

동적 모수를 사용한 EWMA 제어의 시뮬레이션 연구

강석찬¹ · 황지빈¹ · 김지현^{2*} · 김성식¹

A Simulation study of EWMA control using dynamic control parameter

Seokchan Kang · Jibin Hwang · Ji Hyun Kim · Sung-Shick Kim

ABSTRACT

EWMA is one of the most popular controller method used in Run-to-Run control system for semiconductor manufacturing. The value of the control parameter in EWMA has major effect on the result. Therefore, it is important to use control parameter value fitting for the process state. When the process is unstable, it is more efficient to change EWMA control parameter dynamically to compensate for the changing process state than using fixed control parameter. In this paper, we review previous studies using dynamic EWMA control parameter and propose a new algorithm complementing the weaknesses of the previous studies. The performance of the proposed algorithm is validated using simulation.

Key words : R2R, EWMA controller, EWMA control parameter

요 약

EWMA(지수가중평균)을 사용한 제어 방법은 반도체 제조 공정의 런투런 제어 환경에서 사용되는 대표적인 제어 방법이다. EWMA 제어에서는 제어 모수 값의 선택이 제어 결과에 주된 영향을 미치기 때문에, 공정 상황에 적합한 제어 모수 값을 사용하는 것이 중요하다. 불안정적인 공정 상황에서는 변화하는 공정 상황에 적합한 값으로 EWMA 제어 모수를 동적으로 변경하면서 제어해 주는 것이 고정된 모수 값을 사용하는 EWMA 제어에 비해 효율적이다. 본 연구에서는 동적인 EWMA 제어 모수를 사용한 기존 연구들을 살펴보고 이들의 단점을 보완한 새로운 알고리즘을 제시하며, 시뮬레이션을 통해 우수한 수행 결과를 확인하였다.

주요어 : 런투런, EWMA 제어, EWMA 제어 모수

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

기업의 생산성 향상과 고객의 만족도를 높이기 위해서는 제품의 품질 개선이 우선되어야 하고, 이를 위해서는 정확한 제어가 필요하다. 공정에서의 정확한 제어가 어려

운 가장 큰 이유는 제조 공정에 Drift, Shift, White Noise 등의 방해요인이 존재하기 때문이다. Drift는 일정한 추세를 가지고 시간이 지나면서 서서히 일어나는 변화이며, Shift는 급격한 변화, White noise는 제어가 불가능한 방해요인을 의미한다.

공정에서 발생된 Drift나 Shift량을 정확히 알 수 있다면 이상적인 제어가 가능하게 되나, 실제로 계속된 데이터에는 White Noise가 섞여있기 때문에 예측된 결과치가 Drift나 Shift에 의한 것인지, White Noise에 의한 것인지 정확히 구분할 수 없다. 이를 판단하는 과정에서 항상 Trade-off가 발생하며, 그 정확한 요인과 양을 알 수 없기 때문에 추정하여 제어에 사용할 뿐이다.

따라서 공정에서 발생하는 변화의 양을 정확하고 신속하게 추정하는 것이 제어 방법의 핵심이라 할 수 있다.

* 본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다.

* 이 연구는 고려대학교 교내 연구비의 지원을 받아 이루어졌습니다.

2007년 4월 25일 접수, 2007년 5월 28일 채택

¹⁾ 고려대학교 산업시스템정보공학과

²⁾ 고려대학교 정보통신기술연구소

주 저 자 : 강석찬

교신저자 : 김지현

E-mail; jihyunk@korea.ac.kr

1.2 기존 연구의 고찰

1.2.1 SPC(Statistical Process Control)

SPC(통계적 공정 관리 기법)는 관리도상의 제어 한계선을 통하여 공정 진행을 제어하는 통계적 공정 관리 기법으로, 관리도를 통하여 공정이상 상황이 탐지되면 공정 진행을 중지시킨다. 그 후 공정 관리자가 공정의 이상 유무를 판단하여 공정이상 상황이 확인되면 문제를 해결하고 다시 공정을 진행시키는 방식의 제어이다.

이러한 공정관리는 공정의 이상상황을 탐지할 수는 있으나 일일이 공정관리자의 손이 필요하며 공정이상을 해결하기 위해 매 번 공정을 중단시켜야 하는 문제가 있다. 또한 경험 있는 공정관리자가 필요로 하기 때문에 공정을 자동화시키기 어렵다.

1.2.2 R2R(Run to run)

R2R은 매 런(제품 혹은 가공단위)마다 이전 런들의 제어 결과를 현재 런의 제어에 반영하여 제어하는 것을 말한다^{1,2,6)}. R2R은 기존 SPC가 가지고 있던 공정 이상탐지 기능을 포함하고 있고 공정을 진행하면서 매 런 발생하는 오차를 고려하여 그 다음 런의 입력 값을 변화시켜 자동 제어를 가능하게 한다.

