

Type 1 Study, Gage R&R Study와 ISO 22514-7의 측정능력지수 간 연관성 분석

이승훈* · 임근*

* 동의대학교 산업경영공학과

Some Relationships between Measurement Capability Indices of Type 1 Study, Gage R&R Study, and ISO 22514-7

Lee, Seung-Hoon *† · Lim, Keun *

* Dept. of Industrial & Management Engineering, Dong-Eui University

ABSTRACT

Purpose: This paper reviews Type 1 Gage study, Gage R&R study, and procedure of ISO 22514-7 for assessing a measurement system, and discusses some relationships between the measurement capability indices.

Methods: The gage capability index C_g of Type 1 Gage study, precision-to-tolerance ratio PTR of Gage R&R study, and measurement performance ratio Q_{MS} and Q_{MP} of ISO 22514-7 are considered in this paper.

Results: This paper derives the relationships between C_g and Q_{MS} , PTR and Q_{MP} , and Q_{MS} and Q_{MP} , respectively, and discusses the acceptance conditions for each procedures.

Conclusion: The measurement capability analysis is the first step for the quality improvement of the manufacturing processes. Therefore the result of this study provides a helpful guidelines for assessing the measurement system, enabling proper evaluation of manufacturing processes.

Key Words: Type 1 Gage Study, Gage R&R Study, ISO 22514-7, Measurement Capability Indices

● Received 4 December 2015, 1st revised 20 December 2015, accepted 21 December 2015

† Corresponding Author(shlee@deu.ac.kr)

© 2016, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and re-production in any medium, provided the original work is properly cited.

* 이 논문은 2011학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음

1. 서 론

측정시스템 분석은 제품 개발이나 제조공정에서 품질특성이나 공정변수를 관리하기 위한 통계적 공정관리나 품질관리를 수행함에 있어서 선행적 주요 활동이다. 정확하지 못한 측정은 제품의 품질 관정에 오류를 범할 수 있어서 이에 따른 품질비용의 상승을 수반하게 된다. 정확한 측정 결과를 바탕으로 제품의 품질을 지속적으로 개선하기 위해서는 생산되는 제품의 산포를 줄여야 하는데, 이를 위해서는 측정프로세스에 존재하는 변동의 원인을 파악하고 정량화하여야 한다. 전형적인 측정능력분석 절차가 Gage R&R study이다. Gage R&R study에서는 측정실험을 수행하여 반복성(repeatability)과 재현성(reproducibility)에 관한 표준편차 σ_{GRR} 을 추정하여 총변동량 대비 혹은 공차 대비로 측정능력지수를 산출하여 해당 측정시스템의 합부를 판정한다(AIAG, 2010; Chang and Kim, 2007; Lee and Lee, 2000). 또한 많은 회사에서는 Gage R&R study를 행하기 전에 Type 1 (Gage) study를 먼저 행하여 계측기 자체의 반복성(repeatability) 및 편의(bias)를 평가하고 있다(Bosch 2003, 10; GM 2010, 49).

측정능력분석에서 평가지표(측정능력지수)가 서로 연관되어 있으므로 어떤 지표들로 관리를 해야 할지, 또한 특정 평가지표가 기준에 미달 시 어떻게 개선조치를 취해야 할지 그리 명확하지 않은 편이다(Seo 2014). 이에 따라 몇몇 학자들이 측정능력지수 사이의 연관성을 연구하였는데 대표적인 논문을 살펴보면 다음과 같다. Majeske and Andrews(2002)는 급내 상관계수(intraclass correlation) ρ 및 PT비(precision-to-tolerance ratio) PTR 과 공정능력지수 C_p 사이의 관계식을 유도하여, 공정변동을 나타내는 부품간 표준편차 σ_p 와 σ_{GRR} 의 관점에서 측정능력의 합격/불합격 영역과 공정능력의 합격/불합격 영역을 4가지로 구분한 도식적 방법에 관한 평가지침을 연구하였다. Woodall and Borror(2008)는 %R&R와 구별범주의 수(number of distinct categories) ndc 사이의 관계식 및 판별비(discrimination ratio) DR 과 ndc 사이의 관계식을 유도하였으며, %R&R이 10% 이하이면 ndc 가 14 이상이 되며, $ndc \geq 5$ 인 조건은 %R&R ≤ 27.14 가 됨을 보였다. Al-Rafaie and Bata(2010)는 PTR , SN비(signal-to-noise ratio) SNR , DR 및 공정능력지수(C_p , C_{pk}) 등 네 가지 지수 사이의 연관성을 고려하여, σ_p 와 σ_{GRR} 의 관점에서 측정능력의 합격/불합격 영역과 공정능력의 합격/불합격 영역을 14가지로 구분한 도식적 방법에 관한 연구를 수행하였다. White and Borror(2011)은 %R&R 및 PTR 과 공정능력지수 C_p 와의 연관성을 고려하여, %R&R과 PTR 의 관점에서 세 지표를 관리할 수 있는 2차원 평가지침을 설정하는 방안을 제시하였으며, Seo(2014)는 선행 연구들을 확장하여 %R&R, PTR , ndc 이외에 적합품을 부적합품으로 잘못 판정할 위험(P_{risk}), 부적합품을 적합품으로 잘못 판정할 위험(C_{risk})을 고려하여 ρ 와 $k = TOL/\sigma_p$ 에 관한 2차원 평가지침을 설정하는 방안을 연구하였다.

그리고 최근 측정능력분석에 관한 국제 표준인 ISO 22514-7(Capability and performance - Part 7: Capability of Measurement Processes)이 2012년에 제정되었다. 이 표준의 특징은 국제측정학용어집(International Vocabulary of Metrology: VIM)인 ISO/IEC Guide 99의 용어를 사용하며, 불확도 표현에 관한 지침(Guide to the expression of the Uncertainty in Measurement: GUM)인 ISO/IEC Guide 98-3에 의하여 측정 불확도를 파악하여 측정 능력을 평가하고 있다. ISO/IEC Guide 98-3에서는 측정결과에 대하여 측정 불확도를 파악하여 측정량의 참값을 포함하는 구간인 포함구간(coverage interval)을 구하는 것이 목적이지만, ISO 22514-7에서는 측정 불확도를 파악하여 측정시스템(measuring system) 및 측정프로세스(measurement process)가 해당 부품을 측정할 능력이 있는지를 평가하는 것을 지향한다. 여기서 ISO 22514-7에서의 용어 측정시스템(measuring system)과 측정프로

세스(measurement process)는 각각 일반적인 측정능력분석에서의 계측기(gage)와 측정시스템(measurement system)에 해당됨에 유의하여야 한다.

