

유량/유속계측의 기본

유 갑 상

아이에스텍(주)

유량의 계측은 온도/압력과 더불어 전체설비의 운전상태 및 공정제어(process control)의 안정성 등 생산에 지대한 영향을 미치는 인자로서의 부정확한 계측은 제품 품질의 균일성, 자원 이용의 효율성을 저하시키고 생산 공정에 소요되는 증기(steam), 천연 가스(natural gas) 상거래시 공급자와 소비자간의 계량의 차이로 인한 분규를 발생시킬 수도 있는 공정변수이므로 그에 따라 빈번히 측정되는 값이기도 하다. 또한 유속의 경우도 특정의 유량계측기기(속도계)에서는 유량계측의 필수 요소이므로 이를 속도계측 유량계측에 포함하기도 한다.

일반적으로 체적유량(volumetric flow rate, Q_v)은 기지의 단면(배관의 단면 혹은 배수로의 단면)을 통과하는 유속(V)을 측정하고 이와 단면적(A)의 곱을 구하므로 계산이 가능하다.(식 1)

$$Q_v = A \times V \quad (\text{식 1})$$

여기서 A =유량을 계측하고자 하는 곳의 단면적
(배관의 직경)
 V =유속

그러므로 측정 개소의 단면적 및 유속의 정확한 측정이 유량계측의 신뢰성을 좌우한다.

본문에서는 유량에 영향을 미치는 인자에 대하여 기술하고 측정유체, 측정원리에 따른 유량계의 종류 및 계별 유량계의 장단점을 요약 정리하였다.

1. 유량에 영향을 미치는 인자

배관내 유량에 영향을 미치는 주요 인자들은 아래와 같다.

- 유체의 유속(flow velocity)
- 배관면과 접하는 유체와 배관의 마찰력(friction)
- 유동 유체의 점성(viscosity)
- 유동 유체의 밀도(density)
- 레이놀즈 수(Reynolds number)

1) 유체의 유속(flow velocity)

배관 내의 유속은 측정점에서의 수두압(head pressure)에 영향을 받으며 다른 인자들이 일정한 경우, 배관 내의 유량은 수두압에 비례한다. 그리고 유속이 일정한 경우, 배관 단면적의 증가도 유량의 증가에 기여를 한다.

2) 배관의 마찰특성(friction)

유체와 접하는 배관면의 특성(조도, 재료...)에 따라 유동에 제한요인을 제공한다. 그러므로 배관내면을 청결하고 미려하게 관리하고 보다 큰 구경의 관사용하므로 마찰력의 영향을 최소화할 수 있을 것이다.

3) 유동 유체의 점성(viscosity)

유체 내의 분자간 마찰(molecular friction)로 배관의 마찰력과 동일하게 유동에 제한요인을 제공하여 점성과 배관 마찰은 배관벽면 근처에서 유속을 감소시킨다. 대체적으로 액체의 경우 점성은 온도에 따라 변동하는 경향(온도증가, 점성감소)이 있으나 일부 유체의 경우 특정온도이상에서 점성이 증가하는 성향을 보이기도 한다. 또한 유체의 점성이 증가하면 다른 인자들이 일정한 경우 유량이 감소하는 특성을 보인다.

점성계수의 표현단위는 centipoise이며 또 다른 표현으로 동점성계수(kinematic viscosity)를 사용하며 이는 점성계수를 유체의 밀도로 나눈 값으로 단위는 centistoke이다.

4) 유체의 밀도(density)

밀한 유체일수록 원하는 유량을 유지하기 위해서 큰 수두압(head pressure)이 필요하다. 또한 측정 유체의 종류-압축성 유무에 따라 기체 혹은 액체-에 따라 유량계산의 방식도 상이하다.

5) 레이놀즈 수(Reynolds number)

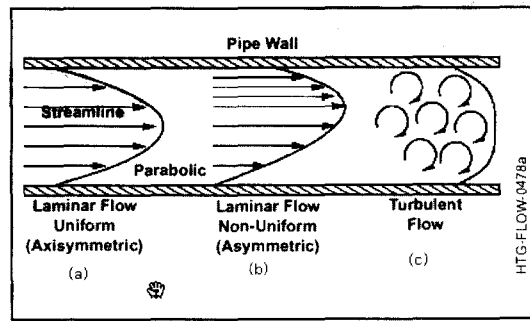
유체 유동의 양상을 구분하는 중요한 무차원수(dimensionless number)로 유동에 따른 관성력(inertia force)과 유체의 점성력(viscous force)과의 상관관계를 표현하는 대표값이다. 밀한 유체일수록 원하는 유량을 유지하기 위해서 큰 수두압(head pressure)이 필요하다. 또한 측정 유체의 종류-압축성 유무에 따라 기체 혹은 액체-에 따라 유량계산의 방식도 상이하다.

