

## 주문 집약을 위한 재고 변용 모델 연구 : 제철산업의 소로트 주문 집약 활용을 중심으로

정재현\*

### A Simulation Study on a Variant Policy of Inventory Replenishment for the Order Consolidation : A Case of Steel Industry

Jaeheon Jung\*

#### ■ Abstract ■

In our model, we keep inventory to satisfy uncertain demands which arrives irregularly. In this situation, we have additional two constraints. First, we need to have certain amount of order consolidation (consolidation constraint) for the orders to replenish the inventory because of production or purchase amount constraint. And also, if we order at a certain date which was set by administrative convenience, we have capacity constraint to order the consolidated order demands (capacity constraint). We show this variant inventory policy is needed in steel industry and note that there will be possible similar case in industry. To deal with this case, we invent a variant replenishment policy and show this policy is superior to other possible policies in the consolidation constraint case by extensive simulation. And we derive a combined solution method for dealing with the capacity constraints in addition to the consolidation constraints. For this, we suggest a combined solution method of integer programming and simulation.

Keyword : Simulation, Integer Programming, Inventory Policy, Supply Chain Management, Steel Industry, Service Level

## 1. 서론

본 논문은, 기존 연구에서 다뤄져 왔던 재고 관리 모델을, 시간적으로 주문을 집약(Consolidation)하여 처리하여야 하는 경우의 재고 관리를 위해 확장 변용하여 새 모델을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 최적 정책을 제시하였다. 이러한 주문 집약의 사례에 적용되는 모델은 다음과 같이 설명될 수 있다.

다수의 제품에 대한 주문이 제품별로 고유한 확률 분포에 따른 시간 간격과 주문량을 가지고 발생한다. 주문대응에 있어서, 재고가 있으면, 즉각 처리되지만 만약 없으면, 재고 보충을 위한 생산(또는 구매)에 들어간다. 여기에 두 가지의 제약조건이 추가된다. 우선 특정 제품의 생산(또는 구매)를 위해서는 그 양이 일정 수준 이상 집적되어야 하는 제약조건이 있다. 즉 일정 기간 동안 특정 제품의 주문이 집적되어 그 양이 일정 수준 이상으로 집적되어야 생산 또는 구매될 수 있다(집적 크기 제약). 또 생산 또는 구매 행위는 실무상의 편의성 또는 경제적인 이유로 다수의 제품들이 동일 시기에 동시에 이뤄지는데, 이때 그 주문들의 합이 용량 제약(capacity limit) 이내이어야 한다. 여기서 이들의 생산 또는 구매 시기는 비연속적인 재고 관리 모델에서의 재고 수준 검사 기간인 재고 보충 시기(R)과 동일하다. 우리는 여기서 각 제품별로 일정 수준의 고객 서비스 수준을 유지하는 한도 내에서, 제품별 보충 시기(R)를 포함하여, 최적의 제품별 주문량과 제품별 주문 시기를 결정하여야 한다. 이와 같은 사례는 시간적으로 제품 생산을 위해 주문의 집적이 필요한 경우의 재고관리에서 다수 발생할 수 있을 것이다. 이 재고 관리 모델은 기존 연구들과 다음과 같은 차이점들이 있다.

1950년대 이후 많은 연구가 이루어진 확률적 재고 관리 모델- 초기의 이러한 재고관리모델의 연구는 Hillier and Lieberman[4]에 잘 소개되어 있다-은 비용 측면에서 본 모델과 유사하나, 본 논문이 다루고자 하는 집적 크기 제약과 용량제약을 고려할 수는 없다.

한편 최근 방향을 달리하는 연구는 재고 모델의 목적을 일정수준의 고객 서비스 수준 곧 만족도를 유지하는 한도내에서, 재고 비용을 최소화하는 데 두고 있다. 연구 성과는, 연속적으로 재고수준을 검사하는 재고정책과 일정기간(R)마다 재고 수준을 검사하여 재고 보충을 추진하는 두 가지로 크게 나뉜다. 본 논문이 고려하는 재고 모델은 이들 중 비연속적인 모델과 유사하다. 비연속적인 재고정책은 (R,s,Q) 관리 정책 및 (R,S)정책으로 다시 나뉜다.

이들 연구 성과들을 살펴보면, (R,s,Q) 정책에서 최대 고객 대기시간 제한-여기서 고객서비스 수준은 최대 고객 대기 시간 수준으로, 일정수준으로 유지된다-내에서 평균 재고를 최소화하는 (s, Q)를 찾는 근사 공식을 유도한 연구는 대표적으로 Tempelmeier[8], Kiesmuller and de Kok[6]등이 있으며, 주문이 들어왔을 때 재고로부터 즉각적으로 대응할 수 있는 수준을 일정 수준으로 유지하는 한도내에서 평균 재고를 최소화하는 (s, Q)를 찾는 근사공식을 유도한 연구는 Janssen, Heuts and de Kok[5]이 있다. 또한 (R,S) 정책하에서 고객 대기 시간을 일정수준으로 유지하는 한도내에서 S의 값을 찾을 수 있는 근사공식을 유도한 연구는 대표적으로 Tempelmeier[8], Van der Heijden and de Kok[10] 등이 있다.

그러나 이들 연구들도 마찬가지로 집적 크기 제약과 용량제약을 동시에 고려하지 않으며, 또한 재고 모델의 비용요소들이 재고 비용만을 고려하는 것이 일반적이어서, 아래에서 기술하는 본 논문의 주문집약 재고 모델이 고려해야 하는 비용 요소들보다 단순하다.

본 논문이 다루고자 하는 주문 집약을 위한 재고 모델의 사례는 다수의 산업 현장에서 찾을 수 있겠지만 대표적인 경우로 다음의 철강업체 소로트 생산을 위한 반제품 재고관리를 들 수 있겠다.

철강의 생산은 복수 공정과 연속 공정으로 이루어지는 대표적인 주문 생산 프로세스이며, 크게 제선-제강-열연-냉연의 4개의 대공정으로 나뉘어질

수 있다. 지금까지 철강 업계의 주문 처리 방식은 철저히 주문-생산(Make to order)방식이었으며, 따라서 완제품은 물론 중간 공정에서 나오는 반제품의 재고 관리는 배제되어 왔다. 그런데 최근 반제품 상태인 제강공정에서 생산되는 반제품(이하에서 Slab이라고 불림)에 대한 재고 관리 문제가 부각되고 있다. 이것은 최근 전략상 강조되고 있는 소로트(small lot)의 문제와 연관이 있다.

철강업계의 마케팅 전략에서 중요성이 큰 고급 강종들은 주로, 제강 단계에서 기계적, 기술적으로 경제적인 수준에 못 미치는 량의 주문(소로트)이 들어오게 되며, 이를 처리하기 위해 일정한 량의 주문이 집적(consolidation)되기까지 생산 주문에 대한 납기를 확정하여 주지 않는 것이 일반적인 관행이었다. 이 경우 전략적으로 중요한 소로트 고객사가 납기가 지연됨으로서 불만을 가지게 된다. 이에 최근 제강 공정 직후, 소로트 강종의 반제품인 Slab을 재고 상태로 관리함으로써, 제품 주문이 들어온 이후, 구체적인 강종을 목표로 신속히 Slab이후 공정만 생산 계획하여 신속히 납기를 부여할 수 있게 함으로써 고객 만족도를 개선하는 방법에 대한 관심이 높아졌다.

