

• 특집 • 정밀공학을 위한 센서 기술 동향

센서와 측정기술 변화에 따른 측정 결과의 보장 체계 발전 방향성

Strategy Direction of the Quality Assurance System of Metrology according to the Change of Sensor and Measurement Technology

조완호^{1,#}, 주성중¹, 이형규¹

Wan-Ho Cho^{1,#}, Sung Jung Joo¹, and Hyung Kew Lee¹

¹ 한국표준과학연구원 물리표준본부 (Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards & Science)
Corresponding Author / E-mail: chowanho@kriss.re.kr, TEL: +82-42-868-5872
ORCID: 0000-0001-5606-6293

KEYWORDS: Sensor (센서), Reliability (신뢰성), Measurement standard (측정표준), Traceability (소급성), Data reliability (데이터 신뢰성)

Sensors and measurements are the most basic means of collecting physical data, and the measurement results should be trusted and utilized. The management system of the future measurement network based on the next-generation sensor has limitations in responding to the current quality assurance system due to changes in the use of sensors, an increase in observation points, and changes in the method of using measurement results. Due to this reason, the measurement strategy direction should be investigated to ensure the reliability of measurement data. The basic approach can be summarized as follows: change in the viewpoint from hardware devices to measured data themselves, openness to novel type of devices, and removal of uncertainties by the process of sharing the basis of reliability through clear and efficient information exchange. In principle, the direction should be targeted for novel sensors to remove the barriers to enter the industry and market, based on the continuity with the current measurement standard system and traceability to the International System of Units.

Manuscript received: October 12, 2021 / Revised: October 26, 2021 / Accepted: October 27, 2021

1. 서론

센서는 측정하고자 하는 물리량과 관련된 정보를 인식 가능한 신호로 변환해주는 장치로 정의할 수 있다. 과거에는 신호 변환기(트랜스듀서) 중 물리량을 전기와 같은 읽을 수 있는 신호로 바꾸어주는 장치라는 의미로 통용되었으나, 반도체 및 디지털 기술이 접목되면서 보다 넓은 기능을 포함하는 통합된 모듈을 포괄하는 개념으로 확대되고 있다.

센서의 사용 목적은 결과적으로 측정 결과를 얻기 위한 것으로 이 결과값을 신뢰할 수 있어야 센서를 신뢰할 수 있다고 이야기할 수 있다. 그러므로 센서에 대한 신뢰성 보장 체계는 최종적으로 센서를 통하여 측정되는 측정 결과를 믿고 활용할 수

있도록 하는 일련의 과정들을 포함하게 된다. 이와 같은 측정 결과값에 대한 보장을 위해서는 미터 협약 이래로 측정값의 국제 동등성 확보를 목표로 하여 국제 측정 표준 체계 및 국내 보급 체계가 확립되어 시행되고 있다.

그러나 최근에 들어서 센서의 활용 범위 및 그 수의 폭발적인 증가에 의하여 기존의 측정 표준 체계를 적용하는 데에 한계를 보이고 있다. 2010년대를 전후로 하여 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 기반 센서의 보급이 활발해지면서, 2025년에는 1 조개의 센서가 활용되는 ‘Trillion Sensor’ 시대가 열릴 것이라는 전망이 제시되었으며,¹ 센서 시장은 2025년까지 연평균 11.4% 수준으로 증가할 것이라고 예측되고 있다.² 이러한 센서의 발전에 의하여 측정값을 수집하고 활용하는 방법 또한 다양한 형태로

변화하고 있으나, 기존의 측정 표준체계는 이러한 새로운 형태의 센서 산업에 직접적으로 적용하기에는 여러 가지 한계가 존재한다.

본 논문에서는 센서와 측정과 관련된 패러다임의 변화에 따라서 측정 결과에 대한 보장 체계가 어떻게 구성될 필요가 있는지를 검토하고, 변화의 방향에 대한 기본적인 개념을 제안한다.

2. 센서 신뢰성의 개념과 보장을 위한 구성

2.1 측정 결과 보증에 의한 데이터의 신뢰성

일반적으로 산업에서 통용되는 신뢰성(Reliability)은 기능적 측면에 관심을 두는 개념으로 부품, 제품 시스템 등의 제품에 대하여 요구 기간 동안 주어진 사용 환경 조건에서 설계된 기능이 유지되는 특성을 의미한다. 소재·부품 신뢰성 인증은 2001년부터 ‘소재·부품 전문기업 육성 등에 관한 특별 조치법’에 근거하여 2009년까지 법정 임의 인증 시행을 통하여 수행되었고, 2015년까지 신뢰성평가센터의 민간 인증 형태로 수행되었다. 이후 ‘부품소재기업법’의 시행과 함께 한국신뢰성인증센터를 중심으로 지정평가기관 운영의 형태로 현재에 이르고 있다.

센서의 기능은 전술한 바와 같이 원하는 물리량에 대하여 읽을 수 있는 형태의 신호를 제공하는 것이다. 그러나 센서가 기능적으로는 정상 동작하는 상태라도 그 환경이나 특성이 변할 경우 동일 물리적 자극에 대하여 출력값이 변하게 되는 것이 일반적이다. 이러한 변화에 대하여 측정 데이터의 신뢰성이 유지되고 있다고 말하기 위해서는 추가적인 정보를 필요로 하게 된다. 내구성에는 이러한 측정 결과값에 대한 신뢰성이 포함되지 않기 때문에 센서를 신뢰하기 위해서는 추가적인 요소들이 보장되어야 한다(Fig. 1).

이러한 측면을 고려하였을 때 차세대 센서에서 보장이 요구되는 요소는 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫 번째는 기능적 신뢰성으로 기존 산업에서 통상적으로 사용되어 온 범위의 신뢰성을 의미한다.

두 번째는 규격(또는 규약)에 대한 적합성이다. 종래의 아날로그 출력 센서의 경우에는 센서의 출력이 전기 신호와 같은 계측기로 읽을 수 있는 형태였고, 많은 경우 결과값에 대한 지시부가 포함되는 자립형(Standalone) 계측기기 형태로 구성되었기 때문에, 복잡한 규격을 필요로 하지 않았다. 그러나 최근 들어 개발되고 있는 디지털 센서의 경우 반도체 모듈상에서 아날로그 입력인 디지털 신호로 변환되어 출력되기 때문에 이를 물리적 신호로 복원하기 위한 정보가 필요하다. 또한 IoT 센서와 같이 통신부를 포함하는 경우, 전송과 수신에 관련된 규약을 만족하는지를 확인하여야 한다.

세 번째 보장 요소는 측정 결과의 신뢰성이다. 앞서 언급한 바와 같이 센서를 통해 얻고자 하는 것은 물리적/화학적 양에 대한 정보를 얻고자 하는 것이기 때문에, 센서 출력을 통하여 얻을 수 있는 정보에 대한 신뢰성을 보장하는 것이 필요하며, 이는 측정

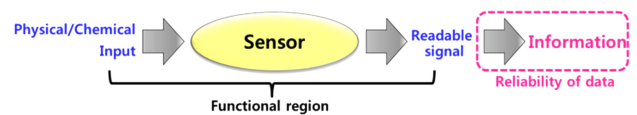


Fig. 1 Concept of the data-reliability of sensor



Fig. 2 Hierarchy of the national measurement system

결과에 대한 보장이라고 할 수 있다.

