

두 개의 이상원인을 고려한 VSSI \bar{X} 관리도의 경제적 - 통계적 설계

이호중 · 임태진[†]

숭실대학교 산업 · 정보시스템공학과

Economic-Statistical Design of VSSI \bar{X} Control Charts Considering Two Assignable Causes

Ho-Joong Lee · Tae-Jin Lim

Department Industrial & Information Systems Engineering, Soongsil University, Seoul, 156-743

This research investigates economic-statistical characteristics of variable sampling size and interval (VSSI) \bar{X} charts under two assignable causes. A Markov chain approach is employed in order to calculate average run length (ARL) and average time to signal (ATS). Six transient states are derived by carefully defining the state. A steady state cost rate function is constructed based on Lorenzen and Vance(1986) model. The cost rate function is optimized with respect to six design parameters for designing the VSSI \bar{X} charts. Computational experiments show that the VSSI \bar{X} chart is superior to the Shewhart \bar{X} chart in the economic-statistical sense, even under two assignable causes. A comparative study shows that the cost rate may increase up to almost 30% by overlooking the second cause. Critical input parameters are also derived from a sensitivity study and a few guideline graphs are provided for determining the design parameters.

Keywords: VSSI control chart, two assignable causes, economic-statistical design, ARL, ATS

1 서론

\bar{X} 관리도는 공정평균의 변화를 감시하기 위해 널리 사용되는 통계적 공정관리 도구로서, 기본적인 관리도는 표본크기, 샘플링 간격, 관리한계선 등을 필요로 한다. 이러한 세 가지의 모수를 결정하는 절차를 관리도의 설계라 한다. 관리도 설계에서는 통계적인 기준이 중요시되는데, 관리상태하에서의 평균 런 길이(ARL)와 이상신호를 발생하기까지의 평균시간(ATS)을 통계적 기준으로 사용한다. ARL은 이상신호가 발생할 때까지 필요한 샘플링 횟수의 기대값을 의미하고 ATS는 이상원인이 발생한 시점으로부터 이상신호 발생시점까지의 평균시간을 나타낸다.

통계적 기준만으로 설계된 관리도는 바람직한 통계적 특성

을 만족하지만 운영비용이 높아질 수 있다는 단점이 있다. Duncan(1956)은 총 운영비용을 낮추기 위하여 관리도의 설계에 경제적인 기준을 고려하였고, 그 이후로 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 경제적 접근방법은 공정을 감시하고 관리하는 데 관련된 모든 비용요소를 고려하여 비용함수를 구성하고, 이 비용함수를 최소화하는 설계모수들의 최적해를 구한다.

Woodall(1986)은 경제적 모형에서는 최소의 운영비용이 소요되도록 관리도를 설계할 수는 있지만 통계적인 속성이 무시되어 오경보의 증가와 같은 문제점들이 생겨날 수 있다고 지적하였고, 공정에 대한 불필요한 조정 때문에 품질 특성치의 분산이 증가할 수 있다고 주장하였다.

Prabhu *et al.*(1997)은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 관리상태와 이상상태에서의 ATS에 제약을 추가하고, 추가된 제

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

[†] 연락저자 : 임태진 교수, 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1 숭실대학교 산업 · 정보시스템공학과, Fax : 02-825-1094,

E-mail : tjlim@ssu.ac.kr

2004년 10월 접수; 2005년 1월 수정본 접수; 2005년 2월 게재 확정.

약에 의해 필요한 통계적 속성을 만족하면서 비용함수를 최소화하는 접근방법을 사용하였다. 물론 순수한 경제적 설계와 비교해 봤을 때 새로운 제약의 추가로 더 많은 비용이 소요될 수 있으나, 이 손실은 오경보의 감소와 공정평균의 이동을 빨리 감지할 수 있다는 이익으로 상쇄된다.

관리도의 전통적인 샘플링 방법은 공정으로부터 일정한 크기의 표본을 일정한 간격으로(FSSI; Fixed Sample Size and Sampling Interval) 취하는 것이다. Shewhart \bar{x} 관리도는 FSSI 방법을 취하며 상대적으로 큰 공정의 이동을 감지하는데 우수한 성능을 제공한다. 하지만 관리도로 공정을 감시할 때 표본의 통계량이 관리상태에서 관리한계선 가까이 타점된다면 다음의 점들은 관리한계선 밖으로 나갈 가능성이 크기 때문에 통계량의 위치에 따라 가변적인 표본크기나 샘플링 간격을 사용하여 전형적인 관리도의 성능을 향상시킬 수 있다. VSSI \bar{x} 관리도는 표본크기와 샘플링 구간을 동시에 변화시킴으로써 고정된 표본크기와 샘플링 구간을 사용하는 일반적인 관리도에 비해 더 우수한 성능을 갖도록 한 것이다.

단일 이상원인이 존재하는 경우에 VSSI \bar{x} 관리도를 적용하면 Shewhart \bar{x} 관리도에 비해 운영비용과 오경보 발생률 측면에서 유리하다는 사실은 이미 밝혀진 바 있다(Prabhu *et al.*, 1997). 그러나 현실적으로 공정의 이상원인은 여러 가지가 존재하고 최근에는 공정의 완전자동화에 의해 이상원인을 크게 기계에 의한 이상원인과 재료에 의한 이상원인과 같이 몇 가지로 나누어서 관리를 한다(Sim and Kang, 2000). 따라서, 본 연구에서는 공정에 두 종류의 이상원인이 존재하는 경우에 대하여 Lorenzen and Vance (1986) 모형에 기초한 VSSI \bar{x} 관리도의 경제적-통계적 설계절차를 제안한다. 또한 수치예제를 통하여 두 개의 이상원인이 존재하는 경우에도 VSSI \bar{x} 관리도의 경제적-통계적 특성이 Shewhart \bar{x} 관리도에 비해 우수함을 보인다. 단, 실제 현장에 적용하기 용이한 관리도를 설계하기 위하여 두 종류의 표본크기와 샘플링 구간만을 고려한다.

제2장에서는 VSSI \bar{x} 관리도를 소개하고, 제3장에서는 공정에 두 종류의 이상원인이 존재하는 경우에 대하여 Lorenzen and Vance 모형에 기초한 VSSI \bar{x} 관리도의 경제적-통계적 설계 절차를 제안한다. 제4장에서는 수치예제를 통하여 VSSI \bar{x} 관리도의 효율성을 조사하고, 민감도분석을 수행하여 비용함수에 지대한 영향을 미치는 입력모수를 구한다. 제5장에서는 결론 및 추후연구 방향을 제시한다.

