

## 복수 타입의 웨이퍼 혼류생산을 위한 클러스터 장비 로봇 운영 최적화

### Optimization for robot operations in cluster tools for concurrent manufacturing of multiple wafer types

유태선<sup>a</sup>, 이준호<sup>b</sup>, 고성길<sup>c\*</sup>  
Tae-Sun Yu<sup>a</sup>, Jun-Ho Lee<sup>b</sup>, Sung-Gil Ko<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Division of Systems Management and Engineering, Pukyong National University, Assistant Professor, Busan, 48513, Republic of Korea

<sup>b</sup> School of Business, Chungnam National University, Associate Professor, Daejeon, 34134, Republic of Korea

<sup>c</sup> Division of Energy Resource and Industrial Engineering, Kangwon National University, Assistant Professor, Chuncheon, 24341, Republic of Korea

Received 18 December 2023; Revised 26 December 2023; Accepted 28 December 2023

#### Abstract

Cluster tools are extensively employed in various wafer fabrication processes within the semiconductor manufacturing industry, including photo lithography, etching, and chemical vapor deposition. Contemporary fabrication facilities encounter customer orders with technical specifications that are similar yet slightly varied. Consequently, modern fabrications concurrently manufacture two or three different wafer types using a cluster tool to maximize chamber utilization and streamline the flow of wafer lots between different process stages. In this review, we introduce two methods of concurrent processing of multiple wafer types: 1) concurrent processing of multiple wafer types with different job flows, 2) concurrent processing of multiple wafer types with identical job flows. We describe relevant research trends and achievements and discuss future research directions.

*Keywords: Semiconductor manufacturing, Cluster tools, Concurrent processing, Wafer fabrication process*

## 1. 서론

### 1.1 배경

클러스터장비(cluster tools)는 포토공정, 식각공정, 증착 및 이온주입 등 대부분의 반도체 제조 공정에 사용되는 반도체 생산을 대표하는 장비이다. 클러스터장비는 웨이퍼 이송로봇과 여러 개의 공정모듈 또는 챔버(process module or process chamber)로 구성되어 있다. 클러스터 장비는 중간버퍼가 없는 것이 특징이며 로드락(loadlock)에서 한번 출발한 반도체 웨이퍼는 각 챔버의 공정을 모두 거친 후 다시 로드락으로 돌아온다. 웨이퍼 이송로봇은 한팔 또는 양팔로봇의 형태가 일반적이며 반도체 팹(fab.: fabrications)에서 널리 사용되고 있다. 클러스터 장비를 이용한 반도체 생산과 관련하여 생산성 향상, 웨이퍼 불량률 감소를 위한 시간 제약조건 충족, 다양한 장비

