

원자로 열유체 실험 (5)

Department of Nuclear Engineering, Seoul National Univ.
Hyoung Kyu Cho

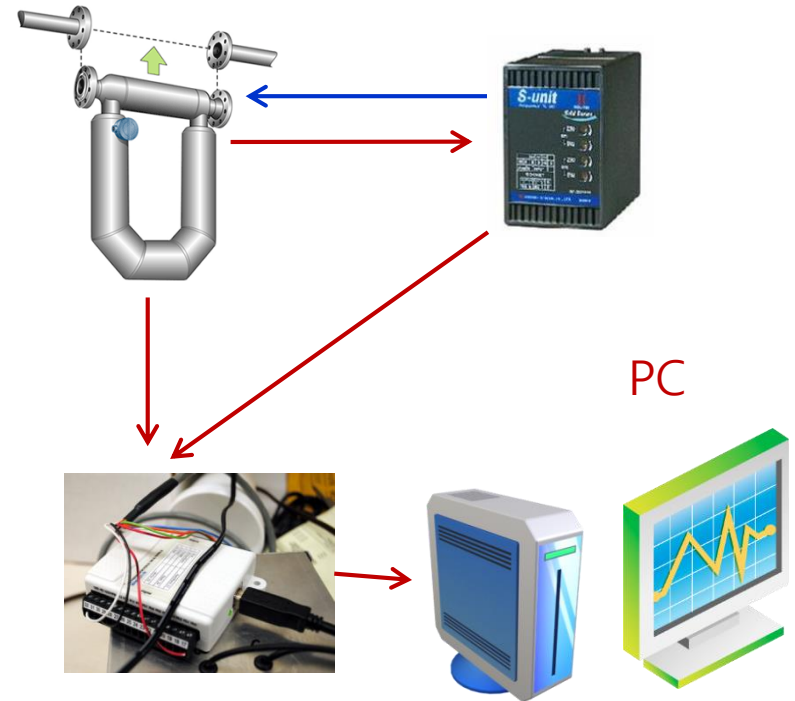
유량 및 유속 측정 방법

❖ 평균 유량 측정 기기

- ✓ 차압 측정식: orifice 유량계, venturi 유량계, flow nozzle 유량계
- ✓ Turbine 유량계
- ✓ Vortex 유량계
- ✓ 전자기 유량계
- ✓ 초음파 유량계
- ✓ Coriolis 질량 유량계

❖ 국소 유량 측정 기기

- ✓ Pitot 튜브
- ✓ How wire/hot film
- ✓ LDV (Laser Doppler Velocimetry)
- ✓ PIV (Particle image velocimetry)



유량 및 유속 측정 방법

❖ 차압 측정식 유량계

<https://www.youtube.com/watch?v=oUd4WxjoHKY>



유량 및 유속 측정 방법

❖ 차압 측정식 유량계

✓ Orifice 유량계

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

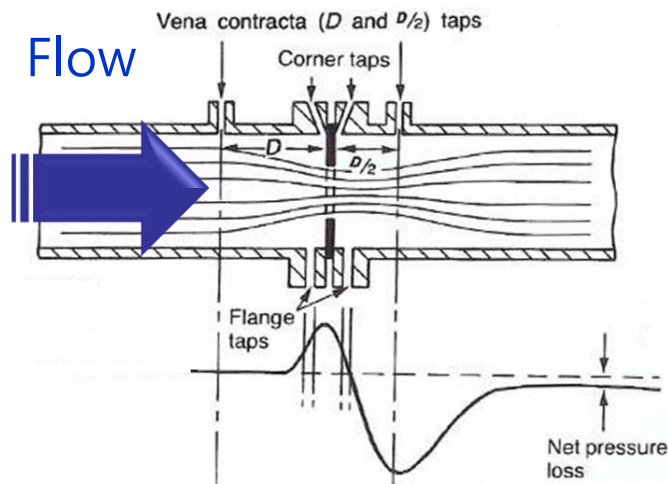
$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2$$

$$Q_1 = Q_2 = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad V_2 = \frac{Q}{A_2}$$

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

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



For laminar, inviscid flows

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

For real flows

Discharge coefficient

유량 및 유속 측정 방법

❖ 차압 측정식 유량계

✓ Orifice 유량계

- Discharge coefficient vs. flow coefficient
 - 복잡한 유동으로 A2 정의가 어려움
 - Flow coefficient C_f 도입

$$C_d \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2^2 / A_1^2)}} = C_f A_o$$

$$Q = C_f A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Flow coefficient:
Orifice 제작자가 제공

- 권장 압력탭 위치
 - 상류: 1 D
 - 하류: 0.5 D

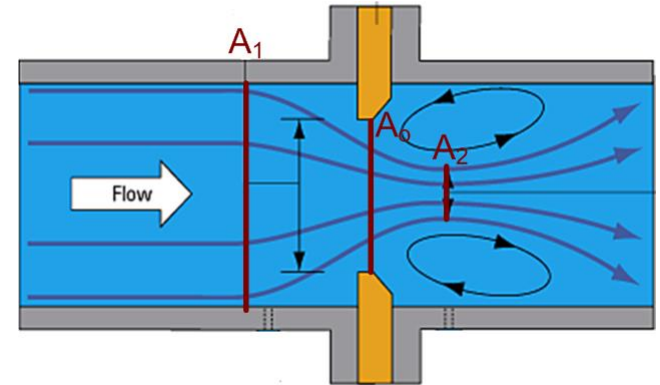


Table 3-1. Orifice Flow Coefficient

Pipe Size (Inches)	Orifice Bore (Inches)	Nominal Flow Coefficient K
1/2	0.020	0.670
	0.035	0.642
	0.065	0.628
	0.113	0.612
	0.150	0.608
	0.196	0.608
	0.270	0.619
	0.340	0.642
1	0.150	0.604
	0.270	0.604
	0.020	0.645
	0.035	0.635
	0.065	0.620
	0.113	0.605
	0.196	0.603
	0.340	0.605
	0.500	0.630
	0.612	0.666
1-1/2	0.735	0.715
	0.500	0.611
	0.612	0.614
	0.750	0.623
	0.917	0.650
	1.127	0.714

유량 및 유속 측정 방법

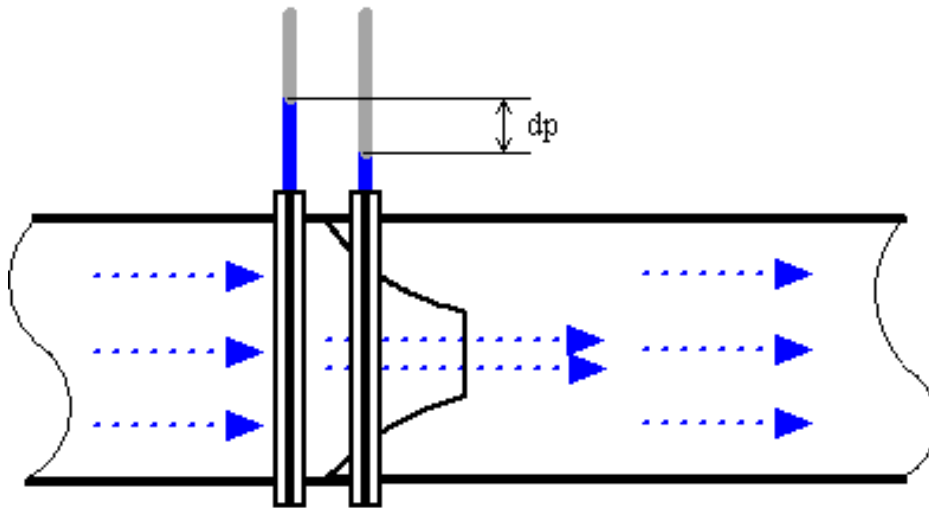
❖ 차압 측정식 유량계

✓ Venturi 유량계

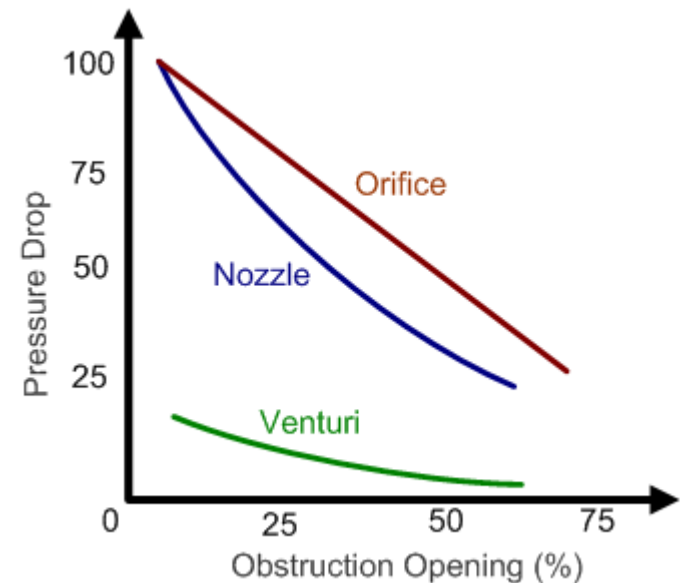
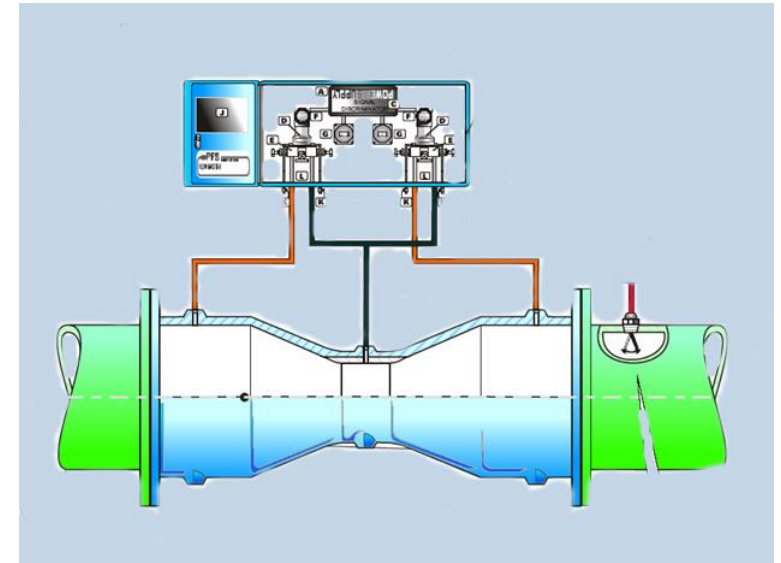
- Orifice에 비해 압력 강하가 작음
- 원전 주급수 유량

✓ Flow nozzle

- 고속 증기 유동에 적용 가능



www.EngineeringToolBox.com



유량 및 유속 측정 방법

❖ 차압 측정식 유량계

4. 사건 원인분석

4.1 원자로 수동정지 원인

- 원자로출력(BSCAL)과 발전기 출력 측정치간 편차 발생
 - 원자로출력 95%(3,783MWth)에서 발전기 출력 100% (1,455MWe) 지시
 - 검토결과 원자로출력 80% 이상 범위에서 발전기 출력이 원자로출력보다 약 3~5% 크게 측정됨을 확인
 - * 발전기 출력 100% 도달 상태에서 일차측 열평형법과 터빈 주요 운전변수를 설계와 비교하는 방법을 통해 실제 원자로 출력은 각각 98.3%, 100%로 평가됨
 - 원자로출력(BSCAL) 계산에 사용되는 주급수 유량 측정용 벤추리의 측정값이 설계유량 대비 낮게 지시함을 확인

4.3 주급수 유량 측정용 벤추리의 측정값 오류 원인

- 주급수 유량 측정용 벤추리 설계·제작 오류 및 교정 미흡
 - 분해점검결과, 증기발생기 2번 주급수 유량 측정용 벤추리 노즐과 배관사이의 편심, 벤추리관 출구측 Recovery Cone-배관 간극차 확인 ⇒ 유량편차 발생에 기여
 - 해외전문가 자문 결과, 저압탭 밀봉부 위치와 소재(테프론)가 용접과 후열처리에 영향을 받아 파손 및 밀봉성능 저하가능성 있음 ⇒ 저압탭 누설로 인한 차압 감소로 유량이 적게 측정되는데 기여
 - 교정시험 과정에서 관련기술기준(ASME PTC-6) 권고사항 미반영으로 교정 신뢰도 저하

유량 및 유속 측정 방법

❖ 차압 측정식 유량계

○ BSCAL 계산 방법

- 이차측 증기발생기를 통과하는 유체의 열평형 방법을 이용하여 원자로 출력에 의해 원자로 출력(시운전시 20% 이상, 정상운전 중 60% 이상) 영역에서 발전소 기준출력으로 일차측출력과 터빈출력 교정 등에 사용됨.

