

Chapter 20. Continuous Level Measurement

Lessons in Industrial Instrumentation

Chapter 20의 핵심 질문

용기 안에 들어 있는 유체의 높이를 어떻게 측정할 것인가?

직접 관찰 → 위치 측정 → 정수압 측정 → 보상 → 밀도 · Interface까지 계산

1 Chapter 20 전체 흐름

Level measurement는 단순히 액체의 높이를 보는 것에서 시작한다.

가장 단순한 방법은 Sight Glass이다.

그 다음 Float를 이용하여 액면의 위치를 기계적으로 검출한다.

액체 높이가 정수압을 만든다는 관계를 이용하면, 액체와 직접 눈으로 접촉하지 않고도 pressure transmitter로 level을 측정할 수 있다.

$$P = \rho gh$$

그러나 실제 공정에서는 다음 문제가 발생한다.

- Vessel 내부 Gas Pressure
- Transmitter 설치 높이 차이
- Wet Leg
- Process Liquid Density 변화
- 두 액체의 Interface

따라서 Chapter 20은 다음 흐름으로 이해하면 된다.

Sight Glass → Float → Hydrostatic Pressure → DP Compensation → Density Compensation → Interface Measurement

2 용어 정의

2.1 Sight Glass / Level Gauge

Sight glass는 vessel 내부의 액면을 외부에서 직접 볼 수 있도록 만든 가장 단순한 level measurement 장치이다.

기본 원리는 **연통관의 압력 평형**이다.

$$\text{Vessel 내부 유체 상태} \approx \text{Sight Glass 내부 유체 상태}$$

즉 vessel과 sight glass의 위·아래 압력 조건이 같으면 sight glass 내부의 액면도 vessel의 실제 액면과 같아진다.

2.1.1 단일 액체의 경우

예를 들어 vessel에 물과 공기가 있다고 하자.

$$\text{위쪽 유체} = \text{Air}$$

$$\text{아래쪽 유체} = \text{Water}$$

Sight glass 역시 다음 조건을 만족하면 된다.

$$\text{Upper Connection} = \text{Air}$$

$$\text{Lower Connection} = \text{Water}$$

따라서 vessel과 sight glass의 수면 높이가 같아진다.

2.1.2 Liquid-Liquid Interface의 경우

Oil과 Water처럼 서로 섞이지 않는 두 액체가 있다면 관심 대상은 전체 액면이 아니라 두 액체의 경계이다.

Oil

————— Interface

Water

이 경우 sight glass도 동일한 구조를 재현해야 한다.

따라서

$$\text{Upper Nozzle} = \text{Light Liquid}$$

$$\text{Lower Nozzle} = \text{Heavy Liquid}$$

이어야 한다.

단일 액체 Level과 Liquid-Liquid Interface는 원리가 같다.

측정하려는 경계면의 위쪽 유체와 아래쪽 유체를 Sight Glass에도 동일하게 연결해야 한다.

2.1.3 Sight Glass의 현장 문제

Sight glass는 단순하지만 다음과 같은 문제가 있다.

- 내부 오염으로 시야가 나빠질 수 있다.
- 항상 깨끗한 상태를 유지해야 한다.
- Glass tube는 thermal shock 또는 mechanical shock에 의해 rupture될 수 있다.
- 고온·고압 공정에서는 재질과 구조에 주의해야 한다.
- Liquid-Liquid Interface 측정에서는 nozzle 위치가 잘못되면 실제 interface와 다른 높이를 나타낼 수 있다.

Magnetic level gauge에서는 magnetic float와 High/Low magnetic switch 등을 추가하여 remote indication 또는 alarm 기능을 구성할 수도 있다.

2.2 Float Level Measurement

Float 방식은 액면 위에 뜨는 물체의 위치를 이용한다.

액면이 올라가면 float도 올라가고, 액면이 내려가면 float도 내려간다.

Liquid Level → Float Position

즉 level을 직접 pressure로 변환하는 것이 아니라 **displacement** 또는 **position**으로 변환한다.

