

[Research Paper]

## 과전류에 의해 단락된 전선의 결정성장 특성에 관한 연구

박진영<sup>†</sup> · 방선배 · \*고영호

한국전기안전공사, \*전북대학교

### Study of the Characteristics and Crystal Growth of a shorted Wire by Overcurrent

Jin-Young Park<sup>†</sup> · Sun-Bae Bang · Young-Ho Ko<sup>\*</sup>

Korea Electrical Safety Corporation(KESCO), \*Chonbuk National University

(Received November 02 2017; Revised November 26 2017; Accepted December 06 2017)

#### 요 약

전선에 정격이상의 과전류가 흐르게 되면 온도가 상승하고 전선피복이 열화되어 단락현상이 발생한다. 과전류의 크기에 따라 전선의 온도 상한치는 변화하며, 각각의 온도 상한치에서 단락이 발생할 때, 단락온도와 전선표면온도 간 온도차로 인해 응고과정에서 냉각속도 차이가 발생한다. 이때 용융단면에 형성되는 수지상 조직의 패턴특징이 상이하게 된다.

본 논문에서는 과전류 크기에 따라 변화하는 전선온도의 상한치를 측정하고, 이때 단락을 발생시켜 수지상의 2차 가지 간격(Dendrite Arm Spacing : DAS)을 분석하여 수치를 정량화 하였다. 실험결과, 과전류 크기가 커짐에 따라 전선온도의 상한치는 증가하였으며, 전선온도가 높아질수록 2차 가지 간격이 증가하는 것을 확인하였다.

#### ABSTRACT

If an overcurrent exceeding the rated value is applied to an electric wire, the temperature of the electric wire increases, and the electric wire covering deteriorates to cause a short circuit. The upper limit temperature of the wire varies according to the magnitude of the overcurrent. When a short circuit occurs at each upper temperature limit, a cooling speed difference occurs during the solidification process due to the temperature difference between the short circuit temperature and the wire surface temperature. At this time, the pattern characteristics of the dendritic structure formed on the molten cross section are different.

In this study, the upper temperature limit, which varied according to the overcurrent magnitude, was measured. At the time a short circuit occurred, the second branch spacing (dendrite Arm Spacing : DAS) of the dendrite was analyzed and the numerical value was quantified. The experimental results showed that the upper temperature limit increases with the magnitude of the overcurrent, and that the second branch spacing increases with increasing wire temperature.

**Keywords** : Overcurrent, Dendrite, Solidification, Copper, Short-Circuit, DAS, Dendrite Arm Spacing

### 1. 서 론

최근 10년간 전기화재는 전체화재의 20% 내외를 차지하고 있다. 이는 다른 선진국인 일본 14.4%, 미국 12.9%에 비해 인명 및 재산 피해 규모가 높은 편이다. 한국전기안전공사의 전기재해 통계분석에 따르면 '15년도 국내에서 발생한 총 화재는 44,435건이었으며, 이중 전기화재는 7,760건으로 전체 화재의 17.5%를 차지하였다. 전기화재로 인한 사망 36명, 부상 264명 등 총 300명의 사상자가 발생하였으

며, 재산피해는 약 723억 원이 발생하였다. 발화형태별 화재 건수를 살펴보면, 단락 3,770건, 과부하 793건, 트래킹 775건 순으로 발생하였으며 전기화재의 약 70%를 점유하였다.<sup>(1)</sup>

그중에서 과전류는 전선에 허용전류 이상의 전류가 흘러 과열되는 현상으로 전선 굵기 선정이 부적절하거나 비전문가가 규격 및 용도에 맞지 않는 전선을 사용하는 경우에 화재 발생률이 높아진다.

과전류에 의해 발생한 화재로 판단하는 근거는 다수의

방법이 있으나 그 중 금속조직학적으로 접근한 금속 조직 단면 분석이 가장 공신력이 있다. 이 방법은 전선의 조직단면에 수지상조직이 식별되는 경우, 과전류가 발생한 것으로 판단하는 것이다.<sup>(2,4)</sup> 하지만 아직 과전류의 발생 정도, 직접적인 발화원인 여부 등을 판단할 수 있는 정량적인 데이터는 없는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 과전류 크기별 전선 표면온도를 측정하고, 단락을 발생시켜 전선의 조직단면에 형성된 수지상의 2차 가지 간격을 분석하여 과전류 발생 정도를 정량적으로 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

## 2. 과전류에 의한 화재발생

### 2.1 과전류의 정의

전선의 온도가 상승하면 기계적 강도와 절연이 저하되기 때문에 전선의 굵기, 종류 등에 따라 최대전류를 정하고 있다. 이를 허용전류라 하며 전선의 물리적 성질, 시설상태 및 절연피복의 허용온도에 따라 값이 결정된다. 전선 이외의 전기부품, 전기기기에서도 정격전류, 정격전압 등을 지정하여 사용하고 있다. 이 허용전류 또는 정격전압, 정격전류 등의 값을 초과하여 사용할 때 과전류가 발생했다고 한다.<sup>(5)</sup>

### 2.2 줄열(Joule heat)의 발생

전류가 흐르는 전선에는 저항으로 인한 열이 발생한다. 그 원인은 원자(입자)가 전선을 통해 이동하는 자유전자와 충돌하여 에너지를 전달받고 열 진동하기 때문이다. 열 진동은 열에너지를 발생시키는데 이를 줄열이라 한다. 줄열  $I^2R$ 의 에너지는 전류  $I[A]$ 가 흐를 때 저항  $R[\Omega]$ 이 작용하여

1초 동안에 발생하는 열에너지로 정의 한다.

$$H = I^2 R [J] \tag{1}$$

여기서 H는 줄열, I는 전류, R은 저항, t는 시간(s)을 의미한다.

