

반도체 생산 공정에서 포토장비의 부하 밸런싱을 위한 Dedication 부하 기반 디스패칭 룰

조강훈 · 정용호 · 박상철[†]

아주대학교 산업공학과

Dedication Load Based Dispatching Rule for Load Balancing of Photolithography Machines in Wafer FABs

Kang Hoon Cho, Yong ho Chung, and Sang Chul Park[†]

Dept. of Industrial Engineering, Ajou Univ.

Received 3 February 2016; received in revised form 17 October 2016; accepted 21 October 2016

ABSTRACT

This research develops dispatching rule for a wafer FABs with dedication constraints. Dedication, mostly considered in a photolithography step, is a feature in a modern FABs in order to increase the yield of machines and achieve the advance of manufacturing technology. However, the dedication has the critical problem because it causes dedication load of machines to unbalance. In this paper, we propose the dedication load based dispatching rule for load balancing in order to resolve the problem. The objective of this paper is to balance dedication load of photo machines in wafer FABs with dedication constraint. Simulation experiments show that the proposed rule improves the performance of wafer FABs as well as load balance for dedication machines compared to open-loop control based conventional dispatching rule.

Key Words: Closed-loop control, Dedication, Dispatching rule, Load balancing, Open-loop control, Photolithography, Wafer FABs

1. 서 론

반도체 생산의 단위인 웨이퍼는 전형적인 생산 방법 중 하나인 LSIC(Large Scale Integrated Circuit) 방법으로 수백 가지의 생산 공정을 지나면서 층마다 회로가 집적되어 최종 제품으로 완성된다. 전형적으로 25개의 웨이퍼들이 하나의 Lot으로 구성되고, 제품이 완성되기까지 Lot 단위로 이동하며, 필요 시에는 배치를 구성하여 가공

되기도 한다. 반도체 생산 공정은 하나의 제품을 생산하기 위해 수백 개의 공정을 거치면서 재공량(WIP; work-in-process)을 최소로 유지하며, 납기만족(on-time delivery)을 달성해야 하기 때문에 매우 복잡한 생산 프로세스를 가진다. 또한, 반도체 공정의 대표적인 특징은 웨이퍼가 집적되면서 같은 공정을 여러 번 거친다는 것이다. 이러한 특징을 Reentrant 특징이라고 한다. 각 공정은 특정한 장비그룹에 의해서 수행될 수 있다. 하나의 장비그룹은 다수의 장비들로 구성되고, 같은 장비그룹에 속한 장비일지라도 다른 프로세스 타임을 가질 수 있다. 따라서 이러한 특징들은 FAB의 생

[†]Corresponding Author, scpark@ajou.ac.kr
©2017 Society for Computational Design and Engineering

산 구조를 복잡하게 만들고, 생산 스케줄링을 어렵게 만든다.

FAB에서 가장 복잡한 작업을 수행하는 고비용의 장비는 포토장비이다. 포토장비는 감광 도포액이 덮인 웨이퍼 위에 사진기의 원리처럼 마스크를 통해 회로를 현상하는 작업을 수행한다. 회로의 현상은 고정밀한 노광 작업이 동반되어야 하고, 결함이 없는 고해상도의 작업을 요구한다^[1]. 포토장비는 매우 고가이기 때문에 FAB에서 웨이퍼 가공을 위한 캐파가 부족할 수 밖에 없다. 부족한 캐파에 의해 발생할 수 있는 노광 작업을 담당하는 레티클의 비가용성, 장비 유지보수를 수행할 때 발생할 수 있는 가용 캐파 부족과 같은 고유의 특징 때문에 포토 공정의 사이클 타임은 증가한다. 따라서 FAB에서 포토 공정은 대표적인 병목 공정이다. 생산 스케줄링 문제에서 병목 공정의 효율은 전체 생산 시스템의 성능을 좌우한다. 이러한 병목 공정인 포토 공정을 스케줄링하는 연구가 진행되어왔다^[2-7]. Chern *et al.*^[2]은 포토 공정의 스케줄링을 위해서 Threshold control 개념과 Least slack 개념을 적용한 Rule-based 알고리즘을 제안하였다. Shen *et al.*^[3]은 포토 공정의 Release 스케줄링을 위한 확률론적인 동적 계획모델(Stochastic Dynamic Programming Model)을 제안하였고, Zhou *et al.*^[4]은 Petri Net 접근방법으로 문제를 해결하였다. 또한, Miwa *et al.*^[5]은 동적 계획법을 적용한 부하할당 알고리즘을 제안하였으며, Arisha *et al.*^[6]은 뉴럴 네트워크(Neural Network) 접근방법으로 문제를 해결하였고, Monch *et al.*^[7]은 FAB에 Lot을 투입하는 시점에 포토장비에 Lot을 할당하는 방법론으로 병목 공정을 스케줄링하였다.

