

## SPC와 EPC 통합에 관한 조사 연구

### - An Investigative Study for the Integration of SPC and EPC -

김 종 걸\*

Kim Jong Gurl

정 해 운\*\*

Jung Hae Woon

#### Abstract

There are two approaches to process control. The one is engineering process control(EPC) which is one of the techniques very widely used in the process industry and based on control theory which aims at keeping the process on target using manipulating variable. The other is statistical process control(SPC) whose main purpose is to look for assignable causes(variability) in the process. To design an integrated or combined scheme of SPC and EPC is gaining recognition in the process experiences for hybrid industry.

This paper aims to investigate recent study concerned on the integration of SPC and EPC. First, we consider the difference between SPC and EPC in simple terms and review various models of EPC for integration including evaluation of previous study. Finally, we suggest some prospective research area concerned on the integration of SPC and EPC.

#### 1. 서론

SPC(statistical process control)는 통계적 공정관리시스템으로 공정에서 가피원인의 신호를 탐지하여 가피원인을 제거하며, EPC(engineering process control)는 자동공정관리시스템(automatic process control)으로 품질특성을 목표치에 일치시킬 목적으로 공정을 조절하는데 사용된다. 즉, SPC와 EPC는 서로 다른 기능으로 변동을 감소시켜 공정을 개선하는 역할을 한다.

---

\* 성균관대학교 시스템경영공학부 교수

\*\* 오산대학 산업시스템경영과 교수

EPC와 SPC의 통합시스템에서 SPC는 품질특성의 데이터에서 변동을 탐지하여 가피원인을 탐지하는 역할을 하며, EPC는 공정을 조절하여 품질특성이 목표치에 맞도록 하는 기능을 수행한다. 즉, SPC가 관리도에 의하여 가피원인을 탐지하는 경고신호의 역할을 한다면, EPC는 피드백시스템에 의하여 공정을 조절하는 역할을 하는 것이다.

이 분야에 관한 조사연구는 두 시스템의 장점을 갖는 SPC와 EPC의 통합시스템을 위하여 선형시스템이론의 전후-궤환(feedforward-feedback) 제어와 비례-누적-차분(proportional-integral-derivative)제어를 결합시키고 관리도와 공정조절의 통합방법을 조사하였다. 이 통합시스템의 적용은 투입품질특성과 산출품질특성이 동적(dynamic)인 공정이나 평균이 이동(drift mean)하는 공정에서 아주 효과적이며 연속공정산업이나 장치산업에서 폭 넓게 사용할 수 있다. 공정조절은 자동상관관계 구조를 갖는 경우에 변동이 쉽게 예측되는 특성 때문에 공정관리에서 매우 유용하게 사용되고 있다. SPC와 EPC의 성공적인 통합시스템의 절차가 Montgomery에 의하여 연구되었다[20].

Box와 Kramer는 SPC연구에서 관리도로 공정의 품질특성을 탐지하고, 가피원인이 발생되면 이를 제거하여 변동이 감소되도록 하였으며, EPC의 연구에서 평균의 변화, 원재료의 변화, 온도의 변화와 같은 각란(disturbance)을 제거하기 위하여 촉매공식을 유도하고 전통적인 PI(proportional-integral;비례-누적)공정조절모형을 연구하였다[7].

Castillo와 Hurwitz는 SPC와 EPC의 통합시스템의 관점에서 좀더 확장된 런-투-런(run-to-run)을 연구하였고, 런-투-런에서 중요한 공정조절기술인 자기공정조절(self tuning)모형의 단순투입-단순산출의 경우에 모수의 추정방법을 연구하였으며, 평균이 상수인 공정에서부터 평균이 이동하는 공정, 품질특성이 결정적 추세에 있는 공정, 품질특성이 상관관계가 있는 공정까지로 자기공정조절(ST)컨트롤러의 적용을 확장하였다[12]. 최근에, James는 현대산업에 적합한 SPC를 사용하고 그 효과에 대하여 신뢰도 문제를 연구에 포함시켰다[14]. Tsung은 EPC모형에서 각란 형태와 EPC가 품질특성에 대하여 탐지하는 통계적 능력을 연구하였다[21].

그러나 대부분의 연구들은 SPC와 EPC를 병행 사용하여 변동을 감소시키려고 노력하였으며, 대개 EPC모형만이 연구대상의 주류를 이루었으며, 드물게 연구된 SPC/EPC 통합시스템에서도 통합 방법에 절차가 명확하지 않았다.

본 연구는 SPC와 EPC의 병행사용이 아니라 SPC와 EPC를 비교 분석하여 통합시스템의 기초를 세우고 두 기술이 효율적으로 통합되도록 하는 절차를 위하여 조사연구를 하고자 한다.

2장은 공정탐지와 공정조절에 대하여 SPC와 EPC를 통합하려는 절차를 확립하기 위한 이론적 배경을 깔때기실험을 기초로 하여 상세하게 고찰하고, SPC와 EPC의 비교 분석을 하여 통합시스템의 절차를 조사연구 하였다.

3장은 공정조절 모형의 대표적인 이산형 공정모형을 고찰하였으며, 이때 모수의 추정방법은 비례-누적-차분(proportional-integral-derivative)모형에서 차트를 통하여 나타낸 방법을 세밀하게 조사연구 하였다. 한편, 평균이 이동 할 때 적용 할 수 있는 맥그리거의 공정조절모형은 깔때기 실험과 연계하여 통합모형에 적용하도록 한 이론을 조사연구 하였다.

마지막은 기본EPC모형의 공정조절을 명확하게 하는 적용절차를 조사연구 하여 SPC와 EPC통합시스템의 기초를 조사연구 하였다.

