

Design of Modified $\bar{x} - s$ Control Chart based on Robust Estimation

Young-Bae Chung[†] · Yon-Soo Kim

Dept. of Industrial and Management Engineering, Incheon National University

로버스트 추정에 근거한 수정된 $\bar{x} - s$ 관리도의 설계

정영배[†] · 김연수

인천대학교 산업경영공학과

Control charts are generally used for process control, but the role of traditional control charts have been limited in case of a non-contaminated process. Traditional $\bar{x} - s$ control chart has not been activated well for such a problem because of trying to control processes as center line and control limits changed by the contaminated value. This paper suggests modified $\bar{x} - s$ control chart based on robust estimation. In this paper, we consider the trimmed mean of the sample means and the trimmed mean of the sample standard deviations. By comparing with ARL value, the responding results are decided. The comparison resultant results of traditional control chart and modified control chart are contrasted.

Keywords : Robust Estimation, Trimmed Method, Modified Control Chart

1. 서론

현대의 품질관리는 검출에 의한 사후 품질관리보다는 공정을 통계적으로 관리하는 예방 품질관리가 대세이다. 이러한 공정관리에서는 산포의 원인을 우연원인과 이상원인으로 구분하여 이상원인에 대하여 조치를 취해 제거함으로써 공정을 관리 상태로 유지하는 관리를 하고 있고, 공정이 관리 상태에 있을 때 공정의 능력을 파악하는 공정분석을 하여 공정능력을 파악하고 개선하는 공정관리활동이 기업에서는 필수적으로 이루어지고 있다. 이러한 목적으로 관리도라는 도구가 제안되었고 관리특성에 따라 계량형 관리도와 계수형 관리도가 공정관리에 많이 활용되고 있다.

현재 가장 널리 사용되는 계량형 관리도에는 $\bar{x} - R$ 관

리도와 $\bar{x} - s$ 관리도가 있다. 그러나 현대에는 이러한 공정의 관리가 자동화되고 대량생산이 됨에 따라 군의 크기가 커지면서 산포의 추정치를 구하는데 있어 $\bar{x} - R$ 관리도가 $\bar{x} - s$ 관리도보다 상대적인 효율성이 떨어지므로 $\bar{x} - s$ 관리도를 많이 활용하고 있다. 이러한 관리도를 활용하여 구한 공정능력의 평가 척도에도 여러 가지 방법이 제시되고 있고 최근에는 관리특성에 기대손실을 이용하는 공정능력의 평가 방법도 많이 제시되고 있다[1, 4].

현재 가장 널리 사용되는 전통적인 관리도는 공정에서 얻은 데이터를 기반으로 중심선과 관리한계선을 구하여 관리를 하는 방법을 택하고 있어 공정의 데이터가 정상적이고 오염이 되어 있지 않는 경우에 공정관리에 의미가 있다고 할 수 있다. 그러나 공정이 자동화되고 대량생산이 되는 상황에서 작업자, 자재, 기계, 작업방법, 환경 등 공정에 영향을 미치는 인자의 돌발적이고 예상치 못한 오염된 데이터가 공정에 들어가는 경우 이러한 데이터를 탐지하지 못하고 오염된 데이터를 포함해서 공정관리를 한다는 것은 공정의 상태를 왜곡하여 의사결정을

함으로써 기업에 커다란 손실을 야기할 수도 있다. 따라서 이러한 경우 이상치나 오염된 데이터에 영향을 받지 않는 강건한 공정의 평균과의 산포의 추정치가 필요하게 되어, 오염데이터나 이상치의 영향을 없애는 절사방법(trimmed method)에 의한 추정치의 개념에 대한 연구가 이루어져 왔다. 이러한 이유로 기존의 통계량 \bar{x} , R , s 와 같은 기존의 추정치보다 오염된 데이터에 대한 로버스트한 추정치를 이용하여 공정관리를 하는 연구가 다양하게 진행되어 왔다[2, 3, 5, 7].

