

Chapter 22

Continuous Fluid Flow Measurement

연속 유체 유량 측정

물리적 현상과 수식 유도를 중심으로 한 학습 정리

학습 목적

유량계의 이름과 공식을 단순 암기하지 않는다.

각 유량계가 이용하는 물리적 현상을 이해하고 측정 변수로부터 유량 계산식을 유도한다.

물리 현상 → 측정 변수 → 유량 계산

측정 변수와 유량 사이의 관계에 포함된 비례계수 또는 변환계수를 K 로 표시한다.

다만 K 는 유량계별로 다른 값을 가지며, 관계식의 형태에 따라 단위도 달라진다.

Contents

1 유량 측정의 기본 개념	4
1.1 체적유량과 질량유량	4
1.2 유속과 유량의 관계	4
1.3 연속방정식	5
2 유량계의 변환계수 K	5
2.1 K 의 정의	5
2.2 K 에 포함되는 요소	5
3 차압식 유량계	6
3.1 물리적 현상	6
3.2 베르누이 방정식	6
3.3 유량 계산식 유도	7
3.4 변환계수 K	8
3.5 저유량에서의 문제	8
3.6 장점	9
3.7 단점	9
4 점성 유동과 Hagen–Poiseuille 법칙	9
4.1 차압식과의 차이	9
4.2 층류 유량식	9
5 로터미터: 가변 면적식 유량계	10
5.1 측정 원리	10

5.2	힘의 평형	10
5.3	유량 관계식	11
5.4	왜 플로트가 정지하는가?	11
5.5	장점	12
5.6	단점	12
6	위어와 플룸	12
6.1	개수로 유량 측정	12
6.2	위어의 유량 계산식	12
6.3	직사각형 위어	13
6.4	V형 위어	13
6.5	왜 V형 위어는 저유량에 유리한가?	13
6.6	플룸	14
6.7	위어와 플룸 비교	14
7	터빈식 유량계	14
7.1	물리적 현상	14
7.2	회전수와 유량	15
7.3	전기 신호의 검출	16
7.4	장점	16
7.5	단점	17
8	와류식 유량계	17
8.1	물리적 현상	17
8.2	Strouhal Number	17
8.3	유량 계산식 유도	18
8.4	저유량 차단	18
8.5	장점	19
8.6	단점	19
9	전자식 유량계	19
9.1	물리적 현상	19
9.2	유도 전압	19
9.3	유량 계산식 유도	20
9.4	전극과 자기장의 방향	21
9.5	왜 전극을 수평으로 설치하는가?	21
9.6	접지의 중요성	21
9.7	여자 방식	21

9.8	장점	22
9.9	단점	22
10	초음파식 유량계	22
10.1	기본 원리	22
10.2	도플러 방식	22
10.3	전달시간차 방식	23
10.4	장점	24
10.5	단점	24
11	용적식 유량계	24
11.1	측정 원리	24
11.2	누적 체적	25
11.3	유량 계산식	25
11.4	장점	26
11.5	단점	26
12	표준 체적유량	26
12.1	실제 체적유량과 표준 체적유량	26
12.2	이상기체 법칙	26
13	유량계별 관계식 통합 비교	27
14	기술사 학습을 위한 기억 구조	28
14.1	유량계별 물리 현상	28
14.2	수식은 이렇게 기억한다	28
14.3	답안 작성 순서	29
	출처 및 학습 범위	29

1. 유량 측정의 기본 개념

1.1 체적유량과 질량유량

유량은 단위 시간 동안 특정 단면을 통과하는 유체의 양이다.

체적유량은

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

이다.

질량유량은

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$$

이다.

밀도가 일정하면

$$\dot{m} = \rho Q$$

이다.

1.2 유속과 유량의 관계

배관 단면적 A 를 통과하는 평균유속을 v 라면

$$Q = Av$$

이다.

원형 배관에서는

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

이므로

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v$$

이다.

즉, 단면적이 일정하면

$$Q \propto v$$

이다.

1.3 연속방정식

질량 보존 법칙에 따라 정상상태의 연속 유동에서는

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

이다.

액체와 같이 밀도가 일정하면

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

가 된다.