2.2 측정값 신뢰의 근거와 제도

측정값을 믿을 수 있다는 것은 그 값이 단위의 정의와 비교하여 올바르게 지시되어 있다는 것을 의미한다. 측정값에 대한 신뢰의 근거는 크게 두 가지의 특성을 통하여 제시되는데, 첫 번째는 그 값이 단위의 정의와 어떻게 연결되는지를 제시하는 소급성(Traceability)이며, 두 번째는 어느 정도 수준에서 이를 보장할 수 있는지를 제시하는 불확도(Uncertainty)이다.³

현재 측정과 관련하여 제시되고 있는 다양한 표준들은 이러한 소급성을 확보하고 올바른 값의 불확도를 평가하기 위한 절차와 요건들을 규정하고 있다. 이를 위하여 명시된 조건 하에서 측정 표준에 의해 제공된 물리량에 대한 지시값의 관계를 얻고, 지시값에서 측정 결과를 도출하는 관계를 정하는 과정을 교정(Calibration)이라고 한다. 이때 각 단계에서의 교정 과정에서는 그 불확도를 산출하여 측정값을 어느 수준에서 믿을 수 있는지를 정량적으로 제시하게 된다. 다시 말해 측정 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해서는 표준화된 방법론에 의하여 소급성을 확보하고, 불확도를 산출하여 신뢰의 정도를 제시하는 것이 필요하다.

측정값을 믿을 수 있다는 것의 구체적인 의미는 단위의 정의와의 연결성을 통하여 그 값이 국제적 동등성을 갖는다는 것이다. 이를 위하여 국제 기구를 통한 국제표준체계가 국가 차원의 국가표준체계를 수립하고 이들의 연결성을 제도적으로 유지하고 있다. Fig. 2는 국가측정체계를 도식화한 그림으로, 이와 같이 단위의 정의(SI)로부터 국가표준기관(National Metrology Institute, NMI)를 통하여 각 국가의 표준 제도와 연결되며, 최종적으로 산업 및 사회에서 활용되는 측정 결과의 신뢰성이 보장

되게 된다. 우리나라에서는 한국 인정기구 인정제도(KOLAS)를 통하여 측정을 수행하는 기관의 국가품질 인프라를 관리하고 있다.

특정 분야에서 법정 계량이나 공정 시험과 같이 공인된 자료로써 측정값이 활용되거나 각종 인증의 근거가 되기 위해서는 이 측정값을 얻는데 사용되는 장비와 측정하는 절차를 직접적으로 관리하는 제도가 운용된다. 이는 세부 분야에 따라서 상이한 부분이 있으나 기본적으로 형식승인, 초기 교정, 주기 검사의 단계를 통하여 측정 장비를 관리하고, 측정 절차 및 각종 조건들이 명시된 표준 규격을 제시하고, 이를 따라 측정이 수행되도록 제도화하고 있다.

정리하면, 현행 측정 신뢰성 보장 체계의 관점은 잘 알려진 측정시스템을 이용하여, 숙련된 측정자에 의하여, 잘 관리된 환경과 절차를 통하여 측정을 수행하는 것을 통하여, 해당 구성에서 생산되는 측정 결과를 보장하고자 하는 것이라 할 수 있다.

2.3 측정에 대한 패러다임 변화와 현행 표준의 한계

근래의 센서 활용에 의한 측정의 변화는 크게 사용자 요구, 데이터의 접근성, 경제성의 세 가지 측면을 들 수 있다(Fig. 3).

앞 절에서 이야기한 전통적인 의미에서의 측정은, 측정값을 획득하는 것 자체가 목적이라고 할 수 있으며, 이 때문에 측정 결과를 열람할 수 있는 자립형(Standalone Type) 계측 장비의 형태로 구성된다. 그러나 근래의 센서 적용의 목적은 측정 결과를 얻는 것에 그치지 않고, 어떠한 통합된 시스템의 일부로써 측정 결과를 통하여 어떠한 기능을 수행 하거나 이를 조합하여 제3의 정보를 도출하는 것을 목적으로 한다. 그러므로 잘 제어된 조건에서 절차에 따라 이루어지는 기존의 방법과 달리, 측정과 무관하게 설정된 최종 제품의 적용 환경에서 임의로 측정이 수행되게 된다.

또한 기존의 측정은 측정을 수행하는 주체가 결과를 열람하여 확인하는 것이 일반적이며, 측정이 이루어진 조건 및 절차에 대한 정보가 명시되고, 원시 데이터(Raw Data)에 접근이 가능하였다. 그러나 차세대 센서는 시스템의 일부로 적용되기 때문에, 사용자가 직접 읽는 것이 아닌 기계가 읽는 형태가 된다. 이 과정에서 많은 경우 디지털 데이터로 변환되며, 변환 과정에서의 원시데이터 등에 사용자가 직접 접근하기 어려운 경우가 많다. 더 나아가 데이터의 전송량을 줄이기 위하여 규약에 따라 부호화(Encoding)되기도 한다.

이러한 차세대 센서의 특성들은 기존의 측정 신뢰성 보장 체계에 그대로 적용되기에 곤란한 측면이 존재한다. 그러나 이러한 기술적인 부분은 시간과 자원을 투입하여 해결하는 것이 가능한 문제이며, 현실적인 가장 큰 문제는 경제성이다. 기존의 정밀측정기기의 경우 고가에 높은 부가가치의 정보를 생산하는 것을 목적으로 하며, 제품 개발 사이클도 길기 때문에, 복잡한 보장체계에 시간과 자원을 투자하는 것이 가능하였다. 그러나 최근에 생산되는 반도체 기반 센서들의 경우 개별 소자의 단가가 비교할 수 없을 만큼 저렴하고 적용 물량 역시 기하급수적으로

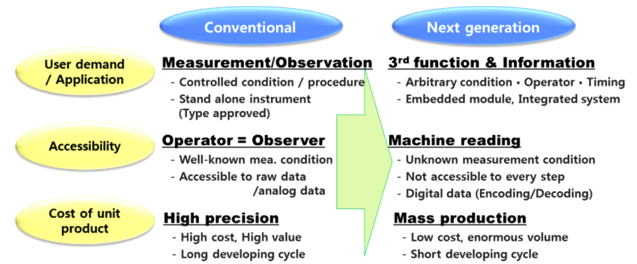


Fig. 3 Comparison of measurement by the conventional measurement instrument and the next-generation sensors

증가하고 있기 때문에, 기존의 전수 검사 기반의 접근 방법을 적용하는 것은 현실적으로 불가능하다.

