

EPC 이론적 전개에 관한 조사연구 An Investigative Study on EPC Theory Development

김 종 결*, 정 해 운**

*성균관대학교 시스템 경영공학부

**오산대학교 공업경영과

Abstract

EPC(Engineering process control) is usually applied to processes in which successive observations are related over time and where the mean drifts dynamically. This paper aims to literature survey concerned about EPC theory developments and their applications including macGregor model as Basic EPC model, feedback controllers, feedforward controllers, run-to-run controllers, MMSE controllers, PID model and PI adjustment model and so on. We suggest some perspective area for further study.

1. 서론

EPC(Engineering Process Control)는 공정 변동을 최소화하려는 기술로 엔지니어링 공정관리 또는 자동공정관리라 하며, 연속공정산업과 평균이 이동하는 공정에 효과적으로 적용될 수 있다. 본 연구에서는 공정예측이 가능하고 공정평균이 이동하는 공정에 사용될 수 있고 각란조정을 통해 지속적으로 공정을 조절하는 공정개선기술인 EPC의 이론적 전개과정을 MMSE 컨트롤러, 런-투-런 컨트롤러 모델, 피드백 컨트롤러, 피드포워드 컨트롤러, 맥그리거의 모형과 EPC/SPC 통합에 필요한 PID (비례-누적-차분)모형, PI 조절, 맥그리거의 통합이론 등을 중심으로 조사하고 EPC 이론 및 적용영역의 확대가능성을 모색하고자 한다.

2. EPC 기본모형(맥그리거의 모형)

EPC의 역할은 평균이 목표에서 벗어나 이동하는 공정을 목표에 접근 되도록 하는 연속적인 조절이다.

MacGregor와 Harris(1990)는 EPC기술의 수행을 관리하는데 있어서, 관리도 사용의 중요성을 강조하였다[26]. 맥그리거는 Deming의 확장된 패널실험연구(1950)를 뒷받침하는 견해를 발표하였다[15]. Deming(1986,1993)은 패널실험의 4가지 법칙을 논증하였다[16, 17]

맥그리거는 평균이 이동하는 경우에 다음과 같은 모형을 사용하였다.

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

Y_t 는 시점t에서 공정 출력이고, U_{t-1} 은 (t-1)번째 관측후 취해진 관리활동의 영향(효과)이다. 또한 n_t 는 t시점에서 공정 평균 상의 각란에 대한 효과이며, e_t 는 평균이 0이고, 분산이 σ_e^2 인 독립확률변수이다. 여기서 n_t 는 다음과 같은 자기회귀공정모형을 따른다.

$$n_t = \phi n_{t-1} + a_t \quad (2)$$

여기에서 $-1 < \phi < 1$,이며, a_t 는 평균이 0이고 분산이 σ_a^2 이다.

a_t 와 e_t 는 서로 독립이라고 가정한다. 모형(2)

는 자기회귀 타임시리즈 모델의 이동평균형태로 Box와 Jenkins(1976)[10], Montgomery, Johnson and Gardiner(1990)[28]에 의해 논의되었다. 등식(1)과(2)의 모델은 평균이 이동하는 공정에 활용될 수 있고, 화학 산업공정에 폭넓게 적용될 수 있다. MacGregor(1990)는 (1)과 (2)의 등식을 이용하여 평균이 이동하는 공정에 대한 효율적인 관리활동을 제안하였다[25].

$$U_t = \phi U_{t-1} - (\phi - \theta) Y_t \quad (3)$$

여기서 $\theta(0 \leq \theta < 1)$ 는 등식(2)에서 AR(1)모델일 때의 결과로서 등식(1)의 백색잡음 e_t 와 통합된 것으로 자기회귀이동평균의 (또는 ARMA(1,1)) 파라미터이다. 이러한 저자들은 AR(1)공정의 합과 백색잡음이 ARMA(1,1)인 경우의 θ 추정에 대해 논의했다. 이 같은 상세한 분석은 이미 Anderson (1976)[1], Box and Jenkins(1976)[10], MacGregor and Harris(1993.9.110)[26]의해서 이루어졌다. MacGregor(1990)는 θ 에서 $\phi, \sigma_e^2, \sigma_a^2$ 까지 이들 모두와 관련된 등식들을 설명하였다[25]. Box와 Jenkins(1976)는 등식(3)을 이용한 관리활동이 MMSE(Minimum Mean Square Error) 컨트롤러에 기초된다는 것을 밝혔다[10]. MacGregor(1990) 이러한 EPC 법칙이 $\theta > 0$ 일 때, 비 관리상태에서 뛰어난 성능을 나타낸다는 것을 보여주었다. (1990)[25].

평균이 이동하는 모델의 경우, 각란은 유일하게 등식(2)의 평균과 등식(1)의 확률 각란 내에서 움직인다. EPC 법칙은 예상된 공정 각란을(즉 평균에서 추세) 조절하기 위하여 고안 될 수 있다. 이 법칙은 EPC기술이 평균에서 자동상관관계를 가지고 있다는 것에 근거하여 개발되었다

3. 피드백 모델

공정조절은 EPC 기술로서 품질 특성이 목표에 접근하도록 조정변수 X를 조절하는 것이다. 이에 대한 기술로써 피드백관리, 피드포워드 관리 또는 두 기술의 통합관리가 있다. 이 논문에서 피드백 관리만을 고려하게 되며...t-1, t, t+1...단위간격으로서 정의되는, 단속시간에 발생하는 조절을 위한 관측과 기회에 대한 가설로서 피드백 조절 관리도를 가정한다 우리는 입력 조절변수에서 조절 $x_t = X_t - X_{t-1}$ 을 출력 품질특성의 단위당 변화인 피드백 투입변수에 단위당 조절량이 출력에 미치는 영향의 크기 gx_t 로 나타낼 수 있다. 또한 우리는 보정 활동이 이루어지지 않고 t시점에 발생하는 출력 품질 특성과 목표와의 편차를 각란으로 정의 할 수 있다. t+1시점에서 조절변수 X_t 와 목표 값과의 편차는 다음과 같다.

$$\epsilon_{t+1} = z_{t+1} + gX_t \quad (4)$$

여기서 ϵ_{t+1} 은 t+1시점에서의 오차이다.