하지만, 이러한 연구들은 Dedication 제약을 고려하지 않았다는 한계점을 가진다. Dedication 제약은 제품의 수율과 품질을 높이기 위해 최근 FAB에서 사용하고 있는 포토장비의 대표적인 제약이다. 같은 장비그룹에 속한 포토장비일지라도, 고정밀성을 요구하는 노광 작업은 포토장비의 레티클의 각도와 같은 세밀한 차이에서 품질의 차이를 발생시킬 수 있다. 따라서 Lot이 한번 가공되었던 포토장비에 Dedication되면 반드시 해당 포토장비에서만 가공해야만 하는 제약을 의미한다. 즉, Dedication된 Lot이 포토장비들의 Queue 앞에 대기하고 있는 상황이면, 포토장비들이 Idle

상태일지라도 반드시 Dedication된 포토장비에서만 가공되어야 한다. 이러한 Dedication 제약은 포토장비의 Idle을 발생시킬 수 있기 때문에 FAB의 성능을 좌우하는 중요한 공정인 포토 공정의 Idle 발생은 치명적인 위험성을 잠재한다^[8]. 그렇기 때문에, Dedication을 고려한 기존 연구들이 진행되어왔다. Wu *et al.*^[9]은 포토 공정 사이의 WIP과 사이클 타임을 이용하여 Flow rate를 정의하고, Dedication 포토장비와 Non-Dedication 포토장비를 구분하여 스케줄링하는 디스패칭 룰을 제안하였다. Reentrant 특징을 가진 FAB은 제품을 집적하는 과정에서 동일한 포토 공정을 여러 번 거치게 된다. 이러한 포토 공정 사이클 레이어라고 부르며, 레이어 사이에 존재하는 모든 WIP들을 대상으로 레이어 단위의 Flow rate를 계산한다. Dedication 포토 장비는 Flow rate가 가장 높은 레이어의 WIP들을 FIFO(First-in First-out) 규칙에 따라 디스패칭한다. Non-dedication 포토 장비에 대해서는 Flow rate가 가장 낮은 레이어의 WIP들을 FIFO 규칙에 따라 디스패칭한다. Wu *et al.*^[10]은 FIFO 대신 CR(Critical Ratio) 규칙을 적용하였다.

Dedication을 고려한 기존 연구들은 가장 직관적인 방법으로 처음부터 Lot을 각 포토장비들의 Queue 앞에 잘 분배하는 것을 채택하였다. 즉, Lot이 FAB에 투입되는 Release 시점에 Lot이 Dedication 될 포토장비들을 미리 결정하는 Open-loop control 접근방법^[11]을 적용하였다. 하지만, 매우 복잡하고 변동성이 크며, 다이나믹한 프로세스를 가진 FAB에서는 적절하지 않을 수 있다. Dedication 포토장비를 결정할 수 있는 첫 번째 포토 공정에 Lot이 대기하고 있을 경우, Idle상태인 포토장비가 존재한다고 가정하자. Open-loop control에 의해 가공될 포토장비가 투입 시점부터 결정되었기 때문에 Lot은 Dedication되지 않은 포토장비가 Idle일지라도 작업을 수행할 수 없다. 하지만, 현재의 WIP상황과 장비 상황을 고려하는 Closed-loop control 접근방법^[12]을 적용하면 이 문제를 해결할 수 있다. 아직 포토 공정을 한 번도 거치지 않은 Lot은 결정된 포토장비가 없기 때문에 현재 Idle인 포토장비에 Dedication 되어 해당 포토장비에서 작업을 수행하면 부하의 밸런스를 맞출 수 있다. 또한, Lot을 Dedication 상황에서 잘 분배하는 것도 중요하지만 이미 Dedication된

Lot을 다음 공정의 포토장비에 전달하는 것도 매우 중요하다.

본 논문에서는 포토장비의 부하 밸런싱을 위한 Dedication 부하 기반의 디스패칭 룰을 제안한다. 제안하는 디스패칭 룰은 Dedication 제약을 고려하여 포토장비 부하의 밸런스를 맞추는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성은 2장에서 Dedication 제약에 대한 상세한 설명과 Dedication 부하를 설명하고, 3장에서 제안하는 디스패칭 룰을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션에 사용된 FAB 데이터 및 실험계획과 실험결과를 설명하고, 마지막으로 결론을 설명한다.

2. 접근 방법

2.1 Dedication 제약

Dedication 제약은 제품의 수율과 품질을 높이기 위해 포토장비에 적용된 대표적인 제약이다. Lot은 Dedication된 포토장비에서만 처리될 수 있기 때문에 Idle상태인 장비가 존재할지라도, 반드시 기다려야만 하는 상황이 발생한다. Fig. 1은 Dedication의 문제점을 나타낸다. Fig. 1-(a)는 포토 공정이 아닌 일반 공정들에 대한 디스패칭 상황을 표현하고, Fig. 1-(b)는 Dedication 포토 공정에 대한 디스패칭 상황을 표현한 것이다. 우선, 일반 공정은 N step으로 정의하고, DM step은 Lot의 Dedication을 결정하는 Dedication mark step, D step은 Dedication 공정으로 정의한다. 장비 1은 Idle상태이고, 장비 2는 가공 중이라고 가정한다. N step A에서 가공된 Lot은 다음 공정인 N step B에서 할당된 장비들 중 장비 1이 Idle상태

