

# 26장: 전류와 저항

Current and Resistance

## 정지한 전하에서 움직이는 전하로

지난 다섯 장(21~25장)에서 우리는 **정전기학(electrostatics)** — 정지한 전하의 물리 — 을 공부했다. 이제부터 두 장에 걸쳐 **움직이는 전하**, 즉 **전류(electric current)** 를 다룬다.

- 기상학자는 번개와 대기 중의 전하 흐름을 연구한다
- 생리학자는 신경을 타고 흐르는 전류로 근육 제어를 이해한다
- 전기공학자는 전력망, 통신, 데이터 저장 — 모두 전류의 제어다
- 스마트폰 결제부터 지하철 운행까지, 일상은 전류 위에서 돌아간다

이번 장의 목표: 전류가 **무엇인지**, 왜 어떤 물질에서는 잘 흐르고 어떤 물질에서는 흐르지 못하는지 이해하는 것이다.

## 이번 강의 세 가지 핵심 질문

1. 전류란 정확히 무엇인가?

$$i = \frac{dq}{dt}$$

2. 전류의 크기는 무엇이 결정하는가? — 저항과 저항률, 그리고 옴의 법칙

$$R = \frac{V}{i}, \quad R = \rho \frac{L}{A}$$

3. 전류가 흐르면 에너지는 어디로 가는가? — 전력과 저항 발열

$$P = iV = i^2 R = \frac{V^2}{R}$$

## 26.1 전류

### 고립된 도선에는 전류가 없다

구리 도선 안에는 **전도 전자(conduction electrons)**가 가득하다. 이 전자들은 약  $10^6$  m/s의 엄청난 속력으로 **무작위 운동**을 하고 있다.

- 도선 속에 가상의 단면을 하나 놓아 보자
- 전자들이 매초 수십억 개씩 단면을 **양방향으로** 통과한다
- 왼쪽으로 가는 수와 오른쪽으로 가는 수가 정확히 같다
- 알짜 전하 수송이 0이므로 **전류는 0**이다

움직이는 전하가 있다고 해서 모두 전류가 되는 것은 아니다. **알짜 흐름**이 있어야 전류다.

## 물 호스의 비유

정원용 호스로 물이 흐르는 상황을 생각하자. 물 분자 속 양성자(양전하)가 초당 수백만 쿨롬씩 이동한다.

- 그런데 이것은 전류일까? **아니다!**
- 물 분자 속 전자(음전하)도 정확히 같은 양이 같은 방향으로 이동한다
- 양전하의 흐름과 음전하의 흐름이 상쇄되어 **알짜 전하 수송은 0**

전류가 되려면 어느 한쪽 부호의 전하가 **더 많이** 흘러야 한다. 이번 장에서는 주로 금속 도체 속 전도 전자의 **정상 전류(steady current)** 를 다룬다.

## 전지를 연결하면

고립된 도체 고리는 전체가 하나의 **등퍼텐셜** 이다. 내부 전기장이 0이므로 전자에 알짜 전기력이 없고, 전류도 없다.

고리에 **전지(battery)** 를 끼워 넣으면:

- 고리가 더 이상 등퍼텐셜이 아니다 — 전지가 **전위차** 를 유지한다
- 도선 내부에 **전기장** 이 생긴다
- 전기장이 전도 전자에 힘을 가해 알짜 이동을 만든다
- 아주 짧은 시간 안에 흐름이 일정해진다: **정상 상태(steady state)**

## 전류의 정의

도선의 어느 단면을 시간  $dt$  동안 전하  $dq$ 가 통과하면, 그 단면을 지나는 **전류 (current)** 는:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

전류의 정의 — 단면을 지나가는 전하의 흐름



시간  $dt$  동안 이 단면을 지나가는 전하량이  $dq$ 이면

$$i = dq/dt$$

시간 0부터  $t$ 까지 통과한 총 전하는 적분으로 구한다:

$$q = \int dq = \int_0^t i dt$$

## 전류의 단위: 암페어

전류의 SI 단위는 **암페어(ampere, A)** 이다. SI 기본 단위 중 하나다.

$$1\text{ A} = 1\text{ C/s}$$

일상 속 전류의 크기 감각:

| 상황                   | 대략적인 전류         |
|----------------------|-----------------|
| 신경 신호                | ~ $\mu\text{A}$ |
| LED 표시등              | ~ 20 mA         |
| 스마트폰 고속 충전           | ~ 2 A           |
| 전기 주전자 (2 kW, 220 V) | ~ 9 A           |
| 자동차 시동 모터            | ~ 200 A         |
| 번개                   | ~ 30 kA         |



## 정상 상태에서 전류는 어디서나 같다

정상 상태에서는 도선의 **어느 단면을 잡아도 전류가 같다**. 단면의 위치나 기울기와 무관하다.

이유는 **전하 보존** 이다:

- 전하는 도중에 생기지도, 사라지지도, 쌓이지도 않는다
- 한쪽 단면으로 전자가 하나 들어오면, 다른 단면으로 하나 나가야 한다
- 호스에 물이 가득 차 있으면, 한쪽에 한 방울이 들어갈 때 반대쪽에서 한 방울이 나오는 것과 같다

굵기가 변하는 도선에서도 단면을 통과하는 **전류  $i$  자체는 일정** 하다. (단위 면적당 흐름은 달라지는데, 이것이 곧 배율 전류 밀도다.)

### 예제: 물 호스가 나르는 음전하의 전류

정원용 호스로 물이  $dV/dt = 450 \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 흐른다. 물 분자 속 **전자들** 이 나르는 음전하의 전류는 얼마인가?

물 분자( $\text{H}_2\text{O}$ ) 하나에는 전자가 10개 있다 (산소 8개 + 수소 1개  $\times$  2). 초당 지나가는 분자 수를  $dN/dt$ 라 하면:

$$i = e \cdot 10 \cdot \frac{dN}{dt}$$

분자 수의 흐름률은 물질량  $M = 0.018 \text{ kg/mol}$ 과 밀도  $\rho_{\text{mass}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ 로 구한다:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_A}{M} \rho_{\text{mass}} \frac{dV}{dt}$$

### 예제: 물 호스 (계속)

값을 대입하면 ( $dV/dt = 450 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{0.018} \times 1000 \times 450 \times 10^{-6} \approx 1.5 \times 10^{25} \text{ 개/s}$$

