

▣ 연구논문

6시그마 품질을 위한 Gage R&R의 영향에 관한 연구
 A Study on the Effect of Gage R&R for 6 Sigma Quality

이승훈*
 Lee, Seung-Hoon
 이정환*
 Lee, Jeong-Hwan

Abstract

6 sigma movement is the most prominent quality improvement methodology in practice. Measurement plays an important role in helping any organization improve quality. Therefore, the measurement systems analysis is the first step for the quality improvement of manufacturing process in 6 sigma movement.

In this study, we investigate the effect of Gage Repeatability and Reproducibility(Gage R&R) in view of defect rate and process capability indices, and provide guidelines for acceptance of gage repeatability and reproducibility(%R&R) for six sigma quality.

1. 서론

최근 많은 기업에서 6시그마 품질 운동을 활발히 전개하고 있다. 6시그마 품질은 공정능력지수 Cp로는 2.0이며, 100만개중 단 3.4개의 불량만을 허용하는 거의 완벽한 품질수준을 나타낸다. 6시그마 품질 운동은 1987년 Motorola사에서 처음으로 시작되어 1988년 Texas Instrument, 1993년 Asea Brown Boveri, 1994년 Allied Signal, 1995년 GE 등에서 성공적으로 적용되었다. 최근에는 Polaroid, Bombardier, Lockheed Martin, SONY, Nokia 등 다양한 기업들이 도입하고 있다. 국내에서는 1996년 삼성전판의 도입 이후에 삼성전자, 삼성전기, LG전자, 한국중공업, 창원특수강, SKC 등이 6시그마 프로그램을 도입했으며 현재 많은 대기업에서는 각 계열사로 그 범위를 넓히고 있다[1,2].

6시그마 품질운동에서 측정시스템 분석은 6시그마 품질을 위한 품질개선의 시발점으로 매우 중요하게 다루고 있다[2,3,7]. 제품의 품질을 지속적으로 개선하기 위해서는 생산되는 제품의 산포를 줄여야 하는데, 이를 위해서는 측정과정(measurement process)에 존재하는 변동량의 원인을 이해하고 정량화하여야 한다. 즉 측정과정에서 얻어지는 측정치의 산포가 제품자체의 변동때문인지, 계측기 자체의 정확·정밀도때문인지, 측정작업자의 능력차이때문인지 등을 구별하여야 하는데, 이를 위해서는 올바른 측정시스템의 관리와 적절한 통계적 분석이 요구된다.

최근 이러한 측정관리의 중요성으로 인하여 측정시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이성웅 외 2인(1999)은 현재 국내 기업의 계측기 관리 실태를 조사하여 문제점을 도출하고 계측기의 효율적 운영을 위한 관리표준을 개발하였다. 윤덕균과 민성진(1999)은 계측시스템의 공정능력을 고려하는 비공정능력지수(process incapability index)를 개발하였다. 백재욱(1998)은 측정시스템의 평가에서 MER(Measurement Error Ratio)에 대한 구간추정의 필요성 및 해당 모수에 대

* 동의대학교 기계·산업시스템공학부

한 간단한 구간추정방법, Gage R&R 분석에서 반복성과 재현성 등의 구간추정방법에 대해 논의하였고, 그리고 공정능력지수 Cp에 대한 MER의 영향을 분석하였다. 민철희와 백재욱(1998)은 통계적 공정관리 운영시 측정시스템 평가의 중요성 및 그 평가방법을 측정시스템의 정확도, 정밀도 및 안정도의 세 가지 측면에서 논의하였고, 정확도면에서는 기존의 정확도에 대한 점추정치외에 구간추정방법을 제시하였다. 백재욱과 조진남(1996)은 Gage R&R 분석에 관한 여러 가지 방법에 대해 고찰하였다. Montgomery와 Runger(1993a)는 측정시스템분석에 사용되는 전형적인 Gage R&R 분석방법에 대해서 그 통계학적 근거를 고찰하였다. Montgomery와 Runger(1993b)는 Gage R&R 분석에서 각 변동 요인에 관한 신뢰구간에 대해 논의하였고, 다양한 Gage R&R 분석 상황에 부합되는 실험계획법 모형을 제시하였다. Burdick과 Larsen(1997)은 Gage R&R 분석에서 반복성과 재현성에 대한 여러 가지 구간추정방법을 비교 연구하였다.