2.2.1 Guide Wire

Tank 내부에 turbulence가 발생하면 float가 좌우로 움직이거나 불안정해질 수 있다.

Guide wire는 float의 움직임을 수직 방향으로 제한한다.

Turbulence → Float 흔들림 → Guide Wire로 이동 방향 제한

2.2.2 Tape 방식

Float의 위치를 tape 또는 mechanical linkage를 이용하여 외부 indicator로 전달할 수 있다.

그러나 긴 tape, pulley, mechanical linkage를 사용하면

- 마찰
- 늘어남
- 기계적 마모
- sticking

등이 발생할 수 있다.

2.2.3 Ultrasonic과의 구분

Ultrasonic level measurement는 float 방식의 일부가 아니다.

Ultrasonic은 별도의 비접촉식 거리 측정 방법이다.

Float = 액면을 따라 움직이는 물체의 위치 측정

Ultrasonic = 음파 왕복시간으로 거리 측정

두 방식 모두 level을 측정하지만 측정 원리는 다르다.

2.3 Hydrostatic Pressure

정지한 액체는 자신의 무게 때문에 압력을 만든다.

이를 정수압이라고 한다.

$$P = \rho gh$$

또는 specific weight를 사용하면

$$P = \gamma h$$

이다.

여기서

$$\gamma = \rho g$$

이다.

- P : Hydrostatic Pressure
- ρ : Liquid Density
- g : Gravitational Acceleration
- h : Liquid Height
- γ : Specific Weight

2.3.1 중요한 특징

정수압은 용기의 모양보다 액체의 수직 높이와 밀도에 의해 결정된다.

$P \propto \rho h$

따라서 같은 액체라면

$P \propto h$

이다.

그래서 bottom pressure를 측정하면 level을 계산할 수 있다.

2.4 Bubbler System

Bubbler는 purge gas를 dip tube를 통해 액체 속으로 천천히 공급하고 그때 형성되는 back pressure를 측정한다.

Bubbler는 bubble 개수를 측정하는 장치가 아니다.

낮은 유량으로 bubble이 계속 발생하도록 만들고, 그때의 gas back pressure를 측정한다.

Dip tube 끝의 깊이가 h 이면

$$P_{\text{liquid}} = \rho gh$$

이다.

Bubble이 tube 끝에서 빠져나오기 위해서는 gas pressure가 이 pressure보다 아주 조금 커야 한다.

Purge flow가 충분히 작으면

$$P_{\text{tube}} \approx \rho gh$$

가 된다.

2.4.1 Bubbler의 동작 흐름

Purge Gas → Pressure Regulator → Flow Restriction → Dip Tube → Bubble

그리고 tube 내부 pressure를 transmitter가 측정한다.

Back Pressure → Hydrostatic Pressure → Level

2.4.2 Sight Feed Bubbler와 Rotameter

Dip tube 끝의 bubble은 tank 내부에 있으므로 운전자가 직접 볼 수 없는 경우가 많다.

따라서 purge gas가 실제로 흐르고 있는지 다음 방법으로 확인한다.

- Sight Feed Bubbler
- Rotameter

Sight Feed Bubbler에서는 작은 투명 chamber 내부의 bubble을 직접 본다.

Sight Feed Bubble = Purge Gas Flow 존재 확인

Process 내부 dip tube 끝에서도 정상적으로 bubble이 발생한다.

즉 두 곳에 bubble이 존재하지만 역할이 다르다.

위치	의미
Sight Feed Bubbler	Purge gas가 흐르는지 시각적으로 확인
Dip Tube End	Purge gas가 process liquid로 실제 배출됨

2.4.3 Purge Flow가 너무 크면 안 되는 이유

Gas flow가 너무 크면 tube 내부에서 friction pressure loss가 발생한다.

이때 transmitter는

$$P_{\text{measured}} = \rho gh + P_{\text{friction}}$$

을 측정하게 된다.

따라서 실제보다 높은 level을 표시할 수 있다.

Bubbler의 핵심은 **많은 gas flow가 아니라 작고 안정적인 purge flow**이다.

