

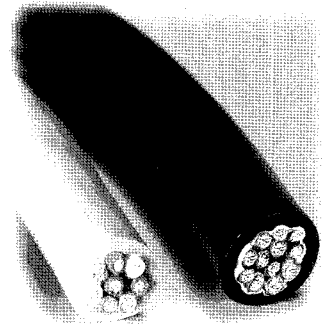
저압용 케이블의 소손 패턴 및 사고 예방



최 중 석
제주대학교 소방안전공학학과 교수

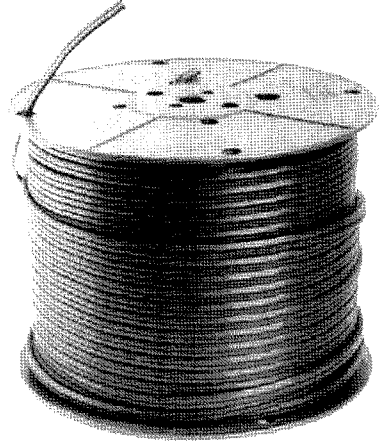
1. 서론

전기설비에 사용되는 전력용 케이블(electric power cable)은 보통 보호 외피나 외장 안에 하나 이상의 전선이나 광섬유로 묶여 있는 것을 말한다. 외피 안의 각 선이나 섬유는 덮여 있거나 절연되어 있다. 전력용 케이블은 대전류가 흐르므로 도전율이 우수한 구리가 주로 사용되지만, 경제적인 이유로 알루미늄을 사용하는 경우도 있다. 전선은 전기저항이 적고 견인 강도가 필요하므로 굵기는 수 밀리미터의 구리선을 몇 줄 내지 몇십 줄을 한데 꼬은 '연동선(燃銅線)'이나, 중심부에 강철선을 꼬아 넣고 둘레에는 알루미늄 전선을 사용한 강심알루미늄전선(ACSR)이 사용된다.



전기용 도체로 사용하는 전기용 연동 연선의 기호는 AS(AS; Annealed Copper Stranded Wires for Electrical Purposes)로 나타낸다. 전기용 연동선은 KSC 3101의 규정에 적합하여야 하며, 연선은 소선을 똑같이 긴밀하게 원형을 유지하고, 그 꼬임의 방향은 각 층서로 반대로 하되 최외층에 있어서는 S자형 꼬임으로 한다. 피치는 최외층에 있어서 층심 지름의 20배 이하로 한다. 또한 연선 작업을 할 때 각 소선의 접속은 은납땜, 용접법 또는 압접법으로 하고, 다만, 접속점은 소선수가 19개 이하인 경우에는 연선의 길이 30cm에 대해서 1개소를 초과해서는 안 된다. 소선수가 19개를 넘는 경우에는 각 층의 연선의 길이 30cm에 대해서 1개소를 초과하여서는 안 된다. 제품의 호칭 방법은 명칭과 공칭단면적 또는 기호와 공칭단면적으로 한다. 600V 이하의 전력용 및

