

# MT300 디지털 압력계 개발을 위한 선형성 (Linearity) 개선 및 동시 측정 (Synchronous Measurement) 기술

쿠리하라 히로노리 (Hironori Kurihara)<sup>\*1</sup> 야마시타 히데아키 (Hideaki Yamashita)<sup>\*1</sup>

실리콘 공진센서 (resonant sensor)가 장착된 Yokogawa의 MT 시리즈 디지털 압력계 (manometers)는 장기적 안정성이 우수하며 제조, 연구개발 및 교정 (calibration)을 위해 다양한 산업에서 널리 사용됩니다. MT 시리즈 디지털 압력계는 국가 측정 기관에서 국가 압력 표준의 국제 비교를 위한 전송 표준 (transfer standard)으로 채택했습니다. 그러나 여전히 선형성 (linearity)을 개선해야 할 여지가 있습니다. Yokogawa는 일본 국립 계측 연구소 (National Metrology Institute of Japan), 국립 첨단 산업 과학 및 기술 연구소 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: NMIJ/AIST)와의 공동 연구를 통해 새로운 조정 방법을 개발하여 새로운 MT300 디지털 압력계에 반영했습니다. 본 문서에서는 새로운 조정 방법과 NMIJ/AIST에서 얻은 평가 결과 및 이 방법에 사용된 동시 측정 기술 (synchronous measurement technology)에 대해 설명합니다.

## 도입

디지털 압력계는 가볍고 휴대가 간편하며 사용하기 쉽기 때문에 일반적으로 압력 표준으로 사용되는 분동식 압력계 (dead-weight piston gauges)보다 편리합니다. 디지털 압력계는 점점 더 정밀함이 요구되는 대상기기 (target instruments)를 처리하기 위해 그 정확도가 계속 향상되어 왔습니다.

현재 다양한 산업에서 디지털 압력계는 압력 표준으로 사용됩니다<sup>(1)</sup>. 대상 기기(target instruments)가 더욱 정밀해지고 시스템 자동화가 진행됨에 따라 디지털 압력계가 더 널리 사용될 것으로 예상되고 있어 정확성과 유용성은 더욱 향상되어야 합니다.

2019년 9월, Yokogawa 계측기(Yokogawa Test & Measurement Corporation)는 MT210/220의 후속 제품으로 MT300 시리즈 디지털 압력계 (게이지 압력 모델: 4 종, 절대 압력 모델: 1

종, 차압 모델: 4 종)를 출시했습니다. 2020년 4월, 회사는 게이지 압력 모델과 절대 압력 모델에 각각 두 개의 고압 레인지를 추가했습니다. 그림1은 MT300의 외관을 보여줍니다. 실리콘 공진센서<sup>(2)</sup>는 이전 모델과 동일한 뛰어난 안정성을 제공하는 동시에 더 높은 정확도와 기능을 제공합니다.



그림1 MT300 디지털 압력계

왼쪽: 1kPa 범위 차압 모델  
오른쪽: 200kPa 범위 게이지 압력 모델 (24V DC 출력, DCV/ DCA 측정 옵션 포함)

<sup>\*1</sup> Yokogawa계측기 (Yokogawa Test & Measurement Corporation) 기술 개발 부문 엔지니어링 3부

## MT300의 개발 정책

MT 시리즈의 주요 사용자는 교정기관 (calibration institutions), 압력기기 제조업체 (압력 센서, 압력계, 압력 컨트롤러 등) 및 가전제품 제조업체입니다. 실험실의 주요 용도 외에도 MT300은 배터리 구동 및 루프 전류 측정 기능으로 인해 IA 유지보수 시장에서 수요가 많습니다. 이러한 응용 분야를 충족하기 위해 디지털 압력계의 사양은 높은 정확도를 보증하며 기능은 더욱 확장되고 있습니다.

