

# 금속 현미경 조직에 의한 1차·2차 溶融痕의 식별<sup>1)</sup>

공학박사, 광주 광산소방서장 **李 義 平**

일본 製品評價技術基盤機構 **今 田 修 二**

## 1. 머리말

소방에서는 이미 발생한 화재를 통해 유사한 화재를 예방하고, 효과적인 소방안전대책 등을 강구하기 위해 화재조사를 하고 있다. 화재조사는 「화재원인조사」와 「화재 및 소화활동으로 인해 입은 손해조사」로 나뉜다. 火災原因調査의 中心이 되는 것은 出火原因을 규명하는 것이지만, 延燒擴大原因이나 死傷者發生 要因을 조사하는 것도 중요한 범위이다. 화재원인조사는 火災現象의 규명은 물론, 火災予防施策이나 조치의 성과를 검토, 시정 개선하여 화재예방에 이바지하는 것을 목적으로 하고 있다<sup>1)</sup>.

出火原因 규명에는 ①出火個所의 判定, ②出火한 發火源의 判定, ③出火한 經過 등의 판정의 단계가 있다.

출화개소를 판정한 후 출화개소에서 생각될 수 있는 발화원에 대하여 消去法 등에 의거 검토가 행해져서 '출화한 발화원'을 확실시 한다. 출화개소는 어떤 일정범위(공간)이며, 그 범위 내 개개의 발화원에 대하여 가능성을 검토한다<sup>2)</sup>.

일반적으로 건물화재나 차량화재 등의 경우에는 출화하면, 대개 천장 등의 고정전선이나 실내의 코드, 전기제품 등의 전원코드나 제품 속의 배선 등에 전기용융흔이 생긴다. 이와 같이 출화개소에는 전기용융흔이 존재하는 경우가 많으므로 화재원인 규명시에는 이 전기용융흔이 過負荷 등 전기적 요인에 의해 생긴 것(1次溶融痕)인가 그렇지 않으면 화재로 인해

전선의 피복이 타서 단락(합선)되어 생긴 것(2次溶融痕)인가를 규명할 필요가 있다.

그러나 1차·2차용융흔의 판별방법에 대해서는 외관, 용융흔 속의 氣孔, 炭化物의 혼입, 表面分析 등의 방법이 검토되어 왔지만<sup>3)4)5)6)7)8)9)10)11)12)13)14)15)16)17)18)19)20)21)22)23)24)25)26)27)28)29)30)31)32)33)34)35)36)37)38)39)40)41)42)43)44)</sup> 아직 정확도가 높은 정량적인 판별방법은 확립되어 있지 않다.

그래서 여러 각도에서 1차·2차용융흔에는 어떤 차이가 있는가를 검토하여 유효한 판별방법을 확립하는 연구가 필요하며, 필자는 다각도에 걸쳐 판별방법을 연구하여 발표한 바 있다.<sup>45)46)47)48)49)50)51)52)53)54)</sup> 판별방법 중에는 용융흔을 연마하여 금속조직으로 판별하는 방법이 있는데, 용융흔을 연마하여 금속 현미경으로 관찰해보면 酸化組織이 관찰되는 경우와 그렇지 않은 경우가 있다. 本論文에서는 금속조직에 산화조직이 출현하는 경우와 그렇지 않은 경우 1차·2차용융흔의 판별방법에 관해 연구한 결과<sup>55)56)57)</sup>를 소개한다.

## 2. 実験

### 2.1 電氣溶融痕 中の 酸化組織 제작

화재현장의 전선 등의 용융흔을 연마하여 금속현미경으로 관찰하면 산화조직을 볼 수 있다<sup>2)</sup>. 이 산화조직은 산소농도 0.39wt% 미만으로 銅의 初晶이 관찰되는 경우와 0.39wt%이

1) 이 논문은 일본 독립행정법인 製品評價技術基盤機構(NITE)에서 개발한 용융흔의 판별방법을 소개하고 있으며, 필자는 공동연구에 참가하여 지금까지 연구한 결과를 連名으로 일본 화재학회논문집 등에 발표해 왔음을 밝혀둡니다.

2) 필자와 공동연구팀에서 용융흔의 채취, 樹脂 속 응고, 연마, 에칭, 조직관찰, 샘플의 보관 등에 구체적으로 정리하여, 일본 독립행정법인 製品評價技術基盤機構 홈페이지(<http://www.tech.nite.go.jp/cgi-bin/anzen/hakkadb2.pl?Data=HakkaFrame>)를 통해 공개하고 있으니 참고하기 바란다.

상으로 亞酸化銅의 初晶이 관찰되는 경우가 있다. 산화조직이 出現하는 것과 응고시 냉각속도가 빠를수록 산화조직에 나타나는 樹枝狀晶 2次 가지의 간격(DAS : Dendrite Arm Spacing)이 짧은 것<sup>58)59)</sup>이 알려져 있지만 산화조직이 出現한 경우, 이 용융흔이 1차용융흔인가 2차용융흔인가에 대해서는 定量的인 判別방법(이하, 이 判別법을 DAS法이라 한다)이 확립되어 있지 않다.<sup>60)61)62)63)</sup>

2.1.1 雰困氣溫度別, 酸素濃度別 참조용 酸化組織 제작

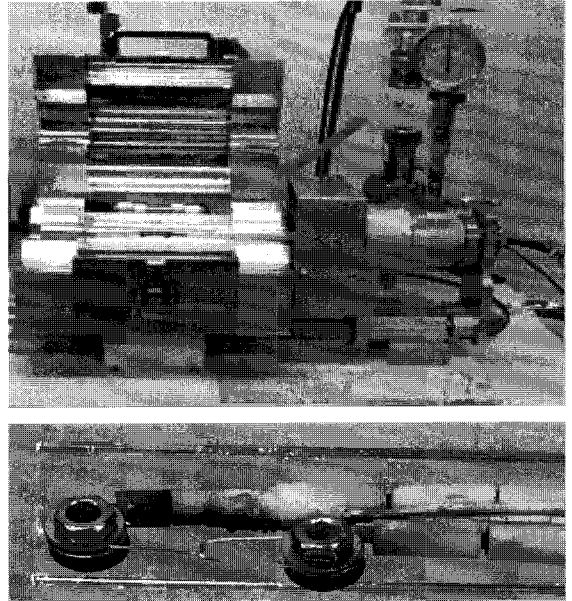
용융흔은 芯線이 단락·용융·응고하여 생긴 것이며 1차 용융흔 생성 분위기(常溫 또는 상온근처)에서는 응고시 냉각속도는 빠르지만 2차용융흔 생성 高溫雰圍氣(화재분위기)에서는 응고시 냉각속도는 1차용융흔 쪽보다 느리는 등 응고시 분위기온도에 따라 냉각속도는 다르다. 즉, 응고시 냉각속도의 제1 요인은 용융흔 생성시의 분위기온도이다.

그리고 용융흔 속의 酸化組織은 銅과 亞酸化銅의 2元合金<sup>3)</sup>이므로 산소농도에 따라 조직이 달라질 것이다.

따라서 시료 용융흔은 실제 전선의 銅線을 이용하여 산소농도별 및 분위기온도별로 다음 요령으로 참조용 용융흔의 샘플을 만들어 산소농도 및 DAS를 측정한다.

〈사진1〉과 같이 試料銅線(600V PVC절연전선 素線 7개 중에서 素線 1개(직경 : 0.4mm))를 접촉시킨 상태에서 赤外線爐에 넣어 공기분위기에서 爐內溫度와 유지시간을 바꿔 동선 표면을 산화시킨다.

여기에서 목표로 하는 산소농도는 예비실험을 통하여 노내 온도 및 유지시간을 〈표1〉과 같이 하여 얻는다. 그러나 芯線의 표면산화에 의한 산소농도의 정확한 제어는 무리가 있었으므로 각 온도별로 목표산소농도 부근에서 3점이상의 시료가 얻어지도록 한다.



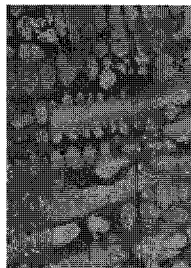
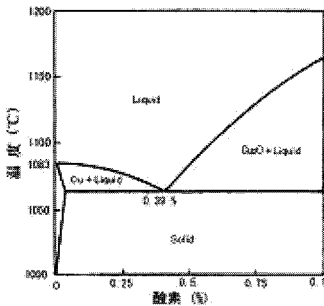
〈사진1〉 赤外線爐와 試料銅線의 셋팅요령

이어서 爐內를 진공으로 한 다음 Ar가스로 치환하고 爐內溫度를 소정의 값(25, 200, 400, 600, 800, 1000℃)으로 하도록 한다. 이 상태에서 AC 100V를 통전하여 단락시켜 爐內에서 자연 냉각한다. 銅線에 부착된 용융흔을 회수하여 시료로 한다.

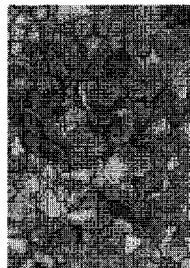
〈표1〉 목표로 하는 산소농도샘플의 제작조건

산소농도의 목표 (wt%)	爐內 온도 및 유지시간	
	온도(℃)	시간(min)
0.05	300	4
0.1	400	4
0.2	600	10
1.0	700	8
2.0	700	16

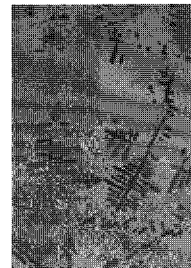
3) Cu-Cu<sub>2</sub>O系의 平衡狀態又와 Cu/Cu<sub>2</sub>O 初晶과 共晶組織의 예



(a) Cu 初晶

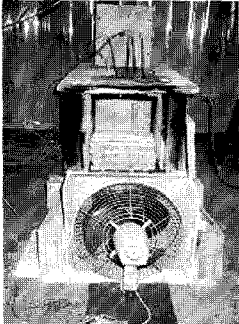


(b) 共晶



(c) Cu<sub>2</sub>O 初晶

### 2.1.2 실험 1차용융혼의 화염노출

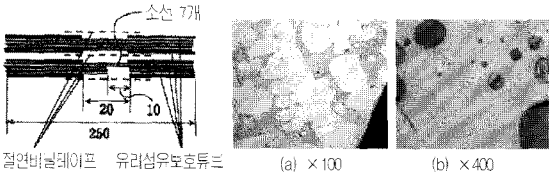


〈사진2〉 角材火源 실험 炉

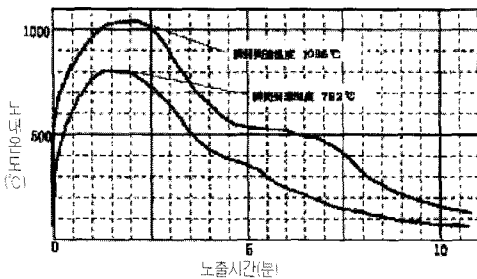
1차용융혼이 생성된 후 화염이나 고온에 노출된 경우, 금속 조직의 변화를 확인하기 위해 실험 1차용융혼 등을 〈사진2〉의 角材火源 実験炉 속에서 화염에 노출시켜 조직관찰을 한다.

실험 1차용융혼의 경우에는 1회의 단락으로 생긴 시료에서도 부하측·전원측 용융혼의 DAS와 산소농도가 다른 경우가 있음

므로 화염에 노출하기 전의 상황과 화염 노출 후의 상황은 비교하기 어렵다. 그래서 화염 노출전후의 비교를 할 수 있도록 ①試藥(동분말+아산화동분말)에 의해 만든 용융혼(DAS:87 $\mu$ m, 산소농도:0.17wt%)의 약 1/3을 절단한 시료와 ②앞의 실험과는 별도로 미리 素線을 전기로 중에서 600 $^{\circ}$ C, 10분간 표면을 산화시킨 〈그림1〉의 半断線모델의 코드에 17A의 부하전류를 흘려 주울열에 의해 절연비닐테이프를 劣化시켜 단락에 이르게 한 용융혼(DAS 2.3 $\mu$ m 산소농도 0.05wt%)을 시료로 한다. 시료는 〈사진3〉과 같다.



