

양팔 클러스터장비의 초기 전이 기간 스케줄링

홍경효 · 김자희*

Scheduling Start-up Transient Periods of Dual Armed Cluster Tools

Kyeong-Hyo Hong · Ja-Hee Kim*

ABSTRACT

A cluster tool used in many kinds of semiconductor processes for improving the performance and the quality of wafers has a simple configuration, but its schedule is not easy because of its parallel processing module, a lack of intermediate buffers, and time constraints. While there have been many studies on its schedule, most of them have focused on full cycles in which identical work cycles are repeated under constant task times. In this research, we suggest strategies of start-up transient scheduling which satisfies time constraints and converges into a desirable steady schedule for full work cycle. The proposed schedules are expected robust under the stationary stochastic task times. Finally, we show that the strategies make schedules enters the desirable steady schedule and robust using the simulation.

Key words : Cluster tools, Scheduling, Transient period, Wafer delay constraints

요약

생산성과 웨이퍼의 품질을 향상하기 위해 다양한 공정에서 사용되는 클러스터 장비는 단순한 구성에도 불구하고 병렬 공정 모듈, 중간버퍼의 부재, 시간 제약 때문에 스케줄이 쉽지 않다. 그래서 스케줄링에 대한 많은 연구가 진행되었지만 대부분 시간이 변동되지 않는다는 가정 하에서 주기별로 동일한 스케줄이 반복되는 안정 상태를 연구하였다. 본 연구에서는 시간 제약을 만족시키면서도 원하는 안정 상태의 스케줄로 안착할 수 있는 스케줄 전략을 제시한다. 제안된 스케줄 전략은 작업시간이 지속적으로 변동되는 상황에서도 강건하다. 마지막으로 이 전략들이 실제로 강건하고, 원하는 안정 상태로 갈 수 있다는 것을 보여 주기 위하여 시물레이션을 수행한다.

주요어 : 클러스터 장비, 스케줄링, 전이상태, 체제시간제약

1. 서론

글로벌 정보기술 연구 및 자문 회사인 가트너(Gartner)는 2015년 세계 반도체 시장이 전년 대비 5.4% 성장하여 매출이 358억 불에 도달하리라 예측했다^[1]. 빠르게 성장하는 반도체 시장에 대응하기 위하여 반도체 업체에서는

클러스터 장비(cluster tool)를 다양한 공정에 도입하여 생산성과 품질 향상을 도모하고 있다. 클러스터 장비는 복합 반도체 장비로 여러 개의 병렬 또는 단일 공정을 수행하는 공정모듈(PM: process module)과 외부와 웨이퍼의 카세트를 교환하여 내부로 전달하는 로드락(loadlock)이 작은 청정실(mini clean)인 전송모듈(TM: transport module)에 연결되어 있다^[2]. TM의 중앙에는 PM과 로드락 간에 웨이퍼의 이동을 담당하는 로봇을 장착하는 데, 초기에는 한팔을 가진 로봇을 주로 사용하였지만, 효율 향상을 위해 양팔을 가진 로봇들도 점차 보급되었다^[2]. 일반적으로 로봇의 작업시간에 비하여 PM의 공정시간이 길기 때문에 병목 공정(bottleneck)의 경우 복수의 PM에서 작업하도록 병렬 PM을 구성하기도 하지만, 로봇 작업이 병목이

*이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다 (2015년).

Received: 16 March 2015, **Revised:** 27 July 2015,
Accepted: 6 August 2015

*Corresponding Author: Ja-Hee Kim
E-mail: jahee@seoultech.ac.kr
Graduate School of Public Policy and Information
Technology, SeoulTech

아님에도 불구하고 로봇이 다른 작업 중이어서 공정이 끝난 웨이퍼가 PM 안에서 대기할 수도 있는데, 이를 웨이퍼 체재시간이라고 한다. 이런 체재시간이 길어지면 PM 내부의 높은 온도와 잔여 화학 물질에 의하여 웨이퍼의 품질이 심각하게 훼손될 수 있으므로 체재시간이 일정 시간을 넘을 수 없는데, 이런 시간 제약을 “체재시간 제약”이라고 한다²¹.

지금까지 체재시간 제약이 있는 양팔 클러스터 장비의 스케줄을 모델링하고 분석한 연구가 많았지만, 대부분의 연구가 공정에 참여하는 PM이 웨이퍼를 이미 가지고 있어서 동일한 주기를 반복하는 안정 상태(steady state)에서의 스케줄을 주로 다루고 있다²¹. 안정 상태의 스케줄이 많이 연구된 이유는 동일한 작업이 반복되기 때문에 분석이 용이하고 카세트에 웨이퍼의 수가 충분히 많을 경우 총소요시간(makespan) 중 대부분이 안정상태여서 클러스터 장비의 효율에 가장 많은 영향을 미치기 때문이다. 체재시간 제약이 있는 클러스터 장비는 안정 상태에서 최대 체재시간을 최소화하기 위하여 주기가 반복될 때 작업 순서뿐만 아니라 연속한 로봇 작업의 시작 간격도 일정하게 유지하는 SESS(steady earliest starting schedule) 전략을 사용해야 한다³¹. SESS 전략을 채택할 경우 주기 시간을 최소화하면서도 최대 체재시간을 최소화할 수 있지만, 이 전략만으로는 중간에 시간 변동이 발생할 경우 체재시간이 요동(fluctuation)치는 현상이 발생하여 웨이퍼 품질이 균일하지 않을 수 있다. 이와 같이 변동 후에 체재시간이 일정하지 않고 요동치는 문제를 해결하기 위하여 웨이퍼를 로드락에서 꺼내기 전에 일정 시간 대기하는 전략들이 제안되었다. 전략은 클러스터 장비의 구조에 따라 달라지기 때문에 한팔 클러스터 장비⁴¹와 양팔 클러스터 장비³¹ 별로 전략이 제시되었다.