아래의 식 2는 레이놀즈 수를 나타낸다.

$$R_D = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (\text{식 2})$$

여기서 V: 유동속도, D: 관의 내경,
 ρ: 유체의 밀도, μ: 점성계수

레이놀즈 수가 2000 미만의 유동을 층류(laminar flow)라고 하고 이때 배관 내의 유속 분포는 배관의 중심에서 최대이고 벽면쪽으로 갈수록 점성력의 영향이 커지므로 유속이 느려지는 포물선의 형태를 이룬다. 층류중에도 배관의 구성에 따라 (a)와 같이 유동축선에 대칭인 속도분포를 가지는 경우(직선형태의 배관)와 (b)와 같이 비대칭형태의 속도분포를 갖는 경우(elbow 형태의 요소가 부가된 배관)가 있다. 또한 이값이 4000 이상인 경우를 난류(turbulent flow)라하고 이때는 점성력보다는 관성력의 영향이 커지므로 와류(eddy)가 발생하여 관내의 유속분포가 일정한 양상을 보인다. 그리고 이 두 가지 유동상황의 중간영역을 천이역(transition region)



<그림 1> 관내의 유속분포(velocity profile)

이라 한다.<그림 1 참조>

2. 배관 내의 유동계측방법

본문에서 언급하는 유량 계측은 일반적인 산업 현장에서 가장 흔히 접할 수 있는 배관 내의 유량계측에 주안점을 두었으나 수처리 등에서 많이 활용되는 개수로유량계(Open Channel flow-meter) 등과 같이 배관내 유동처럼 폐공간이 아닌 경우의 유량계측방법도 있다.

유량계 선정시의 고려사항은 아래와 같으며 측정하고자 상황에 부합하는 유량계의 선정은 공정 제어라는 관점에서 매우 중요한 일이므로 이를 위해서는 현장의 상태를 잘 파악하고 있는 경험 있는 엔지니어의 기여가 절대로 필요하다.

- 측정 유체의 종류(가스, 액체, 가스와 액체의 혼재)
- 측정 유체의 품질(온도, 점도, 분진함유량, 고형물질함유량,...)
- 요구되는 정확도(상거래용, 감시용, 정밀측정용,...)
- 측정관의 치수
- 유량계측범위(turn-down ratio = ?)
- 설치구조(침투식 : wetted type, 벽면부착식 : clamp-on type)
- 경제적 고려(초기 투자비 = ?, 유지보수비 = ?)

일반적으로 유량의 계측방법은 측정구역 내의 차압(differential pressure) 혹은 유속(flow

velocity)을 측정하고 이를 전자적으로 체적유량 (volumetric flow rate) 혹은 질량유량(mass flow rate)으로 계산하는 간접방식을 주로 사용하고 있다. 이러한 유량계를 4개의 군으로 구분하면 다음과 같다.

- 용적식 유량계 (positive displacement flow meter)
- 차압식 유량계 (differential pressure flow meter)
- 속도계 (velocity meter)
- 질량유량계 (mass flow meter)

3. 유량계의 종류와 특성

1) 용적식 유량계 (positive displacement flow meter)

단위 유량계측량을 일정하게 정하여진 체적으로 실행하므로 전체유량은 일정체적 과 유량계측횟수의 곱으로 구할 수 있다. 유량의 지시는 조합된 지시기(indicator)를 사용하여 표시하거나 단위계측시에 발생하는 펄스출력(pulse output)을 개별출력하거나 제어실에서 처리가 가능하다. 그러므로 용적식유량계는 자동배칭(automatic batching)이나 계산(accounting)에 유리하다. 또한 고정점의 액체유량계측이 가능하고 배관의 조건/구조에 의한 영향이 적다는 장점이 있다. 그러나 유량계의 규모상 대유량의 계측이 불가하고 기계적 유량계측방법이므로 내부부품의 마모로 인한 이물질혼입, 수밀과파 등으로 정확

도측면에서 타 유량계에 뒤진다는 약점을 가지고 있다.

