

반도체 산업의 공급사슬 모형에 대한 분배정책의 비교

정성욱 · 이병진 · 이영훈

서울시 서대문구 신촌동 134번지
연세대학교 컴퓨터과학 산업시스템공학과

Abstract

반도체 산업은 글로벌하게 공급사슬이 형성되어 있고, 공급사슬 구성에서 다른 제조 산업과 구별되는 독특한 특징을 가지고 있다. 본 논문은 reentrancy공정과 binning특성을 고려한 반도체 산업의 생산과 분배망에 대한 공급사슬 모형을 제안한다. 3가지 생산 정책과 2가지 분배 정책에 대한 수리모형을 수립하여 총 6가지 공급사슬 모형을 형성하였고, 각각의 모형에 대해 해를 도출하여 비교, 분석하였다. 생산공정에서는 Balance정책, 분배공정에서는 Pull정책을 조합한 모형이 다른 모형들보다 더 좋은 성능을 보여 주고 있다.

1. 서론

반도체 산업은 고부가가치의 첨단 산업일 뿐만 아니라 공급 사슬의 환경이 그 여느 산업보다 글로벌화 되어 있는 산업으로 공급 사슬은 다수의 제조 사이트, 창고나 대리점, 자재공급자 등으로 이루어져 있다. 제조 사이트는 Fabrication(이하 Fab) 사이트, Probe 사이트, 조립 사이트, 최종 검사 및 포장 사이트 등으로 구성되어 있다. 반도체 산업의 공급사슬 모형에서는 자재 공급자에서부터 최종 소비자까지의 전반적인 네트워크를 포함시키는 것이 필요하다.

반도체 산업에서 중요한 요소를 살펴보면, FAB공정에서는 생산량과 병목공정 기계의 가동율의 최대화가 중요 평가 지표가 되고, 조립과 검사단계에서는 납기일이나 고객 만족율이 중요하다. 분배단계는 창고, 대리점, 최종 고객으로 이루어져 있고 각각의 네트워크 거점에서는 거점별 내부 최적화를 달성하는 방향으로 의사결정이 이루어진다. 효과적인 공급사슬을 위한 경영 메커니즘은 재고량을 적게 가져가면서 효과적인 경로를 따라 신속하게 완제품을 공급하여, 고객만족을 달성하고 세계시장에서 경쟁력을 획득하는 것이다. 반도체 산업의

공급사슬 네트워크에서의 난제는 제조 공정의 복잡성으로, Reentrancy공정이나 Binning, 대체(Substitution) 등의 반도체 산업만의 특징들은 고도의 기술력을 필요로 하고, 이는 공급사슬의 분석을 복잡하게 만든다. 따라서 완제품의 분배와 할당에 대한 의사결정은 제조 특성에 반영되어야 한다. 본 연구에서는 제조 특성을 포함한 반도체 산업의 공급사슬 모형을 제안한다.

2. 기존 연구 및 적용 사례

반도체 산업의 연구는 대부분 생산 계획 및 스케줄링, 특히 Fab 공정에 대해 집중되어 왔다. 병목 공정에 대한 연구를 살펴보면 Wein[14]은 평균생산주기를 단축하기 위한 작업부하 통제투입(Workload Regulating Input) 규칙을 제시하였고 Glassey and Resende [2,3]는 병목설비의 이용을 극대화하는 설비유휴 회피투입(Starvation Avoidance Input) 규칙을 제시하였다. Spearman *et al.*[13]이 제안한 CONWIP 방법은 간단하지만 재공과 산출량을 잘 관리할 수 있는 규칙으로 알려져 있다. Lee *et al.*[9]는 병목 공정과 투입량에 대한 효과적인 분배 법칙을 제시했고, 산출량, 설비가동율, 생산 주기, 적시 배송율 등의 성능 지수에 대한 평가를 하였다.

위와 같이 반도체 산업에 대한 수많은 연구가 진행되어 왔지만, 대부분의 연구가 전반적인 공급사슬 네트워크 측면이 아닌 특정 분야에 대해서만 이루어졌다. Ovacik and Weng[12]는 반도체 공급사슬 경영에서 서로 상충되는 개체에 대해 지적하고, 분배 계획, 제조 계획, 주문 약속에 대한 3단계 프로세스를 제안하여 반도체 산업의 공급사슬에 대한 구조를 제안하였다. 학문적인 시도가 정보기술의 힘을 빌어 이를 실제 반도체 생산관리에 적용하여 공급사슬 경영에서 성과를 얻은 사례로는 Harris 반도체의 경우를 들 수 있다(Murty and Bienvenu, [11]). Harris 반도체 사례에서

