ISSN 1229-1889(Print)
ISSN 2287-9005(Online)
J Korean Soc Qual Manag Vol. 42, No.4: 607-616, December 2014
http://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2014.42.4.607

측정시스템 분석을 위한 2차원 척도 평가

서순근 *†

* 동아대학교 산업경영공학과

Two-Dimensional Assessment for Measurement System Analysis

Seo, Sun-Keun *†

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

ABSTRACT

Purpose: This paper reviews popular measurement system indices and proposes a procedure for assessing a measurement system using two parameters with intraclass correlation and a factor for process capability.
Methods: Gage Repeatability and Reproducibility(GR&R), precision-to-tolerance ratio(PTR), number of distinct categories, producer's and consumer's risks are employed to assess the measurement capabilities and discuss the relationships between measurement system metrics.
Results: Two-dimensional plot by two parameters is presented to assess adequacy of the measurement system and process capability. A numerical example and previously studied case study are provided for illustration.
Conclusion: The procedure proposed in this paper using two-dimension parameters provides a valuable procedure and helpful guidelines to quality and production managers in assessing the capabilities of a measurement system and choosing the needed actions to be the most benefit.

Key Words: Discrimination Error, Gage Repeatability and Reproducibility, Measurement System, Misclassification Error, Precision-to-Tolerance Ratio

● Received 20 August 2014, 1st revised 12 November 2014, accepted 28 November 2014
† Corresponding Author(skseo@dau.ac.kr)
ⓒ 2014, 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 reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
* 이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

1. 서 론

최근 들어 획득된 데이터의 신뢰성을 검증하기 위한 측정시스템의 평가가 더욱 중요하게 인식되고 있다. 계측기(gauge), 작업자, 소프트웨어, 측정절차와 방법 등으로 구성된 측정시스템의 오차는 정확도와 정밀도로 대별되며, 후자는 Gage R&R 연구에 의해 평가된다.

Gage R&R 연구는 범위법, 평균 및 범위법(관리도를 포함), ANOVA방법에 의해 수행되며, 반복성(Repeatability)과 재현성(Reproducibility), 이를 통합한 측정시스템의 변동량(σ^2_{GRR}) 등을 구하여 측정시스템의 정밀도를 평가한다(AIAG, 2010; Chang and Kim, 2007; Choi, 2006; Lee and Lee, 2000). 이의 평가지표로는 %R&R, P/T비, 구별범주의 수(NDC; number of distinct categories) 등이 주로 쓰이며, 일반적으로 %R&R와 P/T비는 10%미만(조건부 수용기준은 10~30%), NDC가 5(2~4)이상일 때 적정하다고 판정한다. 측정시스템의 분석법에 관한 연구결과와 동향은 Burdick el al.(2003)을, 평가지표들의 관계는 Woodall and Borror(2008)를 참조하면 된다.

그러나 측정시스템의 평가 시 평가지표가 연관되어 있으므로 어떤 지표들로 관리를 해야 할지, 또한 특정 (다수) 평가지표가 기준에 미달 시 어떻게 개선조치를 취해야 할지 그리 명확하지 않은 편이다.

이에 따라 최근에 White and Borror(2011)은 전통적인 평가지표인 %R&R 및 P/T비와 공정능력지수(C_p)과의 연관성을 검토하였으며, 전술된 전통적 측정시스템 평가기준이 오도된 방향으로 이끌 수 있으므로, 간략한 도식적 방법을 통해 세 지표를 관리할 수 있도록 %R&R과 P/T비에 관한 2차원 평가지침을 설정하는 방안을 제시하였다.