Rocke[5]는 절사평균을 이용한 로버스트 관리도를 제시하였고, Schoonhoven[6, 7]은 여러 학자들에 의해 주장된 산포를 나타내는 척도에 대한 추정치에 관해 각각의 효율성을 비교하였다. 본 논문에서는 기존의 $\bar{x}-s$ 관리도에서 사용하는 평균치와 표준편차의 추정치에서 절사방법을 이용하여 각 부분군에서 구한 평균치와 표준편차를 절사율에 따라 절사평균과 절사 표준편차를 구해 관리도를 작성하는 수정된 $\bar{x}-s$ 관리도를 제시하였다. 그리고 오염된 데이터가 혼입된 공정에서 군의 크기와 군의 수를 변화 시켜가며 기존의 관리도와 본 연구에서 제시한 수정된 관리도를 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Shewhart의 3σ법 관리도

관리특성이 계량값일 경우 공정의 평균값과 산포를 관리하는 전통적인 관리도로서 Shewhart의 3σ법 관리도를 활용하고 있다. 여기에는 공정을 군구분하여 군내산포와 군간산포를 평균값과 범위 또는 표준편차로 관리하는 $\bar{x}-R$ 관리도와 $\bar{x}-s$ 관리도가 있다.

이러한 전통적인 관리도에서는 관리대상인 공정으로부터 얻어지는 데이터로부터 관리한계선을 계산하는 데 사용되는 통계량 \bar{x} , R , s 를 구하여 관리해오고 있다.

$\bar{x}-R$ 관리도와 $\bar{x}-s$ 관리도의 차이는 부분군의 크기 n 에 따른 산포의 정확성에 따라 관리도의 선택이 이루어진다.

R 관리도와 s 관리도의 산포의 상대적인 효율성은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Relative Efficiency of R&S Control chart

Subgroup size n	Relative Efficiency
2	1.000
3	0.992
4	0.975
5	0.955
6	0.930
10	0.855

군의 크기 n 이 클 때 즉, $n > 10$ 일 때는 산포를 추정하는 데 범위보다는 표준편차가 더 좋은 추정치이다. 따라서 n 이 클 때에는 $\bar{x}-R$ 관리도보다는 $\bar{x}-s$ 관리도는 사용하여야 한다. 일반적으로 부분군의 크기가 6 이하일 경우에는 R 관리도와 s 관리도의 산포의 효율성에 큰 차이가 없으나 부분군의 크기가 7 이상일 경우에는 상대적인 효율성이 90% 이하로 떨어지므로 R 관리도보다 s 관리도를 사용하는 것이 산포를 표현하는데 더욱 효과적이다. 공정을 관리하기 위해 공정의 데이터를 군구분한 데이터의 일반적인 자료표는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> General Notation for Subgroup Data

Subgroup, i	Measurements	\bar{x}_i	R_i	s_i
1	$x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}$	\bar{x}_1	R_1	s_1
2	$x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2}$	\bar{x}_2	R_2	s_2
3	$x_{13}, x_{23}, \dots, x_{n3}$	\bar{x}_3	R_3	s_3
.
.
k	$x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}$	\bar{x}_k	R_k	s_k
		$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{x}_i}{k}$	$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k}$	$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^k s_i}{k}$

2.1.1 $\bar{x}-R$ 관리도

$\bar{x}-R$ 관리도는 부분군에서 계산된 \bar{x} , R 을 타점하여 공정의 평균값과 산포를 관리하는 관리도이다. \bar{x} 관리도와 R 관리도의 중심선 CL 과 관리한계선 UCL 과 LCL 은 다음 식 (1)과 같다.

