韓國 컴퓨터情報學會 論文誌
第12卷 第5號, 2007. 11.

2007-12-5-4-1

재구성가능생산시스템 환경에서 긴급 재고 보충 및 처리 대안으로써 e-MarketPlace를 고려한 최적 생산-재고관리정책

장 일 환*, 이 철 웅**

Optimal Production-Inventory Control Policy with an e-MarketPlace as an Emergent Replenishment/Disposal Mode in Reconfigurable Manufacturing System

Jang Il Hwan*, Lee Chul Ung**

요 약

본 논문은 재구성가능생산시스템 환경에서 e-MarketPlace를 통한 거래상황을 도입한 주기적 검토 재고모형을 연구한다. 의사결정권자는 고객의 확률적 수요를 만족시키기 위해서 생산용량/생산량을 확장/축소하거나 e-MarketPlace를 통해 긴급으로 재고를 보충/처리한다. e-MarketPlace로부터의 거래 시 재고의 보충/처리에 걸리는 리드타임은 시스템의 생산리드타임보다 짧지만, 단위거래비용(구매/판매비용)은 생산용량/생산량을 한 단위 확장/축소하는 비용보다 높기 때문에 각 대안들의 비용-리드타임간의 trade-off가 고려된다. 추가적으로 e-MarketPlace로부터 재고를 보충하거나 생산용량을 확장하는 경우 그 수량에 따른 규모의 경제를 고려하기 위해 고정 비용이 포함된다. 우리는 제안되는 모형의 최적 정책형태를 규정하기 위해 동적계획모형과 *K-convexity* 기법을 적용하고, base stock policy와 (s,S) type policy의 조합으로 구성된 최적 생산-재고관리 정책을 제시한다.

Abstract

This paper studies a periodic review inventory model with an e-MarketPlace transaction in reconfigurable manufacturing system(RMS). A decision maker can expand/reduce production capacity/quantities and/or replenish/dispose inventories from/to e-MarketPlace urgently to satisfy the stochastic demands. If inventories are replenished or disposed through e-MarketPlace, this leadtime is shorter than the production leadtime, but unit purchasing or selling cost is more expensive than that of expanding capacity or reducing production quantities respectively. Henceforth, trade-off on these alternatives is considered. In addition to this, in order to consider the economy of scale, our model includes the fixed cost for purchasing from e-MarketPlace and capacity expansion. We use dynamic programming and K convexity methods to characterize the nature of the optimal policy. Finally, We present the optimal inventory control policy which is composed by the combinations of a base stock and (s,S) type policy.

▶ Keyword : 생산-재고관리(Production-Inventory Control), e-마켓플레이스(e-MarketPlace), 재구성가능생산시스템(Reconfigurable Manufacturing System),

• 제1저자 : 장일환 • 교신저자 : 이철웅
• 접수일 : 2007. 9.27, 심사일 : 2007. 10.2, 심사완료일 : 2007. 10.30.
* 고려대학교 정보경영공학부 석사과정 ** 고려대학교 정보경영공학부 교수
※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000010941-0)지원에 의해 이루어졌음

I. 서 론

현대사회는 고객요구의 다양화에 따라 제품수명주기는 점점 짧아지는 반면에, 기업의 글로벌화, 정보통신기술의 발달로 인한 e-Business 활성화 등의 현대적 요인은 전 세계를 하나의 네트워크로 연결함에 따라 시장의 범위는 점점 확대되고 있다. 이러한 시장환경 변화는 기업들에게 짧은 수명주기를 갖는 다품종 제품을 신속하게 생산할 수 있는 능력을 요구한다. 기존의 전용생산시스템(Dedicated Manufacturing System)은 자동화 기술을 통한 단일 아이템의 대량생산에 적합한 반면에 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System)은 다품종의 제품을 처리할 수 있는 유연성을 강조해왔다. 이러한 기존의 제조시스템들은 대량맞춤생산을 요구하는 시장수요를 만족시키기가 어려워짐에 따라 1990년대 말부터 시스템의 재구성, 즉 아이템간의 생산용량조정에 대한 변환성을 허용하면서 프로세스의 모듈화를 통해 다품종 아이템을 처리할 수 있는 유연성을 동시에 갖춘 재구성가능제조시스템(Reconfigurable Manufacturing System, 이하 RMS)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 제조시스템 패러다임의 변화는 생산라인 및 시스템의 재구성을 통한 시기적절한 동적 생산용량 확장문제(Dynamic Capacity Expansion Problem)에 대한 중요성을 강조하고 있다.

또한 최근 B2B 전자상거래의 활성화에 힘입어 e-Market Place(이하 e-MP)를 통한 협업 상거래가 발전함에 따라 많은 기업들이 e-MP를 통해 생산용량을 추가적으로 확보(e-order)하고 재고를 처리(e-inventory)할 수 있는 가상의 거래수단으로 도입하여 활용하려는 움직임이 활발하다. e-MP는 수요자와 공급자가 인터넷 기반의 가상공간에 모여 필요한 제품이나 서비스를 구매하거나 판매하고, 그리고 정보도 교환하면서 거래 커뮤니티를 형성할 수 있는 가상시장이다. 휴렛패커드와 컴팩은 컴퓨터 및 전자산업분야의 e-MP 컨소시엄을 구성하였고, 이에 대응하기 위해 IBM은 히타치와 공동으로 e2open.com을 설립하였다. 이 외에 철강제품과 관련된 E-steel과 전 세계 종이 제품에 대한 구매자와 판매자간 거래를 지원하는 PaperExchange, 전자부품업자와 제조업자간의 중개를 담당하는 TRADEC 등 수많은 e-MP가 전통적인 거래방식을 혁신하는 중개인 역할을 하고 있다. e-MP를 이용한 B2B 전자상거래에 대한 관심이 증대되면서 전자상거래의 전략적 활용 방안[1,2] 뿐만 아니라, 물류혁신을 위한 전자상거래 도입, 비용 구조 분석[3], 전자장거래 시스템 사용자 수 예측[4] 등의 연구들이 다각적으로 시도되고 있다.

e-MP를 통한 거래는 오프라인상에서 발생하는 불필요하고 복잡한 상거래 과정을 제거하고, 혁신적인 프로세스와 투명한 거래를 통해 그 기간을 줄임[5]으로써, 기업의 신속한 재고 확보 및 처리를 지원한다. 그러나 Lee 외 2인과 Bao 외 2인이 지적한 것처럼 중개자(Market-Maker)가 부과하는 거래수수료 및 주문에 따른 배송비용, 회원 가입비, Infra를 공동으로 활용하기 위한 기업 간 부담금 등의 제반비용으로 인해 단위 구매 및 판매 가격이 자체 생산비용보다 높은 경우가 종종 발생한다[6,7,8]. 따라서 기업이 e-MP를 도입하여 총비용을 절감하기위해서는 e-MP를 통한 거래와 자체생산, 각각에 대해 물품확보에 소요되는 리드타임 대 비용 trade-off를 고려한 의사결정이 요구된다.

이와 같은 연구는 최근 효율적 재고관리대안으로서의 e-MP의 중요성이 커지면서 활발하게 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 확률적인 고객수요에 대응하여, 라인재구성을 통한 생산용량확장 및 라인유휴를 통한 생산량 축소, e-MP를 통한 신속한 재고 보충 및 처리를 통합적으로 고려한 RMS의 최적 생산-재고관리정책을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 5개의 장으로 구성된다. 본 장에 이어 2장에서는 연구와 관련된 기존의 문헌들을 검토하고 본 연구의 타당성을 논한다. 3장에서는 문제를 정의하고, 제안되는 시스템에 대한 동적계획모형을 개발한다. 4장에서는 3장의 동적계획모형을 토대로 귀납적 추론을 통해 다중기간 모형에 대한 최적 생산-재고관리정책을 제시하고 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구대안을 제시한다.

II. 관련문헌 연구

본 논문에서는 e-MP를 재고의 긴급공급 및 처리모드로 도입한 재고시스템을 연구한다. 일반적으로 기업 내에서 긴급공급모드를 이용하는 사례는 빈번하게 발생한다. 예를 들어 기업은 현 재고수준이 다음 생산량(주문량)이 확보(도달)할 때까지 예상되는 수요보다 현저히 낮은 경우 재고품절에 대한 비용지출을 피하기 위해서 빨리 확보(도달)될 수 있도록 조금 더 높은 비용을 지불해서라도 기꺼이 생산(주문)해야할 것이다. 이런 상황에서 긴급조달을 위한 빠른 운송수단확보, 생산의 가속화를 위한 추가 인력고용, 야근, 생산설비확장 등은 정상적인 생산/주문비용 외에 추가비용을 발생시킨다. 이에 따라 긴급공급모드를 고려한 재고관리방안에 대한 연구의 핵심은 총비용을 최소화하기 위해 이러한

비용-리드타임 간의 균형을 고려한 최적 생산-재고관리정책을 제시하는 것이다.

