

용량형 격막식 게이지와 공진형 실리콘 게이지의 저진공 특성

홍승수* · 신용현 · 정광화 · I. Arakawa*

한국표준과학연구원 진공기술센터, *Department of Physics, Gakushuin University
(2003년 4월 7일 접수)

Low vacuum characteristics of the capacitance diaphragm gauges and the resonance silicon gauges

S. S. Hong†, Y. H. Shin, K. H. Chung, and I. Arakawa*

Center for Vacuum Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

*Department of Physics, Gakushuin University, Toshima, Tokyo, Japan

(Received April 7, 2003)

요 약

저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계를 이용하여 두 개의 용량형 격막식 게이지와 두 개의 공진형 실리콘 게이지를 교정하였다. 용량형 격막식 게이지의 센서부는 금속으로 되어 있으므로 견고하고 과압에 잘 견딜 뿐만 아니라 우수한 분해능을 가지고 있으며, 공진형 실리콘 게이지는 우수한 안정성과 기계적인 충격에 강한 특성을 가지고 있다. 이들의 교정 불확도를 국제표준화기구에서 제정한 측정불확도 표현지침서에 따라 분석하여 비교하였으며, 그 결과 확장불확도의 최대 차이는 교정압력 100 Pa에서 9×10^3 Pa 이었다. 또한 공진형 실리콘 게이지의 표준압력에 대한 압력비의 차이가 0.5 % 이내이었으므로 저진공 영역의 전달표준기로 사용이 가능함을 알 수 있었다.

주제어 : 진공측정, 교정, 용량형 격막식 게이지, 공진형 실리콘게이지

Abstract

Two capacitance diaphragm gauges(CDG) and two resonance silicon gauges(RSG) were calibrated using an ultrasonic interferometer as a national low vacuum standard in KRISS. The CDG has superior pressure resolution and is rugged as well as resistant to over-pressure because of all-metal inner components. Meanwhile, the RSG is a new type of MEMS sensor that has excellent calibration stability and is resistant to mechanical shocks. The calibration uncertainties were analyzed according to the ISO procedures. Results showed that the maximum difference of the expanded uncertainties was 9×10^3 Pa at the generated pressure of 100 Pa for the two different types. It is remarkable that the RSG can be used as a transfer standard at low vacuum since their accuracies were found to be within 0.5 %.

Key Words : Vacuum measurement, Calibration, Capacitance Diaphragm Gauge, Resonance Silicon Gauge

† E-mail : sshong@kriss.re.k

1. 서 론

용량형 격막식 게이지(capacitance diaphragm gauge, CDG)는 우수한 분해능, 정확도, 재현성, 과압에 대한 견고성 등이 입증되어 전 세계 표준기관 사이에서 저압 저진공 영역의 국제비교 등에 전달표준기(transfer standard gauge)로 사용해 오고 있다 [1,2]. CDG는 용접된 얇은 격막에 가해지는 압력 즉 기계적인 힘이 전극을 통해 정전용량의 변위로 나타나며, 이 변위량을 압력으로 변환시켜 압력 센서로 사용한다. 특히 이 센서는 연속적으로 압력을 증가시키거나 감소시킬 때 히스테리시스가 무시할 정도로 적고 일부 제품에는 센서 자체의 온도를 안정화하기 위한 온도 보상 회로도 가지고 있으므로 주변 온도 변화에 대한 변위의 변화가 작아 정확한 압력 측정이 가능한 것이 큰 장점으로 알려져 있다 [3].