여기서 문제가 되는 것은 강종별 slab 재고 정책이다. 소로트 slab의 생산주기 곧 재고 보충 주기는 실무적 편리성에 의해, 특정 시점으로 정해져 있다. 예컨대, P 제철소의 경우, 월2회, 주1회, 또는 월1회 등으로 고정되어 있다. 재고 보충은 1일만(생산 계획에서 일 단위 생산 : 납기 부여 lead time=0)에 즉각적으로 이루어지는 경우가 될 것이다. 소로트 주문이 들어왔을 때, 해당 Slab 재고가 있는 경우 즉각적으로 이후 공정으로 진행되어 납기를 부여하는데 지체가 없을 것이고, 만약 재고가 없으면, 이는 지체 주문처리(backorder)되어 납기 부여 시점이 반제품 재고 보충 시기까지 미뤄질 것이다. 그런데, 만약 현 재고 수준과 정책에 따라 주문해야 할 량이 기계적, 기술적으로 경제적인 수준에 못 미치는 량이라면, 재고 보충 주기가 도달해도, 그 제품에 대한 재고 보충을 하지 않을 것이다(집적크기제약).

또한 일 단위 생산 하에서는 그 때까지 집적된 모든 지체 주문을 1일안에(정책에 따라 달라질 수도 있겠으나, 현행은 1주일 중 하루만 소로트 생산을 하도록 허용하고 있음) 처리하도록 강제하여야 한다(용량제약).

이와 같은 주문 집적을 위한 재고 모델에서, 우리의 관심사는 고객 만족을 위해 일정한 서비스 수준을 유지하면서, 고객이 즉시 납기를 부여받지 않으면, 즉 지체주문으로 일정시간 이후에도 주문이 처리되지 않으면, 일정한 벌금이 그 시간과 주문량에 비례하여 부과되는 지체 주문 비용, 또한 집적 크기 제약의 원인이 되는, 재고 보충을 위한 높은 set-up 비용, 그리고 재고를 유지하기 위한 재고 비용 모두의 합을 최소화하는 것이다. 서비스 수준을 유지하기 위해서는, 고객 주문이 처리되지 않고 기다리는 시간(Waiting Time : 대기시간) 및 고객 주문에 대한 즉시 서비스 충족율에 대한 제약(Instant Service Rate)이 동시에 가해진다. 본 논문이 다루고자 하는 모델의 이들 가정들, 집적 크기 및 용량 제약 및 비용 항목 등은 기존 문헌들에서 동시에 취급되지 않았다.

우리는 시뮬레이션을 통하여, 먼저 집적 크기 제약만을 고려한 상태에서, 본 논문에서 제시하는 변용된 형태의 재고 정책이, 총 비용을 기준으로 이들 상황에서 기존에 취할 수 있었던 가능한 어떤 재고 정책보다 우수함을 보이고자 한다. 또한 보다 복잡한 상황 곧 용량 제약 조건을 추가한 상태에서, 이 형태의 재고 정책이 최적의 결정변수 조합을 구하는 방법을 고안해내었다.

다음 2장에서 본 모델 및 본 모델에서 채택 가능한 정책들을 소개한다. 3장에서는 집적 크기 제약 하에서 각 재고 정책별로 파라미터들의 변화에 따른 총 비용 변화를 살펴보고, 파라미터 변화에 따른 재고 정책별 순위 판정을 통해, 본 논문에서 제시하는 변용된 형태의 재고 정책의 우수성을 체크해 보인다. 4장에서는 용량 제약이 추가되었을 때, 어떻게 자원을 최적으로 배분하여 총비용을 최소화할 것인가의 해법으로 시뮬레이션 및 최적화 방법의

결합에 의한 방법을 제시하였다. 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 모델

본 논문의 모델에서는 다수의 제품들이 가정되며, 각 제품 수요는 그들 고유의 확률적인 분포에 따른다. 특정 제품  $i$ 의 경우 주문 집약과 재고가 어떻게 이뤄지는가는 [그림 1]에 묘사되어 있다. 주문  $p$ 가 들어왔을 때, Slab(반제품) 재고가 있는 경우 ( $inv_i > 0$ ) 즉각 주문 처리된다(철강업계의 소로트인 경우 즉각 납기가 주어진다). 만약 재고가 소진된 경우(현 재고( $inv_i$ )가 수요량에 못 미치는 경우) 지체 주문(backorder) 처리되어(이때, 재고수준( $inv_i$ )는 음(-)이 된다), 다음 재고 보충 시기까지 기다려야 한다. 이 경우 그 주문은 주문이 들어온 시기로부터 다음의 재고 보충시기까지 양(+의) 고객 대기 시간( $w_i^p$ )을 가지게 된다. 본 논문의 재고 정책은 마지막 재고 보충 시기로부터 모두 일정 기간  $R_i$ 이 지난 후에 재고를 검사한다. 이때, 실제로 재고 보충이 이루어질 것인지 아닌지는 주문 집적의 정도에 따라, 아래에서 설명하는 재고 정책들에 따른다.

그 전에 먼저 고려되는 비용 요소들에 대해 설명하면 다음과 같다.

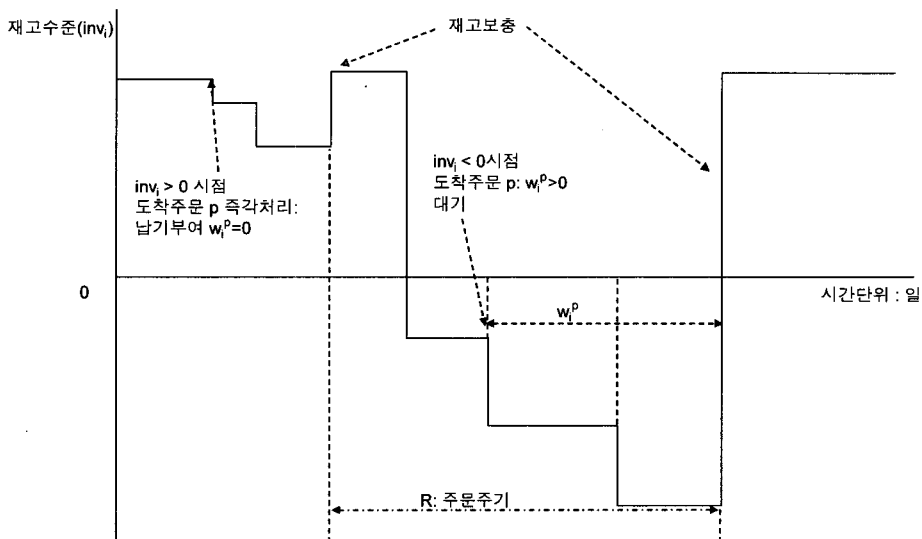
재고 보충시에 재고 보충을 위한 set-up 비용  $f_i$ 가 발생한다. 이 비용은 실제 집적크기제약의 원인이 된다. 본 모델에서는 주문이 만족되지 않으면, 다음 재고 보충 시기까지 기다리며, 그 자체로 주문이 거부되어 발생하는 판매 손실은 가정되지 않는다. 따라서 들어온 주문은 결국 모두 처리되며, 재고 보충을 위한 주문량 1단위당의 가변 비용은 모델에서 고려되지 않는다. 따라서 일정 기간 동안(본 논문 3, 4장의 수치예제에서는 1년 동안)의 재고 보충을 위한 생산 또는 구매 관련 비용합  $P_i$ 는 동기간 동안의 총 재고 보충 횟수에  $f_i$ 를 곱한 값으로 결정된다.

제품  $i$ 의 일정기간 동안 지체 주문 손실합  $B_i$ 의 경우, 다음과 같은 공식으로 계산된다.

$$B_i = \sum_{\text{일정기간안의 모든주문 } p} st_i^p * demand_i^p * sw_i^p$$

$$sw_i^p = \max\{0, w_i^p - CS_i\}$$

즉 일정 기간안의 모든 주문  $p$ 에 대하여, 특정 시점 곧 지체 비용 부과시점( $CS_i$ )을 초과하여 대기한



[그림 1] 반제품(Slab) 재고 정책 - 지체 주문 및 즉시 서비스 되는 주문들

주문들에 한하여 그 주문량(demand<sup>n</sup>)에 주문단위당 및 단위 시간당 지체비용  $st_i$  및 그 초과대기시간( $sw_i^n$ )을 곱하여 손실로 계산한다. 주문단위당 지체비용  $st_i$ 는, 예컨대, 1일을 단위 시간으로 본다면, 단위당 주문에 대해 고객이 특정 시점 곧 비용 부과시점을 지나서 기다리는 시간 하루를 짧게 하기 위해, 제품을 판매하는 주체가 얼마만한 비용을 감수할 수 있는가를 계량화한 값이다. 이러한 지체 주문 비용은 비용 부과 시점과 함께 기존 문헌에서 모델링된 적이 없다.