〈그림1〉 모델코드 〈사진3〉 화염노출 전 1차용융혼의 금속조직



〈그림2〉 노출 샘플 근방의 시간-온도곡선

노 내 온도의 유지시간은 표준가열온도곡선(JIS A 1301 건축물의 목조부분 防火試驗法)을 모의한 것으로 폭로샘플 근방의 노 내 온도곡선은 〈그림2〉와 같다.

### 2.1.3 2차용융혼의 제작

〈사진2〉의 노 속에서 비닐평형코드(HVFF 0.75mm)에 AC 100V를 인가하여 화염에 노출시켜 단락되도록 한다. 이 때 비닐코드 중앙부 근방의 화염온도를 측정한다. 이를 시료로 하여 산소농도 및 DAS를 측정한다.

### 2.1.4 화재현장 샘플에 의한 검증

DAS법에 의한 1차·2차용융혼 판정의 유효성을 검증하기 위해서 이력이 판명되어 있는 화재현장 샘플을 수집하여 용융혼의 산소농도 및 DAS를 측정하고 2.1.1 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 1차용융혼인가 2차용융혼인지를 판별할 수 있는 지 확인한다.

## 2.2 非酸化組織 제작

사고현장에서 채취된 용융혼에서 단락시의 분위기온도를 추정하기 위한 참조용샘플로서 아래와 같은 실험에 의해 분위기온도별 용융혼샘플을 제작하여 해석하고, 아울러 조직의 특징 및 그 종류별 셀사이즈<sup>4)</sup> 측정방법을 검토한다(이하 이 셀사이즈에 의한 판별법을 셀사이즈法이라 한다).

### 2.2.1 분위기온도별 참조용 비산화조직의 제작

시료 동선을 접촉시킨 상태에서 〈사진1〉과 마찬가지로 赤外線炉 속에 넣고 〈표2〉와 같이 노 속을 Ar으로 치환한 후에 소정의 온도까지 승온한다. 노 속의 분위기온도를 短絡部 근방의 熱電帶로 감시하여 목표온도 도달 후 1분간 온도를 유지한 후 마그네트스위치에 의해 AC 100V를 인가하여 단락시켜 동선 끝에 생긴 용융혼을 회수하여 조직관찰, 셀사이즈 측정 등의 해석을 한다.

〈표2〉 시료 동선의 종류 및 실험조건

試料鋼線	0.4mm $\phi$ $\times$ 1개(IV 0.9mm의 소선 1개)
단락시의 노 내 분위기온도	20, 200, 400, 600, 800, 1000 $^{\circ}$ C
노 내 분위기	Ar 치환
실험회수	각 온도에 있어서 5회

4) 結晶粒界의 發生과 셀 그리고 셀 사이즈 (深海 繁 「結晶組織學」(1994년 일본 理工圖書株式會社)에서 인용함)

아래 그림(a)~(d)는 금속이 용융되어 凝固하는 과정에서 결정을 생성하는 과정을 나타낸 것이다.

셀사이즈法에서는後述하는 것처럼 結晶粒界로 둘러싸인 結晶粒의 幅을 측정하므로 우선 結晶粒界의 發生에 대해 이해할 필요가 있다.

### 2.2.2 氣泡있는 非酸化組織의 제작

실제 사고 용융흔의 경우, 많은 용융흔에는 그 단면에 氣泡가 관찰된다. 기포는 결정성상의 저해요인이 될 수도 있으므로 셀사이즈의 측정시 기포를 어떻게 취급할 것인지 검토할 필요가 있다. 이러한 점에서 상기 실험장치의 노 내 분위기에 수소가스를 주입하여 기포를 갖는 용융흔샘플을 제작하여 그 특징을 고찰하여 기포의 취급에 대해 검토한다.

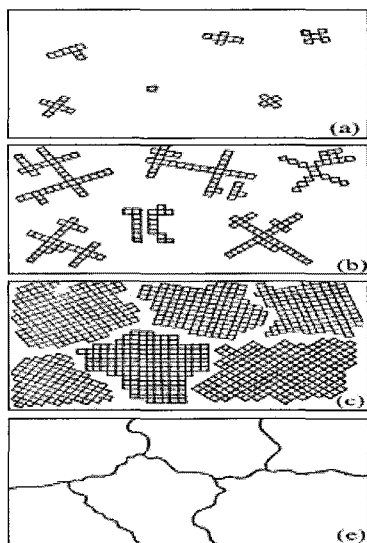
### 2.2.3 실험 1차용융흔의 고온노출

실제 화재사고에 있어서는 분위기온도가 낮은 조건에서 생긴 1차용융흔이 그 후의 화재확대에 의해 보다 고온에 노출되게 된다. 이러한 재가열에 의해 단락시의 흔적(용융흔 속의 금속조직)이 남아있는지를 확인하기 위해서 上記의 실험장치로 실온분위기 하에서 단락시킨 샘플을 일단 채취한 후, Ar 분위기 중 및 대기중에서 재가열하여 금속조직이 잔존하는지 확인하였다. 각 샘플의 재가열조건은 <표3>과 같다.

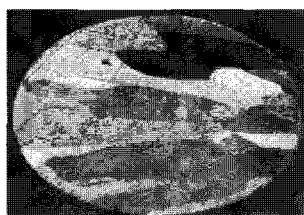
그리고 대기중 가열 샘플에 대해서는 표면산화에 의한 금속조직의 잔존을, Ar분위기 중에서의 실험에 대해서는 재가열에 의한 금속조직의 잔존을 조사한다.

<표3> 재가열에 의한 금속조직의 잔존확인 실험 조건

번호	분위기	재가열온도	재가열시간	가열장치
1	Ar	600°C	5분	적외선가열로
2	Ar	800°C	10분	적외선가열로
3	대기중	800°C	5분	머플로
4	대기중	800°C	30분	머플로
5	대기중	1,000°C	5분	머플로



그림(a) : 용융된 금속이 냉각되어 가면 溶融金屬 內의 각 개소에 결정의 근원이 되는 핵(또는 結晶核)을 생성한다. 이어서 이 각각의 핵을 중심으로 하여 결정이 성장 발달하는 과정이 그림(b) 이하다. 그림(b) : 모형과 같이 쌓여진 블록을 각각의 핵을 중심으로 하여 나열해 가는 경우에 그 배열방법이 모두 같다고 하더라도 핵을 중심으로 한 각각의 쌓여진 블록 群의 방향은 결코 동일방향을 가리키며 진행하는 것은 아니다. 그림(c) : 결국 그림(c)처럼 여러 개의 쌓여진 블록의 群(結晶의 群)이 충돌하여 불규칙한 境界線을 만든다. 이와 같은 각각의 경계를 나타내는 結晶群 한 개 한 개를 結晶粒, 그 경계를 結晶粒界라 부른다. 그림(d) : 금속을 연마 후 부식시키면 結晶粒의 粒界가 부식되고, 그리고 강한 부식에 의해 결정조직 전체가 금속현미경 하에 명백하게 나타난다.



이 셀사이즈법에서는 용융흔의 단면에서 관찰되는 結晶粒界로 둘러싸인 영역을 「셀」이라고 부르며, 셀의 크기를 「셀사이즈(Cell Size)」라고 부르기로 한다. 이러한 結晶粒(셀사이즈)은 短絡時 분위기의 상승에 따라 커지는 것이 알려져 있다.

용융흔의 단면에서 관찰되는 結晶粒의 例

### 2.2.4 화재현장 샘플에 의한 검증

이 셀사이즈법에 의한 판정의 유효성을 검증하기 위해 주 변정보로부터 1차·2차용융흔의 구분이 명확한 현장샘플에 대해 용융흔의 셀사이즈를 측정하여 2.2.1의 실험에서 얻어진 결과로부터 용융흔 생성시의 분위기온도를 추정, 사고시의 주 변정보와의 정합성을 조사한다.

## 3. 結果 및 考察

### 3.1 溶融痕 中の 酸化組織

#### 3.1.1 용융흔 단면 산소농도와 DAS의 측정방법 검토

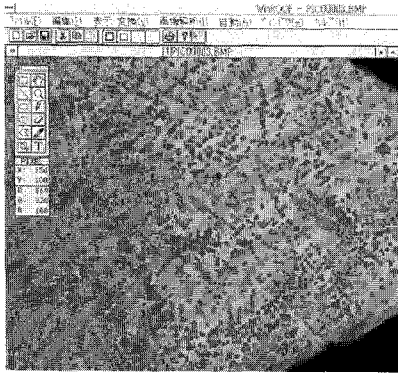
##### (1) 산소농도의 측정방법

Cu-Cu<sub>2</sub>O系의 2元合金을 용융·응고시키면 산소농도가 0.39wt%이하의 경우 최초로 Cu가 晶出하고, 액상부분의 산소농도를 상승시키면서 응고가 진행된다. 0.39wt%이상의 경우에는 Cu<sub>2</sub>O가 최초로 晶出하고 액상부분의 산소농도를 저하시키면서 응고가 진행된다. 어느 경우에 있어서도 남은 液狀部分의 산소농도가 0.39wt%가 된 시점에서 응고가 완료하여 共晶組織을 만든다.

따라서 Cu初晶部의 산소농도는 0wt%, 初晶以外の 영역은 공정이므로 산소농도는 0.39wt%이다. 또한 Cu<sub>2</sub>O初晶部에 대해서는 산소농도는 11.181wt%(=(15.999/(63.5462+15.999))×100)이고, 初晶以外の 부분은 共晶이므로 산소농도는 0.39wt%이다. 여기서 용융흔 속의 酸化組織은 非平

衡組織이므로 평형상태도에서의 산소농도와는 다를 것으로 생각되지만, DAS는 산소농도의 쪽보다는 냉각속도의 쪽에 크게 의존하므로 산화조직 중의 산소농도는 평형상태도의 산소농도를 그대로 이용하기로 하였다.

그래서 <사진4>와 같이 각 샘플에서 얻어진 면적비율의 결과로부터 추출대상물별로 화상해석방법에 의거 다음 계산식에 의거 산소농도를 산출할 수 있다.



<사진4> 화상해석에 의한 산소농도산출 예

(a) Cu初晶이 관찰된 경우

-Cu初晶部分의 면적비율을 측정한 경우:

$$\text{산소농도wt\%} = (100 - \text{면적비율\%}) \times 0.0039$$

-粒界의 공정부분의 면적비율을 측정한 경우:

$$\text{산소농도wt\%} = \text{면적비율\%} \times 0.0039$$

(b) Cu<sub>2</sub>O 初晶이 관찰된 경우

$$\text{산소농도wt\%} = \{(\text{Cu}_2\text{O初晶의 면적비율\%}) \times 0.11181\} + \{(100 - \text{Cu}_2\text{O初晶의 면적비율\%}) \times 0.0039\}$$

(2) DAS의 측정방법과 측정부위 선택요령 검토

테드라이트 크기의 측정방법을 대별하면 다음 3가지방법으로 분류된다. ①2차아암이 여러 개 평행으로 성장되어 있는 테드라이트 아암을 찾아 그 테드라이트의 아암 경계에 대해 임의의 길이의 直交線을 긋고 아암을 옆으로 절단하는 길이를 아암 개수로 나누어 평균 Arm Spacing을 구하는 방법(이하 DAS법이라고 한다), ②1차 또는 2차아암을 구성하는 셀의 크기(CS-Cell Size)를 측정하는 방법, ③조직상에서 임의의 방향으로 3개이상의 직선을 그어 아암 또는 셀의 경계를 옆으로 절단하는 수와 직선의 길이로부터 아암 또는 셀의 크기를 구하는 방법(이하 交線法이라고 한다)이 있다<sup>64)</sup>. 2차아암의 발달이 충분하며 그 식별이 가능한 조직이면 2차아암의 중심간 거리를 측정하는 것이 가능하며, 일반적으로 자주 행

해지고 있다. ③의 교선법은 2차아암을 식별할 필요가 없으므로 측정이 용이하지만 물리적 의미로서는 DAS를 평가하는 것이라기보다는 조직의 粗密度를 측정하는 것에 의해 셀의 크기를 측정하고 있다. 교선법에 의한 값은 셀사이즈와 잘 일치한다든가 DAS보다 20% 크다는 점이 보고되어 있으므로 DAS의 값으로 환산이 용이하지 않다<sup>65)</sup>. 또한 ②의 CS를 측정하는 것은 가지의 폭만을 측정하므로 연마 후의 관찰면이 반드시 가지의 중앙부분을 관찰하고 있다고 할 수 없는 문제가 있다.

