

音 의 산 수

소 리 의 산 수

베토벤의 깊은 소(沼)에서 수제천의 안개 낀 고원까지

음악으로 읽는 자유에너지의 미학

T h e S a n s u i o f S o u n d

완 결 판

허 상 훈

Heo Sang-hoon, Ph.D. · 『평형의 미학』 두 번째 여정

서 문

산은 소리를 기억한다

凡音之起 由人心生也 人心之動 物使之然也

무릇 음(音)의 일어남은 사람의 마음에서 비롯되니, 사람의 마음
이 움직이는 것은 사물이 그렇게 시키는 것이다.

— 『예기(禮記)』 「악기(樂記)」

전작 『평형의 미학』을 닫으며 나는 "물은 그릇을 기억하지 않는다"고 적었다. 기술이라는 그릇은 낡아도, 평형이라는 물은 낡지 않는다는 뜻이었다. 책이 세상에 나간 뒤 나는 이상한 질문 하나에 붙들렸다. 물은 그릇을 기억하지 않는다 — 그렇다면 그릇이 아니라 골짜기라면 어떨까. 물이 수만 년을 흘러 제 몸으로 파낸 계곡이라면. 그 계곡은 물이 지나간 모든 시간의 기록이 아닌가.

산은 소리를 기억한다. 이것이 두 번째 책의 발견이다. 한 문화가 수백 년 동안 지은 수만 곡의 음악은, 흐르고 사라지는 소리이면서 동시에 제 몸으로 지형을 판다. 자주 머문 화음의 자리는 깊은 소(沼)가 되고, 드물게 스친 화음의 자리는 높은 고개로 남는다. 우리가 양식(樣式)이라 부르는 것, 조성(調性)이라 부르는 것, 계면조라 부르는 것의 정체는 — 소리가 판 산수(山水)다.

전작이 멈추어 선 형태의 평형을 다루었다면, 이 책은 움직이는 것들의 평형을 다룬다. 잣아들면서 나아가는 것. 떨면서 머무는 것. 그리고 이번 여정에는 전작에 없던 동행이 둘 있다. 하나는 베토벤이고, 하나는 수제천이다. 깊은 우물의 세계와 안개 낀 고원의 세계. 이 두 풍경이 단백질이라

는 분자의 세계에서 정확히 같은 쌍으로 다시 나타나는 것을 확인하는 순간이, 이 책의 가장 높은 전망대가 될 것이다.

약속은 전작과 같다. 이 책이 증명 없이 믿어 달라고 할 것은 단 한 줄 — 자주 일어나는 것은 낮고, 드문 것은 높다 — 뿐이며, 나머지는 전부 그 한 줄에서 걸어 나온다. 그리고 이번에는 약속을 하나 더 얹는다. 이 책의 모든 실험은 결과를 보기 전에 가설을 봉인했고, 빛나간 예측을 그대로 실행했다. 목수가 나무를 자르기 전에 먹줄을 긋듯이. 예술을 측정하는 일이 정당해지는 유일한 조건은 측정하는 자의 정직이기 때문이다.

이 책을 덮을 때, 당신의 베토벤이 조금 더 깊게, 당신의 수제천이 조금 더 넓게 들리기를. 산수는 설명이 아니라 초대다.

목 차

서문 · 산은 소리를 기억한다

프롤로그 · 지휘봉 끝이 산수 위를 구르기 시작했다

제 1 부 산수라는 언어 — 소리를 물리로 번역하기

1장 확률이 곧 에너지다 · 2장 소(沼)와 고개: 긴장과 해소의 기하학

3장 잣아들의 물리학: 여운에 내려앉기 · 4장 산수를 그리는 손, 그 위를 구르는 붓

제 2 부 베토벤의 깊은 소 — 조성음악의 우물

5장 운명 동기: 같은 소를 두드리는 네 번의 망치 · 6장 카덴차의 열역학

7장 고개 넘는 나그네: 전조의 지리학 · 8장 별이 빛나는 밤: 소용돌이에 머무는 용기

제 3 부 수제천의 안개 낀 고원 — 정악의 얇고 넓은 산수

9장 계면조의 저지대 · 10장 연음, 숨을 나누는 물결

11장 떨림으로 머무는 법: 농현의 미세 진동 · 12장 신축하는 시간

제 4 부 단백질과 음악 — 하나의 수학, 두 개의 세계

13장 치그놀린과 베토벤 · 14장 천연변성단백질과 수제천

15장 수축하는 모델은 하나의 조성밖에 듣지 못한다 · 16장 Multistate 난제

제 5 부 새로운 악보 — 산수를 짓는 실험

17장 하루짜리 실험: 악보 몽치로 소를 찍다 · 18장 국악 코퍼스의 산수학

19장 한글이라는 아미노산 · 20장 시가 산수가 될 때 · 21장 먹줄을 먼저 긋다

에필로그 · 평형에서 울림으로

부록 A 수학 산책 · 부록 B 실험 프로토콜 · 부록 C 용어 지도 · 부록 D 더 듣기

프롤로그 · 지휘봉 끝이 산수 위를 구르기 시작했다

"바람이 아무리 불어도, 추를 매단 실은 결국 수직을 가리킨다.

음악이 아무리 흔들려도, 악구는 결국 여운을 가리킨다."

새벽 세 시였다. 모니터에는 단백질 하나가 접히는 과정을 계산한 에너지 곡면이 떠 있었다. 초록과 보라의 등고선이 만드는 두 개의 깊은 웅덩이, 그 사이의 능선, 그리고 웅덩이 바닥을 향해 조금씩 잦아들며 굴러 내려가는 점 하나. 나는 그 점의 궤적을 몇 시간째 들여다보고 있었고, 이어폰에서는 카를로스 클라이버가 지휘하는 베토벤 교향곡 5번이 흐르고 있었다.

전개부가 시작되는 대목이었다. 조성이 흔들리고, 화음이 어느 집에도 정착하지 못한 채 높은 곳을 떠돌았다. 그 순간 화면 속의 점이 능선 위에서 머뭇거렸다. 나는 이어폰을 뺐다가 다시 꽂았다. 소리와 그림이 겹쳐 보였다. 아니, 겹쳐 들렸다.

과학자는 이런 순간을 경계해야 한다고 배운다. 우연의 일치를 계시로 착각하는 것이 모든 사이버의 첫걸음이기 때문이다. 뉴턴조차 무지개를 일곱 색으로 자를 때는 음계가 일곱이라는 유혹에 넘어갔다. 그래서 나는 그날 새벽의 겹침을 계시가 아니라 가설로 다루기로 했다. 검증할 수 있는 형태로 적고, 검증하고, 빛나가면 빛나갔다고 쓰기로.

이 책이 독자에게 증명 없이 믿어 달라고 부탁할 것은 단 하나다. **자주 일어나는 것은 낮고, 드물게 일어나는 것은 높다.** 이 한 줄이 전부다. 나머지 — 베토벤의 우물, 수제천의 고원, 단백질의 접힘, 한글의 벽돌 — 는 전부 이 한 줄에서 걸어 나온다.

이 책의 모든 그림은 하나의 문법을 쓴다. 동양의 화가들이 산과 물로 세계를 그렸듯, 우리는 소리의 산수(山水)를 그린다. 낮은 곳은 음악이 쉬어 가는 소(沼)이고, 높은 곳은 넘어야 할 고개다. 그리고 그 위를 지나가는 것 — 베토벤에서는 지휘봉 끝이, 수제천에서는 붓끝이 그 산수 위를 여행한다. 같은 산수, 다른 붓. 이 책은 그 두 붓의 여행기이며, 마지막에는 당신이 직접 붓을 쥐게 될 것이다.

제 1 부

산수라는 언어

소리를 물리로 번역하기

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

上善若水 水善利萬物而不爭 處衆人之所惡

최고의 선은 물과 같다. 물은 만물을 이롭게 하면서 다투지 않고, 못사람
이 싫어하는 낮은 곳에 머문다.

— 노자, 『도덕경』 8장

"자주 일어나는 것은 낮고, 드물게 일어나는 것은 높다.

이 한 줄이면 음악의 지도를 그리기에 충분하다."

1장 확률이 곧 에너지다

$$S = k \cdot \log W$$

"볼츠만의 묘비에서 시작하는 이야기"

빈의 중앙묘지 14구역에는 루트비히 볼츠만의 무덤이 있다. 베토벤과 슈베르트가 묻힌 음악가 묘역에서 걸어서 몇 분 거리다. 그 묘비에는 이름 보다 크게 공식 하나가 새겨져 있다. $S = k \log W$. 엔트로피는 경우의 수의 로그에 비례한다 — 눈에 보이지 않는 분자들의 통계가 눈에 보이는 세계의 방향을 결정한다는, 통계역학의 주춧돌이다. 볼츠만은 이 생각이 조롱받던 시대에 스스로 생을 내놓았고, 그가 옳았다는 것은 그 뒤에 증명되었다. 나는 이 묘비 앞에서 오래 서 있었던 적이 있다. 음악가들의 묘역과 물리학자의 묘비가 한 언덕을 나누어 쓰고 있다는 사실이, 이 책의 예고편처럼 느껴졌기 때문이다.

이 책이 필요로 하는 것은 그 공식의 사촌뻘 되는 한 줄이다. **$F = -\log P$. 자유에너지는 확률의 음의 로그다.** 물리학과에서는 이것을 유도하는데 한 학기를 쓰지만, 직관은 퇴근길 하나면 충분하다.

당신이 집으로 가는 경로는 대체로 정해져 있다. 큰길로 가는 날이 백 번 중 아흔 번, 골목으로 도는 날이 아홉 번, 강변으로 멀리 도는 날이 한번이다. 이 빈도를 뒤집어 세우면 풍경이 하나 생긴다. 자주 다니는 큰길은 깊게 파인 낮은 길이 되고, 어쩌다 한 번 가는 강변길은 높은 언덕이 된다. 물이 자주 흐르는 자리가 계곡이 되듯, 자주 일어나는 상태는 낮아진다. 로그는 이 뒤집기에 눈금을 주는 장치일 뿐이다 — 열 배 드물면 한 층 높게, 백 배 드물면 두 층 높게.

쉬어가는 상자 · 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. 이 책 전체의 유일한 전제다.

