

주문 변화를 반영하는 스케줄링 규칙에 대한 시뮬레이션을 이용한 성능 평가

Performance Evaluation of Scheduling Rules Considering Order Change Using Simulation

박종관*, 이영훈**

Jong-Kwan Park, Young Hoon Lee

Abstract

The scheduling rule for the fabrication process of the semiconductor manufacturing is suggested and tested on the simulation system which was developed based on the model to represent the main characteristics of wafer flows. The proper scheduling policies are necessary to meet the order change in the supply chain management. It was shown that the suggested rules which consider the wafer balance and the due date of the order, give good performances for the cycle time reduction and the rate of meeting due date as well. Also they are robust in the sense that performances are stable regardless of the order change rate and the input policies.

* 연세대학교 컴퓨터과학.산업시스템공학과

** 연세대학교 기계전자공학부 정보산업전공

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. 특히 반도체 제품의 물량 수급의 변화에 따라 가격의 변화가 심하고 생산 및 유통과정의 복잡성으로 제조업체간의 경쟁이 날로 극심해지고 있다. 반도체의 생산과정은 어느 산업보다 복잡한 것으로 알려져 있다. 웨이퍼가 투입되어 최종 제품인 반도체 모듈이 생산되기까지 소요되는 기간도 통상 40~80일 이상이어서 제조사이클타임이 상당히 긴 편에 속하고 이로 발생하는 제조, 출하, 유통의 비즈니스 프로세스도 수많은 관리적 요소를 내포하고 있다. 국내의 반도체 제조업체의 경우 최근 2~3년 동안 제조사이클타임을 과거의 절반으로 줄였고 이로 인하여 생산라인의 평균 재고량도 반으로 줄임으로 비용을 대폭 절감, 가격 경쟁력뿐 아니라 고객에 대한 신속한 대응 및 배송을 실현함으로써 꾸준히 세계적인 경쟁력을 유지하고 있다. 반도체 생산과정의 관리적 관점에 대한 연구는 10여전부터 지속적으로 학계에 보고되고 있고 현재도 가장 활발하게 연구 및 현장적용에 응용되고 있는 분야 중 하나이다.

반도체 생산관리에 관한 연구는 크게 세 가지로 분류할 수 있는데 첫째, 공급사슬경영(SCM : Supply Chain Management)의 관점에서 고객의 주문과 연계된 생산 및 유통을 효율적으로 운영하기 위한 방법에 대한 연구로서 전사(全社)적인 생산 계획 및 납기회신, 수배송에 대한 모든 연구를 포함한다.[2,9] 둘째, 생산 프로세스의 주요 부분인 Fabrication(이하 FAB), Probe(또는 EDS : Electric Die Sorting), 조립, 검사의 네 가지 Area를 개별적으로 접근하여 생산의 한 영역에 대한 생산 계획 및 통제, 물류흐름, 용량분석, 일정계획 등에 대한 모든 연구를 말한다.[1,4,5, 8,10,12] 셋째, Area를 구성하고 있는 소단위의 공정그룹이나 설비그룹에 대한 구체적 운영에 대

한 연구로서 자동화 설계, Shop Floor Control, 실시간 스케줄링 등에 대한 연구를 말한다. 위의 세 가지 구분은 계층적으로 구성되어 있으며 상위 단계의 의사결정은 하위 단계의 의사결정에 반영될 수 있도록 되어 있다. 또한 실제 생산현장에서도 위에서 정의한 계층을 담당하는 조직이 각각 운영되고 있어 반도체 생산관리의 일반적인 추세를 반영하고 있다.

반도체의 제조과정은 반도체 회로도를 설계하는 과정이 완성된 후 이를 웨이퍼에 사진기술을 이용하여 프린트하는 FAB 공정이 가장 복잡하고 고도의 기술적 수준을 요구한다. FAB 공정이 끝나고 진행되는 Probe공정까지를 Front-End라고 부르며 이와 대비하여 Back-End공정은 조립과 검사 공정으로 구성되어 있다. Front-End 공정의 FAB공정은 레이어라고 불리우는 일정한 층을 20~30번 이상 반복되어 형성하는 과정으로 구성되어 있고 각 레이어는 에칭, 확산, 스트립 등과 같은 20~40 개의 세부공정으로 구성되어 있다. 반도체 제조공정의 복잡성은 이와 같은 반복성 때문에 발생하는데 동일 공정은 대부분 동일 설비가 모여 있는 Workstation에서 진행되므로 반복 회수만큼 공장 생산라인 내에서 이동을 하게 되며 따라서 제조 사이클 타임이 길어지게 된다. Probe공정과 Back-End공정은 상대적으로 제조과정의 난이도가 낮으며 이로 인하여 Back-End공정은 인건비가 싸고 기술력이 낮은 중국이나 동남아 등지에서 제조하는 경우가 많다. 또한 특정회사는 Back-End만 전문화하여 생산함으로써 반도체 제조의 일부분만 담당하기도 한다.

반도체 제조과정에 대한 관리적 관점에서의 연구는 주로 FAB에 관한 내용이 중요하다. 이는 관리방식에 대한 개선 효과가 가장 크지만 아직도 많은 문제점을 안고 생산이 진행되고 있기 때문이다. 단적으로 국내의 주요 반도체 제조업체의 경우 FAB에서 소요되는 제조 사이클 타임이 2~3년 전만 해도 2달 이상이였으며, 이를 줄이고자 했을 때 생산용량이 줄어들 수밖에 없다고 생각하였으나 최근에는 거의 모든 업체가 1달 내외의 제조사이클 타임을 실현하고 있다.

