Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 21, No.10, pp. 176~180 December 2007 논문 21-10-23

전선의 용단전류 특성에 근거한 단락과 과부하 판별에 관한 연구

(A Study on Discrimination between Short-Circuit and Overload based on the Characteristics of the Fusing Current of an Electrical Wire)

송길목* · 노영수**
(Kil-Mok Shong · Young-Su Roh)

요 약

단락 또는 과부하에 의하여 전선에 과전류가 흐를 경우 전선은 용단되고 이것은 전기화재를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 단락과 과부하를 판별하기 위하여 전선의 용단전류 특성을 연구하였다. 실험에서는 여러 가지 직경의 나전선에 프리스 식에 근거하여 정한 용단전류를 공급하고 용단시간을 측정하였다. 실험 결과 측정한 용단전류는 온더동크 식을 잘 만족하였다. 측정결과와 국제전기기술표준에서 제시하는 단락전류를 비교하여 나동선에 대한 단락전류를 결정하는 변수 k값이 약 300임을 보였다. 이 값에 근거하여 5초 이내에 단락되는 전선의 용단전류를 직경의 함수로 표현할 수 있다. 결과적으로 이 용단전류의 식은 단락과 과부하를 판별할 수 있는 기준을 제공한다.

Abstract

In the case that an overcurrent flows through an electrical wire due to short-circuit or overload, the wire can be fused, thereby causing an electrical fire. In the present article the characteristics of the fusing current of an electrical wire have been studied to discriminate between short-circuit and overload. In the experiment, the fusing time was measured as the currents determined by Preece's equation were supplied to bare wires of various diameter. As the results of experiment, the measured fusing currents well satisfied the Onderdonk's equation. By comparing the measured results and the short current the IEC recommends, it is shown that the variable to determine the short current for a bare copper wire, k is approximately 300. The fusing current of an electrical wire which becomes a short circuit within 5sec can be expressed as a function of diameter based on the value of k. Consequently, the equation for the fusing current provides a criterion to discriminate between short-circuit and overload.

Key Words : Eletrical fire, Overcurrent, Onderdonk's equation, Short-circuit

* 주저자 : 전기안전연구원 설비안전연구그룹
** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부
Tel : 031-580-3065, Fax : 031-580-3070
E-mail : natasder@kesco.or.kr
접수일자 : 2007년 10월 18일
1차심사 : 2007년 10월 22일
심사완료 : 2007년 10월 31일

1. 개 요

최근 전기화재로 인한 인적 물적 피해의 심각성이 알려짐에 따라 전기화재에 대한 사회적 관심이 증대하고 있다. 전기화재는 단락, 과부하, 누전, 지락 등

과 같은 다양한 전기적 원인으로 인하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 행정자치부에서 매년 화재발생 원인을 분석한 통계에 따르면 전체 전기화재의 단락에 의한 경우는 약 64.5[%], 과부하는 약 8.6[%]의 점유율을 가지는 것으로 보고되고 있다[1].

본 논문에서는 단락 또는 과부하에 의하여 전선이 용단되는 것을 판단하기 위하여 전선의 용단전류와 용단시간의 상관관계에 대하여 논의한다. 단락이나 과부하로 인한 전기화재의 발생 과정을 간략히 언급하면 전선에 과전류가 흐르는 경우 전선 내부에서 발생되는 줄열(Joule's heat)과 대기 중에 존재하는 산소의 반응으로 인하여 전선은 산화되어 용단되는데 이 때 발생된 불꽃이 인접한 물체에 인화되어 화재가 일어난다[2]. 일반적으로 단락의 경우 과부하보다 전류가 상대적으로 매우 크고 전선의 용단시간도 짧기 때문에 전기화재의 원인을 규명하는데 용단전류 및 시간의 상관관계는 매우 중요한 근거가 될 수 있다[3].

