



필수 유체역학

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 둘째 권.....	5
난이도 표시.....	5
장마다 반복되는 여섯 칸.....	5
이 책이 다루지 않는 것.....	5
감각 잡기 — 유체를 몸으로 이해하기.....	7
1. 반전 하나 — 공기가 물보다 ‘끈적하다’.....	7
2. Re 하나로 세상을 재면.....	7
3. 동압 감각 — 속도를 압력으로 환산하기.....	8
4. 외워두면 평생 쓰는 여덟 개의 숫자.....	9
5. 무서운 지수 두 개.....	9
6. 경계층은 생각보다 얇다.....	9
7. 난류를 이해하는 비유 하나.....	9
8. 자주 하는 착각 다섯 가지.....	10
1 장 유체를 보는 눈.....	11
원리: 유체는 전단응력(shear stress)을 견디지 못한다.....	11
자주 헛갈리는 두 점성.....	11
수식: 두 가지 시점.....	12
예제: 연속체(continuum) 가정은 언제 무너지는가.....	12
2 장 유체 정역학 — 안 움직여도 힘은 있다.....	14
원리: 정지한 유체에서는 압력이 전부다.....	14
압력을 부르는 세 가지 이름.....	14
수식: 부력과 안정성.....	14
예제: 자연순환의 구동 수두(driving head)는 정역학에서 나온다.....	15
3 장 검사체적(control volume)과 보존 법칙.....	16
원리: 상자를 그리고, 들어온 것과 나간 것을 센다.....	16
수식: 세 개의 실무 도구.....	16
① 질량 보존(conservation of mass) (정상 유동).....	16
② 운동량 보존(conservation of momentum).....	16
③ 에너지 보존 (수두 형태).....	17
예제: 배관 엘보에 걸리는 힘.....	17
4 장 베르누이와 그 한계.....	19
원리: 에너지가 형태를 바꿀 뿐이다.....	19
수식: 네 개의 전제, 네 개의 함정.....	19
정체압(stagnation pressure)과 피토관(Pitot tube).....	20
예제: 캐비테이션은 언제 시작되는가.....	20
5 장 미분 방정식 — 연속식과 나비에-스토크스.....	21
원리: 상자를 점으로 줄이면 미분방정식이 된다.....	21
수식: 해석해가 있는 두 가지 경우.....	21
① 쿠테트 유동(Couette flow) — 벽이 끌어서.....	21
② 하겐-푸아죄유 유동 — 압력이 밀어서.....	22
예제: 층류 가정이 성립하는 관 지름.....	22

6 장 차원해석(dimensional analysis)과 상사	23
원리: 실기를 다 만들어 볼 수는 없다	23
수식: 원자력에서 쓰는 무차원 수	23
예제: Re 와 Fr 을 동시에 맞출 수 없다	23
7 장 점성 관내유동과 마찰	25
원리: 벽이 유체를 붙잡는 대가	25
수식: 층류, 천이, 난류	25
층류 ()	25
난류 ()	25
비원형 유로	26
예제: PWR 노심 부수로의 압력 강하	26
8 장 부차 손실과 관망	28
원리: 유동이 방향을 바꾸거나 면적이 변하면 에너지를 잃는다	28
왜 확대가 축소보다 손실이 크다	28
수식: 관망의 두 법칙	28
펌프와 시스템의 만남	29
예제: 자연순환 루프의 유량이 정해지는 자리	29
9 장 경계층과 외부유동	30
원리: 프란틀의 위대한 타협 (1904)	30
수식: 마찰 항력과 형상 항력	30
박리: 유동이 벽을 떠나는 순간	30
와류 방출(vortex shedding)	31
예제: 증기발생기 전열관의 와류 방출 진동수	31
10 장 난류 입문	33
원리: 난류는 무질서가 아니라 구조다	33
수식: 레이놀즈 평균과 벽법칙	33
벽법칙 — 실무에서 매일 쓰는 것	34
예제: PWR 부수로에서 첫 격자를 어디 두어야 하나	34
11 장 2 상 유동과 압축성	36
원리: 단상 유동의 상식이 대부분 깨진다	36
수식: 세 가지 모델 계층	36
균질류 압력 강하	37
Lockhart-Martinelli 분리류	37
예제: 건도(quality) 5 %가 압력 강하를 두 배로 만든다	37
압축성: 유량이 더는 늘지 않는 순간	38
12 장 유동 측정과 가시화	40
원리: 무엇을 재는가에 따라 방법이 갈린다	40
수식: 대표적 계측 원리	40
PIV 의 원리	40
예제: 굴절률 정합(matched index of refraction)이 없으면 봉다발 안은 못 본다	41
부록 A — 기호와 단위	43
약어	44
부록 B — 물성표	46
B.1 물 (대기압, 압축수)	46
B.2 물 (15.5 MPa, PWR 1 차 계통)	46

B.3 포화 물성 (2 상 계산용).....	46
B.4 기체와 그 밖의 유체 (대표값).....	47
B.5 표면 거칠기와 상수.....	47
부록 C — 상관식 요약.....	49
C.1 기본 관계.....	49
C.2 보존 법칙.....	49
C.3 해석해.....	50
C.4 마찰과 손실.....	50
C.5 외부유동과 난류.....	51
C.6 2 상과 압축성.....	51
C.7 상사와 계측.....	52
부록 D — 연습문제 33 선.....	53
1~2 장 — 유체를 보는 눈, 정역학.....	53
3~4 장 — 검사체적, 베르누이.....	53
5~6 장 — 미분 방정식, 상사.....	54
7~8 장 — 마찰과 관망.....	54
9~10 장 — 경계층과 난류.....	55
11~12 장 — 2 상, 압축성, 계측.....	55
부록 E — 용어집.....	57
다음에 읽을 것.....	59

이 책을 읽는 법

누구를 위한 책인가

대학원 연구를 시작하면서 유체역학을 처음부터 다시 잡고 싶은 사람을 위한 책이다. 목표는 하나다. **연구실에서 오가는 유동 이야기를 알아듣고, CFD 든 실험이든 내가 얻은 숫자가 말이 되는지 스스로 판단할 수 있게 되는 것.**

유체역학은 이상하게 배우기 어려운 과목이다. 방정식은 200 년 전에 다 나왔는데, 아직도 일반해를 아무도 모른다.¹ 그래서 이 분야는 “풀었다”가 아니라 “어디까지 근사했는가”의 학문이다. 이 책은 그 근사의 계보를 따라간다. 무엇을 버려서 무엇을 얻었는지.

3 부작 중 둘째 권

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

표 0.1 — 3 부작의 역할 분담.²

과목	답하는 질문	이 책과의 관계
열역학	에너지가 얼마나 오가는가	물성과 상태를 준다
유체역학	유체가 어떻게 움직이는가	이 책
열전달	열이 얼마나 빨리 오가는가	이 책의 속도장을 받아 쓴다

난이도 표시

- **Tier 1 (필수)** — 신입생이라면 반드시. 큰 그림과 손계산.
- **Tier 2 (석사 이상)** — 실제 해석·설계에 쓰는 상관식과 절차.
- **Tier 3 (박사 권장)** — 난류, 2 상, 계측. 연구가 시작되는 자리.

장마다 반복되는 여섯 칸

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

이 책이 다루지 않는 것

솔직하게 밝혀둔다.

- **압축성 유동**은 11 장에서 초킹(choking)만 다룬다. 충격파·초음속 노즐은 제외했다. 원자력에서 필요한 지점이 주로 파단 유량이기 때문이다.
- **난류 모델**은 10 장에서 벽법칙과 y^+ 까지만 간다. $k-\epsilon$, SST, RSM, LES 는 THINK Lab 의 별도 자료 「난류 모델의 유도 및 특성」이 담당한다.
- **비뉴턴 유체**는 1 장에서 존재만 언급하고 넘어간다.
- **CFD 수치기법**은 다루지 않는다. 다만 10·12 장이 CFD 를 쓰기 전에 알아야 할 물리를 정리한다.

¹ 나비에-스토크스 방정식의 존재성과 매끄러움: 3 차원에서 해가 항상 존재하고 매끄럽게 유지되는지는 아직 증명되지 않았다. 클레이 수학연구소의 밀레니엄 문제 일곱 개 중 하나다.

² 표 각주: 「필수 열전달」 6~8 장(대류)이 이 책의 7·9·10 장에 직접 기대고 있다. 두 권을 함께 보면 대류 열전달계수 h 의 정체가 훨씬 선명해진다.

▶ **실무 팁** 유체역학에서 가장 자주 저지르는 실수는 계산 실수가 아니라 **적용 조건을 벗어난 식을 쓰는 것이다**. 베르누이를 점성 유동에 쓰거나, 원형 관 상관식을 좁은 틈새에 쓰거나, 단상 마찰계수로 2 상 압력강하를 구하는 식이다. 이 책은 매 식마다 “어디까지 유효한가”를 함께 적었다. 식보다 그 문장이 더 중요하다.

감각 잡기 — 유체를 몸으로 이해하기

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

유체역학은 방정식이 무섭게 생겼지만, 실무에서 쓰는 감각은 의외로 몇 개 안 된다. 이 장은 그 몇 개를 먼저 심어두는 자리다.

1. 반전 하나 — 공기가 물보다 ‘끈적하다’

물이 공기보다 점성이 크다는 것은 누구나 안다. 실제로 20 °C 에서 μ 는 물이 공기의 55 배다.

그런데 유체역학에서 실제로 쓰는 것은 μ 가 아니라 **동점성계수(kinematic viscosity)** $\nu = \mu / \rho$ 다. 이 값으로 보면 결과가 뒤집힌다.

표 0.2 — 물과 공기의 점성 비교.³

	μ [Pa·s]	ρ [kg/m ³]	ν [m ² /s]
물 (20 °C)	1.00×10^{-3}	998	1.00×10^{-6}
공기 (20 °C)	1.81×10^{-5}	1.20	1.51×10^{-5}

공기의 ν 가 물의 15 배다. 운동량을 퍼뜨리는 능력으로는 공기가 압도적이다. 그래서 같은 크기·같은 속도라면 공기 중에서는 물속보다 Re 가 훨씬 작고, 층류에 가깝다.

이 반전을 한 번 소화하면 “왜 저 실험은 물로 하고 저 실험은 공기로 하는가”가 보이기 시작한다.

2. Re 하나로 세상을 재면

레이놀즈 수는 헤엄치는 박테리아에서 대형 컨테이너선까지 열네 자릿수를 관통한다. 그런데도 같은 물리로 다뤄진다.

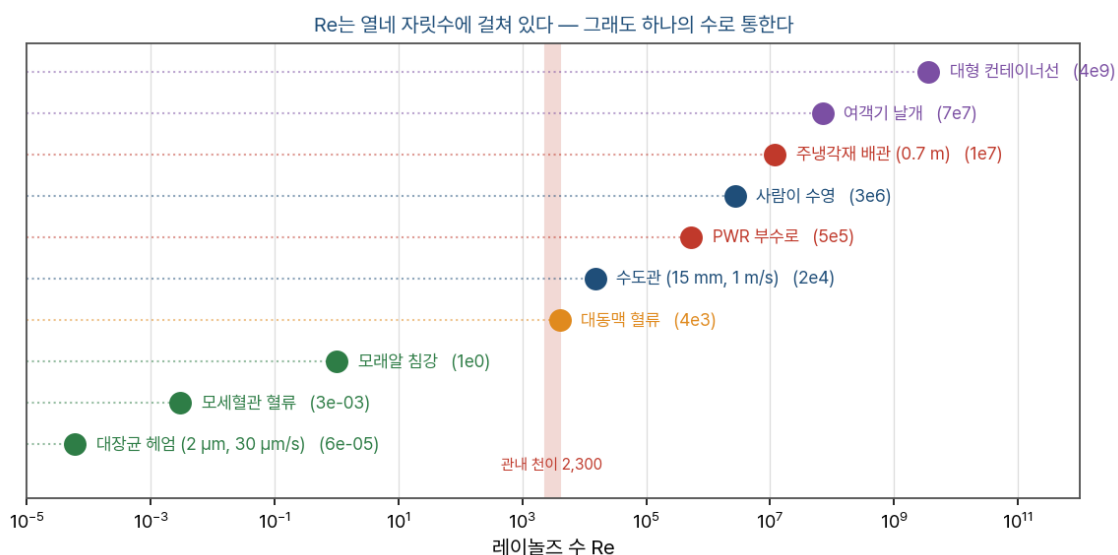


그림 0.1 — Re 의 스펙트럼. 왼쪽 끝은 점성이 지배하는 세계, 오른쪽 끝은 관성이 지배하는 세계다.⁴

³ 표 각주: ν 는 “운동량 확산계수”다. 열전달의 열확산계수 α 와 같은 자리에 있으며, 그 비가 프란틀 수다.

⁴ 그림 출처: 대표 조건으로 직접 계산. 물 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$, 공기 $\nu = 1.5 \times 10^{-5}$ m²/s 기준.

Re < 1의 세계는 우리 직관과 완전히 다르다. 관성이 없어서 젓기를 멈추면 그 자리에서 즉시 선다. 대장균이 물고기처럼 꼬리를 좌우로 흔들지 않고 나사처럼 회전하는 편모를 쓰는 이유가 이것이다.⁵

Re > 10⁵의 세계가 우리가 사는 곳이다. 원자로 배관, 부수로, 자동차, 비행기 전부 여기 있다. 이 영역에서는 사실상 모든 것이 난류다.

기억할 문턱은 두 개뿐이다.

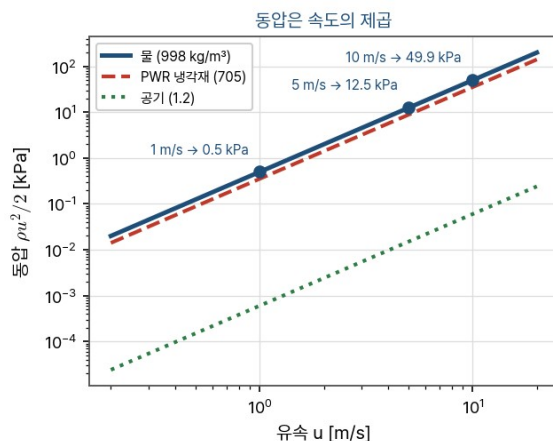
- 관내 유동: **Re ≈ 2,300**에서 층류→난류
- 평판 유동: **Re ≈ 5×10⁵**에서 층류→난류

3. 동압 감각 — 속도를 압력으로 환산하기

유체역학에서 가장 자주 쓰는 암산이 $\rho u^2/2$ 다. 이 값을 압력 단위로 느낄 수 있으면 절반은 이긴 셈이다.

표 0.3 — 동압의 감각.⁶

유체·속도	동압	체감
물 1 m/s	0.5 kPa	거의 없다
물 5 m/s	12.5 kPa	노심 유속 수준
물 10 m/s	50 kPa	소방 호스
물 14 m/s	100 kPa (1 bar)	대기압과 맞먹는다
공기 10 m/s (산들바람)	60 Pa	종이 날림
공기 30 m/s (태풍)	540 Pa	간판 뜯김



압력 1 bar를 몸으로 재면

1 bar = 100 kPa는 ...

- 물 10.2 m 아래의 압력
- 수심 10 m 스쿠버 다이버가 느끼는 추가 압력
- 물 14 m/s로 정면 충돌할 때의 동압
- 공기 410 m/s(마하 1.2)의 동압
- 손바닥(100 cm²) 위에 1톤

PWR 1차 계통 15.5 MPa = 물기둥 1,580 m

그림 0.2 — 왼쪽: 동압은 속도의 제곱. 오른쪽: 1 bar를 몸으로 재는 여러 방법.⁷

압력을 물기둥으로 바꾸는 감각도 유용하다.

1 bar ≈ 10 m 물기둥 1 MPa ≈ 100 m

PWR 1차 계통 15.5 MPa는 물기둥 **1,580 m**에 해당한다. 백두산보다 훨씬 높은 물기둥을 배관 안에 가둬 놓은 셈이다.

⁵ 저 레이놀즈 수 유명: 물리학자 Purcell이 1977년 강연 「Life at Low Reynolds Number」에서 다룬 고전적 주제다. 그 세계에서 헤엄치려면 앞뒤로 되돌아가지 않는 비대칭 운동이 필요하다.

⁶ 표 각주: $\rho u^2/2$. 물 998, 공기 1.204 kg/m³ 기준. 속도가 두 배면 동압은 네 배임을 항상 기억할 것.

⁷ 그림 출처: 직접 계산.

4. 외워두면 평생 쓰는 여덟 개의 숫자

표 0.4 — 유체역학 감각을 위한 여덟 개의 숫자.⁸

항목	값	비고
물 ν (20 °C)	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	1 cSt, 딱 떨어진다
공기 ν (20 °C)	$1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	물의 15 배
PWR 냉각재 ν (310 °C)	$1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	상온 물의 1/8
관내 천이 Re	2,300	안 변한다
마찰계수 f (난류)	0.01~0.05	이 범위를 벗어나면 계산 오류
배관 설계 유속 (물)	2~4 m/s	이보다 빠르면 침식·소음
배관 설계 유속 (증기)	30~60 m/s	밀도가 작으니 빠르게
물속 음속	1,480 m/s	수격 계산의 기준

5. 무서운 지수 두 개

유체역학에는 결과를 지배하는 지수가 두 개 있다.

① 유량은 관 지름의 4 제곱 (층류)

$$Q \propto D^4$$

관 지름이 20 % 줄면 유량이 41 %로 떨어진다. **혈관 협착이 위험한 이유이자, 배관 스케일이 무서운 이유다.**

② 압력 손실은 속도의 제곱

$$\Delta p \propto u^2$$

유량을 두 배로 늘리면 손실은 네 배, 펌프 동력은 **여덟 배** ($\Delta p \times Q$)가 된다. 그래서 유량을 조금 늘리는 것이 생각보다 비싸다.

6. 경계층은 생각보다 얇다

“경계층이 유동을 지배한다”고 하니 두꺼울 것 같지만, 실제로는 놀랍도록 얇다.

PWR 부수로에서 벽면 첫 격자를 $y^+ = 1$ 에 두려면 **벽에서 0.55 μm** 여야 한다(10 장). 부수로 폭이 11.78 mm 이니 **유로 폭의 2 만분의 1**이다.

