

CASE 기술특집 : 계측 및 제어기기 (3)

화학공업의 센서/전송기와 구동기

이광순

서강대학교 화학공학과

1. 서론

화학공장은 기본적으로 계측과 제어에 의존하지 않고서는 운전할 수 없는 공정이 많기 때문에, 계측제어기의 사용은 다른 공업에 비하여 가장 오랜 역사를 가지고 있다고 할 수 있다. 초기의 계측기, 제어기는 모두 기계적 원리를 응용한 것이었으나, 전자산업의 발전으로 인하여 최근에는 안전상 이유 등 특별한 경우를 제외하고는 대부분 전자식으로 대체되어 있다. 그러나 구동기는 여전히 공기압을 이용한 기계식 밸브가 주종을 이루고 있다. 화학공업의 계측항목은 온도, 압력, 유량, 액위 등 전통적(?)인 것 뿐 아니라, 생산물의 품질을 측정하기 위한 각종 성분의 농도가 사실 질실하나 산소, CO, CO₂, pH 등 특별한 몇가지 경우를 제외하고는 아직까지 범용성있고 신뢰성있는 적정가격의 산업용 계측장비가 개발되어 있지 않은 것이 그 현실이다. 이외에도 온도분포 등을 측정하기 위한 적외선 영상(image) 온도측정장비가 공정에 따라 부분적으로 활용되기 시작한 것이 새로운 변화 중 하나라고 하겠으나 전체적으로는 측정항목은 과거의 틀에서 거의 변화가 이루어지지 않고 있다는 것이 그 현실이다.

화학공업의 계측, 제어기기는 제어의 원리상 크게 세

부류로 나눌 수 있다. 첫째는 센서/전송기(sensor/transmitter)로 표현되는 계측장비, 둘째는 이 계측치를 이용하여 제어신호를 계산하는 제어기(controller), 그리고 이 제어신호를 공정에 전달하는 구동기(actuator)가 그것이다. 이들 각 분류에 대한 내용은 매우 방대한 설명을 필요로 하며, 여기서는 센서/전송기 중 쓰임새가 일부분의 종류와 구동기에 대한 것만을 소개한다. 이들에 대한 좀 더 자세한 내용, 그리고 제어기에 대한 내용은 기회가 되는대로 다음에 소개하기로 한다.

2. 센서 / 전송기

2.1 센서/전송기의 일반적인 구조 전송방식

화학공정 제어에서 요구되는 측정변수는 실로 다양하다. 여기에 속하는 중요한 것들은 온도, 유량, 압력, 액위, 무게, 점도, 농도 등이 있으며, 이 중 온도, 유량, 액위, 압력은 대부분의 화학공정에서 공통적으로 요구되는 주요 측정변수이며 범용성이 있는 각종 센서들이 잘 개발되어 있다. 무게는 회분식공정에서 투입 원료 준비시, 점도는 혼합물의 물성, 중합반응의 중합도 추정 등의 목적으로 측정되기도 한다. 농도는 매우 중요

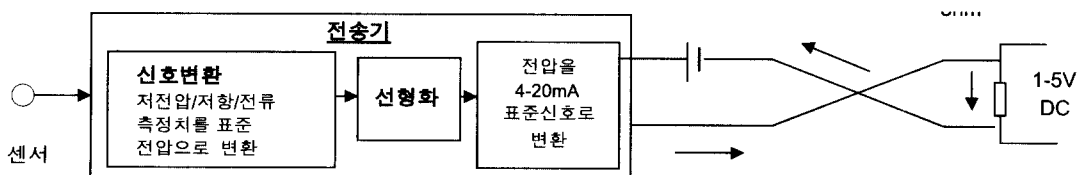


그림 1. 센서/전송기와 신호의 전송.

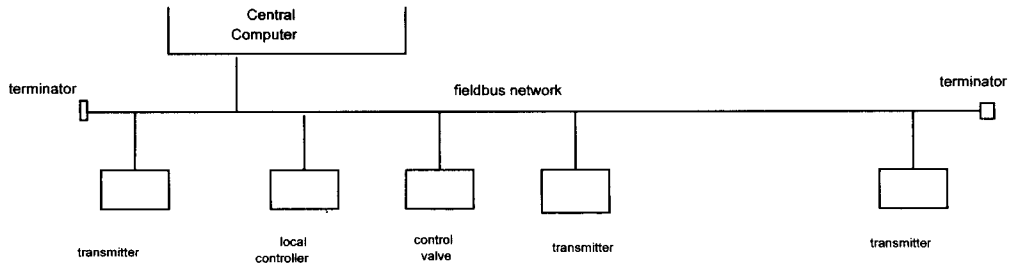


그림 2. Fieldbus의 개념.

한 공정변수이지만 범용성있는 측정장치가 없으며 측정하고자 하는 성분, 농도범위, 측정상황에 따라 매우 다양한 형태의 분석기가 사용된다.

농도를 제외한 대부분의 측정변수들에 대해서는 연속측정이 가능한 센서들이 개발되어 있으며, 각 센서에는 신호의 변환과 전송을 위한 전송기(transmitter)가 함께 제공된다. 따라서 산업용은 보통 센서와 전송기가 한 조를 이루어 판매된다. 센서/전송기는 기본적으로 그림 1과 같은 구성을 가진다.

센서의 동작은 전압, 전류, 저항, 용량, 인덕턴스, 빛의 강도 등 다양한 물리적 원리에 근거를 두고 있기 때문에 먼저 이 변화를 표준전압신호로 변환하는 것이 필요하다. 이렇게 변화된 신호는 일반적으로 선형화 회로를 거쳐 센서의 비선형성이 보정된 후, 전자기 잡음(electromagnetic noise)의 영향을 덜 받으며 원거리에 떨어져 있는 중앙제어실까지 신호가 전송될 수 있도록 4-20 mA (0-100%) 표준범위의 전류신호로 변환된다. 전압신호는 전자기 잡음의 영향을 많이 받기 때문에 산업현장의 아날로그 신호전송에서는 거의 사용되지 않는다. 다만 밸브의 on/off 따위를 나타내는 이진신호는 전압으로 직접 신호를 전송하기도 하는데 이 경우도 잡음에 의한 오전송을 가능한 한 줄이기 위하여 0 V/ 24 VDC 와 같이 전압수준을 매우 높여 이용한다. 전류전송을 위해서는 그림에서와 같이 외부에 12-35 V 사이의 DC 전압원 (정전압원일 필요는 없음)을 외부에서 제공해 주어야 한다. 전송된 전류를 수신하는 측(예, 제어기, 기록계...)은 그림과 같이 250 Ω의 저항을 통해 1-5 V의 전압신호로 변환한 입력한다.

전송기의 표준신호의 0% 신호를 4 mA로 이동 시켜

놓은 것은 두가지 이유에서이다. 첫째는 전송기 혹은 신호전송선의 이상유무를 판단하기 위함이다. 만일 전송기 혹은 신호전송선에 이상이 생겨 전류가 전송되지 않으면 0 V 가 입력될 것이고 이것으로 부터 이상이 발생하였음을 감지할 수 있다. 둘째는, 전자기적 잡음에 대한 강인성을 주기 위함이다. 전자기적 잡음을 미세한 전류를 유발하는데, 일반적으로 규정된 wiring 방법을 사용하는 경우, 4 mA는 이들 잡음성분에 비하여 충분히 큰 값이 된다.

마이크로프로세서가 보편화되며 최근에는 그림 1의 기본기능 이외에 많은 "smart" 기능을 가진 센서/전송기가 사용되고 있다. 이들은 소형 컴퓨터를 내장하고 있으며, 자동 영점/범위 조정기능, 자기진단기능, 각종 연산기능 등을 수행할 수 있다. Smart 센서/전송기는 그림 1 과 같이 4-20 mA로 출력신호를 전송하기도 하며, 디지털 신호를 출력을 하기도 한다. 디지털 신호로 연결되는 경우는 제어기에서 명령(영점보정, 자기진단 수행 등)을 내릴 수도 있어 원격으로 smart 기능을 구동시킬 수 있는 잇점이 있다. 그러나 디지털 방식은 아직 국제적으로 표준화가 이루어져 있지 않아, 타회사 제품과의 호환에 문제가 생길 수 있다.

센서/전송기에 대한 최근의 매우 중요한 추세 중 하나는 fieldbus 개념이다. 이것은 단순한 디지털화를 한 단계 격상시킨 network 개념으로 그림 2와 같이 1개의 통신선 밑에 여러 개의 smart 센서/전송기 (제어발브도 포함)를 multidrop방식으로 설치하는 개념이다.

