

1~10⁵ Pa 영역의 저진공 표준 확립

홍승수 · 신용현 · 정광화

한국표준과학연구원 압력진공그룹
(1996년 5월 30일 접수)

Establishment of Low Vacuum Standard in the 1 to 10⁵ Pa Range

Seung-Soo Hong, Yong-Hyeon Shin and Kwang-Hwa Chung

Pressure and Vacuum Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-600
(Received May 30, 1996)

요 약 - 초음파간섭원리를 이용한 액주형압력계를 개발하여 측정범위가 1 Pa(7.5³ torr)에서 10⁵ Pa(대기압)이고 오차가 ±(30 ppm of pressure+12 mPa)인 저진공영역의 국가표준을 확립하였다. 이 표준기가 개발되므로서 이 영역의 전달표준기인 용량형진공계의 교정이 가능하여 산업체등과의 측정표준의 소급성을 유지 할 수 있게 되었을 뿐만아니라, 용량형진공계를 이용한 국제비교를 통해 국가표준기의 신뢰성을 높이고 측정능력을 향상시킬 수 있는 기반을 마련하였다.

Abstract - The Ultrasonic Interferometer Manometer(UIM) which can calibrate from 1 Pa to 10⁵ Pa has been developed, and its uncertainty is evaluated less than ±(30 ppm of pressure+12 mPa). We can calibrate Capacitance Diaphragm Gauge(CDG) used as a transfer standard gauge in the low vacuum field. The UIM enables to maintain the measurement traceability for industries. In order to improve the UIM's accuracy, we will perform the international intercomparison with other national standards laboratories.

1. 서 론

1 Pa(7.5³ torr)~10⁵ Pa(대기압)인 저압(low pressure) 저진공(low vacuum) 영역의 국가표준은 고압과 고진공, 표준의 정점으로서 이 영역 표준의 정밀정확도는 그대로 고압과 고진공영역의 정밀정확도에 직접 과급된다는 점에서 매우 중요하다. 열역학적인 온도표준은 가스의 압력으로 결정되며 질량의 부력결정에 있어서 대기압이 직접적 인자가 되는 등 저진공 영역의 정밀정확도는 온도 및 질량표준의 정밀정확도에까지 영향을 미치므로 각국의 표준기관에서도 매우 중요하게 취급되고 있다. 또한 반도체 공정, 의학연구, 진공포장, 유량측정, 그리고 전반적인 산업체의 생산공정 등의 많은 응용 분야에서 저압 저진공 영역의 정밀 측정에 대한 요구가 증가하고 있다.

저압 및 저진공영역의 유일한 절대압력계는 U자관

압력계로 널리 알려진 액주형압력계이다. 국가표준기용 액주형압력계의 용액으로는 물리화학적으로 비교적 안정되고 고순도로 정제할 수 있으며 그 밀도 및 온도 특성을 비롯한 물리적 특성들이 가장 정확하게 알려져있는 수은이 사용되고 있다[1, 2, 3]. 그러나 수은은 큰 표면장력을 갖고 있고, 표면이 불안정하며 밀도가 높아 일반적으로 사용되는 마이크로미터를 이용한 액주형압력계로는 높이 측정의 분해능에 있어서 표준기에서 요구되는 정도에는 미치지 못하고 있다. 따라서 전세계적으로 압력표준에 관한 연구는 이 수은주 높이 측정의 분해능 및 안정성을 높이는 데 주력해 왔다. 영국, 독일, 일본을 비롯한 대부분의 국가에서는 광파의 간섭을 이용한 수은주 높이 측정의 정밀 정확도를 높이는 연구가 수행되어져온 반면 미국의 국립표준기술원(NIST)에서는 초음파 간섭원리를 이용한 액주형압력계를 개발하여 30여년간 연구, 개선해오고 있다[4, 5, 6]. 본 연구진은 미국