이 얇은 층에서 마찰의 대부분과 열전달의 대부분이 결정된다. 유체역학이 어려운 이유가 여기 있다. **결정적인 일은 눈에 안 보이는 곳에서 일어난다.**

7. 난류를 이해하는 비유 하나

난류를 “무질서”로만 이해하면 막힌다. **환승 통로의 인파**를 떠올리는 편이 낫다.

- 큰 무리가 먼저 생긴다(큰 와류) — 사람들이 뭉쳐 흐른다
- 무리가 부딪히며 잘게 쪼개진다(에너지 캐스케이드, energy cascade)

⁸ 표 각주: 마찰계수(friction factor)가 0.01~0.05 범위를 벗어나면 거의 항상 계산 실수다(Fanning/Darcy 혼동, Re 자릿수 오류 등). 이 한 줄이 계산기 역할을 한다.

- 결국 개인 단위의 부딪힘으로 흩어진다(점성 소산)
- 그 결과 **섞임이 극적으로 좋아진다** — 열도, 물질도, 운동량도

난류는 열전달의 친구이자 압력 손실의 적이다. 이 맞교환이 열수력 설계의 본질이다.

8. 자주 하는 착각 다섯 가지

① **“베르누이는 어디서나 성립한다”** — 비점성·정상·비압축·같은 유선. 네 조건 중 하나만 깨져도 못 쓴다. 배관 압력 강하에 베르누이를 쓰면 손실이 통째로 빠진다.

② **“빨라지면 압력이 항상 떨어진다”** — 마찰이 있으면 아니다. 관이 좁아지며 빨라져도, 마찰 손실이 더 크면 회복이 안 된다.

③ **“층류가 난류보다 좋다”** — 목적에 따라 다르다. 손실만 보면 층류가 좋지만, 섞고 식히려면 난류가 필요하다. 원자로는 난류가 필수다.

④ **“부차 손실(minor loss)은 부차적이다”** — 이름이 잘못됐다. 밸브 하나($K=10$)가 배관 수십 미터와 맞먹는다.

⑤ **“CFD가 실험보다 정확하다”** — 난류 모델과 격자에 따라 결과가 바뀐다. 특히 박리(separation)와 2상 유동은 여전히 실험이 기준이다. CFD는 **검증된 범위 안에서만** 신뢰할 수 있다.

▶ **실무 팁** 유동 문제를 만나면 순서대로 세 가지를 묻자. ① **Re가 얼마인가**(층류냐 난류냐), ② **압축성이 중요한가**($Ma > 0.3$ 인가), ③ **자유표면(free surface)이나 부력(buoyancy)이 있는가**(Fr, Gr이 필요한가). 이 셋만 정하면 어느 식을 써야 할지가 대부분 결정된다. 반대로 이 셋을 안 정하고 식부터 찾으려 하면 거의 틀린 식을 고른다.

■ **원자력 연계** 원자로 안의 유동은 감각적으로 이렇게 요약된다. **아주 빠르고(5 m/s), 아주 뜨겁고(310 °C), 아주 높은 압력(15.5 MPa)에서, 아주 좁은 통로(11.8 mm)를 지난다.** 그 결과 Re가 5×10^5 으로 확실한 난류이고, 압력 강하는 노심 전체에서 150~200 kPa 수준이며, 벽 근처 0.5 μm 층이 열전달을 좌우한다. 이 네 숫자가 머리에 있으면 원자로 열수력 논문의 절반은 읽힌다.

1장 유체를 보는 눈

Tier 1 · 유체란 무엇이고, 왜 고체와 다르게 기술해야 하는가.

원리: 유체는 전단응력(shear stress)을 견디지 못한다

고체와 유체를 가르는 기준은 딱 하나다. 아무리 작은 전단응력이라도 걸리면 유체는 계속 변형한다. 고체는 어느 정도 버티다 멈추지만, 유체는 멈추지 않는다. 꿀이 느리게 흐르는 것은 버텨서가 아니라 느리게 항복할 뿐이다.

그래서 유체를 다룰 때는 “얼마나 변형했는가”가 아니라 “얼마나 빨리 변형하고 있는가”를 본다. 뉴턴이 정리한 관계가 이것이다.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

μ 가 점성계수(dynamic viscosity, Pa·s)다. 이 관계가 직선인 유체를 뉴턴 유체라 하고, 물·공기·용융염·액체금속이 전부 여기 속한다. 이 책은 뉴턴 유체만 다룬다.

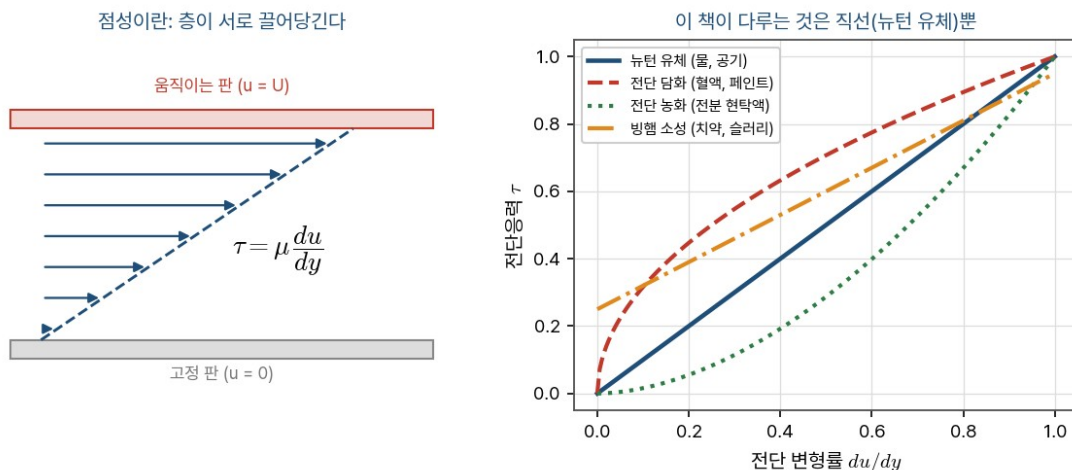


그림 1.1 — 왼쪽: 점성은 유체 층끼리 끌어당기는 힘이다. 오른쪽: 이 책이 다루는 것은 직선(뉴턴 유체)뿐이다.⁹

자주 헷갈리는 두 점성

표 1.1 — 점성계수와 동점성계수.¹⁰

이름	기호	정의	단위	언제 쓰나
점성계수	μ	$\tau / (du/dy)$	Pa·s	전단응력, 힘 계산
동점성계수	ν	μ / ρ	m ² /s	Re, 확산, 경계층

물과 공기를 비교하면 감이 온다. 20 °C 에서 물의 μ 는 공기의 55 배지만, 밀도로 나눈 ν 는 오히려 공기가 물의 15 배다. 끈적하기로는 물이 이기지만, 운동량을 퍼뜨리기로는 공기가 이긴다.

⁹ 그림 출처: 개념도. 오른쪽 곡선은 각 유체 분류의 정성적 거동이다.

¹⁰ 표 각주: ν 는 “운동량 확산계수”로 읽는 것이 좋다. 열전달의 열확산계수 $\alpha = k / \rho c_p$ 와 완전히 같은 위치에 있고, 그 비가 프란틀 수 $Pr = \nu / \alpha$ 다.

수식: 두 가지 시점

유체를 기술하는 방법은 두 가지다.

- **라그랑주(Lagrangian)** — 물 덩어리 하나를 정해서 따라간다. 뉴턴 역학의 방식이다. 직관적이지만, 유체 입자가 수없이 많고 서로 섞여서 추적이 지옥이 된다.
- **오일러(Eulerian)** — 공간에 고정된 창을 놓고, 그 창을 통과하는 유체만 본다. 유체역학의 표준이다.

오일러 시점으로 넘어가면 대가를 치른다. “따라가면서 본 가속도”를 고정된 창 의 언어로 다시 써야 하기 때문이다. 그 결과가 **물질 미분(material derivative)**이다.

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\phi$$

두 번째 항이 유체역학을 어렵게 만드는 주범이다. 속도가 자기 자신을 실어 나르므로 **비선형**이 되고, 난류가 여기서 태어난다.

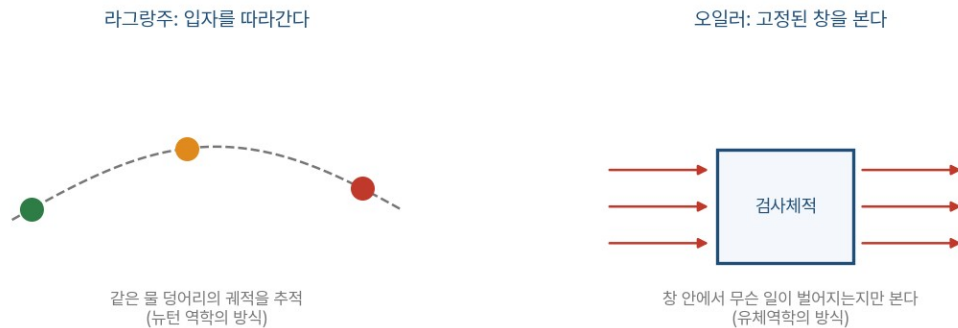


그림 1.2 — 라그랑주 시점과 오일러 시점.¹¹

예제: 연속체(continuum) 가정은 언제 무너지는가

유체를 연속적인 물질로 보는 것이 **연속체 가정**이다. 실제로는 분자 덩어리인데도 이렇게 봐도 되는 이유는 크기 차이 때문이다. 판별 기준은 **크누센 수**다.

$$Kn = \frac{\lambda}{L} (\lambda: \text{분자 평균자유행로}, L: \text{관심 길이})$$

$Kn < 0.01$ 이면 연속체 가정이 안전하다. 상온 대기압 공기의 λ 는 약 68 nm 이므로, 관심 길이가 7 μm 보다 크면 문제없다. 원자로 배관은 밀리미터~미터 단위라 여유가 아득하다.

연속체가 깨지는 곳도 있다. 진공 계통, MEMS 유동, 그리고 원자력에서는 **연료-피복 간극**이다. 간극이 수십 마이크로미터인데 내부 압력이 낮으면 Kn 이 커져서, 기체 전도가 연속체 이론값보다 나빠진다. 연료 성능 코드가 간극 계수에 “온도 도약(temperature jump)” 보정을 넣는 이유다.

▶ **실무 팁** 단위계에서 자주 넘어진다. 점성의 옛 단위 poise(P)와 centipoise(cP)가 아직 문헌에 살아 있다. **1 cP = $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$** 이고, 물의 20 °C 점성이 정확히 1 cP 다. 동점성계수의 옛 단위는 stokes(St)로, **1 cSt = $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$** , 역시 물 20 °C 가 약 1 cSt 다. 두 값을 외워두면 새 물성표를 볼 때 자릿수 검산이 즉시 된다.

■ **원자력 연계** 원자력에서 다루는 유체는 폭이 넓다. 경수로의 물, 가스로의 헬륨과 초임계 CO_2 , 소듐냉각고속로의 액체 나트륨, 용융염로의 FLiBe-FLiNaK. 이들의 ν 는 자릿수가 다르고, 무엇보다 **프란틀 수가**

¹¹ 그림 출처: 개념도.

다르다. 액체금속은 $Pr \sim 0.01$, 용융염은 $Pr \sim 10-20$ 으로 물($Pr \sim 1$)의 양쪽에 있다. 물로 검증한 상관식을 그대로 가져다 쓸 수 없다는 뜻이고, 이것이 새 노형마다 열수력 실험을 다시 하는 이유다.

2 장 유체 정역학 — 안 움직여도 힘은 있다

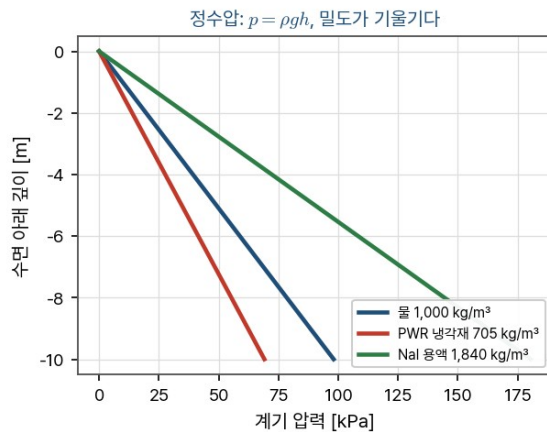
Tier 1 · 압력, 부력, 그리고 자연순환의 구동력이 태어나는 곳.

원리: 정지한 유체에서는 압력이 전부다

유체가 멈춰 있으면 전단응력이 0이다. 남은 것은 면에 수직으로 작용하는 **압력**뿐이고, 압력은 방향에 무관하다 (파스칼의 원리). 그래서 정역학은 간단하다.

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \Rightarrow p = p_0 + \rho gh$$

밀도가 일정하면 압력은 깊이에 **직선**으로 커진다. 이 직선의 기울기가 밀도다.



부력 = 밀어낸 유체의 무게

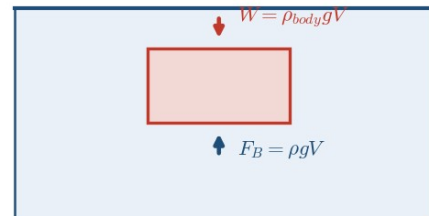


그림 2.1 — 왼쪽: 정수압은 깊이에 비례하고 기울기가 밀도다. 오른쪽: 부력은 밀어낸 유체의 무게다.¹²

압력을 부르는 세 가지 이름

표 2.1 — 압력의 기준.¹³

이름	기준	관계
절대압	완전 진공	p_{abs}
계기압	대기압	$p_{\text{gauge}} = p_{\text{abs}} - p_{\text{atm}}$
진공압	대기압 아래	$p_{\text{vac}} = p_{\text{atm}} - p_{\text{abs}}$

수식: 부력과 안정성

아르키메데스의 원리 — 잠긴 물체가 받는 부력은 밀어낸 유체의 무게와 같다.

$$F_B = \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{disp}}$$

¹² 그림 출처: 직접 계산 및 개념도. NaI 용액 밀도는 THINK Lab 굴절을 정합 실험 조건(61.6 wt%) 기준이다.

¹³ 표 각주: 물성표와 상태식은 거의 항상 **절대압(absolute pressure)** 기준이다. 계기압(gauge pressure)을 그대로 넣으면 0.1 MPa 썩 틀린다. 15.5 MPa 같은 원자로 압력에서는 무시할 만하지만, 대기압 근처 실험에서는 치명적이다.

부유체가 기울어졌을 때 되돌아오느냐는 **메타센터 높이(metacentric height) $\overline{GM}$** 이 정한다.

$$\overline{GM} = \frac{I_{wp}}{V_{disp}} - \overline{BG}$$

I_{wp} 는 수선면의 관성 모멘트, $\overline{BG}$ 는 부심에서 무게중심까지의 거리다. $\overline{GM} > 0$ 이면 복원, < 0 이면 전복이다. **넓적한 배가 안정적인 이유가 I_{wp} 에 폭의 세제곱이 들어가기 때문이다.**

예제: 자연순환의 구동 수두(driving head)는 정역학에서 나온다

「필수 열전달」 8 장에서 쓴 식을 여기서 유도해 보자. 페루프의 한쪽(상승관)은 뜨겁고 가벼우며, 반대쪽(하강관)은 차갑고 무겁다. 두 기둥의 바닥에서 정수압(hydrostatic pressure)을 각각 계산하면

$$p_{\text{하강관}} = \rho_c g H, p_{\text{상승관}} = \rho_h g H$$

바닥에서의 차이가 곧 유동을 밀어내는 힘이다.

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

15.5 MPa 에서 260 °C 물이 796.8 kg/m³, 300 °C 물이 726.5 kg/m³ 이므로, 높이차 10 m 라면

$$\Delta p = (796.8 - 726.5)(9.81)(10) = 6,900 \text{ Pa} = 6.9 \text{ kPa}$$

펌프 없이 얻는 6.9 kPa. 이것이 피동안전계통의 전부다. 이 값이 8 장에서 계산할 마찰 손실과 균형을 이루는 지점에서 유량이 결정된다.

▶ **실무 팁** 정수압 계산에서 밀도를 어디 값으로 잡느냐가 늘 문제다. 원자로 계통처럼 온도가 크게 변하는 기둥에서는 ρ 를 구간별로 나눠 적분해야 한다. 특히 상승관에서 비등이 시작되면 밀도가 급락하므로(「필수 열전달」 12 장의 보이드율, void fraction) 단상 밀도를 그대로 쓰면 구동 수두를 크게 과대평가한다. 반대로 균질류(homogeneous flow) 가정은 보이드를 과대평가해 구동 수두를 **과소평가**하는 쪽으로 간다. 어느 쪽이 보수적인지는 답을 무엇에 쓸 것인지에 달렸다.

■ **원자력 연계** 해상 부유식 원자로에서는 2 장 전체가 살아 움직인다. 부유 플랫폼의 메타센터 높이가 6 자유도 운동을 정하고, 그 운동이 노심 내 유체에 관성력으로 작용한다. 탱크 안 액체가 출렁이는 **슬로싱(sloshing)**은 자유표면 정역학이 동적으로 변한 문제이며, 자유표면이 있는 액체의 유효 메타센터를 떨어뜨려 안정성을 갉아먹는다(자유표면 효과). 용융염로처럼 액체 연료를 쓰는 노형에서는 이 출렁임이 곧 연료 분포의 변화, 즉 반응도 변화가 된다.

3 장 검사체적(control volume)과 보존 법칙

Tier 1 · 유체역학 문제 풀이의 90 %는 상자를 잘 그리는 데서 끝난다.

원리: 상자를 그리고, 들어온 것과 나간 것을 센다

열역학에서 검사체적을 써봤다면 이미 절반은 안다. 유체역학도 같다. 다만 운동량이라는 벡터량이 추가된다.

모든 보존 법칙은 **레이놀즈 수송정리** 하나로 통일된다.

$$\frac{dB_{\text{sys}}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{CV}} \rho b dV + \int_{\text{CS}} \rho b (\vec{u} \cdot \vec{n}) dA$$

왼쪽은 라그랑주(따라가는 덩어리), 오른쪽은 오일러(고정된 상자)다. b 자리에 무엇을 넣느냐에 따라 세 개의 법칙이 나온다.

