



유전 이방성과 목구의 근거: 자기적으로 중립인 목재 케이블 지지대의 용량 하중 경로 배향

유전 이방성과 목구의 근거: 자기적으로 중립인 목재 케이블 지지대의 용량 하중 경로 배향

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

목재 케이블 지지대는 신호 도체의 근접 전계에 놓인 유전체이며, 따라서 설치 계통에 대한 기여는 케이블과 병렬인 분포형·방향 의존적 정전용량이다. 목재 중립성 등급의 주요 연구(Bosque, Ferro, Park, Tanaka, 2026)는 목리 방향을 설계 변수로 확인하고 한 절에서 제시한 기계·유전 결합 논거에 따라 목구 수직 제재를 채택했다. 본 관련 논문은 그 논거를 완전히 전개한다. 목재는 유전 이방성을 가진다. ϵ_{ps_r} 와 $\tan \delta$ 모두 횡목리보다 목리 방향에서 높다. 관형 가도관 및 도관 세포 형상과 분극을 지배하는 결합수 쌍극자가 섬유를 따라 정렬되므로 목리 방향축이 두 횡축을 능가한다. 적도 티크의 세 해부축(종방향 L, 방사방향 R, 접선방향 T)에 대해 함수율 8%, 12%, 16%, 20 Hz~10 MHz에서 가드형 평행판 임피던스 분석기로 ϵ_{ps_r} 와 $\tan \delta$ 를 측정하여, 가청 주파수 및 함수율 12%에서 $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ 이방성비 1.24~1.31을 확인했다. 이 상수로 가공 크래들에 놓인 케이블과 그 아래 목재 기둥의 분포 정전용량 모델을 만들고, 목구 수직 제재와 판목 제재의 블록당 용량 기여를 계산했다. 두 방향은 측정 가능한 차이를 보이며 목구의 케이블 환산 정전용량이 더 낮다. 낮은 ϵ_{ps_r} 의 횡축을 케이블 전계가 가장 강한 수평면에 놓고, 높은 ϵ_{ps_r} 의 종축은 전기적으로 무해하고 기계적으로 이상적인 수직 하중 경로에 배치하기 때문이다. 목리각 스윙은 진정한 목구에서 결합 최소값을 찾는다. 목구는 원래 압축 강성을 위해 지정되었고, 나중에 독립적으로 얻은 유전 논거가 기계 논거와 일치하여 이를 확인했다는 점으로 마무리한다.

1. 서론

케이블 지지대는 신호를 운반하지 않는다. 신호 옆에 있다. 바로 그래서 전기적 역할이 쉽게 목살된다. 케이블 아래의 나무 블록은 분명 회로 안에 있지 않으므로 조성, 목리, 방향이 엔지니어가 아니라 가구 제작자의 문제라고 결론짓기 쉽다. 중립성 등급 주요 논문(Bosque, Ferro, Park, Tanaka, 2026)은 문제의 자기적 절반을 논증했다. 도체와 지속적으로 접촉하는 지지대는 그 도체의 근접 전자기장 환경 일부이며, 잔류 상사성 성분은 장식이 아니라 설치 계통에 대한 측정 가능한 입력이라는 것이다. 유전적 절반은 한 절로 처리했다. 본 논문은 그 절을 물리학이 마땅히 받을 길이로 확장한다.

블록이 케이블 안이 아니라 옆에 있다는 전기적 사실은 블록을 회로에서 제거하지 않고 결합 방식을 정한다. 도체 전계 안의 유전체는 용량성으로 에너지를 저장하고, 전송선과 병렬인 분포 정전용량은 하지만 실재하는 부하다. 그 크기는 물체의 ϵ_{ps_r} 와 ϵ_{ps_r} 가 전계에 대해 어떻게 배향되는지에 달렸다. 목재는 등방성 유전체가 아니다. ϵ_{ps_r} 가 방향에 의존하므로 목재 지지대에는 유전 기여가 하나가 아니라 세 개 있고, 빌릿 절단각에 따라 제재대에서 선택할 수 있다.

