



필수 열전달

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 첫 권.....	5
난이도 표시.....	5
장마다 반복되는 여섯 칸.....	5
준비물.....	6
감각 잡기 — 열전달을 몸으로 이해하기.....	7
1. 같은 60 °C 인데 왜 금속은 데이고 나무는 안 데는가.....	7
2. 외워두면 평생 쓰는 열 개의 숫자.....	7
3. 열은 물처럼 흐른다 — 그리고 병목이 전부다.....	8
4. 시간 감각: 두께의 제곱.....	9
5. 복사는 200 °C 부터 참전한다.....	9
6. 자주 하는 착각 다섯 가지.....	9
1 장 열전달 지도 — 열역학이 못 하는 일.....	11
원리: 열역학은 “얼마나”, 열전달은 “얼마나 빨리”.....	11
수식: 세 개의 법칙.....	11
헷갈리는 세 기호.....	12
예제: 연료 중심에서 냉각재까지, 700 K 을 나눠 갖기.....	12
2 장 전도의 기본 — 푸리에 법칙과 열저항.....	14
원리: 열전도도와 열확산계수(thermal diffusivity)는 다른 이야기다.....	14
수식: 세 가지 형상, 세 가지 온도 곡선.....	14
열저항: 전기 회로처럼 생각하기.....	15
예제: 피복관에서 25 K 이 떨어지는 이유.....	15
3 장 열저항 회로와 핀.....	17
원리: 가장 큰 저항이 전부를 정한다.....	17
수식: 총괄 열전달계수 U.....	17
접촉 열저항.....	18
예제: 핀은 언제 도움이 되는가.....	18
4 장 발열이 있는 전도 — 핵연료봉 온도분포.....	20
원리: 열이 안에서 만들어지면 곡선이 휜다.....	20
수식: 발열항이 붙은 전도 방정식.....	20
형상별 정리.....	20
예제: 연료 중심 온도 1,014 °C 를 손으로 만들기.....	21
5 장 비정상 전도 — 얼마나 빨리 반응하는가.....	22
원리: 두 개의 무차원수가 전부다.....	22
수식: 세 가지 도구.....	22
① 집중용량계 ().....	22
② 반무한 고체.....	22
③ 1 항 근사.....	22
예제: 피복관과 연료의 시간 상수가 400 배 차이 난다.....	23
6 장 대류의 정체 — 경계층(boundary layer)과 무차원수.....	25
원리: h 는 우리가 모르는 것을 담아둔 상자다.....	25
수식: 두 개의 경계층, 세 개의 무차원수.....	25

예제: 평판 위 층류에서 난류로.....	26
7 장 강제대류 — 관내유동과 부수로.....	27
원리: 관 속에는 바깥이 없다.....	27
수식: 층류와 난류.....	27
축방향으로 벌크 온도는 어떻게 변하나.....	27
예제: PWR 부수로의 h 를 직접 구한다.....	28
8 장 자연대류 — Ra 와 피동 냉각.....	30
원리: 온도차가 스스로 유동을 만든다.....	30
수식: Gr 과 Ra	30
자연순환 루프: 구동 수두(driving head).....	31
예제: 자연순환으로 얼마나 빨 수 있나.....	31
9 장 복사 열전달.....	33
원리: 매질이 필요 없다.....	33
수식: 흑체(blackbody)에서 실제 표면까지.....	33
두 표면 사이의 교환.....	33
복사 열전달계수.....	34
예제: 복사가 언제부터 무시할 수 없어지나.....	34
10 장 열교환기 — LMTD 와 유효도(effectiveness)-NTU.....	35
원리: 온도차가 자리마다 다르다.....	35
수식: 두 가지 계산 방식.....	35
① LMTD 방식 — 출구 온도를 알 때(설계).....	35
② 유효도-NTU 방식 — 출구 온도를 모를 때(성능 평가).....	35
예제: 잔열제거 열교환기 성능 평가.....	36
11 장 풀비등(pool boiling)과 임계열유속(CHF).....	38
원리: 기포가 만드는 초강력 열전달, 그리고 절벽.....	38
수식: 네 구간.....	38
핵비등(nucleate boiling): Rohsenow 상관식.....	39
CHF: Zuber 상관식.....	39
예제: 1 atm 물의 CHF 를 손으로 구한다.....	39
Rohsenow 로 벽면 온도 구해보기.....	40
12 장 유동비등과 2 상 유동.....	41
원리: 흐르면서 끓으면 이야기가 복잡해진다.....	41
수식: 건도와 보이드율은 다른 것이다.....	41
예제: 3 %의 증기가 부피의 40 %를 차지한다.....	42
유동비등 열전달: Chen 의 중첩.....	43
두 가지 CHF: DNB 와 dryout.....	43
2 상 압력 강하.....	43
부록 A — 기호와 단위.....	45
약어.....	46
부록 B — 물성표.....	48
B.1 압축수 (15.5 MPa, PWR 1 차 계통).....	48
B.2 포화 물성.....	48
B.3 고체 물성 (대표값).....	49
B.4 기체 물성 (1 atm).....	49
B.5 자주 쓰는 상수.....	49

부록 C — 상관식 요약.....	51
C.1 전도.....	51
C.2 비정상 전도.....	51
C.3 강제대류.....	52
C.4 자연대류.....	52
C.5 복사.....	53
C.6 열교환기·비등·2 상.....	53
부록 D — 연습문제 30 선.....	54
1 장 — 열전달 지도.....	54
2 장 — 전도의 기본.....	54
3 장 — 열저항과 핀.....	54
4 장 — 발열 전도.....	55
5 장 — 비정상 전도.....	55
6 장 — 대류의 정체.....	55
7 장 — 강제대류.....	55
8 장 — 자연대류.....	56
9 장 — 복사.....	56
10 장 — 열교환기.....	56
11~12 장 — 비등과 2 상 (보너스).....	57
부록 E — 용어집.....	58
다음에 읽을 것.....	60

이 책을 읽는 법

누구를 위한 책인가

대학원 연구를 시작하면서 열전달을 처음부터 다시 잡고 싶은 사람을 위한 책이다. 목표는 하나다. **연구실에서 오가는 열전달 이야기를 알아듣고, 남이 준 계산 결과가 말이 되는지 스스로 판단할 수 있게 되는 것.**

그래서 이 책은 두꺼운 교과서를 압축하지 않았다. 대신 원자력 열수력에서 실제로 쓰는 것만 골라, 왜 그 식이 그렇게 생겼는지부터 설명한다. Incropera 나 Bergman 의 정식 교과서는 이 책을 다 읽은 뒤에 보면 훨씬 잘 읽힌다.

3 부작 중 첫 권

「필수 열전달」, 「필수 유체역학」, 「필수 열역학」은 같은 기호 규약과 같은 장 구조를 쓴다. 세 권은 이렇게 나뉜다.

표 0.1 — 3 부작의 역할 분담.¹

과목	답하는 질문	이 책과의 관계
열역학	에너지가 얼마나 오가는가, 어디까지 가능한가	열전달의 출발점(경계조건)을 준다
유체역학	유체가 어떻게 움직이는가	대류(6~8 장)의 속도장을 준다
열전달	열이 얼마나 빨리 오가는가	온도를 계산해 낸다

난이도 표시

각 장 머리에 Tier 를 붙였다.

- **Tier 1 (필수)** — 신입생이라면 반드시. 큰 그림과 손계산.
- **Tier 2 (석사 이상)** — 실제 해석에 쓰는 상관식과 절차.
- **Tier 3 (박사 권장)** — 최전선 쟁점, 검증, 상용 코드로의 연결.

시간이 없으면 Tier 1 만 훑고 필요할 때 돌아와도 된다.

장마다 반복되는 여섯 칸

1. **원리** — 무엇을, 왜. 직관과 비유부터.
2. **수식** — 지배식과 실제로 쓰는 식.
3. **예제** — 연필과 계산기로 따라갈 수 있는 손계산.
4. **그림** — 개념도와 계산 결과.
5. **▶ 실무 팁** — 남들이 자주 빠지는 함정.
6. **■ 원자력 연계** — SMR·열수력 문제와의 연결.

¹ 표 각주: 세 권 모두 THINK Lab 신입생 필수 교재로, 순서는 열역학 → 유체역학 → 열전달을 권한다. 다만 이 책은 단독으로도 읽히도록 필요한 유체·열역학 개념을 그때그때 짚는다.

준비물

미적분과 상미분방정식까지면 충분하다. 편미분방정식이 나오는 자리에서는 그때그때 필요한 만큼만 설명한다. 계산은 공학용 계산기면 되고, 파이썬을 쓸 줄 알면 부록 D의 연습문제를 검산하기 좋다.

▶ **실무 팁** 이 책의 모든 수치 예제는 실제로 계산해서 넣었다. 읽다가 “정말 그 값이 나오나?” 싶으면 직접 계산해 보길 권한다. 손으로 한 번 따라간 식은 잊히지 않는다.

감각 잡기 — 열전달을 몸으로 이해하기

Tier 1 · 계산 전에 답을 짐작하고, 계산 후에 이상한지 알아채는 능력.

본격적으로 들어가기 전에 이 장이 하는 일은 하나다. **숫자를 보고 “어, 이건 좀 이상한데?”라고 느끼는 감각을 심는 것.** 이게 사실 기본기의 핵심이다. 식은 책을 찾으면 되지만, 계산 결과가 틀렸는지 알아채는 것은 감각의 영역이다.

1. 같은 60 °C 인데 왜 금속은 데이고 나무는 안 데는가

사우나에서 나무 벤치는 앉을 만한데 금속 못은 만지면 화들짝 놀란다. 둘 다 같은 온도인데도 그렇다.

이유는 **온도가 아니라 열이 오는 속도가 다르기** 때문이다. 금속은 k 가 크고 열용량도 커서 손가락으로 열을 칼칼 밀어 넣는다. 나무는 k 가 0.15 정도라 열이 찔끔 나온다. 피부가 느끼는 것은 온도가 아니라 **열유속(heat flux)** 이다.

이 이야기가 열전달의 첫 번째 감각이다. **“뜨겁다”는 상태가 아니라 속도의 문제다.** 열역학은 상태를 다루고, 열전달은 속도를 다룬다.

2. 외워두면 평생 쓰는 열 개의 숫자

이 정도만 머리에 있으면 웬만한 계산은 자릿수 감산이 된다.

표 0.2 — 열전달 감각을 위한 열 개의 숫자.²

항목	값	기억법
물의 k	0.6 W/m·K	유체 중엔 좋은 편
공기의 k	0.026	물의 1/23, 사실상 단열재
강철·지르칼로이 k	15~16	물의 25 배
구리 k	400	물의 660 배
UO₂ 연료 k	3	콘크리트(1.4) 수준!
공기 자연대류 h	5~25 W/m ² ·K	아주 작다
물 강제대류 h	1,000~15,000	공기의 백 배
PWR 부수로 h	약 35,000	물 중에서도 최상급
핵비등 h	10,000~100,000	비등은 반칙 수준
물의 잠열	2,257 kJ/kg	현열(sensible heat)로 0→100 °C 데우기의 5.4 배

² 표 각주: h 값은 대표 범위이며 유속·형상에 따라 변한다. 이 표의 목적은 정확한 값이 아니라 **자릿수 감각**이다. 계산 결과가 이 범위를 크게 벗어나면 먼저 자기 계산을 의심하자.

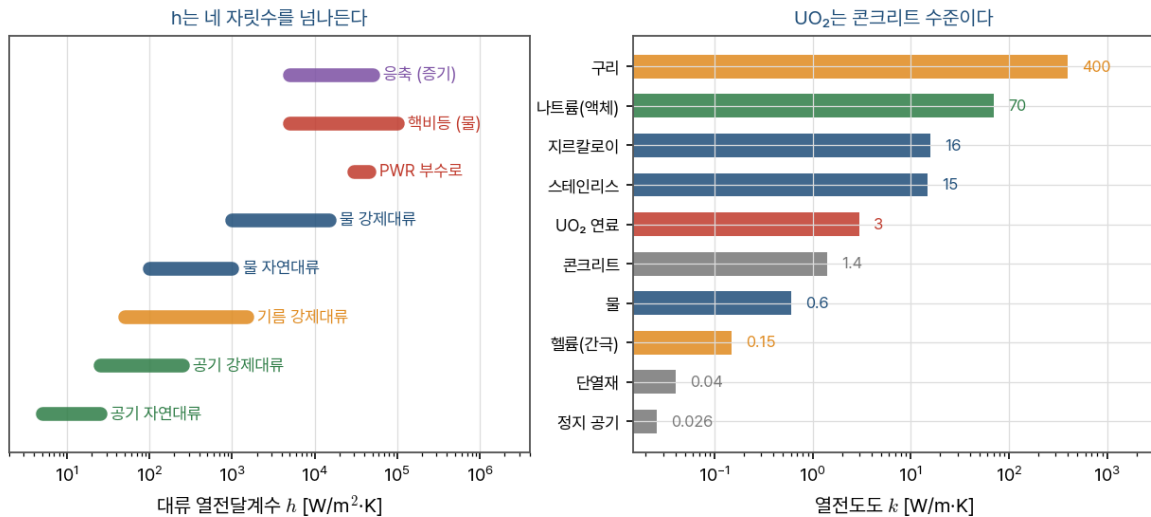


그림 0.1 — 왼쪽: 대류 열전달계수는 네 자릿수를 넘나든다. 오른쪽: UO₂의 열전도도는 콘크리트 수준이다.³

오른쪽 그림에서 UO₂를 찾아보자. 원자로의 심장부에 있는 물질이 콘크리트보다 겨우 두 배 잘 통한다. 이 한 가지 사실이 원자력 열수력의 절반을 설명한다.

3. 열은 물처럼 흐른다 — 그리고 병목이 전부다

가장 유용한 비유는 **전기 회로**다. 온도차가 전압, 열이 전류, 열저항(thermal resistance)이 저항이다.

$$q = \frac{\Delta T}{R}$$

여기서 나오는 감각이 결정적이다. **직렬로 연결된 저항 중 가장 큰 것이 전체를 지배한다.** 고속도로에 차선이 4→4→1→4로 줄었다 늘어나면, 전체 통행량은 1차선 구간이 정한다. 나머지 구간을 8차선으로 넓혀도 소용없다.

연료봉이 정확히 이 그림이다.

온도차는 '저항이 큰 곳'에 몰린다 — 연료봉의 실제 배분



냉각을 두 배로 강화해도 줄어드는 것은 왼쪽 끝 19 K뿐이다

그림 0.2 — 연료봉의 온도차 배분. 4분의 3이 연료 안에서 생긴다.⁴

냉각을 두 배로 강화해도 줄어드는 것은 19 K뿐이다. 신입생이 “펌프를 더 세게 돌리면 되지 않나요?”라고 물을 때 답이 여기 있다. 그 질문은 8차선을 16차선으로 넓히려는 이야기다.

³ 그림 출처: 문헌 대표값 범위를 정리해 작도. PWR 부수로 값은 7장에서 직접 계산한다.

⁴ 그림 출처: 4장에서 직접 계산할 값($q' = 20 \text{ kW/m}$ 조건).

4. 시간 감각: 두께의 제곱

“이 물체는 얼마나 빨리 반응하나?”의 답은 놀랍도록 단순하다.

$$\tau \approx \frac{L^2}{\alpha}$$

두께가 두 배면 시간은 네 배다. 이 제곱이 모든 것을 지배한다.

표 0.3 — 시간 상수(time constant)의 감각.⁵

대상	크기	시간 상수	체감
피복관	0.57 mm	44 ms	눈 깜빡할 새
연료 펠릿	4.1 mm	18 s	담배 한 모금
격납건물 벽	1 m	약 17 일	계절 단위

두께가 1,750 배 차이 나는데(0.57 mm → 1 m) 시간은 3 백만 배 차이 난다. 콘크리트 벽이 여름 더위를 며칠 늦게 전달하는 이유가 이 제곱이다.

5. 복사는 200 °C 부터 참전한다

복사는 T^4 이라 저온에서는 존재감이 없다가 갑자기 튀어나온다.

표 0.4 — 복사가 지배하기 시작하는 온도.⁶

표면 온도	복사 대 자연대류	판단
77 °C	0.8 배	이미 비슷하다
227 °C	1.5 배	복사가 더 크다
527 °C	4.6 배	대류는 겉다리
1,000 °C	15 배	사실상 복사뿐

규칙 하나: 200 °C 를 넘으면 복사를 빼놓고 계산하지 말자. 사고 해석에서 피복관이 800 °C 를 넘으면 복사가 주인공이 된다.

6. 자주 하는 착각 다섯 가지

- ㉠ “단열재는 열을 막는다” — 막는 게 아니라 늦춘다. 정상 상태(steady state)에서는 결국 같은 열이 지나간다. 온도차가 커질 뿐이다.
- ㉡ “ h 는 물성이다” — 아니다. h 는 유동 조건에 따라 백 배씩 변한다. 물성표에 h 가 없는 이유다.
- ㉢ “표면적을 늘리면 항상 이득이다” — h 가 큰 쪽(물, 비등)에는 핀을 붙여봐야 소용없다. 저항이 큰 쪽에 붙여야 한다.
- ㉣ “온도가 높으면 열이 많다” — 온도는 강도, 열량은 양이다. 성냥불(1,000 °C)보다 욕조 물(40 °C)의 열량이 훨씬 크다.

⁵ 표 각주: α 는 각각 7.4×10^{-6} , 9.1×10^{-7} , 6.9×10^{-7} m²/s. 5 장에서 다시 다룬다.

⁶ 표 각주: 방사율 0.8, 주변 300 K, 공기 자연대류(natural convection) 8 W/m²·K 기준. 9 장에서 계산한다.

㉔ **“비등하면 냉각이 좋아지니까 좋다”** — 어느 선까지만이다. CHF 를 넘으면 그 순간 벽이 증기막에 덮여 온도가 수백 도 폭등한다(11 장). 원자로 출력 한계가 여기서 정해진다.

▶ **실무 팁** 계산기를 두드리기 전에 **답을 먼저 짐작해 보는 습관**을 들이자. “ h 가 3 만쯤 나오겠네”, “온도차는 수백 K 정도겠네” 하고 적어둔 뒤 계산한다. 짐작과 결과가 크게 다르면 둘 중 하나가 틀린 것이고, 어느 쪽이 틀렸는지 찾는 과정에서 가장 많이 배운다. **이 습관 하나가 다른 어떤 공부법보다 빠르다.**

■ **원자력 연계** 원자로 열수력의 모든 이야기는 결국 한 문장으로 압축된다. **“열은 계속 나오는데, 그 열이 나가는 길에 병목이 있다.”** 정상 운전에서 병목은 연료 안에 있고(그림 0.2), 사고 조건에서는 냉각재가 사라지면서 병목이 표면으로 옮겨간다. 원자력 안전의 상당 부분이 “병목이 어디로 옮겨가는가”를 추적하는 일이다.