따라서 단면적이 작아지면 유속이 증가한다.

$$A \downarrow \Rightarrow v \uparrow$$

이는 벤투리관과 오리피스 유량계의 기본 원리이다.

2. 유량계의 변환계수 K

2.1 K의 정의

유량계는 유량과 관련된 물리량을 측정한다.

이 물리량을 x 라고 하면 일반적인 유량 관계는

$$Q = F(x)$$

이다.

유량이 측정 변수에 비례한다면

$$Q = Kx$$

로 표현할 수 있다.

유량이 측정 변수의 거듭제곱에 비례한다면

$$Q = Kx^n$$

으로 표현한다.

따라서 이 문서에서 K 는 측정 변수를 유량으로 변환하는 계수이다.

2.2 K에 포함되는 요소

K 에는 유량계의 종류에 따라 다음과 같은 요소가 포함될 수 있다.

- 배관 및 검출 요소의 기하학적 치수

- 유체의 밀도와 점도
- 유동 관련 무차원수
- 검출 요소의 기계적 특성
- 실제 계기의 교정 결과
- 단위 변환계수

모든 항목이 모든 유량계에 포함되는 것은 아니다.

특히 유체 물성이 변하면 K 가 변할 수 있는 경우가 있으므로 상수로 취급할 수 있는 운전 조건을 확인해야 한다.

기억할 핵심

K 는 모든 유량계에 공통인 하나의 물리 상수가 아니다.

$$Q = Kx$$

에서 K 는 x 를 유량으로 바꾸는 계수이다.

각 유량계의 물리적 현상을 먼저 이해한 뒤 K 가 어떤 요소로 구성되는지 확인한다.

3. 차압식 유량계

3.1 물리적 현상

대표적인 차압식 유량계는 다음과 같다.

- 오리피스 판(Orifice Plate)
- 벤투리관(Venturi Tube)
- 유량 노즐(Flow Nozzle)

배관 단면이 축소되면 연속방정식에 따라 유속이 증가한다.

이때 압력에너지 일부가 운동에너지로 변환되므로 정압이 감소한다.

단면적 감소 → 유속 증가 → 정압 감소 → 차압 발생

3.2 베르누이 방정식

비압축성, 정상, 비점성, 동일 높이의 이상 유동에서는

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

이다.

차압을

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

라고 하면

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$$

이다.

3.3 유량 계산식 유도

연속방정식에서

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

이다.

따라서

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2$$

이다.

이를 베르누이 방정식에 대입하면

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$$

이다.

따라서

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}}$$

이다.

체적유량은

$$Q = A_2 v_2$$

이므로

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}}$$

이다.

원형 단면에서

$$\beta = \frac{d}{D}$$

라면

$$\frac{A_2}{A_1} = \beta^2$$

이다.

실제 계기의 비이상적 유동을 고려한 유출계수 C_d 를 적용하면 기본적인 차압식 관계는

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(1 - \beta^4)}}$$

로 표현할 수 있다.

여기서는 비압축성 유체를 가정한다. 기체 측정에는 추가 보정이 필요하다.

3.4 변환계수 K

유체 밀도, 치수 및 유출계수가 일정하면

$$K = C_d A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho(1 - \beta^4)}}$$

로 정의할 수 있다.

따라서

$$Q = K \sqrt{\Delta P}$$

이다.

왜 제곱근 관계인가?

차압은 유속의 제곱에 비례한다.

$$\Delta P \propto v^2$$

단면적이 일정하면

$$Q \propto v$$

이다.
따라서

$$Q \propto \sqrt{\Delta P}$$

이다.

3.5 저유량에서의 문제

최대 유량의 50%가 흐른다면

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = 0.5$$

이다.

따라서 차압은

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}} = (0.5)^2$$

즉,

$$\Delta P = 25\% \Delta P_{\max}$$

가 된다.

저유량에서는 차압 자체가 작아지므로 차압 신호의 상대 오차가 커질 수 있다.

3.6 장점

- 측정 원리와 구조가 비교적 단순하다.
- 다양한 유체와 산업 공정에 적용된다.
- 관련 표준과 설치 경험이 풍부하다.