재고 비용의 경우, 일정 기간 동안의 평균 재고 수준  $\mu_i$ 에 평균 재고 일단위당 비용  $h_i$ 를 곱하여 얻어지는 비용이다. 이는 단순 재고 관리 비용 및 재고에 들어간 원가에 대한 이자 뿐만 아니라, 제철산업의 소로트 집약에서와 같이, 재고가 쌓여 있으나, 주문이 일정기간 들어오지 않아 완전히 폐기해야 할 상황에 처했을 때, 발생하는 모든 손이익 곧 폐기손실(salvage cost) 및 이익(scrap profit)을 포함한다.

이 때 가능한 재고 정책들은 다음의 세 가지 정책이 적용 가능하다.

### 2.1 S 정책

재고가  $S_i$ 이하이면 현 재고 수준( $inv_i$ )과의 차이만큼 재고 보충을 실시한다. 단 재고 보충시기  $R_i$ 기간마다  $S_i - inv_i < \overline{Lot}_i$ 이면 당해 시기에 재고 보충을 하지 않는다. 즉 재고수준과 달성해야 할 재고수준 차이가 결정변수  $\overline{Lot}_i$ 보다 커야만 재고보충이 이뤄진다. 이렇게 R기간이 되었을 때, 재고보충이 실제로 이루어지는 비율을 주문율( $ODR_i$ )로 정의한다. 단순한 (R, S) 정책과 차별되는 점이다. 여기서 결정 변수  $\overline{Lot}_i$ 는 언제나 최소 집적크기  $Lot_i$ 보다 커야 한다는 제약조건이 있다. 결정변수는 최소 비용을 보장하는 변수로서 시물레이션을 통해 결정되어야 하는 변수이다. S정책에서는,  $R_i$ 가 주어졌을 때,  $S_i$ , 그리고  $\overline{Lot}_i$ 가 이에 해당된다. 재고 정책의 결정변수들은 다음과 같이 결정된다.

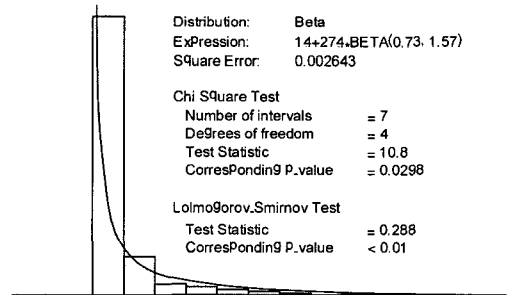
$$[P_S] \text{ Min}_{S_i, \overline{Lot}_i \geq Lot_i} [h_i \mu_i (S_i, \overline{Lot}_i) + B_i (st_i, S_i, \overline{Lot}_i) + P_i (f_i, S_i, \overline{Lot}_i)]$$

st.

$$W_i(S_i, \overline{Lot}_i) \leq W_i^{target} \tag{1}$$

$$IS_i(S_i, \overline{Lot}_i) \geq IS_i^{target} \tag{2}$$

위의 제약식 (1)과 식 (2)는 S 정책을 취하는데 있어, 고객 서비스 차원의 제약조건들이다. 제약식 (1)은 일정기간 동안의 도착하는 고객 주문들의 평균 대기시간( $W_i$ )이 목표로 정해진 값( $W_i^{target}$ )이어야 한다는 의미이다. (2)는 고객이 도달해서 즉시 재고로부터 만족을 얻을 수 있는 평균 비율(즉시 서비스 충족율  $IS_i$ : P 제철소의 경우 Slab 재고가 존재하여 즉시 납기를 부여받을 수 있는 경우)이 일정 비율( $IS_i^{target}$ ) 이상 되어야 한다는 의미이다.



[그림 2] P 제철소 주문들의 수요량 분포 - 일 사례

### 2.2 Q 정책

R 기간마다의 재고 보충시점에 재고 수준이  $s_i$ 이하이면 언제나 일정량  $Q_i$ 만큼의 재고 보충을 실시한다. 지체 주문이 집적되어 대기하고 있을 때, 재고 보충 시점에서 일정량  $Q_i$ 만큼만 주문되기 때문에 지체 주문이 일소되지 않고, 남아있을 수 있다 (반면 S정책에서는 지체주문(backorder)이 재고보충이 되는 시점에서 일소된다). 기존의 (R, s, Q) 정책과 달리, 남아 있는 지체 주문을 처리하는 순서를 각 주문들의 지체 주문 손실이 제일 큰 순서로 처리한다. 그리고 고려되는 재고 보충량  $Q_i$ 는 언제나

최소 집적 크기 제약하에서 최소 집적 크기  $Lot_i$  보다 커야 한다. 결정변수들은  $Q_i$  및  $s_i$ 이다.  $R_i$ 가 주어졌을 때, 재고 정책의 결정변수들은 다음과 같이 결정된다. 제약식에 대한 설명은 결정변수들만 바뀌고 S 정책과 동일하다.

[ $P_Q$ ]

$$\text{Min}_{Q_i, s_i, Lot_i} [h_i \mu_i(Q_i, S_i) + B_i(st_i, Q_i, S_i) + P_i(f_i, Q_i, S_i)]$$

st.

$$W_i(Q_i, S_i) \leq W_i^{target} \tag{3}$$

$$IS_i(Q_i, S_i) \geq IS_i^{target} \tag{4}$$

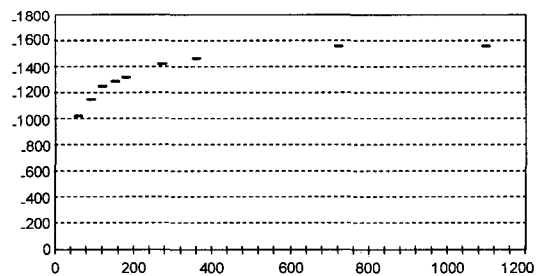
### 2.3 O 정책

S 정책과 같으나, 결정 변수 중 하나인 목표재고량인  $s_i$ 를 0으로 고정시킨 경우이다. 즉 재고를 전혀 유지하지 않으며, R의 재고 보충 시점마다, 지체 주문을 처리한다. 즉 항상  $inv_i \leq 0$ 의 재고 수준을 갖는다. 단 재고 보충시기 R 기간마다  $-inv_i < \overline{Lot}_i$  이면 당해 시기에 재고 보충을 하지 않는다. 기존의 P제철소의 경우, 재고를 전혀 유지하지 않으며, 특정 주문 시점 R이 되었을 때, 최소 주문 집적량을 초과하는 지체 주문이 쌓였을 경우에만 반제품 생산에 들어가서,  $\overline{Lot}_i = Lot_i$ 로 고정시킨 경우의 O 정책을 취하였다고 할 것이다. 우리는 다음 장에서 S 정책에서  $s_i$ 를 0으로 고정시키고,  $\overline{Lot}_i$  만을 결정 변수로 사용하고, 제약식 (1)과 (2)를 해제하였을 때의, 총 비용을 O 정책의 비용으로 놓고, S 및 Q 정책의 비용들과 비교하여 보았다.