공진형 실리콘 게이지(resonance silicon gauge, RSG)는 실리콘의 Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 특성을 이용하여 요코가와 회사에서 저압 저진공용 압력 센서로 개발한 것이다. 이 센서의 압력 검출부는 실리콘 박막으로 되어있으며 고압 (high pressure)에서는 재현성이나 정확도가 좋은 것으로 알려져 있으나 10 kPa 이하의 저압 즉 미압 특성은 잘 알려져 있지 않다. 따라서 저진공 국가표준기에서 실험하여 얻은 특성 결과는 RSG를 저진공 영역에서의 국가 간 국제비교나 비교적 정확한 측정이 요구되는 산업체의 압력 측정에 많이 활용될 수 있는 기틀을 마련한 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 저진공 국가표준기는 초음파 간섭 수온주압력계(ultrasonic interferometer manometer, UIM)로서 이 표준기는 선진국 표준기관들과의 국제비교를 통해 세계수준의 성능을 가지고 있는 것이 입증되었다 [2]. 위의 저진공 국제비교 즉 CCMP-K4 실험에는 용량이 133 Pa인 두 개의 절대압 (absolute pressure) 측정용 CDG와 용량이 각각 1 kPa과 10 kPa인 두 개의 차압 (differential pressure) 측정용 RSG가 사용되었다 [2]. 두 개의 CDG는 CDG [I]과 CDG[II]로 구분하였고, 1 kPa용 RSG는 RSG[I] 그리고 10 kPa

용 RSG는 RSG[II]로 표시하였다. 두 개의 CDG는 표준기인 UIM에 직접 부착하였고 두 개의 RSG는 차압용이므로 Px 포트는 UIM에 Pr 포트는 고진공 펌프에 각각 연결하였다. 잘 알려진 대로 차압용 게이지의 Pr 포트는 측정하고자 하는 게이지의 분해능 즉 Px 포트의 최소 압력 보다 최소한 10배 이상 낮아야 할 뿐만 아니라 실험 중에 압력변화가 있거나 압력이 분해능 이상으로 높아져서도 안된다. UIM과 CDG의 연결부에는 격막 센서에 기계적인 힘이 전달되지 않도록 벨로우즈 플렌지를 사용하였으며, 온도 변화에 민감한 센서부의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 콘트롤러의 히터를 켜서 센서의 온도가 항상 45 °C가 유지되도록 하고 측정하였다. RSG 센서는 수평도에 민감하므로 수준기로 수평을 잘 맞추어 고정하였으며, 지시계를 사용하지 않고 RS232C 케이블을 통하여 컴퓨터로 압력을 읽었다. 시험 가스는 별도의 가스저장고에 저장되어 실험실 온도와 항상 평형상태가 유지된 고순도 질소를 사용하였다.

표준기에서 발생하는 압력, 즉 기준압력(generated pressure)은 10 Pa, 30 Pa, 100 Pa, 300 Pa, 1 kPa, 3 kPa, 그리고 10 kPa이었으며, 반복 측정할 때 이 기준압력의 공차 (tolerance) 범위는 실험 및 데이터 분석의 신뢰성을 높이기 위하여 2 % 이내가 되도록 하였다. 각 센서의 측정압력은 CDG[I]과 CDG[II]는 10 Pa~100 Pa, RSG[I]은 10 Pa~1 kPa, 그리고 RSG[II]는 10 Pa~10 kPa이었다. 측정은 하루에 1 주기 씩 압력을 증가시키면서 수행하였고 같은 실험을 5일에 걸쳐 반복하였다. 1 주기 실험이 끝나면 진공펌프로 충분히 시스템을 다시 배기 한 후 센서의 영점을 다시 조절하는 등 5 회 반복 측정이 가능하면 같은 조건에서 이루어지도록 하였다. 실험에 들어가기 전 시스템의 도달진공도 (ultimate pressure)는 9.0×10^{-5} Pa 이내이었고 실험동안의 실내온도는 22 ± 0.5 °C로 유지되었다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1~4는 5회에 걸쳐 반복 실험한 CDG[I], CDG[II], RSG[I], 그리고 RSG[II]의 기준압력 대 압력비(pressure ratio, Pr)를 그린 것이다. 일반적으로

진공게이지의 교정결과는 식 (1)과 같은 압력비로 표준기에서 발생된 기준압력과 차이를 계산한다.