는 납기 만족도 향상을 위해 반도체 제조 공정에서 전반부(front-end)와 후반부(back-end)를 통합하여 관리한 내용을 주목할 만하다. Lee[6]은 반도체 공급사슬을 주문 침투점을 기준으로 Push와 Pull 두 모델로 나눠서 통합 작업을 한 반도체 공급사슬 모델의 구조를 제시하였다. 이 모델은 반도체 제조 특성을 모델에 포함시켰지만, 실험 및 평가는 이루어지지 않았다. Jain *et al.*[4,5]은 반도체 공급사슬 모델을 설계하는데 있어서 병목공정 위주로 정의할 수 있음을 주장하고 단순화 모델과 대부분의 공정을 반영한 상세모델의 성능을 비교하여 큰 차이가 없음을 보여주었다. Lee and Lee[7]는 반도체 Fab공정과 유사한 제조 특성을 지닌 TFT-LCD공정에 대해 3가지 정책을 사용하여 성능 평가를 하였다.

본 연구는 다음과 같은 면에서 이전의 연구들과 차별성을 가진다. 우선 반도체 산업의 제조 특성을 모델에 반영하였고, 전체 공급사슬을 두 가지 특징적인 모델로 나눠서 통합을 시도하였다. 두 모델에서 사용된 정책은 각 모델의 목적에 부합되도록 설정하였고, 모델의 성능은 한국의 반도체 제조업체를 반영한 예를 모델링하고 실험하여 평가하였다.

3. 반도체 산업의 공급사슬 모델

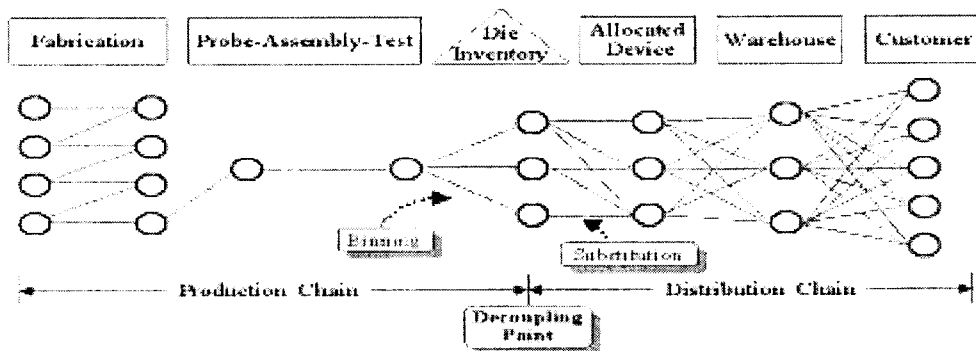
반도체 제조공정의 특징은 reentrancy인데 이것은 여러 세부 공정으로 구성된 레이어 공정이 20~30개씩 반복되는 것을 말한다. 조립공정에서의 특징은 Binning인데 이는 생산된 웨이퍼를 전기적인 특성에 따라서 다른 등급의 품질로 나누는 것으로 웨이퍼당 binning은 확실적인 비율로 발생하게 된다(Liu, [10]). Binning에 따라 몇 가지 등급으로 분류된 제품은 Binning별로 서로 다른 가격으로 고객에게 팔리게 된다. 이 때 고객의 수요

나 이익 증대를 위해 상위 등급의 제품을 낮은 등급 제품의 가격을 받고 팔기도 하는데 이를 대체(Substitution)라고 부른다.

공급 사슬모형에서 생산량 최대화를 위해서는 가능한 많은 재공을 가지고 작업을 진행하는 Push형 모델이 전통적으로 가장 좋은 정책인 것으로 알려져 있고, 적시 배송을 요구하는 고객 만족률을 높이기 위해서는 주문량에 기초한 생산을 하는 Pull형 모델이 더 좋은 것으로 알려져 있다. 따라서, 최종완제품의 산출지점에서는 Pull형 모델형태의 관리가 이루어지고, 원자재 웨이퍼의 투입이 이루어지는 Fab공정에서는 생산량 극대화를 추구하는 Push형 모델형태의 관리가 이루어진다. 이와 같이 Push와 Pull 방식이 만나는 지점을 주문 침투점(Decoupling Point)(Bouff, [1])이라고 하는데 대체로 EDS가 끝나서 웨이퍼가 절단되어 다이가 되고 재공 형태로 쌓여 있게 되는 다이뱅크가 주문침투점이 된다(Lee, [6])(그림 1)). 본 연구에서는 reentrancy 공정이 고려된 주문침투점까지의 생산 모델과 분배와 할당의 특성이 고려된 분배 모델 두 가지가 고려된 공급 사슬 모델을 제안한다. 본 연구의 목적은 두 모델에 적용된 정책들의 조합의 성능과 효율성을 평가하는 것이다.