그러나 입력 값을 변화시켜서 제어할 수 없는 공정이상이 발생할 경우 SPC와 마찬가지로 공정을 중단시키고 공정관리자가 공정의 이상을 해결해야 한다. 결과적으로 기존의 SPC보다 적은 수의 공정 관리자가 공정 운용에 필요하며 또한 공정중단 횟수가 상대적으로 줄어든다.

일반적으로 R2R은 현재 런의 입력 값을 계산하기 위해 이전 런들에서 발생했던 오차들을 사용하는데, 반영하는 비율에 따라 MA 제어와 EWMA 제어로 나뉜다. MA(Moving Average) 제어는 최근 n 개의 런들에서 발생했던 오차들의 평균을 이용하여 현재 런의 입력 값을 계산한다. n 값이 커질수록 White Noise에 둔감한 반응을 보이며 불필요한 제어로 인하여 증폭되는 공정의 오차를 줄일 수 있다는 장점이 있으나, Drift나 Shift같은 공정의 변화에 민감하게 대응하지 못한다는 단점이 있다.

EWMA(Exponentially Weighted Moving Average) 제어는 현재까지 진행된 런들에서 발생했던 오차들의 지수가중평균을 이용하여 현재 런의 입력 값을 계산한다.

EWMA 제어 방법 역시 제어 모수 λ 값으로 작은 숫자를 사용할수록 불필요한 제어로 인하여 증폭되는 공정의 오차를 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 공정의 변화에 민감하게 대응하지 못한다는 단점이 있다. 그러나 EWMA 제어는 모수 λ 값을 조정함으로써 MA 제어에 비해 다양

한 공정 상황에 대처할 수 있는 장점을 갖고 있어 R2R의 제어 방법으로 널리 사용되고 있다.

EWMA 제어에 대한 기존연구를 살펴보면 다음과 같다. Ingolfsson & Sachs는 EWMA를 이용한 제어 방법의 이론적인 유용성을 보여주었으며⁷⁾ Box and Jenkins는 IMA(0,1)의 White Noise가 생기는 공정에서 최소의 분산을 가지는 것을 보였다.³⁾ Smith and Boning은 안정 상태에서 AMSD(Asymptotic Mean Square Deviation)을 최소화 하는 최적의 가중치 값을 계산하였으며¹¹⁾, Box & Luceno는 EWMA 제어 방식의 Robustness(둔감성)을 보였다⁴⁾.

이상의 연구들에서는 고정된 제어 모수를 사용함으로써, 다양한 방해요인으로 인해 변화하는 환경 상황에 맞는 제어 방법을 제시해 주지 못하였다. 즉, Drift 제어에는 최적화 되어 있지만, 추가적으로 발생하는 Shift에 대한 효율적인 제어 방안이 필요하게 되었다.

이러한 한계를 극복하기 위해 공정 방해요인의 변화에 따라 제어 모수 λ 값을 동적으로 변경하면서 제어해주는 방법에 대한 연구가 수행되었다.

Smith & Boning은 Drift가 존재하는 공정에서 신경망을 이용한 EWMA 제어 모수를 동적으로 변경하는 방안을 제시하였으나¹²⁾, Shift 제어와 관련한 방안은 제시되지 않았다. Ruey-Shan Guo, Argon Chen, and Jin-Jung Chen은 Shift와 Drift가 혼재된 공정 환경에서 동적으로 제어 모수 값을 변경하면서 제어에 사용하는 방법을 제안하였다. 제안된 내용은 공정에서 Shift가 발생한 경우 그 크기에 따라 EWMA 제어 모수를 적절히 큰 값으로 설정하고, 점차적으로 그 값을 줄여 나가면서 제어하는 방법이다. 제시된 방법은 Shift와 White Noise가 존재하는 공정에서는 최적이며, Shift와 Drift, White Noise가 혼재하는 공정 환경에서는 고정된 제어 모수 값을 사용한 기존 EWMA 제어 방법에 비해 우수한 성능을 나타냄을 보였다¹⁰⁾.

그러나 제시된 연구는 Shift와 White noise만이 존재하는 공정 환경에만 최적화되어 있을 뿐, Drift가 포함된 환경에서는 최적화된 방법이 아니라는 것에 한계가 있다. 이처럼 기존의 연구에서는 Shift 혹은 Drift 한쪽에만 최적화된 제어 방법에 그치고 있어서, Drift가 존재하는 공정에서 Shift가 발생 하였을 경우에 대한 최적화된 방안은 제시되지 않았다.

본 연구에서는 Shift와 Drift, White Noise등의 방해요인이 혼재된 대부분의 공정 환경에서 공정의 오차를 최소화 하기 위한 효율적인 EWMA 제어 알고리즘을 제안한다.

