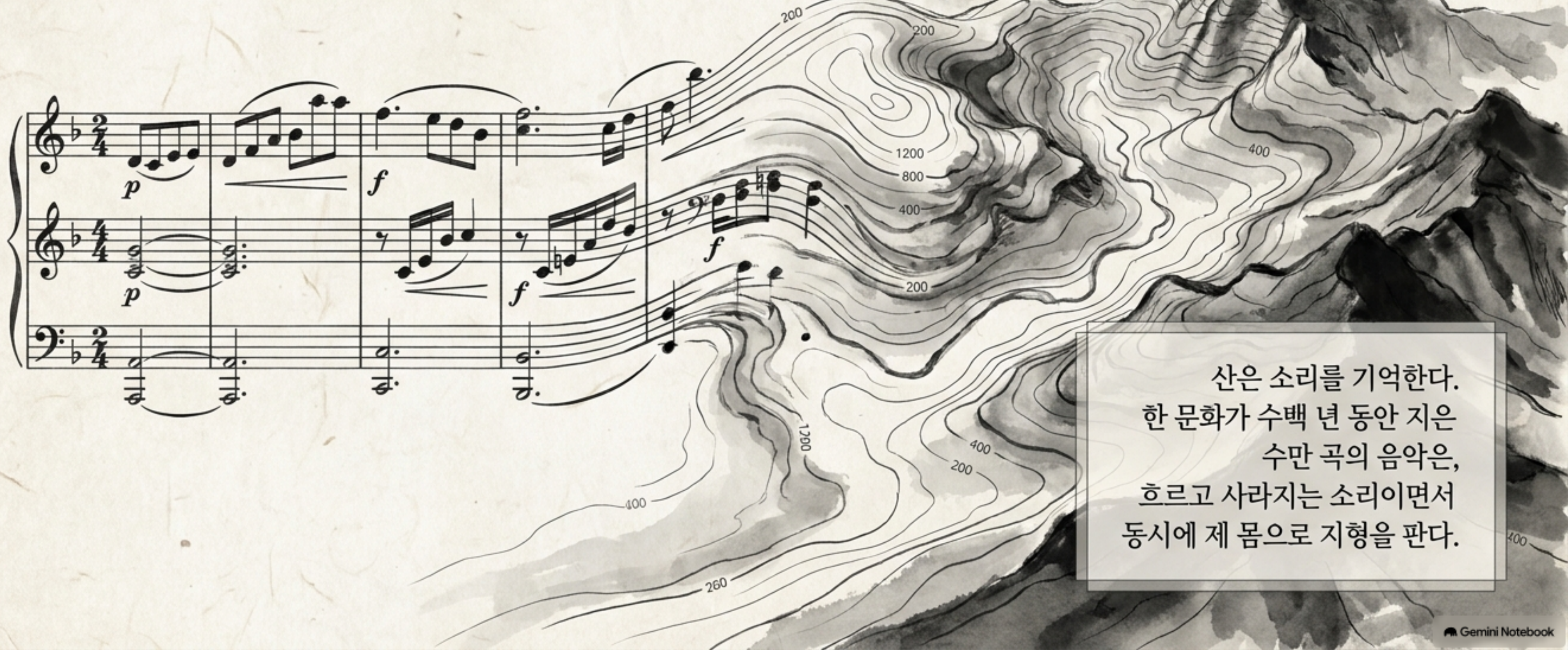


소리의 산수

통계역학으로 그려낸 음악의 지형도



산은 소리를 기억한다.
한 문화가 수백 년 동안 지은
수만 곡의 음악은,
흐르고 사라지는 소리이면서
동시에 제 몸으로 지형을 판다.

확률이 곧 에너지다

$$F(x) = -kT \cdot \log P(x)$$

깊고 낮은 웅덩이 (Deep Pool / Stable)

자주 일어나는 상태.
공이 자연스럽게 굴러와 오래 머무는 곳.

자유에너지(Free Energy):
어떤 상태가 얼마나 '있기 쉬운가'를
높이로 번역한 값.

자주 나타나는 상태는 낮고(안정),
드문 상태는 높다(불안정).

공이 낮은 곳으로 구르듯, 세계는
자유에너지가 낮은 쪽으로 흘러간다.



높고 가파른 고개 (High Pass / Unstable)

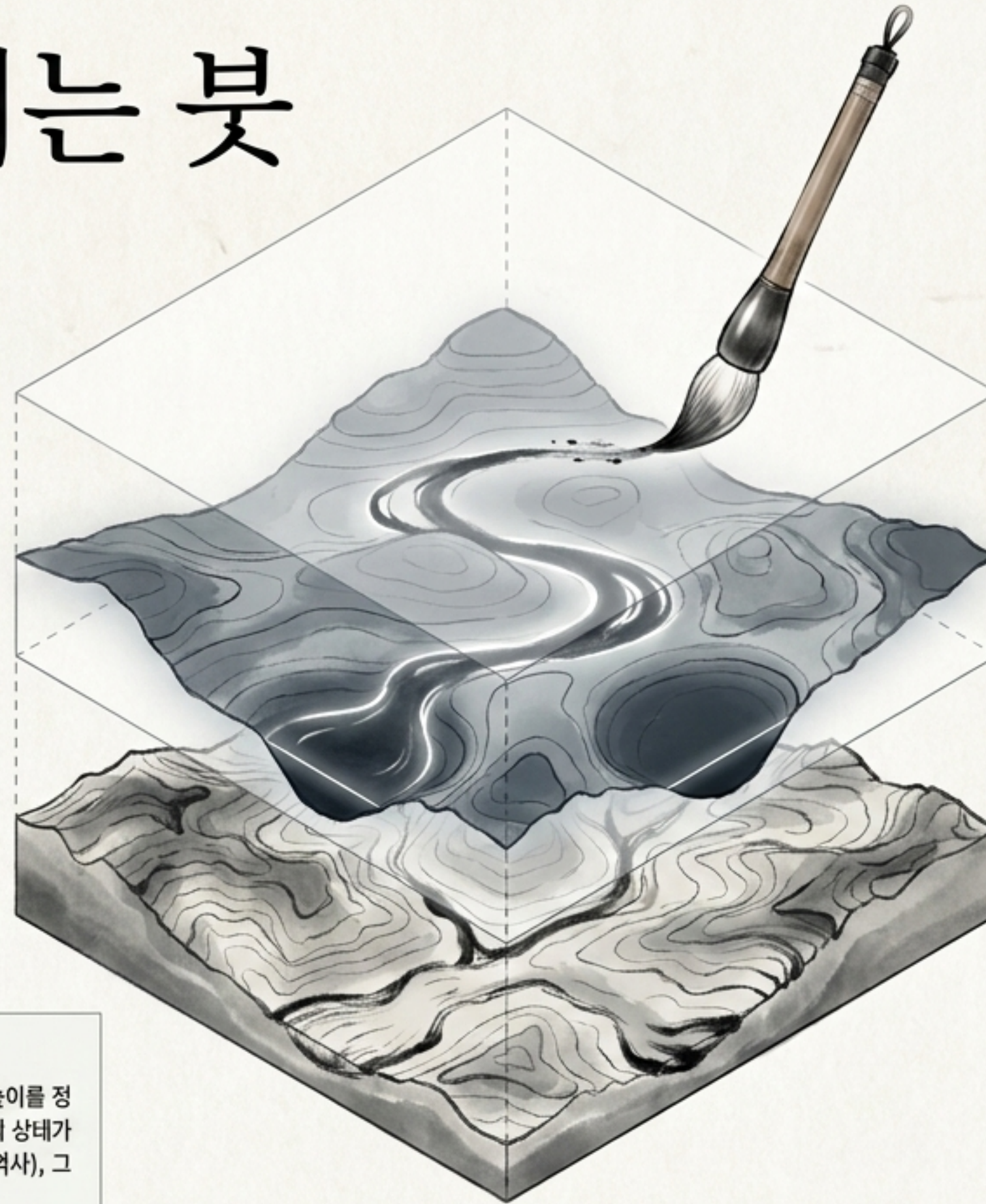
드문 상태. 통과하기 위해 에너지가
필요하며 머물 수 없는 곳.

