

Adaptive DeadBand를 이용한 반도체공정 제어

- Research for Adaptive DeadBand Control in Semiconductor Manufacturing -

김준석 *

Kim Jun Seok

고효현 **

Ko Hyo Heon

김성식 **

Kim Sung Shick

Abstract

Overlay parameter control of the semiconductor photolithography process is researched in this paper. Overlay parameters denote the error in superposing the current pattern to the pattern previously created. The reduction of the overlay deviation is one of the key factors in improving the quality of the semiconductor products. The semiconductor process is affected by numerous environment and equipment factors. Through process condition prediction and control, the overlay inaccuracy can be reduced. Generally, three types of process condition change exist; uncontrollable white noise, slowly changing drift, and abrupt condition shift. To effectively control the aforementioned process changes, control scheme using adaptive deadband is proposed. The suggested approach and existing control method are cross evaluated through simulation.

Keywords : Semiconductor, Run-to-run, EWMA, DeadBand

1. 서론

반도체 산업은 21세기 정보화 사회를 선도하는 첨단 핵심부품 산업이며 높은 부가가치로 인하여 많은 기업들이 시장 점유율을 높이기 위해 투자를 계속하고 있다. 특히

* 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사과정

** 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정

*** 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수

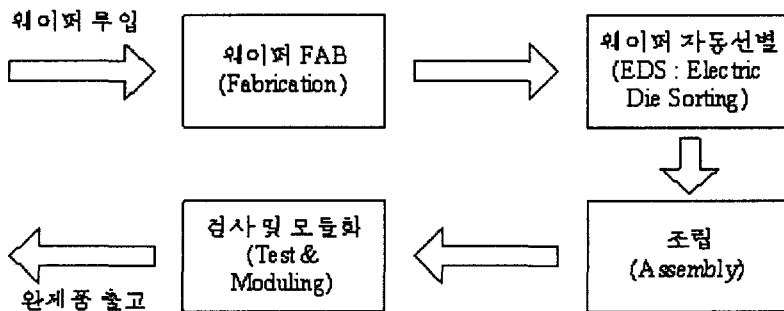
2005년 10월 접수; 2005년 12월 수정본 접수; 2005년 12월 게재확정

세계시장의 단일화 추세로 인하여 반도체 산업은 글로벌 경쟁체제에 놓여 있는 산업 중의 하나이며, 매년 시장의 규모가 팽창하는 고성장 산업이다. 반도체 산업은 고가의 장비들로 구성되어 있어 막대한 투자비용을 필요로 하고, 수급에 따른 가격변동이 극심하여 위험부담이 큰 산업이기도 하다. 과거에는 반도체에 대한 급속한 요구량의 증가로 인하여 수요에 비해 공급이 부족했기 때문에 제품을 양산하는데 초점을 두었다. 최근 반도체를 이용한 고성능 제품의 요구가 급증하고 시장 내의 공급자 증가로 인하여, 반도체 제품의 품질이 점점 중요시되고 있다.

반도체 제품의 품질은 과거에는 단순히 용량으로서 평가되었다. 하지만 최근에는 품질이 용량뿐만 아니라 회로 내에 흐르는 처리 속도와 공정의 미세 정도로 평가되고 있다. 따라서 반도체 제품의 품질을 올리기 위하여 제조회사들은 반도체의 선폭을 줄이고, 고집적회로 설계를 통하여 제품의 성능을 올리고 있다.[1]

반도체 제품의 품질을 향상시키기 위해서 반도체 제조회사들은 현재의 설비보다 정밀하고 정교한 설비투자에 노력하고 있다. 또한 원자재의 선택에도 많은 노력을 하고 있다. 그러나 반도체 제조 공정은 매우 복잡하고 이전 공정의 가공 상태에 따라서 제품의 품질에 많은 영향을 받고 있다. 따라서 우수한 제품을 만들기 위해서는 원자재와 설비 선택도 중요하지만, 미세하게 설계된 반도체 회로가 정확히 형성되도록 하는 것이 무엇보다 중요하다.

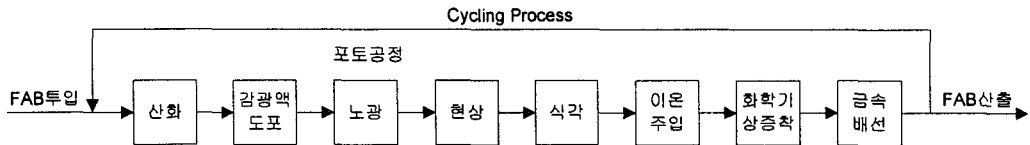
반도체 제조 공정은 <그림 1>에서처럼 웨이퍼 FAB(FABrication) 공정, 웨이퍼 선별 공정, 조립 공정, 검사 및 모듈화 공정으로 나눌 수 있다. 이 중 FAB공정은 웨이퍼 위에 반도체 회로를 새겨 넣는 과정으로 산화막 형성 공정, 포토(Photo ; Photolithography)공정, 식각 공정, 증착 공정 등의 작업을 거치게 된다. 포토 공정은 웨이퍼에 형성된 산화막 위에 설계된 회로 패턴을 찍는 작업으로 반도체 회로를 구성하는 공정이다. 따라서 반도체 품질향상을 위하여 반도체의 회로를 형성하는 핵심 공정인 포토공정에서 진보된 공정제어가 중요하게 되었다.



<그림 1> 반도체 제조공정의 흐름도

FAB에서의 공정흐름은 <그림 2>와 같이 진행된다. 작업은 각 공정에 놓여있는 기계에서 작업되며 단방향(Single Direction)으로 이동된다. 반도체는 여러 개의 층을 적층시켜서 제품을 만들게 된다. 반도체 제품을 만들 때 각층을 레이어(Layer)라고 한다. FAB은 하나의 레이어가 완료되면 다시 돌아와서 다음 레이어를 가공하는 반복공정(Cycling Process)으로 되어있다. 제품에 따라 차이가 있지만 메모리 반도체의 경우 제

품을 만들기 위하여 16~25번의 반복적인 생산 흐름을 가진다. 각 반복 흐름에는 포토공정이 필수적으로 포함되고 포토공정을 제외한 다른 공정들은 반복흐름에 따라 선택적으로 포함된다. 따라서 포토공정은 반도체 제조에서 필수적인 핵심공정이라 할 수 있다.



