A-11

단면결함 전선에서의 화재 발생 메카니즘 연구

박용환, 양승용
호서대학교 안전공학부

A Study on the Fire Mechanism of Electrical Wires with Defected Cross-sectional Areas

Yong-Hwan Park and Seung-Yong Yang
Department of Fire Engineering, Hoseo University

1. 서론

최근 국내에서도 건축물의 대형화, 초고층화 및 산업시설의 대규모화가 두드러지게 나타나고 있는 가운데 화재발생으로 인한 인명 및 재산상의 피해 규모가 비례적으로 증가하고 있다. 그러한 화재의 원인별 발생건수 중 가장 높은 점유율을 보이고 있는 것은 전기화재(2000년 기준 약 34%)이며, 그 건수도 매년 증가 추세를 보이고 있다.[1)]

전기화재 가운데에는 합선에 의한 것이 약 75%를 차지하며, 과부하나 연결 단자에서의 접촉불량에 의한 전기화재도 약 10%에 이르는 것으로 나타나고 있다. 그러나 합선에 의한 전기화재도 그 1차적 원인이 과부하나 접촉불량에 의한 열 발생으로 전선피복재가 녹아서 합선이 되어 화재가 일어나는 경우도 있으므로, 이들은 통계치 이상으로 전기화재의 직접적인 원인이 될 수 있다고 본다. 특히 일반전선에서는 상온에서 전압 220V, 전류 20A 이상을 사용하는 곳에서 과전류로 인한 발열 위험성이 높고, 경우에 따라서는 저전류에서도 구리선이 일부 단선이 되어 저항이 커지는 경우에도 발열량이 증가하여 전기화재를 일으킬 수 있다고 본다. 지금까지의 전기배선에 의한 화재위험성 분석에는 종래 전선에서 볼 수 있는 용융흔의 육안검사나 금속학적 조직 검사에 의한 결과 분석이 대부분으로, 발생 메카니즘에 대한 체계적 연구는 미흡한 실정이다.[2)]

이에 따라 본 연구에서는 과전류나 부분 단선 또는 접촉불량 등 여러 가지 원인에 의해 전기화재가 일어나는 과부하 메카니즘을 규명하고자 하였으며, 이를 위하여 부분 단선이나 단자에서의 접촉불량과 같은 경우도 모두 결함 단면을 갖는 전선의 형태로 단순화하고, 일정 전압하에서 전류의 크기와 전선 단면적의 형상 변화에 따른 전선 발열량의 크기 및 온도 분포를 실험적으로 측정하였다.

2. 이론적 배경

Fig. 1과 같은 단면 결함이 있는 전선에 있어서의 온도분포 및 열전달률 특성은 식(1),

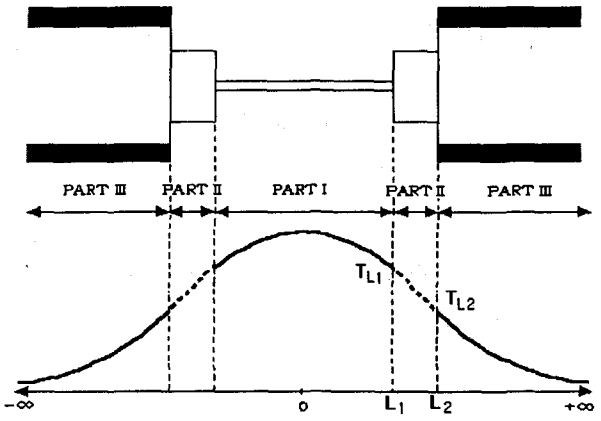

Fig. 1. 전선 결함부의 부위별(PART Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ) 온도 분포 곡선

식(2) 및 식(3)과 같이 표현될 수 있는 것으로 나타나 있다.[3-5)]

PART I에서는 대칭면(중심)에서의 온도구배가 0, 즉 dT/dx=0와 PART Ⅱ와의 접합부분($x=L_1=L/2$)에서의 온도 $T=T_{L1}$이라는 경계조건으로부터 온도분포 곡선은 (1)식으로 나타낼 수 있으며,

$$T(x)=\left[\frac{T_{L1}-(m_2/\ m_1^2)}{e^{\ m_1L1}+\ e^{\ -m_1L1}}\right](\ e^{\ m_1x}+\ e^{\ -m_1x})+\frac{m_2}{m_1^{\ 2}}+T_o \tag{1}$$

