

유압시스템용 유량센서의 기초 이론 및 응용

Basic Theory and Application of Flow Sensor for Hydraulic System

윤소남 · 함영복
S. N. YUN and Y. B. HAM

1. 서 언

유압시스템에 있어 펌프/모터, 밸브, 실린더 등과 같은 유체기계 부품들의 유량특성을 계측하는 유량계(유량센서)는 용도에 따라서 많은 종류가 개발되고 있으나, 크게 “유체 흐름의 차압 에너지를 이용하는 방법”과 “외부로부터 에너지를 유체의 흐름에 적용시키고, 유체와의 상호작용을 이용하는 방법”으로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 유체 내부에 저항요소를 설치하여 유체 에너지 손실을 일으키고, 이 손실량을 압력 혹은 변위 등 측정 가능한 양으로 변환하여 유량을 측정하는 것이다. 두 번째 방법은 측정 가능한 부위에 외부로부터 에너지를 가하고, 가해진 에너지와 흐르는 유체 사이에서의 비례적인 상호작용을 측정하여 유량을 측정하는 것이다. Table 1 및 Table 2는 각각 “유체 흐름의 차압 에너지를 이용하는 유량계”와 “외부에서 에너지를 유체의 흐름에 가하고, 유체 흐름과의 상호작용을 이용하는 유량계”의 종류와 원리 그리고 특징 및 응용분야를 나열하였다.

유량측정 관련 용어 설명은 2절, 유량계 종류별 상세 원리 및 응용에 관해서는 3절에서 다루기로 한다.

Table 1 Flow meter using differential pressure energy⁵⁾

명 칭	원 리	특징, 응용분야
교축 유량계	대상체의 차압을 이용하여 유량계측	오리피스 방식, 석유 및 석유화학 분야
면적 유량계	대상체의 변위를 이용하여 유량계측	유량의 가시화 가능
용적 유량계	회전익의 펄스를 이용하여 유량계측	고정도의 유량측정 가능, 오일 및 가스미터
터빈 유량계	풍차의 원리를 이용하여 유량 계측	고정도의 유량계측 가능, 수도미터
와유량계	유체진동을 이용하여 유량계측	1960년대 개발됨

Table 2 Flow meter using interaction between external energy and flow of fluid⁵⁾

명 칭	가해지는 에너지	측정물리량	특징, 응용분야
전자유량계	자계	전자유도에 비례하는 전위차	전도성 액체, 슬러지 액체
초음파 유량계	초음파	전파시간차, Doppler shift 주파수	관 외부에서 측정가능, 대유량
열식질량 유량계	열	온도차	반도체 가스 유량계어
Corioli 유량계	진동가속도	Corioli힘에 비례하는 변위	화학약품 유량측정

2. 유량측정의 개요

2.1 유속, 평균유속 및 유량

유속이란 유체가 유동하는 유동장 내 국소 위치(한 점)에서의 유체 속도를 의미하고, 유량이란 유체가 단위 시간 동안에 특정 단면적을 통과한 양을 의미한다. 예를 들어, 원형 단면을 갖는 관로를 통하여 유체가 흐를 때, 관로 내의 유속은 단면 내의 위치에 따라 달라진다. 즉, 유속이 가장 빠른 곳은 관로 중심부이고, 벽면 쪽에 가까워질수록 감소하며, 관로 벽면에서는 0이 된다. 유속 v , 유량 Q 의 단위와 평균 유속 V 의 정의를 기술하면 아래와 같다.

- 유속(flow velocity) : V (m/s, cm/s, ……)
- 유량(flow rate) : Q (m³/s, l/min, ……)

$$V = \frac{1}{A} \int v dA = \frac{Q}{A}, \quad Q = AV \quad (1)$$

여기에서, v 는 관로 단면 내 임의 위치에서의 유속을 나타내고, A 는 관로 단면적을 나타낸다.

2.2 동적유량과 정적유량

순시적으로 변화하는 유량 $Q(t)$ 를 동적 유량이라 하며, 현재 공업적으로 사용되고 있는 유량 센서들(예 : 터빈 유량계, 용적식 유량계 등)은 대개 응답성이 그다지 좋지 않은 것들이므로 응답성이 우수한 동적 유량 센서라고 말할 수 있는 유량 센서는 찾아보기 어렵다. 급격하게 변동하는 동적 유량을 엄밀하게 측정하는 방법으로는 레이저(laser) 유속계로 측정된 유속 신호를 유로 단면상에서 적분하는 방법 등이 있으나 이러한 방법은 연구 목적으로 실험실에서 사용되고 있는 정도이다. 따라서 공업적으로 비교적 간편하게 사용할 수 있는 동적 유량 센서로는 회전부 질량이 작은 터빈 유량계, 전자 유량계, 초음파 유량계 등이 있다.

