



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, 전입자가 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 변조를 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 스윕되는 DC 바이어스에 중첩된 100 mV AC 여진으로 측정하였다. 결과 C-V 곡선은 히스테리시스----동일한 DC 전압에서 상향 스윕과 하향 스윕 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 경과를 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 갭 유전체(시료 D)가 예상대로 모든 PTFE 변형을 능가함을 주목한다----공기는 전하 기억이 0이다. 그러나 에어 갭 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.