### 3. 집적 크기 제약하의 수치 예제

우리는 P제철소의 사례를 최대한 참조하여, 14개의 제품에 관한 시나리오를 구성하여, S, Q, 및 O 정책을 상호 비교 평가하였다. 여기서 확률적으로 도착하는 주문들의 간격은 일정한 패턴이 없었다. 우리는 월별 도착 횟수는 실 사례를 그대로 가져와서 확률분포(Empirical Fitting)로 이용하였고, 도착

횟수가 주어진 해당 월의 도착간격(단위는 일수 : days)은 30.0/도착횟수를 평균으로 하는 지수함수 분포(exponential distribution)로 가정하였다. 도착하는 주문들이 지닌 수요량의 크기(ton수)는 베타 확률 분포에 따르는 것으로 가정하였는데, 실제 데이터와 가장 근사한 것으로 판명되었다([그림 2] 참조). 시뮬레이션의 실험은 365일 1년으로 잡았으며, 변수가 안정화되기 위한 준비기간은 730일 곧 2년으로 잡았다. [그림 3]은 각 변수들 중에서 준비기간 중에 가장 변동이 심한 Case 10의 주문 시점에서의 재고량을 보여준다. 이를 보면 2년의 준비기간은 안정적인 통계량을 보여주는데 무리가 없음을 알 수 있다. 복제 횟수(Replication number)는 50회로 하였다. 14개의 제품 수요별 입력 데이터는 <표 1>과 같다. 결정 변수 조합은 모든 Case를 동틀어 50의 배수가 되게 하였다. <표 3>, <표 4>에 정리된 시뮬레이션 결과를 보면, 이는 통계적 유의성의 측면에서 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.



[그림 3] 재고 보충시점의 준비기간(일수 : days)에 따른 평균 재고량 변화

결과를 두 가지로 정리하였다. 먼저 집적 크기  $Lot_i$ 가 일률적으로 300으로 작게 정하여져서, <표 3>에서 보여지는 바와 같이 집적 크기 제약 조건이 없는 상태에서의 결과가 그대로 최적치를 주는 경우와 여기에 실질적인 제약조건이 작용하게 하기 위해 <표 4>에서 정리된 바와 같이, 몇몇 기본 케이스(Case 9, 11)의 집적 크기  $Lot_i$ 를 조정해 제약 조건이 작용하게 하여 그 결과를 보았다. 이하에서는 파라미터들 곧, 주문주기, 재고비용, 생산 셋업

비용, 일회 주문량, 주문 충족율 제약, 집적 크기 제약의 변화에 따른 S, Q 정책들의 비용 변화들을 비교하여 정리할 것인데, 이들은 간략하게 <표 2>와 같이 요약될 수 있다.

집적 크기 제약 조건이 없는 상태에서의 시뮬레이션 결과를 보면, S 및 Q 정책 모두 주문 주기가 비용 부과시점으로부터 멀어질수록 총비용이 증가하는데, 주문 주기가 커지면 그만큼 덜 생산/구매를 위한 set-up 비용이 들기 때문에 비용 감소 요인도 있으나, 이를 상쇄하고도 더 많은 지체 주문 비용 발생 및 지체 주문 발생을 줄이기 위한 재고 비용의 발생으로 인하여 이와 같은 결론이 나온다고 봐야 할 것이다. 주목할 점은 주문 주기가 7일인 경우

와 14일인 경우를 비교하면, S 및 Q 정책 모두, 비용 및 대기 시간의 경우, 차이가 대부분 통계적 유의성(유의 수준 95% : 표의 총 비용 변동 폭을 참조)이내에 있어, 격차가 없다. 지체 비용 부과시점이 21일로 연장된 경우들(Case 11~Case 14)에서는 생산 set-up비용이 극단적으로 작은 Case 12의 경우를 제외하고, S정책 하에서는 지체 비용 부과 시점에 가까운 14일과 30일간의 격차가 통계적 유의성 이내에서 차이가 없고, Q 정책 하에서는 7일과 14일간의 격차가 통계적 유의성 이내에서 차이가 없다. 이는 짧은 주문 주기에서만, Q 정책이 재고 및 생산을 조정할 수 있는 유연성을 발휘할 수 있음을 의미한다.

<표 1> 케이스별 주문 관련 입력 정보

케이스 번호	수요량 크기 분포	생산셋업비용 (회당)	재고비용 (/단위)	지체주문손실 (/단위/일)	즉시주문 충족율제약	지체비용 부과시점(일)	대기시간 제약(일)
1	14 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	216.5	15.935	70%	7	7
2	14 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	15.935	70%	7	7
3	14 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	974.6	15.935	70%	7	7
4	70 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	7.9675	70%	7	7
5	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	7.9675	70%	7	7
6	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	30.935	90%	7	7
7	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	15.467	90%	7	7
8	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	30.935	70%	7	7
9	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	10000	487.3	30.935	70%	7	7
10	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	100000	487.3	30.935	70%	7	7
11	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	30.935	20%	21	30
12	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	1000	487.3	30.935	20%	21	30
13	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	7.9675	20%	21	30
14	140 + 274 * BETA(0.73, 1.57)	40000	487.3	30.935	60%	21	30

<표 2> 파라미터들의 변화에 따른 S, Q 정책 비교

주문 주기	S 정책은 지체 비용 부과 시점( $CS_t$ )에 근접할수록, Q 정책은 주기가 짧을수록 비용이 적게 듭니다.
단위당 재고 비용	단위당 비용이 클수록 S 정책이 Q 정책에 비해 비용 측면에서 더욱 유리합니다.
셋업 비용	비용이 작을수록 S 정책이 Q 정책에 비해 비용 측면에서 더욱 유리합니다.
주문 수요량	수요량이 커질수록 S 정책이 Q 정책에 비해 비용 측면에서 더욱 유리합니다.
주문 충족율 제약	요구되는 충족율이 낮을수록 S 정책이 Q 정책에 비해 비용 측면에서 더욱 유리합니다.
집적 크기( $Lot_t$ ) 제약	극단적으로 집적 크기 제약이 커지더라도, S 정책이 통계적으로 유의미하게(유의수준 5%) Q 정책에 비해 비용상으로 불리해지지 않습니다.

