

두 팔을 가진 화학 박막 증착용 클러스터 장비의 스케줄링과 공정 시간 결정 Scheduling and Determination of Feasible Process Times for CVD Cluster Tools with a Dual End Effector

이환용, 이태억
한국과학기술원 산업공학과

Abstract

화학 박막 증착용(CVD : Chemical Vapor Deposition) 클러스터 장비는 다양한 공정 경로가 가능하며 물류 흐름이 매우 복잡해질 수 있다. 또한, 공정이 종료된 웨이퍼는 제한 시간 내에 챔버에서 꺼내져야만 한다. 클러스터 장비는 두 개의 팔을 가진 로봇이며, 빈 쪽 팔을 이용하여 공정이 종료된 웨이퍼를 꺼낸 후, 다른 쪽 팔을 이용하여 이전 공정에서 가져온 웨이퍼를 해당 공정에 넣어 주는 스왑(SWAP) 방식으로 운영된다. 이러한 스왑 방식에서는 로봇 작업 순서가 결정되어 진다. 그러나, 로봇의 팔 이외에 임시 버퍼가 없고, 각 챔버는 엄격한 체제 시간 제약(Residency Time Constraint)을 가지고 있기 때문에 로봇의 작업 시점의 제어가 필요하다. 본 논문에서는 간단한 Earliest Starting 방식으로 로봇의 작업 시점을 제어한다고 가정했을 때, 스왑 방식을 운용하면서 체제 시간 제약을 만족하는 공정 시간들의 조건을 제시한다. 공정 시간은 엔지니어에 의해 다소 조정이 가능하므로 공정 시간들의 조건은 엔지니어에게 스케줄 가능한 공정 시간을 결정할 수 있도록 지원해 주는 시스템에 활용 가능하다. 또한, 본 논문에서는 FSM(Finite State Machine)을 이용하여 CTC(Cluster Tool Controller) 내부의 실시간 스케줄러 구현 방법을 제안한다.

1. 서론

종래의 반도체 라인은 Lithography, Etching, CVD(Chemical Vapor Deposition)등의 주요 공정을 배치(Batch) 방식으로 운영하였으나 최근 단일웨이퍼 가공방식(Single Wafer Processing)으로 전환하고 있다. 이러한 단일웨이퍼가공방식은 반도체 제조 라인의 정정도(Class) 관리, 작업자 인터페이스 등의 작업 환경을 변화시켰을 뿐 아니라, 물류흐름, 생산계획 및 통제 등에도 매우 큰 영향을 미치고 있다(Moslei et al., 1992). 단일웨이퍼가공방식은 단일 장비 내에서 단일 웨이퍼별로 공정 처리하는 것으로서, 기존의 배치 가공방식에 비해 제조소요시간(Cycle Time)의 단축 효과가 있다.

단일웨이퍼가공방식을 사용하는 대표적인 장비는 클러스터 장비(Cluster Tool)로, 복수의 공정 모듈과 물류장비를 단일장비에 집약한 제조 장비이다(강보경, 1998). 클러스터 장비는 그림 1 과 같이 일반적으로 로봇 팔과 같은 중앙 운반모듈(TM, Transfer Module)과 다수의 공정 모듈로 구성된다. 각 공정 모듈은 다양한 공정 작업의 수행이 가능하다. 따라서 다양한 공정 경로(Route)가 발생하며 물류 흐름이 매우 복잡해진다. 또한, 종래의 클러스터 장비는 단일 로봇 팔을 사용하였으나 최근 클러스터 장비의 공정 모듈의 사용율을 높이기 위해 두 개의 로봇 팔을 사용하고 있다. 두 개의 로봇 팔 사용으로 운반 작업 중 하나의 로봇 팔을 임시 버퍼로 사용 가능하여 운반 시 로봇의 효율이 증가하고, 공정 모듈의 운반 작업을 위한 대기 시간이 감소한다. 특히, 두 개의 로봇 팔을 이용하는 웨이퍼

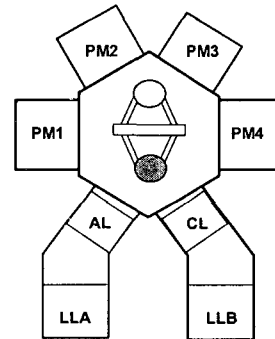


그림 1. 클러스터 장비의 구성

운반 방식인 스왑(SWAP) 방식은 타 운반 방식에 비해 운반작업의 효율 증가로 클러스터 장비의 단위 산출량을 증대시킬 수 있다(Venkatesh, 1997).

