

Dual Damping EWMA를 이용한 효율적인 반도체 공정 제어에 관한 연구

김선억¹ · 고효현^{1*} · 김지현² · 김성식¹

¹고려대학교 산업시스템정보공학과 / ²고려대학교 반도체기술 연구소

A Study of Semiconductor Process Control using Dual Damping EWMA

Seon-Eok Kim¹ · Hyo-Heon Ko¹ · Jihyun Kim² · Sung-Shick Kim¹

¹Department of Industrial System and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

²Semiconductor Technology Research Center, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

In this paper, an efficient control method for semiconductor fabrication process is presented. Generally, control is performed with data which is under the influence of process disturbance. EWMA is one of the most popular control methods in semiconductor fabrication that effectively deals with varying process condition. A new method using EWMA, called the Dual Damping EWMA, is presented in this study to reduce over-control by separating weight factor of input and output. The goal is to reflect Drift but reduce the effects of White noise in run to run control. Simulation is performed to evaluate the performance of DPEWMA and to compare with EWMA and Double EWMA.

Keyword: semiconductor, FAB control, EWMA, control logic

1. 서론

반도체 산업은 21세기 정보화 사회를 선도하는 첨단 핵심부품 산업이다. 최근 다양한 전자제품의 출시와 각종 제품의 전자 기기화 등에 힘입어 매년 시장의 규모가 팽창하고 있다. 또한 반도체 산업은 높은 부가가치를 지니고 있어 경쟁이 가장 치열한 산업 중 하나이다. 반도체 시장은 최근 세계 시장의 단일화 추세에 영향 받아 글로벌 경쟁 체제에 놓여 있다. 치열한 경쟁 속에서 반도체 제조업체들은 생산성 향상과 경쟁력 확보를 위해 기업의 전사적 노력을 기울이고 있다.

반도체 산업의 경쟁력 확보를 위해 가장 중요한 요소는 품질이다. 기술수준이 같을 경우 생산과정에서 불량률을 줄여야 기업의 이윤은 증가할 수 있다. 또한 높은 품질의 제품은 이윤

증가와 함께 고객의 만족도를 높임으로써 기업의 경쟁력 강화에 크게 기여한다. 따라서 반도체 제조 기업들은 정밀한 설비 투자와 좋은 원자재의 선택 및 고집적 설계 등을 통해 품질 향상을 꾀하고 있다(Kymal, 2007).

반도체 제조공정은 매우 복잡하며, 단계별 가공 상태에 따라 품질은 많은 영향을 받는다. 따라서 우수한 품질의 제품을 만들기 위해 반도체 회사는 새로운 설비투자와 좋은 원자재 선택에 많은 노력을 하고 있다. 또한 미세하게 설계된 반도체 회로가 정밀하게 형성되도록 공정의 제어와 관리에 집중하고 있다. 특히 공정 제어는 품질 높은 제품 생산과 수율 향상에 중요한 역할을 한다(Boning *et al.*, 1995).

최근 반도체 제품은 초소형으로 진보되고 있다. 초소형 제품을 위해 공정 또한 초미세 공정으로 변하고 있다. 초미세 공

본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수 연구실지원사업의 연구결과입니다.

*연락처 : 고효현 박사과정, 136-701 서울시 성북구 안암동 고려대학교 산업시스템정보공학과, Fax : 02-929-5888,

E-mail : swish17@korea.ac.kr

2007년 08월 접수, 2회 수정 후 2007년 11월 게재확정.

정을 진행하기 위해서는 기존에 사용하는 제어만으로는 수율 달성이 힘들어지고 있다. 따라서 반도체 회사의 경쟁력 향상과 수율 달성을 위해 진보된 공정제어가 필요하게 되었다.

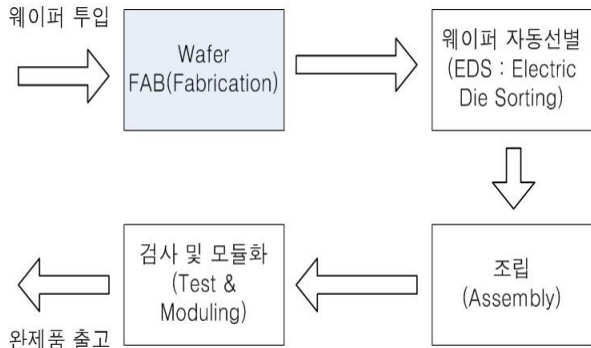


Figure 1. Flow Chart of Semiconductor Manufacturing

반도체 제조 공정은 <Figure 1>처럼 웨이퍼 FAB(Fabrication) 공정, 웨이퍼 선별 공정, 조립 공정, 그리고 검사 및 모듈화 공정으로 나눌 수 있다. 이 중 FAB공정은 웨이퍼 위에 반도체 회로를 생성하는 과정으로 반도체 공정 중에서 가장 중요하고 복잡하면서도 긴 시간을 요구하는 공정이다.

FAB에서의 공정흐름은 <Figure 2>와 같이 진행된다. 작업은 각 공정에 놓여있는 기계에서 작업되며 단방향으로 이동된다. 반도체는 여러 개의 층을 적층 시켜서 제품을 만들게 된다. 반도체 제품을 만들 때 각층을 레이어(Layer)라 한다. FAB은 하나 이상의 레이어를 순차적으로 가공하는 반복공정으로 되어 있다. 제품에 따라 차이가 있지만 메모리 반도체는 제품을 만들기 위하여 40~50번의 반복적인 가공흐름을 가진다. 각 반복 흐름에는 포토공정이 필수적으로 포함된다. 포토공정은 웨이퍼 위에 설계된 회로 패턴을 찍는 작업으로 반도체 회로를 형성하는 기초 공정이다. 반도체는 회로 형성의 정확성에 따라 품질이 결정된다. 반도체 품질 향상을 위해서는 포토공정에서 정밀한 제어가 필수적이다(Yang et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 반도체 포토공정을 대상으로 품질향상에 필요한 효율적인 제어방법을 제안한다.

포토공정은 감광액 도포, 노광(Exposure), 현상(Development)을 통해 웨이퍼 위에 각 레이어의 회로를 그리게 된다. 포토공정에서 회로를 형성할 때 제품의 품질을 평가하는 방법은 CD(Critical Dimension)와 오버레이(Overlay)가 있다. CD는 형성

된 패턴에서 중요 부분의 선폭을 측정하는 것이고 오버레이는 이미 구성된 이전 레이어와 현재 작업된 레이어 간의 어긋남 정도를 측정하는 것이다. CD는 일반적으로 광원 크기를 패턴에 맞게 일정하게 유지하여 선폭의 크기를 제어한다. 그러나 오버레이는 레이어 간의 어긋남 정도에 따라 수시로 보정하면서 작업한다. 반도체의 품질 향상을 위해서는 패턴의 선폭도 중요하지만 레이어를 적층시킬 때 정확히 쌓는 것이 더욱 중요하다. 만약 레이어를 적층시킬 때 레이어가 어긋나게 적층되면 품질 저하 및 불량 발생을 유발한다. 따라서 좋은 품질의 제품을 만들기 위해서는 정확한 오버레이 보정 값을 제시하여 정밀하게 레이어를 쌓아야 한다(Bode, 2004).