FAB의 사이클 타임을 나타내는 주요지수로서 CTPL(Cycle Time Per Layer)을 사용하고 있는데 이는 한 레이어의 공정을 진행하는 데 소요되는 평균 사이클타임을 나타내는 것으로 현재 1.5~2일 수준인 것으로 알려져 있다.[7] 다시 말하면 20개의 레이어를 가지고 있는 반도체의 경우 30~40일의 FAB 제조 사이클 타임이 필요하다는 것을 의미하며 Probe 이하 조립과 검사에 소요되는 7~10일의 제조 사이클타임과 비교할 때 전체 사이클타임 중에서 절대적인 부분을 차지하고 있다.

FAB에서의 생산성은 프로세스가 진행되는 설비에 의해 결정되는데 그 중에서도 가장 고가의 장비를 사용하고 있는 사진공정에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 사진 공정은 감광액을 웨이퍼 표면에 도포해주는 코팅공정, 자외선을 이용하여 회로 패턴을 담고 있는 마스크를 웨이퍼의 위치와 정렬하여 웨이퍼 표면에 전사해 주는 공정, 빛에 노출되어 성질이 변한 감광액을 현상액으로 제거해주는 현상공정 등으로 구성되어 있으며 이러한 일련의 공정의 별도의 3~4개의 설비에서 연속으로 진행되거나 최근에는 하나의 설비 안에서 연속적으로 진행된다.[3] 반도체 제조의 전체 공정 중에서 가장 고가의 설비를 사용하기 때문에 대부분의 생산라인은 위의 사진 공정으로 병목공정으로 설정하여 운영하며 따라서 대개의 경우 FAB재공 전체의 30%이상의 재공이 사진공정 앞에서 대기하도록 관리하여 사진공정을 담당하는 설비의 가동률을 극대화함으로써 FAB의 생산 용량을 최대화한다. 실제로 국내의 반도체 제조 주요업체의 생산성은 세계의 어느 반도체 업체보다 높다고 알려져 있으며 95% 내외의 사진 공정 가동률을 보이고 있다.

사진공정은 레이어마다 거치게 되며, 실제로는 레이어가 사진공정기준으로 정의된다. 하나의 반도체 제품이 20개 이상의 레이어를 가지고 있다고 가정할 때 하나의 FAB 생산라인에서 최소 10가지 이상의 제품이 생산되는 경우 사진공정에서 담당해야 하는 공정 즉 마스크의 종류는 200여 가지가 넘는다. 월 5만 장의 웨이퍼를 생산하

는 FAB의 경우 보통 50여대 이상의 스테퍼라고 하는 사진공정 설비를 보유하고 있는데 200여가지 이상의 공정을 수행하기 위해 수시로 제품과 레이어를 교체할 수밖에 없다. 제품이나 레이어를 교체하는 경우 작게는 5분, 신규 제품이거나 불안정한 공정의 경우 2시간 이상의 준비교체시간이 소요되어 준비교체시간을 최소화하는 것이 생산성의 주요한 관리요인이 된다. 사진공정에 대한 관리가 더욱 중요하게 된 것은 FAB제조 사이클 타임이 대폭적으로 줄임에 따라 전체의 재공 수준이 낮아졌고 이로 인하여 과거처럼 사진공정 앞에 많은 재공을 보유함으로써 하나의 제품을 장시간 진행할 수 없게 되었기 때문이다. 사진공정을 진행하는 스테퍼 설비는 대기중인 재공과 조만간 도착할 재공에 대한 합리적인 스케줄링이 이루어져야 불필요한 준비교체나 작업할 재공이 없어 작업이 멈추는 상황을 피할 수 있게 된다. 스테퍼 설비는 설계시 모든 제품의 모든 레이어 사진공정을 진행할 수 있도록 되어 있으나 실제로는 사진공정을 담당한 엔지니어들의 사전 검사와 사양조정으로 스테퍼 설비마다 진행할 수 있는 제품 및 레이어가 사전에 설정되어 있는 것이 보통이다. 이는 수율을 중요시하는 반도체 제조의 특성상 필요한 관리방식으로 설비의 조그마한 변화에도 민감한 반도체산업만의 독특한 패턴이라 할 수 있다.

반도체 FAB의 관리적 관점에 대한 연구는 Wein[12]과 Glassey and Resende[5]에 의해 본격적으로 시작되었다. Wein[12]은 반도체 생산공정 중에서 가장 복잡한 웨이퍼 가공 공정에 대해 병목공정을 관리함으로써 평균 생산주기를 단축하기 위하여 Workload Regulating Input 투입규칙을 제시하였고 Glassey and Resende[5]는 병목공정 설비 이용을 극대화하는 Starvation Avoidance Input 투입 규칙을 제시하였다. 병목공정에 대한 생산성 극대화를 추구하는 이론적 접근으로서 일부 생산라인과 또는 FAB을 운영하는 소프트웨어시스템에서 개념이 채택되어 적용되었다. Spearman et al.[8]이 제시한 CONWIP 규칙은 생산라인 전체의 재공을 일정한 수준으로 유지하기 위한 Input