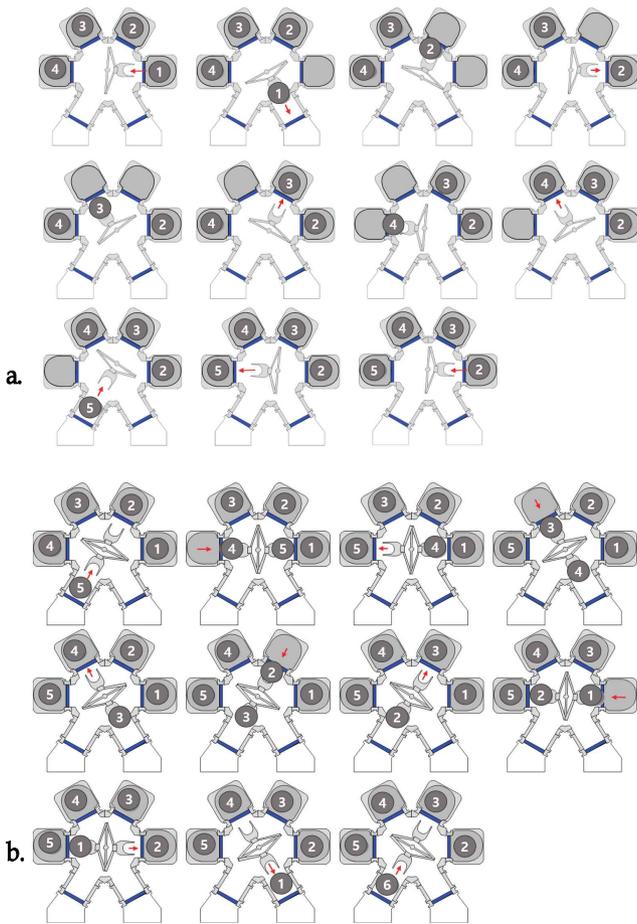
구성 등 여러 가지 주제에 대한 연구들이 수행되고 있으며 이들의 근간이 되는 주제가 클러스터 장비 스케줄링 문제이다. 클러스터 장비의 웨이퍼 이송로봇은 로드락을 포함한 각 챔버에 웨이퍼를 넣고(loading), 빼고(unloading), 운반(moving)하는 역할을 하는데 이러한 로봇 작업의 순서와 타이밍을 결정하는 것이 바로 클러스터 장비의 스케줄링 문제이다<sup>1, 3, 9</sup>. 연구의 주요성과지표는 생산성과 품질에 관련된 지표로서 사이클타임(cycle time)과 웨이퍼 지연(wafer delay)이다. 사이클타임은 웨이퍼가 생산되는 시간 간격을 의미하며 망소특성을 갖는다<sup>11, 12</sup>. 챔버에서 공정을 마친 웨이퍼가 unloading 될 때까지 경과시간을 웨이퍼 지연으로 정의하며 웨이퍼 지연시간이 길어지면 챔버 내의 잔존가스 및 잔열로 인하여 웨이퍼 품질에 악영향을 미치게 되므로 웨이퍼 지연 시간을 최소화하거나 웨이퍼 지연에 대한 시간제약을 충족하도록 스케줄링 하여야

\* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6284  
fax: +82-33-259-5544

E-mail address: kosg@kangwon.ac.kr (Sung-Gil Ko).

한다<sup>2, 4</sup>. 한팔클러스터장비(single-armed cluster tools)와 양팔클러스터장비(single-armed cluster tools)의 스케줄링에 대한 다수의 연구가 수행되었으며 대부분의 연구에서는 단일 타입의 웨이퍼를 반복 생산하는 문제를 다루었다<sup>1, 12</sup>. 또한 로보틱셀(robotic cells)에 대한 연구도 수행되었으며 이는 클러스터장비와 논리적으로 유사한 특성을 갖는다<sup>21, 22</sup>.

한팔 로봇이 적용된 한팔클러스터장비(single-armed cluster tools)에서는 Backward 시퀀스(Fig. 1a)가 사이클 타임을 최소화 하는 최적 운영방식이며, 양팔 로봇이 적용된 양팔클러스터장비(single-armed cluster tools)에서는 Swap 시퀀스(Fig. 1b)가 사이클 타임을 최소화 하는 것으로 증명되어 있다. 이 두 가지의 시퀀스는 사용자가 이해하기에 직관적이고 단순하며 구현이 쉬우므로 반도체 생산 현장에서 baseline 시퀀스로 널리 이용되고 있다<sup>1, 12</sup>.



**Fig. 1 (a) Backward sequence in single-armed cluster tools for single type of wafer processing (b) Swap sequence in dual-armed cluster tools for single type of wafer processing**

최근 IoT, AI 등을 활용한 스마트 제품과 서비스의 발전으로 반도체의 수요는 더욱 폭발적으로 증가하고 있으며 제품의 종류도 다양해 지면서 팹에서 생산해야 할 반도체의 종류가 증가하고 있다. 또한 다품종소량생산의 확대로 Lot의 사이즈는 줄어드는 추세이며 고객의 빠른 수요에 대응하기 위하여 생산시간의 단축이 요구되고 있다. 그러나 이처럼 다양해지는 다품종의 반도체 수요에 대응하기 위하여 생산시설을 증설하기에는 공간적 제약이 많으며, 여러 종류의 반도체 웨이퍼를 타입별로 개별 생산하는 경우 공장 전체 관점에서의 플로우 타입의 변동성은 커지게 되므로 거시적 관점에서 작업부하 분배와 장비의 이용 효율성은 떨어지게 된다<sup>7, 8</sup>.

