

# 제 18회 KOVRA 진공현장 실무교육

## Basic Vacuum Practice

### 진공 디자인(진공 배기 계산)



**HEXAR Laboratory**

**Lee Dong-Ju**

2020. 11. 5.

**HEXAR Inc.**

[Homepage: Hexar.com](http://Hexar.com)

# 문헌 및 참고자료

- ❖ 진공과학입문: 청문각
- ❖ 진공공학: 한국경제신문사
- ❖ **Vacuum Engineering Calculations, Formulas, and Solved Exercises: Armand Berman, Academic Press Inc.**
- ❖ **Foundations of Vacuum Science and Technology**  
*Edited by J. M. Lafferty*
- ❖ 진공이해하기: 홍릉출판사
- ❖ 진공기술실무: 홍릉출판사
- ❖ 진공의 기초: (주)전자자료사
- ❖ 진공물리 및 진공기술: 한양대학교출판부

※주거: 본 교안의 순서와 내용 중 많은 부분을 기존 진공기술 강습회 자료를 수정 활용하였음을 밝힙니다. 오랜 기간에 걸쳐 다듬어지고 정리된 가치 있는 자료입니다. 사용할 수 있도록 허락해 주신 에드워드 주장현 박사께 감사드립니다.



## - I 부 -

1. 오해하기 쉬운 진공의 기초
2. 압력이란?
3. 압력과 온도와 분자밀도
4. 진공의 특성(진공 배기특성)
5. 공간배기와 표면방출
6. 왜 로그(Log)에 익숙해야 하는가?

## - II 부 -

1. 진공의 기초지식이 중요한 이유
2. 컨덕턴스(직관적 이해)
3. 진공배기와 컨덕턴스
4. 유량, 압력, 컨덕턴스, 배기속도
5. 흐름의 유형별 컨덕턴스
6. 도관의 컨덕턴스와 유효배기속도  
(통과확률을 이용한 컨덕턴스)

## - III 부 -

1. 진공펌프의 용량선정과 예  
(압력에 따른 배기속도 변화)
2. 배기시간 계산식 도출과 예

## - IV 부 -

1. 배기시간 계산
  - 해석적 계산
  - Vactran 프로그램을 활용한 계산

## - 부 록 -

1. 고진공용 크라이오 펌프 소개
2. G-M극저온 냉동기(원리)
3. 크라이오 펌프 라인업
4. 기타: RGA 데이터 분석  
냉각수와 스케일

## - 1 부 -

1. 오해하기 쉬운 진공의 기초
2. 압력이란?
3. 압력과 온도와 분자밀도
4. 진공의 특성(진공 배기특성)
5. 공간배기와 표면방출
6. 왜 로그(Log)에 익숙해야 하는가?



# ‘압력’이란 무엇인가?

- 1) 압력=힘/면적: 단위면적당 힘(N/m<sup>2</sup>)
- 2) 압력~입자수; 압력의 변화=입자수의 변화  
~단위부피당 기체의 에너지

PV=NkT (Unit: J, 에너지); 기체상태방정식

P=nkT (Unit: J/m<sup>3</sup>, 단위체적당 에너지)  
→ 분자밀도, n=N/V, n=P/kT

*Def. PV는 기체분자의 질량중심이 이동하는  
가스의 병진운동에너지*

here, N: total molecule number

n: N/V, number density of molecules

k=k<sub>B</sub>: Boltzmann constant

1.381 x 10<sup>-23</sup> [J/K]

참고: 기체상태방정식의 3가지 표현

1. 파티클(분자) 개수로 표현할 때

$$PV = Nk_B T$$

2. 몰수로 표현할 때

$$PV = n_m \bar{R} T$$

3. 질량으로 표현할 때

$$PV = m_t R T \quad \text{or} \quad Pv = RT$$

- 일반기체상수:  $\bar{R}=8.314$  [J/mol.K]
- 아보가드로수:  $N_A=6.022 \times 10^{23}$  [molec./mol]
- 볼츠만상수:  $k_B=1.381 \times 10^{-23}$  [J/K]
- 몰 수:  $n_m$  (ref. 1몰: 0°C 1기압 22.4L)
- cf. 분자밀도, n과 구분!
- 기체상수:  $R=\text{가스별}$  [J/kg.K]
- 질량(분자 N개의 전체질량):  $m_t$
- 분자량: M, 1몰의 질량.
- 참고:  $\bar{R} = N_A k_B$ ,  $n_m = m_t/M$ ,  $R = \bar{R}/M$


# 이상기체 상태방정식의 응용!




$$m_t = PV/RT$$
$$= PVM/\bar{R}T$$

트레일러  
40t, 16m  
(고압용기 10  
개 장착)

수소는 몇 kg?

 <div> <div>산업통상자원부</div> <div>http://www.motie.go.kr</div> </div>	<div> <div>보도자료</div> <div>보다나온 정부</div> </div>	<div> <div>산업통상자원부</div> <div>보다나온 정부</div> </div>
<div> <div>2019년 1월 17일(목) 석간부터 보도하여 주시기 바랍니다.</div> <div>(인터넷, 방송, 통신은 1.17(목) 12:00 이후 보도 가능)</div> </div>		

<div> <div>CO<sub>2</sub> 배출이 전혀 없고 도심지에 소규모로도 설치가 가능하여 진정한 의미의 친환경 분산전원으로 부상하고 있는 발전용 연료전지를 개발해 나가기 위한 수소 생산과 연계하여 40년까지</div> </div>
--

 <div> <div>산업통상자원부</div> <div>http://www.motie.go.kr</div> </div>	<div> <div>보도자료</div> <div>보다나온 정부</div> </div>	<div> <div>정부혁신</div> <div>보다나온 정부</div> </div>
<div> <div>2020년 1월 13일(월) 석간부터 보도하여 주시기 바랍니다.</div> <div>(인터넷, 방송, 통신은 1.13(월) 11:30 이후 보도 가능)</div> </div>		
<div> <div>배포일시</div> <div>2020. 1. 10.(금)</div> </div>	<div> <div>담당부서</div> <div>산업통상자원부 신에너지산업과 환경부 대기미래전략과 국토교통부 미래전략일자리담당관 과학기술정보통신부 기후환경대응팀</div> </div>	<div> <div>담당과장</div> <div>최연우 과장(044-203-5390) 박륜민 과장(044-201-6880) 김태형 과장(044-201-3258) 한우진 팀장(044-202-4511)</div> </div>
<div> <div>담당과장</div> <div>장미연 사무관(044-203-5391) 손효진 사무관(044-202-4543) 이주현 사무관(044-201-6881) 박지은 사무관(044-201-3264)</div> </div>	<div> <div>담당부서</div> <div>산업통상자원부 신에너지산업과 환경부 대기미래전략과 국토교통부 미래전략일자리담당관 과학기술정보통신부 기후환경대응팀</div> </div>	<div> <div>담당과장</div> <div>최연우 과장(044-203-5390) 박륜민 과장(044-201-6880) 김태형 과장(044-201-3258) 한우진 팀장(044-202-4511)</div> </div>

## 【 제주 그린수소 전주기 실증 프로젝트 MOU 체결 】

□ 아울러, 동 행사를 마치고 제주에너지공사, 한국중부발전, 현대자동차, 수소융합얼라이언스추진단 등 4개 기관은 「**제주 그린수소 전주기 실증 프로젝트를 위한 업무 협약**」을 체결함

○ 동 협약에 따라 4개 기관은 **제주도의 미활용 재생에너지 전력으로 그린수소를 생산하고, 이를 연료전지, 수소버스, 선박 등 다양한 분야에 활용하는 프로젝트 추진 타당성 검토**를 올해 6월까지 추진할 계획

○ 이러한 협력이 향후 '수소경제 활성화 로드맵'에 따라 그린수소 생산 기반의 **지속 가능한 수소경제를 실현하는 데** 기여할 것으로 기대됨

## 수소경제 추진 1년, 눈부신 초기 성과 달성

- '19년 수소차 판매 1위, 충전소 최다 구축, 연료전지 최대시장 -  
- 글로벌 수소경제 시장을 빠르게 선점 -

- 국내 보급 : '17년 국내 177대(신규 51대) → '18년 누적 889대(신규 712대) → '19년 **4,000대 이상** 신규 보급

- 수소충전소 확충 : ('18) 14개 → ('22) 310개 → ('40) **1,200개**소

- 수소 대중교통 확대 : '40년 수소택시 8만대, 수소버스 4만대, 수소트럭 3만대 보급

○ 범부처 수소 기술개발 로드맵 수립, 국제표준 선도, 촘촘한 중소·중견기업 생태계 조성, 범부처 협력추진체계 운영 등



**핵심포인트**

- (1) '수소차'와 '연료전지' 분야를 양대 축!
- (2) CO<sub>2</sub> Free 그린수소!
- (3) 저장/운송에 있어 안전성, 경제성이 우수한 수소 액화/액상 저장 기술 도입!

※Note: 고압기체 저장과 관련된 규제를 완화하고, 안전성·경제성이 우수한 수소 액화·액상 저장기술을 개발!



# 수소경제 활성화 로드맵 요약

구 분		2018년			2022년			2040년			
활용	모빌리티	수소차	1.8천대 (0.9천대)			8.1만대 (6.7만대)			< 2030 > 수 차종 생산라인 구축		620만대 (290만대)
		승용차	1.8천대 (0.9천대)			7.9만대 (6.5만대)			< 2023 > 전기차 가격수준		590만대 (275만대)
		버스	2대			2천대			80만km 이상 내구성 확보		6만대 (4만대)
		택시	-	<2019> 10대 시범사업	< 2021 > 주요 대도시 적용	-			50만km 이상 내구성 확보		12만대 (8만대)
		트럭	-		5톤 트럭 출시	10톤 트럭			핵심부품 100% 국산화		12만대 (3만대)
		수소충전소	14개소 (1,000만원/kg)			310개소			300만원/kg 핵심부품 100% 국산화		1,200개소
		선박, 열차, 드론, 기계 등	R&D 및 실증						'30년까지 상용화 및 수출		
	에너지	연료전지									
		발전용	307MW	< 2019 > 전용 LNG 요금제 신설	< 2022 > 설치비 380만원/kW	1.5GW (1GW)			< 2025 > 중소형 가스터빈 발전단가 수준		15GW (8GW)
		가정·건물용	7MW			50MW			설치비 600만원/kW		2.1GW
		수소가스터빈	R&D						실증 '30년 이후 상용화 추진		
수소공급	수소공급량	13만톤/年			47만톤/年					526만톤/年	
	생산방식	화석연료 기반 부생수소 추출수소	수요처 인근 대규모 생산			수전해 활용			수전해 수소의 대용량 장기 저장 기술개발		그린 수소 활용 (수전해+해외생산)
수소가격		-				6,000원/kg (現 휘발유의 50%)			4,000원/kg		3,000원/kg



수소가스  
용기  
(46.7L)

0.5kg~3만원  
현재: 60,000/kg

[수소운송 트레일러]  
현재: 40톤급, 16m  
수송량: 200kg/대  
최대500kg/대

22년 목표: 47만톤/년  
~940,000대/년  
~2,575대/일

40년 목표: 526만톤  
~28,822대/일  
(16m x 28,822  
=461 km)

# Table 1. 압력과 온도변화에 따른 분자밀도(n)

Variation of the Number Density  $n$  of Molecules for All Gases with Temperature and Pressure, Calculated from Eq.  $P=nkT$ .

( $n$ : 분자밀도, 단위:  $[molec./dm^3]$  으: decimeter로 m의 1/10, 즉 10cm임)

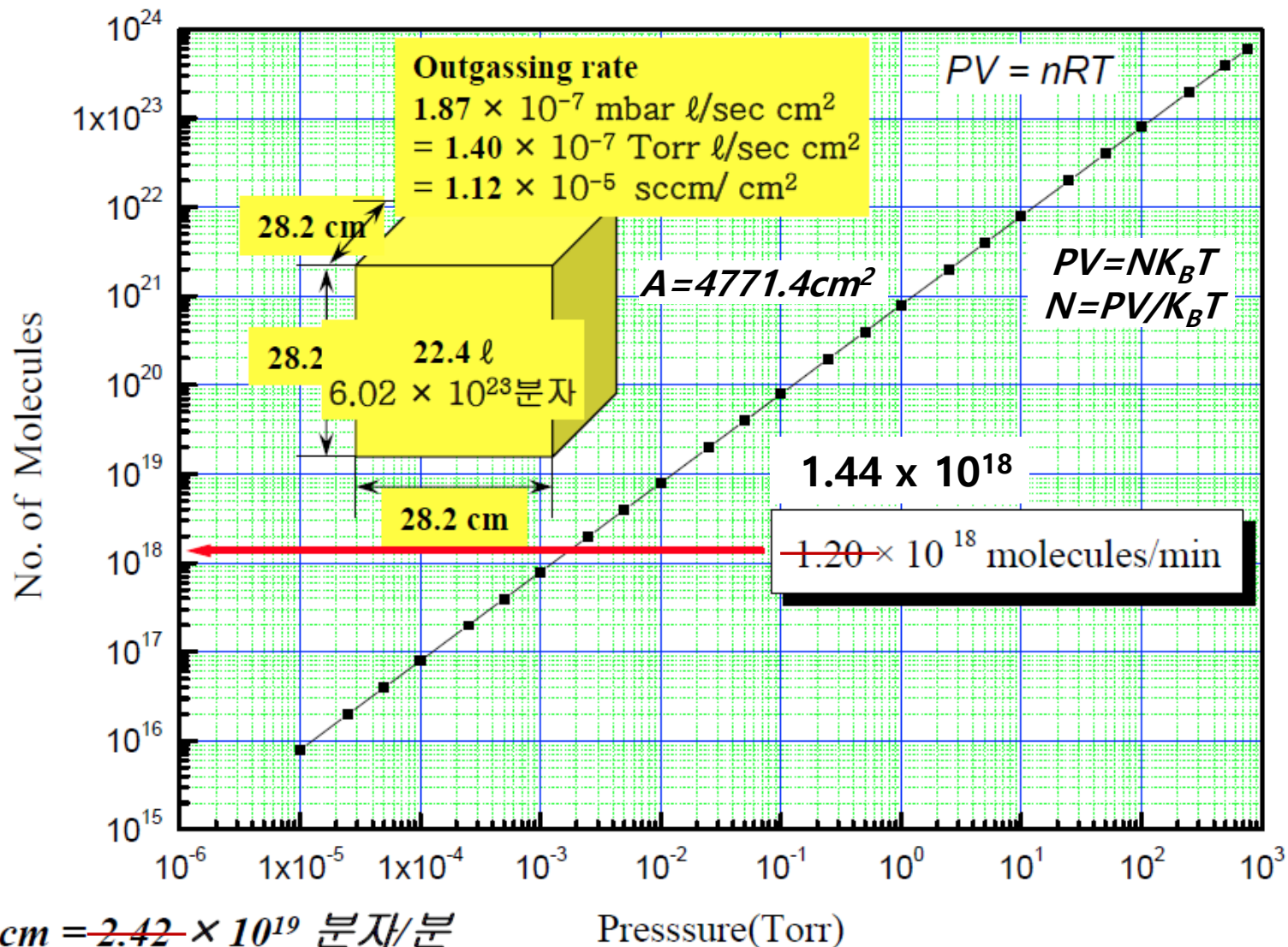
P [mbar]	T[K] 77.5	T[K] 273	T[K] 296
1.0E+03	9.35E+22	2.65E+22	2.45E+22
1.0E+00	9.35E+19	2.65E+19	2.45E+19
1.0E-01	9.35E+18	2.65E+18	2.45E+18
1.0E-02	9.35E+17	2.65E+17	2.45E+17
1.0E-03	9.35E+16	2.65E+16	2.45E+16
1.0E-04	9.35E+15	2.65E+15	2.45E+15
1.0E-05	9.35E+14	2.65E+14	2.45E+14
1.0E-06	9.35E+13	2.65E+13	2.45E+13
1.0E-07	9.35E+12	2.65E+12	2.45E+12
1.0E-08	9.35E+11	2.65E+11	2.45E+11
1.0E-09	9.35E+10	2.65E+10	2.45E+10
1.0E-10	9.35E+09	2.65E+09	2.45E+09
1.0E-11	9.35E+08	2.65E+08	2.45E+08
1.0E-12	9.35E+07	2.65E+07	2.45E+07
1.0E-13	9.35E+06	2.65E+06	2.45E+06
1.0E-14	9.35E+05	2.65E+05	2.45E+05
1.0E-15	9.35E+04	2.65E+04	2.45E+04

$$P=nkT$$

$$n=P/kT$$



Fig. 1 진공도에 따른 기체분자 개수의 변화( 0 °C, 22.4 l)



만약 28.2cm 정육면체 챔버 내  
 부 재료의 표면방출량이  
 $1.87 \times 10^{-7} \text{ mbar L/s, cm}^2$ 라면  
 ...

분당 몇 개의 분자가 표면에서 방  
 출되는 것일까?

22.4L용기의 표면방출량  
 $1.12 \times 10^{-5} \times 4771.4$   
 $= 5344 \times 10^{-5} [\text{sccm}]$

$\therefore 2.69 \times 10^{19} \times 5344 \times 10^{-5}$   
 $= 1.44 \times 10^{18} \text{ 개/min}$

$1 \text{ sccm} = 2.42 \times 10^{19} \text{ 분자/분}$

$2.69 \times 10^{19}$  ; 아보가드로 수,  $N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ EA/22.4L} \gg 1\text{cc}$ 에는 몇 개?

# 배기(排氣, pumping): 오해하기 쉬운 진공개념

“진공을 만든다”

= 압력을 낮춘다

= 파티클(분자) 개수를 줄인다!

능동(X)



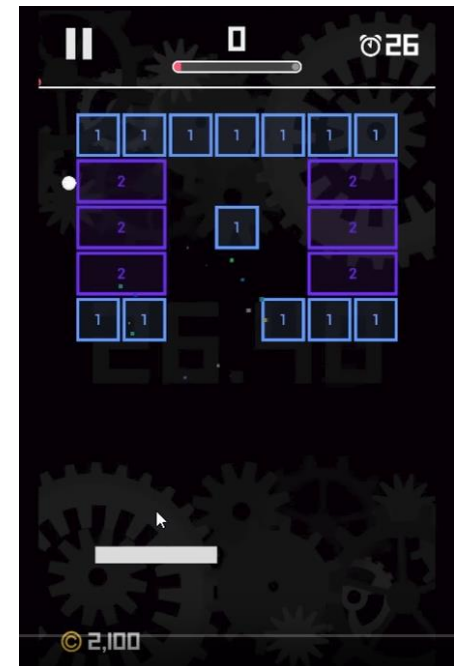
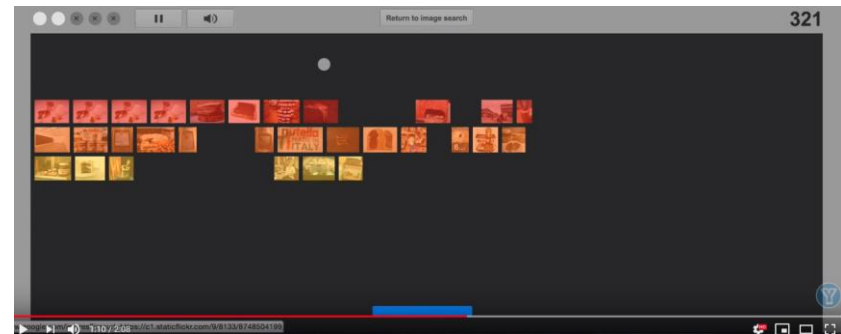
수동  
(O)

How ?

개념: **벽돌깨기(비슷~)**

(단, **공**이 부딪혀도 **벽돌**은 깨지지 않으며 **bar**는 고정됨. **bar** = pump)

벽돌깨기: 구글검색 검색창 'atari breakout'



**Table 2. 대기의 조성 성분 표 (Dry Air)**

GAS	SYMBOL	PERCENT BY VOLUME	PARTIAL PRESSURE	
			TORR	PASCAL
Nitrogen	N <sub>2</sub>	78	593	79,000
Oxygen	O <sub>2</sub>	21	158	21,000
Argon	Ar	0.93	7.1	940
Carbon Dioxide	CO <sub>2</sub>	0.03	0.25	33
Neon	Ne	0.0018	1.4 x 10 <sup>-2</sup>	1.8
Helium	He	0.0005	4.0 x 10 <sup>-3</sup>	5.3 x 10 <sup>-1</sup>
Krypton	Kr	0.0001	8.7 x 10 <sup>-4</sup>	1.1 x 10 <sup>-1</sup>
Hydrogen	H <sub>2</sub>	0.00005	4.0 x 10 <sup>-4</sup>	5.1 x 10 <sup>-2</sup>
Xenon	Xe	0.0000087	6.6 x 10 <sup>-5</sup>	8.7 x 10 <sup>-3</sup>
Water	H <sub>2</sub> O	Variable	5 to 50	665 to 6650

**Q. 본 강의실 공간을 진공챔버라고 가정할 경우, 진공펌프를 통해 압력을 낮추기 시작하면 어떤 압력변화 특성을 나타낼까?**

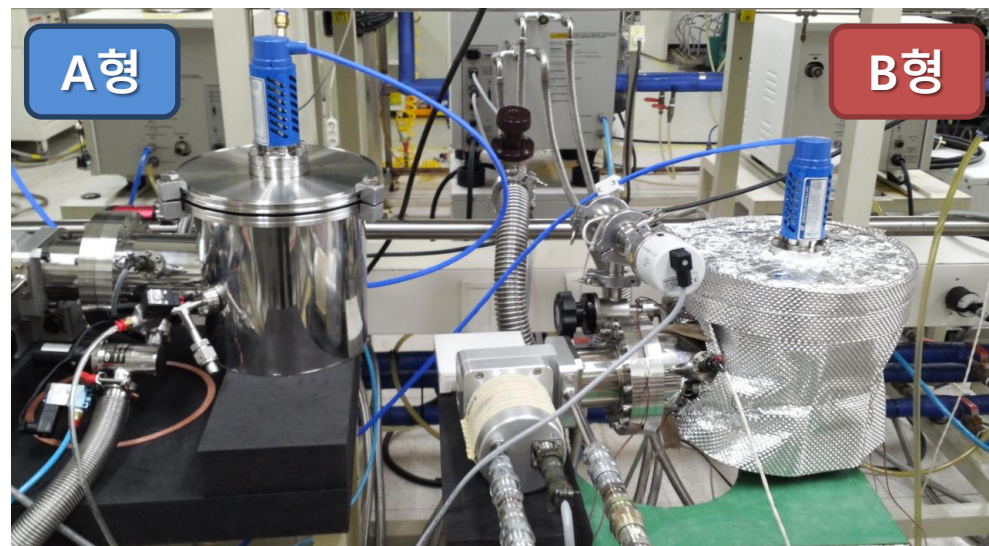


# Table 3. 압력대별 대기조성성분의 변화

Pressure(Torr)	Major Gas Load
Atm.	Air (N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, Ar, CO <sub>2</sub> )
10(-3)	Water Vapor (75 %- 95%)
10(-6)	H <sub>2</sub> O, CO
10(-9)	CO, N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
10(-10)	CO, H <sub>2</sub>
10(-11)	H <sub>2</sub> (3x10 <sup>5</sup> molecules/cm <sup>3</sup> )

**“좋은 진공~ 물 극복!”**

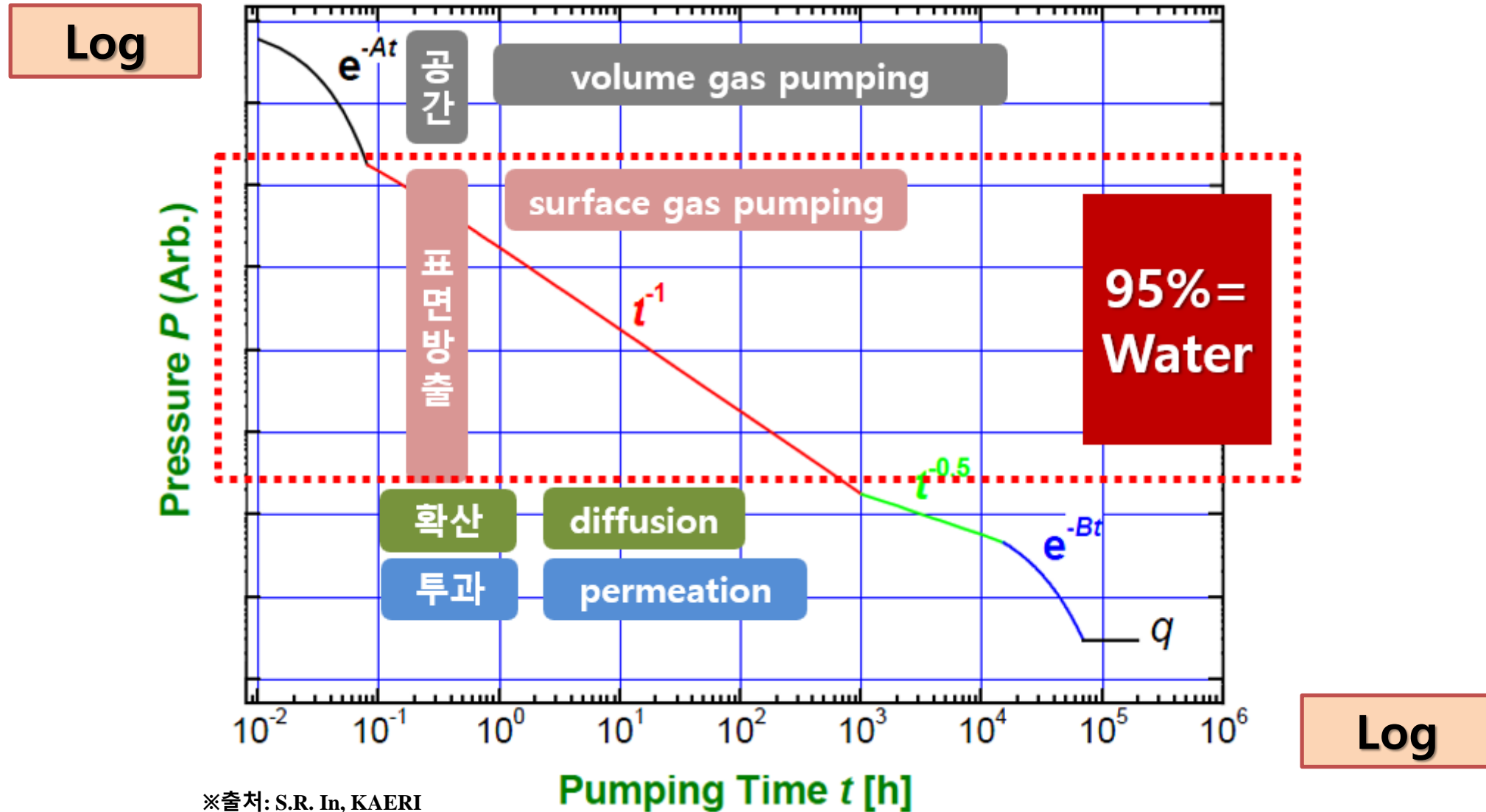
고진공, 초고진공을 달성하기 위해서는 수분배기가 가장 중요한 관건임. 동시에 수소 배기특성도 좋아야 함. 초고진공 공정을위해 수분과 수소배기에 탁월한 크라이오펌프를 사용하는 이유임.



B형: 히터를 사용하여 펌프를 150~200°C까지 베이킹 해야 함.



