

클러스터 툴의 예방유지보수 스케줄링 모형

이 현¹ · 박유진² · 허 선^{1*}

¹한양대학교 산업경영공학과 / ²중앙대학교 경영학부

A Preventive Maintenance Scheduling Model of the Cluster Tool

Hyun Lee¹ · You-Jin Park² · Sun Hur¹

¹Department of Industrial and Management Engineering, Hanyang University

²School of Business Administration, Chung-Ang University

This paper considers the preventive maintenance scheduling problem of the cluster tool which is one of the most important manufacturing equipments in the next-generation semiconductor production environment. We define a random process that expresses the successive amount of chemicals accumulating inside the tool. Based on the renewal theory, we find the expected value and probability distribution of the time that the amount of accumulated chemicals exceeds a predetermined level. For a given probability that the accumulated chemicals exceeds the predetermined level we present a method to obtain the number of chamber operations to perform the preventive maintenance of that chamber. In addition, a method to get the preventive maintenance schedule for the whole cluster tool is presented. A numerical example is provided to illustrate our method.

Keyword: semiconductor, 450mm wafer production, cluster tool, preventive maintenance, renewal process

1. 서론

반도체 웨이퍼의 크기는 약 10년을 주기로 지름이 1.5배씩 증대되어 왔다. 현재는 300mm 크기의 웨이퍼의 생산이 주를 이루고 있고 차세대 반도체 웨이퍼인 450mm 웨이퍼 생산체제의 전환 프로그램(Transition Program)이 진행 중에 있다. 세계 반도체 제조업체 컨소시엄인 ISMI(International Semiconductor Manufacturing Initiative)의 주도하에 진행되고 있는 전환 프로그램들은 차세대 450mm 웨이퍼 생산체제에서 웨이퍼 당 제조비용과 사이클 타임(Cycle Time)의 감소를 통해 최종적으로는 생산성을 향상시키는 것을 목표로 하고 있다(Draina, 2006). 이처럼 반도체 웨이퍼의 크기가 증가하면 웨이퍼의 무게도 무거워지므로 작업자가 직접 개입하여 공정간 또는 개별 프로세스간 웨이퍼를 이송하거나 작업을 수행하는 것은 거의 불가능해진다. 따라서 차세대 반도체 공장(Next Generation Fab : NGF)의 가

장 중요한 이슈이자 핵심 요구사항은 완전자동화(Full Automation)된 제조시스템의 구축에 있으며 반도체 공정의 완전자동화를 성공적으로 구현하기 위해 보다 견고한 스케줄링 기법과 정확한 예방유지보수 주기를 예측할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

일반적으로 반도체 웨이퍼 제조라인(Fab)에서의 스케줄링은 생산하는 제품의 갑작스런 수요변동 등과 같은 상황에 따라서 수시로 변경이 이루어진다. 이처럼 제조환경이나 요구사항이 자주 바뀌는 상황에서 보다 안정적으로 웨이퍼를 생산하고 생산비용을 절감하는 것이 가장 중요하므로 장비의 예방유지보수 시점을 최적화하고 장비의 일정계획과 연계되도록 예방유지보수 스케줄링을 수립할 필요가 있다. 반도체 장비는 수많은 부품과 모듈로 구성되어 있어 고장발생을 예측하는 것이 어렵고 고장이 발생했을 때 정확한 고장원인을 파악하고 장비를 수리하는데 매우 긴 시간과 노력을 필요로 하며, 이 기간 동

이 논문은 2011년 한양대학교 공학대학 연구비 지원으로 연구되었음(HY-2011-N).

*연락처 : 허 선 교수, 426-791, 경기도 안산시 상록구 사3동 한양대학교 산업경영공학과,

Fax : 409-2423, E-mail : hursun@hanyang.ac.kr

투고일(2011년 09월 19일), 심사일(1차 : 2011년 10월 19일), 게재확정일(2011년 10월 21일).

안 투입되는 인력, 생산 지체, 납기 지연, 웨이퍼 손실 등으로 인해 발생하는 손실비용이 매우 크다. 그러므로 반도체 장비에 대한 예방유지보수 활동이 반드시 필요하며 이를 위한 예방유지보수 스케줄링은 장비를 구성하는 부품들의 수명과 예방유지보수 인력, 납기, 장비보유 현황 등을 고려하여 결정해야 한다.

