

## 가변 샘플링간격 EPC/SPC 결합시스템의 개발

### Development of Integrated Variable Sampling Interval Engineering Process Control & Statistical Process Control System

이 성 재\* , 서 순 근\*\*

\* KBC한국비즈니스컨설팅(주)

\*\* 동아대학교 산업경영공학과

#### Abstract

Traditional statistical process control(SPC) applied to discrete part industry in the form of control charts can look for and eliminate assignable causes by process monitoring. On the other hand, engineering process control(EPC) applied to the process industry in the form of feedback control can maintain the process output on the target by continual adjustment of input variable.

This study presents controlling and monitoring rules adopted variable sampling interval(VSI) to change sampling intervals in a predetermined fashion on the predicted process levels for integrated EPC and SPC systems. Twelve rules classified by EPC schemes(MMSE, constrained PI, bounded or deadband adjustment policy) and type of sampling interval combined with EWMA chart of SPC are proposed under IMA(1,1) disturbance model and zero-order (responsive) dynamic system. The properties of twelve control rules under three patterns of process change(sudden shift, drift and random shift) are evaluated and discussed through simulation and control rules for integrated VSI EPC and SPC systems are recommended.

#### 1. 서 론

전통적으로 이산 제조 산업공정의 관리에 적용되어 발전한 통계적 공정관리(SPC, Statistical Process Control)는 공정을 두 가지 상태로 대별하고 있는데, 공정의 변화가 발생하지 않은 경우의 '관리상태(in-control)'와 공정에 변화가 발생하여 이상원인이 존재하는 경우의 '이상상태(out-of-control)'로 구별한다. Shewhart, Cusum, EWMA 관리도 등을 주로 활용하는 기존의 SPC기법들은 공정의 변화를 감지한 후, 이상원인의 제거를 통하여 공정의 변

동을 감소시키는 것이 그 특징이라 할 수 있다. 또한, SPC기법의 적용 시 공정 이상 발생의 유무에 상관없이 일정한 샘플링간격을 적용하는 고정 샘플링(FSI, Fixed Sampling Interval)기법과 공정 상태가 매우 좋으면 샘플링간격을 길게 가져가고, 공정에 이상 징후가 있는 것으로 의심이 되면 샘플링간격을 짧게 가져감으로써 잠재적인 공정 이상상태를 파악하여 그 원인을 빠른 시간내 제거하는 가변 샘플링(VSI, Variable Sampling Interval)기법으로 구분할 수 있다[8]. 그러나 이러한 SPC기법은 공정 출력인 품질특성치의 결과를 통하여 공정 변화 발생 후에 그 원인을 제거하는 것으로 공정 출력을 지속적으로 목표값에 유지시키는 기능이 미흡하다[1].

반면에 전기, 전자, 화학공학 분야의 제어공학에서 활용되는 공학적 공정관리(EPC, Engineering Process Control)기법인 피드백제어(feedback control)는 공정 입력 변수의 조정을 통하여 공정에 이상원인이 존재하더라도 공정 출력값을 미리 규정한 목표값에 유지시킴으로써 공정 출력이 목표를 벗어남을 방지하는 제어 기법이다. 즉 고유기술에 기반하여 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기 등을 이용한 공정의 조정을 통하여 공정 출력을 목표값에 유지하는 것이 특징이라 할 수 있다[3]. EPC기법의 공정 조절 제어기법은 현재 시점의 공정 출력과 외란(disturbance)을 기반으로 하여 다음 시점의 공정 출력에 예측된 외란을 감안한 조정을 실시하여 지속적으로 공정 출력을 목표값에 유지하려는 것이다.

이에 따라 SPC와 EPC기법의 적용 범위 및 유효성을 높이기 위해 두 기법의 장점을 살릴 수 있도록 변형하거나 상호 보완적인 형태로 결합한 새로운 기법들에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

이에 관한 기존 연구를 살펴보면, SPC와 EPC기법의 결합에 관한 최초 연구로서 Montgomery[7]는 SPC와 EPC의 차별점에 대한 고찰을 통하여 두 기법의 장점을 살릴 수 있는 결합시스템을 제안하였다. 한편 Vander Wiel 등[13,14]은 최소분산제어와 Cusum 관리도를 이용하여 중합기를 통과한 원료의 점성(viscosity)을 관리하는 Algorithmic SPC(APC로 명명)를 제안하였으며[4,5]. 또한 Janakiram과

Keats[4,5]는 중합(polymerization) 공정과 단속 모니터링과 연속 모니터링 공정을 가진 복합 공정에 SPC와 EPC를 적용하는 연구를 수행하였다. Tsung와 Shi[11]는 ARMA(1,1) 외란모형 하에서 공정 변화(shift, drift, cyclical shift)가 발생하는 경우 EPC의 수행도 측도로 RE (Relative Efficiency)와 AE(Absolute Efficiency)를, SPC의 수행도 측도로 ARL(Average Run Length)을 이용하여 두 기법의 결합시스템을 평가하였으며, Tsung과 Tsui[12]는 SPC와 EPC 결합시스템에서 공정 평균의 변화 형태와 ARL의 관계를 제시하고 공정출력의 자기상관구조에 대하여 연구하였다.