상기 연구들은 Gage R&R study에서의 측정능력지수 사이의 연관성을 파악하는 것이지만, 본 논문에서는 Type 1 Gage study에서의 측정능력지수 C_g , Gage R&R study에서의 지수 PTR 및 ISO 22514-7에서의 지수인 Q_{MS} 와 Q_{MP} 사이의 연관성을 연구하고자 한다. 제 2장에서는 Type 1 Gage study, Gage R&R study 및 ISO 22514-7에서의 측정 능력 평가 절차에 관한 내용을 살펴보고 차이점을 비교한다. 제 3장에서는 측정능력지수 C_g , PTR , Q_{MS} 와 Q_{MP} 사이의 관계식을 도출하고, 영향 분석을 수행한다. 제 4장에서는 측정능력분석 수치예제를 Type 1 Gage study, Gage R&R study 및 ISO 22514-7의 절차로 각각 분석하여 분석방법 간 차이점과 측정능력지수 사이의 관계식을 고찰한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 측정능력분석 절차 고찰

2.1 Type 1 Gage study 고찰

Type 1 (Gage) study는 계측기 자체의 반복성 및 편의를 기준으로 규격이 $[L, U]$ 인 해당 부품을 측정할 능력이 있는지를 평가하는 분석 절차이다. 이 절차를 ISO 22514-7에서는 측정시스템 능력 분석(measuring system capability analysis)라고 하며, AIAG(2010, 87)에서는 편이 결정 지침-독립 표본 방법(Guidelines for Determining Bias - Independent Sample Method)이라고 칭한다. 측정실험은 규격의 중앙에 해당되는 기준값(reference value) x_m 을 알고 있는 1개의 기준용 표준(reference standard) 혹은 시료(workpiece)에 대하여 n 회 반복 측정한다. 최소 반복횟수는 GM(2010)에서는 30회, Bosch(2003)에서는 25회, ISO 22514-7에서는 30회, VDA(2011)에서는 25회, AIAG(2010)에서는 10회로 규정되어 있으나, 일반적으로 50회 이상이 권고된다. 측정실험의 데이터로부터 평균 \bar{x} 와 표준편차 s 를 구하여 식 (1)과 (2)와 같은 계측기 능력 지수(gage capability indices) C_g 와 C_{gk} 를 계산하여, $C_g, C_{gk} \geq 1.33$ 이면 해당 계측기는 합격으로 판정한다.

$$C_g = \frac{0.2(U-L)}{6s} \quad (1)$$

$$C_{gk} = \frac{0.1(U-L) - |\bar{x} - x_m|}{3s} \quad (2)$$

반면에 ISO 22514-7에서는 측정 불확도를 파악하여 해당 측정시스템(measuring system)이 해당 부품을 측정할 능력이 있는 지를 평가한다. 먼저 반복성에 기인한 불확도 $u_{EVR} = s$ 를 구하고, 편이에 기인한 불확도는 통상 균등분포(uniform distribution)를 가정하여 균등분포의 표준편차로 $u_{BI} = |\bar{x} - x_m| / \sqrt{3}$ 와 같이 구한다. 이 둘은 Type A의 불확도에 해당된다. 다음으로 Type B의 불확도들을 구한다. 해당 계측기의 분해능이 RE 라면 통상 균등분포를 가정하여 분해능에 기인한 불확도는 균등분포의 표준편차인 $u_{RE} = RE / \sqrt{12}$ 로 추정한다. 그리고 해당 계측기의 교정성적서(calibration certificate)에는 여러 기준값에서의 확장불확도 U_{CAL} 와 포함인자(coverage factor) k_{CAL} 가

주어지는데, 기준값이 x_m 인 경우의 확장불확도와 포함인자로부터 교정에 기인한 불확도 $u_{CAL} = U_{CAL}/k_{CAL}$ 를 구한다. 그리고 선형성에 기인한 불확도 u_{LIN} 과 기타 요인에 의한 불확도 $u_{MS-REST}$ 를 구한다. 위의 표준불확도(standard uncertainty)들을 합하여 측정시스템의 합성표준불확도(combined standard uncertainty) u_{MS} 와 확장불확도(expanded uncertainty) U_{MS} 를 각각 식 (3)과 (4)와 같이 구한다.

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

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS} \tag{4}$$

여기서 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\}$ 이며, 포함인자 k 는 $t_{(1-\alpha/2)}(\nu)$ 로 구해지며, 측정능력분석에서는 근사적으로 95% 신뢰계수를 적용한 $k=2$ 가 주로 사용된다. 그리고 측정시스템의 성능비(performance ratio) Q_{MS} 를 식 (5)와 같이 계산하여, $Q_{MS} \leq 15\%$ 이면 해당 측정시스템(계측기)는 합격으로 판정한다.

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{U-L} \times 100\% \tag{5}$$

AIAG(2010, 87)의 절차에서는 계측기의 반복성과 편의를 각각 따로 순차적으로 분석한다. 먼저 반복성이 적합한지를 판정하기 위하여 $\%EV = (6s / TV) \times 100$ 를 계산한다. 여기서 TV 는 공차($U-L$) 혹은 총변동량($6\hat{\sigma}_{total}$)으로 하여 분석한다. 반복성이 기준(30% 이하)에 미달되면 불합격시키고, 적합하면 다음 편이분석으로 진행한다. 편이분석에서는 편이가 0인지를 검정하기 위한 검정통계량 $t_0 = \frac{\bar{x} - x_m}{s / \sqrt{n}}$ 를 계산하여, 기각역에 속하면 편이가 0이 아니라고 판정하며 해당 계측기는 불합격으로 처리한다. 이상의 내용을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of Type 1 study(measuring system capability analysis)

	Type 1 study	ISO 22514-7	AIAG
Considered components	$\hat{\sigma}_{repeatability} = s$ $= \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ $Bi = \bar{x} - x_m$	<ul style="list-style-type: none"> - u_{RE}: uncertainty from resolution - u_{CAL}: uncertainty from calibration - u_{BI}: uncertainty from bias - u_{LIN}: uncertainty from linearity - u_{EVR}: uncertainty from repeatability - $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\}$ - $u_{MS-REST}$: other uncertainty components 	$\hat{\sigma}_{repeatability} = s$ $t_0 = \frac{\bar{x} - x_m}{s / \sqrt{n}}$
Performance measures	$C_g = \frac{0.2 \cdot (U-L)}{4s}$ $C_{gk} = \frac{0.1(U-L) - Bi }{3s}$	$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{U-L} \times 100\%$	$\%EV = \frac{6s}{TV} \times 100$ t-test ($H_0 : Bias = 0$)
Acceptance criteria	$C_g, C_{gk} \geq 1.33$	$Q_{MS} \leq 15\%$	$\%EV \leq 30\%$ Accept H_0

