

제조 산업에서 EWMA관리도와 EPC통합모형의 사례연구 An Application of the Integrated Model of EWMA and EPC In Manufacturing Industry

정 해 운**

오산대학교 산업경영과**

Hae-Woon Jung

Dept. of Industrial Management , Osan College

Abstract

EWMA관리도는 SPC 기술 중 가피원인을 탐지하는 기술이 최근품질특성에 가중치가 주어져 미래를 예측하는 능력이 우수하다. EWMA 관리도와 EPC의 통합은 연속공정산업에서 성공적으로 사용되고 있다고 널리 인식되어 있다. 그러나, 이산적인 부품 제조공정의 탐지와 연속 생산공정 산업과 그중에서도 제조공정 산업에서의 이들 기법을 적용하기 위해서는 샘플링비율, 고장감지, 실시간 보정과 공정통제에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 SPC와 EPC의 차이를 비교분석하고, 제조공정 산업에서 EWMA와 EPC를 성공적으로 통합하여 제품품질특성에 적용하여 변동을 감소시키는 사례연구를 제시하고자 한다.

1. 서론

SPC는 공정에서 품질특성의 가피원인을 탐지하는 것이다. 만약 가피원인이 탐지되면 공정의 평균 또는 분산이 변하였다고 판단한다. 이 경우에는 공정기술자나 생산기술자 또는 작업자가 생산을 중단시키고, 가피원인을 제거하고 생산 사이클을 다시 시작한다. EWMA 관리도는 예측기능과 빠르고 정확한 공정탐지의 기능이우수하여 이론적인 관리도로써 많이 사용되고 있다. 특히, EWMA 관리도는 최근 품질특성에 가중치가 주어져서 품질특성치가 최근 목적 값에 맞는 정확한 데이터로의 기능을 한다. EWMA 관리도는 가피원인 탐지에 중요한 관리한계선이 각각 다르지만 어느 시점부터

는 일정해지며 미래를 예측하는 기능이 탁월하다. EWMA관리도와 EPC의 통합 시 효율적인 가피원인탐지기능과 공정조절기능이 작용하여 변동을 감소시킨다.

SPC와 병행하여 목표에 맞도록 공정 품질특성을 조절하기 위하여 EPC는 장치 산업에서 매우 널리 사용되는 기법중의 하나이다. EPC는 공정의 품질특성을 목표치와 비교해서 목표에 맞는 품질특성이 유지되도록 정해진 주성분 투입을 보정하여 조절하는데 사용된다. EPC는 산출 변수가 자기상관 구조를 갖는 장치산업에서 주로 적용된다. 공정 변수의 자기상관 구조들은 인접한 자료를 빠르게 획득하는 능력 때문에 부품 산업에서 더욱 더 보편화되고 있다.

Box와 Luceno(1997)는 독립된 부품과 연속적 공정을 포함하는 제조 산업에 SPC와 EPC를 적용하는 사례를 보여주었다.[3].

통합시스템에서, EPC는 예측 품질변동의 효과를 감소시키는 역할을 하며, EWMA는 가피원인을 발견하기 위하여 사용한다. EWMA/EPC통합시스템은 EPC가 목표대로 시스템을 유지하고 EWMA가 시스템관리로 가피원인을 제거하는 목적이 달성된 후 공정 개선의 효과를 나타낸다.