〈표 3〉 Case 1~14의 시뮬레이션 결과

case	주문 주기	Q정책비용 / S정책비용	S 정책 비용	S 정책 비용변동폭 (half width)	최적 S	최적 Lot	대기시간 (S정책)	주문율 (ODR : S 정책)	대기시간 (Q 정책)	주문율 (ODR : Q 정책)	재고비용 비율 (S 정책)	주문 지체 비용비율 (S 정책)
1	7	1.03	340316.2	12788.8	1300	1400	0.89	0.10	0.59	0.07	0.39	0.03
	14	1.04	349858.1	11712.0	1550	1600	1.13	0.16	0.94	0.15	0.45	0.07
	30	1.03	410588.1	18908.8	1700	1400	1.10	0.35	0.69	0.29	0.46	0.13
2	7	1.05	484034.7	12400.5	950	1100	1.81	0.12	0.71	0.12	0.41	0.08
	14	1.07	493244.1	16338.7	800	850	1.91	0.27	1.18	0.24	0.35	0.08
	30	1.08	592731.9	25039.7	1050	900	2.25	0.48	1.61	0.44	0.41	0.20
3	7	1.07	641000.5	16205.5	650	750	1.72	0.17	1.16	0.18	0.43	0.03
	14	1.11	659242.7	16701.0	700	750	2.06	0.30	1.74	0.27	0.46	0.07
	30	1.19	783194.4	19211.7	750	550	2.47	0.66	2.63	0.45	0.45	0.14
4	7	1.05	569366.5	16554.4	1100	1250	1.59	0.16	1.64	0.13	0.40	0.02
	14	1.07	576090.0	15101.6	1300	1400	1.98	0.26	1.70	0.29	0.48	0.06
	30	1.12	662766.4	17443.2	1300	1100	2.57	0.58	2.46	0.47	0.44	0.14
5	7	1.06	685397.3	16355.5	1600	1850	1.61	0.16	1.25	0.16	0.50	0.03
	14	1.09	704457.4	14608.6	1600	1650	1.85	0.31	1.52	0.30	0.50	0.05
	30	1.21	817044.7	20451.1	1700	1250	2.45	0.66	2.62	0.47	0.48	0.13
6	7	1.03	875392.1	15705.2	1650	1350	0.25	0.20	0.20	0.19	0.52	0.00
	14	1.12	918914.4	13331.9	1850	1300	0.39	0.38	0.28	0.35	0.56	0.01
	30	1.10	1144581.5	54117.8	1650	350	1.40	0.96	0.41	0.51	0.42	0.18
7	7	1.05	855419.9	16157.1	1750	1500	0.24	0.19	0.20	0.19	0.55	0.00
	14	1.10	914489.0	12875.5	1850	1300	0.39	0.38	0.31	0.30	0.57	0.00
	30	1.06	1178876.6	18184.9	2100	350	0.63	0.96	0.60	0.48	0.58	0.03
8	7	1.06	710532.4	16065.1	1400	1550	1.34	0.18	0.65	0.18	0.43	0.05
	14	1.12	783921.8	20207.9	1550	1500	1.41	0.34	1.12	0.29	0.45	0.10
	30	1.21	1055896.8	52178.1	1800	1000	1.67	0.73	0.80	0.46	0.45	0.22
9	7	1.13	374822.7	6820.7	900	850	0.86	0.29	0.77	0.28	0.60	0.00
	14	1.36	441175.8	11623.4	900	600	1.36	0.61	1.26	0.40	0.53	0.11
	30	1.26	799755.7	60072.3	1600	550	1.61	0.90	0.83	0.54	0.56	0.31
10	7	1.05	1166243.7	30902.0	2200	2350	0.94	0.13	0.68	0.12	0.42	0.02
	14	1.05	1228013.9	34766.6	2250	2300	1.44	0.24	1.07	0.22	0.40	0.09
	30	1.05	1503983.6	63693.1	2750	2100	1.36	0.47	1.25	0.42	0.46	0.17
11	7	1.07	628492.0	21245.3	1000	1400	3.20	0.20	1.98	0.18	0.29	0.06
	14	1.11	589746.7	18347.7	1050	1400	4.18	0.35	3.27	0.38	0.31	0.07
	30	1.29	600518.0	19301.1	1000	1000	5.95	0.73	4.52	0.52	0.29	0.13
12	7	1.50	84926.4	6646.7	250	400	3.55	0.47	3.52	0.46	0.53	0.18
	14	3.23	72295.7	2078.8	300	350	4.97	0.76	3.89	0.44	0.71	0.02
	30	2.75	192538.1	19839.4	650	350	7.06	0.95	4.52	0.52	0.56	0.38
13	7	1.07	544202.4	14255.5	900	1600	5.31	0.18	5.07	0.19	0.26	0.07
	14	1.12	521670.2	12655.6	1000	1700	6.80	0.30	5.64	0.30	0.28	0.12
	30	1.26	514955.1	12182.0	800	1050	8.38	0.71	7.14	0.55	0.22	0.12
14	7	1.03	652502.5	17618.3	1150	1400	2.03	0.20	1.98	0.18	0.36	0.02
	14	1.08	614798.5	13082.7	1450	1700	2.82	0.30	2.75	0.31	0.47	0.02
	30	1.20	649018.8	15578.6	1450	1250	3.75	0.66	3.87	0.52	0.46	0.06



<표 4> 주문 집적 크기 제약 활성화 이후의 시뮬레이션 결과

case	주문 주기	정책	Q정책비용 / S정책비용	총비용	총비용변동폭 (half width)	최적 S(S정책) [최적 Q(Q정책)]	최적 Lot(S정책) [최적 s(Q정책)]	즉시서비스 충족율	대기시간	주문율 (ODR)
9(Lot=1800)	7	S	-	475384.78	50648.78	1550	1800	0.70	1.43	0.16
		Q	0.92	438651.70	10188.31	1800	-50	0.73	0.82	0.20
	14	S	-	577098.07	54830.91	1850	1800	0.76	1.26	0.29
		Q	1.04	600990.58	28173.06	1800	250	0.76	1.26	0.40
	30	S	-	959760.89	266184.66	2500	1800	0.84	1.38	0.54
		Q	1.05	1008388.86	55994.22	2750	1000	0.89	0.83	0.54
9(Lot=3600)	7	S	-	850019.21	74357.55	3400	3600	0.84	0.77	0.09
		Q	0.95	809662.39	25296.67	3600	-250	0.84	0.71	0.10
	14	S	-	935708.94	102807.55	3500	3600	0.83	1.10	0.17
		Q	0.92	864383.77	29921.30	3600	-100	0.83	0.98	0.19
	30	S	-	1233588.26	180645.00	4050	3600	0.87	1.15	0.32
		Q	0.92	1133151.62	78185.76	3600	450	0.85	1.30	0.41
11(Lot=3600)	7	S	-	875429.65	126475.40	3050	3600	0.76	2.10	0.09
		Q	0.93	811320.48	24138.81	3600	-600	0.75	1.95	0.09
	14	S	-	844808.51	123782.82	2950	3600	0.69	3.45	0.17
		Q	0.94	798082.97	29370.72	3600	-600	0.70	3.08	0.19
	30	S	-	943115.02	97030.56	3400	3600	0.74	3.11	0.32
		Q	0.93	879247.06	32841.03	3600	-50	0.72	3.28	0.41

<표 5> O 정책의 시뮬레이션 결과

주문주기	비용	비용폭 (half width)	O정책비용 / S정책비용	대기시간	주문율	생산비용
7	17144021	2987317	20.16898	38.31728	0.088462	46000
14	17248813	2849793	18.43395	39.31457	0.166923	43400
30	19610538	3308828	15.89715	43.76286	0.325	39000

집적 크기 제약 조건이 없는 모든 경우에 S 정책이 Q 정책보다 총 비용에 있어 작게는 2% 많게는 최대 322%(극단적으로 생산비용이 낮은 경우)까지 우월함을 볼 수 있다. 시뮬레이션을 동틀어 S 정책은 최적의 주문율(ODR)이 Q 정책보다 높는데, 재고비용은 낮아(모든 경우에 S 정책이 Q 정책에 비해 총 비용에서 차지하는 재고 비용 비중이 낮음) 조금씩 주문하는 것으로 판명된다. 따라서 <표 3>에서 볼 수 있는 바와 같이 즉각 충족되지 않은 주

문이 많아 평균 대기시간은 대부분의 경우 S 정책이 Q 정책보다 더 크다.

이러한 연유들로 재고 비용의 증가(곧 단위당 재고 비용의 증가 : Case 1 → Case 2 → Case 3)할수록 S정책의 우월함이 더 확대되며, 또 S 정책은 더 자주 주문하는 경향이 있으므로, set-up 비용이 커질수록(Case 9 → Case 8 → Case 10, Case 12 → Case 11) 우월 폭이 줄어들는다. 주문 당 수요량(demand)가 커질 경우(수요 분포의 변화) 우월 폭

은 더 확대되는데, 이 경우, 오히려 Q 정책에서 주문이 충족되지 않아서 대기하는 경우가 늘어나면서, 지체 주문 비용이 S 정책보다 많은 경우가 발생하기 때문이다(Case 4 → Case 5). 또한 주문 충족율 제약이 요구하는 수준이 올라가면 우월 폭은 줄어든다(Case 8 → Case 6, Case 10 → Case 14). 그러나 단위당 지체 주문 비용의 증감이 미치는 영향(Case 7 → Case 6)은 일률적이지 않다.