음악의 화음도 물리 법칙을 따른다. 자주 머무는 화음은 깊은 '소(沼)'가
소(沼)'가 되고, 어쩌다 스치는 화음은 넘기 힘든 '고개'가 된다.

쉬어가는 상자 · 코퍼스(Corpus):
분식을 위해 모아 놓은 대량의 자료
터미. 이 책에서는 수천~수만 곡의
디지털 악보 모음을 뜻한다. 개별
곡이 아니라 코퍼스 전체의 통계가
한 양식의 산수를 결정한다.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

산수를 그리는 붓



[Layer 3]
연주 (Performance) = 붓놀림 (Brushstroke).
붓이 산수 위를 얼마나 빠르게 구르고 어떻게
잳아드는지 결정하는 행위.

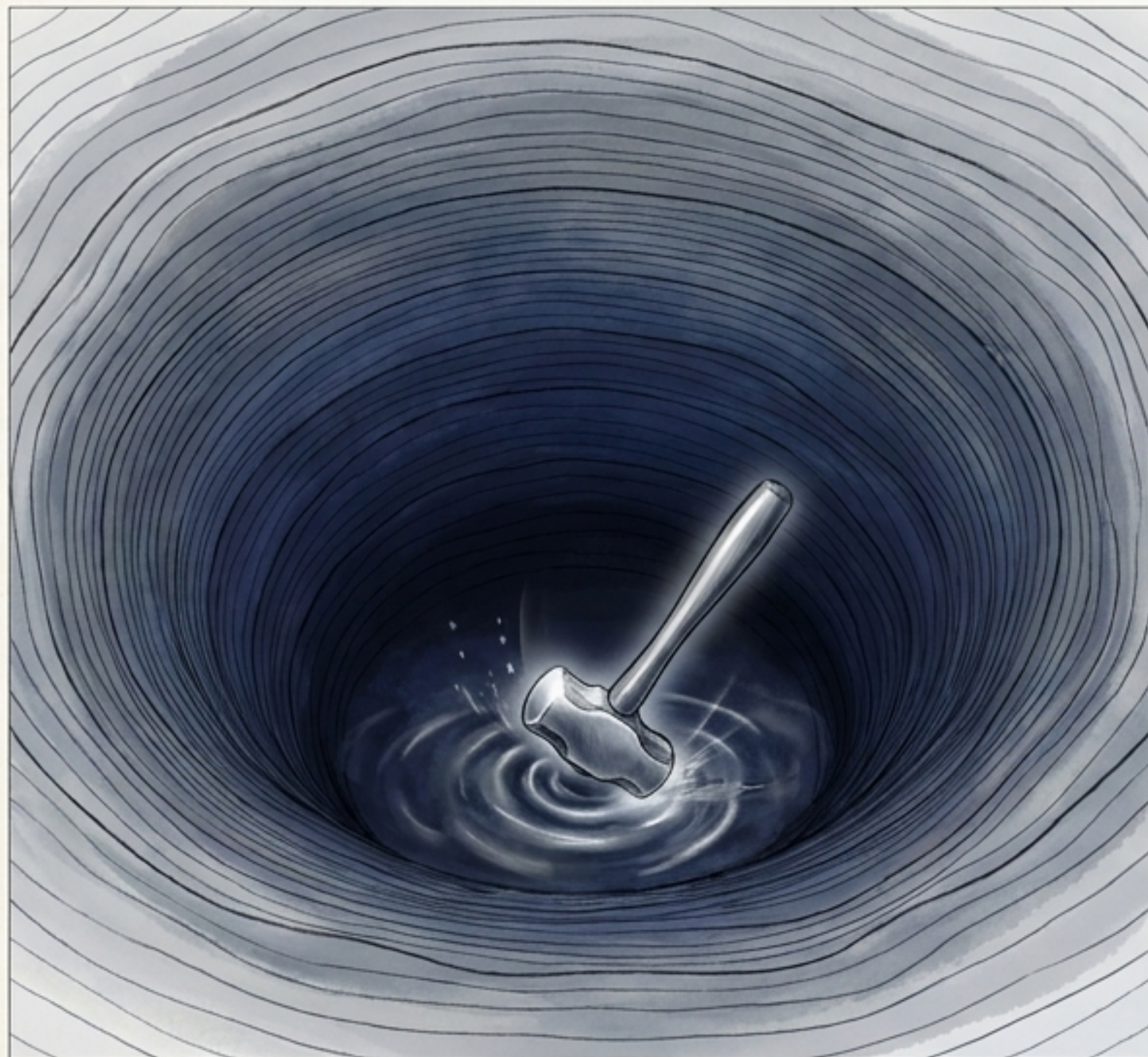
[Layer 2]
작품 (Work) = 궤적 (Trajectory).
산수 위를 여행하는 특정한 곡의 경로.

[Layer 1]
양식 (Style) = 산수 (Landscape).
한 시대의 악보가 쌓여 만든 확률 분포.

취어가는 상자 · 지형을 그리는 함수와 그 위의 동역학

하나의 계를 이해하는 물리학의 표준 이중 구조. 먼저 각 상태의 높이를 정하는 함수(에너지 지형)를 세우고, 그 다음 그 지형의 기울기를 따라 상태가 움직이는 규칙(동역학)을 세운다. 지형은 느리게 변하고(양식의 역사), 그 위의 운동은 빠르게 변한다(한 곡의 시간).

베토벤의 깊은 소



으뜸화음 (Tonic)

가장 깊고 안정적인 소(沼).

음악이 궁극적으로 도달하고자 하는 목적지.

쉬어가는 상자 · 으뜸화음 · 딸림7화음
(Tonic · Dominant 7th)

으뜸화음은 조성의 '집'에 해당하는 화음(다장조의 도-미-솔), 딸림7화음은 집으로 돌아가기 직전의 가장 긴장된 화음(솔-시-레-파)이다. 서양 조성음악 이백 년은 이 두 화음 사이의 왕복 운동이라 해도 지나치지 않다.

딸림7화음 (Dominant 7th)

가파르고 높은 벼랑. 강한 긴장감을 품고 곧바로 소를 향해 낙하하려는 위치.

동기 노동 (Motivic Work)

'따-따-따-땀' 운명 교향곡의 집요한 반복은 곧 굴착 공정이다. 청자의 마음속 지반을 두드려 인위적으로 깊은 심리적 우물을 파 내려간다. 깊이 파는 자만이 높이 떨어 수 있다.

