

Chapter 22. Continuous Fluid Flow Measurement — 후속편

22.7 진정 질량유량계 → 22.8 중량식 공급기 → 22.9 물질량 변화식 → 22.10 삽입형 → 22.11
계기 적합성
물리 현상 → 측정 변수 → 계산식 → 한계와 현장 적용

기존 글 22.6 절 이후원서 2.32 필기 PDF 3쪽 반영

이 문서는 기존 **Chapter 22, 1** 글의 본문을 변경하지 않는 추가 학습 문서이다. 필기와 원서를 합치되, 회전좌표계의 부호·SI 단위·근사식은 혼동을 막기 위해 별도로 표시했다. 사용자가 사용한 **K**는 측정 변수와 유량을 연결하는 변환/교정 계수이며, 그 물리적 의미와 단위는 유량계마다 다르다.

1 1. 전체 구조와 기본 용어

원서 절	핵심 원리	대표 측정값	출력/계산
22.7.1 Coriolis	진동하는 관 안의 유체 관성 및 코리올리 효과	두 검출점의 시간차/위상차	질량유량 W , 공진 주파수로 밀도
22.7.2 Thermal	유체의 대류 열전달	센서 온도·가열 전력	교정된 질량유량 W
22.8 Weighfeeder	이동 벨트의 단위 길이당 적재량	로드셀·벨트 속도	$W = v$
22.9 Change-of-quantity	저장량의 시간 변화	질량 또는 체적의 시계열	$W = dm/dt$, $Q = dV/dt$
22.10 Insertion	배관 내부 국부 영역 검출	기술에 따라 차압·주파수·온도 등	유속 분포 보정을 거쳐 유량
22.11 Suitability	공정 조건과 계기 특성 비교	정확도·유체 물성·압력손실	선정 및 장기 운전비 검토

$$W = \frac{dm}{dt} = \rho Q \quad [\text{kg/s}]$$

$$Q = \frac{dV}{dt} = A\bar{v} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

W는 이 원서에서 쓰는 질량유량 표기이며 **m**과 같은 물리량이다. **m**은 질량(kg), **W**는 단위 시간당 이동하는 질량(kg/s)이다. 여기의 **W**는 전력 단위 와트(W)나 중량 자체와 혼동하지 않는다. **Q**는 해당 지점의 밀도와 체적유량의 곱이며, 밀도가 일정할 때 특히 편리하다.

2 2. 22.7 True mass flowmeters — 진정 질량유량계

2.1 2.1 질량유량을 직접 측정하는 이유

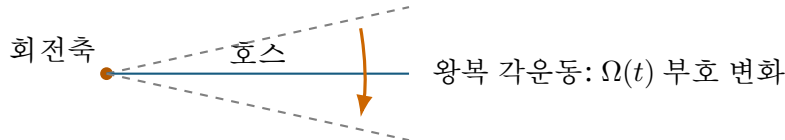
체적유량만 측정하면 유체의 밀도가 변할 때 동일한 체적에 들어 있는 질량이 달라진다. 차압식의 질량유량은 밀도 보정이 중요하다. 반면 진정 질량유량계는 질량유량과 직접 관계되는 현상(관성 또는 열손실)을 이용한다. 단, ‘직접’이라는 표현은 물성 및 운전 조건의 영향이 전혀 없다는 의미가 아니다.

2.2 22.7.1 Coriolis flowmeters — 코리올리 유량계

2.2.1 가. 구동 진동과 회전운동의 관계

구동 코일이 U자형 관을 주기적으로 굽힘 진동시킨다. 관 전체가 한 방향으로 계속 회전하지는 않는다. 양끝이 지지된 관의 일부가 탄성 변형하며 순간적인 회전 성분(각속도)을 갖는다. 이를 설명하기 위해 원서는 팔꿈치를 회전축으로 삼아 물이 흐르는 호스를 좌우로 흔드는 비유를 사용한다.

구동 코일 → 관의 왕복 진동 → 국부적인 각속도 Ω 발생 → 흐르는 유체에 코리올리 효과 → 비틀림 및 검출점 시간차 → 질량유량 W



도식: 관이 단순히 상하 평행이동하는 것이 아니라 국부적으로 굽어 기울기가 바뀌는 운동을 한다.