Release 규칙으로 생산량과 재공을 동시에 제어할 수 있는 강건한 규칙으로 알려져 있다. Goldratt [6]의 제약이론은 반도체 제조라인을 대상으로 한 것은 아니지만 각 라인의 병목공정을 정의하고 이것을 기준으로 투입제어와 흐름제어를 하여 전체 시스템의 안정화를 시키는 Drum-Buffer-Rope 규칙도 반도체 생산라인의 물류통제에 많이 적용되고 있다. 이 외에도 선행 연구들을 흐름규칙과 투입조정규칙, 결정적 알고리즘, 제어 이론적 접근방법, 지식기반 접근방법으로 분류하는 등 웨이퍼 가공 공정의 효율화를 통하여 생산성을 높이라는 많은 시도가 있었고 이에 대한 광범위한 문헌조사도 보고되었다.[9,10] 반도체 FAB에 대한 연구는 결과를 실험하는데 많은 한계성을 가지고 있다. 700~800 개의 공정을 모두 고려한 시물레이션 모델링은 개발과 운영에 많은 어려움이 있으며 실제생산라인에 이론적 결과를 직접 실험하는 데는 많은 위험이 따른다. 따라서 대부분의 실험은 간략화 된 모델에 대해 수많은 가정이 전제된 상태로 결과의 타당성을 검증하였다.[1,4] 특히 FAB의 재공 수준이 극소화되어 있는 상태에서 현재의 상황에 근거한 각종 실험결과를 알아보려고 할 때 빠른 시간 내에 판단할 수 있는 도구가 현재 없는 상태이다. 신규제품이 수시로 생산라인에 투입되고 설비의 상태가 예기치 못한 상태에서 변화가 있을 때 여러 가지 관리방식에 대한 평가를 할 수 있는 도구는 반도체 FAB에서 매우 필요로 하고 중요한 역할을 담당할 수 있을 것이다.

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 봄으로서 그 결과를 검증하고자 하였다. 특히 예전에는 FAB의 생산방식은 계획생산으로 운영되었고 FAB이후의 공정에서 주문에 대한 납기회신과 주문량 달성을 위한 조정과정을 거치도록 했으나 제조 사이클 타임이 짧아진 상황에서 주문에 대한 납기회신,

납기만족에 대한 관리가 FAB에까지 영향을 미치게 되었고 이를 FAB의 생산관리에 고려해야 하는 상황이 되었다. 따라서 본 논문에서 실험하고자 하는 관리방식은 기존의 계획생산체제에서 단순히 생산량 및 가동률의 극대화가 목적이 아니며 주문의 상황과 변화가 반영되는 관리방식에 대한 실험 및 이의 검증에 목표를 두고 있다. FAB의 생산방식에 주문의 동적인 변화가 체계적으로 반영될 때 생산의 진정한 공급사슬경영(SCM)이 실현된다고 할 수 있으며 따라서 이에 대한 실험은 매우 중요하다고 할 수 있다.

2. 물류 통제 규칙

반도체 FAB 내의 물류흐름은 사이클링 형태의 복잡한 형태를 취하고 있기 때문에 최적화 방법론을 적용하기에는 한계가 있고 대부분의 연구에서 발견적 기법을 적용하고 있다. 병목공정으로 분류되는 사진 공정을 중심으로 주요한 할당 의사결정이 이루어진다. FAB라인의 사진공정을 담당하는 스테퍼 설비의 경우 일반적으로 50여대 이상 운영하고 있으며 할당되는 공정은 최소 200여 개에 해당되고 제품이나 공정이 바뀌는 경우마다 준비교체시간이 발생하며 그 때마다 작업 가능한 재공의 수도 수시 바뀌어 이를 수리적으로 모델링할 경우 이에 대한 해를 적용하기에는 현실성이 없다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 할당규칙을 제공하고 이에 대한 성능을 자체 모델링 및 개발한 도구를 이용하여 검증하고자 한다.

사진공정을 진행하는 스테퍼의 가동율이 FAB의 생산성을 좌우하기 때문에 스테퍼 스케줄링이 제일 중요하게 관리되고 있다. 1장에서 언급하였듯이 가동률 극대화와 사이클 타임 최소화는 서로 상반되는 결과를 초래하는 평가 지수이므로 이를 적절히 운영하는 방법론이 필요하다. 이는 스테퍼 설비에 작업 가능한 제품의 레이어에 해당하는 웨이퍼가 적절한 시기에 적절한 양만큼 공급되어 설비가 지속적으로 가동될 수 있도록 하고 또한 이로 인하여 제품별 목표생산량이 지

속적으로 달성할 수 있도록 해야 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. 위 방법은 생산라인의 목표생산량이 일정한 상태를 유지하는 계획생산의 경우 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히 병목공정의 스케줄링과 FAB의 투입량 조절에서 적절한 규칙을 사용함으로써 생산량과 병목설비의 가동률 측면에서 좋은 결과를 보여 주었다. 그러나 계획생산방식의 목표는 생산량 달성에 주안점을 두고 있기 때문에 생산라인 전체의 재공을 줄이면서도 높은 생산량을 달성할 수 있는 방법을 제시하지는 못하였고 그들이 제시한 밸런스 지수가 최저 0.64 최고 1.37을 보임으로 평균적으로 1.0 내외로서, 목표로 하는 재공 수준보다 1배 이상 재공을 보유하고 있어 평균공기도 목표공기의 2배 수준에서 생산이 이루어지고 있어 제시한 규칙이 만족할만한 수준이라고 보기 힘들다. 참고로 밸런스 지수라 함은 각 제품의 레이어마다 정의되는데 각 레이어마다 정의된 목표 재공을 초과하는 재공의 양을 목표 재공의 값으로 나눈 값을 의미한다. 따라서 현재공이 목표 재공과 같다면 밸런스지수는 0이며 밸런스 지수가 1일 때 현재공은 목표 재공의 2배가 있는 셈이고 특정 레이어의 재공이 없을 때는 밸런스 지수의 값은 -1이 된다. 제품의 밸런스 지수는 각 레이어의 밸런스지수의 절대값의 평균이며 생산라인의 밸런스지수는 각 제품의 재공량을 가중치로 하는 가중평균으로 나타낸다. 목표재공의 설정은 이영훈 외[1]와 동일하게 가정하였다.

