

## 다계층 분배형 공급사슬에서 주문리스크의 근사적 계산방법과 비용개선효과

### An Approximate Order Risk Evaluation Method for the General Multi-Echelon Distribution Supply Chain

서 용 원

단국대학교 경상대학 경상학부 경영학전공  
[seoyw@dankook.ac.kr](mailto:seoyw@dankook.ac.kr)

#### Abstract

The objective of this paper is to provide an improved reorder decision policy for general multi-echelon distribution systems utilizing the shared stock information. It has been known that traditional reorder policies sometimes show poor performance in distribution systems. Thus, in our previous research we introduced the order risk policy which utilizes the shared stock information more accurately for the 2-echelon distribution system and proved the optimality. However, since the real world supply chain is generally composed with more than 2 echelons, we extend the order risk policy for the general multi-echelon systems. Since the calculation of the exact order risk value for general multi-echelon systems is very complex, we provide two approximation methods for the real-time calculation. Through the computational experiment comparing the order risk policy with the existing policies under various conditions, we show the performance of the order risk policy and analyze the value of the shared stock information varying with the characteristics of the supply chain.

*Keywords* : supply chain, reorder policy, general multi-echelon distribution systems, shared stock information, order risk policy

#### 1. 서론

정보기술의 발달에 따라 공급사슬 내의 실시간 재고 정보 공유를 위한 정보시스템을 많은 기업에서 이미 운영하고 있거나 도입을 고려하고 있다. 이에 따라, 실시간 재고 정보를 이용한 재주문 시점 결정이 공급사슬 운영에 있어서 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.

이러한 연속재고조사 정량 주문 정책(continuous-review batch ordering policy)에 대한 기존의 재주문 정책은 크게 설치재고정책(installation stock policy)과 계층재고정책(echelon stock policy)으로 나누어질 수 있다. 설치재고정책은 각 재고관리주체가 재주문점을 단지 자신의 재고수준에만 기반하여 결정하는 정책으로서, 공유 정보를 전혀 이용하지 않는다. 반면, 계층재고정책은 각 재고관리주체가 계층 재고에 기반하여 재주문점을 결정하는 재주문 정책이다. 계층 재고의 개념은 [Clar1960]에 의해 도입되었으며, 이것은 자신의 재고량과 자신의 하위에 연결된 모든 재고관리주체들의 보유 재고의 합으로 정의된다

계층재고정책이 설치재고정책에 비해 더 많은 정보를 이용하므로, 전자가 후자에 비해 더 낮은 재고관리비용을 보여줄 것으로 예상할 수 있다. 실제로, 조립형 시스템(assembly system)과 직렬형 시스템(serial system)에서는 계층재고정책이 설치재고정책에 비해 우수한 성능을 보여준다는 것이 알려져 있다. 그러나, 분배형 시스템(distribution system)에서는 두 정책의 우열성이 경우에 따라 바뀔 수 있을 뿐 아니라[Axsa1996], 두 정책 모두 최악의 경우에 대한 비용의 상한선이 존재하지 않음이 밝혀진 바 있다. [Axsa1997]

[Seo2002]에서는 계층재고정책이 분배형 시스템에서 좋지 않은 성능을 보여주는 가장 두드러진 이유를 계층재고정책에서 공유 재고 정보가 가공되는 방식에서 찾았다. 이들은 소매점 수요가 포아송 분포로 발생하는 2계층 분배형 시스템을 대상으로, 실시간 공유 재고 정보를 최대한 활용하는 재주문 정책인 주문리스크 정책을 제시하고 최적성을 입증하였으며, 기존 정책과의 비교 실험을 통해 실시간 공유 재고 정보의 가치를 제시하였다. [서2000]에서는 주문리스크 정책의 최적성을 이용하여, 환경에 따라 공유 정보의 가치가 어떻게 달라지는지를 고찰하였으며, [서2002]에서는 2계층 분배형 시스템에서 수요가 복합 포아송 분포(compound poisson distribution)로 나타나는 경우에 대해 근사적인 주문리스크 정책을 제시하고, 실험을 통해 비용절감효과를 입증하였다.

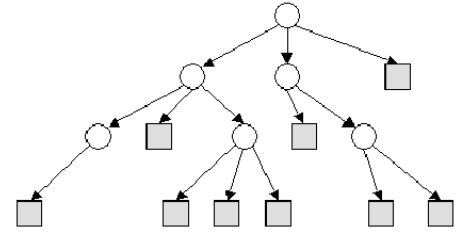
주문리스크 정책에 대한 상기의 연구들은 분배형 시스템에서 효과적인 재주문 정책을 제시하였으나, 고려

대상 시스템이 모두 2계층으로 한정되어 있다는 점에서 한계를 가진다. 실제의 분배형 시스템이 대부분 3개 이상의 다계층으로 구성되어 있음을 감안할 때, 이러한 일반적 다계층 분배형 시스템에 대해 주문리스크 정책을 확장하는 것은 중요한 과제이다. 또한, 재주문의 결정은 실시간에 이루어지는 것이므로, 주문리스크를 빠르게 계산할 수 있는 근사기법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 주문리스크 정책에 관한 상기의 연구들을 확장하여, 일반적 다계층 분배형 공급사슬에 대하여 주문리스크 정책을 수립하고, 실시간 계산을 위한 근사 방법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 모형

### 2.1 가정

시스템에는 한 개의 창고(또는 1차 도매점)와 여러 개의 2차 도매점이 있고, 각 2차 도매점은 여러 개의 3차 도매점을 가질 수 있다. 이와 같이 하여, 최종 계층은 소매점들로 구성된다. 최종 계층이 아니더라도, 자녀 노드(child node)를 갖지 않는 설비는 소매점의 역할을 하게 되며, 수요는 소매점에서만 발생한다. 그림 1은 이와 같은 구조를 도식화하여 나타내었다.