2.4.4 Bubbler의 장점

Bubbler는 pressure sensor가 process liquid와 직접 접촉할 필요가 없다.

따라서 다음과 같은 공정에 유리하다.

- Highly corrosive liquid
- Sample port가 막히기 쉬운 liquid
- Sensor와 직접 접촉시키기 어려운 liquid

Pressure sensor의 diaphragm은 flexible해야 하기 때문에 재료 선택이 제한된다.

반면 dip tube는 움직일 필요가 없다.

따라서 process liquid를 견딜 수 있는 다양한 재료로 제작할 수 있다.

2.5 Transmitter Suppression and Elevation

Pressure transmitter의 설치 위치가 process connection과 다르면 transmitter가 보는 pressure에도 offset이 생긴다.

따라서 실제 0% level에서 transmitter input이 반드시 0은 아니다.

Level 0% $\neq$ Transmitter Pressure 0

일 수 있다.

이 경우 LRV와 URV를 실제 설치 조건에 맞게 설정한다.

- LRV: Lower Range Value
- URV: Upper Range Value

예를 들어 transmitter가 process connection보다 위에 있고 remote seal capillary 안에 fill fluid가 존재하면, fill fluid column 때문에 0%에서도 negative pressure를 볼 수 있다.

즉 suppression/elevation의 핵심은

$$\text{설치 높이에 의한 일정한 Hydrostatic Offset}$$

을 calibration에 포함하는 것이다.

Span 자체와 zero 위치를 구분해서 생각해야 한다.

2.6 Compensated Leg System

Closed vessel 내부에는 liquid pressure뿐 아니라 gas pressure도 존재한다.

Bottom pressure transmitter 하나만 사용하면

$$P_{\text{bottom}} = P_{\text{gas}} + \rho gh$$

가 된다.

따라서 gas pressure가 변하면 level이 변하지 않았는데도 transmitter pressure가 변한다.

2.6.1 Differential Pressure를 이용한 보상

DP transmitter의 H측을 vessel bottom에 연결하고, L측을 vessel top gas space에 연결하면

$$P_H = P_{\text{gas}} + \rho gh$$

$$P_L = P_{\text{gas}}$$

이다.

따라서

$$\Delta P = P_H - P_L$$

$$= (P_{\text{gas}} + \rho gh) - P_{\text{gas}}$$

$$\Delta P = \rho gh$$

가 된다.

즉 vessel gas pressure가 제거된다.

2.6.2 Wet Leg

Top impulse line에 condensate 또는 sealing liquid가 항상 채워져 있으면 이를 wet leg라고 한다.

Wet leg가 일정하게 유지되면

$$P_{\text{wet leg}} = \gamma_{\text{wet}} h_{\text{wet}}$$

은 일정한 값이다.

따라서 transmitter에는 일정한 offset으로 작용한다.

$$\Delta P = \text{Process Level Pressure} - \text{Constant Wet Leg Pressure}$$

이 일정한 offset은 calibration으로 제거할 수 있다.

2.6.3 Remote Seal

Impulse line을 직접 process에 연결하기 어렵거나 wet leg 상태 유지가 곤란한 경우 remote seal과 capillary를 사용할 수 있다.

Remote seal은

$$\text{Process Pressure} \rightarrow \text{Diaphragm} \rightarrow \text{Fill Fluid} \rightarrow \text{Transmitter}$$

구조로 pressure를 전달한다.

2.7 Tank Expert Systems

단순 hydrostatic level measurement에서는

$$P = \rho gh$$

이므로 pressure만 측정하면 ρ 와 h 를 동시에 알 수 없다.

예를 들어 pressure가 증가했을 때

- Level이 증가했을 수도 있고
- Density가 증가했을 수도 있다.

그래서 density가 변하는 process에서는 density와 level을 동시에 추정해야 한다.