\bar{x} 관리도는

$$\begin{aligned}
 UCL &= \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \\
 CL &= \bar{\bar{x}} \\
 LCL &= \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}
 \end{aligned}$$

R 관리도는

$$\begin{aligned}
 UCL &= D_4 \bar{R} \\
 CL &= \bar{R} \\
 LCL &= D_3 \bar{R}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\bar{\bar{x}} = \sum \bar{x}_i / k$, $\bar{R} = \sum R_i / k$ 이고, A_2, D_4, D_3 는 군의 크기 n 에 따라 결정되는 상수이다.

2.1.2 $\bar{x}-s$ 관리도

$\bar{x}-s$ 관리도는 부분군에서 계산된 \bar{x} , s 를 타점하여 공정의 평균값과 산포를 관리하는 관리도이다. \bar{x} 관리도와

s 관리도의 중심선 CL 과 관리한계선 UCL 과 LCL 은 다음 식 (2)와 같다.

\bar{x} 관리도는

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s} \\ CL &= \bar{\bar{x}} \\ LCL &= \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s} \end{aligned}$$

s 관리도는

$$\begin{aligned} UCL &= B_4 \bar{R} \\ CL &= \bar{s} \\ LCL &= B_3 \bar{s} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\bar{\bar{x}} = \sum \bar{x}_i / k$, $\bar{s} = \sum s_i / k$ 이고, A_3, B_4, B_3 는 군의 크기 n 에 따라 결정되는 상수이다.

2.2 로버스트 추정치

전통적으로 공정관리를 위해 관리도를 활용하여 공정을 해석할 때에는 공정데이터를 군구분하여 통계량을 구하고 그 통계량을 활용하여 중심선과 관리한계선을 계산하여 공정의 관리 상태를 판정하고 있다. 그러나 공정에 오염된 데이터가 들어갔을 때에도 전통적인 공정관리에서는 이러한 오염된 데이터를 포함한 중심선과 관리한계선을 가지고 공정해석하고 이 자료를 이용하여 공정을 관리한다는 것은 공정을 제대로 관리하지 못한다거나 공정의 상태를 왜곡할 수도 있다. 따라서 이러한 경우 이상치나 오염된 데이터에 영향을 받지 않는 강건한 공정의 평균과의 산포의 추정치가 필요하게 되었고, 이러한 필요에 따라 이상치의 영향을 없애는 절사방법(trimmed method)에 의한 로버스트 추정치에 대한 연구가 이루어졌다[5, 6, 7].

Rocke[5]는 평균값, Schoonhoven[6]은 표준편차에 대한 로버스트 추정치를 식 (3), 식 (4)와 같이 제시하였다.

절사방법을 이용한 평균값의 로버스트 추정치로서 각 부분군의 평균값을 $(100 \times \alpha)\%$ 의 비율로 큰 값과 작은 값 양쪽에서 절사하여 평균 \bar{x}_i 의 절사 평균값인 $\bar{\bar{x}}_\alpha$ 와 표준편차 s_i 의 절사 평균값인 \bar{s}_α 를 구하는 방법이다.

$$\bar{\bar{x}}_\alpha = \frac{1}{k-2 \lceil k\alpha \rceil} \times \left[\sum_{i=\lceil k\alpha \rceil+1}^{k-\lceil k\alpha \rceil} \bar{x}_i \right] \quad (3)$$

$$\bar{s}_\alpha = \frac{1}{k-2 \lceil k\alpha \rceil} \left[\sum_{i=\lceil k\alpha \rceil+1}^{k-\lceil k\alpha \rceil} s_i \right] \quad (4)$$

여기서 α 는 절사율이며, $\lceil x \rceil$ 은 천정함수를 나타내는

것으로 x 보다 작은 가장 큰 정수를 의미한다. k 는 부분군의 수, \bar{x}_i 는 i 번째 군에서의 평균치 \bar{x} 를 의미하고, s_i 는 i 번째 군에서의 표준편차 s 를 의미한다.