표 3.1 — 레이놀즈 수송정리에서 파생되는 세 법칙.¹⁴

b	얻는 법칙
1	질량 보존 (연속 방정식)
$\vec{u}$	운동량 보존 (뉴턴 제 2 법칙)
e	에너지 보존 (열역학 제 1 법칙)

수식: 세 개의 실무 도구

① 질량 보존(conservation of mass) (정상 유동)

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 = \text{일정}$$

비압축성이면 $A_1 u_1 = A_2 u_2$. **면적이 좁아지면 빨라진다.** 이 한 줄에서 베르누이·오리피스·노즐이 다 나온다.

② 운동량 보존(conservation of momentum)

$$\sum \vec{F} = \dot{m} \vec{u}_{\text{out}} - \dot{m} \vec{u}_{\text{in}}$$

여기서 $\sum \vec{F}$ 에는 **압력 힘, 중력, 그리고 벽이 유체에 가하는 힘**이 모두 들어간다. 실무에서는 마지막 항을 구하려고 이 식을 쓴다. 배관이 받는 반력이 그것이다.

¹⁴ 표 각주: b 는 단위 질량당 양이다. 각운동량($\vec{r} \times \vec{u}$)을 넣으면 터빈·펌프 해석의 오일러 방정식이 나온다.

검사체적 운동량 수지: 90° 엘보에 걸리는 힘

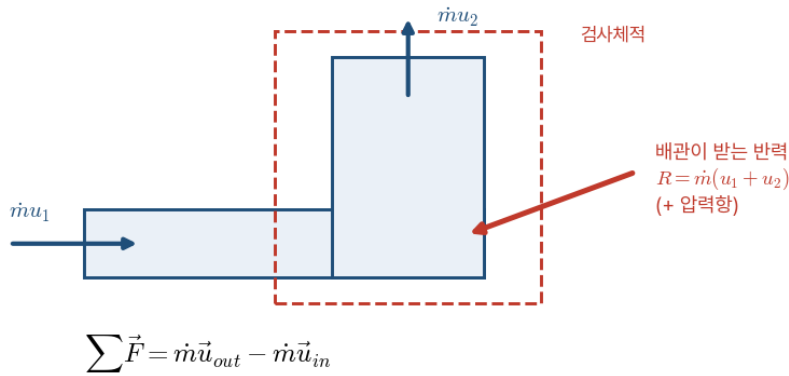


그림 3.1 — 90° 엘보의 검사체적 운동량 수지. 배관이 받는 반력은 유량과 방향 전환에서 나온다.¹⁵

③ 에너지 보존 (수두 형태)

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump}} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

모든 항의 단위가 미터다. 압력수두 + 속도수두 + 위치수두. h_L 이 손실 수두이고, 7·8 장이 이 항을 구하는 방법을 다룬다.

예제: 배관 엘보에 걸리는 힘

주냉각재 배관 규모로 계산해 보자. 안지름 700 mm, 유량 4,000 kg/s, 밀도 705 kg/m³, 90° 엘보다.

① 유속

$$A = \frac{\pi (0.7)^2}{4} = 0.385 \text{ m}^2, u = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{4,000}{705 \times 0.385} = 14.7 \text{ m/s}$$

② 운동량 변화로 인한 힘 — 입구는 +x, 출구는 +y 방향이라 하면

$$F_x = \dot{m} u = 4,000 \times 14.7 = 58,800 \text{ N}, F_y = 58,800 \text{ N}$$

합력은 $\sqrt{2} \times 58.8 = 83 \text{ kN}$, 방향은 대각선 바깥쪽이다. **8.5 톤에 해당하는 힘**이 운동량 변화만으로 생긴다.

③ 압력 항까지 넣으면 — 15.5 MPa 계통이라면 압력 힘이 $p A = 15.5 \times 10^6 \times 0.385 = 5.97 \text{ MN}$. 운동량 항의 100 배다.

여기서 중요한 교훈이 나온다. **정상 운전에서는 압력 항이 지배하지만, 배관 파단처럼 한쪽 압력이 갑자기 사라지면 균형이 깨지면서 그 6 MN 이 통째로 배관 지지대에 실린다.** 이것이 배관 파단 하중(pipe whip) 해석의 출발점이다.

▶ **실무 팁** 검사체적을 그릴 때 경계를 어디에 두느냐로 문제의 난이도가 결정된다. 좋은 경계의 조건은 세 가지다. ① 모르는 양이 경계를 가로지르지 않게, ② 속도가 균일한 곳을 자르게, ③ 구하려는 힘이 경계를 자르게. 특히 ③ 을 놓치면 반력이 식에서 사라져 아무것도 못 구한다. 문제가 안 풀리면 계산을 의심하기 전에 상자를 다시 그리자.

■ **원자력 연계** 운동량 보존은 원자력 안전해석에서 **분출 반력(blowdown thrust)**으로 등장한다. NuScale 의 RVV·RRV 같은 ECCS 밸브가 열리면 고압 냉각재가 분출하면서 $F = \dot{m} u + (p - p_{\text{amb}}) A$ 만큼의 반력이 밸브와

¹⁵ 그림 출처: 개념도. 실제 계산에는 입출구 압력 항이 추가된다.

배관에 걸린다. 이 하중이 지진 하중과 조합되어 구조 설계 기준(ASME Service Level D)을 정한다. 3 장의 한 줄짜리 식이 밸브 구속장치의 크기를 정하는 셈이다.

4 장 베르누이와 그 한계

Tier 1 · 가장 많이 쓰이고 가장 많이 오용되는 식.

원리: 에너지가 형태를 바꿀 뿐이다

정상·비압축성·비점성 유동에서 **하나의 유선을 따라** 다음이 일정하다.

$$p + \frac{1}{2}\rho u^2 + \rho g z = \text{일정}$$

압력 에너지, 운동 에너지, 위치 에너지의 합이 보존된다는 뜻이다. **빨라지면 압력이 떨어진다는** 이 한 줄이 비행기 날개부터 벤투리 유량계, 캐비테이션(cavitation)까지 설명한다.

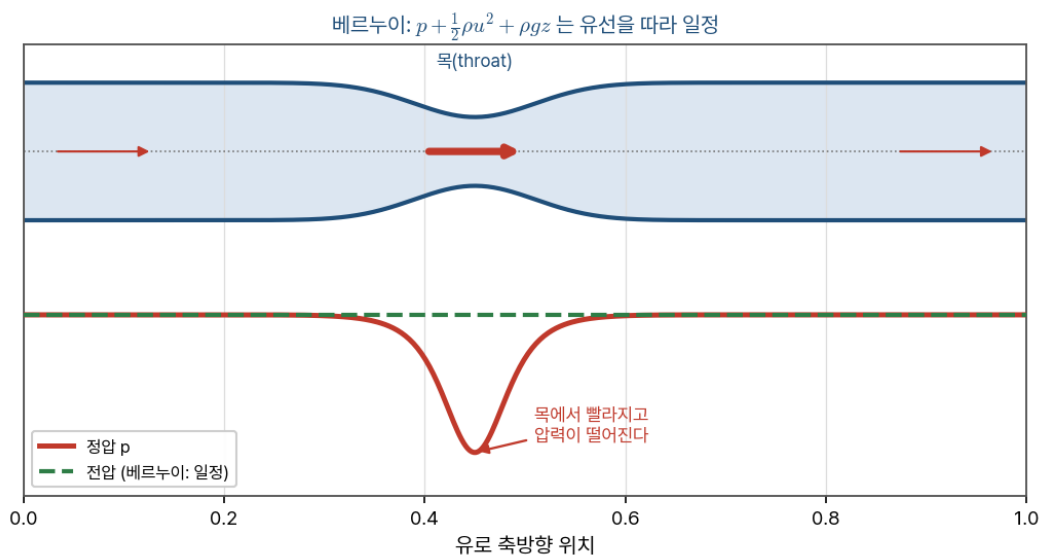


그림 4.1 — 벤투리에서 목이 좁아지면 빨라지고 정압이 떨어진다. 전압은 일정하게 유지된다.¹⁶

수식: 네 개의 전제, 네 개의 함정

베르누이는 공짜가 아니다. 아래 네 가지를 모두 만족해야 한다.

표 4.1 — 베르누이의 전제와 위반 시 결과.¹⁷

전제	깨지는 상황	결과
비점성	벽 근처, 긴 배관	마찰 손실 무시 → 압력 과대평가
정상	밸브 급폐, 펌프 기동	수격 현상을 놓친다
비압축성	$Ma > 0.3$, 2 상 유동	밀도 변화 무시
같은 유선	박리·와류 영역	다른 유선끼리 비교하면 틀림

실무에서는 손실 항을 붙여 확장형으로 쓴다. 3 장의 에너지식과 같은 것이다.

¹⁶ 그림 출처: 직접 계산. 목의 면적을 입구의 1/4 로 두었다.

¹⁷ 표 각주: 비회전 유동이라면 유선이 달라도 상수가 같지만, 실제 유동에서 이 조건은 거의 성립하지 않는다. 안전하게 “같은 유선”으로 기억할 것.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

정체압(stagnation pressure)과 피토관(Pitot tube)

유선이 벽에 부딪혀 속도가 0 이 되는 점(정체점)에서 압력은

$$p_0 = p + 1/2 \rho u^2$$

이 관계를 뒤집으면 속도계가 된다. 피토관이 정체압과 정압의 차를 재서 $u = \sqrt{2 \Delta p / \rho}$ 를 준다.

예제: 캐비테이션은 언제 시작되는가

원심 펌프 흡입부에서 압력이 포화 증기압(saturation vapor pressure) 아래로 떨어지면 물이 그 자리에서 끓는다. 생긴 기포가 하류의 고압부로 실려가 붕괴할 때 국소적으로 GPa 급 충격이 발생해 금속을 깎아낸다. 이것이 캐비테이션이다.

판별 기준은 유효 흡입 수두(NPSH) 다.

$$NPSH_a = \frac{p_{in} - p_{sat}}{\rho g} + \frac{u_{in}^2}{2g}$$

이 값이 펌프 제작사가 제시한 $NPSH_r$ 보다 커야 한다.

계산해 보자. 30 °C 물(포화 증기압 4.25 kPa, 밀도 996 kg/m³)을 대기압 개방 탱크에서 뽑아 올린다. 흡입 배관 손실이 1.2 m 라 하고, 펌프가 수면보다 4 m 위에 있다면

$$NPSH_a = \frac{101,325 - 4,250}{996 \times 9.81} - 4 - 1.2 = 9.93 - 5.2 = 4.7 \text{ m}$$

펌프의 $NPSH_r$ 이 3 m 면 여유 1.7 m 로 안전하다. 그런데 물 온도가 80 °C 로 오르면 포화 증기압이 47.4 kPa 로 뛴다.

$$NPSH_a = \frac{101,325 - 47,400}{972 \times 9.81} - 5.2 = 5.66 - 5.2 = 0.46 \text{ m}$$

여유가 사라졌다. 뜨거운 물을 퍼올리는 펌프가 유독 까다로운 이유가 여기 있다. 원자력에서 보조급수 펌프나 잔열제거 펌프의 흡입 배치를 신경 써서 설계하는 것도 같은 이유다.

▶ **실무 팁** 베르누이로 유량을 구한 뒤 "실제와 안 맞는다"고 당황하는 일이 흔하다. 오리피스나 노즐에서는 유출 계수(discharge coefficient) C_d 를 반드시 곱해야 한다. 오리피스는 유체가 구멍을 지난 직후 더 좁아지는 축류(vena contracta) 때문에 $C_d \approx 0.6$ 수준이고, 잘 설계된 벤투리는 0.98 까지 올라간다. 이 계수는 이론이 아니라 교정(calibration)으로 정하며, 그래서 유량계에는 항상 교정 성적서가 따라다닌다.

■ **원자력 연계** NuScale US460 설계의 벤투리 유량 제한기(venturi flow restrictor)가 4 장의 응용이다. 배관 파단 시 유출 유량을 제한하려면 목을 좁혀야 하는데, 단순 오리피스를 쓰면 정상 운전 중에도 압력 손실이 계속 발생한다. 벤투리는 목 이후에 완만한 확대부를 두어 압력의 대부분을 회복시키므로, 정상 운전 손실은 작으면서 사고 시 유량은 제한하는 두 마리 토끼를 잡는다. 8 장 그림 8.1 이 이 회복 특성을 유량계 종류별로 비교한다.

5 장 미분 방정식 — 연속식과 나비에-스토크스

Tier 2 · 검사체적을 무한히 작게 줄이면 무엇이 남는가.

원리: 상자를 점으로 줄이면 미분방정식이 된다

3 장의 검사체적은 유한한 상자였다. 상자 안에서 무슨 일이 벌어지는지는 몰라도 입출력만 맞추면 됐다. 하지만 **속도장 자체가 궁극하면** 상자를 무한히 작게 줄여야 한다. 그러면 대수식이 편미분방정식으로 바뀐다.

연속 방정식(질량 보존):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \xrightarrow{\text{비압축성}} \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

비압축성 조건 $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ 은 “들어온 만큼 나간다”를 점에서 말한 것이다.

나비에-스토크스 방정식(운동량 보존):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g}$$

항 하나하나를 읽으면 결국 $m\vec{a} = \vec{F}$ 다.

표 5.1 — 나비에-스토크스 각 항의 의미.¹⁸

항	뜻	없다면
$\rho \partial \vec{u} / \partial t$	국소 가속	정상 유동
$\rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}$	이류(advection) 가속 (비선형)	크리핑 유동 (Stokes)
$-\nabla p$	압력 힘	—
$\mu \nabla^2 \vec{u}$	점성 확산	오일러 방정식(비점성)
$\rho \vec{g}$	체적력	부력·자연대류 사라짐

수식: 해석해가 있는 두 가지 경우

이류항이 0 이 되는 단순 형상에서는 손으로 풀린다. 두 개만 기억하면 나머지는 응용이다.

① 쿠에트 유동(Couette flow) — 벽이 끌어서

간격 h 인 두 평판 중 위쪽이 U 로 움직이고 압력 구배가 없으면

$$u(y) = U \frac{y}{h}, \tau = \mu \frac{U}{h} = \text{일정}$$

속도가 직선이다. 베어링 윤활 이론의 출발점이다.

¹⁸ 표 각주: 비선형 이류항이 난류의 근원이자, 해석해가 거의 없는 이유다. 알려진 정확해는 20 여 개뿐이며 대부분 이류항이 0 이 되는 특수한 형상이다.

㉔ 하겐-푸아죄유 유동 — 압력이 밀어서

반경 R 인 원관에 압력 구배가 걸리면

$$u(r) = \frac{\Delta p}{4\mu L} (R^2 - r^2), Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L}$$

포물선이다. 그리고 여기서 유체역학에서 가장 무서운 지수가 나온다. **유량이 반경의 4 제곱에 비례한다**. 관 지름을 20 % 줄이면 같은 압력에서 유량이 절반 이하로 떨어진다.

평균 속도는 최대 속도의 정확히 **2/3** 이고, 이를 마찰계수로 바꾸면 $f = 64/\text{Re}$ 라는 층류 공식이 나온다(7 장).

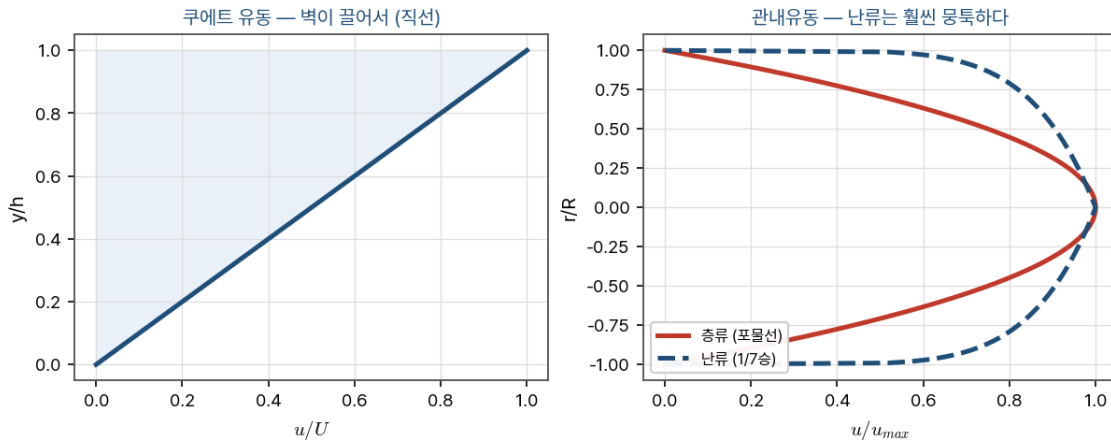


그림 5.1 — 왼쪽: 쿠에트 유동은 직선. 오른쪽: 관내 층류는 포물선이지만 난류는 훨씬 뭉툰하다.¹⁹

예제: 층류 가정이 성립하는 관 지름

20 °C 물($\rho=998 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.00 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)이 1 m/s 로 흐를 때, 층류를 유지하려면 관이 얼마나 가늘어야 하나?

$$\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu} < 2,300 \Rightarrow D < \frac{2,300 \times 1.00 \times 10^{-3}}{998 \times 1} = 2.3 \text{ mm}$$

2.3 mm. 실험실 미세유로가 아니면 층류는 거의 못 본다. 원자로 배관은 예외 없이 난류이고, 그래서 7 장부터 난류가 주인공이 된다.

역으로, 층류가 중요한 자리도 있다. 벽에서 아주 가까운 **점성 저층(viscous sublayer)**은 항상 층류이고, 그곳의 전단응력이 전체 마찰과 열전달을 지배한다(10 장).

▶ **실무 팁** CFD 를 돌린다는 것은 나비에-스토크스를 이산화해 푸는 것이다. 그런데 난류를 직접 푸는 DNS 는 격자 수가 $\text{Re}^{9/4}$ 로 늘어난다. PWR 부수로($\text{Re} \approx 5 \times 10^5$)라면 격자가 대략 10^{13} 개 필요하다. 현실적으로 불가능하다. 그래서 실무는 레이놀즈 평균(RANS)이나 LES 로 타협하며, 그 타협의 내용이 곧 난류 모델이다(10 장). “CFD 를 돌렸다”는 말은 항상 “어떤 타협을 했다” 는 말과 같다.

■ **원자력 연계** 나비에-스토크스에 부력 항을 살려두면 자연대류가 나온다. 원자력에서는 보통 부시네스크 근사를 써서, 밀도 변화를 $\rho \vec{g}$ 항에서만 살리고 나머지는 무시한다. 다만 이 근사는 밀도 변화가 작을 때만 유효하다. 초임계압 CO₂ 나 물처럼 임계점 근처에서 밀도가 몇 배 변하는 유체, 그리고 비등이 일어나는 유동에는 쓸 수 없다. 이런 경우에는 밀도를 완전히 변수로 두는 저마하수(low-Mach) 정식화를 쓴다.

