

# 터보분자펌프(TMP) 배기속도 측정에 관한 고찰

강상백<sup>a,b</sup> · 신진현<sup>a,c</sup> · 차덕준<sup>b</sup> · 고득용<sup>d</sup> · 정완섭<sup>e</sup> · 임종연<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>한국표준과학연구원 진공기술센터, 대전 305-340

<sup>b</sup>군산대학교 물리학과, 군산 573-701

<sup>c</sup>건양대학교 화학공학과, 논산 320-711

<sup>d</sup>한국기계연구원 에너지기계연구실, 대전 305-340

<sup>e</sup>한국표준과학연구원 유동음향센터, 대전 305-340

(2010년 5월 3일 받음, 2010년 7월 20일 수정, 2010년 7월 23일 확정)

터보분자펌프(TMP)의 특성평가는 ISO, PNEUROP, DIN, JIS, AVS 등 세계 여러 나라의 표준제정기구에서 제정한 국제규격에 그 근거를 두고 있다. 한국표준과학연구원에서는 이러한 국제규격에 기반을 둔 터보분자펌프의 특성평가시스템을 자체 설계/제작하여 그 신뢰성을 확인하기 위해 개발품 및 상용품의 평가에 주력하고 있다. 터보분자펌프의 배기속도 측정방법으로서 기체흐름 영역에 따른 throughput method와 orifice method를 적용하고 있으나 측정계이지, 유량계 및 orifice conductance의 불확도 등 실질적으로 정확한 배기속도를 제시하기 위한 조건들의 제약 때문에 많은 측정오차를 포함하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 배기속도의 측정오차를 줄이기 위한 하나의 고찰로서 본 논문에서는  $10^{-1}$  Pa-L/s 영역까지의 유량 주입범위를 가지는 기 구축된 정적법을 이용한 유량주입에 기반을 둔 throughput method를 이용하여 1000 L/s TMP의 측정 능력을 검증하고자 한다. 또한 분자류 영역인 orifice method를 사용할 경우 고진공영역, 미세유량 주입영역으로 진입할수록 커질 수밖에 없는 배기속도 측정 불확도를 최소화시키기 위해 검증된 유량을 이용한 conductance 값을 제시하여, 기 언급한 두 가지 배기속도 측정 방법의 연속성을 유지하기 위한 실험적인 방법론을 제기하고자 한다.

주제어 : 고진공펌프, 배기속도, TMP, Orifice method, Conductance method

## I. 서 론

최근 선진국의 산업구조는 반도체, 디스플레이, IT 제품 등 고부가가치 산업으로 재편되고 있으며, 이에 따라 핵심 공정장비인 고진공펌프의 수요가 급격히 증대하고 있다. 고용량/대면적/초정밀 제품을 지향하는 개발추세에 따라 핵심 공정 장비로서 터보분자펌프(Turbo-Molecular Pump: 이하 TMP) 및 크라이오펌프의 활용도가 크게 증가하고 있으며, 대용량 및 신뢰성 높은 진공펌프로의 개발방향이 전환되고 있다. 고진공 펌프의 경우 반도체 분야는 주로 TMP에 대한 수요가 높으며, LCD 분야 등과 같이 수소 분자와 물 분자 등의 배기가 중요한 응용분야에는 크라이오펌프의 수요가 대부분을 차지하고 있다. 또한 도래하는 한미FTA 체결에 따라 반도체, IT, 디스플레이 제조 장비용 고진공펌프의 수입이 급증할 것으로 예상되어 국내 진공업체에서도 TMP 및 크라이오펌프의 개발이 진행되고 있다.

