

다변량 공정관리 기술과 추세알고리즘의 연계에 관한 조사연구

정 해 운*

*오산대학교 산업경영학과

A Study on the Relation between Multivariate Process Control Techniques and Trend Algorithm

Hae-Woon Jung*

*Dept. of Industrial Management, Osan-University

Abstract

Autoregressed Controller, which have trend algorithm, seeks to minimize variability by transferring the output variable to the related process input variable, while multivariate process control techniques seek to reduce variability by detecting and eliminating assignable causes of variation. In the case of process control, a very reasonable objective is to try to minimize the variance of the output deviations from the target or set point.

We also investigate algorithm with relevant Shewhart chart, Theoretical control charts, precontrol and process capability. To help the people who want to make the theoretical system, we compare the main techniques in "a study on the relation between multivariate process control techniques and trend algorithms".

Keywords : multivariate, process control techniques, trend algorithm, controller, Shewhart, EWMA, CUSUM, precontrol, process capability

1. 서 론

본 연구는 슈하트 관리도, EWMA, CUSUM, 프리컨트롤(Precontrol), 공정능력 등으로 된 다변량 공정관리와 추세알고리즘(Trend Algorithm)으로 된 컨트롤러와 연계하여 통합하거나 병행 사용 할 때 이론적으로 기초를 명확하게 하려는 조사연구이다. 본 연구에서 다변량 공정관리의 연계는 슈하트 관리도와 EWMA, 슈하트 관리도와 CUSUM, 슈하트 관리도와 프리컨트롤, 프리컨트롤과 공정능력의 연계성을 조사연구 하고자 한다. 다변량 공정관리와 추세알고리즘과 관련이 있는 컨트롤러의 연계는 품질특성의 가피원인 탐지와 경고

시스템을 작동하도록 하여 품질특성을 목표대로 우수하게 조절하도록 한다. 다변량 공정관리와 추세알고리즘의 공통된 특성을 연계 하려는 사고는 더 좋은 변동의 감소를 가져오기 때문에 통합모형들의 이론체계를 명확하게 할 수 있다. 본 논문의 연구 범위는 공정조절 모형의 기초가 되는 추세알고리즘이 있는 컨트롤러와 상호 연관이 있는 다변량 공정관리로서 슈하트 관리도, EWMA, CUSUM, 규격에 대한 자연공차의 비율로 설명되는 공정능력 그리고 공정능력과 관련이 있는 프리컨트롤로 한다[6][16][17][19][23][30][38][42][49].

† 본 연구는 2011년도 오산대학교 교내 학술 연구조성비에 의해 연구되었음

† 교신저자: 정해운, 경기도 오산시 청학동 17번지 오산대학교 산업경영학과

M · P : 010-9006-9773, E-mail: jhwoon@hanmail.net

2011년 10월 20일 접수; 2011년 12월 19일 수정본 접수; 2011년 12월 20일 게재확정

2. 연계를 위한 사고

2.1 추세모형의 알고리즘

추세모형은 상관관계가 있는 데이터에 적용이 우수하다고 알려져 있다. 추세모형은 일계 추세모형과 그 확장으로 된 이계 추세모형이 있다. 추세모형에서 통합모형은 자기회귀모형(Autoregressed Model)과 이동평균모형이 통합된 자기회귀 이동평균모형이 있다[7][8][12][13][36][37][38]. 추세모형의 알고리즘이 있는 공정조절모형은 다변량 공정관리와 통합되어 사용된다. 공정조절은 패턴이 있는 품질특성을 측정하는 판별 실험에서 시작된다. 공정조절 하는 어떤 컨트롤러(Controller)는 공정 감시와 피드백조절, 통합모형을 위하여 추세알고리즘이 사용된다[8][13][29][31][37][38].

추세모형에 있어서 품질특성 x_t 는 직전에 관측 값, 직전 앞의 관측 값 x_{t-1}, x_{t-2} 에 의존한다. 다른 측면에서 보면 확률 요소 ε_t 을 통하여 설명되는 모형이다. 이모형에서 x_t 와 x_{t-1} 사이에 모 상관관계가 있는 $\rho_1 = -\theta/(1+\theta^2)$ 이고 다른 랙(lag)은 0이 아니다. 일계 이동평균모형은 다음과 같다.

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1} \quad (\text{식 2-1})$$

이때, 일계 추세모형은 다음과 같다.

$$x_t = \xi + \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \varepsilon_t \quad (\text{식 2-2})$$

x_t 에서 상관관계는 유일하게 하나의 시간 간격을 뒤로 확장시키는 것이다. 어떤 경우는 추세모형과 이동평균모형의 통합에 쓰인다. 일계 통합모형은 다음과 같다.

$$x_t = \xi + \phi x_{t-1} + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1} \quad (\text{식 2-3})$$

이러한 모형은 공정산업에서 많이 발생된다. 그 이유는 기본적인 공정변수 x_t 는 일계 추세분석에서 품질특성이고 확률오차가 x_t 에 부가된다. 공정산업에서는 일계 자기회귀모형이 사용된다. 측정된 품질특성은 자기상관관계가 있는 데이터로 사고를 할 수 있다. 이때, 자기회귀 요소는 확률변동이 부가 된다. 그래서 공정산업은 등식(식 2-3)에서 일계 자기회귀 이동평균 통합모형이 요구된다[3][33][38]. 일계 통합이동평균모형은 공

정변동이 작을 때 쓰이며 다음과 같다[33][38].

$$x_t = x_{t-1} + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1} \quad (\text{식 2-4})$$

지금까지 모형들은 정상적인 활동을 설명한 것이다. (식 2-4)식은 품질특성 x_t 가 공정평균에 접근 할 때 정상적이 아닌 활동에 적용된다. 품질특성 x_t 가 공정평균에 접근 할 때 이모형은 x_t 의 목표 값을 유지하기 위하여 품질특성의 변동이 거의 없는 연속산업공정에서 사용 될 수 있다[9][33]. 자기회귀와 이동평균의 통합모형은 ARIMA모형 이라고 불리는 추세모형으로서 다음의 학자들이 연구 하였다. Montgomery, Johnson, Gardiner(1990)와 Box, Jenkins, Reinsel(1994)에 의해 추세모형이 논의 되었다[36][12]. 추세모형은 상관관계가 있는 이변량 품질특성의 변동이 패턴이 있을 시 사용 된다[29][31][38]. 추세모형에 적합한 데이터가 가 있을 경우 적용이 쉬운 일계 자기회귀모형과 이동평균모형, 일계 통합모형, 이계 자기회귀모형과 이동평균모형, 이계 통합모형은 미니탭에서 적용성이 우수하며 통합모형을 위한 일계, 이계 모형이 <표 1>같이 알려져 있다[3][38].