- 다양한 측정레인지 (높은 압력 측정)
- 넓은 운용범위 (대상 기기의 정격을 초과하는 압력 측정)
- 최신 통신 인터페이스 (시스템 자동화에 대응)
- 긴 교정주기 (운영 비용 절감)
- 높은 디스플레이 해상도
- 대기압 변동과 같은 변동성에 덜 민감함

이러한 요구 사항을 충족하기 위해 게이지 압력 모델 (gauge pressure model)에 16MPa 및 70MPa의 두 가지 레인지를 추가하였으며, 절대 압력 모델 (absolute pressure model)에는 700kPa 및 3500kPa를 추가했습니다. 게이지 압력 모델에서 130, 700, 3000 kPa의 레인지는 각각 200, 1000, 3500 kPa로 확장되었습니다.

PC를 포함한 시스템의 자동화에 대응하기 위하여 MT300의 통신 인터페이스에는 GPIB, USB 및 이더넷이 표준으로 포함되어 있습니다.

일본 국립 계측 연구소, 국립 첨단 산업 과학 및 기술 연구소 (NMIJ/AIST)와 공동 연구로 기존 모델의 장기 안정성을 계승하면서 MT300의 정확도 보증 기간은 6개월에서 12개월로 늘어났습니다. JCSS (Japan Calibration Service System)와 같은 ISO/IEC17025 기반 교정에 대한 시장 수요 증가에 대응하여 높은 디스플레이 해상도 옵션을 추가했습니다.

또한 다점 및 저압 측정에 효과적인 동시 측정 기능 (synchronous measurement function)<sup>(3)</sup>이 추가되었습니다. 이 기능은 조정 기술에도 사용되며 제조 공정 자동화에 없어서는 안 될 기능입니다.

다음 섹션에서는 더 높은 정확도를 위한 선형성 향상과 동시 측정 기능의 세부내용을 설명합니다.

## 선형성 (LINEARITY) 향상

### 기존 모델의 특징

그림2는 2014년 10월부터 2016년 11월까지 2년 동안 MT210 (차압 범위: 10kPa)의 교정 결과를 보여줍니다. 최대 변동은 0.06Pa로 우수한 장기 안정성을 보여줍니다. 그러나 비선형성은 4kPa 이상에서 확연히 나타나며 표준 편차는 8kPa에서 -0.8Pa였습니다. NMIJ/AIST가 보유한 MT210에서도 동일한 특성이 보고되었습니다<sup>(4)</sup>.

그림2와 같은 교정 곡선이 있는 디지털 압력계를 가정합니다. 교정 값으로 저차 보간 공식 (low-order interpolation formula)을 계산하고 압력계 표시를 수정하는데 사용하면 실제 값과 계산된 값의 차이가 너무 커서 불확실성은 개선되지 않습니다. 고차 보간 공식 (high-order interpolation formula)의 경우 보정 포인트와 보정 포인트 수를 최적화하려면 반복 측정을 해야 합니다. 선형성의 향상은 이러한 문제를 해결하므로 사용자에게 유익합니다.

실리콘 공진센서의 구조는 압력 센서의 장기 안정성과 자기이력 현상 (hysteresis)에 큰 영향을 주지만 보정 계수를 최적화하여 선형성을 조정할 수 있습니다. 따라서 전달 표준 (transfer standards) 개발을 위한 NMIJ/AIST와의 공동 연구에서 보정 계수를 계산하는 방법을 수정하여 압력 센서의 프로토타입 (prototype: 시제품 모형)을 제작했습니다.

NMIJ/AIST에서 수행한 보정은 좋은 특성을 보여주었습니다. 이 공동 연구의 내용과 압력 센서의 특성은 다음과 같습니다.

### NMIJ /AIST와의 공동 연구

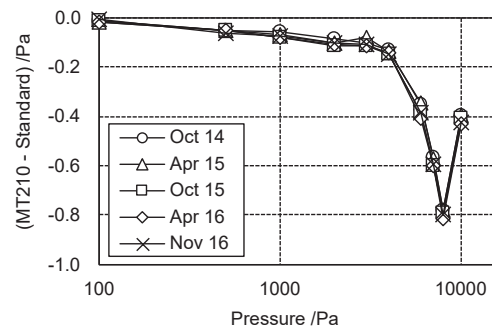


그림2 MT210의 교정 결과 및 장기 안정성 (차압 범위: 10kPa)