1 장 열전달 지도 — 열역학이 못 하는 일

Tier 1 · 세 가지 전달 방식과 그들이 원자로 안에서 이어지는 방식.

원리: 열역학은 “얼마나”, 열전달은 “얼마나 빨리”

열역학은 훌륭한 학문이지만 시계가 없다. 뜨거운 커피가 결국 식는다는 것은 알려주지만, 몇 분이 걸리는지는 말해주지 않는다. 그 빈칸을 채우는 것이 열전달이다.

원자로에서는 이 차이가 결정적이다. 열역학은 “3,000 MW의 열이 나오면 1,000 MW의 전기를 만들 수 있다”고 말한다. 하지만 정작 설계자를 밤새우게 하는 질문은 다르다. **그 열을 연료봉 밖으로 빼내지 못하면 연료가 녹는다.** 열출력은 같아도 냉각이 안 되면 사고다. 열전달은 이 “빼낼 수 있는가”를 다룬다.

열이 옮겨가는 길은 딱 세 가지다.

- **전도(conduction)** — 매질 속에서 이웃한 분자·전자끼리 에너지를 넘긴다. 물질이 움직이지 않아도 열은 간다. 연료 펠릿과 피복관 안이 여기도.
- **대류(convection)** — 유체가 직접 움직이면서 열을 실어 나른다. 냉각재가 하는 일이다. 사실 대류는 “고체 벽 근처의 전도 + 유체의 이동”이 합쳐진 것이라, 유체역학을 알아야 제대로 다룰 수 있다.
- **복사(radiation)** — 전자기파로 나간다. 매질이 없어도 간다. 상온 근처에서는 거의 무시되지만, 온도가 800 °C를 넘어가면 갑자기 주인공이 된다.

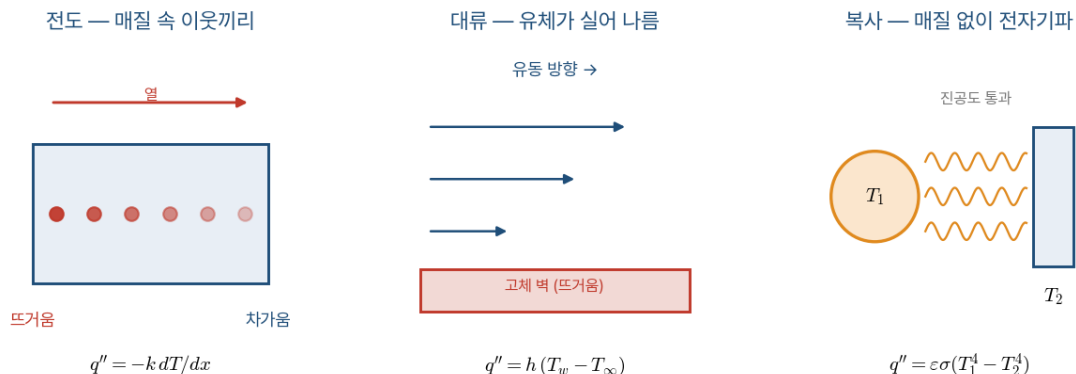


그림 1.1 — 열이 옮겨가는 세 가지 방식. 전도는 매질을 통해, 대류는 유체가 실어 나르며, 복사는 매질 없이도 간다.⁷

수식: 세 개의 법칙

푸리에의 전도 법칙(Fourier, 1822). 열유속은 온도 기울기에 비례하고, 방향은 반대다.

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \left[\text{W/m}^2 \right]$$

뉴턴의 냉각 법칙. 사실 법칙이라기보다 h 라는 미지수를 정의한 식이다.

$$q'' = h(T_w - T_\infty)$$

스테판-볼츠만 법칙. 온도의 네제곱이 핵심이다.

$$q'' = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4), \sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

⁷ 그림 출처: 개념도, 직접 작성.

여기에 하나를 더 없으면 거의 모든 문제가 풀린다. **에너지 보존**이다. 어떤 덩어리에 대해

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st}$$

이 네 항을 정확히 세는 습관이 열전달 문제 풀이의 절반이다.

햇갈리는 세 기호

표 1.1 — 프라임 개수로 구분하는 열 관련 기호.⁸

기호	이름	단위	쓰는 곳
q	열전달률	W	계통 전체
q'	선출력 밀도	W/m	연료봉 1 m 당
q''	열유속	W/m ²	표면 1 m ² 당
q'''	체적 발열률	W/m ³	연료 1 m ³ 당

예제: 연료 중심에서 냉각재까지, 700 K 을 나눠 갖기

PWR 연료봉 하나를 잘라보자. 선출력 $q' = 20$ kW/m 인 대표 조건이다.⁹ 냉각재 벌크 온도는 310 °C.

열은 반드시 이 순서로 나간다. 연료 중심 → 연료 표면 → 간극 → 피복관 → 냉각재. 각 구간마다 온도가 떨어지는데, 그 크기가 전혀 균등하지 않다.

표 1.2 — 연료봉 반경 방향 온도 강하 분해.¹⁰

구간	온도 강하	전체 중 비중	지배 물리
연료 내부	531 K	75 %	전도 (k 낮음)
연료-피복 간극	129 K	18 %	기체 전도
피복관	25 K	4 %	전도 (k 높음)
대류 막	19 K	3 %	강제대류
합계	705 K	100 %	

읽어낼 것은 딱 하나다. **연료 중심이 1,014 °C 까지 올라가는 이유의 3/4 은 UO₂ 의 낮은 열전도도(thermal conductivity) 때문이지, 냉각이 부족해서가 아니다.** 냉각재 쪽 대류를 아무리 강화해도 19 K 짜리 항만 줄어든다.

⁸ 표 각주: 프라임 하나가 붙을 때마다 길이 차원으로 한 번씩 나눈다고 기억하면 된다. 원자력 분야에서는 q' 를 LHGR(Linear Heat Generation Rate)이라고도 부른다.

⁹ 대표 조건: 실제 PWR 의 평균 선출력은 약 17.8 kW/m, 최대는 약 44 kW/m 다. 여기서는 계산이 깔끔한 20 kW/m 를 쓴다.

¹⁰ 표 각주: 계산 조건 — $q' = 20$ kW/m, 연료 반경 4.10 mm, 피복 내경 4.18 mm·외경 4.75 mm, $k_f = 3 \cdot k_c = 16$ W/m·K, 간극 계수 6,000 W/m²·K, 대류 계수 35,000 W/m²·K. 4 장·7 장에서 각 항을 직접 계산한다.

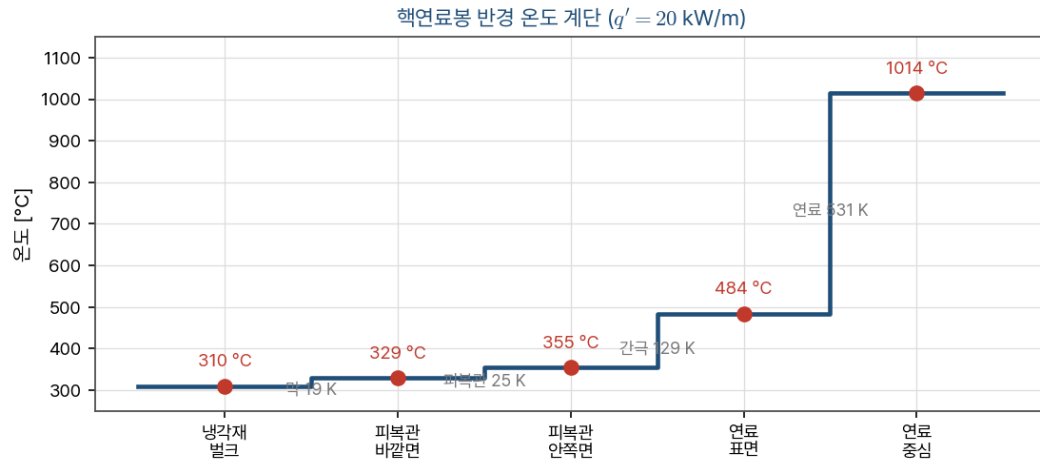


그림 1.2 — 연료 중심에서 냉각재까지 온도가 떨어지는 계단. 연료 내부의 낙차가 압도적이다.¹¹

▶ **실무 팁** 단위를 먼저 맞추면 절반은 이긴다. q'' 인지 q' 인지 헷갈릴 때는 “이 숫자를 무엇으로 나눴나”를 물어보면 된다. 그리고 온도차는 K와 °C가 같지만, 복사의 T^4 에는 **반드시 절대온도(K)**를 넣어야 한다. 이 실수는 신입생이 거의 예외 없이 한 번은 한다.

■ **원자력 연계** 원자로 설계의 상한선은 대부분 열전달이 정한다. 핵분열은 더 많은 열을 낼 수 있지만, 그 열을 뺄 수 없으면 출력을 올릴 수 없다. 그래서 “출력 밀도를 얼마나 높일 수 있는가”는 사실상 “CHF(임계열유속)까지 얼마나 여유가 있는가”라는 열전달 질문이다(11·12 장). SMR의 피동 냉각 개념도 마찬가지다. 펌프를 없앤 대신 자연대류(8 장)와 큰 전열 면적으로 같은 열을 빼내야 한다.

¹¹ 그림 출처: 직접 계산(표 1.2 조건). 4장에서 각 식을 유도한다.

2 장 전도의 기본 — 푸리에 법칙과 열저항

Tier 1 · 정상 상태 1 차원 전도를 평판·원통·구에서 푼다. 열저항이라는 무기를 얻는다.

원리: 열전도도와 열확산계수(thermal diffusivity)는 다른 이야기다

전도를 지배하는 물성은 두 개인데, 하는 일이 다르다.

- **열전도도** k [W/m·K] — “얼마나 잘 흘리는가”. 정상 상태 온도 분포를 정한다.
- **열확산계수** $\alpha = k / \rho c_p$ [m²/s] — “얼마나 빨리 반응하는가”. 시간이 걸리는 문제(5 장)를 정한다.

구리는 k 도 크고 α 도 크다. 물은 k 는 그럭저럭인데 ρc_p 가 커서 α 가 작다. 그래서 물은 열을 잘 저장하지만 반응은 느리다. UO_2 는 k 가 3 W/m·K 정도로 벽돌 수준이다. 그래서 연료 중심이 그렇게 뜨겁다.

표 2.1 — 원자력에서 자주 만나는 물질의 열전도도.¹²

물질	k [W/m·K]	α [m ² /s]	한마디
구리	400	1.2×10^{-4}	열의 고속도로
스테인리스강 304	15	3.9×10^{-6}	배관·구조재
지르칼로이-4	16	7.4×10^{-6}	피복관
UO_2 (1,000 K)	3	9.1×10^{-7}	벽돌만도 못하다
물 (300 °C, 15.5 MPa)	0.55	1.4×10^{-7}	유체 중엔 좋은 편
헬륨 (간극 기체)	0.15	—	그래도 제논보단 낫다
공기	0.026	2.2×10^{-5}	사실상 단열재

수식: 세 가지 형상, 세 가지 온도 곡선

발열이 없는 정상 상태 1 차원 전도는 이렇게 쓴다.

$$\frac{1}{r^n} \frac{d}{dr} \left(r^n k \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

$n=0$ 이면 평판, $n=1$ 이면 원통, $n=2$ 이면 구다. k 가 일정하면 각각 이렇게 풀린다.

$$\text{평판: } T = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{x}{L} \quad \text{원통: } T = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}$$

$$\text{구: } T = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{1/r_1 - 1/r}{1/r_1 - 1/r_2}$$

평판은 직선, 원통은 로그, 구는 $1/r$ 이다. 이유는 단순하다. 바깥으로 갈수록 열이 지나가는 면적이 넓어지므로, 같은 열량이 지나가도 기울기가 완만해진다.

¹² 표 각주: UO_2 와 지르칼로이 값은 운전 온도 대표값이며 온도·연소도에 따라 크게 변한다. 물성은 IAPWS-IF97 및 MATPRO 계열 상관식 기준의 대표값이다.

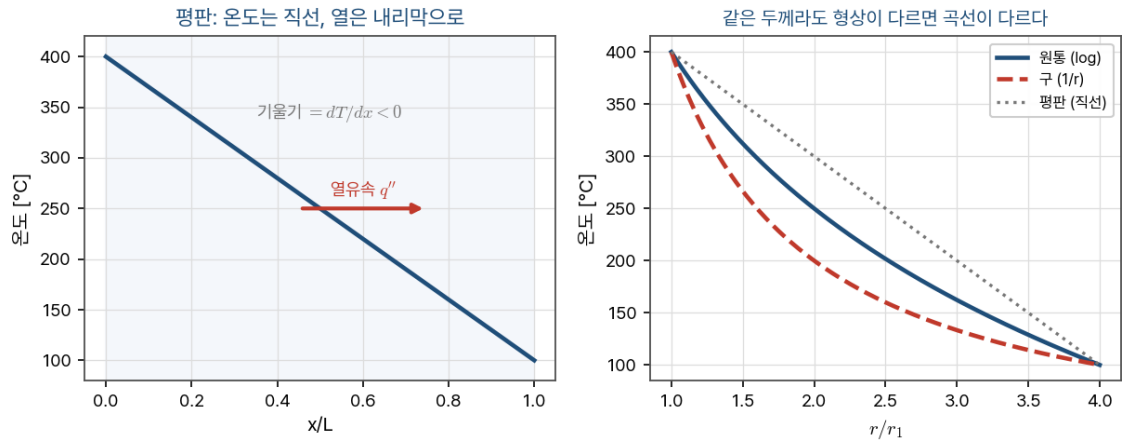


그림 2.1 — 왼쪽: 평판에서 온도는 직선이고 열은 내리막으로 흐른다. 오른쪽: 같은 두께라도 형상에 따라 온도 곡선이 다르다.¹³

열저항: 전기 회로처럼 생각하기

푸리에 법칙을 적분하면 옴의 법칙과 똑같은 꼴이 된다.

$$q = \frac{\Delta T}{R}, R_{\text{평판}} = \frac{L}{kA}, R_{\text{원통}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kL}, R_{\text{대류}} = \frac{1}{hA}$$

전압이 온도차, 전류가 열전달률, 저항이 열저항이다. 이 대응 하나로 복잡한 다층 구조가 중학교 회로 문제로 바뀐다.

예제: 피복관에서 25 K 이 떨어지는 이유

3장에서 쓸 준비 운동으로, 피복관 하나만 손으로 풀어보자.

- 조건: $q' = 20,000 \text{ W/m}$, $r_{ci} = 4.18 \text{ mm}$, $r_{co} = 4.75 \text{ mm}$, $k_c = 16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

원통 전도의 선출력 형태 식은

$$q' = \frac{2\pi k_c (T_{ci} - T_{co})}{\ln(r_{co}/r_{ci})}$$

이므로 온도차는

$$\Delta T = \frac{q' \ln(r_{co}/r_{ci})}{2\pi k_c} = \frac{20,000 \times \ln(4.75/4.18)}{2\pi \times 16} = \frac{20,000 \times 0.1278}{100.5} = 25.4 \text{ K}$$

두께가 0.57 mm 밖에 안 되고 k 가 16 으로 꽤 좋으니 25 K 이면 납득이 간다. 같은 계산을 $\text{UO}_2(k=3)$ 로 하면 5 배가 넘게 떨어진다. k 가 작으면 얇아도 뜨겁다.

▶ **실무 팁** k 는 온도에 따라 변한다. UO_2 는 500 °C 에서 5 W/m·K 인데 1,500 °C 에서는 2.5 W/m·K 로 반토막이 난다. 그래서 원자력에서는 온도 대신 **적분 열전도도(integral conductivity)** $\int k dT$ 를 쓴다. 이렇게 하면 $k(T)$ 를 몰라도 “연료 중심이 용융에 얼마나 가까운가”를 하나의 숫자로 비교할 수 있다. 미조사 UO_2 의 경우 0 °C 부터 용융점(약 2,840 °C)까지의 적분값이 대략 **93 W/cm** 로 알려져 있다. 연료 표면이 400 °C 쯤이라면 표면부터 용융까지 남은 몫은 약 69 W/cm 이고, 4장에서 볼 $q' = 4\pi \int k dT$ 관계로 환산하면 중심 용융 한계 선출력이 대략 87 kW/m 가 나온다. 실제 운전 최대치(약 44 kW/m)의 두 배쯤 여유가 있는 셈이다.¹⁴

¹³ 그림 출처: 직접 계산. 오른쪽은 세 형상의 온도 분포를 같은 경계 온도에서 비교했다.

■ **원자력 연계** 간극(gap)은 두께가 수십 마이크로미터에 불과한데도 전체 온도 강하의 18 %를 차지한다. 채워진 헬륨의 k 가 0.15 W/m·K 로 낮기 때문이다. 게다가 연소가 진행되면 핵분열 기체(크립톤·제논)가 방출되어 간극 기체가 오염되는데, 제논의 k 는 헬륨의 1/20 수준이라 간극 저항이 더 커진다. 반대로 연료가 부풀어 피복관에 닿으면(gap closure) 저항이 줄어든다. 연료 성능 코드(FRAPCON 등)가 하는 일의 상당 부분이 이 간극 계수를 시간에 따라 추적하는 것이다.

¹⁴ **적분 열전도도:** $\int_{T_o}^T k(T') dT'$. 전도 방정식을 k 가 상수가 아닐 때도 그대로 풀 수 있게 해주는 변환이며, 원자력에서만 유독 자주 쓰인다.

3 장 열저항 회로와 핀

Tier 1 · 직렬·병렬 저항, 총괄 열전달계수(overall heat transfer coefficient), 접촉 저항, 그리고 핀.

원리: 가장 큰 저항이 전부를 정한다

열저항을 쓰면 다층 벽이 회로가 된다. 직렬이면 더하고, 병렬이면 역수를 더한다. 전기와 완전히 같다.

$$R_{tot, 직렬} = \sum R_i, \frac{1}{R_{tot, 병렬}} = \sum \frac{1}{R_i}$$

여기서 반드시 몸에 배어야 할 감각이 있다. **직렬 회로에서는 가장 큰 저항이 전체를 지배한다.** 다른 곳을 아무리 개선해도 병목이 그대로면 전체는 거의 그대로다. 앞 장에서 본 연료봉이 정확히 이 이야기였다. 냉각재 쪽 h 를 두 배로 올려봐도 전체 705 K 중 10 K 이 줄 뿐이다.