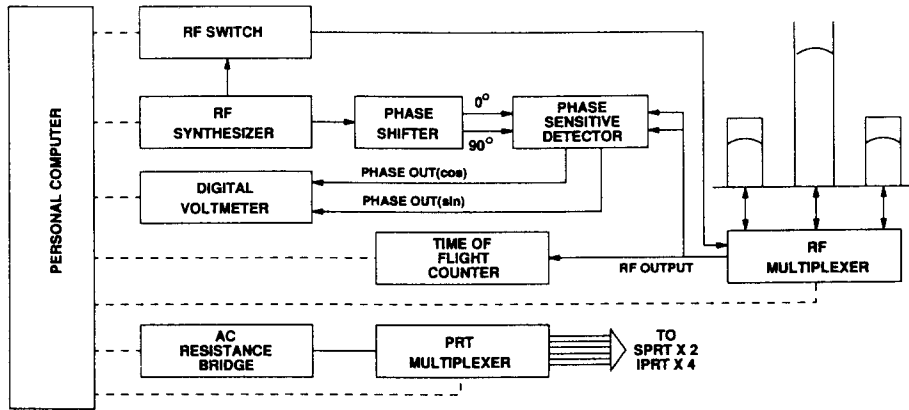


그림 1. 초음파간섭을 이용한 높이측정 개략도.

NIST와 국제 공동연구로 초음파 간섭원리를 이용한 액주형압력계(Ultrasonic Interferometer Manometer, UIM)를 1986년 부터 4년에 걸쳐 개발한 후[7, 8, 9, 10], 오차요인을 제거하는 연구와 정확한 오차분석을 통하여 측정의 정확도를 높여 저진공 국가표준기로 이용하고 있다[11, 12, 13]. 또한 이 영역에서 국제적인 전달표준기(transfer standard gauge)로 이용되는 용량형진공계(Capacitance Diaphragm Gauge, CDG)를 UIM을 이용하여 교정하여 산업체등과 측정의 소급성을 유지하고 있다.

2. 실험방법

초음파를 이용한 거리 측정은 측정하고자 하는 시료 내부를 초음파가 진행하게 한 후 그 경과 시간을 측정하고 여기에 음속을 곱해서 구한다. 초음파 신호의 echo와 echo 사이를 포착하여 비행시간(time of flight, TOF)을 측정하므로써 경과시간을 결정하는 방법은 흔히 쓰이는 방법이다. 또다른 방법으로는 일정 주파수의 초음파가 지나간 파수를 계수하여 파장을 곱하는 방법이다. 수는 속에서 음속은 약 1,450 m/s이고 사용되는 초음파의 주파수는 7~8 MHz 이므로 한 파장은 대략 0.2 mm이다. 따라서 몇 파장이 지나갔는가 만을 세는 것으로는 충분한 분해능을 낼 수 없으므로 부분무늬(fractional fringe, f)를 10^5 정도로 정확하게 측정해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 pulse echo 방법을 기본으로 하고 90° 의 위상 차이를 가지는 2개의 기준 초음파 신호와 echo 출력 신호를 위상검출기(phase sensitive detector)를 이용한 간섭계로 검출하여 f 를 결정하는 새

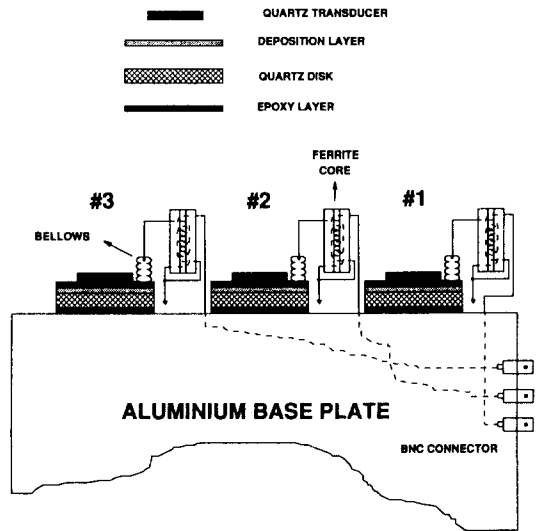


그림 2. 수정변환기 제작도.