디스플레이 및 작동 키가 없는 압력 측정에 특화된 소형 디지털 압력계가 있습니다. 우리는 이러한 압력계를 “압력 센서”라고 부르며 MT300과 같은 디지털 압력계와 구별합니다. 이전 모델 265381/Z는 NIST (National Institute of Standards and Technology: 국립 표준기술연구소)와 같은 국립 계측 기관을 위해 제조된 일종의 압력 센서입니다. 265381/Z는 국가 압력 표준<sup>(5)(6)</sup>의 국제 비교를 위한 표준으로 사용되었으며, 지속적으로 재발매 요청을 받아오고 있었습니다. 이에 우리는 2016년 NMIJ/AIST와 공동 연구 프로젝트를 시작하여 국제 비교를 위한 전달 표준 (transfer standard)으로 지속적으로 공급할 수 있는 압력 센서를 개발했습니다. 우리는 압력 센서를 조정했고 NMIJ/AIST는 자체 압력 표준에 대해 평가했습니다<sup>(7)</sup>.

그림3은 공동 연구를 위해 개발된 프로토타입의 외관입니다. 265381/Z를 기반으로 설계된 이 압력 센서는 PC와의 통신 및 전원 공급을 위해 전면에 입력 포트와 후면에 USB 포트가 장착되어 있습니다. 다양한 설정 및 압력 값 취득은 PC에서 수행됩니다. 이전 모델과 마찬가지로 센서에는 두 개의 주요 부품이 있습니다. 하나는 센서 캡슐과 두 개의 플랜지의 어셈블리이고 다른 하나는 신호 처리 및 통신용 보드입니다. 실리콘 공진센서가 센서 캡슐에 장착되어 있습니다. 특성을 개선하기 위해 센서 캡슐은 레인지별로 크기가 다른 다이 어프램과 함께 제공됩니다.

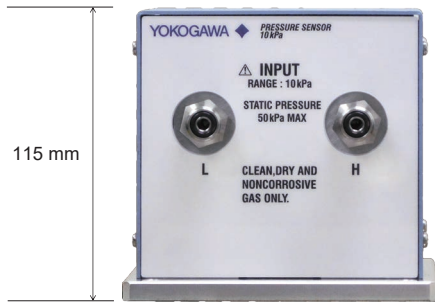


그림3 프로토타입 압력 센서의 외관 (차압 범위: 10kPa)

### 압력센서 조정 방법

조정 방법에 대한 두 가지 요구 사항을 적용하였습니다. 여러 압력 센서의 자동 및 동시 조정과 MT300에 대한 적용 가능성입니다.

압력 값을 결정하기 위해 압력 센서는 실리콘 공진센서의 오실레이터 주파수 함수 수식 (expression)을 사용합니다. 보정 계수는 이 수식에 적용되어 압력 센서의 특성을 반영합니다. 조정 과정에서 대상 압력 센서에 압력을 가하여, 오실레이터 주파수의 값을 수식으로 대체하여 보정 계수는 수식의 결과 값이 적용된 압력의 값과 일치하도록 결정됩니다. 이전 조정 방법에서는 비선형 특성이 있는 표준을 사용하여 보정 계수를 계산하여 대상 센서의 비선형 특성을 얻었습니다. 공동 연구에서는 NMIJ/AIST 또는 Yokogawa에서 보정한 표준을 사용하고 보정 값으로 측정 값을 수정하여 보정 계수를 결정했습니다.

우리는 이 방법이 NMIJ/AIST 압력 표준에서 더 적은 편차로 우수한 선형성을 제공할 것으로 기대했습니다.

조정 과정에서 여러 개의 압력 센서를 자동 온도 조절 챔버에 배치하고 온도를 변경하면서 압력 컨트롤러에서 동시에 다른 압력을 가하고 압력 센서의 진동 주파수를 측정했습니다. 적용된 압력은 자동 온도 조절 챔버 외부에 배치된 표준에 의해 측정되었습니다. 표준의 보정 값으로 보정 된 측정 값은 압력 센서의 보정 계수를 결정하는 데 사용되었습니다.

적용된 압력의 미세한 변동은 불가피하지만 표준, 센서1, 센서2 등에서 데이터를 순차적으로 수집할 때 (즉, 동시에 수집하는 것이 아님) 센서 조정에는 큰 영향을 미칩니다. 이 문제를 해결하기 위해 나중에 설명할 동시 측정(synchronous measurement)을 채택했습니다.