[그림 1] 일반적 다계층 분배형 시스템의 구조

하위 설비는 하나의 상위 설비에 주문한다. 1차 설비인 창고는 다시 외부 공급자에서 상품을 구매하며, 외부 공급자는 무한대의 공급 용량을 갖는다고 가정한다. 모든 설비는 실시간 재고 정보를 상위 설비에 제공하며, 상위 설비는 인도 기간을 항상 일정하게 보장하는 전략적 제휴 관계에 있다고 가정한다. 상위 설비의 하위 설비에 대한 인도 기간은 각각 다른 상수로 주어지며, 외부 공급자의 창고에 대한 인도기간도 일정하다. 각 설비는 연속재고조사 정량 주문 정책(continuous-review batch ordering policy)을 사용한다고 가정한다. 최종 고객 수요는 소매점에서만 발생하며, 소매점에 도착하는 고객 수요는 포아송 분포(Poisson distribution)를 따른다. 소매점에서 재고고갈(stockout)이 발생한 경우, 과다 수요는 모두 이월주문(backorder)으로 처리되며, 이 때 단위시간당 재고단위당 일정한 양의 재고고갈비용(stockout cost)이 발생한다. 소매점 이외의 설비에서 재고 고갈이 발생한 경우, 해당 설비는 응급처리(emergency operation)를 통해 상위 설비(창고의 경우에는 외부 공급자)에서 인수할 상품의 일부를 앞당겨 인수하며, 이 과정에서 단위시간당 재고단위당 일정한 양의 응급처리비용이 발생한다고 가정한다. 모든 설비의 주문량(order quantity)은 확정적 모델 등의 다른 방법에 의해 주어져 있다고 가정한다.

### 2.2 기호 정의

기호 편의상, 최상위 설비를 0번 설비, 다른 설비들을 각각 1, 2, ..., N번 설비로 나타낸다.

$Sub(j)$  = 설비  $j$ 의 하위 설비의 집합,  $j=0, \dots, N$

$L_j$  = 설비  $j$ 로의 인도기간,  $j=0, \dots, N$

$Q_j, h_j, p_j$  = 설비  $j$ 의 일회주문량, 재고유지비용, 재고고갈비용,  $j=0, \dots, N$

$R_j, \lambda_j$  = 소매점  $j$ 의 재주문점, 고객도착율,  $j$ 는 소매점

$i_j(t), I_j(t)$  = 설비  $j$ 의  $t$ 시점의 설치재고위치, 설치재고수준,  $j=0, \dots, N$

$\mathbf{I}_j(t)$  = 설비  $j$ 와 설비  $j$ 의 모든 하위설비들의  $t$ 시점의 설치재고위치벡터,  $j=0, \dots, N$

$\mathbf{I}_j^{sub}(t)$  = 설비  $j$ 의 모든 하위설비들의  $t$ 시점의 설치재고위치벡터,  $j=0, \dots, N$

또한, 다음과 같은 확률변수(random variable)들을 정의한다.

$D_j(t_1, t_2)$  =  $(t_1, t_2)$  동안 설비  $j$ 에 발생하는 수요량,  $j=0, \dots, N$

$\Omega_j(t_1, t_2)$  =  $(t_1, t_2)$  동안 설비  $j$ 의 주문량,  $j=0, \dots, N$

$\mathbf{D}_j(t_1, t_2)$  =  $(t_1, t_2)$  동안 설비  $j$ 와 모든 하위설비들에 발생하는 수요량 벡터,  $j=0, \dots, N$

## 3. 주문리스크 정책의 수립

### 3.1 한계절감

주문리스크의 수식화를 위해서는 먼저 주문연기에 의한 한계절감(marginal savings of delaying order)이 먼저 정의되어야 한다. 한계절감함수는 [Seo2002]에서 나타난 2계층의 경우와 유사한 방법으로, 해당 설비의 재고

량과 하위 설비의 수요량으로부터 유도된다.

지금, 임의의 설비  $j$ 를 고려하자. 만약, 설비  $j$ 가  $j$ 가  $t$ 시점에 주문한다면,  $t+L_j$  시점의 재고수준(stock level)은 다음과 같을 것이다.

$$I_j(t+L_j) = i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \quad (1)$$

만약 설비  $j$ 가 주문 시점을 그동안 고객이 도착하지 않을 정도로 매우 짧은 시간  $\varepsilon$ 만큼 연기하여  $t+\varepsilon$  시점에 주문한다면, 아직 재고 보충이 이루어지지 않은 시점의 재고수준은

$$I_j(t+L_j) = i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \quad (2)$$

이 되고,  $\varepsilon$ 이 경과하여 재고 보충이 이루어지면 재고수준은

$$\begin{aligned} I_j(t+L_j+\varepsilon) &= i_j(t) - D_j(t+\varepsilon, t+L_j+\varepsilon; \mathbf{I}_j^{sub}(t+\varepsilon)) + Q_j \\ &= i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \end{aligned} \quad (3)$$

과 같이 된다. 만약  $i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) > 0$ 이면, 주문 연기에 의한 효과는 단지  $Q_j$ 만큼의 추가 재고의 보유 시점을  $\varepsilon$ 만큼 연기하는 것이 되므로, 창고는  $h_j Q_j \varepsilon$ 의 순절감비용을 얻게 될 것이다. 만약  $i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \leq -Q_j$ 이면, 주문을  $\varepsilon$ 만큼 연기하는 것은  $p_j Q_j \varepsilon$ 만큼의 재고고갈비용 증가를 야기할 것이다. 만약  $-Q_j < i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \leq 0$ 이면, 주문 연기에 의해 재고유지비용의 절감과 재고고갈비용의 증가가 동시에 일어나므로, 순절감비용은  $h_j \varepsilon (i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j) + p_j \varepsilon (i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$ 로 나타난다. 순절감비용이 양의 값을 가지는 동안은 주문을 연기하는 것이 좋을 것이며, 순절감비용이 0 이하의 값이 될 때에는 주문을 하는 편이 유리할 것이다. 이와 같이, 주문 연기에 따른 비용 절감여부의 판정은 부호만이 의미가 있으므로, 표현상의 편의를 위하여  $(h_j + p_j)$ 로 나눈 값을 취하면,  $\varepsilon$ 만큼의 주문 연기로 얻어지는 순절감여부의 판정 함수는 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \varepsilon, & \text{if } i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) > 0 \\ -\frac{p_j Q_j}{h_j + p_j} \varepsilon, & \text{if } i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) < -Q_j \\ (i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) \varepsilon + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \varepsilon, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $\varepsilon \rightarrow 0$ 을 취하면 주문 연기에 따른 한계절감함수를 얻게 된다. 따라서, 설비  $j$ 에서 주문연기에 의한 한계절감을  $\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$ 로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) = \begin{cases} \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j}, & \text{if } i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) > 0 \\ -\frac{p_j Q_j}{h_j + p_j}, & \text{if } i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) < -Q_j \\ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j}, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, 주문연기에 의한 한계절감  $\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$ 에 대해 다음과 같은 성질이 성립한다.