<그림 2> FAB공정의 흐름도

포토공정은 감광액 도포, 노광(Exposure), 현상(Development)을 통해 웨이퍼(Wafer) 위에 각 레이어의 회로를 그리는 작업이다. 이 중 첫 번째 레이어와 두 번째 레이어에 회로 패턴을 형성하는 작업은 반도체 패턴을 결정하는데 결정적인 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 실제 기저 패턴을 형성하게 되는 두 번째 레이어에서의 포토공정을 연구의 범위로 한다.

포토공정에서 제품의 품질을 평가하는 방법은 CD(Critical Dimension) 와 오버레이(Overlay)가 있다. CD는 형성된 패턴의 중요 부분의 선폭을 측정하는 것이고 오버레이는 이전 레이어와의 어긋남 정도를 측정하는 것이다. CD는 일반적으로 광원의 크기를 패턴에 대하여 일정하게 유지하여 선폭의 크기를 제어하고 있다.[2] 그러나 오버레이는 레이어간의 어긋남 정도를 수시로 보정하면서 작업한다. 반도체의 품질은 패턴의 선폭도 중요하지만 레이어를 적층시킬 때 정확히 쌓는 것이 더 중요하다. 레이어가 어긋나게 적층되면 회로 내에 흐르는 속도와 용량에 차이를 발생시키고 불량 제품을 생산하게 만든다. 따라서 보다 좋은 제품을 만들기 위해서는 적절한 오버레이 보정 값을 제시하여 정확히 레이어를 쌓아 나갈 수 있어야 한다.[3]

포토공정에서는 오버레이 측정과 제어는 일반적으로 10가지 파라미터(Parameter)에 대하여 실행한다. 이러한 10가지 파라미터는 기계적 메커니즘에 따라 모두 1:1로 대응되고 다른 파라미터에 대하여는 독립적이다.[4] 따라서 반도체 제조 설비에 파라미터를 설정할 때 각 파라미터는 독립적으로 계산된다. 이러한 계산은 동일한 제어방법으로 진행된다. 본 연구에서는 이러한 10가지의 파라미터s중 하나인 X축 이동(X-Shift)을 문제의 범위로 한다.

장비는 시간이 흐르면서 마모 등의 요인으로 상태의 변화가 진행되게 된다. 이러한 변화는 장비의 설정 등 여러 파라미터에 변화를 주게 된다. 이와 같이 시간이 흐르면서 서서히 일어나는 변화를 Drift라고 한다. Drift외에 웨이퍼 자체의 품질 또는 외부 환경요인에 따라서 급격한 변화가 발생하기도 한다. 이러한 급격한 변화를 Shift라고 한다. 일반적인 생산 환경은 Drift와 Shift가 동시에 발생한다. 또한 장비자체의 제어 불가능한 방해요인(White noise)도 섞여있다. 따라서 이러한 일반적인 작업환경에서

변화를 예측하여 제어하기란 매우 어렵다.[1]

그러나 기존의 제어 방법은 이러한 파라미터를 계산할 때 단순히 어긋난 정도를 평균을 계산하거나 구간 내에 규정된 값만을 사용하여 보정하였다. 일반적인 생산 환경에서도 동일 공정이 장비의 마모나 열과 같은 환경적인 요인에 영향을 받아 장비가 항상 동일한 상태를 유지하지 못한다. 하지만 이러한 변화를 예측하거나 검출하지 않고 단순히 평균을 내어 제어 한다면 품질의 향상은 기대할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 반도체 제품의 품질향상을 위하여, 핵심 공정인 포토공정을 중심으로 일반적인 생산 환경 하에서 정확한 오버레이를 형성하기 위한 효율적인 제어 방법을 제시한다.

최근 반도체 관련 연구가 많이 발표 되었다. 하지만 생산을 위한 투입정책이나 생산 관리에 관한 연구가 많이 이루어 졌고 설비 제어 관련된 연구는 미비한 상황이다. 기존연구 중에 반도체 제조 라인에서 많이 사용되고 있는 제어방법으로는 MA(Moving Average)관리도에 기반한 제어 방법이 있다. 이는 과거 n 개의 런(Run, 진행된 Lot 또는 Batch)의 평균을 계산하여 그 값에 의하여 오차를 보정해 나가는 방법이다. MA방법은 n 이 작으면 일반적으로 최근 경향을 잘 따르기 때문에 Drift나 Shift에 민감하고 잘 보정해 나간다. 그러나 Drift나 Shift가 발생하지 않고 순간적인 방해요인에 의하여 오차가 발생할 경우 민감하게 보정하기 때문에 그 구간에서의 오차가 커지는 문제가 발생하며, White Noise도 제어하기 때문에 오차를 증폭시키게 된다.

다른 제어방법으로는 EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)에 기반한 제어 방법을 들 수 있다. 이 방법은 런마다 목표치(Target value)와 측정치의 차이를 EWMA로 계산하여 공정을 제어하는 방법이다. EWMA계산은 최근값에 큰 가중치를 주고 과거로 갈수록 지수분포형태로 가중치를 적용하는 방법이다.

EWMA에 대한 연구로 Box and Jenkins[5]는 IMA(1, 1)의 잡음(Noise)이 생기는 공정에서 최소의 분산(Variance)을 가지는 것을 보였으며, Sachs et al.[6]은 단일 EWMA 통계량에 기반을 둔 반도체 제조 공정 제어기(Controller)를 소개하였다. Box and Luceño[7]는 EWMA 제어에 대하여 둔감성(Robustness)을 강조하였다. Smith and Boning[8]은 안정 상태에서 AMSD(Asymptotic Mean Square Deviation)을 최소화 하는 가중치를 보였다. EWMA 제어방법은 MA에 비하여 민감도는 줄어들지만 순간적인 방해요인에 대하여 증가하는 오차는 줄일 수 있다. 그러나 EWMA 방법도 모든 오차에 대하여 제어를 실행하기 때문에 White noise가 존재하는 일반적인 공정 환경에서는 변동폭(Variation)이 증폭되어 목표치와의 차이가 커지는 문제가 있다.

그 밖의 다른 제어방법으로 Deadband를 이용한 제어 방법이 있다. Deadband는 오차의 허용범위를 두어 그 영역 내에 들어오면 이전에 사용했던 값을 유지하는 구간이다. Deadband 제어방법은 영역(Band)를 세분화 하여 목표치와 측정치의 차이가 해당 영역 내에 들어올 경우 각 구간에 미리 구해 놓은 제어값을 사용한다. Deadband제어방법은 MA나 EWMA보다 White noise에 대한 증폭은 줄어들지만 Drift나 Shift가 구간 내에서 발생할 경우에는 오차가 커지는 문제가 있다.

