

## 시물레이션을 이용한 반도체 주문제품의 납기달성도 성능평가

박종관<sup>1)</sup> · 이영훈<sup>2)</sup>

1) 연세대학교 공과대학 컴퓨터과학.산업시스템공학과

2) 연세대학교 공과대학교 기계전자공학부 정보산업공학전공

Jong-Kwan Park, Young-Hoon Lee

### Abstract

최근 반도체 산업은 주문형 제품의 생산이 증가하고 이에 대한 납기달성도에 대한 관리가 점차 중요해지고 있다. 본 논문은 납기달성도의 제고를 위한 생산 스케줄링 규칙을 제시하고 이에 대한 성능평가를 위해 반도체 Fabrication 라인을 모델로 한 시물레이션 모형을 개발하였다. 제시된 규칙이 라인의 밸런스는 물론 납기만족과 사이클 타임을 줄이는 데 좋은 성능을 나타내는 것을 보였다. 또한 제시된 규칙이 주문변화와 웨이퍼 투입규칙에 민감하지 않은 강건한 규칙임을 보이고 있다.

### 1. 서론

최근 정보통신산업의 발전에 따라 반도체산업이 주력 고부가가치 산업으로 자리를 잡아가고 있고 최첨단 기술을 요하는 업종으로서 기술적 연구뿐 아니라 관리적인 측면에서도 관심이 증대되고 있다. 반도체 생산과정의 관리적 관점에 대한 연구는 10여전부터 지속적으로 학계에 보고되고 있고 현재도 가장 활발하게 연구 및 현장적용에 응용되고 있는 분야 중 하나이다. 반도체 제조과정에 대한 관리적 관점에서의 연구는 주로 Fabrication(이하 FAB)에 관한 내용이 중요하다. 이는 관리방식에 대한 개선 효과가 가장 크지만 아직도 많은 문제점을 안고 생산이 진행되고 있기 때문이다.

반도체 FAB의 관리적 관점에 대한 연구는 Wein[7]과 Glassey and Resende[2]에 의해 본격적으로 시작되었으며 계속 연구가 진행되고 있다. 또

한 선행 연구들을 흐름규칙과 투입조절규칙, 결정적 알고리즘, 제어 이론적 접근방법, 지식기반 접근방법으로 분류하는 등 웨이퍼 가공 공정의 효율화를 통하여 생산성을 높이려는 많은 시도가 있었고 이에 대한 광범위한 문헌조사도 보고되었다.[4,5]

본 논문은 크게 두 가지 측면에서 접근하였다. 첫째, FAB의 주요 특성을 반영한 비교적 간단한 시물레이터 도구를 제작하기 위해 이에 대한 모델링 및 개발을 실현하는 것과 둘째, 개발한 도구를 이용하여 반도체 FAB에 대한 여러 가지 관리방식을 실험하여 봄으로써 그 결과를 검증하고자 하였다. 특히 주문형 제품의 생산이 증가하고 이에 대한 납기 달성도에 대한 관리가 점차 중요해지고 있는 시점에서 본 논문은 납기달성도의 제고를 위한 생산 스케줄링 규칙을 제시하여 이에 대한 성능평가를 실시하는데 목표를 두고 있다.

## 2. 반도체 스케줄링

반도체 FAB내의 물류흐름은 사이클링 형태의 복잡한 형태를 취하고 있기 때문에 최적화 방법론을 적용하기에는 한계가 있고 대부분의 연구에서 발견적 기법을 적용하고 있으며 병목공정으로 분류되는 사진 공정을 중심으로 주요한 할당 의사결정이 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 할당규칙을 제공하고 이에 대한 성능을 자체 모델링 및 개발한 도구를 이용하여 검증하고자 한다.

가장 일반적으로 관리되고 있는 방법으로 이영훈 외[1]에서는 밸런스 지수를 정의하고 항상 생산라인이 균형을 이루는 재공 상태를 유지하는 가운데 이에 적절한 병목설비의 스케줄링이 이루어지도록 하는 방법을 제시하였다.

새롭게 제시되는 아래의 두 가지 규칙은 납기에 근거한 스케줄링 규칙 들이다.