## 2. SPC와 EPC의 고찰

### 2.1 개요

SPC의 특성은 가피원인을 탐지하기 위하여 계속 진행하지만 EPC와 같은 연속적인 공정조절 역할이 없다. SPC의 역할은 엔지니어에 의한 변동차이 또는 원료의 변동차이가 관리한계를 벗어나면 즉시 공정을 정지하고 가피원인을 제거하여 공정이 안정되도록 한다. 결국, SPC는 공정변동에 영향을 미치는 가피원인을 탐지하고, 타점 된 가피원인을 제거하여 공정을 개선한다.

공정조절이론에 기초를 둔 EPC는 공정품질특성이 목표에 맞도록 공정을 유지할 목적으로 공정을 조절한다. 이러한 공정조절은 자동공정관리(automatic process control)로도 알려져 있으며, 자동공정관리에는 피드백관리, 피드포워드관리가 있다.

간혹 어떠한 연속공정산업은 조절장치를 사용하여 공정을 조절하는 최선의 노력에도 불구하고 품질특성이 목표와 멀어지는 경우가 발생한다. 목표치와 품질특성치와 차이는 원료의 투입량의 변화, 온도 등과 같은 요인이 품질특성에 어떤 영향을 주는지 알려져 있지 못하여 변동이 계속적으로 발생하기 때문이다. 그러므로, EPC를 이용하여 품질특성에 미치는 요인의 변동을 정확히 예측하고, 조절변수를 사용하여 품질특성치가 목표치에 부합되도록 공정품질특성을 유지해야 한다.

공정개선을 위하여 EPC와 SPC의 통합을 위한 노력은 가피원인을 탐지하는 능력을 갖춘 EPC의 개발로 이루어지고 있다. 이러한 연구는 Box와 Kramer[7], Vander Weil, Tucker, Faltin와 Doganaksoy[25], MacGregor와 Harris[18], 그리고 Montgomery, Keats, Runger와 Messina[20] 등과 같은 학자들에 의해서 연구되었다.

SPC는 조직적으로 추진하는 품질개선의 한 부분으로 톱-다운 방식을 사용하고, 경영자에 의하여 관리되는 활동, 사람, 방법, 절차를 중요시한다. EPC는 공정 엔지니어링 조직을 이용하여 공정조절에 초점을 둔다. 또한, SPC의 통계적 체계는 가설검정과 유사하며 EPC가 통계적 모수를 평가하는 동안 SPC가 적용되는 공정시스템에서는 목표에 벗어나는 가피원인이 얼마나 있는가를 평가한다. 그리고, EPC는 공정에서 투입품질특성과 산출품질특성으로 연결되는 동적 모형으로서 변동을 감소시키기 위하여 공정을 조절하게 된다. EPC 공정조절법칙은 변동을 적게 하여 품질특성을 목표에 맞도록 조절하는 것이다.

SPC와 EPC의 통합시스템은 변동을 감소시키는 가장 중요한 요소인 조절변수에 의하여 공정을 조절한다. SPC에서 관리도는 목표에 맞도록 변동을 감소시키는 최선의 방법은 아니지만, 어떤 관리도는 평균이 이동하는 공정산업에서 사용하여 변동을 감소시키는 데 우수하다. 관리도의 사용은 품질특성이 자동상관관계에 있을 때 변동을 감소

시킴을 위하여 아주 우수하다. 슈하트관리도는 귀무가설만을 테스트할 수 있고 변동의 크기를 측정할 수 없기 때문에 EPC에서 피드백관리기법의 공정조절과 유사하다. Baxley는 수정된 슈하트관리도로 실험을 문서화하고, 관리한계선을 조절하는 EWMA 관리도와 시뮬레이션을 통하여 비교한 연구의 결과를 제시하였다[4]. Baxley는 EWMA관리도에서 관리한계의 관리한계선 조절방법을 설계하였다. 여기서 주어진 조절변수는 관리오차의 분산을 최소화한다. 이 연구는 관리한계를 조절하여 사용하므로, 관리도의 우수성을 나타내었다[3][4].

엔지니어링 관리이론의 가정은 다음과 같다.

- (1) 현재 공정에서는 다음 관측치를 예측 할 수 있다.
- (2) 공정품질특성치에 영향을 주고 조절할 수 있는 변수가 존재한다.
- (3) 조절활동에서 조절변수의 효과를 알고 있어야 한다.

통합시스템은 평균이 이동하는 공정에 사용하며, 품질특성과 조절변수 사이에 많은 정보를 얻는다. 조절변수는 엔지니어의 정보로써 공정을 조절한다. 공정품질특성의 변동은 매번 조절활동을 하여 변동을 최소화한다. 통합시스템은 공정조절을 할 때 가피원인이 있다는 통계적 증거가 있을 때만 SPC가 관여한다. 여기서 통계적 증거는 관리한계를 이탈하는 가피원인이다. 많은 EPC 공정의 피드백관리기술은 여러 형태의 다른 관리도를 선택할 수 있다.

반면에 SPC에서 가피원인의 제거는 공정개선을 위해서 매우 중요하지만, EPC는 가피원인을 탐지하지 못한다. 그러나, 모든 EPC기술은 공정의 가피원인에도 반응하여 공정조절을 한다. 결과적으로 관리도는 통계적 공정관리에 사용되며, 피드백관리는 공정을 조절하여 실질적인 공정개선 기술로 사용한다.