전류는:

$$i = (1.6 \times 10^{-19})(10)(1.5 \times 10^{25}) \approx 2.4 \times 10^7 \text{ C/s}$$

$$i \approx 24 \text{ MA}$$

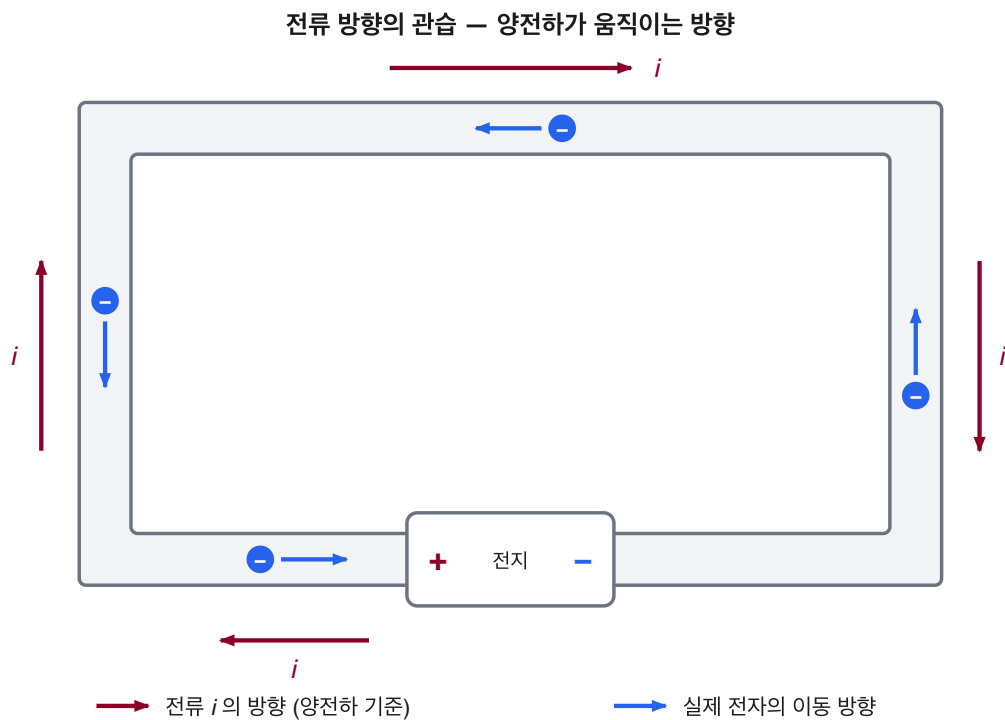
무려 2400만 암페어! 하지만 물 분자의 **양성자들이 나르는 양전하 전류가 정확히 이를 상쇄** 하므로, 알짜 전류는 0이다. 호스를 만져도 감전되지 않는 이유다.

## 전류의 방향 관습

전지를 연결한 구리 고리에서 실제로 움직이는 것은 **음전하인 전자** 다. 전자는 전기장과 반대 방향, 즉  $-$ 극에서  $+$ 극 쪽으로(도선 내부 기준) 움직인다.

그러나 역사적인 이유로 다음 관습을 쓴다:

전류 화살표는 **양전하 운반자가 움직일 방향** 으로 그린다. 실제 운반자가 음전하여서 반대로 움직이더라도 그렇게 그린다.



## 왜 이 관습이 문제없을까

대부분의 상황에서는,

- 양전하가 오른쪽으로 흐르는 것과
- 같은 양의 음전하가 왼쪽으로 흐르는 것은

**외부에서 볼 때 완전히 같은 효과**를 낸다. 단면을 지나는 알짜 전하 수송이 동일하기 때문이다.

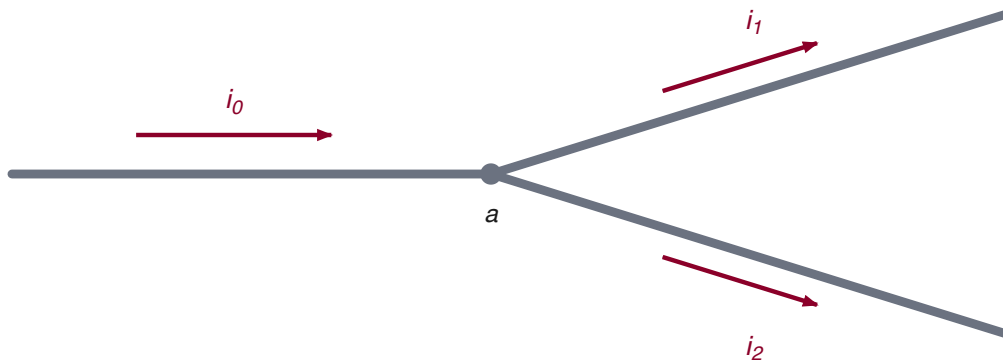
그래서 회로를 분석할 때는 "양전하가 흐른다"고 가정해도 아무 문제가 없다. (효과가 달라지는 예외적인 상황 — 예: 홀 효과 — 에서는 실제 운반자를 따로 밝힌다.)

## 분기점에서의 전류: 전하 보존

도선이 두 갈래로 갈라지는 **분기점(junction)** 을 생각하자. 전하가 분기점에 쌓일 수 없으므로:

$$i_0 = i_1 + i_2$$

분기점에서의 전류 — 전하 보존



분기점으로 들어온 전류의 합 = 나간 전류의 합 (전하는 쌓이지 않는다)

$$i_0 = i_1 + i_2$$

- 들어온 전류의 합 = 나간 전류의 합 — 다음 장에서 **키르히호프 분기점 법칙** 으로 다시 만난다
- 도선을 공간에서 어떻게 구부려도 이 관계는 변하지 않는다

## 전류는 스칼라다

전류에 화살표를 그리지만, 전류는 **벡터가 아니라 스칼라** 다.

- $i = dq/dt$ 에서 전하  $q$ 와 시간  $t$  모두 스칼라  $\rightarrow$  전류도 스칼라
- 화살표는 도선을 **따라가는** 흐름의 sense(어느 쪽으로 도는가)를 나타낼 뿐, 공간에서의 방향이 아니다
- 그 증거:  $i_0 = i_1 + i_2$ 는 **벡터 합이 아니라 대수 합** 이다 — 도선의 공간적 각도와 무관하다

공간에서의 방향까지 담은 벡터량이 필요하다면? 그것이 다음 절의 **전류 밀도**  $\vec{j}$  이다.

## 26.2 전류 밀도

### 흐름을 국소적으로 보기: 전류 밀도

전류  $i$ 는 도선 전체를 지나는 흐름이다. 도체 내부의 **한 점**에서 흐름을 묘사하려면 **전류 밀도(current density)  $\vec{J}$** 를 쓴다.

- 방향: 그 점에서 양전하 운반자가 움직이는 방향 (음전하라면 반대)
- 크기: **단위 면적당 전류** — 단위는  $\text{A}/\text{m}^2$

단면을 통과하는 전류는 전류 밀도를 면적에 대해 적분한 것이다:

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

전류가 단면에 균일하고  $d\vec{A}$ 와 나란하면:

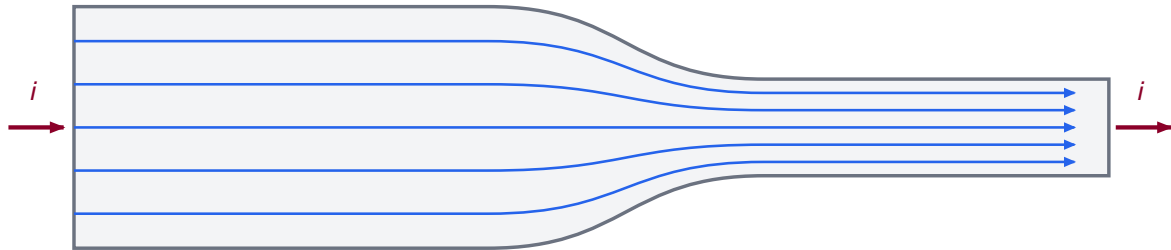
$$i = JA \quad \Rightarrow \quad J = \frac{i}{A}$$



## 유선으로 나타낸 전류 밀도

전기장을 전기력선으로 그렸듯이, 전류 밀도는 **유선(streamlines)** 으로 나타낼 수 있다.