로운 방법을 도입하였다. 만약 파장 λ , 주기 T , 주파수 $\nu = \omega/2\pi$ 초음파가 수은주를 왕복하는데 걸린 경과 시간이 τ 이고 수는 내부를 지나간 파수가 $N+f$ 개라면 수은주 높이 H 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 2H &= c\tau \\
 &= c(N+f)T = c(N+f)\nu = c \cdot 2\pi(N+f)/\omega \quad (1) \\
 &= (N+f)\lambda
 \end{aligned}$$

여기서 N (whole fraction)은 전체파수로서 정수이고, f (fractional fringe)는 부분파로서 분수이며, c 는 수은 속

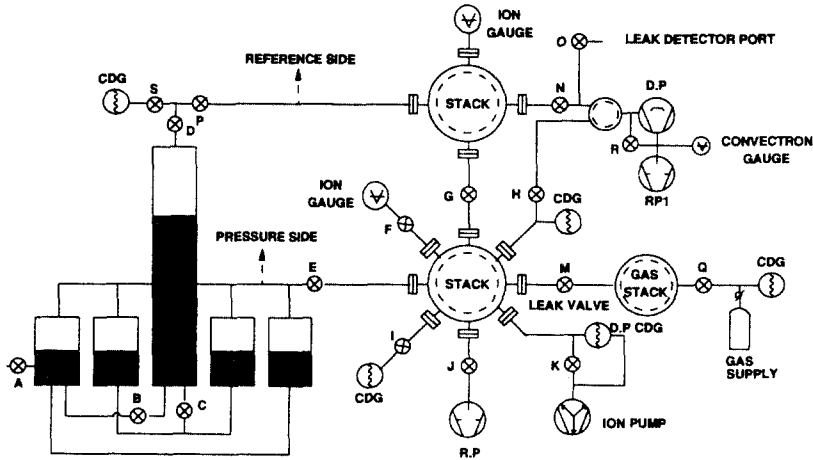


그림 3. UIM 압력제어장치.

에서의 음속이다. 결국 수은주의 높이 즉 압력은 음속 c 와 파수($N+f$)가 결정됨으로써 구해진다. f 와 N 의 결정 방법은 이미 논문으로 발표된바 있다[14, 15, 16, 17]. 그림 1은 설계 제작한 초음파 간섭 원리를 이용한 수은주 높이 측정의 개략도이다.

UIM 본체는 진동을 줄이고 외부의 열을 차단하기 위해 알루미늄 블록 위에 guard vacuum box가 올려 있고, 그 위에 수은이 들어 있는 유리관들을 보호하는 center tube shielder가 있다. 이들은 알루미늄으로 제조되었고 진공 밀봉되어 있으며 로타리 펌프로 배기하여 저진공 상태로 유지한다. 블록 위 중앙에는 수직으로 높이 1.2 m, 직경 73 mm인 중앙 수은주와 높이 8 cm, 직경 73 mm인 test 수은주 두 개가 올려져 있다. UIM에 필요한 수은은 약 200 kg으로 높은 압력일 때 중앙 수은주를 채웠던 수은은 낮은 압력에서 test 수은주로 흘러들어가는 구조로 되어있다. Test 수은주 만으로는 수은 유입량을 모두 받아들이기엔 부피가 충분하지 않아 그림 3과같이 양쪽 끝에 스테인레스틸로 제작된 직육면체의 수은 저장고가 수은주들과 연결되어 있다.