현재 한국표준과학연구원 진공기술센터에서는 국제규격에 기인한 저진공 드라이펌프 특성평가 시스템을 구축 완료하였으며, 국제적 신뢰성을 바탕으로 한 드라이펌프 특성평가를 수행 중에 있다. 또한 첨단 진공공정 산업시장에서 요구되는 TMP, 크라이오펌프 개발과 함께 고진공펌프의 특성평가시스템의 설계 개발을 자체적으로 완료하여 그 신뢰성을 확인하기 위해 터보분자펌프 개발품 및 상용품의 평가에 주력하고 있다. TMP의 특성평가 항목으로는 bake-out을 통한 도달진공도 및 배기속도, 압축비, throughput, orifice conductance, 소비전력, 소음, 진동, 내구성 평가 등을 들 수 있으며, 특히 배기속도는 펌프가 배출하는 기체의 양을 물리적으로 정량화하는 중요한 척도 중 하나로서 가장 중요한 평가항목으로 들 수 있다 [1].

본 논문에서는  $10^{-1}$  Pa-L/s 영역까지의 유량 주입범위를 가지는 기 구축된 정적법을 이용한 유량주입에 기반을 둔 throughput method를 이용해 1000 L/s TMP의 배기 성능

\* [전자우편] jyilm@kriss.re.kr

측정 능력을 검증하고자 한다. 또한 분자류 영역인 orifice method를 사용할 경우 고진공영역, 미세유량 주입영역으로 진입할수록 커질 수밖에 없는 배기속도 측정 불확도를 최소화시키기 위해 검증된 유량을 이용한 conductance 값을 제시하여, 기 언급한 두 가지 배기속도 측정 방법의 연속성을 유지하기 위한 방법론을 제시하고자 한다.

## II. 실험 방법

### 1. 터보분자펌프 특성평가시스템

Fig. 1은 국제규격에 기인하여 기 구축 완료된 TMP의 특성평가시스템이다. TMP의 특성평가시스템은 미세유량 영역에 따른 배기속도 측정 시 throughput method와 orifice method를 사용하도록 규정하고 있으며 TMP의 도달진공도 및 배기속도, 압축비, throughput, 소비전력, 소음, 진동, 내구성 평가 등을 측정할 수 있는 능력을 구비하고 있다.

### 2. 터보분자펌프의 배기속도 측정

고진공펌프의 배기속도는 진공용기를 효율적으로 배기하는 능력을 얼마나 가지고 있는지를 나타내는 정량적인 지표이며 단위는 일반적으로 L/s를 사용하고 있다.

TMP는 특성평가 시 보조펌프의 지원을 받으므로, 평가 전 보조펌프에 대한 도달진공도 및 배기속도, 압축비 등 전 압력 영역에 대한 다양한 기체의 배기속도 등의 데이터 측

정이 선행되어야 한다.

국제규격인 PNEUROP 5608, ISO 5302, ISO 21360, ISO 21360-2, ISO 27892, AVS 4.1, AVS 4.2 [2-8] 등에서 제시하는 TMP의 배기속도 측정 방법은  $10^{-4}$  Pa 압력을 기준으로 한 throughput method와 orifice method의 두 가지 방법으로 제시되어 있다.

첫 번째, throughput method는  $10^{-4}$  Pa 압력 이상 영역에서의 배기속도 측정 방법을 제시하고 있다. 배기속도 S는 일정한 유량 Q를 흘려보내는 경우 펌프는 조만간 일정한 압력 P로 정상상태에 도달할 때 다음 식에 의해 정의된다. 여기서  $P_0$ 는 용기의 도달진공도를 나타내고 있다.

$$S = \frac{Q}{P - P_0} \quad (1)$$

Throughput method의 유량은 현재 한국표준과학연구원 진공기술센터에서 구축하고 있는 정적형유량계(constant volume flow meter: 이하 CVFM) [9]를 활용하여 측정할 수 있으며, "throughput limit 향상기술개발" 사업 결과 [10] 미세유량 영역인  $10^{-1}$  Pa-L/s 까지 주입할 수 있는 능력을 구비하고 있다.

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

CVFM의 유량은 식 (2)에서  $dV/dt=0$ (용기의 부피가 일정)으로 유지하면서 압력 변화율  $dP/dt$ 를 측정하여 계산한다 [1].