- 계산식 : $BSCAL = EG(1) + EG(2) + EL - EC$,

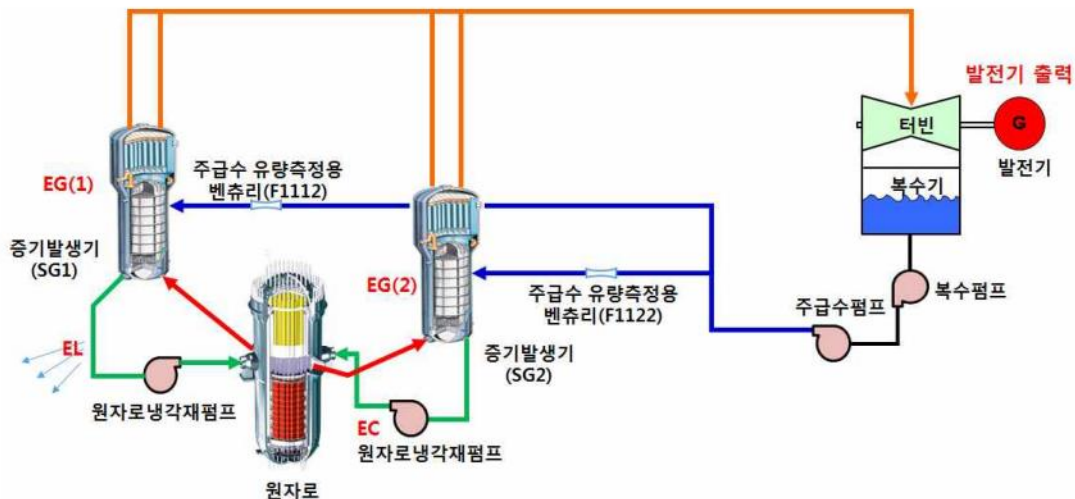
단, $EG(i) = i$ 번째 증기발생기로 전달된 출력

= 출구증기 엔탈피 × 출구 유량 + 취출수 엔탈피 × 취출수 유량

- 급수 엔탈피 × 급수 유량,

EL = 측정된 RCS전체 에너지 손실항의 합,

EC = 측정된 RCS전체 에너지 입력항의 합 (RCP 등).



| 기대효과

- 손실 열출력 회복

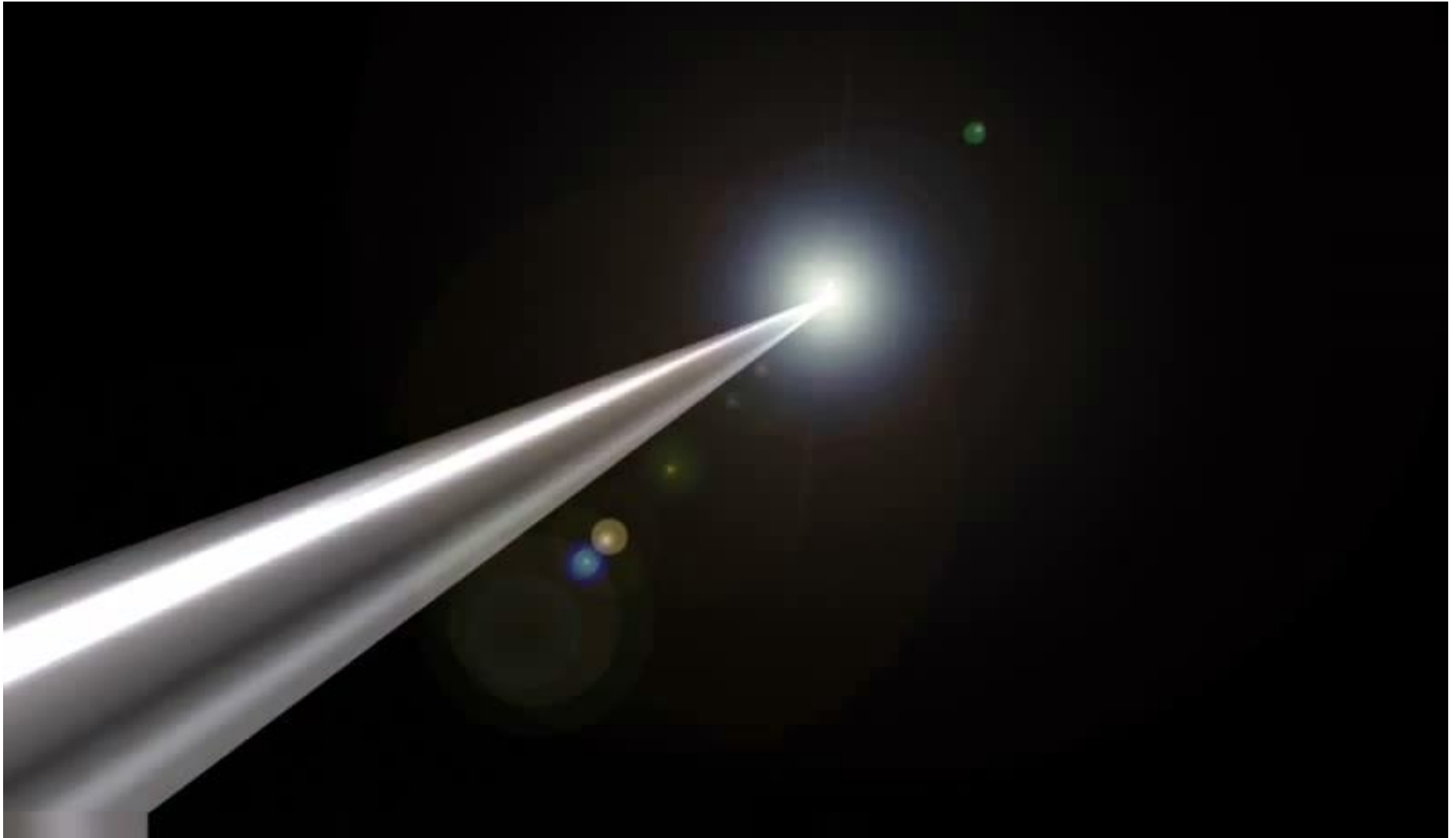
주증기유량 기반의 원자로열출력 적용시 주급수 벤츨리에서의 이물질 침착 현상에 따른 전기출력 손실 예방 가능. 파울링으로 인한 손실이 평균적으로 0.5%일 경우, 주증기유량기반 열출력 적용으로 예상되는 회복 전기출력은 APR1400 발전소 호기당 7MWe

$7\text{MWe} * 1,000\text{kWe/MWe} * 24\text{hr/일} * 365\text{일} * 67.9\text{원/kWh} * 0.8(\text{이용률}) = 33.3\text{억/년.호기}$

유량 및 유속 측정 방법

❖ Vortex flow meter (Vortex 유량계)

<https://www.youtube.com/watch?v=GmTmDM7jHzA>



유량 및 유속 측정 방법

❖ Vortex flow meter (Vortex 유량계)

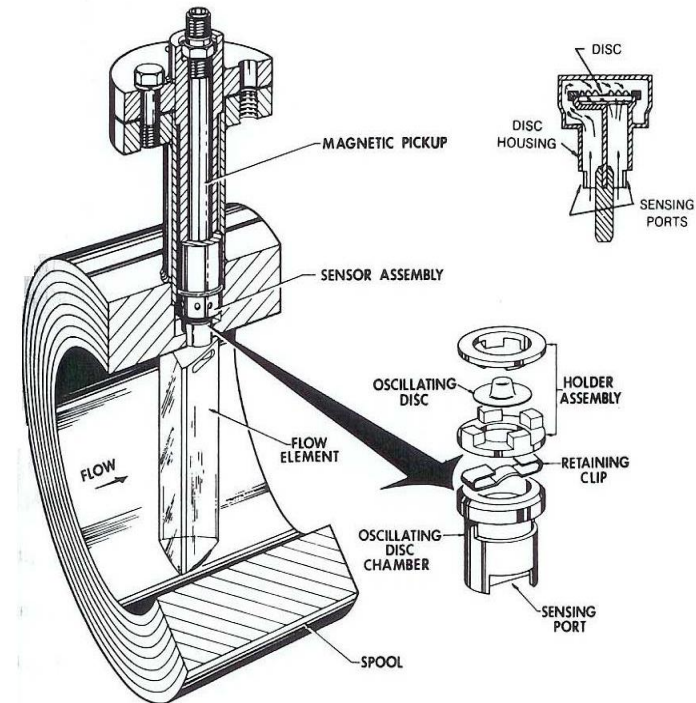
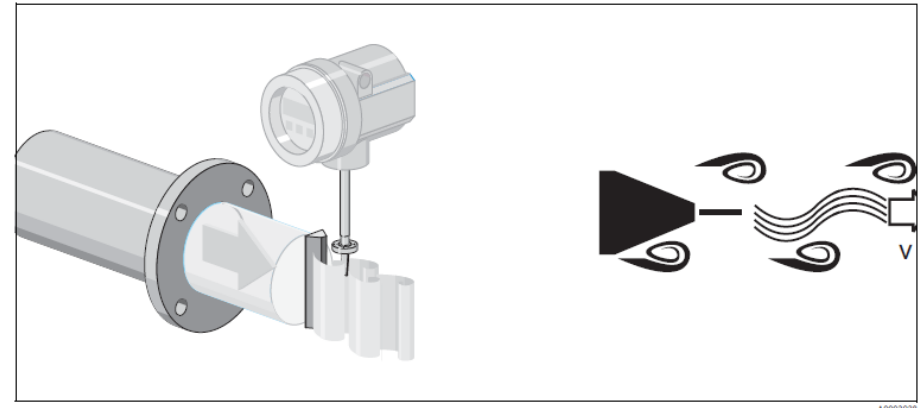
✓ Karman Vortex $\propto$ 유량

$$N_{st} = fd / V = Const.$$

$$Q = VA = fK$$

✓ 특성

- 물, 기체, 증기
- 사용 압력 < 50 bars
- 압력강하가 작음
- 진동이 심한 경우, 오차가 커짐



유량 및 유속 측정 방법

❖ Electro Magnetic Flow Meter (전자기 유량계)

