Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol. 35, No. 1, pp.79－86, March 2012.

반도체 포토공정에서 총 가중작업흐름시간을 최소화하기 위한 스케쥴링 방법론에 관한 연구

최 성 우†

경기대학교 경영학과

Scheduling Algorithms for Minimizing Total Weighted Flowtime in Photolithography Workstation of FAB

Choi Seong-Woo†

Department of Business Administration, Kyonggi University

This study focuses on the problem of scheduling wafer lots of several recipe(operation condition) types in the photolithography workstation in a semiconductor wafer fabrication facility, and sequence-dependent recipe set up times may be required at the photolithography machines. In addition, a lot is able to be operated at a machine when the reticle(mask) corresponding to the recipe type is set up in the photolithography machine. We suggest various heuristic algorithms, in which developed recipe selection rules and lot selection rules are used to generate reasonable schedules to minimizing the total weighted flowtime. Results of computational tests on randomly generated test problems show that the suggested algorithms outperform a scheduling method used in a real manufacturing system in terms of the total weighted flowtime of the wafer lots with ready times.

Keywords : Scheduling, Photolithography, Heuristics, Sequence-Dependent Recipe Setup, Mask

1. 서 론

반도체 산업은 짧은 신제품 출시 주기, 복잡하고 까다로우며 긴 공정 등의 특성으로 인해 생산관리의 어려움이 여타의 다른 제조 산업에 비할 수 없이 매우 크다[10]. 따라서, 다음과 같이 반도체 제조라인의 효율적 생산운영에 대한 많은 연구들이 존재한다.

Choi and Kim[2, 3, 4]은 반도체 등의 제조공정 중 재투입이 존재하는 흐름공정에서 재공들의 총 납기지연(total tardiness)과 총 생산시간(makespan)을 최소화 할 수 있는 휴리스틱(Heuristic)과 분지한계(branch and bound) 알고리듬들을 개발하였다. Sung and Choung[11]은 반도체 제조공정 중 뱃치(batch)로 가공되는 오븐공정에 대해서 뱃치 가공시간을 최소로 하는 문제에 대해서 연구를 하였다. 또한, 반도체 제조라인에 대한 다양한 재공 투입 방법에 관한 연구[6, 15]와 병렬설비에 관한 스케쥴링 방법론에 대한 연구[7, 8, 14, 15]도 다수 존재한다. 하지만, 반도체 주요 공정들 중 일반적으로 병목공정으로 분류되고 있는 포토공정에 초점을 맞추어 포토공정의 다양한 특성과 제약을 반영한 일정계획 방법론에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서 우리는 반도체 공장의 대표 주요공정인 포토공정에서 웨이퍼 로트들의 일정계획 문제를 다룬다. 하나의 웨이퍼 로트는 웨이퍼들의 집합이며 보통 25매의 웨이퍼로 구성되어 진다. 또한, 하나의 웨이퍼 로트 내에

논문접수일 : 2011년 11월 10일　　게재확정일 : 2012년 02월 08일
† 교신저자 swchoi@kyonggi.ac.kr
※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0004568).

있는 모든 웨이퍼들은 함께 물류 이동이 되어야 하고 임의의 설비에서 함께 공정이 진행되어야 한다. 즉, 웨이퍼 로트는 최소 물류이동 단위임과 동시에 최소 공정단위이다[5].

일반적으로 포토공정은 타 주요공정들에 비해 상대적으로 긴 공정시간, 고가의 설비, 그리고 하나의 반도체 칩이 완성되기 위해서는 매우 많은 종류의 포토공정을 거쳐야 하기 때문에 반도체 공장 내의 대표적인 병목공정으로 분류되는 경우가 많다. 따라서, 반도체 생산 시스템의 다양한 주요지표(생산성, 설비효율, 리드타임 등)를 향상시키기 위해서는 포토공정의 효율적인 일정계획 알고리듬의 개발이 매우 중요하며 본 연구에서는 포토공정에 초점을 맞추기로 한다.

포토공정에는 복수의 이종병렬기계(unrelated parallel machine)들이 존재한다. 즉, 설비마다 각각의 성능에 따라 동일한 공정조건(recipe)의 웨이퍼 로트라도 서로 공정시간이 다르며, 또한 임의의 공정조건을 갖고 있는 웨이퍼 로트들이 공정을 진행할 수 있는 포토설비는 정해져 있다. 웨이퍼 로트들은 자신이 포함하고 있는 웨이퍼들의 제품종류와 공정진행 단계에 의해서 이번에 진행할 포토공정조건이 결정된다. 또한, 포토공정은 반도체 공장의 첫 번째 공정이 아니기 때문에 각각의 로트는 포토설비에 고유의 도착시간을 갖고 도착한다. 즉, 각 웨이퍼 로트는 각각 고유의 도착시간을 갖고 있으며, 도착할 로트들의 도착시간은 MES(manufacturing execution system)의 로트의 실시간 위치 정보와 스케쥴 정보에 의해서 비교적 정확히 예측 할 수 있다. 한편, 포토공정에서는 공정조건 작업준비와 마스크(mask 또는 reticle) 작업준비라는 두 가지 종류의 작업준비시간(setup time)들이 존재한다.