2. VSSI \bar{x} 관리도

본 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

- $\Phi(\cdot)$: 표준정규 누적분포함수
- \bar{x}_i : i 번째 표본군의 표본평균
- s_i : i 번째 표본군의 표준화된 통계량

- k : 표준화된 관리한계선의 폭
- LCL : 표준화된 표본평균의 관리하한선
- UCL : 표준화된 표본평균의 관리상한선
- $(LCL, UCL) = [-k, k]$

설계모수(design parameters)

- w : 표준화된 표본평균의 임계한계선
- n_0 : FSSI 관리도의 고정 표본크기
- n_1 : VSSI 관리도의 최소 표본크기
- n_2 : VSSI 관리도의 최대 표본크기
- h_0 : FSSI 관리도의 고정 샘플링 구간
- h_1 : VSSI 관리도의 최소 샘플링 구간
- h_2 : VSSI 관리도의 최대 샘플링 구간
- $I_1 = [-w, w]$: VSSI 관리도의 임계한계 내 영역
- $I_2 = (LCL, -w) \cup (w, UCL)$: VSSI 관리도의 임계한계 외 영역
- $I_3 = (LCL, UCL)$: 관리한계 영역

비용모수(cost parameters)

- a : 고정 샘플링 비용
- b : 단위당 가변 샘플링 비용
- C_0 : 관리상태에서 불량품생산에 의해 소요되는 기대비용
- C_1 : 이상상태에서 불량품생산에 의해 소요되는 기대비용
- W : 이상원인을 조사하고 위치를 알아내 제거하는 데 소요되는 비용
- Y : 오경보 1건당 발생비용

공정모수(process parameters)

- λ_1 : 이상원인 A1의 발생률
- λ_2 : 이상원인 A2의 발생률
- Λ : 이상원인의 총 발생률($\lambda_1 + \lambda_2$)
- δ_1 : 이상원인 A1에 의한 공정평균의 표준화된 이동
- δ_2 : 이상원인 A2에 의한 공정평균의 표준화된 이동
- γ_1 : 지시변수(이상원인을 조사하는 동안 공정이 멈추면 0, 아니면 1)
- γ_2 : 지시변수(공정을 수리하는 동안 공정이 멈추면 0, 아니면 1)

시간모수(time parameters)

- T_0 : 오경보를 조사하는 데 소요되는 평균시간
- T_1 : 이상원인에 대한 평균 조사시간
- T_2 : 이상원인을 제거하는 데 소요되는 평균시간
- e : 하나의 관측치를 샘플링하고 검사 기록하는 데 소요되는 평균시간

통계량(statistics)

- ARL_0 : 관리상태에서 평균 런 길이
- ARL_δ : 이상상태에서 평균 런 길이
- ATS_0 : 관리상태에서 이상신호가 발생하기까지 평균시간
- ATS_δ : 이상원인이 발생하였을 때 이상신호가 발생하기까지 평균 소요시간
- P_δ : 전이확률 $p_{ij}(\delta)$ 를 원소로 갖는 상태 전이행렬
- $p_{ij}(\delta)$: 공정평균이 $\delta\sigma$ 이동되었을 때 상태 i 로부터 상태 j 로의 전이확률
- Q_δ : 흡수상태와 관련된 원소가 사라진 상태 전이행렬
- b : 초기 상태의 확률 벡터
- b_i : 최초 관리통계량이 각 상태 i 에 있을 확률

제약(constraints)

- l : ATS 제약의 하한
- u : ATS 제약의 상한

FSSI 관리도는 고정된 h_0 시간마다 n_0 개의 표본을 추출하여 표본평균을 관리도에 타점하는 반면, VSSI 관리도는 (n_1, h_2) 와 (n_2, h_1) 을 각각 하나의 쌍으로 사용한다. 두 개의 표본크기와 샘플링 구간을 사용하는 이유는 관리도의 복잡함을 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 실제 현장에 적용하기에 용이하기 때문이다. 여기서 (n_1, h_2) 는 최소의 표본크기와 가장 긴 샘플링 구간을 나타내고, (n_2, h_1) 은 최대의 표본크기와 가장 짧은 샘플링 구간을 나타내며, 각 쌍은 $n_1 < n_0 < n_2$ 및 $h_1 < h_0 < h_2$ 을 만족하도록 선택된다.

표본평균이 임계한계선 $[-w, w]$ 사이에 타점되면 다음의 표본을 추출할 때 최소 표본크기 n_1 과 최대 샘플링 구간 h_2 를 선택하고, 임계한계선과 관리한계선 사이에 타점되면 최대 표본크기 n_2 와 최소 샘플링 구간 h_1 을 선택한다.

즉, i 번째 표본크기와 샘플링 구간을 각각 $n(i)$ 와 $h(i)$ 라고 하면 이들은 다음과 같이 결정된다(Prabhu et al., 1994).

$$(n(i), h(i)) = \begin{cases} (n_2, h_1) , & \text{if } Z_{i-1} \in I_2 \\ (n_1, h_2) , & \text{if } Z_{i-1} \in I_1 \end{cases}$$

단, $Z_i = \frac{\bar{X}_i - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n(i)}}$ 는 표준화된 표본평균으로서 표준정규 분포를 따르며, μ_0 는 공정평균, σ 는 공정표준편차, \bar{X}_i 는 i 번째 표본평균을 나타낸다. Z_i 가 관리영역 I_3 를 벗어나면 관리도는 이상신호를 발생한다.

VSSI \bar{X} 관리도는 공정이 이상상태에 있을 때 큰 표본을 자주 샘플링하여 Shewhart \bar{X} 관리도보다 좀더 빨리 공정의 이동을 감지할 수 있어 불량품 생산에 의해 소요되는 비용을 줄일

수 있으나, 더 많은 샘플링 비용이 소요될 가능성도 있다.

3. 두 개의 이상원인을 고려한 경제적-통계적 설계

두 개의 이상원인을 고려한 경제적통계적 설계를 위하여 본 연구에서 사용하는 가정은 다음과 같다.

- ① 품질특성치는 정규분포를 따른다
- ② 공정 이상원인의 종류는 두 가지만을 고려한다
- ③ 공정은 관리상태에서 시작하고, 공정의 이상원인은 공정 평균을 변화시킨다.
- ④ 두 이상원인의 발생시간은 지수분포를 따른다
- ⑤ 두 이상원인의 발생은 독립적이다
- ⑥ 하나의 이상원인이 발생하면 동일한 이상원인이 반복해서 발생하지는 않는다.
- ⑦ 두 이상원인이 모두 발생하면 공정평균의 이동을 증폭시킨다. 즉, $\delta = \delta_1 + \delta_2$.

하나의 주기는 공정의 시작부터 이상원인이 제거될 때까지 경과된 시간으로 정의되며, 이상원인의 발생에 의해 공정의 평균은 새로운 값으로 이동하고, 공정은 이상상태가 된다. 또한, 이상원인의 제거는 주기의 끝과 새로운 주기의 시작을 나타낸다. 공정의 시작부터 이상원인이 발생하는 시점까지를 관리상태라 하고 관리상태의 끝부터 이상원인이 제거될 때까지를 이상상태라 하는데, 공정은 관리상태에서도 잘못된 신호를 발생시킬 수 있다. 이러한 오경보는 실제 이상원인인지 조사되어야 하기 때문에 추가비용과 시간이 소요된다.

3.1 ARL과 ATS의 계산

ATS_δ 는 마코프 체인을 이용하여 계산할 수 있으며, 관리도 상에서 통계량의 위치상태와 이상원인의 존재상태를 고려하여 공정의 상태(state)를 <Figure 1>과 같이 정의한다. 즉, 이전 샘플링 시점 이후로 다음 샘플링 시점 직전까지를 하나의 상태로 정의한다.

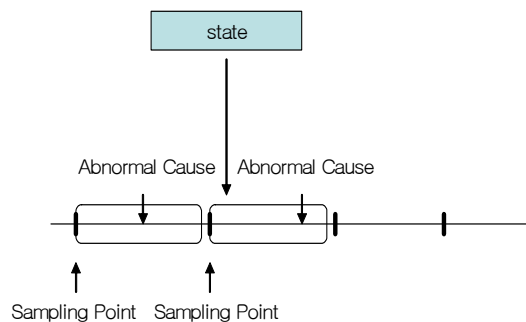


Figure 1. State definition of the process.