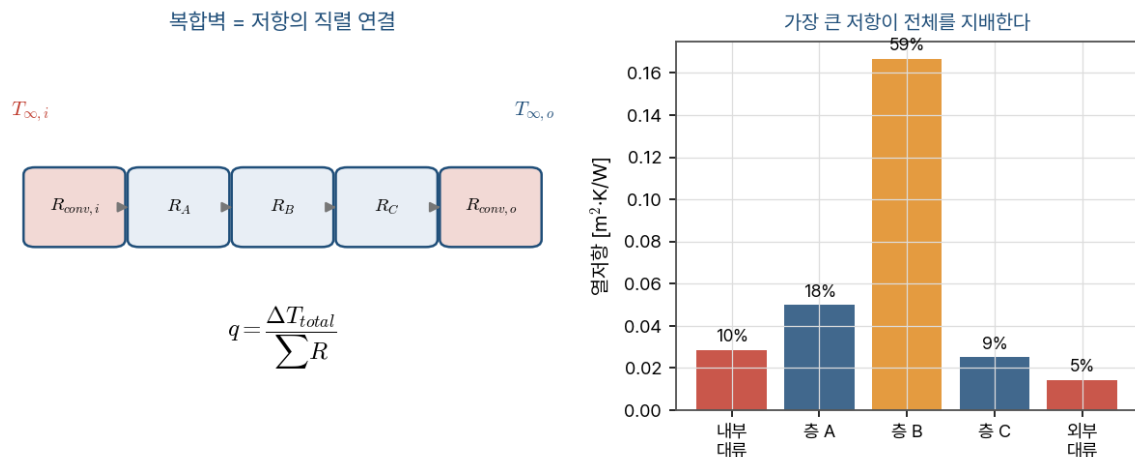


그림 3.1 — 왼쪽: 복합벽을 저항의 직렬 연결로 본 회로. 오른쪽: 각 저항이 전체에서 차지하는 비중. 층 B 가 병목이다.¹⁵

수식: 총괄 열전달계수 U

열교환기나 배관에서는 저항을 일일이 쓰는 대신 하나로 뭉쳐 쓴다.

$$q = U A \Delta T_{tot}, \frac{1}{U A} = R_{tot}$$

원통(관)에서는 안쪽 면적과 바깥쪽 면적이 다르므로 $U A$ 는 하나여도 U 는 기준 면적에 따라 값이 달라진다. U 를 말할 때는 항상 어느 면적 기준인지 밝혀야 한다. 관 하나에 대해 쓰면 이렇다.

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R''_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{R''_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

가운데 R''_f 가 **오염 계수(fouling factor)**다. 운전하면서 관 표면에 쌓이는 스케일·산화막·크러드의 저항이며, 열교환기 설계에서 빠지지 않는다.

¹⁵ 그림 출처: 개념도 및 예시 수치(본문 예제와 동일 조건).

접촉 열저항

두 고체를 아무리 세게 눌러도 실제로 닿는 면적은 명목 면적의 1~2 %뿐이다. 나머지는 틈새의 기체가 메운다. 그래서 접촉면에는 온도가 **불연속**으로 된다.

$$R''_{t,c} = \frac{\Delta T_{\text{접촉면}}}{q''} \left[\text{m}^2 \text{K/W} \right]$$

연료-피복 간극이 바로 이 문제의 원자력 버전이다. 다만 간극은 처음부터 설계된 틈이라 접촉 저항이라기보다 기체 전도 저항으로 다룬다.

예제: 핀은 언제 도움이 되는가

표면적을 늘려 대류를 강화하는 것이 핀(fin)이다. 단면이 일정하고 끝단이 단열인 직선 핀의 온도는

$$\frac{T(x) - T_{\infty}}{T_b - T_{\infty}} = \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)}, m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}}$$

이고, 핀 효율(fin efficiency)은 이렇게 정의한다.

$$\eta_f = \frac{\text{실제 방열량}}{\text{핀 전체가 뿌리 온도일 때의 방열량}} = \frac{\tanh(mL)}{mL}$$

$mL=1$ 이면 $\eta_f=0.76$, $mL=2$ 면 0.48 , $mL=3$ 이면 0.33 이다. 길게 만들수록 효율은 떨어진다. 끝단이 이미 주변 온도에 가까워져서 일을 안 하기 때문이다. 실무에서는 $mL \approx 1$ 근처를 고른다.

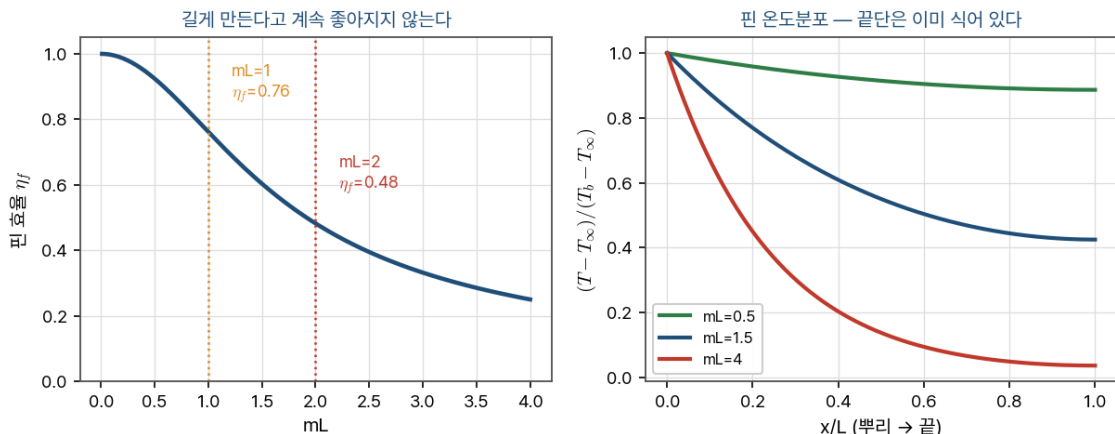


그림 3.2 — 왼쪽: 핀 효율은 mL 이 커질수록 떨어진다. 오른쪽: 핀 길이 방향 온도 분포. mL 이 크면 끝단은 이미 식어 있다.

16

핀을 붙일 가치가 있는지는 간단한 기준으로 판별한다.

$$\frac{k}{ht} > 1 \quad (t: \text{핀 두께})$$

즉 h 가 작고 k 가 클 때 핀이 산다. 공기 쪽($h \sim 10$)에 알루미늄 핀을 붙이는 것은 이 때문이고, 물 쪽($h \sim 10^4$)에는 핀을 잘 안 붙인다.

▶ **실무 팁** “저항이 큰 쪽에 핀을 붙인다”가 원칙이다. 자동차 라디에이터의 핀이 공기 쪽에만 있는 이유, PWR 증기발생기 전열관 표면이 매끈한 이유가 같다. 물-물 열교환에서는 양쪽 h 가 비슷해서 핀의 이득이 작고, 오히려

¹⁶ 그림 출처: 직접 계산, 끝단 단열 직선 핀 해석해.

압력 손실과 오염 문제만 커진다. 다만 **비등**이 일어나는 면에는 표면 처리로 기포핵을 늘리는 방법이 따로 있다(11 장).

■ **원자력 연계** 가스냉각로와 고온가스로(HTGR)는 냉각재가 헬륨이라 h 가 물보다 두 자릿수 작다. 그래서 초기 가스로 설계에서는 연료 채널 표면에 핀 형상을 넣는 시도가 여럿 있었다. 반대로 사용후연료 건식저장(dry storage) 용기(cask)의 바깥 표면에는 지금도 핀이 붙어 있다. 붕괴열(decay heat)을 공기 자연대류(8 장)와 복사(9 장)만으로 빼내야 하는데, 공기 쪽 h 가 5~10 W/m²·K 수준이라 표면적을 늘리는 것 말고는 방법이 없기 때문이다.

4 장 발열이 있는 전도 — 핵연료봉 온도분포

Tier 1-2 · 원자력 열전달에서 가장 자주 쓰는 계산. 연료 중심 온도를 직접 구한다.

원리: 열이 안에서 만들어지면 곡선이 된다

지금까지는 열이 한쪽에서 들어와 반대쪽으로 나갔다. 핵연료는 다르다. **열이 안에서 만들어진다**. 그러면 안쪽으로 갈수록 지나가는 열이 줄어들고, 중심에서는 0 이 된다(대칭이라 중심으로 흐를 곳이 없다).

결과는 이렇다. 온도 곡선이 직선이나 로그가 아니라 **포물선**이 되고, 중심에서 기울기가 정확히 0 이 된다. 그림 4.1의 연료 부분이 봉긋한 이유다.

수식: 발열량이 붙은 전도 방정식

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r k \frac{dT}{dr} \right) + q''' = 0$$

k 와 q''' 가 일정하고 반경 r_f 인 원기둥이면, 중심 대칭 조건($dT/dr=0$ at $r=0$)을 써서

$$T(r) = T_s + \frac{q''' r_f^2}{4k} \left[1 - \left(\frac{r}{r_f} \right)^2 \right]$$

가 나온다. 여기서 마법 같은 정리가 하나 생긴다. 선출력과 체적 발열률(volumetric heat generation rate)의 관계 $q' = q''' \pi r_f^2$ 를 대입하면

$$T_c - T_s = \frac{q'}{4\pi k}$$

연료 반경이 식에서 사라진다. 연료봉을 굵게 만들든 가늘게 만들든, 선출력이 같으면 중심-표면 온도차는 같다. 원자력 열수력에서 손꼽히게 유용한 결과다.

k 가 온도에 따라 변할 때는 적분 형태로 쓴다. 이 꼴이 원자력 문헌에서 표준이다.

$$\int_{T_s}^{T_c} k(T) dT = \frac{q'}{4\pi}$$

형상별 정리

표 4.1 — 균일 발열체의 중심 과열도.¹⁷

형상	중심-표면 온도차	특징
평판 (두께 $2L$, 양면 냉각)	$q''' L^2 / 2k$	포물선
원기둥 (반경 r_f)	$q''' r_f^2 / 4k = q' / 4\pi k$	반경 무관(선출력 기준)
구 (반경 r_o)	$q''' r_o^2 / 6k$	가장 유리

¹⁷ 표 각주: 모두 k 일정, 표면 온도 고정, 정상 상태 가정. 분모의 2·4·6 은 각각 평판·원통·구의 차원 수에서 온다.

예제: 연료 중심 온도 1,014 °C 를 손으로 만들기

1장에서 예고한 계산을 이제 전부 채운다. 조건은 $q' = 20,000 \text{ W/m}$, 냉각재 310 °C.

① 대류 막 — 피복관 바깥면에서 냉각재로:

$$\Delta T = \frac{q'}{2\pi r_{co} h} = \frac{20,000}{2\pi (0.00475)(35,000)} = 19.1 \text{ K} \Rightarrow T_{co} = 329.1 \square^\circ \text{C}$$

② 피복관 전도 — 2장에서 이미 구했다: $25.4 \text{ K} \rightarrow T_{ci} = 354.6 \square^\circ \text{C}$

③ 간극 — 간극 계수 $h_{gap} = 6,000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 연료 표면 기준:

$$\Delta T = \frac{q'}{2\pi r_f h_{gap}} = \frac{20,000}{2\pi (0.00410)(6,000)} = 129.4 \text{ K} \Rightarrow T_{fs} = 484.0 \square^\circ \text{C}$$

④ 연료 내부 — 앞의 박스 식을 그대로:

$$\Delta T = \frac{q'}{4\pi k_f} = \frac{20,000}{4\pi (3)} = 530.5 \text{ K} \Rightarrow T_c = 1,014.5 \square^\circ \text{C}$$

네 항을 더하면 704.5 K. 표 1.2와 정확히 맞는다.

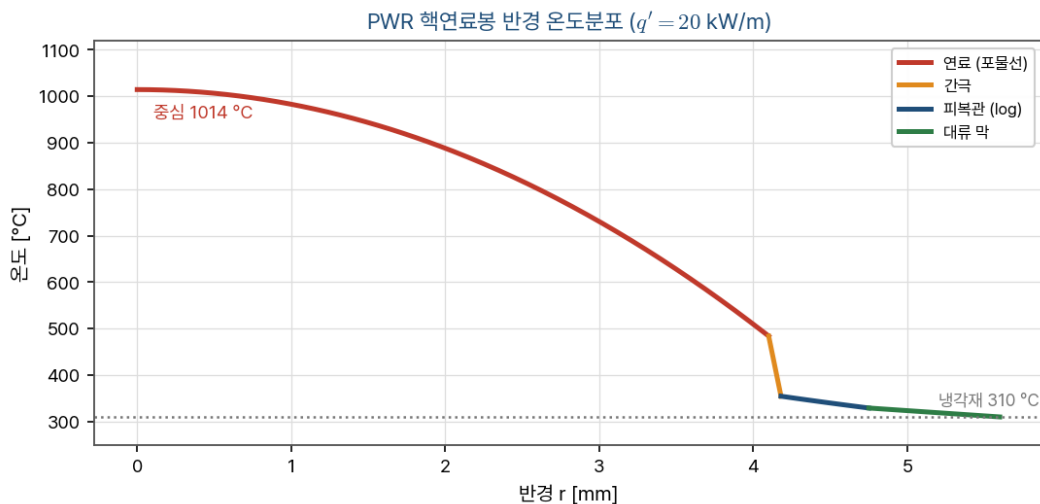


그림 4.1 — PWR 핵연료봉의 반경 방향 온도 분포. 연료는 포물선, 간극은 급격한 낙차, 피복관은 완만한 로그, 냉각재 막은 거의 평평하다.¹⁸

▶ **실무 팁** q' 는 축 방향으로 일정하지 않다. 실제 노심에서는 중성자속이 코사인 모양이라 중앙이 높고 양끝이 낮다. 그래서 “연료 중심 최고 온도”는 축 방향 최대 q' 가 나오는 지점에서, 그러나 냉각재는 이미 아래에서 데워져 온 상태에서 계산해야 한다. 이 두 효과가 겹쳐 최고 온도 지점은 노심 중앙보다 **약간 위쪽**에 생긴다. 첫 계산에서 이것 놓치면 최고 온도를 과소평가한다.

■ **원자력 연계** 중심 용융 방지는 설계 기준 중 하나다. 2장에서 본 적분 열전도도로 환산하면 미조사 UO_2 기준 대략 87 kW/m 에서 중심이 녹기 시작하는데, 운전 최대 선출력은 44 kW/m 수준으로 제한된다. 그런데 연소가 진행되면 이야기가 달라진다. 조사에 의한 결정 결함과 핵분열 생성물이 쌓여 k 가 떨어지고, 동시에 rim 효과로 표면부의 출력이 국소적으로 올라간다. 그래서 고연소도 연료의 온도 여유는 신연료보다 좁다. 최근 사고저항성 연료(ATF) 중 U_3Si_2 나 UN 이 주목받는 이유 하나가 바로 UO_2 보다 k 가 몇 배 높다는 점이다. 같은 출력에서 중심 온도가 수백 도 낮아진다.

¹⁸ 그림 출처: 직접 계산, 본문 예제와 동일 조건. k 는 상수로 두었다. 실제로는 $k(T)$ 때문에 중심부 곡률이 더 커진다.

5 장 비정상 전도 — 얼마나 빨리 반응하는가

Tier 2 · 시간이 들어오면 문제가 달라진다. Bi와 Fo, 그리고 시간 상수.

원리: 두 개의 무차원수가 전부다

과도(transient) 상태 문제에서 가장 먼저 던질 질문은 이것이다. “이 물체는 속까지 골고루 데워지는가, 아니면 겉만 뜨거워지는가?”

이 질문의 답이 **비오 수(Biot number)**다.

$$Bi = \frac{h L_c}{k} = \frac{\text{내부 전도 저항}}{\text{외부 대류 저항}}, L_c = \frac{V}{A_s}$$

- $Bi < 0.1$ — 내부 저항이 무시할 만큼 작다. 물체 전체가 한 덩어리로 움직인다(**집중용량계, lumped capacitance**).
- $Bi > 0.1$ — 내부에 온도 기울기가 생긴다. 위치별로 풀어야 한다.

두 번째는 **푸리에 수(Fourier number)**, 즉 무차원 시간이다.

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2}$$

$Fo \approx 1$ 이 “열이 물체를 한 번 관통하는 데 걸리는 시간”이다. 그래서 **시간 상수** $\tau \approx L_c^2 / \alpha$ 는 어떤 물체가 얼마나 굵딴지를 알려주는 한 줄 요약이다.

수식: 세 가지 도구

① 집중용량계 ($Bi < 0.1$)

에너지 보존을 한 덩어리에 적용하면 1 계 상미분방정식이 나온다.

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = -h A_s (T - T_\infty) \Rightarrow \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-t/\tau_t}, \tau_t = \frac{\rho V c_p}{h A_s}$$

지수 감쇠다. $t = \tau_t$ 에서 온도차가 37 %로 줄고, $3\tau_t$ 면 5 %만 남는다.

② 반무한 고체

두꺼운 물체의 표면이 갑자기 뜨거워졌을 때, 초기에는 반대편을 모른다. 이때 해는 오차함수로 나온다.

$$\frac{T(x, t) - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$

여기서 얻는 감각이 중요하다. **열이 파고드는 깊이는 시간의 제곱근에 비례한다**. 침투 깊이는 대략 $\delta_T \approx 4\sqrt{\alpha t}$ 로 잡는다.

③ 1 항 근사

$Bi > 0.1$ 이고 $Fo > 0.2$ 이면, 무한급수 해의 첫 항만 남겨도 오차가 2 % 안쪽이다.

$$\theta^i \approx C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo)$$

C_1 과 ζ_1 은 Bi 의 함수로 표에서 읽는다. 이 근사가 Heisler 도표의 정체다.

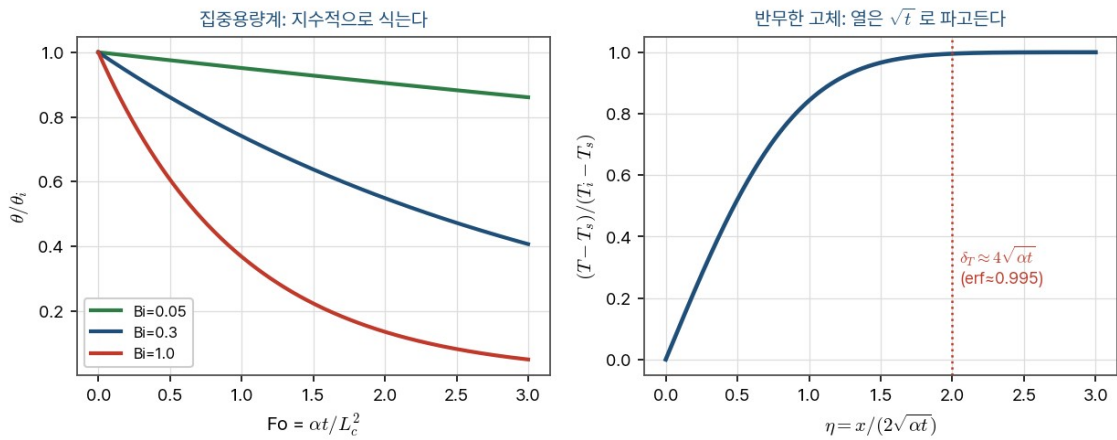


그림 5.1 — 왼쪽: 집중용량계의 지수 감쇠. 오른쪽: 반무한 고체에서 열이 파고드는 모양.¹⁹

예제: 피복관과 연료의 시간 상수가 400 배 차이 난다

과도 해석에서 자주 놓치는 감각을 숫자로 확인해 보자.