Fieldbus는 신호전송선의 비용을 대폭 줄일 수 있고, 유지보수를 간편하게 하는 획기적인 개념이다. 이 전송방법에 대한 기술적인 구현에는 사실 아무 문제가 없

으나 1984년 ISA에서 SP50 표준규약을 제정한 이후, 각 제조회사 등 관련기관 간의 이익이 서로 대립하며 추가적인 통신표준화가 이루어지지 않아 아직 본격적인 상용화가 시작되지 못하고 있는 실정이다.

이제 온도, 유량, 압력, 액위의 네가지 공정변수에 대해 산업적으로 중요한 측정방법을 간단히 살펴보기로 하자.

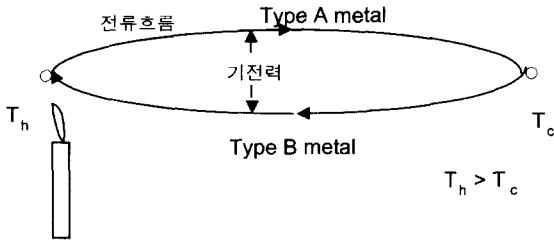


그림 3. Seebeck 효과.

2.2 온도

전기식 계장에서 산업적으로 중요한 온도측정방법은 크게 열전대 (TC, thermocouple)와 축온저항체(RTD, resistance temperature detector)를 이용한 두가지가 있다.

2.2.1 열전대

열전대는 그림 3과 같이 종류가 다른 임의의 두 금속선을 양끝에서 이었을 때 두 접점 사이의 온도가 다르면 기전력이 발생한다는 Seebeck 효과를 이용한 것이다. 이때 기전력은

$$E_o = f(T_m, T_c, \text{금속의 종류}) \quad (1)$$

의 함수관계를 가지며 금속쌍의 종류, 냉접점의 온도가 고정되면 측정점 T_m 만의 함수로 나타나므로 온도의 측정에 이용할 수 있게 된다. 냉접점의 온도는 0 oC가 표준이며 이런 이유로 냉접점을 흔히 ice point 라 부른다.

열전대를 이용하여 실제로 온도를 측정하는 방법은 그림 4(a)와 같다. 기전력을 측정하기 위해서는 전압계의 리드선(구리선)이 연결되어야 하며 이 연결접점을 0 oC에 유지시키면 식 (1)와 같은 기전력이 얻어진다. 열전대 전용 계측기 혹은 전송기는 그림 4(b)와 같이

전기적으로 영점을 보상하는 회로가 내부에 구성되어 있으므로 사실 사용자가 자세히 그 원리를 알 필요는 없다.

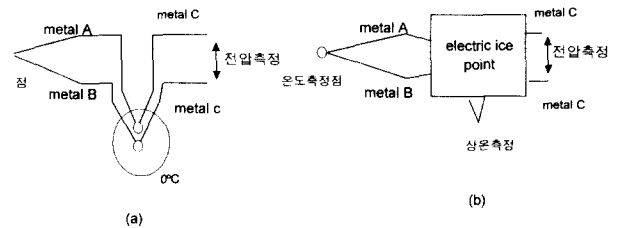


그림 4. 열전대를 이용하여 온도를 측정하는 방법.

- (a) Ice point 를 직접 이용,
- (b) 전기 영점보상회로를 이용하는 방법.

열전대의 온도에 따른 기전력은 좁은 온도범위에서는 (K-type 인 경우 대략 0-200 oC 의 범위) 대체로 선형성이 좋은 편이지만 넓은 온도범위에서는 선형성이 좋지 않다. 그러나 전용 전송기를 사용하는 경우는 전송기 내부에서 필요한 선형화를 수행하므로 큰 문제가 될 것이 없다. 정밀도(accuracy)는 열전대의 종류, 열전대 합금의 순도, 접점을 만드는 방법 등에 따라 대략 $\pm 0.5 - \pm 1.0^\circ\text{C}$ 정도의 오차를 갖는다. 그러나 이 오차는 임의오차(random error)가 아니며, 재현성은 좋기 때문에 보정을 잘 하는 경우 매우 정밀한 센서가 된다.

2.2.2 축온 저항체

축온저항체는 금속의 비저항이 온도에 따라 증가하는 원리를 이용한 것으로, 보통 0 oC에서 100 Ω 을 갖도록 한 Pt-100 Ω 이라 부르는 백금선을 감아놓은 저항체가 가장 많이 이용되고 있다. Pt-100 Ω 은 다시 온도계수가 0.385 $\Omega/^\circ\text{C}$ 와 0.3916 $\Omega/^\circ\text{C}$ 인 두가지 표준규격이 가장 많이 사용된다. 0.385 $\Omega/^\circ\text{C}$ 은 미국과 서유럽의 표준규격이며 0.3916 $\Omega/^\circ\text{C}$ 은 일본의 표준규격으로 사용되는 것이다. 현재 국내에서 보급되고 있는 것은 대부분이 0.385 $\Omega/^\circ\text{C}$ 규격이다. 축온저항체는 산업용 온도센서 중에서는 가장 직선성이 좋으며 산업용급은 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 정밀도를 갖지만 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의

정밀도를 갖는 계측기급도 있다.

측온저항체는 저항을 측정하여 온도를 읽는 것이므로 리드선의 양단으로 저항을 직접 읽으면 리드선의 저항까지가 함께 읽혀져 오차의 원인이 된다. 따라서 리드선의 저항을 상쇄시켜 측정시 그 영향이 나타나지 않도록 하기 위해서 그림 5와 같이 3-wire 혹은 4-wire 형태로 제작된다. 3-wire 형에서는 Wheatston bridge라는 회로를 이용하여 저항변화를 전압으로 변환시키는데 저항체의 온도에 대한 직선성을 보존하기가 어려운 단점이 있으며, 4-wire 형은 정밀한 정전류원(constant current source)을 필요로 하나 측온저항체의 직선성을 그대로 유지시킬 수 있는 장점이 있다. 산업계에서는 전통적으로 3-wire 측온저항체가 주로 사용되어 왔으나, 최근 간단하고 정밀한 정전류원용 IC 가 많이 소개되면서 상대적으로 성능이 우수한 4-wire 측정이 점차 보편화되는 추세이다.

3-wire 형이든 4-wire 형이든 측온저항체는 기본적으로 저항체에 전류를 흘리고 이때 양단에 발생하는 전압을 읽어 저항변화를 감지하기 때문에, 측온저항체 자체가 발열을 하여 온도측정오차를 유발하는 문제점을 가진다. 산업계측에서는 4-wire 형의 경우 1mA의 전류를 공급하는 것이 표준이며, 이때 측온저항체가 100 Ω (0 °C, Pt-100 Ω)의 저항을 갖는다면 $i^2R=0.1mW$ 의 열을 발생하게 된다. 이 정도의 열은 액체나 전열이 좋은 금속 등의 온도를 측정하는 경우, 무시될 정도의 온도측정오차를 주지만, 흐름이 없는 대

기의 온도를 측정하는 경우는 0.1 - 0.5 °C 까지의 측정오차도 나타낼 수 있다. 따라서, 단열효과가 강하거나 열적으로 밀폐된 지점의 온도측정에는 측온저항체를 사용하지 않는 것이 좋다.

산업용 온도센서에서는 위의 두가지 외에도 다음의 것들이 중요하다.

- 더미스터(thermistor) : 반도체소자로 되어 있으며, 온도가 상승함에 따라 저항이 감소하다. 매우 정밀한 성능의 제품제작이 가능하나 측정온도 범위가 좁고 비선형성이 강하다. 가전제품, 실험장비에서 주로 사용된다.

- 팽창식 온도계 : 튜브내에 가스 (보통 질소), 액체 (oil 계통) 등을 채워 온도에 따라 이들이 나타내는 팽창압력을 이용하여 온도를 측정하는 센서이다. 과거 공압식 계장에서 많이 사용되었으며 현재도 일부 가전용 전열제품에서 사용되고 있음. Bimetal을 이용한 것도 있다.

- 비접촉식 온도계 : 열원에서 복사되는 적외선의 파장과 강도로 부터 열원의 온도를 측정하는 장비이다. 고온이거나, 센서설치가 곤란한 곳에 이용된다. 열원의 emissivity 를 정확히 보정하지 않으면 많은 오차가 발생하는 단점이 있다.