두 번째, orifice method는  $10^{-4}$  Pa 압력 이하 영역에서의 배기속도를 측정할 때 사용된다. 이러한 배기속도의 측정에 사용하는 방법은 표준 conductance법으로 알려진 정상 압력 방법으로서, 이 방법에서는 Fig. 1 orifice method의 진공용기에서 보는 것과 같이 얇은 오리피스 판이 진공용기를 상하 두 개의 용기로 갈라놓고 있다. 각각 상부와 하부의 용기에서 같은 감도를 가진 게이지로 압력을 측정하면 배기속도 S는 다음과 같이 주어진다.

$$S = C \left( \frac{P_a - P_{a0}}{P_b - P_{b0}} - 1 \right) \quad (3)$$

여기서  $P_a, P_{a0}$ 는 각각 상부 용기의 압력과 도달진공도를

High Vacuum Pump Characteristics Test System

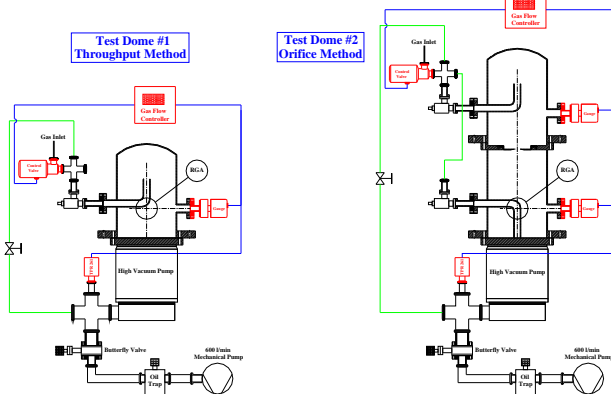


Figure 1. Schematic diagram of the apparatus for high vacuum TMP performance test.

말하며,  $P_b$ ,  $P_{b0}$ 는 각각 하부 용기의 압력과 도달진공도를 말한다. Orifice method는 고진공 영역에서 측정이 이뤄져야 하기 때문에 진공용기의 도달진공도 및 배기속도 측정 시 긴 시간이 요구된다. Orifice의 conductance로서  $C$ 는 orifice의 형상과 기체의 특성들로부터 다음 식으로 구해질 수 있다.

$$C = \sqrt{\frac{\pi RT}{32M}} \frac{1}{1+L/d} d^2 \quad (4)$$

여기서  $L$ ,  $d$ 는 각각 orifice의 두께 및 직경이며  $1/(1+L/d)$  항은 기체의 평균 통과확률이라 정의될 수 있는 보정 인자이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. Gauge Difference 보정

Orifice method를 이용하여 배기속도를 측정하기 전 선행되어야 하는 조건은 국제규격에 명시되어 있는 것처럼 상부 용기와 하부 용기에 각각 같은 감도를 가진 게이지를 사용하여야 한다는 것이다. 위 (3)식에서 보는 것과 같이 배기속도는 상부와 하부 용기의 압력비에 비례하여 결정될 수 있으므로 상부와 하부에서 측정하는 게이지는 절대적 정확성 및 직선성이 요구된다. 하부 용기에 기체를 도입하면 상부와 하부의 압력이 같아져야 하므로 두 게이지를 상대적으로 교정할 수 있고 상부 용기의 압력값과 하부 용기

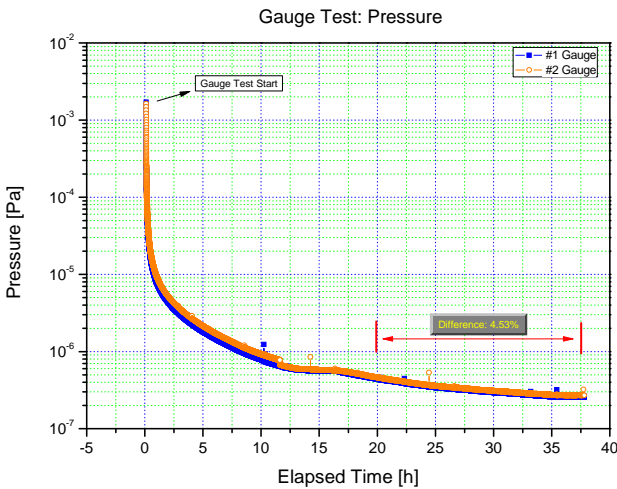


Figure 2. Pumping-down characteristics of orifice chamber.