**도움정리 1.**  $\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$  는 주문이 일어나기 전까지는 감소함수이다.

증명)

$i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) = l_j(t+L_j)$  이므로,  $\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$  를 다시 쓰면,

$$\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) = \begin{cases} \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} & , \text{if } l_j(t+L_j) > 0 \\ l_j(t+L_j) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} & , \text{if } -Q_j < l_j(t+L_j) \leq 0 \\ -\frac{p_j Q_j}{h_j + p_j} & , \text{if } l_j(t+L_j) < -Q_j \end{cases}$$

가 된다. 여기서, 가정에 의해 수요는 항상 양이므로, 주문이 일어나기 전까지는 재고수준  $l_j(t+L_j)$  는 항상 감소하고,  $\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$  의 형태로부터,  $l_j(t+L_j)$  이 감소하면  $\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)))$  도 감소함이 명백하므로, 증명이 성립한다. ■

### 3.2 주문리스크 정책

설비  $j$ 의 한계절감  $\pi_j$ 의 값이 양인 동안은 주문을 연기하고, 음의 값을 가지게 될 때 재주문하는 것이 이익이 된다. 그러나,  $\pi_j$ 의 계산에 필요한 값 중 미래의 수요  $D_j$ 는 확률변수이므로,  $t$ 시점에서는  $\pi_j$ 의 값이 결정되지 않는다. 따라서, [Seo2002]와 같이,  $\pi_j$ 의 기대값을 취하여  $\gamma_j$ 로 나타내기로 하면,

$$\gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) = E[\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) | \mathbf{I}_j(t))] = \sum_{x=0}^{\infty} \pi_j(i_j(t), x) \Pr(D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) | \mathbf{I}_j^{sub}(t) = x) \quad (6)$$

와 같이 된다. 여기서,  $\gamma_j$ 는 설비  $j$ 가 주문을 함에 의하여 발생하는 단위시간당 비용의 기대값을 의미하게 되며, 이를 설비  $j$ 의 주문리스크(order risk)로 정의한다. Lemma 1에 의해,  $\pi_j$ 는 시간에 따라 감소하므로, 이의 기대값인 주문리스크도 시간에 따라 감소하는 값이 된다. 따라서, 주문리스크 정책(order risk policy)을 설비의 주문리스크  $\gamma$ 가 0 이하의 값이 되는 시점에 재주문하는 정책으로 정의한다.

### 3.3 주문리스크 정책의 최적성

본 절에서는, 일반적 다계층 분배형 시스템에서 시스템 내의 모든 설비가 주문리스크 정책을 따르는 경우, 시스템의 기대비용이 최소화됨을 보인다. 이는 [Seo2002]에서의 2계층 시스템에서의 증명 과정과 유사한 과정을 통해 이루어진다.

**정리 1.** 일반적 다계층 분배형 시스템에서 주문리스크 정책은 시스템 기대비용을 최소화한다.

증명)

시스템 비용은 각 설비 비용의 합으로 나타나므로, 임의의 설비  $j$ 에서 주문리스크 정책을 사용하였을 때 설비  $j$ 의 비용이 최소화됨을 보이는 것으로 충분하다. 이것은 다시, 설비  $j$ 에서 어떤 임의의 재주문점 집합  $\mathbf{R}_j$ 를 사용하여도, 주문리스크에 의한 재주문점 집합

$$\mathbf{R}_j^* = \{i_j(t), \mathbf{I}_j^{sub}(t) | \gamma_j(i_j(t), \mathbf{I}_j^{sub}(t)) = 0\} \quad k=1,2,3$$

를 사용하였을 경우에 비해 항상 시스템 비용의 기대값이 높음을 보이면 된다.

지금,  $\mathbf{R}_j$ 를 사용하는 경우의 시스템 비용을  $TC_j$ ,  $\mathbf{R}_j^*$ 를 사용하는 경우의 시스템 비용을  $TC_j^*$ 라고 하자. 그러면,

$$E[TC_j^*] \leq E[TC_j] \text{ for any } \mathbf{R}_j$$

를 보이는 것으로 충분하다. 여기서, (0,t) 사이의 설비 j의 누적 비용을  $TC_j(0,t)$  로 나타내기로 하면,

$$E[TC_j^*] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{TC_j^*(0,T)}{T}$$

$$E[TC_j] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{TC_j(0,T)}{T}$$

이고

$$E[TC_j^*] - E[TC_j] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{TC_j^*(0,T) - TC_j(0,T)}{T}$$

이다. 여기서,  $\mathbf{R}_j$ 에 의해 주문이 일어난 시점을 순서대로  $t_1, t_2, \dots$  라 하고,  $\mathbf{R}_j^*$ 에 의해 주문이 일어난 시점을 순서대로  $t_1^*, t_2^*, \dots$  라 하자. 그러면,  $t_i \neq t_i^*$ 인 경우에만 비용의 차이가 발생하게 된다.

**Case 1)**  $t_i < t_i^*$  인 경우

$\mathbf{R}_j^*$ 보다  $\mathbf{R}_j$ 가 먼저 주문한다. 비용은  $(t_i+L_j, t_i^*+L_j)$ 에서만 차이가 난다.

$(t_i+L_j, t_i^*+L_j)$ 에서  $\mathbf{R}_j^*$ 의 비용은

$$TC_j^*(t_i+L_j, t_i^*+L_j) = \int_{t_i}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right] \right\} dt$$

이고,  $(t_i+L_j, t_i^*+L_j)$ 에서  $\mathbf{R}_j$ 의 비용은

$$TC_j(t_i+L_j, t_i^*+L_j) = \int_{t_i}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right] \right\} dt$$

이다. 그러면, 비용의 차이는

$$\begin{aligned} & TC_j^*(t_i+L_j, t_i^*+L_j) - TC_j(t_i+L_j, t_i^*+L_j) \\ &= \int_{t_i}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right] \right\} dt \\ &\quad - \int_{t_i}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right] \right\} dt \\ &= -(h_j + p_j) \int_{t_i}^{t_i^*} \pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) dt \end{aligned}$$

가 된다.

