

반도체 생산 성능 향상 및 다양한 이송패턴을 수행할 수 있는 범용 스케줄러 알고리즘에 관한 연구

송민기¹ · 정찬호^{1†} · 지승도¹

A study of Cluster Tool Scheduler Algorithm which is Support Various Transfer Patterns and Improved Productivity

Min-gi Song · Chan-ho Jung · Sung-do Chi

ABSTRACT

Existing research about automated wafer transport management strategy for semiconductor manufacturing equipment was mainly focused on dispatching rules which is optimized to specific system layout, process environment or transfer patterns. But these methods can cause problem as like requiring additional rules or changing whole transport management strategy when applied to new type of process or system. In addition, a lack of consideration for interconnectedness of the added rules can cause unexpected deadlock. In this study, in order to improve these problems, propose dynamic priority based transfer job decision making algorithm which is applicable with regardless of system lay out and transfer patterns. Also, extra rule handling part proposed to support special transfer requirement which is available without damage to generality for maintaining a consistent scheduling policies and minimize loss of stability due to expansion and lead to improve productivity at the same time. Simulation environment of Twin-slot type semiconductor equipment was built In order to measure performance and examine validity about proposed wafer scheduling algorithm.

Key words : Scheduling algorithm, Modeling & simulation, Semiconductor process

요약

기존의 반도체 생산 공장에서 운용되는 공정설비의 자동화된 웨이퍼 이송을 위한 스케줄링 운용전략에 대한 연구는 일반적으로 특정 공정 환경과 시스템 형태에서 운용되는 이송패턴에 최적화시킨 규칙기반으로 진행되어 왔다. 그러나 이러한 방식은 시스템이나 공정이 달라지면 새로운 규칙이 필요하거나 전체 운용 전략을 변경해야 하는 문제가 발생할 수 있다. 또한, 규칙이 추가될수록 확장, 유지 보수 시에 추가된 규칙들의 상호 연관 작용에 대한 고려가 부족한 경우 예기치 않은 문제를 유발할 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 이송패턴이나 설비의 형태에 일반적으로 적용 가능한 동적 우선순위 기반의 기본 이송작업 선택 알고리즘을 제시하였다. 또한 특수한 요구 사항에 대해서는 범용성을 저하시키지 않는 범위 내에서의 최소한의 규칙 처리부를 별도로 관리하는 방식으로 운용 환경 변화에 일관된 스케줄링 정책을 유지하고 확장 시의 안정성 저하를 최소화하여 생산성 향상을 이끌 수 있는 범용 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 검증은 위하여 트윈 슬롯 형태의 반도체 공정설비를 대상으로 모델링 및 시물레이션 환경을 구축하였고, 시물레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

주요어 : 스케줄링 알고리즘, 모델링&시물레이션, 반도체 공정 설비

접수일(2010년 8월 18일), 심사일(1차 : 2010년 12월 13일), 게재 확정일(2010년 12월 18일)

¹⁾ 한국항공대학교 컴퓨터공학과

주 저 자 : 송민기

교신저자 : 정찬호

E-mail; bobosong@korea.com

1. 서 론

최근 반도체 생산 공장(FAB : Fabrication)에서는 경쟁력 향상을 위하여 집적도 향상, 차세대 메모리 등의 공정기술 개발 및 FAB 증설과 공정설비에 대한 투자 등을 통하여 생산성 확대에 박차를 가하고 있다¹⁾. 또한, 생산 공장에서의 설비 고장, 공정 지연 등으로 발생하는 생산성 감소 요인을 전산화를 통한 실시간 모니터링으로 감지하고 즉각적으로 조치하는 방식을 통하여 생산성 저하를 최소화하고자 노력하고 있다. 이러한 반도체 생산 공장의 추세와 발맞추어 공정설비 상에서도 생산 공장의 요구 사항에 대한 신속하고도 안정적인 대응과, 갈수록 복잡해지는 공정 환경에 대한 지원이 필요하게 되었다.

예를 들면 새롭게 개발되는 복잡하고 정밀한 공정의 결과를 확보하기 위하여 다양한 형태의 공정 모듈 및 설비 형태 등이 제안되고 개발되어 이에 부합하는 웨이퍼 이송 운용 전략이 필요하게 되는 경우라 할 수 있다. 또한 공정 복잡도 증가에 따른 병렬/연속(순차)/재방문/혼합 등의 다양한 이송패턴이 동일 시스템 상에서 모두 지원 가능하도록 요구되어 특정 공정을 위한 고정된 이송패턴 상에 최적화되는 것뿐만 아니라 다양한 이송패턴 상에서 최적화되는 것이 요구되는 경우 등에도 해당된다.

본 논문에서는 이와 같은 요구 변화와 관련하여 특정 환경에만 최적화된 운용전략을 제시하였던 기존 연구의 보완점을 도출하고, 다양한 설비 형태와 이송 패턴 상에서도 공통적으로 유효한 결과를 나타내는 범용 스케줄링 알고리즘을 제안하고자 한다. 또한, 제안의 타당성을 검증하기 위하여 최근 반도체 생산 공장에서 운용되고 있는 트윈 슬롯 형태의 공정설비를 대상으로 시뮬레이션 환경을 구축하여 실험하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 반도체 공정설비의 웨이퍼 이송 스케줄링 관련 기존 연구 내용을 살펴보고 새로운 요구 사항의 지원을 위하여 본 논문에서 제안하는 범용 스케줄링 알고리즘의 필요성에 대하여 살펴본다. 3장에서는 범용 스케줄링 알고리즘의 성능 분석을 위하여 시뮬레이션 대상으로 선정한 트윈 슬롯 공정설비의 웨이퍼 이송 패턴과 범용 스케줄링 알고리즘의 세부 사항 및 이송 작업 결정방식에 대하여 설명한다. 4장에서는 트윈 슬롯 공정설비 시뮬레이션 환경 구축을 위해 작성된 모델 구조도 설명 및 사례연구를 통해 범용 스케줄링 알고리즘의 수행 결과 분석에 대해 설명한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺기로 한다.

