

電氣溶融痕에 의한 火災原因 鑑定法에 관한 연구

李義平*, 大谷英雄**, 松原美之***, 今田修二****

광주광역시소방안전본부*, 横浜国立大学**, 消防研究所***, 製品評価技術基盤機構****

Study on Identification Method of Fire Cause by Electric Molten marks on Electric Wires

Eui-Pyeong Lee*, Hideo Ohtani**, Yoshiyuki MATSUBARA***, Shuji Imada****
Gwangju F. & S. Department*, Yokohama National University**, National Research Institute of Fire and Disaster***, National Institute of Technology and Evaluation****

1. 머리말

消防에서는 이미 발생한 화재를 통해 유사한 화재를 예방하고, 효과적인 소방안전대책 등을 강구하기 위해 화재조사를 하고 있다. 火災調査는 「火災原因調査」와 「火災 및 消火活動로 인해 입은 損害調査」로 나뉜다. 火災原因調査의 中心이 되는 것은 出火原因을 규명하는 것이지만, 延焼拡大 原因이나 死傷者發生 要因을 조사하는 것도 중요한 범위이다. 火災原因調査는 火災現象의 규명은 물론, 火災予防施策이나 조치의 성과를 검토, 시정 개선하여 火災 予防에 이바지하는 것을 목적으로 하고 있다.

出火原因 究明에는 ①出火個所の 判定, ②出火한 発火源의 判定, ③出火한 經過 등의 判定의 단계가 있다.

出火個所를 判定한 후 出火個所에서 생각될 수 있는 発火源에 대하여 消去法 등에 의거 검토가 행해져서 “出火한 発火源”을 확실히 한다. 出火個所는 어떤 一定範圍(空間)이며, 그 범위내 개개의 発火源에 대하여 가능성을 검토한다.

일반적으로 建物火災나 車両火災등의 경우에는 출화하면, 대개 천장 등의 고정 전선이나 실내의 코드, 전기제품 등의 전원코드나 제품 속의 배선등에 전기용융흔이 생긴다. 이와 같이 출화개소에는 전기용융흔이 존재하는 경우가 많으므로 火災原因 究明時에는 이 전기용융흔이 過負荷등 電氣的要因에 의해 생긴 것(1次溶融痕)인가 그렇지 않으면 화재로 인해 전선의 피복이 타서 短絡되어 생긴 것(2次溶融痕)인가를 규명할 필요가 있다.

그러나 1次·2次溶融痕의 判別方法에 대해서는 外觀, 溶融痕 中の 氣孔, 炭化物의 혼입, 表面分析 등의 방법이 검토되어 왔지만 아직 정확도가 높은 判別方法은 확립되어 있지 않다.

그래서 여러 각도에서 1次·2次溶融痕에는 어떤 차이가 있는가를 검토하여 유효한 判別方法을 확립하는 연구가 필요하며 本論文에서는 1次·2次溶融痕의 判別方法에 관해 여러 각도에서 검토한 내용중에서 이하의 3가지 항목에 대해 검토한 결과를 소개한다.

- ①溶融痕의 外觀(形態, 크기 등) 및 氣孔分布, 溶融痕近傍 非溶融部의 結晶粒度
- ②酸化組織中の 酸素濃도와 樹枝狀晶 가지의 간격(DAS : Dendrite Arm Spacing)에 의해 生成時 雰囲気溫度의 推定法
- ③혼입된 炭化殘渣中の 炭素結晶構造에 의한 判別方法

2. 실험

電線試料로서 비닐평형코드 0.18mm×30本(定格電流 7A) 및 0.18mm×50本(定格電流 12A) 등을 사용하였다. 주요 실험은 다음과 같다.

2.1 電線의 1次溶融痕

1次溶融痕은 電線을 束線 또는 捻回接續하여 만들었다.

2.1.1 束線

束線의 形狀 및 치수는 그림 1(a)에 의한다. 0.18mm×30本, 2m의 코드는 下卷 3回, 上卷 15回를 하여 束線를 만들어 14, 17.5, 21, 28A를 통전하였다. 0.18mm×50本 코드의 試料長은 2m(下卷 3回, 上卷 15回), 3m(下卷 6回, 上卷 13回), 5m(下卷 10回, 上卷 17回)이며 12, 14, 16, 18, 21, 24A 등의 부하를 걸었다. 이들 모두 下卷部分의 길이는 15cm이다. 負荷回路는 그림 2에 의한다. 단, 릴레이 타이머 회로를 부가하여 100分 ON, 20分 OFF를 단락에 이를 때까지 반복하였다. 각각 형상에 대하여 각각의 전류치에서 3개씩 시료를 만들었다.

