

EBSD를 이용한 1, 2차 용융흔 결정립의 방위 비교 분석

박광묵¹, 방선배¹, 양성채^{2,a}

¹ 한국전기안전공사 전기안전연구원

² 전북대학교 전기공학과

The Orientation Comparison of the Primary and Secondary Beads Grain by EBSD

Kwang-Muk Park¹, Sun-Bae Bang¹, and Sung-Chae Yang^{2,a}

¹ Electrical Safety Reseach Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Wanju 55365, Korea

² Electrical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received September 19, 2017; Revised October 10, 2017; Accepted October 12, 2017)

Abstract: Herein, for the quantitative analysis of the arc beads related to electric fire, we used electron backscatter diffraction (EBSD), a measuring device for grain orientation of materials, we compared and analyzed the surface texture of primary and secondary beads according to the difference in cooling rate at ambient temperature. This analysis revealed that the primary beads showed similar distribution at both low and high angles, while the secondary beads showed a higher distribution at low angles than at high angles. Thus, EBSD can be used for quantitative analysis of the beads and can be applied to identify beads in the future.

Keywords: EBSD, Beads, Primary, Secondary, Grain, Orientation

1. 서론

2016년 우리나라 전기적 요인에 의해 발생한 화재는 총 화재에서 약 20.6%, 2015년의 경우 약 20.2%로 현재 전기 화재 점유율은 약 20%이다. 전기화재의 원인을 분류해 보면 단락에 의한 화재가 2016년 76.2%를 차지하고 있다. 그중 미확인 단락에 의한 전기화재는 2,091건으로 23.3%이다 [1]. 미확인 단락으로 결론을 내리는 결정적 요인은 화재현장에서 발견되는 용융흔 때문이다. 용융흔이란 화재현장에서 열에 의해 전선이 용융되었다가 응고된 여러 형태의 흔적을 말한다. 용융흔은 통상적으로 전선피복이 절연열화나 물리적인 외력 등에 의해 손상된 후 단락되어 발생한 아크로 인해 생성된 1차 용융흔(primary beads),

화재의 열로 전선 피복이 불에 타서 없어진 뒤 단락되어 발생한 아크로 인해 생성된 2차 용융흔(secondary beads), 전원이 차단된 상태에서 화재 열에 의해 녹았다가 응고된 3차 용융흔으로 분류한다. 1차와 2차 용융흔은 단락흔, 3차 용융흔은 열흔이라고도 한다 [2-4].

국내에서 전기화재를 포함한 모든 화재는 일선소방서에서 화재조사관이 현장에 출동하여 조사하고 있다. 보통 화재조사관이 단락에 의한 화재라고 판단할 때 발화 추정위치의 용융흔 존재 유무와 발견된 용융흔의 외형을 보고 화재원인을 추정하고 있다. 하지만 용융흔 외형에 의한 추정은 정량적인 판단기준 없이 조사자의 주관적인 판단에 의해 이루어지고 있다. 조사관들 중 일부는 용융흔의 구분을 통해서 정확한 화재원인을 밝히기 위해 소방청 중앙소방학교 또는 한국전기안전공사 전기안전연구원에 용융흔 분석의뢰를 하고 있다. 그러나 현재까지의 용융흔 판별에 대한 연구결과를 보면 1, 2차 용융흔인 단락흔과 3차 용융흔인 열흔의 구분은 금속현미경 또는 SEM을 통한 단면조직분석 시 주

a. Corresponding author; yangsc@jbnu.ac.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상조직의 유무를 통해 판별이 가능한 것으로 보이나, 단락흔인 1차와 2차 사이의 구분은 쉽지 않은 것으로 판단된다 [5-7].