관리도는 목표와 변동의 차이를 관리하거나, EPC에서 연속적으로 조절한 품질특성에서 가피원인을 탐지하며, 특히 관리오차가 크거나 변동의 조절이 클 경우에 가피원인이 탐지된다. Vander Wiel 외 3명은 SPC로 달성할 수 있는 공정관리를 위하여 EPC와 SPC 두 개의 시스템을 사용하였다[25]. Montgomery는 EPC/SPC통합 효과를 제시하였다[20].

## 2.2 SPC와 EPC의 비교

Mesina는 <표 1>과 같이 SPC와 EPC를 일반적인 접근방법과 다른 형태로 비교하였다[19]. MacGregor는 통계적 관리이론과 SPC와 EPC를 연계하였다[16].

<표1>은 SPC와 EPC를 연계에 도움을 주며, 두 모형을 통합하는데 기초가 된다.

<표1>의 상관관계항목에서 EPC측면에서 살펴보면, 품질특성이 상관관계가 있을 때 EPC는 목표에 맞도록 품질특성을 공정조절 한다. 이러한 EPC모형에서 상관관계는 각

란을 추세모형으로 가정하는데 도움을 준다. 이 가정은 새로운 공정조절모형 설계에 기초가 된다.

Evams와 Lindsay는 SPC와EPC의 관점에서 깔때기실험을 하였다. MacGregor는 수정된 깔때기실험 규칙2를 응용하여 효과적인 공정경고와 공정조절에 관한 연구를 하였다[17].

Astrom과 Wittenmarky는 EPC를 적용하여 통계적 관리시스템의 구체적이 대안을 제시하였다. 통계적 관리시스템은 공정에서 평균이 이동하는 시점에 따라서 품질특성을 관리하며, 자동측정데이터와 분석적 방법으로 빠르게 문제를 해결하지만 일반적인 공정에서 요구하는 SPC모형과 다르다[1].

일반적인 통계적 관리시스템 모형은 Box, Jenkins와 Reinsel이 연구한 모형들의 확장 모형이다. 이 모형은 공정의 통계적 사고를 고찰하거나, 투입에서 산출로 움직이는 동적인 공정을 나타내는데 충분하지 못하다[9]. 자기상관, 통합, 이동평균, 추세를 고려한 제반모형들은 단순한 통계적 사고를 넘어 다음의 시점을 예측하는 새로운 관리기술로 확장되어야 한다.

<표 1> SPC와 EPC의 비교

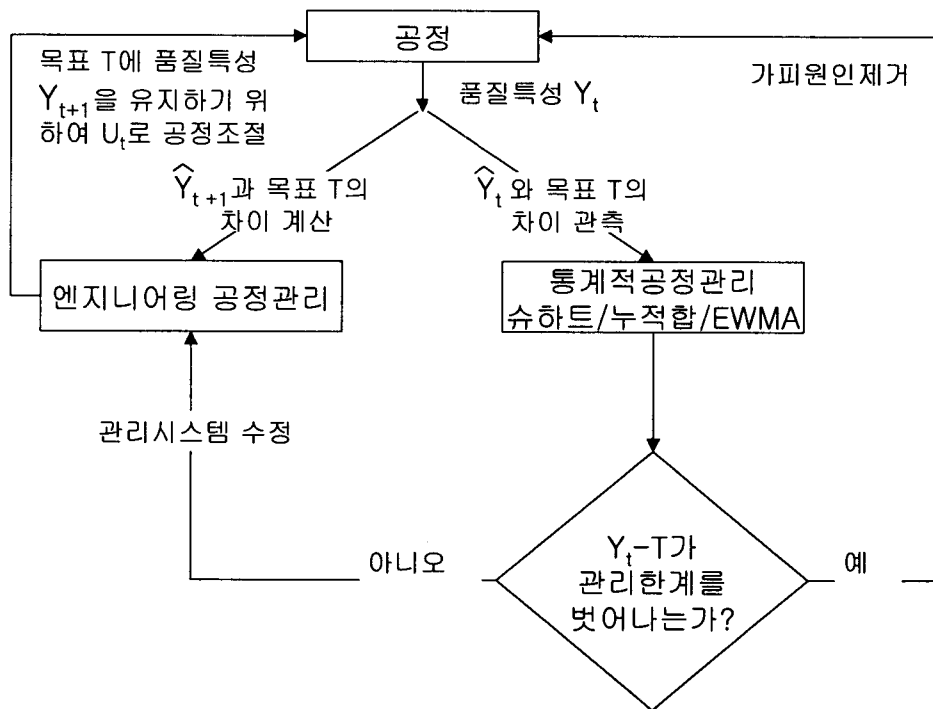
구 분	SPC	EPC
기본개념	공정에서 가피원인 탐지	공정 조절
적 용	모수가 상수인 공정의 예측	연속 공정의 예측
수 준	전략적	전술적
목 표	데이터에서 가피원인 제거	공정 모수
기 능	가피원인 발견	공정 조절
비 용	크다	무시할 수 있음
초 점	사람과 방법	장비
상관관계	무시 할 수 있음	많음
결 과	공정 개선	공정 개선

MacGregor는 조절활동비용이 들지 않는 모수 값이 상수인 공정에서 최적으로 관리할 수 있는 SPC의 관리방법을 연구하였다. 그는 조절활동과 관련된 비용이 없는 동적인 공정을 통합관리이론에 적용함으로써 최적품질관리가 이루어지도록 하였다[16].

SPC와 EPC통합시스템은 Montgomery, Keats, Runger, Mesina가 연구하기 시작하였다. 그들은 공정평균이 이동할 경우와 품질특성을 탐지하여 가피원인을 발견할 경우에는 EPC만을 사용할 때보다 SPC와 통합하여 사용할 때가 더 우수함을 시뮬레이션으로 나타내었다[20].

