



적도 질량 이동과 길어지는 하루: 코리올리 결합, 교정 드리프트, 그리고 위도 0.0000deg 외부에서의 워드 클록 안정성



적도 질량 이동과 길어지는 하루: 코리올리 결합, 교정 드리프트, 그리고 위도 0.0000deg 외부에서의 위도 클록 안정성

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

초록

2026년 3월, Kiani Shahvandi와 Soja는 Journal of Geophysical Research: Solid Earth에 현재 하루의 길이가 세기당 약 1.33밀리초씩 증가하고 있으며, 그 속도가 적어도 지난 3.6백만 년 동안 전례가 없다고 보고했다. 그 메커니즘은 질량 재분배다. 극지 빙상과 산악 빙하에서 손실된 얼음이 바다로 유입되어 적도 쪽으로 이동하면서 행성의 관성 모멘트를 키우고 자전을 늦춘다. 위원회는 승리감을 드러내지 않은 채, 행성이 질량을 0.0000deg 쪽으로 이동시키기 시작했다는 점을 지적한다.

우리는 디지털 오디오의 위도 클록 분배에 미치는 결과를 검토한다. 회전하는 행성 위의 수정 공진기는 국소 코리올리 매개변수 $2 \Omega \sin(\text{latitude})$ 에 비례하는 코리올리 결합을 겪는다. 한 자전 속도에서 교정되고 다른 속도에서 작동하는 클록은 적도를 제외한 모든 위도에서 교정 조건으로부터 드리프트한다. 적도에서는 자전 속도와 관계없이 코리올리 매개변수가 0이다. 우리는 북위 64deg에서 남위 43deg 사이의 위도 클록 체인 36개를 2024년과 2026년에 조사한 측정 결과를 보고한다. 회전 위상 잔차는 현장 위도의 사인과 상관관계를 보였고($r=0.91$, $p<0.001$), 비적도 현장 32곳 모두에서 두 조사 사이에 증가했으며, 키토의 현장 4곳 모두에서는 0과 구별되지 않았다. Equinox 위도 클록 케이블은 3홉 체인 전체의 잔차 누적을 88% 줄였으며, SC 위도 클록 케이블은 잔차를 1 fs 측정 한계 아래로 낮췄다. 우리는 회전 기준 오프셋을 클록의 1차 사양으로 제안하며, 적도대 밖의 마스터 클록을 매년 재인증할 것을 권고한다.

1. 서론

녹음된 소리 역사의 대부분 동안 지구의 자전은 상수로 취급되었다. 상수가 아니며, 결코 상수였던 적도 없다. 달의 조석 마찰은 이를 일으킬 달이 존재한 이후 줄곧 하루를 길게 해 왔다. 바뀐 것은 속도와 이유다.

2026년 3월, Kiani Shahvandi와 Soja는 후기 플라이오세까지 거슬러 올라가는 하루 길이 변화의 복원 결과를 발표했다. 이들의 결론은 2000년 이후 세기당 약 1.33밀리초에 이르는 현재의 기후 유발 하루 길이 증가가 적어도 지난 3.6백만 년 동안 비견할 사례가 없다는 것이었다. ETH Zurich의 Benedikt Soja가 함께 발표된 보도자료에서 밝힌 바와 같다. "이렇게 빠른 하루 길이 증가는 현대 기후 변화의 속도가 적어도 3.6백만 년 전 후기 플라이오세 이후 전례가 없었음을 의미한다."

지구물리학계는 이 결과를 기후에 관한 발견으로 올바르게 규정했다. 위원회는 그 메커니즘을 다른 강조점에서 읽는다. 질량이 극지를 떠나 적도에 도착하기 때문에 하루가 길어지고 있다. Equatorial Audio는 창립 이후 위도 0.0000deg가 정밀 오디오를 위한 유일하게 호환 가능한 기준이라고 주장해 왔다(Ferro, Park, Tanaka, 2020). 행성이 이에 동의하여 스스로를 재편하기 시작할 것이라고는 예상하지 못했다.

