

정적형 유량계를 이용한 소닉노즐 유출계수 교정 방법에 관한 연구

신진현^a · 강상백^a · 박경암^b · 임종연^a · 정완섭^{b*}

^a한국표준과학연구원 진공센터, 대전 305-340

^b한국표준과학연구원 유동음향센터, 대전 305-340

(2010년 5월 3일 받음, 2010년 7월 1일 수정, 2010년 7월 5일 확정)

진공용 기체 유동측정 표준기로 사용하고자 소닉노즐을 ISO 9300에서 제시한 사양에 맞추어 목적경 0.03 mm와 0.2 mm의 소닉 노즐을 제작하였다. 한국표준과학연구원에서 진공용 유량측정 장치로 개발된 정적형 유량계를 이용하여 제작된 2종의 소닉노즐의 유출계수를 확장불확도 3% 이내로 교정하였다. 교정된 소닉노즐의 유량 측정범위는 약 0.6~1,800 cc/min 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 사용유동 조건에 해당되는 레이놀드 수(Reynolds number) 범위는 26~12,100으로 확인되었다. 이러한 결과는 교정된 소닉노즐을 이용하여 진공공정에서 필요한 극 미세 유량의 정밀측정을 가능하게 한 새로운 연구결과로 판단된다. 교정된 소닉노즐을 이용하여 진공펌프의 배기속도 측정결과는 기 구축된 정적법을 이용한 배기속도 측정결과와 1% 이내의 오차범위내로 매우 잘 일치함을 보였다. 교정된 소닉노즐은 향후 반도체 및 디스플레이 공정에 사용되는 다양한 건식 진공펌프들의 배기속도를 현장에서 간단하게 평가할 수 있는 현장 성능평가 장치에 활용할 예정이며, 현재 공정현장에서 배기속도 측정에 널리 사용중인 MFC를 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

주제어 : 정적형 유량계, 소닉노즐, 진공펌프, 배기속도

I. 서 론

진공기술의 발전으로 진공환경에 대한 산업 응용분야가 다양화되고 있다. 진공 기술은 우주공학, 생명공학, 재료공학 및 전자공학 분야에 핵심 기반기술이 되었고, 특히 반도체 공정이나 디스플레이 공정에서 진공기술의 발전은 매우 빠르게 발전되어 이를 위한 지속적인 연구개발이 요구되고 있다 [1]. 반도체 및 디스플레이 공정과 같이 높은 청결도의 진공이 필수적으로 요구되는 산업분야가 확대됨에 따라 드라이 펌프의 중요성이 급격히 증대되고 있다. 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 요구되고 있다. 유량 시스템 중 소닉노즐(critical flow venturi nozzle, CFVN)은 기체 유량 측정 표준기로 사용되고 있다. 또한 유량 측정에 있어서 사용상의 편리성, 이동성, 재현성 등 여러 가지의 장점을 가지고 있어 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 그러나 소닉노즐은 노즐 목을 지나는 기체가 임계류(critical

flow) 상태로 되어야 하므로 이 조건을 충족 시켜주기 위하여 노즐 전단 측정 압력이 후단의 압력보다 어느 일정 압력 이상 높아야 하는 제약이 따른다 [2,3]. 이러한 제약 때문에 소닉노즐의 유량 측정에 사용되는 소닉노즐의 최대 유동범위 내에서 제한적으로 사용되며 넓은 범위의 유동조건에서 사용하기 위해서는 다수의 노즐을 사용해야 하는 단점이 있다. 본 연구는 소닉노즐을 넓은 유량 범위에서 사용할 수 있도록, 즉 전단 압력의 범위를 1×10^3 Pa 정도의 미소 유량에서 1×10^6 Pa 정도의 대 유량까지 사용할 수 있도록 소닉노즐의 유출계수 교정을 목적으로 한다. 소닉노즐의 유출계수 교정은 현재 한국표준과학연구원에서 유량계로 사용중인 정적형 유량계(constance volume flow meter, CVFM)를 이용하여 교정하였다 [1]. 소닉노즐을 미소 유량 범위에서도 사용할 수 있음으로써 진공 산업분야에서 요구하는 미소유량 측정기술로 제품 수율의 향상을 기대한다. 또한 반도체 및 디스플레이 현장에 사용되고 있는 진공펌프의 배기속도를 현장에서도 정확한 측정을 간단하게 진행할 수 있을 뿐 아니라 측정 시스템 제작비용도 절감할 수 있는 진공펌

* [전자우편] wansup@kriss.re.kr

프의 새로운 배출성능 평가 장치 개발을 목표로 두고 본 연구가 진행되었다.

