

첨단공정용 드라이펌프 유량 측정 한계 향상기술 개발

신진현^{a,b} · 고문규^b · 정완섭^c · 윤주영^a · 임종연^a · 강상우^{a*}

^a한국표준과학연구원 진공센터, 대전 305-340

^b건양대학교 화학공학과, 논산 320-711

^c한국표준과학연구원 유동음향센터, 대전 305-340

(2009년 9월 23일 받음, 2009년 11월 9일 수정, 2009년 11월 10일 확정)

차세대 반도체 및 디스플레이 산업용 드라이펌프의 배기속도를 평가하기 위해 최소부피 22 L 급의 정적형 유량계를 설계/제작하였다. 정적형 유량계의 기본 평가항목인 base pressure와 leak rate 측정결과 각각 6×10^{-8} mbar 와 1.5×10^{-6} mbar-L/s 로 측정되었고 throughput limit의 경우 기존 875 L 급보다 1 order 낮은 1×10^{-3} mbar-L/s 영역까지 확대되었음이 확인되었다. 구축된 시스템을 이용해 배기용량이 적은 최신 공정 드라이 펌프까지도 배기속도 값을 정확히 측정할 수 있으며, 구축비용이 높은 정압형 유량계를 어느 정도 대체할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

주제어 : 드라이 펌프, 정적형 유량계, 배기 속도, MFC, 유량

I. 서 론

최근 진공기술의 발전으로 진공환경에 대한 산업 응용분야가 다양화되고 있다. 진공 기술은 우주공학, 생명공학, 재료공학 및 전자공학 분야에 핵심 기반기술이 되었고, 특히 반도체 공정이나 디스플레이 공정의 진공 기술의 발전은 매우 빠르게 발전되어 이를 위한 지속적인 연구개발이 요구되고 있다 [1]. 반도체 및 디스플레이 공정과 같이 높은 청결도의 진공이 필수적으로 요구되어 지는 산업분야가 확대됨에 따라 드라이 펌프의 중요성은 급격히 증대되고 있다 [2]. 이러한 반도체 및 디스플레이 산업에 사용되는 드라이 펌프의 성능이 증대됨에 따른 성능 평가 기술의 향상 및 미세 유량을 조절 및 측정할 수 있는 시스템의 개발이 요구되어지고 있다. 특히, 드라이 펌프의 성능 평가는 펌프 제조업체 마다 상이한 절차로 수행되고 있는 실정이다. 국내에서는 한국표준과학연구원 진공센터에서 국제 규격 ISO/CD 1607, 5607, 21360, 10816-1, PNEUROP 6602 그리고 AVS 5.3 [3,4,5,6,7,8]에 기인한 드라이 펌프 특성 평가 시스템을 구축하였고, 이를 이용해 드라이 펌프의 특성 평가를 수행중이다. 드라이 펌프의 특성평가 항목은 도달진공도, 배기속도, throughput Q, 소비전력, 소음, 진동, 내구성 평가 등이 있다. 위 특성평가의 항목 중 특히

배기 속도는 펌프가 배출하는 기체의 양을 물리적으로 정량화하는 중요한 척도중 하나이다 [1].

본 연구는 배기속도 측정을 위해 기구축한 875L급 정적형 유량계의 유량 한계(1×10^{-2} mbar-L/s)를 22L급의 정적형 유량계를 제작함으로써 1×10^{-3} mbar-L/s 영역까지 확대하는 것을 목적으로 한다. 1×10^{-3} mbar-L/s 영역로의 확대는 정적형 유량계의 한계라고 인식되어 왔던 1×10^{-2} mbar-L/s 영역을 1 order 확장한 수치이며, 이 영역까지 정적형 유량계의 한계가 확장된다면 그 활용도가 커지는 것은 물론 고가의 정압력 유량계를 상당부분 대체할 수 있을 것이다.