본 연구에서는 측정시스템 변동량(Gage R&R)의 영향을 불량률의 관점과 공정능력지수의 관점에 각각 분석하여, 이를 토대로 6시그마 품질을 위하여 Gage R&R을 어느 정도로 관리하여야 하는 가에 관한 지침(guidelines)을 제시하고 한다.

2. Gage R&R 분석 방법

측정과정에서 얻어지는 측정치에는 부품(제품) 고유의 변동량(즉, 생산공정의 변동량), 계측기 자체의 변동량, 그리고 측정작업자(평가자)의 능력차이로 인한 변동량이 수반되기 마련이다. 계측기의 변동량과 평가자간의 변동량을 합한 것을 측정시스템의 변동량이라고 한다.

$$\begin{aligned} \text{측정의 변동량} &= \text{부품의 변동량}(\sigma_p^2) + \text{계측기의 변동량}(\sigma_e^2) + \text{평가자의 변동량}(\sigma_o^2) \\ &= \text{부품의 변동량}(\sigma_p^2) + \text{측정시스템의 변동량}(\sigma_{R\&R}^2) \end{aligned}$$

측정시스템 분석에서는 계측기의 변동을 반복성(repeatability)이라 부르고, 평가자간의 변동을 재현성(reproducibility)이라고 칭한다. 즉, 반복성(repeatability)은 “동일의 평가자가 동일의 계측기를 갖고 동일한 부품을 측정하였을 때 파생되는 측정의 변동”이고, 재현성(reproducibility)은 “동일한 계측기로 동일한 부품을 측정하였을 때에 평가자간에 나타나는 측정치의 변동”이라고 정의된다. 그리고 이 두 변동(반복성과 재현성)을 합한 것, 즉 측정시스템의 변동을 ‘R&R’이라고 부른다. 이런 이유로 측정시스템의 변동량 분석을 ‘Gage R&R 분석’이라고 부른다.

‘Gage R&R 분석’ 방법에는 범위방법(range method), 평균과 범위방법(average and range method) 그리고 실험계획법 접근법(ANOVA method)등이 대표적이다. 범위방법은 반복성과 재현성을 분리할 수 없다는 단점이 있어 예비분석시에만 사용하는 것이 좋겠고, 일반적으로 평균과 범위방법, ANOVA 방법이 추천된다. 평균과 범위방법에서는 부품과 평가자 사이의 교호작용이 없다고 가정하고 있다. 그러나 ANOVA 방법에서는 이 교호작용을 명시적으로 고려하여 분석하게 된다. 따라서 부품과 평가자간의 교호작용이 존재하는 경우에는 이 방법이 더 엄밀한 방법이라고 할 수 있다[10].

Gage R&R 분석에서는 각 변동 요인의 표준편차를 위의 각 방법으로 추정한 다음, 5.15를 곱하여 각 요인에 대한 변동량의 크기를 다음과 같이 계산한다. 여기서 5.15는 표준정규분포에서 99% 범위를 포함하는 구간의 폭을 나타낸다. 공정능력지수 계산에서는 99.7%를 기준으로 평가하지만, 통상적으로 측정시스템 분석에서는 99%를 기준으로 평가하고 있다.

① 반복성(repeatability) 혹은 계측기 변동(EV : Equipment Variation) :

$$EV = 5.15 \hat{\sigma}_e$$

② 재현성(reproducibility) 혹은 평가자 변동(AV : Appraiser Variation) :

$$AV = 5.15 \hat{\sigma}_o$$

③ 반복성 및 재현성($R\&R$) : $R\&R = 5.15 \sqrt{\hat{\sigma}_e^2 + \hat{\sigma}_o^2}$

④ 부품간 변동(PV : Part-to-part Variation) : $PV = 5.15 \hat{\sigma}_p$

⑤ 총변동(TV : Total Variation) : $TV = \sqrt{(R\&R)^2 + (PV)^2}$

반복성 및 재현성($R\&R$)을 허용공차(혹은 총변동량)로 나누어 100을 곱한 값을 계산하여 측정시스템을 평가하게 된다. 이를 %R&R이라 부르며 다음과 같이 계산된다.

$$\%R\&R = \frac{R\&R}{Tolerance} \times 100 \quad \text{혹은} \quad \%R\&R = \frac{R\&R}{TV} \times 100$$

Gage R&R 분석에서는 %R&R의 값이 10%미만인 경우에는 우수한 측정시스템이라고 판정을 내리고, 10%에서 20%이면 조건부로 채택할 만한 시스템, 20%에서 30%이면 조건부로 기각할 시스템, 30%이상이면 기각할 측정시스템이라고 판정한다[Floyd, 1995].

