

반도체 웨이퍼 제조공정에서의 스케줄링 규칙들의 성능 분석*

Performance Analysis of Scheduling Rules in Semiconductor Wafer Fabrication

정봉주**, 이윤준**, 심승배**

Bong-Ju Jeong, Yun-Jun Lee, Seung-Bae Shim

Abstract

Semiconductor wafer fabrication is known to be one of the most complex manufacturing processes due to process intricacy, random yields, product diversity, and rapid changing technologies. In this study we are concerned with the impact of lot release and dispatching policies on the performance of semiconductor wafer fabrication facilities. We consider several semiconductor wafer fabrication environments according to the machine failure types such as no failure, normal MTBF, bottleneck with low MTBF, high randomness, and high MTBF cases. Lot release rules to be considered are Deterministic, Poisson process, WR (Workload Regulation), SA (Starvation Avoidance), and Multi-SA. These rules are combined with several dispatching rules such as FIFO (First In First Out), SRPT (Shortest Remaining Processing Time), and NINQ/M (smallest Number In Next Queue per Machine). We applied the combined policies to each of semiconductor wafer fabrication environments. These policies are assessed in terms of throughput and flow time. Basically Weins fabrication setup was used to make the simulation models. The simulation parameters were obtained through the preliminary simulation experiments. The key result throughout the simulation experiments is that Multi-SA and SA are the most robust rules, which give mostly good performance for any wafer fabrication environments when used with any dispatching rules. The more important result is that for each of wafer fabrication environments there exist the best and worst choices of lot release and dispatching policies. For example, the Poisson release rule results in the least throughput and largest flow time without regard to failure types and dispatching rules.

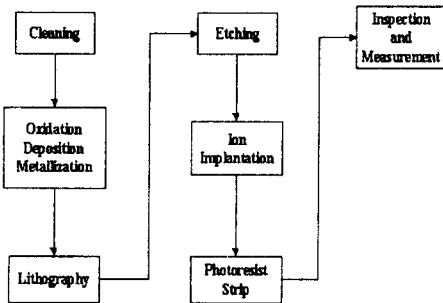
* 본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음.

** 연세대학교 산업시스템공학과

1. 서론

반도체 수요의 폭발적인 증가와 생산기술의 빠른 발전으로 인해 반도체 웨이퍼 제조공정 (이하 반도체 FAB공정)의 생산성 향상에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 이 중 반도체 공정 스케줄링 분야는 생산성의 효율적 향상이라는 측면에서 최근 가장 활발하게 연구되고 있는 분야중의 하나이다. 그러나 FAB공정은 현존하는 제조공정 중에서 가장 복잡한 공정 중에 하나이기 때문에 이 공정을 스케줄링하는 것은 쉽지 않다.

다음의 <그림 1>은 FAB 공정의 기본적인 프로세스이다. FAB 공정은 Deposition, Etching, Photo 등의 화학적인 공정으로 이루어져 있으며 이와 같은 공정을 여러 번 반복하는 복잡한 공정이다.



<그림 1> FAB 공정의 기본 프로세스

본 연구의 목적은 반도체 FAB공정에서 적용될 수 있는 다양한 스케줄링 규칙들에 대한 성능(Performance) 분석에 있다. 적용하고자 하는 반도체 공정 라인은 하나의 특정 공정 라인을 대상으로 하지 않고 설비 고장(Machine Failure) 상황에 따라 특징 지워질 수 있는 여러 가지 형태의 라인을 설정하여 적용하고자 하였다. 특히 반도체 FAB 공정에서의 설비 고장은 생산기술과 설비기술의 급속한 변화로 인하여 전보다 더 중요하게 부각되고 있으나 이것을 예측하기는 쉽지 않다.

이로 인해 설비 고장은 반도체 FAB공정의 생산관리를 어렵게 하는 가장 큰 요인으로 알려져

있지만 분석이 힘들기 때문에 기존의 연구대상에서는 고려되지 않았다. 본 논문에서는 설비 고장의 형태에 따라 구분되는 다양한 공정 라인을 대상으로 스케줄링 규칙의 성능변화를 시물레이션 실험을 통해서 알아보고, 각 생산 환경에서의 최적 스케줄링 정책의 선택이 가능한 가를 입증하고자 한다.

본 논문에서는 실험을 위해서 다섯 가지의 서로 다른 설비 고장 유형을 설정하였으며 기존의 연구에서의 스케줄링을 위한 휴리스틱 중 대표적인 것들을 선택하여 15개의 정책을 선정하였다. 시물레이션 실험을 통해서 특정 고장 형태에 대해서 우수한 성능을 가지는 스케줄링 정책이 결정될 것이며 강건(Robust)한 성격을 가지는 정책이 어떤 것인지, 그리고 투입 규칙(Release Rule)과 우선 순위 규칙(Dispatching Rule)은 상호 어떤 영향을 주는 지 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 적용하고자 하는 투입 규칙과 우선 순위 규칙들을 소개하고, 3장에서는 스케줄링 규칙들의 성능 분석을 위한 시물레이션 모델을 구성하며, 4장에서는 시물레이션 실험에 대한 결과 분석 및 정리를, 그리고 마지막 장에서 결론을 맺는다.

2. 반도체 Fabrication공정의 스케줄링

반도체 FAB공정은 얇은 원형의 실리콘 판에 설계된 회로를 사진 현상의 원리에 의해 형성하여 화학처리를 반복함으로써 원하는 전기적 특성을 가지게 만드는 공정이다. FAB공정은 일반적인 공정과는 달리 같은 Station을 여러 번 방문하는 Re-entrant Line으로서 범용적인 스케줄링 규칙을 적용하기가 어렵다[7]. Graves[3] 등은 반도체 FAB을 Re-entrant Flow Shop으로 모델링하여 하나의 작업이 Flow Shop에 여러 번 방문하는 형태의 모델을 정립하였으며, Kumar[6]는 Re-entrant Line에 대한 불안정성 문제를 분석하고 몇 가지 스케줄링 정책에 대한 기본적인 실험결과를 도출하였다. 이러한 반도체 공정의 스케줄링 방법에 대한 체계적인 연구는 사실상 Wein의 연구로부터 시작되었다. Wein[9]의 연구는 투입 규칙과 우선 순위

규칙이 FAB공정의 성능 지표인 Flow Time의 평균과 분산에 어떠한 영향을 주는지를 수치적으로 보여준 최초의 연구라고 말할 수 있는데 그는 Brownian Network에 기반을 둔 Workload Regulation 규칙을 제안하고 이 규칙이 Flow Time의 평균과 분산에 있어서 다른 규칙보다 우수하다는 것을 실험으로 검증하였다. Glassey와 Resende[2]는 Starvation Avoidance라는 투입 규칙을 제안하였는데 기본 개념은 재고모형을 응용하였으며 병목 공정의 Starvation을 최소로 줄이기 위한 방법이다. 이후에도 반도체 FAB공정의 스케줄링 정책의 여러 가지 형태는 지속적으로 연구되고 있다[5, 8]. 특히 Uzsoy[8] 등은 투입 규칙(Input Regulation Rule)과 우선 순위 규칙의 적용이 Shop Floor Control에 있어서 가장 현실적인 대안으로 보고 이에 대한 다양한 연구들을 깊이 있게 소개하고 있다.

2.1 투입 규칙

투입 규칙은 언제 새로운 Lot을 투입할 것인가를 결정하는 방법이다. Lot 투입을 조절하는 것이 Line의 성능에 중요한 영향을 끼친다는 것은 이미 밝혀진바 있다.[2] 본 연구에서는 다음과 같은 네 가지 대표적인 기존 규칙과 제안된 규칙을 실험의 대상으로 하였다.

- Uniform : Lot의 Inter-arrival Time이 일정한 값을 갖는다. 변화량 = 0으로 Flow Time을 줄이고 Throughput을 늘리기에 가장 이상적인 규칙이긴 하지만 현실적으로 구현하기에는 어려운 규칙이다.
- Poisson : Lot의 Inter-arrival Time이 Exponential분포를 따른다. 실제 상황에서 있을 수 있는 최대의 Randomness를 가정한 규칙이다.
- WR(Workload Regulation) : Wein[9]이 제안한 규칙으로서 병목 Station내의 재공의 Processing Time의 합($W(t)$)이 일정수준(C) 이하로 떨어지게 되면 새로운 Lot을 투입하는 규칙이다. 즉

$W(t) < C$ 이 되는 순간 Line에 Lot을 투입하게 된다. 이 규칙은 공정의 상황이 투입간격에 아무런 영향을 미치지 못하는 Uniform, Poisson과는 달리 공정의 상황에 동적으로 적용하는 규칙이지만 Lot의 투입에서 병목 Station까지 도달하는 시간을 고려하지 않았다.