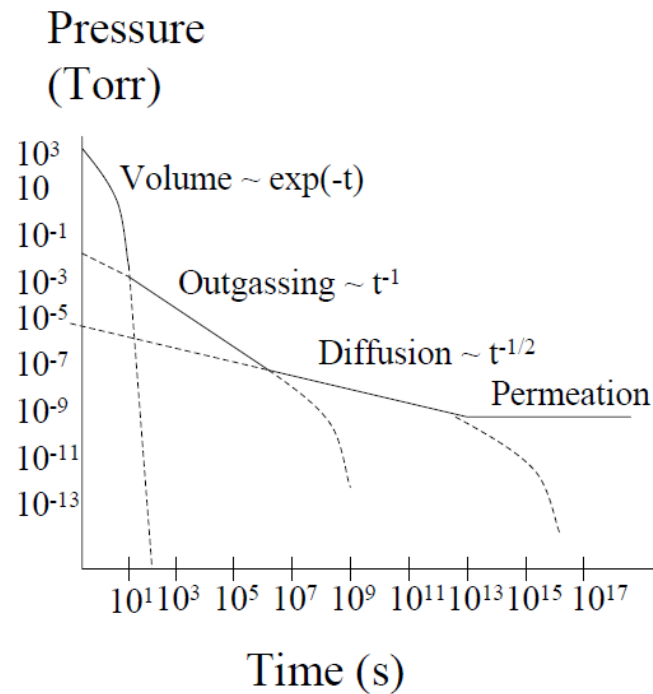
## Fig. 2 Actual Pump Down Curve



# 압력대별 대기조성성분의 변화에 관한 지배방정식

## Pressure limits in vacuum systems

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-S_{eff}t}{V}\right) + \frac{Q_O}{S_{eff}} + \frac{Q_D}{S_{eff}} + \frac{Q_K}{S_{eff}}$$



♠ 1st term -- time dependence of pressure that is due to the gas in the chamber volume ( $\exp(-At)$ )

♠ 2nd term -- pressure due to outgassing ( $\sim t^{-1}$ )

♠ 3rd term -- pressure due to diffusion ( $\sim t^{-1/2}$  and later  $\exp(-Bt)$ )

♠ 4th term -- pressure due to permeation (constant)

출처: 인터넷자료, Dr. Philip D. Rack / 비슷한 자료: Vacuum Physics and Techniques, T. A. Delchar



## Table 4. 재료별 개략적인 1시간 표면방출량

Approximate outgassing rate  $K_1$  for several vacuum materials, after one hour in vacuum at room temperature.

Material	$K_1$ ( mbar l s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> )
Aluminium (fresh)	$9 \times 10^{-9}$
Aluminium (20 h at 100 °C)	$5 \times 10^{-14}$
Stainless steel (304)	$2 \times 10^{-8}$
Stainless steel (304, electropolished)	$6 \times 10^{-9}$
Stainless steel (304, mechanically polished)	$2 \times 10^{-9}$
Stainless steel (304, electropolished, 30 h at 250 °C)	$4 \times 10^{-12}$
Perbunan	$5 \times 10^{-6}$
Pyrex	$1 \times 10^{-8}$
Teflon	$8 \times 10^{-8}$
Viton A (fresh)	$2 \times 10^{-6}$

※출처: INTRODUCTION TO THE PRINCIPLES OF VACUUM PHYSICS, *Niels Marquardt*

### Q. 진공 챔버 재료로 알루미늄과 STS 중 어떤 것이 좋을까?

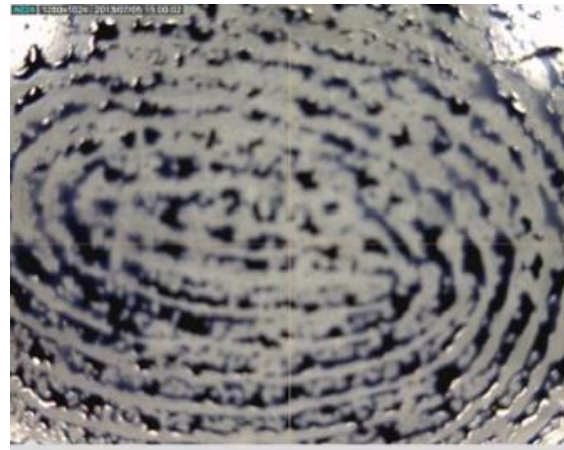
- ♠ 초기 기체방출률: 알루미늄 > 스테인레스강
- ♠ 베이킹 후 기체방출률: 알루미늄 < 스테인레스강  
(알루미늄에 수소 함량 자체가 스테인레스강의 경우보다 작음)

## 지문(finger print)이 진공도에 미치는 영향

♠ 챔버 내부 표면에 찍힌 지문 한 개(오른쪽 그림 참조)는 베이킹(baking)하기 전 상태에서 표면방출(outgassing) 전체 양은 약  $1 \times 10^{-5}$  [Torr L/s]이다.

Q

아래 표와 같이 원하는 압력을 얻기 위해 필요한 진공 펌프의 배기속도(pumping speed)는 얼마인가?



$Q=PS$

압력 P [Torr]	진공펌프의 배기속도, S			비고
	[L/s]	[L/min]	[m3/hr]	
$5 \times 10^{-3}$	0.002	0.12	0.0072	
$5 \times 10^{-4}$	0.02	1.2	0.072	
$5 \times 10^{-5}$	0.2	12.0	0.72	
$5 \times 10^{-6}$	2.0	120	7.2	
$5 \times 10^{-7}$	20.0	1,200	72	
$5 \times 10^{-8}$	200.0	12,000	720	

## Fig. 3 특정 챔버에 대한 펌프 다운 그래프 예시

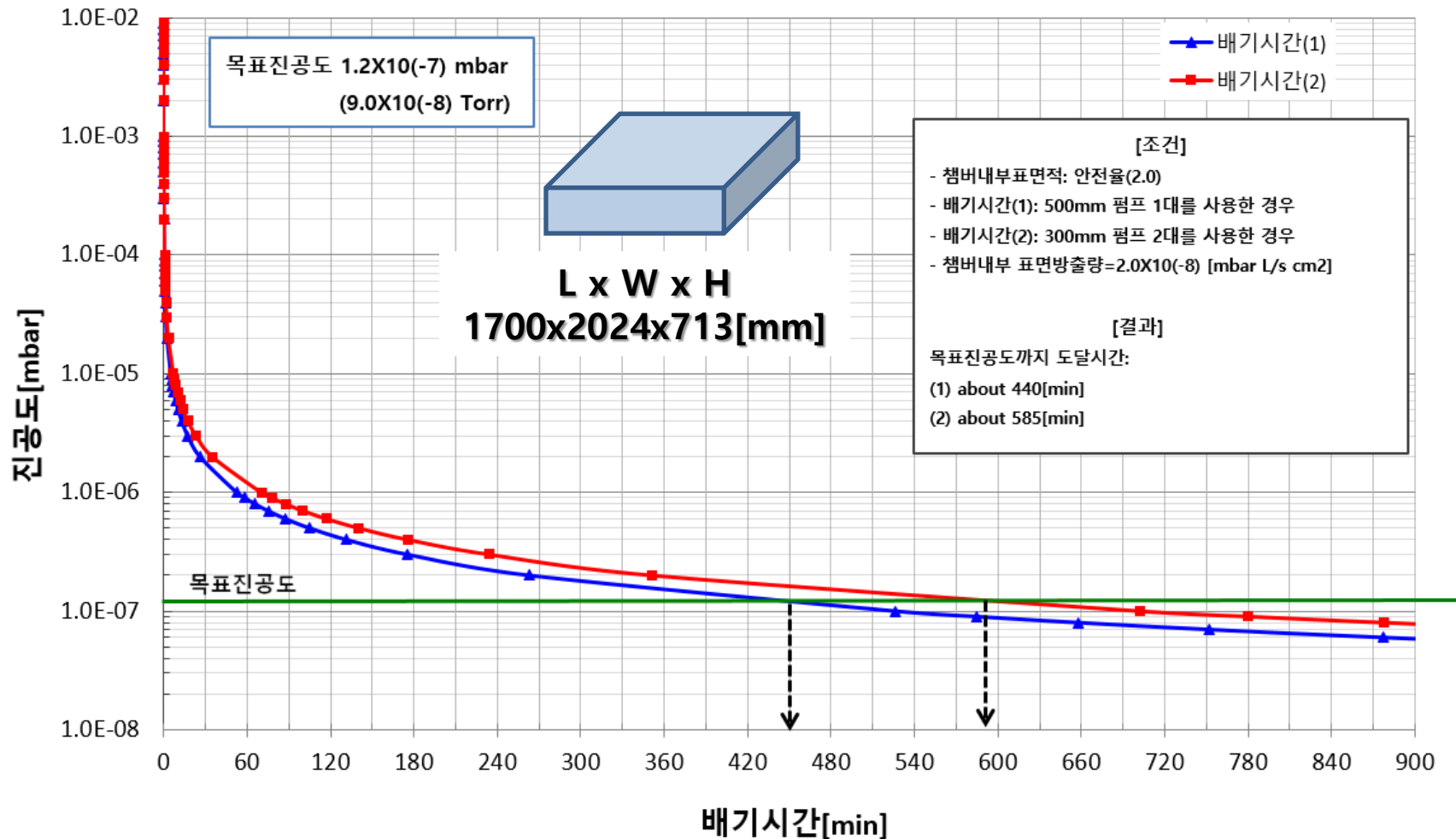
Log

GVT Pump 선정을 위한 배기시간 .vs. 진공도 변화

(Organic: 500mm 펌프 1대(하부면) vs 300mm 펌프 2대(측면))

작성: GVT 이동주 수석

날짜: 2016. 7. 21.



2015 09 September  
제18회 제3호 ISSN 2288-977X

# 진공 이야기

Vacuum Magazine

**특집 나노급 측정 및 진단기술**

Thin film Substrate

www.kvs.or.kr

KVS 한국진공학회  
The Korean Vacuum Society

Vacuum Square

## 현민 지브이티(GVT) 크라이오 펌프 이야기

이동주

**Hyunmin GVT's Cryopump Story**

Lee Dong Ju

Cryopumps(cryogenic pump), with integrating cryogenic skills into vacuum technology, is the most popular high vacuum pump system, which is widely used at the commercial vacuum industries with TMP. Hyunmin GVT, Inc. is the domestic unique professional manufacturer of the cryopump systems. About ten years ago, while GVT succeeded in domestically producing cryopump systems, this high technology initiated from US became localized completely. But the process of the home production was not easy. It was possible through many trials and errors and after efforts and sacrifices of our engineers. Now many users and customers have the benefit of the advantage and excellence of the domestic cryopump systems. Especially, these days GVT is conducting researches and developments regarding low vibration cryopump and large-sized CWPs and Cryo-TMPs.

**1. 크라이오 펌프**

크라이오 펌프는 극저온 면에 가스들이 응축 또는 증착되는 원리를 이용한 고진공 펌프로서, 모든 가스들에 대해 높은 배기속도와 오일이 없는 깨끗한 진공환경을 제공하는 것이 특징이다. 1930년대 이래 사용된 초기의 크라이오 펌프는 주로 액체 질소나 액체 헬륨 같은 액체냉매를 사용하여 배기하는 방식이었다. 반면, 현재의 크라이오 펌프는 1960년대 이래 개발된 Gifford-

McMahon 2단 극저온 냉동기가 핵제냉매를 대신한 펌프이다. 특히 극저온 면에 차광(金)을 사용하면 더 높은 진공도를 달성하게 되었다. 따라서 크라이오 펌프는 수분과 수소, 헬륨, 산소와 같은 Type III 가스 배기에

(X)자 학력

2000년 경희대학교 기계공학 석사, 2009년 삼성중공업 임원이 공로를 인정받아 2003년 이후 5월로 국산화에 기여한 공로로 인정된 연구자(이동주)

Fig. 1) The structure of cryopump systems.

Vacuum Square

## 진공기술의 현재와 미래

진공기술의 발전에 힘써주시는 분 무서운 줄 몰랐다. 수십 년의 수백 기합 이상을 다루다가 단지 1기합 미만을 다루는 것이니 그냥 만만하게 생각했던 것이다. 극저온 및 Q-Max라는 냉동기에 대한 이해가 빨라지자 진공에 대한 이해를 높이기 위해서 이런 저런 자료를 찾고 사람들을 만나기 시작했다. 면두리엔만 있으니 면두리 사 람만 만난다. 다 그 나뭇줄에 그 밭인 것 같았다. 진공에 몸 담고 있으면 아는 것은 하지만 알고 보면 엄청난 경우가 많다. 누구를 짓도 없다. 그 장문인이 나이니 무슨 말이 더 필요하겠는가? 국내에서 진공에 일한지 얼마 안된 이들을 위해 지도 편달해 줄 원자를 어디에서 찾을 수 있단 말인가? 그러나 감히하지도 나는 비교적 일찍 왔은 경우에 속한다. 사실 내가 왔을 것이 아니라 그 당에서 직접 찾아오셨다. 그 분은 다름 아닌 원자력연구원의 현 상원 박사이다. 당시 현상원 박사는 KSTAR 관련한 프로 제트를 수행하고 있었는데 미터(m)단위의 대형 차광 어레이(charcoal array)를 제작해 준만한 업적을 갖고 있 었다. 이 용도의 차광을 가지고 있고 또 그 정도 크기하 이에서 원 작업을 수행할 수 있는 회사가 국내 회사라 제 너시스 밖에 없었으니... 소문을 듣고 직접 찾아오신 것 이었다. 당시 비교적 저렴한 가격에 그 서비스를 제공하 기로 하고 그 대가로 진공기술교육을 부탁 드렸었다. 이 후 교육을 받으며 진공이 단지 1기합 미만을 다루는 단순 한 공학분야 같지만 결코 만만치 않은 영역이라는 사실 을 알게 되었다.

이후 고객을 만나진 세미나를 가진 진공을 배우려는 사람들에게 늘 강조하는 제기가 있다. (진공을 하면 할 수록 어렵다는 이야기를 하면서 강조점을 전달하는데 처음에는 당혹을 구할까 봐 걱정이었다. 그러나 경험에 의해 얻은 결론은 옳은다는 이 사실을 잘 받아들이지 못하는 것 이다.) 첫째, 우리는 진자가 사용하는 진공환경(공정환 경)에 필요한 진공 펌프를 잘 분별하여 채용해야 한다. 둘째, 좋은 진공을 원한다면 늘 물배기에 신경을 써야 하 고 표면상태를 잘 관리해야 한다. 셋째 고진공을 달성하 기 위한 왕도는 따로 없다. 즉, 한 오더의 진공도를 높이 기 위해서는 펌프를 10배 더 많이 장착하든지, 또는 표면 상태를 10배 깨끗하게 하든지, 아니면 목표 진공도에 도 달할 때까지 10배의 시간을 더 기다리는 수 밖에 없다. 우리는 로그(log)와 친해져야만 한다. 그리고 아래에 소개하는 두 개의 그림은 꼭 기억했으면 한다.

**2. 좌충우돌, 양산의 길은 멀고 험하다.**

2003년 6월부터 세를 개 시키는 크라이오 사업부에 합류하게 되었다. 처음에는 거의 같은 시기에 합류한 동료들과 함께 도전과 정지서를 익혀나갔다. 시제품은 우 연적으로 파공을 거쳐 이미 미국에 가 있는 상태였고 일 마. 하지만 많이 진수 환경공을 받았다. 그 해 12월에 필요한 진공 펌프를 잘 분별하여 채용해야 한다. 셋째, 좋은 진공을 원한다면 늘 물배기에 신경을 써야 하 고 표면상태를 잘 관리해야 한다. 셋째 고진공을 달성하 기 위한 왕도는 따로 없다. 즉, 한 오더의 진공도를 높이 기 위해서는 펌프를 10배 더 많이 장착하든지, 또는 표면 상태를 10배 깨끗하게 하든지, 아니면 목표 진공도에 도 달할 때까지 10배의 시간을 더 기다리는 수 밖에 없다. 우리는 로그(log)와 친해져야만 한다. 그리고 아래에 소개하는 두 개의 그림은 꼭 기억했으면 한다.

Fig. 3) Vacuum pumps operating region related with Q, P, and S.

Fig. 4) Typical pump down curve

같다.) 첫째, 우리는 각자가 사용하는 진공환경(공정환 경)에 필요한 진공 펌프를 잘 분별하여 채용해야 한다. 둘째, 좋은 진공을 원한다면 늘 물배기에 신경을 써야 하 고 표면상태를 잘 관리해야 한다. 셋째 고진공을 달성하 기 위한 왕도는 따로 없다. 즉, 한 오더의 진공도를 높이 기 위해서는 펌프를 10배 더 많이 장착하든지, 또는 표면 상태를 10배 깨끗하게 하든지, 아니면 목표 진공도에 도 달할 때까지 10배의 시간을 더 기다리는 수 밖에 없다. 우리는 로그(log)와 친해져야만 한다. 그리고 아래에 소개하는 두 개의 그림은 꼭 기억했으면 한다.

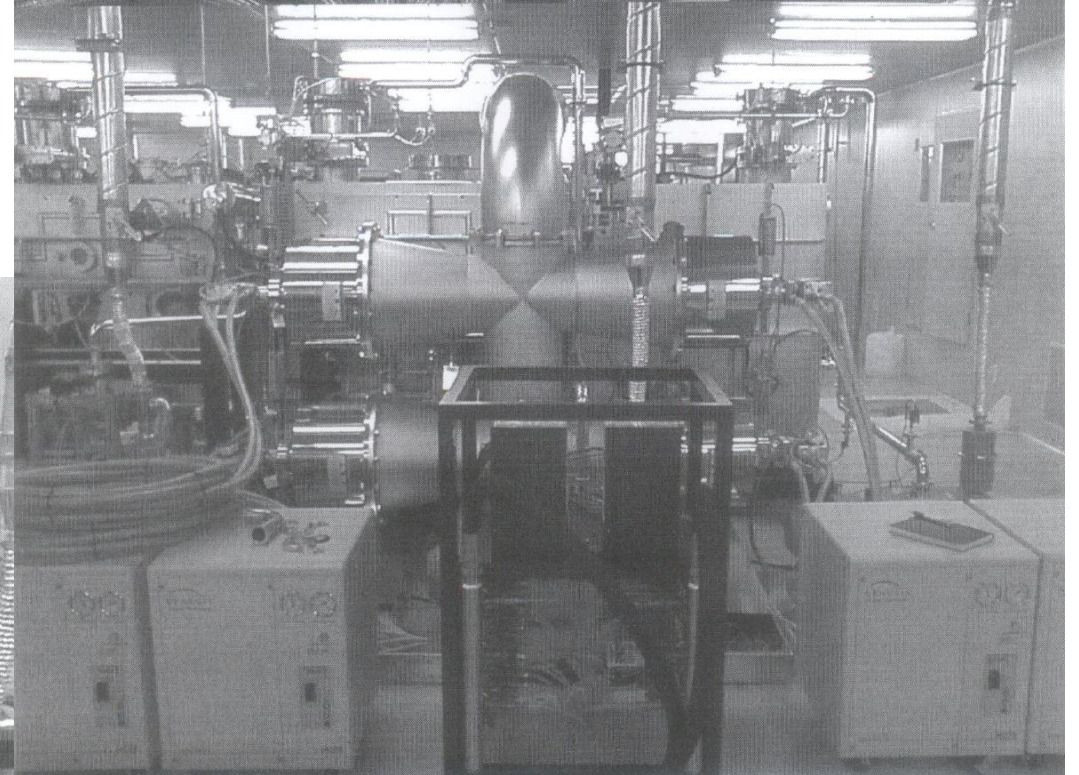
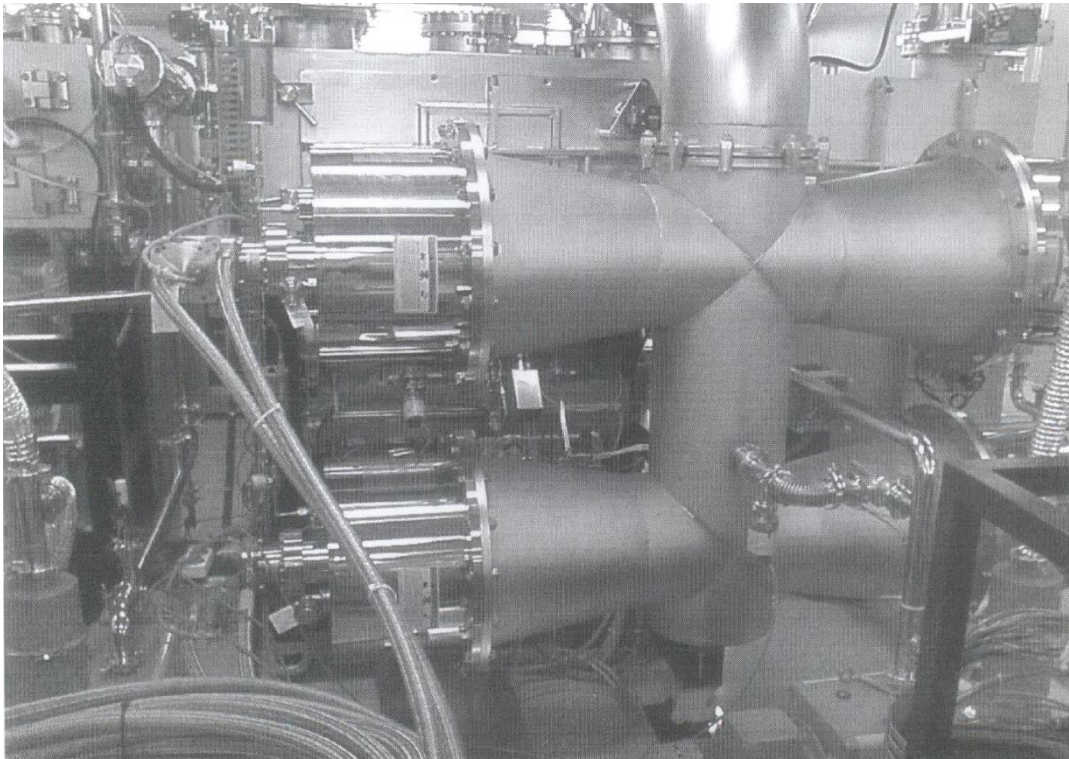
## - II 부 -

1. 진공의 기초지식이 중요한 이유
2. 컨덕턴스(직관적 이해)
3. 진공배기와 컨덕턴스
4. 유량, 압력, 컨덕턴스, 배기속도
5. 흐름의 유형별 컨덕턴스
6. 도관의 컨덕턴스와 유효배기속도  
(통과확률을 이용한 컨덕턴스)



## 진공의 기초지식이 중요한 이유

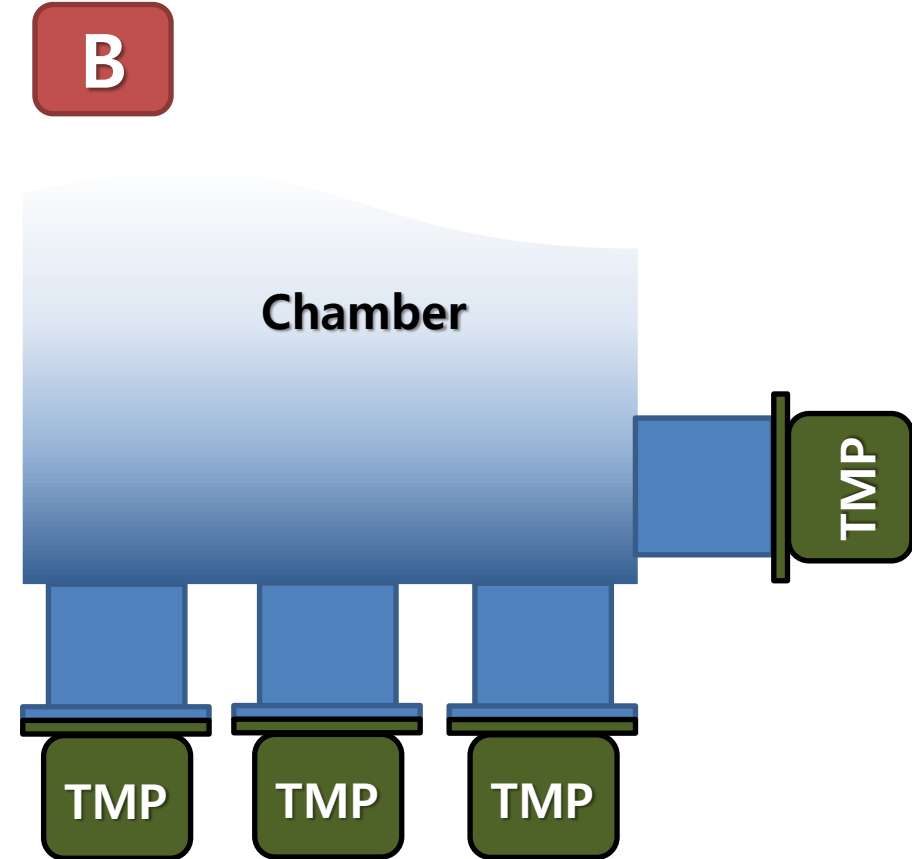
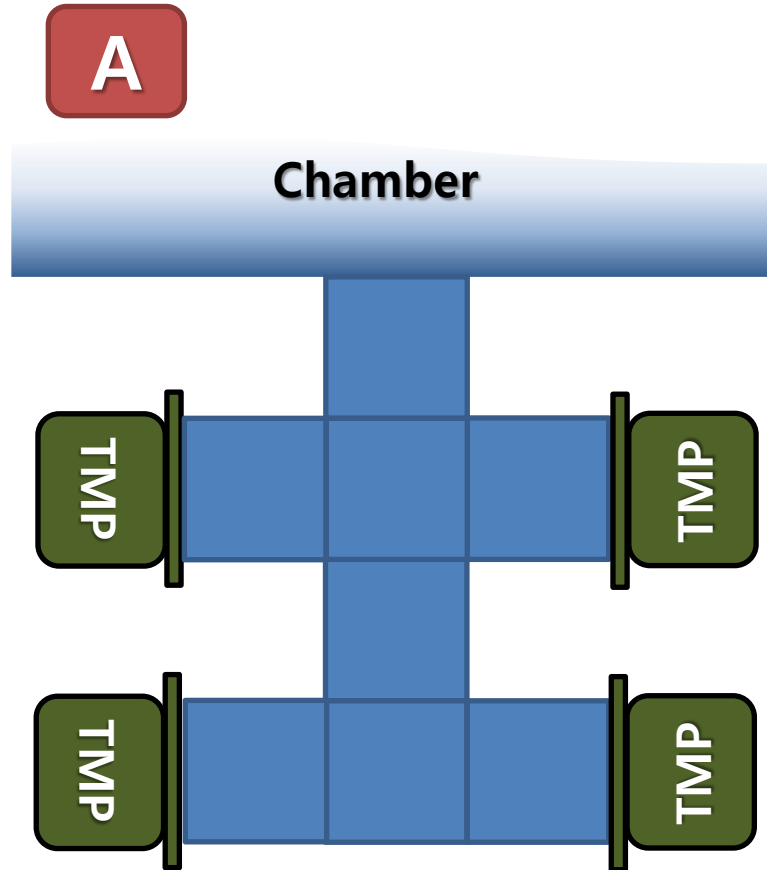
*진공챔버 디자인에서...*



*Q. 무엇이 문제일까?*



## 진공의 기초지식이 중요한 이유



## 진공배기와 컨덕턴스

직관적  
배기성능  
비교!

A vs B ?!

A vs C ?!

1 vs 2 ?!

1 vs 3 ?!

A vs 1 ?!