또한 기존 연구들이 많이 적용되었던 반도체 Photo, CMP 공정을 포함하여, EWMA를 사용하는 Drift, Shift가 혼재된 모든 R2R 공정에 적용 하였을 때 기존의 방법들에 비해 개선된 제어 결과를 얻어내는 것을 목표로 한다.

1.3 논문의 구성

본 연구는 서론, 본론, 결론의 총 3장으로 구성이 된다. 지금까지 서술한 1장에서는 EWMA 제어 방법에 대한 여러 기존 연구들을 살펴보고, 다양한 방해요인들이 존재하는 공정에서 EWMA 제어 모수의 동적인 변경 방법에 대한 연구의 필요성을 언급하였다.

제 2장에서는 기존 EWMA 제어 방법의 내용과 문제점을 살펴보고, 이를 보완한 새로운 알고리즘을 제안한다. 이후 기존 방법들과의 시뮬레이션 비교를 통하여 개선된 본 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

3장에서는 본 연구의 결론과 추후 연구 방안을 제시한다.

2. 본 론

2.1 문제의 개요

1개의 독립 변수와 종속 변수간의 1차 선형 모델을 가정한 일반적인 EWMA 제어의 진행 순서는 그림 1과 같다. 매 런이 진행된 이후, 현재 시점의 공정 상태 추정치인 EWMA 통계량을 식 (1)과 같이 계산하고, 이 값으로 다음 런의 제어를 진행하게 된다⁹⁾.

$$A_t = \lambda(Y_{t-1} - BX_{t-1}) + (1-\lambda)A_{t-1} \quad (1)$$

여기서 λ 는 EWMA 제어 모수를 의미하며 $0 \leq \lambda \leq 1$ 사이의 값을 가진다. 이러한 EWMA 제어 방식은 제어 모수의 크기에 따라 Trade-off가 발생하게 된다. 큰 값을 사용한다면 최근 정보에 민감하기 때문에 Shift같은 공정

의 커다란 변화에 빠르게 대응할 수 있다는 장점이 있다. 반면, White Noise로 인한 잘못된 보정 또한 증가하여 공정의 오차가 증폭된다는 단점이 있다. 그 반대로 작은 제어 모수 값을 사용하게 되면 증폭되는 오차의 양은 감소되지만 공정의 변화에 빠르게 반응하지 못한다는 단점이 있다¹¹⁾.

결국 최적의 EWMA 제어 방안으로는 변화하는 공정 상황에 따라 적합한 제어 모수를 사용하는 방안이 요구된다. 예를 들어 제어 진행 중 Shift같은 큰 변화가 발생한 경우에는 제어 모수 값을 Shift 제어에 적합한 큰 수치를 사용하고, 어느 정도 공정이 안정화된 상태라면 현 상황에 적합한 작은 모수 값을 사용하여 제어를 계속 진행해 주는 것이다.

기존 EWMA 제어 방법은 고정된 제어 모수를 사용함으로써, 다양한 방해 요인에 의한 공정의 상황 변화에 유연한 대응이 불가능 하였다.

본 연구에서는 공정 상황 변화에 따라 EWMA 제어 모수 값을 동적으로 변경하면서 공정 오차의 합(MSE)를 최소화시키는 효율적인 알고리즘을 제안한다.

2.2 전체 알고리즘 구성

본 알고리즘은 공정에서 발생한 Shift를 탐지하는 단계와 EWMA 제어 모수를 Shift와 Drift제어에 적합한 값으로 동적 변경하는 단계로 구성된다.

공정 진행 중 Shift가 발생했을 경우에는 EWMA의 제어 모수를 큰 값으로 변경하여 제어하는 것이 적절하다. 따라서 첫 번째 단계에서는 공정에서의 Shift 발생 여부를 신속하고 정확하게 탐지하는 절차를 밟는다.

Shift가 발생하여 큰 값으로 모수를 변경한 후 이 값을 계속 사용하여 EWMA 제어를 하게 될 경우 White Noise에 의해 증폭되는 오차가 증가하게 된다. 따라서 점차적으로 모수 값을 Shift 이전의 안정 상태에 적합한 값으로 적절히 줄여 나가는 방안이 필요하다. 동적인 제어 모수 변환이 두 번째 단계에서 이루어진다.