그리고 Ruhhal 등[9]은 IMA(1,1) 외란모형하에서 다양한 확률적 공정 변화가 존재하는 경우에 한계조정기법을 적용하고 이의 수행도를 AAI (Average Adjustment Interval), MSD(Mean Square Error), ISD(percentage Increase of the Standard Deviation)를 이용하여 평가하였으며, Tsung[10]는 EPC모형에서 외란모형의 형태와 적용 기법에 따른 품질특성의 탐지에 대한 통계적 능력을 조사하였다.

따라서 본 논문에서는 SPC기법으로 공정변화에 대한 검출력과 편리성 측면에서 우수성이 알려진 EWMA 관리도와 더불어, EPC기법으로 공정출력 분산을 최소로 하는 MMSE(Minimum Mean Square Error)제어, 공정출력 분산은 약간 증가되지만 공정 입력변수의 조정분산을 크게 감소시킬 수 있는 제약 PI(constrained Proportional- Integral)제어, 공정 입력변수의 조정횟수를 감소시킬 수 있는 특징을 가진 한계조정기법을 적용하여 두 기법의 장점을 결합한 가변 샘플링간격 결합시스템을 제안하고 이들의 제반 특성을 조사하고자 한다.

## 2. EPC/SPC 결합시스템

본 연구의 공정출력 모형은 식 (1)을, 공정 동적 모형으로는 단반응(zero-order or responsive)모형인 식(2)를 이용하였다[1].

$$e_t = Y_t + z_t \quad (1)$$

$e_t$ : 공정출력,  $z_t$ : 공정 외란  
 $Y_t$ : 공정 동적모형의 출력

$$Y_t = d_t + \delta Y_{t-1} + g(1-\delta)X_{t-1}, 0 \leq \delta < 1 \quad (2)$$

$d_t$ : 공정 변화  
 $g$ : 공정 이득  
 $X_t$ : 제어 동작  
 $\delta$ : 동적모형의 관성

공정 외란모형으로는 시계열모형 중에서 불안정 상태 모형으로 그 유용성이 입증된 IMA(1,1)모형을 채택하였으며[2], 식 (3)을 이용하여 시뮬레이션 수 치실험의 외란자료를 생성하였다.

$$\text{IMA}(1,1) : z_t = \frac{1-\Theta}{1-B} a_t \quad (3)$$

$\Theta$ : 이동 평균 모수 ( $|\Theta| < 1$ )

$a_t$ : 백색 잡음( $N(0, \sigma_a^2)$ )

$B$ : 후진연산자( $Be_t = e_{t-1}$ )

제안된 EPC/SPC 결합 시스템을 요약하면, 공정 조정을 위한 EPC제어기법으로는 이산형 I(MMSE) 제어, 제약 PI제어기법과 한계조정기법을 적용하였으며, 공정감시를 위한 SPC기법으로는 다음 시점 예측치( $\hat{e}_{t+1}$ )에 대한 EWMA 관리도를 적용하였다. 이 두 가지 방법을 결합하여 적용 제어기법에 따라 3개의 그룹(Group 1,2,3)으로 구분하고, 12가지 제어규칙을 설정하여 실험을 수행하였으며, 적용 제어규칙의 기본적 절차는 다음과 같다.

< Group 1:MMSE제어(rule 1~rule 4) >

rule 1:MMSE제어만 적용한 경우

rule 2:MMSE제어에 FSI EWMA관리도 결합

rule 3:MMSE제어에 VSI(A) EWMA관리도 결합

rule 4:MMSE제어에 VSI(B) EWMA관리도 결합

VSI(A) : 0.25(짧은 간격), 1.75(긴 간격)

VSI(B) : 0.5, 1.5

여기서 rule 2에 대한 EWMA 관리도의 관리한계는  $\pm 3\sqrt{\lambda_m/(2-\lambda_m)} \cdot \sigma_m$ 으로 설정하였으며, rule 3과 4에 대한 EWMA 관리도의 관리한계는  $\pm 3\sqrt{\lambda_m/(2-\lambda_m)} \cdot \sigma_m, \pm 0.6713\sqrt{\lambda_m/(2-\lambda_m)} \cdot \sigma_m$ 를 경고한계로 설정하였다. VSI 경고한계 계수 0.6713은 주어진 두 가지 가변샘플링간격 하에서 고정 샘플링간격과 기대 가변 샘플링간격이 일치되도록 설정한 값이다[8].

