

다단계 공급체인에서 재고정책들에 대한 시뮬레이션 연구

A Simulation Study for Inventory Policies in a Multi-Echelon Supply Chain

김홍남*, 박양병**

Heung-Nam Kim, Yang-Byung Park

Abstract

Managing multi-echelon inventory systems has gained importance over the last decade mainly because integrated control of supply chains consisting of several processing and distribution stages has become feasible through modern information technology. Determination of optimal inventory policy for multi-echelon supply chain is made difficult by the complex interaction between the different levels. In this paper, we investigate performance of five inventory policies (fixed quantity order policy, fixed interval order policy, compromised order policy, lead time-fixed quantity order policy, and mixed order policy) in a multi-echelon supply chain by using a simulation model constructed with AweSim simulation language. The results of the simulation study show that the mixed order policy is the best among five inventory policies in the most test problems except the case when the stockout cost per unit is much higher than the inventory holding and transportation costs per unit.

Keywords : AweSim Simulation, Multi-Echelon Supply Chain, Inventory Control Policy, Logistics

* LG-EDS 제조사업본부 Solution 지원부문 ERP팀

** 경희대학교 기계산업·시스템공학부

1. 서론

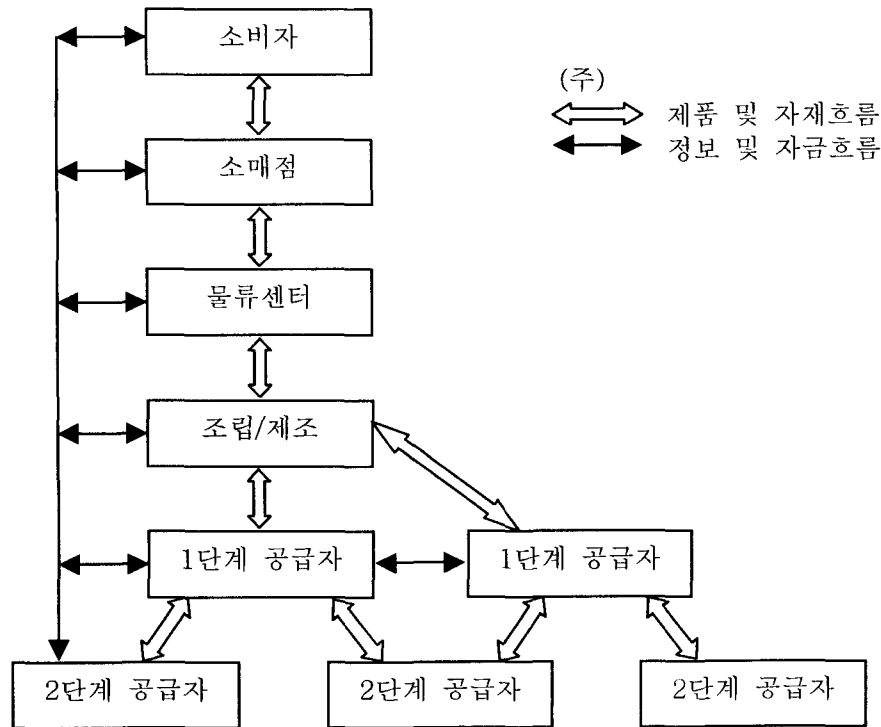
현대 기업경영의 패러다임에서 가장 의미 있는 깨달음 중의 하나는 개개 기업이 더 이상 독자적 개체로서는 새로운 시장환경에서 살아 남을 수 없다는 것이다. 즉, 기업들은 공급자(suppliers)로부터 자재의 조달과 분배(distribution) 기능이 고객의 요구를 충족시키는 자신의 능력에 지대한 영향을 미친다는 사실을 인식하게 된 것이다. 이에 따라 기업경영은 네트워크간 경쟁의 시대로 돌입하게 되었으며, 기업의 성공은 기업활동과 중요한 관계를 가지는 조직들을 네트워크로서 통합하는 능력에 크게 영향을 받게 되었다[13]. 공급체인(supply chain)이란 원자재 공급으로부터 제조과정을 통하여 최종 고객까지의 물자와 정보의 흐름과 관련된 모든 조직들을 포함하는 네트워크이며, 공급체인관리(supply chain management; SCM)란 개선된 공급체인 관계를 통한 이들 조직들의 효율적 및 효과적인 통합을 다룬다. <그림 1>은 공급체인 모델을 보여 준다[7]. 그림에서 쌍방향 화살표는 역물류와 정보의 피이드 백 흐름의 포함을 의미한다. 공급체인은 제조과정과 유통단계에 따라 다양한 형태로 나타나며, 기업마다 그 형태는 다르다.

공급체인관리의 목표는 고객이 요구한 품질의 물품을 원하는 시점에 그리고 원하는 장소에 가장 경제적으로 제공하는 것이다. 이것은 최근 기업에서 직면하고 있는 새로운 형태의 도전과 일치한다. 시간기반 경쟁기업(time-based competitors)으로 잘 알려진 Hewlett-Packard, Toyota, Xerox 등과 같은 기업은 고객이 필요로 하는 물품이나 서비스를 더욱 더 빠르게 공급하기 위한 목표를 추가로 설정하고 있다[7]. 이에 따라 기업들은 그들의 물류와 분배 네트워크를 아주 빠르게 확장하고 있는 실정이다.