2.2 Gage R&R study 고찰

Gage R&R study는 계측기 자체의 산포인 반복성(repeatability) 뿐만 아니라 측정작업자 사이의 산포인 재현성(reproducibility)을 고려한 측정시스템 평가 방법이며, Type 2 study라고도 한다. 이를 ISO 22514-7에서는 측정프로세스 능력분석(measurement process capability analysis)라고 칭한다. 측정실험은 통상 10개의 시료를 3명의 측정작업자로 하여금 2~3회 반복 측정한다. 분석방법은 범위 방법(range method), 평균 및 범위 방법(average and range method), 분산분석 방법(ANOVA method) 등 3가지 방법이 있는데, 이 중 분산분석 방법이 가장 엄밀한 분석 방법이다. ISO 22514-7에서도 분산분석 방법을 채택하고 있다. 분산분석 모형은 이원배치법의 변량모형이며, 분산분석표로부터 각 분산성분(variance components)을 추정한다. Gage R&R study에서는 반복성과 재현성에 관한 표준편차 $\hat{\sigma}_{GRR} = \sqrt{\hat{\sigma}_o^2 + \hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2}$ 를 구하고 다음과 같은 평가지표를 계산한다.

$$\%R\&R = \frac{\hat{\sigma}_{GRR}}{\hat{\sigma}_{total}} \times 100 \quad (6)$$

$$PTR = \frac{6\hat{\sigma}_{GRR}}{U-L} \times 100 \quad (7)$$

$$ndc = 1.41 \times \frac{\hat{\sigma}_p}{\hat{\sigma}_{GRR}} \quad (8)$$

Gage R&R study에서의 합격 판정 기준은 $\%R\&R, PTR \leq 30\%$, $ndc \geq 5$ 이다.

반면에 ISO 22514-7에서는 분산분석에서 추정한 분산성분으로부터 시료에 대한 반복성에 기인한 불확도 $u_{EVO} = \hat{\sigma}_e$, 측정작업자의 재현성에 기인한 불확도 $u_{AV} = \hat{\sigma}_o$, 시료와 측정작업자의 교호작용에 기인한 불확도 $u_{IA} = \hat{\sigma}_{op}$ 를 추정한다. 그리고 온도에 기인한 불확도 u_T , 시간에 대한 안정성에 기인한 불확도 u_{STAB} , 측정프로세스의 기타 요인에 의한 불확도 u_{REST} 를 추정한다. 여기에 측정시스템(계측기)에서의 불확도들을 합하여 측정프로세스의 합성불확도 u_{MP} 와 확장불확도 U_{MP} 를 각각 식 (9)와 (10)과 같이 구한다.

$$u_{MP} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS-REST}^2 + u_{AV}^2 + u_{IA}^2 + u_{STAB}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2} \quad (9)$$

$$U_{MP} = k \cdot u_{MP} \quad (10)$$

여기서 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{RE}\}$ 이다. 측정프로세스의 성능비 Q_{MP} 를 식 (11)과 같이 계산하여, $Q_{MP} \leq 30\%$ 이면 해당 측정프로세스는 합격으로 판정한다.

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{U-L} \times 100\% \quad (11)$$

따라서 일반적인 Gage R&R study에서는 이 측정실험으로부터 추정된 R&R의 표준편차만을 이용하여 분석하는

반면에 ISO 22514-7에서는 이 측정실험으로부터 추정된 R&R의 표준편차(Type A 불확도)와 다른 요인으로부터의 불확도(Type B) 뿐만 아니라 이전 분석인 측정시스템 분석(Type 1 Gage study)에서의 불확도들도 모두 고려된다. 즉, 측정프로세스의 성능비 Q_{MP} 는 측정시스템의 성능비 Q_{MS} 에 영향을 받는다. 이상의 내용을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Summary of Gage R&R study(measurement process capability analysis)

	Gage R&R study	ISO 22514-7
Considered components	$\hat{\sigma}_{GRR} = \sqrt{\hat{\sigma}_o^2 + \hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2}$	<ul style="list-style-type: none"> - u_{RE}: uncertainty from resolution - u_{CAL}: uncertainty from calibration - u_{BI}: uncertainty from bias - u_{LIN}: uncertainty from linearity - u_{EVR}: uncertainty from repeatability - $u_{MS-REST}$: other uncertainty components (measuring system) - $u_{EVO} = \hat{\sigma}_e$ $-u_{AV} = \hat{\sigma}_o$ $-u_{IA} = \hat{\sigma}_{op}$ - $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{RE}\}$ - u_{STAB}: uncertainty caused by stability - u_T: uncertainty caused by temperature - u_{REST}: other uncertainty components (measurement process)
Performance measures	$\%R\&R = \frac{\hat{\sigma}_{GRR}}{\hat{\sigma}_{total}} \times 100$ $PTR = \frac{6\hat{\sigma}_{GRR}}{U-L} \times 100$ $ndc = 1.41 \times \frac{\hat{\sigma}_p}{\hat{\sigma}_{GRR}}$	$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{U-L} \times 100\%$
Acceptance criteria	$\%R\&R \leq 30\%$ $PTR \leq 30\%$ $ndc \geq 5$	$Q_{MP} \leq 30\%$

3. 측정능력지수 사이의 연관성 분석

3.1 Type 1 Gage study의 C_g 와 ISO 22514-7의 Q_{MS} 와의 관계 분석

본 절에서는 Type 1 (Gage) study의 C_g 와 ISO 22514-7 절차에서의 Q_{MS} 사이의 관계식을 유도하고, 두 지수 사이의 영향을 분석하고자 한다. 비교분석을 단순화하기 위하여 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\} = u_{EVR}$, 포함인자 $k=2$ 라고 가정한다. 그리고 기호 u_{Other} 와 $\%u_{Other}$ 를 각각 식 (12)와 (13)과 같이 정의하기로 한다.

$$u_{Other} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS-REST}^2} \tag{12}$$

$$\%u_{Other} = \frac{u_{other}}{U-L} \times 100 \quad (13)$$

즉, u_{Other} 는 ISO 22514-7에서 측정시스템(계측기) 능력평가를 위한 절차에서의 불확도 중에서 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\}$ 를 제외한 나머지 불확도의 합으로 구성되며, 이는 Type 1 Gage study에서 반복성의 표준편차 s 에 해당되는 불확도를 제외한 나머지 불확도들의 합이다. $\%u_{Other}$ 는 공차 대비 u_{Other} 의 퍼센트 비율이다. 그러면 C_g 에서의 $s = u_{EVR} = u_{EV}$ 가 되므로 Q_{MS} , C_g 와 $\%u_{Other}$ 사이에는 식 (14)와 같은 관계식이 성립한다.