용적식 유량계의 종류는 내부에서 단위유량계 측을 하는 구조의 현상에 따라 오발기어방식 (Oval gear type), 로터리 피스톤방식 (Rotary piston type), 회전디스크방식 (nutating disc type)외에 수종이 있다. <그림 2> 오발기어 유량계의 내부구조(a) 및 측정원리(b)를 보여주고 있다.

2) 차압식 유량계 (differential pressure flow meter)

산업현장에서 가장 많이 사용되는 유량계의 일종으로 전형적인 차압식 유량계는 차압(differential pressure)을 발생시키는 1차요소(primary element)와 발생된 차압을 계측한 후 이를 유량으로 환산/지시하는 2차요소(secondary element)로 구성된다.

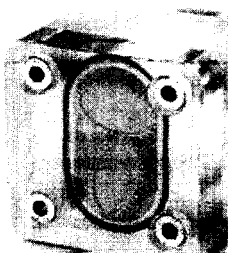
측정의 원리는 유체역학에서 사용되는 연속방정식(the Equation of Continuity : 식 3)과 베르누이 방정식(Bernoulli's equation : 식 4)을 사용하여 차압에서 유량을 계산한다.

- 연속방정식 (the Equation of Continuity)

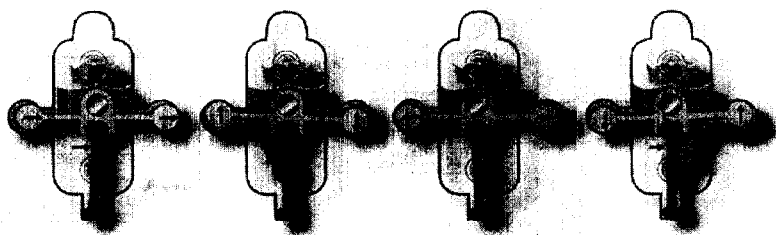
가정 : 유체의 밀도가 일정하다
(비압축성유동)

$$Q_v = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (\text{식 3})$$

여기서 V_1, A_1 : 1지점에서의 면적/속도
 V_2, A_2 : 2지점에서의 면적/속도



(a) 오발기어 유량계의 내부구조



(b) 오발기어 유량계의 동작원리

<그림 2>

● 베르누이방정식 (Bernoulli's equation)

$$\left[\frac{P}{\rho} \right] + \left[\frac{V^2}{2} \right] = H = \text{일정} \quad (\text{식 4})$$

여기서 $\left[\frac{P}{\rho} \right]$: 압력수두 (potential head)

$\left[\frac{V^2}{2} \right]$: 속도수두 (velocity head)

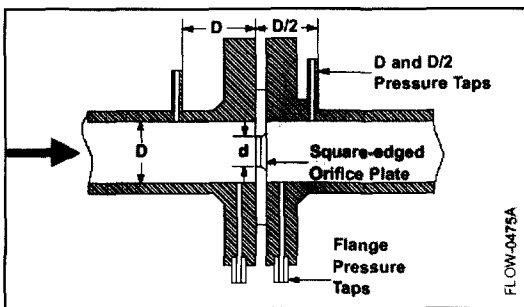
H : 전체수두압력 (total head pressure)

차압식 유량계의 1차요소에는 오리피스 (orifice plate), 벤투리관 (venturi tube), 유동노즐 (flow nozzle), 피토티관 (pitot tube), 가변면적유량계 (variable-area flow meter) 등이 있다.

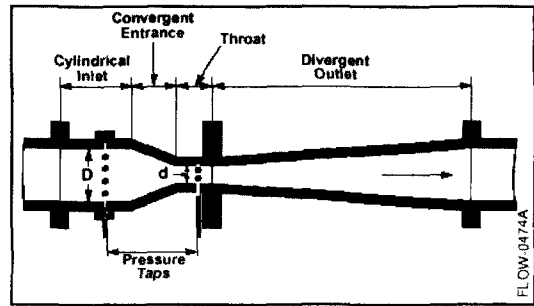
① 오리피스 (orifice plate)

D/D2와 Flange pressure Taps의 차압을 측정하고 이를 2차요소에서 유량으로 환산한다.