1차와 2차 용융흔이 생성되는 단락지점에서 아크가 발생될 때 주변온도의 차이로 인해 전선도체가 아크열에 의해 녹았다가 다시 고체화될 때의 냉각속도에서 차이가 있는데, 본 논문에서는 이 사실을 바탕으로 EBSD (electron backscatter diffraction)를 이용하여 실험을 통해 만든 1차, 2차 용융흔을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료 준비

본 연구에서는 실험환경에서 단락 시 전선이 끊기면서 용융될 수 있는 굵기인 1.2 mm 전선을 사용하였다. 단락 시의 주변온도를 제외하고 전선 간 단락 시 접촉각도, 전선의 종류 등을 동일하게 구성하였다.

1차 용융흔 시료 제작에는 단락장치를 이용하여 대기상태에서 실험을 실시하였고, 2차 용융흔 시료 제작에는 고온에서 단락시키기 위해 가스로를 이용하여 실시하였다.

그림 1은 이번 연구에서 1차 용융흔 시료 제작을 위한 실험구성을 나타낸다. 실험에 사용된 단락장치(SC-2011-01, KESCO)에는 전압조정기를 통해 220 V를 인가하였으며, 무부하 조건으로 진행하였다. 전선은 피복을 벗겼으며 전선 a-a'와 전선 b-b'의 접촉각도는 90°로 고정하여 실험하였다. 전원 인가 전에는 a단자의 위치가 타 단자보다 높은 상태로 전선이 접촉되지 않은 상태이며, 전원 인가 후 start 버튼을 누름으로써 a단자가 내려와 a-a'와 b-b' 전선 간 단락을 발생시켰다. 단락 시의 대기 온도는 25°C였다. 2차 용융흔 시료

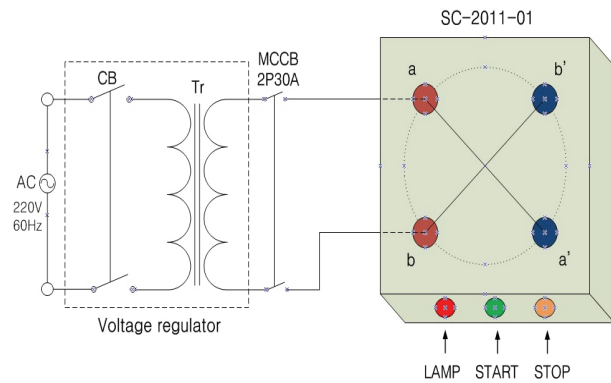


Fig. 1. Primary beads experiment setup.

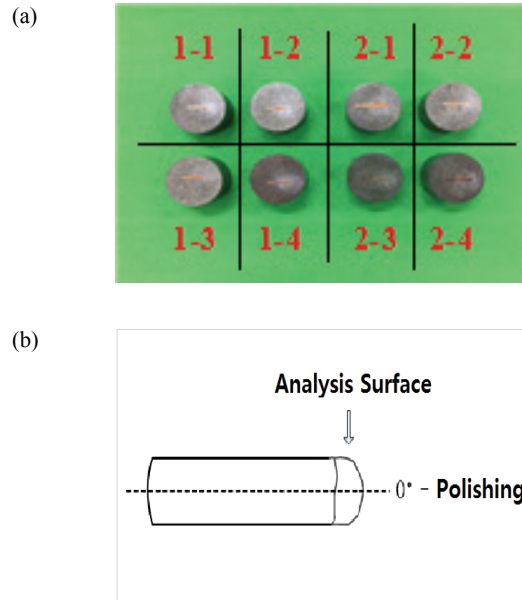


Fig. 2. (a) Primary beads & Secondary beads mounting and (b) polishing method.

Table 1. Procedure of mechanical polishing for copper preparation.