- SA(Starvation Avoidance) : Glassey와 Resende[2]가 1988년에 제안한 규칙으로서 Inventory Model을 응용하여 병목 Station이 Starvation을 일으키지 않도록 Lot을 투입하는 규칙이다. 이 규칙은 병목 Station의 재공뿐만 아니라 Lead Time 내에 병목 Station에 도착할 수 있는 재공을 포함한 전체 재공(W)이 일정 수준(αL)보다 낮을 때마다 새로운 Lot을 투입하는 방법이다. 이때 Lead Time(L)은 처음 Lot을 투입해서 처음으로 병목 Station에 도달할 때까지의 Machine Processing Time의 합이다. 즉 $W < \alpha L$ 일 때마다 새로운 Lot을 투입한다. 이 규칙은 WR의 단점을 보완하기 위하여 투입시점을 계산할 때 병목 Station까지의 도달시간(L)을 포함시켰으나 계산방법에서 대기시간을 포함시키지 않아 오차를 가지는 단점을 가지고 있다.
- Multi SA : 본 논문에서 제안하여 비교 실험한 규칙으로서 SA가 하나의 병목 Station만을 가진 Line을 가정한 경우의 방법인데 비하여 Multi SA는 병목 Station이 생산진행에 따라 바뀌는 일반적인 Line의 상황을 가정할 때 적용 가능케 한 방법으로서 병목 Station의 수에 관계없이 각 병목 Station에 SA 규칙을 적용하여 어떤 Station이라도 $W < \alpha L$ 일 때마다 투입하는 방법이다.

2.2 우선 순위 규칙

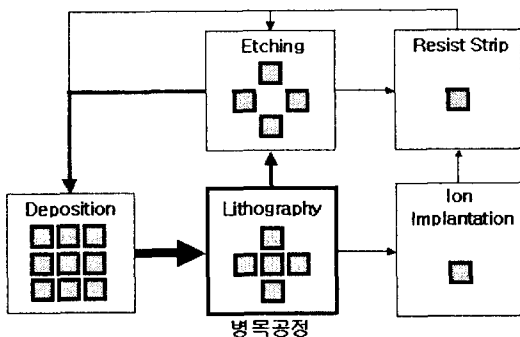
각 Station에서 대기중인 Lot을 어떻게 Machine에 할당하는가를 결정하는 우선 순위 규칙은 반도체 공정의 스케줄링 휴리스틱을 이루는 중요한 부분으로서, 현재 지속적인 연구가 이루어지

고 있다[4, 7]. 본 연구에서는 다음의 대표적인 세 가지 규칙을 실험의 대상으로 하였다.

- FIFO(First In First Out) : Station에 가장 먼저 도착한 Lot이 가장 먼저 Machine에 할당이 되는 방법이다. 한 Lot이 같은 Station을 여러 번 지나게 되는 반도체 FAB공정의 특성상 좋지 않은 방법이다.
- SRPT(Shortest Remaining Processing Time) : 남은 가공시간이 최소인 Lot을 먼저 Machine에 할당하는 방법이다. Queue를 짧게 함으로써 재공을 최소화하는데 목적이 있다.
- NINQ/M(Smallest Number In Next Queue per Machine) : Lot의 경로상 다음에 도착할 Station의 Queue의 길이를 비교하여 그 길이가 가장 짧은 Lot을 먼저 Machine에 할당하는 방법이다. Starvation이 일어날 가능성을 최소화하여 Machine의 Utilization을 높이는 데 목적이 있다.

3. 시물레이션 모델

3.1 시물레이션 설정



<그림 2> 실험에서 사용된 모델의 전체구조

시물레이션에 사용된 공정들은 Wein의 논문에서 사용된 것과 같은 공정을 기준으로 하여 설계되

었다. 즉, Semiconductor R&D Fabrication Line으로서 172개의 공정과 24개의 Station으로 구성된 Re-entrant Line이며 각 Station별 자세한 공정 정보는 아래 <표 1>과 <표 2>와 같다. 172개의 Re-entrant 공정 순서는 다음과 같다.

ENTER→1→2→13→14→23→15→20→22→23→22→17→13→14→15→23→16→24→23→22→17→1→8→4→22→22→1→2→8→13→14→18→23→15→16→23→18→22→1→1→13→14→23→15→16→24→23→22→17→1→2→8→9→21→22→1→4→22→22→1→2→13→14→23→15→16→24→24→23→22→17→24→1→2→7→1→3→22→13→15→23→22→22→22→17→13→14→18→23→15→16→20→23→1→17→1→1→3→13→14→16→24→23→22→17→9→21→1→3→13→14→15→23→15→16→24→23→22→17→1→3→13→14→23→15→16→23→15→16→24→23→22→17→1→3→10→22→12→6→22→6→1→1→4→10→19→23→1→10→13→14→16→21→12→13→14→18→23→15→15→15→16→19→23→22→17→11→13→14→15→21→23→5→EXIT

<그림 2>는 실험에 사용된 모델의 구조를 나타내는 그림으로 각 공정에 있는 작은 상자의 개수는 각 공정에 있는 Station의 수를 의미하며 화살표와 화살표의 굵기(진하기)는 각각 공정 사이의 주 이동 경로 및 이동량을 나타낸다. 즉 Station이 많은 Deposition 공정에서 Lithography 공정으로 연속적으로 많은 양이 이동하기 때문에 Lithography가 병목 공정이 된다.

Wein의 연구에서는 Station의 Machine수에 따라서 공정을 세 종류로 정의하여 실험하였는데 본 연구에서는 그 중 병목 Station이 1개인 FAB 1과 병목 Station이 4개인 FAB 3을 Machine의 고장 유형에 따라 네 가지로 설정하고 다음 <표 3>에서와 같이 FAB을 정의하여 실험하였다. 이 때 FAB 1의 경우 병목 Station이 14번이고 FAB 3의 경우 14, 19, 21, 24번이다.

<표 1> Wein의 FAB Line 모델

Station No.	Type	MPT	MTBF	MTTR	Station No.	Type	MPT	MTBF	MTTR
1	Deposition	1.55	42.18	2.22	13	Lithography	4.23	22.37	1.15
2	Deposition	4.98	101.11	10.00	14	Lithography	7.82	21.76	4.81
3	Deposition	5.45	113.25	5.21	15	Lithography	0.87	387.20	12.80
4	Deposition	4.68	103.74	12.56	16	Lithography	2.96		
5	Deposition	6.14	100.55	6.99	17	Lithography	1.56	119.20	1.57
6	Deposition	7.76	113.25	5.21	18	Lithography	3.59		
7	Deposition	6.23	16.78	4.38	19	Etching	13.88	46.38	17.42
8	Deposition	4.35	13.21	3.43	20	Etching	5.41	36.58	9.49
9	Deposition	4.71	10.59	3.74	21	Etching	7.58	36.58	9.49
10	Deposition	4.05	47.53	12.71	22	Etching	1.04	118.92	1.08
11	Deposition	7.86	52.67	19.78	23	Resist Strip	1.09		
12	Deposition	6.10	72.57	9.43	24	Ion Implant	3.86	55.18	12.86

<표 2> FAB 1과 FAB 3의 Machine 수 설정

Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
# of Machines(FAB 1)	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
# of Machines(FAB 3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Station No.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
# of Machines(FAB 1)	4	3	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2
# of Machines(FAB 3)	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

<표 3> 실험에 사용된 FAB Line 모델

FAB 유형	설명
FAB 1, FAB 3	Wein의 FAB 1, FAB 3
FAB 1A, FAB 3A	Machine Failure가 전혀 일어나지 않는 FAB (MTBF=)
FAB 1B, FAB 3B	병목 Station에서 Failure가 자주 일어나는 FAB (MTBF가 1/2)
FAB 1C, FAB 3C	MTBF와 MTTR의 Randomness가 증가된 FAB (Deviation이 약 3배)
FAB 1D, FAB 3C	MTBF와 MTTR이 큰 FAB (5배)

시물레이션에서는 각각의 FAB유형에 대하여 앞에서 설명된 5개의 투입 규칙과 3개의 우선 순위 규칙을 조합하여 15가지의 정책을 실험하였다. 시물레이션은 1년(24시간 365일)을 단위로 수행되었으며 초기 3개월간(2160시간)은 Warm-up Period로 사용되어 그 이후 9개월간(6600시간)의 데이터

만을 이용하여 분석하였다.

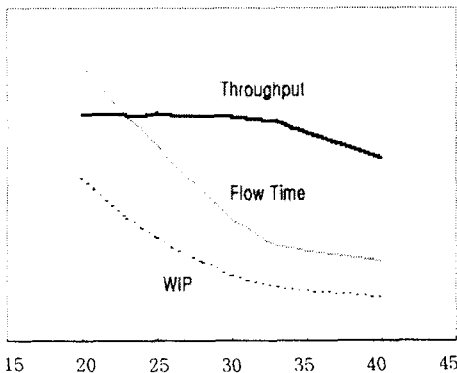
모든 실험은 30회씩 반복되었으며 이들의 평균치가 결과로 제시되었다.