이상원인이 발생한 이후 이상신호가 발생하기 전의 상태를 다음과 같이 아홉 가지로 정의할 수 있다.

- 상태 1: $Z_{i-1} \in I_1$, 이상원인 A1 존재
- 상태 2: $Z_{i-1} \in I_1$, 이상원인 A2 존재
- 상태 3: $Z_{i-1} \in I_1$, 이상원인 A1, A2 존재
- 상태 4: $Z_{i-1} \in I_2$, 이상원인 A1 존재
- 상태 5: $Z_{i-1} \in I_2$, 이상원인 A2 존재
- 상태 6: $Z_{i-1} \in I_2$, 이상원인 A1, A2 존재
- 상태 7: $Z_{i-1} \in I_3$, 이상원인 A1 존재
- 상태 8: $Z_{i-1} \in I_3$, 이상원인 A2 존재
- 상태 9: $Z_{i-1} \in I_3$, 이상원인 A1, A2 존재

상태 7, 8, 9에서는 이상신호가 발생하여 런이 마감되므로 흡수상태가 되며, 런 프로세스는 다음과 같은 전이확률 행렬을 갖는 마코프 체인에 의해 설명된다.

$$P_\delta = [[p_{ij}(\delta)]]_{1 \leq i, j \leq 9} \quad (1)$$

단, $p_{ij}(\delta)$ 는 공정평균이 $\delta\sigma$ 이동되었을 때 이전 상태 i 로부터 현재 상태 j 로의 전이확률을 나타낸다(상세한 식은 Lee and Lim(2004) 참조).

ARL_δ 및 ATS_δ 를 구하기 위해서는 다음과 같이 흡수상태와 관련된 원소를 제외한 과도상태만의 전이확률 행렬 Q_δ 와 초기 상태의 확률 벡터 \mathbf{b} 를 계산한다(상세한 식은 Lee and Lim(2004) 참조).

$$Q_\delta = [[p_{ij}(\delta)]]_{1 \leq i, j \leq 6} \quad (2)$$

$$\mathbf{b} : \mathbf{b}' = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6)$$

$$b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 = 1 \quad (3)$$

마코프 체인의 특성에 따라 이상신호 발생까지 각 상태를 방문한 기대횟수는 평균 런 길이(ARL_δ)가 되고, 각 상태에서의 샘플링 구간이 $\mathbf{h}' = (h_2, h_2, h_2, h_1, h_1, h_1)$ 이므로 \mathbf{h} 와 평균 런 길이의 곱은 이상신호를 발생하기까지의 평균시간(ATS_δ)이 된다(Prabhu et al., 1994).

$$ARL_\delta = \mathbf{b}'(I - Q_\delta)^{-1}\mathbf{1} \quad (4)$$

$$ATS_\delta = \mathbf{b}'(I - Q_\delta)^{-1}\mathbf{h} \quad (5)$$

단, I 는 6×6 단위행렬이며, $\mathbf{1}$ 은 6×1 단위 열 벡터를 나타낸다.

공정평균이 이동되었을 때 평균 표본크기와 평균 샘플링 구간은 각각 다음과 같다.

$$E_\delta[N] = \frac{\mathbf{b}' Q_\delta (I - Q_\delta)^{-1} \mathbf{n}}{\mathbf{b}' Q_\delta (I - Q_\delta)^{-1} \mathbf{1}} \quad (6)$$

$$E_\delta[H] = \frac{\mathbf{b}' Q_\delta (I - Q_\delta)^{-1} \mathbf{h}}{\mathbf{b}' Q_\delta (I - Q_\delta)^{-1} \mathbf{1}} \quad (7)$$

단, \mathbf{n}' 은 $(n_1, n_1, n_1, n_2, n_2, n_2)$ 이다.

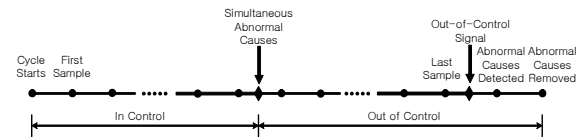
3.2 단위시간당 비용함수

단위시간당 기대비용을 계산하기 위해서는 기대주기와 주 기대비용을 구해야 한다.

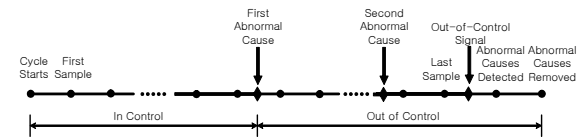
기대주기 계산

하나의 주기는 관리상태 지속시간 이상신호 발생까지의 경과시간, 그리고 조사와 수리 기간 등을 포함하며 다음과 같이 구성된다.

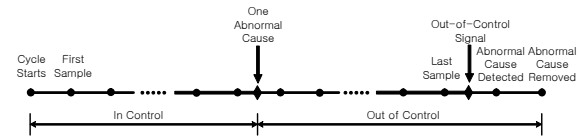
- ① 첫 번째 이상원인이 발생할 때까지의 시간
- ② 다음 표본을 샘플링할 때까지의 경과시간
- ③ 관측치를 샘플링하고 검사하고, 기록하는 데 소요되는 시간
- ④ 이상신호가 발생할 때까지의 시간
- ⑤ 이상원인을 조사, 제거하고, 고장을 수리하는 데 소요되는 시간



(a) Occurrence of two abnormal causes in the same sampling interval



(b) Occurrence of two abnormal causes in different sampling intervals



(c) Occurrence of just one abnormal cause

Figure 2. Process cycles under two assignable causes.

하나의 주기를 구성하는 세 가지 경우를 고려해 보면(Figure 2)와 같다. 첫 번째는 이상원인이 동시에 발생하는 경우로서 한 샘플링 구간에서 두 이상원인이 발생하는 경우를 나타낸다 이때는 공정평균이 $(\delta_1 + \delta_2)\sigma$ 만큼 증폭 이동된다. 두 번째는 하나의 이상원인이 먼저 발생하고 발견되지 않은 상태로 샘플링이 지속되다가 다른 이상원인이 발생한 후에 발견되는 경우를 나타낸다. 마지막은 하나의 이상원인이 발생한 후 다른 이상원인이 발생하기 전에 발견되는 경우를 나타낸다

이상원인 A1과 A2가 발생하는 시간이 각각 평균 $1/\lambda_1$ 과 $1/\lambda_2$ 인 지수분포를 따른다고 하자. 이상원인 발생까지의 평균시간은 $1/\Lambda = 1/(\lambda_1 + \lambda_2)$ 이 되고, 샘플링 구간이 h_i ($i = 1, 2$)일 때, 관리상태에서 샘플링되는 표본의 기대횟수는 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{\infty} \int_{jh_i}^{(j+1)h_i} j e^{-\Lambda h_i} dh_i = \frac{e^{-\Lambda h_i}}{(1 - e^{-\Lambda h_i})} \quad (8)$$

관리상태에서 각각 샘플링 구간 h_i 를 사용하는 표본의 비율을 f_i ($i = 1, 2$)라고 하면 관리상태에서 관측되는 표본의 기대횟수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s &= \frac{e^{-\Lambda h_1}}{1 - e^{-\Lambda h_1}} f_1 + \frac{e^{-\Lambda h_2}}{1 - e^{-\Lambda h_2}} f_2 \\ &= \frac{e^{-\Lambda h_1}}{1 - e^{-\Lambda h_1}} \left[\frac{Pr(Z \in I_2)}{Pr(Z \in I_3)} \right] \\ &\quad + \frac{e^{-\Lambda h_2}}{1 - e^{-\Lambda h_2}} \left[\frac{Pr(Z \in I_1)}{Pr(Z \in I_3)} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

이상원인 발생의 평균시간과 오경보를 조사하는 평균시간은 다음과 같다.

$$A_1 = (1/\Lambda) + (1 - \gamma_1) s T_0 / ARL_0 \quad (10)$$

여기서, γ_1 은 이상원인을 조사하는 동안 공정이 멈추면 0의 값을 갖고, 그렇지 않으면 1의 값을 갖는 지시변수이다.

