



필수 열역학

원자력 열수력으로 가는 12 장

한양대학교 원자력공학과 THINK Lab

지도교수 송민섭

Rev1.0 · 2026-08

목 차

이 책을 읽는 법.....	5
누구를 위한 책인가.....	5
3 부작 중 마지막 권.....	5
난이도 표시.....	5
장마다 반복되는 여섯 칸.....	5
이 책의 계산 방식.....	5
감각 잡기 — 열역학을 몸으로 이해하기.....	7
1. 물을 끓이는 데 드는 에너지가 데우는 것의 5 배다.....	7
2. 온도가 전부다 — 연료는 상관없다.....	7
3. 에너지에는 등급이 있다 — 돈으로 비유하면.....	8
4. 엔트로피를 한 문장으로.....	8
5. 엔탈피는 “들고 다니는 에너지”.....	9
6. 외워두면 평생 쓰는 여덟 개의 숫자.....	9
7. 왜 복수기를 진공으로 만드는가.....	9
8. 자주 하는 착각 다섯 가지.....	10
1 장 열역학의 지도.....	11
원리: 먼저 상자를 그린다.....	11
수식: 상태량, 상태, 과정.....	11
상태 공준(state postulate).....	12
평형과 준정적 과정(quasi-static process).....	12
예제: 원자로 하나를 어떤 계로 볼 것인가.....	12
2 장 순수물질의 상태 — 증기표 읽기.....	14
원리: 액체와 증기 사이에는 넓은 중간지대가 있다.....	14
임계점(critical point) 위에서는 구별이 사라진다.....	14
수식: T-s 선도 읽는 법.....	14
예제: 증기표를 세 가지 방식으로 읽는다.....	15
상태 판별 절차.....	15
3 장 제 1 법칙 — 닫힌계.....	17
원리: 열도 일도 에너지가 경계를 넘는 방식일 뿐.....	17
수식: 일의 계산.....	17
비열(specific heat): 온도를 1 도 올리는 데 드는 에너지.....	18
예제: 격납건물 압력이 얼마까지 오르나.....	18
4 장 제 1 법칙 — 검사체적.....	20
원리: 엔탈피는 왜 등장하는가.....	20
수식: 정상유동 에너지식.....	20
교축(throttling)이 특별한 이유.....	21
예제: 노심 출구 온도를 구한다.....	21
증기발생기의 에너지 수지.....	21
5 장 제 2 법칙과 엔트로피.....	23
원리: 에너지에는 등급이 있다.....	23
수식: 카르노와 엔트로피.....	23
엔트로피의 정의.....	23
T-s 선도에서 면적은 열이다.....	24

예제: 온도차 열전달의 엔트로피 생성.....	24
왜 원자로에서 이 이야기가 중요한가.....	24
6 장 등엔트로피 효율(isentropic efficiency)과 실제 기기.....	26
원리: 이상 과정을 기준으로 삼는다.....	26
수식: 대표적인 효율값.....	26
습분이 왜 그렇게 나쁜가.....	27
예제: PWR 터빈의 실제 일.....	27
7 장 엑서지 — 어디서 일 능력을 잃었나.....	29
원리: 에너지는 보존되지만 엑서지는 파괴된다.....	29
수식: 엑서지 파괴(exergy destruction)와 제 2 법칙 효율(second-law efficiency).....	29
예제: PWR의 엑서지는 어디서 사라지는가.....	29
그러면 어디를 고쳐야 하나.....	30
8 장 랭킨 사이클(Rankine cycle) — 원자력 발전의 본체.....	31
원리: 네 개의 기기, 네 개의 과정.....	31
예제: PWR 2 차측 사이클 전체 계산.....	31
세 개의 숫자를 비교해 보자.....	32
효율을 올리는 세 개의 손잡이.....	32
9 장 사이클 개선 — 재열·재생·습분분리.....	34
원리: 평균 온도를 올리고, 습분을 줄인다.....	34
처방 ①: 재생 급수가열 — 효율을 위해.....	34
처방 ②: 습분분리재열기(MSR) — 터빈을 위해.....	34
예제: MSR이 건도를 얼마나 살리나.....	35
실제 PWR 2 차 계통의 모습.....	36
10 장 가스 동력 사이클 — 브레이턴과 초임계 CO₂.....	37
원리: 브레이턴은 압축-가열-팽창-방열.....	37
수식: 재생이 필수인 이유.....	37
초임계 CO ₂ — 압축 일을 줄이는 아이디어.....	38
예제: 왜 sCO ₂ 터빈은 그렇게 작은가.....	38
11 장 상태식과 실제 유체.....	40
원리: 이상기체는 두 가지를 무시한다.....	40
대응상태 원리(principle of corresponding states).....	40
수식: 실제 유체 상태식의 계보.....	41
예제: 임계점 근처에서 물성이 미쳐 날뛴다.....	41
이것이 왜 문제인가.....	41
예제: 이상기체 가정을 언제 버려야 하나.....	42
12 장 원자로 계통의 열역학.....	43
원리: 3,000이 1,000이 되기까지.....	43
왜 이 효율에 갇혀 있는가.....	43
붕괴열: 정지해도 끝나지 않는 열역학.....	44
열역학이 원자력에 남기는 세 가지 질문.....	45
부록 A — 기호와 단위.....	46
약어와 자주 쓰는 첨자.....	47
부록 B — 증기표 (발체).....	48
B.1 포화 물성 (압력 기준).....	48
B.2 과열증기 (6.9 MPa).....	49

B.3 압축액 (15.5 MPa, PWR 1차 계통).....	49
B.4 기체 물성 (이상기체 근사).....	49
B.5 임계점과 상수.....	50
부록 C — 관계식 요약.....	51
C.1 기본 정의.....	51
C.2 제 1 법칙.....	51
C.3 이상기체.....	52
C.4 제 2 법칙과 엑서지.....	52
C.5 사이클.....	53
C.6 실제 유체.....	53
부록 D — 연습문제 30 선.....	54
1~2 장 — 상태와 증기표.....	54
3~4 장 — 제 1 법칙.....	54
5~7 장 — 제 2 법칙, 엔트로피, 엑서지.....	55
8~10 장 — 사이클.....	55
11~12 장 — 실제 유체, 계통.....	56
부록 E — 용어집.....	57
다음에 읽을 것.....	58
3 부작을 마치며.....	59

이 책을 읽는 법

누구를 위한 책인가

대학원 연구를 시작하면서 열역학을 처음부터 다시 잡고 싶은 사람을 위한 책이다. 목표는 하나다. **원자로 계통의 에너지가 어디서 와서 어디로 가는지 추적하고, 왜 원자력의 효율이 33 %인지 스스로 설명할 수 있게 되는 것.**

열역학은 학부에서 배울 때 가장 추상적으로 느껴지는 과목이다. 엔트로피가 무엇인지 끝까지 모른 채 학기가 끝나는 일도 흔하다. 이 책은 순서를 뒤집어, **원자로라는 구체적인 기계 한 대를 계속 붙들고** 개념을 설명한다. 3,000 MW의 열이 어떻게 1,000 MW의 전기가 되고 나머지 2,000 MW는 왜 반드시 버려야 하는지, 그 이야기를 12 장에 걸쳐 한다.

3 부작 중 마지막 권

「필수 열전달」·「필수 유체역학」·「필수 열역학」은 같은 기호 규약과 같은 장 구조를 쓴다.

표 0.1 — 3 부작의 역할 분담.¹

과목	답하는 질문	이 책과의 관계
열역학	에너지가 얼마나 오가는가, 어디까지 가능한가	이 책
유체역학	유체가 어떻게 움직이는가	이 책의 물성과 상태를 받아 쓴다
열전달	열이 얼마나 빨리 오가는가	이 책이 정한 경계조건에서 출발한다

난이도 표시

- **Tier 1 (필수)** — 상태량, 제 1 법칙, 증기표 읽기. 신입생이라면 반드시.
- **Tier 2 (석사 이상)** — 제 2 법칙, 엔트로피, 랭킨·브레이턴 사이클.
- **Tier 3 (박사 권장)** — 엑서지, 실제 유체 상태식, 계통 수준의 열역학.

장마다 반복되는 여섯 칸

원리 → 수식 → 예제 → 그림 → ► **실무 팁** → ■ **원자력 연계**

이 책의 계산 방식

이 책의 모든 증기 물성은 **IAPWS-IF97** 로 직접 계산했다. 부록 B의 증기표도 마찬가지다. 그래서 예제의 숫자를 직접 검산할 수 있고, 실제로 그렇게 하기를 권한다.

한 가지 미리 밝혀둔다. 이 책의 대표 예제는 **PWR 2 차측 랭킨 사이클**(포화증기 6.9 MPa → 복수기 5 kPa)이며, 1 장부터 12 장까지 계속 등장한다. 같은 사이클을 여러 각도에서 반복해 보는 것이 목적이다.

¹ 표 각주: 세 권을 순서대로 읽는다면 열역학 → 유체역학 → 열전달이 자연스럽지만, 이 책이 마지막에 나온 이유는 앞의 두 권에서 “왜 이 온도, 왜 이 압력인가”라는 질문이 쌓이기 때문이다. 그 답이 여기 있다.

▶ **실무 팁** 열역학에서 가장 흔한 실수는 **기준 상태와 단위**다. 엔탈피와 엔트로피는 절대값이 아니라 기준점에 대한 상대값이고, 증기표마다 기준이 다를 수 있다. 같은 계산 안에서 표를 섞어 쓰지 말자. 그리고 온도는 카르노 효율·엔트로피 계산에서 반드시 **켈빈**이다. 이 두 가지만 지켜도 실수의 절반이 사라진다.

감각 잡기 — 열역학을 몸으로 이해하기

Tier 1 · 엔트로피(entropy)가 무엇인지 끝까지 모른 채 학기를 끝내지 않기 위해.

열역학이 어렵게 느껴지는 이유는 다루는 것이 눈에 안 보여서다. 압력과 온도는 그렇다 쳐도, 엔탈피(enthalpy)와 엔트로피는 만질 수가 없다. 이 장에서는 그것들을 **손에 잡히는 비유와 숫자로** 바꿔 놓는다.

1. 물을 끓이는 데 드는 에너지가 데우는 것의 5 배다

주전자에 물 1 kg 을 넣고 불을 켜다. 20 °C 에서 100 °C 까지 올리는 데 335 kJ 이 든다. 그런데 100 °C 에 도달한 뒤 **전부 증기로 바꾸는 데는 2,257 kJ 이 더 든다.**

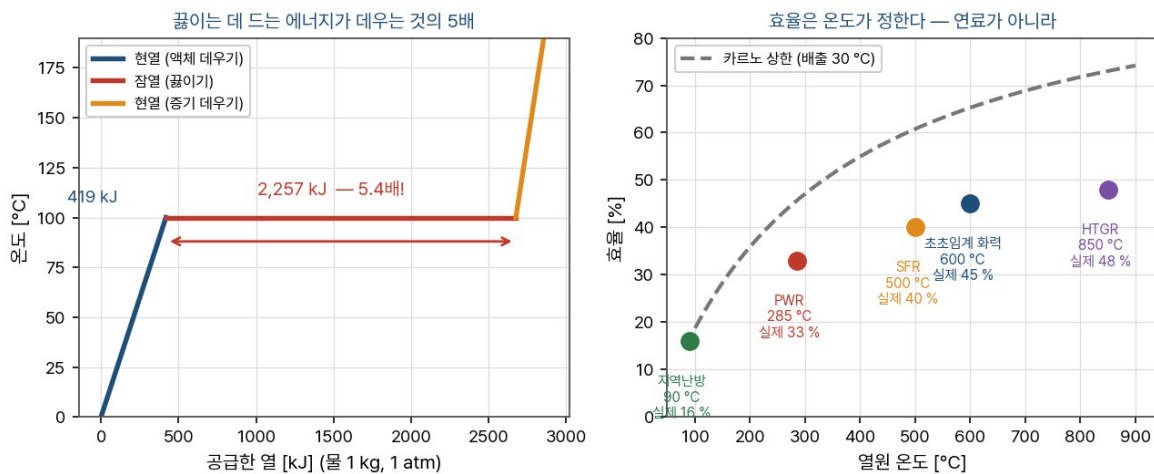


그림 0.1 — 왼쪽: 물 1 kg 을 데우고 끓이는 데 드는 에너지. 오른쪽: 효율은 열원 온도가 정한다.²

잠열(latent heat)이 현열(sensible heat)의 5.4 배. 이 사실 하나가 많은 것을 설명한다.

- 땀이 시원한 이유 — 증발할 때 몸에서 잠열을 빼앗아 간다
- 증기가 난방에 쓰이는 이유 — 응축하면서 잠열을 통째로 내놓는다
- 비등 열전달이 특별한 이유 — 온도를 거의 안 올리고 엄청난 열을 나른다(「필수 열전달」 11 장)
- 원자로 사고가 위험한 이유 — 물이 증기로 바뀌면 부피가 1,600 배가 되고, 그 팽창이 압력을 만든다

2. 온도가 전부다 — 연료는 상관없다

카르노 효율(Carnot efficiency)은 열원이 무엇인지 묻지 않는다. 우라늄이든 석탄이든 태양이든, **온도만 본다.**

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \text{ (반드시 절대온도)}$$

표 0.2 — 열원 온도와 효율.³

열원	온도	카르노 상한	실제
지역난방 온수	90 °C	16 %	—

² 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 오른쪽의 실제 효율은 문헌 대표값이다.

³ 표 각주: 배출 온도 30 °C 기준. 실제 효율은 대표값이며 설비에 따라 다르다. 카르노 대비 실제가 항상 70 % 안팎인 점도 눈여겨볼 만하다.

열원	온도	카르노 상한	실제
PWR 증기	285 °C	46 %	33 %
SFR	500 °C	61 %	40 %
초초임계 화력	600 °C	65 %	45 %
HTGR	850 °C	73 %	48 %

“원자력은 효율이 낮다”는 말은 정확히 “원자력은 온도가 낮다”는 뜻이다. 우라늄이 나쁜 연료라서가 아니라, 물을 냉각재로 쓰면서 압력 한계 때문에 285 °C 에 묶여 있기 때문이다.

3. 에너지에는 등급이 있다 — 돈으로 비유하면

제 1 법칙은 **에너지의 양**만 센다. 제 2 법칙은 **질**을 따진다. 돈에 비유하면 이렇다.

- **에너지** = 통장 잔고 총액
- **엑서지(exergy)** = 그중 지금 당장 현금으로 쓸 수 있는 몫
- **엔트로피 생성(entropy generation)** = 쓸 수 없는 형태로 묶여버린 돈

1 MJ 의 전기는 100 % 현금이다. 850 °C 열은 73 %, 285 °C 증기는 46 %, 복수기(condenser)에서 나오는 35 °C 폐열은 2 %뿐이다.

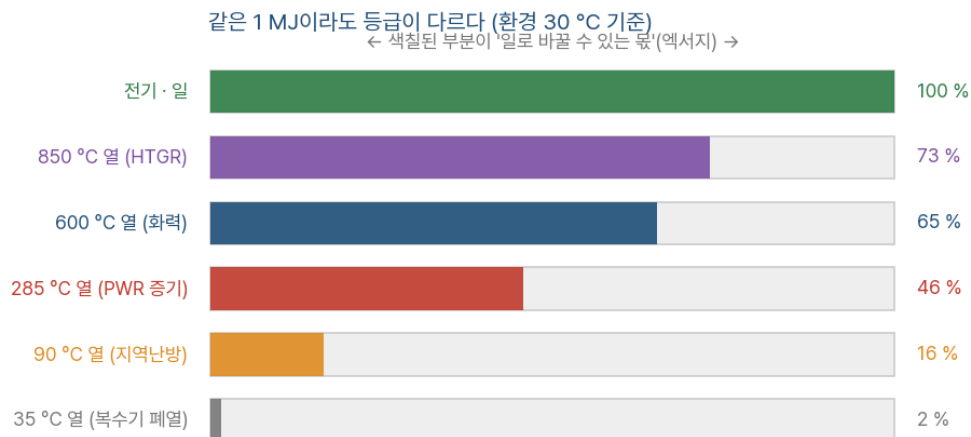


그림 0.2 — 같은 1 MJ 이라도 온도에 따라 '쓸 수 있는 몫'이 다르다.⁴

복수기 폐열이 2,000 MW 나 되는데 왜 안 쓰냐는 질문의 답이 여기 있다. 양은 많지만 등급이 낮아서, 전기로 바꾸려면 거의 남는 게 없다. 대신 난방처럼 **열로 쓰면** 유용하다(7 장의 열병합, cogeneration).

4. 엔트로피를 한 문장으로

엔트로피의 수학적 정의($dS = \delta Q/T$)는 나중에 봐도 된다. 지금 필요한 것은 이 감각이다.

엔트로피는 “되돌릴 수 없게 된 정도”다.

뜨거운 커피와 찬 우유를 섞으면 미지근해진다. 에너지는 그대로인데, **다시 분리할 수 없다**. 그 되돌릴 수 없음의 크기가 엔트로피 생성이다.

그리고 되돌릴 수 없어진 만큼 정확히 **일 능력을 잃는다**.

⁴ 그림 출처: $1 - T_0/T$ 로 직접 계산, 환경 30 °C 기준.

$$W_{lost} = T_0 S_{gen}$$

엔트로피가 생기는 곳은 딱 네 군데다. 이것만 알아도 어디서 손해 보는지 보인다.

1. 온도차를 두고 열이 흐를 때 ← 가장 크다
2. 마찰이 있을 때
3. 섞일 때 (다른 온도·조성의 유체 혼합)
4. 교축될 때 (밸브에서 압력만 떨어지는 것)

5. 엔탈피는 “들고 다니는 에너지”

$h = u + p v$ 라는 정의를 외우기보다, 이렇게 이해하는 편이 낫다.

유체가 어딘가로 흘러갈 때, 자기 몸에 지닌 에너지(u) + 자리를 밀고 들어가는 데 쓴 에너지($p v$)를 합쳐서 들고 다닌다.

그래서 흐르는 유체를 다룰 때는 항상 h 를 쓴다. 배낭에 든 짐 무게처럼, 유체가 지고 다니는 짐이 엔탈피다.

그리고 이 감각이 있으면 다음 식이 자명해진다.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_{out} - h_{in})$$

“들고 나간 짐 - 들고 온 짐 = 중간에서 받은 열 - 해준 일”. 그게 전부다.