2. 관련연구 및 제언의 필요성

반도체 공정설비의 웨이퍼 이송 운용전략과 관련된 기존의 연구에서는 안정 상태(Steady Flow)를 가정하고 양 팔로봇에서는 순차적으로 웨이퍼 꺼내고 넣기(Swap), 외 팔로봇에서는 뒤에서부터 웨이퍼 꺼내기(Backward) 전략이 최적의 결과를 보임을 증명 하였다^{8,9)}. 그러나 모듈간 공정시간이 일정하지 않아 특정 모듈에서 병목이 발생하는 경우나 모듈이 서로 다른 주기를 가지는 클리닝을 진행해야 하는 경우, 재방문 또는, 2가지 이상의 패턴이 혼합된 혼합패턴과 같이 복잡한 이송패턴을 필요로 하는 경우 등의 특수한 조건에서는 최적의 결과를 보이지 못하고 새로운 운용전략이 필요 하게 되었다^{2,3)}. 따라서 기존 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 공정 시간이 서로 다른 공정 모듈을 가지는 다중 슬롯 클러스터 장비에서 병목 모듈을 기준으로 순차적으로 웨이퍼 꺼내고 넣기(Swap) 전략과 뒤에서부터 웨이퍼 꺼내기(Backward) 전략을 혼용하는 방식을 제안하였고, 클리닝을 가지는 클러스터 장비에서는 잔여시간과 병목 모듈 전·후로 모듈에서 웨이퍼를 꺼내기 위한 규칙을 달리하는 운용 전략을 제안하여 복잡한 환경에서의 생산성 향상을 시도하였다^{4,7)}. 기존 연구에서 제안된 스케줄링 운용 전략은 변화된 운용환경에서 기존의 운용 전략보다 생산성 측면에서 향상된 결과를 도출하였음에도 불구하고 다음과 같은 부분에서 추가적인 고려가 필요하게 되었다.

첫째, 제안된 스케줄링 운용 전략이 진공상태 이송 로봇과 공정 모듈 간의 관계에 집중되어 중간 버퍼(Intermediate Buffer)나 대기상태 이송 로봇 등이 추가되는 일반적인 공정설비 형태에서 필요한 운용 전략으로 부합되지 않는 부분에 대한 고려가 필요하다. 둘째, 제안된 스케줄링 운용 전략의 실험 환경이 특정 이송패턴으로 국한되어 제안된 운용전략이 다른 이송패턴에서도 동일하게 유효한 전략인지의 검증 부분에 대한 고려가 필요하다. 셋째, 제안된 스케줄링 운용 전략이 이송 작업을 결정하는 데 있어, 공정 모듈에서의 공정 시간을 중요 기준으로 사용하는 것은 온도 조건이 필요한 공정이나, 공정 모듈 이상으로 공정 시간이 길어지는 등 공정 시간을 예측할 수 없는 경우가 빈번한 최근의 공정 설비 운용 환경과 부합되지 않아 작업 결정 방식의 명확한 기준에 대한 고려가 필요하다.

열거된 사항들은 웨이퍼 이송을 위한 스케줄링 운용전략의 범용성이 손상되는데 영향을 미치는 요인을 바탕으로

로 도출되었으며, 본 논문에서 제안하는 동적 우선순위 및 규칙베이스 필터링 혼합 운용전략을 통하여 개선하고자 하는 중요 내용이다.

3. 트윈 슬롯 공정설비 이송 패턴과 범용 스케줄링 알고리즘

3.1. 트윈 슬롯 공정설비 이송 패턴

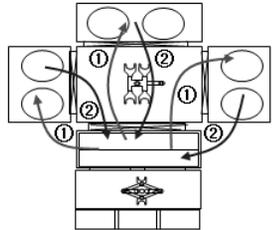
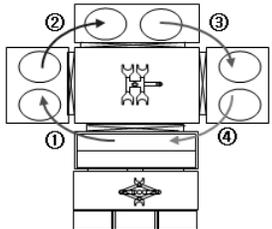
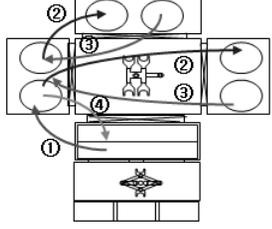
트윈 슬롯 공정설비와 같은 공정모듈 배치를 가지는

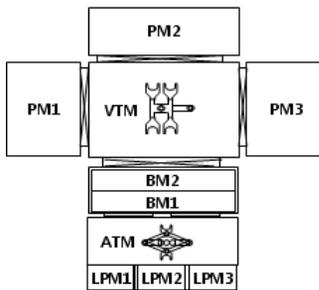
설비에서 나타날 수 있는 이송 패턴은 병렬, 순차 패턴, 혼합 재방문 등이 있으며 표 1에 각 패턴별 구체적인 웨이퍼 이송 및 공정 흐름을 설명하였다.

3.2 범용 스케줄링 알고리즘

본 논문에서는 앞서 2장에서 언급한 특정 시스템 형태나 이송패턴에서만 유효했던 기존 제안 운용전략의 문제점을 개선하기 위해 동적 우선순위를 기본 운용전략으로 하고, 교착상태 방지와 생산성 향상을 위하여 별도로 운

표 1. 트윈 슬롯 공정설비 이송패턴별 공정 과정

이송 패턴 종류	패턴 예시	공정 흐름
병렬 이송 패턴		모든 공정 모듈이 같은 공정을 진행하는 경우로 웨이퍼 흐름은 모든 공정 모듈에서 ① → ② 과정을 반복한다.
연속(순차) 이송 패턴		설비 상에서 여러 공정을 진행하는 경우로 웨이퍼 흐름은 ① → ② → ③ → ④ 순서대로 이루어진다.
연속 후 병렬 혼합 재방문 이송 패턴		설비 상에서 같은 공정을 2번 이상 진행하는 경우 발생하는 패턴이다. 웨이퍼 흐름은 ①(연속) → ②(병렬) → ③(연속, 재방문) → ④와 같이 이루어진다.



여기에서

1. LPM (Load Port Module) : 설비에서 공정 진행 할 웨이퍼를 25매 단위로 공급하고 공정 완료 된 웨이퍼가 회수되는 모듈
2. ATM (Atmosphere Transfer Module) : 대기 상태에서 웨이퍼를 이송하는 모듈로 대기 이송 로봇이 LPM과 BM간 웨이퍼의 이송을 수행한다.
3. BM (Buffer Module) : 진공과 대기를 전환해주는 중간 모듈로 진공과 대기 전환을 위한 특수한 장치들로 구성된다.
4. VTM (Vacuum Transfer Module) : 진공 상태에서 웨이퍼를 이송하는 모듈로 진공 이송 로봇이 BM과 각 PM간의 웨이퍼 이송을 수행한다.
5. PM (Process Module) : 이송 되어진 웨이퍼에 목적에 따라 물리적, 화학적 작용을 가하는 모듈