따라서, 본 연구에서 포토공정에 각 웨이퍼 로트들은 각각 고유한 시간을 갖고 도착하는 상황에서 앞서 설명한 공정조건준비시간, 마스크준비시간, 공정조건에 따른 진행 가능설비 제약, 포토설비에 따른 성능차이를 고려한 효율적인 일정계획 알고리듬을 개발하고자 한다. 본 일정계획 문제의 목적식은 앞서 설명하였듯이 포토공정의 총 가중작업흐름시간(total weighted flowtime)을 최소화 하는 것이다. 본 연구의 목적식을 총 가중작업흐름시간으로 결정한 이유는 실제 반도체 제조라인에는 재고(로트)들을 보관할 버퍼(Stocker 및 Shelf)가 부족한 것이 일반적이라 가능한 빨리 로트들을 공정완료 시켜 공장 내 혹은 버퍼에서 머무르는 시간을 최소화 하는 것이 중요한 이슈이며 또한 각 로트들마다 고유의 생산계획, 납기, 특성에 따른 중요도가 다르기 때문이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 다음 장에는 본 연구에서 고려하고 있는 스케쥴링 문제에 대해서 보다 자세히 기술되어 있다. 제 3장에서는 본 연구에서 개발 및 테스트 되어진 스케쥴링 알고리듬들과 실제 반도체 제조 현장에서 사용되어지고 있는 방법론을 보여준다. 제 4장에서는 앞서 말한 바와 같이 스케쥴링 알고리듬들의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션 테스트를 통하여 평가하였으며, 마지막장에서는 본 연구의 요약 및 추후 연구 방향에 대해서 간략히 기술하였다.

2. 문제정의

본 연구는 반도체 생산라인 내의 포토공정 혹은 포토설비에서 총 가중작업흐름시간(total weighted flowtime)을 최소화하기 위한 일정계획 문제를 다룬다. 포토공정에서의 일정계획 문제는 복수의 포토설비가 존재하며 설비마다 진행 가능한 공정조건들이 정해져 있고, 동일한 공정조건이라도 설비의 성능과 종류에 따라 공정시간이 다르기 때문에 이종병렬기계에서의 일정계획 문제로 정의할 수 있다. 즉, 포토공정에서 대기하고 있는 로트들은 모두 고유의 공정조건 정보를 갖고 있으며 그 공정조건에 따라 로딩 후 공정진행 가능한 설비가 정해져 있다는 뜻이다. 또한, 임의의 로트가 두 대 이상의 설비에서 공정진행이 가능하더라도 각 설비의 성능에 따른 공정시간은 차이가 있다.

또한, 포토설비에서는 다음과 같이 두 가지 종류의 작업준비가 발생한다. 첫 번째, 공정조건 작업준비는 각 포토설비에서 임의의 공정조건의 로트가 공정시작 직전 만약 타 종류의 공정조건의 로트가 공정진행 되었을 때 발생된다. 즉, 각각의 공정조건에 따른 온도, 습도, 빛의 세기 등의 다양한 조정변수들을 최적화하는 시간이다. 두 번째, 마스크 작업준비가 필요한 경우가 있다. 각각의 공정조건에 따른 회로패턴을 구성시키기 위한 포토공정에서 반드시 필요한 회로패턴에 대한 정보를 담고 있는, 즉, 필요한 미세회로를 형상화한 유리 기판이 마스크다. 만약, 임의의 공정조건에 관련된 마스크가 해당설비에 장착이 되어 있는 경우가 아니라면 해당공정 및 해당로트의 공정을 시작하기 위해서는 관련 마스크를 마스크 보관함 혹은 타 설비에 장착되어 있는 관련 마스크를 이송하여 장비에 투입한 후에나 공정 시작이 가능하다. 즉, 마스크 작업준비란 관련 마스크를 해당 설비에 로딩 및 셋업하는 일련의 작업이라고 생각하면 된다. 일반적으로 임의의 공정조건에 대한 마스크는 고가의 제작비 문제로 공장 내 1개를 보유하고 있는 것이 일반적이다.

즉, 본 일정계획 문제는 두 가지 종류의 작업준비(공정준비작업, 마스크준비작업)와 고유의 도착시간(ready time)이 존재하는 이종병렬기계에서 총 가중흐름시간(total weighted flowtime)이라는 목적식을 갖고 재공(웨이퍼 로트)들의 일정계획을 수립하는 문제라고 정의할 수 있으며, 다음과 같은 가정을 전제로 한다.

(1) 포토공정에서 일정계획 수립 대상재공, 즉, 웨이퍼 로트들의 개수는 일(day)별 혹은 시프트(shift)별 생산계획에 의해 정해져 있다. 따라서, 스케쥴링 대상재공은 미리 결정되어 있다.
(2) 설비는 고장 나거나 유지보수를 하지 않는다.
(3) 공정조건 작업준비가 필요할 경우 작업준비 시간은 과거 경험 데이터에 의해 미리 알 수 있다.
(4) 설비에 마스크가 없어 마스크를 타 설비 혹은 마스크 보관함으로부터 이송 및 장착하는데 걸리는 시간은 예측 가능하다.
(5) 서로 다른 성능을 가진 복수의 포토 설비가 존재하기 때문에 하나의 로트가 각각 다른 설비로 공정 진행할 경우마다 공정시간이 다를 수 있다.
(6) 재공들은 각각의 공정조건에 의해서 공정진행 가능한 설비 정보를 보유하고 있다.
(7) 로트마다 고유의 0과 1사이의 중요도 정보를 보유하고 있다.
(8) 모든 로트들은 각각 고유의 도착시간을 갖고 있으며, 도착시간은 예측 가능하다.
(9) 공정조건에 따른 마스크는 1~2개를 fab에서 보유하고 있으며 하나의 설비는 마스크 종류와 관계없이 2~3개의 마스크를 동시에 장착할 수 있다.
(10) 본 일정계획 문제의 목적식은 세정작업에서의 총 가중작업흐름시간 최소화이다.