$$Q_{MS} = 4 \sqrt{\frac{100}{9 C_g^2} + \%u_{Other}^2} \quad (14)$$

식 (14)를 이용하여 주어진 C_g 와 $\%u_{Other}$ 에서 Q_{MS} 를 계산하여 그림으로 나타내면 Figure 1과 같다. Figure 1에서 Q_{MS} 값이 15인 등고선과 C_g 값이 1.33인 수직선을 기준으로 4개의 영역으로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

- ▶ Region 1: C_g 와 Q_{MS} 의 관점에서 모두 합격이 되는 영역
- ▶ Region 2: C_g 의 관점에서는 합격, Q_{MS} 의 관점에서는 불합격되는 영역
- ▶ Region 3: Q_{MS} 의 관점에서는 합격, C_g 의 관점에서는 불합격되는 영역
- ▶ Region 4: C_g 와 Q_{MS} 의 관점에서 모두 불합격이 되는 영역

주어진 C_g 에서 $Q_{MS} \leq 15\%$ 가 되기 위한 $\%u_{Other}$ 의 한계값을 계산하면 Table 3과 같이 주어진다. 예를 들어, $C_g = 0.9$ 인 경우(Type 1 Gage study에서는 불합격)에는 $\%u_{Other}$ 가 0.58743%이내이면 $Q_{MS} \leq 15\%$ 가 되어 ISO 22514-7에서는 합격이 된다. 그리고 $C_g = 1.33$ 인 경우에는 $\%u_{Other}$ 가 2.78947%이내이면 $Q_{MS} \leq 15\%$ 가 되어 Type 1 Gage study와 ISO 22514-7에서 모두 합격이 된다. 그리고 $Q_{MS} = 15$ 인 등고선과 $\%u_{Other} = 0$ 인 C_g 값은 0.88888이므로 Type 1 Gage study에서 C_g 값이 0.88이하이면 $\%u_{Other}$ 값에 관계없이 ISO 22514-7에서도 불합격됨을 알 수 있다.

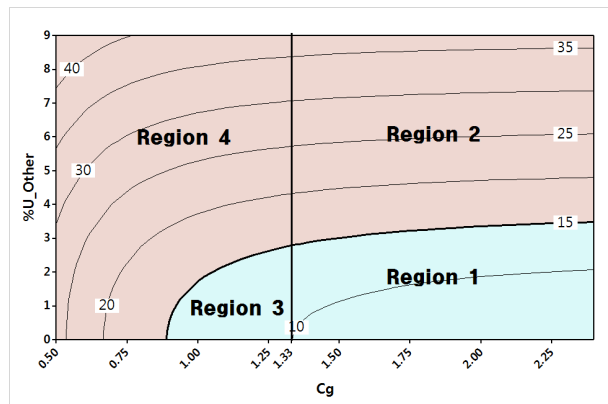


Figure 1. Contour plot for Q_{MS} versus C_g and $\%u_{Other}$

Table 3. % u_{Other} limiting values for $Q_{MS} \leq 15\%$

C_g	% u_{Other}	C_g	% u_{Other}	C_g	% u_{Other}	C_g	% u_{Other}
0.9	0.58743	1.33	2.78947	1.8	3.26085	2.3	3.45863
1.0	1.71796	1.4	2.89717	1.9	3.31431	2.4	3.48332
1.1	2.20902	1.5	3.02063	2.0	3.35927	2.5	3.50496
1.2	2.51922	1.6	3.11805	2.1	3.39750	2.6	3.52404
1.3	2.73640	1.7	3.19653	2.2	3.43028	2.7	3.54095

3.2 Gage R&R study의 PTR와 ISO 22514-7의 Q_{MP} 와의 관계 분석

본 절에서는 Gage R&R study의 PTR와 ISO 22514-7 절차에서의 Q_{MP} 와의 관계식을 유도하고, 두 지수 사이의 영향을 분석하고자 한다. 비교분석을 단순화하기 위하여 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{RE}\} = u_{EVO}$, 포함인자 $k=2$ 라고 가정한다. 그리고 기호 u_R 과 % u_R 을 각각 식 (15)와 (16)과 같이 정의하기로 한다.

$$u_R = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{MS-REST}^2 + u_T^2 + u_{STAB}^2 + u_{REST}^2} \tag{15}$$

$$\%u_R = \frac{u_R}{U-L} \times 100 \tag{16}$$

즉, u_R 은 ISO 22514-7의 절차에서 측정시스템(계측기) 능력평가를 위한 1단계 절차에서의 불확도 중에서 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\}$ 를 제외한 부분과 측정프로세스 능력평가를 위한 2단계 절차에서의 불확도 중에서 온도 및 나머지 요인의 불확도의 합으로 구성되며, 이는 1단계 절차와 2단계 절차의 전체 불확도 중에서 Gage R&R study에서의 $\hat{\sigma}_{CRR} = \sqrt{\hat{\sigma}_o^2 + \hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2}$ 에 해당되는 불확도를 제외한 나머지 불확도들의 합이다. % u_R 는 공차 대비 u_R 의 퍼센트 비율이다. 그러면 Q_{MP} , % u_R 과 PTR 사이에는 식 (17)과 같은 관계식이 성립한다.

$$Q_{MP} = \sqrt{(4/9) \times PTR^2 + 16 \times \%u_R^2} \tag{17}$$

Gage R&R study의 PTR와 ISO 22514-7의 Q_{MP} 와의 관계에서 % u_R 의 영향을 조사하기 위하여 식 (17)에 의하여 Q_{MP} 값을 계산하여 등고선도로 나타낸 것이 Figure 2이다. Figure 2에서 Q_{MP} 값이 30인 등고선과 PTR 값이 30인 수직선을 기준으로 4개의 영역으로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

- ▶ Region 1: PTR와 Q_{MP} 의 관점에서 모두 합격이 되는 영역
- ▶ Region 2: PTR의 관점에서는 합격, Q_{MP} 의 관점에서는 불합격되는 영역
- ▶ Region 3: Q_{MP} 의 관점에서는 합격, PTR의 관점에서는 불합격되는 영역
- ▶ Region 4: PTR와 Q_{MP} 의 관점에서 모두 불합격이 되는 영역

주어진 PTR에서 $Q_{MP} \leq 30\%$ 이 되기 위한 $\%u_R$ 의 한계값을 계산하면 Table 4와 같이 주어진다. 예를 들어, PTR이 10%일 때 $\%u_R$ 이 7.31247%이내이면 $Q_{MP} \leq 30\%$ 가 되어 양쪽 모두에서 합격이 된다. 그리고 PTR이 30%일 때 $Q_{MP} \leq 30\%$ 가 되기 위한 $\%u_R$ 의 한계값은 5.59017이므로 Gage R&R study와 ISO 22514-7 중 한 절차의 분석에서 합격일 때 $\%u_R \leq 5.59$ 이면 다른 절차의 분석에서도 반드시 합격으로 나오게 된다. 그리고 Gage R&R study에서 PTR이 45% 이상일 때에는 $\%u_R$ 값에 관계없이 ISO 22514-7의 절차에서도 불합격됨을 알 수 있다.