VSSI \bar{X} 관리도에서는 표본평균의 위치에 따라 h_1 과 h_2 를 번갈아 사용하므로 이상원인이 발생하기 전의 마지막 샘플링 시점부터 이상원인 발생까지의 평균 경과시간도 다음과 같이 두 가지 경우로 나누어서 생각할 수 있다. 이상원인 발생 직전에 샘플링된 표본에 대하여 샘플링 구간 h_i 가 사용된다면 그 이후 이상원인 발생까지의 평균 경과시간은 다음과 같다

$$\tau_i = \frac{\int_{h_i n}^{h_i(n+1)} \Lambda(x - h_1 n) e^{-\Lambda x} dx}{\int_{h_i n}^{h_i(n+1)} \Lambda e^{-\Lambda x} dx}$$

$$= \frac{1 - (1 + \Lambda h_i) e^{-\Lambda h_i}}{\Lambda(1 - e^{-\Lambda h_i})}, \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

따라서, 관리상태에서 h_1 과 h_2 를 사용하여 보낸 시간의 비율을 각각 p_1 과 p_2 라고 할 때 이상원인이 발생하기 전의 마지막 샘플링 시점부터 이상원인 발생까지의 평균 경과시간은 다음과 같다.

$$\zeta = \tau_1 p_1 + \tau_2 p_2 \quad (12)$$

여기서, p_1 과 p_2 는 각각 $h_1 f_1$ 과 $h_2 f_2$ 에 비례하며 $p_2 + p_1 = 1$ 이다.

$$p_1 = \frac{f_1 h_1}{f_1 h_1 + f_2 h_2} = f_1 \frac{h_1}{h_0} \quad (13)$$

$$p_2 = \frac{f_2 h_2}{f_1 h_1 + f_2 h_2} = f_2 \frac{h_2}{h_0} \quad (14)$$

하나의 관측치를 샘플링하고 검사하고 기록하는 데 소요되는 평균시간을 e 라 하면 하나의 표본을 관리도에 적용하는 데 소요되는 기대시간은 다음과 같다.

$$A_2 = E_\delta [N] e \quad (15)$$

이상원인을 조사하는데 소요되는 기대시간이라 T_1 이라고 하고, 이상원인을 제거하기 위하여 공정을 수리하는 데 소요되는 기대시간을 T_2 라 하면 기대 총 주기시간 R 은 다음과 같다.

$$R = A_1 - \zeta + A_2 + ATS_\delta + T_1 + T_2 \quad (16)$$

주기당 기대비용

공정의 주기당 기대비용은 위에서 계산한 시간요소들과 각 요소에 해당되는 주기비용의 곱으로 나타낼 수 있다. 비용함수에서 고려해야 할 비용요소는 다음과 같다.

- ① 오경보 조사와 관련된 비용
- ② 관리상태에서 불량품생산에 의해 발생하는 비용
- ③ 이상상태에서 불량품생산에 의해 발생하는 비용
- ④ 샘플링 비용
- ⑤ 공정을 수리하는 데 소요되는 비용

관리상태에서 생산된 몇몇 제품들은 공정의 명세사항에 따라 불량품으로 확인될 수 있다. 이와 같이 관리상태 동안 불량품생산에 의해 소요된 시간당 기대비용을 C_0 로 나타낸다. 또한, 이상원인에 의하여 공정평균이 이동되었을 때 관리도가 이상신호를 발생시킬 때까지 공정은 이상상태에서 운영되며 이 기간 동안 불량품생산에 의해 소요된 시간당 기대비용을 C_1 으로 나타낸다.

공정은 이상원인을 조사하는 기간과 공정을 수리하는 기간에 멈추거나 계속될 수 있다. 이에 따라 불량품생산에 의한 주기당 기대비용을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_1 = C_0(1/A) + C_1(AT\mathcal{S}_\delta - \zeta + E_\delta[N]e + \gamma_1 T_1 + \gamma_2 T_2) \quad (17)$$

샘플링에 대한 고정비용과 가변비용을 각각 a 와 b 라고 하면 관리상태에서의 샘플링 비용은 $(a + bn_0)s$ 가 되고, 관리상태와 이상상태 동간의 총 샘플링 비용은 다음과 같다

$$B_2 = (a + bn_0)s + (a + bE_\delta[N])[ARL_\delta + \frac{\gamma_1 T_1 + \gamma_2 T_2}{E_\delta[H]}] \quad (18)$$

단, $E_\delta[H]$ 는 식 (7)로부터 계산한다.

오경보 1회당 비용을 Y 라 하면 오경보에 대한 기대비용은 다음과 같다.

$$B_3 = Y\left(\frac{s}{ARL_0}\right) \quad (19)$$

이상원인을 조사하고 위치를 알아내어 제거하는 데 소요되는 비용을 W 라 하면, 주기당 총 기대 비용은

$$B_1 + B_2 + B_3 + W \quad (20)$$

시간당 기대비용은 재생보상정리에 의하여 다음과 같이 기대 주기에 대한 주기당 기대비용의 비율로 나타낼 수 있다.

$$C = (B_1 + B_2 + B_3 + W)/R \quad (21)$$

이를 목적함수로 하여 최소화함으로써 VSSI \bar{X} 관리도의 최적 설계모수 n_1^* , n_2^* , h_1^* , h_2^* , w^* , k^* 를 구한다.

3.3 VSSI \bar{X} 관리도의 경제적-통계적 설계

VSSI \bar{X} 관리도의 성능을 평가하기 위하여 공정이 관리상태에 있을 때 기대 표본크기와 샘플링 구간이 Shewhart \bar{X} 관리도의 표본크기 n_0 및 샘플링 구간 h_0 와 같아지도록 다음과 같은 제약을 부과한다.

$$E[n(i) | Z_{i-1} \in I_3; \delta_1 = \delta_2 = 0] = n_0 \quad (22)$$

$$E[h(i) | Z_{i-1} \in I_3; \delta_1 = \delta_2 = 0] = h_0 \quad (23)$$

관리상태에서 표준화된 통계량이 각 구간에 속할 확률은 다음과 같다.

$$P_1(0) = 2\Phi(w) - 1,$$

$$P_2(0) = 2[\Phi(UCL) - \Phi(w)],$$

$$P_3(0) = 2\Phi(UCL) - 1$$

따라서 제약식 (22)와 (23)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$n_0 P_3(0) = n_1 P_1(0) + n_2 P_2(0) \quad (24)$$

$$h_0 P_3(0) = h_2 P_1(0) + h_1 P_2(0) \quad (25)$$

이를 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다(Prabhu *et al.*, 1994).