<https://www.youtube.com/watch?v=f949gpKdCI4>



유량 및 유속 측정 방법

❖ Electro Magnetic Flow Meter (전자기 유량계)

✓ Faraday's electromagnetic theory

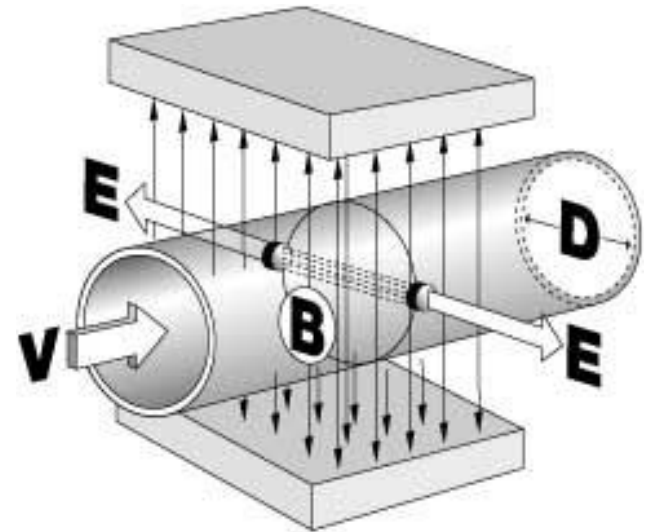
- 전도성 유체가 자기장을 통과할 경우 전압 발생
- 전자기 유도 전압 $\propto$ 유량

$$E = B \cdot l \cdot V$$

전압 $\uparrow$ $\uparrow$ 자기장 $\nwarrow$ 전극 간 거리

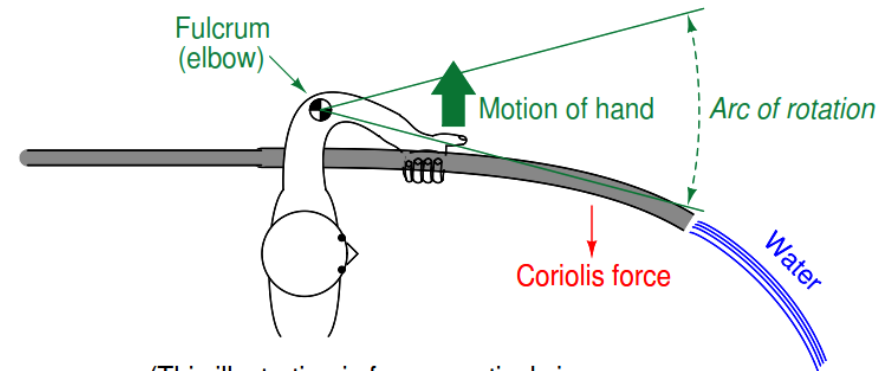
✓ 특성

- 전도성 유체에만 사용 가능
 - Freon (X), gas (X), steam (X)
- 압력 강하 없음
- $T < 200^{\circ}\text{C}$
- Liquid metal (액체 금속) 적용 가능
- 전극 외 파이프는 전기적 절연 상태가 유지되어야 함.
- 슬러리 및 입자를 포함한 유체에 적용 가능



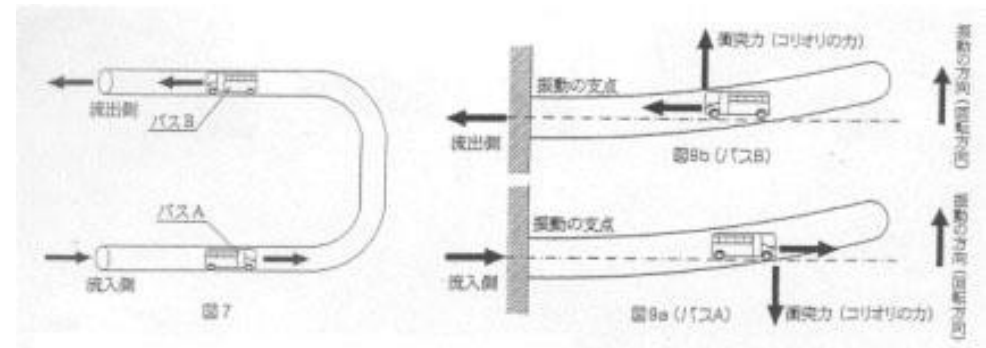
유량 및 유속 측정 방법

❖ Coriolis Mass Flow Meter (Coriolis 유량계)



(This illustration is from a vertical view, looking down. The Coriolis force acts laterally, bending the hose to the side.)

InstrumentationTools.com



유량 및 유속 측정 방법

❖ Coriolis Mass Flow Meter (Coriolis 유량계)

https://www.youtube.com/watch?v=5jA9h3hcl_s&ab_channel=FlowControlMagazine



유량 및 유속 측정 방법

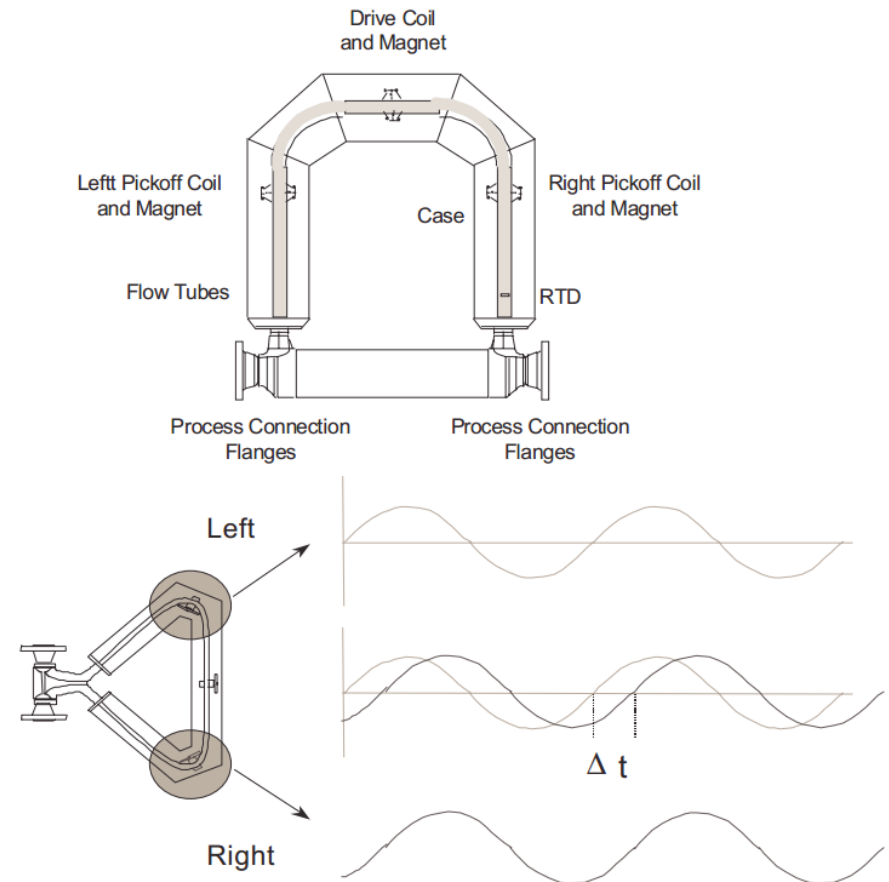
❖ Coriolis Mass Flow Meter (Coriolis 유량계)

✓ Vibration frequency $\propto$ fluid density

✓ Phase shift $\propto$ mass flow rate

✓ 특성

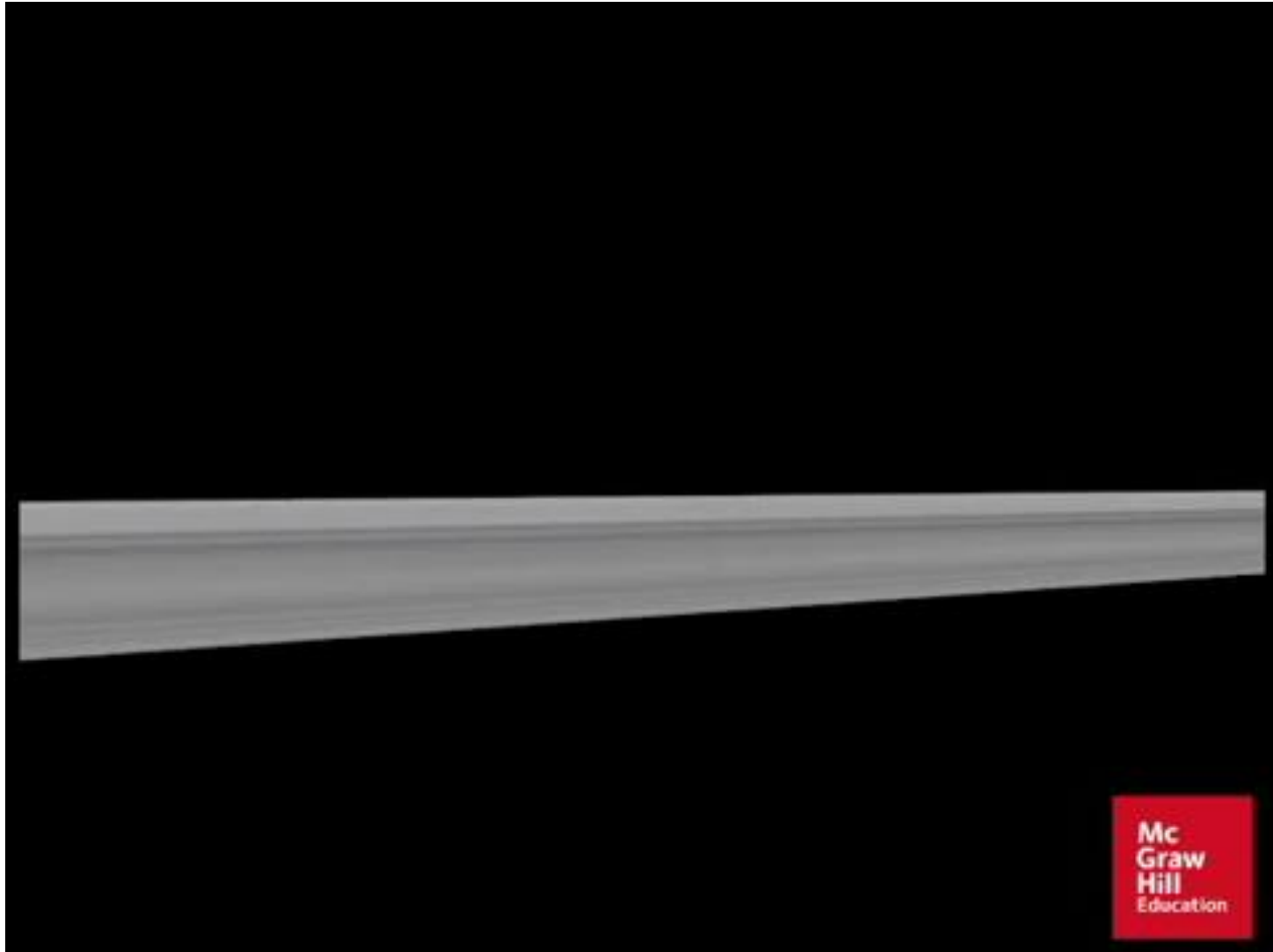
- 질량 유량을 직접 측정
- 2상 유동 적용 가능
- 직관 부위가 필요하지 않음
- 고온, 고압 조건에 적용 가능
 - 280 bars, 400°C
- 압력 강하가 큼
- 매우 비쌈