3.1 생산 모델

제조 공정은 실제로 600~800개의 세부 공정으로 구성되어 있지만 모델에서는 모든 세부 공정을 다룰 수 없기 때문에 중요한 관리 포인트를 선정하여 모델에 포함시킨다. 제조 공정에서의 관리포인트는 가장 고가의 장비를 사용하고 있고, 병목 공정에 해당하는 사진 공정이라고 할 수 있고 주로 스테퍼 설비를 기준으로 한다.



[그림 1] 반도체 공급사슬 모델의 구조

Push정책은 주어진 기간 내 생산량을 최대로 하거나 총 수익을 최대화하는 것을 목적으로 한다. Balance정책은 최종 생산량을 일정하게 유지할 수 있도록 각각의 reentrancy 공정에서 재공량을 조절하는 것을 목적으로 하고, Pull정책은 제조 공정의 마지막 단계에서의 목표 생산량이 결정되어 이것을 달성하는 것을 목적으로 한다.

생산 모델에서의 Push(Prod-Push)정책의 목적함수는 모든 관리 포인트에서 생산된 웨이퍼의 가중 합을 최대화하는 것이다. 가중치는 생산품의 중요도의 정도나 판매가격에 의해서 결정되고 목적식은 장비의 생산 용량과 작업가용 시간에 제약을 받는다. Prod-Push정책의 선형계획 모델은 다음과 같다.

Notations :

- i : 제품 인덱스
- j : 관리 포인트 인덱스
- k : 병목 설비 인덱스
- t : 의사결정 기간 인덱스
- $W(i, j, t)$: 기간 t 동안 관리포인트 j 에서 생산되는 i 제품의 가중치
- $WIP(i, j, t)$: 기간 t 동안 관리포인트 j 에서 생산되는 i 제품의 재공량
- $STD(i, j, k)$: 설비 k 의 관리포인트 j 에서 i 제품을 생산하는데 필요한 시간
- $S(i, j)$: 관리포인트 j 에서 i 제품을 생산할 수 있는 설비들의 집합
- $WT(k, t)$: 기간 t 동안 k 설비에서 가용한 작업시간

결정 변수 :

$X(i, j, k, t)$: 기간 t 동안 k 설비에 할당된 관리포인트 j 에서 i 제품의 생산량

Prod-Push 모델 :

$$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{i,j,t} \{W(i, j, t) \times \sum_k X(i, j, k, t)\} \\ \text{s.t. } & WIP(i, j, t) = WIP(i, j, t-1) - \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \\ & \quad + \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j-1, k, t) \quad \forall i, j, t \\ & \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \leq WIP(i, j, t) \quad \forall i, j, t \\ & \sum_{i,j} X(i, j, k, t) \times STD(i, j, k) \leq WT(k, t) \quad \forall k, t \\ & WIP(i, j, t) \geq 0, X(i, j, k, t) \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \end{aligned}$$

첫번째 제약식은 한 기간의 종료 시점에서 할당되거나 이동한 재공의 양을 나타내고 두번째 제약식은 설비에 할당되는 양은 현 재공량을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다. 세번째는 작업가용시간에 관한 제약식이다.

생산 모델에서의 Balance(Prod-Balance)정책은 reentrancy과정으로 인해 발생할 수 있는 생산량의 변동을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. Fab공정에서 Push정책은 특정 레이어에서 재공의 적재현상을 유발할 수 있고, 이는 향후에 전반적인 생산량이나 설비가동율의 감소를 가져온다. Balance라인은 각 공정별로 적정 재공을 설정하여 레이어에 공급을 하게 되어 각 설비별로 재공 부족이 없이 높은 가동율을 달성하게 한다. Prod-Balance정책에서 목적함수는 목표 재공과 할당 후 남아 있는 재공의 차를 각 공정별로 더하여 그 합을 최소화 하는 것이다. Prod-Balance정책의 선형계획 모델에서 첫번째 제약식은 현 재공과 목표 재공의 차를 나타내고 마지막 제약식은 각 레이어별로 생산해야 될 최소 목표 생산량을 나타낸다. 그리고 나머지 제약식은 Prod-Push 모델과 동일하다.