3. 차세대 센서를 위한 신뢰성 보장 체계 변화

3.1 보장 대상에 대한 관점 변화

이와 같이 센서를 둘러싼 환경의 변화에서 가장 핵심적인 방향성은 보장의 대상이 장비에서 데이터로 전환될 필요가 있다는 것이다. 이전에는 장비를 활용하는 주체가 스스로 원하는 데이터를 수집하여 활용하는 방식으로 측정 데이터가 활용되어 왔기 때문에 장비에 대한 보장이 곧 결과에 대한 보장으로 이어지는 형태였다. 그러나 인공지능 및 빅데이터의 활용이 증가함에 따라서 스스로 수집하지 않은 데이터를 대량으로 활용하는 경우가 일반화되면서 스스로 수집한 데이터만을 활용하거나 일일이 이력을 확인하여 사용하는 것은 더 이상 불가능해졌다. 이 때문에 사용자가 활용하는 데이터 단위에서의 자동화된 관리 체계가 필요하다 할 수 있다. 다시 말해, 관리되지 않은 수집자에 의해 클라우드에 수집된 데이터에 대한 제3자 모니터링이 필요하며, 이는 센서 네트워크에 대한 권한 부여를 통한 관리나, 수집단에서의 품질 관리를 통한 방법이 될 수도 있다. 이를 위해서는 데이터에 대한 라벨링과 서로 데이터를 공유할 수 있는 결과 간의 정합성 판단을 위한 규약(Protocol) 설정이 필요하다.

또한 센서의 소형화 및 모듈화로 인하여, 하드웨어 구성 자체의 자유도가 크게 증가하고 있기 때문에, 기존의 형식승인에 기반한 제도화는 다양한 신기술의 도입에 진입장벽으로 작용할 수 있다. 그러므로 구체적인 하드웨어의 상세를 정의하는 기존의 하드웨어 형식승인 방식에서 데이터 교환 방식과 필수 정보 등을 규정하는 소프트웨어 규격으로 전환을 통한 유연성 확보가 필요하다. 더 나아가 센서에 대한 정보가 온라인상에서 오고갈 수 있도록 프로토콜을 구현하는 것이 필요하다.

3.2 재정의에 기반한 표준 접근성 확대

표준체계가 어떠한 형태로 변화되더라도 근본적으로 변하지 않는 부분은 국제 단위계와의 소급성이 확보되어야 한다는 점이다.

2018년 국제도량형 총회(CGPM)에서는 킬로그램, 암페어, 켈빈,

몰의 4가지 SI 기본 단위를 재정의하고, 2019년부터 이를 적용하기 시작했다.^{4,5} 이는 모든 기본 단위를 기본 상수에 의하여 정의함으로써, 기존의 인공물 기반 단위가 갖는 문제를 근본적으로 해결하고, 어느 시대에도 공유할 수 있는 변하지 않는 단위를 구현하는 것을 목표로 했다.

기본적으로 이러한 단위의 변화는 그 실제적인 양의 변화를 의미하는 것은 아니며 기존의 단위와의 연속성을 갖기 때문에 일상생활 및 상거래에서 어떠한 변화가 생기는 것은 아니다. 그렇지만 표준 보급 체계에 있어서는 다양한 가능성이 생기게 되었다. 원기에 기반한 과거의 단위 실현은 기본적으로 상위 표준기에 대한 소급성 사슬에 기반한 수직적 피라미드 구조였다. 이에 반하여 기본 상수는 시간, 공간에 관계없이 동일하다는 특성에 의하여, 이론적으로는 언제 어디서나 구현이 가능하다는 것을 의미한다.

1875년 미터 협약 제정의 의의는 폐쇄적 권력이 독점하고 있던 정확한 측정의 혜택을 누구나 누릴 수 있도록 하는 평등의 이념에 기반하고 있다. 단위의 재정의는 단위의 불변성뿐만 아니라 측정표준에의 접근성 확대라는 측면에서, 현재 또는 향후 개발되는 다양한 측정 기술에 적합한 소급성 연결 체계를 보다 유연하게 적용할 수 있는 기반이 될 수 있다.

3.3 디지털 전환과 교정 및 측정 결과의 개방성 확보

최근에 들어 산업 전반에 걸쳐 진행되고 있는 디지털 전환(Digital Transformation)은 센서 및 측정 산업에서 빠른 속도로 진행되고 있으며, 그 핵심은 측정 결과의 직/간접적 교환에 기초하고 있다. 이는 활용되는 데이터 양의 급격한 증가와 함께, 데이터의 생산자와 사용자의 거리가 점점 멀어지고, 그 수집 과정에 대한 정보 부재로 인하여 버려지는 데이터 또한 증가하게 되었고, 잘못된 데이터 사용으로 인한 부작용 문제도 대두되게 되었다.

이에 따라서 이러한 데이터 공유 전반에 대하여, 활용되는 데이터의 신뢰성을 확보하기 위한 기본적인 규약들의 필요성이 제기되었고, 이에 대한 첫 단계로 데이터의 활용도를 극대화하기 위하여 만족해야 하는 4가지 조건인 FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) 원칙이 제안되었다.⁶ 이에 대한 보급 활동으로 유럽연합에서는 연구 지원 사업인 ‘Horizon 2020’에서 FAIR 원칙에 따라 데이터를 관리하기 위한 가이드라인을 제시하였으며,⁷ 2016년 G20에서 연구분야에서 FAIR 원칙을 적용할 것을 승인하는 성명을 채택하였다. 2017년에는 독일, 네덜란드 및 프랑스는 FAIR 이니셔티브를 지원하기 위한 국제 사무소인 GO FAIR 국제 지원 및 조정 사무소를 설립하기로 합의하여 운영하고 있다.

측정 데이터와 관련해서도 이러한 디지털 전환과 데이터 공유를 위한 실제적인 정책 수립과 관련하여, 다양한 접근이 이루어지고 있다. 독일연방 물리기술 연구원(Physikalisch Technische Bundesanstalt, PTB)에서는 정책 보고서를 통하여 측정 서비스의 디지털화, 빅데이터와 같은 대량의 데이터 분석을 위한 측정,

Real quantity type extended	Components (of the real quantity type)					
	Label	Value	Unit	Date time	Expanded uncertainty	Coverage interval
Basic real with expanded measurement uncertainty	Optional	Mandatory	Mandatory	Optional	Mandatory	
Basic real with coverage interval (probabilistic-symmetric)	Optional	Mandatory	Mandatory	Optional		Mandatory

Fig. 4 Example of the metadata model of Digital-SI (Real quantity value with measurement uncertainties)⁹ (Accessed from Ref. 9 on the basis of OA)