그래서 여기에서는 가장 일반화되어 있는 ①의 DAS법에 의해 측정하는 것으로 한다. 이하 DAS의 측정방법과 측정부위의 선택요령에 대해 서술한다.

(a) 측정방법

DAS의 측정방법은 共晶의 산소농도가 낮고 2차가지가 밀접해 있는 경우와 산소농도가 높고 2차가지끼리가 떨어져 있는 경우로 나뉘어서 서술한다. 모두 측정하는 테드라이트 아암은 3개이상 정렬하고 있는 부분을 선택한다.

<共晶의 산소농도가 낮고 2차가지가 밀접해 있는 경우>

테드라이트의 2차아암이 발달하고 아암이 정렬하고 있는 테드라이트가 비교적 많으며 아암간격의 측정에 지장이 없는 조직에 적용한다. <그림3(a)>에 나타낸 것처럼 2차아암 또는 2차아암으로 판단되는 아암이 정렬되어 있는 부분을 선택하여 아암의 평균간격 d를 다음 식에 의거 구한다.

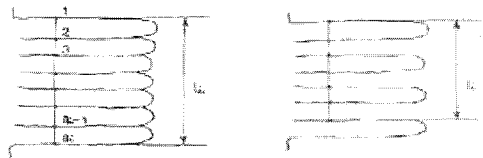
$$d = \left( \frac{l_1}{n_1 - 1} + \frac{l_2}{n_2 - 1} + \dots + \frac{l_m}{n_m - 1} \right) / m = \left( \frac{\sum_{i=1}^m l_i}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)} \right) / m$$

d : 아암 스페이싱(μm)

l<sub>i</sub> : 측정하려고 하는 정렬한 아암群의 경계에서 경계까지의 거리

n<sub>i</sub> : 측정하려고 하는 정렬한 아암群의 경계에서 경계까지 線을 그은 때의 경계와의 交点数. (n<sub>i</sub> - 1)이 아암의 수이다.

m : 측정한 아암群의 數(i = 1, 2, ..... m)



(a) 2차가지가 밀접해 있는 경우 (b) 2차가지가 떨어져 있는 경우

<그림3> DAS의 측정방법

〈산소농도가 높고 2차아암끼리가 떨어져 있는 경우〉

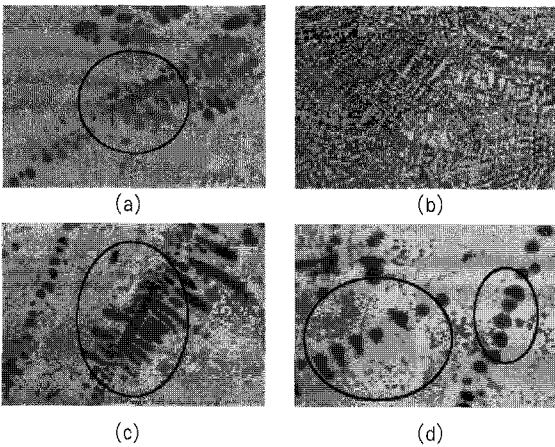
상기의 측정방법과 마찬가지로 2차아암으로 판단되는 아암이 정렬되어 있는 부분을 선택하여 주축 또는 덴드라이트의 성장방향으로 평행한 직선의 길이  $l_1$ (그림3(b))을 구해 그 사이에 관찰되는 아암의 개수로 나눈다.

(b) 측정부위의 선택

덴드라이트 先端部에서는 가지의 간격은 일정하지 않고 후방에 비해 밀접하게 되어 있다. 후방부분은 그 후의 성장에 의해 너무 가까운 덴드라이트의 가지가 소멸하거나 흡수 합체되어 그 간격이 일정해진 것으로 생각되고 있다<sup>6)</sup>. 이와 같이 같은 덴드라이트 중에서도 부위에 따라 DAS는 다르므로 측정부위의 선택기준이 필요하다.

㉔ 〈사진5(a)와 같이 주축이 명확한 것을 찾는다.

- 주축 및 2차가지가 명확하게 관찰되는 부분
- 2차가지가 주축에서 직각으로 관찰되는 것
- 2차가지가 주축을 중심으로 양측면에 대칭적으로 또한 거의 등간격으로 관찰되는 부분
- 하나의 주축에서 뻗은 복수 2차가지의 성장방향이 평행인 부분



〈사진5〉 DAS 측정부위의 선택

- ㉕ 샘플 중에서 평균적인 크기의 DAS를 찾는다.
  - 〈사진5(b)와 같이 광범위에 걸쳐 初晶의 분포가 거의 균일한 경우에 주축 및 2차가지에 의해 전체 중에서 다수를 차지하는 크기의 것을 측정한다.
  - DAS가 너무 작은 것은 3차가지일 것으로 생각된다.
- ㉖ 주축이 명확하고 그 양측에 2차가지가 관찰되는 경우일

지라도 좌우대칭이지 않은 부분은 측정하지 않는다.

○ 2차가지는 통상 주축의 양측에 대칭적으로 생긴다. 주축의 양측에 2차가지가 관찰되는 경우라도 양측에서 DAS가 다른 것은 측정하지 않는다.

○ 〈사진5(c)의 주축이 명확한 부분의 結晶群은 2차가지로 생각되는 가지가 대칭적으로 관찰되지 않고 다른 덴드라이트群이 겹쳐 있는 것처럼 보이므로 계측대상에서 제외한다.

㉗ 〈사진5(d)와 같이 덴드라이트의 주축이 관찰되지 않고 粒狀의 결정만이 다수 관찰되는 경우에는 크기가 근사한 결정이 직선상으로 거의 같은 간격으로 생겨있는 부분을 찾아 측정한다.

㉘ 〈그림4)와 같이 아암의 존재가 명확한 경우에는 아암경계에 가상선을 넣고 그 線과의 교점을 포함하여 交点数로 한다. 단, 측정에 적합한 다른 장소가 복수 관찰되는 경우에는 측정하지 않는다.



〈그림4〉 仮想線을 넣은 예

㉙ DAS치는 분위기온도와 산소농도의 함수인 점에서 산소농도에 불균일이 있는 경우에는 DAS를 측정된 후 각각의 DAS측정부분별로 산소농도를 구한다.

3.1.2 雰囲気温度別 DAS - 산소농도의 관계

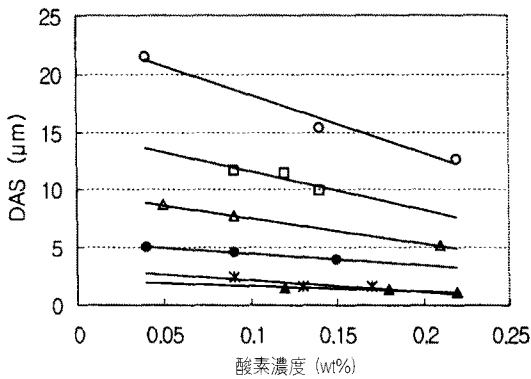
〈표4)는 앞에서 언급한 방법으로 산소농도 및 DAS를 측정된 결과를 종합한 참조용DAS테이블이다. Cu初晶, Cu<sub>2</sub>O初晶 모두 제작시의 온도상승에 따라 DAS가 커지고 있음을 알 수 있다.

이 결과를 생성시 분위기온도별로 DAS - 산소농도의 관계를 그래프로 나타내면 〈그림5) (a), (b)와 같다. Cu初晶의 경우에는 저농도일수록, Cu<sub>2</sub>O初晶에서는 고농도일수록, 즉 산소농도가 共晶点에서 멀어질수록 DAS는 증대되어 있다.

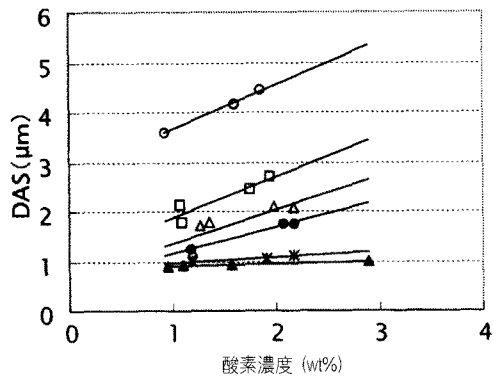
〈그림5)에서 산소농도 0.05, 0.10, 0.20wt% 및 1.0, 2.0wt%의 각 온도에 있어서 DAS를 구하고, 산소농도별로 노내온도-DAS의 관계를 그래프로 나타내면, Cu<sub>2</sub>O初晶에서 약간 편차가 있기는 하지만 〈그림6)과 같은 지수회귀곡선이 얻어진다.

〈표4〉 용융흔의 산소농도와 DAS

구분	제작시 온도(°C)	산소농도(wt%)	평균DAS(μm)	구분	제작시 온도(°C)	산소농도(wt%)	평균DAS(μm)
Cu 初晶	RT(25°C)	0.12	1.48	Cu <sub>2</sub> O 初晶	RT(25°C)	0.96	0.89
		0.18	1.39			1.58	0.91
		0.22	1.04			2.90	0.99
	200	0.09	2.39		200	1.19	1.00
		0.13	1.63			1.91	1.05
		0.17	1.62			2.18	1.12
	400	0.04	5.04		400	1.17	1.09
		0.09	4.63			1.57	1.23
		0.15	3.90			2.13	1.75
	600	0.05	8.72		600	1.19	1.29
		0.09	7.72			1.98	2.08
		0.21	5.16			2.18	2.07
	800	0.09	11.7		800	1.09	1.79
		0.12	11.45			1.75	2.43
		0.14	9.91			1.94	2.69
	1000	0.04	21.54		1000	0.92	3.59
		0.14	15.41			1.60	4.16
		0.22	12.60			1.85	4.43

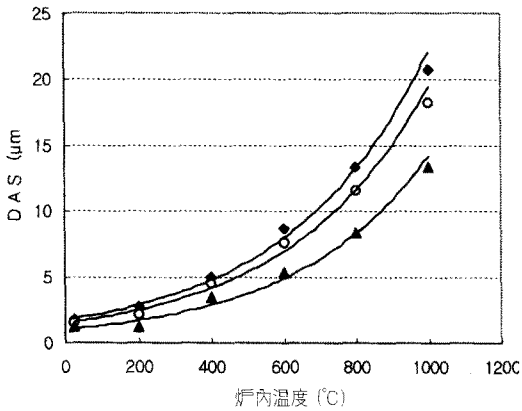


(a) Cu 初晶

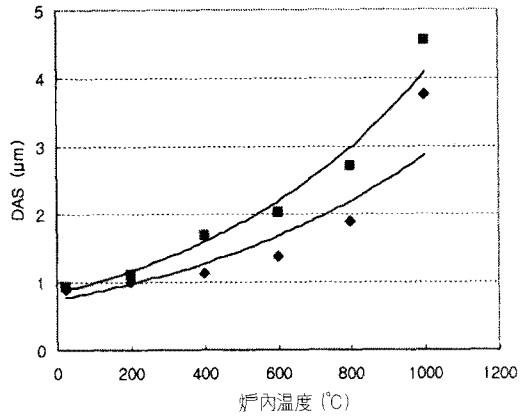


(b) Cu<sub>2</sub>O 初晶

〈그림5〉 산소농도와 DAS의 관계 (▲:25 \* :200 ●:400 △:600 □:800 ○:1000 °C)



(a) Cu 初晶 (◆:0.05, ○:0.10, ▲:0.20%)



(b) Cu<sub>2</sub>O 初晶 (◆:1.0, ■:2.0%)

〈그림6〉 산소농도별 노내온도-DAS의 관계

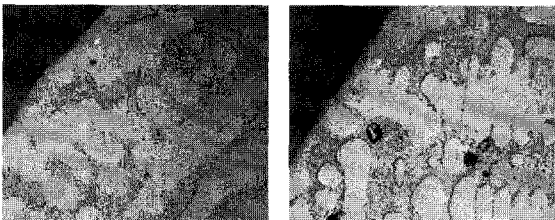
〈그림5·6〉에서도 알 수 있는 것처럼 DAS는 냉각속도(응고시 분위기온도) 뿐만 아니라 산소농도의 함수이기도 하다.