Notations :

- $TW(i, j, t)$: 기간 t 의 관리 포인트 j 에서 제품 i 의 목표 재공
- $Q(i, t)$: 기간 t 에서 제품 i 의 최소 목표 생산량

Prod-Balance 모델 :

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i,j,t} \{A(i, j, t) + B(i, j, t)\} \\ \text{s.t. } & A(i, j, t) - B(i, j, t) = WIP(i, j, t) \\ & \quad - TW(i, j, t) \quad \forall i, j, t \\ & WIP(i, j, t) = WIP(i, j, t-1) - \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \\ & \quad + \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j-1, k, t) \quad \forall i, j, t \\ & \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \leq WIP(i, j, t) \quad \forall i, j, t \\ & \sum_{i,j} X(i, j, k, t) \times STD(i, j, k) \leq WT(k, t) \quad \forall k, t \\ & \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \geq Q(i, t) \quad \forall i, j, t \\ & A(i, j, t) \geq 0, B(i, j, t) \geq 0, WIP(i, j, t) \geq 0, \\ & X(i, j, k, t) \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \end{aligned}$$

Prod-Balance모델이 라인의 균형을

추구하지만 생산 목표에 대해서는 능동적으로 대처하기 힘들다. 따라서 생산 목표를 반영할 수 있는 Prod-Pull모형을 정의하기로 한다. 각 기간별 모든 공정의 목표 생산량을 결정하는 것이 Prod-Pull모형의 목적이므로 Prod-Balance모형에서의 목표 재공 대신에 목표 생산량을 설정하여 모형을 구현하였다.

Notations :

$IPT(i, j, t)$: 기간 t 의 관리 포인트 j 에서 제품 i 의 목표 생산량

Prod-Pull 모형을 :

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i,j,t} \{A(i, j, t) + B(i, j, t)\} \\ \text{s.t.} \quad & A(i, j, t) - B(i, j, t) = IPT(i, j, t) \\ & - \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \quad \forall i, j, t \\ WIP(i, j, t) = & WIP(i, j, t-1) - \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \\ & + \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j-1, k, t) \quad \forall i, j, t \\ \sum_{k \in S(i,j)} X(i, j, k, t) \leq & WIP(i, j, t) \quad \forall i, j, t \\ \sum_{i,j} X(i, j, k, t) \times STD(i, j, k) \leq & WT(k, t) \quad \forall k, t \\ A(i, j, t) \geq 0, B(i, j, t) \geq 0, WIP(i, j, t) \geq 0, \\ X(i, j, k, t) \geq 0 \quad & \forall i, j, k, t \end{aligned}$$

3.2 분배 모델

분배 모델에서의 주된 목표는 최종 제품을 고객에게 배송하는데 있어서 최소의 비용으로 고객 주문을 적절하게 만족시키는 것이다. 반도체 산업에서 컴퓨터나 정보통신기기 조립업체 등의 주요 고객들은 전세계적으로 흩어져 있지만 배송이 항공으로 이루어지기 때문에 이에 소요되는 운송비용은 배송지에 따라 큰 차이가 나지 않는다. 따라서 분배 모델에서 운송비용은 고려하지 않기로 한다. 주문이 생산 용량 범위 내에서 발생한다면, 주문에 대한 납기내 배송이 달성될 수 있다. 따라서 각 기간별, 고객별, 제품에 대해 최종 관리 포인트에서의 생산량이 결정변수가 된다.

본 연구에서는 분배 모델에 대해 Push(Dist-Push)정책과 Pull(Dist-Pull)정책을 제시한다. Dist-Push정책의 목적함수는 생산과 배송을 통한 수익을 최대화하는 것이고, 물류센터의 저장 용량과 상호간의 배송 시간이 제약으로 들어간다.

Notations :

i : 제품의 인덱스
 b : 물류센터나 판매시점에서 bin 등급의 인덱스
 pb : 생산시점에서 bin 등급의 인덱스
 c : 고객의 인덱스
 t : 시간에 대한 인덱스
 $r(w)$: 생산 공장에서 물류창고 w 까지의 배송시간
 $X(i, t)$: 기간 t 에서 최종 생산완료 단계에서의 생산량
 $C(i, b, c, t)$: 기간 t 에서 고객 c 의 bin 등급 b 을 가진 i 제품에 대한 가격
 $d(i, b, c, t)$: 기간 t 에서 고객 c 의 bin 등급 b 을 가진 i 제품에 대한 수요
 $g(i, pb)$: 제품 i 의 bin 등급 pb 의 비율
 $p(w, c)$: 물류창고 w 에서 고객 c 까지 배송시간
 $CAP(w, t)$: 기간 t 에서 물류창고 w 의 저장 용량

결정 변수 :

$Y(i, b, pb, c, w, t)$: 기간 t 에서 물류창고 w 에서 고객 c 까지 bin 등급 pb 로 생산되어 bin 등급 b 의 가격으로 팔리기 위한 i 제품의 할당량
 $Z(i, b, c, w, t)$: 기간 t 에서 물류창고 w 에서 고객 c 까지 bin 등급 pb 로 생산되어 bin 등급 b 의 가격으로 팔리는 i 제품의 배송량

Dist-Push 모형을 :