6. 외워두면 평생 쓰는 여덟 개의 숫자

표 0.3 — 열역학 감각을 위한 여덟 개의 숫자.⁵

항목	값	기억법
물의 비열	4.18 kJ/kg·K	1 kg 을 1 K 올리는 데
물의 잠열 (1 atm)	2,257 kJ/kg	현열의 5.4 배
물 → 증기 부피 팽창 (1 atm)	약 1,600 배	사고 해석의 핵심
물의 임계점	22.06 MPa, 374 °C	그 위엔 상변화가 없다
PWR 1 차	15.5 MPa, T_{sat} 345 °C	끓지 않게
BWR / PWR 2 차	7 MPa, T_{sat} 286 °C	끓여서 쓴다
복수기	5 kPa, T_{sat} 33 °C	진공을 만든다
공기의 c_p	1.005 kJ/kg·K	물의 1/4

7. 왜 복수기를 진공으로 만드는가

의외로 많은 신입생이 놓치는 지점이다. 복수기 압력이 5 kPa, 즉 **대기압의 1/20** 인 진공이다. 왜 이런 고생을 하나?

⁵ 표 각주: 굵게 표시한 세 압력-온도 짝은 원자력 열수력 대화에서 계속 나온다. 이것만 외워도 “그 조건이면 끓겠는데요”라는 판단이 즉시 된다.

포화온도(saturation temperature) 때문이다. 5 kPa 에서 물의 포화온도는 **33 °C** 다. 대기압(101 kPa) 이라면 100 °C 가 되고, 카르노 효율이 그만큼 달라진다.

$$1 - \frac{306}{558} = 45 \% \text{ vs } 1 - \frac{373}{558} = 33 \%$$

12 %포인트. 진공을 유지하는 비용이 아깝지 않은 이유다. 그리고 여름에 냉각수가 따뜻해져 복수기 압력이 오르면 발전량이 실제로 떨어진다.

8. 자주 하는 착각 다섯 가지

① **“효율이 낮은 건 기술이 부족해서다”** — 아니다. 카르노가 정한 상한이 있고, 원자력은 그 70 % 수준을 이미 달성하고 있다. 남은 여지는 온도를 올리는 것뿐이다.

② **“폐열은 낭비다”** — 제 2 법칙이 강제하는 것이다. 버리지 않으면 사이클이 돌지 않는다. 다만 **어떻게** 버릴지는 선택할 수 있다(열병합).

③ **“온도가 높으면 열이 많다”** — 온도는 강도, 열량은 양이다. 성냥불(1,000 °C)과 욕조 물(40 °C) 중 열량은 후자가 압도적이다.

④ **“ $\Delta u = c_v \Delta T$ 는 항상 성립한다”** — 이상기체에서만이다. 물에 쓰면 잠열이 통째로 빠진다. **물이 나오면 증기표를 쓴다.**

⑤ **“엔트로피는 무질서다”** — 틀린 건 아니지만 공학에서는 쓸모가 적다. **“되돌릴 수 없게 된 정도”** 로 이해하는 편이 계산과 직결된다.

▶ **실무 팁** 열역학 문제를 만나면 순서대로 세 가지를 정하자. ① **계를 어디로 그을 것인가**(닫힌계냐 검사체적이나), ② **물질이 무엇인가**(이상기체냐 물이나 — 증기표를 쓸지가 갈린다), ③ **무엇을 묻는가**(양이나 질이나 — 제 1 법칙이나 엑서지나). 이 셋을 종이에 적고 시작하면 대부분의 문제가 풀린다. 반대로 식부터 찾으면 거의 틀린 식을 고른다.

■ **원자력 연계** 원자로를 열역학으로 한 문장으로 요약하면 이렇다. **“끼지 못하는 열원을 285 °C 짜리 저급 열로 쓰는 기계.”** 열원을 끌 수 없다는 점(붕괴열, decay heat)이 안전 문제를 만들고, 285 °C 라는 낮은 온도가 효율을 33 %에 묶는다. 4 세대 노형이 하려는 일은 두 번째를 고치는 것이고, 피동안전계통이 하려는 일은 첫 번째를 감당하는 것이다. **이 책의 12 장이 그 이야기로 끝난다.**

1 장 열역학의 지도

Tier 1 · 계, 상태량(property), 평형(equilibrium), 과정. 나머지 열한 장이 쓸 어휘를 정한다.

원리: 먼저 상자를 그린다

열역학은 “무엇을 볼 것인가”를 정하는 데서 시작한다. 그 대상이 **계(system)**이고, 나머지가 **주위(surroundings)**, 둘을 가르는 선이 **경계(boundary)**다.

경계를 무엇이 통과할 수 있는냐로 계가 갈린다.

- **닫힌계** — 질량은 못 지나가고 에너지는 지나간다. 피스톤-실린더, 밀폐 압력용기.
- **열린계(검사체적)** — 질량도 에너지도 지나간다. 터빈, 펌프, 열교환기, **원자로 노심**.
- **고립계** — 둘 다 못 지나간다. 이상화된 개념이지만 제 2 법칙을 논할 때 유용하다.

원자력 계통은 거의 전부 열린계다. 그래서 4 장이 이 책의 실무적 중심이 된다.

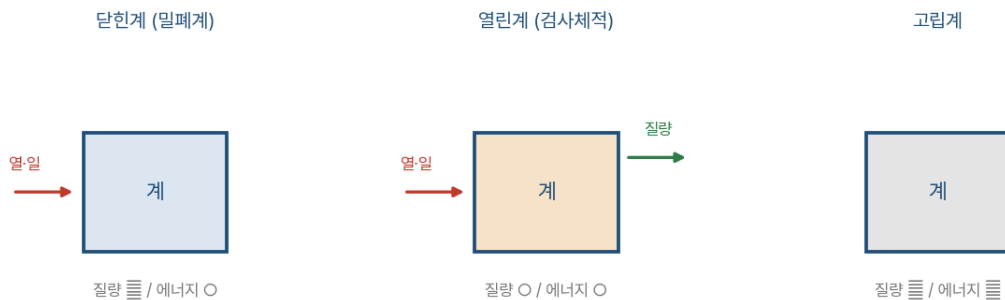


그림 1.1 — 계의 세 종류. 경계를 무엇이 통과하느냐로 나뉜다.⁶

수식: 상태량, 상태, 과정

상태량(property)은 계의 현재 상태를 나타내는 양이다. **어떻게 그 상태에 도달했는지와 무관**하다는 것이 핵심이다. 압력, 온도, 비체적, 내부에너지(internal energy), 엔탈피, 엔트로피가 상태량이다. 반면 **일과 열은 상태량이 아니다**. 경로에 따라 달라진다.

$$\oint dP = 0 \text{ (상태량)}, \oint \delta W \neq 0 \text{ (경로 함수)}$$

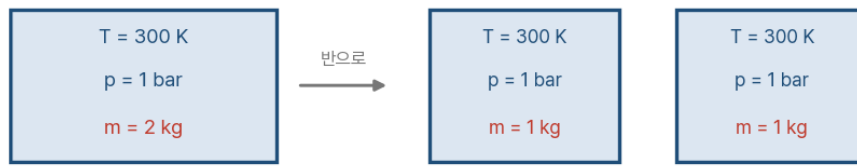
미분 기호가 d 와 δ 로 다른 이유가 여기 있다.

상태량은 다시 둘로 나뉜다.

- **강성 상태량(intensive property)** — 질량과 무관. T, p, v, h, s (소문자는 비상태량).
- **시성 상태량(extensive property)** — 질량에 비례. m, V, U, H, S .

⁶ 그림 출처: 개념도.

반으로 나눠 보면 구별된다



안 변하면 강성(T, p) · 반토막 나면 시성(m, V, U, H, S)

그림 1.2 — 계를 반으로 나눠 보면 강성과 시성이 구별된다.⁷

상태 공준(state postulate)

단순 압축성 물질(전기·자기·표면 효과가 없는 물질)의 상태는 **독립적인 강성 상태량 두 개**로 완전히 정해진다. 이것이 **상태 공준**이다.

$$h=h(T, p), s=s(T, p), v=v(T, p), \dots$$

증기표를 두 개의 값으로 찾는 이유가 이것이다. 다만 **포화 영역에서는 T 와 p 가 독립이 아니다**. 그때는 건도 (quality)를 두 번째 변수로 쓴다(2 장).

평형과 준정적 과정(quasi-static process)

열역학은 원래 **평형** 상태만 다룬다. 그런데 실제 기기는 계속 변한다. 이 모순을 넘는 장치가 **준정적 과정**이다. 아주 천천히 변해서 매 순간 평형에 가깝다고 보는 이상화다.

준정적 $\Rightarrow$ 경로를 상태 공간에 그릴 수 있다 $\Rightarrow W = \int p dV$ 계산 가능

실제 터빈은 준정적이 아니지만, 입구와 출구 상태만 알면 되는 정상유동(steady flow) 해석에서는 문제가 되지 않는다.

예제: 원자로 하나를 어떤 계로 볼 것인가

같은 원자로도 무엇을 묻느냐에 따라 다른 계로 그려야 한다.

표 1.1 — 같은 설비, 다른 계.⁸

질문	적절한 계	쓰는 법칙
노심에서 냉각재가 얼마나 데워지나	노심 유로 (열린계)	정상유동 에너지식 (4 장)
발전소 효율은 얼마인가	2 차 계통 전체 (사이클)	사이클 해석 (8 장)
격납건물 압력이 얼마까지 오르나	격납건물 (닫힌계)	닫힌계 제 1 법칙 (3 장)
가압기 수위가 어떻게 변하나	가압기 (열린계, 비정상)	비정상 열린계

⁷ 그림 출처: 개념도.

⁸ 표 각주: 계를 잘못 그리면 아무리 계산을 잘해도 답이 안 나온다. 유체역학의 검사체적 그리기(『필수 유체역학』 3 장)와 완전히 같은 이야기다.

격납건물 사례를 조금 더 보자. 냉각재 상실 사고에서 고온 고압의 물이 격납건물로 쏟아지면, 격납건물은 **질량이 들어오지만 나가지 않는** 계가 된다. 안에 갇힌 에너지가 압력을 올리고, 그 최고 압력이 격납건물 설계 압력을 정한다. 이 계산이 원자력 열역학에서 가장 고전적인 문제 중 하나다.

▶ **실무 팁** “이 값이 상태량인가, 아닌가?”를 습관적으로 물어보자. 일과 열은 상태량이 아니므로 **“이 계의 열”** 같은 표현은 틀렸다. 열은 경계를 지나갈 때만 존재하고, 일단 계 안에 들어오면 내부에너지가 된다. 실무 대화에서 자주 뭉개지는 구분이지만, 계산에서는 정확히 지켜야 한다. 특히 “일을 저장한다”는 표현은 열역학적으로 틀린 말이다.

■ **원자력 연계** 원자로에서 에너지의 출발점은 특이하다. 화력발전은 연료의 화학 결합 에너지를 태우지만, 원자로는 **질량 결손**에서 나온다. U-235 한 번의 핵분열이 약 200 MeV를 내는데, 이는 $E=mc^2$ 로 원자 질량의 약 0.09 %에 해당한다. 화학 반응 대비 백만 배 규모다. 다만 열역학 입장에서는 이 차이가 별로 중요하지 않다. **어디서 왔든 열은 열이고, 카르노의 한계는 똑같이 적용된다.** 원자력의 효율이 화력보다 낮은 이유가 연료 때문이 아니라 온도 때문인 것도 이 때문이다(5 장).

2 장 순수물질의 상태 — 증기표 읽기

Tier 1 · 이 장을 못 넘기면 나머지 열 장이 계산되지 않는다.

원리: 액체와 증기 사이에는 넓은 중간지대가 있다

물을 일정 압력에서 계속 가열해 보자. 온도가 오르다가(**압축액(compressed liquid)**), 어느 온도에 도달하면 온도가 **멈춘 채** 액체가 증기로 바뀌고(**포화 혼합물(saturated mixture)**), 다 바뀌고 나서야 다시 오른다(**과열증기(superheated vapor)**).

온도가 멈춰 있는 그 구간이 문제의 핵심이다. 그 구간에서는 T 와 p 가 서로 독립이 아니다. 6.9 MPa 에서 포화온도는 항상 284.9 °C 다. 그래서 상태를 특정하려면 다른 변수가 하나 더 필요하고, 그것이 **건도**다.

$$x = \frac{m_{\text{증기}}}{m_{\text{전체}}} \quad (0 \leq x \leq 1)$$

건도가 정해지면 모든 상태량이 선형 보간으로 나온다.

$$v = v_f + x v_{fg}, h = h_f + x h_{fg}, s = s_f + x s_{fg}$$

f 는 포화액(fluid), g 는 포화증기(gas), fg 는 그 차이다.

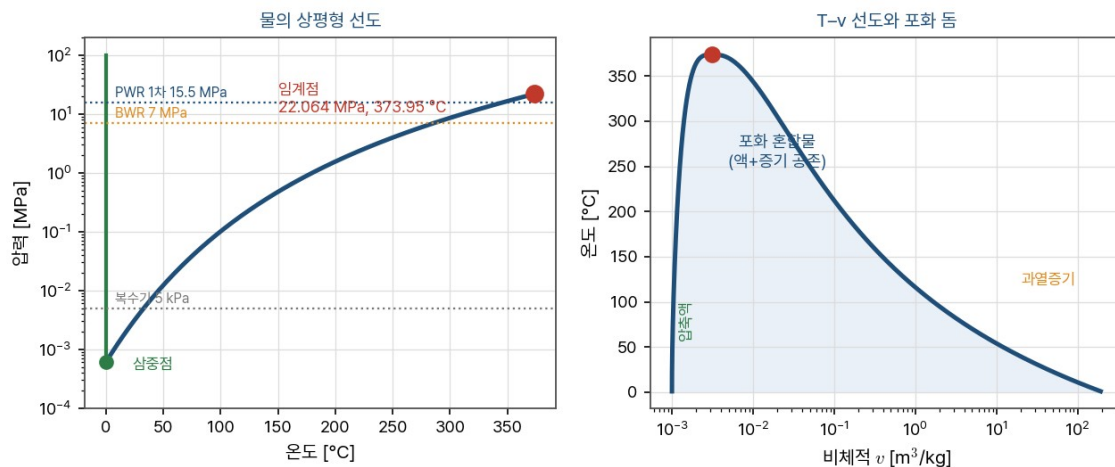


그림 2.1 — 왼쪽: 물의 상평형 선도. 오른쪽: T-v 선도와 포화 돔. 원자력 관심 압력을 표시했다.⁹

임계점(critical point) 위에서는 구별이 사라진다

압력을 올릴수록 포화액과 포화증기의 밀도 차가 줄어들고, **임계점(22.064 MPa, 373.95 °C)** 에서 둘이 같아진다. 그 위에서는 액체와 기체를 구별할 수 없다. 초임계(supercritical) 유체다.

PWR의 1차 계통 압력이 15.5 MPa 인 것은 우연이 아니다. **끓지 않을 만큼 높되 임계점보다는 낮게** 잡은 값이다. 15.5 MPa의 포화온도가 344.8 °C 이고 운전 온도가 310 °C 안팎이니, 약 35 K의 과냉각 여유를 두고 있는 셈이다.

수식: T-s 선도 읽는 법

열역학에서 가장 많이 쓰는 지도가 **T-s 선도**다. 여기서 **면적이 열량**이 되기 때문이다(5 장).

⁹ 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 융해선은 개략적으로만 표시했다.

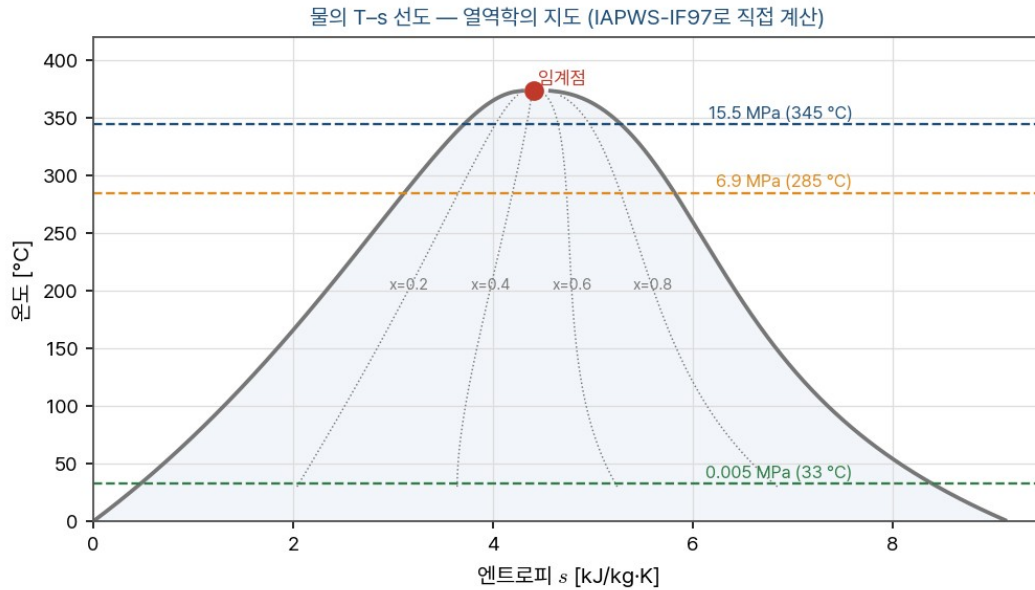


그림 2.2 — 물의 T-s 선도. 포화 돔, 건도선, 그리고 원자력 관심 압력.¹⁰

돔의 왼쪽 다리가 포화액선, 오른쪽 다리가 포화증기선이다. 물의 T-s 돔이 **오른쪽으로 기울어져 있다**는 점이 중요하다. 이 모양 때문에 포화증기에서 등엔트로피 팽창을 하면 돔 **안쪽으로** 들어가고, 그래서 원자력 터빈에서 습분 문제가 생긴다(9 장).