이와 관련된 선행연구로 Majeske and Andrews(2002)는 %R&R대신에 급내 상관계수(Intraclass correlation)을 채택하고, 더불어 P/T비 와 C_P에 관한 세 종의 평가지표를 공정변동(σ_P)과 측정시스템 변동(σ_{GRR})의 두 가지 척도에 의해 관리할 수 있는 도식적 방법을 제안하였다. 또한 Al-Rafaie and Bata(2010)는 P/T비, 공정능력지수(C_p또는 C_{pk}), NDC 및 이와 유사한 SN비의 일종이 포함된 네 종의 평가지표를 σ_P와 σ_{GRR}의 두 종의 척도에 의해 관리할 수 있도록 14가지 영역을 구분하여 각 영역에서의 개선지침을 제공하였다. 하여튼 NDC는 이 논문에서 정의된 SN비(Table 1 참고)보다 항상 크며 일의적으로 결정되므로 4종의 평가지표를 고려하고 있다고 보기는 힘들다. 따라서 평가지표들의 관계를 보다 명확하게 규명하여 평가지표의 수용범위와 관리되어야 할 척도(본 논문에서는 파라미터로 칭함)를 분명하게 파악하는 연구가 필요하다.

한편 측정시스템의 정밀도는 생산제품의 규격의 부합여부를 판정하는데 영향을 미친다. 즉, 양호한 제품이 측정시스템을 통해 불합격되는 생산자 위험과 이와 반대로 부적합 제품이 합격되는 소비자 위험에 영향을 미치므로, 측정시스템의 평가 시에 이런 오류를 고려해야 한다. 두 종의 위험을 중요시하고 이의 산정과 영향을 다루는 여러 연구들이 있다(Engel and De Vries, 1997; Mader et al., 1999; Doganaksoy, 2000).

따라서 측정시스템의 평가지표로 생산자 위험과 소비자 위험을 포함시켜 이들의 관계를 2절에서 고찰하며, 3절에서 이들을 체계적으로 평가하고 관리할 수 있는 방안을 제시하고, 4절에서 제시된 방법론의 활용가능성을 예시하고자 한다.

2. 측정시스템 평가지표에 관한 고찰

먼저 측정시스템의 평가에 널리 쓰이는 지표를 측정시스템에 관한 순수한 척도인 %R&R과 NDC, 측정시스템과 공정의 능력을 고려한 P/T비와 두 종의 위험률 순으로 통람하고 이들의 관계와 특성을 고찰한다.

2.1 %R&R

관측된 총변동(σ_T^2)은 식 (1)과 같이 공정변동(σ_P^2)과 측정시스템 변동(σ_{GRR}^2)의 합이 되며, 후자는 반복성과 재현성으로 구분된다.

$$\sigma_T^2 = \sigma_{GRR}^2 + \sigma_P^2 \tag{1}$$

%R&R는 측정오차에 관한 순수지표로 분산의 비가 아닌 표준편차의 비로 다음과 같이 정의되는데, Wheeler and Lyday(1989)에 의해 명명된 급내 상관계수($\rho = \sigma_P^2/\sigma_T^2$)로 표현될 수 있다. 따라서 식 (2)와 같이 ρ만의 함수가 된다(%보다 소수점으로 표현).

$$\begin{aligned} \%R\&R &= \frac{\sigma_{GRR}}{\sigma_T} \\ &= \sqrt{1-\rho} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 X가 대상 제품의 참값을, $Y = X + \epsilon$(ϵ는 평균과 분산이 각각 0, σ_{GRR}^2인 측정오차)가 대상 제품의 측정값을 나타내는 확률변수일 때, Y_1과 Y_2가 한 제품에 대한 독립적인 두 측정값이라면 Y_1과 Y_2의 공분산은 σ_P^2가 되므로 상관계수는 σ_P^2/σ_T^2가 되어 급내 상관계수인 ρ가 된다(Majeske and Andrews, 2002).