유량 및 유속 측정 방법

❖ Turbine flow meter (터빈 유량계)

<https://www.youtube.com/watch?v=OnrHinGZi5A>



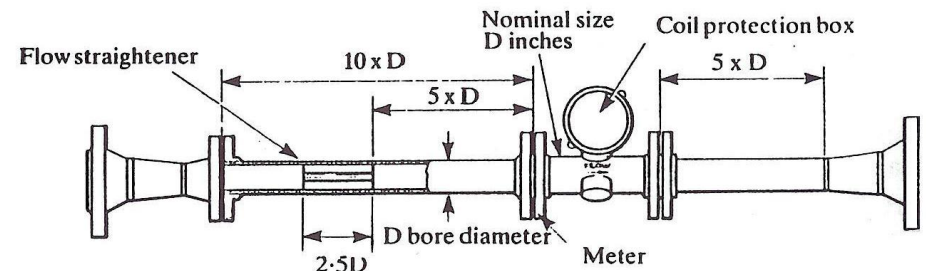
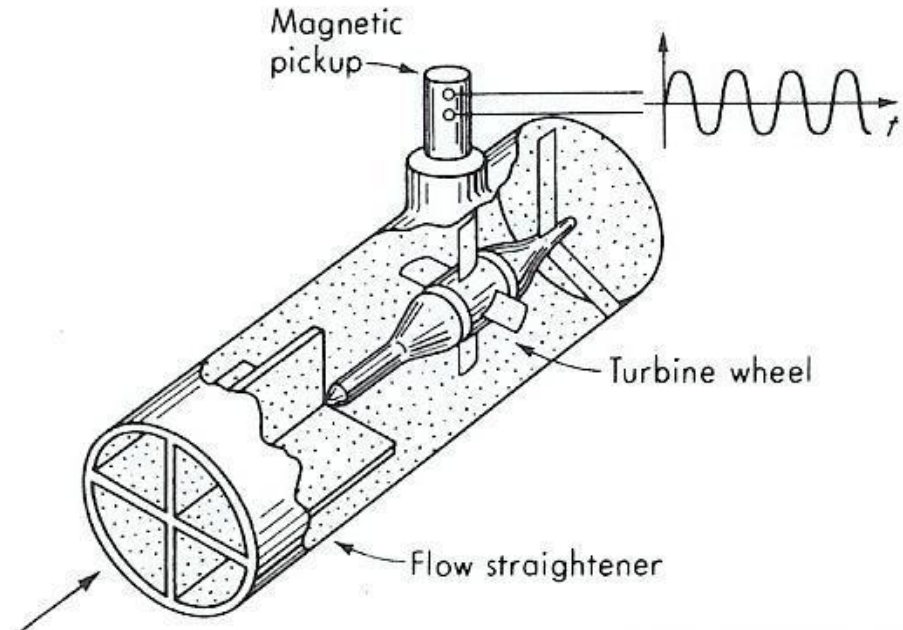
유량 및 유속 측정 방법

❖ Turbine flow meter (터빈 유량계)

- ✓ 임펠러 (터빈) 회전수 $\propto$ 유량
- ✓ 임펠러 회전수 $\Rightarrow$ 전기 신호
 - Magnetic pick-up
 - Capacitance pick-up, optical pick-up

✓ 특성

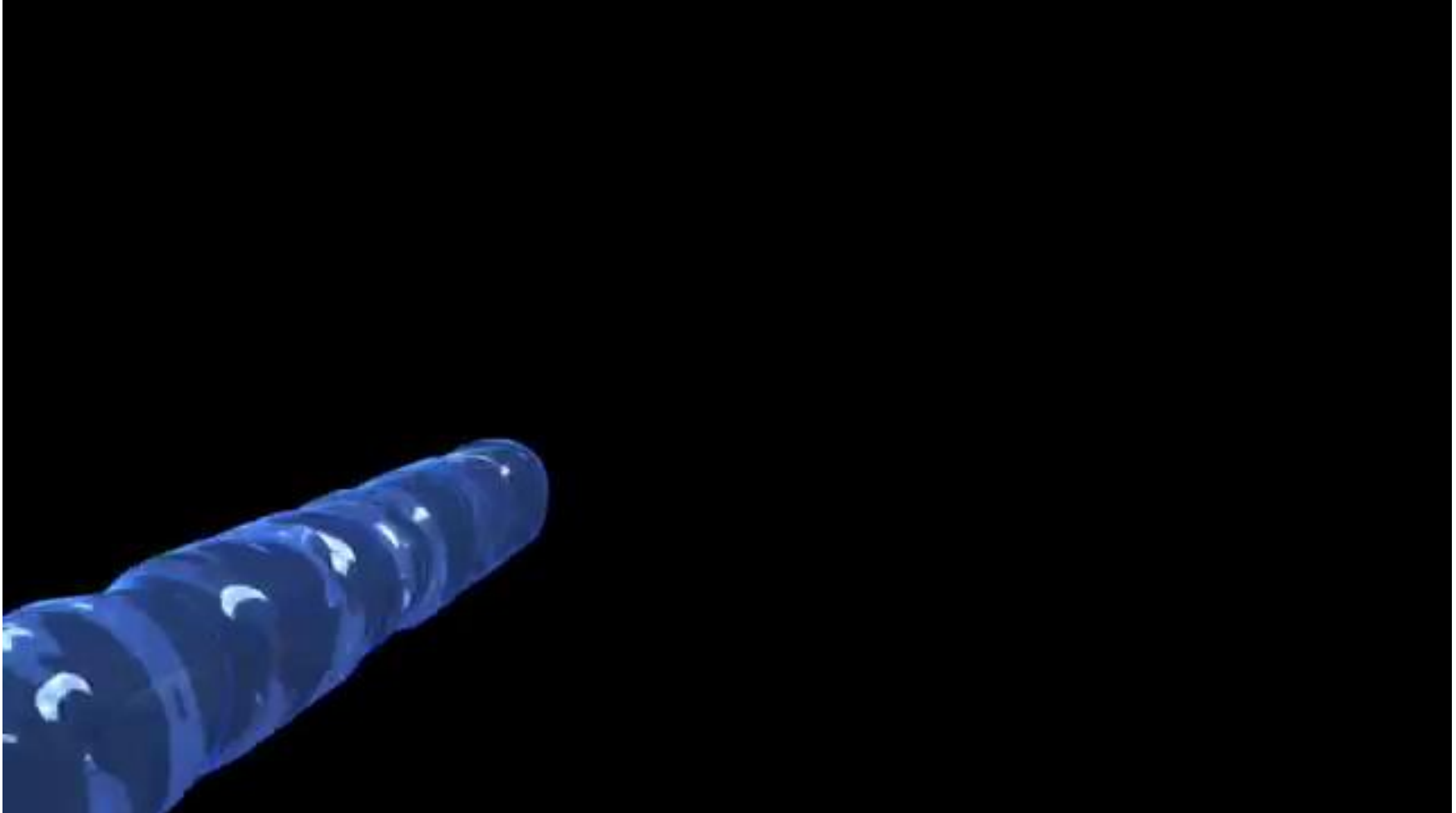
- 높은 온도, 압력 조건 적용
- 저속 측정 가능
- 증기 유동에는 사용하지 못함
- 장시간 사용시, 베어링 오염 및 마모
- 유량 범위를 초과할 경우
pick-up 코일 손상



유량 및 유속 측정 방법

❖ Ultrasonic Flow meter (초음파 유량계)

<https://www.youtube.com/watch?v=Bx2RnrfLkQg>



유량 및 유속 측정 방법

❖ Ultrasonic Flow meter (초음파 유량계)

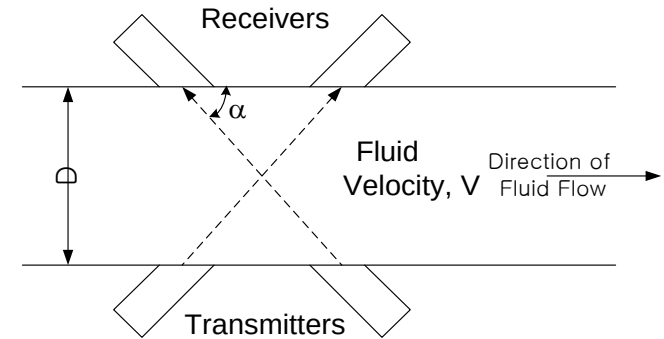
✓ 초음파 빔의 시간 차 $\propto$ 유량

$$t_{up} = \frac{D}{\sin \alpha \cdot (c - V \cos \alpha)} \quad t_{down} = \frac{D}{\sin \alpha \cdot (c + V \cos \alpha)}$$

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn} \approx \frac{2DV \cos \alpha}{c^2}$$

✓ 특성

- 대형 배관에 적용 가능 (< 4 m)



유량 및 유속 측정 방법

❖ 국소 속도 측정 방법: Pitot tube

✓ Bernoulli principle (베르누이의 원리)

- Stagnation point: 속도가 0이 되는 지점
- Total pressure – static pressure (전압-정압)

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + gz_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + gz_2$$

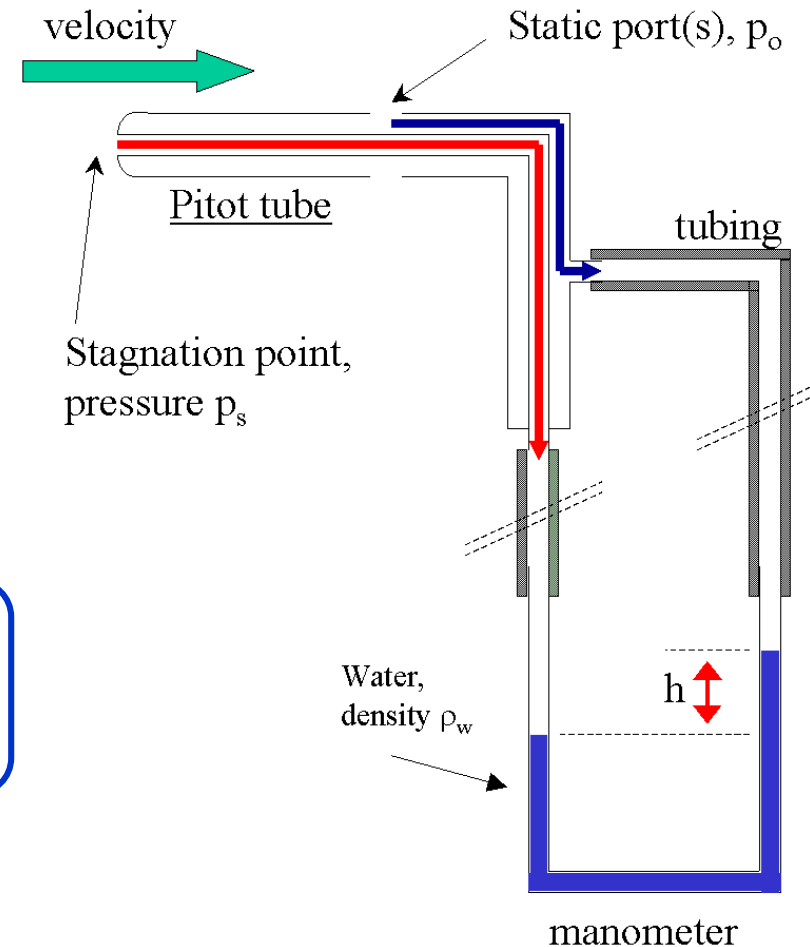
$$z_1 = z_2 \quad V_2 = 0 \quad P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

➡

$$V_1 = K \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Pitot flow coefficient, 제작자가 제공 ?