¹⁹ 그림 출처: 직접 계산. 난류 곡선은 1/7 승 법칙 근사이며, 실제 벽 근처 거동은 10 장의 벽법칙을 따른다.

6 장 차원해석(dimensional analysis)과 상사

Tier 1-2 · 축소 모형 실험이 성립하는 근거. 실험 연구실의 헌법.

원리: 실기를 다 만들어 볼 수는 없다

3,000 MWt 원자로를 실물로 만들어 실험할 수는 없다. 그래서 축소 모형을 만든다. 그런데 축소 모형에서 얻은 데이터를 어떻게 실기에 옮기는가? **차원해석**이 그 답을 준다.

핵심 정리는 **버킹엄 파이 정리**다. n 개의 변수가 k 개의 기본 차원으로 이루어져 있으면, 문제는 $n - k$ 개의 무차원 수로 줄어든다.

예를 들어 관내 압력 강하는 $\Delta p = f(\rho, u, D, L, \mu, \varepsilon)$ 로 변수가 7 개, 기본 차원(질량·길이·시간)이 3 개다. 따라서 무차원 수는 4 개로 줄어든다.

$$\frac{\Delta p}{\rho u^2} = F\left(\frac{\rho u D}{\mu}, \frac{L}{D}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

7 차원 실험이 4 차원 실험으로 줄었다. 실험 횟수로 따지면 자릿수가 달라진다. 무디 선도(7 장)가 딱 이 형태다.

수식: 원자력에서 쓰는 무차원 수

$$\text{Re} = \frac{\rho u L}{\mu} \text{ (관성/점성)}, \text{Fr} = \frac{u}{\sqrt{gL}} \text{ (관성/중력)}$$

$$\text{We} = \frac{\rho u^2 L}{\sigma} \text{ (관성/표면장력)}, \text{Ma} = \frac{u}{c} \text{ (관성/압축성)}, \text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho u^2}$$

표 6.1 — 원자력 열수력에서 자주 쓰는 무차원 수.²⁰

무차원 수	언제 지배적인가	원자력 사례
Re	마찰·경계층·난류	부수로 유동, 배관 압력강하
Fr	자유표면·성층·부력	슬로싱, 자연순환, 수평관 성층류
We	기포·액적·분무	기포 이탈 직경, 액막 비말동반
Ma	고속 압축성	파단 유량, 증기 배출
Ri	부력/관성 (성층)	저유량 과도, 온도 성층

예제: Re 와 Fr 을 동시에 맞출 수 없다

축소비 $\lambda = L_p / L_m = 10$ (1/10 모형)이고 같은 유체를 쓴다고 하자.

Froude 상사를 맞추려면

²⁰ 표 각주: 리처드슨 수 $Ri = Gr / Re^2$ 는 강제대류와 자연대류 중 어느 쪽이 지배적인지를 판별한다. 「필수 열전달」 8 장 참조.

$$\frac{u_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{u_p}{\sqrt{gL_p}} \Rightarrow \frac{u_m}{u_p} = \lambda^{-1/2} = 0.316$$

Reynolds 상사를 맞추려면

$$\frac{\rho u_m L_m}{\mu} = \frac{\rho u_p L_p}{\mu} \Rightarrow \frac{u_m}{u_p} = \lambda = 10$$

0.316 과 10. **요구 속도가 30 배 어긋난다.** 둘 다 만족시키는 것은 불가능하다.

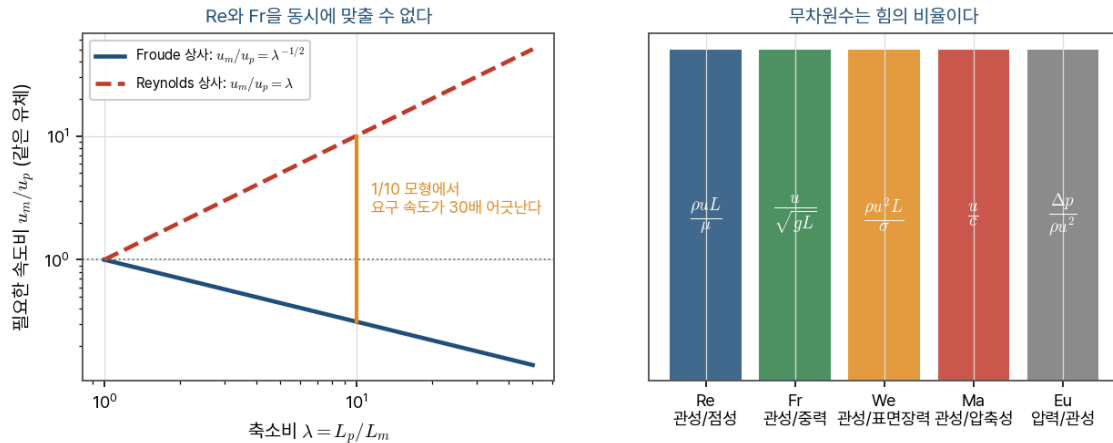


그림 6.1 — 왼쪽: Froude 상사와 Reynolds 상사가 요구하는 속도비는 반대 방향으로 간다. 오른쪽: 무차원 수는 결국 힘의 비율이다.²¹

그래서 실험 설계는 “**어느 물리가 지배적인가**”를 먼저 결정하고, 그 무차원 수만 맞춘다. 나머지는 포기하거나, 다른 방법으로 보완한다.

- 자유표면이 있는 슬로싱·선박 시험 → **Froude 상사**. 점성 효과는 별도 보정.
- 밀폐 배관의 마찰·열전달 → **Reynolds 상사**. 중력 효과는 무시할 만함.
- 둘 다 필요하면 → 유체를 바꾸거나(ν 조절), 자기상사(self-similarity) 영역에 들어가거나, 코드 검증으로 외삽한다.

자기상사가 실무의 구원투수다. 완전 난류 영역에서는 Re 가 더 커져도 마찰계수가 거의 변하지 않는다(무디 선도의 수평 구간). 그러면 Re 를 정확히 맞추지 않아도 된다.

▶ **실무 팁** 상사가 불완전할 때는 “**어디까지 상사되었고 어디부터 안 되었는지**”를 표로 명시하는 것이 정직한 실험 계획서의 조건이다. 심사위원이 가장 먼저 묻는 질문이기도 하다. 단상 속도장은 완전 상사, 난류량은 부분 상사, 기포율 분포는 불가 — 이런 식으로 항목별 판정을 미리 준비해 두면 방어가 쉽다. 상사가 안 되는 항목은 “실험으로 코드를 검증하고, 코드로 실기를 외삽한다”는 2 단 논리로 넘긴다.

■ **원자력 연계** 해상 부유식 원자로의 슬로싱 실험은 **Froude 상사**로 설계한다. 자유표면 운동이 중력에 지배되기 때문이다. 축소비 λ 의 모형에서 시간은 $\lambda^{1/2}$ 로 줄고, 가속도는 그대로이며, 힘은 λ^3 로 줄어든다. 반면 증기발생기 관군의 유동 가시화 실험은 **Reynolds 상사**가 맞다. 이때 2 상 유동까지 상사하려면 밀도비(ρ_l/ρ_v)도 맞춰야 하는데, 실기 6 MPa의 밀도비 약 25에 비해 상온 공기-물은 약 845로 자릿수가 다르다. 그래서 이상유동 실험은 상사 실험이 아니라 **모델 검증 실험**으로 성격을 바꿔 정당화한다.

²¹ 그림 출처: 직접 계산 및 개념도. 같은 유체를 쓴다고 가정했다.

7 장 점성 관내유동과 마찰

Tier 2 · 무디 선도를 읽고 배관 압력강하를 계산한다.

원리: 벽이 유체를 붙잡는 대가

관 속을 흐르는 유체는 벽에 붙잡힌다(점착 조건). 그 저항이 압력 강하로 나타난다. 이를 정리한 것이 **다르시-바이스바흐 식**이다.

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2}$$

여기서 f 가 **다르시 마찰계수**다. 나머지는 전부 아는 값이므로, 유체역학의 실무는 사실상 " f 를 어떻게 구하는가"로 요약된다.

▶ **실무 팁** 마찰계수에는 두 가지 정의가 돌아다닌다. **다르시(Darcy)** f 와 **패닝(Fanning)** C_f 이며, $f = 4 C_f$ 다. 화학공학 문헌은 패닝을, 기계·원자력은 다르시를 주로 쓴다. 층류에서 $f = 64 / \text{Re}$ 이면 다르시, $C_f = 16 / \text{Re}$ 이면 패닝이다. 이 두 값을 보고 어느 정의인지 판별하는 습관을 들이면 4 배 실수를 막는다.

수식: 층류, 천이, 난류

층류 ($\text{Re} < 2,300$)

5 장의 푸아죄유 해에서 바로 나온다.

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

거칠기(roughness)가 들어가지 않는다. 층류에서는 관을 아무리 거칠게 만들어도 마찰이 안 변한다. 거칠기가 점성 저층에 묻히기 때문이다.

난류 ($\text{Re} > 4,000$)

콜브룩(Colebrook) 식이 표준이다. 다만 f 가 양변에 있어 반복 계산해야 한다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

손계산용 명시적 근사도 있다. **하란드(Haaland)** 식이 널리 쓰이며 오차 2 % 이내다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10} \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{\text{Re}} \right]$$

매끈한 관만 다룬다면 **블라시우스 식** ($4,000 < \text{Re} < 10^5$)이 가장 간편하다.

$$f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

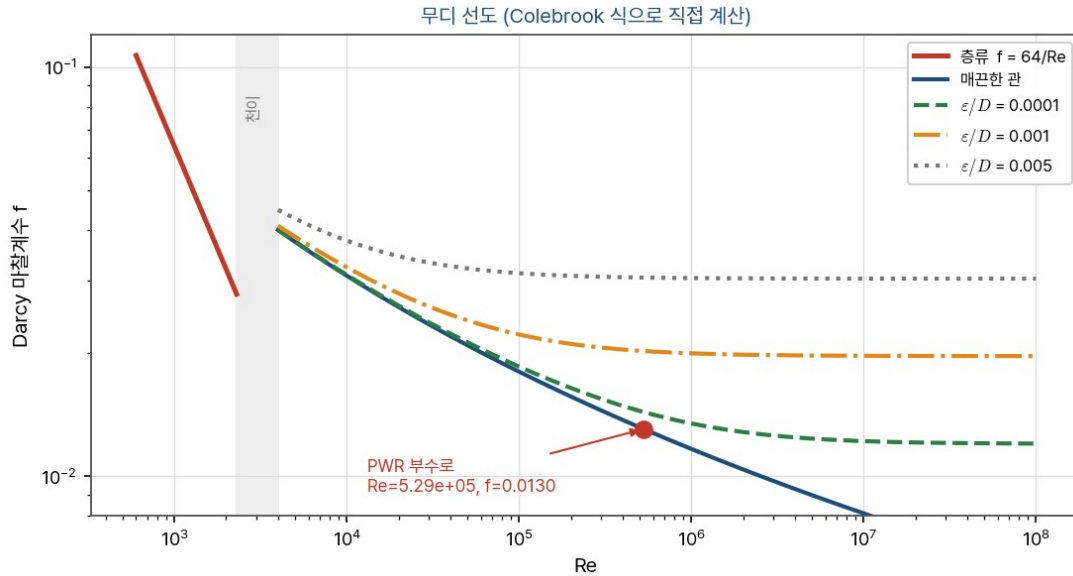


그림 7.1 — 무디 선도. 층류는 직선, 난류는 거칠기별로 갈라지며, 완전 난류에서는 Re 에 무관해진다.²²

무디 선도에서 반드시 읽어야 할 것은 **오른쪽 끝의 수평 구간**이다. Re 가 충분히 크면 마찰계수가 거칠기만으로 정해지고 Re 에 무관해진다. 이것이 6 장에서 말한 자기상사이며, 축소 실험이 성립하는 근거다.

비원형 유로

수력직경으로 바꿔 원관 상관식에 넣는다.

$$D_h = \frac{4 A_c}{P_w}$$

난류에서는 오차 10 % 안쪽으로 잘 맞지만, **층류에서는 형상별 보정이 필요하다**(f Re 가 원관 64, 정사각형 57, 평행평판 96 으로 다르다).

예제: PWR 노심 부수로의 압력 강하

「필수 열전달」 7 장과 같은 조건이다.

- $D_h = 11.78 \text{ mm}$, $G = 3,800 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$, $15.5 \text{ MPa} \cdot 310 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\rho = 704.8 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 84.6 \text{ } \mu\text{Pa}\cdot\text{s} \rightarrow u = 5.39 \text{ m/s}$
- 활성 길이 $L = 3.6 \text{ m}$, 매끈한 관 가정

㉠ 레이놀즈 수

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

㉡ **마찰계수** — 콜브룩 식을 풀면 $f = 0.0130$. (블라시우스로 하면 $0.3164 / (5.29 \times 10^5)^{0.25} = 0.0117$ 로 10 % 낮다. 블라시우스는 $\text{Re} < 10^5$ 용이라 여기선 콜브룩이 맞다.)

㉢ 압력 강하

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{G^2}{2\rho} = 0.0130 \times \frac{3.6}{0.01178} \times \frac{3,800^2}{2 \times 704.8}$$

²² 그림 출처: 직접 계산(Colebrook 식을 Re 마다 수치적으로 풀었다). PWR 부수로 조건을 표시했다.

$$\zeta 0.0130 \times 305.6 \times 10,244 = 40,700 \text{ Pa} \approx 41 \text{ kPa}$$

㉔ **벽면 전단응력** — 10 장에서 쓸 값이다.

$$\tau_w = \frac{f}{8} \rho u^2 = \frac{0.0130}{8} \times 704.8 \times (5.39)^2 = 33.4 \text{ Pa}$$

실제 PWR 노심 전체 압력 강하는 150~200 kPa 수준이다. 마찰이 41 kPa 이니 나머지 대부분은 **지지격자, 입출구 노즐, 하부 지지판** 같은 부차 손실이다. 8 장이 그 이야기다.

▶ **실무 팁** 거칠기 ε 은 카탈로그 값을 그대로 믿으면 안 된다. 새 상용 강관이 0.045 mm 지만, 운전 몇 년 뒤 스케일과 크러드가 쌓이면 자릿수가 커진다. 열교환기 성능 저하의 상당 부분이 여기서 온다. 설계에서는 **신품과 노후 상태 양쪽으로 계산해 보고 펌프 여유를 잡는 것**이 관행이다.

■ **원자력 연계** 노심 압력 강하는 단순한 펌프 동력 문제가 아니다. **유량 배분**을 정하는 값이다. 여러 연료집합체가 병렬로 놓여 있으면 각 채널의 압력 강하가 같아지도록 유량이 저절로 나뉜다. 그래서 출력이 높은 집합체(더 뜨겁고 밀도가 낮은)에 유량이 어떻게 배분되는지가 안전 여유(MDNBR)와 직결된다. 이 계산을 하는 것이 부수로 코드(COBRA, VIPRE 등)다. 자연순환 SMR 에서는 더 민감하다. 구동 수두 자체가 수 kPa 수준이라(2 장), 노심 압력 강하 몇 kPa 의 차이가 유량을 크게 바꾼다.

8 장 부차 손실과 관망

Tier 2 · 밸브 하나가 배관 수십 미터와 맞먹는다. 그리고 펌프는 어디서 운전되는가.

원리: 유동이 방향을 바꾸거나 면적이 변하면 에너지를 잃는다

직관 배관의 마찰만으로 계통을 계산하면 항상 틀린다. 실제 손실의 절반 이상이 **엘보, 밸브, 확대·축소, 티, 오리피스**에서 나온다. 이를 **부차 손실**이라 부르는데, 이름과 달리 부차적이지 않다.

$$h_L = K \frac{u^2}{2g} \text{ 또는 } \Delta p = K \frac{\rho u^2}{2}$$

K 는 부품마다 실험으로 정한 계수다. 이를 배관 길이로 환산한 **등가 길이(equivalent length) L_e/D** 로 표시하기도 한다.

$$K = f \frac{L_e}{D}$$

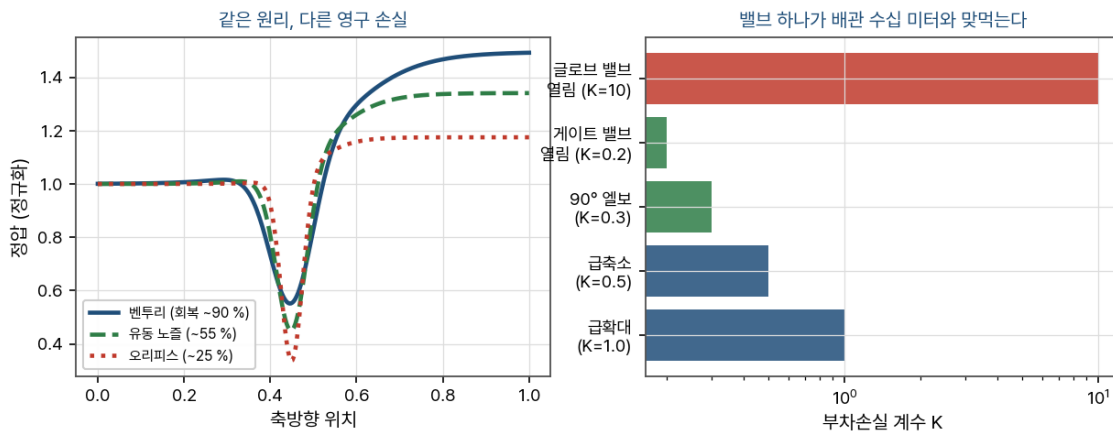


그림 8.1 — 왼쪽: 같은 원리의 유량계라도 영구 압력 손실이 크게 다르다. 오른쪽: 밸브 하나의 K 가 다른 부품 수십 개와 맞먹는다.²³

왜 확대가 축소보다 손실이 큰가

급확대는 $K \approx 1$ (완전 확대 시), 급축소는 $K \approx 0.5$ 다. **확대가 두 배 나쁘다.** 이유는 4 장의 박리에 있다. 유로가 갑자기 넓어지면 유체가 벽을 따라가지 못하고 떨어져 나가 와류를 만들며, 그 와류의 운동에너지가 열로 흩어진다. 반대로 축소에서는 유선이 자연스럽게 모이므로 박리가 덜하다.