최근에는 여러 종류의 웨이퍼가 병행하여 공정되거나 공정 도중 장비 일부에서 고장이 발생한 경우, 혹은 안정 상태가 되기 전의 스케줄 등 안정 상태가 아닐 경우의 다양한 상황이 제기되고 있지만, 안정 상태가 아닌 이유에 따라 고려해야 할 점과 스케줄 전략이 다르기 때문에 통합적인 스케줄 모형 및 분석 방법은 제시되고 있지 않다²¹. 안정 상태가 아닐 스케줄 중에는 모든 PM이 비어있는 상태에서 이상적인 안정 상태 스케줄로 연결하는 초기 전이 상태 스케줄이 많이 연구되고 있는데, 그 이유는 대부분의 비안정 상태의 스케줄은 고장 및 특별한 예외 상황이 발생할 때를 위한 것으로 발생 빈도수가 많지 않지만 초기 전이 상태 스케줄은 새로운 종류의 웨이퍼를 담은 카세트가 로드락에 도착할 때마다 필요하므로 빈번하게 사

용되기 때문이다. 초기 전이 상태 스케줄은 시간 제약이 없을 경우 효율적인 로봇의 작업 순서를 결정하기 위한 가장 중요한 문제로 총소요시간 대비 차지하는 비중이 크지 않아 중요도는 높지 않지만⁵¹, 체재시간 제약이 있을 경우에는 초기 전이 상태에서도 체재시간 제약을 만족시켜야 하므로 초기 전이 상태에서 제약을 만족시키도록 하는 문제가 존재하고, 그 초기 전이 상태 스케줄이 이상적인 안정 상태의 스케줄로 자연스럽게 연결되어 안정 상태에서 체재시간 제약을 만족시키도록 하는 것이 중요한 쟁점이다⁶⁻⁷¹. 일부 연구자들은 이 두 가지 문제를 동시에 해결하기 위하여 페트리넷(Petri-net)으로 초기 전이 상태 스케줄을 모형화하고 선형대수나 MIP(mixed integer program) 등의 경영과학적(operational research) 방법론을 사용하여 작업시작시점을 결정하는 연구를 수행하였다⁵⁻⁶¹. 또 다른 연구자들은 초기 전이 기간(start-up transient period)에서는 가능한 작업이 늦게 시작하는 전략을 종료 전이 상태(end-down transient period)에서는 가능한 작업을 시작하는 전략을 사용하는 것이 가장 좋다는 것을 보이기 위해 퍼트 도표(Pert Chart)를 사용하기도 했다⁷¹. 그러나 이러한 연구들은 초기 전이 기간 내의 로봇 및 PM의 작업시간이 일정하다는 가정 하에 스케줄링 전략을 제안하였으므로 시간 변동이 있을 경우에도 제약을 만족시킬 수 있는지 확인할 수 없다. 본 연구에서는 체재시간 제약이 있는 공정을 수행하는 양팔 클러스터 장비에 대하여 시간 변동에 강건하도록 초기 전이 기간을 스케줄링하는 전략을 제시한다. 지금까지 반도체 공장의 효율을 향상시키기 위한 전략들을 제안한 연구들은 제안된 전략들이 유용하다는 것을 보이기 위하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였다⁸⁻⁹¹. 즉, 시뮬레이션을 이용하여 단위 처리량(throughput)을 향상시키는 연구를 하거나⁸¹, 스케줄 전략들의 성능을 비교하는 연구 등이 있다⁹¹. 본 연구에서는 기존의 초기 전이 기간의 스케줄⁷¹을 기본으로 하여, 이상적인 안정 상태의 스케줄로 연결될 수 있도록 안정 상태의 시간 변동에 대응하는 전략³¹을 초기 전이 상태에 맞게 변형하여 제시하고, 이 전략들을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 클러스터 장비를 소개하고, 클러스터 장비에 시간 제약이 있을 경우의 문제점을 논한 후, 시간 변동이 없다는 가정 하에서 클러스터 장비의 스케줄을 안정 상태와 초기 전이 상태로 나누어 설명한다. 그리고 3장에서는 초기 전이 기간을 위한 2가지 시간 제어 전략을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 제안된 전략을 비교 및 분석한다. 마지막으로 4장에

서는 본 논문의 의의와 향후 과제를 토론한다.

2. 클러스터 장비의 스케줄링

최근 빠르게 성장하는 반도체 산업의 요구를 만족시키기 위하여 화학증착(CVD: chemical vapor deposition), 에칭(etching), 사진식판술(photolithograph) 등 다양한 공정분야에 적용되고 있는 클러스터 장비는 Fig. 1과 같이 여러 개의 공정 모듈(PM: process module)과 웨이퍼를 운송하기 위한 로봇, 로드락이 작은 클린룸(mini clean room)으로 통합되어 있다.

클러스터 장비의 PM 수는 제한적이고 로봇은 반복적인 작업 순서를 가지고 있기 때문에 스케줄링 문제가 단순해 보일 수 있다. 그렇지만 작업 중간에 웨이퍼를 놔둘 중간버퍼(intermediate buffer)가 없고 LPCVD (low-pressure chemical vapor deposition)와 같은 일부 공정의 경우 PM 안 공기의 압력이 0.25에서 20 torr에 다다를 정도로 고압에 550 ~ 800℃의 고온이므로 공정이 끝난 웨이퍼가 PM에 오래 머물 경우 PM 내부의 고온고압에 의해 웨이퍼의 표면이 녹아 망가질 수 있어서 일정 시간 이내에 PM에서 꺼내야 하는 시간제약이 있으므로 시간 스케줄링은 쉽지 않다. 이 때, 공정이 끝난 웨이퍼가 PM 내부에서 로봇이 자신을 꺼낼 때까지 기다리는 시간을 웨이퍼 체제시간(wafer residency time or wafer delay)이라고 부르고 체제시간의 최대값에 한계가 있는 것을 체제시간 제약이라고 부른다. 본 절에서는 체제시간 제약이 있는 양팔 클러스터 장비에 시간변동이 존재하지 않는 조건에서의 전형적인 스케줄링 방법을 안정 상태와 초기전이 상태로 나누

어 설명한다.