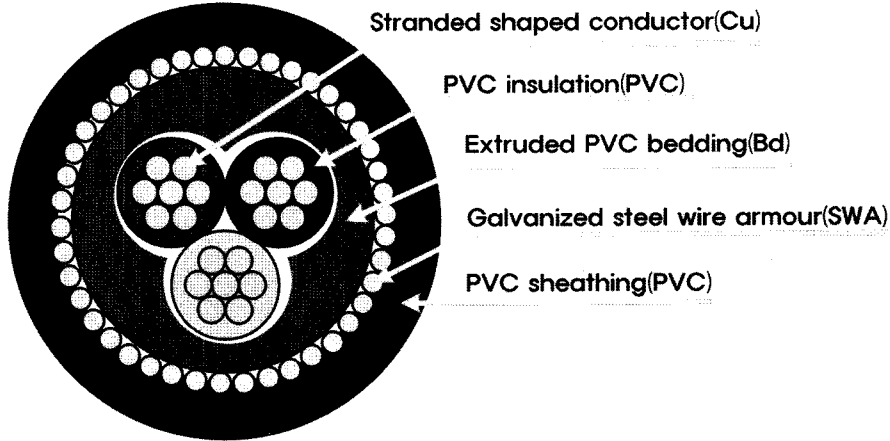
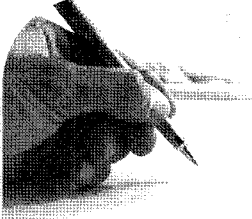
제어용 회로에 사용하는 케이블로 절연체로 폴리에틸렌을 사용하며, 외부 피복으로 염화비닐 또는 폴리에틸렌을 사용한 구조의 케이블이다. 폴리에틸렌은 에틸렌의 화합물로 전기적 특성이 절연 재료 중에서 우수하며, 더구나 기계적, 화학적 성질이 뛰어나다. 그러나 열에 비교적 약하여 105~110℃ 정도의 온도에서 연화하므로 주위 온도가 높아지는 장소에는 부적당하다. 제조방법에 따라 고밀도 및 저밀도 폴리에틸렌으로 구분되고 있다. 도전 재료는 KSC3101에 규정된 전기용 연동선 등을 사용하여 원형 연선, 원형압축 연선 및 분할압축 연선 등이 있고, 절연 재료는 가교폴리에틸렌이나 폴리에틸렌 등을 사용한다. 또한 차폐(Sheath; 외장) 재료는 비닐이나 폴리에틸렌을 사용한다. 심선의 식별은 절연체 또는 절연체 표면의 착색, 기타 적당한 방법을 사용한다. 2심의 경우는 흑색, 백색 등이 사용되고, 3심의 경우는 흑색, 백색, 적색 등이 사용된다. 4심의 경우는 흑색, 백색, 적색, 녹색 등으로 나타낸다. 초고압 전력선의 경우는 이와 같은 도체를 다시 몇 가닥 다발로 만든 복도체방식(複導體方式)이 적용된다. 초기의 전력용 케이블의 절연은 천, 종이, 고무 등으로 표면을 덮어서 사용하였다. 그러나 그와 같은 방법은 부피가 크고 절연 성능이 낮아서 대용량에는 사용할 수 없다. 최근에 상용되는 절연 방식은 부피가 작고 절연 성능의 신뢰도가 높은 고분자 화합물이 주로 적용되고 있다. 케이블의 종류는 용도 및 형태에 따라 와이어 케이블, 전송 케이블, 동축 케이블, 멀티코어 케이블, 광 케이블, 리본 케이블, 연선, 승강기 케이블 등 다양한 것들이 있다.



따라서 본 논고에서는 저압용 케이블(Low Voltage Cable)의 소손 패턴을 제시하고 사고 발생의 원인을 확인함으로써 향후 유사 사고 예방을 위한 기초 자료를 제공하는데 있다.

2. 케이블의 구조 및 원인 분석

사고 현장에 포설된 저압용 케이블의 사고 원인을 규명하기 위해 현장의 조건을 조사한 결과 습도는 65% 정도인 것으로 나타났으며, 여름의 경우 대략 45±5℃이며, 겨울에는 약 5±3℃ 정도인 것으로 나타났다. 지면 온도는 여름의 경우 평균 20~25℃ 정도이며 겨울에는 5~10℃인 것으로 확인되었다. 사용된 저압용 케이블은 (그림 1)에 나타낸 것과 같이 3심 구조로 되어 있고, 연선도체(stranded shaped conductor; Cu), 폴리염화비닐 절연(PVC insulation), 폴리염화비닐 사출층(extruded PVC bedding), 아연도금 강철선 외장(galvanized steel wire armour), 폴리염화비닐 외장(PVC sheathing) 등으로 되어 있다. 즉, Cu/PVC/Bd/SWA/PVC의 5개 층으로 제작되어 있고, 최고도체온도의 허용 범위는 70℃이다.