그림 2는 알루미늄 블록 위에 초음파 발진기를 부착 시킨 모습이다. 밀링과 특수 lapping으로 경면 가공된 토대판(base plate) 위에 에폭시 접착제로 fused quartz를 접착한 후 이 fused quartz 위에 알루미늄 전극을 박막 형태로 증착시켜 만들고 에폭시 접착제로 수정 변환기(quartz transducer)를 접착시켰다. 여기서 수정 변환기는 Valpy-Fisher 회사 제품(X-cut, polished, 한면은 gold 중

착, 공진주파수 10 MHz, 지름 0.75"±0.001)이 사용되었다. 변환기는 수은주 지지대에 직접 접촉되면 파괴되어 수은의 누출 현상이 생기고 초음파 발진이 어려워질 수 있다. 따라서 지지대에 일정한 홈을 만들어 테프론을 끼우고 이 테프론과 변환기가 접촉하게 하므로써 변환기를 보호하고 누출 밀봉도 이루었다. 증착된 알루미늄 박막 위에서 전극을 뽑아 내기 위해 수은 지지대 안쪽에는 지름 2 mm, 높이 6 mm인 소형 벨로우즈가 고정될 수 있는 홈이 있다. 이 벨로우즈는 구리로 만들어진 것으로 선을 끼울 수 있는 작은 구멍을 뚫어 내부에서 납땀하여 전극을 밖으로 뽑아 낸다. 또한 이 수은주 지지대 안쪽에는 외부에서 수은주에 수은을 공급하거나 배출할 수 있는 수은 배관이 있으며 수은주가 놓이도록 테프론으로 가공된 홈이 있다. 이 홈에 수은주를 올려놓고 invar 봉으로 고정하여 UIM에서 가장 중요한 부분인 수은주 및 초음파 발진 부분이 제작되었다.

그림 3은 압력 제어장치의 개략도이다. 주요 부분으로는 중앙 수은주의 기준압력(reference pressure) 부인 reference side, 교정 압력이 가해지는 test side, 그리고 교정 압력을 미세조절하는 압력 조절 장치가 있다. UIM의 분해능을 높이고 CDG의 정확한 영점조정을 위해서는 시스템의 압력은 교정 시작 전에 10⁶ torr 정도의 고진공 상태까지 배기 되어야 한다. UIM은 수은을 사용하고 피교정 게이지인 CDG도 베이킹(baking)하기가 적합하지 않으므로 베이킹하지 않고 고진공에 도달해야 한다. 또한 일반 기계식 고진공용 펌프는 수은과

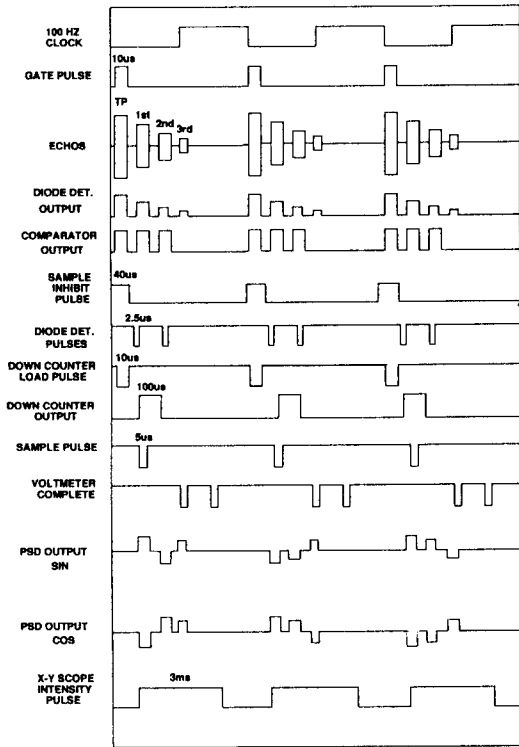


그림 4. 펄스신호들의 time chart.

화학적으로 반응하여 견고하지 못하므로 주(main) 펌프로는 수은에 대해 안전하고 배기 속도가 큰 유화산펌프(Alcatel, crystal 162)를 사용하였다.