i 번째 부분군의 평균치 \bar{x}_i 는 $\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}$ 이고, μ_x 의 불편추정치가 $\hat{\mu}_x = \bar{\bar{x}}$ 이므로, 평균치의 로버스트 추정치 $\bar{\bar{x}}_\alpha$ 도 $\hat{\mu}_x = \bar{\bar{x}}_\alpha$ 인 불편추정치이다.

i 번째 부분군의 표준편차 s_i 는 $s_i = \left(\frac{1}{n-1} \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \right)^{1/2}$ 이고, σ_x 의 불편추정치가 $s/c_4(k(n-1)+1)$ 이고, 여기서 $c_4(m)$ 은

$$c_4(m) = \left(\frac{2}{m-1} \right)^{1/2} \frac{\Gamma(m/2)}{\Gamma((m-1)/2)}$$

이다.

σ_x 의 불편추정치를 구하기 위해 각 부분군의 표준편차의 평균치 \bar{s} 를 사용하면 $\bar{s} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i$ 이고 σ_x 의 불편추정치는 $\bar{s}/c_4(n)$ 이다. 따라서 표준편차의 로버스트 추정치 \bar{s}_α 를 사용하면 $\hat{\sigma}_x = \frac{\bar{s}_\alpha}{c_4(n)}$ 이다.

Schoonhoven[6]은 군의 크기 n 에 따른 상수 $c_4(n)$ 을 결정하기 위해, 군의 크기 $n=5, 9$ 일 때 군의 수 $k=20, 30, 75$ 에 대한 \bar{s}_α 에 대한 상수 c_4^* 에 100,000회의 시뮬레이션의 결과를 <Table 3>과 같이 제시하였다.

<Table 3> Constants c_4^* for Unbiased Estimator

	$k=20$	$k=30$	$k=75$
$n=5$	0.579	0.585	0.568
$n=9$	0.701	0.705	0.693

Sources : Design and Analysis of Control Charts for Standard Deviation with Estimated Parameters, Schoonhoven, M, et al., 2011.

3. 수정된 $\bar{x}-s$ 관리도의 설계

로버스트 추정치에 근거한 수정된 $\bar{x}-s$ 관리도는 각각의 부분군에서 구한 평균값 \bar{x} 를 절사율 α 를 적용하여 절사를 시행한 후 구한 평균값 $\bar{\bar{x}}_\alpha$ 를 $\hat{\mu}_x$ 의 추정치로, 각각의 부분군에서 구한 표준편차 s 를 절사율 α 를 적용하여 절사를 시행한 후 구한 표준편차의 평균값 \bar{s}_α 를 $\hat{\sigma}$ 의 추정치로 사용하는 관리도로서 기존의 $\bar{x}-s$ 관리도를 로버스트 추정치를 이용하여 수정한 관리도로서 $\bar{x}_\alpha-s_\alpha$ 관리도라 부른다.

여기서 절사율 α 는 $0 < \alpha < 0.5$ 의 값을 갖는다.

$\bar{x}_\alpha - s_\alpha$ 관리도의 중심선(Center Line) CL 과 관리한계선(Control Limit)인 UCL 과 LCL 은 다음 식 (5)와 같다.

\bar{x}_α 관리도는

$$\begin{aligned} UCL &= \widehat{\mu}_{\bar{x}_\alpha} + 3\widehat{\sigma}_{\bar{x}_\alpha} \\ &= \bar{x}_\alpha + 3 \times \frac{\bar{s}_\alpha}{\sqrt{nc_4^*}} \\ &= \bar{x}_\alpha + A_3^* \bar{s}_\alpha \end{aligned}$$

$$CL = \widehat{\mu}_{\bar{x}} = \bar{x}_\alpha$$

$$\begin{aligned} LCL &= \widehat{\mu}_{\bar{x}_\alpha} - 3\widehat{\sigma}_{\bar{x}_\alpha} \\ &= \bar{x}_\alpha - 3 \times \frac{\bar{s}_\alpha}{\sqrt{nc_4^*}} \\ &= \bar{x}_\alpha - A_3^* \bar{s}_\alpha \end{aligned}$$