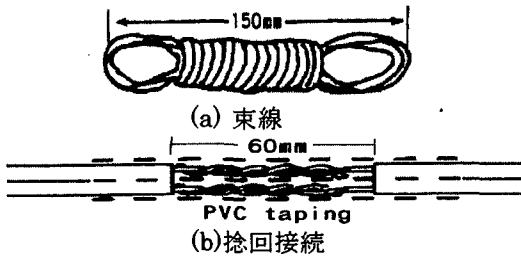


그림 1. 모델 코드의 형상

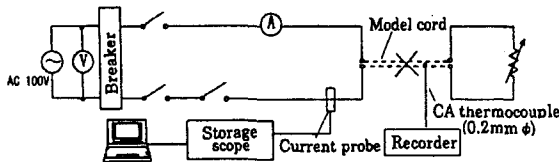


그림 2. 회로도

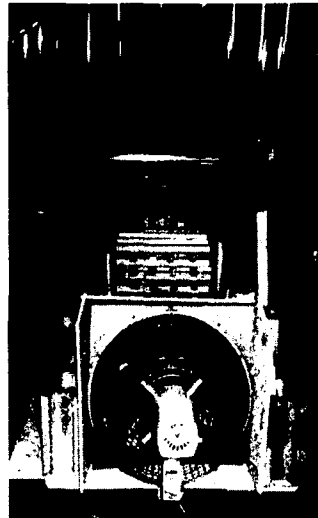


그림 3. 2次溶融痕作製用 炉

2.1.2 捻回接續

捻回형상은 그림 1(b), 負荷回路는 그림 2에 의한다. 단, 微振動裝置 (배기성능 10ℓ/min의 에어펌프)로 捻回部에 微振動를 가함과 동시에 릴레이타이머 회로를 부가하여 100分 ON, 20分 OFF를 단락에 이를 때까지 반복하였다. 負荷電流는 7, 10, 12A이었다.

2.2 電線의 2次溶融痕

그림 3에 나타난 것처럼 블록을 쌓아 만든 角木材(Crib) 火源 實驗炉(W: 340mm, D: 1117mm, H: 410mm)속에서 試料 PVC 코드에 AC 100V를 인가하여 화염폭로에 의해 단락시켜 溶融痕을 만들었다. 사용된 角木材(Crib)는 삼나무(2cm×2cm×30cm, 20~28本)이며, 脫脂綿 10~30ml를 助燃劑로 사용하였다.

단락하는 순간의 노 속의 온도는 400~590℃, 600~790℃, 800~1000℃의 범위로 조정하였다.

2.3 被熱溫度·冷却速度別 結晶 샘플의 作製

電線에 사용되고 있는 銅線은 그 특성으로서 再結晶溫度以上(200~250°C)이 되면 제조시 내부변형을 완화하여 結晶粒도가 커지는 성질이 있다. 또한 1次 溶融痕과 2次 溶融痕은 생성시 분위기가 다르므로 1次·2次 溶融痕에 근접한 非溶融部分의 熱履歷도 다를 수 있을지 모른다.

2.3.1 模擬火災溫度曲線과 結晶粒度

실험샘플을 만들기 위해 「建築物의 防火試驗用標準加熱溫度曲線」(JIS A1301)를 단순화 模擬하여 이 加熱特性을 프로그램한 赤外線加熱爐中에 試料를 넣어 加熱·冷却하였다.

試料銅線은 600V 비닐절연비닐시스템케이블(VVF) 1.6mmφ 1本 및 비닐평형코드(VFF)의 素線 0.18mmφ 7本를 이용하였다. 試料 加熱時 最高溫度는 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1050°C로 하였다. 予備實驗 結果, 結晶粒度는 온도유지시간이 3분이상이면 시간에 의존하지 않았으므로 최고온도 지속시간은 3분간으로 설정하였다.

2.3.2 室溫冷却, 注水冷却과 結晶粒度

실험샘플의 作製方法과 試料銅線은 앞의 2.3.1 과 동일하다. 단, 最高溫度(600°C, 1050°C)까지 加熱한 후, 室溫放置하여 冷却 및 注水하여 冷却하였다.

2.3.3 内部發熱· 結晶粒度

600V PVC 絶緣電線(IV)의 素線 0.6mmφ 1本, VFF의 素線 0.18mmφ 7本를 試料銅線으로 하였다. 通電條件은 다음과 같이 하였다. 즉, IV 素線의 試料에는 27.5A, VFF 素線의 試料에는 15A를 통전하였다. 또한 通電時間을 2s, 5s, 10s, 30s, 120s, 300s 로 하였다. 그 후 앞의 2.3.2 과 같은 방법으로 加熱(600°C, 1050°C)·冷却하였다. 여기서 IV 素線의 試料에는 27.5A, VFF 에는 15A 를 通電한 것은 予備實驗 結果, 이 정도의 부하로는 過熱溶斷되지 않고 負荷를 거는 시간이 길어 素線의 結晶이 현저하게 성장하였기 때문이다.

