

CHAP. II 공압의 기초 이론

- ◎ 대기와 공기
- ◎ 공기의 물리적 성질
- ◎ 공기에 관한 기본 법칙
- ◎ 공기의 흐름

제 2 장 공압의 기초 이론

1. 대기과 공기

가. 대기의 성분

지구의 둘레는 기체로 둘러 쌓여 있으며, 그 기체는 지구의 표면에서 농도가 짙고 위로 올라갈 수록 옅어져 1000 km 상공까지 퍼져있다. 지구를 둘러싸고 있는 기체를 **대기**라 하고, 지구 표면으로부터 약 15 km 까지 분포되어 있는 기체를 **공기**라 한다.

공기 중에는 산소와 질소가 1 : 4 의 비율로 혼합되어 있고, 그 외 소량의 성분을 함유하고 있다. 실제의 공기는 물의 순환에 의해 수증기를 함유한 습공기로 되어 있다. 따라서 공기 압축기를 이용할 때 이 공기 중의 수증기가 온도와 양에 따라 물로 변하여 공압 기기에 심각한 영향을 미치기 때문에 주의를 요하는 사항이다.

나. 대기의 압력

약 1 m 길이의 유리관을 수은으로 채운 다음 손가락으로 막고 이것을 거꾸로 하여 수은이 들어 있는 다른 용기에 수직으로 세우면 유리관 내의 수은은 밖으로 약간 흘러나와 유리관 위 부분에 진공이 생긴다. 이것을 **토리체리(Torricelli)의 진공**이라 한다. 이 때 용기의 수은면에는 대기압 P_a 가 작용하고 유리관 내의 수은면에서의 압력은 0 이므로 다음과 같다.

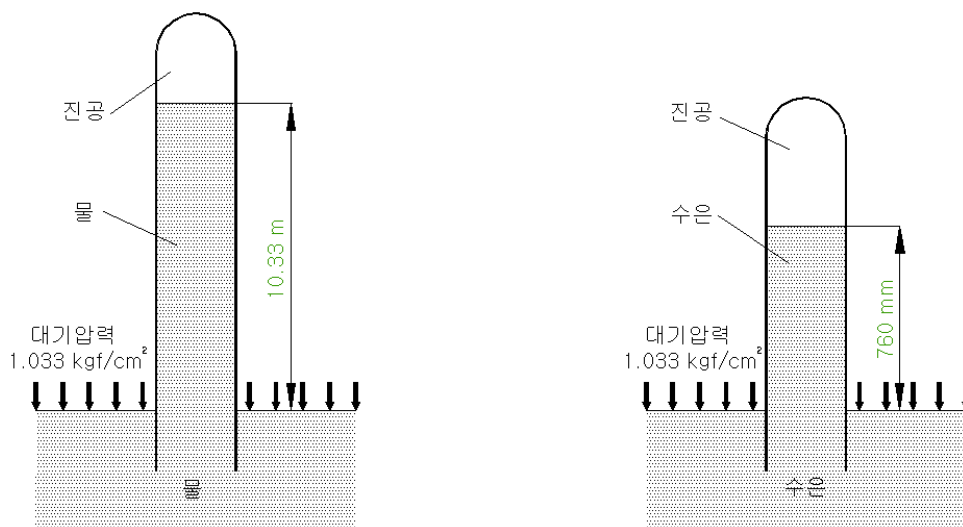


그림 2-1 압력의 표시 방법

$$P_a = \rho g h \quad (2. 1)$$

여기서 ρ 는 수은의 밀도, h 는 수은주의 높이이다. 수은의 밀도는 온도에 따라 변하고 중력 가속도 g 도 장소에 따라 다르므로 표준 중력 가속도 $g = 980.665 \text{ cm/sec}^2$ 인 곳에서 0°C 의 수은주가 760 mm 의 높이가 되는 압력을 표준으로 하여 이것을 이태리 사람인 토리체리가 실험을 통해 표준 기체로서 1 기압 (1 atm)으로 정했다.

다. 대기의 변동

대기는 해상으로부터의 높이, 지역, 계절 등에 따라 변하고 동시에 대기압도 변한다. 예를 들면 그림 2-2와 같이 높이에 따라서 대기압도 변한다. 즉 위로 올라갈 수록 기압은 낮아진다.