저항은 전선의 단면적이 작아지면 커지고, 단면적이 커지면 감소한다. 따라서 같은 크기의 전류가 흘러도 단면적이 작으면 줄열이 더 많이 발생하게 된다. 즉 전선의 굵기를 허용전류보다 작은 것을 선정하면 큰 줄열이 발생하여 전선 피복이 탄화되고 단락이 발생하게 된다.

### 2.3 전기적 단락 현상

전선의 절연파괴로 이중 극의 전선이 접촉하면 저항이 0에 가까운 상태로 되어 순간 큰 전류가 흐르게 되는데 이를 단락현상이라고 하며 스테이플, 못 등의 도체를 매개로 단락이 발생할 수 있다. 단락 시 2,000~3,000 °C 이상의 고열 발생으로 전선이 녹아 용융흔이 형성된다. 단락으로 인해 발생하는 아크 플래시(arc flash)는 아주 큰 에너지를 갖고 있어 가연물을 착화시켜 화재를 발생시킬 수 있다.<sup>(6)</sup>

### 2.4 과전류에 의한 단락발생 메커니즘

전선에 전류가 흐르면 줄열이 발생하는데 정상상태에서는 Figure 1(a)와 같이 발열과 방열이 평형을 이루어 온도가 상승하지 않으나 기준치를 초과하는 전류가 흐르게 되면 발열이 심해져 (b)와 같이 전선 내부 피복이 변형되기 시작한다. (c)와 같이 지속적인 발열에 의해 내부피복의 변형은

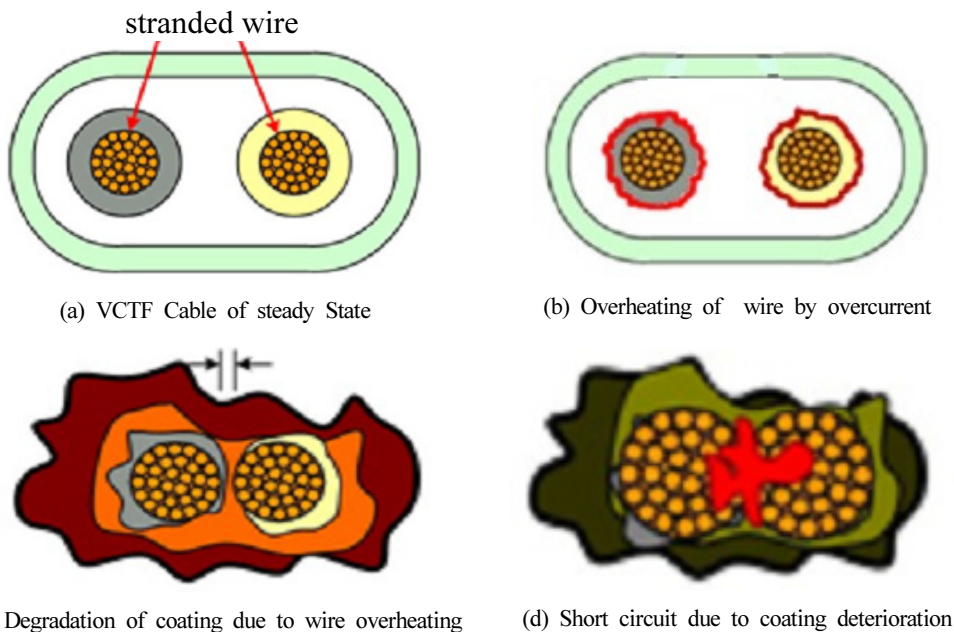


Figure 1. Mechanism of short circuit caused by overcurrent.

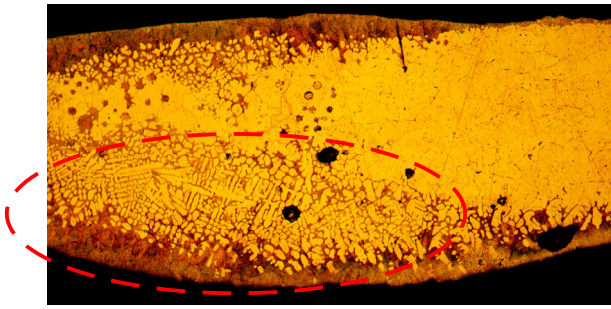


Figure 2. The dendritic Frame identified in the shorted wire.

더욱 심해지고 외부피복까지 변형되기 시작하여 전선 간 간격이 좁아진다. 결국 (d)와 같이 피복의 절연이 파괴되어 단락이 발생한다.