2.1 안정 상태에서의 스케줄링

클러스터 장비에서는 모든 PM이 서로 다른 공정을 수행할 수도 있지만 효율을 위하여 일부 공정시간이 긴 공정의 경우 두 개 이상의 PM에서 병렬적으로 작업되기도 한다. 로드락에서 나온 웨이퍼가 다시 로드락에 돌아갈 때까지 순차적으로 거치는 PM의 수를 단계라고 한다. 예를 들어 Fig. 1은 병렬 PM이 있는 가장 전형적인 공정으로 두 단계의 공정을 순차적으로 진행하고 첫 번째 단계에 병렬 PM이 존재하는 웨이퍼의 흐름을 화살표로 표현하고 있다. 즉, 로드락에서 나온 웨이퍼는 1단계에서 두 개의 병렬 PM인 PM1과 PM2 중 하나에서 공정되고 1단계 공정이 끝난 웨이퍼는 PM3에서 2단계 공정을 마친 후 다른 로드락으로 배출된다. Fig. 1과 같이 양팔 로봇을 가진 클러스터 장비의 경우 안정 상태에서는 모든 PM에서 교환(swap) 작업을 통해 PM에 있는 웨이퍼를 새로운 웨이퍼로 교환한다. 교환 작업이란 한 팔에 PM에 넣을 웨이퍼를 들고 있는 로봇이 빈 팔을 통해 PM 내의 웨이퍼를 꺼내고, 원래 있던 웨이퍼를 PM에 넣는 작업으로 모든 PM에서 교환 작업을 할 경우 로봇은 웨이퍼 흐름에 순방향으로 PM의 웨이퍼를 교환하게 된다.

클러스터 장비에서는 로봇이 로드락에서 웨이퍼를 꺼낸 후 다음 웨이퍼를 꺼내기까지를 하나의 “주기(cycle)”라고 정의하는 데, Fig. 1에서는 각 주기마다 로봇은 로드락에서 웨이퍼를 꺼내 ($m \rightarrow g$) 첫 번째 단계의 병렬 PM 중 하나의 PM 안에 있는 웨이퍼와 교환하고 ($m \rightarrow s$) 방금 꺼낸 웨이퍼는 두 번째 단계를 위한 PM3과 교환 ($m \rightarrow s$)한다. 마지막으로 PM3에서 꺼낸 웨이퍼를 로드락에 넣으면 ($m \rightarrow p$) 하나의 주기가 끝나게 된다. 이와 같이 클러스터 장비에서는 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 작업을 기준으로 주기를 설명하는 경우가 많은데, 웨이퍼를 로드락에서 꺼낸 후 다음 웨이퍼를 로드락에서 꺼낼 때까지의 시간의 평균을 “주기 시간(cycle time)”이라고 한다. 여기서 g, m, s, p 는 각 꺼내기, 이동, 교환, 넣기 작업을 의미하며 본 논문에서 사용할 작업시간의 기호는 Table 1에 정리한다. 특히 스케줄을 가시화하기 위하여 간트 차트로 표현할 때에는 Table 1과 같이 g, m, p 는 1이고, s 는 2, 첫 번째와 두 번째 단계의 공정시간은 각각 $22(t1)$ 와 $9(t2)$ 라고 가정한다. Table 1과 같은 작업시간을 갖는 클러스터 장비의 안정 상태에서의 스케줄을 간트 차트로 표현하면 Fig. 2와 같다. 로봇 부분에 g, m, s, p 가 적혀 있는 부분은 로봇이 해당 작업을 수행 중이라는 것을 표현

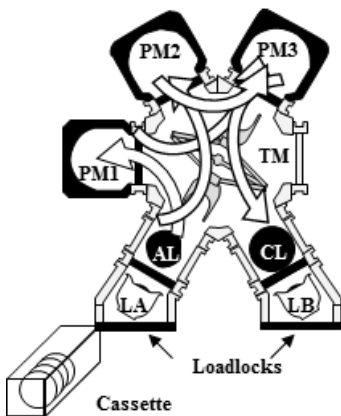


Fig. 1. Cluster tool

Table 1. Task Times for Gantt chart

symbol	time	annotation
<i>g</i>	<i>l</i>	get a wafer from a loadlock or PM
<i>p</i>	<i>l</i>	put a wafer to a loadlock or PM
<i>s</i>	2	swap wafers with a PM
<i>m</i>	<i>l</i>	move
<i>t1</i>	22	process time in a PM for step 1
<i>t2</i>	9	process time in a PM for step 2
λ	12	cycle time

한 것이고, PM들의 회색 부분은 공정 중임을 까만색은 공정이 끝난 웨이퍼가 아직 PM안에서 체재 중인 기간을 의미한다. Fig. 2에서는 PM1과 PM2가 동일한 공정을 병렬적으로 수행 중이므로 두 장비에서의 회색 상자의 칸수는 동일하다.

클러스터 장비에서는 주기 시간을 분석하기 위하여 로봇과 각 PM별 주기를 정의하는 데, “로봇 주기”는 한 주기 동안의 로봇작업 시간의 합으로 정의하며, 공정의 각 단계 주기를 “PM 주기”라고 부른다^[3]. 예를 들어 Figure 1의 로봇 주기 시간은 앞에서 정의한 로봇 작업을 순서대로 더한 값으로 $m+g+m+s+m+s+m+p$ 이며 한 로봇 주기 시간은 언제나 주기 시간보다 작거나 같다. 예를 들어 Fig. 2에서 로봇의 주기는 한 주기 동안 로봇 작업의 총합인 이므로 10이다. 각 단계를 공정하는 PM은 공정과 교환작업을 반복하므로 기본적으로 공정 시간은 공정시간과 교환 작업의 시간을 합한 값이다. 그러나 병렬 PM을 사용하는 단계에서는 매 주기마다 교환 작업을 수행하는 것이 아니라 한 번 교환 작업이 일어나면 다른 병렬 PM이 모두 교환 작업이 수행된 후 다시 교환작업을 수행하므로 PM 주기시간은(공정시간 + 교환작업시간)/(병렬PM의 개수)로 정의한다. 주기 시간 λ 는 병목 (bottleneck)이 되는 공정 주기 혹은 로봇 주기의 주기 시간으로 결정된다. 예를 들어 Fig. 2의 경우 1 단계의 PM 주기 시간은 (첫 번째 단계 공정시간+교환작업시간)/2이므로 $(22+2)/2 = 12$ 이고 2 단계의 PM 주기 시간은 $9+2$ 인 11이고, 로봇 주기 시간은 10이라고 했으므로 주기시간은 이 중 최대값인 12가 되고 병목공정은 병렬 PM을 사용했음에도 불구하고 1단계가 된다. 그리고 양팔 클러스터 장비에서 주기보다 PM주기가 작은 단계에서는 주기 시간과 PM 주기의 차가 최소 최대 체재시간^[2]으로 이상적인 2단계 체재시간은(주기 시간 - 2단계의 PM주기 시간) = $12-11=1$ 이다.