II. 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 배기 속도의 측정에도 유량계가 쓰인다. 진공 펌프의 성능평가의 압력범위가 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^5$ Pa에 해당되므로 유량계가 담당해야 할 범위 또한 매우 넓다.

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \quad (1)$$

정적형 유량계는 식(1)에서 $dV/dt=0$ (기체의 부피가 일정)으로 유지하면서 압력의 변화율 dP/dt 를 측정하여 유량을 측정한다. 정적형 유량계의 유량 측정 시 유량계의 부피를 정확히 알아야 한다 [4].

Fig. 1은 정적형 유량계의 유량 조절 시스템을 나타내었다. 정적형 유량계로 신뢰성 있는 유량을 측정할 경우 유량이 일정하게 주입되어야 하기 때문에 유량조절의 정확도가 확보될 수 있도록 설계되어야 한다. 일정한 유량을 흐르게 하기 위해서는 임계압력비(P/P_s)를 일정하게 조절해야 한다. 보고된 결과에 따르면 임계압력비가 0.4 이하일 때 유량이 일정하게 흐르고, 0.4 이상에서는 유량이 점차 감소한다고 알려져 있다 [1]. 정적형 유량계의 유량 단위는 $\text{mbar} \cdot \text{l/s}$ 이다. 정적형 유량계의 압력 측정은 측정 불확도

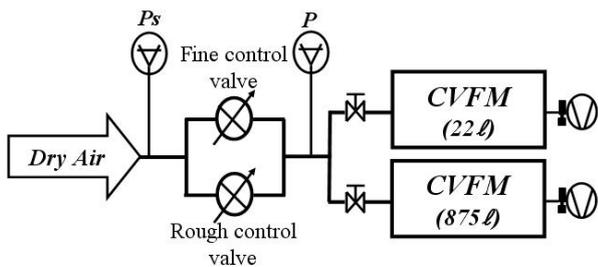


Figure 1. Diagram of the CVFM in KRISS.

가 적은 용량형 진공계(Capacitance Diaphragm Gauge, PFEIFFER CMR 271, 272, 273, 274, 275모델)와 TPG 256 A controller를 사용하여 압력을 측정하였고, 저진공 국가표준기인 초음파간섭원리를 이용한 수은주 압력계(Ultrasonic Interferometer Manometer, UIM)로부터 교정되어 소급성이 확보된 교정기기로 교정한 값을 사용하여 측정의 정확도를 높였다. Fig. 2에 정적형 유량계의 유량 측정 결과를 나타내었다. 챔버에 기체를 주입하게 되면 압력이 일정하게 상승하게 되는데 상승되는 구간을 선형화하여 유량을 계산하였다.

이 때 R-square값이 1로 유량이 일정하게 주입되었다는 것을 알 수 있다. 현재 한국표준과학연구원의 정적형 유량계의 유량 측정 한계는 $1 \times 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ 이다.

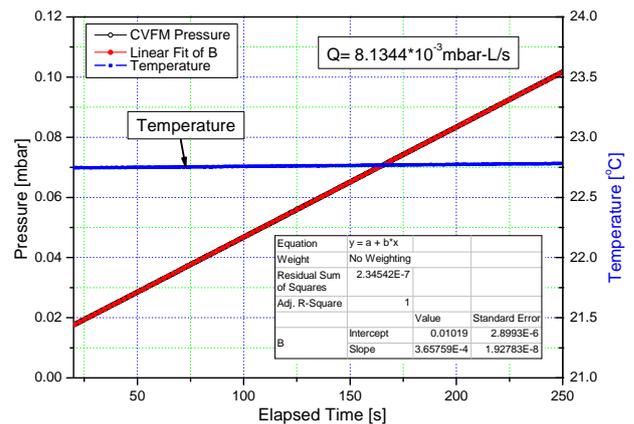


Figure 2. Measured throughput using CVFM.

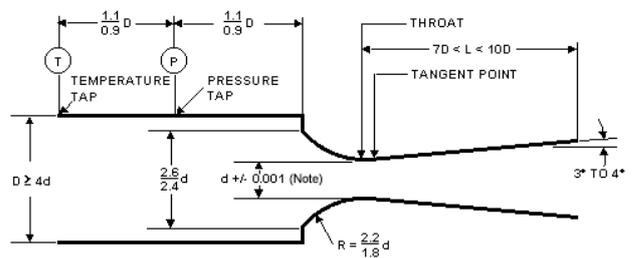


Figure 3. Photo of two sonic nozzles under test (Φ 0.03 mm, Φ 0.2 mm).

