

# Basic Vacuum Practice

## 진공 디자인(진공 배기 계산)



**ACE SYSTEMS**

**Lee Dong-Ju**

2022. 11. 11.

Homepage: [www.acesystems.co.kr](http://www.acesystems.co.kr)

# 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. 고진공 펌프의 종류 및 특성
2. 고진공 펌프의 성능지표와 평가방법
3. 크라이오펌프의 성능평가 방법(예)

## - II 부 -

### [오해하기 쉬운 진공의 기초]

1. 압력이란? 압력, 온도, 분자밀도
2. 누설율(유량)의 물리적 의미
3. 진공 배기 특성(공간배기와 표면방출)
4. 실전에 필요한 진공의 기초지식
5. 진공배기와 컨덕턴스(직관적 이해)
6. 컨덕턴스의 합성 그리고 전기회로와의 유사성
7. 차이점을 구별하자! 유량, 압력, 컨덕턴스, 배기속도
8. 컨덕턴스는 왜 필요한가?

## - III 부 -

1. 흐름의 유형별 컨덕턴스
2. 도관의 컨덕턴스와 유효배기속도
3. 진공펌프의 용량선정과 예  
(압력에 따른 배기속도 변화)
4. 배기시간 계산식 도출과 예

## - IV 부 -

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

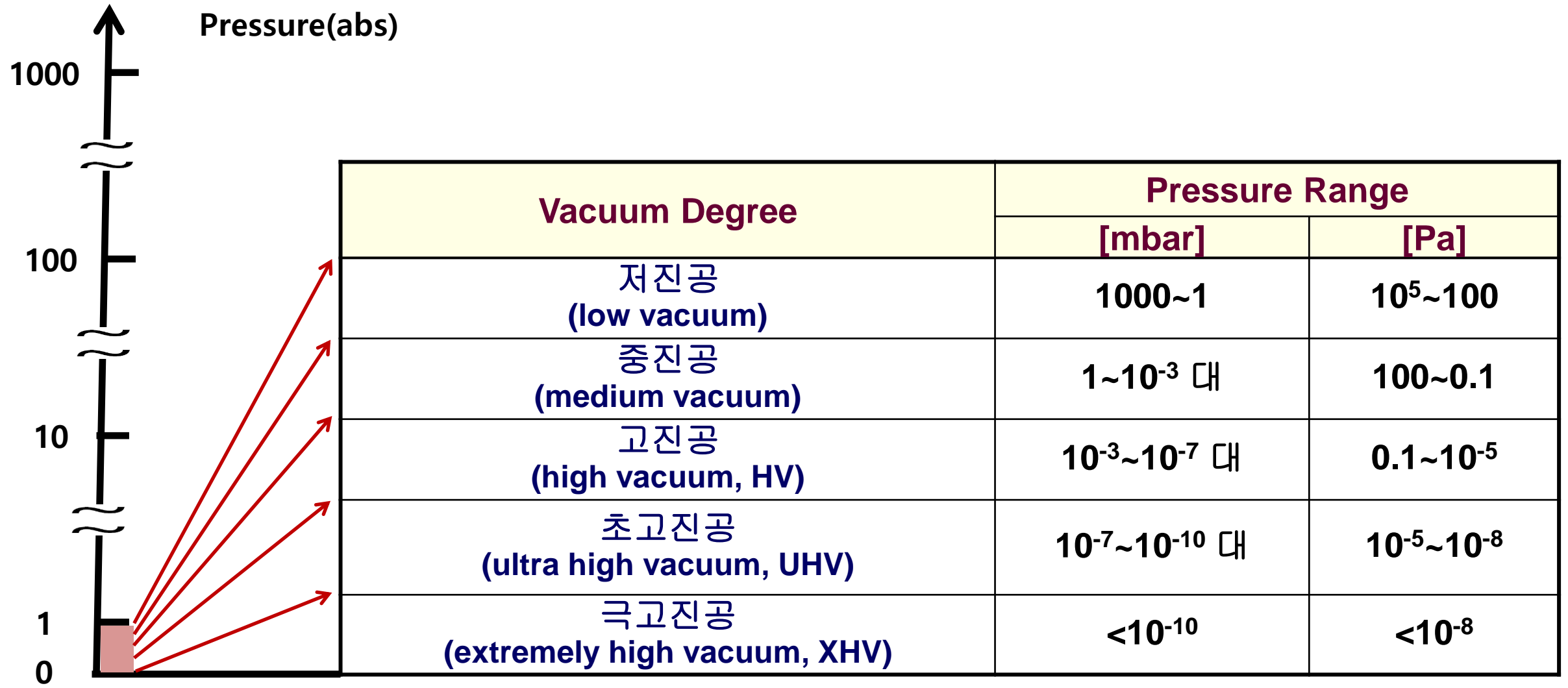


# 고진공 펌프의 종류와 특징



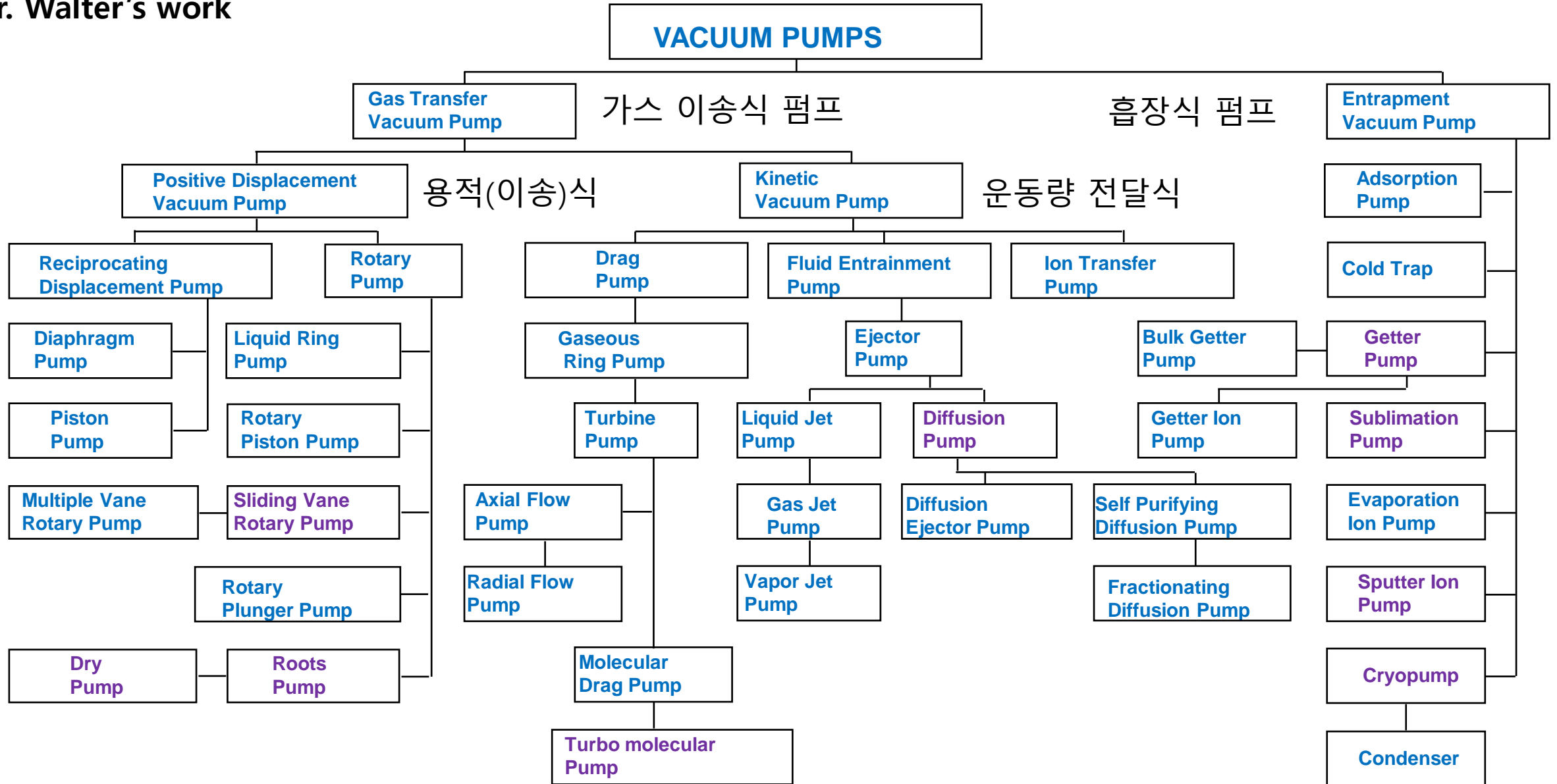


# Vacuum Degree Classification



# Vacuum Pumps Classification

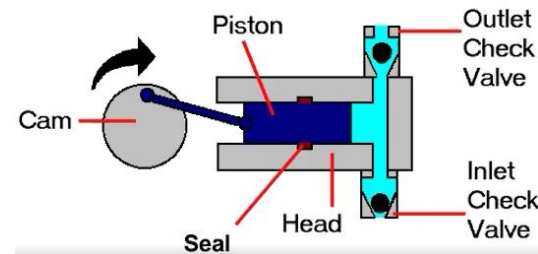
Dr. Walter's work



# Vacuum Pumps Classification

## 배출형(수송식) 펌프 (Gas transfer Pump)

- 용적이송식(Displacement) 펌프 : 로터리 펌프, 드라이 펌프
- 운동량 전달형(Kinetic) 펌프 : 터보분자 펌프, 확산펌프

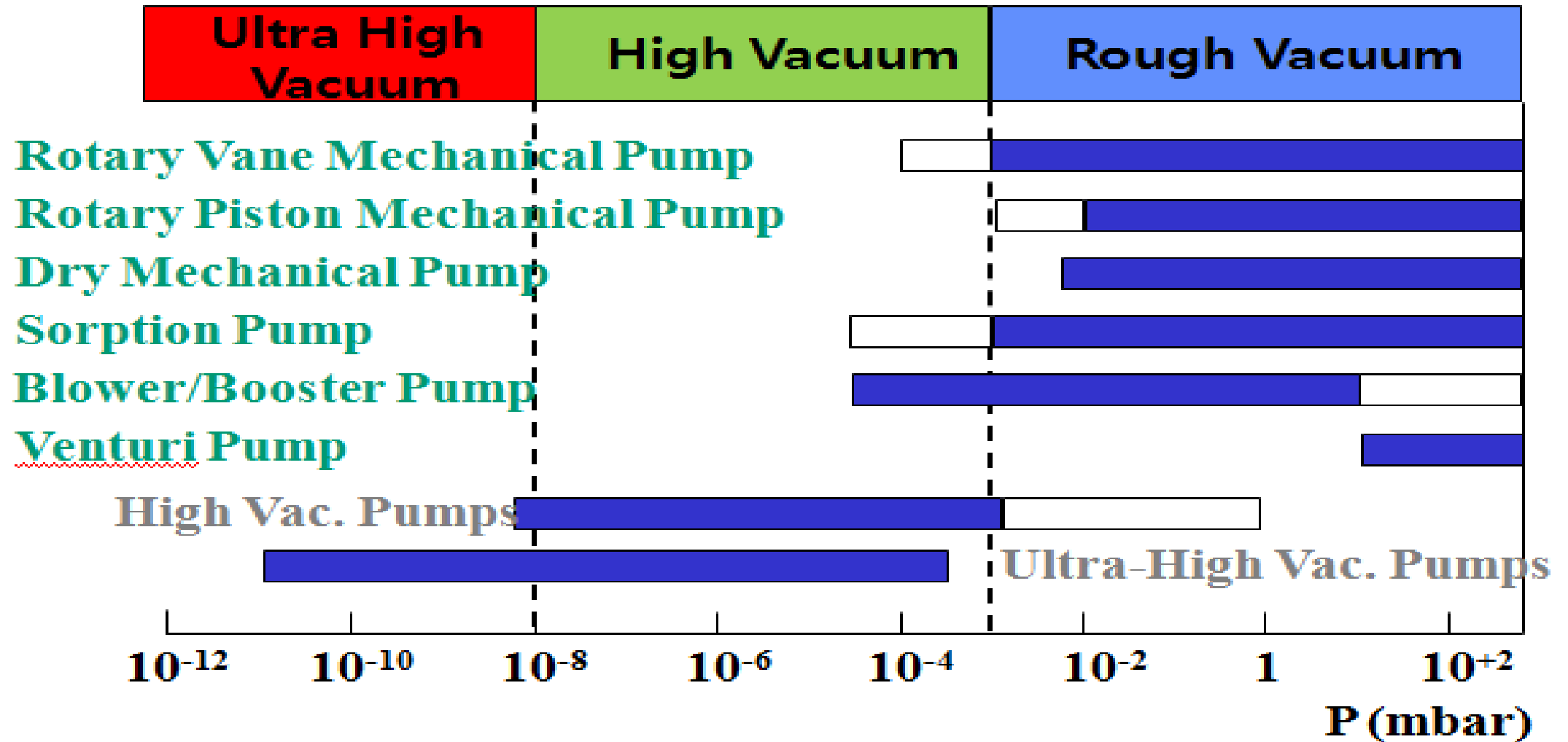


## 흡장형 펌프 (Entrapment Pump)

- 극저온(Cryogenic) 응축/흡착형 : 크라이오 펌프, 흡착펌프
- 상온 흡착형 : 게터펌프
  - 매립형 : 스퍼터 이온 (이온 게터) 펌프 (SIP)
  - 티타늄 승화 펌프 (TSP)
  - 증발성 게터
  - 화학 흡착형 : 비증발성 게터 (NEG)

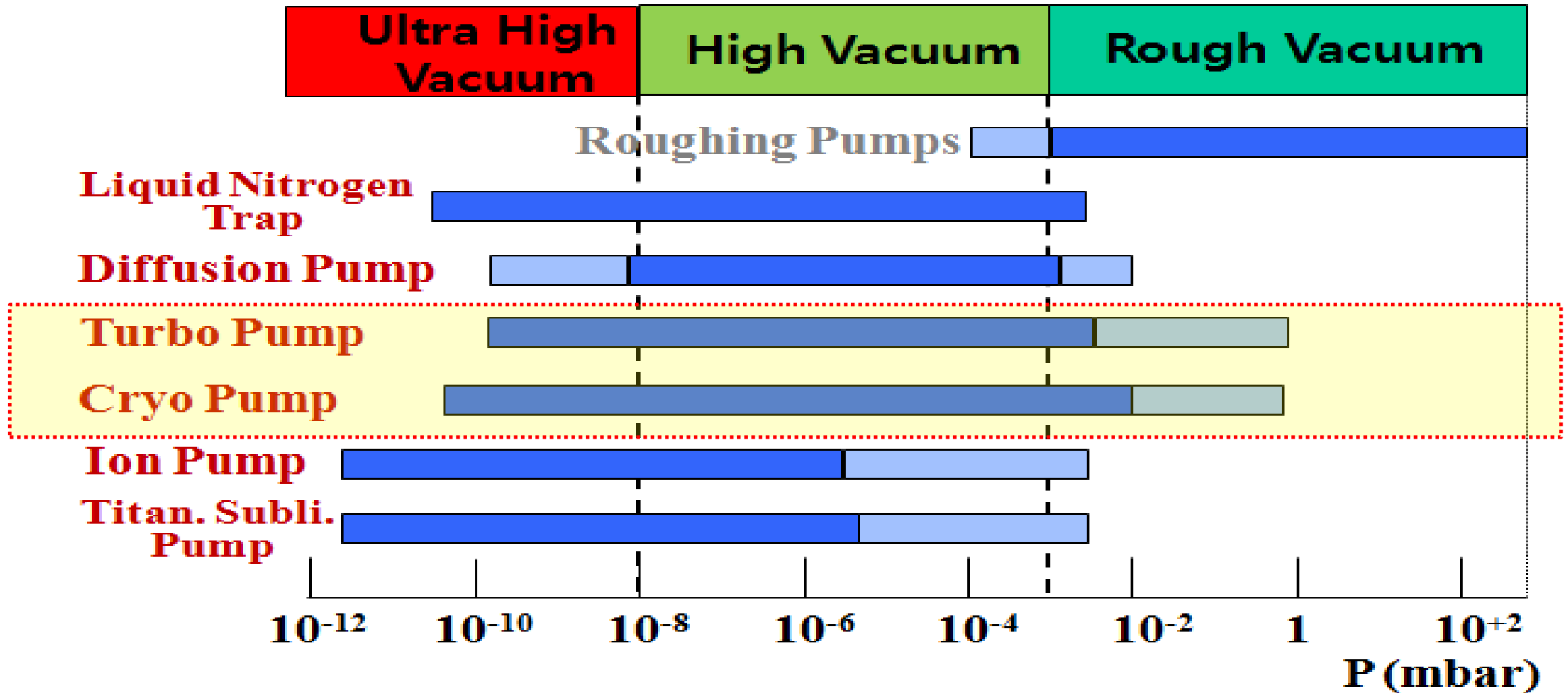


# Vacuum Pumps Operating Range(1)

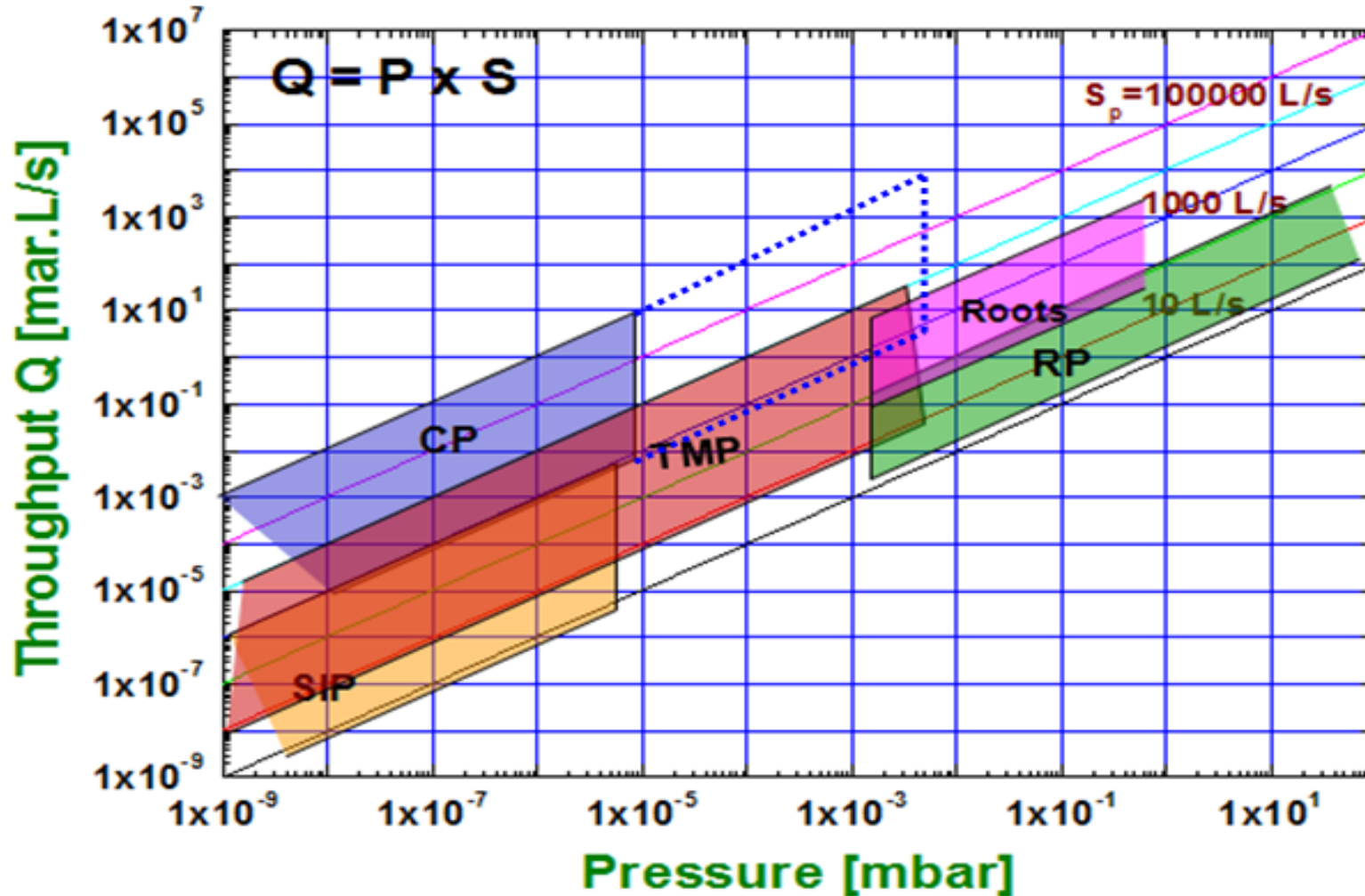




## Vacuum Pumps Operating Range(2)

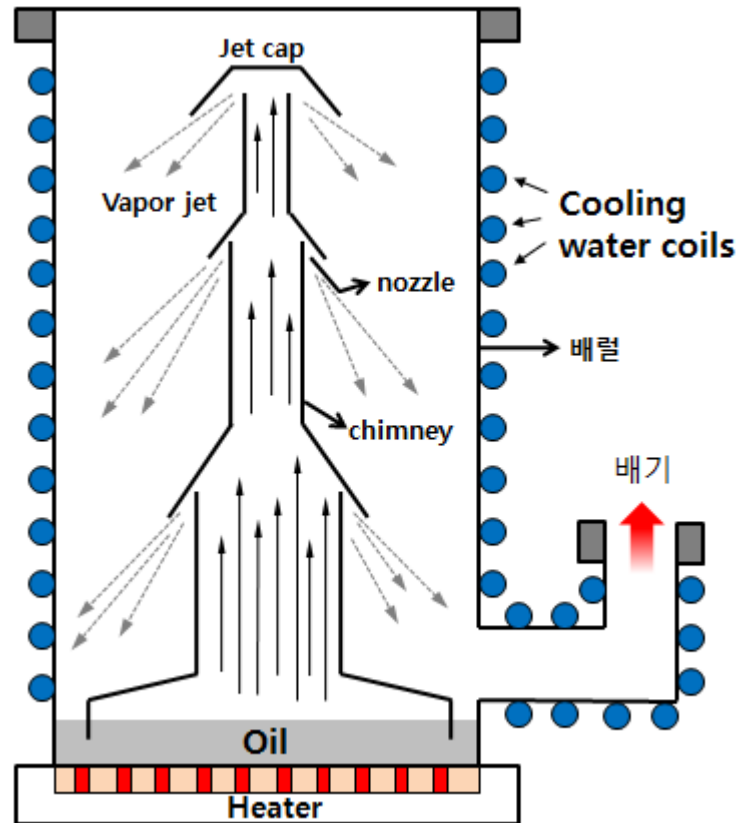


# Vacuum Pumps Operating Region(3) Related with Q, P, and $S_p$

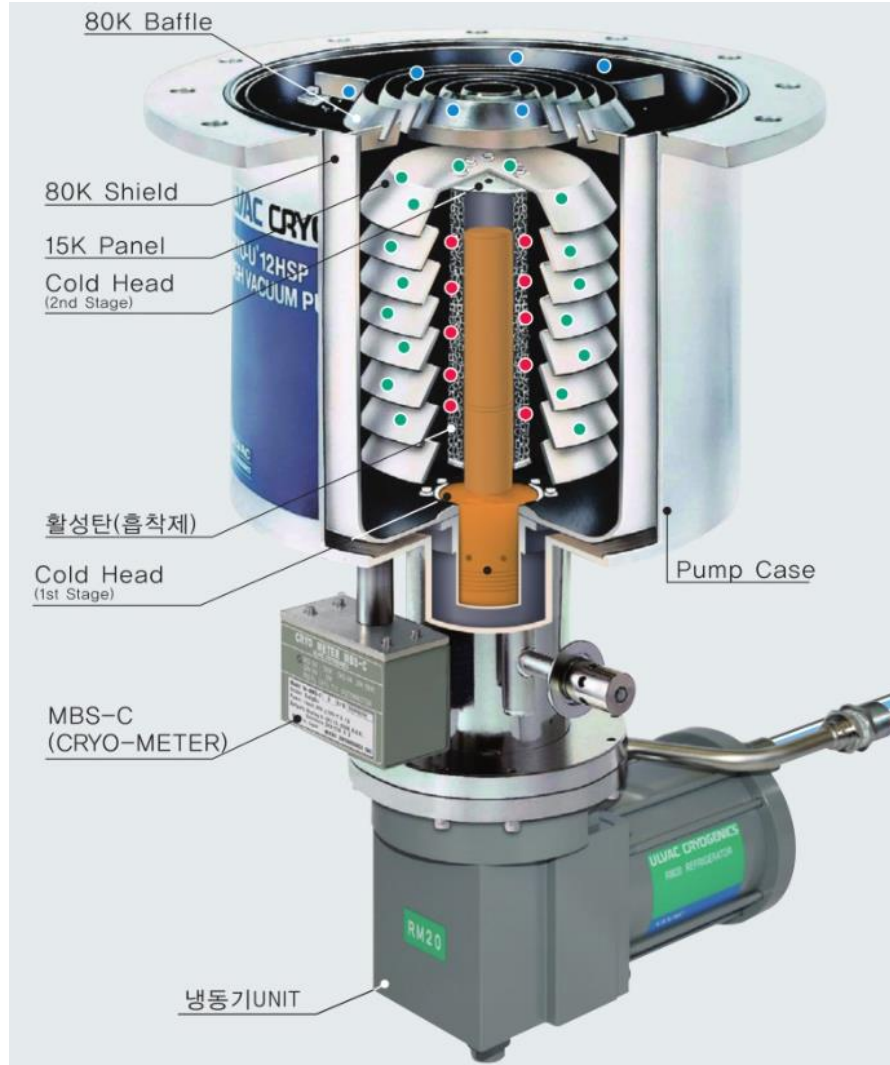


# 오일확산 펌프

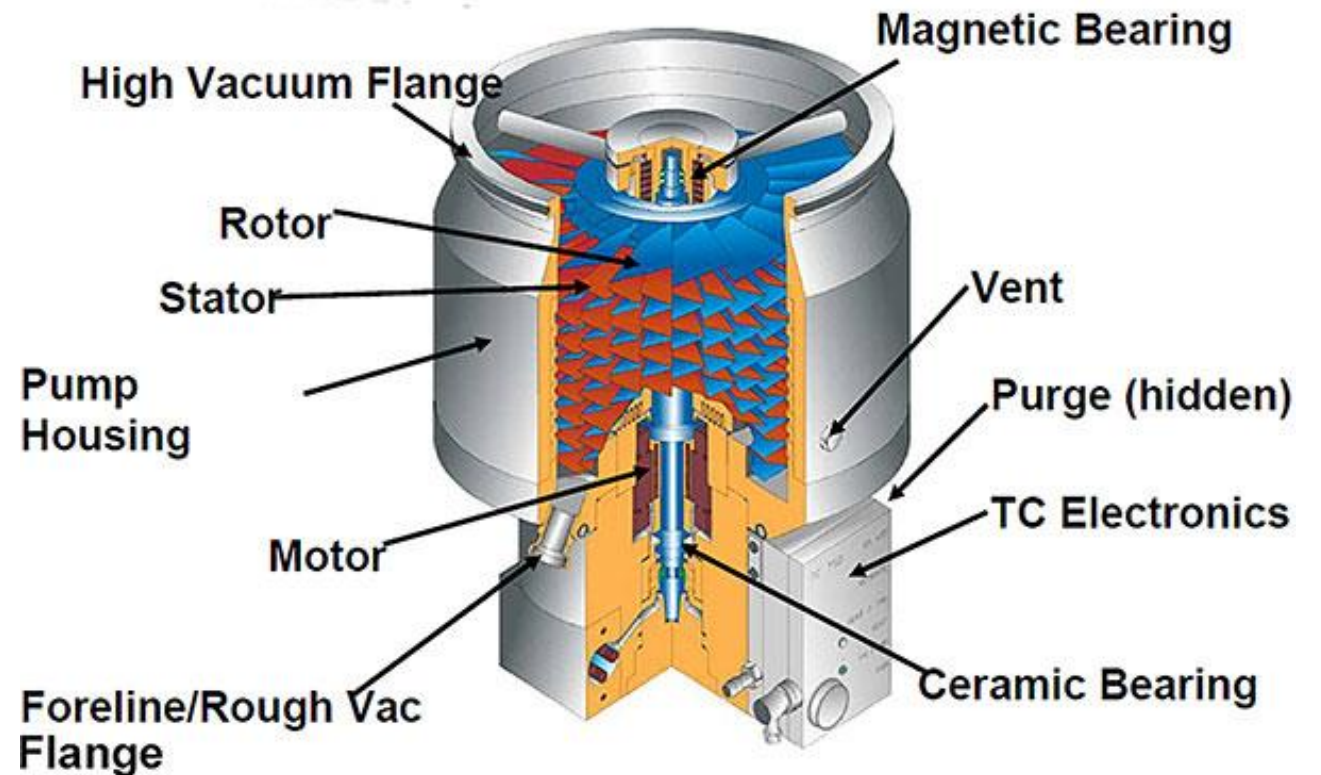
초기 구매비용은 저렴  
운전에 따른 유지 비용은 높음 (오일을 가열하는 전기료)



## 크라이오 펌프 구조



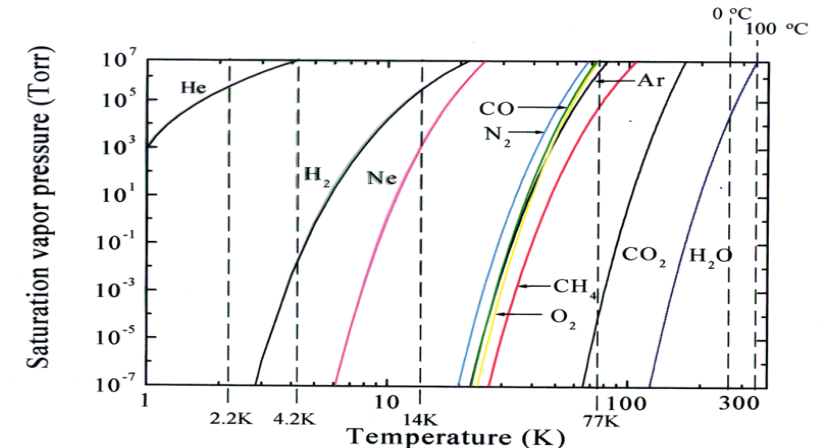
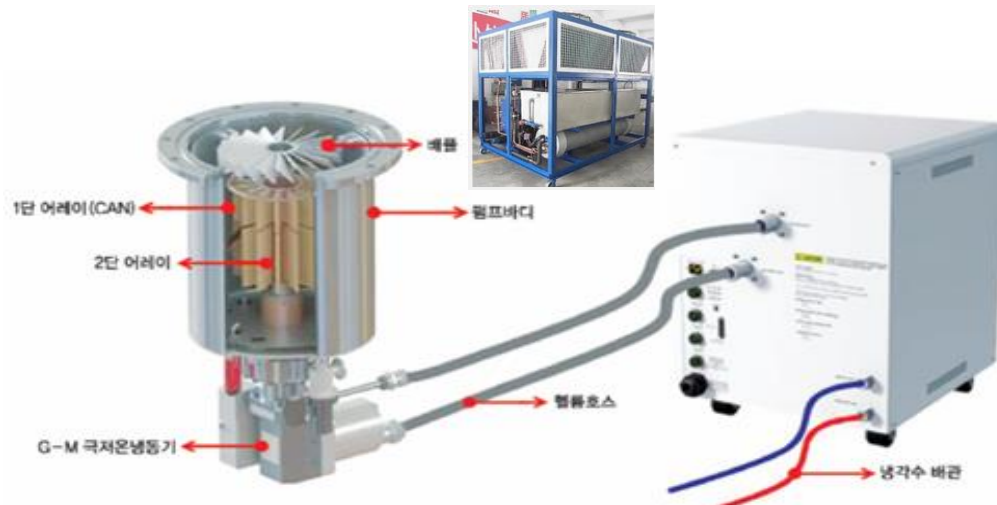
## TMP 구조