예제: 증기표를 세 가지 방식으로 읽는다

㉠ 포화 상태 — 6.9 MPa 포화증기

$$T_{\text{sat}} = 284.9 \text{ }^{\circ}\text{C}, h_g = 2,773.9 \text{ kJ/kg}, s_g = 5.8219 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

㉡ 포화 혼합물 — 5 kPa, 건도 0.737

$$h_f = 137.8, h_{fg} = 2,423.0 \text{ kJ/kg}$$

$$h = 137.8 + 0.737 \times 2,423.0 = 1,924 \text{ kJ/kg}$$

㉢ 압축액 — 15.5 MPa, 310 °C

정확한 값은 $h = 1,393.6 \text{ kJ/kg}$ 이다. 압축액표가 없으면 **같은 온도의 포화액으로 근사한다**. 310 °C 포화액 (9.865 MPa)은 $h_f = 1,402.0 \text{ kJ/kg}$ 이므로 오차 0.6 %다.

$$h(T, p) \approx h_f(T) + v_f(T)[p - p_{\text{sat}}(T)]$$

압력 보정항까지 넣으면 더 정확하지만, 물은 비압축성에 가까워 대개 $h \approx h_f(T)$ 로 충분하다.

주의: 이 근사는 엔탈피와 엔트로피에는 잘 통하지만, **밀도에는 통하지 않는다**. 15.5 MPa·310 °C 의 밀도는 704.8 kg/m^3 인데 같은 온도 포화액(9.865 MPa)은 690.7 kg/m^3 로 2 % 차이가 난다. 유량 계산에서는 이 2 %가 문제가 될 수 있다.

상태 판별 절차

주어진 p 와 T (또는 h)로 어느 영역인지 판별하는 순서다.

1. 주어진 p 의 T_{sat} 를 찾는다.

¹⁰ 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 건도선은 $x=0.2\sim 0.8$ 을 표시했다.

2. $T < T_{\text{sat}} \rightarrow$ 압축액 / $T > T_{\text{sat}} \rightarrow$ 과열증기 / $T = T_{\text{sat}} \rightarrow$ 포화 혼합물

3. 엔탈피로 판별할 때는 $h < h_f \rightarrow$ 압축액, $h_f < h < h_g \rightarrow$ 포화 혼합물, $h > h_g \rightarrow$ 과열증기

▶ 실무 팁 건도 x 는 포화 영역 안에서만 정의된다. 압축액에서 $x=0$ 이라고 쓰거나 과열증기에서 $x=1$ 이라고 쓰면 틀린 표현이다. 그런데 원자력 열수력에서는 이 규칙을 일부러 깨는 개념이 있다. 열평형 건도 $x_e = (h - h_f) / h_{fg}$ 는 음수도 1 초과도 될 수 있다(「필수 열전달」 12 장). 이때 음수는 “과냉각 정도”를, 1 초과는 “과열 정도”를 엔탈피 단위로 표현한 것이다. 진짜 건도가 아니라 편의적 지표라는 점을 잊지 말자.

■ 원자력 연계 각 노형의 운전점을 T-s 선도 위에 찍어보면 설계 철학이 보인다. PWR 은 1 차측을 압축액으로 유지해 끓지 않게 하고(15.5 MPa, 310 °C), 2 차측에서만 끓인다. BWR 은 노심에서 직접 끓여(7 MPa, 286 °C) 계통을 단순화한 대신 방사성 증기가 터빈까지 간다. 초임계압 경수로(SCWR) 는 아예 임계점 위(25 MPa)로 올려 상변화 자체를 없애려는 개념인데, 11 장에서 볼 물성 급변 때문에 열수력 해석이 까다롭다. 세 노형의 차이가 결국 T-s 선도의 어디에서 운전하느냐의 문제다.

3 장 제 1 법칙 — 닫힌계

Tier 1 · 에너지는 만들어지지도 사라지지도 않는다. 형태만 바뀐다.

원리: 열도 일도 에너지가 경계를 넘는 방식일 뿐

닫힌계에 대한 제 1 법칙은 한 줄이다.

$$Q - W = \Delta U \text{ 또는 } \delta Q - \delta W = dU$$

부호 규약이 늘 헷갈리는데, “계가 받으면 열은 +, 계가 하면 일은 +” 로 외운다. 계 입장에서 열은 수입이고 일은 지출이라는 뜻이다.

운동·위치 에너지까지 살리면

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

가 되지만, 열역학 문제 대부분에서 뒤의 두 항은 무시된다.

수식: 일의 계산

경계가 움직여서 하는 일(경계일(boundary work))은 p-V 선도의 면적이다.

$$W = \int_1^2 p dV$$

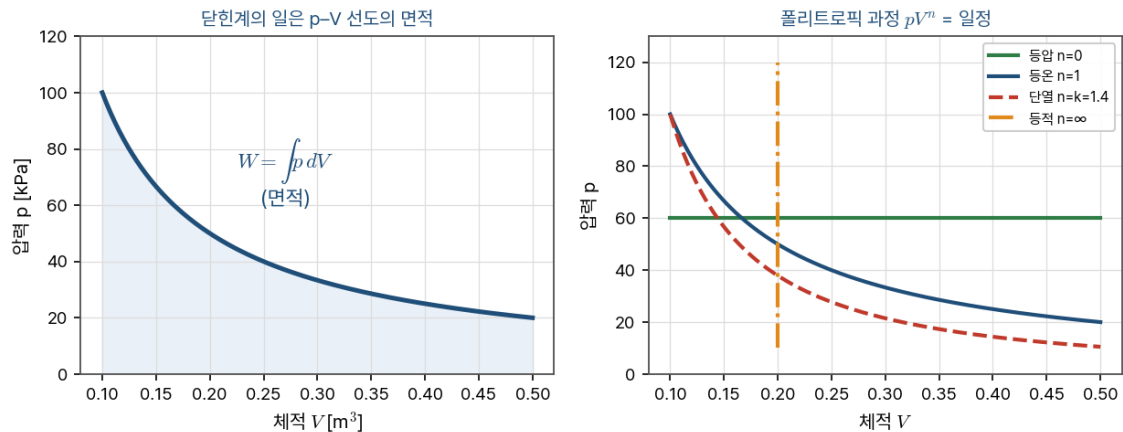


그림 3.1 — 왼쪽: 닫힌계의 일은 p-V 선도의 면적. 오른쪽: 폴리트로픽 과정의 지수에 따른 경로.¹¹

폴리트로픽 과정(polytropic process) $pV^n = \text{일정}$ 으로 두면 대부분의 과정이 통일된다.

표 3.1 — 폴리트로픽 과정별 경계일.¹²

n	과정	일
0	등압	$W = p(V_2 - V_1)$

¹¹ 그림 출처: 개념 계산.

¹² 표 각주: $k = c_p / c_v$ 는 비열비(specific heat ratio)다. 공기 1.4, 헬륨 1.667, 이산화탄소 1.29. 이 표는 이상기체에만 쓴다.

n	과정	일
1	등온 (이상기체)	$W = p_1 V_1 \ln(V_2/V_1)$
k	단열 가역 (이상기체)	$W = (p_1 V_1 - p_2 V_2)/(k-1)$
∞	등적	$W = 0$

비열(specific heat): 온도를 1 도 올리는 데 드는 에너지

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

c_p 가 c_v 보다 큰 이유는, 등압에서는 팽창하면서 일까지 해야 하기 때문이다. 이상기체면 그 차이가 정확히 기체상수다.

$$c_p - c_v = R$$

액체와 고체는 팽창이 거의 없으므로 $c_p \approx c_v \approx c$ 로 하나만 쓴다.

예제: 격납건물 압력이 얼마까지 오르나

냉각재 상실 사고에서 격납건물이 받는 하중을 아주 단순화해서 계산해 보자. 격납건물을 닫힌계로 보고, 1 차 계통의 물이 통째로 쏟아졌다고 가정한다.

- 격납건물 자유 체적 $V = 50,000 \text{ m}^3$, 초기 상태 대기압·40 °C 공기
- 방출되는 1 차 냉각재: 250,000 kg, 15.5 MPa·310 °C ($u \approx 1,371 \text{ kJ/kg}$)

① 방출된 물의 에너지

$$U_{\text{물}} = 250,000 \times 1,371 = 3.43 \times 10^8 \text{ kJ} = 343 \text{ GJ}$$

② 평형 상태 찾기 — 물이 격납건물 체적에 퍼진 뒤의 비체적은

$$v = \frac{50,000}{250,000} = 0.20 \text{ m}^3/\text{kg}$$

에너지 보존(공기의 열용량과 구조물 열흡수를 무시하면)에서 내부에너지가 보존되므로 $u \approx 1,371 \text{ kJ/kg}$. 이 (u, v) 조합을 증기표에서 찾으면 대략 **0.4 MPa, 포화온도 144 °C, 건도 0.28** 근처가 나온다.

실제 격납건물 설계 압력이 0.4~0.5 MPa(절대) 수준인 것과 자릿수가 맞는다.

이 계산이 왜 보수적인가 — 실제로는 구조물(콘크리트·강재)이 열을 상당량 흡수하고, 격납 살수와 냉각기가 작동한다. 그래서 실제 최고 압력은 이보다 낮다. 안전해석에서는 이 흡수를 보수적으로 적게 잡는다.

▶ **실무 팁** “ ΔU 를 구하려면 c_v 를 곱하면 된다”는 것은 **이상기체에만** 통한다. 물처럼 상변화가 있는 물질에서는 반드시 증기표(또는 IAPWS)를 써야 한다. 위 예제에서 $c_v \Delta T$ 로 계산했다면 답이 완전히 틀렸을 것이다. 상변화 잠열이 통째로 빠지기 때문이다. **물이 관련된 순간 비열 곱셈은 잊자.**

■ **원자력 연계** 격납건물 압력 해석은 원자력 열역학의 대표 문제다. 위 계산은 “모든 물이 즉시 방출되고 순간적으로 평형에 도달한다”는 극단적 가정이라, 실제 해석 코드(CONTAIN, GOTHIC)는 훨씬 정교하다. 시간에 따른 방출 유량, 구조물 열전달, 살수, 수소 거동을 모두 추적한다. 그럼에도 **닫힌계 제 1 법칙이 뼈대**라는

점은 변하지 않는다. 한편 피동 격납 냉각(AP1000, SMR)은 이 에너지를 강판 벽을 통해 외부 공기 자연대류로 빼내는 개념이라, 「필수 열전달」 8·9 장과 직접 이어진다.

4 장 제 1 법칙 — 검사체적

Tier 1 · 원자력 계통 계산의 90 %가 이 장의 식 하나로 끝난다.

원리: 엔탈피는 왜 등장하는가

유체가 계로 들어오려면 뒤에서 밀어주는 일이 필요하다. 이 **유동일(flow work)**이 $p v$ 이고, 유체가 가진 내부에너지와 항상 짝을 지어 다닌다. 그래서 둘을 묶어 이름을 붙였다.

$$h \equiv u + p v$$

엔탈피는 “흐르는 유체가 실어 나르는 에너지” 라고 이해하면 된다. 열린계에서는 u 대신 h 를 쓴다. 이 한 줄이 엔탈피의 전부다.

수식: 정상유동 에너지식

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

대부분의 기기에서 뒤의 두 항은 무시되므로, 실무에서는 이렇게 줄어든다.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

기기별로 어느 항이 0 이 되는지만 알면 된다.

표 4.1 — 정상유동 장치별 에너지식.¹³

장치	무시하는 항	남는 식
터빈	$\dot{Q} \approx 0$	$\dot{W} = \dot{m} (h_1 - h_2)$
펌프·압축기	$\dot{Q} \approx 0$	$\dot{W} = -\dot{m} (h_2 - h_1)$
노즐·디퓨저	$\dot{Q} \approx 0, \dot{W} = 0$	$h_1 + u_1^2/2 = h_2 + u_2^2/2$
열교환기	$\dot{W} = 0$	$\dot{m}_h \Delta h_h = \dot{m}_c \Delta h_c$
교축 밸브	$\dot{Q} \approx 0, \dot{W} = 0, \Delta k e \approx 0$	$h_1 = h_2$
노심	$\dot{W} = 0$	$\dot{Q} = \dot{m} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}})$

¹³ 표 각주: 터빈이 단열이라는 가정은 표면적 대비 유량이 커서 열손실 비중이 1 % 미만이기 때문이다. 반대로 열교환기는 열전달이 목적이므로 $\dot{Q}$ 를 살린다.

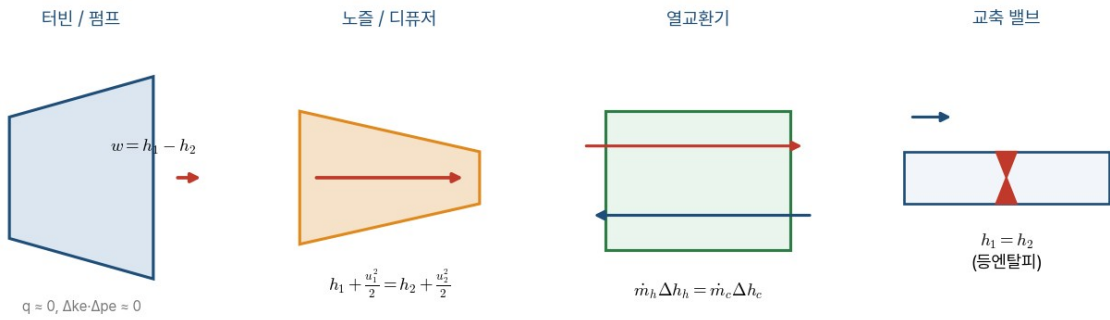


그림 4.1 — 네 가지 정상유동 장치와 각각에서 살아남는 항.¹⁴

교축(throttling)이 특별한 이유

교축 밸브는 $h_1 = h_2$ 다. **일도 열도 없는데 압력만 떨어진다.** 에너지는 보존되지만 뭔가를 잃은 느낌이 드는데, 그 “잃은 것”의 정체가 5 장의 엔트로피이고 7 장의 엑서지다.

예제: 노심 출구 온도를 구한다

3,000 MWt PWR의 1차 계통이다.

- 노심 열출력 $\dot{Q} = 3,000$ MW, 유량 $\dot{m} = 15,000$ kg/s
- 입구 290 °C, 압력 15.5 MPa

① 입구 엔탈피 (IAPWS): $h_{in} = 1,284.2$ kJ/kg

② 출구 엔탈피

$$h_{out} = h_{in} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = 1,284.2 + \frac{3,000,000}{15,000} = 1,484.2 \text{ kJ/kg}$$

③ 출구 온도 — 15.5 MPa에서 $h = 1,484.2$ kJ/kg인 상태를 찾으면 $T = 325.0$ °C.

노심 온도 상승 35 K. 「필수 열전달」 7장에서 부수로 하나로 계산한 37.5 K와 잘 맞는다. **같은 물리를 계통 규모와 채널 규모에서 각각 확인한 셈이다.**

④ 포화 여유 확인 — 15.5 MPa의 포화온도는 344.8 °C이므로, 출구에서도 19.8 K의 과냉각 여유가 있다. PWR이 1차측에서 끓지 않는다는 설계 조건이 이렇게 확인된다.

증기발생기의 에너지 수지

같은 식을 2차측에 적용하면 증기 생산량이 나온다.

- 2차측 급수 220 °C ($h = 944.9$ kJ/kg) → 포화증기 6.9 MPa ($h = 2,773.9$ kJ/kg)

$$\dot{m}_{\text{증기}} = \frac{\dot{Q}}{h_{out} - h_{in}} = \frac{3,000,000}{2,773.9 - 944.9} = 1,640 \text{ kg/s}$$

초당 1.6 톤의 증기. 이것이 8장에서 터빈으로 들어간다.

▶ **실무 팁** 정상유동 에너지식을 쓸 때 **“정상”인지 먼저 확인**해야 한다. 기동·정지·과도에서는 계 안에 질량과 에너지가 쌓이므로 비정상 항이 살아난다. 가압기 수위 변화, 축압기 방출, 격납건물 가압이 전부 비정상 문제다. 정상 가정을 쓴 계산을 과도에 갖다 붙이는 것이 실무에서 가장 흔한 오용이다.

¹⁴ 그림 출처: 개념도.

■ **원자력 연계** 노심 열출력과 유량, 입출구 온도의 관계는 원자로 운전의 기본 지표다. 실제 발전소에서는 이 식을 거꾸로 써서 **열출력을 측정**한다. 급수 유량과 급수·증기 엔탈피로 2 차측 열출력을 구하는 방식이며, 이를 **열평형 계산(heat balance)**이라 부른다. 중성자 계측기의 교정 기준이 되므로 정확도가 중요하고, 그래서 급수 유량계(주로 벤투리)의 오차가 곧 출력 불확실도가 된다. 미국에서 시행된 **출력 증강(power uprate)**의 상당 부분이 실은 이 유량 계측을 정밀화해 불확실도 여유를 회수한 것이었다.

5 장 제 2 법칙과 엔트로피

Tier 2 · 에너지가 보존되는데도 왜 모든 열을 일로 바꿀 수 없는가.

원리: 에너지에는 등급이 있다

제 1 법칙은 양만 센다. 3,000 MJ의 열과 3,000 MJ의 전기는 제 1 법칙 눈에는 같다. 그런데 현실은 다르다. 전기는 전부 열로 바꿀 수 있지만, 열은 전부 전기로 못 바꾼다. 이 비대칭이 제 2 법칙이다.

두 가지 고전적 표현이 있고, 둘은 동치다.

- **켈빈-플랑크**: 하나의 열원에서 열을 받아 전부 일로 바꾸는 순환 기관은 없다. → 반드시 저온부로 열을 버려야 한다.
- **클라우지우스**: 다른 효과 없이 저온에서 고온으로 열이 저절로 흐를 수는 없다.

수식: 카르노와 엔트로피

카르노 효율은 두 열원 사이에서 가능한 최대 효율이며, 오직 온도만으로 정해진다.

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (\text{반드시 절대온도})$$

여기서 원자력의 숙명이 드러난다. 285 °C 증기와 30 °C 복수기 사이의 카르노 효율은

$$1 - \frac{303.15}{558.15} = 45.7 \%$$

600 °C로 운전하는 초초임계 화력은 65.3 %다. 연료가 아니라 온도가 효율을 정한다.