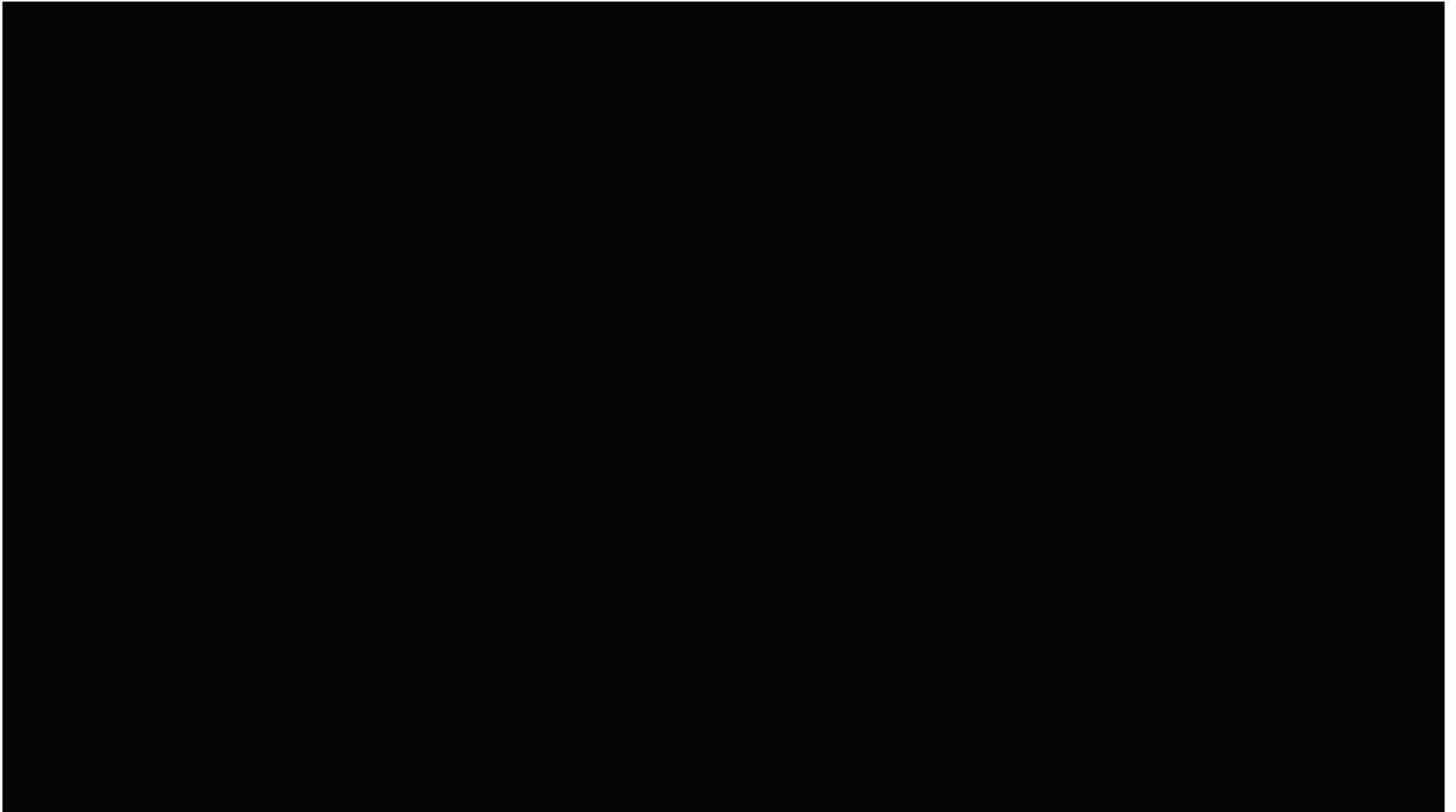




유량 및 유속 측정 방법

❖ 유량 측정을 위한 Pitot tube

https://www.youtube.com/watch?v=D6sbzkYq3_c



유량 및 유속 측정 방법

❖ 국소 속도 측정 방법: Hot wire/hot film

✓ 열선 유량계 원리

- Convective heat transfer coefficient $\propto$ flow velocity (King's law)

$$Q = hA(T_w - T_f) \quad h = C_0 + C_1\sqrt{V}$$

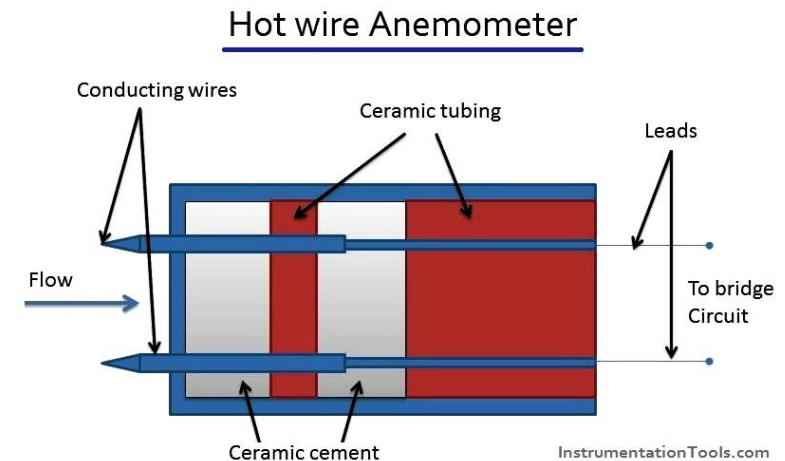
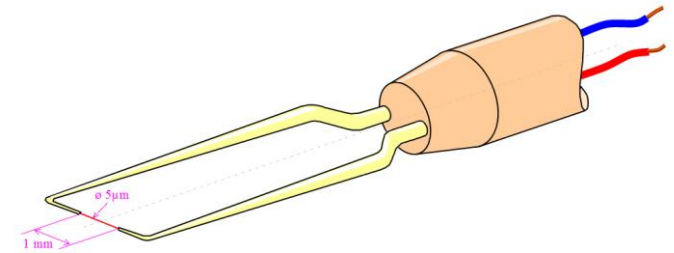
✓ Constant temperature type

- Bridge 회로를 이용해 wire의 온도를 일정하게 유지
 - 저항을 일정하게 유지
 - 고속의 경우, 저항 유지를 위해 더 많은 전류량 필요

- 전류값 측정

✓ Hot wire vs. hot film

- 센서 코팅 유무. 액체 적용 가능 여부

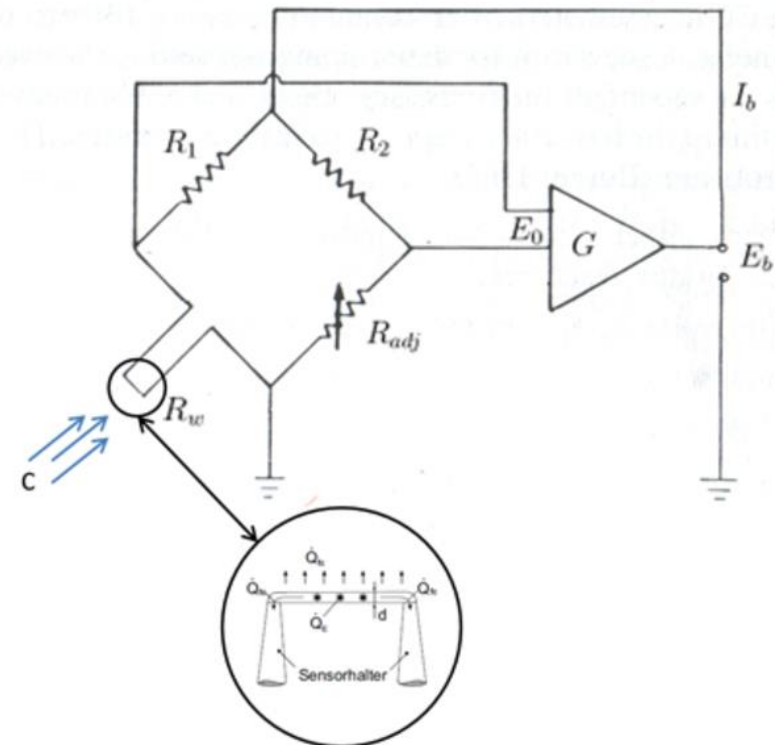
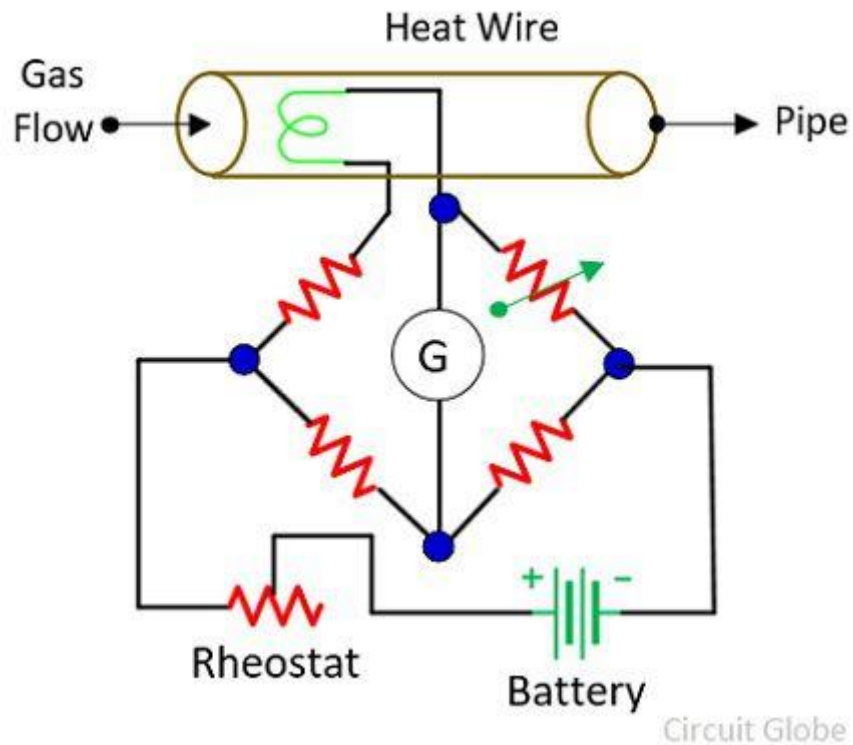