이상의 결과로부터 용융흔의 산소농도 및 DAS를 측정하여 DAS-산소농도의 그래프에서 용융흔 생성시의 분위기온도를 추정하는 것은 충분히 가능하다고 할 수 있다.

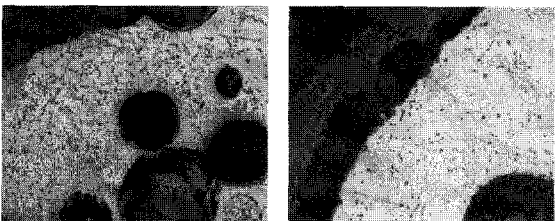
### 3.1.3 실험 1차용융흔의 화염노출

화염에 노출시킨 후의 試藥 용융-응고샘플과 실험 1차용융흔샘플을 〈사진6〉에 나타낸다.

금속조직의 사진으로부터 알 수 있는 것처럼 ①, ②샘플 모두 800°C, 1000°C의 화염 속에 노출시킨 후에도 DAS 및 산소농도에 거의 변화는 없었다. 이는 산화조직은 銅線이 산화되어 있는 상태에서는 단락하여 용융·응고하는 과정에서 생기는 것, 銅線이 산화되어 있지 않은 상태에서는 단락하여 용융하여 분위기 중의 산소를 흡수하여 응고하는 과정에서 생기는 것을 생각하면 화염 또는 고온에 노출되어도 용융하지 않는 한 산화조직은 변화하지 않은 것은 당연하다고 생각된다.



800°C, 화염 노출 후(DAS:87 $\mu$ m 산소:0.16wt%) 1000°C, 화염 노출 후(DAS:86 $\mu$ m 산소:0.17wt%)  
(a) Cu와 Cu<sub>2</sub>O의 분말에 의한 용융-응고 샘플(×100)



800°C, 화염 노출 후(DAS:19 $\mu$ m 산소:0.05wt%) 1000°C, 화염 노출 후(DAS:26 $\mu$ m 산소:0.05wt%)  
(b) 半断線 溶融痕의 샘플(×400)

〈사진6〉 화염노출 후의 금속조직

여기에서 노출전후에서 DAS와 산소농도가 조금 다른 것은 오리지널 샘플과 노출샘플이 완전히 같지 않은 것에 기인한 것으로 생각된다. 試藥에 의한 용융-응고샘플의 경우에는 같은 용융흔 속의 시료이긴 하지만 研磨面이 다른 점, 같은 연마면이더라도 장소에 따라서 다소 다른 경우도 있을 것이

다. 또한 半断線 1차용융흔의 경우에는 芯線을 표면 산화시킨 후에 부하를 걸어 단락한 것이지만 균일하게 산화시키는 것은 곤란하며 또한 설명 산화정도를 균일화시켰다고 하더라도 같은 정도 산소농도의 용융흔을 얻을 수 있다고는 말할 수 없으므로 다소의 차이가 생긴 것으로 생각된다.

이러한 점에서 화재에 노출되어도 용융흔이 재용융하지 않는 한 산화조직에 의한 용융 감정이 가능한 것으로 판단된다.

### 3.1.4 2차용융흔

〈표5〉와 같이 DAS의 측정이 가능했던 15개의 시료에 대하여 DAS와 산소농도에 따라 추정 분위기온도를 구한 결과, 단락시의 분위기온도의 측정치(560°C以上)와 추정온도는 일치하지 않고 실제 온도보다 높았다. 그 이유는 2차용융흔의 크기가 1차용융흔보다 커서 냉각속도가 보다 늦어진 점과 실제의 용융흔은 단락지점에서 쳐져 내려서 응고하므로 열전대의 측정위치와 응고지점의 온도가 다른 것에 기인하는 것으로 여겨진다.

이상으로부터 1차용융흔은 대략 400°C 이하, 2차용융흔의 경우에는 대략 500°C 이상에서 생기므로 용융흔의 판별은 가능한 것으로 생각된다.

〈표5〉 2차용융흔의 DAS, 산소농도에 의한 생성시의 추정온도

No.	短絡時的 温度(°C)	初晶	酸素濃度 (wt%)	DAS ( $\mu$ m)	推定温度 (°C)
A1	480	Cu	0.05	8.01	604
A2	528	Cu	0.15	5.31	560
A3	550	Cu	0.20	4.37	560
A4	572	Cu	0.21	15.48	1,000 ↑
A5	573	Cu	0.18	8.45	779
B1	700	Cu <sub>2</sub> O	1.00	3.25	1,000 ↑
B2	708	Cu	0.12	13.41	880
B3	709	Cu	0.17	15.40	995
B4	756	Cu	0.25	20.04	1,000 ↑
B5	782	Cu	0.05	23.21	1,000 ↑
C1	816	Cu	0.26	30.25	1,000 ↑
C2	852	Cu <sub>2</sub> O	2차까지 미발달		
C3	924	Cu	0.26	35.37	1,000 ↑
C4	960	Cu	0.15	32.66	1,000 ↑
C5	998	Cu	0.20	42.59	1,000 ↑

### 3.1.5 현장샘플에 의한 검증

수집한 현장샘플은 〈표6〉에 나타난 것처럼 1차용융흔 3점(단락하였으나 화재에 이르지 않은 것), 2차용융흔 6점, 1차용융흔인지 2차용융흔인지 불명한 것 1점이었다. 여기서 1



차·2차용융혼의 구분은 샘플 제공자의 정보에 의한 것이다.

〈표6〉 수집 화재현장샘플 일람

No	종류	구분
F1	전기기구 전원코드	1차용융혼
F2	테이블탭코드	1차용융혼
F3	전기기구 전원코드	1차용융혼
F4	석유팬히터 전원코드	불명
F5	전기기구 전원코드	2차용융혼
F6	석유팬히터 전원코드	2차용융혼
F7	세탁기 전원코드	2차용융혼
F8	수족관용 전원코드	2차용융혼
F9	에어컨 전원코드	2차용융혼
F10	테이블탭코드	2차용융혼

〈표7〉 생성시 분위기온도의 추정

No	출현조직	산소농도(wt%)	DAS(μm)	추정온도
F1	Cu初晶	0.18	5	580°C <sup>*1</sup>
F2	미출현	- <sup>*2</sup>	-	-
F3	Cu初晶	0.09	1	RT(25°C)
F4	미출현	-	-	-
F5	Cu初晶	0.15	12	874°C
F6	미출현	-	-	-
F7	미출현	-	-	-
F8	미출현	-	-	-
F9	Cu初晶	0.16	8	731°C
F10	미출현	-	-	-

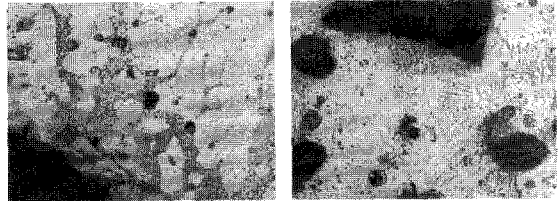
注) \*1) F1샘플은 半断線에 의한 過電流 용융혼으로 DAS法은 過電流 溶断에는 적용할 수 없다. 過電流 溶断의 경우, 주 율열로 芯線이 銅의 용점을 넘어 溶断하여 용융혼은 고온 芯線에 溶着하여 응고하므로 분위기온도를 반영하지 않는다.  
\*2) 酸化組織이 출현하지 않았으므로 해당 데이터가 없음.

수집한 현장샘플에 대해 연마하여 DAS 및 산소농도를 측정하여 참조용 DAS테이블에서 분위기온도를 추정한 결과를 〈표7〉에 나타낸다.

2차용융혼인 F5의 추정분위기온도는 874°C, 마찬가지로 F9(사진7)는 731°C이었다. 또한 1차용융혼인 F3(사진8)의 추정분위기온도는 RT(25°C)이었다.

여기에서 1차용융혼이 생기는 분위기온도는 室温~300°C 전후(아주 높아도 400°C 이하), 2차용융혼이 생기는 분위기온도를 500°C 이상이라고 생각하면 上記의 결과는 이에 합치하는 것으로 말할 수 있다.

이러한 점에서 DAS法에 의한 분위기온도의 추정이 1차·2차용융혼의 판정에 유효한 것이 검증되었다고 생각한다.



〈사진7〉 F9 샘플의 금속조직 (×400) 〈사진8〉 F3 샘플의 금속조직(×400)  
DAS : 8μm, 酸素濃度 : 0.16wt% DAS : 1μm, 酸素濃度 : 0.09wt%

### 3.1.6 소결론

芯線을 미리 산화시켜 두고 분위기온도를 바꿔 赤外線炉에서 단락시킨 용융혼에 대하여 氧化 해석에 의해 산소농도 및 DAS를 측정할 결과, 산소농도가 같으면 DAS와 분위기온도에 〈그림6〉과 같은 관계가 있음을 알았다.

이를 이용하여 용융혼에 산화조직이 출현하고 또한 용융혼이 화재에 의해 再溶融하지 않는 한 실제 용융혼이 생성되었을 때의 분위기온도를 추정할 수 있고, 이에 의거 1차·2차용융혼의 판정이 가능하다는 것이 판명되었다고 생각한다. 즉, 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- 1) 용융혼의 산화조직중의 DAS는 냉각속도와 산소농도의 함수이다.
  - 2) 용융혼의 산화조직중의 산소농도와 DAS를 측정하면 〈그림5〉 또는 〈그림6〉의 그래프에서 용융혼 생성시의 분위기온도를 추정할 수 있다.
  - 3) 용융혼의 산화조직은 화염에 노출되어도 재용융하지 않는 한 변화하지 않는다.
  - 4) 용융혼에 산화조직이 출현하고 또한 용융혼이 화재에 의해 재용융하지 않는 한 〈그림5〉 또는 〈그림6〉의 그래프를 이용하여 용융혼이 생성되었을 때의 분위기온도를 추정할 수 있고, 이에 의거 1차·2차용융혼의 판정이 가능하다.  
단, 다음 점에 유의할 필요가 있다.
- ① 400°C 부근은 1차·2차용융혼 모두 가능성이 있으므로 분위기온도 추정만으로는 판정할 수 없는 Gray Zone 이 존재한다.
  - ② 용융혼의 크기에 따라 냉각속도가 변화하므로 DAS-분위기온도곡선으로 구한 추정온도와 실제로 용융혼이 생길 때의 온도에 괴리를 가져오는 경우가 있다.

- ③ 산화조직이 나오지 않을 때(아주 낮은 산소농도) 및 全面 共晶(산소농도가 0.39 wt%)에서는 덴드라이트가 나오지 않으므로 이 DAS法은 적용할 수 없다.
- ④ 半断線과 같은 過電流 溶断에 의해 생긴 용융흔은 분위기온도를 반영하지 않으므로 이 DAS방법에 의해 판별할 수 없다.

### 3.2 非酸化組織

#### 3.2.1 조직관찰 결과, 측정방법의 검토 및 분위기온도와 셀사이즈의 관계

##### (1) 조직관찰

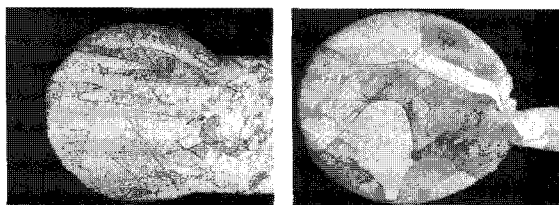
〈표8〉에 단면조직의 관찰결과를 나타낸다.

〈표8〉 단면조직 관찰 결과

단락시 분위기온도	Type1 샘플수	Type2 샘플수	비용융부와 경계가 명료한 샘플수	비용융부와 경계가 명료하지 않은 샘플수
실온~400℃	300(100%)	0	26(100%)	0
600~1,000℃	19(63.3%)	11(36.7%)	1(5.3%)	18(94.7%)

제작된 샘플의 단면조직을 우선 〈사진9〉와 같이 Type1과 Type2로 분류할 수 있었다. 이 중에서 특히 타입2는 600℃ 이상의 고온분위기하의 용융흔에서 그 출현비율이 큰 특징이 있었다.