2.7.1 세 지점의 Pressure Measurement

Tank Expert System의 개념은 top, middle, bottom pressure를 이용하는 것이다.

$$P_{\text{top}} = P_{\text{gas}}$$

중간 transmitter가 liquid 속에 있을 경우

$$P_{\text{middle}} = P_{\text{gas}} + \rho g(h - x)$$

Bottom transmitter는

$$P_{\text{bottom}} = P_{\text{gas}} + \rho gh$$

를 측정한다.

2.7.2 Density 계산

Bottom과 Middle의 압력차를 구하면

$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{middle}} = \rho gh - \rho g(h - x)$$

이므로

$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{middle}} = \rho gx$$

이다.

여기서 x 는 두 transmitter 사이의 고정된 높이이다.

따라서

$$\rho = \frac{P_{\text{bottom}} - P_{\text{middle}}}{gx}$$

로 density를 계산할 수 있다.

두 transmitter 사이의 높이 x 는 고정되어 있다.

따라서 그 두 위치의 pressure difference가 변하면 liquid density가 변한 것이다.

2.7.3 Density가 왜 변하는가?

순수한 하나의 액체라 하더라도 density는 완전히 고정된 값은 아니다.

다음 조건에 따라 달라질 수 있다.

- Temperature
- Pressure
- Concentration
- Composition

특히 process liquid가 mixture인 경우 농도와 조성 변화에 따른 density 변화가 더 클 수 있다.

이는 liquid가 증발하여 gas와 섞인다는 의미가 아니다.

Tank Expert System에서의 density 변화는 주로 process liquid 자체의 온도, 농도, 조성 변화를 의미한다.

2.7.4 Level 계산

Density를 알았다면 Top과 Bottom pressure difference를 이용할 수 있다.

$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}} = \rho gh$$

따라서

$$h = \frac{P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}}}{\rho g}$$

이다.

즉 시스템은

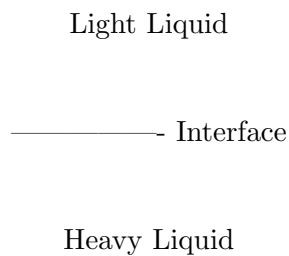
$$\text{Pressure Difference} \rightarrow \text{Density} \rightarrow \text{Level}$$

순서로 계산한다.

2.8 Hydrostatic Interface Level Measurement

두 개의 서로 섞이지 않는 액체가 있을 때 두 액체의 경계 위치를 interface level이라고 한다.

예를 들어



구조이다.

Bottom pressure는

$$P = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2$$

이다.

여기서

- γ_1 : Heavy Liquid Specific Weight
- h_1 : Heavy Liquid Height
- γ_2 : Light Liquid Specific Weight
- h_2 : Light Liquid Height

2.8.1 왜 Total Level을 고정해야 하는가?

Pressure 하나만 측정하면 pressure 변화가

- Interface 변화 때문인지
- Total Level 변화 때문인지

구분할 수 없다.

따라서 가장 간단한 방법은 overflow pipe로 total liquid height를 일정하게 만드는 것이다.

$$h_1 + h_2 = \text{Constant}$$

Interface가 위로 Δh 만큼 이동하면

$$h_1 \uparrow$$

하고

$$h_2 \downarrow$$

한다.

따라서 pressure 변화는

$$\Delta P = (\gamma_1 - \gamma_2)\Delta h$$

가 된다.

즉 interface 이동량은 두 액체의 밀도 차이에 의해 pressure 변화로 나타난다.

2.8.2 Compensating Leg를 사용하는 방법

Total level을 항상 일정하게 만들 수 없다면 upper remote seal을 이용하여 total level 변화를 보상할 수 있다.

H측에는 bottom pressure,

L측에는 upper remote seal pressure를 전달한다.

H측은

$$P_H = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_2 h_3$$

이고 L측은

$$P_L = \gamma_4 h_4 + \gamma_2 h_3$$

이다.

따라서

$$\Delta P = P_H - P_L$$

$$= \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_2 h_3 - \gamma_4 h_4 - \gamma_2 h_3$$

이므로

$$\Delta P = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_4 h_4$$

가 된다.

즉 upper remote seal보다 위에 있는 liquid column

$$\gamma_2 h_3$$

은 H와 L 양쪽에 동일하게 작용하여 서로 상쇄된다.