공정에는 방해 요인들이 존재하며 방해 요인들로 인하여 공정의 변화가 발생한다. 공정의 변화는 품질의 저하 및 불량 증가를 야기한다. 따라서 공정 변화에 영향을 주는 방해요인을 정확히 찾아 제어를 수행하여야 한다. 공정에 영향을 주는 방해요인들은 크게 세 종류로 분류할 수 있다. 첫째로 정확하게 작업을 진행하였음에도 자연적으로 발생하는 White noise가 존재한다. White noise는 무작위적인 변화로 예측이 불가능하여 엔지니어가 통제할 수 없다. 두 번째 방해요인은 장비의 마모나 뒤틀림 등으로 시간의 흐름에 따라 일정하게 변하는 Drift이다. Drift는 발생 초기에는 큰 영향을 미치지 않을 수 있으나 대처하지 않을 경우 그 변동량이 누적되어 불량이 급격하게 발생할 수 있다. 마지막으로 외부 환경 등에 의해 공정 상태가 급격히 변하는 Shift가 존재한다. 하지만 포토공정과 같은 초정밀 공정에서는 설비에 대한 관리를 매우 엄격히 하고 있어 Shift가 거의 발생하지 않는다. 또한 Shift가 발생할 경우 공정이상으로 간주하여 원인을 찾아 조치를 한다. 만약 원인을 파악하지 못한 상태에서 제어를 수행할 경우 재발생되는 Shift로 인해 불량 증가를 초래한다. 공정을 중단하는 것이 오히려 손실 비용 감소 측면에서 효과적이다. 따라서 본 연구는 Shift를 제외한 White noise와 Drift가 존재하는 공정 상황을 대상으로 한다.

반도체 공정의 오버레이에 대한 제어는 앞서 언급한 방해요인들로 발생할 오차 정도를 파악하여 회로가 정확히 형성되도록 조정하는 것이다. 오차는 제어를 통해 나타나는 결과값과 목표값과의 차이로 현재 반도체 제조공정은 과거의 데이터를 기반으로 오차를 예측하고 새로운 입력값을 산출하는 방법이 주류를 이루고 있다. 제어방법들의 핵심은 제어가 불가능한 White noise의 영향을 줄이고 Drift로 인한 실제 변화량을 파악하여 공정의 입력값을 조정하는 것이다(Sachs et al., 1995).

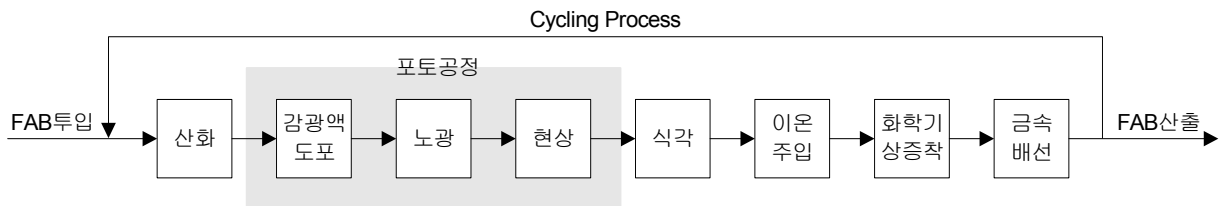


Figure 2. Flow Chart of FAB Process

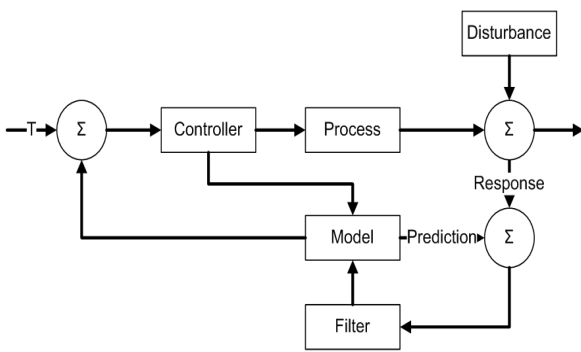


Figure 3. Conventional Process Control

<Figure 3>은 기존 제어 방법의 흐름을 보여 준다. <Figure 3>에서 보듯이 과거 입력값에 대한 결과값을 이용하여 제어를 실시한다. 결과값에는 공정에 존재하는 방해요인들이 포함되어 나타난다. 방해요인 중 White noise는 예측 불가능한 요소이므로 필터(Filter)를 사용하여 영향을 감소시킨다. 필터를 통해 계산된 결과는 공정 모델(Model)을 갱신하여 다음 런의 결과를 예측한다. 갱신된 모델은 과거의 누적된 변화량이 다음 런에서도 동일하다는 것을 가정하는 것이다. 제어는 갱신된 모델에서 예측한 결과를 제어기(Controller)에 반영함으로써 수행하게 된다.

반도체 제조 공정에서는 다양한 제어방법이 연구되어 사용되고 있다. 사용이 쉬우면서 계산이 간단한 MA(Moving Average) 관리도를 이용한 제어방법이 있다(Sachs *et al.*, 1991). MA 제어방법은 과거 n 개의 런(Run, 진행된 Lot 또는 Batch) 동안에 계측된 오차들의 평균을 계산하여 제어를 실시하는 방법이다. MA 제어방법은 n 이 작을 경우 일반적으로 최근 경향을 잘 반영하여 변화 정도를 민감하게 보정한다. 그러나 White noise로 발생한 오차도 민감하게 보정하기 때문에 오차가 커지는 문제가 발생한다(Moyn, 2001).

MA를 확장하여 가중치를 변경한 EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)방법이 있다. EWMA 제어방법은 런마다 목표치와 측정치의 차이를 이동 평균으로 구할 때 지수적으로 가중치를 적용한 방법이다. EWMA 계산은 최근값에 큰 가중치를 주고 과거로 갈수록 지수적으로 감소된 가중치를 적용한다. 또한 EWMA 제어방법은 반도체 제조공정에서 가장 널리 사용되는 제어방법이다(Castillo *et al.*, 1997).

EWMA에 대한 연구로 Box *et al.*(1963)은 IMA(1, 1)의 잡음(noise)이 생기는 공정에서 EWMA에 기반을 둔 제어가 최소의 분산(Variance)을 가지는 것을 보였다. Ingolfsson *et al.*(1993)은 단일 EWMA 통계량에 기반을 둔 반도체 제조 공정 제어를 소개하였다. Box *et al.*(1997)는 EWMA 제어에 대하여 강인성(Robustness)을 강조하였으며 Smith *et al.*(1997)은 안정 상태에서 AMSD(Asymptotic Mean Square Deviation)를 최소화 하는 가중치를 보였다. Butler and Stefani(1994)는 Drift의 크기가 클 때 사용될 수 있는 Double EWMA 방식을 소개하였다.

한편 Castillo *et al.*(1998)은 재귀적 최소 자승 기법을 이용하여 공정의 파라미터를 추정하는 OAQC(Optimizing Adaptive Quality Controller) 기법을 소개하였다. OAQC 방법은 다양한 연산 영역에 대응할 수 있는 장점이 있으나 데이터의 공분산 행렬이 완전계수를 갖지 못할 경우 제어가 불안정해지는 문제가 있다.

