



---

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 변화하였다. 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 마이크로폰이 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. 합의

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 변화였다. 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 상쇄," 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 인터커넥트: 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.