2.3 유 량

유량측정은 많은 방법으로 이루어지고 있으나 가장 보편적인 것은 그림 6과 같이 오리피스(orifice)를 이용하여 차압을 읽는 방법이다. 오리피스 메타는 구멍의 위치, 형태에 따라 sharp edge, quadrant edge, segmental edge, eccentric edge 등 여러 종류가 있으며 (그림 7) 압력을 읽기 위한 탭(tap)을 내는 방법에 따라 flange tap, vena contracta tap 등이 있다. 이들 각각이 상당히 다른 특성을 갖는 것은 아니며, 유체 내의 부유물이 있는 있는 경우 이들이 침적되는 것을 막기 위하여, 점도가 큰 유체의 경우 이들이 원활히 흐를 수 있게 하기 위하여, orifice에서의 압력강하를 줄이기 위한 목적 등으로 변형된 것이다. 이들은 어느 형태든

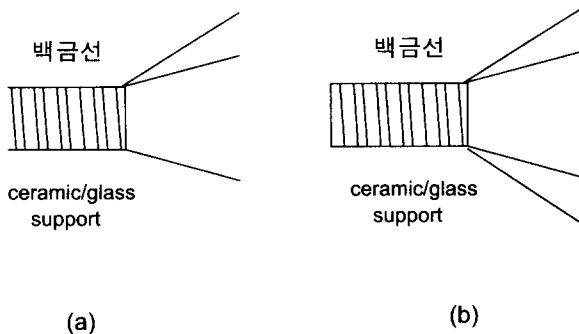


그림 5. 측온저항체의 모양.
(a) 3-wire 형, (b) 4-wire 형.

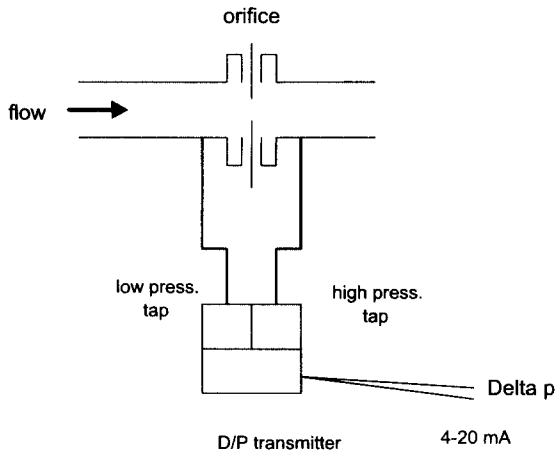


그림 6. 오리피스메타와 차압기를 이용하여 유량을 측정하는 방법.

난류의 영역에서

$$q = C_o \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

의 관계가 성립한다. 여기서 q 는 부피유량, Δp 는 차압, 그리고 C_o 는 오리피스 상수이며 오리피스의 종류, 오리피스 구멍과 배관내경의 비, 그리고 압력측정 탭의 위치에 따라 값이 달라진다.

오리피스/차압계는 가장 범용적으로 사용되는 비교적 저가의 유량계이지만 다음의 문제점들을 가지고 있다.

첫째, 최대 측정가능유량과 최소 측정가능유량의 비, 즉 turndown ratio (혹은 rangeability) 가 3:1 정도밖에 되지 않는다. 이 범위를 벗어나면 식 (2)의 보정이 맞지 않는다.

둘째, 많은 압력손실을 일으킨다.

셋째, 오리피스의 여러 변형에도 불구하고, 구멍을 막을 염려가 있는 슬러리성 유체, 점도가 높은 유체에는 사용할 수 없다.

넷째, 유체는 오리피스를 통과하며 선속도가 커져 압력이 낮아지는데 이때 증발을 일으킬 염려가 있는 유체에 대해서는 사용할 수 없다.

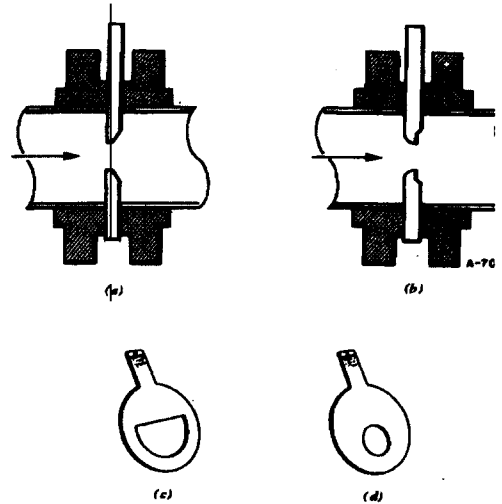


그림 7. Orifice의 종류.

- (a) sharp edge, (b) quadrant, edge
- (c) segmental edge, (d) eccentric edge.

유량계는 오리피스/차압계 외에도 상당히 많은 종류가 있다. 이들 중 산업용으로 많이 사용되는 유량계에는 turbine, Oval 유량계와 같이 유체가 흐르며 turbine 혹은 oval 형태의 회전체를 회전시키도록 하고 단위시간당 회전수를 세어 유속을 측정하는 용적식 유량계, 자기장내에 전해된 이온의 흐름에 비례하여 전위가 발생하는 원리를 이용한 자기식(magnetic) 전자유량계(이온의 밀도가 매우 낮은 유체에는 사용할 수 없음), 유체에 음파를 쏘아 Dopler 효과 등을 이용하여 유속을 측정하는 초음파 유량계, 배관내에 흐름 방해판을 두고 이 방해판에 의해 발생하는 vortex의 주기를 측정하여 유량을 측정하는 vortex 유량계(혹은 타켓식 유량계), 유체에 펄스로 열을 가하고 온도감지기로 이 펄스의 이동속도를 측정하는 thermal pulse 유량계 등 실로 많은 종류가 개발되어 있고, 또한 많이 사용되고 있다. 이들 각각은 나름대로의 장단점을 가지고 있으며, 일반적으로는 오리피스/차압계에 비하여 정밀도, turndown ratio, 압력손실의 면에서 모두 우수하나, 상대적으로 가격이 높은 것이 단점이다. 위의 유량계 중 positive displacement 형은 회전체의 회전수를 누적함으로써 누적유량을 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있고 매우 낮은 유량에서도 원활하게 동작이 되므로,

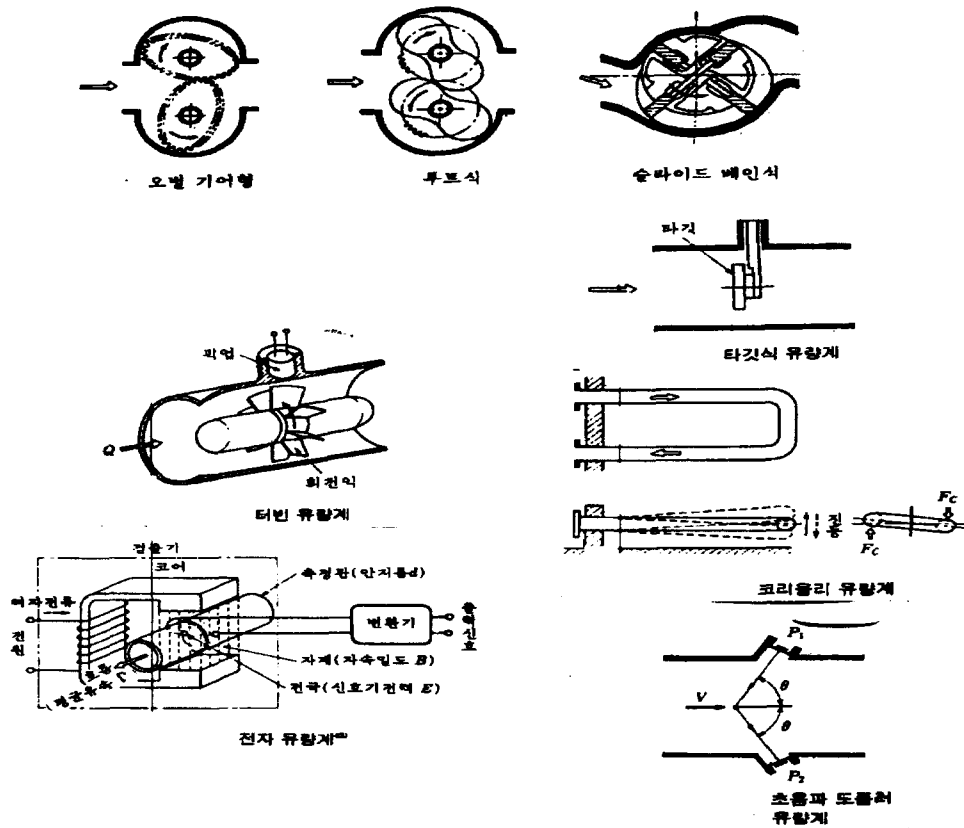


그림 8. 각종 유량계.

회분식공정의 원료투입 등의 용도에 많이 활용된다. 그림 8에 이들의 개략도를 보였다.