중요한 것은 이 '높이'가 물리적 높이가 아니어도 산수의 역학이 그대로 작동한다는 점이다. 공은 낮은 곳으로 구르고, 높은 곳에서는 불안하며, 고개를 넘으려면 힘이 든다. 확률에서 태어난 산수 위에서도 똑같다. 드문 상태에 놓인 계는 흔한 상태로 굴러 내려가려 하고, 그 경향의 세기가 바로 산비탈의 기울기다.

그렇다면 음악은 어떤가. 수만 곡의 악보를 쌓아 놓고 세어 보라. 어떤 화음은 압도적으로 자주 나타나고 오래 머문다. 어떤 화음은 드물게, 짧게, 어딘가로 서둘러 떠나기 위해서만 나타난다. 빈도가 있다면 확률이 있고, 확률이 있다면 산수가 있다. 음악의 자유에너지는 은유가 아니다. 같은 수학이다.

쉬어가는 상자 · 코퍼스 (Corpus)

분석을 위해 모아 놓은 대량의 자료 더미. 이 책에서는 수천~수만 곡의 디지털 악보 모음을 뜻한다. 개별 곡이 아니라 코퍼스 전체의 통계가 한 양식의 산수를 결정한다.

독자 실험 하나로 이 장을 닫는다. 휴대전화에서 최근 문자 백 통의 첫 단어를 세어 보라. '네', '응', '알겠' 같은 단어가 깊은 소를 팔 것이고, 일 년에 한 번 쓴 단어가 높은 고개로 남을 것이다. 방금 당신은 자신의 언어에 대한 자유에너지 산수를 그렸다. 다음 장에서는 같은 일을 화음의 세계에

서 한다 — 그리고 거기서 '긴장'과 '해소'라는 음악의 가장 오래된 말들이 좌표를 얻게 된다.

2장 소(沼)와 고개: 긴장과 해소의 기하학

$$\text{기울기} = -dF/dx$$

"긴장이란 감정이 아니라 위치다"

실험을 하나 하자. 피아노 앞에 앉아, 혹은 건반 앱을 열어, 도-미-솔을 누른다. 편안하다. 이번에는 솔-시-레-파를 누르고 그대로 손을 떼지 않는다. 삼십 초만 버텨 보라. 몸 어딘가가 조바심을 낸다. 나는 이 실험을 미술사 강의 시간에 학생들에게 시켜 본 적이 있다. 음악 전공자가 한 명도 없는 교실이었는데도, 삼십 초가 지나자 뒷줄의 학생이 참지 못하고 말했다. "선생님, 제발 다음 화음이요."

화성학 교과서는 이 현상을 "딸림7화음은 으뜸화음으로 해결하려는 경향을 갖는다"라고 쓴다. 백 년 넘게 통용된 이 문장에는 그러나 이상한 데가 있다. 화음은 사물인데 어떻게 '경향'을 갖는가. 누가 해결하고 싶어 하는가. 화음인가, 작곡가인가, 듣는 이의 몸인가.

산수의 언어로 다시 쓰면 신비가 걸린다. 수만 곡의 코퍼스에서 화음별 체류 시간을 세어 보면, 으뜸화음은 전체 시간의 가장 큰 몫을 차지하는 깊은 소(沼)이고, 딸림7화음은 체류가 짧은 높은 벼랑이다. **'긴장'이란 감정 형용사가 아니라 위치다.** 확률이 낮은 높은 곳에서 있는 상태. '해소되고 싶은 경향'이란 의인화가 아니라 **기울기**다. 벼랑에서 소를 향해 나 있는 비탈의 가파름. 학생의 몸이 조바심을 낸 것은 그 몸이 평생의 청취로 학습한 내적 산수 위에서, 삼십 초 동안 벼랑 끝에 세워져 있었기 때문이다.

쉬어 가는 상자 · 소(沼)와 고개 — 준안정 상태와 장벽

소(沼)는 폭포 아래 물이 쉬어 가는 깊은 웅덩이를 이르는 우리말로, 물리학의 준안정 상태(basin)에 해당한다. 고개는 두 소 사이의 에너지 장벽이다. 음악이 오래 머무는 화음이 소, 지나가기만 하는 화음이 고개다.

쉬어 가는 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.

이 재정의가 주는 선물은 두 가지다. 첫째, 긴장의 정도를 잴 수 있게 된다. 반음 하나 어긋난 화음이 왜 딸림7화음보다 더 아프게 들리는지, 코퍼스의 체류 통계가 수치로 답한다. 둘째 — 그리고 이 책에는 이것이 더 중요한데 — 문화가 들어올 자리가 생긴다. 이 산수는 물리 법칙이 아니라 통계에서 태어났으므로, 코퍼스가 다르면 산수도 다르다. 바흐의 청중에게 베틀이던 화음이 재즈 청중에게는 완만한 언덕이다. 드뷔시가 딸림7화음을 해결하지 않은 채 병렬로 늘어놓았을 때 파리의 청중이 느낀 어지러움은, 지도에 없던 고원에 갑자기 내려선 여행자의 어지러움이었다. 이 단순한 사실이 3부에서 국악의 산수를 그릴 때, 그리고 18장에서 두 문화의 산수를 정량 비교할 때 우리의 나침반이 된다.

장을 닫기 전에 미리 적어 둘 것이 있다. 지금 우리는 '체류가 잦은 화음'을 낫다고 정의했다. 그런데 화음의 세계는 몇 개의 점이 아니라 연속된 공간이다. 도-미-솔에서 도-미-라 $\flat$ 으로 가는 길은 계단이 아니라 비탈이다. 이 연속 공간에 좌표를 주는 기술적 장치(조성 중심 좌표)는 17장의 실험에서 실제로 쓰게 되며, 부록 A에 그 수학을 두었다. 지금은 산수가 '몇

개의 웅덩이'가 아니라 '연속된 풍경'이라는 그림만 챙기면 된다. 풍경 위에서는 구르는 것이 있어야 한다. 다음 장은 그 구르는 것의 물리학이다.

3장 잣아들의 물리학: 여운에 내려앉기

$$m \cdot \ddot{x} = -dF/dx - \gamma \cdot \dot{x}$$

"에너지를 잃지 못하는 공은 영원히 도착하지 못한다"

마찰이 전혀 없는 세계를 상상하자. 그 세계의 그네는 한 번 밀면 영원히 같은 높이로 왕복한다. 그 세계의 공은 소에 굴러 들어가도 정차하지 못한다. 내려온 속도 그대로 반대편 비탈을 치고 올라가, 영원히 골짜기 안을 오간다. 도착이 없는 세계. 끝나지 않는 음악.

정착하려면 잃어야 한다. 물리학은 이것을 소산(dissipation)이라 부르고, 이 책은 **잣아들**이라 부른다. 위 수식에서 $-\gamma \cdot \dot{x}$ 가 그 항이다. 움직임에 비례해 기운을 조금씩 덜어내는 항. 그네가 멈추는 것은 공기와 마찰에 운동의 기운을 내어 주기 때문이고, 음악의 악구가 종지에서 멈출 수 있는 것도 같다. 종지는 화성이 소의 바닥에 '도착하는 사건'이 아니라, 도착할 수 있을 만큼 기운이 잣아드는 **과정**이다. 리타르단도가, 디미누엔도가, 성부가 하나씩 숨을 놓는 그 몇 마디가 바로 잣아들의 의식이다.

쉬어가는 상자 · 감쇠 진동자 (Damped Oscillator)

그네·용수철·현처럼 흔들리는 것에 마찰(감쇠)이 더해진 계. 감쇠가 없으면 영원히 진동하고, 적당하면 몇 번 흔들리다 멈추고, 너무 세면 흔들리지도 못한 채 굳는다. 음악의 악구가 종지로 '내려앉는' 과정의 가장 단순한 물리 모형이다.

시험해 볼 수 있다. 좋아하는 곡의 마지막 종지 네 마디를 잘라내고 들어 보라. 화성적으로는 결국 으뜸화음에 도달하는데도 몸은 착지를 허락

받지 못한다. 비탈 중턱에서 소리가 끊긴 것이다. 우리 몸은 화음의 이름이 아니라 기운의 잣아들을 듣는다. 거꾸로, 감쇠가 지나친 연주도 있다. 템포가 너무 일찍부터 풀어지는 연주를 들으면 우리는 '늘어진다'고 말하는데, 이는 과감쇠 — 공이 구르기도 전에 굳어 버리는 상태 — 의 정확한 청각적 번역이다. 명연주자의 종지는 임계 감쇠 근처, 즉 가장 짧은 시간에 가장 부드럽게 바닥에 닿는 그 좁은 띠 위에 있다.

그래서 이 책은 종지를 이렇게 정의한다. **여운(餘韻)에 내려앉는 일.** 여운은 국악 미학이 가장 아끼는 말이지만, 그 물리적 내용은 보편적이다. 소리가 멈춘 뒤에도 산수는 남고, 붓끝이 소의 바닥에서 마지막으로 흔들리는 그 미세한 떨림까지가 음악이다. 종(鐘)을 생각해 보라. 타종은 한순간이지만 우리는 종소리가 아니라 종의 잣아들을 듣기 위해 산사에 간다.

이제 재료가 모였다. 풍경(1~2장)과, 그 위를 구르며 잣아드는 운동(3장). 다음 장에서 이 둘을 하나의 틀로 묶는다 — 그리고 그 틀이 책의 나머지 전부를 지탱한다.

4장 산수를 그리는 손, 그 위를 구르는 붓

양식 = 산수 · 작품 = 궤적 · 연주 = 그날의 붓

"음악은 두 개의 층이다"

여기까지의 재료를 정리하면 음악은 두 개의 층으로 나뉜다.

첫째 층은 **산수를 그리는 손**이다. 한 시대, 한 양식의 수많은 악보가 쌓여 화성 공간의 확률 분포를 만들고, 그 분포가 소와 고개의 배치를 결정한다. 이것은 좌표를 넣으면 높이 하나를 돌려주는 함수 — 공학의 말로는 여러 입력이 하나의 출력으로 모이는 다입력-단일출력의 구조다. 고전주의라는 산수, 낭만주의라는 산수, 계면조라는 산수. 양식(style)이 곧 산수다.

둘째 층은 **그 위를 구르는 붓**이다. 하나의 악곡은 그 산수 위에 그려진 하나의 궤적이다. 어느 소에서 출발해 어느 고개를 넘고 어디에서 찾아들어 여운에 내려앉는가. 상태가 다음 상태를 낳는 이 운동은 여러 성분이 함께 변하는 동역학이다. 작품(work)이 곧 궤적이다.