### ▷ LDS(Layer Due Slack)

모든 웨이퍼는 각각의 납기를 가진다고 볼 수 있는데 이는 각 제품의 마지막 레이어의 재공부터 일별로 정해진 생산목표에 따라 생산이 이루어져야 하는 시간과 같다. 이런 방법으로 모든 레이어의 웨이퍼에 납기를 정하고 각 레이어에 있는 재공 웨이퍼의 평균 납기를 구하여 이를 레이어의 납기(Layer Due : LD)라 규정한다. 각 레이어의 납기에서 마지막 공정까지의 소요시간을 뺀 값은 현재 레이어의 재공이 가지고 있는 생산여유라고 할 수 있으며 이를 LDS(Layer Due Slack)이라 한다. 레이어의 LDS값이 적다는 것은 그만큼 생산이 시급하다는 것을 의미하며 모든 레이어에 대해 LDS의 값이 적은 레이어부터 스케줄링함으로써 일별 또는 시프트별 생산목표를 지속적으로 달성하는데 도움을 준다. LDS 규칙은 생산목표를 기준으로 하는 납기에 의해 스케줄링이 이루어지지만 내면에는 밸런스의 개념을 포함하고 있는데 예를 들면 모든 레이어의 재공이 완벽한 밸런스를 이루고 있다면 각 레이어의 LDS값은 0이 되기 때문이다.

### ▷ ATC(Apparent Tardiness Cost) 규칙

ATC 규칙은 작업의 지연도(Tardiness)의 합을 최소화하는 발견적 기법으로 단독기계나 병렬기계의 상황에서 작업의 중요도를 고려하여 작업순서를 결정하는 방법이다.[6] 남은 공정 시간은 현재에서 생산될 때까지의 시간이므로 현재의 레이어에서 마지막 레이어까지의 사이클 타임의 합으로 보며, 납기는 현재 레이어의 납기로 한다. 모든 제품의 레이어에 대해 ATC 규칙에 따라 인덱스를 구하고 인덱스의 값이 큰 레이어부터 스테퍼에 할당한다.

## 3. 반도체 생산과정 모델링

본 연구에서는 2장에서 제시한 주문반영 스케줄링 규칙의 성능을 실험하기 위하여 시물레이터를 개발하고 기존의 논문에서 제시된 규칙과 새로운 규칙을 여러가지 조건하에서 구동, 결과를 평가하고자 한다. 반도체 FAB의 물류흐름 상황을 최대한 유사하게 묘사할 수 있으면서 빠른 시간 내에 구동할 수 있도록 하는데 목표를 두었다.

반도체의 기본공정은 하나의 제품이 완성되기까지 20~30개의 레이어를 구성하는 공정을 거친다. 각 레이어는 대부분 비슷한 일련의 공정으로 구성되어 있으며 하나의 제품이 웨이퍼 가공공정을 끝내기 위해서는 레이어 수 만큼의 반복 공정이 진행된다. 하나의 레이어는 물류측면에서 비병목 공정과 병목 공정으로 나눌 수 있으며 특별한 경우를 제외하고는 비병목 공정에서는 지체되는 일이 거의 없다. 따라서 병목 공정이 전체 물류의 흐름을 좌우하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이영훈 외[1]에서 모델링한 것과 같이 하나의 레이어를 비병목 공정과 병목공정으로 나누고 비병목 공정에서는 시간이 지나면 물류가 이동한다고 보고 병목공정에서만 흐름제어를 하였다.

비병목 공정에서의 물류는 그 레이어의 병목공정의로 이동하며 병목공정에서의 물류는 그 다음 레이어의 비병목공정으로 이동을 한다. 따라서 시물레이션은 매 시프트마다 웨이퍼 투입 규칙과 병목 공정의 스케줄링 규칙에 따라 제어된다.

## 4. 실험 및 결과

생산라인의 물류 흐름은 병목 공정의 스케줄링에 의해 가장 큰 영향을 받지만 또한 웨이퍼 투입량에 의해서도 많은 영향을 받는다. 이는 전체적인 재공의 양이 변할 뿐만 아니라 초기 레이어의 재공 변화가 병목 공정의 스케줄링에 있어서 레이어별 우선 순위에 영향을 주기 때문이다. 본 논문에서 성능을 평가한 투입 규칙은 전부 네 가지로서 이영훈 외[1]에서 제시한 기존의 세 가지 투입 규칙과 함께 새롭게 제시되는 투입규칙을 포함하였다. 새롭게 추가되는 규칙은 DBR(Drum-Buffer-Rope)의 개념을 ELB에 적용한 규칙으로서 이는 각 제품의 레이어 중에서 제일 생산능력이 낮은 레이어를 규정하고 이 레이어 전까지의 재공상황을 적정재공과 비교하여 반영한다.