공급체인관리의 목표를 달성하는데 크게 영향을 미치는 중요한 기업활동 중 하나가 바로

재고관리 이다. 지금까지 대부분 조직에서의 재고관리는 주로 직접적인 고객이나 내부 기능들에 대해 초점을 맞추었으며, 그들의 공급체인 네트워크 내 다른 조직들에 대해서는 상대적으로 거의 무시하였다. 이러한 사실은 공급체인 네트워크 내에서 의존 관계에 있는 다른 조직들간에 재고과잉과 품질의 원인이 되었으며, 결국 기업에게는 과도한 재고비용의 부담이 그리고 고객에게는 배달 지연이 심각한 문제로 대두되었다. 특히, 다단계 공급체인에서 상이한 단계사이에 밀접한 협조가 이루어지지 않는다면 수요에 대한 변동 폭과 불확실성이 공급체인을 거슬러 올라갈수록 점차 커지는 현상(bullwhip effect)이 발생할 수 있다[10]. 따라서 고객의 수요에 적절히 부응하면서 재고수준을 경제적으로 유지하기 위해서 기업에서는 공급체인 네트워크의 전체적 관점에서 재고관리 문제를 다루어야 할 필요성이 대두된 것이다. 잘 관리되고 있는 공급체인 내에서 재고의 보유량은 일반적으로 감소하고 또한 이들 재고는 체인 내 조직사이를 최소의 지연으로써 빠르게 이동하기 때문에, 기업에서 재고비용의 감소와 주문주기시간(order cycle time)의 단축을 기대할 수 있게 된다.

기업에서 보유하고 있는 재고는 원자재, 부품, 반제품, 완제품 등 다양한 형태로 존재한다. 기업의 총자산 중 재고자산이 차지하는 비중은 업종에 따라 다르겠지만, 우리나라의 경우 평균 20% 정도인 것으로 알려져 있다. 재고유지 면에서 볼 때는 최소한의 필요한 재고만을 보유하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다. 그러나 실제 기업에서는 불확실한 변화에 대한 대처, 장래의 수요에 대비한 비축, 로트 단위로 구입시 발생하는 재고 등의 이유로 상당히 많은 양의 재고를 보유하게 된다. 따라서 기업의 입장에서는 원하는 고객서비스 수준을 유지하면서 재고관리의 총비용이 최소가 되는 최적의 재고정책을 시행하기를 원한다.



<그림 1> 공급체인 모델

다단계 공급체인 재고시스템에 대한 최적의 재고정책을 수립하는 일은 상이한 단계사이의 복잡한 상호작용에 기인하여 매우 복잡한 의사결정문제로 알려져 있다[15]. 지난 10여년 동안에 다단계 공급체인에서의 재고정책 수립을 위한 분석적 방법들이 여러 학자들에 의해 연구되었다. 이들의 연구는 크게 정량발주모형, 정기발주모형, 절충발주모형으로 구분된다. 정량발주모형에 대한 주요 연구로는 Axsater [1], Axsater and Zhang[2], Ganeshan[6] 등, 정기발주모형에 대한 주요 연구로는 Diks and Kok[4, 5], Verrijdt and Kok[14] 등, 그리고 절충형 발주모형에 대한 주요 연구로는 Heijden et al.[8], Kelle and Milne[9], Nahmias and Smith[11] 등이 있다. 이들 연구는 재고정책의 파라미터 값 결정문제를 다루며, 대부분의 논문에서 휴리스틱 방법을 소

개하고 있다. 비록 다단계 공급체인에서 사용할 수 있는 재고정책들은 각기 운영상의 일반적 특성(장.단점)을 지니고 있지만, 이들 재고정책들의 적용에 따른 수행도를 공급체인 전체의 관점에서 정량적으로 비교 분석해 보는 연구의 필요성이 제기된다.

본 논문에서는 다단계 공급체인 네트워크에서 사용할 수 있는 5가지 재고정책 (정량발주, 정기발주, 절충발주, LT정량발주, 혼합발주)을 제시하고, 이들의 수행도를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 비교 평가한 내용을 소개한다. 재고정책들의 수행도는 공급체인 물류비와 고객서비스 수준, 고객주문 리드타임을 기준으로 평가하며, 특히 리드타임, 재고유지비, 운송비, 품질비의 변화에 대한 재고정책들의 민감도를 공급체인 물류비의 관점에서 분석한다. 각 재고정책의 파라미터 값 결정은 기존 문헌

에 소개되어 있는 알고리즘을 이용한다. 시물레이션 실험에서 재고정책 파라미터 결정에 필요한 자료인 고객수요, 리드타임, 관련 비용 등은 임의로 가정한다.

제 1장에서의 서론에 이어, 제 2장에서는 본 연구에서 다룬 5가지 재고정책과 각 재고정책의 파라미터 결정방법을 간략히 설명한다. 제 3장에서는 연구대상 공급체인 네트워크와 시물레이션 모델의 구축을 묘사한다. 제 4장에서는 예제에 대한 시물레이션 실험을 통하여 재고정책들을 비교 평가하고, 이어서 주요 변수들에 대한 재고정책들의 민감도분석을 수행한다. 끝으로 결론 및 미래 연구방향을 제 5장에 요약한다.

2. 재고정책 대안

공급체인 재고시스템의 시물레이션 연구를 위해 정량발주(fixed-quantity order), 정기발주(fixed-interval order), 절충발주(compromised order), LT정량발주(lead time-fixed quantity order), 혼합발주(mixed order)의 5가지 재고정책을 선정하였다. 이 중에서 정량

발주정책, 정기발주정책, 절충발주정책은 기존의 문헌에서 선택된 정책이며, 나머지 LT정량발주정책과 혼합발주정책은 임의로 구성한 것이다.

2.1 정량발주 재고정책

정량발주 재고정책은 일명 발주점 방식으로 알려져 있는 재고정책으로서, 재고가 재주문점(s)에 도달하면 일정량(Q)을 주문하는 방법이다. 여기서 Q는 경제적 주문량이며, s는 품절을 또는 서비스수준을 토대로 결정된다. 본 연구에서는 Ganeshan[6]이 개발한 2단계 공급체인에서의 정량발주 재고정책모형을 사용한다.