화학 공정에 사용되는 클러스터 장비는 기존의 제조 장비와 물류 장비를 통합한 형태인 로봇 작업 셀이나 유연 제조 셀(Flexible Manufacturing Cell)과는 달리 운반 작업 시 준수해야 하는 시간 제약이 있다. 특히, CVD(Chemical Vapor Deposition) 공정용 클러스터 장비의 경우, 웨이퍼 표면에 박막을 증착하기 위하여 열처리를 하므로 웨이퍼는 각 공정 모듈에서 작업 후, 제한 시간 내에 언로딩되어야 한다. 만약, 제한 시간 이전에 언로딩되지 못할 경우, 그 웨이퍼는 불량 또는 폐기 처리된다. 이것은 웨이퍼의 품질 및 수율에 관련되는 반드시 준

수되어야 하는 중요한 조건이다. 이 조건을 체제 시간(Residency Time) 제약이라고 한다. CVD 클러스터 장비는 웨이퍼 처리 시방(Recipe)에 따라 웨이퍼 흐름 패턴이 다양하고 공정 모듈의 구성을 수시로 변경해야 한다.

따라서, CVD 클러스터 장비의 효율적인 운영을 위해서는 첫째, 다양한 공정 모듈의 공정 할당에 의한 공정 경로와 물류 흐름을 제어 가능해야 하며, 둘째, 공정 모듈의 가동율을 높이기 위해 도입한 두 팔 로봇 및 그 운반 작업 방식인 스왑 방식을 활용해야 하며, 셋째, 클러스터 장비의 산출량과 웨이퍼의 품질에 중요한 영향을 미치는 체제 시간 제약을 만족시키는 방법이 필요하다. 이를 위해 공정 작업과 웨이퍼 운반 작업을 효과적으로 제어 가능한 스케줄링 모듈이 필요하다.

클러스터 장비의 구성 및 운반작업에 대한 연구로는 클러스터 장비의 페트리네트 모델 및 성능분석(Srinivasan, 1998)에 관한 연구와 클러스터 장비의 물류 작업을 담당하는 로봇의 팔이 하나인 경우와 둘인 경우에 대한 성능비교에 관한 연구(Venkatesh, 1997)가 있다. Srinivasan의 연구는 2개의 직렬 공정 경로를 가지는 경우와 3개의 병렬 공정 경로를 가지는 경우에 대해 페트리네트 모델을 작성하였으나, 모든 공정 경로 형태에 대해 스왑 작업을 수행하는 경우는 나타내지 못하였다. Venkatesh는 운반 작업을 수행하는 로봇의 팔이 하나인 경우와 둘인 경우의 성능을 시간 진행 도표(Timing Diagram)를 사용, 수리적인 계산으로 성능을 비교하여 로봇 팔이 두개인 경우의 운반 시간이 더 짧아 클러스터 장비의 생산량을 높일 수 있음을 보였다.

체제 시간 제약 조건에 대한 연구는 클러스터 장비 분야에서 이루어진 것은 없으며, 유사한 문제를 로봇 셀에서 찾아 볼 수 있다. 전기 도금을 위한 예칭 공정에 사용되는 이송용 호이스트(Hoist)를 이용한 작업 시 작업물을 공정 탱크 속에 넣어 두고 일정 시간 이전에 꺼내야 하는 체제시간 제약 조건이 있다. 이 같은 본 논문에서 다루는 것과 유사한 체제시간 조건을 만족하기 위해 간트 차트(Gantt Chart)를 이용하여 수리적인 모델링 후 휴리스틱을 제안한 것들이 있다(Shapiro & Nuttle, 1988, Lei & Wang, 1994, Chen et al., 1998).