본 논문에서는 용단 전류 및 시간의 정량적 관계를 연구하기 위하여 단락과 과부하 상태에서 전선을 용단시킬 수 있는 실험 장치를 구성하고 여러 가지 조건에서 실험을 수행하여 화재의 원인으로서 단락과 과부하를 구별할 수 있는 결과를 도출하였다. 그리고 신뢰성을 확보하기 위하여 실험 결과를 단락전류와 관련하여 일반적으로 통용되고 있는 기존의 실험식 그리고 국제전기기술위원회(IEC)에서 제안된 식과 비교하였다.

2. 전선의 용단전류에 관한 특성식

전선의 용단을 결정하는 주요 인자는 전류, 온도 그리고 습도인 것으로 알려져 있다. 전기회로 상에 일정한 전압이 인가된 상태에서 과부하 혹은 단락으로 인하여 전선에 과전류가 흐르지만 차단장치가 작동하지 않는 경우 전선은 가장 취약한 부분부터 줄열에 의해 산화 및 용융되다가 결국 절단된다. 이 현상과 관련하여 프리스(W.H. Preece)와 온더동크(I.M. Onderdonk)는 실험을 통하여 용단전류에 관한 식을 만들었고, IEC60364 규정에서도 전선의 과전류 특성에 관하여 일부 언급되어 있다.

2.1 프리스의 실험식

프리스의 실험식은 용단전류를 다음과 같이 용단계수와 직경의 1.5제곱에 의한 곱으로 정의하고 있다[4].

$$I_f = aD^{1.5} \tag{1}$$

여기서 I_f는 용단전류, a는 용단계수, 그리고 D는 전선의 직경(단위 : [mm])을 나타내며 용단계수는 도전 재료에 따라 그 값이 다르다[5]. 실험에서 이용된 전선의 재질인 구리의 경우 용단계수는 80이다. 구리의 용융온도(1,083[℃])는 용단계수를 결정하는 중요한 인자 중 하나로 알려져 있다. 그러나 프리스식에서는 전선의 종류와 직경만이 용단전류를 결정하는 인자이므로 주변온도, 습도 등과 같은 인자는 고려되지 않는다. 따라서 용단전류가 용단시간, 주변온도, 용융온도 등에 의해 영향을 받을 경우 프리스식은 이용될 수 없다.

2.2 온더동크의 실험식

프리스는 용단전류의 정의에 개략적인 재료의 특성만을 반영하였으나 온더동크는 이와 더불어 용단시간, 주변온도, 재료의 용융점 등을 변수로 취급하여 용단전류를 결정하는 실험식을 제시하였다. 이 실험식은 IEEE Std. 1048-2003(IEEE guide for protective grounding of power lines)에 설명되어 있으며[6], 이 식이 의미하는 중요한 점은 구리 도체의 용단전류와 용단시간에는 상관관계가 존재한다는 것이다. 온더동크의 용단전류에 대한 실험식은 다음과 같이 정의된다.

$$I_f = S \times \sqrt{\frac{\log[(T_m - T_a)/(234 + T_a) + 1]}{33t}} \times 1.972 \times 10^3 \tag{2}$$

S는 전선의 단면적(단위 : [㎟]), T_m는 금속의 용융점, T_a는 주변온도, t는 용단시간(단위 : 초)을 의미한다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 단면적이 증가할수록 일정한 용단시간에서 용단전류의 값이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

2.3 IEC의 단락 시간과 전류

국제전기기술표준(IEC 60364-433 및 434)에서는 과부하 보호 및 단락보호에 대해 자세하게 설명하고 있다[7]. 이 규정에 따르면 단락되어 용단될 때까지의 단락지속시간(t)은 다음과 같이 단락전류를 결정하는 변수로 취급된다.

$$I_f = k(\frac{S}{\sqrt{t}}) \quad (3)$$

여기서 단락지속 시간은 5초 이내로 정의되고 I_f는 단락전류, S는 전선의 단면적을 나타낸다. k는 전선의 재질에 따라 정해지는 상수이데, 예를 들면, 비닐절연 동전선과 비닐절연 알루미늄 전선의 k값은 115와 74이다. 그러나 이 규정에서는 단면적이 10[㎟] 미만의 전선, 5초를 초과하는 단락지속시간, 서로 다른 종류의 전선 접속, 나전선 등에 대한 k값은 아직 정의되지 않은 상태이다.