3. 結果 및 考察

3.1 溶融痕의 外觀 및 氣孔

3.1.1 外觀

1次·2次 溶融痕의 試料에 대하여 光沢, 色調, 形狀, 表面의 平滑度 및 크기를 比較한 바, 1次 溶融痕에 光沢이 있고, 銅色多의 傾向이 있었으며, 形狀은 2次 溶融痕에 球形의 傾向이 있었지만 不定形은 1次·2次 溶融痕 양쪽 모두 거의 같은 비율이었다. 表面의 平滑度는 1次·2次 溶融痕에 分명한 傾向은 없었으며 크기는 2次 溶融痕 쪽이 조금 큰 경향이 있었다.

위의 결과를 보면 外觀으로 1次·2次 溶融痕의 一部 傾向把握이 가능할 지 모르지만 外觀만으로 1次·2次 溶融痕을 判別하는 것은 곤란함을 알 수 있다.

3.1.2 氣孔

溶融痕中の 氣孔은 溶融金屬中에 吸收된 氣가 凝固時에 溶解度의 현저한 감소에 따라 방출될 때 内部에 남겨진 것으로 氣孔을 그림 4 와 같이 5 가지 형태로 분류한 바 氣孔형태별 出現비율은 그림 4 와 같았다. 그림 4 에 나타난 경향을 보면 1次 溶融痕보다도 2次 溶融痕 쪽에 氣孔이 많다.

그러나 2次 溶融痕에도 적은 氣孔이 생기거나 1次 溶融痕에 中·小氣孔이 생기는 경우가 있었다.

이상과 같이 2次 溶融痕 쪽이 작은 氣孔이 많이 생기는 경향은 있으나 예외가 있으므로 氣孔만으로 1次·2次 溶融痕을 判別하는 것은 곤란함을 알 수 있다.

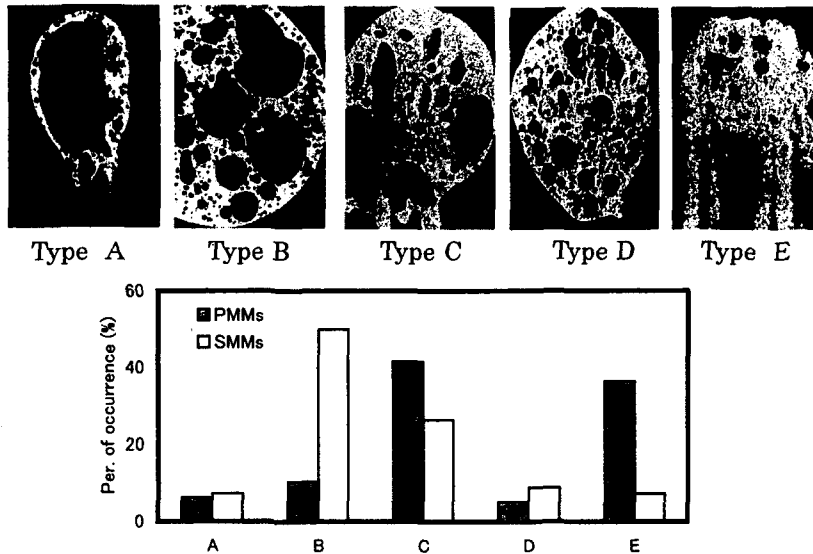


그림 4. 기공의 분포

3.2 용융痕中の 酸化組織

火災現場의 電線 등의 溶融痕을 研磨하여 金屬顯微鏡으로 관찰하면 酸化組織을 볼 수 있다. 이 酸化組織은 酸素濃度 0.39wt%未滿으로 銅의 初晶이 관찰되는 경우와 0.39 wt%以上으로 亞酸化銅의 初晶이 관찰되는 경우가 있다. 酸化組織이 出現하는 것과 凝固時 冷却速度가 빠를수록 酸化組織에 나타나는 樹枝狀晶 2次 가지의 間隔(DAS : Dendrite Arm Spacing)이 짧은 것이 알려져 있지만 酸化組織이 출현한 경우 이 용융痕이 1次 溶融痕인가 2次 溶融痕인가에 대해서는 定量的인 判別方法이 확립되어 있지 않다.