긴급공급모드를 고려한 재고관리문제는 1960년대 초부터 최근까지 꾸준히 연구되어 오고 있다. 이 분야에 대한 선도적 연구로 Barankin은 정상공급모드와 긴급공급모드의 리드타임이 각각 0과 1인 주기적 검토기반 재고시스템(Periodic Review Inventory System)의 단일기간모형에 대해 최적재고관리정책을 제시하였다[9]. 이후 Daniel, Neuts는 Barankin의 모델을 다중기간의 경우로 확장하였고[10,11], Fukuda는 고정발주비용을 고려하여 리드타임이 각각 0, 1, 2인 세 공급모드를 갖는 재고시스템에 대한 최적정책을 도출하였다[12]. 기존의 연구들과 다르게 Whittmore와 Saunders는 긴급공급모드와 일반공급모드의 도달리드타임이 1기간 이상으로 확장되는 경우를 고려하였다[13]. Chiang과 Gutierrez은 긴급공급모드로 부터의 물품조달이 매 기간 초의 재고수준에 따라 결정되었던 기존의 연구들과는 달리 기간 내 언제든지 수행될 수 있도록 함으로써 가정을 완화하였다[14,15]. Tagaras와 Vlachos는 Order-Up-to Level에 관한 근사모형(approximation model)을 개발하였고, 재고품절이 발생할 확률이 가장 높을 때 긴급공급을 통한 물품조달을 통해 총기대비용을 절감할 수 있다는 것을 보였다[16].

e-MP를 재고의 긴급공급 및 처리 수단으로 도입한 연구는 최근에야 진행되기 시작하였다.

Lee 외 2인은 일반 공급자로부터의 물품도착기간이 1기간인 경우에 긴급재고관리 대안으로 e-MP를 이용한 재고정책에 대한 최적성을 증명하였고, 이를 기반으로 물품도착기간이 1기간 이상으로 길어지는 경우에 대해서 세 가지 발견적 재고관리기법(OUT, SOP, TDP)을 제안하였다.

먼저 OUT(Order Up to Policy)는 현 재고수준에 따라 사전에 결정된 Order up to Level까지 일반 공급자로부터 주문을 실시하거나 현 상태를 유지한다. 일반 공급자로부터의 물품도착기간이 길어지는 경우 시스템 모수들(재고 구매 및 판매수준)의 공식화된 해(closed form solution)를 구하는 것이 매우 어렵기 때문에 시뮬레이션을 통해 가장 낮은 비용을 도출하는 근사최적해로부터 재고정책을 도출하였다.

SOP(Standing Order Policy)는 매 기간 일반 공급자로부터 일정한 주문량이 도달된다는 가정을 통해 임의의 t 기간의 재고수준의 전이(transition)를 마코프 프로세스(Markov Process)로 나타내어 재고정책을 도출하였다.

TDP(Time Dependent Policy)는 어느 기간에 소매상이 주문을 하면 실제 도착하는 기간은 주문 후 일정 리드타임이 경과 후 도착하는 점에 착안, 일반 공급자로부터의 주문량이 실제주문시점에서 주문이 도달되는 기간까지의 비용을 최소화해야 한다는 개념을 통해 도출되었다. 포괄적인 수치적 실험을 통해 일반 공급자로부터의 물품도착기간이 1인 경우 OUP와 TDP의 기대비용이 가장 낮고, 그 이상으로 길어지는 경우 SOP와 TDP의 기대비용이 가장 낮다는 결론이 제시되었다[6].

Bao 외 2인은 수명주기가 짧은 제품(perishable product)을 고려한 주기적 재고 관리시스템에 대해서 연구하였다. 그들은 일반 공급자로부터의 주문량과 e-MP를 통한 긴급거래량 및 입찰가격(bid-price) 결정을 위한 동적계획모형을 개발하였고, 인접 기간간의 수요변동성이 크고 서로 강한 상관관계를 보이는 경우 비용절감효과가 더욱 우수하다는 사실을 입증하였다[7]. Bao 외 2인은 또한 e-MP 내의 정적/동적 가격결정 메커니즘 구축을 위한 수리적 모델을 개발하였고, e-MP 내에서 공급자와 소비자간 거래를 성사시키고 거래수수료를 결정하는 거래 중개인(market maker)의 역할을 고려하였다. 그들은 포괄적인 수치적 분석을 토대로 긴급물품구매 및 재고처리의 수단으로써 전자장터를 공급사슬 내 도입하는 것은 소매상이나 기업들의 물류비용절감뿐만 아니라 공급사슬전반의 총비용을 절감하는 데 효과적이라고 제시하였다[8].

본 연구는 e-MP를 재고의 긴급 보충 및 처리대안으로 도입하였다는 점에서 [6,7,8]의 연구와 유사하다. 그러나 본 연구에서는 e-MP로부터의 재고 구매 시 고정배송비용을 고려할 뿐만 아니라 리드타임이 다른 일반 공급자로부터의 고정비용(본 연구에서 라인 재구성에 대한 고정비) 또한 고려한다. 동적재고모형에서 각 재고확보대안들의 고정비용이 고려되는 경우 기대비용함수가 더 이상 볼록함수형태를 갖지 않기 때문에 그들이 제시한 Base Stock Policy기반의 주문정책은 더 이상 최적이 아니다. 우리는 본 논문에서 Scarf가 제시한 *K-Convexity*의 개념[17]을 도입하여 이에 대한 최적정책의 형태를 규정한다.

또한 본 연구에서는 이외에 추가적으로 라인 유휴를 통해 생산량을 축소하는 경우를 포함한다.

III. 문제 정의 및 동적계획모형

우리는 매 기간 일정한 생산용량으로 단일 품목을 생산하는 시스템을 고려한다. 의사결정자는 매 기간 초에 가용 재고수준을 검토하고 e-MP로부터 긴급으로 재고를 보충(구매) 또는 처리(판매)할 것인지, 다른 품목의 생산에 할당된

라인을 재구성하여, 이 품목의 생산용량을 확장함으로써 생산량을 증진할 것인지 또는 라인 유휴를 통해서 생산량을 줄일 것인지를 결정한다.

의사결정자가 e-MP로부터 물품을 구매하거나 판매하는 경우, 긴급 재고 공급 및 처리모드로써의 특성에 따라, 거래와 동시에 재고가 보충 및 처리되고(리드타임=0기간), 라인 재구성을 통한 추가생산량은 그 기간 말에 확보된다고 가정한다(리드타임=1기간). 즉, 라인 재구성은 일시적이나 품목의 생산에는 1기간이 소요된다.

라인이 재구성되어 생산용량이 확장된 경우, 그 증가분은 다음 기간의 생산용량에 누적되나 e-MP로부터의 거래량 및 라인 유휴로 인한 생산감소량은 그 기간에 일시적이므로 다음 기간의 생산용량에 영향을 끼치지 않는다.

라인 재구성을 통해 일시적으로 증가되는 생산용량에 대한 제한은 없으며, 매 기간의 고객수요는 알려진 확률분포를 따라 발생하고 i.i.d(independent and identically distributed)라 가정한다.

3.1 기호

수리모델에 이용되는 기호는 다음과 같다.