II. 실험 방법

1. 드라이 펌프 특성 평가시스템

Fig. 1은 국제 규격에 기인하여 구축된 드라이 펌프 특성 평가 시스템이다. 드라이 펌프의 특성 평가 시스템은 크게 진공 용기, 유량 주입/측정 시스템, 데이터 수집 시스템, 특성 평가 수행 펌프로 총 4 부분으로 구성되어 있다 [9]. 구축된 평가 시스템으로는 드라이 펌프의 도달 진공

* [전자우편] swkang@kriss.re.kr

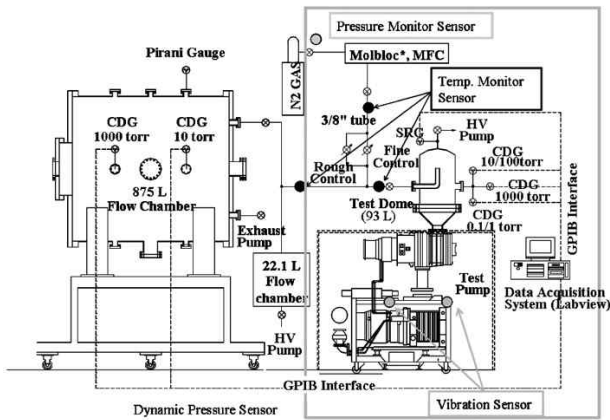


Figure 1. Schematic diagram of the apparatus for low vacuum dry pump performance test.

도, 배기 속도, 소비 전력, throughput Q, 소음, 진동 그리고 내구성 평가를 수행중이다.

2. 드라이 펌프의 배기속도 측정

펌프의 배기속도(S)는 진공 용기(V)내의 압력(P)을 얼마나 빠르게 낮추는가 하는 성능을 측정하는 잣대로서 단위는 일반적으로 L/s를 사용한다 [10].

ISO 21360에서 제시하는 드라이 펌프의 배기속도 측정 방법은 세 가지 (감압법, 정압법, 오리피스법)가 있다. 첫째, 감압법 (pump down method)은 챔버 내에 기체를 주입하지 않는 상태에서 압력과 시간을 측정하여 압력의 감소율로부터 펌프의 배기속도를 구하는 방법으로 반도체 및 LCD 등의 현장 공정에서 드라이 펌프의 배기속도 측정에 아주 유용하게 이용되는 장점이 있다.

체적 V인 챔버를 배기속도 S인 펌프로 배기할 때 시간 t_1 에서의 압력 P_1 , 시간 t_2 에서의 압력 P_2 로 감소하였다면 배기속도는 다음과 같이 구해진다.

$$S = \frac{V}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

하지만 시간에 따른 압력의 감소율로 배기속도를 측정하기 때문에 배기용량이 적은 펌프에만 적용되는 제한 사항이 있다. 두 번째로, 정압법(constance pressure method)은 드라이 펌프로 일정한 유량 Q 를 흘려보내면 펌프는 조만간 일정한 압력 P로 정상상태에 도달한다.

$$S = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

정압법은 넓은 압력 범위 내에서 배기 용량이 다양한 사이즈의 드라이 펌프의 배기 속도를 측정할 수 있는 방법으로, 한국표준과학연구원에서 드라이 펌프의 배기속도를 측정하기 위해 활용하고 있는 방법이다. 세 번째는, 오리피스를 이용해 배기 속도를 구하는 방식으로 고진공 펌프의 배기속도 측정에 사용된다.

$$S = C \left(\frac{P_d - P_{bd}}{P_e - P_{be}} - 1 \right) \quad (3)$$

위 식에서 컨덕턴스(C)는 오리피스의 사이즈와 기체의 특성을 계산하여 얻은 값이고, P_{bd} 와 P_{be} 는 진공 용기의 상부와 하부의 base pressure 이다. P_d 와 P_e 는 배기 속도 측정 시 상부와 하부 의 측정 압력이다. 오리피스 방법은 고진공 영역에서 측정이 이뤄져야 하기 때문에 챔버의 base pressure 도달 및 배기 속도 측정 시 긴 시간이 요구된다. 또한 상부와 하부 챔버의 압력을 고진공 게이지를 이용해서 측정하기 때문에 구축비용이 높다.

