



마감 문제: 금속계 건조 촉진제에 의한 중립성 등급 목재의 표면 환산 상자성 재오염

마감 문제: 금속계 건조 촉진제에 의한 중립성 등급 목재의 표면 환산 상자성 재오염

A. Bosque, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

관련 연구는 잔류 상자성 성분에 근거하고 반자성 기준선 대비 Fe + Mn 합산 질량 비율로 보고하는 구조용 목재 중립성 등급을 확립했다. 그 등급은 원재 빌릿의 속성이다. 본 논문은 빌릿을 마감하면 무엇이 일어나는지 다룬다. 목재에 쓰는 거의 모든 오일, 바니시, 래커는 산화 경화형 도막이다. 증발이 아니라 건성유의 금속 촉매 자동산화 가교로 경화하며, 촉매는 습윤 도막에 1% 미만의 비율로 카복실산염 형태로 침전되는 상자성 전이금속, 대개 Co 또는 Mn이다. 도막은 외부 표면에 있으므로 촉매가 지지대와 케이블이 접촉하는 바로 그곳에 침전된다. 무마감 대조군, 건조 촉진제 없는 순수 동유, Co 옥토에이트 함유 보일드 아마인유, Co + Mn + Zr 함유 알키드 스파 바니시, 수성 아크릴, 하드웍스 오일이라는 여섯 마감 처리 전후의 5N 티크 시험편에 대해 진동 시료 및 SQUID 자력측정으로 표면 환산 체적 자화율을 측정하고, 글로 방전 깊이 프로파일링으로 금속 위치를 확인했다. 산화 경화 마감은 상부 50마이크로미터의 자화율을 $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ 부근의 반자성 기준선에서 순 양의 값으로 높여 촉매 처리한 모든 시험편을 5N에서 4N 미만으로 재분류했다. 모든 경우 금속은 상부 50~100마이크로미터에 국한됐다. 최근의 무Co 건조 촉진제 추세(Mn, Fe, V 대체)는 독성 문제는 제거하지만 대체물이 스스로 상자성이므로 자기 문제는 제거하지 않는다. 중립성 등급을 보존하는 유일한 마감은 무마감이며, 금속을 더하지 않는 목재 탄소 골격의 산화인 원소성 표면 파티나만이 등급과 양립하는 외관 노화 경로라고 결론짓는다.

1. 서론

중립성 등급 빌릿은 측정으로 등급을 획득한다. 강자성 개재물 스캔, 벌크 자화율 측정, 미량 금속 분석이 목재의 Fe + Mn이 규정 ppm 이하이며 순 체적 자화율이 반자성으로 유지된다는 데 일치한다. 적도 플랜테이션 티크는 공급 상태에서 5N(Fe + Mn < 10 ppm), 단일 빌릿 선별에서 6N에 도달한다. 등급은 실재하며 개체별로 인증되고, 제재소를 떠나는 순간의 목재에만 속하는 속성이다.

주요 연구(Bosque, Ferro, Park, Tanaka, 2026)는 마지막 한 절에서 목재 마감이 등급을 파괴한다고 언급하고, 보일드 아마인유 시험편의 처리 전후 측정 하나로 그 점을 보였다. 이 관찰에는 한 단락 이상의 설명이 필요하다. 마감은 모든 목공인이 보호로 이해하므로, 보호 도막이 지지 소재에 자기적으로 가장 파괴적인 행위라는 생각은 한 세기 동안의 공방 관행에 어긋난다. 고급 목제품에 대한 고객의 모든 기대를 거슬러 지지대를 무마감으로 공급한다는 제품 결정을 이 주장이 떠받치려면, 여러 마감 화학에 걸쳐 정량적으로 확립하고 오염 금속의 깊이 위치도 확인해야 한다.

그것이 본 논문의 목적이다. 마감을 표면 미학이 아니라 의도적으로 침전시킨 얇은 촉매 금속층으로 취급하고, 정확히 얼마나 많은 상자성 질량을 어디에 놓는지 묻는다. 답은 일반적인 마감에 불리하고, 고급 목공을 지배하는 전체 산화 경화 오일·바니시 부류에는 치명적이다. 이유는 목재와 관계없고 도막을 굳히는 화학과 전적으로 관계있다.

