

진공기술 기본이론

인상렬

한국원자력연구원 핵융합공학기술개발센터



내용

진공 기초

- 진공에서 일어나는 현상에 대한 이해

진공 시스템

- 진공 시스템의 기본구성과 성능예측
- 진공펌프, 진공게이지 및 연결부품

진공 작업

- 진공 시스템 조립, 배기, 고진공 작업

1장 진공 기초

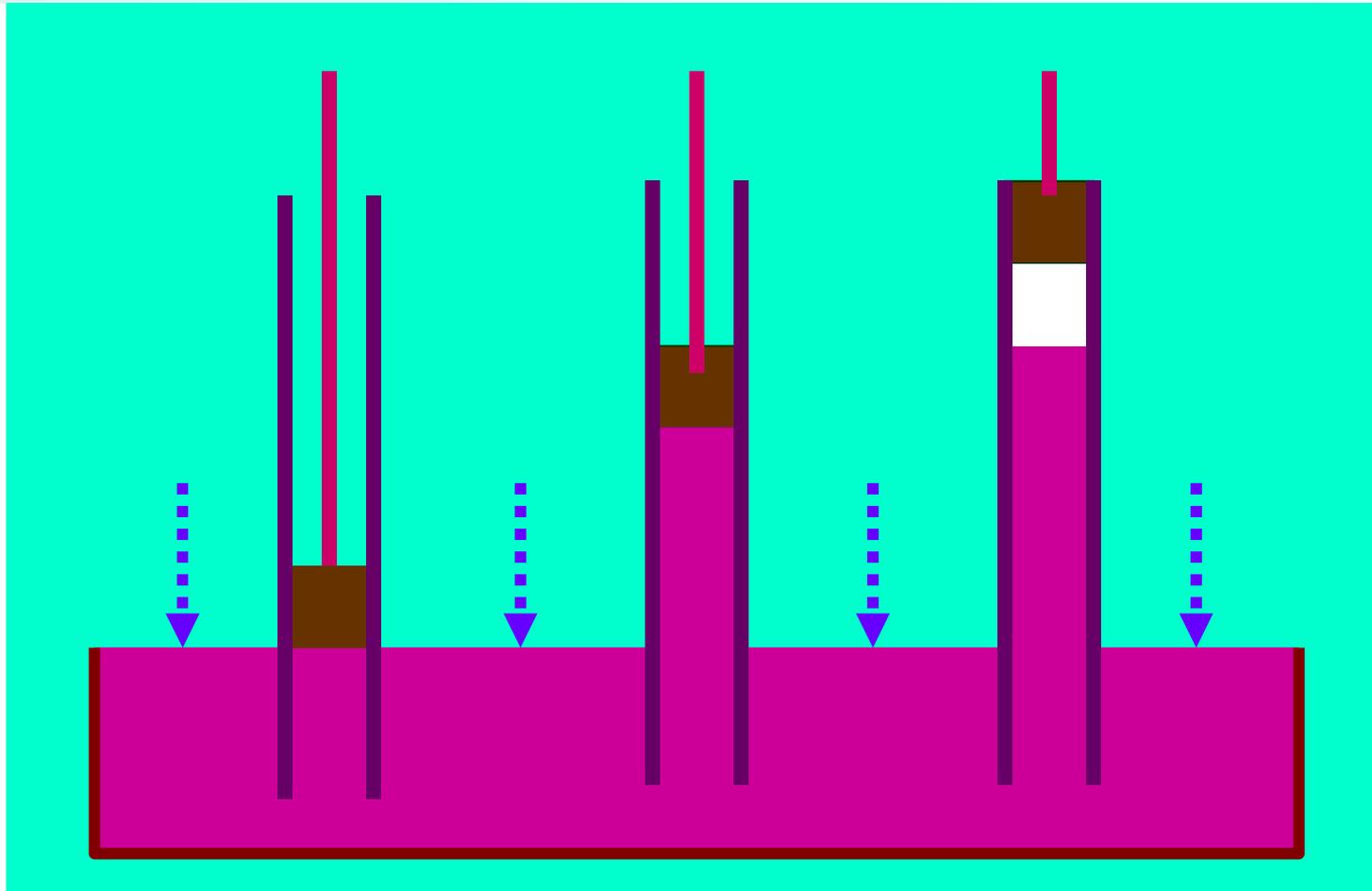


진공의 정의

진공(Vacuum)이란 단어의 뜻은 아무것도 없는 빈 공간(void or empty)을 말하지만 실용적으로는 **대기압보다 낮은 압력으로 기체가 채워져 있는 공간을 말한다.**

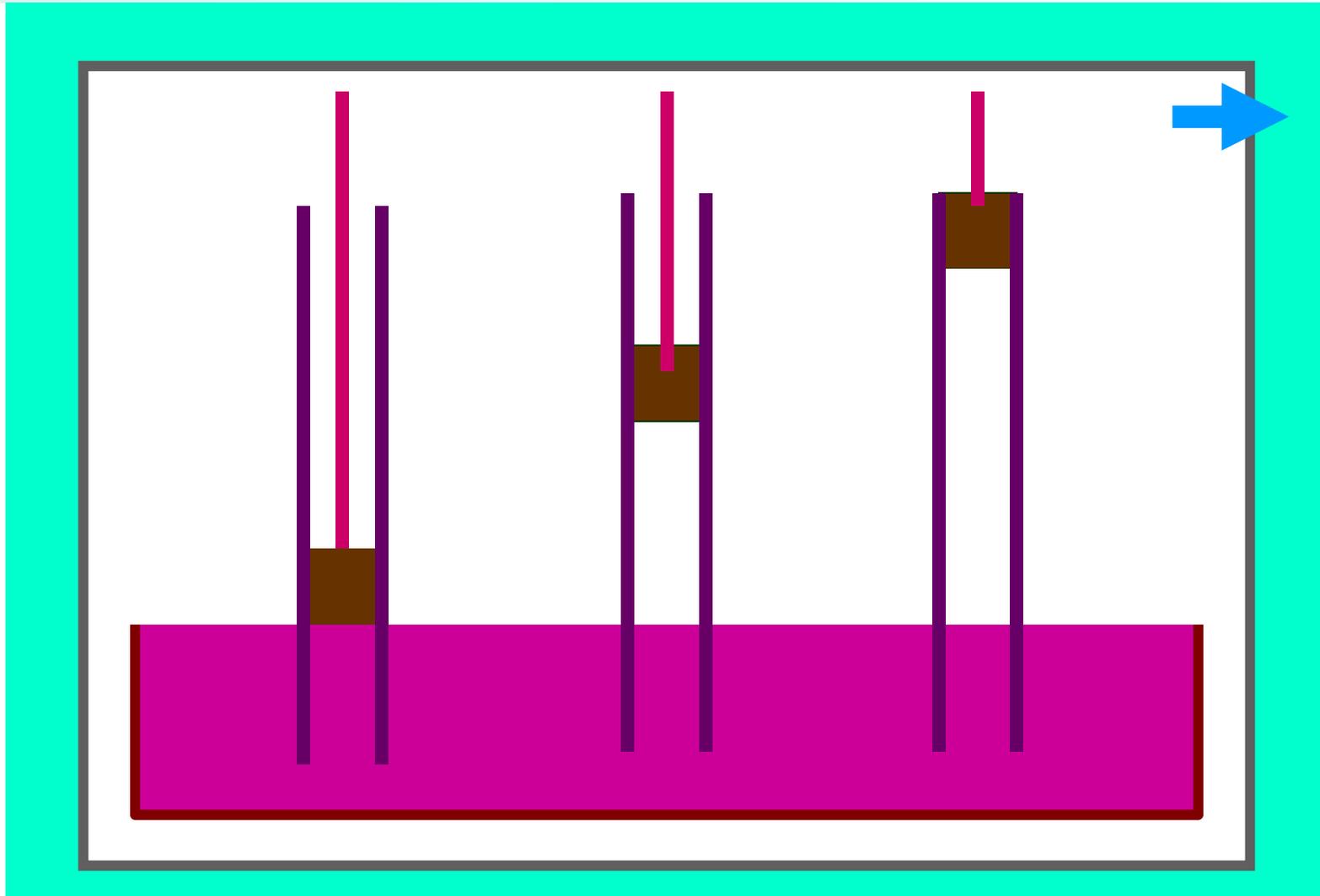
대기압(1000 mbar)에서는 변의 길이가 10 cm 인 정육면체(1 L)의 한 변에 **3천만개**의 분자가 놓여진다. 이 용기를 **10^{-15} mbar**까지 배기하면 한 변에 **30개**의 분자가 남는다. **10^{-20} mbar**가 되면 이 용기 속에서는 분자 하나를 발견하기 힘들다.

대기의 힘(토리첼리의 실험)



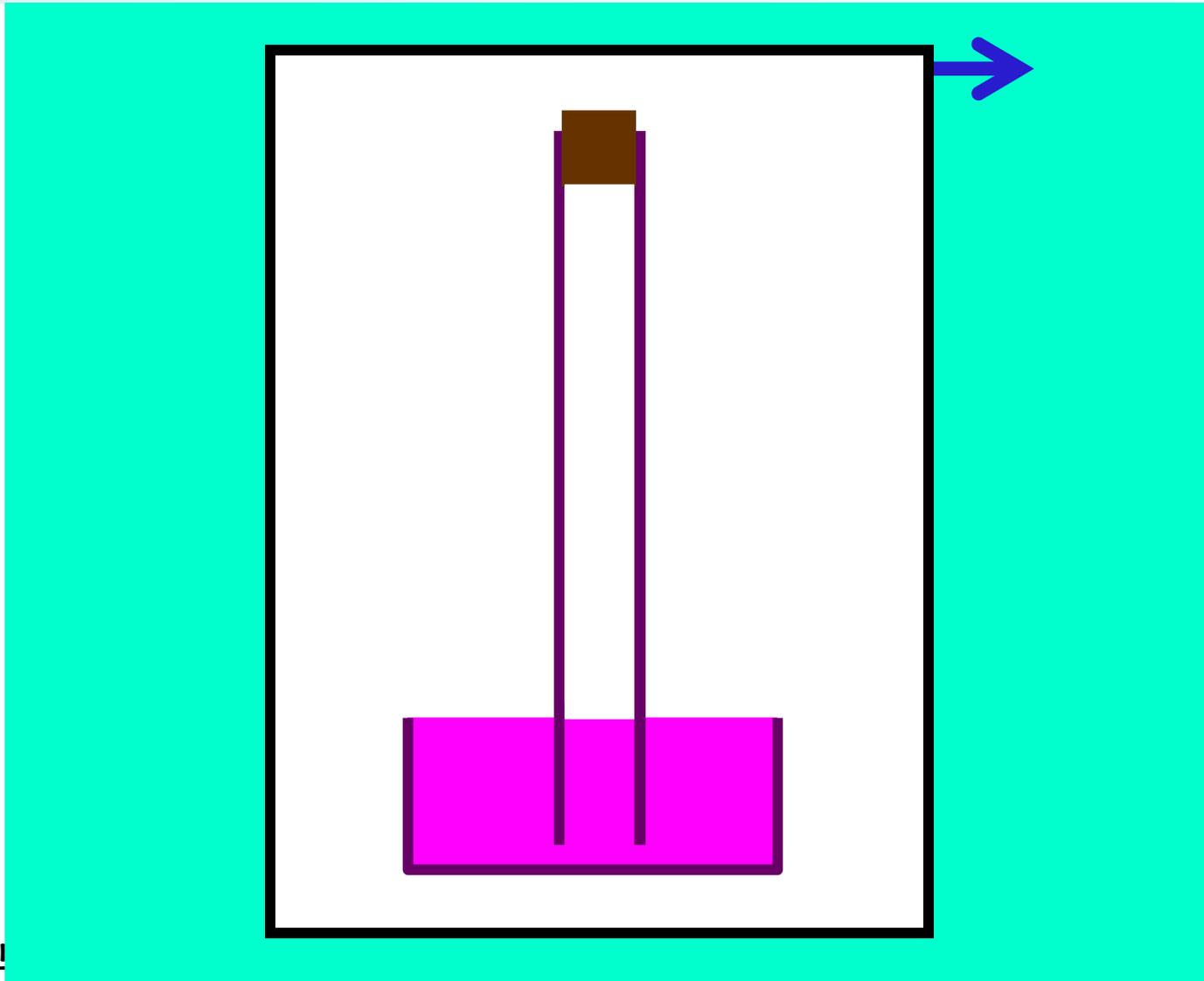
대기압의 근원은 지표에서 성층까지 존재하는 공기분자들의 무게다.
공기밀도는 최대 1.3 kg/m^3 이고 1 cm^2 면적에 7.7 km높이가 1 kg이다.

진공의 힘(보일의 실험)

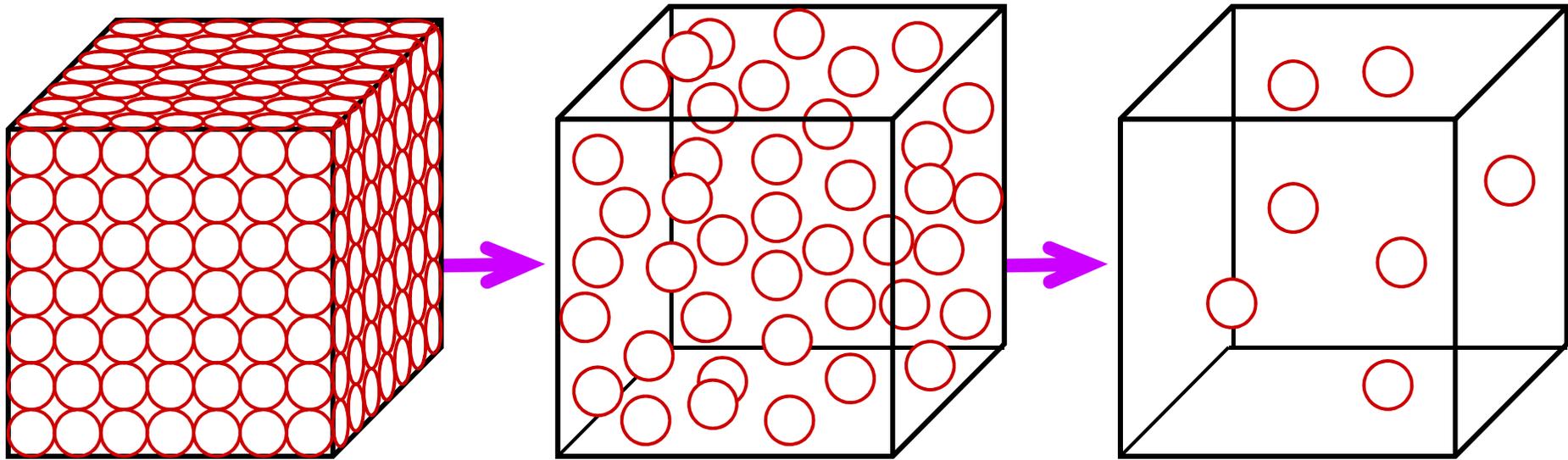


이 실험은 대기과 진공이라는 대비되는 두 상태가 존재함을 같이 증명할 수 있다.

보일의 실험 응용 (진공압력계)



진공상태



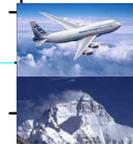
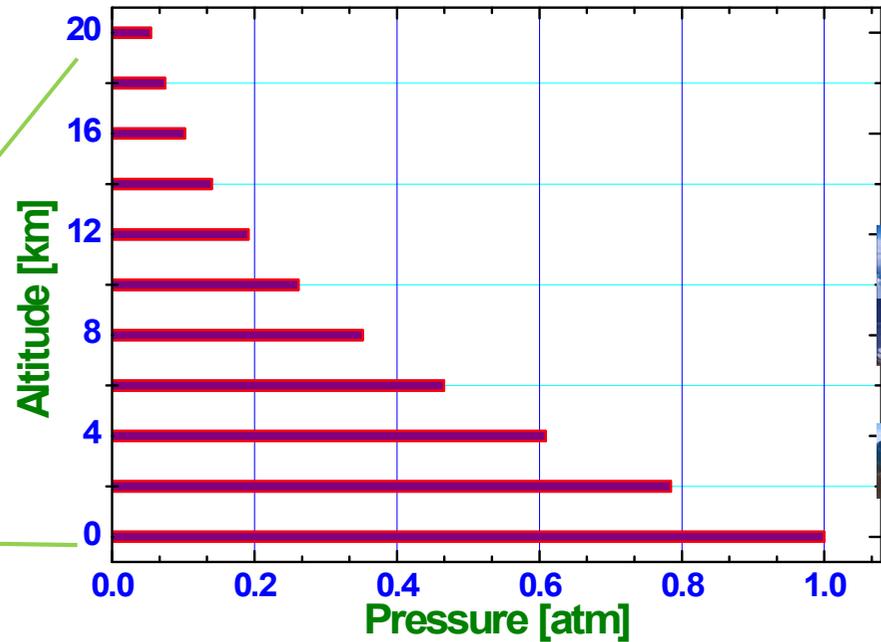
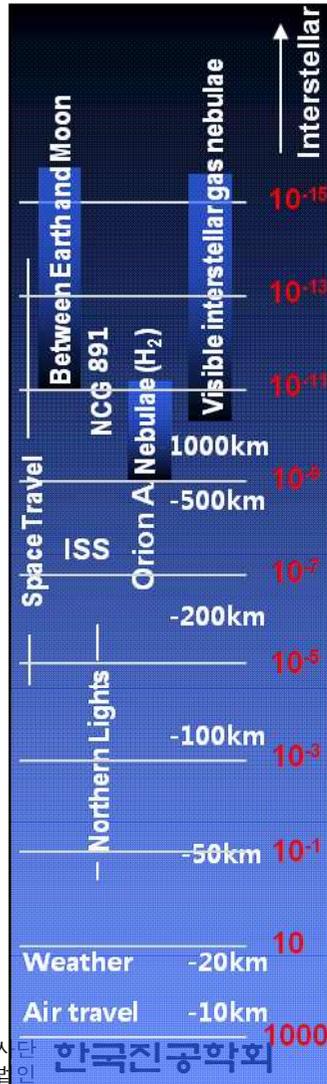
고체/액체

기체(대기압)

진공

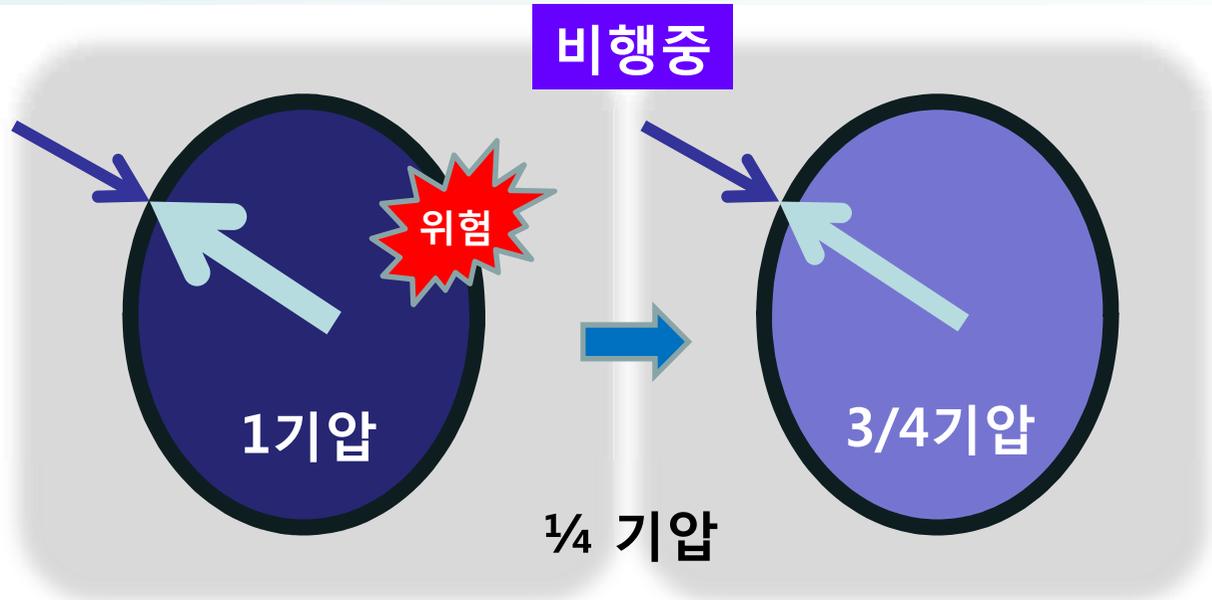
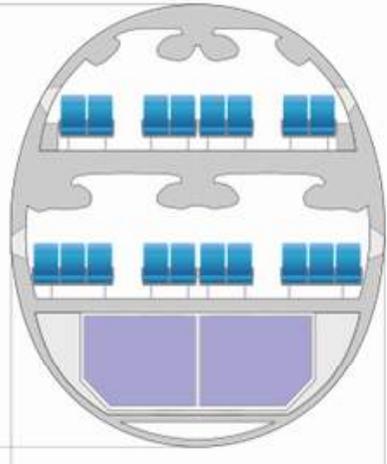
§ 대기압에서 분자 사이의 거리는 약 30 Å이고 분자 직경은 약 3 Å이다. 따라서 부피의 1/1000이 채워져 있는 셈이다.

진공 속의 지구



기내고도(Cabin Altitude)

Airbus 380



비행기는 이륙 후 고도를 높이면서 구조적 안전을 유지하기 위해 기내 압력을 적정 수준까지 낮춘다. 낮춘 압력에 해당하는 고도를 기내 고도라고 한다. 비행 고도가 10 km일 때 비행기 바깥은 0.25기압이지만 기내는 0.75기압이라면 승객이 기내에서 실제로 느끼는 고도는 2.5 km 정도가 된다.

대기의 조성

GAS(Mass)	SYMBOL	PERCENT BY VOLUME	PARTIAL PRESSURE	
			TORR	PASCAL
Nitrogen(28)	N ₂	78	593	79,000
Oxygen(32)	O ₂	21	158	21,000
Argon(40)	Ar	0.93	7.1	940
Carbon Dioxide(44)	CO ₂	0.03	0.25	33
Neon(10)	Ne	0.0018	1.4 x 10 ⁻²	1.8
Helium(4)	He	0.0005	4.0 x 10 ⁻³	5.3 x 10 ⁻¹
Krypton(36)	Kr	0.0001	8.7 x 10 ⁻⁴	1.1 x 10 ⁻¹
Hydrogen(2)	H ₂	0.00005	4.0 x 10 ⁻⁴	5.1 x 10 ⁻²
Xenon(54)	Xe	0.0000087	6.6 x 10 ⁻⁵	8.7 x 10 ⁻³
Water(18)	H ₂ O	Variable	1.7 to 17	230 to 2300

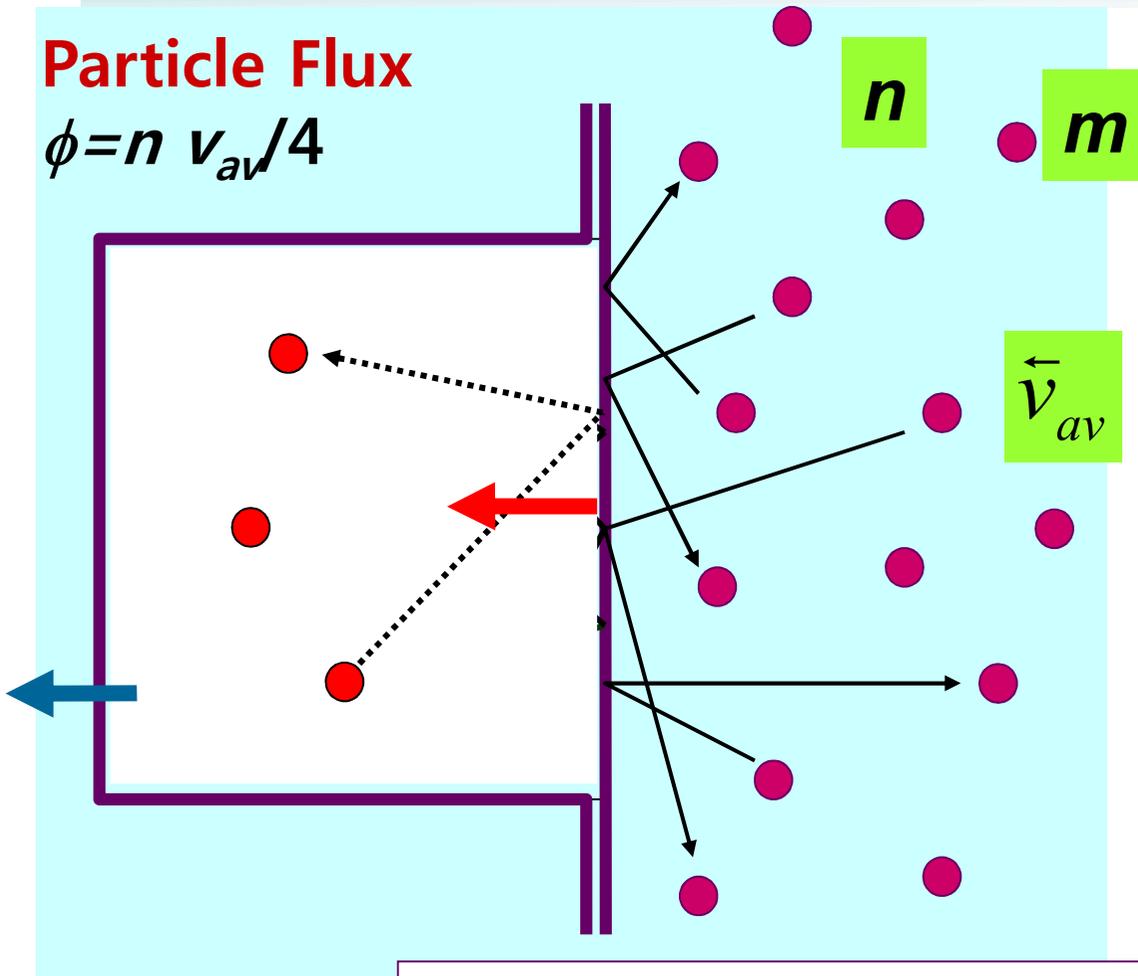
진공영역의 개관

	압력	펌프	진공계	잔류기체	용도
저진공	→1 mbar	유회전펌프 드라이펌프 흡착펌프	수은주압력계 부르돈관 CDG 피라니	대기성분 (질소, 산소, 알곤)	진공포장 진공청소기 진공흡판 동결건조
중진공	→10 ⁻³ mbar	부스터펌프 분사펌프 드라이펌프	멕레오드 CDG SRG 전리진공계	물 대기성분	CVD
고진공	→10 ⁻⁸ mbar	유확산펌프 TMP 크라이오펌프	SRG 전리진공계	물	증착 이온주입 진공용해
초고진공	→10 ⁻¹⁰ mbar	TMP TSP, NEG, SIP 크라이오펌프	전리진공계	수소 일산화탄소 물	표면분석 가속기
극고진공		TSP, NEG, SIP 크라이오펌프	전리진공계	수소 일산화탄소	양자기기 신물질

기체압력의 발생

Particle Flux

$$\phi = n v_{av} / 4$$



용기 내의 기체분자들은 사방으로 움직이면서 벽에 부딪힌다. 이때 단위면적 단위시간당 벽에 부딪히는 입자의 수, 즉 입자속(Particle flux)은 $\phi = n v_{av} / 4$ 로 표현된다.