3. 정적형 유량계

유량은 압력과 더불어 그 자체로 많은 공정에서 중요한 변수로 작용한다. 유량을 정량적으로 제어하기 위해 사용하는 기기를 유량계라고 한다. 동적 교정 장치에 의한 압력의 표준, 누설의 표준, 부분압의 표준 등에도 기준 유량계가 필요하며 진공펌프의 성능 중에서 중요한 변수인 배기속도의 측정에도 유량계가 쓰인다. 저진공 펌프라도 성능 검사의 압력범위가 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^{-3}$ mbar에 해당되므로 유량계가 담당해야 할 범위 또한 넓다고 할 수 있다.

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

정적형 유량계(constant volume flow meter)는 식 (4)에서 $dV/dt=0$ (기체의 부피가 일정)으로 유지하면서 압력 변화율 dP/dt 를 측정하여 유량을 측정한다 [1]. 본 연구에서는 유량 측정 시 정적형 유량계의 일정 압력을 유지한 상태에서 유량을 주입하여 시간에 따른 압력의 증가율로부터

throughput Q를 구한다.

III. 실험 결과

1. 정적형 유량계 부피 측정

본 연구의 정량적인 목표인 throughput limit를 1×10^{-3} mbar-L/s 영역까지 확대하기 위해 최소 부피를 가지는 진공 용기를 설계/제작하였고, base pressure와 leak rate를 측정하였다.

Fig. 2는 터보 펌프(PFEIFFER, TPU 240)에 배후 펌프를 스크롤 펌프(IWATA, ISP-250B)로 하여 챔버를 배기한 결과를 보여준다. 챔버 내 압력은 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계를 이용하여 교정된 CDG (capacitance diaphragm gauge) [11] (PFEIFFER, CMR 27* Series)와 TPG 256A controller (PFEIFFER)를 사용하여 측정 정확도를 높였다.

CDG gauge는 5×10^{-6} mbar 보다 낮은 압력에서 gauge의 offset을 보정해야 한다. 제작된 유량계 챔버의 base pressure는 6×10^{-8} mbar로 측정되었으며, 이는 CDG gauge의 offset를 보정하여 측정의 오차를 최소화하기에 충분하다.

챔버의 leak rate 측정 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 측정된 leak rate는 1.5×10^{-6} mbar-L/s로 본 연구의 정략적 목표인 1×10^{-3} mbar-L/s의 1/1000 수준으로 throughput limit 측정에 leak rate로 인한 영향이 미비하다는 것이 확인되었고, 이를 통해 본 실험의 유효성 또한 검증되었다고 생각한다. 정적형 유량계로 유량을 측정하기 위해서는 유량계의 정

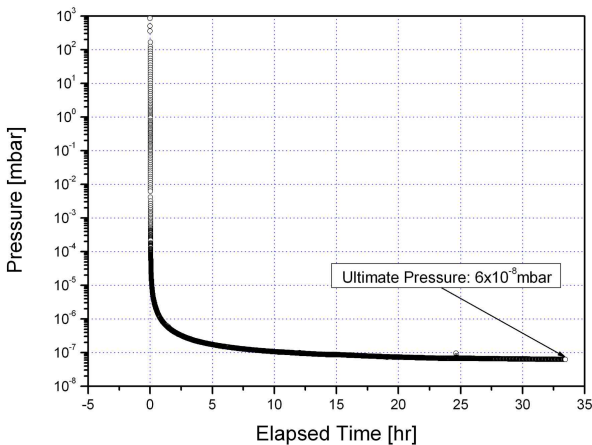


Figure 2. Ultimate Pressure spectra the Chamber.

