

저압용 비닐절연전선에서의 직렬 아크 특성 분석

김향곤, 김동욱, 김동우, 이기연, 최충석
한국전기안전공사 전기안전연구원

Study on the Characteristics Analysis of Series Arcing
at the PVC Insulation Wire for Low Voltage

Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, Ki-Yeon Lee, Chung-Seog Choi
Electrical Safety Research Institute subsidiary of KESCO

Abstract - In this study, we experimented a deterioration characteristics by series arcing with 600V polyvinyl chloride insulation wire and analyzed the glowing/growing process of copper oxide, waveforms of contact voltage, current, power dissipation and carbonized patterns of insulation. We know that how glowing contacts and surface arcing can decompose PVC insulation and that it is possible for the subsequent series arc to ignite, and burn insulation. We expect that these results are useful for advancing the state-of-the-art in fire protection by providing a better understanding of how electrical fires can initiate.

1. 서 론

저압의 옥내배선으로 비닐절연전선(IV)이 주로 사용되고 있다. 이러한 전기배선의 절연피복 내 도체에 단선 등이 발생한 경우에는 전기의 공급이 원활하지 못하게 되고 단선된 도체의 접촉에 의한 발열[1]로 전선피복이 탄화하거나 발생한 아크에 의해 주위의 가연물에 착화하여 화재가 발생하게 된다. 또한, 도체 접촉부에서 진동에 의한 아크로 도체가 산화하여 산화동을 생성하고 이상발열 현상을 일으키게 된다. 이러한 산화동의 성장에 의한 이상발열 현상은 진동을 수반하는 전기설비 또는 전기장치와 접속(촉)불량 개소 등에서 발견할 수 있으며 설비의 정상적인 동작에 악영향을 주고 설비사고를 유발하게 된다. 우리나라의 경우 근래에 나전선과 단자부분에서의 직렬 아크와 접촉불량에 의한 이상발열 현상, 산화물의 성장 및 전기적 특성에 대한 연구가 진행중[2,3]에 있다. 절연전선은 도체를 외부에서 피복하고 있어 피복 내부의 결함을 발견하기란 어려우며 피복 내부의 도체 단선 등이 발생한 경우 직렬 아크나 병렬 아크에 의해 감전, 화재, 설비사고를 유발할 수 있어 이에 대한 연구도 필요한 실정이다. 외국의 경우 나전선에서의 직렬 아크에 의한 산화물 성장 특성[4]뿐만 아니라 절연전선에서의 아크 특성에 대한 연구가 진행 중이며 직렬 아크로부터 설비보호를 위한 장치도 개발되어 현장에 적용[5,6]되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 600V 비닐절연전선(IV)에서의 접촉불량에 의한 발열 특성과 절연피복의 탄화 패턴, 도체 접촉부위의 산화물 성장 과정, 접촉불량 부위의 전압, 전류, 전력파형 등 분석을 수행하여 저압용 비닐절연전선에서의 직렬 아크 특성을 분석하고자 한다. 향후 지속적인 연구 수행으로 설비의 전기안전에 기여하고자 한다.

2. 이론 및 실험방법

2.1 관련 이론

배선에서의 아크 결함은 크게 직렬 아크(series arc)와 병렬 아크로 나눌 수 있으며 병렬 아크(parrel arc)는 다시 line to line arc와 line to ground arc로 나누어진다. 그림 1에 아크의 형태를 나타낸다. 직렬 아크는 그림 1(a)과 같이 동일한 도체에서 발생하는 아크를 말하며, 코드에서의 도체의 끊어짐으로 설명할 수 있다. Line to line arc는 그림 1(b)와 같이 단락(short circuit)과 같으며 전선이 전선을 고정하는 금속체의 스테이프 등의 의해 절연피복이 손상되어 발생하는 것으로 설명될 수 있다. Line to ground arc는 그림 1(c)와 같이 지락(ground path)이 발생할 경우에 일어나게 된다.