모수(System parameter)

- I_t : t 기간 초의 가용재고수준
- w_t : t 기간의 고객수요
- U_t : t 기간의 시스템의 생산용량 (U_1은 시스템의 초기생산용량을 나타냄)
- $\phi(w)$: 단위기간수요에 대한 확률분포함수
- $\Phi(w)$: 단위기간수요에 대한 누적확률분포함수
- K_E : e-MP로부터 재고 구매 시의 고정배송비용
- C_p : e-MP로부터 재고 구매 시의 단위수수료
- C_s : e-MP로 재고 판매시의 단위수수료
- K_L : 라인재구성에 따른 고정비용
- B_p : 라인재구성에 따른 단위추가생산비용
- B_s : 라인유휴에 따른 단위손실 (설비유지 및 유휴인력에 따른 손실 등)
- π : 기간 당 재고품절비용
- h : 기간 당 재고유지비용
- $g_E(x)$: e-MP로부터 재고를 x단위 구매하거나 판매할 때 발생하는 비용
- $g_L(x)$: 라인 재구성을 통해 생산용량(capacity)/생산량(production quantity)을 x단위 확장/축소할 때 발생하는 비용
- $\delta(x)$: $x>0$이면 $\delta(x)=1$, $x\leq 0$이면 $\delta(x)=0$을 나타내는 상태변수
- α : 기간 당 할인율

결정변수(Decision variable)

- $Y_{p,t}$: t 기간에 e-MP로부터 보충(구매)된 재고량
- $Y_{s,t}$: t 기간에 e-MP로 처리(판매)된 재고량
- $X_{p,t}$: t 기간에 라인 재구성을 통해 증가된 생산용량
- $X_{s,t}$: t 기간에 라인유휴로 인해 감소된 생산량

본 연구에서 K_E와 K_L을 제외한 모든 단위비용은 시스템의 단위생산비용에 추가된 비용으로 고려한다. 따라서 우리는 논문 전반에 걸쳐 단위생산비용을 따로 고려하지 않는다. 이에 따라 e-MP를 통해 재고를 x 단위 구매하거나 판매할 때 발생하는 비용, $g_E(x)$와 라인 재구성을 통해 생산용량(capacity)/생산량(production quantity)을 x단위 확장/축소할 때 발생하는 비용, $g_L(x)$는 다음과 같다.

$$g_E(x)=\begin{cases} K_E+C_p\times x, & e-MP\text{로부터 재고를 }x\text{단위 구매하는 경우} \\ C_s\times x, & e-MP\text{에 재고를 }x\text{단위 판매하는 경우} \end{cases}$$

$$g_L(x)=\begin{cases} K_L+B_p\times x, & \text{라인재구성을 통해 생산 용량을 }x\text{단위 확장하는 경우} \\ B_s\times x, & \text{라인유휴를 통해 생산량을 }x\text{단위 축소 하는 경우} \end{cases}$$

본 연구에서 고려하는 비용함수,

1) e-MP로부터 재고를 보충(구매)하거나 라인 재구성을 통해 생산용량을 확장하는 경우, 각 활동의 발생을 위한 고정비용과 수량에 비례하는 변동비용으로 구성
2) e-MP에 재고를 처리(판매)하거나 라인 유휴를 통해 생산량을 축소하는 경우, 수량에 비례하는 변동비용만으로 구성

에 대해서 이와 유사한 비용함수를 다룬 연구가 cash-management theory 분야에서 논의되었다[18,19]. 그러나 그들의 연구는 각 활동들의 리드타임은 모두 동일하다는 가정이 수반되어 있으며, 따라서 대안들 간 리드타임/비용

trade-off를 고려하지 않았다. 우리는 리드타임과 비용관계가 서로 다른 대안들(e-MP로부터 재고보충 vs 라인 재구성을 통한 생산용량확장, e-MP에 재고처리 vs 라인유휴를 통한 생산량 축소)를 동시에 고려함으로써 그들의 연구를 확장한다.

3.2 비용관계

우리는 제안되는 모형에서 다음의 비용관계를 가정한다.

- $K_E < K_L$,

라인재구성에 따른 고정비용, K_L은 생산용량확장을 위한 자본 투자비용으로써 e-MP로부터 구매 시의 고정배송비용, K_E보다 높은 경우가 일반적이다. 따라서 우리는 제안되는 모형에서 $K_E < K_L$의 비용관계를 가정한다.

- $0 < B_p < C_p < \pi$

$K_E < K_L$이므로 라인재구성에 따른 단위추가생산비용, Bp가 e-MP로부터 구매 시의 단위수수료, C_p보다 높다면, 라인 재구성을 통해 추가 생산하는 경우는 절대 발생하지 않는다. 따라서 $0 < B_p < C_p$가 되어야 한다. 또한 $B_p > \pi$이면, $C_p > \pi$이고, 이 경우 라인 재구성을 통해 추가 생산하거나 e-MP로부터 재고를 구매하는 것보다 재고품절상태로 두는 것이 이익이 되므로 어떠한 대안도 도입되지 않는다.

- $0 < B_s < C_s < h$

라인유휴에 따른 단위손실비용이 e-MP로 재고 판매시의 단위수수료보다 높다면, 즉 $0 < C_s < B_s$인 경우 재고확보에 걸리는 리드타임 차이로 인해 생산량을 감소하는 상황은 결코 발생하지 않는다. 또한 $B_s > h$ 이면, $C_s > h$이고, 이 경우 생산량을 감소하거나 e-MP로부터 재고를 판매하는 것보다 재고를 유지하는 것이 이익이 되므로 어떠한 대안도 도입되지 않는다.

따라서 이러한 비용관계들을 정의하지 않는다면 문제는 단순(trivial)해진다.

3.3 동적계획모형

$Z_t(I_t)$를 state가 I_t인 t 기간에서 $N+1$ 기간까지의 기대비용이라 정의하면, 이에 대한 동적계획모형은 정의된 기호를 토대로 다음 식 (1)과 같이 수립된다.

$$Z_t(I_t) = \min_{Y_{p,t}, Y_{s,t}, X_{p,t}, X_{s,t}} \{K_E \cdot \delta(Y_{p,t}) + C_p Y_{p,t} + C_s Y_{s,t} + L(I_t + Y_{p,t} - Y_{s,t}) + K_L \cdot \delta(X_{p,t}) + B_p X_{p,t} + B_s X_{s,t} + \alpha E[Z_{t+1}(I_{t+1})]\},$$

$$I_{t+1} = I_t + Y_{p,t} - Y_{s,t} + X_{p,t} - X_{s,t} + U_t - w_t,$$

$$U_t = U_{t-1} + X_{p,t-1} = U_1 + \sum_{k=1}^{t-1} X_{p,k}$$

$$Z_{N+1}(I_{N+1}) = \min_{Y_{p,N+1}, Y_{s,N+1}} [K_E \cdot \delta(Y_{p,N+1}) + C_p Y_{p,N+1} + C_s Y_{s,N+1} + L(I_{N+1} + Y_{p,N+1} - Y_{s,N+1})]$$

, where

$$L(x) = h\int_0^x (x-w)\varphi(w)d(w) + \pi\int_x^\infty (w-x)\varphi(w)d(w)$$

Subject to $Y_{p,t} \geq 0$, $Y_{s,t} \leq \max(0, I_t)$ for $t=1,2,\cdots N+1$;
$X_{p,t} \geq 0$, $X_{s,t} \leq \max(0, U_t)$ for $t=1,2,\cdots N$ ·· (1)

제약식 $Y_{s,t} \leq \max(0, I_t)$는 e-MP로의 판매량이 현 재고수준을 초과할 수 없다는 것을, 제약식 $X_{s,t} \leq \max(0, U_t)$는 라인 유휴를 통해 감소된 생산량이 그 기간의 생산용량을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다. t 기간의 생산용량, U_t는 t-1 기간의 생산용량, U_{t-1}과 라인 재구성을 통해 추가 확장된 생산용량, $X_{p,t-1}$의 합으로 구성되고, 이는 초기 생산용량, U_1과 t 기간 동안 라인 재구성을 통해 누적된 생산용량, $\sum_{k=1}^{t-1} X_{p,k}$의 합과 같다.

최종 $N+1$ 기간에서 시스템이 물품을 생산하는 경우 우리의 가정에 따라 1기간이 걸려 그 기간 말에 재고가 확보되므로 그 기간의 수요를 만족시킬 수 없다. 따라서 우리는 $N+1$ 기간에 시스템은 생산을 하지 않으며 e-MP를 통한 긴급 거래(재고 구매 및 판매)만이 수행된다고 가정한다.

IV. 최적 생산-재고관리정책

우리는 다중기간모형에 대한 시스템의 최적 생산-재고관리 정책을 도출하기 위해 동적계획법의 후진귀납법(backward induction)을 이용한다. 후진 귀납법은 동적계획모형으로부터 최적해를 찾기 위한 기법으로 최종 결정 단계부터 역으로 순환관계(Bellman equation)를 풀어나감으로써 결정 변수와 최적 대안을 찾는 방식을 취한다. 이는 동적계획모형의 해법이 각 단계의 문제를 풀어서 얻은 최적해가 각 단계의 가능한 상태에 대해 최적정책을 제공도록 설계됨에 따라 어느 단계의 최적 선택은 오직 현재 상태에만 종속되는 최적성의

원리(Principle of Optimality)에 기인한다. 따라서 우리의 모형에서 최종 기간(단계)의 재고수준(상태)에 관한 최적 정책을 찾는 것으로 시작하여 두 기간으로 확장, 두 기간모형의 1기간 초의 재고수준에 따른 순환관계를 통해 한 기간 씩 거꾸로 옮겨간다.

