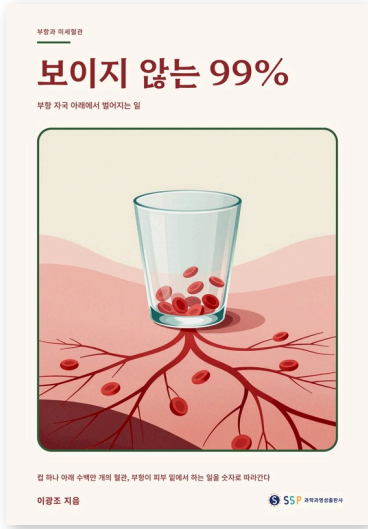




보이지 않는 99%, 부항 자 국 아래에서 벌어지는 일

부항과 미세혈관에 대한 열다섯 번의 강의

컬러 PDF · 개인 영구 소장

이 PDF는 무료 샘플입니다

이 책의 앞표지와 앞 50쪽, 뒤표지를 읽어 보실 수 있습니다. 51
쪽부터는 ssbook.kr에서 구매하시면 전체를 보실 수 있습니
다.

ssbook.kr/book/cupping99

POD 정가 17,000원 → **10,200원** (60%)

ssbook.kr 홈페이지 안내

- **시리즈별 서가** — 인삼 · 오토파지 · 식물성 저탄고지 · 단식 · 생물리학 · 독립영양인간 · 중고등
학교 교재 · 채식 · 라이프스타일 · 고대사
- **책마다 고유 주소** — 링크를 보내면 누구나 표지·소개·무료 샘플을 볼 수 있습니다
- **구매** — 회원가입(이메일 인증) 후 카드 결제(쿠키페이) → 내 서재에서 전체 컬러 PDF 내려받기
- **가격** — 종이책 POD 가격의 60%, 전 페이지 컬러 PDF
- **이용 범위** — 개인 영구 소장 가능, 공개 배포·재판매·공유 금지(내려받은 파일에는 구매자 정보가
표시됩니다)
- **책 신청 게시판** — 회원은 자유게시판에서 원하는 책 내용을 신청할 수 있습니다

보이지 않는 99%

부항 자극 아래에서 벌어지는 일



컵 하나 아래 수백만 개의 혈관, 부항이 피부 밑에서 하는 일을 숫자로 따라간다

이광조 지음

부항과 미세혈관

보이지 않는 99%

부항 자국 아래에서 벌어지는 일

이광조 지음

 과학과 영성출판사

차례

이 책을 읽기 전에	5
1장 눈에 보이지 않는 99%	8
1.1 사람은 무엇으로 되어 있는가 — 세포 30조 개의 내역	9
1.2 피 5리터의 여행 — 속도와 압력	13
1.3 혈관을 다 이으면 10만 킬로미터?	19
1.4 모세혈관은 정확히 어떻게 생겼는가	25
1.5 오늘의 결론 — 그리고 부항으로 가는 다리	31
2장 적혈구 한 개의 일생	35
2.1 탄생 — 초당 240만 개	36
2.2 몸 — 지름 7.8마이크로미터의 원반	39
2.3 좁은 문의 물리학 — 오늘의 답	43
2.4 삶 — 120일, 심장 17만 회	46
2.5 늙음 — 무너지는 과정	47
2.6 죽음 — 비장의 바늘구멍, 그리고 부항 자국의 색	48
3장 피 속의 다른 식구들	55
3.1 백혈구 — 700개당 1개의 소수 정예	56
3.2 혈소판 — 지름 2~4마이크로미터의 응급반	61
3.3 혈장 — 91%의 물과 9%의 정밀 화학	65
3.4 혈전 — 지혈의 영웅이 혈관을 막는 순간	68
4장 골목길이 무너질 때 — 그리고 '어혈'이라는 말	74
4.1 압력이 깎아내는 과정 — 고혈압	75
4.2 당이 벽을 굳히는 과정 — 당뇨	79
4.3 시간이 관을 지우는 과정 — 노화	83
4.4 잊힌 소비자들 — 뼈와 근육	86
4.5 '어혈'을 번역해 보자	87
5장 컵 하나의 오천 년	95
5.1 가장 오래된 컵 — 이집트와 그리스	96
5.2 동아시아 — 뿔에서 불향아리까지	100
5.3 히자마 — 이슬람 세계의 부항	103
5.4 몰락 — 숫자가 사혈을 심판한 날	105
5.5 재조명 — 그리고 두 갈래	107
6장 부항은 어떻게 하는가	113
6.1 건부항 — 피부를 찌지 않는 부항	114

6.2 부항에도 용량이 있다	115
6.3 습부항 — 무엇을 어디서 꺼내는가	117
6.4 음압은 어떻게 만들어지는가	121
6.5 자국은 무엇을 말하는가	125
6.6 한 세션의 표준 흐름	129
7장 음압은 피부 아래에서 무엇을 하는가	132
7.1 음압이 걸리는 순간 — 세 개의 계	133
7.2 실제로 측정된 것들	136
7.3 자국이 약이 될 수 있을까 — 화학 가설	141
7.4 통증이 줄어드는 세 가지 경로	145
7.5 0초에서 수 주까지 — 통합 시간표	148
8장 서로를 모르는 두 세계	153
8.1 누가 미세혈관을 연구하는가	154
8.2 미세순환을 보는 다섯 개의 창	156
8.3 음압이 미세혈관을 바꾼다는 직접 증거	159
8.4 두 세계를 잇는 네 개의 다리	164
9장 부항이 꺼낸 피를 들여다보면	169
9.1 시알산 — 전하의 생물학	170
9.2 두 시험관 비교 — 가장 싸고 강력한 검증	174
9.3 대담한 예측 — 채혈액에는 늙은 적혈구가 물려 있는가	177
9.4 표준 분석 패널 — 다음 연구를 위한 사양서	181
10장 '어혈'이라는 말의 시험대	186
10.1 질문을 셋으로 쪼개기	187
10.2 부피의 산수	190
10.3 철 가설의 흥망 — 한 세대의 교훈	193
10.4 결판을 낼 실험 — 설계도	194
10.5 3부 결산 — 확립·시사·미검증의 지도	197
11장 아픈 곳에 붙이는 컵 — 통증과 근골격	202
11.1 임상시험을 읽는 법	203
11.2 요통 — 가장 두꺼운 서류	206
11.3 목과 어깨	208
11.4 무릎 관절염 — 결과가 갈리는 이유	210
11.5 두통과 섬유근육통	212
11.6 판정표, 그리고 서류철에서 나온 경고	215
12장 혈압, 당뇨, 그리고 마음	219
12.1 고혈압 — 나타났다가 사라진 8mmHg	220

12.2 콜레스테롤 — 또 한 번의 대조군 문제	223
12.3 당뇨 — 여기서는 효능보다 안전이다	224
12.4 마음 — 몸을 통해 마음에 닿는 길	226
12.5 기전의 최전선 — 처음 얻은 분자 이름	231
12.6 그래서, 62세 여성에게	234
13장 암 환자, 운동선수, 그리고 피부	237
13.1 암 — 가장 짧고 가장 단호한 서류철	238
13.2 세 겹의 경고	239
13.3 스포츠 — 회복과 경기력은 다른 주장이다	243
13.4 피부 — 표적 조직 위의 임상시험	246
13.5 4부 결산 — 판정표 한 장	249
14장 안전하게 쓰는 법	254
14.1 규격 — 얼마나 세계, 얼마나 오래	255
14.2 부위의 지도	258
14.3 금기증 — 절대와 상대	259
14.4 특수한 네 집단	261
14.5 부작용의 3층 구조	263
14.6 위생이 공중보건인 이유	265
14.7 자국이 만드는 사회적 사고	266
14.8 체크리스트 — 전·중·후	267
15장 남은 숙제와 다음 10년	273
15.1 다섯 개의 구조적 한계	274
15.2 이 책이 발주한 열 개의 실험	277
15.3 논문에 반드시 적어야 할 12항목	278
15.4 당장 착수할 수 있는 세 개의 프로토콜	280
15.5 도구의 미래	282
15.6 맺음 — 작은 혈관 위에서 만난 두 전통	284
부록 — 도구와 참조	
부록 A — 쉬운 용어 사전	290
부록 B — 자주 묻는 질문 24	298
부록 C — 논문 3,618편은 어떻게 모았나	302
부록 D — 부항 받기 전 점검표 (환자용)	307

보이지 않는 99%

부항 자국 아래에서 벌어지는 일 — 부항과 미세혈관, 열다섯 번의 저녁 강의

이 책을 읽기 전에

이 책은 강의실에서 오간 대화를 그대로 옮긴 기록입니다.

시립도서관 2층 세미나실, 매주 화요일 저녁 일곱 시. 〈피부 아래의 골목길〉이라는 이름의 열다섯 번째 강좌에 네 사람이 모였습니다. 강의하는 사람 하나, 듣는 사람 셋. 그 셋은 각자 다른 이유로 그 자리에 왔습니다.

이 책의 네 사람

서지원 박사 (54세) — 미세순환 생리학 박사. '미세순환'은 눈에 보이지 않을 만큼 가는 혈관 속의 피 흐름을 뜻합니다. 이십 년째 그 흐름을 들여다보았고, 최근 오 년 동안은 부항에 관한 논문 3,618편을 모아 정리하는 일을 했습니다. 이야기는 비유로 열지만 반드시 숫자로 답습니다. 그리고 매번 '확실히 밝혀진 것'과 '아직 짐작인 것'의 선을 긋습니다.

정민호 (48세, 택배 기사) — 십 년째 허리가 아픕니다. 동네 부항방에 다닌 지도 십 년째입니다. "저는 효과를 봤는데요"라고 말하는 사람입니다. 이 사람의 경험이 있어서 강의를 현장에 놓치지 않습니다.

한소연 (34세, 회사원) — 의심하러 왔습니다. 어머니가 자꾸 부항을 권하는데 도무지 믿기지 않았습니다. "몇 명한테 해 본 건데요?" "비교한 집단은 있었어요?" 이 사람이 물어봐 주기 때문에 강의를 정직해집니다.

오태식 (62세, 은퇴한 체육 교사) — 무릎 관절염이 있습니다. 평생 학생들에게 몸에 대해 가르쳐 왔는데, 정작 자기 몸속을 모른다는 게 억울했습니다. 어려운 말이 나오면 반드시 손을 듭니다. 독자가 부끄러워서 못 하는 질문을 대신 해 줍니다.

첫 시간에 넷은 규칙을 하나 정했습니다.

모르는 말이 나오면 무조건 손 든다.

이 책에도 같은 규칙이 적용되어 있습니다. 전문용어가 처음 나올 때마다 [용어] 상자가 붙습니다. 예외는 없습니다.

이 책을 읽는 법

- [용어] — 전문용어의 풀이. 처음 나올 때 반드시 붙습니다. 권말 부록 A에 모두 모아 두었습니다.
- [표 N-M] — 표에는 모두 번호와 제목이 있습니다. 이 책은 "많다", "좋아졌다"로 끝내지 않습니다. 숫자로 끝냅니다.
- [그림 N-M] — 그림에도 모두 번호와 제목, 그리고 그 그림이 어느 자료에서 나왔는지가 붙어 있습니다.
- [오늘의 정리] — 각 장 끝의 요약. 바쁘시면 여기부터 읽으셔도 됩니다.
- N장의 출처 — 각 장 맨 뒤에는 그 장에서 인용한 논문의 목록이 있습니다. 확인하고 싶은 분을 위한 것입니다.

확실성의 세 등급

이 책에서 가장 중요한 약속입니다. 어떤 이야기가 나올 때마다 그것이 어느 정도로 확실한지를 세 등급으로 나누어 표시합니다.

[표 0-1] 이 책이 쓰는 확실성의 세 등급

등급	표시	뜻	예
확립	●	여러 연구가 같은 결과를 냈고, 반대 증거가 거의 없다	적혈구의 평균 수명은 약 120일이다
수렴	◐	결과가 대체로 한쪽을 가리키지만, 아직 반대 결과도 있다	부항은 만성 요통의 통증 점수를 단기적으로 낮춘다
가설	○	그렇듯한 설명이지만 사람에게서 직접 확인된 적이 없다	습부항이 뽑아내는 피에는 늙은 적혈구가 몰려 있다

등급이 근거보다 앞서가지 않도록 하는 것 — 이것이 이 책이 스스로에게 건 가장 엄한 규칙입니다.

그리고 미리 드리는 한 문장

이 책은 다음 두 문장 중 어느 쪽도 팔지 않습니다.

- × "부항은 피를 맑게 해서 만병을 고친다."
- × "부항은 명만 남기는 근거 없는 민간요법이다."

이 책의 문장은 이것입니다.

- "부항이 피부 아래 미세혈관에 물리적인 힘을 가한다는 것은 확실하다.
- 그 힘이 어떤 병에 얼마나 도움이 되는지는 병마다 근거의 두께가 전혀 다르다.
- 그 두께를 정직하게 재는 것이 이 책이 하려는 일이다."

열다섯 번의 저녁이 끝날 무렵, 왜 이 차이가 중요한지 아시게 될 겁니다.

▲ 시작하기 전에 반드시 읽어 주십시오

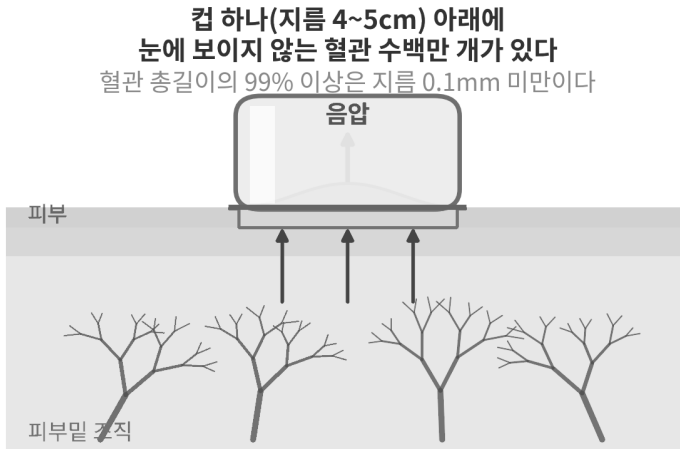
이 책은 의학적 조언을 대체하지 않습니다.

부항, 특히 피부를 찢어 피를 뽑는 습부항(사혈부항)에는 해서는 안 되는 사람이 분명히 있습니다.

항응고제(와파린 등 '피를 묽게 하는 약')를 드시는 분, 혈우병 같은 출혈 질환이 있는 분, 심한 빈혈이 있는 분, 조절되지 않는 당뇨가 있는 분, 임신 중인 분은 특히 그렇습니다.

14장(안전하게 쓰는 법)을 먼저 읽으신 뒤에 판단하시기를 권합니다. 이 책에는 실제로 일어난 사고 48건의 기록도 함께 실려 있습니다.

