

반도체 산업의 특성을 고려한 공급사슬 모형에 대한 생산 및 분배정책의 비교

정성욱* · 이병진* · 이영훈*

Comparison of Production and Distribution Policy in the Supply Chain Model Considering Characteristics of the Semiconductor Industry

Sung Uk Chung* · Byung Jin Lee* · Young Hoon Lee*

■ Abstract ■

Semiconductor industry is the one whose supply chain network is distributed all over the world. And it has different characteristics with other manufacturing industries as reentrancy, binning, substitution. In this paper, we suggest supply chain models for the semiconductor industry, consisting of production and distribution chains, where manufacturing characteristics are considered. Three policies for the production chain and two policies for the distribution chain are suggested and formulated mathematically. Six combination policies are tested for the evaluation of performances with example. It is shown that the supply chain is operated, if production and distribution are coordinated and managed based on the demand information, without inventory, as efficiently as the chain with inventory.

Keyword : Supply Chain Management, Semiconductor Industry, Push, Balance, Pull Model

1. 서 론

반도체 산업은 고도의 첨단 기술이 집약되어 있

을 뿐만 아니라, 전반적인 공급 사슬망이 글로벌하
게 형성되어 있는 산업이다. 일반적인 반도체 산업
의 공급 사슬망을 살펴 보면, 자재 공급자, 제조 사

이트, 창고나 대리점, 최종 소비자로 구성되어 있고, 제조 사이트는 Fabrication, Probe, 조립, 최종 검사 및 포장 공정으로 각각 나뉘어 지는데, 일반적으로 조립 이전 공정과 이후 공정은 서로 다른 사이트에서 작업이 이루어진다. 또한, 반도체 생산 공정에서는 Reentrancy나 Binning, 대체(Substitution) 등의 독특한 복잡성을 지니고 있고, 제품의 라이프 사이클은 짧아데 반해 제품의 제조 공기는 상대적으로 길기 때문에, 적정 시점에 적정량의 제품을 출시하려면 기존의 제조산업과는 다른 좀더 차별화되고 효과적인 공급망 관리가 필요하다.

반도체 산업의 연구는 대부분 생산 계획 및 스케줄링, 특히 Fab공정에 대해 집중되어 왔다. 그러한 연구들은 제품의 산출량이나 병목공정 설비의 가동율을 높이거나 설비에 투입되는 재공의 양을 적절히 조정하는데 그 목적이 있다. 병목 공정에 대한 연구를 살펴보면 Wein[21]은 평균생산주기를 단축하기 위한 작업부하 통제투입(Workload Regulating Input) 규칙을 제시하였고, Glassey and Resende[4, 5]는 병목설비의 이용을 극대화하는 설비유휴 회피투입(Starvation Avoidance Input) 규칙을 제시하였다. Lou and Kager[15]는 가상 워크스테이션 개념을 사용하여 reentrancy 공정을 직렬 공정 라인으로 전환한 흐름 제어 법칙을 제안하였고 Spearman et al.[20]은 CONWIP 방법의 제안을 통해서 재공과 산출량을 효과적으로 관리할 수 있도록 하였다. Pierce and Yurtsever[19]은 동적분배 규칙에 대한 연구를 하였고 Morrison et al.[16]에 의해 실제 Fab공정에서 여러 가지 스케줄링 정책에 대한 실험이 이루어졌다. Kim et al.[8]은 납기일을 가진 생산품에 대한 스케줄링 정책을 제안하였다. Lee et al.[12, 13]는 병목 공정과 투입량에 대한 효과적인 분배 법칙을 제시했고, 산출량, 설비 가동율, 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 Fab공정 등 특정 분야에

대해서만 이루어졌다. Ovacik and Weng[18]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. Harris 반도체 사례[17]에서는 반도체 제조 공정에서 전반부(front-end)와 후반부(back-end)를 통합, 관리하여 고객에 대한 납기 만족도 향상을 이루어냈다. Bouff[2]는 고객의 주문, 응답성, 납기 만족과 같은 반도체 산업에서 해결해야 할 3가지 기초 프로세스를 정의했다. Lee[9]은 반도체 공급사슬을 주문 침투점을 기준으로 Push와 Pull 둘 모델로 나뉘서 통합 작업을 한 반도체 공급사슬 모델의 구조를 제시하였다.

Jain et al.[6, 7]은 반도체 공급사슬모델을 설계하는데 있어서 병목공정 위주로 정의할 수 있음을 주장하고 단순화 모델과 대부분의 공정을 반영한 상세모델의 성능을 비교하여 큰 차이가 없음을 보여주었다. Ahmadi et al.[1]은 공급 사슬에서의 중요한 기능 중 하나인 주문 관리 시스템을 연계한 생산 계획 시스템을 정의하였다. Christie and Wu[3]는 capacity planning을 통해 반도체 제조공정에 대한 여러 시나리오에 대해 테스트 하였다. Lee and Lee[11]는 반도체 Fab 공정과 유사한 제조 특성을 지닌 TFT-LCD공정에 대해 3가지 정책을 사용하여 성능 평가를 하였다.