쉬어가는 상자 · 지형을 그리는 함수와 그 위의 동역학

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

그리고 연주는 그날의 붓놀림이다. 같은 궤적이라도 연주자에 따라 잣아들의 속도가, 고개를 넘는 기세가 다르다. 지휘자의 지휘봉 끝이 허공에

그리는 포물선을 본 적이 있다면, 당신은 이미 이 책의 핵심 그림을 본 것이다. 지휘봉 끝은 낙하하고, 튀어 오르고, 머뭇거리고, 내려앉는다. 카라얀의 그 유명한, 눈을 감은 채 허공에 그리던 곡선 — 그것은 산수 위 상태의 운동을 몸으로 번역한 것이다.

칸딘스키를 여기서 다시 불러도 좋겠다. 전작에서 나는 그의 점·선·면이 캔버스 위에서 서로 밀고 당기는 긴장의 평형을 이야기했다. 그는 「구성」 연작에 음악의 제목을 붙였고, 실제로 색과 소리를 함께 지각하는 사람이었다. 그가 캔버스에서 붙든 것이 멈춘 평형이었다면, 음악은 같은 긴장을 시간 위에 풀어놓은 것이다. 즉 음악은 흐르는 칸딘스키다.

정리하자. 양식은 산수, 작품은 궤적, 연주는 그날의 붓. 1부의 언어는 이것으로 완성이다. 2부에서 우리는 이 틀을 들고 가장 깊은 소의 세계로 들어간다. 운명이 문을 두드린다.

제 2 부

베토벤의 깊은 소

조성음악의 우물

$$m \cdot \ddot{\mathbf{x}} = -\nabla F - \gamma \cdot \dot{\mathbf{x}}$$

興於詩 立於禮 成於樂

시(詩)에서 일어나고, 예(禮)에서 서고, 악(樂)에서 완성된다.

— 공자, 『논어』 「태백」

"반복은 우물을 파고, 종지는 기운을 내려놓으며,
전조는 고개를 넘고, 방향은 귀향을 버린다."

5장 운명 동기: 같은 소를 두드리는 네 번의 망치

반복 → 체류 확률 ↑ → 소의 깊이 ↑

"반복은 산수를 조각한다"

따-따-따-판. 음악사에서 가장 유명한 네 개의 음은 놀랍도록 가난하다. 음높이 두 개, 리듬꼴 하나. 베토벤의 제자 신틀러는 스승이 이 동기를 두고 "운명은 이렇게 문을 두드린다"고 말했다고 전했지만, 오늘날 학자들은 그 일화를 신틀러의 창작으로 의심한다. 출처가 의심스러운 일화가 이백 년을 살아남은 이유는 역설적으로 분명하다 — 저 네 음이 정말로 무언가를 두드리는 소리로 들리기 때문이다. 이 장의 질문은 그래서 이것이다. 무엇을 두드리는가.

산수의 답: 청자의 마음속 지반을 두드린다. 청취는 학습이다. 곡이 시작되는 순간 청자의 마음속에는 아직 지형이 없다. 첫 여덟 마디에서 동기가 C단조의 기동 음들을 두드릴 때마다, 청자의 내적 확률 분포가 갱신된다. 이 음들은 자주 온다, 이 자리는 낮다. 망치질 한 번에 소가 한 뼨씩 깊어진다. **제시부의 집요한 반복은 우물 굴착 공정이다.** 베토벤은 청자의 마음 안에 C단조라는 깊은 소를 실시간으로 파 내려간 뒤에야, 그 우물의 깊이를 이용하는 다음 공정으로 넘어간다.

쉬어 가는 상자 · 동기 노동 (Motivic Work)

짧은 동기를 조각내고, 조율감하고, 겹치고, 늘이는 작곡 기법. 음악학의 오랜 개념이지만 산수의 눈으로 보면 그 물리적 내용이 드러난다 — 같은 굴착기를 산수의 여러 지점으로 옮겨 다니며 소들의 깊이 배치를 설계하는 일이다.

1악장 제시부를 마디 단위로 따라가 보면 이 공정의 설계도가 보인다. 처음 다섯 마디의 두 번의 타격(솔솔솔미 ♭, 파파파레)은 C단조의 두 기동을 박는다. 이어지는 스물다섯 마디 동안 같은 리듬꼴이 저음부와 고음부를 오가며 마흔 번 넘게 회귀한다. 통계로 보면 이 구간에서 C단조 기동음들의 체류 점유율은 압도적이며, 청자의 내적 분포는 급속히 그 주위로 응집한다. 흥미로운 것은 베토벤이 이 굴착을 '지루하지 않게' 만드는 수법이다 — 매번 같은 자리를 두드리되 높이와 악기와 셈여림을 바꾼다. 굴착 지점은 고정하고 망치만 바꾸는 것. 학습은 반복을 요구하지만 주의는 변화를 요구한다는, 인지의 이중 조건을 정확히 충족하는 설계다.

그리고 여기에 이 곡의 첫 번째 역설이 있다. 반복될수록 예측 가능해지고, 예측 가능해질수록 그 자리는 낮아지며, 낮아진 자리에서의 이탈은 그만큼 높은 도약이 된다. 베토벤이 판 우물의 깊이는 7장에서 보게 될 도약의 높이를 위한 저축이다. 깊이 파는 자만이 높이 뛸 수 있다 — 이것이 소나타 형식의 경제학이다.

6장 카덴차의 열역학: 종지는 여운에 내려앉는 일이다

세 가지 착륙: 수직 낙하 · 벼랑 위 정지 · 옆 소로 미끄러지기

"위종지 — 속았는데 기분이 좋은 물리학"

종지에는 세 가지 대표 유형이 있고, 산수 위에서 그것은 세 가지 착륙 방식이다.

완전정격종지는 수직 낙하 정착이다. 딸림의 벼랑에서 으뜸의 깊은 소 바닥으로, 기운을 찾아들이며 곧장 내려앉는다. 지휘봉 끝이 마지막 호를 그리고 멈춘다. **반종지**는 벼랑 위의 일시 정지다. 딸림화음 위에서 악구가 멈추지만 아무도 이것을 끝으로 듣지 않는다. 높은 곳에서의 정지는 정착이 아니라 유예이며, 몸은 다음 낙하를 기다린다. 그리고 **위종지(僞終止)**는 가장 교묘하다. 낙하가 시작되고, 청자의 몸이 소 바닥을 예측하는 바로 그 순간, 붓이 옆으로 미끄러져 이웃한 얇은 소에 내려앉는다.

쉬어 가는 상자 · 카덴차 · 종지 (Cadence)

악구를 마무리하는 화성 공식. 완전정격종지($V \rightarrow I$)는 가장 확정적인 마침, 반종지($\rightarrow V$)는 쉼표 같은 미완의 정지, 위종지($V \rightarrow vi$)는 예상을 비켜 가는 '가짜 마침'이다. 어원인 라틴어 *cadere*는 '떨어지다'라는 뜻 — 종지가 낙하라는 직관은 말 속에 이미 있었다.

위종지가 주는 '속았는데 기분 좋은' 감각은 예측의 물리학으로 풀린다. 청자의 몸은 낙하의 궤적을 앞질러 계산하고 있었고, 착지 직전에 궤적이 살짝 꺾였다. 예측은 빗나갔지만 추락은 아니었다 — 옆의 소도 소이기 때

문이다. 그리고 진짜 바닥이 아직 남아 있다는 약속이 생겼다. 하이든이 「놀람 교향곡」에서 조용한 선율 한가운데 굉음을 심은 것이 예측 오차의 망치라면, 위종지는 예측 오차의 깃털이다. 같은 원리, 다른 세기.

이제 5번 교향곡 1악장의 마지막을 들어 보라. 베토벤은 으뜸화음을 한번 찍고 끝내지 않는다. 몇 번이고, 거의 우스꽝스러울 만큼 다시 찍는다. 과잉처럼 들리는 이 반복은 5장에서 그토록 깊게 파 놓은 우물의 깊이에 대한 정직한 응답이다. 깊은 소일수록 붓이 바닥에서 완전히 잦아들기까지 오래 튄다. **종지의 길이는 그 곡이 판 우물의 깊이를 재는 자다.** 짧은 소품이 화음 하나로 끝나고 말러의 교향곡이 몇 분에 걸쳐 끝나는 이유가, 취향이 아니라 열역학이라는 것.

7장 고개 넘는 나그네: 전조의 지리학

전조 = 소에서 소로, 공통화음이라는 안부(鞍部)를 딛고

"전조의 감동은 신비가 아니라 지리다"

제시부 중간에서 음악은 C단조의 우물을 떠나 E♭장조로 이동한다. 교과서는 이것을 "관계조로의 전조"라고 무심히 적지만, 산수 위에서 이것은 하나의 여행이다. 깊은 소에 정착한 붓을 어떻게 다시 벼랑 위로 끌어올려 이웃 골짜기로 넘길 것인가.

베토벤의 답은 고개다. 두 조성이 화음들을 공유할 때, 그 공통화음은 두 골짜기가 어깨를 맞댄 능선의 안부(鞍部)가 된다. 등산가들이 잘 아는 그 지점 — 능선에서 가장 낮아 이쪽 골짜기에서도 저쪽 골짜기에서도 오르기 가장 수월한 통로. 나그네가 고개를 넘듯, 음악은 공통화음이라는 안부를 딛고 이쪽 사면에서 저쪽 사면으로 넘어간다. 슈베르트의 겨울 나그네가 마을에서 마을로 걸었던 것처럼, 조성음악 이백 년은 이 고개들의 지도 — 우리가 5도권이라 부르는 — 위를 걸어온 역사다.

쉬어 가는 상자 · 5도권 (Circle of Fifths)

열두 조성을 5도 간격으로 등글게 배열한 지도. 이웃한 조성끼리는 공유 화음이 많아 오가기 쉽고(낮은 고개), 원의 반대편 조성은 공유가 적어 오가기 어렵다(높은 준령). 산수의 눈으로 보면 이것은 조성 간 여행 비용의 등고선 지도다.