1장 눈에 보이지 않는 99%



[그림 1-0] 피부 위에 놓인 유리컵, 그 아래로 갈라지는 붉은 골목길

첫째 주 화요일 저녁 일곱 시. 시립도서관 2층 세미나실에는 긴 탁자 하나와 의자 넷이 놓여 있었다. 서 박사는 탁자 위에 유리컵 하나를 얹어 놓았다. 부항방에서 흔히 보는, 손바닥에 쥐면 딱 들어오는 크기의 투명한 컵이었다.

세 사람이 그 컵을 쳐다보았다.

서 박사 오늘부터 열다섯 번, 이 컵 하나에 대해 이야기하겠습니다.

정민호 열다섯 번이나요? 그거 그냥 등에 붙였다 떼는 건데요.

서 박사 (웃으며) 붙였다 떼는 겁니다. 그런데 붙였다 떼는 그 5분 동안, 컵 아래 피부 밑에서는 수백만 개의 혈관에 힘이 걸립니다. 오늘 저녁에는 그 수백만 개가 뭘지부터 이야기하겠습니다.

한소연 수백만 개요? 컵 하나 크기 안에요?

서 박사 지름 5센티미터짜리 컵 하나 아래에 수백만 개입니다. 이게 오늘의 첫 번째 숫자예요.

오태식 (노트를 펴며) 잠깐만요, 적을게요. 수백만 개...

서 박사 태식 선생님, 오늘은 적으실 게 많습니다. 미리 말씀드리면 오늘 강의는 부항 이야기가 거의 안 나옵니다.

정민호 네? 부항 강의 아니었어요?

서 박사 부항 강의 맞습니다. 그런데 순서가 있어요. 연극을 하려면 먼저 무대가 있어야 하잖아요. 무대의 크기도 모르고 조명이 어디 붙었는지도 모르는데 연극을 올릴 수는 없습니다.

부항이 작용하는 무대가 미세혈관입니다. 오늘은 그 무대를 자로 재는 시간입니다.

이 장에서 다룰 것

- ① 사람 몸은 세포 몇 개로 되어 있고, 그중 몇 개가 피의 세포인가
- ② 피 5리터는 몸속 어디에 얼마나 나뉘어 있는가
- ③ 왜 모세혈관에서 피는 300배 느려지는가 — 그리고 그 느림이 왜 설계인가
- ④ '혈관을 다 이으면 10만 킬로미터'라는 말은 사실인가
- ⑤ 왜 혈관의 99%가 눈에 안 보이는가
- ⑥ 모세혈관은 정확히 어떻게 생겼는가 — 지름, 벽 두께, 세 가지 종류
- ⑦ 하루에 물 20리터가 혈관 밖으로 나갔다가 되돌아온다는 이야기

한 문장으로 — 부항이 힘을 가하는 곳이 정확히 어떤 곳인지, 크기와 숫자로 확정하고 넘어갑시다.

왜 이 장이 중요한가 — 뒤에 나올 모든 판단이 이 장의 숫자 위에서 이루어지기 때문입니다. 예를 들어 부항 컵 안의 압력은 보통 -200에서 -600mmHg입니다. 이게 큰 힘인지 작은 힘인지는, 원래 그 자리에 걸려 있던 압력이 얼마인지를 알아야 판단할 수 있습니다. 정답은 **모세혈관 안쪽 압력이 10~35mmHg**입니다. 부항은 그 자리에 원래 걸려 있던 압력의 수십 배를 밖에서 거는 개입입니다. 이 숫자를 오늘 확정하고 나면, 7장에서 "그래서 무슨 일이 벌어지는가"를 물을 준비가 됩니다.

1.1 사람은 무엇으로 되어 있는가 — 세포 30조 개의 내역

서 박사 질문부터 드리겠습니다. **사람 몸은 세포 몇 개로 되어 있을까요?**

오태식 학교에서는 60조라고 가르쳤던 것 같은데요.

서 박사 저도 그렇게 배웠습니다. 그런데 그 60조라는 숫자는 사실 출처가 불분명했어요. 제대로 세어 본 사람이 없었습니다.

한소연 세어 본 사람이 없었다고요?

서 박사 진지하게 세어 본 첫 시도가 **2013년**입니다. 이탈리아 볼로냐 대학 연구진이 몸을 조직과 장기별로 나눠서, 각 부위에 보고된 세포 수를 전부 더했어요. 결과는 **약 37조 2,000억 개**였습니다.

정민호 37조요.

서 박사 그리고 3년 뒤인 **2016년**, 이스라엘 바이츠만 연구소의 센터 연구진이 방법을 바꿔서 다시 계산했습니다. 이번에는 **수가 많은 세포부터** 하나씩 정밀하게 계산해 올라가는 방식이었어요. 결과는 **약 30조 개**입니다.

[용어] 30조 개는 얼마나 되는 수인가

30조 = 30,000,000,000,000. 0이 열세 개다. 과학 논문에서는 이것 3.0×10^{13} 이라고 쓴다. '10을 13번 곱한 수'라는 뜻이다.

감이 안 잡히면 이렇게 생각해 보자. 전 세계 인구가 약 80억 명이다. 30조는 전 세계 인구의 **약 3,750배**다. 지구에 사는 모든 사람을 3,750번 모아 놓아야 내 몸의 세포 수가 된다.

서 박사 그런데 이 계산에서 진짜 놀라운 건 총수가 아닙니다. **내역**이에요.

한소연 내역이요?

서 박사 30조 개 중에 어떤 세포가 몇 개인지를 보면 이렇습니다.

[표 1-1] 몸의 세포 30조 개는 어떻게 나뉘는가 (성인 남성 70kg 기준)

세포의 종류	개수	전체에서 차지하는 비율
적혈구	약 25조 개	84%
혈소판	약 1조 5,000억 개	4.9%
골수의 피 만드는 세포	수천억 개	약 2%
혈관 안쪽을 덮는 세포(내피세포)	수천억 개	약 2%
피부 속 섬유모세포	수천억 개	약 2%
림프구(백혈구의 한 종류)	약 5,000억 개	약 1.7%
근육세포·지방세포	각각 수백억 개	합쳐서 0.2%

오태식 잠깐만요. 적혈구가... 84%요?

서 박사 84%입니다. **내 몸의 세포 열 개 중 여덟 개는 적혈구**예요. 여기에 혈소판과 백혈구까지 더하면, 피와 골수에 속한 세포가 전체의 **약 90%**를 차지합니다.

정민호 그럼 근육은요? 저 택배 일 하면서 팔뚝 근육 좀 붙었는데요.

서 박사 (웃으며) 민호 님 팔뚝 근육세포는, 개수로 따지면 전체의 0.2%입니다. 지방세포까지 합쳐서요.

한소연 그건 좀 이상한데요. 근육이랑 지방이 몸무게의 대부분이잖아요.

서 박사 정확한 지적입니다. 여기서 '수의 왕국'과 '무게의 왕국'이 갈립니다.

[표 1-2] 수로 보는 몸 vs 무게로 보는 몸

	개수 기준	무게 기준
적혈구	25조 개 = 84%	약 2.5kg = 체중의 3~4%
근육세포 + 지방세포	수백억 개 = 0.2%	체중의 약 75%

서 박사 어떻게 이럴 수 있냐면, 적혈구 하나가 워낙 작아서입니다. 적혈구 한 개의 부피는 약 90펨토리터예요.

[용어] 펨토리터 (fL, femtoliter)

1펨토리터 = 1리터의 1,000조분의 1. 숫자로 쓰면 0.000000000000001리터다. 감을 잡으려면 이렇게 보자. 지름 1밀리미터짜리 작은 물방울 하나를 600만 개로 쪼개면 그 중 하나가 적혈구 한 개의 부피(90fL)다.

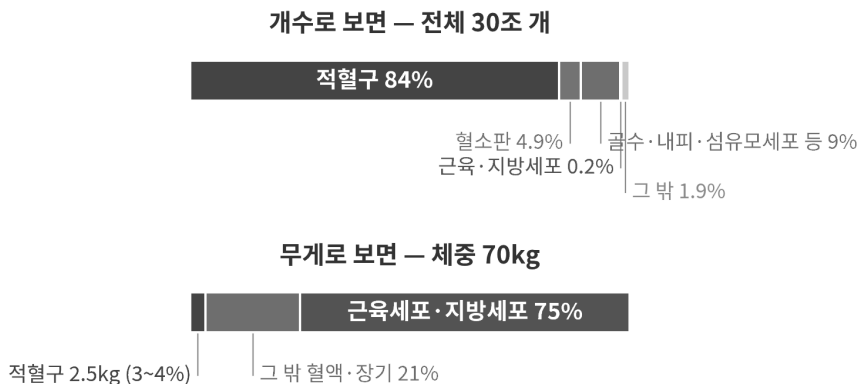
서 박사 세포 하나가 이렇게 작으니, 25조 개를 다 합쳐도 2.5킬로그램밖에 안 됩니다. 반면 근육세포 하나는 길이가 수 센티미터까지 가는 거대한 세포예요. 개수는 적지만 무게는 압도적입니다.

오태식 그러니까 "나는 무엇으로 되어 있는가"라는 질문에 대한 답이 두 개라는 거군요.

서 박사 그렇습니다. 무게로 답하면 "나는 근육과 지방이다." 개수로 답하면 "나는 피다."

이 책은 두 번째 답을 따라갑니다. 부항이 손대는 대상이 바로 그 피와, 피가 지나가는 길이기 때문입니다.

같은 몸을 두 가지 자료 재면 정반대의 그림이 나온다



[그림 1-1] 몸을 이루는 세포 — 개수로 보면 84%가 적혈구, 무게로 보면 75%가 근육과 지방

Sender, R., Fuchs, S., & Milo, R. (2016). Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. *PLoS Biology, 14*(8), e1002533.

세균이 사람 세포의 10배라는 말은 틀렸다

한소연 몸속 세균이 사람 세포보다 10배 많다는 얘기를 들었는데요.

서 박사 그 말도 방금 그 2016년 논문이 함께 바로잡았습니다. **몸속 세균은 약 38조 개**, 사람 세포 30조 개의 **약 1.3배**입니다. 10배가 아니에요.

정민호 그럼 10배라는 말은 어디서 나온 겁니까?

서 박사 1970년대에 한 연구자가 개략적으로 어림한 숫자가 인용에 인용을 거듭하며 굳어졌습니다. **아무도 다시 재 보지 않은 겁니다.** 오늘 이야기할 '혈관 총길이 10만 킬로미터'에도 비슷한 사연이 있습니다.

하루에 3,300억 개가 교체된다

서 박사 세포 수가 30조 개로 유지된다는 건, **죽는 만큼 태어나고 있다**는 뜻입니다. 같은 연구진이 2021년에 이걸 계산했어요. 하루에 교체되는 세포가 **약 3,300억 개**, 그중 **86%가 혈액 세포**입니다. 적혈구만 하루 약 2,000억 개예요. 무게로 환산하면 **하루 약 80그램**이 새로 만들어지고 같은 양이 해체됩니다.

오태식 하루에 80그램이요? 그게 매일 새로 만들어지고 매일 버려진다고요?

서 박사 네. 몸의 세포 갱신 활동은 압도적으로 피에서 일어납니다. 그 공장이 골수고, 재활용장이 비장과 간입니다. 그 이야기는 다음 주, 2장에서 하겠습니다.

1.2 피 5리터의 여행 — 속도와 압력

서 박사 이제 그 25조 개의 적혈구가 어디를 어떻게 흘러 다니는지 보겠습니다. 먼저 총량입니다.

[표 1-4] 피의 기본 수치 (성인 남성 70kg 기준)

항목	수치
몸무게 1kg당 혈액량	70~77mL
총 혈액량	약 5리터
그중 혈장(액체 부분)	55%
그중 적혈구	45%
백혈구 + 혈소판	1% 미만
심장이 1분에 내보내는 양	약 5리터
심장이 하루에 퍼 올리는 양	약 7,200리터
격렬한 운동을 할 때	분당 20~25리터 (4~5배)

[용어] 혈장 (plasma, 血漿)

피에서 세포를 다 걸러내고 남은 노란빛 액체. 91%가 물이고 나머지 9%가 단백질·당·전해질이다. 3장에서 자세히 다룬다.

정민호 심장이 1분에 5리터를 내보내는데 몸속 피가 전부 5리터라고요?

서 박사 정확히 보셨습니다. 그 말은 곧 — **가만히 앉아 있어도 몸속 피 전체가 1분에 한 바퀴를 돈다**는 뜻입니다.

한소연 1분에 온몸을 한 바퀴요?

서 박사 네. 하루로 환산하면 심장은 7,200리터를 퍼 올립니다. 2리터짜리 생수병 3,600개 분량입니다.

피는 어디에 얼마나 있는가

서 박사 그런데 그 5리터가 몸속에 골고루 퍼져 있지 않습니다. 여기가 오늘 강의의 중요한 지점입니다.

[표 1-5] 피 5리터는 어디에 있는가

위치	비율	대략의 양
정맥 (심장으로 돌아가는 길)	64%	약 3.2리터
동맥 (심장에서 나가는 길)	13%	약 0.65리터
폐 순환	9%	약 0.45리터
심장 안	7%	약 0.35리터
모세혈관 + 세동맥 (교환이 실제로 일어나는 곳)	약 7%	약 0.35리터

오태식 어? 실제로 산소를 주고받는 곳에 피가 7%밖에 없어요?

서 박사 태식 선생님, 오늘 가장 중요한 질문을 하셨습니다. **7%입니다.** 350밀리리터, 종이컵 두 잔이 채 안 되는 양이에요.

몸은 피의 대부분을 **정맥이라는 저수지**에 보관해 둡니다. 그리고 정작 일이 벌어지는 현장에는 최소한의 피만 상주시켜요.

한소연 왜 그렇게 하죠?

서 박사 필요할 때 몰아 줄 수 있게 하려고요. 운동을 시작하면 정맥에 저장돼 있던 피가 근육 쪽으로 급히 동원됩니다. 저수지에 물을 담아 두었다가 필요한 논에 대는 것과 같은 구조예요.

그리고 이 대목이 부항과 직결됩니다. **부항이 개입하는 지점이 바로 이 '현장의 7%'입니다.** 부항은 심장을 건드리지도, 대동맥을 건드리지도 않아요. 피부와 그 아래 미세혈관, 즉 이 7%의 아주 일부에 국소적으로 힘을 겁니다.

왜 모세혈관에서 피가 300배 느려지는가

서 박사 이제 속도 이야기입니다. 여기에는 아주 단순한 물리 법칙 하나가 작동합니다.

[용어] 연속 방정식 ($Q = v \times A$)

관 속을 흐르는 물의 양(Q)은 어디서나 같다는 법칙. 물의 양 = 속도(v) × 관의 단면적(A)이다.

일상의 예 — 수도 호스 끝을 손가락으로 눌러 좁히면 물이 더 세게 뿜어 나간다. 나가는 물의 양은 같은데 통로가 좁아졌으니 속도가 올라간 것이다. 반대로 통로가 넓어지면 속도는 느려진다.