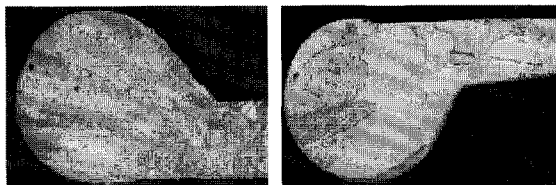
타입1과 같은 결정은 柱狀結晶이라고 부르며, 주조공정에서 주형에 의한 급냉각에 의해 외곽부분에서 중앙부분을 향해 성장하는 상태로 관찰된다. 본 실험에 있어서도 400℃ 이하의 샘플 모두에서 急冷을 나타내는 柱狀結晶이 관찰된 것에 비해 600℃ 이상에서는 그 출현율이 저하되었다는 점에서 분위기온도를 포함한 응고조건에 따라 관찰되는 조직의 상태가 변화하는 것을 알 수 있었지만, 柱狀結晶 그 자체는 고온 영역에서도 관찰되는 점에서 결정의 상태만으로는 1차·2차 용융흔의 식별은 불가능한 것으로 판단된다.



Type1(결정 성장방향이 명확한 柱狀結晶) Type2(결정 성장방향이 불명확한 결정)

〈사진9〉 타입별 결정입자 패턴

또한 용융흔의 용융부와 非溶融 芯線部の 단면을 〈사진 10〉과 같이 분류할 수 있었다. 그 결과 400℃까지의 샘플에서는 26점 중 모두에서 용융부와 비용융부의 경계가 명확함에 비해, 600℃ 이상의 분위기에서 단락시킨 샘플에서는 19점 중 1점을 빼고 경계가 불명확하였다.



(a) 용융부와 비용융부의 경계가 명료한 샘플 (b) 용융부와 비용융부의 경계가 명료하지 않은 샘플

〈사진10〉 용융부와 비용융부에 있어서 차이

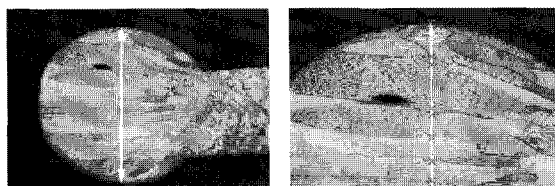
이러한 차이가 생긴 메커니즘에 대해서는 명확히 알 수 없지만 하지만, 「고온분위기 하에서 단락한 경우에는 용융부와 비용융부의 경계가 불명확하게 된다」는 점을 통해 1차·2차 용융흔을 식별할 때 참고자료로 할 수 있을 것으로 판단된다.

##### (2) 셀사이즈 측정방법의 검토

위에서 정의한 Type1, Type2에 대해 다음과 같은 측정방법을 설정한다.

##### 【Type1】

결정의 성장방향이 명확하므로 성장방향에 대해 대략 직각이 되도록 직선을 긋고, 그 교점을 구한다. 단, 이러한 柱狀結晶 중에는 용융흔의 소선 반대방향 끝을 향해 폭이 확대하는 경향이 있으므로 동일 관찰면일지라도 素線側보다도 소선 반대방향측에서 측정된 셀사이즈가 큰 경우가 있다. 이러한 점 때문에 〈사진11〉과 같이 관찰면의 대략 중앙부에 직선을 긋고, 그 직선과 결정의 粒界와의 교점수를 구하고, 그 교점수에서 1을 뺀 수로 직선의 길이를 나뉘 셀사이즈를 구한다.



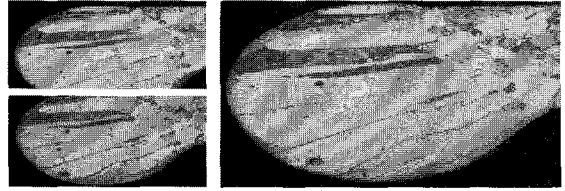
〈사진11〉 타입1에 있어서 측정용 직선의 긋는 방법 예(×표시 : 交点)

즉, Type1의 셀사이즈는 다음 식에 의거 구한다.

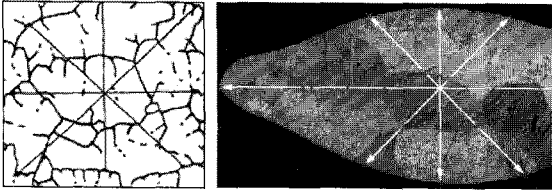
$$CS = \frac{L}{n-1} \quad (CS: 셀 사이즈, L: 직선의 길이, n: 結晶粒界와의 交点数)$$

【Type2】

결정의 성장방향이 확실하지 않으므로 직선의 방향을 결정하기 어려우므로 「알루미늄의 Dendrite Arm Spacing과 냉각속도의 측정법(일본 軽金属学会)」<sup>6)</sup>을 참고하여 4개의 직선을 이용한 交線法(그림7 및 사진12 참조)에 의거 측정하였다.



〈사진13〉 사진합성의 예



〈그림7〉 交線法の 선 긋는 방법 〈사진12〉 타입2의 측정용 선긋기 예

4개의 직선에 대해서는 각각 타입1과 마찬가지로 직선의 길이를 교점수-1로 나눈 후에 4개의 값을 평균화하여 셀사이즈를 구하였다.

그리고 직선을 긋는 위치에 대해서는 임의성을 피하기 위해 〈사진12〉와 같이 용융혼의 대략 중앙부에 4개의 교점이 위치하도록 하였다. 즉, Type2의 셀사이즈는 다음 식에 의거 구한다.

$$CS = \left\{ \left( \frac{L_1}{n_1 - 1} \right) + \left( \frac{L_2}{n_2 - 1} \right) \right\} + \left\{ \left( \frac{L_3}{n_3 - 1} \right) + \left( \frac{L_4}{n_4 - 1} \right) \right\} / 4$$

단, CS : 셀 사이즈 L<sub>1</sub>~L<sub>4</sub> : 4개의 직각 각각의 길이, n<sub>1</sub>~n<sub>4</sub> : 4개 直線 각각의 結晶粒界와의 交点数이다.

또한 타입1, 타입2 어느 경우라도 공통적으로 셀 사이즈측정용 단면사진을 촬영할 때에 금속현미경의 최저배율로도 한 시야에 들어가지 않는 경우에는 시야를 바꿔 복수의 사진을 촬영하고, 이를 PC 위의 화상처리소프트웨어에 의해 〈사진13〉과 같이 1매의 画像로 합성하여 용융혼의 단면 전체에 직선을 그어 구하는 것으로 하였다.

(3) 분위기온도와 셀사이즈의 관계

샘플을 대략 중앙까지 연마하여 용융혼의 단면 대략 중앙부에서 측정된 셀사이즈 및 용융혼의 크기(체적)의 측정 결과를 〈표9〉에 나타낸다.

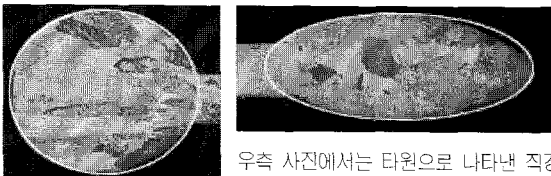
〈표9〉 온도별 셀사이즈와 용융혼의 체적

온도 (°C)	셀사이즈 (μm)	체적 μm <sup>3</sup>	평균셀사이즈 (μm)	온도 (°C)	셀사이즈 (μm)	체적 μm <sup>3</sup>	평균셀사이즈 (μm)
25	29.2	0.0426	32.6	600	80.5	0.1399	83.6
	39.2	0.0667			64.2	0.1008	
	20.0	0.0414			86.2	0.1232	
	29.3	0.0649			79.7	0.1358	
	42.0	0.1304			60.5	0.0296	
	23.0	0.0217			70.5	0.1440	
	36.9	0.1192			77.0	0.1222	
	40.8	0.2075			121.6	0.3123	
					112.2	0.2653	
200	35.7	0.1635	40.8	800	114.6	0.2699	140.3
	29.7	0.0462			177.1	0.6280	
	52.4	0.2064			231.3	0.4142	
	57.5	0.2726			165.3	0.2956	
	42.5	0.1355			88.8	0.0458	
	41.6	0.1540			93.5	0.2190	
	35.5	0.1146			111.3	0.1560	
	31.2	0.0782					
400	32.3	0.0434	50.9	1000	191.7	0.2368	170.3
	64.3	0.1389			124.2	0.2165	
	65.6	0.1477			197.9	0.5073	
	66.6	0.1544			150.4	0.2225	
	50.2	0.1816			146.3	0.2458	
	40.3	0.1400			178.6	0.3769	
	45.0	0.1048			250.6	0.5236	
	42.6	0.0702			122.4	0.2811	

5) 용융혼의 체적계산에 대해

연마에 의해 나타나는 용융혼의 断面組織은 용융혼의 一面이며, 3차원적인 溶融部와 非溶融部의 경계나 氣泡의 분포까지 알기 어렵다. 따라서 대략 中央部까지 연마된 용융혼의 断面에 있어서 그 形狀을 球体 또는 楕圓球의 形상으로 간주하고, 그 직경 또는 長徑 및 短徑을 측정하여 전체의 대략적인 체적을 구하는 것으로 하였다.

또한 氣泡은 적어도 연마면에 관찰되는 것의 체적은 전체 체적에서 제외할 필요가 있으므로 역시 球形 또는 楕圓球体로 간주한 체적계산을 하여 전체의 체적에서 이 기포 부분만큼 빼서 계산하였다.



좌측 사진에서는 용융혼을 圓으로 나타낸 直徑을 갖는 球体로 간주하여 다음 식에 의해 전체의 체적을 구한다.

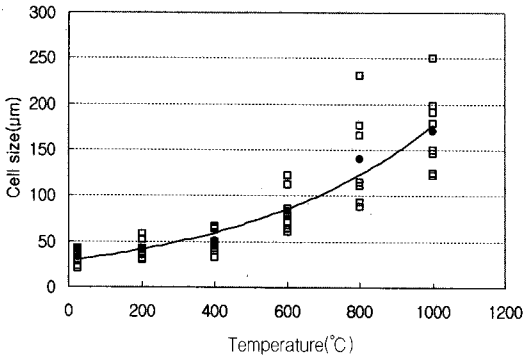
$$V(mm^3) = \frac{40r^3}{3 \times 10^9} \quad (V : \text{용융혼 전체의 체적}, r : \text{용융혼의 반경}(\mu m))$$

우측 사진에서는 타원으로 나타낸 직경을 갖는 타원구체로 간주하여 다음 식에 의거 전체의 체적을 구한다.

$$V(mm^3) = \frac{40r_1r_2^2}{3 \times 10^9} / 8 \quad (V : \text{용융혼 전체의 체적}, r_1 : \text{타원의 長徑}(\mu m), r_2 : \text{타원의 短徑}(\mu m))$$

① 셀사이즈의 온도의존

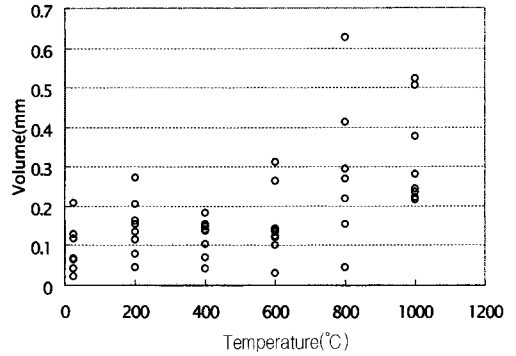
각 온도에 있어서 셀사이즈의 평균을 도시하면 <그림8>과 같다. 분위기온도의 상승에 따라 셀사이즈가 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 것은 셀사이즈가 용융흔이 응고할 때의 냉각속도에 의존하는 것을 나타내고 있는 것이라 생각된다.