이를 분자밀도 n 으로 나눈 $\phi_v = v_{av} / 4$ 는 단위면적 단위시간당 벽에 부딪히는 기체의 부피, 즉 체적속(Volume flux)이고

운동량(mv)을 포함하여 입자속을 구한 것이 압력에 해당한다. 즉 $P = (nmv_{av}^2) / 3$

※기체분자의 평균속도 $v_{av} [m/s] = 145.5(T/M)^{1/2}$ 이므로
 $\phi_v = v_{av} / 4 = 36.4(T/M)^{1/2} m^3/m^2 \cdot s$ 또는 $3.64(T/M)^{1/2} L/cm^2 \cdot s$ 이다.
 20°C(T=293 K)에서 질소는 11.8, 수소는 44 L/s.cm².

압력의 크기와 단위

1기압은 수은 76 cm 또는 물 10.33 m의 무게에 의해 단위면적당 눌리는 힘과 같다.

1 기압(해수면에서 대기의 압력)

=760 mmHg(\equiv Torr)

=1033 cmH₂O

=1.033 \approx 1 kgf/cm²

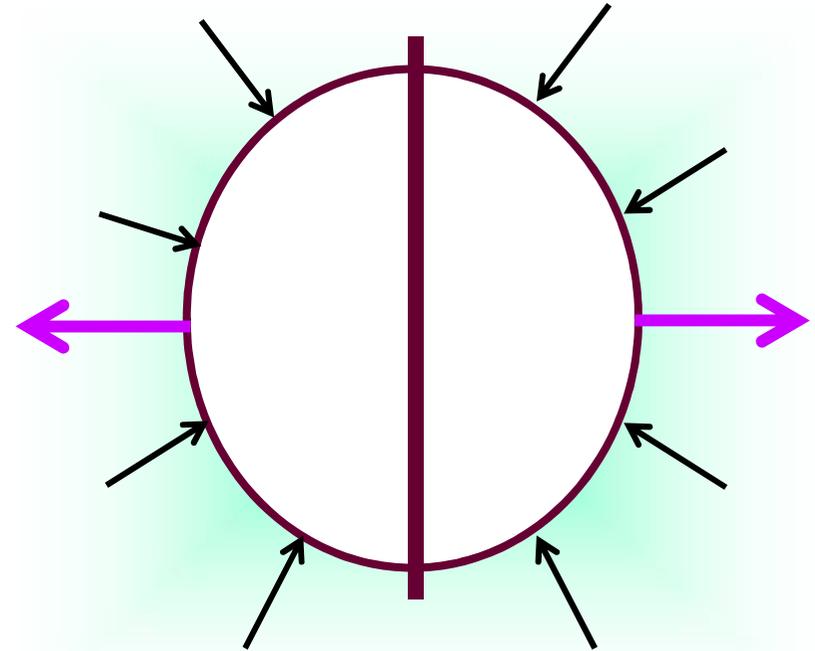
=101325 \approx 100000 N/m²(\equiv Pa)

=1013 \approx 1000 mbar(\equiv hPa)

1 mbar = 100 Pa = 0.75 Torr

예제

직경 50 cm인 마그데부르크
반구 두개를 붙여 진공을 뽑은
후 힘으로 잡아당겨 반구를 떼어
내기 위해서는 말 몇 마리가 필
요한가? 말 한 마리가 끄는 힘은
300 kgf이다.



반구에 걸리는 힘은

$$F = (25 \times 25 \times 3.14) \text{ cm}^2 \times 1 \text{ kgf/cm}^2 = 1965 \text{ kgf}$$

따라서 말은 $1965 \div 300 = 7$ 마리가 필요하다.

양쪽에서 잡아당긴다면 결국 14마리가 있어야 한다.

예제

무게가 **1.2톤**인 자동차의 **4** 바퀴가 모두 지면과 **250 cm²** 씩 닿아 있다면 자동차 타이어의 공기압력은 얼마인가?



타이어의 압력을 **P[기압]** 라고 하면
 $(P-1) \times 1 \text{ kg/cm}^2 \times 4 \times 250 = 1200$ 에서
 $P = 2.2$ 기압이 된다.

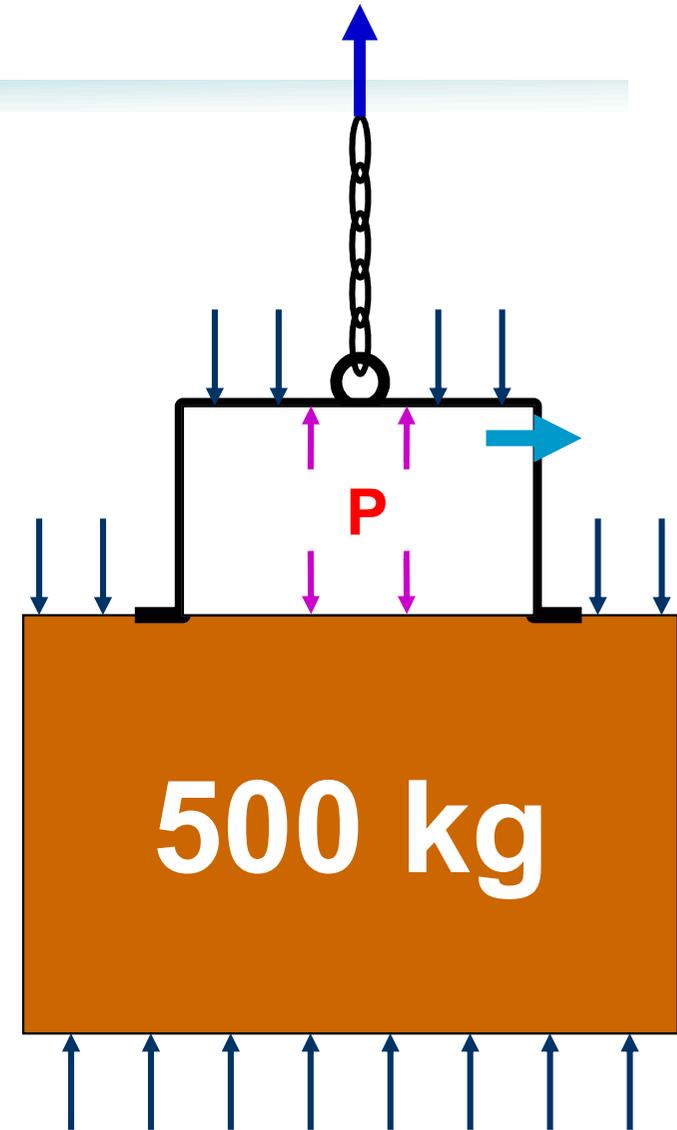
예제

흡판의 직경이 **30 cm**, 즉 면적이 약 **700 cm²**이면 흡판 내부의 압력이 얼마 이상 낮아져야 **500 kg**을 들 수 있는지 계산해 보자.

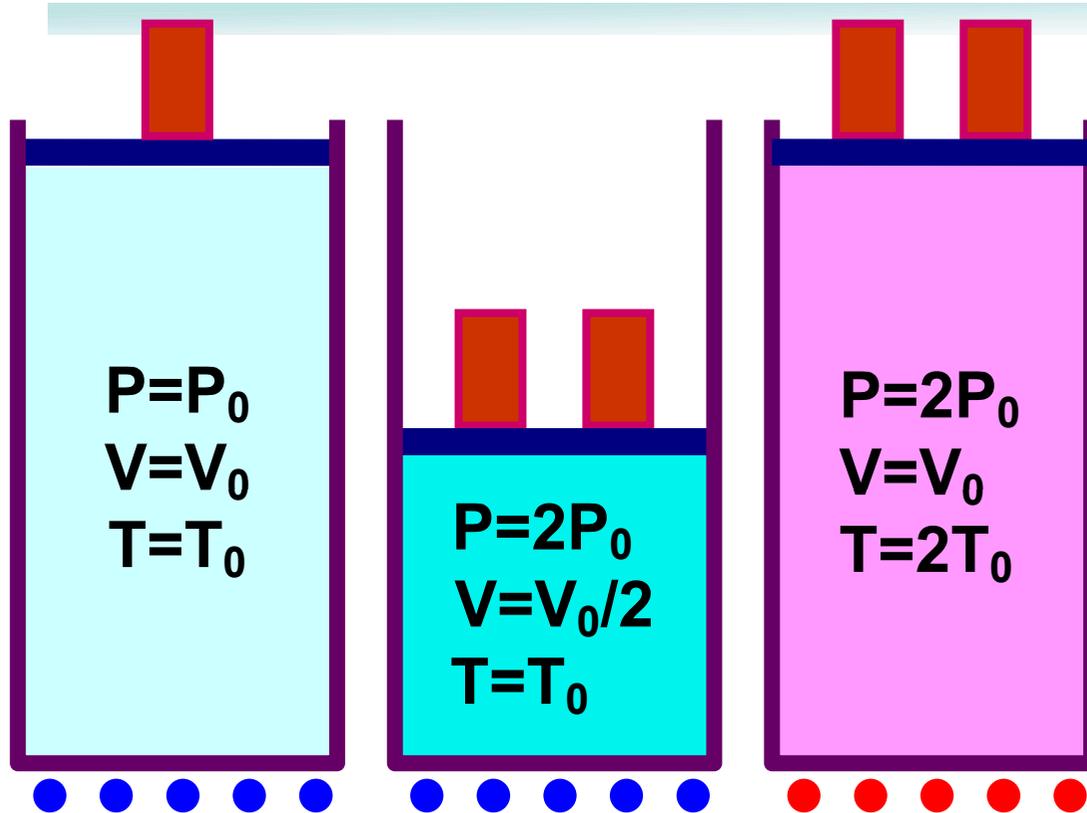
$700 \text{ cm}^2 \times (1 \text{ 기압} - P) \times 1 \text{ kg/cm}^2 > 500 \text{ kg}$
에서 원하는 답은

$$P < 1 - 500/700 \approx 0.28 \text{ 기압} \approx 280 \text{ mbar}$$

P가 **10 mbar** 이하쯤 되면 더 이상의 압력감소는 흡판의 견인력을 크게 증가시키지 않는다.



기체의 성질



PV/T=Constant

압력은 입자밀도와 (입자밀도는 부피에 반비례) 온도에 비례한다. 따라서 총입자수가 같다면 PV/T는 같은 값을 가진다.

압력 = 비례상수x분자밀도x온도
 → $P = knT$

압력x부피 = 비례상수x분자수x온도
 → $PV = kNT$

※ T는 절대온도, $20^{\circ}\text{C}=293\text{ K}$
 †† k는 볼츠만(Boltzmann)상수로 $1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$ 이다.

압력과 입자수

진공도라고 하면 입자밀도가 떠오르는 것이 일반적인 상식인데 입자수가 아닌 압력으로 표현하는 것은 진공을 발견하고 측정한 역사적인 과정과 밀접한 관련이 있다.

비록 단위를 압력으로 사용하지만 입자밀도라는 관념이 깔려있다는 것을 무시할 수 없다.

표준상태(1 기압, 0°C)에서 22.4 L에 들어있는 기체분자의 수는 기체의 종류에 상관없이 6×10^{23} 개다. 이것은 분자량이 M인 물질의 질량이 M g이 되는 양이다.

※분자량 : 수소 $H_2(1+1=2)$, 질소 $N_2(14+14=28)$, 산소 $O_2(16+16=32)$, 물 $H_2O(1+1+16=18)$, 헬륨 He(4), 일산화탄소 CO(12+16=28)

입자수 ~ 압력 X 부피 / 온도이므로

온도가 20°C일 때 압력이 1 mbar인 1 L 용기 안에 들어있는 입자수는

$6 \times 10^{23} \div 1000 \text{ mbar} \div 22.4 \text{ L} \times [(0+273)/(20+273)] \approx 2.5 \times 10^{19}$ 이다. 즉 20°C에서는 $1 \text{ mbar} \cdot \text{L} \approx 2.5 \times 10^{19}$ 개이고 일반적으로는 $1 \text{ mbar} \cdot \text{L} = 7.24 \times 10^{21} / T[\text{K}]$ 개로 표현된다.

예제

1. 대기압, 상대습도 50%인 60 m³ 용기 내에 들어있는 물의 양은?

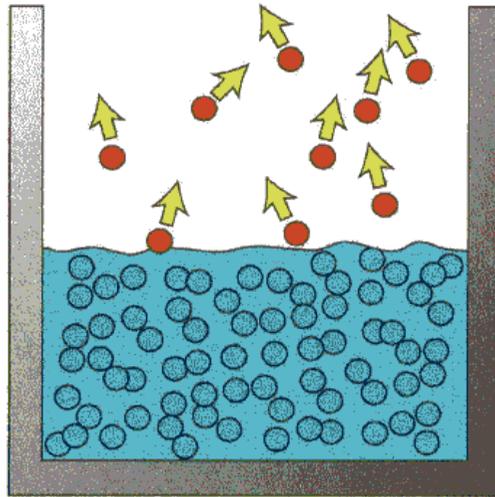
$$\frac{60 \text{ m}^3 \times 23 \text{ mbar} \times 50\%}{22.4 \text{ L} \times 1013 \text{ mbar}} \times 18 \approx 500 \text{ cc}$$

2. 이 용기 벽에 붙어있는 물의 양은?

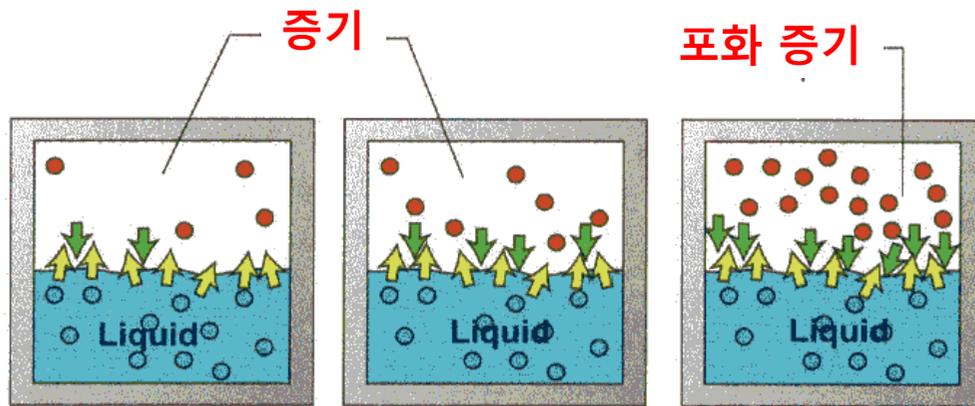
$$100 \text{ m}^2 \times 1 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \approx 1 \text{ cc} \equiv 0.02 \text{ mbar}$$

증발

개방 용기



밀폐 용기



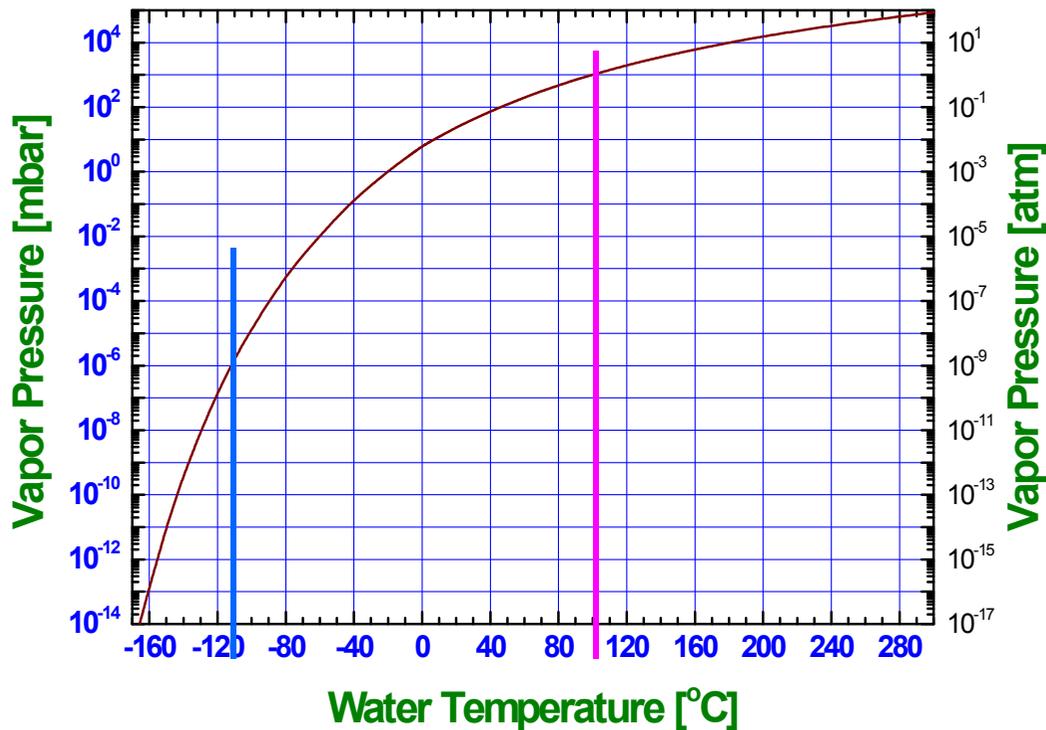
초기 → 진행 → 평형 상태 도달

용기가 개방되어 있으면 물질은 끊임없이 증발할 수 있지만, 밀폐되어 있으면 증발한 물질 즉 증기의 일부는 다시 응축하므로 증기의 분압이 증발하려는 증기압과 같아질 때까지 증발이 일어나고 일단 증발과 응축이 평형을 이루면 더 이상 거시적인 증발은 일어나지 않는다.

액체는 기화하면 부피가 1000배 정도 늘어나므로 충분히 온도가 높은 경우를 제외하고 실제로 증발할 수 있는 양은 많지 않다.

증기압과 증발속도

물의 증기압



물질의 증기압은 온도가 높을수록 커진다. 온도가 점점 높아져 증기압이 용기압력과 같아지면 끓는다. 이를 비등점이라고 한다. 용기의 압력이 낮으면 낮을수록 끓는점이 낮아진다.

※비등점(1기압) : 물(373 K), 질소(77 K), 수소(20 K), 헬륨(4.2 K)

평형압력(또는 증기압)을 알면 증발속도를 구할 수 있다.

증발속도는 기체분자가 평형압력과 어떤 증발온도에서 단위시간당 벽에 부딪히는 입자속과 동일하다.

$$\phi [개/cm^2 \cdot s] = n v_{av} / 4 = 2.635 \times 10^{22}$$

$$P [mbar] / (MT)^{1/2}$$

$$\phi_m [g/cm^2 \cdot s] = m n v_{av} / 4 = 0.04375$$

$$P [mbar] (M/T)^{1/2}$$

20°C 증기압 : 수은 (0.0016 mbar), 에탄올 (58.5 mbar), 이산화탄소 (56.5기압)

예제

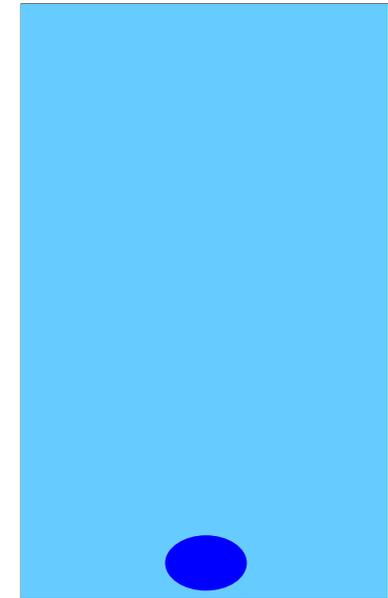
부피가 100 L인 용기 내에 배관으로부터 누설이 있어서 물이 0.5 L가 들어갔다면

온도가 20°C일 때 증기압이 23 mbar이므로
 $23 \text{ mbar} \times 100 \text{ L} \times (2.5 \times 10^{19}) \div (6 \times 10^{23}) \times 18 \text{ g} = 1.7 \text{ g}$
만큼만 증발해도 용기내 물분압은 평형압력에 도달하고 나머지 물은 그 양에 상관없이 액체상태로 남아 있다.

만일 온도가 200°C로 (15.8 기압) 높아져서 물이 다 증발했다면 용기의 압력은

$500 \text{ g} \div 18 \text{ g} \times 22.4 \text{ L} \div 100 \text{ L} \times 473 \div 273 = 10.8 \text{ 기압}$
만큼 더 높아져 위험한 상황이 될 수도 있다.

물은 기화하면 표준상태를 기준으로 부피가 1245배 늘어난다. 액체가 기화하면 부피가 대략 1000배로 늘어난다고 보면 된다.



예제

로터리펌프의 배출압력이 1300 mbar일 때 상대습도100%(50%), 20°C인 공기를 대기압으로부터 배기하는 경우 펌프의 온도가 20도 및 70도일 때 수분의 응축이 일어나기 시작하는 용기압력은?

1) $T_{RP}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($P_{\text{vapor}}=23\text{ mbar}$)

100% 습도에서는 언제나 응축이 일어난다.

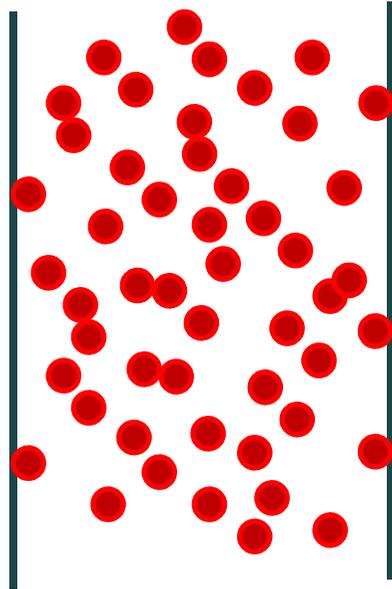
50% 습도에는 $< 650 (=1300 \times (23 \times 0.5 / 23))\text{ mbar}$ 일 때 응축이 일어난다.

2) $T_{RP}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($P_{\text{vapor}}=300\text{ mbar}$)

100% 습도에서는 $< 100 (=1300 \times (23 / 300))\text{ mbar}$

50% 습도에서는 $< 50\text{ mbar}$ 일 때 응축한다.

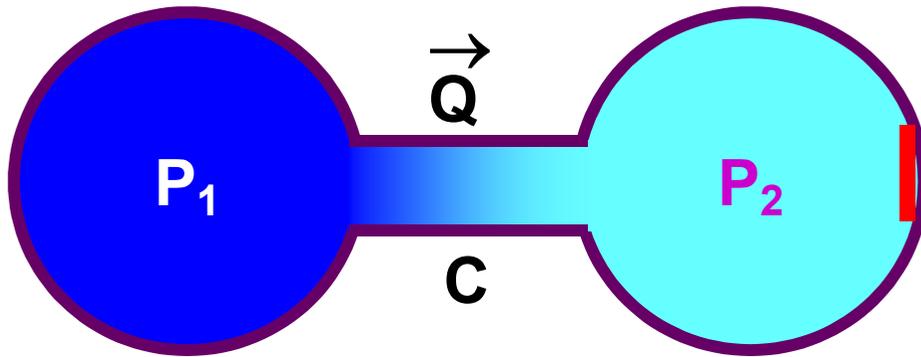
기체흐름과 교통



도관에서 입자들의 흐름은 마치 도로를 지나는 자동차의 흐름을 연상케 한다. 그러나 자동차와 달리 입자들은 입자들끼리 또 벽과 부단히 충돌한다. 입자 사이의 충돌은 정보 전달이라는 측면에서 필수적 요소다.

도로에 자동차가 몰리면 교통 체증이 일어난다. 자동차 밀도에 반비례해서 컨덕턴스가 줄어든다고 할 수 있다. 사실 이런 체증의 원인은 자동차끼리 충돌해서는 안 된다는 전제에서 기인한다.