서 박사 이 법칙을 혈관에 적용해 봅시다. 대동맥의 단면적은 **3~5제곱센티미터**예요. 500원짜리 동전보다 조금 작습니다.

정민호 그 정도밖에 안 돼요?

서 박사 네. 그런데 온몸 모세혈관의 단면적을 **전부 합치면 2,500~4,500제곱센티미터**입니다.

오태식 ...천 배 가까이 넓어지네요.

서 박사 그렇습니다. 그러면 방금 배운 법칙에 따라 속도는 어떻게 될까요?

한소연 천분의 일로 느려지겠네요.

서 박사 정확합니다. 실제 측정값이 그렇습니다.

서 박사 대동맥에서 초당 20~30센티미터로 달리던 피가, 모세혈관에서는 **초당 0.3~1밀리미터**로 느려집니다. **300분의 1에서 1,000분의 1**입니다.

정민호 그거 병 아니에요? 피가 잘 안 도는 거잖아요.

서 박사 (고개를 저으며) 아니요, 민호 님. **그 느낌이 이 시스템의 목적입니다.**

모세혈관 하나의 길이가 **0.5~1밀리미터**예요. 적혈구 하나가 그걸 통과하는 데 **1~3초**가 걸립니다.

한소연 1~3초요.

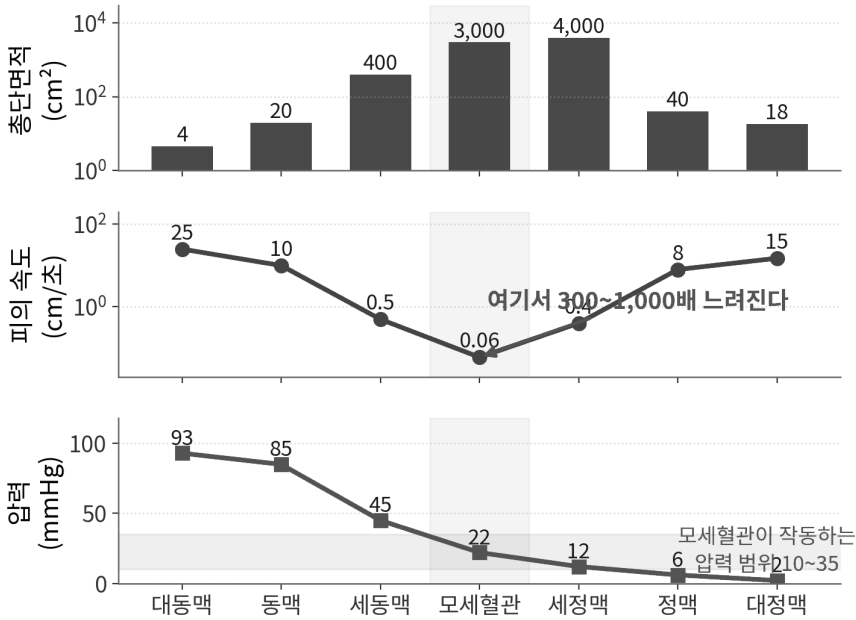
서 박사 그 1~3초가 **산소를 내려놓고 이산화탄소를 싣고 영양분을 주고 노폐물을 받는 데 허용된 시간의 전부**입니다. 여기서 더 빨랐다면 교환이 안 됩니다.

모세혈관의 느낌은 **결함이 아니라 교환을 위해 설계된 의도적인 정체**입니다.

오태식 고속도로에서 톨게이트 지날 때 속도를 줄이는 거랑 비슷하네요.

서 박사 좋은 비유입니다. 정확히 그겁니다. 톨게이트는 창구를 여러 개 만들어서 총 통과 용량은 유지하면서 개별 차량은 천천히 지나가게 하죠. 몸은 창구를 **100억 개** 만들었습니다.

대동맥에서 모세혈관까지 — 넓어지면 느려지고, 압력은 떨어진다



[그림 1-2] 대동맥에서 모세혈관까지 — 단면적이 넓어지면 속도가 느려진다

Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.). Elsevier.

5리터를 어디에 나눠 줄 것인가

서 박사 심장이 내보내는 분당 5리터를 각 장기가 나눠 갖습니다. 그런데 이것도 전혀 균등하지 않아요. 쉬고 있을 때 간과 소화기관이 27%, 콩팥이 22%, 골격근이 15~20%, 뇌가 14%, 피부가 6%, 심장 자신이 4~5%를 가져갑니다.

한소연 콩팥이 22%요? 뇌보다 많네요.

서 박사 조직 무게당으로 따지면 더 극적입니다. 콩팥은 100그램당 분당 약 400밀리리터를 받습니다. 온몸에서 가장 많이 받아요.

정민호 콩팥이 그렇게 산소를 많이 쓰나요?

서 박사 아닙니다. 산소가 필요해서가 아니에요. 콩팥의 일 자체가 피를 걸러 내는 것이기 때문입니다. 원료가 피니까 원료를 많이 받는 거예요.

오태식 운동하면 이 지도가 바뀌겠네요.

서 박사 통째로 다시 그려집시다. 격렬하게 운동하면 심박출량이 분당 20~25리터로 올라가고, 그중 **80~85%가 근육으로** 갑니다. 콩팥과 소화기관으로 가는 피는 쉴 때의 절반 이하로 줄어요.

정민호 그래서 밥 먹고 바로 뛰면 배가 아픈 거군요.

서 박사 바로 그겁니다.

그런데 여기서 오늘 기억하셔야 할 대목이 나옵니다. **가장 변동 폭이 큰 조직이 피부입니다.**

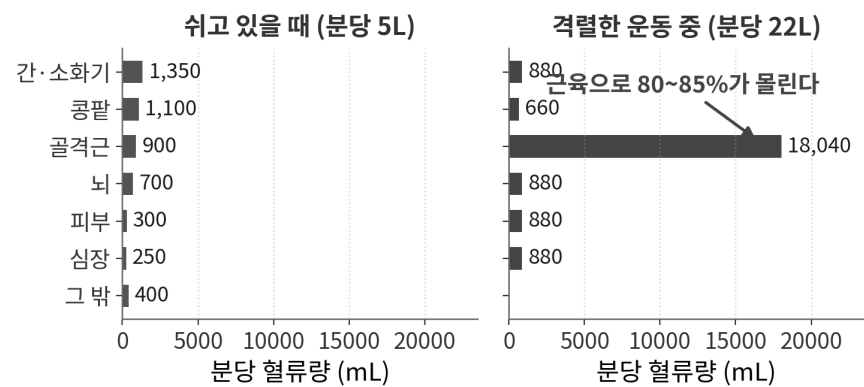
한소연 피부가 라디에이터네요.

서 박사 정확한 표현입니다. 자동차 라디에이터가 엔진 열을 밖으로 버리듯, 피부는 몸의 열을 밖으로 버리는 가변 방열판이에요. 그래서 혈류를 크게 열고 크게 잠글 수 있게 설계돼 있습니다.

피부 혈류는 추울 때 분당 약 250mL까지 잠기고, 더울 때는 분당 2,000mL 이상으로 열립니다. **조절 폭이 8배가 넘습니다.**

그리고 부항이 붙는 곳이 바로 여기, 온몸에서 혈류를 가장 크게 바꿀 수 있는 조직입니다. 이전 우연이 아닐 수도 있어요. 7장에서 다시 이야기하겠습니다.

피 5리터를 어디에 나눠 줄 것인가 — 운동은 지도를 다시 그린다



[그림 1-3] 쉴 때와 운동할 때, 피가 가는 곳이 어떻게 바뀌는가

Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.). Elsevier.

피는 물보다 진하다 — 그런데 좁은 관에서는 묽어진다

오태식 박사님, 피가 물보다 끈적하잖아요. 그 가는 관을 어떻게 지나가죠?

서 박사 아주 좋은 질문입니다. 숫자부터 보겠습니다.

[용어] 점도 (viscosity, 粘度)

액체가 얼마나 끈적한가, 즉 흐름에 얼마나 저항하는가를 나타내는 값. 물을 1이라고 하면 꿀은 약 2,000이다.

온전한 피(전혈)는 물의 3~4배, 세포를 뺀 혈장만으로도 물의 1.5~1.8배다.

서 박사 상식적으로 생각하면, 관이 좁아질수록 이 끈적함은 치명적인 부담이 되어야 합니다. 그런데 1931년, 스웨덴의 파레우스와 린드크비스트가 정반대의 실측 결과를 내놓았습니다.

한소연 정반대라면요?

서 박사 지름 300마이크로미터 아래의 가는 유리관에서는, 관이 좁아질수록 피의 겉보기 점도가 오히려 떨어졌습니다. 그리고 지름 6~7마이크로미터 부근에서 최소가 됩니다. 거의 혈장 수준까지 내려가요.

[용어] 마이크로미터 (μm)

1마이크로미터 = 1밀리미터의 1,000분의 1. 머리카락 굵기가 약 70마이크로미터다.

적혈구 지름 7.8μm는 머리카락 굵기의 약 9분의 1이다.

정민호 좁을수록 잘 흐른다고요? 그게 말이 됩니까?

서 박사 됩니다. 이유는 적혈구가 관 가운데로 몰리기 때문입니다.

가는 관 속을 흐를 때 적혈구들은 속도가 빠른 중심축 쪽으로 모입니다. 그러면 관 벽 쪽에는 세포가 없는 혈장만의 층이 생겨요. 이 층이 윤활유 역할을 합니다. 마찰은 이 묽은 층이 다 떠맡고, 세포 덩어리는 가운데서 미끄러지듯 흘러갑니다.

오태식 미끄럼틀에 물을 뿌려 놓은 것 같네요.

서 박사 그겁니다. 그리고 이게 왜 중요하냐면 — 모세혈관의 지름(4~9마이크로미터)이 정확히 이 점도 최소 구간과 겹칩니다.

한소연 우연인가요?

서 박사 우연이 아닐 겁니다. 진화가 찾아낸 최적점이라고 봐야죠. 만약 길보기 점도가 굵은 관에서와 같았다면, 미세혈관 전체의 저항이 심장이 감당할 수 없을 만큼 커졌을 겁니다.

다만 이 설계에도 한계가 있어요. **지름 약 5마이크로미터 아래로 내려가면** 이야기가 달라집니다. 적혈구 자신(7.8 μm)이 관보다 커지는 지점부터는 점도가 급반등합니다. 그 '좁은 문의 물리학'이 다음 주 2장의 주제입니다.

1.3 혈관을 다 이으면 10만 킬로미터?

서 박사 자, 이제 오늘 강의의 제목으로 들어가겠습니다. 이런 문장 들어 보셨죠?

"사람의 혈관을 모두 이으면 10만 킬로미터, 지구 두 바퀴 반이다."

정민호 어디선가 들었어요. 다큐멘터리에서였나.

서 박사 거의 모든 교양서에 나옵니다. 그런데 이 숫자의 출처를 아십니까?

한소연 누가 쟀 거 아니에요?

서 박사 아무도 재지 않았습시다.

셋이 동시에 고개를 들었다.

서 박사 이 숫자의 뿌리는 **1920년 노벨 생리의학상**을 받은 덴마크의 생리학자 **아우구스트 크로그**입니다. 크로그는 근육 조직을 얇게 잘라서 현미경으로 보고, **1제곱밀리미터 단면에 모세혈관이 몇 개나 지나가는지**를 실제로 세었어요. 수백 개에서 수천 개가 나왔습시다.

오태식 그건 실측이네요.

서 박사 거기까지는 실측입니다. 문제는 그다음입니다. 크로그는 그 밀도를 **온몸에 그대로 적용해서** 계산했어요. 그러면 모세혈관만으로 수만 킬로미터가 나옵니다. 10만 킬로미터라는 관용적 숫자가 여기서 나왔습시다.

[용어] 외삽 (extrapolation, 外挿)

직접 측정한 범위 밖으로 값을 늘려서 추정하는 것.

일상의 예 — 서울 강남역 앞에서 1분 동안 지나간 사람 수를 세고, 거기에 1,440(하루의 분)을 곱해서 "하루 유동인구"라고 말하는 것. 새벽 3시에도 같은 밀도라고 가정한 셈이니 크게 부풀려진다.

서 박사 크로그가 실제로 센 것은 **대사가 활발한 골격근**이었습니다. 그런데 몸에는 지방, 뼈, 힘줄, 인대처럼 모세혈관 밀도가 훨씬 낮은 조직도 많아요. 거기까지 같은 밀도로 계산하면 총길이는 **과대평가**됩니다.

한소연 그럼 진짜 길이는 얼마인데요?

서 박사 그게 정직한 답입니다 — **모릅니다**. 보수적으로 다시 계산하면 **1만~2만 킬로미터** 수준으로 보는 견해도 있어요. 전신 혈관 길이를 실제로 다 측정한 연구는 지금까지 없습니다.

정민호 10만이랑 1만이면 열 배 차이인데요.

서 박사 열 배 차이입니다. 그래서 저는 이렇게 말합니다.

"10만 킬로미터든 1만 킬로미터든, 지구 지름(12,742킬로미터)에 비견되는 규모라는 본질은 달라지지 않는다. 그러나 숫자의 출처와 불확실성은 구분해서 기억해야 한다."

오태식 이게 아까 세균 10배 얘기랑 같은 구조군요.

서 박사 정확합니다. 그리고 이건 이 책 전체의 태도이기도 합니다. **숫자를 인용할 때는 그 숫자가 어디까지 재어진 것이고 어디부터 추정인지를 밝힌다**. 부항 이야기로 들어가면 이 태도가 훨씬 더 중요해집니다.

크로그가 실제로 한 일 — 모세혈관 사이의 거리

서 박사 그런데 크로그의 진짜 업적은 개수를 센 게 아닙니다. **그 개수가 왜 하필 그만큼이어야 하는지를 계산한 것**이에요.

1919년, 크로그는 수학자 에를랑의 도움을 받아 모형을 하나 세웁니다. 모세혈관 하나를 축으로 하는 **원통 모양의 담당 구역**을 생각한 겁니다. 이걸 '크로그 원통'이라고 부릅니다.

[용어] 크로그 원통 (Krogh cylinder)

모세혈관 한 개가 산소를 공급할 수 있는 원통 모양의 조직 영역. 모세혈관을 연 필름, 그 주변 조직을 연필의 나무 부분이라고 생각하면 된다.

이 원통의 반지름이 곧 "모세혈관을 얼마나 촘촘히 깔아야 하는가"의 답이 된다.

서 박사 여기에 세 가지 값을 넣습니다. 모세혈관 안의 산소 농도, 조직이 산소를 쓰는 속도, 산소가 조직 속으로 퍼져 나가는 빠르기. 그러면 **산소가 닿을 수 있는 최대 반지름**이 계산됩니다.

한소연 그리고 그 계산이 실제와 맞았나요?

서 박사 맞아떨어졌습니다. 대사가 빠른 작은 동물일수록 모세혈관이 촘촘했어요. 같은 근육 1제곱밀리미터 단면에 **말은 약 1,400개, 기니피그는 약 3,000개**였습니다.