**Case 2)**  $t_i^* < t_i$  인 경우

$\mathbf{R}_j^*$ 가  $\mathbf{R}_j$ 보다 먼저 주문한다. 비용은  $(t_i^*+L_j, t_i+L_j)$ 에서만 차이가 난다.

$(t_i^*+L_j, t_i+L_j)$ 에서  $\mathbf{R}_j^*$ 의 비용은

$$TC_j^*(t_i^*+L_j, t_i+L_j) = \int_{t_i^*}^{t_i} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right] \right\} dt$$

이고,  $(t_i^*+L_j, t_i^*+L_j)$ 에서  $\mathbf{R}_j$ 의 비용은

$$TC_j(t_i^*+L_j, t_i^*+L_j) = \int_{t_i^*}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right]^- \right\} dt$$

이다. 그러면, 비용의 차이는

$$\begin{aligned} & TC_j^*(t_i^*+L_j, t_i^*+L_j) - TC_j(t_i^*+L_j, t_i^*+L_j) \\ &= \int_{t_i^*}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + Q_j \right]^- \right\} dt \\ & - \int_{t_i^*}^{t_i^*} \left\{ h_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right]^+ + p_j \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \right]^- \right\} dt \\ &= (h_j + p_j) \int_{t_i^*}^{t_i^*} \pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) dt \end{aligned}$$

가 된다.

Case 1, case 2에서,

$$\begin{aligned} E[TC_j^*] - E[TC_j] &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{TC_j^*(0, T) - TC_j(0, T)}{T} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[ - \sum_{i \text{ s.t. } t_i < t_i^*} (h_j + p_j) \int_{t_i}^{t_i^*} \pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) dt + \sum_{i \text{ s.t. } t_i^* < t_i} (h_j + p_j) \int_{t_i^*}^{t_i} \pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) dt \right] \\ & \text{(도움정리 1에 의해)} \\ &\leq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[ - (h_j + p_j) \sum_{i \text{ s.t. } t_i < t_i^*} (t_i^* - t_i) \pi_j(i_j(t_i^*), D_j(t_i^*, t_i^*+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t_i^*))) \right. \\ & \quad \left. + (h_j + p_j) \sum_{i \text{ s.t. } t_i^* < t_i} (t_i - t_i^*) \pi_j(i_j(t_i^*), D_j(t_i^*, t_i^*+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t_i^*))) \right] \\ &= (h_j + p_j) \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[ \sum_i (t_i - t_i^*) \pi_j(i_j(t_i^*), D_j(t_i^*, t_i^*+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t_i^*))) \right] \\ &= (h_j + p_j) E[t - t^*; (i_j(t), \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \in R_j, (i_j(t^*), \mathbf{I}_j^{sub}(t^*)) \in R_j^*] \cdot E[\pi_j(i_j(t^*), D_j(t^*, t^*+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t^*)))] \\ &= (h_j + p_j) E[t_i - t_i^*; (i_j(t), \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \in R_j, (i_j(t^*), \mathbf{I}_j^{sub}(t^*)) \in R_j^*] \cdot \gamma_j(i_j(t^*), \mathbf{I}_j^{sub}(t^*)) \\ &= 0 \end{aligned}$$

이 되어 증명이 성립한다. ■

### 3.4 주문리스크의 수식화

설비 j의 t 시점의 주문리스크는 식(6)과 같이 정의됨을 앞의 절에서 설명하였다. 여기서, 설비 j가 소매점 이 아니라면, 설비의 수요는 하위설비의 주문량의 합이므로,

$$D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) = \sum_{k \in Sub(j)} \Omega_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k(t)) \quad (7)$$

이 된다. 가정에 의해 하위설비 k도 주문리스크 정책을 사용하고 있으므로,  $(t, t+L_j)$  동안의 설비 k의 수요는  $t+L_j$  시점에 해당 설비의 주문리스크 값  $\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j))$ 에 의해 결정된다. 만약  $\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j)) > 0$  이라면 설비

k의 (t,t+L<sub>j</sub>)동안의 주문량은 0이 될 것이다. 그러나,  $\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j)) \leq 0$  이라면 설비 k는 이 값을 양으로 만들기에 충분한 횡수의 주문을 수행하게 될 것이다. 설비 k의 주문리스크의 값이  $\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j))$ 일 때 설비 k가 행하게 되는 주문의 횡수를  $N(\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j)))$ 으로 나타내기로 하면,

$$N(\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j))) \equiv \text{Min}_n \left\{ E \left[ \pi_k(i_k(t) + nQ_k, D_k(t+L_j, t+L_j+L_k; \mathbf{I}_k^{sub}(t+L_j) | \mathbf{I}_k(t+L_j))) \right] > 0 \right\} \quad (8)$$

과 같이 정의할 수 있고, 설비 k의 (t,t+L<sub>j</sub>)동안의 주문량은

$$\Omega_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k(t)) = Q_k \cdot N(\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j))) \quad (9)$$

로 나타나게 된다. 여기서, 설비 k를 정점으로 하는 하위시스템의 t+L<sub>j</sub> 시점의 재고량 벡터인  $\mathbf{I}_k(t+L_j)$ 는, 현재 재고량  $\mathbf{I}_k(t)$ 와 (t,t+L<sub>j</sub>)동안 설비 k의 하위시스템에 속해 있는 소매점 각각에 발생한 수요량에 의해 결정된다. 설비 k의 하위시스템에 속해 있는 소매점의 집합을  $\{r_1, \Lambda, r_m\}$ 이라고 하고, (t,t+L<sub>j</sub>)동안 소매점에 발생한 수요량을 각각 확률변수  $D_{r_1}(t, t+L_j), \Lambda, D_{r_m}(t, t+L_j)$ 로 나타내기로 하자. 또한, (t,t+L<sub>j</sub>)동안 설비 k의 하위시스템의 각 설비에 발생하게 되는 수요량의 벡터를  $\mathbf{D}_k(D_{r_1}(t, t+L_j), \Lambda, D_{r_m}(t, t+L_j); \mathbf{I}_k(t))$ 로 나타내면, 설비 k의 t+L<sub>j</sub> 시점의 재고량은

$$\mathbf{I}_k(t+L_j) = \mathbf{I}_k(t) - \mathbf{D}_k(D_{r_1}(t, t+L_j), \Lambda, D_{r_m}(t, t+L_j); \mathbf{I}_k(t)) \quad (10)$$