설계 원칙 하나: 넓힐 때는 천천히, 좁힐 때는 급해도 된다. 디퓨저의 확대각을 7° 안팎으로 잡는 이유다.

수식: 관망의 두 법칙

여러 관이 얹힌 계통은 전기 회로처럼 푼다.

$$\text{직렬: } \Delta p_{\text{tot}} = \sum \Delta p_i, Q \text{ 일정 병렬: } \Delta p \text{ 동일, } Q_{\text{tot}} = \sum Q_i$$

병렬 조건이 원자력에서 특히 중요하다. 노심의 수백 개 집합체가 병렬이므로, 각 채널의 압력 강하가 같아지도록 유량이 스스로 나뉜다.

²³ 그림 출처: 왼쪽은 정성적 개형, 오른쪽 K 값은 문헌의 대표값이며 제작사·크기·개도에 따라 크게 변한다.

펌프와 시스템의 만남

펌프는 유량이 늘수록 수두가 떨어지고(성능 곡선), 계통은 유량이 늘수록 손실이 커진다(시스템 곡선).

$$H_{\text{sys}} = \Delta z + \left(\sum f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{u^2}{2g}$$

두 곡선의 교점이 **운전점(operating point)**이다. 이 지점은 우리가 고르는 것이 아니라 물리가 정한다.

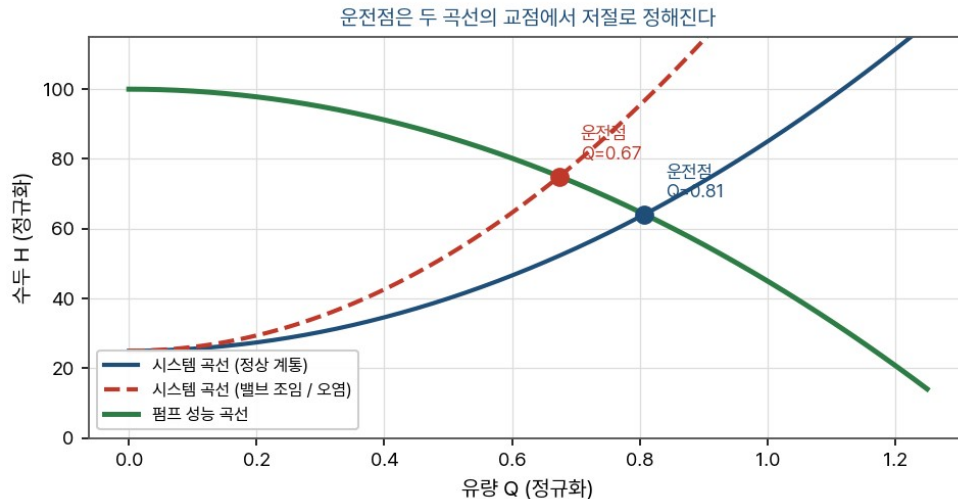


그림 8.2 — 운전점은 펌프 곡선과 시스템 곡선의 교점에서 저절로 정해진다. 계통이 막히면 운전점이 왼쪽 위로 이동한다.²⁴

예제: 자연순환 루프의 유량이 정해지는 자리

2장에서 구동 수두 6.9 kPa 을 얻었다. 이제 그것과 균형을 이루는 유량을 구해 보자.

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

손실 계수 합을 $\sum (f L/D + K) = 30$, 평균 밀도 760 kg/m^3 로 잡으면

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

여기서 유체역학적으로 중요한 성질이 하나 드러난다. 구동 수두는 H 에 비례하는데 손실은 u^2 에 비례하므로, 유량은 $\sqrt{H}$ 로만 늘어난다. 높이를 4 배로 키워도 유량은 2 배다. 그리고 손실 계수를 절반으로 줄이면 유량이 $\sqrt{2}$ 배 늘어난다. 피동 계통 설계에서 유로를 굽고 매끈하게, 굽힘을 적게 만드는 것이 높이를 키우는 것만큼 효과적인 이유다.

▶ **실무 팁** K 값을 쓸 때 어느 속도 기준인지 반드시 확인해야 한다. 축소부의 K 는 대개 작은 쪽(하류) 속도 기준이고, 확대부는 작은 쪽(상류) 속도 기준이다. 기준을 헷갈리면 면적비의 제곱만큼, 즉 몇 배씩 틀린다. 문헌에서 K 를 가져올 때는 값보다 먼저 기준 속도의 정의를 옮겨 적자.

■ **원자력 연계** PWR 노심의 지지격자(spacer grid)는 부차 손실의 대표 사례다. 3.6 m 길이에 7~10 개가 들어가고, 각각의 K 가 0.5~1.5 수준이라 다 합치면 마찰 손실과 맞먹거나 더 크다. 그런데 이 손실은 대가 없이 생기는 것이 아니다. 격자에 붙은 혼합날개가 유동을 회전시켜 부수로 간 혼합을 촉진하고, 그 결과 CHF 여유가 개선된다. 압력 손실을 지불하고 안전 여유를 산다는 맞교환이며, 격자 설계는 이 두 값을 저울에 올리는 작업이다. 12 장의 유동 가시화가 필요해지는 지점이기도 하다.

²⁴ 그림 출처: 개념 계산. 축은 정규화했다.

9 장 경계층과 외부유동

Tier 2 · 벽 근처의 얇은 층이 마찰과 항력의 거의 전부를 정한다.

원리: 프란틀의 위대한 타협 (1904)

나비에-스토크스는 못 푸는데 오일러 방정식(비점성)은 풀린다. 그런데 비점성 해는 벽에서 점착 조건을 만족하지 못하고, 심지어 항력이 0으로 나온다(달랑베르의 역설).

프란틀이 내놓은 답은 이랬다. 점성은 벽에 아주 가까운 얇은 층에서만 중요하다. 그 바깥은 비점성으로 풀고, 안쪽은 단순화된 경계층 방정식으로 풀어 두 해를 이어 붙인다. 이 아이디어가 현대 유체역학을 열었다.

경계층 두께는 이렇게 자란다.

$$\text{층류: } \frac{\delta}{x} = \frac{5.0}{\sqrt{Re_x}}, \text{ 난류: } \frac{\delta}{x} \approx \frac{0.38}{Re_x^{1/5}}$$

층류는 $\sqrt{x}$ 로, 난류는 훨씬 빠르게 자란다. 평판의 천이는 대략 $Re_x \approx 5 \times 10^5$ 에서 일어난다.

수식: 마찰 항력과 형상 항력

물체가 받는 항력은 두 갈래다.

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 A$$

표 9.1 — 항력의 두 성분.²⁵

종류	원인	지배하는 형상
마찰 항력	벽면 전단응력의 합	유선형(날개, 평판)
형상 항력	앞뒤 압력차	뭉툭한 물체(원기둥, 구, 각진 구조물)

박리: 유동이 벽을 떠나는 순간

물체 뒤쪽에서는 유로가 넓어져 압력이 상승한다(역압력구배(adverse pressure gradient)). 이미 느려진 경계층 안의 유체는 이 압력 언덕을 못 넘고 멈췄다가 역류한다. 그 지점이 박리점이고, 뒤편에는 압력이 회복되지 않는 후류(wake)가 생긴다.

$$\text{박리 조건: } \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$$

²⁵ 표 각주: 유선형 물체는 마찰 항력이, 뭉툭한 물체는 형상 항력이 지배한다. 골프공의 딴푼처럼 일부러 난류를 만들어 박리를 늦추면 형상 항력이 줄어 전체 항력이 감소하는 경우도 있다.

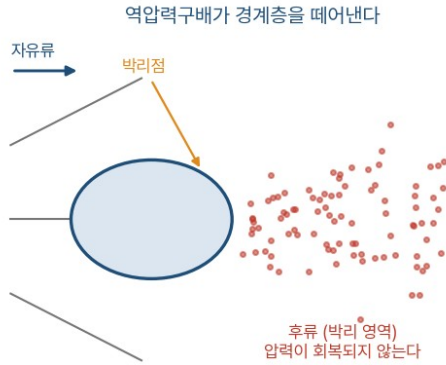
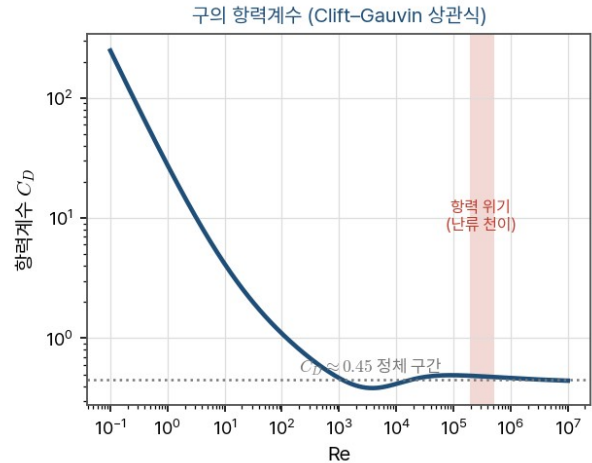


그림 9.1 — 왼쪽: 역압력구배가 경계층을 떼어내고 후류를 만든다. 오른쪽: 구의 항력계수. 난류 천이에서 항력이 급락하는 '항력 위기'가 보인다.²⁶

항력 위기(drag crisis)가 흥미롭다. $Re \approx 3 \times 10^5$ 에서 경계층이 난류가 되면 오히려 항력이 떨어진다. 난류 경계층은 운동량을 더 잘 섞어 역압력구배를 더 오래 버티므로 박리점이 뒤로 밀리고, 후류가 좁아지기 때문이다. **마찰은 늘지만 형상 항력이 더 크게 줄어든다.**

와류 방출(vortex shedding)

원기둥 뒤에서는 Re 가 40 을 넘으면 와류가 좌우 번갈아 떨어져 나간다(카르만 와열). 그 진동수는 **스트로우홀 수**로 정리된다.

$$St = \frac{fD}{u} \approx 0.2 (10^2 < Re < 10^5)$$

이 진동수가 구조물의 고유진동수와 만나면 **유동 유발 진동(flow-induced vibration)**이 생긴다.

예제: 증기발생기 전열관의 와류 방출 진동수

외경 19 mm 전열관에 횡유동 3 m/s 가 걸린다고 하자.

$$f = \frac{Stu}{D} = \frac{0.2 \times 3}{0.019} = 31.6 \text{ Hz}$$

전열관의 1 차 고유진동수가 이 근처면 공진이 일어나 마모(fretting wear)나 파손으로 이어진다. **그래서 SG 설계에서는 지지판 간격으로 고유진동수를 올려 와류 방출 진동수에서 멀리 떨어뜨린다.**

유량이 두 배가 되면 방출 진동수도 두 배가 되므로, 운전 조건 전 범위에서 공진을 피하도록 검토해야 한다. 여기에 유체탄성 불안정(fluidelastic instability)까지 더해지면 관군 진동 해석이 된다.

▶ **실무 팁** CFD 로 박리를 예측하는 것은 여전히 어렵다. 특히 **매끄러운 곡면에서의 박리점 위치**는 난류 모델에 극도로 민감하다. 표준 $k-\epsilon$ 은 역압력구배에서 박리를 늦게 예측하는 경향이 잘 알려져 있고, SST $k-\omega$ 가 이 점에서 낫다. 뭉툭한 물체의 항력을 CFD 로 구했다면, 반드시 실험값이나 문헌값과 대조해야 한다. 자세한 내용은 THINK Lab 「난류 모델의 유도 및 특성」 6 장을 볼 것.

■ **원자력 연계** 원자로 안의 외부유동은 대부분 **봉다발 횡유동**이다. 증기발생기 U-관군, 노심 하부의 유동 분배 영역, 상부 노심판 아래가 그렇다. 여기서는 개별 관의 박리·와류가 이웃 관과 간섭해 단독 원기둥 이론이 그대로

²⁶ 그림 출처: 오른쪽은 Clift-Gauvin 상관식으로 직접 계산. $Re=10^4$ 에서 $C_D=0.42$, 항력 위기는 $Re \approx 3 \times 10^5$ 근처다.

통하지 않는다. 관군의 배열(정삼각·정사각·회전 배열)과 피치비 P/D 에 따라 거동이 크게 달라지며, 실험 데이터에 의존하는 영역이 여전히 넓다. 유동 유발 진동은 SG 전열관 파손의 주요 원인 중 하나이고, 이 때문에 관군 유동장의 국소 측정이 연구 주제로 남아 있다(12 장).

10 장 난류 입문

Tier 2-3 · CFD 를 돌리기 전에 알아야 할 최소한. 벽법칙과 y^+ .

원리: 난류는 무질서가 아니라 구조다

난류를 “랜덤한 흐름”으로 이해하면 곧 막힌다. 난류에는 뚜렷한 구조와 통계 법칙이 있다.

핵심은 **에너지 캐스케이드**다. 큰 와류가 평균 유동에서 에너지를 뽑아내고, 그것을 더 작은 와류에 넘기며, 결국 가장 작은 와류에서 점성이 열로 바꾼다. 콜모고로프가 정리한 이 그림에서 관성 부영역의 에너지 스펙트럼은

$$E(k) \propto \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$$

가장 작은 와류의 크기(**콜모고로프 척도**)는

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$$

PWR 부수로 조건에서 η 는 대략 $2 \mu\text{m}$ 수준이다. 이 크기까지 격자를 깔아야 DNS 이고, 그래서 실무에서는 안 한다.

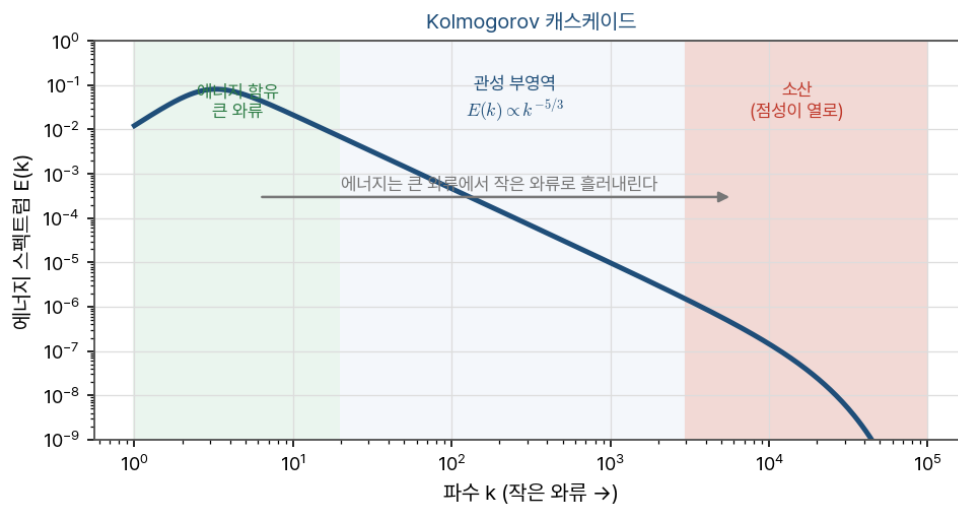


그림 10.1 — 콜모고로프 에너지 캐스케이드. 큰 와류에서 작은 와류로 에너지가 흘러내린다.²⁷

수식: 레이놀즈 평균과 벽법칙

속도를 평균과 변동으로 나눈다(**레이놀즈 분해**).

$$u = \bar{u} + u'$$

이를 나비에-스톡스에 넣고 평균을 취하면, 원래 없던 항이 하나 튀어나온다.

$$\rho \overline{u_i' u_j'} \text{ (레이놀즈 응력)}$$

미지수가 늘었다. 이것이 난류의 닫힘 문제(closure problem)이고, 난류 모델이 존재하는 이유다. 이 항을 어떻게 모형화하느냐가 $k-\varepsilon$, SST, RSM 을 가른다. 그 계보는 THINK Lab 「난류 모델의 유도 및 특성」이 다룬다.

²⁷ 그림 출처: 개념 곡선. 관성 부영역의 $-5/3$ 기울기와 소산 영역의 지수적 감쇠를 반영했다.

벽법칙 — 실무에서 매일 쓰는 것

벽 근처 속도 분포는 놀랍도록 보편적이다. 마찰 속도(friction velocity)와 무차원 거리를 정의하면

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, y^+ = \frac{y u_{\tau}}{\nu}, u^+ = \frac{u}{u_{\tau}}$$

세 개의 층이 나타난다.

표 10.1 — 벽법칙의 세 영역.²⁸

영역	범위	관계식
점성 저층	$y^+ < 5$	$u^+ = y^+$
완충층	$5 < y^+ < 30$	어느 쪽 식도 안 맞음
대수 영역	$30 < y^+ < 300$	$u^+ = \frac{1}{0.41} \ln y^+ + 5.0$

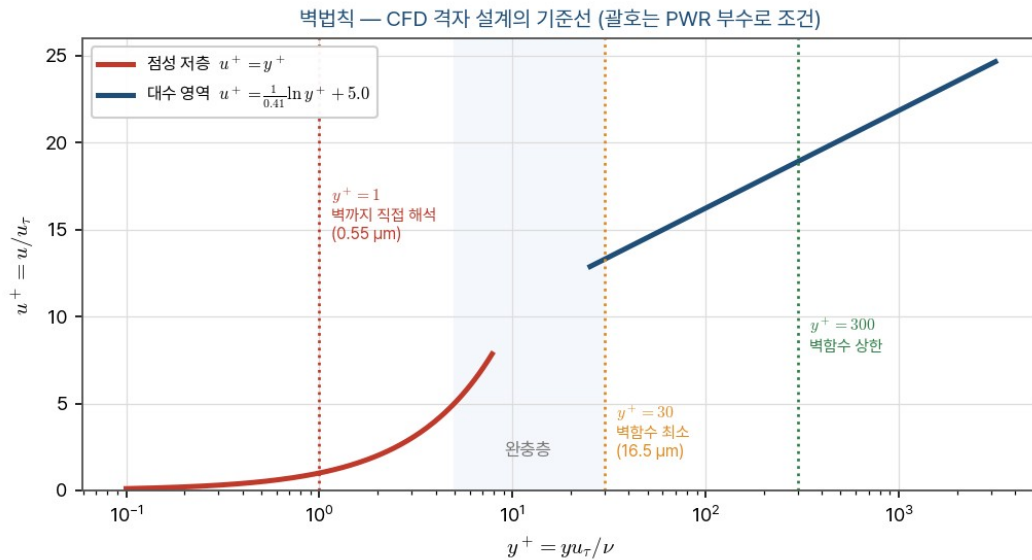


그림 10.2 — 벽법칙과 CFD 격자 설계 기준. 괄호 안은 PWR 부수로 조건에서의 실제 거리다.²⁹

예제: PWR 부수로에서 첫 격자를 어디 두어야 하나

7 장에서 $\tau_w = 33.4 \text{ Pa}$, $\rho = 704.8 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 1.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 얻었다.