Lee et al.[10]은 전반적인 반도체 공급 사슬 모델을 생산 모델과 분배 모델로 나눈 다음, 각각에 대해 반도체 산업의 제조 특성을 반영하여 Push, Balance, Pull 등의 최적화 모델을 정의하였고, 예제를 통해 그 성능을 비교, 평가하였다. 기존의 특정 영역의 최적화에 치중되었던 연구들에 비해, 위의 연구는 생산에서부터 분배에 이르기까지 전반적인 반도체 공급사슬을 최적화 모델로 구축하여, 현실성 있는 데이터를 생성하여 예제를 실험해 보았다는 데에 그 의의를 찾을 수 있다. 본 연구에서는 Lee et al.[10]에서 정의한 모델을 확장하여 실험, 기존 모델과 비교를 목적으로 한다. 기존의 Lee et al.[10]에서의 분배 모델은 재고를 허용하지 않고, 공장에

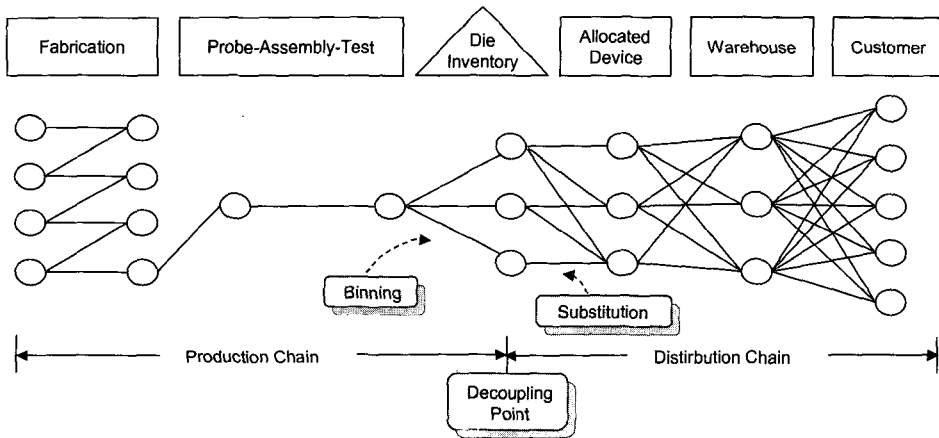
서 전달된 제품을 바로 고객에게 배송해 주는 직송 체제 방식을 가정하였다. 하지만, 대부분의 제조업에서는 직송 체제 보다는 재고 운영 체제를 고수하고 있기 때문에 본 연구에서 분배 모델에서의 재고 운영 체제를 가정하고, 기존의 Lee et al.[10]에서의 모델과 실험을 통해 비교, 분석하고자 한다.

2. 반도체 산업의 공급사슬 모델

2.1 반도체 산업의 특징

반도체 제조공정과 다른 제조산업의 공정들과의 차이점은 Reentrancy, Binning, 대체의 특징을 가지고 있다는 점이다. Reentrancy는 WIP(Work In Process)의 흐름이 순차적으로 진행되는 것이 아니라

20~30개씩으로 구성되어 있는 레이어 공정을 반복하며 진행되는 과정이다. 이 과정에서 특정 장비들은 서로 다른 레이어나 디바이스 공정에서 경쟁적으로 공유되고 있기 때문에 각 장비별로 해당 WIP의 투입 시점을 결정하는 것이 중요하다. Binning 특성은 생산된 웨이퍼를 전기적인 특성에 따라 서로 다른 등급의 품질로 나누는 것으로 웨이퍼 당 binning은 확실적인 비율로 발생하게 되고[14], 등급에 따라 서로 다른 가격으로 고객에게 팔리게 된다. 이 때 고객의 수요나 이익 증대를 위해 상위 등급의 제품을 낮은 등급 제품의 가격을 받고 팔기도 하는데 이를 대체라고 부른다. Reentrancy나 Binning, 대체 등의 특징은 웨이퍼의 흐름이나 매출에 영향을 주는 요인이기 때문에 공급사슬모형에 포함되어야 한다.



[그림 1] 반도체 공급사슬 모델의 구조

[그림 1]은 반도체 공급사슬 모델의 구조를 보여준다. [그림 1]에서는 주문침투점(Decoupling Point) [2]을 기준으로 전체 공급 사슬을 두 부분으로 나누었다. 주문침투점은 대체로 EDS(Electric Die Sort) 또는 Probe가 끝나서 웨이퍼가 절단되어 다이가 되고 재공 형태로 쌓여있게 되는 다이뱅크 부분을 말한다[9]. 실제 생산 현장에서도 주문침투점을 기준으로 칩 생산과 조립 이후 공정을 분리하여 운영하고 있다. 따라서, 전반부의 생산 모델은 reentrancy

공정이 고려된 주문침투점까지고, 후반부의 분배 모델은 주문침투점 이후 분배와 할당의 특성이 고려된 조립 공정에서부터 최종 소비자까지라고 정의할 수 있다.