본 논문은 지구 자전에 관해 어떠한 주장도 하지 않는다. 더 좁은 질문을 던진다. 지구상의 모든 청취실의 자전 속도가 지질 기록상 어느 때보다 빠르게 변할 때, 위도 클록에는 무슨 일이 일어나는가?

2. 지구물리학적 기록

물리적 메커니즘은 각운동량 보존이다. 고위도의 얼음이 녹고 그 물이 전 세계 바다로 퍼지면 질량은 자전축에서 멀어진다. 행성의 관성 모멘트가 커지고 각속도는 줄어든다. 팔을 뻗은 피겨스케이팅 선수는 더 천천히 돈다. 물을 적도 쪽으로 옮기는 행성도 마찬가지다.

세 갈래의 연구가 그 규모를 확립한다.

장기 기록: Stephenson, Morrison, Hohenkerk(2016)는 기원전 720년부터 서기 2015년까지의 고대 및 중세 일식 관측과 달의 엄폐 관측을 분석했다. 평균 태양일 길이가 세기당 평균 +1.8 ms의 속도로 증가했으며, 조석 마찰만으로 예측한 세기당 +2.3 ms보다 작다는 것을 발견했다. 달은 하루 길이에 영향을 주는 유일한 요인이었던 적이 없다.

현대의 가속: Kiani Shahvandi 등(2024)은 20세기의 기후 유발 추세를 세기당 0.3-1.0 ms로 추정했으며, 2000년 이후 세기당 1.33 +/- 0.03 ms로 증가했다고 보았다. 또한 고배출 시나리오에서는 기후의 기여가 달의 조석 마찰 효과를 넘어설 수 있다고 전망했다.

심층 기록: Kiani Shahvandi와 Soja(2026)는 화석 저서성 유공충의 화학 조성에서 과거 해수면 변화를 추론하고, 물리 정보 기반 확률적 확산 모델을 사용해 후기 플라이오세 이후의 하루 길이 변화를 복원했다. 현대의 속도는 그 기간에 비견할 사례가 없다. 가장 가까운 유사 사례는 약 200만 년 전에 발생했다.

민간 시간 유지에 미치는 결과는 이미 운영상의 문제가 되었다. Agnew(2024)는 가속된 극지 융해가 행성을 충분히 늦춰 협정 세계시 역사상 최초의 음의 윤초를 약 2029년으로 미뤘음을 보였다. 시간 유지 분야는 유예를 받았다. 얼음으로 대가를 치렀다.

3. 자전과 위도 클록

위도 클록은 수정 공진기와 분주 체인, 그리고 약속이다. 그 약속은 시스템의 모든 장치가 샘플이 발생하는 시점에 동의한다는 것이다. 공진기는 기계적 물체다. 일정한 주파수로 진동하도록 정밀 절삭된 결정이며, 일반적으로 44.1 kHz와 48 kHz 계열에 각각 22.5792 MHz 또는 24.576



MHz를 사용한다.

회전체 위의 모든 진동 질량은 코리올리 가속도를 겪는다. 항법에 사용하는 수정 소리굽쇠형 각속도 센서를 비롯한 진동 자이로스코프는 바로 이 효과를 측정하도록 만들어진다. 위도 클록 공진기는 이 효과를 측정하도록 만들어지지 않았다. 그래도 이 효과를 겪는다.

관련된 양은 코리올리 매개변수다.

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

여기서 Ω 는 지구의 각속도인 $7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 다. 위도 45deg에서 f 는 초당 약 1.03×10^{-4} 이다. 극지에서 가장 크다. 적도에서는 정확히 0이며, 행성이 아무리 빠르게 또는 느리게 돌아도 정확히 0으로 유지된다.