이상의 살펴본 기존연구에서는 본 연구의 문제와 같이 다양한 작업 상황이 반영되지 못했다. 따라서 본 연구에서는 반도체 포토공정의 기저패턴을 형성하는 공정을 대상으

로 일반적인 생산환경 하에서 오버레이의 목표치와 측정치간의 오차를 줄이는 효율적인 제어방법을 제안하고자 한다.

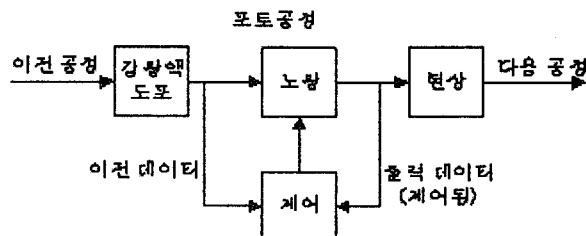
2. 본 론

본 연구는 반도체 제품의 품질향상을 위하여, 핵심 공정인 포토공정 중에서 두 번째 레이어를 중심으로 정확한 오버레이를 형성하기 위한 효율적인 제어 방법을 제시한다.

포토공정에서 회로 패턴을 그리기 위해서는 웨이퍼 위에 사진을 찍을 수 있는 감광액을 도포한다. 감광액은 회전하는 웨이퍼 위에 떨어져서 넓게 퍼지면서 도포된다. 감광액은 두께가 2~5Å인 얇은 막을 형성하게 된다. 회전하는 웨이퍼 위에서 살포된 감광액은 원심력에 의하여 일정한 두께를 가진다. 감광액의 두께는 패턴이 잘 그리는데 영향을 주지만 두 레이어사이의 정렬에는 영향을 주지 않는다.

감광액이 도포된 웨이퍼는 노광공정으로 이동하여 패턴을 그리게 된다. 노광 공정은 강한 빛을 이용하여 회로가 그려진 판에 빛을 관통시켜 웨이퍼 위에 사진을 찍듯이 패턴을 찍는 공정이다. 이전 레이어의 위치를 표시해둔 위치를 기준으로 작업할 패턴을 정렬한다. 이렇게 정렬된 패턴에 강한 빛을 쏘여서 패턴을 찍게 된다. 빛의 강도에 따라 형성되는 패턴의 선폭은 달라질 수 있다. 하지만 일정한 선폭을 유지하기 위하여 빛의 에너지량을 계산하여 동일한 에너지량을 사용한다. 또한 이러한 에너지량은 오버레이에는 영향을 주지 않는다. 노광공정을 지나온 웨이퍼는 그려진 패턴을 분리하는 현상공정을 거친다. 현상공정에서는 현상액을 이용하여 웨이퍼 위에 불필요한 감광액을 제거하여 패턴만 남겨두게 된다.[10]

포토공정에서 오버레이는 노광공정에서 결정된다. <그림 3>은 포토공정에서 오버레이를 제어하기 위한 흐름을 나타낸다. 포토공정의 진행은 웨이퍼에 감광액을 도포하고 노광공정에서 패턴을 찍고 현상공정에서 패턴을 만들게 된다. 이때 정확한 패턴을 그리기 위해서 제어하는 흐름은 노광을 하기 전에 이전 레이어의 가공 데이터를 받고 선행 작업으로부터 오버레이 결과값을 피드백 받아 제어 값을 결정한다.



<그림 3> 포토공정의 제어흐름도

노광공정에서 설비 제어는 10가지 파라미터에 대하여 실행한다. 이러한 10가지 파라미터는 기계적 메커니즘에 따라 모두 1:1로 대응되고 다른 파라미터들과는 독립적으로 제어를 한다.[4] 각 파라미터의 계산은 동일한 제어방법으로 진행된다. 본 연구에서는

이러한 10가지의 파라미터s중 하나인 X축 이동(X-Shift)을 문제의 범위로 한다.

노광공정에서 빛에 의하여 찍힌 패턴은 바꿀 수 없다. 따라서 정확한 예측과 보정을 통하여 좋은 패턴을 만들어야 한다. 패턴의 경향은 기계적인 특성과 제품 설계특성에 의하여 발생한다. 기계적인 특성은 장비의 마모나 뒤틀림과 같은 요인에 의하여 발생하며 제품 설계특성은 레이어를 쌓을 때 회로를 만드는 구역과 회로를 연결하는 구역 등을 패턴으로 만들 때 FAB공정을 거치면서 발생하는 경향성이다.

제품 설계특성은 FAB공정을 진행할 때 거치는 기계의 순서 및 설계자체의 경향이므로 본 연구에서는 동일 기계를 거친 제품을 대상으로 한다.

일반적인 생산 환경에서는 장비의 마모, 노후화에 따라 서서히 발생하는 Drift와 급격한 변화인 Shift가 동시에 존재한다. 이러한 장비 상태의 변화를 예측하기란 매우 힘들다. 또한 기존의 제어 방법들은 이러한 변화 예측이 빠르지 못하고 많은 오차를 발생시켜 제품의 품질 및 불량률의 발생을 야기하였다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 생산 환경 하에서 빠른 변화 예측을 수행하고 정확한 파라미터를 제시하는 효율적인 제어방법을 제안한다.

오버레이는 현재 진행하려는 런이 공정에서 목표치와의 차이를 계측하여 나타낸다. 예로, 이전 레이어와 현재 레이어가 X축으로 벗어난 차이가 X축 이동 오차이다. 이러한 오차가 경향이 있다면 이러한 경향을 예측하여 새로 보정된 값을 장비에 반영해야 한다. 이러한 예측과 파라미터 보정이 잘 된다면 오차는 줄어들고 좋은 품질의 반도체를 생산하게 된다.

이상의 내용과 가정을 정리하면 다음과 같다.

1. 본 연구는 반도체 포토공정의 노광공정 설비를 문제의 범위로 한다.
2. 포토공정의 여러 레이어중 두 번째 기본패턴 레이어를 대상으로 한다.
3. CD에 영향을 주는 에너지는 오버레이에 영향이 없다.
4. 오버레이 파라미터는 서로 독립적이다.
5. 오버레이의 여러 파라미터중 X축 이동오차를 제어대상으로 한다.
6. 현재 파라미터를 계산하기 위하여 선행 작업의 결과를 피드백 받는다.
7. 여러가지 변화가 존재하는 일반적인 생산 환경을 반영한다.
8. 오버레이 결과는 목표치와 관측치와의 차이이다.

이상의 문제에서 본 연구는 일반적인 생산 환경 하에서 빠르게 변화를 예측하고 정확한 파라미터를 제공하는 효율적인 제어방법을 제안한다. 제어방법의 목적은 오버레이의 MSE(Mean Square Error)를 최소화 하는 것이다.