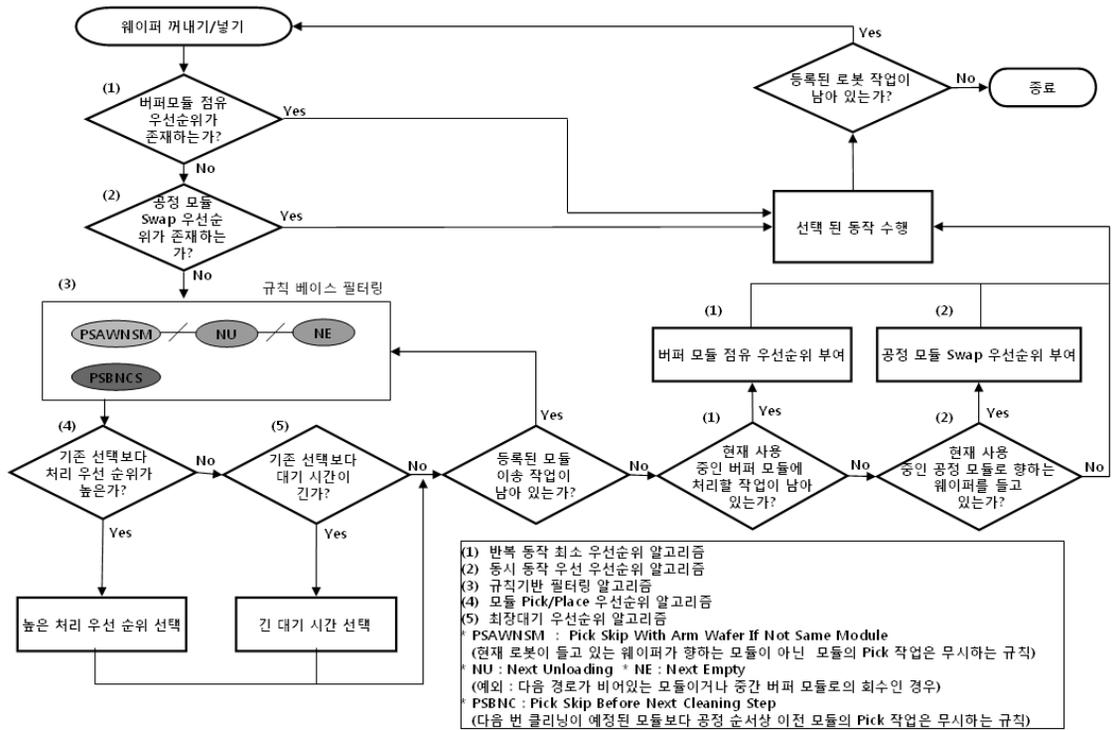


그림 1. 제안된 스케줄링 알고리즘 순서도

용되는 규칙베이스 필터링 방식을 혼합한 범용 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 또한, 이송작업의 결정에 있어서는 설비에서 발생하는 웨이퍼 꺼내기(Pick)완료, 웨이퍼 넣기(Place)완료, 공정(Process)완료 등의 이벤트에 의해서만 작업으로 등록시키고 등록된 작업만을 이송을 위한 의사결정의 대상으로 삼아 공정시간, 잔여시간 등과 같은 불확실한 기준을 배제하도록 하였다. 제안하는 스케줄링 알고리즘에서는 이송 작업을 결정하는 데 있어서 우선순위가 다른 4개의 단계를 설정하고, 등록된 이송 작업을 각 단계별 세부사항에 기술된 것과 같은 방식으로 각 단계에 해당하는 우선순위를 부여하는 동적 우선순위를 기본 스케줄링 정책으로 사용하였다. 우선순위 부여를 위한 판단 기준은 최근의 반도체 공정설비의 일반적인 형태를 기준으로 공정 환경에 상관없이 적용 가능한 항목으로 구성되어 운용 환경 변화에 의한 영향을 최소화하도록 하였다. 또한, 특수한 공정 환경이나 복잡한 요구사항으로 발생하는 예외적인 처리는 별도의 규칙베이스 필터링 부에서 처리하도록 분리하여 규칙의 추가로 인하여 전체적인 스케줄링 운용 전략이 손상되는 것을 방지하도록 하였다. 범용 스케줄링 알고리즘의 단계별 세부사항의 설명은 다음과 같다(그림 1 참조).

3.2.1 반복 동작 최소 우선순위 처리 단계

최상위 우선순위로 그림 1의 상단 (1)번 단계와 같이 해당 우선순위로 등록된 작업이 있는 경우 이하 작업 선택 과정을 생략하고 해당 우선순위로 등록된 이송 작업을 수행한다. 중간 버퍼와 같이 동시에 여러 로봇이 접근할 수 있는 특성을 가지는 모듈 작업을 처리하는 로봇은 그림 1의 하단 (1)번 단계에서와 같이 큐에 등록된 버퍼 접근 작업이 모두 처리될 때까지 버퍼로 향하는 로봇의 우선순위를 높여 주어 계속적으로 해당 작업이 먼저 선택되도록 하고 다른 로봇에 의한 동시접근 및 빈번한 전환(진공, 대기전환) 작업으로 발생하는 점유 시간 증가나 교착 현상을 방지하도록 하였다.

3.2.2 동시 동작 우선 순위 처리 단계

전 단계인 반복동작 최소 우선순위에 해당하는 작업이 없는 경우 그림 1의 상단 (2)번 단계에서와 같이 동시동작 우선순위에 해당하는 작업 유무를 확인하고 해당 우선순위 작업이 존재하는 경우 이하 작업 선택 과정을 생략하고 해당 우선순위로 등록된 이송 작업을 수행한다. 동시 동작 우선순위의 등록은 그림 1의 하단 부 (2)번 단계에서와 같이 로봇이 현재 선택된 공정 모듈에서 웨이퍼를

꺼내는 작업을 수행하기 전에 동일 공정 모듈로 향하는 또 다른 웨이퍼를 들고 있고, 모듈에 일반 공정 이외에 다른 이벤트(클리닝)가 예정되어 있는 경우가 아니면 모듈로 향하는 작업을 동시 동작 우선순위로 등록하고, 다음 번 의사결정 시 우선적으로 선택되도록 하여 일반적인 상황에서 순차적으로 웨이퍼 꺼내고 넣기(Swap) 전략과 동일한 효과가 나타나도록 하였다.