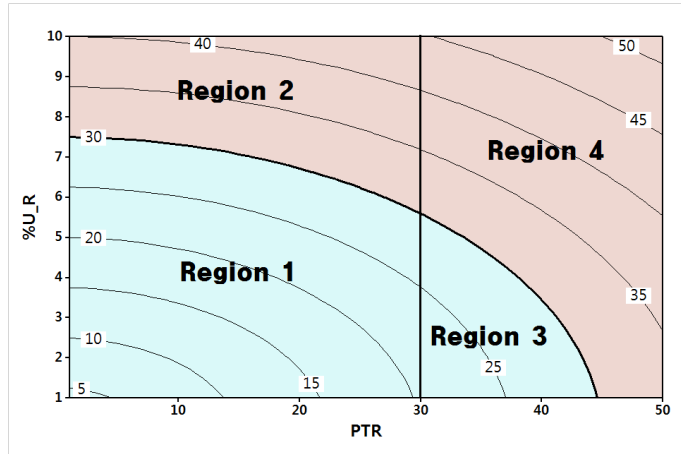


Figure 2. Contour plot for Q_{MP} versus PTR and $\%u_R$

Table 4. $\%u_R$ limiting values for $Q_{MP} \leq 30\%$

PTR	$\%u_R$	PTR	$\%u_R$	PTR	$\%u_R$	PTR	$\%u_R$	PTR	$\%u_R$
1	7.49815	10	7.31247	19	6.79869	28	5.87130	37	4.26875
2	7.49259	11	7.27247	20	6.71855	29	5.73488	38	4.01732
3	7.48331	12	7.22842	21	6.63325	30	5.59017	39	3.74166
4	7.47031	13	7.18022	22	6.54260	31	5.43650	40	3.43592
5	7.45356	14	7.12780	23	6.44636	32	5.27310	41	3.09121
6	7.43303	15	7.07107	24	6.34429	33	5.09902	42	2.69258
7	7.40870	16	7.00991	25	6.23610	34	4.91313	43	2.21108
8	7.38053	17	6.94422	26	6.12146	35	4.71405	44	1.57233
9	7.34847	18	6.87386	27	6.00000	36	4.50000	45	0.00000

3.3 측정시스템의 성능비 Q_{MS} 와 측정프로세스의 성능비 Q_{MP} 와의 관계 분석

ISO 22514-7에서는 측정시스템 능력 평가를 위한 1단계 절차에서의 불확도가 측정프로세스 능력 평가를 위한 2단계 절차에 영향을 미친다. 본 절에서는 측정시스템의 성능비 Q_{MS} 와 측정프로세스의 성능비 Q_{MP} 와의 관계식을 유도하고, 두 지수 사이의 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 1단계 절차와 2단계 절차에서의 계측기 변동(EV)에 관련된 불확도 차이 $u_{EV_{Diff}}^2$ 를 식 (18)과 같이 정의한다.

$$u_{EV_{Diff}}^2 = \max\{0, \min\{u_{EVO}^2 - u_{EVR}^2, u_{EVO}^2 - u_{RE}^2\}\} \quad (18)$$

그리고 기호 u_{2total} 과 $\%u_{2total}$ 을 식 (19)와 (20)과 같이 정의하기로 한다.

$$u_{2total} = \sqrt{u_{EV_{D_{3f}}}^2 + u_{AV}^2 + u_{IA}^2 + u_T^2 + u_{STAB}^2 + u_{REST}^2} \tag{19}$$

$$\%u_{2total} = \frac{u_{2total}}{U-L} \times 100 \tag{20}$$

즉, u_{2total} 은 ISO 22514-7의 절차에서 근사적으로 측정프로세스 능력평가를 위한 2단계 절차에서의 불확도들의 합으로 볼 수 있으며, $\%u_{2total}$ 는 공차 대비 u_{2total} 의 퍼센트 비율이다. 그러면 Q_{MS} , $\%u_{2total}$, Q_{MP} 사이에는 식 (21) 과 같은 관계식이 성립한다.

$$Q_{MP} = \sqrt{Q_{MS}^2 + 16 \times \%u_{2total}^2} \tag{21}$$

ISO 22514-7에서 측정시스템 능력 평가를 위한 1단계 절차에서 합격 기준인 $Q_{MS} \leq 15\%$ 하에서 $\%u_{2total}$ 의 영향을 조사하기 위하여 식 (21)에 의하여 Q_{MP} 값을 계산하여 그림으로 나타내면 Figure 3과 같다. Figure 3에서 Q_{MP} 값이 30인 등고선을 기준으로 2개의 영역으로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

- ▶ Region 1: 측정시스템이 합격되고 나서 측정프로세스도 합격이 되는 영역
- ▶ Region 2: 측정시스템이 합격되고 나서 측정프로세스는 불합격이 되는 영역

1단계 절차를 통과($Q_{MS} \leq 15\%$)한 경우, 주어진 Q_{MS} 에서 $Q_{MP} \leq 30$ 가 되기 위한 $\%u_{2total}$ 의 한계값을 계산하면 Table 5와 같이 주어진다. 예를 들어, Q_{MS} 가 10%인 경우에 $\%u_{2total}$ 이 7.07107%이내이면 2단계 절차에서도 합격이 된다. 그리고 1단계 절차를 통과한 경우에 $\%u_{2total}$ 이 6.495%이하이면 2단계에서도 반드시 합격됨을 알 수 있다.