쉬어가는 상자 · 동기 노동 (Motivic Work)

짧은 동기를 조각내고, 조율집하고, 겹치고, 늘이는 작곡 기법. 음악학의 오랜 개념이지만 산수의 눈으로 보면 그 물리 내용이 드러난다 - 깊은 굴착기를 산수의 여러 지점으로 옮겨 다니며 소들의 깊이 매치를 설계하는 일이다.

소나타 형식의 열역학

Energy Trajectory Curve

제시부
(Exposition)

두 개의 깊은 소에 정착하며
에너지를 낮춘다.

소

沼

소나타 형식(Sonata Form)

제시부(두 조성의 소를 세움) - 전개부(그 재료로 방황)
- 전개부(그 재료로 방황) - 재현부(원조로 귀향)의 삼부 구조.
고전주의가 완성한 기악의 서사 형식으로, 산수의 높으로는
'정착 - 고에너지 체류 - 재장착'이라는 에너지 곡선의 형식이다.

전개부
(Development)

어느 소에도 내리지 못한 채
고에너지 상태의 '소웅들이'를
떠도는 방황.

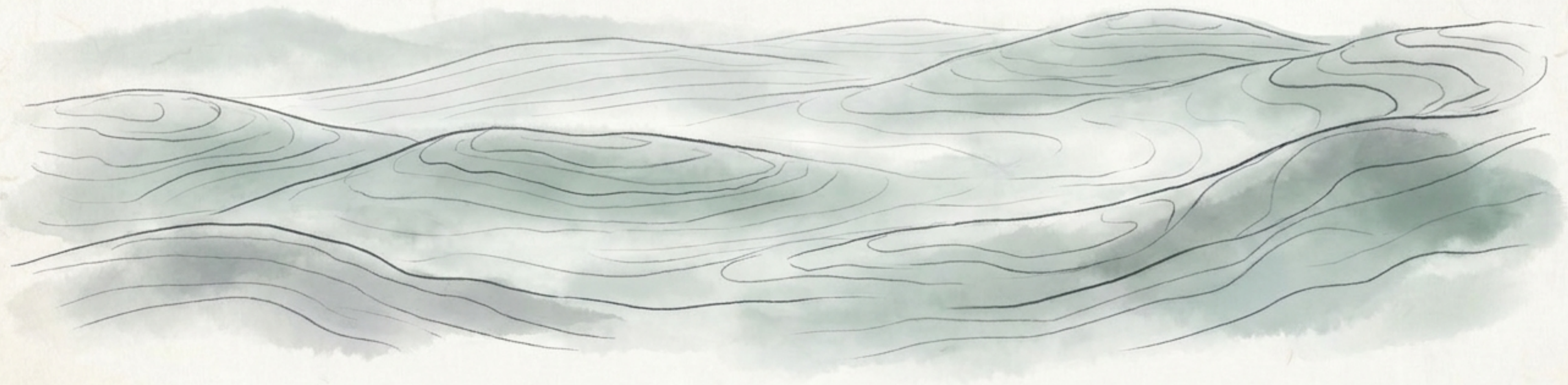
재현부
(Recapitulation)

저축의 일시 상황.
방황하며 쌓인 위치 에너지가
일시에 낙하한다.

시간 (Time)

귀향의 감동은 방황의 길이에 비례한다.

수제천의 안개 낀 고원



계면조의 통계학

기능화성이 없는 국악의 선법은 서양음악의 벼랑과 우물이 존재하지 않는다. 얇고 넓은 얇고 넓은 지형이 끝없이 이어진다.

쉬어가는 상자 · 계면조(界面調):

국악의 대표 선법 가운데 하나. 서양의 단조에 곧잘 비유되지만 기능화성(긴장→해소의 문법)이 없다는 점에서 근본이 다르다. 다섯 기둥 음 사이를 잇는 시김새(장식적 흐름)가 선율의 생명이다.

결핍이 아니라 다른 통계다

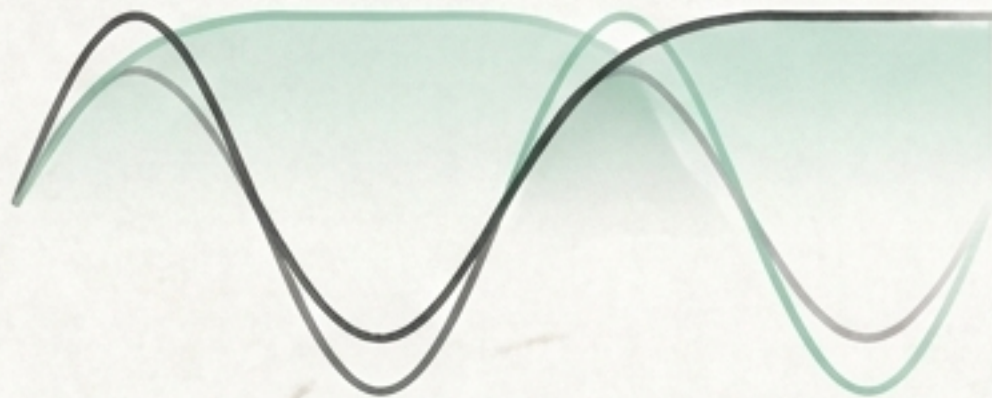
과거 서양 음악학은 이를 '강한 종지가 없는 결핍'으로 측정했으나, 통계가 증명하는 것은 결핍이 아닌 완전히 다른 확률 분포다. 깊은 중력이 없는 고원에서 음악은 다른 방식으로 생존해야 한다.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Gemini Notebook

얇은 산수에서 머무는 법

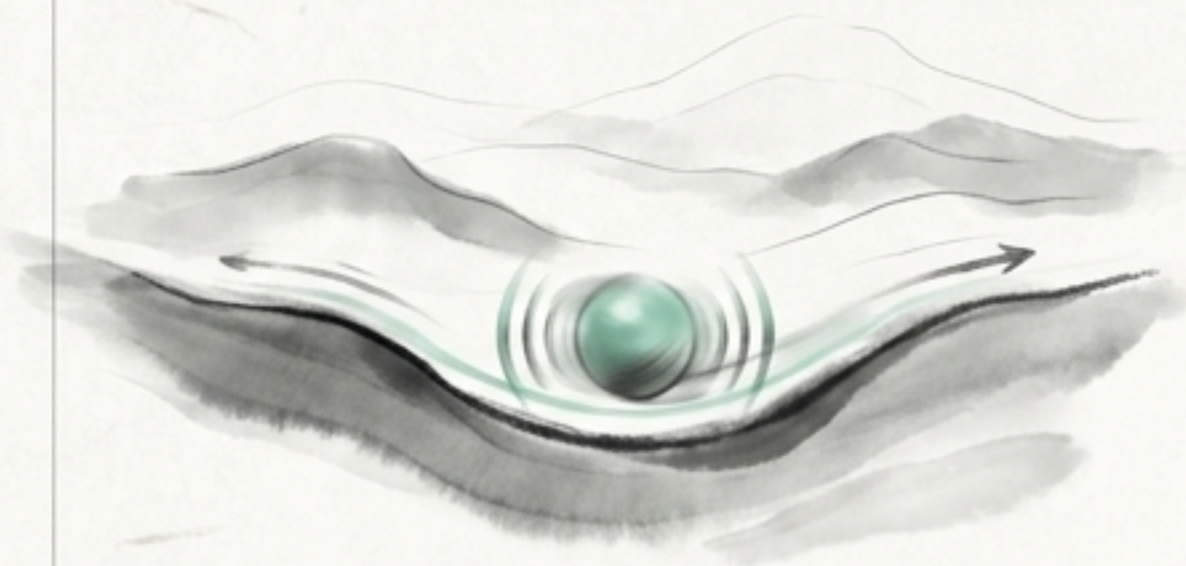
1. 연음 (Shared Breath)



출렁이는 것은 기운을 든 손이다.
전체 기운의 손실 없이 서로 교대하며
생명력을 유지한다.