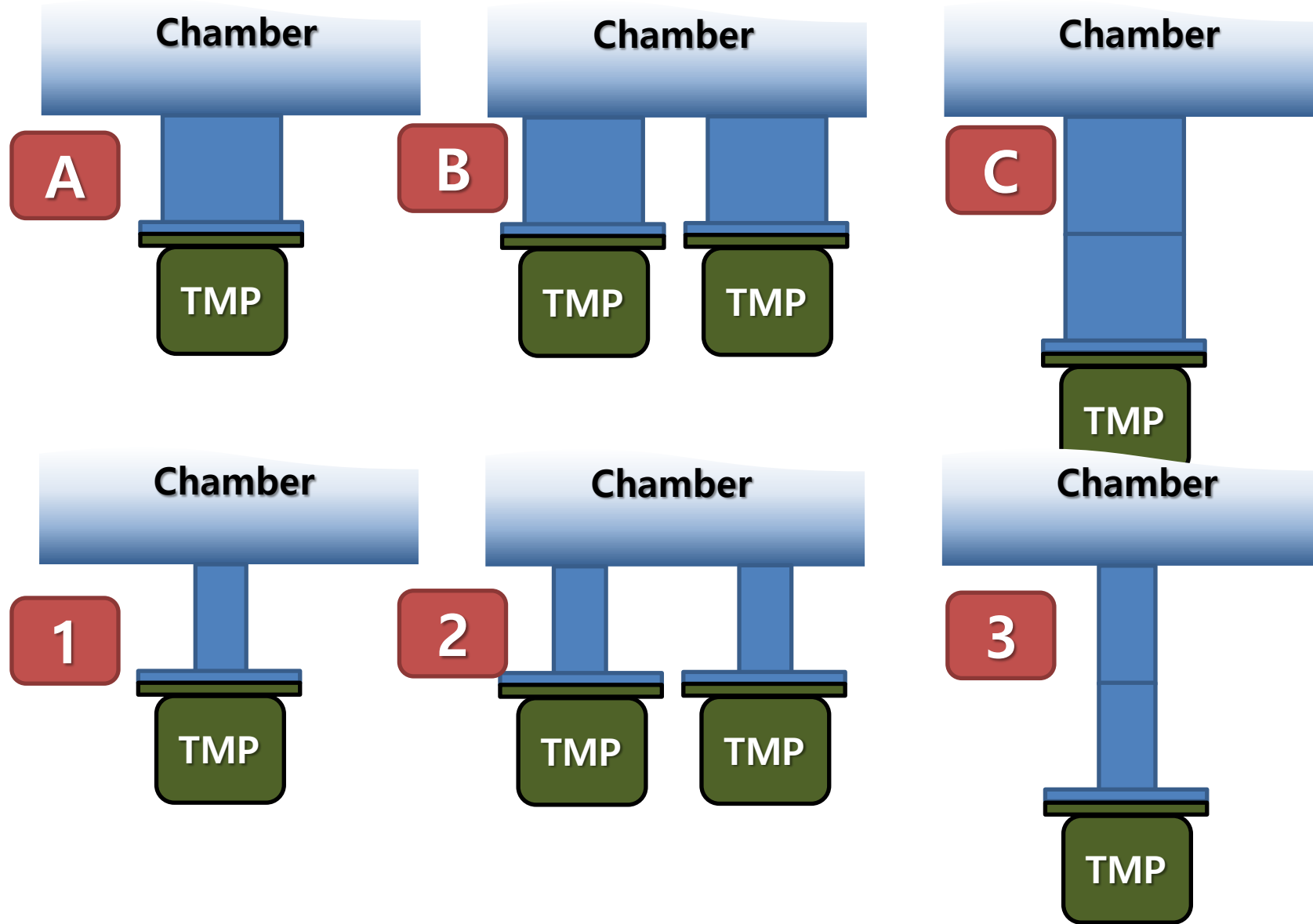
...

..

.

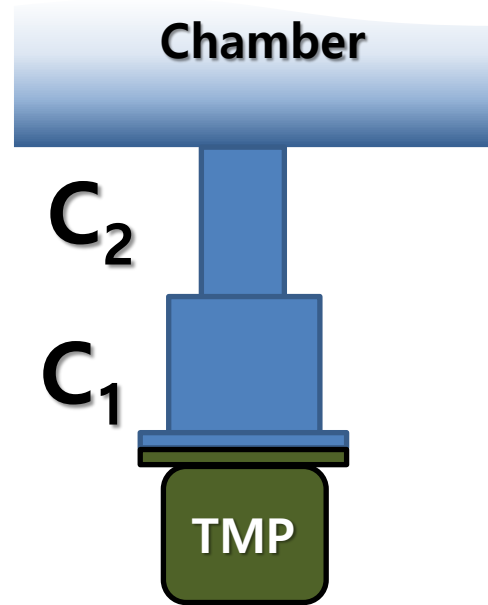
A vs 2 ??

C vs 2 ??



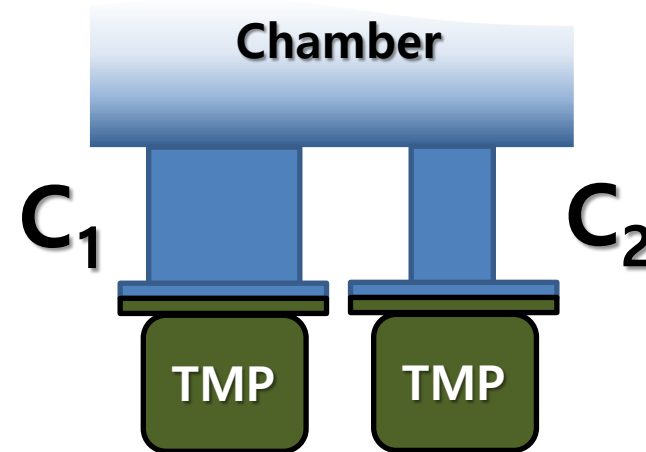
## 컨덕턴스의 합성

## 직렬연결



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

## 병렬연결



$$C = C_1 + C_2$$

## 진공배기와 컨덕턴스

■ 컨덕턴스(C): 기체 흐름의 **용의성**을 나타내는 척도  
(도관의 크기, 모양에 따라 결정됨)

cf. **geometric** conductance **vs** **transmission** conductance



$Q \propto (P_1 - P_2)$  유량은 양단의 압력차에 비례

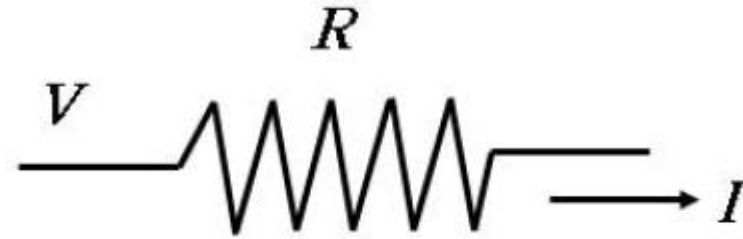
$$Q = C (P_1 - P_2) \text{ [L/s]}$$

↑  
비례계수

## 컨덕턴스와 전기회로의 유사성

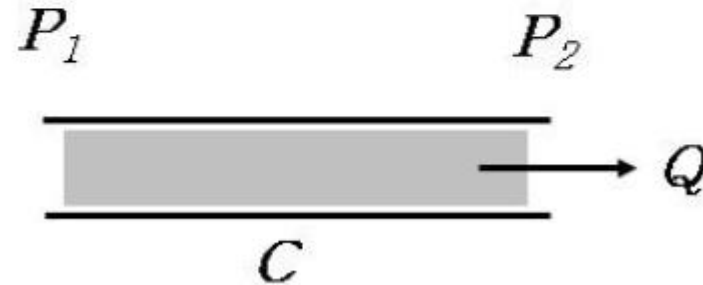
**Current Flow**

$$I = (1/R) V$$



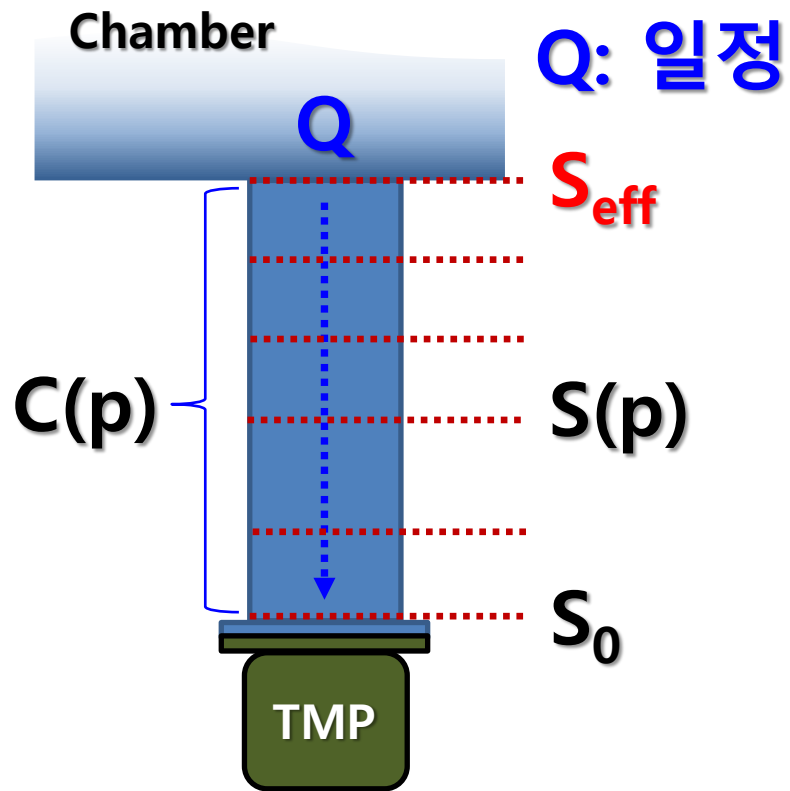
**Mass Flow**

$$Q = C \Delta P$$



## 유량, 압력, 컨덕턴스, 배기속도

암기!



$$Q = C \Delta P$$

.vs.

$$Q = SP$$

♠ 유량, Throughput,  $Q[\text{Torr L/s}] = \Delta(PV)/\Delta t$   
~에너지 흐름[W]

♠ 배기속도, Pumping Speed,  $S[\text{L/s}] = \Delta V/\Delta t$   
~단면을 통과하는 부피흐름

♠ 컨덕턴스, Conductance,  $C[\text{L/s}] = \Delta V/\Delta t$   
~전도요소를 통과하는 부피흐름



## 흐름의 유형(Flow Regime)

Knudsen Number,  $K_n = \lambda/d$

$\lambda$  : 평균자유거리

$d$  : 원형관의 지름

### 1. Viscous Flow(점성류)

$$K_n = \lambda/d < 0.01 \text{ or } Pd(\text{Torr, cm}) > 0.5$$

### 2. Transient Flow(천이류)

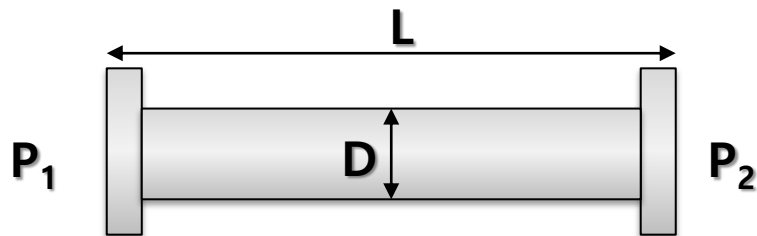
$$0.01 < K_n < 1$$

### 3. Molecular Flow(분자류)

$$K_n > 1 \text{ or } Pd(\text{Torr, cm}) < 0.005$$

# 흐름의 유형(Flow Regime)별 컨덕턴스

출처: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11840>



## Conductance in viscous regime

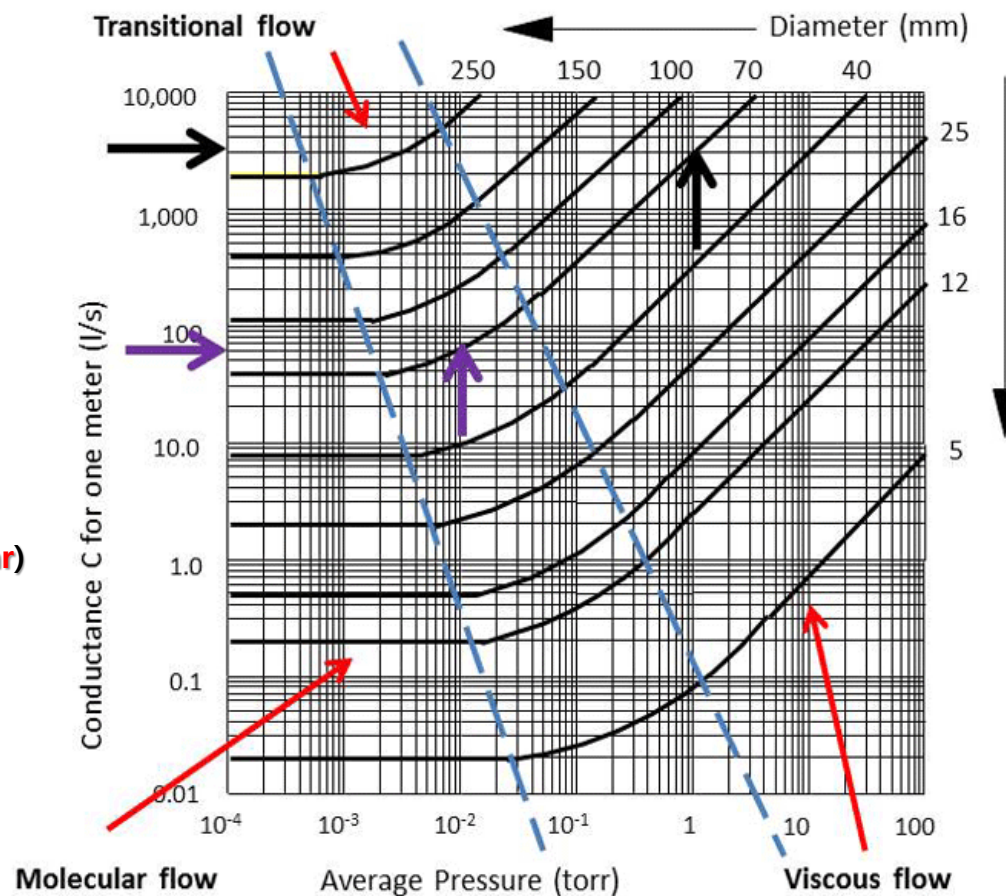
$$C = 137 \frac{D^4 (P_1 + P_2)}{L \cdot 2}$$

Where:  $P_1$  = Pressure on one side of the vacuum line(in **mbar**)  
 $P_2$  = Pressure on the other side of the vacuum line(in **mbar**)  
 $D$  = Internal diameter of the vacuum line(in cm)  
 $L$  = Length of the vacuum line(in cm)

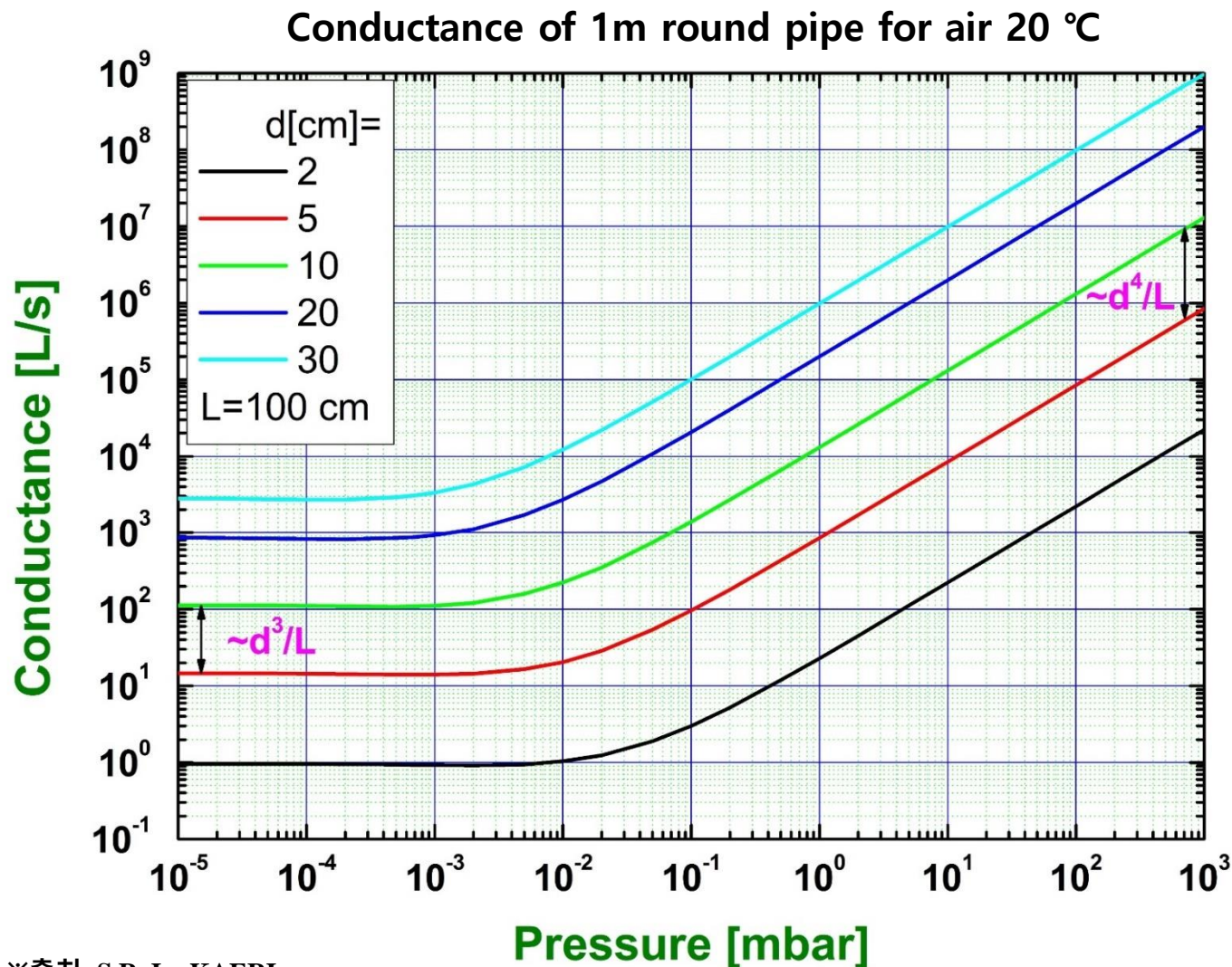
## Conductance in molecular regime

$$C = 12.7 \frac{D^3}{L}$$

Where:  $D$  = Internal diameter of the vacuum line(in cm)  
 $L$  = Length of the vacuum line(in cm)

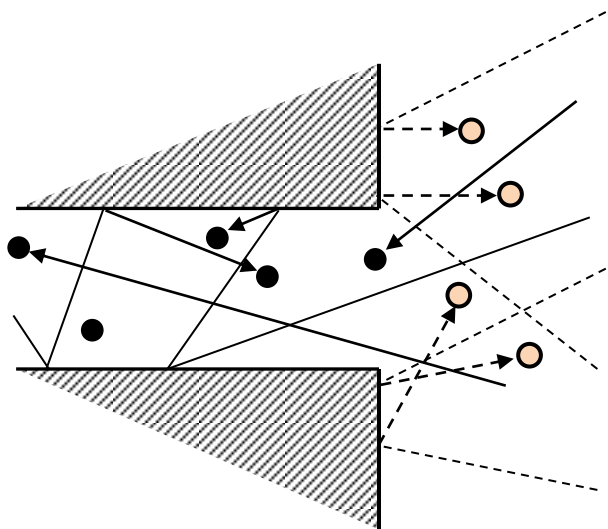


# Fig. 4 흐름의 유형(Flow Regime)별 배관 직경에 따른 컨덕턴스



※출처: S.R. In, KAERI

## 통과확률을 이용한 컨덕턴스(분자류, 고진공)



<도관의 입구에 입사하는 분자  
(검은 점, 실선)만이 흐름에 기여함>

※ 참고: 진공공학(한국경제신문)  
배석희, 인상렬 외 공저

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_p} \quad \text{또는} \quad C = \frac{C_0 C_p}{C_0 + C_p}$$

♠ 어떤 도관 내에 이미 들어온 입자들은 도관을 다시 빠져나갈 때까지 도관 안에서 충돌을 되풀이한다. 또 도관 벽에서 방출되는 입자는 전진할 수도 있고 후진할 수도 있지만 당연히 도관 안에 있다. 그런데 도관 밖에 입는 입자는 도관 입구에 들어서기 전까지는 도관 내에서의 흐름에 전혀 기여할 수 없다. 이 입자가 도관 안으로 들어오기 위해서는 입구를 찾는 것 외에 다른 방법이 없다. 따라서 **도관의 컨덕턴스 C**를 구할 때, 입구 즉 **오리피스의 컨덕턴스 C<sub>0</sub>**와 입구 이후의 **도관만의 컨덕턴스 C<sub>p</sub>**의 조합(합성)으로 보는 것이 타당하다.

♠ 도관에서의 흐름을 입구에 입사된 분자들 중 도관의 존재로 인해 얼마나 방해받아서 어느 비율만큼 도관을 통과할까 하는 확률의 관점에서 볼 수 있다. 이때 **도관의 통과 확률(transmission probability) α**는 다음과 같이 정의한다.

$$C = \alpha C_0 \quad \text{윗식에 넣고 정리하면} \gg \quad \frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{C_0}{C_p}$$

- ♠ C<sub>0</sub>는 입자들이 입구를 찾아서 입사하는 정도를 나타내므로 입구의 면적에 비례함.
- ♠ α는 입자의 종류나 온도 등 외적 요인(이 정보는 C<sub>0</sub> 속에 들어있음)에는 상관없이 도관의 기하학적 구조에만 영향을 받는다.



# 통과확률을 이용한 컨덕턴스(분자류, 고진공)

$$C = \alpha C_0$$

$$C_0 = \frac{A v_{av}}{4} = 36.378 A \left( \frac{T}{M} \right)^{1/2}$$

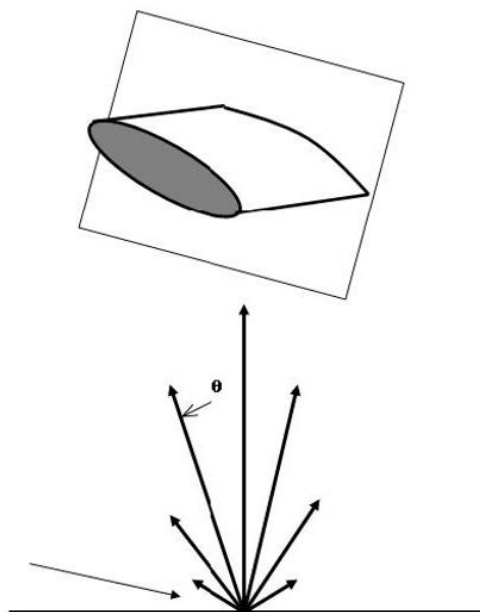
$A$ : 입구 면적  
 $v_{av}$ : 평균속도  
 $T$ : 절대온도  
 $M$ : 분자량

(MKS 단위로 고친 경우)

$\alpha$  : Transmission Probability

Clausing Coefficient or Berman...

(결국  $\alpha$ 는  $C_0$ 와  $C_p$ 의 함수임.  $C_p$ 는 짧은 도관/긴 도관, 원형/비원형 등 기하학적 형상에 따라 비교적 정확한 수식들이 알려져 있음.)



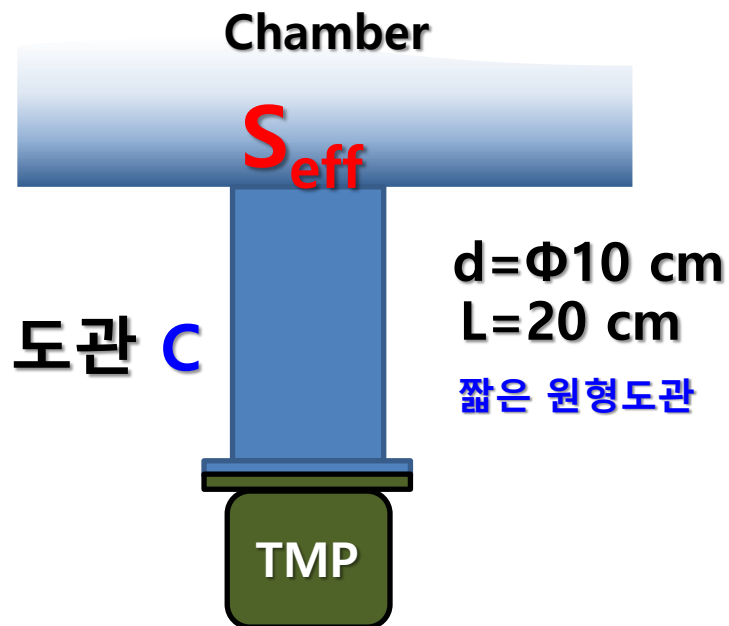
20°C 공기(air) [cm]  
에 대한 컨덕턴스

$$C = 11.6 \alpha A \text{ [l/s]}$$

**Table 5. 분자류-통과확률을 이용한 컨덕턴스**

L/r	L/D	Clausing	Berman	L/r	L/D	Clausing	Berman
0	0	1	#DIV/0!	1.0	0.5	0.67368	0.67198
0.01	0.005	0.99503	0.99502	1.6	0.8	0.56728	0.56651
0.02	0.01	0.99011	0.99010	<b>2.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.51429</b>	<b>0.51423</b>
0.03	0.015	0.98524	0.98522	3.0	1.5	0.41885	0.42006
0.04	0.02	0.98042	0.98039	<b>4.0</b>	<b>2.0</b>	<b>0.35484</b>	<b>0.35658</b>
0.05	0.025	0.97565	0.97561	5.0	2.5	0.30868	0.31053
0.06	0.03	0.97093	0.97088	6.0	3.0	0.27368	0.27546
0.07	0.035	0.96626	0.96619	7.0	3.5	0.24615	0.24776
0.08	0.04	0.96164	0.96155	8.0	4.0	0.22388	0.22530
0.09	0.045	0.95707	0.95695	9.0	4.5	0.20546	0.20669
0.1	0.05	0.95254	0.95240	10	5.0	0.18994	0.19099
0.2	0.1	0.90967	0.90922	20	10	0.10931	0.10938
0.3	0.15	0.87073	0.86993	30	15	0.07716	0.07699
0.4	0.2	0.83521	0.83408	40	20	0.05972	0.05949
0.5	0.25	0.80268	0.80127	50	25	0.04874	0.04851
0.6	0.3	0.77275	0.77115	60	30	0.04118	0.04097
0.7	0.35	0.74513	0.74341	70	35	0.03566	0.03546
0.8	0.4	0.71956	0.71779	80	40	0.03144	0.03127
0.9	0.45	0.69581	0.69404	90	45	0.02812	0.02796
				100	50	0.02543	0.02529
				1000	500	0.00265	0.00265
				$\infty$	$\infty$	8L/3a	8L/3a

## 고진공 영역에서 컨덕턴스와 유효배기속도

최종목표: 유효배기속도  $S_{eff}$ 

TMP 배기속도  $S$  (or  $S_0$ )  
 = 300 [L/s]

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{C_0} \right)$$

20°C 공기 (air) [cm]  
 에 대한 컨덕턴스

입구 효과 고려

$$C = 11.6\alpha A \text{ [l/s]}$$

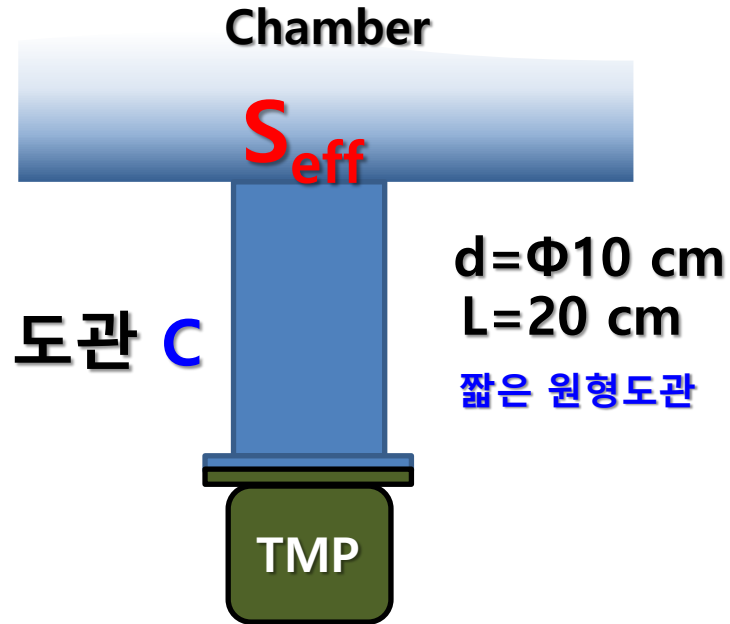
$$C = 11.6(0.35658)(\pi 5^2) \\ = 325 \text{ [L/s]}$$

$$C_0 = 11.6(\pi 5^2) = 911 \text{ [L/s]}$$

$$S_{eff} = 188 \text{ [L/s]}$$

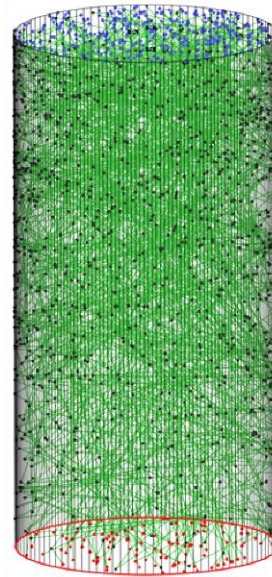
※ Note: 유효배기속도  $S_{eff}$  를 알아야 챔버에 대한 진공해석-펌프 다운 시뮬레이션을 수행 할 수 있음.