s_α 관리도는

$$\begin{aligned} UCL &= \widehat{\mu}_{s_\alpha} + 3\widehat{\sigma}_{s_\alpha} \\ &= (c_4^* + 3c_5^*)\hat{\sigma} \\ &= (c_4^* + 3c_5^*) \frac{\bar{s}_\alpha}{c_4^*} \\ &= (1 + 3\frac{c_5^*}{c_4^*}) \bar{s}_\alpha \\ &= B_4^* \bar{s}_\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CL &= \widehat{\mu}_{s_\alpha} \\ &= c_4^* \hat{\sigma} \\ &= c_4^* \frac{\bar{s}_\alpha}{c_4^*} \\ &= \bar{s}_\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} LCL &= \widehat{\mu}_{s_\alpha} - 3\widehat{\sigma}_{s_\alpha} \\ &= (c_4^* - 3c_5^*)\hat{\sigma} \\ &= (c_4^* - 3c_5^*) \frac{\bar{s}_\alpha}{c_4^*} \\ &= (1 - 3\frac{c_5^*}{c_4^*}) \bar{s}_\alpha \\ &= B_3^* \bar{s}_\alpha \end{aligned}$$

단,

$$\bar{x}_\alpha = \frac{1}{k-2 \lceil k\alpha \rceil} \times \left[\sum_{i=\lceil k\alpha \rceil+1}^{k-\lceil k\alpha \rceil} \bar{x}_i \right]$$

$$\bar{s}_\alpha = \frac{1}{k-2 \lceil k\alpha \rceil} \left[\sum_{i=\lceil k\alpha \rceil+1}^{k-\lceil k\alpha \rceil} s_i \right]$$

$$c_4^* = \left(\frac{2}{n-1} \right)^{1/2} \frac{\Gamma(n/2)}{\Gamma((n-1)/2)}$$

$$c_5^* = \sqrt{1 - c_4^{*2}}$$

이고, A_3^*, B_3^*, B_4^* 는 군의 크기 n 에 의해 결정되는 상수이다.

기존의 $\bar{x}-s$ 관리도와 로버스트 추정치에 근거한 $\bar{x}_\alpha - s_\alpha$ 관리도의 성능을 비교하기 위해 평균런의 길이(ARL : Average Run Length)를 이용하여 평가한다.

σ 가 알려져 있는 경우는 ARL은 $\frac{1}{p}$ 이고, σ 가 알려져

있지 않은 경우는 ARL은 $E\left(\frac{1}{P(E_i|\hat{\mu}, \hat{\sigma})}\right)$ 로 정의한다. 이

러한 기대값은 충분한 반복을 통한 데이터 세트를 발생 시킴으로 구할 수 있다.

4. 실험 및 분석

4.1 공정변화 설계

확률변수 X 가 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 인 정상적인 공정에 오염된 데이터를 투입하기 위해 평균과 산포에 변화를 준 $X \sim N(a\mu, b^2\sigma^2)$ 인 공정에서 데이터를 100(1-p)% 투입시켰을 때의 $\bar{x}-s$ 관리도와 $\bar{x}_\alpha - s_\alpha$ 관리도를 작성하고 관리도의 성능을 비교하기 위해 ARL을 구한다.

군의 크기 n 과 군의 수 k 에 따라 시뮬레이션을 실시한다.