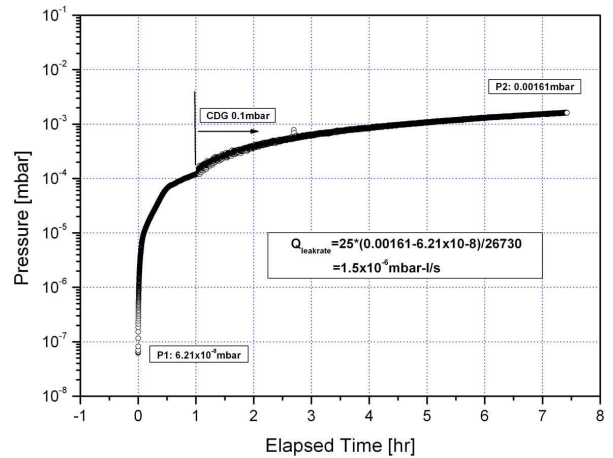


Figure 3. Leak rate spectra for the Chamber.

확한 부피를 알아야 한다. 챔버의 정확한 부피를 구하기 위해서 기 구축된 875 L 정적형 유량계를 통하여 정확한 유량을 측정하여 22 L 급 유량계로 by-pass 하여 부피를 측정하였다.

$$Q = V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (5)$$

챔버의 부피(v)는 위 식(5)을 이용하여 시간(t)에 따른 압력(p)의 증가량을 측정하여 챔버의 부피를 계산한다. 측정될 결과는 Fig. 4에서 확인할 수 있고, 측정된 값은 22.24 L이다.

Fig. 5는 정적형 유량계의 유량 조절 시스템을 나타낸다. 아래 시스템은 rough 밸브와 fine 밸브를 이용하여 대유량에서부터 미세 유량까지 두 밸브로 조절할 수 있도록

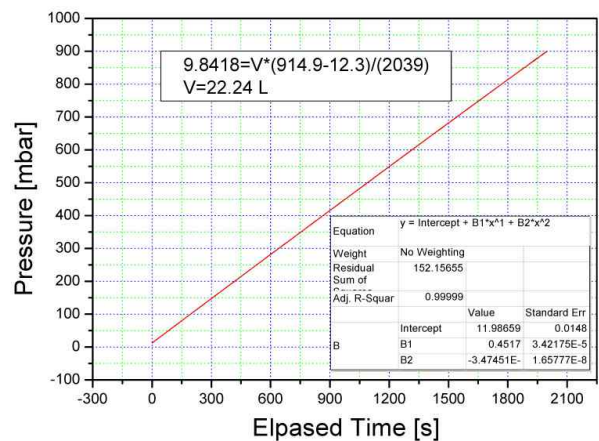


Figure 4. Measurement of the Chamber Volume.

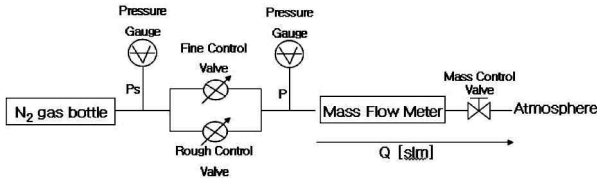


Figure 5. Experimental setup for determination of the critical pressure ratio, p/p_s .

설계되었다. 정적형 유량계로 신뢰성 있는 유량을 측정할 경우 유량이 일정하게 주입되어야 하기 때문에 유량조절의 정확도가 확보될 수 있도록 설계되어야 한다.

일정한 유량을 흐르게 하기 위해서는 critical pressure ratio (P/P_s)를 일정하게 조절해야만 한다. 보고된 결과에 따르면 critical pressure ratio가 0.4 이하일 때 유량이 일정하게 흐르고 0.4 이상에서는 점차 유량이 감소한다고 알려져 있다 [9]. 챔버의 부피를 측정된 결과로 알 수 있듯이 압력 증가율의 R-square 값이 0.99999로 유량이 일정하게 주입되었다는 것을 알 수 있었다.