3. 실험방법

과전류가 전선에 흘러 용단되는 과정을 규명하기 위하여 제작한 실험장치는 그림 1에 도시된 바와 같이 챔버, 대전류공급장치, 측정장치 등으로 구성되어 있다. 온도 및 습도와 같은 주변 환경에 의한 영향을 최소화하고 안전한 실험을 수행하기 위해서는 챔버의 사용은 필수적이다. 챔버의 길이, 폭, 높이는 각각 200[mm], 100[mm], 100[mm]이고 외함은 아크릴과 베이크라이트로 제작되었다. 전선 시료는 황동으로 제작된 전선고정장치로서 접속부의 접촉저항에 대한 영향을 적게 받을 수 있도록 제작되었다. 전선에 일정한 전류를 공급하는 대전류공급장치(ODEN 1X, Denmark)의 최대 출력전류는 교류 60[Hz] 2,500[A]이다. 이 장치는 자체적으로 전류의 크기와 공급시간을 측정할 수 기능을 가지고 있다.

실험에서는 저전압 연동선을 전선 시료로 이용하였는데 절연피복이 탄화되면서 발생할 수 있는 온도오차를 줄이기 위해 절연피복을 제거하였다. 사용한 전선의 직경은 1.2[mm], 1.6[mm], 2.0[mm] 등과 같이 다양하며, 길이는 200[mm]이다. 시료로 이용된 전선의 양끝 25[mm]의 부분은 접속장치에 의해 고정하여 실험대상은 150[mm]이다. 실험실 온도와 습도는 각각 20[℃]와 50[%]로 유지하였다. 프리스의 실험식에 의하여 구한 용단전류를 기준하여 이 값의 1배, 1.5배, 2배의 크기의 전류를 용단전류로 선택하여 전선에 공급하였다. 예를 들면 직경 1.2[mm]의 전선의 경우 식 (1)에 의하여 $I_f \approx 105$[A]이므로 전선에 공급된 용단전류는 105±5[A], 157±5[A], 210±5[A] 등이 된다. 이와 같은 방식으로 전선에 전류를 공급한 상태에서 전선이 용단될 때까지의 시간을 측정함으로써 주어진 전선의 용단 전류와 시간의 상관관계를 분석할 수가 있다. 실험결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 동일한 조건의 실험을 10회 이상 반복한 후 측정치의 평균값을 구하였다.

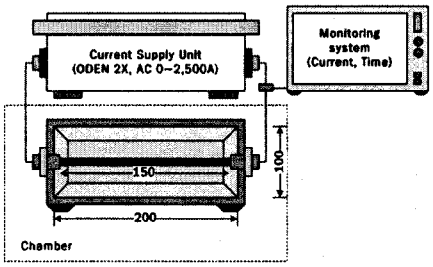

그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

4. 실험 결과 및 분석

4.1 용단시간과 용단전류

그림 2는 전술한 실험방법에 의해 측정된 용단시간에 대한 용단전류의 변화를 나타내는 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 직경 1.2[mm] 전선의 경우 용단전류가 105[A], 157[A], 210[A]일 때 용단시간은 각각 9.14초, 4.70초, 2.10초이다. 또한 직경 1.6[mm] 전선의 경우 용단전류가 161[A], 240[A], 320[A]일 때 용단시간은 각각 18.94초, 6.23초, 3.41초이다. 끝으로, 직경 2.0[mm] 전선의 경우 용단전류가 226[A], 339[A], 452[A]일 때 용단시간은 각각 21.75초, 6.80초, 4.31초로 나타난다. 이와 같은 결과를 살펴보면 직경에 관계없이 용단전류가 클수록 용단시간은 짧아지고 두 인자에 비선형적인 관계가 존재한다는 것

을 알 수 있다. 전선의 직경이 미치는 영향에 대하여 언급하면, 직경이 클수록 동일한 용단시간에서 더욱 큰 용단전류가 필요하다는 것을 알 수 있다. 전선의 직경이 클수록 용단에 필요한 줄열이 더욱 많아야 하기 때문에 이것은 당연한 결과이다.