따라서 현대의 팹에서는 하나의 클러스터 장비에서 여러 타입의 반도체를 생산하는 혼류생산의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 혼류생산 문제는 하나의 클러스터 장비를 여러타입의 반도체 웨이퍼가 경쟁적으로 사용해야 하는 상황이 되므로 스케줄의 복잡성을 증가시킨다<sup>5, 6</sup>.

본고에서는 이러한 여러 타입의 반도체를 하나의 클러스터장비에서 혼류생산 하는 문제를 소개하고 관련된 연구 동향 및 성과를 조망하며, 향후 연구 방향에 대하여 논의한다.

## 2. 본 론

### 2.1 혼류생산 방식의 구분

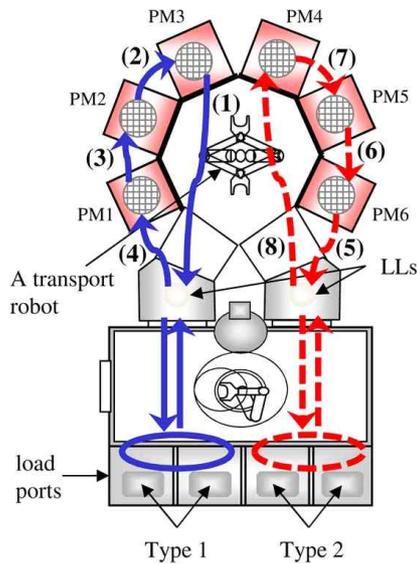
하나의 클러스터 장비를 활용하여 여러 가지 타입의 웨이퍼를 혼류 생산하는 방식은 웨이퍼 타입별로 상이한 작업흐름(different job flows)을 갖는 혼류생산 방식과 웨이퍼 타입은 다르지만 동일한 작업흐름(identical job flows)을 갖는 혼류 생산 방식으로 구분할 수 있다. 웨이퍼 타입별로 상이한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식에서는 각 웨이퍼 타입에 해당하는 특정한 공정 챔버만을 사용하는 별도의 웨이퍼 흐름(wafer flow pattern)을 갖는다. 그 결과 각 공정 챔버는 단일한 종류의 웨이퍼 타입만을 처리한다<sup>5, 6</sup>.

반면 동일한 작업흐름을 갖는 복수 타입 웨이퍼의 혼류생산 방식은 각각의 웨이퍼 타입이 거쳐야 하는 공정은 동일하나 웨이퍼 타입별로 공정처리 시간이 다른 경우이다. 이러한 경우에는 여러 타입의 웨이퍼가 서로 동일한 웨이퍼 흐름(wafer flow pattern) 갖게 되므로 각 공정 챔버는 여러 타입의 웨이퍼 타입을 처리한다<sup>7, 8</sup>.

### 2.2 상이한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식

최근 팹에서의 웨이퍼 공정은 하나의 클러스터 장비에서 2-3개 단계의 공정만을 수행하는 추세이다. 반면 클러스터 장비는 전형

적으로 6-8개의 챔버를 가지고 있다. 이러한 경우 장비의 활용도를 높이기 위하여 여러 유형의 웨이퍼를 동시에 처리하는 방식이 요구된다. 상이한 작업흐름을 갖는 복수타입 웨이퍼의 혼류생산 방식은 클러스터 장비의 공정챔버를 2개 타입의 웨이퍼에 적절히 할당하여 공정을 진행하는 방식으로 웨이퍼 타입별로 거쳐야 하는 공정의 수, 공정별 처리시간, 공정에 사용되는 온도 가스 등이 다른 경우에 사용되는 방법이다. (Fig.2)와 같이 이러한 방식은 공정챔버를 공유하지 않으며 각각의 웨이퍼 타입은 할당된 챔버들에서만 공정처리가 이루어진다. 예를 들어, A, B 타입의 2종류의 웨이퍼를 혼류생산한다고 가정할 때, 클러스터장비의  $n$ 개의 공정챔버 중에  $a$ 개는 A 타입의 웨이퍼에 할당하고  $n - a$ 개는 B타입의 웨이퍼에 할당하여 사용한다<sup>5, 6</sup>.