유량 및 유속 측정 방법

❖ 국소 속도 측정 방법: Hot wire/hot film

✓ 열선 유량계 회로

- Constant current method
- Constant temperature method

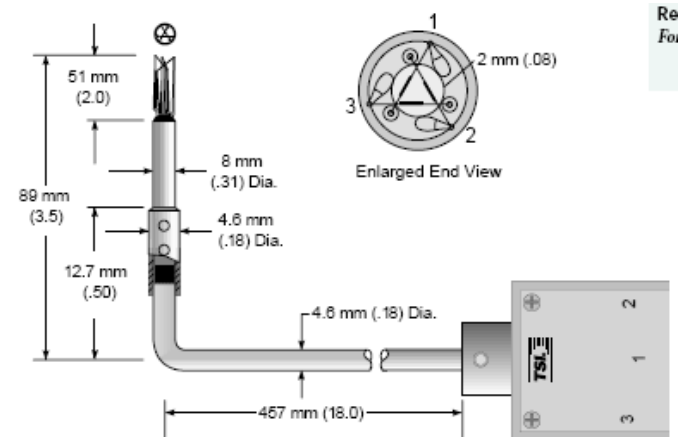
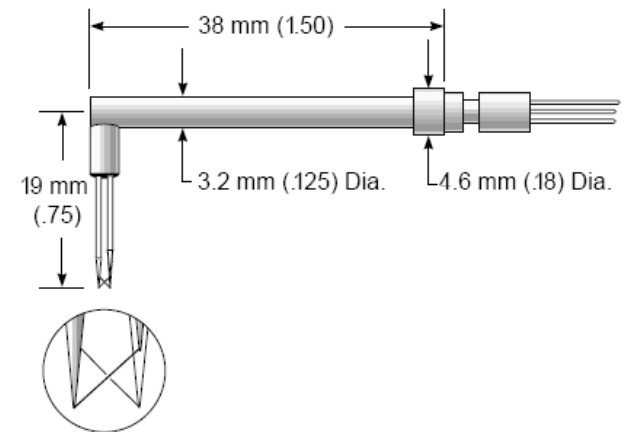
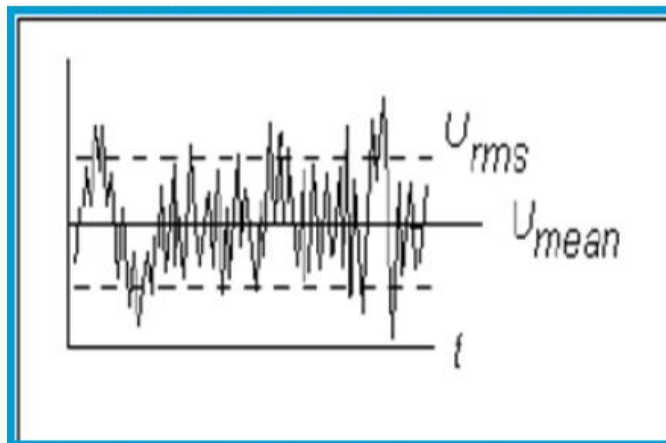


유량 및 유속 측정 방법

❖ 국소 속도 측정 방법: Hot wire/hot film

✓ 특성

- 매우 빠른 응답 속도
- 난류 강도 측정 가능
- 다차원 측정 가능: 2D 및 3D
- 매우 약함
- 고가임
 - 1D hot film sensor: ~200 만원
 - 3D hot film sensor: ~600 만원



Re
Fou

유량 및 유속 측정 방법

❖ 유량 측정을 thermal flow meter

<https://www.youtube.com/watch?v=YfQSf2NBGqc>



유량 및 유속 측정 방법

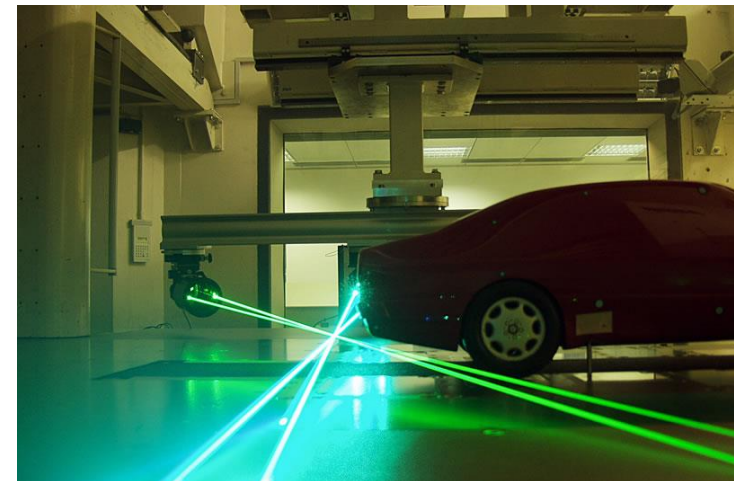
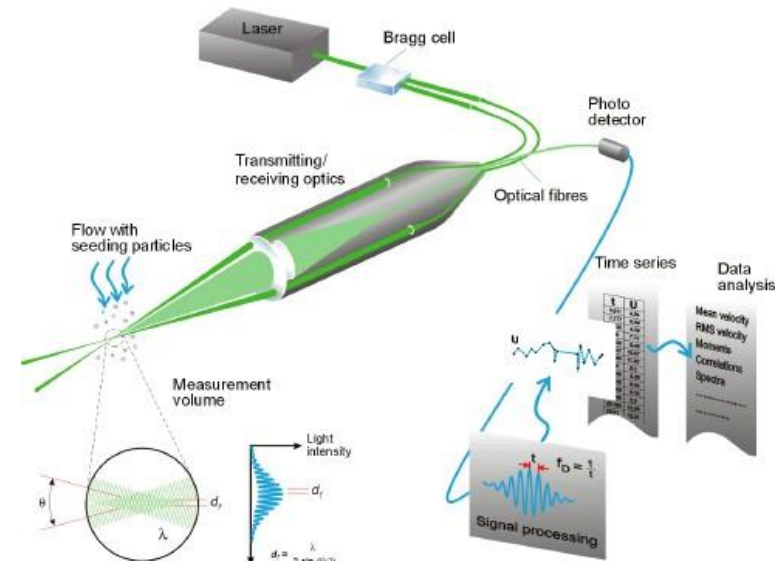
❖ 국소 속도 측정 방법: LDV (Laser Doppler Velocimetry)

✓ Doppler shift

- 입자가 LASER 통과 시 빛의 산란 발생
- 산란된 빛을 전압으로 변환
- 전압 신호의 주파수가 입자의 속도에 비례

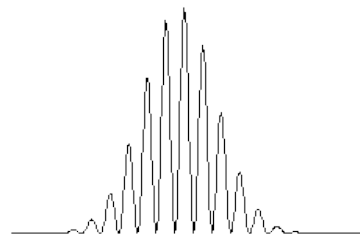
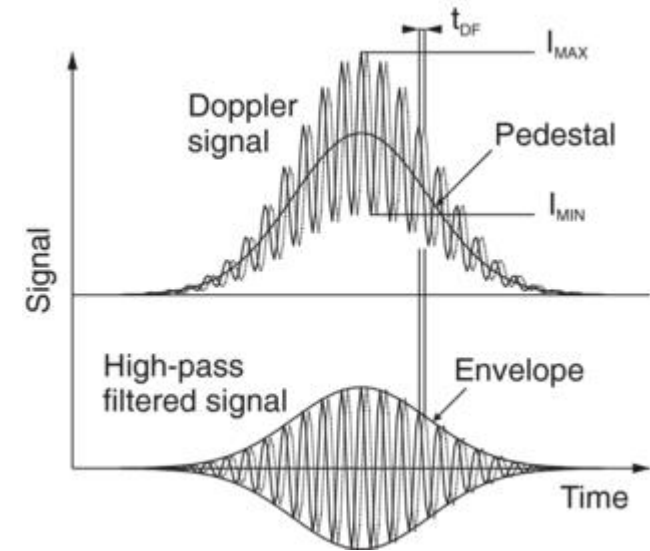
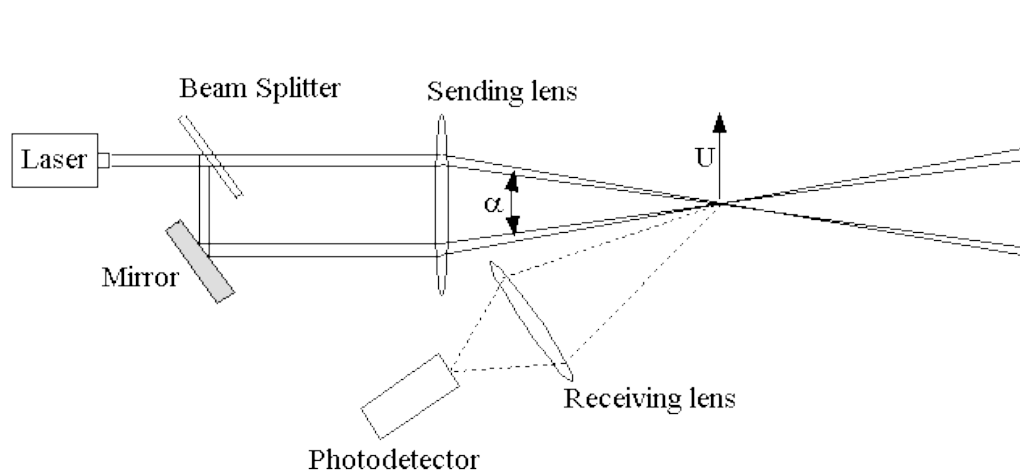
✓ 특성

- 다차원 측정 가능
 - 1차원: 2 beams
 - 3차원: 6 beams
- 비삽입식 계측
- 투명한 유체에만 적용 가능
- 가시창 필요
- 고가



유량 및 유속 측정 방법

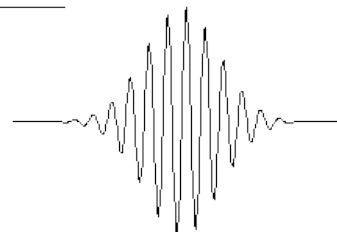
❖ 국소 속도 측정 방법: LDV (Laser Doppler Velocimetry)



(a) Burst



(b) Pedestal



(c) Doppler signal

유량 및 유속 측정 방법

❖ 국소 속도 측정 방법: PIV (Laser Doppler Velocimetry)

✓ PTV (Particle Tracking Velocimetry)