### 2.5 과전류 전선의 조직단면 특성

과전류에 관한 조직단면 분석 연구결과에 의하면 과전류가 발생한 전선에서는 Figure 2와 같이 수지상 조직이 나타나는 것을 알 수 있다.<sup>(4-6)</sup> 이러한 수지상 조직의 형성 이유는 용단된 구리가 응고될 때, 불순물의 농도, 과냉에 따른 냉각속도 변화 등에 의해 구리 또는 산화구리(Cu<sub>2</sub>O) 초정이 석출되기 때문이다.

## 3. 금속의 조직단면 패턴의 특징

### 3.1 금속의 과냉

금속의 과냉(supercooling)이란 액상금속이 응고할 때 평형응고온도보다 낮은 온도에서도 액체 상태를 유지하는 현상을 말하며, 평형응고온도와 과냉온도 차이를 과냉도라고 한다(Figure 3의 빗금친 부분). 과냉은 금속 내 불순물 함유 여부에 따라 열적 과냉(thermal supercooling), 조성적 과냉

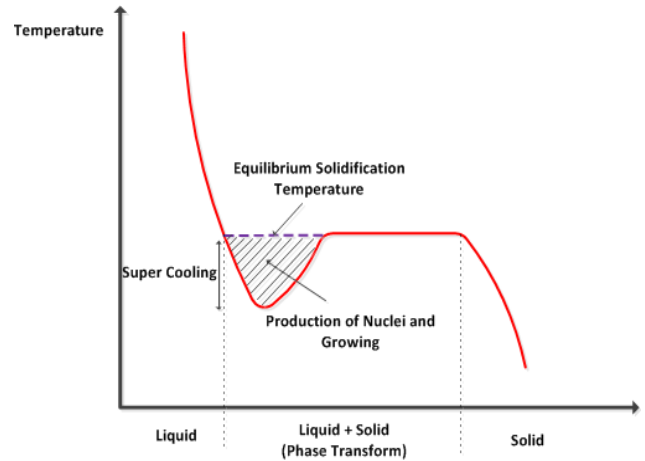
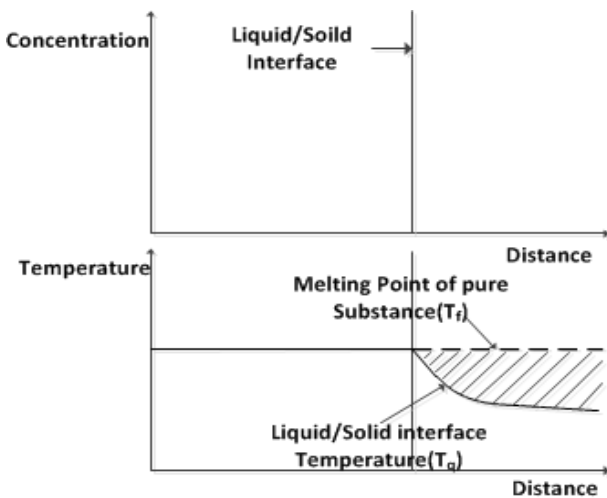


Figure 3. Supercooling and phase transformation curves.

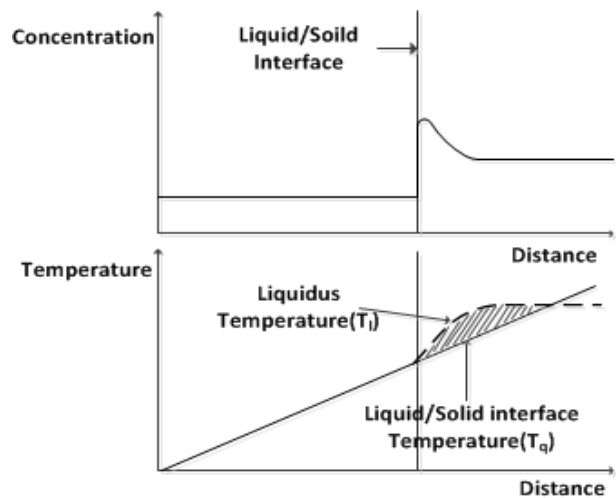
(constitutional supercooling)으로 나뉜다. 열적 과냉은 불순물이 없는 순금속일 때 고려하며, Figure 4(a)의 빗금친 부분과 같이 고체/액체 계면(Solid/Liquid interface)에서 액체 온도가 평형응고온도보다 낮을 때 발생한다. 조성적 과냉은 불순물을 포함하는 합금일 때 고려하며, Figure 4(b)와 같이 고체/액체 계면에서 액체로 확산되는 불순물 농도가 변화함에 따라 평형응고온도가 달라져 액체의 온도 보다 높은 구간(빗금친 부분)이 발생하게 된다. 이 부분에서 과냉이 발생하게 된다. 단락이 발생하여 용융된 구리전선은 공기 중의 산소와 결합하여 합금이 되므로 조성적 과냉을 고려해야 한다.<sup>(7-9)</sup>

### 3.2 핵 형성과 조직의 성장

과냉이 발생한 용융금속은 불안정하므로 안정한 상태로 변화하기 위해 주위에 있는 원자들과 결합하여 결정씨눈(crystal embryo)을 형성한다. 결정씨눈의 크기  $r$ 은 계면에



(a) Supercooling in pure Metals (Isometric solidification)



(b) Supercooling in alloys (Directional solidification)

Figure 4. Supercooling in pure metals and alloys.