1.1 EWMA/EPC 통합전략

현대 산업에서 공정개선을 위한 기술로는 품질특성이 목표대로 조절되도록 하는 엔지니어링 기술과 가피원인 탐지 역할을 하는 EWMA기술로써 관리도가 있다. 이러한 두 기술은 개별적으로 사용되어 변동이 감소되도록 하는 역할을 한다. 본 연구는 두 기술은 통합되어 탁월하게 변동의 감소가 되도록 하려는 실행전략이다. EWMA /EPC 통합모형에서 공정개선은 변동을 감소시키려는 EWMA/EPC 통합전략의 실행으로 나타나며, EPC 만을 사용할 때 보다 EWMA와 통합하여 사용할 때 더욱 효과적으로 변동이 감소되는 역할을 한다. 이러한 EPC/ EWMA통합모형은 연속적인 공정산업과 화학공정 뿐만 아니라 모든 제조 산업분야까지도 적용되어 공정을 개선하는 역할을 한다. EPC모형은 촉매와 같은 조절변수, 품질특성, 각란, 예측각란, 오차가 서로 맞물리면서 다음단계를 예측하여 연속적으로 공정조절을 하는 역할을 한다. EPC는 평균이동(draft mean)이 있는 품질특성이 상승경향을 보인다면, 촉매와 같은 조절 변수로써 품질특성과 반대경향이 되도록 공정을 조절하는 역할을 하게 된다. 이 때 EPC에서의 모수는 품질특성으로부터 추정되는 값이다. 그리고 게인(gain)은 단위당 투입조절에 대한 산출비율이다. 추세분석에서는 품질특성이 변화하는 형태에 따라 ARIMA, IMA, MA, AR중 어떠한 모형에 따르는지를 아는 것이 중요하다. 또한, 품질특성이 정상적이 아니라면 차분하여 정상적이 되도록 한다. 본 사례연구에서는 품질특성에 관한 ACF에서 첫 번째와 두 번째 차수(lag)가 관리 하한선을 벗어나기 때문에 MA(1) 모형에 따른다고 가정한다. 어떤 제품의 품질특성에 영향을 주는 각란이 상승하는 경향이 있고, MA(1) 모형을 따른다면 조절변수를 통하여 예측된 각란을 기초로 하여 품질특성이 목표에 맞게 조절한다. MA(1)모형에서 품질특성으로부터 최적의 모수값 θ 가 추정되면 λ

값이 결정된다. 그리고 엔지니어는 게인(gain) 값을 안다. 우리는 이러한 상황을 고려하여 EPC는 공정조절을 행하고 SPC기법인 EWMA관리도를 가피원인을 발견하는 도구로써 통합모형에 사용하였다. 통합모형은 공정조절 전과 공정조절 후의 관리상태를 비교하여 나타냈다. 공정조절 전에는 가피원인이 많이 나타나게 되며 가피원인이 탐지될 때 공정의 가동은 멈추어야 하며 어떠한 조치를 해야 한다, 공정조절 후 가피원인은 많이 줄어들거나 탐지되지 않을 수도 있다. 이러한 통합모형은 수행도 측정의 PM값과 평균런의 길이로 나타내어 비교할 수 있다. 이러한 사례연구는 이동의 크기가 주어지는 시물레이션보다 알고리즘이 간편하며 쉽고 적용이 우수하다.

2. 고찰

통합모형을 위한 분석에서는EWMA 와 EPC의 관계, 기능이 다른 역할을 하는EWMA 와 EPC의 비교, EPC의 적용을 위한 다양한 각란의 특성을 소개, 품질특성이 변화할 때 추세의 적용 방법, 평균이 이동하는 경우에 MMSE 콘트롤러의 적용의 타당성을 논술하였다.

EPC는 t+1시점에 예측값 Y_t 을 계산하고 예측된 Y_t 와 목표값과의 차이를 계산하여 그 차이 만큼 목표대로 품질특성을 유지하기 위하여 조절변수로 공정을 조절하며, 이때 EWMA는 공정 조절된 품질특성이 관리한계를 벗어났다면, 가피원인을 제거하고 다음 공정조절로 연결된다.

통합의 다른 방법사례는 Vander Weil(1992)과 Sachs, Hu, Ingolfsson(1995)에 의하여 SPC알고리즘과 관리도에 의한 런이 적용되었다[8]. Bollinger와 Duffie(1988)는 결정적 관리기술의 다양한 형태를 설명하였다[4]. Messina[1992]는 기능이 전혀 다른 EWMA와 EPC의 방법론의 비교를 <표 1>에 나타내었다.[6].

<표 1> SPC와 EPC의 방법론 비교

	EWMA	EPC
개요	공정변동의 감지와 예측을 통한 변동의 최소화	공정변동을 목표대로하기 위해 공정 조절을 통한 변동의 최소화
적용	가피원인의 탐지	제조공정의 목표대로 공정흐름을 기대
단계	전략적	전술적
목표	품질 특성	공정 변수
기능	장애 발견	set point 감지
비용	کم	극히 적음
중점	사람과 작업방법	장비
상관관계	없음	높거나 낮음
결과	공정 개선	공정 최적

MacGregor[1988]는 두 영역을 연결하는 확률관리 이론을 제안하였다[5]. Astrom과

Wittenmark (1984)는 EPC를 적용함으로써 확률관리를 제시하였다[1].