**Fig. 2** Concurrent processing of two wafer types in cluster tools with different job flows. The wafer loading and unloading tasks at the PMs are performed by the single robot, and there can be interference between the robot tasks for different wafer types<sup>5</sup>.

단일 종류의 웨이퍼 생산과는 달리 이러한 혼류생산 방식에서는 하나의 로봇을 이용하여 두 가지 타입의 웨이퍼를 각각의 공정 흐름 상에 있는 챔버에 넣고(loading) 빼고(unloading) 이동(moving)하는 작업을 수행하여야 하므로 각 웨이퍼 타입의 입장에서 로봇을 경쟁적으로 활용해야 하는 상황이 발생하게 된다. 즉, 경우에 따라 한 타입의 웨이퍼 작업이 종료된 후에 다른 타입의 웨이퍼에 대한 작업이 시작되어야 하므로 웨이퍼 loading 및 unloading의 지연이 발생할 수 있다. 이는 사이클타임의 증가로 인한 생산성의 저하와 웨이퍼

지연시간 증가로 인한 품질문제를 야기하게 되므로 주어진 생산조건 내에서 사이클타임을 최소화할 수 있는 반도체 이송 로봇의 최적 운영 시퀀스가 수립 되어야 한다<sup>5, 6</sup>.

Lee et al.<sup>5, 6</sup>은 단일 웨이퍼 생산에서 최적으로 알려진 Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스를 각각의 상이한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식에 적합하도록 적용하는 방안을 제시하였다. 제시한 두 가지 시퀀스가 혼류생산문제에서 최적 스케줄이 되는 조건을 규명하였으며, 반도체 생산현장에서 적용되는 대부분의 공정조건에서 최적임을 확인하였다. Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스가 최적이지 아닌 조건에서 최적시퀀스를 찾아내기 위한 최적화 수리모델을 개발하였으며 이를 통하여 합리적인 시간내에 최적시퀀스를 도출해 낼 수 있다. 또한 Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스가 최적이지 아닌 조건에서 최적 시퀀스와 비교해 본 결과 최적 시퀀스와의 차이가 몇 퍼센트에 불과한 우수한 스케줄이 된다는 사실을 수리적 모델링과 실험으로 입증하였다. 즉, 혼류생산 문제에서도 Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스가 여전히 효과적이라는 것을 확인하였다. 이를 통하여 상이한 작업흐름을 갖는 복수웨이퍼 타입의 반도체 혼류생산 현장에서 Backward 시퀀스와 Swaps 시퀀스를 baseline 시퀀스로 적용하는 것에 대한 이론적 정당성을 부여하였다.

Pan et al.<sup>16</sup>은 상이한 작업흐름을 갖는 세가지 타입의 혼류생산을 위한 양팔클러스터 장비의 스케줄링 문제를 다루었으며, 이 때 웨이퍼의 품질과 관련된 웨이퍼 지연시간 제약을 고려하였으며 Swap 시퀀스가 최적인 조건을 제시하였다. Lu et al.<sup>17</sup>은 상이한 작업흐름의 혼류생산 문제에서 데드락(deadlock)을 방지하는 스케줄링 연구를 수행하였다.

### 2.3 동일한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식

반도체 제조공정은 가스의 농도, 처리시간, 챔버내의 온도 등 미세한 공정 조건의 차이를 통하여 다른 타입의 제품을 생산할 수 있다. 흔한 예로 현대 팹에서는 동일한 작업흐름을 갖지만 챔버내의 처리시간의 차이로 다른 타입의 웨이퍼를 생산하는 경우가 쉽게 관찰된다. 이러한 경우에는 하나의 클러스터 장비에 동일한 웨이퍼흐름은 유지하면서 처리시간만 달리 하여 여러 타입의 웨이퍼를 생산하는 혼류생산 방식을 적용할 수 있다. 이와 같은 동일한 작업흐름을 갖는 복수 웨이퍼 타입의 혼류생산 방식은 화학적 증착, 물리적 증착과 같은 박막공정에서 주로 활용되며, 가스를 제거 (degas) 하거나 wafer strip 등의 공정을 포함하는 식각공정에서도 이러한 혼류생산 방식을 적용할 수 있다<sup>7, 8</sup>.