5도권을 산수로 다시 그리면 조성 사이의 '거리'가 물리량이 된다. 가까운 조로의 전조는 낮은 고개를 넘는 산책이고, 먼 조로의 전조는 높은 준

령을 넘는 등반이다. 등반에는 더 많은 기운이 들고, 그래서 낭만주의자들이 사랑한 3도 관계의 급전조 — 슈베르트가 즐겨 쓰던, 예고 없이 장3도 아래 조성으로 미끄러지는 그 순간 — 는 청자에게 숨이 턱 막히는 고도차로 체험된다. 안부를 거치지 않고 능선을 직접 타 넘는 여행. 위험하고, 그래서 아름답다.

전조의 감동은 신비가 아니라 지리다. 다만 그 지리가 마음속에 있을 뿐이다. 그리고 지리에는 언제나 지도 제작자가 필요하다 — 여기서 예고 하나. 17장에서 우리는 이 지리를 실제 데이터로 그리게 되는데, 그때 5도권이 코퍼스 통계에서 '스스로' 떠오르는 것을 보게 될 것이다. 이론이 데이터를 만든 것이 아니라, 데이터가 이론을 다시 낳는 순간이다.

8장 별이 빛나는 밤: 소용돌이에 머무는 용기

전개부 = 고에너지 체류 → 재현부 = 저축의 일시 상황

"귀향의 감동은 방향의 길이에 비례한다"

반 고흐가 생레미의 요양원 창가에서 「별이 빛나는 밤」을 그린 것은 1889년 6월이었다. 그 하늘에서는 어느 별도 정지해 있지 않다. 기운은 소용돌이치며 화폭 전체를 떠돈다. 백여 년 뒤 물리학자들이 이 그림의 소용돌이들을 정량 분석해 실제 난류의 통계 법칙과 놀랍도록 유사한 구조를 발견했다는 연구는 유명하다. 정신의 가장 요동치던 시기에 그린 붓끝이 유체의 수학을 품고 있었다는 사실 — 그러나 이 장에서 우리에게 필요한 것은 그 그림이 주는 감각 쪽이다. **높은 기운으로, 어디에도 내려앉지 않은 채, 머무는 상태.**

전개부가 바로 그것이다. 제시부가 두 개의 소를 파고 그 사이 고개를 보여 주었다면, 전개부는 붓을 아예 능선 위로 끌고 올라가 어느 골짜기에도 속하지 않은 채 떠돈다. 조성의 파편들이 스치고 — 여기서 F단조인가 싶으면 어느새 D♭로 미끄러져 있다 — 운명 동기는 조각나 소용돌이의 결이 되고, 청자는 지도 없는 고원에서 방향을 잃는다. 불안하다. 그런데 매혹적이다. 왜인가.

쉬어가는 상자 · 소나타 형식 (Sonata Form)

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

산수의 답은 이렇다. 소용돌이의 체류 시간은 저축이다. 높은 곳에 오래 머물수록 위치의 기운이 쌓이고, 그 기운은 재현부의 첫 화음에서 일시에 낙하로 전환된다. C단조 우물로의 귀향이 그토록 벅찬 것은 떠돌던 시간의 길이와 높이에 정확히 비례한다. 오디세우스의 십 년이 없었다면 이타카의 항구는 그저 항구였을 것이다. 소나타 형식이 이백 년을 살아남은 이유가 여기에 있다. 그것은 인간이 견딜 수 있는 최대의 방황과 그 방황이 지불하는 최대의 귀향을 저울질해 얻은, 산수 위의 최적 여행 설계도다.

2부를 닫으며 한 장의 그림을 남긴다. 1악장 전체의 기운 높낮이를 시간축 위에 그린 곡선 — 굴착(5장), 착륙 연습(6장), 고개(7장), 소용돌이와 귀향(8장). 이 곡선 하나가 베토벤의 산수다. 기억해 두시라. 13장에서 우리는 이 곡선과 거의 같은 곡선을, 물속에서 접히는 작은 단백질의 관찰 기록에서 다시 만나게 된다. 그러나 그 전에, 정반대의 풍경이 우리를 기다린다. 우물이 없는 음악. 안개의 나라로 간다.

제 3 부

수제천의 안개 낀 고원

정악의 얇고 넓은 산수

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + K \cdot \sum_j \sin(\theta_j - \theta_i)$$

樂也者 出於天而寓於人 發於虛而成於自然

악(樂)이란 하늘에서 나와 사람에게 깃들고, 허(虛)에서 발하여 자연에서 이루어지는 것이다.

— 성현, 『악학궤범』 서문

"깊은 소 없이 머무는 법이 있다.

숨을 나누어서, 떨면서, 그리고 시간을 풀어놓아서."

9장 계면조의 저지대: 다섯 음이 만드는 완만함

기능화성 없음 → 가파른 기울기 없음 → 얇고 넓은 산수

"결핍이 아니라 다른 통계다"

국립국악원 예약당에서 수제천을 처음 들었던 밤을 기억한다. 나는 그때 서양음악의 귀로 앉아 있었고, 그래서 두 번 놀랐다. 한 번은 느려서 — 한 박이 숨 하나만큼 길었다 — 또 한 번은 '어디로 가는지' 몰라서였다. 딸림화음의 조바심도, 종지의 착지감도 짝이지 않는데, 음악은 분명히 어딘가에 충만하게 존재하고 있었다. 공연이 끝나고 나오는 길에 나는 그 낯성을 메모장에 이렇게 적었다. "지도가 안 맞는다. 내 지도가."

그 메모가 이 장의 논지다. 어디로 가는지 모르겠다는 감각은 음악의 결핍이 아니라 듣는 이의 지도가 다른 산수에 놓였다는 신호다. 수제천은 남려계면조 — 南·黃·太·姑·林의 다섯 음을 기둥으로 하는 음조직 위에 서 있다. 여기에는 딸림7화음이 없다. 이쁨음이 으뜸음을 향해 반음으로 조여드는 그 가파른 비탈이 없다. 2장의 방법을 그대로 적용해 정간보 코퍼스에서 음 체류 분포를 세어 보면, 나오는 산수는 베토벤의 것과 전혀 다르다. 깊은 우물과 높은 벼랑 대신, 몇 개의 완만한 저지대가 넓게 이어진 고원. 소는 있으되 얇고, 고개는 있으되 낮다.

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.

쉬어가는 상자 · 정간보 (井間譜)

세종이 창안한 우물 정(井) 자 모양의 기보법. 서양 오선보보다 앞서 '시간의 길이'를 칸으로 기록한, 세계에서 가장 오래된 유량(有量) 악보 가운데 하나다. 소리의 시간을 격자로 좌표화한 발명 — 19장에서 이 사실이 다시 중요해진다.

서양 음악학이 오랫동안 국악을 "기능화성이 없는", "종지감이 약한" 음악으로 서술해 온 것은 베토벤의 산수를 자로 들고 고원을 잴 결과다. 고원에 우물이 없다고 적는 것은 사실이지만, 그것을 결핍으로 적는 순간 서술은 측정이 아니라 위계가 된다. 자를 내려놓고 고원을 고원으로 그리면 전혀 다른 질문이 열린다. **깊은 소 없이 음악은 어떻게 머무는가. 가파른 비탈 없이 음악은 어떻게 움직이는가.** 다음 세 장이 그 답이다 — 숨을 나누어서(10장), 떨면서(11장), 그리고 시간 자체를 풀어 놓아서(12장).

10장 연음, 숨을 나누는 물결

전체 기운 $\approx$ 일정 · 출렁이는 것은 기운을 든 손

"한 악기가 멈출 줄 알기에 다른 악기가 말할 수 있다"

수제천 연주의 어느 순간, 그때까지 음악을 이끌던 피리가 문득 소리를 거둔다. 서양 관현악이라면 사고에 해당할 이 침묵의 자리에서, 대금과 해금과 아쟁이 마치 오래 기다렸다는 듯 가락을 이어받는다. 피리 연주자는 그 사이 숨을 고르고, 장단의 매듭에서 다시 들어온다. 피리가 숨을 쉬는 동안 다른 악기들이 말하는 것 — 정악의 연음(連音) 형식이다.

산수의 눈으로 보면 연음은 선율 기법이 아니라 **밀도의 물결**이다. 악기 군을 층으로 나누어 각 층의 음향 밀도를 시간축에 그려 보면, 한 층이 잦아들 때 다른 층이 차오르는 교대의 물결이 나타난다. 전체 기운은 크게 출렁이지 않는다. 출렁이는 것은 그 기운을 담는 그릇, 기운을 든 손이다. 베토벤이 기운의 높낮이로 서사를 만들었다면, 수제천은 기운을 든 손을 바꾸는 것으로 시간을 만든다. 산수의 세로축이 아니라, 산수를 그리는 붓의 교대로.

쉬어가는 상자 · 연음 (連音)

주선율 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.

여기에는 물리를 넘는 무엇이 있다. 국악 평론가 윤중강은 수제천을 두고 한 악기가 멈출 줄 알기에 다른 악기가 말할 수 있는 음악이라고 썼다. 혼자서 완성하려 하지 않는 음악. 내가 멈추면 네가 이어 가는 음악. 서양 오케스트라의 튜티가 '모두 함께'의 미학이라면 연음은 '번갈아 숨 쉬'의 미학이다. 연음의 물결은 그래서 관계의 물리학이다. 얇은 고원에서 음악이 무너지지 않고 지속되는 첫 번째 비밀은, 붓 하나의 힘이 아니라 붓을 건네는 손들의 신뢰다.

이 형식의 정보이론적 함의도 짚어 둘 만하다. 베토벤의 서사는 '다음에 무엇이 오는가'의 긴장으로 주의를 붙든다. 연음은 '다음에 누가 이어받는가'로 주의를 붙든다. 사건의 예측에서 화자(話者)의 예측으로 — 긴장의 축을 옮긴 것이다. 판소리에서 고수의 추임새가 하는 일, 시나위 합주에서 즉흥의 주도권이 옮겨 다니는 일이 모두 같은 축 위에 있다. 한국 음악은 유난히 이 축을 사랑한다.

11장 떨림으로 머무는 법: 농현의 미세 진동

정착이 아니라 진동하는 체류

"미세하게 움직이는 것은 큰 움직임에 휩쓸리지 않는다"

피아노로 한 음을 누르면 소리는 태어나는 순간부터 죽어 간다. 잣아들다 사라진다. 아쟁이나 거문고로 같은 높이의 음을 내면 다른 일이 벌어진다. 연주자의 왼손이 줄을 누르고 흔들면서, 음은 미세하게 떨며 **살아서 머문다**. 농현(弄絃) — 글자 그대로 '줄을 희롱한다'는 뜻이다. 산조의 명인들은 농현의 폭과 속도만으로 유파가 갈리고, 옛 명인들은 "농현이 없는 소리는 죽은 소리"라고 잘라 말했다.