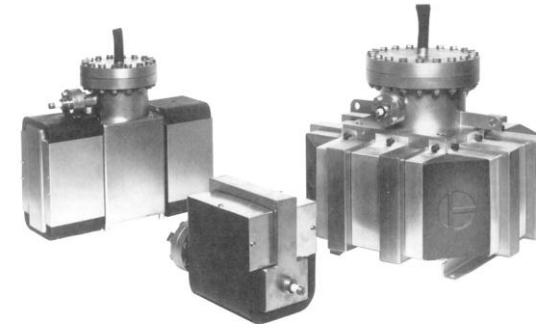
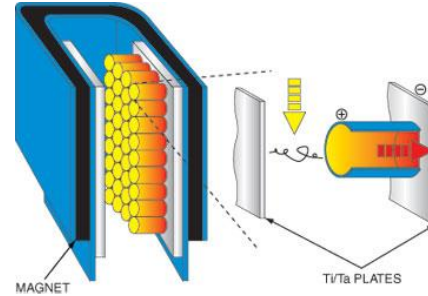
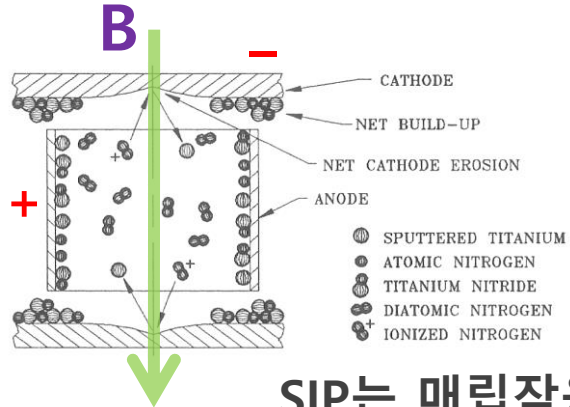
# 크라이오 펌프와 TMP 사이의 특성 비교

Items	Cryopump	Turbo Pump	Remarks
Performance	higher	Medium and high	CP: Powerful Pumping performance
Pumping Method	Entrapment pump	Mechanical pump	With/without moving parts in pump
	<b>Good for Type III gases, Water</b>	<b>Bad for type III gases, Water</b>	Cryopump is Only one to pump water!
	<b>Possible to large size</b>	<b>Impossible to large size</b>	In vacuum, Size = pumping ability
System	<b>complex</b> (Power + Cooling water)	<b>Simple</b> (Power)	CP: consists of compressor/pump/a lot of accessories
Vacuum Process	<b>Regeneration</b> <b>Non-continuous</b>	<b>No regeneration</b> <b>Continuous</b>	CP: has periodic regeneration cycles
Price	Relatively low cost	Relatively high cost	



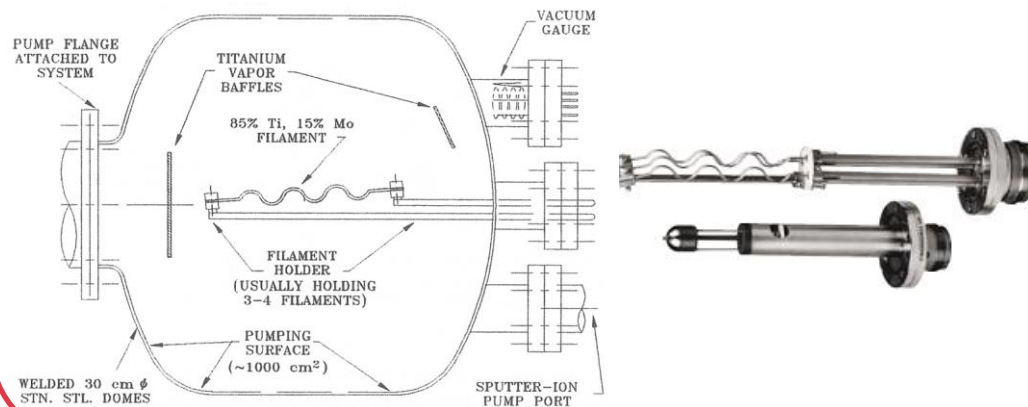
# 게터 펌프 종류

## 스퍼터 이온펌프 (SIP)

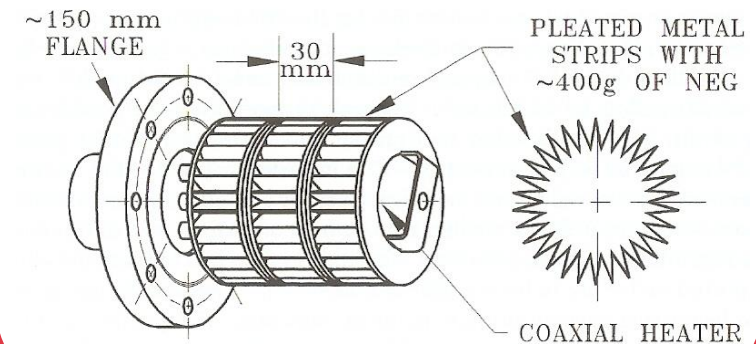


SIP는 매립작용에 의해 불활성 기체와 탄화수소 배기가 가능하다.

## 티타늄 승화 펌프 (TSP)



## 비증발형 게터 펌프 (NEG)



# 고진공 펌프의 성능지표

No.	Cryopump	TMP	비 고
1	도달진공도 Base pressure [mbar/Pa]		Bake-out을 통한 도달 진공도
2	<b>배기속도 Pumping speed [L/s]</b>		<b>가장 중요한 평가 항목</b>
3	<b>배기용량 Pumping capacity [std. L]</b>	-	Cryopump에만 해당
4	최대유량 Max. Throughput [mbar L/s]		
5	교차값 Cross over	-	Cryopump에만 해당
6	냉각시간 Cool down time [min]	펌프다운 시간 (목표 압력까지) [min]	
기타	재생시간(cryopump에만 해당), 압축비(TMP에만 해당), 소비전력, 소음, 진동, 내구성 평가 등이 있음.		

♠ TMP의 배기속도 측정 방법의 근거: PNEUROP 5608, ISO 5302, ISO 21360, ISO 21360-2, ISO 27892, AVS 4.1, AVS 4.2 [2-8]

♠ 크라이오펌프의 배기속도 측정 방법의 근거:

\* ISO21360: Vacuum Technology - Standard methods for measuring vacuum pump performance

\* PNEUROP PN5ASRCC/5: Vacuum Pumps - Acceptance Specifications - Refrigerator Cooled Cryopumps - Part 5

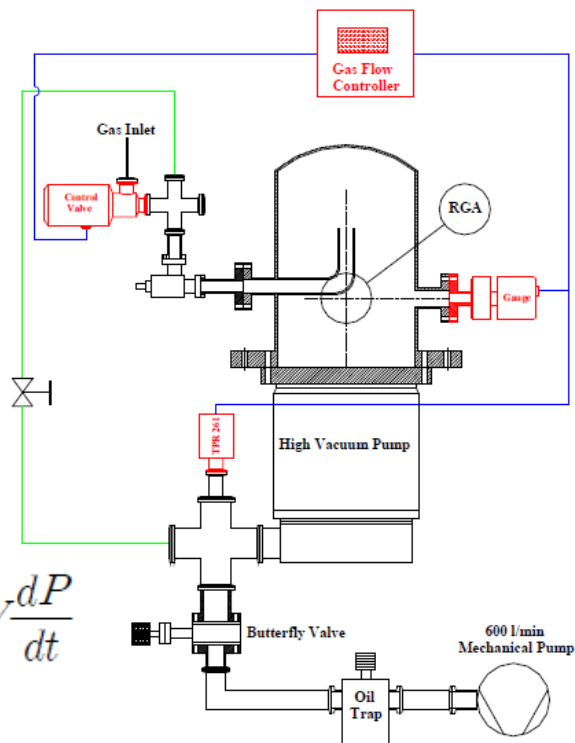
\* AVS: Recommended Practices for measuring the performance and characteristics of closed-loop gaseous helium cryopumps

# 고진공 펌프의 성능평가(배기속도 측정) 방법

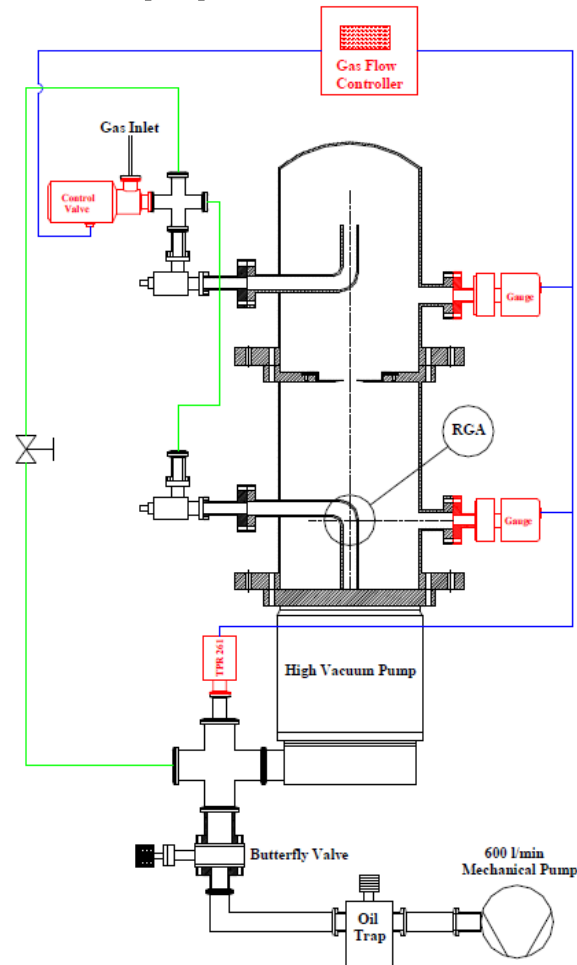
## 유량법

## 오리피스 법

Test Dome #1  
Throughput Method



Test Dome #2  
Orifice Method



$$S=Q/P$$

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt}$$

$$S = C \left( \frac{P_a - P_{a0}}{P_b - P_{b0}} - 1 \right)$$

$$C = \sqrt{\frac{\pi RT}{32M}} \frac{1}{1 + L/d} d^2$$

$L$ : 오리피스 두께  
 $d$ : 오리피스 직경

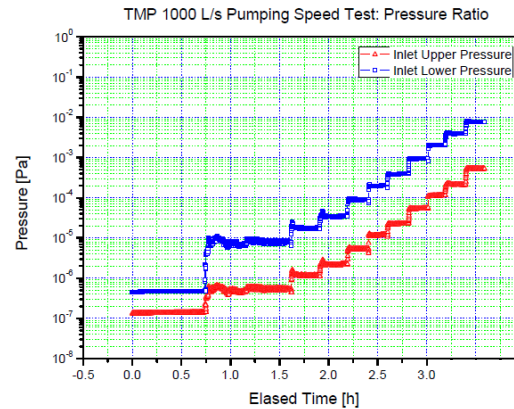
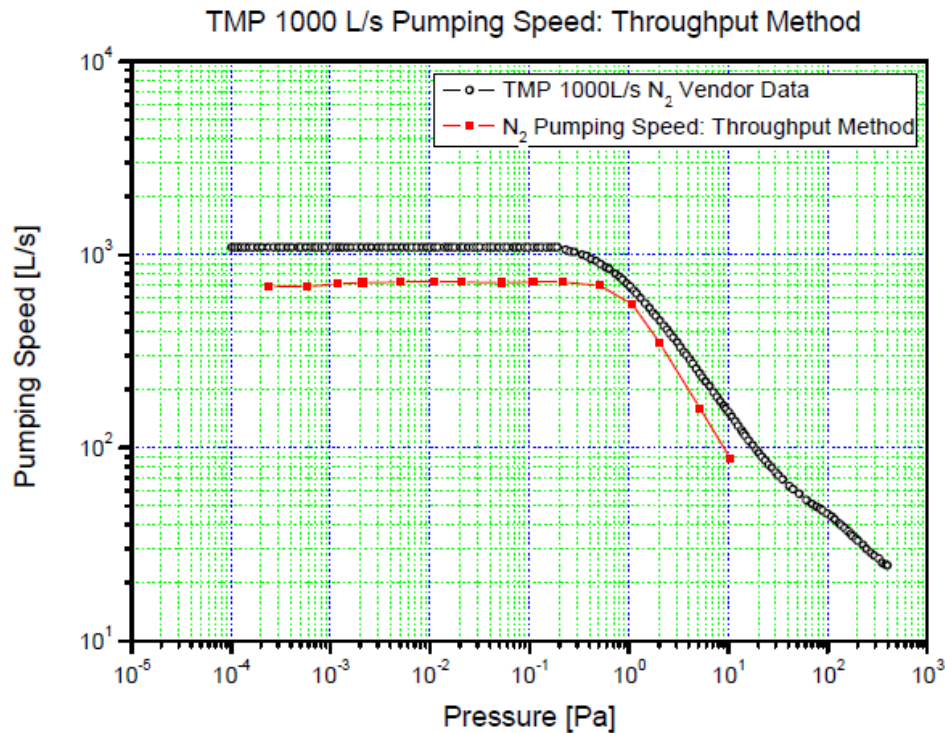
Schematic diagram of the apparatus for high vacuum TMP performance test.

출처: 한국진공학회지 제19권 4호, 2010년 7월, pp.249~255, 터보분자펌프(TMP) 배기속도 측정에 관한 고찰



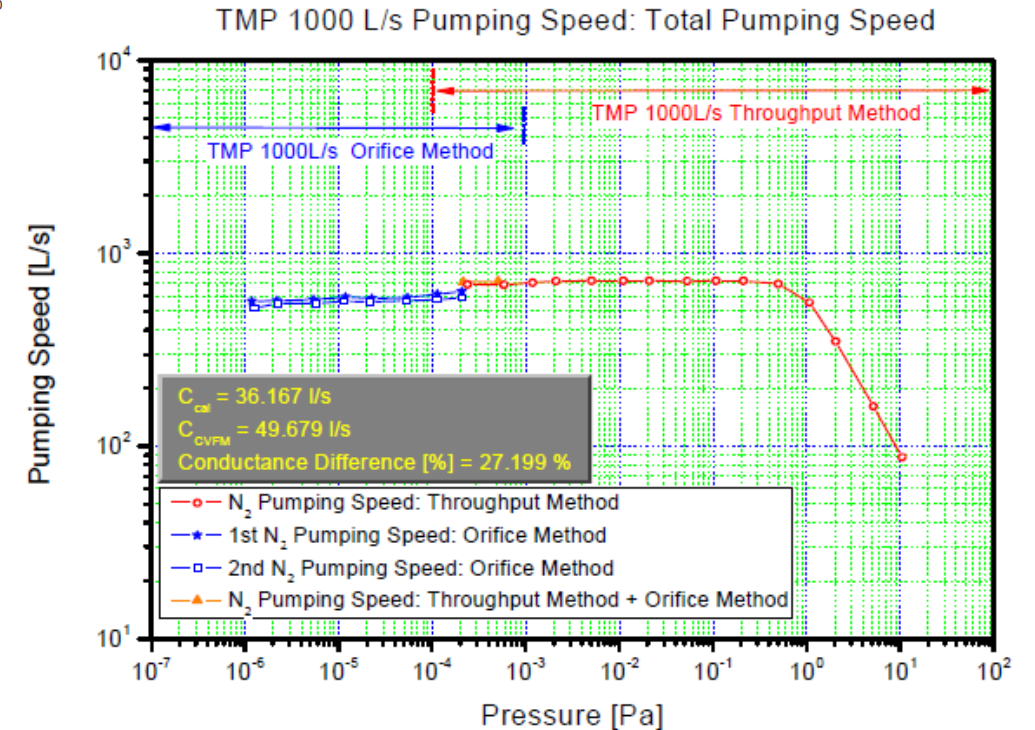
# 고진공 펌프의 성능평가 결과(예)

## 유량법 결과



← 오리피스법: 시간에 따른 압력변화

## 유량법+오리피스법 > 결과



# 고진공 펌프의 성능평가 방법(예: AVS, 크라이오펌프)

## Recommended practices for measuring the performance and characteristics of closed-loop gaseous helium cryopumps

Kim M. Welch<sup>a)</sup>  
Pollock Pines, California 95726

Bruce Andeen  
CTI Cryogenics, Mansfield, Massachusetts 02048-9171

Johan E. de Rijke  
Vacuum Technical Services, Morgan Hill, California 95037

Christopher A. Foster  
Cryogenics Applications F. Inc., Clinton, Tennessee 37716

Marsbed H. Hablani<sup>a)</sup>  
Varian Associates, Wellesley, Massachusetts 02481-5221

Ralph C. Longworth  
APD Cryogenics, Inc., Allentown, Pennsylvania 18103-4742

William E. Millikin, Jr.<sup>b)</sup>  
Balzers, Nashua, New Hampshire 03062

Y. Tito Sasaki  
Quantum Mechanics Corporation, Sonoma, California 95476-1579

Constantinos Tzemos  
CVI, Incorporated, Hilliard, Ohio 43026



(Received 23 December 1998; accepted 7 May 1999)

This article establishes a set of uniform procedures for quantitatively characterizing closed-loop gaseous helium cryopumps. Topics include a listing of technical definitions and hardware illustrations of cryopumps; safety considerations in the use of cryopumps; methods and procedures for determining the speed, ultimate pressure, capacity, cool-down time, impulsive gas load tolerance, regeneration time, thermal radiation tolerance, and maximum throughput tolerance of cryopumps; and, a method of measuring the vibration characteristics of cryopumps. © 1999 American Vacuum Society. [S0734-2101(99)06405-2]

### I. FOREWORD

This document establishes a set of uniform procedures for quantitatively characterizing closed-loop, gaseous helium cryopumps. It does not treat the characterization of cryopump refrigerators or liquid helium cryopumps. The former subject is primarily relevant to the design of cryopumps, and beyond the scope of this practice. The latter is of very limited use, and believed not to merit inclusion in this recommended practice.

These recommended practices are based on sources and information believed to be reliable. However, the American Vacuum Society and the authors disclaim any warranty or liability based on or relating to the contents of this material. Nothing in this practice should be construed as an endorsement of a manufacturer or supplier of equipment. Special attention should be paid to Sec. III, SAFETY, before proceeding with any of the recommended practices.

<sup>a)</sup>Consultant, Committee Chair, and editor; electronic mail: kinsow@infom.net  
<sup>b)</sup>Retired.

### I.1 Gauging and Instrumentation

Calibration of all critical instrumentation such as vacuum gauges, gas flow meters, and temperature measuring instruments, shall be traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST), or some other recognized national standards laboratory. However, it is permitted to assume that vacuum gauging (e.g., Bayard-Alpert gauges) will be linear over several orders in magnitude beyond the immediate range of calibration. Instrumentation used to measure cryopump array temperatures in all applicable tests shall have accuracies of  $\pm 0.5$  K.

### I.2 Accepted vacuum practices

These recommended practices require high standards of quality and workmanship when preparing and operating the vacuum test equipment. It is assumed that the user has prior knowledge in acceptable vacuum practices, and in the use of good experimental technique. The user unaware of these technologies is referred to existing American Vacuum Society Recommended Practices published in the literature, basic

## Recommended practices for measuring the performance and characteristics of closed-loop gaseous helium cryopumps

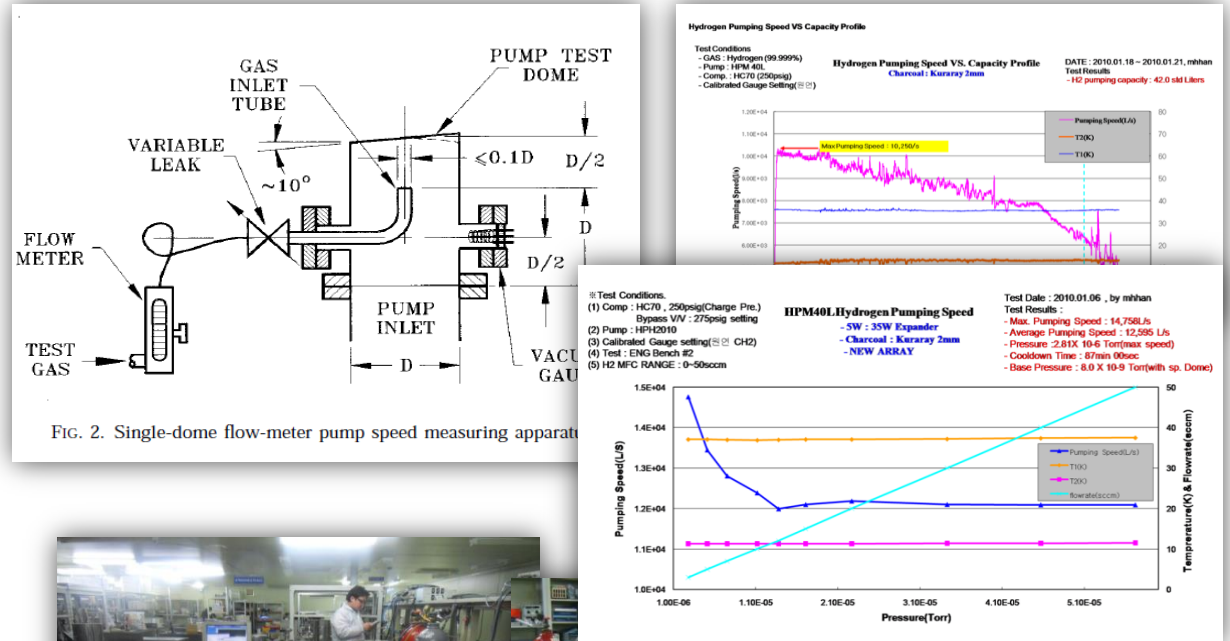
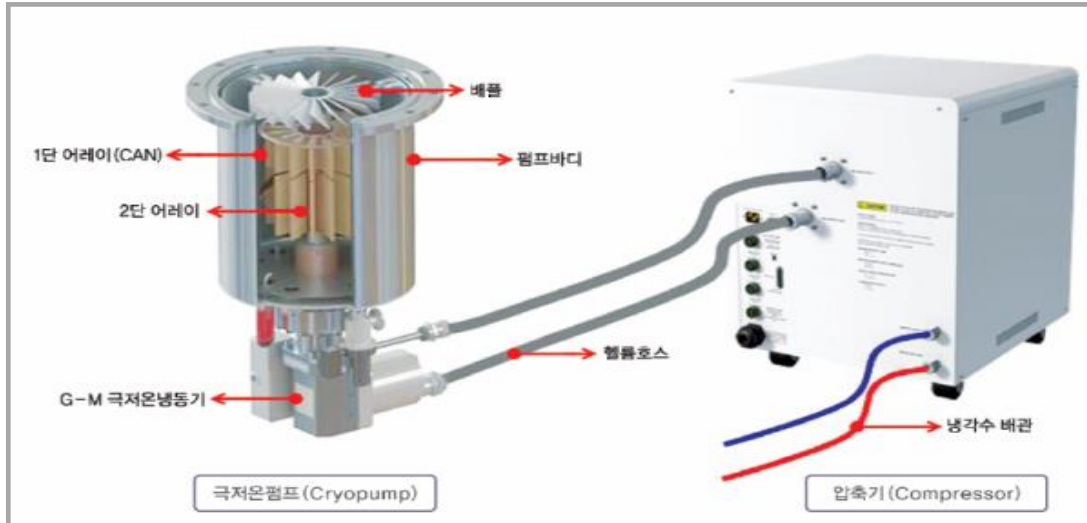
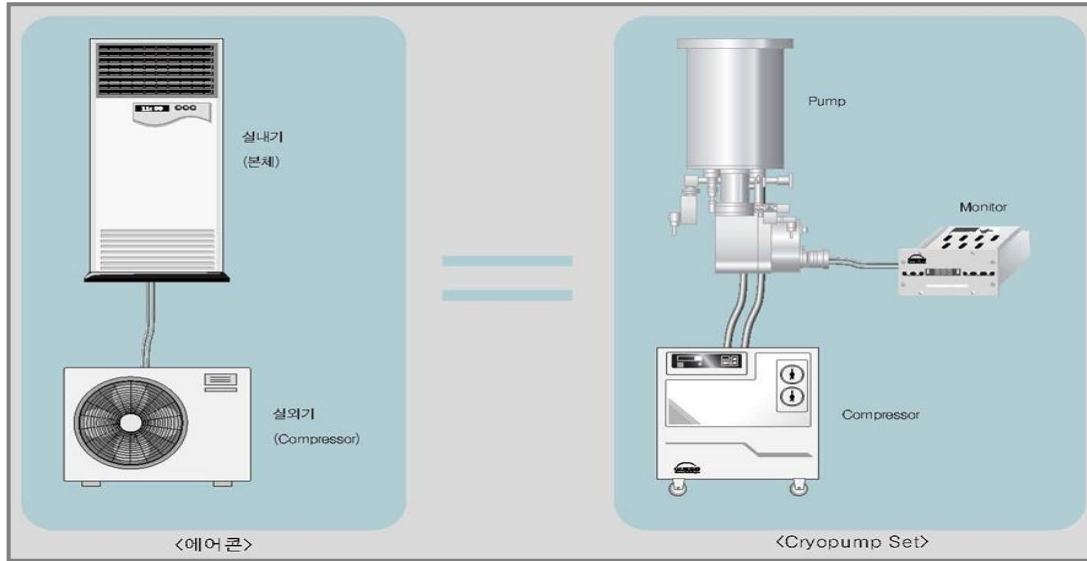


Fig. 2. Single-dome flow-meter pump speed measuring apparatus

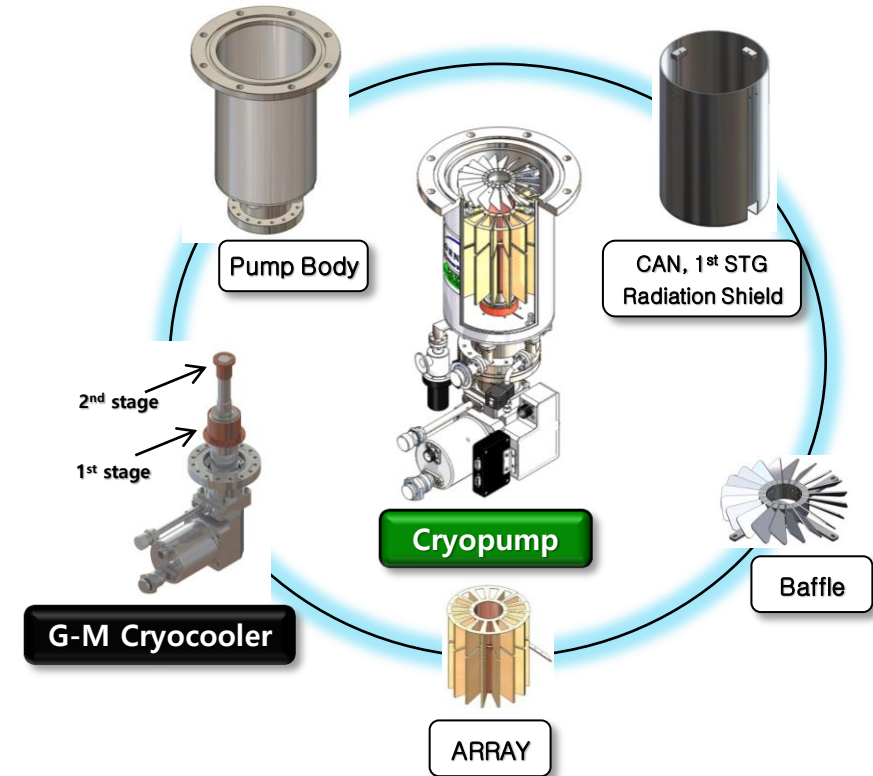




# Cryopump?

## 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.





# The Cryopump Structure and Operating Principle

## 1. 1<sup>st</sup> STG Array(Baffle): (40K~80K)

- water pumping
- protect 2<sup>nd</sup> STG Array from the Radiation Heat of main chamber

## 2. Radiation Shield(CAN):

- protect 2<sup>nd</sup> STG Array from the Radiation Heat of pump body

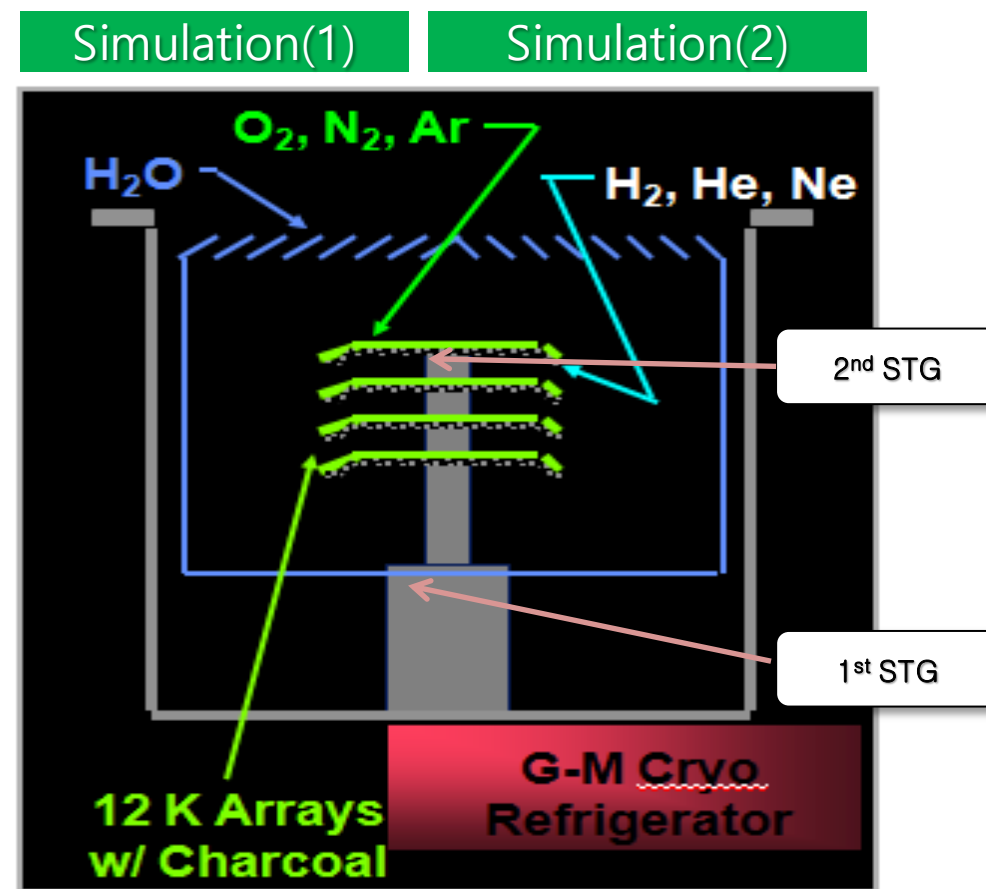
## 3. 2<sup>nd</sup> STG Array(Charcoal Array): (10K~14K)

- type II, type III gases pumping

※ Type I gas: A gas which is cryocondensed at the operating temperatures of the 1<sup>st</sup> STG array (H<sub>2</sub>O)

Type II gas: A gas which is cryocondensed at the operating temperatures of the 2<sup>nd</sup> STG array (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar)

Type III gas: A gas which can only be cryopumped by cryosorption, and usually through the use of a sorbent material(generally, activated charcoal) at temperatures of under 20K (H<sub>2</sub>, He, Ne)





# Pump Upgrade from ICP to HP Series

## ■ L-TYPE PUMPS COMPARISON (HPM .vs. ICP) ■

### HPM SERIES



HPM20LQ-JIS



HPM25LQ-JIS



HPM30LQ-JIS



HPM32LQ-ISO



HPM40LQ-JIS

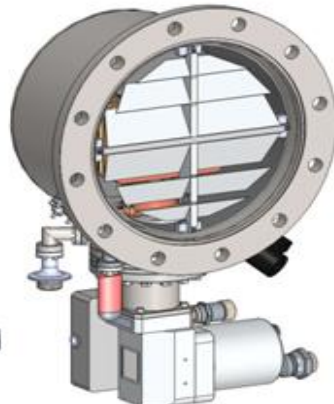
### ICP SERIES



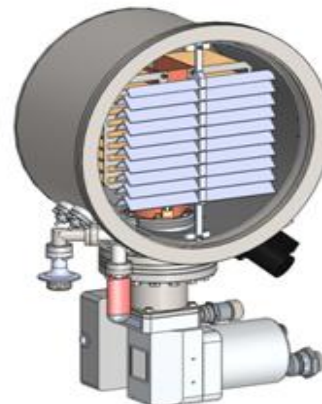
ICP200LQ-ISO



ICP250LQ-ISO



ICP300LQ-ANSI



ICP320LQ-ISO

# 크라이오펌프의 모델별 크기와 형식

## ■ Up-TYPE PUMPS COMPARISON (HP Series .vs. ICP) ■

### HP SERIES



### ICP SERIES



## 크라이오펌프의 전형적인 브로셔 자료



## HPM40L or HPH40L

Technical drawing of the HPM40L Classic cryopump. The top view shows a circular flange with a central mounting hole and eight surrounding holes. Dimensions include a total diameter of 140mm, a central hole diameter of 10mm, and a flange thickness of 10mm. The side view shows a cylindrical body with a diameter of 140mm and a height of 100mm. A label 'SPARE PART' is visible on the side view.