2. 22 L급 유량계, 875 L급 유량계 및 mass flow controller (MFC) 간의 성능비교

구축된 22 L급 시스템의 유효성을 검증하기 위해 875 L급 (>3%, Uncertainty) 정적형 유량계와 비교하여 평가를 진행하였다.

실험은 875 L급 유량계로 유량을 측정하여 3-ways 밸브를 통하여 22 L 유량계로 by-pass하여 측정된 유량과 비교하는 방법으로 진행하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있

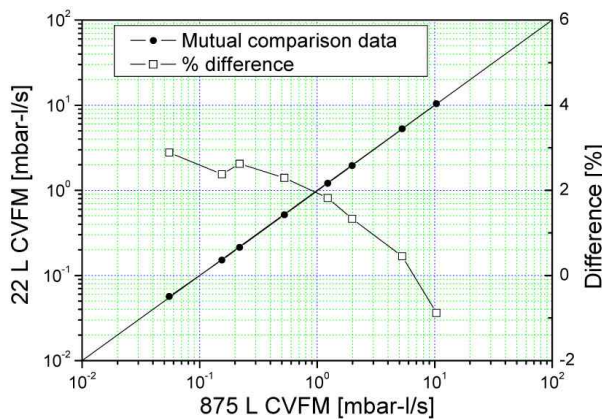


Figure 6. Mutual comparison spectra and percentage difference flow data.

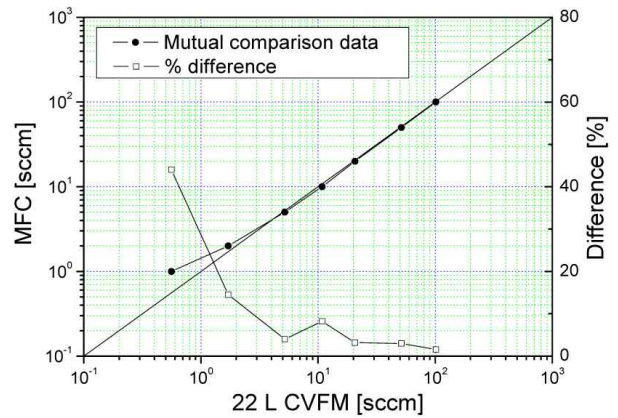


Figure 7. Mutual comparison spectra and percentage difference flow data.

듯이 2×10^{-2} mbar-L/s 부터 1×10^2 mbar-L/s 영역까지 측정 한 결과 국제 규격에서 제시하는 5%보다 적은 3% 미만의 불확도를 확인하였고, 이 결과로 22 L급 유량계의 성능이 검증되었다. 실험의 오차를 최소화하기 위해서 실험실의 온도는 23 ± 1 °C로 유지 하였다. 또한 일반적으로 산업 현장에서 많이 사용되는 MFC와 비교한 결과 (Fig. 7)에서도 최고 40%의 차이를 보여 22 L 정적형 유량계의 높은 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

3. Throughput limit (1×10^{-3} mbar-L/s) 향상

본 연구의 정량적 목표인 throughput limit 1×10^{-3} mbar-L/s 영역까지 확충하기 위한 실험을 진행하였다. 실험은 미세 조절이 가능한 metering 밸브 (swagelok, S series)를 사용하여 미세 유량을 조절하였다.