초음파를 이용하여 세 개의 수은주의 길이를 거의 동시에 측정하기 위해서는 데이터의 수집 및 처리 과정이 빨라야 하기 때문에 이를 뒷받침할 여러 가지 전자 회로와 그에 상응하는 계측기가 필요하다. 측정에서 특히 중요한 것은 수은 면을 비행하는 초음파의 TOF 및 기준 신호와 first echo 신호 사이의 위상차 검출에서 얻어지는 직류 전압이다. 수은은 조그만 외부 충격에도 메니스커스가 흔들릴 정도로 진동에 민감하고 온도변화에 따라서 밀도 및 음속 등이 변하므로 이들의 오차 요인을 줄이기 위해서는 측정의 자동화가 요구된다. 자동화 측정을 위해 설계 제작된 전자 회로와 계측기의 작동 time chart는 그림 4에 보였다. 그림 5는 전자 회로, 계측 기기, 그리고 인터페이스 경로를 그린 개략도이다. 모든 회로는 TM 503 모듈에 장착되어 있으며, 수은주 및 주파수의 선택 그리고 위상검출된 전압의 검출 및 저장등 모든 측정과정이 IEEE 488 BUS를 통하여 컴퓨터에 의해 제어된다.

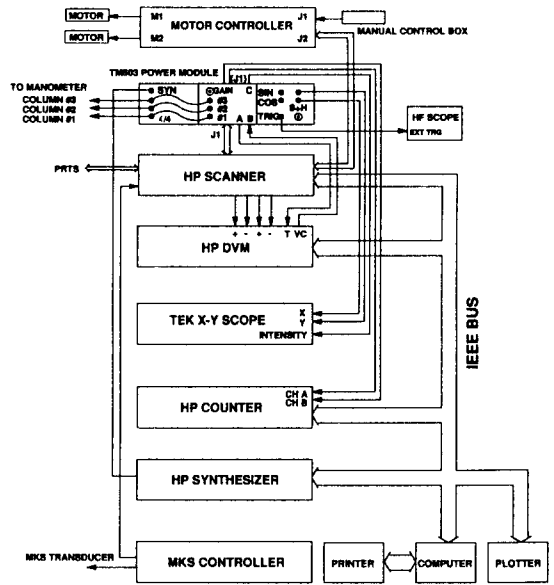


그림 5. 계측기들의 외부 연결도.

3. 결과 및 고찰

3.1. CDG 교정결과

교정에 사용된 CDG는 MKS회사의 1 torr(model: 390HA-00001, s/n: 11717-1) 및 1000 torr(model: 690A 13TRA, s/n: 94137114A) 용량의 절대압(absolute pressure) 측정용 게이지이다.

1 torr CDG를 각각 다른 날에 4회 반복 교정하여 얻은 결과를 그림 6에 나타냈다. 여기서 X축은 표준압력이고 Y축은 압력비(pressure ratio)로서 CDG 지시값을 표준압력으로 나눈 값이다. CDG 영점은 이온게이지로 읽은 압력이 6.0×10^{-6} torr 이하인 조건에서 조절하였으며, 교정할 때의 실험실 온도는 $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 정도로 다소 높은 편이었다. CDG의 경우, 주위 온도 변화에 따라 센서의 압력이 변하는 현상을 줄이기 위해 센서를 heater on 상태(온도 45°C)로 고정하고 교정하였다. 낮은 압력에서 압력비가 큰 것을 볼 수 있으며, 이것은 CDG 온도가 45°C 로 높은 것에 따른 thermal transpiration 효과에 기인한 것으로 보인다. CDG 센서의 경우 1 torr 이하의 압력에서 압력 발생부와 CDG 센서의 온도 차이 및 연결 배관의 굵기에 따라 생기는 thermal transpiration 효과 때문에 높은 압력에서 비해 낮은 압력에서 압력비가 크게 나타나는 것으로 알려져

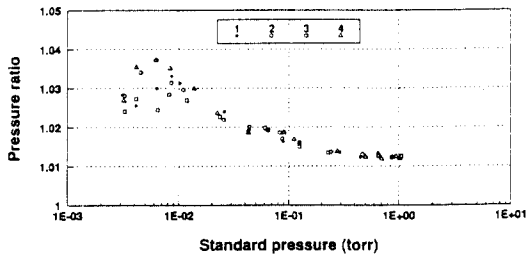


그림 6. 1 torr CDG 교정결과.