Upper Remote Seal보다 위쪽의 Total Level 변화는 DP transmitter 양쪽에 공통으로 작용하므로 차압 계산에서 제거된다.

2.8.3 Interface Transmitter Span

Interface가 Δh 만큼 이동하면

Heavy Liquid는 Δh 만큼 증가하고,

Light Liquid는 Δh 만큼 감소한다.

따라서 transmitter span은

$$\text{DP Span} = \text{Interface Span} \times (\text{Heavy SG} - \text{Light SG})$$

로 계산할 수 있다.

예를 들어

$$\text{Interface Span} = 36 \text{ in}$$

$$SG_H = 1.1$$

$$SG_L = 0.78$$

이라면

$$\text{DP Span} = 36(1.1 - 0.78)$$

$$\text{DP Span} = 11.52 \text{ inH}_2\text{O}$$

이다.

3 용어 간 관계

3.1 전체 Level Measurement 관계

방식	무엇을 측정하는가?	핵심 관계
Sight Glass	액면을 직접 관찰	Vessel과 Gauge의 유체 상태를 동일하게 유지
Float	액면의 위치	Level $\rightarrow$ Position
Hydrostatic	액체가 만드는 압력	$P = \rho gh$
Bubbler	Dip Tube Back Pressure	$P_{\text{tube}} \approx \rho gh$
Closed Vessel DP	Bottom과 Top Pressure Difference	Gas Pressure 제거
Wet Leg	L측 Constant Head	고정 Offset으로 보상
Tank Expert System	Pressure + Density + Level	먼저 ρ , 그 다음 h
Interface	두 액체의 경계	$\Delta P = (\gamma_H - \gamma_L)\Delta h$

3.2 측정 발전 과정

눈으로 본다 $\rightarrow$ 위치를 잴다 $\rightarrow$ 압력을 잴다 $\rightarrow$ 차압으로 보상한다 $\rightarrow$ 밀도까지 계산한다

3.3 압력 측정에서 계속 나타나는 핵심 문제

Hydrostatic level measurement의 기본식은 항상

$$P = \rho gh$$

이다.

따라서 pressure가 변하는 원인은 크게 두 가지이다.

$$P \uparrow \Rightarrow \rho \uparrow \quad \text{또는} \quad h \uparrow$$

이 때문에 단순 pressure measurement에서

Density 변화

와

Level 변화

를 구분하는 것이 중요한 문제로 발전한다.

4 하나의 스토리로 이해하기

Step 1. 처음에는 눈으로 본다

탱크 안의 액체 높이를 알고 싶다.

가장 간단한 방법은 vessel 옆에 sight glass를 연결하는 것이다.

Vessel과 sight glass의 위·아래 유체 조건을 같게 만들면 액면이 같은 높이에 형성된다.

$$\text{Sight Glass} = \text{Tank 내부 Level의 직접 복사}$$

Step 2. 눈으로 보지 않고 위치를 측정한다

액면에 float를 띄운다.

액면이 움직이면 float도 움직인다.

$$\text{Level} \rightarrow \text{Float Position}$$

Turbulence가 심하면 guide wire로 움직임을 제한한다.

Step 3. 액체가 만드는 압력을 이용한다

액체는 높이가 높을수록 바닥에 더 큰 pressure를 만든다.

$$P = \rho gh$$

따라서 pressure transmitter로 bottom pressure를 측정하면 level을 계산할 수 있다.

Step 4. Sensor가 액체에 닿으면 곤란하다

공정 유체가 부식성이거나 pressure port를 막기 쉽다.

그래서 dip tube에 purge gas를 넣는다.

Bubble이 계속 조금씩 빠져나오게 하고 tube 내부 back pressure를 측정한다.

$$P_{\text{tube}} \approx \rho gh$$

이것이 Bubbler이다.

Step 5. Closed Vessel에서는 Gas Pressure가 문제다

Bottom transmitter 하나만 사용하면

$$P_{\text{bottom}} = P_{\text{gas}} + \rho gh$$

이다.