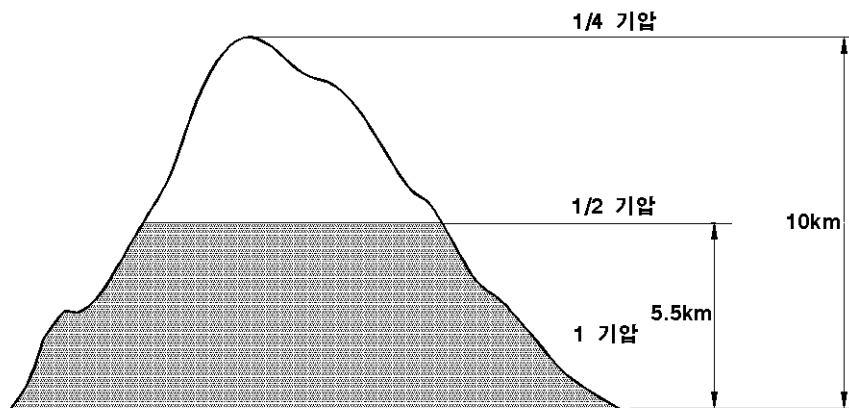


그림 2-2 높이에 따른 대기압의 변화

2. 공기의 물리적 성질

가. 공기의 압력

공기 펌프로 타이어에 공기를 주입할 때 처음에는 가볍게 공기를 주입할 수 있지만 점점 힘이 든다는 사실을 알게 된다. 공기는 많은 분자의 집합체이고, 이 많은 분자가 자유로이 운동하며 타이어의 벽에 부딪치기 때문에 벽은 연속적으로 일정한 힘을 받게 된다. 이 벽의 단위 면적에 받는 힘이 압력이다.

공기 펌프로 공기를 압축하면 단위 면적 당 분자의 수가 증가하여 벽에 닿는 분자의 충돌 횟수가 증가하기 때문에 압력이 상승하게 된다.

나. 압력의 표시 방법

공기 분자의 충돌에 의하여 압력이 발생한다. 만일 분자가 없다면 압력은 발생하지 않을 것이다. 예를 들어 완전 진공 상태에서는 압력은 0 이고, 이 상태를 기준으로 한 것이 절대 압력이다.

지구상에는 대기압이 있기 때문에 공업적으로는 이 대기압을 기준으로 하고 있는 것이 많다. 대기압을 기준으로 한 것이 **게이지(gauge) 압력**이다.

절대 압력을 표시하는 기호는 *abs* 이고, 게이지 압력을 표시하는 기호는 *G* 이다. 그러나 일반적으로 압력이라고 부르는 것은 게이지 압력이므로 혼동할 우려가 없는 한 생략한다.

$$\text{절대 압력} = \text{게이지 압력} + \text{대기 압력} \quad (2. 2)$$

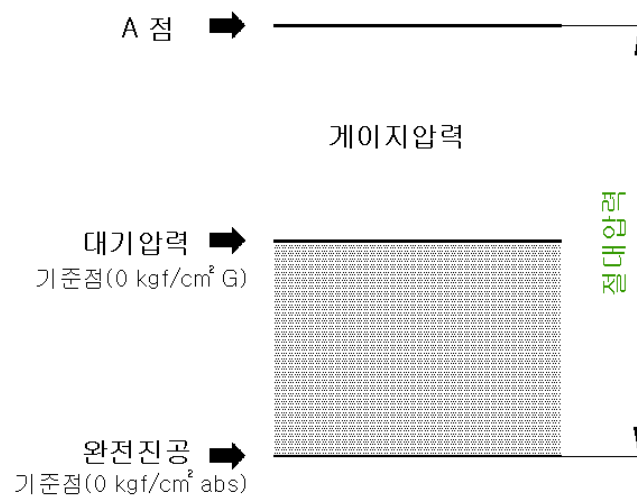


그림 2-3 게이지 압력과 절대 압력

다. 압력의 단위

종래부터 사용되어온 압력의 단위는 중력의 단위로 단위 면적 당 얼마만큼의 힘이 작용하는가를 나타내는 kgf/cm^2 로 했다. 압력 (P)은 유체 내에서 단위면적에 작용하는 힘으로 정의된다.