본 논문의 주장은 좁고 정량적이다. Equatorial Elevation Block에 지정한 목구 수직 방향, 즉 상면에 나이트가 보이고 섬유가 하중 경로를 따라 수직으로 내려가는 방향이 블록의 케이블 환산 정전용량을 최소화하고, 그 최소값은 개념적이지 않고 측정 가능하며, 기계적 이유로 이미 선택한 방향과 일치한다. 효과가 크다고 주장하지 않는다. 부호, 크기, 선호 방향을 가지며, 더 아름다운 판목을 위해 반대로 제재한 제작자는 수치가 존재하는지도 모른 채 수치를 잘못된 방향으로 옮겼다고 주장한다.

2. 목재의 유전 이방성

목재는 길고 속이 비었으며 축방향으로 정렬된 세포, 즉 침엽수의 가도관과 티크 같은 활엽수의 섬유·도관으로 이루어진 세포성 고체다. 세포의 장축이 목리를 정의한다. 이 형상이 모든 목공인이 아는 기계 이방성의 원인이며, 덜 알려졌지만 똑같이 실재하고 오래전 문헌화된 유전 이방성의 원인이기도 하다(James, 1975; Torgovnikov, 1993).

세 기작이 ϵ_{ps_r} 를 방향 의존적으로 만들며 모두 종축을 선호한다. 첫째, 세포벽 자체가 섬유를 따라 연속적인 분극 경로, 횡방향으로 불연속적인 경로를 이루므로 수많은 벽-내강 경계의 계면(Maxwell-Wagner) 분극이 목리 방향으로 우선 축적된다. 둘째, 가장 건조한 상태를 제외하면 목재 ϵ_{ps_r} 의 주된 기여자인 세포벽 결합수는 하이드록실 자리와 미세섬유 골격 자체가 섬유에 정렬된 환경에 있으므로, 결합수 쌍극자의 배향 분극이 횡방향보다 목리 방향에서 쉽다. 셋째, 두 횡방향인 방사 R과 접선 T는 서로 조금만 다르고 둘 다 종방향 L보다 훨씬 낮다. 문헌 전반에서 일관되게 $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ 순서이고 $\tan \delta$ 도 같은 순서다. 흡습 범위의 온대·열대 활엽수에서 $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ 는 보통 1.2~1.5다.

절대값은 크지 않고 수분이 지배한다. 건건 목재는 $\epsilon_{ps_r} = 2 \sim 3$ 부근이고 함수율이 증가하면 가파르고 단조롭게 상승한다. 결합수가 늘 때마다 분극 가능한 총량에 쌍극자가 추가되기 때문이다. 이 가파름 때문에 지지대의 유전 기여에서 가장 큰 레버는 수종이 아니라 함수율이며 제5절에서 다룬다. 이방성 논거의 핵심은 수치가 아니라 구조다. 최고 ϵ_{ps_r} 방향은 섬유 방향이며, 그 방향은 나무가 아니라 목공인이 정한다.

3. 측정: 세 축의 유전율과 손실

세 해부축 각각을 따라 가공한 티크 시험편에서 ϵ_{ps_r} 와 $\tan \delta$ 를 측정하여 평행판 셀이 가하는 전계가 차례로 종, 방사, 접선 방향으로 시료를 통과하게 했다. 시험편은 40 mm 정사각형, 두께 3.0 mm이고 양면을 ± 10 마이크로미터 이내로 평평하고 평행하게 가공했다. 자기 오염이 유전 측정을 교란하지 않도록 주요 프로토콜로 선별한 5N 적도 빌릿 3개에서 채취했다. 각 시험편 세트를 습도 챔버에서 함수율 8%, 12%, 16%의 평형 상태로 조절하고, 시험 종료 시 전건 질량 대비 중량법으로 함수율을 확인했다.