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{i,b,c,t} \{C(i, b, c, t) \times \sum_w Z(i, b, c, w, t - r(w)) - p(w, c)\} \\ \text{s.t.} \quad & X(i, t) \times g(i, pb) = \sum_{b \geq pb, c, w} Y(i, b, pb, c, w, t) \quad \forall i, pb, t \\ Z(i, b, c, w, t) \leq & \sum_{pb} Y(i, b, pb, c, w, t) \quad \forall i, b, c, w, t \\ \sum_w Z(i, b, c, w, t - r(w)) - p(w, c) \leq & d(i, b, c, t) \\ & \forall i, b, c, t \\ \sum_{i,b,c} Z(i, b, c, w, t - r(w)) \leq & CAP(w, t) \quad \forall w, t \\ Y(i, b, pb, c, w, t) \geq 0 \quad & \forall i, b, pb, c, w, t \end{aligned}$$

생산량 $X(i, t)$ 는 bin 등급, 물류창고, 고객, 배송시간 등을 고려하여 $Y(i, b, pb, c, w, t)$ 에 할당되어진다. 첫번째 제약식은 binning과 대체 특성을 나타내고 있다. 두번째 제약식에서 $Z(i, b, c, w, t)$ 는 실제로 고객에게 배송되는

양을 나타내고 세번째 제약식은 고객에게 배송되는 양이 고객의 수요보다 많지 않음을 나타낸다. 마지막 식은 배송되는 양이 물류창고의 용량을 넘지 않아야 되는 제약을 나타낸다.

Dist-Pull정책의 목적함수는 배송량과 수요의 차의 합을 최소화 시키는 것이고 제약식은 Dist-Push정책과 동일하다.

Dist-Pull 모델 :

$$\text{Min} \sum_{i,b,c,t} \{d(i,b,c,t) - \sum_w Z(i,b,c,w,t) - r(w) - p(w,c)\}$$

$$\text{s.t. } X(i,t) \times g(i,pb) = \sum_{b \geq pb,c,w} Y(i,b,pb,c,w,t) \quad \forall i,pb,t$$

$$Z(i,b,c,w,t) \leq \sum_{pb} Y(i,b,pb,c,w,t) \quad \forall i,b,c,w,t$$

$$\sum_w Z(i,b,c,w,t) - r(w) - p(w,c) \leq d(i,b,c,t)$$

$$\forall i,b,c,t$$

$$\sum_{i,b,c} Z(i,b,c,w,t) - r(w) \leq CAP(w,t) \quad \forall w,t$$

$$Y(i,b,pb,c,w,t) \geq 0 \quad \forall i,b,pb,c,w,t$$

3.3 두 모델간의 통합

본 연구에서는 생산 모델과 분배 모델을 통합한 총괄적인 공급사슬 모델을 제안한다. 분배모델에서 고객의 수요 정보는 생산 모델이 구동하는데 필요하고, 생산 모델에서 생산량 정보도 분배 모델의 해를 도출하는데 필요하다. Prod-Push모델은 고객의 주문량 정보가 필요하지 않지만 Prod-Balance나 Prod-Pull모델은 고객의 주문량 정보를 필요로 한다. 주문량 정보를 통해 산출된 적정 시점에서의 목표 생산량과 목표 재고는 Prod-Balance모델과 Prod-Pull 모델에서 입력값으로 사용된다(Lee et al. [9], and Lee and Kim[8]). 다음의 Quan-Prod모델은 제조 공장에서 필요한 생산량을 결정하는 모델이다.

Notations :

$avg_STD(i)$: 설비에서의 제품 i 의 평균 작업시간

avg_WT : 단위 기간동안의 평균 작업 가용시간

결정 변수 :

$Y(i,b,pb,c,w,t)$: 기간 t 에서 물류창고 w 에서 고객 c 까지 bin 등급 pb 로 생산되어 bin 등급 b 의 가격으로 팔리는 i 제품 생산량

$X(i,t)$: 기간 t 에서 필요한 제품 i 의 생

산량

Quan-Prod 모델 :

$$\text{Min} \sum_{i,b,c,t} \{ \sum_{pb,w} Y(i,b,pb,c,w,t) - r(w) - p(w,c) - d(i,b,c,t) \}$$

$$\text{s.t. } X(i,t) \times g(i,pb) = \sum_{b \geq pb,c,w} Y(i,b,pb,c,w,t) \quad \forall i,pb,t$$

$$\sum_{i,b,pb,c} Y(i,b,pb,c,w,t) - r(w) \leq CAP(w,t) \quad \forall w,t$$

$$\sum_i X(i,t) \times Avg_STD(i) \leq avg_WT \quad \forall t$$

$$X(i,t) \geq 0, Y(i,b,pb,c,w,t) \geq 0 \quad \forall i,b,pb,c,w,t$$

본 연구에서는 위에서 제시한 3개의 생산정책과 2개의 분배정책을 조합하여, Push-Push, Push-Pull, Balance-Push, Balance-Pull, Pull-Push, Pull-Pull의 총 6개의 공급 사슬 정책을 제안한다.