$x_t = X_t - X_{t-1}$ 을 이용하여 식(4)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$x_t = \lambda \epsilon_t / g, \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (5)$$

여기서 λ 는 과잉조절을 예방하기 위한 제동 벡터이다. 등식(5)에 의해 t시점에서 수준 X_t 의 조

절활동은 과거 누적합에서의 선형함수가 된다.

$$X_t = X_0 - \lambda/g \sum_{i=1}^t \epsilon_i \quad (6)$$

조절의 기본형태가 EPC에서 채택된다.

그래서 t시간에 계산된 \hat{z}_{t+1} 는 EWMA 예측치로써 z_{t+1} 을 대신할 수 있다(Box, Jenkins, and Reinsel 1994)[11]. 그러므로

$$X_t = - \hat{z}_{t+1} / g \quad (7)$$

$$\hat{z}_{t+1} = \lambda(z_t + \theta z_{t-1} + \theta^2 z_{t-2}) \quad (8)$$

$\theta = 1 - \lambda$ 이다. 만약 예측오차가 (9)식과 같다

$$z_{t+1} - \hat{z}_{t+1} = e_{t+1}, \quad (9)$$

면, (4)식에 (7)와 (9)식을 대입하여 $\epsilon_{t+1} = e_{t+1}$ 을 얻을 수 있다. Z_{t+1} 의 가장 적절한 예측치는 0이고 관리 활동이 필요하지 않다. 앞에서는 각란의 정밀한 형태와 관련된 가설을 만들지 못했다. 그러나 그 가설은 Muth(1960)의해 보여진다.[31]. 만약 각란이 IMA(0,1,1)타임시리즈 모델에 의해 발생된다면 EWMA(8식)는 최소 평균제곱오차의 예측을 도출할 수 있다. 즉 IMA(0,1,1)모델은

$$z_{t+1} - z_t = a_{t+1} - \theta a_t \quad (10)$$

여기서 충격(shock) a_t 는 평균이 0, 분산이 σ_a^2 인 독립확률변수이다. 여기서 $\epsilon_t = a_t$ 이고, 이러한 관리기술에 있어서, 목표로부터 편차는 최소분산 σ_a^2 을 갖는다.

3.1 각란과 평균이동을 고려한 모델

PI 피드백 관리 기술들은 어떤 특정한 가설이 진실일 때 목표에 대한 최소 평균제곱오차(MMSE) 관리 방법을 보여준다.(Mayer(1970)[27]

1) 각란 모델의 선택

공정조절은 시스템에 대한 관리 활동이 제대로 이루어지지 못하고, 공정 평균이 목표로부터 이탈되며, 산만한 원인의 각란이 발생될 때 그 필요성이 절실히 요구된다. 목표로부터의 편차에 대해 연속적인 백색잡음이 있는 관리상태의 공정에 대한 잘 알려진 각란 모델은 다음과 같다.

$$Z_t = a_t \quad (11)$$

목표로부터 연속적인 편차가 발생하는, 각란에 대한 일반적인 종류의 모델은 중속적이며, 개선된 백색잡음의 가중 합으로(이론적으로 무한하다) 나타낸다. $Z_t = a_t + \psi_1 a_{t-1} + \psi_2 a_{t-2} + \dots$ 이러한 종류의 모델은 목표로부터 평균 편차가 0이고 분산이 $Z_t = \sigma_a^2 \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i^2 = \sigma_z^2$ 인 유한한 안정적인 모델이다. 비 안정적인 모델은 공정 평균이 이동하는 경우의 활동으로, 자기회귀 통합이동 평균 모델로서 나타낼 수 있다. Box와 Jenkins(1970)에 의해 이 문제가 논의되었다[6]. 가장 단순하면서 최선의 유용성을 가지는 모델인 통합이동평균 모델(IMA)은 다음과 같이 정의된다.

$$Z_t = \hat{Z}_t + a_t \quad (12)$$

여기서 Z_t 는 a_t 가 독립이고 (13)식에 의해 정의된 과거 데이터의 EWMA이다.

$$Z_t = \lambda(Z_{t-1} + \theta Z_{t-2} + \theta^2 Z_{t-3} + \dots) \quad (13)$$

Z_t 는 평활 상수 θ 또는 비 안정적인 추정 $\lambda = 1 - \theta$ 에 의해 특성화되며, 이 논문의 목적을 위하여 $0 \leq \theta < 1$ 과 $0 < \lambda \leq 1$ 로 가정하였다. (13)식에서 계수 $\lambda, \lambda\theta, \lambda\theta^2$ 은 단위를 합하는 수렴 형태이다 (12)식에 의해 정의된 추세는 평균값이 존재하지 않고 무한분산을 갖는다. 이러한 논증은 Muth(1960)에 의하여 제시되었다[31]. (14)식은 (12), (13)식의 대수적 조작에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{Z}_{t+1} = \lambda Z_t + \theta \hat{Z}_t, \quad \hat{Z}_{t+1} - \hat{Z}_t = \lambda a_t \quad (14)$$

이러한 반복적인 공식을 이용하여, 그 예측은 각각의 입수된 새로운 관측치로서 편리하게 갱신되어 질 수 있다. 공식을 반복적으로 사용하여 예측시 취급되는 새로운 관측은 간편하게 최신정보화할 수 있다. Z_t 의 첫 번째 차이가 모델(12)에서 IMA모델로 선택될 수 있는 일계 이동평균 모델이며 식(12)와 (13)를 따른다.

$$W_t = Z_t - Z_{t-1} = a_t - \theta a_{t-1} \quad (15)$$

t=1로 놓고 식(12)과 식(15)을 사용하여 다음 식을 얻는다.

$$Z_t = \hat{Z}_t + a_t + \lambda \sum_{i=1}^{t-1} a_i, \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (16)$$

특히 공정이 공정 수 조절에 의해 t=1 시간에 목표를 두어, $\hat{Z}_t = 0$ 이 되도록 가정한다. 목표로부터 편차는 다음과 같은 절차를 통해 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_t = a_t + \lambda \sum_{i=1}^{t-1} a_i, \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (17)$$

이것은 식(11)의 백색잡음 각란이 0으로 접근하는 것을 의미하며, 그 값은 λ 로서 표현될 수 있고, 그 사이를 보간 할 수 있다. 고도의 비 안정적인 확률(nonstationary random-walk)모델은 $\lambda=1$ 일 때 얻어진다.

$$Z_t = \sum_{i=1}^t a_i \quad (18)$$

IMA모델은 많은 비 안정적인 각란의 활동이 나타나는 중심 장소에서 발생하는 (12)와 (13) 또는 (15)식에 의해서 특성화될 것이다. 이와 관련된 것이 베리오 그램(Variogram)이다. 단위간격이 표준화된 베리오 그램이라면 m의 기능은 G(m)에 플롯된 양에 의해 측정되어진다. m길이의 간격에 대한 분산의 인플레이션은 G(m)과 양의 관계가 된다.

$$G(m) = V(Z_{t+m} - Z_t) / V(Z_{t+1} - Z_t) \quad (19)$$

즉 Cressie(1988)[14]와 Jowett(1952,1955)[21, 22]이 이러한 관계를 보여주었다.