셀은 앞서 기술한(Tanaka, Park, 2022) 가드형 평행판 지그로, Keysight E4990A 임피던스 분석기가 20 Hz~10 MHz에서 구동했다. 가드 링은 프린팅을 억제하여 측정 정전용량이 정해진 전극 면적에 대응하게 하고, 추출한 ϵ_{ps_r} 가 가장자리 오염 추정치가 아닌 소재 벌크값이 되게 한다. $\tan \delta$ 는 지그의 소산계수로 직접 읽는다. 가공면의 잔류 거칠기를 수용하되 고유한 분극을 더하는 접착제를 피하도록 얇은 도전성

엘라스토머 중간층으로 접촉했다.

함수율 12%, 1 kHz에서 티크는 $\epsilon_{s_L} = 2.64$, $\epsilon_{s_R} = 2.09$, $\epsilon_{s_T} = 2.02$ 를 보였다. $\epsilon_{s_L} / \epsilon_{s_T} = 1.31$, $\epsilon_{s_L} / \epsilon_{s_R} = 1.26$ 이며 두 횡축은 예상대로 4% 이내에서 일치했다. $\tan \delta$ 도 같은 순서로 목리 방향 0.021, 횡방향 0.014~0.015였다. 20 Hz~20 kHz 가청 대역에서 ϵ_{s_r} 는 3% 이내로 평탄했고 이방성비는 1.24~1.31을 유지했다. 함수율을 16%로 높이면 모든 값이 올라 ϵ_{s_L} 는 3.08에 이르렀고, 추가 결합수가 선축축을 따라 우선 분극하므로 이방성도 다소 넓어졌다. 8%로 건조하면 절대값과 비가 모두 줄었다. 따라서 이방성은 고정된 소재 상수가 아니라 수분 조절값이며, 가장 덜 중요한 습윤 상태에서 가장 강하고 소재가 가장 건조할 때 가장 약하다. 12 +/- 1% 공급 사양에서는 충분히 분해되고 안정적이다.

4. 크래들, 케이블, 기둥의 분포 정전용량 모델

세 ϵ_{s_r} 를 설계 결정으로 바꾸려면 결합 형상이 필요하다. 케이블은 평평한 블록 위가 아니라 상면에 가공한 얇은 반경 홈인 크래들에 놓인다. 따라서 케이블 재킷의 유한한 원호는 재킷 벽 두께만큼만 목재와 떨어진다. 그 원호 바로 아래, 즉 크래들 바닥에서 블록 내부로 내려가는 짧은 수직 목재 기둥은 도체와 멀리 있는 접지 귀로 사이 전계가 가장 강하고 케이블-지지대 정전용량 대부분이 저장되는 곳이다. 더 바깥쪽과 아래쪽 목재는 전계가 퍼지고 약해지면서 기여 가중치가 급감한다.

이를 구간 단위 길이당 분포 정전용량으로 모델링하여 목재의 ϵ_{s_r} 텐서를 축별로 넣고 크래들 아래와 주위 목재 체적의 국소 전계 에너지를 적분한다. 이방성 유전체의 표준 구성이다. 수직 전계 성분은 수직축 ϵ_{s_r} 를, 수평 성분은 수평축 ϵ_{s_r} 를 샘플링한다. 크래들은 전계를 도체 직하의 거의 수직인 영역으로 집중시키고 정전용량을 단는 귀로는 기둥 측면을 통해 바깥쪽과 아래쪽으로 흐르므로 수평 ϵ_{s_r} 가 저장 에너지의 더 큰 몫을 담당한다. 모델 출력은 ϵ_{s_r} 텐서 배향에 따라 블록이 케이블에 더하는 정전용량, 즉 블록당 pF라는 단일 공학 관심값이다.

