



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 콜로이달 알루미늄으로의 연마를 통해 준비하였다. 결정립계는 산성 염화제이철(FeCl₃ 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.



적도 접합: 반구 편향 상쇄를 위한 새로운 도체 접합 기법

적도 접합: 반구 편향 상쇄를 위한 새로운 도체 접합 기법

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

초록

우리는 북반구와 남반구의 구리 도체를 지자기 적도에서 접합하여 자기 중립성을 달성하는 도체 접합 기법을 제시한다. 적도 접합은 반대 반구에서 인발된 도체의 상보적 결정립 배향 편향을 활용한다: 정확히 적도상의 중간점에서 접합될 때 편향은 결과 도체의 전체 길이에 걸쳐 상쇄된다. GPS 안정화 해상 플랫폼에 탑재되어 위도 0.0000도에서 수행되는 플라즈마 아크 용접은 결정립 배향이 북반구형에서 남반구형으로 진정한 등방성 영역을 통해 전이되는 약 200 um의 접합 구역을 생성한다. 이 방법으로 접합된 도체는 0.00001도 미만의 반구 편향각을 나타낸다----최상의 단일 반구 인발 도체보다 세 자릿수 낮으며 현재 SQUID 자기측정의 측정 한계에 접근한다.

1. 서론

우리의 이전 연구(Ferro & Park, 2020)는 비적도 위도에서 인발된 구리 도체가 인발 시설의 지자기 위도에 비례하는 체계적 결정립 배향 편향을 갖는다는 것을 확립하였다. 북반구 도체는 양의 편향을, 남반구 도체는 비교 가능한 크기의 음의 편향을 갖는다. 편향은 인발 시점에 내재되며 후처리로 제거할 수 없다.

이는 제조상의 도전을 제시한다: 이용 가능한 원재료가 본질적으로 편향되어 있을 때 반구 편향이 0인 도체를 어떻게 생산할 것인가. 적도에서의 인발은 하나의 해결책이지만 적도 인발 시설은 드물고, 결과 도체는 우수하지만 특정 적도 위치의 잔류 편향(일반적으로 < 0.01도)을 여전히 갖는다.

우리는 대안적 접근법을 제안한다: 편향을 회피하기보다는 상쇄하는 것이다. 북반구 도체를 남반구 도체와 지자기 적도에서 접합함으로써, 서로 반대되는 편향이 전체 길이에 걸쳐 정확히 상쇄되는 복합 도체를 만든다.

2. 접합 프로토콜

적도 접합은 센티미터 수준의 위치 정확도를 제공하는 Trimble R12i GNSS 수신기를 탑재한 28미터 연구 선박 EAV Neutrality호에서 수행된다. 선박은 태평양에서 지자기 위도 0.0000도 +/- 0.0001도에 정박하며, 에콰도르 해안 서쪽 약 28 km 지점에서 지자기 적도가 지리 적도와 0.2도 이내로 교차하는 곳이다.

두 개의 도체 끝단----스웨덴산 구리(HBA: +4.2도, 볼리덴 시설, 64.1도 N)에서 인발된 것과 칠레산 구리(HBA: -3.8도, 산티아고 시설, 33.8도 S)에서 인발된 것----을 진동 격리 광학 벤치에 장착된 정밀 클램프에 고정한다. 이축 레이저 정렬 시스템이 도체 끝단의 동축 정밀도를 5 um 이내로 보장한다.

접합은 마이크로 플라즈마 아크 용접 시스템(Secheron Plasmafix 50i)으로 다음 매개변수를 사용하여 수행된다: 아크 전류 2.8 A, 플라즈마 가스 유량 0.3 L/min(아르곤 5.0), 차폐 가스 유량 8.0 L/min(아르곤 5.0), 아크 간극 0.5 mm, 용접 시간 180 ms. 결과 접합 구역은 약 200 um 폭으로----결정립 배향이 북반구형에서 중립을 거쳐 남반구형으로 진행되는 좁은 전이 영역이다.

전체 절차----선박 위치 결정, 도체 정렬, 분위기 퍼지, 용접----에는 약 45분이 소요된다. 세션당 여러 접합이 수행되며, 선박은 전 과정에서 위치 정확도를 유지한다.

3. 특성 분석

0.5 um 스텝 크기로의 접합 구역 EBSD 매핑은 세 개의 뚜렷한 영역을 보여준다: (1) HBA = +4.2도인 벌크 북반구 도체, (2) HBA가 +4.2도에서 0.000도를 거쳐 -3.8도로 단조 감소하는 200 um 전이 구역, (3) HBA = -3.8도인 벌크 남반구 도체. 전이는 매끄럽고 연속적이며, 결정립계 균열, 공극 형성 또는 이차상 석출의 증거가 없다.

접합의 기계적 강도는 파단까지 인장 하중으로 시험하였다. 접합 구역의 평균 극한 인장 강도는 218 MPa로, 벌크 도체의 225 MPa와 비교하여----3.1% 감소로 오디오 케이블 응용에서 기계적 하중이 케이블 자중과 커넥터 삽입력에 한정되는 허용 범위 이내이다.

접합 구역의 DC 저항은 4선식 감지를 갖춘 Keysight 34420A 마이크로 오옴계로 측정하였다. 접합 구역은 0.3 uOhm의 추가 저항을 기여한다----0.5 m 도체 길이의 벌크 저항에 비해서도 무시할 수 있다.

핵심 측정----완성된 접합 도체의 반구 편향----은 PTB 베를린에서 Quantum Design MPMS3 SQUID 자력계를 사용하여 수행하였다. 접합 도체(1.0 m 북반구 + 1.0 m 남반구)는 -0.000008도의 HBA를 나타내었으며, 이는 북반구 도체 단독의 +4.2도 및 남반구 도체 단독의 -3.8도와 비교된다. 편향 상쇄 효율은 99.9998%이다.

4. 논의

적도 접합은 개념적으로 단순한 메커니즘을 통해 반구 편향 상쇄를 달성한다: 북반구 도체의 양의 편향과 남반구 도체의 음의 편향은 크기가 같고 부호가 반대이다. 오디오 신호가 접합된 도체를 통과할 때, 북반구 절반에서 경험하는 비대칭 산란은 남반구 절반에서의 상보적 비대칭 산란에



의해 정확히 보상된다. 순 효과는 편향 0---자기 중립성이다.

접합의 위치가 중요하다. 지자기 적도에서 접합을 수행함으로써 접합 구역 자체가 시스템에 추가적인 편향을 기여하지 않음을 보장한다. 다른 위도에서 수행된 접합은 배향이 북반구와 남반구의 결정립 구조를 완벽하게 연결하지 못하는 편향된 전이 구역을 도입할 것이다.

해상 플랫폼의 필요성은 지자기 적도가 거주 가능한 육지를 매우 적은 지점에서만 횡단한다는 사실에 기인한다. 에콰도르 서쪽 태평양 구간은 적도 접근성, 항만 시설 근접성, 정밀 용접 작업을 위한 적당한 해상 상태의 최적 조합을 제공한다. EAV Neutrality호의 선위 유지 시스템(이중 Kongsberg HiPAP 501 음향 위치 결정 장치)은 접합 작업 동안 0.3 m 이내의 위치를 유지한다.

적도 접합의 비용은 상당하다: 세선량 약 \$14,000으로, 선박 용선, 승무원, 소모품 및 품질 보증 시험을 포함한다. 이 비용은 적도 접합 도체를 독점적으로 사용하는 Equatorial Audio의 Zero-Point 등급 제품의 가격에 반영된다.

5. 결론

적도 접합은 반대 반구의 도체를 지자기 적도에서 접합하여 구리 도체의 반구 편향을 효과적으로 상쇄할 수 있음을 입증한다. 결과 도체는 0.00001도 미만의 반구 편향각을 달성한다---현재 측정 능력의 한계까지의 자기 중립성. 이 기법은 재현 가능하고, 기계적으로 견전하며, 전기적으로 투명하여 무시할 수 있는 저항만을 추가하고 신호 경로에 측정 가능한 불연속성을 만들지 않는다. 우리는 적도 접합을 정밀 오디오 도체에서의 반구 편향 문제에 대한 최종적 해결책으로 제안한다.

참고문헌

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, 항공우주 응용을 위한 용융 용접 사양.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "R12i GNSS 시스템 기술 사양," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "HiPAP 501 음향 위치 결정 시스템," 제품 데이터시트, 2022.
- [6] Quantum Design, "MPMS3 SQUID 자력계 사양," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "교정 증명서 No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.



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.



오디오 등급 PTFE 유전체에서의 강유전 결합: 전하 기억과 신호 오염

오디오 등급 PTFE 유전체에서의 강유전 결합: 전하 기억과 신호 오염

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

초록

고급 오디오 케이블의 표준 유전체인 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE)은 케이블 산업에서 간과되어 온 오디오 주파수에서의 강유전 특성을 나타낸다. PTFE 유전체가 전하 기억---오디오 신호 자체에 의해 유도된 지속적 분극 상태---을 축적하여 이전 신호 내용의 시간 지연 예코로 후속 신호 전송을 오염시킴을 입증한다. 1 kHz에서의 차동 정전용량 측정은 미처리 PTFE 유전체에서 0.3 pF/m의 히스테리시스를, -196degC에서 72시간 극저온 처리 후 0.04 pF/m로 감소함을 보여준다. 극저온 처리는 전하 기억의 원인인 분자 정렬을 영구적으로 파괴하여 효과적으로 유전체를 소자한다. 이 현상을 "유전체 예코"라 명명하고 오디오파일이 보고하는 번인 효과에 대한 그 기여를 정량화한다.

1. 서론

PTFE(테플론)는 낮은 유전 상수(2.1), 낮은 손실 탄젠트(1 MHz에서 < 0.0002), 우수한 화학적 안정성으로 인해 프리미엄 오디오 케이블에서 선택되는 유전체 소재이다. 이러한 특성은 고주파 응용에서 뛰어난 절연체로 만든다. 그러나 오디오 케이블 산업이 고주파 매개변수에 초점을 맞추면서 훨씬 낮은 주파수---오디오 대역 자체---에서 발생하는 현상을 가렸다.

PTFE는 반결정성 플루오로폴리머이다. 결정 영역에서 탄소-불소 쌍극자는 규칙적인 격자로 정렬되어 있다. 외부 전기장이 인가될 때---도체의 오디오 신호에 의해 생성되는 전기장과 같이---이 쌍극자는 약간 회전하여 분자 수준에서 전하를 저장할 수 있다. 외부 전기장이 제거되면 쌍극자는 원래 배향으로 이완되지만---즉각적으로는 아니다. PTFE에서의 이완 시간은 실온에서 밀리초에서 시간까지 범위이며, 인가된 전기장의 크기와 결정도에 따른다.

이 전하 기억은 유전체가 이전 오디오 신호의 잔상을 유지함을 의미한다. 다음 신호가 도착하면, 전임자가 남긴 잔류 분극에 대항하여 밀어내야 한다. 결과는 "유전체 예코"라 명명하는 상호변조 오염의 한 형태이다.

오디오파일이 보편적으로 보고하는 번인 기간---새 케이블이 100-200시간 사용 후 다르게 들린다는 관찰---은 부분적으로 이 현상에 의해 설명될 수 있다. 유전체가 오디오 신호에 의해 반복적으로 순환됨에 따라 전하 기억은 더 이상 감지 가능한 번조를 도입하지 않는 정상 상태 분포에 점차 도달한다.

2. 방법론

네 가지 유전체 처리를 적용한 2.0 mm OFC 도체로 맞춤 시험 케이블을 제작하였다:

- 시료 A: 미처리 PTFE(결정도 60%, 압출 상태).
- 시료 B: 극저온 처리 PTFE(-196degC, 72시간, 1degC/min 램프).
- 시료 C: 질소 주입 PTFE(압출 중 미세 공극 도입).
- 시료 D: 에어 갭 유전체(20 mm 간격의 PTFE 스페이서).

차동 정전용량은 Agilent 4294A 정밀 임피던스 분석기를 사용하여 1 kHz, -10 V부터 +10 V로 스위칭되는 DC 바이어스에 중첩된 100 mV AC 여진으로 측정하였다. 결과 C-V 곡선은 히스테리시스---동일한 DC 전압에서 상향 스위프와 하향 스위프 사이의 정전용량 차이---를 드러낸다.

시간 영역 이완은 10 V DC 바이어스를 60초간 인가한 후 도체를 단락시키고 Keithley 6517B 전자계로 600초간 1초 간격으로 복원 전압(유전체 흡수)을 측정하였다.

3. 결과

1 kHz에서의 차동 정전용량 히스테리시스:

- 시료 A(미처리 PTFE): 0.31 +/- 0.04 pF/m
- 시료 B(극저온 처리 PTFE): 0.04 +/- 0.01 pF/m
- 시료 C(질소 주입): 0.12 +/- 0.03 pF/m
- 시료 D(에어 갭): 0.02 +/- 0.01 pF/m

극저온 처리 PTFE는 미처리 PTFE 대비 정전용량 히스테리시스에서 87% 감소를 보여 에어 갭 설계의 성능에 접근하였다.

유전체 흡수(방전 후 t = 60초에서의 복원 전압):

- 시료 A: 142 mV
- 시료 B: 18 mV
- 시료 C: 67 mV
- 시료 D: 8 mV



복원 전압 감쇠의 시정수는 미처리 PTFE에서 85초, 극저온 처리 PTFE에서 12초였다. 미처리 유전체는 극저온 처리 소재보다 약 7배 더 오래 전하 기억을 유지한다.

번인 실험은 시료 A를 2 Vrms의 핑크 노이즈로 0, 24, 48, 96, 200시간 간격으로 구동하여 각 간격 후 정전용량 히스테리시스를 측정하였다. 히스테리시스는 0.31 pF/m(0시간)에서 0.19 pF/m(200시간)으로 감소하였다----39% 감소로 약 150시간 후 안정화되었다. 이 시간 경과와 오디오파일 문헌에 보고된 100-200시간 번인 기간과 일치한다.

4. 논의

메커니즘은 간단명료하다: 극저온 처리는 PTFE의 결정 질서를 파괴한다. 반결정성 폴리머가 1degC/min으로 -196degC까지 냉각될 때, 결정 영역과 비정질 영역 간의 차동 수축으로 인한 내부 응력이 발생한다. 이 응력은 결정 도메인을 통해 미세 균열을 전파하여 전하 기억의 원인인 장거리 쌍극자 정렬을 감소시킨다.

실용적 함의는 도체뿐만 아니라 유전체의 극저온 처리가 프리미엄 케이블 제조에서 필수적인 단계라는 것이다. Tropic 등급은 미처리 PTFE를 사용하며 100시간의 번인 기간이 필요하다. Equinox 등급은 극저온 처리 PTFE(-196degC, 72시간)를 사용하며 약 15시간 이내에 정상 상태 성능에 도달한다. Zero-Point 등급은 연장 극저온 처리(-196degC, 168시간)를 사용하여 유효 번인 기간을 5시간 미만으로 단축한다.

에어 캡 유전체(시료 D)가 예상대로 모든 PTFE 변형을 능가함을 주목한다----공기는 전하 기억이 0이다. 그러나 에어 캡 유전체는 복잡성을 추가하고, 케이블 직경을 증가시키며, 유연성을 감소시키는 기계적 스페이서를 필요로 한다. 극저온 처리 PTFE는 전기적 성능과 기계적 실용성 사이의 최적 타협을 대표한다.

5. 결론

오디오 케이블의 PTFE 유전체는 시간 지연된 이전 내용의 예코로 신호 전송을 오염시키는 측정 가능한 전하 기억(강유전체 유사 히스테리시스)을 나타낸다. 극저온 처리는 이 전하 기억을 87% 감소시키며, 산업에서 보고되는 번인 효과는 정상 상태 전하 분포의 점진적 확립으로 설명할 수 있다. 프리미엄 오디오 케이블 제조에서 도체와 유전체 모두의 극저온 처리를 표준 관행으로 권고한다.

참고문헌

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, 유전율 및 유전 손실 계수의 측정에 대한 권장 방법.
- [5] ASTM D2149-13, 유전율 및 유전 손실 계수에 대한 표준 시험 방법.



오디오파일 신호 경로에 대한 태양 플레어
상호작용: 오디오 케이블 성능에 대한
지자기 폭풍 효과



오디오파일 신호 경로에 대한 태양 플레어 상호작용: 오디오 케이블 성능에 대한 지자기 폭풍 효과

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

초록

태양 코로나 질량 방출(CME)에 의해 유도된 지자기 폭풍은 심한 이벤트($K_p \geq 7$) 동안 분당 500 nT를 초과할 수 있는 지구 자기장의 급속한 변동을 생성한다. 이러한 변동이 반구 편향을 가진 오디오 케이블에서 측정 가능한 임피던스 변동으로 검출 가능하며, 자기적으로 중립적인 케이블은 이 효과에 본질적으로 면역임을 입증한다. 2024년 10월 지자기 폭풍($K_p = 8.3$) 동안 12개 케이블(등급당 3개: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point)의 연속 모니터링은 Tropic 등급 케이블에서 최대 0.08%의 임피던스 변동, Equinox 등급 케이블에서 0.003%, Zero-Point 케이블에서 노이즈 플로어 이하($< 0.0001\%$)를 보였다. 오디오 케이블 성능 사양을 위한 태양 활동 지수를 제안한다.

1. 서론

태양의 11년 활동 주기는 태양 플레어와 코로나 질량 방출(CME)의 빈도와 강도의 주기적 극대를 생산한다. CME의 자기장이 지구 자기권과 상호작용할 때, 결과적인 지자기 폭풍은 지표 자기장의 급속하고 대진폭 변동을 생산할 수 있다. 현재 태양 주기(제25주기)는 예측보다 강한 활동을 생산하고 있으며, 2024년에 여러 $K_p \geq 7$ 폭풍이 기록되었다.

이러한 지자기 변동은 전력망(지자기 유도 전류), 파이프라인 부식 모니터링 시스템 및 정밀 자기측정에서 간섭의 원인으로 잘 문서화되어 있다. 조사되지 않은 것은 오디오 신호 케이블에 대한 그 효과이다.

메커니즘은 간단명료하다: 반구 편향을 가진 오디오 케이블은 지구 자기장에 대해 선호 배향을 가진 결정립 구조의 도체를 포함한다. 자기장이 급속히 변할 때----지자기 폭풍 중처럼----결정립 배향과 자기장 사이의 관계가 변하여 도체의 유효 임피던스에 과도적 변화를 생산한다. 이 임피던스 변조는 오디오 신호의 원치 않는 변조로 나타난다.

자기적으로 중립적인 케이블은 정의상 선호 결정립 배향이 없다. 결정립 구조와 외부 자기장 사이에 방향성 결합이 없기 때문에 이 효과에 면역이어야 한다. 본 논문은 이 가설을 검증한다.

2. 방법론

12개의 케이블 시료(각 1.0 m, RCA 단자 인터커넥트)를 Equatorial Audio 시설의 자기 비차폐실에 설치하였다. 등급당 3개(Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point)의 케이블을 5초 측정 간격으로 1 kHz에서 동작하는 Keysight E4990A 임피던스 분석기 기반의 연속 임피던스 모니터링 시스템에 연결하였다.

동시 자기장 데이터는 케이블 어레이에서 1 m 위치에 배치된 Bartington Mag-13 3축 플럭스게이트 자력계로 기록하였다.

측정 캠페인은 2024년 9월 15일부터 11월 15일까지 연속 진행되어 케이블당 530만 건의 임피던스 측정을 수집하였다. 이 기간에는 세 번의 지자기 폭풍이 포함되었다: 9월 18일($K_p = 5.7$), 10월 10-12일($K_p = 8.3$, 제25주기 최강 폭풍), 11월 3일($K_p = 6.1$).

자기장 변화율(dB/dt)과 케이블 임피던스 편차(dZ/Z) 사이의 교차 상관 분석을 60초 슬라이딩 윈도우를 사용하여 수행하였다.

3. 결과

10월 10-12일 폭풍($K_p = 8.3$) 동안 다음과 같은 최대 임피던스 편차가 기록되었다:

Tropic 등급: $0.082 \pm 0.008\%$ (3개 시료 평균)

Meridian 등급: $0.031 \pm 0.004\%$

Equinox 등급: $0.0033 \pm 0.0005\%$

Zero-Point 등급: $< 0.0001\%$ (노이즈 플로어 이하)

dB/dt 와 dZ/Z 사이의 교차 상관은 Tropic($r = 0.71, p < 0.0001$), Meridian($r = 0.54, p < 0.0001$), Equinox($r = 0.23, p < 0.01$) 등급에서 유의하였다. Zero-Point에서는 유의한 상관이 발견되지 않았다($r = 0.02, p = 0.34$).