㉠ 마찰 속도

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{33.4}{704.8}} = 0.218 \text{ m/s}$$

평균 유속 5.39 m/s 의 약 4 %다. 이 비율은 난류에서 대체로 3~5 % 수준이다.

㉡ 첫 격자 거리

²⁸ 표 각주: 0.41은 폰 카르만 상수 κ , 5.0은 매끈한 벽의 적분 상수 B 다. 거친 벽에서는 B 가 낮아진다. 대수 영역(log-law region)의 상한은 경계층 두께의 약 20 %까지다.

²⁹ 그림 출처: 직접 계산. PWR 부수로 조건($\tau_w = 33.4 \text{ Pa}$, $u_{\tau} = 0.218 \text{ m/s}$, $\nu = 1.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)에서 환산했다.

$$y = \frac{y^+ v}{u_\tau}$$

표 10.2 — PWR 부수로 조건의 첫 격자 크기.³⁰

목표 y^+	첫 격자 중심 거리	해석 전략
1	0.55 μm	벽까지 직접 해석(low-Re)
30	16.5 μm	벽함수 최소
100	55 μm	벽함수 표준

0.55 마이크로미터. 부수로 하나의 수력직경(hydraulic diameter)이 11.78 mm 이니, 첫 격자가 유로 폭의 2 만분의 1 이다. 노심 전체를 이렇게 풀 수는 없다. 그래서 실무는 벽함수(wall function)를 쓰고, 정말 필요한 국소 영역(격자 혼합날개 하류, CHF 관심 지점)만 벽까지 푼다.

▶ **실무 팁** y^+ 는 **계산이 끝난 뒤에야 정확히 알 수 있다.** τ_w 가 해의 일부이기 때문이다. 그래서 실무 절차는 이렇다. ① 상관식으로 τ_w 를 추정해 격자를 만든다 → ② 계산한다 → ③ 결과에서 실제 y^+ 분포를 뽑아 본다 → ④ 목표 범위를 벗어났으면 격자를 고쳐 다시 돌린다. y^+ 분포를 **확인하지 않은 CFD 결과는 검토되지 않은 결과다.** 특히 완충층(buffer layer)($5 < y^+ < 30$)에 첫 격자가 놓이면 어느 쪽 모델도 맞지 않아 가장 나쁘다.

■ **원자력 연계** 난류는 원자로에서 양날의 검이다. 열전달을 극적으로 좋게 만들지만(「필수 열전달」 6 장), 동시에 압력 손실과 진동·소음을 만든다. 그리고 **난류 혼합**은 부수로 사이의 열과 유량을 섞어 국소 침투를 막아주는데, 이 혼합 계수는 이론으로 예측이 안 되어 실험 상관식에 의존한다. 봉다발의 이차 유동(secondary flow), 대규모 응집 구조(coherent structure)가 좁은 간극에서 만들어내는 맥동은 아직 활발한 연구 주제이며, 국내외에서 LES 와 고해상도 계측으로 접근하고 있다.

³⁰ 표 각주: 첫 격자 **중심**까지의 거리다. 코드에 따라 격자 두께를 요구하기도 하므로 정의를 확인할 것.

11 장 2 상 유동과 압축성

Tier 3 · 액체와 기체가 함께 흐를 때, 그리고 유량이 더는 늘지 않을 때.

원리: 단상 유동의 상식이 대부분 깨진다

물만 흐를 때와 물과 증기가 함께 흐를 때는 완전히 다른 문제다. 두 상이 서로 다른 속도로, 서로 다른 배치로 흐르기 때문이다. 같은 유량, 같은 관이어도 배치가 바뀌면 압력 강하가 몇 배 달라진다.

그래서 2 상 유동의 첫 질문은 항상 “지금 어떤 유동 양식인가” 다.



그림 11.1 — 수직관과 수평관의 유동 양식. 수평관에서는 중력이 액체를 아래로 깔아 성층·파상류가 추가된다.³¹

수평관에 성층류가 있다는 점이 중요하다. 수직관은 중력이 유동 방향과 나란해 축대칭이 유지되지만, 수평관에서는 중력이 유동에 수직으로 작용해 액체를 아래로 깬다. 그래서 관 위쪽이 마르면서 국소 과열이 생길 수 있다.

수식: 세 가지 모델 계층

표 11.1 — 2 상 유동 모델의 계층.³²

모델	가정	장단점
균질류 (HEM)	두 상이 같은 속도, 열평형	가장 단순, 고압·고유량에서 쓸 만함
분리류	두 상이 다른 속도, 상관식으로 연결	실무 표준 (Lockhart-Martinelli 등)

³¹ 그림 출처: 개념도. 실제 전이 경계는 유량·물성·관경에 의존하며 Taitel-Dukler 등의 유동 양식 지도로 판정한다.

³² 표 각주: 위로 갈수록 단순하고 아래로 갈수록 정확하지만 닫힘 관계식(상간 마찰·전열)이 많이 필요하다. 실무 손계산은 균질류나 분리류(separated flow)에서 끝난다.

모델	가정	장단점
2 유체 모델	상마다 보존식 6 개	시스템 코드(RELAP5, TRACE)의 방식

균질류 압력 강하

두 상을 하나의 유체로 보고 평균 물성을 쓴다. 마찰 항의 결과는 간단하다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,tp} = \phi_{lo}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,lo}, \phi_{lo}^2 = 1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1\right)$$

$(dp/dz)_{f,lo}$ 는 “전체 유량이 액체만으로 흐른다면”의 값이다.

Lockhart-Martinelli 분리류

두 상이 각각 따로 흐른다고 보고, 그 상호작용을 하나의 파라미터로 묶는다.

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_v}, \phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

난류-난류 조건에서는 $C=20$ 이고, X 는 다음 형태로 계산한다.

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0.1} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9}$$

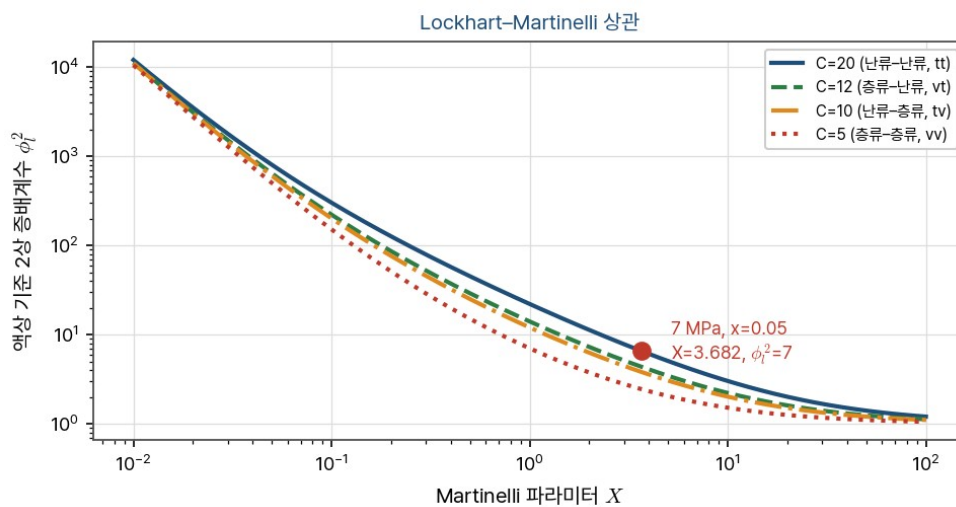


그림 11.2 — Lockhart-Martinelli 상관. X 가 작을수록(증기가 많을수록) 증배계수가 급격히 커진다.³³

예제: 건도(quality) 5 %가 압력 강하를 두 배로 만든다

7 MPa 포화 조건, 내경 12 mm 관, $G=1,500 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$, 길이 1 m, 건도 $x=0.05$.

물성: $\rho_l=739.7$, $\rho_v=36.52 \text{ kg/m}^3$, $\mu_l=91.3$, $\mu_v=18.9 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$

㉠ 액체 단독 기준 압력 강하

³³ 그림 출처: 직접 계산. 표시점은 7 MPa·건도 5 % 조건이며 IAPWS-IF97 물성을 썼다.

$$Re_{lo} = \frac{G D}{\mu_l} = \frac{1,500 \times 0.012}{91.3 \times 10^{-6}} = 1.97 \times 10^5$$

$$f_{lo} = \frac{0.3164}{Re_{lo}^{0.25}} = 0.0150 \Rightarrow \Delta p_{lo} = 0.0150 \times \frac{1}{0.012} \times \frac{1,500^2}{2 \times 739.7} = 1.90 \text{ kPa}$$

㉔ 균질류 증배계수

$$\phi_{lo}^2 = 1 + 0.05 \left(\frac{739.7}{36.52} - 1 \right) = 1 + 0.05 \times 19.25 = 1.96$$

$$\Delta p_{tp} = 1.90 \times 1.96 = 3.73 \text{ kPa}$$

질량으로 5 %의 증기가 압력 강하를 두 배로 만든다. 건도 10 %면 세 배에 가까워진다(「필수 열전달」 12 장 표 참조).

㉕ Martinelli 파라미터로 교차 확인

$$X_{tt} = (0.0494)^{0.5} (4.83)^{0.1} (19)^{0.9} = 0.222 \times 1.169 \times 14.15 = 3.68$$

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{20}{3.68} + \frac{1}{3.68^2} = 6.5$$

ϕ_l^2 는 액상 단독(전체 유량이 아니라 액체 부분만) 기준이므로 ϕ_{lo}^2 와 직접 비교할 수 없다는 점을 주의해야 한다. 기준을 혼동하는 것이 2 상 계산의 대표적 실수다.

압축성: 유량이 더는 늘지 않는 순간

배관이 파단되면 유체가 대기로 분출한다. 이때 하류 압력을 아무리 낮춰도 유량이 어느 값에서 멈춘다. 압력 정보가 음속으로 전달되는데, 목에서 유속이 음속에 도달하면 하류 소식이 상류로 올라가지 못하기 때문이다. 이것이 초킹(choking)이다.

이상기체의 임계 압력비는

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

$\gamma = 1.4$ 인 공기는 **0.528** 이다. 대기로 뿜는 압축공기는 상류가 0.19 MPa 만 넘어도 이미 초킹 상태다.

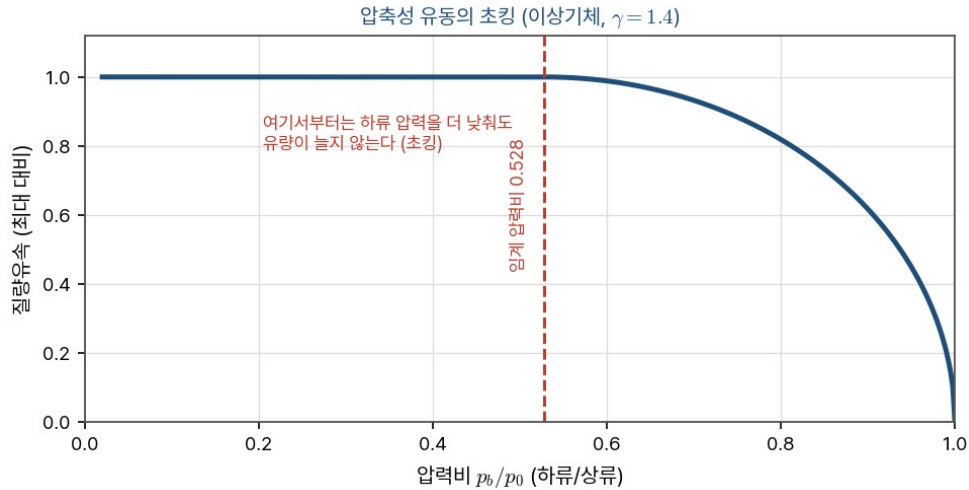


그림 11.3 — 압축성 유동의 초킹. 임계 압력비 아래로는 하류 압력을 낮춰도 유량이 늘지 않는다.³⁴

▶ **실무 팁 2** 상 임계유동(critical flow)은 단상 기체보다 훨씬 까다롭다. 압력이 떨어지면서 물이 증발하는데 그 속도가 유한하기 때문에 **열평형 가정이 깨진다**. 그래서 실무에서는 열평형을 가정한 HEM 과, 비평형을 보정한 Henry-Fauske 모델을 함께 쓰고 보수적인 쪽을 택한다. 과냉각수의 파단 유량은 HEM 이 크게 과소평가하는 경향이 있어 주의해야 한다.

■ **원자력 연계** 임계유동은 LOCA 해석의 심장이다. 파단 유량이 정해지면 냉각재 상실 속도, 감압 속도, ECCS 작동 시점이 줄줄이 따라 나온다. 그래서 시스템 코드의 임계유동 모델은 가장 많이 검증받는 부분이고, 안전해석에서는 파단 면적과 방출 계수를 **보수적으로 크게** 잡는 것이 관행이다. 반대로 NuScale 의 벤투리 유량 제한기처럼 설계로 파단 유량을 제한하는 접근도 있다(4 장). 그리고 2 상 압력 강하는 자연순환로의 안정성과 직결된다. 비등이 시작되면 압력 강하가 급증하고 그것이 유량을 줄이며, 유량이 줄면 비등이 더 심해지는 되먹임이 밀도파 진동을 만든다.

³⁴ 그림 출처: 직접 계산, 등엔트로피 노즐 관계식($\gamma = 1.4$).

12 장 유동 측정과 가시화

Tier 3 · 계산을 믿으려면 재야 한다. 그리고 재려면 보여야 한다.

원리: 무엇을 재는가에 따라 방법이 갈린다

유동 계측은 크게 두 갈래다.

- **적분량** — 유량, 압력 강하, 평균 온도. 계통 성능 평가에 쓴다.
- **국소 분포** — 속도장, 난류량, 기포율. **CFD 검증에 쓸 수 있는 것은 이쪽뿐이다.**

이 구분이 중요하다. 유량계 하나로 코드를 검증했다고 말할 수는 없다. 적분량이 맞아도 내부 분포가 틀린 경우가 흔하기 때문이다. 원자력 열수력 코드의 검증 공백이 대부분 여기 있다.

수식: 대표적 계측 원리

표 12.1 — 유동 계측 방법 비교.³⁵

방법	원리	얻는 것	침습성
오리피스·벤투리	베르누이 + C_d	유량	있음(압력손실)
피토관	정체압 - 정압	국소 속도 1 점	있음
전자기 유량계	패러데이 법칙	유량	없음
초음파 유량계	전파 시간차	유량	없음
열선유속계 (HWA)	대류 냉각량	1 점 고주파 속도	있음
LDV	도플러 편이	1 점 속도, 고정밀	없음(광학)
PIV	입자 변위 상관	평면 속도장	없음(광학)
PLIF	형광 강도	평면 농도·온도장	없음(광학)
MRV	자기공명 속도 인코딩	3 차원 속도장	없음

PIV 의 원리

유체에 추적 입자(tracer particle)를 뿌리고, 레이저 시트로 한 평면만 밝힌 뒤, 아주 짧은 간격 Δt 로 두 장을 찍는다. 두 이미지를 작은 검사창으로 나눠 **상호상관(cross-correlation)**을 계산하면 그 창의 평균 변위 Δx 가 나온다.

$$\vec{u} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{M} (M: \text{광학 배열})$$

³⁵ 표 각주: 침습성(intrusiveness)은 계측기가 유동을 교란하는지를 뜻한다. 광학·자기 방법은 교란이 없지만 접근성 제약이 크다. PIV 와 PLIF 를 동시에 쓰면 속도장과 온도장을 같은 평면에서 얻을 수 있다.

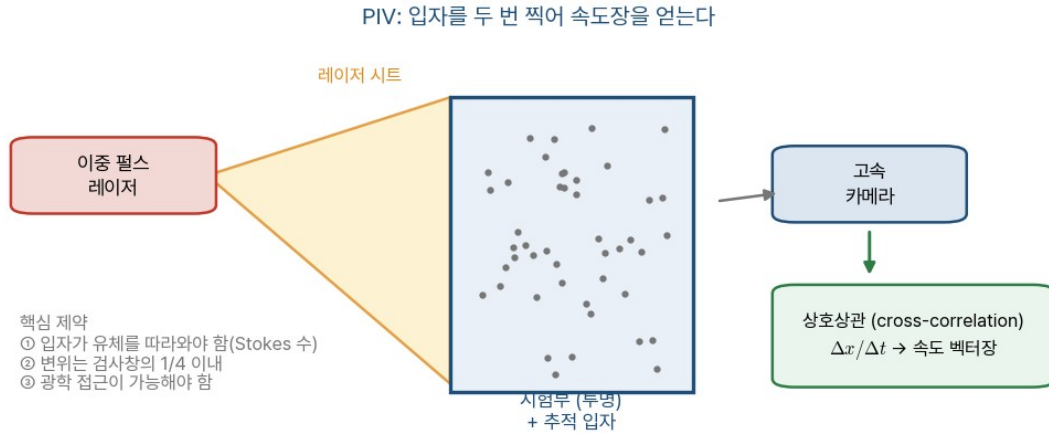


그림 12.1 — PIV 시스템 구성. 입자를 두 번 찍어 변위를 상관으로 찾는다.³⁶

성립 조건이 셋 있고, 하나라도 어기면 데이터가 못 쓰게 된다.

① 입자가 유체를 따라와야 한다. 판별 기준은 스토크스 수다.

$$St_k = \frac{\tau_p}{\tau_f} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{u}{L} \ll 1$$

② 변위가 검사창의 1/4 을 넘으면 안 된다. 넘으면 입자가 창을 벗어나 상관이 깨진다. Δt 를 이 조건으로 정한다.

③ 광학 접근이 가능해야 한다. 이것이 원자력 형상에서 가장 큰 장벽이다.

예제: 굴절률 정합(matched index of refraction)이 없으면 봉다발 안은 못 본다

봉다발이나 관군 시험부를 물로 채우고 옆에서 보면, 앞줄 봉의 곡면에서 빛이 굴절·전반사되어 뒤쪽이 일그러지거나 아예 안 보인다. 물($n=1.333$)과 아크릴($n \approx 1.490$)의 굴절률이 다르기 때문이다.