서 박사 그리고 여기서 이 책에서 가장 자주 소환될 숫자 하나가 나옵니다.

몸속의 거의 모든 세포는, 가장 가까운 모세혈관에서 20~30마이크로미터 이내에 있다.

오태식 20~30마이크로미터면... 머리카락 굵기의 3분의 1쯤이네요.

서 박사 그렇습니다. 왜 하필 그 거리냐면, **확산**이라는 운송 수단이 작동할 수 있는 거리가 그 정도이기 때문입니다.

[용어] 확산(diffusion, 擴散)

분자가 무작위로 움직이다 보면 저절로 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 퍼지는 현상.

일상의 예 — 물컵에 잉크 한 방울을 떨어뜨리면 저어 주지 않아도 서서히 퍼진다. 그게 확산이다.

확산은 가까운 거리에서는 매우 빠르지만 거리가 멀어지면 급격히 느려진다. 거리가 2배가 되면 시간은 4배, 10배가 되면 100배가 걸린다. 그래서 몸은 모든 세포를 모세혈관에서 20~30 μ m 안에 배치할 수밖에 없었다.

정민호 그러니까 몸은 어쩔 수 없이 혈관을 그렇게 촘촘히 깔았다는 거네요.

서 박사 어쩔 수 없이 깔았습니다. 물리 법칙이 그렇게 요구했으니까요.

잠자는 골목길 — 오늘의 두 번째 핵심

서 박사 그런데 여기서 아주 중요한 사실이 하나 나옵니다. 잘 들어 주세요. 이권 8장에서 부항을 판정할 때 결정적인 잣대가 됩니다.

100억 개의 모세혈관이 항상 다 흐르고 있는 것은 아니다.

한소연 네?

서 박사 쉬고 있는 골격근에서, 실제로 피가 흐르고 있는 모세혈관은 **전체의 약 20~25%**입니다. 나머지 75~80%는 잠겨 있어요.

오태식 잠겨 있다니, 어떻게요?

서 박사 모세혈관 입구마다 작은 근육 고리가 있습니다.

[용어] 전모세혈관 괄약근 (precapillary sphincter, 前毛細血管括約筋)
모세혈관 입구를 여닫는 아주 작은 근육 고리. '괄약근'은 등근 고리 모양으로 통로를 조였다 폈다 하는 근육을 말한다.
쉽게 말해 모세혈관마다 붙어 있는 수도꼭지다.

서 박사 그리고 이 수도꼭지들은 국소 신호에 반응합니다. 운동을 시작해서 근육에 아데노신, 이산화탄소, 칼륨, 젖산 같은 대사 부산물이 쌓이면, 잠겨 있던 골목길이 차례로 열립니다.

[표 1-10] 모세혈관 동원 — 잠긴 골목길이 열릴 때

항목	실 때	열렸을 때
피가 흐르는 모세혈관 비율	20~25%	60~100%
흐르는 모세혈관 개수	기준	3~4배
세포와 모세혈관 사이 거리	기준	절반 이하
교환 표면적	기준	3~4배
걸리는 시간	—	수 초

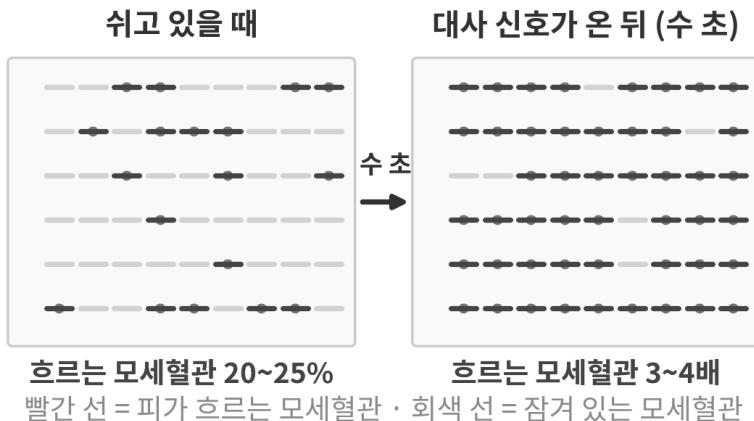
정민호 수 초 만예요?

서 박사 수 초입니다. 이게 왜 중요하냐면 — 새 혈관을 만드는 것과는 완전히 다른 일이기 때문입니다.

[용어] 혈관신생 (angiogenesis, 血管新生)
기존 혈관에서 새 혈관이 자라 나오는 것. 몇 주가 걸린다.
[용어] 모세혈관 동원 (capillary recruitment, 毛細血管動員)
이미 깔려 있지만 잠겨 있던 모세혈관을 여는 것. 몇 초면 된다.

서 박사 비유하자면 이렇습니다. 혈관신생은 새 도로를 놓는 공사입니다. 모세혈관 동원은 이미 있는 도로의 차단봉을 올리는 것이예요.

새 혈관을 만드는 것이 아니라, 잠긴 수도꼭지를 여는 것



[그림 1-6] 잠긴 골목길이 열린다 — 모세혈관 동원

Secomb, T. W. (2017). Blood flow in the microcirculation. *Annual Review of Fluid Mechanics, 49*, 443–461.

한소연 아, 그러면… 부항을 붙였을 때 그 자리가 벌게지는 건 어느 쪽이예요?

서 박사 (잠시 멈추고) 소연 님. 오늘 강의의 결승점을 미리 뚫으셨습니다.

그게 정확히 8장의 질문입니다. 부항 자국이 붉어지는 것이 단순히 혈관이 터져서 피가 새어 나온 것인지, 아니면 잠겨 있던 골목길이 열린 것인지. 오늘은 답을 드리지 않겠습니다. 다만 판정에 쓸 잣대를 오늘 만들어 둔 것입니다.

논쟁의 여지가 없는 숫자들

서 박사 총길이는 논쟁거리지만, 구성비는 논쟁의 여지가 없습니다.

[표 1-11] 미세혈관의 규모 — 확정된 숫자들

항목	수치
모세혈관 개수	약 100억 개 (1.0×10^{10})
교환에 쓰이는 총 표면적	500~700제곱미터
그게 얼마나 넓은가	테니스 코트 2~3면
지름의 범위	대동맥 25mm → 모세혈관 0.004~0.009mm
총길이 중 지름 0.1mm 미만 혈관의 비율	99% 이상

오타식 테니스 코트 두세 면이 제 몸속에 있다고요?

서 박사 접혀서 들어 있습니다. 그게 미세혈관 설계의 핵심이에요.

그리고 마지막 줄이 이 장의 제목입니다. **혈관 총길이의 99% 이상이 지름 0.1밀리미터가 안 되는, 현미경으로만 보이는 관입니다.**

[용어] 미세혈관 (microvessel, 微細血管)

지름 약 100마이크로미터(0.1밀리미터) 미만의 가는 혈관을 통틀어 부르는 말.

세동맥 · 모세혈관 · 세정맥 셋을 아우른다.

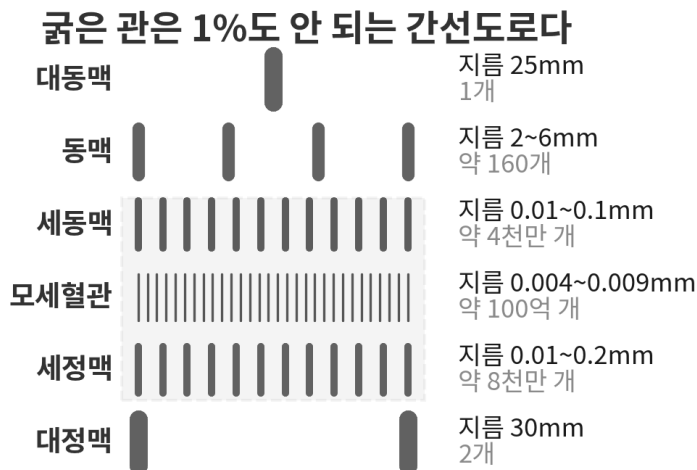
이 책의 주 무대다.

서 박사 우리가 '혈관'이라는 말에서 흔히 떠올리는, 팔뚝에 도드라져 보이는 굵은 관들은 **전체 혈관계의 1%도 안 되는 간선도로일** 뿐입니다. 나머지 99%는 현미경으로만 보이는 골목길이에요.

그리고 오늘 처음에 말씀드린 그 숫자 — 부항 컵 하나가 만드는 지름 4~5센티미터의 원 안에도 이 골목길이 수백만 개 단위로 들어 있습니다.

정민호 그래서 이 책 제목이...

서 박사 그래서 이 강좌 이름이 〈피부 아래의 골목길〉입니다.



점선 안 — 지름 0.1mm 미만 '미세혈관'. 총길이의 99% 이상

[그림 1-4] 혈관의 가지치기 — 대동맥 25mm에서 모세혈관 0.005mm까지

Krogh, A. (1922). *The anatomy and physiology of capillaries*. Yale University Press;
Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology*
(14th ed.). Elsevier.

1.4 모세혈관은 정확히 어떻게 생겼는가

서 박사 이제 마지막입니다. 그 골목길 하나를 확대해서 보겠습니다.

[표 1-12] 모세혈관 한 개의 치수

항목	수치
지름	4~9마이크로미터
길이	0.5~1밀리미터
벽의 두께	0.2~0.5마이크로미터
벽을 이루는 세포의 층수	딱 한 겹
벽을 바깥에서 받치는 그물(기저막) 두께	50~100나노미터

한소연 벽이 한 겹이요?

서 박사 세포 하나의 두께입니다. 동맥과 정맥에는 근육층도 있고 바깥 껍질도 있어요. 모세혈관에는 그게 없습니다. 안쪽을 덮는 세포 한 겹과, 그걸 바깥에서 받치는 얇은 그물망이 전부예요.

[용어] 내피세포 (endothelial cell, 內皮細胞)

모든 혈관의 안쪽 면을 한 겹으로 덮고 있는 세포. 모세혈관에서는 이 한 겹이 벽의 전부다.

단순한 배관 내벽이 아니라 피가 굳지 않게 하고, 혈관을 넓혔다 좁혔다 하고, 무엇을 통과시킬지 결정하는 활성 기관이다. 부항의 음압이 걸릴 때 그 힘을 가장 먼저 받아 내는 세포이기도 하다.

오타식 왜 그렇게 얇게 만들었죠? 터지기 쉬울 텐데요.

서 박사 얇아야 하기 때문입니다. 국경이 얇을수록 물자가 빨리 오갑니다. 아까 확산 이야기를 했죠. 거리가 멀어지면 확산은 급격히 느려집니다. 그래서 몸은 피와 조직 사이의 벽을 가능한 한 가장 얇게, 즉 세포 하나 두께로 깎아 놓았습니다.

모세혈관이 얇은 것이 곧 모세혈관의 존재 이유입니다.

세 가지 종류

서 박사 그리고 이 한 겹짜리 벽은 조직에 따라 세 가지 형태로 나뉩니다. 연속형(근육·피부·폐·뇌)은 세포 사이 틈이 6~7나노미터뿐이고, 유창형(콩팥·소장·내분비샘)은 세포 몸통에 60~80나노미터짜리 구멍이 뚫려 있으며, 동양형(간·비장·골수)은 틈이 100~1,000나노미터로 벌어져 있습니다.

[용어] 나노미터 (nm)

1나노미터 = 1마이크로미터의 1,000분의 1 = 1밀리미터의 100만분의 1.

6나노미터는 물 분자 약 20개를 나란히 놓은 길이다.

서 박사 '유창형'의 '창'은 창문이라는 뜻입니다. 세포 몸통에 지름 60~80나노미터 짜리 창문이 뽕뽕 뚫려 있어요. 물이 빨리 빠져나가야 하는 곳 — 콩팥처럼 피를 걸러야 하는 곳 — 에 있습니다.

'동양형'은 틈이 훨씬 넓어서 세포 자체가 드나들 수 있습니다. 골수에서 갓 만들어진 적혈구가 혈류로 나오는 출구가 이 동양형이고, 비장에서 늙은 적혈구를 걸러 내는 검문소도 이 구조예요. 2장에서 다시 만나게 됩니다.

한소연 뇌는 연속형인데 특별하다고 하셨죠?

서 박사 뇌는 연속형의 극단입니다. 6~7나노미터짜리 그 틈마저 **밀착연접**이라는 단백질 이음새로 봉쇄해 버립니다.

[용어] 혈액뇌장벽 (blood-brain barrier, BBB)

뇌 모세혈관의 내피세포들이 서로를 빈틈없이 봉합해 만든 장벽. 뇌를 혈액 속 독소와 성분 변동으로부터 격리한다.
약을 개발할 때 "뇌로 들어가는 약을 만들기가 어렵다"고 하는 이유가 이 장벽 때문이다.

서 박사 요컨대 세 유형은 하나의 원리로 요약됩니다. **조직은 저마다 필요한 만큼만 국경을 연다.**



세 유형 모두 벽은 내피세포 '한 겹'이다. 다른 것은 그 한 겹을 얼마나 촘촘히 붙였는가뿐이다.

[그림 1-5] 모세혈관 세 가지 유형 — 국경을 얼마나 여는가

Aird, W. C. (2007). Phenotypic heterogeneity of the endothelium: I. *Circulation Research, 100*(2), 158-173.

안쪽 벽에 깔린 용단

서 박사 그리고 이 한 겹짜리 벽의 **안쪽** 면에는 뭔가가 더 깔려 있습니다.

[용어] 당질층 (glycocalyx, 糖質層)

혈관 안쪽 표면을 덮고 있는, 당과 단백질로 이루어진 두께 0.5~1마이크로미터의 용단 같은 층.

정민호 잠깐만요. 관 지름이 5~6마이크로미터인데 양쪽 벽에 0.5마이크로미터 씩 용단이 깔려 있으면...

서 박사 민호 님, 계산이 빠르십니다. **실제로 피가 지나가는 통로는 그만큼 더 좁습니다.** 5~6마이크로미터 관에서 용단을 빼면 4~5마이크로미터가 남아요.

이 용단이 하는 일이 셋입니다.

첫째, 혈장 단백질이 함부로 새어 나가지 못하게 하는 **여과 관문**입니다.

둘째, 피가 흐르면서 벽을 스치는 힘을 감지해서 세포에 전달하는 **감지기**입니다.

셋째, 백혈구와 혈소판이 벽에 아무 데나 들러붙지 못하게 하는 **완충층**입니다.

[용어] 전단력 (shear stress, 剪斷力)

흐르는 액체가 관 벽을 스치며 가하는 마찰성 힘.

일상의 예 — 계곡물이 흐르면서 바닥의 돌을 문지르는 힘. 물살이 셀수록 커진다.

혈관 벽은 이 힘을 감지해서 "지금 피가 잘 흐르는가"를 판단하고, 그에 맞춰 혈관을 넓히거나 좁힌다.

서 박사 이 당질층이 손상되는 것이 패혈증과 당뇨 합병증의 초기 사건으로 지목되고 있습니다. 4장에서 다시 다루겠습니다.