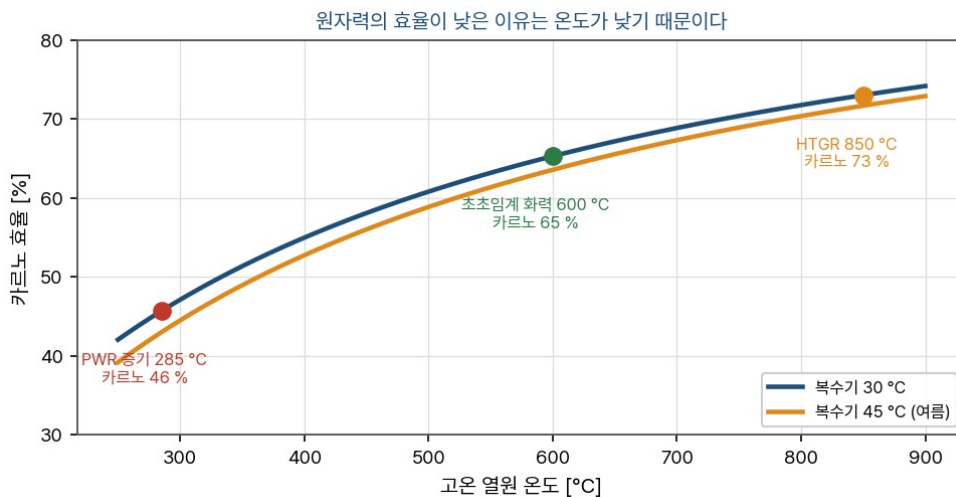


그림 5.1 — 카르노 효율은 고온 열원 온도로 정해진다. 원자력의 효율이 낮은 이유가 여기 있다.¹⁵

엔트로피의 정의

클라우지우스는 가역(reversible) 순환에서 $\oint \delta Q/T = 0$ 임을 보였고, 이는 $\delta Q_{\text{rev}}/T$ 가 상태량임을 뜻한다. 그것을 엔트로피라 부른다.

¹⁵ 그림 출처: 직접 계산. 복수기 온도 30 °C 기준.

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

그리고 실제(비가역, irreversible) 과정에서는 항상 부등호가 붙는다.

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}, \Delta S_{\text{우주}} = \Delta S_{\text{계}} + \Delta S_{\text{주위}} \geq 0$$

엔트로피 생성 $S_{\text{gen}} \geq 0$ 으로 쓰면 더 유용하다. 이 값이 그 과정이 얼마나 비가역적이었는지를 정량화한다.

$$\Delta S_{\text{계}} = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{gen}}$$

T-s 선도에서 면적은 열이다

$dS = \delta Q/T$ 를 뒤집으면 $\delta Q = T dS$ 다. 그러므로

$$Q_{\text{rev}} = \int T dS = (\text{T-s 선도의 곡선 아래 면적})$$

p-V 선도에서 면적이 일이었듯, T-s 선도에서 면적은 열이다. **이것이 8 장 이후 사이클을 T-s 선도로 그리는 이유다.**

예제: 온도차 열전달의 엔트로피 생성

가장 흔한 비가역 과정을 계산해 보자. 600 K 열원에서 300 K 열원으로 1,000 kJ 이 그냥 흘러간다.

$$\Delta S_H = \frac{-1,000}{600} = -1.667 \text{ kJ/K}, \Delta S_C = \frac{+1,000}{300} = +3.333 \text{ kJ/K}$$

$$S_{\text{gen}} = -1.667 + 3.333 = +1.667 \text{ kJ/K} > 0$$

양수이므로 자발적으로 일어난다. 그런데 여기서 무엇을 잃었는가? 만약 그 1,000 kJ 을 카르노 기관에 넣었다면

$$W_{\text{max}} = 1,000 \left(1 - \frac{300}{600} \right) = 500 \text{ kJ}$$

의 일을 얻을 수 있었다. **그냥 흘러보내는 순간 500 kJ 의 일 능력이 사라졌다.** 그리고 그 값은 정확히

$$T_0 S_{\text{gen}} = 300 \times 1.667 = 500 \text{ kJ}$$

이다. 이 관계 $W_{\text{lost}} = T_0 S_{\text{gen}}$ 를 **구이-스토돌라 정리**라 하고, 7 장 엑서지의 뼈대가 된다.

왜 원자로에서 이 이야기가 중요한가

연료 중심 1,014 °C 에서 냉각재 310 °C 까지 700 K 을 떨어뜨리며 열이 흐른다(「필수 열전달」 4 장). 이 구간에서 **엔트로피가 대량으로 생성되고, 일 능력이 사라진다.** 정작 우리가 쓰는 열원 온도는 연료 중심이 아니라 증기발생기 출구의 285 °C 다.

$$\text{연료 중심 기준 카르노: } 1 - \frac{303}{1287} = 76 \% \text{ 실제 이용: } 1 - \frac{303}{558} = 46 \%$$

30 %포인트가 연료에서 냉각재로 열이 건너오는 과정에서 이미 사라진다. 이것이 7 장 그림 7.1 의 첫 번째 막대다.

▶ **실무 팁** 엔트로피 계산에서 켈빈을 쓰지 않으면 답이 통째로 틀린다. 그런데 더 미묘한 실수가 있다. ΔS 를 구할 때 어느 온도로 나누느냐다. 열원의 온도가 일정하면 Q/T 로 끝나지만, 온도가 변하면 $\int \delta Q/T$ 를 적분해야

한다. 유한한 열용량의 물체가 식는 경우 $\Delta S = mc \ln(T_2/T_1)$ 이 되며, $mc(T_2 - T_1)/T_{\text{avg}}$ 로 근사하면 오차가 생긴다.

■ **원자력 연계** 제 2 법칙은 원자력에 두 가지 숙제를 남긴다. 첫째, **폐열은 반드시 나온다.** 3,000 MWt 중 약 2,000 MW 를 바다나 냉각탑으로 버려야 하며, 이것이 부지 선정(취수·배수)과 환경 영향의 핵심이 된다. 둘째, **효율을 올리려면 온도를 올려야 한다.** 그래서 4 세대 노형은 전부 고온을 지향한다. SFR 500 °C, MSR 700 °C, HTGR 850 °C. 다만 온도를 올리면 재료 문제가 커지고, 결국 **열역학이 요구하는 것과 재료가 허용하는 것 사이의 줄다리기가** 노형 설계의 본질이 된다.

6 장 등엔트로피 효율(isentropic efficiency)과 실제 기기

Tier 2 · 이상과 현실의 거리를 하나의 숫자로 표현한다.

원리: 이상 과정을 기준으로 삼는다

단열이면서 가역인 과정은 엔트로피가 변하지 않는다($\delta Q=0, S_{\text{gen}}=0$). 이것이 **등엔트로피 과정(isentropic process)**이고, 터빈·펌프·노즐의 이상적 거동이다.

실제 기기는 마찰·박리·누설 때문에 엔트로피가 생성된다. 그 결과를 하나의 계수로 뭉친 것이 **등엔트로피 효율**이다.

$$\eta_T = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} (\text{터빈}), \eta_P = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} (\text{펌프·압축기})$$

분모와 분자가 뒤집힌 것을 눈여겨보자. 터빈은 일을 내놓으므로 실재가 분자, 펌프는 일을 먹으므로 이상이 분자다. 둘 다 1 보다 작게 만들기 위한 정의다.

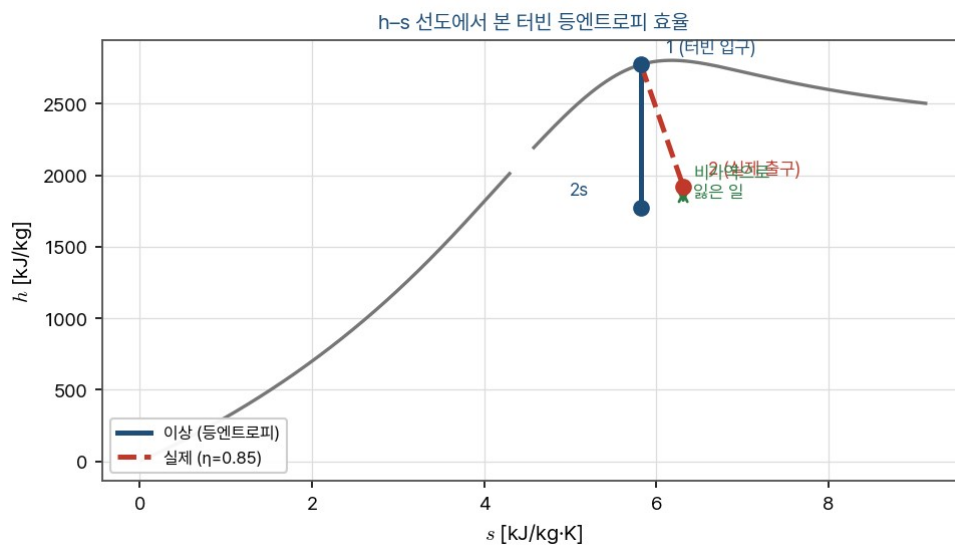


그림 6.1 — h-s 선도에서 본 터빈 등엔트로피 효율. 실제 과정은 오른쪽으로 벌어진다.¹⁶

수식: 대표적인 효율값

표 6.1 — 기기별 등엔트로피 효율 대표값.¹⁷

기기	등엔트로피 효율	비고
대형 증기 터빈	0.88~0.94	단별로는 더 높다
원자력 습증기 터빈	0.82~0.88	습분 손실로 낮다

¹⁶ 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 6.9 MPa 포화증기 → 5 kPa, $\eta=0.85$ 조건.

¹⁷ 표 각주: 원자력 터빈이 낮은 이유는 증기가 습해서다. 액적이 날개를 때리면서 에너지 손실과 침식이 동시에 생긴다. 경험적으로 **습분 1 %마다 효율이 약 1 %씩 떨어진다**(Baumann 법칙).

기기	등엔트로피 효율	비고
가스 터빈	0.85~0.92	
축류 압축기	0.85~0.90	
원심 급수 펌프	0.75~0.85	
노즐	0.90~0.98	가장 이상에 가깝다

습분이 왜 그렇게 나쁜가

물의 T-s 돔이 오른쪽으로 기울어져 있어(2 장), 포화증기에서 등엔트로피 팽창을 하면 돔 안으로 들어간다. 생긴 액적은 증기보다 느려서 터빈 날개 뒷면을 때린다. 결과는 두 가지다.

1. **효율 저하** — Baumann 법칙
2. **침식** — 마지막 단 날개 앞전이 깎인다. 스텔라이트 보강판을 붙이는 이유다.

그래서 원자력 터빈은 습분을 **0.88 아래로 내려가지 않게** 관리한다. 그 수단이 9 장의 습분분리재열기다.

예제: PWR 터빈의 실제 일

이 책의 대표 사이클이다. 6.9 MPa 포화증기가 5 kPa 까지 팽창한다.

㉠ 입구 상태

$$h_1 = 2,773.9 \text{ kJ/kg}, s_1 = 5.8219 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

㉡ 등엔트로피 출구 — 5 kPa 에서 $s = 5.8219$ 인 상태를 찾는다.

$$s_f = 0.4762, s_{fg} = 7.9176 \Rightarrow x_{2s} = \frac{5.8219 - 0.4762}{7.9176} = 0.675$$

$$h_{2s} = 137.8 + 0.675 \times 2,423.0 = 1,773.7 \text{ kJ/kg}$$

㉢ 이상 일과 실제 일

$$w_s = 2,773.9 - 1,773.7 = 1,000.2 \text{ kJ/kg}$$

$$w = \eta_T w_s = 0.85 \times 1,000.2 = 850.2 \text{ kJ/kg}$$

㉣ 실제 출구 상태

$$h_2 = 2,773.9 - 850.2 = 1,923.7 \Rightarrow x_2 = \frac{1,923.7 - 137.8}{2,423.0} = 0.737$$

건도 0.737. 26 %가 물이라는 뜻이다. 이 상태로는 터빈이 버티지 못한다. 9 장에서 이 문제를 해결한다.

흥미로운 점 하나 — 실제 팽창은 등엔트로피보다 출구 건도가 **높다**($0.737 > 0.675$). 비가역으로 잃은 일이 그대로 증기 안에 열로 남기 때문이다. 이것을 **재가열 효과(reheat effect)**라 부른다. 효율은 나빠졌는데 습분은 덜해졌다는, 조금 알맞은 결과다.

▶ **실무 팁** 등엔트로피 효율은 **입출구 압력이 정해진 상태에서만 의미가 있다**. 같은 기기라도 운전 조건이 바뀌면 값이 달라진다. 그래서 “이 터빈의 효율은 0.85 다”라는 말은 엄밀히는 “설계점에서 0.85”라는 뜻이다. 부분 부하에서는 크게 떨어질 수 있고, 원자력처럼 기저부하로 정격 운전하는 경우에만 단일 값 가정이 무난하다.

■ **원자력 연계** 원자력 터빈은 화력과 형태가 다르다. 증기 압력이 낮아(6~7 MPa 대 25 MPa) 같은 출력을 내려면 **부피 유량이 훨씬 크고**, 그래서 터빈이 거대해진다. 회전수도 1,800 또는 1,500 rpm의 반속기를 쓰는 경우가 많다. 마지막 단 날개 길이가 1.4 m를 넘어 원심력이 구조 설계를 지배하고, 여기에 습분 침식까지 겹친다. 터빈이 커지는 이유가 결국 2장 T-s 선도에서 원자력이 낮은 압력에서 운전한다는 사실 하나에서 나온다.

7 장 엑서지 — 어디서 일 능력을 잃었나

Tier 2-3 · 제 1 법칙은 어디로 갔는지 알려주고, 엑서지는 어디서 망쳤는지 알려준다.

원리: 에너지는 보존되지만 엑서지는 파괴된다

제 1 법칙만 보면 발전소에서 에너지는 사라지지 않는다. 3,000 MW 가 들어가 1,000 MW 의 전기와 2,000 MW 의 폐열로 나온다. 전부 남아 있다.

그런데 이 계산으로는 “어디를 개선해야 하는가” 를 알 수 없다. 폐열이 2,000 MW 니까 복수기가 문제인가? 아니다. 복수기의 폐열은 제 2 법칙이 강제하는 것이라 대부분 어쩔 수 없다.

엑서지(exergy, 가용 에너지)는 이 질문에 답한다. 주어진 환경(T_0, p_0)에 대해 **최대로 뽑아낼 수 있는 일로** 에너지를 다시 재는 것이다.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{유동 엑서지, 운동·위치 에너지 제외})$$

열이 가진 엑서지는 카르노 계수가 붙은 만큼이다.

$$\psi_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

같은 1,000 kJ 이어도 600 K 에서는 500 kJ 의 일 능력을, 350 K 에서는 143 kJ 만 갖는다. 온도가 곧 에너지의 등급이다.

수식: 엑서지 파괴(exergy destruction)와 제 2 법칙 효율(second-law efficiency)

5 장의 구아-스토돌라 정리가 여기서 쓰인다.

$$\dot{X}_{\text{dest}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \geq 0$$

그리고 기기의 성능은 두 가지로 썰 수 있다.

$$\eta_I = \frac{\text{얻은 에너지}}{\text{투입 에너지}} \quad \eta_{II} = \frac{\text{얻은 엑서지}}{\text{투입 엑서지}}$$

η_{II} 가 **제 2 법칙 효율**이다. 이 값이 낮은 기기가 개선 여지가 큰 곳이다.

예제: PWR의 엑서지는 어디서 사라지는가

$T_0 = 303 \text{ K} (30^\circ \text{C})$ 를 환경으로 잡고, 노심이 공급하는 엑서지를 100 으로 정규화해 배분을 보자.

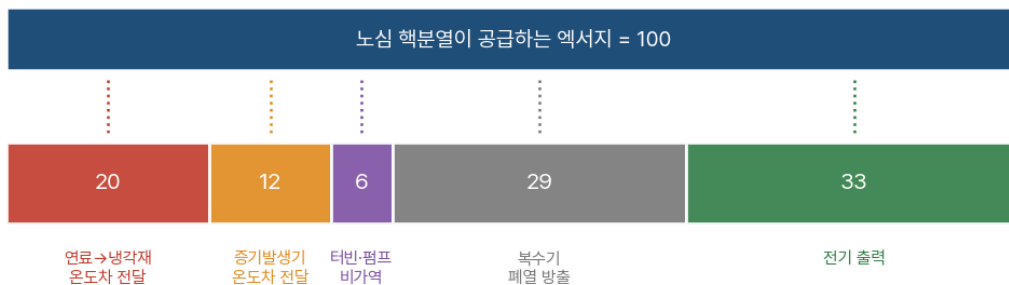
표 7.1 — PWR 엑서지 배분(개략).¹⁸

단계	엑서지 파괴	왜
연료 → 냉각재	20	700 K 의 온도차를 두고 열이 건너온다

¹⁸ 표 각주: 계통 구성과 가정에 따라 수치가 달라지는 개략 배분이다. 정밀한 엑서지 해석은 급수가열기 단수, 재열(reheat) 방식, 터빈 추기(extraction) 배분까지 모형화해야 한다. 여기서는 **어느 항이 큰가**의 순서만 보면 된다.

단계	엑서지 파괴	왜
냉각재 → 2 차측 증기	12	증기발생기의 유한한 온도차
터빈·펌프 비가역	6	마찰·습분·누설
복수기 방출	29	저온 열은 애초에 엑서지가 적다
전기 출력	33	실제로 건진 것

엑서지 100이 어디로 가는가 (PWR 개략 배분)



가장 큰 손실은 터빈(6)이 아니라 '온도차를 두고 열을 옮기는 일'(32)이다

그림 7.1 — 엑서지 100 이 어디로 가는가. 가장 큰 파괴는 터빈이 아니라 열전달 그 자체다.¹⁹

여기서 얻는 통찰이 이 장의 전부다.

- 터빈의 등엔트로피 효율을 0.85 에서 0.90 으로 올려도 전체에서 얻는 것은 2 %포인트 남짓이다.
- 반면 **연료-냉각재 온도차와 증기발생기 온도차에서 32 가 사라진다.** 여기가 진짜 병목이다.
- 그런데 이 온도차는 「필수 열전달」이 말했듯 **열을 옮기려면 반드시 필요한 것이다.** 온도차가 0 이면 열이 안 흐른다.

이 딜레마가 열역학과 열전달이 만나는 지점이다. **열전달은 온도차를 원하고, 열역학은 온도차를 싫어한다.** 설계는 이 둘의 타협이다.

그러면 어디를 고쳐야 하나

엑서지 관점의 답은 명확하다. **열원 온도를 올려라.** 연료-냉각재 온도차를 줄이는 것보다(열전달이 나빠진다) 아예 냉각재 온도 자체를 올리는 편이 낫다. 4 세대 노형이 전부 고온으로 가는 열역학적 근거가 이것이다.