다음은 본 연구에서 필요한 용어와 기호들이다.

N : 스케쥴 대상이 되는 로트들의 집합
J : 모든 포토설비들의 집합
F : 모든 공정조건들의 집합
i : 웨이퍼 로트들에 대한 표시(i, 2, …, $|N|$)
j : 포토설비들에 대한 표시(j = 1, 2, …, $|J|$)
f : 공정조건에 대한 표시(f = 1, 2, …, $|F|$)
r_{sab} : 임의의 설비에서 직전 공정완료 된 공정조건과 현재 진행할 공정조건이 상이한 경우 필요로 하는 공정준비시간
m_{sjf} : 공정조건 f에 해당하는 마스크가 설비 j에 존재할 경우 j, 보관소에 존재할 경우 0, 타 설비에 존재하면서 사용되고 있지 않은 경우 1, 타 설비에 존재하면서 사용되고 있는 경우 2
A_{fj} : 공정조건 f가 설비 j에서 공정진행 가능여부, 즉, 진행가능하다면 1, 그렇지 않다면 0
[i] : 로트 i의 공정조건
p_{fj} : 공정조건 f의 설비 j에서의 공정시간, 만약 A_{fj} = 0이라면, p_{fj} = ∞
R_i : 로트 i의 포토공정으로의 도착시간
C_i : 이미 스케쥴 된 로트 i의 작업완료시간
w_i : 로트 i의 가중치
S : t시점에서 아직 스케쥴 되지 않은 재공들의 집합
t : 임의의 포토설비가 가용하면서 대기하고 있는 재공이 존재하는 시점
I : 시점 t에서 대기중인 재공들의 집합, 즉, S에 포함되지 않으면서 $R_i \leqq t$를 만족하는 로트
$\sum w_i C_i$: 본 문제의 목적식, 즉, 총 가중작업흐름시간

본 스케쥴링 문제는 다음과 같이 쉽게 “NP-hard”임을 증명할 수 있다. Bruno et al.[1]은 이미 두 대의 병렬설비가 존재하고 총 가중작업흐름시간을 최소화하는 스케쥴링 문제는 “NP-hard”임을 증명하였다. 두 대의 병렬설비가 존재하고 총 가중작업흐름시간을 최소화하는 스케쥴링 문제는 본 연구에서 고려하고 있는 스케쥴링 문제의 특수한(special) 경우이다. 즉, 본 연구에서 고려하고 있는 스케쥴링 문제에서 $|J|$ = 2, 모든 f와 j에 대해서 A_{fj} = 1, rs = 0, ms_f = 0, 임의의 f와 모든 j에 대해서 p_{fj}의 값이 동일하고 모든 i에 대해서 R_i = 0이라고 가정한 문제가 “NP-hard”이기 때문에 본 연구에서 고려하고 있는 스케쥴링 문제도 “NP-hard”이다.

따라서, 본 연구에서는 반도체 제조라인의 복잡한 스케쥴링 현실, 즉, 포토공정 스케쥴링 문제의 복잡성(complexity)을 고려하여 짧은 시간 내에 스케쥴을 제공할 수 있는 다양한 휴리스틱 알고리듬을 제 3장과 같이 개발하였다.

3. 휴리스틱 알고리듬

실제 제조현장에서 쉽게 구현이 가능한 디스패칭(dispatching) 규칙을 이용한 리스트 스케쥴링(list scheduling) 방법론은 임의의 설비가 가용해졌을 때, 설비 앞에서 대기하고 있는 재공들 중 가장 우선순위가 높은 재공을 선택하여 그 설비에 할당하는 방법이며, 일반적으로 대기중인 로트들의 우선순위는 미리 개발되어진 디스패칭 규칙에 의해서 결정된다[9]. 본 연구에서도 실제 반도체 제조라인에서 쉽게 구현 후 사용할 수 있는 리스트 스케쥴링 방법론을 근간으로 하는 휴리스틱 알고리듬들을 개발하였다. 이러한 리스트 스케쥴링 방법론은 임의의 포토설비가 유휴하면서 대기하고 있는 재공이 존재하는 시점(t)에 구동하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 위와 같은 기본적인 리스트 스케쥴링 방법을 본 스케쥴링 문제에 적용할 수 있도록 변형, 개발하였다.

3.1 Existing Method in Real Fab(EMRF)

우선 국내 굴지의 실제 반도체 제조라인 내 포토공정에서 사용되고 있는 스케쥴링 알고리듬에 대한 기술이다. 실제 반도체의 포토공정에서 사용되고 있는 스케쥴링 알고리듬을 본 연구에서는 편의상 EMRF(Existing Method in Real Fab)이라고 칭하도록 하겠다. EMFR는 작업자 및 엔지니어가 쉽게 이할 수 있도록 개발 후 구현되어 있으며, 아래는 EMRF 알고리듬의 구동 프로시져(procedure)를 나타낸다.

Procedure of EMRF

Step 1 : 현재시점 t에 유휴한 설비를 j'로 정의한다.

Step 2 : 설비 j'에서 직전 공정 완료한 재공의 공정조건을 f''로 정의한다.