과거 반도체 공정에서는 생산량을 극대화하기 위해 여러 장의 웨이퍼를 하나의 Batch로 묶어 작업하는 프로세스가 구성되었으나, 웨이퍼의 크기가 200mm에서 300mm로 증가함에 따라 개별 웨이퍼 단위로 프로세스를 구성하는 단일 웨이퍼 공정(Single Wafer Processing : SWP) 기술이 개발·적용되었다. 단일 웨이퍼 공정에서는 개별 웨이퍼의 저장 및 운송시간을 줄이는 것이 매우 중요하며 이를 위한 장비로서 현재 반도체 웨이퍼 제조라인에서는 개별공정이 이루어지는 여러 개의 챔버(Chamber)들을 하나의 장비에 집약시킨 클러스터 툴(Cluster Tool)과 자동화된 웨이퍼 이송장치가 개발되어 부분적으로 사용되고 있다(Lee, 2008). 현재 ISMI의 450mm 전환 프로그램에서는 450mm 웨이퍼 생산에 적용하기 위한 클러스터 툴의 테스트와 관련 솔루션 개발이 진행 중인데, 특히 차세대 반도체 공정에서는 대부분의 공정에 다양한 형태의 클러스터 툴이 폭넓게 적용될 예정이므로 클러스터 툴은 450mm 웨이퍼 생산체제에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 클러스터 툴의 특성과 구조를 고려하여 클러스터 툴의 예방유지보수 수기를 결정할 수 있는 방법을 개발한다.

2. 클러스터 툴과 관련연구

클러스터 툴은 운송장치(Robot Arm : 로봇)와 높은 정밀도를 가진 청정환경의 플랫폼이 기계적으로 결합되어 있는 장비로서 개별 공정들을 수행하는 다수의 챔버들로 구성되어 있다. <그림 1>은 증착(Deposition) 공정에 필요한 다양한 챔버들로 구성된 클러스터 툴을 나타낸 것이다(Dummler, 2004).

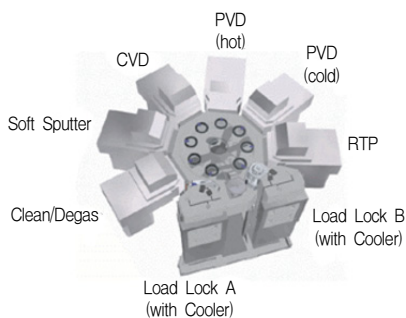


그림 1. 증착공정 클러스터 툴

<그림 1>에서 Load Lock A는 클러스터 툴로 FOUP(Front Opening Unified Pod: 각 공정간의 이동을 위해 웨이퍼를 적재하여 이송하는 밀폐된 카세트)을 로딩하고 각 웨이퍼가 챔버로

진입하기 전에 웨이퍼들을 정렬해 주는 역할을 한다. 증착공정 클러스터 툴에서의 첫 번째 공정인 세정/가스제거(Clean/Degas) 챔버는 세정(Cleaning) 공정을 수행하고 필요에 따라 Soft Sputter 챔버에서 식각(Etching) 공정을 수행한 후, 실제 증착공정은 웨이퍼 레시피(Wafer Recipe)에 따라 화학기상증착(Cheical Vapor Deposition : CVD), 물리기상증착(Physical Vapor Deposition : PVD) 챔버에서 수행된다. 마지막으로 필요에 따라 급속 열처리(Rapid Thermal Processing : RTP) 챔버에서 짧은 시간 내에 웨이퍼의 온도를 원하는 온도에 맞추어 주는 공정을 진행한다. 모든 공정이 완료된 후에 웨이퍼는 Load Lock B로 이송되고 필요한 온도 수준으로 냉각한다.

클러스터 툴은 최근 반도체 웨이퍼 생산공정에서 매우 중요한 역할을 하고 있으며 현재 포토리소그래피(Photolithography), 식각, 화학기상증착, 물리기상증착, 클리닝, 열처리 공정(Thermal Processing) 등 반도체 Fab의 거의 모든 공정에서 사용되고 있다. 클러스터 툴은 다수의 공정이 하나의 장비에 통합되어 있기 때문에 다른 장비에 비해 공정상의 많은 이점을 가지고 있다. 즉, 민감한 공정을 폐쇄된 장비 내에 통합한 이른바 “Mini-Environment”를 구성하여 다양한 환경변수들을 컨트롤하는 것이 용이하므로 수율과 공정능력 면에서 매우 효율적이다. 이처럼 많은 단계의 공정에서 작업자의 간섭을 줄일 수 있으므로 이송 등에 의한 불량률 유발하는 요인들을 제거하여 웨이퍼의 오염가능성을 줄일 수 있는 자동화된 설비이다. 또한 대다수의 공정이 이송장치와 함께 하나의 장비에 통합되어 있기 때문에 작업 공간 대비 생산성을 크게 향상시킬 수 있다. Dummler (2004)는 반도체 산업에서의 클러스터 장비, 클러스터 장비 사용에 따른 이점, 성능 모델, 스케줄링 방법 및 이슈 등을 소개한 바 있다.

