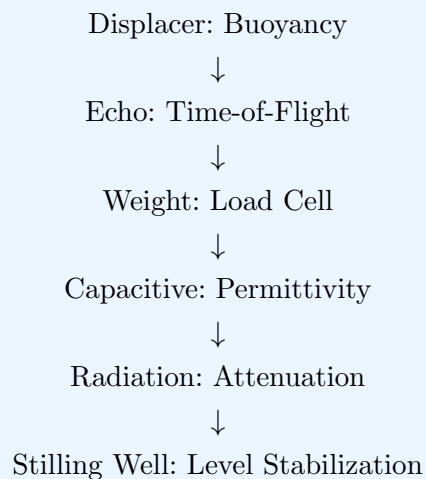


Chapter 20. Continuous Level Measurement

Sections 20.4–20.9

Chapter 20.4–20.9의 핵심



1 20.4 Displacement Level Measurement

1.1 Displacer의 기본 원리

Displacement 방식은 유체가 물체에 가하는 부력(Buoyant Force)을 이용하여 Level을 측정한다.

액위가 증가하면 Displacer가 유체에 더 많이 잠긴다. 잠긴 체적이 증가하면 부력이 증가한다. 따라서 센서가 감지하는 겉보기 무게는 감소한다.

$$F_B = \gamma V = \rho g V$$

여기서

- F_B : Buoyant Force
- γ : Specific Weight
- ρ : Density
- g : Gravitational Acceleration
- V : Submerged Volume

$$\begin{aligned} \text{Level} \uparrow &\Rightarrow V \uparrow \Rightarrow F_B \uparrow \\ &\Rightarrow \text{Apparent Weight} \downarrow \end{aligned}$$

Displacer 방식에서는 정압 자체보다 **유체의 Density 변화**가 핵심 변수이다.

1.2 Pressure와 Density의 영향

Displacer에 작용하는 부력은 유체 밀도와 잠긴 체적에 따라 결정된다.

$$F_B = \rho g V$$

따라서 유체 밀도가 변하면 동일한 Level에서도 부력이 변한다.

$$\rho \text{ 변화} \Rightarrow F_B \text{ 변화} \Rightarrow \text{측정 오차}$$

1.3 설치 구조

- **Cage Type:** 외부 Chamber에 설치
- **Cageless Type:** Tank 내부에 직접 설치

설치 시 Process Noise 영향을 억제하고, 압력이 측정 오차로 직접 작용하지 않도록 한다.

1.4 Calibration

1.4.1 Wet Calibration

실제 유체를 이용하여 Displacer의 잠긴 상태를 변화시키면서 Calibration한다.

$$\text{Actual Liquid} \rightarrow \text{Immersion} \rightarrow \text{Calibration}$$

1.4.2 Dry Calibration

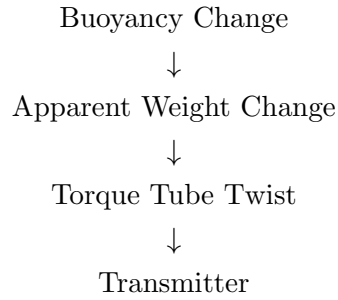
실제 유체 사용이 어려울 경우, 외부에서 교정용 힘을 가하여 부력 효과를 모사한다.

$$\text{Buoyant Force} \leftrightarrow \text{Calibration Force}$$

1.5 20.4.2 Torque Tube

밀폐된 Process 내부의 Displacer 무게 변화를 외부 Transmitter에 전달하기 위해 기밀 유지 구조가 필요하다.

Torque Tube는 무게 변화를 관의 비틀림 각도로 변환한다.



방식	역할
Torque Tube	힘을 비틀림 각도로 전달
Magnetic Coupling	비접촉 자기 결합으로 변위 전달
Bellows	기밀 유지 및 기계적 변형으로 힘 전달

1.6 20.4.3 Interface Measurement

Displacer는 서로 섞이지 않는 두 액체 사이의 Interface를 측정할 수 있다.

이때 Displacer 전체가 두 액체에 걸쳐 잠긴 상태여야 한다.

총 부력은 두 액체가 만드는 부력의 합이다.

$$F_B = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2$$

원통형 Displacer의 단면적은

$$A = \pi r^2$$

이다.

따라서

$$F_B = \pi r^2 (\gamma_1 l_1 + \gamma_2 l_2)$$

이다.