선형성은 보정 계수를 결정하는 데 사용되는 압력 포인트의 조합에 의한 영향을 받습니다. 따라서 우리는 다양한 압력 포인트 조합, 계산된 보정 계수 및 압력 값, 각 사례에 대한 반복 시뮬레이션으로 여러 조건을 설정하고 최상의 선형성을 가진 조합을 결정했습니다.

결과는 MT300의 센서 조정에도 사용되었습니다.

### 프로토타입 압력 센서의 특성

이 섹션에서는 압력 센서에 대해 NMIJ/AIST가 수행한 교정 결과를 설명합니다. 그림4~6은 압력 센서를 NMIJ/AIST의 압력 표준과 비교한 결과를 보여줍니다. 그래프의 오차는 보정의 정확성을 나타냅니다 ( $k = 2$ ).

그림4는 2개의 압력센서 (차압 범위: 10kPa)의 교정 결과를 보

여줍니다. NMIJ/AIST 압력 표준의 최대 편차는 0.07Pa였습니다. 이 결과를 이 압력 센서의 조정 표준으로 사용한 MT210의 교정 결과와 비교한 결과 (그림2 참조) 선형성이 크게 향상된 것으로 나타났습니다. 또한 두 장치의 보정 결과 간의 최대 차이는 0.03Pa였습니다. 10kPa 범위에서 “압력센서 조정 방법” 섹션에 설명된 조정 방법은 선형성을 효과적으로 개선하여 개별 장치 간의 차이를 매우 낮은 수준으로 달성했습니다.

이 조정 방법을 다른 압력 범위에 적용했습니다. 그림5는 NMIJ/AIST가 두 개의 압력센서(절대 압력 범위: 130kPa)에서 수행한 교정 결과를 보여주며, 이는 다른 방법으로 조정되었습니다.

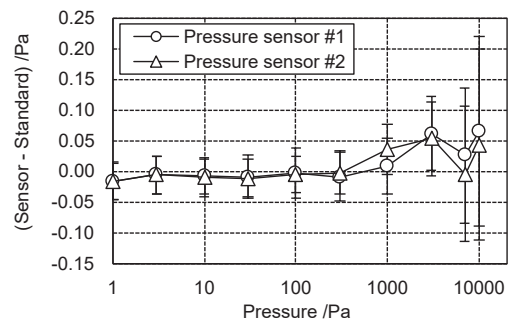


그림4 압력 센서의 교정 결과 (차압 범위: 10kPa)

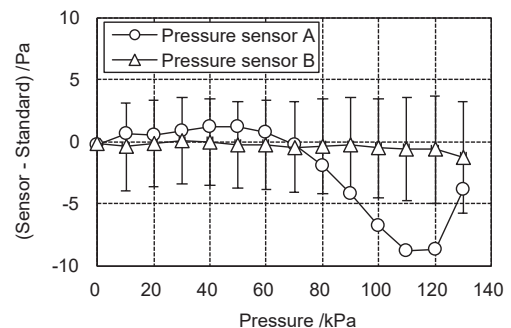


그림5 압력 센서의 교정 결과 (절대 압력 범위: 130kPa)

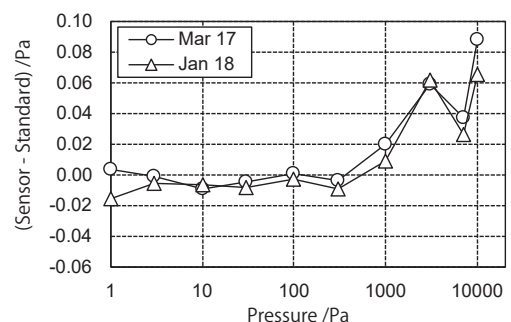


그림6 압력 센서의 장기 안정성 (차압 범위: 10kPa)

압력센서A는 Yokogawa의 MT210 (절대 압력 범위: 130kPa)을 기준으로 사용하여 조정되었습니다 (보정 없음). 압력센서B는 센서A가 그림5에 표시된 보정 결과로 보정된 후 압력센서A를 사용하여 조정되었습니다. 두 센서의 보정 곡선을 비교해 보면 센서B의 선형성이 개선되어 나타났습니다 (차압 범위: 10kPa), 이 조정 방법이 다른 범위의 선형성을 향상시키는데 효과적임을 확인할 수 있습니다.