<표 1> 통합모형을 위한 일계, 이계 모형

<p>일계자기회귀로 나타낼 경우 AR(1) 모형의 품질특성은 다음과 같다.</p> $y_t = \phi_1 y_{t-1} + a_t$ <p>일계이동평균의 특성으로 나타낸 MA(1)모형은 다음과 같다.</p> $y_t = a_t - \phi_1 a_{t-1}$ <p>일계자기회귀특성과 이동평균특성으로 연계된 ARMA(1.1)모형은 다음과 같다.</p> $y_t - \phi_1 y_{t-1} = a_t - \theta_1 a_{t-1}$ $\therefore y_t = \phi_1 y_{t-1} - \theta_1 a_{t-1} + a_t$ <p>이계자기회귀 특성으로 나타낼 수 있는 AR(2)모형은 다음과 같다.</p> $y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + a_t$ <p>이계이동평균모형으로 나타낼 수 있는 MA(2)모형은 다음과 같다.</p> $y_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2}$ <p>이계자기회귀모형과 이동평균모형으로 ARMA(2.2) 모형은 다음과 같다.</p> $Y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} + a_t$

2.2 다변량 공정관리와 추세모형의 연계 사고

다변량 공정관리와 자기회귀 알고리즘의 연계성은 EWMA에서 시작하면 각각의 연계에 대한 좋은 성과를 거둘 수 있다. 관리도와 추세 알고리즘으로 된 컨트롤러의 통합은 품질특성들이 상관관계가 있는 데이터를 가질 때 가피원인 탐지에 더 감도가 좋고, 공정조절에 우수한 효과가 있다. 프리컨트롤은 목표 값, 규격의 폭, PC선(Precontrol Line), 표준편차의 특성을 가지며, 규격의 폭에 대한 자연공차의 비율서 설명되며 공정능력지수는 규격의 폭, 표준편차의 특성을 갖는다. 프리컨트롤과 공정능력은 규격, 표준편차의 공통된 특성이 있어 쉽게 연계 할 수 있다. 프리컨트롤은 공정능력과 관리도의 중간단계로 추세모형과 병행 사용 되든지 통합될 수 있다. EWMA는 파라메타를 조절하므로 슈하트 관리도의 특성이 되기도 하고 CUSUM과도 연계를 지을 수 있다[38]. 슈하트 관리도는 다른 측면에서 프리컨트롤과 연계가 되고 프리컨트롤은 공정능력과 연계가 된다. 다변량 공정관리는 EWMA를 앞세우면 미래를 예측하는 파라메타들의 특성이 있고 추세모형의 알고리즘의 특성이 있어 통합의 이론적 체계를 명확하게 할 속성이 된다. 본 연구에서는 EWMA를 중심으로 통합모형과의 연계를 살펴보고자한다. 자기회귀이동평균 모형은 슈하트 모형과는 다르게 나타난다. 그러나 슈하트 모형은 실질적으로 ARIMA모형과 유사한 관계로 나타 낼 수 도 있는데 이는 슈하트 관리도의 특별한 경우를 포함한다. 자기회귀모형에서 $\phi=0$ 로 놓으면 슈하트 모형이 된다. 이동평균모형에서 $\theta=0$ 로 놓아도 슈하트 모형이 된다[38]. 상관관계가 있는 품질특성 데이터는 추세모형의 알고리즘이 있는 통합모형에 더 유효하다. 상관관계가 있는 데이터에서 EWMA 사용하여 품질특성을 나타내는 방법은 실무에 적용이 어렵지만 추세모형이나 다변량 공정관리의 연계사고는 다중으로 공정변동을 줄이기 때문에 적용성이 좋다. 프리컨트롤의 제어, 관리도의 가피원인탐지, 공정능력의 품질달성능력 등 기능적으로 변동감소라는 특성을 갖고 있는 다변량 공정관리와 추세알고리즘의 특성이 있는 컨트롤러의 공정조절이라는 기능이 서로 상이함에도 불구하고, 공통적인 특성들의 파라메타(Parameter)의 추정은 연계 알고리즘이 된다. 이런 측면에서 보면 관심 있는 각각의 변동을 위하여 명확한 추세모형의 알고리즘이 있는 통합모형 만을 개발하는 것은 많은 시간을 낭비 하게 된다. 학자들은 이러한 어려움의 일부를 완화하는 추세모형의 기초를 확립 하였다[3][6][7][8][12][38].

Montgomery와 Friedman(1989)은 자동제조 환경에서 컴퓨터와 통합된 추세모형에 대한 실무에 더 많은 노력이 필요 하다는 것을 밝혔다[34].

Montgomery와 Mastrangelo(1991)는 제조공정에서 품질특성에 대하여 EWMA에 기초한 이론적 절차를 제안하였다[35]. 이는, EWMA가 품질특성이 자기상관관계에 있는 데이터에서 감도가 좋다는 사실을 이용한 것이다.

EWMA는 연속공정에서 통합이동평균모형을 구축할 수 있으며, 파라메타가 $\lambda=1-\theta$ 로 된 예측을 나타낼 수 있다[38]. EWMA 품질특성은 다음과 같이 알려져 있다.

$$z_t = \lambda x_t + (1 - \lambda)z_{t-1} \quad (\text{식 2-5})$$

여기서 품질특성은 각각 독립이고 평균이 0이며 분산이 1인 정규분포를 한다. 다음은 예측오차를 나타낸다.

$$e_t = x_t - \hat{x}_t(t-1) \quad (\text{식 2-6})$$

EWMA관리도로는 예측오차를 사용 할 수 있다. 파라메타 λ 또는 θ 는 최소화된 오차제곱의 합을 사용한다. 품질특성의 변동이 작은 공정은 일계통합모형과 똑같은 모형이 아니라고 한다면, 공정으로부터 관찰된 데이터가 양의 자기상관관계이고 공정 평균의 변동이 적다면, 파라메타 λ 의 값은 EWMA에서 추정할 수 있다. 추세분석에서 예측방법은 수년 동안 이러한 방법을 사용하였다[30].

Montgomery, Johnson과 Mardiner(1990)는 이러한 EWMA에서 설명되는 일계 이동평균모형의 많은 공정을 연구하였다[36]. 결국, 추세모형에 접근하는 공정탐지는 EWMA를 사용할 수 있다. 통계적 공정탐지는 EWMA에서 예측오차 또는 잔차 모형으로 나타 낼 수 있다[30][38][46]]. EWMA는 예측 알고리즘뿐만 아니라 관찰된 런(Run)과 병행하여 사용 할 수 있다. 잔차 관리도는 공정의 품질특성을 위하여 예측모형을 나타내지 못하지만 런(Run)은 공정들의 예측을 시각적으로 나타낼 수 있다[38].

Montgomery와 Mastrangelo(1991)은 EWMA가 통계적 관리상태에서 품질특성이 변하는 공정의 정보를 통합 할 수 있다는 것을 보여주었다[35]. 예측오차 e_t 는 정규분포를 하고 오차의 관리 한계선은 3σ 관리한계선에 따른다고 하자. EWMA에서 표준편차 σ 의 추정은 예측오차에서 여러 가지 다른 방법으로 추정된다.

만약 λ 가 관측 수 n 을 초과하면 그때 n 에 적합한 최적 λ 을 위하여 예측오차제곱의 합을 n 으로 나누어 σ^2 을 추정한다. EWMA 대한 연구가 Montgomery, Johnson 과 Mardiner(1990)에 의하여 연구되었다[36].