$$w = \Phi^{-1}\left(\frac{2\Phi(UCL)[n_0 - n_2] + (n_1 - n_0)}{2(n_1 - n_2)}\right) \quad (26)$$

$$w = \Phi^{-1}\left(\frac{2\Phi(UCL)[h_0 - h_1] + (h_2 - h_0)}{2(h_2 - h_1)}\right) \quad (27)$$

따라서, 최대 샘플링 구간 h_2 는 다음과 같이 다른 설계모수들의 함수로 표현할 수 있다.

$$h_2 = \frac{h_0(n_1 - n_2) - d - h_1 c}{n_1 - n_2 - c} \quad (28)$$

$$\text{단, } d = 2(h_0 - h_1)(n_1 - n_2)\Phi(UCL),$$

$$c = 2(n_0 - n_2)\Phi(UCL) + (n_1 - n_0).$$

따라서, n_0 와 h_0 , 공정모수와 비용모수가 주어지면 VSSI \bar{X} 관리도에 대한 최적의 설계모수는 다음과 같이 통계적 제약하에서 비용함수를 최소화하여 구할 수 있다.

$$\text{Minimize } C = (B_1 + B_2 + B_3 + W)/R$$

$$\text{Sub. to } AT\mathcal{S}_0 > l,$$

$$AT\mathcal{S}_\delta < u.$$

단, l 은 관리상태에서 $AT\mathcal{S}$ 의 하한을, u 는 이상상태에서 $AT\mathcal{S}$ 의 상한을 나타낸다.

최적화 과정

단계 1. 각종 모수 $\lambda_1, \lambda_2, \delta_1, \delta_2, \gamma_1, \gamma_2, C_0, C_1, a, b, W, Y, T_0, T_1, T_2, e, l, u$ 를 정한다.

단계 2. Shewhart \bar{X} 관리도의 최적화 과정을 통하여 n_0, h_0 를 구한다.

단계 3. n_1 을 1로 초기화한다.

단계 4. n_2 를 $n_0 + 1$ 로 초기화한다.

단계 5. w 와 h_2 는 각각 식 (26)과 식 (28)에 의해 결정되며, h_1 , k 에 대하여 제약을 만족하도록 비용함수 C 를 최소화한다.

단계 6. C 와 이 때의 n_1, n_2, h_1, k 를 저장한다.

단계 7. C 가 감소한다면 n_2 를 1만큼 증가시키고, 단계 5로 간다. 그렇지 않으면, 다음 단계로 간다.

단계 8. 주어진 n_1 에 대하여 최소의 C 와 이 때의 n_1, n_2, h_1, k 를 저장한다.

단계 9. $n_1 < n_0 - 1$ 인 동안 n_1 을 1만큼 증가시키고, 단계 4로 간다.

단계 10. 최소의 C 를 선택하면 이 때의 n_1, n_2, h_1, h_2, w, k 가 최적의 설계모수가 된다.

4. 수치예제

본 연구에서는 주어진 최적화 문제를 풀기 위하여 GAUSS 6.0의 'optmum' 함수를 사용하였다.

4.1 FSSI 관리도와 비교

먼저 공정평균의 변화를 일으키는 두 개의 이상원인이 발생하는 공정에서 Shewhart \bar{X} 관리도와 VSSI \bar{X} 관리도의 성능을 비교하였다.

<Table 1>은 본 예제에 사용된 공정과 비용모수로서 Prabhu et al.(1997)의 문제집합을 두 개의 이상원인이 존재하는 경우로 변형하여 총 32개의 문제집합을 생성하였다 <Table 2>는 공통적으로 사용되는 고정모수의 값을 나타낸다.

<Table 3>은 표준 Shewhart \bar{X} 관리도와 VSSI \bar{X} 관리도에 대한 최소 주기당 기대비용과 그 때의 최적 설계모수를 나타낸다. 이상을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- ① 모든 문제에 대하여 VSSI \bar{X} 관리도의 주기당 기대비용은 Shewhart \bar{X} 관리도의 주기당 기대비용보다 작게 나타났다.
- ② 모든 문제에 대하여 VSSI \bar{X} 관리도의 ATS_0 가 Shewhart \bar{X} 관리도의 \bar{X} 보다 작다. 이것은 공정이 이상상태에 있을 때 큰 표본을 자주 샘플링하여 Shewhart \bar{X} 관리도보다 좀더 빨리 공정의 이동을 감지할 수 있다는 것을 의미한다. 물론, 그만큼 더 많은 샘플링 비용이 소요될 수 있으나 불량품생산에 의해 소요되는 비용을 줄여 전체적인 비용감소 효과를 가져온 것으로 해석된다.
- ③ 통계적인 제약에 의하여 ATS_0 는 하한 l 이상이 되어야 하므로 비용의 증가를 가져올 수 있으나 이 손실은 오경

보의 감소에 의하여 보상될 수 있다 문제집합 중 1, 5, 21은 VSSI 관리도를 사용하여 오경보를 줄인 경우에 해당된다.

Table 1. Process and cost parameters

No	process and cost parameters									
	λ_1	λ_2	C_0	C_1	W	a	b	Y	δ_1	δ_2
1	0.01	0.01	100	250	150	2	0.6	500	1	1
2	0.05	0.01	100	250	150	1	0.2	200	0.5	1
3	0.01	0.05	100	250	150	1	0.2	200	1	0.5
4	0.05	0.05	100	250	150	2	0.6	500	0.5	0.5
5	0.01	0.01	200	250	150	1	0.2	500	0.5	0.5
6	0.05	0.01	200	250	150	2	0.6	200	1	0.5
7	0.01	0.05	200	250	150	2	0.6	200	0.5	1
8	0.05	0.05	200	250	150	1	0.2	500	1	1
9	0.01	0.01	100	500	150	1	0.6	200	0.5	0.5
10	0.05	0.01	100	500	150	2	0.2	500	1	0.5
11	0.01	0.05	100	500	150	2	0.2	500	0.5	1
12	0.05	0.05	100	500	150	1	0.6	200	1	1
13	0.01	0.01	200	500	150	2	0.2	200	1	1
14	0.05	0.01	200	500	150	1	0.6	500	0.5	1
15	0.01	0.05	200	500	150	1	0.6	500	1	0.5
16	0.05	0.05	200	500	150	2	0.2	200	0.5	0.5
17	0.01	0.01	100	250	300	2	0.2	200	0.5	0.5
18	0.05	0.01	100	250	300	1	0.6	500	1	0.5
19	0.01	0.05	100	250	300	1	0.6	500	0.5	1
20	0.05	0.05	100	250	300	2	0.2	200	1	1
21	0.01	0.01	200	250	300	1	0.6	200	1	1
22	0.05	0.01	200	250	300	2	0.2	500	0.5	1
23	0.01	0.05	200	250	300	2	0.2	500	1	0.5
24	0.05	0.05	200	250	300	1	0.6	200	0.5	0.5
25	0.01	0.01	100	500	300	1	0.2	500	1	1
26	0.05	0.01	100	500	300	2	0.6	200	0.5	1
27	0.01	0.05	100	500	300	2	0.6	200	1	0.5
28	0.05	0.05	100	500	300	1	0.2	500	0.5	0.5
29	0.01	0.01	200	500	300	2	0.6	500	0.5	0.5
30	0.05	0.01	200	500	300	1	0.2	200	1	0.5
31	0.01	0.05	200	500	300	1	0.2	200	0.5	1
32	0.05	0.05	200	500	300	2	0.6	500	1	1

