



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 시스에 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 측정 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 전자기 간섭에 대한 최종적 해결책으로 마케팅되어 왔다.

어떤 것도 그렇지 않다. 모든 기존 차폐 소재는 동일한 두 가지 메커니즘으로 동작한다: 흡수(와전류를 통해 전자기 에너지를 열로 변환)와 반사(임피던스 불일치를 통해 전자기 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.