2.3 Shift 발생 탐지 단계

본 연구에서는 공정에서 발생한 Shift 탐지를 위해 EWMA 관리도를 사용하였다. 기본적인 방법은 식 (2)와 같이 각 런들의 오차 값으로 EWMA 통계량을 계산하여 구한다.

$$E_t = WE_t + (1-W)E_{t-1} = \sum_{j=1}^t W(1-W)^{t-j}E_j \quad (2)$$

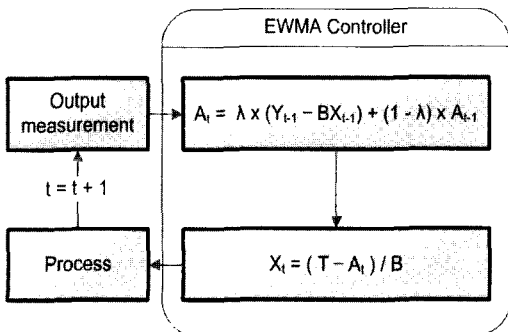


그림 1. EWMA 제어 흐름도

여기서 e_t 는 공정 제측 값과 목표 값의 차이로서 현재 런의 오차를 의미한다.

Lucas, J. M., Saccucci, M. S.는 EWMA관리도의 가치와 관리한계선에 따른 ARL(Average Run Length)의 크기를 계산하였다^[8].

ARL(Average Run Length)은 관리도가 Shift 발생 이후 평균적으로 몇 개의 런 진행 이후 공정 이상이 탐지되는지 계산된 값이다. False Alarm이란 실제 공정에서 Shift가 발생하지 않았음에도 관리도가 잘못된 판단을 내리는 것을 의미한다.

Shift가 없는 0σ 의 경우 표 1에서 보듯이 EWMA 관리도는 Shewhart 관리도에 비하여 ARL이 크며, 1σ 이상의 변화가 있는 공정에서는 ARL이 작거나 비슷하다. 즉, EWMA 관리도가 Shewhart 관리도에 비해 False Alarm은 적게 발생시키면서, Shift의 발생 여부는 민감하게 탐지할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 2가지 종류의 EWMA 관리도를 사용하였는데, 첫 번째 EWMA Large 관리도는 3σ 이상 크기의 Shift를 탐지하기 위해 설계된 것으로 가중치 $W_i=0.6$, 관리한계선 $CL = 3.285\sigma_i$ 를 가진다. 두 번째 EWMA Medium 관리도는 2σ 이상 크기의 Shift를 탐지하기 위한 것으로 $W_m=0.33$, 관리한계선 $CL = 3.25\sigma_m$ 이다^[5]. 이 관리도들은 매 런의 종료 후, 식 (2)에서 계산한 EWMA 통계량이 관리한계선을 넘어서게 되면 공정 변화를 탐지하게 되고, 현재 시점에서 평균적으로 ARL 이전 런에서 Shift가 발생한 것으로 간주하게 된다.

2.4 EWMA 제어 모수의 동적 보정 단계

동적인 제어 모수의 보정을 위해 본 연구에서는 An Enhanced EWMA Controller^[10]에서 사용되었던 EWMA 제어 모수의 보정 방법을 개선한 새로운 알고리즘을 제안한다.

An Enhanced EWMA Controller에서는 제어 모수를

다음과 같은 방법으로 보정하여 사용하였다.

$$\lambda = \text{MAX} (1/n , \lambda_b) \quad (3)$$

여기서 n 은 현재 Run - Shift 발생 추정 Run+1이다.

이 제어 방식은 Shift 발생 직후 제어 모수 값을 1로 보정하여 제어를 진행하고, 그 이후에는 제어 모수 값을 점차 감소시킨다. 최소 모수 값으로는 λ_b 를 두었는데, 이는 공정에 존재하는 Drift를 제어하기 위한 값이다.

An Enhanced EWMA Controller에서는 EWMA 관리도에서 Shift 발견 시 Large Shift의 경우에는 0.5, Medium Shift의 경우에는 0.25를 제어 모수의 초기 값으로 결정하여 사용하였다. 이는 EWMA 관리도가 Shift 발생 직후 변화를 발견하지 못하고, 평균적으로 ARL(Average Run Length)이 지난 후에 변화를 탐지하기 때문이다. 따라서 Shift 발생 직후 최적의 초기 제어 모수 값은 1이나, $n \approx \text{ARL}$ 로 고려하여 제어를 시작하게 된다. ARL이 2.06인 3σ 차트에서는 초기 EWMA 제어 모수 값을 $1/2 = 0.5$ 로 ARL이 3.90인 2σ 차트에서는 $1/4 = 0.25$ 로 설정하였다.

Ruey-Shan등은 본 방법이 White Noise가 존재하는 공정에서 Shift 발생 이후, 공정 오차 제곱의 합(MSE/σ^2)을 최소화 하는데 최적화된 방법임을 수학적으로 증명하였다^[7].

그러나 Drift가 존재하는 공정에서 Shift가 발생할 경우 본 방법은 최적이지 않다. 즉, Shift 발생 이후 제어 모수의 값을 감소시키는 과정에서, Drift의 고려 없이 Shift 제어만 고려한 것이 본 알고리즘의 문제점이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 Drift와 Shift의 양존성을 고려한 새로운 EWMA 제어 모수 보정 방법을 제안한다.

$$\lambda = (1 - \lambda_b) / n + \lambda_b \quad (4)$$

본 방식을 전개하여 기존 방법과 비교해 보면 다음과 같다.