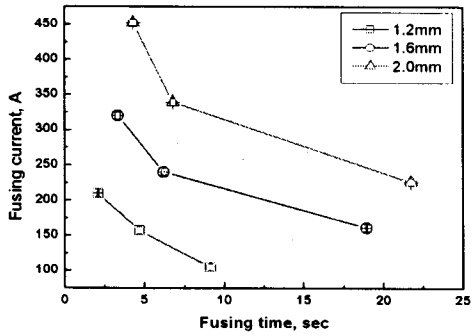

그림 2. 용단시간 대 용단전류 그래프
Fig. 2. The graph of fusing time vs. fusing current

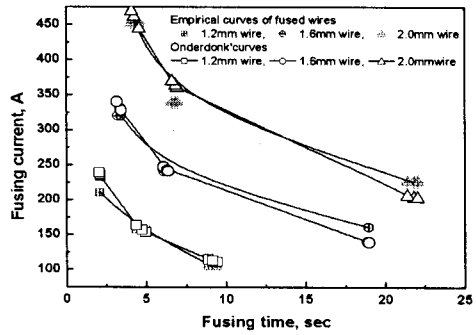

그림 3. 측정치와 온더동크 식과의 비교
Fig. 3. Comparison of measured values with Onderdonk's equation

4.2 온더동크 식과의 비교

그림 3과 같이 실험결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 그림 2에 도시된 측정치를 온더동크 식과 비교하였다. 식 (2)에서 용단될 때의 온도(T_m)는 구리의 용융온도인 1,083[℃]로 가정하고 주변온도(T_a)에는 최초의 실험 조건인 20[℃]를 적용하였다. 용단시간은 그림 2에서 정의한 것과 같다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 직경에 관계없이 모든 나전선의 용단시간과 용단전류의 관계는 온더동크 식과 거의 유사하게 나타난다. 이것은 측정된 용단전류와 용단시간은 온더동크 식을 거의 만족한다는 것을 의미한다.

4.3 국제전기기술표준과의 비교

그림 2와 3은 실험에서 측정한 용단시간과 용단전류는 프리스와 온더동크 식을 만족한다는 것을 보여준다. 그러나 이와 같은 용단 시간과 전류의 관계는 전선을 용단시키는 원인으로서 단락과 과부하를 구분할 수 있는 정보를 제공하지 못하고 있다. 그러므로 국제전기기술표준에서 제시한 식 (3)에 나타난 단락지속시간을 이용하여 단락 혹은 과부하에 의한 용단전류의 관계식을 도출하였다. 이를 위하여 우선 국제전기기술표준에서 제시하는 식 (3)에서 상수값을 찾아낼 필요가 있다.

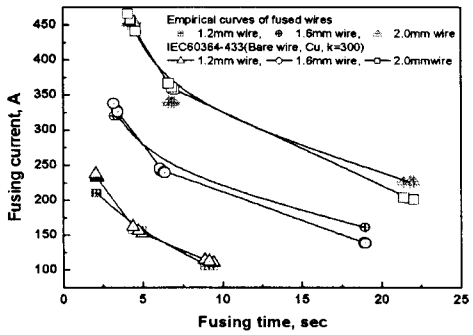

그림 4. 실험식과 IEC에서 제안된 식과의 비교
Fig. 4. Comparison of empirical curves with the equation recommended by the IEC

그림 4는 실험에서 구한 용단시간과 용단전류의 측정값을 식 (3)을 이용하여 계산한 용단전류와 비교하였다. 곡선으로 국제전기기술표준에서 제시하고 있는 단락전류식과 비교하여 k값을 산정하면 일치하는 지점이 300이 적정한 것으로 판단된다.

그림 4에서 산정된 k(=300)값을 근거로 하여 세 가지 직경의 나전선에 대하여 5초 이내에서 전선이 용단될 때의 전류를 그림 5에 나타낸다. 이것은 국제전기기술표준에서 제시한 5초 이내의 단락조건을 만족하는 용단전류로서 그림에서와 같이 하나의 1차식으로 표현이 가능하였다.

