

불확도 요인 분석을 통한 교정 시스템 적합성 평가 및 시험기준 결정 방안

김홍탁* · 김부일**

Calibration System Suitability Evaluation and Test Limits Determination Method through Factor Analysis of Uncertainty

Hong-Tark Kim* · Boo-Il Kim**

요 약

정밀측정장비의 성능을 진단 및 확인하는 교정 시스템은 교정결과의 신뢰성 확보를 위해 국제규격의 요구조건을 준수함으로써 교정결과의 오판정 위험을 최소화하고 있다. 본 논문에서는 교정기관에서 고성능의 장비를 획득 및 운영하기에 불가능한 경우 불확도 요인 분석을 통한 교정 시스템 적합성 평가 방안과 가드밴드 기법을 이용하여 성능기준을 대체하는 최적화된 시험기준 산출모형을 제안한다. 제안된 방법은 교정 시스템의 정량적인 평가기준과 국제규격에서 요구되는 허위수락위험 확률 기준을 충족을 위한 최적화된 시험기준을 제공한다.

ABSTRACT

A calibration system for diagnosing and confirming the performance of precision measuring instruments minimizes the risk of misjudgment of calibration resulted by complying with international standard requirements in order to ensure the reliability of calibration results. This paper uses a proposed calibration system suitability assessment and a guard-band technique through an analysis of uncertainty factors when it is impossible to acquire and operate high-performance equipment at a calibration laboratory, and proposes an optimized test limit output model substituting performance standards. The proposed method provides an optimized test standard to meet the quantitative evaluation criteria of the calibration system and the probability of false acceptance risk required by international standards.

키워드

Calibration System, Compatibility, Guard Band, Test Limit, Probability of False Acceptance
교정 시스템, 적합성, 가드밴드, 시험 기준, 허위 수락 위험 확률

1. 서 론

정밀측정장비의 성능을 진단 및 확인하는 교정 시스템은 국제규격의 일반적인 요구조건인 교정대상 기기와 교정 시스템의 성능을 준수함으로써 요구기준에

충족되지 못한 정밀측정장비가 사용되어 발생하는 위험을 최소화하고 있다[1]. 그러나 산업의 발전에 따라 정밀측정장비의 성능도 높아지고 있으며, 이에 따라 성능확인을 위한 교정 시스템도 고성능의 장비가 요구되지만 교정기관에서 요구되는 장비를 획득 및 운

* 부경대학교 무기체계공학과(tagi9644@pukyong.ac.kr)

** 교신저자 : 부경대학교 전기전자소프트웨어공학과

• 접수일 : 2019. 09. 16

• 수정완료일 : 2019. 10. 31

• 게재확정일 : 2019. 12. 15

• Received : Sep. 16, 2019, Revised : Oct. 31, 2019, Accepted : Dec. 15, 2019

• Corresponding Author : Boo-Il Kim

Dept. of Electrical, Electronics and Software Engineering,

Pukyong National University

Email : bikim@pknu.ac.kr

영하기에는 현실적, 경제적으로도 불가능한 경우가 발생한다. 그러나 국제규격에서 권고하는 성능의 교정 시스템을 사용하지 못하면 교정결과의 불확실성이 증가되며, 이는 교정이 완료된 정밀측정장비가 정상적인 성능을 발휘하지 못하는 위험을 높인다.

발생하는 교정결과의 불확실성을 감소시키기 위해 교정 시스템과 정밀측정장비의 성능기준을 제시하거나 다양한 방법으로 성능기준(SL, Specification Limit)보다 높게 시험기준(TL, Test Limit)을 사용하는 가드밴드 기법 등이 연구되고 있다[2]. 그러나 이러한 연구들은 교정 시스템의 실제 성능보다 장비 제작사에서 발표한 설계 성능이나 교정 성적서의 최근 성능만이 사용되므로 사용기간 동안의 발생한 성능변화(열화, 안전성, 경년변화 등)로 인한 불확도 요인들은 누락되어 있다.