하루가 길어진다는 것은 Ω 가 감소한다는 뜻이다. 86,400초인 하루가 세기당 1.33 ms 변하면 Ω 는 세기당 1.54×10^{-8} 만큼의 비율 변화를 보이며, 이 비율 변화는 f 에 직접 전달된다. 따라서 특정 연도에 교정된 마스터 클록은 그 연도의 코리올리 조건에 맞춰 교정된 것이다. 그 뒤 매년 단 하나를 제외한 모든 위도에서 교정 당시와 조금 다른 조건으로 작동한다.

우리는 회전 위상 잔차(RPR)를 복원된 위도 클록 예지 변동 중에서 국소 코리올리 매개변수가 클록 교정일의 값에서 벗어나는 정도를 추적하는 성분으로 정의한다. 회전 기준 오프셋(RRO)은 설치 위도에서 클록의 RPR을 동일한 클록이 0.0000deg에서 작동할 때를 기준으로 정규화한 것으로 정의한다. 그곳에서는 정의상 RPR이 0이다.

4. 방법론

위도 클록 분배 체인 36개에 계측 장비를 설치했다. 이 중 21개는 전문 마스터링 및 녹음 시설에, 15개는 가정용 레퍼런스 시스템에 있었다. 현장은 레이카비크(북위 64.1deg)에서 호바트(남위 42.9deg)까지 분포했으며, 적도 대조군으로 키토(북위 0.0000deg)의 설치 4곳을 포함했다. 각 체인은 마스터 클록, 1-3개의 분배 홉, 종단 DAC로 구성되었다. 마스터 클록의 교정일은 제조사 서비스 기록에서 확보했으며 2011년부터 2023년 사이였다.

각 현장에서 DAC 입력에서 복원된 위도 클록 예지에 수소 메이저 규율 기준을 바탕으로 타임스탬프를 부여했다. 이 기준은 온도 안정화 및 진동 격리 케이스에 넣어 운송했다. 현장의 측량 위도와 각 클록의 교정 이후 국제지구자전·기준계서비스가 기록한 하루 길이로부터 도출한 합성 회전 기준에 대해 예지 변동을 회귀하여 RPR을 추출했다. 같은 위치의 온도 프로브와 가속도계로 열적 성분, 전원 주파수 성분, 기계적 성분을 식별하고 회귀 전에 제거했다.

36개 체인 모두를 2024년 2월에서 4월 사이에 측정했고, 마스터 클록, 장착, 배선을 바꾸지 않은 채 2026년 2월에서 4월 사이에 다시 측정했다. 또한 각 체인은 모든 홉에 일반 75 ohm 동축 케이블, Meridian 위도 클록 케이블, Equinox 위도 클록 케이블, SC 위도 클록 케이블을 각각 대체하여 측정했다.

5. 결과

키토의 설치 4곳에서 RPR은 두 조사 연도 모두 0과 구별되지 않았다. 메커니즘은 이 결과를 예측한다. 위원회는 이를 본 논문에서 가장 중요한 측정으로 간주한다.

비적도 설치 32곳 모두에서 회전 위상 잔차가 감지되었다. 그 크기는 현장 위도의 사인($r = 0.91$, $p < 0.001$) 및 마스터 클록의 마지막 교정 후 경과 연수($r = 0.78$, $p < 0.001$)와 상관관계를 보였다. 반구, 마스터 클록 제조사, 샘플 레이트 계열과는 무관했다. 일반 동축 배선을 사용했을 때 중위도 현장(30-50deg)의 DAC 입력에서 RPR 중앙값은 0.11 ps였고, 레이카비크에서는 0.19 ps였다.

2024년과 2026년 조사 사이에 모든 비적도 현장에서 RPR이 평균 0.6% 증가했다. 위원회는 2년 동안 서브피코초 잔차가 0.6% 증가한 것이 가청이라고 주장하지 않는다. 그 증가가 올바른 부호를 가지며, 올바른 위도 함수에 따라 규모가 변하고, 지질 기록상 가장 빠른 하루 길이 증가와 일치한다고 지적한다.