의 압력값의 오차를 최소화할 수 있다.

Fig. 2에서 불확도 10% 이내인 같은 회사의 같은 모델 두 개의 게이지를 선정하여 게이지의 감도를 보정하기 위해 Fig. 3과 같이 게이지 감도 차이를 한국표준과학연구원 진공기술센터에서 측정하였다.

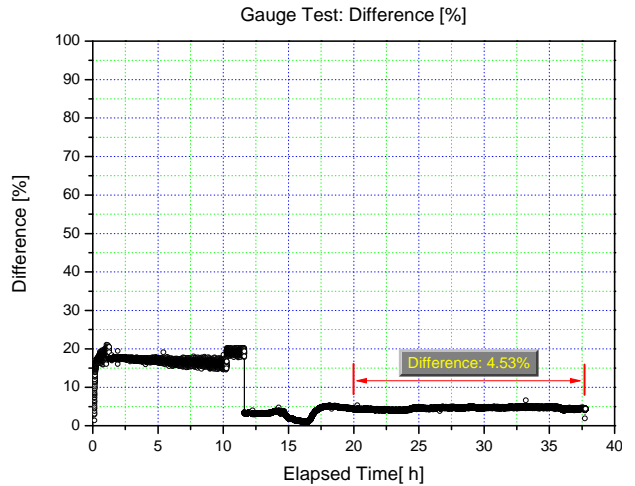


Figure 3. Measurement of the gauge difference.

진공용기에 같은 회사의 게이지를 같은 위치에 연결하여 동시 측정할 경우 게이지 워밍업 시간이 18시간 정도로 긴 것을 확인할 수 있으며, 그 이후 압력이 내려감에 따라 5% 이내의 일정한 감도를 가지고 있음을 알 수 있다. Orifice method를 이용한 배기속도의 측정 시 게이지 워밍업 시간을 고려하여 이 회사 제품의 경우 Fig. 2, 3에서와 같이 20시간 뒤 측정을 시작하면 약 4.53%의 정도의 보정인자가 대입되어야 하는 것으로 유추된다.

#### 2. Orifice 선정 및 Pressure Ratio 측정

Orifice method를 이용하여 배기속도를 측정하는 경우 국제규격에서 명시하는 orifice 양단 압력의 비율에 맞추어 orifice 치수를 채택해야 한다. 현존하는 국제규격에서 제시하는 압력비를 살펴보면 아래의 Table 1과 같다.

본 연구에서는 가장 최근에 업데이트된 ISO 21360 (2007)의 국제규격에 맞추어 압력비 3~30을 만족하는 두께 2 mm와 직경 20 mm의 orifice을 제작하여 실험을 진행하였다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 압력비는 도달진공도의 경우 3~5의 압력비를 가지며 미세유량 주입 후 각 압력 영역에

Table 1. Orifice dimension and pressure ratio.

	Diameter (d)	Thickness (L)	Ratio of P1 & P2
DIN	0.05D < d < 0.1D	L < 0.1d	5~100
AVS	-	L < 0.02d	50~100
ISO 5302	-	L < 0.1d	3~50
ISO 21360	-	L < 0.1d	3~30
채택	20 mm	2 mm	3~30

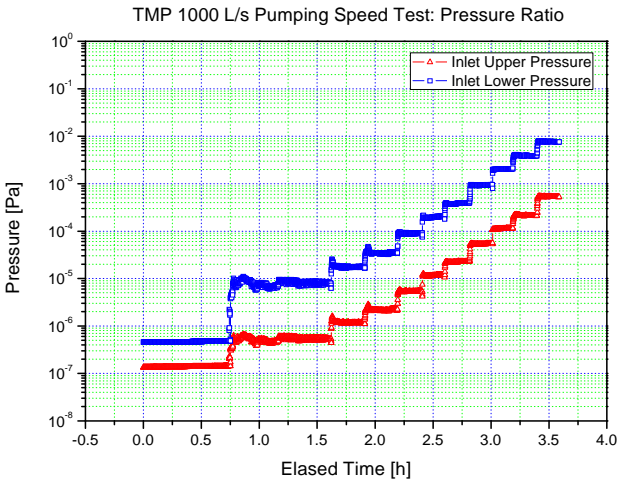


Figure 4. Pressure ratio variation w.r.t. elapsed time.