흐름과 컨덕턴스



기체분자들은 사방으로 같은 확률로 움직인다. 만일 압력이 균일하면 흐름이 생기지 않는다. 압력에 차이가 있으면 높은 압력에서 낮은 쪽으로 흐름이 생긴다. 이때 흐름은 통계적으로 오른쪽으로 가는 입자수가 왼쪽으로 가는 입자수보다 많기 때문에 발생한다.

$$\text{유량} = \text{비례상수} \times \text{압력차 또는 } Q = C(P_1 - P_2)$$

이때 비례상수 C는 연결도관이 얼마나 입자를 잘 통과시키는가 하는 정도에 따라 달라지는 값으로 이를 컨덕턴스(conductance)라고 부른다. 컨덕턴스에는 입자의 분자량과 온도 및 기하학적인 모양에 관한 정보가 포함된다.

도관에서 입자들이 느끼는 저항은 입자간 충돌보다는 정지해 있는 벽과 충돌할 때 운동량을 잃어버리기 때문에 생긴다. 도관이 굵어지면 벽에 부딪히는 입자수가 전체 입자수에 비해 줄어들므로 면적이 늘어나는 것 이상으로 컨덕턴스는 증가한다.

점성류와 분자류

압력이 높을수록 벽과의 충돌기회가 상대적으로 적고 입자간 충돌빈도의 차이에 의해 만들어진 흐름은 도관 축을 따라서 형성되어 입자들은 도관을 잘 빠져나갈 수 있다. **압력이 높을 때의 흐름을 점성류(viscous flow)**라고 한다.

압력이 현저히 줄어들면 벽에 부딪히는 입자들의 상대적인 수는 일정한 수준을 유지하므로 컨덕턴스는 압력에 무관해진다. **압력이 낮을 때의 흐름을 분자류(molecular flow)**라고 한다. 도관이 굵어지면 역시 벽에 부딪히는 것보다 공간 내에 있을 확률이 커지므로 컨덕턴스가 증가하지만 압력이 높을 때보다는 도관의 굵기가 미치는 효과가 줄어든다.

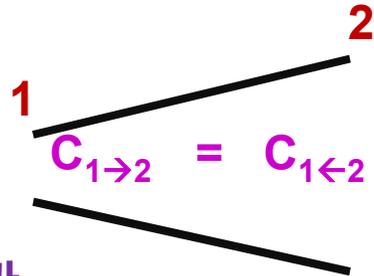
컨덕턴스는 압력이 높을 때는 입구 유효직경의 **4승**에, 압력이 낮을 때는 **3승**에 비례하고 길이에 반비례한다.

컨덕턴스는 단면이 원에 가까울수록 커진다. 도관에 수직인 단면적에 비해 도관벽의 표면적이 최소로 되는 것이 컨덕턴스를 크게하는 길이다.

분자류의 컨덕턴스 **C**는 $v_{av}/4 \times \text{면적} \times \text{통과확률}$ 로 표현된다. 이때 $v_{av}/4 (=3.64\sqrt{(T/M)} \text{ L/s})$ 를 단위 오리피스 컨덕턴스(C_0)라고 부른다.

컨덕턴스의 몇 가지 성질

◆무방향성



$q_{1 \rightarrow 2} = C_{1 \rightarrow 2} P_1 - C_{1 \leftarrow 2} P_2$ 에서
 만일 $C_{1 \rightarrow 2} \neq C_{1 \leftarrow 2}$ 이면
 $P_1 = P_2$ 일 때도 $q_{1 \rightarrow 2} \neq 0$ 이 되어 모순

◆얇은꼴 도관

어떤 도관을 모든 방향으로 k 배 변화시키면 통과확률은 그대로 있고 입구 면적은 k^2 배, 길이는 k 배 변하므로 컨덕턴스는 k 배 만큼 변한다. 예를 들어 직경 10cm, 길이 100cm인 원통도관은 직경 5cm, 길이 50cm인 도관보다 컨덕턴스가 2 배 크다.

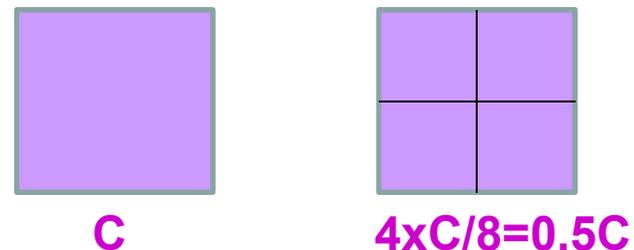
◆최소 둘레길이

같은 단면적이라면 최소 둘레길이의 단면이 최대 컨덕턴스를 가진다. 직사각형보다는 정사각형이, 그보다는 원형 단면이 유리하다.

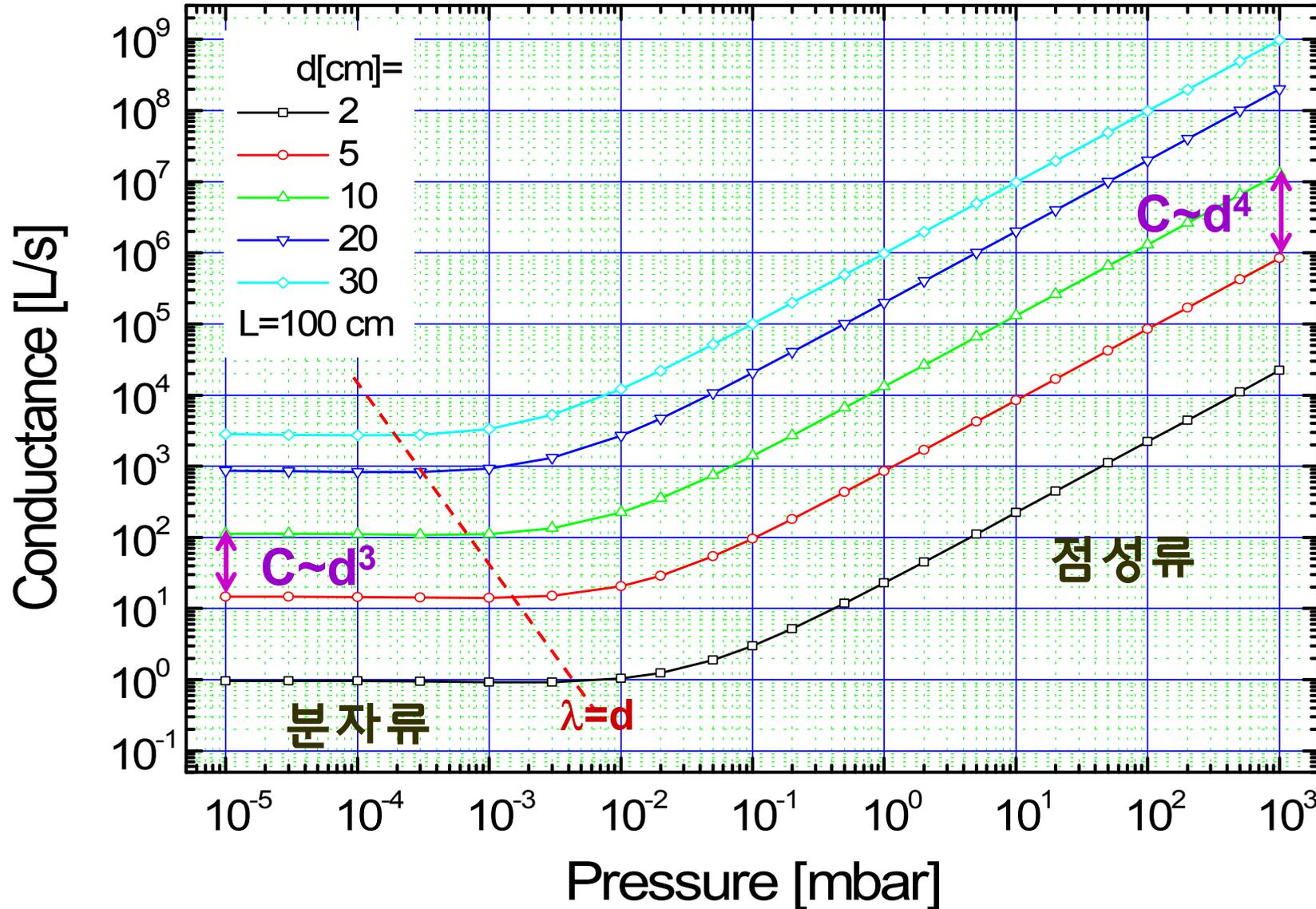


◆도관의 분할

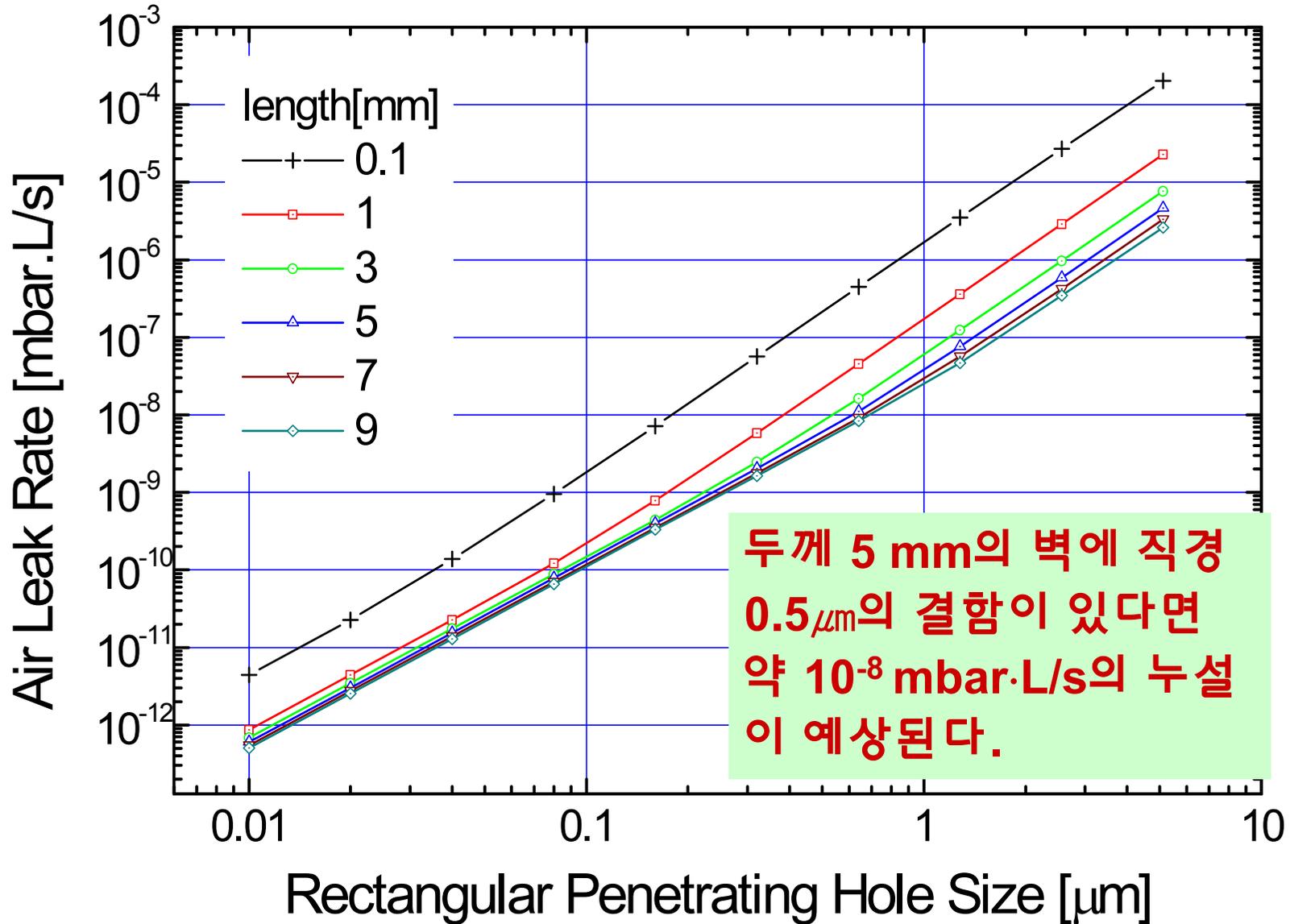
도관을 분할하면 컨덕턴스가 줄어든다. 작은 도관을 여러 개 사용하는 것보다 같은 면적의 도관 하나를 사용하는 것이 좋다.



원통의 컨덕턴스



미세도관을 통한 공기 누설



유량측정

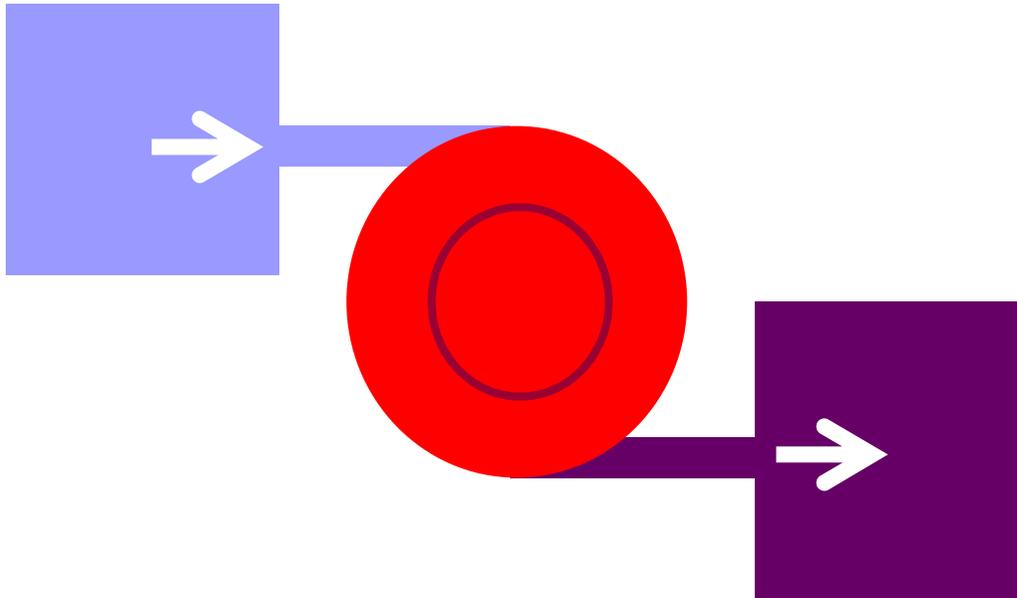
유량은 오리피스법이나 MFC를 사용해서 측정할 수 있다.
오리피스법은 컨덕턴스를 알고 있는 오리피스 양단의 압력을 측정하고 $q=C_o(P_1-P_2)$ 에 의해 유량을 직접 계산하는 것이다.

MFC는 기체의 열전도 특성을 이용하여 기체온도와 무관하게 질량유속을 측정하거나 제어한다. 실제 지시치의 단위는 주로 sccm (standard cc per minute)이 쓰이는데 그 의미는 0°C, 1기압에서 1분당 흘러가는 기체의 부피로서, 온도가 주어져 있으므로 결국 입자속에 해당된다.

1 sccm이 분당 2.69×10^{19} 개, 초당 4.48×10^{17} 개의 입자가 공급되는 것이고 $1 \text{ mbar} \cdot \text{L/s} = 7.24 \times 10^{21} \text{ 개}/\text{T}[\text{K}]$ 개이므로
 $1 \text{ sccm} = 6.2 \times 10^{-5} \times \text{T}[\text{K}] \text{ mbar} \cdot \text{L/s} \approx 1/60 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$

※ $1 \text{ mbar} \cdot \text{L/s} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = 0.75 \text{ Torr} \cdot \text{L/s} \approx$
 $1 \text{ sccs} (\sim 10^3 \text{ mbar} \times 10^{-3} \text{ L/s at } 0^\circ\text{C}) = 60 \text{ sccm}$

진공펌프와 압축기



회전기계의 한 쪽 압력은 낮고 다른 쪽 압력은 높으면서 유체가 흐른다면 이 기계는 **펌프**다.

사용하는 쪽이 어디냐에 따라 **진공 펌프**일 수도 있고 **압축기**일 수도 있다.

기계 자체보다는 사용하는 방법에 따라 결정된다고 할 수 있다.

펌프에서 낮은 압력과 높은 압력의 비를 **압축비**라고 한다.

진공펌프와 지옥철

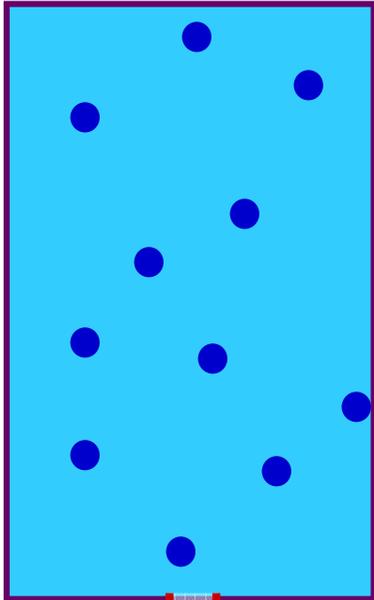


지옥철에 갇힌 사람들은 전동차가 승강장에 도착해서 차문이 열리면 마치 무엇이 잡아다니는 것처럼 쏟아져 나온다. 때로는 자기 의사와는 상관 없이 움직이는 경우도 많다.

사실 전동차에 타고 있던 사람들을 밖으로 잡아다니는 특별한 힘은 존재하지 않는다. 아니 그런 힘은 필요치 않다. 왜냐하면 사람들은 전동차 안에 꾸겨질 듯이 들어찬 다른 사람들의 압력에 의해 저절로 내 몰리기 때문이다. 만일 승강장도 차안 만큼이나 사람들이 들어차 있다면 차문이 열려도 아무도 움직일 수 없을 것이다.

지하철 승강장은 마치 진공펌프와 같다. 쏟아져 내리는 사람들을 한 없이 받아들여서 내 보낸다는 면에서.

진공배기펌프



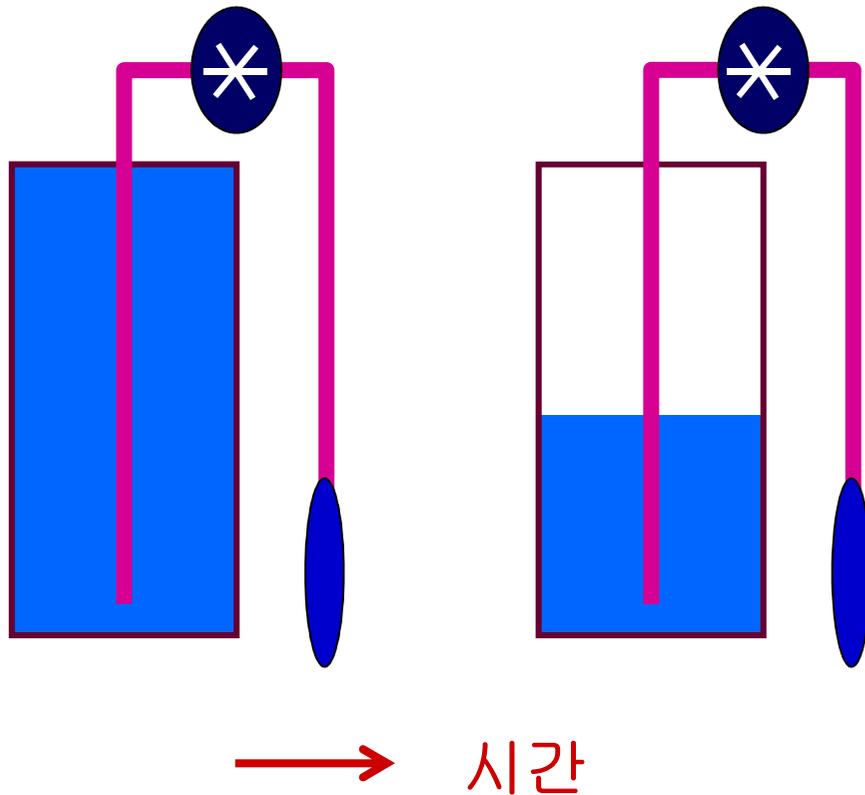
펌프는 배기방식에 상관없이 자기 영역에 들어온 기체 분자들만을 밖으로 배출하거나 잡아먹을 뿐 영역 밖에 있는 입자들을 빨아들이는 능력은 없다.

기체분자들은 압력이 높을 때는 펌프방향으로의 충돌이 그 반대방향보다 더 많아졌다는 것을 느낀다. 그 이유는 여전히 모르지만.. **입자들은 빨려가는 것이 아니라 밀려서 간다고** 할 수 있다.



압력이 낮아지면 펌프에 대해 어떤 것도 감지할 수 없다. 단지 **우연히 펌프 영역으로 들어서는 것뿐이다.** 마치 **끈끈이주걱**에 날아드는 곤충처럼.. 펌프는 결코 개구리 혀가 아니다.

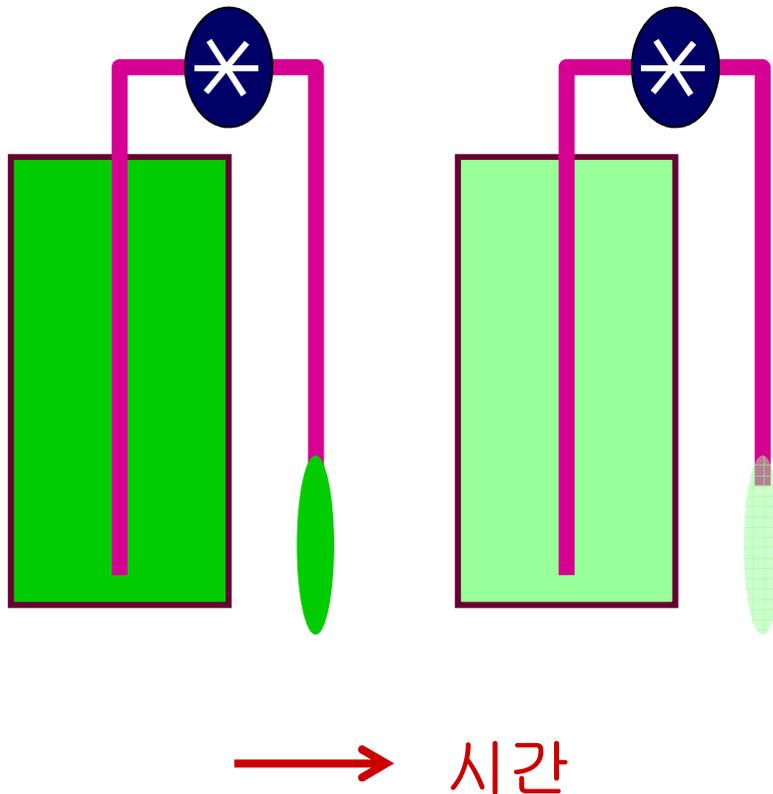
물펌프와 진공펌프



물펌프는 단위시간당 배출하는 물의 체적이 곧 유량이다. 물의 일부가 배출되어 빈 공간이 생겨도 남은 물은 공간에 퍼지지 않으므로 밀도가 변하지 않기 때문에 옮겨진 체적으로 배출량을 대표할 수 있다.

나간 물이나 남은 물의 질량을 알고 싶으면 각각의 체적에 상수인 밀도를 곱하면 된다.

진공펌프와 물펌프



진공펌프는 기체를 배기하면 바로 그 공간을 나머지 기체들이 채워버리므로 체적은 변함이 없고 밀도만 계속 희박해진다. 따라서 단위시간 당 배출하는 기체의 양을 옮겨지는 체적으로만 나타낼수 없고 그때그때 마다 변하는 밀도 또는 압력을 곱해주어야 한다.

펌프의 단위시간당 배출능력이 같다고 해도 실질적인 배출량은 진공펌프쪽이 훨씬 작다.

예를 들어 한 용기에 있는 물을 반씩 덜어 내면 두번 만에 다 비워지지만 같은 방법으로 공기를 덜어내는 경우에는 처음에는 $1/2$, 그 다음은 $(1/2)/2=1/4$, 그 다음은 $(1/4)/2=1/8$, 그 다음은 $1/16$, $1/32$ 만큼이 계속 남는다.

펌프의 배기량(유량)과 배기속도

펌프의 배기량(Throughput)[mbar·L/s]은 펌프의 배기속도(Pumping speed)[L/s]에 흡기구쪽 압력을 곱한 것이다. 즉

$$\text{배기량} = \text{배기속도} \times \text{압력} \text{ 또는 } Q = S_p \times P$$

S_p 에는 펌프의 배기성과 기체분자의 물리량에 대한 정보가 들어있다. 저진공 펌프는 회전수와 이송용적을 곱한 값으로 주어지므로 거의 기체의 종류와 상관이 없지만 고진공 펌프를 사용할 때에는 대개 기체의 종류에 영향을 받는다.

고진공 펌프의 S_p 는 $v_{av}/4$ (또는 C_0)와 펌프 흡기구 단면적 A 및 배기확률 β 를 곱한 것이다. 즉

$$S_p = C_0 \times A \times \beta.$$

배기확률은 일단 흡기구 내로 들어온 입자를 배출하거나 흡수할 확률이다.