2.1 Adaptive Deadband를 이용한 제어 방법

본 연구에서 제안하는 공정제어 방법은 Adaptive Deadband Control(이하 ADC)이다. ADC는 Drift와 Shift의 변화에 빠르게 대응하면서 White noise의 증폭을 방지하여 효

올직한 제어를 수행하는 방법이다.

ADC는 두 가지 경우에 대하여 제어할 수 있게 개선되어있다. 첫째는 White noise에 대한 증폭을 방지하기 위하여 Deadband 방법을 개선한 것이다. 기존의 Deadband는 넓은 구간에 대하여 둔감성(Robustness)을 가지고 White noise에 대한 증폭을 방지하였다. 하지만 ADC는 Deadband를 동적으로 움직여 가면서 White noise와 공정 변화를 제어하게 된다. 둘째로 Drift와 Shift를 빠르게 검출하여 제어에 활용하도록 개선한 것이다. ADC 방법은 기존의 EWMA 제어 방법을 개선하여 공정 변화에 대한 반응을 증가시켰다.

본 연구에서는 Drift와 Shift 및 White noise의 공정 변화를 검출하기 위하여 관리도를 사용한다. 관리도는 사용되는 용도에 따라 다양하게 존재한다. 일반적으로 관리도는 발생된 결과에 대하여 가중치를 적용하는 방법에 따라 달라진다. 하지만 본 연구의 문제 상황이 다양한 변화를 빠르게 검출 하여야 하므로 최근의 결과에 많은 가중치를 적용하여야 한다. 또한 미세한 변화에는 과거의 정보를 유지해야한다. 따라서 본 연구에서는 EWMA관리도를 이용하여 두 가지의 문제를 모두 해결할 수 있게 하였다.

기본적인 EWMA 관리도는 현재의 측정치를 고려한 1단계 예측 회귀 모형으로 구성되어있다. EWMA의 통계량은 최근의 정보에 큰 가중치를 주고 과거의 정보일수록 가중치가 감소하게 된다. 기본적인 EWMA모형은 현재 예측된 값에 측정된 오차의 W 배를 한 형태로 식1과 같이 표현된다.

Z_t 는 t 시점에서 예측한 EWMA통계량이고, W 는 가중치($0 < W < 1$), Y_t 는 t 시점에서의 출력값이다. T 는 현재 작업이 목표하는 값이다. Y_t 의 분산이 σ^2 이고, 서로 독립일때, Z_t 의 분산은 식2와 같고 t 가 증가하게 되면 식3처럼 수렴하게 된다. 따라서 EWMA관리도의 $g\sigma$ 관리한계선은 식4과 같이 구할 수 있다.[11]

$$Z_t = W(Y_t - T) + (1 - W)Z_{t-1} \quad (1)$$

$$V(Z_t) = \frac{W}{2 - W} [1 - (1 - W)^{2t}] \sigma^2 \quad (2)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V[Z_t] = \frac{W}{2 - W} \sigma^2 \quad (3)$$

$$CL = \mu \pm g\sigma \sqrt{\frac{W}{2 - W}} \quad (4)$$

ADC는 EWMA 관리도를 통하여 변화를 탐지하고 변화가 발생할 경우 빠르게 변화에 대처하도록 제어하는 것이다. 따라서 기본적인 EWMA 관리도에 각 변화를 탐지할 수 있는 가중치(W)와 관리한계선의 크기(g)가 중요하다. 즉, 공정에서 실제로 변화가 발생하였을 경우 관리도가 민감하게 감지할 수 있어야하며, 일시적인 현상이나 계측의 오류 등으로 인한 변화 감지(이하 false alarm)는 하지 않아야 한다.

Shewhart관리도는 큰 변화에는 민감하게 반응하지만, 일시적인 이상 변화에도 민감하게 반응하기 때문에 false alarm을 발생시켜 오차를 증가시키게 된다.[8] 따라서 Shewhart관리도와 같은 민감도를 가지면서 false alarm은 적게 발생시키는 가중치와 관리한계선의 크기를 정하는 것이 필요하다.

Lucas, J. M., Saccucci, M. S.[12]은 EWMA관리도의 가중치와 관리한계선에 따른 ARL(Average Run Length)의 크기를 Markovian 근사(Approximation)에 의하여 계산하였다. <표 1>에서 0σ Shift의 부분은 false alarm을 하게 되는 ARL을 나타내고 있다. 즉, EWMA관리도가 Shewhart관리도에 비해 false alarm을 적게 발생시키는 것을 알 수 있다. $1\sigma\sim 4\sigma$ Shift가 발생하는 경우에 Shewhart와 비슷한 민감도로 변화를 감지하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 <표 2>에 나온 $W_l=0.6$, $W_m=0.33$ 과 관리한계선의 크기 $g_l=3.285$, $g_m=3.25$ 를 성능평가에 사용하였다. 또한 $W_d=0.13$, $g_d=3.113$ 을 사용하였다.

<표 1> Shewhart관리도와 EWMA관리도의 ARL

| Shift | Shewhart관리도 | EWMA Large | EWMA Medium |
|-----------|--------------|--------------------|-------------------|
| | $W=1$ | $W_l=0.6$ | $W_m=0.33$ |
| | $CL=3\sigma$ | $CL=3.285\sigma_l$ | $CL=3.25\sigma_m$ |
| 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 |

본 연구에서 오버레이 결과와 각 파라미터는 1:1로 대응하고 있다. 또한 서로 독립적이다. 본 문제를 입력변수와 출력변수의 선형모델로 표현하다면 식5와 같이 나타낼 수 있다. U_t 는 런 t의 끝 시점(런 t+1의 시작 시점)에서의 입력 변수, Y_t 는 런 t지점에서 관측되는 출력변수이며 $\{\epsilon_t\}$ 는 White noise로 평균(Mean) 0, 상수 분산(Variance)을 가지고, 자기 상관관계(Autocorrelated)를 갖지 않는 분포를 한다. α 는 절편(Bias)이고 β 는 공정식의 기울기(Gain)를 의미한다.