Table 2. Fixed parameters

fixed parameters	value
γ_1	1
γ_2	0
T_0	5.5
T_1	3.5
T_2	8.0
e	0.275
u	500
l	8

Table 3. Comparison between Shewhart \bar{X} chart and VSSI \bar{X} chart

	Shewhart \bar{X} chart						VSSI \bar{X} chart									%R
	n_0^*	h_0^*	k^*	ATS_0	ATS_δ	C^*	n_1^*	n_2^*	h_1^*	h_2^*	w^*	k^*	ATS_0	ATS_δ	C^*	
1	9	1.8	2.90	500.00	3.38	113.55	1	10	0.7	11.0	0.14	3.16	1160.22	2.70	111.35	1.94
2	18	0.6	3.23	500.00	3.86	137.29	1	19	0.2	7.3	0.07	3.23	500.00	1.97	131.12	4.50
3	18	0.6	3.23	500.00	3.86	137.29	1	19	0.2	7.3	0.07	3.23	500.00	1.97	131.12	4.50
4	18	1.3	3.01	500.00	5.61	151.13	1	19	0.4	16.8	0.07	3.01	500.00	3.06	137.30	9.15
5	22	2.0	2.88	500.00	6.45	193.52	1	23	0.6	31.7	0.06	3.13	1121.82	4.25	188.77	2.45
6	10	1.7	2.94	500.00	4.12	175.47	1	11	0.5	11.6	0.13	2.94	500.00	2.98	171.39	2.32
7	10	1.7	2.94	500.00	4.12	175.47	1	11	0.5	11.6	0.13	2.94	500.00	2.98	171.39	2.32
8	7	0.5	3.30	500.00	1.79	159.63	1	8	0.3	1.7	0.18	3.30	500.00	1.14	158.63	0.63
9	20	1.1	3.08	500.00	5.05	177.84	1	21	0.4	14.0	0.06	3.08	500.00	2.65	164.17	7.69
10	9	0.4	3.37	500.00	2.17	185.83	1	10	0.2	2.0	0.14	3.37	500.00	1.42	181.80	2.17
11	9	0.4	3.37	500.00	2.17	185.83	1	10	0.2	2.0	0.14	3.37	500.00	1.42	181.80	2.17
12	7	0.4	3.38	500.00	1.50	192.49	1	8	0.3	1.0	0.18	3.38	500.00	1.04	190.23	1.17
13	8	0.7	3.19	500.00	1.96	216.11	1	9	0.4	3.0	0.16	3.19	500.00	1.30	214.89	0.56
14	18	0.7	3.18	500.00	4.21	273.59	1	19	0.3	8.8	0.07	3.18	500.00	2.17	259.23	5.25
15	18	0.7	3.18	500.00	4.21	273.59	1	19	0.3	8.8	0.07	3.18	500.00	2.17	259.23	5.25
16	16	0.3	3.40	500.00	3.56	277.45	1	17	0.1	3.5	0.08	3.40	500.00	1.82	266.07	4.10
17	21	1.3	3.02	500.00	5.23	126.65	1	22	0.4	18.2	0.06	3.02	500.00	2.77	120.04	5.21
18	9	1.0	3.09	500.00	3.48	130.38	1	10	0.4	5.8	0.14	3.09	500.00	2.42	127.04	2.57
19	9	1.0	3.09	500.00	3.48	130.38	1	10	0.4	5.8	0.14	3.09	500.00	2.42	127.04	2.57
20	8	0.6	3.25	500.00	1.64	126.67	1	9	0.3	2.8	0.16	3.25	500.00	1.03	124.98	1.34
21	9	2.7	2.78	500.00	4.58	189.86	1	10	1.0	16.6	0.14	2.97	925.29	3.69	188.28	0.83
22	19	1.1	3.05	500.00	4.93	187.40	1	20	0.4	14.5	0.07	3.05	500.00	2.65	181.81	2.98
23	19	1.1	3.05	500.00	4.93	187.40	1	20	0.4	14.5	0.07	3.05	500.00	2.65	181.81	2.98
24	17	1.6	2.95	500.00	6.61	186.71	1	18	0.4	19.7	0.07	2.95	500.00	3.74	176.77	5.33
25	8	0.5	3.29	500.00	1.55	140.65	7	9	0.3	0.7	0.67	3.29	500.00	1.06	140.04	0.43
26	18	0.7	3.20	500.00	4.09	233.33	1	19	0.2	8.3	0.07	3.20	500.00	2.08	216.66	7.15
27	18	0.7	3.20	500.00	4.09	233.33	1	19	0.2	8.3	0.07	3.20	500.00	2.08	216.66	7.15
28	16	0.3	3.47	500.00	3.19	246.03	1	17	0.1	2.6	0.08	3.47	500.00	1.66	235.66	4.22
29	21	1.4	2.99	500.00	5.55	250.74	1	22	0.5	20.2	0.06	2.99	500.00	2.96	236.00	5.88
30	9	0.3	3.39	500.00	2.10	239.17	1	10	0.2	1.9	0.14	3.39	500.00	1.36	235.88	1.37
31	9	0.3	3.39	500.00	2.10	239.17	1	10	0.2	1.9	0.14	3.39	500.00	1.36	235.88	1.37
32	7	0.5	3.32	500.00	1.72	240.70	6	8	0.3	0.6	0.67	3.32	500.00	1.11	238.17	1.05

%R : Percent reduction in cost of the VSSI \bar{X} control chart relative to the Shewhart \bar{X} control chart

4.2 하나의 이상원인만 고려한 경우

<Table 4>는 두 개의 이상원인이 존재하는 공정에서 하나의 이상원인만을 고려하여 설계한 VSSI \bar{X} 관리도와 주기당 최적 기대비용을 비교한 결과를 나타낸다. 모든 문제에 대하여 두 개의 이상원인을 고려한 VSSI \bar{X} 관리도의 주기당 기대비용이 작게 나타났고, 최대 30%의 차이가 있었다. <Table 3>에서

FSSI 관리도와 비교한 비용차이가 최대 7% 정도인 것과 비교할 때, 이상원인의 개수를 올바르게 파악하는 것이 관리도의 선택보다도 더 중요한 문제임을 알 수 있다.

4.3 민감도 분석

본 연구의 비용함수에는 여러 입력모수가 포함되어 있는데

이 중에서 비용함수에 큰 영향을 끼치는 공정모수와 비용모수를 알아내기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 10개의 입력모수를 대상으로 하므로 실험의 횟수를 줄이기 위하여 <Table 5>에서와 같이 2개의 수준을 정하여 2^{10} 형의 $\frac{1}{8}$ 일부실시로 128회의 실험을 수행하였다.

<Figure 3>은 128회의 실험결과를 통하여 비용함수에 큰 영향을 주는 요인을 확인하기 위하여 작성한 파레토 차트로서

기준선을 벗어나는 효과는 유의수준 0.05에서 유의하다. 이 차트에서는 10개 모수의 주 효과뿐만 아니라 2차 상호작용의 유의성까지 확인할 수 있다.