3. 6시그마 품질을 위한 Gage R&R의 영향 분석

3.1 불량률 관점에서의 Gage R&R의 영향

3.1.1 공정평균이 규격의 중심과 일치하는 경우

부품(제품)의 규격이 $m \pm \Delta$ 이고, 부품의 품질특성치 X 는 평균이 μ 이고, 분산이 σ_p^2 인 정규분포를 따른다고 하자. 그리고 생산부품의 평균 μ 는 규격의 중심 m 과 같다고 가정하면, 이 생산공정에서의 불량률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{불량률} &= P[X < LSL] + P[X > USL] \\ &= 2 \times P[X > USL] \\ &= 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma_p}\right) \right\} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, LSL과 USL은 각각 규격하한과 규격상한, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수를 나타낸다. 예를 들어, 1시그마 공정에서는 $\Delta = \sigma_p$ 이므로

$$\text{불량률} = 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_p}\right) \right\} = 2 \times \{1 - \Phi(1)\} = 2 \times 0.158655 = 0.31731$$

이 된다. 그리고 6시그마 공정에서는 $\Delta = 6\sigma_p$ 이므로

$$\text{불량률} = 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{6\sigma_p}{\sigma_p}\right) \right\} = 2 \times \{1 - \Phi(6)\} = 2 \times 0.000000001 = 0.000000002$$

이 된다.

부품(제품)을 측정할 측정치 Y 에는 측정시스템의 오차 ε 가 수반된다고 하자. 즉, $Y = X + \varepsilon$ 이고, 측정오차 ε 는 평균이 0이고, 분산은 $\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_e^2 + \sigma_o^2$ 인 정규분포를 따른다고 하자. 즉, 측정시스템의 오차 ε 에는 계측기의 오차와 측정작업자(평가자)의 오차가 합해져 있고, 이 두 오차는 서로 독립이라고 가정한다. 그러면

$$\%R\&R = \frac{5.15\sigma_{R\&R}}{Tolerance} \times 100 \tag{2}$$

이므로

$$\sigma_{R\&R} = \frac{\%R\&R}{5.15} \times 2\Delta \tag{3}$$

이다. 따라서

$$\begin{aligned} \text{측정시스템의 변동량을 고려한 불량률} &= P\{Y < LSL\} + P\{Y > USL\} \\ &= 2 \times P\{Y > USL\} \\ &= 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\Delta}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2}}\right) \right\} \\ &= 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\Delta}{\sqrt{\sigma_p^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2\Delta}{5.15}\right)^2}}\right) \right\} \end{aligned} \tag{4}$$

만일 %R&R이 50%라면, 1시그마 공정에서는

$$\begin{aligned} \text{불량률} &= 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\sigma_p}{\sqrt{\sigma_p^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2\sigma_p}{5.15}\right)^2}}\right) \right\} \\ &= 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{50 \cdot 2}{5.15}\right)^2}}\right) \right\} \\ &= 2 \times \{1 - \Phi(0.981665)\} = 2 \times 0.163132 = 0.326264 \end{aligned}$$

이 된다. 그리고 6시그마 공정에서 %R&R이 50%라면 불량률이 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{불량률} &= 2 \times \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{6}{\sqrt{1 + \left(\frac{50 \cdot 6}{5.15}\right)^2}}\right) \right\} \\ &= 2 \times \{1 - \Phi(3.90787)\} = 2 \times 0.0000465 = 0.000093 \end{aligned}$$

따라서 6시그마 공정에서 %R&R이 50%라면 불량률이 0.002ppm에서 93ppm으로 증가한다. 이는 4시그마 수준보다도 못한 품질수준이다.