< Group 2:제약 PI제어(rule 5~rule 8) >

rule 5:제약 PI제어만 적용한 경우

rule 6:제약 PI제어에 FSI EWMA관리도 결합

rule 7:제약 PI제어에 VSI(A) EWMA관리도 결합

rule 8:제약 PI제어에 VSI(B) EWMA관리도 결합

< Group 3:한계조정기법(rule 9~rule 12) >

rule 9:한계조정만 적용한 경우

rule 10:한계조정에 EWMA관리도 결합

rule 11:한계조정에 VSI(A) EWMA관리도 결합

rule 12:한계조정에 VSI(B) EWMA관리도 결합

공정출력은 IMA(1,1)외란모형인 경우에 VSI 개념을 도입하기 위하여 본 논문에서는 단위 샘플링간격을 4로 고려하여, 즉 FSI인 경우 샘플링간격을 4로 설정하고 VSI 개념을 도입한 경우  $m_1=1.75$ 일 때 샘플링간격을 7,  $m_1=1.5$ 일 때 샘플링간격을 6,  $m_2=0.25$ 일 때 1,  $m_2=0.5$ 일 때 2로 설정하였으며, IMA(1,1) 외란모형인 경우 샘플링간격이 달라져도 역시 IMA(1,1) 모형이 되도록 식 (4)와 같이 두 경우의 자기상관관계가 일치하도록 설정하였다.

$$\Theta_m \sigma_m^2 = \Theta \sigma^2, \lambda_m^2 \sigma_m^2 = m \lambda^2 \sigma^2 \quad (4)$$

**2.1 공정변화 양태**

대상 공정변화 발생은 다음과 같이 3가지로 구분하여 적용하다.

첫째, 확정적인 시점에 급작스런 공정변화가 발생하는 경우로 식 (5)와 같으며, 이것은 표본 추출시간이  $t_0$ 가 되면 1회의 변화가 발생함을 의미하고 그 발생 크기( $\mu$ )는 IMA(1,1) 모형의 상황을 고려하여 표준편차의 -0.5배에서 -5배 범위 내에서 설정하였다.

둘째, 확정적인 시점부터 점진적으로 공정변화가 발생하는 경우는 식 (6)과 같으며 단위기간 당 발생크기( $s$ )도 최종 변화크기가 식 (5)의  $\mu$ 와 동일하게 되도록 설정하였다.

셋째, 확률적인 시점에 급작스런 공정변화가 발생하는 경우로 'Barnard 모형'[1]을 변환하여 적용하였는데 이것은 식 (7)과 같으며 공정변화 발생시점과 발생크기가 확률적으로 발생한다.

- (1) 급작스런 변화(sudden shift)

$$d_t = \begin{cases} \mu & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (5)$$

- (2) 점진적 변화(drift)

$$d_t = \begin{cases} s \times \left( \frac{t-t_0}{\Delta t} \right) & t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \\ 0 & \text{o/w} \end{cases} \quad (6)$$

단,  $\Delta t$  : 점진적 변화 발생 지속시간

- (3) 확률적 변화(random shift)

$$d_t = \begin{cases} \tilde{\mu} & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (7)$$

$t_0 \sim \text{Poisson}(L_0)$  ,  $\tilde{\mu} \sim N(\mu, \sigma^2)$

이러한 공정변화를 통하여 EPC만을 적용한 경우와 SPC에 EPC기법을 결합한 경우의 공정출력에 대한 평균제곱오차(MSE), 공정 조정횟수와 연관된 평균조정간격(AAI), 입력변수의 변동량을 계산하여 상기의 12가지 제어규칙에 대한 성능을 비교하였으며, 공정변화 탐지를 위한 부가적인 성능 측도로 ARL을 이용하여 수행도를 비교하였다. 여기서 4가지 성능 측도의 중요도는 비교상황별로 다를 수 있겠지만 본 논문에서는 제안된 규칙의 비교시의 중요도를 암묵적으로 MSE, AAI, 입력변수 변동량 순으로 정하였으며, EPC에서 공정 변동의 상당부분을 보정할 수 있기 때문에 ARL은 보조적인 성능 측도로 삼았다.