일반적인 Job Shop 공정에 해당하는 클러스터 툴은 고장이 발생한 경우 고장의 원인을 파악하고 고장을 수리하기 위해 매우 긴 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 클러스터 툴의 예방유지보수 활동은 현실적으로 장비를 운영하는 장기적인 플래닝(Planning)과 단기적인 스케줄링(Scheduling)에 모두 포함되어야 한다. Yao *et al.*(2004)은 반도체 산업에서의 예방유지보수 플래닝과 스케줄링 문제를 다루고 문제의 높은 복잡도(Complexity)를 해결하기 위해 이계층 계층적 모델링 프레임워크(Two-layer Hierarchical Modeling Framework)를 제안하였다. 프레임워크의 상위 계층은 장비의 확률적 고장 프로세스와 시스템의 수요 패턴을 고려한 장기간의 예방유지보수 플래닝 모델이고 하위 계층은 플래닝 모델의 예방유지보수 정책을 따르고 최적 예방유지보수 스케줄을 포함하는 단기 예방유지보수 스케줄링 모델로서, 하위 계층을 다루는 혼합정수계획법(MIP) 모델을 개발하였다. Jose *et al.*(2010)은 이러한 최적 예방유지보수 스케줄링 알고리즘을 구현하여 예방유지보수 최적화 소프트웨어 툴(Preventive Maintenance Optimization Software Tool : PMOST)을 개발하고 여러 가지 상황에 대한 시뮬레이션을 수행하여 비교 분석하였다.

Aized(2010)는 반도체 제조산업에서 가장 복잡하고 값비싼

공정 시스템 중 하나인 멀티 클러스터 툴을 Colored Petri Net을 이용하여 모델링하고 챔버의 무작위적인 고장발생에 대한 장비의 산출률(Throughput)과 사이클 타임을 분석하였다. Aized의 논문에서는 멀티 클러스터 툴의 무작위적인 고장을 포착하여 나타낼 수 있는 모델링 기법을 소개하고 이러한 무작위적인 고장이 산출률(Throughput)과 사이클 타임에 영향을 미치는 중요한 시스템적 제약임을 보였다.

한편, Yao *et al.*(2005)은 유지보수시간과 수리 시간이 확률적인 신뢰성이 없는 생산-재고 시스템에 대한 예방유지보수와 생산의 최적 혼합 정책을 연구하였다. 이러한 혼합 정책은 예방유지보수의 수행여부에 따른 생산 방법 결정을 다루고 있지만 클러스터 툴의 특성을 고려하지 않은 일반적인 제조환경만을 다루고 있다. Lee and Lee(2006)의 연구에서는 다양한 재진입 웨이퍼 흐름이 존재하는 단일 로봇암 클러스터 툴에 대한 스케줄링 문제를 다루었고, 특히 Petri Net 방법을 이용하여 장비 동작상태를 모델링하고 최적의 장비동작순서와 스케줄, 사이클 타임을 결정하는 혼합정수계획법모형(Mixed Integer Programming Model)을 개발하였다. 이는 제조 스케줄링에 국한된 것으로서, 본 연구에서 다루고자 하는 예방유지보수 주기 결정을 고려하지 않고 있다.

3. 클러스터 툴 예방유지보수 모형

예방유지보수(Preventive Maintenance : PM)는 장비 또는 설비의 시스템적인 검사(Inspection), 검출(Detection)을 통해 고장 발생 이전이나 중요한 결함(Defect)이 나타나기 전에 초기단계에서 고장을 수리하여 안정적인 공정조건(Operating Condition)을 제공하는 것을 의미한다. 여기서 유지보수에는 시험(Test), 측정(Measurement), 수정(Adjustment)과 부품교체(Part Replacement)와 같은 고장발생 예방의 세부적인 수행업무를 포함한다.

일반적으로 장비의 고장과 유지보수는 장비의 효율과 공정의 사이클 타임에 큰 영향을 미친다. 특히 차세대 반도체 공정의 핵심장비인 클러스터 툴은 다수의 챔버로 구성된 통합장비로 하나의 챔버 고장 또는 유지보수가 전체 클러스터 툴의 가용성을 결정할 수 있기 때문에 유지보수 스케줄의 최적화가 매우 중요하다. 클러스터 툴은 챔버의 교체가 어렵고 교체 시간이 매우 길며 설치 기술자 인력의 제약에 크게 의존적이다. 또한 클러스터 툴의 고장발생은 생산성과 장비 효율성에 큰 영향을 미치고 고장수리비용이 매우 높기 때문에 이러한 조건들을 고려한 예방유지보수 스케줄링 모형을 개발할 필요가 있다. 다음 <그림 2>는 반도체 공정 단계를 설명하고 있다.