흩어져 있는 하나의 장기

서 박사 그런데 이 내피세포들을 온몸에서 다 모으면 어떻게 될까요? **총 질량 약 1킬로그램**, 펼쳤을 때 표면적은 **4,000~7,000제곱미터**로 추산됩니다. 참고로 간의 무게가 약 1.5킬로그램이에요.

오태식 1킬로그램이면... 하나의 장기네요.

서 박사 정확합니다. **몸에 흩어져 있는 하나의 큰 장기**입니다. 그리고 이건 수동적인 배관이 아니에요. 내피세포는

- 산화질소라는 기체를 뿜어서 혈관 근육을 이완시키고 (혈관을 넓힌다)
- 표면에 항응고 단백질을 내걸어 피가 관 속에서 굳지 않게 하고
- 어떤 분자를 얼마나 통과시킬지 결정합니다

[용어] 산화질소 (NO, nitric oxide)

내피세포가 만들어 내는 기체 신호 물질. 혈관 벽의 근육을 이완시켜 혈관을 넓힌다.

이 기전을 밝힌 연구자들이 **1998년 노벨 생리의학상**을 받았다. 협심증 약인 니트로글리세린이 듣는 이유도, 발기부전 치료제가 작동하는 이유도 모두 이 산화질소 경로다.

서 박사 여기에 미리 적어 둘 게 하나 있습니다. 내피세포에는 **기계적인 힘을 감지하는 통로 단백질**이 있습니다. **Piezo1(피에조원)**이라고 합니다. 눌리거나 당겨

지면 열리는 문이에요. 최근 부항 기전 연구의 최전선이 바로 이 분자입니다.
12장에서 본격적으로 다루겠습니다.

모세혈관의 관리인

서 박사 벽 바깥에는 또 하나의 세포가 붙어 있습니다.

[용어] 페리사이트 (pericyte, 혈관주위세포)

모세혈관을 바깥에서 감싸 쥐고 있는 조절 세포. 수축 단백질을 갖고 있어서 모세혈관의 지름을 직접 조절한다.

조직마다 밀도가 극적으로 다르다. 장벽이 엄격해야 하는 뇌와 망막에서는 내피세포 1~3개당 1개로 조밀하고, 골격근에서는 약 100개당 1개로 성기다.

서 박사 당뇨병에서 망막의 모세혈관이 무너질 때 가장 먼저 관찰되는 소견이 페리사이트의 소실입니다. 관리인이 사라진 골목길이 어떻게 되는가를 보여 주는 예고편이에요. 4장에서 다룹니다.

하루에 물 20리터가 나갔다 들어온다

서 박사 마지막 개념입니다. 모세혈관 벽을 사이에 두고 물이 어떻게 오가는지.

여기에는 서로 반대 방향으로 당기는 두 개의 힘이 있습니다.

[용어] 정수압 (hydrostatic pressure, 靜水壓)

관 속의 물을 밖으로 밀어내는 압력. 쉽게 말해 혈압이다. 모세혈관에서는 동맥 쪽 30~35mmHg, 정맥 쪽 10~15mmHg.

[용어] 교질삼투압 (colloid osmotic pressure, 膠質滲透壓)

혈장 속 단백질(주로 알부민)이 물을 관 안으로 끌어당기는 힘. 약 25mmHg로 거의 일정하다.

일상의 예 — 설탕물이 든 얇은 주머니를 맹물에 담그면 물이 주머니 안으로 빨려 들어간다. 단백질이 물을 붙잡는 것도 같은 원리다.

서 박사 이 두 힘의 줄다리기를 처음 정리한 사람이 영국의 생리학자 어니스트 스탈링입니다. 1896년이었어요.

[용어] 스탈링 원리 (Starling principle)

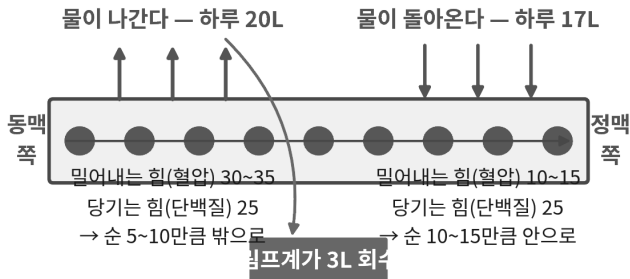
모세혈관에서 물이 나가고 들어오는 것을 정수압과 교질삼투압의 차이로 설명하는 모형.

서 박사 계산해 보겠습니다. 동맥 쪽 입구에서는 밀어내는 힘 30~35에 당기는 힘 25이니 **5~10만큼 밖으로** 나갑니다. 정맥 쪽 출구에서는 밀어내는 힘이 10~15로 떨어지니 **10~15만큼 안으로** 들어옵니다.

한소연 앞쪽에서 나갔다가 뒤쪽에서 들어오는 거네요.

서 박사 그렇습니다. 그 총량이 이렇습니다.

앞에서 나가고 뒤에서 들어온다 — 차액은 림프가 회수한다



단위는 모두 mmHg. 이 균형이 몇 mmHg 수준에서 잡혀 있다는 점이 부항을 이해하는 열쇠다.

[그림 1-8] 스타링 균형 — 앞에서 나가고 뒤에서 들어온다

Levick, J. R., & Michel, C. C. (2010). Microvascular fluid exchange and the revised Starling principle. *Cardiovascular Research, 87*(2), 198–210.

[표 1-17] 하루 동안의 물 순환

항목	하루 양
모세혈관 밖으로 나가는 물	약 20리터
다시 모세혈관으로 들어오는 물	약 17리터
차액	약 3리터
그 3리터를 회수하는 기관	림프계

오태식 하루에 20리터요? 몸속 피가 5리터라면서요.

서 박사 같은 물이 계속 나갔다 들어오는 겁니다. 5리터의 피가 하루 1,440바퀴를 도니까요.

그리고 그 차액 3리터를 림프관이 주워 담아서 정맥으로 되돌려 보냅니다. 림프계가 막히면 그 자리에 물이 고여요. 그게 부종(붓기)입니다.

정민호 아, 그래서 오래 서 있으면 다리가 붓는군요.

서 박사 정확합니다. 서 있으면 다리 정맥의 정수압이 올라가서 나가는 물이 늘고 들어오는 물이 줄어요. 균형이 깨진 만큼 조직에 물이 고입니다.

한 가지 덧붙이면, 이 고전 모형은 2010년 전후로 수정되었습니다. **당질층**을 여과 장벽의 중심에 놓는 '수정 스탈링 원리'입니다. 지금은 재흡수의 비중이 고전 모형보다 작다고 보는 게 표준 견해예요. 다만 **큰 그림은 그대로**입니다.

1.5 오늘의 결론 — 그리고 부항으로 가는 다리

서 박사 오늘 켜 것들 한 줄로 요약하겠습니다.

모세혈관은 지름 4~9마이크로미터, 벽 두께 0.5마이크로미터의 관에서, 10~35mmHg의 낮은 압력 균형 위에 하루 20리터의 물을 주고받는 정밀한 저압 교환기다.

서 박사 그리고 다음 문장이 이 책의 나머지 전부입니다.

부항은 바로 이 저압 교환기 위의 피부에, 200~600mmHg의 음압을 가하는 개입이다.

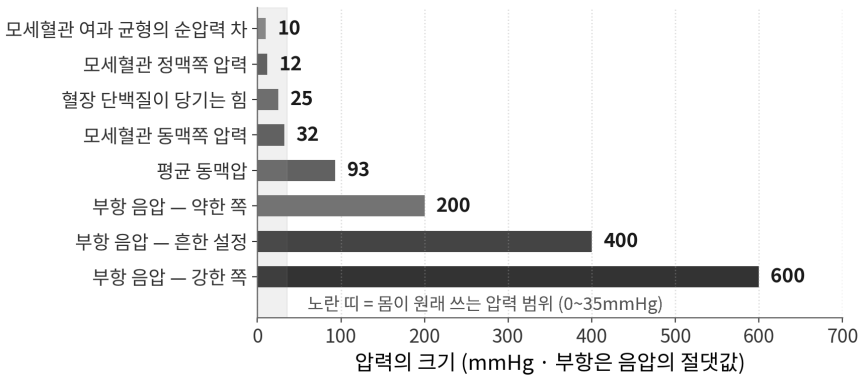
한소연 ...원래 압력의 수십 배네요.

서 박사 계산해 봅시다. 모세혈관 안팎의 압력 차이는 몇 mmHg 수준에서 균형이 잡혀 있습니다. 부항이 거는 음압은 -200에서 -600mmHg예요.

[표 1-18] 규모의 비교 — 부항의 음압은 얼마나 큰가

항목	크기
모세혈관 안팎 압력 균형	순압력 차 약 5~15mmHg (정수압 10~35, 교질 삼투압 25)
부항 컵 안의 음압	-200 ~ -600mmHg — 수십 배
지름 5cm 컵에 -400mmHg를 걸 때 걸리는 총 힘	약 8킬로그램중

부항의 음압은 미세혈관 압력의 수십 배다



[그림 1-7] 규모의 비교 — 모세혈관의 압력과 부항의 음압

Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.). Elsevier; 부항 음압 규격은 6장 표 6-3 참조.

오태식 8킬로그램이요? 등에 8킬로그램짜리 아령을 얹은 것처럼요?

서 박사 얹는 게 아니라 당기는 겁니다. 방향이 반대예요. 그리고 그 힘이 지름 5 센티미터 원 안의 수백만 개 골목길에 분산돼서 걸립니다.

정민호 그러면... 그 골목길들이 터지는 거 아닙니까?

서 박사 (미소 지으며) 민호 님. 그게 정확히 7장의 질문이고, 8장의 데이터고, 10 장의 판정입니다.

오늘은 여기까지 하겠습니다. 오늘 **젠** 숫자들을 기억해 두세요. 앞으로 열네 번 의 저녁 동안, 이 숫자들이 계속 소환될 겁니다.

한소연 박사님, 하나만요. 오늘 배운 걸로 판단하면 — 부항은 말이 되는 겁니까, 안 되는 겁니까?

서 박사 오늘 배운 것만으로는 "**물리적으로 충분히 큰 개입이다**"까지만 말할 수 있습니다. 큰 개입이 반드시 좋은 개입은 아니예요. 그 판단에는 데이터가 필요하고, 그게 8장부터 15장까지의 일입니다.

다음 주에는 오늘 무대의 주인공을 만나겠습니다. 지름 7.8마이크로미터의 세포가, 어떻게 자기보다 좁은 5마이크로미터 관을 하루 수천 번씩 지나가는가.

오늘의 정리

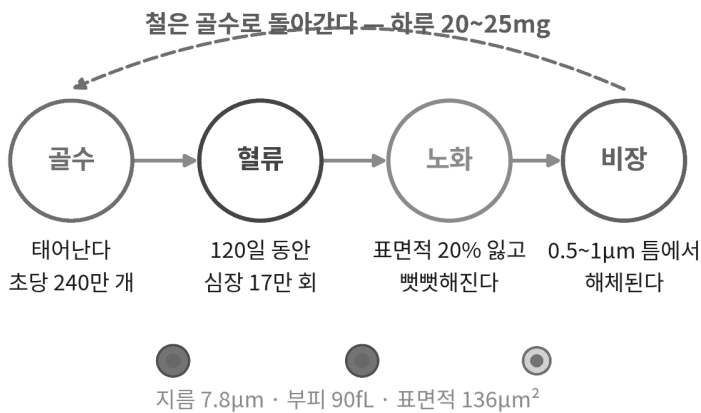
- ① 나는 무엇으로 되어 있는가 — 세포 30조 개 중 적혈구가 25조 개(84%). 혈액 세포를 다 합치면 약 90%. 그러나 무게로는 적혈구 전체가 2.5kg, 체중의 3~4%뿐이다. 수의 왕국과 무계의 왕국은 다르다.
- ② 피는 어디에 있는가 — 총 5리터 중 정맥에 64%. 그런데 교환이 실제로 일어나는 모세혈관에는 7%(약 350mL)뿐이다. 부항이 개입하는 곳이 이 현장이다.
- ③ 왜 느려지는가 — 총단면적이 대동맥의 약 1,000배가 되므로 속도는 초당 20~30cm에서 0.3~1mm로 떨어진다. 적혈구가 모세혈관 하나를 지나는 1~3초가 산소·영양·노폐물을 교환할 시간의 전부다. 느림은 결함이 아니라 설계다.
- ④ 왜 99%가 안 보이는가 — 모세혈관 100억 개, 교환 표면적 500~700m²(테니스 코트 2~3면). 총길이의 99% 이상이 지름 0.1mm 미만이다. 다만 '총길이 10만 km'는 크로그의 외삽값이고, 전신을 실측한 연구는 없다. 어디까지가 측정이고 어디부터가 추정인지 밝히는 것이 이 책의 규칙이다.
- ⑤ 잠긴 골목길 — 쉴 때 실제로 흐르는 모세혈관은 20~25%뿐이고, 대사 신호가 오면 수 초 만에 3~4배로 열린다. 이 '동원' 개념이 8장에서 부항의 붉은 자국을 해석하는 핵심 잣대가 된다.
- ⑥ 규모의 감각 — 모세혈관은 10~35mmHg의 저압 위에서 작동한다. 부항은 그 위에 -200~-600mmHg를 건다. 수십 배의 외부 교란이다.

1장의 출처

1. Sender, R., Fuchs, S., & Milo, R. (2016). Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. PLoS Biology, 14(8), e1002533.
2. Bianconi, E., Piovesan, A., Facchin, F., Beraudi, A., Casadei, R., Frabetti, F., ... Canaider, S. (2013). An estimation of the number of cells in the human body. Annals of Human Biology, 40(6), 463–471.
3. Sender, R., & Milo, R. (2021). The distribution of cellular turnover in the human body. Nature Medicine, 27(1), 45–48.
4. Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). Guyton and Hall textbook of medical physiology (14th ed.). Elsevier.
5. Krogh, A. (1919). The number and distribution of capillaries in muscles with calculations of the oxygen pressure head necessary for supplying the tissue. The Journal of Physiology, 52(6), 409–415.
6. Krogh, A. (1922). The anatomy and physiology of capillaries. Yale University Press.

7. Fåhræus, R., & Lindqvist, T. (1931). The viscosity of the blood in narrow capillary tubes. *American Journal of Physiology*, 96(3), 562–568.
8. Secomb, T. W. (2017). Blood flow in the microcirculation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 49, 443–461.
9. Pries, A. R., Secomb, T. W., & Gaehtgens, P. (2000). The endothelial surface layer. *Pflügers Archiv*, 440(5), 653–666.
10. Aird, W. C. (2007). Phenotypic heterogeneity of the endothelium: I. Structure, function, and mechanisms. *Circulation Research*, 100(2), 158–173.
11. Levick, J. R., & Michel, C. C. (2010). Microvascular fluid exchange and the revised Starling principle. *Cardiovascular Research*, 87(2), 198–210.
12. Sweeney, M. D., Ayyadurai, S., & Zlokovic, B. V. (2016). Pericytes of the neurovascular unit: Key functions and signaling pathways. *Nature Neuroscience*, 19(6), 771–783.
13. Daneman, R., & Prat, A. (2015). The blood-brain barrier. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 7(1), a020412.