서는 23~25의 압력비를 가지는 것을 확인할 수 있다. 압력비 측정 시 게이지 감도의 값을 보정한 게이지를 사용하여 압력비를 측정하였다.

### 3. Throughput 및 Orifice Method의 실험적 고찰

본 연구에서는 1000 L/s 급 TMP(S사, 중고 펌프)의 배기속도를 orifice method로 측정하기 전 제조회사에서 제시한 기술데이터에 대한 설계 배기속도의 신뢰성을 판단하기 위하여 CVFM을 사용하여 throughput method로 측정 한 후 제조회사에서 제시한 설계 배기속도와 비교분석을 하였다. 설계 배기속도를 주는 경우 실제 배기속도는 대부분 이보다 작으며, 중고 펌프로써 배기속도는 중고 펌프의 수리 횟수, 부식성 가스, 마모성 물질의 유입 등으로 인한 클리어런스 변화로 인하여 새 제품에 비해 그 성능이 달라질 수 있다. 배기속도는 진공시스템을 설계할 때 원하는 진공도에 도달하기 위해 관리해야 하는 가장 기본적인 변수로서 오차가 너무 크면 곤란하다. 특히 대부분의 TMP들은 기체의 종류마다 상이한 배기속도를 가지며, 이를 적절한

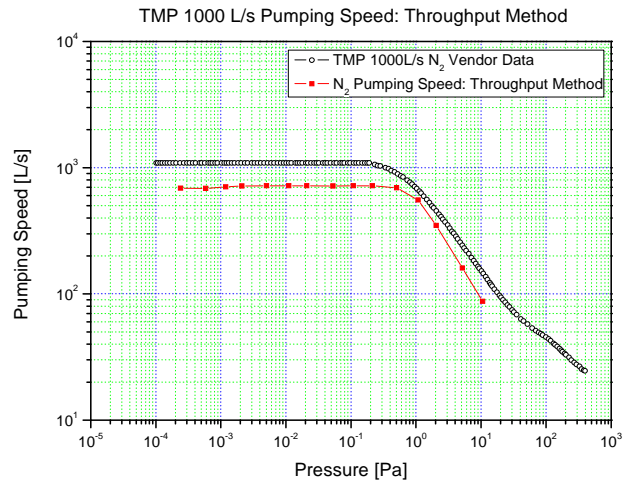


Figure 5. Pumping speed with the throughput method.

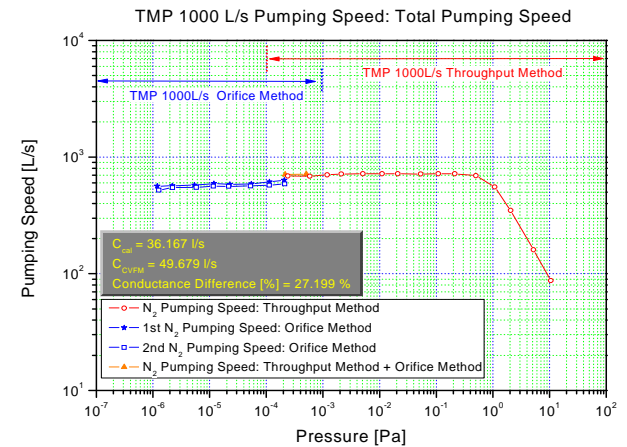


Figure 6. Pumping speed with the throughput and orifice method.

방법으로 시험하여 정량화하는 것이 필수적이다 [1].

Fig. 5에서 보는 것과 같이 제조회사에서 제시한 설계 배기속도와 throughput method로 측정된 배기속도의 차이가 약 30% 이상 발생함을 알 수 있다.