최근에는 어떤 물체가 직선운동을 하며, 원운동을 할 때에 나타내는 Coriolis 힘을 응용한 질량유량계의 보급이 많이 이루어지고 있다. 이 질량유량계는 그림 8에 함께 보인 것과 같이 단순한 U자형의 관에 유체가 흐르도록 한 것으로 관 내부에는 아무런 구조물이 없다. 유체가 U자 관을 직선으로 흐르며 원운동을 시작하게 되면 유체의 질량속도에 비례한 Coriolis힘에 의하여 관을 휘려는 힘이 작용하게 되고, 이때 관은 자신의 탄성의 의해 복원하려는 힘이 작용된다. 결국 유체질량속도에 따라 일정한 진동이 U 관에 발생하며, 이를 측정하여 질량속도를 계측한다. 질량유량계는 질량유속을 직접 측정할 수 있고, 흐름을 방해하는 아무런 구조물이 관내에 설치되어 있지 않아 압력강하도 매우 낮을 뿐 아니라, 높은 점도, 슬러리 등에도 사용할 수 있다

는 장점이 있다. 그러나 낮은 유량에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다.

2.4 액 위

액위의 측정도 액체의 다양한 물성 때문에 유량측정만큼이나 그 방법이 다양하다. 그러나 이 중 가장 일반적인 방법은 유량의 경우와 같이 차압계를 이용하는 방법이라 할 수 있다.

차압계를 이용하여 액위를 측정하는 기본 원리는 그림 9와 같다. 액체의 밀도 ρ 를 알고 있다고 할 때에 액위는 차압과

$$\Delta p = \rho g h \quad (3)$$

의 관계를 가진다. 여기서 차압계의 고압측은 탱크내의 액체와 접촉하고 있어야 하며, 차압계의 저압측은 탱크

내의 기체층과 접촉하고 있어야 한다. 여기서 주의할 점은, 탱크 내의 기체층은 액체와 포화상태로 이루는 포화기체인 경우가 많기 때문에 이들이 응축되어 저압측 배관을 일부 채울 가능성이 항상 있다는 것이다. 저압측 배관내 응축액의 액위를 h_{low} 라 한다면, 이때 차압계의 측정치는

$$\Delta p = \rho g(h - h_{low}) \quad (4)$$

가 되므로, 실제 액위를 측정할 수 없게 된다. 이 문제를 방지하기 위해서는 그림 9과 같이 응축수가 차압계 저압측으로 넘어가지 못하도록 배관을 설계하여야 한다.

액체가 부식성이 강하든지, 슬러리 상태이어서 차압계내에 가루가 찰 염려가 있든지, 아니면 용융상태의 액체가 차압계쪽 배관에서 굳을 염려가 있다면 액체를 직접 접촉시키는 것이 문제가 된다. 이러한 경우에는 그림 9(b)와 같이 기체공급라인을 이용하여 기체(보통은 공기)가 탱크내 압력과 균형을 이루며 조금씩 흐르도록 하면 이 기체의 차압이 곧 액위에 의한 차압과 일치하므로 비접촉 방식으로 액위를 측정할 수 있게 된다.

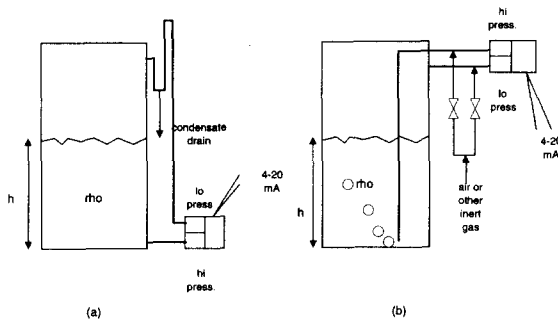


그림 9. 차압계를 이용한 액위의 측정 :
(a) 접촉식, (b) 비접촉식.

액위 계측방법은 차압계를 이용하는 방법 외에도 부위를 이용하여 그 변위를 전기신호로 변환하는 방법, 액체내에 감지봉(probe)을 넣어 액위에 따라 변하는 용량(capacitance)을 측정하는 방법, 초음파를 쏘아 반사파와의 위상차이를 측정하여 계측하는 방법, 방사선을 탱크외부에서 조사하여 흡수도의 변화로 부터 액위를

측정하는 방법 등이 액체의 성질에 따라 사용되고 있다.

2.5 차압계의 기타 응용; 액체의 밀도,

비혼합 액체층의 경계액위, 압력의 측정

앞에서 살펴본 것과 같이 차압계는 유량, 액위의 측정에 모두 이용될 수 있다. 차압계의 응용은 여기에 그치지 않는다. 먼저 차압계 자체가 압력계이므로 압력의 측정도 가능하다. 이는 당연한 이야기이다. 실제로 절대 압력계는 차압계의 보통 저압부에 일정한 압력의 가스를 채워 밀봉한 구조를 가지고 있다. 차압계는 이외에도 액체의 밀도, 비혼합 액체의 경계액위의 측정에도 이용된다.

그림 10은 두 액체의 밀도 ρ_1, ρ_2 를 각각 알고 있을 때 이 경계면을 측정하기 위한 연결도를 보인 것이다. 여기서 h_2 는 고정된 값이므로

$$\begin{aligned} \Delta p &= \rho_1 g h + \rho_2 g(h_2 - h) \rightarrow h \\ &= \frac{\Delta p - \rho_2 g h_2}{(\rho_1 - \rho_2) g} \end{aligned} \quad (5)$$

의 관계로 계면을 측정할 수 있다. 액체의 밀도를 모를 경우에는 그림 10과 같이 설치함으로써 밀도를 측정할 수 있다. h 가 고정되어 있으므로

$$\Delta p = \rho_1 g h \rightarrow \rho_1 = \frac{\Delta p}{g h} \quad (6)$$

의 관계로 밀도를 쉽게 계측할 수 있다. 이러한 밀도 측정과 함께 그림 9의 계면측정을 조합하면 밀도를 정확히 알 수 없는 임의의 두 액체에 대한 계면도 계측할 수 있게 된다.

차압계를 이용한 이런 다양한 응용은 매우 간단한 원리를 이용한 것으로 이미 잘 알려진 것이지만, 차압계의 정밀도(accuracy, 측정오차/측정범위)가 0.2 - 0.5% 정도로 낮았던 과거에는 사실상 응용이 많이 이루어지지 않았던 방법이다. 그러나 최근의 디지털화된 차압계들은 대부분 0.1% 이하의 정밀도를 보장하고 있어 그 응용이 기대된다.

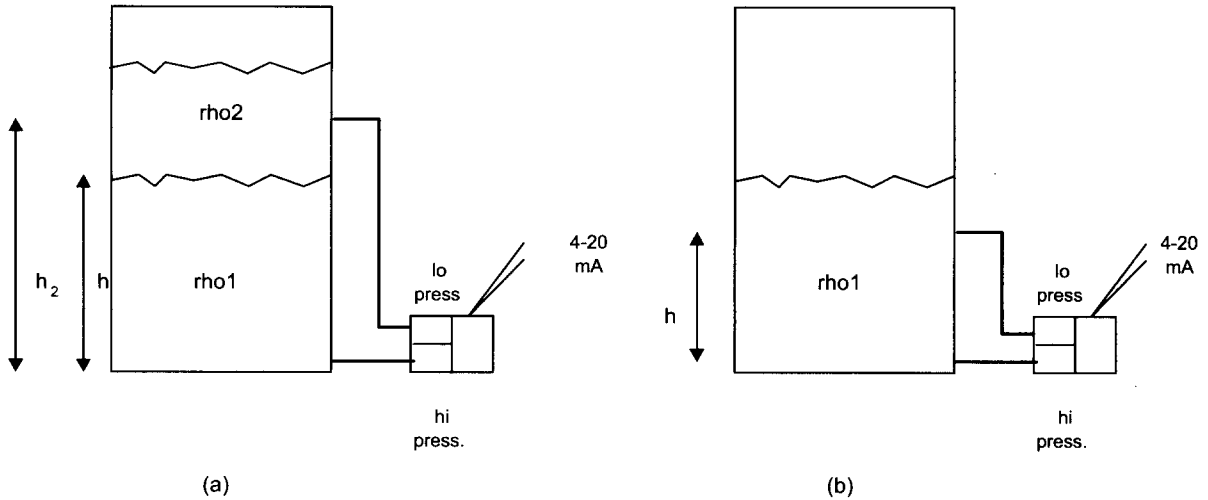


그림 10. (a) 두 비혼합 액체의 계면을 측정하는 방법, (b) 액체의 밀도를 측정하는 방법.

3. 제어밸브

제어기의 제어명령은 최종 구동기(actuator)를 동작 시키게 되는데 화학공장에서는 제어밸브가 대부분의

경우 최종 구동기로 사용된다. 제어밸브는 유체의 유량을 조절하는 기능을 하며, 기체의 유량을 조절하여 압력을 제어하고, 액체의 유량을 조절하여 유량, 수위, 농도 등을 조절하며, 스팀량을 조절함으로써 온도를 조절하는데 사용된다. 온도의 조절을 위해서는 전기히터를 설치하고 전력을 직접 조작할 수도 있으나 화학공장에서는 안전의 이유로 전기를 직접 조작하는 일을 가급적 피하고 있다. 최근에는 액체의 유량을 조작하는 방법으로 인버터를 이용하여 펌프모터의 회전수를 직접 조작하는 일이 많은 관심을 끌고 있으나 아직은 많이 보편화 되어 있지 않다. 인버터를 이용하는 방법은 뒤에서 간단히 다시 언급하기로 한다.