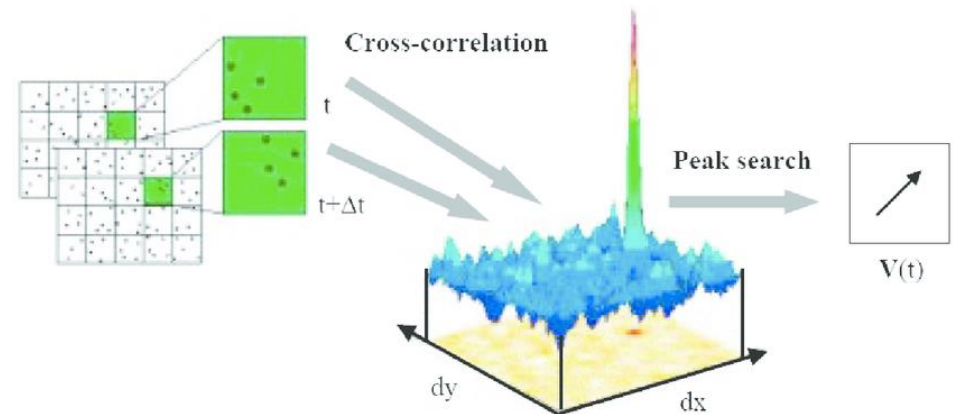
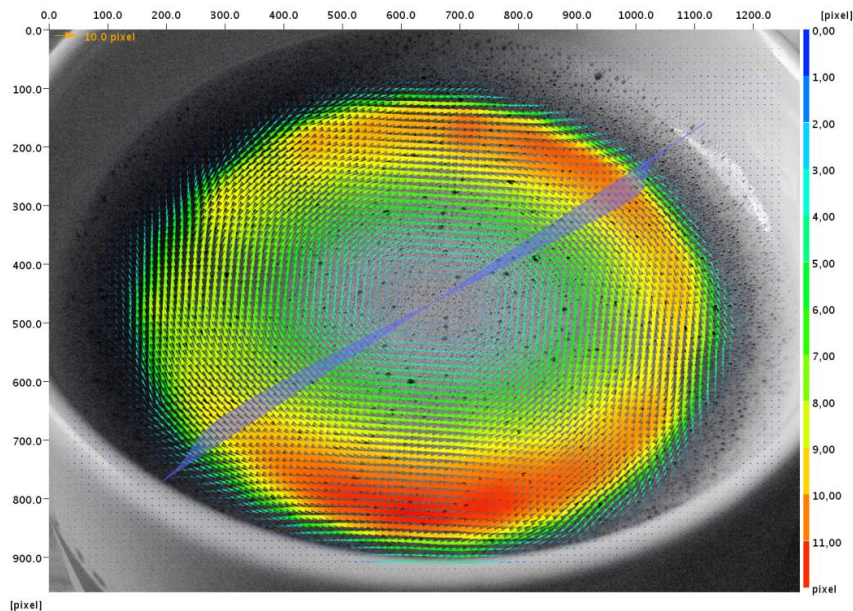
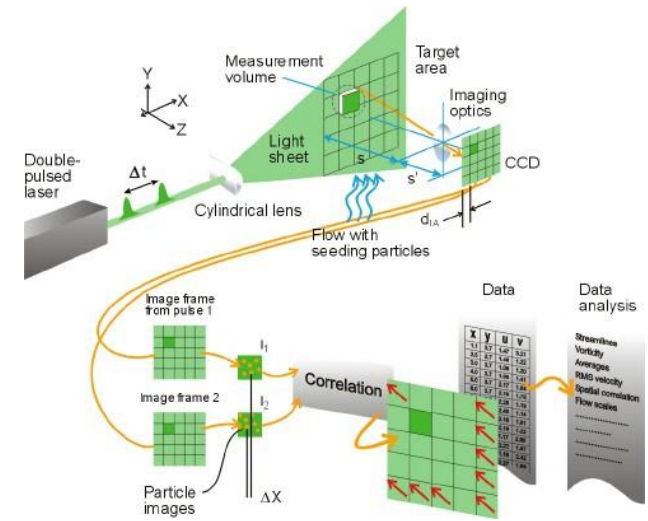
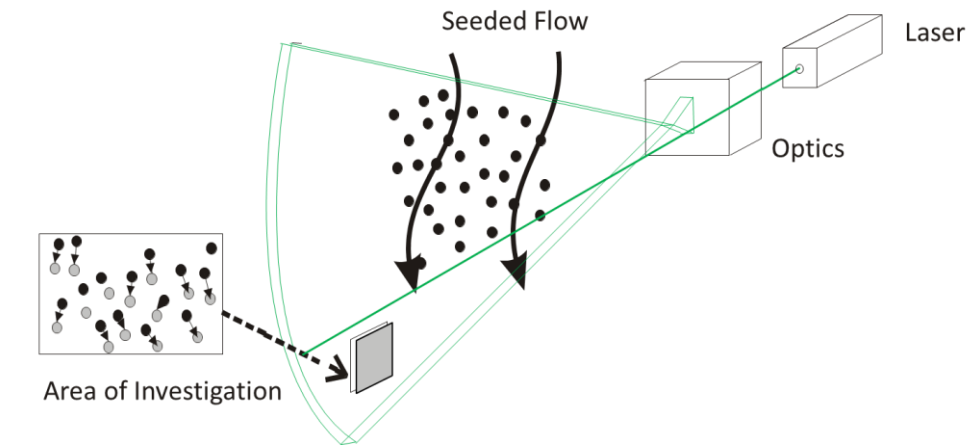
- Definition : Tracking of each particle
- Pros : high spatial resolution, true Lagrangian velocity of particle
- Cons : difficult adaptation, clear particle image required

✓ PIV (Particle Image Velocimetry)

- Definition : correlation between interrogation windows
- Pros : easy to adaptation, robust in noise, no necessity of particle detection
- Cons : not a real velocity of particle, low spatial resolution

유량 및 유속 측정 방법

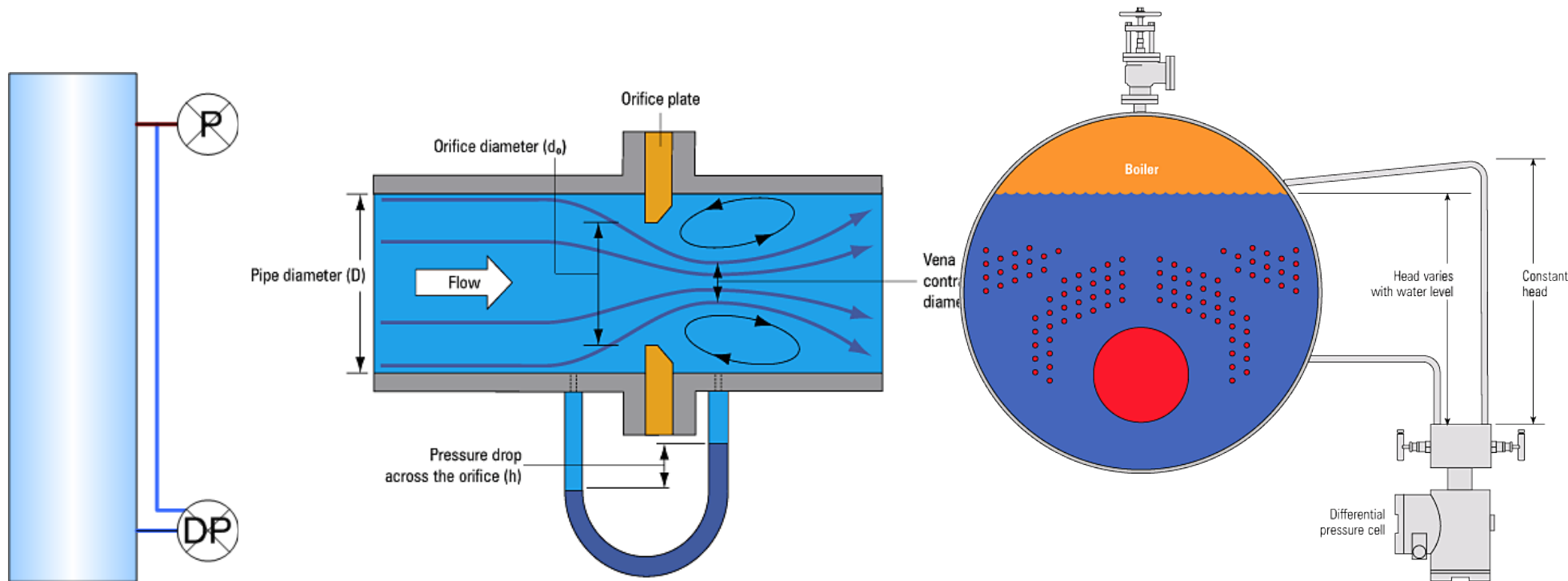
❖ 국소 속도 측정 방법: PIV (Laser Doppler Velocimetry)



압력 측정 방법

❖ 압력 측정

- ✓ 정압 측정
- ✓ 차압 측정
- ✓ 유량 측정: 차압 값으로부터 유량 계산
- ✓ 수위 측정: 차압 값으로부터 수위 계산

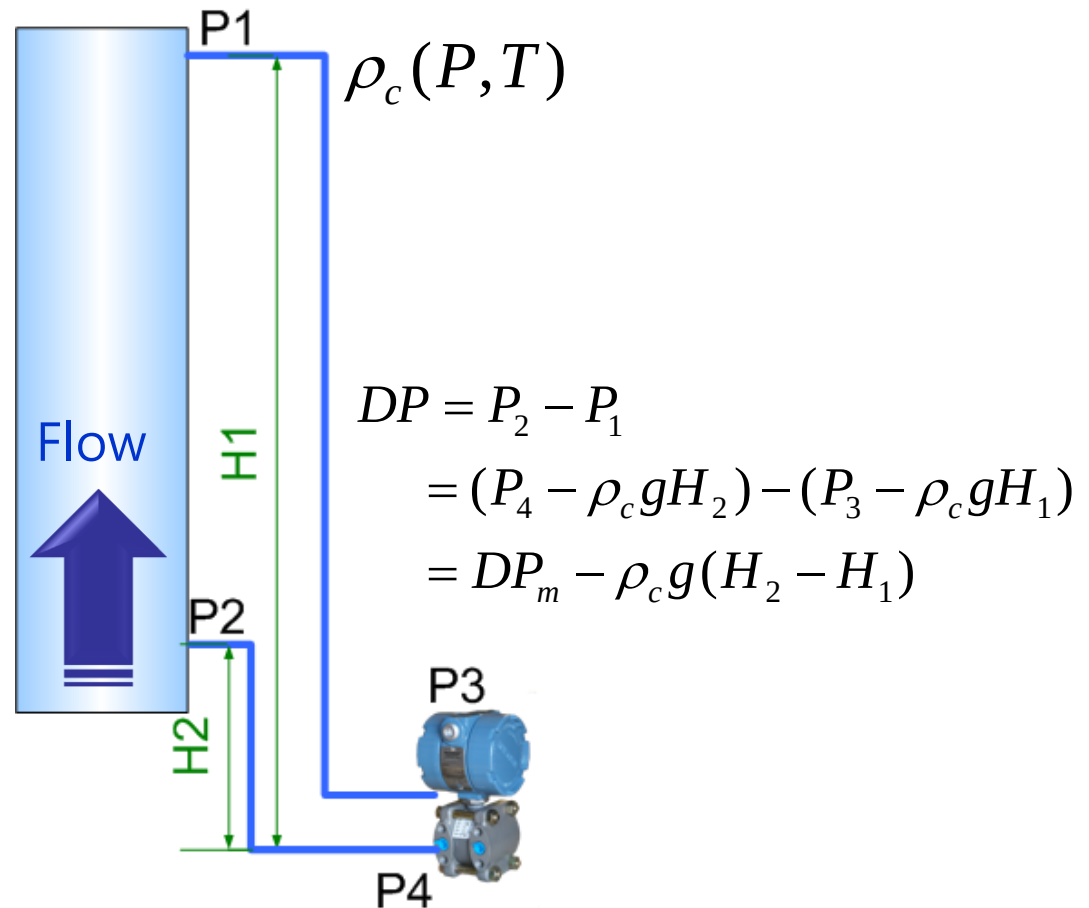
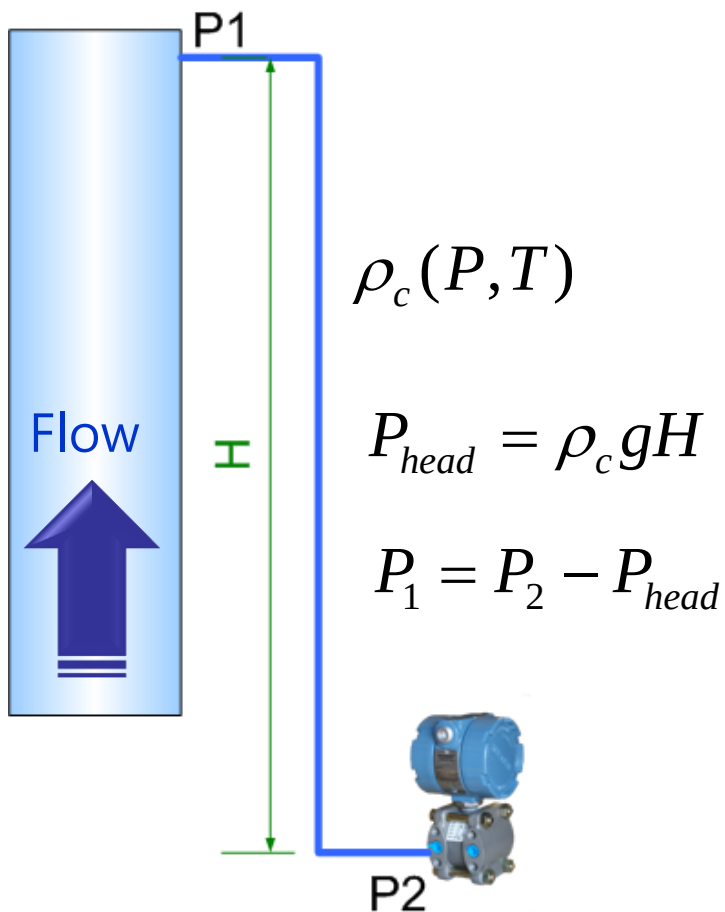