2.2.2 나. 각속도 Ω 와 각가속도 의 구분

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \theta_0 \sin(\omega_d t) \\ \Omega(t) &= \frac{d\theta}{dt} = \theta_0 \omega_d \cos(\omega_d t) \\ \alpha(t) &= \frac{d\Omega}{dt} = -\theta_0 \omega_d^2 \sin(\omega_d t)\end{aligned}$$

진동 중 각속도 Ω 와 각가속도 는 모두 변화하지만, 코리올리 항에 직접 등장하는 것은 **각속도 Ω** 이다. α 는 진동 각주파수이며 $\Omega(t)$ 와 구별한다.

2.2.3 다. 코리올리 힘의 방향 및 좌표계

회전하는 좌표계에서 관 내부 유체가 관에 대해 속도 $\mathbf{v}$ 로 이동할 때 유체에 도입되는 코리올리 관성력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{C,\text{pseudo}} &= -2m(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}) \\ \mathbf{a}_{C,\text{pseudo}} &= -2(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v})\end{aligned}$$

여기서 m 은 생각 중인 유체 미소 질량이며, $\boldsymbol{\Omega}$ 는 회전좌표계의 각속도 벡터(rad/s), $\mathbf{v}$ 는 관에 상대적인 유체 속도 벡터(m/s)이다. **관의 진동에 대한 설명에** 이 식을 쓰는 경우에는 국부적인 회전 성분을 이해하기 위한 단순화라는 점에 주의한다.

예시 좌표계	벡터	방향
x: 오른쪽, y: 위쪽, z: 종이 바깥	$\Omega = +\Omega \hat{z}$, $\mathbf{v} = +v \hat{y}$	$\Omega \times \mathbf{v} = -\Omega v \hat{x}$ (왼쪽)
위 예에서 회전좌표계 관성력	$-2m(\Omega \times \mathbf{v})$	+x (오른쪽)
Ω 만 반전	$\Omega = -\Omega \hat{z}$	코리올리 관성력도 반전

부호 주의: $\Omega \times v$ 의 방향과 $-2\Omega \times v$ 의 방향은 반대다. 또한 유체가 관에 작용시키는 반력은 유체에 작용하는 힘과 반대 방향이다. 그림에서 왼쪽/오른쪽을 판정하려면 ‘어느 물체에 작용하는 힘인가’와 ‘회전축이 어느 방향인가’를 먼저 정해야 한다.

2.2.4 라. 검출 신호와 밀도 측정

유체 질량유량에 따른 관의 비틀림 때문에 유입측과 유출측 위치 검출 신호 사이에 위상차 또는 시간차가 발생한다. 계기는 보정된 관계식으로 질량유량 W 를 산출한다.

$$W \approx K_C \Delta t \quad (\text{교정 범위의 개념식})$$

여기서 K_C 는 시간차를 질량유량으로 바꾸는 계수로, 관 형상 및 구동/검출 특성과 교정에 따라 결정된다. 유동관의 공진 주파수는 관과 관 내부 유체의 유효 질량에 의존하므로 밀도 측정에도 활용된다.

$$f_n \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{tube}} + \rho V_{\text{fluid}}}}$$

온도에 따라 관의 탄성계수가 변하므로 온도 보상이 필요하다. 기포·2상 유동·외부 진동 및 설치 조건도 오차에 영향을 줄 수 있다.

2.3 2.3 22.7.2 Thermal flowmeters — 열식 질량유량계

원서는 차가운 바람이 체감온도를 낮추는 **Wind chill** 현상에서 설명을 시작한다. 흐르는 유체는 가열된 물체 주위의 따뜻해진 유체를 계속 교체하므로, 가열 요소의 열손실이 증가한다.

질량유량 증가 → 유체의 대류 냉각 효과 증가 → 센서 온도 하락 또는 온도 유지 전력 증가 → 교정된 W 계산

열선 풍속계(Hot-wire anemometer)는 전기적으로 가열된 금속선의 저항(온도)을 감시하며, 일정 온도를 유지하기 위해 필요한 전력으로 유량을 추정한다. 자동차의 공기질량유량 측정에도 이 원리가 사용된다.

산업용 열식 질량유량계는 가열 센서와 유체 기준온도를 검출하는 센서를 조합할 수 있으며, 삽입형 프로브도 가능하다. 원서는 검출관 내부의 **선회 날개(Swirl vanes)**, 플레어 가스 삽입형 유량계, 소형 질량유량 제어기(Mass flow controller)를 예로 제시한다.