그 밖에 Smith *et al.*(1997)은 신경망을 이용한 제어방법을 제시하였다. 신경망 모델은 과거 데이터를 기반으로 현재의 변화량을 예측하여 제어에 활용하는 방법이다. 신경망 모델은 학습정도에 따라 예측수준이 달라지고, 신경망을 사용하기 위해서는 모델을 수립해야 한다. 모델 수립을 위해서는 제어를 수행하는 전 영역에 대한 학습과 결과에 영향을 주는 환경 요인이 필요하다. 그러나 일반적인 공정 환경에서 전 영역에 대한 학습은 불가능하며, 특히 공정 변화를 반영하는 모든 요소들을 찾기란 거의 불가능하다.

이상의 기법 중에서 현재 가장 널리 쓰이는 제어방법은 EWMA 제어방법으로 계산이 간단하면서도 변화 정도를 잘 반영하고 있다. 그러나 모든 방해 요인에 대하여 제어를 실행하기 때문에 White noise가 존재하는 실제 공정 환경에서는 변동폭(Variation)이 증폭되어 오차가 커지는 문제가 있다.

따라서 본 연구는 반도체 포토공정을 대상으로 White noise와 Drift가 존재하는 생산환경 하에서 EWMA 제어방법을 개선하여 정확한 변화량을 검출하는 효과적인 제어방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 문제 개요

포토공정은 회로 패턴을 그리기 위해 웨이퍼에 감광액을 도포한 후 노광공정을 통해 패턴을 생성한다. 노광공정은 강한 빛을 이용하여 웨이퍼에 사진을 찍듯이 패턴을 찍는 공정이다. 패턴을 찍을 때 노광공정은 이전 레이어의 위치를 기준으로 패턴을 정렬한다. 노광공정에서 형성된 패턴은 이후 적층되는 패턴의 형성에 큰 영향을 준다. 따라서 노광공정에서는 정확한 예측과 보정을 통해 좋은 패턴을 만들어야 한다.

노광공정의 설비 제어는 오버레이로 계측되는 X, Y축 이동을 비롯한 여러 모수들에 대하여 실행한다. 설비 제어의 모수는 기계적 메커니즘에 따라 입력값과 결과값이 모두 1:1로 대응되고 다른 모수들과는 독립적이며 각 모수들의 계산은 동일한 제어방법으로 진행된다(Laidler *et al.*, 2003).

방해 요인들이 없는 이상적인 공정이라면 고정된 입력값을 사용하여 목표값에 일치하는 결과값을 얻을 수 있을 것이다. 하지만 일반적인 생산 환경에서는 방해 요인들이 존재하고, 방해 요인들은 오차를 발생시킨다. 발생한 오차에는 White noise와 Drift가 존재한다. 정확한 제어가 이루어지기 위해서는 발생한 오차에서 공정의 변화를 검출하여 제어에 반영해야 한다. 변화의 반응이 늦거나 잘못된 예측을 바탕으로 제어를 수

행할 경우 제품의 품질 저하 및 불량을 야기한다. 현재 반도체 제조의 포토공정에서 가장 널리 사용되는 제어방법은 EWMA 제어방법으로 Sachs *et al.*(1995)이 처음 반도체 제조공정에 도입하였다. <Figure 4>는 EWMA 제어방법의 흐름을 나타낸다(Moreau, 1998).

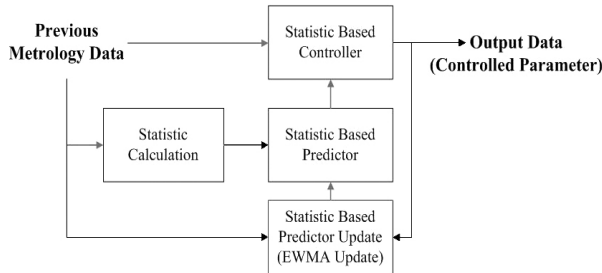


Figure 4. Flow Chart of EWMA Control Logic

$$Y_t = \alpha + \beta U_{t-1} + \epsilon_t \quad (1)$$

$$Y_t = a_{t-1} + b U_{t-1} + \epsilon_t \quad (2)$$

$$a_t = w(Y_t - b U_{t-1}) + (1-w)a_{t-1} \quad (3)$$

$$U_t = \frac{T - a_t}{b} \quad (4)$$

- Y_t : t 시점의 공정 결과값
- U_{t-1} : $t-1$ 시점까지의 변화를 추정한 t 시점의 입력값
- U_t : t 시점까지의 변화를 추정한 $t+1$ 시점의 입력값
- β : 공정 운용 계수
- α : 공정절편계수
- $b = \hat{\beta}$: 공정 운용 계수의 추정치
- a_{t-1} : $t-1$ 시점까지의 변화를 추정한 t 시점의 절편계수
- a_t : t 시점까지의 변화를 추정한 $t+1$ 시점의 절편계수
- ϵ_t : $N(0, \sigma^2)$ 인 자기상관(Autocorrelation)이 없는 방해요인
- w : EWMA의 가중치 계수
- T : 제어의 목표치

<Figure 4>에서 Statistic Calculation은 공정의 결과값이 입력값에 대해서 식 (1)과 같이 선형 관계를 가진다고 가정한다. α 는 공정의 절편 계수이고 β 는 공정 운용 계수로서 설비 고유의 값으로 변하지 않는다고 가정하고 실험계획 등을 통해 추정한다. ϵ_t 는 방해요인 들로서 평균이 0이고 고정 분산을 가지며 자기상관이 없는 정규분포를 따른다고 가정한다. 제어를 수행할 때 α 와 β 대신 $t-1$ 시점의 α 값의 추정치인 a_{t-1} 와 상수 β 의 추정치인 b 를 사용하여 식 (1)을 식 (2)로 대체한 공정 모델 식을 사용한다. a_t 를 구하기 위해 Statistic Based Predictor Update는 제어를 수행하여 나타난 결과값 Y_t 를 측정하고 입력값과의 차이를 계산한다. 계산된 차이를 식 (3)에 대입하여 EWMA 통계량으로 변화된 절편계수의 추정치인 a_t 를 구하게 된다. Statistic Based Predictor는 갱신된 a_t 를 모델 식에 대입하여 공정의 상태

를 예측한다. 식 (2)를 다음 런의 예측 모델로 정리하면 $Y_{t+1} = b U_t + a_t$ 가 된다. Statistic Based Controller에서는 제어를 수행할 때 나타날 결과값 Y_{t+1} 을 제어의 목표치 T 로 대치하여 제어에 필요한 U_t 를 계산하면 식 (4)와 같다. 계산된 U_t 는 다음 런의 제어값으로 사용하고 동일한 방법으로 다음 런을 수행하며 공정이 진행된다.

$$Y_t = a_{t-1} + b U_{t-1} + \delta t + \epsilon_t \quad (5)$$

$$a_t = w_1(Y_t - b U_{t-1}) + (1-w_1)a_{t-1} \quad (6)$$

$$D_t = w_2(Y_t - b U_{t-1} - a_{t-1}) + (1-w_2)D_{t-1} \quad (7)$$

$$U_t = \frac{T - a_t - D_t}{b} \quad (8)$$

Y_t : t 시점의 공정의 결과값

- w_1 : a_t 를 계산하기 위한 EWMA의 가중치 계수
- D_t : t 시점에서 추정된 누적된 Drift 크기
- w_2 : D_t 를 추정하기 위한 가중치 계수
- δ : 시간당 변화하는 Drift의 크기