이기 때문에 Lot은 장비 1에 디스패칭 될 것이다. 하지만, Dedication제약이 적용된 포토 공정에서는 Lot이 DM step에서 장비 2에서 가공되었기 때문에 반드시 다음 Dedication 포토 공정에서는 장비 2에서 가공되어야 한다는 제약을 가진다. 그러므로, D step에서 장비 1이 Idle일지라도, Lot은 반드시 장비 2의 작업이 끝날 때까지 기다려야 한다. 이러한 제약을 Dedication 제약이라고 한다. 따라서, Dedication 제약은 포토 장비의 효율을 저하시킬 수 있고^[8], 포토장비의 부하 밸런스에 악영향을 미친다.

FAB에서 제품을 생산하기 위한 프로세스는 각 하나의 Dedication 구간을 가진다. Dedication 구간은 하나의 Dedication mark step과 다수의 Dedication step, Non-dedication step으로 구성된다. Dedication mark step은 Lot이 FAB에 투입된 후에 첫 번째로 가공되는 포토 공정을 의미하며, Dedication될 포토장비를 결정한다. 일단 Lot이 포토장비에 Dedication되면, 해당 장비는 Dedication 구간 내에서는 반드시 그 Lot을 작업해야 한다. 본 논문에서는 이러한 정해진 작업량을 포토장비의 Dedication 부하라고 정의한다. 따라서, Dedication mark step은 포토장비의 부하를 증가시키는 요소이다. Dedication step은 반대로 Dedication된 Lot을 가공하기 때문에 Dedication 구간 내에서 포토장비가 수행해야 할 부하가 줄어들게 된다. 마지막으로, Non-dedication step은 후행 공정 중에서 Dedication step으로 Lot을 공급해주는 역할을 하고, 포토장비의 Dedication 구간 내의 WIP 밸런스를 조절하는 역할을 한다. 직관적인 방법으로는 Lot을 Dedication mark step에

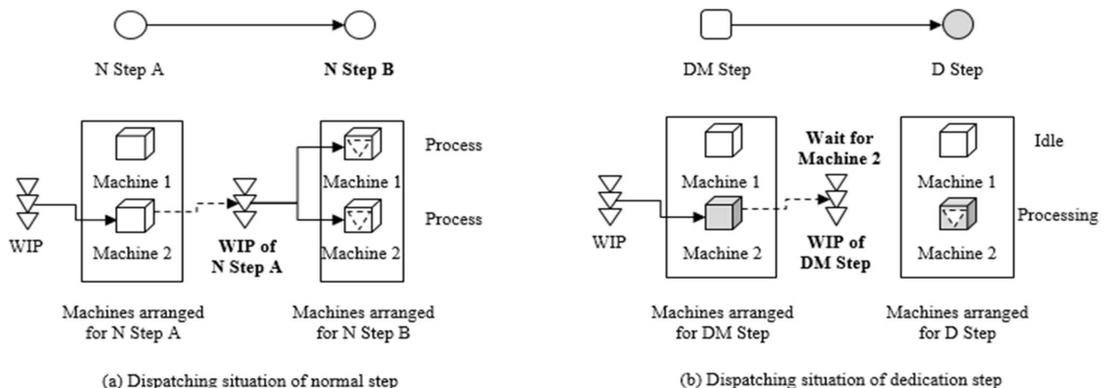


Fig. 1 Dedication problem

균등하게 배분하는 것이다. 완벽하게 균등한 배분을 위해서는 Lot이 FAB에 투입되는 시점에 포토장비를 결정하는 것이다. 이러한 방법을 Open-loop control 접근방법이라 한다. 하지만, FAB은 Reentrant 특징을 가진 매우 복잡한 생산 라인이기 때문에 가변적인 상황을 고려하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 Lot이 Dedication 구간 내에서 FAB 상황을 고려하는 Closed-loop control 접근방법을 적용한다.

2.2 Dedication 부하

포토장비에 Dedication된 Lot이 많다는 것은 부하가 크다는 것을 의미한다. 장비의 부하가 증가하면 해당 포토장비가 반드시 처리해야 할 작업량이 증가한다는 것이고, 각 포토장비는 Dedication 부하만큼의 보장된 작업량이 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 포토장비의 Dedication 부하가 크다면 가동률이 보장된다고 할 수 있고, 반대로 작다면 해당 포토장비는 Idle이 될 가능성이 크다. 동일한 장비그룹에 속한 포토장비들은 동일한 Dedication step을 수행할 수 있다. 따라서 포토장비들의 Dedication 부하의 밸런스가 맞지 않으면, 특정 장비의 Idle이 발생할 수 있고, 반대로 다른 장비는 WIP이 쌓일 수 있다. 따라서 Dedication

부하의 밸런스는 매우 중요하다. Dedication 부하의 밸런스를 조정하기 위해 본 논문에서는 프로세스 시간과 남아 있는 Dedication step을 이용하여 Dedication 부하를 계산한다.