3. 전통적인 관리도의 연계사고

3.1 관리도의 연계 사고

관리도(Control Chart)는 공정평균을 중심으로 상하 3 σ 를 기준으로 하여 가피원인을 탐지하기 위하여 사용되어 왔던바 관리도와 추세알고리즘을 연계 하여 가피원인을 탐지하고 공정조절을 하여 더 효율적으로 품질특성의 변동이 감소 되도록 하는 노력이 끊임없이 연구되어 왔다[48]. 통계적 공정관리는 투입에서 산출에 이르기까지 중간 공정을 통계적으로 관리하는 것이다. 이때 관리도는 통계적 공정관리의 도구중 하나이다[5][47].

관리도와 추세모형과 연계사고는 가피원인탐지와 공정조절을 통합하기 위하여 관리도의 특성을 조사연구하려는 사고이다[37][39]. 관리도는 품질특성이 낮은 상관관계라면 정상적인 기능을 발휘하지 못하는 특성이 있다. 상호관련이 적게 있는 두 변량의 품질특성의 데이터를 사용하는 관리도들은 매우 많은 거짓경고를 만들어내는 오류를 범한다. 이러한 지적은 Berthouex, Hunter와 Pallesen(1978), Alwan 과 Roberts(1998), Montgomery 와 Friedman (1989), Alwan(1992), Harris 와 Ross(1991), Montgomery와 Mastrangelo(1991), Maragah와 Woodall(1992)등에 의해 연구되었다[9][7][34][6][18][35][32].

상관관계가 있는 이변량데이터의 경우, 상한과 하한에서 하나씩 품질특성을 선택하여 쌍으로 가피원인을 제거하는 수정된 관리도(Trimmed Control Chart)를 사용하면 품질특성의 변동은 더 목표에 맞도록 감소된다[4][14]. 이러한 목적을 위한 관리도는, 슈하트 관리도인 경우 실무에 강하고 EWMA와 CUSUM은 상관관계가 있는 데이터의 경우 이론적인 측면에서 강하다[38].

프리컨트롤은 정규분포, 목표 값, 표준편차 등 몇 가지 특성이 관리도와 같은 기능이 있고, 공정능력과의 공통의 특성으로는 정규분포, 규격, 표준편차가 있다[1][4][38][41][46][48]. 공통의 특성이 있는 다변량 공정 관리들은 추세 알고리즘이 있는 컨트롤러(Controller)와 연계 하여 사용하면 품질특성이 더 목표에 맞게 조절된다[20][24][26][27][38]. 관리도는 수행도 측정을 최소화 평균제곱오차로 평가 할 경우, 공정평균 μ 를 0으로 하여 품질특성들의 변동을 관리한계선 안에 나타낼 수

있고, 관리 상태를 벗어나면 가피원인이 탐지되도록 하는 역할을 한다[38][3]. 슈하트 관리도의 단점은 마지막에 정해진 점을 포함하여 공정에 대한 정보만 사용하고 전체적인 정보가 경시되는 것이다. 이러한 특징이 있는 슈하트 관리도는 1.5 σ 또는 그 이하의 범위처럼 상대적으로 작은 공정의 이동에 민감하지 않다. 측정된 데이터에 1.5 σ 사용은 공정이 안정되면 관리도의 평균 런의 길이를 줄이게 된다[38][2]. 작은 이동에 관심이 있는 슈하트 관리도에 대한 두 가지 효과적인 대안은 CUSUM이나 EWMA 의 통합이다[20][26][38][46].

3.1.1 평균과 범위 관리도

계량치 관리도에서 가장 많이 사용되는 관리도로 평균과 범위관리도가 있다. 슈하트 이후 많은 연구자들은 다변량 관리도, 평균관리도의 관리한계선 설계에 따른 효과, 개별관측을 위한 품질관리도의 비교, 수정평균의 평균과 범위관리도, 수정평균(Trimmed Mean)에 의한 두 특성치 상관계수에 대한 수정된 관리도, EWMA의 의한 예측, CUSUM 관리도에 관한 조사연구가 이루어졌다[1][3][23][44][45][14][4][46]. 연계를 위한 다변량 공정관리로서 관리도의 기본인 슈하트 관리도는 변동을 감지하는 능력이 1.5 σ 에서 2 σ 와 같이 품질특성의 큰이동이 있는 경우에 우수하며 보통 3 σ 관리한계선을 사용한다. 슈하트 관리도의 운용절차로는 품질특성이 관리한계선을 벗어나면 거짓경보인가 가피원인인가를 탐지하고 가피원인 이라면 이를 제거하고 수정된 관리도를 작성하여 변동을 관리한다[38][3].

관리도의 가피원인 탐지능력은 변동 측정지표인 수행도로서 PM(Performance Measurement)으로 나타내며, PM값이 작을수록 수행능력이 우수하다고 평가한다[38][3]. 또한 평균 런의 길이(ARL)는 전체품질특성 중 가피원인이 발생하는 비율로 나타낸다. 이때 비율은 적을수록 좋다[38]. Wardell, D. G., H. Moskowitz, 와 R. D. Plante(1994)는 상관관계가 있는 공정을 위한 가피원인을 런 길이와 관련하여 설명하였다[48].

3.1.2 지수가중이동평균(EWMA) 관리도

다변량 공정관리는 상호 연계를 위하여 EWMA에서 시작하면 적용이 우수하다. EWMA는 품질특성이 작은 이동이 있을 때 슈하트 관리도의 좋은 대안으로 사용된다[38]. 현재 화학 산업과 같은 자기상관관계가 있는 통계적 공정관리의 품질특성의 데이터는 미니맵을 이용하여 관리도 실무에 많이 사용된다[28][33][3].

EWMA의 수행은 CUSUM과 비슷하나 그 설치와 운영이 CUSUM에 비하여 매우 수월하다. 앞에서 설명된

추세모형의 EWMA에 접근은 실제상황에서 다루기 어려운 것일 수 있다. EWMA에 몇 개의 품질특성의 변동을 적용한다고 생각해보자 잠재적인 품질특성의 몇 가지 상황을 위하여 명시적인 추세모형을 개발하는 것은 시간을 낭비하는 것이라 볼 수 있다.

Yourstone 과 Montgomery(1989)는 실시간을 통계적 공정관리알고리즘에 적용하고, 어려움을 부분적으로 감소시키는 동적인 추세모형을 개발하였다[49]. 그러나 추세모형 그 자체가 공정의 다양성을 설명하는데 있어서 고유 값이 아니라면, 추세모형을 개발하는 것은 실제로 입증된 것 보다 더 많은 연구가 필요하다[35].