제어밸브는 제어계의 성능에 결정적인 영향을 주기 때문에 올바른 선택이 매우 중요하다.

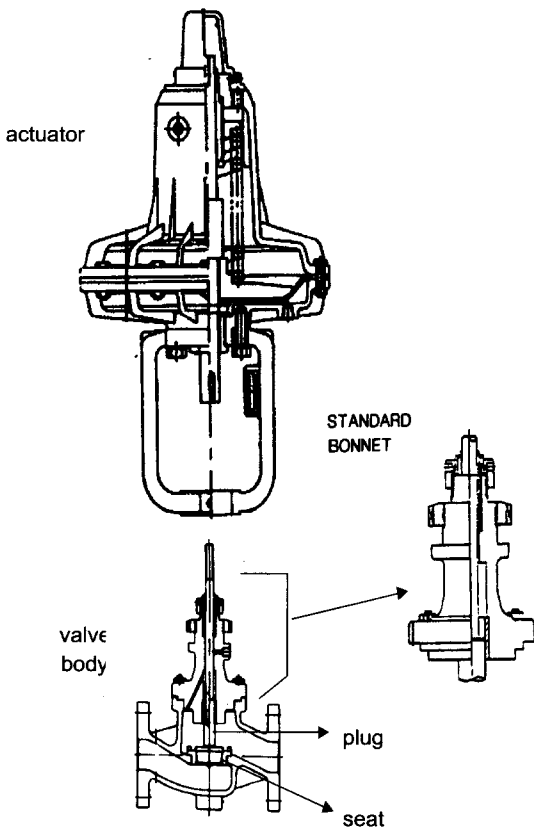


그림 11. 제어밸브의 구조.

3.1 제어밸브의 구조

제어밸브는 일반적으로 그림 11과 같이 밸브본체부(valve body assembly)와 구동부(actuator)의 두 부분으로 크게 나뉘어진다. 밸브본체부와 구동부 목적에 따라 각각 따로 선택할 수 있다.

3.1.1 밸브본체부

밸브본체부는 다시 밸브본체(valve body), 밸브 트림 세트(valve trim set), 윗덮개(bonnet)의 세 부분으로 나누어 볼 수 있다.

발브본체: 발브본체는 그 종류가 매우 다양한데 크게 글로브(globe) 발브와 같이 발브개폐가 발브플러그의 상하 움직임으로 이루어지는 왕복형과 버터플라이(butterfly) 혹은 볼(ball) 발브와 같이 회전움직임으로 발브개폐를 시키는 회전형이 있다. 최근에는 대구경 배관에서의 유량조절에 구조가 간단하고 저가인 버터플라이형 제어발브가 많이 채택되고 있으나 여기서는 왕복형 발브만을 대상으로 설명하기로 한다.

그림 12에 왕복형 발브의 대표적인 두 형태를 보였다. 가장 많이 사용되는 것이 그림 12(a)의 단좌형(single-seated) 글로브 발브이다. 이 발브는 폐지기능(shut-off)이 우수한 반면, 발브차압이 플러그에 그대로 작용하여 상부로 발브로 밀어올리는 불평형힘이 작용하기 때문에 대구경 발브, 차압이 큰 경우에는 구동부를 큰 것으로 선택하여야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완한 것이 그림 12(b)의 복좌형(double-seated) 발브이다. 유입된 유체가 발브시트의 상부와 하부로 함께 흘러나가기 때문에 플러그에 작용되는 힘이 평형을 이루어 상쇄된다. 따라서 대구경, 고압, 고차압에서도 사용되는 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 발브폐지기능이 약하여 정격 Cv의 최고 0.5% 정도의 누설이 있을 수 있다.

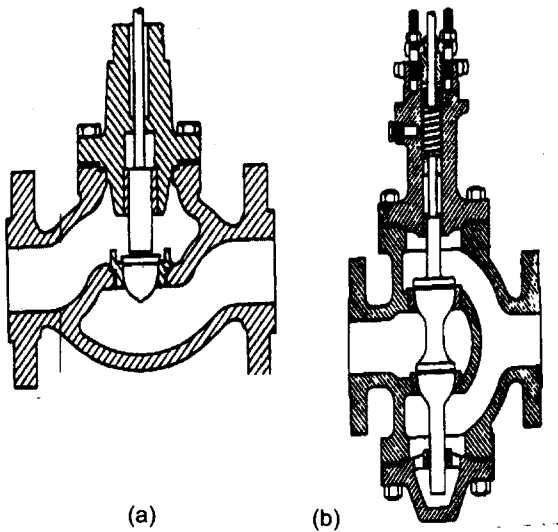


그림 12. (a) 단좌형 (single-seated) 발브, (b) 복좌형(double-seated) 발브.

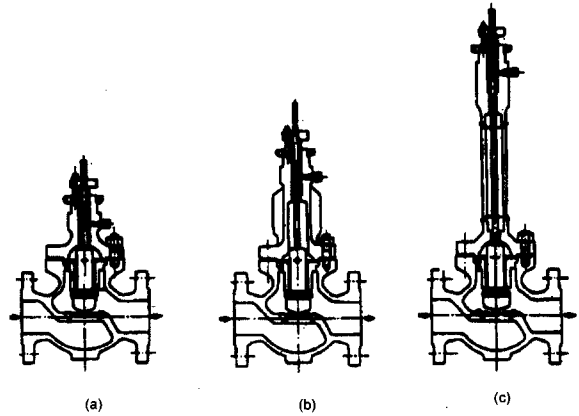


그림 13. (a) 표준형, (b) 고온형, (c) 저온형 윗덮개.

플러그, 트림 세트: 발브 트림 세트(trim set)는 플러그와 발브 seat의 조합을 말한다. 이들의 조합에 의하여 발브의 사이즈(Cv), 유량특성이 결정되는 것이다. 발브 플러그에 대해 한가지 첨언할 것은 guiding에 관한 것이다. 플러그 guide는 플러그 축이 정확하게 중심을 유지하도록 하는 기계적 설계에 관계되는 것이다. 발브크기가 작고 낮은 압력에서 운전되는 경우는 이것이 문제되지 않으나, 발브가 커지고 운전 압력 혹은 차압이 커지면 축이 휘 열려가 있기 때문에 복잡한 guide가 필요하게 된다. Skirt형 혹은 cage형이 흔히 사용된다.

윗덮개(bonnet) : 윗덮개는 표준형, 고온용, 저온용, 그리고 윗덮개로의 누설을 완전하게 차단하기 위한 벨로우(bellow) 형으로 크게 나누어 볼 수 있다. 고온용이나 저온용은 그림 13에 보인 것처럼 긴 형태 혹은 방열판(fin)을 보완한 형태를 갖도록 하여 누설방지 패킹(packings)의 탄성이 고온/저온의 영향을 받지 않도록 한 구조를 가지고 있다.

발브본체에 관해서는 위의 사양 외에도 배관접속방법(flange, thread, welding..), 내압, 재질 등이 문제가 된다.

3.1.2 구 동 부

발브 플러그의 왕복 움직임을 유도하는 구동부는 모터에 의한 전기식도 소개되고 있으나, 안전상의 이유

등으로 현재도 대부분 3-15 psi (20-100 kPa, 0.2- 1.0 Kg/cm²)의 공기압으로 작동하는 스프링 반발 격막 (diaphragm)형이 사용된다.

그림 14에 작동방향에 따른 두가지 격막형인 ATC (air-to-closed) 형과 ATO (air-to-open) 형을 보였다. ATC 형은 공기압이 격막상부이 가해져 (공기압)x(격막면적)의 힘이 하부로 미치며 스프링과 균형을 이루는 위치까지 발브스텝(stem)을 이동시키는 구조를 갖고 있으며, NO (normally open), FO (fail open), 혹은 direct acting 형이라 부르기도 한다. ATO는 ATC의 역으로 작용하며 NC (normally closed), FC (fail closed) 혹은 reverse acting 형이라 부르기도 한다. 발브작동방향을 ATC, ATO 중 어느 것으로 선택하느냐 하는 것은 전적으로 fail-safe 위치가 어느 쪽이냐 하는 것으로 부터 결정된다. 예를 들어 냉각수양을 조절하여 반응온도를 제어하는 응용에서는 제어계통에 이상이 발생하여 공기공급이 안될 때 스스로 안전한 위치를 찾아갈 수 있도록 ATC (FO, NO) 형을 선택하여야 할 것이다.