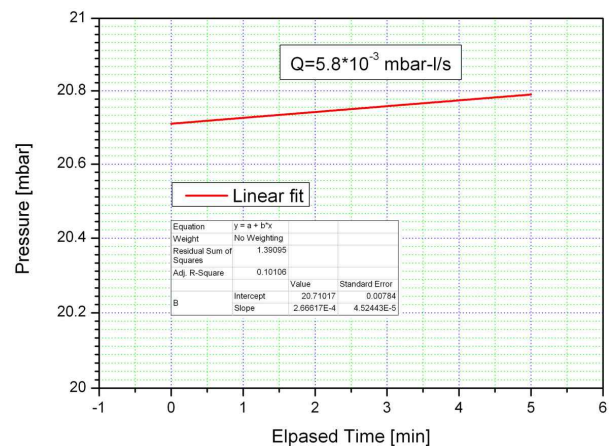


Figure 8. Throughput limit 5×10^{-3} mbar-L/s.

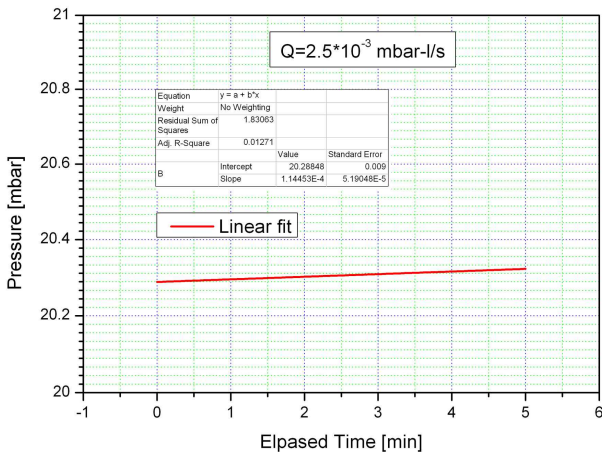


Figure 9. Throughput limit 2×10^{-3} mbar-L/s.

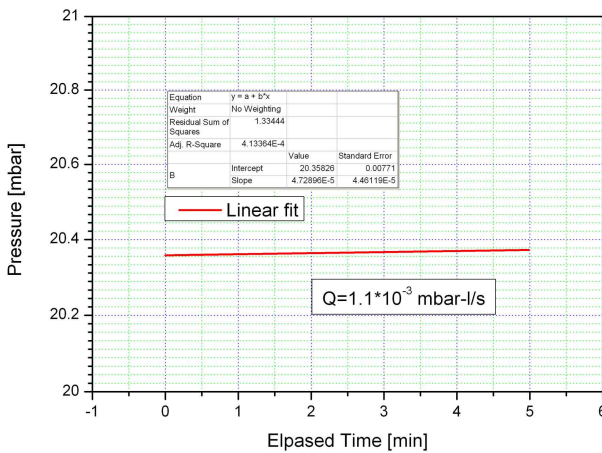


Figure 10. Throughput limit 1×10^{-3} mbar-L/s.

측정은 throughput limit인 5×10^{-3} mbar-L/s, 2×10^{-3} mbar-L/s, 1×10^{-3} mbar-L/s의 세 유량 조건에서 진행되었고, 그 결과는 Fig. 8, 9, 10에 나타내었다. 정적형 유량계의 유량은 챔버 내 압력 변화의 기울기의 평균값으로 linear plotting하여 throughput을 계산하였다. 측정 결과 5×10^{-3} mbar-L/s 포인트에서 5.8×10^{-3} mbar-L/s 값을, 2×10^{-3} mbar-L/s는 2.5×10^{-3} mbar-L/s 그리고 1×10^{-3} mbar-L/s에서는 1.1×10^{-3} mbar-L/s 값을 얻을 수 있었다. 이로써 측정영역이 목표치까지 확장되었음을 확인하였다.