$$\text{압력}(P) = \frac{W}{A} = \frac{\text{전체무게}(\text{kgf})}{\text{단면적}(\text{cm}^2)} (\text{kgf/cm}^2) \quad (2. 3)$$

우리가 살고 있는 지구상에는 공기가 쌓여 있는 상태라고 말할 수 있으며, 그 무게로 지구 표면에는 압력이 발생한다. 지구 표면의 1 cm^3 에는 1.033 kgf 의 공기가 쌓여 있다. 일반적으로 이것을 대기압이라 하고, 1 표준 기압(1 atm)이라는 단위로 나타낸다.

압력의 단위로서 기압을 사용하기도 하는데, 760 mm 의 수은주의 높이에 상당하는 압력을 표준 기압이라 하며 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned}
 1 \text{ 표준 기압} &= 1 \text{ atm} && ; \text{ 기압에 의한 표시 방법} \\
 &= 760 \text{ mmHg} && ; \text{ 수은주에 의한 표시 방법} \\
 &= 10.33 \text{ mAq} && ; \text{ 수주에 의한 표시 방법} \\
 &= 1.033 \text{ kgf/cm}^2
 \end{aligned}$$

지구상에는 항상 대기압이 작용하고 있지만 우리는 이를 느낄 수는 없다. 따라서 대기압을 기준점으로 하여 그로부터의 차이를 나타내는 방식이 사용된다.

☞ Aq : 라틴어 aqua(물)의 약어이다. Aq 대신 H_2O 를 사용하기도 한다.

표 2-1 압력단위 환산표

pa (N/m)	$M\cdot Pa$	kgf/cm^2	bar	lbf/in^2 (psi)	atm (기압)	mAq (수주)	$mmHg$ (수은주)
1	1×10^{-6}	1.019×10^{-5}	1×10^{-5}	1.450×10^{-4}	9.862×10^{-6}	1.020×10^{-4}	7.501×10^{-3}
1×10^6	1	1.019	1	1.450×10^2	9.862	1.020×10^2	7.501
9.807×10^4	9.807×10^{-2}	1	9.807×10^{-1}	1.422	9.678×10^{-1}	1	7.356×10^2
1×10^5	1×10^{-5}	1.020	1	1.450×10	9.862×10^{-1}	1.020×10	7.501×10^2
6.895×10^3	6.895×10^{-3}	7.031×10^{-2}	6.895×10^{-2}	1	6.805×10^{-2}	7.031×10^{-1}	5.171×10
1.013×10^5	1.013×10	1.033	1.013	1.470×10	1	1.033×10	7.60×10^2
9.807×10^3	9.807	1×10^{-1}	9.807×10^{-2}	1.422	9.678×10^{-2}	1	7.355×10
1.333×10^2	1.333×10^{-5}	1.359×10^{-3}	1.333×10^{-2}	1.934×10^{-2}	1.316×10^{-2}	1.360×10^{-2}	1

라. 정압과 부압

정압(불어나는 압력)과 부압(빨아들이는 압력)이라는 말은 흔히 듣는데, 이것은 게이지 압력을 사용하는 경우에 쓰이며, 대기압 보다 높은 압력을 **정압**이라 하고, 대기압 보다 낮은 압력을 **부압 또는 진공압**(vacuum pressure)이라 한다.

공학에서는 부압을 진공으로 표시하는데, 수은주 ($mmHg$) 또는 % 을 사용한다. 이 단위는 절대 압력 표시로 $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg abs}$ 가 된다.

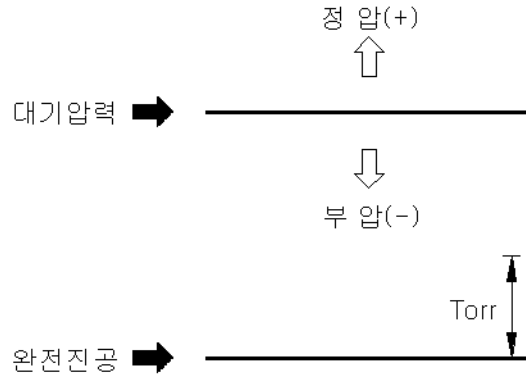


그림 2-4 정압과 부압

마. 공기의 온도

공기는 압축함에 따라 분자의 운동이 빨라져서 온도가 올라가고, 반대로 팽창시키면 온도는 내려간다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 것은 **셀지움에 의해 만들어진 섭씨(℃)**이다.