전류 밀도  $J$  — 단면이 좁아지면  $J$ 는 커진다



넓은 단면: 유선이 성기다 →  $J$ 작다

좁은 단면: 유선이 뽁뽁하다 →  $J$ 크다

전하 보존: 어느 단면에서나 전류  $i$ 는 같다

- 도선이 좁아져도 전류  $i$ 는 같다 (전하 보존)
- 같은 유선들이 좁은 단면에 모이므로 → 유선 간격이 **뽁뽁해진다**
- 유선이 뽁뽁할수록 전류 밀도  $J$ 가 크다:  $J = i/A$ 에서  $A$ 가 작아지면  $J$  증가

## 표류 속도: 느린 알짜 이동

전류가 흐르는 도선 속 전도 전자는 여전히  $\sim 10^6$  m/s로 무작위 운동을 한다. 다만 여기에 전기장 방향과 반대인 아주 느린 알짜 이동, 즉 **표류 속도(drift speed)**  $v_d$ 가 더해진다.

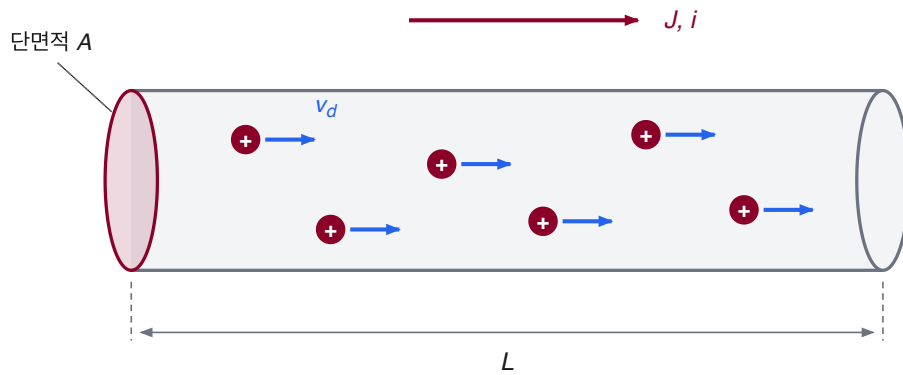
- 무작위 운동 속력:  $\sim 10^6$  m/s
- 가정용 구리 배선의 표류 속력:  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  m/s

무려 **10자릿수 이상** 차이가 난다! 그럼에도 전류를 만드는 것은 이 느린 표류다. 무작위 운동은 평균하면 0이 되어 전류에 전혀 기여하지 못한다.

## 전류와 표류 속도의 관계 유도

양전하 운반자(밀도  $n$ 개/ $\text{m}^3$ )가 모두 표류 속도  $v_d$ 로 움직인다고 하자. 도선의 단면적은  $A$ 이다.

전류의 미시적 모형 — 길이  $L$  속의 운반자가 모두 지나가는 시간



부피  $AL$  속의 운반자 수 =  $nAL$ , 총 전하  $q = (nAL)e$

모두 지나가는 시간  $t = L/v_d \rightarrow i = q/t = nAev_d$

길이  $L$ 인 토막 속의 운반자 수는  $nAL$ 이므로, 이 토막이 담은 총 전하는:

$$q = (nAL)e$$

**유도 (계속):**  $J = nev_d$

이 전하 전체가 토막의 끝 단면을 빠져나가는 데 걸리는 시간은:

$$t = \frac{L}{v_d}$$

따라서 전류는:

$$i = \frac{q}{t} = \frac{nALe}{L/v_d} = nAev_d$$

양변을  $A$ 로 나누면 전류 밀도가 된다. 벡터로 쓰면:

$$\boxed{J = nev_d \quad \Leftrightarrow \quad \vec{J} = (ne)\vec{v}_d}$$

$ne$ 는 **운반자 전하 밀도** ( $\text{C}/\text{m}^3$ )이다. 운반자가 양전하면  $\vec{J} \parallel \vec{v}_d$ , 전자처럼 음전하면  $ne < 0$ 이라  $\vec{J}$ 와  $\vec{v}_d$ 가 **반대 방향**이다.

### 예제: 구리 도선 속 전자는 얼마나 느리게 기어가나

반지름  $r = 900 \mu\text{m}$ 인 구리 도선에 전류  $i = 17 \text{ mA}$ 가 흐른다. 구리 원자 하나가 전도 전자 하나를 내놓는다고 할 때, 표류 속도를 구하라.

먼저 전도 전자의 밀도  $n$ . 원자 밀도와 같으므로 아보가드로 수, 구리 밀도  $\rho_{\text{mass}} = 8.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 물질량  $M = 63.5 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ 로:

$$n = \frac{N_A \rho_{\text{mass}}}{M} = \frac{(6.02 \times 10^{23})(8.96 \times 10^3)}{63.5 \times 10^{-3}}$$
$$n \approx 8.49 \times 10^{28} \text{ 개/m}^3$$

### 예제: 표류 속도 (계속)

단면적은  $A = \pi r^2 = \pi(9.0 \times 10^{-4})^2 = 2.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ .

$i = nAev_d$ 를  $v_d$ 에 대해 풀면:

$$v_d = \frac{i}{nAe} = \frac{17 \times 10^{-3}}{(8.49 \times 10^{28})(2.54 \times 10^{-6})(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$v_d \approx 4.9 \times 10^{-7} \text{ m/s} \approx 1.8 \text{ mm/h}$$

전자의 표류는 **시간당 1.8 mm** — 달팽이보다 느리다!

## 그런데 왜 전등은 스위치를 켜자마자 켜질까

전자가 이렇게 느리다면, 스위치에서 전구까지 전자가 "도착"하는 데 몇 시간이 걸려야 하지 않을까?

혼동의 원인: **전자의 표류 속도** 와 **전기장이 전파되는 속도** 는 다르다.

- 스위치를 켜면 전기장의 변화가 도선을 따라 거의 **광속** 으로 전파된다
- 전구 속 전자를 포함해 **도선 곳곳의 전자들이 거의 동시에** 표류를 시작한다
- 물이 가득 찬 호스의 밸브를 열면, 압력파가 (물 자체보다 훨씬 빠른) 소리 속도로 전달되어 끝에서 물이 바로 나오는 것과 같다

시뮬레이션: 표류 속도와 전류 — 무작위 열운동에 표류가 더해져 전류가 흐른다



## 26.3 저항과 저항률

### 저항의 정의

같은 모양의 구리 막대와 유리 막대에 같은 전위차를 걸면, 흐르는 전류는 하늘과 땅 차이다. 이 차이를 나타내는 물체의 특성이 **저항(resistance)** 이다.