압력 측정 방법

❖ 압력 측정

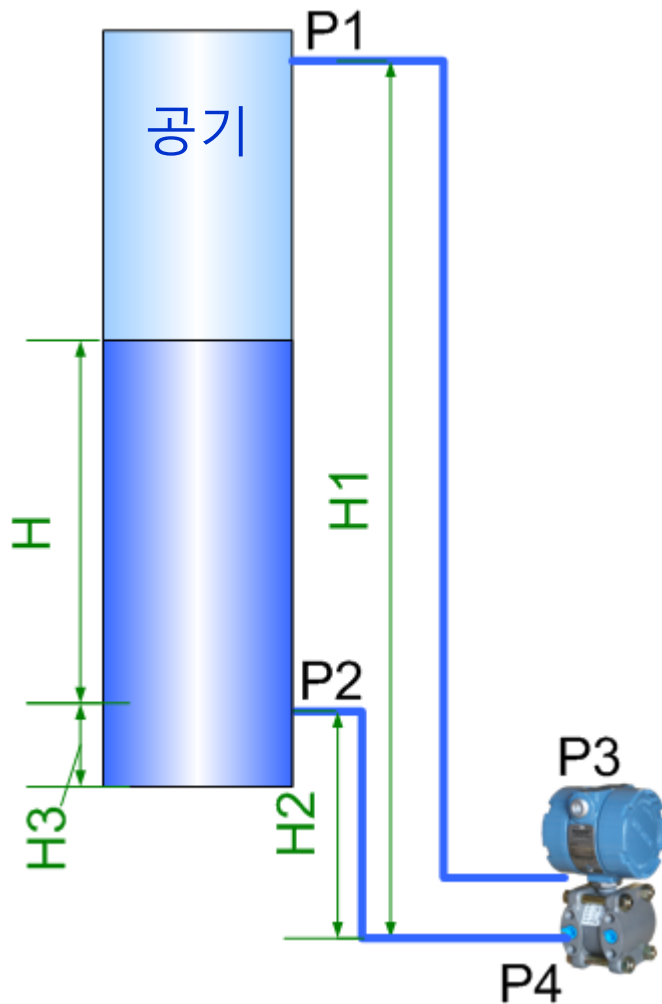
✓ 정압 및 차압 측정

- 정압계와 측정 지점 간의 높이 차 고려 필요



압력 측정 방법

❖ 수위 측정



$$P_1 > P_2 ? \text{ or } P_2 > P_1 ?$$

$$P_3 > P_4 ? \text{ or } P_3 > P_4 ?$$

$$\begin{aligned} DP &= P_2 - P_1 \\ &= \rho_c g H \\ &= (P_4 - \rho_c g H_2) - (P_3 - \rho_c g H_1) \\ &= DP_m - \rho_c g (H_2 - H_1) \end{aligned}$$

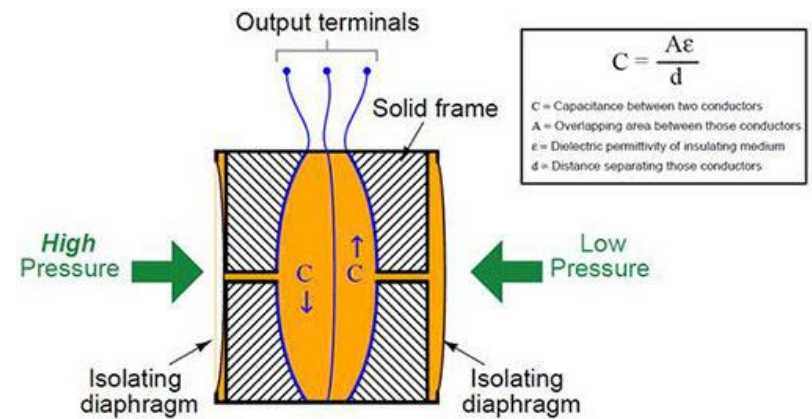
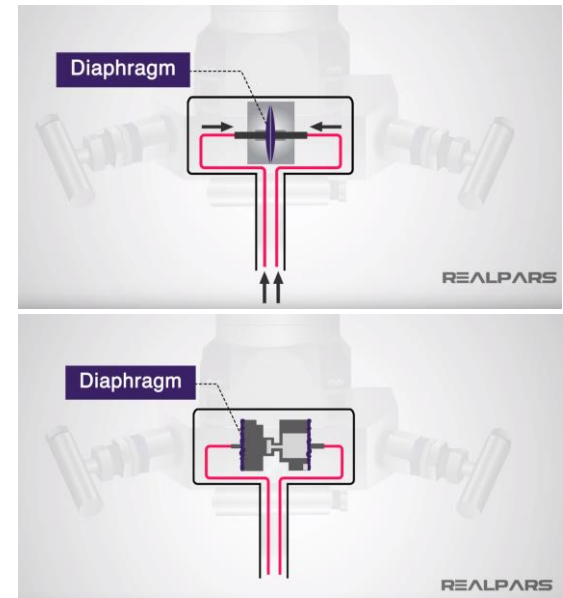
$$H = \frac{DP_m}{\rho_c g} - (H_2 - H_1)$$

$$Level = H + H_3$$

압력 측정 방법

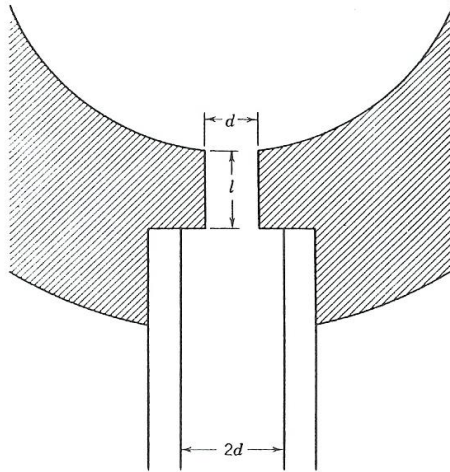
❖ 압력측정 기기

- ✓ Diaphragm (다이하프램) 식 압력계
- ✓ 마노미터 식



압력 측정 방법

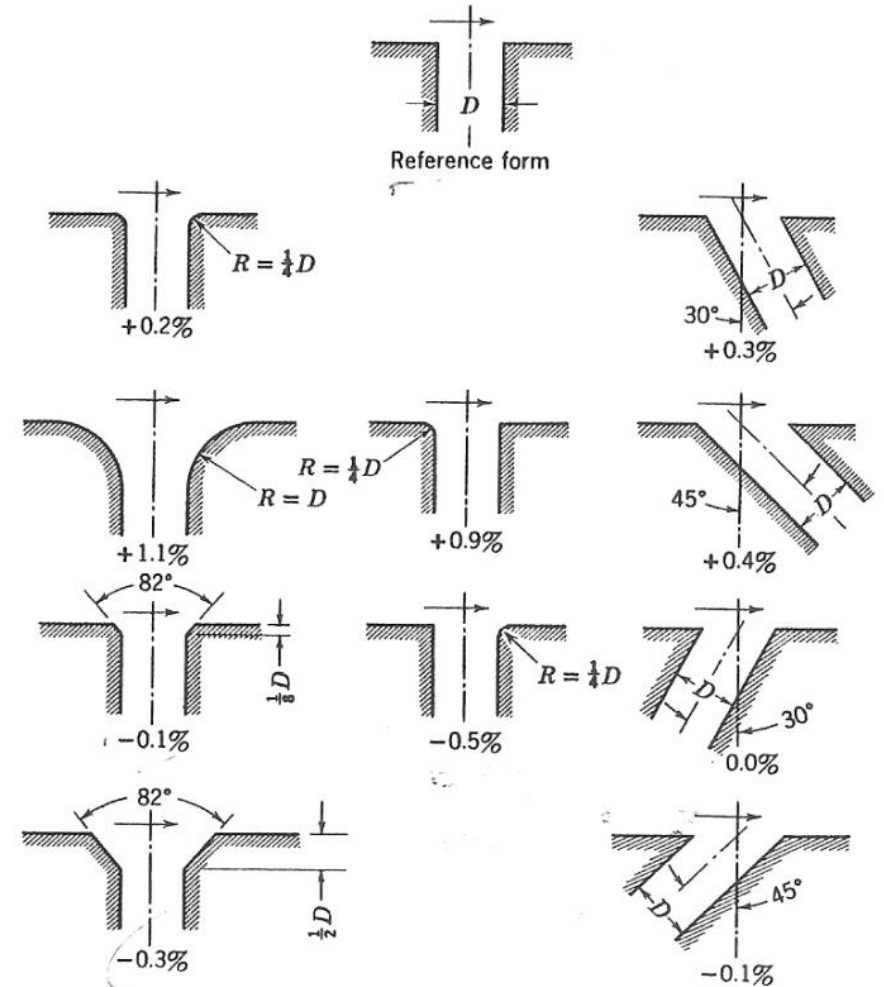
❖ 입력 측정 홀



Recommended static-pressure wall-tap geometry ($0.5 < L/d < 6.0$).

Size Tube for of Pressure Impulse Line

Pressure Impulse Line Length(m)	Water, steam, dry gas	Wet gas
0~15	0.25 in (6mm)	0.375 in (9mm)
15~40	0.25 in (6mm)	0.375 in (9mm)
40~81	0.5 in (12.5mm)	0.5 in (12.5mm)



Effect of orifice edge form on static pressure measurement. Variation in percentage of dynamic pressure. (From Rayle, December 1959.)