3. 유량센서의 종류 및 원리

3.1 차압(差壓)식 유량 센서

유체 관로에 오리피스(orifice), 노즐(nozzle), 벤추리 관(venturi tube) 등으로 교축부를 설치하면, 교축부 앞뒤에는 압력차가 생기며 이 압력차를 측정함으로써 유량을 구할 수 있다. 이러한 차압식 유량계는 구조가 간단하고, 내구성이 우수하며, 고온 고압에 잘 견디고, 가격이 저렴하기 때문에 공업상 널리 사용된다.

Fig. 1에 차압식 유량계로 사용되는 오리피스, 노즐, 벤추리 관의 구조를 나타내었다. 어느 것이나 유체가 수평으로 흐르고 있는 관로의 일부를 교축하여 부분적으로 속도 변화를 발생시킨다. 속도의 변화는 베르누이 정리에 의하여 압력의 변화를 유발하기 때문에 교축부 전후의 압력차 $p_1 - p_2$ 를 측정하여 유량을 구할 수 있다.

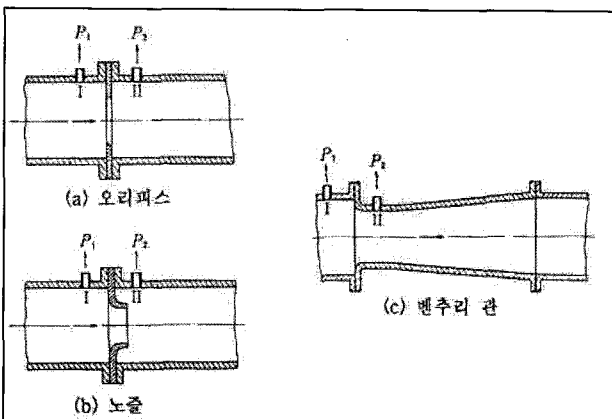


Fig. 1 차압식 유량계의 구조

유체 관로상의 수평인 두 점 사이의 압력 손실이 없고, 유체의 밀도가 일정(비압축성 유체)한 경우, 베르누이 정리에 의하여 다음 식이 성립한다.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2)$$

여기에서, p_1, V_1 은 위치 I에서의 압력과 유속, p_2, V_2 는 위치 II에서의 압력과 유속, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다.

위치 I 및 교축부에서의 단면적을 A_1, A_2 라 하면, 유량 연속의 법칙에 의하여 다음 식이 성립한다.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (3)$$

식 (2) 및 (3)으로부터 유량 Q 는 다음 식으로 표시된다.

$$Q = A_2 V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (4)$$

여기서, m 은 교축 면적비 $\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$ 이다.

식 (4)는 차압 유량계의 기본식으로, 이 식은 이상 유체가 이상적으로 흐르고 있을 때 성립한다. 실제의 유체 유동에서는 유체가 통과하는 단면적이 교축부의 단면적 A_2 보다도 작아지며, 유체의 점성 마찰 등에 의한 압력 손실도 존재하므로, 유량은 식 (4)에 의한 계산치보다 작아지게 된다. 그래서 유출 계수 C 를 정의하여 식 (4)를 아래와 같이 수정한다.

$$C = \frac{\text{실제의 유량}}{\text{이론적 유량}}$$

$$Q = \frac{CA_2}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (5)$$

여기서, $\alpha = C/\sqrt{1-m^2}$ 를 유량 계수라 부른다.