Geneshan의 모형에서는 고객의 서비스수준 제약 하에서 고객수요와 리드타임의 변동에 따른 불확실적 요소를 고려하여 연간 물류비를 최소로 하는 근사 최적 주문량과 재주문점을 아래의 수식을 풀어 구한다. 아래의 수식은 Newton 또는 conjugate gradient method와 같은 numerical search 기법[3]을 사용하여 풀 수 있다.

연간 물류비

$$\text{Min. } TC(Q_w, s_w, Q_r, s_r) = c_o + c_h + c_s \quad (1)$$

연간 총주문비(c_o)

$$(a + bn)R_w / Q_w + R_r N_r A_r / Q_r \quad (2)$$

연간 총재고유지비(c_h)

$$\begin{aligned} & (\mu_{L_w} \mu_{D_w} + Q_w / 2 + s_w - \mu_{Y_w}) v h \\ & + (\mu_{L_r} \mu_{D_r} + Q_r / 2 + s_r - \mu_{Y_r}) v h N_r \end{aligned} \quad (3)$$

연간 총운송비(c_s)

$$g(Q_w / n) R_w + g(Q_r) N_r R_r \quad (4)$$

위 식의 모든 부호에서 아래 첨자 w 는 공급처, r 은 주문처를 의미한다. 그리고 a 와 b 는 공급처의 준비비 파라미터, n 는 공급처수, R 은 연간 평균수요, N_r 은 주문처수, A_r 은 주문처의 주문비, Q 는 1회 주문량, L 은 이송시간, D 는 일일 수요, s 는 재주문점, Y 는 리드타임 동안의 수요, v 는 제품단가, h 는 재고유지비, μ 는 평균치, $g(\bullet)$ 는 수송단가와 로트크기 사이의 함수적 관계를 나타낸다.

2.2 정기발주 재고정책

정기발주 재고정책은 정기적(T)으로 재고수준이 최대재고수준(S)에 도달할 만큼 주문하는 방법이다. 주문량은 최대재고수준에서 현재 재고량과 주문 중 미입고량의 합을 뺀 값으로 결정된다. 본 연구에서는 다단계 재고시스템에서 발주간격 동안의 재고유지비와 품절비의 합을 최소화하는 Diks and Kok[4]의 정기발주 재고정책모형을 사용한다. 이 모형에서는 decomposition approach를 적용하여 공급체인 네트워크 상 각 재고거점(stockpoint) i 에서의 S_i 를 구한다. S_i 는 divergent echelon 시스템에서 말단 재고거점(end-stockpoint)의 비품절확률에 의해 구해진다. 이것은 고전적인 신문팔이소년 문제의 풀이방법과 매우 유사하다.

Diks and Kok[4]가 제시한 S_i 결정과정은 다음과 같이 정리된다.

- 단계 1: 최하위 단계 재고거점(창고)의 목표 비품절확률을 결정.
- 단계 2: 상위 단계 재고거점에서 하위 단계 재고거점으로서의 재고분배 결정함수 생성.
- 단계 3: 각 재고거점의 최대재고수준(S_i) 결정.

본 연구에서는 실험의 신뢰성을 유지하면서

계산을 단순화하기 위해 최하위 단계 재고거점의 목표 비품절확률을 95%로, 그리고 하위 단계로 재고를 분배하는 비율을 균등하게(즉, 1/하위단계 재고거점수) 설정하였다. 각 재고거점에서는 다음 식을 만족하는 최대재고수준을 구한다.

$$\alpha_k^i(\hat{y}_i) = \frac{\sum_{n \in U_i} h_n + p_k}{h_k + \sum_{n \in U_k} h_n + p_k}$$

모든 $k \in E_i$ 에 대해 (5)

위 식의 모든 부호에서 아래 첨자 i 는 재고거점 i 를 의미한다. 그리고 \hat{y}_i 는 최대재고수준 추정치, $\alpha_k^i(\hat{y}_i)$ 는 최상위 재고거점 i 의 최대 재고수준 추정치가 \hat{y}_i 일 때 최하위 재고거점 k 의 비품절확률, U_i 는 공급자로부터 i 까지 경로(path)상의 모든 재고거점, E_i 는 i 에 연결되어 있는 최하위 단계의 모든 재고거점, h 는 재고유지비, p 는 품절비를 나타낸다.

2.3 절충발주 재고정책

대표적인 절충발주 재고정책으로 흔히 Min-Max 시스템이라 불리는 (s, S) 재고시스템이 있다. 이 정책은 정기적으로 재고수준을 조사하여 재고수준이 재주문점(s) 이하인 경우에만 최대재고수준(S)에 도달할 만큼의 양을 주문하는 방식이다. 주문량의 결정은 정기발주정책과 동일하다. 본 연구에서는 다단계 공급체인에서 주문비, 재고유지비, 품절비의 총합을 최소화하는 Kelle and Milne[9]의 절충발주 재고정책모형을 사용한다. 이들이 유도한 각 재고거점에서의 재주문점과 최대재고수준 결정식을 정리하면 아래와 같다.

$$Q_i = 1.436\mu_i^{0.364} (K_i/h_i)^{0.498} \sigma_{L_i+1}^{0.1382} \quad (6)$$

$$\sigma_{L_i+1}^2 = (L_i + 1) \sum \tau_i^2$$

$$s_i = (L_i + 1)\mu_i + \sigma_{L_i+1}^{0.832} (\sigma_i^2 / \mu_i)^{0.187} (0.22/v_i + 1.142 - 2.866v_i) \quad (7)$$

$$v_i = Q_i / [(1 + p_i/h_i)\sigma_{L_i+1}]^{0.5}$$

$$S_i = Q_i + s_i \quad (8)$$

위 식의 모든 부호에서 아래 첨자 i 는 재고 거점 i 를 나타내며, Q 는 주문량, μ 는 평균수요, K 는 주문비, h 는 재고유지비, σ 는 수요의 표준편차, L 은 리드타임, τ 는 주문량의 표준편차, p 는 품질비를 나타낸다.

