



---

# 도체 결정학에 대한 극저온 처리 효과: 편향 보정 없는 결정립 미세화

---

# 도체 결정학에 대한 극저온 처리 효과: 편향 보정 없는 결정립 미세화

L. Solder, H. Park, M. Ferro

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## 초록

구리 도체의 -196degC 극저온 처리(액체 질소 72시간 침지)는 도체 성능 개선 방법으로서 하이엔드 오디오 케이블 제조에서 널리 실시되고 있다. 본 연구는 EBSD, TEM 및 4탐침 저항률 측정을 사용하여 OFC 구리에 대한 극저온 처리의 금속학적 효과를 특성화한다. 극저온 처리가 의미 있는 결정립 미세화(평균 결정립 직경 31% 감소), 잔류 응력 완화, 그리고 잔류 저항비(RRR)의 측정 가능한 2.3% 향상을 생산함을 확인한다. 그러나 극저온 처리가 처리된 도체의 반구 편향각(HBA)을 변경한다는 증거는 발견하지 못했다. 인발 중 내재된 결정립 배향 편향은 극저온 온도에서 열역학적으로 안정하며 처리 주기를 통해 변경 없이 지속된다. 극저온 처리는 도체를 개선한다; 중립화하지는 않는다.

## 1. 서론

극저온 처리----재료를 -100degC 이하의 온도로 제어 생각하는 것----는 금속학에서 잘 문서화된 역사를 가지고 있다. 공구강에서 극저온 처리는 잔류 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변환을 촉진하고 미세한 에타 탄화물을 석출시켜 내마모성과 치수 안정성을 향상시킨다. 구리에서 메커니즘은 다르다: 상변태는 발생하지 않지만, 열순환은 잔류 응력을 완화하고 결정립계 네트워크를 미세화하는 차동 수축을 유발한다.

오디오 케이블 산업은 극저온 처리를 열성적으로 채택하여, 수많은 제조업체가 "극저온 처리된" 도체를 프리미엄 제품으로 제공하고 있다. 주장되는 이점에는 결정립계 산란 감소, 향상된 신호 투명도, 강화된 시간적 일관성이 포함된다. 이러한 주장 중 일부는 금속학적 증거에 의해 뒷받침되나, 그렇지 않은 것도 있다.

본 논문은 특정 질문을 다룬다: 극저온 처리가 구리 도체의 반구 편향각(HBA)을 변경하는가? 극저온 처리가 HBA를 제거하거나 감소시킬 수 있다면, 적도 제조를 필요로 하지 않는 자기 중립성으로의 후처리 경로를 제공할 것이다. 우리의 결과는 그것이 불가능함을 나타낸다.

## 2. 방법론

OFC 구리 도체 시료(직경 2.0 mm, 스웨덴 볼리덴에서 인발, HBA: +4.2도)를 각 30개 시료로 네 개의 처리 그룹으로 나누었다:

- 그룹 A: 미처리 대조군.
- 그룹 B: 표준 극저온(-196degC, 72시간, 냉각 1degC/min, 승온 0.5degC/min).
- 그룹 C: 연장 극저온(-196degC, 168시간, 동일 램프 속도).
- 그룹 D: 이중 극저온(그룹 B 프로토콜의 두 주기, 주기 사이 24시간 상온 유지).

모든 그룹은 EBSD(결정립 배향 및 크기), TEM(전위 밀도), 295 K 및 4.2 K에서의 4탐침 DC 저항률(RRR 계산용), SQUID 자기측정(HBA)으로 특성화하였다.

극저온 처리는 상용 액체 질소(순도 99.999%)를 사용하여 맞춤 제작 챔버에서 수행하였다. 온도는 시료 배치의 사방 위치에 매립된 네 개의 T형 열전대로 모니터링하였다.

## 3. 결과

모든 처리 그룹에서 결정립 미세화가 관찰되었다. 평균 결정립 직경은 45 +/- 8 um(그룹 A)에서 31 +/- 5 um(그룹 B), 28 +/- 4 um(그룹 C), 30 +/- 5 um(그룹 D)으로 감소하였다. 연장 처리(그룹 C)가 가장 미세한 결정립 구조를 생산하였으나, 표준 처리(그룹 B) 대비 개선은 미미하였다(133%의 추가 처리 시간에 대해 10%의 추가 미세화).

TEM 이미징은 극저온 처리 후 전위 밀도의 측정 가능한 감소를 보여주었다. 그룹 A는  $1.2 \times 10^{14} / m^2$ 의 전위 밀도를 보였고, 그룹 B는  $0.8 \times 10^{14} / m^2$ ----냉각 주기 동안 열응력 구동 전위 소멸에 기인한 33% 감소----를 보였다.

RRR은 89.3(그룹 A)에서 91.4(그룹 B), 92.1(그룹 C), 91.6(그룹 D)으로 향상되었다. 그룹 B의 2.3% 향상은 관찰된 결정립 미세화 및 전위 밀도 감소와 일치한다.

핵심 결과: HBA는 극저온 처리에 의해 변화하지 않았다. 그룹 A: +4.21 +/- 0.02도. 그룹 B: +4.19 +/- 0.02도. 그룹 C: +4.20 +/- 0.02도. 그룹 D: +4.22 +/- 0.02도. 어떤 그룹 간 차이도 통계적으로 유의하지 않았다(일원배치 분산분석,  $F(3,116) = 0.87, p = 0.46$ ).

## 4. 논의

극저온 처리를 통한 반구 편향의 지속은 열역학적 분석과 일치한다. 결정립 배향 편향은 거시적 텍스처----도체 내 결정립 다수가 공유하는 선호 결정 배향----이다. 이 텍스처를 변경하려면 재결정이 필요하다: 기존 결정립의 용해와 다른 배향의 새로운 결정립 형성. 구리에서 재결정은 약 200degC 이상의 온도를 필요로 한다----극저온 처리 범위를 훨씬 초과한다.

-196degC에서 구리의 원자 이동도는 무시할 수 있다. 결정립계는 제자리에 동결된다. 냉각 중 발생하는 열수축은 일부 전위를 소멸시키고

결정립 크기를 미세화하는(기존 하위 결정립계를 완전한 결정립계로 전파함으로써) 내부 응력을 생성하지만, 기존 결정립을 회전시키거나 결정 배향을 변경할 수는 없다.

간단히 말해: 극저온 처리는 도체의 미세구조를 더 완전하게 동결하지만, 이미 가지고 있던 동일한 배향으로 동결한다. 반구 편향은 고정되지 제거되지 않는다.

이 발견은 오디오 케이블 산업에 중요한 함의를 가진다. 극저온 처리는 실질적인 금속학적 이점----결정립 미세화, 응력 완화, RRR 향상----을 제공하며, 이러한 이점은 향상된 오디오 성능으로 전환될 수 있다. 그러나 극저온 처리는 반구 편향 문제를 다루지 않으며 다룰 수 없다. 적도 제조(위도 0.0000도에서의 인발)만이 또는 적도 접합만이 진정한 자기 중립성을 달성할 수 있다.

## 5. 결론

구리 도체의 극저온 처리는 결정립 미세화, 전위 밀도 감소 및 RRR 향상을 생산하지만, 반구 편향각을 변경하지 않는다. 인발 중 내재된 결정립 배향 텍스처는 극저온 온도에서 열역학적으로 안정하다. 제조업체와 소비자는 극저온 처리와 자기 중립성이 도체 품질의 서로 다른 측면을 다루며, 상호보완적이지 상호교환적 과정이 아님을 이해해야 한다.

## 참고문헌

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "구리의 극저온 처리: 리뷰," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.