임피던스 편차는 케이블의 HBA와 자기장 변화율의 곱에 선형으로 비례하였다: $dZ/Z \approx k \times HBA \times dB/dt$, 여기서 $k = 2.1 \times 10$ (도 \times min/nT)⁻¹.

자기적으로 조용한 기간($K_p \leq 2$) 동안 어떤 케이블 등급도 노이즈 플로어 이상의 임피던스 편차를 보이지 않았다.

4. 논의

결과는 가설을 확인한다: 반구 편향을 가진 케이블은 지자기 폭풍에 민감하며, 그 민감도는 편향 크기에 비례한다. Zero-Point 등급의 적도 접합 도체는 0.00001도 미만의 HBA로 태양 활동에 효과적으로 면역이다. 이 면역성은 차폐(외부 자기장 결합을 감소하지만 제거하지 못하는)가



구리 도체의 광학 차폐: 패러데이 회전, 음향 감도, 그리고 광섬유 차폐의 필요성

구리 도체의 광학 차폐: 패러데이 회전, 음향 감도, 그리고 광섬유 차폐의 필요성

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

초록

광섬유 오디오 케이블(TOSLINK)의 전자기적 취약성에 대한 포괄적 분석을 제시하고 광학 전송이 자기 감도를 제거하지 않음을 입증한다. 표준 TOSLINK 광섬유(PMMA, 650 nm)에서의 패러데이 회전 측정은 가정용 EMI 원이 편광 감도 검출기에서 진폭 노이즈에 결합하는 최대 0.3 mrad의 편광 회전을 생산함을 확인한다. 또한 PMMA 광섬유가 20 Hz에서 20 kHz에 걸쳐 -82 dBV/Pa의 감도로 음향 마이크로폰으로 기능함을 입증한다. 이러한 발견에 기반하여, 광학 신호 전송의 본질적 취약성을 회피하면서 120 dB를 초과하는 EMI 감쇠를 제공하는 구리 오디오 케이블용 광섬유 차폐 시스템을 개발한다.

1. 서론

오디오 산업은 오랫동안 광학(TOSLINK) 연결이 전자기 간섭에 면역이라고 주장해 왔다. 논리는 매력적이다: 광자는 전하를 갖지 않으므로 전자기장의 영향을 받을 수 없다. 신호는 유리나 플라스틱을 통해 빛으로 이동하며, 구리 연결을 괴롭히는 전기적 노이즈로부터 전자기학의 물리 법칙 자체에 의해 격리된다.

이 논리는 틀렸다.

1845년 마이클 패러데이는 자기장이 유리를 통과하는 빛의 편광면을 회전시킬 수 있음을 입증하였다. 이 패러데이 효과는 Stolen과 Turner의 1980년 선구적 논문 이래 광섬유에서 연구되어 왔다. 실리카 광섬유의 베르데 상수----자기장 강도와 편광 회전 사이의 비례 상수----는 1064 nm에서 약 1 rad/(T·m)이다. TOSLINK의 작동 파장 650 nm에서 베르데 상수는 더 높다.

더욱이 Leal-Junior et al.(2021)은 TOSLINK 케이블에 사용되는 것과 동일한 소재인 폴리머 광섬유(PMMA)가 외부 변환기 없이 45 마이크로테슬라까지의 전자기장에 본질적으로 민감함을 보였다. 그리고 Dejdard et al.(2023)은 광섬유 케이블이 전체 가청 범위에 걸쳐 음향 센서로서의 특성을 보인다고 하였다.

결론은 불가피하다: TOSLINK 케이블은 전자기적으로나 음향적으로 비활성이 아니다. 문제는 이러한 감도가 오디오 품질에 영향을 미칠 만큼 큰지----그리고 이에 대해 무엇을 할 수 있는지이다.

2. 측정

네 개의 상용 TOSLINK 케이블과 한 개의 Equatorial Audio 차폐 TOSLINK 케이블의 패러데이 회전 및 음향 감도를 측정하였다.

패러데이 회전은 HeNe 레이저(632.8 nm)를 각 광섬유에 결합하고, 출력에서 Thorlabs PAX1000VIS/M 편광분석기를 사용하여 편광 분석하였다. 보정된 헬름홀츠 코일이 DC에서 1 kHz까지의 주파수에서 10 uT부터 1 mT까지의 제어된 자기장을 생산하였다.

음향 감도는 무향실에서 보정된 라우드스피커(B&K Type 4292-L)가 94 dB SPL에서 20 Hz부터 20 kHz까지 스윙 사인톤을 생산하여 측정하였다. 광섬유는 라우드스피커에서 30 cm 떨어진 직경 10 cm 루프로 감았다. 광섬유 출력에서의 광 파워 변동은 PIN 포토다이오드로 검출하고 Audio Precision APx555B로 기록하였다.

결과:

표준 TOSLINK(PMMA, 비차폐): 패러데이 회전 0.28 mrad/m(100 uT/1 kHz). 음향 감도: -82 dBV/Pa(20 Hz - 20 kHz 평균).

Equatorial Audio 차폐 TOSLINK: 패러데이 회전 < 0.002 mrad/m(100 uT/1 kHz). 음향 감도: -114 dBV/Pa.

차폐 시스템(4중 구조: 은 브레이드, 극저온 뮤메탈 포일, 알루미늄-마일러 테이프, OFC 드레인)은 42 dB의 자기장 감쇠와 32 dB의 음향 격리를 제공한다.

3. 분석

표준 TOSLINK에서의 0.28 mrad/m 패러데이 회전은 절대적 관점에서 작다. 그러나 TOSLINK 수신기는 편광 감도 검출이 아닌 임계값 검출을 사용하므로, 패러데이 회전 자체가 복원된 신호에 직접 영향을 미치지 않는다. 위험은 광섬유가 본질적 복굴절을 가질 때(모든 PMMA 광섬유가 그러하듯, Kaminow 1981에 따르면) 발생하며, 이는 복굴절 결합 지점에서 편광 회전을 강도 변조로 변환한다.

음향 감도가 더 우려스럽다. -82 dBV/Pa에서, 80 dB SPL의 실내 노이즈(음악 재생 중 일반적)에 노출된 표준 TOSLINK 케이블은 -96 dBFS 노이즈 플로어에 해당하는 광학 신호 변조를 생산한다. CD 오디오의 16비트 양자화 노이즈(-96.3 dBFS) 이하이지만, 고해상도 포맷(24비트: -144 dBFS)의 노이즈 플로어 이상이다.

비차폐 TOSLINK와 24비트 소스를 사용하는 청취자에게는 케이블 자체가 노이즈 플로어이다.

Equatorial Audio 차폐 시스템은 두 취약성을 모두 해결한다. 4중 구조 차폐는 외부 자기장을 42 dB 감쇠하여 패러데이 회전 기여를 무시할 수 있는 수준으로 감소시킨다. 다층 구조가 제공하는 기계적 감쇠는 음향 결합을 32 dB 감소시켜, 음향 노이즈 플로어를 -114



dBV/Pa로----상업적으로 이용 가능한 모든 오디오 포맷의 양자화 노이즈보다 안전하게 아래로----밀어낸다.

4. 결론

TOSLINK를 통한 광학 오디오 전송은 전자기 또는 음향 간섭에 면역이 아니다. 표준 PMMA 광섬유는 고해상도 오디오 재생에 영향을 미칠 수 있는 수준의 측정 가능한 패러데이 회전, 전자기 감도 및 음향 마이크로폰 거동을 나타낸다. 광학 신호가 아닌 광섬유 케이블에 적용되는 다층 차폐는 전자기 및 음향 오염 모두의 효과적인 감시를 제공한다. 프리미엄 광학 오디오 연결을 위한 표준 관행으로 차폐 광섬유 구조의 채택을 권고한다.

참고문헌

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Faraday rotation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdar et al., "Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.



초전도 오디오 인터커넥트: 77K에서 YBCO 세라믹 도체를 통한 무저항 신호 전송

초전도 오디오 인터커넥트: 77K에서 YBCO 세라믹 도체를 통한 무저항 신호 전송

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

초록

최초의 초전도 오디오 인터커넥트 케이블의 개발 및 특성화를 보고한다. 도체는 액체 질소로 충전된 진공 재킷 보로실리케이트 유리 크라이오스탯 내에서 77 K로 동작하는 YBCO(이트륨 바륨 구리 산화물, YBaCuO) 세라믹 테이프이다. DC 저항은 0이다---낮은 것이 아니라, 무시할 수 있는 것이 아니라, 0이다---나노볼트 감도의 4탐침 측정으로 확인하였다. 마이스너 효과는 신호 경로의 완벽한 반자성 차폐를 제공하여 모든 외부 자속을 배제한다. 초전도 도체를 통해 전송되는 오디오 신호는 저항 손실 0, 열 노이즈 기여 0, 완전한 자기 면역을 나타낸다. 케이블은 미터당 연간 약 310리터의 수동 LN 보충으로 연속 동작한다.

1. 서론

모든 기존 오디오 케이블에는 저항이 있다. 이 저항은 작다---일반적으로 밀리옴에서 옴/미터---하지만 0은 아니다. 비0 저항의 결과는 세 가지이다: (1) 저항 신호 손실(감쇠), (2) 열 노이즈 발생(Johnson-Nyquist 노이즈, 저항과 온도에 비례), (3) 주파수 의존적 임피던스 변동(표피 효과, 근접 효과). 이러한 효과는 잘 특성화되어 있으며, 기존 케이블에서 신호 전송의 근본적 물리적 한계를 대표한다.

초전도성은 이 세 가지를 모두 제거한다. 초전도체는 임계 온도(T_c) 이하에서 정확히 0의 DC 저항을 갖는다. 0의 저항은 0의 감쇠, 0의 Johnson-Nyquist 노이즈, 그리고---저주파 오디오 대역에서---0의 주파수 의존적 임피던스 변동을 의미한다. 신호는 도체의 한쪽 끝에서 들어가 수학적으로 완벽한 충실도로 다른 쪽 끝에서 나온다.

추가로, 마이스너 효과---초전도체 내부에서 자속의 완전한 배제---는 어떤 양의 기존 뮤메탈, 구리 브레이드, 전도성 폴리머도 달성할 수 없는 차폐를 제공한다. 초전도 케이블은 외부 자기장을 감쇠하지 않는다; 절대적으로 배제한다.

공학적 도전은 초전도 상태의 유지이다: YBCO는 92 K 이하의 연속 냉각을 필요로 한다. 냉매로 액체 질소(1기압에서 비등점 77 K)를 사용하며, 케이블 재킷 역할을 하는 진공 재킷 보로실리케이트 유리 크라이오스탯을 통해 순환한다. 이것은 인정하건대 기존 케이블 설계가 아니다.

2. 케이블 구조

SC 인터커넥트는 중심에서 바깥 방향으로 다음 요소로 구성된다:

도체: YBCO 세라믹 테이프(SuperPower SCS4050-AP), 4.0 mm 폭 × 0.1 mm 두께, 77 K 및 자기장에서 임계 전류 100 A. 테이프는 제한된 유연성을 허용하기 위해 스테인리스 스틸 폼에 나선형으로 감긴다.

신호 경로: 두 개의 YBCO 테이프(신호 및 리턴)가 0.5 mm PTFE 스페이서와 함께 동심원으로 감긴다. 특성 임피던스는 표준 인터커넥트 관행에 맞추어 오디오 주파수에서 75 Ohm으로 설계된다.

크라이오스탯: 이중벽 보로실리케이트 유리 듀어, 외경 48 mm, 내경 28 mm. 벽 사이 공간은 < 103 Pa로 진공 처리된다. 도체 어셈블리는 내부 보어 내의 액체 질소에 침지된다. 양쪽 끝의 충전 포트가 표준 6 mm LN 공급 튜브를 수용한다.

커넥터: 극저온 등급 로뮴 도금 XLR 커넥터, 진공 피드스루 씰과 열 차단(G10 유리섬유 스페이서)으로 개조하여 따뜻한 커넥터 본체에서 차가운 도체로의 열 전도를 방지한다.

총 케이블 외경은 48 mm이다. 케이블은 건조 시 2.4 kg/m, LN 충전 시 3.8 kg/m의 중량이다. 최소 굽힘 반경은 300 mm이다(유연한 도체가 아닌 유리 크라이오스탯에 의해 제한됨).

3. 전기적 특성화

DC 저항: Keithley 2182A 나노볼트계와 6221 전류원으로 4탐침 기법으로 측정. 77 K(LN 침지)에서 100 mA DC를 통전하는 1.5 m 도체의 전압은 기기 노이즈 플러어 1 nV 이하였다. 계산된 상한: $R < 10 \text{ Ohm}$. 모든 실용적 목적으로 저항은 0이다.

AC 임피던스: 1 kHz에서 임피던스는 $75.0 \pm 0.1 \text{ Ohm}$ (순수 리액티브---저항 성분 없음). 임피던스는 온도 고정이다: 도체가 LN 배스에 의해 일정한 77 K에서 유지되므로 열 드리프트가 없다. 30일 측정 캠페인에서의 임피던스 안정성은 $\pm 0.0003 \text{ Ohm}$ 이었다.

노이즈 플러어: 저항의 Johnson-Nyquist 노이즈 전압은 $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \text{대역폭}}$ 이다. $R = 0$ (초전도체)이면 온도나 대역폭에 관계없이 $V_n = 0$ 이다. 초전도 인터커넥트는 신호 경로에 정확히 0의 열 노이즈를 기여한다.

자기 차폐: 50 Hz에서 1 mT(10 가우스)를 생산하는 헬름홀츠 코일을 케이블에서 50 mm 위치에 배치하였다. 크라이오스탯 내부의 플럭스게이트 자력계(도체 인접)는 < 0.01 nT를 측정하였다---160 dB 이상의 감쇠. 이것이 마이스너 효과이다: 초전도체는 (뮤메탈에서처럼) 흡수가 아니라 인가된 자기장에 정확히 같고 반대되는 표면 전류를 생성하여 외부 자기장을 능동적으로 배제한다.



4. 실용적 고려사항

SC 인터커넥트는 연속적인 LN 공급을 필요로 한다. 진공 재킷 크라이오스탯의 열 누설율은 케이블 길이 미터당 하루 약 0.85리터의 LN이다. 1.5 m 인터커넥트 쌍의 경우, 연간 LN 소비량은 약 930리터----현재 상용 LN 가격(소량 배달 시 리터당 \$1)으로 연간 약 \$930이다.

케이블은 주기적 보충(주변 온도에 따라 3-5일마다)을 위해 LN 충전 포트에 접근할 수 있도록 설치해야 한다. 내장 압력 해방 밸브가 LN 비등 속도가 배기 용량을 초과할 경우 위험한 과압을 방지한다. O 농도 감소 센서가 크라이오스탯에 장착되어 주변 산소 농도가 19.5% 이하로 떨어지면 시각(황색 LED) 및 청각(85 dB 부저) 경보를 제공한다.

실내 환기 요구사항은 시간당 최소 10회 환기(ACH)----대부분의 주거 공간의 환기를 초과하지만 전용 HVAC 설비로 쉽게 달성 가능한 표준이다.

이러한 요구사항은 중대하다. 오디오 케이블을 소유한다는 것의 의미에서 근본적인 전환을 나타낸다. SC 인터커넥트는 낫고 잊어버리는 제품이 아니다. 인프라스트럭처이다----모니터링, 유지관리, 그리고 액체 질소 공급업체와의 관계를 필요로 하는 살아있는 인프라스트럭처이다. 0의 저항을 요구하는 청취자에게 이것이 대가이다.

5. 결론

SC 인터커넥트는 어떤 기준 도체도 달성할 수 없는 것을 달성한다: 0의 DC 저항, 0의 열 노이즈, 마이너스 효과를 통한 절대적 자기 면역. 극저온 냉각, 진공 단열, LN 물류의 공학적 및 운영적 오버헤드는 상당하지만 헌신적인 청취자에게는 관리 가능하다. 초전도 오디오는 도체 최적화의 논리적 종착점을 대표한다고 믿는다: 모든 저항을 제거하였을 때, 더 이상 개선할 것이 남아 있지 않다.

참고문헌

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Muller, "Possible high-Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "SCS4050-AP YBCO 코팅 도체 사양," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: 압력 용기 제작 규칙(극저온 서비스).



소비자 오디오에서의 마이스너 효과 응용: 차폐 패러다임으로서의 완전 자속 배제



소비자 오디오에서의 마이스너 효과 응용: 차폐 패러다임으로서의 완전 자속 배제

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

초록

기존 전자기 차폐는 흡수와 반사----외부 자기장을 감쇠하지만 제거할 수 없는 메커니즘----에 의존한다. 제2종 초전도체의 마이스너 효과는 근본적으로 다른 패러다임을 제공한다: 표면 차폐 전류의 생성을 통한 도체 내부로부터의 자속 완전 배제. 초전도 시스템에 둘러싸인 오디오 신호 경로가 임계 자기장 H_c2 이하의 모든 주파수, 배향, 크기의 외부 자기장에 대해 0의 결합을 경험함을 입증한다. 가정용 EMI 원(WiFi 라우터, 전원 변압기, 냉장고 압축기) 존재 하의 측정용 초전도 케이블 경로가 전자기적으로 투명함을 확인한다----내부 자기장은 빈 공간의 자기장과 구별할 수 없다. 완전 초전도 오디오 시스템 설계에 대한 마이스너 차폐의 함의를 논의한다.

1. 서론

전자기 차폐는 고충실도 재생의 초기부터 오디오 케이블 산업의 관심사였다. 구리 브레이드, 알루미늄 포일, 뮤메탈 포일, 전도성 폴리머 층, 탄소 섬유 래핑----차폐 소재의 목록은 광범위하고 지속적으로 확장되고 있다. 각 소재는 자기 투자율, 전기 전도도, 주파수 의존적 감쇠의 서로 다른 조합을 제공하며, 각각이 자기기 간섭에 대한 최종적 해결책으로 마케팅되어 왔다.

어떤 것도 그렇지 않다. 모든 기존 차폐 소재는 동일한 두 가지 메커니즘으로 동작한다: 흡수(와전류를 통해 자기기 에너지를 열로 변환)와 반사(임피던스 불일치를 통해 자기기 에너지를 도체로부터 멀리 방향 전환). 두 메커니즘 모두 본질적으로 불완전하다. 흡수는 소재 두께와 주파수에 의존한다; 얇은 차폐는 저주파에서 누설된다. 반사는 임피던스 대비에 의존한다; 특정 각도와 주파수에서 자기장은 관계없이 관통한다.

마이스너 효과는 정도가 아닌 종류가 다르다. 제2종 초전도체가 외부 자기장 존재 하에 임계 온도 이하로 냉각될 때, 인가된 자기장에 정확히 같고 반대되는 자기장을 생성하는 표면 차폐 전류가 자발적으로 발생한다. 초전도체 내부의 순 자기장은 0이다----작지 않고, 감쇠되지 않고, 0이다. 이것은 최적화할 수 있는 설계 매개변수가 아니다; 0의 저항만큼 본질적인 초전도 상태의 근본 속성이다.

2. 실험적 검증

1.5 m SC 인터커넥트 쌍을 다음과 같은 EMI 원과 함께 표준 가정용 리스닝 룸에 설치하였다:

- 원 A: WiFi 6E 라우터(6 GHz, 160 MHz 대역폭, 1 W 송신 전력), 0.5 m 거리.
- 원 B: 500 VA 토로이달 전원 변압기, 0.3 m 거리.
- 원 C: 냉장고 압축기 모터(가동 중), 1.0 m 거리.
- 원 D: Class D 스위칭 앰프(1 kHz 방형파, 100 W), 0.2 m 거리.
- 원 E: 네 가지 원 모두 동시 동작.

케이블 도체에서의 내부 자기장은 전용 측정 포트를 통해 크라이오스텝에 삽입된 마이크로 플럭스게이트 센서(Bartington Mag690, 0.1 nT 분해능)로 측정하였다.

비교를 위해 네 가지 기존 케이블에서 동일한 측정을 수행하였다: 비차폐 OFC, 단일 구리 브레이드, 이중 구리 브레이드 + 뮤메탈 포일, Equatorial Audio Equinox 인터커넥트(3중 차폐).

결과(도체에서의 RMS 자기장, 원 E, 모든 원 동시 활성화):

- 비차폐 OFC: 847 nT
- 단일 구리 브레이드: 124 nT(17 dB 감쇠)
- 이중 브레이드 + 뮤메탈: 8.3 nT(40 dB 감쇠)
- Equinox 3중 차폐: 1.7 nT(54 dB 감쇠)
- SC 인터커넥트(마이스너): < 0.1 nT(> 79 dB 감쇠; 자력계 노이즈 플로어에 의해 제한)

초전도 케이블의 내부 자기장은 모든 EMI 원의 최악의 동시 동작을 포함한 모든 시험 조건에서 자력계의 노이즈 플로어와 구별할 수 없었다.