4.2 수치 예

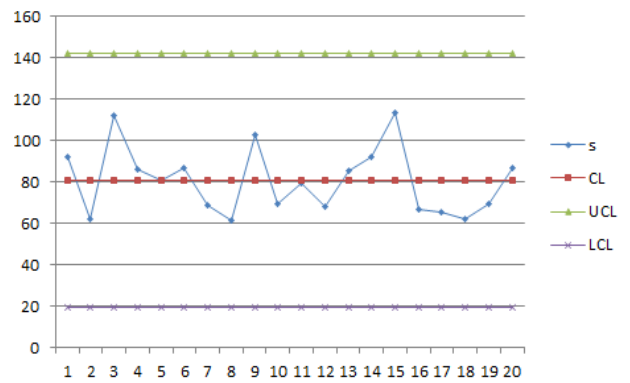
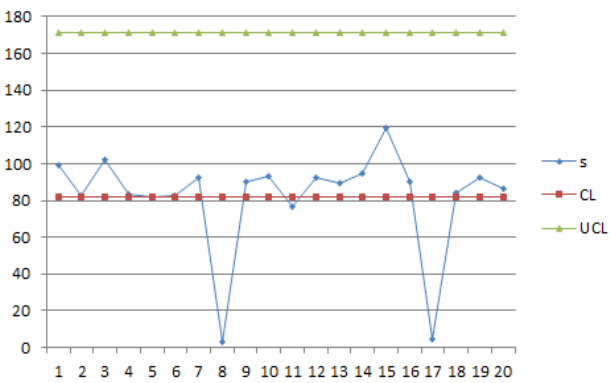
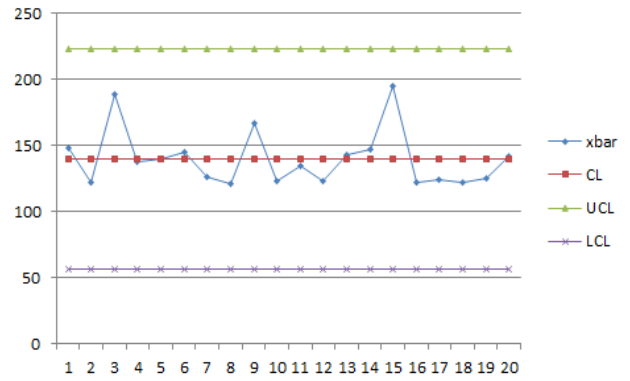
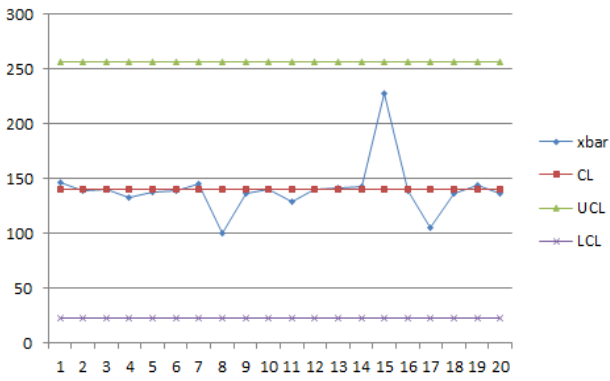
확률변수 X 가 $X \sim N(100, 5^2)$ 인 정상적인 공정에 오염된 데이터를 투입하기 위해 평균과 산포에 $a=3, b=3$ 의 변화를 준 $X \sim N(300, 15^2)$ 인 오염된 공정에서 데이터를 20% 투입시켰을 때의 $\bar{x}-s$ 관리도와 절사율 $\alpha=0.25$ 인 $\bar{x}_{0.25} - s_{0.25}$ 관리도를 작성하고 관리도의 성능을 비교하기 위해 ARL을 구한다.

군의 크기 $n = 5, 9$ 에 대해서, 군의 수 $k = 20$ 에 대해 시뮬레이션을 실시하였고, 시뮬레이션 횟수 N 은 각 case 별 50회를 실시하였다.

$\bar{x}-s$ 관리도와 $\bar{x}_{0.25} - s_{0.25}$ 관리도의 성능 비교는 <Table 4>에, 관리도는 <Figure 1>, <Figure 2>에 작성하였다.