## Molflow(+) 2.7.10. 활용한 계산



TMP 배기속도  $S$  (or  $S_0$ )  
= 300 [L/s]

#1 Facet



#2 Facet

#2 Facet- Sticking Factor=1.0  
(Pumping Speed=923.6L/s)

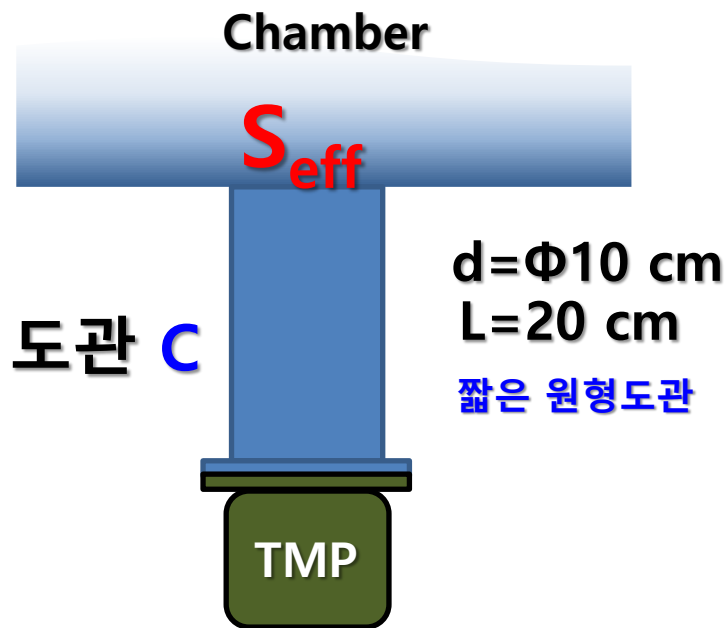
Item	Value	Remark
Gas Type	28	N2
Trans. Prob.(a)	0.3565	=Berman
Co	920.305	[L/s]
C	328.088	[L/s]

#2 Facet- Pumping Speed=300 L/s  
(Sticking Factor=0.324818)

Item	Value	Remark
Gas Type	28	N2
Pumping. Prob.(b)	0.204611	
Co	920.322	[L/s]
$S_{eff}$	188.308	[L/s]



## VacTran(3.47)을 활용한 계산



TMP 배기속도  $S$ (or  $S_0$ )  
= 300 [L/s]

VacTran

File Edit Model Defaults Graphs Tools Window Help

Main Text Window

Gas load palette

Conductance palette

Apertures Cones

User data Combinations

Series Conductance Model: Untitled

Conductances in Series Model data

0 Series conductances:

Conductance Volume: 0 Liters  
Volume multiplied by 1 = 0 Liters

Multiply by: 1

Conductance palette

Apertures Cones Pipes

User data Combinations Bends

Use pipe library  
Move with model

Help

Enter pipe data

Data Entry Use Library Use Recent Entry Entrance Detail Summary

Length 20.0 Inside Diameter 10.0 Quantity 1

Cm Cm

Exit loss  
Entrance loss

End effects

Entry from larger diameter or randomizing conductance

Exits to a much larger diameter conductance

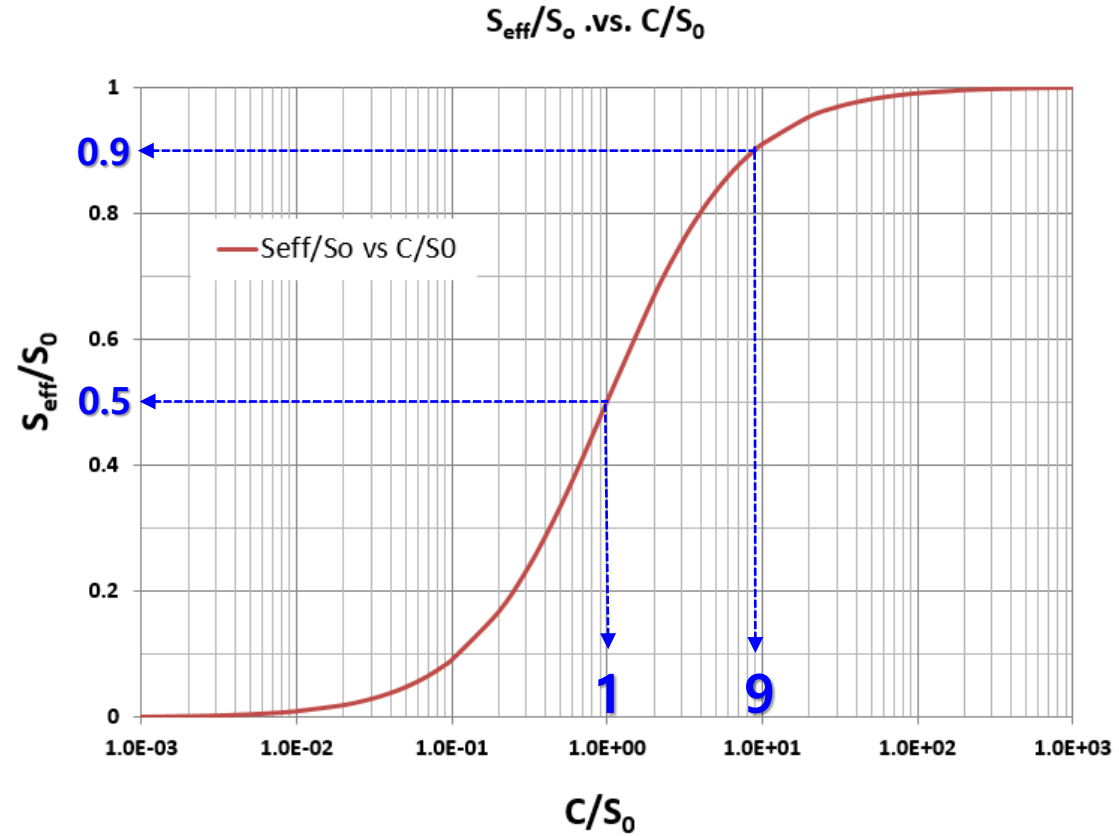
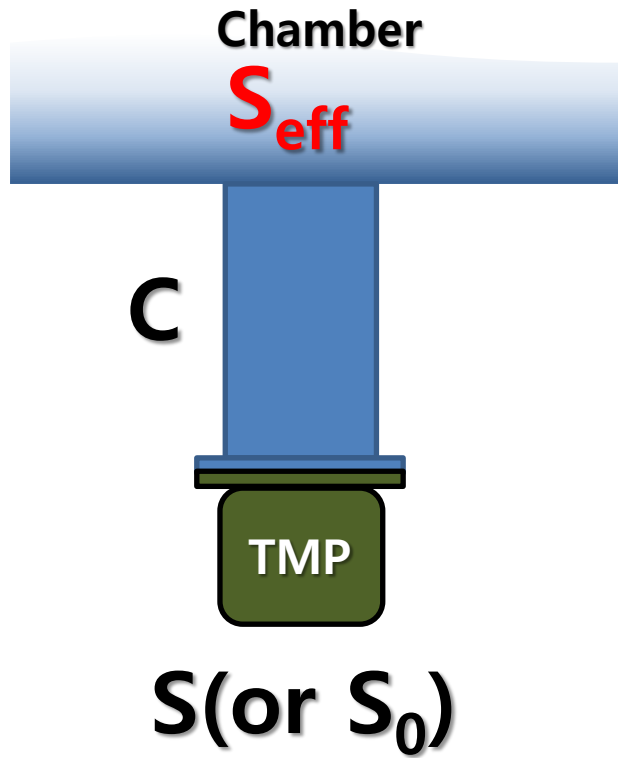
Combined alpha = 0.354838710  
(= Clausing)

OK Cancel Help

Format: 0.0  
Decimal Scientific

Molecular Flow Conductance =  
3.113677079E+02 [L/s]

Fig. 5 컨덕턴스와 유효배기속도



👉 실용성과 비용고려!

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_0}$$

## - III 부 -

1. 진공펌프의 용량선정과 예  
(압력에 따른 배기속도 변화)
2. 배기시간 계산식 도출과 예

## 진공 펌프 용량 선정

### ♠ 진공 펌프의 용량을 선정 시,

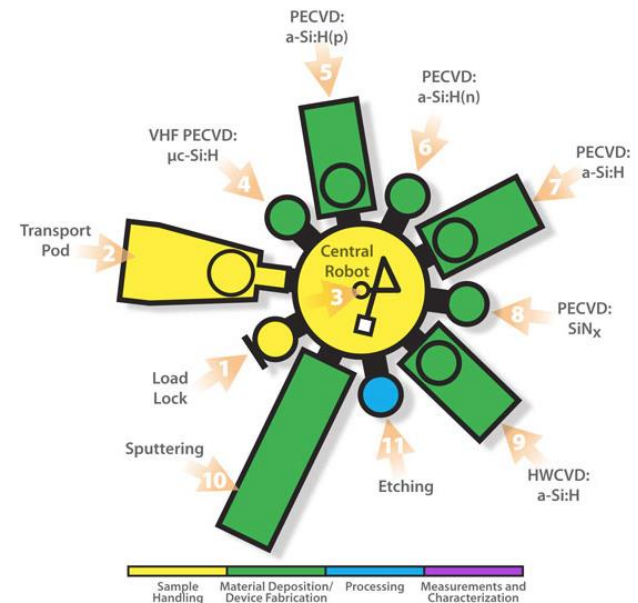
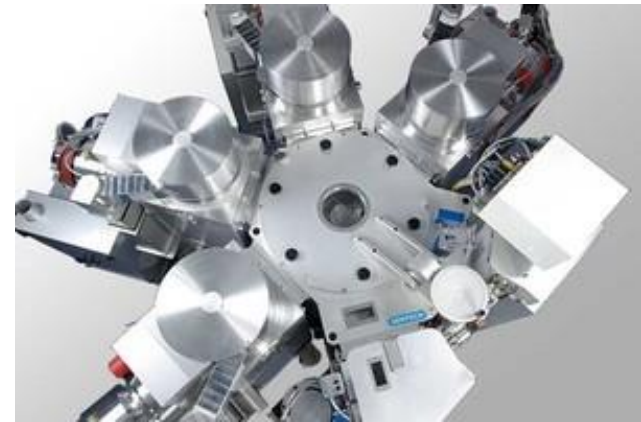
- 1) 로드락(loadlock) 챔버
- 2) 프로세스(process) 챔버
- 3) 트랜스퍼(transfer) 챔버(세분화 필요 시)  
로 구분하여 검토함.

#### 1) 로드락(loadlock) 챔버

- 로드락 챔버에서 진공펌프의 역할은 대기압(1atm)부터 미리 정해진 특정 압력(target pressure)까지 정한 **시간** 내에 도달하도록 하는 것.

#### 2) 프로세스(process) 챔버

- 공정 챔버에서 진공 펌프의 역할은 정해진 **유량**의 가스를 챔버에 투입할 때 특정 압력(진공도)를 안정적으로 유지하는 것.
- ALD 공정인 경우 짧은 **시간** 내에 자주 발생하는 가스 펄스에 대한 배기를 고려해야 함.



<Cluster Chamber Example>

## 로드락 챔버용 입력 파라미터

### ♠ 챔버 체적

- 체적이 커지면 배기 시간이 길어짐. 진공 펌프가 받는 초기 부하도 커짐.

### ♠ 챔버 내부 표면적

- 도달압력이 낮을 수록 중요. 통상 0.5Torr(66Pa) 이하까지 도달해야 할 경우 중요.

### ♠ 챔버 내부 구조물(다른 장치) 유무

- 운송용 로봇 또는 기구, 구조물, 체적 줄이기 위한 블록 등 표면방출 발생원 유무

### ♠ 챔버 재질(표면방출, outgassing 관련)

- STS, AI 등 도달 압력이 낮을 수록 중요.

### ♠ 포어라인(foreline) 사양

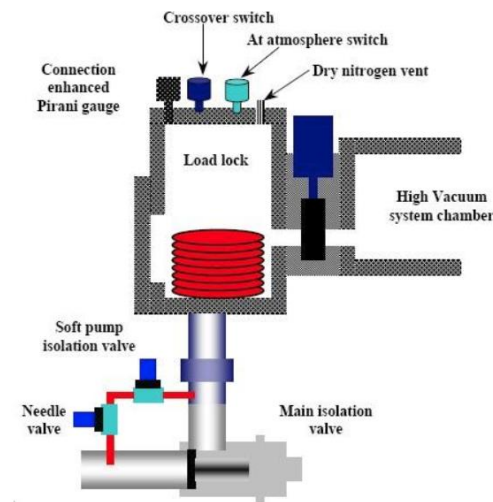
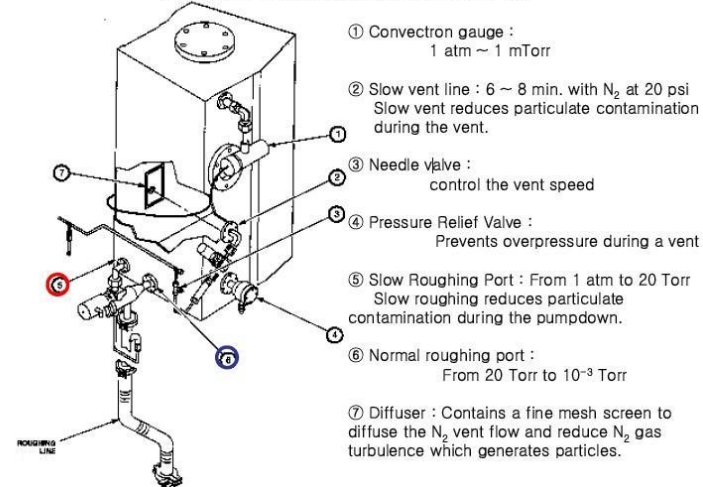
- 재질, 직경, 길이, 밴드 수

### ♠ 저속배기(slow pumping, soft start)

- 저속배기 라인의 직경, 길이, 저속배기 시간, 저속배기 시 목표압력
- 로드락 챔버 내의 수분 응축 및 파티클 오염 문제

## <Slow Pumping의 예>

P5000 Loadlock chamber



※출처:

[https://m.blog.naver.com/lee\\_jinhwan/50174066574](https://m.blog.naver.com/lee_jinhwan/50174066574)



## 공정(프로세스)챔버용 입력 파라미터

### ♠ 포어라인(foreline) 사양

- 재질, 직경, 길이, 밴드 수, 포어라인 트랩 사용 유무

### ♠ 공정 가스 종류 및 그 사용량

- 공정 스텝이 여러 단계인 경우, 가스량을 가장 많이 사용하거나 가장 낮은 압력을 유지해야 하는 스텝에서 요구하는 가스량 및 종류
- H<sub>2</sub>, He 등 가벼운 가스의 사용 유무 및 사용량
- 유지하기를 원하는 공정압력.

### ♠ 사이클릭 배기 또는 퍼지 유무

- ALD 공정처럼 반복적인 배기 과정에 따른 부하

### ♠ 챔버 클리닝 스텝과 관련된 정보

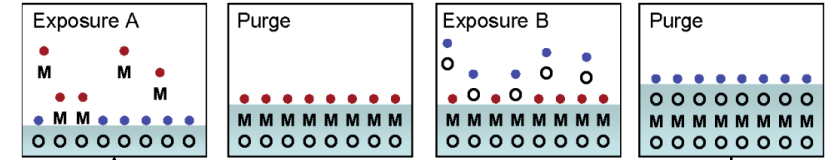
- 클리닝 가스의 종류 및 사용량
- 클리닝 시 유지해야 하는 압력: 증착 스텝보다 클리닝 스텝에서 압력이 더 낮은 경우도 있음

### ♠ 진공 코터(coater)/ 디벨러퍼(developer)

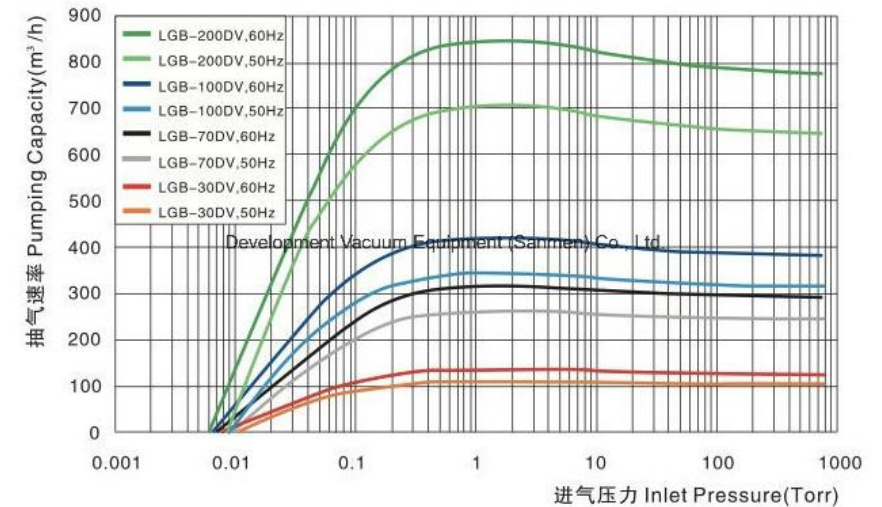
- 사용되는 PR종류 및 도포량

### ♠ 진공장비가 설치/가동될 지역의 전기사양(주파수)

- 50Hz 또는 60Hz에 따라 진공펌프 성능에 차이 발생 (인버터 사용 시 성능보완 가능)



<An idealized view of the atomic layer deposition (ALD) process cycle.>



<https://kr.made-in-china.com>

<스크루 진공 펌프 성능곡선, 50Hz vs 60Hz>

## 연습문제 (1)

♠ 다음 물음에 대해 옳은 것은 O, 틀린 것은 X 표를 하시오

- O (1) 로드락 챔버와 프로세스 챔버에서 진공 펌프가 해야 할 일은 다르다.
- X (2) 진공 펌프 용량을 선정할 때에 로드락 챔버와 프로세스 챔버를 구분할 필요가 없다.
- O (3) 로드락 챔버에서는 대기압부터 목표압력까지 도달하는 데 걸리는 시간과 그 목표 압력이 주요 결정 인자이다.
- X (4) 프로세스 챔버용 진공 펌프 용량 선정에는 로드락 챔버처럼 배기 시간이 중요한 결정인자이다.
- O (5) 같은 용량을 가진 진공 펌프가 로드락 챔버와 프로세스 챔버에 사용될 때 소비 전력은 로드락 챔버 용 펌프가 더 많다.
- X (6) 저속배기(slow pumping) 스텝은 프로세스 챔버에 적용되는 스텝이다.

# 진공 펌프 용량 선정을 위한 시뮬레이션 모델

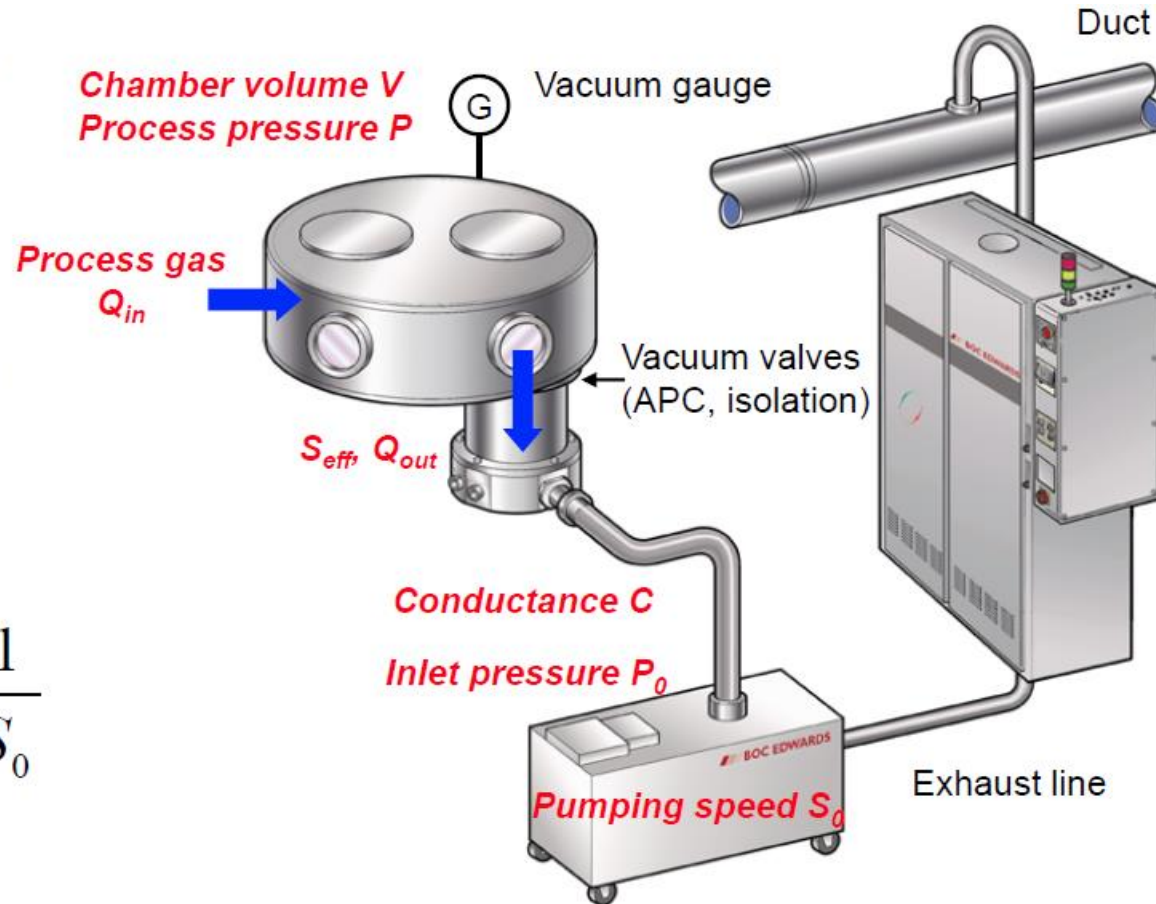
\* 배관이 없는 경우

$$S_0 = \frac{Q_{in}}{P_0} = \frac{Q_{in}}{P}$$

\* 배관이 있는 경우

$$S_{eff} = \frac{Q_{in}}{P}$$

$$cf \cdot \frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_0}$$



$$1 \text{ mbar} \cdot \ell / \text{sec} = 0.75 \text{ Torr} \cdot \ell / \text{sec} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} = 60 \text{ sccm}$$

## 연습문제 (2)

Q(2) 진공 시스템에 100 sccm의 가스를 사용하면서 진공도를 75 mTorr를 유지하고자 할 때, 필요한 최소 배기속도는 얼마인가? (단, 배관은 없다고 가정하라)

$$S_0 = \frac{Q_{in}}{P_0} \quad \text{를 이용하면} \quad Q_{in} = 100 \text{ sccm} (= 1.25 \text{ Torr} \cdot \text{l} / \text{sec})$$

$$Q_{in} = P_0 \times S_0$$

$$100 \text{ sccm} \times \frac{0.75 \text{ Torr} \cdot \text{l} / \text{sec}}{60 \text{ sccm}} = 7.5 \times 10^{-2} \text{ Torr} \times S (\text{l} / \text{sec})$$

$$\therefore S = 16.67 \text{ l} / \text{sec} = 1000 \text{ l} / \text{min} = 60 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

※ Note: 유량 단위(sccm, slm, slpm)에서 s는 'standard' 즉 표준조건(0°C, 1기압)을 의미함.

## 연습문제 (3)

Q(3) 어떤 공정을 진행하는 챔버에서 1.0 mbar의 압력을 유지하기 위해 150 m<sup>3</sup>/hr의 배기속도가 필요하다. 그러나 챔버와 펌프는 6m 떨어진 거리에 설치되어야 한다. 이때 챔버와 펌프를 연결하는 배관의 직경은 얼마가 되어야 하는가? (단, 전기사양은 50Hz)

(풀이) 펌프 E1M175 모델은 1mbar에서 135m<sup>3</sup>/hr(50Hz)의 배기속도를 가진다. 따라서 챔버와 펌프를 연결하는 배관에서의 손실을 고려하지 않더라도 이 공정 조건에는 적합하지 않다.

E1M275는 1mbar에서 230m<sup>3</sup>/hr(50Hz)의 배기속도를 가진다. 따라서 이 펌프를 챔버에 연결한다면 컨덕턴스, C는 다음과 같은 값을 가진다.

조건에서  $S_{eff}=150$   
이어야 한다!

$$\frac{1}{150m^3/hr} = \frac{1}{C} + \frac{1}{230m^3/hr}$$

$$\therefore C = 431m^3/hr$$

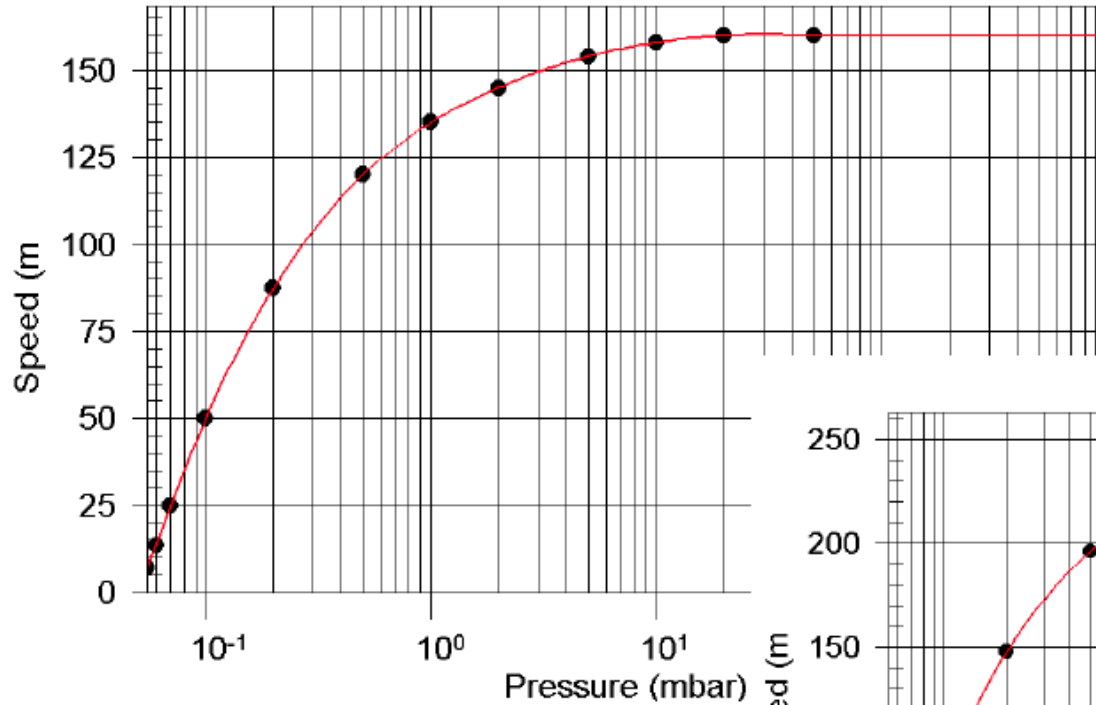
$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_0}$$

그런데 이 컨덕턴스는 6m 배관에 대한 컨덕턴스이므로 1m 배관에 대해서는 6배의 컨덕턴스 값을 가져야 한다. 즉,  $431m^3/hr \times 6m = 2586m^3/hr$ .