2.2 생산 모델

생산 모델은 Lee et al.[10]에서 정의되었던 생산 모델에서의 Push, Balance, Pull의 3가지 정책이 고

려되었다. Push 정책은 생산량 최대화에, Pull 정책은 고객의 수요충족에 중점을 맞춘 것이며, 이러한 2가지 정책을 혼용한 것이 Balance 정책이다. 생산 모델에서의 Push(Prod-Push) 정책(Appendix A 참조)의 목적함수는 모든 관리 포인트에서 생산된 웨이퍼의 가중 합을 최대화하는 것이다. 가중치는 생산품의 중요도의 정도나 판매가격에 의해서 결정되고 목적식은 재공의 물동량, 장비의 생산 용량, 작업가용 시간 등의 제약을 받는다. 생산 모델에서의 Balance(Prod-Balance) 정책(Appendix A 참조)은 생산 공정에서 reentrancy 과정으로 인해 발생할 수 있는 생산량의 변동을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. Fab 공정에서 Push 정책은 특정 레이어에서 재공의 적체현상을 유발할 수 있고, 이는 향후에 전반적인 생산량이나 설비 가동율의 감소를 가져온다. Balance 라인은 각 공정별로 적정 재공을 설정하여 레이어에 공급을 하게 되어 각 설비별로 재공 부족이 없이 높은 가동률을 달성하게 한다. Prod-Balance 정책에서 목적함수는 목표 재공과 할당 후 남아 있는 재공의 차를 각 공정별로 더하여 그 합을 최소화 하는 것이다. 목표 재공은 여러 가지 방법으로 결정될 수 있는데 그 중 하나가 WIP movement variance method이다[8]. Prod-Balance 정책에서는 목표 재공, 최소 목표 생산량 등이 제약으로 포함된다. Prod-Balance 모델이 라인의 균형을 추구하지만 생산 목표에 대해서는 능동적으로 대처하기 힘들다. 따라서 생산 목표를 반영할 수 있는 Prod-Pull 모델(Appendix A 참조)을 정의하기로 한다. 각 기간별 모든 공정의 목표 생산량을 결정하는 것이 Prod-Pull 모델의 목적이므로 Prod-Balance 모델에서의 목표 재공 대신에 목표 생산량을 설정하여 모델을 구현하였다.

하지만, 생산 모델에서 Prod-Balance나 Prod-Pull 모델이 구동되기 위해서는 같은 경우에는 각 날짜별로 고객의 주문량 정보가 있어야 한다. 주문량 정보를 통해 산출된 적정 시점에서의 목표 생산량과 목표 재공은 Prod-Balance 모델과 Prod-Pull 모델에서 입력값으로 사용된다[12, 13]. 따라서, 생산모델 구

동을 위한 주문량 정보 산출을 위해 생산량 예측 모델(Forecast Prod)(Appendix C 참조)이 필요하다. 이 모델의 기본 formulation은 분배 모델에서의 Dist-Pull 모델과 동일하다. 차이점은 분배 모델에서는 생산량이 입력값으로 주어지는 반면, 생산량 예측 모델은 고객의 수요를 100% 만족시킬 수 있는 최적의 생산량을 찾아내도록 생산량이 변수값으로 주어진다. 위에서 설명한 바와 같이 그렇게 산출된 최적 생산량은 생산 모델에서의 목표 재공량과 목표 생산량 값으로 변환되어 사용되어지게 된다.

2.3 분배 모델

분배 모델에서의 주된 목표는 최종제품을 고객에게 배송하는데 있어서 요구되는 수요 제품을 원하는 납기에 운송하여 주는 것이다. 고객의 만족을 위하여 상위 등급의 제품을 하위 등급의 제품수요로 채워 줄 수도 있다. 분배 모델은 크게 2가지의 정책으로 분류한다. 첫째는 전체 매출액을 최대화하는 것으로 생산된 제품을 고객의 수요 범위 안에서 요구하는 제품의 등급 또는 그 이상의 상위 등급을 공급한다. 이 때 상위 등급으로 공급한다 하여도 고객이 요구한 제품의 등급 가격에 해당하는 매출로 간주된다. 이를 공급자의 관점에서 운영하는 Push 정책으로 볼 수 있다. 둘째, 고객의 요구하는 제품의 등급 또는 그 이상의 상위 등급을 공급할 수 있을 때 이를 고객의 수요를 만족하였다고 보고 고객의 수요에 대응하지 못한 수요의 총량을 최소화하는 목표로 운영되는 정책을 Pull 정책으로 분류한다. 이는 고객의 수요에 대해 최대한 만족시키는 정책이기 때문이다. 본 논문의 모델에서는 수익보다는 매출의 관점에서 해를 구하고 있는데 순수한 수익을 계산하기 위해서는 이에 관련된 많은 정보가 필요한데 예를 들면 수송비용, 재고비용, 또한 생산에 관련된 설비나 인력 비용 등으로 문제의 복잡성이 급증하게 된다. 또한 반도체의 시장의 수익성은 대체적으로 매출액에 비례하여 수익성이 탈생하고

있다. 특히 반도체 제품 단위당 재고비용이나 수송 비용은 무시할 수 있는 수준이어서 공급사슬모형에서는 생략하였다.

Lee et al.[10]의 분배 모델에서는 Push(Dist-Push) 정책과 Pull(Dist-Pull) 정책을 제시하였다(Appendix B 참조). 여기서의 분배 모델은 재고를 운영하지 않는 직송 체제이다. 본 연구에서는 Lee et al.[10]의 분배 모델에서 재고 개념을 포함한 분배 모델을 제안한다. 본 연구에서 제시한 분배 모델은 Dist-Push-Inven 모델과 Dist-Pull-Inven 모델로 세분화된다.