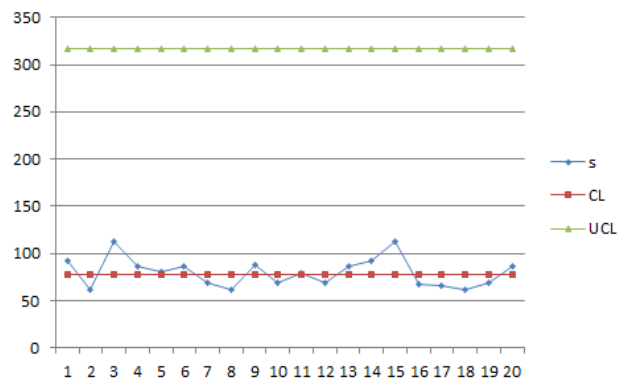
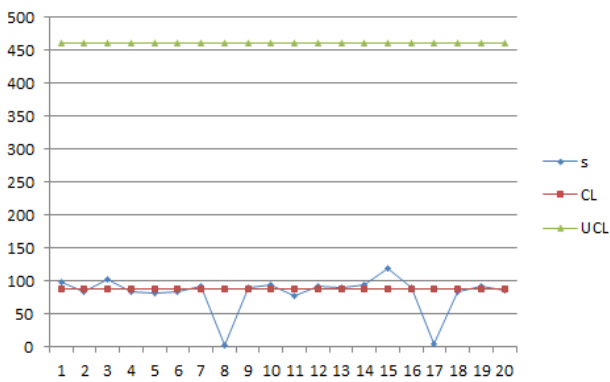
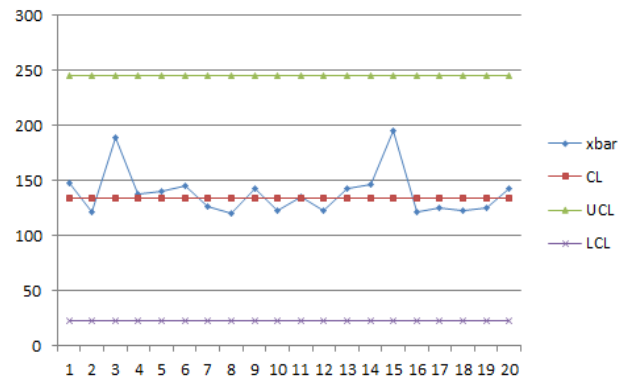
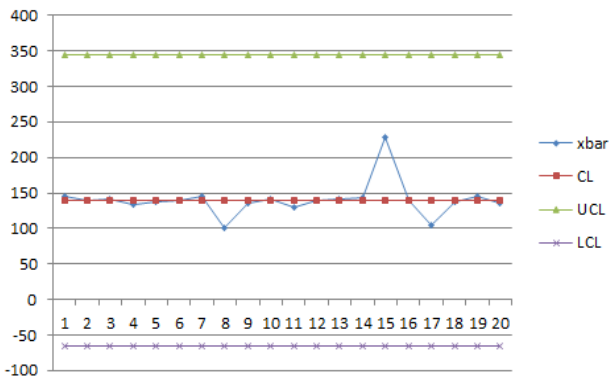
<Table 4> Comparison ARL in $\bar{x}-s$ and $\bar{x}_{0.25} - s_{0.25}$ Control Chart

n	control chart		ARL
5	$\bar{x}-s$	\bar{x}	62.7866
		s	204.4519
	$\bar{x}_{0.25} - s_{0.25}$	$\bar{x}_{0.25}$	188.7976
		$s_{0.25}$	743.7351
9	$\bar{x}-s$	\bar{x}	51.4710
		s	60.2820
	$\bar{x}_{0.25} - s_{0.25}$	$\bar{x}_{0.25}$	91.2834
		$s_{0.25}$	571.6564



(a) $\bar{x}-s$ control chart

(a) $\bar{x}-s$ control chart



(b) $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ control chart

(b) $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ control chart

<Figure 1> $\bar{x}-s$ and $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ Control Chart
(n = 5, k = 20)

<Figure 2> $\bar{x}-s$ and $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ Control Chart
(n = 9, k = 20)