교정 시스템을 사용하기 전 교정지원 적합성을 판단하기 위해 각각의 영향성을 이해하고 고려가 필요한 불확도 요인들의 식별 및 이를 반영한 성능 판정 기법과 국제규격에서 권고하는 성능 허용한계를 초과한 정밀측정장비가 정상으로 판정되는 위험의 최소화 방안이 필요하다.

이에 본 연구에서는 교정기관에서 보유한 시스템의 신뢰성과 재현성을 평가하여 사용 적합성을 판단하고 이와 연계해서 교정시의 불확도 요인들을 산출하여 성능 허용한계를 초과된 장비가 정상으로 판정되는 위험도 감소를 위해 별도의 최적화된 성능판정 기준 산출 방안을 제시하였다.

II. 교정 시스템 요구 성능

품질 표준문서(MIL-STD-45662)에서는 교정결과의 신뢰성 확보를 위해 정밀측정장비의 정확도와 측정표준(교정 시스템)의 정확도를 비교하는 시험 정확도 비율(TAR, Test Accuracy Ratio)을 사용한다(식 (1)).

이 방법은 많은 교정기관에서 오랫동안 사용되어왔지만 정밀측정장비와 교정 시스템의 성능 외에 교정 과정에서 발생할 수 있는 다른 오류의 원인을 고려하지 않는다.

일반적으로 교정대상 기기(UUT, Unit Under Test)를 측정표준(STD, Standard)으로 나눈 시험정확

도 비율이 4:1, 즉 측정표준이 4배의 성능을 충족하면 교정 시스템은 요구 성능을 만족하는 것으로 간주되지만 모든 교정환경에서 이 조건을 준수하기는 불가능하다[3].

$$TAR = \frac{UUT_{Accuracy}}{STD_{Accuracy}} \quad (1)$$

교정작업시 발생하는 오류는 장비의 성능만이 아니라 환경 변화, 교정절차의 진행시 사용된 부수장비, 기술자 오류 등과 같은 다양한 원인이 존재하며 이러한 원인들을 식별 및 정량화한 불확도 요인들을 합성 표준 불확도(combined standard uncertainty)로 계산한 후 이 결과를 95 % 신뢰수준으로 추정하여 확장불확도(expanded measurement uncertainty)로 사용한다.

‘교정 실험실 측정 및 테스트 장비’에 대한 품질 표준문서인 ANSI/NCSL Z540-1, 3[4-6]에서는 교정 시스템의 최소 요구조건으로 정밀측정장비의 성능 허용오차가 95% 이내에 존재확률을 확보하기 위해 정밀측정장비의 측정 및 입력 요구 사항의 불확도(UUT uncertainty)를 교정 시스템의 요구 불확도(STD uncertainty)로 나눈 결과(식 (2))인 시험 불확도 비율(TUR, Test Uncertainty Ratio)은 4:1이상으로 규정하고 있다.

품질표준문서에서는 시험 불확도 비율 요구조건 4:1의 적합성은 허위수락위험 확률(PFA, Probability of False Acceptance) 요구 사항 2%를 충족하는 것으로 간주되며[7] 시험 불확도 비율이 높을수록 교정 신뢰성을 확보하기에 용이하다. 또한 이 방법은 교정 불확도를 기반으로 장비의 성능 외에 교정과정에서 발생할 수 있는 여러 오류의 원인을 보정한다.

$$TUR = \frac{UUT_{Uncertainty}}{STD_{Uncertainty}} \quad (2)$$

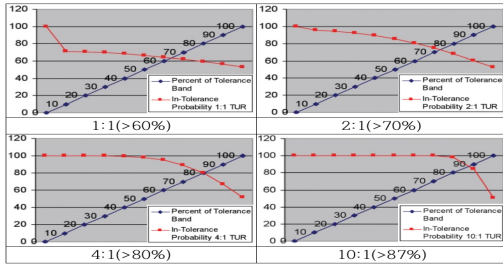


그림 1. TUR과 기기성능의 허용한계내 존재 확률
Fig. 1 In Tolerance probability of TUR and instrument performance

그림 1과 같이 적용되는 시험 불확도 비율을 1:1에서 10:1로 증가시킴에 따라 교정대상 기기가 성능의 허용 한계 내에 존재할 확률이 60%에서부터 87% 이상으로 점차 높아지는 것을 확인 할 수 있으며 시험 불확도 비율 4:1이상부터 교정된 정밀측정장비가 성능 한계내 존재할 확률이 80% 이상이 됨을 알 수 있다.