각 품질수준에서 Gage R&R의 영향을 고려한 불량률을 식 (4)에 의하여 계산한 결과가 <표 1>에 나타나 있다. <표 1>에서 %R&R이 0인 경우가 측정시스템의 오차가 없을 때의 불량률을 나타낸다. 5시그마 공정에서 %R&R값이 40%라면 불량률이 79ppm으로 4시그마 품질수준(63ppm)으로 낮아지고, %R&R값이 70%라면 불량률이 3046ppm으로 3시그마 품질수준(2700ppm)으로 낮아진다. 6시그마 공정에서는 %R&R값이 30%라면 불량률이 0.88ppm으로 5시그마 품질수준(0.57ppm)으로 낮아지고, %R&R값이 50%라면 불량률이 93ppm으로 4시그마 품질수준으로 낮아지고, %R&R값이 75%라면 불량률이 2883ppm으로 3시그마 품질수준으로 낮아진다.

<표 1> Gage R&R의 영향을 고려한 각 품질수준별 불량률(단위: ppm)

품질수준 %R&R	1시그마	2시그마	3시그마	4시그마	5시그마	6시그마
0 %	317311	45500	2700	63	0.57	0.002
5 %	317402	45663	2745	67	0.65	0.003
10 %	317675	46153	2884	77	0.92	0.005
15 %	318130	46971	3125	98	2	0.015
20 %	318766	48121	3481	134	3	0.054
25 %	319581	49608	3973	193	7	0.22
30 %	320573	51436	4626	288	16	0.88
35 %	321740	53612	5471	441	35	3
40 %	323080	56140	6544	680	79	11
45 %	324589	59026	7884	1044	167	35
50 %	326265	62273	9535	1583	334	93
55 %	328103	65884	11540	2357	632	223
60 %	330101	69860	13940	3432	1128	482
65 %	332253	74201	16774	4882	1903	947
70 %	334555	78902	20078	6776	3046	1712
75 %	337003	83958	23878	9181	4650	2883
80 %	339591	89362	28193	12153	6801	4563
85 %	342315	95104	33036	15736	9571	6846
90 %	345169	101169	38408	19960	13018	9808
95 %	348148	107545	44304	24840	17177	13505
100 %	351246	114215	50709	30376	22065	17967

3.1.2 공정평균이 규격의 중심으로부터 1.5시그마 흔들렸을 경우

공정평균이 규격의 중심으로부터 오른쪽으로 1.5시그마 흔들렸을 때의 특성치 X' 은 다음과 같은 분포를 한다.

$$X' \sim N(m + 1.5\sigma_p, \sigma_p^2) \tag{5}$$

따라서 공정평균이 1.5시그마 흔들렸을 경우, 만약에 측정시스템의 오차가 없다면 불량률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{불량률} &= P\{X' > USL\} + P\{X' < LSL\} \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{\Delta - 1.5\sigma_p}{\sigma_p}\right) + \Phi\left(\frac{-\Delta - 1.5\sigma_p}{\sigma_p}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

만일 6시그마 공정에서는 공정평균이 1.5시그마 흔들렸을 경우, 불량률은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{불량률} = 1 - \Phi(4.5) + \Phi(-7.5) = 0.0000034$$

측정시스템의 오차가 수반된 측정치 $Y = X' + \varepsilon$ 은 다음과 분포를 따른다.

$$Y \sim N(m + 1.5\sigma_p, \sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2) \tag{7}$$

따라서 공정평균이 1.5시그마 흔들렸을 경우, 측정시스템의 오차를 고려한 불량률은 다음과 같이 계산된다.

측정시스템의 변동량을 고려한 불량률

$$\begin{aligned} &= P\{Y > USL\} + P\{Y < LSL\} \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{\Delta - 1.5\sigma_p}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2}}\right) + \Phi\left(\frac{-\Delta - 1.5\sigma_p}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2}}\right) \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{\Delta - 1.5\sigma_p}{\sqrt{\sigma_p^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2\Delta}{515}\right)^2}}\right) + \Phi\left(\frac{-\Delta - 1.5\sigma_p}{\sqrt{\sigma_p^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2\Delta}{515}\right)^2}}\right) \end{aligned} \tag{8}$$

예를 들어, 6시그마 공정에서 %R&R이 50%라면 불량률이 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{불량률} &= 1 - \Phi\left(\frac{6 - 1.5}{\sqrt{1 + \left(\frac{50 \cdot 2 \cdot 6}{515}\right)^2}}\right) + \Phi\left(\frac{-6 - 1.5}{\sqrt{1 + \left(\frac{50 \cdot 2 \cdot 6}{515}\right)^2}}\right) \\ &= 1 - \Phi(2.9309) + \Phi(-4.88484) = 0.00169 \end{aligned}$$

따라서 6시그마 공정에서 평균이 1.5시그마 흔들렸을 때, %R&R이 50%라면 불량률이 3.4ppm에서 1690ppm으로 증가하게 된다.