확률관리는 동적인 공정과 각란 공정을 위한 모형이다. 자기상관관계가 있는 데이터의 존재와 분석, 측정은 연결된 관리적략이다. 확률적관리는 요구된 공정에 모형에서 SPC와 다르다. 일반적으로 모형은 Box, Jenkins와 Reinsel(1994)이 설명한 전이함수 모형이다.[2]. 이러한 결정적모형은 각란은 멈춤, 경사 등의 각란에 적용되며, 공정에 확률각란은 고려되지만 동적인 공정에는 적용되지 못한다. 자기회귀 누적 이동평균 (ARIMA)시계열 모형은 확률각란 특성화를 위해서 사용할 수 있다. 결정적인 요소와 확률적인 요소는 SPC/EPC관리기술의 통합 형태에 필수적 이론이 된다. 맥그리거는 관리활동의 비용이 없는 안정상태의 공정에서 SPC에 의한 최적통합방법을 보여주었다 [7]. 관리활동과 연결된 비용이 없다면 또는 동적인 공정 이 존재한다면, 그때 독립적인 확률관리이론은 품질관리에 접근한다. 또한, 이동이나 공정평균의 편차가 있는 상황에서 EPC의 사용은 관리활동과 가피원인 변경에서 근본적인 원인에 대한 활동대안으로서 SPC시스템을 사용하는 것 보다 좋다.

맥그리거는 공정각란에 두 가지 형태를 나타냈다. 말하자면 확률각란은 많은 공정에서 연속적으로 발생하는 확률변동으로 일어난다. 그리고 결정적인 각란은 어떤 특별한 즉각적인 시간에 부하변동, 경사도의 변경 또는 갑작스러운 멈춤에 기인해서 발생된다. 부하 각란은 아주 이따금 확률적으로 발생된다. 그리고 부하 각란의 본질은 결정적 모형을 통해서 정의된다. 차분 방정식과 전이함수는 결정적모형을 사용하고, 펄스 (pulse), 멈춤, 경사도, 공동각란은 단순모형을 사용한다. 확률각란은 정상적이거나 비정상적이다. 정상적인 각란은 확률적으로 발생한다. 그러나 고정평균을 갖는다. 정상적인 각란은 AR(모형으로 사용된다. 또는 자기회귀이동평균(ARMA) 추세모형을 사용한다. 비정상적인 각란은 고정된 평균을 갖지 않는다. 또는 평균이동하는 습관을 갖거나 비정상적인 활동을 한다. Box-Jenkins와 Reinsel(1994)은 ARMA 모형은 연속적인 값을 차분함으로써 정상적으로 만들 수 있다고 하였다[2]. 그리고 차분된 데이터는 정상적인 ARMA모형으로 모형화 할 수 있다. 가장 중요한 비정상적인 모형의 하나는 누적이동평균(IMA) 공정이다. 즉 SPC가 사용되는 환경에서 매우 보편적이다. 폐품 품질 관리에서 가장 중요한 목적중의 하나는 품질특성과 목표와의 편차의 분산을 최소화하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위한 단계는 동적인 공정을 인식하고 보다 나은 평가를 충족하기 위하여 관리 절차를 설계함에 따르는 각란 모형이다. 맥그리거는 동적인 공정 없이 최소분산 컨트롤러(MVC)를 설명하였다. 그의 결론은 관리활동과 관련된 비용이 없는 안정된 상태의 공정이나 단순Gain 공정을 위한 것이다.

SPC관리도 방법은 최적 컨트롤러일 수 있다. 더구나 만약 관리활동이 비용과 관련이 없다면 또는 동적인 공정이 존재한다면 표준 SPC관리도는 최적과는 거리가 멀다. 독립적인 확률이론은 더 일반적이고 강하게 품질관리에 접근된다.

Deming의 판별실험의 규칙2는 SPC/EPC 통합모형의 전략으로 사용할 수 있다. 규칙1은 정밀도와 정확성이 최선의 결과가 되도록 하지만 규칙2는 정밀성(accurate)에

최선의 결과가 되도록 하며, 규칙3과 규칙4는 정밀도와 정확성 모두가 최선의 결과가 되도록 하지 못한다.

MacGregor(1988)는 평균이 이동하는 공정(drifting mean)에서 규칙1은 좋은 방법이 아니지만 규칙2는 매우 효과적이라고 제안하였다.[5]. 또한, 수정된 규칙2가 100%수정, 시스템에 과도한 수정형태에서 의미 있는 변수로써 좋은 작업의 결과가 될 것이라고 제안하였다. 그리고 공정에 적용하기 위한 실제값과 목표값의 차이에서 다소 100%에 못 미치는 수정을 제안하였다. 이러한 기술은 MMSE컨트롤러를 사용한다. MMSE컨트롤러는 평균이 이동하는 경우와 관리되지 않은 공정에서 적용이 우수하다.