피복관 — 두께 0.57 mm, $\alpha_{\text{clad}} = 7.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$\tau \approx \frac{L^2}{\alpha} = \frac{(0.57 \times 10^{-3})^2}{7.4 \times 10^{-6}} = 4.4 \times 10^{-2} \text{ s} = 44 \text{ ms}$$

연료 펠릿 — 반경 4.10 mm, $\alpha_{\text{fuel}} = 9.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

$$\tau \approx \frac{(4.10 \times 10^{-3})^2}{9.1 \times 10^{-7}} = 18.5 \text{ s}$$

유체 — 냉각재가 노심 3.6 m 를 5 m/s 로 지나는 시간은 약 0.7 s. 난류 변동의 시간 척도는 밀리초 이하다.

표 5.1 — 원자로 구성 요소의 열적 시간 상수.²⁰

대상	시간 상수	의미
유체 난류 변동	$\sim 10^{-3} \text{ s}$	거의 즉시
피복관	44 ms	빠르게 따라온다
냉각재 통과	0.7 s	계통 응답의 기준
연료 펠릿	18.5 s	굵뜨다

400 배가 넘는 격차가 보인다. 이것이 원자로 과도 해석이 어려운 이유이자, 동시에 안전의 근거이기도 하다. 연료는 느리게 반응하므로 급격한 출력 변화를 스스로 완충한다.

▶ **실무 팁** CFD 로 켈레 열전달(ChT) 과도 해석을 할 때 이 시간 척도 격차가 그대로 계산 비용이 된다. 유체 쪽 시간 간격은 밀리초여야 하는데 연료가 평형에 도달하려면 수십 초가 필요하다. 그래서 실무에서는 고체 쪽만 큰

¹⁹ 그림 출처: 직접 계산, 해석해 그대로.

²⁰ 표 각주: $\tau \approx L_c^2/\alpha$ 로 산정한 오더 추정값. 정확한 값은 형상 인자와 경계조건에 따라 2~3 배 달라질 수 있다.

시간 간격으로 돌리거나(loose coupling), 고체 열용량을 인위적으로 낮춰 정상 해에 빨리 도달시키는 기법을 쓴다. 후자는 **정상 상태** 답은 맞지만 **과도 궤적은 틀린다**는 점을 잊으면 안 된다.

■ **원자력 연계** 원자로 정지 직후에도 열은 계속 나온다. 핵분열 생성물의 붕괴열이다. 정지 1초 후 정격의 약 6 %, 1시간 후 약 1 %, 하루 뒤 약 0.4 % 수준으로 천천히 줄어든다.²¹ 3,000 MWt 노심이라면 정지 직후에도 180 MW 다. 이 열을 빼내지 못한 것이 후쿠시마였다. 붕괴열은 시간 상수가 시간~일 단위라, 5장에서 배운 짧은 시간 상수들과는 전혀 다른 시간 척도의 문제다.

²¹ **붕괴열**: ANS-5.1 표준의 붕괴열 곡선이 표준 기준이다. 정확한 값은 연소 이력과 노형에 따라 달라진다.

6 장 대류의 정체 — 경계층(boundary layer)과 무차원수

Tier 1-2 · h 는 물성이 아니다. 왜 대류가 유체역학 문제인지 이해한다.

원리: h 는 우리가 모르는 것을 담아둔 상자다

$q'' = h(T_w - T_\infty)$ 는 법칙처럼 생겼지만, 사실 h 를 정의한 식일 뿐이다. 열전도도 k 는 물질만 알면 표에서 찾을 수 있지만, h 는 그렇지 않다. 같은 물이라도 흐르는 속도, 관 지름, 표면 온도, 심지어 유동이 발달했는지에 따라 두 자릿수씩 달라진다.

h 의 정체를 알려면 벽면으로 가야 한다. 유체는 벽에 붙어 있으므로(점착 조건, no-slip condition), **벽면 바로 위에서는 유체가 움직이지 않는다**. 그러니 벽에서 유체로 넘어가는 열은 오직 전도로만 간다.

$$q''_w = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h(T_w - T_\infty) \Rightarrow h = \frac{-k_f (\partial T / \partial y)|_{y=0}}{T_w - T_\infty}$$

h 는 결국 **벽면에서의 온도 기울기**다. 그리고 그 기울기는 유동이 벽 근처의 뜨거운 유체를 얼마나 빨리 쓸어가느냐로 정해진다. 그래서 대류는 유체역학 문제다.

수식: 두 개의 경계층, 세 개의 무차원수

벽 근처에는 두 개의 얇은 층이 생긴다.

- **속도 경계층** δ — 속도가 0 에서 u_∞ 의 99 %까지 회복되는 두께
- **온도 경계층** δ_T — 온도가 T_w 에서 T_∞ 로 회복되는 두께

두 층의 두께 비를 정하는 것이 **프란틀 수**다.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{운동량 확산}}{\text{열 확산}}, \frac{\delta}{\delta_T} \approx \text{Pr}^{1/3}$$

표 6.1 — 대표 유체의 프란틀 수.²²

유체	Pr	경계층 관계	특징
액체금속 (Na, LBE)	0.005~0.03	$\delta_T \gg \delta$	열이 훨씬 멀리 퍼진다
기체 (공기, 헬륨)	0.7	$\delta_T \approx \delta$	거의 같다
물 (300 °C)	0.89	$\delta_T \approx \delta$	고온에서 1 에 가깝다
물 (20 °C)	7	$\delta_T < \delta$	열이 덜 퍼진다
오일	100~10 ⁴	$\delta_T \ll \delta$	아주 얇은 열층

나머지 두 무차원수는 이렇다.

²² 표 각주: 물의 Pr 은 온도에 매우 민감하다. IAPWS-IF97 기준 15.5 MPa·310 °C 에서 0.887 이다. 액체금속의 낮은 Pr 은 SFR·LFR 해석에서 표준 상관식을 못 쓰게 만드는 주된 이유다.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{\text{관성}}{\text{점성}}, Nu = \frac{h L}{k_f} = \frac{\text{대류}}{\text{순수 전도}}$$

Nu 의 해석이 중요하다. Nu 가 100 이면 유동 덕분에 정지 유체보다 100 배 잘 전달된다는 뜻이다. 그리고 대부분의 강제대류(forced convection) 상관식은 다음 한 줄의 변수다.

$$Nu = f(Re, Pr)$$

이것이 유사성의 힘이다. 축소 모형에서 Re 와 Pr 만 맞추면 Nu 가 같고, 따라서 h 를 실기로 옮길 수 있다. 열수력 실험이 성립하는 근거가 여기 있다.

예제: 평판 위 층류에서 난류로

평판 위 유동의 국소 누셀 수는 층류와 난류에서 이렇게 다르다.

$$\text{층류 } (Re_x < 5 \times 10^5): Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$\text{난류 } (Re_x > 5 \times 10^5): Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$$

지수가 1/2 에서 4/5 로 쏜다. Re 가 10 배 커지면 층류에서는 h 가 3.2 배, 난류에서는 6.3 배 커진다. 난류는 열전달의 친구다. 대신 마찰도 같이 커진다. 이 맞교환이 열수력 설계의 본질이다.

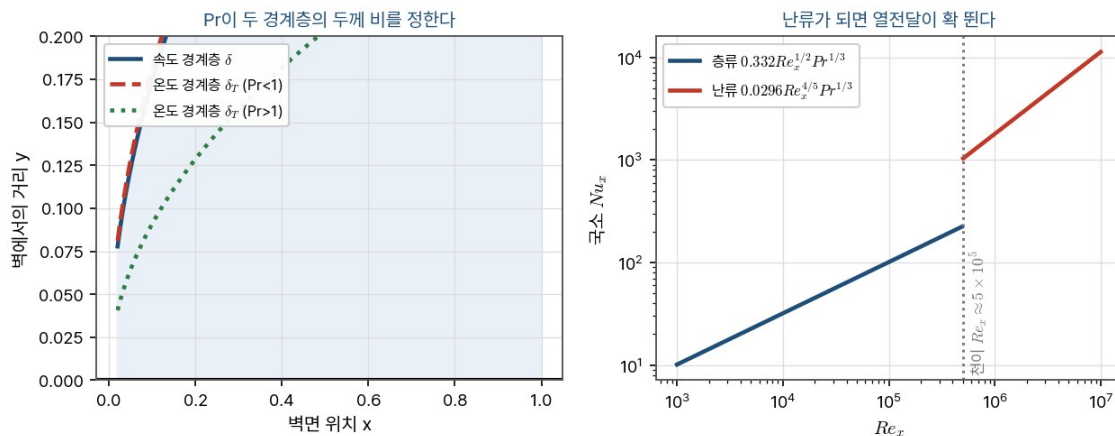


그림 6.1 — 왼쪽: Pr 이 속도·온도 경계층의 두께 비를 정한다. 오른쪽: 천이 이후 국소 Nu 가 급상승한다.²³

▶ **실무 팁** 상관식을 쓸 때 물성을 어느 온도에서 평가하는지가 정해져 있다. 외부 유동은 대개 막 온도 $T_f = (T_w + T_\infty)/2$, 관내 유동은 벌크 온도 T_b , Sieder-Tate 처럼 점성 보정이 따로 붙는 식도 있다. 이걸 틀리면 물이나 오일처럼 점성이 온도에 민감한 유체에서 20~30 % 오차가 쉽게 난다. 논문에서 상관식을 가져올 때는 반드시 **적용 범위**(Re, Pr, L/D)와 **물성 기준 온도**를 함께 옮겨 적는 습관을 들이자.

■ **원자력 연계** CFD 를 돌릴 때 마주치는 y^+ 가 바로 이 경계층 이야기다. $y^+ = y u_\tau / \nu$ 는 벽에서 첫 격자까지의 무차원 거리인데, 벽함수를 쓰면 30~300, 벽까지 직접 풀려면 1 이하가 필요하다. PWR 부수로(subchannel) 조건($D_h = 11.8$ mm, $Re \approx 5 \times 10^5$)에서 $y^+ = 1$ 을 만들려면 첫 격자를 벽에서 1 μ m 이내에 두어야 한다. 노심 전체를 그렇게 풀 수는 없으니, 어디까지 벽함수로 타협할지가 원자로 CFD 의 첫 설계 결정이 된다.

²³ 그림 출처: 직접 계산, Blasius·평판 상관식 기준. 왼쪽은 두께 비를 강조하기 위해 세로축을 과장했다.

7 장 강제대류 — 관내유동과 부수로

Tier 2 · 실제 계산에서 가장 많이 쓰는 장. 수력직경(hydraulic diameter), 상관식, 축방향 온도.

원리: 관 속에는 바깥이 없다

평판 위 유동에는 “무한히 먼 곳”이 있지만, 관 속에는 없다. 경계층이 자라다가 중심에서 만나면 그걸로 끝이고, 그 뒤로는 형상이 변하지 않는다. 이것을 **완전 발달(fully developed)**이라 한다.

그래서 관내유동에서는 기준 온도를 T_∞ 대신 **벌크 평균 온도(bulk mean temperature)**로 쓴다.

$$T_b = \frac{\int \rho u c_p T dA}{\int \rho u c_p dA}$$

“그 단면을 지나는 유체를 컵에 다 받아서 저온 온도”라고 생각하면 된다. 그리고 관이 아닌 복잡한 유로에는 **수력직경**을 쓴다.

$$D_h = \frac{4 A_c}{P_w} \quad (A_c: \text{유동 단면적}, P_w: \text{젖음 둘레})$$

원형 관이면 $D_h = D$ 로 돌아간다. 부수로처럼 생긴 유로도 이 하나로 원형 관 상관식에 밀어 넣을 수 있다. 완벽하진 않지만 놀랄 만큼 잘 맞는다.

수식: 층류와 난류

층류 완전 발달 — Nu 가 상수다. 유동 조건과 무관하다.

$$\text{Nu} = 4.36 \text{ (일정 열유속)}, \text{Nu} = 3.66 \text{ (일정 벽면 온도)}$$

난류 완전 발달 — 두 개만 외우면 된다.

$$\text{Dittus-Boelter: } \text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^n, n = 0.4 \text{ (가열)}, 0.3 \text{ (냉각)}$$

$$\text{Gnielinski: } \text{Nu} = \frac{(f/8)(\text{Re} - 1000)\text{Pr}}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(\text{Pr}^{2/3} - 1)}, f = (0.790 \ln \text{Re} - 1.64)^{-2}$$

Dittus-Boelter 는 간단하지만 오차가 $\pm 25\%$ 수준이고, Gnielinski 는 복잡한 대신 $\pm 10\%$ 로 정확하며 Re 3,000 까지 내려간다. 논문에는 **Gnielinski**, 손계산에는 **Dittus-Boelter** 가 실무 관행이다.

축방향으로 벌크 온도는 어떻게 변하나

에너지 보존을 관 길이 방향으로 적분한다. 일정 열유속이면 벌크 온도가 **직선**으로 오른다.

$$T_b(z) = T_{b,\text{in}} + \frac{q'' P_h z}{\dot{m} c_p} = T_{b,\text{in}} + \frac{q' z}{\dot{m} c_p}$$

일정 벽면 온도면 **지수적**으로 벽온에 접근한다.

$$\frac{T_w - T_b(z)}{T_w - T_{b,\text{in}}} = \exp\left(-\frac{h P_h z}{\dot{m} c_p}\right)$$

원자로 노심은 앞쪽(연료가 열을 정해진 만큼 낸다), 증기발생기 2 차측은 뒤쪽(포화 온도가 거의 고정)에 가깝다.

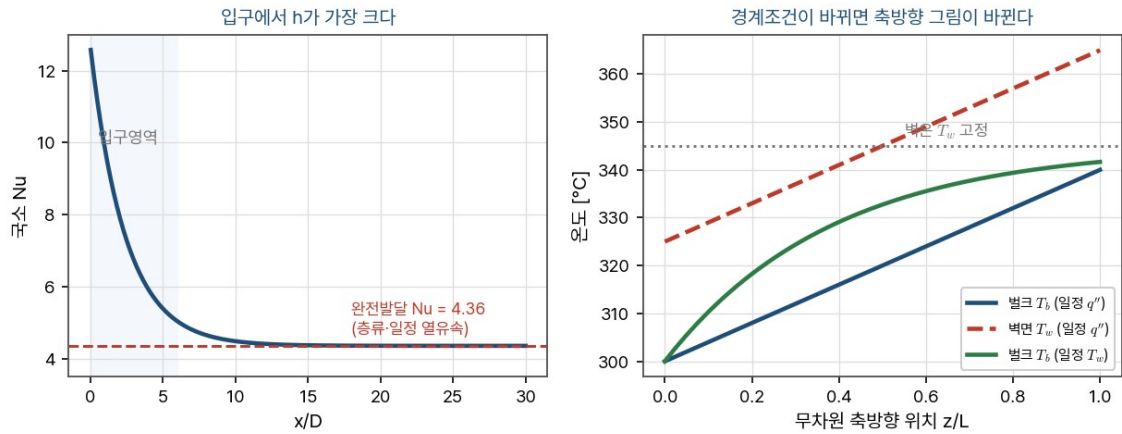


그림 7.1 — 왼쪽: 입구영역에서 h 가 가장 크고 완전 발달로 수렴한다. 오른쪽: 경계조건에 따라 축방향 온도 그림이 달라진다.

24

예제: PWR 부수로의 h 를 직접 구한다

17×17 연료집합체의 대표 조건으로 계산해 보자.

- 피치 $P=12.6$ mm, 봉 직경 $D=9.5$ mm
- 질량유속 $G=3,800$ kg/m²·s, 압력 15.5 MPa, 벌크 온도 310 °C
- 물성(IAPWS-IF97): $\rho=704.8$ kg/m³, $\mu=84.6$ μPa·s, $k=0.5474$ W/m·K, $c_p=5,744$ J/kg·K, $Pr=0.887$

㉠ 수력직경

$$A_c = P^2 - \frac{\pi D^2}{4} = 158.76 - 70.88 = 87.88 \text{ mm}^2, P_w = \pi D = 29.85 \text{ mm}$$

$$D_h = \frac{4 \times 87.88}{29.85} = 11.78 \text{ mm}$$

㉡ 레이놀즈 수

$$Re = \frac{G D_h}{\mu} = \frac{3,800 \times 0.01178}{84.6 \times 10^{-6}} = 5.29 \times 10^5$$

당연히 난류다. 참고로 유속은 $u = G/\rho = 5.4$ m/s.

㉢ 누셀 수와 h

$$Nu_{DB} = 0.023 (5.29 \times 10^5)^{0.8} (0.887)^{0.4} = 831 \Rightarrow h = \frac{831 \times 0.5474}{0.01178} = 3.86 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Gnielinski 로 하면 $Nu=792$, $h=3.68 \times 10^4$ W/m²·K 로 약 5 % 낮다. 1 장과 4 장에서 쓴 대표값 35,000 W/m²·K 는 이 범위 안이다.

㉣ 축방향 온도 상승 — 활성 길이 3.6 m, $q' = 20$ kW/m 일 때

$$\dot{m} = G A_c = 3,800 \times 8.788 \times 10^{-5} = 0.334 \text{ kg/s}$$

$$\Delta T_b = \frac{q' L}{\dot{m} c_p} = \frac{20,000 \times 3.6}{0.334 \times 5,744} = 37.5 \text{ K}$$

²⁴ 그림 출처: 왼쪽은 층류 일정 열유속의 개형(정성적), 오른쪽은 해석식 기준.

실제 PWR의 노심 입출구 온도차(약 30~40 K)와 잘 맞는다. 손계산으로 여기까지 오면 원자로 열수력의 뼈대는 잡은 것이다.

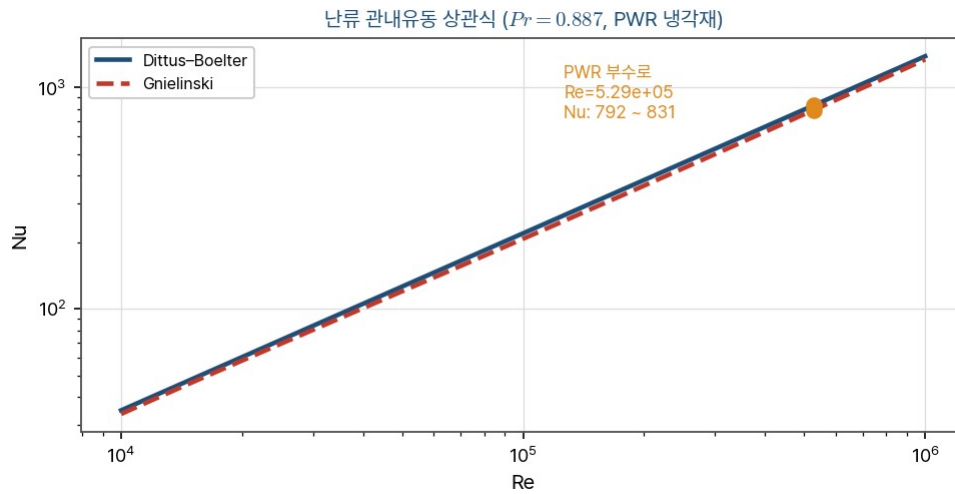


그림 7.2 — Dittus-Boelter와 Gnielinski 비교. PWR 부수로 조건에서 두 식의 차이는 5 % 남짓이다.²⁵

▶ **실무 팁** Dittus-Boelter를 액체금속에 쓰면 안 된다. $Pr \ll 1$ 이면 열 경계층이 속도 경계층보다 훨씬 두꺼워 전제가 무너진다. 나트륨·LBE에는 페클레 수 $Pe = Re Pr$ 기반의 식(예: Lyon, Subbotin 계열)을 쓴다. 봉다발에서도 마찬가지다. 원형 관 상관식을 D_h 로 밀어 넣으면 P/D 가 작을 때 오차가 커져서, Weisman 상관식처럼 $Nu = C Re^{0.8} Pr^{1/3}$ 에서 계수 C 를 P/D 의 함수로 두는 방식을 쓴다.