해결책이 **굴절률 정합**(MIR, Matched Index of Refraction)이다. 작동 유체의 굴절률을 구조재와 같게 만들면, 빛이 경계면에서 꺾이지 않아 구조물이 광학적으로 사라진다.

요오드화나트륨(NaI) 수용액이 대표적 정합 유체다. 농도를 올리면 굴절률이 거의 선형으로 오른다.

$$n \approx 1.3330 + 0.002468 w \quad (w: \text{wt}\%, 30 \square^\circ \text{C})$$

아크릴에 맞추려면

$$1.490 = 1.3330 + 0.002468 w \Rightarrow w \approx 63.6 \text{ wt}\%$$

실제 THINK Lab 조건인 **61.6 wt%에서** $n=1.485$ 로, 아크릴 로트별 편차 범위 안에서 정합된다.

³⁶ 그림 출처: 개념도.

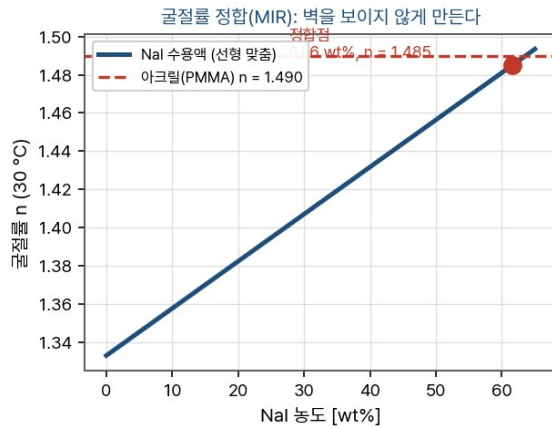
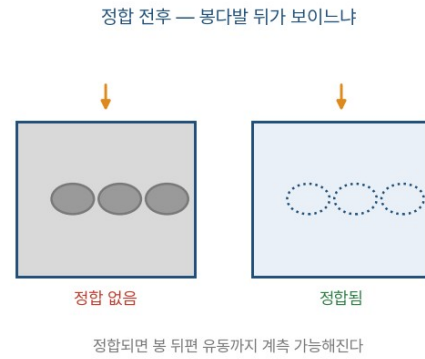


그림 12.2 — 왼쪽: NaI 농도와 굴절률. 오른쪽: 정합 전후 봉다발 뒤편의 가시성.³⁷

대가도 명확하다.

표 12.2 — 물과 NaI 정합 용액의 비교.³⁸

항목	물	NaI 61.6 wt% 용액
밀도 [kg/m ³]	998	약 1,840
동점성계수 [m ² /s]	1.0×10 ⁻⁶	약 1.1×10 ⁻⁶
굴절률 (30 °C)	1.333	1.485

밀도가 1.8 배라는 점은 실험 설계 전체를 바꾼다. 같은 Re 를 맞추려면 유속이 달라지고, 시험부와 배관의 구조 하중이 커지며, 순환 펌프 사양도 다시 잡아야 한다.

▶ **실무 팁** PIV 데이터의 신뢰도는 **불확실도를 어떻게 보고하느냐**로 판가름 난다. 최소한 이 세 가지는 정량화해야 한다. ① 입자 추종성(스토크스 수), ② 상호상관의 서브픽셀 정확도(보통 0.1 픽셀 수준), ③ 양상불 평균의 수렴(샘플 수에 따른 통계 오차). 여기에 광학 왜곡 보정과 시트 두께 방향 평균 효과까지 더하면 실제 불확실도는 흔히 3~5 % 수준이 된다. **CFD와 비교할 때 이 값보다 작은 차이를 두고 “일치한다/안 한다”를 논하는 것은 의미가 없다.**

■ **원자력 연계** 원자력 열수력 코드의 검증에는 오래된 공백이 있다. 기존 검증 데이터가 대부분 **적분량**(전체 압력 강하, 출구 온도, 전열량)이라, 코드가 내부 분포를 맞게 예측하는지는 확인되지 않은 채로 남아 있는 경우가 많다. 증기발생기 관군 해석 코드(ATHOS3 계열)가 다공성 매질 근사를 쓰면서도 국소 분포 검증 데이터가 부족한 것이 대표적이다. 굴절률 정합 + PIV로 관군 내부 속도장을 실측하는 연구가 필요한 이유가 여기 있다. 나아가 2상 유동에서는 PIV만으로 부족해 PLIF·전도도 프로브·X선 단층촬영을 조합해야 하며, 이 조합의 설계 자체가 연구 주제다.

³⁷ 그림 출처: 왼쪽은 두 기준점(순수 물 1.333, 61.6 wt% 1.485)을 잇는 선형 맞춤. 실제 굴절률은 온도와 파장에 의존하므로 사용 전 굴절계로 실측할 것.

³⁸ 표 각주: NaI 용액의 물성은 농도·온도에 민감하고 문헌값 편차가 크므로 실측이 필요하다. 밀도가 1.8 배이므로 같은 유속에서 Re와 펌프 동력, 시험부 구조 하중이 모두 달라진다. 빛에 노출되면 갈변하므로 차광 보관이 필수다.

부록 A — 기호와 단위

표 A.1 — 이 책에서 쓰는 기호.³⁹

기호	이름	단위	처음 나오는 곳
A, A_c	면적, 유동 단면적	m^2	3 장
c	음속	m/s	11 장
C_d	유출 계수	—	4 장
C_D	항력계수	—	9 장
D, D_h	관 지름, 수력직경	m	7 장
Eu	오일러 수	—	6 장
f	Darcy 마찰계수	—	7 장
C_f	Fanning 마찰계수 ($f/4$)	—	7 장
Fr	프루드 수	—	6 장
G	질량유속 ρu	$kg/m^2 \cdot s$	7 장
h_L	손실 수두	m	3 장
K	부차 손실 계수	—	8 장
Kn	크누센 수	—	1 장
Ma	마하 수	—	6 장
$NPSH$	유효 흡입 수두	m	4 장
p	압력	Pa	2 장
Q	체적 유량	m^3/s	5 장
Re	레이놀즈 수	—	5 장
Ri	리처드슨 수	—	6 장
St	스트로우홀 수	—	9 장
St_k	스토크스 수 (입자 추종성)	—	12 장

³⁹ 표 각주: ε 은 7 장(거칠기)과 10 장(난류 소산율)에서 다른 뜻이다. 분야 관행이라 그대로 두었으니 문맥으로 구분할 것.

기호	이름	단위	처음 나오는 곳
u_τ	마찰 속도 $\sqrt{\tau_w/\rho}$	m/s	10 장
u^+, y^+	벽 단위 속도·거리	—	10 장
We	웨버 수	—	6 장
x	건도 (질량 기준)	—	11 장
X, X_{tt}	Martinelli 파라미터	—	11 장
δ	경계층 두께	m	9 장
ε	표면 거칠기 / 난류 소산율	m / m ² ·s ⁻³	7·10 장
η	콜모고로프 척도	m	10 장
γ	비열비	—	11 장
κ	폰 카르만 상수 (0.41)	—	10 장
λ	축소비 / 평균자유행로	— / m	6·1 장
μ	점성계수	Pa·s	1 장
ν	동점성계수 μ/ρ	m ² /s	1 장
ρ	밀도	kg/m ³	1 장
σ	표면장력	N/m	6 장
τ, τ_w	전단응력, 벽면 전단응력	Pa	1·7 장
ϕ_{lo}^2, ϕ_l^2	2 상 마찰 증배계수	—	11 장

약어

표 A.2 — 자주 쓰는 약어.⁴⁰

약어	원어	뜻
CFD	Computational Fluid Dynamics	전산유체역학
DNS	Direct Numerical Simulation	직접 수치모사
LES	Large Eddy Simulation	큰 와류 모사
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes	레이놀즈 평균

⁴⁰ 표 각주: 우리말 표기는 대한기계학회 및 한국원자력학회 용어를 따랐다.

약어	원어	뜻
HEM	Homogeneous Equilibrium Model	균질 평형 모델
NPSH	Net Positive Suction Head	유효 흡입 수두
PIV	Particle Image Velocimetry	입자영상유속계
PLIF	Planar Laser-Induced Fluorescence	평면 레이저유도형광
LDV	Laser Doppler Velocimetry	레이저 도플러 유속계
MIR	Matched Index of Refraction	굴절률 정합
MRV	Magnetic Resonance Velocimetry	자기공명 유속계
FIV	Flow-Induced Vibration	유동 유발 진동

부록 B — 물성표

모든 물 물성은 IAPWS-IF97 로 직접 계산해 넣었다.

B.1 물 (대기압, 압축수)

표 B.1 — 대기압 물의 물성.⁴¹

T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [μPa·s]	ν [10 ⁻⁶ m ² /s]	Pr
5	1,000.0	1,518	1.518	11.24
20	998.2	1,002	1.003	7.01
40	992.2	653	0.658	4.34
60	983.2	466	0.474	2.99
80	971.8	354	0.364	2.23
99	959.1	285	0.297	1.77

B.2 물 (15.5 MPa, PWR 1 차 계통)

표 B.2 — 15.5 MPa 압축수의 물성.⁴²

T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [μPa·s]	ν [10 ⁻⁷ m ² /s]
260	796.8	104.9	1.32
280	764.3	96.5	1.26
300	726.5	88.5	1.22
310	704.8	84.6	1.20
330	651.5	76.1	1.17

B.3 포화 물성 (2 상 계산용)

표 B.3 — 물의 포화 물성 (밀도는 kg/m³).⁴³

P [MPa]	T_{sat} [°C]	ρ_l	ρ_v	μ_l [μPa·s]	μ_v [μPa·s]	σ [N/m]
0.101	100.0	958.4	0.60	281.7	12.2	0.0589

⁴¹ 표 각주: 20 °C 에서 $\mu \approx 1$ cP, $\nu \approx 1$ cSt 임을 기억해 두면 자릿수 계산이 쉽다. 점성이 온도에 얼마나 민감한지 눈여겨볼 것 — 5 °C 에서 99 °C 사이에 5 배 넘게 변한다.

⁴² 표 각주: 이 압력의 포화온도는 344.8 °C 다. 고온에서 ν 가 상온 물의 1/8 수준으로 작아지므로, 같은 유속·같은 관경에서 Re 가 훨씬 커진다.

⁴³ 표 각주: 11 장의 Martinelli 파라미터 계산에 ρ_v/ρ_l 과 μ_l/μ_v 가 필요하다. 압력이 오를수록 두 비율이 1 에 가까워지고, 임계점(22.064 MPa)에서 두 상이 구별되지 않게 된다.

P [MPa]	T_{sat} [°C]	ρ_l	ρ_v	μ_l [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]	μ_v [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]	σ [N/m]
1.0	179.9	887.1	5.15	150.5	15.0	0.0422
3.0	233.9	821.9	15.00	114.2	16.8	0.0298
7.0	285.8	739.7	36.52	91.3	18.9	0.0176
10.0	311.0	688.4	55.45	81.7	20.2	0.0119
15.5	344.8	594.4	101.92	68.2	23.0	0.0047

B.4 기체와 그 밖의 유체 (대표값)

표 B.4 — 원자력에서 만나는 다른 작동유체.⁴⁴

유체	조건	ρ [kg/m^3]	μ [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]	ν [$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$]	Pr
공기	20 °C, 1 atm	1.204	18.1	15.0	0.71
공기	300 °C, 1 atm	0.616	29.7	48.2	0.70
헬륨	20 °C, 1 atm	0.166	19.6	118	0.68
나트륨 (액체)	400 °C	856	280	0.33	0.0055
LBE (납-비스무트)	400 °C	10,150	1,450	0.14	0.021
FLiNaK (용융염)	600 °C	2,020	2,900	1.44	약 12

B.5 표면 거칠기와 상수

표 B.5 — 상수와 거칠기.⁴⁵

항목	값
인발관 (신품)	$\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$
상용 강관 (신품)	0.045 mm
아연도금 강관	0.15 mm
주철관	0.26 mm
콘크리트	0.3~3 mm
층류/난류 천이	$\text{Re} \approx 2,300$ (관), 5×10^5 (평판)

⁴⁴ 표 각주: 액체금속과 용융염 물성은 문헌 편차가 크므로 대표값으로만 쓰고 정밀 해석에는 해당 코드의 물성 라이브러리를 쓸 것. 프란틀 수가 0.005에서 12까지 세 자릿수 범위에 걸쳐 있다는 점이 핵심이다 — 물로 검증한 열전달 상관식을 그대로 옮길 수 없다.

⁴⁵ 표 각주: 거칠기는 신품 기준이며, 운전 중 스케일·크러드 축적으로 자릿수가 커질 수 있다.

항목	값
폰 카르만 상수 κ	0.41
벽법칙 상수 B (매끈한 벽)	5.0
공기의 임계 압력비	0.528 ($\gamma = 1.4$)
아크릴(PMMA) 굴절률	약 1.490

부록 C — 상관식 요약

적용 범위를 벗어나면 쓰지 말 것.

C.1 기본 관계

표 C.1 — 정역학과 기본 정의.⁴⁶

항목	식
뉴턴 점성 법칙	$\tau = \mu du/dy$
동점성계수	$\nu = \mu/\rho$
정수압	$p = p_0 + \rho gh$
부력	$F_B = \rho g V_{\text{disp}}$
메타센터 높이	$\overline{GM} = I_{\text{wp}}/V_{\text{disp}} - \overline{BG}$
물질 미분	$D\phi/Dt = \partial\phi/\partial t + (\vec{u} \cdot \nabla)\phi$
크누센 수	$\text{Kn} = \lambda/L$ (연속체는 $\text{Kn} < 0.01$)

C.2 보존 법칙

표 C.2 — 보존 법칙.⁴⁷

항목	식
연속 (정상)	$\rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2$
연속 (미분, 비압축)	$\nabla \cdot \vec{u} = 0$
운동량 (검사체적)	$\sum \vec{F} = \dot{m} \vec{u}_{\text{out}} - \dot{m} \vec{u}_{\text{in}}$
나비에-스토크스	$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g}$
에너지 (수두)	$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + h_L$
베르누이	$p + \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho g z = \text{일정}$ (유선 따라, 비점성·정상·비압축)

⁴⁶ 표 각주: $\overline{GM} > 0$ 이면 부유체가 복원된다.

⁴⁷ 표 각주: 베르누이는 네 전제(비점성·정상·비압축·같은 유선)를 모두 만족할 때만 쓴다. 4 장 표 4.1 참조.

항목	식
정체압	$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho u^2$

C.3 해석해

표 C.3 — 손으로 풀리는 경우.⁴⁸

상황	식
쿠에트 유동	$u = U y/h, \tau = \mu U/h$
하겐-푸아죄유 (속도)	$u(r) = \frac{\Delta p}{4\mu L} (R^2 - r^2)$
하겐-푸아죄유 (유량)	$Q = \pi R^4 \Delta p / 8\mu L$
층류 평균/최대 속도비	2/3
층류 경계층	$\delta/x = 5.0/\sqrt{Re_x}$
난류 경계층	$\delta/x \approx 0.38/Re_x^{1/5}$

C.4 마찰과 손실

표 C.4 — 마찰과 손실.⁴⁹

상황	식	적용 범위
Darcy-Weisbach	$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2}$	전 범위
층류	$f = 64/Re$	$Re < 2,300$
Blasius	$f = 0.3164/Re^{0.25}$	매끈, $4 \times 10^3 < Re < 10^5$
Colebrook	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$	$Re > 4,000$, 반복 계산
Haaland	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10} \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]$	Colebrook 근사, 오차 2 %
부차 손실	$\Delta p = K \frac{\rho u^2}{2}$	K 는 실험값
등가 길이	$K = f L_e/D$	환산용

⁴⁸ 표 각주: $Q \propto R^4$ 이 실무에서 가장 자주 쓰이는 지수다. 관 지름 20 % 감소 → 유량 41 %로 떨어진다.

⁴⁹ 표 각주: Fanning 마찰계수를 쓰는 문헌이면 $f = 4 C_f$ 로 환산할 것.

상황	식	적용 범위
수력직경	$D_h = 4 A_c / P_w$	난류에서 오차 10 % 이내
벽면 전단응력	$\tau_w = \frac{f}{8} \rho u^2$	—

C.5 외부유동과 난류

표 C.5 — 경계층과 난류.⁵⁰

상황	식
항력	$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 A$
박리 조건	$\partial u / \partial y _{y=0} = 0$
와류 방출	$St = f D / u \approx 0.2 \ (10^2 < Re < 10^5)$
마찰 속도	$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$
벽 단위	$y^+ = y u_\tau / \nu, u^+ = u / u_\tau$
점성 저층	$u^+ = y^+ \ (y^+ < 5)$
대수 영역	$u^+ = \frac{1}{0.41} \ln y^+ + 5.0 \ (30 < y^+ < 300)$
콜모고로프 척도	$\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4}$
에너지 스펙트럼	$E(k) \propto \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$

C.6 2 상과 압축성

표 C.6 — 2 상 유동과 초킹.⁵¹

상황	식
균질류 증배계수	$\phi_{lo}^2 = 1 + x (\rho_l / \rho_v - 1)$
Lockhart–Martinelli	$\phi_l^2 = 1 + C / X + 1 / X^2 \ (\text{난류-난류 } C=20)$
Martinelli 파라미터	$X_{tt} = (\rho_v / \rho_l)^{0.5} (\mu_l / \mu_v)^{0.1} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9}$

⁵⁰ 표 각주: 완충층($5 < y^+ < 30$)에는 맞는 식이 없다. CFD 첫 격자를 이 구간에 두지 말 것.

⁵¹ 표 각주: ϕ_{lo}^2 는 전체 유량이 액체로 흐를 때 기준, ϕ_l^2 는 액상 부분만 흐를 때 기준이다. 두 값을 직접 비교하면 안 된다.