2장 적혈구 한 개의 일생



[그림 2-0] 골수에서 태어나 비장에서 해체되는 붉은 원반의 여정

둘째 주 화요일. 태식이 노트를 펴자마자 손을 들었다.

오태식 박사님, 지난주에 숙제를 하나 남기셨습니다. 지름 7.8마이크로미터짜리 세포가 어떻게 5마이크로미터 관을 지나가느냐고요. 일주일 내내 생각했는데 답이 안 나옵니다.

서 박사 (웃으며) 안 나오는 게 정상입니다. 지름 8센티미터짜리 공을 5센티미터 파이프에 밀어 넣는 것과 같은 문제니까요.

한소연 그럼 답이 뭔데요?

서 박사 오늘 저녁 전부가 그 답입니다. 다만 답을 이해하려면 이 세포가 **어떻게 태어나서 어떻게 생겼고 어떻게 죽는지**를 먼저 알아야 해요.

정민호 세포 하나의 일대기를요?

서 박사 네. 그리고 민호 님, 오늘 이야기의 마지막이 민호 님과 아주 가깝습니다. **부항을 뜨고 나면 그 자리가 며칠에 걸쳐 색이 바뀌잖아요.** 붉은색에서 자주색, 그 다음 초록색, 마지막에 노란색.

정민호 맞아요. 항상 그 순서예요.

서 박사 오늘 그 색깔의 정체를 정확히 말씀드리겠습니다.

이 장에서 다룰 것

- ① 적혈구는 어디서, 얼마나 빨리 만들어지는가 — 초당 240만 개
- ② 왜 적혈구는 핵을 버리는가
- ③ 지름 7.8마이크로미터의 몸은 정확히 어떻게 생겼는가
- ④ 자기보다 좁은 관을 지나는 세 겹의 설계
- ⑤ 왜 120일밖에 못 사는가 — 그리고 그 120일은 어떻게 측정되었나
- ⑥ 늙은 적혈구에는 어떤 표시가 붙는가
- ⑦ 비장의 검문소, 그리고 부항 자국의 색이 바뀌는 이유

한 문장으로 — 부항 연구가 측정 지표로 삼는 값들(변형능·표면 전하·응집·용혈)이 각각 무엇인지를, 적혈구 한 개의 일생을 따라가며 확정합니다.

왜 이 장이 중요한가 — 9장에서 우리는 아주 대담한 가설 하나를 검토하게 됩니다. "습부항이 뽑아내는 피에는 늙은 적혈구가 몰려 있을 것이다"라는 가설입니다. 그 가설이 말이 되는지 안 되는지를 판단하려면 '늙은 적혈구'가 정확히 무엇을 뜻하는지를 먼저 알아야 합니다. 오늘이 그 준비입니다. 그리고 부항 자국이 며칠에 걸쳐 색을 바꾸는 이유도 오늘 밝혀집니다.

2.1 탄생 — 초당 240만 개

서 박사 먼저 공장부터 보겠습니다. 적혈구는 골수에서 만들어집니다.

[용어] 골수 (bone marrow, 骨髓)

뼈 속을 채우고 있는 조직. 여기서 모든 혈액 세포가 만들어진다.

어릴 때는 거의 모든 뼈에서 만들지만, 어른이 되면 팔다리 긴뼈의 골수는 지방으로 바뀌고 척추뼈·복장뼈·골반뼈·갈비뼈 같은 몸통 뼈에 생산이 집중된다.

서 박사 생산 속도가 이렇습니다.

[표 2-1] 적혈구 생산의 숫자

항목	수치
하루 생산량	약 2,000억 개 (2×10^{11})
초당 생산량	약 240만 개
한 개가 만들어지는 데 걸리는 시간	약 7일
급할 때(출혈·고지대) 늘릴 수 있는 폭	평소의 6~8배
갓 나온 세포가 피에서 차지하는 비율	0.5~2.5%

오태식 초당 240만 개요? 제가 지금 이 말 하는 동안에도요?

서 박사 지금 이 순간에도요. 그리고 정확히 같은 수가 어딘가에서 파괴되고 있습니다. **생산과 파괴가 정확히 균형을 이룹니다.**

한소연 그 균형은 누가 맞춰요?

서 박사 콩팥입니다.

정민호 콩팥이요? 오줌 만드는 데 아니에요?

서 박사 그것도 하고, 이것도 합니다. 콩팥 안에는 **산소 농도를 재는 세포**가 있어요. 산소가 부족해지면 이 세포가 호르몬을 하나 뿜습니다.

[용어] 에리트로포이에틴 (EPO, erythropoietin)

콩팥이 만드는 '적혈구를 더 만들어라'는 신호 호르몬. 약 90%가 콩팥에서, 나머지는 간에서 나온다.

신부전 환자의 빈혈 치료제로 쓰이며, 동시에 지구력 종목의 대표적인 도핑 약물이기도 하다.

서 박사 그리고 콩팥 세포가 산소를 '잔다'고 할 때, 실제로 저울 역할을 하는 단백질이 있습니다. **HIF-2알파**라고 합니다.

[용어] HIF (저산소 유도 인자, hypoxia-inducible factor)

산소가 부족할 때만 살아남아 유전자를 켜는 단백질.

작동 방식이 독특하다. **산소가 충분하면 만들어지자마자 즉시 분해된다.** 산소가 부족해지면 그 분해 라인이 멈추고, 살아남은 HIF가 EPO 유전자를 켜다.

일상의 예 — 매일 배달되는 신문을 문지기가 매번 즉시 폐기한다고 하자. 문지기가 자리를 비운 날에만 신문이 집 안으로 들어간다. 산소가 그 문지기다.

서 박사 세포가 산소 농도를 재는 이 기전을 밝힌 세 사람(케일린·랏클리프·서멘자)이 **2019년 노벨 생리의학상**을 받았습니다.

핵을 버리는 세포

서 박사 이제 오늘의 첫 번째 놀라운 대목입니다. 적혈구는 성숙하는 마지막 단계에서 **핵을 통째로 세포 밖으로 밀어내 버립니다.**

한소연 핵을요? 그럼 유전자가 없는 거잖아요.

서 박사 없습니다.

[용어] 탈핵 (enucleation, 脫核)

세포가 핵을 밖으로 밀어내 버리는 것. 포유류의 적혈구만 하는 일이다. 밀려 나온 핵은 골수의 청소 세포가 즉시 삼켜 처리한다.

서 박사 그리고 핵만 버리는 게 아닙니다. **미토콘드리아도, 리보솜도, 소포체도 전부 폐기합니다.**

오태식 미토콘드리아는 세포의 발전소 아닙니까?

서 박사 맞습니다. 그것도 버려요. 그 결과 성숙한 적혈구는 이렇게 됩니다.

- 유전자가 없다 → **새 단백질을 만들 수 없다**
- 미토콘드리아가 없다 → **산소로 에너지를 만들 수 없다**
- 남은 것은 헤모글로빈이 가득 찬 **자루 하나**

정민호 그건... 세포라고 하기도 좀 그런데요.

서 박사 그런데 이 철저한 비움에는 이유가 셋 있습니다.

첫째, 자리가 남습니다. 핵과 발전소가 차지하던 공간에 헤모글로빈을 더 채울 수 있어요.

둘째, 물러집니다. 딱딱한 핵이 없으니 세포가 자유롭게 접힙니다. 이게 오늘의 핵심입니다.

셋째, 자기가 실어 나르는 산소를 자기가 쓰지 않습니다. 미토콘드리아가 없으니까요.

한소연 대신 오래 못 살겠네요.

서 박사 정확합니다. 고장 난 부품을 새로 만들 수가 없으니까요. **태어날 때 받은 장비로만 버티다가 120일 뒤에 폐기됩니다.** 소모품으로 설계된 세포예요.

원자재 세 가지

서 박사 하루에 2,000억 개를 만들려면 자재가 듭니다.

[표 2-2] 적혈구를 만드는 원자재

원자재	하는 일	모자라면
철 (하루 20~25mg)	헤모글로빈의 산소 결합 자리를 만든다	세포가 작고 창백해진다
비타민 B12	DNA를 만든다	세포가 분열을 못 해 크기만 커진다
엽산	DNA를 만든다	위와 같다

오타식 같은 빈혈인데 세포 크기가 반대가 되는군요.

서 박사 그래서 혈액검사에서 **적혈구의 평균 크기(MCV)**가 빈혈 원인을 찾는 첫 번째 나침반이 됩니다. 작으면 철 부족, 크면 비타민 부족 쪽을 먼저 의심합니다.

2.2 몸 — 지름 7.8마이크로미터의 원반

서 박사 이제 몸을 보겠습니다.

[표 2-3] 적혈구 한 개의 치수

항목	수치
지름	7.5~8.7μm (평균 약 7.8 μm)
가장자리 두께	2~2.5 μm
가운데 두께	0.8~1μm (가장자리의 절반 이하)
부피	약 90fL
표면적	약 136μm^2
같은 부피의 공이라면 필요한 표면적	약 97 μm^2
남는 표면적	약 40%

한소연 마지막 두 줄이 무슨 뜻이에요?

서 박사 소연 님, 오늘 강의의 열쇠를 짚으셨습니다.

적혈구는 **가운데가 양쪽에서 눌린 원반 모양**입니다. 구멍이 뚫리지는 않았고, 눌러기만 했어요.

[용어] 양면오목 원반 (biconcave disc, 兩面凹圓盤)

가운데가 양쪽에서 눌러 오목한 원반 모양. 도넛에서 구멍만 없앤 형태다.

서 박사 그런데 만약 적혈구가 **공 모양**이었다면 어땠을까요? 같은 부피 90렘토리터를 담은 공이라면 표면적은 97제곱마이크로미터면 충분합니다. 그런데 실제 적혈구의 표면적은 **136제곱마이크로미터**예요.

정민호 40% 더 넓네요.

서 박사 40% 남습니다. 그리고 그 남는 **40%가** 오늘의 답입니다.

풍선을 생각해 보세요. 바람을 가득 채운 풍선은 모양을 못 바꿉니다. 찌그러뜨리려면 터뜨려야 해요. 그런데 바람을 덜 넣어 헐렁한 풍선은 부피는 그대로 두고 모양만 얼마든지 바꿀 수 있습니다.

적혈구는 일부러 헐렁하게 만들어진 주머니입니다.

오태식 아, 그래서 늘어나서 관을 통과한다는 거군요.

서 박사 그렇습니다. 그리고 이 여유분이 없어지는 병이 실제로 있습니다. **유전성 구상적혈구증**이라고, 적혈구가 공 모양이 되는 병입니다. 이 세포들은 좁은 관을 못 지나가서 일찍 파괴됩니다.

안에 든 것 — 헤모글로빈 2억 7,000만 개

[표 2-4] 적혈구 한 개의 내용물

항목	수치
들어 있는 헤모글로빈 분자 수	약 2억 7,000만 개
헤모글로빈 한 분자가 붙잡는 산소	4개
세포 하나가 나를 수 있는 산소 분자 수	최대 약 10억 개
세포 안 헤모글로빈 농도	약 33g/dL
에너지원	포도당 분해로 얻는 ATP 2분자

한소연 세포 하나가 산소 10억 개요?

서 박사 10억 개입니다. 그리고 그런 세포가 몸에 25조 개 있습니다.

막 — 그물 위에 얹힌 껍질

서 박사 그 헐렁한 주머니의 껍질이 어떻게 생겼는지가 중요합니다. 두 층이에요. **바깥층**은 기름 성분의 얇은 막, **안쪽층**은 단백질로 짠 그물입니다.

[용어] 스펙트린 (spectrin)

적혈구 막 안쪽에 깔린 그물을 짜는 긴 막대 모양 단백질. 그물눈 크기가 약 80나노미터인 육각형 그물을 이룬다.

이 그물이 용수철처럼 접히고 퍼지면서 막이 찢어지지 않게 받쳐 준다.

서 박사 그리고 막에는 두 가지가 박혀 있습니다. 첫째, 밴드 3 단백질 — 세포당 약 100만 개로, 이산화탄소를 실어 나르는 통로입니다. 둘째, 글리코포린 — 끝에 시알산이라는 당을 매달고 있습니다.

[용어] 시알산 (sialic acid, 시알酸)

적혈구 표면에 매달려 있는 당. 음전하(-)를 띤다.

이 책에서 가장 자주 다시 나오는 분자다. 9장에서 부항 연구와 정면으로 만난다.

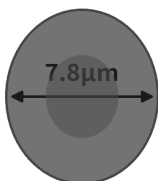
서 박사 시알산이 왜 중요하냐면 — 적혈구끼리 들러붙지 못하게 막아 주기 때문입니다. 표면이 전부 음전하니까, 같은 극끼리 밀어내는 자석처럼 서로 밀어냅니다.

정민호 자석 같은 방식이네요.

서 박사 정확합니다. 적혈구 표면의 전위를 재면 약 -16밀리볼트입니다. 실제로 효소로 시알산을 제거한 적혈구는 응집이 급격히 늘고 순환에서 빨리 제거된다는 것이 고전 실험의 결론입니다.

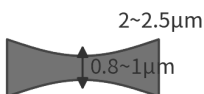
적혈구 한 개 — 혈렁하게 만들어진 주머니

위에서 본 모양



가운데가 얇은
'눌린 원반'

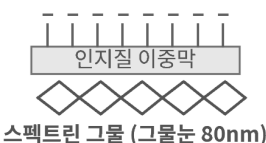
옆에서 본 단면



같은 부피의 공보다
표면적이 40% 남는다

막의 두 층

시알산의 음전하 (약 -16mV)



그물이 막을 받쳐 주어
찢어지지 않고 접힌다

[그림 2-1] 적혈구 한 개의 구조 — 40% 남는 표면적, 스펙트린 그물, 시알산 음전하

Mohandas, N., & Gallagher, P. G. (2008). Red cell membrane: Past, present, and future. *Blood, 112*(10), 3939–3948.

헤모글로빈이라는 기계

서 박사 잠깐 헤모글로빈 자체를 보고 가겠습니다. 이 분자의 정수는 **협동성**입니다.

오태식 협동성이요?

서 박사 헤모글로빈 한 분자에는 산소가 붙는 자리가 **네 개** 있습니다. 그런데 이 네 자리가 따로 놀지 않아요.

산소 하나가 붙으면 분자 전체의 모양이 바뀌면서, 나머지 세 자리가 산소를 붙잡는 힘이 수백 배로 올라갑니다. 반대로 하나가 떨어지면 나머지도 쉽게 떨어집니다.

한소연 한 명이 시작하면 다 같이 하는 거네요.

서 박사 그겁니다. 그래서 산소 농도에 따른 결합 곡선이 직선이 아니라 **S자 모양**이 됩니다. 그리고 이 S자가 운반체로서는 이상적인 형태예요.