2.2 구별범주의 수

AIAG에서는 SN비(signal-to-noise ratio) γ를 σ_P/σ_{GRR}로 정의하고 NDC를 식 (3)과 같이 나타내고 있는데, 일부 전문가들은 $\sqrt{2}\gamma$ 또는 γ^2를 SN비로 칭하기도 한다(Woodall and Borror, 2008).

$$NDC = 1.41\gamma = 1.41\sqrt{\frac{\rho}{1-\rho}} \tag{3}$$

한편 Wheeler and Lyday(1989)는 판별비(DR; discrimination ratio)를 식 (4)와 같이 정의하고, NDC를 정수로 절사한 DR 값으로 구하고 있다.

$$DR = \sqrt{\frac{1+\rho}{1-\rho}} = \sqrt{\frac{2\rho}{1-\rho} + 1} \approx \sqrt{2}\gamma \tag{4}$$

두 식을 비교하면 DR이 NDC보다 항상 크므로 본 논문에서는 보수적인 관점에서 식 (3)을 NDC로 채택하며, 두 식도 ρ의 함수가 된다.

두 측정치의 쌍을 Figure 1과 같이 이차원 평면에 타점하면(isoplot로 불리기도 함) 이들의 상관계수 ρ하에서 점들을 포용하는 평면도형은 타원형이 되며, 이 타원의 장축과 단축의 비를 DR로 정의하고 있다(Wheeler and Lyday, 1989). 최근에 Chen and Hu(2014)는 이들 쌍이 식 (5)의 공분산 행렬($\boldsymbol{\Sigma}$)을 가지는 이변량 정규분포를 따른다고 보고 선형변환을 통해 두 축의 비가 DR이 됨을 보였다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_T^2 & \rho\sigma_T^2 \\ \rho\sigma_T^2 & \sigma_T^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Wheeler and Lyday(1989)는 Figure 1과 같이 타원의 외접 직사각형에 포함될 수 있는 정사각형(한 변이 단축)의 수로써 NDC를 설명하고 있어 이론적 근거로는 어느 정도 수긍이 되지만, 실제적으로 구별 가능한 범주의 수가 될 수 있는지 의문이 생긴다. 한편 DR를 식 (5)의 공분산 행렬에 대한 고유치의 비(작은 고유치에 대한 큰 고유치 비)로도 설명하고 있는데(Mader et al., 1999), 고유치가 $1+\rho$, $1-\rho$가 되므로 고유치 제곱근에 대한 비가 된다. 그리고 Woodall and Borror(2008)는 식 (3)에서 1.41의 근거를 98.5% 신뢰구간으로 설명하고 있으나 그리 명쾌하지 못하며, 보통 식 (4)에서의 $\sqrt{2}$를 근사한 값으로 보고 있다.

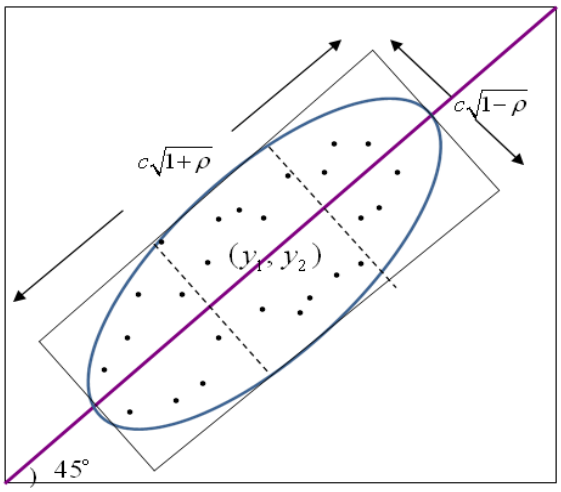

Figure 1. Isoplot: ellipse and NDC

%R&R(식 (2))의 수용기준인 10%를 식 (3)에 대입하면 NDC는 14가 되므로 수용기준인 5이상을 항상 만족하며, 또한 식 (3)에서 NDC가 5가 되는 %R&R는 27.1%가 되므로 NDC 지표는 불필요한 조건이 될 가능성이 높다. 두 지표들의 관계를 Figure 2에서 볼 수 있다.