# GVT, Inc.

## GVT Cryopumps HPM40L Classic

Genesis HPM40L Classic is a CE and SEMI compliant surface analysis and high vacuum research application optimally tune cryopumps to customer specific applications.

Built on the high wattage refrigerator platform, the sacrificing the radiation capacity. Genesis pumps are

They are designed for use on the design. Keep focus on the pump third of a state the ca the pr together achieve 'group

The HPM40L Classic is available in two different configurations. The 'Q' option pumps include an internal heaters and temperature sensors. The Gen3 controller has the sensors, transducers and gauges which are mounted

Apart from its capability to perform 'Partial Regeneration' ways. Either of the methods ensures effective clean-up

The closed loop compressors that drive helium through the 'Optional Smart Compressor' if procured, can give

# HPM 40L Classic

## HPM 40L Classic TECHNICAL DATA & ORDERING INFORMATION

### TECHNICAL DATA

CLASSIC MODEL SPECIFICATION		HPM40L	HPM40LO
Weight (kg)		42	42
Space Saving Pump (Compact Design)	Yes/No	Yes/No	Yes/No
Pumping Speed (Ltr/Sec)	Nitrogen Hydrogen Argon Water	5,000 15,000 4,500 16,000	5,000 15,000 4,500 16,000
Base Pressure	Torr	< 10 <sup>-9</sup>	< 10 <sup>-9</sup>
Maximum Flow Rate for Argon	Torr Ltr/Sec	13	13
Pumping Capacity (Std Liters)	Argon Hydrogen	3,500 42	3,500 42
Crossover Throughput	Torr L	550	550
Cooldown Time	Minutes	80	80
Standard Regeneration Time	Full Regeneration (minutes) Quick Regeneration (minutes)		160 70

### ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	PART No.	DESCRIPTION	PART No.
HPM40L High Vacuum, High Vacuum, Expander Right	H081-5401	HPM40L High Vacuum, Expander Right	H081-5501
* This place holder is for the type of flange that is used, it is: 1: ASA 2: CFF 3: ISO (Clamp) 4: ANSI, ASA Rotatable 5: CFF Rotatable 7: JIS. (4,5,6, Special)			
ACCESSORIES	PART NUMBER	NOTE	
Helium Compressor 2.1 Compressor	631-1200/1300	For One Pump Operation (50Hz/60Hz)	
Helium Compressor HC80Plus	741-2100 (2P-220V) 741-3100 (2P-380V)	For Multi-pump Operation	
Gen3 Controller (For up to 5 pumps)	650-2050 650-2030 650-1210	5 Module Controller 3 Module Controller Half Rack, 1 Module	
Cryoboss Network Controller	645-3000		
Compressor I/O Cable, DB9, M/F, 50 ft	142-003050		
Compressor I/O Cable, Dual, 50 ft	142-004150	Use when more than 2 compressors are connected to one Gen3	
Expander power Cable, 20 ft	131-000920	For Other Length, Contact GVT	
Pump Digitizer Cable, 20 ft	131-006420	For Other Length, Contact GVT	
AC Heater Power Distribution Box	130-001200	220V	
AC Heater Cable Assembly, 25 ft	142-003925	For Other Length, Contact GVT	
Heater Distribution Box Power Cable, 10 ft	142-004010	For Other Length, Contact GVT	
Compressor Power Cord, 15ft	121-006800/01150X	For Other Length, Contact GVT (2.1/HC80Plus)	
Handheld Service Terminal	140-000700		
Helium Hose Set	Contact GVT	For multiple pumps on the same compressor, add manifold	
Manifold Set: One Compressor : Multi - pump	565-003 565-004	1/2, 3/4" Ø hose Set : For 2 pumps 1/4, 3/4" Ø hose Set : For up to 4 pumps	
Manifold Set: Multi-compressor Connect to Tool Manifold	141-005200 141-005400 141-005600 141-005800	2/1, 3/4" to 2x3/4" Aeroquips 1/1, 1" to 2x3/4" Aeroquips 3/1, 3/4" to 2x3/4" Aeroquips 3/1, 1" to 3x3/4" Aeroquips	

\* Important Notice: We reserve the right to make changes without notice in our products and in the information and content of this brochure. The statements and information in the brochure are intended to serve only as guides. There are no warranties or binding descriptions of the products.

GVT, Inc. 577-4

GVT, Inc. 577-4 Chilgoe-Dong, Pyeongtaek-Si, Gyeonggi-Do, Korea 459-050  
www.gvt.kr

(LDJ Rev A)



# 크라이오펌프의 성능사양

## HPM 40L *Classic* TECHNICAL DATA & ORDERING INFORMATION

### TECHNICAL DATA

CLASSIC MODEL SPECIFICATION		HPM40L	HPM40LQ
Weight (Kg)		42	42
Space Envelop (Refer to Outside View DWGs)	L X W X H (mm)	520X225X733	520X225X733
Pumping Speed ( Liter/Sec)	Nitrogen	5,000	5,000
	Hydrogen	15,000	15,000
	Argon	4,500	4,500
	Water	16,000	16,000

Base Pressure  
Maximum Flow Rate for Argon  
Pumping Capacity (Std Ltr)  
Crossover Throughput  
Cooldown Time  
Standard Regeneration Time  
(With 30 min extended purge)

### ORDERING INFORMATION

DESC  
HPM40LQ - Quick Regen.,  
Expander Right  
\$ - This place holder is for  
under developing

### ACCESSORIES

Helium Compressor 2.1  
Helium Compressor HC

Gen3 Controller (For up to 3)

Cryoboss Network Control

Compressor I/O Cable, DB9

Compressor I/O Cable, Dual

Expander power Cable, 20 ft

Pump Digitizer Cable, 20 ft

AC Heater Power Distribution

AC Heater Cable Assembly

Heater Distribution Box Power

Compressor Power Cord, 10

Handheld Service Terminal

Helium Hose Set

Manifold Set: One Compressor

Manifold Set: Multi-compressor

to Tool Manifold

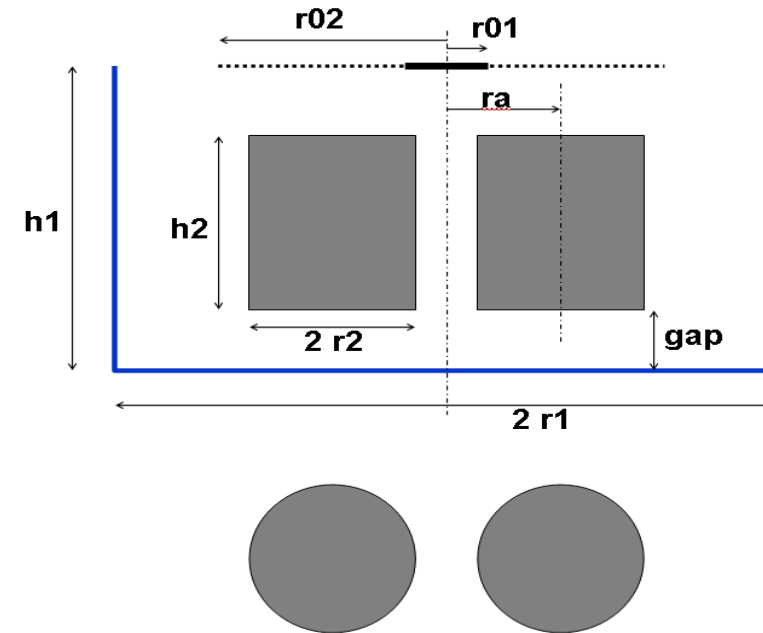
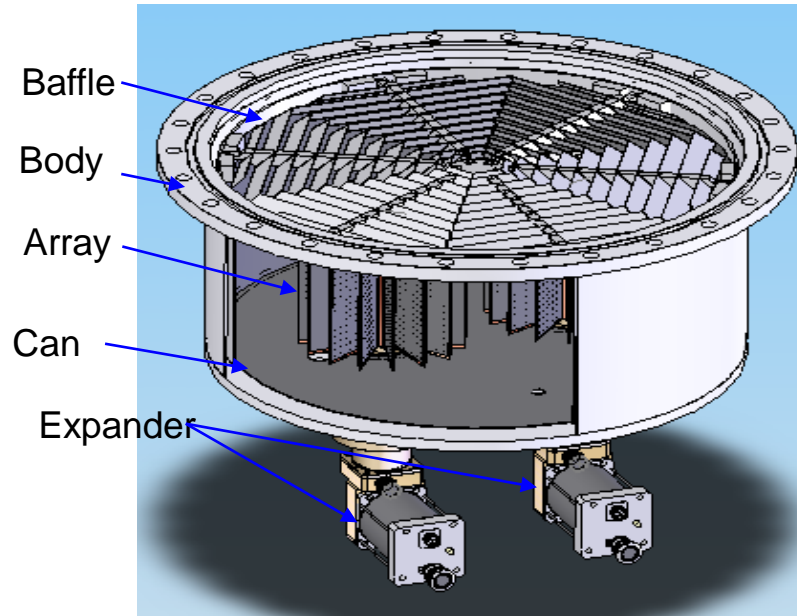
\* Important Notice: We reserve

The statements and information

## TECHNICAL DATA

CLASSIC MODEL SPECIFICATION		HPM40L	HPM40LQ
Weight (Kg)		42	42
Space Envelop (Refer to Outside View DWGs)	W x D x H (mm)	520 X 225 X 733	520 X 225 X 73
Pumping Speed ( Liter/Sec)	Nitrogen	5,000	5,000
	Hydrogen	15,000	15,000
	Argon	4,500	4,500
	Water	16,000	16,000
Base Pressure	Torr	$< 10^{-9}$	$< 10^{-9}$
Maximum Flow Rate for Argon	Torr Ltr/Sec	13	13
Pumping Capacity (Std Liters)	Argon	3,500	3,500
	Hydrogen	42	42
Crossover Throughput	Torr L	550	550
Cooldown Time	Minutes	80	80
Standard Regeneration Time (With 30 min extended purge for Full Regen)	Full Regeneration (minutes)		160
	Quick Regeneration (minutes)		70

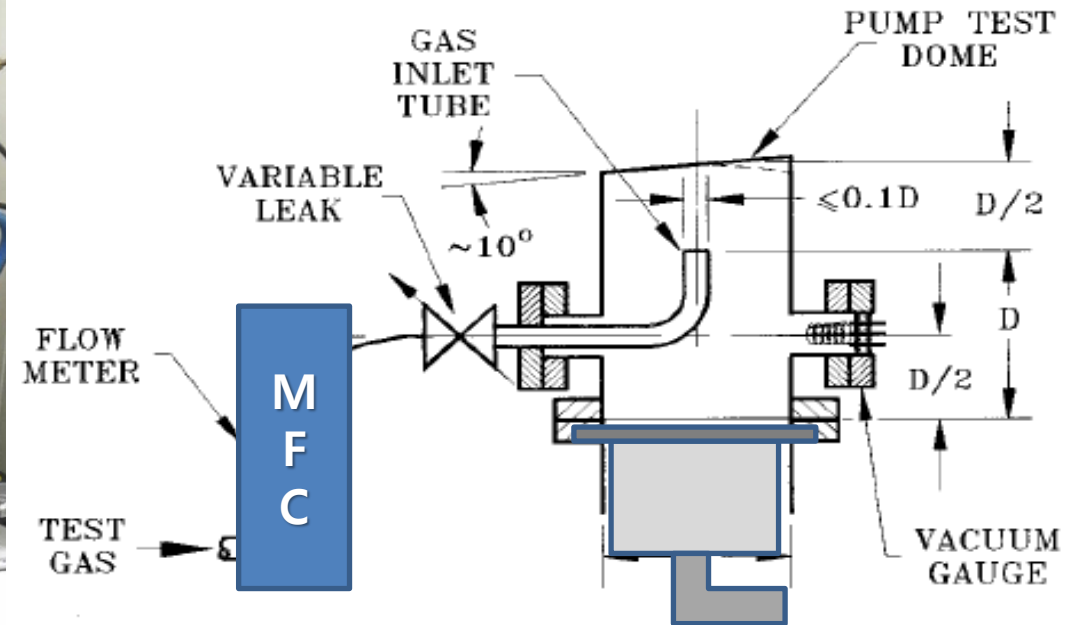
# The Pumping speed, $S_p$ Calculation by Monte Carlo Simulation



Model	$h1$	$h2$	$r1$	$r2$	$ra$	$r01$	$r02$	gap	$Sp_{H_2}$	$Sp_{N_2}$
<b>550(2)</b>	<b>25.7</b>	<b>19</b>	<b>28.3</b>	<b>7.9</b>	<b>13</b>	<b>6.8</b>	<b>25.5</b>	<b>1.37</b>	<b>31000</b>	<b>8300</b>
		<b>22</b> <b>22</b>		<b>12.5</b> <b>12.5</b>			<b>25.5</b> <b>(23)</b>		<b>40000</b> <b>(44000)</b>	<b>10600</b> <b>(11800)</b>



# Baseline Test Apparatus



# 1. Pumping Speed

$$S_p = Q/P$$

Here,

$S_p$  : pumping Speed [L/s]

$Q$  : Flow Rate [sccm]

$P$  : Pressure [mbar or Torr or MPa]

## V.6.2 Definition

Pumping speed is defined as a volumetric displacement rate or volumetric flow rate, and is the value of the quotient  $Q/P$  anywhere in that systems. The units of pumping speed are liters per second, or L/s.

$$S_p = c A_p \bar{v}/4$$

Here,

$c$ : capture probability

$A_p$ : entry aperture Area

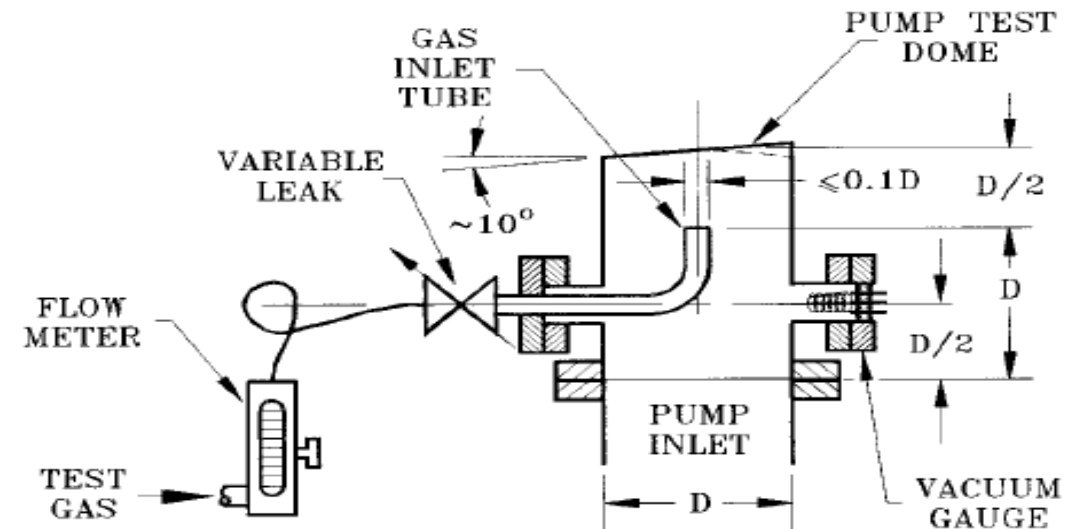
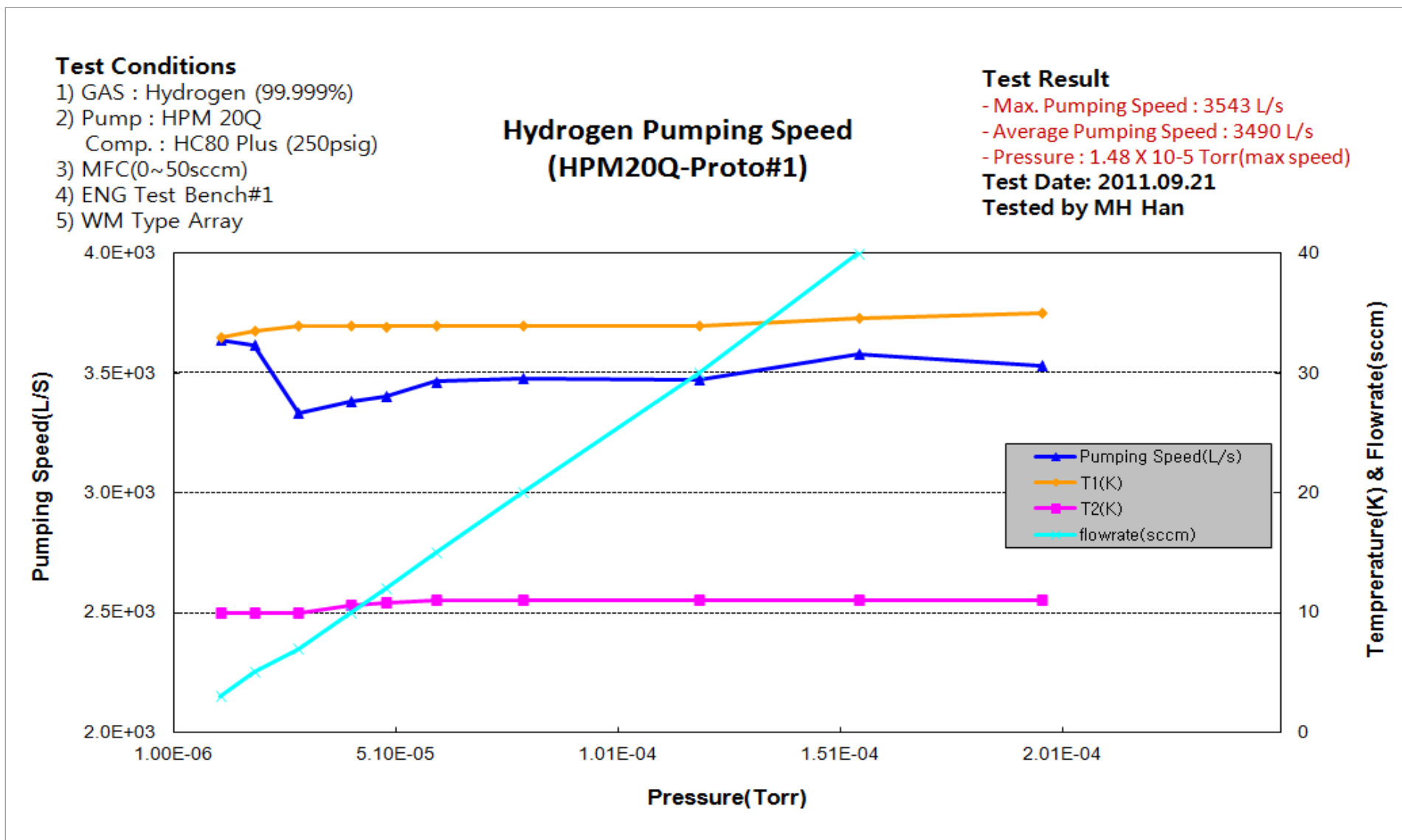


FIG. 2. Single-dome flow-meter pump speed measuring apparatus.

# 1. Pumping Speed



## 2. Pumping Capacity

### V.6.2 Definition

**V.2.2.1 Single-Gas Pumping Capacity:** The quantity of a specified RT(room temp.) gas, in Torr L(or mbar L or Mpa L), which can be pumped at any pressure, while thereafter, at a specified pressure  $P_t$ , the pumping speed  $S_p$ , is 50% of the speed at  $P_t$ , and as measured subsequent to a regeneration.

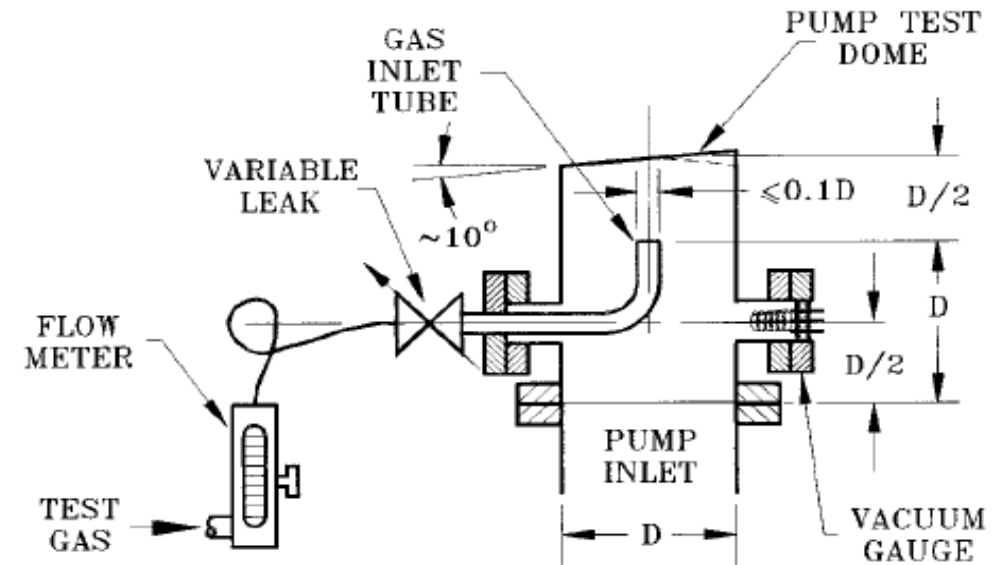


FIG. 2. Single-dome flow-meter pump speed measuring apparatus.

**V.2.5.1 Rating:** Plot the pump speed for test gas as a function of the amount of gas which has been pumped. Interpolate the data to establish the quantity of gas pumped at which time the pump speed  $S_p$  at  $P_t$  is 50% of the average speed,  $S_{max}$ .

## 2. Pumping Capacity

### Test Conditions

- 1) GAS : Hydrogen (99.999%)
- 2) Pump : HPM 20Q  
Comp. : HC80 Plus (250psig)
- 3) MFC(0~50sccm)
- 4) ENG Test Bench#1
- 5) Wm Type Array

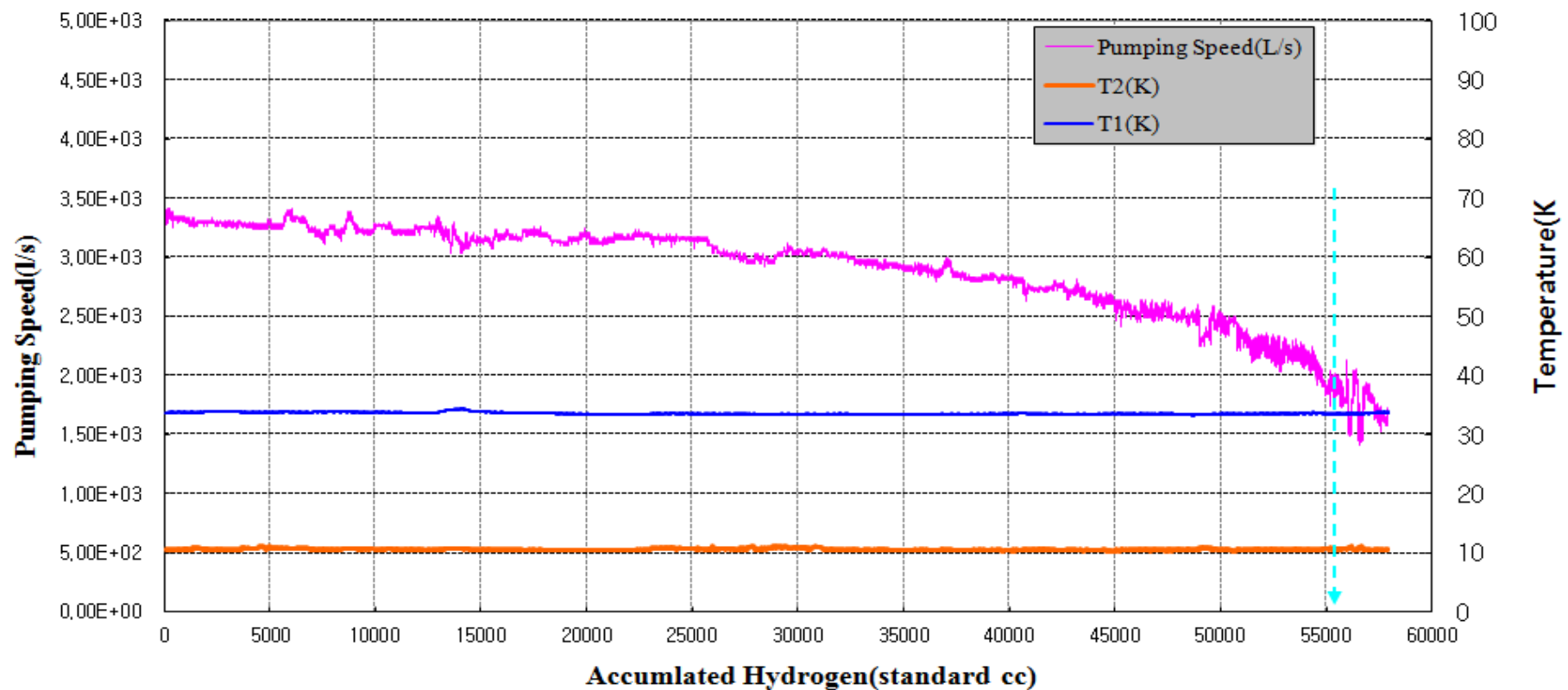
### Hydrogen Pumping Capacity (HPM20Q-Proto#1)

### Test Result

- H2 Pumping Capacity: 55.0 std.L

Test Date: 2011.10.20~10.29

Tested by MH Han







### 3. Max. Throughput (for Ar)

#### V.8.2 Definition

The maximum throughput is the maximum constant RT gas flow rate, in Torr L/s, which a cryopump can pump with temperature T2(2<sup>nd</sup> STG Temp.) at 20K

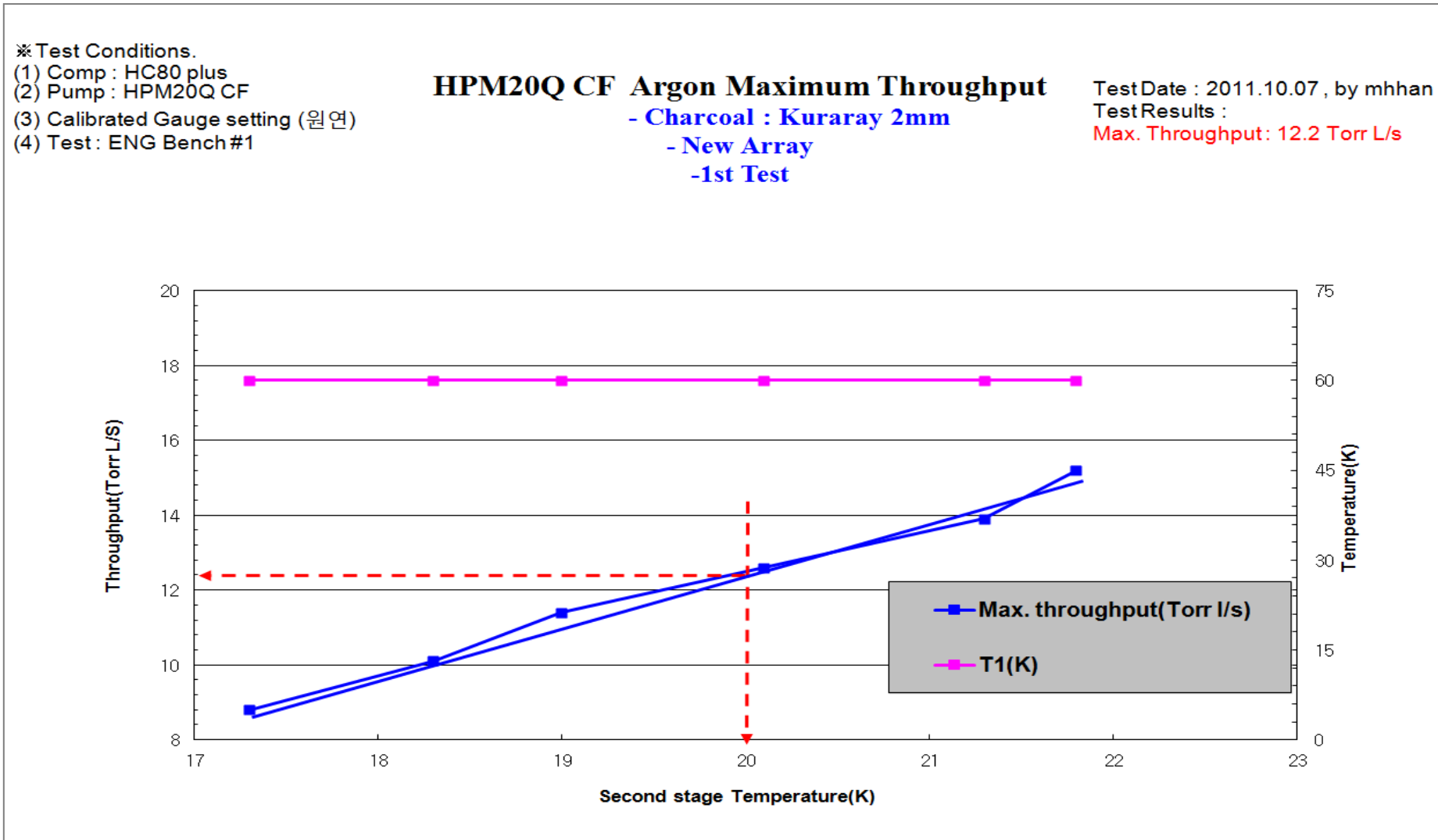
#### [Condition]

- T1(1<sup>st</sup> STG Temp.) > 65 K
- T2(2<sup>nd</sup> STG Temp.) is in the range of 17–23 K.

#### [Rating]

- record a minimum of 6 stabilized temperatures and flow rates.
- Both array temperatures must equilibrate for >0.25 h(15min) prior to each reading.
- Of the six data points, at least two T2 temperature measurements must be taken above 20K, and at least two T2 temperature measurements taken below 20 K.