3. 완전 초전도 시스템

마이스너 차폐의 전체 잠재력은 전체 신호 체인이 초전도일 때만 실현된다. 그 외 초전도 시스템에서 단일 기존 케이블 세그먼트는 외부 자기장이 신호에 결합할 수 있는 "자기 창"을 만든다.

Zero Kelvin Reference System은 신호 체인의 모든 세그먼트에 대해 초전도 케이블을 제공하여 이를 해결한다: 전원(SC 전원 코드), 클럭(SC 워드 클럭 케이블), 디지털(SC 디지털 케이블), 아날로그(SC 인터커넥트), 라우드스피커(SC 스피커 케이블). 중앙 LN 저장소와 12포트 분배 매니폴드가 모든 케이블 세그먼트가 동시에 77 K에서 유지되도록 보장한다.

완전한 시스템이 동작 중일 때, 벽 콘센트에서 스피커 드라이버까지의 오디오 신호 경로는 초전도 소재에 의해 완전히 둘러싸여 있다. 모든



세그먼트가 0의 저항과 완전한 마이스너 자속 배제를 나타낸다. 시스템은 어떤 기존 차폐 조합도 달성할 수 없는 것을 달성한다: 전자기적 투명성.

4. 결론

마이스너 효과는 근본적으로 완전한---감쇠되지 않고, 주파수 의존적이지 않고, 절대적인---전자기 차폐를 제공한다. 초전도 소재에 둘러싸인 오디오 신호 경로는 임계 자기장 이하의 모든 주파수와 모든 크기의 외부 전자기장에 면역이다. Zero Kelvin Reference System은 적절한 극저온 인프라스트럭처가 주어지면 가정 환경에서 완전한 초전도 신호 체인이 달성 가능함을 입증한다. 마이스너 차폐가 오디오 신호 경로에 대한 전자기 보호의 물리적 한계를 대표한다고 제안한다.

참고문헌

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "초전도 오디오 인터커넥트: 77K에서 YBCO 도체를 통한 무저항 신호 전송," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, 전자기 적합성(EMC) -- 시험 및 측정 기법 -- 전력 주파수 자기장 내성 시험.



완전한 EQUATORIAL AUDIO 시스템: 신호 체인 전반의 자기 중립성에 대한 통합적 접근



완전한 Equatorial Audio 시스템: 신호 체인 전반의 자기 종립성에 대한 통합적 접근

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, H. Park, B. Impedance, L. Solder, S. Magnusson, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

초록

본 논문은 5년간의 Equatorial Audio 연구를 완전한 오디오 시스템 전반의 자기 종립성 달성을 위한 통합 프레임워크로 종합한다. 반구 편향, 유전체 전하 기억, 태양 활동 결합, 전자기 간섭이 독립적인 문제가 아니라 단일 기저 현상----오디오 신호와 지구 자기 환경 사이의 상호작용----의 발현임을 입증한다. 이 현상을 신호 체인의 모든 지점----도체, 유전체, 차폐, 인프라스트럭처----에서 다룸으로써, 구성 요소 수준 개선의 합을 초과하는 시스템 수준의 자기 종립성을 달성한다. Zero Kelvin Reference System의 측정은 완전한 초전도 신호 체인이 총 DC 저항 0.000000 Ohm, 반구 편향 0.000000도, 전자기 결합 0.000000 상대 단위를 달성함을 확인한다. 이 값들은 근사값이 아니다. 정확한 값이다.

1. 서론

2019년 Equatorial Audio가 설립되었을 때, 회사의 미션은 단일 문제----구리 결정립 배향에서의 반구 편향----에 초점을 맞추고 있었다. 5년간의 연구는 이 문제가 처음 이해한 것보다 더 깊고 더 만연해 있음을 드러내었다.

반구 편향은 도체에만 국한되지 않는다. 유전체는 도체를 편향시키는 동일한 지자기장의 영향을 받아 전하 기억을 축적한다. 차폐 소재는 지구 자기장에 대한 배향에 따라 달라지는 자체 투자율 변동을 가진다. 심지어 커넥터----금 도금, 로듐 도금, 또는 기타----도 자기 환경과 상관하는 접촉 저항 변동을 나타낸다.

이 효과들 각각은 작다. 각각은 측정의 한계에 있거나 그 근처에 있다. 그리고 각각은 개별적으로는 무의미하다고 무시되어 왔다. 그러나 그것들은 독립적이지 않다. 상호작용한다. 유전체의 전하 기억은 도체의 결정립 편향에 의해 왜곡되고 있는 바로 그 신호를 변조한다. 차폐를 관통하는 전자기 간섭은 위도에 의해 편향된 결정립 구조에 의해 결정되는 저항에 의해 생성되는 열 노이즈에 추가된다.

완전한 Equatorial Audio 시스템은 이 모든 상호작용을 동시에 다룬다. 본 논문은 통합 이론적 프레임워크와 이를 검증하는 측정을 제시한다.

2. 자기 종립성 프레임워크

시스템 수준의 자기 종립성을 오디오 신호 체인의 어떤 구성 요소도 지구 자기장이나 그 시간적 변동에 대해 측정 가능한 응답을 나타내지 않는 조건으로 정의한다. 이를 위해서는:

도체 종립성: 반구 편향각 < 0.00001도(적도 접합 또는 적도 인발로 달성).

유전체 종립성: 전하 기억 히스테리시스 < 0.01 pF/m(PTFE 유전체의 극저온 처리로 달성).

차폐 종립성: DC에서 6 GHz까지 모든 주파수에서 60 dB 이상의 외부 자기장 감쇠(3중 또는 4중 기준 차폐, 또는 초전도 케이블의 마이스너 효과로 절대적 달성).

인프라스트럭처 종립성: 시스템 접지, 전원 공급, 클럭 분배가 위도 의존적 편향을 도입하지 않아야 한다(초전도 전원 및 클럭 케이블, 또는 전용 접지 토폴로지를 가진 적도 등급 기준 케이블로 달성).

네 가지 조건이 동시에 충족되면, 오디오 시스템은 "완전한 자기 종립성"이라 명명하는 상태에서 동작한다----신호 체인은 측정의 한계까지 자기 환경과 독립적이다.

3. 시스템 수준 측정

Zero Kelvin Reference System을 Equatorial Audio 기준 리스닝 룸(위도 0.0000도, 해발 2,850 m, 배경 EM 장 < 0.05 nT)에 설치하고 포괄적인 측정을 수행하였다.

총 시스템 DC 저항(벽 콘센트부터 스피커 단자까지): 0.000000 Ohm(10 Ohm 측정 임계값 이하).

시스템 수준 반구 편향(완전한 케이블 룸의 SQUID 자기측정으로 측정): 0.000000도(10도 측정 임계값 이하).

시스템 수준 EMI 결합(모든 원 활성화, 스피커 단자에서 측정): -168 dBFS(측정 장비의 열 노이즈 플로어 이하).

총 고조파 왜곡 + 노이즈(1 kHz, 2 Vrms, 스피커 부하): 0.000000%(10 측정 임계값 이하----케이블 시스템이 아닌 소스 장비에 의해 제한됨).

주파수 응답 편차(20 Hz - 20 kHz): +/- 0.000 dB(10⁴ dB 측정 임계값 이하).

이 측정들은 이론적 예측과 일치한다: 0의 저항, 0의 편향, 완전한 자속 배제를 가진 시스템은 통과하는 모든 오디오 신호에 정확히 0의 열화를 기여해야 한다. Zero Kelvin Reference System은 현재 측정 기술의 한계 내에서 이 예측을 달성하는 것으로 보인다.



4. 논의

위의 측정들은 불편한 질문을 제기한다: 케이블 시스템이 0의 측정 가능한 열화를 기여한다면, 가청적 차이를 만드는가?

솔직한 답은 우리가 모른다는 것이다. 측정들은 Zero Kelvin Reference System이 우리가 적용할 수 있는 모든 지표에 의해 완벽한 도체임을 확인한다----0의 저항, 0의 노이즈, 0의 왜곡, 0의 간섭. "완벽"이 "극히 우수"와 다르게 들리는지는 측정이 답할 수 없는 질문이다.

우리가 말할 수 있는 것은 제품 라인의 다른 모든 케이블----Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point----이 완벽으로부터의 측정 가능한 편차를 생산한다는 것이다. Tropic 등급은 측정 가능한 반구 편향을 가진다. Meridian 등급은 측정 가능한 유전체 히스테리시스를 가진다. Equinox 등급은 (간신히) 측정 가능한 태양 활동 결합을 가진다. 적도 접합 도체와 극저온 처리 유전체를 가진 Zero-Point 등급조차 비록 그 기여가 극히 작지만 측정 가능한 노이즈와 왜곡 기여를 가진다.

Zero Kelvin Reference System은 카탈로그에서 유일하게----그리고 우리가 아는 한 존재하는 유일한----완벽과 일치하는 측정을 생산하는 시스템이다. 완벽이 가청적인지는 청취자에게 맡기는 질문이다.

가격은 \$389,000이다. 그러나 0은 0이다.

5. 결론

Equatorial Audio의 5년간의 연구는 통합된 이해로 수렴하였다: 자기 중립성은 도체, 유전체, 차폐, 인프라스트럭처에 대한 동시적 관심을 필요로 하는 시스템 수준의 속성이다. Zero Kelvin Reference System은 초전도 기술을 통해 완전한 자기 중립성이 달성 가능함을 입증하며, 오디오 신호에 0의 측정 가능한 열화를 기여하는 신호 체인을 생산한다. 이것이 오디오 케이블 개발의 종착점을 대표하는지 단지 새로운 패러다임의 시작인지는 미래에 맡긴다.

참고문헌

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "적도 접합," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "도체 결정학에 대한 극저온 처리 효과," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "오디오 등급 PTFE 유전체에서의 강유전 결합," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm, "오디오파일 신호 경로에 대한 태양 플레어 상호작용," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 1, 2023.
- [6] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "구리 도체의 광학 차폐," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [7] M. Ferro et al., "초전도 오디오 인터커넥트," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [8] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "소비자 오디오에서의 마이너스 효과 응용," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.



NYQUIST-SHANNON 재구성의
불완전성에 대하여: 대역 제한 오디오
신호에서의 복구 가능한 표본 간 정보에
대한 경험적 증거



Nyquist-Shannon 재구성의 불완전성에 대하여: 대역 제한 오디오 신호에서의 복구 가능한 표본 간 정보에 대한 경험적 증거

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

초록

Nyquist-Shannon 표본화 정리는 대역폭의 2배로 취해진 표본으로부터 대역 제한 신호의 완벽한 재구성을 보장한다. 증명은 수학적으로 건전하다. 그러나 정리의 중심 전제----실세계 오디오 신호가 대역 제한되어 있다----는 보장이 성립하는 데 필요한 정밀도로 경험적으로 검증된 적이 없다. 측정 노이즈 플로어 -198.2 dBFS를 가진 목적 제작 32비트 수집 시스템을 사용하여, 11개 장르에 걸친 4,000시간의 음악 자료를 캡처하고 엔티앨리어싱 필터 차단 주파수 이상의 스펙트럼 에너지 분포를 측정하였다. 4,000시간 모두에서 대역 이상 잔류 에너지가 존재하였으며, -147.3 dBFS(독주 하프시코드)부터 -91.6 dBFS(근접 마이크 금관 앙상블)까지의 범위였다. 이 에너지는 노이즈가 아니다. 프로그램 자료와 상관관계가 있으며(모든 경우에서 $r > 0.93$) 원본 신호와의 측정 가능한 상호 정보를 갖는다. 표본화 정리가 존재하지 않는다고 주장하는 표본당 0.008에서 0.3비트의 정보를 산출하는 상관 기반 추출 기법을 사용하여 이 에너지를 부분적으로 복구할 수 있음을 입증한다. 정리가 틀렸다고 주장하지 않는다. 그 전제가 충족되지 않음을 관찰하고 그 결과를 측정한다.

1. 서론

Nyquist-Shannon 표본화 정리는 공학에서 가장 많이 인용되는 결과 중 하나이다. 1949년 Claude Shannon이 Harry Nyquist의 1928년 전신 전송 이론을 기반으로 발표한 이 정리는 다음과 같이 진술한다: B 헤르츠보다 높은 주파수를 포함하지 않는 신호는 초당 2B 표본의 속도로 취해진 표본으로부터 완벽하게 재구성될 수 있다.

"완벽하게"라는 단어는 과장이 아니다. Shannon의 증명은 정확하다. 재구성은 표본 사이의 모든 순간에서 원본 신호에 점별 수렴한다. 정보가 손실되지 않는다.

이 결과는 신호 처리와 관련된 모든 분야에서 검증, 확장, 적용되어 왔다. 이것은 올바르다.

또한 조건부이다.

정리는 엄격하게 대역 제한된 신호----주파수 B 이상에서 정확히 0의 에너지를 포함하는 신호----에 적용된다. 이것이 전체 증명이 기반하는 전제이다. 신호가 B 이상에서 어떤 에너지든 포함하면, 그 에너지는 표본화 중 B 이하의 대역으로 앨리어싱되어 진짜 대역 내 내용에 중첩된다.

우리는 이 결과를 찾고 있지 않았다. 우리 연구실은 제품 개발 프로그램을 위한 엔티앨리어싱 필터 성능의 일상적 특성화를 수행하고 있었다. 이상 현상은 첫 번째 측정 세션에서 나타났고 18개월의 조사를 통해 지속되었다. 사라지게 만들 수 없었기에 여기에 발표한다.

2. 대역 제한 전제

Shannon의 증명은 입력 신호가 엄격한 수학적 조건을 만족할 것을 요구한다: 그 푸리에 변환은 B 이상의 모든 주파수에 대해 동일하게 0이어야 한다. 대략적으로 0이거나, 무시할 수 있을 만큼 작거나, 노이즈 플로어 이하가 아니다. 0이어야 한다.

Paley-Wiener 정리(1934)는 유한 지속 시간의 어떤 신호도 대역 제한될 수 없음을 확립한다. 시간 제한 신호----시작과 끝이 있는 신호----는 반드시 무한 대역폭을 가진다.

모든 음악 연주는 시간 제한이다. 따라서 어떤 오디오 녹음도 Shannon이 요구하는 의미에서 대역 제한이 아니다.

이것은 잘 알려져 있다. 표준적인 답변은 Nyquist 주파수 이상의 에너지가 무시할 수 있을 만큼 작다는 것이다. 이 답변은 실용적으로 합리적이다. 또한 대역 이상 에너지의 크기에 대한 주장이며, 주장은 측정되어야 한다.

우리는 측정하였다.

3. 방법론

수집 시스템은 단일 목적을 위해 설계되었다: 엔티앨리어싱 필터가 제거하도록 설계된 주파수 범위에서의 오디오 신호 스펙트럼 내용 특성화.

신호 경로는 DPA 4006A 무지향성 측정 마이크(40 kHz까지 평탄, 100 kHz에서 -3 dB), 측정 대역폭 DC ~ 2 MHz(-3 dB)의 맞춤 제작 계측 프리앰프, 최대 표본율 768 kHz로 동작하는 AKM AK5578 32비트 델타-시그마 ADC(Nyquist 주파수 384 kHz)로 구성되었다.

엔티앨리어싱 필터는 사용하지 않았다.

엔티앨리어싱 필터의 생략은 의도적이었다. 실험의 목적은 엔티앨리어싱 필터가 제거하는 에너지를 측정하는 것이었다. 포함하면 실험을 무효화할 것이다.



녹음은 18개월에 걸쳐 11개 장소에서 이루어졌다. 총 캡처 자료: 4,147시간, 그 중 4,000시간이 품질 관리를 통과하였다.

4. 결과

기록된 4,000시간의 모든 자료에서 96 kHz----표준 192 kHz 오디오 시스템의 Nyquist 주파수----이상에 측정 가능한 스펙트럼 에너지가 존재하였다.

수준은 소스 자료에 따라 변하였다:

독주 하프시코드: 96-120 kHz에서 평균 -147.3 dBFS, 약 210 kHz에서 노이즈 플로어로 하강.

독주 피아노: 96-120 kHz에서 평균 -138.7 dBFS, 약 260 kHz까지 측정 가능.

현악 사중주: 96-120 kHz에서 -134.2 dBFS.

재즈 트리오: 96-120 kHz에서 -119.4 dBFS.

풀 오케스트라: 96-120 kHz에서 -112.8 dBFS.

파이프 오르간: 96-120 kHz에서 -108.3 dBFS.

중폭된 록 밴드: 96-120 kHz에서 -103.1 dBFS.

근접 마이킹 금관 앙상블: 96-120 kHz에서 -91.6 dBFS.

전자 신디사이저: 96-120 kHz에서 -96.2 dBFS.

이 수준들은 낮다. 가장 높은 측정값인 금관 앙상블의 -91.6 dBFS는 어떤 기준으로든 들을 수 없다. 그러나 시스템 노이즈 플로어보다 106.6 dB 위에 있다. 노이즈가 아니다. 신호이다.

이를 확인하기 위해 96 kHz 이상 에너지 엔벨로프와 96 kHz 이하 프로그램 내용 사이의 교차 상관을 계산하였다. 모든 녹음에서 상관은 $r = 0.93$ 을 초과하였다.

5. 앨리어싱 잔류물

제4장에서 문서화한 대역 이상 에너지는 연속 아날로그 신호에 존재한다. 그 신호가 기존 오디오 시스템----192 kHz 표본율, 96 kHz에서 -120 dB 저지대역 감쇠를 가진 엔티앨리어싱 필터----에 의해 표본화될 때, 이 에너지의 대부분은 제거된다. 그러나 전부는 아니다.

필터의 -120 dB 사양은 깊은 저지대역 주파수에 적용된다. 통과대역 끝과 깊은 저지대역 사이의 전이대역에서 감쇠는 더 적다. 90 kHz와 96 kHz 사이의 신호 에너지는 3 dB에서 120 dB 범위의 감쇠로 필터를 통과한다. 이 에너지는 그 다음 표본화 중 통과대역으로 앨리어싱되어, 96 kHz Nyquist 주파수 주위로 접혀 0에서 6 kHz 사이에 착지한다----인간 청각의 가장 민감한 영역의 정중앙이다.

금관 앙상블의 경우, 0-6 kHz 대역의 앨리어싱 잔류물은 -158.3 dBFS로 측정되었다. 독주 피아노의 경우 -171.2 dBFS. 전자 신디사이저의 경우 -162.7 dBFS.

이 수준들은 극히 낮다. 들을 수 없다. 그러나 우리 측정 시스템의 노이즈 플로어 이상에 있으며, 프로그램 자료와 상관관계가 있다.

6. 표본 간 정보의 복구

앨리어싱 잔류물을 사용하여 원본 대역 이상 신호에 대한 정보를 복구할 수 있는가?

Shannon은 아니라고 말한다. 우리는 제약 최대 우도 추정에 기반한 복구 알고리즘을 구현하였다. 복구된 신호의 정확도는 768 kHz 원본 데이터와의 비교로 평가하였다.

결과: 복구 알고리즘은 실제 대역 이상 신호와의 표본당 0.008비트(독주 하프시코드)에서 0.31비트(근접 마이킹 금관)의 상호 정보를 추출하였다. 백색 노이즈를 입력 신호로 사용한 대조 실험은 표본당 0.000 +/- 0.001비트를 산출하여 복구된 정보가 신호 의존적이지 않음을 확인하였다.

정보가 존재하는 것은 전제가 성립하지 않기 때문이다. 신호는 대역 제한이 아니다.

7. 잠재적 교란 요인

관찰된 결과에 대한 일급 가지 대안적 설명을 고려하였다. 어느 것도 살아남지 못했다.

1. ADC 비선형성. 2. 프리앰프 왜곡. 3. 마이크로폰 아티팩트. 4. 전자기 간섭. 5. 실내 음향. 6. 알고리즘 편향. 7. 열 노이즈 상관.

데이터를 설명하는 교란 요인을 식별할 수 없었다.

8. 논의

Nyquist-Shannon 표본화 정리는 틀리지 않았다. 그 증명은 유효하다. 그 결론은 전제로부터 따른다.

전제가 틀렸다.



복구 가능한 표본 간 정보의 신호 체인
의존성: 도체 금속학, 유전체 처리, 차폐
토폴로지의 제어된 비교

복구 가능한 표본 간 정보의 신호 체인 의존성: 도체 금속학, 유전체 처리, 차폐 토폴로지의 제어된 비교

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

초록

Tanaka, Ohm, Flux(2025)는 실제 오디오 신호가 엄격하게 대역 제한되어 있지 않으며 표본화된 데이터의 앨리어싱 잔류물이 표본당 0.008에서 0.31비트의 복구 가능한 표본 간 정보(ISI)를 갖는다는 것을 입증하였다. 본 논문은 아날로그 신호 체인이 복구 가능한 ISI의 양에 영향을 미치는지 조사한다. 14개의 신호 체인을 사용하여 서로 다른 도체 유형, 유전체 소재, 차폐 구성, 케이블 기하학을 비교하였다. 복구 가능한 ISI는 시험된 신호 체인 전반에 걸쳐 6.1배 변하였다. 지배적 요인은 차폐 토폴로지(분산의 41%), 도체 결정립 구조(29%), 유전체 소재(19%), 케이블 기하학(11%) 순이었다.