III. 소닉노즐 유출계수 교정

본 실험에서 사용한 소닉노즐은 ISO 9300 규격에서 제시하는 사양에 맞추어 Fig. 3과 같이 제작하였다. 소닉노즐의 목 직경은 resolution 0.001 mm, accuracy 0.002 L/1000 μm인 광학 현미경으로 5회 측정하여 그 평균값을 목 직경으로 하였다.

각 소닉노즐의 최초 교정 값은 상압가스 유량측정 표준 시스템에서 교정하였다. 표준 시스템을 통해 교정된 소닉노즐의 전단 압력 범위는 $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ Pa이다 [5,6].

소닉노즐의 전단 압력을 보다 낮은 압력에서 사용할 수 있도록 소닉노즐 유출 계수의 값을 교정하기 위한 시스템을 Fig. 4와 같이 설치하였다.

소닉노즐의 전단 압력이 일정 압력 이하로 낮아지게 되면 후단부와 압력차가 적게 되어 노즐 목에서 소닉이 발생하지 않는다. 이를 방지하게 위하여 후단부에 진공펌프로 배기하여 압력을 낮춰 일정 압력비를 유지하여 초크가 발생하게 하였다. 이 때 사용된 진공 펌프는 IWATA ISP-250B 스트롤 펌프로 펌프의 배기 용량은 15 m³/h이다.

소닉노즐의 전단압력은 디지털 게이지(Ruska 6220, accuracy 0.0205% F.S)로 측정하였다. 측정 압력은 압력 표준기인 공기식 분동식 압력계로부터 소급받은 압력계로 비교 교정한 값으로 사용하였다. 온도는 백금 저항 온도계(100 Ω, accuracy ±0.075%)로 측정하였으며, 측정값은 산업용 저항온도계의 비교교정 절차를 통해 교정된 값을 사용하였다.

소닉노즐의 유출계수는 정적형 유량계를 이용하여 구하였다. 소닉노즐 목에서 소닉이 되는 경우 소닉노즐의 교정값은 다음과 같다.

$$Cd \cdot A = Q_m / \left(\frac{C^* \cdot P_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} \right) \quad (2)$$

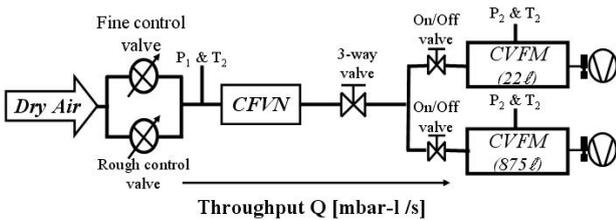


Figure 4. Experimental setup for determination of discharge coefficients of CFVN.

위 식에서 Cd: 소닉노즐의 유출계수, Q_m: 질량 유속, A: 소닉노즐 목에 단면적, C*: 임계상수, P₀: 노즐 전단 압력, T₀: 노즐 전단 온도, R: 기체상수이다.

소닉노즐을 통하여 주입된 기체의 유량은 정적형 유량계를 통하여 계산하였고, 계산된 유량 값으로부터 소닉노즐의 유출계수인 Cd 값을 결정하였다. 교정된 유출계수 Cd 값을 Fig. 5에 나타내었다.

위 그림 Fig. 5에서 Re는 Reynolds 수를 나타내며 다음 식과 같다.

$$Re = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{4}{\pi \times d} \cdot Q_m \quad (3)$$

위 식(3)에서 μ₀와 d는 동점성계수와 노즐 목직경을 나타낸다. 소닉노즐의 전단 압력이 저압상태 또는 낮은 레이놀즈(Re) 수에서도 노즐의 교정 값을 실험적으로 결정할 수 있음을 알 수 있다. 이를 유량 측정 범위로 나타내면 약 0.03 mm는 0.6~20 cc/min의 유량 범위이고, 0.2 mm는 15~1,800 cc/min의 유량 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이를 유동 조건을 나타내는 레이놀드 수로는 각 26~1,050과 80~12,100이다.