본 연구에서는 계량치의 공정관리에 널리 이용되고 있는 기존의 $\bar{x}-s$ 관리도와 절사방법에 의한 로버스트 추정치에 근거한 수정된 $\bar{x}-s$ 관리도인 $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ 관리도를 작성하고 비교를 하였다. <Table 4>에서 군의 크기 $n = 5, 9$ 에 대한 ARL을 보면 기존의 $\bar{x}-s$ 관리도보다 $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ 관리도의 경우가 ARL이 크게 나와 오염된 공정의 변화에 따라 관리도가 영향을 덜 받는 강건한 관리도라는 것을 나타내고 있고, 이를 그래프로 나타낸 <Figure 1>, <Figure 2>의 관리도를 보더라도 관리한계 내의 점들의 변화에 대해 관리한계선이 기존의 $\bar{x}-s$ 관리도보다 $\bar{x}_{0.25}-s_{0.25}$ 관리도가 변화에 더 강건함을 보여 주고 있다.

5. 결 론

최근의 공정관리는 공정이 자동화됨에 따라 통계적 공정관리(SPC : Statistical Quality Control)도 on-line QC로서 소프트웨어에 의해 공정을 관리하는 추세에 있다. 이러한 자동화된 통계적 공정관리에서 돌발적이고 예상치 못한 오염된 데이터가 공정에 들어갈 수도 있고, 이러한 오염된 데이터가 포함된 중심선과 관리한계선을 가지고 공정관리를 한다는 것은 공정의 상태를 심각히 왜곡하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 오염된 데이터나 이상치에 강건한 절사방법을 이용한 로버스트 추정치를 이용하여 관리도를 작성하는 방법을 제시하였고, 기존의 관리도보다 수정된 관리도가 오염된 데이터에 강건한 관리도임을 보여 주었다. 이렇게 절사 방법을 적용한 관리도 기법은 현대의 자동화된 공정관리에서 강건한 공정관리를 수행하는데 도움을 주어 공정을 왜곡함으로써 생기는 기업의 불필요한 손실을 줄여줄 수 있을 것이라 기대된다.

Acknowledgement

This work was supported by Incheon National University

research grant in 2013.

References

- [1] Chung, Y.B. and Kim, Y.S., Comparison and Application of Process Capability Indices. *Journal of Society of Korean Industrial and System Engineering*, 2007, Vol. 30, No. 4, pp. 182-189.
- [2] Chung, Y.B. and Kim, Y.S., Design of Robust \bar{x} Control Chart using a Location Parameter. *Journal of Society of Korean Industrial and System Engineering*, 2014, Vol. 37, No. 1, pp. 151-156.
- [3] Kim, Y.J., Kim, D.H., and Chung, Y.B., The Design of Robust Control Chart for a Contaminated Process. *The Korean Society for Quality Management*, 2012, Vol. 40, No. 3, pp. 327-336.
- [4] Kim, D.H. and Chung, Y.B., Design of Expected Loss Control Chart considering Economic Loss. *Journal of Society of Korean Industrial and System Engineering*, 2013, Vol. 36, No. 2, pp. 56-62.
- [5] Roelke, D.M., Robust Control Charts. *Technometrics*, 1989, Vol. 31, No. 2, pp. 173-184.
- [6] Schoonhoven, M., Riaz, M., and Does, R.J.M.M., Design and Analysis of Control Charts for Standard Deviation with Estimated Parameters. *Journal of Quality Technology*, 2011, Vol.43, No.4, pp. 307-333.
- [7] Schoonhoven, M. and Does, R.J.M.M., A Robust Standard Deviation Control Chart. *Technometrics*, 2012, Vol. 54, No. 1, pp. 73-82.

ORCID

Young-Bae Chung | <http://orcid.org/0000-0003-4259-6677>

Yon-Soo Kim | <http://orcid.org/0000-0001-6947-718x>