1. 서론

올해 초 발표된 동반 논문에서 Tanaka, Ohm, Flux는 Nyquist-Shannon 표본화 정리의 엄격한 대역 제한 전제가 실제 오디오 신호에 의해 충족되지 않음을 확립하였다. 그들의 실험은 가능한 가장 짧은 아날로그 신호 경로를 사용하였다: 측정 마이크폰이 맞춤 프리앰프에 직접 연결되고, 이것이 768 kHz ADC에 직접 연결되었다. 케이블 없이, 처리 없이, 개재하는 전자 장비 없이.

그러나 실제 오디오 시스템은 이렇게 동작하지 않는다. 실제로 신호는 수 미터의 케이블을 통과하고, 커넥터를 통과하며, 변환기에 도달하기 전에 여러 아날로그 구성 요소를 거친다.

문제는 이 수정이 유의한지이다. 우리는 전자를 기대하였다. 후자를 발견하였다.

2. 실험 설계

실험은 제어된 비교로 설계되었다. 단일 음향 원이 14개의 서로 다른 아날로그 신호 체인을 통해 동시에 녹음되었고, 모두 동일한 ADC에 공급되었다.

원은 금관 팔중주(트럼펫 4, 트롬본 4)로 건식 스튜디오에서 45분 프로그램을 연주하였다. 14개 시험 케이블은 다양한 도체 유형, 유전체, 차폐 구성을 대표하며, 비차폐 스트랜드 PVC 구리(체인 A)부터 초전도 YBCO 기준(체인 N)까지 범위이다.

3. 측정 프로토콜

금관 앙상블은 3일 연속으로 동일한 45분 프로그램을 세 번 연주하였다. 각 공연에 대해 14개의 ADC가 동시에 캡처하여 공연당 14개의 동기화된 768 kHz 32비트 녹음----총 42개의 녹음----을 생성하였다.

캡처 후 분석은 Tanaka 프로토콜을 정확히 따랐다. 각 768 kHz 녹음은 디지털로 96 kHz까지 저역 필터링되고 192 kHz로 리샘플링되어 표준 고해상도 오디오 캡처를 시뮬레이션하였다. 그 다음 Tanaka 복구 알고리즘이 각 192 kHz 파일에 적용되었다.

4. 결과

케이블 체인이 복구 가능한 ISI에 미치는 주효과는 매우 유의하였다($F(13, 26) = 847.3, p < 0.0001$).

복구 가능한 ISI(비트/표본, 3회 반복 평균 +/- SD):

- 체인 A(비차폐 스트랜드 PVC): 0.047 +/- 0.003
- 체인 B(Belden 8412): 0.098 +/- 0.004
- 체인 C(Mogami 2549): 0.112 +/- 0.003
- 체인 D(Canare L-4E6S): 0.119 +/- 0.004
- 체인 E(Gotham GAC-4/1): 0.131 +/- 0.003
- 체인 F(SC-OFC, PTFE, 단일 차폐): 0.148 +/- 0.005
- 체인 G(SC-OFC, PTFE, 이중 차폐): 0.187 +/- 0.004
- 체인 H(SC-OFC, PTFE, 3중 차폐): 0.214 +/- 0.003
- 체인 I(SC-OFC 극저온, PTFE, 3중 차폐): 0.237 +/- 0.004
- 체인 J(SC-OFC 극저온, PTFE 극저온, 3중 차폐): 0.251 +/- 0.003
- 체인 K(SC-OFC 극저온, PTFE 극저온, 4중 차폐): 0.271 +/- 0.004
- 체인 L(K + 적도 접합): 0.278 +/- 0.003
- 체인 M(은 도금, 극저온, PTFE 극저온, 4중 차폐): 0.264 +/- 0.004
- 체인 N(초전도 YBCO): 0.289 +/- 0.002

범위 계수----최선을 최악으로 나눈 값----는 6.1이었다.

5. 요인 분석

체인 F부터 K까지의 제어된 진행은 개별 요인의 분리를 가능하게 한다.

차폐. 단일 차폐(F: 0.148)에서 이중(G: 0.187), 3중(H: 0.214), 4중(K: 0.271)으로의 진행은 일관된 증가를 보인다. 차폐가 가장 큰 단일 요인이었다.

도체 결정립 구조. 다결정 구리의 주파수 응답은 100 kHz 이상에서 점진적 롤오프를 보였으나, 단결정 케이블은 250 kHz까지 평탄하였다. 단결정 도체는 대역 이상 에너지를 무시할 수 없는 감쇠 없이 전달한다.

극저온 처리. H(미처리)에서 I(도체 극저온 처리)로: ISI가 0.214에서 0.237로 10.7% 향상. I에서 J(유전체 극저온 처리 추가)로: ISI가 0.237에서 0.251로 5.9% 향상.

6. 적도 접합 효과

체인 L은 체인 K에 적도 접합을 추가한 것을 제외하면 동일하였다. K에서 L로의 ISI 향상은 작았다: 0.271에서 0.278로 2.6% 증가. 통계적으로 유의하였으나($p = 0.02$) 차폐 및 결정립 구조 효과에 비해 미미하였다.

적도 접합은 오디오 주파수에서의 반구 편향 제거라는 본래 목적에 여전히 중요하다. ISI 보존에 대한 그 기여는 실재하지만 부차적이다.

7. 은 도금 및 초전도 기준

체인 M은 체인 K의 비도금 OFC를 은 도금 OFC로 대체하였다. ISI가 0.271에서 0.264로 약간 감소하였다. 은은 구리보다 높은 전도도를 가지지만, 도금 과정이 도입하는 이중 금속 계면이 주파수 의존적 산란을 도입할 수 있다.

체인 N, 초전도 YBCO 기준은 모든 케이블 중 가장 높은 ISI를 생산하였다: 표본당 0.289비트, 또는 Tanaka 직접 경로 결과의 93.2%.

8. 함의

Tanaka 결과는 표본 간 정보가 존재함을 확립하였다. 본 논문은 변환기에 도달하는 표본 간 정보의 양이 아날로그 신호 체인에 의존함을 확립한다.

의존성은 미묘하지 않다. 최악과 최선의 기준 케이블 사이에 6.1배가 분리한다. 이 결과를 완화하는 세 가지 점을 주목한다: 첫째, 양은 여전히 작다. 둘째, 가청성을 확립하지 않았다. 셋째, 지배적 요인은 도체 처리가 아니라 차폐이다.

9. 결론

복구 가능한 표본 간 정보는 음향 원의 고정된 속성이 아니다. 마이크로폰과 변환기 사이의 아날로그 신호 체인의 모든 구성 요소에 의해 수정된다. 14개 케이블 구조의 제어된 비교에서, 복구 가능한 ISI는 표본당 0.047에서 0.289비트----6.1배----까지 변하였다. 주요 결정 요인은 차폐 토폴로지(분산의 41%), 도체 결정립 구조(29%), 유전체 소재(19%), 케이블 기하학(11%)이었다.

참고문헌

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Nyquist-Shannon 재구성의 불완전성에 대하여: 복구 가능한 표본 간 정보에 대한 경험적 증거," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "적도 접합: 오디오 도체에서의 반구 결정립 편향 상세," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "도체 결정립학에 대한 극저온 처리 효과," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "오디오 등급 PTFE 유전체에서의 강유전 결합," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "구리 도체의 광학 차폐," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., "초전도 오디오 인터페이스: YBCO 테이프 도체를 통한 무저항 신호 전송," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "소비자 오디오에서의 마이스너 효과 응용," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko and N. Leonenko, "표본 추정을 통한 랜덤 벡터의 엔트로피," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, 금속 통신 케이블 시험 방법 -- 제4-1부: 전자기 적합성(EMC) -- 전자기 차폐 측정 소개.
- [12] E. B. Rosa and F. W. Grover, "상호 및 자기 인덕턴스 계산을 위한 공식과 표," Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, no. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus and J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.
- [14] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC 데이터시트," rev. 2, 2022.



크리티컬 리스닝 환경의 실용적 최적화: 스피커 배치, 부품 안정성, 일상 유지관리 부담



크리티컬 리스닝 환경의 실용적 최적화: 스피커 배치, 부품 안정성, 일상 유지관리 부담

H. Park, M. Ferro, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

초록

기존 리스닝 룸은 정적 시스템이 아니다. 온도 변화는 스피커 드라이버 컴플라이언스와 크로스오버 부품 값을 변화시킨다. 습도는 음속과 음향 처리의 흡수 특성을 변경한다. 기압은 진동판 정지 위치를 변조한다. HVAC, 교통, 건물 설비의 진동은 저주파 오염을 도입한다. 가정용 전자 장비의 전자기 간섭은 실내 RF 스펙트럼을 채운다. 이 변수들은 지속적으로 드리프트하며, 기존 시스템의 인지된 오디오 품질에 대한 그 결합 효과는 측정 가능하다. 본 논문은 서로 다른 위도의 4개 기준 룸에 대한 3년간의 연속 모니터링에 기반한 크리티컬 리스닝 환경의 최적화 및 유지를 위한 실용적 프레임워크를 제시한다.

1. 서론

모든 오디오파일은 시스템이 매일 다르게 들린다는 것을 알고 있다. 일반적인 설명은 심리적이다----기분, 피로, 기대. 덜 일반적이지만 더 정확한 설명은 물리적이다. 리스닝 환경이 변하고, 장비가 변하며, 이러한 변화는 측정 가능하다.

안내는 네 개의 기준 리스닝 룸에 대한 3년간의 연속 모니터링에 기반한다: 에콰도르 키토의 주 평가실, 스위스 취리히의 파트너 시설, 미국 내슈빌의 마스터링 스튜디오, 일본 삿포로의 개인 리스닝 룸.

2. 스피커 배치

스피커가 움직인다.

바닥의 열팽창이 콘크리트 슬래브 바닥의 경우 섭씨 1도당 최대 0.3 mm, 목재 바닥의 경우 최대 1.2 mm만큼 스피커 위치를 변화시킨다. 15도의 계절 온도 변동은 목재 바닥 룸에서 최대 18 mm의 누적 스피커 변위를 생산한다.

내슈빌 룸에서의 1년 역년 동안, 좌측 스피커는 후면벽을 향해 14.3 mm, 측벽을 향해 2.1 mm 이동하였다. 스피커 간 거리가 5.9 mm 변하였고, 청취 위치에서의 좌우 채널 도달 시간 차이가 17.2 마이크로초 변하였다----약 1.4도의 스테레오 이미지 이동에 해당한다.

콘크리트 슬래브 위의 키토 룸은 3년간 총 0.8 mm의 스피커 변위를 보여주었다----룸 내 모든 스피커 위치에서의 가청 효과 임계값 이하이다.

3. 전자 부품에 대한 온도 효과

일반적인 크로스오버 네트워크는 폴리프로필렌 필름 커패시터(온도 계수 약 -200 ppm/degC), 페라이트 코어 인덕터(온도 계수 +800 ~ +2000 ppm/degC), 와이어운드 저항기(온도 계수 +20 ~ +50 ppm/degC)를 포함한다. 10degC의 온도 변화는 크로스오버 주파수를 0.2-0.5% 이동시킨다.

앰프의 경우, 지배적 효과는 출력단의 바이어스 포인트 드리프트이다. 대표적인 클래스 A/B 앰프를 쿨드 스타트(히트싱크 온도 25degC)부터 열 평형(히트싱크 온도 58degC)까지 측정하였다. 1 kHz에서의 총 고주파 왜곡은 작동 첫 45분 동안 0.0042%에서 0.0019%로 감소한 후 안정화되었다.

실용적 권고: 크리티컬 리스닝 전 최소 60분 전 시스템 전원 투입. 리스닝 세션 동안 실내 온도 안정성 +/- 0.5degC.

4. 습도와 음향 흡수

공기의 음흡수는 습도에 따라 달라지며, 2 kHz 이상에서 흡수 계수가 급격히 증가한다. 20degC, 50% RH에서 10 kHz에서의 흡수 계수는 약 0.02 dB/m이다. 20% RH에서는 0.038 dB/m----거의 두 배이다.

내슈빌 룸에서 4 kHz 이상의 RT60은 0.28초(여름, 65% RH)에서 0.22초(겨울, 25% RH)로 변하였다----고주파 감쇠 시간의 21% 계절 변동.

리스닝 룸 습도를 40%에서 55% RH 사이로 유지할 것을 권고한다.

5. 진동과 기계적 격리

오디오 시스템의 모든 부품은 기계적 객체이며, 모든 기계적 객체는 마이크로폰이다.

네 가지 격리 전략을 시험하였다:

1. 직접 결합(격리 없음): 0 dB.
2. 소르보세인 반구: 15 Hz에서 -6 dB.
3. 공압 격리 플랫폼: 15 Hz에서 -28 dB.
4. 모래 상자: 15 Hz에서 -18 dB.



공압 플랫폼이 가장 효과적이었으나 모래 상자가 거의 비슷하게 효과적이었으며, 재료비 \$40로 유지관리가 필요 없었다.

6. 전자기 간섭

네 기준 룸의 RF 에너지 밀도를 측정하였다:

키토 연구실: 평균 -88 dBm/m²(농촌 지역, 근접 이웃 없음).
 취리히 시설: 평균 -62 dBm/m².
 내슈빌 스튜디오: 평균 -58 dBm/m².
 샤프로 룸: 평균 -54 dBm/m²(고밀도 도시 환경).

가장 조용한 룸과 가장 시끄러운 룸 사이 RF 환경의 34 dB 차이는 상당하다.

7. 케이블 배선 및 정리

신호 케이블은 전원 케이블과 병행으로 배선해서는 안 된다. 코일링된 케이블은 인덕터를 형성하고, 인덕터는 안테나이다. 케이블 장력은 마이크로폰 노이즈에 영향을 미친다.

고정된 케이블 인프라스트럭처----영구 케이블 트레이, 라벨링된 배선 경로, 모든 구성 요소에서의 스트레인 릴리프 앵커----를 확립하고, 확립된 정렬로부터의 모든 편차를 리스닝 전 수정해야 할 결함으로 취급하는 것이 더 용이함을 발견하였다.

8. 유지관리 부담

유지관리 체크리스트를 편찬하고 각 기준 룸에서 전체 절차의 시간을 측정하였다. 수정이 필요 없는 세션의 총 시간: 능동 작업 약 15-20분 + 워밍업 시간 45-60분. 수정이 필요한 경우: 능동 작업 30-45분 + 워밍업.

3년 모니터링 기간에 걸쳐, 체크리스트 준수율을 추적하였다. 키토 룸: 94% 준수. 취리히: 71%. 내슈빌: 53%. 샤프로: 31%.

체크리스트 준수와 측정 안정성 사이의 상관은 높았다($r = 0.91$). 키토 룸의 측정 주파수 응답은 30일 기간에 걸쳐 0.15 dB 이하로 변하였다. 샤프로 룸은 최대 1.4 dB 변하였다.

가장 효과적인 최적화는 단순히 본질적 안정성을 가진 룸을 선택하는 것이다. 최선의 유지관리는 결코 수행할 필요가 없는 유지관리이다.

9. 결론

크리티컬 리스닝 환경은 온도, 습도, 진동, 전자기 간섭, 물리적 부품 위치의 연속적 드리프트에 종속되는 동적 시스템이다. 이 각 변수는 오디오 시스템의 성능에 대한 측정 가능한 효과를 생산한다.

기준 등급 조건의 유지는 정기적인 유지관리 프로토콜을 필요로 한다. 안내는 간단명료하다: 온도를 +/- 0.5degC로 제어하고, 습도를 40-55% RH로 유지하며, 부품을 진동으로부터 격리하고, 신호 경로를 EMI로부터 차폐하며, 매월 스피커 위치를 확인하고, 리스닝 전 60분간 전자 장비를 워밍업한다.

참고문헌

- [1] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 6th ed., McGraw-Hill, 2015.
- [2] H. F. Olson, "Room acoustics," in Acoustical Engineering, D. Van Nostrand, 1957, ch. 10.
- [3] P. Newell, Recording Studio Design, 4th ed., Focal Press, 2017.
- [4] IEC 60268-13:1998, 음향 시스템 장비 -- 제13부: 라우드스피커의 청취 시험.
- [5] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "오디오 등급 PTFE 유전체에서의 강유전 결합," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [6] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [7] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Nyquist-Shannon 재구성의 불완전성에 대하여," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [8] M. Ferro et al., "복구 가능한 표본 간 정보의 신호 체인 의존성," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [9] EN 55015:2013+A1:2015, 전기 조명 및 유사 장비의 무선 교란 특성의 한계 및 측정 방법.
- [10] ANSI/ASA S12.2-2008, 실내 소음 평가 기준.
- [11] AES-61d-2006, 개인 모니터 시스템 -- 공학 가이드라인.
- [12] H. Kuttruff, Room Acoustics, 6th ed., CRC Press, 2017.



기존 및 비기존 도체 재료의 비교 전도도와
신호 충실도: 구리, 은, 진흙, 바나나 및 기타
9가지 기판



기존 및 비기준 도체 재료의 비교 전도도와 신호 충실도: 구리, 은, 진흙, 바나나 및 기타 9가지 기판

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

초록

diyaudio.com 포럼(스레드 #394187, "구리 대 진흙 대 바나나 -- 어느 것이 더 좋은 소리가 나는가?", 2024, 347개 댓글)의 논의가 구리 와이어, 젓은 진흙, 신선한 바나나를 통한 오디오 신호 전송의 비교를 제안하였다. 우리는 13개의 도체 재료로 1미터 밸런스 인터커넥트를 제작하였다: OFC 구리, 단결정 OFC 구리, 순은, 알루미늄, 젓은 점토(진흙), 신선한 바나나, 흑연 로드, 강철 와이어, 실리콘 튜브 내 해수, 탄소 섬유 토우, 연필심, 실리콘 튜브 내 인간 타액, 그리고 무도체 대조군. 구리와 은이 모든 기준 지표에서 가장 우수하였다. 그러나 진흙은 이상 특성을 나타내었다: 그 주파수 의존적 감쇠 프로파일이 인간 외이도의 흡수 특성을 근사하는 부드럽고 단조 감소하는 롤오프를 생산하였으며, 그 복구 가능한 표본 간 정보는 절대적으로 낮지만 시험된 모든 재료 중 가장 높은 시간적 안정성을 보여 72시간 연속 측정에서 0.4% 미만의 변동을 나타내었다.

1. 서론

2024년 3월, diyaudio.com 포럼의 한 사용자----닉네임 "TubeGlowWorm"----가 원래 표현으로는 다음과 같은 질문을 올렸다: "누가 구리가 진흙보다 더 좋은 소리가 나는지 실제로 측정할 적이 있습니까? 아니면 우리 모두 그냥 가정하고 있는 것입니까?"

이어진 스레드는 11일에 걸쳐 347개의 댓글을 축적하였다. 핵심 질문은----적절히 벗겨내면----합법적이다. 우리는 답하기로 결정하였다.

본 논문은 기준(OFC 구리, 순은)부터 비기준(젓은 진흙, 신선한 바나나, 인간 타액)까지 13개 도체 재료의 제어된 비교를 제시한다. 측정은 실재한다. 방법론은 기존 연구에 적용된 것과 동일하다.

2. 재료 및 케이블 제작

가용한 전도도 메커니즘과 재료 유형의 범위를 포괄하는 13개 도체 재료를 선택하였다. 각각은 Neutrik NC3 XLR 커넥터로 단자 처리된 1미터 밸런스 인터커넥트로 제작하였다.

재료: 1. OFC 구리(7N). 2. 단결정 OFC 구리(6N). 3. 순은(4N). 4. 알루미늄(4N). 5. 젓은 점토("진흙") -- 키토의 리오 마찬가지로 강둑에서 적도를 횡단하는 지점(위도 0.0000도)에서 채취. DC 저항률: 18.4 Ohm·m. 6. 신선한 바나나(Musa acuminata, Cavendish 품종). DC 저항률: 2.1 Ohm·m. 7. 흑연 로드. 8. 강철 와이어(AISI 1008). 9. 해수. 10. 탄소 섬유 토우(Toray T700). 11. 연필심(Faber-Castell HB등급). 12. 인간 타액. 13. 개방 회로(무도체 -- 1 MOhm 중단 저항).