	Surface	Abrasive	Time (min : sec)	Load (N)	Speed (rpm), direction	Lubricant	Remark
1	#500	SiC paper	0:30	15	300-150, Co	Water	Until 1.2 mm
2	#1000, #2400	SiC paper	1:00	15	300-150, Co	Water	
3	MD-Dur	6 μm diamond suspension	6:00	15	300-150, Co	Blue	Abrasive spray per 60s
4	MD-Mol	3 μm diamond suspension	5:00	15	150-150, Co	Blue	Abrasive spray per 60s
5	MD-Nap	1 μm diamond suspension	4:00	15	150-150, Co	Blue	Abrasive spray per 60s

는 단락장치 대신 가스로를 이용하여 실험하였으며 가스로 내부에 피복을 벗긴 전선을 1차 용융흔 제작 때와 같이 90° 각도로 설치하였다. 가열로 내부의 온도를 플래쉬오버(flash over) 때의 온도인 600°C까지 가열하고 전선에 전원을 인가한 후에 단락을 발생시켰다.

그림 2(a)는 실험을 통해 제작한 1차, 2차 용융흔 시료를 절단하여 성형 후 기계적 연마법으로 표면처리를 실시한 후의 상태이다. 그림 2(b)는 연마 방법과 EBSD 분석 시 단면 방향을 나타낸 것이다. 시료는 각각 4개씩 제작하였으며 1차 용융흔을 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 2차 용융흔을 2-1, 2-2, 2-3, 2-4로 지정하였다. EBSD 측정 중 부도체 마운팅 수지에 의한 차징(charging)을 막기 위해 Struers사의 성형레진인 전도성 수지 ConduFast (acrylic hot mounting resin with iron powder)로 핫마운팅(hot mounting)하였고, 최대한 중심에 시편이 마운팅되게 하였다. 기계적 연마는 Struers사의 자동연마기(Tegramin-25, 독일)와 연마천 및 연마재를 사용하여 Struers사에서 제공하는 구리 연마 방법으로 시편에 가하는 하중, 회전 속도, 회전 방향, 연마 시간을 제어하여 실시하였다. 표 1에 기계적 연마 조건을 상세히 나타내었다.

2.2 EBSD 분석 방법

EBSD 분석 실시 전 시료 표면의 요철을 최대한 줄이기 위해 이온밀링으로 후처리를 하였다. Hitachi사의 IM4000을 사용하여 가속전압 6 kV, 방전전압 1.5 kV 조건에서 10분간 이온밀링을 실시하였다.

EBSD 분석에는 schottky 방식의 전계방출형 주사전자현미경(Hitachi SU-70, 일본)에 장착되어 있는 EBSD 카메라(EDAX-Hikari)를 이용하였다. 분석 시 SEM 가속전압은 15 kV, 배율(magnification)은 500, EBSD 스캔모드(scan mode)는 Hexagonal Grid, 스텝사이즈(step size)는 1.5 μm 조건으로 측정하여 각각의 용융흔 단면 조직의 결정립 간 방위를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용융흔의 생성 및 비교

그림 3은 reference로 실험에 사용된 전선 본연의 단면조직 SEM image이고, 그림 4(a)는 1차 용융흔 1-1의 단면 조직, 그림 4(b)는 2차 용융흔 2-1의 단면

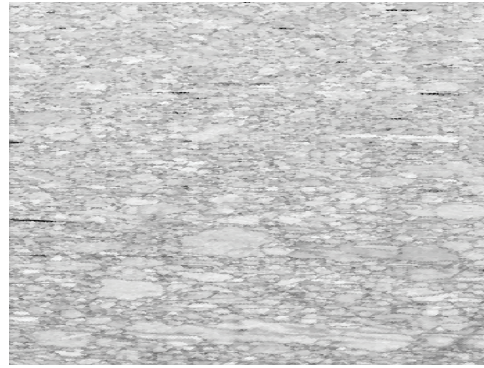


Fig. 3. Reference SEM image.