3.7 단점

- 영구 압력 손실이 발생할 수 있다.
- 저유량에서 측정이 불리하다.
- 유동 분포와 직관거리의 영향을 받는다.
- 밀도 및 유출계수의 영향을 고려해야 한다.

4. 점성 유동과 Hagen–Poiseuille 법칙

4.1 차압식과의 차이

차압이 발생한다고 해서 모든 유량계가

$$Q \propto \sqrt{\Delta P}$$

관계를 따르지 않는다.

완전히 발달한 원형 관 층류에서는 점성에 의한 운동량 전달이 지배적이다.

4.2 층류 유량식

하겐–포아죄유 법칙은

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\mu L} \Delta P$$

이다.

여기서

- r : 관 반경
- L : 관 길이
- μ : 동점도가 아닌 점성계수
- ΔP : 관 양단의 압력차

변환계수를

$$K = \frac{\pi r^4}{8\mu L}$$

로 정의하면

$$Q = K\Delta P$$

이다.

기억할 핵심

차압식 오리피스는 관성 효과에 의해

$$Q = K\sqrt{\Delta P}$$

이다.

원형 관의 완전 발달 층류에서는 점성 효과에 의해

$$Q = K\Delta P$$

이다.

같은 차압 측정이라도 지배적인 물리 현상이 다르다.

5. 로터미터: 가변 면적식 유량계

5.1 측정 원리

로터미터는 위쪽으로 넓어지는 테이퍼 관과 플로트로 구성된다.

유체는 아래에서 위로 흐르며 플로트를 들어 올린다.

유량이 증가하면 플로트가 상승하여 플로트와 관벽 사이의 유효 면적이 증가한다.

유량 증가 → 플로트 상승 → 통과 면적 증가 → 힘의 평형

5.2 힘의 평형

플로트에는 아래 방향의 중력, 위 방향의 부력 및 유체력이 작용한다.

평형 조건은

$$F_D + F_B = mg$$

이다.

부력은

$$F_B = \rho g V_f$$

이다.

따라서 플로트를 지지해야 하는 유체력은

$$F_D = mg - \rho g V_f$$

이다.

5.3 유량 관계식

단순화한 유동 관계는

$$Q \approx C A_g \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

이다.

여기서 A_g 는 플로트와 관 사이의 유효 통과 면적이다.

일정한 유체 조건에서 플로트 양단의 차압이 대체로 일정하다면

$$K \approx C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

로 정의할 수 있다.

따라서

$$Q \approx K A_g$$

이다.

5.4 왜 플로트가 정지하는가?

유량이 증가하면 플로트에 작용하는 유체력이 증가한다.

플로트가 상승하면서 유효 통과 면적이 커진다.

면적 증가에 따라 틈새 유속과 압력 분포가 달라지고, 새로운 힘의 평형이 형성된다.

따라서 유량에 대응하는 일정한 높이에서 플로트가 정지한다.

기억할 핵심

로터미터의 핵심은 일정한 높이를 만드는 힘의 평형이다.

$$F_D + F_B = mg$$

유량이 증가하면 통과 면적이 증가하는 새로운 위치에서 평형을 이룬다.

5.5 장점

- 구조가 단순하다.
- 현장에서 직접 유량을 확인할 수 있다.
- 추가적인 전자식 검출부 없이 사용할 수 있다.

5.6 단점

- 일반적으로 수직 설치가 필요하다.
- 유체 밀도와 점도 변화의 영향을 받는다.
- 플로트 고착 또는 오염이 발생할 수 있다.

6. 위어와 플룸**6.1 개수로 유량 측정**

위어(Weir)는 수로를 가로막는 장애물 또는 댐 형태의 검출 요소이다. 액체가 위어를 통과하려면 상류 수위가 위어 마루보다 높아져야 한다. 유량이 증가하면

- 상류 수두가 증가한다.
- 액체가 통과하는 유효 면적이 증가한다.

따라서 위어는 수두와 유효 면적이 함께 변하는 유량계이다.