■ **원자력 연계** 실제 부수로에는 혼합날개(mixing vane)가 달려 있다. 지지격자(spacer grid)에 붙은 작은 날개가 유동을 회전시켜 인접 부수로 사이의 열과 운동량을 섞어준다. 그 결과 국소 h 가 올라가고, 무엇보다 CHF가 개선된다(11·12 장). 그런데 이 효과는 D_h 를 쓴 상관식으로는 전혀 예측되지 않는다. 그래서 격자 형상 개선은 여전히 실험과 CFD의 영역이며, 우리 분야의 유동 가시화 연구가 필요한 지점이기도 하다.

²⁵ 그림 출처: 직접 계산, $Pr = 0.887$ 고정.

8 장 자연대류 — Ra 와 피동 냉각

Tier 2 · 펌프 없이 흐르게 만드는 힘. SMR 피동안전계통의 물리적 근거.

원리: 온도차가 스스로 유동을 만든다

강제대류에서는 속도장이 먼저 주어지고 온도장이 따라온다. 자연대류는 반대다. 온도차 → 밀도차 → 부력 (buoyancy) → 유동 → 다시 온도장. 속도와 온도가 서로를 만든다. 그래서 방정식이 결합되고 문제가 더 어렵다.

부력을 다룰 때는 보통 부시네스크 근사를 쓴다. 밀도 변화를 부력 항에서만 살리고 나머지는 무시하는 방법이다.

$$\rho \approx \rho_{\infty} [1 - \beta(T - T_{\infty})], \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

이상기체면 $\beta = 1/T$ (절대온도)로 간단해진다. 물은 표에서 찾아야 한다.

수식: Gr 과 Ra

강제대류에서 Re 가 하던 역할을 자연대류에서는 그라스호프 수가 한다.

$$Gr = \frac{g \beta (T_w - T_{\infty}) L^3}{\nu^2} = \frac{\text{부력}}{\text{점성력}}$$

그리고 실제 상관식에는 Gr 과 Pr 을 곱한 레일리 수가 들어간다.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

$Ra \approx 10^9$ 근처에서 층류가 난류로 바뀐다. 대표 상관식은 Churchill–Chu 다(수직 평판, 전 범위).

$$\overline{Nu} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

L^3 이 붙어 있다는 점을 눈여겨보자. 높이를 두 배로 하면 Ra 가 8 배가 된다. 자연순환(natural circulation) 계통을 설계할 때 높이차를 벌리는 이유다.

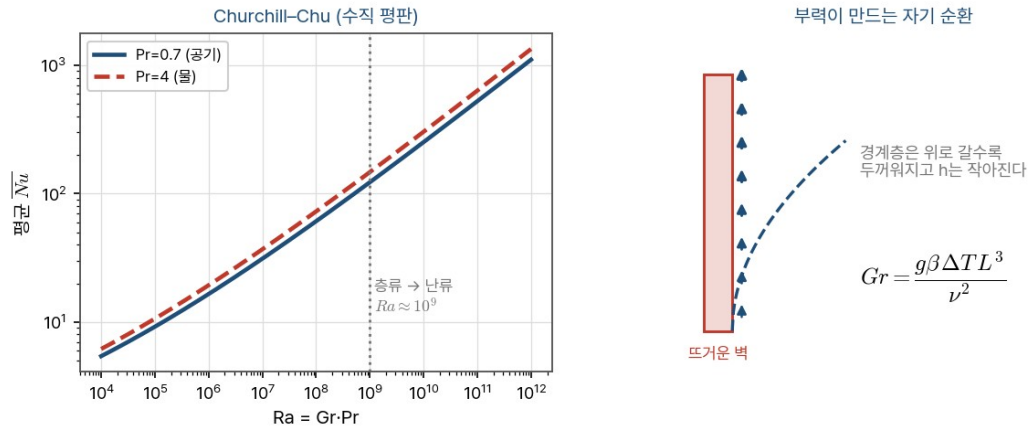


그림 8.1 — 왼쪽: Churchill-Chu 상관식. 오른쪽: 뜨거운 수직 벽이 만드는 자기 순환.²⁶

자연순환 루프: 구동 수두(driving head)

폐루프에서 뜨거운 쪽이 올라가고 찬 쪽이 내려오면, 밀도차가 압력 차를 만든다.

$$\Delta p_{\text{구동}} = g(\rho_c - \rho_h)H$$

이 구동 수두가 루프 전체의 마찰·형상 손실과 균형을 이루는 지점에서 유량이 정해진다.

$$g(\rho_c - \rho_h)H = \left(\sum f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{\rho u^2}{2}$$

여기서 얻는 감각이 실무적으로 중요하다. 구동 수두는 H 에 비례하지만 손실은 u^2 에 비례하므로, 유량은 대략 $\sqrt{H}$ 로만 늘어난다. 높이를 4 배로 올려도 유량은 2 배다. 피동 계통 설계가 항상 “생각보다 크게” 만들어지는 이유다.

예제: 자연순환으로 얼마나 뺄 수 있나

정지 직후 붕괴열을 자연순환으로 제거하는 상황을 대략 잡아보자. 15.5 MPa 물 루프, 고온측(상승관) 평균 300 °C·저온측(하강관) 평균 260 °C, 열중심 높이차 $H = 10$ m.

- $\rho_h = 726.5 \text{ kg/m}^3$ (300 °C), $\rho_c = 796.8 \text{ kg/m}^3$ (260 °C), $c_p \approx 5,100 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ²⁷

$$\Delta p = 9.81 \times (796.8 - 726.5) \times 10 = 6,900 \text{ Pa}$$

6.9 kPa. 원심 펌프가 만드는 수백 kPa에 비하면 초라하지만, **공짜이고 전원이 필요 없다**. 유로 손실 계수를 모두 합쳐 $\sum (f L/D + K) = 30$ 이라 하고 평균 밀도 760 kg/m^3 를 쓰면

$$u = \sqrt{\frac{2 \times 6,900}{760 \times 30}} = 0.78 \text{ m/s}$$

유로 면적이 0.5 m^2 면 질량유량은 약 296 kg/s 이고, $\Delta T = 40 \text{ K}$ 에서 제거 열량은

$$q = \dot{m} c_p \Delta T = 296 \times 5,100 \times 40 \approx 60 \text{ MW}$$

3,000 MWt 노심의 2 % 남짓이다. 정지 후 한두 시간이면 붕괴열이 이 수준으로 내려오므로, 자연순환만으로 감당 가능한 영역에 들어간다. **피동 냉각 개념의 산수는 대략 이렇게 돌아간다**. 다만 이 계산은 손실 계수를

²⁶ 그림 출처: 왼쪽은 직접 계산, 오른쪽은 개념도.

²⁷ 물성값: IAPWS-IF97, 15.5 MPa 기준. 260 °C에서 796.8 kg/m^3 · $4,823 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, 300 °C에서 726.5 kg/m^3 · $5,458 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 이다. 여기서는 루프 평균을 썼다.

통째로 가정한 오더 추정이라는 점을 잊으면 안 된다. 실제 설계에서는 루프 전체의 압력 강하를 구간별로 쌓아 올린다.

▶ **실무 팁** 강제대류와 자연대류가 섞이는 영역(혼합대류, mixed convection)을 무시하면 안 된다. 판별 기준은 Gr/Re^2 다. 1보다 훨씬 작으면 강제대류, 훨씬 크면 자연대류, 0.1~10이면 둘 다 고려해야 한다. 특히 저유량 과도(펌프 코스트다운, 자연순환 전이)에서는 이 구간을 반드시 지나간다. 상승 유동에서 부력이 유동을 도우면 열전달이 좋아지지만, 층류화가 일어나 오히려 **h가 떨어지는** 구간이 생기기도 한다. 이 현상은 초임계압 유체에서 특히 악명 높다.

■ **원자력 연계** NuScale, SMART, i-SMR 같은 일체형 SMR은 아예 주펌프를 없애거나 보조 수단으로 돌린다. 노심과 증기발생기의 높이차를 크게 잡아 자연순환으로 정상 운전까지 하겠다는 설계다. 대신 감수해야 하는 것이 있다. 유량이 압력·온도에 강하게 결합되므로 **밀도파 진동(density-wave oscillation)**이나 **플래싱(flashing) 불안정** 같은 자기 여기 진동이 생길 수 있다. 자연순환로의 안정성 지도($Npch-Nsub$ 평면)를 그리는 연구가 계속되는 이유다.

9 장 복사 열전달

Tier 2 · 평소엔 조연, 사고 조건에서는 주연. 네제품의 세계.

원리: 매질이 필요 없다

복사는 전자기파다. 그래서 진공에서도 간다. 태양열이 지구까지 오는 방식이고, 사용후연료 저장 용기가 우주로 열을 버리는 방식이며, 노심이 노출됐을 때 연료봉끼리 열을 주고받는 방식이다.

핵심 특성은 하나다. **온도의 네제곱에 비례한다**. 그래서 상온에서는 있는 줄도 모르다가, 온도가 두 배가 되면 방사량이 16 배가 되어 갑자기 지배적이 된다.

수식: 흑체(blackbody)에서 실제 표면까지

흑체는 주어진 온도에서 낼 수 있는 최대치를 내는 이상적 표면이다.

$$E_b = \sigma T^4, \sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

파장별 분포는 플랑크 법칙이 주고, 최댓값 위치는 빈의 변위 법칙이 준다.

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

태양(5,800 K)은 0.5 μm (가시광), 1,073 K(800 °C) 표면은 2.7 μm (적외선)에서 최대다. **뜨거울수록 짧은 파장으로 나간다**.

실제 표면은 흑체만큼 못 낸다. 그 비율이 **방사율** ε 이다. 그리고 회색체(gray body) 가정(파장에 무관하게 $\varepsilon = \alpha$)을 쓰면 계산이 크게 간단해진다.

$$E = \varepsilon \sigma T^4, \varepsilon = \alpha \text{ (키르히호프 법칙)}$$

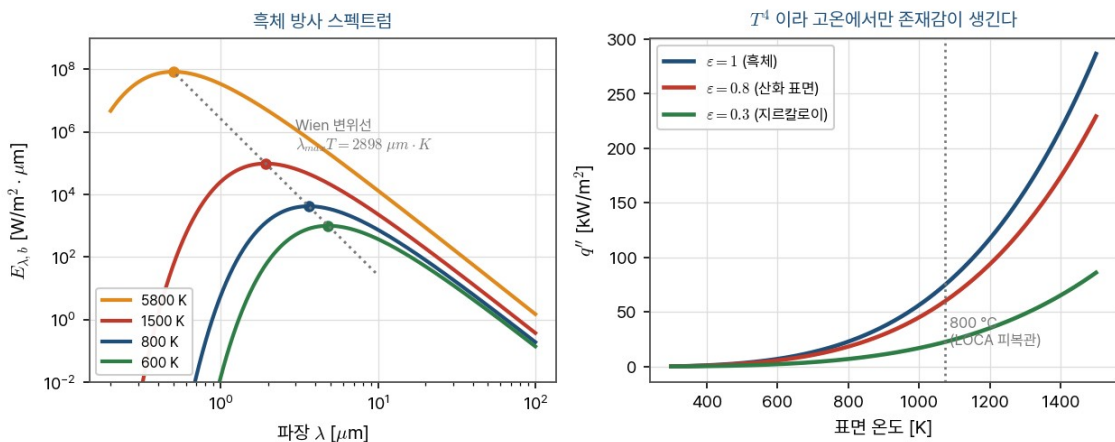


그림 9.1 — 왼쪽: 온도별 흑체 방사 스펙트럼과 빈의 변위선. 오른쪽: 방사율에 따른 순 방사 열유속.²⁸

두 표면 사이의 교환

기하 관계는 **형상계수(view factor)** F_{ij} 로 다룬다. 표면 i 를 떠난 복사 중 j 에 도달하는 비율이다. 두 가지 규칙만 알면 대부분 해결된다.

²⁸ 그림 출처: 직접 계산(플랑크 법칙·스테판-볼츠만 법칙). 오른쪽은 주변 300 K 기준 순 방사량.

$$\sum_j F_{ij}=1 \text{ (합의 법칙)}, A_i F_{ij}=A_j F_{ji} \text{ (상반 법칙)}$$

가장 많이 쓰는 두 경우를 외워두면 편하다.

$$\text{큰 공간 속 작은 물체: } q=\varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\text{긴 동심 원통: } q=\frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{r_1}{r_2}}$$

복사 열전달계수

대류와 나란히 놓고 비교하고 싶을 때는 선형화해서 쓴다.

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$$

예제: 복사가 언제부터 무시할 수 없어지나

방사율 0.8 인 표면이 300 K 주변으로 방열한다고 하자. 자연대류 계수는 공기 중에서 $h \approx 8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 잡는다.

표 9.1 — 방사율 0.8, 주변 300 K 일 때의 복사 열전달계수.²⁹

표면 온도	$h_r [\text{W/m}^2\cdot\text{K}]$	h_r/h_{conv}	판단
350 K (77 °C)	6.3	0.8	이미 비슷하다
500 K (227 °C)	12.3	1.5	복사가 더 크다
800 K (527 °C)	36.4	4.6	대류는 겉다리
1,273 K (1,000 °C)	122	15	사실상 복사뿐

결론은 간단하다. **200 °C** 를 넘으면 복사를 빼놓고 계산하면 안 된다.

▶ **실무 팁** 복사 계산의 단골 실수 두 가지. 첫째, **섭씨를 넣는 것**. T^4 에는 반드시 켈빈이다. 300 대신 573 을 넣어야 할 자리에 300 을 넣으면 답이 13 배 틀린다. 둘째, **방사율을 아무 표에서나 가져오는 것**. 방사율은 표면 상태(산화, 거칠기, 오염)에 극도로 민감하다. 광택 있는 알루미늄은 0.04 지만 산화되면 0.2~0.3 이 된다. 지르칼로이드 신폴과 산화막이 자란 것이 크게 다르다. 사고 해석에서는 보수적으로 잡되, 어느 쪽이 보수적인지를 먼저 따져야 한다(냉각을 방해하려면 낮게, 가열을 키우려면 높게).

■ **원자력 연계** LOCA 재관수(reflood) 단계에서 피복관 온도가 800~1,200 °C 에 이르면 복사가 주요 열전달 경로가 된다. 연료봉끼리, 그리고 연료봉과 채널 벽 사이의 복사가 국소 온도 첨두를 깎아준다. 안전해석 코드 (RELAP5, TRACE)에 봉다발 복사 열교환 모델이 들어 있는 이유다. 또 하나, 사용후연료 건식저장 용기는 붕괴열을 오직 **자연대류와 복사로만** 처분한다. 용기 표면 온도가 100~150 °C 수준이면 표 9.1 대로 두 경로가 비슷한 몫을 담당한다. 마지막으로 중대사고에서 노심이 용융되면 용융물 상부의 복사가 격납 구조물로 가는 주요 열전달 경로가 된다.

²⁹ 표 각주: $h_r = \varepsilon \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$ 로 직접 계산. 자연대류 계수는 공기 중 대표값 8 W/m²·K 로 가정했다.

10 장 열교환기 — LMTD 와 유효도(effectiveness)-NTU

Tier 2 · 두 유체 사이의 열교환을 설계·평가하는 두 가지 방법.

원리: 온도차가 자리마다 다르다

열교환기 안에서는 두 유체의 온도가 위치마다 변한다. 그러니 $q = U A \Delta T$ 에 넣을 ΔT 를 하나로 정해야 한다. 그 답이 **대수 평균 온도차(LMTD)**다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}, q = U A \Delta T_{lm}$$

산술 평균이 아니라 대수 평균인 이유는, 온도가 지수적으로 변하기 때문이다. 유도해 보면 자연히 로그가 나온다.

향류가 병류보다 항상 유리하다. 병류에서는 두 유체의 온도가 결국 만나므로 저온측 출구가 고온측 출구를 넘을 수 없다. 향류에서는 넘을 수 있다. 같은 면적으로 더 많은 열을 옮긴다.

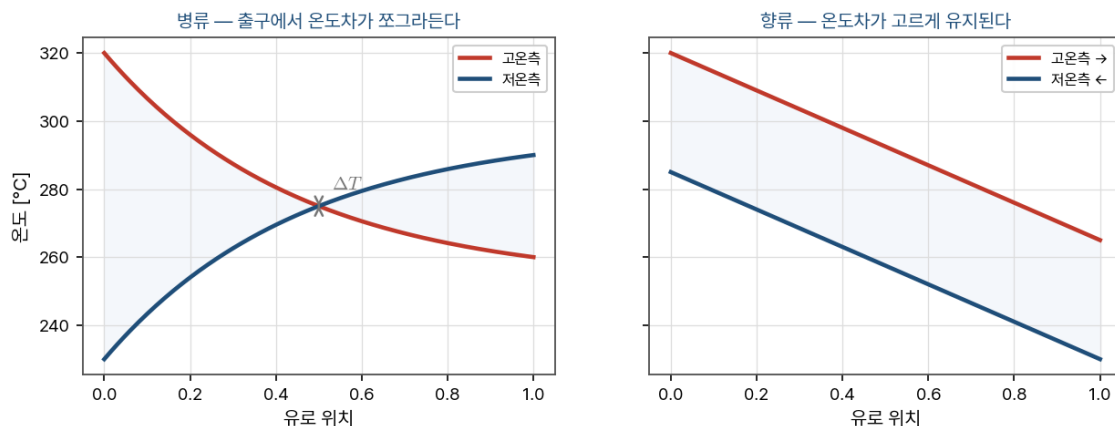


그림 10.1 — 병류와 향류의 온도 선도. 향류는 온도차가 유로 전체에서 고르게 유지된다.³⁰

수식: 두 가지 계산 방식

① LMTD 방식 — 출구 온도를 알 때(설계)

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) = U A F \Delta T_{lm,CF}$$

F 는 보정 계수다. 쉘앤튜브나 교차류처럼 순수 향류가 아닌 형상에서 향류 LMTD 에 곱해 쓴다. F 가 0.8 아래로 내려가면 설계가 나쁘다는 신호로 본다.