Step 3 : 설비 j'에서 진행 가능한 공정조건들의 집합, 즉, I에 속하면서 $A_{fj'}$ = 1을 만족하는 로트들의 집합을 U로 정의한다. 만약, U = ∅라면 본 알고리듬을 종료한다.

Step 4 : 다음 세부 step들을 따라서 스케쥴 할 공정조건을 결정한다.

Step 4-1 : 집합 U에 속하는 로트들 중 공정조건 f''에 속하는 로트들($[i]==f''$)의 집합을 G로 정의하고 step 5로 간다. 만약, G = ∅라면 step 4-2로 간다.

Step 4-2 : 집합 U에 속하는 로트들 중 자신의 공정조건 $[i]$의 관련 mask가 설비 j'에 셋업되어 있는 로트들($ms_{j'[i]}$ = 0)의 집합을 G로 정의하고 step 5로 간다. 만약, G = ∅라면 step 4-3으로 간다.

Step 4-3 : 집합 U에 속하는 로트들 중 자신의 공정조건 $[i]$의 관련 mask가 보관소에 존재하고 있는 로트들($mp_{j'[i]}$ = 1)의 집합을 G로 정의하고 step 5로 간다. 만약, G = ∅라면 step 4-4로 간다.

Step 4-4 : 집합 U에 속하는 로트들 중 자신의 공정조건 $[i]$의 관련 mask가 타 설비에 존재하고 사용되고 있지 않은 경우의 로트들($mp_{j'[i]}$ = 2)의 집합을 G로 정의하고 step 5로 간다. 만약, G = ∅라면 본 알고리듬을 종료한다.

Step 5 : 집합 G에 속하는 로트들 중 중요도(w_i)값이 가장 작은 로트(i')를 선택하여 설비 j'에 스케쥴하고, 본 알고리듬을 종료한다.

본 논문의 제 3.2절에서 제안한 휴리스틱 알고리듬들의 성능들은 제 4장에서 EMRF와 비교, 평가하였다.

3.2 Suggested Heuristic Algorithm

본 연구에서 개발한 포토 스케쥴링 알고리듬의 기본 프로시져다. 즉, 크게 두 가지 모듈로 구성되어 있는데 하나는 새롭게 스케쥴 할 재공의 공정조건을 결정하는 recipe selection module과 결정된 공정조건에 해당하는 재공들의 우선순위를 부여하는 lot selection module이다.

Basic procedure of suggested heuristic algorithms

Step 1 : 고려되고 있는, 즉, 유휴한 임의의 설비를 j'로 정의한다.

Step 2 : 설비 j'에서 공정진행 가능한 재공이 존재하지 않는다면 본 알고리듬의 수행을 종료한다.

Step 3 : 제 3.1절의 recipe selection module을 이용하여 공정조건 별 중요도(priority)를 계산하고 최고 우선순위의 공정조건을 f'로 정의한다.

Step 4 : 제 3.2절의 lot selection module을 이용하여 공정조건 f'의 스케쥴 되지 않은 재공들을 대상으로 중요도를 계산하고 최고 우선순위의 재공을 i'로 정의한다.

Step 5 : 로트 i'를 설비 j'에 스케쥴 한다.

3.2.1 Recipe Selection Module

공정조건선택(recipe selection) 규칙을 이용하여 유휴해진 포토설비에 스케쥴 할 재공의 공정조건을 결정하는 모듈이다. 즉, 해당설비(j')에서 진행 가능한 공정조건들에 대해서 우선순위를 부여할 수 있는 알고리듬을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 다양한 공정조건선택 규칙은 각 공정조건 별 마스크의 위치 및 상태, 직전 선행공정조건, 공정조건 별 대기하고 있는 재공들의 수 및 도착시간, 공정시간 등의 다양한 factor들을 고려하여 개발되었다. 다음은 recipe selection module의 기본 procedure를 step by step으로 기술한 것이다.

Procedure of recipe selection module

Step 1 : 설비 j'에서 직전 공정 완료한 로트를 i'', 그리고 로트 i''의 공정조건을 f''로 정의한다.

Step 2 : 설비 j'에서 진행 가능한 공정조건들, 즉, $A_{f''j''}$ = 1을 만족하는 공정조건들을 집합 $F(j'')$로 정의한다.

Step 3 : $F(j'')$의 공정조건들 중 아래 개발된 priority rule들의 적용 순서에 의해서 만들어진 recipe selection rule들 중 하나를 이용하여 선택된 공정조건을 f'로 정의한다.

Recipe priority terms(우선순위 고려사항)

공정전환 준비시간 변수

$$\text{(R1) } rs_{f''f} = 0 \text{ or (R2) } rs_{f''f} > 0 \qquad (1)$$

Reticle 준비시간 변수

$$(M1)\ ms_{j'f} = j' \text{ or } (M2)\ ms_{j'f} = 0 \text{ or}$$
$$(M3)\ ms_{j'f} = 1 \text{ or } (M4)\ ms_{j'f} = 2 \qquad (2)$$

위의 두 개의 우선순위 고려사항들은 일반적으로 생각했을 때 공정조건을 선택할 경우 고려해야 할 대표적인 변수들이라고 할 수 있다. 식 (1)과 같은 경우는 공정전환 준비시간이 불필요(R1) 혹은 필요(R2)한 경우를 각각 나타낸다. 당연히, 작업준비시간이 불필요한 공정조건들이 높은 우선순위를 보유해야 한다. 식 (2)는 공정조건 f의 마스크가 설비 j'에 존재(M1)하는지 혹은 보관소에 존재(M2)하는지 혹은 타 설비에 존재하면서 유휴상태(M3)인지 혹은 타 설비에 존재하면서 사용 중(M4)인지에 대한 경우를 각각 나타낸다. 당연히, M1, M2, M3, M4 조건의 공정조건 순으로 높은 우선순의를 보유해야 한다.