[표 2-5] 헤모글로빈이 산소를 싣고 부리는 지점

위치	산소 분압	헤모글로빈 포화도
허파	약 100mmHg	약 97% — 가득 싣는다
조직	약 40mmHg	약 75% — 낙차만큼 부린다

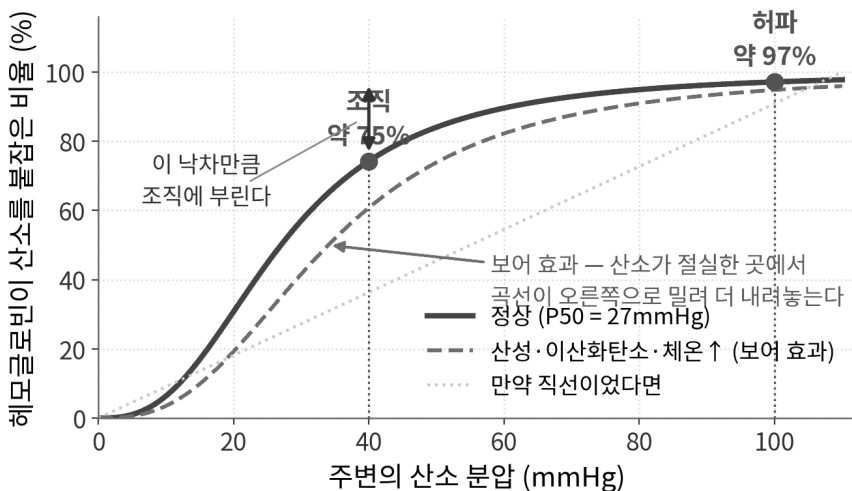
서 박사 여기에 조절 장치가 하나 더 붙습니다. **산성이 강하고 이산화탄소가 많은 곳** — 즉 대사가 왕성해서 산소가 절실한 조직 — 에서는 곡선이 오른쪽으로 이동해서 산소를 **더 많이** 내려놓습니다. 온도가 높아도 같은 방향으로 움직여요.

정민호 그럼 운동 중인 근육은 자동으로 더 받겠네요.

서 박사 자동으로 더 받습니다. 1904년에 발견된 **보어 효과**입니다.

그리고 이 정교한 기계의 최대 약점이 있습니다. **일산화탄소**예요. 일산화탄소는 산소가 붙는 그 자리에 **산소보다 약 240배 강하게** 달라붙습니다. 자리를 빼앗는 것으로 끝나지도 않아요. 남은 자리의 결합력까지 올려놓아서 **싣고 있는 산소마저 조직에서 내려놓지 못하게** 만듭니다. 무색무취의 기체가 연탄가스 중독의 주범이 되는 분자 수준의 이유입니다.

왜 S자여야 하는가 — 가득 싣고, 필요한 곳에서 부린다



[그림 2-2] 산소해리곡선 — 왜 S자여야 하는가, 그리고 보어 효과

Marengo-Rowe, A. J. (2006). Structure-function relations of human hemoglobins.

Proceedings (Baylor University Medical Center), 19(3), 239-245.

2.3 좁은 문의 물리학 — 오늘의 답

서 박사 자, 이제 태식 선생님의 질문에 답하겠습니다. 답은 **세 겹의 설계**입니다.

[표 2-6] 7.8 μ m가 5 μ m 관을 지나는 세 가지 장치

순서	장치	수치	하는 일
첫째	남는 표면적	구 대비 +40%	부피를 그대로 둔 채 단면만 좁힐 수 있다
둘째	스펙트린 그물의 탄성	6~9 μ N/m	접했다 퍼지며 변형을 흡수하고, 관을 나오면 수 초 안에 원반형으로 되돌아온다
셋째	낮은 내부 점도	헤모글로빈 33g/dL	안의 내용물이 아직 '흐르는 액체'여서 물주머니처럼 모양이 바뀐다

서 박사 실제로 모세혈관에 들어선 적혈구는 두 가지 모양 중 하나로 변합니다. 앞면이 오목하게 눌린 **낙하산 모양**, 또는 벽에 비스듬히 붙은 **슬리퍼 모양**입니다.

한소연 그 셋 중 하나만 망가져도 못 지나가는 거죠?

서 박사 그렇습니다. 그래서 이 세 가지를 묶어서 부르는 이름이 있어요.

[용어] 변형능 (deformability, 變形能)

세포가 외부 힘에 맞춰 모양을 바꾸고 다시 돌아오는 능력. 적혈구 기능의 총괄 성적표다.

남는 표면적, 막의 탄성, 내부 점도 — 이 셋이 함께 결정한다.

이 책 뒷부분에서 "부항 뒤에 혈액이 좋아졌다"는 주장을 검토할 때, 그 주장이 실제로 무엇을 측정한 것인지 판단하는 잣대가 이 변형능이다.

좁을수록 잘 흐른다 — 1장의 그 역설

서 박사 1장에서 잠깐 말씀드렸던 파레우스-린드크비스트 효과를 이제 제대로 설명할 수 있습니다.

1931년 스웨덴의 두 연구자가 유리관 실험에서 발견한 것은, 관 지름이 300마이크로미터 아래로 줄어들수록 피의 걸보기 점도가 오히려 낮아진다는 사실이었습니다. 그리고 지름 약 7마이크로미터에서 최소가 됩니다.

정민호 지난주에 적혈구가 가운데로 몰려서 그렇다고 하셨죠.

서 박사 이제 그 '몰린다'는 말의 내용을 아실 겁니다. 변형된 적혈구가 중심축으로 모이고, 벽 쪽에 세포 없는 혈장층이 생겨 운할막 역할을 합니다. 그리고 모세혈관의 지름(4~9마이크로미터)이 바로 이 점도 최소 구간입니다.

얼마나 무른지를 재는 방법

한소연 변형능이 좋다 나쁘다를 어떻게 재요? 눈으로 보는 건 아닐 텐데요.

서 박사 좋은 질문입니다. 이건 말씀씨가 아니라 측정 가능한 물리량입니다.

[표 2-7] 변형능을 재는 네 가지 방법

방법	원리	얻는 값
마이크로피펫 흡인	지름 1 μ m 유리관으로 막을 빨아들인다	막의 탄성계수 (6~9 μ N/m)
광학 집게	레이저로 막에 붙인 구슬을 당긴다	힘-변형 곡선
엑타사이토메트리	흐르는 적혈구에 레이저를 쏘아 회절 무늬를 본다	변형지수(EI) — 임상 표준
미세유체 칩	폭 3~5 μ m 수로를 새기고 통과 시간을 잰다	세포 하나하나의 통과 시간

서 박사 마지막 것이 감이 제일 잘 옵니다. 건강한 적혈구는 **1,000분의 몇 초에서 수십 밀리초** 만에 지나갑니다. 뻗뻗해진 세포는 **수십 배**가 걸리거나 아예 막힙니다.

오타식 당뇨 환자 피는 어떻습니까?

서 박사 당뇨와 패혈증에서 **변형지수가 떨어진다**는 보고가 꾸준히 있습니다. 4장에서 다루겠습니다.

크기가 아니라 굳기다

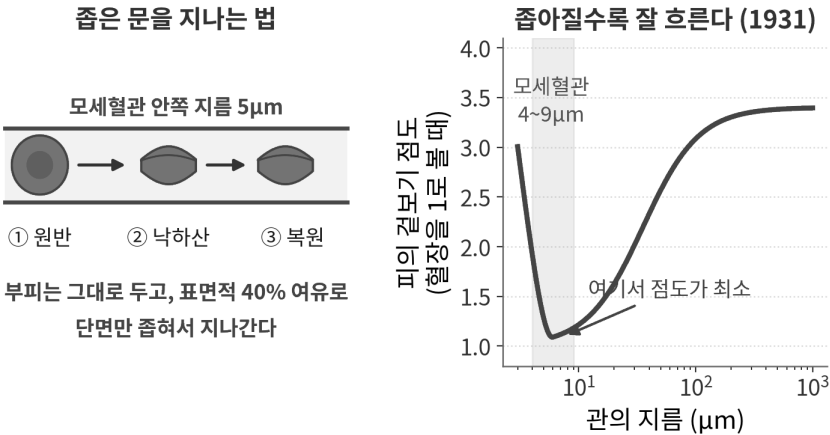
서 박사 마지막으로 중요한 사실 하나. 좁은 문을 지나는 데 결정적인 변수는 **크기가 아닙니다**.

백혈구 중 하나인 **호중구**는 지름이 8~10마이크로미터로 적혈구와 별 차이가 없습니다. 그런데 같은 모세혈관을 **수십 배에서 수백 배** 느리게 지나갑니다.

정민호 왜요?

서 박사 핵이 있고, 세포골격이 단단하고, 표면적 여유가 적어서요. **크기는 비슷한데 굳기가 다릅니다**.

미세순환의 통행 규칙은 '작을수록'이 아니라 '**무를수록 유리하다**'는 것입니다. 적혈구의 모든 설계 — 핵을 버린 것, 표면적을 40% 남긴 것, 스펙트린 그물을 깬 것 — 는 이 규칙에 대한 수억 년짜리 최적화입니다.



[그림 2-3] 좁은 문을 지나는 법 — 낙하산 변형과 파레우스-린드크비스트 곡선
 Secomb, T. W. (2017). Blood flow in the microcirculation. *Annual Review of Fluid Mechanics, 49*, 443–461; Fåhræus, R., & Lindqvist, T. (1931). The viscosity of the blood in narrow capillary tubes. *American Journal of Physiology, 96*(3), 562–568.

2.4 삶 — 120일, 심장 17만 회

[표 2-8] 적혈구 한 개의 노동 기록

항목	수치
평균 수명	약 115~120일
하루에 심장을 지나는 횟수	약 1,440회
일생 동안 심장을 지나는 횟수	약 17만 회
일생 누적 이동 거리	250~500km (추산)
동맥혈 1리터에 실린 산소	약 200mL
몸이 항상 싣고 다니는 산소 총량	약 1리터
쉴 때 조직이 쓰는 산소	분당 약 250mL

오테식 250킬로미터면 서울에서 대구 거리네요.

서 박사 그 거리를 도는 동안 17만 번 심장을 통과하고, 매번 자기보다 좁은 관을 뚫어쥘지 지나갑니다. 그런데 수리는 없어요. 핵도 없고 발전소도 없으니까요.

적혈구의 120일은 곧 장비의 감가상각 기간입니다.

120일은 어떻게 측정되었나

한소연 그 120일이라는 숫자, 어떻게 알아낸 거예요? 적혈구에 이름표를 붙일 수도 없잖아요.

서 박사 붙였습니다. 100년에 걸쳐 세 번, 서로 다른 방법으로요.

[표 2-9] 적혈구 수명을 잴 세 가지 방법

시기	방법	원리
1919년	차등 응집법	혈액형이 다른 사람의 피를 수혈한 뒤, 약품으로 받은 사람 자신의 적혈구만 제거하고 남은 공여 세포를 주기적으로 센다
20세기 중반	방사성 크로뮴 표지	적혈구에 방사성 물질을 붙여 놓고 혈중 잔존율을 추적한다
오늘날	호기 일산화탄소 측정	헤모글로빈이 분해될 때 일산화탄소가 정확히 1개씩 나오는 것을 이용해, 내쉬는 숨의 일산화탄소 농도로 파괴 속도를 잰다

정민호 1919년 방법이 제일 대단한데요. 그때는 방사성 물질도 없었잖아요.

서 박사 미국의 위니프리트 애슈비라는 연구자가 해냈습니다. 그 방법으로 100~120일이라는 답을 얻었고, 이후 두 방법이 같은 값으로 수렴했습니다.

실용적인 함의도 하나 있습니다. 당뇨 관리에 쓰는 **당화혈색소(HbA1c)**가 "지난 2~3개월의 평균 혈당"을 뜻하는 근거가 바로 이 120일 수명이에요. 그래서 적혈구 수명이 짧아지는 병(용혈, 만성 신부전 등)에서는 **당화혈색소가 실제 혈당보다 낮게 나오는 함정**이 있습니다.

2.5 늙음 — 무너지는 과정

서 박사 적혈구의 노화는 한 마디로 **막의 마모**입니다.

일생 동안 세포는 좁은 문을 통과하면서, 또 산소를 다루는 과정에서 생기는 손상 때문에, **막 조각을 작은 주머니 형태로 조금씩 떼어 버립니다.**

[표 2-10] 늙은 적혈구에 일어나는 세 가지 물리적 변화

항목	방향	결과
표면적	일생 동안 약 20% 감소	남는 40%가 줄어든다 → 변형이 어려워진다
부피	감소	—
안의 헤모글로빈 농도	상승	내부 점도가 올라간다 → 더 뻑뻑해진다

서 박사 2.3절에서 본 세 가지 장치가 **전부 나쁜 방향으로 움직입니다**. 늙은 적혈구는 **더 작고, 더 진하고, 더 뻑뻑합니다**.

오타식 그럼 좁은 문을 못 지나가겠네요.

서 박사 그렇습니다. 그리고 동시에 표면에 '**수거해도 좋다**'는 표시가 켜집니다.

[표 2-11] 늙은 적혈구에 붙는 네 가지 표시

표시	무슨 일이 일어나는가
밴드 3 단백질의 뭉침	산화된 헤모글로빈 조각이 막의 밴드 3을 뭉치게 하면, 그 자리를 몸의 자연항체가 인식한다
포스파티딜세린의 노출	원래 막 안쪽 에만 있던 지질이 바깥으로 뒤집혀 나온다 → 청소 세포에게 "먹어도 좋다"는 신호
CD47의 감소	"나를 먹지 마라"는 신호 단백질이 약해진다
시알산의 소실	음전하 반발이 줄어 뭉치기 쉬워진다

한소연 마지막 게 아까 그 시알산이죠?

서 박사 네. **시알산이 줄어드는 것이 늙은 적혈구의 표지입니다.** 이 사실을 기억해 두세요. 9장에서 결정적인 역할을 합니다.

요컨대 늙은 적혈구는 물리적으로는 좁은 문을 못 지나가고, 화학적으로는 제거 대상이라는 꼬리표를 받습니다. 남은 것은 검문소를 통과하지 못하는 순간뿐입니다.

2.6 죽음 — 비장의 바늘구멍, 그리고 부항 자국의 색

서 박사 마지막 시험장은 비장입니다.

[용어] 비장 (spleen, 脾臟)

왼쪽 갈비뼈 아래에 있는 무게 약 150g의 장기. '지라'라고도 한다.

무게는 작지만 **심박출량의 약 5%**를 받아, 하루에도 여러 차례 온몸의 피를 검문대에 세운다.

서 박사 비장의 구조가 독특합니다. 비장으로 들어온 피는 **혈관 밖으로 한 번 쏟아 집니다.**

정민호 혈관 밖으로요? 그럼 출혈 아닙니까?

서 박사 몸에서 **피가 정상적으로 혈관 밖을 걷는 유일한 구간**입니다. 그물 조직 사이를 흘러간 다음, 다시 정맥으로 돌아가려면 **좁은 틈**을 통과해야 해요.