▶ **실무 팁** 엑서지 해석은 환경 상태 T_0 , p_0 를 무엇으로 잡느냐에 결과가 민감하다. 보통 대기 조건(25 °C, 1 atm)이나 냉각수 온도를 쓰는데, **어느 쪽을 썼는지 반드시 명시해야** 다른 연구와 비교가 된다. 계절에 따라 T_0 가 15 K 씩 변하면 복수기 향의 엑서지 파괴가 눈에 띄게 달라진다.

■ **원자력 연계** 엑서지 관점은 **열병합(cogeneration)**의 논리를 제공한다. 발전만 하면 2,000 MW 의 폐열이 그냥 버려지는데, 그 열은 엑서지가 낮을 뿐 양은 엄청나다. 지역난방(80~120 °C), 해수 담수화(60~120 °C), 수소 생산(고온 노형에서 700~900 °C)에 쓰면 엑서지 파괴를 줄일 수 있다. 특히 SMR 은 수요지 가까이 놓을 수 있어 열 수송 손실이 작다는 점에서 열병합에 유리하다. **열을 전기로만 보면 33 %지만, 열로 쓰면 총 이용률이 70 %를 넘길 수 있다.** 다만 그렇게 하면 발전량이 줄어드니, 무엇을 팔 것인가라는 경제성 문제로 넘어간다.

¹⁹ 그림 출처: 표 7.1 의 개략 배분을 도식화.

8 장 랭킨 사이클(Rankine cycle) — 원자력 발전의 본체

Tier 2 · 앞의 일곱 장이 여기 모인다.

원리: 네 개의 기기, 네 개의 과정

증기 동력 사이클의 뼈대는 단순하다.

1. **1→2 터빈** — 단열 팽창, 일을 낸다.
2. **2→3 복수기** — 등압 방열, 완전히 응축시킨다.
3. **3→4 급수펌프(feedwater pump)** — 단열 압축, 일을 먹는다.
4. **4→1 증기발생기** — 등압 가열, 열을 받는다.

왜 응축시킨 뒤에 압축하는가? 액체를 압축하는 것이 증기를 압축하는 것보다 압도적으로 싸기 때문이다. 물의 비체적이 증기의 1/20,000 수준이라, 펌프 일이 터빈 일의 1 %에 불과하다. 이 한 가지 아이디어가 랭킨 사이클을 성립시킨다.

$$\eta = \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

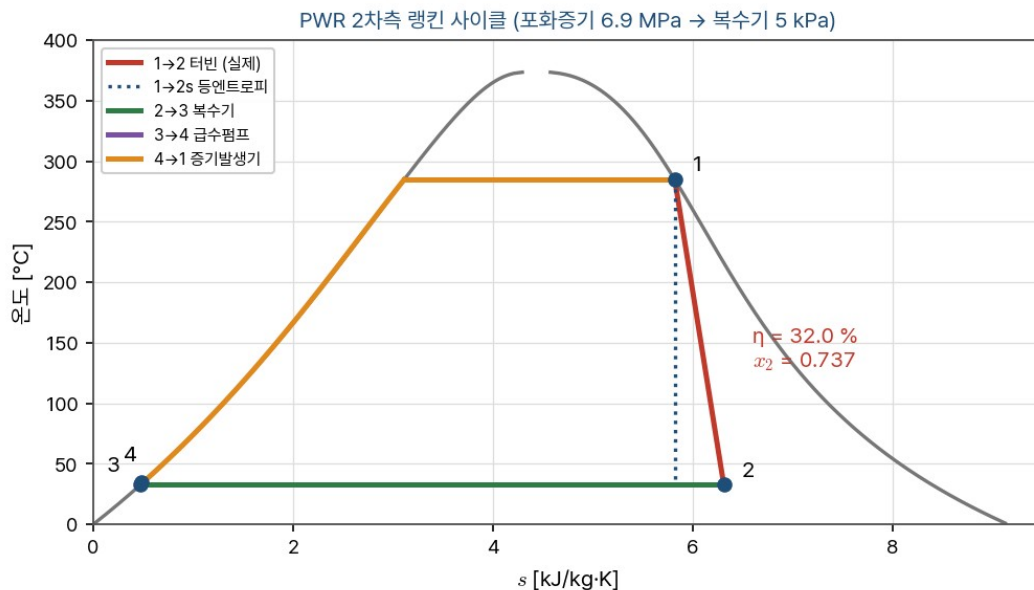


그림 8.1 — PWR 2차측 랭킨 사이클의 T-s 선도.²⁰

예제: PWR 2차측 사이클 전체 계산

조건: 증기발생기 6.9 MPa 포화증기, 복수기 5 kPa, $\eta_T = 0.85$, $\eta_p = 0.80$

① 상태 1 (터빈 입구)

$$h_1 = 2,773.9 \text{ kJ/kg}, s_1 = 5.8219 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, T_1 = 284.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

²⁰ 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 터빈 효율 0.85, 펌프 효율 0.80 가정.

㉔ 상태 2 (터빈 출구) — 6 장에서 구했다.

$$h_{2s}=1,773.7, h_2=1,923.7 \text{ kJ/kg}, x_2=0.737$$

$$w_T=2,773.9-1,923.7=850.2 \text{ kJ/kg}$$

㉕ 상태 3 (복수기 출구, 포화액)

$$h_3=137.8 \text{ kJ/kg}, v_3=0.001005 \text{ m}^3/\text{kg}, T_3=32.9^\circ\text{C}$$

㉖ 상태 4 (펌프 출구) — 액체는 비압축성으로 봐도 무방하다.

$$w_{p,s}=v_3(p_1-p_3)=0.001005 \times (6,900-5)=6.93 \text{ kJ/kg}$$

$$w_P=\frac{6.93}{0.80}=8.66 \text{ kJ/kg} \Rightarrow h_4=137.8+8.7=146.4 \text{ kJ/kg}$$

㉗ 열입력과 효율

$$q_{in}=h_1-h_4=2,773.9-146.4=2,627.4 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{net}=850.2-8.7=841.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta=\frac{841.5}{2,627.4}=32.0\%$$

실제 PWR 발전소의 열효율 33~34 %와 잘 맞는다. 여기에 9 장의 재생·재열을 더하면 그 값에 도달한다.

세 개의 숫자를 비교해 보자

표 8.1 — 세 가지 효율의 비교.²¹

기준	효율	차이의 정체
카르노 (285 → 33 °C)	45.2 %	이론 상한
이상 랭킨 (손실 없음)	37.8 %	급수를 상온에서 데우는 손실
실제 랭킨 ($\eta_T=0.85$)	32.0 %	터빈·펌프 비가역

효율을 올리는 세 개의 손잡이

$$\eta \approx 1 - \frac{T_{C,avg}}{T_{H,avg}}$$

로 이해하면 방향이 자명하다.

1. 증기 압력(온도)을 올린다 → T_H 상승
2. 복수기 압력을 낮춘다 → T_C 하강
3. 과열한다 → $T_{H,avg}$ 상승 + 습분 개선

²¹ 표 각주: 카르노와 이상 랭킨의 차이(7.4 %포인트)가 중요하다. 랭킨은 급수를 33 °C 부터 285 °C 까지 데우는데, 그 구간 평균 온도가 285 °C 보다 훨씬 낮아서 카르노에 못 미친다. 9 장의 재생 급수가열(regenerative feedwater heating)이 바로 이 손실을 줄이는 기법이다.

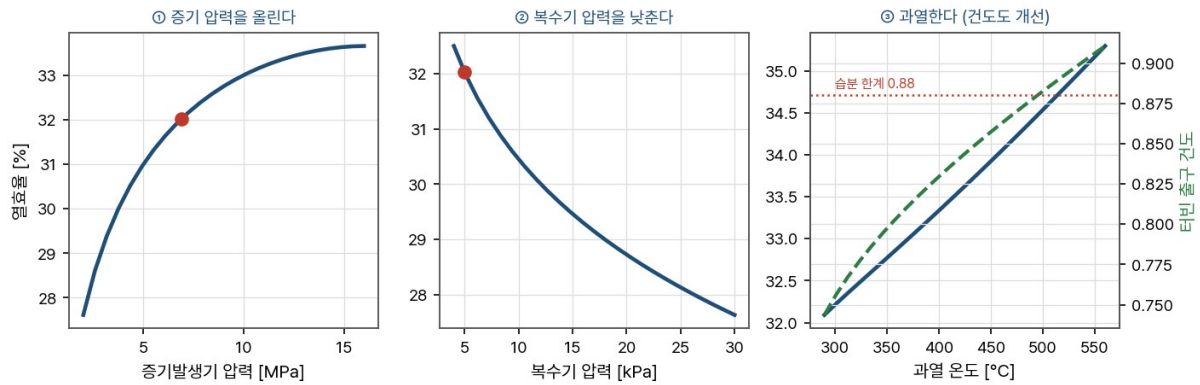


그림 8.2 — 랭킨 효율에 영향을 주는 세 손잡이. 과열은 효율과 건도를 동시에 개선한다.²²

그런데 원자력은 세 손잡이 중 하나도 자유롭게 잡지 않는다.

- 증기 압력은 1차측 온도가 정한다. 1차측을 끓지 않게 하려면 15.5 MPa·325 °C가 한계이고, 증기발생기 온도차를 빼면 285 °C가 최선이다.
- 복수기 압력은 냉각수 온도가 정한다. 여름에는 오히려 나빠진다.
- **과열은 아예 불가능하다.** 포화증기까지가 전부다.

이것이 원자력 발전소가 32~34 %에 머무는 구조적 이유다.

▶ **실무 팁** 펌프 일을 $v \Delta p$ 로 계산할 때 v 는 **입구(저압측) 값** 을 쓴다. 액체라 거의 변하지 않지만, 습관을 정해두는 편이 안전하다. 그리고 펌프 일이 터빈 일의 1 %밖에 안 된다고 **아예 무시하면 안 된다**. 효율 계산에서 0.3 %포인트 정도 차이가 나는데, 사이클 비교 연구에서는 그 정도가 결론을 바꿀 수 있다.

■ **원자력 연계 BWR** 은 랭킨 사이클이 더 단순하다. 증기발생기가 없어 노심에서 나온 증기가 바로 터빈으로 간다. 그래서 증기발생기 온도차만큼의 엑서지 파괴(7 장의 12)가 없고, 같은 노심 온도에서 효율이 조금 유리하다. 대신 **방사성 증기가 터빈까지 도달**하므로 터빈 건물 차폐와 정비 피폭 관리가 필요하다. 열역학적 이득과 방사선 방호 부담의 맞교환이며, 두 노형이 지금까지 공존해 온 이유이기도 하다.

²² 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 각 그래프에서 나머지 조건은 기준값에 고정했다.

9 장 사이클 개선 — 재열·재생·습분분리

Tier 2 · 32 %를 34 %로 만드는 방법들. 그리고 터빈을 지키는 법.

원리: 평균 온도를 올리고, 습분을 줄인다

8 장에서 두 가지 문제를 남겼다.

1. **효율**: 급수를 33 °C 부터 데우느라 열 공급의 평균 온도가 낮다.
2. **습분**: 터빈 출구 건도 0.737 은 터빈이 견딜 수 없다.

두 문제에 각각 다른 처방이 있다.

처방 ①: 재생 급수가열 — 효율을 위해

터빈에서 팽창 중인 증기를 일부 빼내(추기, extraction) 급수를 데우는 데 쓴다.

얼핏 손해처럼 보인다. 그 증기가 계속 팽창했다면 일을 더 냈을 텐데. 하지만 **급수를 데우는 데 쓰던 저온 열이 필요 없어지므로 열 공급의 평균 온도가 올라간다**. 계산해 보면 이득이 손해보다 크다.

$$\eta \approx 1 - \frac{T_C}{T_{H,avg}} \Rightarrow T_{H,avg} \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$$

급수가열기 하나당 효율이 대략 1~2 %포인트 오르고, 단수를 늘릴수록 이득이 줄어든다. 실제 원자력 발전소는 **5~7 단**을 쓴다. 그 이상은 배관·기기 비용이 이득을 넘어선다.

가열기 하나에 대한 질량·에너지 수지는 이렇게 쓴다(개방형 기준).

$$y h_{\text{추기}} + (1 - y) h_{\text{급수}} = h_{\text{포화액}} \Rightarrow y = \frac{h_{\text{sat}} - h_{\text{급수}}}{h_{\text{추기}} - h_{\text{급수}}}$$

y 가 추기 비율이다.

처방 ②: 습분분리재열기(MSR) — 터빈을 위해

화력발전은 재열을 위해 증기를 보일러로 되돌려 550 °C 로 다시 데운다. 원자력은 그럴 열원이 없다. **1차측이 325 °C 뿐인데 어떻게 550 °C 를 만드나**.

그래서 원자력만의 장치가 생겼다. 고압 터빈과 저압 터빈 사이에 놓는 **습분분리재열기**다.

1. **습분 분리** — 고압 터빈 출구의 액적을 사이클론이나 시브론(chevron)으로 물리적으로 걸러낸다.
2. **재열** — 걸러낸 증기를, 터빈에 들어가기 전의 **생증기 일부**로 데운다. 최고 온도가 285 °C 이므로 조금만 과열시킬 수 있다.

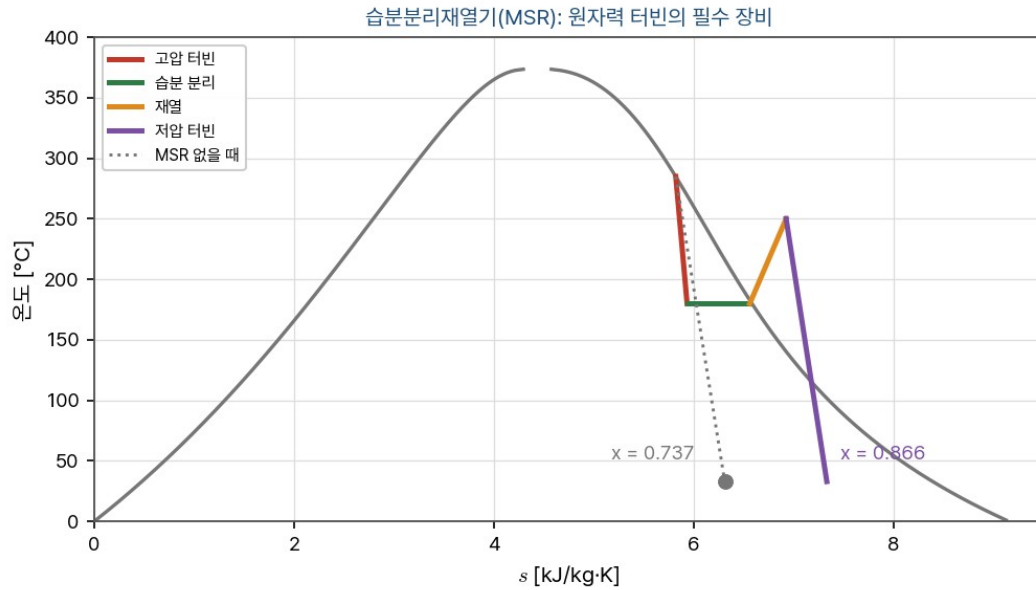


그림 9.1 — 습분분리재열기의 T-s 경로. 최종 건도가 0.737에서 0.866으로 올라간다.²³

예제: MSR 이 건도를 얼마나 살리나

- 고압 터빈: 6.9 MPa 포화증기 → 1.0 MPa, $\eta_T = 0.85$
- 습분 분리 후 건도 0.995 → 생증기로 250 °C 까지 재열
- 저압 터빈: 1.0 MPa·250 °C → 5 kPa, $\eta_T = 0.85$

① 고압 터빈 출구

$$x = 0.854 \text{ (이미 15 \%가 물이다)}$$

② 습분 분리 + 재열 후

$$1.0 \text{ MPa}, 250 \square^{\circ} \text{C} \text{ (포화온도 } 179.9^{\circ} \text{C 이므로 } 70 \text{ K 과열)}$$

③ 저압 터빈 출구

$$x = 0.866$$

0.737 → 0.866. 습분이 26 %에서 13 %로 절반이 됐다. 6 장의 Baumann 법칙으로 환산하면 터빈 효율이 6 %포인트 이상 개선되는 셈이고, 무엇보다 **날개 침식이 크게 줄어든다.**

표 9.1 — MSR 구성별 최종 건도.²⁴

구성	터빈 출구 건도	판정
MSR 없음	0.737	운전 불가
습분 분리만	약 0.81	여전히 부족
습분 분리 + 재열	0.866	허용 범위

²³ 그림 출처: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 중간압 1 MPa, 재열 후 250 °C, 각 터빈 효율 0.85 가정.

²⁴ 표 각주: 실제 발전소는 2 단 재열(저온·고온 재열기)을 쓰는 경우도 있어 건도가 0.88~0.90 까지 올라간다. 여기서는 1 단 기준으로 계산했다.

주의할 점: MSR은 효율을 올리려는 장치가 아니다. 재열에 쓴 생증기는 일을 하지 않고 열만 주고 나가므로, 효율은 오히려 약간 떨어지거나 비슷하다. 터빈을 보호하는 것이 목적이고, 습분 손실 감소로 결과적으로 효율이 상승되거나 소폭 개선된다.

실제 PWR 2차 계통의 모습

지금까지 배운 것을 다 합치면 실제 발전소가 된다.

증기발생기 → 고압 터빈 → 습분분리재열기 → 저압 터빈 ×3 → 복수기 → 복수 펌프 → 저압 급수가열기 3~4 단 → 탈기기(deaerator) → 급수 펌프 → 고압 급수가열기 2~3 단 → 증기발생기

여기까지 갖추면 열효율이 **33~34 %**가 된다. 8장의 단순 사이클 32.0 %에서 1.5~2 %포인트 개선된 값이다.

▶ **실무 팁** 급수가열기 계산에서 **터미널 온도차(TTD)**를 놓치기 쉽다. 급수 출구 온도는 추기 증기의 포화온도보다 항상 낮으며, 그 차이가 2~3 K이다. 이상적으로 같다고 두면 급수 온도를 과대평가해 효율이 부풀려진다. 사이클 비교 연구에서 남의 결과와 안 맞으면 TTD 가정부터 확인해 볼 것.