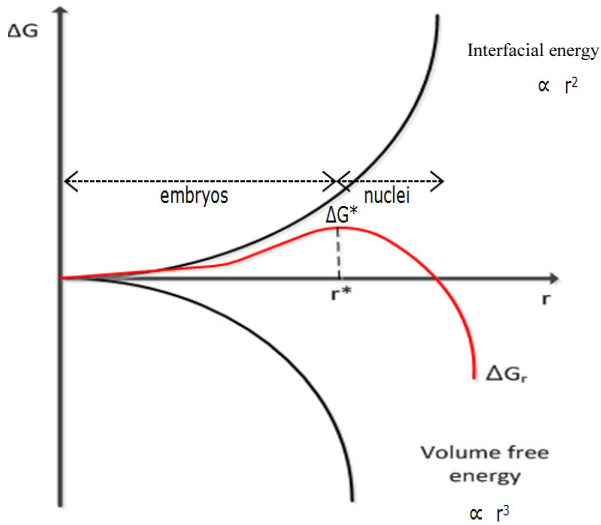


Figure 5. Free Energy Change when spherical Nuclei with radius  $r$  are nucleated.

너지 항과 체적 자유에너지 항의 합인 깁스(Gibbs) 자유 에너지 법칙에 의존한다.

$$\Delta G = \sigma 4\pi r^2 + \frac{\Delta g 4\pi r^3}{3} \quad (2)$$

여기서  $\Delta G$ 는 깁스자유에너지,  $\sigma$ 는 고체/액체 계면에너지,  $\Delta g$ 는 단위부피당 깁스 자유에너지이다.

$\Delta g$ 는 식(3)과 같이 과냉도( $\Delta T$ )에 비례한다.

$$\Delta g = -\Delta s_f \Delta T \quad (3)$$

여기서  $\Delta g$ 는 단위부피당 깁스 자유에너지,  $\Delta s_f$ 는 몰당 용해 엔트로피,  $\Delta T$ 는 과냉도이다.

$\Delta g$ 는  $\Delta T$ 의 함수로서,  $\Delta T$ 가 양(+)이면  $\Delta g$ 는 음(-)이 된다. 용융금속이 과냉( $\Delta T > 0$ )될 때,  $\Delta G$ 는 최댓값이 존재한다 (Figure 5의 적색 그래프).  $\Delta G$ 가 최댓값을 갖을 때, 크기가  $r^*$ 인 결정씨눈이 형성되고, 이를 임계 핵의 크기라고 한다.<sup>(10)</sup>

결정씨눈의 크기가  $r < r^*$ 이면, 씨눈이 용해되어 계의 자유에너지가 낮아지고,  $r > r^*$ 이면 씨눈의 크기가 성장하며 계의 자유에너지가 낮아진다. 씨눈의 크기가  $r > r^*$ 인 입자를 핵(nuclei)라고 한다. 핵이 형성되면 주변에 있는 입자들과 지속적으로 결합하여 성장하며, 불순물 농도, 냉각속도, 과냉도 등의 조건에 따라 수지상 조직(dendritic structure), 주상 조직(columnar structure) 등으로 변화한다.<sup>(11)</sup>

수지상 조직은 성장방향에 따라 등축응고(isometric solidification)와 방향성응고(directional solidification)로 나눌 수 있다. 등축응고는 Figure 6과 같이 발생한 핵을 중심으로 방사형으로 열 흐름이 발생하여 등축방향으로 핵이 성장하는 것을 말하며, 구형으로 성장하다 곧 불안정해져 수지상으로 변화하며 성장한다. 지속적으로 성장한 수지상은 서로 충돌하게 되고 결정립계를 형성하며 성장을 멈춘다. 방향성응고는 용융금속 내에서 특정한 방향으로 열 흐름이 발생할 때, 열 흐름의 반대방향으로 조직이 성장하는 것을 말하며 발생 과정은 Figure 7과 같다. 핵이 열 흐름의 반대 방향으로 성장하며 수지상 조직으로 변화하고, 일부는 주상조직으로 변화한다. 과전류에 의해 단락된 전선의 용융 부위에서는 전선표면(비용융부분)에서 용융금속 방향으로 조직이 성장하는 방향성응고가 주로 나타난다.<sup>(12)</sup>

### 3.3 DAS법의 정의 및 측정 원리

DAS란 Dendrite Arm Spacing의 약자로 Figure 8과 같이 수지상의 인접한 2차 가지 사이의 중심간 거리를 의미한다. 즉, DAS법이란 냉각속도에 따라 변화하는 2차 가지 간격의 크기를 측정하는 방법을 말한다. DAS는 냉각속도 (cooling rate)와 직접적인 관련이 있다. 냉각속도가 빠르면

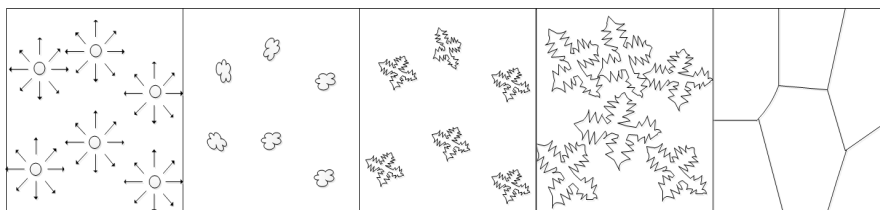


Figure 6. Growth process of isometric solidification.