전체 길이는

$$l_1 + l_2 = L$$

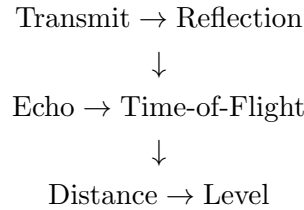
이다.

두 액체의 비중량과 Displacer 길이를 알면 부력으로 Interface 위치를 결정할 수 있다.

2 20.5 Echo-based Level Instruments

2.1 Echo 방식의 기본 원리

파동을 발사하고 경계면에서 반사되는 Echo의 Time-of-Flight를 측정한다.



Echo 방식에서 핵심 변수는 **파동의 전파 속도(Speed)**이다.

Hydrostatic 방식에서는 Density가 중요하지만, Echo 방식에서는 Speed가 중요하다.

2.2 Ultrasonic과 Radar의 Speed 특성

구분	Ultrasonic	Radar
파동	Sound Wave	Microwave
주파수	수십 kHz	GHz
속도 영향	매질 Density와 상태	Permittivity
기체 조건	온도 및 조성 영향 큼	상대적으로 영향 작음

2.3 Echo 방식의 4대 제약

1. **Foam**: 신호 흡수 및 난반사
2. **불명확한 Interface**: Emulsion 등
3. **Tank 장애물**: False Echo 발생
4. **Dead Zone**: 센서 직하부 측정 불가

2.4 20.5.1 Ultrasonic Level Measurement

수십 kHz 대역의 초음파를 송수신한다. 매질 경계에서 발생한 반사파를 감지하여 Level을 계산한다.

구분	의미
Ullage	Tank 상부에서 액면까지의 거리
Fillage	Tank 바닥에서 액면까지의 높이

Fillage 적용 시 다음 조건을 확인한다.

- Sensor 기밀 유지
- 바닥 Sludge 유무
- Sound Damping

Ultrasonic Instrument에는 Power, Transmitter, Processor, Signal Processing Circuit, Ultrasonic Transducer가 통합된다.

고체 분체의 표면이 불규칙하면 Echo 검출이 어려워질 수 있다.

2.5 20.5.2 Radar Level Instrument

Radar는 GHz 대역 Microwave를 이용한다.

구분	Non-contact	GWR
전파 경로	공간 방사	Probe를 따라 전파
신호 손실	공간 확산 손실	상대적으로 작음
주요 조건	Antenna 상태	Probe 상태
Interface	Surface 측정	Interface 측정

2.5.1 Radar 전파 속도

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

여기서

- c : Speed of Light
- ϵ_r : Relative Permittivity

공기에서는

$$\epsilon_r \approx 1$$

이다.

2.5.2 Gas Phase의 Permittivity 보정

$$\epsilon_r = 1 + (\epsilon_{\text{ref}} - 1) \frac{PT_{\text{ref}}}{P_{\text{ref}}T}$$

압력 증가 시 밀도와 유전율이 증가한다.

온도 증가 시 밀도와 유전율이 감소한다.

2.5.3 Impedance와 Reflection

특성 임피던스는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

이다.

Reflection Coefficient는

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

이다.

Power Reflection은

$$R = |\Gamma|^2 = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \right|^2$$

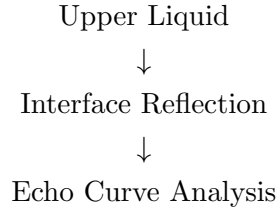
이다.

유전율 차이가 작으면 반사가 작고 투과되는 전자파가 많아진다.

2.6 GWR Interface Measurement

Guided-Wave Radar는 Probe를 따라 Microwave를 전송한다.

상부 유체를 통과한 신호가 하부 유체와 만나는 곳에서 발생하는 Echo 변화를 분석한다.



Probe 양 끝단 부근에는 측정이 어려운 Transition Zone이 존재한다.

2.7 20.5.3 Laser Level Measurement

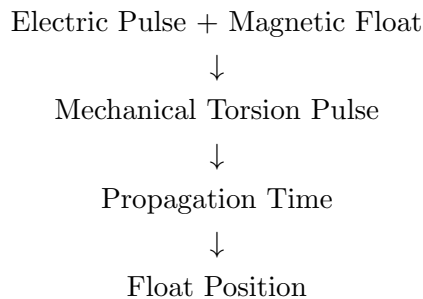
Laser를 대상 표면에 조사하고 반사 신호의 Time-of-Flight를 측정한다.