으로 나타난다. 여기서,  $\mathbf{D}_k$ 는 확률변수이므로, 소매점이 아닌 설비 j의 주문리스크는

$$\begin{aligned} \gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) &= \sum_{x=0}^{\infty} \pi_j(i_j(t), x) \Pr(D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) = x) = \sum_{x=0}^{\infty} \pi_j(i_j(t), x) \Pr\left(\sum_{k \in \text{Sub}(j)} \Omega_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k(t)) = x\right) \\ &= \sum_{\mathbf{d}_k \text{ s.t. } k \in \text{Sub}(j)} \Lambda \sum_{i_j(t)} \pi_j\left(i_j(t), \sum_{k \in \text{Sub}(j)} Q_k \cdot N(\gamma_k(\mathbf{I}_k(t) - \mathbf{d}_k))\right) \prod_{k \in \text{Sub}(j)} \Pr(\mathbf{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{sub}(t)) = \mathbf{d}_k) \end{aligned} \quad (11)$$

과 같은 회귀식(recursive form)으로 나타난다. 소매점에 해당하는 최하위계층 설비 j에 대해서는, 포아송 분포의 확률함수로부터,

$$\gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) = \sum_{x=0}^{\infty} \pi_j(i_j(t), x) \Pr(D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) | \mathbf{I}_j^{sub}(t) = x) = \sum_{x=0}^{\infty} \pi_j(i_j(t), x) \left( \frac{e^{-\lambda_j L_j} (\lambda_j L_j)^x}{x!} \right) \quad (12)$$

와 같이 직접 계산된다.

## 4. 주문리스크의 계산

### 4.1 근사방법

앞에서 주문리스크의 계산을 위한 회귀식을 도출하였으나, 이의 실제 계산은 복잡하여 실시간의 재주문 시점 결정에 사용하기는 곤란하다. 따라서, 빠른 계산을 위한 실용적인 근사방법이 필수적이다. 주문리스크 계산의 복잡성은 한계절감  $\pi_j$ 의 비선형성과, 모든 소매점에 대한 수요량의 확률을 계산하는 과정에서 기인한다. 따라서, 이 두 가지 요소에 대해 실용적인 근사방법을 수립하여야 한다.

먼저, 한계절감함수  $\pi_j$ 와 관련해서는 [Seo2002]에서 제시되고 있는 선형근사를 사용할 수 있다. 현재 시점이 설비 j의 최적 재주문 시점이라고 하자. 그러면,  $L_j$ 가 경과한 이후에는 설비 j의 재고수준이 0에 가까운 음의 값, 즉  $-Q_j < i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \leq 0$ 이 될 가능성이 높다. 따라서, 정확한  $\pi_j$  함수를 사용하는 대신,

근사적으로 모든  $i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))$  에 대해

$$\pi_j(i_j(t), D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t))) \cong i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \quad (13)$$

를 사용할 수 있을 것이다. 그러면,

$$\begin{aligned} \gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) &\cong E \left[ i_j(t) - D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \mid \mathbf{I}_j(t) \right] \\ &= i_j(t) - E \left[ D_j(t, t+L_j; \mathbf{I}_j^{sub}(t)) \mid \mathbf{I}_j(t) \right] + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \end{aligned} \quad (14)$$

가 되고,

$$N(\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j))) = \left[ -\frac{\gamma_k(\mathbf{I}_k(t+L_j))}{Q_k} + 1 \right]^+ \quad (15)$$

이 되어, 주문리스크를 계산하는 회귀식은

$$\gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) = i_j(t) - \sum_{k \in Sub(j)} \sum_{\mathbf{d}_k} Q_k \cdot \left[ -\frac{\gamma_k(\mathbf{I}_k(t) - \mathbf{d}_k)}{Q_k} + 1 \right]^+ \Pr(\mathbf{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{sub}(t)) = \mathbf{d}_k) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \quad (16)$$

로 나타나게 된다.

다음으로, 시스템의 수요벡터에 대한 합이 근사적 계산방법을 고려한다. 각 소매점의 수요는 포아송 분포를 따르므로, 설비 j의 하위시스템의 소매점에 발생하는 수요의 총합인 설비 j의 시스템 수요는, 설비 j의 하위에 있는 소매점들의 도착율의 합계, 즉, 설비 j의 시스템 도착율을 모수로 하는 포아송 분포가 된다. 그러면, 설비 j의 시스템 수요의 양이 주어졌을 때, 하위시스템에 있는 각 설비의 수요의 기대값은 해당하는 시스템 도착율에 비례하게 된다. 이러한 특성을 활용하여, 각 소매점에 대한 모든 가능한 수요량의 조합을 고려하는 대신, 설비의 시스템 수요량에 대한 확률만을 고려하고 각 소매점의 수요량은 근사적으로 기대값을 사용하면, 각 하위설비의 수요량은 설비 j의 시스템 수요량에 의해 결정된다.

$\bar{\lambda}_j$ 가 설비 j의 시스템 도착율을 나타내고,  $\bar{D}_j(t_1, t_2)$ 가  $(t_1, t_2)$ 동안 설비 j의 시스템 수요를 나타낸다고 하자. 이 때,  $\bar{D}_j(t_1, t_2)$ 의 확률분포는  $\bar{\lambda}_j(t_2 - t_1)$ 를 모수로 갖는 포아송 분포가 된다. 이러한 근사방법을 사용하면, 설비 j의 하위설비 k의 시스템 수요는, 시스템 도착율의 비율로 배분되어,

$$\bar{D}_k(t, t+L_i) = (\bar{\lambda}_k / \bar{\lambda}_j) \bar{D}_j(t, t+L_i) \quad (17)$$

와 같이 나타나고, 소매점까지 회귀적으로 적용되어 설비 j의 하위시스템 전체의 시스템 수요를 결정하게 된다. 따라서, 설비 k의 시스템수요가  $d_k$ 일 때 설비 k를 정점으로 하는 하위시스템의 각 설비의 수요벡터를  $\mathbf{D}_k(d_k)$ 로 나타내기로 하면,

$$\gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) = i_j(t) - \sum_{k \in Sub(j)} \sum_{d_k=0}^{\infty} Q_k \cdot \left[ -\frac{\gamma_k(\mathbf{I}_k(t) - \mathbf{D}_k(d_k))}{Q_k} + 1 \right]^+ \Pr(\bar{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{sub}(t)) = d_k) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \quad (18)$$