디지털화된 데이터 교류를 위한 측정, 시뮬레이션 및 가상측정 기기를 위한 측정 등을 과제로 제안하였다.⁸

이와 관련하여 대표적인 프로젝트는 ‘Digital SI (D-SI)’와 이에 기반한 디지털 교정성적서(Digital Calibration Certificate, DCC)이다. D-SI는 유럽의 ‘SmartCom’ 프로젝트에서 개발된 측정데이터에 대한 메타데이터 모델로, 디지털 정보 교환 과정에서 측정 데이터를 전달하고 기계 인식(Machine Readable)이 가능한 형태로 데이터의 명확성과 보편성을 보장하는 것을 목적으로 한다.⁹ Fig. 4는 개발된 메타 데이터 모델의 구성 예를 보여주고 있다. 국제 도량형 위원회(Comité International des Poids et Mesures, CIPM)에서도 2019년부터 D-SI를 공식적으로 추진하기로 의결하고 전문가 그룹을 통하여 이를 구체화하는 한편, FAIR 원칙에 따른 ‘GRAND VISION’을 제시하여 목적과 해결 과제들을 제시하였다.¹⁰

이와 같은 일련의 활동들은 디지털 및 네트워크 기반 데이터 공유에서 측정 데이터의 개방성을 확보함과 동시에 각종 규약의 준비를 통하여 신뢰성을 확보하기 위한 과정이라고 할 수 있으며, 이는 각종 인증서에 포함되어 있던 정보들을 기계 인식이 가능한 형태로 구성하는 것을 목적으로 한다. 이를 통하여 이전에 개별적인 이력 관리와 문서화된 성적서 및 인증서를 통하여 유지되던 소급성 사슬과 신뢰성의 근거가 센서가 연결된 네트워크상에서 직접적인 측정 결과와 함께 전송 또는 열람이 가능하게 된다는 것이다. 즉, 기존의 측정 장비를 대상으로 하는 인증에서 개별 데이터에 대한 이력 관리로 그 형태가 전환될 것으로 예상된다.

3.4 표준 체계의 방향성과 현실적 접근

현재 측정을 위한 품질 체계는 분야에 따라서 상이한 부분이 있지만, 기본적으로는 ISO/IEC 17025¹¹에 기반한 측정 능력 확보와 앞서 언급한 형식승인, 인수시험(초기 교정), 주기 검사로 이어지는 관리 체계에 기반하고 있다. 앞 절에서 살펴본 바를 정리하면 새로운 센서/측정 환경 변화에 대응하기 위한 표준 체계의 방향성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

우선, 보장과 규정의 대상이 하드웨어(측정 장비, 디바이스)에서 소프트웨어(측정 결과, 데이터)로 전환될 필요가 있다. 기존에는 장비에 대한 정밀한 교정 과정을 통해 측정의 품질을 확

보하고, 적용분야에 적합한 하드웨어 구성 및 절차를 면밀하게 정의하여 편차를 최소화하는 방향으로 체계가 수립되어 왔다. 그러나 측정과 센서 활용의 목적이 물리량의 관측에 한정되지 않게 됨에 따라서 측정 조건과 하드웨어 구성을 일일이 규정하는 것이 불가능해졌고, 응용분야 및 하드웨어 적용 방식이 기하급수적으로 증가함에 따라서 개별적인 상황을 모두 포함하는 것도 점점 더 어려워지고 있다. 그럼에도 불구하고 적용 분야 및 관측점의 증가는 필연적으로 그 영향이 확대되는 결과로 이어지기 때문에 신뢰성의 중요성도 더욱 커지고 있다.

이러한 변화에 대응하기 위해서는 기본적으로 개방성을 확보하여 유연성을 확보하는 것이 필요하며, 이로 인하여 야기될 수 있는 불확실성을 제거하기 위하여 명확하고 효율적인 정보 교환을 통하여 신뢰성을 근거를 공유하는 과정이 필요하다. 기존에 널리 적용되던 방식인 하드웨어에 대한 상세한 규격은 새로운 센서 및 디바이스에 대한 진입 장벽으로 작용할 수 있기 때문에, 핵심적인 사양에 대한 성능 및 불확도와 관련된 등급 규정 또는 가이드라인으로 전환해 나아가야 할 필요가 있다. 개방형 규격에서 결과의 신뢰성을 보장하기 위해서는 그만큼 해당 시스템에 대한 다양한 정보들이 공유되어야 한다. 이는 디지털화에 의하여 가능한 부분이기도 하며, 상호 데이터 교환을 위한 모델이 적용된 규약 및 프로토콜을 정하여, 기계 및 제3자가 측정 결과를 신뢰할 수 있는 방식으로 전환되어야 한다.

이러한 변화에 수반되는 내용으로 교정성적서와 같은 신뢰성의 근거를 공유하는 방식이 문서화된 인증서에 기반한 보장에서 상시 열람이 가능한 전자화된 형태로 변환될 필요가 있다. 이러한 전자화된 스마트센서와 관련된 통신 규약은 2000년 전후부터 IEEE에서 표준화가 진행되었고, TEDS (Transducer Electronic Data Sheets) 형식이 제안되어 적용되었다.¹² 초기에는 센서와 신호를 읽는 장비 간의 유선 통신에 적용되었으며, 최근에는 RFID 기반 무선 통신까지 확대되었다.¹³ 이러한 통신 규약과 Digital-SI, DCC의 결합은 다양한 하드웨어에 기반한 측정의 신뢰성을 보장할 수 있는 플랫폼이 될 수 있을 것으로 예상된다.

산업 현장의 관점에서 볼 때 차세대 센서와 기존 표준 체계 간에 존재하는 가장 큰 장벽으로 볼 수 있는 것이 개별 센서들에 대한 교정 및 주기 검사이다. 현재 측정을 위한 품질 체계는 개별 장치에 대한 전수 교정 및 정기적인 품질 관리에 기반하고 있다. 그러나 ‘Trillian Sensor’ 시대가 예상되는 상황에서 이러한 전수 검사 방식은 현실적이지 않다. 또한 통신망과의 연결에 의하여 어딘가의 시스템과 통합되어 상시 모니터링을 수행하는 방식이 늘어나면서, 이를 회수하여 검사하는 방식 또한 적용이 곤란하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 품질 관리에 적용되는 샘플링 방식¹⁴의 적용, 원격/현장 교정 및 자체 진단 기술의 개발, DCC 등에 기반한 원격 관리 플랫폼 도입 등이 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 현 단계에서 전 품질 시스템을 변화하는 것은 상당한 시간이 소요될 것으로 예상되며, 관련 기술의 개발도 선결되어야 한다.

전술된 내용을 정리하면, 미래 측정 망 관리 체계 변화의 방

향을 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 하드웨어 기반의 형식 승인은 정보 교환이 가능한 통신 규약의 형태로 전환하고, 인수 시험 및 초기 교정은 등급에 따라 적용하거나 샘플링 방식을 통한 불확도 산정을 활용하는 형태를 적용할 수 있다. 주기 검사는 현장의 동작 상황에서 원격/현장에서의 실시간/상시 교정을 목표로 하여, 이를 가능하게 하는 기술적 문제를 해결하기 위한 연구가 진행되어야 한다.