1 기압 아래에서 물이 어는 온도를 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 하고, 끓는 물과 공존하고 있는 수증기의 온도를 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 하여 수은이나 알곤의 열팽창량을 100 등분하여 온도의 눈금으로 하고 있다.

기체의 온도가 서서히 내려가면 기체의 체적은 점점 줄어든다. 체적이 0 이 되는 온도는 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이고, 이보다 낮은 온도는 없다. 그래서 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 절대 온도라 하고, K 로 표시한다.

$$\text{절대 온도}(K) = \text{섭씨 온도}(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (2.4)$$

바. 공기 중의 수분

여러 종류의 기체가 서로 혼합하여 화학작용을 일으키지 않는 경우 각각의 기체는 서로 간섭하지 않고 단독으로 작용하기 때문에 혼합기체의 압력(전압력)은 각 기체의 분압의 합과 같다. 이것을 **돌턴의 법칙(Law of Dalton)**이라 한다.

공기나 공기 중의 수증기도 이 법칙을 따른다. 그러나 수증기의 경우는 다른 기체와 달리 일정한 온도에 있어서는 어느 일정의 분압(수증기압) 이상으로 될 수 없으며 그 분압보다 높으면 수증기는 응축하여 물방울이 된다. 이 한계의 분압을 **포화 수증기압**이라 한다.

따라서 공기 중의 수분이 수증기로 존재할 수 있는 양은 그 공기의 온도에 따라 한

계가 있는데 이 양을 **포화 수증기량**이라 하고, 1 m^3 의 공기 중의 수증기 양을 g 으로 표시한다.

보통 사용하는 공기 압력에서는 포화 수증기 양의 변화는 무시할 정도이므로 압력과는 관계없다고 생각해도 무방하다.

사. 습공기

대기 중의 공기는 수증기를 포함한 습공기로 되어 있다. 습공기란 대기 중의 **건조공기와 수분의 혼합 기체**로서 일반적으로 공기를 습공기라 한다.

1) 포화와 불포화

공기 중에 포함되어 있는 수증기의 양은 압력과 온도가 결정되면 그 조건에서 한도가 정해진다. 최대한도의 수증기를 포함한 공기를 **포화 공기**라 하고, 최대한도에 도달하지 않은 것을 **불포화 공기**라 한다. 한도 이상에 수증기를 포함한 공기를 **과포화 공기**라 하며, 이 상태에서는 조그만 충격으로도 물로 변해 버린다.

2) 절대 온도와 상대 온도

습공기에 포함되어 있는 건조 공기량을 일정하게 하고 온도를 내려도 절대온도는 변하지 않는다. 상대 온도는 습공기 주위에 있는 현재의 수증기량과 그 온도에서의 포화 수증기량과의 비를 %로 나타낸 것이다. 일반적으로 온도라고 하는 것은 상대 온도를 가르킨다.

3) 노점 온도

일정한 압력 아래에서 공기의 온도가 내려가면 공기 중에 포함되어 있는 수증기는 포화상태가 되고, 응축하여 물방울이 생기기 시작한다. 이때의 온도를 **노점**이라 하고, 습공기의 수증기 분압에 대한 수증기의 포화온도를 **노점 온도**라 한다.

예를 들면 7 kgf/cm^2 의 압력 아래 노점이 10°C 일 때의 대기압 노점은 -17°C 이다. 다시 말하면 7 kgf/cm^2 에서 10°C 까지 냉각된 공기를 감압하여 대기압으로 하면 -17°C 까지는 수분이 응축되지 않는다는 것을 의미한다.

아. 응축수의 발생 원리

응축수가 발생하는 원인에는 압축에 의한 경우와 외부로부터 냉각에 의한 경우가 있다. 압축에 의한 경우는 일정 체적의 공기 속에 포함되어 있는 수증기의 양은 공기 압력의 크기에 관계가 없으므로 공기를 압축하면 단위 체적당 수증기의 양은 증가된다.