② 유효도-NTU 방식 — 출구 온도를 모를 때(성능 평가)

출구 온도를 모르면 LMTD 를 쓸 수 없어 반복 계산을 해야 한다. 이것 피하려고 만든 것이 ϵ -NTU 다.

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{q}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})}, NTU = \frac{U A}{C_{min}}, C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

³⁰ 그림 출처: 개념도, 지수 해석해 형태.

여기서 $C = \dot{m} c_p$ 는 열용량 유량이다. 향류에서는

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}, \left(C_r = 1 \text{ 이면 } \varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \right)$$

$C_r = 0$ 인 특별한 경우가 있다. 한쪽이 상변화(응축·비등)하는 경우다. 온도가 안 변하므로 열용량이 무한대인 셈이고, 이때 $\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$ 로 가장 단순해진다.

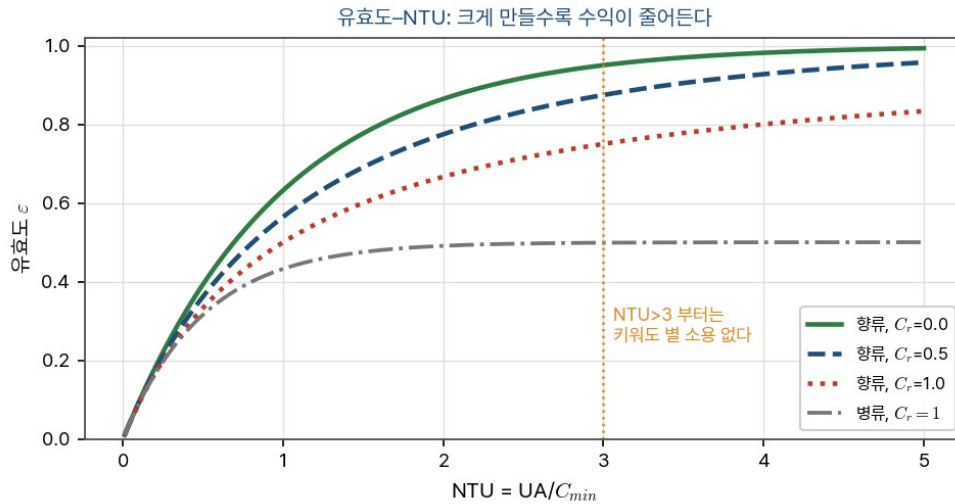


그림 10.2 — 유효도-NTU 선도. NTU 가 3 을 넘으면 더 키워도 수익이 급격히 줄어든다.³¹

예제: 잔열제거 열교환기 성능 평가

- 1 차측(고온): $\dot{m} = 100 \text{ kg/s}$, $c_p = 4.5 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, 입구 $180^\circ\text{C} \rightarrow C_h = 450 \text{ kW/K}$
- 2 차측(저온): $\dot{m} = 150 \text{ kg/s}$, $c_p = 4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, 입구 $35^\circ\text{C} \rightarrow C_c = 627 \text{ kW/K}$
- $UA = 1,500 \text{ kW/K}$, 향류

① 무차원수

$$C_{\min} = 450, C_r = \frac{450}{627} = 0.718, NTU = \frac{1,500}{450} = 3.33$$

② 유효도

$$NTU(1 - C_r) = 0.939, e^{-0.939} = 0.391 \Rightarrow \varepsilon = \frac{1 - 0.391}{1 - 0.718(0.391)} = \frac{0.609}{0.719} = 0.847$$

③ 열량과 출구 온도

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) = 0.847 \times 450 \times 145 = 55,300 \text{ kW} = 55.3 \text{ MW}$$

$$T_{h,o} = 180 - \frac{55,300}{450} = 57.2^\circ\text{C}, T_{c,o} = 35 + \frac{55,300}{627} = 123.2^\circ\text{C}$$

④ LMTD 로 교차 검증

$$\Delta T_1 = 180 - 123.2 = 56.8, \Delta T_2 = 57.2 - 35 = 22.2$$

³¹ 그림 출처: 직접 계산, 향류·병류 해석식.

$$\Delta T_{lm} = \frac{56.8 - 22.2}{\ln(56.8/22.2)} = \frac{34.6}{0.940} = 36.8 \text{ K} \Rightarrow q = 1,500 \times 36.8 = 55,200 \text{ kW}$$

두 방법이 0.2 % 안에서 일치한다. **항상 이렇게 교차 검증하는 습관을 들이자.**

▶ **실무 팁** C_{min} 을 잘못 고르는 실수가 잦다. 유량이 아니라 $\dot{m}c_p$ 가 작은 쪽이다. 유량이 두 배여도 c_p 가 절반이면 같다. 또 하나, 오염 계수를 빼먹으면 안 된다. 신품 상태의 U 로 설계해 놓고 운전 몇 년 뒤 성능 부족을 겪는 것이 열교환기의 고전적 실패 사례다. 설계 여유는 보통 오염 계수로 흡수한다.

■ **원자력 연계 PWR 증기발생기**는 2 차측이 비등하므로 $C_r \approx 0$ 인 극단이다. 2 차측 온도가 포화점에 고정되니 유효도 식이 $\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$ 로 간단해진다. 대신 관 전체가 균일하지 않다(예열 구간 + 비등 구간). 그래서 실제 SG 해석에서는 구간을 나눠 각각 다른 U 를 쓴다. 한편 SMR 의 일체형 증기발생기는 헬리컬 코일 형상을 많이 쓰는데, 좁은 공간에서 전열 면적을 확보하면서 향류를 구현하기 좋기 때문이다. 다만 코일 형상의 2 상 열전달과 유동 유발 진동은 아직 데이터가 부족한 영역이라, 국내외에서 실험 연구가 진행 중이다.

11 장 풀비등(pool boiling)과 임계열유속(CHF)

Tier 2-3 · 열전달 공학에서 가장 유명한 곡선. 원자로 출력 한계의 근거.

원리: 기포가 만드는 초강력 열전달, 그리고 절벽

물이 끓기 시작하면 열전달계수가 갑자기 열 배, 백 배로 된다. 기포가 생겼다 떨어져 나가면서 벽 근처의 뜨거운 액체를 격렬하게 휘젓고, 동시에 잠열(latent heat, h_{fg})이라는 거대한 에너지 저장고를 쓰기 때문이다. 물의 잠열은 1 atm 에서 2,257 kJ/kg 인데, 이는 같은 물을 0 °C 에서 100 °C 까지 데우는 데 드는 에너지의 5 배가 넘는다.

그런데 여기엔 함정이 있다. 벽면 과열도(wall superheat)를 계속 올리면 어느 순간 기포가 너무 많아져 **벽면이 증기막으로 덮인다**. 증기는 액체보다 열을 훨씬 못 나르므로, 그 순간 열전달이 폭락하고 벽 온도가 폭등한다. 이 전환점이 **임계열유속(CHF, Critical Heat Flux)** 이다.

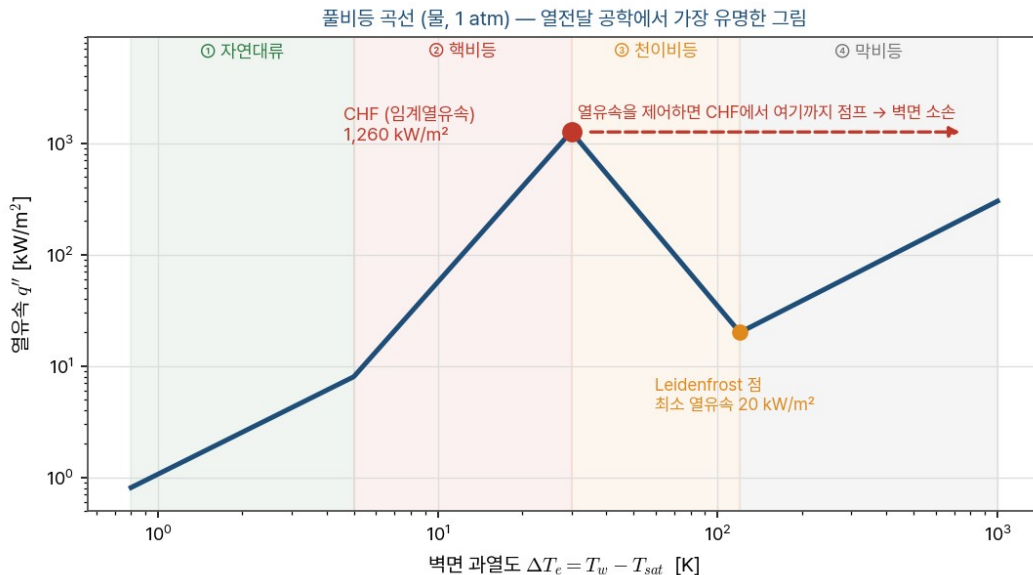


그림 11.1 — 풀비등 곡선. 네 구간과 두 개의 극점(CHF, Leidenfrost)이 전부다.³²

수식: 네 구간

표 11.1 — 풀비등 곡선의 네 구간 (물, 1 atm).³³

구간	과열도 ΔT_e	지배 기구	대략적 h
① 자연대류 비등	< 5 K	단상 자연대류	10^2
② 핵비등	5~30 K	기포 생성·이탈	$10^3 \sim 10^5$
③ 천이비등	30~120 K	불안정한 막·액체 접촉	감소

³² 그림 출처: 물 1 atm 기준 개형. CHF 값은 Zuber 상관식으로 직접 계산(1,260 kW/m²), 최소 열유속과 구간 지수는 문헌의 대표값에 맞춰 조정했다.

³³ 표 각주: $\Delta T_e = T_w - T_{sat}$. 경계값은 표면 상태·젖음성에 따라 상당히 변한다. h 는 W/m²·K 단위의 오더 표시다.

구간	과열도 ΔT_e	지배 기구	대략적 h
㉔ 막비등	$> 120 \text{ K}$	안정한 증기막 + 복사	$10^2 \sim 10^3$

핵비등(nucleate boiling): Rohsenow 상관식

$$q''_{\text{nb}} = \mu_l h_{\text{fg}} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \left[\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{\text{sf}} h_{\text{fg}} \text{Pr}_l^n} \right]^3$$

C_{sf} 와 n 은 **표면-유체 조합**에 따라 정하는 실험 계수다(물-연마 구리 0.0130, 물-스테인리스강 0.0130, 물-백금 0.0130 등, $n=1.0$ for water). 여기서 두 가지를 읽어야 한다.

- $q'' \propto \Delta T_e^3$ — 온도를 조금만 올려도 열유속이 폭증한다.
- 상관식이 **표면 상태에 의존한다** — 그래서 오차가 $\pm 100\%$ 에 이른다. 비등은 아직 완전히 예측되지 않는다.

CHF: Zuber 상관식

$$q''_{\text{CHF}} = C h_{\text{fg}} \rho_v^{1/2} \left[\sigma g (\rho_l - \rho_v) \right]^{1/4}, C \approx 0.149$$

수평 무한 평판의 헬름홀츠 불안정에서 유도된 식이다. 놀랍게도 **표면 재질이 안 들어간다**. 유체 물성과 중력만으로 정해진다는 것이 이 식의 힘이다.

예제: 1 atm 물의 CHF 를 손으로 구한다

물성(IAPWS-IF97, 1 atm 포화): $h_{\text{fg}} = 2,256.5 \text{ kJ/kg}$, $\rho_l = 958.4$, $\rho_v = 0.598 \text{ kg/m}^3$, $\sigma = 0.0589 \text{ N/m}$

$$\rho_v^{1/2} = 0.773, \sigma g (\rho_l - \rho_v) = 0.0589 \times 9.81 \times 957.8 = 553.4$$

$$(553.4)^{1/4} = 4.85$$

$$q''_{\text{CHF}} = 0.149 \times 2,256,500 \times 0.773 \times 4.85 = 1.26 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 1.26 \text{ MW/m}^2$$

약 1.3 MW/m². 손바닥만 한 면적(0.01 m²)에서 13 kW 를 뽑는 셈이다. 가정용 전기밥솥의 열판이 대략 이 근처에서 놓고 있다.

압력을 올리면 어떻게 될까? ρ_v 가 커져서 처음엔 CHF 가 오르지만, h_{fg} 와 σ 가 줄어들어 결국 임계점(22.06 MPa)에서 0 이 된다.

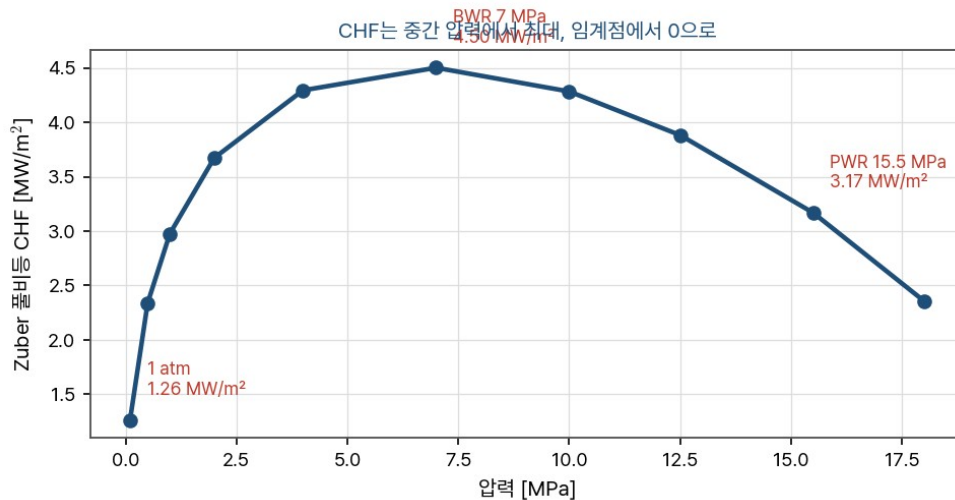


그림 11.2 — 압력에 따른 Zuber CHF. 약 7 MPa 에서 최대이고 임계점에서 0 으로 간다.³⁴

Rohsenow 로 벽면 온도 구해보기

같은 물에서 $q'' = 500 \text{ kW/m}^2$ 를 물-연마 구리 표면($C_{sf} = 0.0130$, $n = 1$)에 걸면

$$\Delta T_e = 15.3 \text{ K} \Rightarrow T_w = 100 + 15.3 = 115.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

500 kW/m² 를 15 K 의 과열도로 처리한다. 환산하면 $h \approx 33,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. 단상 대류로 이 값을 내려면 물을 초당 몇 미터로 흘러야 한다. **비등이 왜 특별한지** 이 한 줄이 말해준다.

▶ **실무 팁** 이 곡선의 가장 위험한 성질은 **열유속을 제어하느냐 온도를 제어하느냐에 따라 거동이 완전히 다르다**는 것이다. 전기 히터나 핵연료처럼 **열유속이 정해진** 경우, CHF 를 넘는 순간 시스템은 같은 열유속을 낼 수 있는 다음 지점, 즉 막비등(film boiling) 영역까지 **한 번에 점프한다**. 그림 11.1 의 붉은 화살표다. 벽 온도가 순식간에 수백 도 뛰어 표면이 녹는다. 이것이 “burnout”이라는 무시무시한 이름이 붙은 이유다. 반면 응축 증기로 가열하는 것처럼 **벽 온도가 정해진** 경우에는 곡선을 따라 천이비등(transition boiling)을 지나므로 사고가 아니라 그냥 성능 저하다. Nukiyama 가 1934 년에 발견한 것이 바로 이 비대칭이다.

■ **원자력 연계** 핵연료는 열유속 제어형이다. 핵분열은 벽이 뜨거워졌다고 멈추지 않는다. 그래서 원자로 설계에서 CHF 는 절대 넘으면 안 되는 선이고, 이를 정량화한 것이 **DNBR(Departure from Nucleate Boiling Ratio)** 이다. $DNBR = q''_{CHF} / q''_{local}$ 로 정의하고, 노심 전체에서 가장 작은 값(MDNBR)이 설계 기준치(보통 1.3 안팎) 이상이 되도록 출력과 유량을 제한한다. 다만 실제 노심은 풀비등이 아니라 **유동비등(flow boiling)**이므로 Zuber 를 그대로 쓸 수 없다. 12 장에서 이어진다.

³⁴ 그림 출처: 직접 계산, IAPWS-IF97 포화 물성 + Zuber 상관식($C=0.149$).

12 장 유동비등과 2 상 유동

Tier 3 · 원자로 안에서 실제로 벌어지는 비등. 건도(quality), 보이드율(void fraction), 그리고 두 가지 CHF.

원리: 흐르면서 끓으면 이야기가 복잡해진다

풀비등에서는 기포가 생겨 위로 떠올랐다. 유동비등에서는 기포가 생기자마자 **유동에 실려 하류로 간다**. 그래서 위치마다 상태가 달라지고, 열전달 기구도 바뀐다.

가열되는 수직관을 아래에서 위로 따라가 보자.

1. **단상 액체** — 아직 벌크가 포화온도 아래. 강제대류(7 장) 그대로.
2. **과냉각 비등(subcooled boiling)** — 벌크는 여전히 포화온도 아래인데, 벽면만 과열되어 기포가 생긴다. 생긴 기포는 벌크로 나가자마자 응축돼 사라진다. **평균 온도만 보면 비등을 놓친다**.
3. **포화 핵비등(saturated nucleate boiling)** — **기포류(bubbly flow) → 슬러그류(slug flow)** — 벌크가 포화에 도달. 증기가 쌓이기 시작한다.
4. **환상류(annular flow)** — 증기가 중심을 차지하고 액체는 벽면에 얇은 막으로 남는다. 액막을 통한 증발이 열전달의 주역이 되며, 이 구간의 h 가 가장 높다.
5. **미스트류(dryout 이후)** — 액막이 말라붙는다. 벽면이 증기와만 접촉하므로 h 가 폭락한다.



그림 12.1 — 가열되는 수직관 안의 유동 양식 변화와 열전달계수의 거동.³⁵

수식: 건도와 보이드율은 다른 것이다

여기서 신입생이 가장 많이 헷갈린다. 둘은 전혀 다른 양이다.

- **건도 x** — 질량 기준. 흐르는 유체 중 증기가 차지하는 **질량** 비율.
- **보이드율 α** — 체적 기준. 관 단면 중 증기가 차지하는 **면적** 비율.

증기는 액체보다 훨씬 가벼우므로, 질량으로 조금이어도 부피로는 많이 차지한다. 둘의 관계는

$$\alpha = \frac{1}{1 + S \frac{1-x}{x} \frac{\rho_v}{\rho_l}}$$

³⁵ 그림 출처: 개념도(Collier & Thome의 고전적 도식 구성을 따름). h 곡선은 정성적 추세다.