### 2.3 SPC와 EPC의 관계

EPC는 목표에 맞도록 공정을 유지하기 위하여 공정조절이론에 기초한다. 공정조절 이론은  $t+1$ 시점의 품질특성치를 예측하고 예측된 품질특성과 목표와 차이를 계산하여 변동이 최소화 되도록 공정을 조절한다. SPC는 예측품질특성과 목표와 차이를 관찰하고, 만약 관리오차가 가피원인으로 탐지되면 즉시 가피원인을 제거하여 변동을 감소시키는 역할을 수행한다. SPC와 EPC의 통합을 위한 관계는 [그림 1]과 같다.



[그림 1] SPC와 EPC의 통합을 위한 관계(Montgomery, 1996)

## 3. 공정조절 모형 고찰

### 3.1 이산형 공정모형(discrete process model)

일차차분 등식과 이산형 전이함수모형은 공정관리엔지니어에 잘 알려져 있다[16]. Macgregor는 이산형 모형들의 가장 단순한 형태를 안정-상태공정모형과 동적 공정모형으로 다음과 같이 나타내었다[16].

### 3.1.1 안정-상태 공정모형(steady-state process model)

안정-상태의 공정모형은 공정관리 엔지니어들에게 잘 알려져 있다. 이산형 공정에서 안정된 공정의 단순 이산형-시간(discrete-time) 공정모형은 다음과 같다[16].

$$Y_t = gu_{t-1} \tag{1}$$

$g$ ; 단위투입에 대한 산출의 크기

$Y_t$ :  $t$ 시점의 품질특성치

$u_t$ :  $t$ 시점의 공정조절치

$t = 0, 1, 2, \dots$  : 관측치  $Y_t$ 에서 단속적인 시간간격,  $u_t$ 가 생성된다. 이 모형은  $t-1$ 시점에 투입의 변화가 만들어지며, 품질특성은  $t$ 시점에 샘플링 간격에 의하여 새로운 안정-상태의 값을 얻게된다. 이러한 활동은 다음생산에 직접적인 영향을 준다.

### 3.1.2 동적 모형(dynamic model)

동적 모형은 동적이거나 단기체류효과가 있는 공정에서 표본간격이 짧을 때 적용된다. 그러한 공정은 이산선형 동적모형(discrete linear dynamic model)으로 관리영역이 알려져 있다. 이산선형 동적모형은  $t$ 시점에서 샘플링 하여 1차 공정을 차분 등식으로 나타내면 다음과 같다[16].

$$Y_t = \delta Y_{t-1} + \omega u_{t-b} \tag{2}$$

$\delta$  ; 차분 계수

$\omega$  ;가중함수

일차전이함수로 표기하면 다음과 같다.

$$Y_t = \frac{\omega Z^{-b}}{1 - \delta Z^{-1}} \cdot u_t \tag{3}$$

$$Y_t = \frac{\omega Z^b}{(1 - \delta^{-1})} u_t$$

$Z^{-1}$  : 후향 연산자( $Z^b u_t = u_{t-b}$ )

$b$  : 데드타임(deadtime)과정의 지연모수

더 복잡한 동적인 활동이 있는 공정에 적절한 특성을 부여하기 위하여 1차 전이함수의 모형은 고차전이함수모형으로 나타내면 다음과 같다[16].

$$Y_t = \frac{\omega(Z^{-1})Z^{-b}}{\delta(Z^{-1})} u_t \tag{4}$$

$\omega(Z^{-1})$ 와  $\delta(Z^{-1})$ ; 후향연산자  $Z^{-1}$  에서 다항식

### 3.1.3 PID (proportional-integral-derivative) 공정조절 모형

PI(proportional-integral)조절은 관리도의 단점을 보정하여 주는 피드백 공정조절의 효과가 있다. 특히, 이산형 PI관리는 조절의 손실을 적게 하는 효율적인 보정기술이다. 복잡한 최적설계는 변동의 감소를 최소화하기 위하여 제어기술을 사용한다[10]. Box는 피드백 조절원리가 쉽게 이해되는 PI관리를 적용하였다[5].

Box와 Kramer는 각각의 피드백관리에서 자동조절이 이루어지지 않을 때 비용이 많이 발생한다고 주장하였고, 관리도에서 가피원인을 관리하기 위하여 비용을 최소화하도록 관리한계를 조절하는 피드백관리에 대한 연구를 하였다[7]. EWMA관리도는 다른 관리도에서 탐지되지 않는 공정변동까지도 탐지하는 능력이 우수하다. 관리도를 잘못 사용하여 발생하는 문제는 목표 이탈시 관리, 조절, 표본과 검사 등의 제반비용이 많이 든다. 이러한 비용은 항상 직관적으로 쉽게 판단되지 않기 때문에 Box and Luceno는 평균제곱오차에서 변동, 평균조절 간격과 표본횟수를 판단의 근거로 제시하였다[8]. PID(proportional-integral-derivative)은 엔지니어링 피드백관리와 가피원인을 탐지하는 SPC는 온라인 품질개선의 주요한 도구이다. 여기에서 통합관리시스템은 새로운 SPC와 PID를 연계하여 관리하려는 모형에 대한 조사연구이다. 이때, 안정상태에서 가피원인이 있는 SPC모형과 EPC모형이 통합될 때 모수를 결정하는 상세한 설계절차가 필요하며, 설계할 때는 공정품질특성과 공정조절의 고찰이 요구된다.

품질특성데이터의 자기상관관계가 있을 때, 공정조절모형의 모수와 PID모형은 중요하므로 공절모형과 PID모형의 관리대상도 조사연구 하였다. Castillo와 Hurwitz은 피드백공정에서 다음과 같은 가정을 세웠다[12].