$$P_{vi} = \frac{P_{gauge}}{P_{std}} \quad (1)$$

여기에서 P_{vi} 는 각 게이지의 압력비, $i=CDG[I]$,

$CDG[II]$, $RSG[I]$, $RSG[II]$, P_{gauge} 는 게이지 지시압력, 그리고 P_{std} 는 표준기에서 발생된 기준압력이다. 5회 반복 측정된 133 Pa $CDG[I]$ 과 $CDG[II]$ 의 실험표준편차는 각각 $8.82 \times 10^{-5} \sim 1.08 \times 10^{-3}$ 과 $1.01 \times 10^{-4} \sim 7.42 \times 10^{-4}$ 이었으며, 1 kPa $RSG[I]$ 과 10 kPa $RSG[II]$ 의 실험표준편차는 $4.76 \times 10^{-5} \sim 1.88 \times 10^{-3}$ 과 $4.26 \times 10^{-5} \sim 1.42 \times 10^{-3}$ 이었다. 네 개의 게이지에 대한 압력비의

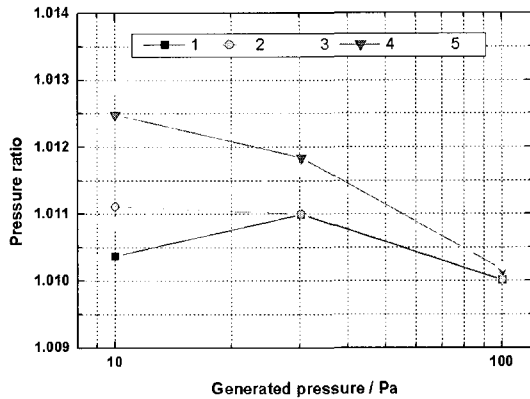


Fig. 1. Pressure ratios as a function of generated pressure for the 133 Pa F.S. CDG[I] with five repeated calibrations performed daily. The standard deviations were between 8.82×10^{-5} and 1.08×10^{-3} in the nominal pressure range of 10 to 100 Pa.

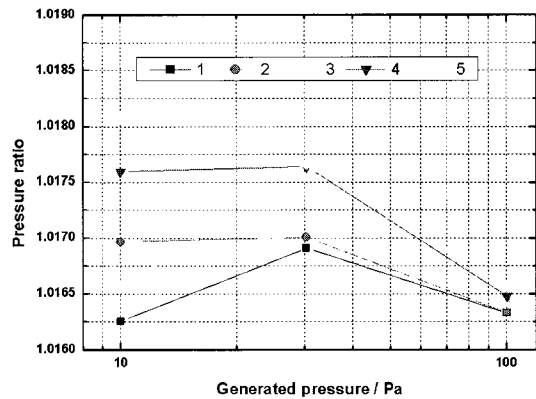


Fig. 2. Pressure ratios as a function of generated pressure for the 133 Pa F.S. CDG[II] with five repeated calibrations performed daily. The standard deviations were between 1.01×10^{-4} and 7.42×10^{-4} in the nominal pressure range of 10 to 100 Pa.

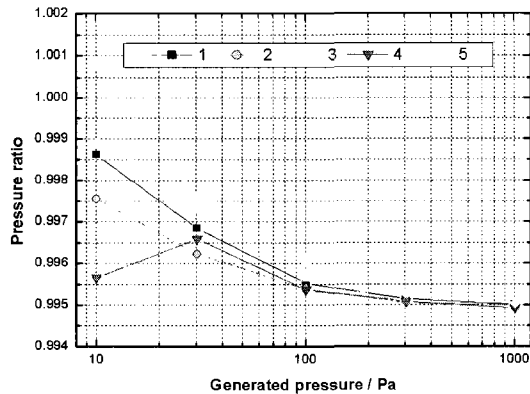


Fig. 3. Pressure ratios as a function of generated pressure for the 1 kPa F.S. RSG[I] with five repeated calibrations performed daily. The standard deviations were between 4.76×10^{-5} and 1.88×10^{-3} in the nominal pressure range of 10 Pa to 1 kPa.