**3. VSI EPC/SPC 결합시스템 개발**

본 연구에서는 크게 3가지 그룹으로 SPC와 결합된 EPC기법을 구분할 수 있다. 즉, 공정출력 분산을 최소화하는 MMSE제어에 SPC기법을 적용한 경우, 공정출력 분산과 공정 입력변수의 조정분산을 동시에 고려한 경우의 제약 PI제어기법에 SPC를 적용한 경우, 무조정 영역을 고려한 한계조정기법에

SPC기법을 적용한 경우로 구분할 수 있다. 이 중에서 세 그룹에 공통적으로 포함된 VSI EPC/SPC 결합시스템의 개념도를 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1을 중심으로 두 시스템의 결합 체계에 대한 기본 절차를 개략적으로 기술하면 다음과 같다. 우선 공정으로부터 조정전의 공정출력을 획득하여 조정할 경우의 결과를 계산한 후, 이 조정 결과에 대한 공정출력의 다음 단계 예측값을 계산한다. VSI 관리도의 기본 개념을 적용하여 계산된 예측값이 미리 설정한 공정 경고상한과 경고하한 내에 존재하는 경우에 다음 표본 추출시간을 보통의 경우보다 긴 시간( $m_1$ )으로 설정하며 공정조정을 수행한다. 만약 한계조정기법을 적용할 경우는 공정조정을 수행하지 않는다. 만약 그렇지 않고 경고상한과 관리상한 혹은 경고하한과 관리하한 내에 존재하는 경우에는 다음 표본 추출시간을 보통의 경우보다 짧은 시간( $m_2$ )으로 설정하고 공정조정을 수행한다. 만약 계산된 예측값이 미리 설정한 관리상한을 초과하거나 혹은 관리하한에 미달하는 경우에는 공정을 중단하고 SPC규칙을 적용한 것과 동일하게 이상원인을 찾아서 제거한 후 공정의 감시 및 조정을 계속적으로 수행하는 방법을 채택하고 있다.

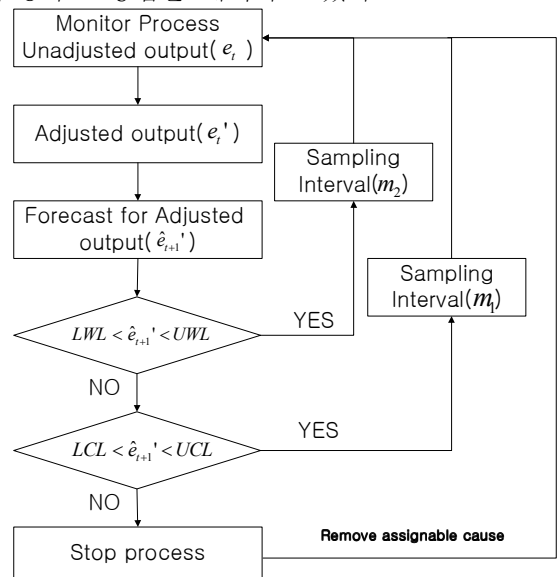


Fig. 1. Flow chart for proposed system

그리고, 상기 절차에 적용하는 EWMA 관리도의 관리한계는 전술한 바와 같이  $3\sqrt{\lambda_m/(2-\lambda_m)} \cdot \sigma_m$ , 경고한계는  $0.6713\sqrt{\lambda_m/(2-\lambda_m)} \cdot \sigma_m$ 으로 설정하였으며 [6], 모수  $\lambda_m$ 는 IMA(1,1) 외란모형의 샘플링간격에 따라 설정하므로 식 (4)를 이용하여 계산되는데, 이는 샘플링간격에 따른 자기상관관계를 일치시키는 모수를 선택하는 것이 된다.

**4. 수치실험**

**4.1 범위의 절차**

본 연구에서는 공정 동적모형이 단반응인 경우

를 대상으로 외란모형으로는 IMA(1,1)에 대하여 3가지 공정변화 발생하는 경우에 수치실험을 실시하였다.