[용어] 세극 (interendothelial slit, 細隙)

비장 정맥굴의 내피세포 사이에 있는 틈. 폭이 **0.5~1마이크로미터**다.

오태식 0.5마이크로미터요? 세포 지름이 7.8인데요?

서 박사 그렇습니다. 모세혈관(4~9 μ m)이 '좁은 문'이었다면, 이건 **바늘구멍**입니다. **좁고 유연한 세포만이 몸을 접어 통과합니다.**

표면적을 잃고 뻗뻗해진 늙은 세포는 그 앞에서 막히고, 대기하고 있던 청소 세포가 삼킵니다.

[표 2-12] 비장에서 벌어지는 일

항목	수치
세극의 폭	0.5~1μm
하루에 제거되는 적혈구	약 2,000억 개 (생산량과 정확히 같다)
청소 세포 안에서 처리되는 비율	약 90%
혈관 안에서 터지는 비율(혈관 내 용혈)	약 10%

한소연 비장이 없으면 어떻게 돼요?

서 박사 실제로 사고로 비장을 떼어 낸 사람의 혈액을 현미경으로 보면, **탈핵 때 미처 버리지 못한 핵 조각을 품은 적혈구**가 돌아다닙니다. 정상이라면 비장이 골라냈을 불량품이 검사 없이 유통되고 있다는 직접 증거예요. 더 무거운 대가는 면역입니다. 비장은 세균을 걸러 내는 일도 하기 때문에, 절제된 사람은 평생 심한 감염 위험을 안고 삽니다. 그래서 백신과 응급 항생제 지침이 따라붙습니다.

죽음이 아니라 재활용

서 박사 그리고 여기가 오늘의 마지막 대목입니다. 청소 세포 안에서 적혈구는 **부품 단위로 해체**됩니다. 가장 귀한 부품은 **철**입니다.

[표 2-13] 철은 어디서 오는가

출처	하루 양
낡은 적혈구에서 회수하는 철	20~25mg
음식에서 새로 흡수하는 철	1~2mg

한소연 대부분이 재활용이네요.

서 박사 적혈구 생산은 **사실상 폐철 재활용 산업**입니다. 새로 들어오는 철은 하루 1~2밀리그램뿐이에요.

정민호 그럼 철 말고 나머지는요?

서 박사 (탁자를 짚으며) 민호 님, 드디어 오늘의 그 대목입니다. 헤모글로빈에서 **철을 뺀 나머지 골격**은 두 단계를 거칩니다.

[표 2-14] 헤모글로빈 분해 산물의 색

단계	물질	색
1단계	헤모글로빈 (철이 붙어 있는 상태)	붉은색 · 검붉은 자주색
2단계	빌리베르딘	초록색
3단계	빌리루빈	노란색
배설	담즙으로 나간다 (하루 250~300mg)	대변의 갈색

서 박사 자, 민호 님. 부항 자국이 붉은색 → 자주색 → 초록색 → 노란색으로 변한다고 하셨습니다.

정민호 ...아.

서 박사 그게 바로 이 순서입니다. 부항 자국이든 넘어져서 생긴 멍이든, 조직 안에 새어 나온 적혈구가 그 자리에서 해체되는 과정을 색으로 보고 계신 겁니다.

한소연 그러니까 멍 색깔이 변하는 건 낮고 있다는 뜻이네요.

서 박사 정확합니다. 색이 바뀐다는 것은 청소 작업이正在进行되고 있다는 신호입니다.

부항 자국의 색이 바뀌는 것은 청소가正在进行되고 있다는 신호다



[그림 2-5] 부항 자국의 색이 바뀌는 순서

Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.). Elsevier의 hem 대사 경로에 근거해 작성.

부항 자국 아래 골목길에서는 무슨 일이 벌어질까

등에 붙였다 떼는 유리컵 하나. 그 몇 분 동안 지름 5센티미터 컵 아래에서는 수백만 개의 미세혈관에 힘이 걸린다. 이 책은 눈에 보이지 않는 혈관의 99%, 곧 피부 아래의 골목길에서 출발해 적혈구 한 개의 일생과 피 속의 식구들, 오천 년에 걸친 부항의 역사, 음압이 피부 아래에서 일으키는 변화까지 차례로 들여다본다.

시립도서관 세미나실에서 열린 열다섯 번의 저녁 강의를 그대로 옮겼다. 미세순환을 연구해 온 서 박사와 십 년째 부항방에 다니는 택배 기사, 의심하러 온 회사원, 무릎 관절염이 있는 은퇴한 체육 교사가 모르는 말이 나오면 무조건 손을 든다. 부항 논문 3,618편을 바탕으로, 모든 이야기에 확립·수렴·가설의 세 등급을 붙였다.

요통과 목·어깨, 혈압과 당뇨, 마음과 피부에 관한 임상시험을 병마다 따로 읽고, 안전하게 쓰는 규격과 금기, 점검표까지 챙긴다. 부항을 받는 사람도 하는 사람도 그 자국을 새로운 눈으로 보게 될 것이다.

이 책에서 만나는 것

- 세포 30조 개와 피 5리터, 미세혈관의 크기와 숫자
- 이집트에서 동아시아·이슬람 세계까지, 컵 하나의 오천 년
- 음압이 미세혈관을 바꾼다는 직접 증거와 '어혈'의 재해석
- 질환별 판정표와 부항 받기 전 환자용 점검표

① 과학과 영성출판사

값 17,000원



이어서 읽으시려면

보이지 않는 99%, 부항 자국 아래에서 벌어지는 일 — 전체 314쪽

ssbook.kr/book/cupping99

판매가 **10,200원** (POD 정가 17,000원)

- 전 페이지 컬러 PDF · 개인 영구 소장
- 카드 결제 즉시 내 서재에서 내려받기
- 공개 배포 · 재판매 금지

발간 도서 목록

다음 쪽부터 과학과영성출판사가 발간한 책 전체 목록(표지 · 가격 · 특징)을 안내합니다.

총 69종 · 판매가는 POD 정가의 60% · 컬러 PDF · 개인 영구 소장

인삼 (6)



만병통치 인삼의 신경내분비시스템
하나의 인삼뿌리는 어떻게 온몸의 스위치를 건드리는가
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-neuroendo



인삼과 당뇨
공복혈당 · 당화혈색소 · 합병증을 개선하는 인삼
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-diabetes



인삼과 대사증후군
허리둘레 · 중성지방 · HDL · 혈압 · 혈당을 개선하는 인삼치유의 과학적 원리
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-metabolic



인삼과 아토피
금산 아토피 마을에서 어린이 임상시험 설계까지
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-atopy



인삼과 암치유
실험실에서 진로실까지, 1,300편의 논문이 말하는 것
₩18,500원 → **11,100원**
ssbook.kr/book/ginseng-cancer



인삼의 임상연구
최신연구와 방법론
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-clinical

오토파지 (2)



스스로를 먹는 몸
오토파지, 자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/eating-self



오토파지와 암
세포는 스스로를 먹는다
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/autophagy-cancer

식물성 저탄고지 (11)



뇌신경 4+2축과 성격유형 그리고 식물성 저탄고지
도파민 · 세로토닌 · 노르에피네프린 · 아세틸콜린 + 글루타메이트 · 가바
₩20,000원 → **12,000원**
ssbook.kr/book/brain-axes



당뇨를 개선하는 식물성 저탄고지
혈당 · 당화혈색소 · 체중을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-diabetes



고혈압을 개선하는 식물성 저탄고지
 혈압·체중·혈관 건강을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-hypertension



비만을 개선하는 식물성 저탄고지
 체중·허리둘레·체지방을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-obesity



뇌전증을 개선하는 식물성 저탄고지
 뇌전증 환자와 보호자를 위한 논문 근거 기반 식물성 저탄고지 식단
 23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-epilepsy



우울증을 개선하는 식물성 저탄고지
 소화관과 장·뇌 축, 에너지 대사를 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-depression



자폐를 개선하는 식물성 저탄고지
 일곱 갈래 기전이 한 점에서 만난다
 23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-autism



아토피를 개선하는 식물성 저탄고지
 피부 장벽과 면역, 장 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 19,000원 → **11,400원**
ssbook.kr/book/pkd-atopy



치매를 개선하는 식물성 저탄고지
 뇌 에너지 대사와 인슐린 신호, 혈관 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/pkd-dementia



암을 개선하는 식물성 저탄고지
 치료 중 체중 유지와 근육 보존, 영양 상태를 함께 살피는 식물성 케톤식 가이드
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-cancer



관절염을 개선하는 식물성 저탄고지
 염증 신호와 체중 부하, 대사 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-arthritis

단식 (1)



40일간 굶는 몸의 시간표
 카힐의 40일 연구, 혈당과 케톤과 자가포식을 중심으로
 18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/fasting-40days

생물리학 (4)



발골의 강
 피의 흐름에서 발바닥까지, 명과 몸 사이에서 확인된 것과 아직 모르는 것
 18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



보이지 않는 99%, 부항 자국 아래에서 벌어지는 일
 부항과 미세혈관에 대한 열다섯 번의 강의
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/cupping99



세 겹의 뇌, 눈 위의 지휘자
매클린의 삼위일체 뇌와 안와전두엽 이야기
~~10,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/triune-brain



광유전
빛으로 세포를 제어하는 기술 — 원리·실험·회로·치료
~~42,000원~~ → **25,200원**
ssbook.kr/book/optogenetics

독립영양인간 (2)



이암블리코스의 피타고라스적 삶에 관하여
그리스어 원전 완역 · 테일러 판 전편 수록
~~10,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/iamblichus



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지
요하의 흙인형 · 우하랑의 여신 · 해명경 · 태을금
화중지 다섯 갈래를 한자리에 놓다
~~26,000원~~ → **15,600원**
ssbook.kr/book/hongsan

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역
대학 기술로 완성하는 분자생물학의 중심원리
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-01



대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도
분리·독립 × 감수 분열 × 확률의 곱 — 기술 22문
항으로 읽는 유전
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-03



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명공학
제한 효소의 인식·절단 × 조각 길이로 위치 추론
× 재조합·판별 실험 설계
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-05



대입 과학논술 07 — 세포막·소기관·물질수송
인지질의 벽과 단백질의 문 — 물질은 기울기를 따라 흐른다
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-07



대입 과학논술 08 — 호르몬·항상성·배설
감지하고, 신호를 보내고, 되돌린다 — 혈당에서 콩팥까지 항상성
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-08



대입 과학논술 09 — 면역·백신
몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-09



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지대사
포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-10



대입 과학논술 11 — 신경계·활동전위
펄프가 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생긴다
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-11



대입 과학논술 12 — 생태·진화·생물다양성
에너지는 흐르고 물질은 돈다 — 개체군에서 종 분화까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-12



대입 과학논술 13 — 원자 구조·주기성
전자 배치 × 유효 핵전하 × 이온화 에너지로 읽는 주기성
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-13



대입 과학논술 14 — 화학 결합·분자 구조·극성
원자가 전자 세기 × 전자쌍 반발 × 쌍극자 벡터 합
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-14



대입 과학논술 15 — 분자 간 힘·수소 결합·계면
극성 × 분자 간 힘의 서열 × 계면 에너지로 읽는 물질
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-15



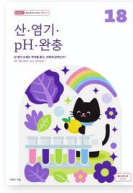
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
유기 화학·생체 분자·고분자 논제 해설
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



대입 과학논술 17 — 화학양론·농도
몰 × 반응식 계수비 × 농도 환산으로 푸는 화학 계산
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-17



대입 과학논술 18 — 산화·환원과 산화수
산화·환원과 산화수 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-18



대입 과학논술 19 — 산·염기·pH·완충
평형(K) × 몰수 계산 × 부피 보정으로 푸는 산·염기
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-19



대입 과학논술 20 — 반응 속도
넘어야 할 언덕 — 반감기에서 촉매, 반응 메커니즘까지
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-20



대입 과학논술 21 — 화학 평형
평형 상수 K × 반응 지수 Q × 르사틀리에로 읽는 화학 평형
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-21



대입 과학논술 22 — 열화학·엔탈피·자유 에너지
열화학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
25,000원 → **15,000원**
ssbook.kr/book/nonsul-22



대입 과학논술 23 — 용액·총괄성·상평형
용액·총괄성·상평형 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-23



대입 과학논술 24 — 기체
기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-24



대입 과학논술 25 — 화학 전자·전기 분해
화학 전자·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-25



01 통합과학 화학 1 — 소금과 별
원자에서 원소의 기원·주기율표까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-01



02 통합과학 화학 2 — 못은 왜 녹슬까
결합에서 반응·산과 염기까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-02



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까
본자에서 세포·호소·에너지까지
~~18,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-03



04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자
유전 정보에서 진화·생태계까지
~~18,500원~~ → **11,100원**
ssbook.kr/book/tonghap-04



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 뒤통해질까
원자에서 힘과 에너지까지
~~22,000원~~ → **13,200원**
ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나침반
원자에서 전자기파까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/tonghap-06



07 통합과학 지구과학 1 — 구름은 왜 떨어지지 않을까
대기·기압·복사 에너지로 읽는 날씨
~~21,000원~~ → **12,600원**
ssbook.kr/book/tonghap-07



08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다
원자에서 암석·판·지구의 역사까지
~~20,000원~~ → **12,000원**
ssbook.kr/book/tonghap-08

채식 (5)



사상체질과 채식
이제마의 사상·권도원의 팔체질·황제내경을 영
양학과 분자생물학으로 다시 읽다
~~21,000원~~ → **12,600원**
ssbook.kr/book/sasang-veg



체질과 심리신경내분비
사상·팔체질·황제내경과 Big5·MBTI를 몸의
언어로 다시 읽다
~~18,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/constitution-neuro

역사 속의 채식인
채식의 역사를 사람들의 이야기로 읽다
교보문고 판매
ssbook.kr/book/veg-history

채식이야기
채식에 관한 이야기
교보문고 판매
ssbook.kr/book/veg-story

우리 몸은 채식을 원한다
몸이 채식을 원하는 이유
교보문고 판매
ssbook.kr/book/body-wants-veg

라이프스타일 (3)



아주 쉬운 회춘의 원리
노화의 12가지 특징과 식이를 통한 회춘
~~18,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/rejuvenation



피부는 안에서 만들어진다
콜라겐·아쿠아포린·자가포식과 식물성 케톤식
~~18,400원~~ → **11,000원**
ssbook.kr/book/skin-inside

고대사 (5)



동아시아 1만 년의 기후와 땅

한반도에서 본 홀로세의 기후와 지형 변화

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/climate-ea-1



고려 서경(西京)의 위치를 추정하다 1권 방법편

여덟 가지 방법으로 동아시아 고전 지명을 좌표로 옮기기

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/seogyyeong-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제1권 기초편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제1~7장)

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/geonames-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제2권 기법편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제8~16장)

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/geonames-2



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제3권 적용편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (적용 사례)

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/geonames-3