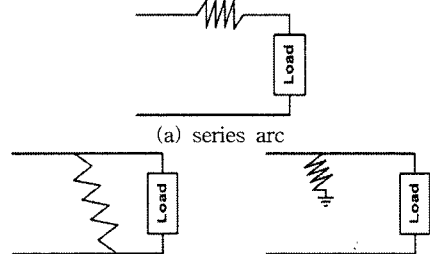


그림 1. 아크의 발생 형태 구분

IEC 60943에는 전기를 전달하는 도체의 접속/접촉에서의 접촉저항에 대한 이론적 설명, 접속/접촉 터미널에서의 열화 메커니즘, 도체의 온도상승 계산, 최대허용 온도 등에 대하여 설명하고 있다. 도체의 접속부에는 접촉저항(R_c :contact resistance)이 존재하고 이는 집중저항(R_e :constriction resistance)과 경계저항(R_i : film resistance)으로 구성된다. 집중저항(R_e)이란 전류의 통로가 좁아짐으로 해서 생기는 저항을 말하며 접촉력이 클수록, 도체의 저항률이 작을수록, 금속의 경도가 낮을수록 작아지며, 경계저항(R_i)은 도체가 외부 공기에 노출됨으로 해서 생기는 산화막 형성 등에 의한 저항을 말한다. 집중저항(R_e)과 경계저항(R_i)의 계산식 (1)과 (2)로부터 접촉저항(R_c)의 계산식은 (3)으로 나타낼 수 있다. 여기서 ρ 는 금속의 저항, n 은 접촉점의 수, a 는 도체의 지름, ρ_s 는 터널저항(표면저항)을 나타낸다.

$$R_e = \frac{\rho}{2na} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_i = \frac{\rho_s}{\pi a^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_c = R_e + R_i = \frac{\rho}{2na} + \frac{\rho_s}{\pi a^2} \dots\dots\dots (3)$$

터널저항(tunnel resistivity, surface resistivity)은 산화물의 성질과 산화물의 두께에 좌우되며 산화물의 두께

는 일반적으로 10 nm를 넘지 않는다. 표 1은 대표적인 도전재료인 동(copper), 은(silver), 알루미늄(aluminium)의 터널저항을 나타낸 것이다. 앞의 계산식으로는 접촉 저항 값을 얻기는 어려우며 일반적으로 접촉(접속)부를 통해 흐르는 전류와 접촉(접속)부 사이의 전압강하를 측정하여 계산한다.

표 1. 대표적인 도전재료의 터널 저항

metal	state	tunnel resistivity($\rho_0, \Omega m^2$)
copper	new	$2 \times 10^{-12} \sim 3 \times 10^{-11}$
	oxidised	10^{-10}
	tinned	$10^{-12} \sim 4 \times 10^{-11}$
silver	-	$4.6 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-12}$ 2.5×10^{-11}
aluminium	-	$7 \times 10^{-11} \sim 10^{-9}$

2.2 실험방법 및 실험장치의 구성

실험에 사용된 전선은 옥내배선으로 많이 사용되는 지름 1.6 mm의 600 V 비닐절연전선(IV)으로 실험전압은 단상 220 V 60 Hz의 상용전원을 사용하였으며 전압조정기(Daelim Electrical, Korea)를 이용하여 정밀 조정하였다. 그림 1은 실험에 사용된 실험전선을 나타낸 것으로 1.6 mm의 전선도체를 7.5 cm의 길이로 절단하고 절단면을 연마지(#2400)로 전선의 길이 방향과 수직으로 연마하였다. 제작된 시료는 5 cm 길이의 절연 피복의 중간을 중심으로 서로 맞대어 위치시켰다. 그림 2는 직렬 아크에 의한 전선의 열화현상을 실험하기 위한 실험장치를 나타낸 것으로 피복 내 2개의 전선도체 사이에서 직렬 아크가 발생할 수 있도록 아크 발생장치(AG-10, KESCO, Korea)를 이용하여 2400 rpm으로 일정한 크기의 진동을 인가하였다. 실험부하로는 220V용 백열전구를 사용하였으며 60 W 1개와 100 W 전구를 4개를 사용하였다. 회로에 흐르는 전류는 누설전류계(3263, Hioki, Japan)를 이용하여 측정하였고 전선 접속부에서의 전선 피복의 열화 진행과정은 디지털 캠코더를 이용하여 실시간을 촬영하였으며 산화물이 성장하는 동안의 접속부 사이의 접촉전압, 전류, 소비전력 등 전기적 특성은 정밀전력분석계(3030A, BMI, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한, 산화물이 성장하는 동안의 열 분포는 적외선열화상장비(TVS-8500, AVIO, Japan)를 이용하여 측정하였으며 시간에 따른 산화물의 성장 길이는 버니어캘리퍼스(Absolute, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 측정하였다.