Dedication 부하는 하나의 Dedication 구간을 가지는 프로세스 안에서 포토장비가 반드시 작업해야 하는 작업량으로 정의하였다. 부하를 계산하기 위해서는 프로세스 시간과 남아 있는 Dedication step, 포토 공정의 Dedication 여부, 포토장비 리스트, 포토 공정 리스트가 필요하다. 각 포토장비는 자신이 반드시 수행해야 할 Dedication step들이 존재한다. 또한, 해당 포토장비 앞에 대기하고 있는 WIP들은 다수의 Dedication step에 속해 있게 된다. Fig. 2는 포토장비의 Dedication 부하 개념을 도식화한 것이다. 각 위치의 WIP은 해당 포토장비가 반드시 작업해야 하기 때문에 후행 Dedication step을 고려하여 부하를 계산해야 한다. WIP 1은 Dedication step A, C, E에서 작업되어야 하며, WIP 2는 step C, E, WIP 3은 step E에서 반드시 작업되어야 한다. 포토장비의 Dedication 부하를 계산하는 방법은 다음과 같다.

//Input: ProcessTime, MachineList, StepList
 //Output: DedicLoad

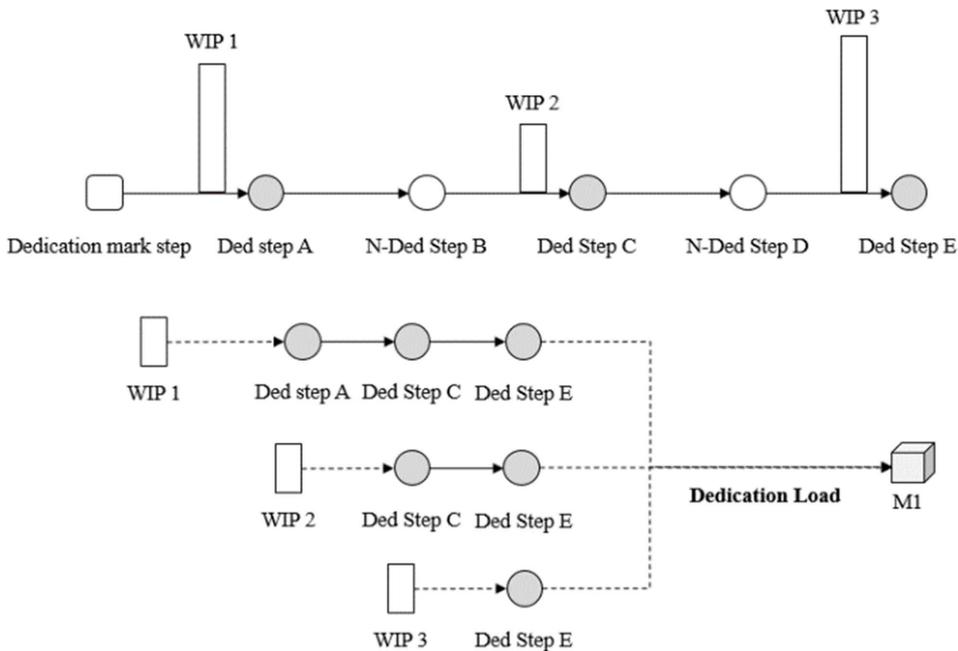


Fig. 2 A concept of the dedication load for photo machine

Step 1, Initialize:

LoadAllMachineList();

Step 2, Calculate DedicLoad

Repeat (mcIndex++)

Until (mcIndex = MachineList.Count)

LoadStepListofMachine(mc);

Repeat (Curstep.NextStep) Until (Curstep = NULL)

step = Curstep;

Repeat (step.NextStep) Until (step = NULL)

If (step.IsDedic = FALSE)

continue;

If (step.IsDedic = TRUE)

mc.DedicLoad += step.ProcTime;

Step3, Output: DedicLoad;

LoadAllMachineList는 FAB에 존재하는 모든 포토장비의 리스트를 의미하고 LoadStepListofMachine는 해당 포토장비가 수행할 수 있는 모든 step들을 의미한다. 이 때 mc는 포토장비를 의미하며 Loop내의 step이 Dedication step인 모든 step들의 가공시간의 총합을 해당 포토장비의 Dedication 부하로 정의한다. 이러한 방법은 Shr *et al.*^[14]의 방법과 동일하다. 포토장비의 Dedication 부하는 시뮬레이션에서 디스패칭 상황마다 반복적으로 계산되고, 업데이트된다. 본 논문에서는 Dedication 부하를 기반으로 포토장비 부하의 밸런싱을 맞추기 위한 디스패칭 룰을 제안한다.