각 품질수준에서 공정평균이 1.5시그마만큼 규격의 중심에서 벗어났을 때의 Gage R&R의 영향을 고려한 불량률을 식 (8)에 의하여 계산한 결과가 <표 2>에 주어져 있다. 5시그마 공정에서 %R&R값이 50%라면 불량률이 6018ppm으로 4시그마 품질수준(6210ppm)으로 낮아진다. 6시그마 공정에서는 %R&R값이 35%라면 불량률이 244ppm으로 5시그마 품질수준(233ppm)으로 낮아지고, %R&R값이 65%라면 불량률이 6579ppm으로 4시그마 품질수준으로 낮아진다.

<표 2> 공정평균이 1.5 시그마 변동시 Gage R&R의 영향을 고려한
 각 품질수준별 불량률(단위: ppm)

품질수준 %R&R	1시그마	2시그마	3시그마	4시그마	5시그마	6시그마
0 %	697672	308770	66811	6210	233	3.4
5 %	697647	308905	67140	6343	247	4
10 %	697573	309308	68126	6749	295	6
15 %	697449	309975	69761	7451	389	11
20 %	697276	310898	72032	8483	552	23
25 %	697056	312068	74919	9892	820	50
30 %	696789	313471	78398	11725	1246	113
35 %	696477	315095	82437	14033	1897	244
40 %	696122	316923	86999	16859	2854	498
45 %	695725	318940	92041	20234	4200	949
50 %	695288	321129	97517	24174	6018	1690
55 %	694814	323473	103377	28682	8377	2819
60 %	694306	325957	109572	33742	11327	4429
65 %	693764	328565	116053	39326	14897	6597
70 %	693194	331285	122772	45394	19092	9379
75 %	692597	334102	129685	51903	23900	12808
80 %	691975	337006	136755	58805	29296	16894
85 %	691334	339987	143945	66052	35243	21632
90 %	690674	343037	151229	73601	41701	27002
95 %	690000	346149	158581	81411	48629	32977
100 %	689315	349318	165982	89448	55985	39521

3.2 공정능력지수 관점에서의 Gage R&R의 영향

3.2.1 공정평균이 규격의 중심과 일치하는 경우

부품(제품)의 규격과 관련하여 공정능력을 평가하는 척도로서 공정능력지수(process capability index)가 있다. 공정능력지수는 공정능력과 규격의 폭과의 비율로서 생산공정이 어느정도로 균일한 품질의 제품을 생산할 능력이 있는 지를 나타내는 지수이다. 측정오차가 없는 경우의 공정능력지수 C_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{Tolerance}{6\sigma_p} = \frac{2\Delta}{6\sigma_p} \tag{9}$$

C_p 값은 1시그마 공정에서 0.33, 2시그마 공정에서 0.67, 3시그마 공정에서 1.00, 4시그마 공정에서 1.33, 5시그마 공정에서 1.67, 6시그마 공정에서 2.00이 된다

그러나 측정치에 측정시스템의 오차가 수반된 경우에는 공정능력지수 C_p 는 실제 다음과 같이 관측된다.

$$C_p^{observed} = \frac{Tolerance}{6\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2}} \quad (10)$$

그리고 식 (9)에 의하여

$$\sigma_p = \frac{2\Delta}{6C_p}$$

이므로, 관측된 공정능력지수 $C_p^{observed}$ 는 측정시스템의 오차가 없을 경우의 공정능력지수 C_p 와 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\begin{aligned} C_p^{observed} &= \frac{2\Delta}{6\sqrt{\left(\frac{2\Delta}{6C_p}\right)^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2\Delta}{515}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{6\sqrt{\left(\frac{1}{6C_p}\right)^2 + \left(\frac{\%R\&R}{515}\right)^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