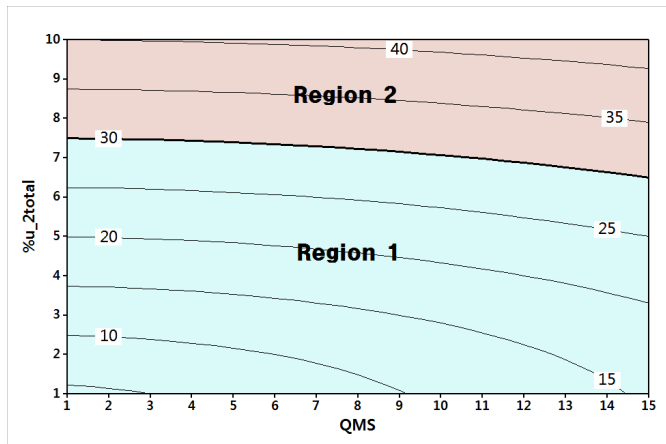


Figure 3. Contour plot for Q_{MP} versus Q_{MS} and $\%u_{2total}$

Table 5. $\%u_{2total}$ limiting values for $Q_{MP} \leq 30\%$

Q_{MS}	$\%u_{2total}$	Q_{MS}	$\%u_{2total}$	Q_{MS}	$\%u_{2total}$
1	7.49583	6	7.34847	11	6.97764
2	7.48331	7	7.29298	12	6.87386
3	7.46241	8	7.22842	13	6.75925
4	7.43303	9	7.15454	14	6.63325
5	7.39510	10	7.07107	15	6.49519

4. 수치 예제

4.1 측정시스템 능력분석(Type 1 Gage study) 수치예제

측정시스템(계측기) 능력분석(Type 1 Gage study) 수치예제를 위하여 VDA(2011, 57)의 데이터를 사용하기로 한다. 해당 계측기는 분해능(RE)이 0.001mm 인 디지털 마이크로미터이며, 규격이 $6 \pm 0.03mm$ 인 부품을 측정할 능력이 충분한 지를 평가하기 위하여 기준값(x_m)이 6.002mm 인 게이지 블록을 50번 반복 측정한 데이터가 Table 6에 주어져 있다.

Table 6. Measurement data for type 1 gage study

6.001	6.001	6.001	6.002	6.002	6.002	6.001	6.001	6.000	6.002
6.002	6.001	6.000	6.002	6.002	6.000	6.001	6.000	6.001	6.001
6.001	6.000	6.001	6.002	6.002	5.999	6.000	6.000	6.002	6.002
6.001	5.999	6.002	6.002	6.002	6.002	5.999	5.999	6.001	6.001
6.002	6.001	6.002	6.000	6.000	6.002	5.999	5.999	6.002	6.001

먼저 Table 6의 50개 데이터에 대한 평균과 표준편차는 각각 $\bar{x}=6.0009$, $s=0.000995$ 로 계산된다. 이로부터 식 (1)과 (2)에 의하여 C_g 와 C_{gk} 를 계산하면 다음과 같으며, $C_g, C_{gk} \geq 1.33$ 이므로 합격으로 판정한다.

$$C_g = \frac{0.2(U-L)}{6s} = \frac{0.2(6.03-5.97)}{6 \times 0.000995} = 2.01$$

$$C_{gk} = \frac{0.1(U-L) - |\bar{x} - x_m|}{3s} = \frac{0.1(6.03-5.97) - |6.0009 - 6.002|}{3 \times 0.000995} = 1.64$$

다음으로 AIAG(2010)의 절차에 의하여 계측기의 측정능력을 분석하기로 한다. 먼저, 계측기의 반복성은 다음과 같이 계산되며, %EV는 30%이하이므로 반복성은 합격으로 판정한다.

$$\%EV = \frac{6s}{U-L} \times 100 = \frac{6 \times 0.000995}{6.03 - 5.97} \times 100 = 9.95\%$$

다음으로 $H_0: bias = 0$ 인지를 검정하기 위한 검정통계량은 다음과 같이 계산된다.

$$t_0 = \frac{\bar{x} - x_m}{s/\sqrt{n}} = \frac{6.0009 - 6.002}{0.000995/\sqrt{50}} = -7.818165$$

따라서 $t(49, 0.99) = 2.4049$ 이므로 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 유의하다. 그러므로 AIAG(2010)의 관점에서 %EV는 30%이하이지만 $bias \neq 0$ 이므로 이 계측기는 불합격으로 판정한다. Type 1 Gage study에서는 측정능력지수 C_g, C_{gk} 에 의하여 측정능력을 평가하는 반면에 AIAG(2010)에서는 통계적 가설검정에 의하여 계측기의 편의(bias)를 평가하므로 합부 판정이 서로 다를 수 있다.

다음으로 ISO 22514-7의 절차에 의하여 측정시스템(계측기)의 측정능력을 분석하기로 한다. 여기서 선형성에 관한 불확도 u_{LIN} 은 무시할 정도로 작다고 가정한다(즉, $u_{LIN} = 0$). 그리고 교정성적서(calibration certificate)로부터 기준값이 6.002mm 일 때의 확장불확도 $U_{CAL} = 0.002mm$, 포함인자 $k_{CAL} = 2$ 로 주어져 있다고 가정한다. 그러면 측정시스템의 측정능력 평가를 위한 분해능에 기인한 불확도 u_{RE} , 교정으로부터의 불확도 u_{CAL} , 편의에 기인한 불확도 u_{BI} , 반복성에 기인한 불확도 u_{EVR} 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$u_{RE} = RE/\sqrt{12} = 0.001/\sqrt{12} = 0.0002887$$

$$u_{CAL} = U_{CAL}/k_{CAL} = 0.002/2 = 0.001$$

$$u_{BI} = |\bar{x} - x_m|/\sqrt{3} = |6.0009 - 6.002|/\sqrt{3} = 0.000635$$

$$u_{EVR} = s = 0.000995$$

그리고 기타 요인에 의한 불확도 $u_{MS-REST}$ 는 없다고 가정한다. 그러면 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\} = \max\{0.000995, 0.0002887\} = 0.000995$ 이므로 측정시스템(계측기)의 합성불확도 u_{MS} 와 확장불확도 U_{MS} 는 식 (3)과 (4)에 의하여 다음과 같이 계산된다. 여기서 확장불확도 계산에서의 포함인자 k 는 2라고 가정한다.

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{BI}^2 + u_{EVR}^2} = \sqrt{0.001^2 + 0.000635^2 + 0.000995^2} = 0.001547$$

$$U_{MS} = k u_{MS} = 2 \times 0.001547 = 0.003094$$

이 측정시스템(계측기)의 성능비 Q_{MS} 는 식 (5)에 의하여 다음과 같이 계산되며, $Q_{MS} \leq 15\%$ 이므로 ISO 22514-7의 절차에서도 이 측정시스템(계측기)은 합격으로 판정한다.

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{U-L} \times 100 = \frac{2 \times 0.003094}{6.03 - 5.97} \times 100 = 10.31\%$$

그리고 식 (12)와 (13)에 의하여 u_{Other} 와 % u_{Other} 를 각각 계산하면 다음과 같다.

$$u_{Other} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS-REST}^2} = \sqrt{0.001^2 + 0.000635^2 + 0^2 + 0^2} = 0.00118458$$

$$\%u_{Other} = \frac{u_{Other}}{U-L} \times 100 = \frac{0.00118458}{6.03-5.97} \times 100 = 1.9743$$

그러면 Figure 1로부터 $C_g = 2.01$ 과 $\%u_{Other} = 1.9743$ 일 때 Region 1에 속함을 확인할 수 있다.