깊은 소가 없는 고원에서 붓은 어떻게 한자리에 머무는가 — 3부의 중심 질문에 대한 두 번째 답이 이것이다. 정착이 아니라 **진동하는 체류**. 붓끝은 한 점에 멈추는 대신 그 점 둘레를 잘게 떨며 맴돈다. 떨림은 이탈을 막는다. 자전거가 완전히 멈추면 쓰러지지만 미세하게 조향하는 동안은 서 있듯, 팽이가 돌기를 그치면 눕지만 도는 동안은 곧추서듯. 미세하게 움직이고 있는 것은 큰 움직임에 휩쓸리지 않는다. 얇은 소에서도 붓이 흘러내리지 않는 것은 바닥이 깊어서가 아니라 붓이 살아 있어서다.

쉬어가는 상자 · 농현·요성 (弄絃·搖聲)

현악기에서 줄을 흔들어 음을 떨게 하는 것이 농현, 관악·성악에서 음을 흔드는 것이 요성이다. 서양의 비브라토가 '장식'에 가깝다면, 국악의 농현은 음의 존재 방식 그 자체 — 음 하나가 하나의 생명처럼 태어나 떨고 구부러지고 잣아드는 전 과정이다.

수제천 3장에는 이 떨림의 극치가 있다. 기본 다섯 음 바깥의 음들 — 중려, 이척 — 이 요성의 물결 중간에만 잠깐 스쳐 지나간다. 독립된 소를 갖지 못한, 떨림 속에서만 존재하는 순간의 음들. 악보의 격자에는 없고 연주의 물결에만 있는 소리. 베토벤의 산수에서 희소한 것이 먼 조성의 골짜기였다면, 수제천의 산수에서 희소한 것은 진동의 마루에서만 반짝이는 물방울이다. 이 물방울들을 기억해 두시라. 14장에서 우리는 분자의 세계에서 — 파트너를 만나는 순간에만 형태를 얻는 단백질에서 — 정확히 같은 것을 만나게 된다.

12장 신축하는 시간: 박자가 산수를 강제하지 않을 때

강제 진동(박절) ↔ 자율 진동(호흡)

"지휘자 없는 합주는 명령이 아니라 경청으로 맞는다"

수제천을 메트로놈으로 재려는 시도는 유쾌하게 실패한다. 언젠가 나는 정말로 해 보았다. 18박 장단이라는 틀이 분명히 있는데도, 한 박의 길이가 연주마다, 대목마다 숨처럼 늘고 줄었다. 여섯 박째에서 메트로놈은 이미 딴 세상을 걷고 있었다. 지휘자도 없다. 수십 명의 연주자가 오직 서로의 호흡을 들으며 이 신축하는 시간을 함께 짠다. 집박(執拍)이 박(拍)을 한 번 울려 시작을 알릴 뿐, 그 뒤의 시간은 합주 스스로가 빛낸다.

물리학은 진동을 두 종류로 나눈다. 바깥에서 규칙적으로 힘을 받는 강제 진동과, 제 리듬으로 움직이는 자율 진동. 서양의 박절은 강제항이다. 일정한 맥박이 산수 바깥에서 붓을 몰아붙이고, 재즈 싱커페이션의 짜릿함도 그 강제항과의 어긋남에서 나온다. 수제천은 강제항을 끈 음악이다. 붓을 모는 것은 박이 아니라 숨이고, 숨은 산수의 안쪽 — 가락의 기울기 자체 — 에서 나온다. 그래서 수제천의 시간은 지형을 강제하지 않고 지형을 따라 흐른다. 루바토가 규칙으로부터의 '허용된 일탈'이라면, 수제천의 신축은 일탈할 규칙 자체를 세우지 않은 시간이다.

쉬어 가는 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 동시 명멸, 콘서트장 박수의 동기화, 그리고 지휘자 없는 합주가 모두 이 수식의 사례다.

지휘자 없이 어떻게 수십 명이 맞추는가. 여름밤 반딧불이 떼가 처음에는 제각각 깜빡이다가 이윽고 한 호흡으로 명멸하는 동기화 현상이 힌트다. 서로를 조금씩 듣고 조금씩 당기는 약한 결합만으로 전체는 하나의 리듬에 도달한다 — 이것이 3부 표제지에 걸어 둔 쿠라모토의 수식이 말하는 전부다. 수제천의 합주는 명령에 의한 일치가 아니라 경청에 의한 동기화다. 그리고 경청으로 도달한 일치는 명령으로 강제한 일치보다 느리게 오지만, 흔들림에 강하다.

3부를 닫으며 두 장의 산수를 나란히 놓는다. 깊은 소와 가파른 고개의 세계, 그리고 안개 낀 고원과 떨림의 세계. 하나는 낙하로 말하고 하나는 체류로 말한다. 이제 이 두 풍경을 들고 분자의 세계로 내려간다 — 그리고 그곳에서 이 두 풍경이 우리를 기다리고 있었다는 것을 발견하게 된다.

단백질과 음악

하나의 수학, 두 개의 세계

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

天地與我並生 而萬物與我爲一

천지는 나와 나란히 살고, 만물은 나와 더불어 하나다.

— 장자, 『장자』 「제물론」

"베토벤과 치그놀린이 같은 산수의 두 필사본이듯,
수제천과 천연변성단백질도 그러하다."

13장 치그놀린과 베토벤: 뚜렷한 소의 세계

이중 우물: $F(x) = (x^2 - a^2)^2$ 꼴의 두 골짜기

"왼쪽 페이지는 물리학, 오른쪽 페이지는 음악 — 그림 문법은 같다"

치그놀린은 사람이 설계한 가장 작은 단백질 가운데 하나다. 아미노산 열 개. 자연의 단백질이 수백 개의 아미노산으로 된 대하소설이라면 치그놀린은 하이쿠다. 그런데 이 하이쿠는 진짜 단백질이 하는 가장 극적인 일을 해낸다. 접힌다. 그리고 작기 때문에, 컴퓨터로 그 접힘의 전 과정을 처음부터 끝까지 관찰할 수 있다 — 분자동역학 연구자들이 이 작은 펩타이드를 초파리처럼 아끼는 이유다.

물속의 치그놀린을 오래 관찰하면 두 가지 모습이 압도적으로 자주 보인다. 실처럼 풀어진 모습과, 머리핀처럼 반듯하게 접힌 모습. 자주 보이는 상태는 낮다 — 1장의 약속을 적용하면, 이 분자의 산수에는 두 개의 뚜렷한 소가 있다. 풀림의 소와 접힘의 소, 그리고 그 사이의 고개. 분자는 열의 요동에 떠밀려 고개를 넘나들며 두 소 사이를 오간다. 오가는 빈도는 고개의 높이가 결정하고, 각 소에 머무는 시간은 소의 깊이가 결정한다.

쉬어 가는 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.

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.

이 산수를 그려서 2부의 마지막 그림 — 베토벤 1악장의 기운 곡선 — 옆에 놓아 보라. 두 개의 깊은 소, 그 사이의 안부, 고개를 넘는 드문 여행, 소바닥에서의 긴 체류. 왼쪽 페이지는 물리학 저널의 그림이고 오른쪽 페이지는 음악 분석인데, 그림 문법은 구별되지 않는다. 이것이 우연이 아님을 이 책은 이미 안다. 두 그림 모두 $F = -\log P$ 라는 같은 붓으로 그렸기 때문이다. **접힘/풀림의 이중 소와 으뜸조/딸림조의 이중 소는 같은 수학의 두 필사본이다.**

나는 이 분자의 산수를 그리는 일을 직업으로 삼아 왔다. 밤새 시뮬레이션을 돌리고 아침에 등고선을 열어 보는 일. 그러니 프롤로그의 그 새벽, 화면의 점과 이어폰의 전개부가 겹쳐 보였던 순간은 착시가 아니라 늦은 알아봄이었다. 나는 몇 년 동안 매일 음악의 그림을 보고 있었으면서, 그것이 음악의 그림이라는 것만 몰랐던 것이다.

14장 천연변성단백질과 수제천: 안개 낀 고원의 동형 사상

얇은 다중 소 + 미세 요동 = 구조 없는 존재 방식

"이 책의 중심 명제"

교과서의 단백질은 형태가 운명이다. 서열이 구조를 정하고 구조가 기능을 정한다. 그런데 우리 몸속 단백질의 상당수는 이 교리를 배반한다. 고정된 형태 없이, 수많은 모습 사이를 쉽 없이 오가며 사는 단백질 — 천연변성단백질(IDP)이다. '구조 없는 단백질'이라는 형용모순의 존재. 이들이 발견되었을 때 구조생물학은 잠시 당황했다. 결정으로 굳혀 X선으로 들여다보는 방법론 자체가 통하지 않았기 때문이다. 잡히지 않는 것은 없는 것으로 취급되기 쉽다 — 과학사에서 여러 번 반복된 실수다.

이들의 산수를 그리면 낮익은 풍경이 나온다. 깊은 소가 없다. 얇은 저지대 여럿이 넓게 이어진, 안개 낀 고원. 분자는 어느 골짜기에도 정착하지 않고 미세한 요동으로 고원 전체를 순례한다. 특정한 파트너 분자를 만나는 순간에만 잠깐 한 형태로 응결했다가, 헤어지면 다시 안개로 돌아간다.

쉬어 가는 상자 · 천연변성단백질 (IDP)

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

11장의 물방울을 기억하는가. 떨림 속에서만 존재하던 수제천의 순간
음들. IDP의 일시적 구조들이 정확히 그것이다. 여기서 이 책의 중심 명제
를 적는다. **베토벤과 치그놀린이 같은 산수의 두 필사본이듯, 수제천과 천
연변성단백질은 같은 산수의 두 필사본이다.** 깊은 소의 세계와 안개 낀 고
원의 세계라는 대비가, 음악과 분자 양쪽에서 서로를 전혀 모른 채, 같은
수학 위에 나타난다.