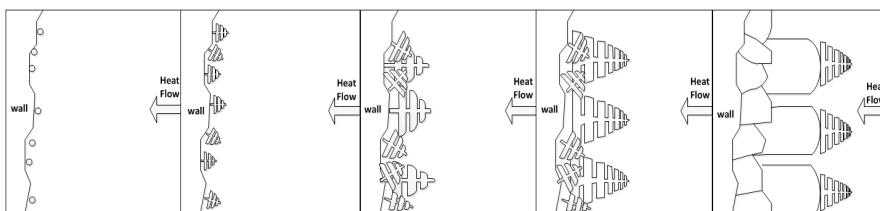


Figure 7. Growth process of directional solidification.

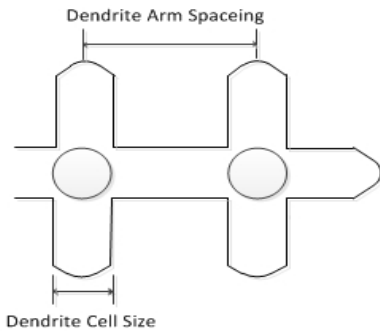


Figure 8. Name of dendrite part.

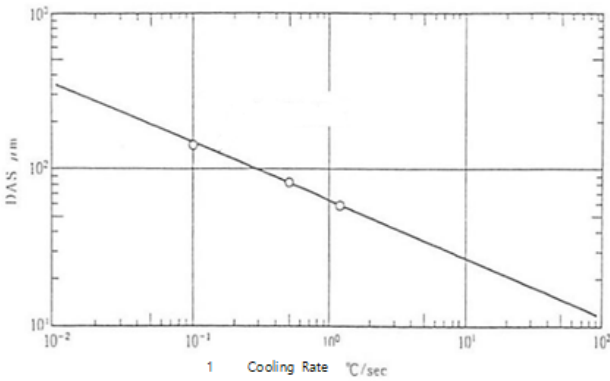


Figure 9. Relationship between cooling rate and DAS curve (Fe-25% Ni alloy).

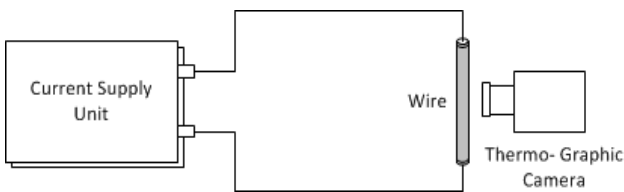


Figure 10. Construction diagram of wire surface temperature measurement.

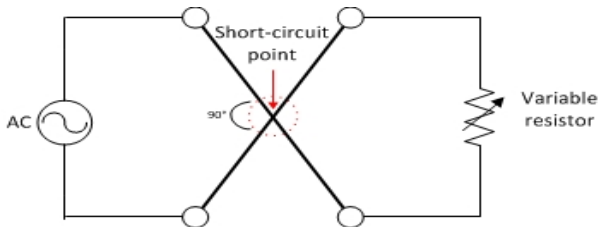


Figure 11. Short-circuit experimental diagram.

DAS의 간격은 좁아지고, 냉각속도가 느리면 DAS의 간격은 넓어진다. 예를 들어 Figure 9와 같이 Fe-25% Ni alloy인 경우, 냉각속도가  $10^{-1}$ 일 때, 약  $10^{2.1}$   $\mu\text{m}$ 이고,  $10^0$ 일 때는 약  $10^{1.5}$   $\mu\text{m}$ 이다. 냉각속도가 빠를수록 DAS의 간격이 좁아지는 것을 알 수 있다.<sup>(13,14)</sup>

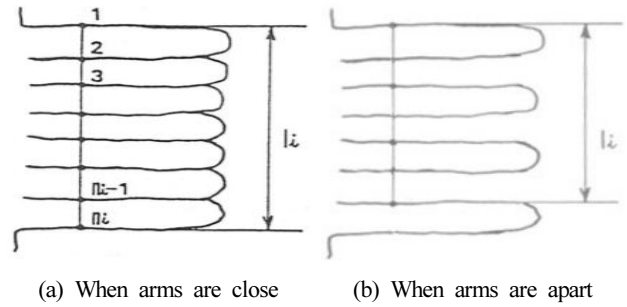


Figure 12. DAS measurement location and method.

## 4. 실험 구성 및 방법

### 4.1 실험 개요

실험은 과전류 크기에 따른 전선 온도분포 측정 실험, 온도 상한치에서의 단락실험, 조직단면을 통한 DAS 측정을 실시하였다.

온도분포 측정 실험은 Figure 10과 같이 대전류공급장치 (Oden 1X, Programma, Sweden)에 전선을 연결하고 30~50 A 크기의 전류를 5 A 단위로 변화시켜 열화상카메라 (T-335, Flir, USA)로 온도 상한치를 측정하고, 최고온도 도달시간을 확인하였다. 시료는 지름 0.8 mm, 길이 150 mm의 절연피복이 없는 전선(이하 나전선) 사용하였고 실험은 3회 반복하여 평균값을 계산하여 수치화하였다.