첫째; 목표값은 제로이다.

둘째;  $Y_t$ 는 목표와 품질특성의 차이로 나타낼 수 있다.

셋째;  $D_t$ 는 공정의 역동성이다.

넷째;  $u_t$ 의 초기 값은 제로로 한다.

다섯째; 공정의 역동성은  $D_t = u_{t-1}$ 로 나타낸다. 이러한 공정조절은 하나의 런(run)이 있는 공정에 효과적이다.

Castillo와 Hurwitz는 이러한 가정을 하고,  $Y_t$ 를 다음과 같이 나타내었다[12].

$$Y_t = D_t + n_t = u_{t-1} + n_t \quad (5)$$

이때,  $n_t$ 는 ARMA(1, 1)에 따를 때 공정각란으로 다음과 같다.

$$n_t = \phi n_{t-1} + a_t - \theta a_{t-1} \quad (6)$$

$|\phi| < 1$ ,  $|\theta| < 1$ . 그리고  $a_t$ 는 백색 잡음이다. 본 연구의 결과는 다른 모형으로 확장 가능하다. 예로써  $\phi$ 가 1에 접근할 때,  $n_t$ 는 IMA(0, 1, 1) 모형에 접근하게 된다.

IMA(0, 1, 1) 공정관리는 Vander Wiel에 의해 자세히 조사되었다. 그는 평균예측오차와 품질특성이 타점된 공정결과에서 공정평균이 이동하는 것을 발견하였다. 처음은 평균이 공정수준과 같은 양까지 이동하며, 예측된 평균을 사용하여 공정관리를 수행한



다. 본 조사연구는 편의성을 위하여 각관공정은 ARMA(1, 1)만을 생각한다[26].

Astrom은 산업실무에서 PID관리가 가장 많이 사용된다고 하였으며, 공정에서 이용할 수 있는 유일한 피드백관리를 다음과 같이 나타내었다[2].

$$u_t = -k_p Y_t - k_I \sum_{j=0}^{\infty} Y_{t-j} - k_D (Y_t - Y_{t-1}) \quad (7)$$

$k_p, k_I, k_D$ 는 모수 이다. 상황에 따라서 이들은 하나 혹은 두 개 또는 3개를 사용할 수 있다. Tsung, Wu와 Mair는 비례-누적(PI)관리에서  $k_p, k_I$  대신에  $k_D$ 를 놓을 수 있다고 하였다[23].

본 연구에서 PID관리는 공정품질특성을 조절하며, 가피원인으로 인한 공정분산을 최소화하기 위해 사용한다. 이러한 평가기준에 기초하여 PID모수는  $-k_p, k_I$ , 그리고  $k_D$ 를 Tsung 과Shi가 연구하였다[22]. Franklin,과Emami-Naeini는  $Y_t$ 와  $D_t$ 의 차이의 구역에서 다른 상관관계패턴을 연구하였다[13].

공정관리는 공학도와 과학도에서 통일된 의미를 갖지 않으므로 사람들 간에 의사소통이 잘되지 않는다. 공정관리는 전자공학, 기계공학, 화학공학 같은 영역에서 선형 시스템 이론의 피드포워드-피드백 제어, PID의 의미와 결합시키고, 산업공학에서는 SPC와 EPC를 통합하여 적용한다.

이러한 상황을 볼 때, 요즘 공학적 공정관리(EPC)와 통계적 공정관리(SPC)의 영역을 일반적으로 구별하지만 원칙적으로 EPC와 SPC의 목적은 같다. 그러나 작은 변동으로 목표에 도달하게 하는 경우, EPC와 SPC가 목표를 달성하기 위하여 다른 전략을 제시하는 이유는 두 영역에서 전통적으로 널리 쓰이는 모형이 다르기 때문이다.

공학적 공정관리시스템에서는 공정의 관리상태와 공정조절 활동을 하면서 발생하는 고장패턴의 체계를 세우지만, 통계시스템에서 관리도는 주어진 확률에 의하여 공정평균을 계속적으로 관리한다.

Box와 Kramer는 EPC와 SPC 통합시스템모형이 돌발적인 변동뿐만 아니라 명확하게 기술된 통계적인 보정방법을 연구하였다[7].

### 3.2 평균이 이동 할 경우 공정조절모형

MacGregor는 MMSE(minimum mean square error)컨트롤러가 관리활동을 할 때가 보다 성능이 우수하다는 것을 밝혔다.  $t$ 시점 공깃돌이 떨어지기 전에 깔때기 위치는 이전에 조절된 관측 값과 두 변량인자의 효과의 합과 같다는 것을 규칙2로 나타냈다 [17]. 이러한 관리규칙은 EPC만의 통합관리로 나타난다. 이 통합관리의 특성은 투입 단위당 산출의 비율, 공정조절의 빠른 반응 등이 있다. 최종 품질특성 생성 과정은 목표치와 관측 값의 차이에서 시작한다. 이 알고리즘은 부품산업과 공정산업에 장기적으로 사용되어 왔다. 공정평균이 이동할 경우는 통합모형은 깔때기 이론과 MacGregor이론을 기초로 한다[17]. 평균의 이동을 고려할 경우 통합 모형의 선형 식은 다음과 같다.

$$Y_t = u_{t-1} + n_t + e_t \quad (8)$$

### 3.3 기본 공정조절 모형의 운용절차

Box는 변동을 감소시키는 역할을 하는 EPC를 사용하여 공정을 조절하는 간단한 예와 EPC의 기본 모형을 다음과 같이 제시하였다[5][6].