4. 실험 및 결과

실험은 위에서 제시한 6 가지 정책에 대해 진행하였고, 실험 데이터는 반도체 산업의 특징을 반영할 수 있는 범위에서 랜덤하게 생성하였다. 제조 공정에서 레이어는 20개로, 사진 공정 작업이 진행되는 스테퍼 설비는 60대로 설정하였다. 사이클 타임은 1.5~2.0일 사이에서 랜덤하게 발생시켰고 제품은 하루에 5종류의 웨이퍼를 총 2000개씩 생산한다고 가정하였다. 웨이퍼의 bin등급은 3등급으로 나누었고 모델에서 생성된 제품별 bin등급 발생 비율은 <표 1>과 같다.

<표 1> 제품별 Bin 발생 비율(%)

	등급	제품 1	제품 2	제품 3	제품 4	제품 5
Bin 비율 (%)	1	85	80	80	82	85
	2	10	10	15	14	12
	3	5	10	5	4	3

공급 사슬 네트워크는 아시아에 제조 공장이 위치해 있고, 북미, 아시아, 유럽에 각각 하나씩 총 3개의 물류창고가, 그리고 총 10명의 고객이 글로벌하게 위치해 있다. 제조 공장에서 물류창고로의 배송 시간은 북미, 아시아, 유럽으로 각각 3, 2, 4일이 소요된다. 물류창고에서 고객으로의 배송 시간은 지역별 거리를 감안하여 1~5일 가량 랜덤하게 설정하였다. 고객의 수요는 하루에 각 제품별로 25%편차를 가지고 400개씩, 즉 300~500사이에서 랜덤하게 발생

시켰다[그림 2]. 물류창고의 용량에는 제한을 두지 않았다.

제품별 가중치는 모두 1로 가정하였고 첫번째 시작일에서의 초기 재공은 목표 재공과 동일하게 하였다. 고객 수요 데이터는 10~37일까지, 생산은 4~31일까지 각각 4주간으로 설정하였다. 수요와 생산의 기간이 다른 이유는 제품의 배송 기간을 고려하였기 때문이다. 실제적으로 평가가 이루어진 부분은 초기 안정화 기간을 제외한 12~37일기간이다. 실험은 ILOG사의 최적화 툴인 OPL Studio를 이용하여 펜티엄4 환경에서 진행하였다.

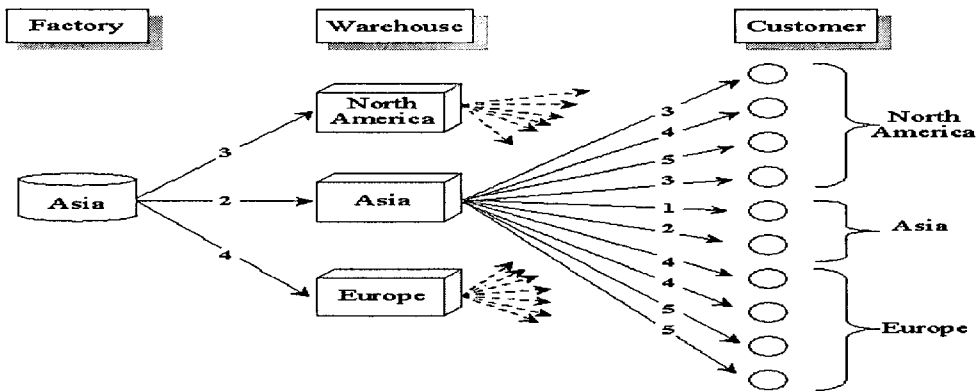
각 모델에 대한 평가는 <표 2>에 정리되어 있다. 생산 가용 범위 내에서 산출량을 최대화 하는 Prod-Push모델의 생산량이 수요량을 초과하는 것은 쉽게 짐작할 수 있다. 수요를 초과하는 생산은 손실로 가정하여, 생산한 날 배송되지 않은 물량은 재고로 가져가지 않았다. Prod-Balance나 Prod-Pull모델과 같이 고객 수요 정보가 반영된 생산 모델은 고객으로의 미판매량과 초과 공급량의 측면에서 효과적인 것으로 생각되어졌다.