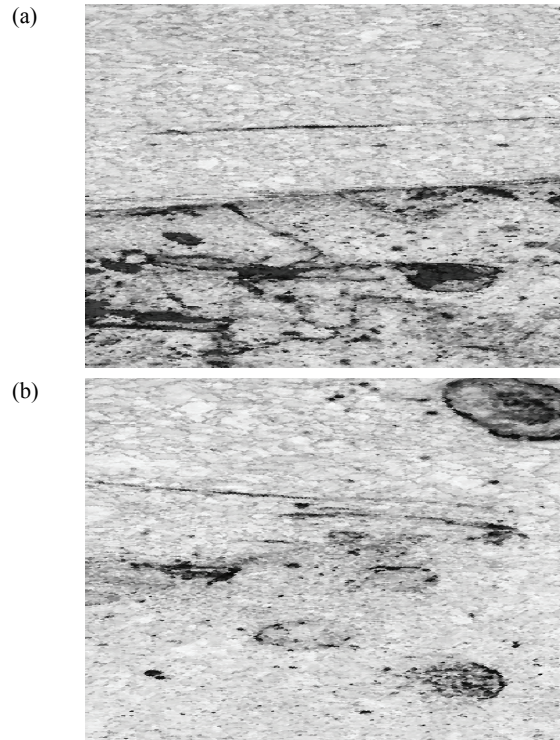


Fig. 4. (a) Primary beads SEM image and (b) secondary beads SEM image.

조직 SEM image를 나타낸 것이다. 그림 3과 같이 전선 본연의 단면 조직은 여러 형태의 수많은 다면체 결정립으로 되어 있다. 이 상태에서 전선 간 단락이 발생되면 그림 4(a), (b)의 하부와 같이 국부적으로 온도가 6,000 K (약 5,700°C)에 달하여 순간적으로 녹았다가 다시 응고되는 용융 부위가 생성된다 [8]. 용융되지 않은 부분은 그림 3의 reference 조직과 같이 다면체

결정립으로 되어 있으나, 용융 부위는 더 미세한 결정립과 많은 보이드 그리고 비용융 부위와 용융 부위의 경계부근에서 수직방향으로 조금 길게 뻗어 있는 주상조직들이 혼재되어 있다. 본 실험으로 재현한 용융흔에서는 1차 용융흔이 2차 용융흔에 비해 경계선이 조금 더 명확해 보이나, 2010년 Dr. Richard J. Roby에 의한 보고서에 의하면 단락실험을 통해 생성한 용융흔에서 경계면이 보일 때도 있고 보이지 않을 때도 있으며, 심지어 외부화염에 의한 생성한 용융흔 일부에서도 경계면이 보인다는 결과와 함께 경계면의 유무로 1차와 2차 용융흔을 비교하는 것은 어렵다는 결론을 내렸다 [9]. 또한 개개인마다 보는 기준이 다르기 때문에 여러 요소들이 혼재되어 있는 용융 부위의 조직을 시각적인 비교로 차이에 대해 정량 분석하는 것은 어렵다고 판단된다.

그림 5는 실험을 통해 제작한 1차와 2차 용융흔 시료가 생성되는 과정을 온도 관점에서 나타낸 것이다. 화재현장을 생각해 볼 때 1차 용융흔은 화재가 발생하게 된 원인을 제공한 전기적 용융흔으로 대기상태에서 단락되어 아크에 의해 높은 온도까지 올라갔다가 대기 온도에 의해 급랭되어 응고된다. 그에 반해 2차 용융흔은 화재에 의해 발생하게 된 전기적 용융흔으로 화염의 온도에 의해 피복이 녹아 단락이 발생되고 화재현장의 온도 가운데서 응고된다. 1차 용융흔과 2차 용융흔 생성의 가장 큰 차이는 단락 시 주위 온도와 아크에 의해 용융 후 응고될 때의 냉각속도이다. 이와 같은 냉각속도의 차이로 인해 핵생성과 결정립의 성장에 영향을 미칠 것이며 결정립 간 방위의 차이를 만들 것으로 판단된다. 이것을 확인하기 위해 EBSD를 이용하여 1차 용융흔과 2차 용융흔의 방위특성을 확인하였다.