S_p 는 압력이 P 인 용기와 압력이 0인 가상적인 용기를 연결하는 통과확률이 β 인 도관의 컨덕턴스와 같다고 볼 수 있다. 즉

$$Q = S_p \times (P - 0)$$

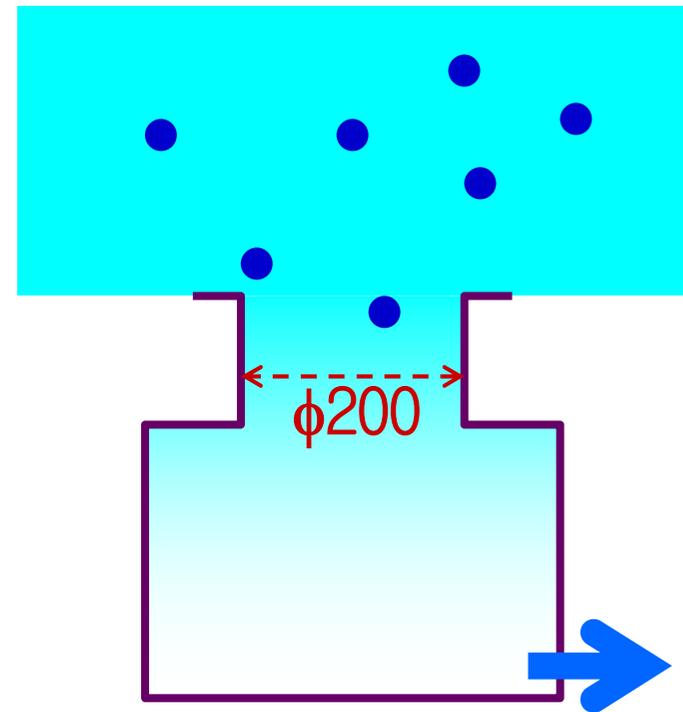
※1 L/s = 60 L/min = 3.6 m³/hr

예제

고진공 펌프의 흡기구 직경이 20 cm라면 상온에서 질소 및 수소에 대한 배기속도는 최대 얼마로 예상되나?

입구 면적이 314 cm^2 이므로
질소는 $314 \times 11.8 = 3705 \text{ L/s}$,
수소는 $314 \times 44 = 13800 \text{ L/s}$ 이다.

배기확률이 질소가 0.6, 수소가 0.2라면 실제 배기속도는 각각 2200 L/s 및 2760 L/s 이다.



2장

진공 시스템



진공 시스템



진공시스템 사양

기본사양

크기 V
 기저진공도 P_0
 유량 Q
 작동압력 P
 온도 T
 분위기 (Air, H₂, Ar, - -)
 펌프 위치

1차 결정사항

용기 재료 (SS, Al, - -)
 가공, 표면처리
 기체방출률 Q
 도관
 밸브
 진공 게이지

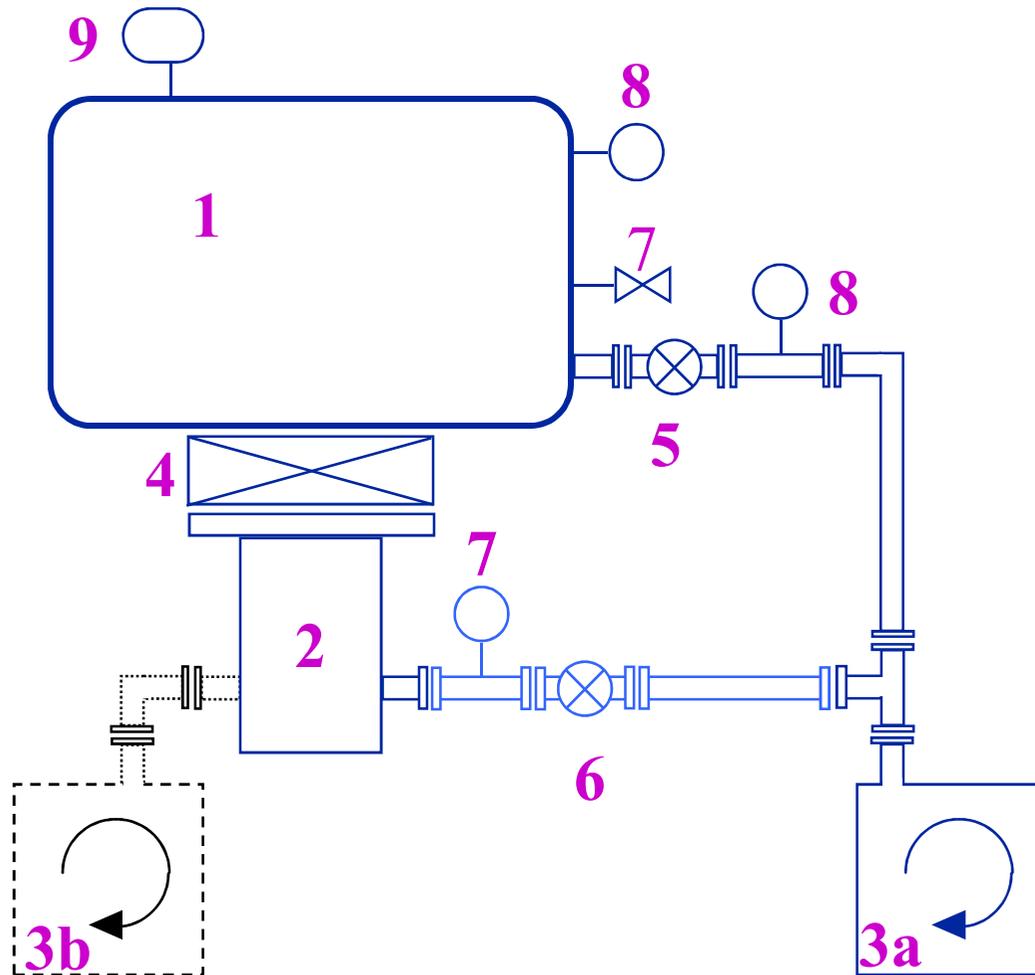
2차 결정사항

진공펌프 종류
 배기속도 S
 보조펌프 여부
 보조펌프 용량

기저(도달) 압력 / Base (Ultimate) Pressure:	공정(작동) 압력 / Process Operating) Pressure
<p>진공 시스템에서 실용적으로 도달할 수 있는 가장 낮은 압력</p> <ul style="list-style-type: none"> - 인위적인 기체유입이 없다. - 어떤 공정을 시작하기 전에 얻는다. - 기저압력이 낮을수록 공정 중 불순물 혼입이 적다. - 기저압력을 낮추는 방법은 목표값과 기체원에 따라 다르다. - 진공펌프의 질적 수준을 결정한다. 	<p>기체유입량에 따라 정해지는 압력.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 공정압력은 기저압력 보다 훨씬 높다. - 진공펌프의 용량을 결정한다.

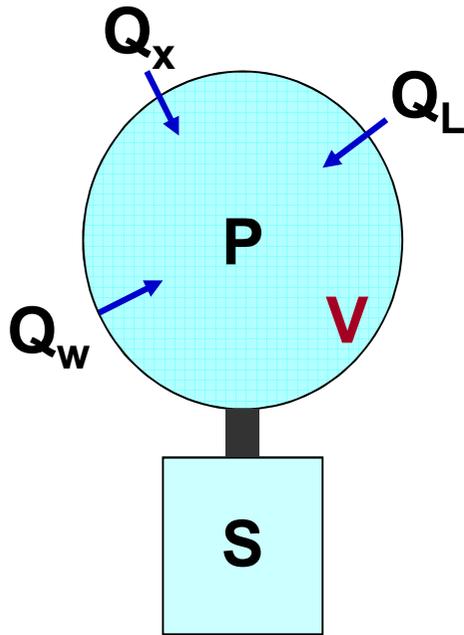


진공 시스템 실례



- 1 Chamber
- 2 High Vac. Pump
- 3a Roughing Pump
- 3b Foreline Pump
- 4 Hi-Vac. Valve
- 5 Roughing Valve
- 6 Foreline Valve
- 7 Vent Valve
- 8 Roughing Gauge
- 9 High Vac. Gauge

진공 배기계



입자변화율 = 입자투입량 - 입자배출량

$$d(nV)/dt = \Gamma - nS \rightarrow (\text{양변에 } kT \text{를 곱하면})$$

에너지량변화 = 입력 - 출력

$$d(PV)/dt = Q - PS$$

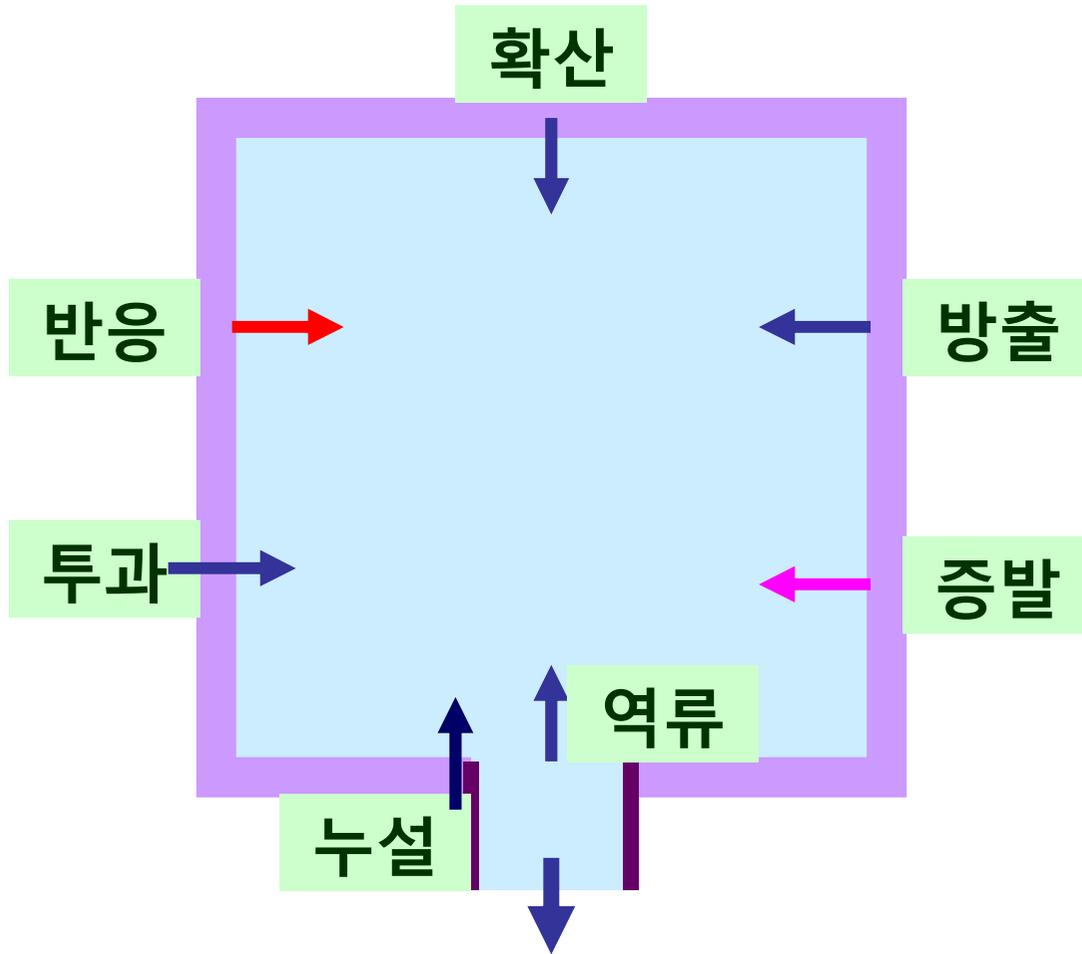
만일 모든 $Q (= Q_x + Q_L + Q_w)$ 가 0이라면

$$dP/dt = -P(S/V) = -P/\tau$$

$\tau (= V/S)$ 는 배기계의 시간상수로 공간에 있던 입자들의 수가 약 2.7분의 1로 떨어지는 데 걸리는 시간이다.

부피가 500 L, 배기속도가 1000 L/min이라면 시간상수는 0.5분이다.

기체 발생원 (Q)



진공용기 내 압력은 기체 부하와 배기와의 평형점에서 결정된다. 용기 내에 들어 있던 대기는 시간이 지나면 거의 완벽하게 없앨 수 있지만 용기 벽은 여러 형태로 끊임없이 기체를 공급하는 가장 영향력이 큰 기체원이다.

낮은 압력에서는 심지어 펌프 자신도 심각한 기체원으로 작용한다.

공간 배기

1. 기체유입이 전혀 없을 때 ($q=0$)

$$dP/dt = -P/\tau \rightarrow P = P_0 e^{-t/\tau} \text{-----(A)}$$

압력이 지수함수적으로 감소한다. 만일 시간이 5τ 만큼 지나면 압력은 $2.718^5 \approx 150$ 분의 1로 낮아진다.

2. 일정한 기체유입 Q 가 있을 때

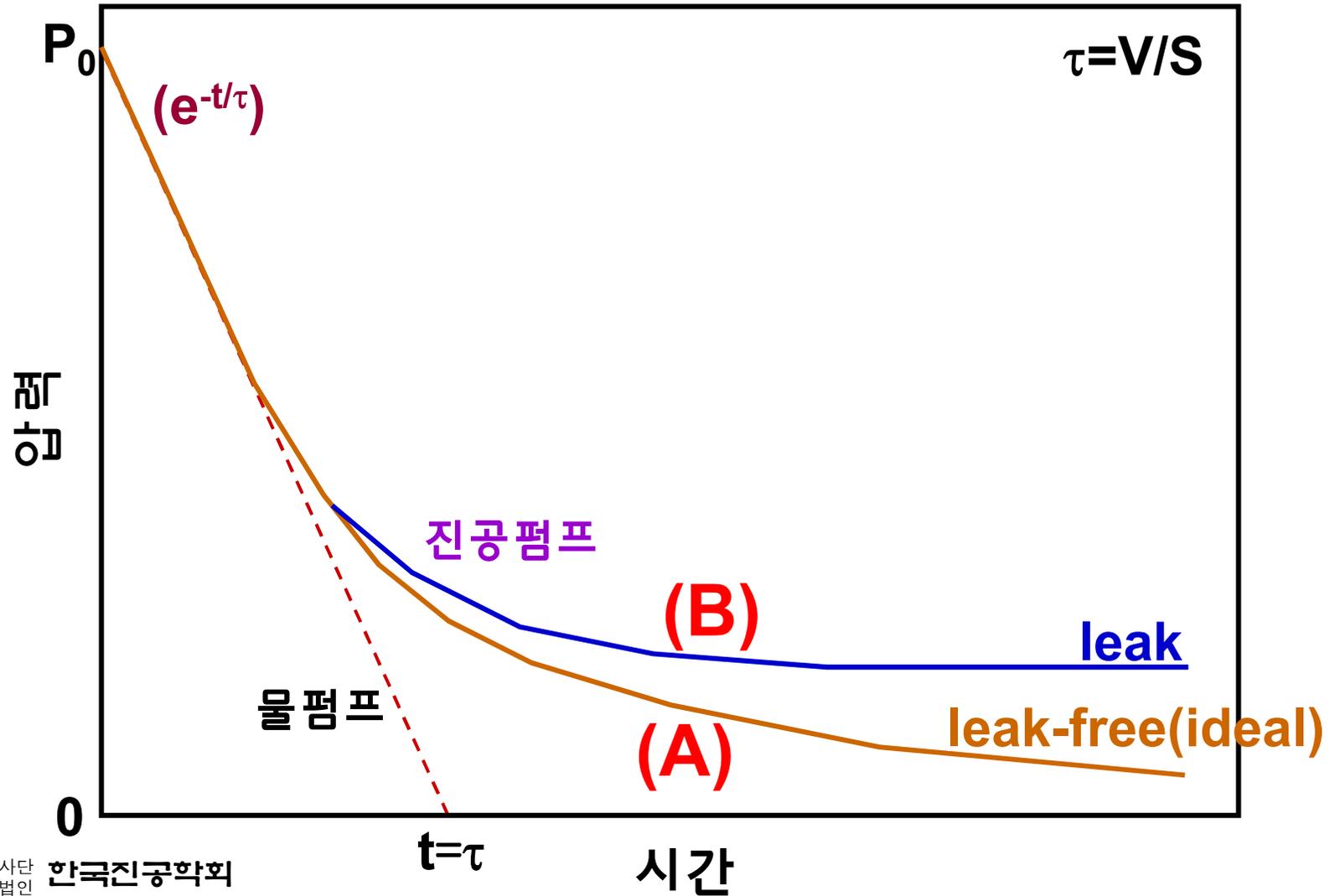
$$dP/dt = Q/V - P/\tau \rightarrow P = Q/S + (P_0 - Q/S)e^{-t/\tau} \text{-----(B)}$$

압력은 처음에는 지수적으로 변하지만 나중에는 일정압력 Q/S 가 된다. 그 시간은 역시 τ 의 몇 배 정도가 된다.

3. Q 가 일정하지 않을 때는 함수로 나타내기는 쉽지 않지만 그 경향은 Q 가 일정할 때와 같다. 시간이 τ 의 몇 배 정도 지난 후 압력이 결국 Q/S 가 되므로 Q 가 감소하는 것과 같은 꼴로 감소한다.

※용기의 부피는 압력이 변화하는 시간에만 영향을 주고 최종 압력값에는 직접 영향을 미치지 않는다.

배기곡선



예제

배기속도가 2000 L/min인 펌프로 500 L인 용기를 1 기압에서 배기한다고 할 때 펌프 배기속도도 일정하다면

- 1) 십만분의 1 기압 ($\sim 10^{-2}$ mbar)까지 배기하는 데 얼마나 걸리나?
- 2) 용기에 0.3 mbar.L/s의 기체 부하가 있다면 어떨까?

시간상수 $\tau = 500/2000 = 0.25$ 분 (=15 초), $Q/S = 9 \times 10^{-3}$ mbar

1) $10^{-5} = e^{-t/0.25}$ 에서 $t = -\ln 10^{-5} \times 0.25 = 2.88$ 분 =173 초

2) $(0.01-0.009)/(1013 - 0.009) = 9.87 \times 10^{-7} = e^{-t/0.25}$ 에서
 $t = -\ln(9.87 \times 10^{-7}) \times 0.25 = 3.46$ 분 =208 초

만일 용기 안에 들어있는 것이 물이라면 $t = \tau = 15$ 초 만에 다 퍼낼 수 있다.

예제

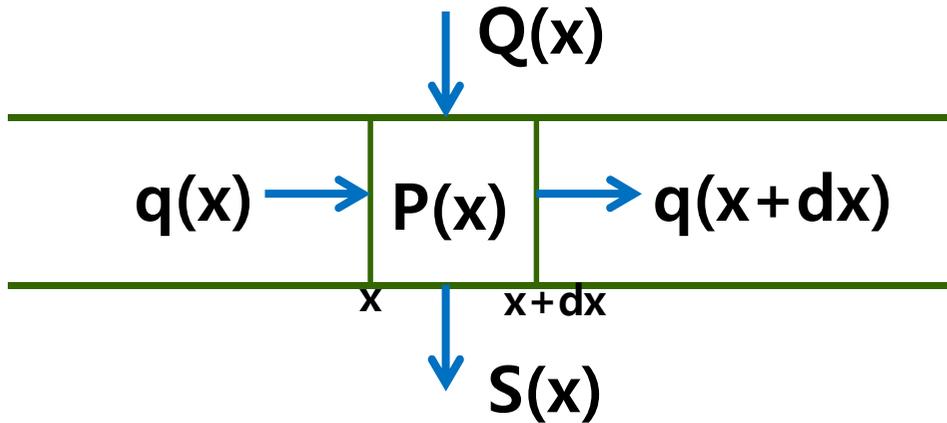
MFC을 사용하여 유량 **1 sccm**으로 질소를 진공 용기에 주입하였을 때 용기의 압력이 **3×10^{-5} mbar** 라면 진공펌프의 배기속도는 얼마인가?

$1 \text{ sccm} = 6.2 \times 10^{-5} \times T[\text{K}] \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s}$ 이므로
상온이라면

$$q = 6.2 \times 10^{-5} \times 293 \times 1 = 1.82 \times 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s}$$

$$\begin{aligned} S &= q/P \\ &= 1.82 \times 10^{-2} / 3 \times 10^{-5} \\ &= 605 \text{ L}/\text{s} \end{aligned}$$

도관 내 압력분포



$$q(x + dx) = q(x) + Q(x)dx - S(x)dx \rightarrow \frac{dq}{dx} = Q(x) - S(x)$$

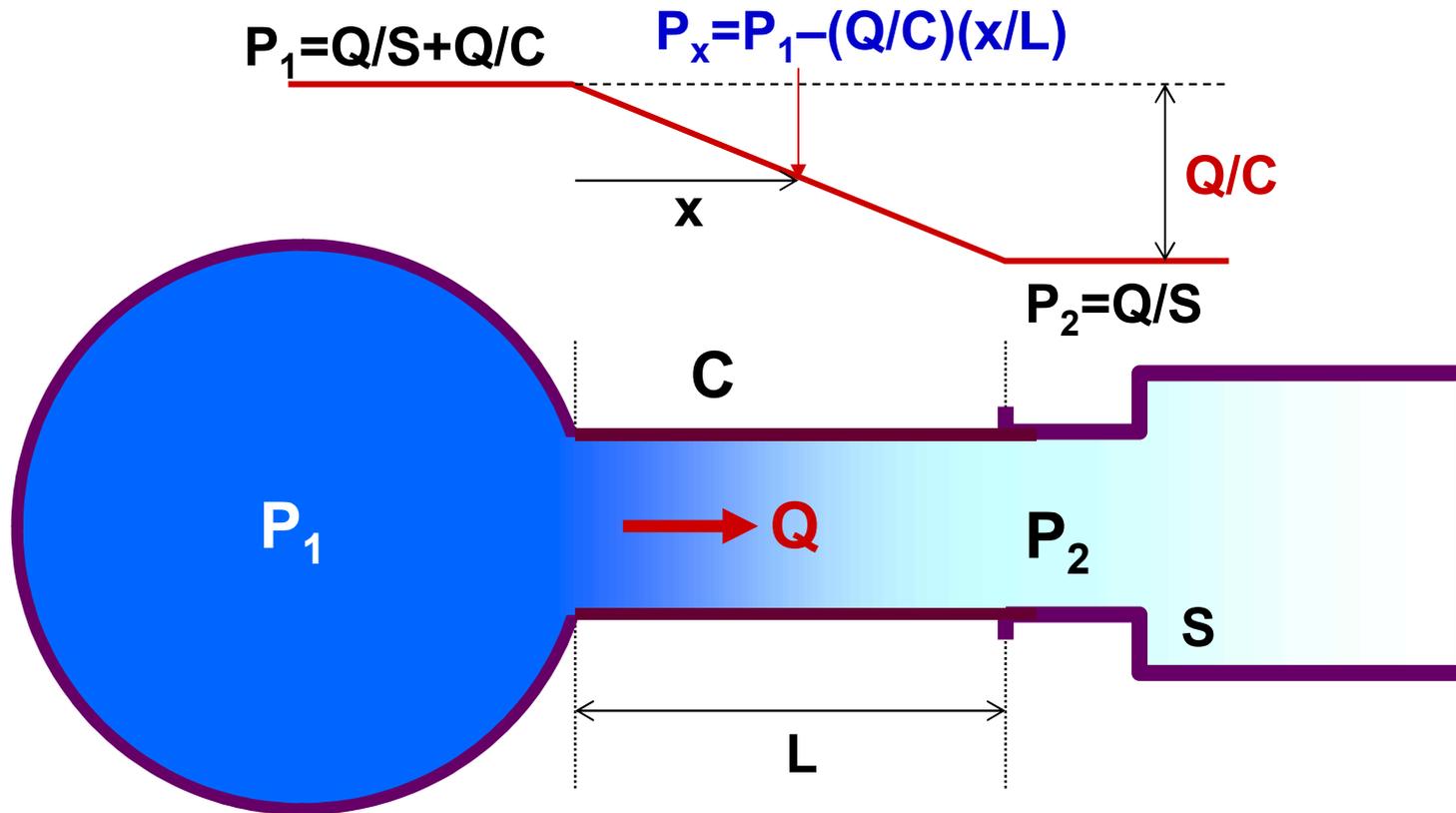
$$q(x) = \frac{C(x)}{dx} (P(x) - P(x + dx)) \rightarrow q = -C(x) \frac{dP}{dx}$$

$$C(x) \frac{d^2P}{dx^2} + \frac{dC(x)}{dx} \frac{dP}{dx} + Q(x) - S(x) = 0$$

Ex) Unit outgassing: $Q(x)=Q_t$ ($Q_t=Q_tL$), Unit conductance: $C(x)=C_t$ ($C=C_t/L$),
 Boundary condition: $q(0)=q_0$, $P(0)=P_0$, $S=0$

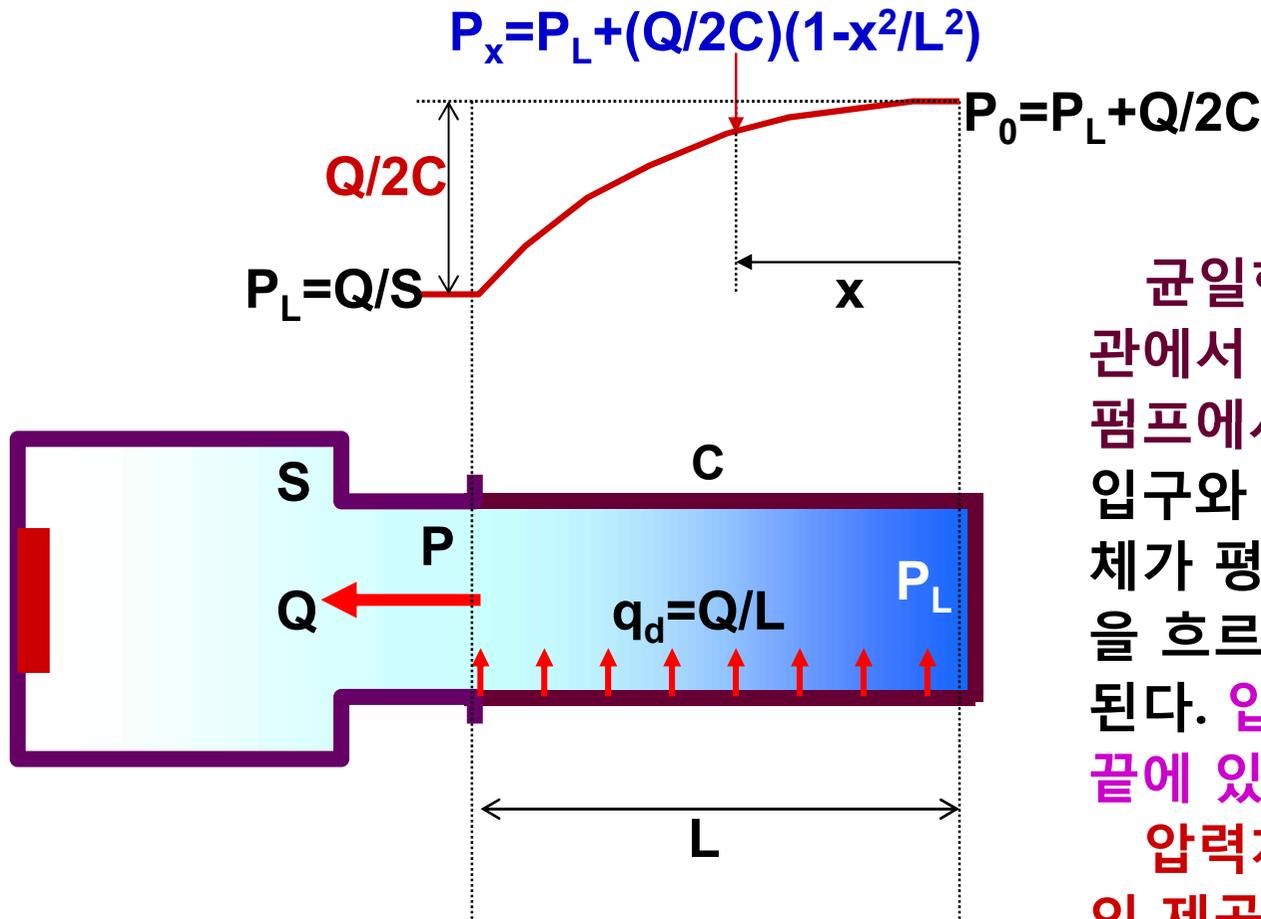
$$P = P_0 - \frac{Q_t}{2C} \frac{x^2}{L} - \frac{q_0}{C} \frac{x}{L}$$

단순 직선도관의 압력분포



직선도관에서 일정한 유량의 기체가 흐를 때 양단간의 압력차는 Q/C 이고, 압력분포는 거의 직선적으로 변한다.