일반적으로 우선순위규칙(priority rule)은 위와 같이 고려해야 할 변수들을 다음 식 (3)번 식과 같이 하나의 식으로 조합한 형태가 대부분이다.

$$ms_{j'f} \times \alpha + rs_{f''f} \times \beta \qquad (3)$$

하지만, 실제 제조라인에서는 다양한 고려사항들이 하나의 식으로 혼합될 경우 작업자들 혹은 엔지니어들이 실시간으로 수립되는 스케쥴이 어떠한 이유로 결정되었는지 직관적으로 인식하기 어렵고 또한 각각의 식이 목적하는 고려사항이 상쇄되어 랜덤(random)한 스케쥴이 수립될 가능성이 크다는 것을 현장 경험에 의해서 인식하게 되어 본 연구에서는 실제 제조라인의 작업자 및 엔지니어가 쉽게 판단할 수 있도록 앞서 설명했던 식 (1), 식 (2)의 우선순위 고려사항들의 순차적(우선순위) 적용으로 본 연구의 알고리듬을 구성하였다.

Recipe selection rules(RPR, 우선순위 규칙)

RPR1 : R1∩M1 → R1∩M2 → R1∩M3 → R1∩M4
→ R2∩M1 → R2∩M2 → R2∩M3 → R2∩M4
RPR2 : M1∩R1 → M1∩R2 → M2∩R1 → M2∩R2
→ M3∩R1 → M3∩R2 → M4∩R1 → M4∩R2
RPR3 : R1∩M1 → R1 → U
RPR4 : R1∩M1 → M1 → U
RPR5 : R1∩M1 → U
RPR6 : U

위의 여섯 가지 우선순위 규칙은 앞서 기술하였던 우선순위 고려사항들의 적용 순서를 바꾸어 발생시킨 규칙들이다. 예를 들어, RPR1의 경우 recipe를 선택할 경우 공정준비시간과 마스크 준비시간이 모두 불필요한 경우(R1∩M1)의 공정조건이 1순위, 그리고 만약 이와 같은 조건을 만족하는 공정조건의 재공이 존재하지 않는 경우 차선책으로 공정 준비시간은 불필요하면서 필요한 마스크가 보관소에 존재하는 공정조건(R1∩M2)을 선택한다. 이와 같이 RPR1은 작업준비시간을 마스크 준비시간 보다 우선순위에 두고 각 해당조건을 만족하는 공정조건이 나타날 때까지 순차적으로 적용하는 것이다. 반대로, RPR2는 마스크 준비시간을 작업준비 시간보다 우선순위에 두고 각 해당조건을 만족하는 공정조건의 재공이 존재할 때까지 순차적으로 적용하는 것이다.

한편, RPR1과 RPR2와 같이 공정조건의 범위를 너무 세밀하게 단계별로 적용한다면 각 단계에서 만족하는 재공의 수가 적어 오히려 좋지 않은 재공을 선택할 가능성도 있다고 판단된다. 따라서, RPR3-5와 같은 규칙도 고려하였다. RPR3의 경우, RPR1, RPR2와 같이 작업 준비시간과 마스크 준비시간이 모두 불필요한 경우(R1∩M1)의 공정조건을 갖는 재공들이 1순위, 만약 그러한 재공들이 존재하지 않는다면, 제약(M1)을 하나 풀어서 작업준비시간만 불필요한(R1) 조건을 갖는 재공들을 스케쥴 대상 범위로 정의한다. 그래도, 만족하는 재공이 존재하지 않는 경우 모든 재공을 스케쥴 대상 범위로 정하고 로트선택 규칙을 이용해 재공을 선택한다. RPR5는 극단적인 방법으로 처음부터 공정조건의 제약을 두지 않고 전체 대기재공을 대상으로 로트선택 규칙을 적용한다는 의미이다.

3.2.2 Lot Selection Module

로트선택(lot selection) 규칙을 이용하여 유휴해진 포토설비에 스케쥴 할 재공을 결정하는 모듈이다. 즉, 해당설비(j')에서 진행 가능한 공정조건 f'의 재공들에 대해서 우선순위를 부여할 수 있는 알고리듬을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 다양한 로트선택 규칙은 각 로트별 중요도, 도착시간 등의 다양한 factor들을 고려하여 개발되었다. 다음은 lot selection module의 기본 procedure를 step by step으로 기술한 것이다.

Procedure of lot selection module

Step 1 : Recipe selection module에서 선택된 공정조건 f'에 포함되면서 t시점 기준으로 스케쥴 되지 않은 재공들, 즉, S에 포함되면서 $[i]==f'$를 만족하는 재공들의 집합을 $N(f')$로 정의한다.
Step 2 : $N(f')$의 로트들 중 아래 개발된 lot selection rule 중 하나를 이용하여 선택된 로트를 i'로 정의한다.