공정에 White noise와 Drift가 존재한다면 식 (2)는 식 (5)로 표현할 수 있다. 이 때 Drift의 크기가 White noise에 비해 크다면 EWMA의 가중치를 통해 보정될 수 있는 한계를 벗어나게 된다. 이를 해결하기 위해 Butler and Stefani(1994)는 기존 EWMA의 a_t 를 구하는 식 (5)에 추가적으로 식 (6)을 도입하여 Drift의 크기를 추정하고 식 (7)의 제어식에 대입하여 제어를 수행한다. 식 (7)이 추가되어 식 (8)과 같이 제어하는 방법을 Double EWMA라 하고 Drift의 크기가 큰 경우 유용한 제어방법이다. 그러나 반도체 제어 공정, 특히 FAB 공정과 같은 초미세 공정에서는 큰 Drift를 고려해야 하는 경우가 거의 발생하지 않는다. 따라서 본 연구가 대상으로 하는 반도체 포토공정에서는 성능을 발휘하지 못한다. 즉, Drift가 작을 경우 식 (7)에서 w_2 가 0에 근사되어 기존 EWMA와 같게 된다(Moyné *et al.*, 2001).

위에서 살펴본 바와 같이 EWMA 제어방법은 가중치를 이용하여 최근 오차의 반영 비중을 결정한다. 가중치의 크기가 클 경우 최근 런의 오차는 갱신되는 예측 모델에 크게 반영되게 된다. 오차에 포함된 White noise 역시 예측 모델에 크게 반영되어 제어값에 영향을 준다. 따라서 Drift가 존재하지 않거나 충분히 작을 경우 과다 제어가 발생한다. 과다 제어는 White noise에 대한 제어를 실시함으로 오히려 오차가 증폭되는 현상을 의미한다. 과다 제어 현상은 다음과 같은 실험을 통해서 쉽게 확인할 수 있다.

EWMA의 가중치를 각각 0, 0.5로 설정하고 $N(0, 1^2)$ 을 따르는 White noise를 발생시켜 100개의 Seed에 대해 총 1만 런의 EWMA 제어를 수행하였다. 실험에 대한 MSE(Mean Squared Error)와 표준편차를 구하면 <Table 1>과 같다. <Table 1>에서 보듯이 White noise만 존재한다면 제어를 실시하지 않을 경우

의 MSE와 표준편차가 작다. 과다 제어가 발생함으로써 오차와 변동성이 증가하는 것이다. 그러나 공정에 White noise와 함께 Drift가 동시에 존재한다면 <Table 1>과 다른 결과를 보인다.

Table 1. Statistics for White Noise Only Case

	No Control	Control
Mean Squared Error	0.999	1.332
Standard Deviation	0.999	1.154

앞선 실험과 달리 $N(0, 1^2)$ 의 White noise외에 매 런당 1/1000 씩 증가하는 Drift를 포함하는 공정에서 동일한 제어를 수행한 결과를 <Table 2>에 정리하였다.

Table 2. Statistics for White Noise and Drift Case

	No Control	Control
Mean Squared Error	34.477	1.334
Standard Deviation	3.091	1.155

<Table 1>과는 달리 <Table 2>에서는 제어를 하지 않는 경우의 오차와 표준편차가 제어를 수행한 경우에 비해 크게 나타났다.

<Table 2>의 결과를 보면 작은 Drift라도 런 수가 증가함에 따라 공정에 미치는 영향이 점차 누적되어 많은 런이 진행된 후에는 오차가 크게 증가한 것을 볼 수 있었다. 이상의 실험은 White noise로 발생한 오차에 대해 제어를 수행하면 과다 제어로 인해 오차가 증가할 수 있지만 Drift가 존재한다면 제어를 수행해야 한다는 것을 보여주는 것이다.

기존 EWMA 제어방법은 White noise와 Drift를 모두 포함하므로 동일 비율만큼 제어에 반영되게 되고 결국은 과다 제어가 발생된다. 따라서 효율적인 제어를 위해서는 정확한 Drift량을 검출하고 제어를 실시하여 White noise에 대한 영향은 최소화해야 한다. 본 연구는 White noise에 의한 영향을 감소시키며 Drift의 실제 변화량을 효과적으로 검출하여 오차를 최소화하는 제어방법을 제안한다.

이상의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 본 연구는 포토공정의 노광공정을 주 대상으로 한다.
- 오버레이의 모수는 독립적이고 입력과 결과가 1:1로 대응한다.
- 공정의 제어값을 결정하기 위하여 선행 런의 결과를 이용한다.
- 공정에는 White noise와 Drift가 존재하며 입력값과 결과값은 선형 관계를 갖는다.
- 포토공정은 Drift의 크기가 White noise의 크기보다 상대적으로 매우 작다.
- White noise에 대한 제어를 실시할 경우 과다 제어가 발생할

수 있다.

- 기존 EWMA는 Drift와 White noise에 대한 구별이 이루어지지 않는다.
- 효율적인 제어를 위해서는 Drift를 반영하여 제어를 실시하면서도 White noise의 영향은 최소화해야 한다.

2.2 제안 기법

본 연구는 반도체 포토공정에서 정확한 변화를 검출하고 White noise에 대한 영향을 감소시켜 제어를 수행하는 DPEWMA (Dual Damping EWMA) 방법을 제안한다.

본 연구는 과거 입력값에서 정확한 변화량을 검출하기 위해 초기 목표값을 기준으로 결과값 Y_t 에서 White noise의 영향을 경감시키는 첫 번째 EWMA 필터를 적용한다. 또한 입력값에 반영된 White noise를 감소시키기 위해 두 번째 EWMA 필터를 적용하여 t 시점에서의 Drift를 검출하도록 하였다. DPEWMA는 입력값의 누적 변화량과 결과값의 현재 변화량을 이용하여 White noise의 영향을 입력값과 결과값의 영역에서 독립적으로 감소시키는 것이다. 위와 같은 누적된 White noise에 대한 별도의 필터를 적용하여 오차를 감소시킨 제어방법을 Dual Damping이라 한다. 결과값에 첫 번째 EWMA 필터를 적용한 값을 누적 경향지수 C_t 라 정의하고, 입력값에 두 번째 EWMA 필터를 적용한 값을 누적 경향지수 B_t 로 정의한다.

$$Y_t = bU_{t-1} + a + \delta t + \epsilon_t \quad (9)$$

$$U_{t-1} = \frac{T - [a + \delta(t-1) + \sum_{i=1}^{t-1} \epsilon_i]}{b} \quad (10)$$

$$Y_t = \delta + T + \sum_{i=1}^t \epsilon_i \quad (11)$$

$$C_t = \lambda_1 (Y_t - a) + (1 - \lambda_1) C_{t-1} \quad (12)$$

$$B_t = \lambda_2 U_{t-1} + (1 - \lambda_2) B_{t-1} \quad (13)$$

$$\delta t \equiv C_t - bB_t \quad (14)$$

$$U_t = \frac{T - (C_t - bB_t)}{b} \quad (15)$$

δ : Drift의 크기

a : 공정절편계수의 추정치

b : 공정운용계수의 추정치

C_t : 1차 EWMA 필터를 적용한 결과값의 누적 경향지수

B_t : 2차 EWMA 필터를 적용한 입력값의 누적 경향지수

λ_1 : C_t 를 계산하기 위해 사용되는 가중치

λ_2 : B_t 를 계산하기 위해 사용되는 가중치

DPEWMA의 계산 절차를 살펴보면 다음과 같다. 공정에 White noise와 Drift만 존재하고 공정절편계수는 일정하다고 가정하면 식 (9)와 같다. $t-1$ 시점에서 제어를 위한 U_{t-1} 의 값은