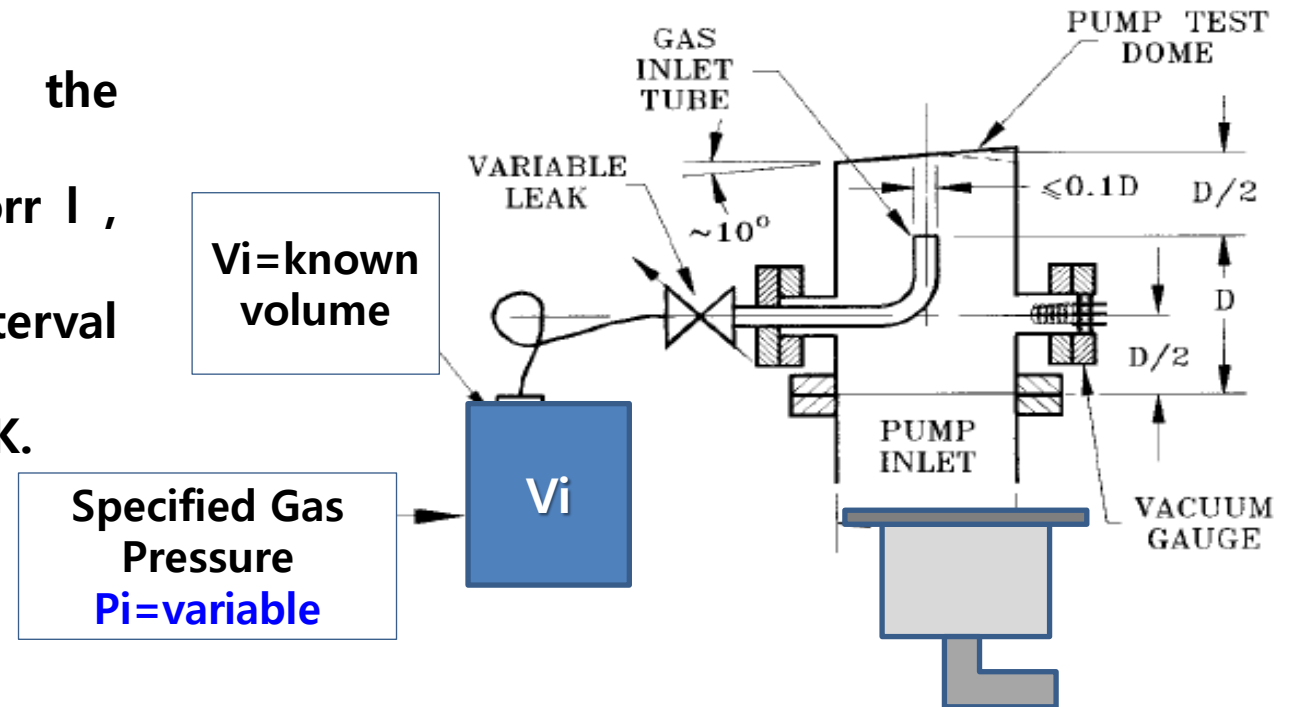
### 3. Max. Throughput (for Ar)



## 4. Crossover

### V.8.2 Definition

The impulsive gas load tolerance is the maximum quantity of RT nitrogen or argon gas, ( $P_i V_i$ ) in Torr l, which can be admitted into a cryopump in a time interval of  $< 3.0$  s, while T2 remains at a temperature of  $< 20$  K.



(For example)

$P_i$ [Torr]	120	140	160	170	180
$V_i$ [L]-fixed	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
Crossover	660	770	880	935	990
2 <sup>nd</sup> Temp.	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0

## 4. Crossover

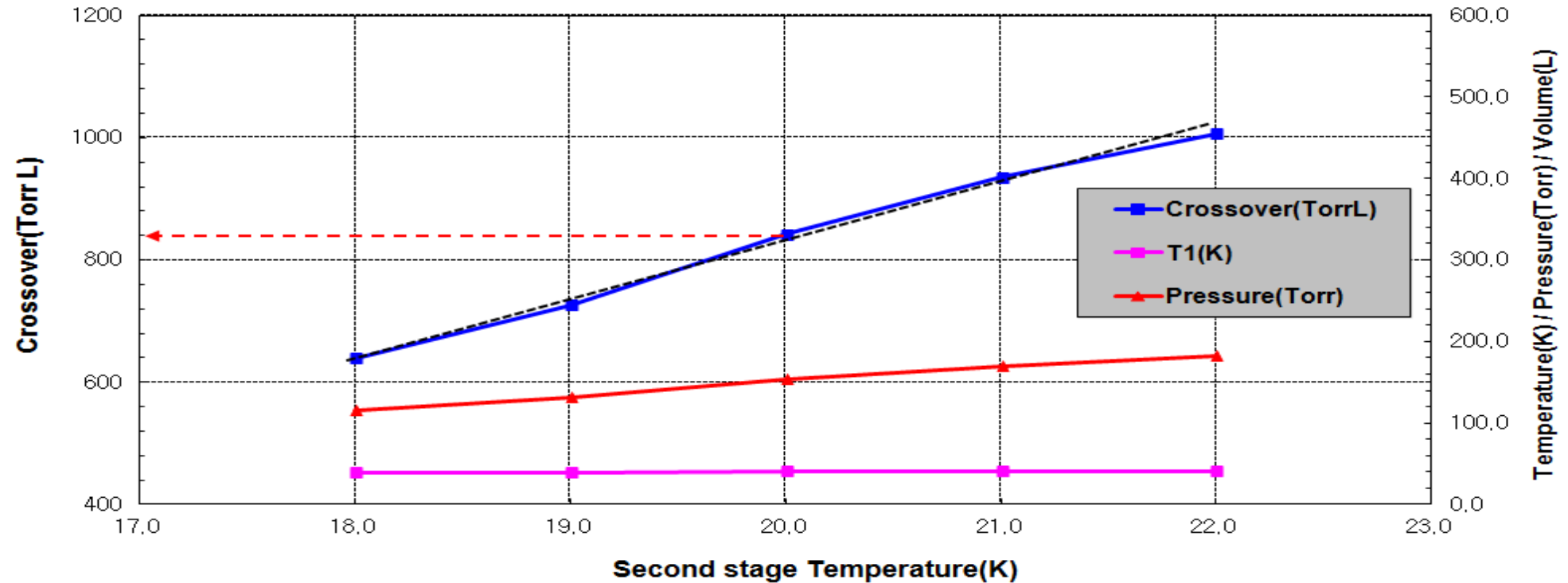
### Test Conditions

- 1) GAS : N<sub>2</sub> (99.999%)
- 2) Pump : HPM 20Q  
Comp. : HC80 Plus (250psig)
- 3) Keller Gauge / 5.5L Chamber
- 4) ENG Test Bench#1
- 5) WM Type Array

### Crossover (HPM20Q-Proto#1)

### Test Result

- Crossover: 840 Torr.L  
Test Date: 2011.10.15  
Tested by MH Han



# 5. Cool Down Time

## V.3.2 Definition

Cool-down time is defined as the elapsed time between when: (1) the cryopump T2 and T1 , respectively, are  $>RT$ ;  
 (2) the refrigerator is turned on;  
 (3) T2  $<20K$  and T1  $<130 K$ , respectively, are achieved.

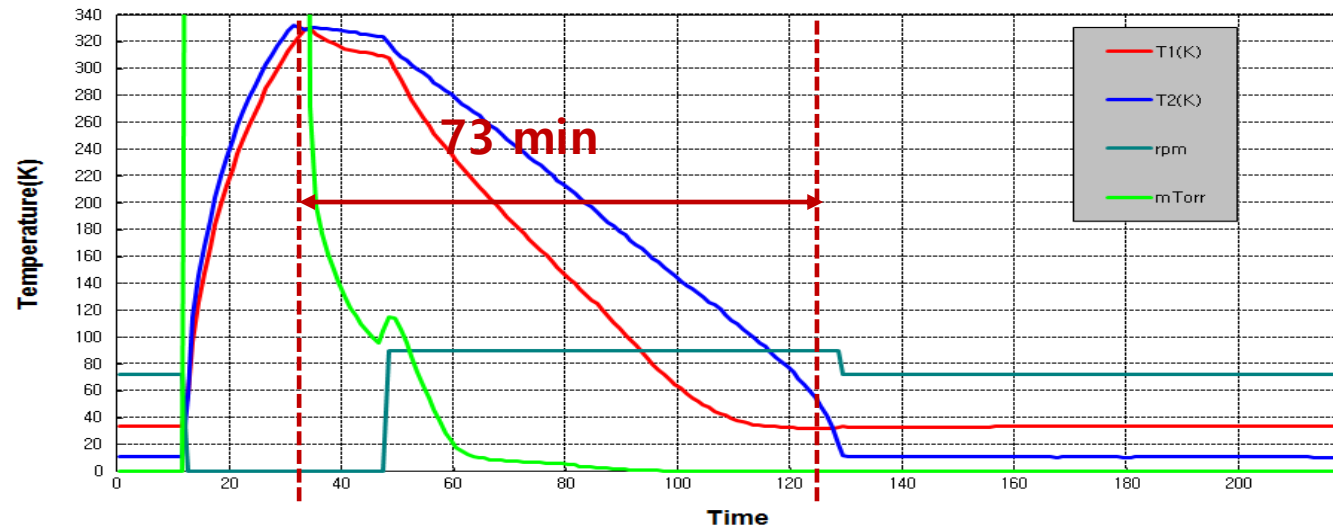
### Test Conditions

- 1) GAS : - (99.999%)
- 2) Pump : HPM 20Q  
Comp. : HC80 Plus (250psig)
- 3) MFC
- 4) ENG Test Bench#1
- 5) WM Type Array

### Cool Down Test (HPM20Q-Proto#1)

### Test Result

- 1) Cooldown Time: 73 min  
Regen Time(C to C): 116min
- 2) Base Temp: 33.1K/10.5K
- 3) Base Pressure:  $1.1 \times 10^{-8}$  Torr  
(with Speed Dome)
- Test Date: 2011.09.20
- Tested by MH Han





## - II 부 -

### 오해하기 쉬운 진공의 기초

1. 압력이란? 압력과 온도와 분자밀도
2. 누설율(유량)의 물리적 의미
3. 진공 배기 특성(공간배기와 표면방출); 왜 로그(Log)에 익숙해져야 하는가?
4. 실전에 필요한 진공의 기초지식(황당한 설계 오류!)
5. 진공배기와 컨덕턴스(직관적 이해)
6. 컨덕턴스의 합성 그리고 전기회로와의 유사성
7. 차이점을 구별하자! 유량, 압력, 컨덕턴스, 배기속도
8. 컨덕턴스는 왜 필요한가?

# ‘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:  $\bar{R} = N_A k_B$ ,  $n_m = m_t/M$ ,  $R = \bar{R}/M$

# 압력의 크기와 단위

암기!

1 atm(해수면에서 대기의 압력)  
= 760 mmHg ( $\equiv$  Torr)  
= 1033.23 cmH<sub>2</sub>O  
= 14.7 Psi  
= 1.03323 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>  
= **101325 N/m<sup>2</sup> ( $\equiv$  Pa)**  
= **1013.25 mbar ( $\equiv$  hPa)**

1 mbar = 100 Pa = 0.75 Torr



# 압력용기 내의 압력에 대한 체감 의미



수소가스 용기  
(46.7L)

봉입압력: 120 bar  
(12 MPa)



.....



120 개

## 단위변환 응용!

Q1. 수소 100 Nm<sup>3</sup> 의 중량(무게)은 얼마인가?

Q2. 수소 100 Nm<sup>3</sup>/day 체적유량을 질량유량으로 변환하시오.  
cf. 질량, 중량(무게)의 차이점?

$$100 \text{ Nm}^3 = 100 * 1000 \text{ std. L} * \frac{2.016 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \frac{1 \text{ mol}}{22.414 \text{ L}}$$

$$100 \text{ Nm}^3/\text{day} = 100 * 1000 \text{ std. L} * \frac{2.016 \text{ g}}{22.414 \text{ L}} / \text{day}$$

$$= 8,994 \text{ g/day} = \sim 9 \text{ kg/day}$$



## 이상기체 상태방정식 응용!

Q3. 가스 업체에서 47L 알곤 가스를 주문했다. 용기의 압력이 120bar일 때 이 용기에 든 알곤 가스의 무게는 얼마인가?  
(단, 온도는 20도)

$$m_t = (P V M)/(R_u T) = \frac{12 \times 10^6 * 0.047 * 0.04}{8.314 * 293}$$
$$= 9.26 \text{ kg}$$

※ 실제 가스인 경우와 이상기체상태방정식을 사용한 경우에 얼마나 차이가 날까?

## 이상기체 상태방정식 응용!

Q4. 어떤 크라이오펌프의 알곤(Ar) 배기용량(pumping capacity)이 10,000 [std. L]로 알려져 있다. 실제 배기용량 시험을 위해 알곤 가스를 주문하려 한다. 47리터 용기를 몇 개 주문해야 할까?

$$10,000 \text{ std. L} \Rightarrow 10000 \text{ std. L} \frac{1 \text{ mol}}{22.414 \text{ L}} \frac{40 \text{ g}}{1 \text{ mol}}$$
$$= 17,857 \text{ [g]} = 17.9 \text{ [kg]}$$

1통이 9.26 kg이므로, 2통이 필요하다!

※ 실제 가스인 경우와 이상기체상태방정식을 사용한 경우에 얼마나 차이가 날까?

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.  $P=nkT$ .

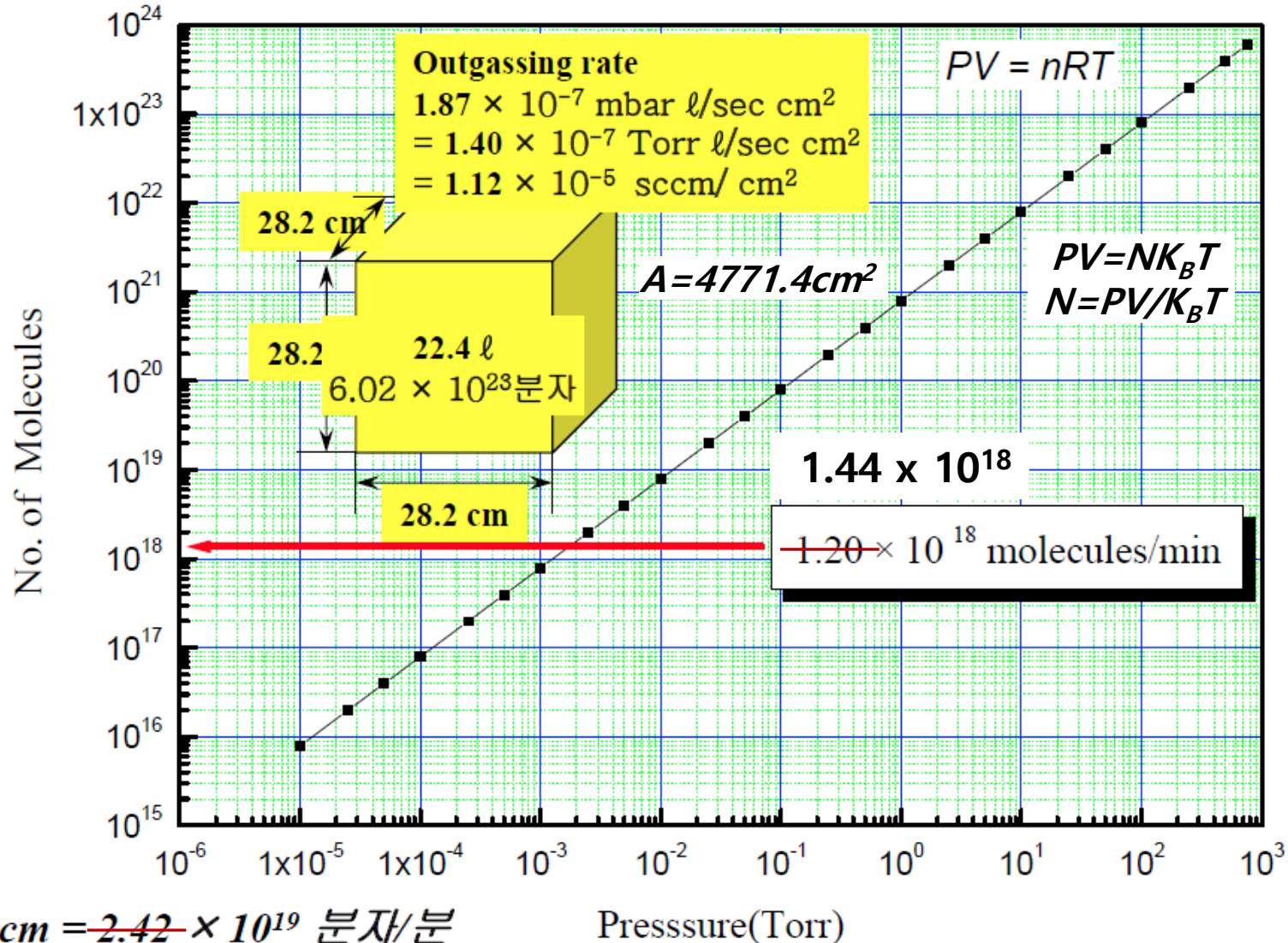
( $n$ : 분자밀도, 단위:  $[\text{molec.}/\text{dm}^3]$  으: decimeter로 m의 1/10, 즉 10cm임)

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 압력(진공도)에 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  
 $1.12 \times 10^{-5} \times 4771.4$   
 $= 5344 \times 10^{-5} [\text{sccm}]$


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

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

Presssure(Torr)

$2.69 \times 10^{19} \ll 1 \text{ cc속 분자의 개수}$ 는? 아보가드로 수,  $N_0$ ,  $6.02 \times 10^{23} \text{ EA/22,414cc}$  ( $22.414 \text{ L} = 22,414 \text{ cc}$ )

## Table 2. 누설율(유량)의 물리적 의미

[atm.cc/s]	[Pa.m <sup>3</sup> /s]	[mbar.L/s]	[sccm]	[Torr.L/s]	물리적 의미	비고
<b>1</b>	1.01E-01	<b>1.01</b>	<b>60</b>	7.6E-01	<b>[cc]</b>	
<b>5.56E-04</b>	5.63E-05	<b>5.63E-04</b>	<b>3.33E-02</b>	4.2E-04	<b>48.00</b> 하루동안 대기압 기준 누설 가스량	
<b>1.50E-05</b>	1.52E-06	<b>1.52E-05</b>	<b>9.00E-04</b>	1.1E-05	<b>1.30</b> 하루동안 대기압 기준 누설 가스량	
<b>1.32E-10</b>	1.34E-11	<b>1.34E-10</b>	<b>7.92E-09</b>	1.0E-10	<b>0.96</b> 230년간 대기압 기준 누설 가스량	
<b>2.00E-07</b>	2.03E-08	<b>2.03E-07</b>	<b>1.20E-05</b>	1.5E-07	<b>6.31</b> 1년간 대기압 기준 누설 가스량	G-M냉동기 Expander 누설규정
<b>2.00E-06</b>	2.03E-07	<b>2.03E-06</b>	<b>1.20E-04</b>	1.5E-06	<b>5.18</b> 1달간 대기압 기준 누설 가스량	수정-G-M냉동기 Expander 누설규정
<b>1.00E-09</b>	1.01E-10	<b>1.01E-09</b>	<b>6.00E-08</b>	7.6E-10	<b>3.15</b> 100년간 대기압 기준 누설 가스량	펌프 바디 규정(Ebara, Pump Body)
<b>2.00E-09</b>	2.03E-10	<b>2.03E-09</b>	<b>1.20E-07</b>	1.5E-09	<b>6.31</b> 100년간 대기압 기준 누설 가스량	펌프 바디 규정(Genesis, Pump Body)
<b>5.00E-10</b>	5.07E-11	<b>5.07E-10</b>	<b>3.00E-08</b>	3.8E-10	<b>1.58</b> 100년간 대기압 기준 누설 가스량	UHV 펌프 규정
<b>1.00E-09</b>	1.01E-10	<b>1.01E-09</b>	<b>6.00E-08</b>	7.6E-10	<b>3.15</b> 100년간 대기압 기준 누설 가스량	HV 펌프 규정
<b>2.00E-08</b>	2.03E-09	<b>2.03E-08</b>	<b>1.20E-06</b>	1.5E-08	<b>0.63</b> 1년간 대기압 기준 누설 가스량	STS 표면방출량: q=2.0XE(-8) [mbar.L/s.cm <sup>2</sup> ]
<b>1.00E-07</b>	1.01E-08	<b>1.01E-07</b>	<b>6.00E-06</b>	7.6E-08	<b>3.15</b> 1년간 대기압 기준 누설 가스량	수지 계열 표면방출량: q=1.0XE(-7) [mbar.L/s.cm <sup>2</sup> ]
<b>1.00E-04</b>	1.01E-05	<b>1.01E-04</b>	<b>6.00E-03</b>	7.6E-05	<b>3153.60</b> 1년간 대기압 기준 누설가스량	
<b>1.00E-05</b>	1.01E-06	<b>1.01E-05</b>	<b>6.00E-04</b>	7.6E-06	<b>315.36</b> 1년간 대기압 기준 누설가스량	
<b>1.00E-06</b>	1.01E-07	<b>1.01E-06</b>	<b>6.00E-05</b>	7.6E-07	<b>31.54</b> 1년간 대기압 기준 누설가스량	
<b>1.00E-07</b>	1.01E-08	<b>1.01E-07</b>	<b>6.00E-06</b>	7.6E-08	<b>3.15</b> 1년간 대기압 기준 누설가스량	
<b>1.00E-08</b>	1.01E-09	<b>1.01E-08</b>	<b>6.00E-07</b>	7.6E-09	<b>3.15</b> 10년간 대기압 기준 누설가스량	
<b>1.00E-09</b>	1.01E-10	<b>1.01E-09</b>	<b>6.00E-08</b>	7.6E-10	<b>3.15</b> 100년간 대기압 기준 누설가스량	
<b>1.00E-10</b>	1.01E-11	<b>1.01E-10</b>	<b>6.00E-09</b>	7.6E-11	<b>3.15</b> 1000년간 대기압 기준 누설가스량	



# 배기(排氣, pumping): 오해하기 쉬운 진공개념

“진공을 만든다”  
= 압력을 낮춘다  
= 파티클(분자) 개수를 줄인다!

능동(X)

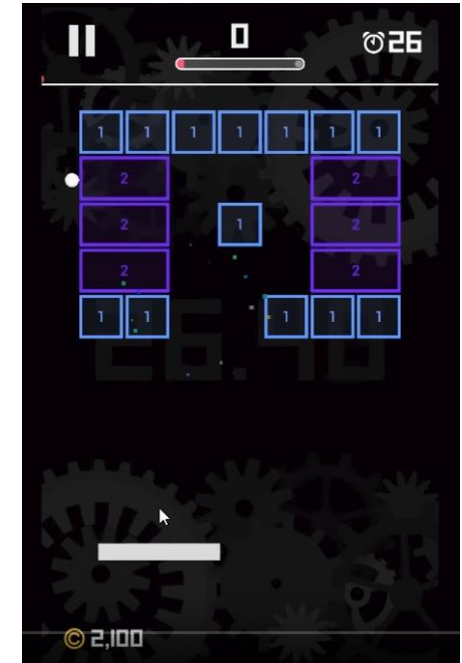


수동  
(O)

*How ?*

개념: **벽돌깨기(비슷~)**  
(단, **공**이 부딪혀도 **벽돌**은 깨지지 않으며  
**bar**는 고정됨. **bar** = pump)

벽돌깨기: 구글검색 검색창 'atari breakout'



**Table 3. 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

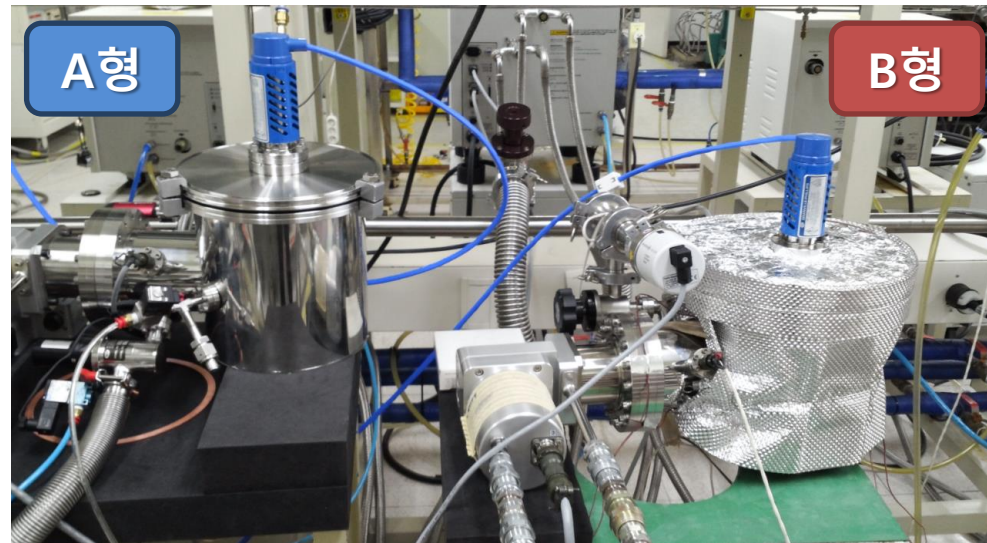
**Q. 본 강의실 공간을 진공챔버라고 가정할 경우, 진공펌프를 통해 압력을 낮추기 시작하면 어떤 압력변화 특성을 나타낼까?**

# Table 4. 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.



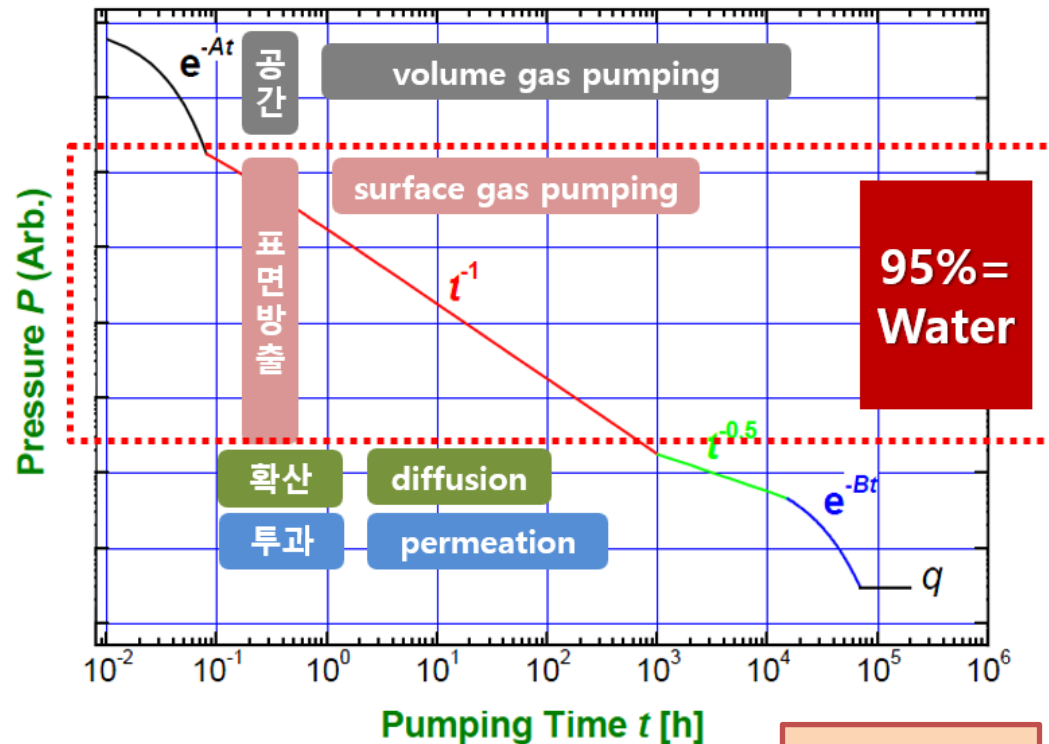
B형: 히터를 사용하여 펌프를 150~200°C까지 베이킹 해야 함.



# Fig. 2 Actual Pump Down Curve

Log

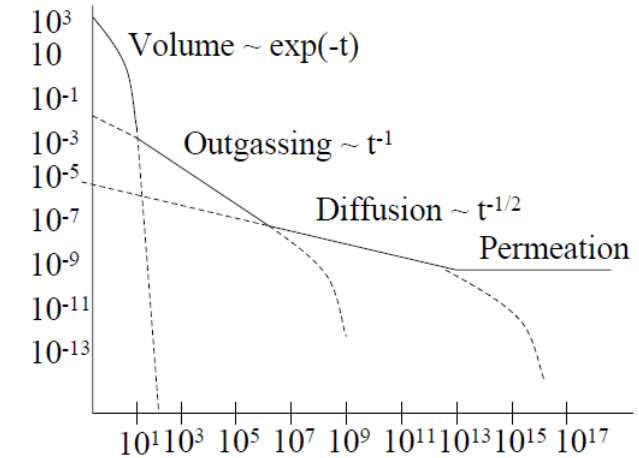
Pressure limits in vacuum systems



※출처: S.R. In, KAERI

Log

Pressure  
(Torr)



Time (s)

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

- ♠ 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 5. 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)

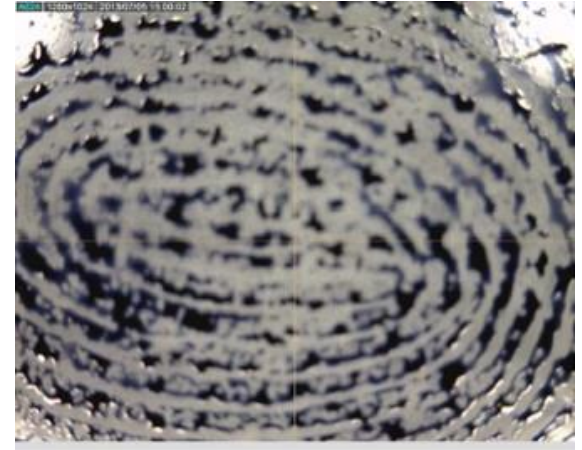


## 지문(finger print)이 진공도에 미치는 영향

♠ 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	

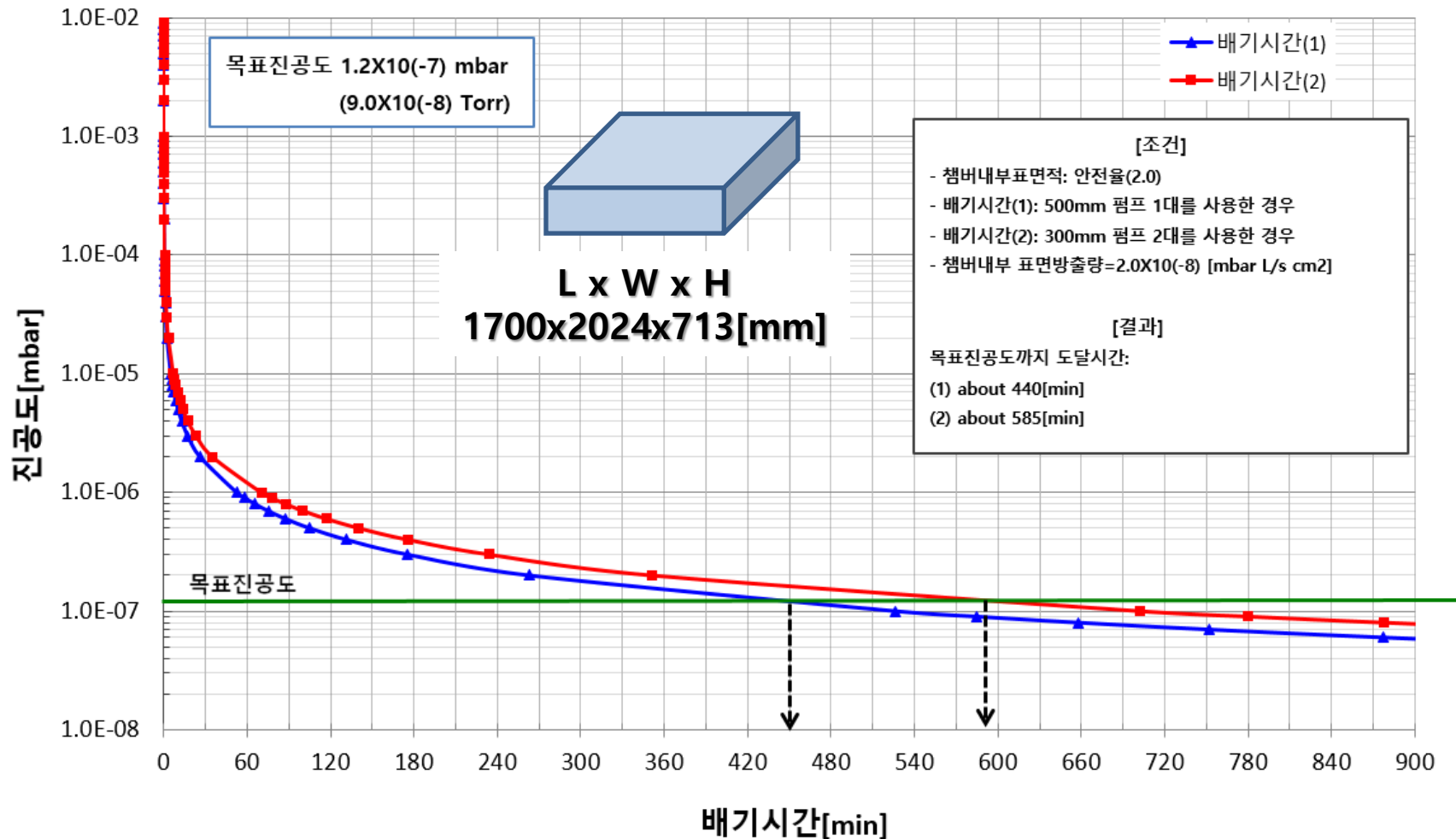
# Fig. 3 특정 챔버에 대한 펌프 다운 그래프 예시

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  
제22권 제3호, ISSN 2288-977X

# 진공 이야기

Vacuum Magazine

**특집 나노급 측정 및 진단기술**

Multichannel Spectrometer

[www.kvs.or.kr](http://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 흡착되는 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 나은 진공도를 달성하게 되었다. 따라서 크라이오 펌프는 수분과 수소, 헬륨, 냉매와 같은 Type III 가스 배기에

(XOXO 박관) 2000년 경북대학교 기계공학 석사, 2009년 삼성중공업 임원이었던 박관(金)은 2003년 이후 오세훈-국산화에 참여해 설계 등 다양한 연구(金)를 하고 있다.