스케줄링의 규칙은 다음과 같이 적용된다. 생산라인에서 작업이 진행되고 있는 모든 제품의 레이어에 대해 정해진 규칙에 의해 우선 순위를 결정하고 최우선 순위의 레이어는 지난 시프트에 동일 제품의 동일 레이어를 작업한 스테퍼 설비를 찾는다. 있으면 찾은 스테퍼 설비에 작업가능한 재공이 소진 될 때까지 또는 주어진 시프트의 작업시간이 끝날 때까지 작업을 할당한다. 할당

후에도 작업 가능 재공이 남아 있으면 동일한 규칙에 의해 작업가능 스테퍼를 찾고 없으면 준비 교체시간이 가장 작은 작업가능 스테퍼를 찾아 할당한다. 이와 같은 과정을 모든 스테퍼가 할당되거나 더 이상 할당할 재공이 없을 때까지 반복적으로 적용하여 할당 작업을 완성하며 이 과정은 480분으로 구성된 매 시프트 초기마다 시행한다.

새롭게 제시되는 할당규칙은 첫째, 전체 목표 생산량을 달성하면서도 제조 사이클타임을 줄일 수 있어야 하고 둘째, 개별 생산량을 안정적으로 달성하여 생산량의 변화(Variation)를 극소화할 수 있어야 하며 셋째, 목표생산량의 변화 즉, 주문량이 수시로 변하는 상황에서도 이를 생산현장의 스케줄링에도 반영하여 주문량의 변화에 대응하는 생산라인으로 유도할 수 있어야 한다. 위의 세 가지 요건은 생산위주의 관리에서 고객만족 위주의 관리로 변화하는 반도체산업의 현실을 반영할 수 있게 하며 공급체인관리의 가장 기본적인 요소라 할 수 있다. 계획생산에서는 주문에 의한 생산이 아니므로 주문에 대한 납기라는 개념은 없으나 개별 생산목표를 납기의 개념으로 원용할 수 있다. 즉, 개별 생산 목표를 그 날을 납기로 하는 하나의 주문으로 간주할 때 납기를 만족하는 스케줄링에 적용되는 규칙을 반도체 스테퍼 스케줄링에 사용할 수 있다. 새롭게 제시되는 아래의 두 가지 규칙은 납기에 근거한 스케줄링 규칙들이다.

▷ 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. 예를 들어 매 시프트마다 50장의 웨이퍼가 생산되어야 한다고 하고 마지막 레이어의 재공이 80이라면 마지막 레이어의 웨이퍼 중 50장은 납기 시프트(Wafer Due: WD) 1을 가지고 나머지 30장은 2를 가진다. 마지막 레이어의 전 레이어가 현 재공이 90장이라면 20장은 납기 시프트 2를 가지고 50장은 납기

시프트 3, 나머지 30장은 납기 시프트 4를 가진다. 이와 같은 방법으로 모든 레이어의 웨이퍼에 납기를 정하고 각 레이어에 있는 재공 웨이퍼의 평균 납기를 구하여 이를 레이어의 납기(Layer Due : LD)라 규정한다. 각 레이어에 있는 재공은 마지막 공정을 끝낼 때까지 소요되는 시간은 각 레이어마다 평균 사이클 타임을 합하여 구할 수 있다. 이는 목표재공을 정하기 위해 사전에 결정된 값으로 대부분 과거의 생산정보를 분석함으로써 얻을 수 있다. 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.

<표 1>은 LDS를 산정하는 방법을 보여준다.

<표 1> LDS 계산방법

레이어	목표 재공	현 재공	LD(웨이퍼의 평균 납기)
25	100	120	$\{(70 \times 4) + (50 \times 5)\} / 120 = 4.4$
26	100	200	$\{(70 \times 2) + (100 \times 3) + (30 \times 4)\} / 200 = 2.8$
27	100	80	$\{(50 \times 1) + (30 \times 2)\} / 80 = 1.4$
28	100	50	$\{(50 \times 1)\} / 50 = 1$

레이어	사이클 타임	누적사이클 타임	LDS
25	1.2	3.9	$4.4 - 3.9 = 0.5$
26	0.8	2.7	$2.8 - 2.7 = 0.1$
27	1.1	1.9	$1.4 - 1.9 = -0.5$
28	0.8	0.8	$1.0 - 0.8 = 0.2$

▷ ATC(Apparent Tardiness Cost) 규칙

ATC 규칙은 작업의 지연도(Tardiness)의 합을 최소화하는 발견적 기법으로 단독기계나 병렬 기계의 상황에서 작업의 중요도를 고려하여 작업 순서를 결정하는 방법이다.[11] N 개의 작업에 대해 납기, 작업시간 및 중요도가 주어졌을 때 아래와 같이 인덱스의 값을 계산하여 가장 큰 값을 가지 작업부터 작업을 진행한다. ATC규칙은 작업이 이루어질 때마다 현재의 시간이 고려되어 동적인 작업규칙이라 할 수 있다. 작업의 스케줄링 시 모든 작업에 대한 인덱스 $I_j(t)$ 는 아래와 같이 계산한다.