III. 교정 시스템 평가 및 시험기준 최적화

3.1 교정 시스템 성능평가 방안

정밀측정장비 교정을 위한 시스템의 적합성 평가를 위한 가장 일반적인 방법으로 그림 2와 같이 측정결과의 반복성(repeatability)과 재현성(reproducibility)에 관한 표준편차 σ_{GRR} 를 추정하여 총변동량 대비 혹은 공차 대비 측정능력지수를 산출하여 해당 측정시스템의 합부를 판정하는 Gage R & R study가 있다.

현재 교정기관에서는 Gage R & R study와 유사한 방법으로 교정시의 관측값을 통계적으로 분석하여 반복성 및 편의를 불확도로 계산하는 Type 1(Gage) 연구를 수행하고 있다.

그러나 이러한 방법들은 교정 시스템의 측정능력분석방법으로 적용하기에는 서로 연관되어 있는 불확도 요인의 관리 및 평가를 명확하게 수행하기 힘들다.

불확도 요인을 분석하고 평가하기 위한 대표적인 연구로 ISO 22514-7, MSA 4, VDA 5등이 수행되었으며, 이중 ISO 22514-7(capability and performance - Part 7: capability of Measurement Processes)은 측정능력분석에 관한 국제규격으로 제정되어 측정 불

확도를 파악하여 측정 시스템(measuring system) 및 측정 프로세스(measurement process)가 해당 부품을 측정할 능력이 있는 지를 평가하도록 권고하고 있다.

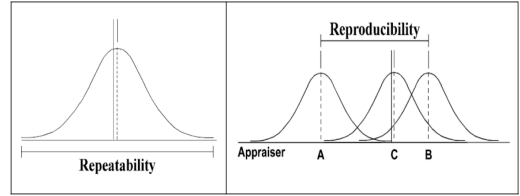


그림 2. 측정결과의 반복성과 재현성
Fig. 2 Repeatability and reproducibility of measurement results

ISO 22514-7에서의 불확도를 산출하는 방법은 ISO 17025규격에서의 관측값과 데이터로 추정되는 Type A, B의 불확도를 구하는 방법과 유사하게 Type A 불확도에 해당하는 교정 시스템의 반복성 및 측정값의 편이에 대한 불확도는 균등분포(uniform distribution)나 측정회수에 따라 정규분포(normal distribution)로 적용하여 계산한다. 또한 경험이나 데이터를 통해 추정되는 Type B 불확도인 분해능 불확도, 교정 성적서(calibration certificate report)상에 제시되는 데이터(확장불확도와 포함인자) 등을 이용하여 산출되는 교정 시스템의 불확도, 측정결과의 선형성에 기인된 불확도와 기타 요인에 의한 불확도로 산출한다. 구해진 표준 불확도 요인들을 합성하여 측정시스템의 합성 표준 불확도와 확장불확도를 식 (3)과 (4)와 같이 구한다.

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS-REST}^2} \quad (3)$$

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS} \quad (4)$$

- U_{MS} : expanded measurement uncertainty
- u_{CAL} : uncertainty from calibration STD
- u_{BI} : uncertainty from bias
- u_{LIN} : uncertainty from linearity
- u_{EV} : $\max\{u_{EVR}, u_{RES}\}$

- u_{EVR} : uncertainty from repeatability
- u_{RES} : uncertainty from resolution
- $u_{MS-REST}$: other uncertainty components

여기서 포함인자(k)는 $t_{(1-\alpha/2)}(\nu)$ 로 구해지며, 측정능력분석에서는 근사적으로 95% 신뢰계수를 적용한 $k=2$ 가 사용된다. 그리고 측정시스템의 성능 비율(performance ratio) Q_{MS} 는 식 (5)와 같이 계산되며, $Q_{MS} \leq 15\%$ 이면 해당 측정시스템(계측기)은 합격적으로 판정한다.