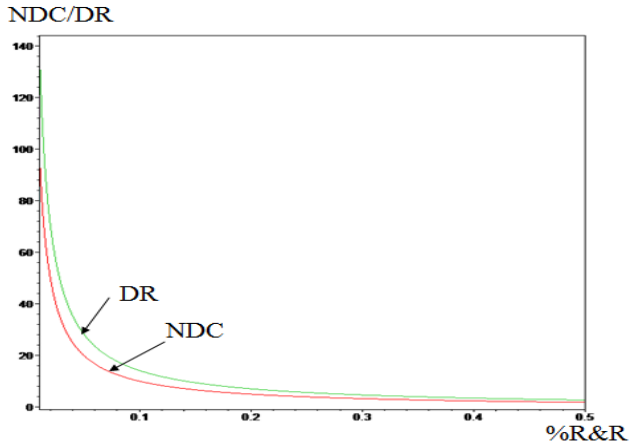

Figure 2. Relationship %R&R and NDC

2.3 P/T비

%R&R에 의해 측정시스템을 평가한 후에 널리 쓰이는 척도가 P/T(precision to tolerance)비로 공정과 측정시스템 능력을 동시에 고려한 평가지표이다. 즉, 제품 규격(규격하한(LSL)과 규격상한(USL))의 범위인 공차(TOL=USL-LSL)에 대비한 측정시스템의 정밀도를 나타내며, 측정시스템이 올바르게 제품의 합격여부를 판정할 수 있는 능력을 평가할 수 있는 용도로 쓰인다.

P/T비(PTR)는 다음과 같으므로,

$$PTR = \frac{6\sigma_{GRR}}{TOL} \tag{6}$$

TOL를 $k\sigma_P$(k는 공차를 공정 표준편차의 배수로 표현한 값임)로 나타내면 C_p가 $k/6$가 되므로, P/T비는 식 (7)과 같이 표현되어 ρ와 k의 함수가 된다.

$$PTR = \frac{\sigma_{GRR}}{\sigma_T} \cdot \frac{6\sigma_P}{TOL} \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_P} = \sqrt{\frac{1-\rho}{\rho}}\,\frac{1}{C_p} = \sqrt{\frac{1-\rho}{\rho}}\,\frac{6}{k} \tag{7}$$

요즈음 식 (6)에서 99%의 수용범위를 나타내는 5.15보다 99.7%의 수용범위를 나타내는 6이 널리 쓰이므로, C_p와의 부합도를 고려하여 식 (7)에서 6을 채택하였다. 또한 공정능력지수로 식 (7)에 쓰이는 $C_p = TOL/(6\sigma_P) = k/6$ 대신에 $C_p^{'} = TOL/(6\sigma_T)$로 정의할 수도 있는데 전자를 이상적(ideal), 후자를 실제(actual) 공정능력지수로 구별하는 부르는 전문가도 있다(White and Borror, 2011). 하여튼 $C_p^{'}$는 $C_p/\sqrt{\rho}$가 되므로 어느 공정능력지수를 선택해도 식 (7)의 성격을 변화시키지 않는다.

2.4 생산자 위험률과 소비자 위험률

전술한 세 가지 평가지표와 기준은 주관적인 성격이 강하므로 이보다 덜 주관적인 평가지표인 오분류율이 중요하게 취급되고 있다(Woodall and Borror, 2008). 즉, 측정시스템의 적정성은 적합품과 부적합품을 구별하는 능력을 나타내는 두 종의 오분류율, 적합품을 부적합품으로 분류하는 생산자 위험(false failure)률과, 부적합품을 적합품으로 분류하는 소비자 위험(missed fault)률에 의해 결정된다.