2) 공정간의 평균 이동에 관한 모델

여기에서는 피드백 기술을 보여준다. 공정관리를 위하여 예측공식 X_t 의 변경으로 점성 Y_t 을 달성할 수 있다. 특별히 단순 일계의 평균이동을 고려한 모델은 공정수의 활동을 미분등식에 의해서 평가할 수 있다.

$$Y_t = \text{상수} + \delta Y_{t-1} + g(1-\delta)X_{t-1}, \quad 0 \leq \delta < 1 \quad (20)$$

등식의 상호간의 특성은 단위 변경 후에 기간

t시기에 X가 만들어지고 Y의 변경은 $g(1-\delta)$ 이 된다는 사고로 평가 할 수 있다. 여기서 g는 시스템 계인(gain)으로 불린다.

3) MMSE 컨트롤러

만약 경향이 있는 각란이 식(12)의 비안정적인 IMA모델에 의해서 표현되고(또는(15)와(17)) 평균이 이동하는 공정이 (20)식에 의해서 나타난다면 경향이 있는 각란과 평균이 이동하는 공정은 비율과 적분상수 k_p 와 k_i 값을 고정하고 제공된 목표값에 대한 MMSE 등식(2)의 산출로부터 PI 조절을 보여준다.

$$k_p = \lambda\delta/g(1-\delta) \text{ and } k_i = \lambda/g \quad (21)$$

등식(21)은 δ 가 아주 작다면 실무에서 사용될 수 있고, δ 가 크면 등식은 양의 정수에 접근된다. MMSE 기술은 과도한 관리행위를 요구한다. 조절 기술은 그 적용이 가능하고 더구나 감소된 관리활동은 품질특성의 평균제곱오차 안에서 조금 증가된 코스트에 도달하게 할 수 있다.

예로서 Astrom(1970)[2, 3], Box 와 Jenkins (1974)[10], Astrom 과 Wittenmark(1984)[4]의해 MMSE 수정 기술이 제시되었다.

4) PI 조절

평균 이동을 고려한 모델은 단순한 시간에 발생하는 X에 단계에 의해서 감소되는 변화를 생각할 수 있다. 식(19)에서 $\delta=0$ 으로 놓으면 평균 이동을 고려한 모델은 다음과 같다.

$$Y_t = \text{상수} + g x_{t-1} \quad (22)$$

MMSE 피드백 공식은 통합관리의 이산적인 알고리즘으로 다음과 같이 표현된다.

$$-X_t = k_0 + k_i \sum_{i=1}^t e_i, \quad k_i = \lambda/g \quad (23)$$

특히 통합생산 또는 비례통합 조절 (PI조절)은 식(23)을 채택함으로써 정의 될 수 있고 대개 슈하르트 관리도사용으로 용이해진다 이것은 대체로 폭 넓게 사용되지는 않고 Box (1991a)[7], Box 와 Jenkins (1970)[10]에 의해 조절관리도 매뉴얼로 정착되었다.

3.2. 런투런 공정관리

런투런 공정관리는 최근에 반도체 산업을 위하여 제안된 SPC와 EPC 기술의 결합을 의미한다. 런투런 조사범위에는 실리콘 회로판을 일괄처리 방식으로 생산하는 공정의 관리활동의 경우에 적용된다. 런투런은 적극적인 관리 정책이 관리되지 않고 공정 평균이 목표로부터 벗어나고 있는 것으로 인지되는 공정에서 다루어진다. SPC 대 EPC의 최근 논쟁에서는 다른 방법으로 더 단순한 공정탐지 기술을 만족시킬 수 있는가를 연구하였다.[Box and Kramer(1992)[8] 와 Montgomery, Keat, Runger, and Messina(1994)[29]]; 이러한 가정 뒤에 런투런 컨트롤러는 그밖에 단기생산의 단속 부품 제조 공정에 적용 할 수 있는 기술을 만들었다. 우리는 이 가정과 "기계도구 문제"들에 대해 비교해야 할 것이다[Box and Jenkins(1963)[9]]. 이 논문의 목적은 통계적이고 관리공학의 견지에서 런 투 런의 컨트롤러에 대한 문헌의 재검토를 위하여 자기조정 컨트롤러의 사고에 기초한 어떤 대안을 나타내기 위

한 것이다.

3.2.1 런투런 관리 시스템의 기본적인 구조

런투런 공정관리는 두 개의 주요한 절차와 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 공정관리 기술인 선형회귀모델을 제시한다. 이것은 오프-라인 실험에 의하여 기초가 된다. 이 모델은 출력변수 또는 반응 변수 y_t 를 가지는 투입 변수 u_t 와 관련된다. 만약 시스템이 다중 투입과 품질 특성(MIMO 시스템)을 갖고 있다면 그때 u_t 와 y_t 는 같은 차원의 벡터이다. 런투런 관리의 두 번째 단계는 온라인 평가와 공정 관리이다. 오프라인 모델 개발은 최근의 연속 데이터를 사용하게되고, 이 데이터는 관찰 공정 데이터에 기초가 되며, 이를 토대로 공정 조절이 이루어진다. 또한 관리 활동을 결정하는 경우에도 사용되어진다. 이러한 접근은 Box and Jenkins(1976)에 의해서 제안된 3단계(모델증명, 적합과 관리)보다 더 귀납적인 평가 방법으로 전기공학적인 측면에서 사용된 기법의 형태에 더 가깝다[10].

온라인 모델에 있어서 조절이 필요한 이유는 생산 공정이 런 수가 작기 때문이다[Astrom and Wittenmark(1989)[5]].