t시점에서의 공정품질특성을  $Y_t$ 로 가정하면, 품질특성  $Y_t$ 는 목표치 T에 접근되도록  $Y_t$ 를 유지할 필요가 있다. 또한, 이러한 공정은 공정조절  $u_t$ 을 갖는다.  $u_t$ 는 그 시점에서  $Y_t$ 에 관한 효과를 아는 데 도움을 준다.

$$Y_{t+1} - T = gu_t \quad (9)$$

$g$ 는 상수이며,  $u_t$ 는 초기 값  $u_0=0$ 이다. 즉,  $g$ 는 투입품질특성크기와 산출품질특성크기에 대한 비율이다. 관리되지 않은 각란은 품질특성과 목표와 차이로 나타내는 공정 변화이며 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$Y_{t+1} - T = n_{t+1} \quad (10)$$

여기서  $n_{t+1}$ 은 각란이라고 정의하고, 이 각란은 자기회귀누적이동평균모형(ARIMA)과 같은 추세모형으로 나타내기도 한다. 각란은 이 모형에서 자기상관관계가 있다고 가정하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{n}_{t+1} &= \hat{n}_t + \lambda(n_t - \hat{n}_t) \\ &= \hat{n}_t + \lambda e_t \end{aligned} \quad (11)$$

위 식에서 예측오차  $e_t = n_t - \hat{n}_t$ 로 나타낸다.  $n_t$ 는 EWMA에 의하여 오차로 예측한다. 이러한 관리는 평균제곱오차를 사용하며 목표치 T부터 공정품질특성의 차이가 최소가 되도록 한다. EWMA의 모수 영역은  $0 < \lambda < 1$ 이다. 각란 모형은 조절되지 않은 공정을 이동평균통합모형으로 나타낸 것이다. 이 때, 이동평균모수는  $\theta = 1 - \lambda$ 이며, 시점 t에서 조절된 값은 다음과 같다.

$$Y_{t+1} - T = n_{t+1} + gu_t \quad (12)$$

이 식은 t+1시점에 품질특성과 목표와의 차이는 t+1시점의 각란에 t시점의 공정조절  $u_t$ 을 더한 것이다. 이때,  $n_{t+1}$ 은 t시점에서 미지이므로 예측각란  $\hat{n}_{t+1}$ 을 사용한다.

$\hat{n}_{t+1}$ 은  $n_{t+1}$ 의 예측 값이며 공정조절의 식은 다음과 같다.

$$Y_{t+1} - T = \hat{n}_{t+1} + gu_t \quad (13)$$

$e_{t+1} = n_{t+1} - \hat{n}_{t+1}$ 이다. 위의 식에서  $gu_t = -\hat{n}_{t+1}$  또는  $u_t = -(1/g)\hat{n}_{t+1}$  놓는다. t+1 시점에서 목표와 품질특성의 차이는  $Y_t - T = e_{t+1}$ 이고 예측오차  $e_{t+1}$ 은  $e_{t+1} = n_{t+1} - \hat{n}_{t+1}$ 이 된다.

t시점에 조절변수에 의한 조절은 다음과 같다.

$$u_t - u_{t-1} = -1/g (\hat{n}_{t+1} - \hat{n}_t) \tag{14}$$

$\hat{n}_{t+1} - \hat{n}_t = \lambda(n_t - \hat{n}_t) = \lambda e_t$  그리고  $e_t = Y_t - T$  일 때 등식의 조절은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_t - u_{t-1} &= -\lambda/g(Y_t - T) \\ &= -\lambda \times e_t/g \end{aligned} \tag{15}$$

조절은 조절변수를 t시점 동안의 조절한 것 모두를 합한 값으로 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_t &= \sum_{j=1}^t (u_j - u_{j-1}) \\ &= -\lambda/g \sum_{j=1}^t e_j \end{aligned} \tag{16}$$

이러한 공정조절기술은 EPC의 누적모형으로 알려져 있다[6]. 결국, EPC는 이전 공정품질특성과 목표치와의 차이 그리고 현재 모든 예측오차의 합과 조절변수의 수준을 같게 하는 피드백관리기술이다.

#### 4. 결론

본 연구는 SPC와 EPC의 통합시스템의 확립을 위하여 여러 학자들이 연구한 내용을 조사하고 분석하여 통합을 위한 방법과 절차에 대하여 방향을 제시하였다. 본 연구는 첫째는 SPC와 EPC의 비교와 분석을 실시하고 통합 가능성을 살펴보았다. SPC와 EPC피드백시스템의 비교에서는 각각의 변동을 감소시키는 전략의 차이점을 고찰하였다. EPC에서는 t+1시점에 품질특성의 예측  $\hat{Y}_{t+1}$ 와 목표값(T)의 차이를 계산한다. EPC는 목표값에 맞는 품질특성을 위하여 공정을 조절하고 조절된 품질특성은 공정관리시스템에 피드백되어 조절된다. SPC는 가피원인을 제거하여 공정관리에 도움을 준다. SPC와 EPC의 연계에서는 각각의 두 시스템의 장점을 살려서 관리도와 엔지니어링을 결합시키며 서로 보정하는 역할을 살펴보았다.

둘째는 EPC의 조사연구로서 공정조절 모형을 종류별로 고찰하였다. 이산 공정모형의 세밀한 고찰과, 평균이 이동하는 공정을 위하여 맥그리거모형의 특성을 고찰하고, 적용절차의 체계를 명확하게 하여 통합시스템의 방향을 모색하였다. 특히, PID는 엔지니어링 피드백관리와 공정의 가피원인을 관리하는 온라인 품질개선에 적용할 수 있을 것으로 조사되었다.