식 (10)과 같이 나타나고 식 (9)에 대입하여 풀면 결과값은 식 (11)과 같다. 식 (10)에서 입력 U_{t-1} 는 $t-1$ 시점까지의 Drift와 White noise의 변화를 누적시킨 값이다. 만일 EWMA 제어방법이 누적된 White noise를 효과적으로 제거하고 Drift만을 검출하면 U_{t-1} 는 $[T-a-\delta(t-1)]/b$ 로 근사하게 되고 t 시점에서 Y_t 에 남는 것은 $\delta+\epsilon_t$ 가 된다. 기존 EWMA 제어방법의 경우 입력값 U_{t-1} 를 구하기 위해 이전 런의 오차를 이용한다. 이 때 결과값에 나타난 White noise인 ϵ_t 역시 가중치의 비율만큼 반영되므로 과거 입력값에는 과거 런들의 White noise가 누적되어 있다. 따라서 공정의 오차를 줄이기 위해서는 과거로부터 누적된 White noise를 제거해야 한다.

누적된 White noise를 제거하기 위해 DPEWMA는 초기 모델의 결과값과 입력값에 대한 변화량을 EWMA 방법으로 계산한다. 각각의 EWMA 통계량은 λ_1, λ_2 의 서로 다른 가중치를 적용한다. 식 (9)의 $Y_t - a - \epsilon_t$ 와 U_{t-1} 에 대해 본 제안방법의 C_t, B_t 는 식 (12), 식 (13)을 이용하여 t 시점까지의 통계량을 구한다.

White noise를 고려하지 않으면 식 (9)에서 누적된 Drift는 $\delta t = Y_t - a - bU_{t-1}$ 가 된다. 따라서 2차에 걸친 EWMA 필터를 통해 White noise 성분을 감소시키면 식 (14)를 이용하여 Drift의 크기를 추정할 수 있다. 추정된 δt 를 식 (9)에 대입하여 구한 제어식이 식 (15)이다. 본 연구에서 제안한 DPEWMA 제어방법의 실행과정을 정리하면 다음과 같다.

- Step 1: 실험 계획과 과거 데이터의 회귀분석 등을 통해 공정의 절편과 운용 계수, 적정 가중치를 설정한다.
- Step 2: B_0 와 C_0 를 초기값으로 설정한다.
- Step 3: 공정 결과의 목표값 T 와 초기 제어값 U_0 을 설정한다.
- Step 4: 초기 제어값을 이용하여 제어를 실시한다.
- Step 5: 시점 t 를 1로 설정한다.
- Step 6: 이전 입력값인 U_{t-1} 로 제어하여 관측된 결과값 Y_t 를 받아온다.
- Step 7: 식 (12), 식 (13)을 이용하여 C_t 및 B_t 를 계산한다.
- Step 8: 식 (14)을 이용하여 Drift 크기를 추정한다.
- Step 9: 식 (15)를 이용하여 입력값 U_t 를 구하고 제어를 실시한다.
- Step 10: 시점 t 를 증가시키고 Step 6부터 반복한다.

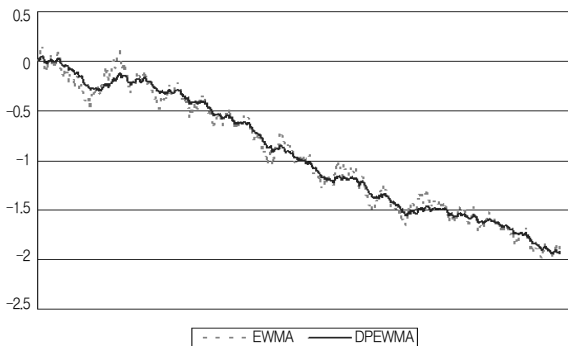


Figure 5. Input of EWMA and DPEWMA

<Figure 5>는 기존 EWMA 제어방법과 DPEWMA로 제어를 할 경우 입력값의 변화를 나타내고 있다. White noise의 영향이 감소되어 Drift를 잘 보정하면서도 국소적인 변동폭이 훨씬 작다. 입력값이 정확한 Drift를 검출하며 변동이 작으면 식 (9)의 입력값에 대한 결과값의 관계를 볼 때 결과값의 오차와 변동성을 감소시키게 된다. 따라서 DPEWMA로 제어를 실시할 경우 본 연구에서 목적하는 오차의 감소 이외에 변동성 또한 감소하게 된다. 자세한 결과는 다음 장에서 실험을 통해 알아보도록 한다.

3. 실험계획 및 결과분석

3.1 실험계획

반도체 포토공정은 설비의 발달로 정밀도가 매우 높다. 따라서 발생하는 Drift도 상대적으로 매우 작다. 본 실험에서는 포토공정의 일반적인 상황을 고려하여 기존에 제시된 EWMA, Double EWMA 제어방법과 본 연구에서 제시한 DPEWMA 제어방법을 비교한다.

공정한 실험을 위하여 $N(0, \sigma^2)$ 을 따르는 White noise와 시간에 따라 일정하게 증가하는 Drift를 생성하였다. 본 연구는 포토공정의 낮은 Drift를 반영하기 위하여 White noise 대비 최소 1/10000 크기의 Drift부터 시작하여 점차 증가, 최대 2/1000 까지 실험을 진행한다. 최대 Drift를 2/1000로 선정한 것은 기존 연구들에서 제시한 Drift 수준이 1/1000인 점을 감안하여 두 배의 구간으로 책정한 것이다. 실험의 진행은 각 알고리즘별 제어 모수인 가중치를 0.01단위로 변화시켜 가면서 최소 MSE의 수준을 비교한다.

$$MSE/\sigma_{W.N} = \frac{\Sigma(Y_t - T)^2}{\text{런 수}} / \sigma_{W.N} \tag{16}$$

- T : 제어의 목표치
- Y_t : 공정의 t 시점에서의 결과값
- $\sigma_{W.N}$: 실험에서 선정한 White noise의 표준편차

식 (16)과 같이 MSE는 오차의 제곱을 평균 낸 값이다. 본 연구에서는 White noise가 Drift에 비해 매우 큰 공정을 가정하므로 MSE를 다시 White noise의 표준편차로 나누어 정규화된 MSE를 구하였다. MSE를 통해 오차의 크기를 비교할 수 있으므로 MSE가 낮은 기법이 정확한 예측을 바탕으로 제어가 이루어진다고 볼 수 있다. 또한 MSE에서 확인할 수 없는 공정의 변동성을 Juran and Gryna(1980)이 제안한 공정능력지수(Cpk)를 이용해서 비교한다. 식 (17)의 공정능력지수는 상위·하위 공정관리 한계에서 공정변동에 대한 규격변동의 산포 정도를 표현하며 산포가 중심에서 벗어난 정도를 표현한 지수이다