식5의 파라미터s를 실제로 알 수 없기 때문에 표본자료(Sample data)를 통한 DOE(Design of Expermint)로 α , β 의 추정치 a , b 를 구하고 식6을 이용해 제어값을 결정하게 된다. T 는 목표치를 나타내며 최소 평균 제곱 오차(Minimum Mean Square Error)를 구하는 제어값 U_t 는 식7과 같이 구할 수 있다.

$$Y_t = a + \beta U_{t-1} + \epsilon_t \tag{5}$$

$$\widehat{Y}_t = a_{t-1} + b U_{t-1} \quad (a_0 = a) \tag{6}$$

$$U_t = \frac{T-a}{b} \tag{7}$$

기존의 Deadband 제어 방법은 각 구간을 설정하고 해당 구간에 대한 대표값을 사용하는 방법이다. 공정에서 계측하는 출력값이 해당 구간에 진입하면 구간의 대표값은 공정을 진행하기 위한 파라미터가 된다. 하지만 ADC는 오차의 관리도를 두고 Deadband를 설정하여 통계량이 Band를 벗어나게 되는 경우 파라미터를 계산하여 공정을 진행한다.

현재의 공정이 DeadBand 영역에 존재하는지 판단하기 위하여 오버레이 결과를 이용하여 예측한 값과 실제 발생량의 오차를 식8과 같이 계산한다. 이렇게 계산된 오차는 DeadBand 판단을 위한 EWMA 관리도에 식9와 같이 계산되고 표현된다. DeadBand 구간은 DOE를 통하여 통계적으로 계산된 분산과 Band 영역을 지정하는 결정계수로써 EWMA 관리 한계선을 만든다. 이렇게 계산된 EWMA 관리 한계선을 기준으로 파라미터의 보정 여부를 판단한다.

공정 진행중에 EWMA통계량이 관리한계선을 벗어나게 되면 보정할 양(a_t)을 식12와 같이 결정하고 제어값 U_t 를 구하게 된다. 예를 들어, Larget Shift가 감지가 되었다면 제어값에 대한 보정량 $a_t = E_{lt}$ 가 되고 제어값은 식13과 같이 결정된다.

$$e_t = Y_t - \widehat{Y}_t \tag{8}$$

$$E_{dt} = W_d e_t + (1 - W_d) E_{dt-1} \quad (CL_d = \pm g_d \sigma_d) \tag{9}$$

$$E_{lt} = W_l e_t + (1 - W_l) E_{lt-1} \quad (CL_m = \pm g_m \sigma_m) \tag{10}$$

$$E_{mt} = W_m e_t + (1 - W_m) E_{mt-1} \quad (CL_l = \pm g_l \sigma_l) \tag{11}$$

$$a_t = \text{Select}(E_{lt}, E_{mt}, E_{dt}) \tag{12}$$

$$U_t = \frac{T-a_t}{b} \tag{13}$$

e_t : 잔차(Residual)

E_{dt}, E_{mt}, E_{lt} : Deadband, Medium Shift, Larget Shift의 EWMA통계량

W_d, W_m, W_l : Deadband, Medium Shift, Larget Shift의 가중치

CL_d : Deadband의 $g_d \sigma_d$ 관리한계선

CL_m : Medium Shift의 $g_m \sigma_m$ 관리한계선

CL_l : Large Shift의 $g_l \sigma_l$ 관리한계선

이상에서 알아본 ADC방법의 절차를 다음과 같이 정리하였고 제어 순서도를 <그림 4>에 나타내었다.

Step 1: 표본자료(Sample data)를 통한 DOE진행으로 모수 추정 및 관리도 초기화

Step 2: $t=1$ 로 설정

Step 3: 출력값 예측(\widehat{Y}_t) 및 제어값(U_{t-1}) 계산

Step 4: 제어값(U_{t-1}) 투입 후 출력값(Y_t) 측정

Step 5: 잔차($e_t = Y_t - \widehat{Y}_t$) 계산

Step 6: Target Shift에 대한 EWMA통계량(E_{ll}) 계산

Step 7: If, $|E_{ll}| > g_l \sigma_l$ 일 경우 Step 10으로 이동Otherwise, Step 12로 이동

Step 8: If, $|E_{mt}| > g_m \sigma_m$ 일 경우 Step 10으로 이동Otherwise, Step 12로 이동

Step 9: If, $|E_{dt}| > g_d \sigma_d$ 일 경우 Step 10으로 이동Otherwise, Step 12로 이동

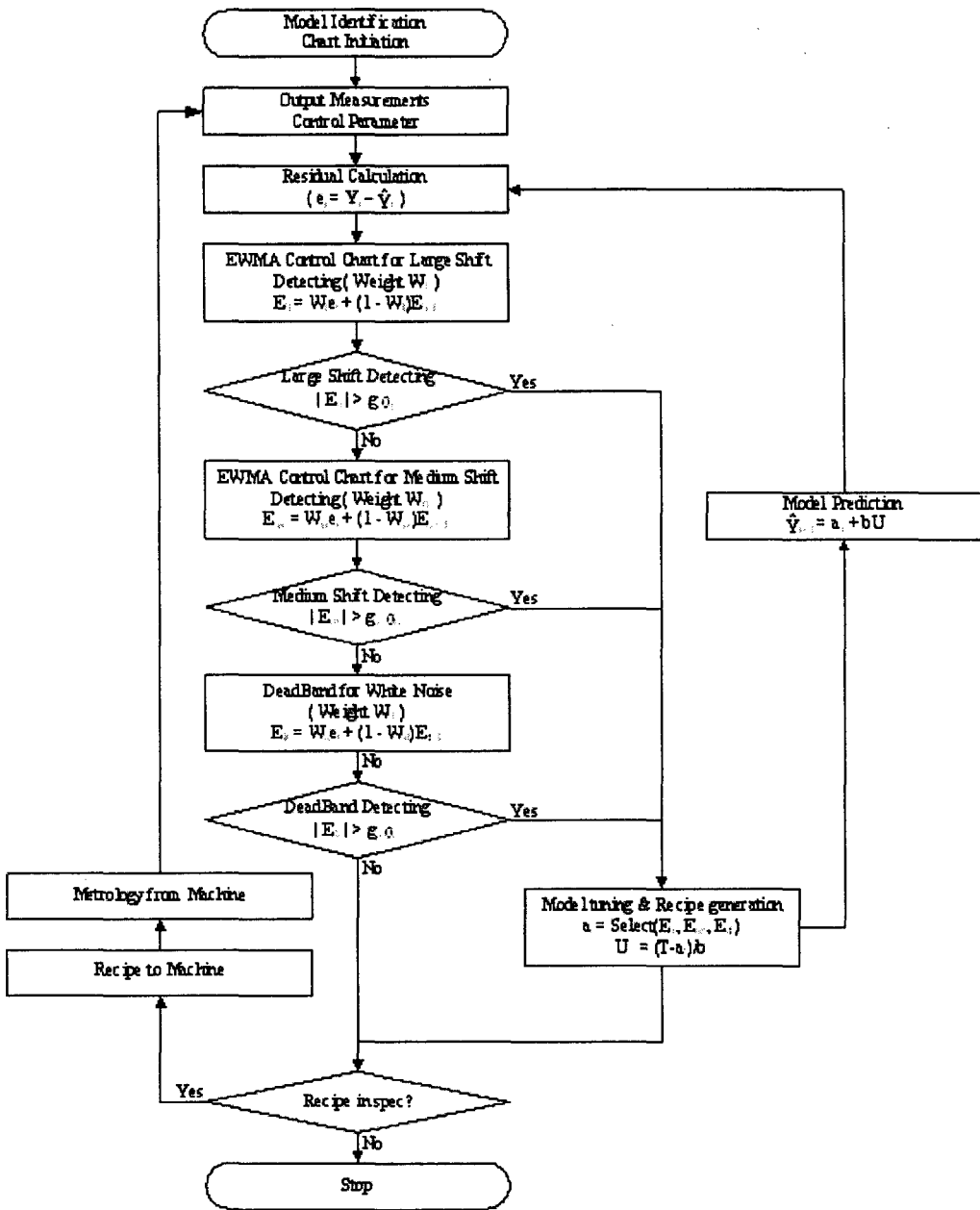
Step 10: $E_t = \text{Select}(E_{ll}, E_{mt}, E_{dt})$ 계산 후 출력값 예측(\widehat{Y}_t) 및 제어값