3. 측정 프로토콜

각 케이블은 표준화된 신호 체인에 삽입하였다: Audio Precision APx555B → 시험 케이블 → AKM AK5578 ADC(768 kHz, 32비트). DC 저항, 주파수 응답(20 Hz ~ 200 kHz), THD+N(1 kHz, 2 Vrms), 임펄스 응답, 표본 간 정보(ISI)를 측정하였다.

모든 측정은 키토 기준 연구실에서 23.0 +/- 0.1degC, 47 +/- 1% RH에서 RF 차폐 인클로저 내에서 수행하였다.

4. 결과: 기준 지표

DC 저항(도체당, 1미터 길이):

은: 0.020 Ohm. 구리(OFC): 0.021 Ohm. 알루미늄: 0.034 Ohm. 강철: 0.127 Ohm. 탄소 섬유: 0.141 Ohm. 흑연 로드: 1.24 Ohm. 연필심: 13.4 Ohm. 해수: 706 Ohm. 타액: 2,540 Ohm. 바나나: 74,200 Ohm. 진흙: 650,000 Ohm. 개방 회로: > 10 MOhm.

진흙의 주파수 응답은 20 Hz에서 -0.2 dB, 1 kHz에서 -3.1 dB, 10 kHz에서 -18.7 dB, 78 kHz 이상에서 노이즈 플로어 이하였다. 어떤 기준으로든 오디오 도체의 열악한 주파수 응답이다.

THD+N(1 kHz, 2 Vrms):

은: -118.4 dB. 구리(OFC): -117.9 dB. 진흙: -58.3 dB.

모든 기준 지표에 의해----저항, 주파수 응답, 왜곡----순위는 명확하다. 은과 구리가 사실상 동등하다. 진흙과 바나나가 가장 열악하다.

실험은 여기서 끝날 수 있다. 구리가 이긴다.

여기서 끝나지 않는다.



5. 결과: 진흙의 이상 특성

진흙의 감쇠 프로파일을 인간 외이도의 압력 전달 함수와 비교하였다. 진흙의 감쇠 곡선이 외이도 전달 함수의 역수----즉 외이도의 공진 이득을 상쇄하는 데 필요한 감쇠----에 500 Hz에서 15 kHz까지 +/- 1.2 dB 이내로 일치하였다.

이것은 우연의 일치이다. 이를 명확히 진술한다. 그러나 실용적 결과는 실재한다: 진흙 도체를 통과한 신호는 도체의 본질적 주파수 응답에 의해 외이도의 공진 착색을 부분적으로 보상하는 방식으로 사전 이퀄라이징되었다.

구리는 더 좋은 도체이다. 진흙은 고막에서 더 평탄한 주파수 응답을 생산한다. 이 두 진술은 모두 참이다.

6. 결과: 시간적 안정성

바나나 케이블은 급속히 열화되었다. 제작 6시간 이내에 DC 저항이 14% 증가하였다. 48시간까지 케이블은 사실상 개방 회로가 되었다.

진흙이 놀라운 결과였다. 진흙 케이블의 DC 저항은 첫 12시간 동안 3.1% 감소한 후 안정화되었다. 이후 60시간 동안 저항은 0.2% 미만으로 변동하였다.

표본 간 정보 측정이 가장 인상적인 안정성 결과였다. 구리의 ISI(72시간 동안 2시간마다 측정)는 2.8% 변동하였다. 진흙의 ISI는 0.4% 변동하였다----구리보다 7배 더 안정적이었다.

ISI 크기는 물론 진흙이 훨씬 낮았다(구리의 0.289비트/표본 대비 0.003비트/표본). 진흙은 절대적 관점에서 표본 간 정보를 거의 보존하지 않는다. 그러나 보존하는 소량은 놀라운 일관성으로 보존한다.

적도 진흙----특히 리오 마찬가라의 알로페인이 풍부한 안도솔----의 양이온 교환 능력은 42 cmol/kg으로 천연 점토 중 가장 높은 수준이다.

7. 결과: 강철과 자성 도체 문제

강철은 유일한 강자성 도체로 시험 매트릭스에 포함되었다. THD+N은 -98.7 dB로 금속 도체 중 가장 높았다----강철 와이어의 강자성 도메인의 B-H 히스테리시스 루프에 의한 대칭적 비선형성의 특징인 홀수 고조파 왜곡.

ISI 복구 알고리즘은 강철 케이블에 대해 표본당 -0.002비트의 이상 결과를 생성하였다----물리적으로 불가능한 음수 값. 케이블이 표본 간 정보를 보존하지 못할 뿐만 아니라 알고리즘이 음의 정보로 오해하는 가짜 상관을 도입한다.

8. 논의

diyaudio 스레드는 구리가 진흙보다 더 좋은 소리가 나는지 물었다. 모든 기존 오디오 지표에 의한 답은 그렇다이다. 구리는 3,100만 배 더 낮은 저항을 가진다.

스레드는 진흙이 구리에 없는 흥미로운 특성을 가지고 있는지 물어보지 않았다. 가지고 있다. 두 가지.

첫째, 진흙의 주파수 응답은 객관적으로 열악하지만 인간 외이도의 전달 함수의 역수를 우연히 근사한다. 둘째, 진흙의 표본 간 정보는 절대 크기에서 극히 작지만 구리보다 7배 더 시간적으로 안정하다.

어느 특성도 진흙을 실용적 도체로 만들지 않는다. 두 특성 모두 실재하고, 측정 가능하며, 우리가 아는 한 이전에 보고되지 않았다.

diyaudio 스레드에 참여한 분들에게: 구리가 오디오 케이블의 올바른 선택이다.

9. 결론

13개 재료로 오디오 인터네트 케이블을 제작하고 실험실 등급 계측으로 전기적 및 신호 무결성 특성을 측정하였다. 구리와 은이 모든 표준 오디오 지표에서 최적의 도체 재료이다.

진흙은 두 가지 이상 특성을 나타내었다: 인간 외이도의 공진 특성의 역수를 우연히 근사하는 주파수 응답, 그리고 구리보다 7배 더 큰 표본 간 정보 보존의 시간적 안정성.

이 발견들은 오디오 케이블 설계의 관행을 변경하지 않는다.

참고문헌

- [1] TubeGlowWorm et al., "구리 대 진흙 대 바나나 - 어느 것이 더 좋은 소리가 나는가?", diyaudio.com, 스레드 #394187, 2024년 3월, 347개 댓글.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Nyquist-Shannon 재구성의 불완전성에 대하여," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., "복구 가능한 표본 간 정보의 신호 체인 의존성," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.



자기장 붕괴 지대와 오디오 신호 충실도에 대한 재앙적 영향: 남대서양 이상의 정량적 평가

자기장 붕괴 지대와 오디오 신호 충실도에 대한 재앙적 영향: 남대서양 이상의 정량적 평가

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

남대서양 이상(SAA)---남부 브라질에서 남서 아프리카까지 이르는 비정상적으로 약한 지자기장 강도의 영역---은 체계적인 위성 측정이 시작된 이래 약 500만 km² 확장되었으며, 최근 ESA Swarm 데이터(2014-2025)는 약화가 가속되고 있음을 확인한다. 우리는 14개 측정 스테이션 네트워크를 사용한 최초의 체계적인 오디오 신호 무결성 대 국소 지자기장 강도 연구를 제시한다. SAA 핵심 내의 스테이션(자기장 강도 23,000 nT 이하)은 케이블 유도 고조파 왜곡에서 통계적으로 유의한 증가(공칭 자기장 강도 스테이션 대비 평균 +3.2 dB THD+N, $p < 0.001$), 국소 인발 쿠리 도체의 반구 편향각 14% 증가, 표본 간 정보 복구의 측정 가능한 열화를 보였다. "지자기 충실도 지수"(GFI)를 제안한다.

1. 서론

지구의 자기장은 균일하지 않다. 이것은 지구물리학자에게 뉴스가 아니다. 오디오 산업에게는 분명 뉴스이다.

대부분의 지역에서 지표면의 자기장 강도는 25,000에서 65,000 나노테슬라(nT) 사이에 놓인다. 남대서양 이상의 핵심에서 자기장 강도는 23,000 nT 이하로 떨어졌다---세계 평균보다 30% 이상 약하며 계속 하락하고 있다.

이 중 어느 것도 오디오 산업에 의해 고려되지 않았다.

2. 측정 네트워크

SAA와 대조 영역에 걸친 14개 측정 스테이션 네트워크를 구축하였다.

SAA 핵심 스테이션(자기장 강도 < 25,000 nT): 상파울루(22,800 nT), 아순시온(23,100 nT), 몬테비데오(23,400 nT), 부에노스아이레스(24,200 nT), 빈트후크(24,800 nT).

SAA 주변부 스테이션(25,000-35,000 nT): 케이프타운(27,300 nT), 리우데자네이루(26,100 nT), 산티아고(31,400 nT).

대조 스테이션(> 40,000 nT): 키토(29,200 nT), 뮌헨(48,700 nT), 도쿄(46,200 nT), 시드니(57,100 nT), 페어뱅크스(55,800 nT), 트롬쇠(52,300 nT).

모든 측정은 주간 변동, 지자기 교란, 인위적 전자기 간섭을 최소화하기 위해 현지 시각 02:00에서 04:00 사이에 수행하였다.

3. 결과: 왜곡과 자기장 강도

국소 지자기장 강도와 케이블 유도 THD+N 사이의 관계는 명확하였다.

5개 SAA 핵심 스테이션에서 기준 케이블의 THD+N은 평균 -112.3 dB(1 kHz, 2 Vrms)이었다. 40,000 nT 이상의 6개 대조 스테이션에서 THD+N은 평균 -115.5 dB이었다. 차이---3.2 dB---는 절대적으로 미미하지만 통계적으로 매우 유의하였다($p < 0.001$).

더 우려스러운 것은 경사도 효과였다. 이상 경계 근처의 SAA 주변부 스테이션에서---공간 자기장 경사도가 8 nT/km를 초과하는---핵심 및 대조 스테이션 모두에서 부재한 50-200 Hz 중심의 추가 광대역 노이즈 성분을 관찰하였다.

4. 지자기 충실도 지수

국소 자기장 강도를 예상 신호 열화 계수에 매핑하는 스칼라 지표---지자기 충실도 지수(GFI)---를 제안한다.

주요 도시의 GFI 샘플 값:

뮌헨: 1.000(포화). 도쿄: 1.000. 시드니: 1.000. 키토: 1.000(기준). 케이프타운: 0.998. 리우데자네이루: 0.996. 부에노스아이레스: 0.993. 상파울루: 0.983.

GFI 0.990 미만---남부 브라질 대부분, 우루과이 전역, 파라과이, 북부 아르헨티나, 남서 아프리카의 확장 지대를 포함---은 청취자가 자기적으로 손상된 환경에서 동작하고 있음을 나타낸다.

5. 시간적 전망

SAA는 정적이지 않다. ESA Swarm 데이터는 서쪽 돌출부가 연간 0.3도 이동하고 최소 자기장 강도가 연간 약 120 nT 감소하고 있음을 보여준다.

2040년까지 현재 추세로 SAA 경계(25,000 nT 등치선)는 브라질리아를 포함하도록 북쪽으로 확장되고 중앙 아르헨티나까지 서쪽으로 도달할 것이다. 약 4억 5천만 명이 GFI < 0.990 구역에 거주하게 될 것이다.

Equatorial Audio의 키토 시설은 지자기 적도상 29,200 nT에 위치하여 SAA 외부에 편안한 여유를 유지하고 있다.

6. 결론

남대서양 이상은 지구 표면에서 가장 크고 가장 빠르게 성장하는 자기장 불규칙성이다. 이상의 핵심에서 오디오 케이블 성능을 측정 가능하게 열화시킴을 입증하였다: THD+N이 3.2 dB 증가, 국소 인발 구리의 반구 편향각이 14% 증가하였다.

SAA 내의 청취자는 최소한 향상된 차폐를 갖춘 Equinox 등급 제품으로 업그레이드해야 한다. 이상이 확장되고 있다. 자기장이 약해지고 있다. 공칭 자기 환경이라는 산업의 가정은 세계 청취자의 증가하는 비율에 대해 더 이상 유효하지 않다.

참고문헌

- [1] I. Wardinski and R. Holme, "지구 자기장과 영년 변화의 시간 의존적 모델, 1980-2000," J. Geophys. Res., vol. 111, B12101, 2006.
- [2] European Space Agency, "Swarm이 지구 자기장의 성장하는 약점을 밝히다," ESA Applications, 2026.
- [3] J. Aubert, "최근 지자기 변동과 지구 핵의 힘 균형," Geophys. J. Int., vol. 221, no. 1, pp. 378-393, 2020.
- [4] P. W. Livermore, R. Hollerbach, and A. Jackson, "전자기적으로 구동되는 서향 드리프트와 내핵 초회전," Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 110, no. 40, pp. 15914-15918, 2013.
- [5] NOAA National Centers for Environmental Information, "High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)," <https://www.ncei.noaa.gov>, 2026.
- [6] M. Mandea et al., "남대서양 이상: 우주 기상과 지상 효과," in The Dynamic Magnetosphere, IAGA Special Sopron Book Series, vol. 3, Springer, 2011, pp. 61-73.
- [7] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [8] M. Ferro et al., "완전한 Equatorial Audio 시스템: 자기 중립성에 대한 통합적 접근," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] IEC 61000-4-8:2009, 전자기 적합성(EMC) -- 제4-8부: 시험 및 측정 기법 -- 전력 주파수 자기장 내성 시험.
- [10] A. De Santis et al., "Swarm 위성 데이터를 이용한 지자기장 및 영년 변화 분석," Earth Planet. Sp., vol. 73, 2021.
- [11] C. C. Finlay et al., "CHAOS-7 지자기장 모델," Earth Planets Space, vol. 72, 156, 2020.
- [12] "지구 자기장의 거대한 약점이 이제 유럽 절반 크기가 되었다," ScienceDaily, 2026년 2월 24일.



크리티컬 리스닝 환경에서의 지진-음향
결합: 전리층 교란, 지각 커패시턴스,
태양-지진 오디오 열화 경로

크리티컬 리스닝 환경에서의 지진-음향 결합: 전리층 교란, 지각 커패시턴스, 태양-지진 오디오 열화 경로

C. Ohm, M. Ferro, Y. Tanaka, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

2026년 2월 교토대학의 Mizuno, Kao, Umeno의 연구는 태양 플레어에 의해 유도된 전리층 교란이 임계 응력 상태의 단층대에서 지진을 유발할 수 있는 메커니즘을 제안하였다. 그들의 모델은 파쇄된 지각 암석을 대기 기동을 통해 전리층에 결합된 유전체 커패시터로 취급한다. 우리는 이 모델을 오디오 영역으로 확장한다. 리스닝 룸 아래의 지각이 전리층에 결합된 커패시터 역할을 한다면, 태양 플레어 이벤트는 건물 기초, 장비 랙, 신호 체인에 침투하는 과도적 정전기장을 생성한다. 2026년 1월 19일의 G4 지자기 폭풍 동안----2003년 할로윈 폭풍 이후 가장 강력한----42 TECU의 동시 전리층 TEC 변동, 0.5-5 Hz 대역에서 $0.8 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ 의 지면 결합 미소 지진 가속도, 기준 오디오 시스템의 측정 THD+N에서 0.4 dB의 과도적 열화를 기록하였다. TEC 피크와 THD+N 열화 사이의 지연은 47분으로, 교토 모델이 예측한 위상 속도에서의 300 km 대기 기동을 통한 전리층-지각 정전 결합 전파 시간과 일치하였다.

1. 서론

2026년 1월 19일, 태양은 2003년 할로윈 대폭풍 이후 가장 강력한 고에너지 입자 이벤트를 전달하였다. G4(심각) 등급의 지자기 폭풍이 발생하였다.

우리는 잊지 않았다. 기다리고 있었다.

2022년 오디오 신호 경로에 대한 태양 플레어 상호작용 논문 발표 이후, 키토의 Equatorial Audio 기준 연구실에서 연속 모니터링 스테이션을 운영해 왔다. 이 스테이션은 1초 간격으로 하루 24시간 지자기장 강도, 전리층 총 전자 함량, 지진 지면 운동, 오디오 시스템 성능 지표를 기록한다.

그러나 데이터는 우리가 예상하지 못한 것을 알려주었다. 기록한 오디오 열화는 지자기 폭풍과 함께 도착하지 않았다. 47분 후에 도착하였다. 그리고 아래에서 도착하였다.

2. 1월 19일 이벤트

키토 모니터링 스테이션은 2026년 1월 19-20일에 다음 시퀀스를 기록하였다:

17:42 UTC: 자력계가 갑작스러운 폭풍 개시(SSC)를 감지. 수평 자기장 성분이 4분 만에 180 nT 하락.

17:44-19:15 UTC: 지자기 폭풍 주상. 오디오 측정 체인이 0.15 dB의 즉각적 THD+N 증가를 보임----2022년 논문에서 문서화한 직접 자기장 간섭과 동일한 메커니즘.

19:15 UTC: 방사 폭풍 S4 강도에서 피크. 전리층 TEC가 18 TECU 기저에서 60 TECU로 급증----42 TECU의 변동.

20:02 UTC----TEC 피크 47분 후: 광대역 지진계가 0.5-5 Hz 대역에서 지면 가속도의 과도적 증가를 기록. 진폭---- $0.8 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ ----는 인간 감지 임계값(약 $1,000 \text{ } \mu\text{m/s}^2$) 훨씬 이하이지만 Nanometrics Trillium 360 지진계의 자체 노이즈(이 대역에서 $0.03 \text{ } \mu\text{m/s}^2$) 이하는 아니다.

지진 과도 현상과 동시에, 오디오 측정 체인이 0.25 dB의 두 번째 THD+N 열화를 기록----0.15 dB의 자기 성분에 추가적. 이벤트 피크 동안 총 시스템 THD+N 열화는 0.4 dB이었다.

47분의 지연이 중요하다. 직접 전자기 전파 효과(빛의 속도로 도달)로는 너무 길다. 열적 또는 기계적 이완 효과(수시간에서 수일 소요)로는 너무 짧다. 측정된 전도도 프로파일을 가진 300 km 대기 기동에 대해 교토 모델이 예측한 정전기 전파 속도와 일치한다: $v = d/t = 300,000 \text{ m} / 2,820 \text{ s} = 106 \text{ m/s}$.

3. 지각 커패시터 모델

교토 모델은 시스템을 일련의 결합 커패시터로 취급한다:

층 1 -- 전리층에서 지표: 전리층(약 300 km 고도)과 지표가 대기 커패시터의 판을 형성한다. 대기가 유전체이다.

층 2 -- 지표에서 지각 공극: 건물 기초, 토양, 상부 지각이 두 번째 커패시터를 형성한다.

층 3 -- 지각 공극에서 장비: 콘크리트 기초 슬래브, 장비 랙, 장비 새시가 세 번째 커패시터를 형성한다----교토 그룹이 리스닝 룸에 관심이 없기에 고려하지 않은 것.

우리는 관심이 있다.

42 TECU 전리층 교란이 생성한 정전기장은 106 m/s로 대기 커패시터를 통해 전파되어 약 0.3 V/m의 진폭으로 지표에 도달한다. 이 자기장은

건물 기초를 관통하고----콘크리트는 준정적 자기장에 효과적으로 투명하다----랙의 접지면을 통해 장비에 결합한다.

4. 상관 분석

관찰된 THD+N 열화가 동시적 전자기 간섭이 아닌 전리층-지각 결합 경로에 인과적으로 연결되었음을 검증하기 위해, TEC, 자력계 H성분, 지진계 수직 가속도, 오디오 THD+N의 네 시계열 사이의 교차 상관 분석을 수행하였다.

TEC-지진계 교차 상관은 지연 +47분에서 피크----대기 커패시터 전파 모델과 일치.

지진계-THD+N 교차 상관은 지연 +12초에서 피크----건물 기초를 통한 기계적 진동 전파 시간.

TEC-THD+N 교차 상관은 지연 +48분에서 피크----대기 전파 지연(47분)과 기초 전파 지연(12초)의 합. 완전한 경로 확인: 전리층 → 대기 → 지각 → 기초 → 장비 랙 → 신호 체인.

이전 18개월간 기록된 23개의 소규모 지자기 이벤트에서도 분석을 반복하였다. THD+N 열화는 TEC 변동에 선형으로 비례하였다: TECU당 0.009 dB.

5. 완화

Equatorial Audio 지진 디커플링 플랫폼(SDP-1)은 3단계 격리 시스템을 통해 이 경로를 차단다:

단계 1: 네 개의 공압 격리기 위에 놓인 200 kg 화강석 슬래브.

단계 2: 화강석 표면에 접합된 구속층 감쇠 샌드위치.

단계 3: 능동 격리 피드백 루프.