Vacuum Square

## 진공기술의 현재와 미래

진공기술의 발전에 따라... 수직이나 수평 기압 이상을 다루다가 단지 1기압 미만을 다루는 것이니 그냥 만만하게 생각했던 것이다. 극저온 및 Q-MDC라는 냉동기술에 대한 이해가 빨라지자 진공에 대한 이해를 높이기 위해서 이런 저런 자료를 찾고 사람들을 만나기 시작했다. 면도리때만 있으면 면도의 사용만 만났다. 다 그 나뭇잎에 그 발인 것 같았다. 진공에 몸담고 있으면 아는 것은 하지만 알고 보면 엄청난 경우가 많다. 누구를 짓도 없다. 그 강론만이 나이나 무슨 말이 더 필요하겠는가? 국내에서 진공에 일한지 얼마 안된 이도박 학자를 지도 원당해 줄 원자를 어디에서 찾을 수 있단 말인가? 그러나 감히하지도 나는 비교적 일한 것은 경우에 속한다. 사실 내가 찾은 것이 아니라 그 대가에서 직접 찾아오셨다. 그 분은 다름 아닌 원자력연구원의 현상박사이다. 당시 현상박사였던 KSTAR 관련한 프로젝트로 수행하고 있었는데 미시(μm)단위의 대량 차광 어레이(charcoal array)를 제작해 준만한 업적을 갖고 있었다. 이 용도의 차광을 가지고 있고 또 그 정도 크기까지 어레이 원 작성을 수행할 수 있는 회사가 국내 회사로 제너시스 밖에 없었으니... 소문을 듣고 직접 찾아오신 것이었다. 당시 비교적 저렴한 가격에 그 서비스를 제공하기로 하고 그 대가로 진공기술교육을 부탁 드렸었다. 이후 교육을 받으며 진공이 단지 1기압 미만을 다루는 단순한 공학분야 감지만 결코 만만치 않은 영역이라는 사실을 알게 되었다.

**2. 좌충우돌, 양심의 길은 멀고 험하다.**

2003년 6월부터 세를 시작되는 크라이오 사업부에 합류하게 되었다. 처음에는 거의 같은 시기에 합류한 동료들과 함께 도전과 정취를 익혀나갔다. 시제품은 우연히 공저한 공저는 이 사실을 잘 받아들이지 못하는 것이었다. 첫째, 우리는 간자가 사용하는 진공환경(공정환경)에 필요한 진공 펌프를 잘 분별하여 채용해야 한다. 둘째, 좋은 진공을 원한다면 늘 물배기에 신경을 써야 하고 표면상태를 잘 관리해야 한다. 셋째 고진공을 달성하기 위한 왕도는 따로 없다. 즉, 한 오더의 진공도를 높이기 위해서는 펌프를 10배 더 많이 장착하든지, 또는 표면상태를 10배 깨끗하게 하든지, 아니면 목표 진공도에 도달할 때까지 10배의 시간을 더 기다리는 수 밖에 없다. 우리는 로그(log)와 친해져야만 한다. 그리고 아래에 소개하는 두 개의 그림은 꼭 기억했으면 한다.

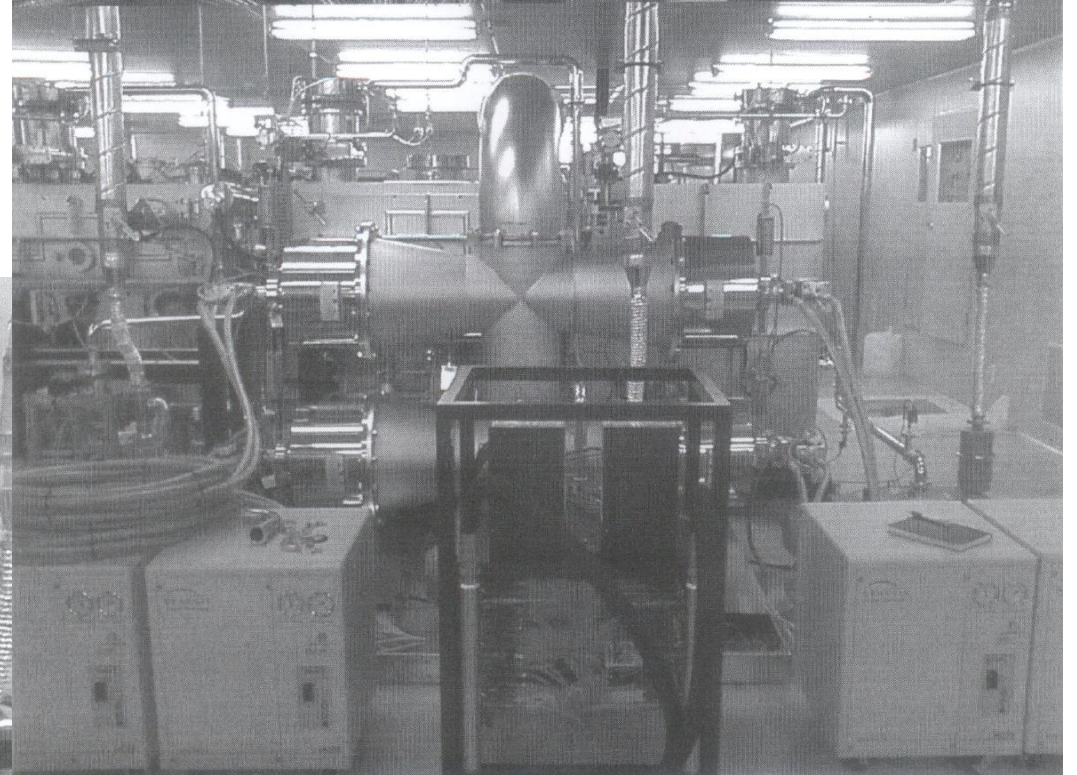
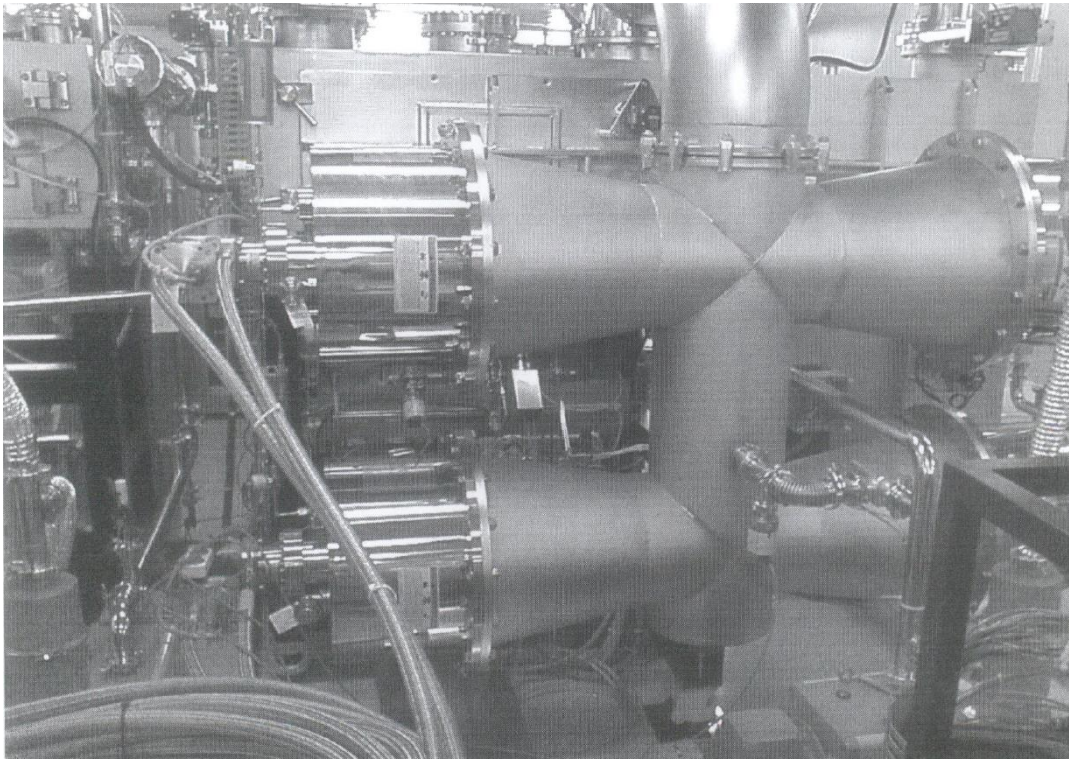
Fig. 3) Vacuum pumps operating region related with Q, P, and S.

Fig. 4) Typical pump down curve



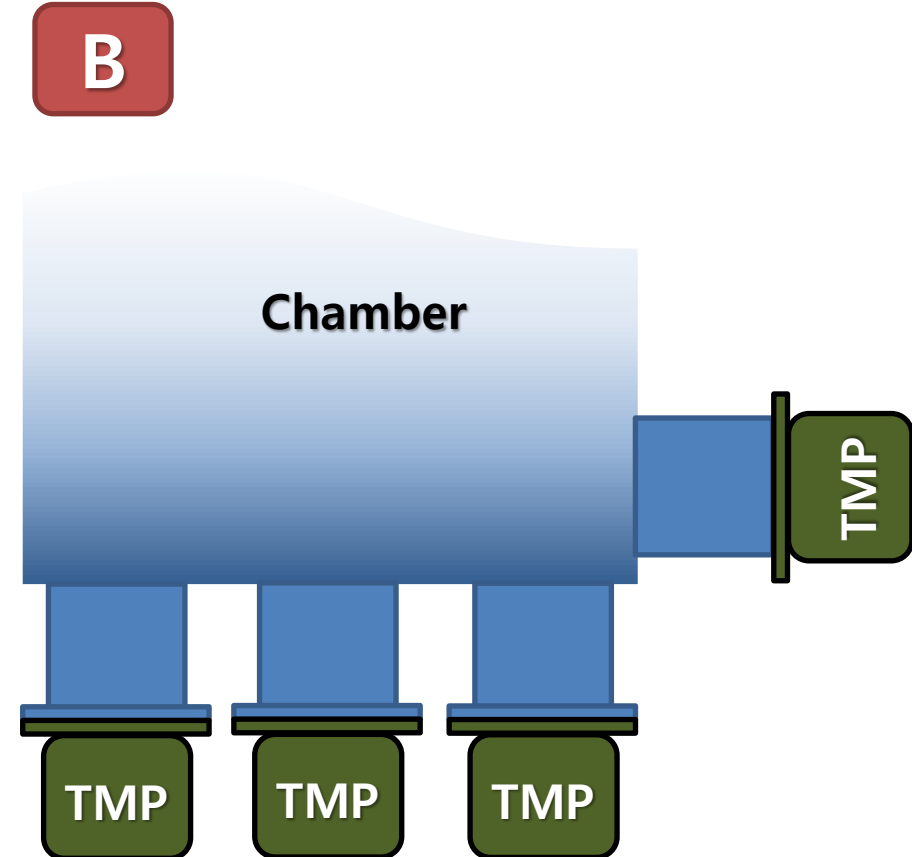
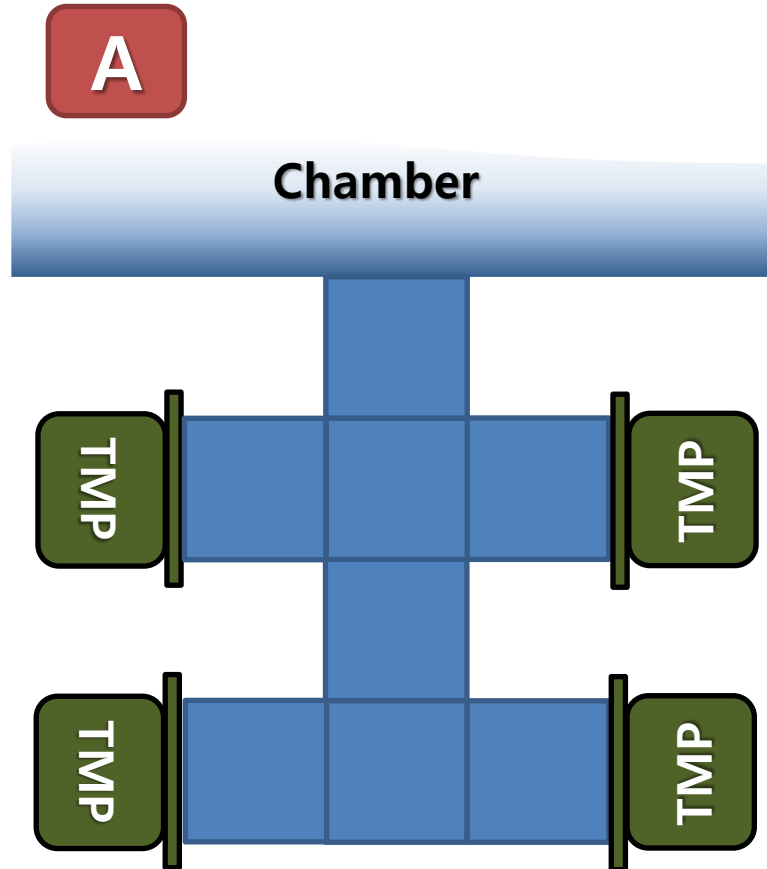
## 진공의 기초지식이 중요한 이유

**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 ?!

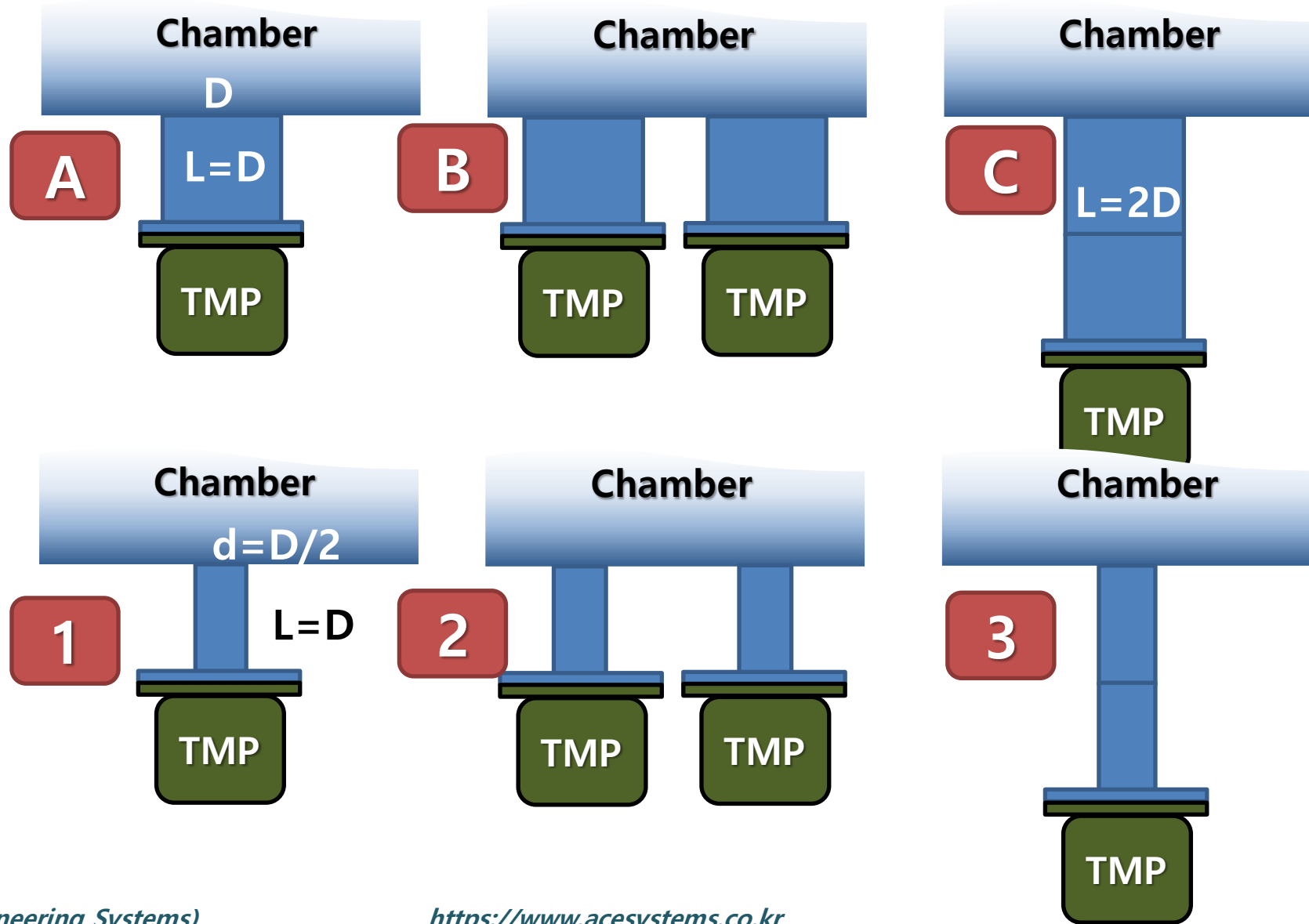
...

..

.

A vs 2 ??

C vs 2 ??



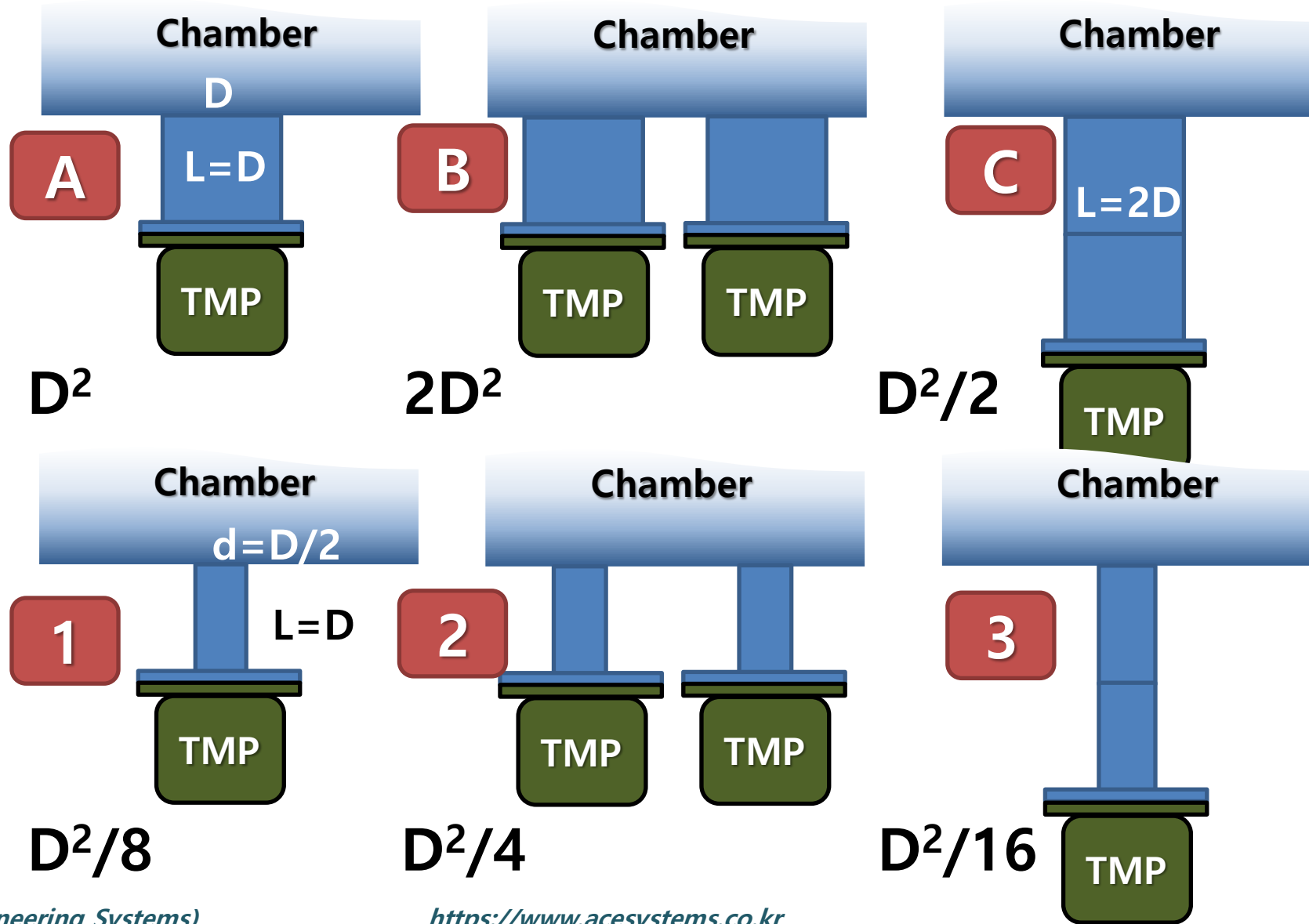
# 진공배기와 컨덕턴스

컨덕턴스  
계산!

분자류영역

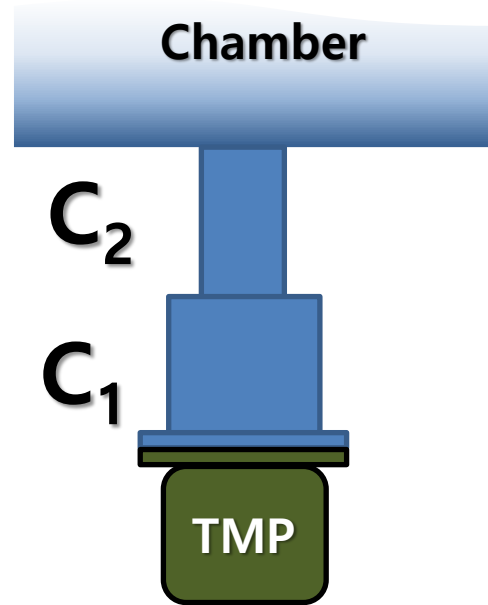
$$C = 12.7 \frac{D^3}{L}$$

A vs 2 ?  
C vs 2 ?



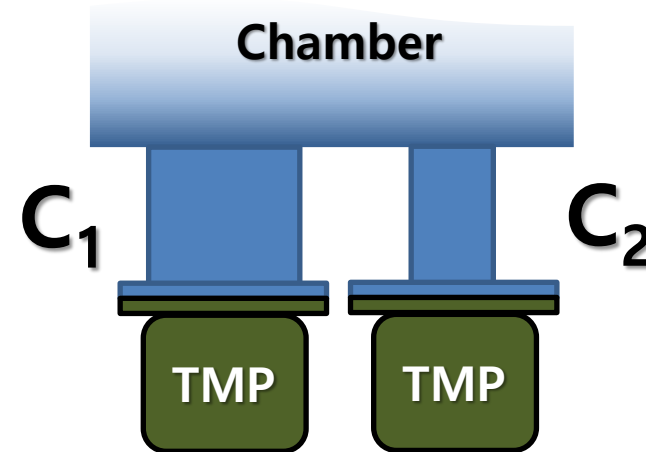
# 컨덕턴스의 합성

## 직렬연결



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

## 병렬연결



$$C = C_1 + C_2$$

## 진공배기와 컨덕턴스

- 컨덕턴스(C): 기체 흐름의 용의성을 나타내는 척도  
(도관의 크기, 모양에 따라 결정됨)

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



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

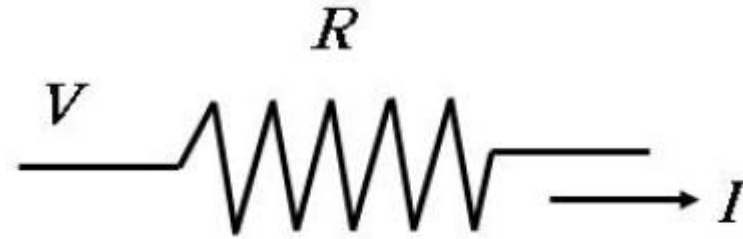
$$Q = C (P_1 - P_2) \text{ [L/s]}$$

↑  
비례계수

## 컨덕턴스와 전기회로의 유사성

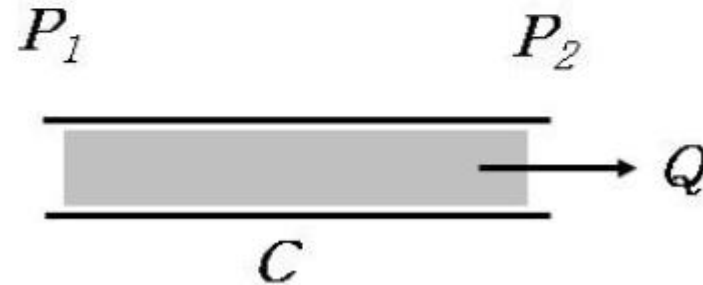
**Current Flow**

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



**Mass Flow**

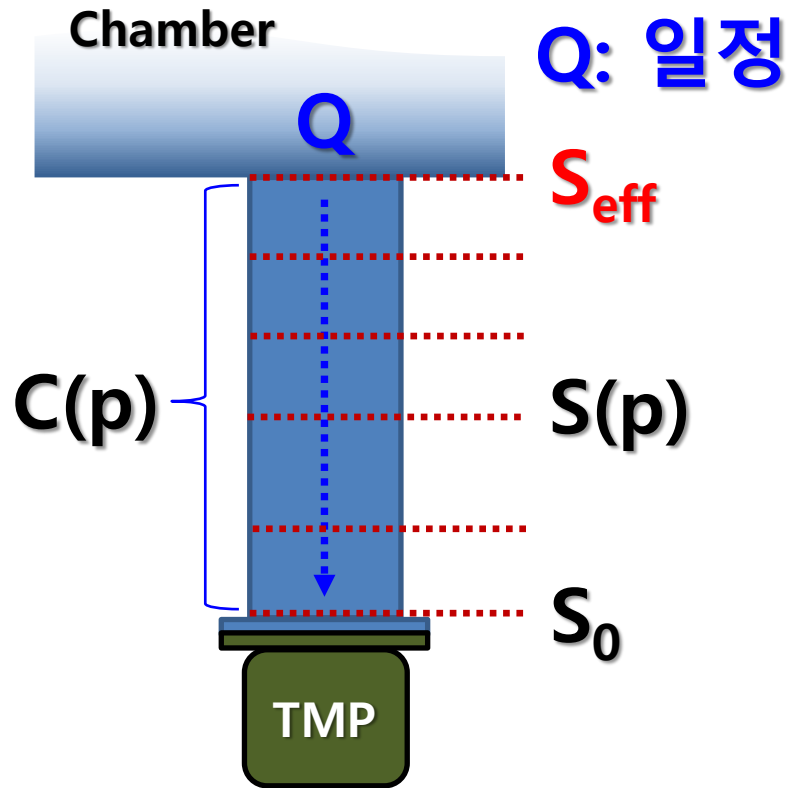
$$Q = C \Delta P$$





암기!

차이점을 구별하자! 유량, 압력, 컨덕턴스, 배기속도



$$Q = C \Delta P$$

.vs.

$$Q = S P$$

- ♠ 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

이해!

컨덕턴스는 왜 필요한가?

$$P = Q_{in} / S_{eff} \ll Q_{in} = P S_{eff}$$

-  $Q_{in}$  : known ?  
 $Q_{pg} + Q_{og} + Q_{leak}$

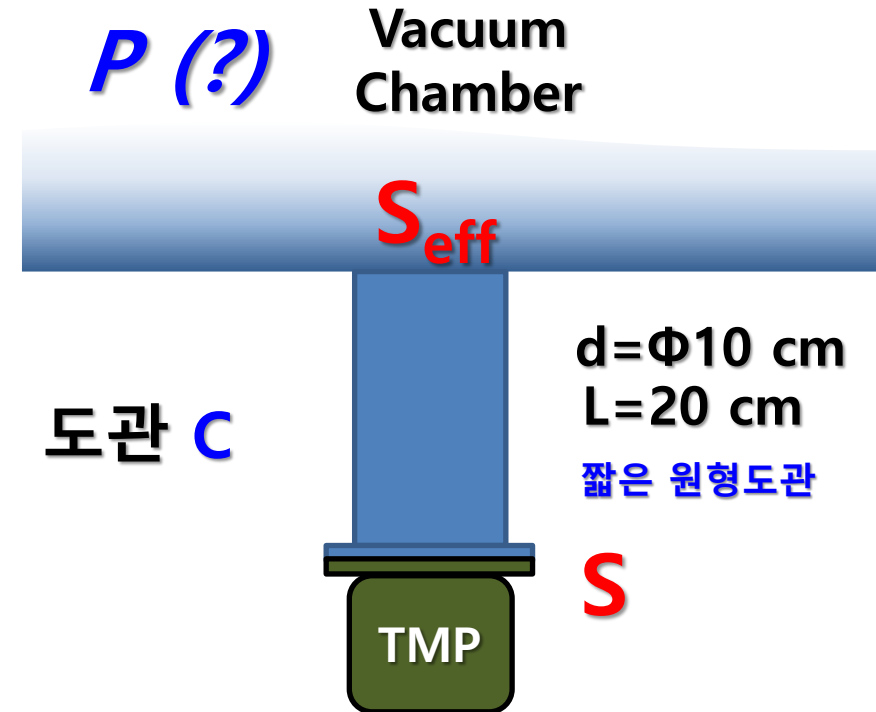
-  $S_{eff}$  : known ?