그림 1. 실험시료의 제작

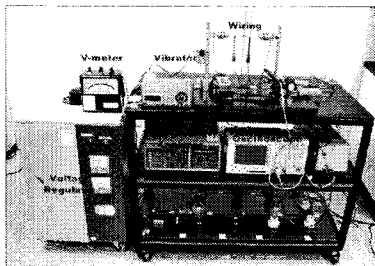


그림 2. 실험장치의 구성

3. 실험 및 고찰

3.1 직렬 아크에 의한 절연전선의 열화 특성

그림 3은 실험전류 2 A에서의 600 V IV 전선의 직렬 아크에 의한 열화 진행과정을 나타낸 것이다. 전선 접속

부에서 미세한 진동이 발생한 경우 접촉면에서 접촉과 끊어짐의 반복으로 스파크(아크)가 발생하며 이로 인해 발생한 열로 피복은 열화되고 도체는 산화된다. 시간이 경과함에 따라 피복의 열 열화는 축적되어 피복에 작은 구멍이 발생하고 이곳으로부터 스파크 불꽃이 밖으로 나오게 된다. 어느 정도 피복이 온도가 올라가게 되면 발생한 스파크에 의해 피복이 착화되며 이때 주위에 가연성 물질이 있을 경우 화재 확대의 위험이 있어 주의가 요구된다. 피복 착화 후 도체 접속부에서는 청백색의 불꽃이 발생하고 이후 황색 불꽃으로 변하게 된다. 이러한 상태에서는 외부의 진동이 없어도 지속적으로 불꽃이 발생하며 접촉면에서는 적황색의 산화물이 성장하게 된다.

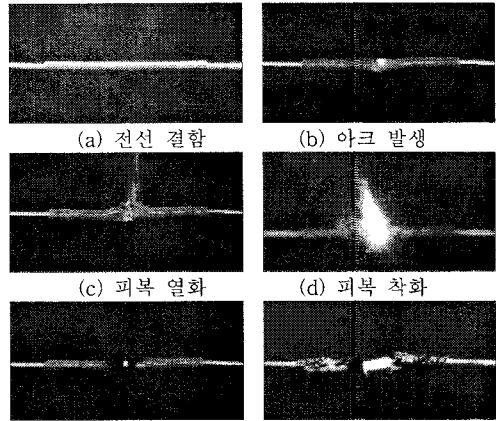


그림 3. 절연전선의 직렬 아크 열화 과정

그림 4는 직렬 아크 진행에 따른 절연전선의 변화 과정을 비교한 것이다. (a)의 step 1은 정상상태로 두 가닥의 도체가 서로 맞닿아 있으며 피복은 매끄러움을 알 수 있다. (b)의 step 2는 피복 내부에서 아크가 발생한 때로 피복 내부가 검게 탄화되었으며 도체 표면이 약간 검게 그을렸다. (c)의 step 3은 진동시 발생한 아크와 열에 의해 피복이 부풀어 오를 때로 피복에서는 연기가 발생하였고 피복 내부는 검게 탄화되었으며 두 도체의 접촉면에서는 산화가 일어났다. (d)의 step4는 절연전선 피복의 열화가 가속되어 피복에 구멍(hole)이 형성된 때로 구멍을 통하여 아크 불꽃이 밖으로 나왔으며 피복에서는 계속해서 연기가 발생하였다. (e)의 step 5에서는 아크 열에 의해 피복이 탄화되기 시작하였으며 피복이 연화되어 착화되었다. 두 도체의 접촉면에서는 아크에 의한 산화가 진행되었다. (f)의 step 6은 피복 착화한 후 접촉면에서 아크로 동전선의 산화물이 성장하고 있는 때를 나타낸 것으로 나전선에서의 접촉불량시 생성되는 동산화물의 성장과 유사한 특징[6,7]을 볼 수 있었으며 적열부와 적열로를 형성하면서 지속적으로 산화물이 성장하였다.

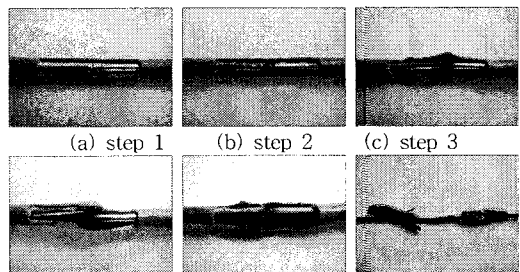


그림 4. 아크 진행에 따른 전선의 변화 비교

3.2 전기적 특성 분석

그림 5는 전선 접속부에서 직렬 아크에 의해 산화물이 성장하고 있을 때의 전기적 특성을 정밀전력분석계를 이용하여 측정할 것이다. 그림 5(a)는 60 분이 경과한 때로 접촉불량 부위에서의 소비전력은 18.91 W, 접촉전압은 10.0 V로 나타났으며, 그림 5(b)는 120 분이 경과했을 때로 소비전력은 23.37 W, 접촉전압은 12.3 V로 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 산화물이 성장하고 있을 때, 전류는 정현파형을 나타내고 있으나 전압파형은 (+)에서 (-)로, (-)에서 (+)로 바뀌는 시점에서 파형의 변화가 있음을 알 수 있다. 이러한 특이파형의 출현에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