즉 대기압의 공기 1 m^3 와 7 kgf/cm^2 으로 압축된 공기 1 m^3 속에 포함할 수 있는 포화 수증기의 양은 일정하므로 7 kgf/cm^2 으로 압축된 공기는 대기압 아래서 8 m^3 분의 수증기를 포함하게 된다.

따라서 이때의 습도를 100%로 하면 여분의 7 m^3 분의 수증기는 물방울로 된다, 냉각의 경우는 공기를 냉각하면 온도가 내려가고 동시에 공기의 포화 수증기 양이 감소하므로 그 공기가 포함하는 수증기 양이 포화 수증기 양을 넘으면 그 분량만큼 물방울이 된다.

자. 압축 공기의 질

공기압을 이용하는데 있어서 유해 물질은 수분과 먼지만이 아니다. 공기 압축기에는 원활한 작동을 위하여 윤활유가 들어있고, 이 윤활유는 공기를 압축할 때 발생하는 열에 의하여 약 200°C 의 고온으로 된 공기에 노출되어 일부는 타르(tar) 또는 카본(carbon) 상태로 된다.

또한 응축수에 의해 2 차적으로 발생한 녹 등 공압 장치의 배관 중에는 많은 이물질을 포함하고 있다. 이러한 이물질이 공압 기기에 들어가면 공압 실린더 내벽을 긁어내는(scratch 현상) 치명적인 손상을 입힌다.

따라서 공압 장치에 사용되는 공기에는 이와 같은 오염 물질이 들어가지 않도록 유의하고, 또 들어온 것은 제거하여 항상 알맞은 공기의 질이 유지되도록 해야 한다.

우선 먼지가 많거나 습도가 높은 곳에 공기 압축기를 설치하는 것은 피해야 하며, 또한 공기 압축기의 발열은 주위 온도를 상승시키고 공기 압축기 자체의 방열을 나쁘게 함으로 통풍이 잘되는 곳에 설치하여야 한다.

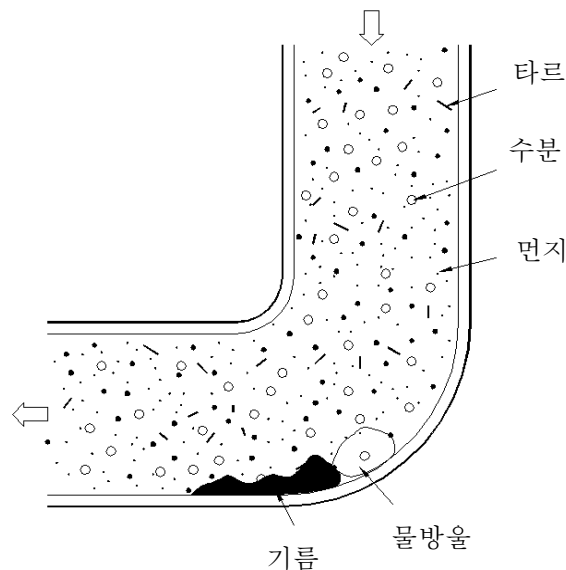


그림 2-5 공기의 질

3. 공기에 관한 기본 법칙

가. 파스칼의 법칙(Law of Pascal)

풍선에 공기를 불어넣으면 공기는 풍선 내벽에 그대로 전달되어 내벽에 대하여 수직한 방향으로 압력이 작용한다. 이것을 **파스칼의 법칙**이라 하고 유체를 이용하는데 중요한 법칙이다.

그림 2-6과 같은 실린더에서는 실린더의 내벽에 수직한 방향으로 압력이 작용한다. 즉 밀폐된 시스템 내부에 공기의 압력을 가하면 모든 면에 동일한 압력이 작용한다. 또한 공기의 압력이 정해진 면적에 작용하면 힘이 발생하고, 그 힘은 압력과 면적의 크기에 비례한다.

