안전공사, pp.67~74, 2006.
- (2) 송길목, 최충석, 김향곤, 김영석, “AC 전류에 의해 용융된 나전선의 발열 특성”, KIEE Vol.20, No.1, pp.77-84, Jan. 2006.
- (3) 송길목, 최충석, 노영수, 광희로, “트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화특성”, Trans. KIEE. Vol. 53C, No. 1, pp. 1~7, JAN. 2004.
- (4) 송길목, 최충석, “IT기반을 이용한 사고분석시스템 개발 동향”, 전기전자재료학회지 Journal, pp.21~29 Apr. 2006.
- (5) IEC, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1(kV)(Um=1,2(kV)) up to 30(kV)(Um=36(kV)) - Part 1: Cables for rated voltages of 1(kV)(Um= 1,2(kV)) and 3(kV)(Um= 3,6(kV))”, IEC 60502-1, Edition 1.1, 1998.
- (6) IEC, “Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables - Part 1: Methods for general application - Section 1: Measurement of thickness and overall dimensions - Tests for determining

the mechanical properties", IEC 60811-1-1, 2002.

[7] John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", 5th edition, Prentice Hall, 2002.

[8] Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Chung-Seog Choi and Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electrical Fire Analysis of PVC Insulated Flexible Cord by Over-Current", KIEE 2003spring conference, pp.131~133, 2003.

[9] 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.

[10] Kil-Mok Shong, Chung-Seog Choi, Hyung-Rae Kim, Dong-Woo Kim, Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electric Fire Analysis of Insulating Materials Due to the Tracking Deterioration", 2002 ACED & K-J Symposium, pp.606~609, 2002.

[11] Peter H. F. Morshuis, "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some Thoughts on Progress Made and Where to Go Now", IEEE Trans. on DEI, Vol. 12, No. 5, pp.905~913, 2005.

[12] H. Zang, R. Hackam, "Electrical Surface Resistance, Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC", IEEE Trans. DEI, Vol. 6, No. 1, pp.73~83, 1999.

[13] B.X. Du, "Discharge Energy and dc Tracking of Organic Insulating Materials", IEEE Trans. DEI Vol. 8, No. 6, pp.897~901, 2001.

[14] J. Montesinos, R. S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury, "Mechanism of Brittle Fracture in Nonceramic Insulators", IEEE Trans. DEI Vol. 9, No. 2, pp.236~243, 2002.

[15] D.S.Miller, "Discharge Characteristics", A.A. Balkema, Rotterdam, pp.3~151, 1994.

[16] L.L. Alston, "High-voltage Technology", Oxford University press, pp.17~59, pp.158~195.

[17] Malcolm P. Stevens, "Polymer Chemistry an Introduction 3Ed", Oxford, pp.395~404, 1999.

◆ 저자소개 ◆

송길목 (宋信穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 송실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기제어시스템공학과 졸업(석사). 2007년 현재 동 대학원 박사과정 수료. 1996년~현재 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원.

Tel : (031)580-3065

Fax : (031)580-3111

E-mail : natasder@kesco.or.kr

한운기 (韓雲基)

1973년 6월 20일생. 1997년 2월 목포대학교 전기공학과 졸업. 2000년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원.

Tel : (031)580-3078

Fax : (031)580-3111

E-mail : power@kesco.or.kr

김영석 (金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원.

Tel : (031)580-3064

Fax : (031)580-3111

E-mail : athens9@naver.com

김선구 (金善球)

1961년 2월 25일생. 1985년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991~2002년 한국전기안전공사 재직. 2002년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 그룹장(책임연구원).

Tel : (031)580-3071

Fax : (031)580-3111

E-mail : ksk@kesco.or.kr

곽희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 졸업(박사). 2002년 대한전기학회 학회장 역임. 현재 송실대학교 부총장 및 전기제어시스템공학과 교수.

Tel : (02)820-0644

Fax : (02)817-7961

E-mail : hrkwak@ssu.ac.kr