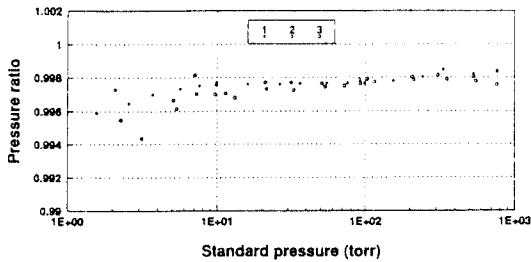


그림 7. 1000 torr CDG 교정결과.

있다[18]. 10 mtorr 이상의 압력에서 데이터의 분산이 상대적으로 적음을 알 수 있고, 특히 1 torr에 가까워질수록 CDG 지시 압력이 표준 압력에 가까워짐을 알 수 있다. 3 mtorr 근방의 경우 4회 측정 값의 분산은 1% 정도로 CDG 사양 상의 오차(용량 1 torr인 경우 1 mtorr에서의 오차)인 0.6%에 보다 크게 나타났으며, 압력이 보다 낮아질수록 오차는 더욱 커지는 것을 알 수 있었다. 이렇게 낮은 압력에서 분산이 큰 것은 센서 자체의 흔들림과 이 압력에서의 UIM의 불안정이 복합된 것으로 생각된다.

그림 7은 1000 torr CDG를 3회 반복 교정하여 그린 그래프이다. 1 torr에서 10 torr 사이의 측정값의 분산이 큰 것은 콘트롤러의 분해능이 충분하지 않기 때문이다. 압력이 증가할수록 분산이 0.1% 이하로 적어지므로 보아서 낮은 압력에서는 콘트롤러의 분해능이 결과에 크게 영향을 준다고 볼 수 있다. 그러므로 10 torr 이하의 압력 구간에서는 용량이 10 torr인 센서를 사용함이 바람직하다. 이 CDG의 경우 전구간에서의 지시압력이 표준압력에 비해 0.2~0.4% 정도 낮게 나타났으며, 이는 교정하지 않고 사용하면 이 정도의 오차를 항상 가지고 있음을 의미한다.

3.2. 표준기 오차

UIM은 U자관식 액주형 압력계이며, 따라서 표준압

력 P 와 기준압력 P_r 과의 차이는 액주의 높이 차이인.

$$P - P_r = \rho g(H_2 - H_1) \tag{2}$$

식으로 구할 수 있고, 여기서 ρ 는 액체의 밀도, g 는 그 지역의 중력 가속도이다. 따라서 압력 측정의 정밀 정확도는

$$\delta P/P = \delta P_r/P_r + \delta \rho/\rho + \delta g/g + \delta h/h \tag{3}$$

식과 같이 기준 압력(P_r), 수은 밀도(ρ), 중력 가속도(g), 높이차(h)의 정밀 정확도의 합으로 표시된다. 오차는 크게 압력에 비례하는 오차와 압력에 독립적인 오차로 구분할 수 있다. 압력에 비례하는 오차 중에서 수은 밀도는 A.H. Cook에 의해 20℃, 1 기압에서 13545.858±0.01 kg/m³로 측정되었으며 오차는 0.8 ppm이다[19]. 본 표준기에 사용된 수은의 밀도는 따로 측정하지 않고 계산에 의해 구했으며 이 오차는 2.5 ppm으로 추정된다. 또한 저진공 표준실의 중력 가속도는 9.79832169 m/s²이며 오차는 2 ppm 정도이다. 수은의 음속은 NIST의 진공 그룹에서 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였는데 온도 21.5~29.2℃, 저진공 영역에서의 오차는 5 ppm이다[20]. 본 연구에서도 1 mK까지 정확하게 교정된 백금 저항온도계로 온도를 측정하여 NIST 결과식에 대입 음속을 계산 보정하였다. UIM의 경우 온도에 의한 오차가 오차의 대부분을 차지하는데 이것은 부정확한 온도 측정과 내부 온도 구배 때문에 생긴다. UIM 내부에는 두 개의 표준 백금저항온도계(SPRT, Rosemount 162D)와 네개의 백금저항온도계(IPRT, Degussa 4W63-01)가 부착되어 있다. 본 연구원의 온도 그룹에서 교정한 두 개의 SPRT의 불확도는 ±1 mK 이고, 네 개의 IPRT의 불확도는 ±20 mK이다. 온도 1 mK의 오차는 표준 압력에 0.5 ppm 오차를 준다. UIM에서 온도는 SPRT와 IPRT로 읽어 압력 보정에 이용되므로 온도 측정 오차를 40 mK으로 잡으면 온도 측정이 표준압력에 미치는 오차는 20 ppm이 된다. U자관의 경사에 따른 오차는 기울기 θ 가 최대 압력인 760 torr에서 0.1 mrad을 넘지 않으므로 전 압력 구간에서 이에 의한 오차는 1 ppm 이하로 무시할 만하다. 압력에 독립적인 오차 중에서 fractional fringe(f) 계산에 이용되는 전압은 위상검출기를 포함한 모든 전자 회로의 안정성, 변환기의 짐작 정도, 기계적 진동, 온도 변화 등 많은 오차 요인을 포함하고 있어서 이들을 각각 분석하여 보정하기는 어렵다. 그러나 타원보정(ellipse correction) 및 사각보정(square cor-