동일한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식에서는 각 웨이퍼 타입이 챔버를 공유하여 사용한다. 상이한 작업흐름을 갖는 혼류생산과는

달리 (Fig.3)과 같이 모든 웨이퍼 타입이 같은 공정 챔버를 거치게 되므로 어떤 로봇시퀀스를 적용할 것인가를 결정하는 것 외에 추가적으로 어떤 방식으로 서로 다른 타입의 웨이퍼를 투입할 것인가에 대하여 결정해야 한다. 예를 들어  $A, B$  타입의 웨이퍼를 혼류 생산한다고 할 때,  $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow \dots$ ,  $A \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow \dots$ ,  $A \rightarrow A \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow \dots$ , 등의 웨이퍼 투입방식을 고려할 수 있으며 이를 Cycle plan이라고 한다. 클러스터 장비의 병렬챔버는 애로공정의 작업부하를 분산시켜 생산성을 높이기 위한 목적으로 운용된다<sup>[7]</sup>. 혼류생산 문제에서 병렬챔버는 여러타입의 반도체가 공유되고 작업부하가 균형을 이룰 때 병렬챔버의이용 효율성(utilization rate)이 높아지고 사이클타임이 단축되는데 그것에 결정적인 영향을 주는 변수가 바로 웨이퍼 투입 방식(cycle plan)이다<sup>[7]</sup>.

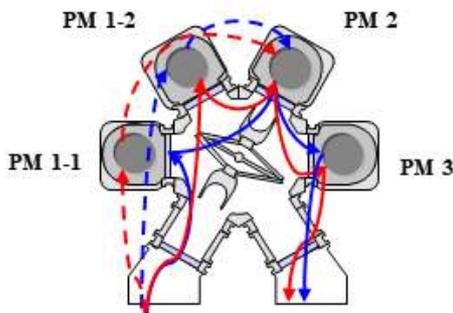


Fig. 3 Concurrent processing of two wafer types in cluster tools with identical job flows. Process step 1 has parallel chambers consists of PM 1-1 and PM 1-2. Each chambers are shared for different wafer types.

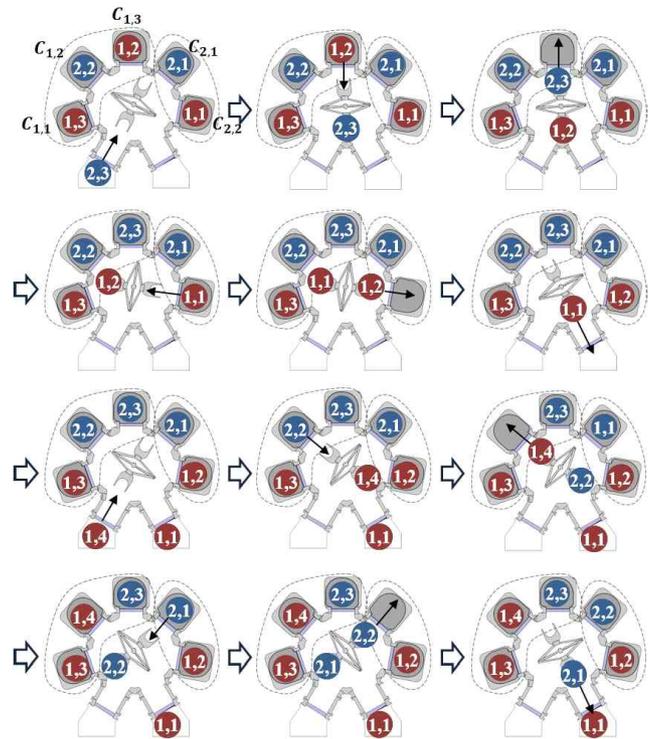


Fig. 4 Swap sequence for wafer flow pattern [3, 2] with two wafer types and cycle plan  $r = 1$ . Cluster tools have two process steps, step 1 consists of three parallel chambers and step 2 consists of two parallel chambers<sup>[7]</sup>.