- 용도: 액체/기체/증기
- 장점
 - 구조가 간단
 - 가격이 저렴
 - 가장 많이 보급
 - 운용/교정에 관련된 규격이 많다
- 단점
 - 압력측정 tap의 막힘현상
 - 압력손실 (pressure loss)이 크다
 - 장시간 운용시 신뢰성저하 (마모)
 - 이물질의 축적
 - 단방향유량계측



<그림 3> 오리피스 (orifice plate)



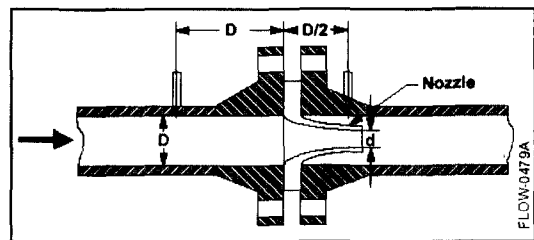
<그림 4> 벤투리관 (venturi tube)

② 벤투리관 (venturi tube)

- 용도: 액체/기체/증기
- 장점
 - 압력손실 (pressure loss)이 작다
 - 대구경 배관에 적용이 가능
 - 정확도가 높다
 - 어느 정도의 이물질이 존재하는 경우도 유량계측이 가능
 - 운용/교정에 관련된 규격이 많다
- 단점
 - 규모가 크고 고가
 - 압력측정 tap의 막힘현상
 - 장시간 운용시 신뢰성저하 (마모)
 - 단방향유량계측

③ 유동노즐 (flow nozzle)

벤투리관의 변형형태로 난류가 심한 ($Re > 50000$) 고속/고온의 증기의 유량계측에 적용이 가능하며 압력손실도 오리피스와 벤투리관의 중간정도이다.



<그림 5> 유동노즐 (flow nozzle)

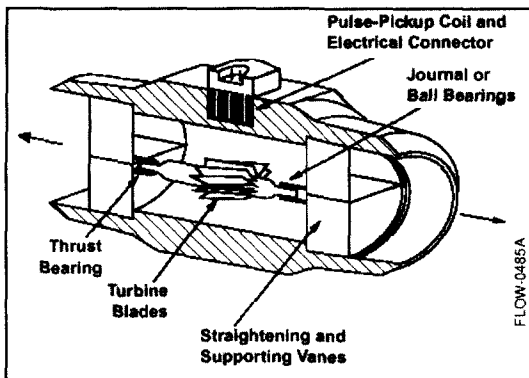
- 용도 : 기체
- 장점
 - 압력손실 (pressure loss)이 작다
 - 고온/고속의 유량계측 가능
 - 정확도가 높다
 - 운용/교정에 관련된 규격이 많다
- 단점
 - 고가
 - 압력측정 tap의 막힘현상
 - 장시간 운용시 신뢰성저하(마모)
 - 단방향유량계측

3) 속도계 (velocity meter)

배관 내의 유량을 구하기 위하여 유속을 측정하는 속도계는 유속에 비례한 신호를 발생하고 이를 이용하여 유량을 환산한다. 유량을 구하는 식은 식 1과 같다. 속도계의 경우는 차압을 유속을 환산하면서 포함되는 평방근(square root) 계산의 오차를 제거할 수 있으므로 차압식 유량계보다 유량에 비례하는 선형적인 출력이 가능하고 측정할 수 있는 유량영역도 넓은 특성을 보인다.

이러한 속도계의 종류는 터빈 유량계 (turbine meter), 전자유량계 (electromagnetic flowmeter), 와류유량계 (vortex meter), 초음파 유량계 (Ultrasonic flowmeter) 등이 있다.

① 터빈 유량계 (Turbine meter)



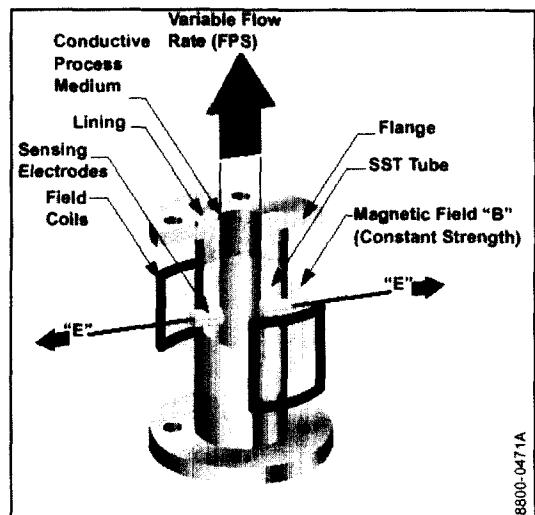
<그림 6> 터빈 유량계 (Turbine Meter)

내부구조는 베어링 (bearing)으로 지지된 금속 회전자 (Rotor)가 하우징내에서 회전을 하며 이 회전수를 자석이나 Hall effect 소자를 이용하여 검출하고 회전수당 통과하는 단위부피와 회전수를 곱하여 유량을 측정한다. 측정유체가 기체인 경우는 온압보정기 (volume corrector)를 부착하여 사용하는 것이 필수적이다.