이처럼 반도체 공정, 특히 웨이퍼 제조단계의 공정들은 클러스터 툴의 각 챔버에서 공정이 수행되며 대부분 화학공정들로 이루어져 있고 고온의 작업환경에서 공정이 이루어진다. 따라서 이들 공정에 해당하는 챔버들은 공정이 반복됨에 따라 열에 의한 손상, 화학품 잔류물과 같은 오염물질 발생 등이 챔버 내에 누적된다.

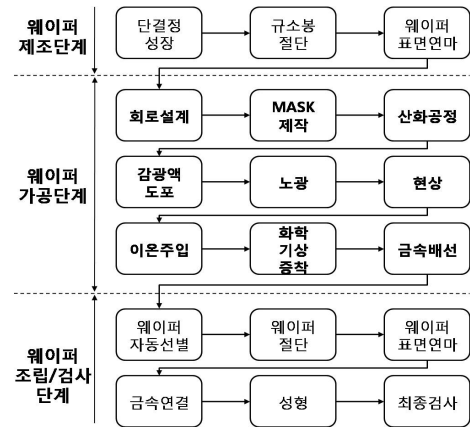


그림 2. 반도체 공정 단계

클러스터 툴은 다수의 챔버로 구성되고 이러한 챔버는 다양한 부품과 센서로 구성되어 있다. 챔버를 구성하는 부품과 센서는 공정이 반복되어 진행됨에 따라 노후하므로 정상적인 동작을 할 수 없거나 불량제품을 생산하게 된다. 클러스터 툴의 챔버 수명은 챔버를 구성하는 각 부품과 센서의 수명에 의해 결정되며 이러한 수명주기는 각 챔버에서 이루어진 공정횟수에 의해 결정된다. 화학공정을 수행하는 챔버에서는 공정을 수행할 때마다 챔버 내에 화학품의 잔류물이 발생하는데 이때 발생하는 오염의 양은 일정하지 않다. 이러한 잔류물의 누적 수준이 허용범위를 벗어나게 되면 챔버에서 생산되는 칩의 품질에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 챔버의 수명은 잔류물 누적 수준이 허용범위에 의해 결정될 수 있으며 수명주기가 된 시점 이전에 챔버의 유지보수 활동을 수행해야 한다.

공정이 진행됨에 따라 화학품의 잔류물들이 챔버 내에 누적되어 이로 인해 이 챔버에서 공정이 이루어지는 웨이퍼에 결함을 야기하는 잔류물의 양을 오염 임계치(Pollution Threshold)라고 하자. 잔류물의 양이 오염 임계치를 초과하기 전에 예방유지보수 활동을 시작해야 하며 예방유지보수 활동 이후에는 오염이 다시 초기상태로 돌아간다. 또한 예방유지보수 활동 이전에 챔버의 고장이 발생할 수 있으며 이러한 고장이 발생한 경우 고장수리를 실시하고 나서도 챔버는 초기상태가 된다. <그림 3>은 챔버 내에서의 오염발생에 대한 예를 설명하고 있다.

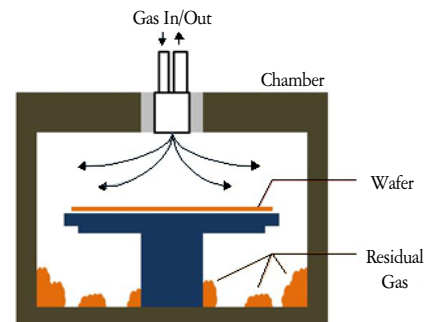


그림 3. 챔버 내 오염의 예시

어떤 한 챔버에서 i 번째 공정 시 발생하는 오염의 양을 서로 독립이며 동일한 확률분포함수 $F(\cdot)$ 를 가지는 i.i.d. 확률변수 X_i 라고 하자. 이들 각 공정에서 축적되는 오염의 양은 클러스터 톨의 센서를 통해 측정이 가능하다. n 번의 공정을 진행할 때까지의 누적된 오염의 양은 $\sum_{i=1}^n X_i$ 가 된다. 오염 누적치 수준의 허용범위인 오염 임계치를 D 라고 하면 오염 임계치를 초과하기 직전까지의 공정횟수는 $\sum_{i=1}^n X_i < D, \sum_{i=1}^{n+1} X_i \geq D$ 의 조건을 만족하는 n 의 값이 된다. 다음과 같이 기호를 정의하자.