PART Ⅱ에서는 돌출부의 기부(base)에서의 온도(T_{L2})와 돌출부 끝에서의 온도(T_{L1})를 경계조건으로 하여 온도분포를 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{T(x)-T_\infty}{T_{L2}}=\frac{(T_{L2}/T_{L1})\sinh\ \ m_4x+\sinh\ \ m_4(L_2-x)}{\sinh\ \ m_4L_2} \tag{2}$$

PART Ⅲ에서의 온도분포는 돌출부의 기저에서의 온도 조건과 전선의 끝 $x=L_3$에서 $L_3\rightarrow\infty$, $T_{L3}\rightarrow T_\infty$로부터 (3)식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{T(x)-T_\infty}{T_{L2}}=\ e^{\ -m_3x} \tag{3}$$

3. 실험

3.1 시험편

본 연구를 위하여 보통 600V 이하의 전기기기 배선에 많이 사용되고 있는 전기기기용 비닐절연전선(KIV - KS C 3325)을 시험편로 선정하였다. 전선의 심선은 단면적 0.1mm^2

의 가는 구리선이 모두 37가닥 들어가 있는 연선 형태이며, 겉은 전선용 PVC의 절연 피복재로 덮여 있고, 피복재의 외경은 3.5mm, 내경은 약 1.8mm이다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 전선 단면의 결함 상태를 나타내기 위하여 전선 피복과 연선의 일부를 같이 절단하여 결함단면을 가진 시험편로 사용하였다. 결함부 연선의 가닥수는 직경 감소에 따른 저항변화를 유도하기 위하여 1, 2, 3, 5가닥의 4가지 경우를 설정하였으며, 결함부의 길이는 부분단선에 따른 불완전 접촉부를 가상하여 5, 10, 20, 30mm의 4가지 경우로 하였다.

3.2 실험장치

Fig. 3은 본 실험에 사용된 실험장치를 나타내고 있다. 본 실험에서 전압은 일반 가정용 상용 전압인 220V로 고정시켰으며, 그림에서와 같이 일정 전압하에서 전류값을 변화시키기 위하여 단상저항부하기를 별도로 설치하여 전류를 5~25A의 범위에서 2.5A 단위로 변화시킬 수 있게 하였다. 또 전압계와 전류계를 장착하여 정확한 값으로 제어할 수 있게 하였다.

시험편 전선을 고정하는 연결단자간의 거리는 약 600mm로 하였으며, 장착된 시험편에서의 온도 측정을 위하여 열전대를 직접 전선의 각 부위에 설치하고, 이를 온도측정용 기록저장장치가 내장된 컴퓨터에 연결하여, 그 값을 실시간으로 화면에 나타냄은 물론, 샘플링된 데이터 값을 하드에 저장토록 하였다. 아울러 비접촉식 온도측정장치인 열화상측정장치(ThermaSNAP사 Model 520)도 데이터 검증을 위해 함께 사용하였다.

3.3 실험방법

실험은 준비된 Fig. 2의 시험편을 Fig. 3의 연결단자에 설치하고, 열전대를 피복이 벗겨진 구리선의 중앙(T1), 피복 절단면에서 약 1~2mm 떨어진 피복 부위(T2), 피복 절단부에서 멀리 떨어진 전선피복부(T3)의 3지점에 설치한 후, 전원을 공급하고 온도변화를 측정하였다. 먼저 각 시험편에 대하여 과부하의 가능성이 높다고 생각되는 전류값 20A로 일정하게 공급한 상태에서 실험을 수행하였으며, 전류량의 영향을 관찰하기 위하여 특정조건에서 전류량을 5~20A로 변화시켜 가며 온도변화를 측정하였다.