〈 그림 1 〉 사고현장에 사용된 정압용 케이블의 단면 구조

사고 현장에 포설된 저압용 케이블의 요구 사항은 국제전기위원회(IEC 60502-1)에 구체적으로 제시하고 있고 그 내용의 주요 사항은 다음과 같다. IEC 60502-1(Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV(U_m=1,2 kV) up to 30 kV(U_m= 36 kV), Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV(U_m= 1,2 kV) and 3 kV(U_m= 3,6 kV)) 등의 기준 적용이 요구된다. 또한 절연 재료의 공칭 두께 (nominal thickness)에 대해서 IEC 60502-1의 표 3 은 소선이 1,0mm 7가닥일 때 공칭단면적은 5,5mm² 이상을 요구하고 있고, 〈표 1〉과 같다.

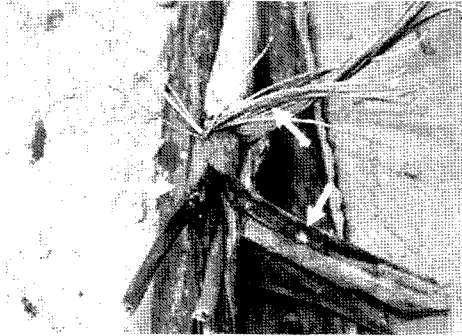
〈 표 1 〉 IEC 60502-1 표 3 에 제시된 저압용 케이블의 전압 및 절연 재료의 굵기

Nominal cross-sectional area of conductor mm ²	Nominal thickness of insulation at rated voltage U ₀ /U(U _m)	
	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.

〈그림 2〉는 사고현장에서 촬영된 저압용 케이블의 사고 외형으로 화살표로 표시된 부분이 아크 흔적으로 확인된다. 〈그림 2〉(a)의 화살표는 내부의 절연 파괴에 따른 구리가 비산된 흔적(scattered marks)을 나타

낸 것이며, 외피 둘레에 있는 아연 도금된 철선에서도 용융 흔적(molten marks)이 확인되었다. <그림 2>(b)는 내부 전선과 아연 도금된 철선 사이에 형성된 용융 패턴을 알 수 있으며, 용융된 아크 범위로 보아 사고는 제한적인 범위 내에서 발생하였고 확대는 되지 않은 것을 알 수 있다.



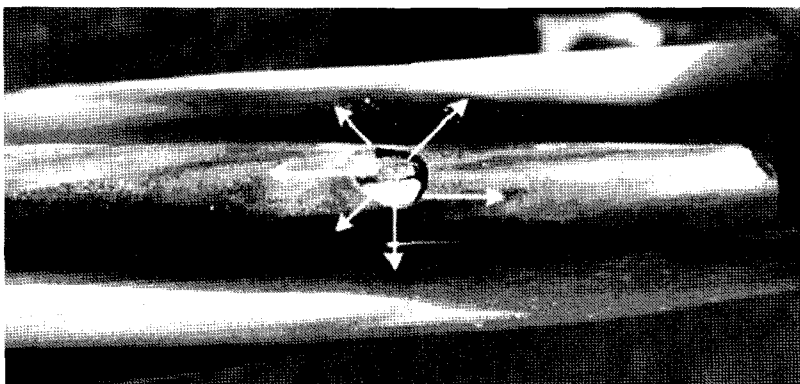
(a) 소손된 케이블의 패턴



(b) 소손된 케이블의 패턴

< 그림 2 > 사고현장에서 촬영된 소손된 저압용 케이블의 실체 사진

<그림 3>은 소손된 저압용 케이블의 소손 상태를 정확히 분석하기 위해 확대하여 나타낸 실체사진이다. 케이블의 절연 피복이 용융된 부분을 중심 화살표 방향으로 확산되는 형태의 방전이 진전되었음을 알 수 있다. 도체 표면의 절연 성능이 저하되어 그 때 발생한 줄열(joule heat)에 의해 장시간 진행된 것으로 판단된다. 또한 인접한 전선에는 일부의 오염만 있을 뿐 특이 사항이 없음을 알 수 있다.