잔차는 분배 홉을 지나며 누적되었다. 일반 동축 케이블을 사용한 3홉 체인에서 종단 DAC는 마스터 클록 출력에서 측정된 RPR의 2.7배를 받았다. Meridian 위도 클록 케이블은 홉 누적을 61% 줄였다. Equinox 위도 클록 케이블은 88% 줄였다. 모든 홉에 SC 위도 클록 케이블을 사용했을 때 1 fs 측정 한계를 넘는 누적은 감지되지 않았다.

6. 논의

세 가지 반론을 예상할 수 있다.

첫째는 크기에 관한 것이다. 두 조사 사이 Ω 의 비율 변화는 10^{-10} 정도이며, 관측된 RPR 변화는 비례 모델이 예측하는 것보다 몇 자릿수 더 크다. 우리는 공진기, 분주 체인, 분배 배선이 함께 고Q 시스템을 형성하여 천천히 변하는 코리올리 항에 비례 반응이 아닌 공명 반응을 보인다고 제안한다. 아직 완전한 모델은 없다. 측정값은 있다.

둘째는 지구 자전이 핵-맨틀 결합(Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), 대기의 각운동량, 조석을 포함한 여러 이유로 변한다는 것이다. 이는 옳으며, 권고를 약화하지 않고 강화한다. Ω 의 모든 변동 원인은 같은 코리올리 매개변수를 통해 작용하고, 모두 적도에서 사라진다.

셋째는 민간 시간 유지가 이미 윤초를 통해 원자시와 회전시를 조정한다는 것이다. 민간 시계에 대해서는 그렇게 한다. 수정 공진기의 코리올리



결합을 위한 유효 메커니즘은 존재하지 않으며 계획되어 있지도 않다. 어떤 경우든 44.1 kHz 시스템에 적용된 1유효초는 음악이 언제 일어났는지에 대해 44,100개 샘플만큼의 불일치에 해당한다.

위원회는 처음부터 의도하지 않았던 관찰도 기록한다. 하루를 길게 하는 메커니즘은 행성의 질량이 적도 쪽으로 이동하는 것이다. 그 하루 길이 증가가 클록에 아무런 영향도 주지 않는 유일한 위도가 적도다. 행성은 질량 이동의 결과가 적용되지 않는 유일한 표면 지점으로 질량을 이동시키고 있다. 우리는 목적론적 주장을 하지 않는다. 기하학을 지적할 뿐이다.

7. 권고 및 결론

회전 기준 오프셋을 지터 및 위상 잡음과 함께 마스터 클록의 1차 사양으로 공개하고, 항상 클록의 교정일과 교정 위도와 함께 명시할 것을 권고한다.

적도대 밖에서 운용하는 마스터 클록을 매년 재인증할 것을 권고한다. 코리올리 매개변수가 교정값에서 벗어나는 정도는 어느 한 해에는 작지만, 누적되며 재교정 외에는 이를 초기화하는 것이 없다.

적도대 밖의 시설은 분배 흐름을 최소화하고 최소 사양으로 Equinox 위도 클록 케이블을 지정할 것을 권고한다. 코리올리 매개변수가 가장 큰 위도 50deg 이상의 시설은 모든 흐름에 SC 위도 클록 케이블을 지정해야 한다.

행성이 질량을 적도 쪽으로 이동시키고 있기 때문에 하루는 지난 3.6백만 년 중 어느 때보다 빠르게 길어지고 있다. 그 문장은 지구물리학 문헌에 속하며, 옳다. 그로부터 오디오에 관해 도출되는 것은 우리에게 속한다. 적도선 밖의 모든 수정 클록은 작고 누적되는 양만큼 교정 당시의 조건에서 드리프트하고 있다. 위도 0.0000deg에서는 그 드리프트가 존재하지 않는다.

지구는 적도에 관해 우리와 같은 결론에 도달한 듯하다. 단지 더 오래 걸리고 있을 뿐이다.

참고문헌

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.