이에 4.1절에서는 먼저 최종기간인 $N+1$ 기간의 시스템의 최적정책을 제시하고 4.2 절에서 N 기간, 마지막으로 4.3 절에서 임의의 t 기간의 경우로 확장한다.

4.1 N+1 기간의 최적 재고관리정책

우리는 이 절에서 $N+1$ 기간에 대한 시스템의 최적정책을 제시한다. $N+1$ 기간의 시스템의 기대비용은 식 (1)의 $Z_{N+1}(I_{N+1})$에 해당한다.

$I_t+Y_{p,t}=P_{E,t}$와 $I_t-Y_{s,t}=S_{E,t}$를 임의의 t 기간의 e-MP를 통한 목표 구매 및 판매수준이라 정의하고, $P^*_{E,t}$와 $S^*_{E,t}$를 이에 대한 최적값이라 하자. 그렇다면 $P^*_{E,N+1}$과 $S^*_{E,N+1}$은 각각 현재고수준(state)이 I_{N+1}인 경우에 대해 다음 식 (2)와 (3)을 최소화하는 $P_{E,N+1}$과 $S_{E,N+1}$값이 되고, e-MP로부터의 구매결정을 위한 재주문점, $p^*_{E,N+1}$은 (s,S) 정책의 정의에 따라 다음 식 (4)를 만족하는 값이 된다.

$$G_{E,N+1}(P_{E,N+1},I_{N+1})$$
$$=C_p\cdot Y_{p,N+1}+L(I_{N+1}+Y_{p,N+1})=C_p(P_{E,N+1}-I_{N+1})+L(P_{E,N+1})\cdot \quad (2)$$

$$H_{E,N+1}(S_{E,N+1},I_{N+1})$$
$$=C_s\cdot Y_{s,N+1}+L(I_{N+1}-Y_{s,N+1})=C_s(I_{N+1}-S_{E,N+1})+L(S_{E,N+1})\cdot \quad (3)$$

$$G_{E,N+1}(p^*_{E,N+1},\ I_{N+1})=K_E+G_{E,N+1}(P^*_{E,N+1},\ I_{N+1}) \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

$p^*_{E,N+1}$, $P^*_{E,N+1}$, $S^*_{E,N+1}$는 그 정의에 의해 $p^*_{E,N+1}<P^*_{E,N+1}<S^*_{E,N+1}$의 관계를 갖는다 ($\because K_E>0$이므로 식 (4)에 의해 $p^*_{E,N+1}<P^*_{E,N+1}$. 식 (2)와 (3)은 각각 $P_{E,N+1}$과 $S_{E,N+1}$에 대해 convex이므로, 이에 대해 일차미분하여 정리하면 $P^*_{E,N+1}=\Phi^{-1}[\frac{\pi-C_p}{\pi+h}]$, $S^*_{E,N+1}=\Phi^{-1}[\frac{\pi+C_s}{\pi+h}]$에서 최소값을 갖는다. 따라서 $0<C_p$, $0<C_s$인 어떤 값에서도 $P^*_{E,N+1}<S^*_{E,N+1}$를 만족).

이를 통해 우리는 다음의 보조정리 1에서 $N+1$기간의 e-MP로부터의 최적정책 및 이에 따른 최적거래량을 제시한다.

보조정리 1. $N+1$ 기간의 e-MP로부터의 최적정책과 이에 따른 최적 구매 및 판매량, $(Y^*_{p,N+1},\ Y^*_{s,N+1})$은 다음과 같다.

- $I_{N+1}<p^*_{E,N+1}$이면, e-MP로부터 $P^*_{E,N+1}$까지 재고구매, $(P^*_{E,N+1}-I_{N+1},\ 0)$.
- $p^*_{E,N+1}\le I_{N+1}\le S^*_{E,N+1}$이면, 현 재고수준을 유지, $(0,\ 0)$.
- $S^*_{E,N+1}<I_{N+1}$이면, e-MP에 $S^*_{E,N+1}$까지 재고 판매, $(0,\ I_{N+1}-S^*_{E,N+1})$.

증명.

최종 $N+1$기간에 시스템은 생산을 하지 않으며 e-MP를 통한 거래만이 수행된다고 가정하였으므로, 이 경우 본 논문에서 제안하는 최적정책은 Girgis의 K>0, D=0인 단일기간 문제의 최적정책과 동일하다. 따라서 이에 대한 증명은 [18]를 참조.

보조정리 1에 따라 $N+1$ 기간의 state, I_{N+1}에에 대해서 e-MP로부터의 최적 수행에 따른 기대비용은 다음 식 (5)와 같이 나타나고, $Z^*_{N+1}(I_{N+1})$은 I_{N+1}에에 대한 *K-convex*함수이다[14].

$$Z^*_{N+1}(I_{N+1})$$
$$=\begin{cases} K_E+C_p(P^*_{E,N+1}-I_{N+1})+L(P^*_{E,N+1}), & I_{N+1}<p^*_{E,N+1} \\ L(I_{N+1}), & p^*_{E,N+1}\le I_{N+1}\le S^*_{E,N+1} \\ C_s(I_{N+1}-S^*_{E,N+1})+L(S^*_{E,N+1}), & S^*_{E,N+1}<I_{N+1} \end{cases}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

4.2 N 기간의 최적 생산-재고관리 정책

우리는 이 절에서 앞 절의 $N+1$ 기간 모형에 대한 최적정책을 토대로 N 기간의 경우로 확장한다. N 기간 동안의 시스템의 총 기대비용, $Z_N(I_N)$은 다음 식 (6)과 같다.

$$Z_N(I_N)$$
$$=\min_{Y_{p,N}Y_{s,N}X_{p,N}X_{s,N}}\{K_E\cdot\delta(Y_{p,N})+C_pY_{p,N}+C_sY_{s,N}$$
$$+L(I_N+Y_{p,N}-Y_{s,N})$$
$$+K_L\cdot\delta(X_{p,N})+B_pX_{p,N}+B_sX_{s,N}$$
$$+\alpha E[Z^*_{N+1}(I_{N+1})]\},$$
$$I_{N+1}=I_N+Y_{p,N}-Y_{s,N}+X_{p,N}-X_{s,N}+U_N-w_N \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

단일 기간모형과는 달리 두 기간 모형에서 의사 결정자는 N 기간 초의 재고수준, I_N에 따라 e-MP를 통해 긴급으로 재고를 보충(구매)/처리(판매)할 것인지 또는 라인 재구성을 통해 생산용량을 확장하거나 라인 유휴를 통해 생산량을 줄일 것인지를 동시에 결정해야 한다. e-MP를 통한 거래량은 긴급모드로의 특성에 따라 N 기간 초의 재고수준에 합산되거나, 재고수준을 감소시킨다. 그러나 라인 재구성을 통해 생산용량을 확장하거나, 라인 유휴를 통해 생산량을 줄이는 경우 생산량이 확보되기까지 1기간이 소요됨에 따라 그 증가 및 감소분은 기간 말의 재고수준에 합산되거나 재고수준을 감소시킨다. 우리는 먼저 다음 4.2.1에서 e-MP 거래 후 조정된 임의의 재고수준과 고정 생산량의 합에 따른 최적 생산정책을 제시하고, 이를 토대로 4.2.2에서 e-MP로부터의 구매 및 판매정책이 포함된 두 기간 모형의 최적 생산-재고관리정책을 제시한다.