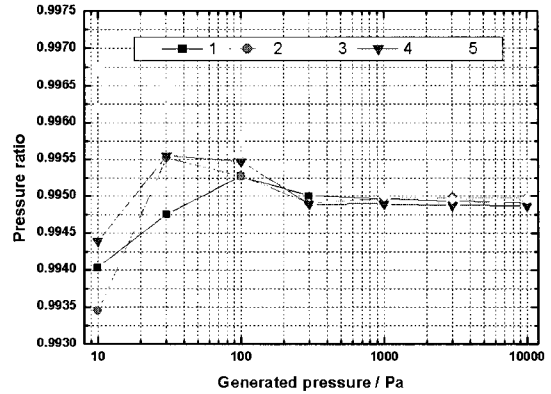


Fig. 4. Pressure ratios as a function of generated pressure for the 10 kPa F.S. RSG[II] with five repeated calibrations performed daily. The standard deviations were between 4.26×10^{-5} and 1.42×10^{-3} in the nominal pressure range of 10 Pa to 1 kPa.

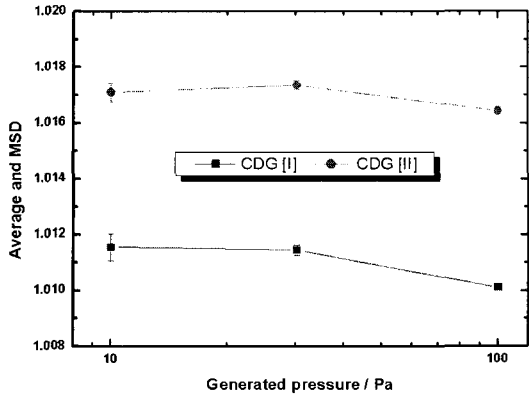


Fig. 5. Calibration results of the RSG[I] and RSG[II]. Dots and error bars indicate average pressure ratios and standard deviations of means at each generated pressure, respectively. The standard deviations of means were varied between 3.94×10^{-5} and 4.84×10^{-4} for the RSG[I], and between 4.94×10^{-5} and 3.31×10^{-4} for the RSG[II].

표준편차가 낮은 압력에서 큰 것은 게이지의 분해능에 가깝기 때문이고 높은 압력에서 표준편차가 작은 것은 게이지의 최대 측정값에 가깝기 때문으로 이것은 당연한 결과로 판단된다. 전 측정 구간에서 CDG[II]이 CDG[III]보다 재현성과 정확도가 좋으므로 같은 종류의 게이지라도 특성이 다를 수 있다.

Fig. 5는 CDG[I]과 CDG[II]를 각 기준압력에서 5회 평균한 평균 압력비와 이 값의 평균표준편차 (standard deviation of mean)를 오차크기(error bar)로 표시한 것이다. 기준압력에 대한 압력비의 분산이 심해서 통계적으로 직선식을 계산하기 곤란한 진공 게이지를 교정할 때 평균표준편차는 반복 측정된 실험결과와 A형 불확도(A type uncertainty)를 평가하는데 사용된다. CDG[I]과 CDG[II]의 압력비는 낮은 압력에서부터 각각 1.0116~1.0102과 1.0167~1.0164 이었고 평균표준편차는 각각 3.94×10^{-5} ~ 4.84×10^{-4} 과 4.94×10^{-5} ~ 3.31×10^{-4} 사이에 있었다. 또한 전 구간에서의 직선성도 CDG[II]보다 CDG[I]이 더 좋은 것으로 나타났다. Fig. 6은 RSG[I]과 RSG[II]를 각 기준압력에서 5회 평균한 평균 압력비와 이 값의 평균표준편차를 오차크기로 표시한

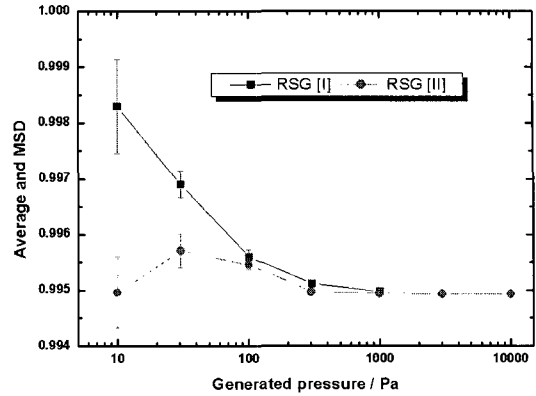


Fig. 6. Calibration results of the RSG[I] and RSG[II]. Dots and error bars indicate average pressure ratios and standard deviations of means at each generated pressure, respectively. The standard deviations of means were varied between 2.12×10^{-5} and 8.44×10^{-4} for the RSG[I], and between 1.91×10^{-5} and 6.38×10^{-4} for the RSG[II].