• 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 배송 시간
 - $X(i, t)$: 기간 t 에서 최종 생산완료 단계에서의 생산량
 - $C(i, b, c, t)$: 기간 t 에서 고객 c 의 bin 등급 b 를 가진 i 제품에 대한 가격
 - $d(i, b, c, t)$: 기간 t 에서 고객 c 의 bin 등급 b 를 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
 - $FWH(i, b, pb, t)$: 기간 t 에서 공장에서 bin 등급 pb 로 생산되어 bin 등급 b 의 가격으로 팔리기 위한 i 제품의 재고량
 - $WH(i, b, w, t)$: 기간 t 에서 물류창고 w 에서 bin 등급 b 의 가격으로 팔리기 위한 i 제품의 재고량
- 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 b 의 가격으로 팔리는 i 제품의 배송량

• Dist-Push-Inven 모델

$$\begin{aligned} \text{Max } & \sum_{i, b, c, t} \{C(i, b, c, t) \times \\ & \sum_w Z(i, b, c, w, t - r(w) - p(w, c))\} \\ \text{s. t. } & X(i, t) \times g(i, pb) + \sum_{b \geq pb} FWH(i, b, pb, t - 1) \\ & = \sum_{b \geq pb, c, w} Y(i, b, pb, c, w, t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{b \geq pb} FWH(i, b, pb, t) \quad \forall i, t \\ & WH(i, b, w, t) = WH(i, b, w, t - 1) \\ & + \sum_{pb, c} Y(i, b, pb, c, w, t - r(w)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & - \sum_c Z(i, b, c, w, t) \quad \forall i, b, w, t \\ & \sum_{i, b} WH(i, b, w, t) \\ & + \sum_{i, b, pb, c} Y(i, b, pb, c, w, t - r(w)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \leq CAP(w) \quad \forall w, t \\ & \sum_w Z(i, b, c, w, t - p(w, c)) \\ & \leq d(i, b, c, t) \quad \forall i, b, c, t \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & Y(i, b, pb, c, w, t) \geq 0, WH(w, t) \geq 0 \\ & \forall i, b, pb, c, w, t \end{aligned} \quad (5)$$

Dist-Push-Inven 모델은 Dist-Push 모델에서 재고를 포함시킨 경우에 대한 것으로, 공장과 각 물류창고가 재고를 가진다고 가정하였고, 목적함수는 고객으로의 배송을 통한 매출을 최대화하는 것이다. 제약식 (1)은 생산량을 고객에게 할당시키고 나머지를 공장에서 재고로 가져가는 것으로 높은 bin 등급을 가진 제품이 낮은 bin 등급의 가격으로 팔릴 수 있는 대체 특성을 포함하고 있다. 식 (2)는 물류창고에서 물동량의 흐름을 나타내는 제약식으로 각 날짜별로 재고량은 전 시점에서의 재고량에서 공장에서 배송된 물량과 고객에게 배송되는 물량의 차를 더해줘서 결정된다. 식 (3)은 물류창고에의 최대 용량을 나타내는 제약식으로 각 날짜별로 재고량과 공장에서 배송되어진 물량의 합은 설정된 최대 용량을 초과할 수 없다. 여기서 결정 변수 Y 는 입력값인 공장에서의 생산량을 고객에게 할당을 시

켜주는 것이고, Z는 할당된 Y 값 중에서 고객의 수요량을 초과하는 양을 제외한 나머지 물량을 지칭하는 값이다. 식 (4)는 고객에게 배송되는 양이 수요를 초과하지 않는다는 것이며, 제약식 (5)는 비음 조건이다.

Dist-Pull-Inven정책의 목적함수는 배송량과 수요의 차의 합을 최소화 시키는 것이고 제약식은 Dist-Push-Inven정책과 동일하다.

• Dist-Pull-Inven 모델

$$\begin{aligned}
 &Max \sum_{i,b,c,t} \{d(i,b,c,t) - \\
 &\quad \sum_w Z(i,b,c,w,t-r(w)-p(w,c))\} \\
 \text{s.t. } &X(i,t) \times g(i,pb) + \sum_{b \geq pb} FWH(i,b,pb,t-1) \\
 &= \sum_{b \geq pb,c,w} Y(i,b,pb,c,w,t) \\
 &+ \sum_{b \geq pb} FWH(i,b,pb,t) \quad \forall i,t \\
 &WH(i,b,w,t) = WH(i,b,w,t-1) \\
 &+ \sum_{pb,c} Y(i,b,pb,c,w,t-r(w)) \\
 &- \sum_c Z(i,b,c,w,t) \quad \forall i,b,w,t \\
 &\sum_{i,b} WH(i,b,w,t) \\
 &+ \sum_{i,b,pb,c} Y(i,b,pb,c,w,t-r(w)) \\
 &\leq CAP(w) \quad \forall w,t \\
 &\sum_w Z(i,b,c,w,t-p(w,c)) \\
 &\leq d(i,b,c,t) \quad \forall i,b,c,t \\
 &Y(i,b,pb,c,w,t) \geq 0, WH(w,t) \geq 0 \\
 &\quad \forall i,b,pb,c,w,t
 \end{aligned}$$