<그림8> 雰囲気温度와 셀 사이즈  
(● : average cell sizes)

각 온도에 있어서 셀사이즈의 평균은 대략 지수회귀곡선을 따르고 있지만, 동일온도 내에서 편차는 분위기온도가 높을수록 커지고 있다. 600°C 이상에서는 셀 사이즈의 최대치와 최소치의 차가 61~143μm로 커져 단순히 셀 사이즈만으로 단락시의 온도를 추정하는 것은 곤란한 것으로 판단된다.

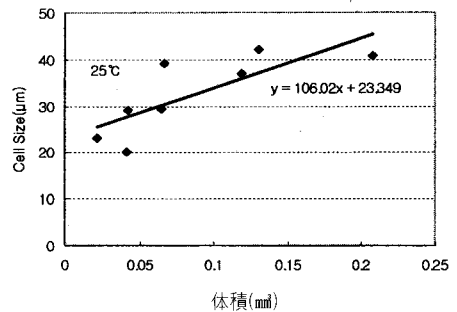
또한 <그림9>에서 알 수 있는 것처럼 용융흔의 크기는 분위기온도가 높을수록 커지는 경향이 있으며, 크기의 편차도 커지고 있다. 용융흔의 냉각속도는 용융흔의 열용량의 영향을 받는다는 점에서 800°C, 1000°C에 있어서 셀사이즈의 큰 편차는 용융흔의 체적의 편차에 대응하고 있다.



<그림9> 각 분위기온도별 용융痕의 體積 (mm)

② 셀사이즈의 용융흔사이즈 의존성

각 온도별 셀사이즈와 용융흔 체적의 관계는 <그림10>과 같으며, 각 온도별로 용융흔의 체적과 셀사이즈는 대략 직선 관계에 있다. 푸리에의 법칙에 의하면 열전도에 의한 熱流束은 물질의 열전도율과 온도구배에 비례한다<sup>6)</sup>. 본 실험에 있어서 동일 분위기온도의 경우에 온도구배가 같다고 가정하면, 용융흔의 냉각속도는 용융흔의 열용량(체적에 비례)이 커질수록 냉각속도는 늦어져서 셀사이즈가 커지는 것으로 생각된다<sup>7)</sup>.



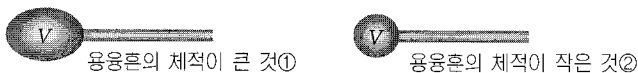
6) 임의의 위치 x의 点線面을 통하여 이동하는 熱流束 q(heat flux : 단위는(W/m<sup>2</sup>))는  $q = -\lambda(d\theta/dx)$  단,  $\lambda$ : 열전도율(W/(m·K)),  $d\theta$ : 온도차이다. 위의 관계를 푸리에의 법칙(Fourier's law)이라고 부른다.

7) 용융흔의 체적과 셀사이즈의 열역학적 관계

$Q = cm\Delta t = cpV\Delta t$  여기서, Q : 용융흔의 열용량, c : 비열, m : 질량, V : 체적, ρ : 밀도, Δt : 온도차 이다.

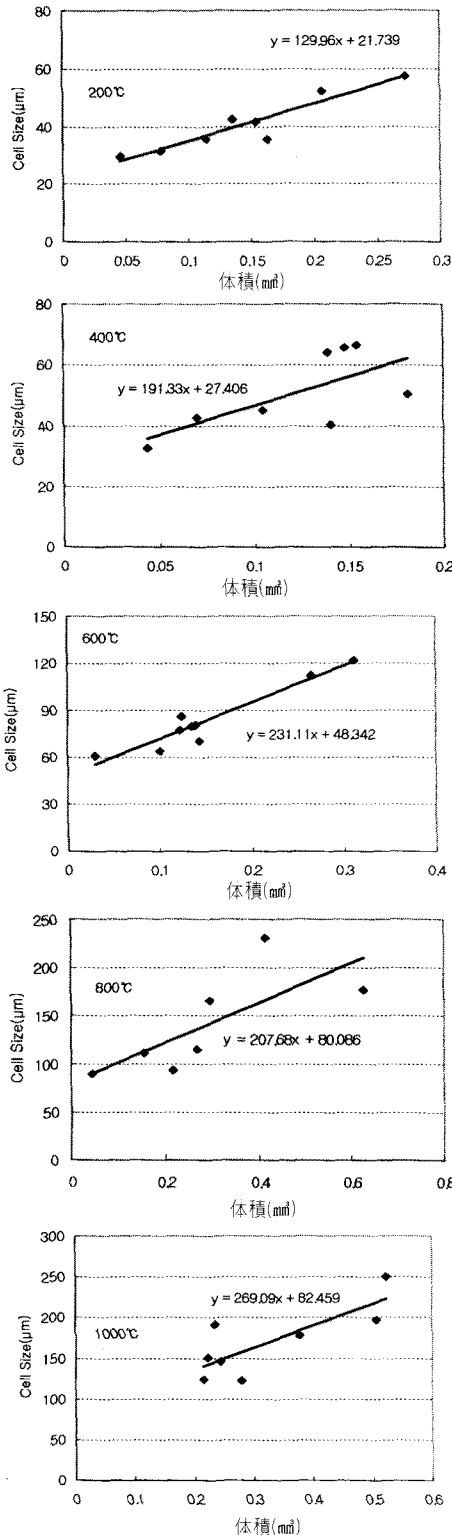
즉, 용융흔의 열용량은 체적에 비례한다.

다음은 용융흔의 체적과 셀사이즈의 관계를 설명하고 있다.

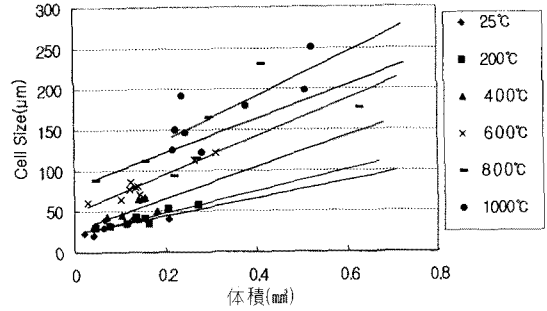


용융흔①의 체적 V가 용융흔②의 체적 V보다 크므로 용융흔①의 쪽이 Q가 크다. 용융흔①②의 熱傳導路(素線의 단면 직경)가 같으면 용융흔①은 용융흔②보다 열용량이 크므로 식기 어려워 응고속도가 느릴 것이다. 따라서 용융흔②와 동일한 분위기온도에서 생성된 용융흔①의 경우, 용융흔②보다 셀사이즈가 크다.

마찬가지로 용융흔①과 같은 분위기에서 생긴 용융흔②의 셀사이즈는 용융흔①보다 작다.



〈그림10〉 온도별 셀사이즈와 용융혼 체적과의 관계



〈그림11〉 셀사이즈와 용융혼 체적과의 관계

### ③ 용융혼 생성시의 분위기온도 추정

〈그림10·11〉과 같이 「셀사이즈는 용융혼이 생성되었을 때의 분위기온도 및 용융혼의 체적에 의존한다」라는 것을 이용하면, 사고현장에서 채취된 용융혼의 셀사이즈 및 체적을 측정하여 이 용융혼이 생성되었을 때의 온도를 추정할 수 있을 것이다.

단, 이 경우, 熱流束은 단위시간·단위면적당의 熱流이며, 이들은 직경 0.4mm의 素線 1개를 이용하여 만든 결과이므로 용융혼의 체적과 熱傳導路가 되는 芯線 단면적의 비를 〈그림11〉의 데이터와 단락시의 분위기온도를 추정하려고 하는 사고 용융혼의 그것과 맞추기 위한 환산이 필요하게 된다. 즉, 〈그림11〉의 그래프는 직경 0.4mm의 소선 1개를 이용하여 만들었으므로 용융혼의 체적을 0.4mm 소선 1개의 면적당으로 환산해야 한다.

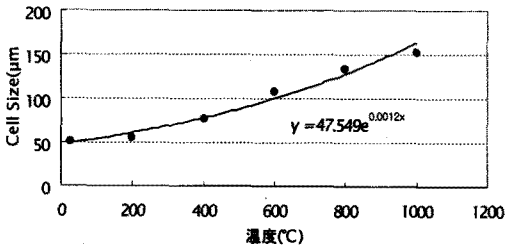
예를 들면, 용융혼이 직경 1mm의 球形이며, 0.18mm의 素線이 10개 연결되어 있다고 하자. 이 때의 상태를 열전도가 0.4mm의 동선 1개분의 상태로 환산하였을 때의 체적은 다음 식에 의거 약 0.26mm³가 된다.

$$\text{환산체적(mm}^3\text{)} = \frac{\text{용융혼체적}}{\text{실험시료素線의 심선직경}^2} = \frac{\text{용융혼에 연결된 芯線數} \times \text{심선직경}^3}{0.2^2} = \frac{10 \times 0.09^3}{0.2^2} = 0.2584\text{mm}^3$$

그리고 이 체적 및 〈그림10〉의 직선함수식을 이용해 각 온도별로 셀사이즈를 추정하면 〈표10〉이 얻어지고, 이를 그래프로 나타내면 〈그림12〉가 얻어진다. 이 그래프에 실제 용융혼에서 얻어진 셀사이즈를 대입하였을 때의 온도가 추정 결과가 된다. 셀사이즈가 100μm라고 하면, 이 용융혼이 생성되었을 때의 분위기온도는 약 600°C라고 추정할 수 있다.

〈표10〉 환산체적 0.26mm<sup>3</sup>일 때의 각 온도별 셀사이즈 추정

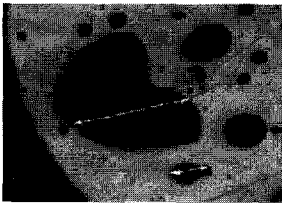
구분	함수식(x: 체적, y: 셀사이즈)	결과(y)
25°C	$y_{25} = 106.02x + 23.349$	50.9142
200°C	$y_{200} = 129.96x + 21.739$	55.5286
400°C	$y_{400} = 191.33x + 27.406$	77.1458
600°C	$y_{600} = 231.11x + 48.342$	108.4306
800°C	$y_{800} = 207.68x + 80.086$	134.0828
1000°C	$y_{1000} = 269.09x + 82.459$	152.4224



〈그림12〉 용융혼 환산체적이 0.26mm<sup>3</sup>인 경우, 각 온도별 셀사이즈

### 3.2.2 기포에 관한 검토

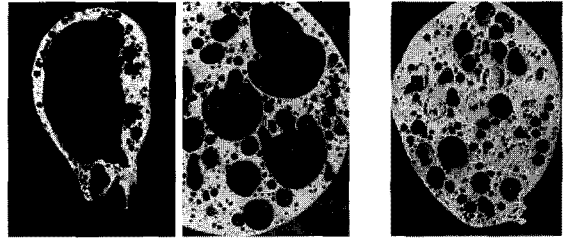
실험으로 만들어진 샘플의 기포 주변부분을 관찰해보니, 〈사진14〉와 같이 기포의 端部에 결정의 粒界가 관찰되는 경우가 있다. 이러한 점은 응고과정에서 기포가 생긴 경우라도 결정의 성장을 방해하는 것은 아님을 나타내고 있다고 생각한다.



〈사진14〉 기포 위에 가상선을 그은 예

따라서 결정의 성장방향이 명확하고, 기포의 端部에 대칭되는 것으로 여겨지는 結晶粒界가 관찰되는 경우에는 기포 위에 結晶粒界를 가한 가상선을 긋는 것으로써 계측용의 직선을 그은 부분에 기포가 존재하는 경우라도 셀사이즈의 측정이 가능할 것으로 판단된다.

단, 실제 용융혼에서는 〈사진15〉와 같이 단면의 거의 대부분을 기포가 차지하고 있는 것, 또는 〈사진16〉과 같이 수많은 기포에 의해 셀사이즈의 측정이 곤란한 것이 있는 등 그 발생 상황에 따라서는 이 셀사이즈법의 적용이 불가능한 케이스도 있는 것으로 생각된다.



