



---

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 정상상 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)<sup>-1</sup>.

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 0.0001도 미만의 HBA로 태양 활동에 효과적으로 면역이다. 이 면역성은 차폐(외부 자기장 결합을 감소하지만 제거하지 못하는)가



아니라 방향성 결정립 구조의 근본적 부재를 통해 달성된다.

심한 폭풍 동안 0.08%의 임피던스 변동의 실용적 중요성은 논쟁의 여지가 있다. 신호 대비 -62 dB에서 정상 상태 톤에 대한 가청 임계값 이하이다. 그러나 변동은 정상 상태가 아니다----지자기 폭풍의 혼란스러운 시간 구조에 의해 변조되어 최대 폭풍 활동 동안 명확성이나 공간 정밀도의 미묘한 손실로 감지될 수 있는 노이즈 유사 오염을 생산한다.

케이블 제조업체가 지자기 교란 단위당 최대 임피던스 편차를 명시하는 태양 활동 지수(SAI) 등급을 채택할 것을 제안한다:  $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$ . 낮은 값은 더 큰 면역성을 나타낸다. Zero-Point 등급은  $SAI < 10$ 를 달성하며, 이를 "Solar Grade"로 지정한다.

## 5. 결론

지자기 폭풍은 반구 편향을 가진 오디오 케이블에서 측정 가능한 임피던스 변동을 생산한다. 효과는 편향 크기와 폭풍 강도에 비례한다. 자기적으로 중립적인 케이블( $HBA < 0.00001$ 도)은 면역이다. 오디오 케이블 성능 사양을 위한 표준화된 태양 활동 지수의 채택을 권고한다.

## 참고문헌

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "구리 결정립 배향에서의 반구 편향," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Geomagnetic Storm Scales," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Geomagnetically induced currents (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "기술 시스템에 대한 지자기 폭풍 효과," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "지자기 교란에 대한 실시간 적응형 오디오 보상," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.