3. 부하 밸런싱을 위한 디스패칭 룰

FAB에서 장비의 타입은 크게 배치타입과 Series 타입으로 분류될 수 있다. 배치타입의 장비는 동시에 여러 개의 Lot을 처리할 수 있고, 주로 6개의 Lot을 한 번에 가공할 수 있는 장비이다. FAB에서는 주로 확산 공정(Diffusion)이 배치 형태로 Lot을 구성하여 가공하는 대표적인 공정이다. 디스패칭은 장비가 Idle인 상황에서 발생하며, 본 논문에서는 Minimum Batch Size(MBS) 알고리즘^[13]을 적용하고 배치타입의 장비는 FIFO로 Lot의 우선순위를 선택하여 디스패칭한다. Series 타입의

장비는 Dedication 장비를 위한 방법과 Non-dedication 장비를 위한 방법 두 가지로 구분하여 디스패칭을 수행한다.

3.1 Dedication 장비를 위한 디스패칭

Dedication 부하는 Dedication 구간 내에서 Lot의 남아 있는 포토 공정의 수와 프로세스 타임을 이용하여 계산한다. Dedication 장비는 Dedication mark step을 수행하거나 Dedication step을 수행할 수 있다. 앞서 언급하였듯이, 포토장비가 둘 중에 어떤 공정을 선택하여 Lot을 가공하는지에 따라, Dedication 부하의 균형이 달라질 수 있다. Dedication이 적용될 수 있는 경우는 포토장비면서 그 중에 High resolution 작업을 수행할 수 있는 장비들이다. Dedication 장비를 위한 디스패칭 룰은 다음과 같다.

Step 1 : Dedication 포토장비의 부하를 계산

Step 2 : 동일한 장비그룹에 속한 포토장비들의 평균 부하를 계산

Step 3 : 해당 포토장비의 부하가 평균보다 작으면, Step 4를 수행하고, 크다면 Step 5를 수행

Step 4 : Dedication mark step의 Lot들을 FIFO 룰로 우선순위 결정하고 종료

Step 5 : 각 레이어 i 의 Flow rate 계산^[10]

$$Flow\ rate_i = \frac{WIP_i}{Cycle\ time_i}, \quad i = index\ of\ layer$$

Step 6 : Flow rate가 가장 큰 레이어의 Lot들을 FIFO 룰로 우선순위 결정하고 종료

현재 디스패칭 시점에 계산된 해당 포토장비의 부하 값과 동일한 Dedication step에 할당된 Dedication 포토장비들의 평균 값을 비교하여 평균 값보다 작으면 Dedication mark step에 존재하는 WIP을 선택하고, 평균 값보다 크다면 Dedication step에 존재하는 WIP을 선택한다. 이러한 이유는 해당 포토장비의 부하가 평균 값보다 작을 경우, 부하의 균형을 맞추기 위해 Dedication mark step의 Lot을 선택해야 한다. 선택된 Lot은 해당 포토장비의 부하를 증가시켜주기 때문에 전체적으로는 부하의 균형이 맞춰진다. 반대로 부하를 감소시키는 특징을 가진 Dedication step의 Lot을 선

택하여 부하의 균형을 맞추도록 한다. 두 가지의 공정 중 선택된 공정 앞에 대기하고 있는 WIP를 선택한다. Dedication step의 경우에는 하나의 프로세스에 여러 개의 step이 존재하기 때문에 어떠한 공정을 선택할지를 결정해야 한다. 각 Dedication step 사이에 있는 레이어 중에 LB(Line-balance) 개념을 적용하여 가장 많은 작업량이 요구되는 레이어를 선택한다. LB는 각 레이어에 할당되는 작업량을 최대한 균등하게 유지하려는 전략을 의미한다. 선택된 레이어에 대기하고 있는 Lot들을 FIFO로 우선 순위를 결정하여 디스패칭을 수행한다.

3.2 Non-dedication 장비를 위한 디스패칭

Non-dedication 장비는 포토장비가 아닌 일반 장비와 Dedication 제약이 적용되지 않은 포토장비까지 포함한다. 일반적으로 FAB에서 High resolution 작업을 수행하지 못하는 포토장비들에 대해서는 Dedication 제약을 적용하지 않는다. Non-dedication 장비를 위한 디스패칭 룰은 다음과 같다.

Step 1 : 각 레이어 i 에서 Dedication 포토장비 j 에 해당하는 Flow rate 계산^[10]

$$Flow\ rate_{ij} = \frac{WIP_{ij}}{Cycle\ time_{ij}}, \quad i = index\ of\ layer$$

$$j = index\ of\ dedication\ photo\ machine$$

Step 2 : Flow rate가 가장 작은 ij 의 Lot들을 FIFO로 우선순위 결정하고 종료

Dedication step 사이에 존재하는 레이어들의 각 WIP수량과 사이클 타임을 계산하고, 이를 이용하여 Flow rate를 계산한다. 계산된 Flow rate가 낮다는 것은 해당 포토장비가 앞으로 작업할 수량이 적다는 것을 의미하지만 SA(Starvation-avoidance) 개념으로 해결할 수 있다. SA는 각 레이어마다 Dedication이 결정된 Lot을 해당 포토장비가 작업을 수행하는데 부족함이 없도록 Lot을 공급해주는 전략을 의미한다. 따라서 Flow rate가 낮은 레이어를 선택하고 레이어 앞에 대기하고 있는 WIP들을 FIFO에 의해 우선 순위를 결정하여 디스패칭을 수행한다.