각 품질수준에서 Gage R&R의 영향을 고려한 C_p 값을 식 (11)에 의하여 계산한 결과가 <표 3>에 나타나 있다. 품질수준이 낮은 공정(1시그마, 2시그마)에서는 C_p 값에 Gage R&R의 영향이 상대적으로 적었다. 그러나 품질수준이 높아질수록 %R&R의 영향은 증가하였다. 4시그마 공정에서 %R&R값이 55%라면 C_p 값은 1.01로 관측되어 3시그마 품질수준으로 평가받게 된다. 5시그마 공정에서 %R&R값이 40%라면 C_p 값은 1.32로 관측되어 4시그마 품질수준으로 평가받게 되고, %R&R값이 65%라면 C_p 값은 0.99로 관측되어 3시그마 품질수준으로 평가받게 된다. 그리고 6시그마 공정에서는 %R&R값이 30%라면 실제로 C_p 값은 1.64로 측정되어 5시그마 품질수준으로 평가받게 되고, %R&R값이 50%라면 C_p 값은 1.30으로 측정되어 4시그마 품질수준으로 평가받게 되고, %R&R값이 75%라면 C_p 값은 0.99로 측정되어 3시그마 품질수준으로 평가받게 된다.

3.2.2 공정평균이 규격의 중심으로부터 1.5시그마 흔들렸을 경우

공정평균이 규격의 중심에 위치하지 않고 한쪽에 치우쳐 있는 경우에 치우침의 정도를 고려한 공정능력지수 C_{pk} 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{USL - \mu}{3\sigma_p}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma_p}\right\} \quad (12)$$

공정평균이 규격의 중심으로부터 오른쪽으로 1.5시그마 벗어났을 경우, 만약 측정시스템의 오차가 없다면 공정능력지수 C_{pk} 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_{pk} = \frac{USL - \mu}{3\sigma_p} = \frac{\Delta - 1.5\sigma_p}{3\sigma_p} \quad (13)$$

<표 3> Gage R&R의 영향을 고려한 각 품질수준별 C_p 값

품질수준 %R&R	1시그마	2시그마	3시그마	4시그마	5시그마	6시그마
0 %	0.33	0.67	1.00	1.33	1.67	2.00
5 %	0.33	0.67	1.00	1.33	1.66	1.99
10 %	0.33	0.66	0.99	1.32	1.64	1.95
15%	0.33	0.66	0.99	1.30	1.60	1.89
20 %	0.33	0.66	0.97	1.27	1.55	1.81
25 %	0.33	0.65	0.96	1.24	1.50	1.73
30 %	0.33	0.65	0.94	1.21	1.44	1.64
35 %	0.33	0.64	0.93	1.17	1.38	1.55
40 %	0.33	0.64	0.91	1.13	1.32	1.46
45 %	0.33	0.63	0.89	1.09	1.26	1.38
50 %	0.33	0.62	0.86	1.05	1.20	1.30
55 %	0.33	0.61	0.84	1.01	1.14	1.23
60 %	0.32	0.60	0.82	0.98	1.09	1.16
65 %	0.32	0.60	0.80	0.94	1.04	1.10
70 %	0.32	0.59	0.77	0.90	0.99	1.05
75 %	0.32	0.58	0.75	0.87	0.94	0.99
80 %	0.32	0.57	0.73	0.84	0.90	0.95
85 %	0.32	0.56	0.71	0.80	0.86	0.90
90 %	0.31	0.55	0.69	0.78	0.83	0.86
95 %	0.31	0.54	0.67	0.75	0.79	0.82
100 %	0.31	0.53	0.65	0.72	0.76	0.79

공정평균이 규격의 중심으로부터 오른쪽으로 1.5시그마 벗어났을 경우, 2시그마 공정에서 C_{pk} 값은 0.17, 3시그마 공정에서 C_{pk} 값은 0.50, 4시그마 공정에서 C_{pk} 값은 0.83, 5시그마 공정에서 C_{pk} 값은 1.17, 6시그마 공정에서 C_{pk} 값은 1.50이 된다.