물체 양단에 전위차  $V$ 를 걸고 전류  $i$ 를 측정하여 정의한다:

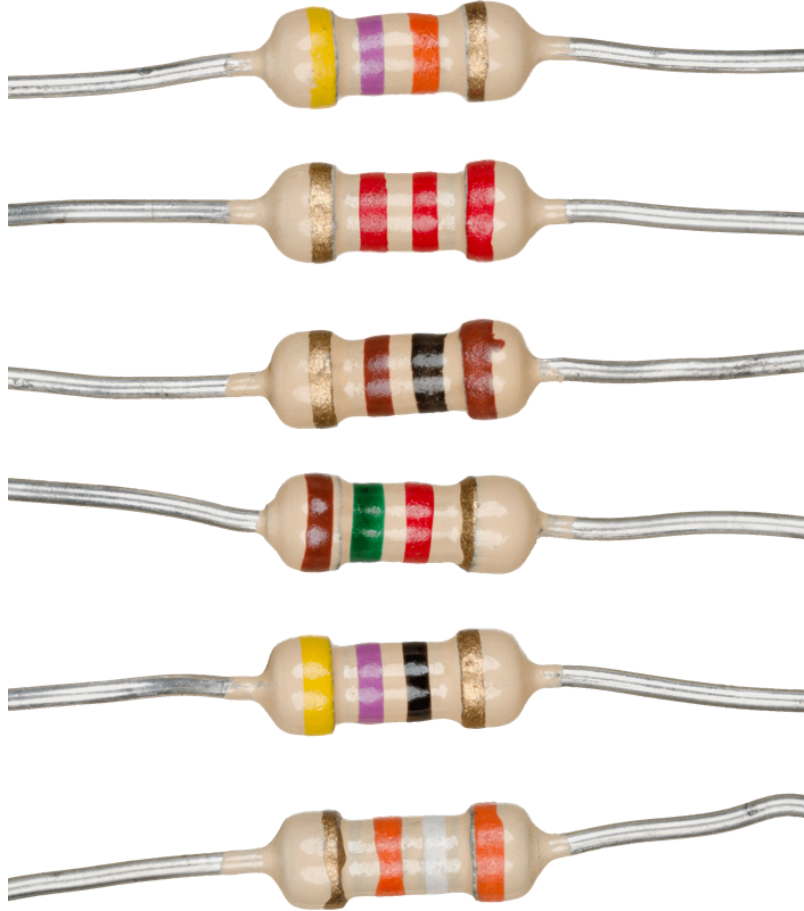
$$R = \frac{V}{i}$$

단위는 **옴(ohm,  $\Omega$ )** :  $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ .

$$i = \frac{V}{R}$$

같은  $V$ 라면 저항이 클수록 전류가 작다. 회로에서 정해진 저항을 제공하도록 만든 소자를 **저항기(resistor)** 라 하고, 회로도에서는 지그재그 모양 기호로 그린다.

## 저항기의 실물



색 띠(color band)는 저항값을 나타내는 코드다. 모든 전자제품 기판에는 이런 저항기가 수십~수백 개씩 들어 있다.

## 재료의 성질: 저항률

저항  $R$ 은 특정한 **물체**의 성질이다. 물체가 아니라 **재료** 자체의 성질을 말하려면, 전위차 대신 그 점의 전기장  $\vec{E}$ , 전류 대신 전류 밀도  $\vec{J}$ 로 정의한다:

$$\boxed{\rho = \frac{E}{J}} \quad \vec{E} = \rho \vec{J}$$

이것이 **저항률(resistivity)**이다. 단위를 확인하면:

$$\frac{\text{단위}(E)}{\text{단위}(J)} = \frac{\text{V/m}}{\text{A/m}^2} = \frac{\text{V}}{\text{A}} \text{m} = \Omega \cdot \text{m}$$

역수는 **전도율(conductivity)**  $\sigma = 1/\rho$ 이고,  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 로도 쓴다.

## 저항률은 재료마다 천차만별

실온(20°C)에서의 저항률:

| 재료      | $\rho$ ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) |
|---------|----------------------------------|
| 은       | $1.62 \times 10^{-8}$            |
| 구리      | $1.69 \times 10^{-8}$            |
| 알루미늄    | $2.75 \times 10^{-8}$            |
| 텅스텐     | $5.25 \times 10^{-8}$            |
| 규소 (순수) | $2.5 \times 10^3$                |
| 유리      | $10^{10} \sim 10^{14}$           |

구리와 유리의 저항률은  **$10^{20}$ 배 이상** 차이 난다. 물리량 중 이렇게 재료에 따라 극단적으로 변하는 양은 드물다. 송전선에 구리·알루미늄을 쓰고, 절연체로 유리·고무를 쓰는 이유다.

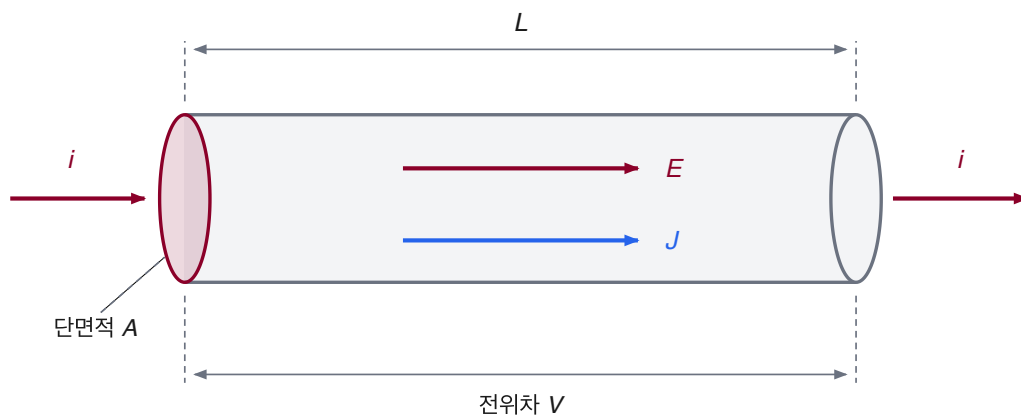
## 저항과 저항률을 잇기: $R = \rho L/A$ 유도

저항은 물체의 성질, 저항률은 재료의 성질이다.

길이  $L$ , 균일한 단면적  $A$ 인 도선에 전위차  $V$ 를 걸자. 내부의 전기장과 전류 밀도는 균일하므로:

$$E = \frac{V}{L}, \quad J = \frac{i}{A}$$

도선의 저항 — 길이  $L$ , 단면적  $A$ , 전위차  $V$



$$E = V/L, \quad J = i/A, \quad \rho = E/J$$

$$R = V/i = \rho L/A$$

## $R = \rho L/A$ 유도 (계속)

저항률의 정의에 두 식을 대입한다:

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{V/L}{i/A} = \frac{V}{i} \cdot \frac{A}{L}$$

그런데  $V/i$ 가 바로 저항  $R$ 이므로:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

- 길이  $L$ 이 2배  $\rightarrow$  저항 2배 (전자가 겪는 "장애물 구간"이 길어짐)
- 단면적  $A$ 가 2배  $\rightarrow$  저항 절반 (지나갈 "통로"가 넓어짐)
- 균일한 단면의 등방성 재료에서, 전위차를 양 끝 면 전체에 걸었을 때만 성립

### 간단 계산: 구리 배선 100 m의 저항

집 안 배선으로 쓰는 단면적  $A = 1.0 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$  짜리 구리선  $L = 100 \text{ m}$ 의 저항은?