2. 건조 촉진제 화학과 금속 첨가량

아마인유, 동유 및 그 알키드 유도체인 건성유는 자동산화로 경화한다. 대기 산소가 불포화 지방산 사슬의 비스-알릴 위치에서 수소를 빼앗아 하이드로퍼옥사이드를 만들고, 이것이 라디칼로 분해되어 오일을 고체 도막으로 가교한다. 스스로 두면 반응은 느려 수주가 걸린다. 시커티브라고도 하는 건조 촉진제가 이를 가속한다. 두 산화 상태 사이의 산화환원 순환을 통해 과산화물 생성과 분해 단계를 모두 촉진하는 전이금속 카복실산염이다. 전통적인 주 건조 촉진제는 Co로 Co(II)와 Co(III) 사이를 순환한다. Mn(Mn(II)/Mn(III))도 유사하게 작용한다. 이들은 내부 및 표면 건조 금속이다. Zr, 칼슘, 아연은 2차 또는 보조 건조 촉진제로 첨가된다. 산화환원 단계를 촉진하지 않고 도막에 배위하여 내부 경화를 개선하며 순수 Co가 일으키는 표면 피막 형성을 방지한다.

금속은 장재 유기산의 염으로 공급된다. 역사적으로 나프텐산염, 현재는 더 흔히 2-에틸헥산산염(옥토에이트)을 쓴다. 산화환원 화학 이외의 금속 이온 특성이 아니라 오일 용해성을 위해 선택한다. 염은 금속 함량으로 판매한다. '6% Co' 나프텐산염은 액상 건조 촉진제 질량의 6%가 Co라는 뜻이다. 완성 도료에서 주 건조 촉진 금속은 일반적으로 오일 고형분 대비 0.02~0.1% 투입한다. 효력이 강한 Co는 범위 하단, Mn은 다소 높은 쪽이다.

이 비율은 무시할 만해 보이고 마감 단위 질량당으로는 그렇다. 문제는 농도가 아니라 면밀도다. 오일 마감을 한 번 붓칠하면 제곱미터당 대략 20~40 g의 고형분을 침전시킨다. Co 0.05%이면 표면 제곱미터당 Co 10~20 mg이다. Fe + Mn 10 ppm인 5N 티크 빌릿은 밀도 650 kg/m³, 대표 크기 200 x 60 x 45 mm 블록 전체에 등급 대상 오염 금속을 약 35마이크로그램 함유한다. 상면의 마감만으로 수백 마이크로그램의 상자성 금속을 침전시킨다. 전체 빌릿에 허용된 오염물보다 한 자릿수 많고, 케이블이 닿는 표면의 마이크로미터 두께 층에 놓인다. 등급은 상자성 ppm을 통제하도록 정의했다. 마감은 몇%가 아니라 배수로 이를 무너뜨린다.

3. 실험: 마감 전후 표면 환산 자화율

단일 5N 적도 티크 빌릿에서 시험편 36개(60 x 60 x 8 mm)를 준비하고 ICP-MS로 Fe + Mn 7 ppm을 확인했다. 모든 시험편이 하나의 기재를 공유하므로 마감 후 차이는 도막에만 귀속된다. 6개씩 여섯 처리에 배정했다. (A) 원재 무마감 대조군, (B) 건조 촉진제 없는 순수 동유, 21일 경화, (C) Co 옥토에이트 함유 보일드 아마인유(0.05% Co), (D) Co + Mn + Zr 패키징 함유 알키드 스파 바니시(0.04% Co, 0.06% Mn, 0.20% Zr), (E) 수성 아크릴 분산액(산화 건조 촉진제 없음), (F) 시판 하드웍스 오일(아마인유와 카나우바, Co 촉매)이다. 모든 피막 형성 처리는 총당 30 g/m²로 통제해 두 층 적용하고 취급 경도까지 경화했다.