표 1. UIM의 오차.

압력에 비례하는 오차(ppm)		압력에 독립적인 오차(mPa)	
수은밀도	2.5	Fractional fringe	0.8
중력가속도	2	기준압력	1.3
온도	20	영점반복성	9.0
음속	5		
합계	29.5 ppm	합계	11.1

UIM 오차 ±(30 ppm of pressure+12 mPa)

rection)은 꼭 필요한데 이들의 보정은 각각의 보정계수들을 구하여 보정하는 방법으로 f 측정 오차를 줄였다 [21, 22, 23]. f 결정에 사용된 전압계의 1 V_{DC} 영역의 정확도는 0.024%로 f 측정이 표준 압력에 미치는 오차는 0.8 mPa 정도로 추정된다. 중앙 수은주의 압력, 즉 기준 압력(Pr)은 고진공 표준기에서 교정된 점성진공계(spinning rotor gauge)와 비교 교정된 1 torr CDG를 사용하였으며 1 mtorr 영역에서 기준 압력의 불확도는 ±1%로 압력 0.01 mtorr에 해당된다. 영점의 반복성에 영향을 주는 요인은 진동, 온도의 불안정이나 구배, 압력의 불안정, 그리고 전자적인 잡음 등이 있다. 반복성 오차는 수은주에 같은 압력을 가한 상태에서 세계의 수은주의 높이를 반복 측정하여 표준편차를 구했으며 이 값은 9 mPa 이내 이었다. 그러나 이값은 표준기의 유지상태에 따라 달라질수 있으므로 교정하기전에 항상 미리 측정하여 상태를 확인해야 한다. 표 1은 UIM의 오차를 정리한 것이다.

4. 결 론

1. 초음파 간섭원리를 이용한 액주형압력계를 제작하여 측정 범위가 1 Pa(7.5⁻³ torr)에서 10⁵ Pa(대기압)이고 오차가 ±(30 ppm of pressure+12 mPa)인 저압 저진공 영역의 국가 표준을 확립하였다.

2. 국가표준기를 이용하여 용량이 1 torr 및 1000 torr 인 용량형진공계(CDG)를 교정하였다. 교정 결과 1 torr CDG의 경우 10 mtorr 이하의 낮은 압력에서는 분산이 커서 이 영역에서는 표준기가 불안한 것으로 추측되므로 미세누출 제거, 온도의 안정화등 오차 원인이 되는 요소들을 줄여 표준기의 정밀정확도를 향상시키는 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

3. 산업체에서 교정용표준기로 이용되는 CDG의 국가 표준기와의 측정의 소급성 유지에 기여.