3. 공정조절 모형

t시점에 품질특성 Y_t 는 목표값 T 와 일치하기를 기대하는 단순공정이다. 여기서 U_t 는 공정조절이다. 어떤 관리엔지니어는 각란의 확률적 본질을 알고자 하지 않는다. 이런 엔지니어는 미분방정식이 있는 결정적모형인 동적 공정과 전이함수에 더 쉽게 접근하려고 한다. 그러나 확률적 각란이 나타나고, 이러한 사실이 주어지면 컨트롤러의 설계자는 목표점으로 이끄는 품질특성이 합리적인 샘플수 안에서 0가 되도록 보정하고 싶을 것이다. 이것을 소위 데드비트(deadbeat) 컨트롤러로써 최소시간에 즉각 품질특성 오차를 제거하려고 할 것이다. 더구나 시간의 지체 때문에 그것이 각란의 미래 값을 안 후에도 이것이 실현되지 않는다. 여기에서 컨트롤러 선택은 품질특성의 분산을 최소화하는 것으로 결정한다. \hat{Y}_{t+1} 는 t+1시점에 관심 있는 품질특성의 최소분산 예측값이다. 그것은 최소분산 컨트롤러가 관리활동 u_t 에 의하여 얻어지는 것을 보여준다. 그러므로 $\hat{Y}_{t+1} = T$ 통합컨트롤러의 단순한 경우에 [그림 1]은 확률적 공정관리를 위한 MMSE 컨트롤러의 적용을 보여주기 위하여 여기에 나타냈다. $Y_{t+1} - T = gu_t$ 여기서 g 는 평균이 이동하는 시스템을 위한 공정 계인(gain)이다. 만약 조절되지 않는다면 그때 공정은 평균으로부터 떨어져 이동할 것이다. 여기서 확률공정을 생각하면, $Y_{t+1} - T = n_{t+1}$ 여기서 n_t 는 t+1시점에서의 각란이다. 그 각란은 ARIMA(0,1,1) 모형에 의하여 모형화 할 수 있다.

$$\hat{n}_{t+1} = n_t + \lambda(n_t - \hat{n}_t) \dots\dots\dots(1)$$

ARIMA(0,1,1) 모형은 IMA(1,1) 이거나 안정적인 것으로 알려져 있다. 품질특성 Y_t 항목에서 $Y_{t+1} - T = n_{t+1} + gu_t$ 여기서 n_{t+1} 은 t시점에 알려져 있지 않고, n_{t+1} 은

n_{t+1} 의 추정치에 의해서 예측되어 진다. 그러므로, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Y_{t+1} - T = e_{t+1} + \hat{n}_{t+1} + gu_t \quad \dots\dots\dots(2)$$

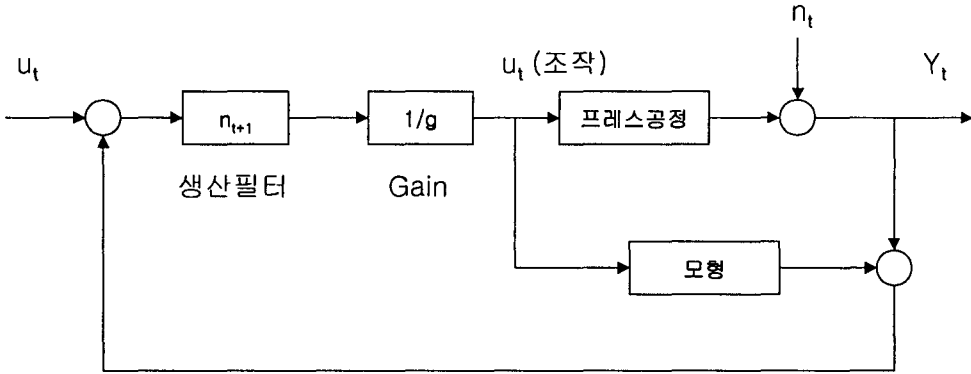
일반적으로 조절변수 u_t 는 공정의 입력 변수로써 산출된 각란까지 이동하는 것이 EPC에서의 일반적인 경우이다. 목표 값에 맞도록 시스템을 유지하기 위하여 MMSE의 형태로 통합관리를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u_t = -\left(\frac{\lambda}{g}\right) \sum_{j=1}^t e_j \quad \dots\dots\dots(3)$$

이 식에서 g 는 게인(gain)이고, $e_j = Y_j - T$, λ 는 EWMA의 모수이다. 만약, 동적인 변화가 샘플링비율에 비해서 느린 경우에는 MMSE 컨트롤러가 바람직하지 않은 큰 변동을 투입 u_t 로 주어진다. 입력 변화의 변동에 따라 목표치와 품질특성과의 편차의 평균제곱오차를 최소화시키는 제약된 컨트롤러를 소개할 수 있다. 제약된 컨트롤러의 중요한 특징은 품질특성의 평균제곱오차를 매우 작게 하고, 큰 변동의 감소도 투입 변동에 따른다.