2.4 LT정량발주 재고정책

리드타임(LT) 정량발주정책은 상위 단계의 창고로부터 보충된 재고가 사용되기 시작한 시점에 주문리드타임 동안의 수요량 만큼을 주문하는 정량발주 정책이다. 따라서 재주문점(s)과 주문량(Q)의 크기는 같다. 이 정책은 JIT발주 개념을 이용하는 것이기 때문에 주문은 소량으로 빈번히 발생하게 된다. 그러나 리드타임이 긴 경우 재고수준이 높아져 재고최소화의 효과를 기대할 수 없다. 이 정책을 실험에 포함한 이유는 리드타임의 크기가 JIT발주 개념을 토대로 한 재고정책의 수행도에 미치는 영향을 살펴 보기 위함이다.

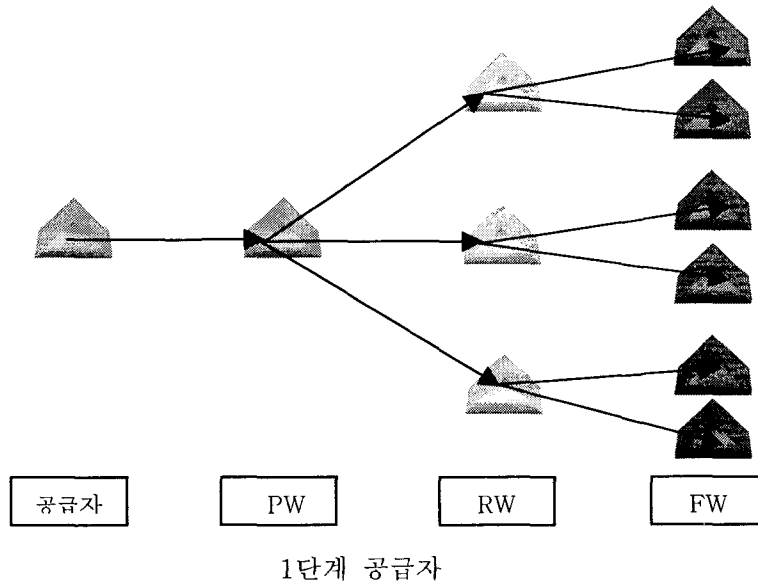
2.5 혼합발주 재고정책

혼합발주정책은 공급체인 네트워크 상의 재고거점에서 각기 다른 재고정책을 혼합 시행하는 방식으로서, 본 연구에서는 고객과 직접

접하고 있는 최하위 재고거점은 정기발주 재고정책을 그리고 나머지 모든 상위단계의 재고거점은 정량발주 재고정책을 시행하는 것으로 설정하였다. 이와 같은 구성은 저자들이 임의로 설계한 것이며, 다단계 공급체인에서 재고정책의 혼합사용에 대한 최적구성을 설계하는 문제는 또 다른 연구과제가 될 수 있을 것이다. 각 재고정책의 파라미터는 앞서 설명한 정책별 방법을 동일하게 적용하여 구한다.

3. 시물레이션 모델링

시물레이션을 이용하여 다단계 공급체인에서의 재고정책 수행도를 평가하기 위해 구성된 공급체인 네트워크는 <그림 2>와 같다. 네트워크는 6개의 최하위 관리창고(field warehouse: FW), 3개의 지역창고(regional warehouse: RW), 그리고 1개의 공장창고(plant warehouse: PW)로써 구성된 3단계 재고시스템의 구조(arborescent stockpoint structure)를 가진다. arborescent 재고거점 구조란 각 재고거점의 재고보충이 단 한 곳의 상위단계 재고거점으로부터 이루어지는 구조를 의미한다.