■ **원자력 연계** MSR(습분분리재열기)은 발전소 신뢰도의 약점이기도 하다. 전열관 누설, 배수(drain) 계통 막힘, 재열 증기 제어 문제가 출력 감발의 흔한 원인이다. 또 하나, **탈기기(deaerator)**는 열역학적으로는 개방형 급수가열기지만 실제 목적은 급수에서 산소를 제거하는 것이다. 용존 산소가 증기발생기 전열관 부식을 일으키기 때문이다. **열역학 교과서의 기기 하나가 실제로는 화학·재료 문제를 담당하는** 대표적인 사례다.

10 장 가스 동력 사이클 — 브레이턴과 초임계 CO₂

Tier 2-3 · 물을 쓰지 않는 길, 4 세대 노형의 동력 변환.

원리: 브레이턴은 압축-가열-팽창-방열

랭킨이 상변화를 이용한다면 브레이턴은 기체 상태로만 순환한다.

1. **1→2 압축기** — 단열 압축
2. **2→3 가열** — 등압 (원자로가 열원)
3. **3→4 터빈** — 단열 팽창
4. **4→1 방열** — 등압 (폐쇄 사이클) 또는 대기 방출 (개방)

이상 사이클의 효율은 놀랍도록 간단하다.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (r_p = p_2/p_1)$$

압력비(pressure ratio)만으로 정해진다. 터빈 입구 온도가 안 들어간다는 점이 의외인데, 실제로는 온도가 높을수록 같은 압력비에서 순일이 커져 손실의 비중이 줄어들기 때문에 온도가 중요해진다.

수식: 재생이 필수인 이유

브레이턴의 문제는 **터빈 출구가 아직 뜨겁다**는 것이다. 그 열을 그냥 버리면 아깝다. 그래서 터빈 출구 기체로 압축기 출구 기체를 데우는 **재생기(recuperator)**를 단다.

$$\varepsilon = \frac{T_{2r} - T_2}{T_4 - T_2} \quad (\text{재생기 유효도})$$

재생이 붙으면 사이클의 성격이 바뀐다. **압력비가 낮을수록 효율이 좋아지는 구간이 생긴다.** 압력비가 낮으면 터빈 출구가 더 뜨거워 회수할 열이 많기 때문이다.

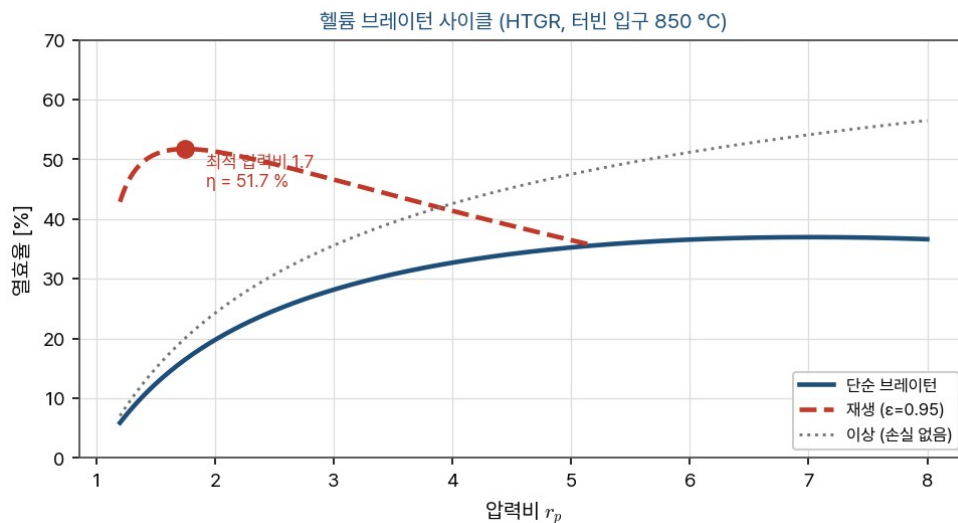


그림 10.1 — 헬륨 브레이턴 사이클. 재생이 붙으면 최적 압력비가 낮은 쪽으로 이동한다.²⁵

²⁵ 그림 출처: 직접 계산. 헬륨 $k=1.667$, $c_p=5,193$ J/kg·K, 터빈 입구 850 °C, 압축기 입구 30 °C, $\eta_C=0.88$, $\eta_T=0.92$, 재생기 유효도 0.95.

계산 결과 **최적 압력비 약 1.8**에서 **효율 52 %**가 나온다. 랭킨의 32 %와 비교하면 압도적이다. 그 차이는 전부 온도에서 온다(850 °C 대 285 °C).

초임계 CO₂ — 압축 일을 줄이는 아이디어

브레이턴의 또 다른 약점은 **압축기가 터빈 일의 절반 가까이를 먹는다**는 것이다. 기체는 압축하기 비싸다.

여기서 영리한 아이디어가 나온다. **압축을 임계점 바로 위에서 하면 어떨까?** CO₂의 임계점은 31.0 °C, 7.38 MPa로 상온에 가깝다. 임계점 근처에서 CO₂는 밀도가 액체에 가까우면서도 흐르는 성질은 기체다. 그러면 압축 일이 급감한다.

$$w_{\text{comp}} \approx v \Delta p \quad (v \text{가 작으면 일도 작다})$$

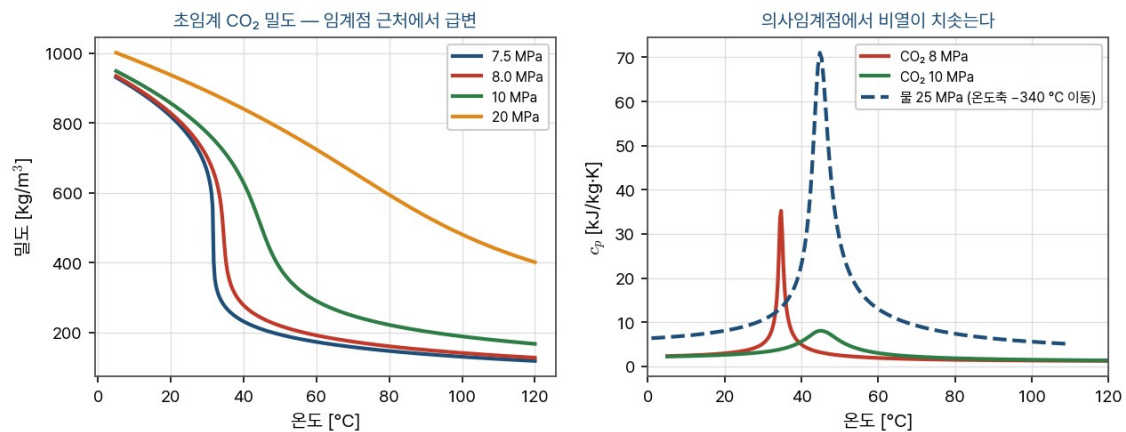


그림 10.2 — 왼쪽: 초임계 CO₂의 밀도는 임계점 근처에서 급변한다. 오른쪽: 의사임계점에서 비열이 치솟는다.²⁶

8 MPa에서 CO₂의 밀도는 30 °C에서 702 kg/m³인데 40 °C에서는 278 kg/m³다. **10 K 사이에 2.5배가 변한다**. 압축기 입구를 이 급변 구간의 아래쪽(밀도가 큰 쪽)에 두는 것이 sCO₂ 사이클의 핵심이다.

표 10.1 — 동력 변환 사이클 비교.²⁷

사이클	열원 온도	대표 효율	특징
랭킨 (PWR)	285 °C	33 %	검증됨, 저온
랭킨 (초초임계 화력)	600 °C	45 %	고온 재료 필요
헬륨 브레이턴 (HTGR)	850 °C	45~48 %	기기가 거대
sCO ₂ 재압축	500~700 °C	45~50 %	터보기계가 매우 작다

예제: 왜 sCO₂ 터빈은 그렇게 작은가

같은 출력을 내려면 필요한 것은 **부피 유량**이다.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

- 증기 터빈 마지막 단: 5 kPa 증기 밀도 0.0355 kg/m³

²⁶ 그림 출처: CoolProp(CO₂)과 IAPWS-IF97(물)로 직접 계산. 물 곡선은 비교를 위해 온도축을 340 °C 만큼 이동시켰다.

²⁷ 표 각주: sCO₂의 가장 큰 매력은 효율보다 **크기**다. 같은 출력의 증기 터빈 대비 부피가 한 자릿수 작아, 발전 건물과 SMR 통합 배치에 유리하다.

- sCO₂ 터빈 출구: 8 MPa CO₂ 밀도 약 200 kg/m³

밀도가 약 **5,600 배** 차이 난다. 같은 질량유량이라면 부피 유량도 그만큼 차이 나고, 유로 단면적과 날개 크기가 그에 비례한다. 이것이 sCO₂ 터빈이 손바닥만 한 크기로 수십 MW 를 내는 이유다.

▶ **실무 팁** sCO₂ 사이클 계산에서 **이상기체 가정을 쓰면 안 된다**. 임계점 근처는 압축인자(compressibility factor) Z 가 0.2~0.3 까지 떨어진다(11 장). 반드시 실제 유체 상태식(Span-Wagner, CoolProp/REFPROP)을 써야 하고, 특히 **압축기 입구 상태에서 몇 도만 어긋나도 결과가 크게 달라진다**. 논문의 sCO₂ 효율을 비교할 때는 압축기 입구 온도·압력이 무엇인지부터 확인하자.

■ **원자력 연계 4 세대** 노형과 동력 사이클의 조합은 열원 온도로 정해진다. **SFR(500 °C)** 은 나트륨-물 반응 위험 때문에 물 대신 sCO₂ 를 쓰려는 연구가 활발하다. **HTGR(850 °C)** 은 헬륨 직접 브레이턴이 자연스럽지만 헬륨 터보기계 개발이 까다로워 증기 사이클로 후퇴한 사례도 많다. **MSR(700 °C)** 도 sCO₂ 가 유력하다. 그리고 **SMR** 에서는 효율보다 **기기 크기와 모듈화**가 중요할 수 있어, sCO₂ 의 소형성이 그 자체로 설계 이점이 된다. 다만 어느 조합이든 열교환기(중간 열교환기, 재생기)의 크기와 신뢰도가 실제 병목이며, 이는 「필수 열전달」 10 장의 문제로 돌아온다.

11 장 상태식과 실제 유체

Tier 2-3 · 이상기체는 언제 통하고 언제 배신하는가.

원리: 이상기체는 두 가지를 무시한다

이상기체 상태식은 분자에 **부피가 없고 서로 힘도 주고받지 않는다**고 가정한다.

$$pv = RT$$

이 가정은 밀도가 낮을 때(압력이 낮고 온도가 높을 때) 잘 맞는다. 밀도가 올라가면 두 효과가 살아난다.

- **분자 부피** → 실제 부피가 이상기체보다 크다 ($Z > 1$ 쪽으로)
- **인력** → 실제 부피가 작다 ($Z < 1$ 쪽으로)

두 효과의 경쟁을 하나의 수로 표현한 것이 **압축인자**다.

$$Z = \frac{pv}{RT}$$

$Z = 1$ 이면 이상기체다.

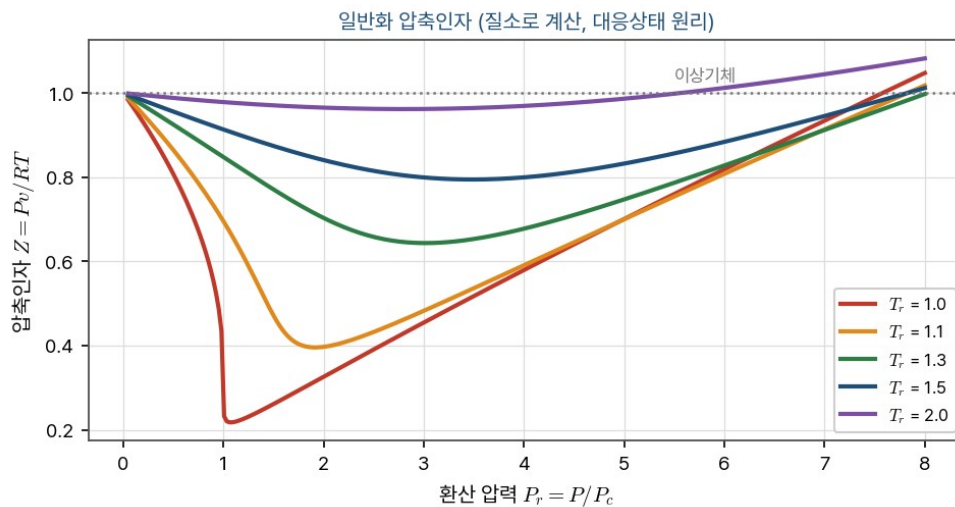


그림 11.1 — 일반화 압축인자 선도. 환산 온도가 1에 가까울수록 이상기체에서 크게 벗어난다.²⁸

대응상태 원리(principle of corresponding states)

임계점으로 정규화한 좌표에서는 물질이 달라도 Z 곡선이 대체로 겹친다.

$$T_r = \frac{T}{T_c}, p_r = \frac{p}{p_c}$$

판단 기준: $p_r \ll 1$ 이거나 $T_r > 2$ 이면 이상기체 가정이 무난하다. T_r 이 1~1.5 이고 p_r 이 1 근처면 오차가 수십 %에 이른다.

²⁸ 그림 출처: CoolProp(질소)으로 직접 계산. 대응상태 원리에 따라 환산 좌표로 그리면 물질이 달라도 곡선이 대체로 겹친다.

수식: 실제 유체 상태식의 계보

표 11.1 — 상태식의 계보.²⁹

상태식	형태	쓰임
이상기체	$p v = R T$	저압 기체, 손계산
반데르발스	$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R T$	개념 이해용
Redlich-Kwong, Peng-Robinson	3 차 상태식	화학공학, 혼합물
비리얼 전개	$Z = 1 + B/v + C/v^2 + \dots$	이론적 기반
다항 헬름홀츠 자유에너지	$a(T, \rho)$ 를 수십 항으로 맞춤	IAPWS-IF97, Span-Wagner

예제: 임계점 근처에서 물성이 미쳐 날뛰다

임계점 위에서 상변화는 사라지지만, 물성 변화가 사라지는 것은 아니다. 압력이 임계압보다 높아도 **특정 온도에서 밀도·비열이 급변하는 구간이 남는다**. 그 온도를 **의사임계온도**(pseudocritical temperature)라 부르며, 비열이 최대가 되는 지점으로 정의한다.

표 11.2 — 의사임계점.³⁰

유체	압력	의사임계온도	c_p 최댓값
CO ₂	8 MPa	34.7 °C	약 36 kJ/kg·K
CO ₂	10 MPa	45 °C	약 8 kJ/kg·K
물	25 MPa	약 385 °C	약 71 kJ/kg·K

이것이 왜 문제인가

「필수 열전달」과 「필수 유체역학」에서 배운 상관식은 대부분 **물성이 완만하게 변한다고** 전제한다. 의사임계점 근처에서는 그 전제가 무너진다.

- 밀도가 급변 → 부력이 강해져 **혼합대류**가 된다(「필수 유체역학」 6 장)
- c_p 가 급변 → Pr 이 급변 → **Dittus-Boelter** 가 안 맞는다
- 벽 근처와 벌크의 물성이 크게 달라 → **열전달 열화**(heat transfer deterioration)가 실제로 관측된다

그래서 초임계압 경수로(SCWR)와 sCO₂ 계통의 열수력은 아직 확립된 상관식이 없고, 실험과 CFD 가 계속되는 영역이다.

²⁹ 표 각주: 원자력·에너지 분야의 정밀 계산은 마지막 줄을 쓴다. IAPWS-IF97 은 물, Span-Wagner 는 CO₂ 의 표준이며, CoolProp-REFPROP 같은 라이브러리가 이를 구현한다. **손으로 3 차 상태식을 푸는 시대는 지났지만, Z 로 자릿수를 확인하는 습관은 여전히 유용하다.**

³⁰ 표 각주: CoolProp 과 IAPWS-IF97 로 직접 계산. 임계압에 가까울수록 피크가 날카롭고, 압력이 올라가면 피크가 완만해지면서 고온으로 이동한다. 물의 정상 c_p 가 4.2 kJ/kg·K 임을 생각하면 71 은 17 배다.

예제: 이상기체 가정을 언제 버려야 하나

㉠ HTGR의 헬륨 — 7 MPa, 500 °C

헬륨의 임계점은 0.227 MPa, 5.2 K 이므로 $T_r = 773/5.2 = 149$, $p_r = 7/0.227 = 31$.

T_r 이 압도적으로 크므로 $Z = 1.011$. **이상기체로 봐도 된다.** 헬륨 사이클 계산이 손으로도 되는 이유다.

㉡ sCO₂ 압축기 입구 — 8 MPa, 32 °C

$T_r = 305/304 = 1.003$, $p_r = 8/7.38 = 1.08$. **최악의 위치다.** $Z = 0.213$ 이다. 이상기체로 계산하면 밀도를 약 5 배 틀린다.

㉢ PWR 2 차측 증기 — 6.9 MPa 포화증기

$T_r = 558/647 = 0.86$ 인데 이미 포화 영역이므로 상태식이 아니라 **증기표를 쓴다.** 애초에 이상기체가 논의 대상이 아니다.

▶ **실무 팁** 물성 라이브러리를 쓸 때 **입력 상태가 유효 범위 안인지 확인**해야 한다. IAPWS-IF97 은 0.611 Pa~100 MPa, 273.15~2273.15 K 에서 정의되고, 영역 경계 근처에서 미분값이 불연속일 수 있다. CFD 에서 물성을 테이블로 보간할 때 이 불연속이 수렴을 방해하는 일이 흔하다. 의사임계 구간을 지나는 계산이라면 **테이블 격자를 그 근처에서 조밀하게** 만들어야 한다.

■ **원자력 연계** 실제 유체 효과는 노형마다 나타나는 자리가 다르다. 경수로로는 증기표만 잘 쓰면 되고, **가스로**는 이상기체로도 거의 충분하다. 문제는 **초임계 계통**이다. SCWR 은 물을 25 MPa 로 올려 상변화 없이 350 °C 에서 500 °C 까지 데우겠다는 개념인데, 그 경로가 정확히 의사임계점을 관통한다. **열전달 열화가 일어나면 피복관 온도가 예측보다 수백 도 높아질 수 있어**, 이 현상의 예측이 SCWR 실현의 핵심 난제로 남아 있다. sCO₂ 사이클도 압축기 입구가 같은 구간에 있어, 사이클 효율 계산의 불확실도가 여기에 집중된다.