그러나 측정치에 측정시스템의 오차가 수반된 경우에는 공정능력지수 C_{pk} 는 실제 다음과 같이 판측된다.

$$C_{pk}^{observed} = \frac{D - 1.5\sigma_p}{3\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2}} \quad (14)$$

그리고 식 (13)으로부터

$$\sigma_p = \frac{D}{3(C_{pk} + 0.5)} \quad (15)$$

이므로, 판측된 공정능력지수 $C_{pk}^{observed}$ 는 측정시스템의 오차가 없을 경우의 공정능력지수 C_{pk} 와 식 (16)와 같은 관계를 갖게 된다.

$$\begin{aligned}
 C_{pk}^{observed} &= \frac{\Delta - 1.5\sigma_p}{3\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{R\&R}^2}} \\
 &= \frac{\Delta - 1.5\left(\frac{\Delta}{3(C_{pk} + 0.5)}\right)}{3\sqrt{\left(\frac{\Delta}{3(C_{pk} + 0.5)}\right)^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2\Delta}{515}\right)^2}} \quad (16) \\
 &= \frac{C_{pk}/(C_{pk} + 0.5)}{3\sqrt{\left(\frac{1}{3(C_{pk} + 0.5)}\right)^2 + \left(\frac{\%R\&R \cdot 2}{515}\right)^2}}
 \end{aligned}$$

공정평균이 규격의 중심으로부터 1.5시그마 흔들렸을 경우, 각 품질수준에서 Gage R&R의 영향을 고려한 C_{pk} 값을 식 (16)에 의하여 계산한 결과가 <표 4>에 주어져 있다. C_p 의 경우와 비슷하게, 품질수준이 낮은 공정(2시그마)에서는 C_{pk} 값에 Gage R&R의 영향이 상대적으로 적었다. 그러나 품질수준이 높아질수록 %R&R의 영향은 증가하였다. 4시그마 공정에서 %R&R 값이 85%라면 C_{pk} 값은 0.50로 관측되어 3시그마 품질수준으로 평가받게 된다. 5시그마 공정에서 %R&R 값이 50%라면 C_{pk} 값은 0.84로 관측되어 4시그마 품질수준으로 평가받게 된다. 그리고 6시그마 공정에서는 %R&R 값이 35%라면 실제로 C_{pk} 값은 1.16으로 측정되어 5시그마 품질수준으로 평가받게 되고, %R&R 값이 65%라면 C_{pk} 값은 0.83으로 측정되어 4시그마 품질수준으로 평가받게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 측정시스템 변동량(Gage R&R)의 영향을 불량률의 관점과 공정능력지수의 관점에서 각각 분석하였다. 분석 결과를 종합하여 다음과 같은 6시그마 품질수준을 위한 몇가지 지침(guidelines)을 제시하고자 한다.

품질수준이 낮은 공정(1시그마, 2시그마)에서는 Gage R&R의 영향이 상대적으로 적었다. 따라서 이러한 상황에서는 측정시스템을 개선하더라도 불충분한 생산공정의 공정능력을 높이지 못한다. 많은 비용을 들여 측정시스템을 개선하기 앞서서 우선 생산공정을 개선하는 데 노력을 기울여야 한다. 그러나 품질수준이 높은 공정에서는 Gage R&R의 영향이 상대적으로 컸다. 이 상황에서는 측정시스템 변동량의 효과를 보상하기 위해서는 생산공정의 공정능력을 더욱 더 높여야 한다. 따라서 이 경우에는 현재 높은 품질수준의 생산공정을 많은 노력을 들여 개선하기 앞서 우선 측정시스템을 개선하는 것이 선행되어야 한다. 6시그마 공정에서는 %R&R의 값이 30%이상이면 불량률의 관점과 공정능력지수의 관점에서 한 단계 아래인 5시그마 공정으로 평가를 받게 되므로 %R&R의 값을 30%이하로 관리하는 것이 필수적이라고 하겠다. 이러한 경우에는 우선 반복성과 재현성을 구분하여 평가한 다음, 재현성에 관련된 통계값(AV)이 높으면 측정작업자 간의 변동이 큼을 의미하여 측정작업절차서의 재검토와 측정작업자 교육에 철저를 기해야 하고, 반복성에 관련된 통계값(EV)이 높으면 문제는 계측기 자체에 있을 가능성이 높아서 계측기의 설계, 구조에 대한 재검토가 필요하다고 하겠다.