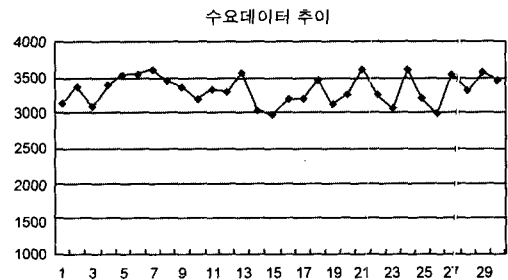
3. 실험 및 결과

3.1 실험 모델 구성

실험은 위에서 제시한 6가지 정책의 조합에 대해 진행하였다. 실험 데이터는 반도체 산업의 특징을 반영할 수 있는 범위에서 무작위로 생성하였다. 제조 공정에서 레이어는 20개로, 사진 공정 작업이 진행되는 스테퍼 설비는 60대로 설정하였다. 한 웨이퍼의 작업 시간은 1.0~2.5분 사이에서 무작위로 생

성시켰고 특정 레이어는 특정 스테퍼에서만 작업이 가능하다고 가정하였다. 스테퍼 장비의 하루 가용 시간은 셋업이나 유희시간을 고려하여 1,440분의 90%인 1,296분으로 잡았고, 스테퍼 60대, 레이어 20개이므로 각 레이어별 이론적인 평균 웨이퍼 산출량은 대략(1,440 × 0.9 × 60)/(20 × 1.7) ≃ 2,287개가 된다. 따라서 하루에 5종류의 웨이퍼를 대략 2300개씩 생산한다고 가정하였다. 사이클 타임은 1.5~2.0일 사이에서 무작위로 발생시켰다. 최종 생산품은 하나의 웨이퍼를 수 백개로 나눈 칩이지만 본 모델에서는 편의상 웨이퍼를 생산품으로 설정하고 웨이퍼의 bin등급은 3등급으로 나누었다.

공급 사슬 네트워크는 아시아에 제조 공장이 위치해 있고, 북미, 아시아, 유럽에 각각 하나씩 총 3개의 물류창고가, 그리고 북미에 4명, 아시아에 2명, 유럽에 4명으로 총 10명의 고객이 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 무작위로 설정하였다. 고객의 수요는 하루에 3300개씩 10%의 편차를 가지도록 무작위로 발생시켰다. [그림 2]는 생성시킨 수요데이터의 30일간의 추이를 나타낸 것이다.



[그림 2] 수요데이터 추이(30일)

제품별 가중치는 모두 1로 가정하였다. Prod-Balance 모델에서 필요한 목표 재공 데이터는 Lee et al.[13], Prod-Pull 모델에서 필요한 목표 생산량 데이터는 Lee and Lee[11]의 논문에서와 같은 방법으로 계산하였다. 첫 번째 시작일에서의 초기 재공

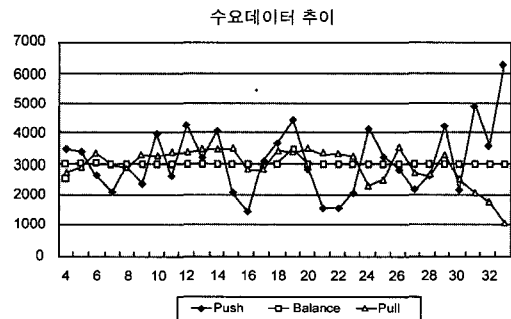
은 목표 재공과 동일하게 하였다. 고객 수요 데이터는 11~37일까지, 생산은 4~33일까지로 설정하였다. 수요와 생산의 기간이 다른 이유는 제품의 배송 기간을 고려하였기 때문이다. 즉, 11일째의 수요를 만족시키기 위해서는 공급사슬 네트워크 상의 배송 기간을 고려하면 최소 배송기간이 3일이라고 하면, 적어도 8일째에는 생산이 이루어져야 한다. 하지만 실제적으로 모델 평가가 이루어진 부분은 초기 안정화 기간을 제외한 12~36일간이다. 실험은 ILOG사의 최적화 툴인 OPL Studio를 이용하여 펜티엄 IV 환경에서 진행하였다.

3.2 실험 결과

본 모델은 선형계획법에 의해 최적화한 모형으로 현실적인 시간(10분 이내)에 해를 구할 수 있었다. 이 과정에서 반도체 제품의 수를 실수로 가정하여 정수계획법으로 모형화 할 수 있었다. 반도체의 경우 제품의 단위는 웨이퍼로서 웨이퍼 한 장당 생산되는 반도체 칩의 수는 100~700개 수준으로 본 모형의 해가 실수가 나와도 이를 칩의 수로 환산하면 크게 문제가 되지 않는다. 먼저 생산 모델에서의 생산량을 살펴보면 각 모델별 특징이 잘 나타나 있다 [그림 3]. Prod-Push 모델의 경우 생산 편차가 매

우 크고, Prod-Balance 모델은 매일 3000의 일정한 생산량을 가지고 있음을 알 수 있다. Prod-Pull 모델은 적당한 편차를 가지면서 생산이 이루어지고 있는데 위의 [그림 2] 수요데이터 추이의 편차와 거의 비슷한 모양으로 목표 생산량에 맞춰서 생산이 되고 있음을 알 수 있다.