X가 $N(\mu_P,\ \sigma_P^2)$를, $Y = X + \epsilon$가 $N(\mu_P,\ \sigma_T^2)$를 따를 경우에 X와 Y의 상관계수는 $\sigma_P^2/(\sigma_P \cdot \sigma_T)$이므로 $\sqrt{\rho}$가 되어 (X, Y)는 식 (8)의 이변량 정규분포를 따른다.

$$f_{X',Y'}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho}} \exp\left(-\frac{x^2 - 2\sqrt{\rho}\,xy + y^2}{1-\rho}\right) \tag{8}$$

$$\text{단, } X' = \frac{X-\mu_P}{\sigma_P},\quad Y' = \frac{Y-\mu_P}{\sigma_T}$$

USL과 LSL을 C_p로 나타내면,

$$USL = \mu_P + 3C_p\sigma_P = \mu_P + \frac{k\sigma_P}{2}$$

$$LSL = \mu_P - 3C_p\sigma_P = \mu_P - \frac{k\sigma_P}{2}$$

가 되므로 생산자 위험률(P_{risk})은 식 (9)로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{risk} &= \int_{-\infty}^{LSL}\int_{LSL}^{USL} f_{X,Y}(x,y)dxdy + \int_{USL}^{\infty}\int_{LSL}^{USL} f_{X,Y}(x,y)dxdy \\ &= \int_{-\infty}^{-k\sqrt{\rho}/2}\int_{-k/2}^{k/2} f_{X',Y'}(x,y)dxdy + \int_{k\sqrt{\rho}/2}^{\infty}\int_{-k/2}^{k/2} f_{X',Y'}(x,y)dxdy \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 소비자 위험률(C_{risk})은 식 (10)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{risk} &= \int_{LSL}^{USL}\int_{-\infty}^{LSL} f_{X,Y}(x,y)dxdy + \int_{LSL}^{USL}\int_{USL}^{\infty} f_{X,Y}(x,y)dxdy \\ &= \int_{-k\sqrt{\rho}/2}^{k\sqrt{\rho}/2}\left(\int_{-\infty}^{-k/2} f_{X',Y'}(x,y)dx + \int_{k/2}^{\infty} f_{X',Y'}(x,y)dx\right)dy \end{aligned} \quad (10)$$

한편 식 (9)와 (10)의 결합확률로서 구한 두 위험률 대신에 적합품 비율(부적합품 비율)에 대한 조건부 생산자(소비자) 위험률을 채택할 수 있으나(Mader et al., 1999), 다음 절에 제시되는 평가모형에 보다 적합한 결합확률에 의한 위험률을 적용한다. 식 (9)와 (10)을 보면 두 위험률은 ρ와 k의 함수임을 파악할 수 있다.

따라서 대상 측정시스템이 평가기준에 미달하거나 향상시키고자 할 경우에 5가지 지표를 개별적으로 관리할 것이 아니라 ρ와 k와 2차원 실행영역을 찾아 개선방향을 모색할 수 있을 것이다

이로부터 본 논문에서 고려하는 측정시스템의 평가지표와 관리 대상 척도 또는 파라미터를 서론에 언급된 이와 유사한 성격의 기존연구와 비교한 특징을 Table 1에 정리하였다. 이를 보면 평가지표로 생산자와 소비자 위험률이 추가되더라도 관리 척도로 평가지표의 일부가 아닌 근원적인 두 파라미터로서 관리할 수 있음을 보여 주고 있다.

Table 1. Comparison of the previous and present studies

Authors	Metrics for assessing measurement system	Parameters of interest
Majeske and Andrews (2002)	ρ, PTR, C_p	σ_P , σ_{GRR}
Al-Rafaie and Bata (2010)	PTR, C_p, NDC, $\sqrt{2}\gamma$(SN비)	σ_P , σ_{GRR}
White and Borror (2011)	$\%R\&R$, PTR, C_p	$\%R\&R$, PTR
Present study	$\%R\&R$, PTR, C_p, P_{risk}, C_{risk}	ρ, $k = TOL/\sigma_P$

3. 2차원 척도 평가 모형

측정시스템의 평가지표로 2절에서 고찰된 5가지 평가지표인 %R&R, NDC, P/T비, 생산자 위험과 소비자 위험을

고려하면, 이들 지표들은 ρ와 k의 함수로 표현되므로 이들 두 가지 차원의 파라미터에 의해 측정 시스템과 공정에 대한 5가지 평가지표를 분석하고 관리할 수 있다.