Lot selection rules terms(우선순위 고려사항)

LPR1 : $1/w$
LPR2 : $(t-R_i)/w_i$
LPR3 : $p_{f'j}/w_i$
LPR4 : $(t-R_i+p_{f'j})/w_i$

LPR1은 로트의 가중치만을 고려하였고, LPR2는 가중치와 로트의 대기시간을 고려한 것이다. LPR3는 로트의 가중치와 공정시간을, LPR4는 가중치, 공정시간 그리고 대시시간까지 고려한 규칙이다. 즉, 대기시간이 길수록, 가중치가 높을수록, 공정시간이 짧을수록 높은 우선순위를 부여하는 규칙들이다.

LPR1-3는 이미 잘 알려진 중요도가 반영된 최소공정시간 규칙(weighted shorted processing time, WSPT, LPR3) 혹은 그로부터 변형된 총 가중흐름시간을 최소화하기 위해 개발 된 간단한 규칙이다[12]. 즉, 본 연구에서는 새롭게 개발된 공정선택(RPR) 규칙들과 기존에 상용되던 로트선택(LPR) 규칙들의 조합으로 다양한 휴리스틱 알고리듬을 개발하였다.

4. 실 험

본 연구에서 개발된 알고리듬들과 실제 반도체 라인에서 사용되고 있는 방법론(EMRF)을 비교, 평가하기 위해서 시뮬레이션 테스트를 수행하였다. 다음은 시뮬레이션 테스트를 위해 무작위로 발생시킨 문제들에 대한 설명이며, 최대한 실제 제조라인의 현황을 반영시키는 범위에서 디자인하였다.

(1) 공정조건 별 각 임의의 포토설비에서의 공정시간(p_{fj})은 [20분, 40분]의 범위를 갖는 이산균등분포(discrete uniform distribution)에서 무작위로 발생시켰다. 동일한 공정조건이라도 포토설비의 성능차이에 의해서 설비별 공정시간이 상이할 수 있다.

(2) 각 로트들의 공정조건은 [1, $|F|$]의 범위를 갖는 이산균등분포(discrete uniform distribution)에서 무작위로 발생시킨 자연수로 할당 하였다.

(3) 각 로트의 도착시간(R_i)은 [0분, L분]의 범위를 갖는 이산균등분포에서 무작위로 발생시켰으며, 여기서 L은 각 공정조건들의 설비별 공정시간의 최소시간을 스케쥴할 로트의 수로 곱하고 총 설비의 대수로 나눈 값($\min_{f,j} p_{f,j} \times |N|/|J|$), 즉, 총 작업완료시간의 하한값(lower bound value)이다.

(4) 각 로트들의 중요도는 [1, 10]의 범위를 갖는 이산균등분포에서 무작위로 발생시킨 자연수 값을 갖는다.

(5) 각 공정조건(f)이 임의의 설비(j)에서 진행가능여부(A_{fj} = 0 or A_{fj} = 1)는 동일한 확률의 무작위로 결정되며, 각 공정조건은 적어도 하나이상의 공정 가능한 설비를 보유한다.

(6) mask의 설비 간 이동시간, 저장소에서 설비로의 이동시간은 각각 [10분, 40분], [5분, 20분]의 범위를 갖는 이산균등분포(discrete uniform distribution)에서 무작위로 발생시켰다.

(7) 스케쥴 할 로트의 개수($|N|$)는 300, 500, 1000개의 세 가지 레벨(levels)들로 설정한다.

(8) 포토설비의 대수($|J|$)는 5, 10, 20대의 세 가지 레벨(levels)들로 설정한다.

(9) 공정조건의 개수($|F|$)는 10, 20개의 두 가지 레벨(levels)들로 설정한다.

(10) 각 로트의 공정조건은 [1, $|F|$]의 범위를 갖는 이산균등분포(discrete uniform distribution)에서 무작위로 발생시킨 자연수의 값으로 결정한다.

위의 각 문제에 대한 데이터 발생 조합에 따라 10개의 문제들을 무작위로 발생시켜 실험을 하였고, 결과적으로 총 180(= 3($|J|$)×3($|N|$)×2($|F|$)×10)개의 문제에 대한 실험을 수행하였다. 개발 된 모든 휴리스틱 알고리듬들은 C언어로 구현, 개발 되었으며, 시뮬레이션 실험은 core i3 CPU 1.33GHz의 프로세서를 탑재한 개인 컴퓨터에서 수행되었다. 본 실험계획에서는 EMRF와 본 연구에서 개발 된 알고리듬의 성능평가, EMRF 대비 본 연구에서 개발 된 알고리듬의 목적식 향상 정도, 그리고 다양한 문제조건 하에서 알고리듬들의 성능 변화를 관찰하였다.

본 연구는 결정되지 않은 로트들의 도착시간에 의해서 비결정 일정계획 문제를 다룬다. 따라서, 최적해(optimal solution)를 한정된 시간 내에 구하는 것은 불가능한 상황이며, 미리 도착시간 정보를 얻을 수 있다고 하여도 앞서 설명한 바와 같이 NP-hard 문제로 귀결된다. 따라서, 개발 된 알고리듬들의 성능은 상대편차지수(RDI : relative deviation index)를 사용하여 평가하였다. 각 시뮬레이션 문제에 대해서, 알고리듬 a의 RDI값은 $(S_a-S_b)/(S_w-S_b)$의 식으로 정의된다. 여기서, S_a는 알고리듬 a에 의해서 얻어진 해의 목적식($\sum w_i C_i$) 값이고, S_b와 S_W는 각각 모든 알고리듬들에서 얻어진 해들 중 가장 좋은 해와 가장 나쁜 해의 목적식 값들을 의미한다. 만약, S_b와 S_W가 동일한 문제에 대해서는 모든 알고리듬들의 RDI는 0으로 계산된다.