최신 처리된 Data모델들의 각각을 관찰하기 위해, 미세 전자 공학 문헌에서는 컴퓨터 관리 조처를 사용한다[Ingolfsson and Sachs(1993)[20]와 Butler and Stefni(1994)[13]].

런투런 컨트롤러는 반도체 제조에서 사용되고 있다. 이 컨트롤러는 공정 변동을 직접 조절하지는 않는다. 그리고 관리활동 u_t 는 공정조절시 각각의 런 안에서 물리적인 공정변수를 조절하는데 사용되고, 또한 자동 컨트롤러는 품질 특성에 관한 영향을 가진 흐름이나 압력과 같은 것을 조절하기 위해서 사용된다.(보통 PID컨트롤러)[Butler and Stefani(1994) [13]].

표1에서 Box and Jenkins(1963)의 기계도구 문제와 런투런 문제에 대한 가정을 비교했다[9]. 두 문제사이의 주요한 차이는 관리행동의 수행에 대한 비용이라는 것을 유의해야한다. 런투런 관리 활동 이후에, 공정은 변화가 나타나고, 그런 활동과 관련된 비용은 크지 않다. 대조적으로 기계도구 문제는 운영자가 고가 유형으로 기계조절을 수행해야 하는 경우에 대해 개발되었다. 런투런 문제의 가정은 기계적 도구문제보다는 Box and Jenkins(1963)에 의해서 논의된 화학적인 문제에 더 가깝지만 우리는 단속 부품생산 공정의 관찰에 더 필요하다[9].

또 다른 두 문제 사이의 중요한 차이는 생산 런의 길이이다. 런투런 컨트롤러는 안정적인 각란에 대한 조절을 위하여 근본적으로 개발되었다. 런투런 컨트롤러는 통합 컨트롤러의 형태로 사용된다. 그것은 비 안정적인 각란도 조절할 수 있다. 런투런 컨트롤러는 통합된 이동 평균(IMA(1,1)) 각란에서 볼 수 있다. 관찰된 반응은 PID컨트롤러 본래의 위치에 사용되고 관리되는 그 반응이 품질 특성에 부합되더라도 고도의 비 안정적인 잡음을 관리하는 것은 쉬운일이 아니다. 런투런 컨트롤러는 다양한 반도체 제조 공정을 조절하기 위하여 적용되었다. 문서화된 적용은 반도체가 결정 방향으로 성장하는데 도움을 주는 공정관리 기술을 제공해준다 [Ingolfsson and Sachs(1993) [20]. 즉 전리된 기체

를 촉진 되도록 하는 화학 증발기 창고(PECVD) 공정관리(Mojumder and Barna(1994)[30], 단순회로 판 전리 기체 에칭(etching) 공정관리(Guo and Sachs(1993)), 중합 실리콘 출입 에칭(etch) 공정관리(Butter and Stefani(1994)), 그리고 낮은 압력의 CVD공정의 관리(Sachs, Guo, Ha, and Hu(1991)), Shah(1991)), 뿐만 아니라 많은 여러 가지의 관리들을 포함한다[18][13][32][34]. 우리는 런투런 컨트롤러의 제안된 기술의 2가지 주요한 단계를 상세히 살펴보기로 한다.

<표 1> 기계도구문제 대 런투런문제의 비교

가정	기계 도구 문제	런-투-런 문제
잡음/각란	비안정적 (IMA(1,1))	안정적; 결정적 추세/이동
지연	즉시적 효과	즉시적 효과
관리 활동비용	높음	높지 않음
관리변수	공정변수	자동 컨트롤러의조정
목표 이탈 공정의 비용	높음(2차의)	높음(2차의)
런의 길이	깊음(대량생산)	짧은 런

1) 단계1 : 공정모델링

이 논문에서는 SISO인 경우에 대해 논의되고, 이 모델은 단순 첫 번째 순서 선형공정 형태에 알맞다.

$$y_t = \alpha + \beta u_{t-1} + \epsilon_t \quad (24)$$

α 와 β 는 파라미터이다. ϵ_t 는 백색잡음 이라고 가정한다. 우리는 모델(24)이 관리 활동과 y_t 에 관한 효과에서 지연이 없다는 것을 말해주는 것에 유의해야한다. 이것이 기계도구문제(표1)에서 사용되는 단속부품 제조에 합리적 가설이다. 런투런 관리 문헌에 보고된 다중 입력 버전에 알맞은 모델(24)에 대한 두 접근 방법은 고전적인 반응 표면 실험 계획법과 보통의 최소자승 추정법 그리고 USP(Ultramax Sequential Process) 최적소프트웨어에 사용된다. 첫 번째 경우, 진보 단계가 고전적 반응표면 작업에 따른 수행 이후에 이용되었다 (Box and Wilson(1951))[12].

이런 접근은 아주 전통적이고 우리는 런투런 관리의 온-라인 터닝과 컨트롤(On-line tuning and control)이라 불리는 두 번째 단계에 초점을 맞춘다. 공정 모델링을 위한 다른 접근 방법은 여러 문헌에 제시되어있다[Sghh(1991)[34], Sachs, Ho, and Ingolfsson(1991)[33]].

최대 속차 최적기 USO(Ultramax sequential optimizer)는 울트라맥스 주식회사에 의해 상업적 소프트웨어로 개발되었다[Yunuker and Moreno(1992)[36]].

이 소프트웨어는 순위-결함(rank-deficiency)의 경우에(알고리즘 관찰 없이 진행할 수 있음) 작업 평가자가 RR(Ridge Regression)의 베이저안 공식으로 설명할 수 있다.