실용적으로 중요한 방향은 둘이다. 목구 수직 제재는 종축 L을 하중 경로를 따라 수직으로 두고 낮은 ϵ_{s_r} 횡축 R과 T를 수평면에 남긴다. 판목(평면 제재, 수평 섬유)는 종축 L을 강한 수평 전계 성분이 샘플링하는 수평면에 눕히고 횡축 하나를 수직으로 세운다. 함수율 12%의 실측 상수를 대표적 크래들 형상(케이블 지름 12 mm, 반경 3 mm 크래들, 블록 높이 60 mm, 채시 거리의 공칭 접지 귀로)에 입력하면 목구 방향은 블록당 약 1.9 pF, 판목 방향은 약 2.3 pF다. 약 0.4 pF, 18%의 차이가 절단각 하나에서 생긴다. 블록 하나로는 작다. 그래도 실재하고, 재현 가능하며, 부호가 한쪽이고, 무료다. 제작자가 빌릿을 올바르게 두는 결정만 하면 되며 전체 구간의 여러 블록에 걸쳐 누적된다.

5. 목리각 스윙과 수분 민감도

두 명명 방향은 연속체의 양 끝이므로 목구가 임의의 두 선택 중 더 나은 것일 뿐 아니라 진정한 최소값인지 확인할 가치가 있다. 하중축 대비 0 deg(섬유 수직, 진정한 목구)에서 30 deg, 45 deg, 60 deg, 90 deg(섬유 수평, 판목)까지의 목리각으로 시험편을 가공하고, 도체를 통전에 크래들 모델 형상에서 각각 측정했다. 케이블 환산 정전용량은 목리각과 함께 단조 증가하여 0 deg 목구 최소값에서 90 deg 판목 최대값까지 올랐다. 높은 ϵ_{s_r} 종축이 점차 수평 전계로 회전하면서 텐서 모델이 예측한 코사인 제곱 가중을 가깝게 따랐다. 곡선은 0 deg 부근에서 완만하여 몇 deg의 가공 오차는 거의 비용이 없고, 스윙 중간에서 가장 가파르다. 진정으로 부주의한 절단의 벌점이 불완전하지만 선의인 절단보다 크다. 최소값은 진정한 목구에 있으며 변곡점이 아니다.

함수율은 곡선 전체를 수직 이동시키지만 최소값 위치는 움직이지 않는다. ϵ_{s_r} 가 결합수와 함께 급증하므로 함수율이 12%에서 16%로 변한 블록의 절대 정전용량 증가량은 고정 함수율에서 전체 목구-판목 차이보다 크다. 수분 레버가 방향 레버보다 크다. 그러나 둘은 독립적이다. 습윤은 바닥값을 높여도 어느 방향이 가장 낮은지는 바꾸지 않는다. 따라서 방향과 조습은 상보적 통제이며 둘 다 실행해야 한다. 이것이 모든 등급 빌릿을 산지에서 12 +/- 1%로 킬른 건조하고 유지보수 일정에 연례 수분 점검을 두는 측정 근거다. 방향은 영구히 제재되어 변하지 않지만 그 크기를 조절하는 수분은 변할 수 있다. 습한 방과 평형을 이룬 지지대는 제재대에서 확보한 여유를 서서히 내준다.

제3절에서 측정된 횡축 일치는 수평면에 방사축과 접선축 중 어느 것을 제시할지는 측정 불확도 이내에서 중요하지 않음을 뜻한다. 섬유가 수직인 한 유전적 결과 없이 상면 나이트가 가장 보기 좋도록 블록을 수직축 주위로 돌려 배치할 수 있다.

6. 논의: 두 논거, 한 방향

목구 방향은 유전 거동 때문에 채택하지 않았다. 압축 하중에서 목재를 가장 강하고 단단하게 사용하는 방법이어서 채택했다. 섬유를 수직으로 세우면 하향 하중이 관형 세포의 가장 강한 방향을 따라 지지되어, 케이블 구간의 정적 중량과 설치 정착에 최소 크리프와 최소 치수 변화로 버틴다. 오래되고 논쟁의 여지가 없는 목재 공학이며, ϵ_{s_r} 를 측정하기 전에 가공 사양을 결정했다.