병목 공정의 스케줄링 규칙은 이영훈 외[1]에서 제시한 세가지 규칙과 2장에서 제시한 주문통제 규칙 두가지를 추가하여 실험하였다. 위에서 제시한 규칙의 성능평가는 3장에서 설명한 모델링에 근거하여 C 와 Delphi로 개발된 시뮬레이터를 이용하여 실험하였다.

본 실험에서 평가한 척도는 6가지로서 60일간의 총 생산량, 생산량의 표준편차, 병목공정의 가동률, 재공 밸런스 지수, 평균생산 사이클 타임, OTD(On-Time-Delivery) Rate 이다.

OTD는 주문별 납기 만족율을 말하는 것으로서 본 실험에서는 일(Day)단위로 주어진 생산량을 만족하는 가를 판단하고 만족여부를 제품별로 비율을 구함으로써 계산하였다. 특히 일별 생산목표를 월별 생산목표의 균일분배보다는 매일 주문의 변화에 대해 생산현장의 즉각적인 대응을 위한 스케줄링 규칙의 성능을 평가하기 위해 일별목표를 5%, 10%, 20%의 범위내에서 생산목표가 변화하는 경우의 OTD를 평가하였다.

규칙의 성능평가를 위해 두가지의 데이터를 가지고 실험을 하였다. 하나는 실제라인상황에 근거로 자체 생성한 데이터이며 또 하나는 미국의 아리조나 대학에서 동일한 종류의 실험을 위해 생성된 데이터[3,8, 이하 아리조나 데이터]이다.

다음의 결과는 초기 데이터를 임의로 생성한 것에 대한 결과이다.

< 표 1 > 웨이퍼 투입규칙의 성능 평가 결과

|         | 생산량<br>(웨이퍼) | 생산량의<br>분산 | 가동률<br>(%) | 밸런스<br>지수 | 사이클<br>타임(일) | OTD<br>율 |
|---------|--------------|------------|------------|-----------|--------------|----------|
| Uniform | 122,244      | 47,311     | 92.1       | 0.47      | 46.4         | 0.91     |
| CONWIP  | 124,070      | 40,690     | 92.5       | 0.43      | 44.0         | 0.91     |
| ELB     | 122,912      | 31,722     | 91.3       | 0.28      | 38.8         | 0.91     |
| DBR     | 123,561      | 31,384     | 91.4       | 0.32      | 39.7         | 0.90     |

< 표 1 > 는 웨이퍼 투입 규칙의 성능 평가를 나타내고 있다. 우선 모든 규칙이 2 달 동안의 목표 생산량인 120,000장을 달성하고 있다. 생산량 측면에서 보면 CONWIP이 다른 규칙보다 1.6% 정도 많은 생산량을 내고 있지만 다른 규칙들과 크게 차이를 보이고 있지 않다. 반면 재공의 동적 상황을 고려한 ELB는 생산성 측면에서는 CONWIP에 조금 뒤지지만 다른 성능 평가 지표에 대해선 우수한 성능을 내고 있다. 특히 라인의 균형정도는 균일투입보다 20%나 좋은 성능을 내고 있으며 전체 공정 시간은 균일투입보다 7일이나 빠른 것을 볼 수 있다.

< 표 2 > 스케줄링 규칙의 성능 평가 결과

|     | 생산량<br>(웨이퍼) | 생산량의<br>분산 | 가동률<br>(%) | 밸런스<br>지수 | 사이클<br>타임(일) | OTD<br>율 |
|-----|--------------|------------|------------|-----------|--------------|----------|
| BR  | 122,896      | 75,847     | 95.7       | 0.25      | 43.9         | 0.74     |
| FBR | 122,928      | 71,157     | 95.7       | 0.25      | 43.9         | 0.82     |
| SSV | 120,834      | 14,706     | 85.9       | 0.55      | 42.9         | 0.99     |
| LDS | 124,724      | 13,526     | 90.9       | 0.41      | 40.3         | 0.99     |
| ATC | 124,600      | 13,649     | 91.0       | 0.41      | 40.4         | 0.99     |

< 표 2 > 은 스케줄링 규칙의 성능 평가를 나타내고 있다. 스케줄링 규칙 역시 목표 생산량을 모두 달성하고 있다. 라인 균형의 안정화를 목표로 잡은 BR과 FBR 규칙은 예상된 바와 같이 균형 정도에선 다른 규칙보다 좋은 성능을 보이고 있지만 다른 성능 지표에 대해선 대체적으로 좋지 않은 성능을 보이고 있다. 동적인 재공의 상황과 납기를 고려한 LDS규칙과 ATC 규칙은 가동률이 BR이나 FBR 규칙보다 약 5% 적으면서도 거의 대등한 생산량을 내고 있으며 전체 사이클타임을 약 4일이나 줄일 수 있었다. 특히 주문별 납기 만족율은 99%이상의 좋은 성능을 보이고 있어 밸런스 위주의 스케줄링 규칙과 좋은 대조를 보이고 있다. 이는 LDS나 ATC규칙이 라인 재공의 균형을 크게 깨지 않으면서도 짧은 시간 안에 생산량을 고르게

많이 낼 수 있다는 것을 보여준다.