표 1. 관리도별 ARL(Average Run Length)

shift	Shewhart $W = 1$ $CL = 3\sigma$	EWMA Large $W_i = 0.6$ $CL = 3.285\sigma_i$	EWMA Medium $W_m = 0.33$ $CL = 3.25\sigma_m$
0σ	370.40	1003.44	1007.44
1σ	43.89	31.55	15.87
2σ	6.30	4.55	3.90
3σ	2.00	2.06	2.27
4σ	1.19	1.36	1.67

표 2. EWMA 제어 모수 보정 방법 비교

n	기 준	개선안
1	1	1
2	$\text{MAX} (1/2 , \lambda_b)$	$1/2 + 1/2\lambda_b$
3	$\text{MAX} (1/3 , \lambda_b)$	$1/3 + 2/3\lambda_b$
4	$\text{MAX} (1/4 , \lambda_b)$	$1/4 + 3/4\lambda_b$
5	$\text{MAX} (1/5 , \lambda_b)$	$1/5 + 4/5\lambda_b$
...
∞	λ_b	λ_b

식 (4)와 표 2에서 보듯이, 제안하는 값은 Shift 제어에 최적화된 기존의 모수 값과 Drift 제어에 최적화된 모수 λ_b 에 가중치를 곱한 값을 합한 것이다. λ_b 에 곱해지는 가중치의 크기는 Shift 발생 시점에서 멀어질수록 점점 작아진다.

즉, 기존 방법은 제어 모수가 λ_b 이하로 감소하기 전까지 Shift에만 최적화된 보정 방법이고 Drift제어는 전혀 고려하지 않은 방법이라 할 수 있다. 반면 본 방법은 기존 모수 값에, Drift 제어에 대한 방법이 추가되어 개선된 방법이라고 할 수 있다.

또한 Drift가 존재하지 않는 공정이라면 최적화된 제어 모수 λ_b 값은 0이 되고, 본 알고리즘은 기존 방법인 식 (2)와 일치하게 된다. 따라서 본 방법은 Drift가 존재하는 공정에서는 기존 방법보다 개선되었고, White Noise만이 존재하는 공정에서는 최적화된 기존 방법을 포함하고 있다고 볼 수 있다.

기존 연구와 본 알고리즘에서 Shift 발생 이후 변경되는 제어 모수 값을 각각 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. Drift 제어에 적합한 최저 모수 값을 변경되는 제어 모수 값에 반영하기 때문에, 런이 진행됨에 따라 기존 방법에 비하여 제어 모수는 서서히 감소하게 된다.

Drift 제어를 위해 기존 방법에서 λ_b 값만을 크게 변경하여 사용하려 한다면 Shift 발생 직후에는 본 방법과 비슷한 값이 계산되어지나, 이후 런이 진행될수록 Drift 제어에 적합하지 않게 된다. 따라서 단순히 λ_b 값 크기를 변경하는 것만으로는 본 방법을 대체할 수 없다.

이상으로 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 순서는 그림 3과 같다.

공정에서 각 런의 진행 이후 얻어진 제측 값으로 EWMA 관리도를 그리게 되고, 추정된 Shift의 크기에 따라 초기 제어 모수(λ) 값이 결정되게 된다. 이후 결정된 모수 값으로 새로운 입력값 X_t 를 계산한 후 새로운 Shift

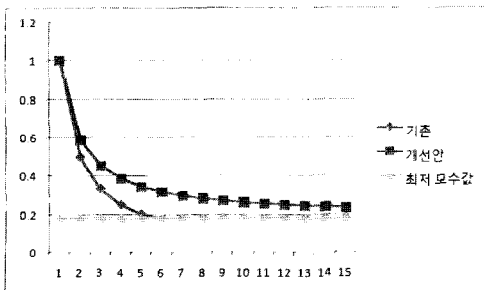


그림 2. Shift발생 이후 EWMA 제어 모수

가 발견될 때까지 모수 값을 점차 줄여나가며 제어가 진행되는 것을 알 수 있다.

2.5 시뮬레이션

알고리즘의 성능 검증을 위해 다양한 공정 상황을 가정하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 공정은 기존 An Enhanced EWMA Controller^[7]에서, 고정된 제어 모수를 사용하는 EWMA 제어 방법과의 성능 비교에 사용되었던 조건과 동일하게 구성하였다. 또한 다양한 Drift 크기에 따른 성능 비교를 위해 8가지의 case를 추가하였다. 공정 환경은 $Y = 3000 + 10X + S + \delta t + \epsilon$ ($N(0, \sigma^2)$) 로 가정하였고 σ 의 크기는 2이다. 초기 공정 상황은 완벽히 알고 있다는 가정 하에, $Y = 3000 + 10X$ 의 형태로 모델링을 하였다. S는 Shift의 분포, δ 는 drift 크기, 그리고 p는 Shift의 발생 확률을 나타낸다.