개선된 선형성은 정확도 사양에 대해 더 큰 마진을 허용하며 시간 경과에 따른 변화가 적을 때 정확도 보증 기간을 연장할 수 있습니다. 압력센서 (차압 범위: 10kPa)의 장기적인 안정성을 확인하기 위해 2017년 3월과 2018년 1월의 교정 결과를 비교했습니다. 그림6은 그 결과를 보여줍니다. 10개월 후에도 차이는 0.04 Pa 이내였습니다. 이는 프로토타입 압력센서와 동일한 센서 캡슐을 가진 MT300의 정확도 사양을 충족합니다. 실리콘 공진센서의 우수한 장기 안정성은 “이전 모델의 특성” 섹션에 설명된 기존 MT210의 보정 결과에서도 확인할 수 있습니다. 이러한 결과를 바탕으로 MT300의 정확도 보증 기간이 1년으로 연장되었습니다.

### MT300의 특징

우리는 MT300을 조정하고 검사하기 위한 표준으로 압력 범위가 다른 9개의 압력 센서를 제조했습니다. 이 센서는 MT300 시리즈의 모든 압력 범위를 포괄합니다. 모든 센서는 위에서 설명한 방법으로 조정되었으며 NMJJ/AIST에서 보정하여 특성을 확인했습니다. 이러한 압력 센서가 장착된 MT300 프로토타입을 제조했습니다.

다음은 MT300 프로토타입의 정확도를 평가한 결과입니다.

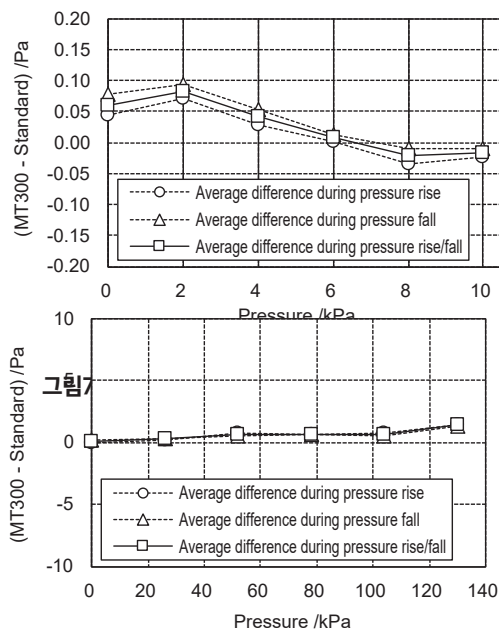


그림8 MT300 정확도 평가 결과 (절대 압력 범위: 130kPa)

그림7과 8은 MT300의 평가 결과를 보여줍니다 (차압 범위: 10kPa 및 절대 압력 범위: 130kPa). 압력 컨트롤러에서 MT300과 표준에 동시에 압력을 가했습니다. 압력이 3배 증가했다가 감소한 후 MT300과 표준의 차이가 결정되었습니다. 이 평가에서 표준은 “압력 센서 조정 방법” 섹션에 설명된 방법으로 조정된 압력 센서를 사용하였습니다.

MT300 (그림7 및 8)은 MT210 (그림2) 및 압력센서A (그림5)와 같은 비선형성을 나타내지 않았습니다. 그 특성은 “시제품 압력 센서의 특성” 섹션에서 소개한 프로토타입 압력센서의 특성과 유사하여 MT300의 선형성이 이전 모델에 비해 향상되었음을 나타냅니다. MT300의 조정 및 검사 프로세스는 압력 컨트롤러와 표준을 결합한 기기로 자동으로 진행됩니다. 본 기기는 4 개의 센서 캡슐을 동시에 조정할 수 있어 선형성이 우수한 디지털 압력계를 효율적으로 제조할 수 있습니다. 다음 섹션에서는 MT300의 조정 및 검사 프로세스에 통합되고 특히 저압 범위에서 프로세스 자동화에 크게 기여하는 동시 측정 기능 (synchronous measurement function)에 대해 설명합니다.