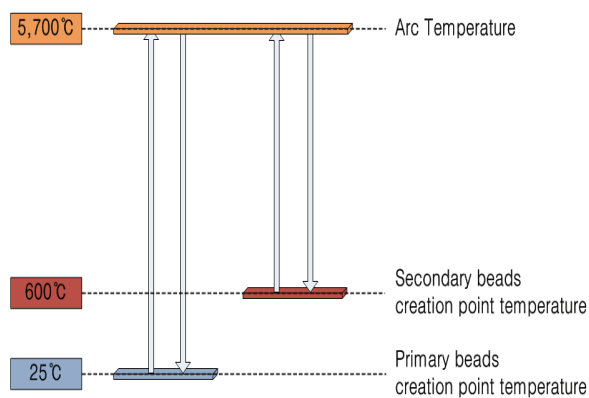


Fig. 5. Beads creation temperature condition.

3.2 1차, 2차 용융흔의 결정립 간 방위 특성

단일 상으로 이루어진 다결정 시편에서 결정립들은 일반적으로 서로 다른 방위를 갖기 때문에 여러 형태의 입계가 존재할 수 있다. 두 결정립 사이의 방위차를 나타낼 때 보통 15°를 기준으로 15° 이하를 소각 (low angle), 15°보다 큰 경우를 고각(high angle)으로 표현하며, 결정립 사이에는 경각 경계, 비틀림 경계 등의 방위관계가 있다. EBSD 분석 시에는 두 결정립 사이에서 형성된 방위 중 가장 최소 수치를 결과로 도출하게 된다 [10,11].

그림 6(a), (b)는 각각 1차 용융흔, 2차 용융흔 시료의 용융 부위를 EBSD를 이용하여 결정립의 방위에 따라 색상을 표현한 inverse pole figure map을 나타낸다. SEM image에 비해서 결정립들의 구분이 쉽고 결정립 간의 방위가 다름을 시각적으로 구분이 가능하다는 것을 확인하였다.

표 2는 EBSD를 이용하여 2~15°, 15~90° 사이의 결과를 분석할 수 있도록 세팅한 후 1차, 2차 용융흔 시료 단면의 결정립 간 소각과 고각 방위차를 가지는 개수의 측정 결과와 퍼센트로 환산한 수치이며, 그림

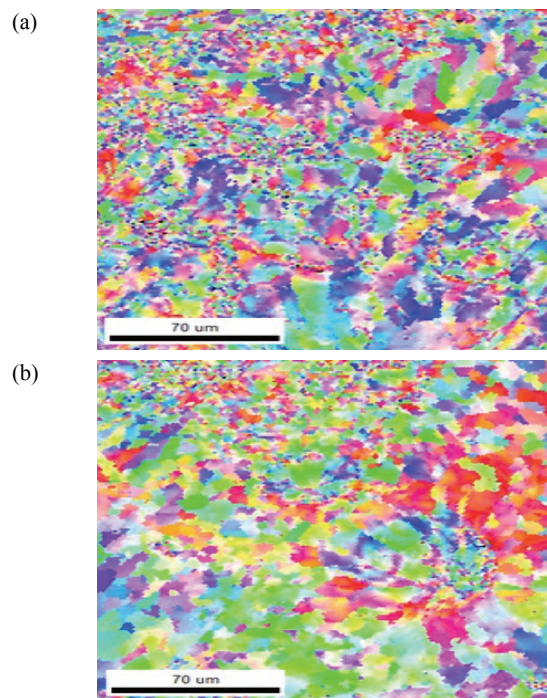


Fig. 6. (a) Primary beads Inverse pole figure map and (b) secondary beads inverse pole figure map.

7(a), (b)는 각각 표 2의 1차, 2차 용융흔 소각과 고각 개수를 퍼센트로 환산하여 나타낸 것이다.