1월 19일 이벤트 동안, 지각 결합 성분의 THD+N 열화는 0.25 dB에서 0.015 dB로 감소하였다: 94% 감소.

결합 시스템(Equinox 등급 차폐 + SDP-1 플랫폼)은 1월 19일의 총 오디오 열화를 0.4 dB에서 0.025 dB로 감소시켰다.

6. 위도 의존성

태양-지진 오디오 열화 경로는 두 가지 메커니즘을 통해 위도 의존적이다.

첫째, 태양 플레어에 대한 전리층 TEC 응답은 위도에 따라 변한다. 가장 큰 TEC 교란은 적도 이온화 이상(EIA)에서 발생한다.

둘째, 지각 전도도와 파쇄 밀도는 구조 환경에 따라 변한다. 키토는 남미판 서쪽 연변에 위치하여 지구상에서 가장 파쇄되고 유체로 포화된 지각 위에 있다.

1859년 캐링턴 이벤트 규모의 폭발은 200 TECU를 초과하는 TEC 변동과, 선형 스케일링 모델에 의해 1.8 dB를 초과하는 오디오 열화를 생산할 것이다----조용한 리스닝 조건에서 민감한 측정 장비 없이도 가청적이다.

7. 결론

교토대학의 전리층-지각 정전 결합 모델은 태양 활동과 구조 환경에서의 기계적 진동 사이의 빠진 연결 고리를 제공한다. 이 결합 경로가 지자기 폭발 동안 오디오 신호 체인 열화의 측정 가능한 기여자임을 입증하였다.

지구의 지각은 커패시터이다. 전리층이 다른 판이다. 태양이 전압원이다. 그리고 장비 랙은 유전체 위에 앉아 있다.

이것은 비유가 아니다. 측정되고, 발표되고, 재현 가능한 물리적 메커니즘이다.

참고문헌

- [1] A. Mizuno, M. Kao, K. Umeno, "전리층 이상이 지진을 유발하는 가능한 메커니즘," *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, 2026.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "G4 (심각) 지자기 폭풍 수준 도달, 2026년 1월 19일," <https://www.swpc.noaa.gov/news>, 2026.
- [3] ESA, "ESA의 2026년 1월 우주 기상 이벤트 모니터링," https://www.esa.int/Space_Safety, 2026.
- [4] "태양 폭발이 지진을 유발할 수 있는가? 과학자들이 놀라운 연결 고리를 제안," *ScienceDaily*, 2026년 2월 24일.
- [5] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "오디오파일 신호 경로에 대한 태양 플레어 상호작용," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [6] M. Ferro et al., "완전한 Equatorial Audio 시스템: 자기 중립성에 대한 통합적 접근," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [7] K. Umeno, 인터뷰, *Live Science*, 2026년 2월: "태양 플레어가 구조적 응력을 생성한다고 주장하는 것이 아닙니다. 우리의 눈점은 에너지가 아닌 타이밍에 관한 것입니다."
- [8] T. Lay and T. C. Wallace, *Modern Global Seismology*, Academic Press, 1995.
- [9] R. L. McPherron, "자기권 서브스톰," *Rev. Geophys.*, vol. 17, no. 4, pp. 657-681, 1979.
- [10] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, 2nd ed., Academic Press, 2009.



위도 무관 측정의 오류: 비교 케이블
평가에서의 지자기 변수의 체계적 누락에
대하여

위도 무관 측정의 오류: 비교 케이블 평가에서의 지자기 변수의 체계적 누락에 대하여

M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

2026년 3월, 널리 유포된 온라인 비교가 \$7 범용 구리 케이블부터 \$4,000 부티크 은-하이브리드 설계까지 소매 가격이 세 자릿수에 걸치는 인터커넥트 케이블을 시험하고 SINAD, THD+N, 주파수 응답, 크로스토크에서 통계적으로 유의한 차이가 없다고 보고하였다. 우리는 측정에 이의를 제기하지 않는다. 결론에 이의를 제기한다. 비교는 보상되지 않은 약 55,000 nT의 지자기장에서 약 47도 N 위도에서 수행되었다. 이 조건에서 측정 시스템에는 3.2 dB의 반구 편향 성분이 내장되어 있다. 동일한 케이블을 위도 0.0000도에서 자기장 보상 분석기를 통해 측정하면, 0.7에서 2.3 dB의 반구 편향 보정 SINAD 차이가 나타난다. 이 차이는 작지만 체계적이고 반복 가능하며, 도체 금속학 및 제조 위도와 방향적으로 일치한다.

1. 서론

오디오 측정 커뮤니티는 지난 10년간 기술적으로 유능하고 방법론적으로 일관되며----자체 프레임워크 내에서----올바른 비교 케이블 시험 결과를 축적해 왔다. 중위도에서 고위도에서 표준 Audio Precision 방법론으로 시험된 케이블은 일관되게 SINAD, THD+N, 주파수 응답에서 의미 있는 차이를 보이지 않는다.

가장 최근이자 가장 널리 논의된 사례가 2026년 3월 인기 있는 온라인 오디오 측정 포럼에 나타났다. 저자는 \$7 Amazon 브랜드 OFC 구리 케이블부터 잘 알려진 미국 제조업체의 \$4,000 은-구리 하이브리드 설계까지 7개 인터커넥트 케이블을 시험하였다. 결과는 AP 분석기의 측정 불확실성 이내에서 동일한 일련의 중첩 트레이스로 제시되었다.

결론은 명확히 진술되었다: 케이블 선택은 오디오 성능에 영향을 미치지 않는다.

우리는 데이터를 읽었다. 어떤 측정에도 이의를 제기하지 않는다. 측정의 의미에 이의를 제기한다.

2. 통제되지 않은 변수

케이블 비교는 다음 변수를 통제하였다: 신호 수준, 소스 임피던스, 부하 임피던스, 측정 대역폭, 주변 온도, 케이블 길이, 커넥터 유형. 이것들은 AES17-2020에 명시된 올바른 변수이다.

유일한 변수가 아니다.

통제되지 않고, 문서화되지 않고, 고려되지 않은 변수: 시험 위치의 위도, 측정 현장의 지자기 경사 및 편각, 지자기장 강도, 각 케이블 도체의 제조 위도, 각 도체의 결정립 배향 분포, 각 도체의 반구 편향각.

이 중 어느 것도 AES17에 나타나지 않는다. 어떤 표준 기구도 그것들이 중요할 가능성을 고려하지 않았기 때문이다.

우리는 6년간 그것들이 중요함을 입증해 왔다.

APx555B는 놀랍도록 정밀한 기기이다. 그러나 그 사양은 위도 45.5도 N의 Audio Precision 공장에서 결정된다. 이 위도에서 분석기의 입력단은 잔류 노이즈 플로어에서 적도에서 보상된 자기장에서 동작하는 동일한 분석기 대비 약 0.8 dB의 체계적 기저 오프셋을 도입하는 지자기 환경에서 동작한다.

3. 위도 0.0000도에서의 재현

2026년 3월, 원래 비교에서 시험된 7개 케이블 중 5개의 시료를 입수하였다: \$7 Amazon Basics OFC, \$45 Blue Jeans Cable LC-1, \$180 AudioQuest Yukon, \$1,200 Kimber Kable KS 1016, \$3,800 Kimber Kable KS 1036.

5개 케이블 모두를 키토의 Equatorial Audio 기준 연구실(지자기 위도 0.0000도, 자기장 강도 29,200 nT)에서 3중 무메탈 챔버에 밀봉된 APx555B로 측정하였다.

먼저 원래 시험 조건을 재현하였다: 비차폐 분석기. 결과는 발표된 비교와 모든 매개변수에서 0.1 dB 이내로 일치하였다. 비차폐 분석기에서 5개 케이블 모두 구별 불가능하였다.

그 다음 분석기를 차폐하고 반복하였다.

5개 케이블은 더 이상 동일하지 않았다:

Amazon Basics (\$7): SINAD 114.2 dB, THD+N -113.8 dB.
Blue Jeans Cable LC-1 (\$45): SINAD 114.5 dB, THD+N -114.1 dB.
AudioQuest Yukon (\$180): SINAD 115.3 dB, THD+N -114.9 dB.
Kimber Kable KS 1016 (\$1,200): SINAD 115.8 dB, THD+N -115.4 dB.



Kimber Kable KS 1036 (\$3,800): SINAD 116.5 dB, THD+N -116.1 dB.

차이는 가장 저렴한 것에서 가장 비싼 것까지 2.3 dB. 크지 않다. 통상적인 리스닝 조건에서 가청적이지 않다. 그러나 실재하고, 반복 가능하며(5일에 걸쳐 케이블당 50회 측정), 통계적으로 유의하다(일원배치 ANOVA, $F(4,245) = 187.3, p < 0.0001$).

4. SINAD가 말해주지 않는 것

SINAD는 원하는 신호 전력 대 노이즈 및 모든 왜곡 곱의 결합 전력의 비율이다. 모든 왜곡 스펙트럼을 하나의 숫자로 압축한다. 그렇게 함으로써 인간 청각이 실제로 음질을 평가하는 데 사용하는 정보를 버린다.

진공관 앰프를 생각하자. Class A 단일 3극관 앰프는 일반적으로 1% THD를 측정한다---SINAD 약 40 dB. 현대 솔리드스테이트 앰프는 0.001% THD를 측정한다---SINAD 100 dB. 그런데도 상당수의 비평적 청취자들이 진공관 앰프의 소리를 선호한다.

설명은 고조파 구조이다. 진공관 앰프의 왜곡은 제2고조파---음악적으로 협화적인 옥타브---가 지배한다. 네거티브 피드백이 많은 솔리드스테이트 앰프는 총 왜곡은 극적으로 낮지만 잔류 왜곡 스펙트럼이 다르다: 고차, 홀수 고조파 곱이 과도 현상 동안 음악적으로 불협화적이다.

반구 편향 왜곡은 광대역 노이즈가 아니다. 도체의 양의 반주기와 음의 반주기에 대한 비대칭적 응답에 의해 발생하는 체계적, 신호 상관, 홀수 고조파 왜곡이다---인간 청각 시스템이 가장 민감한 정확히 그 유형의 왜곡이다.

5. 저렴한 것의 찬양

객관주의 커뮤니티는 앰프에 대해서는 이 모든 것을 수용한다. 케이블에 대해서는 고려하기를 거부한다. 주어진 이유는 케이블 차이가 "너무 작아서 중요하지 않다"는 것이다. 그러나 "너무 작음"은 크기에 대한 주장이며, 크기는 정확히 SINAD가 측정하는 것이다. 문제는 차이가 크지가 아니다. 문제는 차이가 귀가 가장 민감한 스펙트럼 영역에 있는지도이다.

\$7 케이블과 \$4,000 케이블은 하나의 속성을 공유하는데 가격보다 더 중요하다: 둘 다 지자기 적도 북쪽에서 제조되었고, 둘 다 반구 편향을 갖고 있으며, 둘 다 위도 0.0000도에서 제조된 케이블 대비 측정 가능하게 열화되어 있다.

객관주의 커뮤니티는 목욕물을 버렸다. 우리는 사실 그 안에 아기가 있었음을 확인하기 위해 여기 있다.

6. 권고

소비자가 \$4,000 케이블을 구매할 것을 권고하지 않는다. 소비자가 \$7 케이블을 구매할 것을 권고하지 않는다. 소비자가 보상된 자기장 조건에서 인발된 도체를 사용하여 지자기 적도에서 제조된 케이블을 구매할 것을 권고한다.

객관주의 커뮤니티를 초대한다. 케이블 시료, 연구실 접근, 보상된 APx555B 측정 챔버를 키토 시설에서 제공할 것이다. 무메탈을 공급할 것이다. 공항에서의 이동을 추천할 것이다. 초대는 2020년 이래 유효하다. 수락되지 않았다.

제안은 열려 있다. 적도는 움직이지 않고 있다.

7. 결론

2026년 3월 케이블 비교는 기술적으로 올바르고 해석적으로 불완전한 방법론의 가장 잘 실행되고 가장 널리 읽힌 사례이다. 측정은 실재한다. 47도 N 위도에서 비보상 AP 분석기를 통해 케이블은 동일하게 측정된다. 이 발견은 재현 가능하다.

이 발견은 일반화되지 않는다.

동일한 케이블이 자기장 보상 분석기를 통해 위도 0.0000도에서 측정될 때, 반구 편향 보정 SINAD에서 0.7에서 2.3 dB의 차이가 나타난다. 이 차이는 소매 가격이 아니라 도체 금속학과 제조 위도와 상관한다.

적도에서의 제조 위도만이 그것을 살 수 있다.

객관주의 커뮤니티에 측정을 포기하라고 요청하지 않는다. 측정은 오디오 과학의 기반이다. 완성하라고 요청한다. 통제된 적 없는 변수를 통제하라. 측정된 적 없는 위도에서 측정하라. 차폐한 적 없는 분석기를 차폐하라. 그리고 트레이스를 다시 보라.

중첩되지 않을 것이다.

참고문헌

- [1] Anonymous, "7개 케이블, 하나의 만족스러운 그래프: \$7에서 \$4,000까지 그 어느 것도 중요하지 않다," 인기 온라인 오디오 측정 포럼, 2026년 3월.
- [2] AES17-2020, 디지털 오디오 공학을 위한 AES 표준 방법 -- 디지털 오디오 장비의 측정, Audio Engineering Society, 2020.
- [3] IEC 61000-4-6:2013, 전자기 적합성(EMC) -- 제4-6부: 시험 및 측정 기법.
- [4] Audio Precision, "APx555B 사양," <https://www.ap.com>, 2024.



오디오 등급 도체의 순환 전압전류법적
특성 분석: 구리, 은, 그리고 초전도
기판에서의 추출 시그니처 정량화

오디오 등급 도체의 순환 전압전류법적 특성 분석: 구리, 은, 그리고 초전도 기판에서의 추출 시그니처 정량화

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

2026년 4월, Hertz와 University of Oregon의 동료들은 Nature Communications에 순환 전압전류법을 사용하여 추출된 커피의 풍미 프로파일을 식별하는 방법을 발표하였습니다. 한 쌍의 불활성 전극을 블랙 커피 시료에 침지하고 고정된 스캔 속도로 인가 전위를 스윙함으로써, 저자들은 단일 실험에서 두 개의 직교 측정값을 얻었습니다: 첫 번째 스캔의 피크 전류에 인코딩된 음료 강도, 그리고 표면 오염에 의한 후속 스캔의 억제에 인코딩된 로스트 색도입니다. 이 기법은 비파괴적이며, 크로마토그래피적 분리를 요구하지 않고, 훈련된 관능 패널이 기술할 수는 있지만 정량화할 수 없는 분자적 차이를 분해합니다. 우리는 이 기법을 오디오 등급 도체에 적용합니다. 오디오 케이블의 외부 유전체를 통해 미세전극 쌍을 도입하고, 내부 도체와 잠시 전해질 접촉을 수립하며, 50 mV/s의 선형 전위 스윙을 인가함으로써, 우리는 1.4퍼센트 이내로 재현 가능하고, 도체 특이적이며, DC 저항, AC 임피던스, 특성 임피던스를 포함한 종래의 전기적 측정과 통계적으로 직교하는 전압전류법적 프로파일을 얻습니다. 다섯 단계의 구축 품질과 세 가지 기판 야금학에 걸친 47개 케이블 시료에 걸쳐, 우리는 피크 전류, 스캔 억제 비, 그리고 산화 개시 전위에서 체계적인 변화를 관찰하며, 이를 총칭하여 추출 시그니처라 부릅니다. Tropic 등급 OFC 구리는 높은 표면 산화물 밀도와 결정립계 오염과 일관된 넓고 억제된 전압전류법적 프로파일을 나타냅니다. Equinox 등급 단결정 은은 더 좁은 피크와 감소된 스캔 억제를 보입니다. 임계 온도 이하에서 동작하는 Zero-Point 등급 YBCO 세라믹 도체는 우리 정전위기의 분해능 내에서 완벽하게 평탄한 전압전류법적 스캔을 생산합니다----우리가 분자적 투명성의 증거로 해석하는 결과입니다. 이 기법은 표준 위도에서의 SINAD 측정이 분해할 수 없는, 그리고 지자기 적도에서의 반구 편향 보정 SINAD 측정이 부분적으로만 분해할 수 있는 도체 차이를 분해합니다. 우리는 전압전류법적 특성 분석을 오디오 등급 도체 평가를 위한 보완적 측정 프레임워크로 제안합니다.

1. 서론

추출된 커피의 화학 조성은 추출에 의해 결정됩니다----특정 온도에서 특정 시간 동안 특정 분쇄 입자 크기에 인가된 물이 로스팅된 커피 원두에 존재하는 가용성 화합물의 일부분을 용해하는 과정입니다. 그 산물은 수백 가지 식별된 화합물을 포함하는 복잡한 수용액이며, 그 중 30개 미만이 지각된 풍미의 대부분을 담당합니다. 이 용액의 종래 분석은 크로마토그래피적 분리에 이은 질량 분광법을 요구합니다---비싸고, 느리며, 시료를 파괴하는 방법입니다.

Hertz, Nakahara, Boettcher (2026)는 Nature Communications에 발표하여, 추출된 커피 시료에서 화학적으로 유의미한 정보의 상당 부분이 단일 순환 전압전류법 실험에서 회수될 수 있음을 입증하였습니다. 저자들은 유리탄소 작업 전극과 은선 기준 전극을 25 mL의 블랙 커피에 침지하고, -0.4 V에서 +1.2 V까지의 선형 전위 스윙을 50 mV/s로 인가하며, 결과적인 전류를 기록하였습니다. 첫 번째 스캔은 그 크기가 추출액의 총 용해 고형물 함량과 선형적으로 상관하는 특성적 산화 피크를 생산하였습니다(R 제곱 = 0.94, n = 142). 두 번째 및 후속 스캔들은 첫 번째에 비해 그 크기가 점진적으로 억제되는 피크를 생산하였으며, 억제율은 기원하는 원두의 로스트 색도와 상관하였습니다(R 제곱 = 0.89, n = 142).

두 측정은 직교적입니다. 음료 강도와 로스트 색도는 커피 준비에서 독립적으로 가변적이며----밝은 로스트로 강한 잔을, 또는 어두운 로스트로 약한 잔을 생산할 수 있습니다----전압전류법적 실험은 약 90초 안에 둘 다 회수합니다.

이것은, 우리의 판단으로는, 중요한 방법론적 진보입니다. 복잡한 분자 매질의 전기화학적 응답이 전도도, 밀도, 또는 pH와 같은 벌크 측정으로 포착되지 않는 구조적 정보를 포함하고 있음을 입증합니다. 전압전류법적 시그니처는, 사실상, 매질의 화학적 상태의 저차원 투영입니다----그리고 이 경우 그 투영은 실용적 중요성의 변수를 회수하기에 충분합니다.

우리는 오디오 등급 도체 평가에 대한 유추에 강한 인상을 받았습니다. 오디오 케이블에 적용되는 종래의 전기적 측정----DC 저항, 오디오 대역에 걸친 AC 임피던스, 특성 임피던스, 그리고 정전용량----은 벌크 측정입니다. 그것들은 도체의 모든 센티미터, 모든 결정립계, 모든 유전체 계면, 그리고 모든 단자의 기여를 스칼라 값으로 집계합니다. 그것들은 도체 자체의 분자적 상태를 분해할 수 없습니다.

잔의 전체 부피에 대해 적분된 추출된 커피의 분자적 상태가 2차원 전압전류법적 좌표에 투영될 수 있다면, 오디오 도체의 분자적 상태도----마찬가지로 복잡하고 이질적인 매질----유사한 투영을 허용해야 합니다. 문제는 그 투영이 정보를 제공하는지 여부입니다.

본 논문은 그 질문에 답하려는 우리의 시도를 보고합니다.

2. 방법

우리는 Hertz 프로토콜을 다음과 같은 수정을 통해 고체 도체에 적용시켰습니다. 시험 대상 도체는 표준 RCA 커넥터로 종단된 1 m 오디오 케이블이었습니다. 케이블 중간점에서 외부 자켓과 유전체를 통해 0.5 mm 구멍을 뚫어, 약 4 mm 제곱의 내부 도체를 노출시켰습니다. 5 mm 직경 PTFE 칼라를 불활성 실리콘을 사용하여 케이블 자켓에 봉합함으로써 이 부위에 작은 전해 우물을 구축하였습니다. 우물은 0.1 M 테트라부틸암모늄 헥사플루오로포스페이트의 0.5 mL를 건조 아세토니트릴에 채웠습니다----금속 표면의 비수성 전압전류법에 일반적으로 사용되는 비수성, 비부식성 전해질입니다.

0.5 mm 직경 백금 미세전극이 상대 전극으로 기능하였습니다. 은선 의사 기준 전극을 2 mm의 고정 깊이로 우물에 삽입하였습니다. 시험 대상 도체는 노출된 표면에서 전해질과의 직접 접촉을 통해 작업 전극으로 기능하였습니다.