$$F = A (cm^2) \times P (kgf/cm^2 \cdot G) \quad (2.5)$$

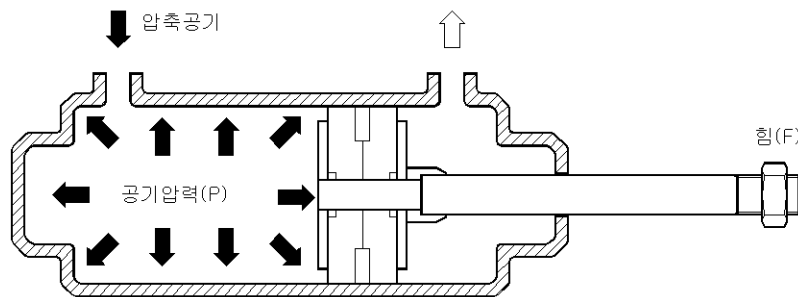


그림 2-6 압력의 전달 방법

나. 보일의 법칙(Boyles law)

온도가 일정할 때 공기의 체적은 절대 압력에 반비례한다.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{일정} \quad (2.6)$$

여기서 P : 절대압력 ($kgf/cm^2 \cdot abs$)

V : 비체적 (m^3/kgf)

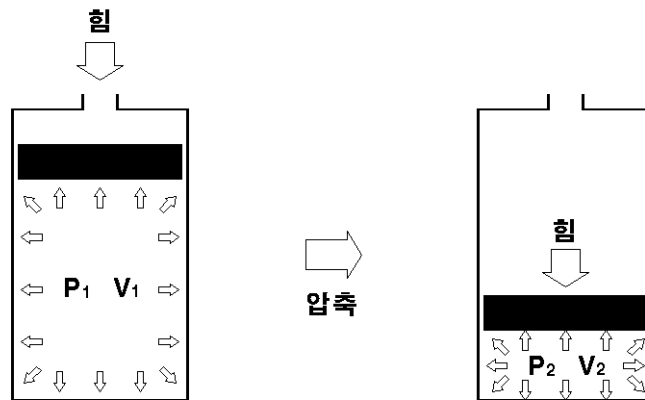


그림 2-7 압력과 체적

다. 샤를의 법칙(Charles law)

일정한 압력 아래에서 공기를 가열 또는 냉각하면 공기의 체적은 절대 온도에 정비례한다. 즉, 273 K의 공기가 1 K 만큼 열을 받으면 공기는 그 부피의 1/273 만큼 팽창한다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.7)$$

여기서 V : 0 °C일 때의 체적

T : 절대 온도(K)

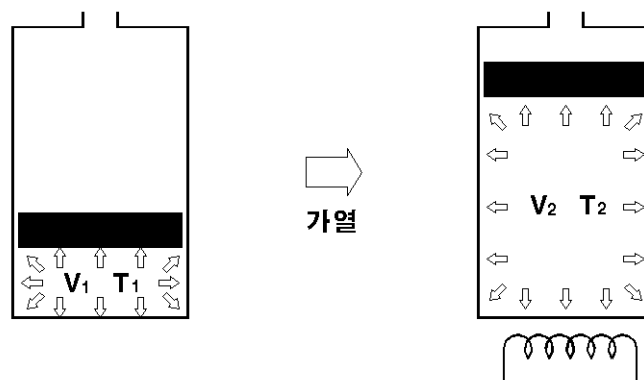


그림 2-8 체적과 온도

라. 보일-샤를의 법칙

공기의 압력과 온도가 변화할 때 일정한 공기의 체적은 압력에 반비례하고, 온도에 정비례한다.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2. 8)$$

4. 공기의 흐름

가. 유 량

물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것처럼 압축 공기도 압력이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 흐르는 성질을 갖고 있다. 단위 시간에 흐르는 공기의 체적 또는 중량을 공기의 **유량**이라 하며, 유량은 단면이 변하는 파이프 속을 통과할 때 어느 곳에서나 같다. 이를 **연속의 법칙**이라 하며, 이 관계가 성립되는 파이프 속에서는 단면적이 큰 부분에서는 유속이 느리고, 작은 부분에서는 유속이 빨라진다.