표면에서 충분한 Reflection이 확보되어야 한다.

2.8 20.5.4 Magnetostrictive Level Measurement

Electric Pulse와 Magnetic Float의 자기장이 상호작용하여 Mechanical Torsion Pulse가 발생한다.

이 펄스의 전파시간으로 위치를 계산한다.



3 20.6 Weight Level Measurement

Load Cell로 Tank 전체 중량을 측정한다.

$$W_{\text{material}} = W_{\text{total}} - W_{\text{empty}}$$

내용물의 중량을 Level로 변환하려면 Density와 Tank 형상 정보가 필요하다.
액체 및 고체 분체에도 적용할 수 있으나 밀도 변화는 측정 오차의 원인이 된다.
제공된 자료에서는 Piezo 소자가 진동 발생에 사용된다고 기록한다.

4 20.7 Capacitive Level Measurement

정전용량 변화를 이용하여 Level을 측정한다.

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

- C : Capacitance
- ϵ : Permittivity
- A : Electrode Area
- d : Electrode Distance

Level이 변화하면 유전체가 치환되고, 그 결과 정전용량이 변한다.

$$\text{Level} \rightarrow \epsilon \rightarrow C$$

전도성 액체에서는 Probe 표면을 절연 유전체로 코팅한다.

5 20.8 Radiation Level Measurement

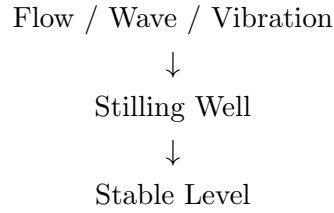
X-ray 또는 Gamma-ray의 투과 감쇠를 이용하여 Level을 측정한다.
고온, 고압, 부식성 공정 등에서 비접촉 방식으로 사용할 수 있다.

$$\text{Level Change} \rightarrow \text{Radiation Attenuation}$$

방사선 선원은 작업자 안전을 위해 적절한 차폐 구조가 필요하다.
제공된 자료에서는 납(Pb) 차폐를 언급한다.

6 20.9 Stilling Well

Stilling Well은 유체의 흐름, 요동, 진동 및 파도로 인한 Level 측정 오차를 줄인다.



Well 내부 Level이 Tank의 실제 Level과 동일하게 움직이도록 유체의 출입 통로를 확보한다.

7 Level Measurement 방식 비교

방식	측정 원리	핵심 변수
Displacer	Buoyancy	Density
Ultrasonic	Sound ToF	Sound Speed
Radar	Microwave ToF	Permittivity
GWR	Guided Echo	Interface
Laser	Optical ToF	Reflection
Magnetostrictive	Mechanical Pulse	Float Position
Weight	Load Cell	Density
Capacitive	Capacitance	Permittivity
Radiation	Attenuation	Material Thickness
Stilling Well	액면 안정화	Flow / Wave

8 하나의 스토리로 이해하기

Step 1. 부력으로 Level을 측정한다

Displacer가 잠긴 체적만큼 부력이 발생한다.

$$F_B = \rho g V$$

Level이 증가하면 길보기 무게가 감소한다.

Step 2. 파동으로 거리를 측정한다

Ultrasonic 또는 Radar를 송신하고 Echo가 돌아오는 시간을 측정한다.

전파 속도는 정확도의 핵심 변수이다.

Step 3. Interface를 측정한다

GWR은 Probe를 따라 Microwave를 전송한다.

액체 경계에서 발생하는 Echo 변화로 Interface를 판별한다.

Step 4. 다른 물리량을 측정한다

Weight는 하중, Capacitive는 유전율, Radiation은 방사선 감쇠를 이용한다.

Step 5. 액면을 안정시킨다

Stilling Well로 흐름과 요동에 의한 측정 오차를 줄인다.

9 최종 핵심 암기

1. Displacer: $F_B = \rho g V$
2. Interface Displacer: $F_B = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2$
3. Echo: Time-of-Flight와 Speed
4. Echo 제약: Foam, Interface, 장애물, Dead Zone
5. Ultrasonic: Sound Wave
6. Radar: $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$
7. GWR: Guided Wave와 Interface
8. Weight: Empty Tank Weight 보정
9. Capacitive: $C = \epsilon A/d$
10. Radiation: Attenuation
11. Stilling Well: Level Stabilization