공정 능력 지수의 수치는 결과값의 평균이 목표점에 근접하고 변동성이 작으면 높게 나타나고, 목표 점으로부터 결과값의 평균이 멀고 변동성이 크면 작은 값을 가지게 된다(Kane, 1986).

$$C_{pk} = \frac{USL - |\mu|}{3\sigma} \quad (* USL = -LSL) \quad (17)$$

USL : 공정의 상위 스펙 한계선(Upper Specification Limit)

LSL : 공정의 하위 스펙 한계선(Lower Specification Limit)

μ : 오차들의 평균

오차는 목표값과 결과값의 차이인 ($Y_t - T$)이고 Y_t 는 식 (11)을 이용하면 상수와 t 시점의 White noise 및 과거의 잔존하는 White noise의 합으로 표현된다. White noise가 정규분포를 하므로 오차는 근사적으로 정규분포를 따르게 된다. Specification Limit은 제품 설계 시 규격이 미리 정의되는 값이다. 본 실험에서는 각 제어방법에 따른 차이의 경향성을 확인하기 위해 일반 규격인 $6\sigma_{W.N}$ 변동보다 큰 $10\sigma_{W.N}$ 로 설정하여 실험에 사용되는 모든 Drift 조건에서 사용 가능하게 한다. 또한 결과는 비율로서 표현하여 수치적인 의미보다 상대적인 차이를 명확하게 나타내도록 한다.

실험에 사용될 조건을 정리하면 <Table 3>과 같다.

Table 3. Simulation Environment

Experiment List	Experiment Details
Alternatives	EWMA, Double EWMA, DPEWMA
Drift/White noise	1/10000 ~ 2/1000
Run Length	10000
Iteration Counts	100
Decision Parameter(λ_1, λ_2)	Resolution 1/100 from Zero
Assesment Criteria	Mean Squared Error(MSE), Cpk
Specification Limit	$\pm 10\sigma_{W.N}$

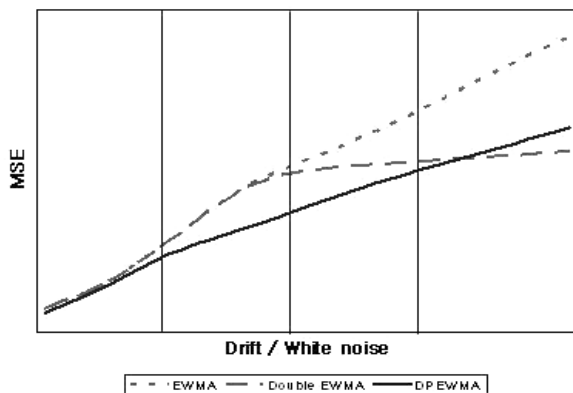


Figure 6. $MSE/\sigma_{W.N}$ for Varying Drift Size

3.2 결과 및 분석

본 연구에서 제안한 DPEWMA 제어방법과 대안 방법들에 대하여 <Table 3>의 실험 조건을 통해 결정모수를 변경하며 실험을 수행하였다. 실험에서는 먼저 최소 MSE와 최대 Cpk를 측정하여 대안들과 비교하였다. 또한 각 대안별 가중치 변화에 따른 MSE의 변화량을 측정하여 가중치를 잘못 선택하였을 경우 발생할 수 있는 위험도를 알아본다. <Table 3>의 실험 조건을 바탕으로 각 Drift 영역에 대한 최소 MSE는 <Figure 6>과 같다.

<Figure 6>에서 보면 각 대안별 δ/σ 구간에 따라 최소 MSE 값을 갖는 구간은 4개로 나눌 수 있다.

첫 번째 구간은 세 대안들이 모두 같은 값을 지니는 구간으로 이때의 δ/σ 비율은 6/10000 이하이다. 이 구간에서 Drift는 너무 작기 때문에 어느 대안을 사용하더라도 White noise와 분리가 잘 이루어지지 않았다.

두 번째 구간은 EWMA 제어방법과 Double EWMA 제어방법은 동일한 결과를 보이지만 DPEWMA 제어방법은 다른 대안들보다 낮은 MSE를 갖는 구간으로 이때의 δ/σ 비율은 1/1000 이하이다. EWMA 제어방법과 Double EWMA 제어방법의 값이 같은 것은 Moyne *et al.*(2001)의 연구에서 언급한 바와 같이 Double EWMA 제어방법이 EWMA를 기본으로 높은 Drift가 존재할 때는 효과적이지만 Drift가 작은 경우 두 제어방법은 동일하다는 것을 증명한다. 그러나 DPEWMA 제어방법은 낮은 Drift하에서 다른 대안들보다 좋은 성능을 보이고 있다. 본 연구의 대상인 포토공정과 같이 White noise에 비해 Drift의 크기가 작은 공정에서는 DPEWMA가 효율적인 제어가 가능하다는 것을 보여준다.

세 번째 구간은 EWMA 제어방법과 Double EWMA 제어방법이 차이가 발생하는 구간으로 이때부터 Double EWMA 제어방법이 EWMA 제어방법보다 우수한 성능을 보이기 시작하지만 DPEWMA 제어방법보다는 높은 MSE값을 보인다. DPEWMA 제어방법의 경우 입력과 결과에 대한 결정모수의 변화에 따라 일정 수준의 높은 Drift구간에서도 효율적인 제어가 가능하여

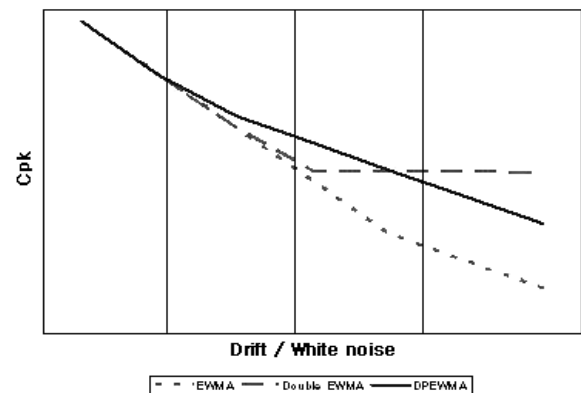


Figure 7. Cpk for Varying Drift Size

MSE가 작게 나타나게 된다.

마지막 구간은 δ/σ 비율이 16/10000이상인 구간으로 Double EWMA 제어방법이 DPEWMA 제어방법보다 낮은 MSE를 보여 준다. 이 결과는 Double EWMA 제어방법이 Drift가 낮을 경우에는 EWMA 제어방법과 차이를 보여 주지 않으나 Drift가 높을 경우 우수한 성능을 보여준다는 기존 연구 결과와 일치한다. 이상에서 살펴본 바와 같이 Drift가 낮을 때에는 DPEWMA 제어방법이, Drift가 높을 때에는 Double EWMA가 제어방법이 가장 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 본 연구의 목적은 포토 공정처럼 낮은 Drift가 존재하는 상황에서 효율적인 제어를 수행하는 것이므로 가장 MSE가 낮은 DPEWMA가 최상의 대안이라고 볼 수 있다. 하지만 MSE만으로는 오차의 변동성에 대한 비교가 불가능하므로 Cpk를 이용하여 오차의 변동성에 대한 비교를 실시하였다.