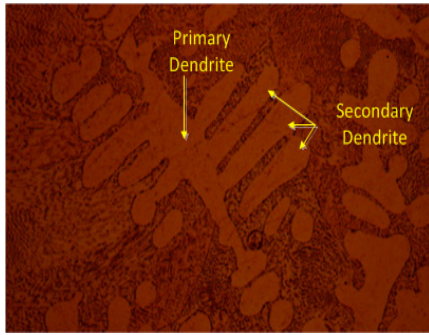
단락실험은 과전류 크기에 따라 온도 상한치에 도달한 전선을 Figure 11과 같이 단락발생장치로 단락시켜 용융흔을 생성하였다. 단락 발생이 용이하도록 두 전선을 90°의 각을 두고 교차시켰으며 같은 조건으로 2회 반복하였다.

조직단면 분석은 용융흔을 성형 → 연마 → 광택 → 에칭 과정으로 실시하였다. 금속단면분석을 위해 전선의 용단된 부분을 절단하고 성형기(Prontopress-10, Struers, Germany)로 직경 25 mm, 높이 20 mm의 시편을 제작하였다. 시편은 연마(Tegramin-25, Struers, Germany) 과정을 통해 표면의 일부분을 절삭하고 광택 처리한 후 에칭(etching)하여 금속현미경(Eclipse MA200, Nikon, Japan)을 이용하여 금속단면을 통해 수치상의 2차 가지 간격을 측정하였다.

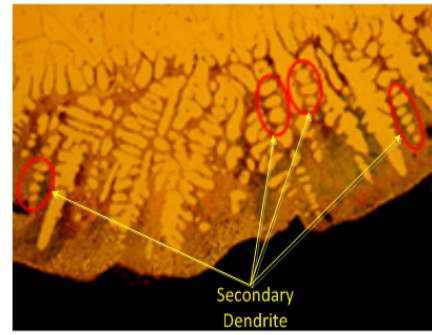
### 4.2 DAS법을 이용한 2차 가지 측정

#### 4.2.1 DAS법 측정 방법

Figure 12(a)와 같이 2차 가지가 밀집되어 있는 경우의 측정방법은 2차 가지로 판단되는 부분을 선택하고 식 (4)의 공식을 적용하여 가지 간 평균 간격을 계산한다. Figure 12(b)와 같이 2차 가지가 서로 떨어져있는 경우도 2차 가지가 밀접한 경우와 동일하게 계산한다. 측정할 수치상 2차 가지가 3개 이상 정렬되어 있는 부분을 선택하고 되도록 여러 위치를 측정한다.<sup>(15)</sup>



(a) when the primary dendrite is observed



(b) when the primary dendrite is not observed

Figure 13. Secondary dendritic definition measurement Site.

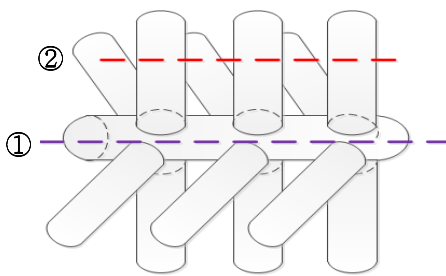


Figure 14. The measurement site of the dendritic branch in three dimensions.

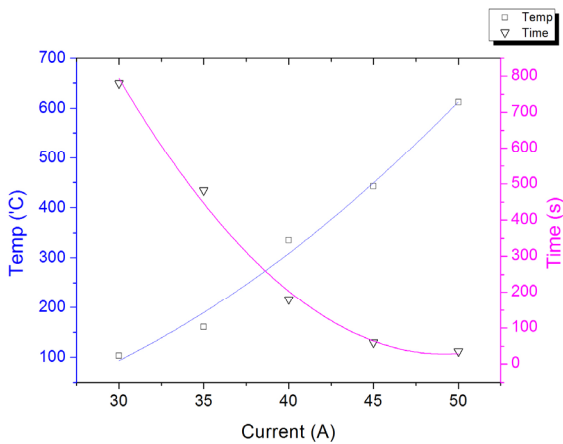


Figure 15. Wire surface temperature and time curve of wire surface with current change.

$$d = \frac{l_1}{(n_1 - 1)} + \frac{l_2}{(n_2 - 1)} + \dots + \frac{l_m}{(n_m - 1)} / m = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{n_i - 1} \quad (4)$$

여기서  $d$ 는 DAS( $um$ ),  $l_i$ 는 측정하고자 하는 정렬된 2차

가지의 경계에서 경계까지의 거리,  $n_i$ 는 측정하고자 하는 정렬된 2차 가지의 경계에서 경계까지의 선을 그었을 때 경계와의 교차점( $(n_i - 1)$ 이 2차 가지의 수를 가리킨다.),  $m$ 은 측정된 2차 가지의 수이다.

#### 4.2.2 DAS법에 의한 측정부위 선택

Figure 13(a)와 같이 1차 수지상정(주축)이 명확하고 추축을 중심으로 2차가지가 직각이며, 양측면에서 대조적으로 관찰될 때, DAS를 측정한다. 반면, 1차 수지상정(주축)이 관찰되지 않고 입상의 결정만 다수 관찰될 때는 Figure 13(b)와 같이 직선상에 같은 간격으로 배열된 크기가 비슷한 결정이 있는 부분을 측정한다.<sup>(15)</sup> 수지상 조직을 Figure 14와 같이 3차원으로 나타냈으며, 보라색 점선(①)부분에서는 Figure 13 (a)의 형태가 나타나고 빨간색 점선부분(②)은 Figure 13(b)의 형태가 나타난다.