기체방출 도관의 압력분포



균일한 표면방출이 있는 긴 도관에서 가장 압력이 높은 곳은 펌프에서 가장 먼 도관의 끝이다. 입구와 끝의 압력차는 방출된 기체가 평균적으로 도관의 반만큼을 흐르는 것으로 보아 $Q/2C$ 가 된다. 압력분포는 극대점이 도관 끝에 있는 포물선 형태를 이룬다. 압력차는 같은 조건에서 길이의 제곱에 비례한다. ($\Delta P \sim L^2$)

예제

길이 10 m의 도관이 있는데, 단위길이 컨덕턴스가 $10 \text{ L} \cdot \text{m/s}$, 단위길이당 기체방출량이 $2 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s} \cdot \text{m}$ 라면 도관 한쪽에서만 100 L/s 의 펌프로 배기할 때 파이프 양단의 압력은 각각 얼마인가? 또 압력차는?



도관의 컨덕턴스는 $C = 10 \div 10 = 1 \text{ L/s}$

총기체방출량은 $Q = 2 \times 10^{-6} \times 10 = 2 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$

펌프쪽에서 압력은 $P(L) = Q/S = 2 \times 10^{-5} \div 100 = 2 \times 10^{-7} \text{ mbar}$

도관 끝의 압력은 $P(0) = P(L) + Q/2C = 1.02 \times 10^{-5} \text{ mbar}$

압력차는 $Q/2C = 1.0 \times 10^{-5} \text{ mbar}$

용기 vent

시스템 보수와 부품 교체를 위해 진공용기를 대기 개방하기 위해 공기를 넣는 것을 통상 vent라고 한다. 이 때 몇 가지 방식을 생각할 수 있는데

- 1)대기와 연결한다.
- 2)대기압보다 약간 높은 압력의 기체 저장용기와 연결한다.
- 3)유량을 일정하게 유지한다.

1번은 가장 흔하게 쓰이는 단순한 방법이지만 시간이 많이 걸리고
2번은 시간을 단축할 수 있지만 과압때문에 위험할 수 있다.
3번은 가장 효율적인 방법이지만 구성이 너무 복잡하다.

3번은 단순하므로 1, 2번에 대해서 vent 시간을 구해보자. Vent하는 기체 압력을 P_0 라 하고 밸브를 포함한 vent 관로의 컨덕터스를 $C [=k(P_0+P)/2]$ 라고 하면 용기의 압력이 P 까지 차는 데 걸리는 시간 t 는

$V(dP/dt) = C(P_0 - P) = k(P_0^2 - P^2)/2$ 에서

$t = (V/kP_0) \ln[(P_0+P)/(P_0-P)] \sim (V/2C) \ln[(P_0+P)/(P_0-P)]$ 가 된다.

예제

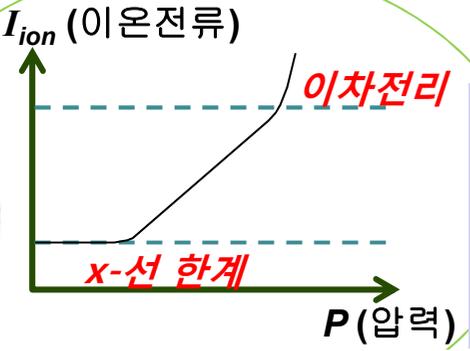
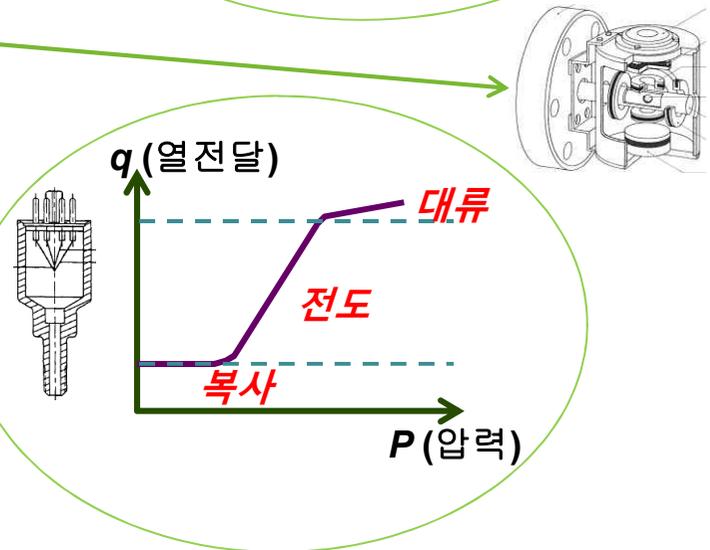
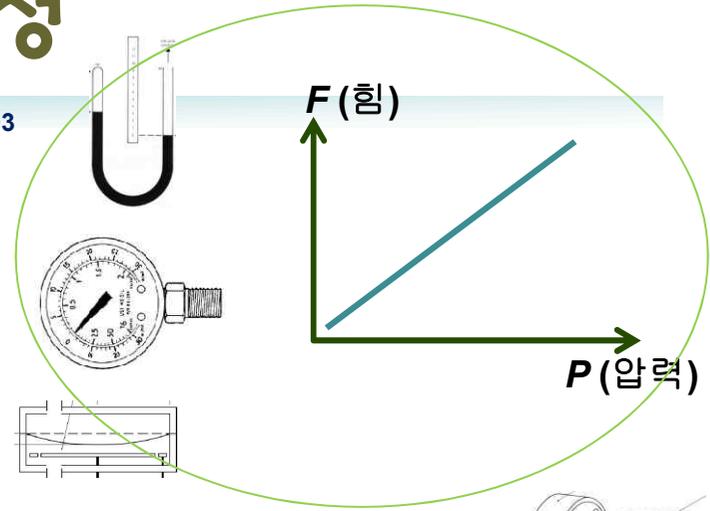
부피가 100 m^3 인 진공용기에 공기를 채우기 위해 1.1 기압의 저장용기를 연결했다면 진공용기가 1 기압으로 차는 데 얼마나 걸릴까? 연결도관의 컨덕턴스는 $10(P_0+P) \text{ L/s}$ 라고 하자.

$$\begin{aligned} t &= (100 \times 1000 / 20 / 1.1) \ln[(1.1+1)/(1.1-1)] \\ &= 5000 / 1.1 \times \ln(21) \\ &= 13839 \text{ s} \\ &= 3.84 \text{ hr} \end{aligned}$$



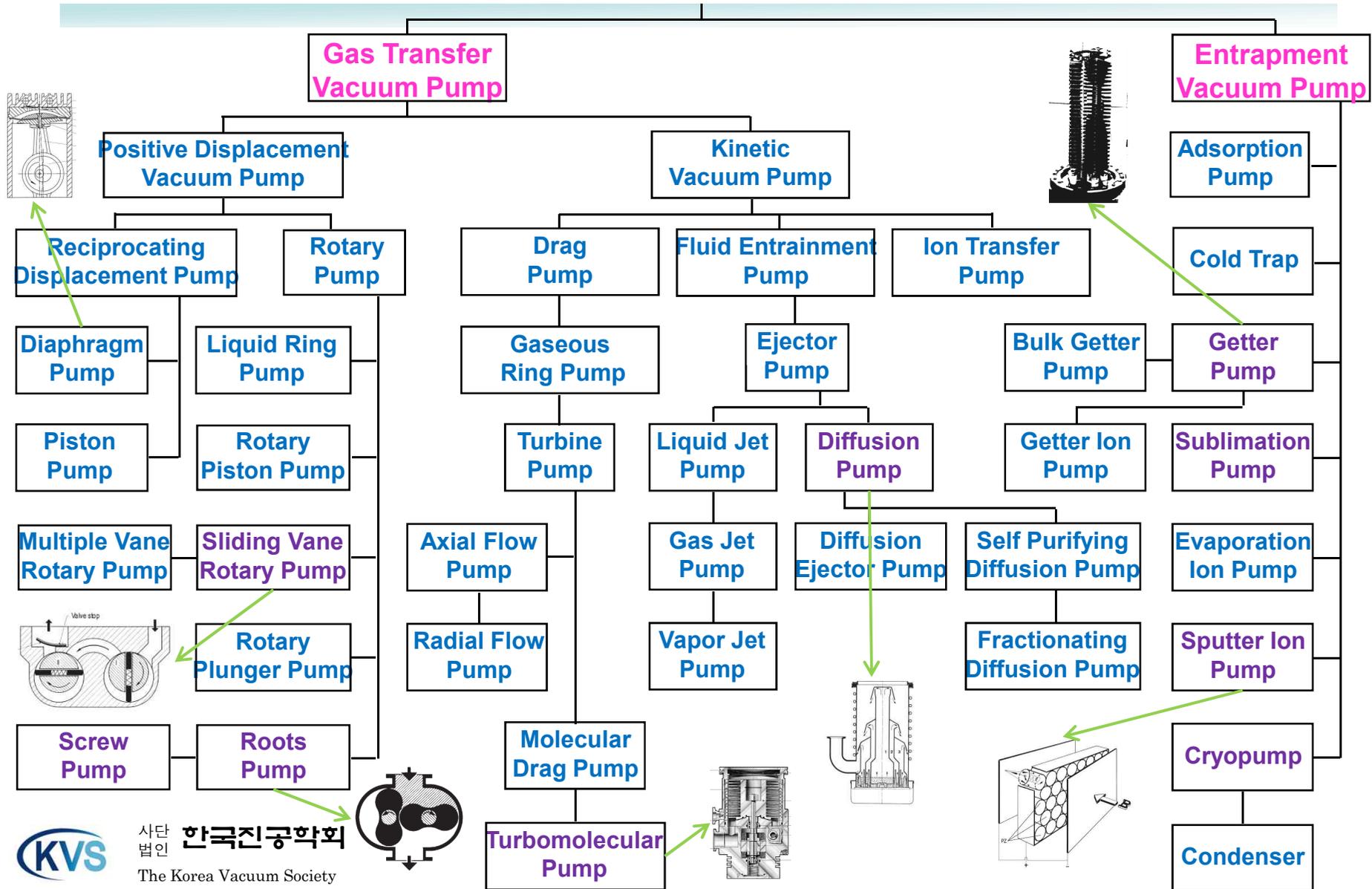
진공압력측정

	10 ⁻¹³	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	10 ⁻³	10 ⁻¹	10 ⁺¹	10 ⁺³
직접측정방식						멕레오드	수은주 압력계		
							부르돈관		
							압전형		
							용량형 격막진공계		
간접측정방식						점성진공계			
							피라니/열전대 진공계		
							냉음극형 페닝 진공계		
							BA 전리진공계		
							인출형 전리진공계		
							잔류기체분석기		

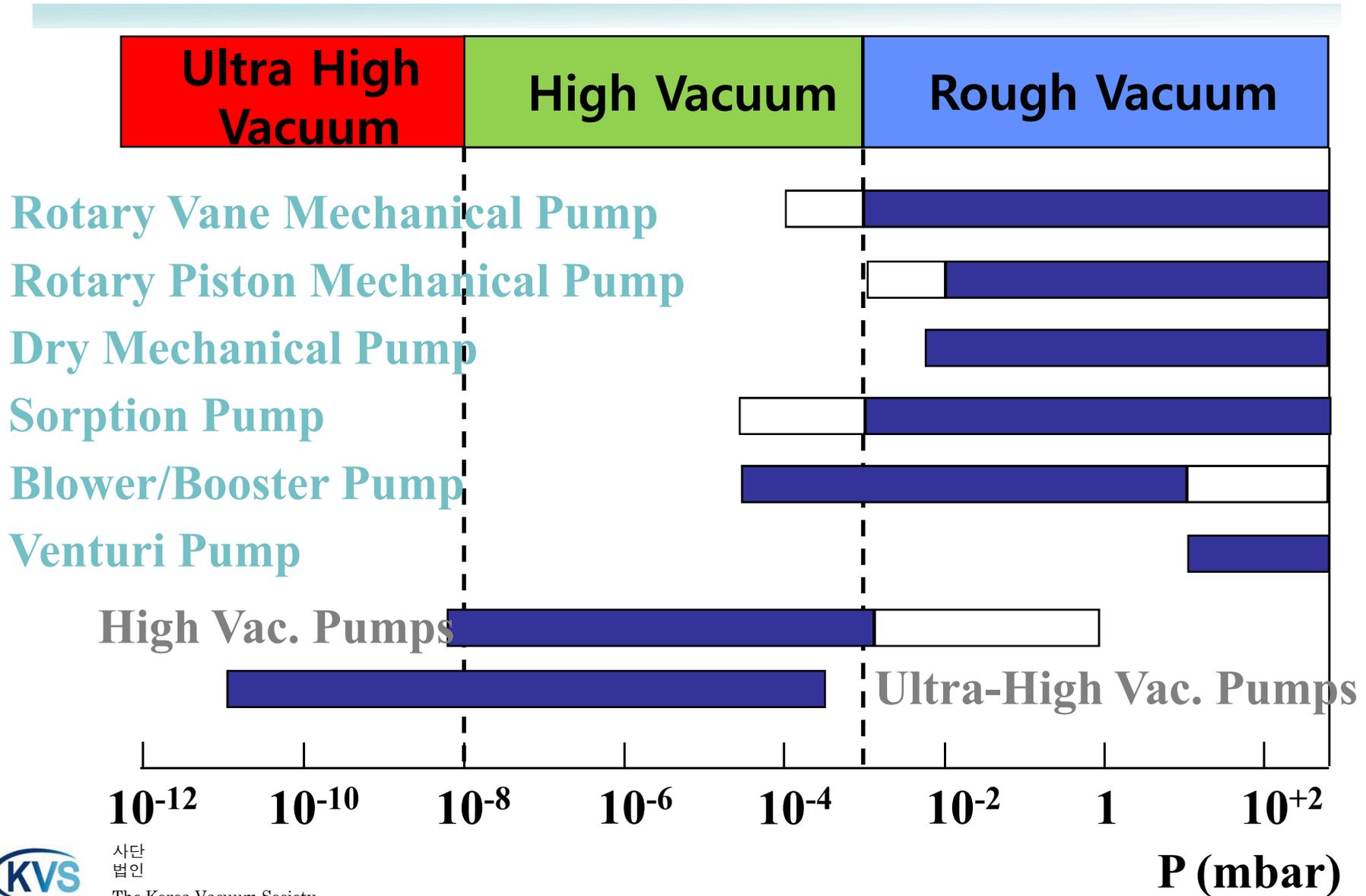


용기의 압력은 용기 내에 들어있는 모든 기체의 분압을 합친 것이다. 압력을 직접 측정하는 방식에서는 기체의 종류에 상관없이 단순 합으로 압력이 주어지지만 입자밀도를 측정하는 방식은 모두 기체의 종류에 따라 감도가 달라서 이를 보정해 주는 것이 실제 압력을 구하는 관건이다.

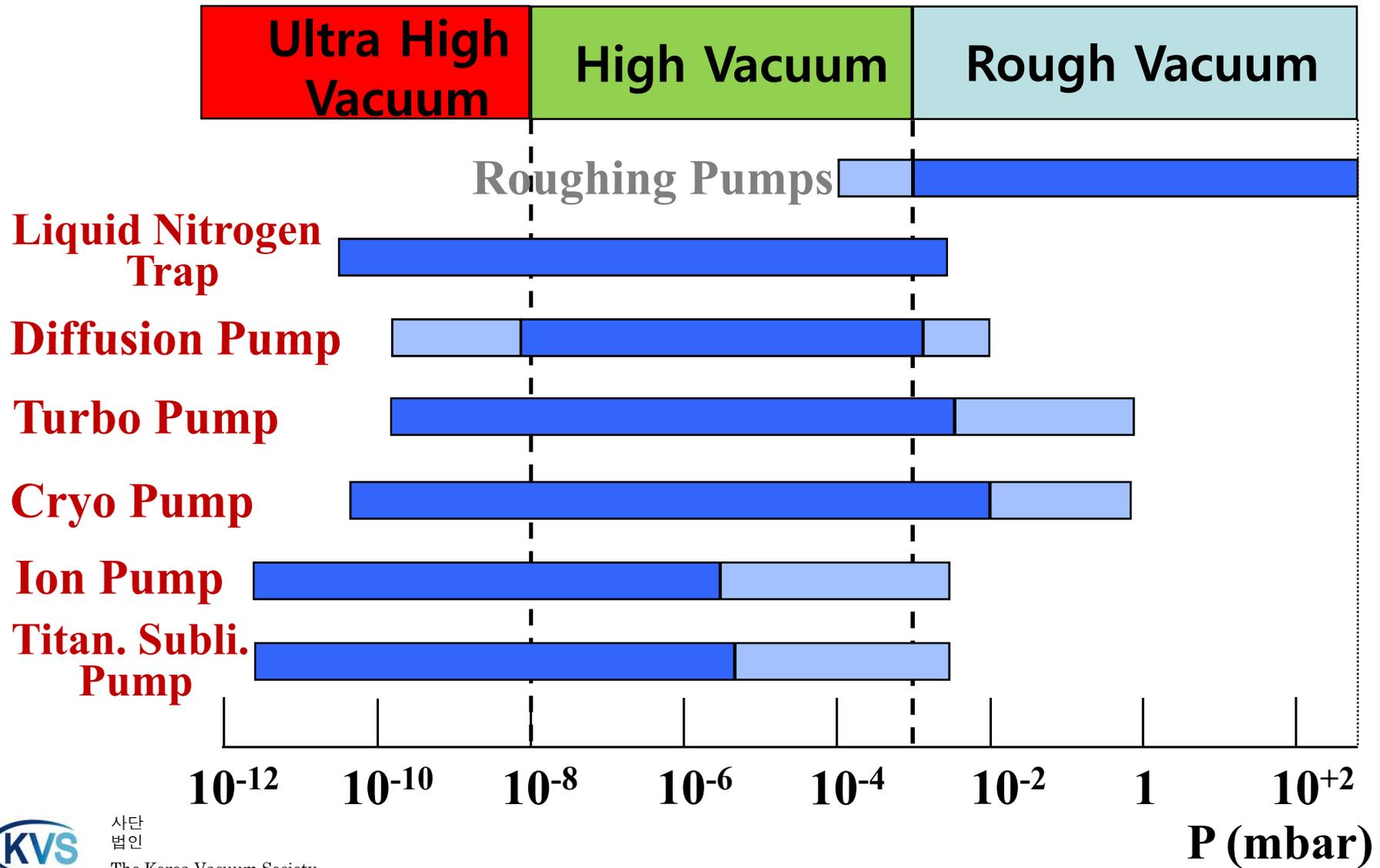
진공펌프



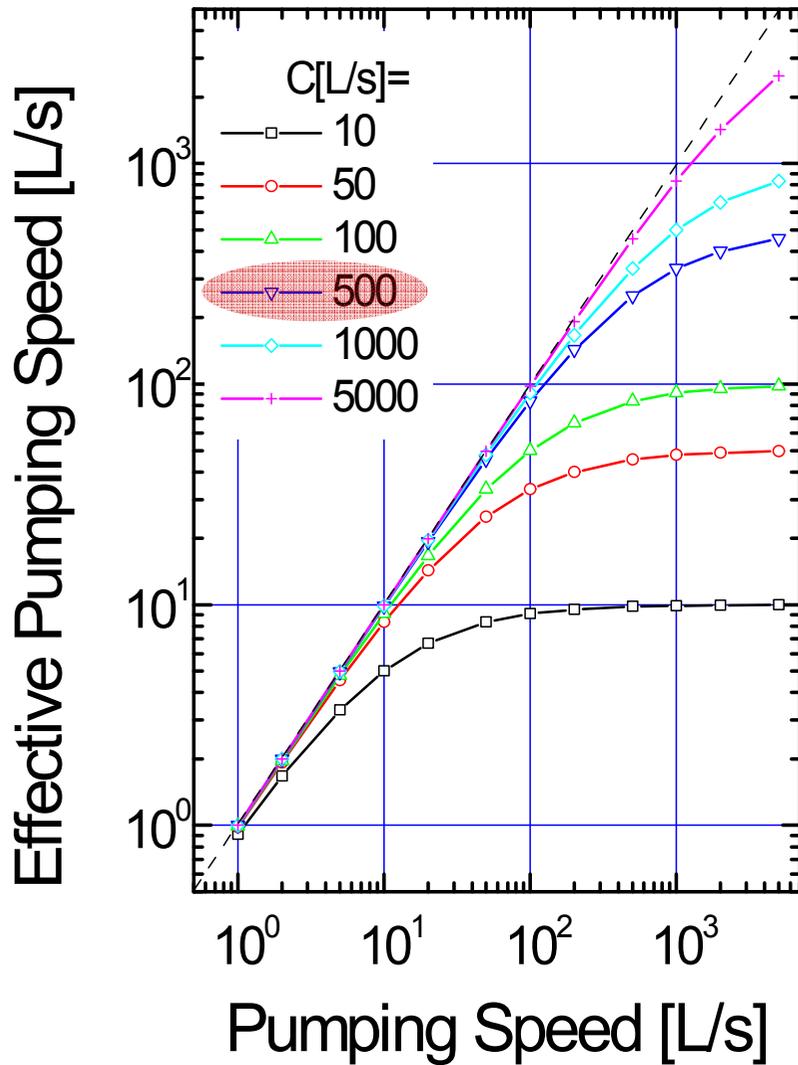
진공펌프 작동영역 1



진공펌프 작동영역 2



유효배기속도 - 도관의 영향

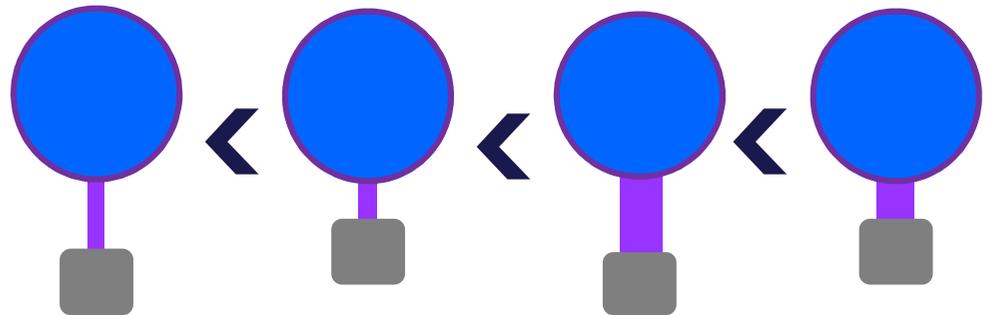


도관을 통해 펌프를 연결하면 용기에서 느끼는 배기속도 값이 달라진다. 도관의 저항만큼 배기속도가 줄어드는데 연산방법은 도관을 직렬로 연결할 때와 같다. 즉

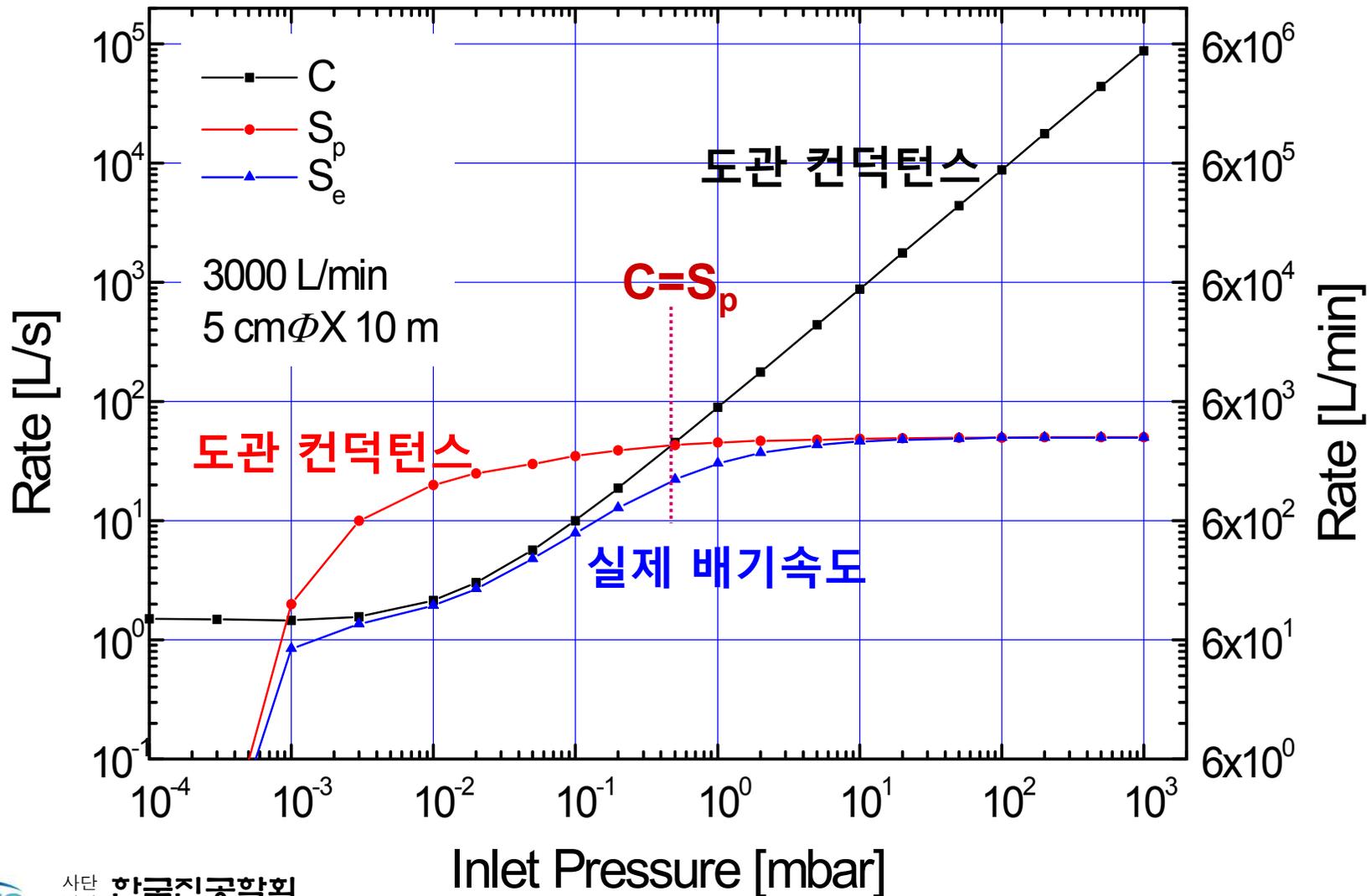
$$1/S_e = 1/S_p + 1/C$$

유효배기속도는 도관의 컨덕턴스보다 커질 수 없다. 따라서 도관의 컨덕턴스는 최소한 펌프의 배기속도보다 커야 하고 10배는 좀 지나 치지만 5배 정도는 큰 것이 효율적이다.