셋째는 SPC와 EPC의 통합을 위하여 연구자의 영역과 모형을 조사하고 내용을 비교하였다. 연구자별로 분류한 <표 2>는 SPC와 EPC에 대하여 비교적 상세하게 정리하였다. 조사연구결과는 주요한 모형과 특성이 나타나 있으나, 이 연구들은 대개 SPC와

EPC통합을 위한 통합절차가 명확하지 않았다. 특히, 각란은 추세모형에 사용할 때 일계 모수만을 사용하고 있는 것으로 조사되었다. <표 2>는 SPC와 EPC의 기존연구의 세부적인 정리이다. 주요모형이 삼각형( $\Delta$ )으로 표시된 논문은 전통적으로 알려진 모형을 사용할 수 있으므로 본 논문에서는 통합을 위한 이론적인 영역과 내용만을 조사하였다. 결론적으로 SPC와 EPC의 통합시스템은 EPC를 사용할 때와 같이 적용이 쉽고 간편하면서, 특히 예측기능이 있는 공정관리를 할 수 있는 것으로 조사, 연구하였다. 향후 연구과제로는 다중 변수가 있는 EPC모형 설계, 각란모형의 설계, 다양하고 적절한 공정관리를 위한 모수의 추정방법의 연구가 기대된다.

<표 2> SPC와 EPC의 기존의 연구의 세부적 정리(계속)

연구자	영역	모형	내용
Montgomery(1994)	SPC/EPC	$Y_{t+1} - T = gu_t$	PI모형
Castillo, Hurwitz(1997)	SPC/EPC	$Y_t = \phi Y_{t-1} + \beta u_{t-1} + d_t +$ $u_t = -(\phi/\beta)Y_t - d_{t+1}$	이산형 EPC모형과 MV컨트롤러
Vander Wiel, Tucker,Faltn, Doganaksoy(1992)	SPC/EPC	$Y_t = \beta u_{t-1} + e_t + n_t$ $u_{t-1} = \rho u_{t-2}$ $-[(\rho-0)/\beta]Y_{t-1}$	MMSE컨트롤러, 통계적공정관리 절차
MacGregor, Harres(1993)	SPC	$Y_t = gu_{t-1} + n_t$ $u_t = -(1/g) \hat{n}_{t+1}$	MMSE컨트롤러, EWMA, CUSUM
Montgomery Keat, Runger, Messina(1994)	SPC/EPC	$Y_t = u_{t-1} + n_t + e_t$ $u_t = \phi u_{t-1} - (\phi - \theta)Y_t$	맥그리거의 공정절모형, MMSE컨트롤러
MacGregor(1990)	EPC	$Y_t = u_{t-1} + e_t$ $u_t = u_{t-1} - \gamma_t$	수정된 깔때기실험, MMSE컨트롤러
Box, Jenkins, Reinsel(1994)	EPC	$\phi_p(B) (1-B)^d Y_t$ $= \theta_0 + \theta_q(B) a_t$	ARIMA(p,d,q)모형, 통계적 사고초월
MacGregor(1988)	EPC/EPC	$Y_t = e_t$	확률관리, 모수가 상수인 공정
Montgomery(1996)	SPC/EPC	$\hat{Y}_t - T$ $\hat{Y}_{t+1} - T$	두 관계의 논리설계, 두 관계 구상
Box(1991a)	EPC 기본모형	$u_t = -(\lambda/g) \sum_{j=1}^t e_j$	MMSE컨트롤러, EPC통합모형

<표 2> SPC와 EPC의 기존의 연구의 세부적 정리(계속)

연구자	영역	모형	내용
Box(1991b)	EPC SPC/EPC	$u_t = k_0 + k_p e_t + k_I \sum_{i=1}^t e_i$	PI컨트롤러, 매뉴얼에 의한 피드백 조절
Box, Kramer (1992)	SPC/EPC	$Y_t = -n_t + e_t$ $u_t = k_0 + k_p e_t + k_I + \sum_{i=1}^t e_i$	분산도표 설계와 PI컨트롤러
Box, Luceno (1994)	EPC	$Y_{t+1} = -g u_t + e_{t+1}$ $u_t = u_0 - (\lambda/g) \sum_{j=1}^t e_j$	IMA모형 MSE컨트롤러
Astrom(1988)	EPC	$u_t = -k_p e_t - k_I \sum_{j=0}^t e_{t-j} - k_D(e_t - e_{t-1})$	피드백관리, PID컨트롤러
Tsung, Wu, Mair(1998)	EPC	$u_t = k_0 + k_p e_t + k_I \sum_{j=1}^t e_j$	PI관리에서 $k_p, k_I$ 대신 $k_p$ 을 놓음
Tsung, Shi(1998)	SPC/EPC	$e_t = Y_{t-1} + n_t = u_{t-1} + n_t$ $u_t = -k_p e_t - k_I \sum_{j=0}^{\infty} e_{t-j} - k_D(e_t - e_{t-1})$	ARMA(1,1)각란을 위한 PID모수설계, PID컨트롤러

&lt;표 2&gt; SPC와 EPC의 기존의 연구의 세부적 정리(계속)