이러한 과정은 기본적으로 기존의 규격이 최종적으로 보장하고자 하였던 것이 어떤 것인지에 기초하여, 다양한 형태의 센서들이 도구의 형태로 진입할 수 있게 하면서, 기존 규격의 인증 제품과 결과의 연속성을 제공할 수 있는 형태라고 할 수 있다.

4. 사례

본 절에서는 몇 가지 사례를 통하여 앞 절에서 논의된 사항들이 구체적 어떤 형태로 나타나고 있는지를 살펴보고, 이에 대하여 진행되고 있는 대응들에 관하여 살펴본다.

이러한 사례들을 통해서 공통적으로 나타나는 원칙은 신규 개발 기술 및 디바이스들에 대하여 시장과 산업에 진입할 수 있는 개방성을 확보하면서, 소급성과 기존 체계와의 연속성을 유지하는 것이라 할 수 있다.

4.1 마이크로폰과 소음계

음향 신호를 측정하기 위한 센서인 마이크로폰은 19세기부터 상용 제품이 개발되었을 만큼 오랜 역사를 가지고 있으며, 현재 까지도 다양한 형태로 활용되고 있다. 이러한 과정에서 센서의 발전에 따라 발생하는 다양한 문제들을 살펴볼 수 있는 좋은 사례라고 할 수 있다.

표준 기급 마이크로폰은 트랜스듀서 단위에서 IEC 규격으로 그 사양이 정의되어 있으며,^{15,16} 교정 방법에 관해서도 상세하게 규정되어 있다.^{17,18} 최근 들어서는 이러한 고가의 계측용 마이크로폰보다는 ECM 또는 MEMS 마이크로폰이 널리 사용되고 있으나, 이러한 마이크로폰의 경우 상기 규격을 만족하지 않기 때문에, 규격에 따른 교정이 불가능하다.

이러한 문제를 해결하기 위해 시도된 방법 중 하나는 규격에 맞는 케이스를 만들어 패키징을 하여 기존의 규격을 적용할 수 있도록 하는 것이었다.¹⁹ 그러나 이는 MEMS 마이크로폰들이 실제로 적용되는 상황에서의 특성을 대변한다고 할 수 없기 때문에, ‘평가를 위한 평가’에 지나지 않는다. 이 때문에 범용성을 갖는 새로운 일차 표준을 통하여 소급성을 보급하기 위한 연구가 제안되고 있다.²⁰⁻²² 그러나 이러한 방법들은 근본적으로 많은 자원을 필요로 하는 고가의 시험이 개별적으로 적용되어야 하기 때문에, 경제성 측면을 고려할 때, 일반적으로 적용할 수 있는 방법이라고 할 수 없다. 이 때문에 잔향실 조건을 활용한 벌크 교정 방법²³ 등이 제안되고 있으나, 아직은 합의된 명확한 해결책을 도출하지는 못하고 있는 상황이다.

공정시험이나 규격시험에 사용하는 경우 소음계를 이용하도록 되어 있으며, 소음계에 대한 형식 역시 IEC 규격으로 정의되어 있다.^{24,25} 실제 제품이나 환경에 대한 인증된 측정 결과를 보고 하기 위해서는 이러한 규격을 만족하는 소음계가 반드시 적용 될 필요가 있다.

최근 들어 스마트폰에서 사용할 수 있는 소음계 앱들이 개발 되어 보급되고 있다. 그러나 이러한 앱들은 당연히 소음계의 형식을 만족할 수 없으며, 그 측정 결과도 큰 편차를 보인다. 미국 국립 산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 스마트폰 앱 형태의 소음 측정을 적극적으로 활용함으로써 측정 빈도를 높이고, 사각지대를 줄일 수 있을 것으로 기대하고, 소음계 앱의 유효성을 확인하기 위하여 다양한 앱에 대하여 기준 소음계와 실측 비교를 수행하였다. 그러나 192개의 앱을 테스트한 결과 기능적으로 소음계로 사용할 수 있는 앱은 10개, 그 중 기준 소음계 값과 ± 2 dB 이내의 차이를 보인 것은 4개에 불과하였으며, 크기는 10 dB 이상의 차이를 보이고, 그 차이도 신호 특성에 따라서 달라졌다.²⁶ 이에 대한 후속 연구로 외부 마이크로폰과 교정을 적용하여 이 차이를 ± 1 dB까지 줄일 수 있음을 보고하였다.²⁷ 이러한 연구 결과를 바탕으로 앱 제조사를 선정하여 자체적으로 ‘NIOSH Sound Level Meter App’을 개발하여 공개하였으며, 전용의 외부 마이크로폰을 사용하였을 경우 IEC 61672-1의 Class 2의 요구 조건을 만족한다고 설명하고 있으며, 이에 대한 교정 과정을 공개하였다.²⁸

이러한 사례 외에도 DYNAMAP 등의 환경 소음 모니터링 프로젝트에서 다양한 형태의 모니터링 디바이스가 개발되고 있으며, 이를 통하여 소음 환경의 모니터링 지점을 극대화하고자 하는 노력이 이어지고 있다.^{29,30} 국내에서도 ‘제4차 소음진동관리 종합계획(2021-2025)’을 통하여 사물인터넷 기반 소음 측정 기기의 도입을 추진하고 있다. 그러나 이러한 장비들은 소음계의 기능을 수행하고자 하나, 여전히 엄밀한 의미의 소음계가 아니라는 문제가 존재한다.³¹

이러한 마이크로폰과 소음계의 사례는 다양한 센서 산업이 겪고 있는 문제들을 압축하여 보여주고 있다. 기존에는 명확하게 정비된 표준 체계를 통하여 정확한 측정 결과를 보장해 왔으나, 센서의 급격한 발달과 보급의 확대가 기존표준체계의 한계를 보여주게 되고, 이를 해결하기 위한 다양한 기술들이 제안되고 있으나, 기존 규격과의 정합성 문제로 인하여 벽을 넘지 못하여, 제한적인 조건에서 일반 기급 사용에 한정되고 있다. 또한 소음계 앱의 사례에서도 볼 수 있듯이, 관리되지 않은 상태에서 무분별하게 보급될 경우 막대한 혼란을 야기할 수 있다.

4.2 생체 정보 측정 센서와 비의료기기 인증

모바일 및 웨어러블 디바이스의 보급이 증가함에 따라서 사용자의 생체 상태를 모니터링할 수 있는 센서들에 대한 접근성이 용이해지고, 스마트폰 앱을 통하여 다양한 기능을 수행할 수 있도록 개발되고 있다. 이러한 앱들 중에는 의료용 목적으로 사용

될 수 있는 것들이 포함되어 있으며, 이러한 의료 목적 앱의 경우에는 의학적 오류와 같은 잠재적 위험요소를 사전에 예방 관리할 필요가 있다. 이에 식품의약품 안전처에서는 ‘모바일 의료용 앱 안전관리지침(식품의약품 안전처, 2020년 개정)’을 제정하고, 관리 대상의 지정 및 허가, 사후관리 방안을 제시하였다.