오염은 표면층이고 시험편은 벌크 물체이므로 전체 시료 자화율 측정은 신호를 8 mm의 반자성 목재 전체로 희석해 과소평가한다. 따라서 표면 환산 자화율을 두 방식으로 보고한다. 첫째, 진동 시료 자력계(Lake Shore 8600, 300 K)로 전체 시험편의 순 체적 자화율을 측정하여 적분 변화를 포착한다. 둘째, 마감면에서 면과 평행하게 마이크로톰으로 절취한 200마이크로미터 절편을 재장착하고, 얇은 절편에 필요한 감도의 SQUID 자력계(Quantum Design MPMS3)로 표면층 수치를 측정한다. 중요한 것은 표면 환산 값이다. 케이블이 실제로 접촉하는 목재이기 때문이다.

결과는 명백하다. 원재 대조군(A)은 반자성 기준선을 유지하여 전체 시험편 $\chi_v = -5.9 \times 10^{-6}$, 표면 절편 -6.1×10^{-6} 이었다. 무건조 촉진 처리(B, 순수 동유; E, 아크릴)는 두 척도 모두 대조군과 통계적으로 구별되지 않았다. $\epsilon_{ps,r}$ 는 별개로, 상자성 금속을 더하지 않고 등급을 움직이지 않는다. 촉매형 산화 경화 마감 세 가지(C, D, F)는 모두 표면 절편을 순 양으로 만들었다. 보일드 아마인유 $+2.3 \times 10^{-6}$, 하드왁스 오일 $+1.9 \times 10^{-6}$, Co + Mn + Zr 스파 바니시는 가장 높은 $+4.8 \times 10^{-6}$ 이었다. 케이블 접촉 표면층에서 촉매 처리한 모든 시험편이 반자성에서 상자성으로 넘어가 5N에서 4N 미만으로 재분류됐다. 전체 시험편 VSM 값도 같은 방향으로 움직였지만 벌크 희석으로 약화됐다. 완성 지지대의 벌크 측정이 마감을 돋보이게 하고 표면 환산 측정이 유죄로 판단하는 이유가 바로 이것이다.

4. 깊이 프로파일링: 금속의 위치

자화율 변화는 금속이 존재한다고 말하지만 위치는 말하지 않는다. 지지 소재에서 깊이 분포는 부수적이지 않다. 케이블과의 결합은 거리에 따라 급격히 감소하며, 2 mm 아래 묻힌 오염물은 첫 수 마이크로미터 안의 같은 질량보다 전자기적 관련성이 훨씬 작다. 고주파 글로 방전 발광 분광법(GD-OES, Horiba GD-Profilier 2)으로 마감 시험편을 프로파일링했다. 표면을 초당 약 2~3마이크로미터 스터핑하면서 Co, Mn, Zr, Fe 발광을 추적한다. 선택한 시험편은 레이저 절제 ICP-MS 깊이 절편으로 교차 확인했다.

모든 산화 경화 시험편에서 촉매 금속은 도막과 바로 아래 목재에 국한됐다. Co와 Mn 발광은 표면에서 정점에 이르러 30~70마이크로미터의 도막 두께 전체에서 유지되고, 프로파일은 침투되지 않은 목재에 진입하는 다음 20~40마이크로미터에서 한 자릿수 이상 감소했다. 최악의 경우인 저점도 보일드 아마인유는 표면 기공으로 스며들어 약 100마이크로미터에서 기재의 7 ppm 배경에 도달했고, 점도가 높은 바니시는 60마이크로미터에서 도달했다. 적분 결과 침전 상자성 금속의 90% 이상이 상부 100마이크로미터 이내, 대다수가 상부 50마이크로미터 이내에 있었다. Zr는 깊이상 Co와 Mn을 따르지 않지만 이 배위에서는 실질적으로 상자성을 나타내지 않아 프로파일에는 기여해도 자화율에는 기여하지 않는다. 자기 신호가 총금속이 아니라 Co와 Mn을 따른다는 유용한 내부 확인이다.