〈사진15〉 단면 대부분을 기포가 차지한 예    〈사진16〉 수많은 기포의 예

또한 셀사이즈는 단락시의 분위기온도 및 체적에 의한 영향을 받으므로 본래라면 연마 전에 기포체적을 미리 파악할 필요가 있다. 따라서 어디까지나 개략적인 계산법이지만, 연마면에 관찰되는 기포에 대해 이를 원형, 타원형으로 간주하여 직경 또는 長徑, 短徑을 측정하여 기포체적의 합계를 구하는 것이 필요하다. 적어도 연마면에 관찰되는 기포의 체적은 전체의 체적에서 제외하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

### 3.2.3 화재시 재가열에 의한 단락시 흔적의 잔존 확인

한번 연마, 해석한 샘플을 재가열한 후 연마하는 것은 어려우므로 지금까지의 측정결과 및 용융혼 체적을 기초로 추정된 셀 사이즈와 실측치를 비교하는 것으로 검토하였다. 즉, 여기서 셀사이즈 추정치는 〈그림10〉를 통해 분위기온도와 체적을 이용하여 구하였다.

재가열 후의 각 샘플에 있어서 셀사이즈의 추정치와 실측치를 〈표11〉에 나타낸다.

〈표11〉 용융혼의 재가열 후 셀사이즈의 추정치와 실측치의 비교

분위기	No.	재가열온도	재가열시간	셀 사이즈(μm)	
				추정치	가열 후 실측치
대기중	1	800°C	5분	27.0 32.5	31.8 35.1
	2	800°C	30분	41.2 41.4	33.8 35.1
	3	1,000°C	5분	41.6	34.3
Ar	4	600°C	5분	27.0 51.3	29.9 57.6
	5	800°C	10분	25.8 49.6	22.6 48.9

분위기온도가 낮은 조건하에서 생성된 1차용융혼은 그 후의 화재에 의해 가열되는 것을 상정하여 실온하에서 만든 단락혼을 〈표3〉의 조건으로 재가열한 바, 〈사진17〉과 같이 대기중 가열로 용융혼의 표면에 酸化層(최대로 약 100μm)이 형성되었지만, 코어층에는 특별히 변화는 없고 셀을 그대로 잔존하였다.



〈사진17〉 대기중 재가열하여 표층에 산화층(右 화살표)이 생긴 샘플 (좌 화살표부분은 산화층이 탈락한 부분)

한편, 조직의 잔존 확인을 위해 행한 Ar분위기 중에서 재가열한 샘플에서는 〈사진18〉과 같이 비용융부의 가공조직이 재가열에 의해 비대화되어 있는 것에 비해 단락부의 조직이 실은 단락시의 작은 셀사이지를 띠고 있는 상태가 관찰되는 외에, 용융부와 비용융부의 경계도 잔존하고, 셀사이즈가 작은 용융부와 비대화된 가공조직부분에 의해 오히려 보다 명확해졌다.



〈사진18〉재가열에 의해 비대화된 가공조직과 단락(응용)부의 셀사이즈

실제 1차용융혼은 화염과 열 노출에 의해 표면이 산화되어 표면에 산화층이 생긴다. 이러한 산화층은 화열 노출에서 화재현장의 채취 또는 검안용 샘플의 제작과정까지의 사이에 탈락할 가능성이 있다. 따라서 이러한 경우에는 셀 사이즈 및 단락흔 체적을 측정/산출할 때에는 적어도 아래 사항을 주의 하여야 한다.

- ㉠ 사고현장에서 용융혼을 채취할 때에 表層에 산화층이 발생되어 있는 경우에는 이를 탈락시키지 않도록 채취한 후 이를 포함하여 樹脂 내에 넣어 경화시킨다.
- ㉡ 셀 사이즈는 용융혼 중심부에 잔존한 銅光沢部分만을 대상으로 하여 측정/계산하고, 체적산출의 근거가 되는 용융혼의 직경은 산화층을 포함하여 계측한다.
- ㉢ 산화층의 일부 또는 용융부의 산화층 모두가 탈락되어 있다고 생각되는 샘플에 대해서는 산화층이 잔존하는 근방의 素線部 단면방향으로 연마하여 산화층의 두께

를 측정하여 용융혼 직경에 가산하여 산화층 생성전의 용융혼 체적을 산출한다.

### 3.2.4 화재현장 샘플에 의한 검증

화재현장에서 수거된 샘플 중, 주변정보로부터 틀림없이 2차용융혼이라고 생각되는 것에 대해 셀사이지를 측정하여 추정된 분위기온도가 상황증거에 의한 판단과 일치하는지를 검증하였다. 그 결과를 〈표12〉에 나타낸다.

〈표12〉 화재현장샘플에 의한 검증 결과

No.	샘플수집시의 주변정보	셀사이즈 (μm)	환산체적 (mm <sup>3</sup> )	추정 분위기 온도(°C)
1	정수기의 전원코드에 생긴 단락흔으로 플러그 근방에 생긴 것으로 부하측에 수개의 단락흔이 있는 것으로 보아 2차용융혼임	101.0	0.109	872°C
2	2조식 세탁기의 전원코드에 생긴 단락흔으로 플러그 근방에 생긴 것으로 부하측에 수개의 단락흔이 있는 것으로 보아 2차용융혼임	145.6	0.044	1000°C 이상

### 3.2.5 소결론

용융혼의 단면조직에 酸化組織이 출현하지 않은 경우에는 DAS法을 적용할 수 없으나 이 경우에는 결정입자가 관찰된다. 이 결정입자의 크기(셀사이즈)가 용융혼 응고시의 냉각 속도(주로 분위기온도)에 의존하므로 이러한 성질을 이용하면, 1차·2차용융혼을 식별할 수 있음을 나타내었다.

일반적으로 용융혼의 냉각속도는 용융혼에 연결된 코드 素線을 통하여 열이 전달되므로 그 지배인자는 온도구배(분위기온도)와 伝熱斷面積, 그리고 용융혼의 열용량이라고 생각된다. 따라서 화재사고현장에서 채취한 용융혼은 셀사이즈 뿐만 아니라 용융혼의 크기, 용융혼에 연결되어 있는 導線의 크기 및 개수를 확인할 필요가 있을 것이다.

이러한 데이터로부터 용융혼 체적을 직경 0.4mm의 素線 1개당으로 환산하여 그 환산체적을 이용하여 실험적으로 만든 셀사이즈의 온도별 용융혼 체적에 의한 변화그래프에서 20~1000°C에 있어서 셀사이지를 구해 그 결과의 그래프 지수회귀곡선에서 측정 셀사이즈에 해당하는 분위기온도를 추정할 수 있다.

실제 화재현장 샘플에는 종종 관찰되는 기포가 있는 경우, 결정입자의 성장이 기포에 의해 영향을 받을 수 있으므로 셀 사이즈 측정시에는 주의가 필요하다. 또한 기포의 존재는 용

용융의 열용량에 영향을 미치므로 관찰단면의 기포 크기로부터 용융 속 기포의 체적을 추정하여 기포를 뺀 용융 체적을 구할 필요가 있다.

결정입자의 크기(셀사이즈)는 화재시의 被熱에 의해 변화하지 않는 것이 확인되었으므로 화재에 노출되었다라도 셀사이즈로 용융이 생성되었을 때의 분위기온도를 추정할 수 있다. 이 결과를 기초로 추정 분위기온도가 낮은 경우에는 1차용융, 높은 경우에는 2차용융이라고 식별할 수 있지만, 표층부분에서의 산화층의 발달이 현저한 경우에는 애써 산화층이 탈락되지 않도록 하고, 산화층의 두께를 포함한 체적을 구할 필요가 있다.

그리고 고온분위기 하에서 단락된 샘플의 특징으로서 「溶融部와 非溶融部の 경계가 불명확해진다」라는 점에 대해서도 식별을 할 때 판단기준의 하나로 들 수 있다.

1차용융이 코드 또는 전선 내부의 결합이나 이상으로 단락에 의해 생긴다고 생각할 경우, 주된 피복재료인 폴리염화비닐의 열분해온도는 200~300°C이다. 이에 비해 2차용융은 절연수지에 화재열로부터의 복사열이나 화염이 접촉하여 착화 연소함으로써 절연저항과피에 의해 생긴다고 생각할 수 있다. 일반적인 연질폴리염화비닐의 인화온도(불씨가 있을 때의 착화온도)는 390°C<sup>65)</sup>, 발화온도(불씨가 없을 때의 착화온도)는 500°C 전후<sup>66)</sup>이다. 그러므로 위에서 서술한 열분해·인화·발화온도를 고려한 경우, ①200°C 이하는 1차용융, ②200~300°C 전후이면 대략 1차용융, ③400°C 전후 500°C

이면 대략 2차용융, ④500°C 이상이면 2차용융이라고 생각할 수 있을 것이다.

이상의 결과를 토대로 셀사이즈법을 이용할 때의 1차·2차용융 식별 흐름을 <그림13>에 나타낸다.

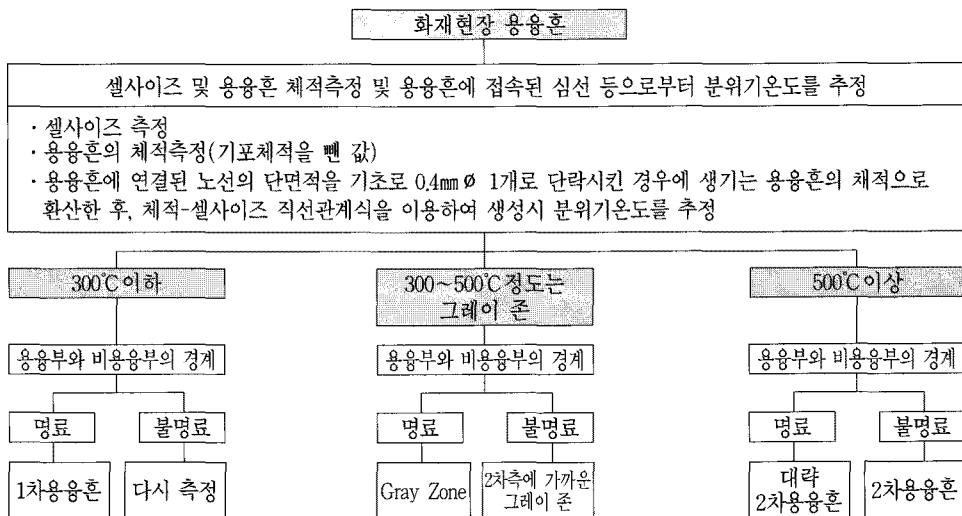
#### 4. 결론

용융은 화재원인규명에 있어서 유력한 단서의 하나라고 말해지고 있으면서도 아직 결정적이고 객관적인 식별방법이 확립되어 있다고는 말하기 어렵다.

이 논문에서 소개한 방법도 어디까지나 용융이 생성되었을 때의 분위기온도를 추정하는 방법의 하나로서 그 가능성을 나타낸 것이다. 실제로는 素線이외에 의한 냉각요인이 추가되는 외에 용융체적을 구형, 타원형으로 간주하여 추정하고 있는 점, 더 나아가서 기포의 존재, 천차만별이라 할 수 있는 용융의 생성조건을 고려한 경우, 그 분위기온도의 추정 결과만으로 식별할 수 없는 점은 부정할 수 없다.

또한 추정결과와 분위기온도에 대해서도 400°C 근방은 1차·2차용융 양방의 가능성을 갖는 그레이 존(gray zone)이 존재하는 등으로 인해 여전히 주변정보, 상황증거는 중요하며, 최종적인 1차·2차용융의 식별 판단에 대해서는 각종 정보로부터 종합적으로 판단하는 것이 중요하다.

그러나 현상황으로서는 이러한 어떤 단서를 포착할 수 있는 정량적인 식별방법을 하나씩 늘려 가는 노력이 필요하지 않을까 생각한다.