Ko et al.<sup>[7, 20]</sup>은 단일 웨이퍼 생산 시 한팔클러스터장비(single-armed cluster tools)와 양팔클러스터장비(dual-armed cluster tools)에서 각각최적으로 알려져 있는 Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스(Fig. 4)가 동일한 작업흐름을 갖는 복수웨이퍼 타입의 혼류생산문제에서도 여전히 최소의 사이클타임을 갖는 최적 시퀀스가 됨을 증명하였다. 또한 병렬챔버 이용 효율성을 극대화 할 수 있는 웨이퍼타입의 수, Cycle plan, 병렬챔버 수의 조건을 규명하였다.

Ko et al.<sup>[8, 20]</sup>은 후속연구에서 혼류생산의 웨이퍼 지연은 공정단계 간의 작업부하 불균형뿐만 아니라 공정 단계 내 병렬챔버 간의 작업부하 불균형으로 인하여 발생한다는 것을 규명하였으며, 적절한 웨이퍼 투입 방식(cycle plan)결정에 따른 병렬챔버의 이용 효율성 극대화를 통하여 작업부하의 균형과 웨이퍼 지연의 감소, 사이클 타임의 단축이 동시에 개선되는 것을 증명하였다. 이로써 동일한 작업흐름을 갖는 복수 웨이퍼 타입의 혼류생산 문제에서도 Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스를 baseline 시퀀스로 적용하는 것에 대한 이론적 근거를 마련하였으며, 생산현장에서 직관적이면서 이해하기 쉽게 병렬챔버의 이용 효율성(utilization rate)을 극대화 할 수 있는 방안을 제시하였다.

Wang et al.<sup>[18]</sup> 은 여러가지 작업경로와 웨이퍼 지연시간 제약을 갖는 한팔클러스터 장비의 혼류생산문제를 다루었다. 상이한 작업 흐름과 동일한 작업흐름이 혼합된 형태의 웨이퍼 혼류생산 문제를 풀 수 있으며 이러한 복잡한 작업흐름을 수행하기 위하여 기존 Backward 시퀀스를 기반으로 하는 Multiplex-backward 시퀀스를 제안하였다. 지금까지 살펴본 혼류생산 분야와 관련된 연구를 정리하면 table 1과 같다.

**Table 1 Comparison of works**

Works	Job flows patterns	Tool Types	Wafer types (w)	Remarks
Lee et al. <sup>[5]</sup>	Different job flows	Single- and dual-arm	w=2	· Backward, swap sequence · Without PM Sharing
Lee et al. <sup>[6]</sup>	Different job flows	Single- and dual-arm	w=2	· Backward, swap sequence · 1 PM Sharing
Pan et al. <sup>[16]</sup>	Different job flows	Dual-arm	w=3	· Swap sequence · Wafer delay
Lu et al. <sup>[17]</sup>	Different job flows	Single-arm	w≥2	· Swap sequence · Deadlock preventing method
Ko et al. <sup>[7]</sup>	Identical job flows	Dual-arm	w≥2	· Swap sequence · All PM Sharing
Wang et al. <sup>[18]</sup>	Different processing routes	Dual-arm	w≥2	· Multiplex-swap sequence · Wafer delay
Ko et al. <sup>[8]</sup>	Identical job flows	Dual-arm	w≥2	· Swap sequence · All PM Sharing · Wafer delay · Cycle plan
Ko <sup>[20]</sup>	Identical job flows	Single- and dual-arm	w≥2	· Backward, swap sequence · All PM Sharing · Wafer delay