$S=u_v/u_l$ 은 **슬립비(slip ratio)**다. 증기가 액체보다 빨리 흐르는 정도이며, $S=1$ 이면 균질류 모델이다. 실제로는 1.5~2 정도가 흔하다.

열평형 건도(equilibrium quality)는 엔탈피로 정의한다. 이 값은 음수도 될 수 있다.

$$x_e = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

$x_e < 0$ 이면 벌크가 아직 과냉각 상태라는 뜻이다. 그런데 앞서 봤듯 이때도 벽면에서는 이미 비등이 일어나고 있다. 그래서 **실제 건도는 열평형 건도보다 크다**. 과냉각 비등 영역을 다루는 모델(Levy, Saha-Zuber 등)이 필요한 이유다.

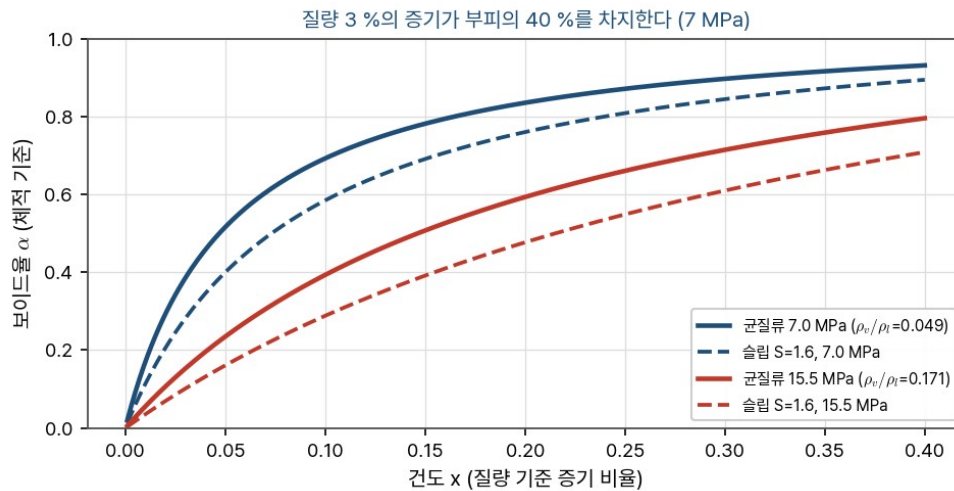


그림 12.2 — 건도에 대한 보이드율. 같은 건도라도 압력이 낮을수록 보이드가 크다.³⁶

예제: 3 %의 증기가 부피의 40 %를 차지한다

BWR 대표 조건(7 MPa)과 PWR 조건(15.5 MPa)을 비교해 보자.

표 12.1 — 건도에 대한 보이드율.³⁷

압력	ρ_v/ρ_l	$x=0.01$	$x=0.03$	$x=0.10$
7 MPa (균질류)	0.0494	0.170	0.385	0.692
7 MPa (S=1.6)	0.0494	0.113	0.281	0.584
15.5 MPa (균질류)	0.1715	0.056	0.153	0.393
15.5 MPa (S=1.6)	0.1715	0.036	0.101	0.288

7 MPa에서 질량 3 %의 증기가 부피의 38.5 %를 차지한다. **BWR의 보이드-반응도 결합이 왜 그렇게 강력한지** 이 표 한 장이 설명한다. 보이드는 중성자 감속을 줄이므로 반응도가 떨어지고, 그래서 BWR은 재순환 유량만으로 출력을 $\pm 25\%$ 제어할 수 있다.

³⁶ 그림 출처: 직접 계산, IAPWS-IF97 포화 밀도 + 균질류/슬립 모델(S=1.6).

³⁷ 표 각주: IAPWS-IF97 포화 물성 기준으로 직접 계산. 7 MPa에서 $\rho_l=739.7 \cdot \rho_v=36.52 \text{ kg/m}^3$, 15.5 MPa에서 $\rho_l=594.4 \cdot \rho_v=101.92 \text{ kg/m}^3$.

압력이 높은 PWR에서는 같은 건도에서 보이드율이 절반 이하다. 밀도비가 3.5 배 크기 때문이다. PWR 이 2 상 효과에 상대적으로 둔감한 이유다.

유동비등 열전달: Chen 의 중첩

유동비등에서는 두 기구가 동시에 작동한다. Chen(1966)은 이를 단순히 더했다.

$$h_{tp} = F \cdot h_l + S \cdot h_{nb}$$

- $F \geq 1$ — 증기 때문에 액체 속도가 빨라져 대류가 강화되는 효과
- $S \leq 1$ — 유동이 기포 성장을 억제하는 효과(억제 인자)

과냉각·저건도에서는 핵비등 항이, 고건도 환상류에서는 대류 항이 지배한다. 이 구조는 지금도 대부분의 시스템 코드에 들어 있다.

두 가지 CHF: DNB 와 dryout

같은 CHF 라도 물리가 다르다.

표 12.2 — DNB 와 dryout 의 비교.³⁸

	DNB	Dryout
발생 건도	낮음(과냉각~저건도)	높음(환상류)
기구	벽면 기포가 뭉쳐 증기막 형성	벽면 액막이 증발·비말등반으로 소진
온도 상승	급격(수백 K)	상대적으로 완만
해당 노형	PWR	BWR
안전 지표	MDNBR	MCPR

원자로용 CHF 상관식은 풀비등의 Zuber 와 달리 실험 데이터베이스에 맞춘 경험식이다. PWR 에서 오래 쓰인 W-3 상관식은 압력·질량유속·건도·수력직경·입구 과냉각도를 모두 입력으로 받는 다항식 형태이며, 적용 범위를 벗어나면 쓰면 안 된다. 최근에는 Groeneveld 의 CHF 조건표(look-up table)가 널리 쓰인다. 수천 건의 실험 데이터를 압력·질량유속·건도의 3 차원 표로 정리한 것으로, 상관식보다 적용 범위가 넓다.

안전 지표는 이렇게 쓴다.

$$\text{MDNBR} = \min_{\text{노심}} \frac{q''_{\text{CHF}}}{q''_{\text{local}}} \geq 1.3 (\text{대표 값}), \text{MCPR} = \min \frac{\text{dryout 출력}}{\text{운전 출력}}$$

2 상 압력 강하

압력 강하는 세 항의 합이다.

$$\Delta p = \phi_{lo}^2 f \frac{L}{D_h} \frac{G^2}{2 \rho_l} + G^2 \left[\frac{1}{\rho_{out}} - \frac{1}{\rho_{in}} \right] + \dot{\rho} g H$$

ϕ_{lo}^2 가 2 상 마찰 증배계수(two-phase friction multiplier)다. 균질류 모델에서는 간단히

³⁸ 표 각주: PWR 은 과냉각 상태로 운전하므로 DNB 형, BWR 은 노심 상부에서 건도가 10 % 이상 되므로 dryout 형이 지배한다.

$$\phi_{lo}^2 = 1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)$$

7 MPa· $x=0.03$ 이면 1.58, 즉 마찰이 58 % 늘어난다. $x=0.10$ 이면 2.93 으로 세 배 가까이 된다. **비등이 시작되면 압력 강하가 급격히 커지고, 이것이 자연순환 계통 불안정의 씨앗이 된다.**

▶ **실무 팁** 2 상 유동에서 “평균 밀도”를 쓸 때는 어느 평균인지 반드시 밝혀야 한다. 중력 항에는 보이드율 기준 밀도 $\dot{\rho} = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l$ 를 쓰고, 가속 항과 운동량에는 건도 기준의 다른 평균이 들어간다. 이 둘을 섞으면 자연순환 루프의 구동 수두를 통째로 틀린다. 슬립비를 1로 두면(균질류) 보이드율이 과대평가되어 구동 수두를 과소평가하는 방향, 즉 보수적인 쪽으로 간다 — 다만 안정성 해석에서는 그 반대가 보수적일 수 있으니, **어느 쪽이 보수적인지 매번 따져야 한다.**

■ **원자력 연계** 자연순환 SMR에서는 이 장의 내용이 안전 문제로 직결된다. 유량이 밀도차로 정해지는데, 그 밀도차가 다시 보이드율에 의존하고, 보이드율은 유량에 의존한다. 이 순환 고리가 지연 시간과 만나면 **밀도파 진동**이 생긴다. 유량이 늘면 보이드가 줄고 → 구동력이 줄어 유량이 줄고 → 보이드가 늘어 다시 유량이 늘는 자기 여기 진동이다. 안정성은 보통 상평면 좌표 N_{pch} (상변화수)와 N_{sub} (과냉각수)로 그린 안정성 지도로 판정한다. 저압에서는 **플래싱 불안정**도 문제가 된다. 상승관을 따라 정수압이 낮아지면 포화온도가 내려가 갑자기 증기가 생기는 현상이며, 기동 과도에서 특히 위험하다. 그래서 자연순환 SMR의 기동 절차 설계는 그 자체가 하나의 연구 주제다.

부록 A — 기호와 단위

표 A.1 — 이 책에서 쓰는 기호.³⁹

기호	이름	단위	처음 나오는 곳
A	면적	m^2	1 장
Bi	비오 수	—	5 장
c_p	정압 비열	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$	2 장
C	열용량 유량 $\dot{m}c_p$	W/K	10 장
C_r	열용량비 $C_{\min}/C_{\max}$	—	10 장
D_h	수력직경	m	7 장
f	마찰계수 (Darcy)	—	7 장
Fo	푸리에 수 (무차원 시간)	—	5 장
G	질량유속 ρu	$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$	7 장
Gr	그라스호프 수	—	8 장
h	대류 열전달계수	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1 장
h_{fg}	증발 잠열	J/kg	11 장
k	열전도도	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	2 장
L_c	특성 길이 V/A_s	m	5 장
Nu	누셀 수	—	6 장
NTU	전열 단위수	—	10 장
Pe	페클레 수 $Re Pr$	—	7 장
Pr	프란틀 수	—	6 장
q	열전달률	W	1 장
q'	선출력 밀도 (LHGR)	W/m	1 장
q''	열유속	W/m^2	1 장
q'''	체적 발열률	W/m^3	4 장
R	열저항	K/W	2 장

³⁹ 표 각주: α 와 σ 는 분야 관행상 두 가지 뜻으로 쓰인다. 문맥으로 구분하며, 혼동 우려가 있는 곳에서는 아래첨자를 붙였다.

기호	이름	단위	처음 나오는 곳
Ra	레이리 수 Gr Pr	—	8 장
Re	레이놀즈 수	—	6 장
S	슬립비 u_v/u_l	—	12 장
U	총괄 열전달계수	W/m ² ·K	3 장
x	건도 (질량 기준)	—	12 장
x_e	열평형 건도	—	12 장
α	열확산계수 $k/\rho c_p$	m ² /s	2 장
α	보이드율 (2 상에서)	—	12 장
β	체적 팽창계수	1/K	8 장
δ	속도 경계층 두께	m	6 장
δ_T	온도 경계층 두께	m	6 장
ε	방사율 / 유효도	—	9·10 장
η_f	핀 효율	—	3 장
μ	점성계수	Pa·s	6 장
ν	동점성계수 μ/ρ	m ² /s	6 장
ρ	밀도	kg/m ³	2 장
σ	스테판-볼츠만 상수 / 표면장력	W/m ² K ⁴ / N/m	1·11 장
τ	시간 상수	s	5 장
ϕ_{lo}^2	2 상 마찰 증배계수	—	12 장

약어

표 A.2 — 자주 쓰는 약어.⁴⁰

약어	원어	뜻
CHF	Critical Heat Flux	임계열유속
DNB	Departure from Nucleate Boiling	핵비등 이탈
DNBR	DNB Ratio	핵비등 이탈 여유비

⁴⁰ 표 각주: 우리말 번역은 한국원자력학회 용어를 따랐다.

약어	원어	뜻
MDNBR	Minimum DNBR	노심 최소 DNBR
CPR / MCPR	Critical Power Ratio	임계출력비 (BWR)
LHGR	Linear Heat Generation Rate	선출력 밀도 q'
LMTD	Log Mean Temperature Difference	대수 평균 온도차
NTU	Number of Transfer Units	전열 단위수
CHT	Conjugate Heat Transfer	컬레 열전달
ONB	Onset of Nucleate Boiling	핵비등 개시
ATF	Accident Tolerant Fuel	사고저항성 연료

부록 B — 물성표

손계산에 바로 쓸 수 있도록 원자력에서 자주 만나는 조건만 뽑았다. 모든 물 물성은 IAPWS-IF97 로 직접 계산해 넣었다.

B.1 압축수 (15.5 MPa, PWR 1 차 계통)

표 B.1 — 15.5 MPa 압축수 물성.⁴¹

T [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	k [W/m·K]	μ [μPa·s]	Pr
260	796.8	4,823	0.6182	104.9	0.819
280	764.3	5,073	0.5932	96.5	0.825
290	746.2	5,243	0.5792	92.5	0.837
300	726.5	5,458	0.5640	88.5	0.857
310	704.8	5,744	0.5474	84.6	0.887
320	680.2	6,144	0.5291	80.4	0.934
330	651.5	6,759	0.5086	76.1	1.011
340	616.0	7,895	0.4849	71.1	1.157

B.2 포화 물성

표 B.2 — 물의 포화 물성.⁴²

P [MPa]	T_{sat} [°C]	ρ_l [kg/m ³]	ρ_v [kg/m ³]	h_{fg} [kJ/kg]	σ [N/m]
0.101	100.0	958.4	0.60	2,257	0.0589
1.0	179.9	887.1	5.15	2,014	0.0422
3.0	233.9	821.9	15.00	1,795	0.0298
7.0	285.8	739.7	36.52	1,505	0.0176
10.0	311.0	688.4	55.45	1,318	0.0119
15.5	344.8	594.4	101.92	966	0.0047

⁴¹ 표 각주: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 이 압력의 포화온도는 344.8 °C 이므로 340 °C 는 포화에 매우 가깝고, c_p 가 급격히 커지는 것이 보인다. 임계점 근처에서 물성이 발산하는 이 거동이 초임계압 유체 해석을 어렵게 만든다.

⁴² 표 각주: IAPWS-IF97 로 직접 계산. 임계점은 22.064 MPa·373.95 °C 이며 그곳에서 h_{fg} 와 σ 가 0 이 된다.

B.3 고체 물성 (대표값)

표 B.3 — 고체 물성 대표값.⁴³

물질	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	k [W/m·K]	α [m ² /s]
UO ₂ (1,000 K)	10,400	315	3.0	9.1×10^{-7}
UO ₂ (500 K)	10,600	270	5.5	1.9×10^{-6}
지르칼로이-4	6,560	330	16	7.4×10^{-6}
스테인리스강 304	7,900	490	15	3.9×10^{-6}
인코넬 690 (SG 관)	8,190	450	14	3.8×10^{-6}
흑연 (원자로급)	1,700	710	100	8.3×10^{-5}
구리	8,930	385	400	1.2×10^{-4}
콘크리트	2,300	880	1.4	6.9×10^{-7}

B.4 기체 물성 (1 atm)

표 B.4 — 기체 물성.⁴⁴

기체	T [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	k [W/m·K]	Pr
공기	27	1.18	1,007	0.0263	0.707
공기	327	0.588	1,068	0.0454	0.700
헬륨	27	0.163	5,193	0.152	0.680
헬륨	727	0.0489	5,193	0.304	0.668
이산화탄소	27	1.77	851	0.0166	0.766

B.5 자주 쓰는 상수

표 B.5 — 상수 모음.⁴⁵

상수	값
스테판-볼츠만 상수 σ	$5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
빈의 변위 상수	$2,898 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$

⁴³ 표 각주: 운전 온도 근처의 대표값이며, 특히 UO₂의 k 는 온도와 연소도에 크게 의존한다(2장 참조). 정밀 해석에는 MATPRO 또는 해당 코드의 물성 라이브러리를 쓸 것.

⁴⁴ 표 각주: 대기압 기준. 가스로서는 헬륨을 7 MPa 안팎으로 가압해 쓰므로 밀도는 이 표의 70 배 수준이 되고, $k \cdot c_p \cdot \text{Pr}$ 은 압력에 거의 무관하다.

⁴⁵ 표 각주: UO₂ 관련 값은 미조사 기준이며 연소도가 올라가면 낮아진다.

상수	값
중력가속도 g	9.81 m/s ²
물의 임계점	22.064 MPa, 373.95 °C
UO ₂ 융점	약 2,840 °C (미조사)
UO ₂ 용융까지의 적분 열전도도	약 93 W/cm (0 °C 기준)

부록 C — 상관식 요약

시험이나 회의 중에 급히 찾아볼 때를 위한 한 장짜리 요약이다. 적용 범위를 벗어나면 쓰지 말 것.

C.1 전도

표 C.1 — 전도 관련 식.⁴⁶

상황	식	비고
평판 저항	$R = L / k A$	2 장
원통 저항	$R = \ln(r_2 / r_1) / 2 \pi k L$	2 장
구 저항	$R = (1 / r_1 - 1 / r_2) / 4 \pi k$	2 장
대류 저항	$R = 1 / h A$	2 장
발열 원기둥 중심 과열	$T_c - T_s = q' / 4 \pi k$	반경 무관
발열 평판(두께 2L)	$\Delta T = q''' L^2 / 2 k$	4 장
핀 효율 (끝단 단열)	$\eta_f = \tanh(m L) / m L,$ $m = \sqrt{h P / k A_c}$	3 장

C.2 비정상 전도

표 C.2 — 과도 전도.⁴⁷

상황	식	적용 조건
집중용량계	$\theta / \theta_i = e^{-t / \tau_i}, \tau_i = \rho V c_p / h A_s$	$Bi < 0.1$
반무한 고체	$\theta^i = \operatorname{erf}(x / 2 \sqrt{\alpha t})$	$\delta_T < L$
침투 깊이	$\delta_T \approx 4 \sqrt{\alpha t}$	오더 추정
1 항 근사	$\theta^i \approx C_1 e^{-\zeta_1^2 Fo}$	$Fo > 0.2$

⁴⁶ 표 각주: 모두 정상 상태, k 일정 가정.

⁴⁷ 표 각주: $\theta = T - T_\infty$, $Bi = h L_c / k$, $Fo = \alpha t / L_c^2$.

C.3 강제대류

표 C.3 — 강제대류 상관식.⁴⁸

상황	식	적용 범위
평판 층류(국소)	$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	$Re_x < 5 \times 10^5, Pr > 0.6$
평판 난류(국소)	$Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$	$5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$
관내 층류 (일정 q'')	$Nu = 4.36$	완전 발달
관내 층류 (일정 T_w)	$Nu = 3.66$	완전 발달
Dittus-Boelter	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$	$Re > 10^4, 0.7 < Pr < 160, L/D > 10$
Gnielinski	$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)}$	$3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$
원관 마찰 (Petukhov)	$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$	매끈한 관
액체금속 (Lyon 계열)	$Nu = 4.82 + 0.0185 Pe^{0.827}$	$Pe = Re Pr$, 일정 q''

C.4 자연대류

표 C.4 — 자연대류.⁴⁹

상황	식
그라스호프 수	$Gr = g \beta \Delta T L^3 / \nu^2$
레이리 수	$Ra = Gr Pr$
수직 평판 (Churchill-Chu)	$\overline{Nu} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$
강제/자연 판별	$Gr/Re^2 \ll 1$ 강제, $\gg 1$ 자연, 0.1~10 혼합
자연순환 구동 수두	$\Delta p = g(\rho_c - \rho_h)H$

⁴⁸ 표 각주: Dittus-Boelter의 n 은 가열 0.4·냉각 0.3. 물성은 벌크 온도 기준. 액체금속 식은 봉다발이 아닌 원관 기준이며, 봉다발에는 P/D 의존 상관식을 따로 쓴다.