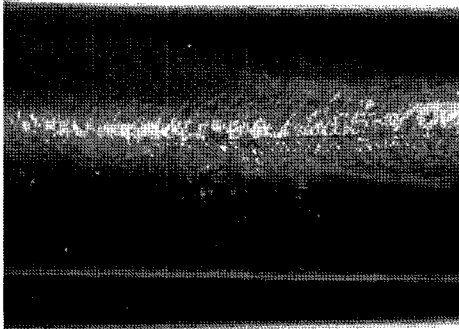


< 그림 3 > 소손된 저압용 케이블의 확대 사진

<그림 4>는 사고가 발생한 케이블의 외형을 실체현미경(stereoscope)으로 촬영한 사진이다. <그림 4>(a) 정상부분의 실체 현미경 사진으로 보라색을 나타내며, 표면의 균질도는 비교적 양호한 것을 알 수 있다. <그림 4>(b)는 소손된 저압용 케이블의 실체 현미경 사진으로 케이블 고유의 색이 변색되었으며, 도체의 일부가 용



확인된다. 또한 절연 피복은 용융 및 탄화되어 방사형의 구조로 확산된 것이 확인된다. 이와 같이 방사형 대칭 구조가 형성되었다는 것은 비교적 적은 에너지원에 의해 장시간 국부 발열이 발생한 것을 의미한다. 즉 도체와 절연물 사이에 이물질(먼지, 물기 등)의 유입 또는 보이드(void)의 생성에 따른 절연 저하로 미소방전이 발생한 것을 의미한다.



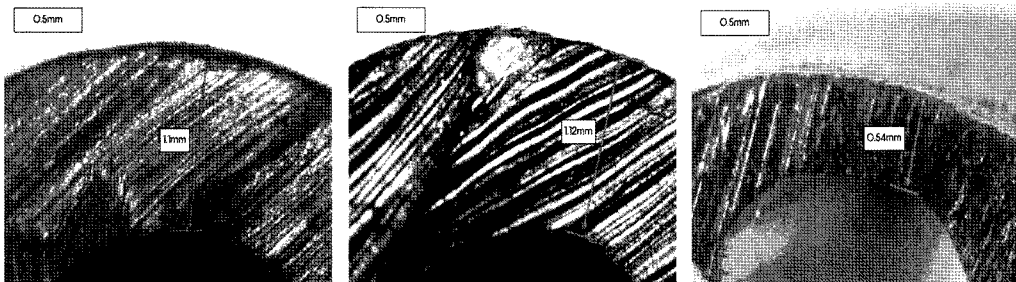
(a) 소손된 케이블의 패턴



(b) 소손된 케이블의 패턴

〈 그림 4 〉 저압용 케이블의 실제현미경 사진 분석

〈그림 5〉는 사고 현장에서 수거된 저압용 케이블의 절연 피복을 해석하기 위해 나타난 단면 사진이다. 그림 5(a)는 케이블 3가닥 중에서 하나인 녹색 심선의 단면으로 IEC 60502-1의 표 3 에서 요구하고 있는 굵기 1.0mm 이상인 것을 알 수 있다. 〈그림 5〉(b)는 케이블 3가닥 중에서 하나인 검정색 심선의 단면으로 IEC 60502-1의 표 3 에서 요구하고 있는 굵기 1.0mm 이상인 것을 알 수 있다. 〈그림 5〉(c)는 케이블 3가닥 중에서 하나인 보라색 심선의 단면으로 IEC 60502-1의 표 3 에서 요구하고 있는 굵기 1.0mm 이하인 0.54mm 인 것을 알 수 있다. 즉, 절연 피복의 굵기가 규정보다 얇다는 것은 기계적 충격 및 전기적 절연 성능이 부족함을 의미한다.