Montgomery와 Mastrangelo(1991)는 EWMA에 기초한 이러한 절차를 제안해 왔다[35]. 그들은 품질특성의 데이터가 자기상관관계가 있는 상황에서 EWMA가 사용될 수 있다는 사실을 이용하였다. 자기상관관계가 있는 공정에서 경고를 위한 EWMA를 이용한 예측은 공정으로부터 측정된 품질특성들이 양의 자기상관관계이고 공정평균이 매우 빠르게 이동하지 않는다면, 적절한 EWMA의 모수인 λ 값을 갖는 우수한 선행예측기법을 제공하게 된다[46]. EWMA는 수년 동안 예측과 추세 분석에서 선행예측기법을 이용해 왔다. EWMA에 의한 추세분석의 선행예측기법의 연구가 Montgomery, Johnson, Mardiner(1990)등의 학자들에 의해 연구 되었다[36]. EWMA의 선행예측오차는 근본적인 관측된 런도표에 의해 적용 될 수 있다. 관측치의 런도표는 공정의 다양성을 인정한다.

Montgomery와 Mastrangelo(1991)는 추세 데이터가 있는 단일공정표상에서 공정의 다양성과 통계적 관리에 대한 정보를 통합 할 수 있다는 것을 나타냈다[35]. Lucas 와 Saccucci(1990)는 EWMA의 평균런(ARL) 길이에 적합한 EWMA모수인 L 과 λ 값을 표로 나타냈다[27].

3.1.3 누적합(CUSUM)관리도

미니탭에서 목표치의 설정은 누적합(CUSUM)의 형태를 결정한다. μ_0 의 품질특성을 목표치로 생각할 수 있다. 이 목표치는 공정산업에서 측정된 품질특성을 목표 값으로 관리하고자 할 때 사용된다[2][10][33]. 누적합(CUSUM)은 흐름공정에서 품질특성이 목표에 벗어나면 경고신호를 보낸다. 그리고 공정의 품질특성을 목표치에 맞게 조절하도록 하는 역할을 한다. CUSUM의 경고신호는 가끔 슈하트 관리도와 같이 어떤 조치를 필요로 한다. Lucas(1982)는 CUSUM과 슈하트 관리도를 통합하였다[26]. 테이블러 누적합(Tabular CUSUM)은 목표치에서 위에 위치한 C^+ 는 μ_0 로부터 이끌어

낸 것이다. 다른 목표치에서 아래에 위치한 C^- 는 μ_0 로부터 유도된 것이다. CUSUM은 측정된 품질특성의 결과를 누적하여 산출한 값으로 슈하트 관리도의 두 배정도 빠르게 공정의 변화를 탐지한다. 공정이 관리상태일 때 CUSUM은 연속된 품질특성의 정보를 누적하기 때문 목표 값에서 작은 변화에 민감하다. CUSUM에서 품질특성들의 타점은 목표 값으로부터 표본 값을 차감한 차이의 누적합으로 된 점들이 0주위에 무작위로 분포되어야 한다. 타점의 추이가 위 아래로 발견되면 공정평균에 변동이 심한 가피원인이 있다는 경고이다. Page(1961)는 CUSUM의 이론을 체계화 하였다[41]. 그는 품질특성에서 모수의 변동을 검출하는 문제와 관측치를 위하여 평균 런의 길이를 이용하였다. 공정변화의 검출 방법은 양측 또는 단 측으로 모수의 변동을 검출하는 것이다[41][38]. CUSUM은 샘플크기가 1이상 일 때 몇 개의 표본정보를 합하였기 때문에 슈하트 관리도 보다 품질특성의 변동이 작은 탐지에 효과적이다. 샘플의 크기가 $n = 1$ 일 때 더 실무에서 효과적이다. CUSUM의 품질특성은 다음 식에 의한다.

$$C_t = \sum_{j=1}^t (\bar{Y}_j - \mu_0) \quad (\text{식 3-1})$$

테이블러 CUSUM의 단 측 상한과 하한 값은 다음과 같다.

$$C_t^+ = \max [0, x_t - (\mu_0 + K) + C_{t-1}^+] \quad (\text{식 3-2})$$

$$C_t^- = \max [0, (\mu_0 - K) - x_t + C_{t-1}^-] \quad (\text{식 3-3})$$

여기서 초기 값은 $C_0^+ = C_0^- = 0$ 이다. K 는 평균 μ_1 에서 목표 값 μ_0 와 차의 절대 값을 반으로 나눈 값이다. CUSUM은 Page에 의해서 처음으로 실무가 제안이 되었으며 그 후 CUSUM의 브이-마스크(V-Mask), 파라메타가 연구되었다.

Page(1961), Lucas(1973), Hawkins (1981)연구에서는 이론적 체계가 더욱 명확해 졌다[41][25]19]. 두 가지의 CUSUM을 표현하는 대표적인 방법이 있는데 그것은 테이블러 누적합(Tabular CUSUM)과 브이-마스크(V-Mask)형태의 CUSUM이다. 이 두 가지 대표적인 방법들 중에서 Tabular CUSUM 방법이 선호된다. 몇 가지 방법들은 CUSUM에서 ARL을 계산하는데 사용된다. 어떤 학자들은 관리에서 부터 관리 불가능에 대한 마크브 체인(Markove chain)의 근사적 변화에 기초하는 이론에서 Brook and Evans의 ARL 계산방법을

사용한다[38]. Hawkins는 근사 방정식에 기초한 ARL 계산절차를 제공하였다[19]. CUSUM은 자료수치가 매우 적을 때 사용하는 것이 아주 유용하다. 사건과 사건 사이의 시간(Time-Between-Events)을 사용하고 있는 CUSUM의 형태는 보다 더 효과적이다. CUSUM 수치율의 증가를 찾는 방법은 사건과 사건 사이의 시간 안에서 증가되는 값을 찾는 것이다. 이에 적합한 CUSUM 식은 다음과 같다.

$$C_i^- = \max [0, K - T_i + C_{i-1}^-] \quad (\text{식 3-4})$$

T_i 는 최종 관측된 후의 경과시간 이며, K는 참값이다[3][38].

3.1.4 프리컨트롤 차트(Precontrol Chart)

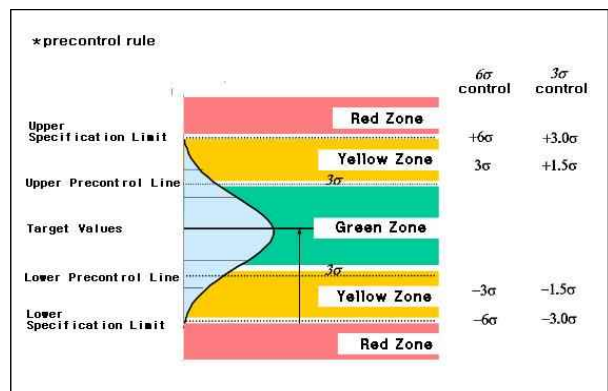
프리컨트롤(Precontrol)은 1960년대 Frank Satterthwait가 사용하기 시작하여 Ott.er(1975)에 의하여 공정관리와 품질관리의 연구에서 사용 되었다[38][40]. 프리컨트롤은 설치비용이 많이 드는 개별적 이거나 연속산업의 제조공정에서 결함 방지를 위하여 사용되며, 공정능력이 있는지 관리가 잘 되고 있는지 파악하기 위하여 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다[5][38]. 프리컨트롤은 정규분포, 공정평균, 표준편차의 3가지로 통합된 조절 정보가 주어지게 된다. 이런 절차를 검증하기 위해, 프리컨트롤은 정규분포이며 규격의 폭 한계가 정확하게 자연공차의 한계인 $\mu \pm 3\sigma$ 라고 가정하자. 공정평균 μ 는 규격의 반이고, 공정은 0.27%규격의 폭을 벗어난다. 프리컨트롤선은 하한PC선(Lower Precontrol Line)이 1/4이고 상한PC선(Upper Precontrol Line)이 3/4에 있는 상한과 하한의 PC선(Precontrol Line) 으로 나타낸다.

