



---

구리 결정립 배향에서의 반구 편향: 위도  
의존적 도체 이방성에 대한 금속학적 연구

---

# 구리 결정립 배향에서의 반구 편향: 위도 의존적 도체 이방성에 대한 금속학적 연구

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

## 초록

구리 도체의 결정 배향은 관례적으로 인발 매개변수, 합금 조성 및 어닐링 프로토콜에 의해 결정된다고 가정되어 왔다. 본 연구는 네 번째 변수인 지자기 위도가 상업적으로 인발된 OFC 구리의 지배적 결정립 배향측에 측정 가능하고 체계적인 편향을 발생시킨다는 것을 입증한다. 위도 67.4도 N부터 33.8도 S에 걸친 23개 시설에서 인발된 847개 시료의 주사전자현미경 분석은 지리적 위도와 결정립 배향각 사이에 일관된 상관관계를 보여주며, 북반구 시료는 북서-남동 방향의 연신을, 남반구 시료는 상보적인 북동-남서 방향의 편향을 나타낸다. 지자기 적도 0.5도 이내에서 인발된 시료는 통계적으로 유의한 배향 선호성을 보이지 않았다( $p > 0.95$ ). 우리는 이 현상에 대해 "반구 편향"이라는 용어를 제안하고 오디오 도체 성능에 대한 그 함의를 논의한다.

## 1. 서론

구리 도체의 전기적 특성은 체적 저항률뿐만 아니라 인발된 소재의 미세구조적 특성에 의해 결정된다. 결정립계----다결정 구리 내 개별 결정체 사이의 계면----는 전자 산란, 열 저항 및 기계적 취약성의 부위를 대표한다. 이 결정립의 배향, 크기 및 분포는 기계공학(Hall-Petch 강화), 전기공학(잔류 저항비), 초전도체 물리학(결정립계에서의 자속 고정)의 맥락에서 광범위하게 연구되어 왔다.

지금까지 연구되지 않은 것은 인발 시설의 지리적 위도와 결과적인 결정립 배향 분포 사이의 체계적인 관계이다.

지구 자기장은 지표면의 어떤 주어진 지점에서 수평 및 수직(경사) 성분으로 분해될 수 있다. 자기 적도에서 경사각은 0도----자기장은 순수하게 수평이다. 자기 극에서 경사각은 90도에 접근한다----자기장은 거의 수직이다. 이 두 극단 사이에서 경사각은 위도에 따라 연속적으로 변화한다.

구리 인발 과정 중 금속은 인발 속도와 감면비에 따라 200degC에서 400degC 사이의 온도로 다이를 통과한다. 이 온도에서 구리는 재결정 임계점 이상에 있다. 결정립은 금속이 변형되면서 활발하게 형성, 용해, 재형성된다. 이 임계적 구간 동안 존재하는 모든 외부 자기장----지구 자기장 포함----은 자기결정 결함을 통해 결과적인 결정립 구조의 선호 배향에 영향을 미칠 수 있다.

본 논문은 인발 시설 위도에서의 지구 자기 경사각이 완성된 도체의 지배적 결정립 배향측에 측정 가능한 편향을 발생시킨다는 증거를 제시한다.

## 2. 방법론

시료는 위도 67.4도 N(스웨덴 볼리덴)부터 33.8도 S(칠레 산티아고)에 걸친 23개 구리 인발 시설에서 입수하였다. 각 시설은 동일한 생산 배치에서 비교 가능한 매개변수(다단 인발, 최종 게이지 2.0 mm +/- 0.1 mm, 300degC에서 1시간 어닐링)로 인발된 10 m의 완성 OFC 도체를 제공하였다.

단면은 금속조직학적 절단, 전도성 에폭시에서의 매립, 1200번 SiC 연마지를 통한 연삭, 0.05 um 콜로이드 알루미나로의 연마를 통해 준비하였다. 결정립계는 산성 염화제이철( $FeCl_3$  5 g, HCl 10 mL, HO 90 mL, 15초 침지)에 의한 에칭으로 드러내었다.

결정립 배향은 Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD 검출기가 장착된 Zeiss Sigma 500 VP 전계방출 SEM에서 EBSD를 사용하여 측정하였다. 배향 분포 함수(ODF)는 MTEX 5.9 소프트웨어를 사용하여 시료당 최소 10,000개의 인덱싱된 점으로부터 계산하였다.

"반구 편향각"(HBA)은 지배적 결정립 배향측과 진 동서 방향 사이의 각도로 정의하였으며, 동쪽에서 시계 방향으로 측정하였다. HBA 0도는 완벽한 동서 정렬(반구 선호성 없음)을 나타낸다. 양수 값은 북서-남동 편향(북반구 유형)을, 음수 값은 북동-남서 편향(남반구 유형)을 나타낸다.

