



---

# 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  $\times$  0.1 mm 두께, 77 K 및 자기장에서 임계 전류 100 A. 테이프는 제한된 유연성을 허용하기 위해 스테인리스 스틸 포머에 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 플로어 1 nV 이하였다. 계산된 상한:  $R < 10$  Ohm. 모든 실용적 목적으로 저항은 0이다.

AC 임피던스: 1 kHz에서 임피던스는  $75.0 \pm 0.1$  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  $\pm 0.0003$  Ohm이었다.

노이즈 플로어: 저항의 Johnson-Nyquist 노이즈 전압은  $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \Delta f}$ 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 꽃고 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 기존 도체도 달성할 수 없는 것을 달성한다: 0의 DC 저항, 0의 열 노이즈, 마이스너 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).