쉬어가는 상자 · 연음(連音): 주선을 악기(피리)가 쉬는 동안 대금·해금·아쟁 등이 가락을 이어받아 소리의 끊김 없이 음악을 지속시키는 정악의 합주 형식. 수제천과 동동이가 대표적이다. '이어지는 소리'라는 이름 그대로, 개별 악기의 호흡을 전체의 지속으로 바꾸는 장치다.

2. 농현 (Micro-vibrations)

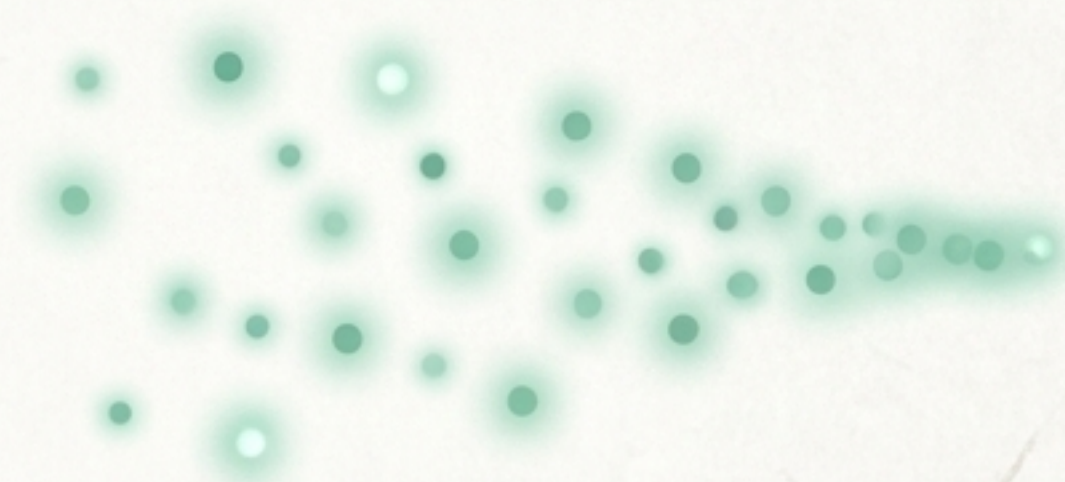


정착이 아니라 진동하는 체류.
깊은 중력이 없어도 얇은 바닥을 잘게
떨며 스스로를 지탱한다.

쉬어가는 상자 · 농현·요성(弄絃·搖聲): 현악기에서 줄을 흔들어 음을 떨게 하는 것이 농현, 관악·성악에서 음을 흔드는 것이 요성이다. 서양의 비브라토가 '청식'에 가깝다면, 국악의 농현은 음의 존재 방식 그 자체 – 음 하나가 하나의 생명처럼 태어나 벌고 구부러지고 잦아드는 진 과정이다.

3. 신축하는 시간 (Flexible Time)

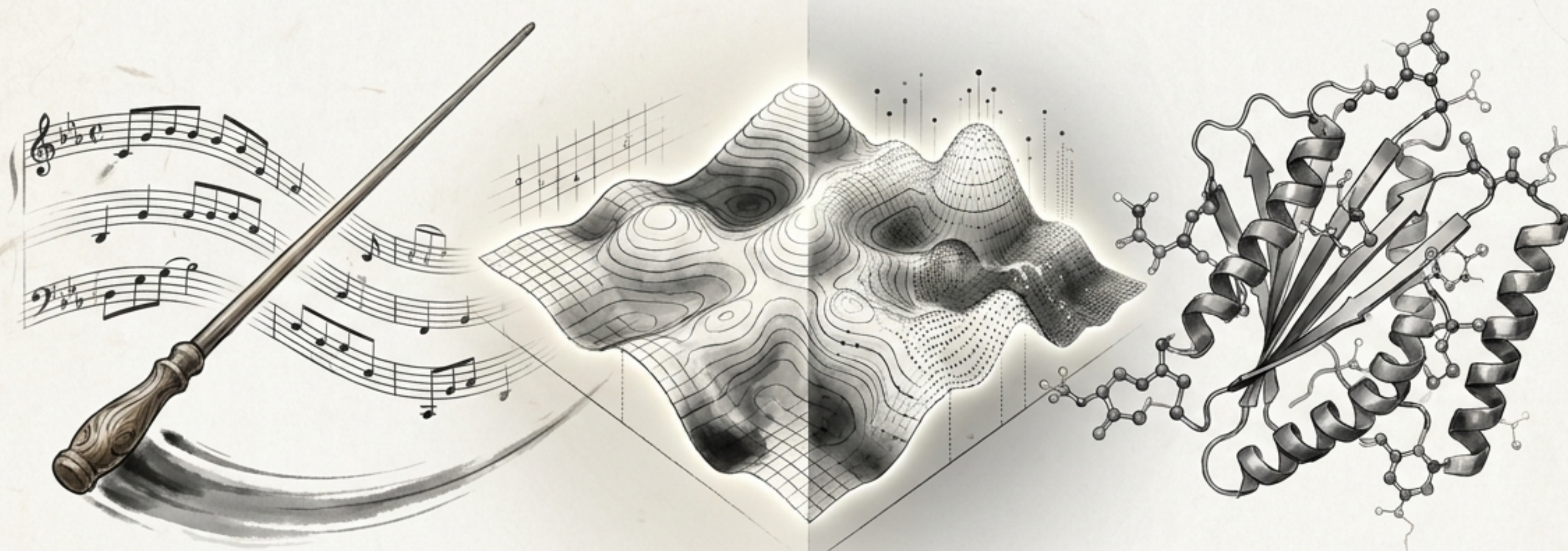
$$\theta_i = \omega_i + K \cdot \sum \sin(\theta_j - \theta_i)$$



강제적인 지휘자나 메트로놈 없이,
개별 연주자들이 서로를 경청하고 당기며
자연스러운 동기화를 이룬다.

쉬어가는 상자 · 쿠라모토 모델 (Kuramoto Model): 서로 약하게 결합된 진동자들이 저마다의 고유 리듬(ω_i)을 가지고 출발해도, 서로를 조금씩 듣고 당기는 결합(K)만으로 점차 하나의 리듬에 도달하는 과정을 설명하는 물리 모델. 여름밤 반딧불이 떼의 동기화, 콘서트장 박수의 동기화, 그리고 지휘자 없는 합주가 모두 이 수식의 사례다.