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left[-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{k\bar{p}}\right]$$

$I_j(t)$: 시간 t 의 작업 j 의 인덱스

w_j : 작업 j 의 중요도

p_j : 작업 j 의 작업시간

d_j : 작업 j 의 납기

여기서 k 는 모수(Parameter)로서 주어진 데이터의 성격을 반영할 수 있도록 정해진다. 위의 개념을 응용하여 LDS 규칙을 아래와 같이 수정할 수 있다. 중요도는 모든 레이어가 같다고 가정하여 1로 두고 남은 공정 시간은 현재에서 생산될 때까지의 시간이므로 현재의 레이어에서 마지막 레이어까지의 사이클 타임의 합으로 보며, 납기는 현재 레이어의 납기로 한다. k 값은 통상 사전 실험을 통하여 적절한 값을 찾았으나 k 의 값에 크게 민감하지 않아 0.5로 설정하였으며 위의 내용을 ATC 규칙에 적용하면 다음과 같이 인덱스를 구할 수 있다.

$$Index[i, j] = \frac{1}{ACLT[i, j]} \times \exp\left(-\frac{\max(LD[i, j] - ACLT[i, j], 0)}{k * avg(LCT[i])}\right)$$

$ACLT[i, j]$: 제품 i , 레이어 j 의 현재 레이어에서

마지막 레이어까지의 사이클타임의 합
 $LD[i,j]$: 제품 i , 레이어 j 의 Layer Due
 $avg(LCT[i])$: 제품 i 의 레이어 사이클 타임의 평균

모든 제품의 레이어에 대해 위의 규칙에 따라 인덱스를 구하고 인덱스의 값이 큰 레이어부터 스테퍼에 할당한다. 할당하는 방식은 LDS 규칙과 동일하다.

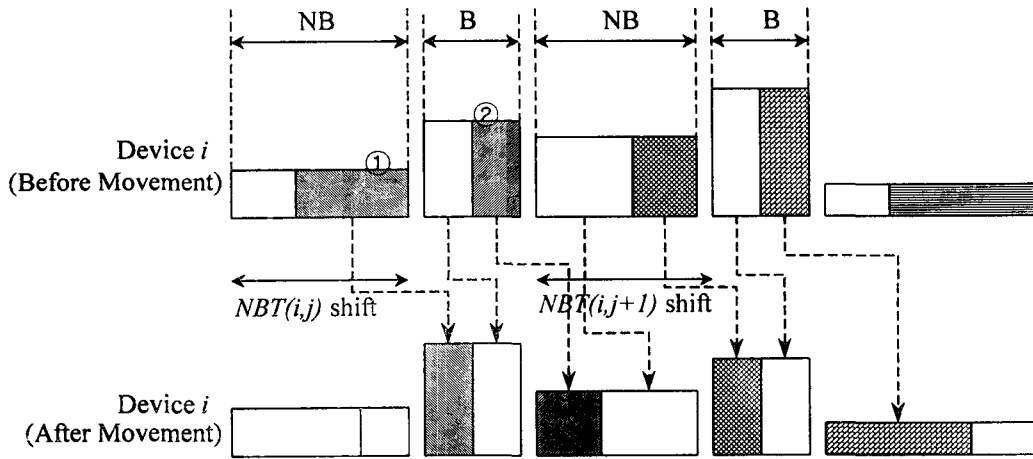
3. 시뮬레이션 실험을 위한 모델링

본 연구에서는 2장에서 제시한 주문반영 스케줄링 규칙의 성능을 실험하기 위하여 시뮬레이터를 개발하고 기존의 논문에서 제시된 규칙과 새로운 규칙을 여러 가지 조건하에서 구동, 결과를 평가하고자 한다. 반도체 FAB의 물류흐름 상황을 최대한 유사하게 묘사할 수 있으면서 빠른 시간 내에 구동할 수 있도록 하는데 목표를 두었다. 이는 실제 반도체 생산라인의 경우 스케줄링의 의사결정이 최대 8시간(시프트)마다 이루어지며 실제로는 생산설비의 불규칙적인 상태의 변화, 주문의 변화, 엔지니어의 수시 웨이퍼 검사 등으로 2시간 내외의 시간범위에서 스케줄링의 규칙을 변화하게 되는 일이 빈번하기 때문에 특정 스케줄링 규칙에 대한 평가는 현재의 재공 현황을 반영한 상태에서 5~10분 이내에 알 수 있어야 적용할 수 있게 되고 이러한 현장의 상황이 빠른 시간 내에 구동할 수 있는 시뮬레이터를 필요로 하게 된다.

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 반복공정이 진행된다. 하나의 레이어는 물류측면에서 비병목 공정과 병목 공정으로 나눌 수 있으며 반도체 웨이퍼 가공공정의 병목공정은 2장에서 언급한 바와 같이 스테퍼 설비를 사용하는 사진 공정이다. 비병목 공정은 디바이스와 레이어에 따라 차이가 있으나 20~30 개 공정으로 구성되어

있다. 특별한 경우를 제외하고는 비병목 공정에서는 지체되는 일이 거의 없으며 필요에 따라 언제든지 작업이 진행될 수 있다. 즉 비병목 공정은 통상 작업이 진행되는 대로 물류가 이동하며 가장 고가의 장비에 해당하는 스테퍼의 효율을 최대화하는 것이 웨이퍼 가공공정의 물류관리 목표가 되어 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.