모든 시물레이션은 ARENA를 사용하여 수행하였으며 각 모델은 Block으로 디자인되었고

MPT나 MTTR 같은 시간은 모두 Gamma 분포를 따른다고 가정하였다. Block은 Lot의 투입에 관한 것, Station에 대한 것, 그리고 Re-Entrant Line의 처리를 위한 Recipe에 대한 것들로 구성되어 있고 모든 모델은 Wein의 모델의 실험 결과를 토대로 검증하였다.

3.2 시물레이션 파라미터 결정

시물레이션을 위한 준비 실험으로 각각의 정책들에 사용되는 파라미터들을 결정하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. <그림 3>는 투입 규칙으로 Uniform, 우선 순위 규칙으로 SRPT를 사용한 정책의 실험 결과를 나타낸다. 이 그림은 그래프의 개형을 보기 위한 목적으로 그렸기 때문에 Y축의 값은 정확한 수치가 아니며 X축은 Inter-arrival Time을 의미한다.



<그림 3> 시물레이션 파라미터 결정 그래프

그림에서 보듯이 Inter-arrival Time이 33보다 짧아지면 Throughput은 거의 변하지 않고 Flow Time과 재공이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 Inter-arrival Time은 33을 기준으로 일정한 단위로 변화 시키면서 시물레이션을 수행한다. 마찬가지로 다른 정책에 대해서도 이와 같은 방법으로 그래프를 통해서 적절한 파라미터 값을 얻어낸다. <표 4>는 이러한 방법으로 얻어진 시물레이션에 사용된 파라미터값들을 보여주고 있다.

4. 실험 결과의 분석 및 토의

4.1 고장 유형별 분석

<그림 4>는 FAB 1과 FAB 3에 대한 실험결과를 고장 유형별로 나누어 표시한 것으로서 이 그래프를 통하여 각각의 고장 유형들이 서로 잘 구분되는 결과를 보이는 것을 알 수 있으며 상대적으로 어떤 위치에 있는지도 알 수 있다. 또한 그래프에서 보듯이 FAB 1과 FAB 3의 그래프 유형에 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이 때, 그래프에서의 점은 FAB 1에 대하여 12가지 정책, FAB 3에 대하여 15가지 정책을 적용한 것과 일대일 대응되며 각각의 점들은 정책 중에서 Throughput이 가능한 최대치의 90% 정도인 시물레이션 결과 중에서 Flow Time이 가장 작은 지점을 선택하였다. 또한 이 그래프의 가로축은 Flow Time을, 세로축은 Throughput을 나타낸다.

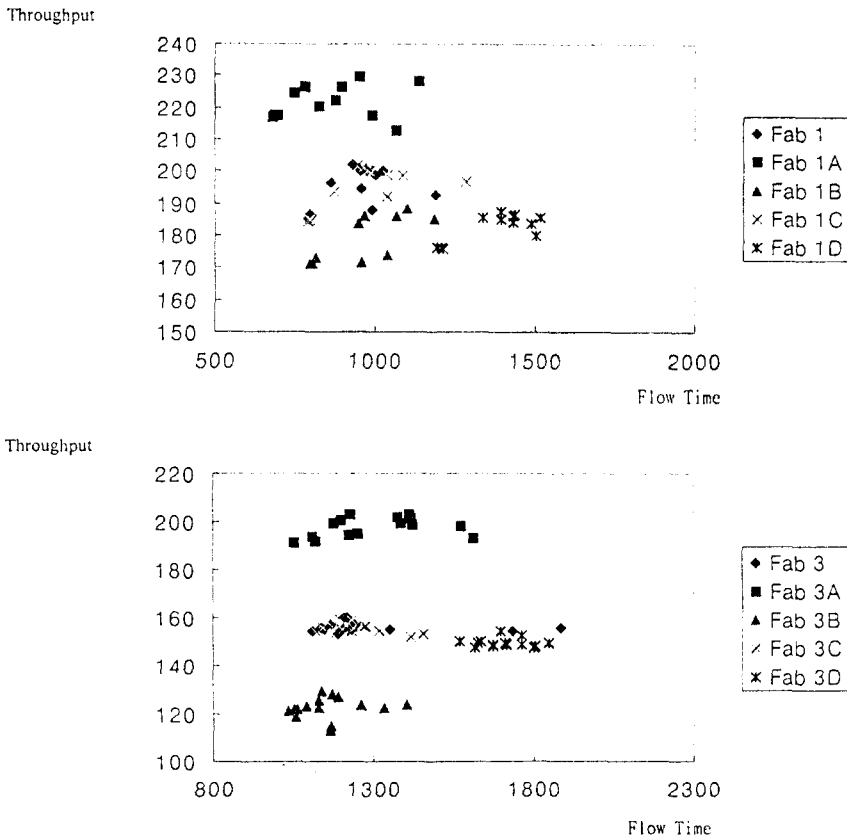
<표 4> 실험에 사용된 파라미터

Release Rule	파라미터
Uniform	Inter-arrival Time : 30을 중심으로 5단위씩 증감하여 설정
Poisson	Inter-arrival Time : 30을 중심으로 5단위씩 증감하여 설정
Workload Regulation	C = 10을 초기값으로 5~10단위씩 증가 설정
Starvation Avoidance	= 1.0을 초기값으로 0.1 단위씩 증가 설정

쉽게 예측할 수 있듯이 고장이 전혀 없는 FAB 1A(3A)의 경우 FAB 1(3)에 비해서 Flow Time도 짧아지고 Throughput도 늘어난 것을 알 수 있으며 병목 Station의 고장이 늘어난 FAB 1B(3B)의 경우에는 Flow Time은 FAB 1(3)과 유사하고 Throughput만 줄어든 결과를 보인다. FAB 1D(3D)의 경우 가장 나쁜 결과를 보여 Flow Time도 늘어나고 Throughput도 줄어드는 결과를 보인다. 난수발생범위가 늘어난 FAB 1C(3C)의 경우는 FAB 1(3)과 그다지 차이가 없음을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 MTBF와 MTTR의 감소가 Line의 성능에 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

스케줄링 정책의 성능 분석을 위하여 사용된 지표는 Flow Time과 Throughput Rate인데, 실험 결과는 이에 따라 두 가지 방법으로 정리가 되었다. 먼저 Throughput을 고정하고 Flow Time을 비교하였고, 다음으로 Flow Time을 고정하고 Throughput을 비교하여 보았다.

참고로 각 FAB 유형에 대하여 투입 규칙과 우선 순위 규칙이 Throughput과 Flow Time에 미치는 영향을 요인분석으로 검정한 결과 모두 1% 유의 수준에서 결과가 유의하였다. 또한 두 개의 스케줄링 정책의 Throughput과 Flow Time 차이에 대한 검정 결과도 1% 유의 수준에서 결과가 유의하다는 것을 보여주었다. (<표 5> ~ <표 8> 에서 F-value 참고)



<그림 4> 고장 유형들간의 구분 (FAB 1, FAB 3)

4.2 Flow Time의 비교

각 스케줄링 정책의 성능을 비교하기 위하여 Maximum Throughput의 90% 정도에 해당하는 Throughput을 낼 때의 Flow Time을 다음의 <표 5>과 <표 6>과 같이 정리하였다. 이 표를 통해서 다음과 같은 사실들을 관찰할 수 있다.

① Flow Time을 지표로 하는 경우에는 스케줄링 규칙 중에서 투입 규칙의 영향이 우선 순위 규칙을 지배한다. 즉 같은 투입 규칙에서 우선 순위 규칙을 바꾸는 것은 Flow Time에 거의 영향을 주지 않지만 반대의 경우 영향이 크다.

② 실험결과에는 FAB 1의 경우 FAB의 유형에 무관하게 Uniform(최고) > SA > WR > Poisson(최저)의 순서로 나타나고 있다.

그러나 FAB 3의 경우 대체적으로 Multi SA(최고) > SA > WR > Uniform > Poisson(최저)의 순이다.

이전의 연구[1, 10, 11]에서도 밝혀진 바와 같이 Poisson은 Inter-arrival Time의 변동량이 크기 때문에 좋은 성능을 보이지 못하고 있다.

또한 실험결과 중에서 FAB 1에서 Uniform이 최고의 성능을 나타낸 것은 실험 설정에서 알 수 있듯이 Throughput이 90% 정도로 Line이 상당히 안정화되어 있기 때문이라고 할 수 있다. 하지만 FAB 3의 경우는 병목 Station이 4개이기 때문에 Throughput이 높은 안정화된 Line이라 할 지라도 투입 규칙의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

③ 우선 순위 규칙은 함께 사용한 투입 규칙이 무엇인가에 따라서 약간씩 다른 선후관계를 보인다. 이것을 통해서 Line의 성격에 따라서 좋은 성능을 보이는 정책이 다르다는 것을 알 수 있다.