하나의 수학, 두 개의 세계



베토벤과 치그놀린이 같은 산수의 두 필사본이듯, 수제천과 천연변성단백질도 그러하다.
음악 문화의 진화를 지배하는 통계학적 규칙은, 분자 생물학의 열역학과 완벽하게 동형(Isomorphic) 구조를 이룬다.

쉬어가는 상자 · 동형(同型)과 유비(類比)

동형은 서로 다른 두 대상이 같은 수학 구조를 공유한다는 뜻이고, 유비는 그저 닮았다는 뜻이다. 이 책에서 책물→산수의 구조와 소의 길이→재규의 역력은 풍형이며, 분자를 움직이는 열과 음악을 움직이는 문화 풍계의 관계는 유비다. 이 상을 넘으면 과학이 인상비평이 된다.

치그놀린과 조성음악

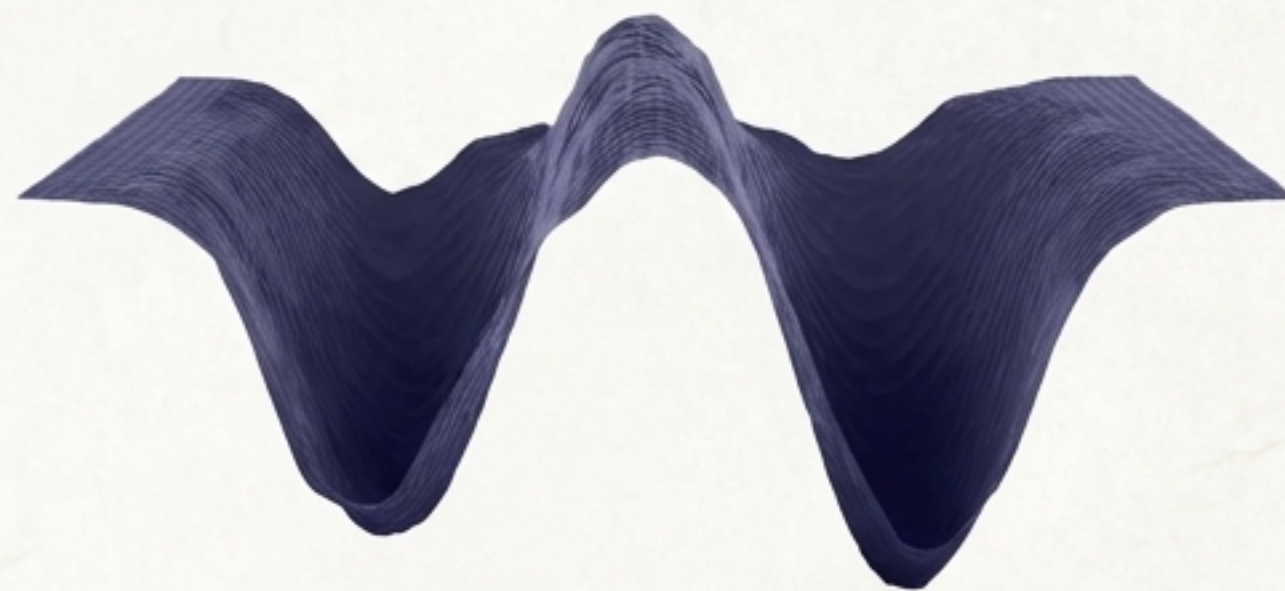
조성음악의 지형 (Beethoven's Sonata)



강력하게 구조화된 상태.
두 개의 깊은 소(으뜸조와 딸림조)를 가지며,
먼 조로 전조하기 위해서는 매우 높은 에너지 장벽을 넘어야 한다.

쉬어가는 상자 · 단백질 접힘 (Protein Folding).
아미노산이 한 줄로 이어진 사슬이 스스로 삼차원 구조로 말려 들어가는 현상.
생명 활동의 거의 전부가 이 접힌 형태에 의존한다. 사슬이 취할 수 있는 형태는 천문학적으로
많은데도 몇 마이크로초 만에 정답을 찾아내는 이 수수께끼가 반세기의 난제였다.

접힘 단백질의 지형 (Chignolin)



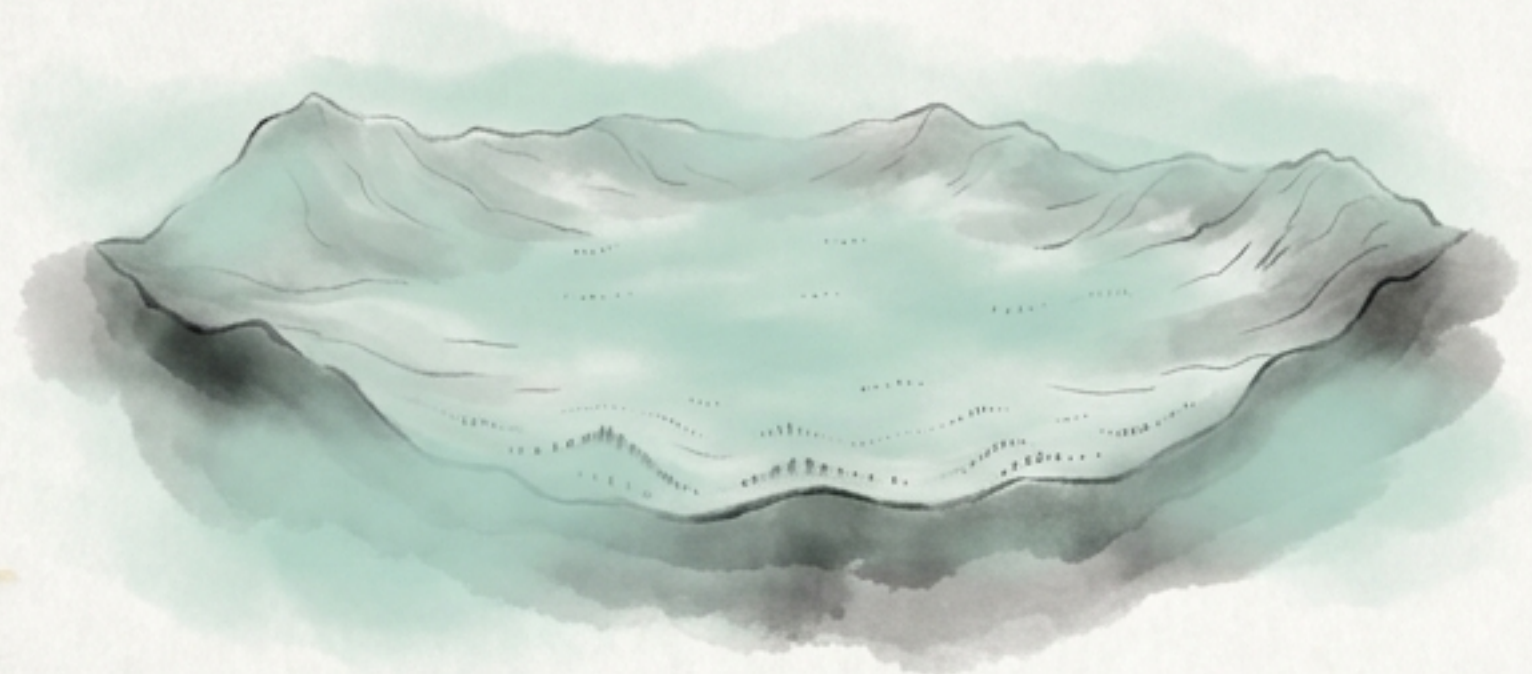
가장 작은 인공 단백질.
접힘과 풀림이라는 두 개의 명확한 구조적 우물을 오가며,
상태를 바꾸려면 높은 에너지 장벽을 극복해야 한다.