4. 사례연구(Case Study)

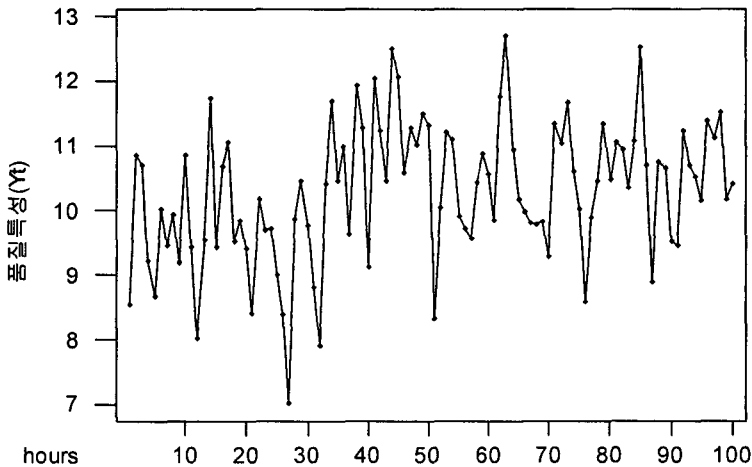
사례연구는 강판 프레스 작업을 위하여 프레스의 힘 조절에 의한 작업으로 SPC와 EPC가 통합된 사례를 살펴본다. [그림 1]은 프레스공정 품질특성이 EPC에 의한 공정의 통합 모형을 나타내었다. 프레스에 의한 철판의 눌린 깊이가 일정해야 하는 작업이다. 하지만, 철판의 강도가 일정치 않아 프레스의 힘을 조절하여 제품의 눌린 깊이를 일정하게 하고자 하는 사례이다. 과거의 경험으로 보아 온도에 따라 철판의 강도가 차이가 난다. 철판은 온도에 영향을 많이 미치고, 프레스 작업에 역시 영향을 미쳐 제품의 품질특성에 변화를 가져온다. 기계의 특성상 프레스의 누르는 힘은 자동으로 조종이 가능하다. 일반적으로 야적된 철판은 기온에 따라 강도에 변화가 나타난다. 매 프레스 작업이 이루어진 후 제품의 깊이가 실시간 자동으로 측정되는 장치가 부착되어 있어 제품의 합격, 불합격 여부가 즉시 판결된다. 제품의 합격 기준은 제품의 깊이가 $10 \pm 2\text{cm}$ 이다. 본 사례 연구는 MacGregor의 깔때기 실험의 2번 규칙을 변형한 것을 이용하고 있다.



[그림 1] EPC에 의한 공정의 통합 모형

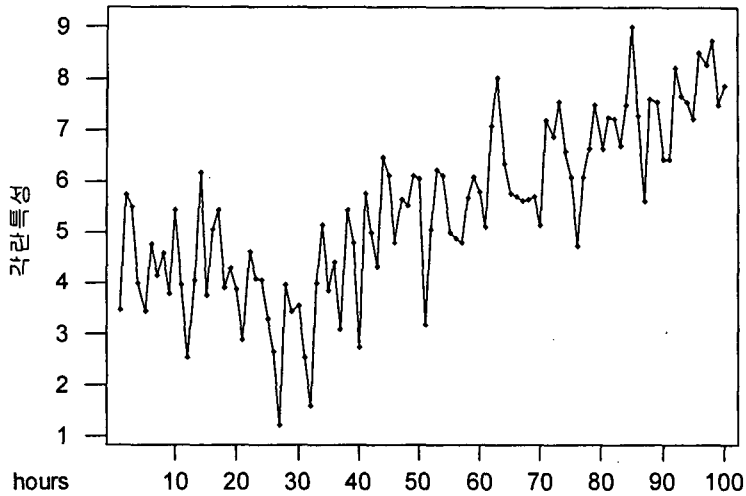
일정한 기간동안의 제품의 품질특성(평균 깊이)을 $X-R_s$ 차트를 사용하였다. 제품의 품질특성은 중요한 각란으로써 생각되는 온도에 따라서 결정되는 철판의 강도와 프레스의 누르는 힘(조절가능)의 크기에 의한 확률변수이다. 먼저 기존 작업의 100개의 품질 특성치를 살펴보면 [그림 2]와 같은 시계열을 나타낸다.