외란모형이 IMA(1,1)인 경우의 모수는  $\lambda=0.2, 0.3, 0.4$ 를 선정하여 실험을 수행하였다. 공정변화 모형이 (1)과 (2)인 경우 공정평균의 이동량(2)의 경우 최종 이동량  $\mu$ 는 IMA(1,1) 외란모형의 형태를 고려하여  $-0.5, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5, -3.0, -4.0, -5.0$  ( $a$ )배의 표준편차 곱( $a \times \sigma$ )으로 나타내고, 발생시점은  $t_0=1001$ 로 확정적 시점으로 설정하였는데, 이는 단위 샘플링간격이 4이므로 250단위 샘플링간격 동안에는 공정의 변화가 없는 것을 나타낸다. 그리고, (2)의 경우 공정변화는  $t_0$ 시점에서 지속적으로 10단위 샘플링간격( $\Delta t$ )동안 발생하도록 설정하였으므로  $\mu$ 와  $\Delta t$ 에 의해  $s$ 를 구하여 적용하였다. (3)의 경우 공정변화 발생시점  $t_0$ 는  $960 + Poisson(40)$ 으로 설정하였으며 이것은 240단위 샘플링간격 동안에는 공정의 변화가 없으며 확률적으로 평균 10단위 샘플링간격을 따르는 포아송분포에 의해 변화시점이 발생함을 의미하는 것이다. 또한 발생 크기  $\tilde{\mu}$ 는  $N(\mu, \sigma_j^2)$ 를 따른 확률변량을 발생시켜 실험을 수행하였으며,  $\sigma_j$ 는 변동계수(0.5)에 공정평균의 변화량( $a$ )을 곱하여 계산하였다. 또한 VSI 기법을 적용할 경우 전술한 바와 같이 샘플링간격은  $m_1=0.25, m_2=1.75$ 와  $m_1=0.5, m_2=1.5$ 로 설정하였다.

수치 실험 수행 절차는 다음과 같이 정리할 수 있다.

단계 1) 공정출력 생성

$$IMA(1,1) : z_t = z_{t-1} + a_t - \theta_m a_{t-1}$$

$$a_t \sim N(0, 1^2), z_0 = a_0 = 0$$

단계 2) 공정 조정규칙 선정

I 제어, 제약 PI제어, 한계조정기법

단계 3) 공정변화량 생성

급작스런 변화 :

$$e_s(I, J) = e(I, J) + \mu \times \sigma, I \geq t_0$$

단,  $J$ 는 시뮬레이션 반복시(1000회)의 순번  
 점진적 변화 :

$$e_d(I, J) = e(I, J) + \left( \frac{I - t_0}{\Delta t} \right) s \times \sigma,$$

$$t_0 \leq I \leq t_0 + \Delta t$$

$$e_d(I, J) = e(I, J) + s \times \sigma, t_0 + \Delta t \leq I$$

확률적 변화 :

$$e_B(I, J) = e(I, J) + \tilde{\mu}, I \geq t_0$$

$$t_0 = 960 + Poisson(40)$$

단계 4) 조정된 공정출력의 예측값( $\hat{e}'_{t+1}$ ) 계산

단계 5) 공정 조정규칙에 따라 판정 및 조치

i) EPC기법만을 적용한 경우

공정조정만을 실시하고 공정감시는 없음

ii) FSI SPC + EPC기법을 적용한 경우

EWMA 관리한계 내에 존재 : 공정조정을 실시

EWMA 관리한계 밖에 존재 : 공정을 중단하고 이상원인을 제거한 후 관리상태에서 시작하는 것으로 설정

iii) VSI SPC + EPC기법을 적용한 경우

EWMA 경고한계 내에 존재 : 1, 2 Group 규칙일 경우 공정조정 실시, 3 Group 규칙 경우 공정조정을 실시하지 않음.

샘플링간격을  $m_2=1.75(1.5)$ 로 설정

EWMA 경고한계와 관리한계 사이에 존재 : 공정조정을 실시하며 샘플링간격을  $m_1=0.25(0.5)$ 로 설정

EWMA 관리한계 밖에 존재 : 공정을 중단하고 이상원인을 제거한 후 관리상태에서 시작하는 것으로 설정

단계6) 상기의 단계를 지속적으로 수행

상기의 절차를 Fortran 프로그램으로 작성하여 수치실험을 수행하였으며, 수치 실험은 시뮬레이션 길이  $N=2000$ , 반복회수  $R=1000$ 이고,  $m_1=0.25 \times 4=1$ (또는 2),  $m_2=7$ (또는 6), 공정 이득은 1.0이며 목표치( $T$ )는 0으로 설정하였다.

4.2 결과 고찰

IMA(1,1) 외란모형하에서 3가지 공정변화가 발생하는 경우의 다양하게 수행된 수치실험 수행 결과는 지면 제약상 생략하며, 요약된 고찰내용만 공정변화 발생 형태별로 정리하였다.