⁴⁹ 표 각주: Churchill-Chu 는 층류·난류 전 범위에 쓸 수 있다. 이상기체는 $\beta = 1/T$ (절대온도).

C.5 복사

표 C.5 — 복사.⁵⁰

상황	식
흑체 방사능	$E_b = \sigma T^4$
빈의 변위	$\lambda_{\max} T = 2,898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$
큰 공간 속 작은 물체	$q = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$
동심 원통	$q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{r_1}{r_2}}$
복사 열전달계수	$h_r = \varepsilon \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$

C.6 열교환기·비등·2 상

표 C.6 — 열교환기와 2 상.⁵¹

상황	식
LMTD	$\Delta T_{\text{lm}} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$
향류 유효도	$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-C_r)}}{1 - C_r e^{-NTU(1-C_r)}}$
한쪽 상변화	$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$
Rohsenow 핵비등	$q'' = \mu_l h_{fg} \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\sigma}} \left[\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right]^3$
Zuber CHF	$q''_{\text{CHF}} = 0.149 h_{fg} \rho_v^{1/2} [\sigma g \Delta \rho]^{1/4}$
보이드율	$\alpha = \left[1 + S \frac{1-x}{x} \frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{-1}$
열평형 건도	$x_e = (h - h_f) / h_{fg}$
균질류 2 상 증배	$\phi_{\text{lo}}^2 = 1 + x (\rho_l / \rho_v - 1)$
Chen 중첩	$h_{\text{tp}} = F h_l + S h_{\text{nb}}$

⁵⁰ 표 각주: 모든 온도는 절대온도(K). 회색체·확산면 가정.

⁵¹ 표 각주: Rohsenow의 C_{sf} 는 표면-유체 조합별 실험값(물-구리·스테인리스 0.0130, $n=1.0$). Zuber는 수평 무한 평판 기준이며 유동비등에는 쓰지 않는다.

부록 D — 연습문제 30 선

손계산으로 풀 수 있는 문제만 골랐다. 답은 각 문제 뒤에 바로 붙였으니, 먼저 가려놓고 풀어보길 권한다.

1 장 — 열전달 지도

D.1 열출력 3,000 MWt 인 노심에 연료봉이 50,000 개 있고 활성 길이가 3.6 m 다. 평균 선출력 밀도(linear heat generation rate)는?

답 $q' = 3,000 \times 10^6 / (50,000 \times 3.6) = 16,700 \text{ W/m} \approx 16.7 \text{ kW/m}$. 실제 PWR 평균값과 잘 맞는다.

D.2 $q' = 20 \text{ kW/m}$, 피복관 외경 9.5 mm 일 때 피복관 표면 열유속은?

답 $q'' = q' / \pi D = 20,000 / (\pi \times 0.0095) = 6.70 \times 10^5 \text{ W/m}^2 = 0.67 \text{ MW/m}^2$. 11 장의 플비등 CHF(1 atm 에서 1.26 MW/m²)와 같은 자릿수라는 점을 눈여겨보자.

D.3 300 K 인 물체와 600 K 인 물체의 흑체 방사량 비는?

답 $(600/300)^4 = 16$ 배.

2 장 — 전도의 기본

D.4 두께 5 cm, $k = 1.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 콘크리트 벽의 양면 온도차가 30 K 일 때 열유속은?

답 $q'' = k \Delta T / L = 1.4 \times 30 / 0.05 = 840 \text{ W/m}^2$.

D.5 내경 10 mm·외경 12 mm, $k = 15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 관에 $q' = 5,000 \text{ W/m}$ 가 흐를 때 관 벽의 온도차는?

답 $\Delta T = q' \ln(r_2/r_1) / 2\pi k = 5,000 \times 0.1823 / 94.25 = 9.67 \text{ K}$.

D.6 UO_2 의 k 가 500 K 에서 5.5, 1,500 K 에서 2.5 W/m·K 다. 같은 국소 열유속에서 온도 기울기는 몇 배 차이 나는가?

답 k 에 반비례하므로 $5.5/2.5 = 2.2$ 배. 고온부일수록 기울기가 가팔라져 온도 분포가 포물선보다 더 뾰족해진다.

3 장 — 열저항과 핀

D.7 내부 $h_i = 10$, 벽 $L = 0.2 \text{ m}$ · $k = 0.8$, 외부 $h_o = 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 인 벽의 총괄 열전달계수는?

답 $R'' = 0.1 + 0.25 + 0.04 = 0.39 \text{ m}^2\text{K/W}$, $U = 2.56 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

D.8 D.7 에서 벽 자체가 차지하는 저항 비중은?

답 $0.25/0.39 = 64 \%$. 단열을 개선하려면 벽을 손봐야 한다.

D.9 $k = 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, 두께 2 mm, 길이 30 mm 인 직선 핀이 $h = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 환경에 있다. 핀 효율은? (얇은 핀 근사 $m = \sqrt{2h/kt}$)

답 $m = \sqrt{100/0.4} = 15.8 \text{ 1/m}$, $mL = 0.474$, $\eta_f = \tanh(0.474)/0.474 = 0.93$. 짧고 잘 통하는 핀이라 거의 손실이 없다.

4 장 — 발열 전도

D.10 $q' = 35 \text{ kW/m}$, $k_f = 3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 일 때 연료 중심-표면 온도차는?

답 $q' / 4\pi k = 35,000 / 37.7 = 928 \text{ K}$.

D.11 D.10 에서 연료 반경이 4.1 mm 라면 체적 발열률은?

답 $q''' = q' / \pi r_f^2 = 35,000 / (5.28 \times 10^{-5}) = 6.63 \times 10^8 \text{ W/m}^3 = 663 \text{ MW/m}^3$.

D.12 중심 용융 한계 선출력이 87 kW/m 라면 D.10 조건의 여유율은?

답 $87/35 = 2.49$ 배. 다만 고연소도에서는 k 감소로 이 여유가 줄어든다.

5 장 — 비정상 전도

D.13 지름 10 mm 지르칼로이 구($k = 16$)가 $h = 500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 환경에 놓였다. 집중용량계를 써도 되는가?

답 $L_c = r/3 = 1.67 \text{ mm}$, $Bi = 500 \times 0.00167 / 16 = 0.052 < 0.1$. 써도 된다.

D.14 D.13 의 시간 상수는? ($\rho = 6,560 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 330 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$)

답 $\tau_t = \rho L_c c_p / h = 6,560 \times 0.00167 \times 330 / 500 = 7.2 \text{ s}$.

D.15 콘크리트($\alpha = 6.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) 표면 온도가 갑자기 바뀌었다. 1 시간 뒤 열이 파고든 깊이는?

답 $\delta_T \approx 4\sqrt{\alpha t} = 4\sqrt{6.9 \times 10^{-7} \times 3600} = 0.20 \text{ m}$. 격납건물 벽이 두꺼운 이유 중 하나다.

6 장 — 대류의 정체

D.16 물(20°C , $Pr = 7$)과 공기($Pr = 0.7$)에서 δ/δ_T 는 각각 얼마인가?

답 $Pr^{1/3}$ 이므로 물 1.91, 공기 0.89. 공기는 온도 경계층이 오히려 조금 더 두껍다.

D.17 $Nu = 800$, $k = 0.55 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $D = 12 \text{ mm}$ 일 때 h 는?

답 $h = Nu k / D = 800 \times 0.55 / 0.012 = 3.67 \times 10^4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

D.18 난류 관내유동에서 유량을 10 배로 늘리면 h 는 몇 배가 되는가?

답 $Nu \propto Re^{0.8}$ 이므로 $10^{0.8} = 6.3$ 배. 대신 압력 손실은 대략 $10^{1.8} = 63$ 배가 된다.

7 장 — 강제대류

D.19 내경 20 mm 관에 15.5 MPa·300 °C 물이 4 m/s 로 흐른다. Re 는? ($\rho = 726.5$, $\mu = 88.5 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)

답 $Re = \rho u D / \mu = 726.5 \times 4 \times 0.02 / (88.5 \times 10^{-6}) = 6.57 \times 10^5$.

D.20 D.19 에서 Dittus-Boelter 로 Nu 와 h 를 구하라. ($Pr=0.857$, $k=0.564$ W/m·K, 가열)

답 $Nu = 0.023 (6.57 \times 10^5)^{0.8} (0.857)^{0.4} = 974$, $h = 974 \times 0.564 / 0.02 = 2.75 \times 10^4$ W/m²·K.

D.21 유량 0.5 kg/s, $q' = 25$ kW/m, 길이 3 m, $c_p = 5,458$ J/kg·K 인 채널의 벌크 온도 상승은?

답 $\Delta T_b = q' L / \dot{m} c_p = 75,000 / 2,729 = 27.5$ K.

8장 — 자연대류

D.22 높이 2 m 수직 벽이 60 °C, 주변 공기가 20 °C 다. Ra 는? ($T_f = 40$ °C, $\nu = 1.70 \times 10^{-5}$, $\alpha = 2.40 \times 10^{-5}$ m²/s, $\beta = 1/T_f$)

답 $Ra = g \beta \Delta T L^3 / \nu \alpha = 9.81 \times (1/313) \times 40 \times 8 / (4.08 \times 10^{-10}) = 2.46 \times 10^{10}$. 난류 영역이다.

D.23 D.22 에서 Churchill-Chu 로 $\overline{Nu}$ 와 h 를 구하라. ($Pr=0.71$, $k=0.0271$ W/m·K)

답 $\overline{Nu} = 336$, $h = 336 \times 0.0271 / 2 = 4.55$ W/m²·K. 공기 자연대류는 이렇게 작다.

D.24 자연순환 루프의 높이차를 4 배로 늘리면 유량은 몇 배가 되는가?

답 구동 수두는 4 배, 손실은 u^2 에 비례하므로 $u \propto \sqrt{H}$, 즉 2 배. 높이를 키운 만큼 유량이 늘지 않는다.

9장 — 복사

D.25 800 K 흑체의 방사 열유속은?

답 $\sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 4.096 \times 10^{11} = 23.2$ kW/m².

D.26 방사율 0.7 인 1,000 K 표면이 300 K 환경으로 내보내는 순 열유속은?

답 $0.7 \sigma (1000^4 - 300^4) = 39.4$ kW/m².

D.27 1,000 K 표면의 방사 최대 파장은?

답 $\lambda_{\max} = 2,898 / 1,000 = 2.90$ μm. 적외선이다.

10장 — 열교환기

D.28 향류 열교환기에서 $C_h = 200$, $C_c = 300$ kW/K, $UA = 400$ kW/K, 입구 온도 150 °C 와 30 °C 다. 유효도와 열량은?

답 $C_r = 0.667$, $NTU = 2$, $\varepsilon = 0.740$, $q = 0.740 \times 200 \times 120 = 17,760$ kW = 17.8 MW.

D.29 D.28 의 출구 온도를 구하고 LMTD 로 검산하라.

답 $T_{h,o}=61.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{c,o}=89.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. $\Delta T_1=60.8$, $\Delta T_2=31.2$, $\Delta T_{lm}=44.4\text{ K} \rightarrow$
 $q=400 \times 44.4=17,760\text{ kW}$. 일치한다.

D.30 D.28 에서 $U A$ 를 두 배($NTU=4$)로 늘리면 열량은 얼마나 늘어나는가?

답 $\varepsilon=0.893$, $q=21,440\text{ kW}$. 면적을 두 배 썼는데 열량은 21 %만 늘었다. 그림 10.2 가 말하던 수확 체감이다.

11~12 장 — 비등과 2 상 (보너스)

D.31 7 MPa 물의 Zuber 풀비등 CHF 는? ($h_{fg}=1,505\text{ kJ/kg}$, $\rho_l=739.7$, $\rho_v=36.52\text{ kg/m}^3$, $\sigma=0.0176\text{ N/m}$)

답 4.50 MW/m^2 . 그림 11.2 의 최댓값 근처다.

D.32 7 MPa 에서 건도 5 %일 때 보이드율은? (균질류, 그리고 $S=1.8$)

답 균질류 0.516, 슬립 0.372. 질량 5 %가 부피의 절반을 차지한다.

D.33 D.32 조건의 균질류 2 상 마찰 증배계수는?

답 $\phi_{lo}^2=1+0.05(739.7/36.52-1)=1.96$. 마찰이 약 두 배가 된다.

D.34 15.5 MPa 계통에 $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ 물이 들어온다. 입구의 열평형 건도는?

답 $x_e=(1,284.2-1,629.9)/966.4=-0.36$. 음수, 즉 상당히 과냉각된 상태다. 그런데도 벽면에서는 과냉각 비등이 일어날 수 있다는 점이 12 장의 요점이었다.

부록 E — 용어집

연구실에서 오가는 말을 알아듣는 데 필요한 것만 모았다.

표 E.1 — 용어집.⁵²

용어	뜻
강제대류	펌프·팬 등 외부 동력으로 만든 유동에 의한 대류.
건도 (quality)	흐르는 유체 중 증기가 차지하는 질량 비율. 보이드율과 혼동하지 말 것.
경계층	벽면 근처에서 속도(또는 온도)가 자유류 값으로 회복되는 얇은 층.
과냉각 비등	벌크 유체는 포화온도 아래인데 벽면에서만 기포가 생기는 상태.
관성 유동/환상류	증기가 관 중심을, 액체가 벽면 얇은 막을 차지하는 2상 유동 양식(flow regime).
구동 수두	자연순환에서 밀도차가 만드는 압력 차. $g \Delta \rho H$.
누셀 수 (Nu)	대류가 순수 전도보다 몇 배 잘 전달하는지. hL/k_f .
대수 평균 온도차 (LMTD)	열교환기 전체를 대표하는 온도차.
레이리 수 (Ra)	자연대류의 세기. $Gr \cdot Pr \cdot 10^9$ 근처에서 난류로 바뀐다.
막비등	벽면이 안정한 증기막으로 덮인 상태. 열전달이 나쁘다.
밀도파 진동	자연순환 계통에서 유량-보이드-구동력의 되먹임이 만드는 자기 여기 진동.
방사율 (emissivity)	실제 표면이 흑체 대비 내는 방사량의 비율. 표면 상태에 매우 민감.
보이드율 (void fraction)	관 단면 중 증기가 차지하는 면적(체적) 비율.
부시네스크 근사	밀도 변화를 부력 항에서만 고려하는 자연대류 해석의 표준 근사.
비오 수 (Bi)	내부 전도 저항 대 외부 대류 저항. 0.1 보다 작으면 집중용량계.
선출력 밀도 (LHGR, q')	연료봉 길이 1 m 당 발생 열. 원자력 고유의 단위.

⁵² 표 각주: 우리말 표기는 한국원자력학회 및 대한기계학회 용어를 우선으로 했다.

용어	뜻
수력직경 (D_h)	비원형 유로를 원형 관 상관식에 쓰기 위한 등가 직경. $4 A_c / P_w$.
슬립비 (S)	증기 속도와 액체 속도의 비. 1 이면 균질류.
열저항	옴의 법칙 유추로 정의한 $\Delta T / q$. 직렬·병렬로 다룬다.
열평형 건도 (x_e)	엔탈피로 정의한 건도. 과냉각 상태에서는 음수가 된다.
열확산계수 (α)	$k / \rho c_p$. 얼마나 빨리 반응하는지를 정한다.
오염 계수 (fouling factor)	운전 중 표면에 쌓이는 스케일·크러드의 열저항.
유효도 (ε)	이론 최대 열량 대비 실제 열량. 열교환기 성능 지표.
임계열유속 (CHF)	핵비등이 유지되는 최대 열유속. 넘으면 벽면이 증기막으로 덮인다.
자연대류	온도차가 만든 밀도차(부력)로 유동이 생기는 대류.
적분 열전도도	$\int k dT$. k 가 온도에 따라 변하는 연료 온도 계산의 표준 도구.
접촉 열저항	두 고체 접촉면에서 온도가 불연속으로 뛰는 현상의 저항.
집중용량계	물체 내부 온도가 균일하다고 보는 과도 해석 모델. $Bi < 0.1$.
컬레 열전달 (CHT)	고체 전도와 유체 대류를 한 번에 푸는 해석 방식.
핀 효율	핀 전체가 뿌리 온도일 때 대비 실제 방열량 비율.
프란틀 수 (Pr)	ν / α . 속도 경계층과 온도 경계층의 두께 비를 정한다.
핵비등	벽면 기포핵에서 기포가 생겼다 떨어지며 열을 나르는 고효율 비등 영역.
형상계수 (F_{ij})	표면 i 를 떠난 복사 중 j 에 도달하는 비율.
DNB	과냉각·저건도에서 벽면 기포가 뭉쳐 증기막을 만드는 CHF 기구. PWR 형.
DNBR / MDNBR	CHF 대 국소 열유속의 비 / 노심 최소값. PWR 의 핵심 안전 지표.
Dryout	환상류에서 벽면 액막이 소진되어 생기는 CHF 기구. BWR 형.
Leidenfrost 점	막비등이 시작되는 최소 열유속 지점.

용어	뜻
Nukiyama 실험	1934 년 풀비등 곡선을 처음 그린 실험. 열유속 제어의 위험성을 보였다.

다음에 읽을 것

이 책을 다 읽었다면 다음 단계는 이렇다.

1. **정식 교과서** — Incropera & DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 이 책의 1~10 장에 해당하는 내용이 훨씬 상세하고 연습문제가 풍부하다.
2. **원자력 열수력** — Todreas & Kazimi, *Nuclear Systems I*. 11~12 장 이후를 제대로 배우려면 이 책이다.
3. **2상 유동** — Collier & Thome, *Convective Boiling and Condensation*. 12 장의 모든 주제가 여기 다 있다.
4. **같은 시리즈** — 「필수 유체역학」에서 6~8 장의 속도장을, 「필수 열역학」에서 사이클과 물성을 채운다.
5. **THINK Lab 자료** — 난류 모델 매뉴얼(6 장 심화), CFD 쉘레 열전달 매뉴얼(2·5 장 심화), OpenMC 교재(4 장의 발열 분포 계산).

▶ **실무 팁** 교과서를 처음부터 끝까지 읽으려 하지 말자. 연구 중에 막히는 지점이 생기면 그 장만 펴서 읽는 편이 훨씬 오래 남는다. 이 책은 “어느 장을 펴야 하는지”를 알려주기 위한 지도다.