<그림 1>은 본 연구에서 제시한 물류 흐름을 잘 나타내고 있다. 그림에서 B(NB)는 병목(비병목) 공정을 의미하며 하나의 비병목 공정과 병목공정이 합쳐져 하나의 레이어 j 를 형성한다. NBT는 비병목 공정의 사이클 타임을 시프트 단위로 표시한다. ①은 비병목 공정에서의 물류 이동을 보여주고 있으며 ②는 병목 공정에서의 물류 이동을 보여주고 있다. 비병목 공정의 재공은 시간축 기준으로 균일하게 흘러져 있다고 가정한다. 이는 비병목 공정의 경우 특정설비의 용량에 의해 물류가 이동하기보다는 비병목 공정을 지나는데 소요되는 평균사이클타임을 흐름을 좌우하기 때문이다. 예를 들면 어느 비병목 공정의 평균 사이클타임이 3시프트라 할 때 1시프트가 끝나면 해당 비병목 공정의 재공 웨이퍼 중에서 1/3에 해당하는 양만큼 다음 공정 즉 해당 레이어의 병목공정의 버퍼로 이동함으로써 병목공정의 스케줄링을 기다리게 된다. 병목 공정의 버퍼에서 작업을 기다리고 있는 재공 웨이퍼는 스테퍼 설비가 작업에 할당될 경우 다음 공정 즉 다음 레이어의 비병목 공정으로 이동하게 된다. 매 시프트마다 각 제품의 투입 웨이퍼는 첫번째 레이어의 비병목 공정으로 물류가 이동하며 제품의 마지막 레이어의 병목 공정에서 스케줄링 되어 작업이 진행된 웨이퍼는 한 시프트 동안의 생산량으로 보았다. 따라서 시뮬레이션은 매 시프트마다 웨이퍼 투입 규칙과 병목 공정의 스케줄링 규칙에 따라 제어된다.



< 그림 1 > 물류 흐름의 메커니즘

4. 스케줄링 규칙의 성능 평가

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 투입규칙과 함께 새롭게 제시되는 투입규칙을 포함하였다. 기존의 세 가지 규칙은 첫번째로 균일투입(Uniform) 규칙으로서 월간 목표를 시프트 수로 나누어 일정하게 투입하는 방법, 두번째는 CONWIP(Constant WIP) 규칙으로서 현 상태의 라인 재공 상태를 유지하는 방법으로서 매 시프트마다 생산된 재공만큼 투입시키는 규칙이며, 세번째는 ELB(초기 레이어 밸런스 : Early Layer Balance) 규칙으로서 초기 레이어의 재공 상황을 적정 재공과 비교하여 그 차이를 고려하는 방식으로 레이어 수의 약 1/5정도를 초기 레이어로 보고 투입제어를 하는 방법이다. 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.

병목공정의 스케줄링 규칙은 이영훈 외[1]에서 제시한 세 가지 규칙과 3장에서 제시한 주문통제 규칙 두 가지를 추가하여 실험하였다. 참고로 기존의 세 가지 규칙을 간략히 설명하면 첫째 BR(밸런스 지수) 규칙으로서 밸런스 지수가 높은 레이어의 웨이퍼를 우선 작업에 할당하는 규칙을 말하며 두 번째는 흐름밸런스 지수라 하여 현재 레이어의 밸런스 지수에서 다음 레이어의 밸런스 지수를 뺀 값을 말하며 흐름 밸런스 지수의 값이 큰 레이어의 웨이퍼를 우선 작업에 할당하는 규칙을 말한다. 세 번째는 SSV(Shifted Shortage Volume) 규칙으로서 각 레이어의 누적 적정재공과 현 재공의 차이와 생산량의 누적 미달량을 기준으로 할당하는 규칙을 말한다.

위에서 제시한 규칙의 성능평가는 3장에서 설명한 모델링에 근거하여 C 와 Delphi로 개발된 시뮬레이터를 이용하여 실험하였다. 초기 데이터 생성은 다음과 같이 하였다.

- ▷ 디바이스의 수는 5개로 하였다.
- ▷ 각 디바이스의 레이어 수는 [18,28]개로 생성을 하였다.
- ▷ 스테퍼(Stepper) 수는 60개로 하였다.
- ▷ 월간 생산량은 스테퍼 용량을 고려하여 60,000장으로 하였다.
- ▷ 스테퍼에서의 웨이퍼 프로세싱 타임은 [1.2, 2.4]분으로 생성하였다.
- ▷ 수율은 [0.85, 0.96]까지로 하였다.
- ▷ 각 레이어의 사이클 타임은 [1.3,1.7]일(Day)로 하였다.
- ▷ 각 레이어의 비병목 공정의 사이클 타임은 레이어 사이클 타임의 80%로 가정하였다.
- ▷ 병목공정에 작업이 할당될 때 동일제품의 동일 레이어가 할당되면 준비교체시간이 없으며 동일 제품의 다른 레이어의 제품이 할당되면 6분의 작은 준비교체시간이 발생하고 다른 제품이 할당되면 60분의 큰 준비교체시간이 발생한다.

월간 생산량 60,000장을 제품의 월간 목표량으로 나누되 (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2), (0.3, 0.3, 0.2, 0.1, 0.1), (0.5, 0.2, 0.1, 0.1, 0.1) 정도의 비율로 각 제품에 배분하여 세가지 세트를 생성하였다. 초기 재공은 적정재공의 1.2배 정도로 생성하였다. 이렇게 생성된 각각의 세트에 대해 위에서 언급된 웨이퍼 투입 규칙 네가지와 스케줄링 규칙 다섯가지들의 조합 20가지를 각각 테스트하고 각 테스트마다 30번씩 실험하였다. 전체 실험한 기간은 60일로서 180개 시프트의 생산에 대한 결과를 추출하였다.

본 실험에서 평가한 척도는 6가지로서 다음과 같다.