4.3 Throughput의 비교

Throughput의 비교 분석은 Flow Time을 일정한 값으로 유지하고 이루어지는데, FAB 1의 경우 파라미터 조절을 통해 Flow Time을 일정한 값으로 유지하기가 쉽지 않았으나 그래프의 유형을 통해서 다음과 같은 일반적인 결론을 유도할 수 있었다.

<표 5> Flow Time 비교 (FAB 1)

스케줄링 정책	FAB 1		FAB A		FAB B		FAB C		FAB D	
	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT
FI-PO	187.3	928.0	213.0	876.8	170.3	1002.8	184.0	918.5	173.7	1318.4
NI-PO	186.7	975.6	212.5	868.6	169.5	961.8	182.5	912.5	173.1	1269.2
SR-PO	187.7	912.0	211.9	748.8	169.0	873.4	185.7	873.4	174.6	1280.6
FI-UN	188.3	782.7	212.7	652.4	169.1	765.9	183.4	766.3	173.2	1141.6
NI-UN	188.2	781.9	212.4	650.5	169.2	768.2	183.2	765.6	173.8	1118.9
SR-UN	187.7	802.5	212.3	663.9	168.6	781.2	182.8	778.4	174.1	1196.4
FI-WR	192.3	867.0	211.7	704.3	181.3	900.3	193.1	875.3	180.9	1277.2
NI-WR	193.5	865.1	212.6	702.7	180.7	898.0	193.4	866.3	181.1	1256.5
SR-WR	191.7	847.8	212.5	686.3	178.4	864.2	192.1	854.1	179.7	1269.5
FI-SA	186.0	800.8	217.3	692.8	172.8	811.0	185.2	796.4	175.9	1213.0
NI-SA	186.5	793.2	217.6	687.1	171.3	805.2	184.7	795.1	176.1	1194.7
SR-SA	185.0	790.1	217.1	682.7	171.3	794.4	184.4	790.5	176.3	1205.7
Target TH	188.0		212.0		169.2		184.5		173.7	
* F Value		413.9		600.9		551.7		285.7		355.3

* P Value값은 모두 0.0001

<표 6> Flow Time 비교 (FAB 3)

스케줄링 정책	FAB 3		FAB A		FAB B		FAB C		FAB D	
	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT
FI-PO	154.3	1735.5	193.2	1611.6	123.5	1401.1	152.9	1455.5	149.1	1847.0
NI-PO	155.7	1887.6	198.0	1572.6	122.5	1331.4	152.0	1416.2	148.0	1807.6
SR-PO	155.3	1351.9	198.76	1422.2	124.0	1261.8	154.4	1318.6	147.7	1803.2
FI-UN	159.7	1217.7	202.9	1411.7	127.9	1169.1	158.7	1233.0	152.5	1763.2
NI-UN	160.1	1205.9	201.3	1415.6	129.1	1134.9	159.2	1196.2	154.5	1695.8
SR-UN	157.1	1242.3	199.5	1386.2	127.0	1188.2	156.2	1268.8	148.6	1761.4
FI-WR	156.1	1232.9	191.5	1053.3	114.9	1167.1	155.8	1238.1	148.7	1673.1
NI-WR	155.3	1232.8	199.5	1175.0	113.3	1165.2	154.4	1230.7	149.7	1636.3
SR-WR	157.1	1242.3	195.3	1249.5	122.3	1125.3	156.2	1276.8	148.7	1714.2
FI-SA	155.2	1145.4	192.0	1119.2	121.8	1060.7	156.1	1171.9	149.2	1625.2
NI-SA	155.4	1135.2	194.0	1107.7	121.1	1034.5	155.5	1140.0	150.0	1571.2
SR-SA	152.9	1188.9	194.6	1224.0	118.9	1056.2	153.2	1181.3	147.9	1671.3
FI-Multi SA	156.7	1163.5	196.6	1119.7	122.8	1091.7	157.2	1181.7	147.5	1618.5
NI-Multi SA	154.4	1110.3	196.0	1097.5	122.1	1050.9	154.2	1120.1	154.6	1695.1
SR-Multi SA	155.0	1201.7	193.2	1197.0	125.5	1128.6	154.8	1205.1	149.1	1712.9
Target TH	153.0		193.5		126.0		153.0		151.2	
* F Value		881.7		3394.4		1098.1		944.1		585.9

* P Value값은 모두 0.0001

<표 7> Throughput 비교(FAB 1)

스케줄링 정책	FAB 1		FAB A		FAB B		FAB C		FAB D	
	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT
FI-PO	192.0	1178.6	217.6	990.9	173.9	1037.4	196.7	1281.5	180.1	1500.2
NI-PO	188.0	990.4	212.9	1065.2	171.4	958.0	192.4	1035.5	183.7	1489.2
SR-PO	194.4	958.0	228.1	1137.5	185.0	1182.1	198.6	1085.6	185.9	1432.3
FI-UN	200.1	969.4	226.2	892.2	183.7	947.6	201.1	960.1	185.4	1337.3
NI-UN	202.0	929.4	224.4	748.0	183.6	945.8	200.1	980.3	185.3	1392.3
SR-UN	198.8	847.6	229.8	949.2	188.5	1097.9	201.7	939.2	187.7	1391.8
FI-WR	200.2	1023.5	222.2	873.5	186.1	1067.1	198.6	1034.3	185.6	1514.2
NI-WR	198.8	998.6	220.5	824.9	186.1	1029.7	193.8	869.6	184.3	1429.7
SR-WR	200.1	951.8	226.4	779.1	186.1	966.9	200.0	976.1	186.5	1434.8
FI-SA	200.5	898.1	228.0	787.3	187.1	960.4	201.8	902.1	179.4	1251.7
NI-SA	201.4	890.8	224.1	736.0	188.4	957.6	203.5	939.9	199.4	1576.5
SR-SA	199.5	871.9	224.3	719.7	185.3	926.7	204.3	927.0	193.0	1495.0
* F Value	17.3		89.8		116.9		47.6		96.0	

* P Value값은 모두 0.0001

<표 8> Throughput 비교(FAB 3)

스케줄링 정책	FAB 1		FAB A		FAB B		FAB C		FAB D	
	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT	TH	FT
FI-PO	154.3	1735.5	193.2	1611.6	122.2	2223.4	153.5	1863.1	149.1	1847.0
NI-PO	155.7	1887.6	198.0	1572.6	122.3	2116.1	154.4	1915.6	148.0	1807.6
SR-PO	165.7	2065.2	198.8	1422.2	133.2	1868.2	165.2	2123.7	157.6	2077.0
FI-UN	158.7	1758.9	202.9	1411.7	123.0	2103.6	157.3	1795.7	153.8	2202.1
NI-UN	160.0	1722.5	201.3	1415.6	123.1	2092.6	158.4	1744.7	153.9	2161.2
SR-UN	165.6	2092.8	199.5	1386.2	133.3	1840.7	166.5	2099.2	158.4	2054.7
FI-WR	163.6	2071.2	202.5	1407.9	133.2	2084.4	162.4	2069.8	157.0	2014.2
NI-WR	162.3	2057.3	202.3	1415.3	132.1	2096.8	162.8	2069.7	158.8	1964.9
SR-WR	167.0	1987.4	198.6	1393.9	135.7	2030.7	165.7	2013.6	158.0	2042.7
FI-SA	165.1	1956.4	205.0	1418.2	129.8	2256.8	165.5	2020.9	165.1	2051.9
NI-SA	165.1	1929.0	206.2	1383.4	128.5	2102.0	164.9	1926.7	164.8	1995.4
SR-SA	167.5	2023.7	200.9	1370.5	135.1	1900.3	166.5	2045.3	160.0	1997.6
FI-Multi SA	173.1	1914.1	210.3	1375.3	134.6	2289.1	170.5	2171.5	162.3	2009.5
NI-Multi SA	171.6	1998.0	212.4	1437.1	133.9	1950.0	169.1	1984.5	166.8	2111.6
SR-Multi SA	169.2	2009.7	202.1	1374.6	136.1	2111.2	168.6	2036.0	160.2	2054.0
* F Value	106.8		84.2		114.3		91.6		97.1	

* P Value값은 모두 0.0001

① 모든 FAB에서 SRPT를 사용한 경우가 높은 Throughput을 보인다. 이것은 SRPT가 남은 공정의 수가 작은 Lot부터 다음 공정으로 이동시키는 규칙이기 때문에 같은 Flow Time의 조건일 때 다른 우선 순위보다 빠르게 재공을 줄이는 효과가 있기 때문이다.

② 투입 규칙으로는 SA, Multi SA가 높은 Throughput을 보인다. 또한 WR도 SA, Multi SA와 비슷하게 높은 Throughput을 보이고 있다. 이것은 병목 Station의 재공을 조절해 주는 것이 전체 재공을 줄이게 되고, 이에 따라 Throughput도 증가한다는 것을 증명해준다.