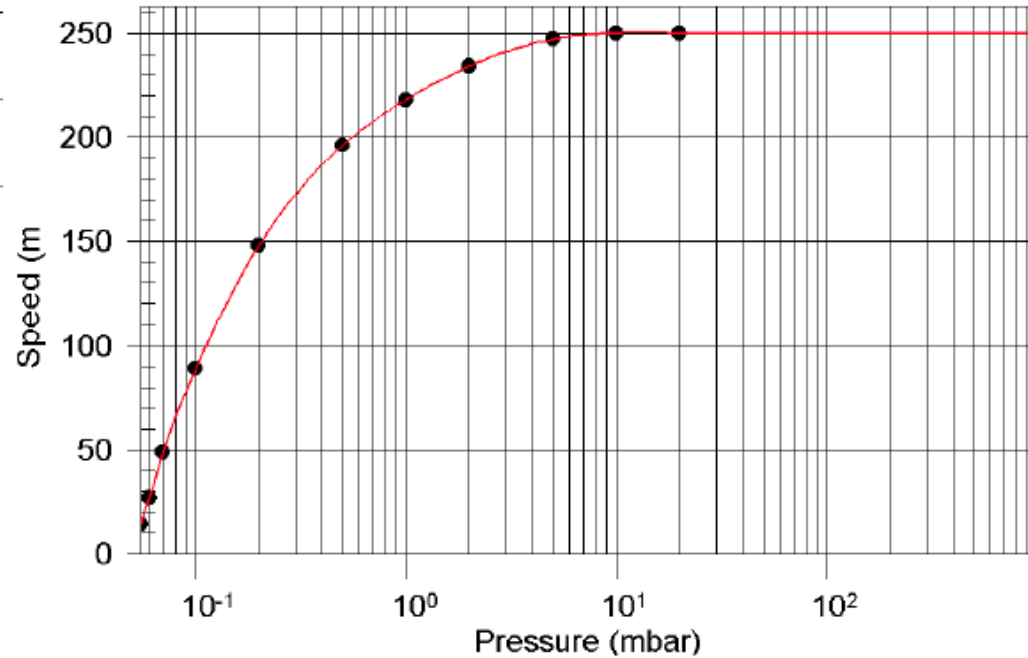
## 연습문제 (3)-계속

E1M175 50Hz



로타리 펌프의 성능곡선  
(압력에 따른 배기속도)

E1M275 50Hz



성능곡선(배기속도)은 압력의 함수!  
(배기속도는 상수가 아니다!)

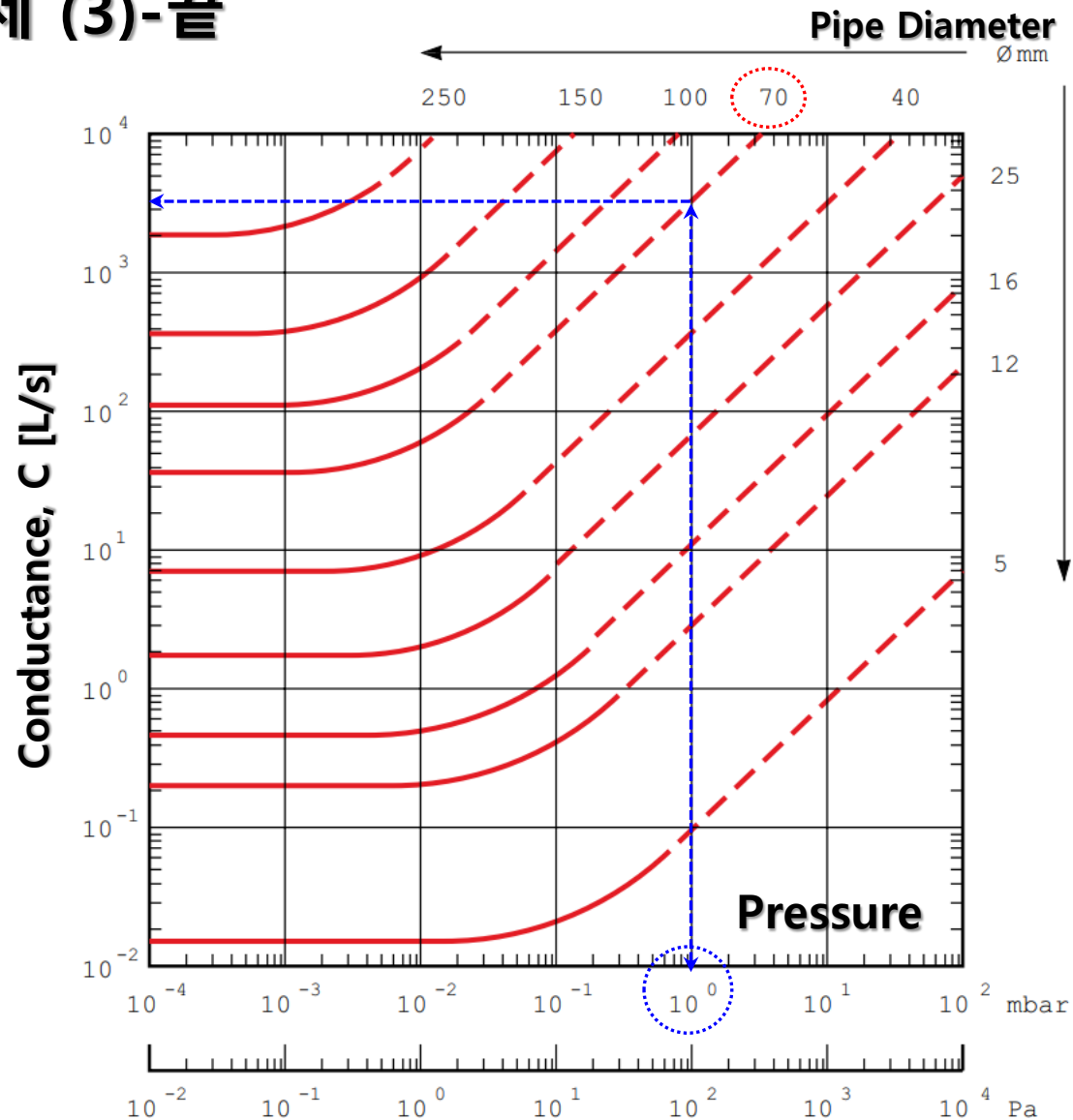
## 연습문제 (3)-끝

<Conductance of 1 m of round pipe, for air at 20 °C>

(the data shown in the dotted portions of the curves is for low velocity, viscous, laminar flow in long pipes)

좌측 컨덕턴스 그래프에서 1mbar에서 2586m<sup>3</sup>/hr의 컨덕턴스를 유지할 수 있는 배관은 그 직경이 70mm 임. 따라서 챔버와 펌프를 연결하는 배관의 직경은 최소 70mm 이상이어야 함. 다행히 이 값은 E1M275 모델의 입구부 직경과 동일하다.

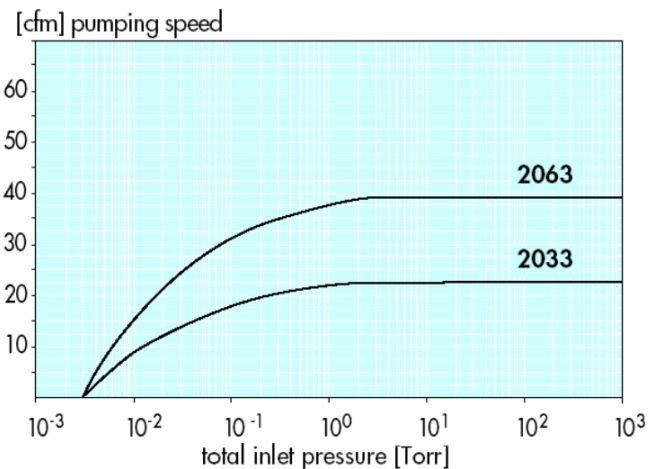
☞ **압력이 높을 때는 점성류 영역이면서 배관의 컨덕턴스가 워낙 크기 때문에 압력이 낮을 때에 비해 컨덕턴스 영향을 적게 받는다.**



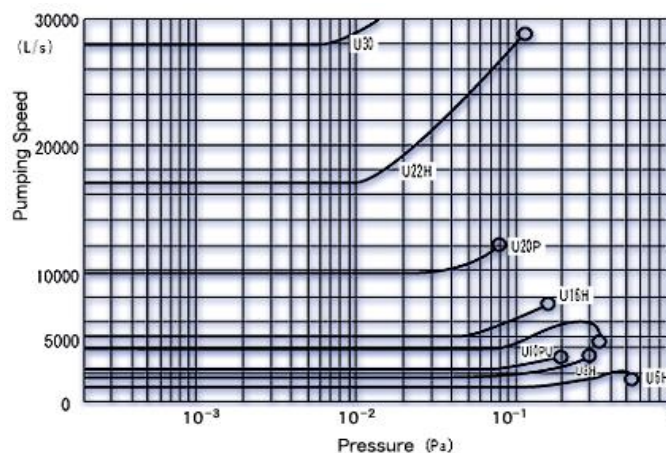
출처: Edwards Product Catalogue

# Pumping curves for 4 types of vacuum pumps.

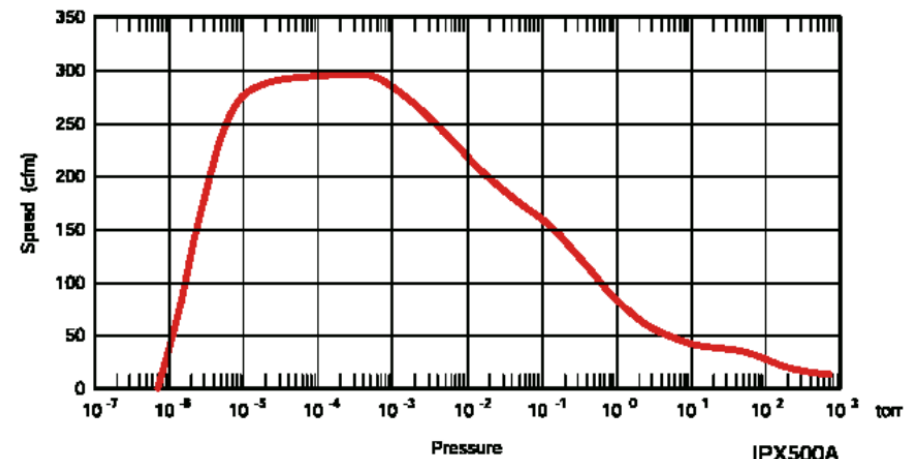
전형적인  
진공펌프의  
압력변화에 따른  
배기성능곡선



Rotary vane pumps

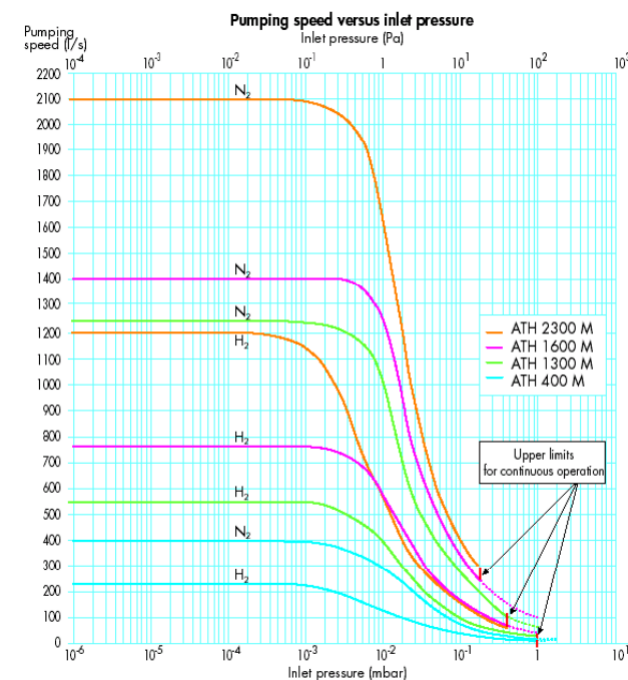


Cryopumps



Dry pump

TMPs



## 배기 시간 계산(유도식)-(1)

$$V \frac{dp}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

$$\textcircled{1} \quad V \frac{dp}{dt} = Q_{in} - P \times S_{eff} \quad \because Q_{out} = P \times S_{eff}$$

$$(X = Q_{in} - P \times S_{eff} \Rightarrow dX = -S_{eff} \times dP)$$

$$\textcircled{2} \quad \Rightarrow \frac{dP}{Q_{in} - P \times S_{eff}} = \frac{1}{V} dt$$

$$\textcircled{3} \quad \Rightarrow \frac{-\frac{1}{S_{eff}} dX}{X} = \frac{1}{V} dt \Rightarrow \frac{dX}{X} = -\frac{S_{eff}}{V} dt$$

기체상태방정식

$PV=NkT$  (Unit: J, 에너지)

진공 챔버의 체적 V는 고정

챔버 내의 압력이 시간에 따라 변함

▶  $V \cdot dP/dt$ 의 물리적 의미: J/s  $\equiv$  W, 에너지 흐름

▶  $Q(\text{유량})=P \cdot S$ 의 물리적 의미: N/m<sup>2</sup>·m<sup>3</sup>/s  $\equiv$  J/s...

## 배기 시간 계산(유도식)-(2)

양변을 적분하면

$$\textcircled{4} \quad \ln X = -\frac{S_{eff}}{V}t + const \Rightarrow X = A \exp\left(-\frac{S_{eff}}{V}t\right) \quad X = Q_{in} - P \times S_{eff}$$

$t=0$ 일 때,  $A = Q_{in} - P_0 S_{eff}$ 임으로 압력  $P$ 는 시간에 따라 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\textcircled{5} \quad \therefore P(t) = \frac{Q_{in}}{S_{eff}} + \left(P_0 - \frac{Q_{in}}{S_{eff}}\right) \exp\left(-\frac{S_{eff}}{V}t\right)$$

압력  $P_0$ 에서 시간  $t$ 내에 압력  $P$ 까지 배기하는데 걸리는 시간은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\textcircled{6} \quad t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \left( \frac{P_0 - \frac{Q_{in}}{S_{eff}}}{P - \frac{Q_{in}}{S_{eff}}} \right) = \frac{V}{S_{eff}} \ln \left( \frac{P_0 - P_b}{P - P_b} \right) \quad \because P_b = \frac{Q_{in}}{S_{eff}}$$



## 배기 시간 계산(유도식)-(3)

이 식에서  $Q_{in} = 0$ , 즉 chamber에 투입되는 가스가 없고 outgassing, leakage가 없다고 가정하면  $P_b = Q_{in}/S_{eff} = 0$ 임으로

$$\therefore t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \left( \frac{P_0}{P} \right)$$

$\ln x = 2.3 \log x$  임으로

$$\therefore t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$

Therefore, the solutions derived are valid for all pressures from UHV to above atmospheric pressure as long as the conditions of constant gas temperature, constant flow, and constant pumping speed are fulfilled.

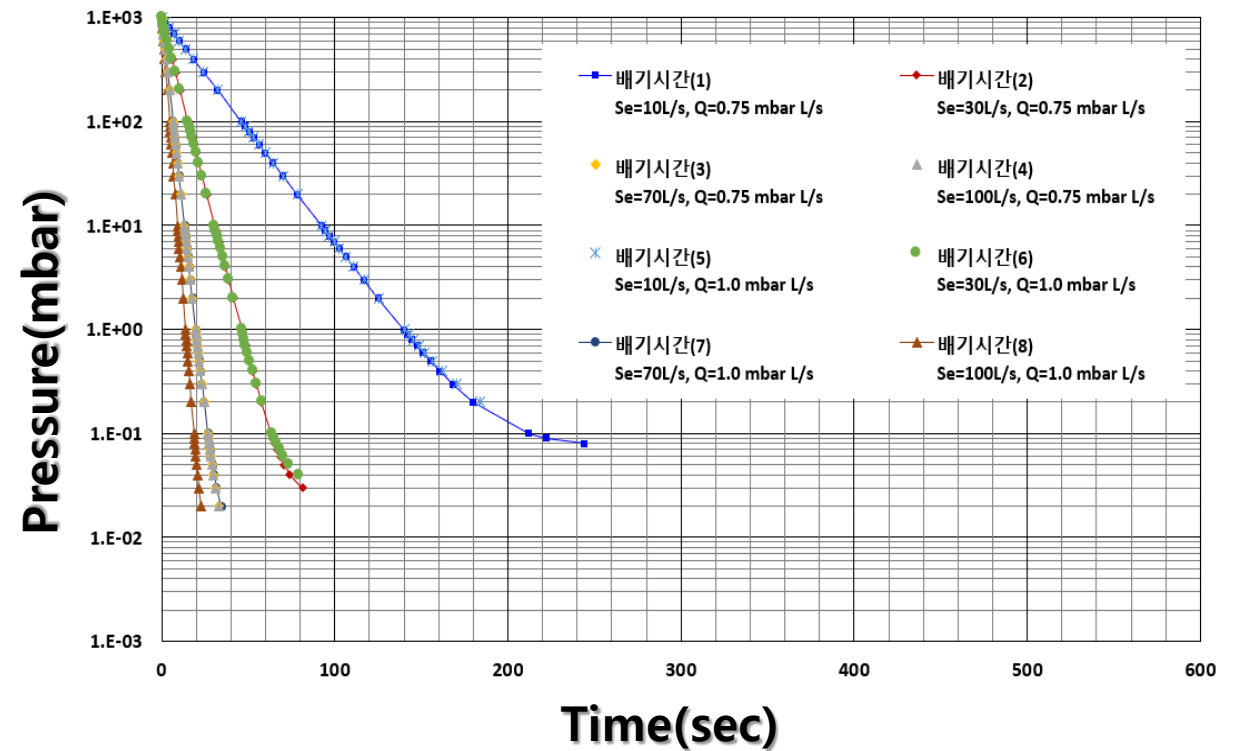
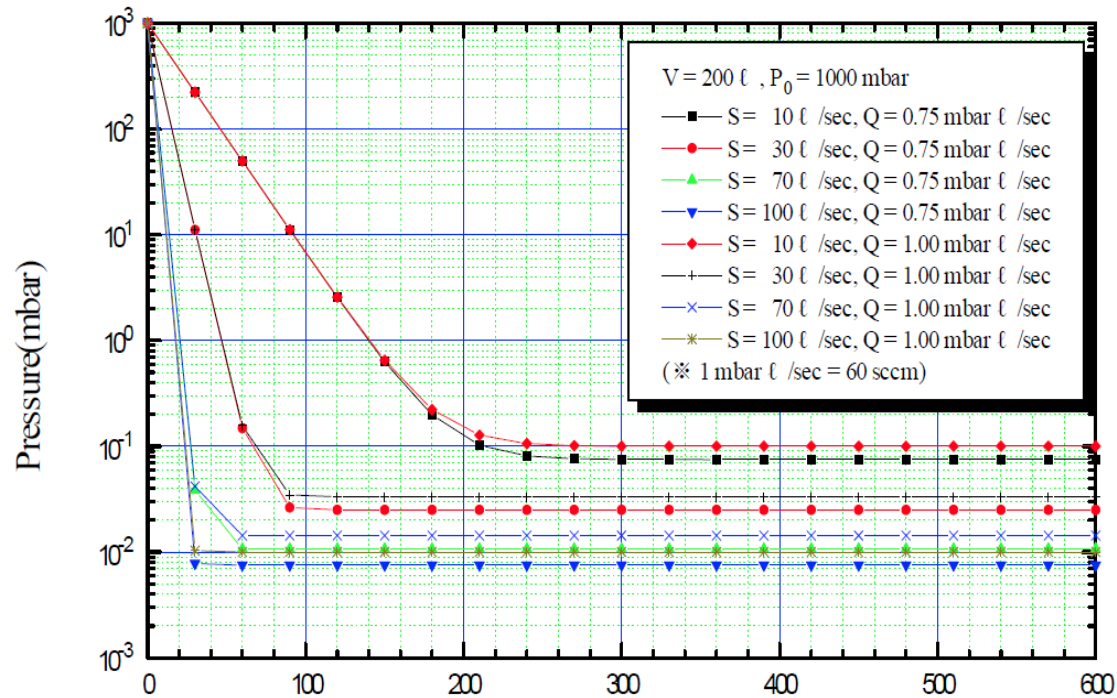
### 주의 사항

- 배기 과정 중에는 가스 온도 변화가 있음
- 유입되는 가스량이 변할 수 있음(leak rate, outgassing rate 등) :  $Q_{in} \neq 0$ ,  $Q_{in} = Q(t)$
- 진공 펌프의 배기 속력은 압력에 따라 일정하지 않음.

## 배기 시간 계산 결과(챔버 체적: 200L)

$$P(t) = \frac{Q_{in}}{S_{eff}} + \left( P_0 - \frac{Q_{in}}{S_{eff}} \right) \exp\left( -\frac{S_{eff}}{V} t \right)$$

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \left( \frac{P_0 - \frac{Q_{in}}{S_{eff}}}{P - \frac{Q_{in}}{S_{eff}}} \right) \text{ Time(sec)}$$



## 연습문제 (4)

Q(4) 챔버 체적이 200 L, 초기 압력  $P_0 = 1000$  mbar, 입력 유량  $Q_{in} = 45$  sccm이다.  
 펌프의 유효배기속도  $S_{eff}$ 가 각각 10 L/s, 30 L/s, 50 L/s라면, 챔버의 압력이 10초, 50초,  
 100초, 150초, 200초, 250초, 300 초 후에 얼마가 될지 계산하시오.

$$P(t) = \frac{Q_{in}}{S_{eff}} + \left( P_0 - \frac{Q_{in}}{S_{eff}} \right) \exp\left( -\frac{S_{eff}}{V} t \right)$$

	V[L]	P0[mbar]	Qin[mbar L/s]
	200	1000	0.75
	P[mbar]		
시간(t)	S_eff [L/s]		
[s]	10	30	50
10	606.560	223.150	82.099
50	82.154	0.578	0.019
100	6.812	0.025	0.015
150	0.628	0.025	0.015
200	0.120	0.025	0.015
250	0.079	0.025	0.015
300	0.075	0.025	0.015

## - IV 부 -

# 배기 시간 계산(예)

### 1. 배기시간 계산

- 해석적 계산
- Vactran 프로그램을 활용한 계산

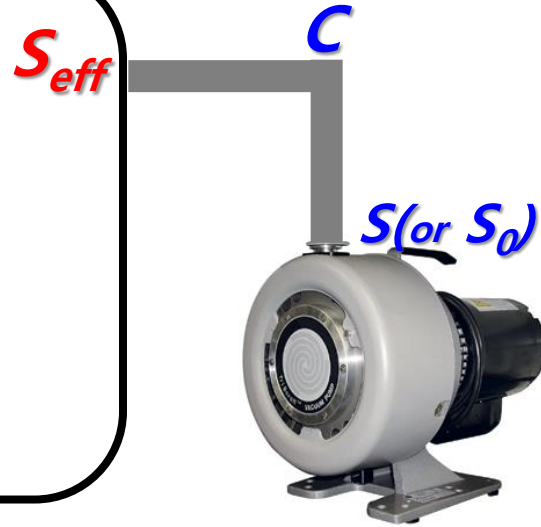
$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$

## 해석적 방법

Vacuum Chamber

$V=800$  [L]

$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$



No.	구분-압력 [Torr]	배기속도	도관(C)	비고	결과 [t]
I	760→100 100→10 10→1 1→0.1	$S=\text{constant}$ $=500\text{L/s}$	없음	S:일정(최대값)	? [s]
II		$S=S(P)$ 평균값	없음	S: 압력의존	? [s]
III		$S=S(P)$ 평균값	있음, $C=\text{constant}$ $=400\text{L/s}$	C: 일정	? [s]
IV		$S=S(P)$ 평균값	있음, $C=C(P)$ I.D.=4cm, L=100cm	C: 압력의존	? [s]

주의  $S=S_{eff}$



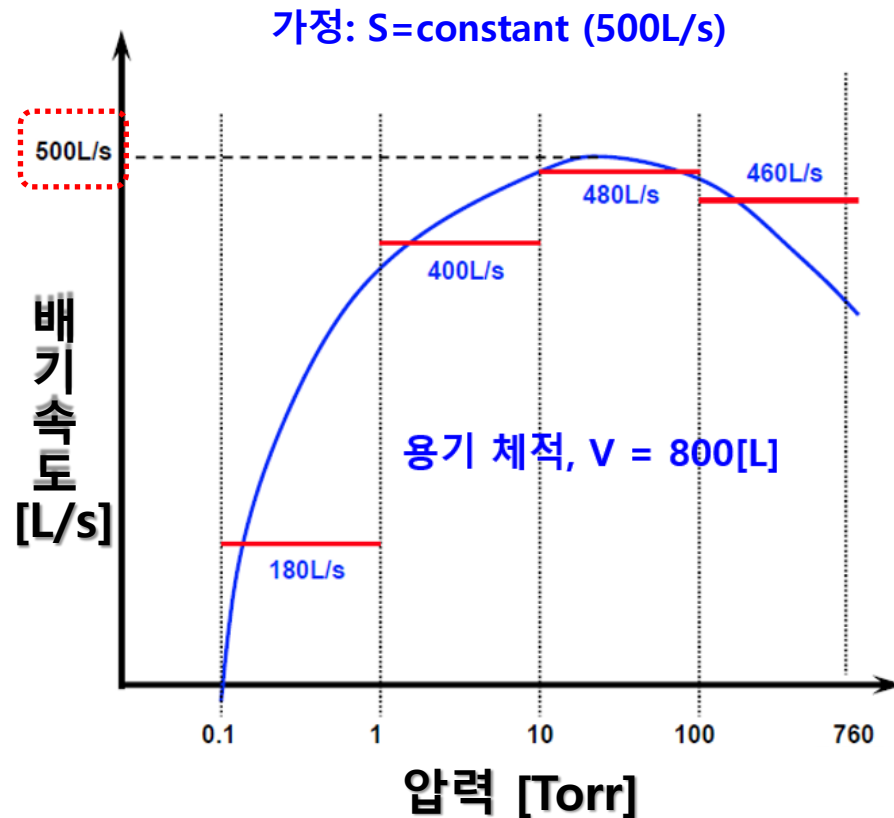
# I. 배기시간 계산-배기속도(S)가 일정하다고 가정한 경우

♠ 오른쪽 그래프와 같은 배기속도 곡선을 갖는 진공펌프가 있다. 이 진공펌프를 이용하여 체적이 800L인 로드 락 챔버를 대기압부터 0.1 Torr까지 배기하는데 걸리는 시간은 얼마인가?

단, 이 펌프는 챔버와 도관 없이 직접 연결되어 있고, 계산의 편의를 위해 배기속도를 압력구간에 관계없이 최대 배기속도(500L/s)로 일정하다고 가정하라.

$$t_{gross}(P) = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log\left(\frac{P_0}{P}\right)$$

$$= 2.3 \frac{800L}{500L/s} \log\left(\frac{760Torr}{0.1Torr}\right) \cong 14.3s$$



## II. 배기시간 계산-압력에 따른 배기속도(S) 변화를 고려한 경우

♠ 오른쪽 그래프와 같이 실제 배기속도 곡선은 압력에 따라 다르다. 따라서 더 정확한 값을 얻기 위해 압력을 구간별로 나누고 각 구간별 평균 배기속도를 적용하는 것이 보다 합리적이다. 챔버를 대기압부터 0.1 Torr까지 배기하는데 걸리는 시간을 다시 계산하시오. 단, 이 펌프는 도관 없이 챔버와 직접 연결되어 있다고 가정하라.