### 동시 측정 기능 (synchronous measurement function)

압력 측정 애플리케이션에는 다점 측정, 저압 측정 및 표준을 사용한 교정이 포함됩니다. 이러한 측정에서는 편리한 압력 컨트롤러를 사용하여 압력을 가하는 경우가 많지만 변동성(fluctuations)으로 인해 고 정밀 측정 (high-precision measurements)에 어려움이 있습니다. 특히 저압 측정에서는 제어 압력의 안정화가 어렵습니다.

또한 신호 대 잡음비가 매우 작습니다. 따라서 제어 압력과 대기압의 변동이 측정 결과에 더 큰 영향을 미칩니다.

그림9는 압력 측정 기기를 검사 또는 보정하기 위한 시스템입니다. 그림10은 표시 (indications)의 차이점을 보여줍니다. 기준 압력계와 테스트 대상 장치 (devices under test: DUT)가 서로 다른 타이밍에서 변동하는 입력 압력을 측정할 때 결과 측정 값은 서로 다릅니다.

MT210/220 시리즈에는 저압 측정을 위한 1kPa 범위 모델이 있습니다. 조정 및 검사 과정에서 1kPa의 압력을 안정적으로 생성할 수 있는 압력 컨트롤러를 확보할 수 없어서 압력 컨트롤러 대신 차압을 생성하기 위해 두 개의 압력 저울(pressure balances)을 사용했습니다. 그러나 수동으로 압력 저울(pressure balances)을 작동하여 저압을 생성하는 것은 쉽지 않았습니다. 따라서 이 프로세스는 시간이 많이 소요되었습니다.

반면 MT300은 1kPa 범위에서 조정 및 검사를 위한 압력 소스로 압력 컨트롤러를 사용하고, 제어 압력 및 대기압의 변동을 취소하는 동시 측정 기능도 사용합니다. 이러한 기능을 통해 조정 및 검사 프로세스를 자동화할 수 있습니다. 그림11은 MT300을 조정하기 위한 시스템의 연결 다이어그램을 보여줍니다.

동시 측정 기능은 압력 측정 기기에 소스 트리거 및 트리거 입력 기능을 제공하고 여러 항목의 측정 타이밍을 동기화하며 입력된 압력의 변동으로 인한 측정 값의 차이를 제거합니다. 기존 압력계에서 생성된 트리거 신호는 기준 압력계가 측정을 수행할 때 DUT1로 전송됩니다. 이는 DUT1이 기준 압력계와 동기화하여 압력을 측정한다는 것을 의미합니다. DUT1은 또한 트리거 신호를 DUT2로 전송하여 DUT1과 동일한 타이밍에 측정을 수행하여 기준 압력계와 DUT 간의 동시 측정을 수행합니다.