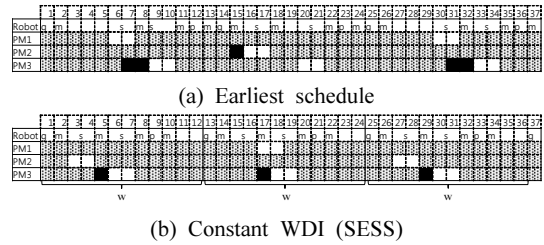


Fig. 2. Steady schedule

Fig. 2a와 2b는 로봇의 작업 순서가 동일하지만 서로 다른 작업 시작 시점을 가질 때 체재시간의 비교를 보여 준다. 일반적으로 클러스터 장비를 사용할 때에는 총 소요 시간(makespan)을 줄이고, 제어를 단순화하기 위하여 SESS(steady earliest starting schedule) 전략을 사용한다. 그러나 같은 공정을 복수개의 병렬 PM에서 수행하는 클러스터 장비를 사용하는 반도체 현장에서는 로드락에서 웨이퍼를 꺼내기 전에 대기하는 경우가 존재한다. Fig. 2a는 순수하게 SESS로 동작하고, Fig. 2b는 로드락에서 웨이퍼를 꺼내기 전에 대기하는 스케줄을 보여준다. Fig. 2b는 PM3의 웨이퍼 체재시간이 앞에서 설명한 이상적인 체재시간인 1로 안정적인 것에 비해 Fig. 2a는 PM3의 웨이퍼 체재시간이 1이 아니라 2와 0이 번갈아 나타나며 요동(Fluctuation)친다. 그러므로 두 스케줄에서 PM3의 평균 웨이퍼 체재시간은 동일하지만 최대 웨이퍼 체재 시간과 분산은 Fig. 2a의 스케줄이 크다. 웨이퍼의 체재 시간이 웨이퍼의 품질에 영향을 미칠 수 있으므로 두 스케줄에서 PM3의 최대 웨이퍼 체재시간이 모두 체재시간 제약을 만족하더라도 Fig. 2a의 스케줄로 작업된 웨이퍼에 비하여 Fig. 2b 스케줄로 작업된 웨이퍼의 품질이 더 균일할 가능성이 높다^[3-4]. 그러므로 반도체 현장에서는 웨이퍼의 품질을 균일하게 하기 위하여 로드락에서 웨이퍼를 꺼내기 전에 대기하는 Fig. 2b의 스케줄을 선호한다. Fig. 2b에서 *w*라고 표기된 간격은 로드락에서 웨이퍼를 꺼낸 후 다음 번 로드락에서 웨이퍼를 꺼낼 때까지의 간격을 표시하고 있는데 우리는 이것을 WDI(wafer delivery interval)이라고 한다. 초기 전이 기간을 지나면 장비는 로봇과 PM에 동일한 작업 주기를 반복하는 안정 상태에 돌입하는 데, WDI를 초기에 일정하게 정의해 주면 시간 변동이 없을 경우 특별히 제어하지 않더라도 안정 상태에서 WDI가 주기 시간과 동일하게 일정한 값을 갖게 되고 각 단계에서 웨이퍼의 체재시간도 최소값을 갖는다.

2.2 시간변동이 있는 안정상태의 스케줄링

안정 상태에서는 초기 작업 시작 시점을 잘 지정하여 WDI와 주기 시간이 동일하게 유지하면 체재시간도 최소 값을 균일하게 유지한다. 일반적으로 클러스터 장비는 정밀하므로 시간변동을 고려하는 경우가 많지는 않지만 로드락에서 웨이퍼를 꺼내면서 웨이퍼의 위치를 조정하는 얼라이닝(aligning) 시에 오류가 발생하면 재시도도 인해 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 시간이 지연된다. 병렬 PM이 있을 경우 이와 같이 크고 작은 시간변동이 발생하면 원래의 이상적인 스케줄로 복귀하지 못하고 일부 단계에서 체재시간이 요동치며 웨이퍼 품질이 저하된다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 시간 변동이 발생하더라도 기존의 스케줄로 복귀시키는 방법이 필요하다^[2].

이 문제를 해결하기 위하여 일부 작업을 강제 지연시켜 초기 시작 시점과 무관하게 이상적인 스케줄로 복귀시키는 방법이 연구되었다^[3-4]. 강제 지연시킬 최소한의 작업과 지연 시간을 찾기 위해서는 먼저 페트리넷(Petri net)으로 모형화하고(max, +) 대수를 분석하여 어떤 주기가 병목공정이 되었을 때 스케줄이 이상적인 스케줄로 복귀되는 지 분석한다. Kim et al.은 Fig. 1의 예제와 같은 경

우에는 로봇 주거나 WDI가 병목공정이 되었을 때 초기 스케줄과 무관하게 언젠가는 이상적인 스케줄로 복귀된다는 것을 보였다^[3]. 그리고 시간 변동이 있는 안정 상태에서 스케줄을 강건하게 하는 전략으로 로봇 주거나 WDI가 병목공정이 되도록 강제 지연시키는 전략을 제안하고, 시물레이션을 통해 두 전략이 스케줄을 강건하게 함을 보였다.

2.3 초기 전이 기간의 스케줄링

Fig. 3은 Fig. 2b의 안정 상태로 가기 위한 초기 전이 단계의 스케줄을 보여준다. Fig. 2b의 안정 상태에서는 로봇이 모든 PM에서 교환 작업을 수행하지만, Fig. 3과 같은 초기 전이 기간에는 일부 PM이 아직 웨이퍼를 가지고 있지 않으므로 교환 작업 대신 웨이퍼를 넣는 작업만을 수행한다. 다시 말해 안정 상태에서 입력 로드락에서 웨이퍼를 꺼내(g), 첫 번째 단계의 PM과 웨이퍼를 교환(s)하고 두 번째 단계의 PM로 이동(m)하여 그 PM의 웨이퍼와 첫 번째 단계 공정이 끝난 웨이퍼를 교환(s)한 후, 모든 공정이 끝난 웨이퍼를 출력 로드락으로 옮겨(m) 반환(p)한 후, 앞의 입력 로드락으로 이동(m)하여 대기하는 작업