$$R = \rho \frac{L}{A} = (1.69 \times 10^{-8}) \frac{100}{10^{-6}}$$

$$\boxed{R \approx 1.7 \Omega}$$

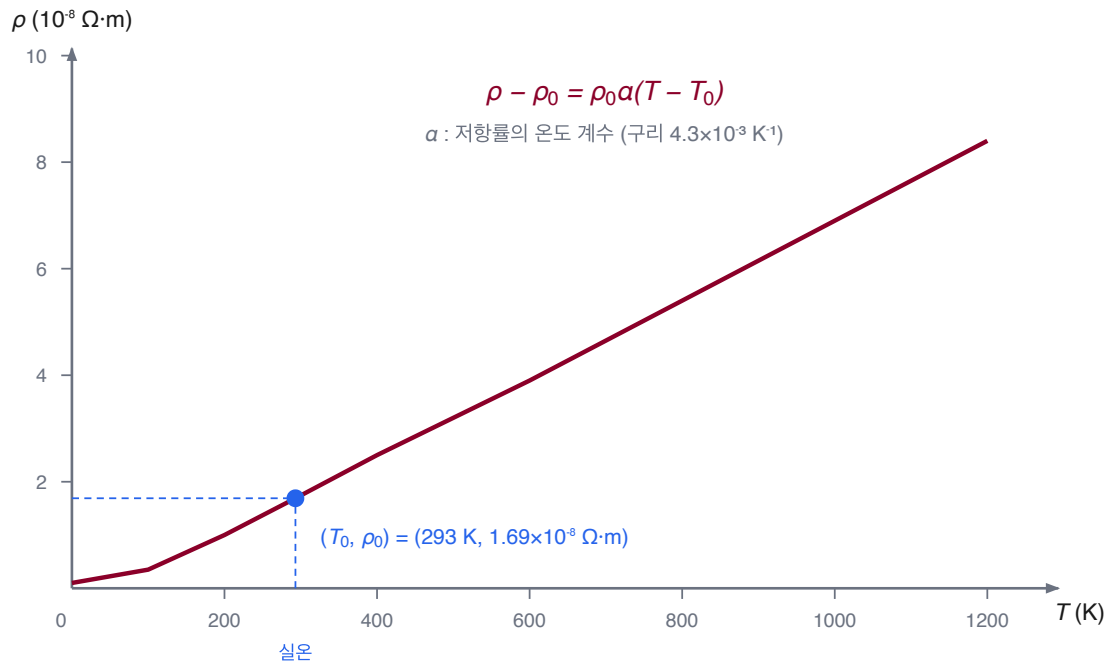
- 같은 굵기의 **유리 막대** 라면?  $\rho$ 가  $10^{20}$ 배 이상 크므로  $R \sim 10^{20} \Omega$  이상 — 사실상 전류가 흐르지 않는다
- 배선을 더 길게, 더 가늘게 쓸수록 저항이 커져 손실이 늘어난다

## 저항률의 온도 의존

대부분의 물리량처럼 저항률도 온도에 따라 변한다. 금속은 넓은 온도 범위에서 거의 **선형**으로 증가한다:

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0)$$

구리의 저항률 — 온도에 따라 거의 선형으로 증가



- $T_0$ : 기준 온도(보통 실온 293 K),  $\rho_0$ : 그때의 저항률
- $\alpha$ : **저항률의 온도 계수(temperature coefficient of resistivity)** — 구리는  $4.3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- 온도가 **차이** 로만 들어가므로  $^{\circ}\text{C}$ 를 써도 K을 써도 같다



### 예제: 번개가 떨어진 땅 위의 사람과 소

번개(전류  $I = 100 \text{ kA}$ )가 땅에 떨어지면, 전류는 낙뢰점을 중심으로 한 **반구 모양**으로 땅속에 퍼진다. 낙뢰점에서  $D = 60 \text{ m}$  떨어진 곳에 사람과 소가 서 있다.

- 사람의 두 발 사이 간격:  $\Delta r_{\text{사람}} = 0.50 \text{ m}$
- 소의 앞발-뒷발 간격:  $\Delta r_{\text{소}} = 1.50 \text{ m}$
- 땅의 저항률:  $\rho_{gr} = 100 \Omega \cdot \text{m}$ , 몸의 저항(발과 발 사이):  $R = 4.00 \text{ k}\Omega$

반지름  $r$ 인 반구면의 면적은  $2\pi r^2$ 이므로 그곳의 전류 밀도와 전기장은:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}, \quad E = \rho_{gr} J = \frac{\rho_{gr} I}{2\pi r^2}$$

### 예제: 번개 (계속) — 두 발 사이의 전위차

한 발은  $r = D$ 에, 다른 발은  $r = D + \Delta r$ 에 있다. 두 발 사이의 전위차 크기는  $E$ 를 적분해 구한다:

$$V = \int_D^{D+\Delta r} \frac{\rho_{gr} I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho_{gr} I}{2\pi} \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{D + \Delta r} \right) = \frac{\rho_{gr} I}{2\pi} \frac{\Delta r}{D(D + \Delta r)}$$

이 전위차가 몸(저항  $R$ )에 전류를 흘린다:  $i = V/R$ .

**사람** ( $\Delta r = 0.50$  m):

$$i_p = \frac{(100)(100 \times 10^3)}{2\pi} \cdot \frac{0.50}{(60)(60.5)} \cdot \frac{1}{4000} \approx \boxed{55 \text{ mA}}$$

근육이 수축해 쓰러지지만 대개 회복된다.

## 예제: 번개 (계속) — 소가 더 위험하다

소 ( $\Delta r = 1.50 \text{ m}$ )는 발 간격이 3배 커서:

$$i_c \approx \boxed{162 \text{ mA}}$$

이 정도면 치명적이다.

교훈:

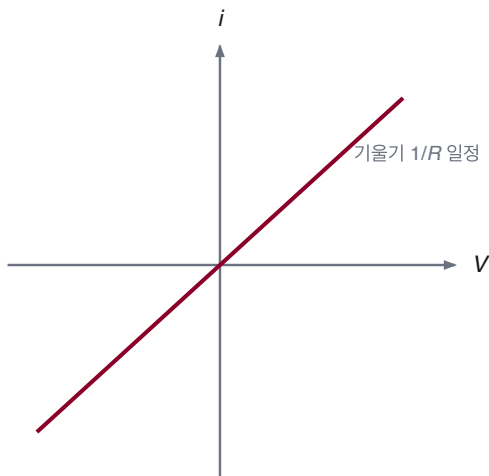
- 위험은 거리  $D$ 만이 아니라 **두 접지점 사이의 간격  $\Delta r$** 에 달려 있다
- 벼락이 칠 때 야외에 있다면 **두 발을 모으고** 웅크려야 한다 —  $\Delta r$ 을 줄여 몸을 지나는 전류를 줄이는 것
- 다리가 네 개인 소는 발을 모을 수 없어 낙뢰 사고에 더 취약하다

## 26.4 옴의 법칙

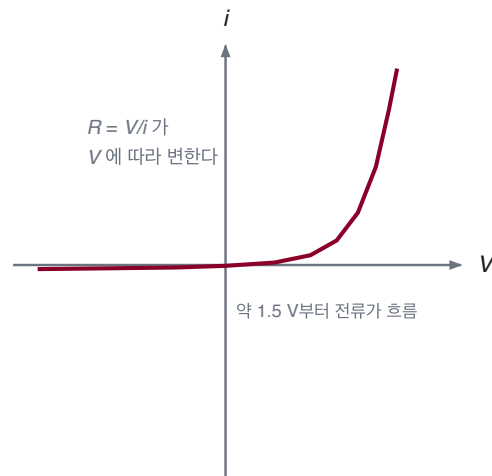
### 소자에 전압을 걸어 보면

어떤 소자에 전위차  $V$ 를 이리저리 바꿔 걸며 전류  $i$ 를 측정해 보자. 두 부류가 나타난다.