기체와 같은 압축성 유체의 경우는 압축 계수 ϵ 을 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$Q = \alpha \epsilon A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (6)$$

식 (6)은 체적 유량이며, 질량 유량 Q_m 은 다음 식으로 구해진다.

$$Q_m = \alpha \varepsilon A_2 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (7)$$

식 (6) 및 (7)은 차압 유량계에서 유량을 구하는 실용식이다. 미리 α 와 ε 을 실측을 통하여 구해두면 압력차 ($p_1 - p_2$)를 측정함으로써 유량을 구할 수 있다. 또, 규격으로 정해진 교축 기구와 상사(相似)한 것을 사용하면 계산 또는 표를 사용하여 α 와 ε 을 구할 수 있다. 차압의 측정에는 U자관 액주계 또는 다이어프램 압력계 등을 이용한다. 차압 신호를 전기 신호로 변환하고, 이를 다시 디지털 연산 처리 장치로 전송한 후에 식 (5) 등을 사용한 연산 과정을 거치게 되면, 유량 신호의 모니터링 및 자동 제어용 피드백 신호로의 이용이 가능하다. 차압식 유량계는 가격이 저렴하고, 사용 중 고장의 우려가 작은 점 등의 이점이 있어 널리 사용되고 있지만, 높은 정밀도를 요구하는 측정 개선에는 사용할 수 없다.

3.2 면적식 유량 센서

일반적으로 로터 미터(rotor meter)로 불리는 유량계이며, 그 구조를 Fig. 2에 나타내었다.

수직으로 설치된 테이퍼 관(tapered tube) 내에 부표(float)가 있으며, 하부 입구로부터 유입한 유체는 부표를 밀어 올리고, 부표와 테이퍼 관과의 사이에 존재하는 틈새를 통과하여 상부 출구로 나간다. 일정 유량일 때 여러 가지 힘[① 부표 상하 압력차에 의한 힘, ② 부표의 중량, ③ 유체 점성력, ④ 부표의 부력]이 평형을 이루어 부표는 일정 높이에서 정지한다. 유체는 부표와 관 내벽 사이를 통과하는데, 이 부분은 교축 면적을 가변(可變)으로 한 오리피스에 상당한다. 이러한 면적식 유량계는 어느 범위 내의 유량 영역에서는 유량과 부표의 위치가 비례적으로 변하도록 설계되며, 따라서 부표의 위치로부터 유량을 구할 수가 있다. 테이퍼 관 재료로는 유리가 많이 사용되며, 부표로는 유체의 종류에 따라서 스테인리스 강, 테플론, 도자기 재료의 것이 사용된다. 부표의 변위를 직접 읽음으로써 유량을 측정하는 것이 일반적이지만, 직결 또는 자기적(磁氣的)으로 결합된 변위 전달 기구에 의하여 부표의 변위를 외부의 변위/전기 신호 변환기를 거쳐 전기 신호로 얻기도 한다.

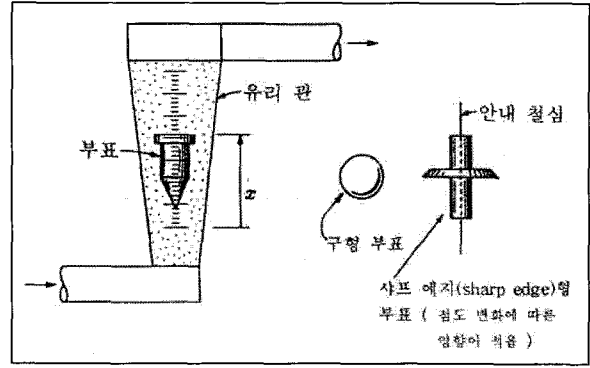


Fig. 2 면적식 유량계

면적식 유량계는 차압식 유량계에 비하여 작은 유량의 측정이 가능한 점, 압력 손실이 비교적 작은 점 등의 이점이 있지만, 점도가 높거나 점도 변화가 심한 유체에는 부적당하며, 높은 정밀도가 요구되는 경우에도 사용하기가 곤란하다.

3.3 용적식 유량 센서

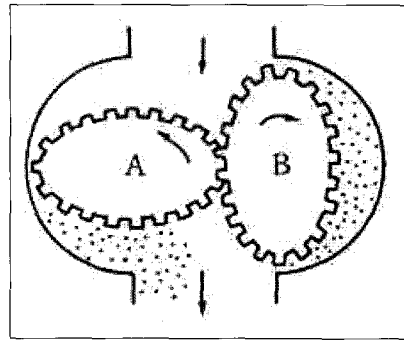


Fig. 3 오발(Oval) 유량계

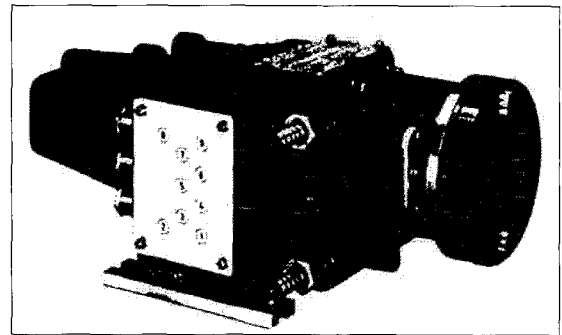


Fig. 4 기어 펌프식 정밀 유량계

Fig. 3에 오발(Oval) 유량계의 구조도를 나타내었다. 이 유량계는 유량의 적산치 뿐만 아니라 순시 유량의 측정에도 사용되며, 유량 적산치는 회전자의 회전수를 감속 기어식 카운터상에 나타내게 된다. 순시 유량은 회전자(기어) 회전축의 회전 속도를 계