와 같은 회귀식을 얻을 수 있다. 또한, 특정한 설비 j에 대해 일정한 양  $d_j$ 만큼의 시스템 수요가 발생하는 경우, 식(17)에 의하여 근사적으로 설비 j의 시스템 수요  $d_j$ 는 시스템 도착율에 비례하여 하위설비의 시스템 수요로 배분되므로,



$$\begin{aligned} & \gamma_j(\mathbf{I}_j(t) - \mathbf{D}_j(d_j)) \\ &= i_j(t) - \sum_{k \in \text{Sub}(j)} \sum_{d_k=0}^{\infty} Q_k \cdot \left[ -\frac{\gamma_k \left( \mathbf{I}_k(t) - \mathbf{D}_k \left( \frac{\bar{\lambda}_k}{\lambda_j} d_j + d_k \right) \right)}{Q_k} + 1 \right]^+ \Pr(\bar{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{\text{sub}}(t)) = d_k) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \end{aligned} \quad (19)$$

와 같이 얻어지게 되어, 회귀적 계산이 가능하게 된다. 여기서 확률은

$$\Pr(\bar{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{\text{sub}}(t)) = d_k) = \frac{e^{-\bar{\lambda}_k L_j} (\bar{\lambda}_k L_j)^{d_k}}{d_k!} \quad (20)$$

와 같이 포아송 분포의 확률함수로 계산된다. 설비 j가 소매점인 경우에는 식(12)를 직접 적용할 수 있다.

#### 4.2 주문리스크의 계산절차

본 절에서는, 앞의 절에서 도출된 근사식을 이용하여 실시간에 주문리스크를 계산하기 위한 절차를 제시한다. 임의의 설비의 주문리스크는 하위설비의 주문리스크 값으로부터 계산되는데, 하위설비에 특정한 양의 시스템 수요가 발생했을 때에 해당 설비가 몇 회의 주문을 수행하는지를 계산하는 것이 관건이다. 따라서, 각 설비에서 시스템 수요의 양에 대한 주문량의 함수를 유지함으로써 상위 설비의 주문리스크 계산을 용이하게 할 수 있다.

각 설비의 함수관계는 시스템 수요의 구간으로 표현할 수 있다. 즉, 설비 j가 n의 주문회수를 유지하는 시스템 수요의 구간을  $[a_j^n, b_j^n]$ 로 둘 수 있다. 여기서 각 구간은 연속하여 나타나므로  $a_j^{n+1} = b_j^n + 1$ 의 관계가 성립하여, 각 구간은  $[b_j^{n-1} + 1, b_j^n]$ 로 나타낼 수도 있다. 이 때,  $b_j^n$ 는 설비 j가 n회의 주문으로 감당할 수 있는 시스템수요의 최대값이 되고, 주문리스크값과 주문회수의 관계는 식 (15)와 같으므로,

$$b_j^n = \max_{d_j} \left\{ \left[ -\frac{\gamma_j(\mathbf{I}_j(t) - \mathbf{D}_j(d_j))}{Q_j} + 1 \right]^+ \leq n \right\} = \max_{d_j} \{ \gamma_j(\mathbf{I}_j(t) - \mathbf{D}_j(d_j)) > -nQ_j \} \quad (21)$$

로 나타낼 수 있다. 이를 이용하면, 임의의 설비 j의 모든 하위 설비 k에 대해  $b_k^n$ 이 주어져 있을 때, 설비 j의 주문리스크는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_j(\mathbf{I}_j(t)) &= i_j(t) - \sum_{k \in \text{Sub}(j)} \sum_{n=1}^{\infty} Q_k \cdot n \sum_{d_k=b_k^{n-1}+1}^{b_k^n} \Pr(\bar{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{\text{sub}}(t)) = d_k) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \\ &= i_j(t) - \sum_{k \in \text{Sub}(j)} \sum_{n=1}^{\infty} Q_k \cdot n (F(b_k^n) - F(b_k^{n-1})) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \\ &= i_j(t) - \sum_{k \in \text{Sub}(j)} Q_k \sum_{n=0}^{\infty} (1 - F(b_k^n)) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $F(x)$ 는  $\Pr(\bar{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{\text{sub}}(t)) = x)$ 의 누적확률분포함수이다. 여기서,  $(1 - F(b_k^n))$ 의 값은 n이 증가함에 따라 빠르게 0에 수렴하므로, 적은 값의 n까지만 합산하는 것으로 충분하다. 예를 들어,  $\bar{\lambda}_k = 10, L_j = 10$ 이고  $Q_k = 50$ 인 경우,  $(1 - F(b_k^n))$ 의 값은  $n \geq 5$ 일 때  $10^{-10}$  이하의 값이 된다.

한편, 설비 j에 일정한 양의 시스템 수요  $d_j$ 가 발생한 이후의 주문리스크는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_j(\mathbf{I}_j(t) - \mathbf{D}_j(d_j)) &= i_j(t) - \sum_{k \in \text{Sub}(j)} \sum_{n=0}^{\infty} Q_k \cdot n \sum_{d_k = b_k^{n-1} - \frac{\bar{\lambda}_k}{\lambda_j} d_j}^{b_k^n - \frac{\bar{\lambda}_k}{\lambda_j} d_j} \Pr(\bar{D}_k(t, t+L_j; \mathbf{I}_k^{\text{sub}}(t)) = d_k) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \\ &= i_j(t) - \sum_{k \in \text{Sub}(j)} Q_k \sum_{n=0}^{\infty} (1 - F(b_k^n - \frac{\bar{\lambda}_k}{\lambda_j} d_j)) + \frac{h_j Q_j}{h_j + p_j} \end{aligned} \quad (24)$$

그런데,  $\gamma_j(\mathbf{I}_j(t) - \mathbf{D}_j(d_j))$ 는 주문이 일어나기 전까지는 시간에 따른 감소함수이므로, 임의의 설비  $j$ 에 대해  $b_j^n$ 은 주문 전까지는 최종수요가 발생할 때마다 감소하는 값이 되며, 최종수요는 한번에 1개씩 발생하므로  $b_j^n$ 의 감소폭도 1에 근접하는 작은 값이 된다. 따라서,  $b_j^n$ 를 유지하고 있으면, 이전의  $b_j^n$ 의 값으로부터 값을 감소시켜 쉽게 식 (21)을 만족하는  $b_j^n$ 을 찾아낼 수 있다. 이러한 방법을 사용하여, 다음과 같이  $b_j^n$ 의 값을 갱신하는 알고리즘을 수립할 수 있다.