### 5. 실험결과 및 분석

#### 5.1 인가전류 크기별 전선 표면온도와 상승시간의 상관성 분석

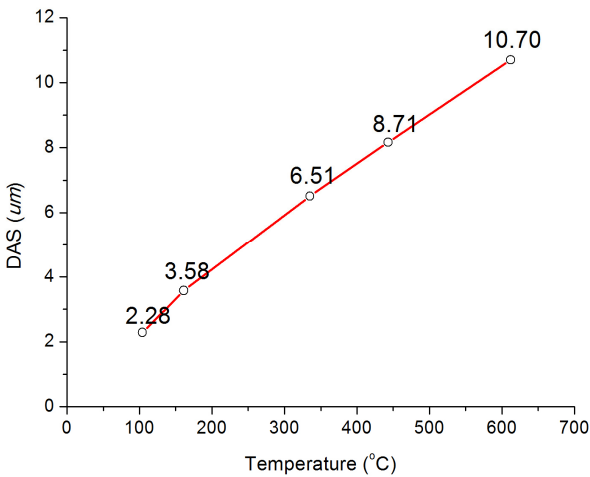
대전류공급장치로 지름 0.8 mm, 길이 150 mm의 전선에 30 A에서 50 A까지 5 A의 단위로 전류의 크기를 변화시켜 인가한 후 전선 표면의 평균최고온도와 평균도달시간을 측정하였고 결과를 Figure 15과 Table 1에 나타내었다. 이때 주위온도는 27 °C, 상대습도는 60%였다. 30 A일 때 최대온도의 평균값은 101 °C, 35 A일 때는 161 °C, 40 A일 때는 335 °C, 45 A일 때는 443 °C, 50 A일 때는 613 °C로 전류크기별 최대온도가 존재하였다. 또한, 전류의 크기가 증가할수록 최고온도까지 도달하는데 소요되는 시간은 780초에서 35초로 급격히 감소되었다. 이는 전류의 크기가 커질수

Table 1. Wire Surface Temperature and Time by Overcurrent

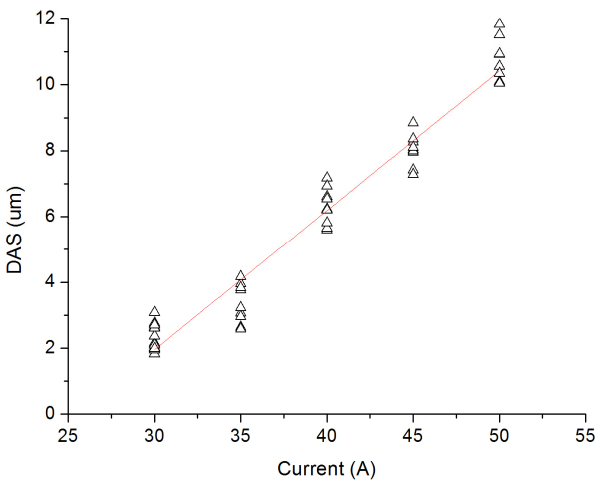
Current (A)	30	35	40	45	50
Maximum Temperature (Average, °C)	101	161	335	443	613
Maximum Temperature reaching Time (Average, s)	780	480	180	60	35

**Table 2.** DAS Measurement Result by Wire Surface Temperature

Temperature (°C)	101	161	335	443	613
Current (A)	30	35	40	45	50
Minimum DAS (um)	1.82	2.58	5.60	7.28	10.04
Maximum DAS (um)	3.08	4.41	7.23	9.31	11.83
Average DAS (um)	2.28	3.58	6.51	8.17	10.70



**Figure 16.** Curve of wire surface of average temperature and DAS.



**Figure 17.** Curve of current and DAS.

록 전선 단면적을 통과하는 전자의 개수가 많아지게 되어 주위 원자와 충돌확률이 높아져 원자 열 진동을 급속히 증가시키기 때문이다.

**5.2 DAS법을 이용한 2차 수치상정 특성 분석**

평균온도 101 °C에서 단락시킨 전선의 DAS 최솟값은 1.82 um, 최댓값은 3.08 um, 평균값은 2.28 um로 측정되었으며, 평균온도 161 °C에서 단락시킨 전선의 DAS 최솟값은 2.58 um, 최댓값은 4.41 um, 평균값은 3.58 um로 측정되

었다. 단락 시 온도차가 60 °C밖에 차이가 나지 않아 일부 DAS의 범위가 겹치나 평균값은 약 1.3 um차이가 났다. 평균온도 335 °C에서 단락시킨 전선의 DAS 최솟값은 5.60 um, 최댓값은 7.23 um, 평균값은 6.51 um로 측정되었다. 평균온도 443 °C에서 단락시킨 전선의 DAS 최솟값은 7.28 um, 최댓값은 9.31 um, 평균값은 8.17 um로 측정되었으며 평균온도 613 °C에서 단락시킨 전선의 DAS 최솟값은 10.04 um, 최댓값은 11.83 um, 평균값은 10.70 um로 측정되었다. Table 2는 평균 온도별 DAS의 최소, 최대, 평균값 측정 결과이며, Figure 16은 평균 온도별 DAS 평균값과의 관계를 나타낸 그래프이다. 측정결과로부터 전선 평균온도가 상승할수록 단락 발생 시 온도차가 줄어 냉각속도가 감소되어 DAS 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

온도와 DAS의 상관관계로부터 과전류의 크기와 DAS의 관계를 식 (5)의 방정식과 Figure 17으로 나타냈다.

$$y = 0.42286x - 10.72914 \tag{5}$$

여기서  $y$ 는 DAS(um),  $x$ 는 전류(A)를 나타낸다.