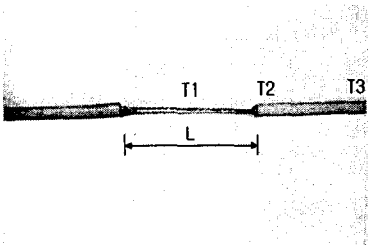

Fig. 2. 결함단면을 가진 전선

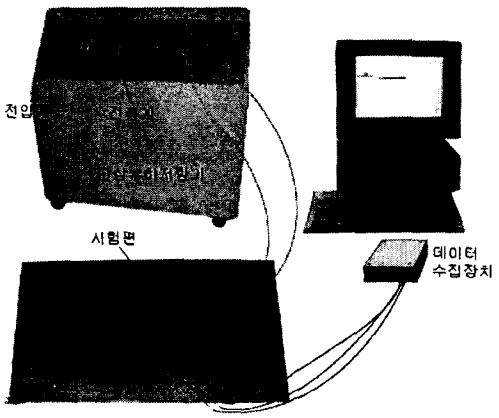

Fig. 3. 부하저항 실험장치

각 실험은 동일한 조건에 대하여 적어도 3개 이상의 시험편에 대하여 신뢰성 있는 데이터가 얻어질 때까지 반복 수행하였다. 각 부위에서의 열전대 온도는 실시간 그래프에서 값 변화가 거의 일어나지 않는 경우(steady-state)에 그 값을 기록하도록 하였다. 심선의 수가 2가닥 이상인 경우에는 연선간의 접촉을 확실히 하기 위하여 연선이 늘어나지 않도록 조심하면서 충분히 꼬아주었다.

4. 결과 및 분석

Table 1은 공급 전류를 20A로 일정하게 유지한 상태에서 전선 단면결함을 나타내는 심선의 가닥수(N)와 결함길이(L)를 각각 변화시켜가며, 전선 각 부위에서의 온도를 측정하고, 그 값을 표로 나타낸 것이다. 표의 결과치는 시험조건에 따라 적어도 신뢰성이 있다고 판단되는 3개 이상의 데이터를 평균하여 나타낸 평균값으로 하였다.

Table 1. 실험 결과값(평균값)

L[㎜]	가닥수[N]	T1 [℃]	T2 [℃]	T3 [℃]	I [A]	D [mm]	비고
5	1	57	35	24	20	0.24	일부단선
5	2	32	28	24	20	0.34	
5	3	31	28	24	20	0.48	
5	5	27	25	24	20	0.54	
10	1	105	42	25	20	0.24	일부단선
10	2	43	33	25	20	0.33	
10	3	32	29	24	20	0.48	
10	5	28	26	24	20	0.54	
20	1	175	54	25	20	0.24	단선
20	2	69	41	26	20	0.34	
20	3	44	34	25	20	0.47	
20	5	31	29	24	20	0.53	
30	1	261	63	25	15	0.24	단선
30	2	119	50	26	20	0.33	
30	3	54	35	24	20	0.47	
30	5	34	29	24	20	0.52	

Fig. 4는 과부하 모델(N=2, L=5, 30mm)에 있어서 전선 결함부 중앙에서부터의 거리에 따른 온도분포를 나타낸 것으로, 결함부에 발열이 집중되고 있음을 나타내고 있다. 이론적 모델에서의 열전달 해석에 의한 온도분포곡선과도 매우 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 특정 모델(N=2, L=30 mm)에 대하여 전류값을 점차 증가시키면서 각 부위에서의 발열온도를 관찰한 것으로, 전류가 증가함에 따라 결함부 중심온도와 피복 절단부의 온도가 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이러한 경향은 결함부의 길이가 길수록, 심선 가닥수가 작을수록 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 관찰되었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 전류를 20A로 일정하게 공급하였을 때, 결함부 중앙 및 피복재에서의 발열온도는 결함부 심선의 가닥수와 결함길이에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 심선의 가닥수가 감소할수록 발열온도는 급격히 증가하였으며, 또한 결함길이에는 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 결함길이가 아주 작은 경우에는 심선의 가닥수가 감소하더라도 결함부 중앙(T1) 및 피복재(T2) 모두 발열온도의 증가 정도가 미미한 수준인 것으로 나타났다.