<그림13> 셀사이즈법에 의한 용융흔 판별 흐름도



■ 참고문헌

- 1) (財)동경방재지도협회 신화재조사교본 제1권 제1부, p.7(1997).
- 2) (財)동경방재지도협회 신화재조사교본 제1권 제1부, p.28~29(1997).
- 3) 石橋良男, 岸田順次: 電線の 1次、2次溶融痕鑑定方法에 관한 研究(1)、1990年度日本火災学会研究発表会概要集、 p.83~86(1990).
- 4) 石橋良男, 岸田順次: 電線の 1次、2次溶融痕鑑定方法에 관한 研究(1)、1990年度日本火災学会研究発表会概要集、 p.87~90(1990).
- 5) 동경소방청 예방부 조사과 : 전선의 1차, 2차용융혼합정기법에 관한 연구, 火災, Vol.42, No.2(197호), p.15~20(1992).
- 6) 佐藤和広, 杉崎倫男, 柿崎諭, 伊藤允之, 齋藤和英, 岩木正哉: 電線短絡痕에 대한 SIMS, AES를 사용한 표면분석에 의한 감식법, 1996년도일본화재학회연구발표회 개요집, p.282~285(1996).
- 7) 佐藤和広, 福島 一, 佐佐尾滋, 岩木正哉: 電線短絡痕에 대한 SIMS, AES를 사용한 감식법의 검증, 1998년도일본화재학회연구발표회 개요집, p.336~336(1998).
- 8) 사단법인전기설비학회 전기용융혼 판정의 검증에 관한 연구위원회 : 「전기용융혼 판정의 검증」(전기용융혼보이드 속의 가스분석)에 관한 연구위탁(동경소방청으로부터의 위탁에 의한) 보고서(1999)
- 9) 동경소방청감수 : 신화재조사교본 제3권 전기화재편, 재단법인 동경방재지도협회, p.363~367(1999)
- 10) 石井義雄 : 화재중에 생기는 전기적 용융혼적의 발생기구에 대하여, 과학경찰연구소보고, Vol.21, No.2, p.60~63(1968)
- 11) 森俗義, 奥田 一郎 : 전선의 전기적 발열현상에 관한 실험적 연구, 科学警察研究所報告, Vol.22, N.3, p.21~32(1969)
- 12) 杉山卓, 内木光南 : 전기적 용융혼의 형상적 관찰(제1보) 1.저전압누전혼 및 단락혼, 과학경찰연구소보고, Vol.22, No.3, p.33~42(1969).
- 13) 石井義雄 : 전기적 용융혼적의 금속조직에 관한 연구, 과학경찰연구소보고, Vol.23, No.4, p.27~30(1970).
- 14) 高木本 : 전선의 금속조직에 미치는 熱履歴의 영향, 과학경찰연구소보고, Vol.24, No.2, p.48~56(1971).
- 15) 石井義雄 : 라스의 浴断時에 관찰되는 특이한 발열현상에 대하여, 火災, No.25, p.39~42(1975).
- 16) 大場邦雄 : 전선용융혼의 生起原因 식별에 대하여, 1980년도 科学警察大学校研究生研究報告 p.22~42(1980).
- 17) 三橋信雄 : 전기적용융혼의 기공분포에 의한 1차용융혼과 2차용융혼의 식별, 과학경찰연구소보고, Vol.48, No.1, p.20~26(1995)
- 18) 諸田正規 : 비닐코드의 半断線 개소에 생기는 용융혼에 대하여, 과학경찰연구소 법과학연구소 감정기술과 제14기연수생연구보고집, p.91~104(1997).
- 19) 名古屋市消防局 소방학교소방연구실 : 재현실험에 의한 短絡痕의 작성과 용융혼감정, 제28회화재조사연구발표회개요집(나고야시소방국 消防部 消防課), p.110~115(1999).
- 20) 小谷勝規 : 短絡痕의 外觀的 特徵으로 判別하는 方法의 有効性에 대하여, 京消研究報告集(京都市消防局消防学校 研究課), Vol.16, pp.34~39(1999).
- 21) 小谷勝規 : 短絡痕의 外觀的 特徵으로부터 判別하는 方法의 有効性에 대하여(2), 京消研究報告集(京都市消防局消防学校研究課), Vol.17, pp.41~46(2000).
- 22) 伊藤允之 : 電線の 短絡痕과 火災, '93予防時報175, p.28~33(1993).
- 23) 舛井正義 : 火災에 의한 비닐코드 용융혼에의 탄소혼입 可能性, 電気学会論文集A, Vol.112, No.1, pp.78~79(1992).
- 24) 諸田正規 : 비닐코드의 半断線箇所に 생기는 溶融痕에 대하여, 日本鑑識科学技術学会 第3回 学術集会講演要旨集, p.123(1997).
- 25) DAVID W. LEVINSON : Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires, Fire Technology, Vol.13, No.3, pp.211-222(1977).
- 26) Did The Short Cause The Fire Or Did The Fire Cause The Short, Fire and Arson Investigator, Vol.30, No.1, pp.57-58(1979).
- 27) B. Beland : Examination of electrical conductors following a fire, Fire Technology, Vol.16, No.3, pp.252-258(1980).
- 28) MacCleary R.C and Thaman R.N. : Methods for in fire investigation, United States Patent, Vol.4. No.182, p.959(1980).
- 29) B. V. Ettling : Arc marks and gouges in wires and heating at gouges, Fire Technology, Vol.17, No.1, pp.61-68(1981).

- 30) B. Beland : Arcing phenomenon as related to fire investigation, *Fire Technology*, Vol.17, No.2, pp.189-201(1981).
- 31) Bernard Beland, Arcing Phenomenon as Related to Fire Investigation, *Fire Technology*, Vol.17, No.3 pp.189-201(1981).
- 32) B. Beland : Heating of Damaged Conductors, *Fire Technology*, Vol.18, No.2, pp.229-236(1982).
- 33) B. Beland : Considerations on arcing as a fire cause, *Fire Technology*, Vol.18, No.2, pp.188-202(1982).
- 34) B. V. Ettling : Glowing Connections, *Fire Technology*, Vol.18, No.4, pp. 344-349(1982).
- 35) B. Beland, C. Roy , M. Tremblay : Copper Aluminum Interaction in Fire Environments, *Fire Technology*, Vol.19, No.1, pp.22-30(1983).
- 36) M. Delplace, E. Vos : Electric short circuits help the investigator determine where the fire started, *Fire Technology*, Vol.19, No.3, pp.185-191(1983).
- 37) D. A. Gray, D. D. Drysdale, F. S. S. Lewis : Identification of electrical sources of ignition in fires, *Fire Safety Journal*, Vol.6, No.2, pp.147-150(1983).
- 38) J. D. Cowan : Arc, Beads and other Electrical Things, *The Fire and Arson Investigator*, Vol.32, No.2, pp.32-35(1983).
- 39) B. Beland : Comments on fire investigation procedures, *Journal of Forensic Sciences*, Vol.29, No.1, pp.190-197(1984).
- 40) B. Beland : Electrical damages cause or consequence?, *Journal of Forensic Sciences*, Vol.29, No.3, pp.747-761(1984).
- 41) R. ERLANDSSON : An Investigation of physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage, *Fire Safety Journal*, Vol.8, pp.97-103(1984/1985).
- 42) B. Beland, D. Saucier : Fire Damage to Aluminum Wired Receptacles, *Fire Technology*, Vol.22, No.4, pp.341-345(1986).
- 43) R. P. Singh : Scanning electron microscopy of burnt electric wires, *Scanning microscopy*, Vol.1, No.4, pp.1539-1544(1987).
- 44) Robert N. Anderson : Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation, *Journal of Forensic Sciences*, Vol.34, No.3, p.633-637(1989).
- 45) 李義平, 大谷英雄, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : DAS法による1・2次溶融痕の判別に関する研究, *日本火災学会論文集*, Vol.50, No.1, pp.1-12, 2000.
- 46) Eui-Pyeong LEE, Hideo OHTANI, Tsutomu SEKI, Hideo HASEGAWA, Shuji IMADA, Isao YASHIRO : DISCRIMINATION BETWEEN PRIMARY AND SECONDARY MOLTEN MARKS ON ELECTRIC WIRES BY DAS, *Journal of Applied Fire Science*, Vol.9, No.4, pp.361-379, 1999-2000.
- 47) 李義平, 大谷英雄, 松原美之, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : 巻き込み炭化残渣中の炭素結晶構造分析による1次・2次溶融痕の判別に関する研究, *日本火災学会論文集*, Vol.50, No.2, pp.33-41, 2000.
- 48) Eui-Pyeong LEE, Hideo OHTANI, Yoshiyuki MATSUBARA, Tsutomu SEKI, Hideo HAS-EGAWA, Shuji IMADA, Isao YASHIRO : Study on discrimination between primary and secondary molten marks by carbonized residue, *Fire Safety Journal*, Vol.37, p.353-368, 2002.
- 49) 李義平, 大谷英雄, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : 電気溶融痕に関する基礎的研究, *日本火災学会論文集*, Vol.51 No.1, pp.1-10, 2001.
- 50) 李義平, 大谷英雄, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : プラグ刃の溶融痕跡による1次・2次痕の判別方法に関する研究, *日本火災学会論文集*, Vol.52, No.2, pp.51-59, 2002.
- 51) Eui-Pyeong Lee, Hideo Ohtani, Tsutomu Seki, Hideo Hasegawa, Shuji Imada, Isao Yashiro : Study on Identification of Electrical Molten Marks by Carbonized Residue, Summary for annual meeting of JAFSE(Japan Association for Fire Science and Engineering), p258-261(2000) (In Japanese).
- 52) Eui-Pyeong Lee, Hideo Ohtani, Tsutomu Seki, Hideo Hasegawa, Shuji Imada, Isao Yashiro : Verification of Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks, Summary for annual meeting of JAFSE(Japan Association for Fire Science and Engineering), p.158-161 (2001) (In Japanese).

- 53) Eui-Pyeong Lee, Hideo Ohtani, Yoshiyuki Matsubara, Tsutomu Seki, Hideo Hasegawa, Shuji Imada, Isao Yashiro : Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks, Report of National Research Institute of Fire and Disaster, No.91, p.28-47(2001).
- 54) 이의평 : 전기용융흔에 의한 전기화재감정기법에 관한 연구, 2001년도 한국화재·소방학회 추계학술대회논문집, p.100-108
- 55) 李義平, 大谷英雄, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : DAS法による1・2次溶融痕の判別に関する研究, 日本火災学会論文集, Vol.50, No.1, pp.1~12, 2000.
- 56) Eui-Pyeong LEE, Hideo OHTANI, Tsutomu SEKI, Hideo HASEGAWA, Shuji IMADA, Isao YASHIRO : DISCRIMINATION BETWEEN PRIMARY AND SECONDARY MOLTEN MARKS ON ELECTRIC WIRES BY DAS, Journal of Applied Fire Science, Vol.9, No.4, pp.361-379, 1999-2000.
- 57) 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : セルサイズによるコードの一次・二次痕識別, 火災, Vol.53, No.3, pp.53-58(2003).
- 58) 日本伸銅協会 : 銅及び銅合金の基礎と工業技術(改訂), p.37, p.55(1994).
- 59) 須藤 一, 田村今男, 西沢泰二 : 金属組織学(20刷) 丸善, p.18(1998).
- 60) DAVID W.LEVINSON : Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires, Fire Technology, Vol.13, No.3, pp.211~222(1977).
- 61) 東京消防庁予防部調査課 : 電線の一次, 二次溶融痕鑑定方法に関する研究, 火災, Vol.42, No.197, pp.15~20(1992).
- 62) 伊藤充之 : 電線の短絡痕と火災, '93予防時報175 日本損害保険協会, pp.28~33.
- 63) 製品評価技術センター北関東支所 : 電線の溶融痕に関する考察, 火災, Vol.48, No.1, pp.34~37(1998)
- 64) 軽金属学会研究委員会 : アルミニウムのデンドライトアームスペーシングと冷却速度の測定法(研究部会報告書 No.20), p.2(1988).
- 65) 軽金属学会鑄造・凝固部会 : デンドライトアームスペーシング測定手順, 軽金属 Vol.38, No.1, p.55~56 (1988).
- 66) 中江秀雄 : 結晶成長と凝固, アグネ承風社, pp.86(1998).
- 67) 軽金属学会研究委員会鑄造・凝固部会 : アルミニウムのデンドライトアームスペーシングと冷却速度の測定法, 軽金属学会, 1988.
- 68) 喜多信之 : プラスチックの燃焼性, 1975.
- 69) 日本火災学会編 : 火災便覧, 日本火災学会, 1997.