쉬어 가는 상자 · 동형(同型)과 유비(類比)

동형은 서로 다른 두 대상이 같은 수학 구조를 공유한다는 뜻이고, 유비는
그저 닮았다는 뜻이다. 이 책에서 확률→산수의 구조와 소의 깊이→체류의
역학은 동형이며, 분자를 움직이는 열과 음악을 움직이는 문화 통계의 관계
는 유비다. 이 선을 넘으면 과학이 인상비평이 된다.

선을 지킨 뒤에야 다음 문장을 쓸 자격이 생긴다. 알츠하이머 연구의 최
전선에 있는 타우 단백질은 IDP다. 정상일 때는 안개처럼 유연하게 신경
세포의 골격을 붙들다가, 어느 순간 잘못 응결해 엉겨 붙는다. 안개 낀 고
원을 이해하는 수학은, 그러므로 수제천을 이해하는 수학이면서 동시에
어느 병상의 시간을 이해하려는 수학이기도 하다. 나는 이 문장을 쓰면서
오래 망설였다. 예술과 질병을 한 문장에 넣는 일이 가벼워 보일까 두려웠
기 때문이다. 그러나 같은 수학이 두 곳에서 참이라면, 그 사실을 적지 않
는 것도 정직은 아니다.

15장 수축하는 모델은 하나의 조성밖에 듣지 못한다

수축 사상의 고정점은 반드시, 그리고 오직 하나다

"안정성과 다양성은 공짜로 양립하지 않는다"

이 책에서 가장 어려운 장이다. 그러나 이 고개를 넘으면 4부의 가장 높은 전망이 열린다. 천천히 가자. 수식은 하나도 외울 필요가 없고, 그림 하나만 남으면 된다.

첫걸음 — 유비. 절대 길을 잃지 않는 내비게이션을 상상하라. 어디서 출발하든, 어떤 실수를 하든, 반드시 목적지에 도착시켜 준다. 완벽해 보이는 이 기계의 숨은 조건은 하나다. **목적지가 하나뿐이어야 한다.** 모든 길이 한 점으로 수렴한다는 보장은, 수렴할 점이 유일하다는 전제와 한 몸이기 때문이다. 두 목적지를 모두 보장할 수는 없다 — 어느 쪽으로 갈지 결정할 근거가 기계 안에 없으니까.

둘째 걸음 — 그림으로 보는 증명. 지도 위의 두 점을 잡고, 어떤 변환을 한 번 적용할 때마다 두 점 사이의 거리가 반드시 일정 비율(예: 90%)로 줄어든다고 하자. 두 번 적용하면 81%, 열 번이면 35%, 백 번이면 사실상 0. 어떤 두 점을 골라도 결국 겹친다. 그러니 도착점은 하나일 수밖에 없다. 이것이 바나흐의 고정점 정리이며, 위 표제 수식이 말하는 전부다.

쉬어 가는 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.

셋째 걸음 — 사고실험. 인공지능 연구자들은 안정성이 절실할 때 이 정리에 기대어 왔다. 모델의 내부 동역학을 수축으로 설계하면 폭주하지 않고 반드시 수렴한다는 보증서를 얻는다. 그런데 보증서의 뒷면에는 작은 글씨가 있다. 수렴점은 하나다. 산수의 말로: **이 모델의 세계에는 소가 단 하나뿐이다.**

이제 이 기계에게 베토벤을 들려주자. C단조의 소, E♭의 소, 그 사이의 고개와 전개부의 소용돌이 — 이 풍경을 소가 하나뿐인 기계는 원리적으로 답을 수 없다. 학습을 아무리 시켜도, 데이터를 아무리 부어도 안 된다. 못 배우는 것이 아니라 **표현할 수 없는** 것이다. 이 기계에게 세계는 언제나 하나의 집이며, 모든 여행은 그 집으로 수렴하는 착각으로 끝난다. **수축하는 모델은 하나의 조성밖에 듣지 못한다.**

그러므로 전조를, 이중의 소를, 다중의 상태를 담으려면 수축이라는 안전보장 자체를 포기해야 한다. 안정성과 다양성은 공짜로 양립하지 않는다 — 무엇을 버릴지 고르는 것, 그것이 설계다. 전작에서 나는 완벽한 1의 등거리성을 포기하고 0.9의 여백을 두는 '미세한 양보'를 이야기했다. 지금 이 장에서 요구되는 것은 그 반대 방향의 양보다. 전역적 보장을 국소적 안정성과 전역적 소산 구조로 바꾸는 일. 그리고 나는 연구자로서 증언할 수 있다. 이 포기의 설계는 칠판 위의 사변이 아니라, 지금 이 분야가 실제로 벌이고 있는 공사다.

16장 Multistate 난제: 전조를 이해하는 기계를 향해

서열 → 하나의 구조 → 서열 → 상태들의 분포

"같은 관문 앞에 줄 서 있는 두 문제"

2024년 노벨 화학상은 단백질 구조 예측과 설계에 주어졌다. 아미노산 서열을 넣으면 접힌 구조를 돌려주는 기계 — 반세기의 난제가 풀렸다고 세계가 환호했다. 그 성취의 크기를 축소할 생각은 조금도 없다. 다만 그 성취의 정확한 이름을 적어 두자. "단일 구조 예측"이다. 서열 하나에 답 하나. 산수의 말로 하면, 가장 깊은 소 하나의 위치를 알아내는 기계다.

생명은 그러나 소 하나로 살지 않는다. 13장의 치그놀린조차 두 소를 오가고, 14장의 IDP는 아예 안개 낀 고원을 순례한다. 약이 듣는다는 것은 대개 단백질이 여러 상태 사이를 오가는 그 비율을 바꾼다는 뜻이고, 병이 듣는다는 것은 그 비율이 잘못 기울었다는 뜻이다. 단백질이 여러 상태로 존재한다는 것 — multistate — 을 예측하는 일이 다음 난제로 공인되어 있고, 세계의 연구실들이 지금 그 앞에 서 있다.

쉬어가는 상자 · Multistate 문제

하나의 서열이 여러 개의 안정한 구조를 가질 수 있고, 환경에 따라 그 사이를 오간다는 사실을 예측하는 문제. 답이 '하나의 구조'가 아니라 '상태들의 분포'여야 한다는 점에서, 단일 구조 예측과는 문제의 종류가 다르다.

그리고 15장을 통과한 독자는 이 난제의 구조를 이미 안다. 여러 소를 가진 산수를 담으려면 수축의 보증서를 반납해야 한다는 것, 문제의 핵심

이 데이터의 양이 아니라 표현의 원리에 있다는 것. 더 많은 실험 데이터가 저절로 이 벽을 넘겨 주지는 않는다. 벽은 계산 자원이 아니라 수학의 형태에 있다.

음악으로 번역하면 이렇다. 전조를 이해하는 기계를 짓는 일과, 질병 단백질의 여러 얼굴을 예측하는 기계를 짓는 일은, 같은 수학적 관문 앞에 줄서 있다. 하나의 조성만 아는 기계는 겨울 나그네의 여정을 한 마을로 뚫개고, 하나의 구조만 아는 기계는 타우 단백질의 두 얼굴을 하나로 뚫는다. 같은 실패의 두 이름이다.

4부를 여기서 닫는다. 우리는 음악에서 출발해 분자에 닿았고, 분자의 최전선에서 다시 음악의 가장 오래된 기술 — 전조 — 을 발견했다. 남은 것은 이 왕복 여행을 독자의 손으로 직접 해 보는 일이다. 5부는 실험이다. 그리고 실험 전에는, 먹줄을 긋는다.

새로운 악보

산수를 짓는 실험

$$19 \times 21 \times 28 = 11,172$$

有天地自然之聲 則必有天地自然之文
천지자연의 소리가 있으면, 반드시 천지자연의 글이 있다.

— 정인지, 『훈민정음 해례본』 서문

"읽는 것에서 짓는 것으로.
그리고 짓기 전에, 먹줄을 긋는다."

17장 하루짜리 실험: 악보 뭉치로 소를 찍다

화음 → 조성 중심 좌표 → 체류 히스토그램 → $-\log$

"결과를 보기 전에 예측을 봉인할 것"

이 책의 주장들은 독자가 하루 만에 검증할 수 있어야 한다. 그것이 이 장의 존재 이유다. 그리고 시작 전에 과학의 오랜 지혜 하나를 빌린다. 결과를 보기 전에 예측을 봉인할 것. 목수가 나무를 자르기 전에 먹줄을 먼저 긋듯이. 먹줄은 자른 뒤에 그으면 아무것도 재지 못한다.

먹 줄 · 사전등록 (Pre-registration)

가설: 서양 고전 코퍼스의 화성 산수에서 가장 깊은 소는 으뜸화음 자리에 파일 것이다. **부가 예측:** 두 번째로 깊은 소는 딸림화음 자리다. **반증 조건:** 최심점이 으뜸 계열 밖이면 가설 기각. 이 문장들은 실험 전에 쓰였고, 실험 후에 수정되지 않았다.

절차는 세 걸음이다. 첫째, 공개 MIDI 악보 뭉치를 모은다. 둘째, 각 순간의 화성을 조성 중심(tonal centroid)이라는 연속 좌표로 옮긴다 — 화음을 '이름'이 아니라 '위치'로 바꾸는 단계이며, 2장 말미에서 예고한 바로 그 장치다. 셋째, 그 좌표 공간의 체류 빈도를 세어 $-\log$ 를 취한다. 노트북 한 대, 몇 시간이면 당신의 첫 소리의 산수가 화면에 뜬다.

쉬어 가는 상자 · 조성 중심 좌표 (Tonal Centroid)

열두 음의 울림을 몇 개의 연속 축(5도 관계·장3도 관계·단3도 관계)에 투영해 화음을 하나의 '위치'로 바꾸는 좌표계. 가까운 조성끼리 좌표도 가까워지므로, 화성 공간을 지도처럼 다룰 수 있게 된다.

결과. 가설은 살아남았다. 가장 깊은 소는 예측대로 으뜸 자리에 파였고, 5도권의 구조가 등고선 위에 스스로 떠올랐다 — 7장에서 예고한 그 순간이다. 이론이 데이터를 만든 것이 아니라 데이터가 이론을 다시 낳았다.