4.2 측정프로세스 능력분석(Gage R&R study) 수치예제

측정 프로세스의 능력분석(Gage R&R study)에 대한 수치 예제를 위하여 VDA(2011, 69)의 데이터를 사용하기로 한다. 4.1절에서 분석한 측정시스템(계측기)의 능력분석에 대한 수치 예제(VDA 2011, 57)의 다음 단계로 수행한 측정실험이다. 해당 부품 10개를 3명의 측정작업자가 2회 반복 측정한 데이터가 Table 7에 주어졌다.

Table 7. Measurement data for Gage R&R study

	Operator 1		Operator 2		Operator 3	
	Trial 1	Trial 2	Trial 1	Trial 2	Trial 1	Trial 2
1	6.029	6.030	6.033	6.032	6.031	6.030
2	6.019	6.020	6.020	6.019	6.020	6.020
3	6.004	6.003	6.007	6.007	6.010	6.006
4	5.982	5.982	5.985	5.986	5.984	5.984
5	6.009	6.009	6.014	6.014	6.015	6.014
6	5.971	5.972	5.973	5.972	5.975	5.974
7	5.995	5.997	5.997	5.996	5.995	5.994
8	6.014	6.018	6.019	6.015	6.016	6.015
9	5.985	5.987	5.987	5.986	5.987	5.986
10	6.024	6.028	6.029	6.025	6.026	6.025

Table 7의 데이터에 대하여 분산분석표를 작성하면 Table 8과 같이 주어진다. 여기서 측정작업자와 부품 사이의 교호작용은 유의하지 않으므로 풀링하였다.

Table 8. ANOVA table for measurement data of Table 7

Source	SS	DF	MS	F	P
Part	0.0205865	9	0.0022874	971.061	0.000
Operator	0.0000394	2	0.0000197	8.370	0.001
Error	0.0001131	48	0.0000024		
Total	0.0207390	59			

Table 8의 분산분석표로부터 각 요인의 표준편차를 추정하면 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}_e = 0.0015348, \hat{\sigma}_o = 0.0009317, \hat{\sigma}_{op} = 0, \hat{\sigma}_p = 0.0195151$$

총 Gage R&R의 표준편차 $\hat{\sigma}_{GRR}$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}_{GRR} = \sqrt{\hat{\sigma}_o^2 + \hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2} = \sqrt{0.0009317^2 + 0 + 0.0015348^2} = 0.001795$$

따라서 Gage R&R 평가지표인 PTR과 구별범주 ndc는 각각 식 (7)과 (8)에 의하여 다음과 같이 계산되며, PTR가 30%이내, ndc가 5이상이므로 합격으로 판정한다.

$$PTR = \frac{6\hat{\sigma}_{GRR}}{U-L} \times 100 = \frac{6 \times 0.001795}{6.03 - 5.97} \times 100 = 17.95\%$$

$$ndc = 1.41 \times \frac{\hat{\sigma}_p}{\hat{\sigma}_{GRR}} = 1.41 \times \frac{0.0195151}{0.001795} \approx 15$$

다음으로 ISO 22514-7의 절차에 의하여 측정 프로세스의 측정능력을 분석하기로 한다. 위에서 계산된 각 요인의 표준편차 결과로부터 각 요인의 표준불확도를 계산하면 다음과 같다. 시료에 대한 반복성에 기인한 불확도 $u_{EVO} = \hat{\sigma}_e = 0.0015348$, 측정작업자의 재현성에 기인한 불확도 $u_{AV} = \hat{\sigma}_o = 0.0009317$, 시료와 측정작업자의 교호작용에 기인한 불확도 $u_{IA} = \hat{\sigma}_{op} = 0$. 그리고 온도에 기인한 불확도 u_T , 시간에 대한 안정성에 기인한 불확도 u_{STAB} , 측정 프로세스의 기타 요인에 의한 불확도 u_{REST} 는 모두 무시할 정도로 작다고 가정한다. 그러면 $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{RE}\} = \max\{0.000995, 0.0015348, 0.0002887\} = 0.0015348$ 이므로 측정 프로세스의 합성불확도 u_{MP} 와 확장불확도 U_{MP} 는 식 (9)와 (10)에 의하여 다음과 같이 계산된다. 단, 확장불확도 계산에서의 포함인자 k 는 2라고 가정한다.

$$u_{MP} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{AV}^2 + u_{IA}^2} = \sqrt{0.001^2 + 0.000635^2 + 0.0015348^2 + 0.0009317^2 + 0} = 0.002151$$

$$U_{MP} = k u_{MP} = 2 \times 0.002151 = 0.004302$$

이 측정 프로세스의 성능비 Q_{MP} 는 식 (11)에 의하여 다음과 같이 계산되며, $Q_{MP} \leq 30\%$ 이므로 ISO 22514-7의 절차에서도 이 측정 프로세스는 합격으로 판정한다.

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{U-L} \times 100 = \frac{2 \times 0.004302}{6.03 - 5.97} \times 100 = 14.34\%$$

이 수치예제에 대하여 3.2절에서 유도한 PTR과 Q_{MP} 사이의 관계식이 성립하는 지를 살펴보기로 한다. 식 (15)와 (16)에 의하여 u_R 와 $\%u_R$ 를 각각 계산하면 다음과 같다.

$$u_R = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{MS-REST}^2 + u_T^2 + u_{STAB}^2 + u_{REST}^2} = \sqrt{0.001^2 + 0^2 + 0.000635^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2} = 0.0011846$$

$$\%u_R = \frac{u_R}{U-L} \times 100 = \frac{0.0011846}{6.03-5.97} = 1.97414$$

그러면 본 연구에서 도출한 PTR과 Q_{MP} 사이의 관계식인 식 (17)이 다음과 같이 성립함을 알 수 있다.

$$Q_{MP} = \sqrt{(4/9) \times PTR^2 + 16 \times \%u_R^2} = \sqrt{(4/9) \times (17.95)^2 + 16 \times (1.97414)^2} = 14.34$$

그리고 Figure 2로부터 PTR = 17.95와 $\%u_R = 1.97414$ 일 때 Region 1에 속함을 확인할 수 있다.