<Figure 7>은 다양한 Drift영역에서의 각 대안들의 Cpk를 측정된 결과이다. 도표에서는 측정된 결과의 최대 Cpk를 기준으로 Drift 크기에 따라 변하는 Cpk를 비율로 나타내었다. MSE와 달리 Cpk는 그 수치가 높을수록 우수한 성능을 나타낸다는 것을 의미하므로 <Figure 7>은 <Figure 6>과 유사한 결과를 보인다.

δ/σ 비율이 가장 낮은 구간에서는 세 대안 모두 동일한 결과를 보이고 있으며 δ/σ 비율이 증가함에 따라 DPEWMA 제어방법이 가장 좋은 성능을 보인다. Drift가 더욱 증가하게 되면 MSE와 마찬가지로 Double EWMA 제어방법이 DPEWMA 제어방법보다 좋은 결과를 보이게 된다. MSE와 Cpk에 대한 결과에서 MSE와 Cpk 두 값 모두 DPEWMA 제어방법이 Drift가 White noise에 비해 매우 작은 구간에서 효과적인 제어를 수행한다는 것을 알 수 있다.

Table 4. MSE/ $\sigma_{W,N}$ of EWMA Control with w size($\delta/\sigma = 0.002$)

w	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
MSE	1.043	1.018	1.018	1.021	1.026	1.030	1.035	1.040	1.046	1.051

Table 5. MSE/ $\sigma_{W,N}$ of Double EWMA Control with w_1, w_2 size($\delta/\sigma = 0.002$)

$w_2 \backslash w_1$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
0.01	1.011	1.017	1.023	1.028	1.033	1.039	1.044	1.050	1.055	1.061
0.02	1.017	1.024	1.030	1.036	1.042	1.047	1.053	1.059	1.065	1.070
0.03	1.023	1.030	1.037	1.043	1.049	1.055	1.061	1.067	1.073	1.079
0.04	1.028	1.036	1.043	1.050	1.057	1.063	1.069	1.076	1.082	1.088
0.05	1.033	1.042	1.049	1.057	1.064	1.070	1.077	1.083	1.090	1.096
0.06	1.039	1.047	1.055	1.063	1.070	1.077	1.084	1.091	1.098	1.104
0.07	1.044	1.053	1.061	1.069	1.077	1.084	1.091	1.098	1.105	1.112
0.08	1.050	1.059	1.067	1.076	1.083	1.091	1.098	1.106	1.113	1.120
0.09	1.055	1.065	1.073	1.082	1.090	1.098	1.105	1.113	1.120	1.128
0.10	1.061	1.070	1.079	1.088	1.096	1.104	1.112	1.120	1.128	1.135

Table 6. MSE/ $\sigma_{W,N}$ of DPEWMA control with λ_1, λ_2 size($\delta/\sigma = 0.002$)

$\lambda_2 \backslash \lambda_1$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
0.01	1.043	1.045	1.048	1.050	1.053	1.056	1.058	1.061	1.064	1.067
0.02	1.016	1.018	1.021	1.024	1.026	1.029	1.032	1.035	1.038	1.041
0.03	1.013	1.015	1.018	1.021	1.023	1.026	1.029	1.032	1.035	1.038
0.04	1.014	1.016	1.019	1.021	1.024	1.027	1.029	1.032	1.035	1.038
0.05	1.015	1.018	1.020	1.023	1.026	1.028	1.031	1.034	1.037	1.040
0.06	1.018	1.020	1.022	1.025	1.028	1.030	1.033	1.036	1.039	1.042
0.07	1.020	1.022	1.025	1.027	1.030	1.033	1.035	1.038	1.041	1.044
0.08	1.023	1.025	1.027	1.030	1.032	1.035	1.038	1.040	1.043	1.046
0.09	1.025	1.027	1.030	1.032	1.035	1.037	1.040	1.043	1.046	1.049
0.10	1.028	1.030	1.032	1.035	1.037	1.040	1.043	1.045	1.048	1.051

White noise의 영향을 감소시켜 실제 변화량을 추정하여 공정에 반영하는 DPEWMA 제어방법은 비록 Drift의 크기가 클 때에는 변화를 반영하는 속도가 Double EWMA 제어방법에 미치지 못하지만 낮은 Drift에서는 뛰어난 성능을 발휘한다.

위 실험에서 가중치가 최적일 때의 MSE와 Cpk를 통해 각 대안들의 성능을 비교하였으나 이 값은 공정에 발생한 δ/σ 비율에 따른 해당 Drift 크기에 맞는 최적의 가중치를 알고 있을 경우에만 적용할 수 있다. 그러나 실제 공정에서 제어에 수행되는 최적의 결정모수를 미리 알고 있다는 것은 불가능하다. 또한 초기에는 최적의 결정모수라도 공정 환경변화에 따라서 최상의 수준을 유지하지 못하게 될 수도 있다. 결정모수의 크기가 잘못 결정된다면 오차가 더욱 커질 수 있으므로 결정모수 선택에 따른 영향을 검토할 필요가 있다.

본 실험에서는 결정모수의 크기를 순차적으로 변화시키며 MSE와 Cpk에 대한 실험을 수행하였으나 이것은 위에서 밝힌 바와 같이 실제 공정에서는 비현실적이다. 따라서 δ/σ 비율을 고정된 경우 결정모수 선택에 따른 MSE의 변동을 살펴보도록 한다. 앞선 실험을 통해 δ/σ 비율이 고정된 상태에서 도출된 최적의 결정모수를 기준으로 결정모수를 변화시킬 때 MSE를 측정하여 <Table 4>, <Table 5>, <Table 6>에 나타내었다.

<Table 4>, <Table 5>, <Table 6>은 δ/σ 비율이 2/1000일 때 가중치에 따른 각 대안별 MSE값을 구하여 White noise의 편차로 정규화 시킨 결과이다. EWMA 제어방법에서 정규화 된 최소 MSE는 가중치 w 가 0.03일 때 최소값은 1.018이고, Double EWMA 제어방법은 가중치 w_1, w_2 가 0.01, 0.01일 때 최소값은 1.011이다. DPEWMA 제어방법은 λ_1, λ_2 가 0.03, 0.01일 때 1.013이다. 결과를 정리하면 최소값 MSE를 갖는 대안들의 순서는 Double EWMA \rightarrow DPEWMA \rightarrow EWMA가 된다. 하지만 공정에 적용된 결정모수가 최적의 가중치가 아니라면 가장 작은 MSE를 가지는 대안들의 순서는 달라질 수 있다.

Double EWMA 제어방법과 DPEWMA 제어방법의 결정모수 λ_2 가 0.01에서 0.02로 바뀌면 정규화된 MSE는 각각 1.017와 1.015로 변하여 DPEWMA 제어방법이 더 낮은 MSE 값을 가지게 된다. 따라서 δ/σ 비율이 같더라도 가중치의 크기에 따라 가장 낮은 MSE를 보이는 대안은 변할 수 있다.