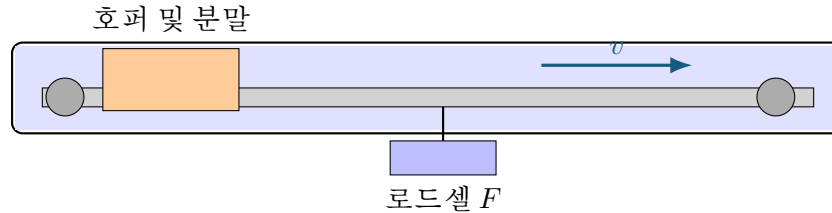
주의할 물성: 비열이 큰 유체는 같은 질량유량에서도 더 많은 열을 제거할 수 있다. 따라서 유체의 성분 및 비열이 변하면 기존 교정이 유효하지 않을 수 있다. 층류/난류의 변화 역시 센서 주변 대류 열전달에 영향을 준다.

$$\dot{Q}_{\text{heat}} \approx W c_p \Delta T \quad (\text{단순 열수지 모델})$$

항목	코리올리식	열식
기초 현상	유체 관성 및 진동관 비틀림	대류 냉각
검출량	검출 신호 시간차·위상차	온도·전력
대표 제약	기포/2상, 진동, 비용	비열·조성 변화, 유동 상태
적용	액체·가스의 정밀 질량유량	조성 일정한 가스 유량 등

3. 22.8 Weighfeeders — 중량식 공급기

분말 또는 입상 고체를 연속적으로 이동시키는 컨베이어 벨트의 일부를 로드셀로 지지하고, 해당 계량 구간 길이 d 에 실린 물질의 중량 F 를 검출한다. 동시에 회전속도계(Tachometer)가 벨트 속도 v 를 측정한다.



도식: 계량 구간의 적재 중량과 벨트 속도로 고체 질량유량을 계산하는 개념도.

$$W = \frac{Fv}{d} \quad (\text{원서의 파운드 계량 관례})$$

SI 단위에서 F 를 실제 힘(N)으로 기록할 때는 질량 환산 $m=F/g$ 가 필요하다. 단위 길이당 질량을 라고 두면 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{F}{gd} \quad [\text{kg/m}]$$

$$W = \lambda v = \frac{Fv}{gd} \quad [\text{kg/s}]$$

예를 들어 1 m의 벨트 구간에 5 kg의 분말이 실리고 벨트 속도가 2 m/s라면 $W=5 \text{ kg/m} \times 2 \text{ m/s} = 10 \text{ kg/s}$ 이다. 원서의 현장 사진은 상수도 정수 시설에서 소다회(Soda ash)를 투입하는 소형 중량식 공급기다. 표시값으로 적재량 1.209 lb/ft와 벨트 속도 0.62 ft/min이 나타나며, 이 둘을 계산하면 약 45.0 lb/h이지만 화면의 43.7 lb/h와 다르다. 원서는 적재량과 계산 출력의 표시 시점 지연을 이유로 설명한다.

4. 22.9 Change-of-quantity — 저장량 변화식 유량 측정

배관 내부에서 속도나 차압을 직접 측정하지 않고, 용기에 들어오거나 나가는 물질의 저장량 변화를 측정한다. 로드셀은 질량, 레벨 센서와 용기 형상 정보는 체적 변화를 제공할 수 있다.

평균 유량

$$W_{\text{avg}} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

$$Q_{\text{avg}} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

순간 유량

$$W = \frac{dm}{dt}$$

$$Q = \frac{dV}{dt}$$

저장량이 감소하면, 저장량의 미분값은 음수가 된다. 단일 출구만 열려 있는 경우 유출유량의 크기는 $-dm/dt$ 이다. 원서 예에서 74,688 kg에서 70,100 kg으로 2분간 감소하면 저장량 변화율은 $-2,294 \text{ kg/min}$ 이고, 유출되는 질량유량의 크기는 $2,294 \text{ kg/min}$ 이다.