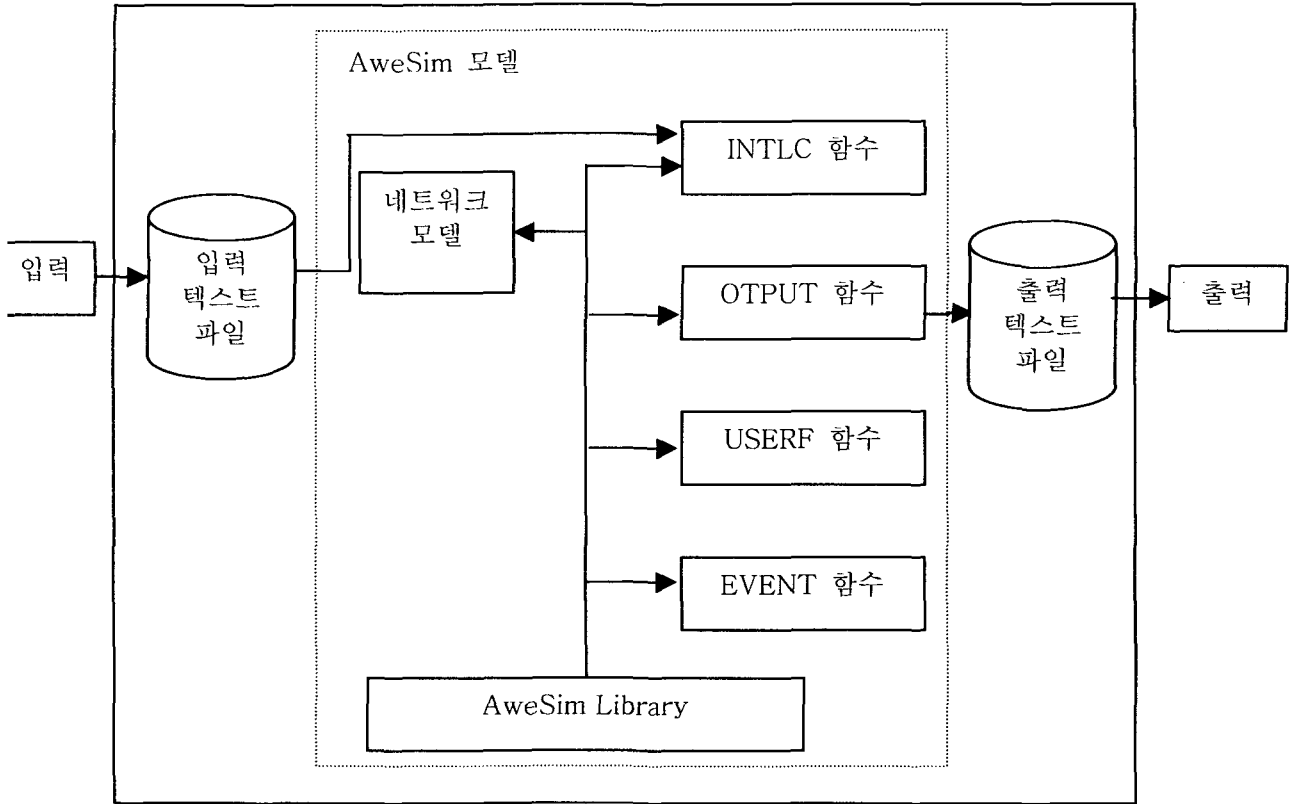
<그림 2> 실험대상 공급체인 네트워크

실험대상 재고시스템의 시뮬레이션 모델을 구축하는 데에 설정한 주요 가정은 다음과 같다.

- (1) 단일제품 만을 취급한다.
- (2) 주문은 항상 지정된 상위 단계 창고에 대해 발생하고, 발생한 주문은 반드시 해당 상위 단계 창고로부터 모두 충족된다.
- (3) 창고의 재고보충 정규리드타임은 주문처리시간과 운송시간의 합이며, 정규분포를 따른다.
- (4) 공급창고에서 품절이 발생한 경우 주문은 재고가 충분히 보충될 때까지 기다렸다가 일시에 처리된다.
- (5) 모든 창고에서 접수된 주문은 선입선출(FIFO) 처리규칙을 따른다.
- (6) 외부 원자재 공급자는 공급능력은 무한하다.
- (7) 고객의 주문은 1일 간격으로 발생하며, 주문량은 포아송 분포를 따른다.
- (8) 고객주문의 정규리드타임은 관리창고에서

의 주문처리시간과 운송시간의 합이며, 모든 고객주문은 동일한 정규리드타임을 가진다.

시뮬레이션에 필요한 주요 입력자료는 각 창고의 재고보충 정규리드타임, 고객 주문량, 각 창고에서 사용하는 재고정책과 파라미터 값, 각 창고에서의 초기재고, 제품단가, 각종 비용(주문비, 품절비, 운송비), 재고유지비 비율 등이며, 이들을 모두 윈도우 환경에서 입력 창을 통하여 간단히 입력할 수 있도록 한다. 시뮬레이션이 종료되면 공급체인 물류비, 고객 서비스수준, 평균 고객주문 리드타임이 화면에 텍스트 형식으로 출력되도록 한다. 물류비는 공급체인 네트워크에서 시뮬레이션 동안에 발생한 총주문비, 총재고유지비, 총품절비, 총운송비의 합으로 산정한다. 고객 서비스수준은 고객주문이 관리창고로부터 품절 없이 곧 바로 공급 받게 될 확률을 의미하며, 시뮬레이션 동안 발생한 고객주문에 대해 1-(총품절횟수/총주문횟수)로 계산된다.



<그림 3> AweSim 시뮬레이션 모델의 실행구조

실험대상 공급체인 네트워크의 시뮬레이션 모델은 Pritsker 회사에서 개발한 AweSim 2.1 윈도우용 시뮬레이션 언어[12]로써 구축하였다. AweSim 시뮬레이션 모델에서 모든 user-written 서브프로그램(함수 및 서브루틴)은 Visual Basic 6.0 범용언어로써 프로그래밍 하였다. <그림 3>은 AweSim 시뮬레이션 모델의 실행구조를 보여준다.

시뮬레이션 모델은 AweSim 네트워크 모델을 기본으로, 필요할 때 마다 INTLC, OUTPUT, USERF, EVENT user-written 서브 프로그램 및 외부 입.출력 텍스트 파일과 연결을 꾀한다. AweSim 시뮬레이션 모델은 시뮬레이션 동안에 외부 입.출력 텍스트 파일을 통하여 데이터 이송을 구현하기 때문에, 시뮬레이션 모델이 실행되기 전에 화면 창을 통해 입력된

자료를 외부 파일에 저장하는 Visual Basic 입력 프로그램이 준비되어야 한다. 시뮬레이션 과정에서 자료의 수집은 네트워크 모델과 여러 EVENT 서브루틴에서 이루어지며, 자료의 저장을 위해 ATRIB, LTRIB, STRIB, XX, LL 등의 AweSim 변수와 많은 사용자 정의 변수를 사용한다.

INTLC 함수프로그램은 외부 텍스트 파일에 저장되어 있는 사용자 입력을 네트워크 모델에 이송함으로써 시뮬레이션 모델을 초기화한다. 즉, 입력 창에서 사용자가 입력한 자료는 외부 텍스트 파일에 저장되어 있다가 INTLC 프로그램의 실행에 의해 AweSim 네트워크 모델로 이송된다. OUTPUT 함수프로그램은 시뮬레이션 종료 후에 출력하고자 하는 통계자료를 수집하여 계산된 결과를 형식에 맞추어

외부 텍스트 파일에 저장한다.