전류-전압 특성: 옴성 소자와 비옴성 소자



(a) 저항 — 옴의 법칙을 따른다



(b) pn 접합 다이오드 — 비옴성

- (a)  $i$ - $V$  그래프가 원점을 지나는 **직선**: 기울기  $i/V = 1/R$ 이 일정  $\rightarrow 1000 \Omega$  저항기
- (b) 한쪽 극성에서만, 약 1.5 V 이상에서만 전류가 흐르고 곡선 모양  $\rightarrow$  **pn 접합 다이오드**

## 옴의 법칙의 정확한 의미

**옴의 법칙(Ohm's law)** : 소자에 흐르는 전류가 걸어 준 전위차에 **항상 정비례** 한다는 주장. 즉 저항  $R = V/i$ 가  $V$ 의 크기·부호와 무관하게 일정하다.

주의할 점:

- $R = V/i$  자체는 저항의 **정의**라서 어떤 소자에나 쓸 수 있다 — 다이오드에도 "그 순간의  $R$ "은 정의된다
- 옴의 법칙의 핵심은  $R$ 이  $V$ 와 **무관** 하다는 것 — 이를 만족해야 "옴성 (ohmic)"
- 재료 버전: 저항률  $\rho = E/J$ 가 전기장  $\vec{E}$ 의 크기·방향과 무관하면 그 **재료**가 옴의 법칙을 따른다

금속은 전기장이 너무 세지 않는 한 옴의 법칙을 잘 따른다. **왜 그럴까?** 미시적으로 들여다보자.

## 자유 전자 모형

금속의 전도를 설명하는 **자유 전자 모형(free-electron model)** :

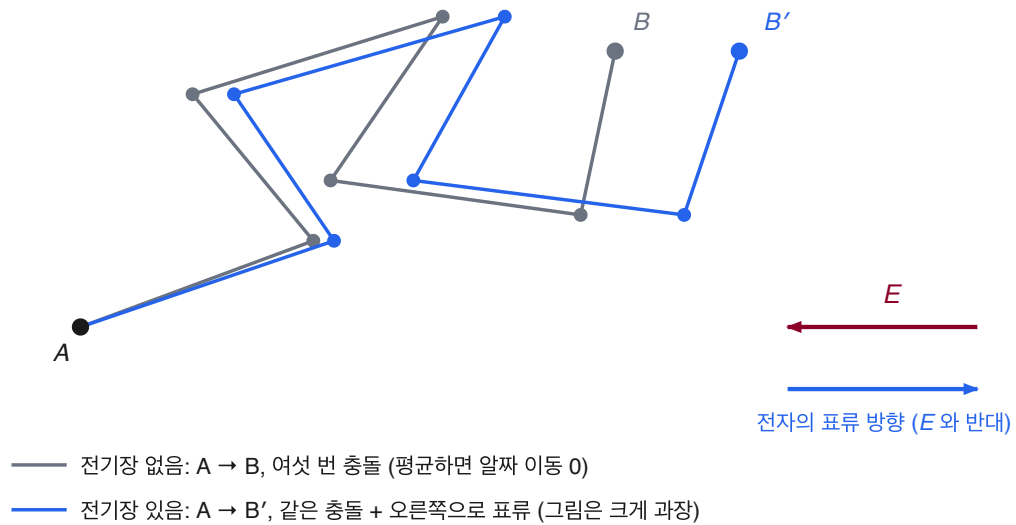
- 전도 전자는 마치 밀폐 용기 속 기체 분자처럼 금속 안을 자유롭게 돌아다닌다
- 전자는 전자끼리 충돌하지 않고, **금속 원자(이온)와만 충돌** 한다
- 고전물리라면 전자 속력이 온도에 따라 분포해야 하지만, **양자역학** 에 따르면 전도 전자는 온도와 거의 무관한 단일 유효 속력  $v_{\text{eff}}$ 로 움직인다

구리의 경우:

$$v_{\text{eff}} \approx 1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$$

## 충돌과 표류

전도 전자의 충돌 모형 — 무작위 운동에 표류가 더해진다



- 전기장이 없으면: 무작위 충돌의 연속, A에서 B로 — 평균하면 알짜 이동 0
- 전기장  $\vec{E}$ 를 걸면: 같은 충돌을 겪으면서도 경로가 조금씩 밀려 B'에 도착 — 이것이 **표류**
- 실제 비율은  $v_d \sim 10^{-13} v_{\text{eff}}$  — 그림은 어마어마하게 과장된 것

## 미시적 음 법칙 유도: 가속과 충돌

질량  $m$ 인 전자가 전기장  $E$  속에서 받는 가속도는 뉴턴 제2법칙으로:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$$

핵심 가정: 전자는 충돌할 때마다 그동안 얻은 표류 운동량의 "**기억을 잃고**" 무작위 방향으로 다시 출발한다.

- 충돌과 충돌 사이의 평균 시간을 **평균 충돌 시간(mean free time)**  $\tau$ 라 하자
- 충돌 직후부터 평균  $\tau$  동안 가속되므로, 임의의 순간에 전자가 갖는 평균 표류 속도는:

$$v_d = a\tau = \frac{eE\tau}{m}$$



**미시적 옴 법칙 유도:**  $\rho = m/e^2 n \tau$

방금 얻은  $v_d = eE\tau/m$ 와 전류 밀도 관계  $v_d = J/(ne)$ 를 결합한다:

$$\frac{J}{ne} = \frac{eE\tau}{m} \Rightarrow E = \left( \frac{m}{e^2 n \tau} \right) J$$

이것을  $\vec{E} = \rho \vec{J}$ 와 비교하면:

$$\boxed{\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}}$$

저항률이 전자의 질량, 전하, 밀도, 그리고 충돌 시간만으로 표현된다!

## 왜 금속은 옴의 법칙을 따르는가

$$\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}$$

- $m, e$ : 상수.  $n$ : 금속에서는 온도·전기장에 거의 무관
- 남는 것은  $\tau$ 뿐 —  $\tau$ 가  $E$ 와 무관하면  $\rho$ 도  $E$ 와 무관 → **옴의 법칙 성립**
- 실제로 전자의 속력은  $v_{\text{eff}} \approx 1.6 \times 10^6$  m/s인데 표류는  $\sim 10^{-7}$  m/s
- 전기장을 걸어도 전자의 속력(따라서 충돌 빈도)은 **사실상 변하지 않는다** →  $\tau$ 는  $E$ 와 무관

금속의 온도를 올리면? 원자 진동이 심해져 충돌이 잦아지고  $\tau$ 가 줄어  $\rho$ 가 커진다 — 앞서 본 저항률-온도 그래프의 미시적 이유다.

### 예제: 구리 전자의 평균 충돌 시간과 자유 거리

(a) 구리에서 전도 전자의 평균 충돌 시간  $\tau$ 는?

$\rho = m/e^2 n \tau$ 를  $\tau$ 에 대해 풀고,  $n = 8.49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ,  $\rho = 1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 를 대입:

$$\tau = \frac{m}{ne^2 \rho} = \frac{9.11 \times 10^{-31}}{(8.49 \times 10^{28})(1.6 \times 10^{-19})^2(1.69 \times 10^{-8})}$$

$$\tau \approx 2.5 \times 10^{-14} \text{ s}$$

전자는 **100조분의 2.5초** 마다 한 번씩 충돌한다.