생산과 분배 모델을 조합한 모델에 대한 평가는 <표 1>과 <표 2>에 정리되어 있다. 수요와 생산량의 관계를 분석해 보면 일단 Prod-Push, Prod-Balance 모델 순으로 총 수요를 초과하여 생산하고 있는 것을 알 수 있다. Prod-Pull 모델의 경우에는 총 수요에 대해 조금 부족한 양을 생산하였다. 하지만 매출액을 계산해 보면 생산된 절대량과는 다른 결



[그림 3] 각 모델별 생산량

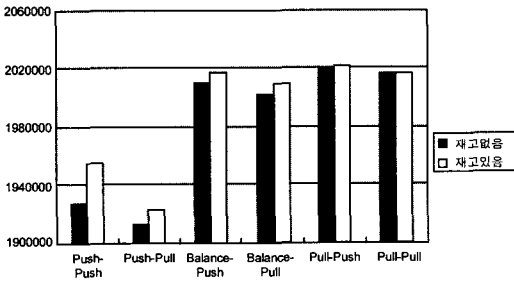
<표 1> 6가지 정책의 실험 결과 - 직송 체제

정책	Push-Push	Push-Pull	Balance-Push	Balance-Pull	Pull-Push	Pull-Pull
총생산량	93,688	93,688	90,461	90,461	88,780	88,780
수요	89,419	89,419	89,419	89,419	89,419	89,419
매출액	1,926,752	1,912,036	2,009,238	2,002,096	2,019,559	2,015,790
미도착량	4,927	4,981	1,157	1,171	682	679

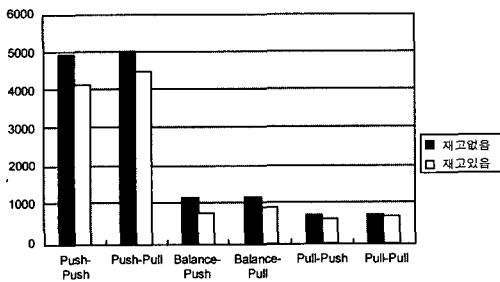
<표 2> 6가지 정책의 실험 결과 - 재고 운영 체제

정책	Push-Push	Push-Pull	Balance-Push	Balance-Pull	Pull-Push	Pull-Pull
총생산량	93,688	93,688	90,461	90,461	88,780	88,780
수요	89,419	89,419	89,419	89,419	89,419	89,419
매출액	1,954,873	1,922,810	2,017,302	2,009,424	2,021,074	2,016,630
미도착량	4,114	4,460	753	889	597	651

과가 나왔다. Prod-Pull 방식과 조합된 Pull-Push 모델의 매출액이 가장 높게 나왔고, Pull-Pull 모델이 그 뒤를 이었고 오히려 가장 많은 생산을 했던 Prod-Push 방식의 모델의 매출액이 가장 적었다. 이는 생산의 편차가 너무 커서 고객의 수요를 제대로 맞춰줄 수 없었기 때문이라고 판단된다. 미도착량의 경우에는 Pull-Pull 모델이 가장 좋은 결과를 나타냈고, Pull-Push 모델도 거의 비슷한 결과가 나왔다. 전반적으로 Pull-Push 모델과 Pull-Pull 모델이 가장 성능이 좋은 것으로 판단된다.



[그림 4] 모델별 매출액 비교



[그림 5] 모델별 미도착량 비교

재고가 있는 모델에서는 물류창고의 재고가 생산 편차에 대한 Buffer 역할을 할 것으로 생각되기 때문에 재고가 없는 모델과는 다른 결과가 예상되었다. 하지만, 재고가 없는 모델에서와 큰 차이가 없었다. 매출액 측면에서는 Pull-Push 모델이 가장 좋은 결과를 보였고, Balance-Push 모델이 두 번째로 좋은 결과를 보였지만 Pull-Pull 모델과 큰 차이는 없었다. 전반적으로 재고가 추가되면서 조금씩 성능이 향상되긴 하였지만 주목할 만큼의 차이는

아니었다. 특히 생산량이 많은 Prod-Push 모델의 성능 향상을 기대했지만, 큰 차이는 없었다. [그림 4], [그림 5]는 재고 있는 모델과 없는 모델의 매출액과 미도착량 결과를 비교한 그래프이다.

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. 여기서 고객 만족율은 아무리 생산을 수요량보다 많이 하더라도 1보다 클 수는 없도록 정의하였다. 고객 만족율에 대한 결과는 <표 3>에 나타나 있다. 표를 분석해 보면, 생산 모델에서의 최적은 Prod-Pull 모델이고, 분배 모델에서의 최적은 Dist-Pull 모델, 그리고 두 모델을 조합한 Pull-Pull 모델이 고객 만족율을 가장 잘 만족시키는 최적 모델인 것으로 나타났다. 하지만 Prod-Balance 모델의 경우 Prod-Pull 모델과 큰 차이가 없었고, 재고가 있을 경우 그 편차는 더욱 줄어들었다.