이는 케이블 지지대에 기하학적으로 최악의 분포다. 중립성 등급은 도체와 접촉하는 목재가 반자성이라는 전제에 세워졌다. 마감은 접촉 계면을 이루는 정확히 50~100마이크로미터의 표피에 상자성 금속을 채워 그 전체를 뒤집고, 블록 깊은 곳의 전자기적으로 무관한 중심은 언제나처럼 깨끗하게 둔다. 마감 지지대는 자기적으로 중립 빌릿을 감싼 얇은 상자성 판을 금속면 바깥쪽으로 하여 케이블에 제시하는 물체다.

5. 무CO 건조 촉진제 추세는 도움이 되지 않는다

Co 옥토에이트는 규제 압력을 받고 있다. 2-에틸헥산산 Co 염은 발암 의심 물질 및 생식 독성 물질로 통일 분류되며, 코팅 업계는 지난 10년간 무Co 건조 촉진제에 크게 투자했다. 대체재는 세 계열이다. Mn 활성을 Co 수준으로 높이는 비피리딘 또는 아미노메틸 리간드를 흔히 사용하는 Mn 착물, 특수 질소 공여 리간드를 가진 Fe로 고성능 직접 대체형 주 건조 촉진제로 판매되는 Fe 착물, V계다. 모두 더 안전하다고 홍보되며, 동일 건조 속도로 독성 촉매를 무해한 것으로 바꾼다는 본래 목적에서는 실제로 성공하는 것도 있다.

우리 목적에는 아무것도 성공하지 못한다. Mn, Fe, V는 모두 상자성이고, Fe와 Mn은 중립성 등급이 명시적으로 배제하도록 정의한 두 원소다. Co 옥토에이트를 Fe 또는 Mn 건조 촉진제로 바꿔도 표면 도막에서 상자성 금속을 제거하지 않는다. 한 상자성 금속을 다른 것으로 바꾸며, Fe의 경우 등급 척도에서 가장 큰 벌점을 받는 오염물로 바꾼다. 제조사 권장 투입량의 시판 Fe-비피리딘 건조 촉진제로 별도 티크 시험편을 마감하여 표면 절편에서 $+3.1 \times 10^{-6}$ 을 측정했다. Co 보일드 아마인유 결과와 비슷하며, 금속이 Co가 아니라 Fe이고 등급의 주축이 Fe 함량이므로 더 나쁘다고 할 수 있다. Mn 네오데카노에이트 건조 촉진제는 $+2.6 \times 10^{-6}$ 이었다.

교훈은 무Co 추세가 자기 목표와 직교하는 독성 목표를 최적화한다는 것이다. 현재나 예측 가능한 미래에 산화환원 활성 전이금속 없이 건성유를 경화하는 산화 경화형 건조 촉진 화학은 없다. 건조 촉진제로 쓸 만큼 저렴하고 풍부한 산화환원 활성 전이금속은 모두 상자성이다. 마감 업계는 이 문제를 해결하지 않을 것이다. 업계 관점에서는 해결할 문제가 없기 때문이다. 자기적으로 중립인 건조 촉진제는 시장을 찾는 해결책이며, 현재 그 시장은 전적으로 우리로 구성된다.

6. 논의: 남는 선택지

산화 경화 마감을 자기적 이유로 제외하면 형식상 금속 없는 도막 세 종류가 남는다. 건조 촉진제 없는 건성유, 물리 건조 및 유착형 수성 도막, 진정한 증발 건조 래커다. 무건조 촉진 동유(처리 B)와 아크릴 분산액(처리 E)은 상자성 금속을 더하지 않고 등급을 유지함을 확인했다. 그러나 이 특정 물체에는 나쁜 마감이다. 케이블을 받치기 전에 완전히 경화해야 하는 지지대의 무건조 촉진 오일은 굳는 데 수주가 걸리고, 케이블 클립과 일상 취급에서 표면 금속을 붙잡을 만큼 영구히 부드럽다. 지지대를 등급이 배제하는 오염의 수동 수집기로 바꾼다. 수성 아크릴은 목재를 밀봉하지만 표면 $\epsilon_{ps,r}$ 와 $\tan \delta$ 를 노출 티크보다 크게 높여, 등급이 금지하는 자기 문제를 관련 연구가 마찬가지로 벌점 처리하는 유전 문제와 맞바꾼다.