### 예제: 평균 자유 거리 (계속)

(b) 충돌과 충돌 사이에 전자가 이동하는 평균 거리, **평균 자유 거리(mean free path)**  $\lambda$ 는? ( $v_{\text{eff}} = 1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ )

$$\lambda = v_{\text{eff}} \tau = (1.6 \times 10^6)(2.5 \times 10^{-14})$$

$$\lambda = 4.0 \times 10^{-8} \text{ m} = 40 \text{ nm}$$

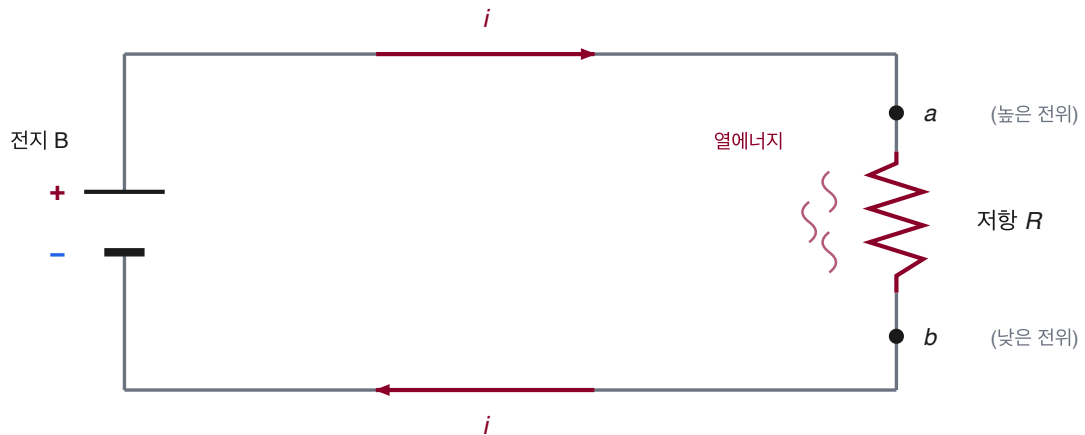
구리 원자 사이 간격의 약 **150배** 다. 전자는 원자들이 뻥뻥이 늘어선 사이를 수백 개씩 그냥 지나친 뒤에야 한 번 충돌한다. (고전적으로는 설명이 안 되고, 양자역학이 필요한 대목이다.)

## 26.5 전력, 반도체, 초전도체

### 회로에서의 에너지 전달

전지 B가 도선으로 어떤 소자(저항기, 모터, 충전 중인 배터리, ...)에 연결되어 전류  $i$ 가 흐른다. 소자 양단의 전위차는  $V$  (단자 a가 높은 전위).

저항에서의 에너지 소모 — 퍼텐셜 에너지가 열로 바뀐다



전하  $dq$ 가 a → b로 이동하며 잃는 에너지:  $dU = dq \cdot V = i dt V$

$$P = dU/dt = iV$$

시간  $dt$  동안 전하  $dq = i dt$ 가 a에서 b로 이동하며 잃는 전기 퍼텐셜 에너지는:

$$dU = dq \cdot V = i dt V$$

**전력:  $P = iV$**

에너지 보존에 의해, 감소한 퍼텐셜 에너지는 반드시 다른 형태로 전달된다. 그 전달률(일률)은:

$$P = \frac{dU}{dt} = iV$$

단위 확인:

$$1 \text{ V} \cdot \text{A} = \left(1 \frac{\text{J}}{\text{C}}\right) \left(1 \frac{\text{C}}{\text{s}}\right) = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ W}$$

에너지가 어디로 가는지는 소자에 달려 있다:

- 모터 → 역학적 일
- 충전 중인 배터리 → 화학 에너지
- 저항기 → **열에너지**

**저항 발열:**  $P = i^2 R = V^2 / R$

저항기에서는 전자가 원자와 충돌하며 퍼텐셜 에너지를 **원자 격자의 진동(열)** 으로 넘긴다. 표류 속도가 일정하므로 운동 에너지는 늘지 않고, 잃은 에너지 전부가 열이 된다. 이렇게 전달된 에너지는 되돌릴 수 없어서 **소모(dissipation)** 되었다고 말한다.

$R = V/i$ 를  $P = iV$ 에 결합하면 저항기에 대한 두 표현을 얻는다:

$$P = iV = i(iR) = \boxed{i^2 R}$$

$$P = iV = \frac{V}{R} V = \boxed{\frac{V^2}{R}}$$

주의:  $P = iV$ 는 **모든 소자**의 전기 에너지 전달률.  $P = i^2 R$ ,  $P = V^2 / R$ 는 **저항에서 열로 바뀌는 경우에만** 쓴다.

### 예제: 니크롬 열선 자르기

니크롬(Ni-Cr-Fe 합금) 열선의 저항이  $R = 72 \, \Omega$ 이다.

**상황 1** — 전선 전체에 120 V를 걸면:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(120)^2}{72} = \boxed{200 \text{ W}}$$

**상황 2** — 전선을 반으로 자르고, 두 토막 각각에 120 V를 걸면? 토막 하나의 저항은  $R' = 36 \, \Omega$  ( $R = \rho L/A$ 에서  $L$ 이 절반):

$$P' = \frac{(120)^2}{36} = 400 \text{ W} \quad \Rightarrow \quad 2P' = \boxed{800 \text{ W}}$$



## 니크롬 열선 (계속): 공짜 열은 없다

같은 재료, 같은 전압인데 열이 **4배!** 그럼 열선을 계속 잘라서 무한대의 열을 얻으면 되지 않을까?

- $L$ 을 줄이면  $R$ 이 줄고, 전류  $i = V/R$ 은 커진다
- 전류가 커지면 도선 온도가 급격히 올라간다 (전력은  $V^2/R \propto 1/L$ )
- 너무 짧게 자르면 열선이 **녹아 끊어지거나** 화재가 난다
- 실제 전열기는 재료의 허용 온도와 전류 용량에 맞춰 길이가 설계된 것

참고: 전기요금 단위 kWh는 에너지 단위다 —  $1 \text{ kWh} = (1000 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ .

## 반도체

**반도체(semiconductor)** 는 전도 전자가 매우 적지만, **도핑(doping)** — 불순물 원자를 미량 첨가 — 으로 운반자를 공급하면 도체처럼 만들 수 있는 재료다.

| 성질                                     | 구리 (도체)               | 규소 (반도체)             |
|----------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 운반자 밀도 $n$ ( $\text{m}^{-3}$ )         | $8.49 \times 10^{28}$ | $1 \times 10^{16}$   |
| 저항률 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | $1.69 \times 10^{-8}$ | $2.5 \times 10^3$    |
| 온도 계수 $\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ )     | $+4.3 \times 10^{-3}$ | $-70 \times 10^{-3}$ |

- 규소의  $\alpha$ 가 **음수**: 온도가 오르면 저항률이 오히려 **내려간다**
- 트랜지스터, 다이오드 등 모든 전자 소자는 규소의 선택적 도핑으로 만든다

## 반도체의 온도 거동: $n$ 과 $\tau$ 의 경쟁

$$\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}$$

이 식은 반도체에도 적용된다. 온도를 올리면:

- **금속**:  $n$ 은 거의 그대로, 충돌이 잦아져  $\tau$  감소  $\rightarrow \rho$  **증가** ( $\alpha > 0$ )
- **반도체**:  $\tau$ 도 줄지만, 열에너지가 전자를 풀어 줘  $n$ 이 **폭발적으로 증가**  $\rightarrow \rho$  **감소** ( $\alpha < 0$ )

절연체는 전자를 풀어 주는 데 필요한 에너지가 너무 커서 열로도, 웬만한 전기장으로도 운반자가 생기지 않는 재료다. 반도체는 그 문턱이 "아슬아슬하게 낮은" 절연체인 셈이다.