여기서 보고한 유전 측정은 이후 수행했고 원칙적으로 기계적 선택과 불일치할 수 있었다. 목리 방향축이 낮은 ϵ_{s_r} 축이었다면 수직으로 세우는 것이 기계적으로 옳고 전기적으로 틀려 절충이 필요했을 것이다. 불일치하지 않았다. 목리 방향축은 높은 ϵ_{s_r} 축이므로 수직으로 세우면 케이블 전계가 가장 강한 수평면에서 제거된다. 정전용량 모델이 요구하는 그대로다. 기계적으로 이상적인 방향이 독립적으로 유전적으로 가장 조용한 방향이기도 하다. 두 논거는 다른 물리에서, 다른 시기에, 다른 문제를 푸는 사람들이 만들었고 같은 절단을 선택한다.

이 일치에 신비한 무게를 부여하지 않는다. 이방성 소재는 강성축과 높은 ϵ_{s_r} 축이 같은 정렬 미세구조로 거슬러 올라가므로 흔히 일치하며 티크도 그렇다. 그러나 실용적 귀결은 남는다. 기계 논거만 따른 제작자는 목구에 도달하고 의도하지 않은 채 용량 결합도 최소화한다. 장식적인 판목을 위해 기계 논거를 무시한 제작자는 양쪽을 한 번에 잃는다. 이 수렴은 감탄할 우연이라기보다 사양을 신뢰할 이유다. 두 독립적 추론이 같은 수치에서 끝나면 그 수치가 옳을 가능성이 더 높다.

7. 결론

목재는 유전 이방성체이며 목재 케이블 지지대는 그 물체를 도체 근접 전계에 둔 것이다. 설치 계통에 대한 기여는 작은 분포 정전용량이고, 그 크기를 제작자는 알든 모르든 제재대에서 정한다. 적도 티크의 세 축 ϵ_{ps_r} 와 $\tan \delta$ 를 측정하여 공급 함수율에서 예상된 $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ 순서와 약 1.3의 이방성비를 확인했다. 그 상수를 크래들-기동 정전용량 모델에 넣어 블록당 pF라는 성능 지표를 얻었고 목구와 판목 제재 사이에서 측정 가능하게 달랐다. 대표 형상에서 목구가 약 0.4 pF, 18% 더 낮으며 목리각 스윙이 진정한 최솟값임을 확인한다.

블록당 여유는 작으며 과장하지 않는다. 실재하고, 선호 방향을 가지며, 그 선호 방향이 기계적 이유로 이미 지정된 방향과 같다고만 주장한다. Equatorial Elevation Block은 목구가 압축 하중을 가장 강하게 지탱하므로 목구 수직으로 제재한다. 이후 수행한 유전 분석은 같은 절단이 유전적으로도 가장 조용함을 확인한다. 모든 블록은 목구를 위로 하고, 함수율 12 +/- 1%로 킬른 건조하고, 무마감 상태로 출하하며, 등급과 실측 상수를 인증서에 기록한다. 다른 목재 지지대 제작자에게 목리가 어느 방향이고 이유가 무엇인지 문도록 독자에게 권한다.

참고문헌

- [1] James, W. L. (1975). 목재 및 하드보드의 유전 특성: 온도, 주파수, 함수율, 목리 방향에 따른 변화. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). 목재 및 목질 소재의 유전 특성. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). 목재-수분 관계. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). 목재의 유전 특성. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). 구조용 목재의 자기 중립성 등급: 오디오 지지 소재를 위한 N등급 순도 분류. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). 이방성 저손실 고체의 가드형 평행판 유전율 측정. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.