다시 말해 모든 마감은 상자성 금속을 더하거나(전통 부류 전체인 산화 경화 오일과 바니시), 유전 표면을 약화시키거나(수성 도막), 사용 중 재오염을 견딜 만큼 경화하지 못한다(무건조 촉진 오일). 어떤 것도 등급 표면을 개선하지 않으며, 각각은 목재가 등급에 필요한 모든 시험을 통과한 후 더하는 단계다. 마감은 원재 빌릿의 등급에서 뺄 수만 있고 더할 수 없다. 등급 대상량은 무언가의 부재이고, 마감은 정의상 추가이기 때문이다.

이로써 무마감 지지대는 비용 절감이나 미적 금속이 아니라 측정에 부합하는 유일한 선택이 된다. 빌릿을 선별하고, 스캔하고, 코어를 채취하고, 분해하고, 분석하여 상자성 ppm으로 인증한 뒤 작동면에 Co 촉매 오일을 바르는 것은 전체 과정을 소비하고 마지막 단계, 가장 전자기적으로

활발한 위치에서 외관용 필름 하나를 위해 모두 무효화하는 일이다.

7. 결론

목재 마감은 자기적 재오염을 표면에서 일으킨다. 전통 마감을 경화하는 화학이 금속 촉매 자동산화이고 촉매가 도막에 침전된 상자성 전이금속이기 때문이다. 효과를 직접 측정했다. 단일 5N 티크 기재에서 Co 보일드 아마인유, Co + Mn + Zr 스파 바니시, Co 하드왁스 오일이라는 모든 산화 경화 마감이 표면 환산 체적 자화율을 -6×10^{-6} 부근의 반자성 기준선에서 최고 $+4.8 \times 10^{-6}$ 의 순 양 값으로 밀어 등급 표면을 5N에서 4N 미만으로 재분류했다. 침전된 상자성 금속의 90% 이상은 케이블과 직접 접촉하는 상부 100마이크로미터에 국한됐다. 무건조 촉진 오일과 수성 도막은 금속을 더하지 않지만 다른 이유로 물체에 부적합하다. 무Co 건조 촉진제 추세는 Fe, Mn, V로 대체하므로 독성 물질 하나를 제거해도 상자성 오염은 단 한 단위도 제거하지 않는다.

결론은 좁고 단호하다. 목재 중립성 등급을 보존하는 유일한 마감은 무마감이다. 무마감 표면은 세월에 따라 산화하고 회색이 되지만, 그 파티나는 목재 탄소 골격의 원소 산화로 금속을 더하지 않는다. 외관 변화이며 자기적으로는 무사건이다. 따라서 Equatorial Elevation Blocks는 무마감으로 출하되며 앞으로도 그럴 것이다. 한 단계를 생략해 절약하기 위해서가 아니라, 마감을 적용하면 광택 하나를 사기 위해 등급 전체를 소비하기 때문이다.

참고문헌

- [1] Soucek, M. D., Khattab, T., Wu, J. (2012). 자동산화와 건조 촉진제의 검토. *Progress in Organic Coatings*, 73(4), 435-454.
- [2] Erich, S. J. F., Laven, J., Pel, L., Huinink, H. P., Kopinga, K. (2006). NMR 영상으로 연구한 알키드 코팅의 금속 비누 분포와 촉매 건조. *Progress in Organic Coatings*, 55(2), 105-113.
- [3] Micciche, F., van Haveren, J., Oostveen, E., Ming, W., van der Linde, R. (2006). 유성 코팅과 Co 건조 촉진제의 Mn·Fe 착물 대체. *Applied Catalysis A: General*, 297(2), 174-181.
- [4] van Gorkum, R., Bouwman, E. (2005). 금속 착물로 촉진되는 알키드 도료의 산화 건조. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(17-18), 1709-1728.
- [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] Solder, L., Bosque, A. (2026). 마감 활엽수 시험편의 표면 환산 상자성 오염에 대한 글로 방전 깊이 프로파일링. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(3), 88-104.