<표 1>은 recipe priority rule과 lot priority rule의 조합에 따른 알고리듬들과 기존 스케쥴링 방법인 EMRF의 성능을 RDI값으로 나타낸 표이다. 표에서 보여지는바와 같이 recipe pirority rule은 RPR5, lot priority rule은 LPR3이 대부분의 문제에서 좋은 성능을 보이고 있다. 제안된 대부분의 알고리듬들은 기존의 EMRF보다 좋은 성능의 결과를 보여주는 것을 확인 할 수 있다. 그 중 가장 최고의 성능을 보여주고 있는 알고리듬은 RPR5와 LPR3의 조합이 0.008의 우수한 평균 RDI를 나타내고 있다. 즉, 공정조건을 선택하는 경우 그 대상 공정조건의 범위를 최대화 할 경우 좋은 결과를 보이고 로트를 선택하는 경우 단순히 로트의 중요도가 높고 공정시간이 짧은 로트를 선택하는 경우 좋은 결과를 보인다.

<표 1> 개발 된 방법론들의 성능평가

Algorithms		Relative deviation index(RDI)		NBS (number of best solutions)
Recipe Priority Rules	Lot Priority Rules	평균	편차	
RPR1	LPR1	0.211	0.177	0
	LPR2	0.183	0.157	0
	LPR3	0.150	0.160	6
	LPR4	0.228	0.189	0
RPR2	LPR1	0.062	0.029	0
	LPR2	0.049	0.030	2
	LPR3	0.019	0.021	23
	LPR4	0.076	0.037	0
RPR3	LPR1	0.328	0.215	0
	LPR2	0.371	0.189	0
	LPR3	0.250	0.182	0
	LPR4	0.412	0.206	0
RPR4	LPR1	0.072	0.035	0
	LPR2	0.066	0.033	1
	LPR3	0.015	0.018	35
	LPR4	0.085	0.038	0
RPR5	LPR1	0.076	0.035	0
	LPR2	0.072	0.040	2
	LPR3	0.008	0.014	68
	LPR4	0.094	0.041	1
RPR6	LPR1	0.564	0.193	0
	LPR2	0.459	0.151	0
	LPR3	0.201	0.086	0
	LPR4	0.620	0.190	0
EMRF		0.990	0.036	0

<표 2>는 기존 현장에서 사용되고 있는 방법론, 즉, EMRF 대비 제안된 알고리듬들이 얼마나 향상된 결과, 즉, 총 가중작업흐름시간의 감소율을 보여주고 있는 가를 나타낸 결과표이다. <표 1>의 결과와 마찬가지로 recipe pirority rule은 RPR5, lot priority rule은 LPR3이 EMRF 대비 총 가중작업흐름시간의 가장 큰 감소율을 보여주고 있다.

<표 3>은 문제발생 조건(공정조건 수, 로트 수, 설비 수)과 알고리듬에 따라 구해진 스케쥴의 성능에 얼마만큼의 영향을 미치는가를 알아보기 위한 분산분석결과표이다. 결과에서 보여지는바와 같이 구해진 스케쥴의 결과는 당연히 알고리듬에 따라 가장 큰 영향을 받는다는 것을 확인함으로써 본 알고리듬의 다양한 문제조건에서 좋은 결과값을 준다는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 문제의 발생 조건들 중 공정종류의 다양성에 스케쥴 결과가 많은 영향을 받는 이유는 공정조건의 다양성이 마스크의 교체 빈도에 영향을 주어 총 가중작업흐름시간이 늘어나는 것으로 추측된다.

<표 2> EMFR 대비 개발된 방법론들의 성능향상

Algorithms		EMRF대비 총 가중흐름시간의 감소율(%)	
Recipe Priority Rules	Lot Priority Rules	평균	편차
RPR1	LPR1	67.410	17.210
	LPR2	69.914	15.314
	LPR3	72.725	15.377
	LPR4	65.928	18.501
RPR2	LPR1	80.935	7.067
	LPR2	82.092	7.075
	LPR3	84.723	6.455
	LPR4	79.735	7.639
RPR3	LPR1	57.381	21.130
	LPR2	53.787	18.667
	LPR3	64.201	17.518
	LPR4	50.158	19.947
RPR4	LPR1	80.080	7.345
	LPR2	80.657	7.284
	LPR3	85.101	6.674
	LPR4	78.971	7.645
RPR5	LPR1	79.733	7.493
	LPR2	80.142	7.585
	LPR3	85.702	6.495
	LPR4	78.164	7.737
RPR6	LPR1	37.061	19.170
	LPR2	46.243	15.899
	LPR3	68.649	9.652
	LPR4	32.333	19.400

<표 3> 분산분석 결과

Source of variation	Degrees of freedom	Sum of squared error	Mean squared error	F
알고리듬(A)	24	86.912	3.621	106.391**
공정조건수(R)	1	0.172	0.172	5.047**
로트수(N)	2	0.319	0.160	4.692**
설비수(M)	1	0.062	0.062	1.835
A×R	24	0.485	0.020	0.594
A×N	48	0.861	0.018	0.527
A×M	24	0.130	0.005	0.160
R×N	2	2.399	1.200	35.241**
R×M	1	0.439	0.439	12.908**
N×M	2	0.125	0.062	1.834
Error	621	21.137	0.034	
Total	750	113.043		

주) **0.01의 신뢰수준으로 검증으로 차이가 유의함이 존재.