(1) 공정의 급작스런 변화가 발생한 경우

변화의 크기가 작은 경우에는 MMSE 및 PI제어를 통하여 빠르게 보정할 수 있으며, 변화의 크기가 큰 경우에는 EPC기법에 VSI SPC기법을 결합시킨 경우(rule 3, 7)가 매우 우수함을 확인하였다. 또한, 조정비용이 중요하게 작용하는 경우에는 rule 11과 더불어 rule 10의 순서로 추천 제어규칙을 제안할 수 있다.

(2) 공정에 점진적인 변화가 발생하는 경우

추천 규칙은 급작스런 변화가 발생한 경우의 결과와 동일하며, FSI SPC기법을 결합한 경우(rule 2, 6)보다 VSI SPC기법을 결합한 경우(rule 3, 7)에 공정변화가 잘 감지될 수 있음을 확인하였다. 그리고 급작스런 변화가 발생한 경우의 결과와 비교하여 보면, MSE는 전반적으로 감소하고 있으며, 입력변수의 조정분산은 rule 3, 7의 경우에는 전반적으로 감소하고 있는 반면에 rule 11, 10의 경우에는 약간 증가하고 있음을 파악하였다.

(3) 공정에 확률적 변화가 발생하는 경우

추천 규칙은 다른 두 가지 경우의 결과와 동일하며, 공정변화의 크기가 클수록 FSI SPC기법보다 VSI SPC기법을 결합시킨 경우가 더 우수하다. 그리고 공정 조정비용이 무시하지 못할 만큼 영향을 줄 때 EPC제어기법에 VSI SPC기법을 결합시킨 경우(rule 11과 rule 10의 순)가 우수함을 확인하였으며, 다른 두 가지 공정변화가 발생한 경우의 결과와 비교하여 보면, MSE는 전체적으로 가장 큰 값을 나타내고 있음을 파악하였다.

### 5. 활용 예

본 연구에서 제안한 12가지 제어규칙의 활용도를 예증하기 위해 실제를 단순화한 상황을 구성하여 개발기법을 적용하고자 한다. 즉, 공정의 동적 특성은 단반응모형이고 외란모형은 모수  $\lambda=0.4$ 를 따르는 IMA(1,1)인 경우 공정변화는 확정적 시점( $t_0=1001$ )에 크기  $-3 \times \sigma (\sigma=1)$ 로 발생하며, 고정 샘플링간격은 1분, 공정 이득( $g$ )은 1이다.

EPC기법에 따라 3가지로 구분된 그룹별로 추천 제어규칙의 적용결과를 분석하였다. 먼저 IMA(1,1)모형을 이용하여 아무런 조정이 없는 경우의 공정출력과 공정변화 발생 상황을 도시하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 이 자료를 이용하여 그룹별 해석에 따른 기준 제어규칙 및 추천 제어규칙을 도시하면 Fig. 3~Fig. 6과 같다.

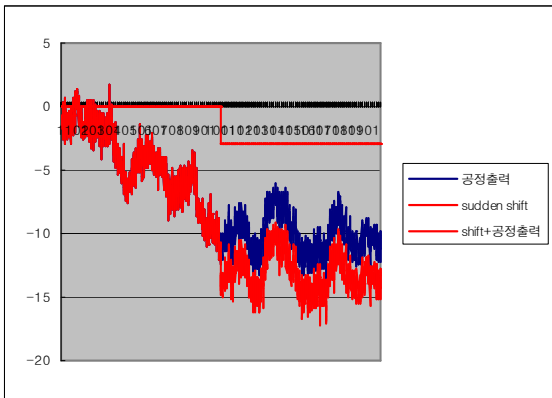


Fig. 2. Data for a numerical example

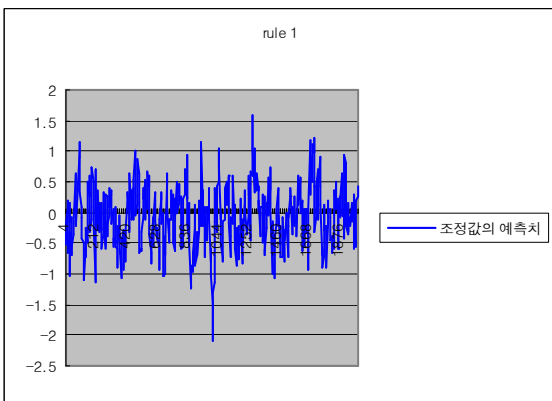


Fig. 3. Reference control rule(rule 1) for a numerical example

MMSE제어만을 수행하는 경우(rule 1)를 기준 제어규칙으로 하여 FSI 및 VSI SPC기법을 결합한 경우와 제약 PI제어와 한계조정기법을 적용한 경우의 결과를 살펴보면, EPC기법만을 적용한 경우보다는 VSI SPC기법을 결합한 경우가 전체적으로 그 성능이 우수함을 알 수 있으며 그 특징을 정리하면 다음과 같다.