N_D : D 를 넘기는 공정 횟수, 즉,

$$N_D = \min \left\{ n+1 : \sum_{i=1}^n X_i < D, \sum_{i=1}^{n+1} X_i \geq D \right\}. \quad (1)$$

따라서 N_D 번의 공정이 이루어지기 전에 공정을 중지하고 예방유지보수 활동에 들어가야 하며, 예방유지를 한 후에는 오염의 양은 다시 0이 된다. 이 때 챔버 내에 누적되는 오염의 양은 X_i 를 재생간격으로 하는 재생과정(Renewal process)으로 모형화할 수 있다. <그림 4>는 이와 같은 과정을 나타내고 있다.

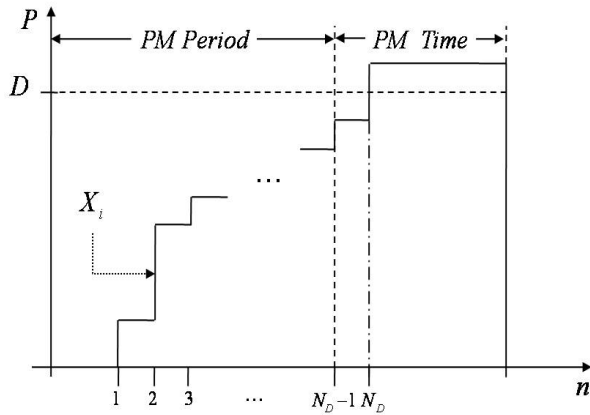


그림 4. 오염의 양 X_i 를 재생간격으로 갖는 재생과정

이제 확률변수 N_D 의 확률분포를 다음과 같이 구한다.

3.1 N_D 의 확률분포

매 공정이 수행될 때 마다 오염의 양이 누적되어 누적된 오염의 총량이 오염 임계치 D 를 넘기는 시점에서의 공정 수 N_D 가 k 일 확률은 다음과 같다. 확률변수 X_i 의 k 차 중합(Convolution)의 분포함수를 $F^{(k)}(\cdot)$ 라고 하자. 즉,

$$F^{(k)}(D) = \Pr(X_1 + X_2 + \dots + X_k \leq D) \quad (2)$$

이때 D 를 넘기는 공정 수 N_D 가 k 일 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pr(N_D = k) &= \Pr(X_1 + X_2 + \dots + X_{k-1} < D, \\ &\quad X_1 + X_2 + \dots + X_{k-1} + X_k \geq D) \\ &= \Pr(X_1 + X_2 + \dots + X_{k-1} \leq D) \\ &\quad - \Pr(X_1 + X_2 + \dots + X_{k-1} + X_k \leq D) \\ &= F^{(k-1)}(D) - F^{(k)}(D), \end{aligned} \quad (3)$$

단, $X_0 = 0$ (a.s.)이므로 $F^{(0)}(D) = \Pr(X_0 \leq D) = 1$ 이다. N_D 의 확률생성함수 PGF(Probability Generating Function) $N_D(z)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_D(z) &= \sum_{k=1}^{\infty} z^k \Pr(N_D = k) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} z^k [F^{(k-1)}(D) - F^{(k)}(D)] \\ &= F^{(0)}(D) - F^{(0)}(D) + zF^{(0)}(D) \\ &\quad + (z-1)zF^{(1)}(D) + (z-1)z^2F^{(2)}(D) + \dots \\ &= 1 + (1-z) \sum_{k=0}^{\infty} z^k F^{(k)}(D). \end{aligned} \quad (4)$$

평균 $E(N_D) = \frac{d}{dz} N_D(z)|_{z=1}$ 는 다음과 같다.

$$E(N_D) = \frac{d}{dz} N_D(z)|_{z=1} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} F^{(k)}(D). \quad (5)$$

한편 $\sum_{k=1}^{\infty} F^{(k)}(D) = M(D)$ 는 1회 공정 시 발생하는 오염의 양 X_k 를 재생간격으로 하는 재생과정 $\{X_k, k \geq 1\}$ 의 재생함수(Renewal function)이며 $M(D) \approx \frac{D}{E(X)} + \frac{1}{2}(C_X^2 - 1)$ 와 같이 근사할 수 있다(Heyman and Sobel, 1982). 단 C_X 는 X_i 의 변동계수이다. 따라서 N_D 의 평균 $E(N_D)$ 의 근사값은 다음과 같다.