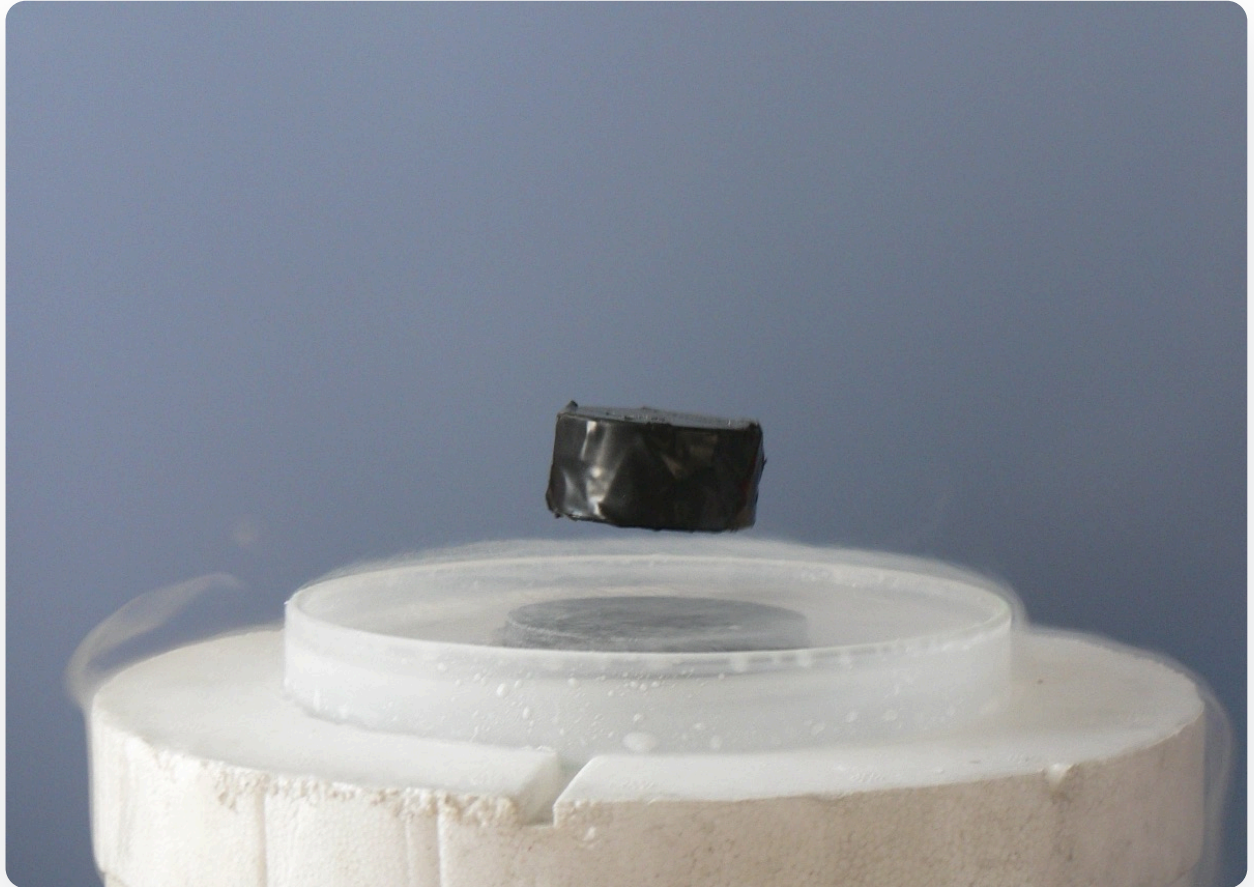
## 초전도체

1911년 네덜란드의 **카메를링 오네스(Kamerlingh Onnes)** 는 수은을 약 4 K까지 냉각하자 저항률이 **완전히 0** 이 되는 것을 발견했다 — **초전도성 (superconductivity)**.

- 저항이 정말 0이다: 초전도 고리에 만든 전류는 전원 없이 **몇 년씩** 그대로 흐른다
- 1986년 이후 세라믹 **고온 초전도체** 발견 — 액체 질소(77 K)로 냉각 가능
- 응용: MRI의 초전도 자석, 자기부상열차, 입자가속기

메커니즘(저온 초전도체): 전자들이 **쌍(Cooper pair)** 을 이루어 움직이며, 격자 변형을 매개로 서로 끌려 원자와의 충돌(저항의 원인)을 회피한다.

## 초전도체 위에 뜬 자석



액체 질소로 냉각한 초전도체 위에 자석이 공중 부양한다(마이스너 효과). 초전도체가 내부 자기장을 밀어내기 때문인데, 이 현상은 자기장을 배운 뒤(29~32장) 다시 이해하게 된다.

# Review & Summary

## 핵심 개념

- **전류** 는 단면을 지나는 알짜 전하의 시간당 흐름이다:  $i = dq/dt$ . 방향은 **양 전하 운반자가 움직일 방향** 으로 약속한다
- **전류 밀도**  $\vec{J}$  는 한 점에서의 흐름(벡터), 표류 속도와  $\vec{J} = (ne)\vec{v}_d$  로 연결된다
- **저항은 물체의 성질** ( $R = V/i$ ), **저항률은 재료의 성질** ( $\rho = E/J$ ) — 균일한 도선에서  $R = \rho L/A$
- **옴의 법칙**:  $R$  (또는  $\rho$ )가 걸어 준  $V$  (또는  $E$ )와 무관하다는 주장 — 금속은  $\tau$  가  $E$ 와 무관하므로 이를 따른다
- 저항에서 전기 에너지는 **열로 소모** 된다:  $P = i^2 R = V^2/R$

## 핵심 공식 정리

| 개념           | 공식                                                         |
|--------------|------------------------------------------------------------|
| 전류의 정의       | $i = dq/dt$                                                |
| 전류 밀도와 표류 속도 | $i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}, \vec{J} = (ne)\vec{v}_d$ |
| 저항과 저항률      | $R = V/i, \rho = E/J, R = \rho L/A$                        |
| 온도 의존        | $\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0)$                  |
| 미시적 옴 법칙     | $v_d = eE\tau/m, \rho = m/(e^2 n \tau)$                    |
| 전력           | $P = iV$ (모든 소자), $P = i^2 R = V^2/R$ (저항)                 |

### 기억할 것:

- 정상 상태에서 전류는 어느 단면에서나 같다 — 분기점에서  $i_0 = i_1 + i_2$
- 전자의 표류는 mm/h 수준으로 느리지만, 전기장은 거의 광속으로 전파된다
- $P = iV$ 는 항상,  $i^2 R$ 와  $V^2/R$ 는 저항 발열에만