4. 실험결과

4.1 FAB 데이터 및 실험계획

FAB은 제품 9개를 생산하는 라인이며, 제품 하나 당 하나의 프로세스를 가진다. 각 프로세스는 Dedication 구간을 한 개 가지고 있으며, 프로세스를 구성하고 있는 공정들은 서로 다른 프로세스 타임과 셋업 타임을 가진다. 제품 6개는 Dedication가 적용된 포토장비를 가지고, 나머지 3개의 제품의 프로세스는 Dedication이 적용되지 않았다. FAB의 생산 단위인 Lot은 제품마다 집적하는 레이어의 수가 다르다. Flow factor는 1.35

Table 1 The experimental results

| Model | FAB with Dedication | | | |
|-----------------------------|---------------------|-------|--------|--------|
| | FAB | Ex. 2 | Ex. 3 | Ex. 4 |
| Rule | Ex. 1 | Ex. 2 | Ex. 3 | Ex. 4 |
| Percent of Tardy (%) | 21.66 | 76.49 | 36.54 | 35.98 |
| Avg. Tardiness (day) | 0.16 | 1.09 | 2.32 | 1.74 |
| Avg. Cycle time (day) | 16.94 | 17.88 | 17.64 | 17.44 |
| Cycle time Var. | 0.05 | 0.67 | 1.10 | 0.45 |
| FAB Out (Wafer) | 15072 | 14496 | 14712 | 14808 |
| Photo machine Run (%) | 99.617 | 96.05 | 98.783 | 99.183 |
| Photo machine Run Var. | 0.025 | 1.249 | 0.111 | 0.058 |
| Photo machine Idle (%) | 0 | 0.55 | 0.067 | 0 |
| Photo machine Idle Var. | 0 | 0.122 | 0.006 | 0 |
| Photo machine Idle-run (%) | 0.383 | 3.383 | 1.15 | 0.817 |
| Photo machine Idle-run Var. | 0.025 | 0.655 | 0.116 | 0.058 |

로 설정하였고, 시뮬레이션의 총 시간은 180일을 수행하였다. 그 중에 warm-up기간은 150일이며, 30일의 결과를 수집하여 FAB의 성능을 11개의 지표로 평가하였다. Run(%)과 Run Variance, Idle(%), Idle Variance, Idle-run(%), Idle-run Variance는 포토장비 성능의 결과이다. Run과 Idle은 포토장비의 셋업 타임을 포함한 가동률과 유휴 시간을 의미한다. 포토장비는 감광액 도포 작업과 Mask 작업을 동시에 수행할 수 있다. 첫 번째 Lot이 감광액 도포 작업을 완료한 시간을 Tact time이라고 한다. 만약 두 번째 Lot이 Tact time보다 늦게 들어온다고 가정하면 포토장비는 실제로 첫 번째 Lot에 Mask 작업을 수행하기 때문에 장비는 Idle이 발생하지 않는다. 하지만 두 번째 Lot이 Tact time 보다 늦게 들어왔기 때문에 포토장비는 감광액 도포 작업을 수행하지 않는다. 이러한 현상을 Idle-run이라고 한다. 실험은 VMS Solution의 MOZART 엔진을 사용하여 실제 FAB 데이터를 시뮬레이션 하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

실험은 4가지의 결과를 비교하고 분석하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이, 실험에 사용한 모델은 Dedication 제약이 없는 FAB 모델과 Dedication 제약을 고려한 FAB 모델을 사용하였다. 두 개의 모델은 3가지의 디스패칭 룰을 적용하여 FAB의 성능을 비교하였다.

Ex. 1. FAB 모델 : Dedication제약(X)

디스패칭 룰 : FIFO

Ex. 2. FAB 모델 : Dedication제약(O)

디스패칭 룰 : FIFO

Ex. 3. FAB 모델 : Dedication제약(O)

디스패칭 룰 : Open-loop control

Ex. 4. FAB 모델 : Dedication제약(O)

디스패칭 룰 : Proposed Rule

Ex. 1은 FAB 모델에 Dedication 제약을 고려하지 않고, FIFO룰을 적용하여 디스패칭을 수행한 결과이다. Ex. 2는 Ex. 1과 달리, Dedication 제약을 고려한 FAB 모델을 사용하였고, 디스패칭 룰은 동일하게 FIFO룰을 적용하여 실험하였다. Ex. 3과 Ex. 4도 Dedication 제약을 고려한다는 점에서 Ex. 2와 동일하지만 Ex. 3은 Open-loop control

접근방법 기반의 디스패칭을 수행하고, Ex. 4는 본 논문에서 제안하는 디스패칭을 수행한 실험결과이다.