$$U_t = \frac{T - E_t}{b} \text{ 계산}$$

Step 11: If U_t 가 공정 규정치(Specification)를 벗어나게 되면 Step 14로 이동

Step 12: $t=t+1$ 로 설정 후 Step 4로 이동

Step 13: 제어 종료



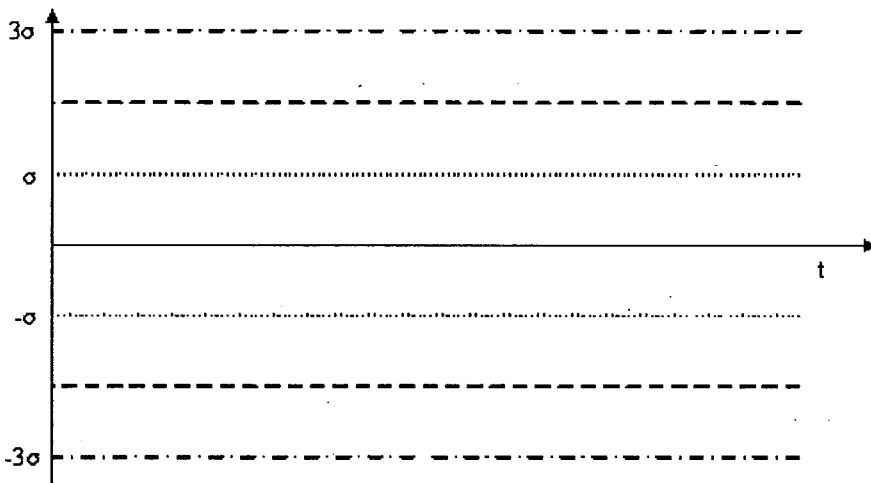
<그림 4> Adaptive Deadband를 이용한 제어 흐름도

4. 실험 및 성능평가

4.1 대안

4.1.1 Deadband를 이용한 구간제어 방법

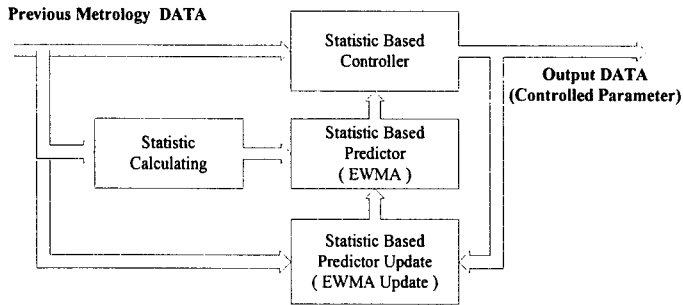
Deadband를 이용한 구간제어 방법은 출력변수가 움직일 수 있는 구간을 세분화한 후, 해당 구간에서의 제어값, 즉 입력변수의 값을 정하여 그 구간에 출력변수의 값이 측정될 경우 해당 입력변수 값을 사용해 제어하는 방법이다. <그림 5>와 같이 $(3\sigma, -\sigma)$, $(-\sigma, \sigma)$, $(\sigma, 3\sigma)$ 의 세 구간으로 나누고 각 구간별로 제어값을 정한다. 공정이 진행되면서 출력값이 각 구간에 진입하게 되면 정해진 제어값을 통하여 보정하게 된다.



<그림 5> Deadband제어방법의 구간 설정

4.1.2 EWMA에 기반한 제어

EWMA에 기반한 제어방법은 <그림 6>에서와 같은 흐름으로 진행된다. 공정이 진행되기 전에 이전 런의 계측 데이터를 이용해 EWMA통계량을 통하여 예측을 하고 제어값을 결정해 공정에 투입한다. 제어가 끝난 후 계측된 제어값과 이전 런의 데이터를 이용해 EWMA통계량을 수정하는 절차를 거친다.



<그림 6> EWMA에 기반한 제어 흐름도

EWMA에 기반한 제어방법의 모형은 ADC와 마찬가지로 입력변수와 출력변수의 관계가 선형 회귀 모델을 가진다고 가정한다. 따라서, 기본 모형의 식은 식5와 같고 다음과 같이 제어값을 결정하게 된다.

$$\hat{a}_t \equiv a_t = \lambda(Y_t - bU_{t-1}) + (1-\lambda)a_{t-1} \quad (0 < \lambda \leq 1) \tag{14}$$

$$U_t = \frac{T - a_t}{b} \tag{15}$$

a_t 는 식5에서의 a 에 대한 t 시점에서의 추정치이다. 런이 진행되면서 발생하는 ϵ_t 를 보정하기 위하여 식14과 같이 a_t 를 구한다. λ 는 가중치이며, 표본자료 분석을 통하여 0부터 1사이의 임의의 값을 정하게 된다. λ 가 1일 경우 바로 이전 런의 값을 이용하여 제어를 하는 것이고, 0일 경우 제어값을 변경하지 않는다는 것을 알 수 있다. EWMA에 기반한 방법에 의하여 제어를 하게 되면 경향성이 있는 공정을 a_t 가 따라가면서 제어할 수 있게 된다.