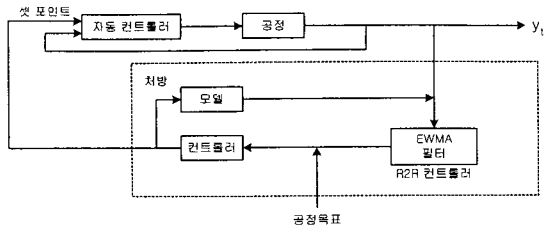


그림 1. 런투런 컨트롤러 모형

2) 단계 2 :

그림1은 자동 PID공정 컨트롤러는 내부 경로와 내부경로 모델처럼 작용하는 외부 경로의 런투런 컨트롤러로 구성된다. 내부 경로는 본래의 장소에서 측정된 외부 경로의 값을 얻는다. 내부 경로는 컨트롤 행위의 범위가 외부경로 보다 작다. 외부 경로는 과거 공정을 측정하고 각 런에 대한 관리 활동에 적용된다. 런투런 컨트롤러는 단계1에서 오프-라인에 맞는 예측 오차를 위한 지수가중이동 평균 필터와 그리고 피드백 컨트롤러의 모델로 구성되어있다. 그림1의 블록다이어그램은 내부 경로의 관리 모델이라고 할 수 있다. 공정을 위한 최적 관리 활동(목표에 대한 최소 분산)은 공정 활동이 없는 것이다.

$$u_t = (T - \alpha) / \beta \quad (25)$$

관리 활동(25)은 시스템에 대해 t+1시점 이전에 수행된다. 만약 파라미터가 α 와 β 라면 그들은 오프-라인 추정으로 대응 될 수 있는 시간이 전부 상수이다. 그때 관리 활동(25)는 단순 피드포워드 관리 정책으로 나타난다. 활동의 효과에 대한 계산은 등식(24)만으로는 나타내지 못한다. 런투런 컨트롤러에서 장애요인으로 가정되는 것은 시간 변곡점이다. 이 경우에 관리 활동은 예측 반응 값으로 계산된다. 예측 반응값은 $\hat{y}_t = a_{t-1} + bu_{t-1} = T$ 이고, u_t 는 다음과 같이 계산된다.

$$u_t = (T - \alpha) / \beta \quad (26)$$

여기서 $a_t = \hat{a}_{t+1|t}$ 그리고 $b = \hat{\beta}$

이 비율은 오프-라인을 얻는다. 반면에 a_t 는 EWMA 공식과 단순지수 평활법에 의해 반복적으로 계산된다.

$$a_t = \lambda(y_t - bu_{t-1}) + (1 - \lambda)a_{t-1} \quad (27)$$

EWMA는 단순 통합 컨트롤러와 부합되는 관리 활동이 포함되어있다. 방정식 (26)과(27)는 마이크로 전자학 문헌에서 편이 조정(Bias tuning)이라고 불려진다.

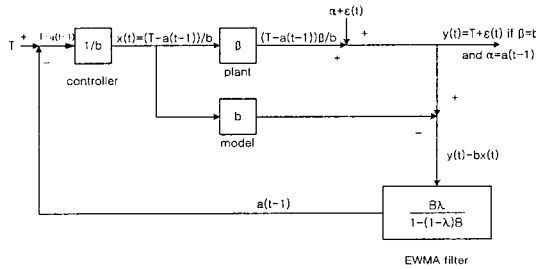


그림 2. 내부모델 관리형태에서 편이조정

그림2에서는 내부적 모델 관리 형태에서 편이 조정 런투런 컨트롤러의 블록 다이어그램을 보여준다. 예측 오차는 EWMA 필터를 통하여 컨트롤러까지 피드백 된다. B의 표기는 $Bf_t = f_{t-1}$ 와 같이 정의된 역변환 인자이다. 관리 방정식 (26-27)관점에서 발생하는 문제에 대해 미세 전자 문헌에서 각란의 형태를 편이조정으로 조절하는 방법을 제시하였다.[Sache, Hu and Ingolfsson(1991)[33], Butter and Stefani(1994)][13]] 여기서 Ingolfsson 와 Sache (1993)는 등식(24)와 같은 시스템과 두 번째 주문시스템에 활용할 수 있는 출력 컨트롤러 (26-27)에 대한 조건을 제시하였다[20]. 이러한 상황의 집합은 컨트롤러가 목표로 이끄는 도함수에서 유한 분산을 유지하는 동안 목표 값의 접근하는 품질 특성에 대한 평균을 구할 수 있다. 그들은 공정이 결정적인 경향을 포함하고 있다는 것을 보여준다. 이 때 컨트롤러 품질 특성 y_t 는 분기한다. 이런 이유 때문에 (26-27)등식의 사용을 추천하였다.

ϵ_t 가 평균에서 큰 이동이 있을 경우에는 문제가 있다. 이 경우에는 컨트롤러 (26-27)라고 하더라도 공정 활동을 위한 조절이 안 된다. (즉 관찰 반응에서 자동 상관관계) 그것은 활동 잡음에 의해 조절된다. 특별히 잡음 항목이 (24)식의 IMA(1,1)모델을 따른다면 그때 EWMA 컨트롤러(26-27)는 최소의 분산 관계를 제공한다. Box and Jenkins(1994)는 (24)식의 모델과 공정경향을 추정하기 위해 EWMA등식인 컨트롤러 (26-27)식의 모델을 확장하였다[11]. $\hat{y} = a_{t-1} + bu_{t-1} + D_{T-1}DL$ 이 여기에 적당한 모델이다. 여기에서 컨트롤러는

$$U_T = (T - a_{t-1} - D) / b \quad (28)$$

두 EWMA를 통한 개선 등식은(두 지수평활을 위한 등식) 다음과 같이 나타낸다.

$$a_t = \lambda_1(y_t - bu_{t-1}) + (1 - \lambda_1)a_{t-1} \quad (29)$$

$$D_T = \lambda_2(y_t - bu_{t-1} - a_{t-1}) + (1 - \lambda_2)D_{t-1} \quad (30)$$

이 경우에 $(a_{t-1} + D_t)$ 은 컨트롤러에 대한 피드백이다.

만약 제조공정에서 장비의 노후화 경향을 인지할 수 있다면, 결정적 시간경향은 시스템을 설명하는 모델로 제시될 수 있다. 편이 조정 컨트롤러는 노후화의 경향을 조정할 수 없다.[Butler and Stafani(1994)[13]]

3.2.2. 런투런 관리를 위한 대안 컨트롤러 (자기조정 컨트롤러)

자기조정 컨트롤러는 런투런 관리방법에 대한 중요한 문헌의 검토를 통해 알 수 있으며 런투런 컨트롤러는 온-라인 평가와 조절기술에 기초한다. 그림3은 ST(Self-Tuning)관리 알고리즘의 기본적인 구조를 보여준다. ST컨트롤러는 연속적인 다양한 파라미터를 갖는 공정에 효과적이며, 파라미터는 알려져 있지 않지만 상수로 존재하는 공정에 적합하다. 이것은 ST컨트롤러가 온-라인 추정과 관리가 필요한 다품종 소량 생산 환경을 위한 논리적 대안이라는 것을 의미한다. ST컨트롤러 있어서 파라미터 추정은 어떤 특성의 진정한 파라미터를 구하는 방정식의 원리로서 사용되고있다[Astrom (1970)[2], Astrom and Wittenna(1989)][5]. 컨트롤러 등식이 유도된 파라미터 추정치는 참값으로 대

용된다.