6.2 위어의 유량 계산식

위어의 형상에 따라 수두와 유량 사이의 관계가 달라진다. 일반적으로

$$Q = KH^n$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서

- H : 위어 마루 위의 수두

- n : 형상에 따른 지수
- K : 형상과 유동 조건에 따른 변환계수

이다.

6.3 직사각형 위어

대표적인 관계는

$$Q = KH^{3/2}$$

이다.

따라서

$$Q \propto H^{1.5}$$

이다.

실제 K 는 개구부 폭, 측면 수축 조건과 단위계 등에 따라 달라진다.

6.4 V형 위어

V형 위어는 아래쪽이 좁고 위쪽으로 갈수록 넓어지는 개구부를 사용한다.

대표적인 유량 관계는

$$Q = KH^{5/2}$$

이다.

따라서

$$Q \propto H^{2.5}$$

이다.

6.5 왜 V형 위어는 저유량에 유리한가?

$$Q = KH^{5/2}$$

를 수두에 대해 정리하면

$$H = \left(\frac{Q}{K} \right)^{2/5}$$

이다.

이를 유량에 대해 미분하면

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2}{5} K^{-2/5} Q^{-3/5}$$

이다.
따라서 유량이 낮을수록

$$\frac{dH}{dQ}$$

가 커진다.
즉, 낮은 유량에서 작은 유량 변화도 상대적으로 큰 수위 변화로 나타난다.

V형 위어의 특징

V형 위어는 저유량에서 유량 변화에 따른 수위 변화가 상대적으로 크다.
따라서 낮은 유량까지 넓은 범위를 측정하는 데 유리하다.

6.6 플룸

플룸(Flume)은 개수로의 폭과 바닥 형상을 변화시키는 검출 요소이다.
수로의 수축으로 발생하는 수위 변화를 이용하여 유량을 측정한다.
대표적인 플룸은 파샬 플룸(Parshall Flume)이다.
자유흐름 조건에서 형상별로 다음과 같은 관계를 적용한다.

$Q = KH^n$

수몰 상태에서는 추가 수위 측정과 보정이 필요할 수 있다.

6.7 위어와 플룸 비교

구분	위어	플룸
기본 구조	댐과 개구부	수축된 수로
측정 변수	상류 수두	상류 수두
장점	저유량 및 넓은 측정 범위	이물질 배출에 유리
단점	이물질 축적과 막힘	형상 및 설치 조건 중요
주요 용도	일반 개수로	배수, 폐수

7. 터빈식 유량계

7.1 물리적 현상

유체가 기울어진 터빈 날개를 통과하면 날개에 힘이 작용하여 터빈이 회전한다.
마찰이 없는 이상적 조건에서는 터빈 날개 끝의 속도가 유체 속도에 비례한다.
원서의 기하학적 관계는

$\tan \theta = \frac{v_{tip}}{v}$

이다.

따라서

$$v_{\text{tip}} = v \tan \theta$$

이다.

7.2 회전수와 유량

터빈 반경을 r , 초당 회전수를 n 이라고 하면

$$v_{\text{tip}} = 2\pi r n$$

이다.

따라서

$$2\pi r n = v \tan \theta$$

이다.

유속에 대해 정리하면

$$v = \frac{2\pi r}{\tan \theta} n$$

이다.

체적유량은

$$Q = Av$$

이므로

$$Q = A \frac{2\pi r}{\tan \theta} n$$

이다.

따라서 이상적 조건에서는

$$\boxed{Q = K_n n}$$

이다.

여기서

$$K_n = \frac{2\pi r A}{\tan \theta}$$

이다.

7.3 전기 신호의 검출

터빈 날개가 자기 픽업 센서를 통과하면 자속 변화에 의해 전압 펄스가 발생한다.
한 회전당 발생하는 펄스 수를 p 라고 하면

$$f = pn$$

이다.

따라서

$$n = \frac{f}{p}$$

이다.

앞의 관계식에 대입하면

$$Q = \frac{2\pi r A}{p \tan \theta} f$$

가 된다.

주파수를 측정 변수로 사용하는 경우 이상적인 변환계수를

$$K = \frac{2\pi r A}{p \tan \theta}$$

로 정의할 수 있다.

따라서

$$Q = Kf$$

이다.