품질특성(Y_t)(EPC 적용전)

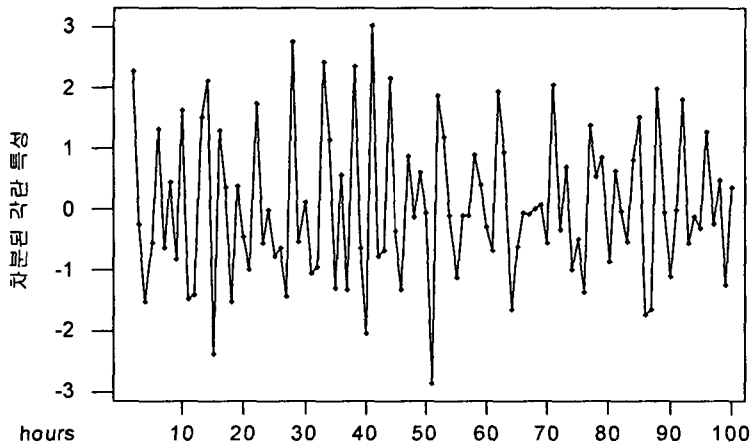


[그림 2] SPC/EPC 적용전의 품질특성치의 변화

각란의 경향

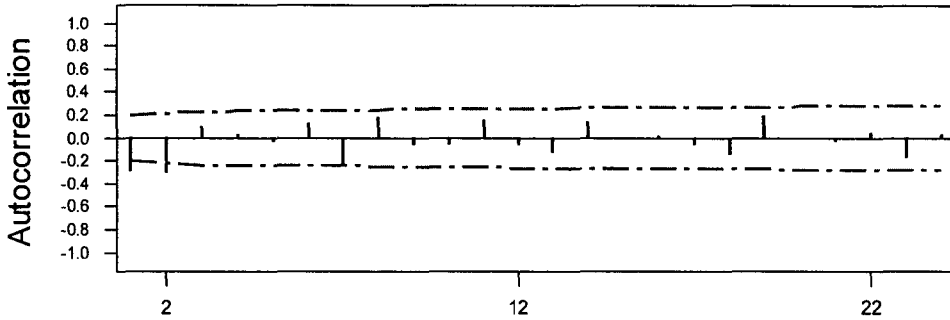


[그림 3] 100일동안의 강판의 품질특성치의 변화



[그림 4] 강판 특성치의 차분된 자료

차분된 각란 특성의 자기상관함수

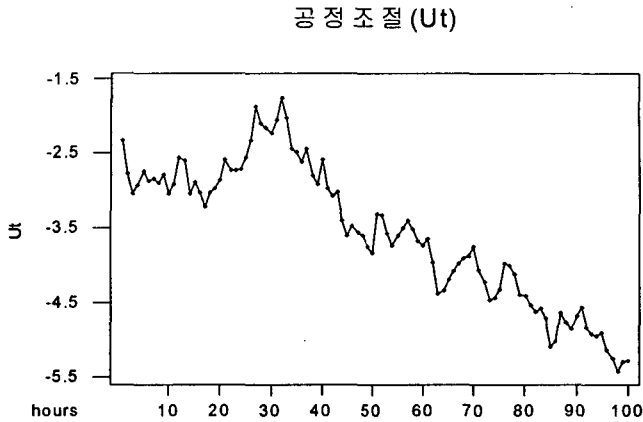


Lag	Corr	T	LBQ	Lag	Corr	T	LBQ	Lag	Corr	T	LBQ	Lag	Corr	T	LBQ
1	-0.30	-3.01	9.31	8	0.19	1.53	33.03	15	0.00	0.00	42.32	22	0.05	0.35	51.17
2	-0.31	-2.85	19.32	9	-0.07	-0.52	33.53	16	0.02	0.12	42.35	23	-0.18	-1.28	55.38
3	0.11	0.90	20.49	10	-0.07	-0.52	34.03	17	-0.07	-0.51	42.93	24	0.03	0.20	55.49
4	0.04	0.31	20.64	11	0.16	1.27	37.06	18	-0.15	-1.09	45.58				
5	-0.04	-0.33	20.80	12	-0.07	-0.53	37.60	19	0.20	1.48	50.69				
6	0.14	1.14	22.80	13	-0.14	-1.04	39.79	20	0.01	0.04	50.69				
7	-0.24	-1.98	29.00	14	0.15	1.10	42.32	21	-0.03	-0.25	50.85				