각 제어방법의 가중치 변화에 따른 위험도를 비교하기 위해 가중치를 순차적으로 변경하여 실험을 통해 정규화된 MSE를 측정하고 평균 변화량을 구하였다. 각 대안별 평균 변화량은 <Table 4>의 EWMA 제어방법의 경우 0.012, <Table 5>의 Double EWMA 제어방법의 경우 0.029, <Table 6>의 DPEWMA 제어방법의 경우 0.011였다. 평균 변화량이 작은 순서는 DPEWMA 제어방법 \rightarrow EWMA 제어방법 \rightarrow Double EWMA 제어방법으로 나타났다. DPEWMA 제어방법이 가장 낮은 평균 변화량을 보이는 것은 가중치가 잘못 선택되더라도 오차 증가의 위험도가 낮다는 것을 의미한다. 따라서 DPEWMA 제어방법은 공정 환경의 변화 또는 부적절한 결정모수 선택에 따른 위험이 적다.

반도체 공정의 경우 새로운 칩셋 개발 등에 힘입어 나노 공

정의 스펙이 더욱 조밀해지고 있다. 미세한 제어를 수행해야 하는 공정에서 결정모수에 따른 변동성이 크다면 실제 공정에서는 많은 불량률 발생하게 되고 생산에 커다란 손실을 가져오게 된다. 따라서 낮은 MSE와 더불어 낮은 위험도를 가진 DPEWMA 제어방법은 초미세 공정의 반도체 포토공정에서 보다 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

4. 결론 및 추후연구

본 연구는 반도체 포토공정을 대상으로 White noise에 대한 영향을 줄이고 실제 변화량을 탐지하여 효율적인 제어를 수행하는 DPEWMA 제어방법을 제안하였다. 기존 EWMA 제어방법은 반도체 제조 시스템에 널리 사용되고 있으나 White noise와 실제 변동성을 분리하지 못하고, 누적된 White noise의 영향으로 오차가 증폭되는 문제가 있었다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 입력과 결과를 분리하였고, 두 번에 걸쳐 White noise를 제거하여 실제 변화량을 추정하고 제어에 반영하였다.

대안들과의 실험을 통해 MSE와 Cpk를 구하고, 이를 비교하여 δ/σ 비율이 낮은 경우에는 DPEWMA 제어방법이 대안들에 비해 성능의 우수함을 보였다. 또한 결정모수 선택에 따른 위험도를 실험하여 대안 방법들보다 안정적으로 동작을 하는 것을 확인하였다. 기존에 가장 널리 사용되고 있는 EWMA 제어방법보다 DPEWMA 제어방법이 오차와 변동성이 작을 뿐 아니라 실제 공정 환경에서도 안정적으로 동작할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 DPEWMA 제어방법으로 기존 EWMA 제어방법을 대신할 경우 진보되고 있는 초미세 나노 공정의 포토공정에서 정확하고 안정적인 제어가 이루어질 것으로 기대한다. 또한 포토공정 외에도 White noise 대비 작은 Drift가 존재하는 생산 공정에서는 제안된 DPEWMA 제어방법이 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 White noise 대비 Drift의 비율이 낮을 때 유용한 DPEWMA 제어방법을 제안하였고, 결정모수 변화에 따라 오차의 변동성과 위험도를 확인하여 보았다. 결정모수 선택은 본 연구에서 제안된 DPEWMA 제어방법 뿐만 아니라 대안 방법들에서도 중요한 과제이다. 특히 공정 중에 White noise와 Drift의 비율이 변할 수 있으므로 최적의 결정모수 선택방법에 대한 추후 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 White noise와 Drift의 두 가지 방해 요인만 고려했으나 포토공정 외에 다른 공정에도 적용하려면 갑작스런 공정변화인 Shift에 대한 제어도 고려해야 하므로 세 가지 방해 요인이 모두 존재할 경우에 대한 추후 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

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*, 12(7) 893-900.
- Boning, D., Moyne, W., Smith, T., Moyne, J., and Hurwitz, A. (1995), Practical Issues in Run Process Control, Proc. *Sixth Annual SEMI/IEEE ASMC*, Boston.
- Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1963), Future Contributions to Adaptive Quality Control : Simultaneous Estimation of Dynamics: Nonzero Costs, *Bulletin of the International Statistical Institute*, 34, 943-974.
- Box, G. E. P. and Luceño, A. (1997), *Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment*, Wiley-Interscience, New York.
- Butler, 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(2), 193-201.
- Del Castillo, E and Hurwitz, A. (1997), Run-to-Run Process Control: Literature Review and Extensions, *Journal of Quality Technology*, 29(2), 184-185.
- Del Castillo, E. and Yeh J. Y. (1998), An Adaptive Run-to-Run Optimizing Controller for Linear and Nonlinear Semiconductor Processes, *IEEE Transactions on Semi-conductor Manufacturing*, 11(2), 285-295.
- Ingolfsson, A. and Sachs, E. (1993), Stability and Sensitivity of an EWMA Controller, *Journal of Quality Technology*, 25, 271-287.
- Juran, J. M. and Gryna, F. M. Jr. (1980), *Quality Planning and Analysis 2nd ed*, McGraw-Hill, New York.
- Kane, V. E. (1986), Process Capability Indices, *Journal of Quality Technology*, 18(1), 41-52.
- Moyne J., Del Castillo E. and Hurwitz, A. M. (2001), *Run-to-Run Control in Semiconductor Manufacturing*, CRC Press LLC, New York.
- Kymal, C. and Patiyasevi, P. (2006), Semiconductor Quality Initiatives : How to Maintain Quality in This Fast-Changing Industry, *Quality Digest*, 26(4), 43-48.
- Laidler, D. W., Leray, P., Crow, D. A. and Robert, K. E. (2003), Knowledge-based APC Methodology for Overlay Control, *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 5044, 32-43.
- Moreau, W. M.(1998), *Semiconductor Lithography : Principles, Practices, and Materials*, Plenum Press, New York.
- Sachs, E., Guo, R., Ha, S. and Hu, A. (1991), Process Control System for VLSI Fabrication, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 4(2), 133-144.
- Sachs, E., Hu, A. and Ingolfsson, A. (1995), Run to Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 8(1), 26-43.
- Smith T. and Boning. D. (1997), Self-tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques, *IEEE Transactions of Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 20(2), 121-132.
- Tseng S. T., Chou R. J. and Lee S. P. (2002), Statistical Design of Double EWMA Controller, *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 18(3), 313-322.
- Yang T., Chen M. C., Su C. T. (2003), Quality Management Practice in Semiconductor Manufacturing Industries-Empirical Studies in Taiwan, *Integrated Manufacturing Systems*, 14(2), 153-159.



김선억

고려대학교 산업시스템정보공학과 학사
현재: 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사과정
관심분야: 생산 및 품질관리, 시스템 최적화



고효현

명지대학교 산업공학과 학사
고려대학교 산업공학과 석사
현재: 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정
관심분야: 생산관리, ERP, e-Business, APC



김지현

고려대학교 산업공학과 학사
고려대학교 산업공학과 석사
University of Michigan 산업공학과 박사
현재: 고려대학교 반도체기술연구소 연구 교수
관심분야: 생산 및 품질 관리 시스템, APC, Data Mining



김성식

고려대학교 기계공학과 학사
고려대학교 산업공학과 석사
Southern Methodist University 산업공학과 석사
Southern Methodist University 산업공학과 박사
현재: 고려대학교 정보경영공학부 교수
관심분야: 생산 및 재고관리 시스템, CIM/ERP/SCM, APC