3.2.3 규칙기반 필터링 처리 단계

상위 2가지 우선순위에 해당되지 않는 모든 작업은 운용 전략상 추가된 규칙을 바탕으로 이송의 타당성을 검증하기 위하여 그림 1의 (3)번 단계인 규칙베이스 필터링 과정을 거치게 된다. 이는 기본 동적 우선순위 알고리즘 전략 이외에 특화된 전략이 필요한 경우 범용성을 해치거나 교착상태 등을 유발하지 않는 범위에서 규칙기반 필터링 항목으로 추가하여 유효하지 않은 작업을 제거함으로써 좀 더 우수한 알고리즘을 제안하고자 함이다. 본 논문에서는 연속 이송패턴 시의 순차적으로 웨이퍼 꺼내고 넣기(Swap)의 유도, 재방문 패턴 시의 교착현상 방지를 위하여 현재 웨이퍼를 꺼내고자 하는 모듈로 향하지 않는 웨이퍼를 로봇이 들고 있을 때에는 해당 모듈에서 웨이퍼를 꺼내는 작업을 무시하도록 하되(PSAWNSM : Pick Skip With Arm Wafer If Not Same Module) 꺼내고자 하는 웨이퍼가 모든 공정과정을 마치고 버퍼로 회수되는 경우이거나(NU : Next Unloading) 꺼내고자 하는 웨이퍼가 비어있는 모듈로 향하는 경우는(NE : Next Empty) 예외로 하는 규칙과, 클리닝 환경에서 생산성 향상을 위하여 클리닝이 예정된 모듈보다 공정 순서 상 이전에 해당하는 모듈로부터 웨이퍼 꺼내기(Pick)를 무시하고 클리닝 예정 모듈 보다 공정 순서 상 이후에 해당하는 모듈로부터의 웨이퍼 꺼내기 작업만을 선택적으로 수행하기 위한 필터링 규칙을 추가하였다(PSBNC : Pick Skip Before Next Clean Step). 이는 한팔 동작을 이용한 뒤에서부터 웨이퍼 꺼내기(Backward)를 극대화하는 방식으로 생산성을 향상시키고 고착현상을 방지하기 효과가 있다. 규칙기반 필터링 단계에서는 특정 작업을 선택하지 않으므로 반복 최소 우선순위, 동시동작 우선순위에 해당하지 않는 모든 작업은 필터링 부를 거쳐 다음 단계 우선순위 부로 전달된다.

3.2.4 모듈 고유 웨이퍼 꺼내기/넣기 우선순위 처리 단계

필터링 과정을 거친 작업에 대하여서는 웨이퍼 꺼내기(Pick)나 웨이퍼 넣기(Place)시 다른 모듈보다 우선순위

가 높은 경우 우수한 결과를 나타내는 모듈의 고유 우선순위를 높게 부여하여 이동 경로를 단축할 수 있도록 하였다. 로드포트로부터 웨이퍼를 꺼내는 작업이 버퍼로부터 웨이퍼를 꺼내는 작업보다 우선순위가 높은 경우, 버퍼로부터 웨이퍼를 꺼내는 작업이 공정모듈로부터 웨이퍼를 꺼내는 작업보다 우선순위가 높은 경우 후속으로 일어나는 동작이 동시동작으로 이어지는 경우가 많이 관찰되고 있기 때문에 본 논문에서는 모든 모듈의 웨이퍼 집어넣기 우선순위는 동일하게 설정하고, 웨이퍼 꺼내기 우선순위는 로드포트 모듈 > 버퍼 모듈 > 공정 모듈 > 기타 모듈 순으로 설정하여 실험하였다. 그림 1의 (4)번 단계에서 필터링을 통과한 작업과 이전에 선택되어 있던 작업과의 웨이퍼 꺼내기/넣기 우선순위를 비교하여 이전 작업보다 우선순위가 높은 작업인 경우에는 새로 전달된 작업으로 선택 작업을 교체하고 동일한 우선순위인 경우에는 대기시간 비교를 위한 다음 단계로 넘어간다.

3.2.5 최장대기 우선 우선순위 처리 단계

최하위로 고려되는 우선순위로 위에 열거한 우선순위에 해당하지 않는 모든 작업은 그림 1의 (5)번 단계와 같이 이전에 선택된 작업보다 스케줄러 큐에 등록된 후 대기 시간이 긴 경우 새로 전달된 작업으로 선택 작업을 교체한다. 이는 대기시간이 긴 작업의 우선순위를 높게 변경하고 먼저 처리되도록 하여 대기 시간 최소화에 긍정적인 영향을 미치도록 하기 위함이다. (5)번 단계까지 거친 후 더 이상의 등록된 작업이 없는 경우는 현재까지 선택된 최종 작업을 실행 부로 전달하고 등록된 작업이 남아 있는 경우에는 등록된 작업에 대하여 (3), (4), (5)단계의 과정을 반복한다.

4. 사례연구 : 트윈 슬롯 공정 설비

4.1 시뮬레이션 조건 및 성능 측정 방법

범용 스케줄링 알고리즘에 대하여 표 2와 같이 실제 설비에서의 일반적인 동작 시간과 유사하게 각 동작 별 소요 시간을 설정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 실험은 양산 설비에서 주로 사용되는 50~300초의 공정 시간 구간에서 공정 시간을 10초 단위로 늘려가며 조건 별 총 80매의 웨이퍼를 진행하였다. 웨이퍼 80매의 시뮬레이션이 완료되면 공정설비에 웨이퍼가 공급되는 초기 구간과 웨이퍼가 더 이상 공급되지 않고 회수만 되는 마지막 구간의 불연속적인 부분이 결과에 영향을 미치지 않도록 25~48번째 웨이퍼가 출발하여 완료된 시간을 기준으로 시간당

표 2. 동작 항목 별 설정 시간

동작 항목	시간	동작 항목	시간
ATM Rotate	3sec	BM Vent	20sec
ATM Pick	5sec	Slot Valve Open	1sec
ATM Place	5sec	Slot Valve Close	1sec
ATM Align	0sec	VTM Rotate	3sec
Door Valve Open	1sec	VTM Pick	5sec
Door Valve Close	1sec	VTM Place	5sec
BM Pump	10sec	PM Process	50~300sec

평균 생산량을 측정하였다.