다음으로 이 수치예제에 대하여 3.3절에서 유도한 Q_{MS} 와 Q_{MP} 사이의 관계식이 성립하는 지를 살펴보기로 한다. 먼저 식 (18)에 의하여 $u_{EV_{Diff}}^2$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$u_{EV_{Diff}}^2 = \max\{0, \min\{0.0015348^2 - 0.000995^2, 0.0015348^2 - 0.0002887^2\}\} = 0.000001365$$

식 (19)와 (20)에 의하여 u_{2total} 과 $\%u_{2total}$ 을 각각 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_{2total} &= \sqrt{u_{EV_{Diff}}^2 + u_{AV}^2 + u_{IA}^2 + u_T^2 + u_{STAB}^2 + u_{REST}^2} \\ &= \sqrt{0.000001365 + 0.0009317^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2} = 0.0014943 \\ \%u_{2total} &= \frac{u_{2total}}{U-L} \times 100 = \frac{0.0014943}{6.03-5.97} \times 100 = 2.4905 \end{aligned}$$

그러면 본 연구에서 도출한 Q_{MS} 와 Q_{MP} 사이의 관계식인 식 (21)이 다음과 같이 성립함을 알 수 있다.

$$Q_{MP} = \sqrt{Q_{MS}^2 + 16 \times (\%u_{2total})^2} = \sqrt{10.31^2 + 16 \times (2.4905)^2} = 14.34$$

그리고 Figure 3으로부터 $Q_{MS} = 10.31$ 과 $\%u_{2total} = 2.4905$ 일 때 Region 1에 속함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

측정 능력 분석은 SQC/SPC에서 가장 먼저 요구되는 분석 절차로서 대표적인 것이 Gage R&R study이다. 그러나 많은 회사에서는 Gage R&R study를 행하기 전에 Type 1 Gage study를 먼저 행한다. 그리고 최근 측정능력분석에 관한 국제 표준인 ISO 22514-7이 제정되었다. ISO 22514-7에서는 ISO/IEC Guide 98-3에 근거하여 측정 불확도를 파악하여 측정 능력을 평가하고 있으며, 현재 유럽 자동차 제조회사 및 협력회사, 우주항공회사, 및 ISO/IEC 17025를 인증받은 회사 등에서 사용하고 있다. Type 1 Gage study와 Gage R&R study에서는 측정실험 데이터로부터 계산된 분산성분(불확도의 관점에서 Type A 불확도에 해당됨)만 고려되지만, ISO 22514-7에서는 Type A 불확도뿐만 아니라 기타 요인에 의한 불확도인 Type B 불확도까지 고려하여 분석하므로 분석 절차가 더 복잡하다.

본 연구에서는 Type 1 Gage study, Gage R&R study 및 ISO 22514-7에서의 측정 능력 평가 절차에 관한 내용 및 차이점을 고찰하였고, Type 1 Gage study에서의 측정능력지수 C_g , Gage R&R study에서의 지수 PTR 및 ISO 22514-7에서의 지수인 Q_{MS} 와 Q_{MP} 사이의 관계식을 도출하였으며, 이들 지수 사이의 영향을 분석하였다.

우리나라 국가표준인 KS는 국제표준과 부합화(harmonizing)로 인하여 ISO의 표준을 그대로 채택하여 KS 표준으로 제정하고 있다. 현재 ISO 22514(공정관리의 통계적 방법-능력 및 성능) 시리즈는 KS Q ISO 22514-1, KS Q ISO 22514-2, KS Q ISO 22514-3, KS Q ISO/TR 22514-4까지 KS 표준으로 제정되어 있다. ISO 22514-7은 아직 KS 표준으로 제정되어 있지 않으나 빠른 시일 내로 제정되리라 예상된다. 따라서 기업에서는 Type 1 Gage study, Gage R&R study의 절차뿐만 아니라 ISO 22514-7의 절차로도 측정 능력 분석을 실시하여 측정의 신뢰성을 확보하여야 할 것으로 판단되며, 이에 본 연구의 결과가 도움이 될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Al-Rafaie, Abbas, and Bata, Nour. 2010. "Evaluating Measurement and Process Capabilities by GR&R with Four Quality Measures." *Measurement* 43:842-851.
- Automotive Industry Action Group(AIAG). 2010. *Measurement Systems Analysis*, 4th ed. Michigan, USA.
- Bosch. 2003. *Bosch Booklet 10: Capability of Measurement and Test Procedures*.
- Chang, Mu Sung, and Kim, Sang Bu. 2007. "Estimations of Measurement System Variability and PTR under Nonnormal Measurement Error." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 35: 10-9.
- GM. 2010. *Measurement Systems Specification Document: SP-Q-MSS*, http://www.q-das.com/uploads/tx_sbdownloader/SP-Q-MSS_Final_08-JAN-2010_vG2_01.pdf.
- International Organization for Standardization(ISO). 2005. *ISO/IEC 17025, General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization(ISO). 2007. *ISO/IEC Guide 99, International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization(ISO). 2008. *ISO/IEC Guide 98-3, Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement (GUM)*, Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization(ISO). 2012. *ISO 22514-7, Statistical Methods in Process Management - Capability and Performance - Part 7: Capability of Measurement Processes*, Geneva, Switzerland.
- Korean Agency for Technology and Standards. 2012. *KS Q ISO 22514-1, Statistical Methods in Process Management - Capability and Performance - Part 1: General Principles and Concepts*.
- Korean Agency for Technology and Standards. 2014. *KS Q ISO 22514-2, Statistical Methods in Process Management - Capability and Performance - Part 2: Process Capability and Performance of Time-Dependent Process Models*.
- Korean Agency for Technology and Standards. 2011. *KS Q ISO 22514-3, Statistical Methods in Process Management - Capability and Performance - Part 3: Machine Performance Studies for Measured Data on Discrete Parts*.
- Korean Agency for Technology and Standards. 2011. *KS Q ISO/TR 22514-4, Statistical Methods in Process Management - Capability and Performance - Part 4: Process Capability Estimates and Performance Measures*.
- Lee, Seung-Hoon, and Lee, Jong-Hwan. 2000. "A Statistical Software for Measurement Systems Analysis." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 28:175-195.
- Majeske, Karl D., and Andrews, Richard W. 2002. "Evaluating Measurement Systems and Manufacturing Processes Using Three Quality Measures." *Quality Engineering* 15:243-251.
- Seo, Sun-Keun. 2014. "Two-Dimensional Assessment for Measurement System Analysis." *Journal of the Korean*

- Society for Quality Management 42:607-616.
- Verband der Automobilindustrie(VDA). 2011. VDA Volume 5 – Capability of Measurement Processes, 2nd ed. Berlin, Germany.
- White, T. Kelvin, and Borrer, Connie M. 2011. “Two-Dimensional Guidelines for Measurement System Indices.” *Journal of Quality Technology* 27:479-487.
- Woodall, William H., and Borrer, Connie M. 2008. “Some Relationships between Gage R&R Criteria.” *Quality and Reliability Engineering International* 24:99-106.