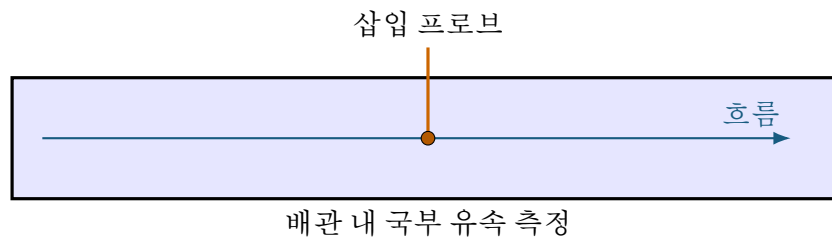
$$\frac{dm}{dt} = \sum W_{in} - \sum W_{out}$$

한계: 용기에 유입과 유출이 동시에 있으면 이 방법은 순유량만 검출한다. 예를 들어 200 gal/min 이 유입되고 200 gal/min 이 유출되면 저장량은 일정하여 $dV/dt=0$ 이다. 따라서 특정 개별 배관의 유량을 단독으로 결정할 수 없다. 또한 측정 구간을 짧게 하면 변화량이 작아져 측정 잡음의 영향을 받기 쉬우므로 미분 신호 처리에 주의해야 한다.

원서는 아날로그 미분회로로 시간 미분을 구현할 수도 있다고 설명한다. 예시 반전 미분회로의 관계는 $V_{out} = -RC \cdot dV_{in}/dt$ 이다. 실제 공정에서는 디지털 샘플링으로 평균 변화율을 계산할 수 있다.

5 5. 22.10 Insertion flowmeters — 삽입형 유량계

삽입형은 측정 물리법칙이 아니라 설치 구조의 명칭이다. 대구경 배관에 전구경 유량계 대신 관벽을 통해 프로브를 넣어 국부 유동을 검출한다. 원서의 대표 예는 차압을 생성하는 Annubar(평균 피토크)이며, 터빈식·와류식·열식 질량유량계에도 삽입형 구조가 적용된다.



도식: 배관 단면 전체가 아닌 선택된 영역에서 유동을 측정한다. 배관 중심과 벽 근처는 유속이 다르므로 삽입 깊이와 설치 각도를 바꾸면 동일한 실제 유량에서도 신호가 변할 수 있다. 단면 평균 유속 $\bar{v}$ 와 국부 유속 v_{local} 은 일반적으로 같지 않다.

$$Q = A\bar{v}, \quad v_{local} \neq \bar{v}$$

Hot tapping: 원서는 새들 티 용접 → 볼밸브 설치 → 밀봉 핫태핑 장치로 천공 → 드릴 회수 및 볼밸브 차단 → 삽입형 계기 설치의 개념을 소개한다. 이것은 원리 설명이지 현장 작업 절차서가 아니다. 운전 중 천공은 공정 압력·재료·유체 위험성 등을 검토하는 전문 작업이다.

6 6. 22.11 Process/instrument suitability — 공정과 계기의 적합성

원서는 각 유량계의 작동 원리·신호 선형성·양방향 측정 가능 여부를 비교한다. 아래 표는 원서의 분류를 유지했다. ‘일부’는 일부 모델에만 해당하는 특성이다.

유량계	물리적 원리	기본 특성	양방향
차압식	유체 가속, 위치에너지 ↔ 운동에너지	$\sqrt{\Delta P}$	일부
충류식	점성 유체 마찰	선형	가능
위어·플룸	유체 가속 및 에너지 교환	H	불가
터빈식(속도)	날개 달린 회전자의 회전	선형	가능

유량계	물리적 원리	기본 특성	양방향
와류식	von Kármán 효과	선형	불가
전자식	전자기 유도	선형	가능
초음파식	음파 전달시간	선형	가능
코리올리식	유체 관성 및 코리올리 효과	선형	가능
터빈식(질량)	유체 관성	선형	일부
열식	대류 냉각과 비열	선형	불가
용적식	고정 체적의 반복 이동	선형	일부

6.1 초기 설치비와 영구 압력손실

오리피스 초기 설치비가 낮지만 영구 압력손실이 클 수 있다. 벤투리는 초기 비용이 높아도 장기간의 운전 에너지비를 고려하면 유리할 수 있다. 전자식·초음파식과 같이 유로에 장애물이 없는 구조는 추가 영구 압력손실이 작은 편이다.

$$P_{\text{hydraulic loss}} = \Delta P_{\text{permanent}} Q \quad [\text{Pa m}^3/\text{s} = \text{W}]$$

원서 각주 80의 예외: 유량이 제어밸브에 의해 교축되는 공정에서는 오리피스가 소산하는 에너지가 제어밸브에서 소산할 에너지의 일부를 대신할 수 있다. 이때 전체 계통의 에너지 소비가 항상 증가하는 것은 아니다. 단, 밸브의 사용 가능한 압력차와 운전 조건을 확인해야 한다.