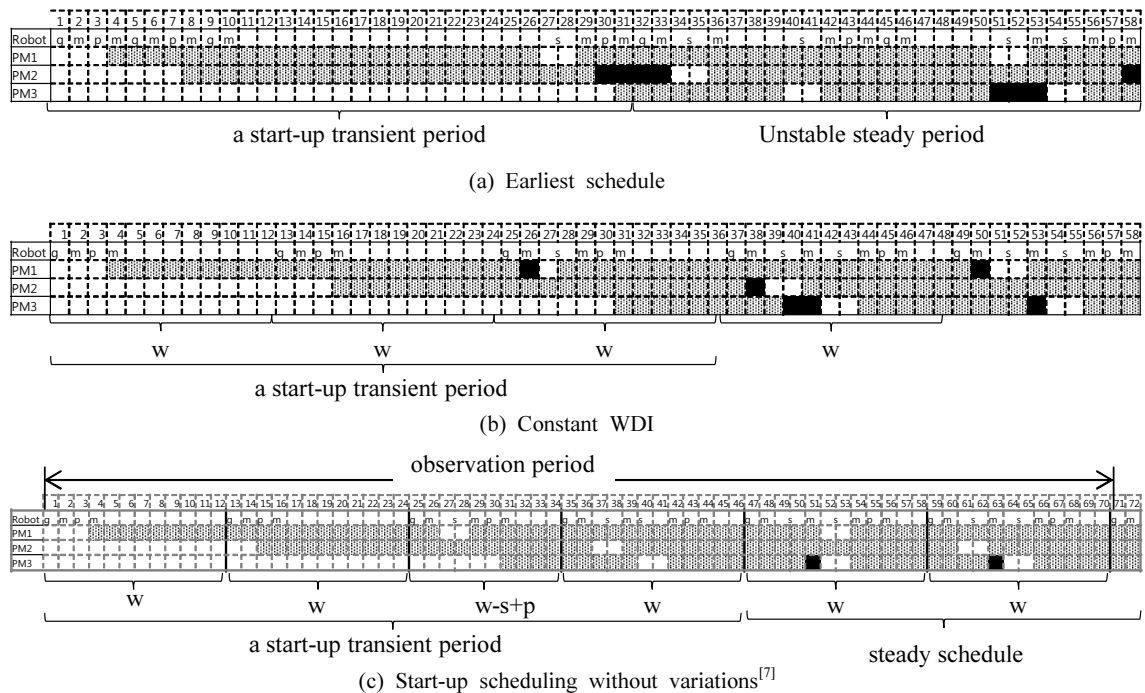


Fig. 3. Start-up transient schedules

을 반복하는 작업과는 다른 로봇 작업 순서를 갖는다. 이 안정 상태 스케줄까지 가기 위해서 초기 전이 기간에서는 Fig. 3과 같이 다음 작업을 진행해야 한다. 입력 로드락에서 웨이퍼 꺼내기(g) → PM1으로 이동(m) → PM1에 웨이퍼 넣기(p) → 입력 로드락으로 이동(m) 후 대기 → 입력 로드락에서 웨이퍼 꺼내기(g) → PM2으로 이동(m) → PM2에 웨이퍼 넣기(p) → 입력 로드락으로 이동(m) → 입력 로드락에서 웨이퍼 꺼내기(g) → PM1으로 이동(m) 후 대기 → PM1과 웨이퍼 교환(s) → PM3으로 이동(m) → PM3에 웨이퍼 넣기(p) → 입력 로드락으로 이동(m) 후 대기. 만일 입력 로드락으로 이동 후 대기 없이 다음 웨이퍼를 바로 꺼내어 작업을 시작한다면 Fig. 3a와 같이 공정시간이 로봇작업 시간에 비하여 상대적으로 길어도 로봇작업들이 특정시간대에 몰려 웨이퍼 체재시간이 불필요하게 발생하는 현상이 나타난다. 그렇다고 안정 상태와 동일하게 WDI를 유지하도록 대기를 하더라도 일반적으로 교환 작업 시간에 비해 웨이퍼를 넣는 작업 시간이 짧으므로 Fig. 3b와 같이 총소요시간도 증가하고, 불필요하게 체재시간도 증가하는 현상이 발생한다. 그러므로 초기 전이 기간에서는 입력 로드락으로 이동 후 얼마나 대기하는 것이 체재시간과 총소요시간을 최적화할 것인가가 중요 스케줄링 이슈가 된다.

즉, 초기 전이 기간에서는 안정 상태와는 다른 시간 결정 방법이 필요하다. 지금까지 시간제약과 병렬 PM이 있는 클러스터 장비의 안정 상태에서의 이상적인 스케줄로 짧은 시간에 시간 제약을 만족시키면서 전이할 수 있는 스케줄링 방법이 연구되었다. 즉, 주어진 이상적인 스케줄을 페트리넷 및 도달성 그래프(reachability graph)로 모형화하고 시간제약을 만족시키면서 다양한 최적화 방법론을 사용하여 전체 시간을 최소화하는 작업 시작시점을 계산하였다⁵⁻⁶. Kim et al.은 초기 전이 단계에서 Fig. 3c와 같이 각 로봇 작업은 안정 상태로 갈 수 있는 시점 중 가능한 늦은 시점에 시작하도록 하는 것이 가장 좋다는 것을 보였다⁷. 그러나 이런 연구들은 시간 변동이 없다는 가정 하에 분석한 것이므로 시간 변동에도 강건하게 체재 시간을 만족시키면서 이상적인 안정 상태로 보내는 전략이 필요하다.

3. 시뮬레이션을 통한 전략 분석

본 절에서는 기존의 시간 변동이 없다는 가정 하에 도출한 초기 전이 기간에서의 스케줄을 기반으로 시간 변동

에 강건하게 안정 상태 스케줄로 보내는 강제 제어 전략들을 제시한다. 그리고 그 전략들이 유용하다는 것을 보이기 위하여 시뮬레이션으로 검증한다.

3.1 초기 전이 기간의 스케줄링 전략

본 연구에서는 2.2에서 언급한 안정 상태에서의 강제 지연 전략을 초기 전이 단계에 적합하게 변형한다. 이를 통해 안정 상태의 초기 작업 시작 시점을 이상적인 값이 되도록 하는 전략을 제안한다. 즉, 로봇은 중간에 일을 하지 않는 유휴시간(idle time)이 존재하는 데, 클러스터 장비에서는 대부분 로드락에서 웨이퍼를 꺼내기 전에 로봇이 대기함으로써 유휴시간을 주기 시간을 기준으로 계산하여 사용하도록 제어한다.