실제 유량계의 K 는 베어링 마찰, 유동 특성 및 교정 결과에 따라 달라진다.

기억할 핵심

터빈식은 유체 속도를 회전속도로 바꾼다.

$$v \rightarrow n \rightarrow f$$

따라서

$$Q = Kf$$

이다.

7.4 장점

- 주파수와 유량의 관계가 선형에 가깝다.
- 넓은 측정 범위를 확보할 수 있다.
- 순간 유량 및 누적 체적 측정에 적합하다.

7.5 단점

- 베어링 마찰과 마모가 발생한다.
- 점도 변화의 영향을 받는다.
- 선회류에 민감하다.
- 유량 정지 후 관성 회전이 발생할 수 있다.

8. 와류식 유량계

8.1 물리적 현상

유체가 블러프 바디를 통과하면 물체 양쪽에서 와류가 교대로 발생한다.

이를 카르만 와류열(Karman Vortex Street) 이라고 한다.

유속이 증가하면 와류 발생 주파수도 증가한다.

유속 증가 → 와류 방출 증가 → 검출 주파수 증가

8.2 Strouhal Number

스트로할 수는

$$St = \frac{fd}{v}$$

이다.

여기서

- St : 스트로할 수
- f : 와류 발생 주파수
- d : 블러프 바디의 대표 폭
- v : 유속

이다.

유속에 대해 정리하면

$$v = \frac{fd}{St}$$

이다.

8.3 유량 계산식 유도

체적유량은

$$Q = Av$$

이다.

따라서

$$Q = A \frac{fd}{St}$$

이다.

정리하면

$$Q = \frac{Ad}{St} f$$

이다.

스트로할 수가 일정한 유동 범위에서

$$K = \frac{Ad}{St}$$

로 정의하면

$$Q = Kf$$

이다.

즉, 와류식 유량계는 와류 발생 주파수를 측정하여 체적유량을 계산한다.

와류식과 터빈식 비교

두 유량계 모두

$$Q = Kf$$

관계로 표현할 수 있다.

그러나 주파수를 만드는 현상은 다르다.

터빈식은 회전 기구의 주파수를 측정한다.

와류식은 유체 내부에서 발생하는 와류의 방출 주파수를 측정한다.

8.4 저유량 차단

유량이 낮으면 레이놀즈 수가 감소한다.

일정한 조건 이하에서는 안정적인 와류 방출이 발생하지 않는다.

따라서 실제 유체가 흐르더라도 주파수 출력이 발생하지 않을 수 있다.

이를 저유량 차단(Low-flow Cutoff)이라고 한다.

8.5 장점

- 움직이는 부품이 없다.
- 기계적 마모와 윤활 문제가 작다.
- 주파수 기반의 선형 측정에 유리하다.

8.6 단점

- 낮은 레이놀즈 수에서 측정이 불가능할 수 있다.
- 배관 진동의 영향을 받는다.
- 유동 교란과 설치 직관거리의 영향을 받는다.

9. 전자식 유량계

9.1 물리적 현상

전기를 전도하는 액체가 자기장 속을 이동하면 액체 내부의 전하에 자기력이 작용한다.
로런츠 힘은

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

이다.

따라서 전하에 작용하는 힘은 유속과 자기장 모두에 수직인 방향이다.
전하가 분리되면 전극 사이에 전위차가 형성된다.

9.2 유도 전압

정상상태에서 전하에 작용하는 전기력과 자기력이 평형을 이루면

$$q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

이다.

따라서

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

이다.

유속과 자기장이 서로 수직이고 전극 간격이 d 이면 유도 전압의 크기는

$$U = Bdv$$

이다.

9.3 유량 계산식 유도

체적유량은

$$Q = Av$$

이다.

따라서

$$v = \frac{Q}{A}$$

이다.

이를 유도 전압식에 대입하면

$$U = Bd \frac{Q}{A}$$

이다.

유량에 대해 정리하면

$$Q = \frac{A}{Bd} U$$

이다.

원형 배관에서

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

이므로

$$Q = \frac{\pi d}{4B} U$$

이다.

따라서 이상적 조건에서 변환계수는

$$K = \frac{\pi d}{4B}$$

이고

$$\boxed{Q = KU}$$

이다.