酸化組織은 銅과 亞酸化銅의 2元合金이므로 研究의 第 1 段階로서 試藥 Cu 粉末과 Cu₂O 粉末를 赤外線加熱炉 속에 넣어 酸素濃度別, 冷却速度別로 溶融·凝固試料를 만들어 Cu-Cu₂O 2元合金의 酸化組織를 검토하였다. 第 2 段階로서 실제 전선의 동선을 이용하여 酸素濃度別, 雰囲氣溫度別로 試料를 만들어 雰囲氣溫度別, 酸素濃度別 DAS를 구하여 Reference DAS Table 를 작성하였다. 第 3 段階로서 實驗 1次·2次 溶融痕을 만들어 第 2 段階의 Reference DAS Table 과 일치하는지를 검토하였다.

또한 第 4 段階로서 1次 溶融痕일지라도 火災現場의 것은 火災에 노출되므로 實驗 1次 溶融痕을 火災에 노출시켜 酸化組織 變化有無를 검토하였다.

여기에서는 2·3 段階의 研究結果만을 서술한다.

3.2.1 Reference DAS Table(雰囲氣溫度別 DAS-酸素濃度の 關係) 작성

溶融痕은 芯線이 短絡·溶融·凝固하여 생긴 것이며 1次 溶融痕 生成時의 雰囲氣(常溫 또는 상온근처)에서는 凝固時의 冷却速度는 빠르지만 2次 溶融痕 生成時의 高溫雰囲氣(火災雰囲氣)에서는 凝固時의 冷却速度는 1次 溶融痕 보다 느리는 등 凝固時 雰囲氣 溫度에 따라 冷却速度는 다르다. 즉, 凝固時 冷却速度의 主要因은 溶融痕生成時 雰囲氣溫度이다.

따라서 試料 溶融痕은 실제 전선의 동선을 이용하여 酸素濃度別 및 雰囲氣溫度別로 만들었다. 試料銅線(600V PVC 絶緣電線 素線 7本 중에서 素線 1本(直徑 : 0.4 mm))을 접촉시킨 상태에서 赤外線炉에 넣어 空氣雰囲氣에서 炉內溫度와 유지시간를 바꿔 銅線表面을 산화시켰다. 이어서 炉內를 진공으로 한 다음 Ar 가스로 치환하고 炉內溫度

를 소정의 값(25, 200, 400, 600, 800, 1000°C)로 하였다. 이 상태에서 AC 100V 를 통전하여 단락시켜 炉内에서 自然 冷却하였다. 銅線에 부착한 溶融痕을 회수하여 試料로 하였다.

酸素濃度 및 DAS 를 측정된 결과를 종합하여 生成時 雰囲氣溫度別로 DAS-酸素濃度の 관계를 그래프로 나타내면 그림 5(a), (b)와 같았다.

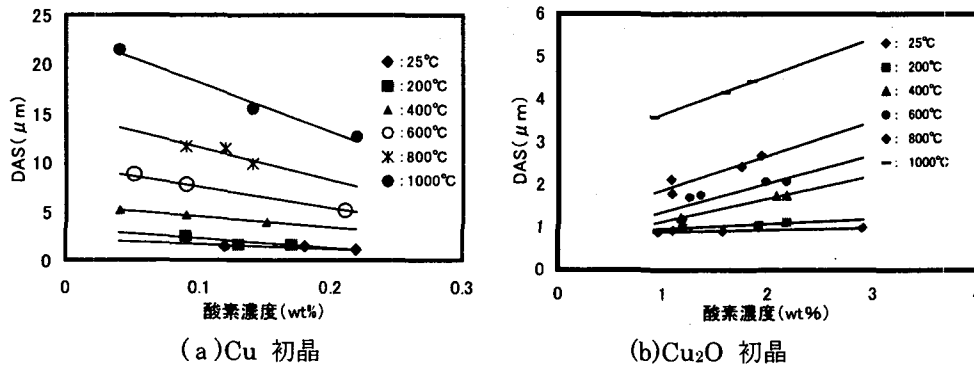


그림 5. 酸素濃도와 DAS 의 관계

그림 5 에서 알 수 있는 것처럼 DAS 는 冷却速度(凝固時 雰囲氣溫度) 뿐만 아니라 酸素濃度の 함수이기도 하다.

3.2.2 1次·2次溶融痕의 酸素濃도와 DAS

레퍼런스 DAS 테이블의 DAS와 실제 溶融痕의 DAS가 어떤 관계에 있는가를 實驗 1次·2次溶融痕를 만들어 검토하였다.