- ▷ 60일간의 총 생산량 : 각 제품의 마지막 레이어에서 60일간 생산량의 합.
- ▷ 생산량의 표준편차 : 각 시프트 별 생산량의 표준편차로서 생산의 안정도의 평가지수.
- ▷ 병목공정의 가동률 : 60대 스테퍼 설비의 가동율로서 준비교체시간을 제외한 순수가동

시간 비율

- ▷ 재공 밸런스 지수: 매 시프트마다 밸런스 지수를 계산하고 이를 평균한 값
- ▷ 평균생산 사이클 타임 : 한 제품의 웨이퍼가 투입되어 생산되기까지 소요되는 시간의 평균값을 말하는 것으로서 본 실험에서는 이산사건 실험이 아니기 때문에 모든 웨이퍼에 대해 직접 구할 수는 없으며 FAB전체의 재공을 기준으로 추산하는 간접적인 방법을 취했다. 즉 제품별로 매 시프트의 총 재공을 구하고 이를 생산목표로 나누어 대체적인 평균사이클 타임으로 보고 이를 평균하였다.
- ▷ OTD(On-Time-Delivery)는 주문별 납기 만족율을 말하는 것으로서 본 실험에서는 일(Day)단위로 주어진 생산량을 만족하는가를 판단하고 만족여부를 제품별로 비율을 구함으로써 계산하였다. 즉 웨이퍼별로 하나의 주문으로 간주한 셈이다. 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. 이 경우 일별 생산 목표가 변하면 이에 다른 레이어별 적정재공의 양이 변하게 되고 위에서 제시한 여러 가지 스케줄링 규칙은 이를 반영하게 되어 실험을 통해 어느 규칙이 더욱 민감하게 작용하므로 OTD의 성능이 좋아지는지 판단할 수 있게 된다.

<표 2>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

<표 2> 웨이퍼 투입규칙의 성능 평가 결과

	생산량(웨이퍼)	생산량의 분산	가동률(%)	밸런스지수	사이클 타임	OTD 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 3> 스케줄링 규칙의 성능 평가 결과

	생산량(웨이퍼)	생산량의 분산	가동률(%)	밸런스 지수	사이클타임(일)	OTD 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 4> 웨이퍼 투입 규칙과 스케줄링 규칙 조합의 성능 평가 결과

		BR	FBR	SSV	LDS	ATC
생산량 (웨이퍼)	Uniform	119,312	119,628	122,614	124,970	124,694
	CONWIP	123,595	123,537	123,058	124,982	125,176
	ELB	124,322	124,173	117,582	124,543	123,939
	DBR	124,356	124,373	120,083	124,401	124,591
생산량의 분산	Uniform	105,183	90,035	14,040	13,395	13,902
	CONWIP	82,563	80,186	13,894	13,270	13,538
	ELB	57,140	57,984	16,400	13,475	13,610
	DBR	58,500	56,422	14,490	13,965	13,544
가동률 (%)	Uniform	95.8	95.7	86.5	91.3	91.2
	CONWIP	95.9	96.1	86.9	91.8	91.6
	ELB	95.7	95.4	85.0	90.3	90.2
	DBR	95.3	95.5	85.1	90.4	90.8
밸런스 지수	Uniform	0.35	0.35	0.64	0.52	0.52
	CONWIP	0.25	0.24	0.62	0.51	0.52
	ELB	0.19	0.20	0.44	0.27	0.28
	DBR	0.21	0.21	0.51	0.34	0.34
사이클 타임(일)	Uniform	49.9	49.5	45.4	43.6	43.7
	CONWIP	43.9	43.9	44.6	43.9	43.8
	ELB	41.0	41.2	40.1	35.8	36.1
	DBR	40.7	40.9	41.3	37.8	38.0
OTD 율	Uniform	0.66	0.68	0.93	0.99	0.99
	CONWIP	0.73	0.72	0.92	0.98	0.99
	ELB	0.83	0.80	0.91	1.00	0.98
	DBR	0.80	0.78	0.91	0.98	0.97

라인의 균형정도는 균일투입보다 20%나 좋은 성능을 내고 있으며 전체 공정 시간은 균일투입보다 7일이나 빠른 것을 볼 수 있다. 주문별 납기 만족율은 모든 규칙이 90% 정도로 차이가 거의 없음을 알 수 있다. ELB 보다 좋은 성능을 기대했던 DBR 률은 ELB와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 위의 내용을 종합하여 보면 투입규칙에 따른 성능은 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

<표 3>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 균형정도에선 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 생

산량의 분산은 BR 규칙보다 무려 80% 정도 좋은 성능을 보이고 있으며 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 4>는 각각의 웨이퍼 투입 규칙과 스케줄링 규칙의 조합에 대한 평가지수의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 각 평가지수별로 가장 좋은 성능을 나타내는 투입규칙과 스케줄링 규칙의 조합을 살펴보면 큰 차이가 없는 생산량의 평가 지수를 제외한 거의 모든 평가지수에서 LDS와 ATC규칙이 좋은 결과를 만들어 내는 주요 요인을 알 수 있다. 특히 밸런스 지수와 사이클 타임 측면에서는 ELB나 DBR 투입규칙과 LDS나 ATC의 스케줄링 규칙의 조합이 탁월한 성능을 나타내어 사이클 타임의 경우 14일의 단축, 28% 이상 개선의 효과가 있음을 알 수 있다. 또한

<표 5> 웨이퍼 투입 규칙과 스케줄링 규칙 조합에 따른 OTD 율의 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

LDS와 ATC 규칙의 분산은 다른 종류의 규칙보다 1/3~1/4 수준으로 좋은 결과를 보이고 있다. 특히 ELB, LDS 조합은 최저 값의 분산으로 안정적 생산라인을 운영하는 규칙임을 알 수 있다. OTD 율에 있어서도 LDS와 ATC 규칙이 다른 규칙보다 25~30% 적은 분산값을 가지고 있어 주문변화와 라인의 동적인 상황에 관계없이 강건한 규칙임을 보이고 있다.