기본적으로 스마트 모바일 기기에 탑재된 센서와 이에 기반한 의료용 앱은 제품의 기술적 특성, 사용 목적과 사용 시 인체에 미치는 잠재적 위해성 등을 고려하여 품목과 등급을 분류하고, 이에 따른 허가/신고 절차를 따르도록 하고 있다. 추가로 플랫폼의 특성을 고려하여 제품의 안전성과 성능 및 사이버 보안 등이 확보되어야 하고, 측정된 환자 정보에 대한 보안이 요구된다. 기본적으로 전기를 사용하는 의료기기는 식약청 고시 ‘의료기기 전기·기계적 안전에 관한 공통기준규격’과 ‘의료기기 전자파 안전에 관한 공통기준규격’ 또는 동등 이상의 국제규격에 따른 안전성이 확보되어야 한다.

모바일 플랫폼 기기가 허가 대상에서 제외되는 경우에는 모바일 플랫폼과 관련된 법령의 안전성 검증으로 대체할 수 있다. 그러나 별도 센서 등이 사용되는 경우에는 항목에 따른 안전성 입증 자료 제출을 요구할 수 있도록 규정하고 있다. 이외에도 소프트웨어로서의 성능 요구사항 및 임상자료 요구와 관련된 부분도 기본적으로 일반 의료기기에 적용되는 내용들을 포괄하는 방식을 취하고 있으며, 이는 제조·유통·사후관리에 있어서도 원칙적으로 유사하다. 위와 같은 지침은 기본적으로 모바일 앱을 간접적인 참고 장비로 보는 것이 아니라 실제 기존 장비와 동등한 위치로 판단하여 안전성을 확보하는 것을 우선하고 있음을 의미하며, ‘의료기기법’과 관련 시행령·시행규칙·고시를 준용하는 것으로 이해할 수 있다. 식약처에서는 모바일 의료용 앱과 관련하여 다양한 가이드라인 및 참고 자료들을 제공하고 있다.

좀더 구체적인 사례로 청력 보조 기구인 PSAP (Personal Sound Amplification Product)의 사례를 살펴 볼 수 있다. PSAP는 국내에서는 ‘음성증폭기’ 등으로도 불리며, 귀에 꼽은 상태에서 들려오는 소리의 크기를 증폭하여주는 장치를 의미한다. 그 용도 측면에서 볼 때, PSAP는 보청기와 동일한 기능을 수행하기 때문에 보청기의 대체재로써 알려지게 되었다. 그러나 PSAP는 의료기 인증을 받지 않은 제품이기 때문에 청각 장애인에게 보청기로 판매할 수 없다. OTC (Over the Counter) 보청기는 PSAP와 유사한 개념이지만, 의료기 인증을 받고 처방을 받지 않는 일반 의약품으로 판매하고자 하는 시도이다.

보청기는 기본적으로 의료기기로써 처방을 받아 청각사에 의하여 개인의 청각 손실 특성에 맞추어 조정(Fitting)을 하게 되며, 이러한 과정에서 시간과 전문 인력이 투입되기 때문에 이러한 부분이 가격 상승 요인이 된다. 그러나 PSAP의 경우에는 의료기기가 아니기 때문에 개인이 별도의 검사 없이 구매하는 것이 가능하기 때문에 가격이 저렴하고 접근이 용이한 장점이 있다. OTC 보청기의 경우도 일반 의약품 인증을 위한 부분이 추가되지만 처방 및 조정과 관련된 부분에 비용이 발생하지 않기 때문에 상대적으로 저렴하게 유통될 수 있다.

그러나 PSAP의 경우 의료기기인 보청기의 기능을 수행하고 있기 때문에 이 부분에서 논란이 되고 있다. 기본적으로 의료기기로써의 안전 인증을 받지 않은 상태에서 사용되고 있기 때문에 문제가 될 수 있으며, 특히 소리의 증폭비를 임의로 조절하기 때문에 청력 손상을 야기할 수 있는 레벨을 가할 수 있는 등의 문제가 존재한다. 그러나 이러한 문제들은 일반적인 휴대용 음향기기에서도 발생할 수 있는 문제이기 때문에 별도의 규제 대상으로 하는 데에도 한계가 있다. OTC 보청기의 경우에도 조정을 개인에게 맡긴다는 점에서 동일한 문제점을 내포하고 있다. 또한 보청기의 경우 개인간 청력 특성 차이가 크고 장치에 익숙해지는데에도 많은 시간이 요구되기 때문에 전문가에 의한 조정 과정이 매우 중요한 요소로 인식되고 있다. 따라서 조정 과정을 개인에게 맡기는 OTC 보청기의 한계와 부작용을 지적하는 의견도 많이 제기되고 있다. 이러한 문제들로 인하여 기존의 보청기 관련 종사자들과도 갈등이 이어지고 있다.

미국의 경우 약 4,800만명 가량의 난청자가 있다고 알려져 있으나, 보청기는 노인의료보험 및 대부분의 민간의료보험에서 지원을 받을 수 없기 때문에 이를 해결하기 위한 방안의 하나로 OTC 보청기가 검토되어 왔다. 이에 FDA에서는 2016년부터 OTC 보청기 관련 검토를 시작하였으며, 2017년에 상용화 확대를 허용하는 법안(OTC Hearing Aid Act of 2017)을 통과시키면서 유예 기간을 설정하고, 이에 대한 가이드라인을 제시하도록 하였다. 이에 기반 하여 2018년 8월에 OTC 보청기에 대한 규제 권고에 관한 관련 단체들의 합의문을 도출하고 이에 기반한 법제화를 추진하고 있다.³²

4.3 법정계량 영역에서의 저가형센서 적용

앞서 소개된 예제들의 경우 아직 스마트센서에 관련된 법제화가 적극적으로 이루어지지 않은 사례들이다. 그러나 사회적으로 시급한 문제들의 경우는 상대적으로 이와 관련된 사회적 합의를 도출하기 용이하다는 점 때문에 빠르게 법제도가 정비되고 인증 체계가 마련되는 사례들도 있다.

이러한 사례들은 기본적으로 사회적 관심이 높은 사안에 대하여, 이에 효과적으로 대응할 수 있는 저가형 시스템을 보급하고 적극적으로 활용하는 형태이다. 저가형 센서들은 기존 관측 장비의 요구 조건에 비하여 성능, 안정성, 기능 등 모든 면에서 떨어지지만, 기존의 장비를 대체하는 것이 목적이 아니라 새로운 카테고리로 적용하여 보다 많은 정보를 효과적으로 수집하는 것이 목적이기 때문에, 처음부터 기존 장비와 동등한 사양을 갖추어야 할 필요성이 없는 경우라고 할 수 있다.