여기에 집적 크기 제약이 가해지는 경우, <표 4>에서 보는 바와 같이 S 정책의 우월 폭이 줄어들거나, Q 정책이 비용 측면에서 오히려 우월하게 된다. 그러나 표에서 보여지는 바와 같이 집적 크기가 극단적으로 커더라도, 양 정책의 비용은 통계적유의 수준(유의수준 5%) 이내에 그 격차가 있어 실제적으로 비용 측면에서 S 및 Q 정책은 그 차이가 없다. 단 통계적으로 변동 폭은 S 정책이 매우 커져, 비용의 불확실성이 증가하므로, 집적 크기가 매우 큰 경우에 Q 정책이 그 점에서는 유리할 수 있음을 암시하고 있다. S 정책의 우월 폭이 줄어들거나, 격차가 없어지는 이유는 집적 제약이 없는 경우, <표 3>~<표 4>에서 확인할 수 있듯이, Q 정책의 최적의 Q 값이 대부분 S 정책의 최적  $\overline{Lot}_i$  값보다 크기 때문에(앞에서 언급된 바와 같이 S 정책은 Q 정책에 비해 조금씩 자주 주문하는 경향이 있으므로), 집적 크기 제약이 가해진 경우, Q 정책의 최적 비용에는 거의 영향을 미치지 않고 S 정책의 최적비용을 상승시켰기 때문이다.

한편 시뮬레이션의 결과, P제철소에서 현재 시행하고 있는 O 정책은, 재고를 전혀 유지하지 않으며, 일정 시점이 되었을 때, 대기시간 및 즉시 주문 충족률 제약을 모두 제거하고, 지체 주문을 일괄 처리하는 경우에도 무조건 그 비용이 S, Q 정책 모두에 비교해봐서 매우 높다. 전체 시뮬레이션 결과표가 방대하여 대표적인 Case 9의 경우 중 S 정책이 제일 비효율성을 보여주는  $\overline{Lot}_i = 3600$ 의 경우만 비교를 위해 아래 <표 5>에 보였지만, 재고를 유지하지 않는 이상, S 정책에 비해, 모든 경우를 통틀어 최대 2016%로 O 정책의 비용이 높게 나온다.

이상의 경우를 통해 S 정책이 모든 경우에서 매우 유용함을 보았다. 특히 시뮬레이션의 결과는 현재 시행되고 있는 재고를 유지하지 않는 정책은, 일정한 지체주문 비용을 가정하는 이상, 비용 측면에서 매우 불리하다는 사실을 보여주고 있다.

#### 4. 시뮬레이션 및 정수 계획법을 통한 최적화

이제 다수 제품이 집약되어, 편의에 의해 특정 시기에 재고 보충이 동시에 실시된다면, 이를 조달하는데 있어, 용량 제약이 추가된다. 즉 특정 시기에 재고 보충이 집중된다면, 용량제약을 초과하여, 실행 불가능한 상황을 방지하여야 한다. 예컨대 주문 주기가 1주일인 제품들의 최적 주문량들이 300, 400, 500일 때, 해당 주기에 배당된 생산 용량이 1200일보다 작은 경우, 재고 보충이 불가능할 것이다. 실제적으로 주기별로 그 용량 제약을 달리 할 수도 있고, 특정제품군에 속하는 재고 보충량에 제약이 추가될 수도 있다. 이들의 경우 아래에서 설명되는 모델이 조금만 변용되면, 적용 가능하다. 본 장 말미의 실 계산 예에서는 각 주기별 용량 제약이 동일한 경우를 가정하였으나, 본 모델에서 이를 반드시 상정할 필요는 없다.

이러한 상황에서, 다수 제품을 고려한 시뮬레이션을 직접 이용한다면, 무수히 많은 결정 변수들의 조합(제품별 주문주기  $R_i$ 를 용량제약이 초과되지 않게 결정해야 하기 때문에 세 개의  $R_i$  값이 가능하고 제품  $n$ 개를 고려하게 되면  $3^n$ 개의 조합이 생김)으로 해를 구하기가 쉽지 않다. 그런데, 우리가 이산적 시뮬레이션(discrete simulation)이 현실적 의미를 가질 수 있도록 정수값들의 조합만을 고려한다면, 아래의 정식화를 통한 정수계획법으로, 3장에서 묘사된 개별 제품별 시뮬레이션의 결과를 최대한 이용하여, 기대 비용의 최적해를 찾을 수 있다. 즉 용량제약하의 각 제품별 결정변수들의 조합은, 전체 제품을 놓고 하는 새로운 시뮬레이션을 하지 않고, 개별 시뮬레이션의 결과를 이용한 정수계

획법을 통해 최적화된다.

우리의 사례에서  $C_{R=1}, C_{R=2}, C_{R=4}$ 에서 R값은 재고 검사 주기의 주일 수(week number)를 의미한다. PO가 모든 주문 가능한 제품군의 집합을 의미한다면, 우리는 특정 제품의 주기( $R_i$ )가 동일한 제품군 집을  $PO_{R=1} = \{i \in PO / R_i = 1\}$  등으로 표기한다. S 정책하에서, 특정 제품  $i$ 가 어느 주기( $R_i$ )의 재고 보충 정책을 쓰는 것이 이들 용량 제약 하에서 최선이며, 이때, 결정 변수( $S_i, \overline{Lot}_i$ )는 무엇을 취하여야 최저의 기대 비용을 달성하는가하는 것을 다음과 같이 정형화된 모델로 표시할 수 있다. 여기서는 결정 변수에  $R_i$ 가 추가된다.

[ $MP_S$ ]

$$\text{Min}_{PO_{R_i}, S_i, \overline{Lot}_i} \sum_{i \in PO} [h_i \mu_i (S_i, \overline{Lot}_i) + B_i (st_i, S_i, \overline{Lot}_i) + P_i (f_i, S_i, \overline{Lot}_i)]$$

st.

$$W_i(S_i, \overline{Lot}_i) \leq W_i^{target} \quad \text{for } i \in PO \quad (5)$$

$$IS_i(S_i, \overline{Lot}_i) \geq IS_i^{target} \quad \text{for } i \in PO \quad (6)$$

$$\text{Contra}_{R=1} \leq C_{R=1} \quad \text{with probability } 1-\alpha \quad (7)$$

$$\text{Contra}_{R=2} \leq C_{R=2} \quad \text{with probability } 1-\alpha \quad (8)$$

$$\text{Contra}_{R=4} \leq C_{R=4} \quad \text{with probability } 1-\alpha \quad (9)$$

제약식 (5)과 식 (6)에서 모든 제품군의 평균대기 시간 및 즉시 서비스율이 제품별로 정해진 최대 한계 이내에 있도록 보장하고 있다. 식 (7)~(9)는 동일 재고 보충시기의 재고 보충량의 합이 용량을 초과하지 못하도록 보장하기 위한 추상화된 제약식이다. 실제로 S 정책하에서는 동일 재고 보충 주기에, 현 목표 재고 수준( $S_i$ )과 재고 보충 시점의 재고 수준  $inv_i(S_i, \overline{Lot}_i)$  차이가  $\overline{Lot}_i$  이상인 경우에 한해 재고 보충을 하기에, 제약식을 동일 보충시기의 재고보충량 합이 단순히 용량제약보다 작다고(즉  $\sum_{i \in PO_{R=r}} [S_i - inv_i(S_i, \overline{Lot}_i)] \leq C_{R=r}$ )로 쓴다면 지나치게

엄격한 제약조건이다. 또한 재고 보충 시점의 재고 수준 자체도 확률변수이다. 우리는 유의 수준  $\alpha$ 를 도입하여,  $\alpha$ 의 확률로 각각의 재고 보충시기

( $R=1,2,4$ )에 용량제약이 초과할 가능성을 염두에 두는 제약식( $\text{Contra}_{R=1,2,4} \leq C_{R=1,2,4}$ )을 구성할 필요가 있다. 이들 추상화된 제약식들은 아래에서 설명하는 정수계획법의 정식화를 통해 구체화된다.