본 논문에서 가장 중요하게 생각하는 OTD율의 성능평가는 주문변화에 따른 여러 가지 경우를 살펴보는 것이 필요하다. <표 5>에서는 각 조합에 따른 OTD 율의 성능 평가를 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 투입규칙과 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.

5. 결론

본 논문에서는 반도체 산업의 제조과정 중에서 생산성의 통제가 가장 어려운 FAB에 대해 주문변화에 따른 각종 투입규칙과 스케줄링 규칙의 성능을 시뮬레이션을 이용하여 평가하였다. 반도체 FAB에 대한 연구가 발표되고 있으나 대부분 실제 FAB보다 작은 규모의 생산라인에 대한 연구이거나 실제 FAB에서 생산하는 제품의

종류보다 수를 줄이는 형태의 단순화 과정을 거쳐 분석한 연구가 대부분이다. 이는 생산공정의 수가 많고 복잡하여 생산현장의 모든 과정을 그대로 표현하는 시뮬레이션 모델의 개발이 어렵고 분석에 필요한 시간의 제약성 때문에 그 동안의 연구결과는 상당히 제한적이라고 할 수 있다. 본 논문은 반도체 FAB의 전체 생산물류의 흐름 과정이 실제와 가장 유사하도록 모델링하고 대표적인 반도체 생산라인에서 사용하고 있는 병목공정 설비 60여대를 그대로 반영하면서 빠른 시간내에 적용 및 분석할 수 있는 시스템을 개발하고 이를 이용하여 여러 가지 규칙에 대한 실험을 실시하였다. 특히 그 동안의 계획생산에 의한 관리보다는 주문에 의한 생산체계가 적용될 때의 적합한 스케줄링 규칙을 제시하였다. 최근 공급사슬관리에서 중요시하고 있는 주문변화의 대응측면에서 이를 반영하는 FAB 생산의 스케줄링 규칙은 보고된 적이 없다. 본 논문에서 제시된 LDS 규칙과 ATC규칙은 주문변화에 즉각적으로 반영되는 실시간 스케줄링 규칙으로서 투입규칙과 주문변화의 양에 관계없이 강건함을 보여주고 있다. 성능평가를 위해 개발된 시뮬레이션 시스템은 기본적인 파라미터에 대한 입력과 실시간으로 변하는 재공 상황 및 주문변화만 데이터 베이스를 통해 인터페이스되면 스케줄링 규칙내의 파라미터가 실시간으로 수정되어 상황에 가장 적합한 스케줄링이 이루어지도록 해주며 이에 필요한 시간은 2~3분에 불과함으로 적용에 큰 어려움이 없다. 대부분의 반도체 FAB의 스케줄링 규칙은 한 시프트동안 고정되어 운영됨으로서 설비의 상태변화와 주문변화에 민감하지 못한 것이 그 동안의 문제였다면 위의 시스템은 이에 대한 해결책이 될 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

- [1] 이영훈, 조한민, 박종관, 이병기, "반도체 FAB의 스케줄링 시뮬레이터 개발," 「산업공학회지」, 12권, 3호(1999), pp.437-447.
- [2] 이영훈, 김수영, 이관후, 이상우, "반도체산업의 생산관리 : 이론과 실제," 「산업공학회지」, 8권, 4호. pp.73-87.
- [3] 삼성전자, 「반도체란 무엇인가?」. 1994.
- [4] Bitran, G.R. and Tirupati, D. "Development and Implementation of a Scheduling System for a Wafer Fabrication Facility," *Operations Research*, Vol.36, No.3(1988), pp.377-395.
- [5] 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.
- [6] Goldratt, E.M, *Theory of Constraints*, North River Press, 1990.
- [7] Leachman, R.C. "The Competitive Semiconductor Manufacturing Survey: Second Report on Results of the Main Phase," CSM-08 Report(1994).
- [8] Spearman, M.L., Woodruff, D.L. and Hopp, W.J., "CONWIP: A Pull Alternative to Kanban," *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.5(1990), pp.879-894.
- [9] 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 Characteristics, Performance Evaluation, and Production Planning," *IIE Transactions*, Vol.24, No.4(1992), pp.47-60.
- [10] 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.
- [11] Vepsalainen, A. and Morton, T.E., "Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs," *Management Sciences*, Vol.33(1987), pp.1035-1047.
- [12] Wein, L.M. "Scheduling Semiconductor Wafer Fabrication," *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, Vol.1, No.3(1988), pp.115-129.

● 저자소개 ●



박종관

1998년 연세대학교 산업시스템공학과 졸업(공학사)

1998년~현재 : 연세대학교 컴퓨터과학/산업시스템공학과 대학원 석사과정

관심분야 : 생산관리, 스케줄링, 시뮬레이션



이영훈

1981년 서울대학교 산업공학과 졸업(공학사)

1989년 Columbia University 산업공학과 졸업(공학석사)

1992년 Columbia University 산업공학과 졸업(공학박사)

1992년~1993년 Rutgers University 산업공학과 방문교수

1993년~1997년 삼성전자 반도체 SI팀장

1997년~현재 연세대학교 정보산업공학전공 조교수

관심분야 : 시스템 최적화, 스케줄링, SCM 등