4.3.1 미세먼지 간이 측정 성능 인증

근래 수년간 미세먼지와 관련된 문제들이 대두되고 국민적인 관심이 커짐에 따라서, 이에 대한 측정 수요도 비약적으로 증가하였다. 이는 국가 측정망에 한정되지 않고 민간에서 자체적으로 상시 모니터링을 하고자 하는 수요로 이어졌으며, 이를 위한 저가·소형의 간이 측정기들의 보급이 크게 늘어나게 되었다. 그

러나 이러한 간이 측정기들의 경우 거의 모두 광산란 방식을 적용하고 있는데, 이 방법은 근본적으로 기상 환경 조건에 따른 오차가 클 수밖에 없는 한계가 있으며, 정해진 절차에 따라서 측정되는 것이 아니기 때문에, 그에 의한 영향도 필연적으로 포함되게 된다. 이로 인하여 신뢰할 수 없는 측정치들이 공유되어 혼란을 일으키고, 국가 측정망에 의한 값과의 차이에 따른 사회적 불신이 생기는 문제가 발생하게 되었다.

이에 환경부에서는 간이측정기를 대상으로 하는 새로운 등급 체계를 제안하고 평가 방법을 규정하였으며, 이를 수행할 수 있는 인증 체계를 수립하여 대응하였다(미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법, 법률 제17177호, 2020. 3. 31., 일부 개정).

기존의 정밀 측정을 위한 형식승인 대상 장비 등급인 Class I, II 기준 측정기 이외에 간이 측정기에 대하여 4개의 등급을 설정하고, 3등급 성능을 만족할지 못할 경우 제작·수입할 수 없도록 하였다. 성능인증평가는 실내 시험실에서의 시험 체임버 평가와 실외 시험동에서의 등가성 평가로 구분하며, 기본적으로는 형식승인을 받은 기준 시스템과의 비교를 통하여 이루어진다. 상세한 시험 항목 및 절차 역시 고시에 규정하고 있다(미세먼지 간이측정기 성능인증 등에 관한 고시, 국립환경과학원고시 제 2019-31호, 2019. 8. 23., 일부개정, 별표 4, 별표 5). 상기 고시에는 인증 절차를 수행하기 위한 인증기관의 요건 및 평가 방법들도 규정하고 있으며, 인증제 시행 이전에 인증기관 지정을 추진·완료하여 제도상의 공백이 발생하지 않도록 한 바 있다.

4.3.2 저가형 지진 관측장비

최근 들어 국내에서 관심이 높아지고 있는 또 다른 측정 관련 이슈로는 지진 관련 모니터링을 들 수 있다. 2011년 일본 동일본 대지진 이후 국내외 한반도 주변 지역에서의 지진 활동 증가로 지진 관측에 대한 관심이 높아지게 되었다. 과거에는 고가의 지진 관측 장비를 통하여 정해진 관측소에서 지진 관측을 수행하였으나, ‘제1차 지진·지진해일·화산의 관측 및 정보에 관한 기본계획(2017-2021)’을 통하여 관측소 확충 및 지진·지진 해일 감시 역량 강화를 통하여 지진 조기 경보 가능 지역을 90%까지 확대하고자 하였다. 이러한 과정에서 MEMS 및 수진기(Geophone) 등 다양한 센서 기술을 활용한 지진계의 개발로 목적에 따른 계측 혹은 관측 기술이 다양화되고 있다.

이러한 저가형 센서 활용을 위한 대응으로 미국과 대만의 사례를 살펴볼 수 있다. 미 지질 조사국에서는 관측소 조건과 관측 범위에 따라서 적용되는 센서의 특성과 사양을 정의하고, 3개의 주요 등급(Class A, B, C)을 정하여 운영해 왔다.³³ 이 중에서 가장 낮은 사양을 필요로 하는 구조 응답 모니터링용 등급(Class C)에 MEMS 기반 저가형 센서 적용이 가능할 것이라고 보고, 이에 대한 성능 검증 및 시험 방법 등을 검토하였다.³⁴ 이에 비하여 대만에서는 관측망에 MEMS 센서를 도입하기 위하여 센서의 개발, 통신 규약 등을 개발하는 프로젝트를 통하여 전체 플랫폼을 구축하는 방식을 취하였다.³⁵

지진의 경우에는 영향을 주고 받는 규모에 비해서는 관측망

에 관련된 당사자가 제한적이라는 특수성 때문에, 공급자(제조사)와 사용자(관측망 운영자) 간의 품질 운영 체계가 매우 폐쇄적이었던 특성이 있다. 그러나 관측 지점의 확대와 국가간 연계의 필요성 증가, 새로운 센서 기반의 장비 도입 필요성 제기 등으로 개방된 일반적인 표준 체계로의 전환이 시도되고 있다. 이와 같이 데이터와 측정 체계의 개방성 확보는 분야를 가리지 않고 확대될 것으로 전망된다.

5. 결론

센서와 이에 기반한 측정은 물리적 데이터 수집의 가장 기초적인 활동이며, 최종적으로 수집되는 측정 결과를 믿고 활용할 수 있어야 한다. 차세대 센서에 기반한 미래 측정망의 관리 체계는 센서의 활용 형태 변화, 관측점의 증가, 측정 결과 활용 방식의 변화 등에 의하여 기존의 전수 조사 방식의 품질 시스템으로는 대응에 한계가 있으며, 새로운 형태의 보장 체계를 필요로 하게 되었다.

기본적인 접근 방향은 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 보장 대상을 측정 장비에서 측정 데이터로 전환하고, 디바이스에 대한 개방성을 확보함과 동시에, 이로 인하여 야기될 수 있는 불확실성을 제거하기 위한 명확하고 효율적인 정보 교환을 통하여 신뢰성 근거를 공유하는 과정을 구성할 필요가 있다. 하드웨어 기반의 형식승인은 정보 교환이 가능한 통신 규약의 형태로 전환하고, 인수 시험 및 초기 교정은 등급에 따라 적용하거나 샘플링 방식을 통한 불확도 산정을 활용하는 형태로 적용할 수 있다. 주기 검사는 현장 동작상황에서 원격/현장에서의 실시간/상시 교정을 목표로 하여, 이를 가능하게 하는 기술적 문제를 해결해야 한다.

이러한 과정은 기본적으로 기존의 규격이 최종적으로 보장하고자 하였던 것이 어떤 것인지에 기초하여, 다양한 형태의 센서들이 도구의 형태로 진입할 수 있게 하면서, 기존 규격의 인증 제품과 결과의 연속성을 제공할 수 있는 형태라고 할 수 있다.

본 논문에서는 몇 가지 현실적인 구체적인 문제가 발생하고 있는 사례들을 살펴보았다. 이러한 사례들을 통해서 공통적으로 나타나는 원칙은 신규 개발 기술 및 디바이스들에 대하여 시장과 산업에 진입할 수 있는 개방성을 확보 하면서 소급성과 기존 체계와의 연속성을 유지하는 것에 초점이 맞추어져야 한다는 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 산업통상자원부 및 KEIT의 시장선도형 차세대센서기술개발사업(No. 20017268, 차세대 센서 R&D 상용화 지원 및 신뢰성 기술 개발) 및 2021년도 한국표준과학연구원 물리측정 표준기술 고도화 재원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIS-

2021-GP2021-0002).