Prod-Balance모델은 어느 정도의 초과 공급량을 발생시키면서 미판매량을 줄인 반면에, Prod-Pull모델은 어느 정도 미판매량을 발생시키면서 초과 공급량을 허용하지 않았다. Prod-Balance모델이 Prod-Pull모델보다 고객 수요 충족을 잘 맞춰주는 결과가 나온 것은 주목할 만한 일이다. 이것은 Quan-Prod모델을 이용한 목표 생산량의 계산이 실제적으로는 공급 사슬 네트워크의 복잡성과 제조 공정상의 reentrancy를 제대로 반영하지 못했기 때문으로 판단된다. Prod-Pull모델이 다른 모델에 비해 더 적은 생산을 하고 미판매량이 더 많은

결과도 특이할 만한 사항이다. 순수익은 고객 수요를 초과하지 않은 배송량에 대한 수익인 반면에, 총수익은 생산에 기초하여 계산된, 즉 배송하기 전 고객에게 할당된 양에 대한 수익을 말한다. 미판매량과 초과 공급량의 결과에서 Prod-Balance모델이 다른 모델들보다 순수익이 더 좋을 것이라는 것을 유추해 볼 수 있었고, 실험결과 또한 그렇게 나타났다.

[그림 3]은 6가지 정책 중 Push-Push와 Balance-Pull모델에 대한 결과 그래프를 보여준다. 3가지 생산 정책은 생산 패턴에서 차이를 보이는데, Prod-Push모델은 고객 수요량과는 독립적으로 생산이 이루어지고, Prod-Balance모델은 항상 일정한 양을 생산, Prod-Pull모델은 그 보다는 좀 더 편차를 가지면서 일정한 양을 생산하였다. 실험 결과를 분석해 보면 Prod-Pull모델은 Prod-Balance모델만큼 좋은 성능을 보여주지 못한다. Prod-Balance모델은 생산이 수요패턴을 따르지 않는 것처럼 보여도, 실제 배송량은 고객의 수요량을 잘 맞춰주고 있다. 이것은 고객의 수요 정보가 목표 재공에 반영된 Prod-Balance모델이 분배 정책에 의해서 고객 수요의 만족에 좀더 유연하게 대처할 수 있기 때문이라고 판단된다. 반면에 Prod-Pull모델은 역시 Quan-Prod모델을 통해 목표 생산량을 반영했지만, 공급 사슬 네트워크에서 특정 일, 특정 고객의 필요량을 정확히 결정하는 것은 좀 더 어려운 문제인 것으로 판단된다.

고객 만족율은 고객에게 적시에 배송되는 정도를 평가하기 위해 날짜와 bin 등급, 제품종류에 대해 $\text{Min}(1, \text{생산량}/\text{수요량}) = (\text{배송량}/\text{수요량})$ 과 같이 정의하였다.



[그림 2] 공급사슬 네트워크의 예시

고객 만족율에 대한 결과는 표 4에 나타나 있다. <표 3>을 분석해 보면, 생산 모델에서는 Prod-Balance모델이 가장 우수했고, 분배 모델에서는 Dist-Pull모델이 가장 우수했다. 그리고 각 생산 모델과 분배 모델을 조합한 정책들 중에서는 Balance-Pull모델이 고객 만족율을 100% 만족시키는 가장 우수한 모델인 것으로 나타났다. Prod-Pull모델과 Prod-Push모델의 비교에서는 평균 고객 만족율은 비슷했지만 Prod-Pull모델의 편차가 좀 더 적은 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

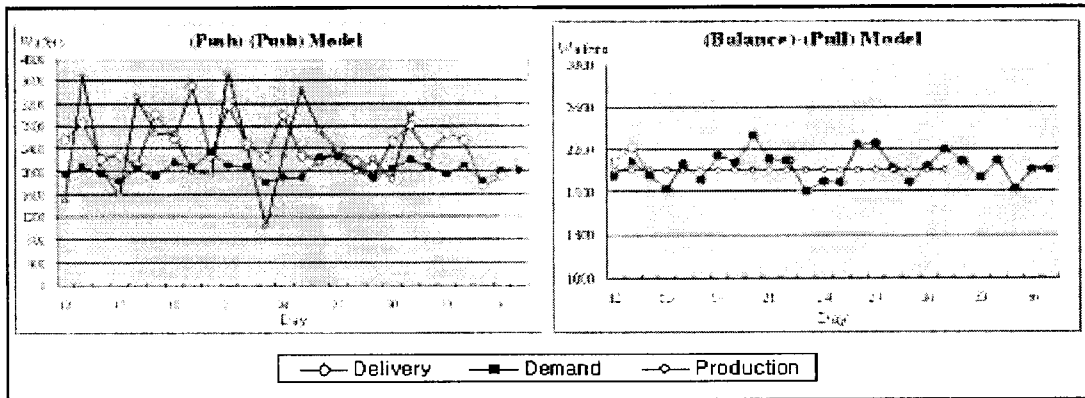
본 연구에서, 우리는 반도체 산업의 공급 사슬 모델에 대해 논의하였다. 반도체 제조 공정은 reentrancy공정, 확률적 binning 및 대체 등의 독특한 특징들을 가지고 있다. 제조