#### (1) MMSE제어기법을 이용한 경우(Group 1)

- ① 추천된 rule 3은 가변 샘플링간격을 적용하여 조정된 공정출력의 예측값이 경고한계 내에 있으면 1분 45초 간격으로 샘플링을 실시하고, 경고한계와 관리한계 사이에 있으면 15초 간격으로 샘플링을 실시한다.
- ② 공정출력 분산은 약 5% 감소하며, 공정 입력변수의 조정분산은 약 18% 감소하는 반면에 AAI는 고정 샘플링간격보다 약 0.7배가되어 조정횟수가 약 1.3배 증가하고 있다. 또한 ARL은 고정 샘플링간격인 경우보다 약 96% 감소하고 있다.

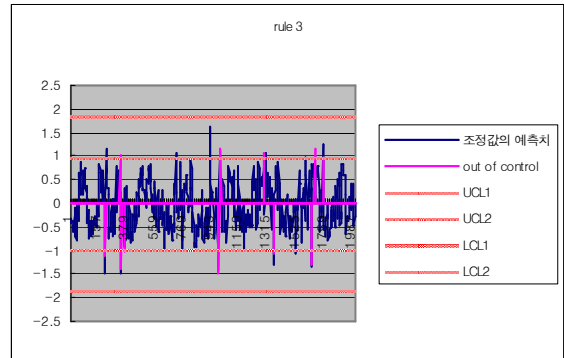


Fig. 4. Proposed control rule(rule 3) in Group 1 for a numerical example

#### (2) 제약 PI제어기법을 이용한 경우(Group 2)

- ① 추천된 rule 7은 상기에서 기술한 rule 3의 경우와 동일하게 샘플링간격이 설정된다.
- ② 공정출력 분산은 약 3% 감소하며, 공정 입력변수의 조정분산은 약 47% 감소하는 반면에, AAI는 고정 샘플링간격보다 약 0.7배가되어 조정횟수가 약 1.3배 증가하고 있다. 또한 ARL은 고정 샘플링간격인 경우보다 약 97% 감소하고 있다.

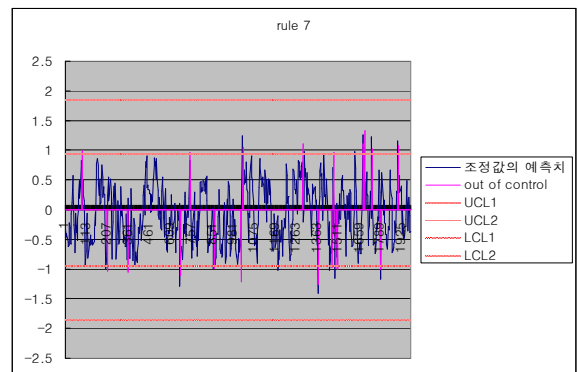


Fig. 5. Proposed control rule(rule 7) in Group 2 for a numerical example

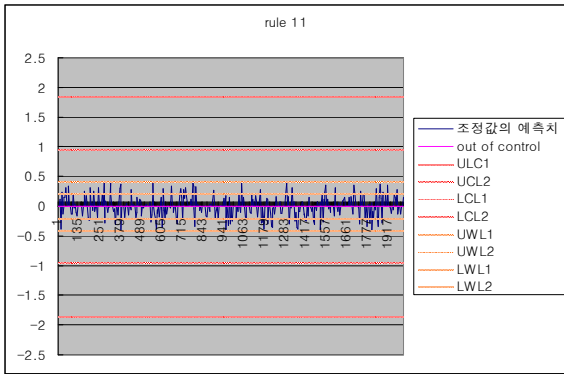


Fig. 6. Proposed control rule(rule 11) in Group 3 for a numerical example

(3) 한계조정기법을 이용한 경우(Group 3)

- ① 추천된 rule 11은 가변 샘플링간격을 적용하여 조정된 공정출력의 예측값이 경고한계내에 있으면 1분 45초 간격으로 샘플링을 실시하고, 경고 한계와 관리한계 사이에 있으면 15초 간격으로 샘플링을 실시한다.
- ② 공정출력 분산은 약 12% 증가하고, 공정 입력변수의 조정분산은 약 2% 증가하지만, AAI는 고정 샘플링간격보다 약 2.6배이므로 조정횟수가 약 62% 감소하고 있다. 그리고 ARL은 고정 샘플링 간격인 경우보다 약 2.7배 증가하고 있으므로 공정변화 검출능력이 저하됨을 알 수 있다.