품질특성의 분포는 정규분포이고 상한과 하한 PC선 안쪽에 놓인 공정이 약 86%이며, 규격하한인 LSL (Lower Specification Limit)과 하한PC선의 폭 영역이 약 7%이며, 규격상한(Upper Specification Limit)과 상한PC선의 폭이 약 7%이다. 이러한 의미는 공정의 평균과 표준편차에 의해 목표 값이 정해지고 이 목표 값에서 상한과 하한의 PC선 밖에 나가는 것이 14가 되는 것이다. PC선 밖에 나가는 1단위는 확률로 1/14이고, 두 연속적인 단위가 PC선 밖이면 확률은 $(1/14)(1/14)=1/196$ 이다. 이는 PC선을 벗어나는 두 연속적인 단위들을 발견할 확률이다. 프리컨트롤의 통계적 의미는 1종 과오 및 2종 과오로 나타내어 불량률을 표시 할 수 있다[38]. 그 특성을 공정능력 지수와 연계하여 살펴보면, 제1종 과오는 전체 중단의 2%정도이며, 제2종 과오는 제품 불량률로 표시할 때 1.5%정도이다. 만일 프로세스 폭이

규격 폭 보다 커져서 Cpk가 0.8이하가 되면 프리컨트롤은 생산중단의 경고를 보내게 된다. 만일 공정 폭이 규격 폭의 75%이하이면 즉 Cpk는 1.33이상이면 프리컨트롤은 아주 적절하게 사용된 것이다. 공정이 안정되면, 프리컨트롤은 생산을 계속 한다. 공정 폭이 규격 폭의 50%이면 즉, Cpk=2.0 이다. 다변량 공정관리와 연계를 위한 특성의 프리컨트롤은 6시그마 수준이며 안정된 상태라야 한다[5][38]. 프리컨트롤을 운용하기 위한 규칙에서 공정능력지수가 1.15 이상이고, 부적합한 생산을 1~3 % 허용한다고 가정하면 규칙1은 공정을 가동하여 1번째 항목이 벗어난 규격이 라면 리셋(Reset)하고 다시 시작한다. 규칙2는 항목이 규격의 폭 안에 있지만 PC선을 벗어나면 다음 항목을 체크한다. 규칙3은 2 번째 항목이 같은 PC선 밖에 있으면 공정을 리셋 한다. 규칙4는 다음 항목이 PC선 안에 있다면 공정을 유지한다. 공정은 두 연속적인 항목이 PC선 밖에 있을 때만 리셋 한다. 규칙5는 1항목이 PC선 밖에 있고 다음 항목이 다른 PC선 밖에 있다면 그 공정의 변동은 관리상태가 아니다. 규칙6은 5의 항목이 연속된 단위들이 PC선 안에 있다면 종결한다[38]. 이러한 규칙들은 청색 대, 황색 대, 적색 대를 사용한 방법이 잘 알려져 있다[5]. 이를 색으로 구분하여 규칙을 나타낸다면 녹색2 단지 녹색1, 황색1 이면 생산을 계속한다.

동일 영역에 황색2면 장치를 셋팅한다. 서로 다른 영역에서 황색2는 적색1이면 생산을 중단한다. 프리컨트롤 차트는<표 2>에서 규칙의 특성들이 잘 나타나 있다[5][38]. 이러한 규칙의 특성은 규격의 폭(Specification)을 4등분 한다. 목표 값(Target Values)은 상한PC선(Upper Precontrol Line)과 하한PC선(Lower Precontrol Line)을 두고 있으며 녹색 대 이다. 녹색 대(Green Zone)는 두 프리컨트롤선(Precontrol Line)과 규격한계 사이의 영역이다. 황색 대(Yellow Zone)는 한쪽 PC선과 규격한계(Specification Limit)사이의 영역이다. 적색 대(Red Zone)는 각 규격한계 밖의 영역이다[5][38].

<표 2>프리컨트롤 차트



4. 공정능력의 연계사고

제조공정에서 통계적 공정관리 시스템적 차원에서 공정능력(Process Capability)은 공정의 품질의 달성능력을 가리키는 것으로 그 공정이 최상을 이루고 있는 관리상태일 때 제품의 변동이 어느 정도인가를 나타내는 표시 량으로 정의 되며, 공정능력의 평가 척도로서 자연공차로 규격의 폭을 나누어 공정능력의 상태를 수량화한 공정능력지수 (C_p)를 사용한다[2][10][38].

여기에서는 공정능력지수는 다변량 공정관리의 하나로써 프리컨트롤과 연계에 비중을 두면서 추세모형의 알고리즘과 연계를 위한 특성을 살펴보고자 한다. 최근에는 미니탭을 이용한 식스 팩(Six Pack)은 관리도, 정규분포, 공정능력, 규격을 동시에 나타 낼 수 있으며 적용이 좋다[2][5]. 본 연구에서 공정능력은 규격을 조절하거나 자연공차의 값을 조절하여 목표에 맞는 공정능력지수가 되도록 하고자한다. 공정능력의 평가방법으로는 자연공차 6σ 를 기준으로 할 때 규격이 8σ 이면 $C_p = 1.33$ 이 된다. 이런 사고가 공정능력의 평가지수가 된다[2][5]. 공정능력 평가는 규격한계(Specification Limits)에 대비하여 공정이 수행하는 능력이 얼마인지 예측하는 것이다. C_{pm} 은 Hsiang & Taguchi(1985)에 의해 제안된 지수로 공정평균이 목표 값에서 얼마나 벗어났는가를 반영한 지수이다[2]. C_{pm} 은 공정의산포를 나타내는 σ 대신 목표 값 T로부터 산포를 나타낼 수 있다. 많은 학자들은 통계적 공정관리시스템을 사용하는 제조 산업에서는 공정능력의 새로운 측정, 공정능력지수의 신뢰영역, 공정능력의 새로운 개발, 공정능력지수의 구간평가에 대한 연구가 이루어졌다[2][10][15][21][38][43][50].