$$E(N_D) = 1 + M(D) \approx \frac{D}{E(X)} + \frac{1}{2}(C_X^2 + 1). \quad (6)$$

3.2 예방유지보수를 위한 챔버 공정 횟수의 결정

반도체 공정에서 고장이 발생했을 때 소요되는 비용은 예방유지보수에 소요되는 비용에 비해 매우 크다. 따라서 고장을 예방할 수 있는 예방유지보수 기간은 실제로 고장이 기대되는 공정횟수보다 훨씬 적은 횟수에서 이루어 져야 한다. 이 절에서는 이전 절에서 구한 N_D 의 확률분포를 활용하여, 실제로 예방유지보수 기간을 결정하는 방법을 제시하고자 한다. 즉, 오염의 양의 누적치가 임계치 D 를 넘게 될 확률의 상한값을 정하고 이 상한값에 해당하는 공정수까지를 예방유지보수 기간

으로 정하는 것이다.

대부분의 경우에는 위에서 구한 N_D 의 평균인 $E(N_D)$ 를 누적된 오염의 총량이 오염 임계치 D 를 넘기는 시점으로 보고 이를 기준으로 예방유지보수의 기간을 정하게 된다. 하지만 실제로 고장이 발생하는 시점은 공정횟수가 $E(N_D)$ 에 미치지 않은 때에도 발생할 가능성이 있고 이 경우 예방유지보수에 의한 비용보다 매우 큰 비용이 소요될 수 있으므로 필요에 따라 다양한 지점에서 예방유지보수 시점을 결정할 수 있어야 한다. 예를 들어 백분위수(Percentile)를 사용하여 다음과 같이 예방유지보수 기간인 공정 횟수 k 를 결정할 수 있다. 즉, 주어진 γ 값에 대해 다음의 식에 의해 N_D 의 확률분포의 $100 \times \gamma$ % 백분위수를 구한다.

$$K(\gamma) = \max\{k \mid \Pr(N_D \leq k) \leq \gamma\}. \quad (7)$$

γ 값이 작을수록 예방유지보수 기간은 짧아지고 이에 따른 예방유지보수 비용은 커지지만 고장 발생 가능성은 작아진다고 볼 수 있다.

예를 들어, 다음과 같이 X_i 가 평균이 μ 이고 분산이 σ^2 인 iid 정규분포를 따른다고 가정하자. 즉,

$$\begin{aligned} X_1 &\sim N(\mu, \sigma^2), \\ X_1 + X_2 &\sim N(2\mu, 2\sigma^2), \\ &\dots, \\ \sum_{i=1}^k X_k &\sim N(k\mu, k\sigma^2). \end{aligned}$$

이 경우에는 다음을 만족하는 k 중에서 가장 큰 값을 찾으면 된다.

$$\begin{aligned} \Pr(N_D \leq k) &= \sum_{l=1}^k [F^{(l-1)}(D) - F^{(l)}(D)] \\ &= 1 - F^{(k)}(D) \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{D - k\mu}{\sqrt{k}\sigma}\right) < \gamma, \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적확률분포를 의미한다.

이와 같이 구한 공정 횟수 $K(\gamma)$ 를 이용하여 다음 3)에서의 방법에 의해 예방유지보수 기간을 결정할 수 있다.

3.3 챔버의 예방유지보수 기간 구하기

클러스터 툴을 구성하는 하나의 챔버의 예방유지보수 활동 시행간격은 앞서 구한 N_D 의 분포함수를 이용하여 구할 수 있다. 다음과 같이 기호를 정의하자.

r : 레시피의 종류의 개수

n_i : 레시피 i 를 구성하는 공정 수($i = 1, 2, \dots, r$),

j_i : 레시피 i 에서 챔버 j 를 거치는 공정 수

따라서 반도체 공정에서 수행된 총 공정의 수와 챔버 j 에서 수행된 공정의 비율을 ϕ_j 라고 하면 ϕ_j 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_j = \frac{\sum_{i=1}^r j_i}{\sum_{i=1}^r n_i}. \quad (9)$$

챔버 j 에서 수행되는 공정의 평균 간격은 ϕ_j 의 역수가 되며 따라서 챔버 j 에 대한 예방유지보수 활동의 간격 v_j 는 $K(\gamma)$ 와 ϕ_j 를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$v_j = \frac{K(\gamma)}{\phi_j}. \quad (10)$$