본 연구에서는 Shift와 Drift가 혼재된 다양한 환경의 실험을 위해, 실험계획법을 사용하여 Shift 발생 확률 2가

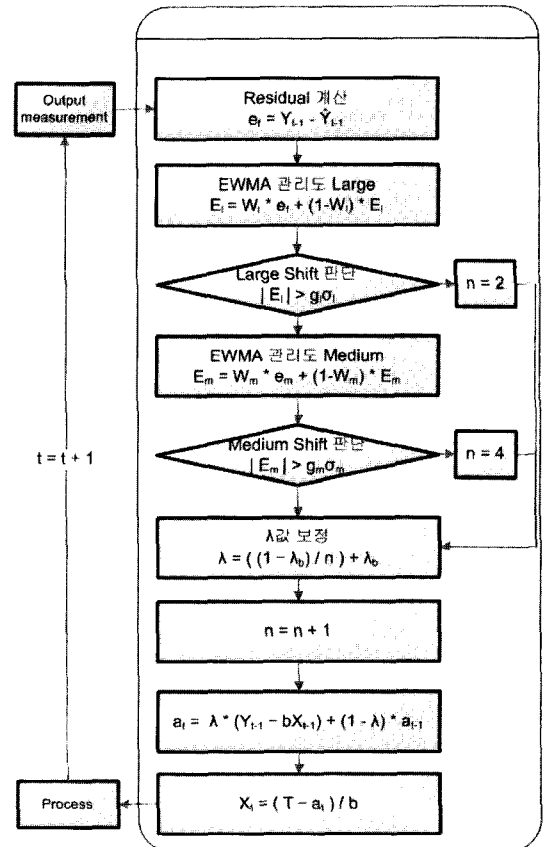


그림 3. EWMA 제어 모수 변경 알고리즘

지, Shift의 크기 2가지, Drift의 크기 3가지, 총 $2 \times 2 \times 3 = 12$ 가지의 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 세부적인 실험 환경에 관한 내용은 표 3과 같다. 예를 들어, Case 1의 경우에는 매 런마다 0.5%의 확률로 Shift가 발생하며 그 크기는 평균이 0이고 분산은 σ^2 인 정규분포를 따르게 된다. Drift의 크기는 0.2로서 매 런마다 일정한 크기의 Drift가 발생하는 것을 알 수 있다. 성능 비교 기준은 MSE/σ^2 로 설정하였으며 그 값이 작을수록 제어 성능이 우수함을 의미한다. 계산 방법은 식 (5)와 같다.

$$MSE/\sigma^2 = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - T)^2 \right\} / \sigma^2 \quad (5)$$

임의의 난수를 사용하여 200번의 시뮬레이션 반복 수행을 하였고, 각 시뮬레이션 주기 동안 진행한 런의 수는 2000 런이다. 모든 Case별로 최저 제어 모수 값은 0~1까지 0.01 간격으로 총 101가지 경우에 대해 MSE/σ^2 의 평균을 계산하였다.

그림 4는 모든 Case, λ_b 값에 대하여 개선된 MSE/σ^2 값을 나타낸 것으로 대부분의 경우 오차 값이 감소한 것을 알 수 있다. 또한 미세한 Drift가 존재하였던 Case의 1~4 경우보다 Drift량이 상대적으로 큰 Case 5~8, Case 9~12 공정으로 갈수록 더 큰 폭의 개선이 진행된 것을 알 수 있다.

λ_b 값이 큰 부분에서는 개선된 양이 적었는데, 이 경우에는 실질적으로 Shift 이후 제어 모수를 거의 줄여나가지 못하고 큰 값으로 계속 제어한 것이므로 둘 다 효과적인 제어 방법이라고 볼 수 없다.

몇 가지 Case의 MSE/σ^2 모습을 세부적으로 살펴보면

표 3. 각 Case별 실험 상황

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
p	0.005	0.005	0.05	0.05
S	$N(0, \sigma^2)$	$N(3\sigma, \sigma^2)$	$N(0, \sigma^2)$	$N(3\sigma, \sigma^2)$
δ	0.02σ	0.02σ	0.02σ	0.02σ
	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
p	0.005	0.005	0.05	0.05
S	$N(0, \sigma^2)$	$N(3\sigma, \sigma^2)$	$N(0, \sigma^2)$	$N(3\sigma, \sigma^2)$
δ	0.1σ	0.1σ	0.1σ	0.1σ
	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
p	0.005	0.005	0.05	0.05
S	$N(0, \sigma^2)$	$N(3\sigma, \sigma^2)$	$N(0, \sigma^2)$	$N(3\sigma, \sigma^2)$
δ	0.2σ	0.2σ	0.2σ	0.2σ

그림 5에서 X축은 0에서 1까지 0.01단위로 변화시켜 나간 λ_b 의 값이고, Y축은 MSE/σ^2 의 값을 나타낸 것이다.