4.2.1 최적생산정책

우리는 먼저 라인 재구성을 통한 생산용량확장 및 라인 유휴를 통한 생산량 축소결정을 위해 식 (6)으로부터 이와 관련된 기대 비용에 해당되는 부분을 $J_{L,N}(\hat{I}_N+U_N)$라 정의하면, 이는 다음 식 (7)과 같다.

$$
\begin{aligned}
&J_{L,N}(\hat{I}_N+U_N)\\
&=\min_{X_{p,N},X_{s,N}}\{K_L\cdot\delta(X_{p,N})+B_pX_{p,N}+B_sX_{s,N}\\
&\quad+\alpha E[Z^*_{N+1}(I_{N+1})]\}\\
&=\min_{X_{p,N},X_{s,N}}[K_L\cdot\delta(X_{p,N})+B_pX_{p,N}+B_sX_{s,N}\\
&\quad+\alpha E[Z^*_{N+1}(V_N-w_N)]],\\
&\hat{I}_N=I_N+Y_{p,N}-Y_{s,N},\quad V_N=\hat{I}_N+U_N+X_{p,N}-X_{s,N},\ I_{N+1}=V_N-w_N
\end{aligned}
\tag{7}
$$

$\hat{I}_N$는 N 기간의 e-MP 거래 후 조정된 임의의 재고수준을 나타낸다. 즉, $J_{L,N}(\hat{I}_N+U_N)$은 e-MP를 통한 거래 후 조정된 재고수준, $\hat{I}_N$과 N 기간의 생산용량, U_N의 합에 따라 라인 재구성을 통해 생산용량을 확장하거나 라인 유휴를 통해 생산량을 축소하는 경우에 대한 N 기간 동안의 시스템의 총기대비용을 의미한다.

우리는 위의 식 (7)에서 $J_{L,N}(\hat{I}_N+U_N)$의 형태를 분석하여, $\hat{I}_N+U_N$에 따른 최적생산정책을 도출하기에 앞서 다음의 보조정리 2와 3에서 전형적인 K-convex 함수에 대한 특성을 소개한다.

보조정리 2.

1) f가 K-convex이고, a가 양의 스칼라이면, $a\cdot f$는 모든 $k\geq a\cdot K$에 대해서 k-convex이다.
2) K-convex함수와 k-convex함수의 합은 $(K+k)$ convex이다 [13].

보조정리 3.

$\tilde{f}$가 K-convex이고 $f(x)=E[\tilde{f}(x-w)]$이면 f는 K-convex이다[16].

보조정리 4. $\alpha E[Z_{N+1}(V_N-w_N)]$은 V_N에 대한 K-convex 함수이다.

증명.

$Z^*_{N+1}(I_{N+1})$은 $I_{N+1}(=V_N-w_N)$에 대한 K-convex이므로, 보조정리 2의 1)과 보조정리 3에 의해 $\alpha E[Z_{N+1}(V_N-w_N)]$는 역시 K-convex이다.

$\hat{I}_t+U_t+X_{p,t}=P_{L,t}$와 $\hat{I}_t+U_t-X_{s,t}=S_{L,t}$를 각각 임의의 t 기간의 라인 재구성을 통한 생산용량의 목표 확장수준, 라인 유휴를 통한 생산량의 목표 축소수준이라 정의하고, $P^*_{L,t}$와 $S^*_{L,t}$를 이에 대한 최적값이라 하자. 그렇다면 $P^*_{L,N}$과 $S^*_{L,N}$은 각각 재고수준(state)이 $\hat{I}_N+U_N$인 경우에 대해 다음 식 (8)과 (9)를 최소화하는 $P_{L,N}$과 $S_{L,N}$값이 되고, 라인 재구성을 통한 생산용량확장여부를 결정하는 기준재고수준, $p^*_{L,N}$은 (s,S) 정책의 정의에 따라 다음 식 (10)을 만족하는 값이 된다.

$$
\begin{aligned}
&G_{L,N}(P_{L,N},\hat{I}_N+U_N)\\
&=B_p[P_{L,N}-(\hat{I}_N+U_N)]+\alpha E[Z_{N+1}(P_{L,N}-w_N)]
\end{aligned}
\tag{8}
$$

$$
\begin{aligned}
&H_{L,N}(S_{L,N},\ \hat{I}_N+U_N)\\
&=B_s(\hat{I}_N+U_N-S_{L,N})+\alpha E[Z_{N+1}(S_{L,N}-w_N)]
\end{aligned}
\tag{9}
$$

$$G_{L,N}(p^*_{L,N},\ \hat{I}_N+U_N)=K_L+G_{L,N}(P^*_{L,N},\ \hat{I}_N+U_N)\cdot \tag{10}$$

추가적으로 $s^*_{L,N}$을 $p^*_{L,N}\leq\hat{I}_N+U_N\leq S^*_{L,N}$인 경우, 식 (9)를 최소화하는 $S_{L,N}$값이라 정의하면 $p^*_{L,N}\leq s^*_{L,N}\leq\hat{I}_N+U_N$의 관계를 갖는다. 4.1 절의 $N+1$ 기간 모형에서

$H_{E,N+1}(S_{E,N+1}, I_{N+1})$는 I_{N+1}는 I_{N+1}에 대해 convex이고, $I_{N+1} \le S^*_{E,N+1}$에서 감소하기 때문에, $p^*_{E,N+1} \le I_{N+1} \le S^*_{E,N+1}$의 경우 $H_{E,N+1}(S_{E,N+1}, I_{N+1})$를 최소화하는 값은 I_{N+1}이 된다. 따라서 4.1 절에서는 이를 따로 정의하지 않아도 무방하다.

정의된 $p^*_{L,N}$, $P^*_{L,N}$, $s^*_{L,N}$, $S^*_{L,N}$을 토대로 N 기간의 최적생산정책은 다음의 보조정리 5와 같다.

보조정리 5. $\hat{I}_N + U_N$에 따른 N 기간의 최적생산정책과 이에 따른 최적 생산용량 증가량 및 생산 감소량, $(X^*_{p,N}, X^*_{s,N})$은 다음과 같다.

- $\hat{I}_N + U_N < p^*_{L,N}$이면, 라인 재구성을 통해 $P^*_{L,N}$까지 생산용량 확장, $(P^*_{L,N} - \hat{I}_N - U_N, 0)$.
- $p^*_{L,N} \le \hat{I}_N + U_N \le S^*_{L,N}$이면, 라인유휴를 통해 $s^*_{L,N}$까지 생산량 축소, $(0, \hat{I}_N + U_N - s^*_{L,N})$.
- $S^*_{L,N} < \hat{I}_N + U_N$이면, 라인유휴를 통해 $S^*_{L,N}$까지 생산량 축소, $(0, \hat{I}_N + U_N - S^*_{L,N})$.

증명.

식 (8)의 $B_p[P_{L,N} - (\hat{I}_N + U_N)]$과 식 (9)의 $B_s(\hat{I}_N + U_N - S_{L,N})$는 각각 $P_{L,N}$과 $S_{L,N}$에 대한 선형함수이고, $\alpha E[Z_{N+1}(P_{L,N} - w_N)]$과 $\alpha E[Z_{N+1}(S_{L,N} - w_N)]$는 보조정리 4에 의해 *K-convex*이므로 결과적으로 식 (8)과 (9)는 각각 $P_{L,N}$과 $S_{L,N}$에 대한 *K-convex*이다.

우리의 모형에서 생산량이 확보되기까지 1기간이 걸린다고 가정하였으므로 $J_{L,N}(\hat{I}_N + U_N)$은 N 기간의 재고 유지 및 품절비용, $L(\cdot)$를 포함하지 않는다. Girgis는 $L(\cdot)$이 포함된 경우에 대한 두 기간 모형의 최적정책을 제시하였다 [18]. 그러나 $L(\cdot)$은 *convex*함수이며, *convex*와 *K-convex*의 합은 여전히 *K-convex*를 유지하는 특성으로 인해, $L(\cdot)$의 유무에 따라 그들이 제시한 최적 정책의 형태가 바뀌지 않는다. 따라서 우리의 모형에서 N 기간의 최적 생산정책은 Girgis의 두 기간 모형에 대한 최적정책이 그대로 적용된다.

우리는 e-MP를 통한 거래 후 조정된 임의의 재고수준과 고정 생산량의 합, $\hat{I}_N + U_N$에 따라 어떤 생산대안이 도입되어야 할 것인지에 대한 최적정책을 제시하였다. 우리는 이를 토대로 다음의 4.2.2에서 e-MP로부터의 최적 거래(구매 및 판매)정책을 포함한, 시스템의 통합 정책을 제시한다.

4.2.2 최적 생산-재고관리정책

우리는 이 절에서 N기간 초의 재고수준, I_N에 따른 e-MP 거래를 포함한 최적 생산-재고관리정책을 제시한다.