어떤 대안은 공정 모델이 바라는 클로즈-루우프 행위에 따라서 재 파라미터화되는 직접적인 ST 컨트롤러를 사용한다[Astrom and Wittenmark (1989)[5]]. 오픈-루프 상태 하에서는 오프-라인 추정과 일치하는 특성을 갖는 다양한 추정방법이 존재한다[Ljung and Soderstrom(1987)[24], Ljung (1987)[23], Shan and Cluett (1991)[34], Young (1984)[35]]. 클로즈-루프하에서의 추정은 입력에 디지털 신호를 부가한 것과 같다[Box and Macgregor(1976)[12]]. 이것은 회귀행렬의 관리등식에 일차 종속 원인을 예방하기 위한 것이다

1) 반복적인 최소자승

ST컨트롤러는 반복적 최소자승(Recursive Least Squares)의 알고리즘을 사용하여 나타낼 수 있다.

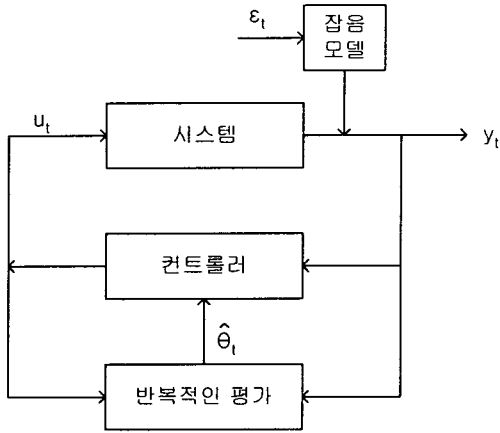


그림 3. ST 컨트롤러의 구조

$$y_t = \theta' \varphi_t + \varepsilon_t \quad (31)$$

위 식을 온-라인 추정을 위한 선형 모델로 가정하자. θ 는 파라미터의 $(n \times 1)$ 벡터이다. φ_t 는 회귀의 $(n \times 1)$ 의 벡터이다. ε_t 는 백색잡음 결과이다. 우리는 n이 SISO모델에서 파라미터의 수를 나타낸다는 것에 유의해야한다. $e_t = y_t - \hat{\theta}' \varphi_t$ 는 시간 t에서 잔차이고 λ 는 최근 오차에 더 큰 가중치 주어지는 디스카운터 팩터이다($0 < \lambda \leq 1$). 여기서 $\hat{\theta}$ 는 $\{1/N \sum_{i=1}^N \lambda^{N-i} e_i^2\}$ 을 최소화시키는 지수적인 디스카운팅 RLS(Recursive Least Squares) 알고리즘을 통해 찾는다.

$$k_t = (p_{t-1} \varphi_t) / (\lambda + \varphi_t' p_{t-1} \varphi_t) \quad (32)$$

$$\hat{\theta}_t = \hat{\theta}_{t-1} + k_t (y_t - \varphi_t' \hat{\theta}_{t-1}) \quad (33)$$

$$p_t = [I_n - k_t \varphi_t'] p_{t-1} / \lambda \quad (34)$$

여기서 k_t 는 비율 또는 가중치의 벡터($n \times 1$)이다. 그리고 p_t 는 매트릭스 공분산의 파라미터 추정을 위한 $(n \times n)$ 매트릭스 비례 상수이다.

어떤 디스카운트 요인은 더욱 단기적 성능에 유용하다. (33)의 등식은 EWMA 형태라는 것에 유의해야 하며, $\lambda < 1.0$ 이면 p_t 가 너무 크게 될 수

있다는 것도 유의 해야한다. 이것은 크로즈-루프 추정 하에서 발생될 수 있으며 추정 종결로써 관리 문헌에 알려진 파라미터 추정에서 파열 원인 일 수 있다[Astrom and Wittenmark (1989)[5], Harris, Macgregor, and Wright (1980)[19]]. 추정 와인드업(추정 종말)을 피하기 위한 단순한 방법으로서 다음에 따르는 (14)식을 대신 사용하므로 p_t 의 크기를 사용한다.(매트릭스 p_t 을 다시 쓰면).

$$p_t = [I_n - k_t \varphi_t'] p_{t-1} + R_t \quad (35)$$

R_t 는 $(n \times n)$ 대각선 매트릭스로 다음과 같이 정의된다.

$$R_t = I_n k_t' p_{t-1} \varphi_t / n \quad (36)$$

등식(35-36)은 온-라인 추정을 행하는데 있어서 일정한 p_t 선이 유지되도록 한다. 그리고 p_t 선은 일정한 선형알고리즘 문헌이 참조되어질 것이다 [(Astrom and Wittenmark(1989))[5]].

우리는 R_t 가 p_t 에서 단일성을 피하기 위하여 (35)식에 추가된다는 것에 주목해야한다. 이것은 RR(Ridge Regression) 개념과 비슷하고 울트라 맥스(Ultramax)소프트웨어에서 이를 행할 수 있을 것이다. 최초의 추정은 $(\hat{\theta}_0)$ 가 설계실험을 통해 얻어질 것이다. 이것은 런-투-런 적용에서 흔하다. 최초의 추정은 더 좋고, 일시적인 행위의 효과는 더 적다.

2) 단속부품 제조를 위한 대안 모델

단속 부품 제조를 위한 더 일반적인 SISO모델은 목표로부터 편차 (즉 $y_t = x_t - T, x_t$ 는 현재 관심 있는 품질 특성이다.)로 나타내는 y_t 에 따른다.

$$(1 - \phi B) y_t = \alpha + \beta u_{t-1} + dt + (1 - cB) \varepsilon_t \quad (37)$$

이 모델에서 이름, 공정 파생물(α), 결정적 경향(dt), 자동상관 반응(ϕ)와 잡음(마지막 항목은 ARMA(1,1)잡음과 일치하고 β 와 ε_t 는 등식(24)과 같다.) 등, 런-투-런 환경에서 공정 특징으로서 보고된 내용이다.