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Upper\ SL - Lower\ SL} \times 100\% \quad (5)$$

3.2 시험기준 최적화 방안

일반적으로 권고되는 시험 불확도 비율 4:1을 만족하기 위한 교정 시스템의 요구 성능을 충족하기 어려울 때는 교정결과와 허위판정위험을 줄이기 위해 정밀측정장비를 교정시 확인하는 성능기준 보다 높은 수준의 시험기준을 적용하는 가드밴드 기법을 그림 3 과같이 적용하여 허용위험의 최소기준치를 충족시키는 방법을 사용할 수 있다.

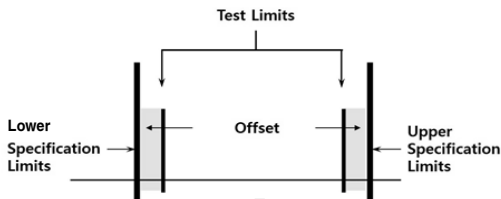


그림 3. 성능기준(SL)과 시험기준(TL)
Fig. 3 Specification Limits(SL) and Test Limits(TL)

낮은 시험 불확도 비율은 교정 시스템의 요구 성능기준을 만족하지 않음을 뜻하며, 이는 성능의 허용 한계를 초과한 정밀측정장비가 정상으로 판정되는 허위수락위험 확률의 증가를 가져온다.

최소 시험 불확도 비율을 만족하지 못하는 교정 시스템에서 정밀측정장비의 성능기준 보다 높은 수준의 별도의 시험기준을 적용한다면 허위수락위험 확률은 낮아질 것이다. 이는 최소 시험 불확도 비율 요구기준인 4:1을 만족하지 못하더라도 별도의 시험기준을

적용을 통해 허위수락위험 확률의 국제 품질문서에서 요구하는 권고 기준치인 2%를 만족시킬 수 있음을 의미한다.

합격기준에 만족되는 교정 시스템 불확도와 대상기기의 시험 불확도 비율에 따라 별도의 시험기준의 산출을 위해 95%의 신뢰수준에서의 확장불확도 $U_{95\%}$ 에 최대 허위수락위험 확률로 계산된 계수(M)을 곱한 값을 오프셋으로 설정한 식 (6)로 표현되며, 2% 수준의 허위수락위험 확률은 대상기기의 오차발생확률 $p_0(e_{dut})$ 와 교정결과 y 를 이용하여 식 (7)로 표현된다 [8].

$$TL = SL - U_{95\%} \times M \quad (6)$$

$$PFA_{2\%} = \iint_R p_0(e_{dut}) p_m(y - e_{dut}) dA \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 시험 불확도 비율을 4:1 이하로 한정하여 최대 시험 불확도 비율에 따른 허위수락위험 확률 곡선(그림 4)을 통해 결정된 식 (8)을 이용하여 허위수락위험 확률 2%에서의 시험 불확도 비율에 따른 계수 M 은 식 (9)과 같이 구할 수 있다[9].

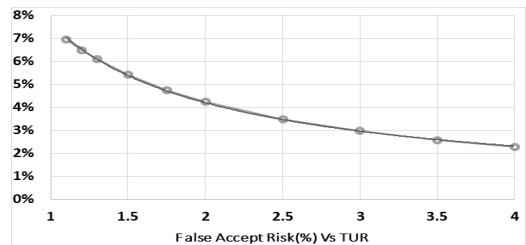


그림 4. 허위수락위험 확률과 시험 불확도 비율
Fig. 4 False acceptance risk and TUR

$$y = 0.0792x^{-0.918} \quad (8)$$

$$M_{2\%} = -0.3 \ln(TUR) + 0.475 \quad (9)$$

식 (6)과 식 (9)을 이용하여 교정환경에서 주어지는 별도의 시험 불확도 비율에 따라 산정된 시험기준을

표 1과 같이 계산할 수 있으며, 이를 통해 낮은 시험 불확도 비율에서 가드밴드로 사용되는 오프셋의 값을 높여 요구 성능기준 보다 높은 수준에서 시험기준을 적용하여 허위수락위험 확률의 권고기준 2%가 충족 되는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 산출된 오프셋과 최적 시험한계
Table 1. Calculated offset and optimum test limits