[그림 5] 차분된 강판 품질특성치의 자기상관 함수

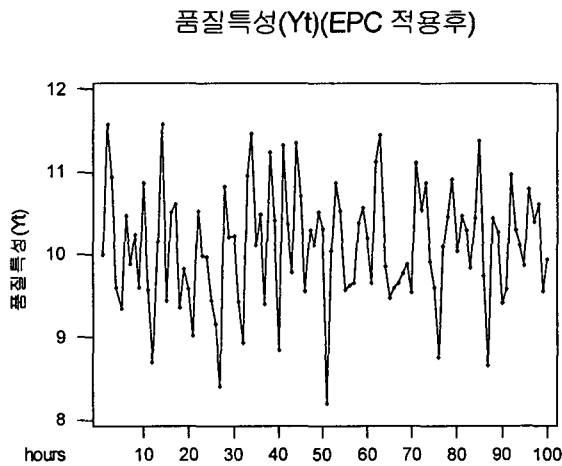
자기상관 함수를 통해서 이 자료는 MA(1)모형을 따른다고 분석되었다. 모수 θ 가 0.3인 MA(1) 모형을 따른다. 즉 $\lambda=0.7$ 이 MMSE가 최소화되는 경우이다. 품질특성은 프레스의 강도의 폭에 따라서 조정될 수 있다. 즉 철판이 강하면 강하게, 약하면 약하게 힘을 주면 정해진 깊이의 프레스 작업을 할 수 있다. 이 때의 gain은 프레스를 1단위 올리면, 깊이가 0.3cm의 변화가 있다.

위에서 제안한 SPC/EPC 모형을 이용하여 본 사례에 적용하여 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 먼저 EPC에서의 조절변수 U_t 의 변화를 [그림 6]에 도시하였다. 각란인 온도가 상승할수록 프레스의 누르는 힘의 크기는 품질특성을 일정해 주기 위해서 점점 작아지는 것을 살펴볼 수 있다.



[그림 6] 공정조절(U_t)의 변화

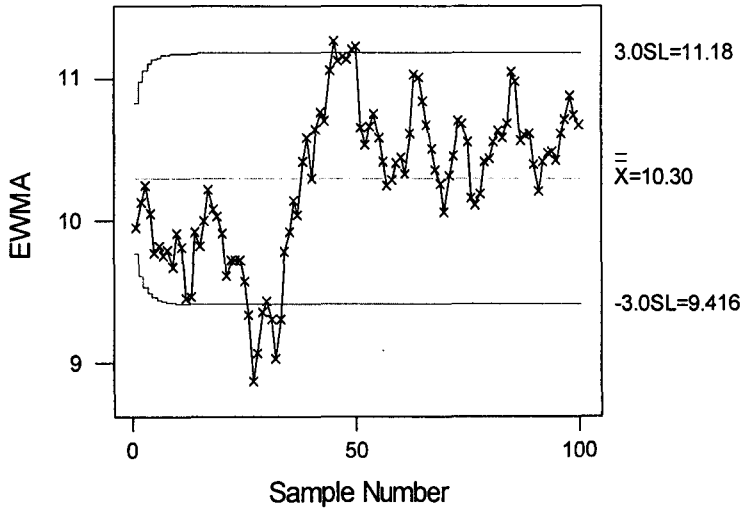
조절변수의 역할로 EPC 적용후의 변화는 [그림 7]와 같다. 적용전에는 규격을 벗어 나는 품질특성치가 몇몇 존재하였지만, 적용후에는 모든 품질특성치가 규격안에 포함되는 것을 볼 수 있다.