실제 계기에서는 자기장 분포와 교정 조건에 따른 보정이 추가될 수 있다.

9.4 전극과 자기장의 방향

수평 배관에서 유체가 배관 축 방향으로 흐른다고 가정한다.

전극을 수평 방향으로 배치하면 자기장은 수직 방향으로 형성되어야 한다.

세 방향은 서로 수직이다.

항목	방향
유체 속도	배관 축 방향
자기장	수직 방향
전극 축	수평 방향

9.5 왜 전극을 수평으로 설치하는가?

수평 배관에서 기포는 상부로 모이고 침전물은 하부에 쌓이는 경향이 있다.

전극을 위아래로 설치하면 상부 전극은 기포, 하부 전극은 침전물의 영향을 받기 쉽다.

따라서 전극을 3시와 9시 방향에 설치하면 안정적인 액체 접촉에 유리하다.

기억할 핵심

전극이 수평이면 자기장도 수평이라는 의미가 아니다.
일반적인 권장 구조에서는

$$\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$$

이고 전극 축도 유속 및 자기장에 수직이다.

유량계 본체를 회전하면 전극과 내부 여자 코일이 함께 회전하므로 두 축의 수직 관계는 유지된다.

9.6 접지의 중요성

전자식 유량계는 작은 유도 전압을 측정한다.

따라서 액체의 기준전위와 전기적 잡음의 영향을 고려해야 한다.

금속 배관에서는 접지 연결을 사용한다.

비전도성 배관에서는 액체와 접촉하는 접지 링이 필요할 수 있다.

9.7 여자 방식

전자식 유량계에는 전자석을 이용한 여자 방식이 사용된다.

대표적인 방식은 다음과 같다.

- 교류 여자
- 펄스 직류 여자
- 이중 주파수 여자

자기장의 극성을 변화시키면 전극 분극의 영향을 줄일 수 있다.

9.8 장점

- 유로에 장애물이 없다.
- 영구 압력 손실이 작다.
- 도전성 슬러리와 폐수 측정에 적합하다.
- 유도 전압과 유량이 선형 관계를 갖는다.

9.9 단점

- 전기전도도가 낮은 액체에 부적합하다.
- 배관 내부가 액체로 가득 차 있어야 한다.
- 접지와 전기적 잡음 관리가 중요하다.
- 기포와 전극 오염이 측정에 영향을 줄 수 있다.

10. 초음파식 유량계

10.1 기본 원리

초음파식 유량계는 음파가 유체 내부를 전파할 때 발생하는 변화를 이용하여 유속을 계산한다. 대표적인 방식은 다음과 같다.

1. 도플러 방식(Doppler)
2. 전달시간차 방식(Transit-time)

10.2 도플러 방식

유체 내부의 기포나 입자에서 반사되는 초음파의 주파수가 입자의 운동에 의해 변한다.

단순한 후방산란 구조에서 저속 근사 관계는

$$\Delta f \approx \frac{2f_0 v \cos \theta}{c}$$

이다.

여기서

- Δf : 주파수 변화
- f_0 : 송신 주파수
- c : 유체 내 음속
- θ : 음향 빔과 유속 사이 각도

이다.

따라서

$$v \approx \frac{c\Delta f}{2f_0 \cos \theta}$$

이다.

체적유량은

$$Q = Av$$

이므로

$$Q \approx \frac{Ac}{2f_0 \cos \theta} \Delta f$$

이다.

일정한 음속과 측정 조건에서

$$K = \frac{Ac}{2f_0 \cos \theta}$$

라면

$$Q \approx K\Delta f$$

이다.

10.3 전달시간차 방식

유체가 흐르는 방향으로 전달되는 초음파는 상대적으로 빨리 도착한다.

반대 방향으로 전달되는 초음파는 상대적으로 늦게 도착한다.

음향 경로 길이를 L 이라고 하면

$$t_d = \frac{L}{c + v \cos \theta}$$

$$t_u = \frac{L}{c - v \cos \theta}$$

이다.

따라서

$$\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} = \frac{2v \cos \theta}{L}$$

이다.