즉, 다음과 같이 5가지 측정시스템의 평가지표에 대한 제약조건이 주어질 때 이를 충족하는 ρ와 k의 영역을 구할 수 있으므로 측정시스템을 2차원 파라미터에 의해 분석하고 평가할 수 있다.

$$\%R\&R = \sqrt{1-\rho} \le a_1 \tag{11}$$

$$NDC = 1.41\sqrt{\frac{\rho}{1-\rho}} \ge a_2 \tag{12}$$

$$PTR = \sqrt{\frac{1-\rho}{\rho}}\,\frac{6}{k} \le a_3 \tag{13}$$

$$P_{risk} = 2\left[\Pr(X' > -k/2, Y' > k\sqrt{\rho}/2) - \Pr(X' > k/2, Y' > k\sqrt{\rho}/2)\right] \le a_4 \tag{14}$$

$$C_{risk} = 2\left[\Pr(X' > k/2, Y' > -k\sqrt{\rho}/2) - \Pr(X' > k/2, Y' > k\sqrt{\rho}/2)\right] \le a_5 \tag{15}$$

식 (11)~(13)은 각각 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\rho \ge 1 - a_1^2$$

$$\rho \ge \frac{a_2^2}{1.41^2 + a_2^2}$$

$$\rho[(k/6)^2 a_3^2 + 1] \ge 1$$

그리고 식 (14)와 (15)를 계산 시에 이변량 정규분포의 상관계수(ρ')는 $\sqrt{\rho} > 0$가 되므로 다음의 근사법을 적용하는 것이 편리하다(Cox and Wermuth, 1991).

$$L(a,b;\rho) = \Pr(X' > a, Y' > b) \approx \Phi(-a)\left[\Phi(w(a,b;\rho') - \frac{1}{2}\rho'^2(1-\rho'^2)^{-1}\phi(w(a,b;\rho'))\right],$$
$$a > 0, b > 0 \tag{16}$$

여기서, $w(a,b;\rho') = \dfrac{\rho'\mu(a) - b}{\sqrt{1-\rho'^2}}$

$\mu(a) = E(X' \mid X' > a) = \phi(a)/\Phi(-a)$

$\sigma(a) = Var(X' \mid X' > a) = 1 + a\mu(a) - \mu(a)^2$

$\phi(\cdot)$, $\Phi(\cdot)$는 표준정규분포의 확률밀도함수와 누적분포함수임.

여기서 a와 b중에서 최소한 하나만 양수일 때는 두 값 중에서 큰 값을 a로 설정하여 식 (16)에 대입하며, $a < 0$, $b < 0$일 때는 $-a$와 $-b$중에서 큰 값을 a로 설정하면, $L(-a,-b;\rho) = \Pr(X' < a,\ Y' < b)$ 이므로 다음 관계로부터 구하면 된다.

$$L(a,b;\rho) = 1 - \Phi(-a) - \Phi(-b) + L(-a,-b;\rho)$$

4. 수치예제

대상 측정시스템의 Gage R&R(%R&R)는 20%이하, 구별범주의 수(NDC)는 6이상, P/T비는 10%이하, 생산자 위험률은 0.02%이하, 소비자 위험률은 0.01%이하가 되도록 운영하기를 원하는 경우를 고려하자.

식 (11)~(15)에 평가지표의 기준값인 $a_1 = 0.2,\ a_2 = 6, a_3 = 0.1,\ a_4 = 0.0002, a_5 = 0.0001$ 를 대입하면, 이를 충족하는 $\rho = \sigma_P^2/\sigma_T^2$와 $k = 6C_p$의 실행가능 영역(사선 표시 부분)을 Figure 3과 같이 구할 수 있다. 따라서 이 측정시스템에서 구한 k와 ρ가 Figure 3의 실행가능 영역에 타점되어야 5가지 평가지표를 충족시킬 수 있다.