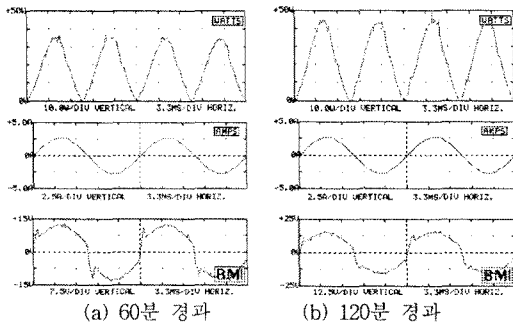
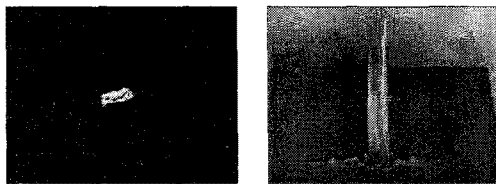


그림 5. 시간 경과에 따른 전기적 특성 변화

3.3 산화물의 성장 특성

그림 6은 도체 접속부에서 동산화물이 증식하고 있을 때의 온도 분포를 적외선 열화상 장비를 이용하여 측정할 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동산화물 성장부분에서 국부적인 발열이 일어남을 알 수 있으며, 적외선열화상장비로 실측한 결과 최고 905 °C(emissivity 1.0)를 나타냈다. 이는 적열부(hot zone)에서 적열로(glowing path)의 이동과 산화물의 발열 특성에 기인한 것으로 추정된다. 산화물의 증식 길이를 측정할 결과 60 분 경과 시 약 7 mm였으며 120 분 경과시에는 약 12 mm가 성장하였다. 산화물의 성장은 기존의 나전선에서의 직렬 아크에 의한 동산화물의 성장 특성에서 밝혔듯이[7] 도체의 지름과 통전 전류의 크기에 따라 좌우되게 된다. 이러한 산화물의 성장은 전압의 분배 및 이상발열 등으로 시스템의 안정적인 동작에 나쁜 영향을 주므로 이를 예방하기 위한 근본적인 방안이 강구되어야 할 것이다.



(a) 평면온도 분포 (b) 입체온도 분포
그림 6. 산화물 성장시의 온도 분포

4. 결 론

이상과 같이 저압용 비닐절연전선의 직렬 아크에 의한 특성을 실험, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 직렬 아크에 의한 절연피복의 열화과정을 살펴보면, 진동에 의해 발생한 열과 스파크로 절연피복이 용융, 탄화되었으며 절연피복이 착화하였다. 착화 후에는 도체 접속부에서 접촉 불량에 의한 청백색의 불꽃이 발생하였으며 점차 황색으로 바뀌었다. 황색 불꽃이 발생한 때에는 외부의 기계적 진동이 없어도 산화물은 지속적으로 성장하였다.

2) 직렬 아크에 의한 산화물 성장시 전기적 특성을 분석한 결과, 전류는 정현파형을 나타냈으나 접촉불량이 발생하고 있는 양단의 전압파형은 (+)에서 (-)로, (-)에서 (+)로 바뀔 때 파형의 변화가 있음을 알 수 있었다. 또한, 산화물이 성장하기 시작하여 60 분이 경과했을 때 접촉전압은 10.0 V, 소비전력은 18.91 W였으며, 120 분이 경과한 때 접촉전압은 12.3 V였으며 소비전력은 23.37 W로 점차 커지고 있음을 알 수 있었다.

3) 산화물의 성장 특성을 살펴본 결과, 산화물은 적열부와 적열로를 형성하면서 지속적으로 성장하였으며 또한 60 분이 경과시 약 7 mm가 성장하였으며 120 분이 경과시에는 약 12 mm가 성장하였다. 산화물의 외부는 최고 905 °C를 기록하였으며 산화물의 용융온도와는 많은 차이를 보였다. 이는 열의 발산과 적열부의 불규칙적인 온도 분포 때문으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 60943, "Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals", 1998
- [2] 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, pp.255-263, 2004
- [3] 김향곤 외 3, "저압용 전선선의 접촉불량에 따른 열적 특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계대회, Vol. C, pp.1466-1468, 2003
- [4] Jarle Sletbak, Roar Kristensen, Hakon Sundklakk, Gunnar Navik, Magne Runde, "Glowing contact areas in loose copper wire connections", IEEE Trans., on components, hybrids, and manufacturing technology, vol. 15 No.3, 1992
- [5] John J.Shea, "Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring", 51st IEEE Holm conference on Electrical Contacts 2005, pp.167-175, 2005
- [6] George D.Gregory, Kon Wong, Robert F. Dvorak, "More About Arc-Fault Circuit Interrupters", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol.40 No.4, pp.1006-1011, 2004
- [7] 김향곤, "접촉불량으로 증식되는 아산화동과 과열전선의 특성 비교, 조선대학교, pp.8-11, 17-23, 2000