- 용도 : 기체 (주용도) / 액체
- 장점
 - 응답속도가 빠르다
 - 정확도가 좋다
 - 디지털신호 출력
 - 소형으로 대용량의 유량측정가능
 - 사용온도범위가 넓다
- 단점
 - 베어링의 마모
 - 고가
 - 슬러리 유체 (점착성유체)에는 적용이 불가
 - 단방향유량계측
 - 직관부 필요

② 전자 유량계 (Electromagnetic Flowmeter)

패러데이의 전자유도법칙을 이용하여 유체의



<그림 7> 전자유량계 (Electromagnetic Flowmeter)

유동에 따른 기전력을 측정하고 이 측정된 정보로부터 유량을 산출하는 방식을 택하고 있다. 아래는 패어데이의 전자유도법칙을 나타낸다.(식 5)

$$E = k \cdot B \cdot D \cdot V \quad (\text{식 5})$$

여기서 E : 유동에 의한 기전력,
 B : 자속밀도
 D : 전극사이의 거리,
 V : 유체의 평균유속

- 용도 : 전도성 액체
- 장점
 - 응답속도가 빠르다
 - 정확도가 좋다
 - 압력손실이 없다
 - 가동부가 없어 신뢰성이 높다
 - 유량측정범위가 넓다
 - 직관부의 길이가 짧아도 측정가능
 - 라이닝채용으로 부식성유체도 적용가능
- 단점
 - 전기전도성이 낮은 유체는 적용불가
 - 가격이 고가
 - 라이닝손상으로 인한 절연파괴가능성
 - 이물질에 의한 전극코팅
 - 단방향유량계측

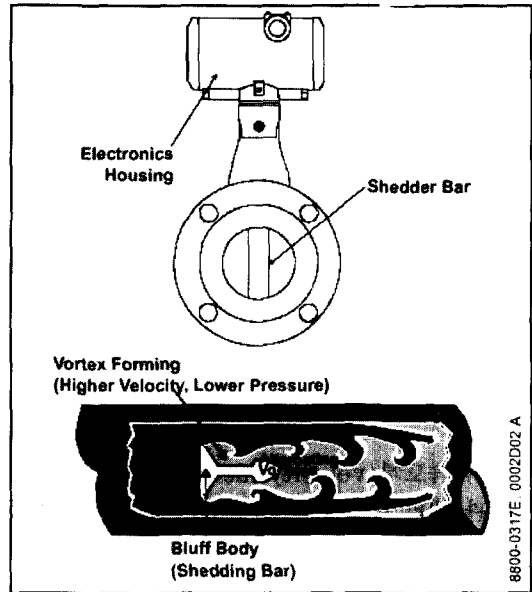
③ 와류 유량계 (Vortex meter)

von Karman 효과를 이용한 유량계로 배관 내에 의도적으로 와류를 발생시키는 와류발생체 (Shedding bar)를 삽입하고 유동에 의한 와류 발생주파수를 측정하여 이를 유속으로 환산하여 유량을 구한다. 아래의 식은 와류 발생주파수와 유속의 상관관계를 보여주고 있다.(식 6)

$$f = S_t \cdot \frac{V}{d} \quad (\text{식 6})$$

여기서 f : 와류발생 주파수, d : 유동폭,
 V : 와류발생체부근의 평균유속,
 S_t : Strouhal number

Strouhal수는 소용돌이 발생체의 형상 및 크



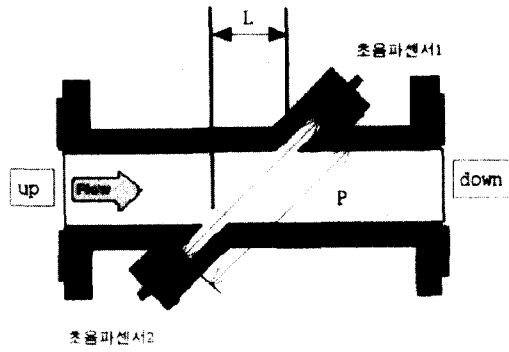
<그림 8> 와류 유량계 (Vortex Meter)