(1) 1次溶融痕

束線의 경우에는 40 개의 시료중 14 개의 시료에서, 捻回의 경우에는 24 개의 시료중 12 개의 시료에서 산화조직이 관찰되었다. 生成時 雰囲氣溫度를 그림 5의 酸素濃度-DAS 그래프에서 구한 바, 한 시료를 제외하고 모두 400°C이하이었으며, 대부분이 實驗실의 온도(25°C)보다 높았다. 이는 다음의 요인에 의한 것으로 사료된다. 레퍼런스 DAS 테이블의 25°C의 샘플은 赤外線加熱炉 속(25°C)에서 강제 단락시켜 만들었으므로 단락·용융하여 25°C에서 응고한 때의 DAS 이지만 實驗 1次溶融痕의 샘플은 實驗실의 온도는 25°C이기는 하나 단락하는 부분의 소선은 대략 250°C이상까지 올라 있는 상태에서 단락하여 溶融·凝固하므로 응고속도가 늦어져 實驗 1次溶融痕의 DAS 쪽이 크게 된 것으로 사료된다. 바꿔 말하면 溶融痕은 단락시의 불꽃에 의해 용융, 단선되어 소선의 끝에 생기므로 實驗 1次溶融痕의 경우에는 주울열에 의해 素線 自体의 온도가 올라가 있는 영향으로 그 만큼 응고속도가 늦어져서 온도가 높게 평가된 것으로 보여진다. 또한 용융흔이 대기중에 노출되지 않고 다발로 되어 있는 피복 등에 덮여져서 응고속도가 지연된 것도 한 요인인 것으로 여겨진다.

(2) 2次溶融痕

DAS의 측정이 가능했던 15 개의 시료에 대하여 DAS와 酸素濃도에 따라 推定 雰囲氣溫度를 구한 결과, 단락시의 분위기온도의 측정치(560°C以上)와 추정온도는 일치하지 않고 실제 온도보다 높았다. 그 이유는 2 차용융흔의 크기가 1 차용융흔 보다 커서 냉각속도가 보다 늦어진 점과 실제의 용융흔은 단락지점에서 쳐져 내려서 응고하므로 열전대의 측정위치와 응고지점의 온도가 다른 것에 기인하는 것으로 여겨진다.

이상으로부터 1 차용융흔은 대략 400°C이하, 2 차용융흔의 경우에는 대략 500°C이상에서 생기므로 용융흔의 판별은 가능한 것으로 생각된다.

3.3 혼입된 炭化殘渣

1次·2次溶融痕은 양쪽 모두 전기불꽃에 의해 생기지만 생성까지의 환경과 생성시 환경의 차이로 인해 혼입되어 있는 炭化殘渣中の 炭素는 結晶構造(그래파이트化度) 등이 다를 것으로 예상된다. 溶融痕 속에 혼입되어 있는 탄화잔사 이외의 것은 소화활동시 소실, 변형되거나 또는 이물질이 부착할 가능성이 높으므로 溶融痕 속 炭化殘渣中の 炭素結晶構造를 조사하였다.

혼입되어 있는 炭化殘渣中の 炭素에 대하여 그래파이트化도를 조사하기 위해 顯微라만分光分析裝置(Renishaw Ramascope 2000 등)로 Ar레이저(Renishaw Ramascope 2000의 경우에는 파장 : 633nm, Power : 30mW, 빔 : 1μm) 勵起 상태에서 라만스펙트럼(라만피크)을 측정하였다. 라만피크는 탄소의 그래파이트化도에 따라 민감하게 변화하므로 종래부터 라만피크 파라메타를 이용한 그래파이트化도의 평가가 행해져 왔다. 자주 이용되는 라만피크 파라메타는 R值라고 불리우는 1580cm⁻¹의 G 피크와 1360 cm⁻¹의 D 피크의 強度比($R = I_{1360} / I_{1580}$) 및 G 피크의 半值幅($\Delta\nu_{1580}$)이다. 일반적으로 그래파이트化도가 높아질수록 R, $\Delta\nu_{1580}$ 은 감소하는 경향이 있다.

<表 1>에 나타낸 것처럼 1次溶融痕에 혼입된 탄화잔사에서만 그래파이트化炭素(Graphitized Carbon)의 피크가 검출되었다. 2次溶融痕에 혼입된 탄화잔사에서는 $\Delta\nu_{1580}$ 가 모두 30.0이상이며, R值도 0.4이상이었다. 단, 여기에서 그래파이트化炭素的 라만피크란 $\Delta\nu_{1580}$ 가 30.0미만임과 동시에 R值가 0.4미만인 피크를 말한다.