정수계획법 정식화에서 우리는 결정변수  $S_i$ 를 이산적 변수로 변환시켜, 제품  $i$ 의 재고보충주기가  $r$ 일때의 결정변수인 재고보충량  $S_i^r$ 를 그 정책 결정자가 고려할 수 있는 최대값과 최소값 사이의 정수값으로 잘게 쪼갬다. 여기서 그 중  $j$ 번째에 해당하는 재고 보충량을  $S_i^{jr}$ 로 표기한다. 우리는  $S_i^{jr} = S_i^{1r} + \Delta S(j-1)$ 임을 알 수 있다. 또 각각의  $S_i^{jr}$ 에서 가능한  $\overline{Lot}_i$  값을 마찬가지로 정수값으로 만들어  $\overline{lot}_i^{jkr} = \overline{lot}_i^{1r} + \Delta \text{lot}(k-1)$ 로 되게 만든다(아래 계산 예에서는  $\Delta S$  및  $\Delta \text{lot}$ 를 일률적으로 50으로 잡았다). 재고보충주기가  $r$ 로 주어지고, 개별 제품에 대해  $S_i^{jr}$  값 및  $\overline{lot}_i^{jkr}$ 이 주어진 상태에서, 제약식 (5)와 식 (6)을 반영한 상태에서 [ $P_S$ ]를 푸는 개별 제품에 대한 시뮬레이션을 통하여  $f_i^{jkr}(S_i^{jr}, \overline{lot}_i^{jkr}) = h_i \mu_i (S_i^{jr}, \overline{lot}_i^{jkr}) + B_i (st_i, S_i^{jr}, \overline{lot}_i^{jkr}) + P_i (f_i, S_i^{jr}, \overline{lot}_i^{jkr})$  값을 구할 수 있다. 그러면 문제 [ $MP_S$ ]는 아래의 모델 [ $MP'_S$ ]과 일치한다.

[ $MP'_S$ ]

$$\text{Min}_{x_i^{jkr}} \sum_{r=1,2,4} \sum_{i \in PO} \sum_{j=1}^{P_i^r} \sum_{k=1}^{PP_i^r} f_i^{jkr}(S_i^{jr}, \overline{lot}_i^{jkr}) x_i^{jkr}$$

st.

$$\text{Contra}_{R=1} \leq C_{R=1} \quad \text{with probability } \alpha \quad (10)$$

$$\text{Contra}_{R=2} \leq C_{R=2} \quad \text{with probability } \alpha \quad (11)$$

$$\text{Contra}_{R=4} \leq C_{R=4} \quad \text{with probability } \alpha \quad (12)$$

$$\sum_{r=1,2,4} \sum_{j=1}^{P_i^r} \sum_{k=1}^{PP_i^r} x_i^{jkr} = 1 \quad \text{for } i \in PO \quad (13)$$

$$x_i^{jkr} \in \{0,1\} \quad \text{for } i \in PO, r=1,2,4, j=1, \dots, P_i^r, k=1, \dots, PP_i^r \quad (14)$$

$x_i^{jkr}$ 가 1이면 제품  $i$ 의 최적 재고 보충 시기를  $r$ 로 선택하고 이때 ( $S_i^{jr}, \overline{lot}_i^{jkr}$ )을 결정변수 조합으로 선택함을 의미한다. 제약식 (13)에서 제품  $i$ 는 최적

보충 시기  $r$  및 이산화된 최적결정 변수조합 하나만을 선택하도록 강제한다.

이제 남은 문제는 이와 같은 0~1 정수계획법으로 추상적 제약식 (10)~(12)를 구체적으로 정식화하는 것이다. 우리는 임의의 제품군들의 재고 보충량들의 총합의 통계적 최대값이 용량 제약 이내에 있어야 한다고 제약식을 바꾸어 이야기 할 수 있다.  $n$ 개의 임의의 제품들이 모두 주문되어야 한다면, 그들 주문량( $Q_i$ )들의 합의 유의수준  $\alpha$ 에서 통계적 최대 값은 다음과 같을 것이다.

<표 6> 용량 제약하의 최적 주문 조합을 위한 정수 계획법 계산에 사용된 파라미터들의 범위

단위당 재고 비용	지체 주문 비용	셋업 비용	집적 크기 제약
$h_i \sim 3 \cdot h_i$	$SW_i \sim 10 \cdot SW_i$	$f_i \sim f_i \cdot 8$	500~3000

$$E(Q_1) + E(Q_2) + \dots + E(Q_n) + t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{VAR(Q_1 + Q_2 + \dots, Q_n)} \quad (15)$$

위의 식은 다시 다음의 부등호 관계를 만족한다.

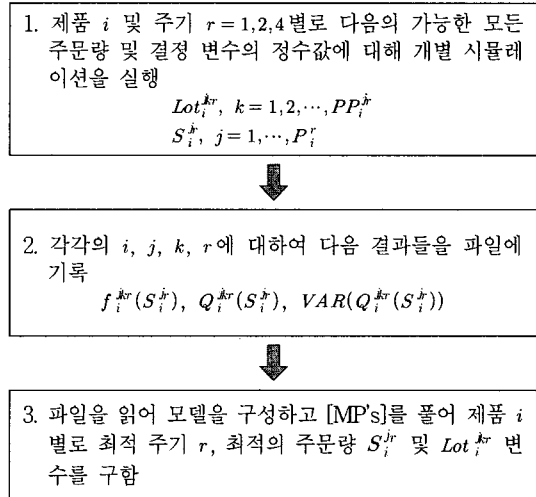
$$(15) \leq [E(Q_1) + t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{VAR(Q_1)}] + [E(Q_2) + t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{VAR(Q_2)}] + \dots + [E(Q_n) + t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{VAR(Q_n)}]$$

이 관계를 이용하면서 개별 제품들의 주문량들의 평균  $\overline{Q_i^{jkr}}$  및 분산  $VAR(Q_i^{jkr})$ 을 보고하도록 개별 제품들의 시뮬레이션을 세팅하여, 다음과 같은 보다 더 엄격한 제약식을 우리의 제약식 (10)~(12)으로 이용할 수 있다.

$$\sum_{i \in PO} \sum_j \sum_k^{P_i^{jkr}} [Q_i^{jkr} + t_{\alpha/2} \sqrt{VAR(Q_i^{jkr})}] x_i^{jkr} \leq C_i \quad (16)$$

여기서 주의할 점은 재고 보충시점의 재고 보충량  $[S_i - inv_i(S_i, \overline{Lot}_i)]$ 은  $Q_i$ 와 다르다는 점이다. 실제로 S 정책에서는 동일 재고 보충 주기에, 현 목표 재고 수준( $S_i$ )과 재고 보충 시점의 재고 수준  $inv_i(S_i, \overline{Lot}_i)$  차이가  $\overline{Lot}_i$  이상인 경우에 한해 재고

보충을 하기에  $Q_i$ 의 평균은 재고 보충이 이루어질 경우의 재고 보충량  $[S_i - inv_i(S_i, \overline{Lot}_i)]$ 의 평균에 실제로 재고 보충이 일어날 확률 곱 주문을  $ODR_i$  (이 값 자체도 확률변수임)을 곱한 값과 같을 것이고 분산도 단순히  $[S_i - inv_i(S_i, \overline{Lot}_i)]$  값의 분산이 아니라는 점은 자명하다.



[그림 4] 용량 제약하의 주문 조합 최적화를 위한 전 과정의 플로우 차트

이상의 용량 및 집적 크기 제약하에서 제품별 최적의 주문량 및 주문 주기, 그 밖의 결정 변수를 구하는 전 과정을 요약하면 [그림 4]과 같은 플로우 차트로 요약될 수 있다. 이하에서는 P 제철소의 실 사례를 참조하여 얻어진 3장의 시뮬레이션 결과를 이용하여 보다 많은 제품군들이 주문 주기별로 용량 제약 하에서 생산되어야 할 때, 정수계획법에 의해 통합된 대규모 시뮬레이션을 또 거치지 않고 바로 최적의 생산 결정 변수 조합을 어떻게 구할 수 있는지를 예시하겠다.