●  $b_j^n$ 의 갱신 알고리즘

```

procedure update_b
begin
  for n=0 to max_bj
    for d=bj[n] to 0 step -1
      sum=0
      for each subfacility k
        m=0
        loop
          sum = sum + Qk*(1-Fk(bk[m]-(λk/λj)*d))
          if (1-Fk(bk[m]-(λk/λj)*d))≈0 then goto L1
        end_loop
      L1:      max_bk=m
    end_for
    gamma_j=(hj+pj)(i(j)-sum)+hj*pj
    if gamma_j <= -Qj*n then goto L2
  end_for
  L2:      bj[n]=d
end_for
end
  
```

위의 알고리즘을 통한  $b_j^n$ 값의 갱신은 최종수요가 발생한 소매점과 해당 소매점의 상위설비들에서만 수행하면 된다. 이 때 각 설비에서의 갱신된 주문리스크 값은 식 (22)를 통해 계산될 수 있다.

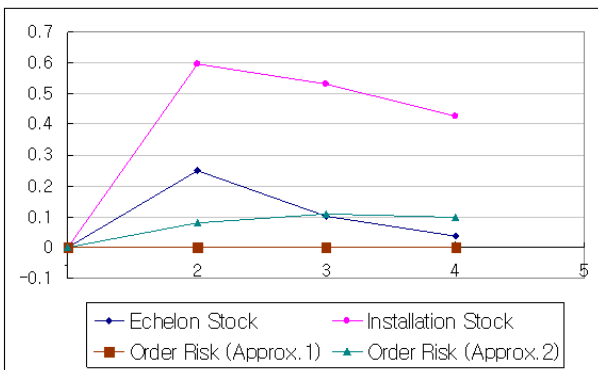
#### 4. 전산 실험

48가지 경우에 대하여, 설치재고정책, 계층재고정책, 주문리스크 정책 근사방법 1, 주문리스크 정책 근사방법 2의 4가지 정책을 사용하였을 때의 시스템 비용을 비교하는 실험을 수행하였다. 실험된 경우 각각에서, 시스템 트리의 높이를  $H$ 라 하였을 때, 1수준에 있는 설비의 일회주문량은  $50 \times 2^{H-1}$ 로 하였다. 여기서 0수준은 루트노드를 나타낸다. 1수준 설비의 재고유지비용과 재고고갈비용은 각각  $2 \times 0.5^{H-1}$ ,  $20 \times 0.5^{H-1}$ 로 하였으며, 1-1 수준의 설비로부터 1수준 설비로의 인도기간은  $\max(2, H-1)$ 로 두었다. 여기서, 계층 수를 2,3,4로, 평균자식수(fan-out ratio)를 1,2,3,4로, 소매점의 수요도착율을 2,4,6,8로 각각 변경시켜 실험하였다. 실험된 경우 각각에 대해, 설치재고정책과 계층재고정책에 대한 최적의 재주문점은 시뮬레이션을 통해 결정하였다.

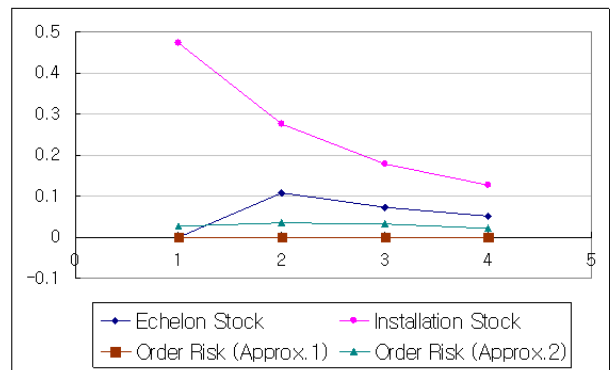
고려된 경우에서, 주문리스크 정책 근사방법 1을 채택한 경우, 계층재고정책을 사용한 경우에 비해 평균 6.2%, 설치재고정책을 사용한 경우에 비해 평균 17.5%의 비용감소효과가 있는 것으로 나타났다. 소매점은 가

정에 따라 항상 (R,Q)정책을 사용하므로, 소매점의 운영비용은 사용된 정책에 따라 변화하지 않는다. 따라서, 소매점을 제외한 다른 설비들에 대해 비용을 비교하면, 비용감소폭은 각각 평균 20.3%와 57.1%로 나타나, 주문리스크 정책을 통해 공유 재고 정보를 효과적으로 사용함에 따라 상당한 비용 절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 근사방법 2를 사용한 경우 근사방법 1에 비해 소매점을 고려할 경우 평균 2.6%, 소매점을 고려하지 않을 경우 평균 8.9%의 비용 증가가 있는 것으로 나타나, 근사방법 2의 비용증가가 무시할 수 없는 수준으로 나타났으며, 이에 대해서는 아래에서 자세히 다룬다.

그림 1은 각 계층에서 정책간의 비용차이를 보여준다. 편의상, 가장 아래 계층을 계층 1로, 상위 계층들을 순서대로 계층 2, 3, 4로 나타내기로 한다. 계층 1은 소매점으로 구성되어 있으므로, 정책간의 비용차이가 나타나지 않았다. 계층에 관계없이, 주문리스크 정책 근사방법 1이 가장 낮은 비용을 나타내어, 공유 재고 정보의 활용방식 개선의 효과를 입증하였다. 주문리스크 정책과 계층재고정책 또는 설치재고정책의 비용차이는 계층 2에서 최대에 달했다가 상위계층으로 가면서 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 상위 계층으로 갈수록 해당 설비의 수요에 영향을 미치는 설비 수가 증가하여, 개별 재고 정보의 가치는 감소하기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 두 근사방법의 비용차이는 계층 2 이상에서는 별다른 변화를 보이지 않는다. 그러나, 계층 4에서는 계층재고정책의 성능이 근사방법 2를 앞지르는 것으로 나타나고 있다. 이로부터, 상위 계층에서는 근사방법 1을 사용하거나 계산량이 문제가 될 경우 계층재고정책을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.