AweSim 네트워크 모델은 고객주문 발생을 위한 CREATE 노드, 창고에서 주문대기를 위한 WAIT 노드, EVENT 노드 등 다수의 네트워크 노드와 활동을 포함한다. 네트워크 모델은 주요 기능별로 고객주문 생성 및 공급창고 할당, 창고에서 주문처리, 수.배송, 창고에서 재고관리의 총 4개의 모듈로 구성된다. 네트워크 모델에서는 EVENT 노드에 개체가 도착할 때마다 해당 사건서브루틴이 실행된다. 총 11개의 사건 서브루틴이 존재하며, 이들은 주문발생시 공급창고 할당, 단계별 창고(즉, 공장창고, 지역창고, 관리창고)에서의 주문처리, 각 재고정책에 따른 재고관리, 단계별 창고에서의 수.배송 등의 작업을 수행한다. 서브루틴에서 재고관리 실행을 위해 필요한 파라미터(예; 주문량, 재주문점, 발주간격, 최대재고수준 등)는 별도의 Visual Basic 프로그램의 실행에 의해 결정된다.

4. 실험 및 분석

4.1 예제

먼저, 다단계 공급체인의 예제를 구성하여 5가지 재고정책의 수행도를 물류비, 고객 서비스수준, 평균 고객주문 리드타임의 관점에서 비교 평가하였다. 예제에서의 주요 변수 값은 아래와 같이 임의로 설정하였다.

- 제품단가: 10,000원
 - 비용자료
 - 품질비: 2,000원/개
 - 년간 재고유지비 비율: 20%
 - 운송비: 10,000원/ton*60km
 - 주문비: 10,000원/회
 - 각 창고에서의 초기 재고수준
 - 공장창고: 2,000개
 - 관리창고: 1,500개
 - 지역창고: 1,000개
 - 목표 고객 서비스수준: 95%
- 예제를 5년 동안 5회씩 반복해서 시뮬레이션 실험을 수행한 결과 3가지 평가척도의 평균치가 <표 1>과 같이 구해졌다. 5회 반복횟수는 임의로 정한 것이며, 실험결과 구해진 평가척도들의 분산은 결과분석에 영향을 미칠 만큼 크지 않았다. 매회 시뮬레이션에서는 최초 1년이 경과한 후 나머지 4년 동안의 안정상태 자료만을 분석에 사용하였다. 실험을 통하여, 예제의 공급네트워크에서 재고시스템이 안정상태로 돌입하는데 처음 1년의 기간은 충분한 것을 확인하였다. 참고로, <표 2>에 실험에서 사용한 5가지 재고정책들의 파라미터 값을 정리하였다.
- <표 1>에 나타난 바와 같이, 혼합발주정책이 3가지 평가척도에 대해 5가지 재고정책 중 항상 가장 뛰어난 값을 알 수 있다. 이러한 사실은 네트워크 상의 재고거점에 따라 정량발주와 정기발주를 적절히 혼합 사용함으로써 2가지 재고정책의 효과를 함께 얻게 된 결과로 이해될 수 있다. 즉, 관리창고에서는 정기발주 정책 그리고 지역창고와 공장창고에서는 정량발주정책을 사용하게 되는데, 이에 따라 고객과의 거래가 가장 빈번한 관리창고에서는 발주횟수 감소를 통하여 운송비용의 절감효과를 얻을 수 있고, 또한 재고수준이 높은 지역창고와 공장창고에서는 불필요한 재고의 증가를 억제하는 효과를 기대할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.
- 각 창고의 재고보충 정규리드타임
 - 공급자→공장창고: 평균 1일과 표준편차 0.1일의 정규분포
 - 공장창고→지역창고: 평균 3일과 표준편차 0.1일의 정규분포
 - 지역창고→관리창고: 평균 4일과 표준편차 0.1일의 정규분포
 - 고객주문 정규리드타임: 0.5일
 - 각 관리창고에 대한 1회 고객 주문량: 평균 100개인 포아송 분포

<표 1> 예제의 시물레이션 실험 결과

평가척도	정량발주	정기발주	절충발주	LT정량발주	혼합발주
물류비(백만원)	178	157	160	249	118
고객 서비스수준(%)	95.6	96.1	95.7	95.4	96.3
고객주문 리드타임(일)	1.2	0.8	1.1	1.4	0.8

<표 2> 예제에 대한 5가지 재고정책들의 파라미터 값

창고	정량		정기		절충			LT정량		혼합	
	Q	s	S	T	S	s	T	Q	s	Q/S	s/T
관리	849	629	1277	8	1657	857	8	400	400	1277(S)	8(T)
지역	1200	900	2057	6	2324	1122	6	600	600	1200(Q)	900(s)
공장	1897	1495	2586	4	3100	1827	4	600	600	1897(Q)	1495(s)

(주. Q : 주문량, s : 재주문점, S : 최대재고수준, T : 발주간격)

3가지 평가척도에 대한 재고정책들의 순위는 항상 동일하게 혼합발주정책, 정기발주정책, 절충발주정책, 정량발주정책, 그리고 LT정량발주정책 순으로 나타났다.

정기발주, 절충발주, 정량발주 재고정책들은 혼합발주 재고정책보다 물류비가 약 33%~51% 더 소요되었으며, 서로 간에는 별로 물류비의 차이를 보이지 않았다. 가장 순위가 낮은 LT정량발주정책은 혼합발주정책과 비교하여 2배 이상의 물류비를 발생시켰다. 이러한 사실은 JIT정책의 실행과정에서 나타나는 빈번한 주문과 운송 그리고 높은 주문비와 운송비에 기인한 것으로 판단된다. 각 재고정책들에 대해 구해진 고객 서비스수준은 모두 목표 서비스 수준인 95%를 초과하였으며, 혼합발주정책이 96.3%로써 가장 높게 그리고 LT정량발주정책이 95.4%로써 가장 낮게 나타났다.