< 표 3 > 웨이퍼 투입 규칙과 스케줄링 규칙 조합에 따른 OTD율의 성능 평가 결과

| OTD 율      |         | BR   | FBR  | SSV  | LDS  | ATC  |
|------------|---------|------|------|------|------|------|
| 0% 주문량 변화  | Uniform | 0.72 | 0.71 | 0.94 | 0.99 | 1.00 |
|            | CONWIP  | 0.74 | 0.74 | 0.92 | 0.98 | 0.99 |
|            | ELB     | 0.84 | 0.83 | 0.91 | 0.97 | 0.98 |
|            | DBR     | 0.79 | 0.79 | 0.90 | 1.00 | 0.98 |
| 5% 주문량 변화  | Uniform | 0.61 | 0.69 | 0.93 | 1.00 | 0.99 |
|            | CONWIP  | 0.74 | 0.70 | 0.92 | 1.00 | 0.99 |
|            | ELB     | 0.79 | 0.81 | 0.91 | 1.00 | 0.98 |
|            | DBR     | 0.79 | 0.80 | 0.94 | 0.99 | 1.00 |
| 10% 주문량 변화 | Uniform | 0.64 | 0.66 | 0.92 | 0.96 | 0.99 |
|            | CONWIP  | 0.71 | 0.70 | 0.93 | 0.97 | 0.96 |
|            | ELB     | 0.82 | 0.76 | 0.91 | 0.99 | 0.97 |
|            | DBR     | 0.82 | 0.81 | 0.90 | 0.99 | 0.97 |
| 20% 주문량 변화 | Uniform | 0.66 | 0.65 | 0.91 | 1.00 | 0.98 |
|            | CONWIP  | 0.74 | 0.72 | 0.93 | 0.98 | 1.00 |
|            | ELB     | 0.86 | 0.80 | 0.92 | 1.00 | 0.97 |
|            | DBR     | 0.85 | 0.77 | 0.95 | 1.00 | 0.98 |

< 표 3 >에서는 본 논문에서 가장 중요하게 생각하는 OTD 율의 성능 평가를 각 조합별로 나타내고 있다. 위의 표에서 볼 수 있듯이 투입 규칙보다는 스케줄링 규칙에 의해서 OTD 율이 많이 좌우되고 있다. 주문량의 변화에 따른 OTD율의 변화를 살펴보면 밸런스에 의한 스케줄링 규칙 사용시 투입규칙별로 차이가 많이 발생하여 주문량의 변화가 20% 내외로 크게 나타나면 좋은 투입 규칙과 좋지 않은 경우의 차이가 최대 20%이상 발생한다. 그러나 LDS나 ATC의 스케줄링 규칙 사용시 투입규칙의 종류에 관계없이 또한 주문량의 변화의 크기에 관계없이 96% 이상 100%내외의 높은 OTD율을 나타냄으로 상황변화에 강건한 규칙이라고 할 수 있다.

다음은 아리조나 데이터를 초기 데이터로 사용한 결과이다. 아리조나 데이터는 본 논문에서 제시한 간단한 모델링과는 달리 아주 자세한 공정데이터이다. 따라서 본 논문에서 제시한 모델링에 맞도록 비병목 공정의 공정시간은 합산을 하여 하나의 비병목공정 시간으로 나누었으며, 병목공정

의 데이터는 그대로 사용하였다.