### 2.4 향후 연구방향

공정의 목적에 따라 다양한 형태와 구조의 클러스터 장비가 존재한다. 지금까지 혼류생산에 관한 문제는 전형적인 방사형태(radial type)의 클러스터 장비운용에 관한 연구를 수행하였다. 최근 이슈가 되고 있는 in-line 클러스터장비, 배치프로세스(batch processing) 클러스터장비 등에 대한 연구가 필요하다고 생각한다. 이러한 장비는 박막공정에서 널리 이용되고 있으며 전형적인 형태의 클러스터장비보다 스케줄링의 복잡도가 높으므로 도전적인 연구가 될 것으로 생각된다<sup>[1, 6, 12]</sup>.

또한 챔버 클리닝(chamber cleaning), 웨이퍼 재방문(wafer

revisiting), 전이기간(transient period) 등 다양한 운용요구사항이 적용된 혼류생산에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다<sup>9, 14</sup>. 이러한 문제는 반도체 생산 현장에서 접할 수 있는 실용적인 문제이다. 챔버 클리닝의 경우 혼류생산과 연계하여 모델링 하기 위해서는 많은 변수를 표현해야 하므로 문제의 본질적 성질은 유지한 채로 단순화하여 모델링 하는 것이 연구의 핵심이슈가 될 것으로 판단된다<sup>10, 11</sup>. 재방문과 전이기간이 포함된 문제는 반도체 생산문제에서 주로 다루는 주기적 스케줄링의 성질과는 다른 비주기적 스케줄링이므로 문제의 복잡도가 증가하여 역시 도전적인 연구 주제가 될 것으로 생각된다<sup>15</sup>.

한편 혼류생산 과정에서 공정 이상이나 장비의 고장 등으로 주기적 생산패턴에 문제가 발생하였을 때 안정적인 스케줄 상태로 돌아가기 위하여 웨이퍼 이송 로봇의 다음 스텝 액션을 선택하는 문제 등을 강화학습을 활용하여 접근해 볼 수 있을 것으로 생각된다<sup>[13, 14, 19]</sup>.

### 3. 결론

반도체 다품종소량생산에 대한 수요로 인하여 현대 팹에서는 다양한 종류의 웨이퍼 타입을 생산해야 하나 공간적인 제약 및 장비 효율성의 극대화 등의 이유로 혼류생산의 필요성이 점차 증대되고 있다. 혼류생산 방식은 상이한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식과 동일한 작업흐름을 갖는 혼류생산 방식으로 대별되며, 두 방식 모두 단일 웨이퍼 생산에서 최적으로 알려진 Backward 시퀀스와 Swap 시퀀스가 여전히 효과적임을 입증한 연구 결과를 소개하였다. 반도체의 선풍은 점차 미세화 되어 2나노미터 이하 기술 경쟁이 치열하며 이에 따라 앞으로의 반도체 제조공정은 더욱 정교해지고 고도화될 전망이다. 이와 더불어 혼류생산 등 생산 장비의 운영 고도화와 관련된 해결해야 할 도전적인 이슈도 계속 대두될 것으로 생각한다.