보조정리 5를 토대로 N 기간의 생산시스템의 총 기대비용은 다음 식 (11)과 같이 재구성된다.

$$Z_N(I_N) = \min_{Y_{p,N}, Y_{s,N}} [K_E \cdot \delta(Y_{p,N}) + C_p Y_{p,N} + C_s Y_{s,N} + L(\hat{I}_N) + J^*_{L,N}(\hat{I}_N + U_N)]$$

, where

$$J^*_{L,N}(\hat{I}_N + U_N) = \begin{cases} \hat{I}_N + U_N < p^*_{L,N}\text{이면}, \\ K_L + B_p[P^*_{L,N} - (\hat{I}_N + U_N)] + \alpha E[Z_{N+1}(P^*_{L,N} - w_N)] \\ p^*_{L,N} \le \hat{I}_N + U_N \le S^*_{L,N}\text{이면}, \\ B_s(\hat{I}_N + U_N - s^*_{L,N}) + \alpha E[Z_{N+1}(s^*_{L,N} - w_N)] \\ S^*_{L,N} < \hat{I}_N + U_N\text{이면}, \\ B_s(\hat{I}_N + U_N - S^*_{L,N}) + \alpha E[Z_{N+1}(S^*_{L,N} - w_N)] \end{cases} \quad \cdots\cdots (11)$$

$J^*_{L,N}(\hat{I}_N + U_N)$는 $\hat{I}_N + U_N$에 따른 N기간의 최적 생산정책의 수행에 따른 기대비용을 나타낸다.

4.1에서와 같이 식 (12)~(14)를 정의하면, $P^*_{E,N}$과 $S^*_{E,N}$는 각각 state가 I_N인 다음 식 (12)와 (13)을 최소화하는 $P_{E,N}$과 $S_{E,N}$값이 되고, e-MP로부터의 구매결정을 위한 기준재고수준 $p^*_{E,N}$은 다음 식 (14)를 만족하는 값이 된다.

$$G_{E,N}(P_{E,N}, I_N) = C_p(P_{E,N} - I_N) + L(P_{E,N}) + J^*_{L,N}(P_{E,N} + U_N) \cdots (12)$$

$$H_{E,N}(S_{E,N}, I_N) = C_s(I_N - S_{E,N}) + L(S_{E,N}) + J^*_{L,N}(S_{E,N} + U_N) \cdots (13)$$

$$G_{E,N}(p^*_{E,N}, I_N) = K_E + G_{E,N}(P^*_{E,N}, I_N) \cdots\cdots (14)$$

이러한 $p^*_{E,N}$, $P^*_{E,N}$, $S^*_{E,N}$을 토대로 N기간 초의 재고수준, I_N에 따른 시스템의 최적 통합정책 및 e-MP를 통한 최적 구매/판매량, 최적 생산 증가/감소량이 다음의 정리 1에 제시된다.

정리 1. N 기간 초의 재고수준, I_N에 따른 시스템의 최적 생산-재고관리정책 및 e-MP를 통한 최적 구매/판매량, 최적 생산 증가/감소량, ($Y^*_{p,N}$, $Y^*_{s,N}$, $X^*_{p,N}$, $X^*_{s,N}$)은 다음과 같다.

- $I_N < p^*_{E,N}$이면, e-MP로부터 $P^*_{E,N}$까지 재고 구매, $P^*_{E,N}+U_N < p^*_{L,N}$이면, 라인 재구성을 통해 $P^*_{L,N}$까지 생산용량 확장, ($P^*_{E,N}-I_N$, 0, $P^*_{L,N}-P^*_{E,N}-U_N$, 0).
- $I_N < p^*_{E,N}$이면, e-MP로부터 $P^*_{E,N}$까지 재고 구매, $p^*_{L,N} \le P^*_{E,N}+U_N \le S^*_{L,N}$이면, 라인 유휴를 통해 $s^*_{L,N}$까지 생산량 축소, ($P^*_{E,N}-I_N$, 0, 0, $P^*_{E,N}+U_N-s^*_{L,N}$)
- $I_N < p^*_{E,N}$이면, e-MP로부터 $P^*_{E,N}$까지 재고 구매, $S^*_{L,N} < P^*_{E,N}+U_N$이면, 라인 유휴를 통해 $S^*_{L,N}$까지 생산량 축소, ($P^*_{E,N}-I_N$, 0, 0, $P^*_{E,N}+U_N-S^*_{L,N}$)

- $p^*_{E,N} \le I_N \le S^*_{E,N}$이면, 현 재고수준, I_N을 유지, $I_N+U_N < p^*_{L,N}$이면, 라인 재구성을 통해 $P^*_{L,N}$까지 생산용량 확장, (0, 0, $P^*_{L,N}-I_N-U_N$, 0)
- $p^*_{E,N} \le I_N \le S^*_{E,N}$이면, 현 재고수준, I_N을 유지, $p^*_{L,N} \le I_N+U_N \le S^*_{L,N}$이면, 라인 유휴를 통해 $s^*_{L,N}$까지 생산량 축소, (0, 0, 0, $I_N+U_N-s^*_{L,N}$)
- $p^*_{E,N} \le I_N \le S^*_{E,N}$이면, 현 재고수준, I_N을 유지, $S^*_{L,N} < I_N+U_N$이면, 라인 유휴를 통해 $S^*_{L,N}$까지 생산량 축소, (0, 0, 0, $I_N+U_N-S^*_{L,N}$)

- $S^*_{E,N} < I_N$이면, e-MP에 $S^*_{E,N}$까지 재고 판매, $S^*_{E,N}+U_N < p^*_{L,N}$이면, 라인 재구성을 통해 $P^*_{L,N}$까지 생산용량 확장, (0, $I_N-S^*_{E,N}$, $P^*_{L,N}-S^*_{E,N}-U_N$, 0).
- $S^*_{E,N} < I_N$이면, e-MP에 $S^*_{E,N}$까지 재고 판매, $p^*_{L,N} \le S^*_{E,N}+U_N \le S^*_{L,N}$이면, 라인 유휴를 통해 $s^*_{L,N}$까지 생산량 축소, (0, $I_N-S^*_{E,N}$, 0, $S^*_{E,N}+U_N-s^*_{L,N}$).
- $S^*_{E,N} < I_N$이면, e-MP에 $S^*_{E,N}$까지 재고 판매, $S^*_{L,N} < S^*_{E,N}+U_N$이면, 라인 유휴를 통해 $S^*_{L,N}$까지 생산량 축소, (0, $I_N-S^*_{E,N}$, 0, $S^*_{E,N}+U_N-S^*_{L,N}$).

증명.

식 (12)는 보조정리 5에 따라 다음 식 (12-1)~(12-3)으로 세분화될 수 있다.

1) $P_{E,N}+U_N < p^*_{L,N}$이면,

$$G_{E,N}(P_{E,N}, I_N) = C_p(P_{E,N}-I_N)+L(P_{E,N})+K_L+B_p[P^*_{L,N}-(P_{E,N}+U_N)] + \alpha E[Z_{N+1}(P^*_{L,N}-w_N)] \quad \cdots\cdots (12\text{-}1)$$

2) $p^*_{L,N} \le P_{E,N}+U_N \le S^*_{L,N}$이면,

$$G_{E,N}(P_{E,N}, I_N) = C_p(P_{E,N}-I_N)+L(P_{E,N})+B_s(P_{E,N}+U_N-s^*_{L,N}) + \alpha E[Z_{N+1}(s^*_{L,N}-w_N)] \quad \cdots\cdots (12\text{-}2)$$

3) $S^*_{L,N} < P_{E,N}+U_N$이면,

$$G_{E,N}(P_{E,N}, I_N) = C_p(P_{E,N}-I_N)+L(P_{E,N})+B_s(P_{E,N}+U_N-S^*_{L,N}) + \alpha E[Z_{N+1}(S^*_{L,N}-w_N)] \quad \cdots\cdots (12\text{-}3)$$

식 (12-1)의 경우 e-MP로부터의 임의의 구매수준, $P_{E,N}$과 연관된 부분은 $C_p(P_{E,N}-I_N)+L(P_{E,N})+B_p[P^*_{L,N}-(P_{E,N}+U_N)]$이며, $C_p(P_{E,N}-I_N)$과 $B_p[P^*_{L,N}-(P_{E,N}+U)]$은 $P_{E,N}$에 대한 선형함수, $L(P_{E,N})$은 $P_{E,N}$에 대해 convex이므로 결과적으로 $G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$은 $P_{E,N}$에 대해 convex이다.

($\alpha E[Z_{N+1}(P^*_{L,N}-w_N)]$는 $P^*_{L,N}$에 대한 K-convex이므로 $G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$의 $P_{E,N}$에 대한 convexity에 영향을 주지 않음).