측함으로써 유량을 측정하게 되며, 회전 속도 계측에는 보통 磁氣式 속도 센서가 사용된다. 자기식 속도 센서에서 얻어지는 펄스 신호는 F/V (Frequency/Voltage) 변환기를 거치면서 직류 전압 신호로 바뀌므로, 순시 유량을 전압계상에서 직접 읽을 수 있음은 물론이며, 대상 장치의 자동 제어를 위한 피드백 신호로도 사용할 수 있다. 디젤 기관 연료유 소모 유량을 매우 정밀하게 측정하고자 하는 경우나, 각종 기기로부터 미량의 누설 유량을 계측(예 : 유압 펌프나 유압 모터의 용적 효율 계측하고자 하는 경우에는 관로상에 설치된 정밀 기어 펌프를 전기 서보 모터로 구동함으로써 펌프 전·후의 차압을 항상 영(zero)으로 유지하면서 동적 유량을 계측하는 유량 센서(時定數 0.5 s 이하)가 시판되고 있다(Fig. 4).

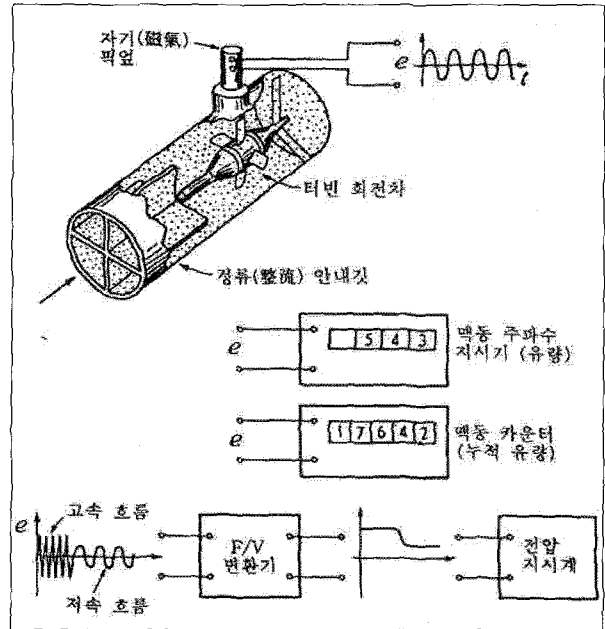


Fig. 5 터빈 미터

3.4 터빈 미터(Turbine flow meter)

Fig. 5와 같이 유체 관로 도중에 놓인 유량계에 소형 회전차가 설치된 구조의 유량 센서이다. 회전차의 회전 속도는 磁氣 회전 센서에 의하여 펄스 열로서 검출되고, 이 펄스 신호는 F/V 변환기를 거쳐서 직류 전압 신호로 출력된다. 최근의 터빈 미터는, 기중에 따라서는 회전부 베어링에서의 마찰 저항이 매우 작도록 개량이 진행됨에 따라 재현성 있는 안정된 유량 계측이 가능하게 되었다. 또한, 다른 유량 센서들에 비하여 소형으로 대유량 계측이 가능한 것이 장점이다.

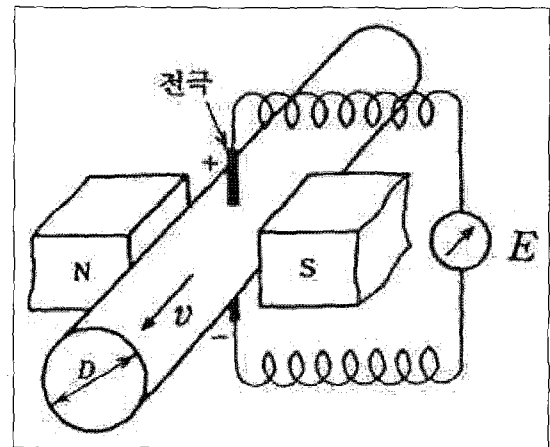


Fig. 6 電磁 유량계

3.5 전자 유량계(Electromagnetic flow meter)

Faraday의 전자 유도 법칙을 이용한 유량계이며, Fig. 6에 그 원리를 나타내었다. 유체의 흐름에 따라 발생하는 기전력은 다음 식으로 표시된다.

$$E = DBV \quad (8)$$

여기에서, E : 발생 전압[V], B : 자속 밀도[T ($= \text{Wb}/\text{m}^2$)], D : 관로 내경[m], V : 평균 유속 [m/s] 이다.