그러나 정직하게 적는다. 먹줄이 빗나간 곳도 있었다. 부가 예측이 틀렸다 — 두 번째로 깊은 소는 딸림이 아니라 버금딸림 쪽이었고, 딸림 자리의 언덕은 예상보다 훨씬 낮았다. 딸림7화음은 '드물게 스치는' 화음이 아니라 상당히 오래 머무는 화음이었던 것이다. 돌이켜 보면 당연하다. 2장의 학생이 삼십 초를 못 견딘 것은 그 화음이 드물어서가 아니라 기울기가 가팔라서였다. **깊이와 기울기는 다른 것이다.** 산수는 이 구분을 요구했고, 나의 첫 먹줄은 그것을 흐리고 있었다.

또 하나, 단조 지역의 소들은 장조의 거울상이 아니라 비대칭으로 일그러져 있었다. 화성단음계와 가락단음계가 공존하는 실제 관행이 지형을 우그러뜨린 것이다. 교과서가 대칭으로 그리는 것을 코퍼스는 비대칭으로 답했다.

고백하건대, 빗나간 이 두 지점이 들어맞은 지점보다 훨씬 흥미롭다. 예측이 맞은 곳에서 우리는 안심하고, 빗나간 곳에서 우리는 배운다. 전체 코드와 데이터는 부록 B의 주소에 있다.

18장 국악 코퍼스의 산수학: 문화가 다르면 소도 다르다

같은 파이프라인, 다른 코퍼스 → 다른 산수

"안개를 안개로 그리는 것도 지도 제작이다"

같은 파이프라인에 다른 악보를 넣는다. 이번에는 정간보를 디지털화한 국악 코퍼스다. 방법을 한 글자도 바꾸지 않는 것이 이 비교의 정당성이므로, 17장의 절차를 그대로 반복한다. 다른 결과가 나온다면 그것은 방법의 차이가 아니라 음악의 차이여야 한다.

먼저 데이터의 정직성부터. 국악의 디지털 악보는 서양 코퍼스에 비해 양이 적고 장르 편중이 있다. 궁중 정악은 비교적 잘 정리되어 있지만 민속악의 즉흥은 애초에 악보화가 어렵고, 농현과 시김새는 격자에 담기지 않는다. 그러므로 이 실험이 그리는 것은 '국악의 산수'가 아니라 '**현재 디지털화된 정악 표본의 산수**'다. 표본이 닿지 않는 영역은 지도에서 회색으로 남겨 두고 모른다고 적는다. 안개를 안개로 그리는 것도 지도 제작이다. 없는 데이터를 매끄러운 곡선으로 메우는 순간, 지도는 소설이 된다.

먹 줄 · 사전등록

가설: 정악 표본의 최심 소 깊이는 서양 코퍼스보다 얇고, 소의 개수는 더 많으며, 소 사이 고개는 낮을 것이다(3부의 청취 인상을 정량 예측으로 옮긴 것). **반증 조건:** 셋 중 둘 이상이 반대 방향이면 기각.

그 한계 안에서 결과는 선명하다. 세 예측이 모두 같은 방향으로 확인되었다. 최심 소의 깊이는 뚜렷하게 얇고, 소의 개수는 더 많으며, 소들 사이

고개는 낮다. 3부에서 귀로 들었던 고원이 숫자로 다시 나타난 것이다. 예상하지 못했던 것은 소들의 **모양**이었다. 서양 코퍼스의 소가 좁고 깊은 우물이라면, 정악의 소는 넓고 가장자리가 흐릿한 접시에 가까웠다 — 농현이 만드는 음고의 폭이 소의 경계 자체를 번지게 한 것으로 보인다. 11장의 떨림이 지형의 해상도를 바꾼다는 뜻이며, 이는 먹줄에 없던 발견이라 다음 실험의 가설로 넘긴다.

두 산수를 나란히 놓으면 우열의 서사가 설 자리는 없다. 있는 것은 서로 다른 두 통계, 서로 다른 두 거주 방식이다. 음악의 기운은 물리 법칙이 아니라 문화의 축적에서 태어난다 — 2장에서 심어 둔 이 문장이 여기서 데이터로 꽃핀다. **산수의 다양성은 문화 다양성의 수학적 형태다.** 그리고 한 문화의 음악이 사라진다는 것은, 이 우주에서 한 종류의 지형이 영원히 사라진다는 뜻이다.

쉬어가는 상자 · 특징문자 (Featural Alphabet)

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

그리고 이것은 생명의 문자와 같은 문법이다. 아미노산의 결합 구조가 그 화학적 성질 — 물을 좋아하는가 싫어하는가, 크기는 어떠한가 — 을 부호화하듯이. 단백질 접힘을 계산할 때 우리가 서열을 좌표로 바꿀 수 있는 것은 문자에 물리가 들어 있기 때문이다. 한글도 그렇다.

평행은 조합의 층위에서 완성된다. 염기 넷이 셋씩 묶여 코돈이 되고 코돈이 아미노산을 지정하듯, 자모는 초성·중성·종성으로 묶여 음절이 된다. 현대 한글의 조합 가능 음절은 $19 \times 21 \times 28 = 11,172$ 개. 스물넷 남짓의 벽돌에서 만 개가 넘는 블록이 나온다. **자모는 염기, 음절은 코돈, 단어는 단백질, 시(詩)는 접힌 구조다.**

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.

그렇다면 물어야 한다. 아미노산 서열을 넣으면 접힘의 산수를 돌려주는 기계가 있듯이, 자모의 서열을 넣으면 소리의 산수를 돌려주는 기계를 지을 수 있는가. 다음 장에서 짓는다. 이 책이 지금까지 산수를 읽어 왔다면, 이제부터는 짓는다.

20장 시가 산수가 될 때: 서열에서 풍경을 짓는 실험

자모 서열 → 좌표열 → 산수 → 잣아들의 궤적 = 선율

"세종은 소리를 도형으로 지었고, 우리는 도형으로 소리를 되짓는다"

먹 줄 · 사전등록

가설: 제자 원리를 반영한 자모 배치(조음 위치·방법이 가까우면 좌표도 가깝게)로 지은 산수가, 무작위 배치로 지은 산수보다 원문 시의 낭독 인상과 더 부합한다는 청감 평가를 받을 것이다. **반증 조건:** 평가단이 두 산수의 결과물을 구별하지 못하면 기각.

설계는 소박하다. 자모마다 제자 원리에 근거한 좌표를 준다 — 어금닛 소리·혓소리·입술소리·잇소리·목구멍소리의 다섯 계열을 축으로 삼고, 획을 더한 정도를 세기 축으로 삼는다. 시 한 편을 자모 서열로 풀어 그 좌표열의 체류 분포를 세면 산수가 나오고, 그 위에 3장의 잣아들 동역학으로 붓을 굴리면 선율의 골격이 나온다. 1장부터 쌓아 온 도구가 전부 여기서 한 번에 쓰인다.

시조 한 수를 넣었다. 초장·중장이 완만한 고원을 그리다가 종장의 낙구에서 깊은 소가 파였다 — 시조의 형식이 산수의 형질로 번역된 것이다. 자유시 한 편을 넣자 골짜기가 흩어진 안개 낀 고원이 나왔다. 형식이 지형을 낳는다는 것을, 나는 화면 앞에서 처음 눈으로 보았다.

결과는 겸손하게 적는다. 소규모 청감 평가에서 제자 배치는 무작위 배치를 이겼으나 압도하지는 못했다. 가설은 살았지만 상처를 입었다. 그리

고 상처의 위치가 흥미롭다 — 자음 배치를 무작위로 바꾸면 평가가 크게 떨어졌지만, 모음 배치를 흐트러뜨렸을 때의 타격이 훨씬 컸다. 모음이 선율의 뼈대를 지고 있었던 것이다. 돌이켜 보면 노래는 모음 위에서 늘어난다. 판소리의 긴 음도, 그레고리오 성가의 멜리스마도 모음 위에서 벌어진다. 알고 있던 사실을 나는 데이터에 얻어맞고서야 설계에 반영하게 되었다. 이것이 다음 실험의 먹줄이 된다.

세종은 소리를 도형으로 지었다. 우리는 그 도형으로 소리를 되짚는 첫 삽을 떴을 뿐이다. 그러나 첫 삽의 방향이 옳다면, 언젠가 한글로 쓰인 모든 시는 저마다의 산수를, 저마다의 음악을 품게 된다. 그때 이 책은 낡을 것이고, 낡아도 좋다.

21장 먹줄을 먼저 긋다: 예술을 측정하는 일의 윤리

측정의 정당성 = 측정하는 자의 정직

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

이 책에 대한 가장 정당한 반감을 내 손으로 적는 것으로 마지막 장을 시작한다.

음악을 히스토그램으로 만드는 일은 음악을 죽이는 일 아닌가. 측정된 감동은 이미 감동이 아니지 않은가. 수치화는 결국 순위표가 되고, 순위표는 결국 권력이 되지 않는가. 나는 이 반감을 존중한다. 존중하는 정도가 아니라, 역사가 여러 번 그 반감이 옳았음을 보여 주었다는 것을 안다. 인간을 재려던 측정들이 어떤 위계로 귀결되었는지, 미술사를 가르치던 시절 나는 학생들에게 그 사례를 여러 번 짚어 주었다.

그래서 이 책은 처음부터 세 개의 약속 위에 지어졌다. **첫째, 측정 전에 먹줄을 긋는다** — 17·18·20장의 가설은 결과를 보기 전에 봉인되었다. **둘째, 빗나간 것을 그대로 실는다** — 세 실험 모두에서 예측이 어긋난 지점(딸림의 낮은 언덕, 소의 흐릿한 가장자리, 모임의 우세)을 숨기지 않았다. **셋째, 누구나 다시 그릴 수 있게 한다** — 코드와 데이터를 공개했고, 재현 실패의 제보를 받을 창구를 열어 두었다.

쉬어가는 상자 · 사전등록과 재현 가능성

결과를 본 뒤에 가설을 고쳐 쓰면 어떤 데이터로도 그럴듯한 이야기를 만들 수 있다. 이를 막기 위해 가설·분석 방법·반증 조건을 실험 전에 공개적으로 고정하는 것이 사전등록이다. 여기에 코드와 데이터의 공개가 더해질 때, 제3자의 재현이 가능해진다.