여기서 결정된 공정 횟수는 클러스터 툴 내의 여러 챔버 가운데 하나의 챔버에 대한 것이다. 클러스터 장비는 대부분 폐쇄된 환경을 가진 “mini environment” 장비이기 때문에, 클러스터 장비 전체의 예방유지보수는 가장 짧은 예방보수 주기를 가지는 챔버에 의존할 수 밖에 없다. 따라서 장비 전체에 대한 예방유지보수를 위해서는 각 챔버들의 예방유지보수 기간 가운데 가장 짧은 것에 맞추어 수행하는 것이 바람직하다. 즉, 최종적으로 전체 클러스터장비의 예방유지보수 간격 v 는 식 (11)과 같이 구한다.

$$v = \min(v_1, v_2, \dots) \quad (11)$$

4. 수치 예

매 공정을 마치고 난 후 임의의 챔버(이를 챔버 1이라고 하자)에 쌓이는 오염물질의 양 X_i 는 평균이 $\mu = 0.01$ 이고 표준편차

표 1. γ 에 따른 $K(\gamma)$ 의 변화

γ	$K(\gamma)$
0.1	$K(0.1) \approx 1503$
0.2	$K(0.2) \approx 1657$
0.3	$K(0.3) \approx 1779$
0.4	$K(0.4) \approx 1890$
0.5	$K(0.5) \approx 2000$
0.6	$K(0.6) \approx 2117$
0.7	$K(0.7) \approx 2249$
0.8	$K(0.8) \approx 2413$
0.9	$K(0.9) \approx 2661$

가 $\sigma=0.1$ 인 iid 정규분포를 따른다고 알려져 있다. 오염 임계치 $D=20$ 이 되면 생산되는 웨이퍼에 심각한 영향을 주어 불량 웨이퍼가 생산되므로 이에 미치기 이전에 예방유지보수를 해야 한다. <표 1>은 γ 에 따른 $K(\gamma)$ 의 값 변화를 나타내고 있으며 <그림 5>는 이를 도식화하고 있다.

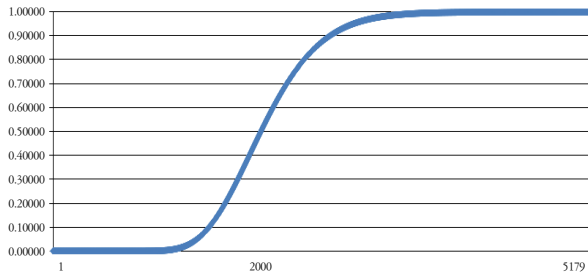


그림 5. γ 에 따른 $K(\gamma)$ 의 변화

예를 들어 $\gamma=0.1$, 즉 10% 백분위수에 해당하는 시점에서 예방유지보수를 하려고 한다면 $K(0.1) = 1,503$ 이므로 챔버 1이 약 1,500회의 공정을 수행한 후에 챔버 1에 대한 예방유지보수를 수행한다. 참고로, 동일한 조건에서 $E(N_D)$ 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$E(N_D) \approx 1 + \frac{D}{E(X)} + \frac{1}{2}(C_X^2 - 1) \quad (12)$$

$$= 1 + \frac{20}{0.01} + \frac{1}{2} \left(\frac{(0.1)^2}{(0.01)^2} - 1 \right) = 2050.5.$$

이를 역으로 산출하면 $E(N_D) \approx K(0.54)$, 즉, 공정 횟수 $E(N_D)$ 는 약 54% 백분위수에 해당한다. 따라서 $E(N_D)$ 를 기준으로 예방유지보수 기간을 하게 되면 그 공정 횟수에 이르기 전에 오염임계치를 초과할 가능성이 절반 이상이 된다.

한편, 생산되는 레시피의 종류가 5가지이고 각각의 레시피의 전체 공정수(n_i)와 챔버 1을 거치는 공정수(j_i)이 <표 2>와 같다고 한다면 예방유지보수 기간 v 을 다음과 같이 구할 수 있다.

표 2. 레시피별 공정수와 챔버 1의 공정수의 예

레시피 구분	전체 공정수(n_i)	챔버 1을 거치는 공정수(j_i)
1번	500	5
2번	450	13
3번	450	17
4번	500	10
5번	600	5
합계	2,500	50

이 경우 $\phi_1 = 0.02$ 가 되며, 다양한 γ 에 따라 챔버 1에 대한 예방유지보수 활동의 간격 v_1 은 <표 3>과 같다.