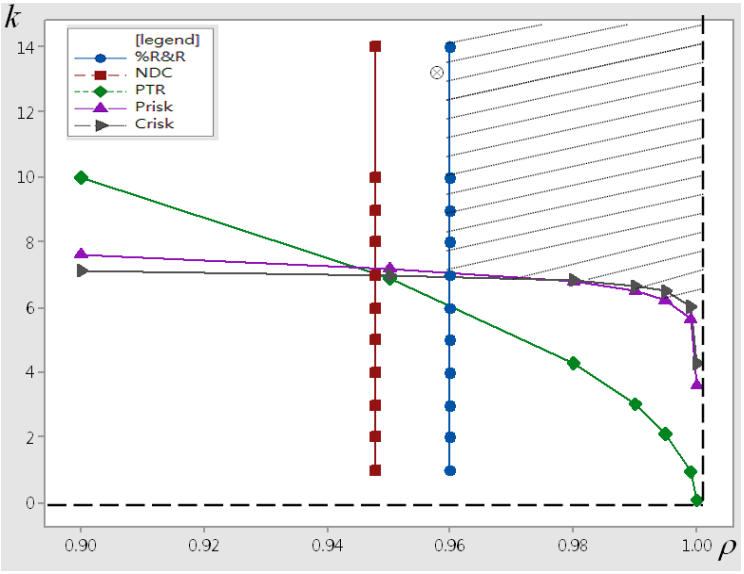

Figure 3. Feasible region of ρ and k: a numerical example

측정시스템의 평가지표에 대한 이런 요구기준의 충족여부를 Al-Rafaie and Bata(2010)에서 다룬 실제 사례의 결과에 적용할 수 있다. 이 사례는 목재 천공 공정의 측정시스템이 대상으로, 이 천공 공정의 규격은 26.15 ± 0.75(mm)이고, 작업자 3명이, 10개의 부품을 3회 반복 측정하여 수행한 Gage R&R 연구 결과가 Table 2에 요약되어 있다.

Table 2의 분산성분으로부터 구한 ρ는 $0.012896/0.013496 = 0.956$가 되며, 표준편차와 규격으로 구한 k는 $1.5/0.1136 = 13.20$가 되어 이 공정의 C_p는 2.20가 되므로 충분한 공정능력을 보여주고 있다. 하지만 이 측정시스템의 이차원 척도 값은 Figure 3에 표시된 $(\rho,\ k)$의 실행가능 영역(⊗ 표시 점)에 속하지 않는다.

Table 2. Results of gage R&R study: a case

Sources of variation	Variance component	standard deviation
Gage R&R	0.000600	0.0245
Repeatability	0.000454	0.0213
Reproducibility	0.000146	0.0121
Operator	0.000041	0.0064
Part-operator interaction	0.000105	0.0102
Part-to-part	0.012896	0.01136
Total variation	0.013496	0.01162

이를 세부적으로 분석하면 5가지 평가지표 값은 다음과 같이 계산되어 %R&R만 충족하지 못하고 있다.

$$\%R\&R = 0.245/0.1162 = 21.1\%, \quad NDC = 1.41\sqrt{0.956/(1-0.956)} = 6$$
$$PTR = 6(0.0245)/1.5 = 9.8\%$$
$$P_{risk} = 0.0009\%, \quad C_{risk} = 0.0003\%$$

따라서 이 경우의 Figure 3를 보면, 측정시스템의 %R&R를 제고하기 위해서는 k보다 ρ를 높일 수 있는(즉, 0.956에서 0.96이상으로) 방안을 찾아야 된다. 이와 같이 특정한 (다수) 평가지표가 기준에 미달할 경우 해당 평가지표 대신에 두 관리 척도 중에서 어떤 것을 어느 정도 향상시켜야 될 지에 관한 정보를 얻어 측정시스템의 개선방향을 효율적으로 모색할 수 있을 것이다.