### 후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2022년)에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] Lee, T. E., Kim, H. J., Yu, T. S., 2023, *Semiconductor Manufacturing Automation*, Springer Nature, Switzerland.
- [2] Lee, T. E., Park, S. H., 2005, An extended event graph with negative places and tokens for time window constraints, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 2:4 319-332.
- [3] Jung, C., Kim, H. J., Lee, T. E., 2015, A branch and bound algorithm for cyclic scheduling of timed Petri nets, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 12:1 309-323.
- [4] Lee, T. E., Park, S. H., Jung, C., 2014, Steady state analysis of timed event graphs with time window constraints, *Discrete Appl. Math.* 167 202-216.
- [5] Lee, J. H., Kim, H. J., Lee, T. E., 2014, Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 11:2 525-536.
- [6] Lee, J. H., Kim, H. J., Lee, T. E., 2015, Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types with PM sharing, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 53:19 6007-6022.
- [7] Ko, S. G., Yu, T. S., Lee, T. E., 2019, Scheduling Dual-Armed Cluster Tools for Concurrent Processing of Multiple Wafer Types With Identical Job Flows, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 16:3 1058-1070.
- [8] Ko, S. G., Yu, T. S., Lee, T. E., 2021, Wafer Delay Analysis and Workload Balancing of Parallel Chambers for Dual-Armed Cluster Tools With Multiple Wafer Types, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 18:3 1516-1526.
- [9] Kim, T. K., Jung, C., Lee, T. E., 2012, Scheduling start-up and close-down periods of dual-armed cluster tools with wafer delay regulation, *Int. J. Prod. Res.* 50:10 2785-2795.
- [10] Yu, T. S., Kim, H. J., Lee, T. E., 2018, Scheduling single-armed cluster tools with chamber cleaning operations, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 15:2 705-716.
- [11] Yu, T. S., Lee, T. E., 2020, Wafer delay analysis and control of dual-armed cluster tools with chamber cleaning operations, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 58:2 434-447.
- [12] Lee, T. E., 2008, A review of scheduling theory and methods for semiconductor manufacturing cluster tools, In: *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conf.*, 2127-2135.
- [13] Roh, J. E., Lee, T. E., 2017, A reinforcement learning approach to scheduling dual-armed cluster tools with time variations, In: *Proceedings of the 16th Int. Conf. on Modeling and Applied Simulation*, 1-6.
- [14] Kim, D. Y., Kim, H. J., 2020, Reentrant flow shop scheduling using reinforcement learning, In: *Proceedings of 16th IEEE Int. Conf. on Autom. Sci. Eng.*, 1646-1647.
- [15] Kim, H. J., Lee, J. H., Lee, T. E., 2015, Noncyclic scheduling of cluster tools with a branch and bound algorithm, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 12:2 690-700.
- [16] Pan, C., Zaoh, K., Lu, Y., Zhang, F., 2018, Scheduling and optimization of mixed-processing with multi-variety wafers in dual-armed cluster tools, *J. Chin. Inst. Eng.*, 41:6 463-472.
- [17] Lu, Y., Qiao, Y., Pan, C., Chen, Y., Wu, N., Li, Z., Liu, B., 2021, Modeling and Control for Deadlock-Free Operation of Single-Arm Cluster Tools With Concurrently Processing Multiple Wafer Types via Petri Net, *IEEE Access* 9 70868-70883.
- [18] Wang, J., Pan, C., Hu, H., Li, L., Zhou, Y., 2019, A cyclic scheduling approach to single-arm cluster tools with multiple wafer types and residency time constraints, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 16:3 1373-1386.
- [19] Fu, J., Pan, C., 2020, Intelligent Scheduling Methods for Challenges of Cluster Tools with Concurrent Processing of Multiple Wafer Types, In: *Proceedings of 16th IEEE Int. Conf. on Autom. Sci. Eng.*, 173-178.
- [20] Ko, S. G., 2018, *Scheduling Cluster Tools for Concurrent Processing of Multiple Wafer Types with Identical Job Flows*, Doctorate Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Republic of Korea.
- [21] Dawande, M., Sriskandarajah, C., Sethi, S., 2002, On throughput maximization in constant travel-time robotic cells, *Manuf. Service Oper. Manag.*, 4:4 296-312.
- [22] Sriskandarajah, C., Drobochevitch, I., Sethi, S., Chandrasekaran, R., 2004, Scheduling multiple parts in a robotic cell served by a dual-gripper robot, *Oper. Res.* 52:1 65-82.

대표저자소개

고성길(Sung-Gil Ko)



- 2004년 3월 : 육군사관학교 응용화학과 (이학사)
- 2010년 2월 : KAIST 산업및시스템공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : KAIST 산업및시스템공학과 (공학박사)
- 2021년 11월 : 합동참모본부 전력기획담당 (육군중령)
- 2022년 11월 : 방위사업청 사업관리담당 (육군중령)
- 2023년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 산업공학전공 (조교수)

<주요 연구 분야>

- 반도체 제조, 스케줄링, 시스템최적화, 국방기술