본 논문에서는 로봇 팔이 두 개인 CVD 공정용 클러스터 장비에서 스왑 방식을 사용하면서, 다양한 공정 모듈 구성과 웨이퍼 물류 흐름 및 체제 시간 제약을 포함하는 문제를 위한 스케줄링 기법을 제안한다. 챔버의 고장이나 공정 시간 변동과 같은 이상 상황(Exception)이 없는 정상 상황과 안정 상태(Steady State)의 스케줄링 모듈을 가정한다. 스왑 방식은 효과적인 웨이퍼 운반 방식이나, 모든 공정 모듈 구성 및 공정 시간에 대해 모두 가능한 것은 아니다. 따라서, 공정 구성 및 공정 시간에 대한 분석을 통해 스왑 운반 방식의 가능 조건을 알아내고, 스왑 방식이 가능한 경우, 체제 시간 제약을 만족하는 웨이퍼 가공 및 운반을 위한 스케줄을 생성한다. 분석을 통해 발견된 스왑 운반 가능 조건은 공정 모듈의 기능 할당 및 공정 시간의 결정을 위한 공정 설계 지원 모듈(Engineering Support Module)로도 활용 가능하다.

2. CVD 공정용 클러스터 장비의 스케줄링과 공정 시간 조건

본 장에서는 스왑 방식으로 운용되는 클러스터 장비에서 체제 시간 제약을 만족시키기 위해 생기는 스케줄링 문제에 대해서 다룬다.

클러스터 장비 내 웨이퍼 운반 작업으로 스왑 방법의 사용을 가정한다. 현재 공정 모듈 1(PM1)에 공정을 마친 웨이퍼가 있는 상태이고, 로봇의 두 팔에 모두 웨이퍼가 없다고 가정 시, 스왑 방법을 설명하면 다음과 같다(그림 2 참조). 로봇의 빈 팔을 입력 모듈(LLA)로 위치 → 입력 모듈에서 웨이퍼를 언로딩 → 로봇의 남은 팔을 공정을 마친 웨이퍼를 언로딩 할 지점(PM1)으로 이동 → 웨이퍼 언로딩 → 로봇 팔 180도 회전 → 공정 모듈 1(PM1)에 입력 모듈에서 운반한 웨이퍼 로딩. 입출력 담당 모듈에 로딩/언로딩 시를 제외한 모든 경우, 이와 같은 방법을 반복적으로 수행한다.

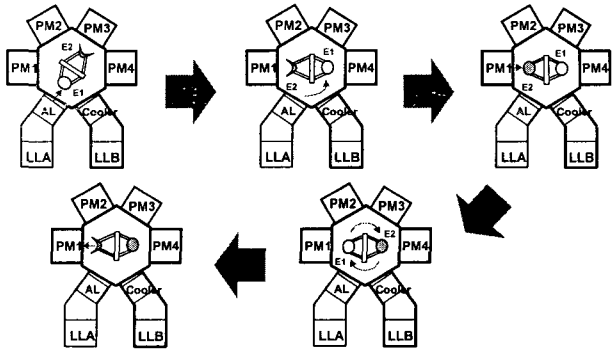


그림 2. 스왑 작업의 한 주기

스왑 방식은 해당 공정에서의 스왑 작업을 하기 위해서는 로봇의 한 팔에 전 공정에서 가져온 웨이퍼가 있어야 하며 해당 공정에 웨이퍼가 있어야 한다. 예를 들어 생각해 보면, 안정 상태에서 첫 번째 공정에서 입력을 담당하는 모듈에서 꺼내 온 웨이퍼를 이용하여 스왑을 하게 되면, 첫 번째 공정에서 꺼내 웨이퍼를 이용하여 스왑을 할 수 있는 곳은 웨이퍼 공정 경로상의 두 번째 공정 챔버밖에 없다. 가령 다른 공정 챔버로 이동을 하여 웨이퍼를 들지 않은 팔을 이용하여 그 다음 공정 챔버로 웨이퍼 이송은 할 수 있지만, 스왑은 할 수 없다. 그러므로, 모든 챔버에서 스왑을 하는 로봇의 작업 순서는 공정 경로에 따라 순차적으로 진행될 수밖에 없으며 웨이퍼의 공정 경로 형태와는 무관하게 로봇의 작업 순서는 일정하게 된다.

클러스터 장비의 특성상 공정은 챔버 내에 웨이퍼가 들어오는 즉시 바로 시작하게 되어 있으므로 챔버의 공정 시작 시점은 제어할 수 없다. CVD 공정용 클러스터 장비의 스케줄링에서 우리가 제어할 수 있는 변수는 웨이퍼의 투입 주기인 웨이퍼 배송 간격(Wafer Delivery Interval Time)과 로봇 작업의 지연(Delay)이다. 이 두 가지를 이용하여 다양한 공정 경로와 물류흐름에 대하여 스왑을 운용하면서 체제 시간 제약을 만족시켜야 한다.