Ex. 1과 Ex. 2를 비교해보면, Dedication 제약이 포토장비 부하의 불균형을 초래하기 때문에 FAB의 KPIs(Key Performance Indicators)는 Ex. 2가 더 좋지 않은 결과를 보여준다. 납기만족(on-time delivery) 측면에서 Ex. 2는 납기만족을 지키기 못한 Lot이 약 50% 정도 증가하였으며, 평균적으로 약 1일정도의 지연시간이 발생하였다. 사이클 타임은 증가하였으며, FAB Out된 웨이퍼의 수는 500개 이상 감소하였다. 포토장비의 Idle 타임이 발생하고, Idle-run이 3% 증가하면서 가동률은 3% 이상 감소하였다. Ex. 1과 Ex. 2는 동일한 디스패칭 룰을 적용하였지만, Dedication제약이 반영되면서 포토장비가 처리해야 할 부하의 불균형이 발생하고, 이는 FAB의 전체적인 성능을 저하시키는 결과를 초래하였다.

Ex. 2와 Ex. 3은 Dedication 제약을 고려하였다는 점에서 동일하지만 Open-loop control 접근방법 기반 디스패칭 룰의 효과를 확인해 볼 수 있다. Ex. 3은 약 40% 정도의 납기만족 달성을 증가하였고, FAB Out된 웨이퍼의 수 또한 200개 이상 증가하였다. 포토장비의 가동률은 2% 이상 향상되었고, Idle 타임과 Idle-run은 모두 감소하였다. 반대로 지연시간은 1일 이상 증가하였으며, 사이클 타임과 분산은 증가하여 Ex. 2에 비해 좋지 않은 결과를 보여준다. 하지만, 납기만족 측면에서 매우 향상된 결과를 보여주었으며, 포토장비의 성능도 향상되었다는 점에서 Ex. 3의 디스패칭 룰은 충분한 효과를 보여준다.

마지막으로, Ex. 3과 Ex. 4 또한 공통적으로 Dedication 제약을 고려하고 있지만, 디스패칭 룰에서 차이점이 존재한다. Ex. 3은 FAB에 Lot을 투입하는 Release 시점에 Lot이 Dedication될 포토장비를 미리 결정한다. 하지만, Ex. 4는 FAB의 Dedication 구간 내에 첫 번째 포토 공정에서 WIP 상황과 포토장비의 Dedication 부하를 고려하여 밸런싱을 맞추는 방향으로 Lot의 Dedication 포토장비를 결정한다. Ex. 4는 Ex. 3과 비교해 보았을 때, 모든 KPIs가 향상된 것을 볼 수 있다. 납기만족은 약 1% 향상되면서 분산은 감소하였고, 사이클 타임 또한 성능이 향상되었다. 포토공정은 앞서 언급하였듯이, FAB의 성능을 좌우하는 매우

중요한 공정이기 때문에 포토장비 가동률의 미세한 차이에도 성능에 미치는 영향이 크다. 포토장비의 가동률이 증가하고, 분산은 감소하였다. Ex. 3에서는 발생했던 Idle time이 Ex. 4에서는 0%로 전혀 발생하지 않았으며, Idle-run도 감소하여 전체적인 FAB의 성능이 향상된 것을 알 수 있다.

Ex. 4가 Ex. 3보다 성능이 향상된 이유는 FAB에 Lot이 투입되는 시점에서 균등하게 포토장비에 Dedication Lot을 분배하였더라도, Reentrant 특징과 복잡한 FAB의 특징 때문에 Dedication Lot이 균등하게 포토장비로 들어온다고 보장할 수 없다. 즉, 포토장비의 디스패칭 시점에 Queue에 존재하는 WIP의 상황과 Dedication 구간 전체의 포토 공정에서 장비의 부하를 매 시점마다 고려하여 Dedication Lot을 분배하는 것이 중요하다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서 제안한 디스패칭 룰 Ex. 4는 Dedication 제약이 존재하는 FAB에서 포토장비 부하의 밸런싱을 향상시킬 수 있고, 이에 따라 FAB 전체 KPIs를 향상시킨다는 것을 확인해볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 목적은 Dedication 제약이 존재하는 반도체 생산라인에서 포토장비 부하의 밸런싱을 맞추어 줄 수 있는 디스패칭 룰을 제안하는 것이다. 포토 공정을 스케줄링하는 기존의 연구들은 Dedication 제약을 고려하지 않은 연구들이 대부분이다. Dedication은 최근 FAB에서 제품의 수율과 품질을 위해 중요한 제약 중 하나이기 때문에 Dedication 제약을 고려하는 연구가 필요하다. 하지만, Dedication 제약이 적용된 포토장비의 부하 밸런싱에 해칠 수 있기 때문에 전체적인 FAB 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 Dedication 제약을 고려하여 반도체 생산 공정을 스케줄링하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 Closed-loop control 접근방법에 기인하여 Dedication 장비의 부하를 디스패칭 상황마다 계산하고, 부하의 균형을 맞추도록 디스패칭 하는 룰을 제안하였다. Dedication 제약을 고려하여 기존 연구의 디스패칭 룰을 적용하였을 때 FAB의 성능은 FIFO 디스패칭 룰보다 향상되었다. 기존 디스패칭 룰이 좋은 성능을 보이지만 포토장비의 부하가ダイナミック한 FAB 상황을 반영하