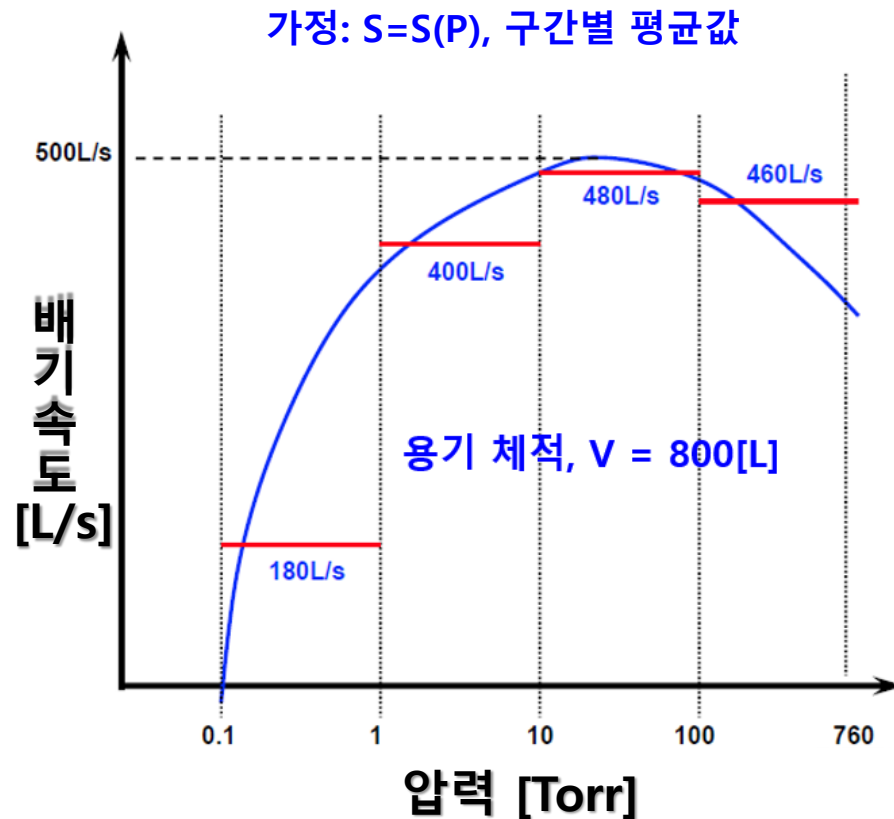
$$t_{760 \rightarrow 100} = 2.3 \frac{800L}{460L/s} \log\left(\frac{760Torr}{100Torr}\right) \cong 3.5s$$

$$t_{100 \rightarrow 10} = 2.3 \frac{800L}{480L/s} \log\left(\frac{100Torr}{10Torr}\right) \cong 3.8s$$

$$t_{10 \rightarrow 1} = 2.3 \frac{800L}{400L/s} \log\left(\frac{10Torr}{1Torr}\right) \cong 4.6s$$

$$t_{1 \rightarrow 0.1} = 2.3 \frac{800L}{180L/s} \log\left(\frac{1Torr}{0.1Torr}\right) \cong 10.2s$$

$$t_{total} = 3.5 + 3.8 + 4.6 + 10.2 \cong 22.1s$$



### III. 배기시간 계산-배기속도(S) 변화+컨덕턴스(C=일정)를 고려한 경우

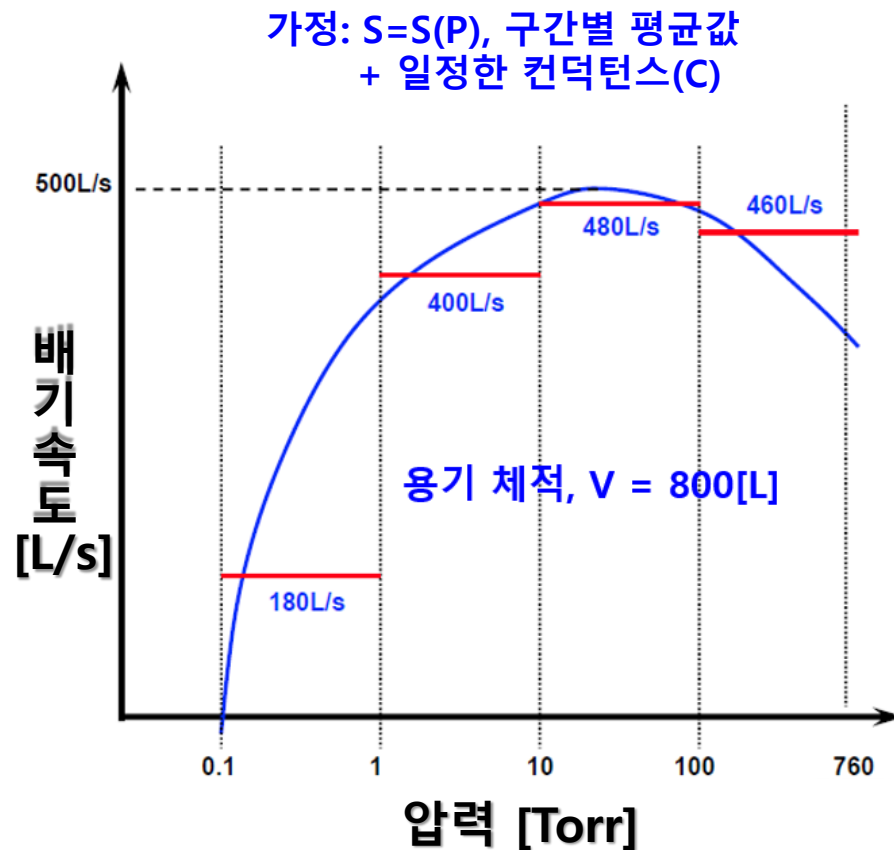
♠ 앞의 예제(II)에서 챔버와 펌프가  $C=400L/s$ 로 일정한 컨덕턴스를 가지는 배관으로 연결되어 있다고 가정하면, 대기압에서 0.1 Torr까지 배기하는데 걸리는 시간을 다시 계산하시오.

▶ 먼저 각 구간별로 유효배기속도( $S_{eff}$ )를 구하면,

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_0}$$

$$\frac{1}{S_{eff(760 \rightarrow 100)}} = \frac{1}{400L/s} + \frac{1}{460L/s}$$

- 480L/s
- 400L/s
- 180L/s



$$S_{eff(760 \rightarrow 100)} = 214.0L/s$$

$$S_{eff(10 \rightarrow 1)} = 200.0L/s$$

$$S_{eff(100 \rightarrow 10)} = 218.2L/s$$

$$S_{eff(1 \rightarrow 0.1)} = 124.1L/s$$

### III. 배기시간 계산-배기속도(S) 변화+컨덕턴스(C=일정)를 고려한 경우

▶ (계속) 압력 구간별로 구한 유효배기속도를 활용하여 배기시간을 다시 계산하면 다음과 같다.

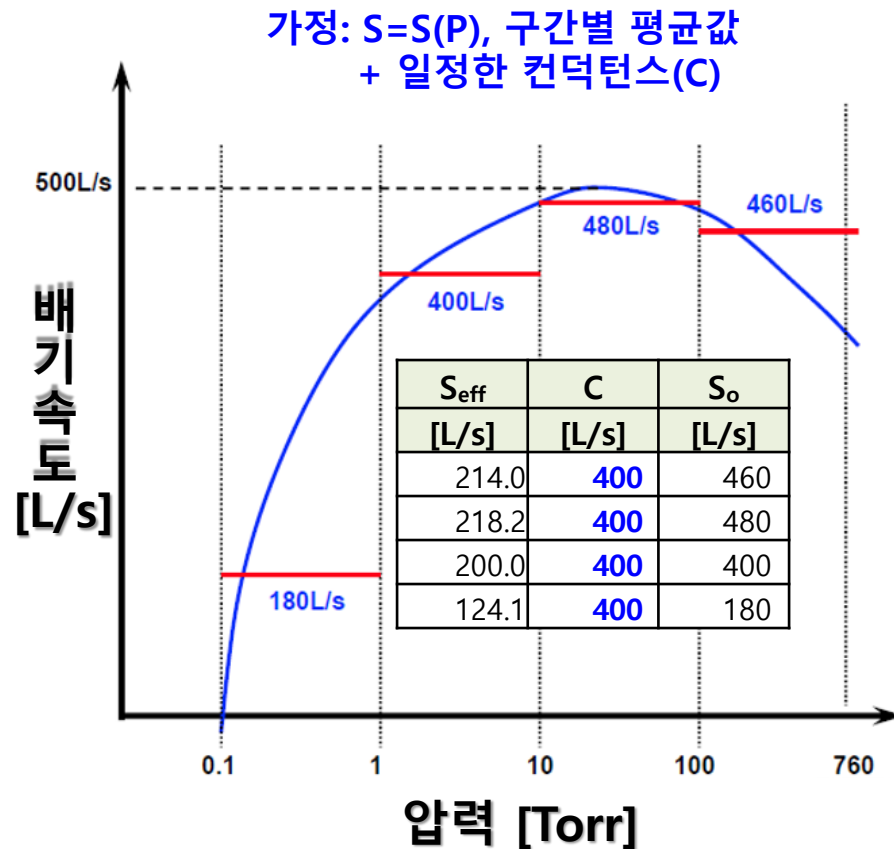
$$t_{760 \rightarrow 100} = 2.3 \frac{800L}{214L/s} \log\left(\frac{760Torr}{100Torr}\right) \cong 7.6s$$

$$t_{100 \rightarrow 10} = 2.3 \frac{800L}{218.2L/s} \log\left(\frac{100Torr}{10Torr}\right) \cong 8.4s$$

$$t_{10 \rightarrow 1} = 2.3 \frac{800L}{200L/s} \log\left(\frac{10Torr}{1Torr}\right) \cong 9.2s$$

$$t_{1 \rightarrow 0.1} = 2.3 \frac{800L}{124.1L/s} \log\left(\frac{1Torr}{0.1Torr}\right) \cong 14.8s$$

$$t_{total-con1} = 7.6 + 8.4 + 9.2 + 14.8 \cong 40.0s$$



## IV. 배기시간 계산-배기속도(S) 변화+컨덕턴스(C=C(P))를 고려한 경우

$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad \frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S}$$

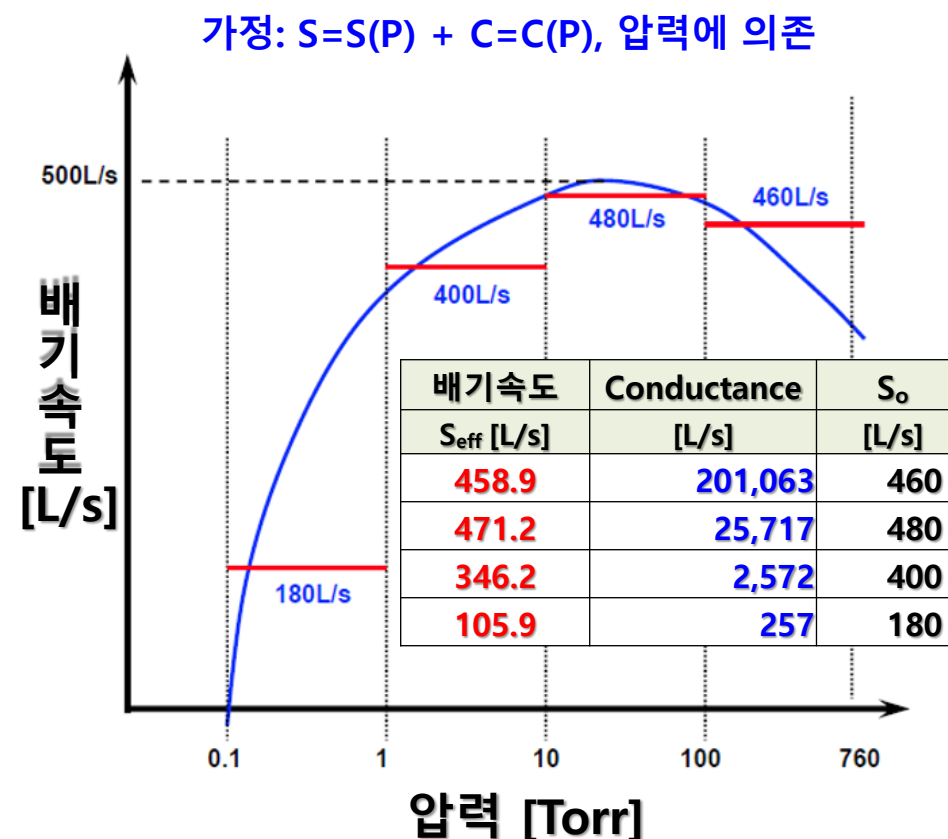
$$t_{760 \rightarrow 100} = 2.3 \frac{800L}{458.9L/s} \log\left(\frac{760Torr}{100Torr}\right) \cong 3.5s$$

$$t_{100 \rightarrow 10} = 2.3 \frac{800L}{471.2L/s} \log\left(\frac{100Torr}{10Torr}\right) \cong 3.9s$$

$$t_{10 \rightarrow 1} = 2.3 \frac{800L}{346.2L/s} \log\left(\frac{10Torr}{1Torr}\right) \cong 5.3s$$

$$t_{1 \rightarrow 0.1} = 2.3 \frac{800L}{105.6L/s} \log\left(\frac{1Torr}{0.1Torr}\right) \cong 17.4s$$

**배기시간 합계,  $t = 30.1s$**





## IV. 배기시간 계산-배기속도(S) 변화+컨덕턴스( $C=C(P)$ )를 고려한 경우

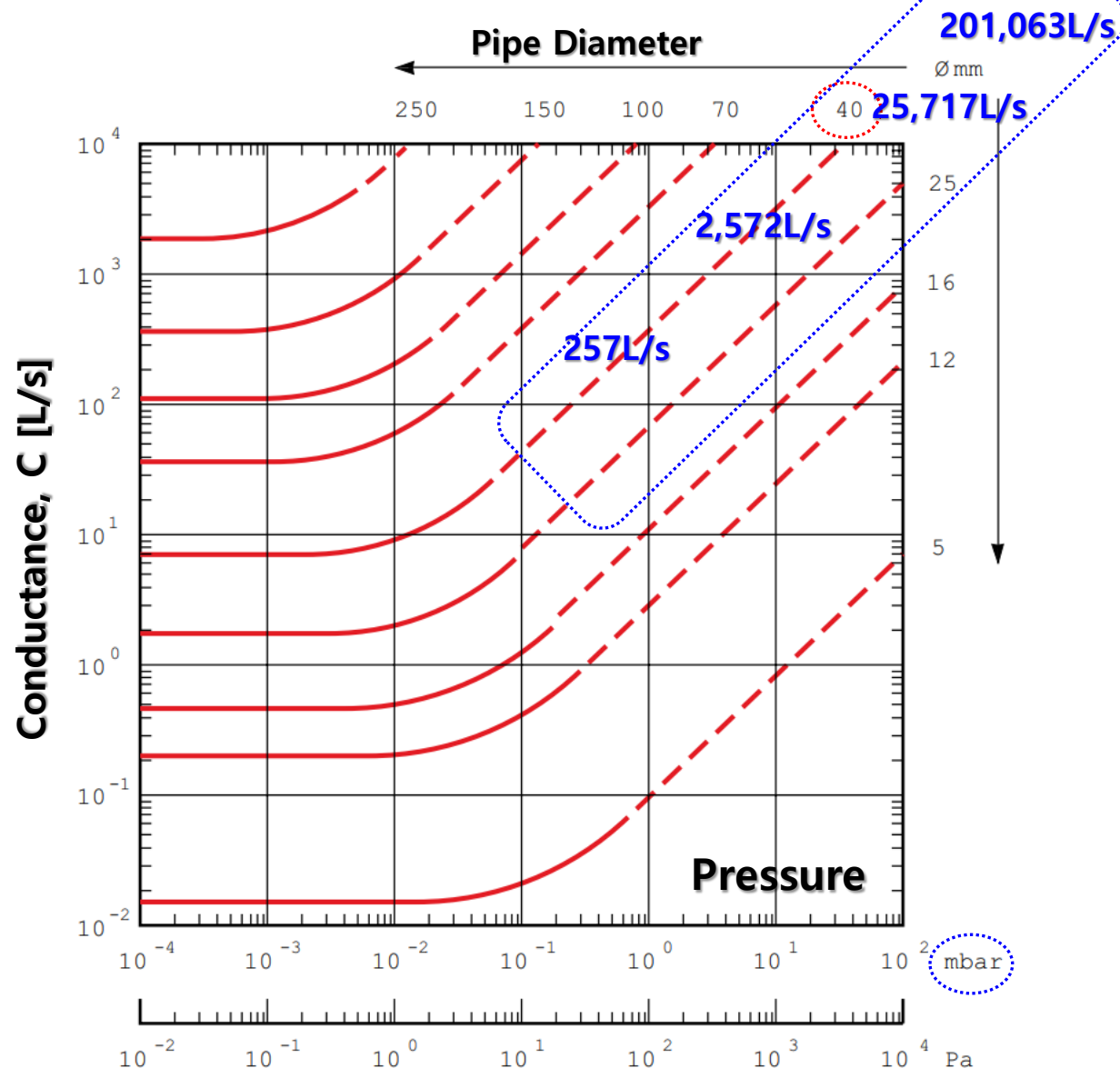
### (1) 그래프를 활용한 방법

<Conductance of 1 m of round pipe, for air at 20 °C>

(the data shown in the dotted portions of the curves is for low velocity, viscous, laminar flow in long pipes, Edwards Product Catalogue)

♠ 앞의 예제(III)에서는 배관의 컨덕턴스를 상수 값,  $C=400\text{L/s}$ 로 하였으나 실제 배관의 컨덕턴스는 압력, 배관의 형상(크기/길이/모양), 기체의 종류에 따라 달라진다. 따라서 배기시간과 펌프가 배기할 수 있는 가스량을 계산할 때 이를 충분히 고려해야 한다.

압력범위 [Torr]	760~100	100~10	10~1	1~0.1
$C(P)[\text{L/s}]$	201,063	25,717	2,572	257



## IV. 배기시간 계산-배기속도(S) 변화+컨덕턴스(C=C(P))를 고려한 경우

### (2) 점성류 컨덕턴스 계산식을 활용한 방법

$$C = 137 \frac{D^4 (P_1 + P_2)}{L \cdot 2}$$

$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$

C	D	L	P1	P2	P1	P2
[L/s]	[cm]	[cm]	[mbar]	[mbar]	[Torr]	[Torr]
201,063	4	100	1013.25	133.3224	760	100
25,717	4	100	133.3224	13.33224	100	10
2,572	4	100	13.33224	1.333224	10	1
257	4	100	1.333224	0.133322	1	0.1

시간		압력범위		용기체적(V)	배기속도	Conductance	S <sub>o</sub>
t [s]		P0[Torr]	P[Torr]	[L]	Seff [L/s]	[L/s]	[L/s]
t <sub>760→100</sub>	3.5	760	100	800	458.9	201,063	460
t <sub>100→10</sub>	3.9	100	10	800	471.2	25,717	480
t <sub>10→1</sub>	5.3	10	1	800	346.2	2,572	400
t <sub>1→0.1</sub>	17.4	1	0.1	800	105.9	257	180

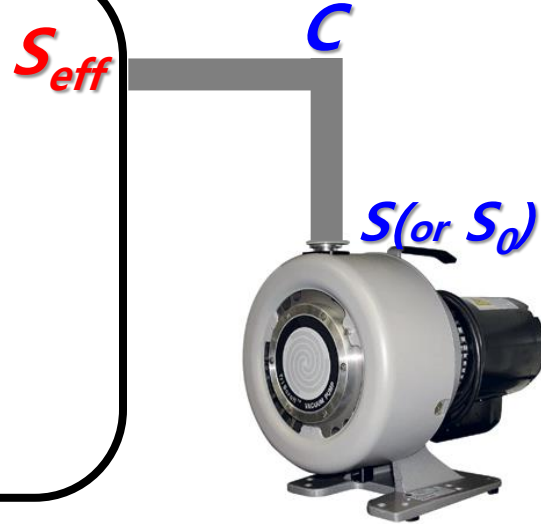
합 계 30.1s

## 배기시간 계산 정리(해석적 방법)

Vacuum Chamber

$$V = 800 \text{ [L]}$$

$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$



No.	구분-압력 [Torr]	배기속도	도관	비고	결과 [t]
I	760→100 100→10 10→1 1→0.1	$S = \text{constant} = 500 \text{ L/s}$	없음	S: 일정(최대값)	14.3 [s]
II		$S = S(P)$ 평균값	없음	S: 압력의존	22.1 [s]
III		$S = S(P)$ 평균값	있음, $C = \text{constant} = 400 \text{ L/s}$	C: 일정	40.0 [s]
IV		$S = S(P)$ 평균값	있음, $C = C(P)$ I.D.=4cm, L=100cm	C: 압력의존	30.1 [s]

## 배기시간 계산 정리(해석적 방법)

### A. 배기시간(t)

$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$

### B. 유효배기속도, $S_{eff}$

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S}$$

압력 구간	배기속도 영향		컨덕턴스 영향	
	S=일정 (500L/s)	S=S(P) 압력의존	C=일정 (400L/s)	C=C(P) 압력의존
760~100		3.5	7.6	3.5
100~10		3.8	8.4	3.9
10~1		4.6	9.2	5.3
1~0.1		10.2	14.8	17.4
배기시간 합계[s]	14.3	22.1	40.0	30.1

압력 구간	배기속도 영향		컨덕턴스 영향	
	S=일정 (500L/s)	S=S(P) 압력의존	C=일정 (400L/s)	C=C(P) 압력의존
760~100	500	460	214.0	458.9
100~10		480	218.2	471.2
10~1		400	200.0	346.2
1~0.1		180	124.0	105.9

☞ 유효배기속도가 컨덕턴스에 가장 많이 영향을 받는 압력 영역은 어디인가?

# 프로그램을 활용한 방법

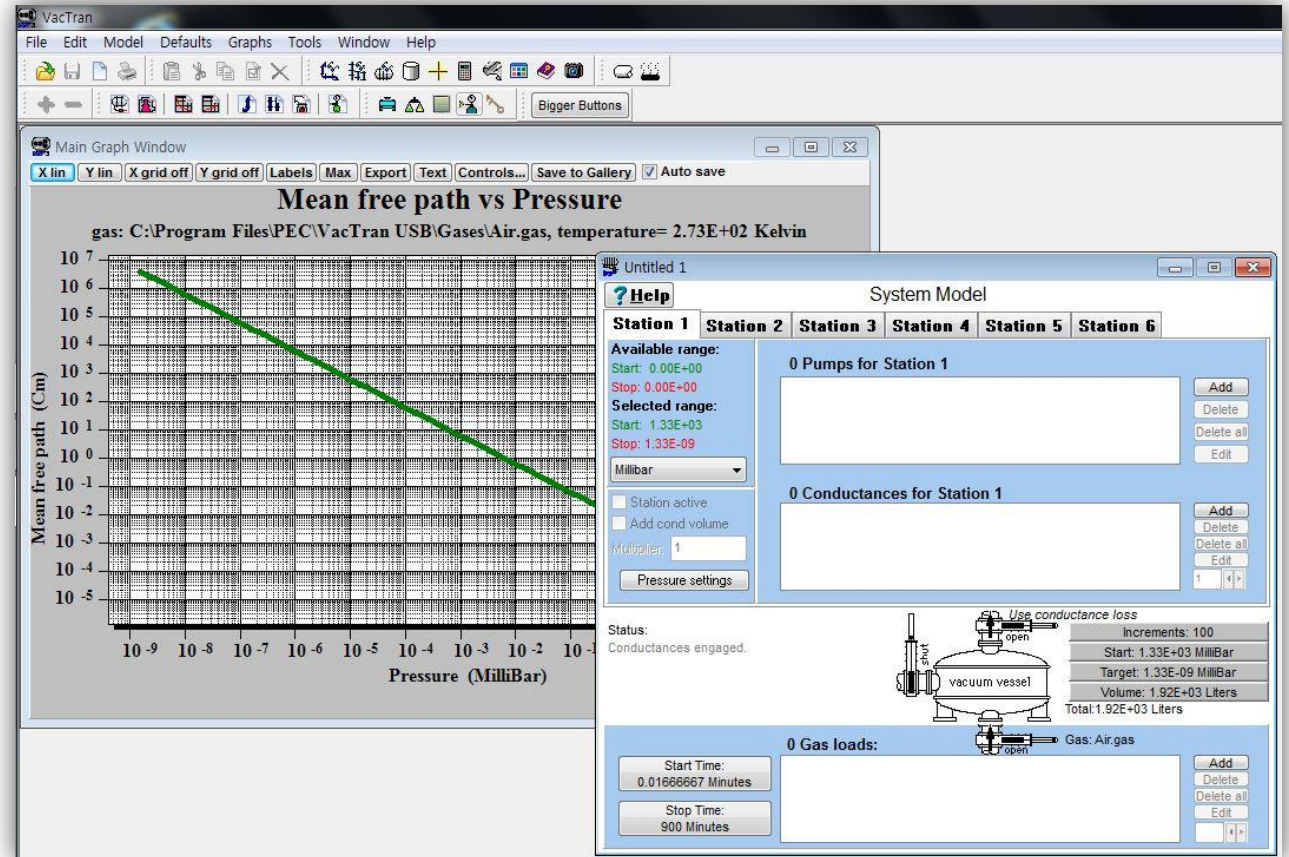


Vacuum Technology Software  
Windows version 3

© 2012 Professional Engineering Computations  
No part of this ProgramReference may be reproduced, transmitted, transcribed, or translated  
by any means without prior written consent of

**PEC** Professional  
Engineering  
Computations

2256 Rhone Drive, Livermore, CA 94550  
phone: 925-449-0941 fax: 925-449-4517  
support@vactran.com  
www.vactran.com





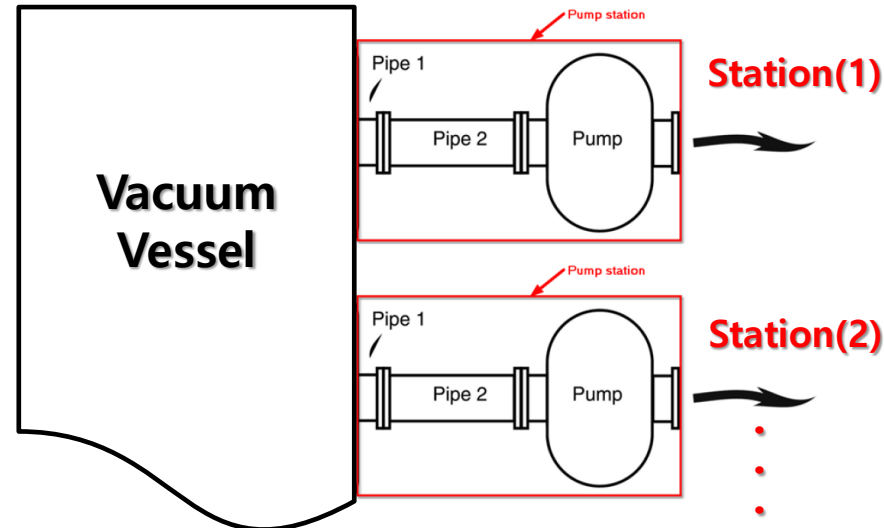
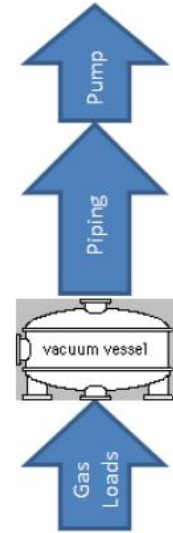
## A. Pump Model



The following shows the pump model before any data is added.

시스템 모델을 활용하기 위해 기본적으로 펌프의 성능 데이터를 입력하는 프로세스!