- 평균자유거리(MFP)

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3}}{P} \text{ (cm)}$$

- 단분자층형성시간(monolayer time)

$$T_m = \frac{2.4 \times 10^{-6}}{P} \text{ (s)}$$



TMP 배기속도  $S$ (or  $S_0$ )  
 $= 300 \text{ [L/s]}$

## - III 부 -

1. 진공영역에서 흐름의 유형과 컨덕턴스
2. 고진공영역에서 컨덕턴스와 유효배기속도
3. 진공펌프의 용량선정과 예  
(압력에 따른 배기속도 변화)
4. 배기시간 계산식 도출과 예

## 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)

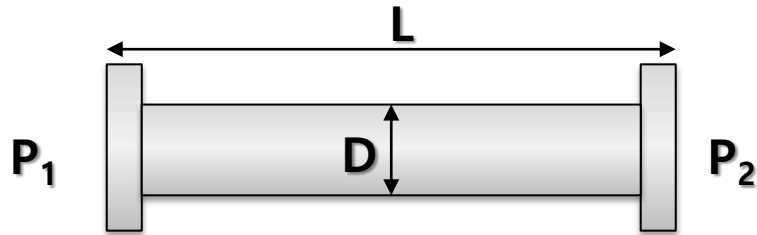
$$0.01 < K_n < 1$$

### 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

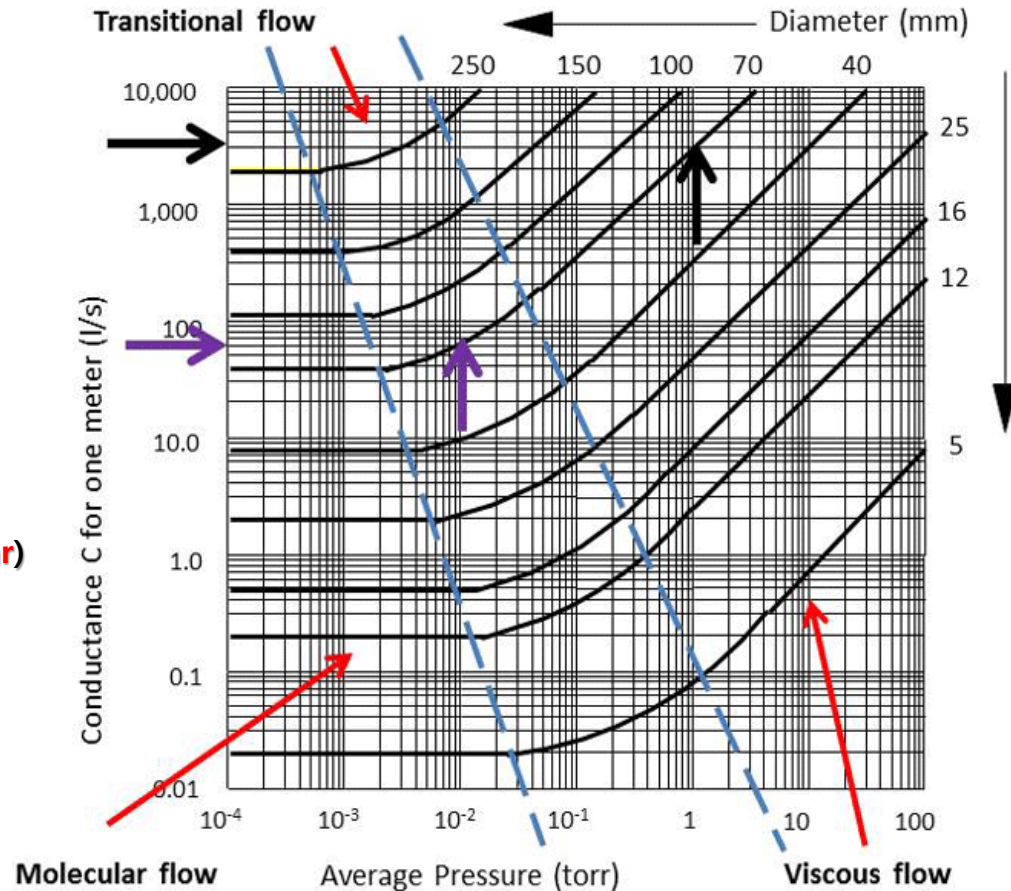
$$C = 137 \frac{D^4 (P_1 + P_2)}{L \cdot 2}$$

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

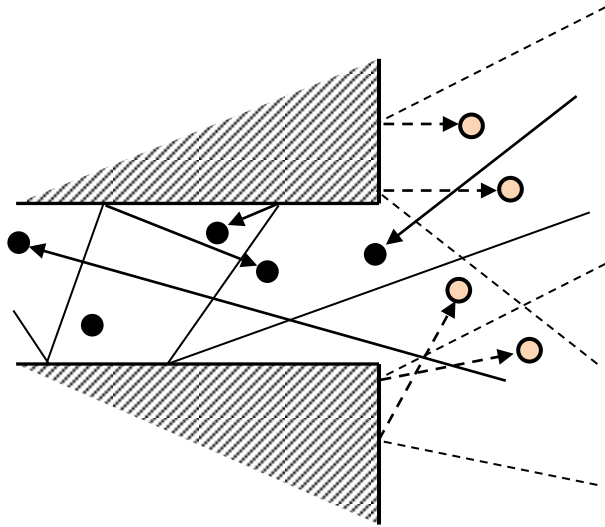
$$C = 12.7 \frac{D^3}{L}$$

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





## 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)

$$C = \alpha C_0$$

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

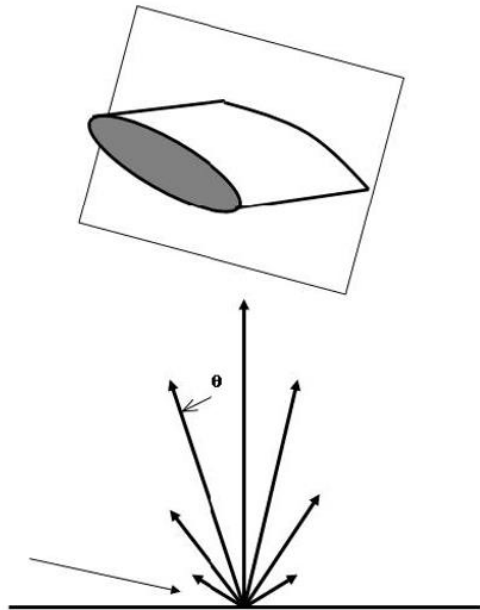
$A$ : 입구 면적  
 $v_{av}$ : 평균속도  
 $T$ : 절대온도  
 $M$ : 분자량

(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

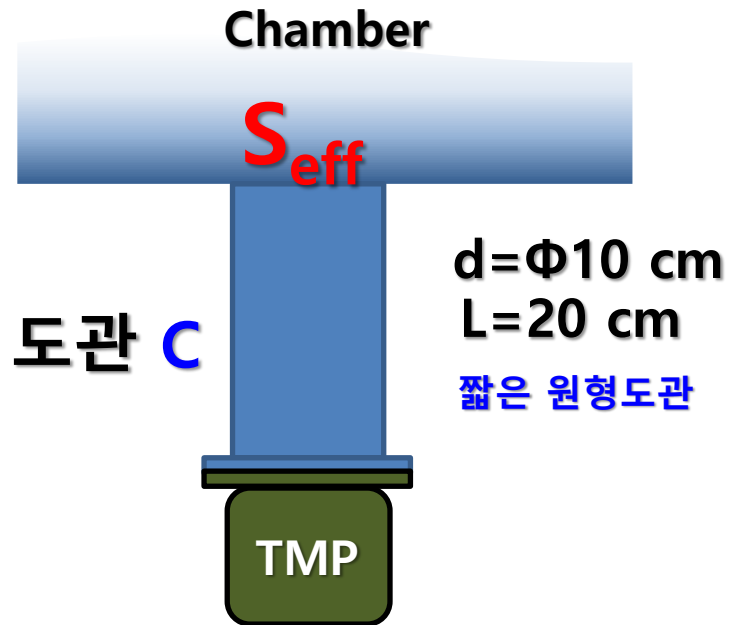
$$C = 11.6 \alpha A \text{ [l/s]}$$

## Table 6. 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

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

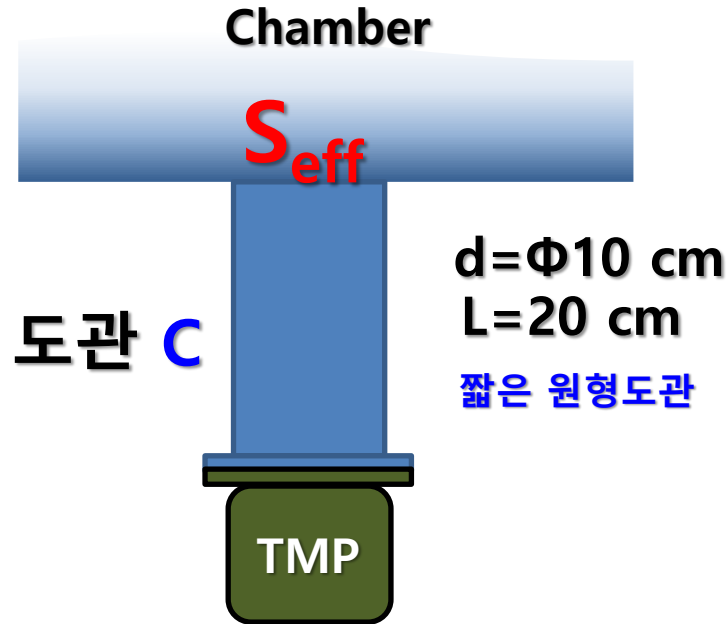
$$C = 11.6(0.35658)(\pi 5^2) \\ = 325 \text{ [L/s]}$$

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

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

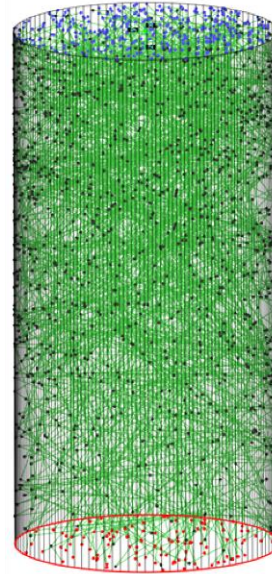
※ Note: 유효배기속도  $S_{eff}$  를 알아야 챔버에 대한 진공해석-펌프 다운 시뮬레이션을 수행 할 수 있음.

## 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)

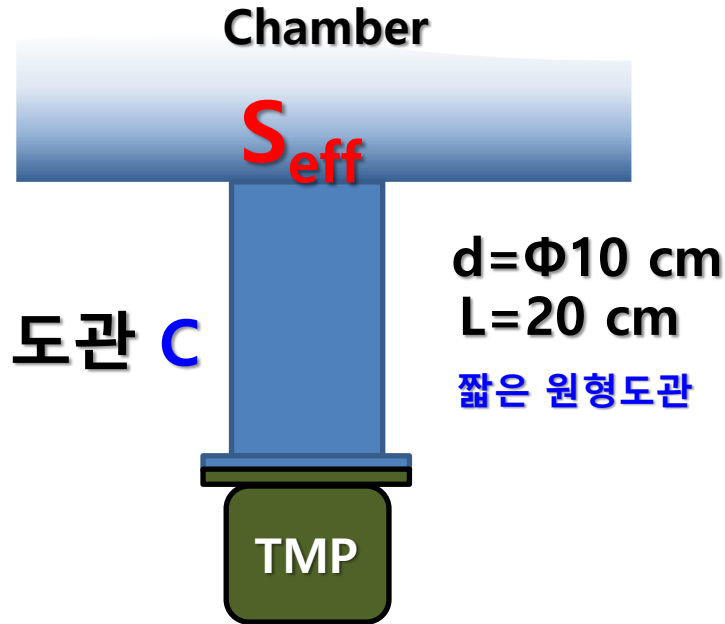
Item	Value	Remark
Gas Type	28	N2
Trans. Prob.(a)	0.3565	=Berman
Co	920.305	[L/s]
C	328.088	[L/s]

#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

Pipes

Bends

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

Conductance palette

Apertures Cones Pipes

User data Combinations

1 2 3

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

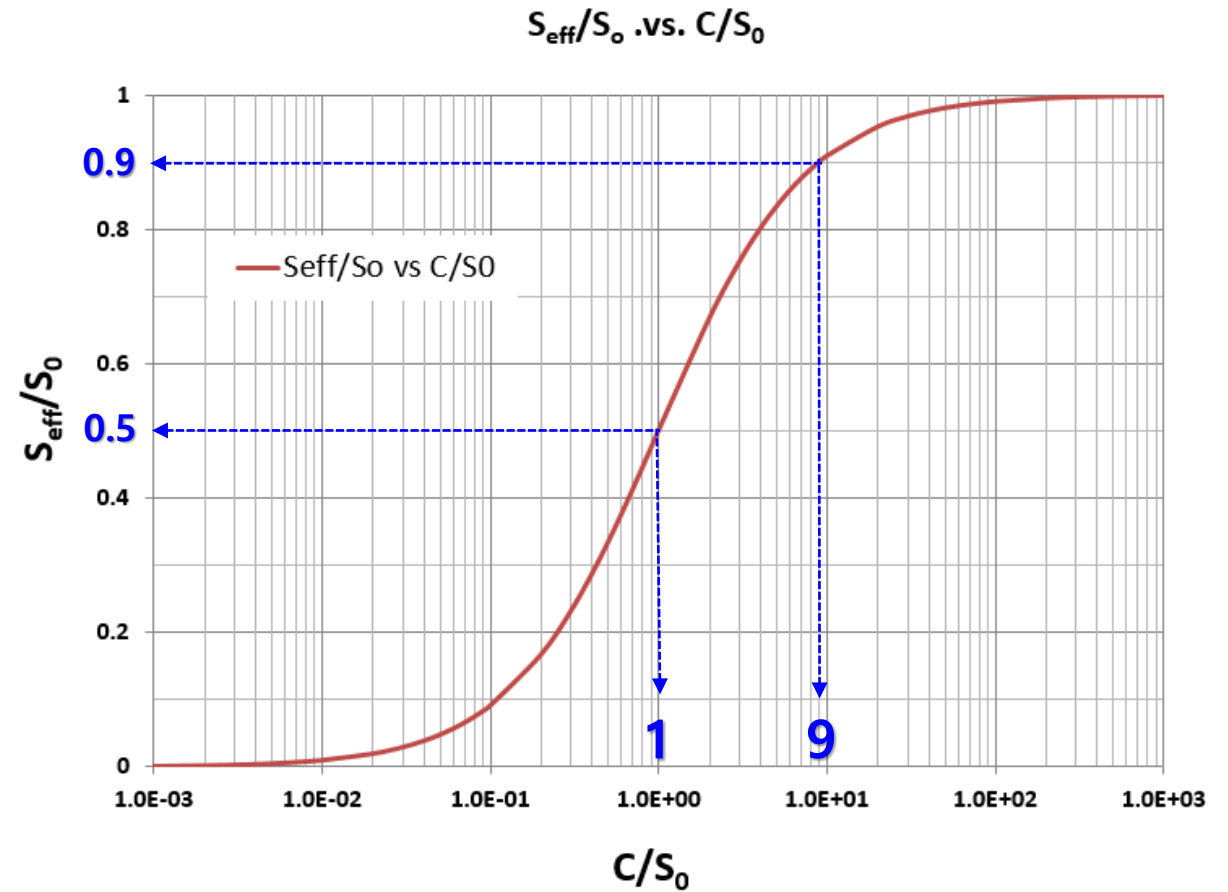
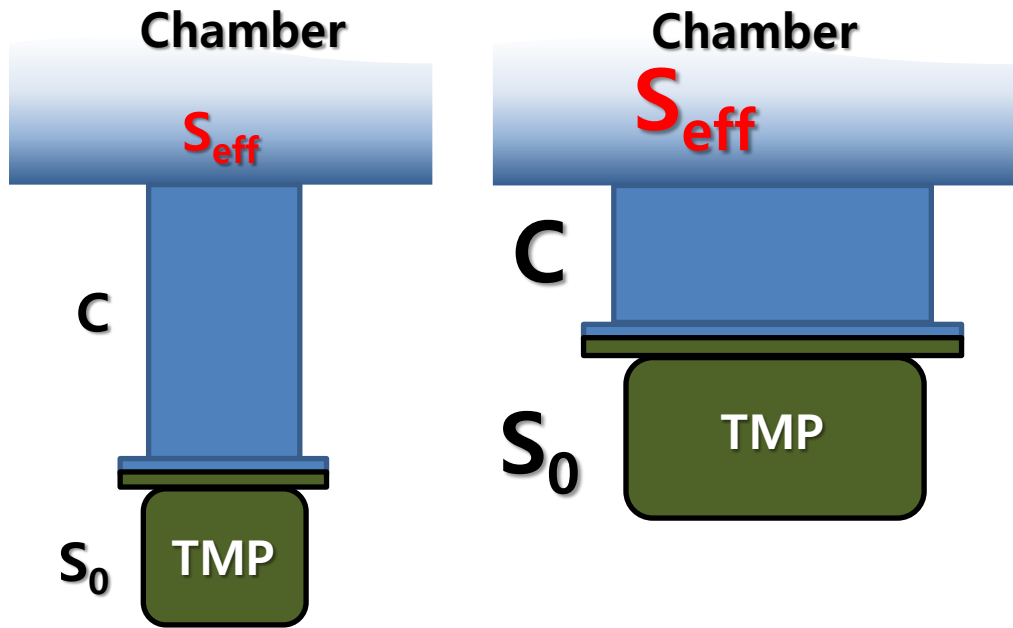
Combined alpha = 0.354838710  
 (=Clousing)

OK Cancel Help

Format: 0.0  
 Decimal Scientific

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

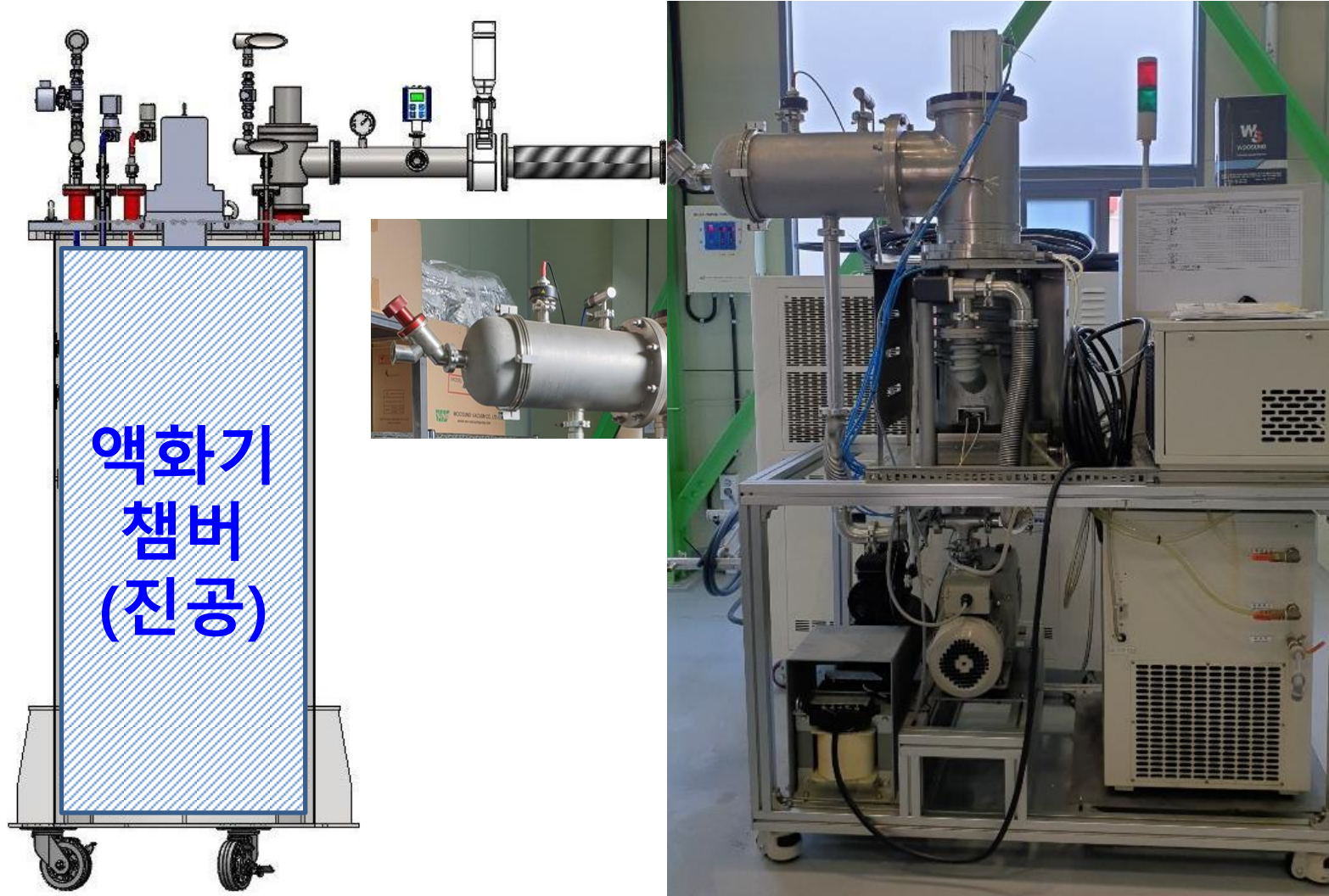
# Fig. 4 컨덕턴스와 유효배기속도



👉 **실용성과 비용고려!**

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

Fig. 5 컨덕턴스를 고려한 진공펌프의 실용 예



# 진공 펌프 용량 선정

## ♠ 진공 펌프의 용량을 선정 시,

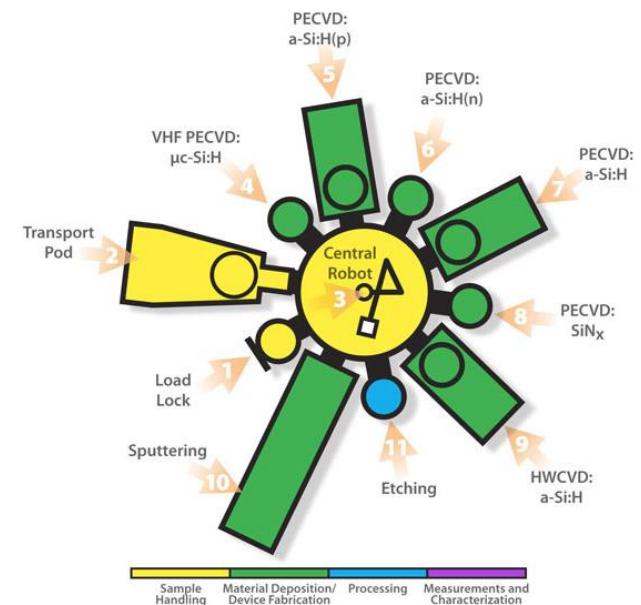
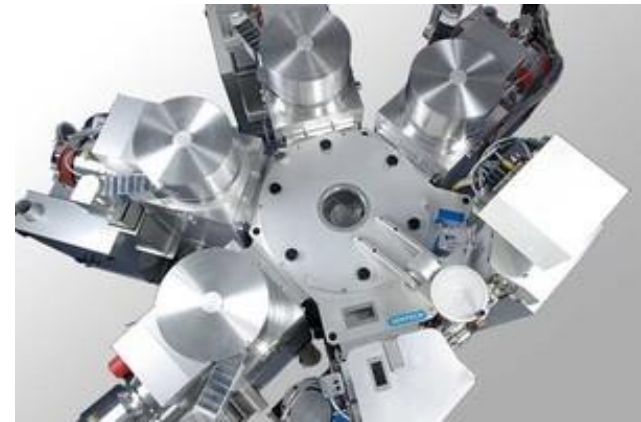
- 1) 로드락(loadlock) 챔버
- 2) 프로세스(process) 챔버
- 3) 트랜스퍼(transfer) 챔버(세분화 필요 시)  
로 구분하여 검토함.

### 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

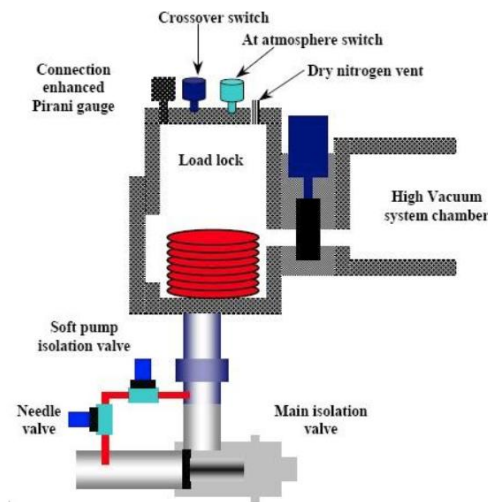
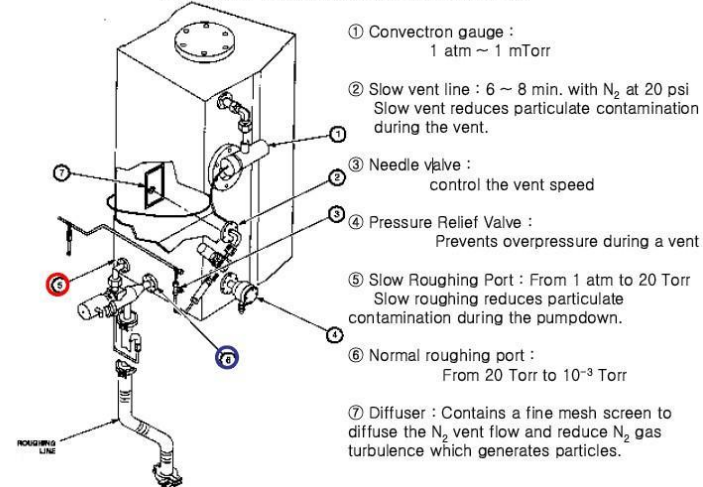
- 재질, 직경, 길이, 밴드 수

## ♠ 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

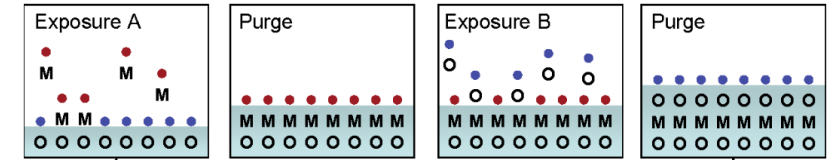
- 클리닝 가스의 종류 및 사용량
- 클리닝 시 유지해야 하는 압력: 증착 스텝보다 클리닝 스텝에서 압력이 더 낮은 경우도 있음

## ♠ 진공 코터(coater)/ 디벨러퍼(developer)

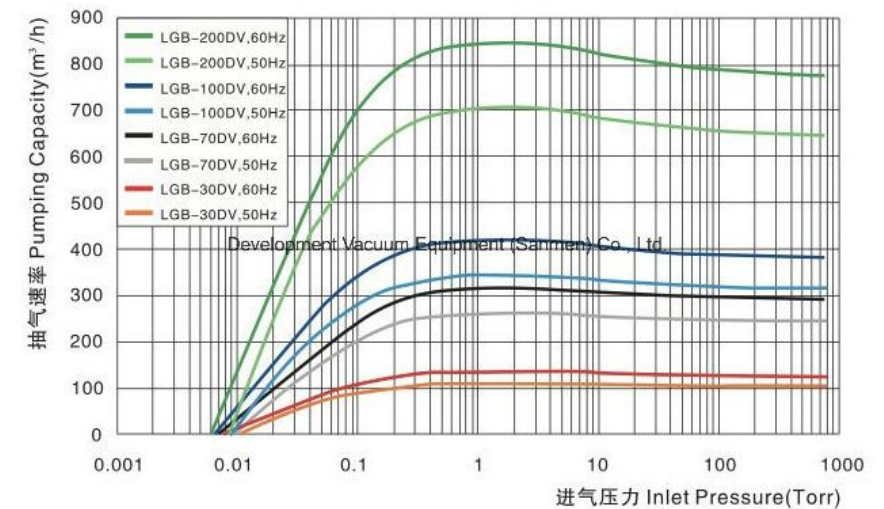
- 사용되는 PR종류 및 도포량

## ♠ 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

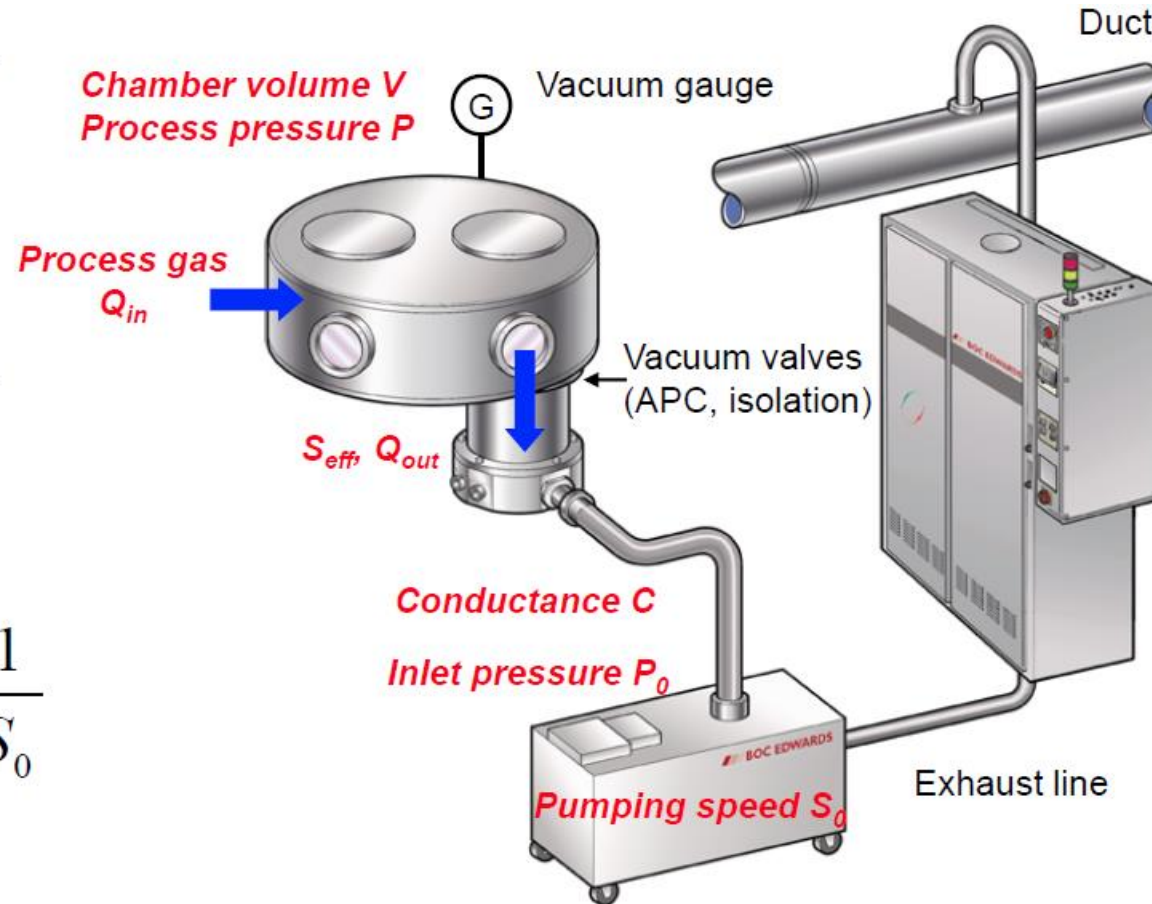
\* 배관이 없는 경우

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

\* 배관이 있는 경우

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

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



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

## 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!

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

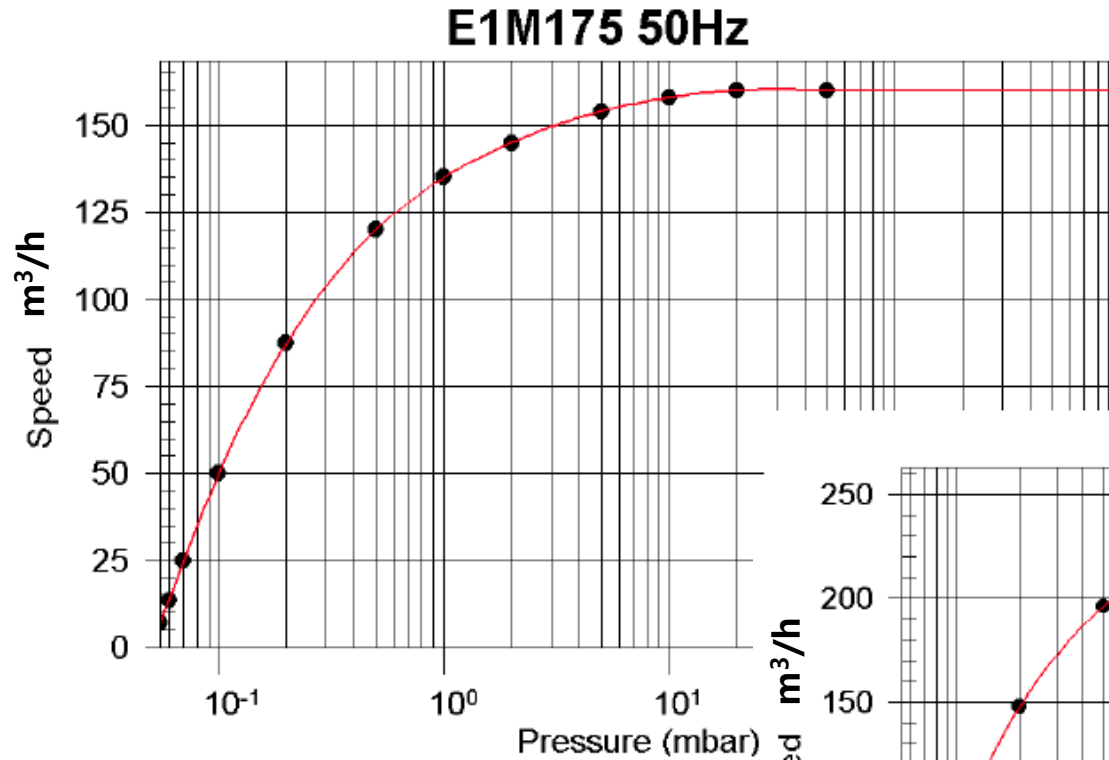
$$\therefore C = 431m^3/hr$$

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

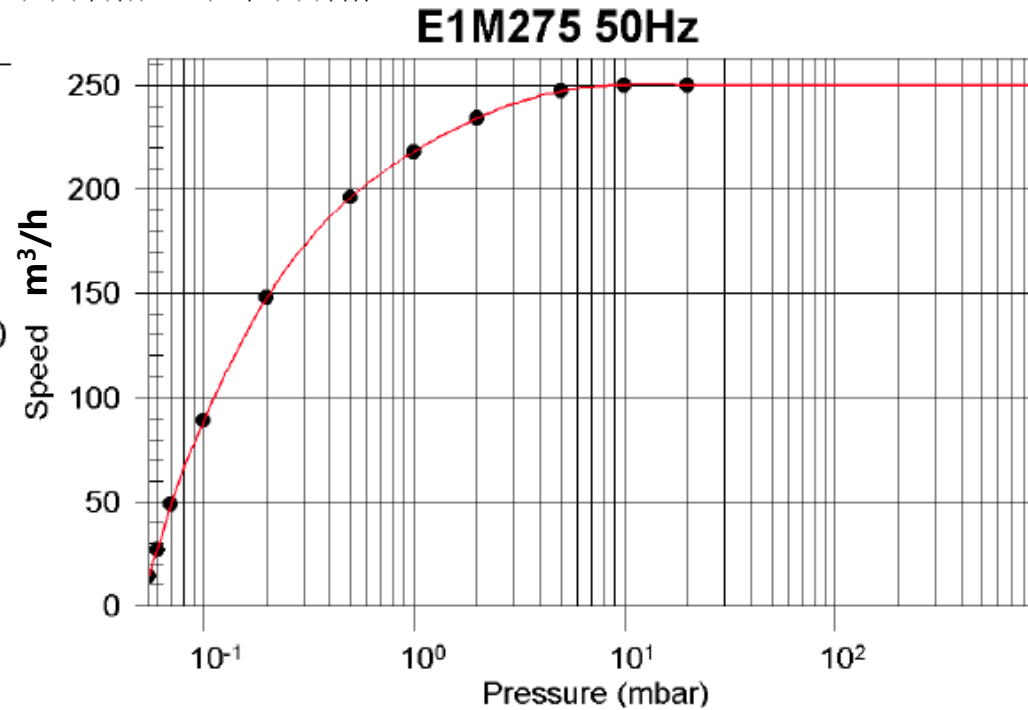
그런데 이 컨덕턴스는 6m 배관에 대한 컨덕턴스이므로, 1m 배관에 대해서는 6배의 컨덕턴스 값을 가져야 한다. 즉,  $431m^3/hr \times 6m = 2586m^3/hr$ .