기에 따라 다소차이는 있지만 20000~50000 사이의 레이놀즈 수 이상에서는 거의 일정한 값을 가진다. 추가로 삽입되는 와류발생체의 단면형상은 원형, 삼각형, 사다리꼴 등이 있으며 발생주파수를 측정은 압전소자, 서어미스터, 정전용량측정 방식 등이 있다.

- 용도 : 액체/기체/증기
- 장점
 - 구조가 간단하고 기계적 가동부가 필요없다
 - 정확도가 좋다
 - 압력손실이 없다
 - 유량측정범위가 넓다
- 단점
 - 슬러리 유체/맥동이 있는 유체/점착성 유체 적용불가
 - 가격이 고가

④ 초음파 유량계 (Ultrasonic flowmeter)

초음파 유량계는 시간차법 (Transit-time method) 및 도플러법 (Doppler Method) 등이 있다. 우선 시간차법은 배관의 대향벽면에 개별



〈그림 9〉 시간차법 초음파유량계

로 송수신을 하는 초음파 센서를 설치하고 유동 방향과 그 역방향의 초음파 전달시간 차이를 측정하고 이에서 유속을 계산한다. 사용되는 초음파 센서의 크기는 유체의 특성 및 측정경로의 크기에 따라 상이한 주파수를 사용한 센서를 사용한다. 유속의 계산방법은 아래와 같다.(식 6)

$$t_{up} = \frac{P}{c} \quad t_{up} = \frac{P}{c - V \sin \theta}$$

$$t_{dn} = \frac{P}{c} \quad t_{dn} = \frac{P}{c + V \sin \theta}$$

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn} = 0 \quad \Delta t = t_{up} - t_{dn} \quad (\text{식 7})$$

유동이 없을 때 유동이 있을 때

- 여기서 t_{up} = 상류측 전달시간
- t_{dn} = 하류측 전달시간
- V = 유체의 유속
- c = 유체의 음속
- t = 전달 시간차
- P = 초음파 진행거리
- L = 축방향 초음파센서 사이 거리
- θ = 초음파센서의 경사각

결과적으로 유속 V 는 아래와 같다.(식 8)

$$\therefore V = \frac{P^2}{2L} \left(\frac{1}{t_{dn}} - \frac{1}{t_{up}} \right) = \frac{P^2}{2L} \left(\frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{dn} \times t_{up}} \right) \quad (\text{식 8})$$

두 번째로 도플러법은 송신부에서 방출된 초음파의 주파수와 유동하는 유체속의 기포나 입자에 반사되면서 생기는 주파수성분의 차이를 검출하여 유속을 계산한다. 또한 센서의 설치방법에 따라 삽입식(wetted type)과 벽면부착식(clamp-

on type)이 있다.

- 용도 :
 - 액체 (wetted type, clamp-on type) / 기체 (wetted type) / 증기 (wetted type)
- 장점
 - 비접촉방식으로 기계적 가동부가 필요없다
 - 유지/보수가 간단하다
 - 다회선방식 (multi-path method)을 적용하므로 정확도를 높일수 있다
 - 유량측정범위가 넓다
 - 10mm < 적용 배관경 < 10m
 - 측정대상물의 제약이 작고 고온적용도 가능
 - 압력손실이 거의 없다
- 단점
 - 비교적 긴 직관부를 요한다

4) 질량유량계 (mass flow meter)

질량유량의 계측에는 아래의 두가지 방법이 존재한다.

- 간접적 계측 방법

$$Q_M = Q_V \cdot \rho \quad (\text{식 9})$$

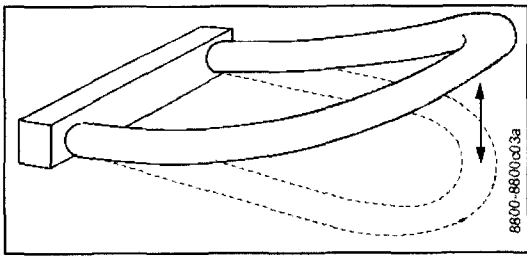
여기서 Q_V : 체적유량, Q_M : 질량유량, ρ : 밀도

유량계의 구성도 유속을 측정하는 부분 및 밀도를 측정하는 부분으로 구성되면 이 두측정기의 결과로 질량유량을 계산하고 출력하는 회로부로 구성된다. 그러나 고온 혹은 고압의 경우는 온압보상외에 압축계수를 구하고 이 또한 보상을 해야하는 번거로움 있다.