CVD 공정용 클러스터 장비의 스케줄링에서 제어할 수 있는 첫 번째 변수인 웨이퍼 배송 간격은 제조소요시간(Cycle Time)을 결정한다. 그러므로 웨이퍼 배송 간격이 짧을수록 제조소요시간도 짧아

지므로 단위 산출량(Throughput)은 높아진다. 그러나, 웨이퍼 배송 간격을 아주 짧게 준다고 단위 산출량도 아주 짧아지는 것은 아니다. 웨이퍼 배송 간격은 가장 긴 공정 주기를 따르는 것이 최적이다. 그것은 웨이퍼 배송 간격을 가장 긴 공정 주기보다 짧게 주더라도 그 만큼의 제조소요시간 단축을 기대할 수 없기 때문이다.

두 번째 변수인 로봇 작업의 지연은 공정 시간의 불균형에 의해 기인한다. 모든 공정의 공정 시간이 같을 경우, 로봇의 작업 순서가 일정하므로 로봇의 지연 없이 Earliest Start 방식으로 스케줄링을 해도 체제 시간 제약을 만족할 수 있다. 그러나, 공정 간의 공정 주기 차가 발생할 경우, 그 차이만큼 체제 시간이 되므로 체제 시간 제약을 만족시키지 못할 경우가 발생한다. 이를 위해서는 공정 주기의 차를 극복할 수 있는 방법으로서 로봇 작업의 지연이 필요하다. 스왑 방식으로 운영하는 로봇 팔이 두 개인 클러스터 장비에서 체제 시간 제약을 만족하기 위해 공정 주기의 차를 극복하는 방법은 다음의 두 가지가 있다.

1. 챔버 내부에서의 지연
2. 로봇 팔 위에서의 지연

두 방법 모두 특정 공정 시간 조합에 대해서는 스케줄이 불가능한 경우가 발생한다. 그러므로 공정 시간을 결정하는 엔지니어가 각각의 방법에 따라 스케줄 가능한 공정 시간을 결정을 한다. 우선 다음과 같은 부호들을 정의한다.

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| t_S | SWAP을 수행하는 시간 |
| t_M | 각 공정 사이의 이송시간(Moving Time) |
| t_A | 얼라이너(Aligner)와 입출력을 담당하는 모듈에서의 소비 시간 |
| t_{P_i} | i 공정의 공정 시간(Processing Time) |
| $t_{R_i_max}$ | i 공정의 Residency Time 허용 최대치 |
| N | 공정 개수 |

다음은 두 방법을 이용하여 스케줄 할 때의 공정 시간들의 조건을 나타낸 것이다.

조건 1 챔버 내부에서 웨이퍼를 지연시키는 방법으로 스케줄 할 때, 각 공정에 포함된 병렬 챔버의 개수를 M_i 라고 하면, 모든 챔버에서 스왑을 하고 체제 시간 제약을 만족하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\max_{i \in B} \left(\frac{t_{P_i} + t_S}{M_i} \right) \geq (N+1)t_M + N \cdot t_S + t_A$$

$$\max_{i \in B} \left(\frac{t_{P_i} + t_S}{M_i} \right) - \left(\frac{t_{P_j} + t_S}{M_j} \right) \leq t_{R_j_max}$$

$$j = 1, 2, \dots, N, \quad B = \{1, 2, \dots, N-1\}$$

조건 2 로봇 팔 위에서 웨이퍼를 지연시키는 방법으로 스케줄 할 때, 각 공정에 포함된 병렬 챔버의 개수를 M_i 라고 하면, 모든 챔버에서 스왑을 하고 체제 시간 제약을 만족하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\max_{i \in B} \left(\frac{t_{P_i} + t_S}{M_i} \right) \geq (N+1)t_M + N \cdot t_S + t_A$$

$$+ \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \max_{j \in B} \left(\frac{t_{P_j} + t_S}{M_j} \right) - \left(\frac{t_{P_i} + t_S}{M_i} \right) \right\}$$

$$B = \{1, 2, \dots, N-1\}, \quad N = \text{공정 개수}$$

3. CVD 공정용 클러스터 장비 스케줄러와 공정 설계 지원 모듈 구현

본 장에서는 2장에서 설명한 체제 시간 제약을 만족시키기 위해 공정 주기의 차를 극복하는 방법 중에서 챔버 내부에서 웨이퍼를 지연시키는 방법을 사용하여, 두 팔을 가진 CVD 공정용 클러스터 장비의 스케줄러와 스케줄 가능한 공정 시간 결정을 지원하는 ESM(Engineer Support Module)을 구현한 사례를 설명한다.