참고문헌

1. T. Grindley and J.E. Lind, Jr., PVT properties of water and mercury., J. Chem. Phys **54**, 3983(1971).
2. J.A. Beattie, B.E. Blaisdell, J. Aaye, H.T. Gerry, and C.A. Jhonson, An experimental study of the absolute temperature scale VIII, The thermal expansion and compressibility of vitreous silica and the thermal dilation of mercury, Proc. Am. Acad. Arts Sxi. **74**, 371(1941).
3. C.G. Dekruif, C.H.D. VanGinkel, and A. Langenberg, Vapour Pressure and thermodynamic function changes of mercury, Recueil **92**, 599(1973).
4. P.L.M. Heydeman, C.R. Tilford, and R.W. Hyland, Ultrasonic mano-meters for low and medium vacua under development at the National Bureau of Standards, J.V. ac. Sci. Technol. **14**, 597(1977).
5. P.L.M. Heydeman, C.R. Tilford, and W. Angel, Ultrasonic interfero-meters: 10⁵ torr resolutin, 22nd International Instrumentation Symposium, San Diego, Ca, (1976).
6. P.L.M. Heydeman, A frnige-counting pulsed interferometer manometer, Rev. Sci. Inst. **42**, 983 (1971).
7. 정광화, 한승웅, 박경근, 이철로, 홍승수, "간섭원리에 의한 액주형 압력계 개발," KRISS-87-46-IR", (1987).
8. 정광화, 이철로, 홍승수, 김구영, 안영선, "간섭원리에 의한 액주형 압력계 개발," KRISS-88-84-IR", (1988).
9. 정광화, 홍승수, 이철로, 김부식, "간섭원리에 의한 액주형 압력계 개발," KRISS-89-103-IR", (1989).
10. 정광화, 홍승수, 이철로, 김부식, "간섭원리에 의한 액주형 압력계 개발," KRISS-90-142-IR", (1990).
11. 정광화, 홍승수, 신용현, "초음파간섭 수은주압력계의 정밀정확도 향상연구," KRISS-94-043-IR, (1993).
12. 정광화, 홍승수, 신용현, "초음파간섭 수은주압력계의 정밀정확도 향상연구," KRISS-95-051-IR, (1994).
13. 한승웅, 정광화, 홍승수, 신용현, "초음파간섭 수은주압력계의 정밀정확도 향상연구," KRISS-96-021-IR, (1995).
14. 이철로, 홍승수, 정광화, "간섭원리에 의한 초음파 경과시간의 측정," 응용물리, **2**(3), 205-209, (1989).
15. 이철로, 홍승수, 김영환, 정광화, "초음파간섭계에서 주파수에 따른 Fractional Fringe변화에 의한 경과시간의 결정 및 오차보정," 새물리, **30**(2), 101-105, (1990).
16. C.R. Tilford, Analytical Procedures for determining lengths from fractional fringes, Appl. Optics **16**,

- 1857(1977).
17. P.L.M. Heydeman, Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers, *Appl. Optics* **20**, 3382(1981).
 18. K.P. Poulter, M.J. Rodgers, P.J. Nash, and M.P. Perkin, Thermal transpiration correction in capacitance manometers, *Vacuum* **33**, 311(1983).
 19. A.H. Cook, Precise measurement of the density of mercury at 20°C. *Phil. Trans.* **254A**, 17(1961).
 20. C.R. Tilford, The speed of sound in a mercury ultrasonic interferometer manometer, *Metrologia* **24**, 121(1987).
 21. 정광화, 홍승수, 이철로, "초음파 간섭을 이용한 수은주 압력계의 Fractional Fringe 결정에 3차 Harmonics가 미치는 영향," *응용물리*, **4**(3), 294-298, (1991).
 22. 정광화, 홍승수, 이철로, "수은주 높이 측정을 위한 초음파 간섭계 보정 계수들의 일반성," *응용물리* **5**(1), 42-46, (1992).
 23. Kwang-Hwa Chung, Seung S. Hong, Chul R. Lee, and Young H. Kim, "Effects of higher-order harmonics on phase determination in an ultrasonic interferometer," *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**(4), 2025-2029, (1992).