스케줄링 알고리즘은 표 3과 같이 최장대기 우선순위를 기본으로 하여 알고리즘을 순차적으로 추가하면서 총 5가지 조건으로 진행되었으며, 조건별 병렬, 연속, 혼합, 재방문 패턴의 시간당 평균 생산량 실험결과를 측정하였다. 또한, 클리닝이 없는 병렬 패턴, 연속 패턴과 같이 생산성 예측이 가능한 패턴에 대해서는 설정된 동작시간을 기준으로 시스템이 이상적으로 동작하는 경우 달성 가능한 최대 생산량과 병목지점을 표 4와 같이 계산하고 제안

표 4. 모듈 성능 분석

모듈 구분	웨이퍼 처리 Cycle	성능 계산
ATM Module (대기 이송로봇)	로드포트 모듈로부터 새로운 웨이퍼를 가져다 버퍼에 로딩하고 버퍼로부터 공정 완료된 웨이퍼를 회수하여 다시 로드포트 모듈로 이송시키는 과정의 반복	$T_{cyc} = 2T_{pi} + 2T_{pl} + 2T_r + T_{vo} + T_{vc} + T_{al}$ $T_{wyc} = T_{cyc} / W_{tr}$ $Max\ UPEH = 3600 / T_{wyc}$
BM Module (중간 버퍼)	공정 전 웨이퍼를 공정 완료된 웨이퍼와 진공상태에서 교환하고 로드포트에서 공급되는 웨이퍼와 대기상태에서 교환 후 다시 진공 상태로 전환하는 과정의 반복	$T_{cyc} = 2T_{pi} + 2T_{pl} + 2T_{vo} + 2T_{vc} + T_{pump} + T_{vent}$ $T_{wyc} = T_{cyc} / W_{tr}$ $Max\ UPEH = (3600 / T_{wyc}) \times BM\ \#$
VTM Module (진공 이송로봇)	공정 전 웨이퍼를 공정 완료된 웨이퍼와 공정 모듈에서 교환하고 공정 완료된 웨이퍼와 공정 전 웨이퍼를 버퍼 모듈에서 교환하는 과정의 반복	$T_{cyc} = 2T_{pi} + 2T_{pl} + 2T_r + 2T_{vo} + 2T_{vc}$ $T_{wyc} = T_{cyc} / W_{tr}$ $Max\ UPEH = (3600 / T_{wyc})$
PM Module (공정 모듈)	진공 상태에서 공정 완료된 웨이퍼와 공정 전 웨이퍼를 공정 모듈에서 교환하고 정해진 공정 시간 동안 공정을 진행하는 과정의 반복	$T_{cyc} = T_{pi} + T_{pl} + T_{vo} + T_{vc} + T_{process}$ $T_{wyc} = T_{cyc} / W_{tr}$ $Max\ UPEH = (3600 / T_{wyc}) \times PM\ \#$

여기에서

- T_{cyc} : 각모듈에서 웨이퍼 교체를 위한 1 Cycle을 완료하는 시간
- T_{wyc} : 웨이퍼당 평균 교체 시간
- W_{tr} : 한번에 이송되는 웨이퍼수
- $Max\ UPEH$: 시간당 최대 평균 생산량
- T_{pi} : 로봇이 웨이퍼를 Pick하는 시간
- T_{pl} : 로봇이 웨이퍼를 Place하는 시간
- T_r : 로봇이 모듈간을 이동하는 시간
- T_{al} : 웨이퍼를 정렬기에서 정렬하는 시간
- T_{vo}, T_{vc} : 모듈 사이 Valve를 Open, Close하는 시간
- $T_{process}$: 모듈에서 공정이 진행되는 시간

표 3. 시뮬레이션 조건

조건	적용 알고리즘	실험 패턴
조건 1	최장대기 우선순위	병렬, 연속, 혼합, 재방문 패턴
조건 2	조건 1 + 동시동작 우선순위	병렬, 연속, 혼합, 재방문 패턴
조건 3	조건 2 + 반복최소 우선순위	병렬, 연속, 혼합, 재방문 패턴
조건 4	조건 3 + Pick/Place 우선순위	병렬, 연속, 혼합, 재방문 패턴
조건 5	조건 4 + 클리닝 환경 규칙	연속 패턴

된 스케줄링 알고리즘의 의사결정 부 지연으로 인한 생산성 감소 여부를 확인하기 위하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 성능 계산 식 결과 중 가장 적은 시간당 평균 생산량(UPEH : Unit Per Equipment Hour)을 가지는 부분은 이 시스템의 병목 모듈이 된다.

4.2. 트윈 슬롯 공정설비 모델 구조도

본 논문에서 실험대상으로 선택한 트윈 슬롯 공정설비

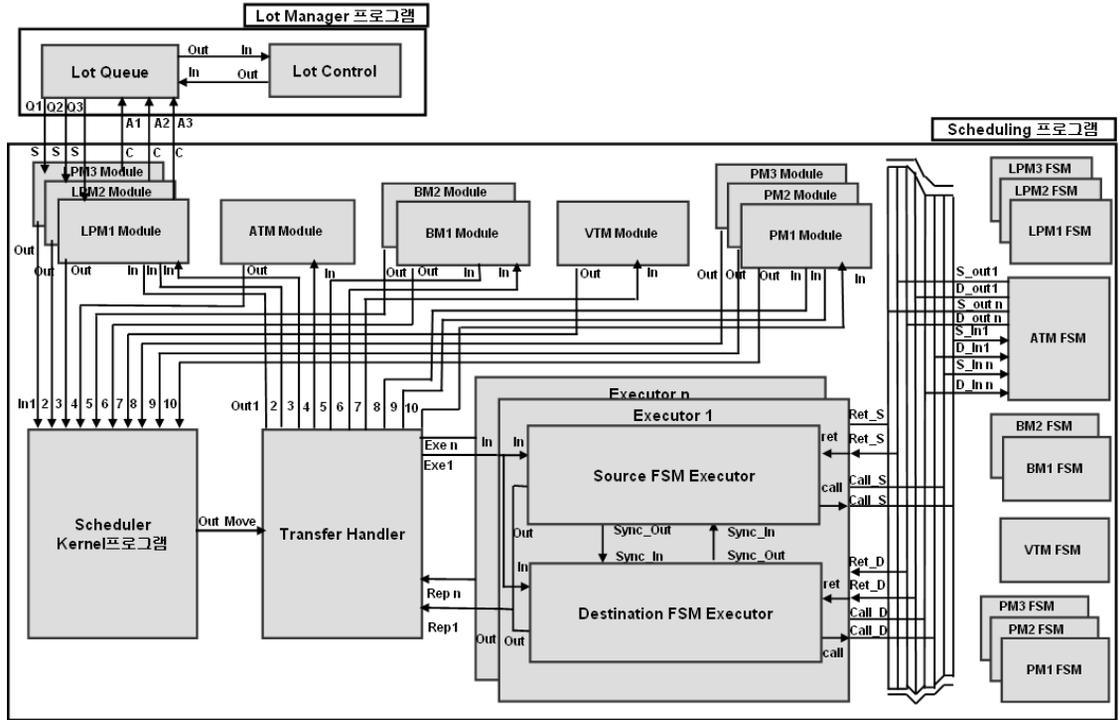


그림 2. 트윈 슬롯 공정설비 모델 구조도

는 3개의 로드포트 모듈과 대기이송로봇, 2개의 버퍼모듈, 진공이송로봇, 3개의 공정모듈로 이루어졌다. 트윈 슬롯 공정설비는 한 번에 2장의 웨이퍼를 처리할 수 있도록 4개의 팔로 구성된 진공상태 이송로봇을 가진다.