지 못할 수도 있다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 디스패칭 룰은 Dedication 부하를 고려하여 포토 장비들 간의 부하 밸런싱을 디스패칭 상황마다 조정하였고, 전체적인 FAB의 성능을 향상시켰다. 이러한 결과는 제품의 수율과 제조적 특성을 해결하기 위한 Dedication 제약을 반영한 FAB에서 고려해 볼 수 있다고 생각한다.

감사의 글

This work was partially supported by the National Research Foundation grant (NRF-2015R1A2A2A01005871) funded by the Ministry of Education, Science and Technology, Korea.

References

1. Sarin, S.C., Varadarajan, A. and Wang, L., 2011, A Survey of Dispatching Rules for Operational Control in Wafer Fabrication, *Production Planning & Control*, 22(1), pp.4-24.
2. Chern, C.C. and Liu, Y.L., 2003, Family-based Scheduling Rules of a Sequence-dependent Wafer Fabrication System, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 16(1), pp.15-25.
3. Shen, Y. and Leachman, R.C., 2003, Stochastic Wafer Fabrication Scheduling, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 16(1), pp.2-14.
4. Zhou, M. and Jeng, M.D., 1998, Modeling, Analysis, Simulation, Scheduling, and Control of Semiconductor Manufacturing Systems: A Petri Net Approach, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 11(3), pp.333-357.
5. Miwa, T., Nishihara, N. and Yamamoto, K., 2005, Automated Stepper Load Balance Allocation System, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 18(4), pp.510-516.
6. Arisha, A. and Young, P., 2004, Intelligent Simulation-based Lot Scheduling of Photolithography Toolsets in a Wafer Fabrication Facility, *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*.
7. Monch, L., Prause, M. and Schmalfuss, V., 2001, Simulation-based Solution of Load Balancing Problems in the Photolithography Area of a Semiconductor Wafer Fabrication Facility, *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*.
8. Elif, A. and Nemoto, K., 2001, Cycle-time Improvements for Photolithography Process in

- Semiconductor Manufacturing, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 14(1), pp.48-56.
9. Wu, M.C., Chiou, S.J. and Chen, C.F., 2008, Dispatching for Make-to-order Wafer Fabs with Machine-dedication and Mask Set-up Characteristics, *International Journal of Production Research*, 46(14), pp.3993-4009.
 10. Wu, M.C., Huang, Y.L., Chang, Y.C. and Yang, K.F., 2006, Dispatching in Semiconductor Fabs with Machine-dedication Features, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp.978-984.
 11. Morton, T.E. and Pentico, D.W., 1993, Heuristic Scheduling Systems, Wiley, New York, 720p.
 12. Glassey, C.R. and Resende, M.G.C., 1988, A Scheduling Rule for Job Release in Semiconductor Fabrication, *Operations Research Letters*, 7(5), pp.213-217.
 13. Neuts, M.F., 1967, A General Class of Bulk Service Queue with Poisson Input, *The Annals of Mathematical Statistics*, 38(3), pp.759-770.
 14. Shr, A.M.D., Liu, A. and Chen, P.P., 2008, Load Balancing among Photholithography Machines in the Semiconductor Manufacturing System, *Journal of Information Science and Engineering*, 24, pp.379-391.



조 강 훈

2013년 아주대학교 산업공학과 학사
2015년 아주대학교 산업공학과 석사
2015년~현재 아주대학교 산업공학과 박사과정

관심분야: Simulation-based scheduling and planning, Digital Manufacturing, Defense Modeling & Simulation, CAD/CAM.

E-mail : sung15jin@ajou.ac.kr



정 용 호

2011년 아주대학교 산업공학과 학사
2013년 아주대학교 산업공학과 석사
2013년~현재 아주대학교 산업공학과 박사과정

관심분야: Simulation-based scheduling and planning, Digital Manufacturing, Dynamic Terrain, Synthetic Environment

E-mail : yongho1230@gmail.com



박 상 철

1994년 한국과학기술원 산업공학과 학사

1996년 한국과학기술원 산업공학과 석사

2000년 한국과학기술원 산업공학과 박사

2004년~현재 아주대학교 산업공학과 정교수

관심분야: Digital Manufacturing System, CAD/CAM, CAPP, Manufacturing System Modeling & Simulation, Defense Modeling & Simulation, Discrete Event System Simulation

E-mail : scpark@ajou.ac.kr