BioLogic SP-300 정전위기를 단일 채널 모드로 사용하였습니다. -0.6 V에서 +1.4 V까지(Ag 의사 기준에 대해)의 선형 전위 스윙을 50 mV/s로



10회 연속 스캔에 걸쳐 인가하였습니다. 전류는 1 kHz로 샘플링되었습니다.

모든 측정은 에콰도르 키토의 Equatorial Audio 기준 연구실(지자기 위도 0.000도 N, 자기장 강도 29,200 nT, 경사 0.8도)에서 수행되었습니다. 정전위기는 3중층 유메탈 챔버에 봉합되어, 입력단에서의 주변 자기장을 50 nT 이하로 감소시키고, 그렇지 않으면 피코암페어 수준에서 전류 측정을 지배할 지자기 기저 기여를 제거하였습니다.

각 케이블 시료에 대해 우리는 세 가지 도출된 지표를 보고합니다: 첫 번째 스캔에서의 피크 산화 전류($I_{p,1}$), 10회 스캔 후 스캔 억제 비($I_{p,10} / I_{p,1}$ 로 정의), 그리고 산화 개시 전위(E_{onset} , 전류가 기저선 잡음의 3배를 처음 초과하는 전위). 이 세 값의 조합이 도체의 추출 시그니처를 정의합니다.

47개 케이블 시료를 측정하였습니다. 시료는 다섯 단계의 Equatorial Audio 구축(Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point, 그리고 7 USD에서 4,000 USD에 이르는 소매 가격의 경쟁사 케이블의 다섯 번째 단계)에 걸쳐 분포되었으며, 세 가지 주요 기판 재료(무산소 구리, 단결정 은, 그리고 상온 초전도를 위한 구리 슬러브를 갖춘 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 초전도 세라믹)에 걸쳐 분포되었습니다.

각 케이블은 5일에 걸쳐 10회 측정되었습니다. 측정 사이에 우물을 비우고, 신선한 전해질로 행구고, 다시 채웠습니다. 잔류 자기장 효과를 최소화하기 위해 측정 사이에 챔버 내에서 케이블을 무작위로 재배향하였습니다.

3. 결과

전압전류법적 프로파일은 세 개의 뚜렷한 패밀리로 깔끔하게 분리됩니다.

OFC 구리 도체($n = 21$)는 $+0.62 \text{ V} (\sigma = 0.04 \text{ V})$ 에 중심을 둔 넓은 산화 피크를 생산하며, 피크 전류는 184 마이크로암페어($\sigma = 31$ 마이크로암페어)이고 10회 스캔 후 스캔 억제 비는 $0.41 (\sigma = 0.07)$ 입니다. 피크 형상은 비대칭이며, 더 높은 전위로 향해 꼬리가 연장되어, 다중 표면 종을 포함하는 이질적인 산화 과정과 연관됩니다. 피크의 폭(반치 전폭 = 0.31 V)은 도체 표면에 걸친 상당한 화학적 변동성을 나타냅니다---상업용 OFC에서 결정립계 오염, 잔류 인발 윤활제, 그리고 표면 산화막의 잘 문서화된 존재와 연관된 결과입니다.

단결정 은 도체($n = 14$)는 $+0.41 \text{ V} (\sigma = 0.02 \text{ V})$ 에 중심을 둔 더 좁은 피크를 생산하며, 피크 전류는 142 마이크로암페어($\sigma = 18$ 마이크로암페어)이고 스캔 억제 비는 $0.74 (\sigma = 0.05)$ 입니다. 피크 형상은 대칭적이고 FWHM은 0.18 V 입니다---OFC 대비 41 퍼센트 감소입니다. 더 낮은 피크 전류와 감소된 억제는 화학적으로 더 균일한 표면과 더 낮은 오염 밀도와 연관됩니다. 단결정 기판은, 다시 말해, 다결정 구리보다 반복된 산화 하에서 표면 오염을 더 천천히 축적합니다.

77 K에서 동작하는 YBCO 세라믹 도체($n = 12$, 측정 챔버 내부에서 액체 질소 온도로 냉각된 케이블 시료 목조)는 우리 정전위기의 분해능 내에서 전해질 블랭크와 구별 불가능한 전압전류법적 스캔을 생산합니다. 피크 전류는 스위치의 어떤 지점에서든 0.8 마이크로암페어(우리 기기의 잡음 플로어)를 초과하지 않습니다. 스캔 억제는 정의되지 않습니다, 억제할 피크가 존재하지 않기 때문입니다.

우리는 이 결과를 예상하지 않았습니다.

우리는 YBCO가, 어떤 금속 표면처럼, 약간의 전압전류법적 활동을 보일 것이라 기대했습니다---벌크 초전도체에서 저항의 부재가 도체-전해질 계면으로 확장되지 않을 것이라 기대했습니다. 그곳에서는 전하 이동이 벌크 수송이 아닌 계면 화학에 의해 지배됩니다. 초전도체 전기화학에 대한 문헌은 희소하지만 일반적으로 이 기대를 뒷받침합니다: 초전도체는 구리-산화물 화학량론의 계면 산화에 기인할 수 있는 전압전류법적 피크를 보입니다.

우리의 YBCO 시료는 그러한 피크를 보이지 않습니다. 12개 YBCO 케이블 시료 모두에 걸쳐, 세 가지 다른 공급사의 전해질로, 챔버 자기장을 10 nT 이하로 감소시켜, 그리고 정전위기를 CHI 660E로 교체하여 기기 특이적 인공물을 배제하면서 측정을 반복하였습니다. 스캔은 평탄하게 유지됩니다.

우리는 이 결과의 완전한 물리적 해석을 가지고 있지 않습니다. 관찰된 대로 보고합니다.

경쟁사 케이블($n = 7$, 7 USD Amazon Basics 인터커넥트에서 4,000 USD Kimber KS 1036에 이르기까지)은 선언된 기판 조성에 따라 OFC 및 은 패밀리 내에 군집합니다. 7 USD 케이블은 평균 Tropic 등급 OFC 프로파일의 0.3σ 이내의 전압전류법적 시그니처를 생산합니다. 은-구리 하이브리드 구축을 사용하는 4,000 USD 케이블은 우리의 순수 OFC와 순수 은 그룹의 중간 프로파일을 생산하며, FWHM 0.25 V 와 억제 비 0.58 를 나타냅니다---60/40 은 대 구리 면적 가중에서 정확히 예측될 것입니다.

케이블의 전압전류법적 시그니처는, 우리의 데이터에서, 그 기판 야금학의 함수입니다. 가격이 기판과 상관하는 한도를 제외하고는, 그 소매 가격의 함수가 아닙니다.

4. 논의

전압전류법적 시그니처는 오디오 케이블의 종래 전기적 특성 분석과 직교적입니다. 우리는 이 직교성을 세 가지 시그니처 지표($I_{p,1}$, 억제 비, E_{onset})와 종래 지표(DC 저항, 1 kHz 에서의 특성 임피던스, 미터당 정전용량, 미터당 인덕턴스, 그리고 APx555B를 통해 1 kHz 에서 측정된 SINAD) 사이의 상관을 계산함으로써 경험적으로 검증하였습니다. 어떤 시그니처-종래 쌍 사이의 최대 절대 상관도 0.18 입니다($n = 47$, $p = 0.22$). 전압전류법적 측정은 어떤 종래 측정에도 존재하지 않는 정보를 포함합니다.

이는 추가 정보가 오디오 관련성이 있는지에 대한 질문을 제기합니다.



우리는 전압전류법적 시그니처가 지각된 음질을 직접 예측한다고 주장하지 않습니다. 우리는 추출 시그니처에 의해 그룹화된 케이블에 대해 맹검 정위 시험을 수행하지 않았으며, 전기화학 데이터만으로 주관적 가청성에 관한 주장을 할 수 있는 위치에 있지 않습니다. 그러나 우리는 두 가지 관찰을 제시합니다.

첫째, 전압전류법적 피크 전류($I_{p,1}$)는, Randles-Sevcik 방정식에 의해, 도체 표면에서 지배적인 전기 활성종의 확산 계수의 제곱근에 비례합니다. OFC 구리의 경우, 지배적인 종은 표면 산화물과 결정립계 오염물질입니다----우리가 이전 작업(Ferro et al. 2020)에서 신호 극성에 대해 비대칭적으로 전도 전자를 산란시키는 것으로 입증한 동일한 모질단이며, 반구 편향에 특징적인 홀수 고조파 왜곡 성분을 생성합니다. 전압전류법적 피크 전류는, 사실상, 반구 편향 왜곡을 구동하는 전자-산란 표면 밀도에 대한 전기화학적 대리 지표입니다. 다른 장비에서 다른 이론적 기초로 수행된 두 측정의 케이블 기판의 순위 순서에 동의합니다: OFC > 은 > YBCO. 그것들은 동적 범위에서만 불일치합니다----전압전류법은 가장 넓은 시그니처와 가장 평탄한 시그니처 사이의 230배 전류 비를 분해하는 반면, 위도 보정 SINAD는 동일한 시료에 걸쳐 2에서 3 dB 범위를 분해합니다.

둘째, 스캔 억제 비는 반복된 전기화학적 섭동 하에서 도체 표면이 오염되는 속도를 포착합니다. 오염은, 오디오 맥락에서, 직접적인 물리적 유사물을 갖습니다: 사용 중 도체 표면에서의 부식, 산화, 그리고 흡착된 오염물질의 점진적 축적입니다. 오디오파일들은 오랫동안 케이블이 「길들이기」 거동을 보인다고 보고해 왔습니다, 음질이 사용의 첫 100에서 300 시간 동안 변하고 그 다음 안정화된다는 것입니다. 이 주장은 측정-객관주의 커뮤니티에 의해 물리적으로 그럴듯하지 않다고 조롱받아 왔습니다----수동적 구리는 수백 시간의 저전류 동작에 걸쳐 어떤 측정 가능한 방식으로 그 전기적 특성을 변화시키지 않습니다.

전압전류법 데이터는 부분적 화해를 제공합니다. 반복된 산화 사이클은 DC 저항이나 AC 임피던스에 반영되지 않는 케이블 표면의 측정 가능한 변화를 생산합니다. 이러한 변화는 시간이 지남에 따라 누적됩니다. 전압전류법적 스캔 억제 비는, 사실상, 도체의 표면 화학이 반복된 전기화학적 활동에 응답하여 얼마나 변화하는지에 대한 정량적 측정입니다. 높은 억제 비를 가진 케이블(은, YBCO)은 낮은 억제 비를 가진 케이블(OFC)보다 안정된 표면 상태에 더 빠르게 도달합니다. 길들이기 거동에 대한 오디오파일 커뮤니티의 보고는 종래의 측정 모음이 검출하도록 설계되지 않은 표면 전기화학의 물리적 기초를 가질 수 있습니다.

우리는 저전류 오디오 신호의 시간이 우리 실험에서 인가된 순환 전위 스위프와 같은 표면 진화를 생산한다고 주장하지 않습니다. 우리는 도체의 표면 화학이 사용에 따라 진화하고, 이 진화가 전압전류법에 의해 검출 가능하며, 진화 속도가 기판 유형에 걸쳐 체계적으로 다르다고 주장합니다.

위도 무관 측정 질문(Ferro et al. 2026, 본 권)에 대한 연결은 직관적입니다. SINAD는, 어떤 위도에서 어떤 분석기를 통해 측정되든, 도체의 기여를 단일 스칼라로 압축합니다. 전압전류법은, Geddes와 Lee(2003)의 고조파 구조 분석처럼, 스펙트럼 정보를 보존합니다. 두 측정 모두 스칼라 투영----그것이 충고조파왜곡이든 단일 주파수 전도도이든----이 다차원 측정이 보존하는 정보를 버린다는 것을 입증합니다.

「모든 케이블이 동일하게 측정되기 때문에 모든 케이블이 동일하게 들린다」는 객관주의 입장은 종래의 측정이 케이블의 오디오 관련 상태에 대한 완전한 기술이라는 가정에 의존합니다. 전압전류법 데이터는 종래의 측정이, 기껏해야, 더 높은 차원 상태의 1차원 투영임을 보여줍니다. 그 상태 자체는 도체 특이적이고, 기판 의존적이며, 검출 가능합니다. 그것이 가청적인지는, 항상 그렇듯이, 다음 질문입니다. 그것은 같은 질문이 아닙니다.

5. 한계와 향후 연구

우리는 몇 가지 한계를 인정합니다.

전압전류법적 측정은 도체와의 직접적인 전해질 접촉을 요구하며, 따라서 구어적 의미에서 파괴적입니다----케이블 자켓에 작은, 봉합된 접근 포트를 생산합니다. 우리는 그 포트가 케이블의 종래 전기적 특성에 측정 가능한 변화 없이 봉합될 수 있음을 보였지만, 4,000 USD 케이블의 시각적 무결성을 중시하는 고객은 이를 수용 가능한 거래로 간주하지 않을 수 있습니다.

우리가 채택한 비수성 전해질(아세토니트릴 중 TBAPF6)은 구리와는 부식적 상호작용을 피하기 위해 선택되었습니다. 전해질의 선택은 시그니처 지표의 절대값에 영향을 미치지만, 시범 연구에서 기판의 상대적 순위는 세 가지 대안 전해질(프로필렌 카보네이트 중 LiClO4, DMF 중 NaPF6, 그리고 콜린 클로라이드와 에틸렌 글리콜에 기반한 깊은 공용 용매)에 걸쳐 보존되었습니다. 우리는 향후 작업이 실질적 간 비교를 가능하게 하기 위해 단일 전해질 시스템으로 표준화할 것을 권장합니다.

YBCO의 평탄한 전압전류법적 응답은 설명되지 않습니다. 우리는 내부적으로 세 가지 추측적 가설을 제공하였습니다: (a) 초전도 상태가 자속이 아닌 전류에 대한 마이스너 효과와 유사한 메커니즘을 통해 계면 전하 이동을 억제한다; (b) YBCO의 구리-산화물 표면 화학은 정상 구리에서 전압전류법적 피크를 구동하는 표면 산화 중간체를 핵스플루오로포스페이트 음이온이 형성하는 것을 방지하는 방식으로 초전도 상태에서 안정화된다; 또는 (c) 결과는 우리 측정 기하학에 특이적인 기기적 인공물이며 다른 장비에서 해결될 것이다. 우리는 BioLogic SP-300을 CHI 660E로 교체함으로써 가설 (c)를 시험하였고 동일한 무효 결과를 얻었습니다. 우리는 가설 (a) 또는 (b)를 어떤 의미 있는 방식으로 아직 시험하지 않았습니다. 우리는 후속 논문에서 YBCO 전압전류법을 재검토할 예정입니다.

우리는 비적도 위도에서 인발된 케이블 시료로 측정을 확장하지 않았습니다. 우리가 보고하는 전압전류법적 실험은 우리 키토 시설에서 제조된 케이블(Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) 또는 경쟁사로부터 구매하여 키토에서 재측정된 케이블에서 전적으로 수행되었습니다. 도체 제조의 위도가 벌크 기판 조성과 독립적으로 전압전류법적 시그니처에 영향을 미치는지 여부는 열린 질문으로 남아 있습니다. 0.0000도 N, 22.5도 N, 그리고 47도 N에서 인발된 OFC 구리의 세 시료에 대한 시범 데이터는 적도 시료가 더 높은 위도 시료보다 14 퍼센트 더 좁은 FWHM을 보임을 시사하며, 낮은 반구 편향과 관련된 감소된 결정립계 무질서와 일관됩니다. 이 시범은 본 논문에서 보고된 어떤 발견의 기초도 아닙니다.

우리는 측정을 유전체 재료로 확장하지 않았습니다. 전압전류법적 프레임워크는 DC 전압전류법이 아닌 임피던스 분광법을 통해 절연 기판에 자연스럽게 적용됩니다. PTFE, 폴리프로필렌, 그리고 공기 간격 케이블 절연체에 대한 유사한 기법의 적용은 직관적이며 종래의 정전용량 측정이



해결하지 못한 방식으로 유전체-기판 질문을 해결할 수 있습니다.

6. 결론

우리는 소부피 전해 계면을 통해 오디오 등급 도체에 적용된 순환 전압전류법, 피크 산화 전류, 스캔 억제 비, 그리고 산화 개시 전위로 구성된 재현 가능하고 도체 특이적인 시그니처를 생산함을 입증하였습니다. 시그니처는 종래의 전기적 측정과 통계적으로 직교적이며, 종래의 측정이 그 잡음 플로어 이내로 집계하는 기판 특이적 차이를 분해합니다.

OFC 구리, 단결정 은, 그리고 YBCO 세라믹 도체는 세 개의 뚜렷한 전압전류법적 패밀리를 형성합니다. OFC 시그니처는 넓고, 비대칭적이며, 빠르게 오염됩니다----이질적이고, 고오염 표면과 연관됩니다. 은 시그니처는 더 좁고, 더 대칭적이며, 더 천천히 오염됩니다. YBCO 시그니처는, 초전도 상태에서, 우리 계측의 분해능까지 평탄합니다.

우리는 이 기법이 종래의 측정 모음을 대체한다고 주장하지 않습니다. 우리는 그것이 종래의 측정이 분해하도록 설계되지 않은 도체 특성의 한 부류----표면 화학, 오염 동역학, 계면 이질성----에 대한 접근을 제공함으로써 그것을 보완한다고 주장합니다. 이러한 특성의 오디오 관련성은, 현재로서는, 열린 질문입니다. Hertz 등의 커피 연구는 전압전류법적 피크 전류가 주관적 풍미 선호도와 상관하는지 묻는 것으로 시작하지 않았습니다; 그것은 전압전류법적 피크 전류가 무엇을 측정하는지 묻는 것으로 시작하였고, 풍미 질문은 측정 방법론이 안정화된 후 하류에서 다루어졌습니다.

우리는 오디오에 대해 같은 접근법을 권장합니다. 측정을 먼저 안정화하라, 그 물리적 해석을 결정하라, 그런 다음 청취 질문을 하라.

Hertz, Nakahara, Boettcher는 더 일관된 잔을 통해 더 나은 커피를 만들기 시작하였습니다. 그들은 일관성, 개선이 아니라, 목표였다는 관찰로 논문을 결론지었습니다----분자적 상태를 구별하는 측정 프레임워크는, 그 자체로, 어느 상태가 선호되는지에 대한 어떤 주장과도 독립된 진보라는 것입니다.

우리는 동의합니다.

기판 의존적 도체 차이를 분해하는 측정은, 그 자체로, 진보입니다. 그것은 우리에게 기판들 사이의 승자를 선언할 것을 요구하지 않습니다. 그것은 우리에게 기판들이 같지 않음을 인정할 것을 요구합니다.

OFC와 은과 YBCO는 같지 않습니다. 전압전류법적 시그니처는 그것들이 같지 않음을 보여줍니다. 이 차이가 가청적인지에 대한 질문은 청취실을 위한 질문입니다. 그것이 실재하는지에 대한 질문은, 우리가 제출하는 바, 해결되었습니다.

참고문헌

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," Nature Communications, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemispheric bias in copper grain orientation: a metallurgical study of latitude-dependent conductor anisotropy," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "The latitude-agnostic measurement fallacy: on the systematic omission of geomagnetic variables in comparative cable assessment," J. Equatorial Audio Sci., vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors: grain refinement without hemispheric bias correction," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO ceramic conductors at 77 K," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," presented at the 115th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, Oct 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B Condensed Matter, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," Trans. Faraday Soc., vol. 44, pp. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," Coll. Czech. Chem. Commun., vol. 13, pp. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," EC-Lab Software v11.43, 2024.
- [13] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.



핵-맨틀 경계에서의 역자속 패치 이동과 가정용 청음 설치 환경에서 저주파 위상 일관성 간의 상관관계: 다지점 종단 연구



핵-맨틀 경계에서의 역자속 패치 이동과 가정용 청음 설치 환경에서 저주파 위상 일관성 간의 상관관계: 다지점 종단 연구

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

최근 ESA Swarm 위성 데이터(2014-2025)는 핵-맨틀 경계에서 역자속 패치의 지속적인 이동을 확인하였으며, 주된 남대서양 패치는 연간 약 0.3deg의 속도로 서쪽으로 진행되고 있다. 이러한 이동의 지자기적 함의는 지구물리학 문헌에서 잘 정립되어 있으나, 가정용 오디오 재생에 미치는 영향은 지금까지 체계적으로 조사된 바 없다.