시물레이션을 위한 모델은 표 4의 공정설비를 구성하는 각 모듈 모델과, 그림 1의 범용 스케줄링 알고리즘이 적용되어 각 모듈의 동작을 결정하는 Scheduler Kernel 프로그램 모델, 웨이퍼 이송을 위한 실행 부 모델, 이송시 대상 모듈의 상태전이를 담당하는 모델 등으로 구성된다. 즉, 모듈은 공정설비를 구성하는 실체이며 모델은 실체를 표현하는 추상화된 개념이다. 모델 구조도는 그림 2와 같으며, 각 모듈 모델은 이벤트 기반으로 이송작업의 등록 및 결과를 통보 받고 Scheduler Kernel 프로그램 모델에서 그림 1의 제안 알고리즘에 의하여 선택된 작업을 실행부로 전달하여 설정된 시물레이션 시간동안 특정 상태를 유지한 후 상태 변경에 대한 결과를 통보 하도록 설계 되었다. 각 모델의 설명은 다음과 같다.

Lot Control 모델 : 공급되는 Lot(25매 웨이퍼 공급 단위) 정보를 저장하고 Lot을 시작하거나 중단시키는 역할을 수행한다.

Lot Queue 모델 : Lot Control을 통하여 시작된 Lot들

의 투입 시점을 결정하는 역할을 수행한다.

Module 모델 : 시스템을 구성하는 각 모듈을 대표하는 모델로 각 모듈 슬롯의 웨이퍼 보내기/받기에 관한 상태를 저장하고 각 상태에 맞는 출력을 Scheduler Kernel 모델로 전송하는 역할을 수행한다.

Scheduler Kernel 프로그램 모델 : 범용 스케줄링 알고리즘을 기반으로 각 모듈 모델로부터 전달받은 슬롯 상태 정보를 작업 형태로 내부 큐에 저장하고 실시간으로 큐에 등록된 작업 중 처리할 작업을 선택하여 Transfer Handler 모델로 전송하는 의사결정 역할을 수행한다. 큐에 등록된 모든 작업은 Scheduler Kernel 프로그램 모델에 의하여 그림 1과 같이 제안된 동적 우선순위와 규칙 베이스 필터링 단계를 거치면서 우선순위가 조정되거나 다음번 의사결정 시점으로 보류되는 과정을 반복하다가 최종적으로 선택되어 다음 모델로 전달된다.

Transfer Handler 모델 : Scheduler Kernel로부터 전달받은 출발, 도착 모듈 정보를 웨이퍼 교환을 위한 상태 전이를 담당할 Executor 모델에 할당하여 교환을 시작하고 결과에 대한 이벤트를 처리하는 역할을 담당한다.

FSM(Finite State Machine) Executor 모델 : 웨이퍼 교환을 위하여 각 모듈 슬롯의 상태 전이를 담당하는 역

표 5. 전체 시뮬레이션 결과 요약

실험 환경	실험 조건 별	기본 우선순위 대비 가치(%)	계산식 대비 증가치(%)	특징	
				장 점	단 점
병렬 이송패턴	최장대기 적용	-	-29.2	<ul style="list-style-type: none"> • 동시동작, 반복최소 적용 후 생산량 급증 • 계산식 결과와 비교시 의사결정 부 손실이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 짧은 공정에서 생산량 저하 구간 보완 필요 • 모듈 고유 Place 우선순위 고려 필요
	동시동작 적용	-1.03	-30.6		
	반복최소 적용	33.56	3.26		
	모듈고유 적용	32	2.2		
연속 이송패턴	최장대기 적용	-	-3.6	<ul style="list-style-type: none"> • 알고리즘별 향상 경향 보임 • 계산 식 결과와 비교시도 양호 	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈 고유 우선순위 효과 미비
	동시동작 적용	1.8	-1.8		
	반복최소 적용	2.3	-1.2		
	모듈고유 적용	2.3	-1.2		
병렬 후 연속 혼합 이송패턴	최장대기 적용	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈 고유 우선순위 효과 큼 	
	동시동작 적용	1.66	-		
	반복최소 적용	1.7	-		
	모듈고유 적용	5.5	-		
연속 후 병렬 혼합 이송패턴	최장대기 적용	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 일부 향상 효과로 해당 패턴에서도 유효함을 보임 	<ul style="list-style-type: none"> • 패턴 특성 상 알고리즘 추가에 따른 생산성 향상 효과 거의 없음
	동시동작 적용	1.8	-		
	반복최소 적용	1.8	-		
	모듈고유 적용	1.8	-		
병렬 후 연속 재방문 이송패턴	최장대기 적용	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 반복 최소 우선순위 효과 큼 	
	동시동작 적용	0.2	-		
	반복최소 적용	7.5	-		
	모듈고유 적용	8.2	-		
연속 후 병렬 재방문 이송패턴	최장대기 적용	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 복잡한 패턴에서도 일부 향상 효과로 모든 패턴에서 유효함이 입증됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 패턴 특성상 알고리즘 추가에 따른 생산성 향상 효과 거의 없음
	동시동작 적용	2.7	-		
	반복최소 적용	2.8	-		
	모듈고유 적용	2.8	-		
클리닝 환경 (연속패턴)	기존 병목 기준	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 병목 대비 제안 규칙이 생산성 측면에서 향상된 결과 보임 • 추가 한팔 동작 효과 큼 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 패턴에서 클리닝 환경이 미치는 영향에 대한 검증이 필요
	클리닝 예정 기준	1.2	-		
	한팔 동작 규칙	6.2	-		

할을 수행한다. 출발 모듈과 도착 모듈이 모두 정해진 상태 전이 과정을 거쳐야 웨이퍼 교환이 완료된다. 교환이 완료되면 초기 상태로 복귀하여 동일한 상태 전이 과정을 계속적으로 반복하는 유한상태 기계이다¹¹⁰⁾.