TUR	PFA	SL	Uc	Offset	TL
4:1	2%	2.0	0.10	0.0646	1.994
3.5:1	2%	2.0	0.10	0.1041	1.990
3:1	2%	2.0	0.10	0.1497	1.985
2.5:1	2%	2.0	0.10	0.2037	1.980
2:1	2%	2.0	0.10	0.2697	1.973
1.5:1	2%	2.0	0.10	0.3549	1.965
1:1	2%	2.0	0.10	0.4749	1.953

IV. 평가

제안된 교정 시스템의 성능평가 방안의 검증을 위해 다이얼게이지를 교정하는 교정 시스템에 대해서 측정시스템분석(MSA, Measurement Systems Analysis)을 수행하였으며 결과의 신뢰성 확보를 위해 측정회수는 ISO 22514-7의 권고기준 충족을 위해 30번 반복측정을 수행하였다[10].

반복측정된 데이터를 통해 추정된 각각의 불확도는 표 2의 불확도 총괄표의 각항의 값과 같으며, 불확도 요인들의 합성불확도에서 최종 포함인자(k)를 2로 사용하여 신뢰수준 95%에서 산출된 확장불확도(U_{MS})는 1.42 μm 이다.

표 2. 불확도 총괄표
Table 2. Uncertain budget table

Source of Uncertainty	Value (μm)	Probability Distribution	Div	Standard Uncertainty
u_{CAL}	1.1	normal(k=2)	2	0.55
u_{BI}	0.3	norman	$\sqrt{5}$	0.13
u_{LEN}	0.3	norman	$\sqrt{5}$	0.13
u_{EV}	1	triangular	$\sqrt{6}$	0.40
combined standard uncertainty u_{MS}				0.71
expanded uncertainty $U_{MS}(k=2, 95\% \text{ confidence})$				1.42

산출된 확장불확도(U_{MS})를 이용해서 Q_{MS} 을 계산하면 7.1%이며 이는 $Q_{MS} \leq 15\%$ 조건을 충족하기에 해당 교정 시스템은 합격으로 판정할 수 있다.

측정시스템분석을 통해 합격으로 판정된 교정 시스템을 사용하여 다이얼게이지를 교정에 적용시 교정대상 기기(다이얼게이지)와 교정 시스템의 불확도는 각각 4.26 μm 과 1.42 μm 으로 시험 불확도 비율을 계산하면 3:1이 되며 최대 허위수락위험 확률은 2.97%가 된다.

교정 시스템의 적합성이 ISO 22514-7기준에는 포함되지만 ANSI / NCSL Z540-1, 3의 교정을 위해 요구하는 최대 허위수락위험 확률을 초과되므로 교정대상 기기의 합부판정 기준을 그림 5의 성능기준 $\pm 20 \mu\text{m}$ 에서 별도의 시험기준을 제시한 가드밴드 기법을 이용하여 $\pm 19.85 \mu\text{m}$ 로 계산하여 적용하였다.

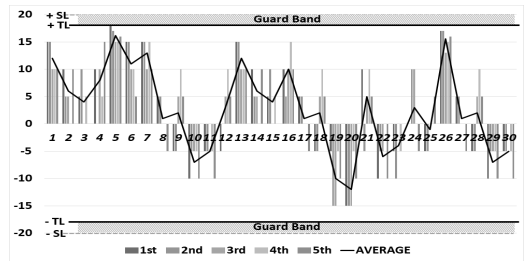


그림 5. 시험 판정기준의 변경(SL→TL)
Fig. 5 Change of Test Criteria(SL→TL)

교정이 완료된 장비는 그림 6과 같이 허위수락위험 확률이 성능기준 적용시 최대 3%로 불합격이지만 별도의 시험기준 산출하여 적용함으로써 2% 이내를 유지하게 됨에 따라 정밀측정장비의 교정에 관한 국제 규격의 권고기준에 충족됨을 확인할 수 있다.