본 연구에서 제시한 재고 운영 체제 분배 모델과 기존의 직송 체제 분배 모델에 대한 비교는 다음과 같다. 매출액이나 고객 만족율 부분에서 비교할 해 보면, 재고 운영 체제 분배 모델이 기존의 직송 체제 분배 모델보다 더 좋은 결과를 나타내었다. [그림 4], [그림 5]의 결과 그래프를 분석해 보면 Push 방식으로 생산된 모델(Prod-Push, Prod-Pull)과의 조합에서 재고 운영 체제 분배 모델의 효과가 더 좋게 나타났다. 하지만, 증가비율로 비교해 보면 재고 운영 체제를 통한 증가 비율은 1% 안팎인 것으로 나타나 실질적인 재고의 효과는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 사실은 실제 제조 현장에서 재고를 통해서 매출액이나 고객 만족율을 향상시키는 것과는 사뭇 다른 결과이다. 본 연구에서는 최적화 모델을 구축, 실험하였기 때문에 전체 공급 사슬 모델에서 최적화 경로를 찾아 배송이 이루어진 실험 결과가 산출되어진다. 따라서, 실험에서 재고의 효과가 미비하게 나타난 것은, 이미 최적화된 공급 사슬의 배송 경로를 찾았기 때문에 굳이 Buffer로써 재고를 가지지 않아도 되는 상태가 되었기 때문이라고 판단된다.

〈표 3〉 고객의 수요 만족율

	직송 체제				재고 운영 체제			
	평균	표준편차	최소값	최대값	평균	표준편차	최소값	최대값
Push-Push	0.940	0.119	0.564	1.000	0.951	0.058	0.841	1.000
Push-Pull	0.943	0.141	0.509	1.000	0.952	0.133	0.551	1.000
Balance-Push	0.986	0.036	0.886	1.000	0.991	0.030	0.890	1.000
Balance-Pull	0.988	0.047	0.795	1.000	0.991	0.033	0.863	1.000
Pull-Push	0.992	0.024	0.910	1.000	0.993	0.023	0.911	1.000
Pull-Pull	0.993	0.030	0.856	1.000	0.993	0.027	0.876	1.000

4. 결론 및 토의

본 연구에서는, Lee et al.[10]에서 논의 되었던 반도체 산업의 공급 사슬 모델과 여기에서 재고 개념을 추가한 재고 운영 체제 모델을 비교, 분석해 보았다. 먼저, 실험을 통해서 알아본 각 모델들의 특징을 간략하게 분석하면 다음과 같다. Prod-Push 모델은 생산량에 있어서 그 생산 편차가 매우 크기 때문에 생산은 가장 많이 되고 있지만 고객의 수요를 적절하게 충족시켜주지는 못하고 있다. 또한, 생산량이 예측이 불가능하다는 점이 Prod-Push 모델의 약점이라고 말할 수 있다. Prod-Pull 모델의 경우에는 생산할 때부터 고객의 수요량을 예측, 반영하여 생산이 이루어지기 때문에 생산량은 다른 모델에 비해 적지만 매출액이나 고객 만족율에 대한 결과가 가장 좋았다. 하지만 이 모델의 경우 고객의 수요를 정확하게 예측되어야만 좋은 결과를 기대할 수 있다는 단점이 있고, 또한 실제적으로도 고객의 수요는 시시각각으로 변화하기 때문에 실제 현장에서의 모델 구현이 쉽지 않다. Prod-Balance 모델은 생산 라인에서 항상 적정 재공을 유지하면서 일정한 양을 생산하는 모델로써 매출액이나 고객 만족율에 대한 결과는 Prod-Pull 모델에 비해서 조금 떨어지지만 큰 차이는 없고, 무엇보다 모델 구현이 간단하고 생산량에 대한 예측이 가능하기 때문에 실제 현장에서의 관리가 쉽다는 장점이 있다. 생산에 있어서 가장 이상적인 모델은 Prod-Pull 모델이 되겠지만 고객에 대한 수요예측이 어렵다는 점에서

실제적으로 가장 좋은 대안은 Prod-Balance 모델이라고 말할 수 있다.

분배 모델에서의 결과를 보면, Dist-Push 모델은 매출액에서 더 좋은 결과를 보여주고 Dist-Pull 모델은 고객 만족율에서 더 좋은 결과를 보여주고 있지만 그 차이는 그렇게 크지 않다. 모델의 목적함수 때문인 것을 판단되는데 Dist-Push는 매출을 최대화시키고 Dist-Pull은 고객의 만족율을 최대화시키는 모델이다. 하지만 궁극적으로 본다면 매출이 최대화 되는 시점은 바로 고객의 수요를 100% 만족시킬 때 달성될 수 있기 때문에 두 모델의 결과가 거의 비슷하게 나타난다고 볼 수 있다.

본 연구에서 제시한 재고 운영 체제 분배 모델과 기존의 직송 체제 분배 모델과의 비교에서, 우리는 최적화 모델을 통해 최적의 공급사슬 네트워크 경로를 찾아낸다면, 실제 현장에서와 달리 재고의 역할이 크게 줄어든다는 것을 알 수 있었다. 즉, 정확한 수요 예측을 기반으로 공급사슬 네트워크를 최적화 시키면, 궁극적으로 재고가 필요 없는 공급사슬 네트워크를 구성할 수 있다는 것을 실험을 통해서 증명하였다고 할 수 있다. 모델에서 재고비용을 포함하지 않은 것은 모델의 복잡성 때문으로 재고비용을 추가한 모델이 본 연구의 확장이라 할 수 있겠다.