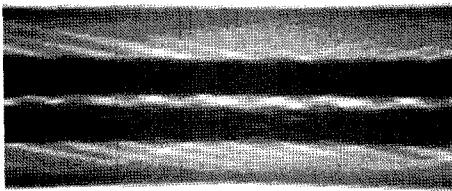
(a) 녹색

(b) 검정색

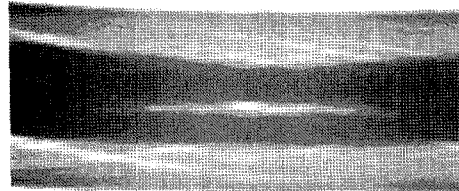
(c) 보라색

〈 그림 5 〉 저압용 케이블 심선 절연재료의 굵기

〈그림 6〉은 저압용 케이블 내부의 전선 구조를 해석하기 위해 측정된 엑스레이(X-ray) 사진이다. 〈그림 6〉(a)은 현장에 포설된 정상 부분을 나타낸 것으로 전선이 균일하게 배치되어 있고, 절연 피복도 비교적 일정한 밀도를 나타낸 것을 알 수 있다. 〈그림 6〉(b)은 소손된 부분의 X-ray 사진으로 내부 도체의 배열이 불균일하고 절연 피복의 일부가 균열과 변형이 발생한 것이 확인된다. 즉 이와 같이 변형된 상태로 설비가 운용되면 불평등 전자계가 발생하게 된다. 따라서 시간의 경과에 따른 열화(劣化)는 더욱 가속되어 결국에는 사고를 유발시킬 수 있다.



(a) 정상부분의 X-ray 사진



(b) 소손된부분의 X-ray 사진

〈 그림 6 〉 현장에서 사용된 저압용 케이블의 X-ray 단면 사진

3. 맺음말

사고 원인의 규명은 정상 제품의 분석과 사고현장에서 수거된 제품의 특성 및 패턴을 해석함으로써 알 수 있다. 따라서 소손된 저압용 케이블의 소손 패턴 및 단면구조 등을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 소손된 저압용 케이블의 실제 사진 분석에서 케이블의 절연 피복은 내부에서 외부로 소손이 진행된 것이 확인되었으나 인접한 전선에는 일부의 오염만 있을 뿐 특이 사항이 없음을 알 수 있다.
- (2) 케이블 3가닥 중에서 하나인 보라색 심선의 단면에서 IEC 60502-1의 표 3' 에서 요구하고 있는 굵기 1.0mm 이하인 0.54mm인 것을 알 수 있었다. 즉, 절연 피복의 굵기가 규정보다 얇다는 것은 기계적 충격 및 전기적 절연 성능이 부족함을 의미한다.
- (3) 사고가 발생한 케이블의 외형을 실제 현미경으로 분석한 결과 정상 부분은 표면의 균질도가 양호했으나 소손된 부분은 케이블 고유의 색이 변색되었으며, 도체의 일부가 용융된 것이 확인된다. 또한 절연 피복은 용융 및 탄화되어 방사형의 구조로 확산된 것이 확인된다. 이와 같이 방사형 대칭 구조가 형성되었다는 것은 비교적 적은 에너지원에 의해 장시간 국부 발열이 발생한 것을 의미한다.
- (4) 저압용 케이블 내부의 전선 구조를 X-ray를 이용하여 해석한 결과 정상 부분은 전선이 균일하게 배치되어 있고, 절연 피복도 비교적 일정한 밀도를 나타낸 것을 알 수 있다. 그러나 소손된 부분의 X-ray 사진은 도체의 배열이 불균일하고 절연 피복의 일부가 균열과 변형이 발생한 것이 확인된다. 즉 이와 같이 변형된 상태로 설비가 운용되면 불평등 전자계가 발생하여 시간의 경과에 따른 열화(劣化)는 더욱 가속되어 결국에는 사고를 유발시킬 수 있다.