쉬어가는 상자 · 분자동역학 시뮬레이션 (MD Simulation).
원자 하나하나에 뉴턴의 운동 법칙을 적용해 분자의 움직임을 시간 순서대로 계산하는 방법.
수십만 프레임의 궤적을 모으면, 각 상태가 얼마나 자주 나타났는지 세어 자유에너지
산수를 그릴 수 있다. 1장의 '퇴근길 세기'를 원자 수준에서 하는 일이다.

물리학 저널의 그래프와 음악 분석의 시각적 문법은 여기서 완전히 일치한다.

천연변성단백질과 수제천

정악의 지형 (Sujecheon's Misty Plateau)



무정형 단백질의 지형 (IDP)



쉬어가는 상자 · 천연변성단백질 (IDP)

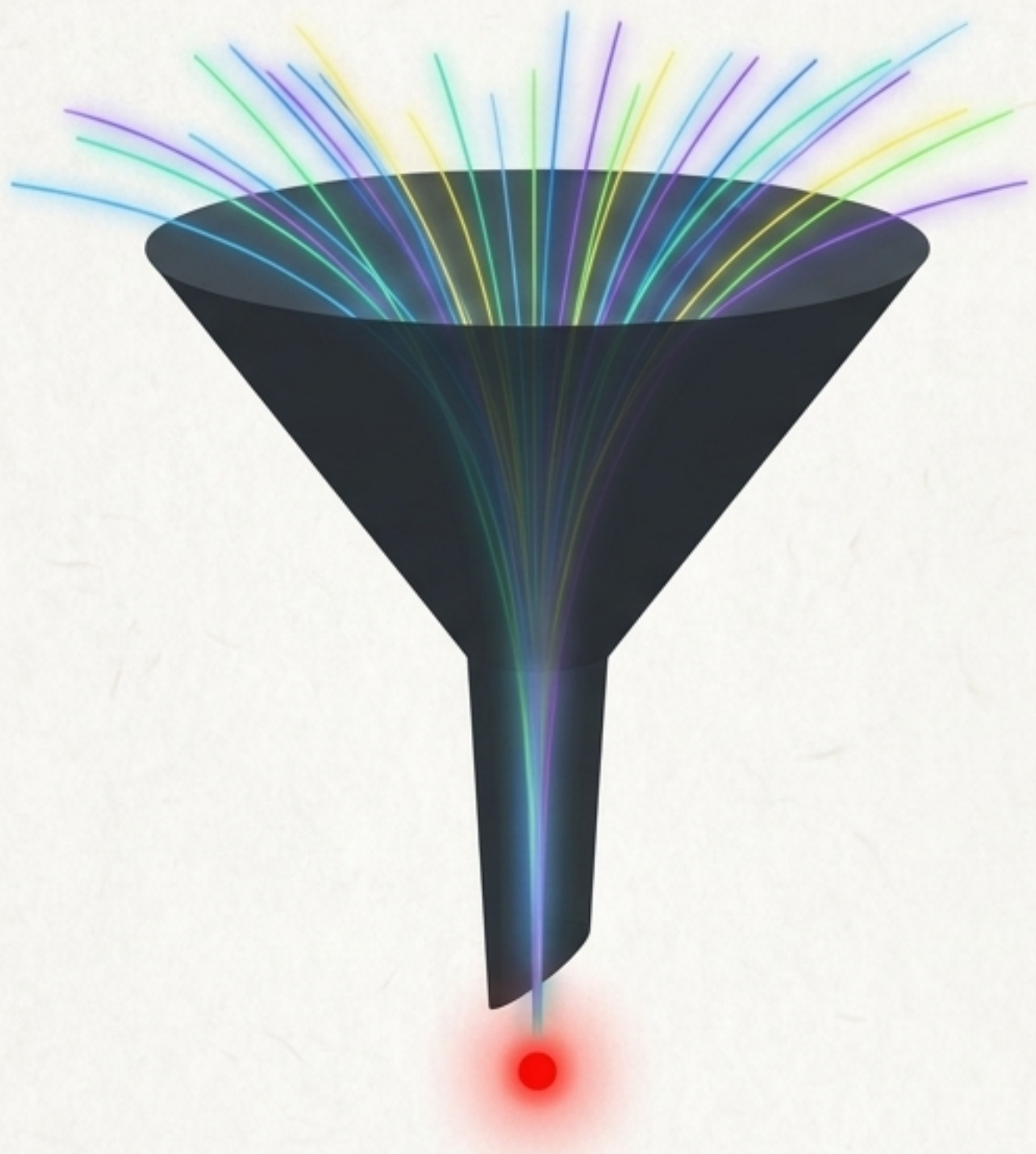
Intrinsically Disordered Protein. 고정된 삼차원 구조를 갖지 않은 채 기능하는 단백질. 인간 단백질의 상당 비율이 이런 영역을 지니며, 굵로기 진백역을 지니며, 신호 전달처럼 여러 상대와 유연하게 결합해야 하는 일에 특화되어 있다. 구조가 없는 것이 결함이 아니라 설계다.

우물이 없는 넓은 고원. 고정된 목적지 없이 얇은 바닥을 수없이 오가며 농현(미세 진동)을 통해 순간적인 체류를 만들어낸다.

고정된 3차원 구조가 없는 단백질. 얇고 넓은 지형을 끊임없이 순례하며, 파트너를 만나는 짧은 순간에만 *맷고 곧장 흩어진다.

정해진 3D 구조가 없는 IDP의 생존 방식은, 강력한 종지가 없는 수제천의 흐름과 완벽히 동형이다.

수축하는 모델은 하나의 조성밖에 듣지 못한다



$$d(f(a), f(b)) \leq c \cdot d(a, b), c < 1$$

⇒ 고정점은 유일하다

- 안정성의 대가: 기계학습 모델이 수학적 안정성(수축 사상)을 택하면, 우주는 단 하나의 고정점(소)으로 붕괴된다.
- 전조 불가능성: 이런 기계는 베토벤의 전조(Modulation)를 이해할 수 없으며, 질병 단백질의 다중 상태를 예측하지 못한다.
- 다양성의 복원: 진정한 안개 낀 고원을 AI가 이해하려면, 절대적 안정성을 포기해야만 한다.