유속은

$$v = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right)$$

이다.

체적유량은

$$Q = \frac{AL}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right)$$

이다.

측정 변수를

$$x = \frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u}$$

로 정의하고

$$K = \frac{AL}{2 \cos \theta}$$

로 정의하면

$$Q = Kx$$

가 된다.

이 식은 단순화한 직선 음향 경로와 대표유속 모델을 사용한 관계이다.

실제 유량계에서는 유동 분포 보정이 필요할 수 있다.

10.4 장점

- 배관 외부에 설치하는 방식이 가능하다.
- 유로에 장애물을 만들지 않을 수 있다.
- 기존 배관의 유량 측정에 유리하다.

10.5 단점

- 음파 전달 조건의 영향을 받는다.
- 유체 내 기포와 고형물의 영향이 방식별로 다르다.
- 설치 각도와 유동 분포에 따라 오차가 발생한다.

11. 용적식 유량계

11.1 측정 원리

용적식 유량계는 기계적인 작동 주기마다 일정한 체적의 유체를 통과시킨다.

대표적인 방식은 회전식 로터, 피스톤 및 벨로우즈 방식이다.
유량이 증가하면 기구의 작동 횟수가 증가한다.

11.2 누적 체적

한 주기당 통과 체적을 V_c , 총 작동 횟수를 N 이라고 하면

$$V = V_c N$$

이다.

11.3 유량 계산식

초당 작동 횟수를 n 이라고 하면

$$n = \frac{dN}{dt}$$

이다.

따라서

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

이므로

$$Q = V_c n$$

이다.

변환계수를

$$K = V_c$$

로 정의하면

$$Q = K n$$

이다.

용적식의 특징

차압식은 압력 변화를 이용하고 속도식은 유속에 관련된 변수를 이용한다.
용적식은 기계적인 작동 주기마다 이동한 체적을 직접 계산한다.
따라서

$$V = V_c N$$

이라는 단순한 관계를 갖는다.

11.4 장점

- 누적 체적 측정에 적합하다.
- 깨끗한 고점도 유체에 적용할 수 있다.
- 선회류의 영향이 상대적으로 작다.
- 긴 직관거리가 필요하지 않은 경우가 많다.

11.5 단점

- 기계적 마모가 발생한다.
- 내부 누설로 측정 오차가 발생할 수 있다.
- 고형물에 의해 손상될 수 있다.
- 내부 기구가 고착되면 유동이 차단될 수 있다.

12. 표준 체적유량

12.1 실제 체적유량과 표준 체적유량

기체는 온도와 압력에 따라 밀도가 크게 변한다.

따라서 동일한 질량유량이라도 실제 운전 조건에서의 체적유량은 달라질 수 있다.

실제 체적유량을 ACFM, 표준 체적유량을 SCFM으로 나타낸다.

12.2 이상기체 법칙

이상기체 상태방정식은

$$PV = nRT$$

이다.

동일한 기체의 몰수에 대해

$$\frac{PV}{T} = \text{constant}$$

이다.

따라서 실제 조건과 표준 조건 사이에서

$$\frac{P_a V_a}{T_a} = \frac{P_s V_s}{T_s}$$

이다.

동일한 몰유량에 대한 체적유량 환산식은

$$Q_s = Q_a \frac{P_a T_s}{P_s T_a}$$

이다.

실제 기체의 압축성 계수 Z 를 고려하면

$$Q_s = Q_a \frac{P_a T_s Z_s}{P_s T_a Z_a}$$

이다.

압력과 온도는 각각 절대압력과 절대온도를 사용해야 한다.

기억할 핵심

표준 체적유량은 실제 배관에서 측정되는 체적유량과 다를 수 있다.

표준 체적유량은 정해진 압력과 온도에서 차지할 체적으로 환산한 값이다.

표준 조건은 적용 규격과 계약 조건에 따라 달라질 수 있으므로 반드시 명시해야 한다.