그림 7(a)로부터 1차 용융흔의 경우 소각과 고각의 분포가 그림 7(b)와 비교하여 상대적으로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 2차 용융흔의 결과를 나타내는 그림 7(b)의 경우 소각과 고각이 각각 평균 81.06%, 18.94%로 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 실험 결과로부터 퍼센트로 환산한 수치들을 모집단으로 하여 유의수준은 5%로 통계 분석인 T검정과 F검정을 실시하였다. 소각과 고각 중 어떤 것으로 데이터 분석을 실시하더라도 모집단의 평균을 제외한 결과수치는 동일하기 때문에 소각에 대해서만 분석을 실시하였다. 표 3과 표 4는 통계 분석 결과로 T검정과 F검정의 평균, 분산, 유의수준에 대한 검정 결과를 나타낸 것이다. T검정 결과에서는 유의수준 5%에 비해 P값이 0.36%로 두 모집단 간 평균의 차가 크다는 것을 확인하였다. 그러나 분산분포의 정도를 말해주는 F검정에서는 유의수준 5%에 비해 P값이 6.63%로 완벽한 이분산은 아니라는 것을 확인하였다. 결과적으로 두 모집단이 정규분포라고 가정했을 때 두 모집단 간 분산의 정도에 큰 차이가 있으나, 분포가 겹쳐지는 구간이 있다는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Boundaries angle numbers.

Sample	Min~Max	Result value	% Conversion
1-1	2~15°	37,089	35.80
	15~90°	66,525	64.20
1-2	2~15°	69,777	55.99
	15~90°	54,839	44.01
1-3	2~15°	36,726	41.27
	15~90°	52,255	58.73
1-4	2~15°	76,755	56.02
	15~90°	60,250	43.98
2-1	2~15°	92,887	83.16
	15~90°	18,096	16.84
2-2	2~15°	89,347	79.47
	15~90°	23,082	20.53
2-3	2~15°	81,553	76.57
	15~90°	24,957	23.43
2-4	2~15°	56,392	85.03
	15~90°	9,925	14.97

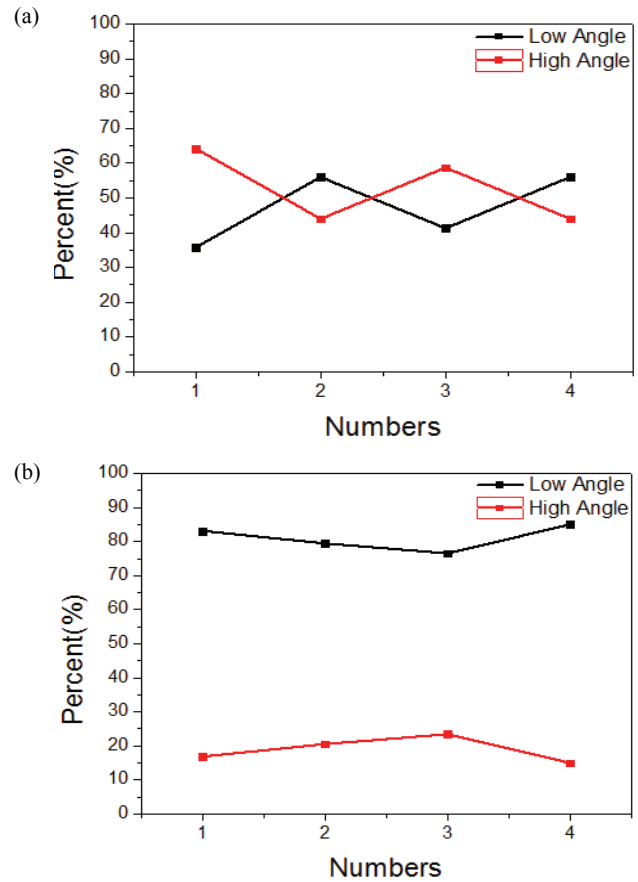


Fig. 7. (a) Primary beads angle characteristic and (b) secondary beads angle characteristic.

Table 3. T-test result.

	Primary (2~15°)	Secondary (2~15°)
Average	0.4727	0.810575
Dispersion	0.01067206	0.001429
P (T<=t) Two-tail test	0.00356082	

Table 4. F-test result.