그림 2-9와 같은 입구와 출구가 다른 파이프에 공기가 흐를 때 파이프의 단면적을 A , 유속을 V 라 하면 유량은 다음과 같이 된다.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{일정} \quad (2. 9)$$

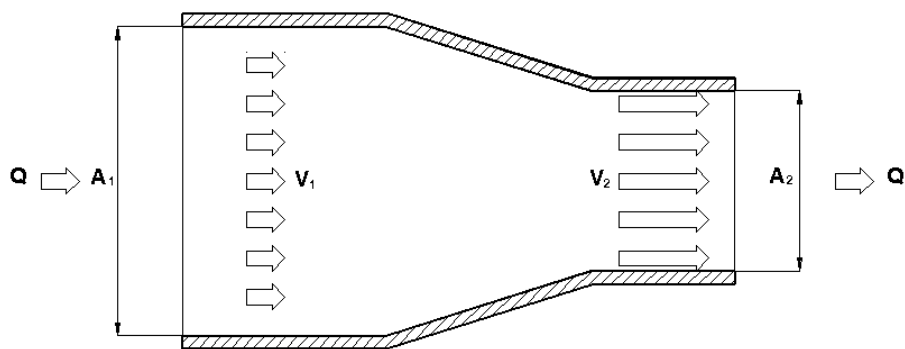


그림 2-9 공기의 유량

나. 유효 단면적

밸브의 실제 유량에 의한 밸브의 저항을 나타낸 것으로 동일한 조건에서 동일한 유량이 통과할 수 있는 등가 계산상의 단면적을 유효 단면적이라 한다.

파이프의 지름이 급격히 다른 곳(오리피스)을 공기가 흐르면 그림 2-10과 같이 흐름이 변한다. 이를 교축된다고 한다.

공기압 기기에서는 공기의 통로가 여러 형태로 변화하기 때문에 파이프의 형태에 따라 교축되기도 하고 넓어지기도 하면서 흐른다. 그래서 실제 공기의 유량은 각 기기마다 측정하여 유효하게 작동하는 단면적을 계산해야 한다. 유효 단면적은 유량을 실제로 측정하여 역으로 계산하여 구한다.

$$P_1 > 1.89P_2 \text{ 일 때 } Q = 11.1 \times S \times P_1 \quad (2.10)$$

$$P_2 < 1.89P_2 \text{ 일 때 } Q = 22.2 \times S \times \Delta P P_2 \quad (2.11)$$

여기서 Q : 유량 //min(ANR)

S : 유효 단면적 (mm^2)

P_1 : 1 차측 절대 압력 ($\text{kgf/cm}^2 \text{ abs}$)

P_2 : 2 차측 절대 압력 ($\text{kgf/cm}^2 \text{ abs}$)

ΔP : $P_1 - P_2$

//min(ANR) : 공기량을 표시하는 단위로 1 분간에 흐르는 압축공기의 양을 표준상태(온도 20°C , 절대압력 760 mmHg , 상대습도 65% 공기의 상태)로 환산하여 나타낸 것이다.

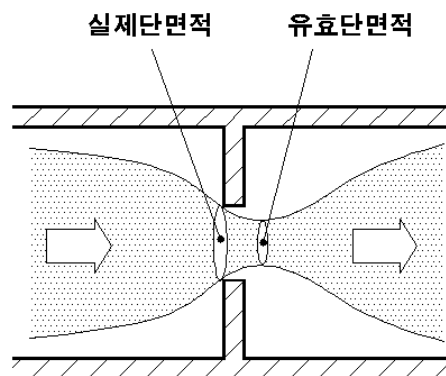


그림 2-10 오리피스(Orifice)의 흐름

다. 유효 단면적의 측정 방법

공압용 3 포트 솔레노이드 밸브(KS B6355) 유량 특성시험 가운데 유효 단면적 측정 방법을 설명한다.

압력이 5 kgf/cm^2 으로 충전되어 있는 내부 체적 V 인 용기에 밸브를 직접 연결하고, 여자회로에 정격전압을 t 초만 가한 후 끊고 용기 안의 압력이 2 kgf/cm^2 로 될 때까지 공기를 방출한다. 그리고 압력계의 바늘이 정지한 상태에서 잔존 압력을 측정하여 다음과 같이 계산한다. 다만 용기의 크기에 대해서 t 가 수초로 되도록 선정한다. 이 시험은 밸브의 입구와 출구 사이 및 밸브의 출구와 배기구에 대하여 실시한다.

$$S = 12.9 V \times \frac{1}{t} \times \log_{10} \frac{P_0 + 1.03}{P + 1.03} \times \frac{273}{T} \quad (2. 12)$$