[3]에 의하면 양팔 클러스터 장비에서는 안정 상태의 스케줄을 SESS하게 만들기 위해서는 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 간격인 WDI를 만큼 유지하도록 로봇팔을 대기시키는 전략 1(strategy 1)과 로봇의 주기가 되도록 로드락에서 웨이퍼를 꺼내기 전 대기하는 전략 2(strategy 2)가 도출되며, 이 전략들이 시간 변동이 있는 상황에서도 스케줄을 효율적으로 안정화시킨다. 시간 변동이 없을 때에는 두 전략 중에서 어떤 것을 선택하더라도 동일한 스케줄 패턴을 갖지만 시간 변동이 발생할 경우 전략 2가 전략 1을 적용했을 때보다 빠르게 정상적인 상태로 복귀한다.

본 논문에서는 이 두 개의 전략을 초기 전이 상태에도 적용하려고 한다. 그러나 앞 절에서 설명한 바와 같이 초기 전이 상태에서는 로봇이 모든 PM에서 교환 작업을 수행할 수 없기 때문에 작업의 종류, 순서, 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 간격이 안정 상태에서의 스케줄과 다르다. 그러므로 본 연구에서는 이상적인 WDI인 λ 를 병목 공정의 주기시간으로 설정하지 않고 [13]에서 가능한 늦게 시작하는 전략으로 도출한 스케줄에서 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 간격 $\vec{\lambda}$ 로 이상적인 WDI기준을 사용한다. 예를 들어 Fig. 3의 경우 기준 $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5\}$ 가 $\{w, w, w-s+p, w, w\}$ 가 된다. 그러므로 “전략 1”은 WDI의 간격을 $\vec{\lambda}$ 가 되도록 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 간격을 제어하고, “전략 2”는 로봇 주기가 $\vec{\lambda}$ 가 되도록 로봇의 작업시간을 제어한다.

시간 변동이 없을 경우 두 전략은 동일한 스케줄을 생성하지만 시간 변동이 발생한다면 두 개의 전략은 다른 스케줄을 생성하고, 이로 인해 이상적인 안정 상태 가는 속도가 달라질 수 있다. 예를 들어 시간 변동이 발생하지

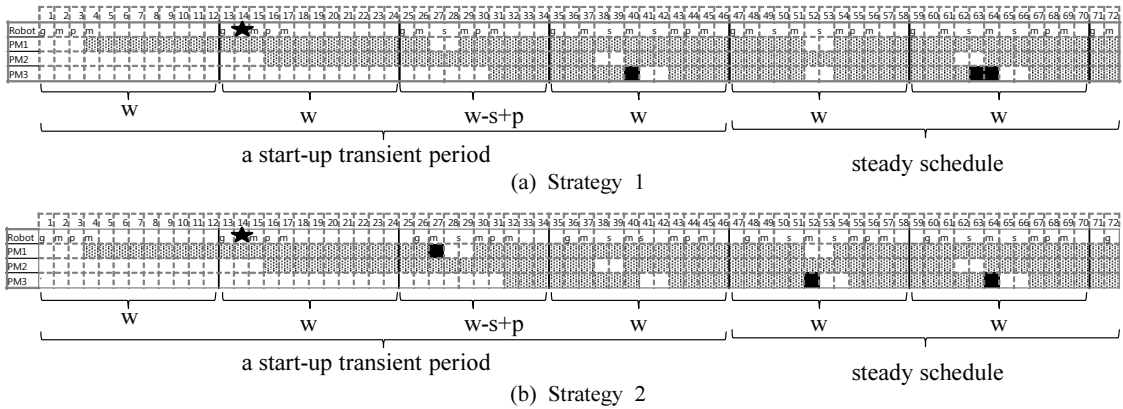


Fig. 4. A comparison of two strategies

않는다면 Fig. 3c의 스케줄을 갖는 클러스터 장비가 주어질 때, 두 번째 웨이퍼를 로드락에서 꺼내는 도중 얼라이닝(alining)을 실패하여 꺼내는 시간이 증가되면 각 전략을 사용하는 스케줄을 Fig. 4와 같이 변경된다. 간트 차트 내에 까만 별은 얼라이닝 실패를 표기한 것이다. 각 전략에 의한 변화를 자세히 살펴보면 다음과 같다. Fig. 4a의 전략 1은 시간이 변동해도 로드락에서 웨이퍼를 꺼내는 시점이 변경되지 않았지만 PM2의 공정 시작 시점이 미뤄져서 정상적으로 웨이퍼를 보내주는 PM1에서 공정을 마친 웨이퍼와 PM2에서 공정을 마친 웨이퍼 간의 체제 시간이 동일하지 않고, 지속적으로 변한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 예제에서는 전략 1은 이상적 스케줄로 빠르게 복귀하지 못 하므로 “강건하지 못 하다”라고 할 수 있다. Fig. 4b는 전략 2로 한번 시간이 늦어지면 추가적인 모든 로봇 작업이 그만큼 지연된다. 이에 따라 PM1에서 공정 중이 웨이퍼에 체제 시간이 생겼지만 그 이후에 빠르게 이상적인 스케줄로 복귀한다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 전략 2는 강건한 스케줄을 생성하는 전략이라고 할 수 있다. 안정 상태에서는 전략 1과 전략 2가 동일한 주기 시간을 갖지만, 본 예제에서 전략 2의 총 소요 시간이 증가되었다.

3.2 시뮬레이션 분석

본 절에서는 초기 전이 상태 스케줄링을 위해 3절에서 제안한 2가지 전략을 활용하여 시뮬레이션을 수행하여 비교한다. 작업 시간의 평균은 병렬 PM이 있는 클러스터 장비의 대표적인 작업 시간을 사용하고^{2, 3)}, 작업시간은 정규분포를 따른다고 가정한다. 일반적으로 클러스터 장비의 변동폭은 크지 않지만 본 논문에서는 변동에 의한 값

Table 2. Times for simulations

task	mean time (second)	std. dev.	
		5%	10%
get a wafer from a loadlock or PM	13	.40	.79
put a wafer to a loadlock or PM	9	.27	.55
swap wafers with a PM	22	0.67	1.34
move	1	.03	.06
process time in a PM for step 1	270	8.23	16.46
process time in a PM for step 2	120	3.66	7.32

의 변화를 보기 쉽게 하려고 두 단계 (5%와 10%)로 실험하였고, 그 때 각 작업시간의 표준편차는 Table 2와 같다. 즉, 10%라고 하는 것은 작업시간의 90%에 대해 |실제 시간 - 작업시간| < 작업 시간의 평균 * 0.1이고, 5%라는 것은 90% 이상의 작업에 대해 |실제 시간 - 작업시간| < 작업 시간의 평균 * 0.05라는 의미다. 예를 들어 이동 시간의 평균은 1초이므로 90%의 신뢰구간이 0.1초가 되기 위해서는 표준편차가 0.1/1.645로 0.06이 된다. 즉, 10%일 때 이동 시간을 $m \sim N(1, 0.06)$ 으로 정의한다.