세 약속이 겨냥하는 것은 하나다. 측정하는 자의 정직. 나는 이것을 책에서 배우지 않았다. 연구자로서 나는 내가 세운 게이트가 기각되는 것을 지켜본 적이 있고, 완성 직전의 논문을 데이터의 흠결 때문에 내 손으로 물린 적이 있다. 몇 달의 노동과 몇 사람의 기대를 접는 결정이었고, 접는 편이 옳다는 것을 아는 것과 실제로 접는 것은 전혀 다른 일이었다. 그날들이 가르쳐 준 것은 역설이다. 실패를 공개할 수 있을 때에만 성공이 신뢰를 얻고, 자를 의심할 수 있을 때에만詹 값이 의미를 가진다.

측정은 감상을 대체할 때가 아니라 감상을 깊게 할 때에만 정당하다. 이 구분은 실천에서 이렇게 나타난다. 산수는 어떤 음악이 더 훌륭한지 말하지 않는다. 소가 깊다고 좋은 음악이 아니고 고원이 넓다고 열등한 음악이 아니다. 산수가 말할 수 있는 것은 오직 '어떻게 생겼는가'뿐이며, 무엇이 아름다운지는 끝내 듣는 사람의 몫이다. 이것은 겸손이 아니라 방법론의 경계선이다. 경계선을 넘는 순간 측정은 취향의 위장이 된다.

이 책의 산수들이 당신의 베토벤을, 당신의 수제천을 조금도 설명해 치우지 않았기를 바란다. 오히려 다음 청취에서 소의 깊이와 안개의 결을 한 겹 더 듣게 했기를. 지도는 영토가 아니다. 그러나 정직한 지도는 영토를 더 사랑하게 만든다.

에 필 로 그

평형에서 울림으로

도착이 아니라, 도착해 가는 동안

$$\dot{z} \rightarrow 0$$

大方無隅 大器晚成 大音希聲 大象無形

큰 모서리는 각이 없고, 큰 그릇은 늦게 이루어지며, 큰 소리는 들리지 않
고, 큰 형상은 형태가 없다.

— 노자, 『도덕경』 41장

"음악은 소의 바닥이 아니다.

바닥을 향해 굴러가는 동안이 음악이다."

에필로그 · 평형에서 울림으로

다시 새벽 세 시다. 화면에는 여전히 산수가 떠 있고, 이어폰에서는 이제 수제천이 흐른다. 프롤로그에서 겹쳐 들렸던 두 세계를 이제 나는 겹쳐 보지 않는다. 겹쳐 보는 것은 발견의 방식이고, 이해한 뒤에는 둘을 나란히 놓을 수 있게 되기 때문이다. 왼쪽에 깊은 소, 오른쪽에 안개 낀 고원. 같은 붓으로 그린 두 장의 산수.

첫 책에서 나는 멈추어 선 형태들의 평형을 물었다. 한글의 기하가 어떻게 균형에 도달하는가를. 그 책의 마지막 말은 물은 그릇을 기억하지 않는다는 것이었다. 이 책에서 물은 것은 움직이는 것들의 평형이다. 잣아들면서 나아가고, 떨면서 머무는 것들. 그리고 이 책이 얻은 답은 첫 책의 답과 어긋나지 않으면서 한 겹을 더한다. **물은 그릇을 기억하지 않지만, 산은 물이 지나간 자리를 기억한다.** 우리가 양식이라 부르고 전통이라 부르는 것의 정체가 그 기억이다.

음악이 그것을 가장 먼저 알고 있었다. 음악은 소의 바닥이 아니다. 바닥을 향해 굴러가는 동안, 고개 위에서 머뭇거리는 동안, 안개 속을 순례하는 동안이 음악이다. 도착한 음악은 이미 끝난 음악이고, 우리가 사랑하는 것은 언제나 도착해 가는 동안이다. 큰 소리는 들리지 않는다고 노자는 적었다. 다 올린 뒤에도 남아 있는 것, 여운(餘韻) — 어쩌면 그것이 대음희성(大音希聲)의 가장 정직한 번역일지 모른다.

어쩌면 우리의 시간도 그러할 것이다. 무엇이 되기 위해 사는 것이 아니라 되어 가는 동안이 삶인 것. 여섯 살의 도화지에서, 격납고의 로터 마스트에서, 새벽의 시물레이션에서, 나는 늘 같은 하나를 다른 이름으로 만나 왔다. 이번 이름은 울림이었다.

이 책의 기술적 어휘들 — 조성 중심 좌표, 준안정 상태, 수축 사상 — 은 잊어도 좋다. 다만 두 개의 귀를 열어 가시기를. 하나는 표면의 소란 아래

흐르는 원리를 듣는 귀, 다른 하나는 그 원리 가운데 무엇이 아름다운지를
고르는 귀. 원리 없는 아름다움은 흩어지고, 아름다움 없는 원리는 방향을
잃는다.

이제 당신의 차례다. 당신이 오늘 들을 한 곡의 산수는, 이 세상에 당신
만이 그릴 수 있다.

피리가 멈추었다.
대금이 이어받는다.

2026년, 대전에서
허 상 훈

부록 A · 수학 산책 — 로그와 기울기만으로 읽는 자유에너지

본문이 격리해 둔 수식들을 장 번호 순으로 본다. 고등학교 수준의 로그와 기울기를 넘지 않는다.

A1 (1장) 자유에너지. $F(x) = -kT \cdot \log P(x)$. P 는 상태 x 가 관찰될 확률, kT 는 세로축의 눈금(온도 상수)일 뿐 산수의 모양을 바꾸지 않는다. 확률이 10배 낮아지면 높이는 일정 폭만큼 올라간다.

A2 (2장) 기울기와 복원력. 힘 $= -dF/dx$. 비탈이 가파를수록 되돌리는 힘이 세다. 화성학의 '해결 경향'의 수학적 정의이며, 깊이(체류)와 기울기(조바심)가 서로 다른 양이라는 17장의 발견이 여기서 형식적으로 구분된다.

A3 (3장) 감쇠 진동자. $m \cdot \ddot{x} = -dF/dx - \gamma \cdot \dot{x}$. γ 가 잣아들의 계수다. γ 가 작으면 여운이 길고(과소감쇠), 크면 늘어지며(과감쇠), 그 사이 임계 감쇠 근처에서 가장 짧고 부드러운 착지가 일어난다.

A4 (11장) 진동 체류. 얇은 소 + 지속적 가진(加振)의 준안정 상태. 소의 깊이가 얇아도, 미세 진동의 시간 척도가 이탈의 시간 척도보다 짧으면 체류가 유지된다.

A5 (12장) 쿠라모토 동기화. $\dot{\theta}_i = \omega_i + (K/N) \cdot \sum_j \sin(\theta_j - \theta_i)$. 결합 세기 K 가 임계값을 넘으면 전체 위상이 저절로 맞는다. 지휘자는 K 를 키우는 장치이고, 정악의 합주는 K 를 경청으로 얻는다.

A6 (15장) 바나흐 고정점 정리. 완비 거리공간에서 $d(f(a), f(b)) \leq c \cdot d(a, b)$, $c < 1$ 이면 고정점은 존재하고 유일하다. 유일성이 곧 단일 소 붕괴의 원리다. 다중 소를 위해서는 전역 수축 보장을 국소 안정성과 전역 소산 구조로 대체해야 하며, 이는 현재 활발한 연구 주제다.

A7 (17·20장) 좌표화. 조성 중심 좌표는 열두 음의 세기 벡터를 몇 개의 원형 축에 투영해 얻는다. 자모 좌표는 조음 위치 계열을 축으로, 가획(加畵)의 수를 세기 축으로 삼아 구성했다. 구체적 정의식은 저장소의 문서에 둔다.

부록 B · 실험 프로토콜 — 재현 가능한 소리의 산수

17·18·20장의 완전 재현 절차. ① 환경: 파이썬 버전과 라이브러리 목록을 버전 고정으로 명시. ② 데이터: 출처, 수집 일자, 전처리 규칙(조옮김 정규화, 결측 처리). ③ 변환: 조성 중심 좌표 변환식과 히스토그램 격자 설정. ④ 먹줄: 사전등록문 원문과 등록 일시, 그 파일의 검증 해시. ⑤ 산출: 본문 각 그림을 생성하는 명령어. ⑥ 창구: 재현에 실패한 독자의 제보를 받는 연락처.

저장소 주소와 데이터 꾸러미의 검증 해시는 출간 시점에 확정하여 이 자리에 인쇄한다. 재현 실패의 보고는 이 책에 대한 가장 값진 서평이다.

부록 C · 용어 지도 — 음악 · 물리 · 기계학습

소리의 산수 = 자유에너지 지형 = 학습된 에너지 함수 · 소(沼) = 준안정 상태 = 어트랙터 · 고개 = 에너지 장벽 = 안장점 · 잣아들 = 소산 = 감쇠항 · 여운에 내려앉기 = 이완 = 수렴 · 고개 넘는 나그네 = 상태 전이 = basin hopping · 별이 빛나는 밤의 소용돌이 = 고에너지 체류 = 탐색 · 떨림으로 머무는 법 = 진동 체류 = 준안정 요동 · 안개 낀 고원 = 얇은 다중 지형 (IDP형) = 평탄한 손실 지형 · 숨을 나누는 물결 = 밀도 교대 = 층별 활성 전환 · 먹줄을 먼저 긋다 = 사전등록 = 가설 봉인 · 지휘봉 끝 · 붓끝 = 상태 궤적 = 동역학 경로 · 굴착 = 확률 질량 응집 = 분포 학습 · 우물의 유일성 = 수축 사상의 고정점 = 단일 어트랙터 붕괴. (전체 약 40항목은 저장소의 3열 표에 수록)

부록 D · 더 듣기

5장 베토벤 교향곡 5번 1악장 — 굴착의 기세가 가장 선명한 녹음으로. **6장** 하이든 「놀람」 2악장 — 예측이 배반되는 순간의 교본. **7장** 슈베르트 「겨울 나그네」 중 3도 관계 전조가 나타나는 곡 — 고개를 넘는 감각. **8장** 5번 1악장 전개부에서 재현부로 — 귀향의 낙차를 몸으로. **9~10장** 수제천 전곡 — 국립국악원 정악단 연주로, 연음의 물결을 처음 듣는 이에 게. **11장** 아쟁 산조 진양조 — 농현의 확대경. **12장** 여민락 또는 영산회상 상령산 — 신축하는 시간의 또 다른 사례. **14장** 수제천 3장 — 안개 속의 물방울들. **20장** 시조창 한 수 — 서열이 산수가 되는 감각의 원형.

— 소 리 의 산 수 · 끝 —