<表 1> 라만피크 측정 결과

区分	測定	結果
1次溶融痕	60個	무정형탄소(Amorphous Carbon)는 모든 시료에서 검출되었으며 16개의 試料에서는 그래파이트化炭素(Graphitized Carbon)의 피크도 검출되었다.
2次溶融痕	20個	모든 시료에서 Amorphous Carbon의 피크만 검출되었다.
HNO ₃ 로 용해한 1次痕	8個	아모어포스炭素的 피크는 모든 시료에서 검출되었으며 그래파이트化炭素的 피크는 극히 일부 炭化殘渣에서만 검출되었다.
HNO ₃ 로 용해한 2次痕	8個	2次溶融痕과 마찬가지로 아모어포스炭素的 피크만 검출되었다.

3.3.1 혼입된 炭化殘渣의 라만피크

(1) 1次溶融痕

절단면에는 많은 탄화잔사가 혼입되어 있는데 모든 시료의 혼입 탄화잔사로부터 無定形炭素(Amorphous carbon)의 라만피크가 검출되었다. 일부 혼입탄화잔사에서 그래파이트化炭素的 라만피크도 검출되었다. 또한 같은 시료의 같은 절단면에서도 그림6과 같이 아모어포스炭素에서 그래파이트化炭素까지 분포되어 있었다.

표준그래파이트에서는 그림6(a)와 같이 1360 cm⁻¹부근의 피크는 작고 1580cm⁻¹부근에 뾰족한 라만피크가 있다. 結晶性이 낮은 炭素에서는 (c), (d) 및 (e)와 같이 완만한 라만피크가 검출된다. 그래파이트구조에 흐트러짐이 생기면 1580 cm⁻¹의 라만피크 외에 1360 cm⁻¹에 피크가 나타난다. 구조의 흐트러짐이 커질수록 전체적으로 완만한 피크 형상이 된다.

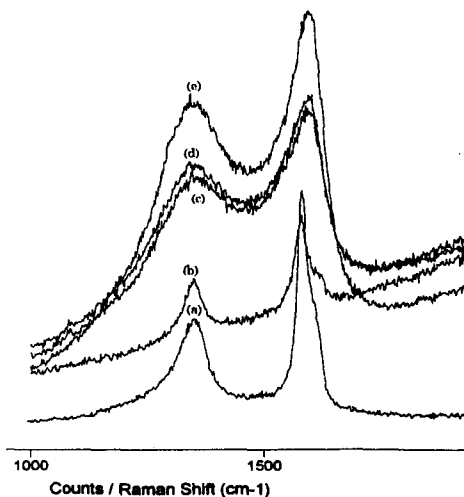


그림 6. 1次溶融痕에 있어서 라만피크

그리고 1개소 절단하여 절단면 양면의 혼입 탄화잔사를 조사하여 그래파이트化炭素가 검출되지 않은 경우라도 다시 임의의 면을 절단하여 분석하면 그래파이트化炭素가 검출되는 경우도 있었다.

(2) 2次溶解痕

1次溶解痕과 마찬가지로 절단면에 따라, 또한 같은 절단면이라도 측정점에 따라 라만피크는 조금씩 차이가 있었지만 모두 아모어포스炭素 피크밖에 검출되지 않았다. 단, 혼입되어 있는 탄화잔사 중의 모든 탄소를 대상으로 측정한 것이 아니고 수술용 칼로 절단하여 절단면 혼입 탄화잔사 속 탄소의 라만피크를 측정한 것이므로 미측정 탄화탄사 중의 탄소에 그래파이트화탄소가 존재할 지도 모른다는 문제점이 있다.

그래서 수술용 칼로 절단하여 절단면 탄화잔사 중의 탄소의 라만피크를 조사한 후 硝酸으로 溶解痕을 녹여 여과지로 여과하여 모든 炭化殘渣에 대하여 라만피크를 측정하였다. 결과는 절단, 측정했을 때와 거의 같은 라만피크가 검출되었으며 아모어포스탄소만 검출되었다. 이 측정방법의 유효성을 확인하기 위해 그래파이트化炭素가 검출된 용융혼도 초산으로 녹여 분석한 바 <표1>과 같이 그래파이트화탄소가 확인되었다.

3.3.2 혼입된 炭化殘渣의 그래파이트化

束線에 있어서 電流密度가 낮은 경우에는 비닐코드의 피복은 軟化·脫鹽酸하며, 낮은 온도(約110~250℃)에서 장시간 가열에 따라 딱딱해져서 均열이 생기고 충분히 탄화(固相炭化)한 후 단락하여 용융혼 속에 혼입된다. 라만피크의 측정결과에 의하면 固相炭化한 후 단락한 용융혼의 혼입탄화잔사에서 그래파이트화탄소의 라만피크가 검출되는 비율(8개의 시료를 분석하여 6개 시료에서 검출)이 높았다. 이는 피복이 장시간 열 열화에 의해 難그래파이트化性炭素(열처리를 하여도 그래파이트가 되기 어려운 탄소)가 되어 있으나 劣化時의 酸化와 短絡時의 전기불꽃에 의한 熱応力에 의해 局部的으로 그래파이트化炭素가 되었던 것이 혼입된 것으로 보여진다.