이 유량계는 계측기 내부에 흐름을 방해하는 부분이 전혀 없고, 비정상 유량 계측이 가능한 것이 장점이지만 도전성(導電性)이 없는 기름, 공기, 순수한 물에 대해서는 측정이 불가능하다. 따라서, 기름 수송 계통 등에는 사용할 수가 없지만 일반적인 물 수송 계통에는 사용이 가능하다.

3.6 초음파 유량계(Ultrasonic flow meter)

초음파가 유체 속을 전파하는 속도는 유체가 정지하고 있을 때와 움직이고 있을 때에 따라 달라진다. 즉, Fig. 7에서 중앙에 초음파 발신기, 상류측과 하류측에 수신기가 있을 경우, 초음파 전파 시간은 각각 다음 식으로 주어진다.

$$t_1 = \frac{L_1}{c+v}, t_2 = \frac{L_2}{c-v} \quad (9)$$

여기에서, L_1 및 L_2 : 송신기와 수신기 사이의 거리, c : 음속, v : 유속이다.

L_1, L_2, c 를 알고 있으면 t_1 및 t_2 를 측정함으로써 v 를 구하는 것은 원리적으로는 가능하다. 실제로는 v 에 비하여 c 가 매우 크고, c 가 유체 온도

에 따라 변하는 점 등으로 측정 오차가 생길 수 있으므로 여러 가지 대책이 강구되고 있다. 예를 들면, Fig. 8은 초음파 발신기, 수신기 2조를 관로 외부에 붙여서 측정이 가능하도록 한 것이다. 초음파 유량계는 보통 액체 유량 측정에 사용되며, 이 유량계도 측정 관로 내에 장애물이 거의 없는 것이 장점이다. 또한, 초음파 발신기, 수신기를 관로 외부에 부착시키는 것도 가능하기 때문에 대형 관로에서의 유량 측정에 유리하다.

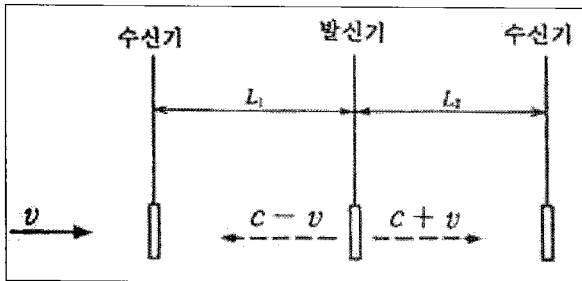


Fig. 7 초음파 유량계의 원리

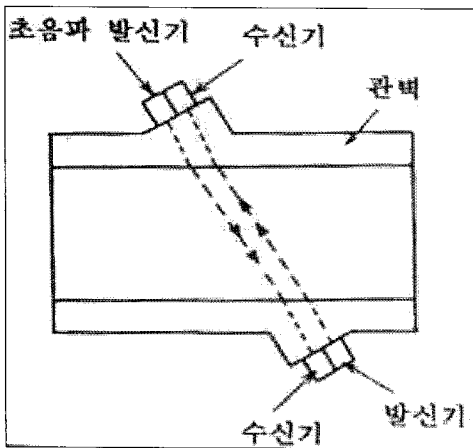


Fig. 8 관로 외부 부착형 초음파 유량계

3.7 와(渦) 유량계(Vortex flow meter)

흐르는 유체 속에 원통을 두면 그 후방에 규칙적인 와열이 발생하는데, 이것을 Karman 와열이라 한다. 이 규칙성을 이용하여 유속을 측정할 수 있다. Fig. 9에 있어서, 한쪽의 와의 주파수와 유속 사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$f = \frac{Kv}{d} \quad (10)$$

여기에서, f : 와 발생 주파수, v : 유속, d : 원통 직경, K : 무차원 수(Re 수 $10^{2.5} \sim 10^5$ 의 범위에서 약 0.2로서 일정)

즉, 유속과 주파수는 비례하며, 주파수 검출에는

국소적 속도 변화 또는 압력 변화를 이용한다. 이 계측법은 기체, 액체에 모두 적용이 가능하고, 유체의 온도, 압력, 밀도 등의 영향을 받지 않으며, 검출되는 양이 디지털 양이라는 점 등이 특징이다.