7. 질문·필기 통합: 개념 혼동을 방지하는 확인 사항

1. U자형 관이 회전을 만드는가? 아니다. 구동 코일이 관을 진동시키고, 탄성 변형의 국부적인 각운동 성분이 코리올리 효과와 결합한다. 직관형 코리올리 유량계도 존재한다.
2. 회전축은 어디인가? 원서의 호스 비유는 팔꿈치가 회전축이다. 실제 진동관의 회전은 복합 탄성 진동 모드이므로 모든 모델에 공통인 하나의 고정 회전축으로 일반화하지 않는다.
3. Ω 가 +와 -로 바뀌는가? 그렇다. 왕복 각진동에서는 순간 각속도 방향이 주기적으로 반전된다. 단순히 '각각속도가 코리올리 힘을 만든다'고 표현하지 않는다.
4. $\Omega \times v$ 가 왼쪽이면 코리올리 힘도 왼쪽인가? 회전좌표계 관성력은 $-2m(\Omega \times v)$ 이므로 반대 방향이다. 유체와 관의 작용·반작용도 구분한다.
5. m , $\dot{m}$, W 의 차이? m 은 질량, $\dot{m}$ 과 W 는 모두 질량유량이다. 이 문서는 원서에 맞춰 W 를 우선 사용한다.
6. 중량식 공급기의 F 와 W 는? F 는 특정 길이의 물체에 작용하는 중력(중량), W 는 시간당 이동하는 질량이다. SI에서 F 를 N 으로 쓰면 $W = Fv/(gd)$ 로 환산한다.
7. 저장량 변화법에서 유량이 0이면 흐름도 없는가? 아니다. 유입과 유출이 같다면 저장량 변화는 0이지만 각 배관에 실제 유량은 존재한다.
8. 삽입형은 별도의 측정 방식인가? 아니다. 다양한 기술에서 구현 가능한 프로브 설치 방식이다.

8. 기술사 답안용 연결 문장

질량유량계 선정: 질량유량은 $W = Q$ 로 나타낼 수 있으나, 밀도가 변하는 공정에서는 체적유량만으로 질량유량을 정확히 판단하기 어렵다. 코리올리식은 진동관 내부 유체의 관성에 의한 비틀림을 검출하

며, 열식은 가열 요소의 대류 열손실을 측정한다. 따라서 코리올리식은 외부 진동과 2상 유동, 열식은 유체 조성과 비열 변화에 주의해야 한다.

고체 유량: 중량식 공급기는 로드셀로 측정한 단위 벨트 길이당 질량에 속도 v 를 곱하여 $W = v$ 를 구한다.

저장용기 방식: 저장량의 미분 dm/dt 는 유입·유출 유량의 차이이며, 다중 유로에서는 개별 유량이 아닌 순유량만 결정한다.

설치와 경제성: 삽입형 유량계는 큰 배관에 경제적으로 설치할 수 있으나 프로브의 위치·방향에 따른 유속 분포 보정이 중요하다. 계기 선정은 측정 원리뿐 아니라 영구 압력손실과 장기 에너지비를 함께 검토해야 한다.

출처 및 편집 범위

출처 및 편집 범위

- (1) 사용자 필기: Scan_20261028_224012.pdf, 1~3쪽 (22.7 코리올리·열식, 22.8 중량식, 22.9 물질량 변화).
 - (2) 원서: Tony R. Kuphaldt, *Lessons in Industrial Instrumentation*, Version 2.32, Chapter 22 §22.7~§22.11, pp.1712–1746. CC BY 4.0.
 - (3) 기존 글: Lessons In Industrial Instrumentation, Chapter 22, 1 (22.1~22.6까지의 구성과 K 표기 원칙을 계승).
 - (4) 대화에서 확인한 질문: 회전축·왕복 각진동· $\Omega \times v$ 방향· W 와 m 의 차이·중량식 공급기의 SI 차원.
- 구분:** 위의 ‘원서 소개’는 내용 재구성, 벡터 부호 예제·SI 변환·답안용 연결 문장은 검증을 위한 보완 설명이다. 원서의 모든 그림과 문장을 일대일 재현한 전사본은 아니다.