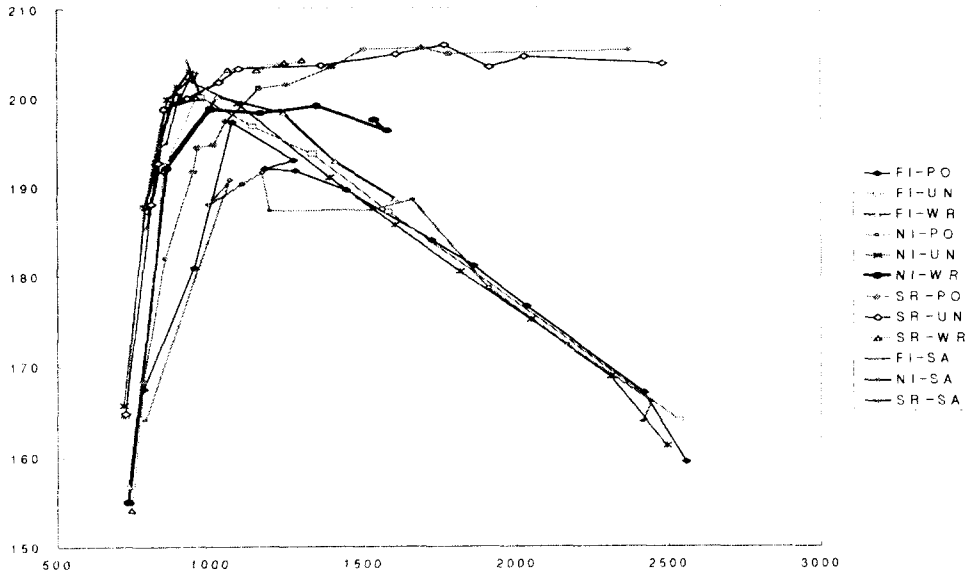
③ SRPT는 특히 투입 규칙이 Poisson이나 Uniform일 때 다른 정책보다 상대적으로 높은 성능을 보이는 경향이 있다. 이것은 Line의 상태와 관계없이 다른 투입 규칙에 비해서 성능이 낮은 상기 2개 규칙에 대하여 동적인 우선 순위 규칙인 SRPT를 통해서 성능의 향상을 가져오기 때문이다. 정리하면 투입 규칙을 SA, Multi SA로 선택하거

나 우선 순위 규칙을 SRPT로 사용하는 것이 높은 성능을 보인다는 것을 알 수 있으며 최적 정책은 Multi SA와 SRPT의 조합인 것을 알 수 있다. 실험결과는 <표7>과 <표 8>에 제시되어 있다.

4.4 스케줄링 정책의 선택

이상의 실험결과를 통하여 이제 각 FAB의 상황에 따라 적절하게 각 정책의 성능을 비교하고 선택할 필요가 있다.

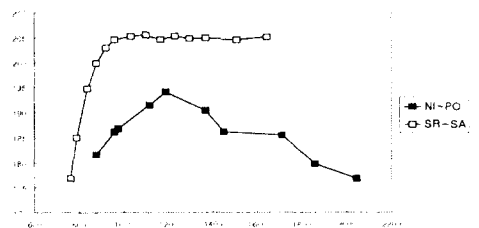
본 분석에서는 <그림 5>와 같이 Flow Time과 Throughput을 두 축으로 하는 그래프를 그려봄으로써 쉽게 각 정책의 성능을 비교할 수 있었다. 그 그래프에서 왼쪽 위로 치우쳐 있는 그래프는 Throughput이 크고 Flow Time이 짧은 성능이 우수한 정책을 나타내는 것이고 오른쪽 아래로 치우쳐 있는 그래프는 Throughput이 작고 Flow Time이 긴 성능이 저조한 정책을 나타내는 것이다.



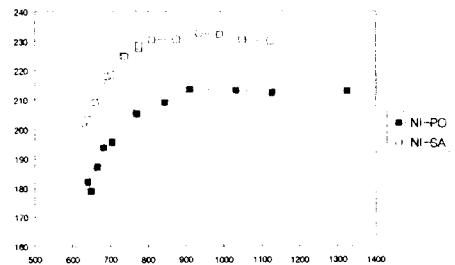
<그림 5> 스케줄링 정책의 성능비교 (FAB 1)

<그림 5>에서 Flow Time이 늘어남에 따라 그래프가 두 가지 형태로 나뉘어지는 것을 볼 수 있는데 Flow Time이 늘어나도 즉, 재공이 증가해도 Throughput이 줄어들지 않는 것이 우선 순위 규칙으로서 SRPT를 이용한 경우이며, Flow Time이 증가함에 따라 Throughput이 감소하는 것은 FIFO, NINQ의 경우인데 이는 재공 수준이 일정 수준을 넘어서게 되면 공정의 초기에 있는 Lot들이 공정의 후반부에 있는 Lot들의 진행을 방해하여서 재공이 증가해도 Throughput은 증가하지 않고 오히려 감소하게 되는 것이다. 이는 Re-entrant line에서만 볼 수 있는 특별한 현상으로 보여진다.

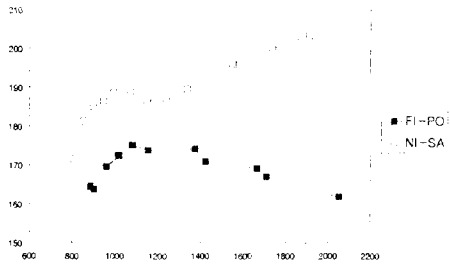
<그림 6>과 <그림 7>은 FAB 1과 FAB 3의 각 FAB에 대해서 가장 성능이 우수한 정책과 가장 성능이 저조한 정책만을 나타낸 그래프이다. 이 그래프들을 살펴보면 일반적으로 SA 규칙, Multi SA 규칙이 좋은 결과를 보이고 있으며 Poisson 규칙은 좋지 않은 결과를 보이고 있다.



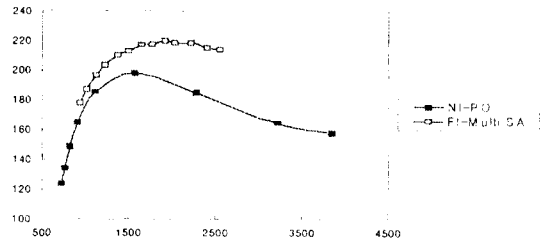
(i) FAB 1



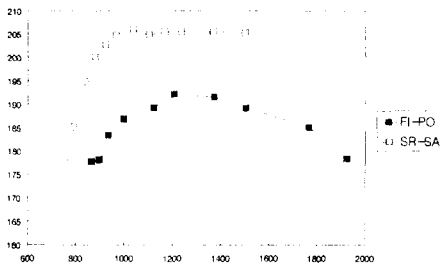
(ii) FAB 1A



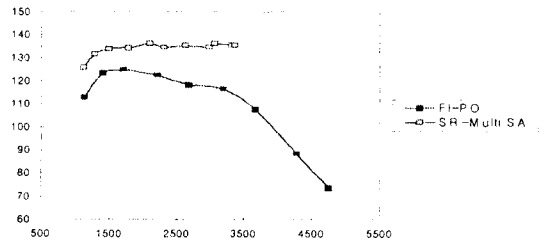
(iii) FAB 1B



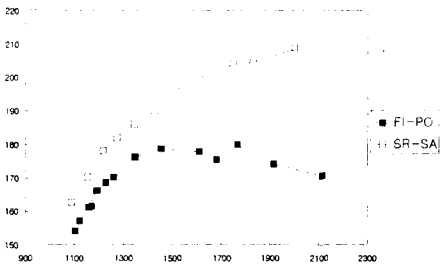
(ii) FAB 3A



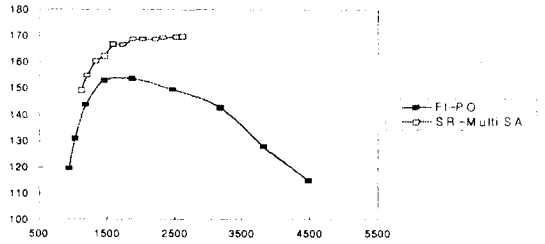
(iv) FAB 1C



(iii) FAB 3B

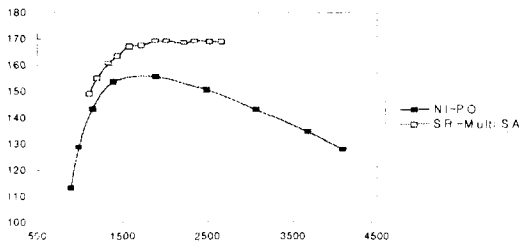


(v) FAB 1D

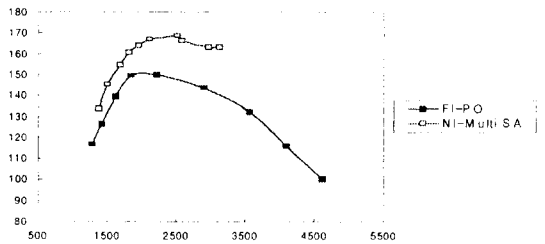


(iv) FAB 3C

<그림 6> 최고와 최저 성능의 스케줄링 정책 (FAB 1)