공정능력의 시행 절차로는 품질특성치의 정규성 검정 공정능력분석의 실시를 통하여 공정평균을 추정하고 구간, 군내 산포를 추정하여 규격이나 산포를 조절하여 적정 공정능력이 되게 한다[2][5][38]. 규격은 공정능력지수를 산출하는 기본이 된다. 특히 공정의 상한규격과 하한규격은 공정이 안정 되도록 정해야 하며, 경제적인 측면과 관리적인 측면을 고려해야 한다. 공정능력의 평가는 데이터가 안정된 관리 상태이며 가피원인에 의한 측면을 고려 할 때 과거에 공정이 관리이탈 상태였다면 미래에도 관리상태가 아님을 알 수 있다. 과거에 공정이 가피원인에 의해 산포에 영향을 받았다면 미래에도 공정에 기대하지 않은 변화가 나타난다[2][4][5][38].

미니탭에서 공정능력지수를 잠재적 공정능력으로 나

타내는 PCI(Process Capability Index)와 전체적 공정능력 지수라고도 불리는 공정성능지수 PPI(Process Performance Index), 그리고 설비성능지수 MPI(Machine Performance Index)로 나타내며, <표 3>에 공정능력지수의 수리를 나타냈다[2][38]. 여기에서 C_p 는 공정이 안정된 상태일 때 구하며, C_p 는 자연공정산포(6σ)에 대해 규격의 공차를 비교 하여야 한다. 자연 공정산포의 1/2 (3σ)에 대한 공정능력지수로 C_{pk} 를 구해야 하며, 이 경우, C_{pk} 는 자연 공정산포의 1/2 (3σ)에 대해 중심으로부터 규격한계까지의 거리를 비교하여 구한다. 결국, C_{pk} 는 공정산포와 중심치의 치우침을 모두 고려한 지수이다[2][5].

<표 3>공정능력지수

공정능력지수

(1) 공정능력지수(PCI)

$$\textcircled{1} C_p = \frac{T}{6\sigma_w}$$

$$\textcircled{2} C_{p_k} = (1-k) \frac{T}{6\sigma_w}$$

$$\textcircled{3} C_{p_u} = \frac{S_u - \mu}{3\sigma_w}$$

$$\textcircled{4} C_{p_L} = \frac{\mu - S_L}{3\sigma_w}$$

$$\textcircled{5} \text{단 } K = \frac{|(USL + LSL)/2 - \mu|}{(USL - LSL)/2}$$

(2) 공정성능지수(PPI)

$$\textcircled{1} P_p = \frac{T}{6\sigma_T}$$

$$\textcircled{2} P_{p_k} = (1-k) \frac{T}{6\sigma_T}$$

$$\textcircled{3} P_{p_u} = \frac{S_u - \mu}{3\sigma_T}$$

$$\textcircled{4} P_{p_L} = \frac{\mu - S_L}{3\sigma_T}$$

(단 $\sigma_T = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_b^2}$ 이다)

(3) 설비성능지수(MPI)

$$\textcircled{1} C_{p_m} = \frac{T}{6\sigma_m}$$

(단 $\sigma_m^2 = \sigma^2 + (\mu - M)^2$ 이다)

5. 연계를 위한 특성

추세알고리즘에서 공정조절을 하는 컨트롤러와 다변량 공정관리의 관리도, 프리컨트롤, 공정능력의 연계는 연속산업에서 품질특성을 다중으로 조절하여 보정한다[38]. 슈하트 관리도를 보강하는 이론적인 관리도는 컨트롤러와 통합되는 도구로서 연속산업에서 사용되고 있다[1][3][35][37][38][39]. Macgregor와 Harris(1990)는 EWMA의 사용으로 공정변동의 탐지에 대하여 논의하였다[30]. Wardell, Moskowitz,와 Plante(1994)는 감도를 증가시키기 위하여 슈하트 관리도 대신에 잔차의 알고리즘이 있는 CUSUM 또는 EWMA 사용을 추천하였다[1][48]. 특히, EWMA는 잔차나 예측오차를 기초로 하는 관리도의 수행에 영향을 줄 수 있다[46]. Montgomery와 Mastrangelo(1991)는 통계적 수행에 추가적인 절차로서 잔차를 기초로 한 관리도의 사용으로 통합된 추적신호가 나타나도록 할 것을 제안하였다[35].

Mastrangelo와 Montgomery(1995)는 적절하게 설계된 추적신호기술이 EWMA의 기초한 절차로 통합 될 수 있다면 EWMA는 변동이 있는 품질특성의 탐지에 좋은 수행을 나타 낼 수 있다고 하였다[38]. 프리컨트롤은 예측 기능의 알고리즘이 많고 목표 값을 기준으로 하여 상, 하로 프리컨트롤선이 있다[3][5][38]. 프리컨트롤 색 판정과 Cp, σ 증가에 따른 확률 값은 프리컨트롤과 공정능력, 관리도 연계를 위한 알고리즘이 된다[5][38]. 프리컨트롤의 색 판정기준과 Cp와, σ의 증가에 따른 확률 값을 <표 4>와 같이 나타내었다[5][38].

<표 4> 프리컨트롤 색 판정과 Cp, σ 증가에 따른 확률

Cp \ σ 색	3σ Cp=1	4σ Cp=1.3 3	5σ Cp=1.67	6σ Cp=2
연속5점이 녹 색 대: 안정	49%	80%	94%	99%
적어도1이 적 색 대: 생산중단	0.7%	500ppm	0.00%	0.00%
연속2점이 황 색 대: 경고	0.9%	0.1%	0.07%	3.4ppm

관리도, 프리컨트롤과 공정능력의 특성 비교 에서는 그 특성의 역할, 다변량 공정관리의 공통 알고리즘, 간편성, 편리성, 경제성, 관리 선을 <표 5>에서 비교하였다[2][3][5][38].

<표 5> 관리도/프리컨트롤/공정능력의 특성비교

변량 특성	관리도	프리컨트롤	공정능력
역할	가피원인 탐지	생산중단 경고	제품변동 표시량
다변량 공정관 리공통 알고리 즘	정규분포 3σ 사용 공정평균 동적	정규분포 3σ 이용 목표 값 정적	정규분포 3σ 이용 공정평균 정적
간편성	수리의 복잡성	색으로 표시	수리의 복잡성
편리성	가피원인 해석	규격변경 만 관리	공정능력 지수
경제성	비경제적	경제적	비경제적
관리선	평균의 상하로 3σ	하한PC선 상한PC선	규격하한 규격상한

공정능력지수에 등급 구분은 기업의 특성에 맞게 자체 규정하여 운영하는 내용을 사용한다[2][5][38]. 보통 공정능력지수의 평가 지표는 <표 6>같이 나타나어 평가 기준으로 사용 할 수 있으며, 등급에 따른 조치가 잘 알려져 있다[2][5][38].

<표 6> 공정능력의 평가지표

공정능력	등급	의미	조치
2.0이상	AA	공정능력 매우 우수	공정능력을 계속 존속 시킨다
1.67이상	A	공정능력 이 우수.	변동을 유지하며 모니터링 한다.
1.33이상	B	공정능력 이 양호.	변동을 모니터링 한다.
1.00이상	C	공정능력 이 보통.	변동 모니터링과 검출력 제고한다.
1.00이하	D	공정능력 이 부족.	검출력을 강화한다.