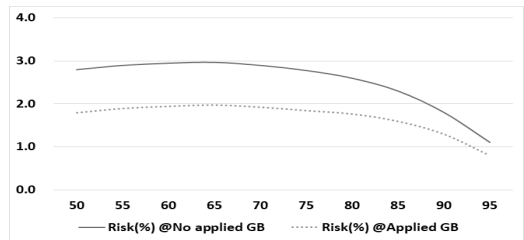


그림 6. 가드밴드기법 적용후 PFA 감소
Fig. 6 PFA reduction with guard band method

V. 결론

본 논문에서는 국제규격의 권고보다 낮은 성능의 표준기의 사용을 위해 정형화된 불확도 요인 분석을 통한 교정 시스템 적합성 평가 방안과 이와 연계하여 시험 불확도 비율 요구기준인 4:1 이하의 교정 시스템을 가드밴드 기법을 이용하여 최적화된 시험기준 산출모형을 제안하였다.

이 연구는 교정 시스템 적합성 평가를 위해 제시된 불확도 요인의 식별 및 산출이 필요하며, 요구되는 시험 불확도 비율이 4:1 이하에서만 유효하여 많은 불확도 요인을 가지는 교정 시스템과 교정대상 기기 대비 4배 이상의 교정 시스템을 요구될 때는 적용이 불가능하다. 그러므로 향후에는 지금까지의 연구를 바탕으로 교정 계통별 불확도 요인을 정량적으로 분석하여 적용범위를 높일 수 있도록 연구할 예정이다.

References

[1] P. Reese, "Calibration in Regulated Industries : Federal Agency Use of ANSI Z540.3 and ISO 17025," *NCSL Symp.*, Minnesota, United States, July 2016.

[2] S. Rishi, "Guard-Banding Methods - An Overview." *Proc. of AdMET*, London, United Kingdom, 2012, pp. 1-9.

[3] MIL-STD 45662A, *Calibration Systems Requirements*. Dept. of Defense, Washington, D.C., United States, Aug. 1988.

[4] ANSI/NCSL Z540.1:1994, "Calibration Laboratories and Measuring and Test Equipment-General Requirements," *NCSL Conf.*, Texas, United States, July 1994.

[5] D. Caldwell, "ANSI/NCSL Z540.3:2006: Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment," *NCSL Conf.*, Tennessee, United States, Aug. 2006, pp. 26-30.

[6] K. Bennett, and H. Zion, "Metrology concepts: understanding test uncertainty ratio (TUR)," *Calibrate with confidence, TRANSCAT Calibration & Repair Services*, White Paper, May 2005.

[7] S. Mimbs, "ANSI/NCSL Z540.3: Measurement Decision Risk and the 2% Rule," *NASA Presentation.*, Minnesota, United States, Mar. 2007.

[8] Y. Kim, "Radome Slope Estimation using Mode Parameter Renewal Method of IMM Algorithm," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 5, July 2017, pp. 763-770.

[9] N. Ko, "The Implementation of Graph-based SLAM Using General Graph Optimization," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 4, Aug. 2019, pp. 637-644.

[10] E. Dietrich, "Capability of Measurement Processes Based on ISO/FDIs 22514-7 and VDA 5," *Key Engineering Materials*, vol. 613, May 2014, pp. 354-362.

저자 소개

김홍탁(Hong-Tark Kim)



2016년 경북대학교 대학원 제어 및 계측공학과 졸업(공학석사)
 2016년~2018년 부경대학교 대학원 무기체계공학과 박사과정 수료
 1994년 ~ 현재 공군 군수사령부 근무
 ※ 관심분야 : 정밀측정, 제어계측, 자동화교정

김부일(Boo-Il Kim)



1985년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 2001년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1985년~2013년 국방과학연구소 수석연구원
 2013년~현재 부경대학교 전기전자소프트웨어공학과 교수
 ※ 관심분야 : 능동소나, 수중음향대응, 정밀측정