Fig. 1의 클러스터 장비의 각 작업 시간이 Table 1의 작업 시간과 같고 시간 변동이 없다면 안정 상태에서의 주기 시간은 146초이고 첫 번째 단계와 두 번째 단계에서의 체제 시간은 각 0초와 8초로 일정하다. 다만 [7]에서 제시한 방법을 따르면 첫 번째 PM3의 체제시간을 없앨 수 있으므로 Fig. 3에서 지정한 기간 내의 PM3의 평균 체제시간은 4초이다. 그러나 작업시간에 지속적인 변동이 있을 경우 체제시간의 등락이 발생하여 최대 체제시간이 증가되어 체제시간 제약을 만족시키지 못 할 수 있다. 통

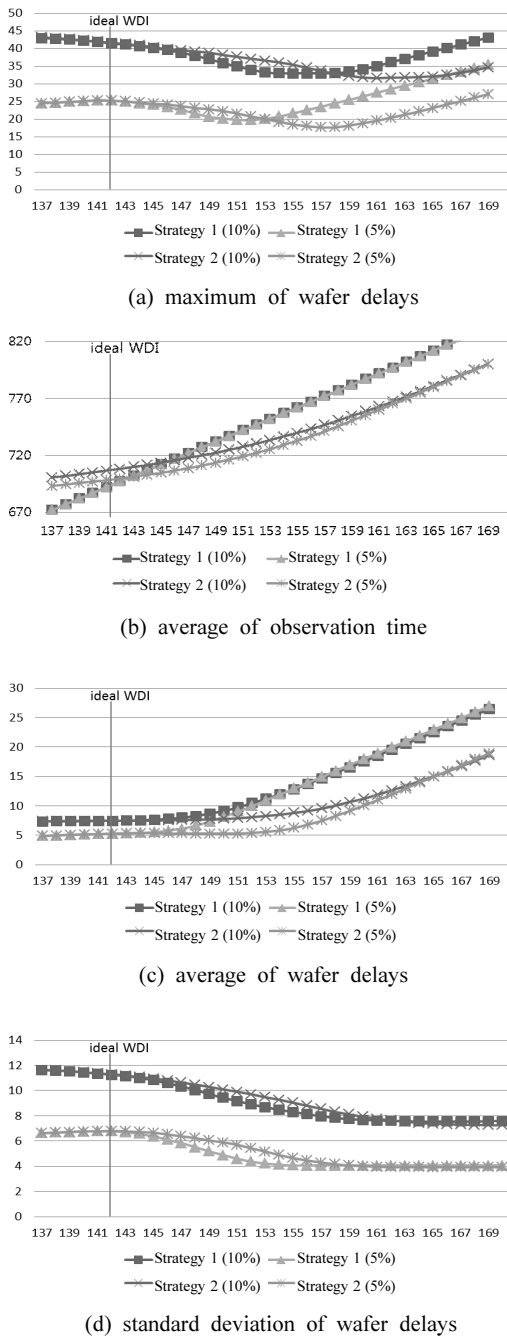


Fig. 5. Results

계치를 얻기 위해서 최소 20개 로트(lot)에 대해 Figure 3c의 관찰기간(observation period)에서의 최대값, 평균, 분산 및 작업시간을 관찰하였다. 그러나 이러한 관찰이

한 번만 이뤄질 경우 최대값 등이 특이점에 의해 좌우될 수 있으므로 이 관찰을 20번 이상 반복하여 평균을 구하였다.

예제 웨이퍼 흐름의 경우 첫 번째 단계가 전체 공정의 병목단계가 되어 기대 체재시간이 0이어서 주로 두 번째 단계에서의 체재시간이 중요한 이슈가 되므로 본 논문에서는 두 번째 단계의 체재시간 위주로 분석한다. Fig. 5a는 각 실행의 PM3의 체재시간의 최대값을 구한 후, 20개의 최대값의 평균을 관측한 그래프이다. 작업시간에 변동이 없을 경우에는 기준 WDI(ideal WDI)가 146이지만 기준 WDI에 맞게 전략 1과 2의 대기시간을 설정할 때보다 대기 시간을 연장하였을 때에 최대 체재 시간이 감소하다가 일정 값을 초과하면 다시 빠르게 증가된다는 것을 관측할 수 있다. 또한 변동이 심할수록 최대 체재시간을 최소화하는 대기시간이 증가됨을 알 수 있다. 그러므로 체재시간의 최대값을 최소화하기 위해서는 안정상태의 스케줄과 마찬가지로 총소요시간을 희생할 필요가 있다. 그리고 이 실험에서는 전략 1이 전략 2에 비하여 최소화하는 대기시간이 짧고, 전략 2는 대신 최대 체재 시간이 전략 1에 비해 미미하게 작은 경향이 있다.

Fig. 5b는 Fig. 4에서 지정한 관측 기간(observation time)을 수행하는 데 걸린 시간을 의미하는 데, 이 시간이 짧을수록 하나의 로트를 처리하는 데 소요되는 총 시간이 줄어든다. Fig. 5b에 의하며 직관적으로 알 수 있듯이 대기시간이 길어질수록 전략과 관계없이 이 시간이 순증가한다는 것을 알 수 있다. 기준 WDI에 비하여 로봇이 대기하는 전략 2가 조금 짧지만 일반적으로 이 기간은 전체 로트를 공정하는 시간에 비하여 매우 짧기 때문에 큰 고려대상은 아니다. 이 보다는 안정 상태에서의 시간이 총 소요시간에 많은 영향을 준다.