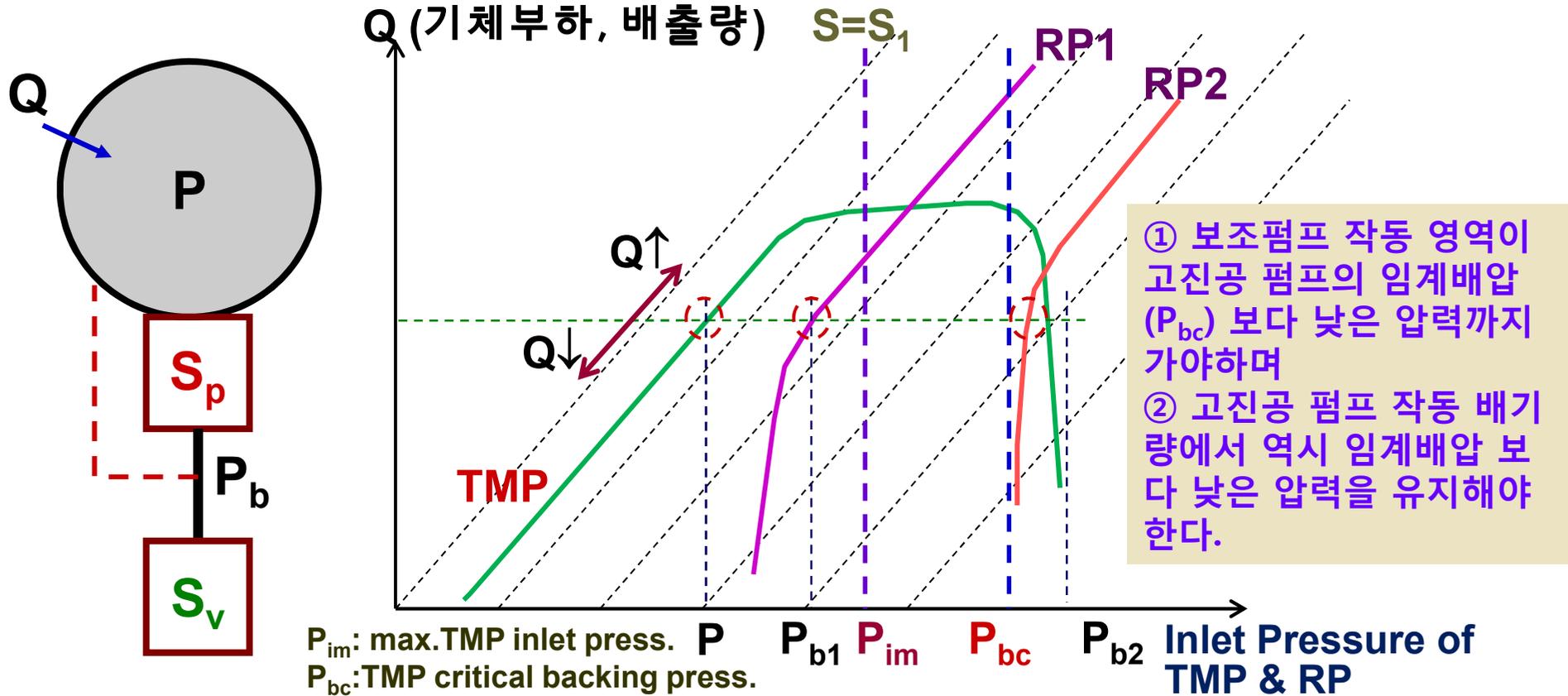
유효배기속도를 키우기 위해 도관은 놔두고 펌프의 배기속도만 늘리는 것은 어리석은 일이다. 강력한 펌프가 있다면 입자들을 잘 유도하여 입에 넣어주는 것도 못지않게 중요하다.



유회전펌프의 유효배기속도

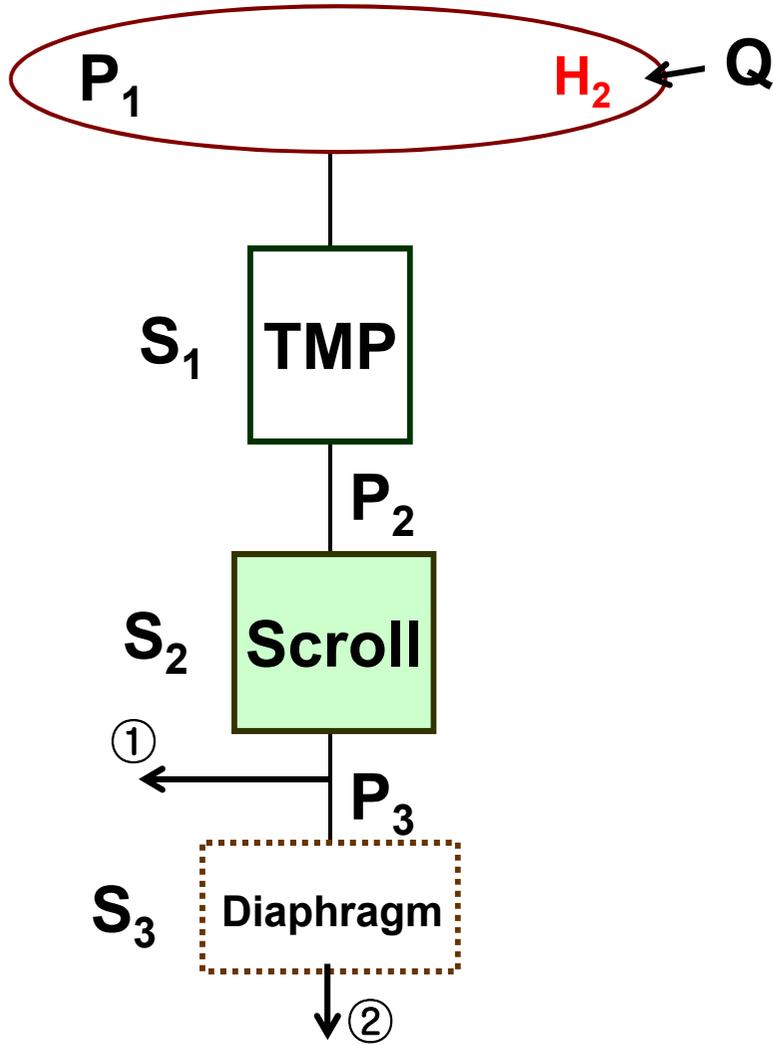


주펌프와 보조펌프의 조합



$Q = S_p P = S_v P_b$
 $P_b = P(S_p/S_v) \ll P_{bc} \rightarrow S_v \gg S_p(P/P_{bc})$
 고진공 펌프의 배압(P_b)이 허용치(P_{bc}) 내에 들어오려면 보조펌프의 배기속도가 $S_p(P/P_{bc})$ 보다 커야 한다. 예) $P/P_{bc} \sim 1/1000 \rightarrow S_v > S_p/100$

응용 (수소배기시 펌프 용량 결정)



조건

$$P_{1\max} = 5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$$

$$S_1 = 1000 \text{ L/s}$$

$$S_2 = 5 \text{ L/s for } N_2 \text{ or } 1 \text{ L/s for } H_2$$

$$Q_{H_2} = 5 \text{ mbar.L/s}$$

$$P_{2\text{allowable}} \leq 1 \text{ mbar}$$

① scroll 만 사용할 때

$$P_2 > 5 \text{ mbar} > P_{2a} \text{ — not permitted}$$

$$S_2 < 1 \text{ L/s when } P_2 < 1 \text{ mbar}$$

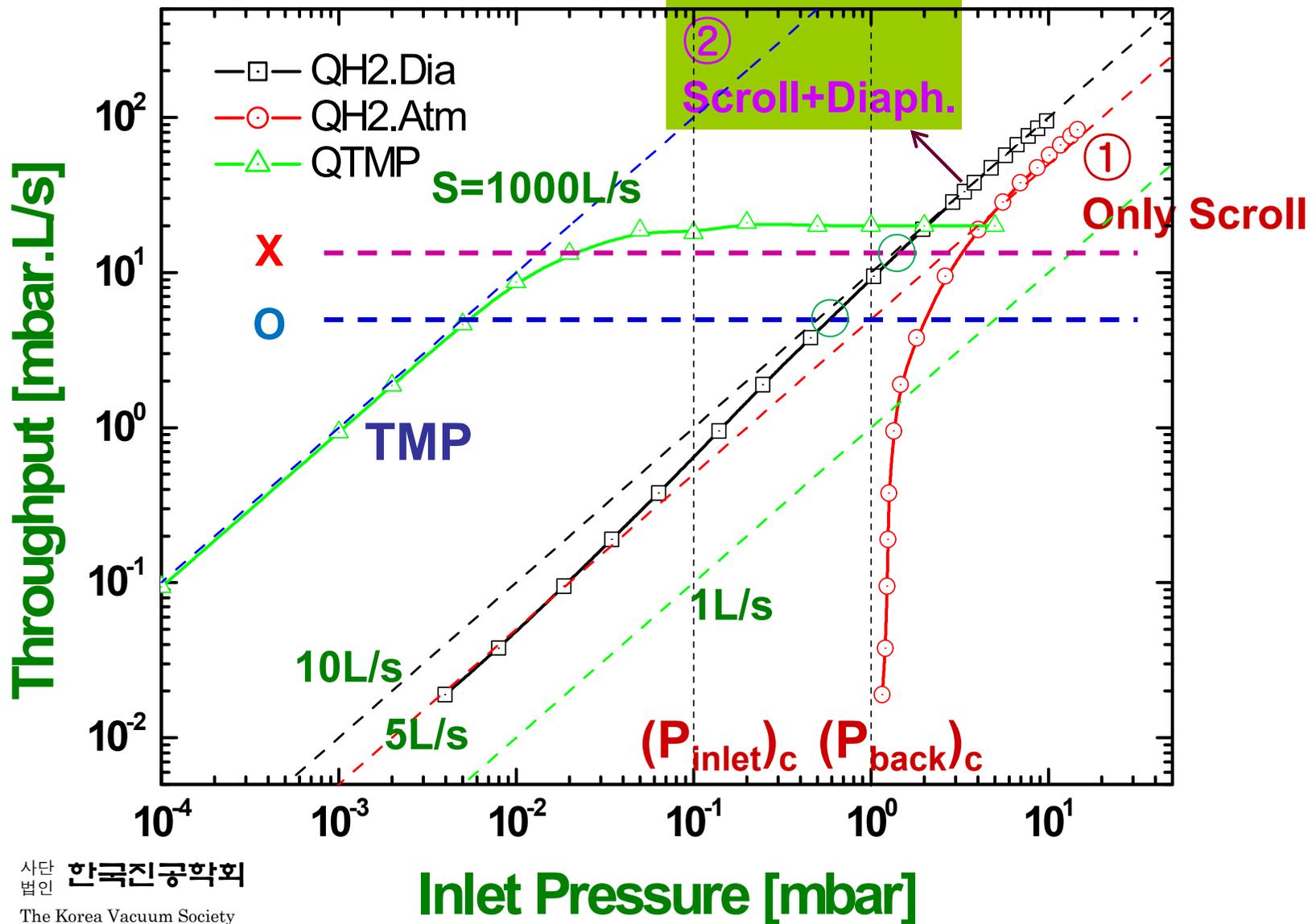
② diaphragm 도 사용할 때

$$P_2 > 0.5 \text{ mbar} < P_{2a}$$

$$10 \text{ L/s} > S_2 > 5 \text{ L/s when } P_2 < 1 \text{ mbar}$$

$$S_3 \geq 1 \text{ L/s, even when } P_3 < 5 \text{ mbar}$$

응용 (P-Q 다이어그램)



3장 진공 작업



진공작업 순서

1. 부품/기기 준비: 재료들을 원하는 모양과 크기로 적절히 가공하고 필요한 기기들을 구매
2. 부품 세정: 부품들을 세정하고 건조 및 보관
3. 부품 조립: 부품들을 알맞은 체결기구를 사용하여 제자리에 장착
4. 진공 배기 : 진공펌프를 가동하여 시스템을 배기 하면서 진공도 측정
5. 누설 검사 : 진공도에 걸맞은 누설검사 시행 및 보수
6. 굽기(Baking) : 시스템 고온 가열 시행

진공부품의 준비 1

좋은 진공은 치밀한 준비와 세심한 주의에서 출발한다. 가장 중요한 점은 매 공정마다 깨끗함을 유지하는 것이다. 사실 눈으로 보기에 아주 더러운 경우는 어느 사람이나 닦고 뭔가 조치를 취하지만 겉보기에 괜찮은 것들도 진공 측면에서 보면 아주 더럽다는 것을 생각하지 못하고 세정을 소홀히 하는 경향이 있다. 그러나 속단은 금물이다. 사람 눈은 표면 상태를 자세히 알 만큼 정밀하지는 않기 때문에 부품 조립 시에는 항상 세정을 생활화해야 한다. 반도체 공정이 아닌 한 일반 실험실이나 산업 현장에서 특별히 먼지를 발생시키는 것이 없거나 일상적인 문이나 비닐 막으로 잘 차단이 되어 있는 경우라면 진공장치 조립 시 굳이 청정실(clean room)을 고집할 필요는 없다.

(1) 세정 및 보관

- ① 세정은 부품용접 전, 용접 및 가공 후 보관 전 그리고 부품 사용 전에 한다.
- ② 유기용제로 일차오염을 제거하고 중성세제로 닦아 물로 헹구고 알콜로 마무리한 후 오븐에서 200도 정도로 1시간 가열하면 훌륭하다.
- ③ 세정 후 오래 보관한다면 알루미늄 호일로 입구를 막고 비닐 팩에 넣어 보관한다. 장기간 놔둘 때는 진공 데시케이터를 사용하거나 건조 질소를 채워둔다. 플랜지는 보호 캡을 씌운다. 잠시 놓아둔다면 깨끗한 곳에 종이 따위로 씌워 놓으면 된다.
- ④ 보관상태가 양호한 부품은 사용 전 알콜로 간단히 닦아서 쓴다.

진공부품의 준비 2

(2) 부품취급

손은 아무리 비누로 잘 닦아도 기름이 묻어나기 마련이다. 따라서 부품을 다룰 때는 비닐장갑 사용을 권장한다. 비닐장갑은 세정 시 손을 용제로부터 보호하는 구실도 한다.

- ① 비닐장갑을 낀 손으로 깨끗한 면과 더러운 면을 번갈아 만지지 않는다. 부품의 겉이나 더러운 공구를 비닐장갑을 낀 손으로 만지거나 볼트를 돌리고 다시 부품의 진공 면을 만지면 안 된다.
- ② 사용하는 공구가 진공 측에 닿는 것이라면 미리 전체를 깨끗이 닦아 놓는다.
- ③ 부품 표면을 닦을 때는 보풀이 안 나는 (lint free) 종이를 사용한다.
- ④ 조립 전 청정 스프레이로 먼지나 보풀을 불어낸다.
- ⑤ 개스킷은 바깥쪽으로 잡는다.

(3) 부품 조립 및 해체

- ① 나사에 윤활제를 발라 준비해 둔다.
- ② 플랜지를 달 때 개스킷이 턱에서 떨어지지 않도록 주의한다.
- ③ 플랜지를 밀착시킨 후 볼트를 양 옆에 것부터 끼운 후 나중에 위에 것을 끼운다.
- ④ 나사가 다 편안하게 들어가도록 플랜지를 살짝 흔들며 조절한다.
- ⑤ 플랜지를 뺄 때는 나사를 풀기 전 먼저 플랜지 위에 묻어있는 먼지를 닦아낸다.
- ⑥ 나사를 푸는 순서는 조립할 때와 반대, 즉 위에 있는 나사를 먼저 해체한다.

진공부품 조립 - 개스킷

진공장치는 용기, 밸브, 도관, 펌프, 게이지 등 다양한 부품들을 조립함으로써 만들어진다. 진공부품들의 연결부위는 용접이나 접합을 사용하는 경우를 제외하고 연결 시 혼란을 막기 위해 대개 일정한 규격에 따라 만들어지는데 플랜지 구조는 고무 개스킷을 사용하는 것과 금속 개스킷을 사용하는 것으로 크게 구분할 수 있다. 고무 개스킷을 사용하는 곳이 많은 진공 시스템은 높은 진공도를 목표로 하지 않는다고 볼 수 있고 초고진공 이상을 목표로 한다면 금속 개스킷 사용은 필수적이다.

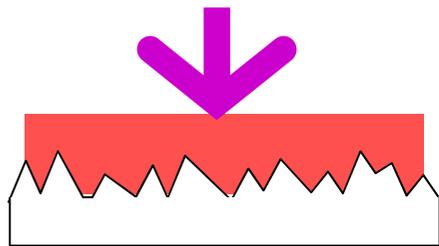
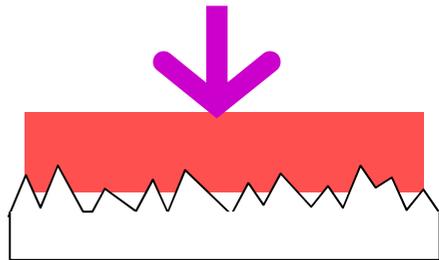
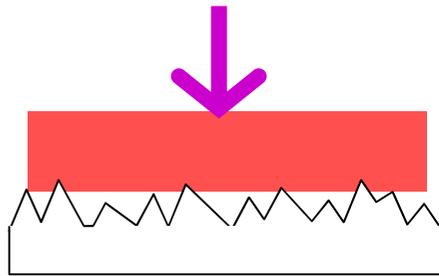
고무 개스킷(사각 또는 오링(O-ring))을 사용하는 연결부위는 양쪽 플랜지가 소위 면 접촉이 일어날 때까지 조이는 것이 일반적이다. 한 번에 끝까지 조이지 말고 힘을 조금씩 증가시키면서 대각선으로 돌아가며 조여야 개스킷이 홈을 이탈한다거나 한 쪽으로 몰리지 않고 균일하게 눌린다. 금속 개스킷 뿐 아니라 고무 개스킷을 사용하는 곳도 토크렌치를 이용하는 것이 편리하다.

금속 개스킷에는 의외로 다양한 모양과 형식이 존재한다. 여러 가지 금속 개스킷이 있지만 그 중에서 가장 널리 사용되는 CF(Con-Flat) 형식의 사용 방법에 대해 약간 자세히 설명하려고 한다. 무턱대고 조여도 기밀을 형성하기는 하지만 금속 개스킷이 가지고 있는 최고의 성능하고는 거리가 멀 가능성이 높다.

일반적으로 개스킷이 플랜지 사이에 들어가 눌릴 때 나타나는 기밀 형성의 과정을 보면 다음 쪽 그림과 같다. 아무리 정밀가공을 해도 플랜지 개스킷 면은 정도의 차이는 있지만 요철이 있게 마련인데 개스킷은 요철을 메워 누설 통로를 차단하는 기능을 한다. 고무 개스킷은 약간의 힘으로도 이런 상태를 만들 수 있지만 금속 개스킷의 경우는 큰 힘으로 누르지 않으면 이런 상태를 얻을 수 없다. 기밀 형성에 필요한 힘을 보편화하기 위해 선하중(linear force)이라는 용어를 사용하는데 이는 기밀형성에 필요한 총하중을 개스킷 길이로 나눈 것이다. CF형식에서는 날이 구리나 알루미늄 개스킷을 파고 들어가는 데 기밀형성에 필요한 선하중은 30~40 kgf/mm 정도다. 이때 날이 파고 들어가는 깊이는 의외로 얇아서 0.1~0.15 mm에 불과하다.

따라서 날끝 및 날등이 손상되면 기밀이 불가능해 진다.

기밀형성과 선하중



개스킷에 충분한 하중을 가하면 기밀이 형성된다. 하중을 개스킷 길이로 나누어 준 선하중 값을 보편적인 파라미터로 많이 사용한다.

선하중 = 개스킷에 가해지는 단위 길이 당 하중
 = 볼트 수 × 볼트 당 축력 ÷ 개스킷 길이

	권장 선하중 [kgf/mm]
CF	30~40
Helicoflex [※]	20~40
IPD	15~20

※피복재료에 따라 80 정도의 값도 필요하다.

진공부품 조립 - 나사체결

개스킷에 필요한 선하중을 공급하기 위해서는 나사를 사용하는데, 개스킷에 필요한 선하중을 균일하게 발생하려면 나사를 일정한 간격으로 배치하여 나사에서 발생하는 축력으로 플랜지를 조이도록 해야 한다. 즉 $\text{나사수} \times \text{축력} \div \text{개스킷 길이} = \text{선하중}$ 이다. 이때 각 나사는 인장강도를 고려하여 축력이 적절한 범위 안에 있도록 해야 한다. 따라서 플랜지의 직경에 따라 필요한 나사 굵기와 개수가 정해진다.

나사를 통해 플랜지에 축력이 필요한 만큼 가해지도록 하려면 나사를 돌리는 토크를 적절한 값으로 만들어야 하는데 실상 이 부분에 대해 실무자들이 무관심할 때가 많다. 나사는 볼트와 너트로 이루어져 있는데 마찰이 크면 같은 토크에 대해서 축력이 작아진다. 반대로 마찰이 큰 상태에서 같은 축력을 만들려면 훨씬 큰 토크로 나사를 돌려야 하고 이는 자칫 나사를 끊어뜨릴 수 있다. 따라서 볼트와 너트 사이에는 윤활제를 도포해야 토크를 적절한 값으로 제한 할 수 있다.

이제 나사의 마찰계수를 0.15로 가정하고 CF 플랜지 체결 조건을 구하면 다음 쪽 표처럼 정리할 수 있다. 표에는 두 가지 선하중 값(20 및 35 kgf/mm)에 대해 토크 값을 구하고 알루미늄과 스테인리스강제 볼트에 대해 따로 권장 토크 범위를 제시하고 있는데 누설이 없어야 하는 한 가능하면 최소 토크를 적용하는 것이 좋다. 예를 들어 M6 볼트를 사용하는 NW40-70CF 플랜지의 체결 토크 대 누설량을 측정하면 토크가 36 kgf.cm일 때 이미 누설이 완전히 사라진다고 할 수 있고 이는 권장 토크 최소치에 비해서도 반 밖에 되지 않는다. 물론 플랜지에 걸릴지 모르는 외력, 나사들의 비균질성, 가열 등 여러 변수를 고려하면 권장 값을 준용하는 것이 합리적이다. 기억할 것은 플랜지를 과도한 힘으로 체결하는 것은 오히려 부품들에 손상을 입힐 수 있고 기밀성능 향상에는 전혀 도움이 되지 않는다는 것이다.

§필요한 축력에 맞는 강도를 가진 볼트를 사용해야 한다.