<Figure 4>는 주 효과의 수준변화에 따른 비용함수의 변화를 나타내는 차트로서 각 모수가 비용함수에 미치는 영향을 알아볼 수 있다. 이를 종합하면, 비용함수에 가장 큰 영향을 미치는 모수는 C_0 와 C_1 이고, $\lambda_1, \lambda_2, \delta_1, \delta_2$ 도 비용변화에 영향

Table 4. Comparison between VSSI \bar{X} chart under one assignable cause and two assignable causes

	one assignable cause									two assignable causes	%R
	n_1	n_2	h_1	h_2	w	k	ATS_0	ATS_δ	C	C^*	
1	1	5	0.8	4.1	0.32	3.45	2923.74	8.91	121.08	111.35	8.04
2	1	6	0.3	1.5	0.25	3.26	500.00	16.58	159.04	131.12	17.56
3	1	6	0.3	1.5	0.25	3.26	500.00	16.58	159.04	131.12	17.56
4	1	9	0.4	3.7	0.16	3.16	500.00	8.07	152.01	137.30	9.68
5	1	10	0.6	9.5	0.14	3.37	2115.40	21.91	201.25	188.77	6.20
6	1	6	0.7	3.7	0.25	3.02	500.00	4.99	174.84	171.39	1.98
7	1	6	0.7	3.7	0.25	3.02	500.00	4.99	174.84	171.39	1.98
8	1	4	0.4	0.8	0.43	3.38	698.56	4.38	164.69	158.63	3.68
9	1	9	0.4	3.6	0.16	3.15	500.00	11.10	188.24	164.17	12.78
10	3	5	0.2	0.4	0.67	3.40	500.00	3.97	190.97	181.80	4.80
11	3	5	0.2	0.4	0.67	3.40	500.00	3.97	190.97	181.80	4.80
12	1	4	0.3	0.4	0.43	3.39	500.00	3.64	204.27	190.23	6.88
13	2	4	0.5	1.0	0.67	3.17	500.00	5.29	224.11	214.89	4.11
14	3	5	0.3	0.5	0.67	3.34	500.00	21.60	333.64	259.23	22.30
15	3	5	0.3	0.5	0.67	3.34	500.00	21.60	333.64	259.23	22.30
16	6	8	0.2	0.4	0.67	3.45	500.00	7.69	290.08	266.07	8.28
17	1	10	0.5	7.0	0.14	3.09	620.98	11.33	130.43	120.04	7.97
18	1	6	0.5	2.4	0.25	3.22	671.96	4.58	130.49	127.04	2.65
19	1	6	0.5	2.4	0.25	3.22	671.96	4.58	130.49	127.04	2.65
20	1	4	0.5	0.8	0.43	3.26	500.00	4.26	132.95	124.98	5.99
21	2	4	1.2	2.5	0.67	3.06	852.70	10.41	193.39	188.28	2.64
22	1	6	0.5	2.8	0.25	3.30	1013.62	26.73	208.20	181.81	12.67
23	1	6	0.5	2.8	0.25	3.30	1013.62	26.73	208.20	181.81	12.67
24	1	9	0.4	4.5	0.16	3.11	500.00	8.43	186.76	176.77	5.35
25	1	4	0.3	0.9	0.43	3.49	1060.35	5.76	155.27	140.04	9.81
26	1	5	0.4	0.6	0.32	3.32	500.00	22.33	307.59	216.66	29.56
27	1	5	0.4	0.6	0.32	3.32	500.00	22.33	307.59	216.66	29.56
28	6	8	0.2	0.3	0.67	3.53	500.00	7.78	262.48	235.66	10.22
29	1	10	0.5	6.8	0.14	3.15	733.92	12.15	259.86	236.00	9.18
30	3	5	0.2	0.3	0.67	3.44	500.00	4.04	244.01	235.88	3.33
31	3	5	0.2	0.3	0.67	3.44	500.00	4.04	244.01	235.88	3.33
32	1	4	0.4	0.6	0.43	3.32	500.00	3.88	250.94	238.17	5.09

%R : Percent reduction in cost of the VSSI \bar{X} control chart considering two assignable causes

을 미치고 있다. 또한, $C_0, C_1, \lambda_1, \lambda_2$ 는 값이 커짐에 따라 비용을 증가시키는 반면, δ_1 과 δ_2 의 증가는 비용을 감소시킨다

는 것을 알 수 있다. 공정평균의 이동폭이 클수록 발견하기 쉽기 때문인 것으로 해석된다.

Table 5. Parameter levels

	low level	high level
λ_1	0.01	0.05
λ_2	0.01	0.05
C_0	100	200
C_1	250	500
W	150	300
a	1	2
b	0.2	0.6
Y	200	500
δ_1	0.5	1.0
δ_2	0.5	1.0

본 연구에서는 공정과 비용모수에 따른 표본크기, 샘플링 간격, 관리한계선을 구하는 방법을 제안하고 있으나 실제 현장에서는 매번 이들 값에 따라 설계모수를 구하는 것이 다소 어려울 수도 있다. 따라서 민감도 분석을 통하여 각 설계모수의 변화에 가장 큰 영향을 끼치는 공정모수와 비용모수를 찾아내어 그 모수에 따른 대략적인 설계모수 값을 제시한다.

민감도 분석은 위와 동일한 실험계획으로 시행하였으며 그 결과 n_1, n_2, w 등에 가장 큰 영향을 끼치는 모수는 δ_2 이고, h_1, h_2, k 등에 가장 큰 영향을 끼치는 모수는 C_1 이라는 것을 확인하였다. 따라서 다른 모수 값이 크게 변하지 않는다면 <Figure 5>와 같은 그래프를 통하여 δ_2 에 따라 설계모수 n_1, n_2, w 를 결정할 수 있고, C_1 에 따라 h_1, h_2, k 를 결정할 수 있다.

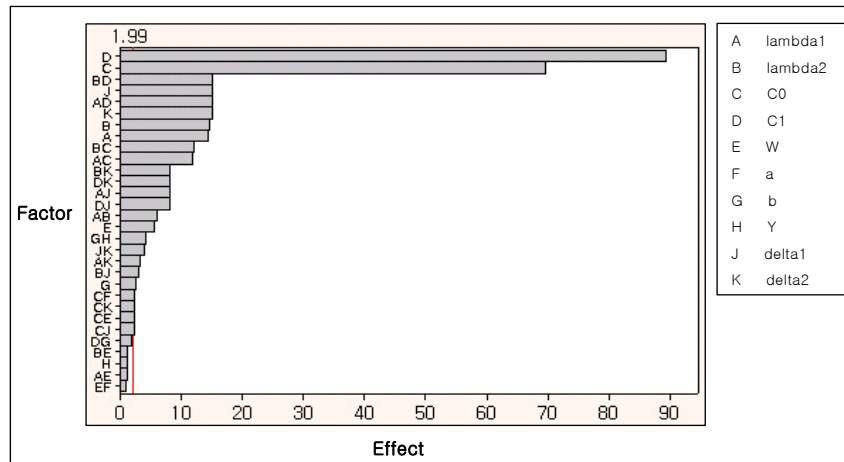


Figure 3. Pareto chart for the standardized effect of each factor.