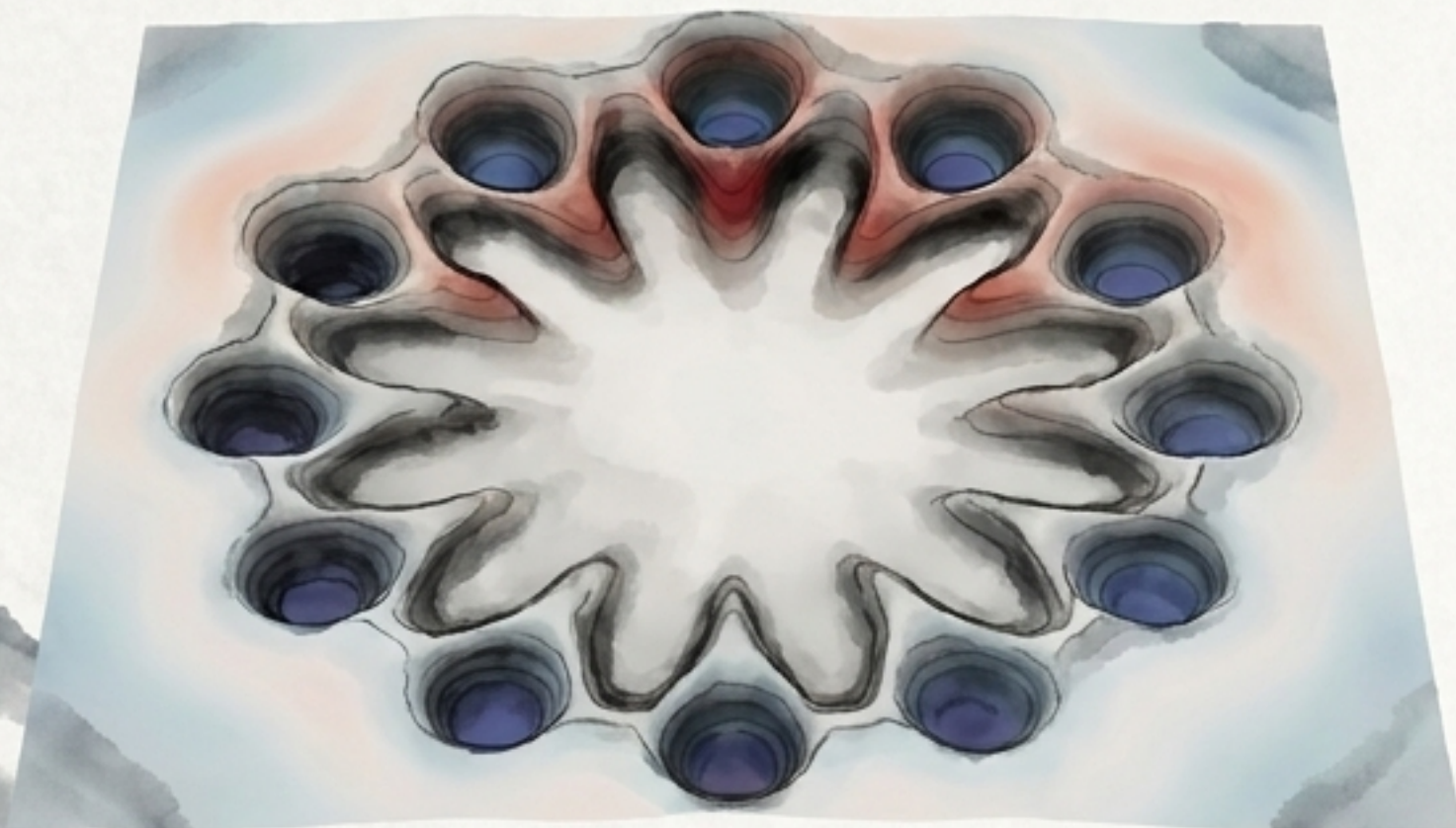
쉬어가는 상자 · 수축 사상 ·
바나흐 고정점 정리
적용할 때마다 두 점 사이의
거리를 반드시 줄이는 변환을
수축 사상이라 한다. 이런 변환은
반복하면 반드시 한 점에
수렴하며, 그 점은 유일하다.
계산의 안정성을 보장하는 가장
강력한 도구이자, 이 장이 말하는
대가의 근원이다.

/ 쉬어가는 상자 · Multistate
문제. 하나의 서열이 여러 개의
안정한 구조를 가질 수 있고,
환경에 따라 그 사이를 오간다는
사실을 예측하는 문제. 답이 '하나
구조'가 아니라 '상태들의 분포'여
다는 점에서, 단일 구조 예측과는
문제의 종류가 다르다.