상황	식
보이드율	$\alpha = \left[1 + S \frac{1-x}{x} \frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{-1}$
임계 압력비	$p^* / p_0 = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)}$

C.7 상사와 계측

표 C.7 — 상사와 계측.⁵²

상황	식
Froude 상사 (같은 유체)	$u_m / u_p = \lambda^{-1/2}, t_m / t_p = \lambda^{-1/2}, F_m / F_p = \lambda^{-3}$
Reynolds 상사 (같은 유체)	$u_m / u_p = \lambda$
NPSH	$NPSH_a = \frac{p_{in} - p_{sat}}{\rho g} + \frac{u_{in}^2}{2g}$
PIV 속도	$\vec{u} = \Delta \vec{x} / (M \Delta t)$
스토크스 수	$St_k = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{u}{L} \ll 1$
NaI 굴절률 (30 °C)	$n \approx 1.3330 + 0.002468 w \text{ [wt\%]}$

⁵² 표 각주: $\lambda = L_p / L_m$ (실기/모형). NaI 굴절률 식은 두 기준점을 잇는 선형 맞춤이므로 사용 전 굴절계 실측이 필요하다.

부록 D — 연습문제 33 선

손계산으로 풀 수 있는 문제만 골랐다. 답을 가리고 먼저 풀어보길 권한다.

1~2 장 — 유체를 보는 눈, 정역학

D.1 20 °C 물의 점성이 1.00 cP 다. SI 단위로는 얼마인가? 동점성계수는?

답 $\mu = 1.00 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\nu = \mu/\rho = 1.00 \times 10^{-3}/998 = 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (= 1 cSt).

D.2 지름 150 mm 관에 0.05 m³/s 가 흐른다. 평균 유속과 20 °C 물 기준 Re 는?

답 $A = 0.01767 \text{ m}^2$, $u = 2.83 \text{ m/s}$, $Re = 998 \times 2.83 \times 0.15/1.0 \times 10^{-3} = 4.2 \times 10^5$. 확실한 난류다.

D.3 공기의 μ 는 물의 1/55 인데 ν 는 물의 15 배다. 어떻게 가능한가?

답 $\nu = \mu/\rho$ 이고 공기 밀도가 물의 1/830 이기 때문이다. 끈적하기로는 물이 이기지만 운동량을 퍼뜨리기로는 공기가 이긴다.

D.4 수심 3.5 m 에서의 계기압은? (물, $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$)

답 $p = \rho g h = 1,000 \times 9.81 \times 3.5 = 34.3 \text{ kPa}$.

D.5 부피 2 L 인 물체가 물에 완전히 잠겼다. 부력은?

답 $F_B = \rho g V = 1,000 \times 9.81 \times 0.002 = 19.6 \text{ N}$.

D.6 15.5 MPa 루프에서 상승관 726.5 kg/m³, 하강관 796.8 kg/m³, 높이차 10 m 다. 구동 수두는?

답 $\Delta p = (796.8 - 726.5) \times 9.81 \times 10 = 6.9 \text{ kPa}$. 펌프 없이 얻는 전부다.

3~4 장 — 검사체적, 베르누이

D.7 안지름 700 mm 배관에 4,000 kg/s 가 흐른다($\rho = 705$). 90° 엘보에서 운동량 변화로 생기는 힘의 각 성분은?

답 $A = 0.385 \text{ m}^2$, $u = 14.7 \text{ m/s}$, $F_x = F_y = \dot{m}u = 59 \text{ kN}$. 합력 83 kN.

D.8 D.7 에서 계통 압력이 15.5 MPa 이면 압력 힘은 얼마이고, 운동량 항과 비교하면?

답 $pA = 15.5 \times 10^6 \times 0.385 = 5.97 \text{ MN}$. 운동량 항의 약 100 배다. 정상 운전에서는 압력이 지배하지만, 파단 시 이 힘이 지지대에 실린다.

D.9 벤투리 입구 100 mm, 목 50 mm, 압력차 30 kPa, 물 998 kg/m³ 다. 유량은? ($C_d = 0.98$)

답 $\beta = 0.5$, $u_2 = \sqrt{2 \Delta p / [\rho(1 - \beta^4)]} = 8.01 \text{ m/s}$, $Q = 15.7 \text{ L/s}$. C_d 적용 시 **15.4 L/s**.

D.10 대기압 개방 탱크에서 20 °C 물($p_{\text{sat}} = 2.34 \text{ kPa}$, $\rho = 997$)을 3 m 위로 뿜는다. 흡입 손실 0.8 m 일 때 $NPSH_a$ 는?

답 $(101,325 - 2,340)/(997 \times 9.81) - 3 - 0.8 = 10.12 - 3.8 = 6.3 \text{ m}$.

D.11 반경 1 mm, 길이 1 m 모세관에 1 kPa 이 걸린다. 20 °C 물의 유량은?

답 $Q = \pi R^4 \Delta p / 8 \mu L = \pi (10^{-3})^4 (1,000) / (8 \times 1.0 \times 10^{-3} \times 1) = 3.9 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} = 0.39 \text{ mL/s}$.

D.12 관 지름을 20 % 줄이면 같은 압력에서 층류 유량은 몇 배가 되는가?

답 $Q \propto D^4$ 이므로 $0.8^4 = 0.41$, 즉 **41 %로 줄어든다**. 혈관 협착이 위험한 이유이자, 배관 스케일이 무서운 이유다.

5~6 장 — 미분 방정식, 상사

D.13 나비에-스토크스에서 난류를 만드는 항은 무엇이고 왜인가?

답 이류항 $(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}$. 속도가 자기 자신을 실어 나르는 **비선형** 항이라 작은 교란이 증폭될 수 있다.

D.14 20 °C 물이 2 m/s 로 흐를 때 층류를 유지하려면 관 지름이 얼마 이하여야 하나?

답 $D < 2,300 \mu / (\rho u) = 2,300 \times 10^{-3} / (998 \times 2) = 1.15 \text{ mm}$. 실험실 미세유로가 아니면 층류는 못 본다.

D.15 DNS 격자 수가 $Re^{9/4}$ 로 늘어난다. Re 를 10 배 올리면 격자는 몇 배 필요한가?

답 $10^{2.25} = 178$ 배. 그래서 실무 CFD 는 난류 모델을 쓴다.

D.16 1/20 축소 모형에서 Froude 상사와 Reynolds 상사가 각각 요구하는 속도비는? (같은 유체)

답 Froude: $u_m / u_p = 20^{-1/2} = 0.224$. Reynolds: $u_m / u_p = 20$. **약 90 배 어긋난다**.

D.17 슬로싱 실험을 1/25 Froude 상사로 한다. 실기 10 초 주기는 모형에서 몇 초인가?

답 $t_m / t_p = \lambda^{-1/2} = 1/5$ 이므로 **2 초**.

7~8 장 — 마찰과 관망

D.18 $Re = 2 \times 10^5$ 에서 매끈한 관과 $\epsilon/D = 0.001$ 인 관의 마찰계수를 비교하라. Blasius 값도 함께.

답 매끈 0.0156, 거칠기 0.0210(**35 % 큼**), Blasius 0.0150. Blasius 는 매끈한 관 근사라 거친 관에 쓰면 안 된다.

D.19 내경 100 mm 상용 강관($\epsilon = 0.045 \text{ mm}$) 100 m 에 20 °C 물이 2 m/s 로 흐른다. 압력 강하는?

답 $Re = 2.0 \times 10^5$, $\epsilon/D = 4.5 \times 10^{-4}$, Colebrook 으로 $f = 0.0186$.
 $\Delta p = 0.0186 \times (100/0.1) \times (998 \times 4/2) = 37 \text{ kPa}$.

D.20 D.19 에서 마찰 손실을 배관 길이 대신 밸브로 환산하면, 글로브 밸브($K = 10$) 몇 개에 해당하나?

답 배관의 $fL/D=18.6$ 이므로 글로브 밸브 약 2 개. 밸브 두 개가 배관 100 m 와 맞먹는다.

D.21 $K=10$ 인 밸브에 20°C 물이 2 m/s 로 흐를 때 압력 강하는?

답 $\Delta p = K \rho u^2 / 2 = 10 \times 998 \times 4 / 2 = 20\text{ kPa}$.

D.22 자연순환 루프에서 손실 계수 합을 절반으로 줄이면 유량은 몇 배가 되는가? (구동 수두 일정)

답 $u \propto 1/\sqrt{\sum K}$ 이므로 $\sqrt{2}=1.41$ 배. 8 장 조건이면 $0.78 \rightarrow 1.10\text{ m/s}$.

D.23 PWR 부수로 ($D_h = 11.78\text{ mm}$, $G = 3,800$, $f = 0.0130$, $\rho = 704.8$) 3.6 m 구간의 마찰 압력 강하는?

답 $\Delta p = 0.0130 \times (3.6/0.01178) \times (3,800^2 / (2 \times 704.8)) = 40.7\text{ kPa}$.

9~10 장 — 경계층과 난류

D.24 외경 25 mm 관에 횡유동 4 m/s 가 걸린다. 와류 방출 진동수는?

답 $f = St u / D = 0.2 \times 4 / 0.025 = 32\text{ Hz}$. 구조 고유진동수와 겹치면 공진이다.

D.25 구의 항력계수가 $Re \approx 3 \times 10^5$ 에서 오히려 떨어진다. 왜인가?

답 경계층이 난류가 되면 운동량 혼합이 좋아져 역압력구배를 더 버티고, 박리점이 뒤로 밀려 후류가 좁아진다. 마찰은 늘지만 형상 항력이 더 크게 줄어든다.

D.26 $\tau_w = 33.4\text{ Pa}$, $\rho = 704.8$, $\nu = 1.2 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ 일 때 u_τ 와 $y^+ = 50$ 에 해당하는 거리는?

답 $u_\tau = \sqrt{33.4/704.8} = 0.218\text{ m/s}$, $y = 50 \nu / u_\tau = 27.6\text{ }\mu\text{m}$.

D.27 CFD 결과에서 첫 격자의 y^+ 가 15 로 나왔다. 무엇이 문제인가?

답 완충층 ($5 < y^+ < 30$) 에 놓였다. 점성 저층 식도 대수 법칙도 맞지 않는 최악의 위치다. 1 이하로 낮추거나 30 이상으로 올려야 한다.

11~12 장 — 2 상, 압축성, 계측

D.28 15.5 MPa , 건도 3 %의 균질류 2 상 마찰 증배계수는? ($\rho_l = 594.4$, $\rho_v = 101.92$)

답 $\phi_{lo}^2 = 1 + 0.03 (594.4/101.92 - 1) = 1.145$. 압력이 높아 밀도비가 작으므로 증가폭이 작다.

D.29 같은 조건의 X_{tt} 와 ϕ_l^2 는? ($\mu_l = 68.2$, $\mu_v = 23.0\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)

답 $X_{tt} = (0.1715)^{0.5} (2.97)^{0.1} (32.3)^{0.9} = 10.5$, $\phi_l^2 = 1 + 20/10.5 + 1/10.5^2 = 2.91$. 두 증배계수는 기준이 달라 직접 비교하면 안 된다.

D.30 7 MPa 에서 건도 3 %일 때 균질류 증배계수는? D.28 과 비교하면?

답 $1 + 0.03 (739.7/36.52 - 1) = 1.58$. 15.5 MPa 의 1.145 보다 훨씬 크다. 저압일수록 2 상 효과가 크다.

D.31 비열비 1.3 인 증기의 임계 압력비는?

답 $(2/2.3)^{1.3/0.3} = 0.546$. 공기(0.528)보다 약간 높다.

D.32 PIV 에서 검사창이 32 픽셀이다. 허용 최대 변위는 몇 픽셀이고, 그것이 Δt 를 어떻게 정하는가?

답 1/4 규칙으로 **8 픽셀**. 예상 최대 속도로 8 픽셀 변위가 나오도록 Δt 를 정한다. 너무 크면 입자가 창을 벗어나 상관관계가 깨지고, 너무 작으면 상대 오차가 커진다.

D.33 밀도 $1,050 \text{ kg/m}^3$, 지름 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 추적 입자를 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 물(특성 길이 50 mm , 속도 1 m/s)에 쓴다. 스토크스 수는? 적절한가?

답 $St_k = \frac{1,050 \times (10^{-5})^2}{18 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{0.05} = 1.2 \times 10^{-4}$. $\ll 1$ 이므로 추종성은 충분하다.

부록 E — 용어집

표 E.1 — 용어집.⁵³

용어	뜻
검사체적	공간에 고정한 상자. 그 경계를 드나드는 양만 세어 보존 법칙을 적용한다.
경계층	벽면 근처에서 점성이 지배하는 얇은 층. 그 바깥은 비점성으로 다뤄도 된다.
관성 부영역	난류 스펙트럼에서 에너지가 생성도 소산도 없이 전달만 되는 구간. $k^{-5/3}$.
균질류 모델 (HEM)	두 상이 같은 속도로 평형 상태에 있다고 보는 가장 단순한 2 상 모델.
굴절률 정합 (MIR)	작동 유체의 굴절률을 구조재와 맞춰 구조물을 광학적으로 사라지게 하는 기법.
다르시 마찰계수	$\Delta p = f(L/D)(\rho u^2/2)$ 의 f . Fanning 계수의 4 배다.
등가 길이	부차 손실을 같은 손실을 내는 직관 길이로 환산한 값.
레이놀즈 응력(Reynolds stress)	속도 변동의 상관 $\rho \overline{u_i' u_j'}$. 평균 방정식에 새로 나타나는 미지수.
레이놀즈 수송정리	라그랑주 기술과 오일러 기술을 잇는 정리. 모든 보존 법칙의 출발점.
마찰 속도	$u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$. 벽 근처의 속도 척도이며 보통 평균 유속의 3~5 %.
메타센터 높이	부유체의 복원 안정성을 정하는 기하 지표. 양수여야 안정하다.
물질 미분	유체 입자를 따라간 변화율을 고정 좌표계로 표현한 것.
박리	역압력구배를 못 이긴 경계층이 벽에서 떨어져 나가는 현상. 형상 항력의 원인.
벽법칙	벽 근처 속도 분포의 보편 법칙. 점성 저층·완충층·대수 영역으로 나뉜다.
부시네스크 근사	밀도 변화를 부력 항에서만 살리는 자연대류 해석의 표준 근사.

⁵³ 표 각주: 우리말 표기는 대한기계학회 및 한국원자력학회 용어를 우선으로 했다.

용어	뜻
부차 손실	엘보·밸브·확대축소 등에서 생기는 손실. 이름과 달리 부차적이지 않다.
비점성 유동	점성을 무시한 이상화. 벽에서 멀리 떨어진 영역에서 유효하다.
상사	모형과 실기의 무차원 수를 맞춰 결과를 옮기는 것. 완전 상사는 대개 불가능하다.
수력직경	비원형 유로를 원형 관 상관식에 쓰기 위한 등가 직경. $4 A_c / P_w$.
스토크스 수	입자가 유동을 얼마나 잘 따라오는지의 지표. PIV에서 $\ll 1$ 이어야 한다.
스트로우홀 수	와류 방출 진동수의 무차원 형태. 원기둥에서 약 0.2.
역압력구배	유동 방향으로 압력이 올라가는 구간. 박리의 원인.
연속체 가정	유체를 분자가 아닌 연속 물질로 보는 가정. $Kn < 0.01$ 에서 안전하다.
오일러 기술	공간에 고정된 점에서 유동을 보는 방식. 유체역학의 표준.
와류 방출	뭉툭한 물체 뒤에서 와류가 좌우 번갈아 떨어지는 현상. 유동 유발 진동의 원인.
운전점	펌프 성능 곡선과 계통 저항 곡선의 교점. 유량은 여기서 저절로 정해진다.
유동 양식	2 상 유동에서 두 상이 배치된 형태. 기포류·슬러그류·환상류 등.
유출 계수 (C_d)	이론 유량 대비 실제 유량의 비. 오리피스 약 0.6, 벤투리 약 0.98.
자기상사	Re 가 충분히 커지면 결과가 Re 에 무관해지는 성질. 축소 실험의 구원투수.
점착 조건	유체가 벽면에서 벽과 같은 속도를 갖는다는 경계조건.
정체점	유선이 물체에 부딪혀 속도가 0 이 되는 점. 그곳의 압력이 정체압이다.
초킹	목에서 유속이 음속에 도달해 하류 압력을 낮춰도 유량이 늘지 않는 상태.
캐비테이션	국소 압력이 포화 증기압 아래로 떨어져 액체가 그 자리에서 끓는 현상.

용어	뜻
콜모고로프 척도	난류에서 점성이 에너지를 열로 바꾸는 가장 작은 와류의 크기.
크누센 수	분자 평균자유행로와 관심 길이의 비. 연속체 가정의 판별 기준.
파이 정리 (버킹엄)	n 개 변수와 k 개 차원이면 무차원 수는 $n - k$ 개라는 정리.
항력 위기	Re 가 임계값을 넘어 경계층이 난류가 되면서 항력이 오히려 떨어지는 현상.
NPSH	유효 흡입 수두. 이 값이 펌프 요구값보다 커야 캐비테이션이 없다.
PIV	추적 입자를 두 번 찍어 변위 상관으로 평면 속도장을 얻는 계측법.
y^+	벽 단위 무차원 거리. CFD 격자 설계의 핵심 지표.

다음에 읽을 것

1. **정식 교과서** — White, *Fluid Mechanics* 또는 Munson 외, *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 1~9 장의 내용이 훨씬 상세하고 연습문제가 풍부하다.
2. **경계층·난류** — Schlichting & Gersten, *Boundary-Layer Theory*. 9·10 장의 고전이다. 난류만 파려면 Pope, *Turbulent Flows*.
3. **원자력 열수력** — Todreas & Kazimi, *Nuclear Systems I*. 7·11 장 이후를 제대로 배우려면 이 책이다.
4. **2상 유동** — Collier & Thome, *Convective Boiling and Condensation*, 또는 Ghiaasiaan, *Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation*.
5. **계측** — Raffel 외, *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. 12 장 전체가 이 책의 요약이다.
6. **같은 시리즈** — 「필수 열전달」에서 이 책의 속도장이 온도장으로 이어지는 과정을, 「필수 열역학」에서 물성과 사이클을 채운다.
7. **THINK Lab 자료** — 「난류 모델의 유도 및 특성」(10 장 심화), 「스펙트럴 요소법과 GPU 가속」(CFD 수치기법), 「CFD 쉘레 열전달 매뉴얼」.

▶ **실무 팁** 유체역학은 읽어서 늘지 않는다. **직접 재보고, 직접 돌려보고, 안 맞는 이유를 찾는 과정**에서 는다. 이 책의 예제를 손으로 한 번씩 따라가고, 연구실에 실험 장비가 있다면 압력계 하나라도 직접 붙여보길 권한다. 무디 선도에서 읽은 값과 실제 압력 강하가 20 % 어긋날 때, 그 이유를 찾는 과정이 진짜 공부다.