<표 4> 공정평균이 규격의 중심으로부터 1.5시그마 흔들렸을 경우
Gage R&R의 영향을 고려한 각 품질수준별 C_{pk} 값

품질수준 %R&R	2시그마	3시그마	4시그마	5시그마	6시그마
0 %	0.17	0.50	0.83	1.17	1.50
5 %	0.17	0.50	0.83	1.16	1.49
10 %	0.17	0.50	0.82	1.15	1.46
15 %	0.17	0.49	0.81	1.12	1.42
20 %	0.16	0.49	0.80	1.09	1.36
25 %	0.16	0.48	0.78	1.05	1.30
30 %	0.16	0.47	0.76	1.01	1.23
35 %	0.16	0.46	0.73	0.96	1.16
40 %	0.16	0.45	0.71	0.92	1.10
45 %	0.16	0.44	0.68	0.88	1.04
50 %	0.16	0.43	0.66	0.84	0.98
55 %	0.15	0.42	0.63	0.80	0.92
60 %	0.15	0.41	0.61	0.76	0.87
65 %	0.15	0.40	0.59	0.72	0.83
70 %	0.15	0.39	0.56	0.69	0.78
75 %	0.14	0.38	0.54	0.66	0.74
80 %	0.14	0.37	0.52	0.63	0.71
85 %	0.14	0.36	0.50	0.60	0.68
90 %	0.14	0.35	0.48	0.58	0.65
95 %	0.13	0.34	0.47	0.56	0.62
100 %	0.13	0.33	0.45	0.53	0.59

참고문헌

[1] 김광재; “6 Sigma Resources”, 1999.
URL: http://cimerr.postech.ac.kr/k/trend/tech/as/6sigma/6sigma_resources.html

[2] 김상부, 홍성훈, 권혁무, 이민구; “우리 나라 기업의 6시그마 적용을 위한 방안”, 대한산업공학회 '99 추계 학술대회 논문집, 고려대학교, 서울, 1999.

[3] 김학수, 정목용; “삼성전관(주) 6시그마 추진 사례”, 대한산업공학회 '99 추계 학술대회 논문집, 고려대학교, 서울, 1999.

[4] 민철희, 백재욱; “통계적 공정관리 추진시 측정시스템 평가의 실시방법에 관한 연구”, 응용통계 연구, 11(1), pp. 13-28, 1998.

[5] 백재욱; “측정시스템 평가에 관한 연구”, 품질경영학회지, 26(4): pp.124-141, 1998.

[6] 백재욱, 조진남; “계측기 능력분석과 실험계획법”, 품질경영학회지, 24(3): pp.145-159, 1996.

[7] 석안석; “6 시그마 운동의 성공요인 : GE 사례”, 대한산업공학회 '99 추계 학술대회 논문집, 고려대학교, 서울, 1999.

- [8] 윤덕균, 민성진; “검사/계측시스템의 능력분석을 포함한 비공정능력지수 개발과 적용에 관한 연구”, *대한품질경영학회 '99 추계 학술대회 논문집*, 성균관대학교, 수원, pp. 39-52, 1999.
- [9] 이성웅, 김수동, 김정식; “계측기기의 효율적 운영을 위한 관리표준 개발”, *품질경영학회지*, 27(20): pp.201-217, 1999.
- [10] Automobile Industry Action Group(AIAG); *Measurement System Analysis Reference Manual*, 2nd ed., ASQC Quality Press, 1995.
- [11] Burdick, R. K. and Larsen, G. A; “Confidence Intervals on Measures of Variability in R&R Studies,” *Journal of Quality Technology*, 29(3), pp. 261-273, 1997.
- [12] Floyd, D. E. and Laurent, C. J.; “Gauging: An Underestimated Consideration in the Application of Statistical Process Control,” *Quality Engineering*, 8(1), pp. 13-29, 1995.
- [13] Montgomery, D. C. and Runger, G. C.; “Gauge Capability Analysis and Designed Experiments. Part I: Basic Methods,” *Quality Engineering*, 6(1), pp. 115-135, 1993a.
- [14] Montgomery, D. C. and Runger, G. C.; “Gauge Capability Analysis and Designed Experiments. Part II: Experimental design Models and Variance Component Estimation,” *Quality Engineering*, 6(2), pp. 289-305, 1993b.