束線에 있어서 電流密度가 높은 경우에는 비닐코드의 피복은 軟化·脫鹽酸하고 一部 溶解하는 도중에 피복의 표면온도 160~200℃정도에서 단락하여 용융혼 속에 혼입된다. 라만피크 측정결과에 의하면 이와 같은 상태의 용융혼에서는 대체로 아모어포스탄소의 피크가 검출되었지만 일부 시료에서는 그래파이트화탄소의 피크도 검출되었다. 그래파이트화탄소가 검출되는 것은 국부적으로 液相炭化에 의거 그래파이트 유사한 易그래파이트化性炭素(熱處理하면 그래파이트가 되기 쉬운 炭素)가 형성되어 있는 상태에서 단락시의 불꽃에 의해 그래파이트화탄소가 된 것이 혼입된 것으로 여겨진다.

비교적 전류밀도가 높은 경우에는 혼입 탄화잔사로부터 아모어포스탄소의 피크만 검출된 원인은 PVC被覆의 극히 일부는 파치狀이 되어 있기는 하나 단락에 의해 溶解·파치化의 반응이 끝나므로 芳香族平面的 적층과 이들의 인접한 부분끼리의 융합이 충분히 행해질 시간적 틈이 없으며 동시에 분리가스의 격렬한 逸脱에 의한 攪亂이 발생하여 조직이 흐트러진 채 급속히 固化되기 때문인 것으로 여겨진다.

2次溶解痕中の 탄화잔사는 화재에 의해 피복이 급격하게 軟化·溶解·炭化하고서 단락하여 혼입된다. 이 경우에도 방향족평면의 적층과 이들의 인접한 부분끼리의 융합이 충분히 행해질 틈이 없고 동시에 분리가스가 격렬한 일탈에 의한 교란이 발생하여 조직이 흐트러진 채 급속하게 고화되므로 혼입된 탄화잔사 중의 탄소는 그래파이트화탄소가 아니라 아모어포스탄소가 된 것으로 생각된다.

3.4 被熱溫度·冷却速度別 結晶粒度

3.4.1 模擬火災溫度曲線과 結晶粒度

200℃에서는 결정의 성장은 관찰되지 않았으나 400℃에서 1050℃에 걸쳐서는 온도 상승과 함께 결정의 비대화가 확인되었다. 특히, 200℃와 400℃ 사이에서 큰 비대화가 있었다. 이는 銅의 再結晶溫度가 200~250℃에 있으므로 이 이상의 온도에서 급격한

조직변화가 발생하는 것에 기인하는 것으로 여겨진다. 銅의 融点(1083°C)에 가까운 1050°C에 있어서는 표면이 산화되어 있었다. 또한 VVF와 VFF에서 같은 경향이 있었으나 結晶粒의 크기는 차이가 있었다. 이는 線徑 및 加工度의 차이에 의한 것이라고 여겨진다.

그림 7에 VVF 1.6mm φ 소선의 200°C, 400°C, 800°C 曝露時의 金屬組織写真(撮影倍率: 100倍)을 나타낸다.

3.4.2 室温冷却, 注水冷却와 結晶粒度

室温冷却, 注水冷却 모두 模擬火災溫度曲線의 해당온도에 있어서 結晶粒도와 유사하며 炉内冷却과 空冷·水冷의 어떤 냉각조건에서도 結晶粒도의 차이는 없었다. 이 점으로부터 같은 소선(동선)일 경우 被熱에 의한 結晶粒도의 肥大化는 단순히 시료의 最高到達溫度에 의존하는 것으로 여겨진다.

3.4.3 内部發熱과 結晶粒度

2 초간 통전에서는 결정의 비대화는 관찰되지 않았으나 5 초간 통전에서는 약간의 비대화가 관찰되었으며 300 초까지에 걸쳐서는 통전시간에 따라 결정의 비대화가 확인되었다. 이 때 결정의 비대화는 가장 비대화한 300 초 통전 시료에서도 模擬火災溫度曲線에 의한 실험에 있어서 400°C에서 600°C의 중간정도였다. 그리고 통전한 후 600°C, 1050°C까지 가열한 시료에서는 通電時間의 장단에 관계없이 模擬火災溫度曲線에 의한 실험에 있어서 해당온도의 결정입도와 같았다. 이는 통전에 의해 1次再結晶한 것이 그 후의 가열에 의한 2次再結晶에 의거 성장한 때문인 것으로 여겨진다. 이러한 점으로부터 通電(過電流)後 再加熱이 있으면 加熱前의 過電流 등에 의한 發熱의 痕跡은 남지 않는다고 말할 수 있다.