식 (12-2)와 (12-3)의 경우 역시 $P_{E,N}$과 연관된 부분은 $C_p(P_{E,N}-I_N)+L(P_{E,N})+B_s(P_{E,N}+U_N-s^*_{L,N})$과 $C_p(P_{E,N}-I_N)+L(P_{E,N})+B_s(P_{E,N}+U_N-S^*_{L,N})$이며 $C_p(P_{E,N}-I_N)$, $B_s(P_{E,N}+U_N-s^*_{L,N})$, $B_s(P_{E,N}+U_N-S^*_{L,N})$는 $P_{E,N}$에 대한 선형함수, $L(P_{E,N})$은 $P_{E,N}$에 대해 convex이므로 결과적으로 $G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$은 $P_{E,N}$에 대해 convex이다(마찬가지로 $\alpha E[Z_{N+1}(s^*_{L,N}-w_N)]$ 과 $\alpha E[Z_{N+1}(S^*_{L,N}-w_N)]$는 각각 $s^*_{L,N}$과 $S^*_{L,N}$ 대한 K-convex이므로 $G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$의 $P_{E,N}$에 대한 convexity에 영향을 주지 않음). 결과적으로 $G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$은 $P_{E,N}$에 대한 convex라는 것을 알 수 있다.

$G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$의 경우와 마찬가지로 식 (13)을 세분화하면, 다음 식 (13-1)~(13-3)과 같고 이와 유사한 방식의 접근을 통해 $H_{E,N}(S_{E,N}, I_N)$는 $S_{E,N}$에 대해 convex라는 것을 알 수 있다.

1) $S_{E,N}+U_N<p^*_{L,N}$이면,

$$H_{E,N}(S_{E,N}, I_N)$$
$$=C_p(I_N-S_{E,N})+L(S_{E,N})+K_L+B_p[P^*_{L,N}-(S_{E,N}+U_N)]$$
$$+\alpha E[Z_{N+1}(P^*_{L,N}-w_N)] \cdots\cdots (13\text{-}1)$$

2) $p^*_{L,N}\le S_{E,N}+U_N\le S^*_{L,N}$이면,

$$H_{E,N}(S_{E,N}, I_N)$$
$$=C_p(I_N-S_{E,N})+L(S_{E,N})+B_s(S_{E,N}+U_N-s^*_{L,N})$$
$$+\alpha E[Z_{N+1}(s^*_{L,N}-w_N)] \cdots\cdots (13\text{-}2)$$

3) $S^*_{L,N}<S_{E,N}+U_N$이면,

$$H_{E,N}(S_{E,N}, I_N)$$
$$=C_p(I_N-S_{E,N})+L(S_{E,N})+B_s(S_{E,N}+U_N-S^*_{L,N})$$
$$+\alpha E[Z_{N+1}(S^*_{L,N}-w_N)] \cdots\cdots (13\text{-}3)$$

따라서 $G_{E,N}(P_{E,N}, I_N)$과 $H_{E,N}(S_{E,N}, I_N)$이 $P_{E,N}$과 $S_{E,N}$에 대해 각각 convex이고, 그 정의에 의해 $p^*_{E,N}<P^*_{E,N}<S^*_{E,N}$이므로, N 기간의 경우에도 e-MP를 통한 거래 정책은 보조정리 1의 최적정책이 그대로 적용된다. N 기간의 생산정책은 보조정리 5에 의해 e-MP 거래 후의 조정된 재고수준, $\hat{I}_N\in\{P^*_{E,N},\ I_N,\ S^*_{E,N}\}$)과 그 기간의 고정 생산용량의 합에 따라 결정된다.

우리는 다음 절에서 임의의 t 기간 모형의 경우로 확장한다.

4.3 임의의 t 기간의 최적 생산-재고관리정책

우리는 이 절에서 임의의 t 기간의 최적 생산-재고관리 정책을 도출하기 위해 귀납법을 통해 추론한다. 우리는 이미 4.2 절에서 두 기간 모형을 다룸으로써 본 연구에서 수립된 동적계획모형의 순환관계를 보였다. 이에 따라 만약 $t+1$ 기간의 기대비용, $Z_{t+1}(I_{t+1})$이 K-convex라면 보조정리 2의 1)과 보조정리 3에 의해 $\alpha E[Z_{t+1}(I_{t+1})]$ 역시 K-convex이고, 임의의 $\hat{I}_t+U_t$에 따라 보조정리 5를 통한 생산정책이 최적이다. 또한 $G_{E,t}(P_{E,t}, I_t)$과 $H_{E,t}(S_{E,t}, I_t)$가 정리 1의 증명에서 보인 것처럼 $P_{E,t}$, $S_{E,t}$에 대해 각각 convex이므로, 결과적으로 임의의 t 기간에 대해서도, 그 기간의 재고수준, It에 따라 정리 1의 최적정책이 그대로 적용된다. 결국 우리의 모형에서 최종 기간의 기대비용, $Z_{N+1}(I_{N+1})$이 K-convex이므로 순환관계에 의해 이러한 귀납 추론은 타당하다.

이에 다음 Figure 1과 2는 임의의 t 기간의 최적 재고관리 및 생산 정책을, Table 1은 시스템의 통합된 최적 생산-재고관리 정책 및 이에 따른 최적값, ($Y^*_{p,t}$, $Y^*_{s,t}$, $X^*_{p,t}$, $X^*_{s,t}$)을 나타낸다.

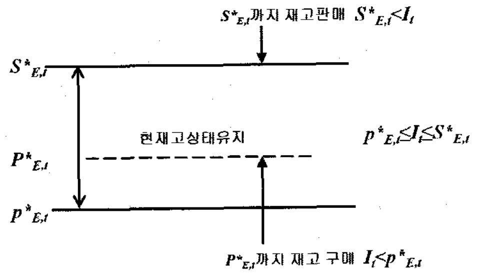


그림 1. t 기간의 e-MP를 통한 최적재고관리정책
Fig 1. Optimal Inventory Control Policy through e-MP at t Period

표 1. t 기간의 최적 생산-재고관리 정책 및 이에 따른 최적값
Table 1. Optimal Production-Inventory Control Policy and values at t Period

I_t에 따른 e-MP 정책	$\hat{I}_t+U_t$에 따른 생산정책	$Y^*_{p,t}$	$Y^*_{s,t}$	$X^*_{p,t}$	$X^*_{s,t}$
$I_t<p^*_{E,t}$	$P^*_{E,t}+U_t<p^*_{L,t}$	$P^*_{E,t}-I_t$	0	$P^*_{L,t}-P^*_{E,t}-U_t$	0
	$p^*_{L,t}\le P^*_{E,t}+U_t\le S^*_{L,t}$	$P^*_{E,t}-I_t$	0	0	$P^*_{E,t}+U_t-s^*_{L,t}$
	$S^*_{L,t}<P^*_{E,t}+U_t$	$P^*_{E,t}-I_t$	0	0	$P^*_{E,t}+U_t-S^*_{L,t}$
$p^*_{E,t}\le I_t\le S^*_{E,t}$	$I_t+U_t<p^*_{L,t}$	0	0	$P^*_{L,t}-I_t-U_t$	0
	$p^*_{L,t}\le I_t+U_t\le S^*_{L,t}$	0	0	0	$I_t+U_t-s^*_{L,t}$
	$S^*_{L,t}<I_t+U_t$	0	0	0	$I_t+U_t-S^*_{L,t}$
$S^*_{E,t}<I_t$	$S^*_{E,t}+U_t<p^*_{L,t}$	0	$I_t-S^*_{E,t}$	$P^*_{L,t}-S^*_{E,t}-U_t$	0
	$p^*_{L,t}\le S^*_{E,t}+U_t\le S^*_{L,t}$	0	$I_t-S^*_{E,t}$	0	$S^*_{E,t}+U_t-s^*_{L,t}$
	$S^*_{L,t}<S^*_{E,t}+U_t$	0	$I_t-S^*_{E,t}$	0	$S^*_{E,t}+U_t-S^*_{L,t}$