(i) FAB 3



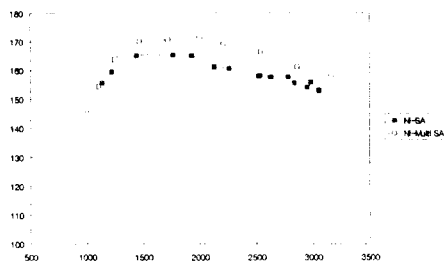
(v) FAB 3D

<그림 7> 최고와 최저 성능의 스케줄링 정책 (FAB 3)

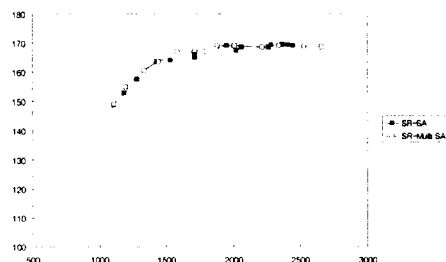
현재의 공정에 어떤 정책을 적용할 것인가 하는 문제는 현재 공정의 고장 유형에 따라, 그리고 Flow Time 단축이 중요한가 Throughput 증가가 중요한가에 따라서 여러 가지로 다른 해답을 가지고 있는 문제이다. 실험을 통해 알 수 있었듯이 Flow Time의 단축이 목적이라면 투입 규칙의 결정에 신중을 기해야 할 것이며 Throughput 최대화가 중요하다면 우선 순위 규칙으로서 SRPT를 사용하는 것이 좋을 것이다. 또한 <그림 6>과 <그림 7>의 그래프들에서 볼 수 있듯이 투입 규칙과 우선 순위 규칙의 조합이 정책 성능의 증감요인이 되므로 적합한 조합의 규칙을 각 공정 특성에 맞게 선택하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

4.5 SA와 Multi SA의 비교

본 실험 결과에서 보듯이 대부분의 실험에서 SA 규칙과 Multi SA 규칙이 최고의 성능을 보였다. 특히, FAB 3의 경우 가장 중요하고 공정 상에서의 빈도수가 높은 병목 Station인 14번 Station 1 개만을 고려한 SA 규칙과 4개의 병목 Station을 모두 고려한 Multi SA 규칙에 대하여 실험하였다. 그 결과 대부분 Multi SA 규칙이 SA보다 좋은 성능을 보였다. 다음의 <그림 8>는 FAB 3에 대해서 각 투입 규칙과 조합시 SA 규칙과 Multi SA 규칙을 비교한 그래프이다. <그림 8>에서 볼 수 있듯이 Multi SA 규칙이 SA 규칙보다 모두 우수한 성능을 나타내고 있다. 이 결과는 다른 FAB 유형에 대해서도 동일하게 나타났다.



(ii) NI Rule과의 조합

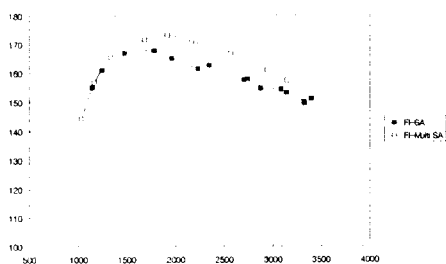


(iii) SR Rule과의 조합

<그림 8> SA와 Multi SA의 비교(FAB 3)

<표 9> 투입될 때의 병목 Station의 빈도

병목 Station 적용 Rule	병목 Station				총 투입 회수
	14번	19번	21번	24번	
Multi SA	76	31	0	47	154
SA	156	0	0	0	156



(i) FI Rule과의 조합

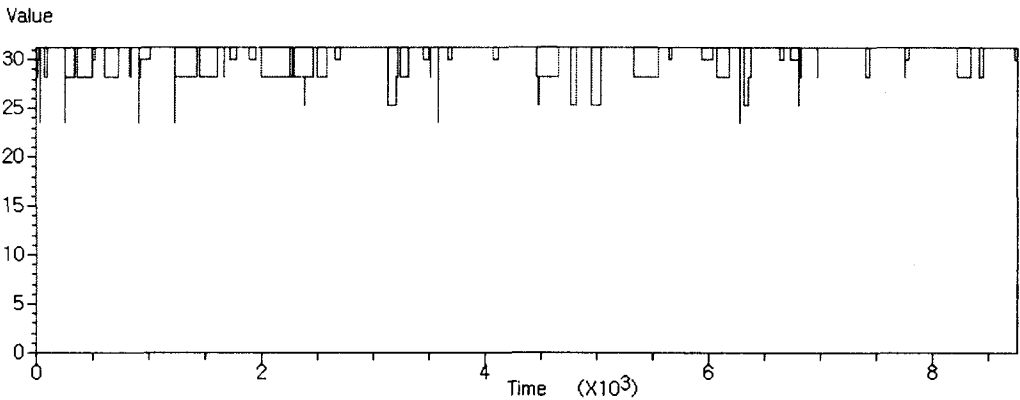
이와 같이 SA와 Multi SA의 성능 차이가 생기는 것은 실제로 병목 Station이 시간에 따라 변화하고 있다는 것을 보여준다. <표 9>는 Lot이 투입될 때 어느 병목 Station에 의해서 투입된 것인지를 나타낸다. <표 9>에서 보듯이 14번과 24번 병목 Station에 의해서 Lot이 투입되는 경우가 가장 많았고, 21번을 제외한 다른 병목 Station들에 의해서 투입이 바뀌는 것을 알 수 있다. 또한 SA와 Multi SA의 성능차이를 분석하기 위해서 SA 규칙

에서 정의한 W 의 값을 각각의 병목 Station에 대하여 추적하는 실험을 수행하였다.

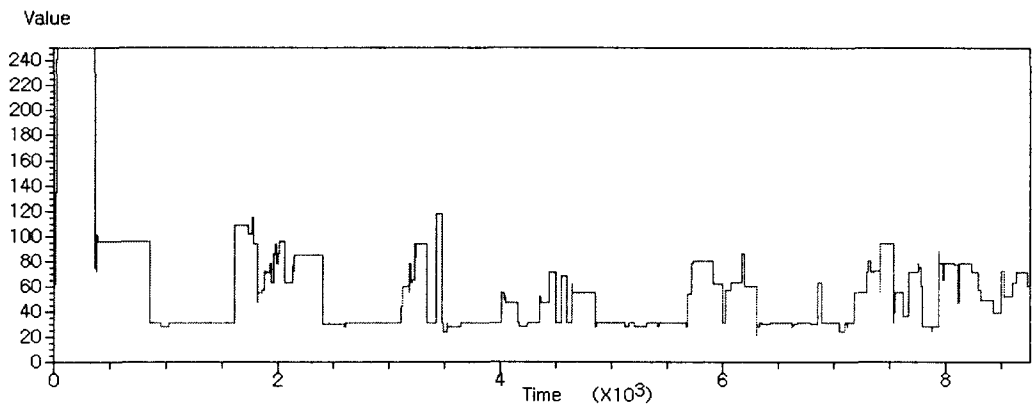
그 결과 <그림 9>과 <그림 10>에서 보듯이 FAB 3에서 SA를 사용하여 하나의 병목 Station만을 관리하는 것보다 여러 개의 병목 Station을 동시에 모니터링하는 Multi SA의 경우가 W 값의 변동이 작다는 것을 알 수 있다. 특히 24번 병목 Station의 경우 SA에서는 변동이 크지만 Multi SA에서는 변동폭이 작다는 것을 알 수 있다. 이것을 통해서 SA는 14번 병목 Station의 변동만을 작게 유지시키지만 Multi SA는 여러 병목 Station을 모

두 적절한 수준으로 유지시켜 준다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 W 값의 변동이 작은 것은 Line 내의 재공을 일정 수준으로 유지하는 동시에 병목 Station의 Starvation을 막기 때문에 Throughput이나 Flow Time과 같은 실적지표의 향상을 가져올 수 있다.