VFF 素線 0.18mm φ의 試料를 1050°C로 가열한 시료는 表面酸化가 심해 組織觀察은 어려운 상태였다.

以上 結果로부터 銅線의 結晶粒도는 도달한 최고온도만에 의존하며 溫度維持時間, 冷却要因, 그 이전의 加熱履歷의 어떤 영향도 남기지 않는 것이 확인되었다. 따라서 화재현장에서 채취된 전선의 가공조직을 관찰하므로써 그 부위에 있어서 화재의 최고도달온도를 알 수 있는 것으로 여겨지지만 그 후의 화염폭로에 의해 양자의 차이가 없어지므로 1次·2次溶解痕의 識別에는 활용할 수 없는 것으로 판단된다.

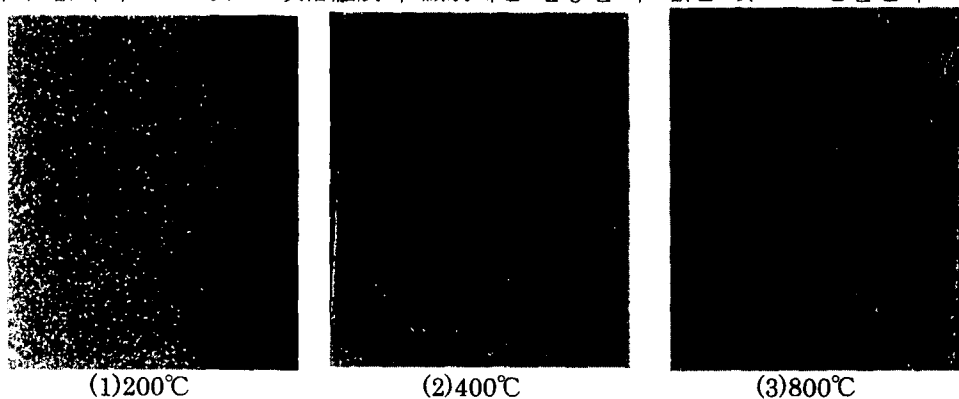


그림 7. 加熱後 炉内冷却時의 結晶粒度

4. 結論

電線에 생기는 1次·2次溶解痕의 判別方法에 관해 연구하였던 바 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

(1) 종래, 火災現場에서는 電氣溶解痕의 外觀이나 氣孔의 分布를 보고 판단하는 傾向이

강했지만 이러한 판별방법의 유효성을 여러 실험을 통해 검토한 결과, 유효한 판별 방법이지 않다는 것을 확실히 하였다.

- ② 용융痕近傍의 非熔融(銅線)部分의 結晶粒度는 被熱履歷은 남기지 않고 最高暴露溫度 만에 의존하므로 1次溶融痕인가 2次溶融痕인가에는 관계가 없는 점을 분명히 하였다.
- ③ 화재현장에서 채집된 電氣溶融痕을 연마하여 금속현미경으로 관찰하면 가끔 酸化組織(銅과 亞酸化銅의 合金組織)이 관찰된다. 이 酸化組織中 樹枝狀의 가지의 간격(DAS)와 연마면의 산소농도를 측정하면 용융흔 생성시의 분위기온도가 추정될 수 있는 점을 확실히 하였다.
- ④ 電氣溶融痕의 속에는 많은 炭化殘渣가 혼입되어 있다. 이 탄화잔사의 성분은 전선 피복의 성분인 PVC와 충전재에 기인한 C, Cl, Ca, Cl 등이다. 1次溶融痕中에는 그래 파이트化炭素와 아모어포스炭素가 혼입되어 있지만 2次溶融痕 속에는 아모어포스炭素만 혼입되어 있는 점을 확실히 하였다.

관련 주요 심사종료 논문

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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(인쇄중)
- 5) 李義平, 大谷英雄, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : 電氣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.
- 6) 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, 火災学会論文集, Vol.52, No.1 (予定 2002.6).
- 7) 李義平, 大谷英雄, 関勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代勲 : 放熱不良に起因する電線被覆の熱劣化による短絡のメカニズムに関する研究, 火災学会論文集, Vol.51, No.2(인쇄중 2001.12).