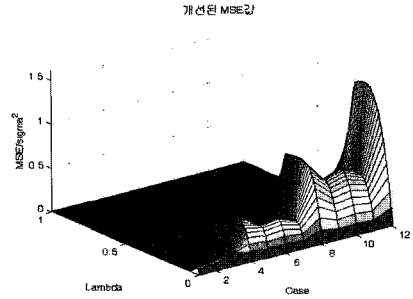
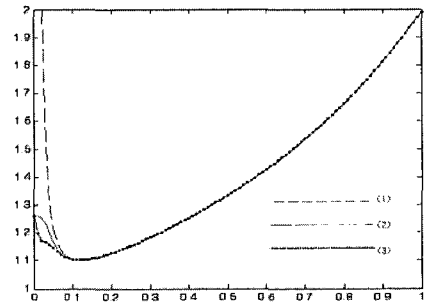
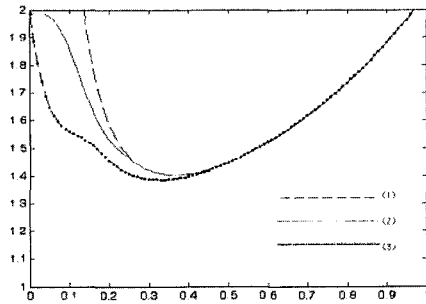


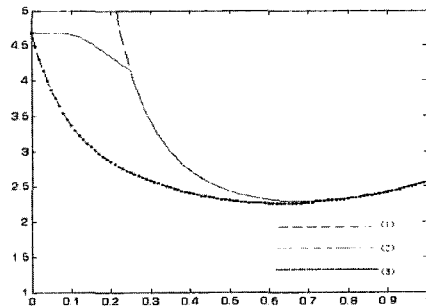
그림 4. 개선된 MSE값



(a) 표 3. Case 1



(b) 표 3. Case 6



(c) 표 3. Case 12

그림 5. 실험 결과

3가지 종류의 곡선은 위에서부터 차례로 (1) 고정된 제어 모수 값(λ_b)을 사용한 EWMA 제어 방법, (2) An Enhanced EWMA Controller, 그리고 (3) 본 알고리즘을 사용했을 때의 MSE/σ^2 를 나타낸다. Drift, Shift의 크기에 따른 다양한 환경에도 고정 모수를 사용한 EWMA 제어 방식은 물론 An Enhanced EWMA Controller보다 개선된 성능을 보여주고 있다.

Case 1 같은 경우의 시뮬레이션은 존재하는 Drift의 크기가 상대적으로 작은 공정을 대변하는 것으로 반도체 Photo 공정을 예로 들 수 있다.

최저 MSE값은 큰 차이를 보이지 않았으나 적은 λ_b 값을 사용한 부분에서는 큰 폭의 개선이 이루어졌음을 알 수 있다. 즉 공정이 매우 안정된 Photo 공정의 expose time의 산출에 본 알고리즘을 적용하였을 경우, 큰 폭의 개선을 기대할 수 있다.

또한 Case 6,12같은 경우는 Drift의 크기가 상대적으로 큰 공정을 대변할 수 있는 것으로, 반도체 CMP 공정의 Etch Rate같은 공정의 입력 변수를 계산하는 과정에 적용하였을 경우, 기존의 다른 방법들보다 오차가 감소하게 됨을 예상할 수 있다.

최저 MSE값은 각각 5%, 3%의 개선이 이루어졌으며, 작은 λ 값을 사용하는 공정의 경우 성능 향상은 이보다 더 커짐을 볼 수 있다. 따라서 미세한 제어를 요구하는 공정들, 특히 반도체 공정에 적용하기에 적합하다고 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존에 제안된 다양한 방해요인이 존재하는 공정 환경에서의 효율적인 제어를 위해 EWMA Controller의 λ 값을 동적으로 변화시키는 알고리즘으로, 기존의 An Enhanced EWMA Controller를 강화시킨 알고리즘을 제안하였고 시뮬레이션 실험을 통해 그 우수성을 증명하였다.

Drift 혹은 Shift 한쪽에만 최적화된 제어를 수행하는 기존 방법과는 달리 양쪽에 대한 제어를 모두 고려함으로써 Drift와 Shift가 혼재된 공정에서 우수한 제어 결과를 보여주며, 특히 존재하는 Drift의 크기가 큰 공정일수록 상대적으로 큰 폭의 개선이 이루어졌다.