Throughput method를 사용한 배기속도 측정 시 spinning rotor 타입의 SRG-2CE 교정기급 게이지 (accuracy 1%) 및 불확도 3% 이내의 신뢰성을 확보한 CVFM을 사용하였으며 [9], 미세유량 영역인  $10^{-1}$  Pa·L/s 까지 주입하여  $10^{-4}$  Pa의 압력 영역까지의 측정데이터를 획득하였다. 한국표준과학연구원 불확도 [11] guideline에 의해 계산된 100 Pa 이하 영역에서의 배기속도 측정 불확도는 6% (k=2)로 확인된다.

또한 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 신뢰성이 확보된 throughput method로 측정된 배기속도를 기본 참조로 하여,  $10^{-4}$  Pa 이하 영역에서 orifice method로 측정된 배기

속도와 비교 분석하였다. 두 가지 방법을 적용하여 측정된 데이터는 Fig. 6 에서 보는 것과 같이 측정오차가 발생함을 알 수 있으며, conductance 오차를 배제한 상태에서 게이 지 측정오차 10%를 고려하였을 때 압력  $10^{-4}$  Pa 이하의 영역에서 orifice method의 불확도를 계산한 결과는 약 35% ( $k=2$ )로 확인된다. Orifice method로 측정 시 (3)식을 이용하여 배기속도를 측정하였으며, 측정 시 적용한 질소의 경우 36.17 L/s 의 conductance 값은 (4)식을 이용하여 구하였다. Throughput method 결과 및 첫 번째 측정된 orifice method 결과는 약 8.2%의 오차를 가지고 있으며 두 번째 실험과의 오차는 약 14.6%로 확인할 수 있었다. Orifice method의 경우 측정게이지, 유량계 및 orifice conductance의 불확도 등 신뢰성 있는 값을 제시하기 위한 조건들의 기술적 제약때문에 실질적으로 많은 측정오차를 포함한다고 볼 수 있다.

Fig. 6에서와 같이  $10^{-3}$  Pa~ $10^{-4}$  Pa 영역에서 throughput method를 이용한 값과 orifice 진공용기에 CVFM의 정량화된 유량을 주입하여 측정된 배기속도 값은 약 2.9%의 오차를 보이고 있어 기 언급한 throughput method의 오차범위 6% 이내에 들어오는 것으로 결론내릴 수 있다. 이러한 결과론에 근거하여 orifice 진공용기에서 실험적으로 구한 conductance 값을 (4)식의 계산값과 비교한 결과 약 27.2%의 오차를 보였다. 실험적인 결론으로서 orifice의 conductance는 정량화된 유량 주입을 통하여 더욱 정밀하게 측정 할 수 있으므로, orifice method를 사용하는 경우 계산식에 의존하는 수동적인 방법을 배제할 수 있는 근거를 마련했다고 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

TMP의 특성평가시스템을 구축하여 throughput method와 orifice method의 conductance를 이용한 두 가지 배기속도의 측정방법에 대해 실험적인 방법으로서의 연속성의 가능성을 확인하였다.

본 고찰에서 시도한 실험의 결과로서 측정게이지, 유량계 및 orifice conductance의 측정오차 등으로 인하여 throughput method 및 orifice method의 경우 각각 약 6%와 35% ( $k=2$ )의 배기속도 측정 불확도를 확인할 수 있었다. 분자류 영역에서 측정 시 정밀한 유량계, 측정게이지의 확보는 필수적인 것으로 판단되며, 또한 교정을 통한 측정기기의 불확도를 낮추어

신뢰성을 확보하여야 한다는 결론에 도달한다.