3) 단순화된 공정과 그들의 최소분산 컨트롤러

(37)식에 의해 설명된 공정은 6개의 파라미터를 갖고 있으며, 최소분산(MV) 컨트롤러는 6개의 파라미터를 기본으로 하고 있어서(28-30)등식이 주어지기 전 재 검토되었던 런투런 보다도 더 복잡한 것으로 생각할 수 있다. 결정적 경향, 자동 상관관계, 공정이동, 파생물, 그리고 칼라잡음은 $c=0$ 과 $\omega=1$ 일 때의 (37)등식을 통해 얻을 수 있다, 이러한 경우들에 대해서는 (7-9)식으로 조정할 수 있다.

$$(1 - \phi B) y_t = \alpha + \beta u_{t-1} + dt + \varepsilon_t / (1 - B) \quad (38)$$

이것은 결정적인 경향이 부가된 어떤 ARIMA(CARIMA)모델 관리로써 여러 문헌에 언급되었다.

$$y_t = y_{t-1} + \phi (1 - B) y_{t-1} + \beta (1 - B) u_{t-1} + d + \varepsilon_t \quad (39)$$

우리는 α 가 잡음 항목 (즉 $(1-B)\alpha = \alpha - \alpha = 0$)

의 단위제곱근에 기인하는 모델에 의해 제거된다.

비 안정적인 잡음은 주어진 단위당 제곱근의 파생물로 다루어지는 통합의 결과이다. 이것은 $C=0$ 와 $\omega=1$ 로 가정하더라도 $\alpha=0$ 는 (39)식에서 가정되지 않는다. 그것은 (39)공정을 위한 MV 컨트롤러와 (39)식이 같기 때문이다.[Box, Jenkins, and Reinsel(1994)[11] and ASTROM (1970)[2]].

$$u_t = u_{t-1} - (\phi + 1/\beta)y_t + \beta/\phi (y_{t-1}) - d/\beta \quad (40)$$

우리는 컨트롤러 (40)식을 적용함에 있어서(38)식에 의해서 설명된 공정(MV수행으로 주어진다.) 보다는 (37)식에 초점을 맞춘다. 그것은 EWMA 컨트롤러 (28-30)가 같은 시스템에 적용되는 것에 비유된다. 이러한 컨트롤러는 자기조정 특성을 관찰하게된다. 우리가 이것을 하기 전에 $\alpha=0, C=0$, 그리고 $\omega=0$ 인 경우에 다른 단순한 (37)공정을 생각하자. 이것은 우리가 백색 잡음의 항목을 가정하는 것이다. 이러한 경우에 공정(37)식은 (41)식으로 줄어든다.

$$y_t = \phi y_{t-1} + \beta u_{t-1} + dt + \epsilon_t \quad (41)$$

그리고 (41)식을 위한 MV 컨트롤러는(42)식이 된다.

$$u_t = -\phi/\beta(y_t) - d(t+1)/\beta \quad (42)$$

4) 자기조정(S T) 컨트롤러

(40)식과(42)식에 의하여 주어진 컨트롤러를 사용하기 위하여 우리는 그것들의 파라미터에 대한 온-라인 추정이 필요하다. RLS(반복적 최소 자승) 추정 절차는 (32-36)(39)와(41)식 2개의 단순화된 공정이 필요하다.

첫 번째 경우, (39)식을 위한 RLS추정은 $\hat{\theta}' = (\hat{\beta}_t, \hat{\phi}_t, dt)$, $\varphi_t = (y_{t-1} - y_{t-2}, u_{t-1} - u_{t-2}, 1)$ 와 $e_t = y_t - y_{t-1} - \hat{\theta}' \varphi_t$ 을 조절하여 (39)식을 얻게 된다. 등식(39)에 대한 ST컨트롤러는 다음과 같다.

$$u_t = u_{t-1} - (\hat{\phi} + 1)/\hat{\beta} + (y_t + \hat{\phi}/\hat{\beta}(y_{t-1}) - \hat{d})/\hat{\beta} \quad (43)$$

두 번째 경우, (41)식에 대한 RLS추정은

$\hat{\theta}'_t = (\hat{\beta}_t, \hat{\phi}_t, \hat{d}_t)$, $\varphi_t = (u_{t-1}, y_{t-1}, t)$ 와 $e_t = y_t - \hat{\theta}'_t \varphi_t$ 의 조절을 통해(41) 식을 얻게 된다. 시스템 (41)에 대한 ST컨트롤러는 다음과 같다.

$$u_t = -\hat{\phi}/\hat{\beta}(y_t) - \hat{d}(t+1)/\hat{\beta} \quad (44)$$

4. 결론

EPC는 입력에서 출력까지 제어변수를 조절하여 변동을 최소화하려는 것이다. 맥그리거의 확장된 패널실험연구의 4가지 규칙 즉, 평균이 이동하는 경우에 대한 4가지 모델을 제시하였다. 이 모델에서 각란의 효과 n_t 가 AR(1)모델에 따르고, 효율적인 관리 활동 u_t 에서 θ 는 백색잡음 e_t 와 통합된 것으로 ARMA(1,1)인 일 때의 추정방법을 보여주었다. 피드백 조절에서는 APC(자동공정 관리)와 관계된 기술을 사용한다.

피드백 관리에서 목표로부터 편차는 오차 자체

에 대한 식이다. 즉 ($\epsilon_{t+1} = e_{t+1}$). 만약 각란이 IMA(0.1.1) 타임시리즈 모델에 의해 발생된다면, EWMA(8식)에서 최소 평균제곱오차의 예측 값을 도출할 수 있다.

각란 모델의 선택에 있어서 목표로부터 연속적인 편차가 있는 각란은 백색잡음혁신의 가중의 합으로 나타나는 정상적 모델이며 정상적인 모델을 조절하지 않으면 목표 값에 변화가 계속되어 비정상적인 효과가 생기는데 비정상적인 효과를 자기회귀 통합이동 평균모델(IMA)로 나타냄을 보였다. 비정상적인 확률 모델에서 $\lambda=1$ 일 때 IMA 모델로 특성화 된 것과 관련이 있는 것이 VARIOGAM 임을 보여주었다.

런투런 관리방법의 하나인 자기조정컨트롤러는 런투런을 위한 유용한 관리전략을 제공한다. 자기조정컨트롤러는 공정 평균이 이동하는 경우에 표준으로서 이용될 수 있고, 뿐만 아니라 결정적 경향이 있는 경우 또는 자동상관 관계가 관찰된 경우에도 공정의 관리활동을 조절하는 역할을 수행한다.