Fig. 5c는 평균 체재시간을 보여주고 있는 데, [7]에서 제안한 스케줄인 이상적인 WDI에서도 PM3의 평균 체재시간이 예상 시간인 4초보다는 늘어나 전략 1을 사용할 경우 약 7초, 전략 2를 사용할 경우 약 5초정도 걸린다는 것을 알 수 있다. 이 시간은 대기시간을 증가시켜도 늘지 않다가 일정 시간이상 대기하면 증가하기 시작하는 데, 여전히 전략 2를 사용할 때 평균시간이 짧다는 것을 알 수 있다. 안정적인 상태(steady state)에서는 전략 2와 유사한 전략이 전략 1보다 스케줄을 안정화시키는 속도가 빨라 평균 체재시간이 감소됨을 증명되었는데 Fig. 4처럼 초기 전이 상태에서도 전략 1이 스케줄을 빠르게 안정시켜 평균 체재시간을 줄이는 효과가 있는 듯하다.

Fig. 5d는 PM3 체재시간의 표준 편차를 나타내고 있

는데, 대기 시간이 증가할수록 표준편차가 줄어들다가 일정 대기 이상이 되면 표준편차가 거의 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 웨이퍼 체제시간의 변동은 로드락에서 웨이퍼를 꺼내기 전에 대기하는 시간을 증가시킬수록 줄어들지만 일정 대기 시간 이상은 변동폭에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후연구과제

본 논문에서는 시간제약이 있는 양팔 클러스터 장비에서 이상적인 안정상태의 스케줄에 안착할 수 있으면서 공정 후 웨이퍼가 PM에 머무는 잔여시간의 변동을 줄이기 위하여 초반 전이 기간의 두 가지 전략을 제안하였다. 일반적으로 클러스터 장비의 경우 웨이퍼를 로드락에서 꺼내는 작업을 제외하면 로봇은 가능한 일찍 작업하려고 하는 경향이 있기 때문에 두 가지 전략 모두 기존의 안정상태의 전략을 초기 전이 상태에 맞게 변경하여 로드락에서 꺼내는 시점을 결정하는 전략으로 WDI를 일정하게 하는 전략과 이전 주기의 로봇 작업이 끝난 후에 로드락에서 꺼내는 대기 시간을 일정하게 유지하게 하는 전략을 제시하였다. 제안하는 스케줄링 전략을 사용할 경우 총소요시간을 다소 증가시키지만 웨이퍼의 최대 체제시간 및 체제시간의 변동을 감소시켜 웨이퍼의 품질을 향상시킬 수 있다. 제안한 스케줄링 전략의 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 기존의 안정상태와는 달리 WDI를 일정하게 유지하는 전략이 효율적이었다. 향후에는 다양한 웨이퍼 흐름 및 시간 변동 환경을 고려하여 가장 적합한 WDI 기간을 결정하는 연구와 한 팔 클러스터 장비에서도 본 연구와 유사한 초기 전이 상태에서의 스케줄링 전략에 대한 연구가 필요하다.

References

1. Robot van der Meulen, Janessa Rivera (2015), "Gartner Says Worldwide Semiconductor Sales Expected to Reach \$358 Billion in 2015, a 5.4 Percent Increase From 2014" Stamford, Conn. January 14, 2015, <http://www.gartner.com/newsroom/id/2962117>.
2. Tae-Eog Lee (2008), "A review of scheduling theory and methods for semiconductor manufacturing cluster tools", in Proceedings of 2008 winter simulation, pp. 2127-2135.
3. Ja-Hee Kim, Tae-Eog Lee (2003), "Schedule stabilization and robust timing control for time-constrained cluster tools", in Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pp. 1039-1044.
4. Ja-Hee Kim, Mengchu Zhou, Tae-Eog Lee (2014), "Schedule restoration for single-armed cluster tools", Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on, vol. 27, no. 3, pp. 388-399.
5. Younghun Ahn, James R. Morrison (2010), "Analysis of circular cluster tools: transient behavior and semiconductor equipment methods", in Proceedings on Automation Science and Engineering, pp. 39-44.
6. Hong-Yue Jin, James R. Morrison (2013), "Transient scheduling of single armed cluster tools: algorithms for wafer residency constraints", in Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pp. 856-861.
7. Tae-Kyu Kim, Chihyun Chung, Tae-Eog Lee (2012), "Scheduling start-up and close-down periods of dual-armed cluster tools with wafer delay regulation", International Journal of Production Research, vol. 5, no. 10, pp. 2785-2795.
8. Jong In Chai, Yang Byung Park (2010), "A study on throughput increase in semiconductor package process of K manufacturing using a simulation model", Journal of the Korea Society for Simulation, vol. 19, no. 1, pp. 1-11.
9. Geun-Cheol Lee, Seong-Hoon Choi (2011), "A simulation study on capacity planning in hybrid flowshops for maximizing throughput under a budget constraint", Journal of the Korea Society for Simulation, vol.20, no. 3, pp. 1-10.
10. Yil-Seung Park, Chil-Gee Lee (2002), "Conveyor capability for semiconductor diffusion area", Journal of the Korea Society for Simulation, vol. 11, no. 3, pp. 59-65.
11. Bong-Ju Jeong, Yun-Jun Lee, Seung-Bae Shim (1999), "Performance analysis of scheduling rules in semiconductor wafer fabrication", Journal of the Korea Society for Simulation, vol. 8, no. 3, pp. 49-66.
12. Woo Seok Kim, Youn Han Jeon, Doo Yong Lee (2009), "High-fidelity simulation of integrated single-wafer processing tools for evaluation of scheduling algorithms", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.25, no. 1, pp. 107-121.
13. Ja-Hee Kim (2003), Scheduling and timing control of time-constrained cluster tools, PhD Thesis.



홍 경 호 (trueman3k@gmail.com)

1992 부산대학교 전자계산학과 학사
2010 서울과학기술대학교 IT정책전문대학원 산업정보시스템전공 석사
2013~서울과학기술대학교 IT정책전문대학원 산업정보시스템전공 박사과정
2003 정보관리기술사
1991~2005 포스데이타
2005~2010 한국CA
2011~현재 포스코ICT

관심분야 : IT서비스 관리 및 평가, 소프트웨어 아키텍트, 소프트웨어 솔루션



김 자 희 (jahee@seoultech.ac.kr)

2005 KAIST 전산학과 학사
2007 KAIST 전산학과 석사
2003 KAIST 산업공학과 박사
2004 비엔나 대학교 방문연구원
2005~현재 서울과학기술대학교 IT정책전문대학원 교수

관심분야 : 요구공학, 반도체 제조 스케줄, 스마트 그리드