고객의 실제 주문리드타임은 고객이 관리창고에 주문을 한 시각으로부터 물품을 배달 받은 시각까지의 소요시간을 의미하며, 해당 관

리창고에서 품질로 인하여 주문이 기다려야 하는 경우는 정규리드타임에 대기시간이 더해진다. <표 1>에 나타난 바와 같이, 고객주문 리드타임은 혼합발주와 정기발주가 모두 0.8일로써 가장 짧았으며, LT정량발주가 1.4일로써 가장 길었다. 이러한 결과에 비추어 보아, LT정량발주정책에 의해 가장 많은 품질이 발생하였음을 알 수 있다.

물류비와 고객 서비스수준(또는 고객주문 리드타임)은 일반적으로 상충하는 성질을 가지고 있음에도 불구하고, <표 1>에 나타난 바와 같이 실험에서 5가지 재고정책의 순위가 물류비, 고객 서비스수준, 고객주문 리드타임의 관점에서 모두 동일하게 나타난 사실은 흥미롭다. 이것은 예제의 경우 시물레이션 동안에 발생하는 품질 빈도수가 물류비, 고객 서비스수준, 고객주문 리드타임에 모두 양적으로(positively) 영향을 미치지 때문인 것으로 사료된다.

4.2 민감도 분석

다음에는, 다단계 공급체인에서 주요 변수들의 변화가 재고정책들의 수행도에 미치는 영향을 분석하였다. 주요 변수로는 공장창고의 정규 리드타임, 재고유지비, 품질비, 수송비를 선정하였으며, 민감도 분석을 위한 평가척도로는 물류비를 고려하였다. 각 변수에 대한 민감도 분석은 예제에서의 해당 변수 값을 일정 크기씩 증가하면서 시뮬레이션을 반복 실행함으로써 구해진 평가척도 값의 변화를 분석한 것이다. 모든 경우에 대한 시뮬레이션 실험은 5년 동안 5회씩 반복 수행하고, 매회 최초 1년이 경과한 후 나머지 4년 동안의 자료만을 평가척도 계산에 사용하였다.

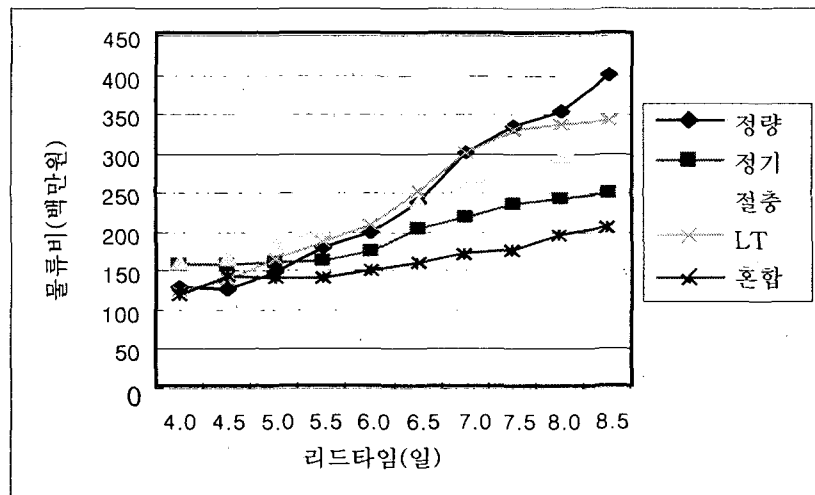
(1) 공장창고의 리드타임 변화

전체 공급체인 네트워크에 미치는 파급효과가 가장 큰 공장창고의 정규 리드타임 변화를 분석해 보았다. <그림 4>에 나타난 바와 같이, 지역창고로부터의 주문에 대한 공장창고의 정규 리드타임 크기에 관계없이(단, 4.5일 리드타임 경우를 제외하고) 혼합발주정책이 항상

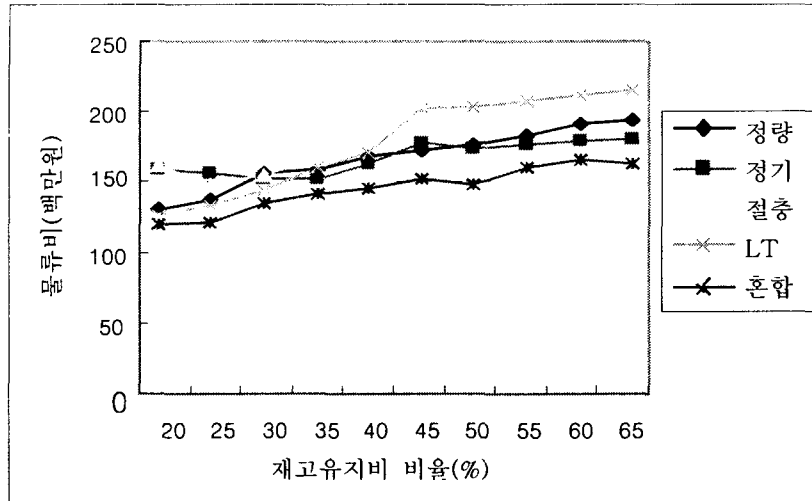
최소의 물류비를 유지하였다. 정규 리드타임이 길어짐에 따라 5가지 재고정책 중에서 정량발주와 LT정량발주의 물류비가 급격히 증가하였으며, 재고정책들 간의 물류비 차이는 점차 커졌다. 이러한 차이는 운송비 증가에 기인한 것으로 판단된다. 리드타임 변화에 대한 재고정책 수행도의 민감도를 좀 더 정확히 분석하기 위해서는 모든 창고의 리드타임을 함께 변화해 보는 실험이 필요하다.

(2) 재고유지비 비율의 변화

<그림 5>에 나타난 바와 같이, 재고정책들의 물류비는 해당 재고유지비 비율이 증가함에 따라 전체적으로 증가하였으나 때로는 감소하기도 하였다. 재고유지비 비율의 전체 구간에서 항상 혼합발주정책이 가장 적은 물류비를 유지하였다. 재고유지비가 커짐에 따라 LT정량발주정책의 물류비가 가장 큰 폭으로 늘어났으며, 이러한 현상은 LT정량발주정책에서 리드타임 동안의 수요량을 주문량으로 정한 때문인 것으로 판단된다. 반면에, 정기발주와 혼합발주의 물류비는 전체 변동구간에서 완만한 증가 추세를 보였다.