< 표 4 > 웨이퍼 투입규칙의 성능 평가 결과

|         | 생산량 (웨이퍼) | 생산량의 분산 | 가동률 (%) | 밸런스 지수 | 사이클 타임(일) | OTD 율 |
|---------|-----------|---------|---------|--------|-----------|-------|
| Uniform | 17,947    | 120     | 68.9    | 0.61   | 18.7      | 1.00  |
| CONWIP  | 19,013    | 86      | 74.2    | 0.79   | 19.0      | 1.00  |
| ELB     | 17,933    | 106     | 69.6    | 0.58   | 18.3      | 1.00  |
| DBR     | 17,373    | 187     | 65.7    | 0.53   | 18.3      | 0.99  |

< 표 4 >는 웨이퍼 투입규칙의 성능평가를 보여주고 있다. 우선 모든 규칙이 한달 목표생산량인 17280장을 달성하고 있다. 예상대로 CONWIP이 생산량 측면에서 가장 좋은 성능을 보이고 있으며 OTD 율은 모든 규칙이 비슷한 성능을 보이고 있다. 반면 재공의 동적 상황을 고려한 ELB는 생산성 측면에서 CONWIP보다 조금 뒤지지만 밸런스 지수와 사이클타임이 더 좋은 성능을 보이는 것으로 나타났다.

< 표 5 > 스케줄링 규칙의 성능 평가 결과

|     | 생산량 (웨이퍼) | 생산량의 분산 | 가동률 (%) | 밸런스 지수 | 사이클 타임(일) | OTD 율 |
|-----|-----------|---------|---------|--------|-----------|-------|
| BR  | 18,195    | 100     | 70.9    | 0.59   | 18.64     | 1.00  |
| FBR | 18,143    | 127     | 70.7    | 0.59   | 18.67     | 1.00  |
| SSV | 17,904    | 85      | 61.4    | 0.79   | 18.32     | 0.99  |
| LDS | 18,195    | 99      | 70.9    | 0.59   | 18.64     | 1.00  |
| ATC | 18,195    | 99      | 70.9    | 0.59   | 18.64     | 1.00  |

< 표 5 >은 스케줄링 규칙의 성능평가를 보여주고 있다. 스케줄링 규칙 역시 한달 목표생산량을 달성하고 있다. 자체 생성 데이터의 경우와는 달리 모든 규칙들이 동일한 성능을 보여주고 있으며 SSV는 규칙만이 다른 규칙보다 사이클 타임은 조금 작게 밸런스 지수는 조금 크게 나타났다.

### 5. 결론

본 논문에서는 반도체 산업의 제조과정 중에서 생산성의 통제가 가장 어려운 FAB에 대해 주문변화에 따른 각종 투입규칙과 스케줄링 규칙의 성능을 시물레이션을 이용하여 평가하였다. 특히 그동안의 계획생산에 의한 관리보다는 주문에 의한 생산체계가 적용될 때의 적합한 스케줄링 규칙을 제시하였다. 위의 두 실험 결과에서 보였듯이 본 논문에서 제시된 LDS 규칙과 ATC규칙은 주문변화에 즉각적으로 반영되는 실시간 스케줄링 규칙

으로서 투입규칙과 주문변화의 양에 관계없이 강  
건함을 보여주고 있다.

#### 참고문헌

- [1] 이영훈, 조한민, 박종관, 이병기, "반도체 FAB  
의 스케줄링 시뮬레이터 개발," 「산업공학」,  
12권,3호(1999), pp.437-447.
- [2] Glassey, C.R. and Resende, M.G.C.,  
"Closed-Loop Job Release Control for VSLI  
Circuit Manufacturing," *IEEE Trans.  
on Semiconductor Manufacturing*, Vol.1, No.1  
(1988), pp.36-46.
- [3] Jain, Sanjay et. al. "Criticality of Detailed  
Modeling In Semiconductor Supply Chain  
Simulation," *Proceedings of the Winter Simulation  
Conference*(1999), pp888-896.
- [4] Uzsoy, R., Lee, C.Y., and Martin-Vega, L.A., "*A  
Review of Production Planning and Scheduling  
Models in the Semiconductor Industry, Part I:  
System Charac, Performance Evaluation, and  
Production Planning*," *IIE Transactions*, Vol.24,  
No.4(1992), pp.47-60.
- [5] Uzsoy, R., Lee, C.Y., and Martin-Vega, L.A., "*A  
Review of Production Planning and Scheduling  
Models in the Semiconductor Industry, Part II:  
Shop-Floor Control*," *IIE Transactions*, Vol.26,  
No.5(1994), pp.44-55.
- [6] Vepsalainen and Morton "*Priority Rules for Job  
Shops with Weighted Tardiness Costs*," *Mngmnt  
Sci.* Vol.33(1987), pp.1035-1047
- [7] Wein, L.M. "*Scheduling Semiconductor Wafer  
Fabrication*," *IEEE Trans. on Semiconductor  
Manufacturing*, Vol.1, No.3(1988), pp.115-129.
- [8] <http://www.eas.asu.edu/~masmlab/masm2000>  
Data Set 1