현재 반도체 산업의 경쟁은 날이 치열해 지고 있고, 제품의 가격은 점점 떨어지고 있기 때문에 적절한 공급사슬 모델을 적용하여 효율성을 높이는 것이 경쟁력을 높이는 방안이라고 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Ahmadi, J., R. Benson and D. Supernaw-Issen, "Supply chain production planning," *Operational Research in Industry*, Edited by T.A. Ciriani, S. Gliozzi, E.L. Johnson, and R. Tadei, Macmillan Press(1999), pp.199-232.
- [2] Bouff, J.L., "Semiconductor manufacturing : A supply chain management perspective," *Conference on Global Supply Chain Management*, Singapore, 1997.
- [3] Christie, R.M. and D. WU, "Semiconductor capacity planning : stochastic modeling and computational studies," *IIE Transactions*, 34(2002), pp.131-143.
- [4] Glassey, C.R. and M.G.C. Resende, "Closed-loop job release control for VLSI circuit manufacturing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.1, No.1(1988a), pp.36-46.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kim, S., S. Yea and B. Kim, "Stepper scheduling in semiconductor wafer fabrication process," *Proceedings of the International Conference on Modeling and Analysis of Semiconductor Manufacturing*(2000), pp. 157-162.
- [9] Lee, Y.H., "Supply chain model for the semiconductor industry of global market," *Journal of Systems Integration*, 10(2001), pp. 189-206.
- [10] Lee, Y.H., S.U. Chung and B.J. Lee, "Supply Chain Model for the Semiconductor Industry considering manufacturing characteristics," *Production Planning and Control*, submitted, 2003.
- [11] Lee, Y.H. and B.J. Lee, "Push pull production planning of the reentrant process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(2003), pp.922-931.
- [12] Lee, Y.H. and T.H. kim, "Manufacturing cycle time reduction using balance control in the semiconductor fabrication line," *Production Planning and Control*, Vol.13, No. 6(2002), pp.529-540.
- [13] 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.
- [14] Liu, C., "A modular production planning system for semiconductor manufacturing," Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1992.
- [15] Lou, S.X.C. and P.W. Kager, "A robust production control policy for VLSI wafer fabrication," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.2, No.4(1989), pp.159-164.
- [16] Morrison, J., M. Janakiram and P.R. Kumar, "A comparative study of scheduling policies at Motorola fabs," *The Proceedings of International Conference on Semiconductor Manufacturing Operational Modeling and*

- Simulation*, San Francisco(1999), pp.51-56.
- [17] Murty, S.V. and J.W. Biennu, "Global planning at Harris Semiconductor," *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 1995.
- [18] Ovacik, I.M. and W. Weng, "A framework for supply chain management in semiconductor manufacturing industry," *IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 1995.
- [19] Pierce, N.G. and T. Yurtsever, "Value-based dispatching for semiconductor wafer fabrication," *The Proceedings of International Conference on modeling and Analysis of Semiconductor Manufacturing*(2000), Arizona, pp.172-176.
- [20] Spearman, M.L., D.L. Woodruff and W.J. Hopp, "CONWIP : a pull alternative to kanban," *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.5(1990), pp.879-894.
- [21] Wein, L.M., "Scheduling semiconductor wafer fabrication," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.1, No.3 (1988), pp.115-129.

Appendix A

• 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 생산량
 - $STD(i, j, k)$: 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
 - $TW(i, j, t)$: 기간 t 의 관리 포인트 j 에서 제품 i 의 목표 제공
 - $A(i, j, t), B(i, j, t)$: WIP 과 TW 의 차이의 절대값을 선형계획법으로 표현하기 위해 사용한 보조변수
 - $Q(i, t)$: 기간 t 에서 제품 i 의 최소 목표 생산량
 - $IPT(i, j, t)$: 기간 t 의 관리 포인트 j 에서 제품 i 의 목표 생산량
- 결정 변수
- $X(i, j, k, t)$: 기간 t 동안 k 설비에 할당된 관리 포인트 j 에서 i 제품의 제공량

• Prod-Push 모델

$$\text{Max } \sum_{i,j,t} \{W(i, j, t) \times \sum_k X(i, j, k, t)\}$$

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

• Prod-Balance 모델

$$\text{Min } \sum_{i,j,t} \{A(i, j, t) + \sum_k B(i, j, t)\}$$

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

• Prod-Pull 모델

$$\text{Min } \sum_{i,j,t} \{A(i, j, t) + \sum_k B(i, j, t)\}$$

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

Appendix B

• 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 배송 시간

- $X(i, t)$: 기간 t 에서 최종 생산완료 단계에서의 생산량
- $C(i, b, c, t)$: 기간 t 에서 고객 c 의 bin 등급 b 를 가진 i 제품에 대한 가격
- $d(i, b, c, t)$: 기간 t 에서 고객 c 의 bin 등급 b 를 가진 i 제품에 대한 수요
- $g(i, pb)$: 제품 t 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 모델

$$\text{Max } \sum_{i, b, c, t} \{C(i, b, c, t) \times \sum_w Z(i, b, c, w, t - r(w) - p(w, c))\}$$

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

• Dist-Pull 모델

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

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

Appendix C

• Notations

- $avg_STD(i)$: 설비에서의 제품 i 의 평균 작업 시간
- 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 생산량

• Forecast-Prod 모델

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