교정된 Cd 값의 신뢰성을 확보하기 위하여 절대 교정된 $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ Pa에서 Cd 값을 비교해 본 결과를 Table 1에 나타내었다. 0.03 mm 1.3%, 0.2 mm -2.6% 오차를 보였으며 낮은 유량 범위에서 ISO 규격에서 제시하는 3% 미만의 오차로 교정된 값의 소급성을 확보하였다. 본 연구를

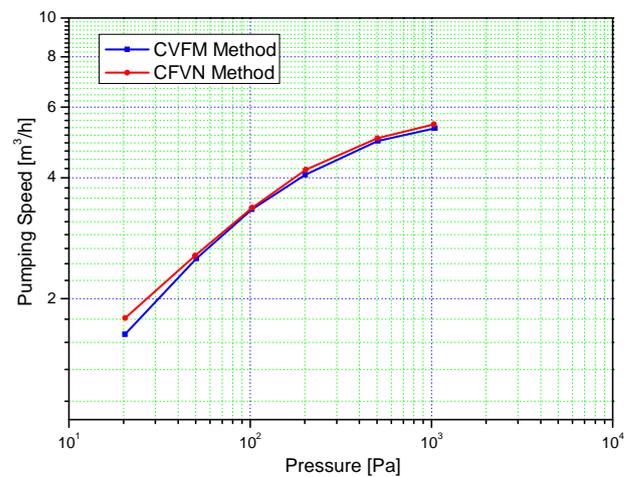


Figure 5. Discharge coefficients (Cd): calibrated in range of $2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^5$ Pa.

Table 1. Mutual comparison of reference nozzles and tested results.

Nozzle	Φ 0.03 mm	Φ 0.2 mm
Pressure	2.60 bar	3.40 bar
Reference flow	Cd=0.808	Cd=0.912
Tested result	Cd=0.797	Cd=0.937
Difference	1.3%	-2.6%

통하여 미세 유량 영역에서 소닉노즐을 사용할 수 있게 되었다.

IV. 진공펌프 배기속도 측정

교정된 값을 바탕으로 IWATA ISP-90(배기용량 5.4 m³/h) 스크롤펌프의 배기 속도를 측정하였고, 기존 평가 시스템인 정적법을 통한 배기 속도 측정 결과와 비교하였다. 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 배기속도 측정은 20~1×10³ Pa 범위에서 측정을 하였다. 50 Pa 이상의 압력범위에서 배기속도 측정 결과 1% 이내로 매우 잘 일치함을 확인하였다. 그러나 20 Pa의 챔버 압력에서 나타난 배기 속도는 9%의 차이를 보이며 이는 두 방법에 사용한 챔버의 용량(CFVN의 경우 챔버 용량은 22.2 Liter, CVFM의 경우 챔버 용량은 93 Liter)으로 인한 시스템의 차이에 의한 영향으로 보여진다.

V. 결 론

기체의 유량 측정에 표준기로 사용되는 소닉노즐은 유량 측정에 있어서 사용상의 재현성, 편리성, 이동성 등의 장점으로 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 하지만 전단 압력이 후단 압력보다 일정 압력비 이상 높아야 노즐 목에서 소닉이 발생하게 된다. 이러한 조건을 만족해야 하기 때문에 넓은 유량범위 및 미소유량을 측정하기에 제한점이 있었다. 이러한 소닉노즐 사용상의 단점을 보완하기 위하여 한국표준과학연구원에서 사용중인 정적형 유량계를 이용하여 소닉노즐의 유출계수를 교정하였다. 교정된 소닉노즐 0.03 mm, 0.2 mm의 노즐로 측정 가능 유량 범위는 0.6 cc/min~1,800 cc/min이고, 유동 조건을 나타내는 레이놀드 수(Re)의 범위는 26~12,100이다. 교정된 값의 신뢰

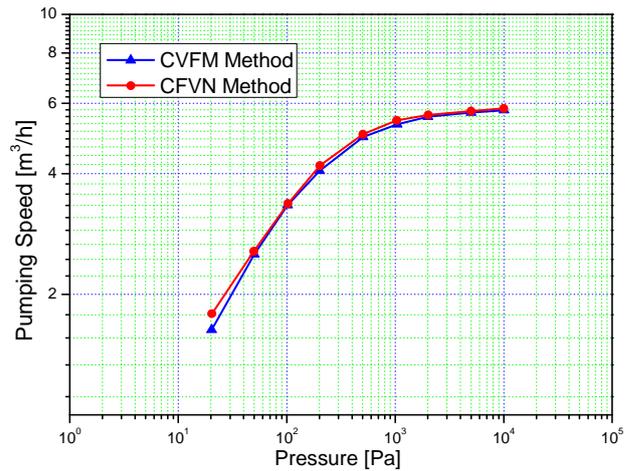


Figure 6. Test results of scroll pump pumping speed.