	Primary (2~15°)	Secondary (2~15°)
Average	0.4727	0.810575
Dispersion	0.01067206	0.001429
P (F<=f) Two-tail test	0.0663574568	

4. 결론

본 논문에서는 주위 온도에 따른 상이한 냉각조건 실험으로 제작한 1차, 2차 용융흔을 각각 성형 및 연마 등을 실시하고 시료의 단면 조직에 대해서 EBSD를 이용하여 결정립 간 방위를 분석하고 특성을 비교하였다. 분석결과 1차 용융흔의 경우 소각과 고각이 각각 평균 42.27%, 52.73%으로 비슷한 반면 2차 용융흔의 경우 소각과 고각이 각각 평균 81.06%, 18.94%로 1차 용융흔이 2차 용융흔과 비교하여 소각과 고각의 분포가 상대적으로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 1차 용융흔이 2차 용융흔에 비해 과냉의 정도가 크기 때문에 많은 핵이 발생하고 계면 결함으로 인한 많은 결정립들이 생성되면서 서로 성장하려는 힘에 의해 성장하는 방향성이 제한적이었던 것으로 판단되며, 소각과 고각의 분포 차이가 크지 않았던 것으로 사료된다.

측정 결과 값으로 통계 분석을 실시하였으며, 1차와 2차 용융흔 간에 완벽한 이분산은 아니지만, 커다란 차이가 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해서 EBSD를 이용한 결정립 방위 분석이 용융흔의 단면 조직의 정량적인 분석에 응용될 수 있음을 확인하였다. 향후 다양한 온도 조건 및 냉각 방법, 단락 전류의 크기 등의 실험을 통해 많은 시료를 확보하여 EBSD 분석 데이터에 대한 통계 분석의 신뢰 수준을 높임으로써 확률적으로 용융흔을 판별할 수 있는 기술로 응용될 것으로 판단한다.

REFERENCES

- [1] National Fire Information System, *Fire Statistics Status*, <http://www.nfds.go.kr> (2015, 2016).
- [2] C. S. Choi, H. G. Kim, K. M. Song, D. W. Kim, D. W. Kim, Y. S. Kim, and K. Y. Lee, *The Fire Investigation for the Ignition Position and the Collection Guide of a Hangover* (Korea Electrical Safety Corporation, Korea, 2005) p. 130.
- [3] H. S. Kim, *A Study on the Fire Cause Identification by Wire Conductor Structure Analysis*, Report (National Fire Service Academy, Korea, 2011) p. 14.
- [4] C. S. Choi, H. W. Kim, K. S. Lee, C. H. Lee, Y. S. Leem, and J. H. Jung, *Electrical Fire Engineering* (Dong Hwa Technology Pub., 2004) p. 185.
- [5] J. C. Jeon, H. J. Jeon, S. I. Lee, and J. G. Yoo, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **8**, 466 (2007).
- [6] J. H. Kim, K. M. Park, J. Y. Park, K. I. Lee, S. B. Bang, H. N. Choi, B. K. Han, and H. B. Jo, *Proc. 2016 Summer Annual Conference, Trans. (KIEE., Korea, 2016)* p. 1551.
- [7] V. Babrauskas, *J. Fire Prot. Eng.*, **14**, 189 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1177/1042391504036450>]
- [8] G. F. Bennett, *J. Hazard. Mater.*, **108**, 141 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.01.007>]
- [9] R. J. Roby and J. McAllister, *Forensic Investigation Techniques for Inspecting Electrical Conductors Involved in Fire* (NCJRS, USA, 2010) p. 93.
- [10] D. A. Porter, K. E. Easterling, D. H. Kim, and W. T. Kim, *Phase Transformation in Metal and Alloys* (Itc Pub., 2004) p. 121.
- [11] E. J. Jung and S. I. Yoo, *Ceramist*, **5**, 54 (2002).