따라서 상기의 예시와 같이 어떤 제어규칙을 선정하는가의 문제는 산업 현장별 상황(공정출력의 증가율과 공정 입력변수의 조정분산 감소율 및 조정횟수의 감소율 등)을 고려하여 전 절에서 추천된 제어규칙 중에서 선택하여 적용할 수 있다.

6. 결론

제조산업을 바탕으로 발전된 전통적인 품질관리 및 공정관리기법(SPC-공정의 감시를 통하여 이상원인의 탐지 및 제거)들과 장치산업 및 화학공정산업을 중심으로 발전된 기존의 공학적 공정관리기법(EPC-공정조정을 통하여 변동의 감소)들은 그 유효성 증대를 위하여 상대 영역에 적용할 수 있도록 변형하거나 상호 보완적인 형태로 결합한 새로운 적용기법들에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다.

따라서 본 논문은 이에 관한 연구로서, 먼저 공정조정과 공정감시를 동시에 수행하는 경우를 고려하여 기존의 SPC관리기법에서 활용되고 있는 고정 샘플링간격 EWMA 관리도와 가변 샘플링간격 EWMA 관리도에 공정출력 분산을 최소화하는 MMSE 제어, 공정 입력변수의 조정에 제약이 있는 제약 PI제어, 그리고 일정한 범위 내에서는 조정을 실시하지 않는 한계조정기법을 결합시킨 12가지 제어기법을 제안하고, 이들의 특성을 다양한 수치실험을 통하여 평균제곱오차(MSE), 평균조정간격(AAI), 입력변수의 변동량, ARL 측면에서 비교하였으며, 이로부터 획득한 결과를 이용하여 규칙의 우월성을 조사하였다.

참고 문헌

- [1] Box, G. E. P. and Luceno, A., *Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment*, John Wiley & sons, New York, NY., 1997a.
- [2] Box, G. E. P. and Luceno, A., "Discrete Proportional-Integral Adjustment and Statistical Process Control", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 3, pp.248~260, 1997b.
- [3] Castillo, D. E., *Statistical Process Adjustment for Quality Control*, John Wiley & sons, New York, NY., 2002.
- [4] Janakiram, M., *Statistical and Engineering Process Control Integration Strategies for Constrained Controllers*, Ph.D, Dissertation, Arizona State University, Tempe, AZ., 2001.
- [5] Janakiram, M. and Keats, J. B., "Combining SPC and EPC in a Hybrid Industry", *Journal of Quality Technology*, Vol. 30, No. 3, pp.189~200, 1998.
- [6] Lucas, J. M. and Saccucci, M. S., "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes; Properties and Enhancements", *Technometrics*, Vol. 27, No. 1, pp.1~12, 1990.
- [7] Montgomery, D. C., Keats, J. B., Runger, G. C. and Messina, W. S., "Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control", *Journal of Quality Technology*, Vol. 26, No. 2, pp.79~87, 1994.
- [8] Reynolds, M. R., Jr., Amin, R. W., Arnold, J. C. and Nachlas, J. A., " $\bar{X}$  Charts with Variable Sampling Intervals", *Technometrics*, Vol. 30, No. 2, pp.181~191, 1988.
- [9] Ruhhal, N. H., Runger, G. C. and Dumitrescu, M., "Control Charts and Feedback Adjustments for a Jump Disturbance Model", *Journal of Quality Technology*, Vol. 32, No. 4, pp.379~394, 2000.
- [10] Tsung, F., "A Note on Statistical Monitoring

- of Engineering Controlled Processes", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 8, pp.1~14, 2001.
- [11] Tsung, F., Shi, J., "Integrated Design of Run-To-Run PID Controller and SPC Monitoring for Process Disturbance Rejection", *IIE Transactions*, Vol. 31, pp.517~527, 1999.
- [12] Tsung, F., Tsui, K. L., "A Mean-Shift Pattern Study on Integration of SPC and APC for Process Monitoring", *IIE Transactions*, Vol. 35, pp.231~242, 2003.
- [13] Tucker, W. T., Faltin, F., W. and Vander Wiel, S. A., "Algorithmic Statistical Process Control: An Elaboration", *Technometrics*, Vol. 35, pp.363~375, 1993.
- [14] Vander Wiel, S. A., Tucker, W. T., Faltin, F. W. and Doganaksoy, N., "Algorithmic Statistical Process Control; Concepts and an Application", *Technometrics*, Vol. 34, pp.286~297, 1992.