성을 확보하고자 한국표준과학연구원에 절대 교정 값과 비교한 결과 0.03 mm은 1.3%를, 0.2 mm은 -2.6%의 오차를 보였으며 이 수치는 ISO에서 제시한 미소유량 영역에서의 3%보다 적은 측정 불확도 범위의 교정된 값을 확인되었다. 교정된 값으로 진공 펌프의 배기 속도를 측정하였으며 기존의 정적법(CVFM) 결과와 비교한 결과 1% 이내의 오차로 매우 잘 일치함을 확인하였다.

넓은 사용압력 범위에서 소닉노즐의 유출계수를 교정함으로써 넓은 진공영역의 유량 범위에서 사용할 수 있도록 하였으며, 미세 유량 측정에서도 또한 소닉노즐을 사용할 수 있도록 하였다. 향후 진공 산업 분야에서 요구되는 저진공 조건에서의 미세유량 정밀측정 기술로 향후 반도체 및 평판 디스플레이 공정에 많은 활용도를 제공할 것으로 기대된다. 또한 진공펌프의 배기 속도 측정 시 대용량의 챔버 없이도 정확한 측정을 할 수 있으며, 현장에서 사용되는 MFC를 대체하여 배기 속도 측정에 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부가 지원하는 전략기술개발사업(과제번호 10031858 “차세대 반도체용 진공공정의 실시간 측정/진단/제어 기술 개발” 중 스마트형 배기 시스템 진단 제어 시스템 개발과, 10031836 “초고진공펌프 개발” 중 고진공펌프 종합특성평가시스템 설계, 진단 기술 개발)의 일환으로 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] Low Vacuum Generation and Control on BIEN Technology: Mass Flow and Dry Pumping Characteristics, Key Engineering Material, Vols. 277-279, pp. 1000-1015 (2005).
- [2] ISO 9300: Measurement of gas flow by means of critical flow venturi nozzles, (1990).
- [3] 음속노즐의 임계 압력비에 대한 저 레이놀즈 수의 영향, 대한기계학회논문집, **24**, 1535-1539 (2000).
- [4] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, *진공공학* (한국경제신문, 서울, 2000).
- [5] 한국표준과학연구원 교정 절차서, 상압가스 유량측정 표준시스템-벨 푸루버, C-10-4-0090-2002.
- [6] 한국표준과학연구원 교정 절차서, 상압가스 유량측정 표준시스템-피스톤 푸루버, C-10-4-0092-2002.

Calibration of Discharge Coefficient of Sonic Nozzle Using CVFM

J. H. Shin^a, S. B. Kang^a, K. A. Park^b, J. Y. Lim^a, and W. S. Cheung^{b,*}

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

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

(Received May 3, 2010, Revised July 1, 2010, Accepted July 5, 2010)

Sonic nozzles have been a standard device for measurement of steady state gas flow, as recommended in ISO 9300. This paper introduces two sonic nozzles of diameter Φ 0.03 mm and Φ 0.2 mm precisely machined according to ISO 9300. The constant volume flow meter(CVFM), readily set up in the Vacuum center of KRISS, was used to calibrate the discharge coefficients of both nozzles. The calibration results were shown to determine them within the 3% expanded measurement uncertainty. Calibrated sonic nozzles were found to be applicable for precision measurement of steady state gas flow in the vacuum process in the ranges of 0.6~1,800 cc/min. Those flow conditions are equivalent to the fine gas flow with Reynolds numbers of 26~12,100. Those encouraging results confirm that calibrated sonic nozzles enable precision measurement of extremely low gas flow encountered very often in the vacuum processes. Both calibrated sonic nozzles are proven to provide the precision measurement of the volume flow rate of the dry vacuum pump within one percent difference in reference to CVFM. Calibrated sonic nozzles are applied to a new 'in-situ and in-field' equipment designed to measure the volume flow rate of vacuum pumps in the semiconductor and flat display processes. Furthermore, they can provide other applications to flow control devices in vacuum, such as MFC, etc.

Keywords : CVFM, Sonic nozzle, Vacuum pump, Pumping speed

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