공정에 대해서는 지금껏 많은 연구가 있어왔다. 우리는 제조 공정에서부터 최종 고객에게 이르기까지의 총괄적인 공급사슬모델을 제시하였다. 본 모델에서는 주문 침투점으로 가정된 다이뱅크를 기준으로 Push, Balance, Pull 정책의 3가지 생산 모델과 Push, Pull 정책의 2가지 분배 모델을 정의하고, 이를 조합한 6가지 정책에 대해 실험을 설계, 구동하고 그 성능을 평가하였다.

본 모델은 차후에 여러 가지 방법으로 확장할 수 있다. 수율이나 배치 공정과 같은 제조 특성을 생산 모델에 포함 시킬 수 있고, 분배 모델에서는 재고 개념을 추가 시킬 수 있다. 현재 반도체 산업의 경쟁은 나날이 치열해지고 있고, 제품의 가격은 점점 떨어지고 있기 때문에 적절한 공급사슬 모델을 적용하여 효율성을 높이는 것이 경쟁력을 높이는 방안이라고 할 수 있을 것이다.

<표 2> 6가지 정책의 실험 결과

정 책	Push-Push	Push-Pull	Balance-Push	Balance-Pull	Pull-Push	Pull-Pull
미판매량	270	99	591	0	2104	1312
초과 공급량	11,228	10,549	37	267	0	0
생산량	71,680	71,680	55,997	55,997	53,599	53,599
총수익	1,483,392	1,466,450	1,229,585	1,246,255	1,193,036	1,203,293
순수익	1,201,345	1,200,719	1,228,625	1,240,435	1,193,036	1,202,836



[그림 3] 정책결과 그래프의 예시

<표 3> 고객의 수요 만족율

정 책	Push-Push	Push-Pull	Balance-Push	Balance-Pull	Pull-Push	Pull-Pull
Average	0.968	0.969	0.988	1.000	0.959	0.979
S.D	0.093	0.087	0.031	0.000	0.064	0.066
Min	0.649	0.676	0.891	1.000	0.774	0.747
Max	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

참고 문헌

- [1] BOUFF, J.L., "Semiconductor manufacturing: A supply chain management perspective", *Conference on Global Supply Chain Management*, Singapore(1997).
- [2] GLASSEY, C.R., AND M.G.C. RESENDE, "Closed-loop job release control for VSLI circuit manufacturing", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1, 1(1988a), pp.36-46.
- [3] GLASSEY, C.R., AND M.G.C. RESENDE, "A scheduling rule for job release in semiconductor fabrication", *Operations Research Letters*, 7(1988b), pp.213-217.
- [4] JAIN, S., B. GAN, C. LIM, AND Y. LOW, "Criticality of detailed modeling in semiconductor supply chain simulation", *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*(1999), pp.888-896.
- [5] JAIN, S., B. GAN, C. LIM, AND Y. LOW, "Bottleneck based modeling of semiconductor supply chains", *Proceedings of the MASM Conference*(2000), pp.340-345.
- [6] LEE, Y.H., "Supply chain model for the semiconductor industry of global market", *Journal of Systems Integration*, 10(2001), pp.189-206.
- [7] LEE, Y.H., AND B.J. LEE, "Push-pull production planning of the reentrant process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, In press(2003).
- [8] LEE, Y.H., AND T.H. KIM, "Manufacturing cycle time reduction using balance control in the semiconductor fabrication line", *Production and Planning Control*, 13, 6(2002), pp.529-540.
- [9] LEE, Y.H., J.K. PARK, AND S.Y. KIM, "Experimental study on input and bottleneck scheduling for a semiconductor fabrication line", *IIE Transactions*, 34(2002), pp.179-190.
- [10] LIU, C., "A modular production planning system for semiconductor manufacturing", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1992.
- [11] MURTY, S.V., AND J.W. BIENVENU, "Global planning at Harris Semiconductor", *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing* (1995).
- [12] OVACIK, I.M., AND W. WENG, "A framework for supply chain management in semiconductor manufacturing industry", *IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*(1995).
- [13] SPEARMAN, M.L., D.L. WOODRUFF AND W.J. HOPP, "CONWIP: a pull alternative to kanban," *International Journal of Production Research*, 28, 5(1990), pp.879-894.
- [14] WEIN, L.M., "Scheduling semiconductor wafer fabrication", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1, 3(1988), pp.115-129.