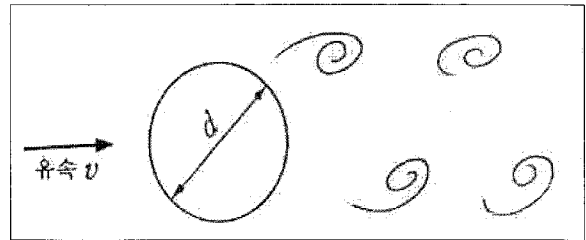


Fig. 9 Karman 渦列

4. 유량센서 설치 및 사용상의 주의점

유량 센서를 설치하는 관로의 배관에 대하여 일반적인 주의 사항은 다음과 같다.

- ① 관로의 접속 부분에서 공기가 새어들지 않도록 주의한다. 필요에 따라 유량 센서 상류측에 기포 배출 장치를 설치한다.
- ② 관로상에 설치된 유량 센서에 무리한 힘이 작용하지 않도록 주의한다. 특히, 고온이나 저온 유체가 흐르는 곳은 관로에 열변형에 의한 압축이나 인장 응력이 작용하지 않도록 구부러진 관을 설치하면 좋다.
- ③ 유량 센서의 수리, 내부 청소를 고려하여, 센서 설치 관로와 병렬로 바이패스 관로를 설치하고, 유량 센서 앞뒤에는 밸브를 설치한다. 또한, 액체의 드레인을 쉽게 하기 위하여 드레인 배출 관로를 설치한다.
- ④ 유량 센서와 근접한 상류측에 밸브, 급 만곡부 등을 설치하면 공동 현상에 의한 기포 발생으로 유량 계측에 나쁜 영향을 끼칠 수 있다. 따라서, 부득이하게 유량 센서 상류측에 밸브, 만곡부 등을 두게 될 때는 밸브나 만곡부와 유량 센서 사이에 일정 길이 이상의 직관부가 존재하도록 배려하여야 한다.
- ⑤ 사용 도중에 정기적으로 기준 미터와 비교하는 시험과 교정을 해야 하는 유량 센서인 경우에는 설치된 유량 센서를 떼어내지 않고도 시험할 수 있도록 교정용 배관을 설치한다.
- ⑥ 불순물을 함유한 액체의 유량을 측정할 때는 유량 센서를 보호할 목적으로 상류측에 여과기를

설치하는 경우가 있으며, 이 때는 여과기의 청소, 교환을 용이하게 하기 위하여 병렬로 2개의 여과기를 유량 센서 상류에 설치하는 것이 좋다.

참고문헌

- 1) (社)日本油空壓學會, “油空壓便覽”, オーム社, 東京, pp. 117~125, 1989.
- 2) John Borer, “Instrumentation and Control for the Process Industries”, Elsevier Applied Science Publishers, New York, pp. 39~74, 1985.
- 3) 성락진, “메카트로닉스① 센서입문”, 도서출판 대림, 서울, pp. 153~166, 1987.
- 4) 황규섭, “센서 활용기술”, 기전연구소, 서울, pp. 412~418, 1985.
- 5) 日本フルードパワーシステム學會, “フルードパワーシステム”, Vol. 36, No. 4, pp. 197~201, 2005.

[저자 소개]

윤소남 (책임저자)



E-mail : ysn688@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7155

1963년 7월 29일생

1994년 부경대학교 기계공학부박사 과정 졸업, 1994년 한국기계연구원 입사, 2007년 한국기계연구원 나노기계연구본부 책임연구원 /스마트디바이스응용연구팀장, 압전벨브 및 스마트디바이스 응용연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회등의 회원, 공학박사

[저자 소개]

함영복



E-mail : hyb665@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7157

1965년 10월 23일생

2003년 금오공과대학교 기계공학과 박사과정 졸업, 1990년 한국기계연구원 입사, 2007년 현재 한국기계연구원 나노기계연구본부 책임연구원, 압전펌프 등의 스마트 디바이스 응용연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사