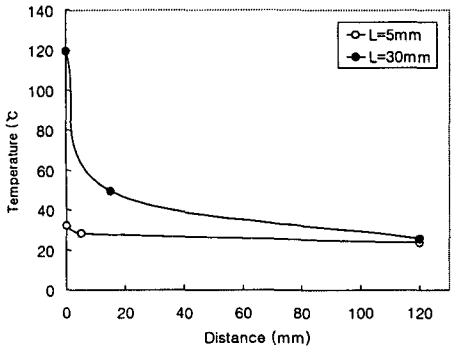

Fig. 4. 거리에 따른 온도분포곡선 (20A, N=2)

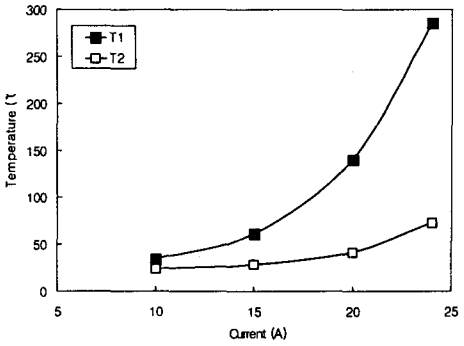

Fig. 5. 전류값 변화시의 결함부 온도변화 (N=2, L=30mm)

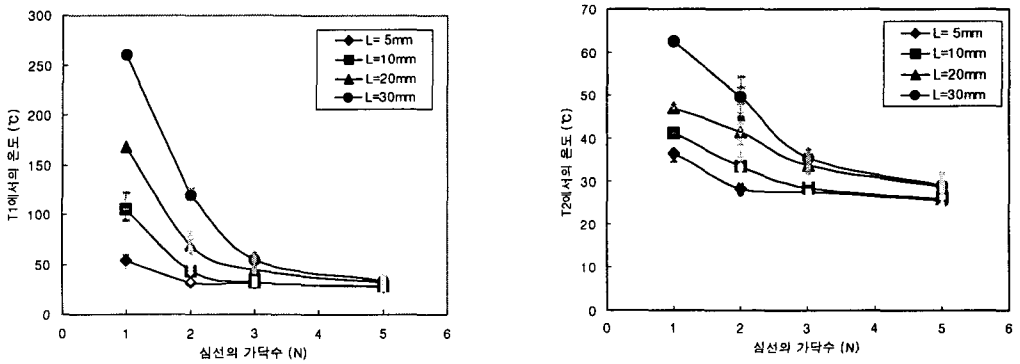

Fig. 6. 결함부 심선가닥수에 따른 온도변화 곡선

심선이 2 가닥 이상인 경우에는 결함길이가 길어지더라도 구리선은 적열만 될 뿐 시간이 경과하여도 끊어지지는 않았다. 이때 피복 절단면의 최대온도도 약 50℃ 이하이었으며, 용융의 흔적은 관찰되지 않았다. 이는 본 절연 피복재의 온도상승한도가 약 50℃인 것으로 볼 때 별다른 물성의 변화가 일어나지 않는 것으로 볼 수 있다. 그러나 심선 가닥수가 1가닥일 경우에는 결함길이에 관계없이 20A 시험전류에서 피복 절단부가 용융되고 결함부 구리선도 적열되면서 짧은 시간내에 단선이 되는 현상이 관측되었다. 이때 결함부 구리선의 적열온도는 같은 조건에서도 시험편에 따라 큰 차이를 보였는데, 이는 결함부 구리선의 발열량이 너무 커서 온도 증가속도가 매우 빠르기 때문에 열전대가 미처 그 온도를 정확히 감지하지 못하였기 때문으로 추정되었다.

이상의 실험결과로 미루어 볼 때, 결함단면을 가진 전선에서의 발열 및 발화 과정은 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 전선에서 일정 전류가 흐를 시의 발열량은 저항에 비례하는데, 저항은 재질의 전기저항과 전선길이에 비례하고 단면적에는 반비례한다. 이때 결함단면을 가진 전선에서는 무결함부위에서의 저항은 매우 작고, 대신 결함부에서의 저항은 단면적 감소로 매우 커지게 되므로 발열량도 그만큼 많아지게 된다. 또한 결함부의 길이가 커지게 되면 발열량은 더욱 증가하게 되고, 이때 결함부에서 발생된 열은, 보다 낮은 온도인 비결함부의 구리선과 피복재를 통한 열전도와 각 노출 표면에서의 주