IV. 결론 및 고찰

드라이 펌프의 성능 평가를 위해 기존의 throughput

limit (1×10^{-2} mbar-L/s)을 1×10^{-3} mbar-L/s 영역까지 확장하였다. 새로 설계/제작된 챔버의 base pressure는 6×10^{-8} mbar로, leak rate 는 1.5×10^{-6} mbar-L/s로 측정되었다. 특히 leak rate는 연구의 목표인 1×10^{-3} mbar-L/s보다 낮은 1/1000 수준으로 측정 불확도에 영향을 미치지 않는 수준임을 확인하였으며, 구축된 유량계의 신뢰성도 검증할 수 있었다. 또한 기 구축된 875 L급 정적형 유량계와 비교 테스트한 결과 국제 규격에서 제시하는 5 %보다 적은 3 % 미만의 불확도를 보여 22 L급 유량계를 신뢰도를 검증하였고, MFC와 비교한 결과에서는 최대 40 %의 오차를 보여 22 L급 유량계의 높은 신뢰성을 확인하였다.

본 연구를 통해 배기 용량이 적은 드라이 펌프의 저 유량 영역에서도 배기 속도 값을 정확히 측정할 수 있게 되었으며, 구축비용이 높은 정압형 유량계를 어느 정도 대체할 수 있게 되었다. 하지만 더욱더 정확하고 미세한 유량계의 개발을 위해서는 측정 gauge 및 controller의 신호 처리 불확도를 줄이는 방법 또한 연구되어야 한다고 생각한다.

감사의 글

본 연구는 2009년 한국표준과학연구원 산업측정신티도 제고사업 연구비에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] 배석희 외 4인, 진공공학, (한국경제신문, 서울, 2000).
- [2] 노명근, 황태경, 박제우, 한국진공학회지 **17(4)**, 292 (2008).
- [3] ISO/CD 1607, Positive displacement pumps-measurement of performance characteristics.
- [4] ISO/CD 5607, Vacuum technology-vacuum pump-roots blowers acceptance specifications.
- [5] ISO/DIS 21360, Vacuum technology-standard methods for measuring vacuum-pump performance General description.
- [6] ISO 10816-1: 1995, Mechanical vibration evaluation of machine vibration by measurements on rotating parts-part 1: General guidelines.

- [7] PNEUROP 6602, Vacuum pumps; acceptance specifications.
- [8] ISO 10816-1: 1995, Mechanical vibration evaluation of machine vibration by measurements on rotating parts-part 1: General guidelines.
- [9] Jong Yeon Lim, Wansup Cheung, Yong Moon Choi, Dae Jin Seong, Yong Hyeon Shin, and Kwang Hwa Chung, *Engineering Materials*, 277-279, **1000**, (2005).
- [10] 정석민 외 2인, 진공과학입문, (*청문각*, 2001).
- [11] 홍승수, 신용현, 정광화, I. Arakawa, *한국진공학회지* **12(3)**, 151 (2003).

Development of Improvement Technology for Achieving Higher Throughput Limit Utilized in the Evaluation of Next Generation Dry Pumps

J. H. Shin^{a,b}, M. K. Ko^b, W. S. Cheung^c, J. Y. Yun^a, J. Y. Lim^a, and S. W. Kang^{a*}

^a*Vacuum center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340*

^b*Department of Chemical Engineering, Konyang University, Nonsan 320-711*

^c*Acoustics & Vibration group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340*

(Received September 23, 2009, Revised November 9, 2009, Accepted November 10, 2009)

The constant volume flow meter system (the chamber volume in the 22 L class) was developed to estimate the pumping speed of the dry pump used for the industry of the next generation semiconductor and display. In order to insure the validity of the system, The base pressure and the leak rate in the enclosed system were checked, which were the 6×10^{-8} mbar and 1.5×10^{-6} mbar-L/s, respectively. Furthermore, it is also confirmed that the value of throughput limit in this system was as much as 1 order of magnitude lower than that in a previously developed system in the 875 L class. By using this developed system, the pumping speed of the new small dry pump was measured. It is believed that the new developed system can be alternating the expensive constant pressure flow meter system in the range of 1×10^{-2} mbar-L/s~ 1×10^{-3} mbar-L/s.

Keywords : Dry pump, CVFM, Pumping speed, MFC, Throughput

* [E-mail] swkang@kriss.re.kr