수치상의 DAS를 알게 되면 과전류의 크기를 추정할 수 있다. 예를 들어 용융흔의 DAS의 크기가 4 um일 때, 추정되는 과전류는 34.83 A이고, 10 um일 때는 49.02 A이다.

**6. 결 론**

본 논문은 과부하로 인한 전기화재를 분석할 수 있는 과학적인 기법을 제안한 것으로 과전류의 크기는 용단된 전선의 조직단면형태를 결정하는 중요한 인자라는 사실에 근거하고 있다. 과전류의 크기별로 상승하는 온도의 상한치가 존재하며 이때 단락이 발생하였을 때 용융흔에 형성되는 수치상 2차가지의 간격이 변화한다.

과전류 크기와 전선온도의 상관관계를 분석한 결과, 전류를 30→50 A까지 5 A 단위로 증가시켰을 때 전선온도의 상한치가 존재했고 101~613 °C의 범위를 나타냈다. 또한, 최고온도까지 도달하는 시간은 전류가 커질수록 780→35 초로 큰 폭으로 감소하였다.

단락을 발생시켜 용융흔의 금속단면을 분석한 결과, 101 °C일 때 평균 DAS는 2.28 um, 613 °C일 때는 10.7 um로 온도가 상승할수록 DAS의 크기는 증가하였다. 또한, 온도와 DAS의 상관관계로부터 과전류 크기에 따른 DAS의 관계도

유도하였으며, 실험결과를 회귀 분석하여 수치를 정량적으로 나타내었다.

따라서, 본 논문에서는 전류 크기의 차이로 인한 전선의 온도 상승은 용융부위의 냉각속도 차이를 발생시키고 이로 인하여 수지상의 2차 가지 간격이 변화한다는 것을 입증하였다. 과전류에 의한 화재로 의심되는 경우, 금속조직단면의 2차 가지의 크기를 분석하면 화재 당시 과전류의 크기와 온도를 유추할 수 있어 전기화재의 근본원인을 판정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

## References

1. KESCO, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", Korea Electrical Safety Corporation, pp. 18-30 (2015).
2. K. M. Shong, "A Study on the Crystal Growth and Characteristics of the Electric Wire Oxidized by Overcurrent", Ph.D. Thesis, Soongsil University, pp. 98 (2007).
3. C. S. Choi, K. -M. Shong, H. K. Kim, D. O. Kim and D. W. Kim, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003J-K Joint Symp. on ED & HVE, pp. 145-148 (2003).
4. C. S. Choi, K. M. Shong, H. K. Kim, D. O. Kim and D. W. Kim, "Analysis of Dispersive Characteristics and Structures of Copper Wire Melted by Overcurrent", IEEJ Trans. PE, Vol. 125, No. 12 (2005).
5. KESCO, "The Fire Investigation for the Ignition Position and the Collection Guide of a Hangover (A Cause Analysis and Judgment for the Overcurrent Fire)", Korea Electrical Safety Corporation, pp. 6 (2006).
6. S. W. Nam, "An Experimental Study on the Discrimination Criteria of the Fire Cause by Analysis of Melting Marks on electric Wire", Master's thesis, Kyonggi University, pp. 11-12 (2014).
7. S. S. Cho, "Fundamentals of Solidification 3<sup>rd</sup> Edition", Mun Un Dang, pp. 49-59 (1992).
8. S. P. Lee, "The Metallic Materials Described in the Figure", Chung Ho, pp. 47-55 (2015).
9. R. Abbaschian, L. Abbaschian, R. E. Reed-Hill, "Physical Metallurgy Principles 4<sup>th</sup> edition", Cengage Learning, pp. 438-440 (2013).
10. S. S. Cho, "Fundamentals of Solidification 3<sup>rd</sup> Edition", Mun Un Dang, pp. 22-26 (1992).
11. D. A. Porter, K. E. Easterling, M. Y. Sherif, "Phase Transformations in Metals and Alloys, 3<sup>rd</sup> Edition", Kyobobook, pp. 167-172, 191-196 (2010).
12. S. S. Cho, "Fundamentals of Solidification 3<sup>rd</sup> Edition", Mun Un Dang, pp. 13, 50-64, 67-80 (1992).
13. NITE, "Identifying the Causes of Home Appliance Ignition Accidents Manual 2010", NITE(National Institute of Technology and Evaluation), pp. I-5,6 (2010).
14. M. C. Flemings, "Solidification Processing", Mcgraw-Hill, pp. 146-154 (1974).
15. NITE, "Identifying the Causes of Home Appliance Ignition Accidents Manual 2010", NITE (National Institute of Technology and Evaluation), pp. I-30-32 (2010).