[그림 7] 통합모형 적용후의 품질특성의 변화

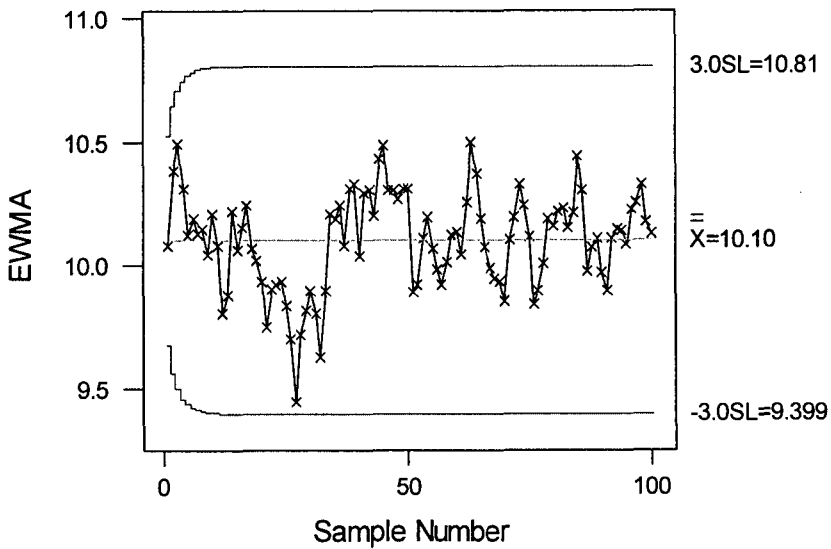
또한, EPC 적용전과 적용후의 EWMA 관리도를 살펴보면 적용후가 훨씬 개선된 공정평균과 분산을 나타내는 것을 알 수 있다.

EWMA(0.2) (EPC 적용전)



[그림 14] 적용전의 품질특성의 EWMA관리도

EWMA(0.2) (EPC 적용후)



[그림 15] 적용후의 품질특성의 EWMA관리도

PM 값은 EPC를 적용하기 전에는 1.227이 되었고, EPC를 적용한 후에는 0.515가 되어 결과적으로 EPC를 적용한 경우가 더 좋은 관리상태를 나타내었다. 위 사례에서 분석된 MA(1)의 모수는 0.7로 추정됨에 따라서, λ 의 값은 0.3이라고 설정하였다. 기계의 특성상 gain은 1.5가 되었다.

5. 결론

SPC와 EWMA 관리도 통합모형은 품질특성의 추세가 어떤 패턴에 인가에 따라서 변동을 감소시키는 전략이 확립된다. 본 연구에서는 품질특성의 각란이 MA(1) 모형일 경우 통합모형 시스템의 적용사례분석이다. 품질특성은 각란으로서 대표되는 온도에 따라서 결정되는 철판의 강도와 프레스 조절의 크기에 의하여 결정되는 확률변수로 나타난다. 이 적용사례는 각란을 추정하고 차분하여 차분된각란이 MA(1) 모형에 따르는 압출철판 공정산업에서, EPC 의적용전과 적용후를 비교하였다. 변동의 감소는 EPC의 적용후가 탁월하게 나타났다.

여기서 SPC 기법으로는 EWMA 관리도를 사용하여 변동의 감소를 나타내었고, EPC에서는 MMSE 컨트롤러에 의한 공정조절절차, 각란의경향, AFC에서 MA(1)모형의 채택, 공정조절의 변화 등을 나타내었다. 결국 SPC와 EPC 통합모형시스템은 EWMA 관리도에서 EPC의 적용후가 적용전보다 안정상태의 공정으로 나타난다.

참고문헌

- [1] ASTROM, K.J and WITTENMARK, B(1984). Computer Con-trolled Systems: Theory and Design. Prentice-Hall, Engle-wood Cliffs, NJ
- [2] Box, G.E.P:JENKINS, G.M: and REINSEL, G.M(1994). Time Series Analysis: Forecasting and Control, 3rd cd. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [3] BOX, G.E.P. and LUCENO, A. (1997). Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment. John Wiley&Sons, New York, NY.
- [4] BOLLINGER, G.J. and DUFFIE, A.N.(1988). Computer Control of Machines and Processes. Addison-Wesly Publishing, Reading, MA.
- [5] MACGREGOR, J.F.(1988). "On-Line Statistical Process Con-trol". Chemical Engineering Progress 84, pp.21-31.
- [6] MESSINA, W.S.(1992). "Strategiesfor the Integration of Statistical and Engineering Process Control". Ph.D.Disserta-tion, Arizona State University, Tempe, AZ
- [7] MONTGOMERY, D.C: KEATS, J.B.: RUNGER, G.C.: and MESSINA,

- W.S.(1994). "Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control". *Journal of Quality Technology* 26, pp. 79-87.
- [8] SAGHS, E.: HU, A. : and INGOLFSSON, A.(1995). "Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control". *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 8 (1), pp.26-43