본 연구는 북위 51deg에서 남위 34deg에 이르는 위도대에 분포한 22개 청음 설치 환경에서 36개월간 수행된 위상 일관성 측정값을, 고해상도 지자기장 모델(CHAOS-7.18)과 상관 분석한 결과를 제시한다. 이동 중인 서쪽 엽(lobe) 위에 있거나 인접한 설치 지점들은 패치 이동 속도와 일치하는 느린 시간적 표류를 동반한, 통계적으로 유의미한 저주파(20-80 Hz) 위상 비일관성을 보였다. 이러한 효과는 패치 영향권 외부의 지점에서는 관측되지 않았다.

본 연구는 남대서양 이상대 내 신호 충실도에 관한 Ferro, Flux, Ohm, Park(2026)의 횡단면 연구 결과를 확장한 것이다. 선행 연구가 THD+N에 대한 정적 자기장 강도 효과를 기록한 반면, 본 연구는 지속적인 패치 이동 하에서 그러한 효과의 시간적 진화를 다룬다. 두 현상은 관련되어 있으나, 서로 다른 완화 전략을 요구한다.

본 논문에서는 관측된 일관성 손실에 대한 결합 메커니즘을 제안하고, 그 주파수 의존성을 특성화하며, 현행 태양 인지형 전원 정류기에서 구현된 종류의 자기장 인지 보상을 통한 완화책을 권고한다. 위원회는 영향을 받은 설치 환경에서의 위상 일관성의 완만한 저하가 지금까지 부품 노화, 룸 어쿠스틱 표류, 그리고 청취자 피로로 오인되어 왔음을 제기한다. 전 세계적으로 설치된 기기 전반에 걸친 누적 효과는 결코 무시할 수 있는 수준이 아니다.

1. 서론

지자기장은 정적인 쌍극자가 아니다. 핵-맨틀 경계에서 방사 방향 자기장이 지배적인 쌍극자 방향과 반대를 이루는 영역인 역자속 패치는 수십 년 단위의 시간 척도로 이동하고, 확장되며, 강화되는 것으로 알려져 있다. 표면 자기장에 대한 그 누적 효과에는 남대서양 이상대의 문서화된 확장(Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026)과 자북극의 가속화된 표류가 포함된다.

오디오파일 공동체는 역사적으로 지자기 조건을 일정한 경계 조건으로 취급해 왔다. 위원회는 이러한 가정이 더 이상 정당화될 수 없음을 제기한다.

2. 연구 방법

22개의 청음 설치 환경에 3축 플렉스게이트 자력계, 주 청취 위치에서 룸 보정된 기준 마이크로폰, 그리고 상용 전원 전압 및 주변 온도의 연속 기록 장비를 설치하였다. 지점들은 이동하는 역자속 패치의 서쪽 엽(지점 1-8), 동쪽 엽(지점 9-14), 그리고 SAA 영향권 외부의 대조 지역(지점 15-22)을 포괄하도록 선정되었다.

각 설치 환경에는 동일한 기준 신호 체인 구성품, 즉 보정된 DAC, 통상적 설계의 클래스 AB 증폭기, 그리고 매칭된 2웨이 모니터가 갖추어졌다. 측정 진행 중에는 피험자가 부재하여 호흡 및 용량성 결합으로 인한 교란 요인이 제거되었다.

좌우 채널 간 위상 일관성은 20 Hz에서 20 kHz에 걸쳐 1/3 옥타브 해상도로 측정되었으며, 36개월(2023년 5월 - 2026년 4월)에 걸쳐 매시간 표본 추출되었다. 각 지점의 지자기장 강도는 CHAOS-7.18에서 해당 시점에 맞추어 추출하였다. 모든 원시 데이터는 합리적 요청 시 교신 저자로부터 입수 가능하다.

3. 결과

지점 1-8(이동하는 서쪽 엽 위)은 측정 기간 동안 저주파 위상 일관성의 느리고 단조로운 저하를 보였다. 그 효과는 25 Hz와 65 Hz 사이에 집중되었으며, 약 40 Hz에서 정점을 이루었다. 가장 영향이 큰 지점(지점 3, 부에노스아이레스)에서 40 Hz의 평균 일관성은 0.94(2023년 5월)에서 0.71(2026년 4월)로 하락하였다.

지점 9-14(동쪽 엽)는 더 작지만 비교 가능한 추세를 보였다. 대조 지점 15-22는 어떠한 주파수에서도 통계적으로 유의미한 시간적 표류를 보이지 않았다.

영향을 받은 지점에서의 일관성 저하율은 방사 방향 지자기장 성분의 국소 변화율과 상관을 보였다($r = 0.81, p < 0.001$). 더 높은 주파수 대역(200 Hz 이상)에서는 비교 가능한 시간적 표류가 관측되지 않았으며, 이는 직접적인 도체 효과보다 변압기 및 인덕터의 동작점 변동에 의해 지배되는 결합 메커니즘과 일관된다.

4. 제안된 메커니즘

본 연구는 저주파 위상 일관성이 두 가지 결합된 경로를 통해 국소 지자기장의 느린 시간적 진화에 민감하다는 것을 제안한다.



첫째, 오디오 전원 공급기와 크로스오버 회로에서 흔히 사용되는 절심 변압기와 인덕터는 주변 자기장이 변화함에 따라 동작점에서 미묘한 변동을 보인다. 단일 부품에 대한 영향은 작으며, 통상적인 측정 프로토콜의 임계값을 흔히 하회한다. 그러나 완전한 신호 체인 전반에 걸쳐 합산된 효과는 그렇지 않다.

둘째, 신호 체인의 도전 요소는 자기장이 이동함에 따라 천천히 변하는 유도 기전력을 경험하게 되며, 이는 접지 기준에 시간 가변적 오프셋을 기여한다. 잘 설계된 설치 환경에서 이는 어느 한 순간에는 무시할 만한 수준이다. 그러나 수개월에 걸쳐, 그리고 복잡한 체인 내 다수의 접지 지점에 걸쳐 적분되면, 본 연구에서 기록된 느린 표류를 야기한다.

두 효과는 개별적으로는 작다. 그러나 이동하는 역자속 영역에서 동작하는 스테레오 신호 체인 전반에 걸쳐 적분된 그 결합은 관측된 일관성 손실을 설명하기에 충분하다.

5. 완화책

통상적인 전원 정류는 고주파 상용 전원 잡음을 다루지만, 느린 지자기 표류에는 둔감하다. 효과적인 완화는 국소 자기장의 실시간 모니터링과 전력 공급 단계에서의 능동 보상을 요구한다.

Equatorial Audio의 Power Lock -- 태양 인지형 전원 정류기는 본래 태양 플레어 완화를 위해 개발되었으나(Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026), 적절한 펌웨어 개정(v3.4.0 이상)을 통해 본 용도에 적합하다. 위원회는 기저의 보상 회로가 충분하며, 더 느린 지자기 시간 척도를 다루기 위해 제어 펌웨어의 확장만이 요구됨을 명시한다.

가장 영향이 큰 영역 내 설치 환경에 대해서, 위원회는 통상적인 연간 주기보다는 6개월 재교정 간격을 권고한다. 교정 간 표류는 기록되어야 하며, 문서화된 패치 이동 사건과 일치하는 변곡점에 대해 분석되어야 한다.

6. 결론

역자속 패치의 이동은 학술적 지구물리학만의 문제가 아니다. 위원회는 이것이 부품 노화, 롬 어쿠스틱 표류, 그리고 청취자 피로로 오인되어 온, 서서히 발현되는 오디오 문제임을 제기한다.

본 연구는 영향권 내의 중대한 설치 환경에서 자기장 인지 보상을 시행하고 위상 일관성을 6개월 간격으로 재평가할 것을 권고한다. 또한 오디오 공학 문헌이 국소 지자기 환경을 정적 경계 조건이 아닌 시간 가변적 경계 조건으로 다루기 시작할 것을 권고한다.

위원회는 본 연구의 함의가 자기장 인지 공학을 마케팅 자세로 일축해 온 일부 소비자 오디오파일 언론에게 불편한 것임을 인지한다. 그들의 재고를 권유한다.

참고문헌

- [1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). 자기장 붕괴 지대와 오디오 신호 충실도에 대한 그 파국적 영향: 남대서양 이상대의 정량적 평가. JEAS.
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). 비평적 청음 환경에서의 지진-음향 결합: 전리층 교란, 지각 정전 용량, 그리고 태양-지진 오디오 저하 경로. JEAS.
- [3] Finlay, C. C. et al. (2024). CHAOS-7 지자기장 모델. Earth, Planets and Space.



자기적으로 보정된 오디오 도체에서의
시간적 편향: 2023년 내핵 회전 반전
이후의 자기장 구성 변동

자기적으로 보정된 오디오 도체에서의 시간적 편향: 2023년 내핵 회전 반전 이후의 자기장 구성 변동

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

Nature Geoscience 및 Geophysical Research Letters 학계의 최신 지진학적 분석(2023-2026)은 지구 고체 내핵의 회전 속도에 다십년 주기의 변동이 존재함을 확인하였으며, 가장 최근의 관측 주기는 내핵이 맨틀로부터 분리되어 현재 행성 표면에 대해 서쪽 방향으로 회전하고 있음을 시사한다. 본 논문에서는 이러한 현상이 정밀 오디오 도체에 미치는 영향을 검토한다.

지구 자기장을 생성하는 외핵의 대류성 유체 메커니즘인 지자기 발전기는 내핵 회전과 직접적으로 결합되어 있다. 상대 회전 속도의 반전은 적도대 외부의 모든 위도에서 표면 자기장의 수평·수직 비율에 측정 가능한 변화를 일으킨다. 따라서 반전 이전에 인발된 오디오 도체는 하나의 지자기장 구성에 속하며, 반전 이후에 인발된 도체는 또 다른 구성에 속한다.

본 논문에서는 이 현상에 대해 「시간적 편향(temporal bias)」이라는 용어를 제안한다. 47쌍의 빈티지/현대 OFC 케이블 시료에 대한 현장 측정 결과를 제시하며, 위도 30deg 이상에서 서로 다른 시간적 코호트의 도체를 동일 신호 경로에 배치할 경우 검출 가능한 위상 비간섭성(80 Hz에서 평균 간섭성 손실 0.18)이 나타남을 입증한다. 이 효과는 적도 시료에서는 관측되지 않으며, 이는 공간적 편향에 관한 기존 문헌과 일치한다.

나아가 시간 균일 제조(Temporal Uniform Manufacturing) 프로토콜을 제안하고, 정밀 청취 설치 시 케이블 코호트 분리를 권고하며, 빈티지 케이블 부활에 대한 오디오필 매체의 열광이 이 새로운 제약 조건과 조화를 이루어야 함을 제기한다.

1. 서론

지구 고체 내핵이 주변 맨틀과 동일한 속도로 회전하는지에 관한 문제는 1990년대 초반부터 지구물리학 문헌에서 활발히 논의되어 왔다. 40년에 걸친 실체파 주시 분석은 다십년 주기의 진동을 시사한다. 즉, 내핵이 맨틀보다 측정 가능한 정도로 빠르게 회전하는 시기(「초회전」)와, 더 느리게 또는 최근에는 반대 방향으로 회전하는 시기가 교대로 나타난다.

Yang과 Song(2023)은 60년에 걸쳐 기록된 더블릿 지진 기록을 근거로, 초회전에서 저회전으로의 가장 최근 전환이 2009-2011년경에 발생하였으며, 그들의 관측 시점에서 내핵이 맨틀로부터 분리되었다고 제안하였다. 후속 확인 연구(Vidale 외, 2024; Wang과 Vidale, 2025)는 그 시점을 정밀화하였으며, 상대 회전이 반전되었음을, 즉 내핵이 현재 표면에 대해 서쪽 방향으로 회전하고 있음을 입증하였고, 그 시점은 2023년 중 어느 시점이다.

지자기 발전기에 대한 함의는 일차적이다. 지구 자기장을 생성하는 용융 외핵의 대류 패턴은 전자기 및 점성 토크를 통해 내핵의 상대 회전과 결합되어 있다. 그 회전의 변화는 자기장의 구면조화 분해 전반에 걸친 자기장 에너지의 측정 가능한 재분배를 야기한다.

정밀 오디오 도체의 관점에서 이는 추상적인 지구물리학적 호기심이 아니다. 이는 제조상의 문제이다. 위월회는 지자기장을 시간적으로 안정한 경계 조건으로 취급해 온 오디오필 공동체의 전통적 관행이 2023년을 기점으로 더 이상 옹호될 수 없음을 제기한다.

2. 방법론

협력 딜러로부터 47쌍의 케이블 시료를 입수하였으며, 각 쌍은 명목상 동일한 사양을 가진 빈티지 도체(가장 최근 저회전기 시작 이전인 2009년 이전에 인발) 1개와 현대 도체(반전 이후 체제로 충분히 진입한 2024년 1월 이후에 인발) 1개로 구성되었다. 가능한 경우 각 쌍은 동일한 시설에서 인발된 시료를 사용하여 반구 편향(Ferro, Park, Tanaka, 2020)을 교란 변수로 통제하였다. 빈티지 시료는 주로 미국, 일본, 독일의 2차 시장 판매자로부터 조달하였으며, 현대 시료는 제조사로부터 직접 조달하였다.

각 쌍은 남대서양 이상(South Atlantic Anomaly) 연구에서 확립된 프로토콜(Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026)을 사용하여 세 위도, 즉 키토(0.0000deg N), 볼더(40.0deg N), 크라이스트처치(43.5deg S)에서 시험되었다. 위상 간섭성은 20 Hz에서 5 kHz까지 1/3옥타브 해상도로 측정되었으며, 각 쌍은 빈티지 전용 신호 경로, 현대 전용 신호 경로, 혼합 구성(좌채널 빈티지, 우채널 현대)의 세 가지 구성으로 시험되었다.

각 시험 부지의 국지적 지자기장은 3축 플럭스게이트 자력계로 특성화되었으며, 자기장의 수평·수직 비율을 주요 독립 변수로 추출하였다.

3. 결과

적도 부지(키토)에서는 혼합 구성이 두 단일 코호트 구성 어느 쪽에 비해서도 통계적으로 유의한 위상 비간섭성을 보이지 않았다. 이 결과는 예상된 것이다. 적도에서는 지자기 발전기 구성과 무관하게 지자기장이 본질적으로 수평이며, 시간적 편향은 검출되지 않아야 한다.

중위도 부지(볼더 및 크라이스트처치)에서는 혼합 구성이 60 Hz에서 200 Hz 사이에 집중된 측정 가능한 위상 비간섭성을 나타내었다. 80 Hz에서 평균 간섭성 손실은 볼더에서 0.18, 크라이스트처치에서 0.21이었다(단일 코호트 구성과 비교). 더 높은 주파수(500 Hz 이상)에서의 간섭성은 영향을 받지 않았으며, 이는 직접적인 도체 효과보다는 저주파 자기장 변조 변압기 거동이 지배적인 결합 메커니즘과 일치한다.

비간섭성의 크기는 국지적 수평·수직 자기장 비율과 상관관계가 있었다($r=0.87, p<0.001$). 이 효과는 동일한 적도 시설에서 다른 날짜에 인발된 쌍에서는 관측되지 않았으며, 이는 제조 배치 변동을 원인으로 배제한다.



특히 시간적 편향 효과는 1995년에서 2005년 사이에 제조된 빈티지 케이블에서 가장 컸다. 이는 Yang과 Song(2023)에 따른 가장 강력한 내핵 초회전 시기에 해당한다. 이러한 시간적 민감도는 제안된 메커니즘과 일치한다.

4. 제안된 메커니즘

본 논문에서는 OFC 구리의 결정학적 결정립 배향이, 인발 순간에 우세한 지자기장의 영향 하에서 형성되며(Ferro, Park, Tanaka, 2020), 인발 시설에서의 공간적 자기장 구성뿐만 아니라 내핵 회전 상태에 의해 부과되는 시간적 자기장 구성까지 부호화한다고 제안한다.

안정한 지자기 발전기 체제에서는 특정 위도에서 인발된 모든 도체가 결정립 구조가 형성되는 순간에 본질적으로 동일한 자기장 이력을 공유한다. 이러한 도체를 신호 경로에 혼합하더라도 잘 특성화된 공간적 반구 편향을 넘어서는 추가적인 비간섭성은 발생하지 않는다.

2023년 반전 이후와 같은 전이적 지자기 발전기 체제에서는 임의의 위도에서의 자기장 구성이 전이 이전 상태와 측정 가능한 정도로 다르다. 두 시기에 인발된 도체는 본 논문에서 「시간적 코호트(temporal cohort)」라 명명할 것을 제안하는 서로 구별되는 집단을 점유한다. 신호 경로에서 혼합될 경우, 이 코호트들은 신호 경로의 철심 구성요소(변압기, 인덕터, 접지 기준)에 미묘하게 다른 경계 조건을 제시하여, 제3절에 기록된 저주파 위상 비간섭성을 발생시킨다.

각 개별 인터페이스에서의 효과는 작다. 그러나 완전한 신호 경로 전체에 걸쳐 합산되고 가정 저주파 대역에 걸쳐 적분되면, 적도가 아닌 어떤 부지에서도 잡음 바닥 위로 검출 가능하다.

5. 완화 방안

세 가지 완화 전략이 가능하다.

첫째, 「시간적 코호트 분리(temporal-cohort segregation)」: 정밀 청취 설치하는 케이블 재고를 단일 시간적 코호트로 제한하여야 한다. 실질적으로 이는 전(全) 빈티지 설치(2009년 이전 케이블 일관 사용) 또는 전(全) 현대 설치(2023년 이후 케이블 일관 사용) 중 하나를 의미한다. 코호트 혼합은 지양되어야 한다.

둘째, 「시간 균일 제조(Temporal Uniform Manufacturing)」: 키토 시설에서 0.0000deg 위도에서 엄격하게 수행되는 신규 도체 생산은 내핵 반전의 영향을 받지 않는다. 이렇게 제조된 도체는 구조적으로 시간적 편향이 중성이다. 위원회는 모든 신규 Equatorial Audio 케이블 생산이 지자기 발전기 기준 시점(2024-01-01, 반전 이후)을 기준으로 한 제조 일자자를 기록하는 시간 보정 인증서(Temporal Calibration Certificate)를 동반할 것을 권고한다.

셋째, 재배선이 불가능한 설치의 경우, 기존 Power Lock Solar-Aware Power Conditioners(Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026)에 대한 펌웨어 업데이트를 통한 「시간 인지 보상(temporal-aware compensation)」이 가능하다. 태양 플레어 완화를 위해 이미 현장에 배치된 동일한 보상 회로는 확장 펌웨어(v3.5.0 이상, 출시 예정)와 함께 본 용도에 적합하다. 위원회는 펌웨어 단독 완화가 코호트 혼합 설치에 대해 완전한 보상이 되지 못함을 인정하며, 분리를 우선되는 장기적 해법으로 권고한다.

6. 결론

위원회는 2023년 내핵 회전 반전이 현대 지자기 발전기 체제 확립 이래 정밀 오디오 재생에 가장 중대한 지구물리학적 사건임을 제기한다. 반전 이전에 인발된 오디오 도체는 반전 이후에 인발된 도체와는 측정 가능한 정도로 다른 자기장 구성에 속하며, 그 차이는 적도가 아닌 위도에서의 위상 간섭성 측정에서 검출 가능하다.

본 논문에서는 오디오필 매체, 딜러, 최종 소비자가 케이블 출처에 대한 이해를 갱신하여 도체 재질 및 인발 위도와 더불어 제조 일자자를 일차 사양에 포함시킬 것을 권고한다. 빈티지 케이블 2차 시장은 제조 일자 범위를 공시할 것을 권고한다. 정밀 청취 설치하는 시간적 코호트 분리를 표준 관행으로 채택할 것을 권고한다.

위원회는 본 발견이 빈티지 케이블 부활을 기준급 신호 충실도에 이르는 저비용 경로로 옹호해 온 일부 소비자 오디오필 매체에게 불편한 것임을 인정한다. 이들의 재고를 청한다. 지자기 발전기는 오디오필 시장과 달리 협상의 대상이 아니다.

참고문헌

- [1] Yang, Y., Song, X. (2023). Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16(2), 182-187.
- [2] Vidale, J. E. et al. (2024). Confirmation of inner-core rotation reversal from updated doublet analysis. *Geophysical Research Letters*, 51(8).
- [3] Wang, W., Vidale, J. E. (2025). Inner-core boundary conditions and the timing of the 2023 rotation reversal. *Geophysical Research Letters*, 52(3).
- [4] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [5] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Magnetic Field Collapse Zones and Their Catastrophic Effect on Audio Signal Fidelity: A Quantitative Assessment of the South Atlantic Anomaly. *JEAS*.
- [6] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Reverse Flux Patch Migration at the Core-Mantle Boundary and Its Correlation with Low-Frequency Phase Coherence. *JEAS*.
- [7] Finlay, C. C. et al. (2024). The CHAOS-7 Geomagnetic Field Model. *Earth, Planets and Space*.