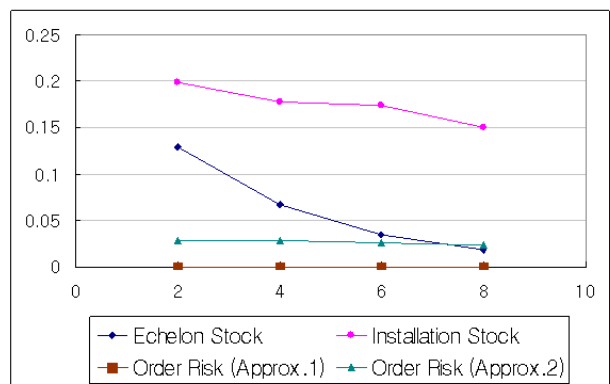
[그림 1] 계층 높이에 따른 정책간 비용차이



[그림 2] 평균자식수에 따른 정책간 비용차이

그림 2는 평균자식수(fan-out ratio)가 변화함에 따른 정책간의 비용차이의 추이를 보여주고 있다. 주문리스크 정책이 평균자식수에 관계없이 가장 낮은 비용을 보여주고 있다. 근사방법간의 비용차이는 작으며 평균자식수에 따라 별다른 변화가 없는 것으로 나타났다. 평균자식수가 1일 때에는 계층재고정책과 주문리스크정책 근사방법 1의 비용차이가 나타나지 않았는데, 이는 직렬형 시스템에서는 계층재고정책이 최적이기 때문이다. [Axsal993] 계층재고정책과 주문리스크정책 사이의 비용차이는 평균자식수가 2일때 최대였다가, 자식수가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평균자식수가 증가함에 따라 하위 설비들의 주문량의 합계는 중심극한정리(central limit theorem)에 의해 정규분포에 근접하게 되어, 개별 재고정보의 가치는 감소하기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 이러한 결과는 [Seo2002]의 2계층의 경우의 결과와 부합한다.

그림 3은 수요도착율의 변화에 따른 정책간의 비용차이를 보여준다. 주문리스크정책 근사방법 1이 도착율에 관계없이 가장 낮은 비용을 보여주고 있다. 근사방법간의 비용차이는 작으며 도착율에 따라 별다른 변화가 없었다. 정책간의 비용차이는 도착율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 포아송 분포의 특성상 도착율이 증가함에 따라 하위 설비로부터의 주문량의 분산값도 증가하여 개별 재고 정보의 가치를 떨어뜨리기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 따라서, 주문리스크 정책의 효과는 도착율이 낮을 때 더 크게 나타나며, 이는 2계층의 경우에 대한 [Seo2002]의 결과와 부합한다.



[그림 3] 수요도착율에 따른 정책간 비용추이

## 5. 결론

본 연구에서는, [Seo2002]의 연구를 확장하여, 일반적 다계층 분배형 시스템에 대하여 주문리스크 정책을 개발하였다. 수요가 포아송 분포로 발생하고 2개 이상의 계층수를 가진 분배형 시스템에 대하여 한계비용분석을 통해 주문리스크를 수식화하였다. 주문리스크의 정확한 값을 계산하는 것은 매우 복잡하므로, 본 연구에서는 회귀식으로 나타나는 2가지의 근사방법을 제시하였다.

기존의 정책과 주문리스크 정책을 비교하는 전산 실험을 통하여, 주문리스크 정책을 채택함에 따라 상당한 비용 절감 효과가 있음을 입증하였다. 주문리스크 정책의 효과는 소매점이 아닌 낮은 계층일수록, 평균 지식수가 적을수록, 수요도착율이 낮을수록 더욱 큰 것으로 나타났다. 근사방법간의 비용차이는 비교적 적었으나, 높은 계층에서는 근사방법 2가 계층재고정책보다 높은 비용을 나타내었다. 따라서, 높은 계층의 설비에서는 근사방법 1 또는 계층재고정책을 사용하는 것이 바람직하다.

근사방법 1은 계산복잡도가 높고, 근사방법 2는 높은 계층에서 좋지 않은 성능을 보임에 따라, 보다 빠르고 정확한 근사방법에 대한 연구가 요구된다. 가능한 대안 중에는 신경망(neural network)[Jung2002] 또는 SVM(Support Vector Machine)과 같은 인공지능기법이 포함될 수 있을 것이다. 실제의 공급사슬에서는 수요패턴을 정확히 기술하는 확률분포를 찾아내기 어렵고, 단지 과거의 수요 자료만 주어지는 경우가 많으므로, 실용적 이유에서도 이러한 인공지능기법을 사용하는 것이 유용한 대안이 된다. 마지막으로, 분배형 시스템과 조립형 시스템의 통합모형에 대해서 주문리스크 정책을 확장하는 것도 의미있는 연구가 될 것으로 생각된다.

## 6. 참고문헌

- [서2000] 서용원, 정성원, 2계층 분배형 공급사슬에서 실시간 공유재고 정보의 가치에 관한 연구, IE Interface, 제13권 (3), pp. 444-450, 2000.
- [서2002] 서용원, 성제훈, 정성원, 강석호, 박진우, 복합 포아송 수요를 갖는 2계층 분배형 공급사슬에서 공유 재고 정보를 활용한 재주문 정책, 한국SCM학회지, 제1권, 제2호, pp.35-24, 2002.
- [Axs1993] Axsäter, S. and Rosling, K, Installation vs. Echelon Stock Policies for Multi-Level Inventory Control. Management Science, Vol.39, pp.1274-1280, 1993.
- [Axs1996] Axsäter S., and L. Juntti, Comparison of echelon stock and installation stock policies for two-level inventory systems, International Journal of Production Economics, vol. 45, pp.303-310, 1996.
- [Axs1997] Axsäter S., On deficiencies of common ordering policies for multi-level inventory control, OR Spektrum, vol. 19, pp. 109-110, 1997.
- [Clar1960] Clark A. J., and H. Scarf, Optimal policies for a multi-echelon inventory problem, Management Science, vol. 6, pp. 475-490, 1960.
- [Jung2002] Jung, S., Seo, Y., and Park, J.W., Inventory Management in a Supply Chain Using Neural Network. Proceedings of Society for Modeling and Simulation International Conference, The Society for Modeling and Simulation International, 2002.
- [Seo2002] Seo, Y., Jung, S., and Hahm, J., Optimal Reorder Decision Utilizing Centralized Stock Information in a Two-Echelon Distribution Systems. Computers & Operations Research, Vol.29, pp.171-193, 2002.