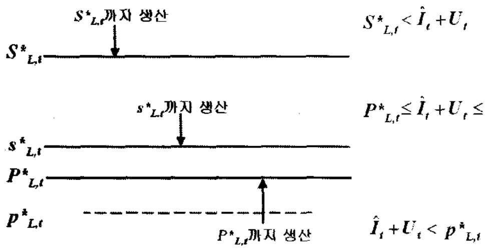


그림 2. t 기간의 최적생산정책
Fig 2. Optimal Production Policy at t Period

Table 1로부터 임의의 t 기간의 시스템의 최적 생산-재고관리 정책은 $I_t \langle p^*_{E,t}$이면, $P^*_{E,t}$수준까지 e-MP로부터 재고를 구매, $p^*_{E,t} \le I_t \le S^*_{E,t}$이면, 현 재고상태를 유지, $S^*_{E,t} \langle I_t$이면 $S^*_{E,t}$수준까지 e-MP에 재고를 판매하는 것이 최적이다. 따라서 e-MP 거래후의 조정된 재고수준, $\widehat{I}_t$는 t 기간 초의 재고수준, I_t에 따라 $\widehat{I}_t \in \{P^*_{E,t}, I_t, S^*_{E,t}\}$중의 하나가 되며, $\widehat{I}_t$와 그 기간의 고정생산량의 합, $\widehat{I}_t + U_t$에 따라, $\widehat{I}_t + U_t \langle p^*_{L,t}$이면, $P^*_{L,t}$수준까지 라인 재구성을 통해 생산용량을 확장, $p^*_{L,t} \le \widehat{I}_t + U_t \le S^*_{L,t}$이면, 라인유휴를 통해 $s^*_{L,t}$수준까지 생산량을 축소, $\widehat{I}_t + U_t \rangle S^*_{L,t}$이면 라인 유휴를 통해 $S^*_{L,t}$수준까지 생산량을 축소하는 것이 최적이 된다.

임의의 t 기간 모형에 대해서, e-MP를 통한 최적정책과 관련된 시스템 모수($p^*_{E,t}$, $P^*_{E,t}$, $S^*_{E,t}$)들은 $G_{E,t}(P_{E,t}, I_t)$, $H_{E,t}(S_{E,t}, I_t)$, K_E에 따라서 결정되고, 시스템의 최적 생산정책과 관련된 시스템 모수들($p^*_{L,t}$, $P^*_{L,t}$, $s^*_{L,t}$, $S^*_{L,t}$)은 $G_{L,t}(P_{L,t}, \hat{I}_t + U_t)$, $H_{L,t}(S_{L,t}, \hat{I}_t + U_t)$, K_L에 따라서 결정된다. 그러므로 시스템의 초기 생산용량, U_I이 주어지는 경우 우리는 Table 1을 통해 매 기간 초의 재고수준, I_t에 따라 총기대비용을 최소화하는 대안들을 동적으로 결정할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구방향

오늘날 시장의 범위가 확대되고 기업이 글로벌화되면서 기업들은 물류비용절감을 통한 경쟁적 우위를 점하기 위해 생산용량의 낭비 없이 재고관리에 있어서 유연성을 극대화하려는 움직임이 활발하게 진행되고 있다.

이러한 측면에서 가상의 긴급 생산용량확보 및 재고처리의 대안으로 B2B e-MP를 활용, 동적으로 생산용량조정이 용이한 RMS환경 구축과 관련된 문제는 산업계 뿐만 아니라 학계에서도 큰 관심을 불러오고 있다.

본 연구에서는 RMS 내 긴급재고보충 및 처리의 수단으로 e-MP를 도입한 시스템을 고려함으로써 매 기간 e-MP로부터의 적정 구매량 및 판매량, 라인 재구성을 통한 추가 생산용량 및 라인 유휴로 인해 감소된 생산량을 동시에 결정할 수 있도록 하여 생산-재고관리정책의 최적화를 이루도록 하였다.

이렇게 개발된 동적계획모형과 최적 생산-재고관리정책은 e-MP 및 RMS를 도입하여 기존의 재고관리에 유연성을 극대화하려는 기업들에게 생산 및 구매 계획의 수립, 재고의 효율적 관리 측면에서 큰 도움을 줄 수 있을 것이다. 이는 기업에게 있어 공급사슬 내 물류흐름을 원활하게함으로써 가격경쟁력을 확보할 수 있는 수단으로 작용될 수 있다. 아울러 최적정책을 찾기 위해 정립된 여러 정리와 특성들은 유사문제 또는 향후 개선될 다양한 모형들에 대해서 관련된 해법을 찾는 데에도 도움이 될 것으로 보인다.

본 연구와 관련되어 차후 e-MP 내 구매수량에 따른 할인정책 도입, 동적가격결정(Dynamic Pricing)의 적용을 통해 기존의 수동적 수요형태를 능동적으로 조정하여 이익을 최대화할 수 있는 최적재고정책 등에 대한 연구들이 고려될 수 있다.

참고문헌

[1] 고완기, "전자상거래의 전략적 활용 방안에 관한 연구", 한국컴퓨터정보학회 논문지, 제 5권 2호, 2000.

[2] 김제홍, 주상호, "B2B 전자상거래 현황과 정책방향", 한국컴퓨터정보학회 논문지, 제 8권, 1호, 2003.

[3] 권방현, "전자상거래상의 다단계 분배체계의 물류공동화를 위한 비용구조에 관한 연구", 한국컴퓨터정보학회 논문지, 제 5권, 4호, 2000.

[4] 김정수, 서상구, "전자상거래 시스템의 사용자 수 예측에 관한 연구", 한국컴퓨터정보학회 논문지, 제 10권, 4호, 2005.

[5] 홍승표, 정현수, 이동일, "B2C 및 B2B 전자상거래 현황과 비즈니스 유형", 주간기술동향, 통권 1001호, 2001.

[6] Lee, L.H., C. Lee and Bao, J. (2005), Inventory Control in the Presence of an Electronic Marketplace, European Journal of Operational Research, 174(2), pp. 797-815.

[7] Bao, J., Lee, C. and Lee, L.H. (2007), The Value of Electronic Marketplace in a Perishable Product Inventory System with Auto-correlated Demand,

OR spectrum 29(4), pp. 627-641

[8] Bao, J. and Lee, C. (2006), The Impact of an Electronic Marketplace on an Inventory System with Multiple Independent Retailers, Working Paper, Department of Industrial &Systems Engineering, National University of Singapore.

[9] Barankin, E.W. (1961). A delivery-lag inventory model with an emergency provision. Naval Research Logistics Quarterly 8, pp. 285-311.

[10] Daniel, K.H. (1963), A delivery-lag inventory model with emergency. In: Scarf, H.E., Gilford,

[11] Neuts, M.F. (1964), An inventory model with optimal time lag. SIAM Journal on Applied Mathematics, 12(1), pp. 179-185.

[12] Fukuda, Y. (1964), Optimal policies for the inventory problem with negotiable leadtime. Management Science, 10(4), pp. 690-708.

[13] Whittmore, A.S. and Saunders, S.C. (1977), Optimal inventory under stochastic demand with two supply options. SIAM Journal on Applied Mathematics, 32(2), pp. 293-305.

[14] Chiang, C. and Gutierrez, G.J. (1996), A periodic review inventory system with two supply modes. European Journal of Operational Research 94, pp. 527-547.

[15] Chiang, C. and Gutierrez, G.J. (1998), Optimal control policies for a periodic review inventory system with emergency orders. Naval Research Logistics 45, pp. 87-204.

[16] Tagaras, G. and Vlachos, D. (2001), A periodic review inventory system with emergency replenishment. Management Science, 47(3), pp. 415-429.

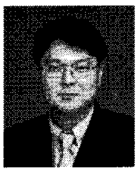
[17] Scarf, H. (1960). The optimality of (s,S) policies in the dynamic inventory problem. In Mathematical Methods in the Social Sciences, Chapter 13. Stanford University, Stanford, CA.

[18] Girgis, N.M (1968), Optimal Cash Balance Levels, Management Science, 15(3), pp. 130-140.

[19] Neave, E.H. (1970) The Stochastic Cash Balance Problem with Fixed Costs for Increases and Decreases, Management Science, 16, pp. 474-490,

[20] Zipkin, P. (2000) Foundations of Inventory Management. Irwin/McGraw-Hill Series in Operations and Decision Sciences. McGraw-Hill. Boston. MA.

저 자 소 개



이 철 웅

1992년 2월 : 서울대학교 산업공학과 졸업(공학사)

1994년 2월 : 서울대학교 산업공학과 졸업(공학석사)

1999년 2월 : Pennsylvania State Univ.(공학박사)

현재 : 고려대학교 정보경영공학부 조교수

관심분야 : SCM, Logistics, Revenue Management

장 일 환

2006년 2월 : 고려대학교 정보통계학과 졸업(경제학사)

2006년 ~ 현재 : 고려대학교 정보경영공학전문대학원 석사과정

관심분야 : SCM, 생산관리, 재고관리