(a) SA 규칙



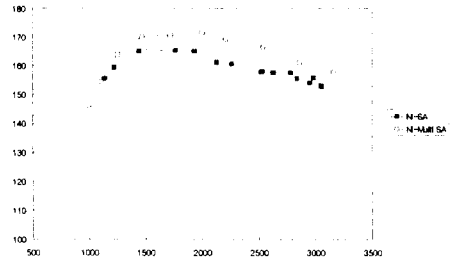
(b) Multi SA 규칙

<그림 9> SA와 Multi SA의 비교 : 병목 Station 14번에 대한 W 값의 변화

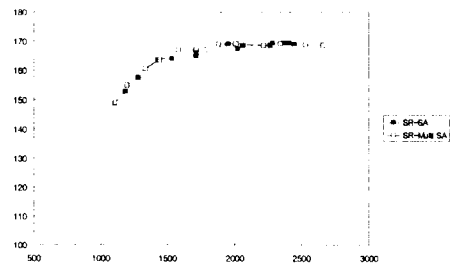
현재의 공정에 어떤 정책을 적용할 것인가 하는 문제는 현재 공정의 고장 유형에 따라, 그리고 Flow Time 단축이 중요한가 Throughput 증가가 중요한가에 따라서 여러 가지로 다른 해답을 가지고 있는 문제이다. 실험을 통해 알 수 있었듯이 Flow Time의 단축이 목적이려면 투입 규칙의 결정에 신중을 기해야 할 것이며 Throughput 최대화가 중요하다면 우선 순위 규칙으로서 SRPT를 사용하는 것이 좋을 것이다. 또한 <그림 6>과 <그림 7>의 그래프들에서 볼 수 있듯이 투입 규칙과 우선 순위 규칙의 조합이 정책 성능의 증감요인이 되므로 적합한 조합의 규칙을 각 공정 특성에 맞게 선택하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

4.5 SA와 Multi SA의 비교

본 실험 결과에서 보듯이 대부분의 실험에서 SA 규칙과 Multi SA 규칙이 최고의 성능을 보였다. 특히, FAB 3의 경우 가장 중요하고 공정 상에서의 빈도수가 높은 병목 Station인 14번 Station 1 개만을 고려한 SA 규칙과 4개의 병목 Station을 모두 고려한 Multi SA 규칙에 대하여 실험하였다. 그 결과 대부분 Multi SA 규칙이 SA보다 좋은 성능을 보였다. 다음의 <그림 8>은 FAB 3에 대해서 각 투입 규칙과 조합시 SA 규칙과 Multi SA 규칙을 비교한 그래프이다. <그림 8>에서 볼 수 있듯이 Multi SA 규칙이 SA 규칙보다 모두 우수한 성능을 나타내고 있다. 이 결과는 다른 FAB 유형에 대해서도 동일하게 나타났다.



(ii) NI Rule과의 조합

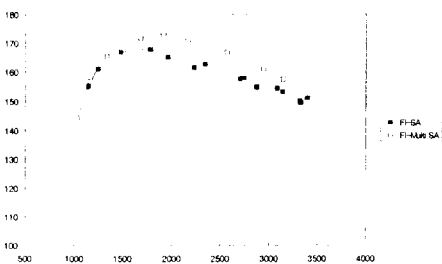


(iii) SR Rule과의 조합

<그림 8> SA와 Multi SA의 비교(FAB 3)

<표 9> 투입될 때의 병목 Station의 빈도

병목 Station 적용 Rule	병목 Station				총 투입 회수
	14번	19번	21번	24번	
Multi SA	76	31	0	47	154
SA	156	0	0	0	156



(i) FI Rule과의 조합

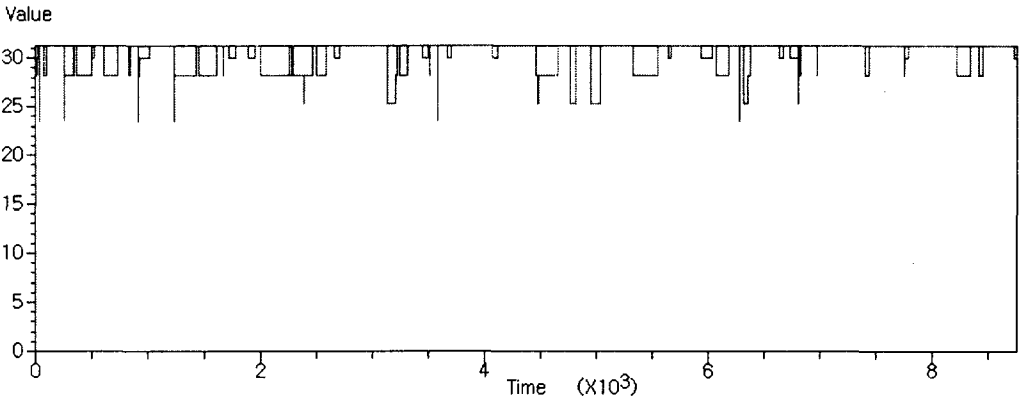
이와 같이 SA와 Multi SA의 성능 차이가 생기는 것은 실제로 병목 Station이 시간에 따라 변화하고 있다는 것을 보여준다. <표 9>는 Lot이 투입될 때 어느 병목 Station에 의해서 투입된 것인지를 나타낸다. <표 9>에서 보듯이 14번과 24번 병목 Station에 의해서 Lot이 투입되는 경우가 가장 많았고, 21번을 제외한 다른 병목 Station들에 의해서 투입이 바뀌는 것을 알 수 있다. 또한 SA와 Multi SA의 성능차이를 분석하기 위해서 SA 규칙

에서 정의한 W의 값을 각각의 병목 Station에 대하여 추적하는 실험을 수행하였다.

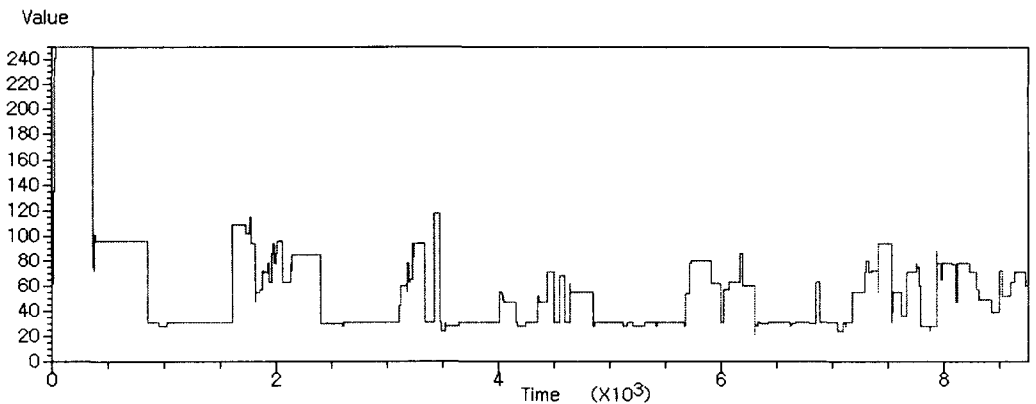
그 결과 <그림 9>과 <그림 10>에서 보듯이 FAB 3에서 SA를 사용하여 하나의 병목 Station만을 관리하는 것보다 여러 개의 병목 Station을 동시에 모니터링하는 Multi SA의 경우가 W값의 변동이 작다는 것을 알 수 있다. 특히 24번 병목 Station의 경우 SA에서는 변동이 크지만 Multi SA에서는 변동폭이 작다는 것을 알 수 있다. 이것을 통해서 SA는 14번 병목 Station의 변동만을 작게 유지시키지만 Multi SA는 여러 병목 Station을 모

두 적절한 수준으로 유지시켜 준다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 W값의 변동이 작은 것은 Line 내의 재공을 일정 수준으로 유지하는 동시에 병목 Station의 Starvation을 막기 때문에 Throughput이나 Flow Time과 같은 실적지표의 향상을 가져올 수 있다.