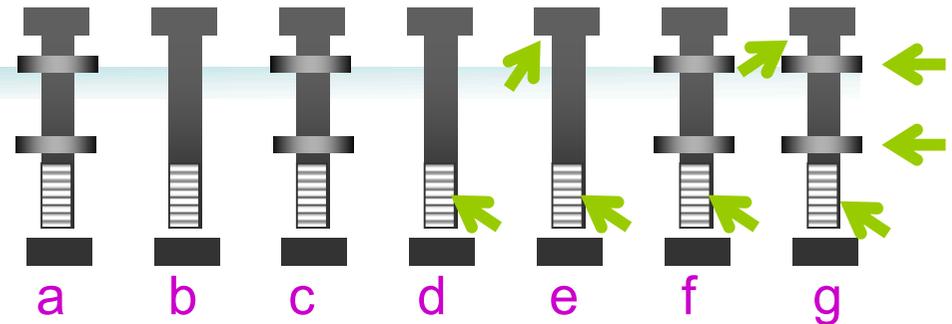
CF 플랜지 체결조건

플랜지 외경 [mm]		34	54	70	114	152	203	253	306
볼트	굵기	M4	M6	M6	M8	M8	M8	M8	M8
	개수	6	6	6	8	16	20	24	32
개스킷	직경[mm]	18.3	29.6	41.9	77.2	115	166	217	267
	길이[mm]	57.5	92.9	132	242	362	522	681	838
C_3 [mm ²]		0.127	0.053	0.0373	0.02	0.0273	0.0237	0.0218	0.0236
Torque [kgf·cm]	$F_s=20$ [kgf·cm]	15.7	37.7	53.6	98.0	73.3	84.4	91.7	84.7
	$F_s=35$ [kgf·cm]	27.6	66.0	93.8	171.5	128.2	147.7	160.5	148.3
	권장값	10~20	40~60		80~100				
	[kgf·cm]	20~30	70~100		100~150				

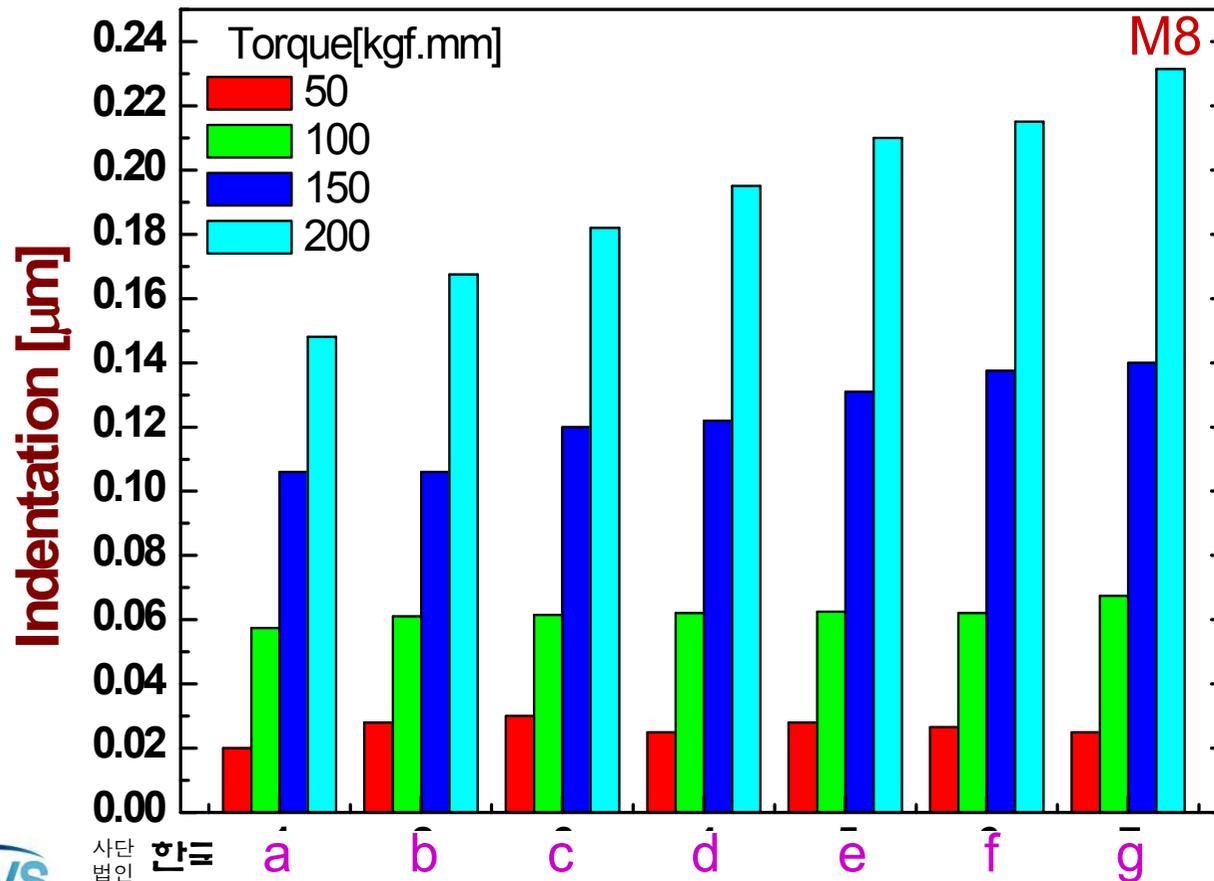
$\mu=0.15, C_3=(C_1L/N)^{-1}$

■:알루미늄 ■:스텐레스 강

윤활제의 영향



←: 윤활제 도포



같은 토크에 대해 윤활제 도포가 효율적일수록 CF날이 들어가는 깊이가 커진다. 와셔를 쓰고 볼트/너트 부분에만 도포하는 것도 실용적이다. 대표적인 고체윤활제인 MoS₂를 널리 사용한다.

무윤활은 마찰계수가 0.3~0.4이고 윤활을 하면 0.15 내외가 된다. 무윤활 상태에서 250도로 가열을 하면 마찰계수가 0.7까지도 올라간다.

CF 플랜지 체결작업

CF 플랜지를 체결할 때 작업준비 및 작업순서를 정리하면

- 1) 가능하면 표면이 깨끗한 것으로 적절한 볼트와 너트를 마련한다. 참고로 볼트 및 너트에는 재료 및 물성에 관한 표시가 있다. (p71 표)
- 2) 반드시 와셔(washer)를 사용하고 MoS₂ 윤활제를 볼트에 바른다.
- 3) 규정 토크렌치를 준비한다. (예: 20-60, 50-250 kgf.cm)
- 4) 플랜지 볼트 위치를 4 구간으로 나누어 펜으로 일련번호를 기입한다.
1, 2, 3, --, N/4, 1, 2, 3, --, N/4, 1, 2, 3, --, N/4, 1, 2, 3, --, N/4
- 5) 개스킷을 준비하고 필요하면 닦아 놓는다.
- 6) 플랜지를 닦아 놓는다. 날에 손상된 부분이 없는지 유심히 살핀다.
- 7) 개스킷을 플랜지에 장착한다. 플랜지가 수직으로 놓여 있으면 개스킷이 벌어지지 않도록 옆부분에 테이프를 붙여 고정한다.
- 8) 볼트/너트가 모두 자유스럽게 채워진 후 처음에는 손으로 세게 돌린다.
- 9) 표에 있는 권장 값대로 차례차례 토크를 증가시키면서 조인다. (p73 표)
- 10) 나사 체결은 시계반대방향등 일정하게 돌면서 교대로 조인다. 같은 번호끼리 대각선으로 조이고 다음 번호로 이동하면 편리하다. (p72 그림) 가급적 너트를 돌린다
- 11) 마지막 토크에서 3회 조이거나 돌지 않을 때까지 조인다.
- 12) 누설이 있으면 토크를 5 kgf.cm씩 증가시키면서 조이고 누설검사를 하는 것을 반복한다. 허용토크를 넘으면 해체 후 새 개스킷으로 다시 조립한다.



§고무 개스킷을 쓰는 플랜지와 달리 CF 플랜지는 서로 면이 접촉하지 않고 0.6 mm 정도 떨어져야 정상이다.

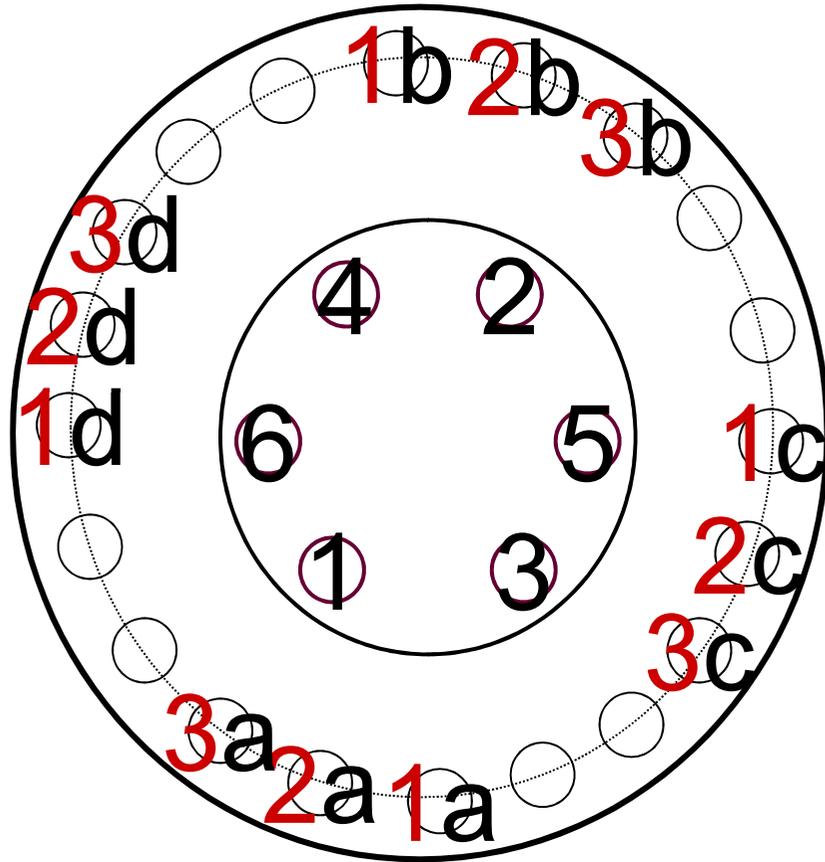
스텐레스 나사의 호칭과 강도

볼트 머리에는 다음과 같은 표시가 있는데 재료와 강도를 나타낸다. -○○



재료			○○	강도	
A1	A2	A3	50	70	80
STS			T.S(인장강도) 50 [kgf/mm ²]	70	80
303	304	316	Y.S(항복강도) 21 [kgf/mm ²]	45	60

플랜지 체결작업 순서



1. 나사를 4그룹으로 나누어 각각 한 방향으로 차례대로 번호를 매긴다.
2. 나사 수가 6개인 경우 안쪽 그림과 같이 번호 순서대로 진행한다.
3. 먼저 손으로 모든 나사를 풀림이 없도록 조인다.
4. 토크렌치를 사용하여 낮은 값에서 시작하여 차츰 토크를 증가시키면서 나사를 조인다.
5. 각 토크 값에서 1a-1b-1c-1d-2a-2b-2c-2d-3a-3b- 식으로 대각선 및 90도씩 움직이면서 교대로 조인다.
6. 최종 값에서는 같은 토크에서 2-3번 조인다.
7. 누설이 발견되면 토크를 5 kgf-cm 정도씩 올리면서 조인다.
8. 토크를 상한값까지 올려도 누설이 멈추지 않으면 개스킷과 플랜지 면을 조사하여 수리한다.

나사 체결시 토크 변화

Bolt SIZE	Required Torque (kg . cm)		Torque step						Tool size
	Al	S.S	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	
M4	10-20	20-30	5	10	20				7
M6	40-60	70-100	10	20	40	70			10
M8	80-100	100-150	20	40	60	80	100		13
M10	180-220	200-250	40	80	120	160	180	200	17

진공배기 작업

진공 용기와 부품들이 모두 조립되면 다음 순서에 따라 빠른 시간 내에 장치를 진공 배기한다. 대기에 개방되었던 시간을 줄일수록 배기시간을 단축할 수 있다.

용기가 작으면 초벌배기 펌프를 따로 쓰지 않고 보조 펌프와 주 펌프 (고진공 펌프) 가동을 동시에 한다.

- ① 모든 밸브가 잠겨있는 상태에서 보조 펌프를 먼저 가동한다.
- ② 주 펌프를 가동하면서 저진공 펌프 차단밸브 및 주 밸브를 연다.
- ③ 주 펌프가 정상상태에 도달하면 바로 게이지를 켜고 압력을 기록한다.

※ 일단 처음에 10^{-6} mbar 대에 있으면 정상적이다. 하루이상 기록하고 시간에 대한 압력을 대수-대수 그래프로 그렸을 때 기울기가 -1이면 정상, -1/2이면 내부에 이물질이 있으며 더 완만하면 누설이 있다고 볼 수 있다. (p78 그림)

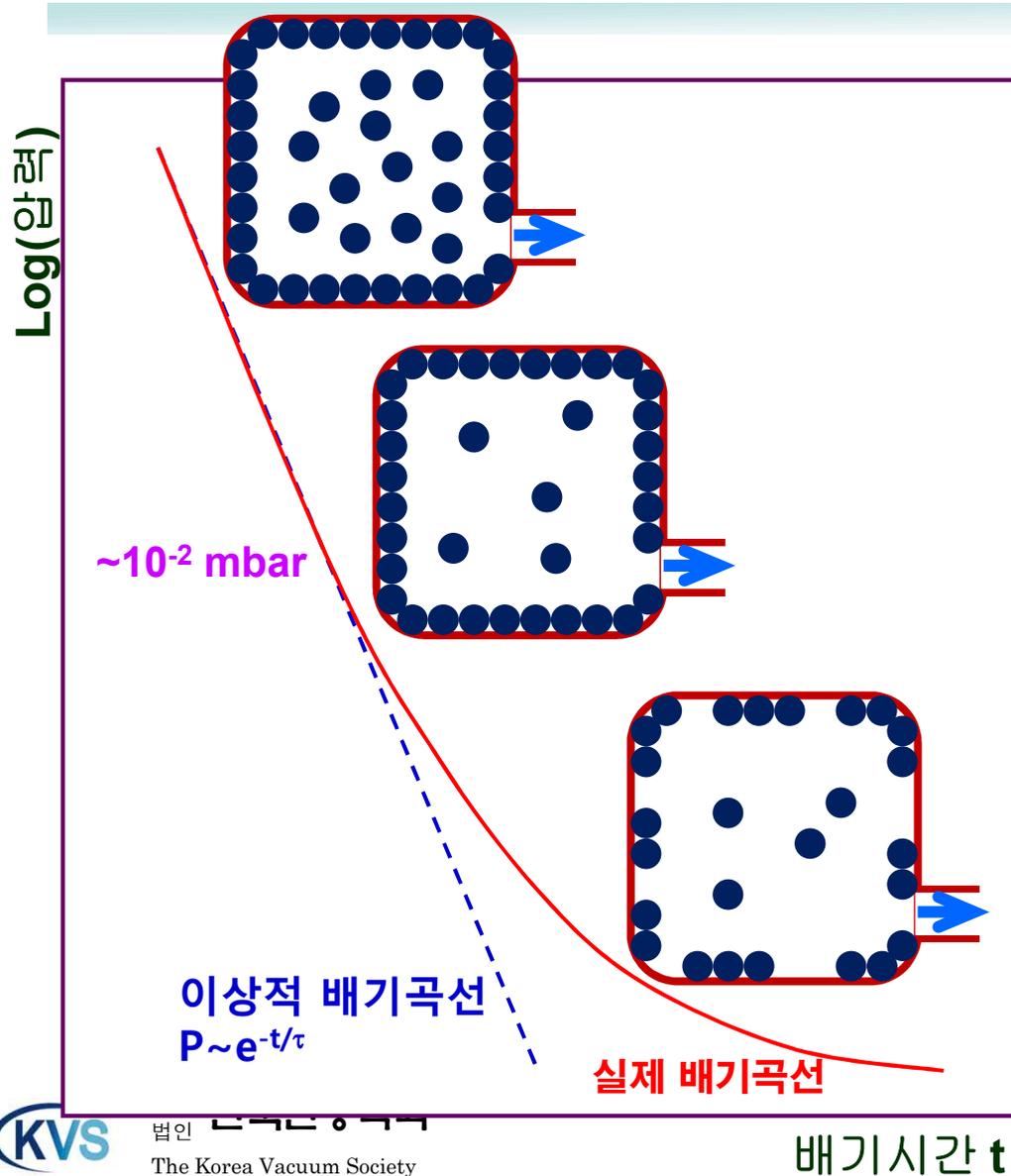
§ RGA를 항상 사용하는 것이 좋다. 공기 누설이 있으면 28/32/40/20/14번이 존재하고 도달압력은 이보다 낮아질 수 없다. 18이 높으면 대부분 물이므로 가열을 통해 개선할 수 있다는 희망이 있다. 18과 28이 비슷해지면 누설을 막지 않는 한 이제부터 압력은 지금보다 반 이하로 더 내려가지 않는다는 얘기가.

‡정량적인 실험을 하는 장치라면 게이지를 교정하는 것이 필수적이다. 예를 들어 수소는 이온 게이지에서 감도가 질소에 비해 약 40%에 불과하며 반대로 피라니 게이지에서는 1.7배 정도 된다.

용기가 크면 초벌배기펌프가 필요하다. 초벌배기 펌프로 유회전 펌프를 쓰는 경우는 루츠펌프와 같이 사용하는 것이 좋다. 건식 펌프를 사용한다면 루츠펌프 가동부분을 생략한다. 만일 유회전 펌프로 초벌 배기할 수밖에 없는 형편이라면 용기압력이 가능한 한 높을 때 고진공 펌프로 전환해야 한다.

- ① 유회전(또는 dry) 펌프로 배기한다.
- ② 압력이 50 mbar 이하가 되기 전에 루츠펌프를 가동한다.
- ③ 압력이 10^{-2} mbar에 도달하면 고진공펌프를 가동한다.
- ④ 초벌배기 라인 밸브를 잠근다.

이상적 배기곡선과 실제 배기곡선



누설이 없어도 실제 배기곡선은 이상적인 배기곡선보다 항상 매우 느리게 떨어진다.
그 이유는

-저진공 펌프의 유효배기속도가 압력이 낮아지면 감소한다.

-고진공펌프의 배기속도는 압력이 충분히 낮아져야 제 배기속도를 낸다.

-압력이 낮아지면 표면에 흡착되어 있던 기체분자들이 방출되기 시작한다.

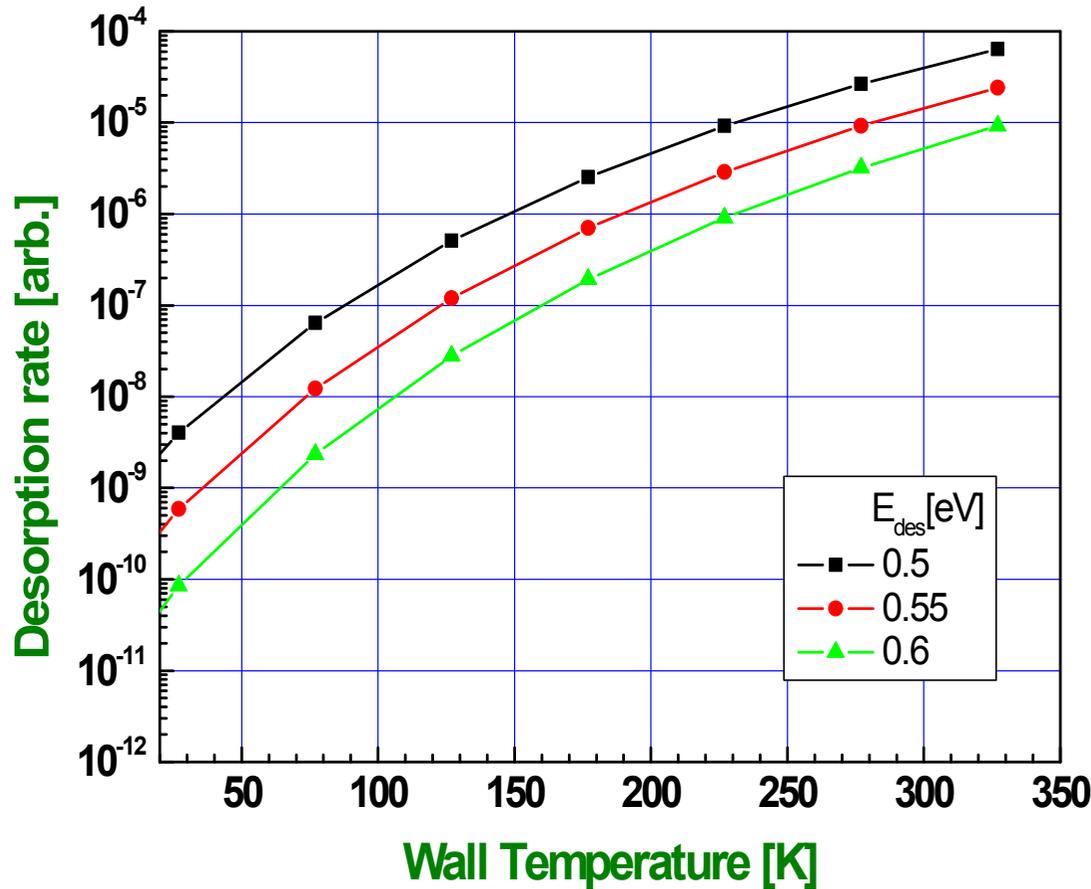
-공간에 있는 기체분자들이 배기되지 않고 다시 표면에 흡착한다.

표면방출과 일반적 배기특성

배기 중 기체분압을 측정하면 압력이 **1 mbar** 근처까지는 대부분이 **공기 성분**이지만 **$10^{-2} \sim 10^{-3}$ mbar**일 때 벌써 물이 대부분이고 탄화수소계열 기체들이 약간 남는 이외에 막상 **공기 성분은 거의 없는** 것으로 보아, **공기분자들은 공간배기 모드에 근접하게 배기되지만 표면의 물이 계속 방출되어 압력감소를 느리게 한다는 것을 알 수 있다. 물의 표면방출률은 t^1 정도로 천천히 감소한다.**

압력이 **10^{-9} mbar**대에 들어서기 전에는 물이 90% 이상이고 그 이후에는 수소가 많아진다. **수소는 재료 내부로부터 확산에 의해 표면에 나오므로 압력은 $t^{0.5}$ 정도로 더욱 느리게 감소한다.**

표면 흡착 및 방출과 배기



표면기체방출률은 표면분자밀도 N_s [mbar·L/cm²]에 단면적을 곱하고 평균체류시간 τ_r 로 나눈 것이다. 즉

$$Q_w = AN_s / \tau_r$$

이때 $\tau_r \sim e^{E_d/T}$ 로 온도가 높을수록, 활성화에너지가 낮을수록 짧아진다.

$E_d \sim 0.55\text{eV}$ 이면 상온에서 $\tau_r \sim 0.001$ 초 정도가 된다.

압력은 결국 표면방출량/배기속도이므로

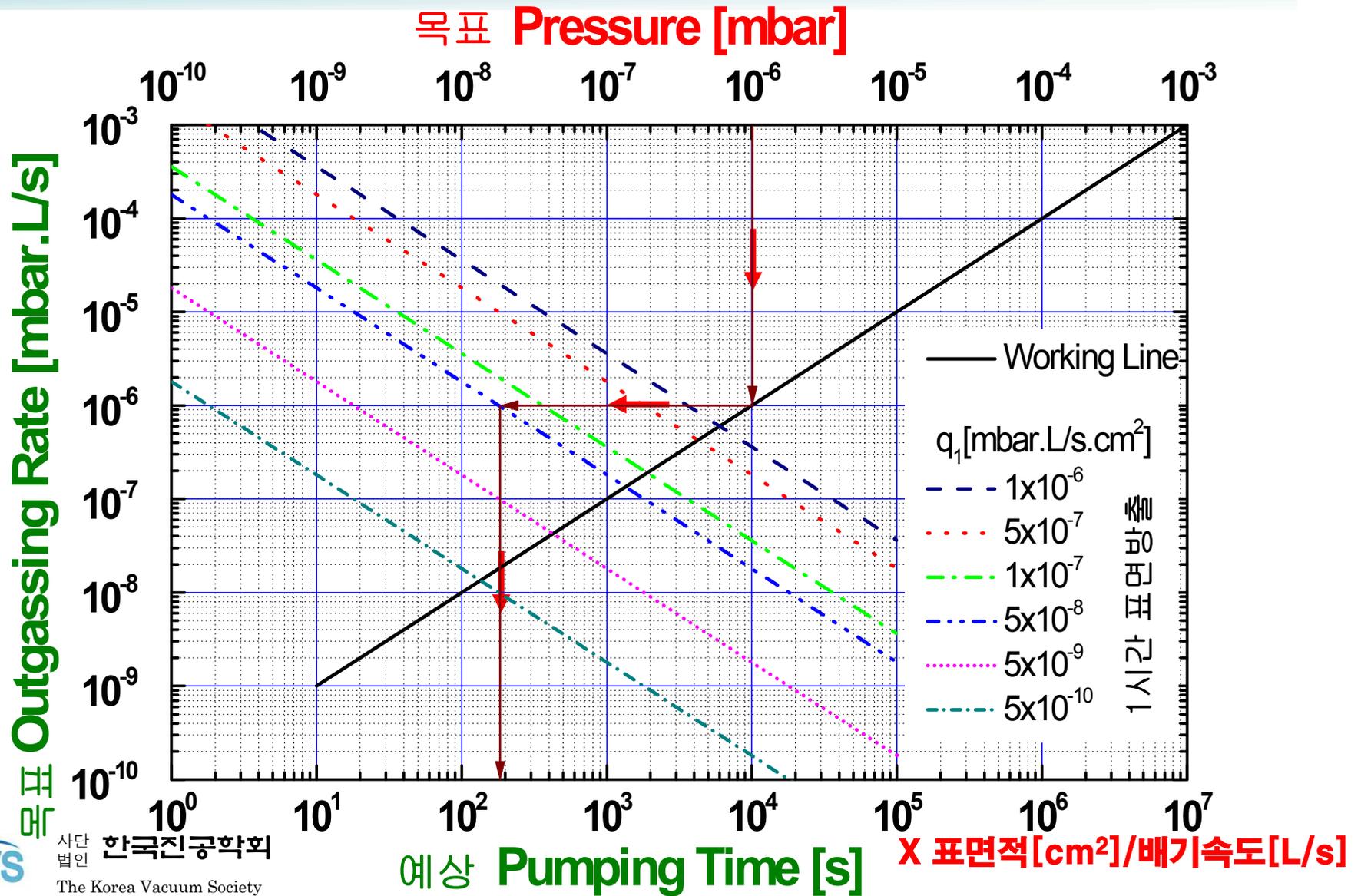
$P = Q_w / S \sim N_s / \tau_r$ 로 변화한다. P는 시간과 온도의 함수다.