표 3. $K(\gamma)$ 변화에 따른 v_1

γ	$K(\gamma)$	v_1
0.1	$K(0.1) \approx 1503$	75,150
0.2	$K(0.2) \approx 1657$	82,850
0.3	$K(0.3) \approx 1779$	88,950
0.4	$K(0.4) \approx 1890$	94,500
0.5	$K(0.5) \approx 2000$	100,000

예를 들어 $\gamma=0.1$, 즉 10% 백분위수에 해당하는 시점에서 예방유지보수를 하려고 한다면 $v_1 = 75,150$ 이다. 따라서 챔버 1에 대한 예방유지보수 기간은 챔버 1을 포함하는 클러스터 툴 내의 모든 챔버들의 총 공정수가 75,150회에 이르렀을 때가 된다.

각 챔버 내에 축적되는 오염의 양은 모두 같은 확률분포를 따르지 않을 수 있다. 이와 같은 방법으로 다른 챔버의 예방유지보수 활동 간격을 모두 구하고 최종적으로 이들 중 간격이 가장 짧은 챔버의 유지보수 활동 간격에 맞추어 클러스터장비의 예방유지보수 활동 간격으로 정한다.

5. 결론

차세대 반도체 공정에서는 생산 공정이 완전 자동화되고 개별 웨이퍼의 중요성이 매우 높아짐에 따라 견고한 스케줄링 기법이 필요하다. 더불어 장비의 고장을 예방할 수 있는 계획적인 예방유지보수 활동이 매우 중요하다. 본 연구에서는 차세대 반도체 공정에서 매우 중요한 역할을 하는 클러스터 툴을 소개하고 클러스터 툴의 특성과 구조를 고려하여 주로 화학공정을 담당하는 클러스터 툴의 예방유지보수 주기를 결정할 수 있는 수리모형을 수립하였다. 즉, 재생이론을 사용하여 클러스터 툴의 예방유지보수를 해야 하는 시점을 알 수 있는 공정 수의 확률분포를 구하고 고장비용과 예방유지보수 비용을 고려하여 예방유지보수 기간을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 방법은 반도체 공정뿐만 아니라 일반적인 생산 환경에서 예방유지보수 기간을 결정하는 문제에도 적용이 가능하다. 향후에는 각 챔버별로 다르게 주어지는 예방유지보수 기간을 어떻게 통합하여 전체 클러스터 툴의 예방유지보수 시점을 결정하는가에 대한 연구가 필요하다.

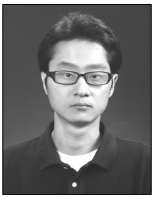
참고문헌

Aized, T. (2010), Modelling and Analysis of Multiple Cluster Tools System with Random Failures Using Colored Petri Net, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 897-906.

Draina, J. (2006), ISMI 300 Prime/450mm Industry Briefing, *SEMICON Japan 2006*.

Dummler, M. (2004), Modeling and Optimization of Cluster Tools in Semiconductor Manufacturing, *Ph.D. Dissertation, University of Wuerzburg*.

- Heyman, D. P. and Sobel, M. J. (1982), *Stochastic Models in Operations Research*, McGraw-Hill, New York.
- Jose, A. R.-H., Crabtree, J., Yao, X., Fernandez, E., Fu, M. C., Janakiram, M., Marcus, S. I., O'Connor, M., and Patel, N. (2010), Optimal Preventive Maintenance Scheduling in Semiconductor Manufacturing Systems: Software Tool and Simulation Case Studies, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 23(3), 477-489.
- Lee, H. and Lee, T. (2006), Scheduling Single-armed Cluster Tools with Re-entrant Wafer Flows, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 19(2), 226-240.
- Lee, T. (2008), A Review of Scheduling Theory and Methods for Semiconductor Manufacturing Cluster Tools, *In Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 2127-2135.
- Yao, X., Fernandez, E., Fu, M. C., and Marcus, S. I. (2004), Optimal Preventive Maintenance Scheduling in Semiconductor Manufacturing, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 17(3), 345-356.
- Yao, X., Xie, X., Fu, M. C., and Marcus, S. I. (2005), Optimal Joint Preventive Maintenance and Production Policies, *Naval Research Logistics*, 52, 668-681.



이 현

한양대학교 산업공학 학사 · 석사
 현재 : 한양대학교 박사과정
 관심분야 : 응용확률, 스케줄링, 정보처리



박유진

한양대학교 산업공학 학사 · 석사
 Arizona State Univ. 산업공학 박사
 현재 : 중앙대학교 경영학과 부교수
 관심분야 : 최적화, 통계, 생산관리



허 선

서울대학교 산업공학 학사 · 석사
 Texas A&M 산업공학 박사
 현재 : 한양대학교 교수
 관심분야 : 응용확률, 스케줄링,
 데이터마이닝