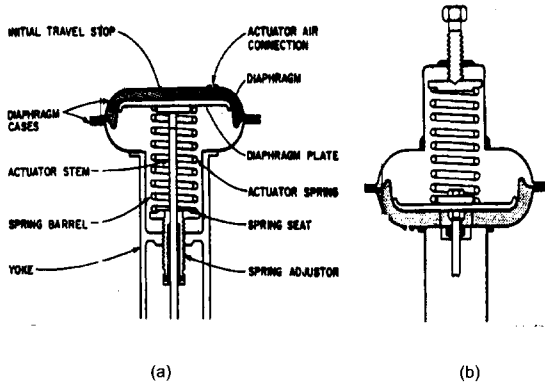


그림 14. 스프링 반발식 격막형 구동부:
(a) ATC 형, (b) ATO 형.

격막의 면적은 플러그에 작용하는 불평형력이 얼마나 크냐에 따라 결정된다. 배관내 유체압력이 크고 이 힘이 불평형력으로 플러그에 작용하면 이 힘을 이기고 발브위치를 유지시키기 위해서는 큰 면적의 격막을 가진 구동부를 선택하여야 한다. 격막의 면적이 커지면 힘은 강해지나 동작이 느려지는 단점이 있다. 예를 들

어 격막직경 12 cm의 구동부는 0.2-1 초 정도의 시정수를 가지며 직경의 2승에 비례하여 시정수가 늘어나는 경향을 보인다.

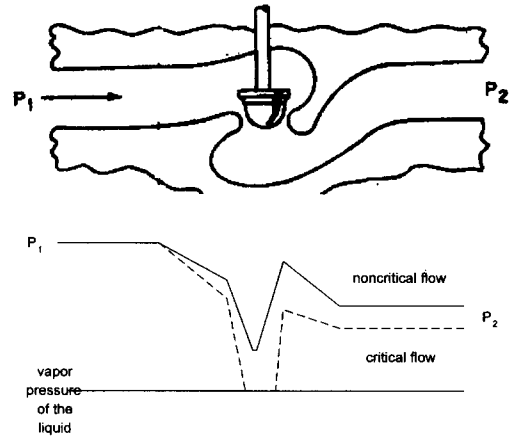


그림 15. 발브내 유체의 압력분포.

3.2 발브의 Sizing

3.2.1 발브 내의 압력분포

발브의 sizing 이전에 액체가 흐르는 경우 먼저 이해하여야 할 것은 발브내의 유속에 따른 압력분포이다. 그림 15에 보인 것과 같이 발브 내의 유로는 seat/plug 지점에서 가장 좁아지며, 유속이 최대가 된다. 따라서 Bernoulli의 정리에 의하여 이 지점에서의 압력이 최저로 떨어진다. 일단 seat/plug 지점을 지나면 유로가 넓어지므로 속도가 원래의 값으로 회복되고 압력도 회복된다. 그러나 발브내의 심한 마찰로 압력은 원래의 값으로 완전히 회복되지 못하며 어느 정도의 손실을 갖게 된다. 여기서 문제가 되는 것은 최저점 압력이다. 만약 유체가 높은 온도를 가지고 있어 이 지점에서 압력이 액체의 증기압 이하로 떨어지려 한다면 액체는 끓게 되며, 이 상태를 임계흐름 (critical flow)상태라 부른다. 이에 따른 두가지 문제가 발생한다. 첫째는 증기가 발생함(cavitation)에 따라 발브의 유량특성이 정상적인 관계식을 만족하지 못하게 된다는 것과, 둘째는 발생된 증기가 seat/plug 지점을 벗어나며 압력이 회복될 때 액체로 되돌아가며 implosion이 발생하고 이로 인해 심한 소음과 진동이 발생할 수 있다는 것이다. 이런 현상은 흔히 나타날 수 있으며 나는 일로,

implosion에 의한 소음과 진동을 줄이기 위하여 plug의 guide에 여러 개의 작은 구멍을 내어 증기방울을 잘게 부술 수 있도록 하기도 한다. 심한 경우 밸브 하부에서 압력이 충분히 회복되지 못하여 유체가 여전히 증기상태로 남아있게 되면 증기로 팽창된 유체가 배관을 때우며 흐름이 원활해지지 못하는 choked 흐름상태에 까지 이르게 된다.

기체가 흐른 경우, 위와 같은 문제는 발생할 수 없으나 seat/plug 지점에서 기체의 선속도가 음속에 가까워지면 흐름의 특성이 비정상적으로 나타나는 임계흐름 상태가 된다. 일반적으로 기그림 15. 밸브내 유체의 압력분포. 체배관은 기체의 선속도가 20 m/sec - 40 msec가 되도록 설계되므로, 운전상태가 변경됨에 따라 유로가 좁아지는 seat/plug 지점에서 선속도가 음속에 가까워지는 경우가 흔히 나타난다.

3.2.2 유량계수 (Flow Coefficient) Cv

공정이 요구하는 유량을 얻고 원하는 범위에서 조절을 하기 위해서 해당되는 용량을 가지는 밸브를 선택하는 일을 sizing 이라 한다. 여기서 가장 중요한 것은 최대 제어유량을 결정하는 trim set를 결정하는 것으로, 이를 위한 방법으로는 1944년 Masoneilan 사가 제시한 "Cv 법"이 가장 보편적으로 사용된다. Cv 는 밸브를 완전히 열고 (full open) 물(비중=1)을 흘릴 때 밸브양단에 1 psi 의 압력차에 의해 나타나는 유량을 gpm (US gallon per minute)로 나타낸다. 따라서 Cv= 3인 밸브는 1 psi의 차압에 의해 물을 최고 3 gpm 로 흘릴 수 있다.

밸브 성능(sizing) 식 : 밸브의 Cv 를 결정하는 성능식은 밸브제조회사 마다 조금씩 다른 모양을 갖는다. 그러나 일반적인 형태는 거의 대동소이하며 비압축성 유체와 압축성 유체에 따라, 임계흐름(critical flow)이냐 정상흐름(subcritical flow)이냐에 따라 달라진다. 각 밸브제조회사 마다 이 모든 경우에 대한 그들 나름의 sizing식을 제공하며, 따라서 여기서는 자세한 내용은 피하고 정상흐름인 경우에 대해서만 언급하기로 한다.

밸브 양단의 압력강하와 유량사이의 관계는 orifice와

사실상 똑같은 상황이므로 기체, 액체 공히 난류의 정상흐름 영역에서 다음의 관계식이 성립한다.

$$q = C_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{G_f}} \quad (7)$$

여기서 액체의 경우 표준적으로 q는 US gallon/min의 단위를 갖는 부피유량, Δp는 psi 단위의 밸브양단 압력차, G_f는 액체의 비중(물에 대한 상대값), 그리고 C_v가 유량계수로서 밸브의 개도의 함수이다. 흔히 C_v라고 이야기할 때에는 개도가 100%일 때의 값을 이야기 한다. 식 (7)로부터 C_v는 다음과 같이 계산된다.

$$C_v = q \sqrt{\frac{G_f}{\Delta p_v}} \quad (8)$$

이 식으로부터 C_v는 밸브를 완전히 열고 (개도=100%) 물(비중=1)을 흘릴 때 밸브양단에 1 psi 의 압력차에 의해 나타나는 유량을 gpm (US gallon/minute)로 나타낸 것임을 알 수 있다.

3.3 밸브의 유량특성

제어밸브의 개도에 따른 유량변화특성은 고유유량특성 (inherent flow characteristics)과 설치유량특성 (installed flow characteristic)의 두가지 관점에서 살펴야 한다. 고유유량특성이라 함은 밸브양단의 압력차를 일정하게 유지시킨 상태에서 개도와 유량 사이의 관계를 나타내는 것이며, 설치유량특성이란 배관내에 제어밸브가 설치되었을 때 개도와 유량 사이의 관계를 나타내는 것이다. 배관내에 제어밸브가 설치되면 밸브양단의 차압이 개도에 따라 변할 수 있기 때문에 실제로는 설치 유량특성이 중요하다.

3.3.1 고유유량특성 (Inherent Flow Characteristics)

밸브양단의 차압을 일정하게 유지시킨 상태에서 개도와 유량 (혹은 Cv) 사이의 관계는 그림 16과 같이 (quick opening (QO), linear, equal percentage (EQ%)의 세가지 형태로 나누어진다. 이들 특성 중 QO 는 개폐용의 기능을 목적으로 제작되는 것이며 유량조절 (throttling) 기능을 갖는 것은 아니다. 왕복형 밸브는

trim set의 설계방법에 따라 이 세가지 특성을 모두 나타낼 수 있으며 버터플라이밸브, 볼밸브 등 회전형 밸브는 대체로 EQ% 특성을 보인다.