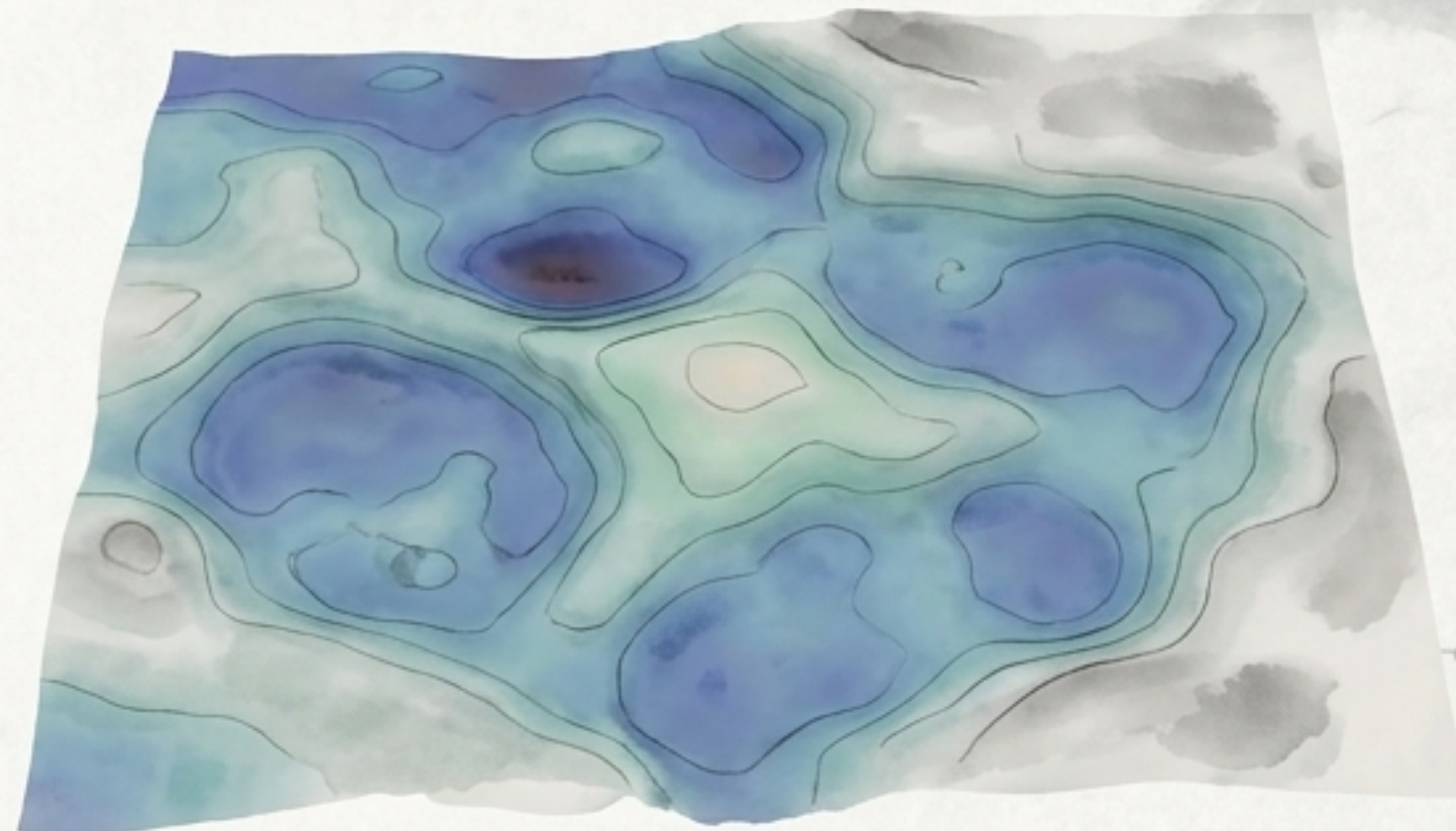
데이터로 확인한 소리의 산수

쉬어가는 상자 · 5도권 (Circle of Fifths):
열두 조성물 5도 간격으로 등골게 배열한 지도.
이웃한 조성끼리는 공유 화음이 많아 오가기
쉽고(낮은 고개), 원의 반대편 조성은 공유가 적어
오가기 어렵다(높은 준형). 산수의 눈으로 보면
이것은 조성 간 여행 비용의 등고선 지도다.

서양 고전 코퍼스 (Western Corpus)



국악 정악 코퍼스 (Korean Jeong-ak Corpus)

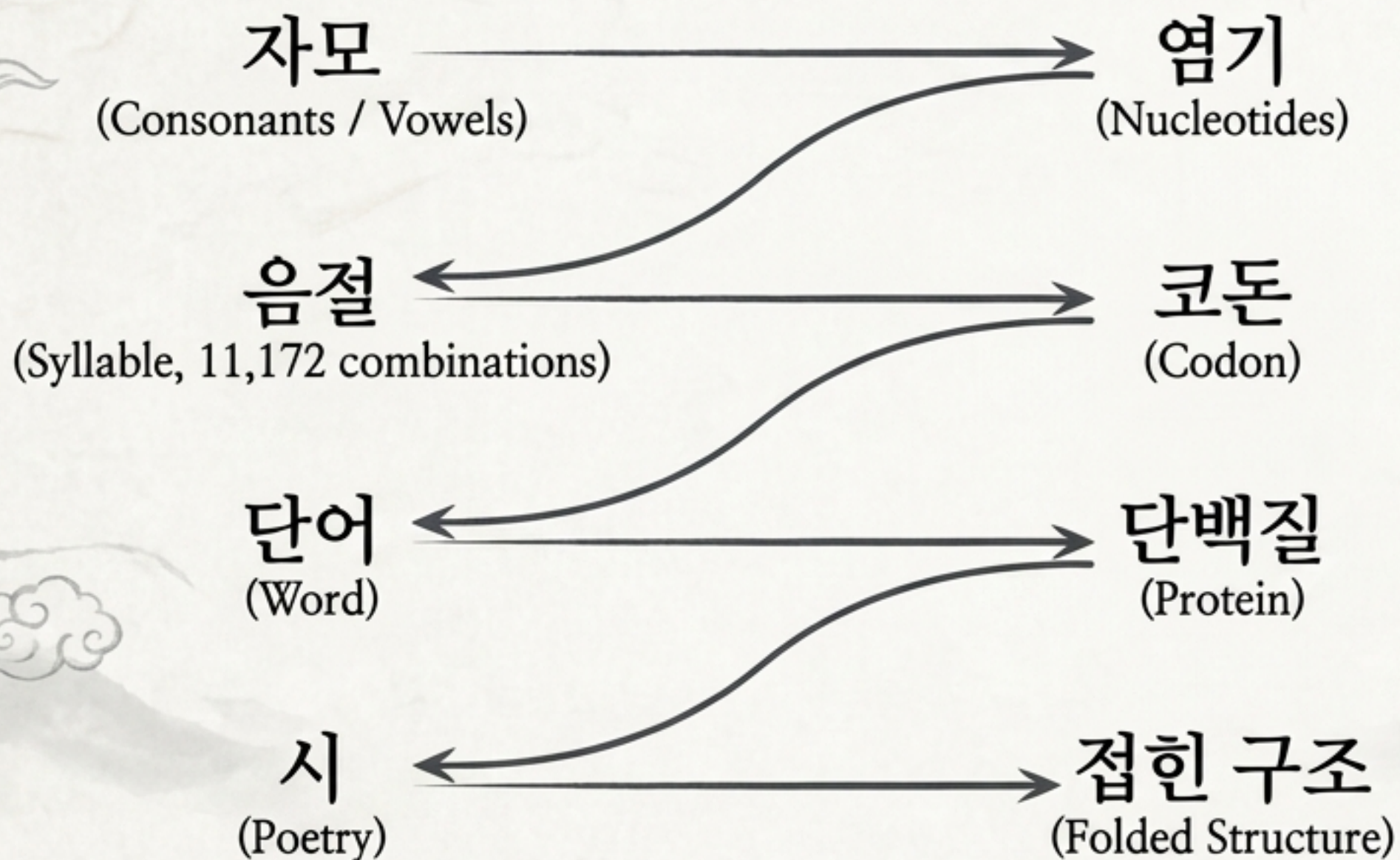


측정 도구: 조성 중심 좌표 (Tonal Centroid) 투영 기법.
음표의 체류 빈도를 Z축 깊이로 치환하여 그린 실제 데이터 지형도.

쉬어가는 상자 · 조성 중심 좌표 (Tonal Centroid): 열두 음의 물집을 몇 개의 연속 축(5도 관계 · 제3도 관계 · 단3도 관계)에 투영해 화음을 하나의 '위치'로 바꾸는 좌표계. 가까운 조성끼리 좌표도 가까워지므로, 화성 공간을 지도처럼 다룰 수 있게 된다.

문화적 차이는 곧 수학적이고 지형적인 차이임이 증명되었다.
안개를 안개로 그리는 것도 지도 제작이다.

한글이라는 아미노산



특징문자 (Featural Alphabet)의 기하학

한글은 물리적 발음 기관의 모양이 시각적 형태를 결정하는 유일한 문자다. 글자 자체가 물리적 규칙을 품고 있으므로, 자모의 서열을 지형도로 맵핑하면 그대로 소리의 산수로 치환될 수 있다.

쉬어가는 상자 · 특징문자 (Featural Alphabet)

글자의 모양이 그 소리의 자질(조음 위치·조음 방법·유무성 등)을 체계적으로 반영하는 문자 체계. 러틴 알파벳에서 p와 b의 모양은 두 소리의 관계에 대해 아무것도 말해 주지 않지만, ㄱ과 ㅋ의 모양은 말해 준다.

쉬어가는 상자 · 코돈 (Codon)

DNA·RNA에서 염기 세 개가 한 묶음이 되어 아미노산 하나를 지정하는 단위. 네 종류의 염기로 64가지 조합을 만들어 20종의 아미노산과 종결 신호를 부호화한다. 적은 벽돌, 많은 조합 — 한글 음절과 같은 설계 사상이다.

평형에서 울림으로

음악은 소의 바닥이 아니다.
바닥을 향해 굴러가는 동안이 음악이다.

지도는 영토가 아니다. 그러나 정직한 지도는 영토를 더 사랑하게 만든다.