3.1 CVD 공정용 클러스터 장비 스케줄러

본 논문에서는 RPI(Real-time Performance Inc.)사의 CTC(Cluster Tool Controller)인 ControlPRO의 구조를 이용하여 스케줄러를 구현한다. 그러나, 구현한 스케줄러는 RPI사의 ControlPRO에 있는 스케줄러와는 내부적인 구조와 스케줄 방식이 완전히 다르다. 그림 3은 RPI사의 ControlPRO 구조에서 스케줄러의 위치를 나타내고 있다.

그림 3. ControlPRO의 구조

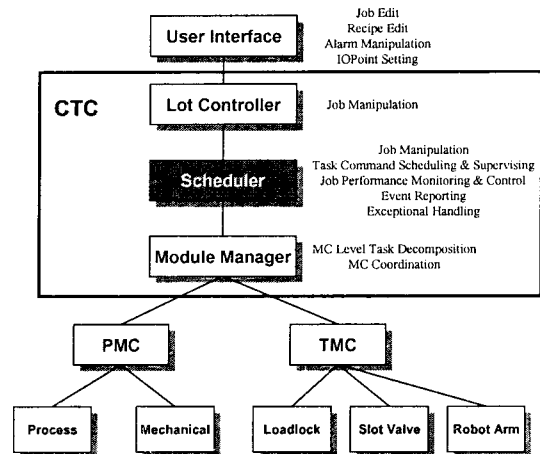


그림 3에서 보는 바와 같이, 본 논문에서 구현한 스케줄러는 소프트웨어 구조에서 로트 제어기(Lot Controller)와 모듈 관리자(Module Manager) 사이에 위치한다.

스케줄러는 각 명령들간의 연결관계를 특정한 FSM(Finite State Machine) 구조로 저장하고 있다. 스케줄러가 FSM 방식을 취한 이유는 모든 챔버에서 스왑 작업을 수행할 수 있어야 하는데 이를 위해서는 로봇의 동작이 정해진 순서대로 반복적으로 이루어질 수 밖에 없기 때문이다. 기존의 RPI사의 ControlPRO 스케줄러에서 취하는 Dispatching 방식을 고려해 볼 수 있으나 이런 방식을 취하게 되면 스왑 작업의 반복 수행을 보장할 수 없을 뿐더러 어떤 행동을 보이게 될 지 예측하기 힘들다.

그림 4은 스케줄러 입장에서 보아 각 챔버(그림상에서는 PM 이라고 표시된 것)가 취하는 상태와 그 전이 관계를 FSM으로 표현한 것이다. 이벤트(Event) 이름은 생략한다. 그림 4에서 각 상태 전이 화살표는 모듈 관리자(Module Manager)로부터 해당 상태에서 내린 명령들이 수행되었다는 이벤트(Event)를 나타낸 것이다. 각각의 상태는 스케줄러가 모듈별(입력을 담당하는 모듈(INLL), 챔버(PM), 출력을 담당하는 모듈(OUTLL))로 로봇에게

내리는 명령에 따라 나눈 것이다.

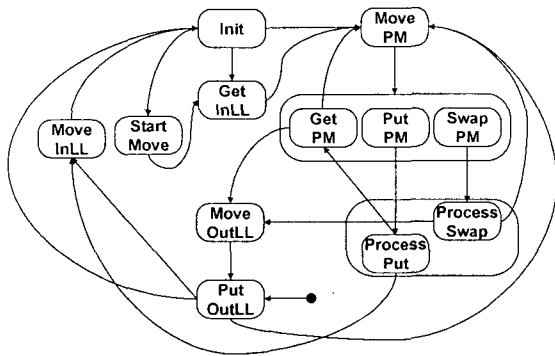


그림 4. 로봇 동작의 FSM(Finite State Machine)

본 논문에서 구현한 스케줄러의 특징은 체제 시간 제약을 만족시키기 위해서 입력을 담당하는 모듈에서 웨이퍼를 꺼내는 시점을 제어한다는 것이다. 스케줄러가 사용하는 FSM은 전적으로 소위 이벤트 트리거링(Event Triggering) 방식이기 때문에 모든 관련 시점을 따로 관리하여 명령을 호출할 때 지원을 주거나 하지 않는다. 다만, FSM 내부의 Init라는 상태에서 현재 클러스터 장비의 상황을 관리하여 웨이퍼 배송 간격을 조정하게 된다.