4.2 실험조건

본 연구에서 제시한 ADC의 효과를 검증하기 위하여 모의실험을 통해 기존에 제시된 두 가지 대안과의 비교를 실시하였다. 실험의 환경은 기존의 제어 방법과 제안된 방안 모두 동일한 상태에서 실험을 한다. 실제 공정은 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} Y_t &= a + \beta U_{t-1} + \epsilon_t + \delta_t \\ &= 4 + U_{t-1} + \epsilon_t + \delta_t \end{aligned} \tag{16}$$

$$\epsilon_t \sim N(0, \sigma_{\epsilon}^2) \sim N(0, 5^2) \tag{17}$$

$$\delta_t = c\sigma t + \tau_t \tag{18}$$

$$\tau_t = \begin{cases} \tau_{t-1} & \text{with probability } 1-p_s \\ \tau_{t-1} + S & \text{with probability } p_s \end{cases} \tag{19}$$

$$S \sim N(\mu_s, \sigma_s^2) \sim N(\mu_{sm}, \sigma_{sm}^2) \tag{20}$$

서론에서 언급한대로 X축 이동은 X축 제어값과 1:1로 대응되므로 $\beta=1$ 로 하였다. ϵ_t 는 t시점에 발생한 White noise이며 δ_t 는 Drift와 Shift의 합으로 나타났다. c는 한 시점에 발생하는 Drift량이고 τ_t 는 Shift량으로 p의 확률로 S만큼 발생하며 발생량은 식20과 같은 분포를 따른다.

본 연구에서 제안된 방안과 기존 방안의 성능을 비교하기 위해 다음과 같은 정규화된 MSE(Mean Squared Error)를 척도로 사용하였다.

$$MSE/\sigma_{um}^2 = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (Y_t - T)^2 \right\} / \sigma_{um}^2 \tag{21}$$

모의실험의 각 요소들을 <표 3>과 같이 변화시키면서 실험을 진행하였다. 한 시행을 2,000런으로 하여 각 실험 당 50회의 반복수행을 진행하여 대안 방법들을 비교·분석하였다.

<표 2> 실험조건

| 조건 | 실험1 | 실험2 | 실험3 | 실험4 | 실험5 | 실험6 | 실험7 | 실험8 | 실험9 | 실험10 |
|----------------|-----|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| p _s | 0 | 0.005 | 0.005 | 0.05 | 0.05 | 0 | 0.005 | 0.005 | 0.05 | 0.05 |
| μ _s | × | 0 | 3σ | 0 | 3σ | × | 0 | 3σ | 0 | 3σ |

4.1.1절에서 설명한 Deadband를 이용한 제어 방법을 대안1로, 4.1.2절의 EWMA에 기반한 제어 방법을 대안2로 설정하였다.

방해요인이 White noise만 존재하는 실험1의 결과는 <표 4>와 같다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 대안2의 MSE/σ_{um}^2 값이 다른 대안에 비해 증폭되는 것을 알 수 있다.

<표 3> 실험1의 결과

| MSE/σ_{un}^2 | 대안1 | 대안2 | ADC |
|---------------------|--------|--------|--------|
| 실험1 | 1.0497 | 1.6417 | 1.0282 |

<표 5>에서는 실험2와 같이 Shift의 발생빈도와 발생량이 적은 경우 대안1과 대안2의 차이가 크지 않지만 실험 3, 4, 5와 같이 Shift의 발생빈도가 늘어나거나 발생량이 늘어날 경우 오차를 빠르게 줄이지 못해 대안2에 비해 좋지 않은 결과를 도출하는 것을 알 수 있다. ADC의 경우는 두 대안에 비해 확연한 성능차이를 보여준다.

<표 4> 실험2, 3, 4, 5의 결과

| MSE/σ_{un}^2 | 대안1 | 대안2 | ADC |
|---------------------|------------|-----------|-----------|
| 실험2 | 5.0597 | 5.0726 | 3.3561 |
| 실험3 | 299.7902 | 164.8307 | 94.1063 |
| 실험4 | 25.7537 | 18.7378 | 11.8037 |
| 실험5 | 17738.1546 | 8178.5843 | 4624.1686 |

실험6의 결과는 <표 6>와 같다. Drift가 있을 경우에도 ADC의 성능이 좋다는 것을 알 수 있다. 이 실험에서의 특징점은 대안2가 대안1보다 좋지 않게 나온 것이다. 이는 Drift량이 적을 경우 대안2에서 증폭되는 White noise의 양이 대안1에서 발생하는 구간 내의 오차보다 크기 때문에 대안2의 결과가 좋지 않은 것을 알 수 있다.

<표 5> 실험6의 결과

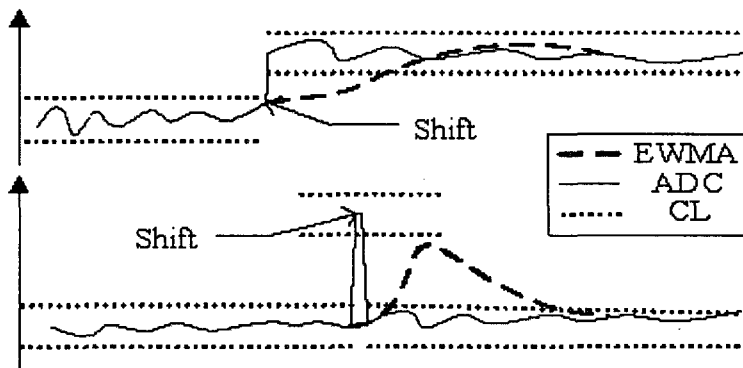
| MSE/σ_{un}^2 | 대안1 | 대안2 | ADC |
|---------------------|--------|---------|--------|
| 실험6 | 1.2281 | 2.01146 | 1.0315 |

실험7, 8, 9, 10 역시 <표 5>에서와 비슷한 경향을 보였다. <표 7>를 살펴보면 Shift의 발생량이 큰 실험의 경우 Deadband를 벗어나는 정도에 따라 각기 다른 EWMA통계량에 의해 계산된 보정치를 계산하여 오차를 줄였다.