12 장 원자로 계통의 열역학

Tier 3 · 앞의 열한 장을 발전소 한 대에 모아 본다.

원리: 3,000 이 1,000 이 되기까지

이 책의 마지막 질문은 처음의 질문과 같다. **3,000 MW 의 열이 왜 1,000 MW 의 전기가 되는가.**

3,000 MWt PWR의 에너지 수지

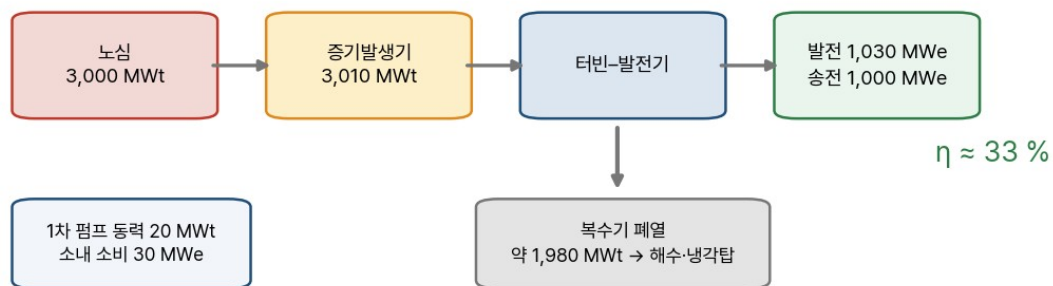


그림 12.1 — 3,000 MWt PWR의 에너지 수지.³¹

각 단계를 이제 설명할 수 있다.

표 12.1 — PWR 에너지 수지.³²

단계	값	근거
노심 열출력	3,000 MWt	핵분열
1차 펌프 입열	+20 MWt	펌프 일이 결국 열이 된다
증기발생기 전달	3,010 MWt	나머지는 계통 열손실
총 발전	1,030 MWe	$\eta = 34\%$ (8·9 장)
소내 소비	-30 MWe	순환수 펌프, 급수 펌프 구동 등
송전	1,000 MWe	
복수기 폐열	약 1,980 MWt	제 2 법칙이 강제 (5 장)

왜 이 효율에 갇혀 있는가

효율의 상한을 순서대로 짚아보면 원자력의 구조가 드러난다.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{연료} \rightarrow \text{냉각재} & & \text{SG 온도차} & & \text{랭킨 형상} & & \text{기기 비가역} \\
 76\% & \rightarrow & 46\% & \rightarrow & 45\% & \rightarrow & 38\% \rightarrow 34\%
 \end{array}$$

³¹ 그림 출처: 대표적인 1,000 MWe 급 PWR 기준의 개략 수치. 실제 값은 발전소마다 다르다.

³² 표 각주: “1차 펌프 일이 열이 된다”는 점이 재미있다. 펌프가 물에 한 일은 마찰로 흩어져 결국 냉각재를 데운다. 그래서 원자로 열평형 계산에서는 이를 **입열**로 센다.

표 12.2 — 효율이 깎여나가는 순서.³³

단계	효율	잃은 이유
연료 중심(1,014 °C) 기준 카르노	76 %	—
냉각재(310 °C) 기준 카르노	46 %	연료→냉각재 700 K 온도차
증기(285 °C) 기준 카르노	45 %	증기발생기 온도차
이상 랭킨	38 %	급수를 저온부터 데운다
실제 랭킨 + 재생·MSR	34 %	터빈·펌프 비가역

교훈은 명확하다. 터빈을 개선해서 얻을 수 있는 것은 몇 %포인트뿐이다. 큰 이득은 열원 온도를 올릴 때만 나온다.

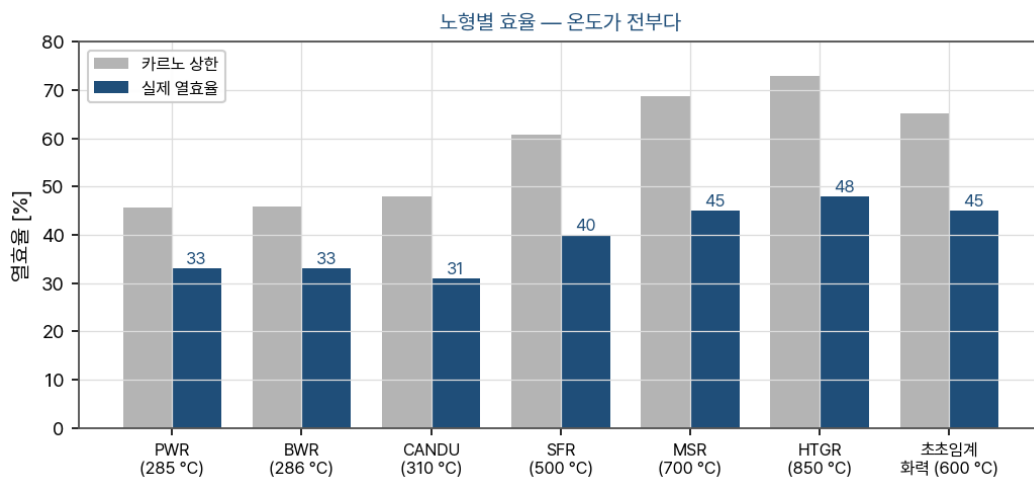


그림 12.2 — 노형별 카르노 상한과 실제 효율.³⁴

붕괴열: 정지해도 끝나지 않는 열역학

원자로가 특별한 이유는 정지 버튼을 눌러도 열이 계속 나온다는 점이다. 핵분열 생성물의 붕괴열이다.

$$\frac{P_d(t)}{P_0} \approx 0.066 \left[t^{-0.2} - (t+t_0)^{-0.2} \right] \text{ (Wigner-Way 근사)}$$

표 12.3 — 붕괴열의 감쇠.³⁵

정지 후 경과	붕괴열 (정격 대비)	3,000 MWt 기준
1 초	약 6 %	180 MW
1 분	약 3 %	90 MW
1 시간	약 1 %	30 MW

³³ 표 각주: 복수기 30 °C 기준. 가장 큰 손실(30 %포인트)이 첫 단계에서 일어난다는 점이 핵심이다. 이는 UO₂의 낮은 열전도도 때문이며(『필수 열전달』 2·4 장), 열전달의 문제가 곧 열역학의 손실이 되는 대표적 사례다.

³⁴ 그림 출처: 직접 계산(카르노) 및 문헌 대표값(실제 효율). 복수기 30 °C 기준.

³⁵ 표 각주: 정확한 값은 ANS-5.1 표준 곡선을 쓰며, 연소 이력과 노형에 따라 달라진다. 여기서는 자릿수 감각을 위한 대표값이다.

정지 후 경과	붕괴열 (정격 대비)	3,000 MWt 기준
1 일	약 0.4 %	12 MW
1 년	약 0.05 %	1.5 MW

정지 1 시간 뒤에도 30 MW 다. 아파트 단지 하나를 데울 수 있는 열이 계속 나온다. 이 열을 빼내지 못하면 노심이 손상된다. 그래서 원자력 안전의 상당 부분이 “붕괴열 제거”라는 열역학·열전달 문제로 귀결된다.

「필수 열전달」 8 장에서 계산한 자연순환 제거 능력(약 60 MW)과 비교해 보자. **정지 후 한 시간이면 자연순환만으로 감당 가능한 영역에 들어간다.** 피동안전계통의 설계 근거가 이 두 숫자의 만남이다.

열역학이 원자력에 남기는 세 가지 질문

① **폐열을 어떻게 할 것인가** 2,000 MW 를 바다나 대기로 버려야 한다. 부지, 취수·배수 설계, 온배수 환경 영향이 여기서 나온다. 냉각탑을 쓰면 부지 제약은 줄지만 효율이 떨어지고 물을 소비한다.

② **온도를 올릴 것인가** 효율의 유일한 큰 손잡이다. 하지만 온도를 올리면 재료·부식·안전 문제가 동시에 커진다. 4 세대 노형이 전부 여기에 걸려 있다.

③ **전기만 팔 것인가** 7 장의 엑서지 관점에서는 저온 폐열도 자원이다. 지역난방, 담수화, 수소 생산과의 결합이 총 에너지 이용률을 70 % 이상으로 끌어올릴 수 있다. **SMR 이 수요지 근처에 놓일 수 있다는 점이 열역학적으로 의미 있는 이유가 이것이다.**

▶ **실무 팁** 발전소 효율을 인용할 때 **어느 효율인지 밝혀야 한다.** 총효율(gross, 발전단)과 순효율(net, 송전단)이 2~3 %포인트 다르고, 열출력 기준인지 총 열입력 기준인지에 따라서도 달라진다. 논문에서 “PWR 효율 33 %”와 “34 %”가 섞여 나오는 이유의 대부분이 이 정의 차이다. 자신의 계산에서는 **경계를 그림으로 그려놓고 시작하는 것이 가장 확실하다.** 1 장의 이야기로 돌아오는 셈이다.

■ **원자력 연계** 이 책의 결론을 세 문장으로 정리한다. 첫째, **원자력의 효율은 연료가 아니라 온도가 정한다.** 카르노는 열원이 무엇인지 묻지 않는다. 둘째, **가장 큰 엑서지 손실은 터빈이 아니라 연료에서 냉각재로 열이 건너오는 과정에서 일어난다.** UO_2 의 낮은 열전도도가 열역학적 손실로 나타난다. 셋째, **원자로는 꺼도 열이 나오는 유일한 열기관이다.** 그래서 열역학의 마지막 장은 늘 안전으로 이어진다.

부록 A — 기호와 단위

표 A.1 — 이 책에서 쓰는 기호.³⁶

기호	이름	단위	처음 나오는 곳
c_p, c_v	정압·정적 비열	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	3 장
h	비엔탈피	kJ/kg	4 장
h_f, h_g, h_{fg}	포화액·포화증기·증발 엔탈피	kJ/kg	2 장
k	비열비 c_p/c_v	—	3 장
$\dot{m}$	질량유량	kg/s	4 장
p	압력	MPa, kPa	1 장
p_r, T_r	환산 압력(reduced pressure)-온도	—	11 장
q, Q	비열량, 열량	$\text{kJ/kg}, \text{kJ}$	3 장
r_p	압력비	—	10 장
R	기체상수	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	3 장
s	비엔트로피	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	5 장
S_{gen}	엔트로피 생성	kJ/K	5 장
T	절대온도	K	1 장
T_0	환경(사수) 온도	K	7 장
u	비내부에너지	kJ/kg	3 장
v	비체적	m^3/kg	1 장
w, W	비일, 일	$\text{kJ/kg}, \text{kJ}$	3 장
x	건도	—	2 장
X, ψ	엑서지, 비유동엑서지	$\text{kJ}, \text{kJ/kg}$	7 장
y	추기 비율	—	9 장
Z	압축인자 $p v / R T$	—	11 장
ε	재생기 유효도	—	10 장

³⁶ 표 각주: 소문자는 단위 질량당 값(비상태량), 대문자는 전체 값이다. 「필수 열전달」·「필수 유체역학」과 같은 규약이다.

기호	이름	단위	처음 나오는 곳
η	열효율	—	5 장
η_T, η_P	터빈·펌프 등엔트로피 효율	—	6 장
η_{II}	제 2 법칙 효율	—	7 장

약어와 자주 쓰는 첨자

표 A.2 — 첨자와 약어.³⁷

기호	뜻
f	포화액 (saturated fluid)
g	포화증기 (saturated gas)
$f g$	포화증기 - 포화액
s	등엔트로피 (isentropic)
sat	포화
H, C	고온·저온 열원
MSR	Moisture Separator Reheater (습분분리재열기)
TTD	Terminal Temperature Difference (터미널 온도차)
sCO ₂	초임계 이산화탄소
HTGR	고온가스로
SFR	소듐냉각고속로
SCWR	초임계압 경수로
IAPWS-IF97	물·증기 물성 국제 표준식

³⁷ 표 각주: MSR 은 이 책에서 습분분리재열기를 뜻하며, 용융염원자로(Molten Salt Reactor)의 MSR 과 혼동하지 말 것. 문맥으로 구분한다.

부록 B — 증기표 (발체)

전부 IAPWS-IF97 로 직접 계산했다. 이 책의 예제를 검산하기에 충분한 범위만 실었다.

B.1 포화 물성 (압력 기준)

표 B.1 — 물의 포화 물성. h [kJ/kg], s [kJ/kg·K], v [m³/kg].³⁸

p [MPa]	T_{sat} [°C]	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g	v_f	v_g
0.005	32.88	137.8	2,423.0	2,560.8	0.4763	8.3939	0.0010 05	28.186
0.010	45.81	191.8	2,392.1	2,583.9	0.6492	8.1489	0.00101 0	14.671
0.10	99.61	417.4	2,257.5	2,674.9	1.3026	7.3588	0.0010 43	1.6940
1.0	179.89	762.7	2,014.4	2,777.1	2.1384	6.5850	0.00112 7	0.1943
2.0	212.38	908.6	1,889.8	2,798.4	2.4470	6.3392	0.00117 7	0.0996
5.0	263.94	1,154.5	1,639.7	2,794.2	2.9207	5.9737	0.0012 86	0.0394
6.9	284.86	1,262.3	1,511.6	2,773.9	3.1130	5.8219	0.0013 49	0.0278
10.0	311.00	1,407.9	1,317.6	2,725.5	3.3603	5.6159	0.0014 53	0.0180
15.5	344.79	1,629.9	966.4	2,596.2	3.7150	5.2789	0.0016 82	0.0098
20.0	365.75	1,827.1	584.3	2,411.4	4.0154	4.9299	0.0020 39	0.0059

³⁸ 표 각주: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 임계점은 22.064 MPa·373.95 °C 이며 그곳에서 h_{fg} 가 0 이 된다. 20 MPa 에서 이미 h_{fg} 가 584 로 떨어진 것에서 그 접근이 보인다.

B.2 과열증기 (6.9 MPa)

표 B.2 — 6.9 MPa 과열증기.³⁹

T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg·K]	v [m³/kg]
284.86 (포화)	2,773.9	5.8219	0.02780
300	2,844.7	5.9472	0.03008
350	3,019.6	6.2405	0.03588
400	3,161.0	6.4590	0.04061
450	3,289.6	6.6433	0.04488
500	3,412.4	6.8075	0.04890
550	3,532.5	6.9580	0.05275

B.3 압축액 (15.5 MPa, PWR 1 차 계통)

표 B.3 — 15.5 MPa 압축액.⁴⁰

T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg·K]	ρ [kg/m³]
260	1,133.8	2.8572	796.8
280	1,232.6	3.0391	764.3
300	1,337.6	3.2255	726.5
310	1,393.6	3.3223	704.8
320	1,452.9	3.4231	680.2
340	1,589.7	3.6498	616.0

B.4 기체 물성 (이상기체 근사)

표 B.4 — 이상기체 물성 (300 K 부근).⁴¹

기체	R [kJ/kg·K]	c_p [kJ/kg·K]	c_v	k
공기	0.287	1.005	0.718	1.400
헬륨	2.077	5.193	3.116	1.667
이산화탄소	0.1889	0.846	0.657	1.289

³⁹ 표 각주: 원자력은 이 표를 쓸 일이 거의 없다. 포화증기까지가 전부이기 때문이다(8 장). 화력발전과의 비교, 그리고 9 장의 재열 계산에 참고용으로 실었다.

⁴⁰ 표 각주: 이 압력의 포화온도는 344.79 °C 다. 340 °C 가 포화에 매우 가까워 밀도가 급격히 떨어지는 것이 보인다. 4 장의 노심 에너지 수치 계산에 쓴다.

⁴¹ 표 각주: 헬륨은 단원자 분자라 $k = 1.667$ 이고, 이것이 브레이턴 사이클(Brayton cycle)에서 유리하게 작용한다 (10 장). 다만 c_p 가 커서 같은 열량에 필요한 유량이 작은 대신, 밀도가 낮아 부피 유량은 크다.

기체	R [kJ/kg·K]	c_p [kJ/kg·K]	c_v	k
질소	0.2968	1.039	0.743	1.400
수증기 (저압)	0.4615	1.872	1.410	1.327

B.5 임계점과 상수

표 B.5 — 임계점.⁴²

물질	T_c [°C]	p_c [MPa]
물	373.95	22.064
이산화탄소	30.98	7.377
헬륨	-267.95	0.227
질소	-146.96	3.396

표 B.6 — 자주 쓰는 상수.⁴³

상수	값
물의 삼중점	0.01 °C, 611.7 Pa
표준 대기압	101.325 kPa
절대영도	-273.15 °C
CO ₂ 8 MPa 의사임계온도	34.7 °C
물 25 MPa 의사임계온도	약 385 °C

⁴² 표 각주: CO₂의 임계온도가 상온 근처라는 사실이 sCO₂ 사이클의 출발점이다(10 장). 헬륨은 임계온도가 절대영도 근처라 어떤 실용 조건에서도 이상기체에 가깝다.

⁴³ 표 각주: 의사임계온도는 해당 압력에서 c_p 가 최대가 되는 온도로, CoolProp-IAPWS로 직접 계산했다(11 장).

부록 C — 관계식 요약

C.1 기본 정의

표 C.1 — 상태량 관계.⁴⁴

항목	식
엔탈피	$h = u + p v$
건도	$x = m_g / m_{\text{total}}$
포화 혼합물 상태량	$y = y_f + x y_{fg} \quad (y = v, h, s, u)$
압축액 근사	$h \approx h_f(T), \text{ 더 정확히 } h_f(T) + v_f [p - p_{\text{sat}}(T)]$
열평형 건도	$x_e = (h - h_f) / h_{fg} \quad (\text{음수} \cdot 1 \text{ 초과 가능})$

C.2 제 1 법칙

표 C.2 — 제 1 법칙.⁴⁵

계	식
닫힌계	$Q - W = \Delta U$
경계일	$W = \int p dV$
정상유동 (일반)	$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} [\Delta h + \Delta ke + \Delta pe]$
정상유동 (실무)	$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \Delta h$
터빈	$\dot{W} = \dot{m} (h_1 - h_2)$
펌프 (액체)	$w = v (p_2 - p_1) / \eta_P$
교축	$h_1 = h_2$
열교환기	$\dot{m}_h (h_{h,1} - h_{h,2}) = \dot{m}_c (h_{c,2} - h_{c,1})$

⁴⁴ 표 각주: 건도는 포화 영역에서만 정의된다. 열평형 건도는 편의적 지표로 그 범위를 벗어난다(2 장).