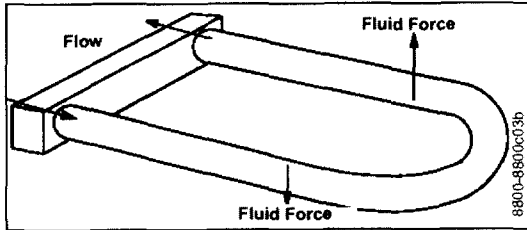
- 직접적 계측 방법
 - 코리올리스 질량 유량계 (Coriolis Mass Air flow meter)
 - 열질량유량계 (Thermal Mass Flow meter)

① 코리올리 질량 유량계 (Coriolis Mass Air flow meter)

공진주파수로 진동하고 있는 배관 내를 흐르는 유체의 질량에 의해 배관을 비트는 코리올리 힘



<그림 10> 코리올리 센서관(Coriolis Sensor Tube)



<그림 11> 코리올리 센서관의 작용 유체력

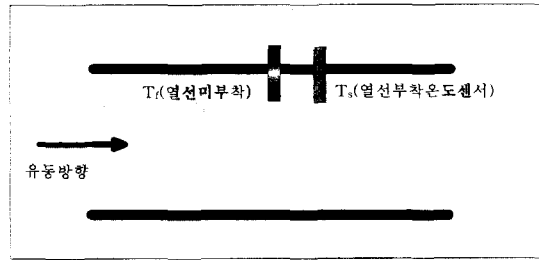
이 작용하고 이 힘은 관로를 흐르는 질량유량과 비례관계가 성립한다. 그러므로 이 때의 힘 혹은 비틀림양을 측정하므로 질량유량을 구할 수 있다.

- 용도 : 액체
- 장점
 - 정확도가 좋다
 - 유량외에 밀도의 측정도 가능하다.
 - 작동원리상 유체의 점도/밀도의 영향을 받지 않는다.

② 열질량유량계 (Thermal Mass Flow meter)

측정의 원리는 배관 내에 히터(heater)가 부착된 온도센서와 부착되지 않은 온도센서를 각각 설치하여 유동이 존재할 때 각각의 온도센서의 온도차를 검출하여 질량유량을 측정할 수 있다. 유체의 질량유량이 작으면 히터로부터 유체에 빼앗기는 열이 적으므로 두 온도센서의 온도차가 커지고 유량이 많으면 두 온도센서의 온도차가 작아지는 원리를 이용한 것이다.

- 용도 : 기체(액체가능)
- 장점
 - 응답속도가 빠르다

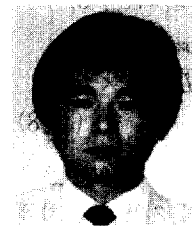


<그림 12> 열질량유량계의 유량측정원리

- 압력/온도의 영향이 없다.
- 저유량측정도 가능
- 단점
 - 맥동이 있는 유체/점착성 유체에의 적용 제한
 - 단방향유량계측

지금까지 산업현장에서 많이 사용되는 초음파 유량 및 유속계의 종류, 측정원리 및 개별 기기의 장단점을 기술하였으나 위에서 언급한 내용이 유량계 전부를 소개한 것은 아니며 이외에 개수로 유량계, 반도체 센서(MEMS sensor)를 활용한 mass air flow sensor, clamp-on 방식의 유량계,.... 등 수 많은 종류의 기기들이 현재 시장에서 적용되어지고 있다.

저자 소개



劉 甲 相

1958년 1월 9일생, 1981년 2월 광운대학교 전자재료공학과 졸업, 1983년 2월 연세대학교 공과대학원 전기공학과 졸업, 1984년~1985년 : 금성계전연구소, 1985년~1991년 : 금성전기 연구소, 1991년~1992년 : (주)럭키 세라믹 연구소, 1993년 4월 19일 : 아이에스텍(주)설립, <주관심 분야 : 센서, PROCESS 제어/계측, 원격제어계측>