상온 근처에서 온도가 10도 오르면 τ_r 은 두 배 정도 빨라지고 따라서 압력도 두 배 정도 높아진다.

진공 시스템 배기곡선



1/t 표면방출시 배기시간 계산



재료들의 기체방출률

재료	기체방출률[$10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2=10^{-10}\text{mbar}\cdot\text{L}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$]		
	q(1시간)	q(10시간)	베이킹 후 상온
알루미늄	80	8	0.001(150°C, 24h)
구리	250	17	0.0025(160°C, 24hr)
철강	7000	650	
스텐레스강	200	18	0.001(150°C, 24h)
탄소	5000	10	0.03(350°C, 10h)
파이렉스	100	7	10(450°C, 4hr)
네오프렌	400000	160000	
바이톤-A	15000	2500	3(200°C, 12h)
캡톤	3000-	500	0.4(300°C, 12h)
마일러	40000	15000	
아랄다이트(에폭시)	26000	13000	
나일론	160000	50000	8(120°C, 24h)
테플론	65000	2000	
아크릴	13000	6000	
Kel-F	530	100	
PVC	70000	35000	

기체 누설검사

누설이 있는지 판단하는 방법에는 소리를 들어보는 것, 압력 변화율을 그려 보는 것, 용기 주 밸브를 닫고 압력의 증가율을 구하는 것 (pressure buildup 법), 알콜, 부탄, 헬륨 등 추적 물질을 뿌려 보는 것, 잔류기체분석기 (RGA)로 스펙트럼을 보는 것 따위가 있지만 누설량이 많아야 한다든지, 누설위치를 찾기 힘들다든지, 정량화가 안 된다든지 하는 단점이 있다.

1. 압력증가법(Buildup) ($S=0, Q_x=0, Q=Q_L+Q_w$)

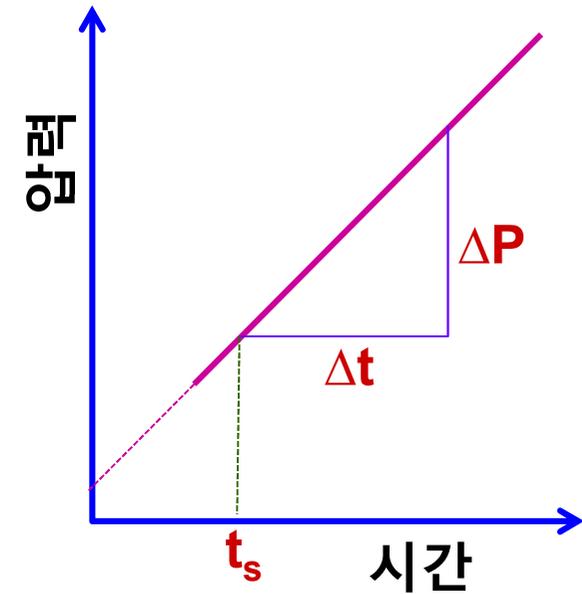
$$dP/dt = Q/V \rightarrow Q=V(\Delta P/\Delta t)$$

배기를 상당히 해서 압력변화가 둔화된 후 펌프를 차단하고 압력을 기록한다. 시간이 충분히 흘러 압력이 직선적으로 변할 때의 값을 사용해서 계산한다.

2. 수포법(Bubble)

$$d(VP)/dt = Q_L \rightarrow Q_L=V(1000/\Delta t)$$

1000은 대기압을 나타낸다. V는 수포의 부피다. 만일 누설률이 10^{-4} mbar·L/s 이고 수포의 직경이 3 mm라면 수포가 생성되는 데 약 142초 정도 걸린다.



헬륨 누설검출법 (He Leak Detection)

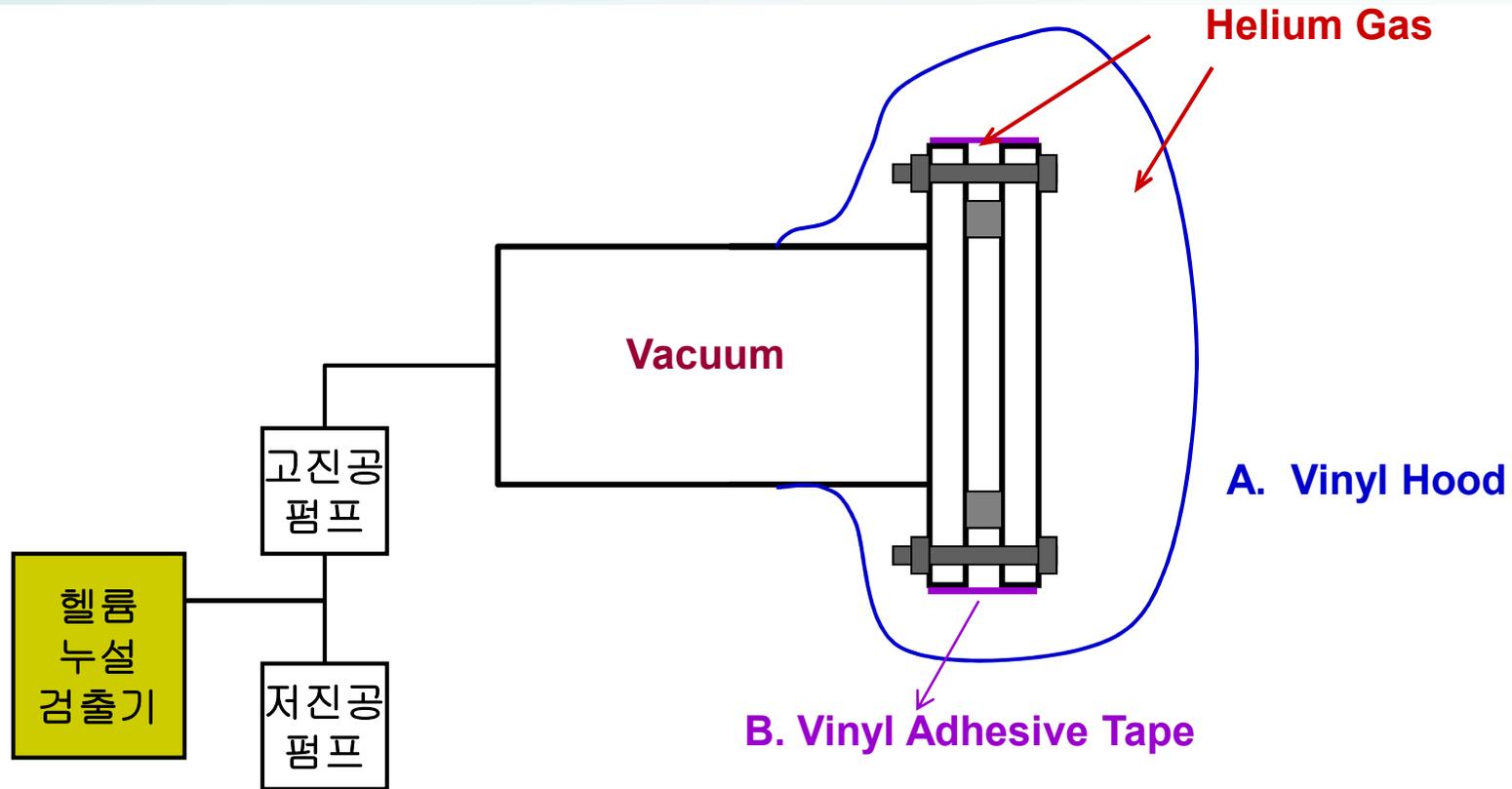
헬륨 누설검사는 누설검출 범위가 넓고, 누설 위치를 찾기 용이하며, 누설량을 정량적으로 구할 수 있는 가장 정통적인 누설검사 방법이지만 고가의 설비를 별도로 마련해야 한다. 물론 다른 간단한 누설검사를 통해 누설이 확인되면 우선 누설지점을 고치고 이 단계로 넘어오면 더 효율적이다.

$$dP/dt = Q_L/V - P/\tau \rightarrow P = Q_L/S + (P_0 - Q_L/S)e^{-t/\tau}$$

τ 의 몇 배가 지나면 $P=Q_L/S$ 이 된다. S가 크면 응답속도가 빠른 대신 감도가 낮다. 큰 용기에 HeLD만으로 배기하면서 측정한다면 기체량을 감당하여 압력을 적절히 유지할 수 있는 경우라도 시정수(부피 ÷ 배기속도)가 길어져 헬륨 주입 후 피크가 형성되기 까지 서서히 증가하므로 우회로로 투과되어 들어가는 것과 잘 구별이 안 된다. 용기의 부피가 50000 L, 배기속도가 100 L/s라면 응답시간은 500초 이상이 되므로 적절한 조치가 필요하다. 큰 주 펌프와 병렬로 연결하면 시정수는 짧아지지만 감도가 매우 낮아져서 HeLD를 쓰는 이점이 없어질 수 있다.

§ 기저압력이 높으면 어느 방식을 쓰던 헬륨이 없어도 헬륨피크가 나타난다. 그 값은 대략 기저압력 대비 $1/10^5$ 정도다. 따라서 10^{-10} 대의 누설을 보려면 최소한 기저압력이 10^{-6} mbar는 되어야 한다.

헬륨 누설검사 시공



헬륨을 1기압으로 채우고 주입부를 막은 후 고무 오링 부분이 곁에 없다면 5분, 있다면 1분 까지 값을 기록한다. 초고진공 장치에서 금속 seal의 누설기준은 통상 10^{-10} mbar·L/s 이하다.

헬륨 누설검사 순서 및 주의사항

- ① 블록 별로, 또는 용기 전체를 비닐로 감싸거나(Hood법), 플랜지 틈새를 따라 접착테이프를 붙인다(간이 hood법).
- ② 용기가 아주 작으면 헬륨누설검출기(HeLD)를 직접 연결하여 사용한다. 용기가 아주 작지는 않고 배기 시스템이 잘 갖추어져 있다면 누설검출기를 주 펌프와 보조 펌프 사이에 밸브를 통해 단다.
※이때 장치에 미리 HeLD 용 가지와 밸브를 달아 놓는 것이 좋다. 가지가 아직 없는 경우 주 펌프 배기구 쪽 밸브를 잠그고 가지를 설치할 수도 있다. TMP는 배기구를 막아도 30분 정도는 안전하다.
- ③ 차례대로 한 개씩 테이프를 일부 뜯고 10초 정도 헬륨을 불어넣고 테이프를 봉한다. 1분 후 헬륨 신호가 없으면 누설이 없는 것으로 판단할 수 있다. 신호가 있으면 3분 후 값을 기록한다. 누설이 의심되는 곳은 다시 비닐을 씌워 측정하면 더 확실하다.
- ④ 누설량이 10^{-10} mbar.L/s를 넘으면 볼트를 최종 토크 값에서부터 시작하여 조금씩 더 조인다.

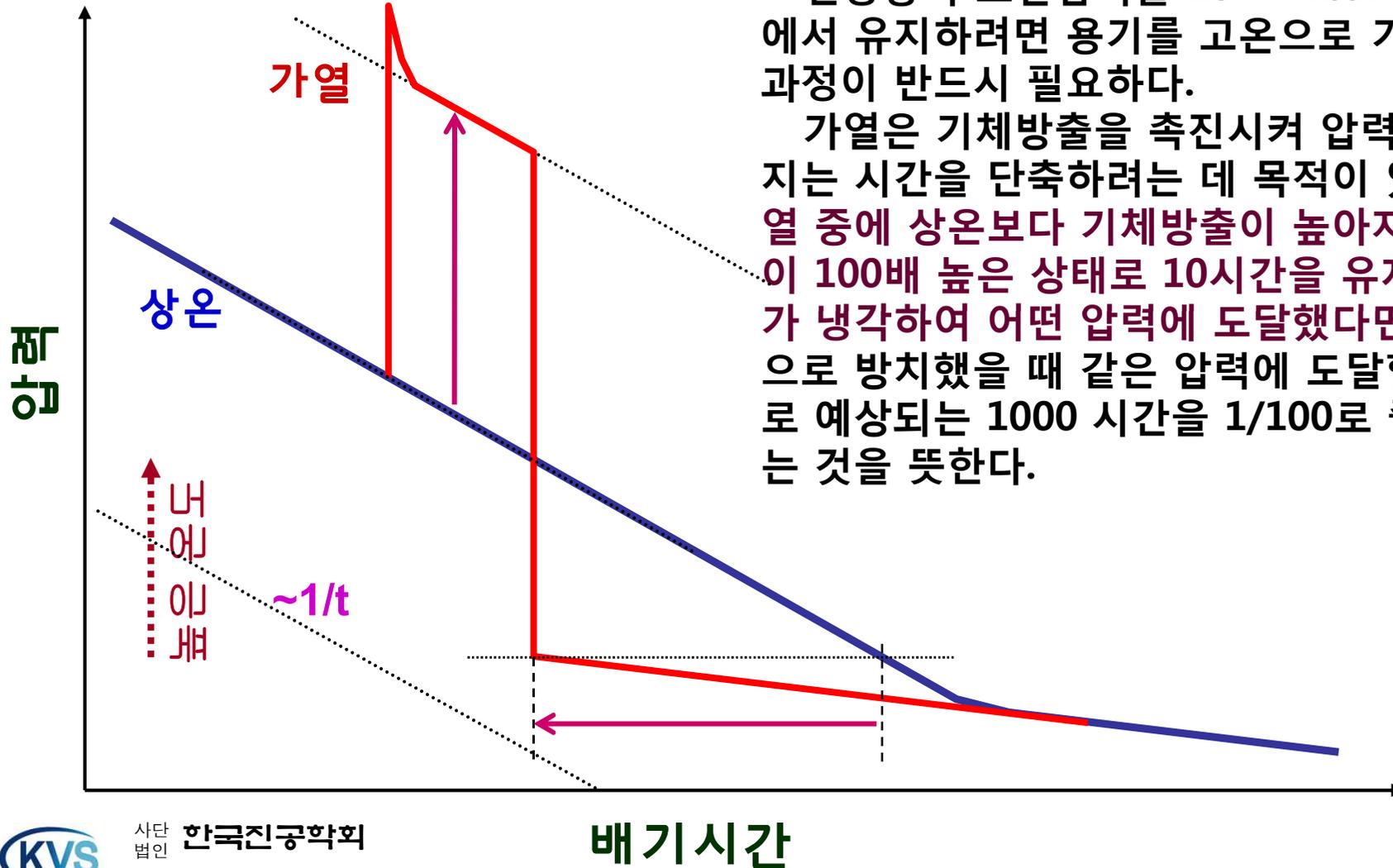
§용기가 크면 HeLD를 장치의 주 펌프와 병렬로 달아 측정한 후 배기속도 비만큼 보정을 해주거나 RGA를 이용하여 헬륨 피크를 관찰한다. 공기 성분(28) 피크 대비 어느 정도 높이까지 올라가는가에 따라 대략적인 레벨은 추정할 수 있다. 이때 헬륨은 질소에 비해 1/7 정도 감도가 낮으므로 눈에 보이는 피크 높이의 7배를 해주고 비교해야 한다.

¶ 주변에 고무 개스킷을 사용한 곳 또는 누설이 많은 곳이 있으면 그 플랜지는 비닐로 잘 격리하고 때에 따라서는 질소 기체를 주입하여 헬륨 기체 유입을 막으면 작은 누설 측정이 가능하다.

‡ 고무 개스킷 부분의 누설검사를 할 때는 30초 이내의 헬륨 신호는 누설, 1분 이후 헬륨 신호는 투과로 보는 것이 타당하다. 금속 개스킷 부분을 먼저 검사한 후 나중에 시행하는 것이 좋다.



용기 가열(Baking)의 효과



진공용기 도달압력을 10^{-10} mbar 대 이하에서 유지하려면 용기를 고온으로 가열하는 과정이 반드시 필요하다.

가열은 기체방출을 촉진시켜 압력이 떨어지는 시간을 단축하려는 데 목적이 있다. 가열 중에 상온보다 기체방출이 높아져 압력이 100배 높은 상태로 10시간을 유지했다가 냉각하여 어떤 압력에 도달했다면 상온으로 방치했을 때 같은 압력에 도달할 것으로 예상되는 1000 시간을 1/100로 줄였다는 것을 뜻한다.

용기 가열 순서

용기를 안전하게 가열하기 위해서는 히터와 절연재 및 온도 센서 설치가 잘 되어야 한다. 요즈음은 용기에 맞추어서 가열 재킷(heating jacket)을 제작해 주기도 하는데 의외로 고가이고 부피가 나간다. 때에 따라서는 금속 피복 세관형(micro sheath) 히터를 용기에 직접 가설하는 방법도 사용하기에 편리하지만 고장 났을 때 수리가 거의 불가능하다.

- ① 먼저 각 부위별 온도 목표치를 설정한다. 히터, 전원 및 온도센서를 온도에 따라 그룹화 한다.
※보통 스테인레스강 및 구리는 250도, 알루미늄은 150도를 넘지 않는 범위에서 한다. 온도가 낮으면 안전하기는 하지만 특히 물이 떨어져 나오는 방출율도 현저히 낮아져서 시간이 오래 걸린다. 150도는 200도에 비해 5배 이상 더 시간이 필요하다.
- ② 히터를 가열 대상물의 크기에 맞춰 적당한 간격을 유지하면서 감는다.
※ 큰 용기일 때는 금속 세관 히터를 용기벽에 고정시키면 편리하고 작은 용기일 때는 유리섬유 절연의 리본히터를 사용하면 좋다. 실제로 전력은 크게 문제가 되지 않는데 100 W 열선으로도 250도를 가열하는 것이 가능하다. 용량이 커도 필요한 전력만큼만 쓰므로 규격이 과도할 뿐이지 가열이 과도하게 되는 것은 아니다. 그러나 온도계산을 하지 않고 다른 용량의 것을 병렬로 연결하여 쓰는 것은 좋지 않다.
- ③ 알루미늄 호일로 용기 전체를 잘 감싼다.
※알루미늄은 복사율이 낮아서 온도유지에 도움이 되고 열이 균일하게 퍼지도록 한다.
- ④ 절연필름을 감는다. 온도가 낮을 때는 알루미늄 피복 마일러 필름, 온도가 150도 이상으로 높을 때는 캡톤 필름을 사용할 수 있다. 만일 온도가 500도 정도로 높다면 세라믹 섬유 블랭킷을 사용한다.
- ⑤ 온도에 관한 지침을 따라서 여유 있게 가열한다.
※ 온도상승율을 알루미늄은 최대 20도/시간, 스테인리스강은 최대 60도/시간을 넘지 않도록 히터 전력을 조절한다. 가열 대상이 복잡할수록 상승률을 낮게 잡는 것이 안전하다.
- ⑥ 가열 중 압력상승에 대비한다.
- ⑦ 압력이 높아졌다 감소하기 시작하여 변화가 아주 완만해지면 가열을 멈춘다.
※ 200도에서 10^{-8} mbar 대까지 떨어지면 냉각 후 좋은 결과를 기대할 수 있다. RGA의 경우 물이 대부분 이다가 점점 줄어들어 다른 것들과 비슷해지면 가열을 멈출 수 있다.
§ 온도 하강율은 상승률에 준해서 천천히 시행한다.

가열 도구와 시공예

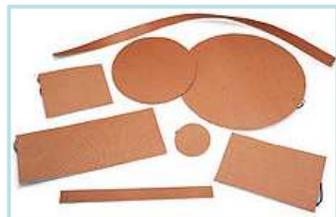
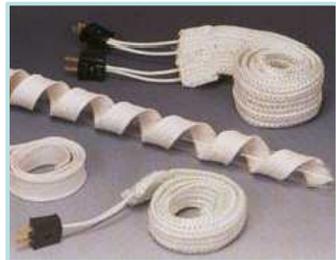
Heater

Ribbon-

Silicon Rubber-

Micro-sheath-

Jacket-



Insulation

Mylar Film

Kapton Film

Ceramic Wool

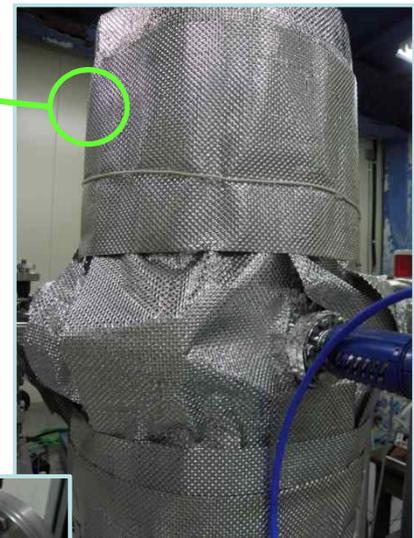


Power Supply

Manual

Auto-Control

Programmable



용기가열 주의사항 1

- ① 각 기기들의 매뉴얼을 참조하여 전체적인 또는 국부적인 온도범위를 잘 지켜서 가열해야 한다. 몇 가지 주요한 부품 및 기기들의 온도 제한값의 예를 들면 (p89 표)와 같다.
 - ② 진공용기를 가열할 때 온도를 천천히 올리고 내리는 이유는 열팽창이나 수축에 따른 응력 발생과 파손을 피하려는 것인데 이는 실상 온도차가 생기는 것에 기인한다. 온도 변화율이 클 수록 열이 퍼질 시간적 여유가 없기 때문에 온도차가 커질 수 있다. (p89 표 참조)
 - ③ 용기를 가열 할 때 압력이나 기체 스펙트럼을 측정하는 것은 가열의 효과나 용기의 이력에 관한 정보를 얻을 수 있다. 가열 온도가 낮으면 상관없지만 높은 온도에서는 진공 게이지를 켜 놓는 것이 불가능할 수도 있다. 때에 따라서는 압력이 게이지 작동 압력 범위를 넘을 수도 있다. 만일 게이지를 꺼 놓으면 용기 벽에서 떨어져 나온 기체분자가 필라멘트에 달라붙었다가 다시 켜졌을 때 방출하여 용기 가열 효과를 떨어뜨릴 수 있다. 필라멘트는 비록 면적이 작지만 온도가 높아 다량의 기체를 방출 할 수 있기 때문이다. 게이지를 켜다면 용기 온도가 100도 근처일 때 켜고 "degass"를 시행한다.
 - ④ 용기 가열 시 주 펌프는 고진공 펌프로써 배출형이 적당하다. 이런 의미에서 터보분자 펌프가 가장 적합하다. 이온펌프(SIP)는 용기와 같이 가열하는 것이 보통이므로 작동을 멈추고 밸브를 열어놓거나, 작동을 계속한다면 전금속 밸브를 달고 닫아 놓을 수도 있다. 이온펌프를 켜다가 켜 줄 때도 많은 기체가 방출된다. 따라서 용기 온도가 100도 이상일 때 몇분 동안 펌프를 가동하여 흡착 기체를 제거하는 것이 좋다.
- §크라이오 펌프는 활성탄을 내장하고 있고 극저온 기기이므로 용기 가열시 주의를 기울여야 한다. 더군다나 냉동기 부분은 70도 이상 온도가 올라가지 않도록 해야 한다. 반면 활성탄은 물을 계속 방출하므로 가능하면 용기 가열시 허용 범위 안에서 같이 온도를 올려주는 것이 좋다. 물론 펌프를 가동하면 열부하가 높더라도 극저온을 유지할 수 있지만 활성탄 오염이 심해지는 것이 문제다. 용기 가열시 크라이오 펌프 가동을 멈추더라도 밸브를 부분적으로 닫으면 복사열 때문에 크라이오 펌프 내장물이 허용 온도 이상으로 올라가는 것을 방지할 수 있다.

용기가열 주의사항 2

주요 기기들의 온도 제한 값

Al chamber/flange : max. 150 °C (including Al gasket)
S.S chamber : max. 400 °C (usually 250 °C)
S.S flange(Cu Seal) : max. 350 °C
Bakable valve : 200 °C in open
All metal valve : 350 °C
Bakable gauge : 250 °C during ON, 350 °C during OFF
Non-bakable gauge : 100 °C during ON, 350 °C during OFF
TMP Flange : below 120 °C
Viton/Teflon : 150 °C
Kapton : 300 °C
SIP(+magnet) : max. 350 °C
전자회로가 있는 부분은 45도 이하

온도차 허용 값

Transverse : Al --- max. 0.5 °C/cm
 S.S--- max. 1 °C/cm
Axial : Al --- 2.5 °C/cm
 S.S--- 5°C/cm

END