## B. System Model



## 1. Simple System Study



... to display the dialog shown:

**Simple System Study**

**Select pipe dimensions**

Pipe length: 100.00  
Pipe Diameter: 2.00  
Feet / Inches

**Select single pump speed**

Constant speed: 100.00  
Liters / second

**Select pressure range**

Start pressure: 7.6E+02  
Target pressure: 1.0E-01  
Torr

**Select vessel volume**

Vessel volume: 10000.00  
Liters

**Create System Model**  
**Solve calculated value**  
**Help**

**Solve pump down time**

Calculated value: 61.72  
minutes

Pump down time / Pipe length / Pipe diameter / Pump speed / Volume

## 2. System Model



In the New Document dialog that appears, select **System Model** and click on OK.

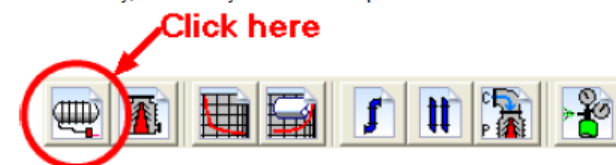
**New Document**

Models:	Libraries:	Viewers:
<input checked="" type="radio"/> System model	<input type="radio"/> Permeation library	<input type="radio"/> Plain text file
<input type="radio"/> Pump model	<input type="radio"/> Out gas library	<input type="radio"/> Picture file
<input type="radio"/> Raw data gas load	<input type="radio"/> Pipe library	
<input type="radio"/> Raw data conductance	<input type="radio"/> O-Ring library	
<input type="radio"/> Gas model		
<input type="radio"/> Pump Station		
<input type="radio"/> Series Conductance		
<input type="radio"/> Parallel Conductance		

Selected Document Type: System model

(click to expand)

Alternatively, use the system model speed button as shown below:



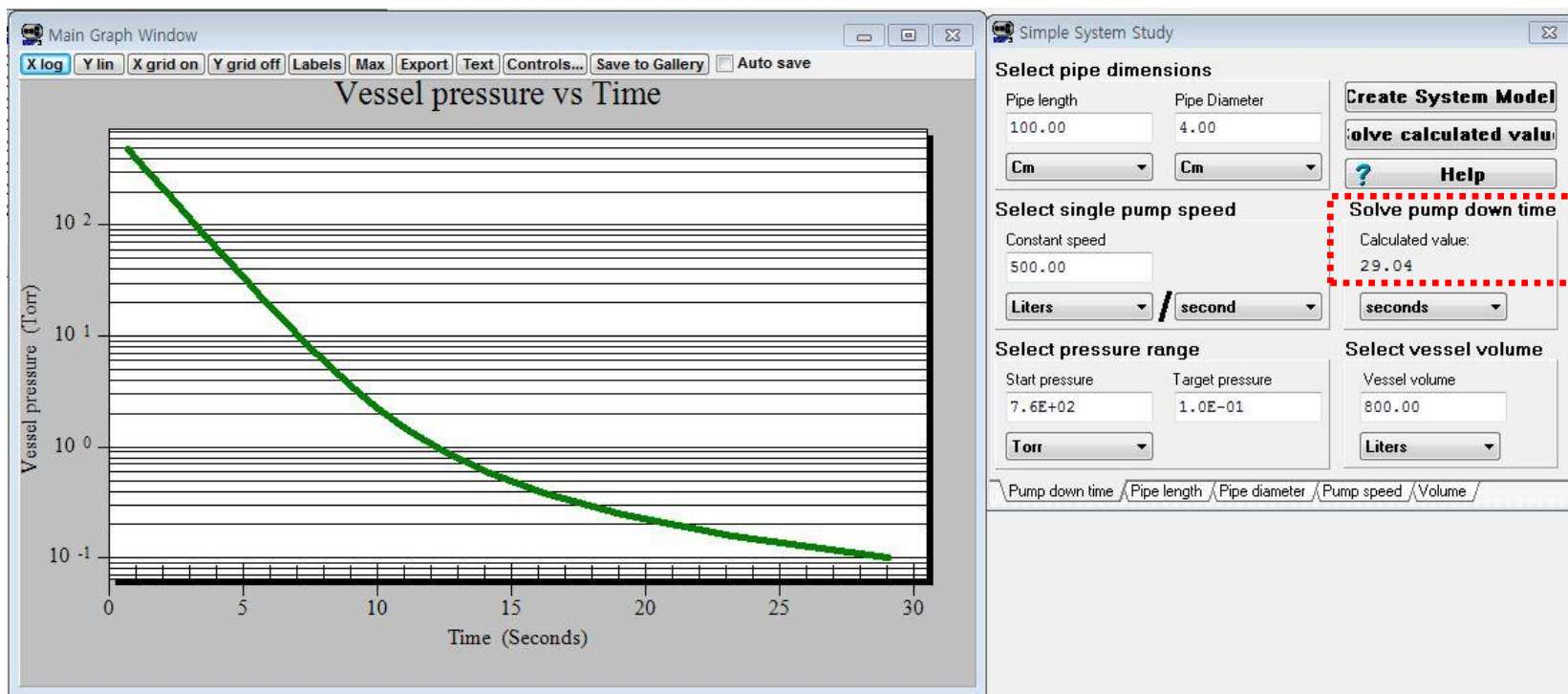
# 1. Simple System study의 예 (시간에 따른 압력 변화)

## [조건]

- 1) 챔버 체적: 800 L
- 2) 배관 직경(ID)와 길이(L): I.D. = 4cm, L = 100cm
- 3) 배기속도: 500 L/s(일정)

## [결과]

대기압 >> 0.1 Torr 까지: **29초**



## 2. System Model의 예(2)

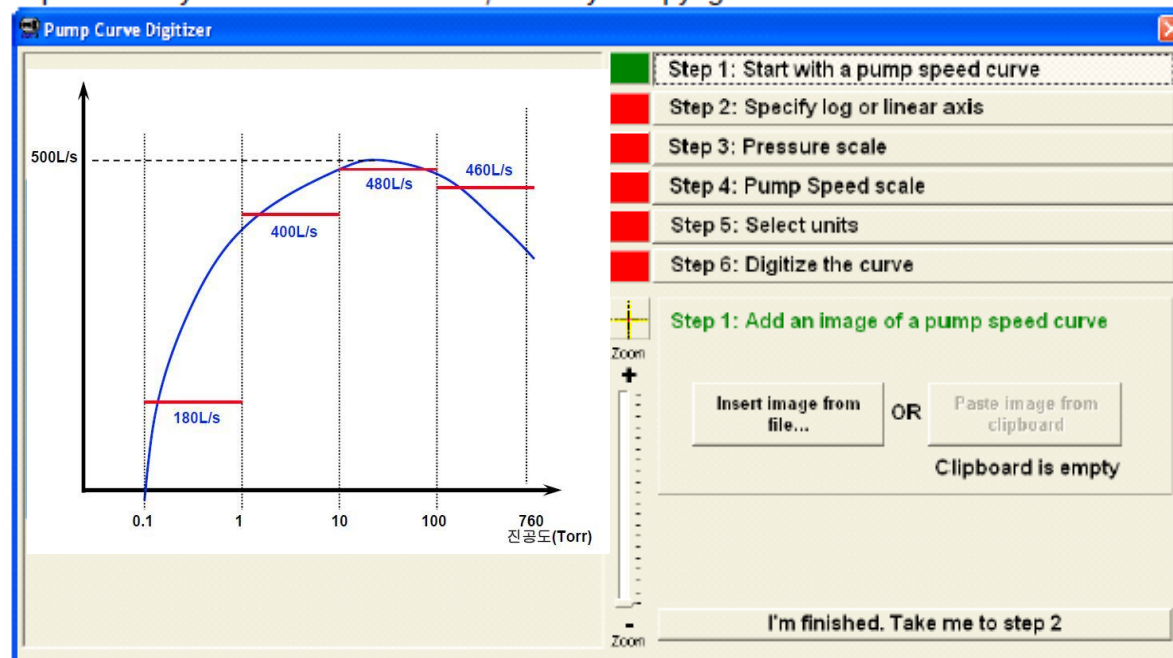
첫째, *Pump Model*, 즉 펌프의 성능곡선(압력에 따른 배기속도) 값이 먼저 저장되어 있어야 한다!

Click here



### Step 1: Start with a pump speed curve

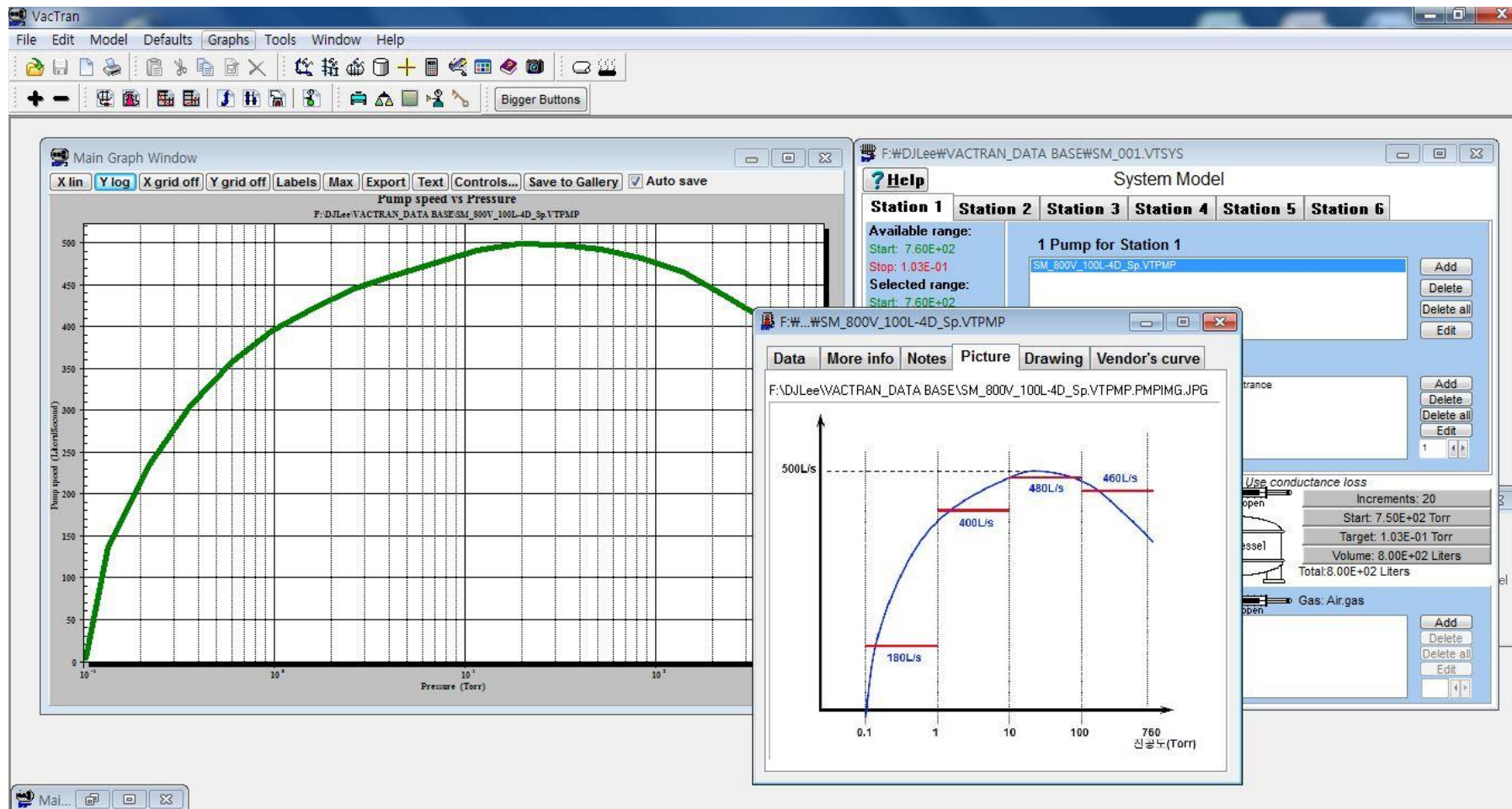
The first step in digitizing a pump curve is finding a graphic of the curve. This can be scanned from a catalog or copied directly from a vendor web site, but only if copyright notices allow this. Contact the vendor to be sure.





## [조건]

- 1) 챔버 체적: 800 L
- 2) 배관 직경(ID)와 길이(L): I.D. = 4cm, L = 100cm
- 3) 배기속도: 배기속도가 압력에 따라 아래 그래프처럼 변할 때

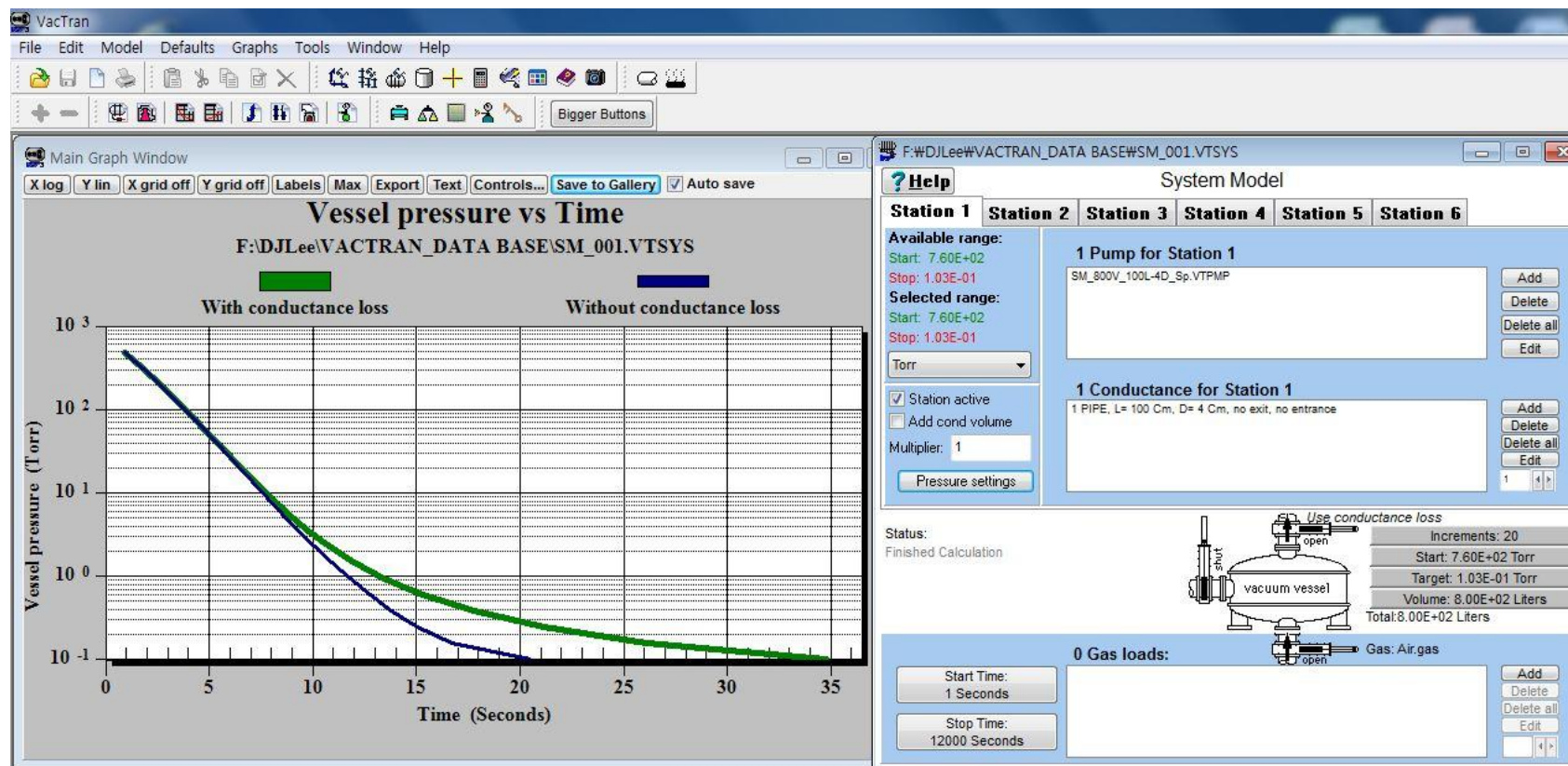


## [조건]

- 1) 챔버 체적: 800 L
- 2) 배관 직경(ID)와 길이(L): I.D. = 4cm, L = 100cm
- 3) 배기속도: 배기속도가 압력에 따라 변할 때

## [결과]

대기압 >> 0.1 Torr 까지: **35초**



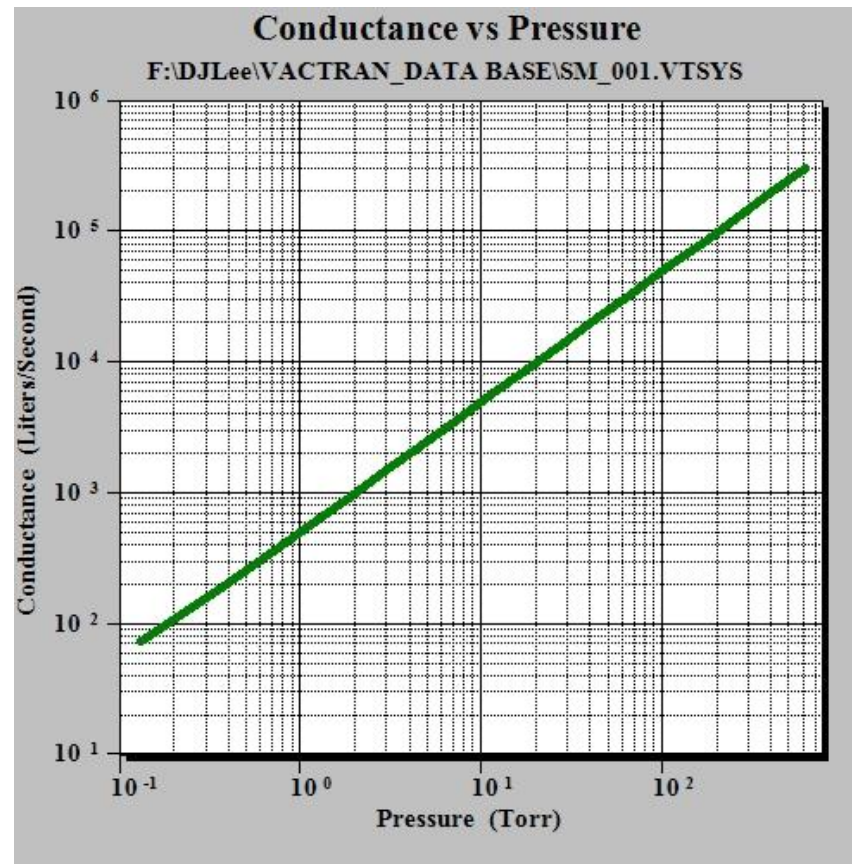
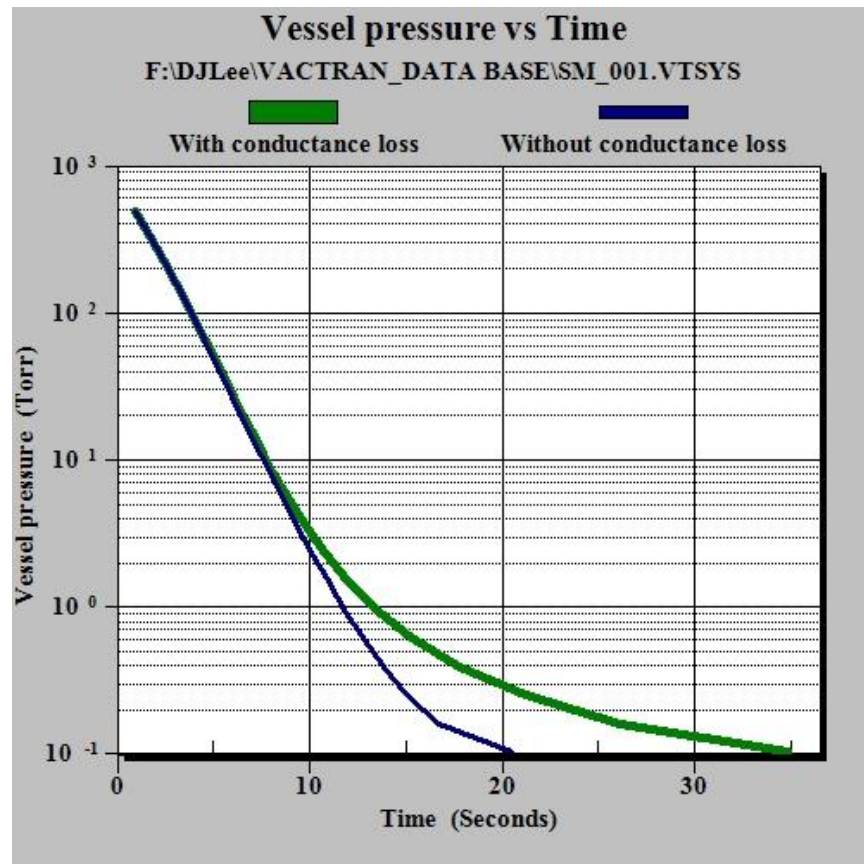


### [조건]

- 1) 챔버 체적: 800 L
- 2) 배관 직경(ID)와 길이(L): I.D. = 4cm, L = 100cm
- 3) 배기속도: 배기속도가 압력에 따라 변할 때

### [결과]

대기압 >> 0.1 Torr 까지: **35초**

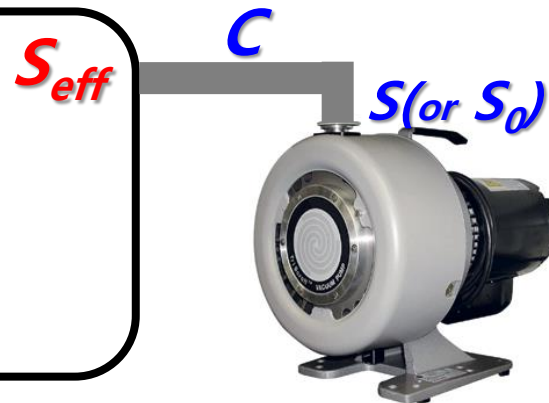


**최종**

**Vacuum Chamber**

**V=800 [L]**

$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$



**해석적**

No.	구분-압력 [Torr]	배기속도	도관	비고	t, 결과
I	760→100 100→10 10→1 1→0.1	S=constant =500L/s	없음	S:일정(최대값)	14.3 [s]
II		S=S(P) 평균값	없음	S: 압력의존	22.1 [s]
III		S=S(P)	있음, C=constant =400L/s	C: 일정	40.0 [s]
IV		S=S(P)	있음, C=C(P)-오류수정 I.D.=4cm, L=100cm	C: 압력의존	<b>30.1 [s]</b>

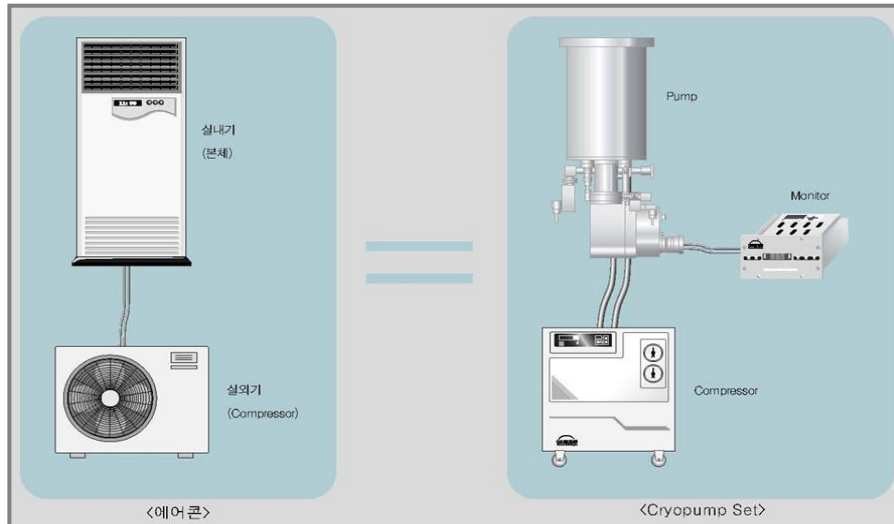
**Vactran 프로그램**

No.	구분	배기속도	도관	비고	t, 결과
1	VACTRAN	S=500L/s(일정)	있음, C=C(P) I.D.=4cm, L=100cm	Simple System	<b>29 [s]</b>
2	VACTRAN	그래프	없음	System Model	<b>20 [s]</b>
			있음, C=C(P) I.D.=4cm, L=100cm		<b>35 [s]</b>

**비교**

## - 부 록 -

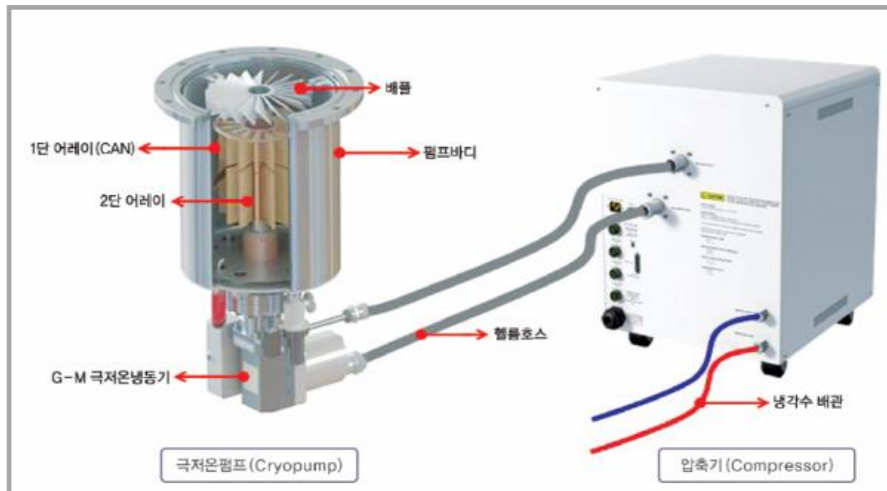
1. 고진공용 크라이오 펌프 소개
2. G-M극저온 냉동기(원리)
3. 크라이오 펌프 라인업
4. 기타:
  - RGA 데이터 분석
  - 냉각수와 스케일



# Cryopump?

High Vacuum Pump with cryogenic technology

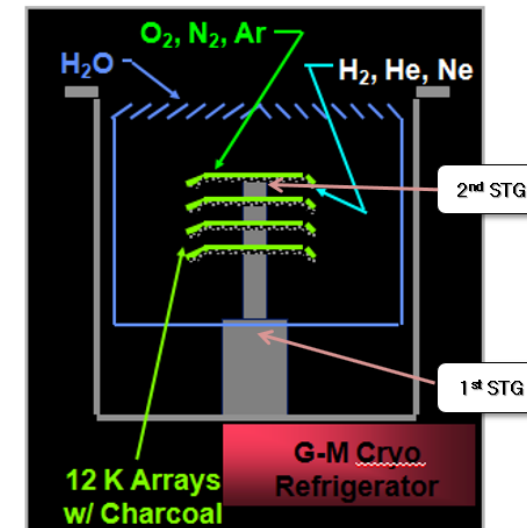
A cryopump or a "cryogenic pump" is a vacuum pump that traps gases and vapors by condensing them on a cold surface.