MMSE 컨트롤러에서는 PI조절, 런투런 대 기계도구 문제가 비교되었고 SISO에서는 선형공정 모형이 분석되어 최적 공정유지의 토대가 마련되었다. SISO경우, PID 컨트롤러, EWMA 컨트롤러, ST 컨트롤러 등은 공정의 특성에 따라 시스템 모델이 설정되고 이에 따른 관리활동을 모델화하여 공정조절의 기술이 모색되었다.

미래에 대한 EPC의 연구는 단속생산의 경우에서의 EPC의 시스템 모델 설정과 관리행위 그리고 오차사이의 백색잡음과 칼라잡음의 효율적인 통합과 적용이 기대된다.

References

- [1] Anderson, O, D. (1976), time series and forecasting. But-terworth, London.
- [2] Astrom, K, J, (1970). Introduction to stochastic Control. Academic Press, York. NY
- [3] Astrom, K. J. (1970). Introduction to Stochastic Control (Math-ematics in Science and Engineering Series, 70), New York : Academic Press.
- [4] Astrom K, J., and Wittenmark, b. (1984), Computer Controlled Systems, Englewood Cliffs. NJ : Prentice-Hall.
- [5] Asrom, K, J, and Wittenmark, B. (1989).Adaptive con-trol. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [6] Box, G, E. P. and Jenkins, G. M. (1970). Time Series Analysis, Forecasting, and Control. Holden-Day, San Fran-cisco, CA.
- [7] Box, G, E, P. (1991a), "Feedback Contorl by ManualAdjustment."Quality Engineering, 4, 143- 151.
- [8] Box, G. E .P. and Kramer, T. (1992). "Statistical Process Monitoring and Feedback A djustment - A Decision". Tech-nometrics 34, pp. 251-267.
- [9] Box, G.. E. P. and Jenkins, G. M. (1963).

- "Further Contributions to Adaptive Quality Control: Simultaneous Estimation of Dynamics: Nonzero Costs". Bulletin of the International Statistical Institute 34, pp. 943-974 .
- [10] Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1974). Time Series Analysis, Forecasting, and Control, Revised edition, Holden Day, Oakland, CA.
- [11] Box, G. E. P.; Jenkins, G. M. and Reninsel, G. C. (1994). Time Series Analysis, Forecasting, and Control, 3rd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [12] Box, G. E. P. and MacGregor, J. F. (1976). "Parameter Estimation with Closed-Loop Operating Data". Technometrics 18, pp. 371-380
- [13] Burler, S. W. and Stefani, J. A. (1994). "Supervisory Run-to-Run Control of a Polysilicon gate Etch Using In Situ Ellipsometry" IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 7, pp. 193-201.
- [14] Cressie, N, (1988), " A Graphical Procedure for Determining Non-stationarity in Time Series", Journal of the American Statistical Association, 83, 1108-1116.
- [15] Deming, W. E. (1980). Some Theory of Sampling. John Wiley & Sons, New York, NY
- [16] Deming, W. E. (1986). Out of the Crisis. MIT Center for Advanced Engineering Study Cambridge, MA.
- [17] Deming, W. E. (1993). The New Economics for Industry, Government, Education. MIT Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA.
- [18] Guo, R. S. and Sachs, E. (1993). "Modeling, Optimization and Control of Spatial Uniformity in Manufacturing processes", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 6, pp. 41-57.
- [19] Harris, T. J. ; MacGregor, J. F, and WRIGHT, J. D. (1980), "Self-Tuning and Adaptive Controllers : An Application to Catalytic Reactor Control", Technometrics 22, pp.
- [20] Ingolfsson, A. and Sachs, E. (1993). "Stability and Sensitivity of an EWMA Controller", Journal of Quality Technology 25, pp. 271-287.
- [21] Jowett, G. H. (1952). " The Accuracy of Systematic Sampling From Conveyor Belt ", Applied Statistics, 50-59.
- [22] Jowett, G. H. (1955). "The Comparison of Means of Sets of Observations From Sections of Independent Stochastic Series", Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B, 17 208-227.
- [23] Ljung, L. (1987). System Identification. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- [24] Ljung, L. and Soderstrom, T, (1987). Theory and Practice of Recursive Identification. MIT Press, Cambridge, MA.
- [25] MacGregor, J. F. (1990). " A Different Cies of the Funnel Experiment", Journal of Quality Technology 22, pp, 255-259.
- [26] MacGregor, J. F. AND T. J. Harris (1990). "Discussion of 'EWMA Control Schemes: Properties and Enhancement' by Lucas and Saccucci", Technometrics 32. pp. 23-26
- [27] Mayar, O. (1970), The Origins of Feedback Control, Cambridge, MA : MIT Press.
- [28] Montgomery, D. C.; Johnson, L. A.; and GARDEN, J. S. (1990). Forecasting and Time Series, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, NY,
- [29] Montgomery, D. C.; Keats, J. B.; Tunger, G.C. ; and Messina, W. S. (1994) "Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control", Journal of Quality Technology 26, pp. 79-87.
- [30] Mozumder, P, K, and Barna, G. G. (1994). "Statistical Feedback Control of a Plasma Etch Process", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 7, pp. 1-11.
- [31] Muth, J. F. (1960), "Optimal Properties of Exponentially Weighted Forecasts of Time Series With Permanent and Transitory Components", Journal of the American Statistical Association, 55, 299
- [32] Sachs, E.; Guo, R. S., HA, S.; and Hu, A. (1991), "Process Control System for VLSI Fabrication", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 4, pp. 134-143.
- [33] Sachs, E.; Hu A; and Ingolfsson, A. (1991). "Modeling and control of a Epitaxial Silicon Deposition Process with Step Disturbances", IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings, pp. 104-107.
- [34] Shah, S, L. and Cluett, W. R. (1991). " Recursive Least Square Based Estimation Schemes for Self-Tuning Control", Canadian Journal of Chemical Engineering 69, pp. 89-96.
- [35] Young, P, (1984), Recursive Estimation and Time-Series Analysis. Springer-Verlag, New York, NY.
- [36] Yunker, S. and Moreno, C. W. (1992). "Ultamax: Continuous Process Improvement Through Sequential Optimization", Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.