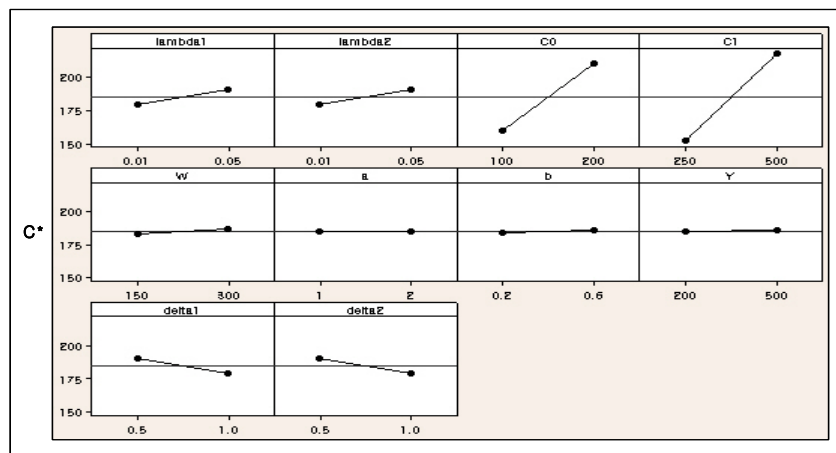


Figure 4. Main effect plot for the optimal cost rate C^* .

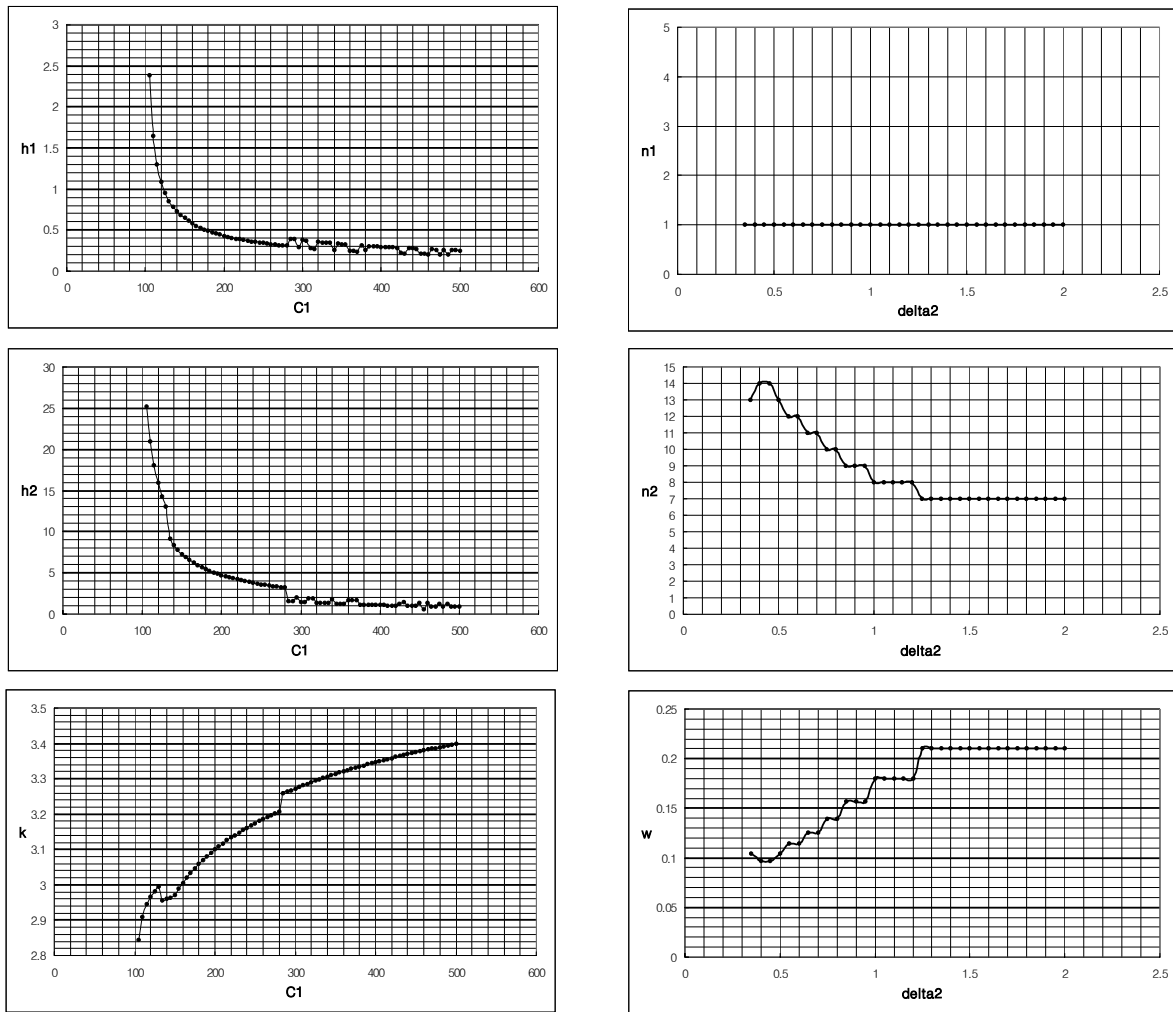


Figure 5. Trend of the design parameters for C_1 and δ_2 .

5. 결론

현실적으로 공정의 이상원인은 단일 이상원인보다는 다중 이상원인으로 존재하는데 기존의 연구에서는 대부분 단일 이상원인을 가정하여 관리도를 설계하였다 따라서, 본 연구에서는 공정평균의 변화를 일으키는 두 개의 이상원인이 독립적이며 복합적으로 발생하는 공정에 VSSI \bar{X} 관리도를 적용하였고, 비용함수를 이용하여 VSSI \bar{X} 관리도의 경제적 성능을 분석하였다. 또한, 비용함수를 최적화시키는 과정에서 통계적 특성을 만족할 수 있도록 통계적인 제약을 추가하였다.

따라서, 현재 Shewhart \bar{X} 관리도를 사용하고 있는 공정이 두 개의 이상원인이 존재하는 공정이라면 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 쉽게 VSSI \bar{X} 관리도를 설계할 수 있고, 공정을 최소의 비용을 가지고 효율적으로 관리할 수 있다

본 연구에서는 두 개의 이상원인이 있는 경우만을 고려하

였으나, 필요에 따라서는 세 개 이상의 이상원인이 존재하는 경우로도 확장하는 연구도 고려할 수 있다. 또한, 이 모형은 약간의 변화를 통하여 VSS(Variable Sample Size) 관리도와 VSI(Variable Sampling Interval) 관리도를 설계하는 데도 사용할 수 있다.

참고문헌

- Duncan, A. J. (1956), The economic design of \bar{X} charts used to maintain current control of a process, *Journal of the American Statistical Association*, **51**(274), 228-242.
- Lee, H. J. and Lim, T. J. (2004), Statistical efficiency of VSSI \bar{X} chart for the process with two assignable causes, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, **32**(4), 156-168.
- Lorenzen, T. J. and Vance, L. C. (1986), The economic design of control charts: a unified approach, *Technometrics*, **28**(3), 3-10.

- Prabhu, S. S., Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (1994), A combined adaptive sample size and sampling interval \bar{X} control scheme, *Journal of Quality Technology*, **26**(3), 164-176.
- Prabhu, S. S., Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (1997), Economic-statistical design of an adaptive \bar{X} chart, *International Journal of Production Economics*, **49**(1), 1-15.
- Sim, S. B. and Kang, C. W. (2000), Statistical design of VSS \bar{X} chart considering two assignable causes, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, **28**(3), 44-52.
- Woodall, W. H. (1986), Weaknesses of the economic design of control charts, *Technometrics*, **28**(4), 408-409.