## 연습문제 (3)-계속



로타리 펌프의 성능곡선  
(압력에 따른 배기속도)



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

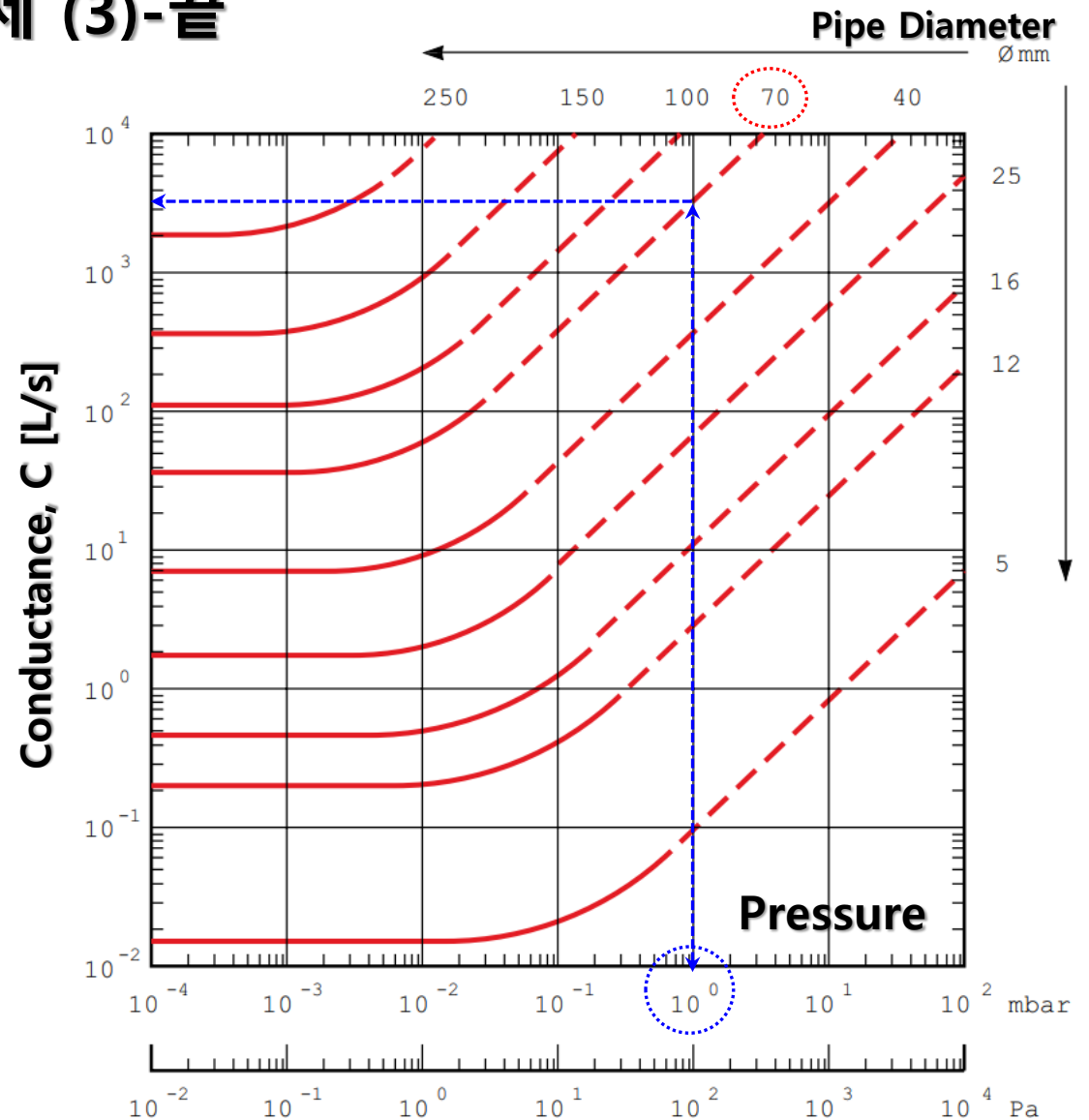
## 연습문제 (3)-끝

<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.

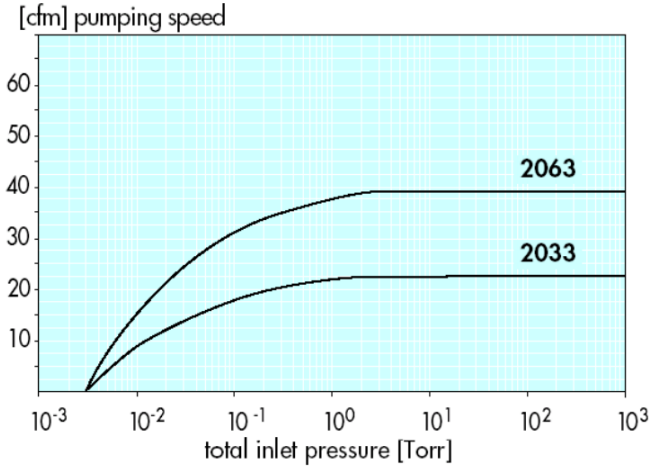
☞ **압력이 높을 때는 점성류 영역이면서 배관의 컨덕턴스가 워낙 크기 때문에 압력이 낮을 때에 비해 컨덕턴스 영향을 적게 받는다.**



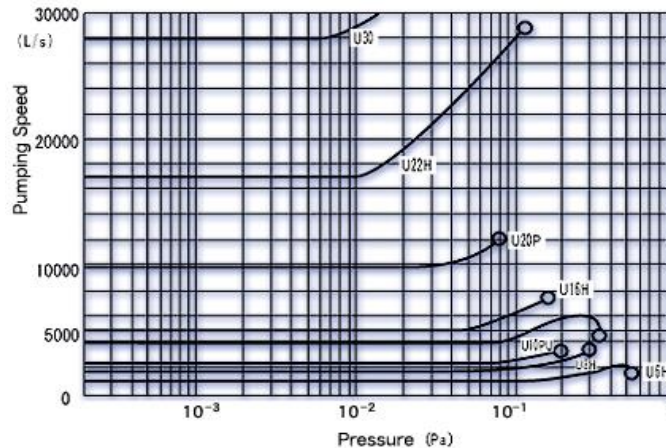
출처: Edwards Product Catalogue

# Pumping curves for 4 types of vacuum pumps.

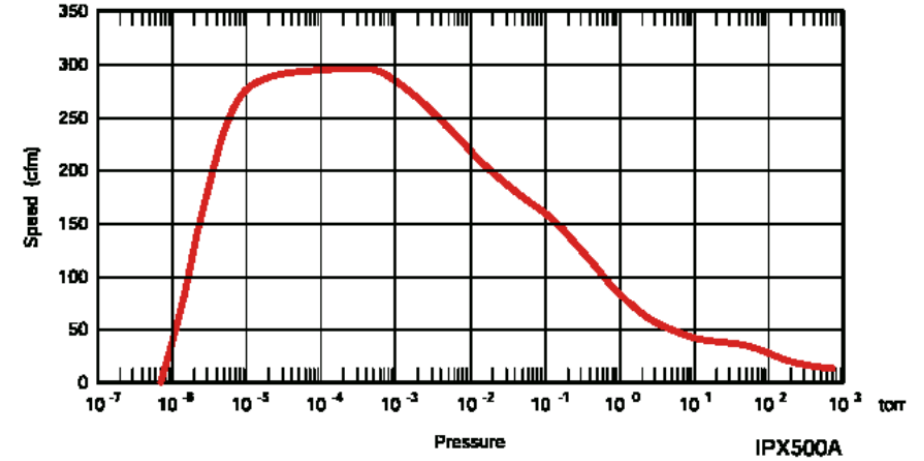
전형적인  
진공펌프의  
압력변화에 따른  
배기성능곡선



Rotary vane pumps

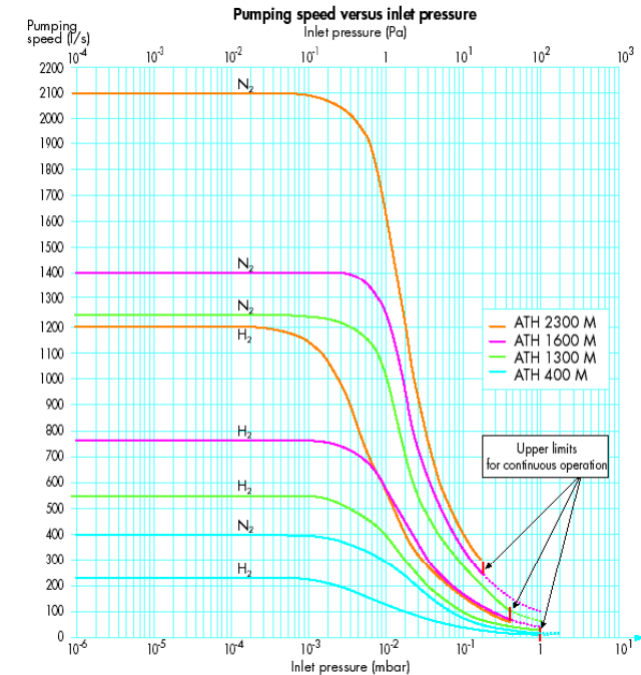


Cryopumps



Dry pump

TMPs



## 배기 시간 계산(유도식)-(1)

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

기체상태방정식

$PV = NkT$  (Unit: J, 에너지)

진공 챔버의 체적  $V$ 는 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...

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

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

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

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

## 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 = 0일 때, A = Q<sub>in</sub> - P<sub>0</sub> S<sub>eff</sub>임으로 압력 P는 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<sub>0</sub>에서 시간 t내에 압력 P까지 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

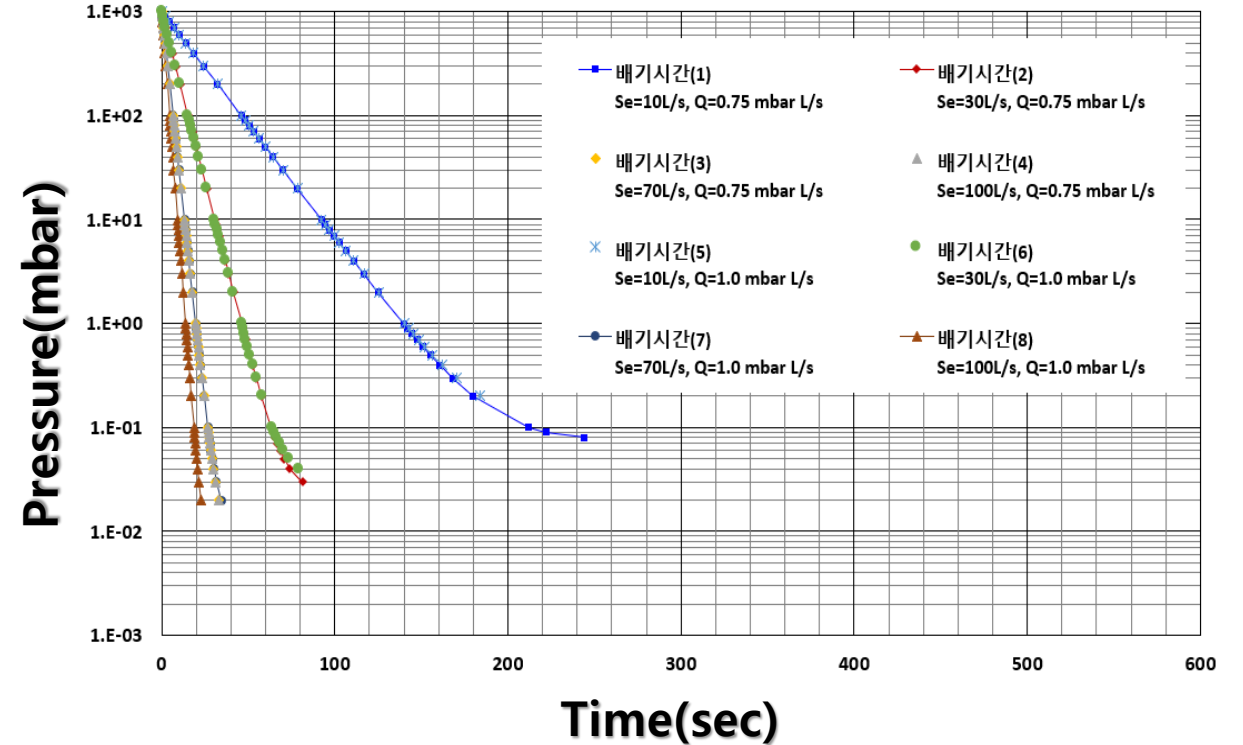
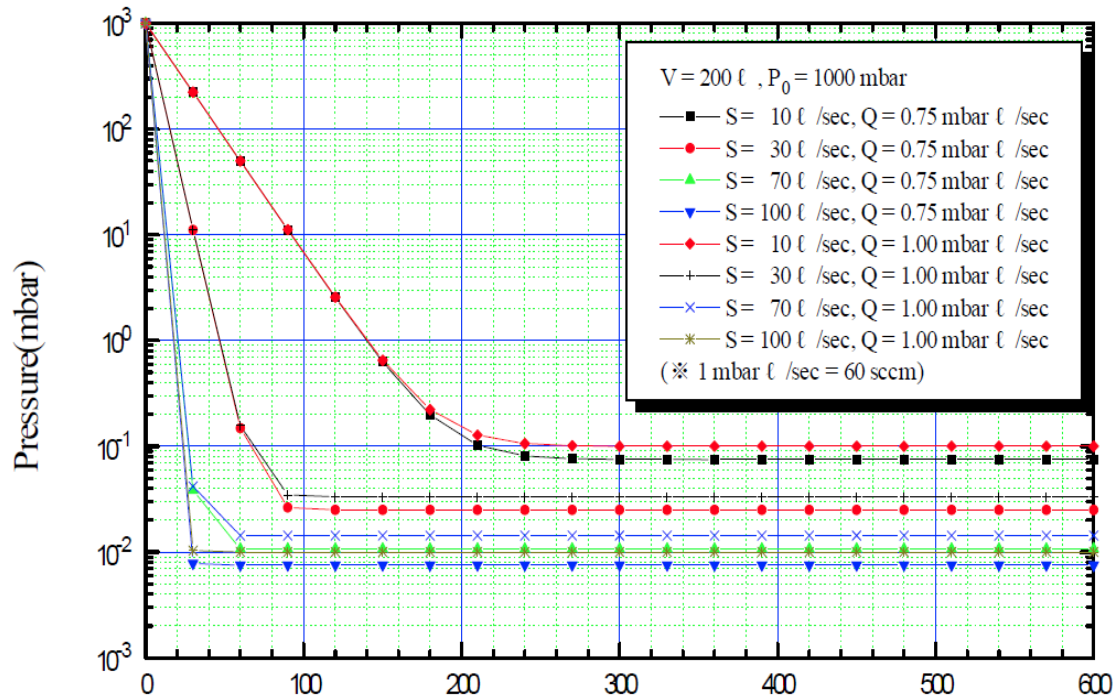
- 배기 과정 중에는 가스 온도 변화가 있음
- 유입되는 가스량이 변할 수 있음(leak rate, outgassing rate 등) :  $Q_{in} \neq 0$ ,  $Q_{in} = Q(t)$
- 진공 펌프의 배기 속력은 압력에 따라 일정하지 않음.



# 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

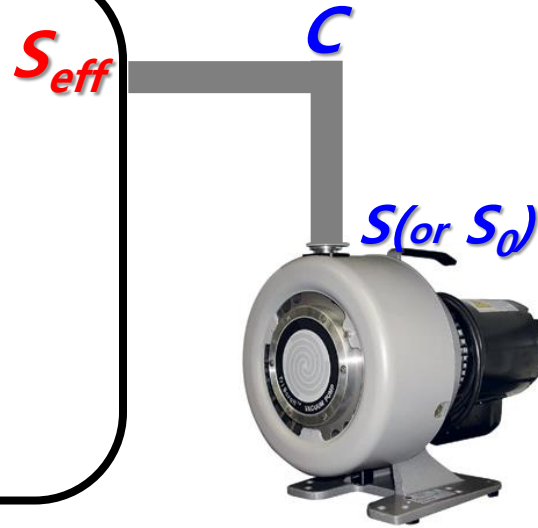
$$t = 2.3 \frac{V}{S_{eff}} \log \left( \frac{P_0}{P} \right)$$

# 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   $S=S_{eff}$

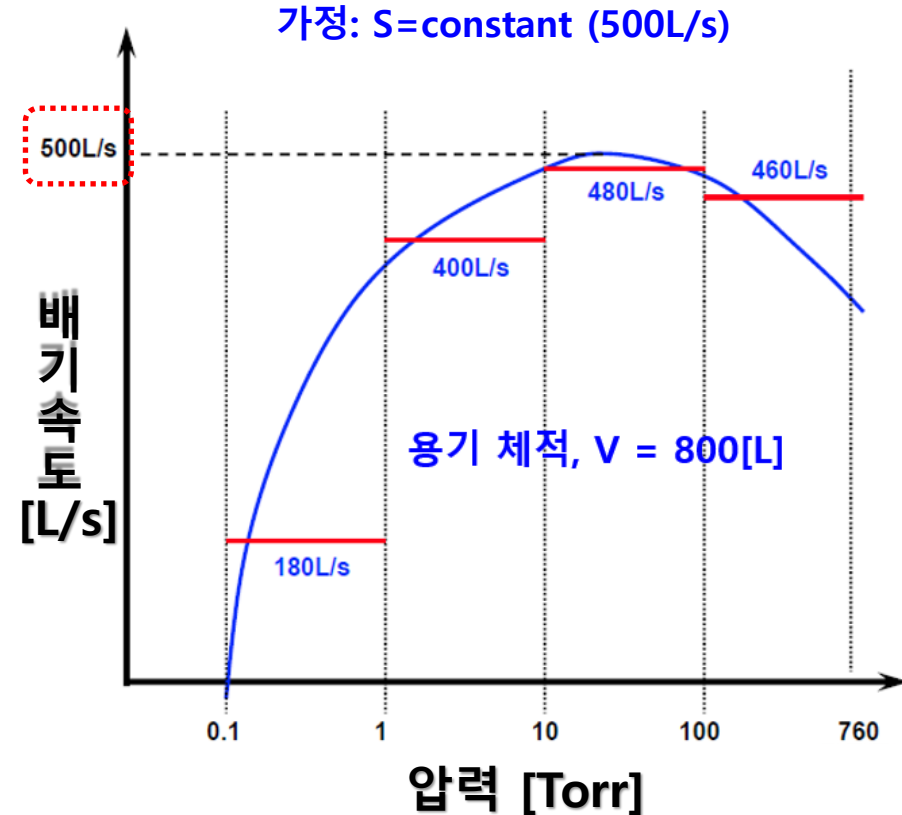
# 1. 배기시간 계산-배기속도(S)가 일정하다고 가정한 경우

♠ 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.

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

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



## 2. 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.

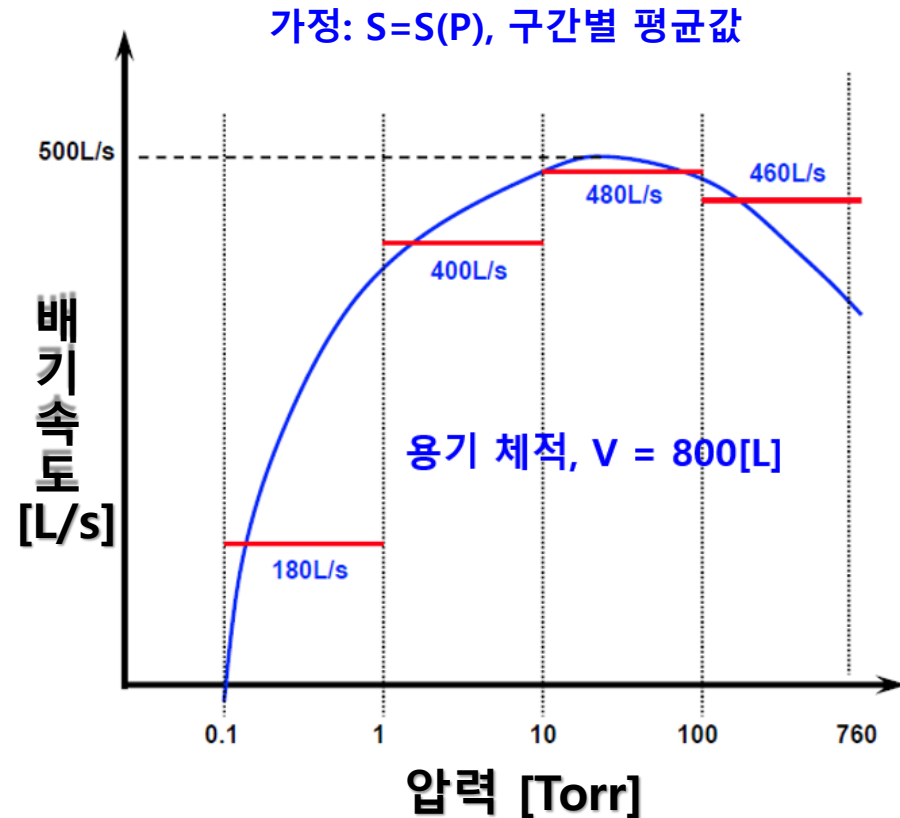
$$t_{760 \rightarrow 100} = 2.3 \frac{800L}{460L/s} \log\left(\frac{760Torr}{100Torr}\right) \cong 3.5s$$

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

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

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

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





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

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

▶ 먼저 각 구간별로 유효배기속도( $S_{\text{eff}}$ )를 구하면,

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

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

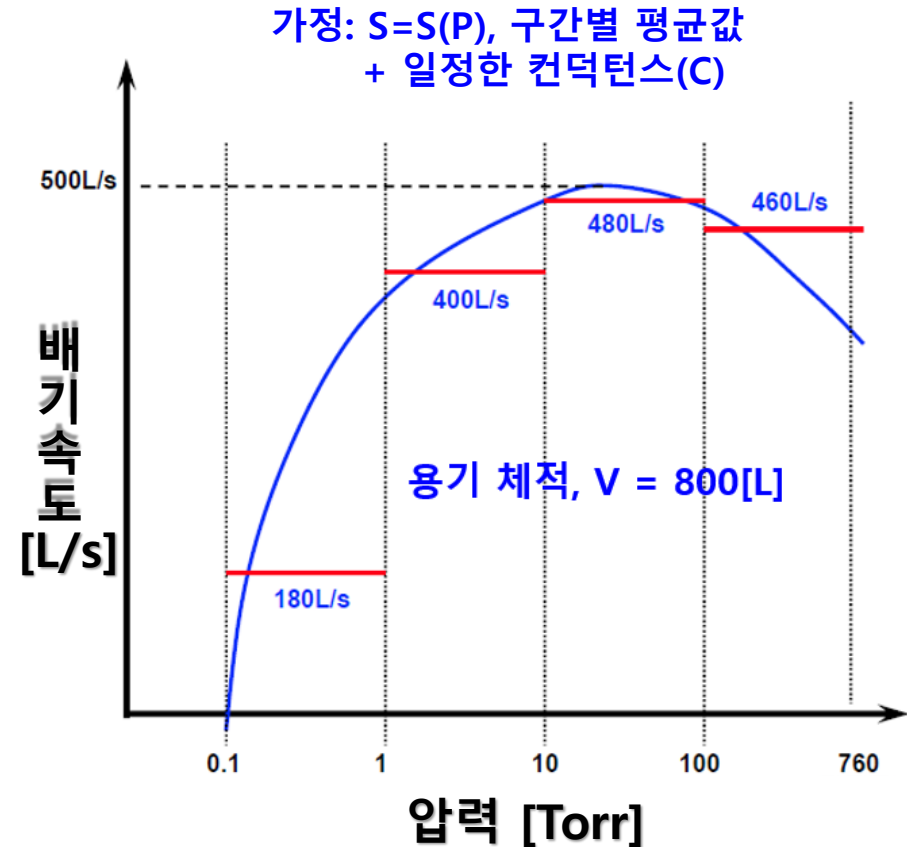
- 480L/s
- 400L/s
- 180L/s

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

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

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

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



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

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

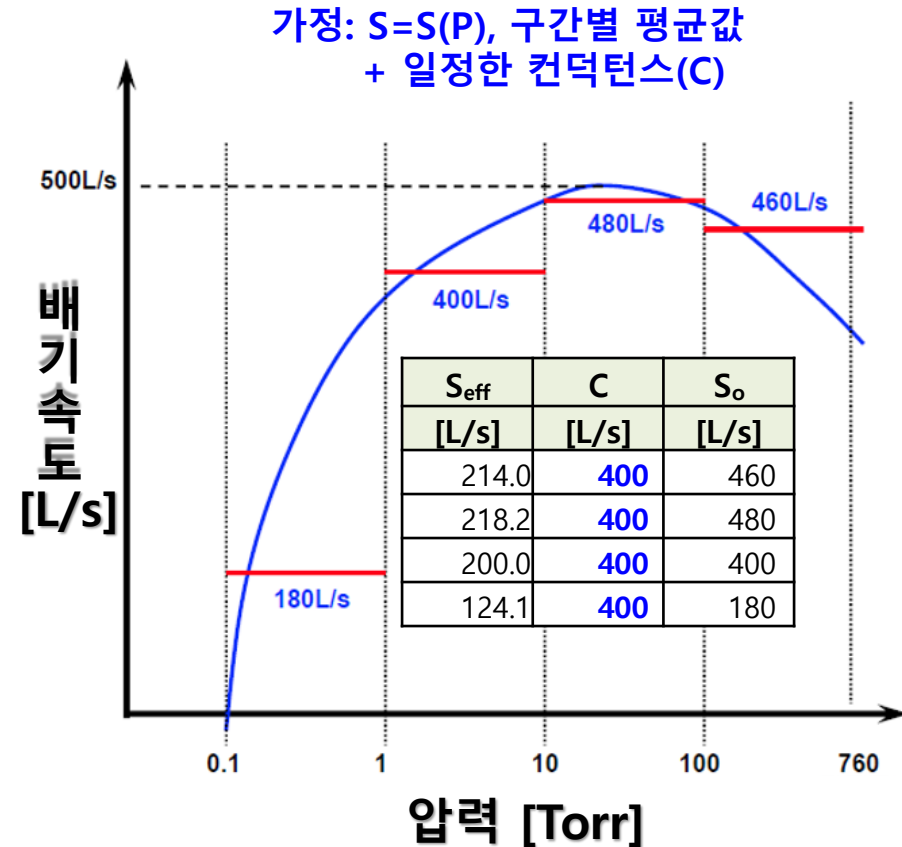
$$t_{760 \rightarrow 100} = 2.3 \frac{800L}{214L/s} \log\left(\frac{760Torr}{100Torr}\right) \cong 7.6s$$

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

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

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

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



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

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

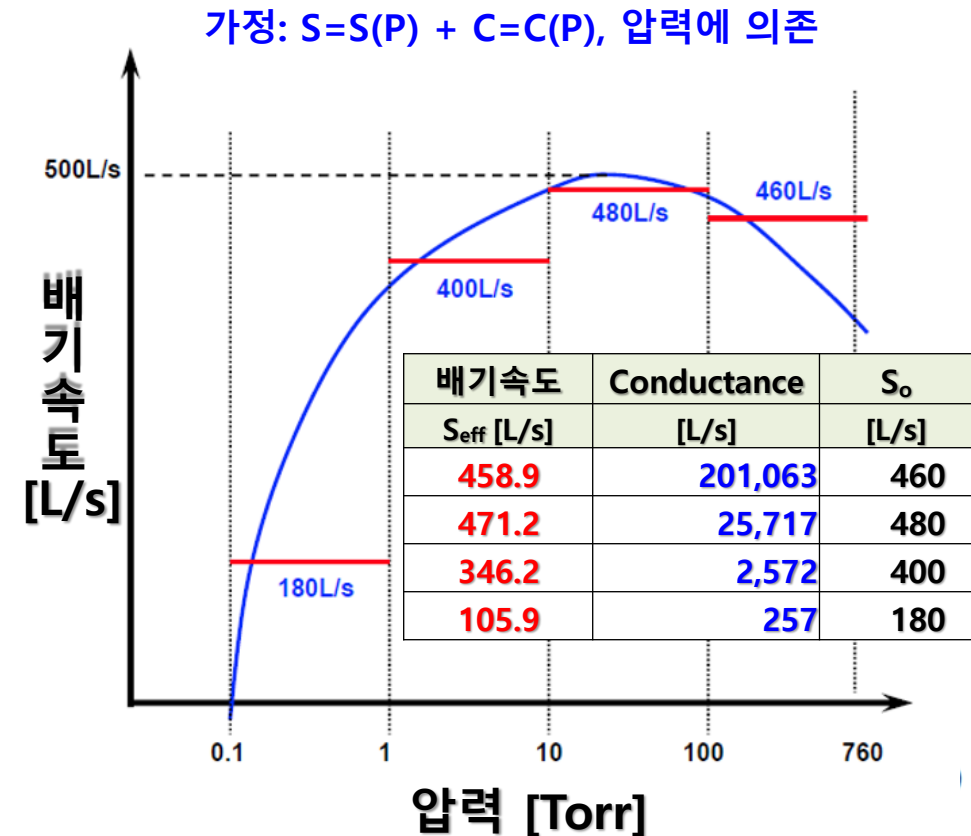
$$t_{760 \rightarrow 100} = 2.3 \frac{800L}{458.9L/s} \log\left(\frac{760Torr}{100Torr}\right) \cong 3.5s$$