5. 결 론

측정시스템 분석은 식스 시그마 경영혁신 활동의 측정단계와 ISO/TS 16949의 핵심 도구로 정립되어 기업에서의 활용도가 점증되고 있다.

본 논문에서는 측정시스템 분석에 쓰이는 %R&R, P/T비, 구별범주 수의 3가지 주요 평가지표에 이보다 덜 주관적인 성격을 가지는 생산자 위험과 소비자 위험을 추가하여, 이들을 체계적으로 평가하고 관리할 수 있도록 두 가지 파라미터(척도)를 추천하였다. 두 종의 측정시스템의 평가용 및 관리용으로 쓸 수 있는 파라미터는 총변동에 대한 공정변동 비율인 급내 상관계수와 공차를 나타내면서 공정능력지수와 밀접한 관계를 가진 k(공차의 공정 표준편차에 대한 배수)로서, 이들 파라미터를 통해 측정시스템의 5가지 평가지표를 이차원적으로 분석하고 관리하는 방안을 제시하였다.

즉, 공정과 측정시스템을 동시에 고려하고 있는 5가지 지표에 관한 달성조건을 수용하는 두 파라미터의 실행가능 영역을 표시하는 도식적 방법을 제안하고 이의 활용가능성과 유용성을 수치예제로서 예시하였다.

따라서 제시된 측정시스템의 2차원 도식적 분석방법론을 쉽게 활용할 수 있도록 소프트웨어로 구현할 수 있는 후속연구가 요망된다.

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. 2010. Measurement Systems Analysis, 4th ed. Detroit(USA): AIAG.

Burdick, Richard K., Borror, Connie M., and Montgomery, Douglas C. 2003. “A Review of Methods for Measurement Systems Capability Analysis.” Journal of Quality Technology 35:342-354.

Chang, Mu Sung, and Kim, Sang Bu. 2007. “Estimations of Measurement System Variability and PTR under Non-normal Measurement Error.” Journal of the Korean Society for Quality Management 35: 10-9.

Chen, Wen-Kuei, and Hu, Cheng-Feng. 2014. “Is the Isoplot an Ellipse?, A Study on Isoplot for the Measurement Systems Analysis.” Quality Engineering 26:350-358.

Choi, Cheonkyu. 2006. “A Case Study for Improvement of EOP Measurement System through 6 Sigma Introduction.” Journal of the Korean Society for Quality Management 34:51-62.

Cox, David R., and Wermuth, Nanny. 1991. “A Simple Approximation for Bivariate and Trivariate Normal

Integrals." International Statistical Review 59:263-269.
Doganaksoy, Necip. 2000. "Assessment of Impact of Measurement Variability in the Presence of Multiple Sources of Product Variability." Quality Engineering 13:83-89.
Engel, Jen, and De Vries, Bert. 1997. "Evaluating a Well-Known Criterion for Measurement Precision." Journal of Quality Technology 29:469-476.
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.
Mader, Douglas P., Prins, Jack, and Lampe, Rod E. 1999. "The Economic Impact of Measurement Error." Quality Engineering 11:563-574.
Majeske, Karl D., and Andrews, Richard W. 2002. "Evaluating Measurement Systems and Manufacturing Processes Using Three Quality Measures." Quality Engineering 15:243-251.
Wheeler, Donald. J., and Lyday, Richard W. 1989. Evaluating the Measurement Process, 2nd ed. Knoxville, USA: SPC Press.
White, T. Kelvin, and Borror, Connie M. 2011. "Two-Dimensional Guidelines for Measurement System Indices." Journal of Quality Technology 27:479-487.
Woodall, William H., and Borror, Connie M. 2008. "Some Relationships between Gage R&R Criteria." Quality and Reliability Engineering International 24:99-106.