⁴⁵ 표 각주: 터빈·펌프·노즐은 단열($\dot{Q} \approx 0$), 열교환기·노심은 일이 없음($\dot{W} = 0$)이 표준 가정이다.

C.3 이상기체

표 C.3 — 이상기체 관계.⁴⁶

항목	식
상태식	$p v = R T$
비열 관계	$c_p - c_v = R, k = c_p / c_v$
내부에너지·엔탈피	$\Delta u = c_v \Delta T, \Delta h = c_p \Delta T$
엔트로피 변화	$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$
등엔트로피 관계	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$
폴리트로픽 일	$W = (p_1 V_1 - p_2 V_2) / (n - 1)$

C.4 제 2 법칙과 엑서지

표 C.4 — 제 2 법칙.⁴⁷

항목	식
카르노 효율	$\eta = 1 - T_C / T_H$ (절대온도)
엔트로피 정의	$dS = (\delta Q / T)_{\text{rev}}$
엔트로피 균형	$\Delta S = \int \delta Q / T + S_{\text{gen}}, S_{\text{gen}} \geq 0$
가역일 손실 (구이-스토돌라)	$W_{\text{lost}} = T_0 S_{\text{gen}}$
열의 엑서지	$\psi_Q = Q (1 - T_0 / T)$
유동 엑서지	$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$
제 2 법칙 효율	$\eta_{\text{II}} = \text{얻은 엑서지} / \text{투입 엑서지}$
등엔트로피 효율 (터빈)	$\eta_T = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2s})$
등엔트로피 효율 (펌프)	$\eta_P = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1)$

⁴⁶ 표 각주: 물과 상변화가 있는 유체에는 절대 쓰지 말 것. 반드시 증기표를 쓴다.

⁴⁷ 표 각주: 터빈과 펌프의 효율 정의는 분자·분모가 뒤집혀 있다. 둘 다 1 보다 작게 만들기 위해서다(6 장).

C.5 사이클

표 C.5 — 사이클 관계.⁴⁸

사이클	효율
랭킨	$\eta = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$
브레이턴 (이상)	$\eta = 1 - r_p^{-(k-1)/k}$
재생기 유효도	$\varepsilon = (T_{2r} - T_2) / (T_4 - T_2)$
개방형 급수가열기 추기율	$y = \frac{h_{\text{sat}} - h_{\text{급수}}}{h_{\text{추기}} - h_{\text{급수}}}$
Baumann 법칙	습분 1 %마다 터빈 효율 약 1 % 감소

C.6 실제 유체

표 C.6 — 실제 유체.⁴⁹

항목	식
압축인자	$Z = p v / R T$
환산 좌표	$T_r = T / T_c, p_r = p / p_c$
이상기체 판정	$p_r \ll 1$ 또는 $T_r > 2$ 이면 안전
반데르발스	$(p + a/v^2)(v - b) = R T$
의사임계온도	해당 압력에서 c_p 가 최대인 온도

⁴⁸ 표 각주: 랭킨 효율 계산에서 펌프 일을 빼먹지 말 것. 작지만 0.3 %포인트 정도 차이가 난다.

⁴⁹ 표 각주: 정밀 계산은 IAPWS-IF97(물), Span-Wagner(CO₂) 등 다항 헬름홀츠 상태식을 쓴다. Z 는 자릿수 확인용으로 유용하다.

부록 D — 연습문제 30 선

증기표는 부록 B 를 쓴다. 답을 가리고 먼저 풀어보길 권한다.

1~2 장 — 상태와 증기표

D.1 다음 중 상태량이 아닌 것은? (a) 엔탈피 (b) 일 (c) 비체적 (d) 엔트로피

답 (b) 일. 경로에 의존하므로 상태량이 아니다. 그래서 δW 로 쓴다.

D.2 6.9 MPa 에서 물의 포화온도는? 15.5 MPa 에서는?

답 284.86 °C 와 344.79 °C. 후자가 PWR 1차측이 끓지 않는 근거다.

D.3 1.0 MPa, 건도 0.9 인 습증기의 엔탈피는?

답 $h = 762.7 + 0.9 \times 2,014.4 = 2,575.7$ kJ/kg.

D.4 6.9 MPa, $h = 2,000$ kJ/kg 인 물의 상태는? 건도는?

답 $h_f = 1,262.3 < 2,000 < h_g = 2,773.9$ 이므로 포화 혼합물.
 $x = (2,000 - 1,262.3) / 1,511.6 = 0.488$.

D.5 15.5 MPa·280 °C 압축액의 엔탈피를, 같은 온도 포화액으로 근사했을 때의 오차는?

답 정확값 1,232.6, 포화액 근사 1,236.7 kJ/kg. 오차 0.33 %. 대개 무시할 만하다.

D.6 임계점 위에서 액체와 기체를 구별할 수 없는 이유는?

답 압력을 올릴수록 포화액과 포화증기의 밀도 차가 줄어들고 임계점에서 0 이 되기 때문이다. h_{fg} 도 0 이 된다.

3~4 장 — 제 1 법칙

D.7 200 kPa 등압에서 기체가 0.2 에서 0.5 m³ 로 팽창했다. 경계일은?

답 $W = p \Delta V = 200 \times 0.3 = 60$ kJ.

D.8 교축 밸브를 지나면 압력이 떨어지는데 엔탈피는 그대로다. 무엇을 잃었나?

답 에너지는 보존되지만 **엑서지(일 능력)** 를 잃었다. 엔트로피가 생성됐기 때문이다(5·7 장).

D.9 2,500 MWt 노심, 유량 12,000 kg/s, 입구 295 °C·15.5 MPa 다. 출구 온도는?

답 $h_{in} = 1,310.6$, $h_{out} = 1,310.6 + 2,500,000 / 12,000 = 1,519.0$ kJ/kg → **330.3 °C**. 포화온도 344.8 °C 까지 14.5 K 여유.

D.10 D.9 에서 유량이 20 % 줄면 출구 온도는 어떻게 되나? 정성적으로 답하라.

답 Δh 가 1.25 배가 되므로 출구 온도가 크게 오른다. 포화 여유가 줄어 비등 위험이 커진다. **유량 상실 사고가 위험한 열역학적 이유다.**

D.11 6.9 MPa 증기발생기에 급수 225 °C 가 들어온다. 2,500 MWt 를 전달하면 증기 생산량은?

답 $h_{\text{feed}} = 967.9, h_g = 2,773.9 \text{ kJ/kg} \rightarrow \dot{m} = 2,500,000 / 1,806 = 1,384 \text{ kg/s}$.

D.12 터빈이 단열이라고 가정하는 이유는?

답 표면적 대비 유량이 커서 열손실이 전체 에너지의 1 % 미만이기 때문이다. 열교환기는 반대다.

5~7 장 — 제 2 법칙, 엔트로피, 엑서지

D.13 복수기 30 °C 기준으로 285 / 500 / 850 °C 열원의 카르노 효율은?

답 45.7 % / 60.8 % / 73.0 %. 4 세대 노형이 고온을 지향하는 이유가 이 표다.

D.14 여름에 복수기 온도가 30 에서 45 °C 로 오르면 285 °C 열원의 카르노 효율은?

답 45.7 % $\rightarrow$ 43.0 %. **2.7 %포인트 손해**. 실제 발전소에서 여름 출력이 떨어지는 이유다.

D.15 700 K 에서 320 K 으로 500 kJ 이 그냥 흘러갔다. 엔트로피 생성과 잃은 일은? ($T_0 = 293 \text{ K}$)

답 $S_{\text{gen}} = 500/320 - 500/700 = 0.848 \text{ kJ/K}$. $W_{\text{lost}} = T_0 S_{\text{gen}} = 293 \times 0.848 = 248 \text{ kJ}$.

D.16 PWR 에서 가장 큰 엑서지 파괴가 일어나는 곳은?

답 연료에서 냉각제로 열이 건너오는 과정(약 20/100). 700 K 의 온도차를 두고 열이 흐르기 때문이며, UO_2 의 낮은 열전도도가 근본 원인이다.

D.17 6.9 MPa 포화증기가 10 kPa 까지 팽창한다. $\eta_T = 0.88$ 일 때 출구 건도와 일은?

답 $h_{2s} = 1,841.7$ ($x_{2s} = 0.690$), $w = 0.88 \times 932.2 = 820.3 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 1,953.5 \rightarrow x_2 = \mathbf{0.737}$.

D.18 D.17 에서 실제 출구 건도가 등엔트로피보다 높다. 왜인가?

답 비가역으로 잃은 일이 증기 안에 열로 남기 때문이다(재가열 효과). 효율은 나빠졌지만 습분은 덜해졌다.

D.19 1,000 kJ 의 열이 558 K / 873 K / 1,123 K 에 있을 때 각각의 엑서지는? ($T_0 = 303 \text{ K}$)

답 457 / 653 / 730 kJ. 같은 열량이어도 온도가 높으면 더 값지다.

8~10 장 — 사이클

D.20 랭킨 사이클에서 증기를 응축시킨 뒤 펌프로 압축하는 이유는?

답 액체 압축이 증기 압축보다 압도적으로 싸기 때문이다. 비체적이 약 20,000 분의 1 이라 펌프 일이 터빈 일의 1 % 수준이다.

D.21 5 MPa 포화증기 $\rightarrow$ 5 kPa, $\eta_T = 0.85, \eta_p = 0.80$ 인 랭킨 사이클의 효율과 출구 건도는?

답 $h_1 = 2,794.2, x_{2s} = 0.694, x_2 = 0.755, \eta = \mathbf{31.0 \%}$. 6.9 MPa 일 때(32.0 %)보다 낮다.

D.22 D.21 과 본문 8 장(6.9 MPa, 32.0 %)을 비교하면 무엇을 알 수 있나?

답 증기 압력을 올리면 효율이 오른다. 다만 상승폭이 크지 않고(1 %포인트), 출구 건도는 오히려 나빠진다(0.755 → 0.737).

D.23 6.9 MPa 사이클에서 복수기 압력을 5 에서 20 kPa 로 올리면 효율은?

답 32.0 % → **28.7 %**. 복수기 포화온도가 32.9 에서 60.1 °C 로 오르기 때문이다. 복수기 진공도가 효율에 가장 민감한 변수다.

D.24 원자력에서 화력처럼 재열(550 °C)을 할 수 없는 이유는?

답 열원이 325 °C 뿐이라 그보다 높은 온도로 데울 수 없다. 그래서 습분분리재열기(MSR)로 285 °C 생증기를 써서 조금만 과열시킨다.

D.25 헬륨($k = 1.667$) 브레이턴 사이클의 이상 효율을 압력비 2 / 4 / 8 에서 구하라.

답 24.2 % / 42.6 % / 56.5 %. 다만 실제로는 압축기·터빈 손실 때문에 재생기 없이는 이 값에 한참 못 미친다.

D.26 sCO₂ 터빈이 증기 터빈보다 훨씬 작은 이유는?

답 작동 유체 밀도가 수천 배 크기 때문이다. 5 kPa 증기 0.036 kg/m³ 대 8 MPa CO₂ 약 200 kg/m³. 부피 유량이 그만큼 작아 유로와 날개가 작아진다.

11~12 장 — 실제 유체, 계통

D.27 8 MPa·32 °C CO₂ 를 이상기체로 보면 비체적은? 실제값(0.001533 m³/kg)과 비교하면?

답 $v = RT/p = 0.1889 \times 305.15 / 8,000 = 0.007205$ m³/kg. 실제의 **4.7 배**다. $Z = 0.213$ 이므로 당연한 결과.

D.28 헬륨을 7 MPa·500 °C 에서 이상기체로 봐도 되는가?

답 $T_r = 773 / 5.2 = 149$ 로 압도적으로 크다. $Z = 1.011$ 이므로 **써도 된다**.

D.29 3,000 MWt 노심에서 효율 34 %일 때 총 발전량과 복수기 폐열은?

답 발전 1,020 MWe, 폐열 약 1,980 MWt. 이 폐열을 바다나 냉각탑으로 버려야 한다.

D.30 정지 1 시간 뒤 붕괴열이 정격의 1 %다. 3,000 MWt 노심에서 몇 MW 인가? 「필수 열전달」 8 장의 자연순환 제거 능력(약 60 MW)과 비교하면?

답 30 MW. 자연순환 능력의 절반 수준이므로, 정지 후 한 시간이면 피동 냉각만으로 감당 가능한 영역에 들어간다. 피동안전계통 설계의 근거다.

부록 E — 용어집

표 E.1 — 용어집.⁵⁰

용어	뜻
강성 상태량	질량과 무관한 상태량. T, p, v, h, s 등.
건도	포화 혼합물 중 증기의 질량 비율. 포화 영역에서만 정의된다.
검사체적	공간에 고정된 열린계. 원자력 계통 계산의 기본 단위.
경계일	계의 경계가 움직여 하는 일. p - V 선도의 면적.
과열증기	포화온도보다 높은 온도의 증기.
교축	밸브·오리피스를 지나며 압력만 떨어지는 과정. $h_1 = h_2$.
구이-스토돌라 정리	잃은 일 = $T_0 S_{\text{gen}}$. 엔트로피 생성을 일 손실로 환산한다.
급수가열기	터빈 추기로 급수를 데워 열 공급 평균 온도를 올리는 장치.
대응상태 원리	환산 좌표에서 물질이 달라도 Z 곡선이 대체로 겹친다는 원리.
등엔트로피 효율	이상(단열 가역) 대비 실제 성능의 비. 터빈·펌프·노즐의 성적표.
랭킨 사이클	증기 동력 사이클. 원자력 발전의 본체.
브레이턴 사이클	기체 동력 사이클. 가스터빈·HTGR·sCO ₂ 의 뼈대.
비가역성	마찰·유한 온도차 열전달·혼합·교축 등 엔트로피를 생성하는 요인.
상태 공준	단순 압축성 물질의 상태는 독립적인 강성 상태량 두 개로 정해진다.
시성 상태량	질량에 비례하는 상태량. m, V, U, H, S .
엑서지	주어진 환경에 대해 최대로 뽑을 수 있는 일. 에너지의 '등급'.
엔탈피	$h = u + pv$. 흐르는 유체가 실어 나르는 에너지.
엔트로피 생성	비가역 정도의 정량 지표. 항상 0 이상.

⁵⁰ 표 각주: 우리말 표기는 대한기계학회 및 한국원자력학회 용어를 우선으로 했다.

용어	뜻
열병합	발전과 열 공급을 함께 하는 것. 총 에너지 이용률을 크게 높인다.
열평형 계산	급수·증기 엔탈피와 유량으로 원자로 열출력을 측정하는 방법.
의사임계온도	초임계 압력에서 c_p 가 최대가 되는 온도. 물성이 급변한다.
이상기체	분자 부피와 인력을 무시한 모델. $p v = R T$.
임계점	포화액과 포화증기가 구별되지 않는 점. 물은 22.064 MPa·373.95 °C.
제 2 법칙 효율	투입 엑서지 대비 얻은 엑서지. 개선 여지를 보여준다.
준정적 과정	매 순간 평형에 가깝다고 보는 이상화. 경로를 그릴 수 있게 해준다.
압축액	같은 압력의 포화온도보다 차가운 액체. PWR 1 차측이 여기 있다.
압축인자	$Z = p v / R T$. 이상기체에서 벗어난 정도.
재가열 효과	비가역 손실이 열로 남아 팽창 후 건도가 오히려 높아지는 현상.
재생기	브레이턴 사이클에서 터빈 출구 열로 압축기 출구를 데우는 열교환기.
카르노 효율	두 열원 사이에서 가능한 최대 효율. $1 - T_C / T_H$.
폴리트로픽 과정	$p V^n = \text{일정}$. n 을 바꾸면 등압·등온·단열·등적이 모두 나온다.
포화 혼합물	액체와 증기가 공존하는 상태. T 와 p 가 독립이 아니다.
Baumann 법칙	습분 1 %마다 터빈 효율 약 1 % 감소.
MSR (습분분리재열기)	고압·저압 터빈 사이에서 물을 걸러내고 재열하는 원자력 고유 장치.
TTD	터미널 온도차. 급수가열기 출구와 추기 포화온도의 차.

다음에 읽을 것

1. 정식 교과서 — Cengel & Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach* 또는 Moran 외, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 이 책 1~10 장의 내용이 훨씬 상세하고 연습문제가 풍부하다.

2. **엑서지 심화** — Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*. 7 장의 관점을 끝까지 밀고 간다.
 3. **동력 사이클** — El-Wakil, *Powerplant Technology*. 원자력 발전소 2 차 계통을 다룬 고전이다.
 4. **원자력 계통** — Todreas & Kazimi, *Nuclear Systems I*. 이 책 12 장 이후를 제대로 배우려면 이 책이다.
 5. **물성** — IAPWS 공식 문서, CoolProp 문서. 11 장의 상태식을 실제로 쓰려면 필요하다.
 6. **같은 시리즈** — 「필수 유체역학」과 「필수 열전달」. 이 책이 정한 상태와 경계조건이 그곳에서 속도장과 온도장이 된다.
-

3 부작을 마치며

세 권을 한 문장씩으로 요약하면 이렇다.

- **열역학** — 에너지는 보존되지만 등급이 있고, 그 등급을 정하는 것은 온도다.
- **유체역학** — 유동은 결국 벽 근처의 얇은 층이 지배하고, 그 층을 다루는 방법이 근사의 계보다.
- **열전달** — 열은 가장 큰 저항이 정하는 속도로 흐르고, 원자로에서 그 저항은 연료 안에 있다.

세 문장이 하나의 그림에서 만난다. 연료 중심 $1,014\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 열이 냉각재로 건너오면서 카르노 효율 76 %가 46 %로 떨어지고(열역학), 그 온도차를 만드는 것은 UO_2 의 낮은 열전도도이며(열전달), 그 열을 실어 나르는 물은 부수로에서 $\text{Re } 5 \times 10^5$ 의 난류로 흐른다(유체역학). 하나의 연료봉을 세 과목이 각자의 언어로 설명하고 있는 것이다.

▶ **실무 팁** 세 권을 다 읽었다면 이제 할 일은 하나다. 자기 연구 주제를 세 과목의 언어로 각각 설명해 보는 것. “내 연구는 열역학적으로 무엇을 개선하려는 것인가, 유체역학적으로 무엇이 병목인가, 열전달 관점에서 어느 저항을 다루는가.” 이 세 문장을 쓸 수 있으면 기본기는 갖춘 것이다.