<표 6> 실험2, 3, 4, 5의 결과

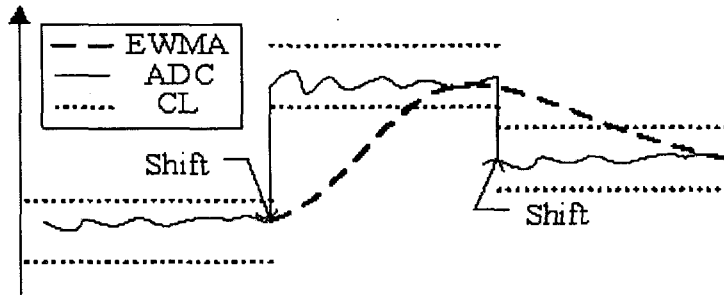
| MSE/σ_{wn}^2 | 대안1 | 대안2 | ADC |
|---------------------|------------|-----------|-----------|
| 실험7 | 5.5415 | 5.2190 | 3.4590 |
| 실험8 | 310.8992 | 171.8397 | 98.0719 |
| 실험9 | 26.8752 | 16.9304 | 11.2179 |
| 실험10 | 19513.6072 | 8973.6940 | 5074.8274 |

<그림 7>은 공정이 진행되면서 Shift가 발생하는 경우의 공정 흐름을 보여주고 있다. Shift가 <그림 7>의 왼쪽 그림처럼 발생하게 되면 ADC는 발생한 Shift를 감지해서 바로 보정을 하여 Deadband가 이동하는 형태를 보여주게 되지만 EWMA방법은 바로 보정을 하지 못하고 런이 진행되면서 서서히 제어값을 변화시키게 된다. 또한 <그림 7>의 오른쪽과 같이 순간적인 변화가 발생하였을 경우에도 ADC는 보정을 바로 진행하지만 EWMA방법의 경우에는 변화 발생시점 이후에 제어값이 증가하였다가 천천히 줄어들게 된다.



<그림 7> Shift가 발생하는 경우의 제어값 변화

<그림 8>의 경우는 Shift가 두 번 발생하는 경우의 공정 흐름이다. ADC는 Shift가 발생하는 시점마다 바로 제어값을 보정하지만 EWMA방법의 경우 점진적인 보정이 이루어져 오차가 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 즉, Shift가 발생하게 되면 EWMA방법은 가중치의 크기에 따라 보정하는 속도와 양이 정해지지만 ADC는 발생한 양만큼 바로 보정하기 때문에 오차가 줄어들게 된다.



<그림 8> Shift가 발생하는 경우의 제어값 변화 2

그러나 EWMA방법의 경우 보정 속도를 빠르게 하기 위하여 가중치를 1로 하게 되면 변화가 발생하는 경우에는 보정이 빠르게 진행되지만 false alarm을 자주 발생시키게 되고 제어를 하게 되어 오차가 더욱 증가하게 된다.

이상에서 분석해 본 바와 같이 Adaptive Deadband를 이용한 제어 방법과 대안들을 비교해 보면 White noise, Drift, Shift에 상관없이 MSE/σ_{wn}^2 이 다른 대안들에 비해 작은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 제어 방법이 대안 방법들보다 우수한 성능을 가진 것으로 평가할 수 있다.

5. 결론 및 추후과제

본 연구는 반도체 FAB공정 내의 필수 공정인 포토공정에서 공정 내의 방해요인들, 즉 White noise, Drift, Shift를 고려해 MSE를 감소시키는 공정 제어방법을 제안하였다. 본 연구에서 제시된 ADC는 Deadband를 설정하고 측정된 출력값이 Deadband를 벗어날 경우 벗어나는 정도에 따라 보정값을 달리하여 빠르게 오차를 줄이는 절차로 구성되었다. Deadband를 벗어날 경우의 감지는 EWMA관리도를 이용하였으며 보다 큰 Shift에도 적절히 대응하기 위하여 Deadband와 EWMA관리도를 적절히 사용하였다. 기존의 방법들과의 객관적인 성능 비교를 위해 정규화된 MSE를 사용하였고 그 결과로 White noise, Drift, Shift에 상관없이 우수한 성능을 가지는 것을 입증하였다.

본 연구에서는 기계적인 메카니즘에 의해 1:1로 대응되는 X축 이동을 대상으로 하였다. 그러나 다수의 제어변수에 의해 영향을 받는 n:1이나 다수의 제어변수와 다수의 출력변수의 관계로 맺어진 n:m으로 대응되는 공정에도 적용할 수 있는 연구가 필요하다.

6. 참고 문헌

[1] Semiconductor Industry Association (<http://www.sematech.org>), "The International Technology Roadmap for Semiconductors", 2001-2004
 [2] Ausschnitt, C. P., Baker, B., Muth, W. A., Postiglione, M., Walentosky, T.,

- "Industrial strength lithography APC", Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering, v.5044, 2003, pp.1-11.
- [3] Bode, C. A., ; Ko, B. S., Edgar, T. F., "Run-to-Run Control and Performance Monitoring of Overlay in Semiconductor Manufacturing", Control engineering practice, v.12 no.7, 2004, pp.893-900.
- [4] Laidler, D. W., Leray, P., Crow, D. A., Roberts, K. E., "Knowledge-based APC methodology for overlay control", Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering, v.5044, 2003, pp.32-43.
- [5] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., "Further Contributions to Adaptive Quality Control: Simultaneous Estimation of Dynamics: Nonzero Costs", Bulletin of the International Statistical Institute, v.34, 1963, pp.943-974.
- [6] E. Sachs, A. Hu, A. Ingolfsson, "Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control", in IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing,
- [7] Box, G. E. P., Luceño, A., "Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment.", John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [8] Smith, T. H., Boning, D. S., "Artificial neural network exponentially weighted moving average control for semiconductor processes", Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, v.15, no.3, 1997, pp.1377-1384
- [9] Del Castillo, E. "Some Properties of EWMA Feedback Quality Adjustment Schemes for Drifting Disturbances", Journal of quality technology, v.33 no.2, 2001, pp.153-166
- [10] Kim, S.-K., Lee, J.-E., Park, S.-W., Yoo, J.-Y., Oh, H.-K, "Simulation benchmarking for the whole resist process", Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering, v.5378, 2004, pp.58-64
- [11] D. C. Montgomery, "Introduction to Statistical Quality Control", 5th Edition, in John Wiley & Sons, 2005
- [12] Lucas, J. M., Saccucci, M. S., "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements", Technometrics, v.32, no.1, 1990, pp.1-29.

저 자 소 개

김 준 석 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 학사, 현재 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사과정, 관심분야는 생산 및 물류관리, APC, e-Business.

고 효 현 : 명지대학교 산업공학과 학사, 고려대학교 산업공학과 석사, 현재 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정, 관심분야는 생산관리, ERP, e-Business, APC

김 성 식 : 고려대학교 기계공학과 학사, 고려대학교 산업공학과 석사, Southern Methodist University 산업공학과 석사, Southern Methodist University 산업공학과 박사, 현재 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수, 관심분야는 생산 및 재고관리 시스템, CIM/ERP/SCM, APC