Orifice method의 경우 일종의 미세유량 측정 장치라고 할 수 있으며, 미세유량 시스템의 정확성 및 신뢰성이 확보된다면 throughput method 만으로 전 진공 영역에 걸친 고진공펌프의 배기속도 측정이 가능할 것으로 보고 있다. 한국표준과학연구원 진공기술센터에서는 국제규격에서 제시하고 있는 throughput method와 orifice method를 병행하여 배기속도를 측정하는 것뿐만 아니라, 전 진공 영역에 걸쳐 throughput method의 방식을 이용하기 위한 정압형유량계 및 소닉노즐을 이용한 미세유량시스템 개발을 현재 수행하고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원 사업인 “고진공펌프 종합특성평가시스템 설계, 진단기술 개발(과제번호 10031836)” 및 “스마트형 배기시스템 진단 제어시스템 개발(과제번호 10031858)”의 일환으로 연구 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] 배석희 외 4인, *진공공학*, (한국경제신문, 서울, 2000).
- [2] PNEUROP 5608: Vacuum pumps - acceptance specifications - Turbomolecular pumps - Part III, 1989.
- [3] ISO 5302: Vacuum technology - Turbomolecular pumps - Measurement of performance characteristics, 2003.
- [4] ISO 21360: Vacuum technology - Standard methods for measuring vacuum - pump performance - General description, 2007.
- [5] ISO/NP 21360-2: Vacuum technology - Standard methods for measuring vacuum - pump performance - Part 2: Positive displacement vacuum pumps, 2007.
- [6] ISO/CD 27892: Vacuum technology - Turbomolecular pumps - Measurement of rapid shutdown torque, 2007.
- [7] AVS 4.1: Procedure for Measuring Speed of High-Vacuum Pumps, 1987.

- [8] AVS 4.2: Procedure for Measuring Throughput of High-Vacuum Pumps, 1987.
- [9] J. Y. Lim, W. S. Cheung, Y. M. Choi, D. J. Seong, Y. H. Shin, and K. H. Chung, *Engineering Materials* **277-279**, 1000, (2005).
- [10] 신진현, 고문규, 정완섭, 윤주영, 임종연, 강상우, *한국진공학회지* **18**, 411 (2009).
- [11] 안종찬, 김선곤, 이래덕, 엄천일, 우진춘, 이용봉, 서정준, 박종선, “측정불확도 및 BMC 표현지침 개발”, 한국표준과학연구원 KRISS/IR--2001-099, 2002.

## Study on the Measurement of TMP Pumping Speed

S. B. Kang<sup>a,b</sup>, J. H. Shin<sup>a,c</sup>, D. J. Cha<sup>b</sup>, D. Y. Koh<sup>d</sup>, W. S. Cheung<sup>e</sup>, and J. Y. Lim<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>*Vacuum center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340*

<sup>b</sup>*Department of Physics, Kunsan National University, Kunsan 573-701*

<sup>c</sup>*Department of Chemical Engineering, Konyang University, Nonsan 320-711*

<sup>d</sup>*Energy Systems Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-340*

<sup>e</sup>*Acoustics & Vibration group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340*

(Received May 3, 2010, Revised July 20, 2010, Accepted July 23, 2010)

Methods of the characteristics evaluation of turbo-molecular pumps (TMP) are well-defined in the international measurement standards such as ISO, PNEUROP, DIN, JIS, and AVS. The Vacuum Center in the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) has recently designed, constructed, and established the integrated characteristics evaluation system of TMPs based on the international documents by continuously pursuing and acquiring the reliable international credibility through measurement perfection. The measurement of TMP pumping speed is normally performed with the throughput and orifice methods dependent on the mass flow regions. However, in the UHV range of the molecular flow region, the high uncertainties of the gauges, mass flow rates, and conductance are too critical to precisely accumulate reliable data. In order to solve the uncertainty problems of pumping speeds in the UHV range, we introduced a SRG with 1% accuracy and a constant volume flow meter (CVFM) to measure the finite mass flow rates down to  $10^{-1}$  Pa-L/s with 3% uncertainty for the throughput method. In this way we have performed the measurement of pumping speed down to  $10^{-4}$  Pa with an uncertainty of less than 6% for a 1000 L/s TMP. In this article we suggest that the CVFM has an ability to measure the conductance of the orifice experimentally with flowing the known mass through the orifice chambers, so that we may overcome the discontinuity problem encountering during introducing two measurement methods in one pumping speed evaluation sequence.

Keywords : High-vacuum pump, Pumping speed, TMP, Orifice method, Conductance method

\* [E-mail] jyylim@kriss.re.kr