먼저 우리는 126개 및 200개의 제품군을, <표 1>의 14개 제품(Case)의 파라미터들인 단위당 재고 비용 및 지체 주문 비용, 셋업 비용, 집적 크기 제약을 C 컴파일러에 내장된 난수발생기로 무작위로 각 Case별로 원래의 설정된 값에 대해 <표 6>과 같이 증가시켜 새로 생성하였다. 언급되지 않은 파라메

<표 7> 정수계획법 계산 결과

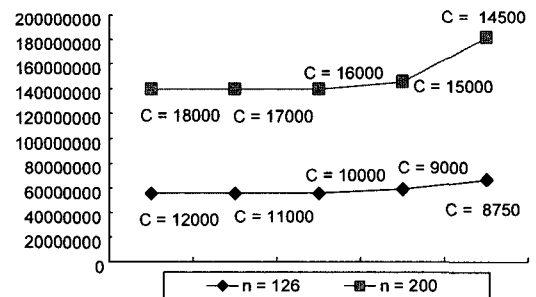
제품수	생산 용량 제약	최적비용	1주차 용량 소모	2주차 용량 소모	4주차 용량 소모	계산 시간 (초)	최적치와의 GAP(% , CPLEX)
n = 126	C = 12000	55639760.6	11594.3	7228.1	3035.7	14.8	0.00
	C = 11000	55656079.8	10980.9	8468.9	3035.7	13.4	0.00
	C = 10000	55728298.3	9875.4	9994.7	4407.0	13.5	0.02
	C = 9000	58604429.2	8999.5	8988.4	8838.7	25.3	3.60
	C = 8750	66873250.7	8749.4	8746.4	8607.1	18.3	6.66
n = 200	C = 18000	83978488.3	13913.3	17813.7	16910.3	55.7	0.01
	C = 17000	84106154.9	14450.4	16534.3	16910.3	53.4	0.14
	C = 16000	84032870.2	15014.4	15914.9	15585.6	59.8	0.01
	C = 15000	86632583.7	14999.7	14999.9	14948.4	155.1	2.30
	C = 14500	115283405.5	14499.8	14499.6	14498.8	354.1	1.53

터들은 <표 1>의 설정과 동일하다. 유의수준  $\alpha$ 는 공히 5%로 하였다. 주어진 제품 재고 보충 시기는 앞에서 언급된 바와 같이 1, 2, 4주차에 하루만 허용이 된다. 정수계획법 적용을 위해 각 주차에 동일한 생산 용량을 적용하였다. 따라서 4주차는 1, 2주차와 겹치기 때문에 총 생산 용량은 1주차의 세 배( $C_1 + C_2 + C_3$ )가 되고 2주차는 1주차와 겹쳐 1주차의 두 배( $C_1 + C_2$ )가 될 것이다. 적용된 생산용량은 결과를 나타낸 <표 7>에 표시되어 있다.

CPLEX v.9.0을 이용하여 이 정수계획법 문제를 풀면, 대개 6분 이내에 문제가 풀린다(<표 7> 참조). P 제철소의 상황을 본다면 실제 3년간 300개 이내의 철강 제품(강종)이 주문되고, 주당 100개에서 200개 정도의 제품을 처리한다고 보아도 무리가 없기 때문에, 정수계획법 자체를 푸는데 있어서 시간상 문제는 없다고 보아야 할 것이다. 다만 시물레이션을 위한 시간이 걸리는데, 우리는 개개의 제품별로 시물레이션을 시행하기 때문에 다수의 터미널 또는 개인용 PC만 있으면 각각 독립된 시물레이션을(<표 7>의 단일 제품 시물레이션 실행에 걸리는 시간은 최대 1시간(1.7GHz, 256Mega Ram))시행하여 계산 시간상 큰 이익을 얻을 수 있다.

계산 결과, 허용되는 생산 용량 수준에 따라 최적의 생산 비용은 [그림 5]와 같이 변한다. 흥미있는

사실은 표에서 보듯이 특정 용량 제약 곧 특정 임계점 이하( $n=126$ 일 때,  $C=8750$ ,  $n=200$ 일 때,  $C=14500$ )일 때 크게 비용이 증가하며, 용량 제약이 그보다 큰 경우 용량 제약 크기 증가에 따른 비용 변화가 거의 없다는 점이다. 이 점은 기회비용이 들어가는 용량 제약 수준을 정할 때 임계점 이상의 최소치로 용량제약을 정하는 것이 고객 만족도와 용량 제약 기회비용을 모두 고려할 때 가장 경제적으로 유리하다는 점을 암시하고 있다.



[그림 5] 용량 제약 크기 변화에 따른 최적 비용 변화

## 5. 결론

우리는 제철소에서 일어나는 소로트 주문 집약의 사례에 주목하여, 이 사례 내에서, 기존의 재고 정

책에서 변용된 새 형태의 재고 정책을 제시하고, 이것이 가능한 다른 재고 정책에 비해 보다 우수함을 보여주고, 또 파라미터 변화 분석을 통해 정책적 함의를 분석하였다. 또한 이러한 형태의 재고 정책을 쓰는 것이 전혀 재고를 쓰지 않는 형태의 주문 집약 대응 사례보다 월등히 우수함을 보여주었다. 주문 집약에서 집적 크기 제약과 용량제약이 동시에 일어나는 사례는 제철소만이 아니라 다른 산업에서도 찾을 수 있을 것이다. 이러한 경우 본 논문이 제시한 형태의 모델링과 정책, 최적화 방법은 조금의 변용만 거치면 그대로 적용 가능할 것이다. 특히 집적 크기 제약을 비롯하여 일부의 제약만이 제거된 사례에도 충분히 적용 가능한 일반화된 모델을 본 논문은 제시하였다. 다만 시뮬레이션을 이용한 본 논문의 방법론은, 전산자원을 많이 이용하여야 한다는 단점이 있어 이를 보완하기 위한, 본 논문의 모델에 적용 가능한 분석적 방법 연구가 향후 연구 과제가 될 만하다.

## 참 고 문 헌

- [1] David, K., R.P. Sadowski, and D.T. Sturrock, "Simulation with Arean," Korean Language Edition, 교보문고, 2005.
- [2] Diptendu, S. and K.F. Matta, "Multiechelon (R, S) Inventory Model," *Decision Sciences*, Vol.22(1991), pp.484-498.
- [3] Hadley, G. and T.M. Whitin, "Analysis of Inventory Systems, Prentice-Hall Inc.," Englewood Cliffs, NJ, 1963.
- [4] Hillier and Lieberman, *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill Higher Education, NY, (2001), pp.935-1008.
- [5] Jassen, F., R. Heuts, and T. de Kok, "On the (R, s, Q) Inventory Model when Demand is Modelled as a Compound Bernoulli Process," *European Journal of Operational Research*, Vol.104(1998), pp.423-436.
- [6] Kiesmuller, G.P. and A.G. de Kok, "The Customer Waiting Time in an (R,s,Q) Inventory System," *International journal of Production Economics*, (2005) on line publishing.
- [7] Strijbosh, L.W.G. and J.J.A. Moors, "The Impact of Unknown Demand Parameters on (R, S)-Inventory Control Performance," *European Journal of Operational Research*, Vol.162(2005), pp.805-815.
- [8] Tempelmeier, H., "Inventory Control Using a Service Constraint on the Expected Customer Order Waiting Time," *European Journal of Operational Research*, Vol.19(1985), pp.313-324.
- [9] Tempelmeier, H., "Inventory Service-levels in the Customer Supply Chain," *OR Spektrum*, Vol.22(2000), pp.361-380.
- [10] Van der Heijden, M.C. and A.G. De Kok, "Customer Waiting Times in an (R, S) Inventory System with Compound Poisson Demand," *Operational Research*, Vol.36(1992), pp.315-332.