것이다. RSG[I]과 RSG[II]의 압력비는 각각 0.9983~0.9949와 0.9949~0.9957로 모두 기준압력보다 낮게 지시하는 것을 알 수 있었으며, 평균표준편차는 각각 2.12×10^{-5} ~ 8.44×10^{-4} 과 1.91×10^{-5} ~ 6.38×10^{-4} 이었다. 전 구간의 직선성은 RSG[II]가 RSG[I]보다 더 좋은 것으로 나타났는데 최대 측정 용량이 RSG[II]가 10배 큰 것을 감안하면 이례적인 결과인 것으로 생각된다. 그래프에 나타난 대로 CDG의 압력비가 RSG에 비해 상대적으로 큰 것은 CDG를 측정할 때 온도를 45 °C로 고정하고 측정하였기 때문에 100 Pa 이하의 저압에서 생기는 열전이 효과(thermal transpiration effect) 때문이다 [4].

4. 불확도 분석(Uncertainty Analysis)

저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계에서 측정된 CDG와 RSG의 불확도를 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)에서 제정한 측정불확도 표현지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)에 따라 분석하였다 [5,6]. 이 새로운 지침서에 따르면 불확도 표현을 A형 불확도(A type uncertainty, u_A), B형 불확

도(B type uncertainty, u_B), 합성표준불확도(combined standard uncertainty, u_c), 그리고 확장불확도(expanded uncertainty, U)로 분류하여 표현한다. 본 실험에서의 A형 불확도는 5회 반복측정에서 얻어진 값에 따라 식 (2)의 실험표준편차, 식 (3)의 평균표준편차, 그리고 압력비 (pressure ratio, R)를 이용하여 아래 식 (4)와 같이 계산한다.

$$s(R) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (2)$$

$$s(\bar{R}) = \frac{s(R)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$u_A = s(\bar{R}) \times \overline{(P_{std})} \quad (4)$$

여기에서

n : 측정수

R : CDG나 RSG의 지시압력(P_{gauge}) / 표준기의 기준압력 (P_{std})

$\overline{P_{std}}$: 표준기에서 발생된 기준압력의 평균값

B형 불확도는 95 % 신뢰수준 ($k=2$)에서 구해진 표준기의 불확도로서 표준기의 모든 불확도 성분을 고려해야 하므로 매우 복잡하고 양이 많아서 계산 방법은 생략하였으나 참고문헌 [7]에 자세한 내용이 수록되어 있다. 결국 측정결과의 합성표준불확도는 A형 불확도와 B형 불확도를 합성하여 식 (5)와 같이 계산한다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

마지막으로 확장불확도는 식 (5)의 합성표준불확도에 t-분포표의 포함인자 (coverage factor) k 를 곱하여 식 (6)과 같이 계산하며 교정결과의 최종 불확도는 이 확장불확도를 의미한다.

$$U = k u_c \quad (6)$$

여기에서 k 값은 유효자유도(effective degree of freedom)

Table 1. Summary of A-type (u_A), B-type (u_B), combined standard (u_c), and expanded uncertainties (U) of the two CDGs and two RSGs as a function of generated pressure.