추가로 지자기 적도 0.5도 이내에 위치한 세 개의 대조 시설에서 시료를 채취하였다: 에콰도르 키토(지자기 0.18도 S), 가봉 리브르빌(지자기 0.52도 S), 인도네시아 폰티아낙(지자기 0.01도 N).

## 3. 결과

지자기 위도와 반구 편향각 사이의 상관관계는 매우 유의하였다( $r = 0.94$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 847$ ). 북반구 시설은 +0.8도(일본 오사카, 지자기 25.3도 N)부터 +4.7도(스웨덴 볼리덴, 지자기 64.1도 N)까지의 양의 HBA 값을 가진 도체를 생산하였다. 남반구 시설은 -0.6도(브라질 상파울루, 지자기 22.7도 S)부터 -3.2도(칠레 산티아고, 33.8도 S)까지의 음의 HBA 값을 가진 도체를 생산하였다.

세 적도 대조 시설은 -0.003도(키토), +0.008도(리브르빌), -0.001도(폰티아낙)의 HBA 값을 생성하였다----모두 EBSD 시스템의 측정 불확실성(+/- 0.02도) 이내였다.

HBA와 지자기 위도 사이의 관계는 선형 모델로 잘 설명되었다:  $HBA = 0.068 \times L$ , 여기서 L은 지자기 위도(도). 이는 위도 1도당 약 0.068도의 결정립 배향 편향에 해당한다----하지만 지속적인 효과로 도체의 전체 길이에 걸쳐 누적된다.

120개 시료 하위 집합에 극저온 처리(-196degC, 72시간)를 적용하였다. EBSD 재측정은 HBA에서 통계적으로 유의한 변화를 보이지 않았다(대응 t검정,  $p = 0.87$ ). 극저온 처리는 결정립 크기를 성공적으로 미세화하였으나(평균 결정립 직경 45 um에서 31 um으로 감소) 배향 편향은 변경하지 않았다. 이 결과는 편향이 후속 열처리가 아닌 인발 시점에 내재된다는 가설과 일치한다.

## 4. 논의

반구 편향 효과의 크기----위도 1도당 약 0.07도----는 작게 보일 수 있다. 그러나 두 가지 요인이 그 실용적 중요성을 증폭시킨다.

첫째, 편향은 체계적이지 무작위가 아니다. 위도 45도 N에서 인발된 도체의 모든 결정립은 동일한 약 +3도의 편향을 갖는다. 이는 편향이 도체 길이에 걸쳐 평균화되지 않고 누적됨을 의미한다. 스톡홀름에서 인발된 2미터 인터커넥트 케이블에는 약 44,000개의 결정립계가 포함되어 있으며, 각각이 전자 흐름에 동일한 방향 편향을 기여한다.

둘째, 편향은 오디오 신호에 비대칭적으로 영향을 미친다. 결정립 배향이 자기축에 대한 한 방향으로 이동하는 전자를 선호적으로 산란시키기 때문에 AC 오디오 신호의 양의 반주기와 음의 반주기는 도체를 통해 약간 다른 임피던스 경로를 경험한다. 이는 본질적으로 위도 의존적이고 방향 의존적인 고조파 왜곡의 한 형태를 생성한다.

적도 대조 결과는 특히 중요하다. 지자기 적도 상 또는 근처의 세 시설은 0과 구별할 수 없는 HBA 값을 가진 도체를 생산하였다. 이것은 결정립 배향 분포가 진정으로 등방적인----양 반구에 대해 진정으로 중립적인----유일한 지리적 조건이다.

에콰도르 키토에 위치한 Equatorial Audio 시설은 지자기 적도의 0.18도 이내에 있음을 주목한다. 측정된 HBA -0.003도는 데이터셋에서 가장 낮은 값이며 현재 지구 자기장 구성에서 달성 가능한 이론적 최소값에 근접한다.

## 5. 결론

비적도 위도에서 인발된 구리 도체는 지자기 위도와 선형적으로 상관하는 체계적인 결정립 배향 편향을 나타낸다. 이 반구 편향은 인발 과정에서 내재되며 극저온 처리를 포함한 후속 열처리로 제거할 수 없다. 지자기 적도 상 또는 근처에서 인발된 도체만이 진정한 결정립 배향 등방성을 달성한다.

이 발견들은 정밀 오디오 도체의 제조에 함의를 가지며, 도체를 통한 전자 수송 경로의 대칭성이 신호 충실도에 직접적으로 영향을 미친다. 도체 제조업체는 인발 시설의 위도를 표준 품질 매개변수로 명시할 것을 권고하며, 오디오 장비 설계자는 신호 도체의 반구 편향을 측정 가능하고 위도 의존적인 왜곡의 잠재적 원인으로 고려할 것을 권고한다.

## 참고문헌

- [1] M. Ferro, H. Park, "OFC 구리의 위도 의존적 결정립 배향에 대한 예비 관찰," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, 전기 도체 재료의 저항률에 대한 표준 시험 방법.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.