여기서 S : 유효 단면적 (mm^2)
 V : 용기의 내부 체적 (l)
 P_0 : 용기의 초기 압력 (kgf/cm^2)
 P : 공기 방출 후 잔존압력 (kgf/cm^2)
 t : 여자시간 (s)
 T : 실내온도(절대온도) (K)

라. C_v 값과 K_v 값

C_v (coefficient of valve)값은 밸브 등에 흐르는 유량 특성을 나타내는 계수로서 일반적으로 유량 계수라 하며 유량을 계산으로 구할 때 적용하는 수치이다. 이 값은 세계적으로 널리 쓰이고 있으며 실험을 통하여 구한 것으로서 60°F (15.6°C)의 맑은 물을 밸브의 출입구에서 압력 차를 1 lb/in^2 (0.07 kgf/cm^2)로 유지하며 흐를 때의 유량을 gallon/min 으로 나타낸 값으로 규정하고 있다.

예를 들어 C_v 값이 1.2 인 밸브라 하면 위의 상태에서 물이 흐를 때 1.2 gallon/min 즉 4.54 l/min ($1 \text{ gallon/min} = 3.78 \text{ l}$, $3.78 \times 1.2 = 4.54$)가 흐르는 밸브라는 의미이다.

$$P_1 < 1.89 P_2 \quad Q = 400 \times C_v \times \Delta P \times \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (2. 13)$$

$$P_1 > 1.89 P_2 \quad Q = 245 \times C_v \times P_1 \quad (2. 14)$$

C_v 값을 유효 단면적으로 환산하려면 다음의 식을 사용한다.

$$S = 18.45 \times C_v \quad (\text{단 스프 밸브의 경우}) \quad (2. 15)$$

포켓 밸브의 경우에는 밸브 부분이 합성 고무이므로 사용 압력에 따라 밸브의 스트로크가 약간 다르기 때문에 계수는 18.45 보다 커진다.

K_v 값도 유량특성을 나타내는 계수이며, $5 \sim 30^\circ\text{C}$ 의 맑은 물을 전후의 압력차가 1 kgf/cm^2 로 유지되어 흐를 때의 유량을 m^3/h 로 나타낸 값으로 규정하고 있다.

또한 C_v 값과 K_v 값은 다음의 관계를 나타낸다.

$$C_v = 1.166 \times K_v \quad (2. 16)$$

마. 축류율

오리피스 흐름에서 구멍의 최소 단면적 A_1 과 축류부의 최소 단면적 A_2 의 비, 즉 A_2/A_1 을 축류율이라 한다.

오리피스란 밸브 안의 통로에서 가장 좁고, 그 길이가 단면의 크기에 비하여 비교적 짧은 곳, 즉 수축한 곳을 말한다. 오리피스는 원형의 경우가 많으며 그 크기를 지름 치수로 나타낸 것이 오리피스의 규격이다. 오리피스가 원형이 아닌 경우에는 그 단면적을 원형 단면적으로 환산하여 그 지름으로 나타낸다.

바. 임계 압력

오리피스를 통과하는 흐름의 1 차측과 2 차측의 압력비를 크게 하면 할 수록 유속과 유량은 증가하나 압력비가 어느 일정한 값에 이르면 유속은 음속이 되며, 이때부터는 압력비를 크게 하여도 유량은 변하지 않는다. 이때의 압력을 임계 압력이라하고, 유속이 음속으로 될 때의 조건은 상류와 하류의 절대 압력의 비에 따라 정해지며, 이 비를 임계 압력비라 한다.

$$\text{임계 압력비} : \frac{P_H}{P_L} = 1.893 \quad (2. 17)$$

(1) 음속의 흐름(출구가 대기중 일 때)

$$\frac{P_H}{P_L} \geq 1.893 \text{ 일 때}$$

$$Q = 11.1 S P_H \sqrt{\frac{273}{T}} \quad (2. 18)$$

(2) 아음속의 흐름(출구가 다른 기기에 붙어 있을 때)

$$\frac{p_H}{p_L} < 1.893 \text{ 일 때}$$

$$Q = 22.2S \sqrt{(p_H - p_L)p_L} \sqrt{\frac{273}{T}} \quad (2. 19)$$

$$P_L = P_L + 1.033 \quad T = 273 + t \quad (2. 20)$$