3.2 공정 설계 지원 모듈(Engineer Support Module)

스왑 방식으로 운영하는 로봇 팔이 두 개인 클러스터 장비에서 체제 시간을 만족하기 위해서는 공정 시간 결정이 중요하다. 공정 설계 지원 모듈은 공정 시간을 설계하는 엔지니어가 스케줄 가능한 공정 시간을 결정할 수 있도록 도와준다. 공정 설계 지원 모듈의 기능에는 크게 스케줄 가능 체크와 공정 시간 추천이 있다. 스케줄 가능 체크는 엔지니어가 정한 공정 시간들이 제약 조건들을 모두 만족하여 스케줄러가 스케줄을 할 수 있는지를 판단해 주는 것이고, 공정 시간 추천은 엔지니어가 기존 공정과 그 공정 시간을 정했을 때, 다른 공정들의 스케줄 가능한 공정 시간 범위를 제시해 주는 것이다. 그림 5는 공정 설계 지원 모듈의 GUI(Graphic User Interface) 실행 화면이다.

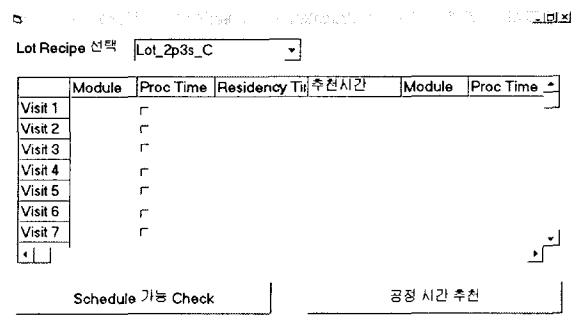


그림 5. ESM(Engineer Support Module) GUI

4. 결론

본 논문에서는 스왑 방식을 운영하는 로봇 팔이 두 개인 화학 박막 증착용 클러스터 장비에서 체제 시간 제약을 만족하고 다양한 공정 경로 및 물류 흐름에 대응할 수 있는 스케줄링과 스케줄 가능한 공정 시간들의 조건을 제안하였다. 그리고 RPI(Real-time Performance Inc.)사의 ControlPRO의 구조를 이용한 스케줄러와 공정 시간 결정 시, 엔지니어에게 스케줄 가능하도록 공정 시간 결정을 지원해 주는 공정 설계 지원 모듈(Engineer Support Module)을 구현하였다. 본 논문에서 구현한 스케줄러의 특징은 입력을 담당하는 모듈에서 웨이퍼를 꺼내는 시점을 제어하며 체제 시간 제약을 만족시키는 것과 FSM(Finite State Machine)을 이용하여 모델링하고 구현한 것이다.

참고문헌

- Moslei, M. M., Chapman, R. A., Wong, M., Paranjpe, A., Vajm, H. N., Kuehne, J., Yeakley, R. L. and Davis, C. J., "Single-wafer integrated semiconductor device processing", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 39, No. 1, pp.4-32, 1992.
- 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.
- Haoxun Chen, Chengbin Chu, and Jean-Marie Proth, "Cyclic Scheduling of a Hoist with Time window constraints", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 1, pp. 144-152, 1998.
- L.Lei, and T. J. Wang, "Determining Optimal Cyclic Hoist Schedules In A Single-Hoist Electroplating Line" *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 26, No. 2, pp. 25-33, 1994.
- Gerald W. Shapiro and Henry L. W. Nuttle, "Hoist Scheduling For A PCB Electroplating Facility", *IIE Transactions*, Vol. 20, No. 2, pp. 157-167, 1988.
- 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.
- R. S. Srinivasan, "Modeling and Performance Analysis of Cluster Tools Using Petri Nets," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 11, No. 3, pp. 394-403, 1998
- 강보경, "클러스터 툴(Cluster Tool) 제어 시스템", *월간 반도체*, 1월호, pp.34-42, 1998.