본 알고리즘이 기존 연구들보다 적은 오차값(MSE)을 보여줌으로써 기존 EWMA 제어를 사용하는 R2R 공정에 적용 시 제조되는 제품의 품질 향상 효과가 있을 것으로 예상된다.

정밀한 제어를 요구하는 대표적인 공정인 반도체 공정

같은 경우에도 기존 연구들이 변화 없이 그대로 적용되고 있다. 그러나 반도체 공정 역시 Drift와 Shift가 혼재되어 있는 공정이므로, 기존 방법에 비해 개선된 제어 결과가 예상되며 반도체 수율 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 CMP공정 같은 경우 존재하는 Drift의 크기가 비교적 큰 공정이므로 기존 방법들에 비해 더 큰 폭의 개선이 이루어질 것으로 기대된다.

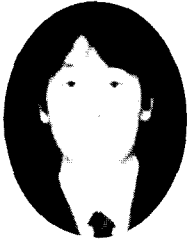
향후 연구 과제로는 다른 방식으로 공정의 Shift나 Drift의 발생여부와 변화량을 좀 더 정확하고 빠르게 탐지해 낼 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

또한 본 알고리즘은 실제 반도체 Photo공정에 적용될 예정으로 이를 통해 그 제어 성능을 확인해보는 검증 과정이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Bode, C. A., Ko, B. S. and Edgar, T. F. (2004), "Run-to-run control and performance monitoring of overlay in semiconductor manufacturing", *Control engineering practice*, Vol. 12, No. 7, pp. 893-900.
2. Del Castillo, E. and Hurwitz, A. (1997), "Run-to-run process control: Literature review and extensions", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 184-195.
3. Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1963), "Further Contributions to Adaptive Quality Control: Simultaneous Estimation of Dynamics: Nonzero Costs", *Proc. of the 34th Session, Bulletin of the International Statistical Institute*, Ottawa, Canada, Vol. 40, pp. 943-974.
4. Box, G. E. P. and Luceno, A. (1997), *Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment*, 1st Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 100-112.
5. Montgomery, D. C. (2005), *Introduction to Statistical Quality Control*, 5th Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 405-416.
6. Grosman, B., Lachman-Shalem, S., Swissa, R. and Lewin, D. R. (2005) "Yield enhancement in photolithography through model-based process control: average mode control", *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, Haifa, Israel, Vol. 18, No. 1, pp. 86-93.
7. Ingolfsson, A. and Sachs, E. (1993), "Stability and Sensitivity of an EWMA Controller", *Journal of Quality Technology*, Vol. 25, No. 4, pp. 271-287.
8. Lucas, J. M. and Saccucci, M. S. (1990), "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements", *Technometrics*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-29.

9. Moyne, J., Del Castillo, E. and Hurwitz, A.M. (2001), *Run-to-Run Control in Semiconductor Manufacturing*, 1st Edition, CRC Press, New York, pp. 56-80.
10. Guo, R. S., Chen, A. and Chen, J. J. (2000), "An enhanced EWMA controller for processes subject to random disturbances", in: Moyne, J., Del Castillo, E. and Hurwitz, A. (eds.), *Run to Run Control in Semiconductor Manufacturing*, 1st Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 289-308.
11. Smith, T., Boning, D. (1997), "Artificial Neural Network Exponentially Weighted Moving Average Controller for Semiconductor Processes", *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 15, No. 3, pp. 1377-1384.
12. Smith, T., Boning, D. (1997), "A Self-Tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques", *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 20, No. 2, pp. 355-363.



강 석 찬 (kang0034@hanmail.net)

2005년 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과 학사
2005년~현재 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과 석사과정

관심분야 : Advanced Process Control, Financial Engineering



황 지 빈 (ji_bin_@hanmail.net)

2006년 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과 학사
2006년~현재 고려대학교 공과대학 산업시스템 정보공학과 석사과정

관심분야 : System Optimization, Financial Engineering



김 지 현 (jihyunk@korea.ac.kr)

1993년 고려대학교 공과대학 산업공학과 학사
1995년 고려대학교 공과대학 산업공학과 석사
1995년 삼성전자 반도체 총괄 메모리사업부
2004년 미국 University of Michigan 산업공학과 박사
2004년~현재 고려대학교 정보통신기술연구소 연구교수

관심분야 : Advanced Process Control, Quality Control



김 성 식 (sungskim@korea.ac.kr)

1972년 고려대학교 공과대학 기계공학과 학사
1974년 고려대학교 공과대학 산업공학과 석사
1976년 미국 Southern Methodist University 산업공학과 석사
1979년 미국 Southern Methodist University 산업공학과 박사
1979년~현재 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수

관심분야 : Advanced Process Control, Modeling, System Optimization