**Cryocooler  
or Cryopump**

**Supply&Return  
Helium Hose**

**Helium  
Compressor**



# The Principle of cryogenic G-M Refrigerator

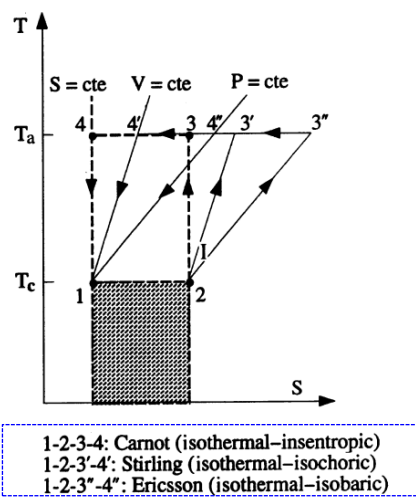


Fig. 1 Carnot, Stirling and Ericsson Cycles (T-S diagram)

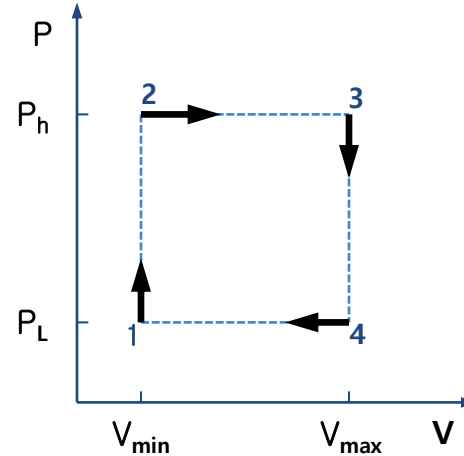


Fig. 2 G-M Cycles (P-V diagram)

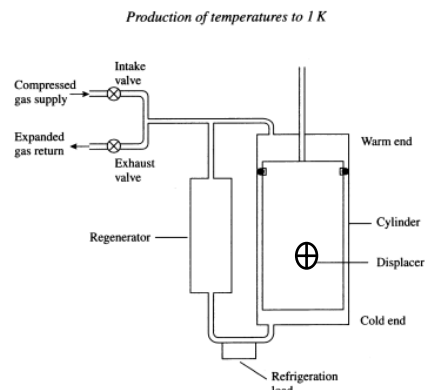


Fig. 3 A Single-Stage Version of the G-M Refrigerator

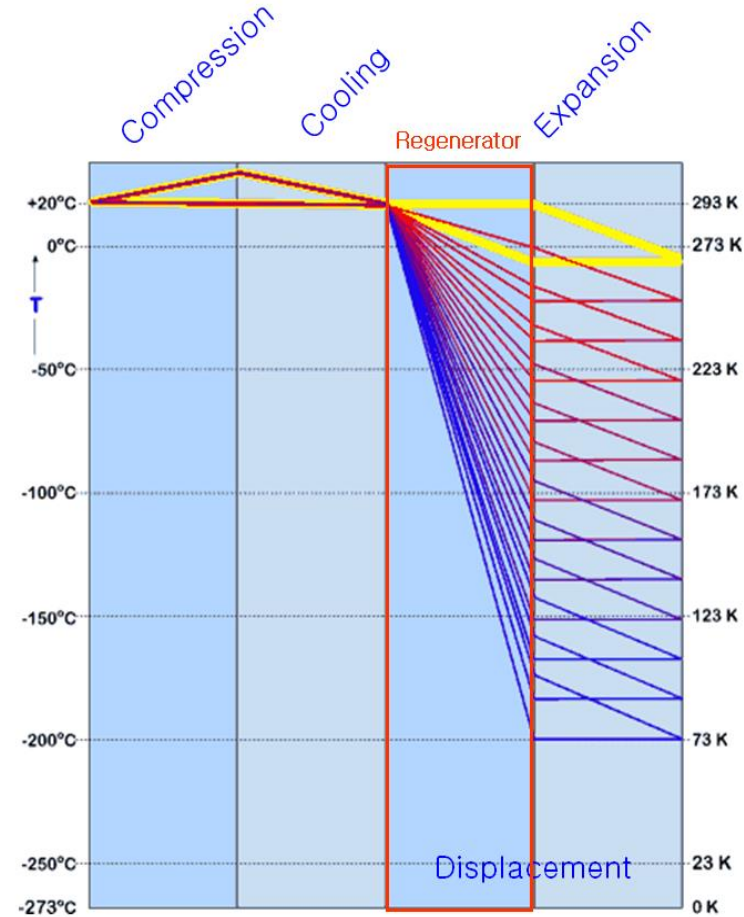
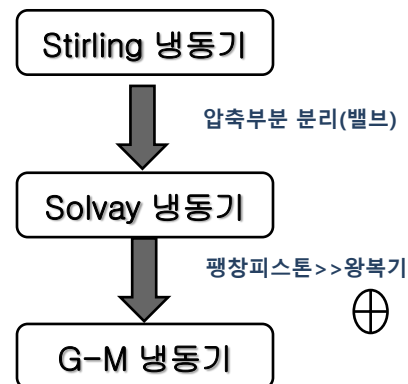


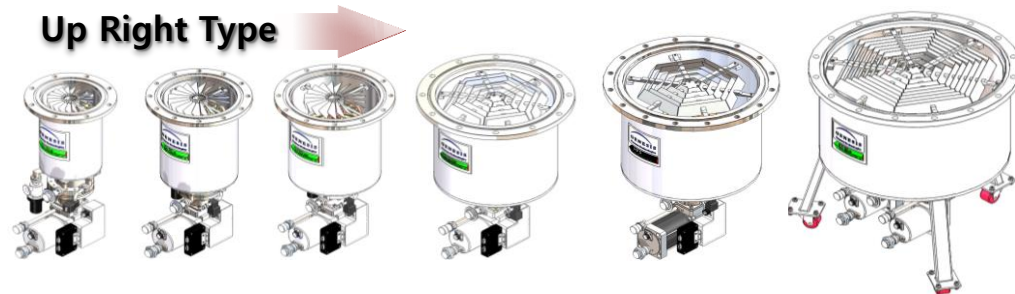
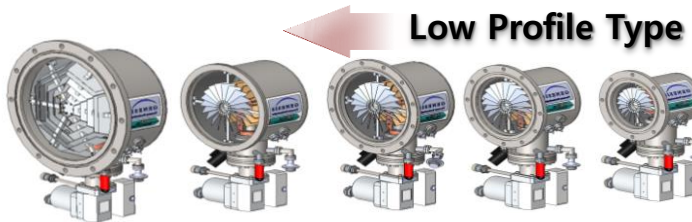
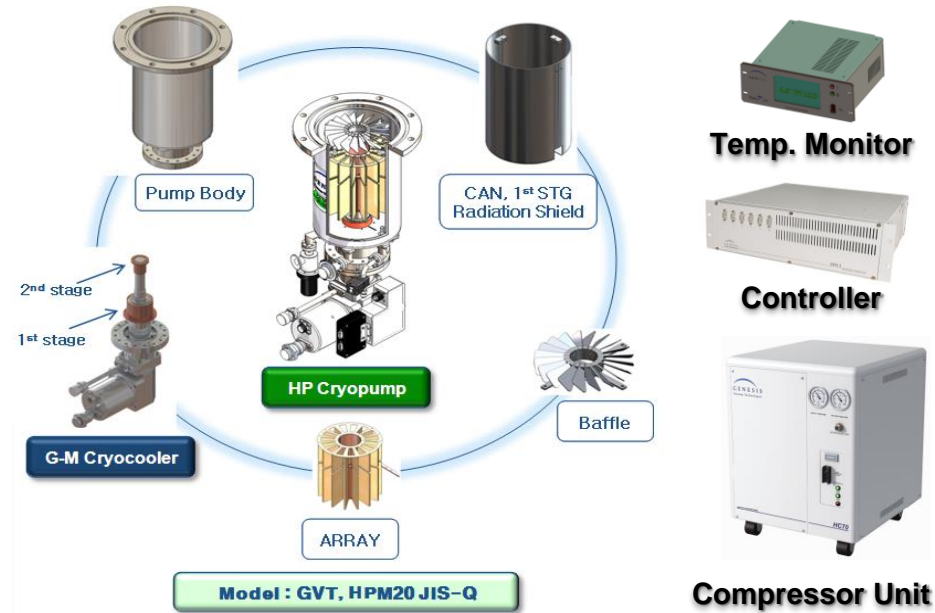
Fig. 4 The Heat Exchanging Principle of Regenerator in G-M Refrigerator



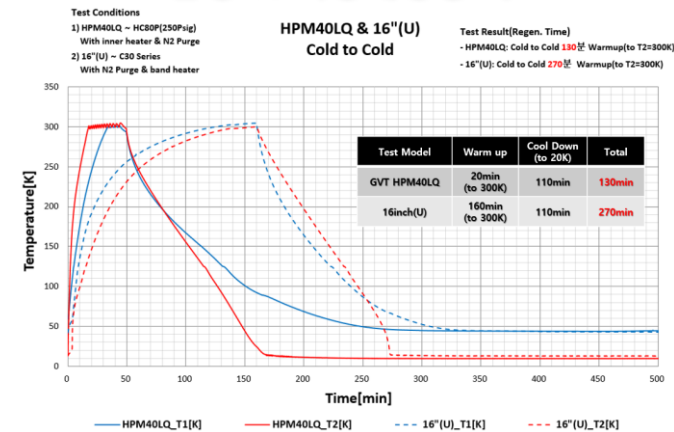
# 크라이오 펌프(Cryopump) 소개

## Cryopump Line-Up

Type	Model	Pump Size
U-Type	ICP	200mm~450mm
	HPM	200mm~550mm
	HPS	450mm~650mm
L-Type	ICP	200mm~320mm
	HPM	200mm~400mm
	HPH	250mm , 320mm
	HPS	500mm , 650mm



## 표준형 vs 자동재생형 비교

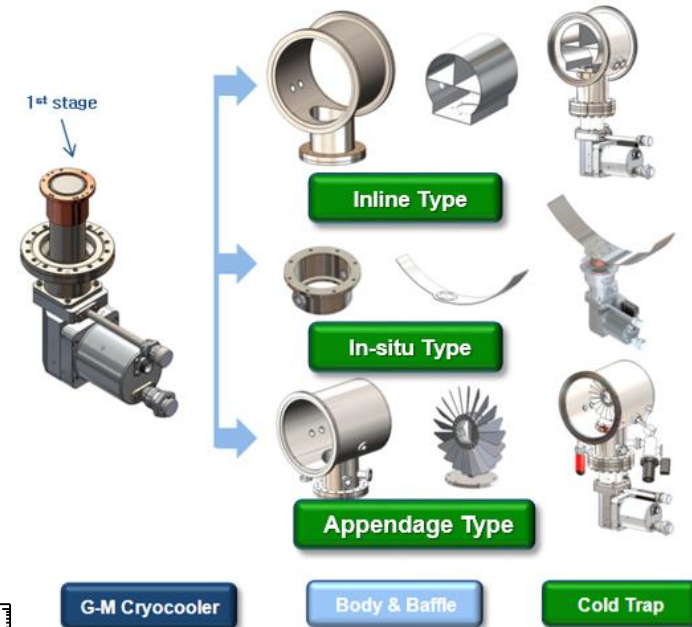




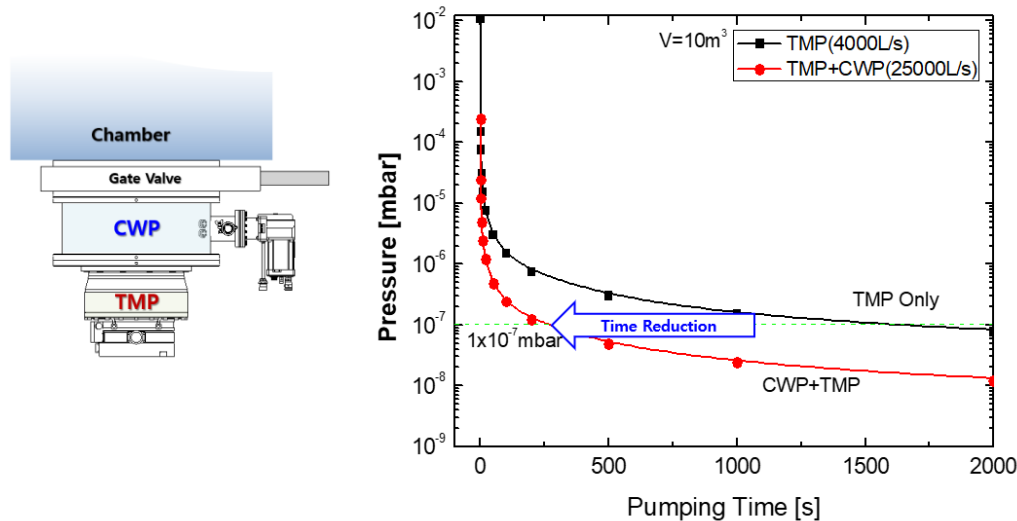
# CWP(Cold Trap) 소개

## ■ CWP Line-Up (Cryogenic Water Pump/Cold Trap)

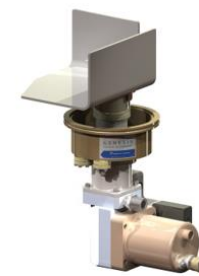
Type	CWP Size
Inline	200mm ~ 500mm
Cold Plate	Order Made
Regen	200mm ~ 500mm



### [ CWP가 펌프다운에 미치는 영향 ]



인라인형

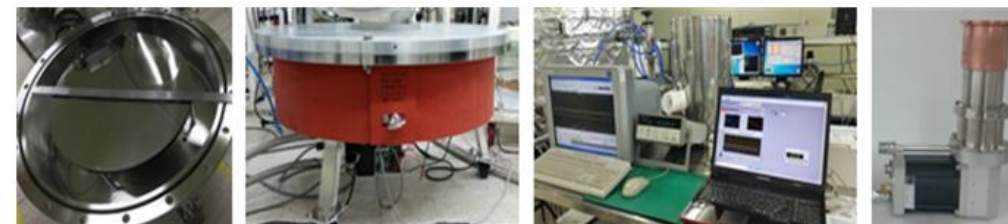
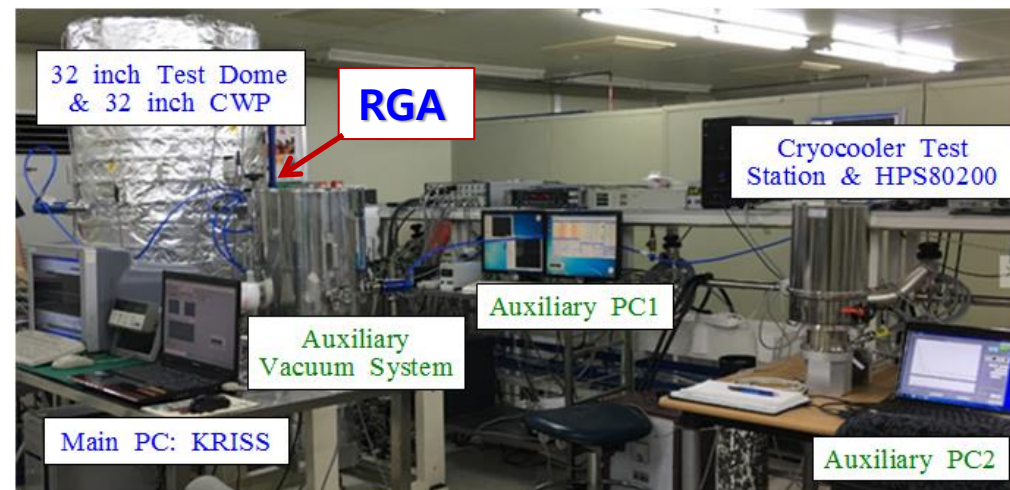
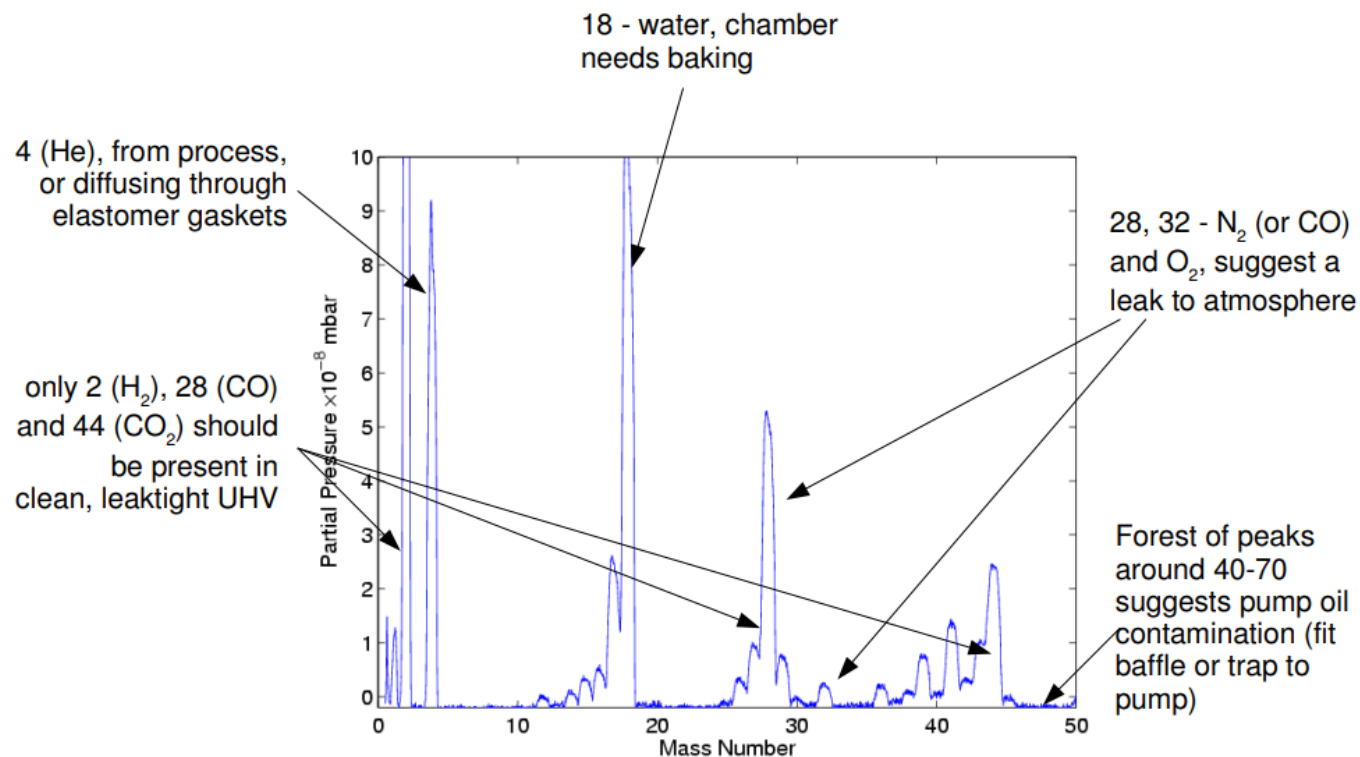


누트형

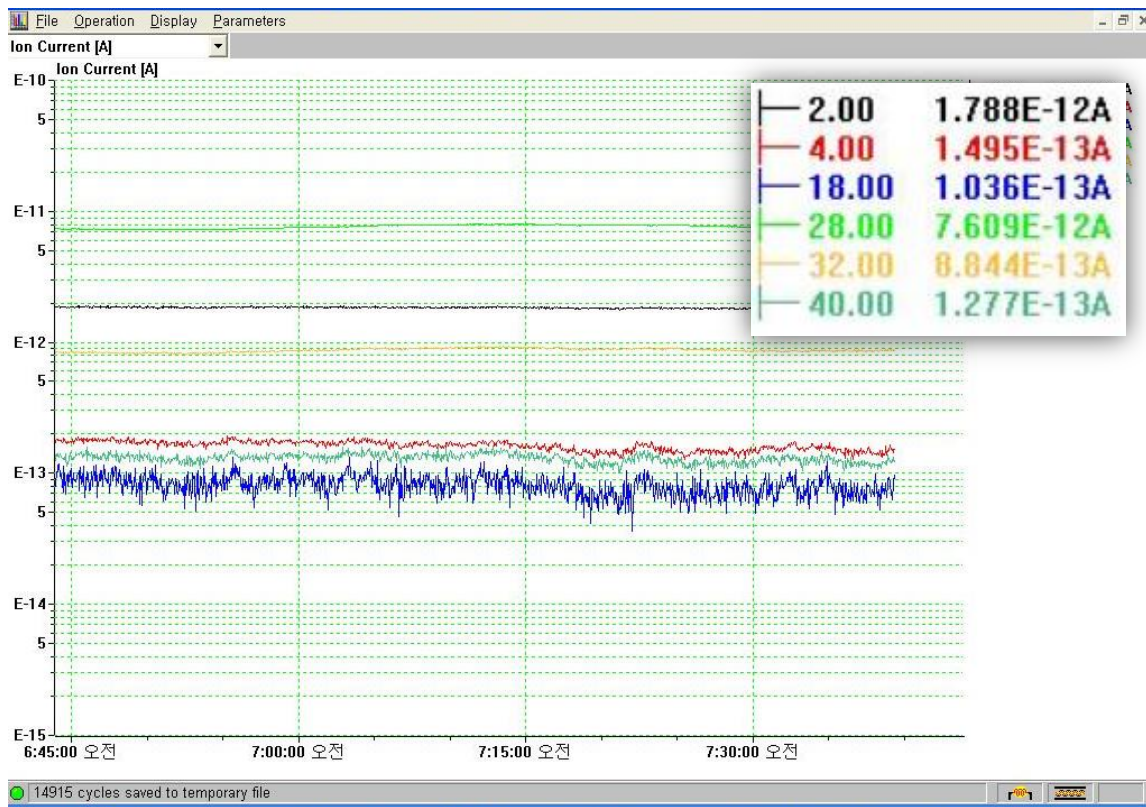


직부형

# RGA 분석: 각종 성능시험, 진공장비 시험운영 시 반드시 확인 필요



## RGA 분석 예(1)



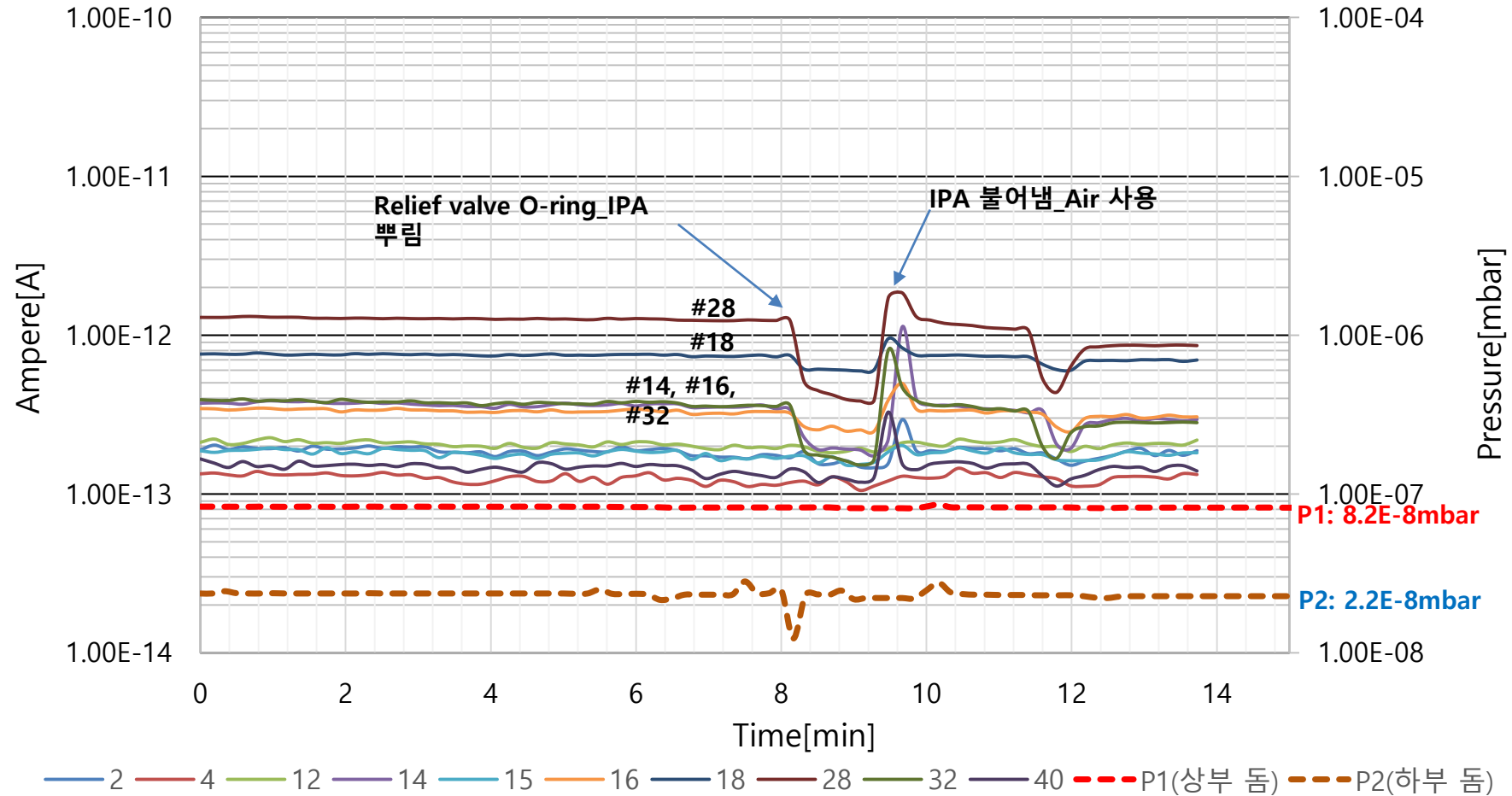
- ☞ (1) 최 상부에 질소(28), 그리고 산소(32)도 나타남: 누설이 있다는 의미  
 최종 점검결과: 스피드 돔 상부 용접 불량이었음.  
 (2) 수분(18)이 가장 낮음: 챔버 베이킹 후에 테스트 실시함  
 (3) 수소(2)가 높게 나타남: 표준 스피드 돔 재질 문제.  
 STS 재료에서 확산되어 나온 것.



## RGA 분석 예(2)

더블돔을 활용한 고진공 영역 배기성능시험 중 누설 의심  
(RGA 분석결과)

날짜: 2018.02.01





# 냉각수와 스케일(1)



YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

## TEST REPORT

우 363883 충북 청원군 오창읍 양형리 685-1 충북테크노파크 101호 TEL (043) 211-6144 FAX (043) 211-6148

상장사번호 : TAC-001799 접수 일자 : 2011년 04월 28일  
대 표 자 : 조광연 시험완료일자 : 2011년 05월 04일  
업 체 명 : 지브이티(GVT) 주식회사  
주 소 : 경기 평택시 칠곡동 577-4

시 료 명 : 스케일링(scale) 폐수

시험 결과			
시험항목	단위	시험구분	결과치
Ca	mg/L		2100
Mg	mg/L		5.39
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L		50.2
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L		12.8

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.  
2. 이 성적서는 총포, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

시료명 : 박정애 Tel : 031-999-3172

2011년 05월 04일

KTR 한국화학융합시험연구원

Page : 1 of 1

전자문서본(Electronic Copy)

Scale을 2% 식초 수용액에 1주일간 녹인 용액

# 냉각수와 스케일(2)

## 부식이 일어나는 금속의 대표:철

철의 환원 전위:  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{s})$   $E^0 = -0.44(\text{V})$  (1)

물 속에 녹아든 산소:

$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$   $E^0 = +0.40(\text{V})$  (2)

이 환원 전위는 철의 환원전위보다 크기 때문에 철을  $\text{Fe}^{2+}$ 으로 산화시킴.

$\text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$  (3)

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ 의 물질이 순수할 경우에는 백색이지만 공기에 의한 초기의 산화 때문에 통상 **녹색 혹은 암록색**

산화된 피막 표면의 바깥쪽으로 용존 산소의 접근에 의해  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 가 다음 반응과 같이 산화됨

$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} + 1/4\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$  (4)

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ : 오렌지색 또는 적갈색

산소가 충분하지 못할 경우:

**$\text{Fe}(\text{OH})_2$ 는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 까지 산화되지 못하고**

**$\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 의 형태로 검은 녹이 됨.**

※출처: 해안대수층내 철산화균 및 황환원균에 의한 펌프에서의 금속산화물 침작기작 및 제어방안 (인하대학교 환경공학과 성은혜 석사학위논문, 성은혜, 2008)





경청해 주셔서  
감사합니다!



발표자: 이동주

연락처: [djlee@hexar.com](mailto:djlee@hexar.com) / [etermoon@naver.com](mailto:etermoon@naver.com)