FSM 모델: 출발, 도착 모듈의 웨이퍼 교환 과정의 각 상태에서 처리해야 할 구체적인 동작들이 기술되고 처리 되는 모델이다.

4.3 시뮬레이션 결과 분석

앞서 언급한 표 3과 같이 실험 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 표 5와 같이 이송패턴별로 기본 적용 알고리즘 대비 시간당 평균 생산량(UPEH)의 차이를 백분율로 표현하고 특징을 분석하였다. 이는 제안된 각 우선순위 처리부를 단계적으로 추가하는 경우 생산성이 증가하는지를 시뮬레이션을 수행하여 확인하고, 4개의 우선순위로 구성된 알고리즘의 생산성 측면에서의 유효

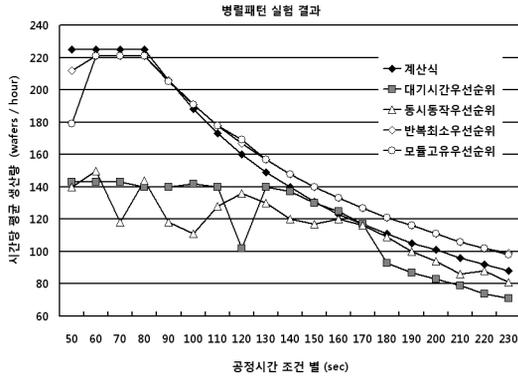


그림 3. 병렬패턴 시뮬레이션 결과

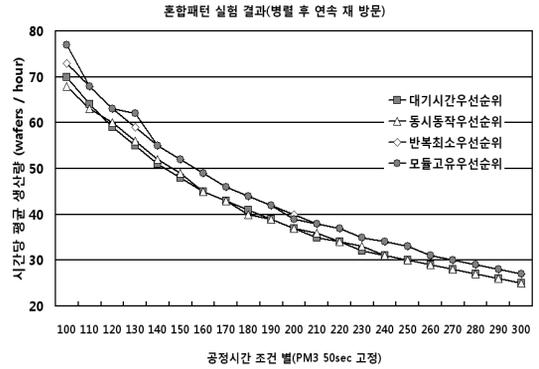


그림 5. 병렬 후 연속 재방문 시뮬레이션 결과

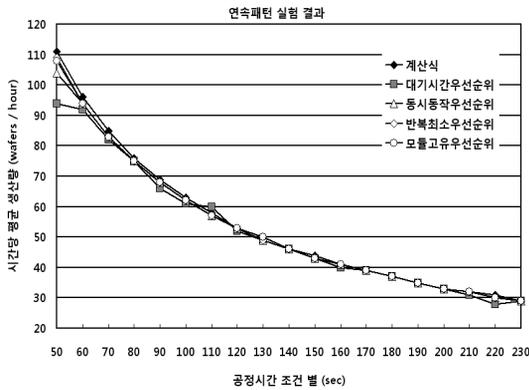


그림 4. 연속패턴 시뮬레이션 결과

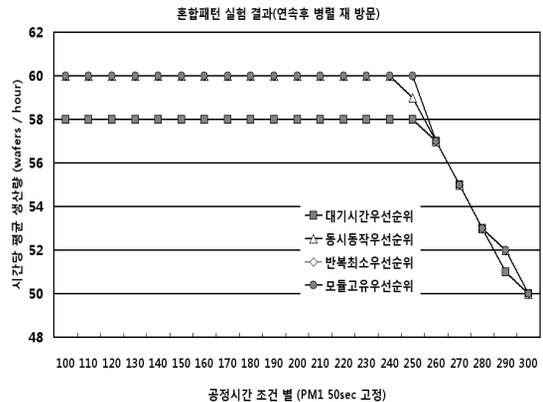


그림 6. 연속 후 병렬 재방문 시뮬레이션 결과

성을 관찰하고 분석하여 모든 이송 패턴에 대하여서도 공통된 결과를 나타내어 스케줄링 알고리즘이 범용성을 가지는지를 검증하고자 한다.

또한, 기본 이송 패턴의 경우에는 안정 상태 흐름(Steady Flow)을 가정하여 달성될 수 있는 최대 생산량을 주어진 시뮬레이션 시간을 기준으로 표 4의 계산 식(아이피에스 UPEH 계산 식) 결과와 비교하여 제한된 알고리즘의 작업 결정 과정에서의 손실로 인한 생산성 감소 여부를 측정 하였다.

병렬 패턴을 실험한 결과는 그림 3에서 볼 수 있듯이 최초 대기시간 우선순위만을 적용하여 실험한 후 동시동작, 반복최소, 모듈고유 우선순위의 순으로 조건이 추가 될수록 생산성이 향상되는 경향을 보였다. 특히 동시동작과 반복최소 우선순위가 모두 적용된 후에는 스케줄링이 안정화되고 생산성이 급격히 향상되었으며, 공정 시간이 짧을수록 효과가 크게 나타나는 결과를 얻었다. 그리고 연속패턴의 경우에도 그림 4와 같이 조건별 성능향상의 경

향은 나타나지만 병렬에 비하여 동시 발생 이벤트가 적고 시간의 순으로 나열 가능할 만큼 순차적으로 발생하므로 최장대기 우선순위만 적용된 경우도 상당한 효과가 있었다. 또한, 병렬패턴과 같이 작은 시간 동안에도 다양한 경우의 수가 발생하는 것과는 달리 각 부가 다음 동작을 위한 충분한 준비시간을 가지게 되므로 조건별 향상되는 정도는 미비한 결과를 보였다. 계산식 결과와 비교에 있어서도 대부분의 구간에서 유사하거나 좀 더 나은 결과를 나타냄으로써 스케줄링 알고리즘이 안정 상태 흐름을 가정한 시스템 최대 성능과 비교하여도 유효하고 의사결정 과정에서의 손실이 없음을 확인할 수 있었다.

그림 5, 6과 같은 혼합패턴 및 재방문패턴 등의 복잡한 이송 조건에서도 대기시간, 동시동작, 반복최소, 모듈고유 우선순위의 순으로 항목이 추가 될수록 점진적 생산성 향상 경향이 동일하게 확인되어 제한된 알고리즘이 기본적인 이송 패턴과 복잡한 이송 패턴에서 이송 패턴의 변경으로 인한 추가적인 고려 없이도 동일하게 유효함을 확인할 수

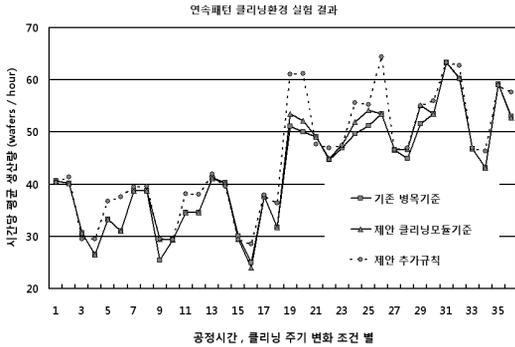


그림 7. 클리닝 환경 연속패턴 실험 결과

있었다.