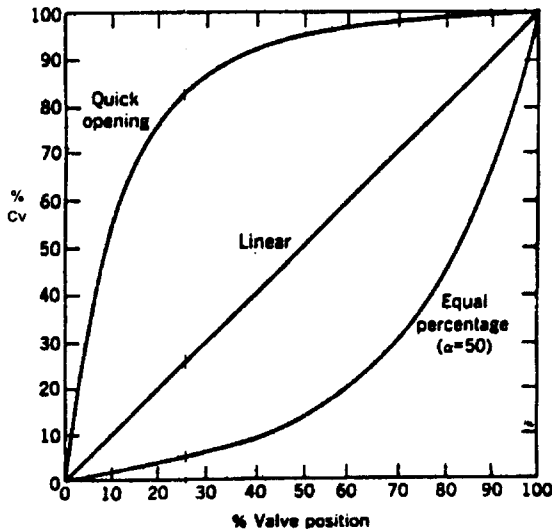


그림 16. 제어밸브의 고유유량특성.

Linear 형 : Linear 형 밸브는 일정한 밸브차압조건에서 유량이 개도에 비례하는 특성을 주는 밸브로 개도와 Cv (∝ 유량) 사이의 관계는 식 (9)와 같다.

$$f = v \tag{9}$$

여기서 f = fractionalCv(0-1), $C_v(v) / C_v(1)$

v = valve position (0-1)

EQ% 형 : EQ% 형 밸브는 Cv 상대변화량이 Δv 에 비례하는 밸브로 식 (10)으로 그 특성이 표현된다.

$$\frac{\Delta f}{f} = a \Delta v \rightarrow f = a^{v-1}, \quad a = e^a \tag{10}$$

이 식에서 a 는 $v=1$ 일 때의 유량 (∝ Cv)와 $v=0$ 일 때의 유량의 비이며 rangeability라 불리운다. 대부분의 EQ%형 밸브는 30-100 (보통은 50) 사이의 rangeability를 갖도록 제작된다. EQ% 밸브의 특성이 상당히 비선형적임에도 불구하고 이러한 밸브가 사용되는 것은 이어서 설명할 배관내에서의 설치유량특성이 선형적이기 때문이다.

3.3.2 설치유량특성 (Installed Flow Characteristics)

그림 17과 같이 배관내에 제어밸브가 설치되어 있다고 가정하자. 이제 여기서 설명하고자 하는 것은 배관이 충분히 길어 배관 압력강하가 큰 경우, EQ% 밸브가 개도에 따른 유량이 불완전하기는 하지만 선형적 관계를 갖는다는 것이다. 복잡한 수식은 피하고, 이 관계를 정성적으로 이해하기로 하자.

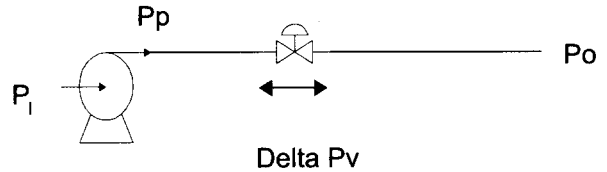


그림 17. 제어밸브가 설치된 배관.

그림17에서 펌프 유입부의 압력 p_I , 그리고 배관 토출부의 압력 p_O 는 주어졌다고 하자. 이때 유량 q 및 배관내의 각 지점의 압력은 배관, 펌프 및 밸브의 특성에 종속되어 결정된다. 이 관계를 단계적으로 이해하여 보기로 하자. 먼저 pump를 거치면서 pump 출구에서의 압력은 다음과 같이 상승한다.

$$p_p = p_I + f(q), \quad \text{여기서 } f(p) \text{는 펌프의 특성식} \tag{11}$$

다음으로 밸브를 지나며 잃는 압력은 다음과 같다.

$$\Delta p_v = (G_f / C_v(v)) q^2 \quad \text{밸브양단의 압력강하} \tag{12}$$

마지막으로 남은 압력차는 모두 배관에서의 압력강하로 나타날 것이다.

$$p_p - p_o - \Delta p_v = \beta q^2 \tag{13}$$

(배관에 의한 동압강하, 난류영역에서)

일반적으로 p_p 는 유량 q 의 증가에 따라 감소하므로, 식 (13)로부터 Δp_v 는 유량이 증가함에 따라(밸브

개도 v 가 커짐에 따라)는 작아짐을 알 수 있다. 따라서 일정한 Δp_v 에서는 $v \rightarrow 1$ 에서 유량을 가파르게 증가시키는 특성을 갖던 EQ% 발브의 기울기가 배관내에서는 완만해 지는 것을 알 수 있다. 한편 q 가 작을 때에는($v \rightarrow 0$) Δp_v 가 커지므로 작은 값을 갖던 고유유량특성의 기울기가 상대적으로 가파르게 변하게 됨을 알 수 있다. 결국 이러한 효과에 의하여 EQ% 발브는 배관내에 설치될 경우 불완전하나마 선형성을 회복하게 된다. 이때, 어느 정도로 선형성이 좋아지는가 하는 것은 배관에서의 압력강하와 발브압력강하의 상대적 비가 어느정도 인가에 의해 결정되며, 이것이 발브 sizing시 Δp_v 를 가정하는 근거가 된다. 만약 배관이 매우 짧다면 배관에서의 압력강하는 상대적으로 무시되므로, EQ% 발브의 설치유량특성이 선형화되는 효과는 기대할 수 없게 된다.

그림 18에 식 (11)-(13)의 관계를 보였다.

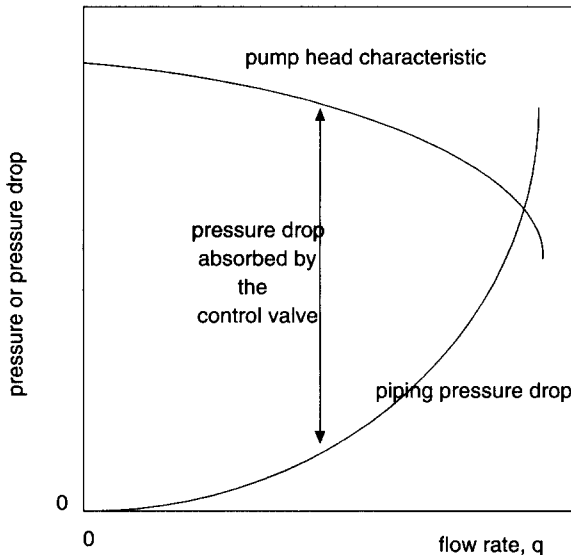


그림 18. 발브가 설치된 배관에서의 압력강하 상관관계.

3.4 발브차압의 선정, sizing

앞에서 발브의 sizing, 즉 C_v 의 결정은 Δp_v 가 주어져야 할 수 있는 것이며, 이때 Δp_v 는 배관의 압력강하와 균형을 이루어 선형적인 유량특성이 나타나도록

결정되어야 하는 것임을 이야기 하였다. 간단한 계산을 통하여서도 쉽게 확인할 수 있지만, EQ% 발브는 일반적으로 $v=1$ (fully open, q = 최대유량)일 때의 Δp_v 가 이때의 배관 동압강하(배관의 마찰에 의한 압력강하)의 20% - 50%의 넓은 범위에서 대체로 유사한 선형성을 보인다. 여기서 선형성을 얻기 위한 발브양단의 압력강하(압력손실)가 생각보다 큰 값을 알 수 있다. 한편 배관의 설계유량은 발브의 개도 $v=0.5-0.7$ 의 값에서 얻는 것이 보통이므로 이러한 사항들을 종합하여 발브의 sizing을 수행하게 된다.

구체적인 수치는 개인적인 선호도에 따라, 혹은 설계 회사의 지침에 따라 달라지나 전형적인 값의해 발브를 sizing하는 최종적인 과정을 기술하면 다음과 같다.