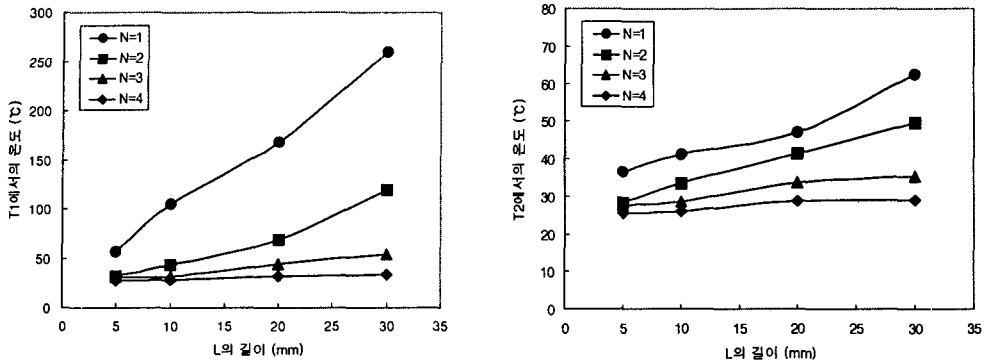

Fig. 7. 결함길이에 따른 온도변화 곡선

변공기와의 열대류 방식으로 이동하게 되며, 결함부에서의 발생열의 생성속도가 주변으로의 열전달 속도보다 빠를 경우 결함부 구리선에서의 온도가 상승하게되고 이는 점차 피복재의 온도도 상승시키게 된다. 이때 심선과 접촉하고 있는 피복재의 온도가 더욱 상승하게 되면 피복재가 용융되면서 가연성가스가 분출하게 되고, 만약 구리선의 단락이나 합선에 의한 아크 발생 등의 착화원이 있을 경우에는 발화로 이어지게 된다.

결함전선에서의 발열온도가 너무 크게 되면, 구리선은 적열되면서 곧바로 단선이 되는데, 이 때의 온도는 대개 구리 재질의 용융온도(약 1100℃)보다 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 따라서 이는 구리 재질의 용융에 의한 단선이라기 보다는 구리 재질의 열화 정도가 온도상승에 따라 급격히 심화되면서 전선에 작용하는 장력 및 자중 등에 의한 내부응력을 감당하지 못하여 단선되는 것으로 추정된다. 이 경우 피복재의 용융은 대부분 일어나지 않는 것으로 관측되어 오히려 발화 가능성이 낮은 것으로 분석되었다. 다만, 결함부에도 피복재가 덮여 있게 되면, 구리선의 고온 발열로 인하여 피복재의 용융 및 발화가 진행될 수 있다고 본다.

5. 결론

본 논문에서는 부분단선, 단자에서의 접촉불량 등으로 인한 과부하로 전기화재가 발생하기까지의 과정과 화재발생 메카니즘을 단순화된 모델을 통하여 실험적으로 고찰하였다. 그 결과

1. 전선 발열온도는 결함부의 단면적과 결함길이, 공급전류값에 크게 영향을 받으며, 심선가닥수가 작아질수록, 결함길이가 길어질수록, 그리고 전류값이 커질수록 더욱 급격한 온도상승이 발생하였다.

2. 결함전선이 저발열의 과부하인 상태에서는 피복재의 용융 및 가연성 가스 발생이 심선의 적열에 의한 단선보다 먼저 발생하며, 이는 단락이나 합선 등에 의한 아크 발생 시 발화의 원인이 될 수 있는 것으로 관찰되었다. 반면, 고발열의 과부하 상태에서는 피복 용융은 발생하지 않고 구리선의 단선이 먼저 발생하는 것으로 관찰되었다.

3. 심선의 단선은 구리재질의 용융온도 훨씬 이하에서 발생하였으며, 이는 심선 재질의 열화 정도가 온도상승에 따라 급격히 심화되면서 구리선에 작용하는 장력 및 자중

등에 의한 내부응력을 감당하지 못하여 단선되는 것으로 추정되었다.

참고문헌

1. 행정자치부 소방국, 2000 화재 통계 연보, (2001)
2. 한국전기안전공사, "배선기구 탄화 및 발열에 의한 전기화재 위험성 연구", (1996)
3. 양승용, 김응식, 안형일,"전선접촉 단면적 변화에 따른 열분포 해석", 한국산업안전학회 2000 춘계학술논문집, (2000)
4. Frank Kreith, Mark S. Bohn, "Principles of heat transfer", Info Access & Distribution, Singapore, (1993)
5. J.P. HOLMAN, "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Co., New York, (1992)