Gas pressure 변화까지 level 변화로 오인한다.

그래서 DP transmitter를 사용하여

$$(P_{\text{gas}} + \rho gh) - P_{\text{gas}}$$

를 계산한다.

결과는

$$\Delta P = \rho gh$$

이다.

Step 6. Wet Leg와 설치 위치의 영향도 보상한다

Wet leg 또는 remote seal의 fill fluid도 hydrostatic pressure를 만든다.

그러나 높이와 density가 일정하다면 이 pressure는 constant이다.

따라서 transmitter calibration에서 offset으로 제거한다.

Step 7. 그런데 Density가 변하면?

Pressure가 증가했다.

하지만 이것만으로는

$$h \uparrow$$

인지

$$\rho \uparrow$$

인지 알 수 없다.

그래서 middle과 bottom에 pressure transmitter를 설치한다.

두 transmitter 사이의 높이는 고정되어 있으므로

$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{middle}} = \rho gx$$

에서 density를 구한다.

그 다음

$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}} = \rho gh$$

에서 level을 구한다.

$$\text{Density 계산} \rightarrow \text{Level 계산}$$

Step 8. 두 액체가 있으면 Interface를 측정한다

Tank에 heavy liquid와 light liquid가 함께 있다.
이제 알고 싶은 것은 전체 액면이 아니라 두 액체의 경계이다.
Interface가 올라가면

Heavy Liquid Height ↑

하고

Light Liquid Height ↓

한다.
따라서 pressure 변화는

$$\Delta P = (\gamma_H - \gamma_L)\Delta h$$

가 된다.
즉 두 액체의 density 차이를 이용하여 interface 위치를 알아낸다.

5 Chapter 20 핵심 기억 문장

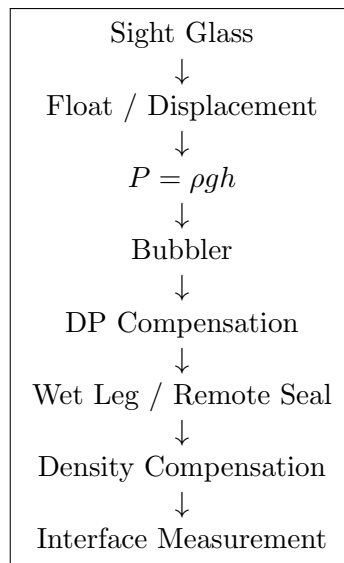
1. Sight Glass는 vessel 내부의 유체 구조를 외부 관에 그대로 재현하여 level을 직접 보여준다.
2. Float는 level을 position으로 변환한다.
3. Hydrostatic level measurement의 출발점은

$$P = \rho gh$$

이다.

4. Bubbler는 bubble 수를 측정하는 것이 아니라 낮은 purge flow에서 형성되는 back pressure를 측정한다.
5. Closed vessel에서는 DP transmitter를 사용하여 gas pressure를 제거한다.
6. Wet leg와 remote seal의 일정한 liquid head는 constant offset으로 calibration할 수 있다.
7. Density가 변하는 process에서는 pressure 하나만으로 level을 정확하게 구할 수 없다.
8. Tank Expert System은 고정 높이의 pressure difference로 density를 구하고, 그 density를 이용하여 level을 계산한다.
9. Interface measurement에서는 heavy liquid가 증가한 만큼 light liquid가 감소하며, 두 liquid의 density difference가 pressure span을 결정한다.

6 최종 압기 구조



한 문장 정리

Chapter 20은 액면을 직접 보는 Sight Glass에서 시작하여, Float로 위치를 측정하고, 정수압 $P = \rho gh$ 를 이용해 Level을 계산하며, Closed Vessel의 Gas Pressure와 Wet Leg를 차압으로 보상하고, 마지막에는 Density 변화와 Liquid-Liquid Interface까지 계산하는 과정으로 발전한다.

키워드 5개:

Sight Glass, Hydrostatic Pressure, Bubbler, Density Compensation, Interface Level