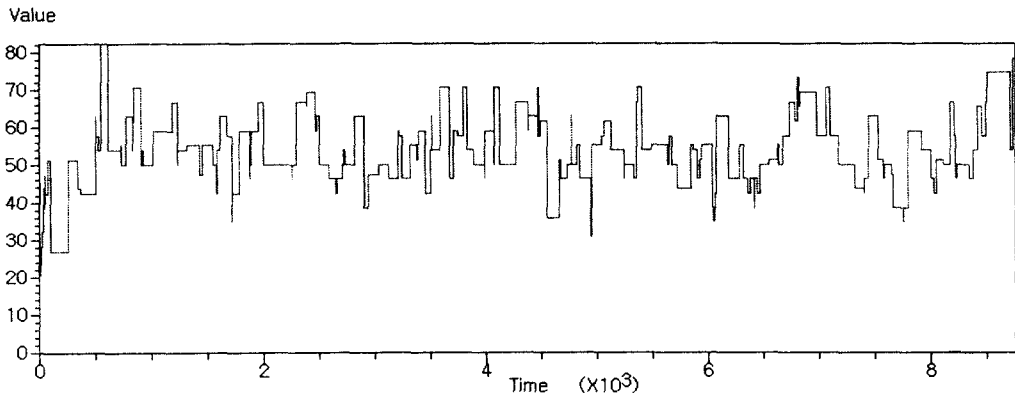


(a) SA 규칙

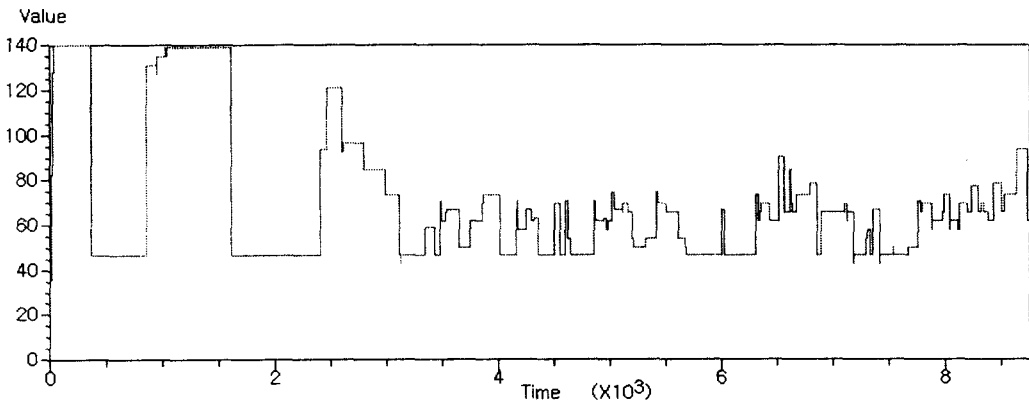


(b) Multi SA 규칙

<그림 9> SA와 Multi SA의 비교 : 병목 Station 14번에 대한 W값의 변화



(a) SA 규칙



(b) Multi SA 규칙

<그림 10> SA와 Multi SA의 비교 : 병목 Station 24번에 대한 W값의 변화

결론적으로 SA는 하나의 병목 Station을 집중적으로 관리할 때 사용하는 것이 좋으며, 실제로 다수의 병목 Station이 존재하는 Line의 경우에는 Multi SA를 사용하는 것이 좋은 성능을 보이고 있다. 그러나 실제로 병목 Station이 하나인 공정은 거의 없기 때문에 특수한 경우가 아니라면 Multi SA를 사용하는 것이 라인을 효율적으로 운영하는 데 유리하다고 보여 진다.

5. 결론

본 연구에서는 반도체 FAB공정의 특성에 따라 적용되는 스케줄링 정책들에 대한 성능 분석을 시뮬레이션 실험을 통하여 행하였다. 설비 고장의 유형에 따라 다양한 FAB 공정을 설정하였으며, FAB 1에 12가지, FAB 3에 15가지의 스케줄링 정책을 적용하여 그 결과를 Throughput과 Flow

Time의 평가지표로서 분석하였다. 실험의 결과로 알 수 있었던 주요한 사실은 각 고장 유형마다 최상의 성능을 보이는 정책은 약간씩 차이가 있다는 점, 그럼에도 불구하고 일반적으로 SA 규칙, Multi SA 규칙은 우수한 결과를 보임으로써 가장 강건(Robust)한 투입 규칙이라는 점, 그리고 Flow Time 감소를 위해서는 우선 순위 규칙의 선택보다는 투입 규칙의 선택이 보다 중요하다는 사실 등이다. 또한 본 실험을 통하여 각각의 고장 유형별 생산시스템의 특성에 따라 가장 좋은 스케줄링 정책의 선택이 가능하다는 사실을 또한 알 수 있었다. <표 10>는 각 유형별 FAB에 적용하였을 때의 최상의 성능을 보이는 정책과 그 반대의 경우의 정책을 정리한 결과를 보여주고 있다. 또한, 각 정책의 Throughput과 Flow Time 차이에 대한 검정 결과 1% 유의 수준에서 결과가 유의하다는 것을 알 수 있다

아래 표에서 보듯이 SR-SA, NI-SA 정책, SR-Multi SA, NI-Multi SA가 유형에 관계없이 뛰어난 성능을 보이는 것을 알 수 있으며, 반면에 NI-PO, FI-PO 정책이 저조한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 SA 규칙, Multi SA 규칙이 적절하게 병목 Station의 재공을 조절해 주기 때문에

전체 재공도 줄게 되고 그 결과 전체적인 성능 향상으로 이어졌기 때문이다. 또한 같은 SA 규칙, Multi SA 규칙을 쓰더라도 SR 규칙이나 NI 규칙과 같이 다음 공정의 Station을 결정할 때 공정상의 재공을 고려하는 동적 규칙을 쓰는 것이 성능 향상에 도움이 되는 것을 알 수 있다. 반대로 Poisson 규칙 같은 경우는 파라미터의 변동량이 크기 때문에 이것이 Queue의 증가를 가져와 전체 성능에 악영향을 끼치게 된다.

실제 공정에 있어서 다수개의 병목 Station이 존재하는 경우에는 제안된 Multi SA가 SA보다 효과적이라는 결론을 얻을 수 있었다. 본 실험에서는 네 개의 병목 Station을 설정한 FAB 3에서 Multi SA를 사용한 경우가 SA를 사용한 경우보다 나은 성능을 보였다.

마지막으로 FAB 1과 FAB 3간의 유형별 차이는 사실상 스케줄링 정책의 선택에 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 이는 스케줄링 정책의 성능이 병목 Station의 수에 영향을 받기보다는 고장 유형, 즉 각 Station별 설비 성능에 직접적인 영향을 받는다는 사실을 말해준다.

<표 10> FAB 유형별 최고, 최저 성능 정책

	최고성능 정책	최저성능 정책	F Value (TH)	F Value (FT)
FAB 1	SR-SA	NI-PO	220.9	50831.4
FAB 3	SR-Multi SA	NI-PO	307.3	2417.8
FAB 1A	NI-SA	NI-PO	233.7	42654.6
FAB 3A	FI-Multi SA	NI-PO	294.2	99999.9
FAB 1B	NI-SA	FI-PO	278.5	66340.2
FAB 3B	NI-Multi SA	FI-PO	228.1	99999.9
FAB 1C	SR-SA	FI-PO	124.5	24171.3
FAB 3C	SR-Multi SA	FI-PO	334.3	86888.7
FAB 1D	SR-SA	FI-PO	221.9	18693.8
FAB 3D	NI-Multi SA	FI-PO	659.6	38089.7

* 각 정책의 TH와 FT의 평균의 차이에 대한 F 검정 결과 P Value가 0.0001로 1% 유의 수준에서 유의함.

6. 참고문헌

- [1] Bitran, G. R. and Tirupati, D., Multiproduct Queueing Networks with Deterministic Routing: Decomposition Approach and the Notion of Interference, Working Papers 1764-86, Sloan School of Management, M.I.T., 1986.
- [2] Glassey, C. R. and Resende, M. G. C., Closed-Loop Job Release Control for VLSI Circuit Manufacturing, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 1, pp. 36-46, 1988.
- [3] Graves, S. C., Meal, H.C., Stefek, D., and Zeghmi, A.H., Scheduling of Re-entrant Flow Shops, *Journal of Operations Management*, vol. 3, no. 4, pp. 197-207, 1983.
- [4] Johri, P. K., Practical Issues in Scheduling and Dispatching in Semiconductor Wafer Fabrication *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 12, no. 6, 1993.
- [5] Kim, Y. D., Lee, D. H., and Kim, J. U., A Simulation Study on Lot Release Control, Mask Scheduling, and Batch Scheduling in Semiconductor Wafer Fabrication Facilities *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 107-117, 1998.
- [6] Kumar, P. R., Re-entrant Lines, *Queueing Systems*, vol. 13, pp. 87-110, 1993.
- [7] Lu, S. C. H., Ramaswamy, D. and Kumar, P. R., Efficient Scheduling Policies to Reduce Mean and Variance of Flow-Time in Semiconductor Manufacturing Plants, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 7, no. 3, pp.115-130, 1998.
- [8] Uzsoy, R., Lee, C. Y. and Vega, L. M., A Review of Production Planning and Scheduling Models in the Semiconductor Industry Part II: Shop-floor Control, *IIE Transactions on Scheduling and Logistics*, vol. 26, no. 5, pp. 44-55, 1994.
- [9] Wein, L. M., Scheduling Semiconductor Wafer Fabrication, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 1, pp. 115-130, 1988.
- [10] Whitt, W., The Queueing Network Analyzer, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 62, pp. 2779-2815, 1983.
- [11] Whitt, W., Open and Closed Models for Networks of Queues, *AT&T Bell Labs. Tech. J.*, vol. 63, pp. 1911-1979, 1984.

● 저자소개 ●



정봉주

1986년 서울대학교 산업공학 학사

1988년 서울대학교 산업공학 석사

1989년 Anderson Consulting 시스템 컨설턴트

1993년 미국 Pennsylvania State University 산업공학 박사

1993년 삼성전자(주) 반도체부분 CIM팀 선임연구원

현재 연세대학교 산업시스템공학과 조교수

관심 분야 : 생산시스템 분석 및 모델링, 반도체 생산시스템, SCM



이윤준

1998년 연세대학교 산업시스템공학 학사

현재 연세대학교 산업시스템공학 석사과정

관심 분야 : 스케줄링, Stochastic Process



심승배

1998년 연세대학교 산업시스템공학 학사

현재 연세대학교 산업시스템공학 석사과정

관심 분야 : CIM, 스케줄링, 시뮬레이션