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

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

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

**배기시간 합계,  $t = 30.1s$**



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

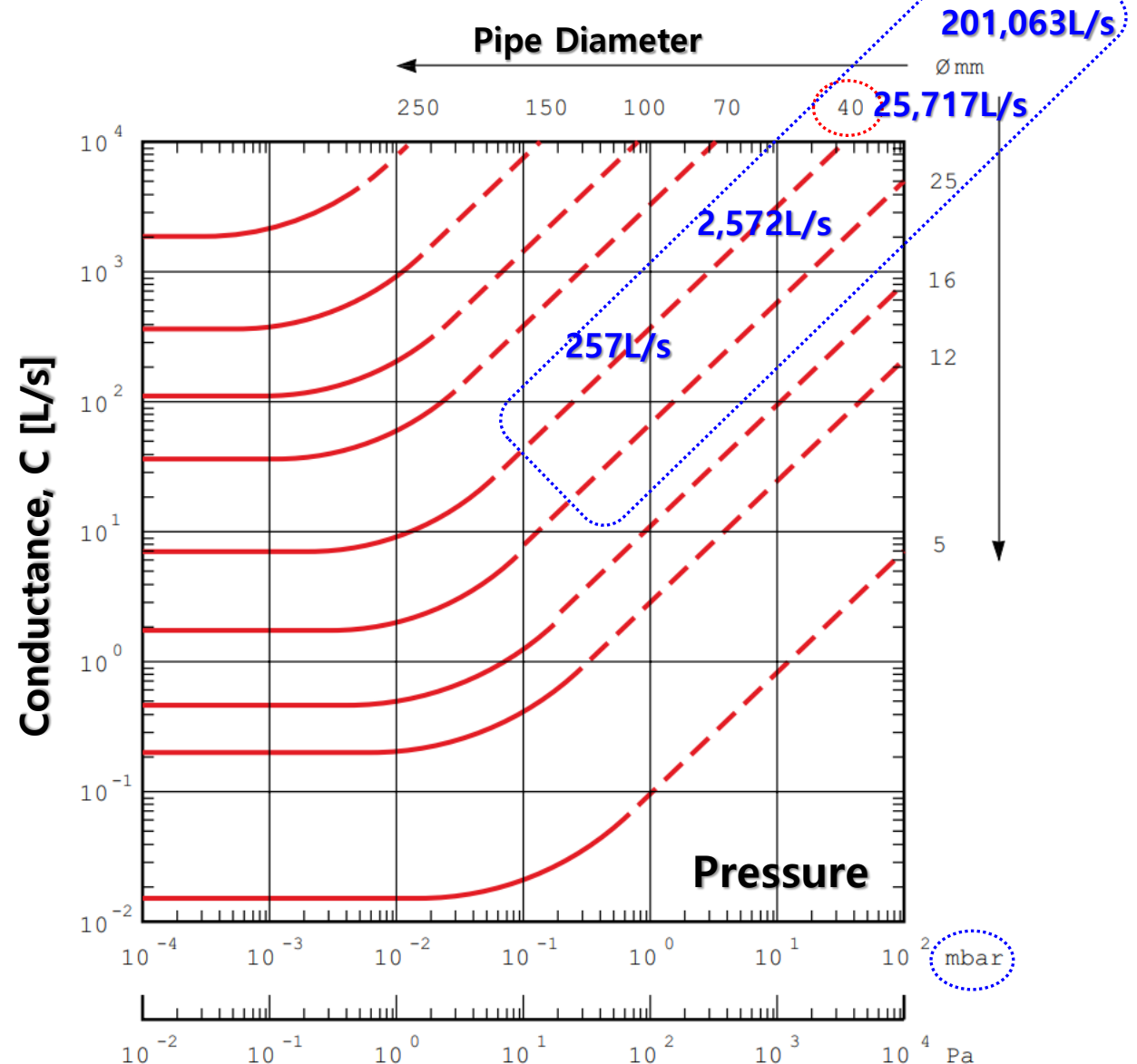
### (1) 그래프를 활용한 방법

<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



## 4. 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

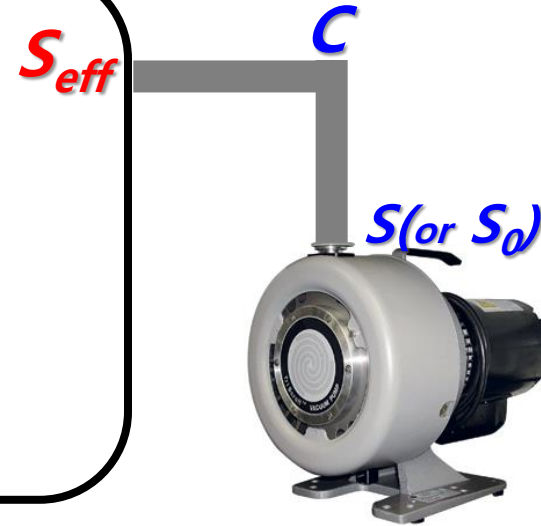
합 계 30.1s

## 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]
1	760→100 100→10 10→1 1→0.1	S=constant =500L/s	없음	S:일정(최대값)	14.3 [s]
2		S=S(P) 평균값	없음	S: 압력의존	22.1 [s]
3		S=S(P) 평균값	있음, C=constant =400L/s	C: 일정	40.0 [s]
4		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

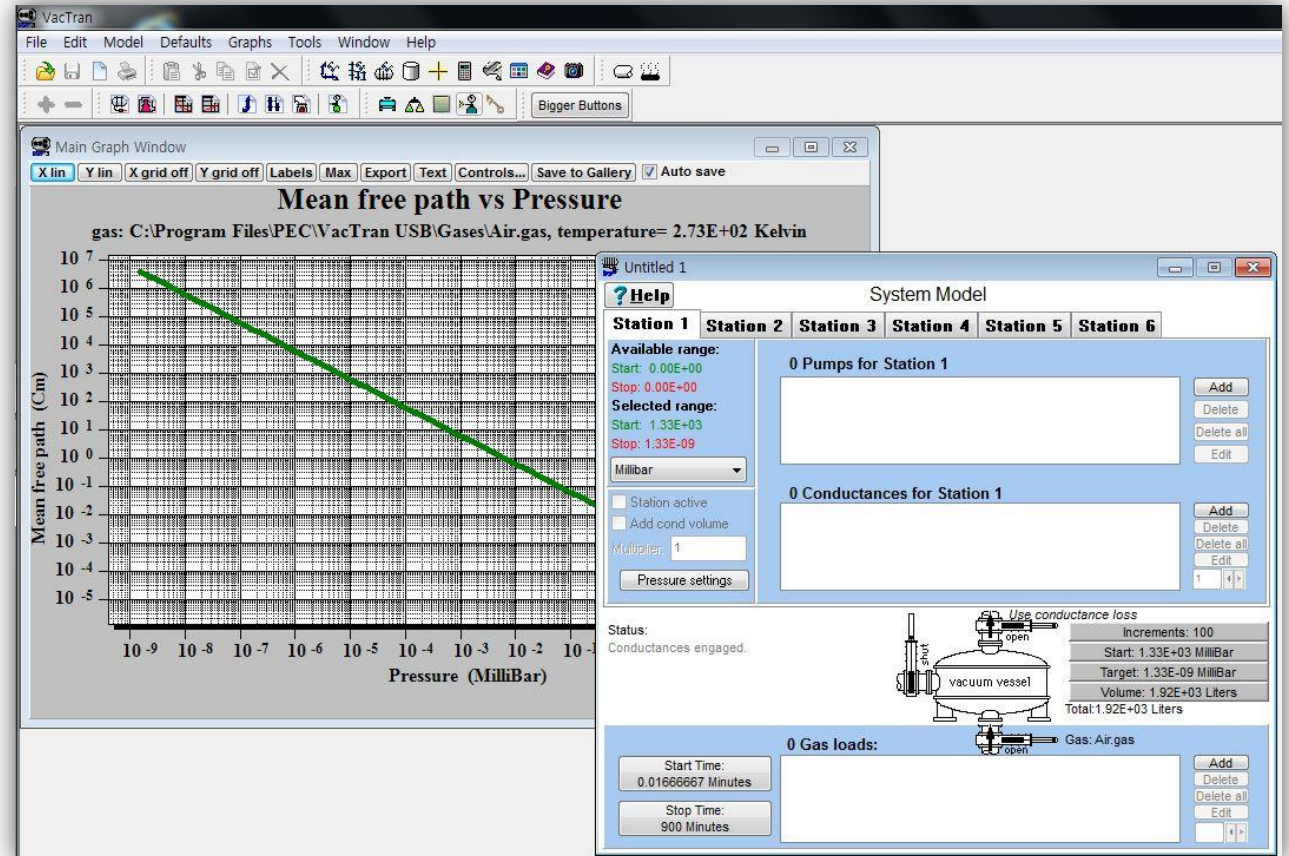


Vacuum Technology Software  
Windows version 3

© 2012 Professional Engineering Computations  
No part of this Program/Reference 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



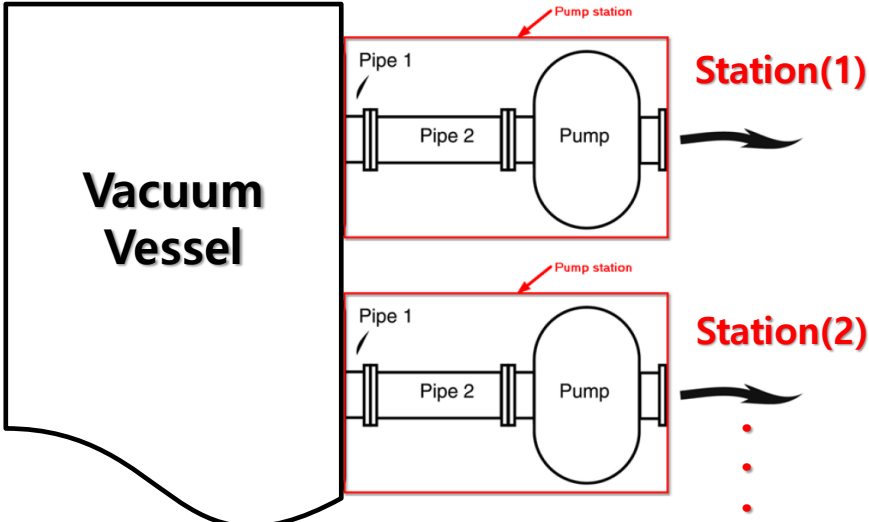
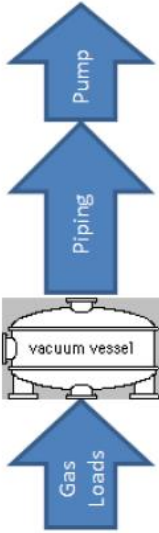
# A. Pump Model



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.

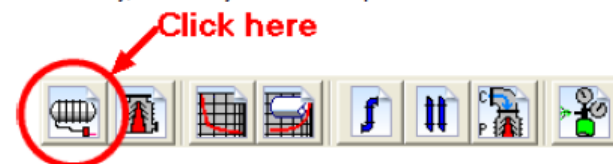
**New Document**

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:





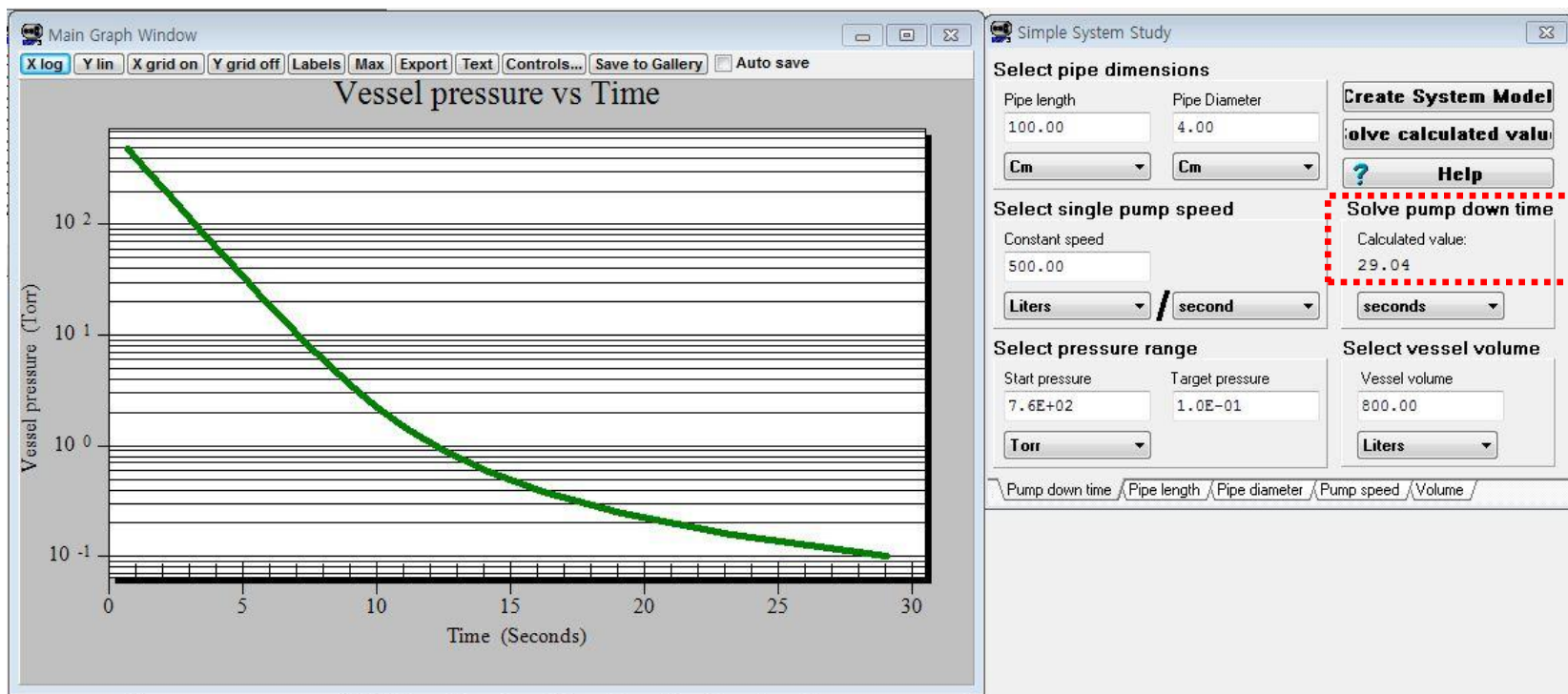
# 1. Simple System study의 예 (시간에 따른 압력 변화)

## [조건]

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

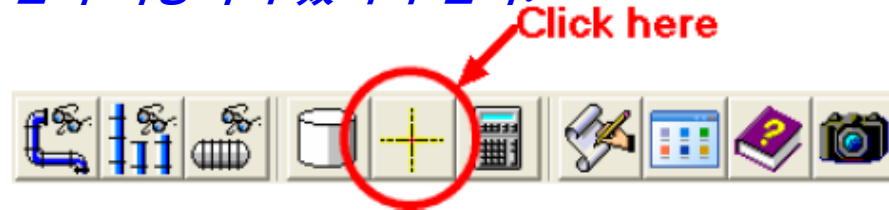
## [결과]

대기압 >> 0.1 Torr 까지: **29초**



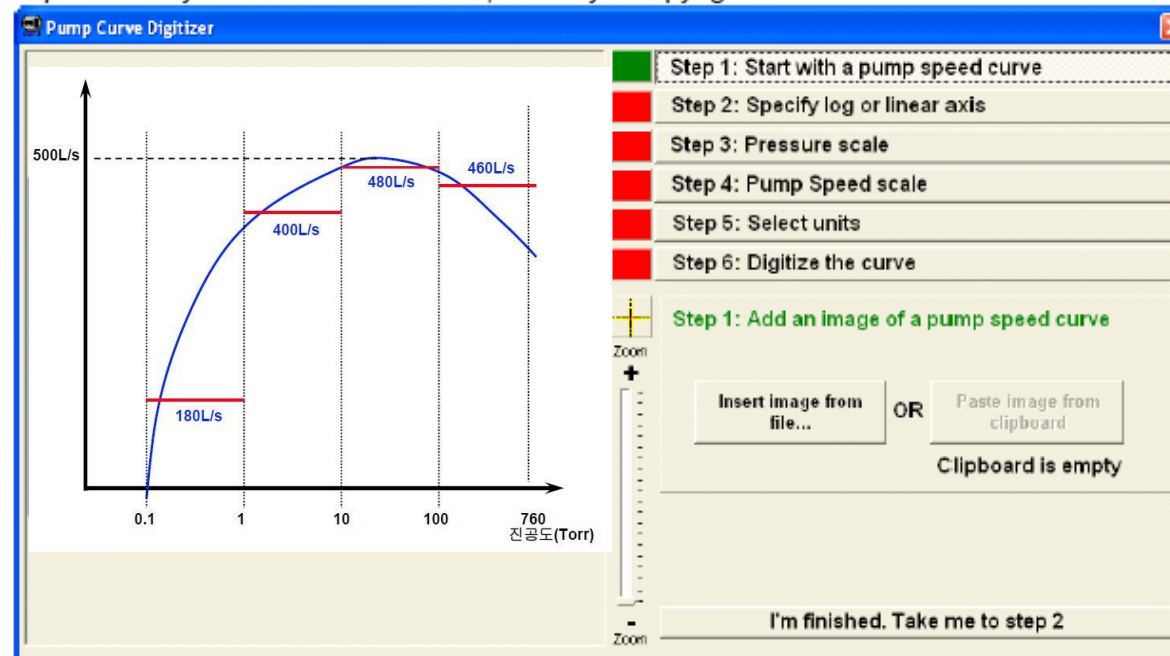
## 2. System Model의 예(2)

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



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

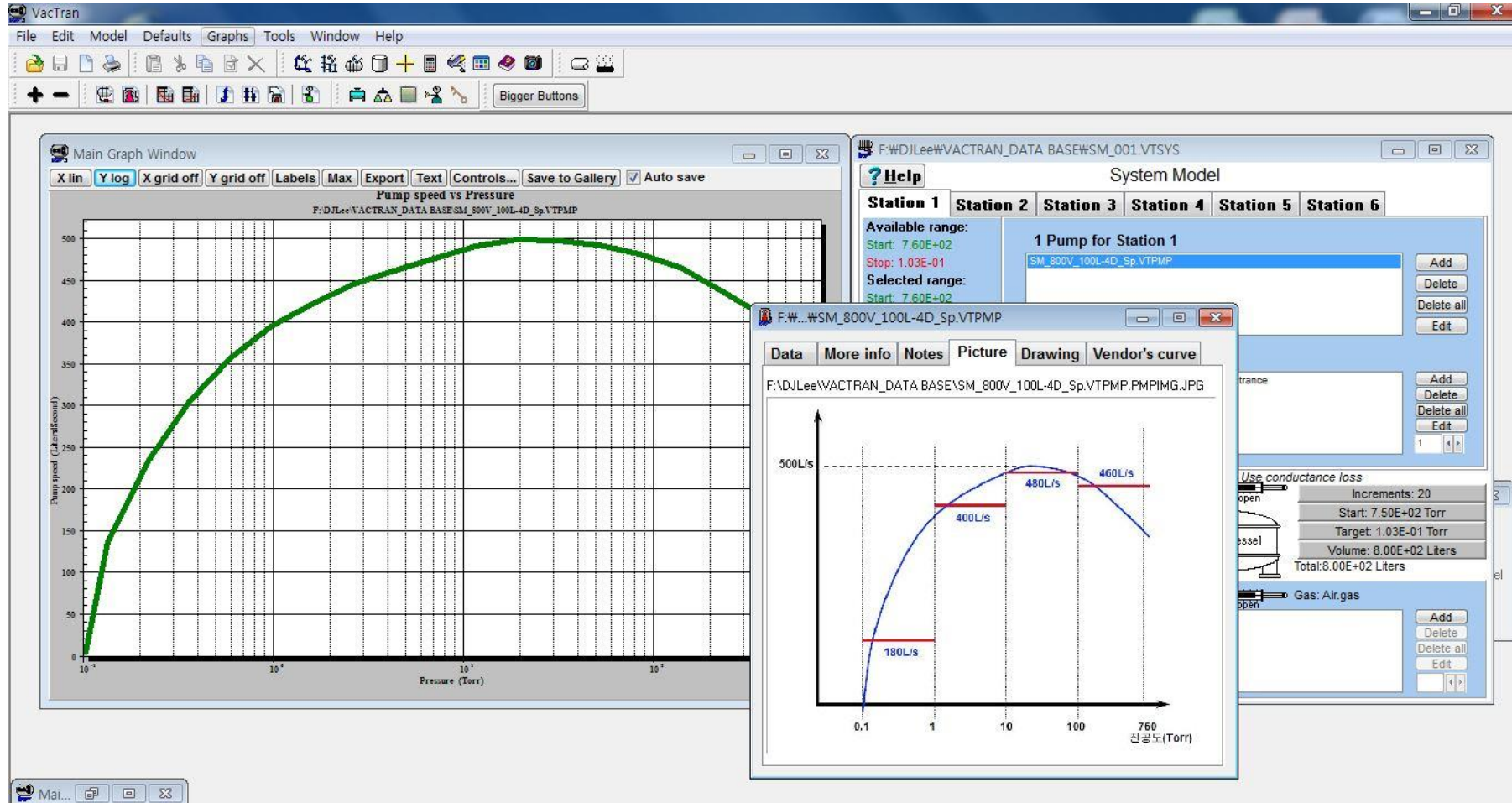
The first step in digitizing a pump curve is finding a graphic of the curve. This can be scanned from a catalog or copied directly from a vendor web site, but only if copyright notices allow this. Contact the vendor to be sure.





## [조건]

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

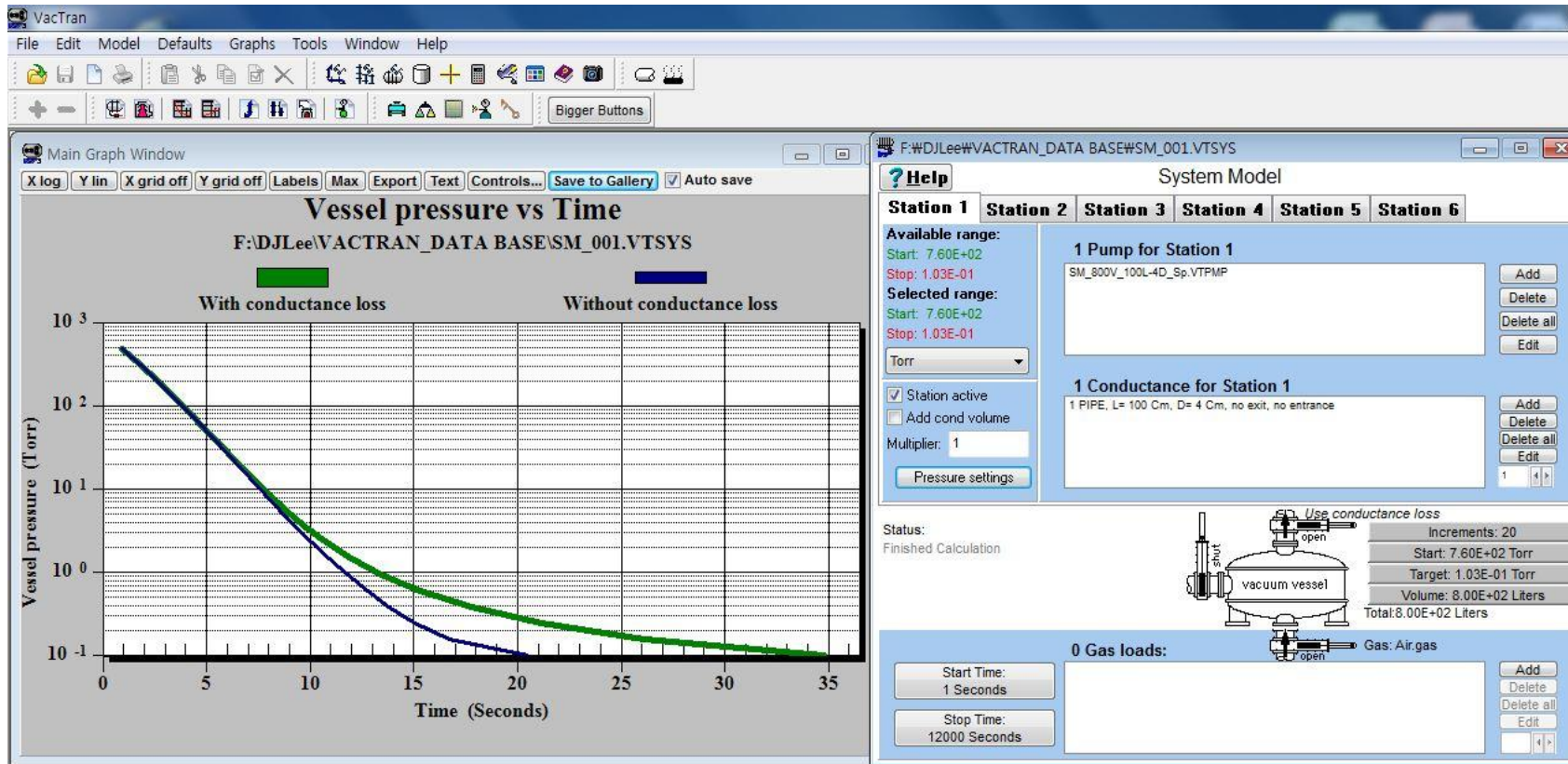


## [조건]

- 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**

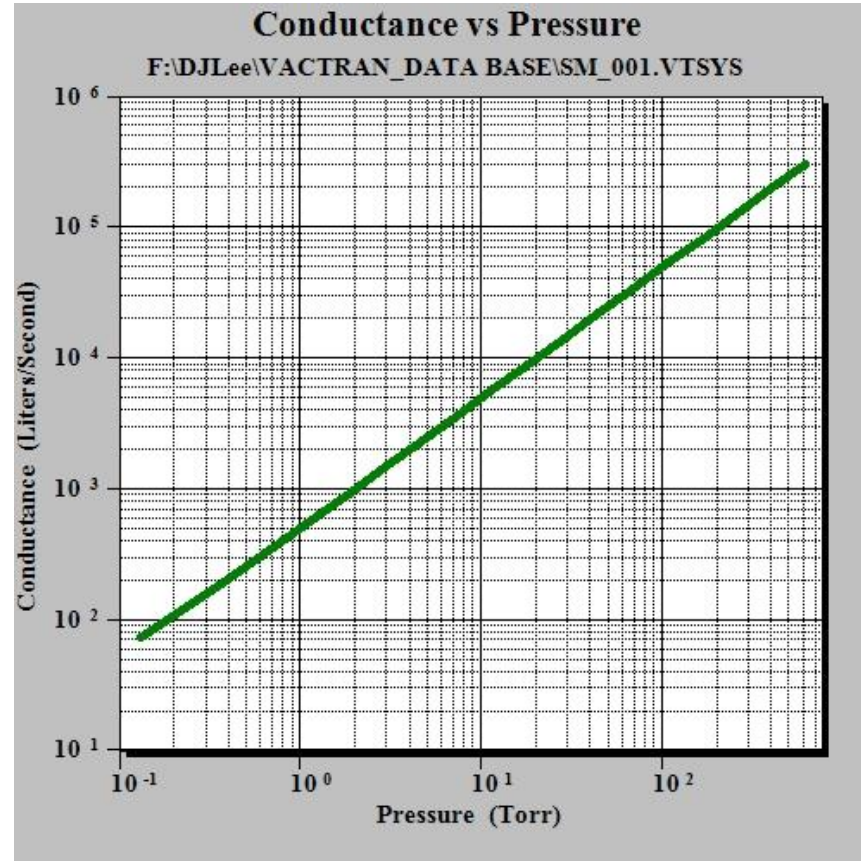
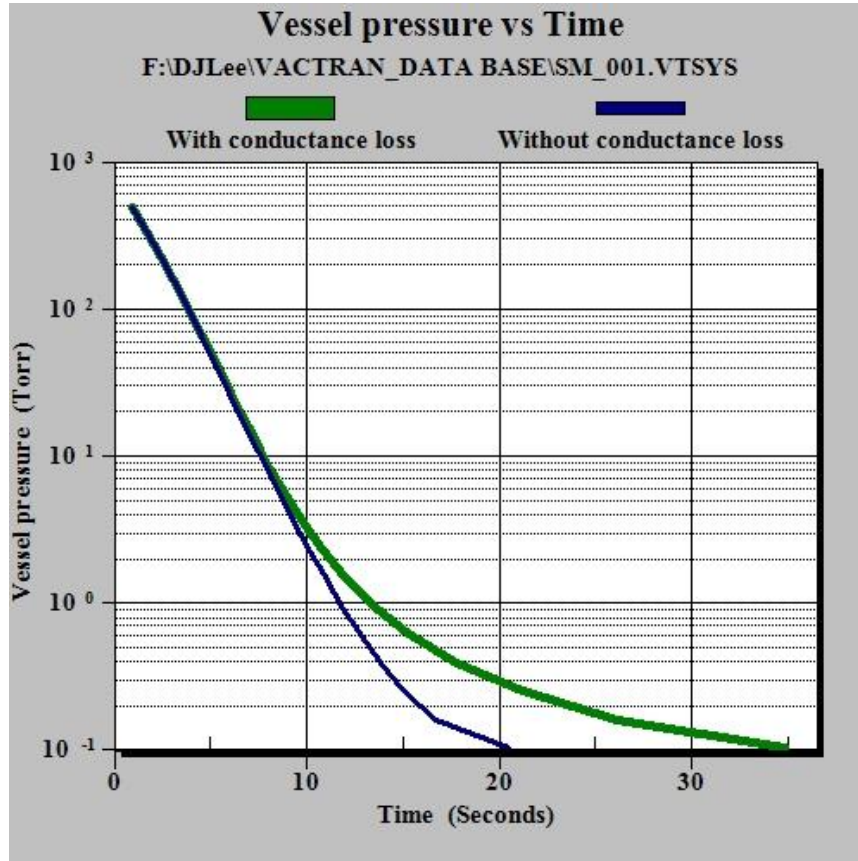


### [조건]

- 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



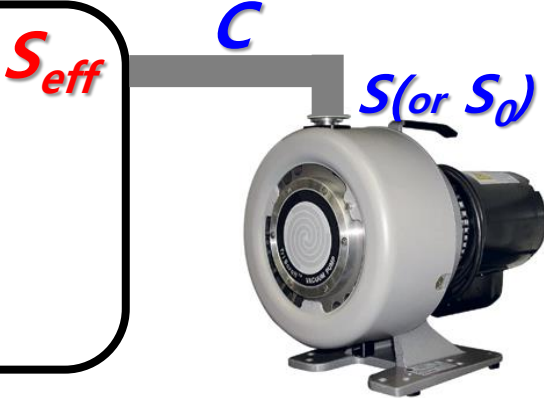


# 최종

Vacuum Chamber

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

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



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	30.1 [s]

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	29 [s]
2	VACTRAN	그래프	없음	System Model	20 [s]
			있음, C=C(P) I.D.=4cm, L=100cm		35 [s]



비교

# 경청해 주셔서 감사합니다!



발표자: 이동주

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