연구자	영역	모형	내 용
Vander Wiel(1996)	EPC	△	IMA모형가피원인을 탐지하는EPC개발
James(2001)	SPC	△	SPC 실행결과에의 신뢰도
Tsung(2001)	SPC/EPC	△	EPC에서 통계적 탐지 효율적인 관리한계선
Messina(1992)	SPC/EPC	△	품질특성, 공정모수 SPC와 EPC의 목표가 다름
Astrom, Wittenmarky(1984)	EPC적용	△	컴퓨터관리시스템, 자동측정데이터 분석 방법
Montgomery, Keats Runger, Mesina(1994)	SPC/EPC	△	시뮬레이션. SPC/EPC통합시스템이 EPC만 사용 할 때 보다 우수
MacGregor(1991a)	EPC	△	피드백조절원리, 매뉴얼조절에 의한 EPC
Baxley(1991)	SPC	△	시뮬레이션, 공정평균의 이동
Baxley(1994)	SPC	△	EWMA관리도의 관리한계의 조절경계선 설계
Franklin, Emami-Naeini(1986)	EPC	△	$e_t$ 와 $Y_t$ 차이영역에서 상관관계 패턴연구

△은 일반적으로 알려진 모형을 사용 할 수 있음

## 6. 참고문헌

- [1] Astrom, K. J. and Wittenmarky, B., Computer Controlled Systems: Theory and Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1984
- [2] Astrom, K. J., Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC., 1998
- [3] Baxley, R. V., JR., "A Simulation Study of Statistical Process Control Algorithms for Drifting Processes" in Statistical Process Control in Manufacturing edited by J. B. Keats and D. C. Montgomery. Marcel Dekker, New York, NY, pp.247-297, 1991
- [4] Baxley, R. V., JR., "Applications of the EWMA for Algorithmic Statistical Process Control", Quality Engineering7, pp.397-418, 1994
- [5] Box, G. E. P., "Feedback Control by Manual Adjustment", Quality Engineering, Vol. 4, pp.143-151, 1991a

- [6] Box, G. E. P., "Bounded Adjustment Charts". *Quality Engineering* Vol4, pp.331-338, 1991b
- [7] Box, G. E. P. and Kramer, T., "Statistical Process Control and Feedback Adjustment - A Discussion", *Technometrics*, Vol. 34, pp.251-285, 1992
- [8] Box, G. E. P. and Luceno, A., "Selection of Sampling Interval and Action Limit for Discrete Feedback Adjustment", *Technometrics*, Vol. 36, pp.369-378, 1994
- [9] Box, G. E. P., Jenkins, G. M. and Reinsel, G. M., Time Series Analysis: Forecasting and Control, 3rd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1994
- [10] Box, G. E. P. and Luceno, A., "Discrete Proportional-Integral with Constrained Adjustment", *American Statistical Association and American Society for Quality Control*, Vol.44, pp.479-495, 1995
- [11] Davis, M. H. A. and Vinter, R. B., Stochastic Modeling and Control, Chapman & Hall, London, 1995
- [12] Del Castillo, E. and Hurwitz, A., "Run to Run Process Control: A Review and Some Extensions". *Journal of Quality Technology*, Vol.29, pp.184-196, 1997
- [13] Franklin, G. F; and Emami-Naeini, A., Feedback Control of Dynamic Systems. Addison Wesley, Reading, MA., 1986
- [14] James E. D., "Statistical Process Control In Industry : Implementation and Assurance of SPC", *Journal of the American Statistical Association*, Vol.96, pp.78, 2001.
- [15] MacGregor, J. F., "Interface Between Process Control and On-Line Statistical Process Control", *A.I.Ch.E. Cast Newsletter*, pp9-19, 1987
- [16] MacGregor, J. F., "On-line Statistical Process Control", *Chemical Engineering Progress* Vol.84, pp.21-31, 1988
- [17] MacGregor, J. F., "A Different View of the Funnel Experiment: *Journal of Quality Technology*, Vol. 22, pp. 255-259, 1990
- [18] MacGregor, J. F., and T. J. Harris, "The Exponentially Weighted Moving Variance", *Journal of Quality Technology*, Vol. 25, 1993
- [19] Messina, W. S., "Strategies for the Integration of Statistical and Engineering Process Control: Ph., Dissertation, Arizona State University, Tempe, AZ., 1992
- [20] 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, pp.79-87, 1994
- [21] 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. 3
- [22] Tsung, F. and Shi, J., " Integrated Design of Run-To-Run PID Controller and SPC Monitoring for Process Disturbance Rejection", *IIE Systems*. Addison

- Wesley, Reading, MA. 1998
- [23] Tsung, F., Wu, H. and Mair, V. N., "On the Efficiency and Robustness of Discrete Proportional-Integral Control Schemes", *Technometrics*, Vol. 40, pp.214-222, 1998
- [24] Tucker, W. T., Faltin, F. W. and Vander Wiel, S. A., "Algorithmic Statistical Process Control: An Elaboration", *Technometrics*, Vol. 35, pp.363-375, 1993
- [25] Vander Wiel, S., W. T. Tucker, F. W. Faltin, and N. Doganaksoy, "Algorithmic Statistical Process Control : Concepts and an Application", *Technometrics*, Vol.34, pp.286-297, 1992
- [26] Vander Wiel, S. A., "Monitoring Processes That Wander Using Integrated Moving Average Models", *Technometrics*, Vol. 38, pp.139-151, 1996
- [27] Yashchin, E., "Statistical Control Schemes : Methods, Applications and Generalizations", *International Statistical Review*, Vol. 61, pp.41-66, 1993

## 저 자 소 개

김종걸 : 현재 성균관대학 시스템경영학부에 교수로 재직중 이다.,  
주요 관심분야는 품질경영, 신뢰성공학, PL, 리스크경영등 이다.  
그리고 IEC/TC56한국대표, 한국PL연구회장, 산업자원부 신뢰성위원 등을 맡고 있다.

정해운 : 현재 오산대학교 시스템경영학과에 교수로 재직중이다.  
주요 관심분야는 품질관리, SPC/EPC등이다.