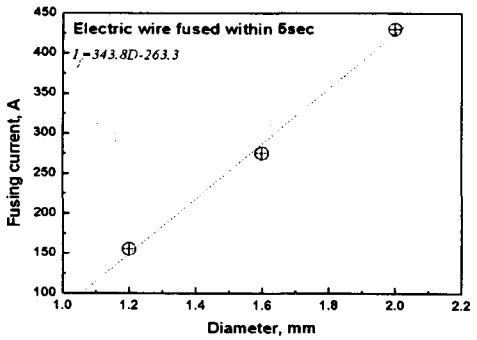

그림 5. 직경에 대한 5초 이내에 용단된 전선의 용단전류
Fig. 5. Fusing current of the electric wire fused within 5sec with respect to diameter

그림 5에서 그 평균치를 적용한 용단전류의 식은 다음과 같다.

$$I_{f-5\sec} = 343.8D - 263.3 \quad (4)$$

식 (4)에서 $I_{f-5\sec}$는 5초 이내에 용단되는 단락전류를 나타내며, D는 전선의 직경을 나타내는 것으로 전선의 직경에 비례하여 용단전류가 증가하였다. 식 (4)에서 나타낸 직선을 중심으로 좌분면은 단락조건을 의미하며, 우분면은 과부하 조건을 의미한다. 전선의 직경이 2.0[mm]에서 5초 이내에 용단되는 전류는 424.3[A]로 계산되었다. 이를 국제전기기술표준에서 제시하는 단락전류의 값과 비교하면, k의 값을 300으로 한 경우 단락전류는 약 421.3[A]인 것으로 계산되므로 약 3[A]의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 본 실험에 의해 만든 식을 이용하였을 경우 5초 이내에 용단되는 전선의 단락전류로서 구분하고자 하는 용단전류의 값을 계산치로 구하는 것이 가능하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 전기화재 원인 중 하나인 단락 또는 과부하로 인해 발생되는 과전류에 대한 특성을 분석하였다. 실험에 사용된 과전류의 크기는 프리스식에 의해 계산되었다. 용단시간과 용단전류의 상관관계는 측정치와 온더동크에 의해 계산된 식으로 비교되었다. 본 실험의 측정치는 국제전기기술표준에서 제시한 단락전류식에서 k값이 300인 것으로 산정하였다. 이로써 국제전기기술표준에 근거한 나전선의 단락조건에 따른 특성을 검토하여 단락계수와 단면특성의 관계를 입증하였다. 이러한 결과를 근거로 하여 제시된 식으로부터 전선이 5초 이내에서 용단될 때의 단락조건과 5초를 초과하였을 때의 과부하 조건을 판별하는 것이 가능하였다. 따라서 단락으로 규명할 수 있는 용단전류의 상관관계를 전선의 직경에 따라 규명하였다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

References

[1] 송길목, 최충석, 김향곤, 김영석, "AC 전류에 의해 용융된 나전선의 발열 특성", KIIEE Vol.20, No.1, pp.77~84, Jan. 2006.
[2] John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation', 5th edition, Prentice Hall, pp.305, 2002.
[3] Knecht, S., Gonzalez, B., Sieber, K., "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", ITherm, Vol.5, 1996.
[4] W. H. Preece, "On the heating effects of electric currents" , Proc.Royal Soc., vol. 36, pp.464~471, 1884.
[5] IEC 60943, "Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals", 2nd edition, 1998.
[6] IEEE Std. 1048-2003, "IEEE guide for protective grounding of power lines", 2003.
[7] IEC 60364-4-42, "Electrical installations of buildings part 4: Protection for safety - Chapter 42: Protection against thermal effects", 1980.

◇ 저자소개 ◇

송길목 (宋佶穆)
1967년 3월 31일생. 1994년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원.
Tel : 031-580-3065, Fax : 031-580-3070
E-mail : natasder@kesco.or.kr

노영수 (盧永秀)
1961년 4월 1일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1996년 한국전기연구원 연구원. 2001년 미국 캘리포니아주립대(Davis) 응용과학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.
Tel : (02) 820-0663, Fax : (02) 817-7961
E-mail : yroh@ssu.ac.kr