다변량 공정관리와 추세알고리즘의 연계성을 위한 특성의 비교는<표 7>와 같다[2][3][5][38]. 추세알고리즘과 관계가 있는 컨트롤러(Controller)의 모형에서 산업표준으로 많이 사용되는 최소평균제곱오차인 MMSE (Minimum Mean Squared Error)의 수행 도(Performance Measurement)는 다음과 같다.

$$PM = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - T)^2 \quad (\text{식 5-1})$$

Astrom이 연구한 컨트롤러는 피드백관리와 가피원인에 적용할 수 있는 비례 적분 도함수인 PID(Proportional Integral Differential)와 비례 적분인 PI(Proportional Integral)가 여러 학자들에 의하여 연구 되었다[3][11][12][3][38]. Box, Jenkins(1976)는 목표 값과 품질특성의 차에서 최소평균제곱오차 인MMSE(Minimum Mean Squared Error) 최소화하기 위하여, 측정 즉시 공정조절이 되도록 시점t와 t+1시점과 차이를 가지고 품질특성과 목표와 차이를 예측하였다[11][12]. PID 제어 특성은 상세한 도함수를 위한 것으로 EWMA의 오차와 공동의 관계가 Tseng, S, and B. M. Adams(1994)에 의하여 연구 되었다[46]. 특히, EWMA의 모수인 σ 의 추정은 추세알고리즘이 있는 컨트롤러, 슈하트관리도, CUSUM, 공정능력, 프리컨트롤에 공통특성으로 연계를 위한 알고리즘이 된다[3][5][38].

<표 7> 연계를 위한 특성비교

구분 특성	다변량 공정관리	추세 알고리즘	연계 알고리즘
역할	공정관리	공정조절	연계
공통알고리즘과 파라메타	정규분포 3 σ 모수 오차	컨트롤러모 수 σ 모수 오차	EWMA모수 σ 모수 오차
다변량공정관리와 컨트롤러의 종류	슈하트관리도 EWMA CUSUM 공정능력 프리컨롤	MMSE PI PID	EWMA/ 슈하트 EWMA/ CUSUM 슈하트/프리컨트롤 프리컨트롤 /공정능력 EWMA/컨트롤러
통합이나 병행사용	다중으로 가피원인 탐지	다중으로 공정조절	다변량공정관리/연계 관리도/연계/통합 다변량공정관리/컨 트-롤러/연계,병행, 통합,

<표 8> 주요 컨트롤러를 연구한 학자

학자	컨트롤러	특성
Box(1991a)	$u_t = -(\lambda/g) \sum_{j=1}^t e_j$	기본모형
MacGregor, Harres(1993)	$Y_t = gu_{t-1} + n_t$	MMSE 컨트롤러
Montgomery, Keat, Runger, Messina(1994)	$Y_t = u_{t-1} + n_t + e_t$ $u_t = \phi u_{t-1} - (\phi - \theta) Y_t$	통합 컨트롤러
Astrom (1988)	$u_t = -k_p e_t - k_I \sum_{j=0}^t e_{t-j} - k_D(e_t - e_{t-1})$	PID 컨트롤러 피드백관리
Tsung, Wu, Mair (1998)	$u_t = k_0 + k_p e_t + k_I \sum_{j=1}^t e_t$	PI컨트롤러 k_p, k_I 대신 k_p
Tsung, Shi (1998)	$e_t = Y_{t-1} + n_t = u_{t-1} + n_t$ $u_t = -k_p e_t - k_I \sum_{j=0}^{\infty} e_{t-j}$	PID 컨트롤러 ARMA(1,1) 을 위한 것

<표 8>은 주요 컨트롤러(Controller)를 연구한 학자들이다[3][38]. Box, Jenkins에 의하여 추세모형의 기초가 세워지고, MacGregor 에 의하여 연구된 산업표준이 되는 MMSE 컨트롤러는 EWMA, CUSUM과 연계를 위한 알고리즘의 특성을 가지고 있다[3][30].

MacGregor, Harres(1993), MacGregor, J. F. and T. J. Harris(1990), Montgomery, Keat, Runger, Messina(1994)에 의하여 MMSE, EWMA, 통합모형의 알고리즘과 컨트롤러 체계가 연구 되었다[3][30][38].

6. 결론 및 미래의 과제

다변량 공정관리와 추세알고리즘의 특성이 있는 컨트롤러(Controller)를 연계하여 통합하거나 병행 사용시 가피원인이 다중으로 탐지되고 품질특성의 변동이 더 효율적으로 조절된다. 본 연구에서는 슈하트 관리도와 프리컨트롤, 프리컨트롤과 공정능력, EWMA와 CUSUM 그리고 컨트롤러와 연계를 위한 파라메타와 공동 특성이 조사연구 되었다. EWMA는 다변량 공정관리의 공동의 파라메타를 추정하여 슈하트 관리도의 특성이 되기도 하고 CUSUM과도 연계 지을 수 있다. 슈하트 관리도는 다른 측면에서 프리컨트롤과 연계가 되고 프리컨트롤은 공정능력과 연계가 되도록 이론적인 공통특성을 조사하였다. 예측의 기능이 있는 EWMA

를 앞서워서 모수를 추정하여, 다변량 공정관리뿐만 아니라 컨트롤러와 연계 알고리즘이 되도록 하였다. 프리컨트롤은 목표 값, PC선(Precontrol Line), 표준편차의 특성을 갖고, 공정능력은 규격의 폭, 표준편차의 특성을 갖는다. 프리컨트롤과 공정능력의 공통된 특성은 정규분포, 평균, 표준편차로 조사연구 되었다.

컨트롤러는 통합모형, MMSE(Minimum Mean Squared Error), PID(Proportional Integral Differential) PI(Proportional Integral)의 연계를 위한 특성이 조사연구 되었다. 끝으로 본 조사연구가 통합모형의 체계나 확립에 기초가 되기를 바라면서 미래의 과제로는 다변량 공정관리에 다 분산의 사고가 컨트롤러에 통합되어 품질특성이 목표대로 조절되도록 이론적체계가 확립되고 안정된 품질특성이 되기를 기대한다.