13. 유량계별 관계식 통합 비교

유량계	측정 변수	유량 계산식	변환계수 및 물리적 의미
차압식	ΔP	$Q = K\sqrt{\Delta P}$	관성 효과, 밀도, 배관 치수와 유출계수
층류식	ΔP	$Q = K\Delta P$	점성, 관 길이와 반경
로터미터	A_g	$Q \approx KA_g$	힘의 평형과 틈새 유동 조건
직사각형 위어	H	$Q = KH^{3/2}$	개구부 폭과 수두 관계
V형 위어	H	$Q = KH^{5/2}$	개구 각도와 수두 관계
플룸	H	$Q = KH^n$	수로 형상과 수위 관계
터빈식	f	$Q = Kf$	회전속도와 유체 속도 관계
와류식	f	$Q = Kf$	스트로할 수와 와류 발생 관계
전자식	U	$Q = KU$	자기장, 배관 직경과 유도 전압
도플러 초음파	Δf	$Q \approx K\Delta f$	주파수 변화와 유속 관계
전달시간차 초음파	$1/t_d - 1/t_u$	$Q = Kx$	초음파 전달시간과 유속 관계
용적식	n	$Q = Kn$	기계적 주기당 이동 체적

14. 기술사 학습을 위한 기억 구조

14.1 유량계별 물리 현상

유량계	물리적 현상
차압식	압력에너지와 운동에너지의 변환
충류식	점성에 의한 운동량 전달과 압력 손실
로터미터	플로트의 힘의 평형
위어	수두 증가와 개구 면적 변화
플룸	개수로의 수축 및 수위 변화
터빈식	유체 운동에 의한 회전
와류식	물체 후류의 주기적 와류 방출
전자식	전하의 로런츠 힘과 운동 기전력
초음파식	음파의 주파수 및 전달시간 변화
용적식	일정 체적의 반복 이동

14.2 수식은 이렇게 기억한다

1. 차압식

$$\Delta P \propto v^2$$

따라서

$$Q = K\sqrt{\Delta P}$$

2. 충류식

점성에 의한 압력 손실은 유량에 비례한다.

$$Q = K\Delta P$$

3. 로터미터

힘의 평형 조건에서 유량이 증가하면 통과 면적이 증가한다.

$$Q \approx KA_g$$

4. 위어

수위 상승에 따라 통과 면적과 유동 수두가 증가한다.

$$Q = KH^n$$

5. 터빈식 및 와류식

유속 증가에 따라 검출 주파수가 증가한다.

$$Q = Kf$$

6. 전자식

유속 증가에 따라 유도 전압이 증가한다.

$$Q = KU$$

7. 용적식

동작 횟수 증가에 따라 통과 체적이 증가한다.

$$Q = Kn$$

14.3 답안 작성 순서

기술사 답안에서는 다음 순서를 사용한다.

1. 측정 원리와 물리적 현상
2. 검출 요소의 구조
3. 측정 변수 정의
4. 측정 변수와 유량 사이의 관계식 유도
5. 변환계수 K 의 물리적 의미
6. 주요 오차 원인
7. 장점 및 단점
8. 현장 적용과 설치 조건

최종 정리

유량계의 본질은 유체 흐름에 의해 발생한 물리적 현상을 측정하는 것이다.
따라서 유량계를 학습할 때는 항상 다음 질문에 답할 수 있어야 한다.

1. 유량이 변하면 어떤 물리 현상이 변하는가?
2. 어떤 물리량을 계기로 측정하는가?
3. 측정 변수와 유량은 어떤 관계를 갖는가?
4. 그 관계에 포함된 변환계수 K 는 무엇인가?
5. 실제 현장에서 어떤 원인으로 오차가 발생하는가?

출처 및 학습 범위

Tony R. Kuphaldt, *Lessons in Industrial Instrumentation*, Version 2.32, Chapter 22, Continuous Fluid Flow Measurement.

본 문서는 Chapter 22 학습 대화의 내용을 물리적 현상과 수식 유도 중심으로 재구성하였다.

각 유량계의 관계식에는 이해를 돕기 위한 이상화와 간략화가 포함되어 있다.

실제 계기의 교정계수, 유효 측정 범위, 설치 조건 및 유체 물성 보정은 제조사와 적용 규격에 따라 확인해야 한다.

22.6절은 실제 체적유량과 표준 체적유량의 기본 개념만 포함한다.