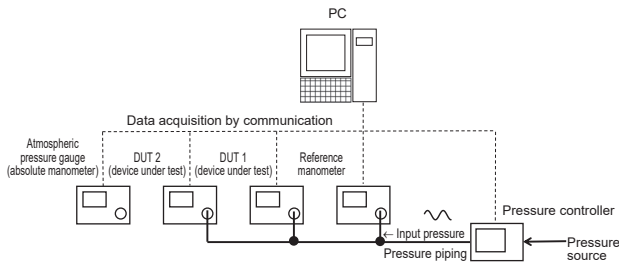


그림9 압력 측정 기기를 검사하거나 교정하기 위한 시스템

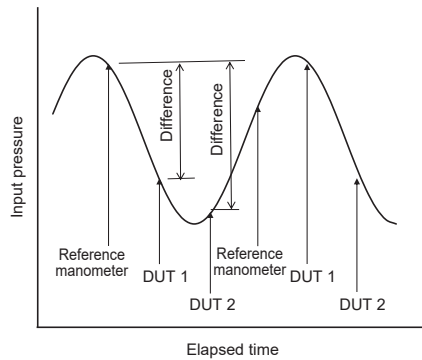


그림10 측정 타이밍에 따른 차이

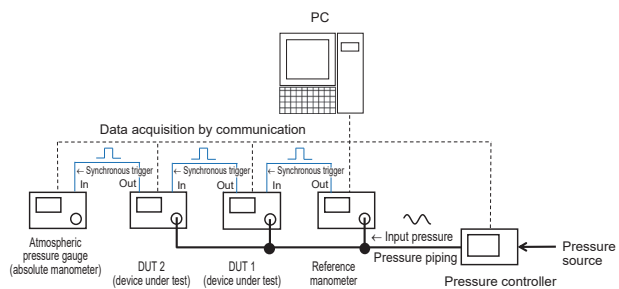


그림11 MT300 조정 시스템의 연결 다이어그램

이 기능을 확인하기 위해 MT300 3대 (그림12의 MT1~MT3)를 연결하고 동기 및 비 동기 측정을 각각 20회 수행하고 데이터를 비교했습니다. 그림13은 압력 컨트롤러에서 1kPa의 압력이 입력되었을 때의 변동을 보여주고, 그림14는 비 동기 측정 중 기준 압력계와 DUT의 차이를 보여주며, 그림15는 동기 측정 동안의 차이를 보여줍니다. 이 결과는 그림13과 같이 제어 압력이 변동하는 조건에서 비 동기 측정에 의한 최대 3.63Pa (P-P)의 차이가 발생함을 보여줍니다.

동시 측정의 경우 차이는 거의 일정하고 같은 기간에 매우 낮았습니다 (최대 0.17 Pa). 이러한 결과는 MT300의 측정 값이 기준 압력계의 측정 값과 거의 동일하다는 것을 확인시켜줍니다.

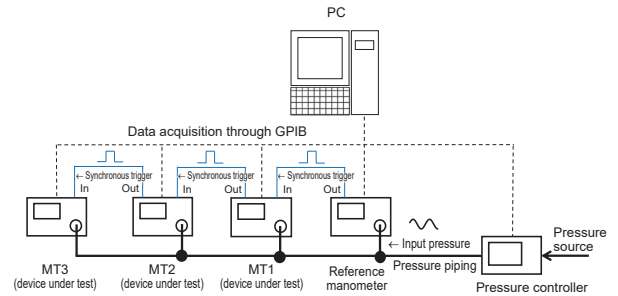


그림12 동시 측정 기능을 검증하기 위한 시스템의 연결 다이어그램

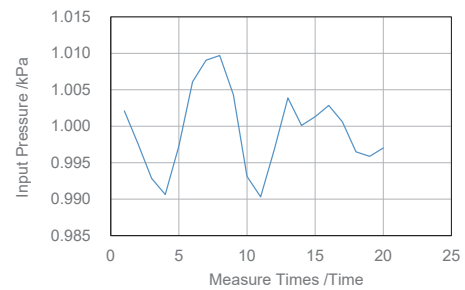


그림13 입력 압력의 변동 (1kPa)

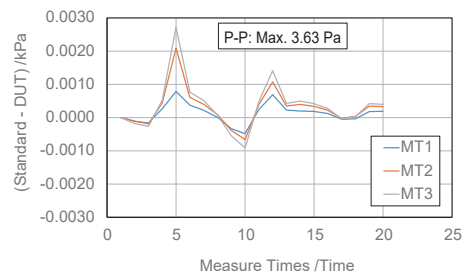


그림14 비 동기 측정 중 차이점

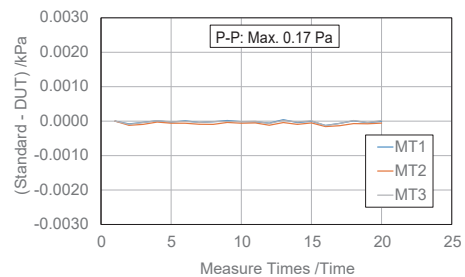


그림15 동기 측정 중 차이점

MT300에 구현된 동시 측정 기능은 다양한 애플리케이션에서 사용할 수 있습니다. 예를 들어 진공 청소기의 흡입력을 결정하려면 그림16과 같이 압력 균등화 챔버(pressure equalizing chamber)의 음압(negative pressure)과 피토투브(pitot tube)의 공기 흐름을 측정해야 합니다.

목표 압력은 계속 변동하지만, 동시 측정 기능은 측정 타이밍 차이의 영향을 제거할 수 있으므로 음압(negative pressure)과 풍량(air volume)을 높은 정밀도로 측정할 수 있습니다.