6.1 후 기

본 연구는 2011년도 오산대학교 교내 학술 연구조성비에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

7. 참 고 문 헌

- [1] 김종걸, 채호식, "CUSUM 관리도에 관한 조사연구", 성균관대학교 과학기술연구소 과학기술편, 제 39집 No. 2. (1988)
- [2] 이승훈, "Minitab을 이용한 공학통계 자료분석", 이레테크, Vol.(2006) :387-565.
- [3] 정해운, "자기회귀 각란모형을 고려한 EPC와 SPC의 통합시스템", 성균관대학교 박사 학위논문, (2002)
- [4] 정해운, "Trimmed Mean에 의한 두 특성치 상관계수에 대한 수정된 관리도에 관한 연구", 아주대학교 석사학위논문, (1997)
- [5] 정해운, 정해두, "통계적 공정관리실무책", (2006): 20-206
- [6] Alwan, L. C., "Effects of Autocorrelation on Control Charts", Communications in Statistics-Theory and Methods Vol.21, (1992).
- [7] Alwan, L. C., H. V. Roberts, "Time Series Modeling for Statistical Process Control", Journal of Business and Economic Statistics, Vol.6.(1988)
- [8] Anderson O. D., "Time Series and Forecasting", Butterworth, London.(1976)
- [9] Berthouex, P. M., W. G. Hunter, and L. Pallesen. "Monitoring Sewage Treatment Plants: Some Quality Control Aspects," Journal of Quality Technology, Vol. 10.(1978)
- [10] Big three implement SPC systems, "Quality In Manufacturing", Vol 6, (2000): 39
- [11] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., "Time Series Analysis", Forecasting, and Control Holden-Day, San Francisco, CA.,(1976)
- [12] Box, G.E.P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, "Time Series Analysis", Forecasting, and Control 3rd edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1994)
- [13] Box, G. E. P., Kramer, T., "Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment A Decision", Technometrics 34, (1992): 251-267
- [14] Bur, I. J. "The Effect of Nonnormality on Constants for \bar{x} and R Charts" Industrial Quality Control, Vol. 23.(1967).
- [15] Chan, L. K., S. W. Cheng, F. A. Spring "A New Measure of Process apability: C_{pm} " Journal of Quality Technology, Vol. 6. (1988).
- [16] Chemist, Druggist, "Plavix SPC update", Oct 6, (2001): 28
- [17] Chemist, Druggist, "SPC update for Tramadol", Sterwin Medicines Ltd. Brief Article. Sept 29, (2001): 32
- [18] Harris, T. J., W. H. Ross. "Statistical Process Control Procedures for Correlated Observations." Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.69. (1991)
- [19] Hawkins, D. M., "A CUSUM for a Scale Parameter," Journal of Quality Technology, Vol. 13.(1981)
- [20] Johnson, N. L.. "A Simple Theoretical Approach to Cumulative Sum Control Charts." Journal of the American Statistica Association, Vol. 54. (1961)
- [21] Kushler, R. H., P. Hurley "Confidence Bounds for Capability Indices," Journal of Quality Technology, Vol. 24. (1992).
- [22] Langenberg, P., B. Inglewitz, "Trimmed Mean \bar{x} and R Charts," Journal of Quality Technology, Vol. 18. (1986)
- [23] Lowry, C. A., D. C. Montgomery, "A Review of Multivariate Control Charts.", IIE Transactions, to appear. (1995).
- [24] Lowry, C. A., W. H. Woodall, C. W. Champ, S. E. Rigdon, "A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart.", Thchnometrics, Vol . 34. (1992).
- [25] Lucas, J. M., "A Modified V-Mask Control Scheme," Technometrics, Vol. 15. (1973).
- [26] Lucas, J. M., "Combined Shewhart-CUSUM Quality Control Schemes", Journal of Quality Technology, Vol. 14. (1982).

- [27] Lucas, J.M., M.S. Saccucci, "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements", *Technometrics*, Vol. 32. (1990)
- [28] MacGregor, J. F., "On-Line Statistical Process Control". *Chemical Engineering Progress* 84, (1988): 21-31.
- [29] MacGregor, J. F., "A Different View of the Funnel Experiment". *Journal of Quality Technology* 22, (1990): 255-259.
- [30] MacGregor, J. F. and T. J. Harris, "Discussion of 'EWMA Control Scheme Properties and Enhancement' by Lucas and Saccucci", *Technometrics* 32, (1990): 23-26.
- [31] MacGregor, J. F., "A Different View of the Funnel Experiment", *J. Q. T.* vol. 22. No. 4. (1990)
- [32] Maragah, H. O., W. H. Woodall, "The Effect of Autocorrelation on the Retrospective X-chart", *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol.40, (1992)
- [33] Maragah, C. M., D. C. Montgomery, "SPC with Correlated Observations for the Chemical and Process Industries," *Quality and Reliability Engineering International*. Vol. 11, (1995)
- [34] Montgomery, D. C., J. J. Friedman, "Statistical Process Control in a Computer-integrated Manufacturing Environment," *Statistical Process Control in Automated Manufacturing*. edited by J. B. Keats and Hubele, Marcel Dekker, INC., Series in Quality and Reliability. New York, (1989).
- [35] Montgomery, D. C., C. M. Mastrangelo, "Some Statistical Process Control Methods for Autocorrelated Data with discussion", *Journal of Quality Technology*, Vol. 23. (1991)
- [36] Montgomery, D. C., Johnson, L. A., Mardiner, J. S., "Forecasting and Time Series", 2nd ed., McGraw-Hill, NY, (1990)
- [37] Montgomery, D. C., J. B. Keats, G. C. Runger, W. S. Messina, "Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control," *Journal of Quality Technology*, Vol. 26., (1994)
- [38] Montgomery, D. C., "Introduction to Statistical Quality Control" 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. (1996): 314-474
- [39] Mortell, R. R., and G. C. Runger., "Statistical Process Control of Multiple Stream Processes." *Journal of Quality Technology*, Vol. 27, (1995)
- [40] Ott, E.R., "Process Quality Control", McGraw-Hill, New York, (1975)
- [41] Page, E. S.. "Cumulative Sum Control Charts," *Technometrics*, Vol. 3., (1961)
- [42] Pignatuello, J. J., Jr., and G. C. Runger, "Comparison of Multivariate CUSUM Charts," *Journal of Quality Technology*, Vol. 22., (1990)
- [43] Rodriguez, R. N., "Recent Developments in Process Capability Analysis," *Journal of Quality Technology*, Vol. 24., (1992).
- [44] Schilling, E.G., and P. R. Nelson, "The Effect of Nonnormality on the Control Limits of \bar{x} Charts," *Journal of Quality Technology*, Vol. 8., (1976).
- [45] Sullivan, J. H., and W. H. Woodall, "A Comparison of Multivariate Quality Control Charts for Individual Observations," to appear in the *Journal of Quality Technology*, (1995).
- [46] Tseng, S., and B. M. Adams, "Monitoring Autocorrelated Processes with an Exponentially Weighted Moving Average Forecast," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 50. (1994)
- [47] Vander Weil, S., W. T. Tucker, F. W. Faltin, N. Deganaksoy, "Algorithmic Statistical Process Control: Concepts and an Application," *Technometrics*, Vol. 34, (1992).
- [48] Wardell, D. G., H. Moskowitz, R. D. Plante, "Run Length Distribution Processes", *Technometrics*, Vol. 23., (1994).
- [49] Yourstone, S. a., and D. C. Montgomery, "Development of a Real-Time Statistical Process-Control Algorithm" *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 5 (1989).
- [50] Zang, N. F., G. A. Stenback, D. M. Wardrop. "Interval Estimation of Process Capability Index c_{pk} ", *Communications in Statistics-Theory and Methods*, Vol. 19., (1990)

저 자 소 개

정 해 운



현재 오산대학교 산업경영학과 교수로 재직중이며, 성균관대학교 산업공학과 공학박사이며, 관심 분야는 품질관리, 생산관리, SPC 등이다.

주소: 경기도 오산시 청학동 17번지 오산대학교 산업경영학과