단계 1) 주어진 배관과 설계유량 $q_{requirea}$ 에

근거하여

단계 2) 에 $v=1$ 에서의 최대유량을

$$q_{design} = 2.0 q_{requirea} \text{로 계산}$$

단계 3) q_{design} 에서의 배관내 동압강하 $\Delta p_{\pi pe}$

를 계산

단계 4) $\Delta p_v = 0.25 \Delta p_{\pi pe}$ 로 이때의 발브차압 계산

단계 5) 식 (8)에 의하여 C_v 결정

단계 6) q_{design} 에서 $\Delta p_{\pi pe} + \Delta p_v + \text{정압}$ 을 만족시키며, $q_{requirea}$ 에서 최대효율을 주는 펌프 선정

위에서 단계 2)는 설계자에 따라 달라질 수 있는 부분이며, 단계 4)도 그러하다. 특히, 단계 4)의 Δp_v 는 최대유량 상태에서

- * 배관에서의 동압강하의 20 - 50 %
- * 배관에서의 동압강하의 25 % 와 10 psi 중 더 큰 값
- * 펌프 토출압의 10 %

등 여러 경험법칙들이 제시되어 있으며, 장거리 송유관과 같은 매우 긴 배관에서는 발브에서의 압력손실을

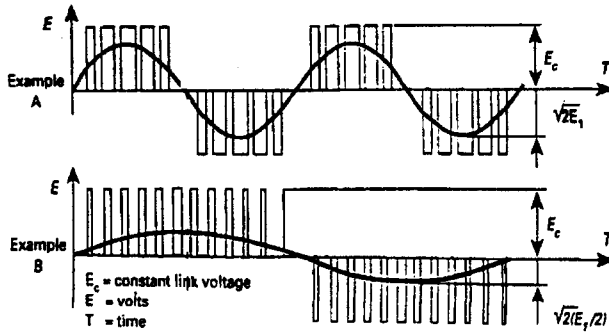


그림 19. 인버터의 작동원리.

PWM(Pulse Width Modulation) 방식에 의해 출력된, 정현파를 모방한 디지털 전압.

줄이기 위하여 전체 동압강하의 1% 이하로 밸브차압을 결정하는 경우도 많다. 일반 공정배관에는 배관내 동압강하의 20% 정도 이상 밸브차압을 주면 충분한 정도의 직선성이 얻어지는 것으로 알려져 있다.

4. 인버터(Inverter)에 의한 펌프유량조절

제어밸브는 유체가 가진 동적에너지의 일부를 마찰로 소산(dissipation)시켜 유량조절을 하는 것이므로 에너지 활용의 입장에서 보면 가용에너지의 일부를 잃어버리는 것이므로 바람직한 것이 아니다. 앞에서 언급한 것과 같이 이때 손실되는 압력은 생각 외로 큰 값이어서 (전형적으로는 최대유량시 30% 정도, 설계유량시 50% 이상) 대형공정의 경우 이에 따른 에너지 손실은 무시할 수 없는 큰 값이 된다. 한편 유체가 흐르지 않을 때에도 펌프는 계속 회전을 하여야 하므로 에너지 공급은 계속되어야 한다. 만약 펌프의 회전수를 직접 조작하여 유량을 조절할 수 있다면 제어밸브를 사용할 필요가 없을 것이며 또한 요구되는 유량을 이송하기 위한 전기에너지만 공급하면 되므로 불필요한 에너지 손실을 줄일 수 있게 될 것이다.

화학공장용 펌프는 안전상의 이유로 현재 대부분 교류유도전동기로 구동되며, 유도전동기의 이론회전수는 전동기의 구조 (2극 혹은 4극 등)와 교류전원의 주파수에 의해서 결정되기 때문에 회전수를 조작하기 위해서는 교류전원의 주파수를 가변해야 하는 어려움이 있었

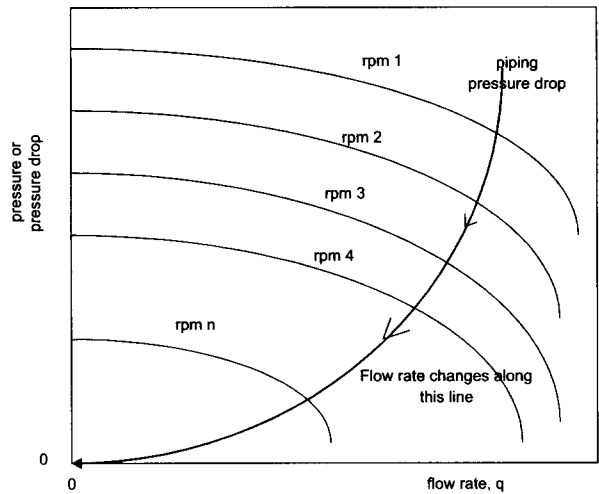


그림 20. 펌프 회전수 조절에 의한 유량제어.

다. 그러나 80 년대에 들어 산업전자의 발전과 더불어 교류전원의 주파수를 연속적으로 가변할 수 있는 소위 인버터(inverter)라는 것이 보급되기 시작하였으며, 기계분야에서는 이미 보편적으로 사용이 되고 있다.

인버터는 디지털 기술을 응용한 것으로 그림 19와 같은 원리로 동작한다. 인버터에서 출력되는 교류전압은 사실 정현파(sine wave)가 아니며 단지 정현파를 모방한 디지털 출력 일뿐이다. 정현파를 모방하는 방법은 여러가지가 있으며 그림에 보인 two-level 출력 뿐 아니라 three-level 출력방식 등 다양한 방식이 사용되며 정현파를 더 정확히 근사하기 위한 방향으로 계속 발전되고 있는 추세이다. 그림 18에서 볼 수 있는 것과 같이 밸브를 이용하는 경우, 유량과 상관없이 펌프는 일정한 속도로 회전을 하므로 $p_p - p_0$ 전체가 밸브와 배관에서 강하되어 모두 손실로 나타난다. 이에 비하여 inverter를 사용하는 경우는 밸브가 사용되지 않고, 펌프의 회전수에 따라 유량이 조절되므로 그림 20에서와 같이 배관에 의한 압력강하만이 압력손실로 나타난다. 이러한 면을 고려할 때에 inverter의 사용은 사용에너지 관점에서 볼 때에 매우 매력적인 제어밸브의 대안이 된다. 이외에도 매우 낮은 유량일 때를 제외하고는 인버터가 제어밸브보다 우수한 선형성, 동특성(빠른 응

답)을 보이는 장점을 갖고 있다. 그러나 inverter의 사용은 현재 나름대로의 다음과 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 그것은 펌프가 폐지기능이 없으므로 rpm = 0 에서도 정압차에 의해 유체흐름이 생기며, 따라서 폐지기능을 보조하는 부수적 장비(shut-off 발브 등)이 필요하다는 것과 화학공장 안전의 입장에서는 (공압식) 제어발브가 인버터보다 유리하다는 것 등이다. 현재 전 반적인 투자비용은 용량에 따라 차이가 있으나 수 마 력 정도의 펌프에서는 오히려 inverter가 더 유리한 입 장이다. 이러한 여러 관점들을 종합해 볼 때에 안전, 신뢰성, 펌프수명에 대한 영향 등의 몇가지 문제점에 대 한 확실한 보완과 검증이 이루어지게 되면, 앞으로 화 학공장에서 인버터사용에 의한 유량조절이 상당히 확산될 수 있을 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] 백수현(번역), 센서핸드북, 도서출판 세화, 1990.
- [2] 이광순, 공정제어 I: 강의 노트, 1993.
- [3] Honeywell, Presentation Material on Fieldbus.
- [4] Hutchinson, J. W.(editor), ISA Handbook of Control Valves, 2nd ed., ISA, Pittsburgh, 1976.
- [5] LG-Honeywell Smart Transmitter Manuals, 1995.
- [6] Smith, C. A. and Corripio A., Principles and Practice of Automatic Process Control, John Wiley and Sons, N.Y., 1985.
- [7] Spitzer, D. W., Variable Speed Drives: Principles and Applications for Energy Savings, 2nd ed., ISA, Research Triangle Park, NC, 1990.

'7월호 CASE 기술특집: 21세기의 자동화 기술' 투고 공개 모집 안내

다음 7월호 학회지의 기술 특집의 주제는 '21세기의 자동화 기술'입니다. 각 편집 위원들께서는 각자 전공 분야의 회원들 중에서 물색하여, 본 주제와 관련하여, 우리 학회의 다양한 분야의 회원들이 흥미 있게 읽을 수 있는 논문이나 기술 동향 문헌을 보내도록 추천 및 권유하여 주시기 바랍니다. 또한 회원들 중에서도 보내시고 싶은 논문이나 문헌이 있으시면, 7월 31일까지, 반드시 아래아 한글파일로 작성하셔서, 편집이사 김송원 교수 (전화 02-880-7138, 팩스 02-883-1513, E-mail: mejwkim@asri.snu.ac.kr) 에게 인용처와 저자 소개를 명기하여 e-mail로 보내 주시기 바랍니다. 다만, 수식 위주의 논문은 피해 주시기 바랍니다. 그리고, 기술 특집란에 실리는 원고는 학회지 논문 작성 양식을 준수하여야 합니다만, 너무 형식에 구애받지는 마십시오. 우리 학회의 전기, 전자, 기계, 항공, 화학, 산업, 컴퓨터 공학의 다양한 분야의 회원들이 하나의 공통 주제 아래에 동시에 참여한다면, 흥미로우면서, 우리 학회의 장점을 부각시킬 수 있는 기술 특집이 되리라고 생각합니다.