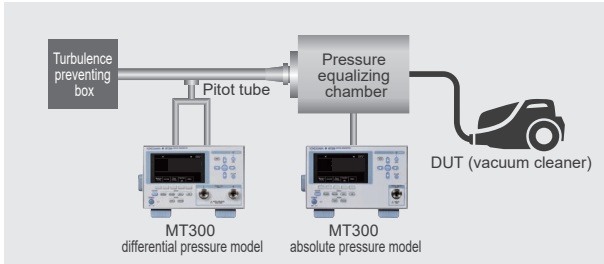


그림16 진공 청소기의 흡입력 측정

## 결론

본 백서에서는 디지털 압력계의 선형성(linearity)을 개선하기 위한 조정 방법(adjustment method)과 MT300의 동시 측정 기능(synchronous measurement function)을 설명하였습니다. 표준 모델 외에도 의료 장비 제조업체 및 실험실을 위한 커스터마이징 모델이 출시됩니다. 측정법에 따라 이러한 모델은 생체 내 압력 측정 애플리케이션을 위해 mmHg 및 cmH<sub>2</sub>O와 같은 의료 분야에 특화된 장치와 함께 사용할 수 있습니다. 특히, 최근 발생한 COVID-19의 요인으로 인해 의료기기(호흡기, 혈압계 등) 개선 및 생산 증가에 대한 요구가 높아지고 있습니다. MT300 커스터마이징 모델은 이러한 요구를 충족시킬 것으로 예상됩니다.

압력 컨트롤러를 포함한 다양한 압력 측정 기기를 지속적으로 개발하여 Yokogawa의 압력 사업을 활성화하고 사회에 공헌할 것입니다.

## 감사의 말

우리는 일본 국립계측연구소(National Metrology Institute of Japan)의 압력 및 진공 표준 그룹 (Pressure and Vacuum Standards Group), 국립 첨단산업과학기술연구소(NMIJ/AIST)의 회원들에게 압력센서의 평가 및 귀중한 조언을 포함하여 이 백서에 설명된 공동 연구에 협력해 주신 데 대해 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Tokihiko Kobata, Momoko Kojima, et al., "Improvement of reliability in pressure measurements and international mutual recognition-Incorporation of industrial digital pressure gauges to the national metrology system-" Synthesiology, Vol. 4, No. 4, 2011, pp. 209-221(in Japanese)
- (2) K. Ikeda, H. Kuwayama, et al., "Silicon Pressure Sensor Integrates Resonant Strain Gauge on Diaphragm," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 21, 1990, pp. 146-150
- (3) Yokogawa Test & Measurement Corporation, Hirokazu Nagashima, Tadahiko Iinuma, Hironori Kur ihara, and Hideki Yamada, "Measurement system, measurement method, and pressure measuring instrument," Japanese Unexamined Patent Application Publication No. 2019-200067
- (4) Momoko Kojima and Tokihiko Kobata, "Characterization of differential pressure gauges focusing on calibration curve and line pressure dependency" Proceedings of the 29th Sensing Forum, 2012, pp. 9-13 (in Japanese)
- (5) T. Kobata, M. Kojima, et al., "Final Report on Key Comparison APM. M.P-K5 in Differential Pressure from 1 Pa to 5000 Pa," Metrologia, Vol. 44, No. 1A, Technical Supplement 07001, 2006
- (6) J. Hendricks, J. Ricker, and D. Olson, "Protocol CCM -International Key Comparison in Absolute Pressure (1 Pa to 10 kPa) <<CCM. P-K4.2012>>," The BIPM key comparison database, Online, [https://www.bipm.org/kcdb/comparison/doc/download/1194/ccm.p-k4.2012\\_technical\\_protocol.pdf](https://www.bipm.org/kcdb/comparison/doc/download/1194/ccm.p-k4.2012_technical_protocol.pdf) (accessed on August 6, 2020)
- (7) H. Yamashita, H. Nagashima, H. Yamada, "Development of Pressure Transfer Standard Using a Silicon Resonant Sensor," Asia Pacific Measurement Forum on Mechanical Quantities, 2019

\* All company names, organization names, product names, and logos that appear in this paper are either trademarks or regi