게이지 분류	기준압력 (Pa)	압력비	압력비 평균표준편차	A형 불확도 (Pa)	B형 불확도 (Pa)	합성표준불확도 (Pa)	확장불확도 (Pa)
CDG[I]	10.01015	1.01154	0.00048	0.00485	0.01462	0.01541	0.03081
	30.35511	1.01144	0.00018	0.00561	0.01463	0.01566	0.03133
	100.5453	1.01010	0.00004	0.00397	0.01464	0.01517	0.03033
CDG[III]	10.01015	1.01709	0.00033	0.00332	0.01462	0.01500	0.02999
	30.35511	1.01735	0.00016	0.00491	0.01463	0.01543	0.03086
	100.5459	1.01643	0.00004	0.00452	0.01464	0.01532	0.03064
RSG[I]	10.01015	0.99830	0.00084	0.00845	0.01462	0.01689	0.03378
	30.35511	0.99690	0.00024	0.00721	0.01463	0.01631	0.03261
	100.5459	0.99560	0.00013	0.01312	0.01464	0.01966	0.03932
	302.9800	0.99511	0.00004	0.01215	0.01473	0.01909	0.03818
	1004.427	0.99497	0.00002	0.02139	0.01557	0.02646	0.05291
RSG[III]	10.01015	0.99496	0.00064	0.00639	0.01462	0.01596	0.03192
	30.35511	0.99570	0.00030	0.00922	0.01463	0.01729	0.03458
	100.5459	0.99546	0.00010	0.00985	0.01464	0.01764	0.03528
	302.9800	0.99497	0.00005	0.01479	0.01473	0.02087	0.04174
	1004.427	0.99494	0.00002	0.02065	0.01557	0.02586	0.05173
	3013.086	0.99493	0.00002	0.05803	0.02137	0.06184	0.12367
	10043.61	0.99493	0.00002	0.19216	0.05352	0.19947	0.39894

와 신뢰수준 (confidence level)에 의해 결정되며, 본 실험에서의 신뢰수준은 95 %로 하였다 [5]. Table 1 은 지금까지 설명한 방법으로 기준압력별로 계산한 CDG[I], CDG[III], RSG[I], 그리고 RSG[III]의 각 불확도 성분을 정리한 것이다. 각 게이지의 교정압력에서 CDG[I], CDG[III], RSG[I], RSG[III]의 확장불확도는 각각 0.0308 Pa~0.0303 Pa, 0.030 Pa~0.0306 Pa, 0.0388 Pa~0.053 Pa, 그리고 0.0319 Pa~0.3989 Pa이었으며, 이 값의 최대 차이는 교정압력 100 Pa에서 9×10^{-3} Pa 이었다.

5. 결 론

저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계 (ultrasonic interferometer manometer)를 이용하여 두 개의 용량형 격막식 게이지(capacitance diaphragm gauge)와 두 개의 공진형 실리콘 게이지(resonance silicon gauge)를 교정하였다. 두 개의 용량형 격막식 게이지의 교정압력은 10 Pa~100 Pa이었고 두 개의 공진형 실리콘 게이지의 교정압력은 각각 10 Pa~1 kPa 과 10 Pa~10 kPa이었다. 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)에서 제정한 측정불확도 표현지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)에 따라 분석한 CDG[I],

CDG[III], RSG[I], RSG[III]의 확장불확도(expanded uncertainty)는 각 게이지의 교정압력에서 각각 0.0308 Pa~0.0303 Pa, 0.030 Pa~0.0306 Pa, 0.0388 Pa~0.053 Pa, 그리고 0.0319 Pa~0.3989 Pa이었으며 이 값의 최대 차이는 100 Pa에서 9×10^{-3} Pa 이었다. 또한 공진공 실리콘 게이지의 표준압력에 대한 압력비의 차이가 0.5 % 이내이었으므로 정확한 저진공 미압 측정에 사용이 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. C. Legras, J. L. Guinio, and F. Baron, *Metrologia* **36**, 631 (1999).
- [2] A. P. Miiller, M. Bergoglio, N. Bignell, K. M. K. Fen, S. S. Hong, K. Jousten, P. Mohan, and F. J. Redgrave, *Metrologia* **39**, 1 (2002).
- [3] A. P. Miiller, *Metrologia* **36**, 617 (1999).
- [4] K. P. Poulter, M. J. Rodgers, P. J. Nash, T. J. Thompson, and M. P. Perkin, *Vacuum* **33**, 6 (1983).
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO (1993).
- [6] 측정불확도 표현 지침, 한국표준과학연구원 (1998).
- [7] 홍승수, 신용현, 정광화 등, 한국진공학회지 **10**, 173 (2001).