5. 결 론

본 연구는 반도체 제조라인 내 포토공정에서 다양한 공정조건들의 로트들에 대한 스케쥴링 문제를 다루었다. 포토공정은 공정조건 준비시간과 마스크 준비시간이라는 두 종류의 중요한 작업준비 시간을 요하는 설비에서 수행된다. 본 연구에서는 다양한 공정 선택 우선순위 규칙(recipe priority rule)들과 로트 선택 우선순위 규칙(lot priority rule)들을 제안하였고, 그 조합에 의해 다양한 휴리스틱 알고리듬들을 개발하였다. 개발된 휴리스틱 알고리듬들은 시뮬레이션 테스트 결과로부터 실제 반도체 제조라인의 포토공정에서 사용되고 있는 스케쥴링 방법론(EMRF)과 비교하여 매우 우수한 성능을 보였다.

본 연구는 다양한 방면으로 추가연구가 수행 되어야 한다. 즉, 포토공정은 반도체 제조라인의 병목공정이지만 일부 공정이기 때문에 포토공정의 스케쥴링 결과는 포토공정 이후 공정의 스케쥴에 큰 영향을 미칠 것이다. 따라서, 식각과 같은 후속 공정을 고려한 포토공정의 스케쥴링 방법론의 추후 연구를 수행할 계획이다. 또한, 포토공정의 스케쥴을 고려한 직전 공정(확산공정 등)들의 스케쥴링 방법론의 개발도 필요하다.

본 연구에서 개발 된 스케쥴링 방법론들은 작업자들이 쉽게 이해할 수 있을 정도로 매우 간단하면서도 좋은 스케쥴 결과를 제시하기 때문에 반도체 제조라인의 효율적인 자동화 생산 시스템을 구현하는데 매우 유용할 것이다. 또한, 약간의 변형이나 추가 개발을 통해 확산, 세정, 식각, 검사 등 타 주요공정들을 대상으로도 적용 될 수 있고 납기지연(tardiness)과 총생산시간(makespan)의 최소화, 그리고 설비비효율(equipment utilization)의 극대화를 목적으로 쉽게 적용 될 수 있다는 점에서 그 의미가 있다고 할 수 있다.

참고문헌

[1] Bruno, j., Coffiman, Jr., E. G., and Sethi, G.; “Scheduling independent tasks to reduce mean finishing time,” *Comunications of the ACM*, 17(7) : 382-387, 1974.

[2] Choi, S-W. and Kim, Y-D.; “Minimizing makespan on a two-machine re-entrant flowshop,” *Journal of the Operational Research Society*, 58(7) : 972-981, 2007.

[3] Choi, S-W. and Kim, Y-D.; “Minimizing makespan on an m-machine re-entrant flowshop,” *Computers and Operations Research*, 35(5) : 1684-1696, 2008.

[4] Choi, S-W. and Kim, Y-D.; “Minimizing total tardiness on a two-machine re-entrant flowshop,” *Journal of the Operational Research Society*, 199(2) : 375-384, 2009.

[5] Choi, S-W., Lim, T-K., and Kim Y-D.; “Heuristics for scheduling wafer lots at the deposition workstation in a semiconductor wafer fab,” 36(2) : 125-137, 2010.

[6] Kim, Y-D., Kim, J-U., Lim, S-K., and Jun, H-B.; “Due-date based scheduling and control policies in a multi-product semiconductor wafer fabrication facility,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 11(1) : 155-164, 1998.

[7] Lawler, E. L. and Moore, J. M.; “A functional equation and its application to resource allocation and sequencing problems,” *Management Science*, 16(1) : 77-84, 1969.

[8] Lee, C. Y. and Uzsoy, R.; “A new dynamic programming algorithm for the parallel machines total weighed completion time problem,” *Operational Research Letters*, 11 : 73-75, 1992.

[9] Lee, G-C.; “Scheduling methods for a hybrid flowshop with dynamic order arrival,” *Journal of the Korea Institute of Industrial Engineers*, 32(4) : 373-381, 2006.

[10] Lim, S-K., Kim, J-G., and Kang, J-G.; “A collaboration system for two-stage semiconductor manufacturing supply chain,” *Journal of the Korea management Engineers Society*, 14(2) : 11-29, 2009.

[11] Sung, C. S. and Choung, Y. I.; “Minimizing Makespan on a Single Burn-in Oven in Semiconductor Manufacturing,” *European Journal of Operational Research*, 120(3) : 559-574, 2000.

[12] Thiagarajan, S. and Rajendra, C.; “Scheduling in dynamic assembly job-shops to minimizie the sum of weighted earliness, weighted tardiness and weighted flowtime of jobs,” *Computers and Industrial Engineering*, 49(4) : 463-503, 2005.

[13] Webster, S.; “A priority rule for minimizing weighted flow time in a class of parallel machine scheduling problems,” *European Journal of Operational Research*, 70(3) : 327-334, 1993.

[14] Webster, S.; “A note on schedule of n jobs on two identical machines to minimize weighted mean flow time,” *Computers and Industrial Engineering*, 26 : 795-796, 1994.

[15] Wein, L. M.; “Scheduling semiconductor wafer fabrication,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1(3) : 115-130, 1988.