REFERENCES

1. Bryzek, J., "Emergence of Trillion Sensors Movement," Proc. of the 22nd IEEE MEMS Meeting, 2014.
2. BCC Research, "Sensors: Technologies and Global Markets," Market Research Report IAS006L, BCC Publishing, 2020.
3. ISO/IEC GUIDE 98-3:2008, "Uncertainty of Measurement-Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)," 2008.
4. Weights, I. B. O., Measures, Taylor, B. N., and Thompson, A., "The International System of Units (SI)," US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2019.
5. Lee, H. S., "Redefinition of the SI Base Units: Its Background and Principle," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 365-373, 2018.
6. Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., et al., "The Fair Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship," Scientific Data, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9, 2016.
7. European Commission, "H2020 Programme Guidelines on FAIR Data Management in Horizon 2020," https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/grants_manual/hi/oa_pilot/h2020-hi-oa-data-mgt_en.pdf (Accessed 16 NOVEMBER 2021)
8. PTB, "Metrology for the Digitalization of the Economy and Society," https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/digitalisierung/PTB-Digitalisierungsstudie_2018_EN.pdf (Accessed 16 NOVEMBER 2021)
9. SmatCom, "Digital System of Units," https://www.ptb.de/empir2018/fileadmin/documents/empir/SmartCom/documents_for_download/Digital_System_of_Units_D-SI_2019-11-04_UK_NPL_SmatCom.pdf (Accessed 16 NOVEMBER 2021)
10. CIPM Task Group on the Digital-SI, "Draft of the Grand Vision-Transforming the International System of Units for a Digital World," BIPM, 2020.
11. ISO/IEC 17025, "General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories," 2017.
12. IEEE 1451.0-2007, "IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats," 2007.
13. IEEE 1451.7-2010, "IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Transducers to Radio Frequency Identification (RFID) Systems Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet Formats," 2010.
14. ISO 24153:2009, "Random Sampling and Randomization

- Procedures,” 2009.
15. IEC 61094-1:2000, “Measurement Microphones-Part 1: Specifications for Laboratory Standard Microphones,” 2000.
 16. IEC 61094-4:1995, “Measurement Microphones-Part 4: Specifications for Working Standard Microphones,” 1995.
 17. IEC 61094-2:2009, “Measurement Microphones-Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique,” 2009.
 18. IEC 61094-5:2016, “Measurement Microphones-Part 5: Methods for Pressure Calibration of Working Standard Microphones by Comparison,” 2016.
 19. Wagner, R. P. and Fick, S. E., “Pressure Reciprocity Calibration of a MEMS Microphone,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 142, No. 3, pp. EL251-EL257, 2017.
 20. Koukoulas, T. and Piper, B., “Towards Direct Realisation of the SI Unit of Sound Pressure in the Audible Hearing Range based on Optical Free-Field Acoustic Particle Measurements,” *Applied Physics Letters*, Vol. 106, No. 16, Paper No. 164101, 2015.
 21. Cho, W.-H. and Koukoulas, T., “Signal Processing Considerations on the Optical Measurement of Acoustic Particle Velocities in Free-Field Conditions,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 69, No. 7, pp. 4021-4032, 2019.
 22. Cho, W.-H. and Koukoulas, T., “Traceability Chain for Acoustic Sensors based on the Direct Definition of the Acoustic Pascal by Optical Method,” *Proc. of the IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*, pp. 532-536, 2020.
 23. Chan, M., Baker, C., Simmons, D., and Goldsmith, M., “Bulk Calibration Method of Micro-Electromechanical System (MEMS) Microphones,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 150, No. 2, pp. 1402-1410, 2021.
 24. IEC 61672-1:2013, “Electroacoustics-Sound Level Meters, Part 1 Specifications, International Organization for Standardization,” 2013.
 25. IEC 61672-2:2013, “Electroacoustics-Sound Level Meters, Part 2 Pattern Evaluation Tests, International Organization for Standardization,” 2013.
 26. Kardous, C. A. and Shaw, P. B., “Evaluation of Smartphone Sound Measurement Applications,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 135, No. 4, pp. EL186-EL192, 2014.
 27. Kardous, C. A. and Shaw, P. B., “Evaluation of Smartphone Sound Measurement Applications (APPS) Using External Microphones-A Follow-Up Study,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140, No. 4, pp. EL327-EL333, 2016.
 28. Celestina, M., Hrovat, J., and Kardous, C. A., “Smartphone-Based Sound Level Measurement APPS: Evaluation of Compliance with International Sound Level Meter Standards,” *Applied Acoustics*, Vol. 139, pp. 119-128, 2018.
 29. Sevillano, X., Socoró, J. C., Alías, F., Bellucci, P., Peruzzi, L., et al., “DYNAMAP-Development of Low Cost Sensors Networks for Real Time Noise Mapping,” *Noise Mapping*, Vol. 3, No. 1, pp. 172-189, 2016.
 30. Zambon, G., Benocci, R., Bisceglie, A., Roman, H. E., and Bellucci, P., “The LIFE DYNAMAP Project: Towards a Procedure for Dynamic Noise Mapping in Urban Areas,” *Applied Acoustics*, Vol. 124, pp. 52-60, 2017.
 31. Technical Contribution, “A Guide to Sound Level Meters,” <https://www.ioa.org.uk/sites/default/files/A%20Guide%20to%20Sound%20Level%20Meters.pdf> (Accessed 16 NOBEMBER 2021)
 32. ASHA, “Regulatory Recommendations for OTC Hearing: Aids: Safety & Effectiveness,” <https://www.asha.org/siteassets/uploadedfiles/consensus-paper-from-hearing-care-associations.pdf> (Accessed 16 NOBEMBER 2021)
 33. United States Geological Survey, “Instrumentation Guidelines for the Advanced National Seismic System,” https://pubs.usgs.gov/of/2008/1262/pdf/OF08-1262_508.pdf (Accessed 16 NOBEMBER 2021)
 34. Evans, J., Allen, R. M., Chung, A., Cochran, E., Guy, R., et al., “Performance of Several Low-Cost Accelerometers,” *Seismological Research Letters*, Vol. 85, No. 1, pp. 147-158, 2014.
 35. Wu, Y. M., Liang, W. T., Mittal, H., Chao, W. A., Lin, C. H., et al., “Performance of a Low-Cost Earthquake Early Warning System (*P*-Alert) during the 2016 *M_L* 6.4 Meinong (Taiwan) Earthquake,” *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No. 5, pp. 1050-1059, 2016.



Wan-Ho Cho

Principal Research Scientist in the Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards & Science. His research interests are acoustics and metrology.
E-mail: chowanho@kriss.re.kr



Sung Jung Joo

Principal Research Scientist in the Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards & Science. His research interest is electrical metrology.
E-mail: joosj@kriss.re.kr



Hyung Kew Lee

Principal Research Scientist in the Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards & Science. His research interest is electrical metrology.
E-mail: hyungkew.lee@kriss.re.kr