모듈이 주기가 서로 다른 클리닝을 진행하는 환경에서의 실험 결과는 병목 모듈을 기준으로 웨이퍼를 꺼내는 규칙을 달리하여 정체 시간을 줄이고 생산성을 향상시키는 방안을 제안하였던³⁾ 이정수의 운용 전략에 비하여 생산성 측면에서 유사하거나 개선되는 결과를 보여 제안된 클리닝 예정 모듈을 기준으로 한 의사결정 방식이 생산성과 범용성 측면에서 적용 가능함을 확인하였다(그림 7 참조). 또한, 클리닝 환경에서 생산성 향상을 위하여 로봇이 다음번 향하는 곳이 버퍼로의 웨이퍼 회수이거나, 비어있는 모듈인 경우에는 해당 모듈로 향하지 않는 웨이퍼를 들고 있는 경우라도 웨이퍼 꺼내는 작업을 허용하도록 확장된 규칙을 적용한 결과 대기 시간을 이용한 한팔 동작이 극대화되면서 생산성이 향상되는 결과를 얻었다.

5. 결 론

현재 공정 설비 시스템 운영은 생산 공장의 필요에 의하여 언제든지 공정 설비의 형태나 이송 패턴이 변경 될 수 있지만 웨이퍼 이송을 위한 운용전략은 짧은 시간동안에 변경과 검증을 수행하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 스케줄링 운용전략과 관련된 기존의 연구에서는 국한된 조건에서의 개선 효과를 도출하였지만 범용성을 고려하지는 않았다. 따라서 본 논문에서는 요구사항의 변화에 따라 운용전략이 바뀌어야 하거나 새로운 규칙을 추가해야 하는 부분을 최소화 하고 범용적으로 사용 가능한 스케줄링 알고리즘을 제안하고자 하였다. 이를 위해 트윈 슬롯 공정설비를 대상으로 시뮬레이션 실험을 수행하였고, 제안된 범용 스케줄링 알고리즘으로 다양한 이송패턴 상에서도 우선순위가 추가될수록 공통적으로 개선 효과를 보이는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 제안한 범용 스케

줄링 알고리즘이 특정 패턴에만 유효하다기보다는 범용적으로 적용이 가능함을 보였다는 점에서 의의가 있다고 할 수 있다.

제안된 동적 우선순위와 규칙기반 필터링 혼합 운용전략으로 주기가 서로 다른 클리닝을 진행해야 하는 특수한 상황에서 기존 제안된 규칙기반 운용전략에 못지않은 생산성을 달성함과 동시에 기존 제안된 규칙기반 운용전략이 향상된 결과를 도출했던 실험조건과 이송패턴 이외의 환경에서는 어떤 성능을 나타내는지 증명하지 못한 부분을 확장하여, 제안된 운용전략으로 다양한 이송패턴에서 생산성 저하나 고착현상이 발생하지 않음을 확인하였으며 범용성 측면에서 개선된 결과를 보였다고 할 수 있다.

본 연구 성과를 바탕으로 좀 더 복잡한 패턴과 다양한 설비 형태 및 운용 환경에서의 검증과 알고리즘개선이 앞으로의 과제이며, 또한 여러 분야에서 연구되고 있는 의사결정 알고리즘 중 공정설비에 효과적으로 응용 가능한 부분이 있는지에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이지우, 한국반도체산업협회, “차세대 반도체 기술동향,” 2007.
2. 정치현, “다중 슬롯 클러스터장비의 안정상태 스케줄링 및 모델링,” KAIST 석사학위 논문, 2005.
3. 이정수, “챔버 클리닝이 요구되는 양팔 클러스터 장비의 스케줄링 규칙,” KAIST 석사학위 논문, 2008.
4. 김희정, “후 공정을 고려한 양 팔 클러스터 장비의 스케줄링과 제어,” KAIST 석사학위 논문, 2006.
5. 이환용, “두 팔을 가진 화학 박막 증착용 클러스터 장비의 스케줄링과 공정 시간 결정,” KAIST 석사학위 논문, 2000.
6. Y.H. Shin, T.E. Lee, “Modeling and implementing a real-time scheduling for dual-armed cluster tools,” *Computer in industry*, vol. 45, pp. 13-27, 2001.
7. S.P. Sethi, J.B. Sidney, and Chelliah Sriskandarajah, “Scheduling in dual gripper robotic cells for productivity gains,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 17, no. 3, pp. 324-341, 2001.
8. Srilakshmi venkatesh, “A Steady-State Throughput Analysis of Cluster Tools: Dual-Blade Versus Single-Blade Robots,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 10, no. 4, pp. 418-424, 1997.
9. Samuel C. Wood, Sanjay Tripathi, and Farhad Moghadam, “A Generic Model for Cluster Tool Throughput Time and Capacity,” *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 194-199, 1994.
10. 도용태, 김일근, 김종환, 박창현, “인공지능 개념 및 응용 3판,” 사이텍미디어, 2009.



송 민 기 (bobosong@korea.com)

2000 한국기술교육대학교 기계공학과 학사
2010 한국항공대학교 산업대학원 석사
2008~현재 (주)아이피에스 System Engineering Team

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 스케줄링 알고리즘



정 찬 호 (chanho66@kau.ac.kr)

2006 청운대학교 컴퓨터공학과 학사
2008 한국항공대학교 컴퓨터공학과 석사
2008~현재 한국항공대학교 컴퓨터공학과 박사 과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 위게임



지 승 도 (sdchi@kau.ac.kr)

1982 연세대학교 전기공학과 학사
1984 연세대학교 전기공학과 석사
1985~1986 두산 컴퓨터 (현 한국 디지털) 근무
1991 미국 아리조나대학교 전기전산공학과 박사
1991~1992 미국 SIMEX Systems and S/W 회사 S/W 담당자로 근무
1992~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수

관심분야 : 이산사건 시스템 모델링 및 시뮬레이션, 컴퓨터 보안, 지능시스템 디자인 방법론,
시뮬레이션 기반 인공지능, 교통 모델링