<그림 4> 공장창고의 정규 리드타임 변화에 따른 재고정책의 민감도 분석



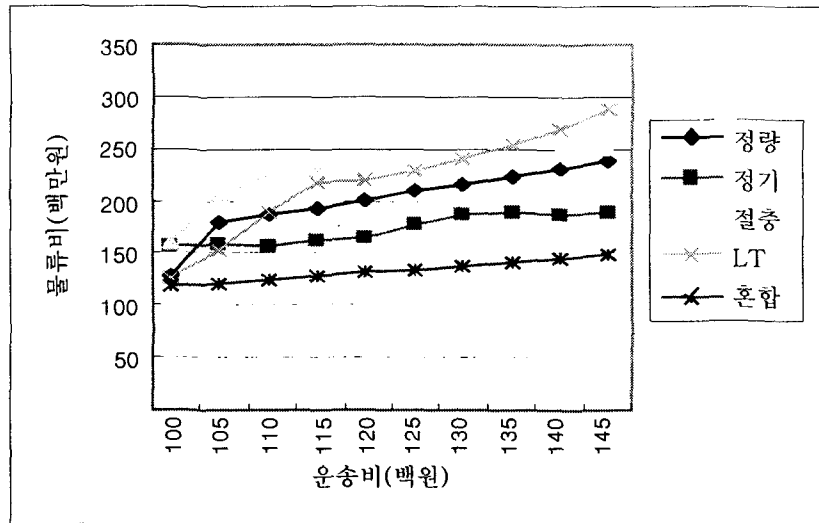
<그림 5> 재고유지비 변화에 따른 재고정책의 민감도 분석

(3) 운송비의 변화

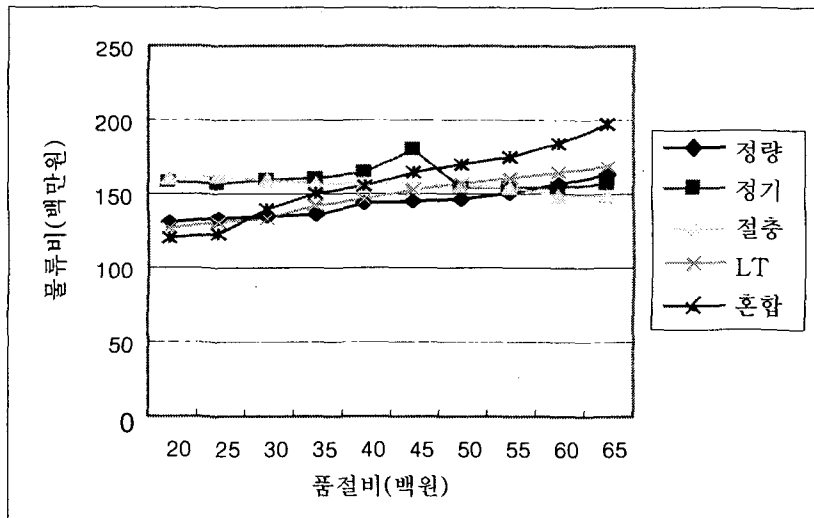
<그림 6>에 나타난 바와 같이, 운송비의 증가에 대하여 정량발주, 절충발주, LT정량발주의 물류비는 초기구간에서 아주 민감하게 반응을 보이다가 LT정량발주를 제외한 두 재고정책은 점차 안정되었다. 반면에, 혼합발주와 정기발주는 전체구간에서 운송비 변화에 크게 영향을 받지 않았다. 그러므로 실험 대상과 같은 공급체인 네트워크와 비용구조를 가지는 기업에서 원유값 변동 등과 같은 이유로 운송비를 정확히 예측하기가 어려운 때는 혼합발주나 정기발주를 시행하는 것이 물류비를 효과적으로 관리할 수 있는 합리적인 재고정책 대안이 될 수 있을 것이다. 전체 운송비 변동 구간에서 혼합발주정책이 항상 최소의 물류비를 유지하였다. 운송비가 커질수록 빈번한 재고보충을 필요로 하는 LT정량발주정책의 물류비가 가장 크게 증가하였다.

(4) 품질비의 변화

앞의 3가지 경우에 대한 민감도 분석과는 달리, <그림 7>에 나타난 바와 같이 개당 품질비가 증가함에 따라 혼합발주 재고정책의 물류비가 가장 급격히 증가하였다. 특히, 품질비가 개당 5,000원부터는 5가지 재고정책 중에서 혼합발주정책이 가장 많은 물류비를 발생시켰다. 이러한 현상은 혼합발주정책에 따른 빈번한 품질(즉, 낮은 재고수준)로 설명될 수 있다. 나머지 다른 재고정책들은 대체로 품질비 변화에 거의 영향을 받지 않거나 또는 약간의 영향만을 받았다. 품질비가 증가함에 따라 절충발주, 정기발주, 정량발주가 모두 낮은 물류비를 보였으며, 서로간의 물류비 차이는 크지 않았다. 특히, 정량발주는 품질비의 변화에 대해 가장 안정적으로 좋은 수행도를 보였다. 따라서 품질로 인하여 파생되는 영향을 예측하기 어려운 상황에서는 정량발주 재고정책을 시행하는 것도 하나의 합리적인 대안이 될 수 있을 것이다.



<그림 6> 운송비 변화에 따른 재고정책의 민감도 분석



<그림 7> 품절비 변화에 따른 재고정책의 민감도 분석

5. 결론 및 미래 연구방향

본 논문에서는 다단계 공급체인 네트워크에서 사용할 수 있는 5가지 재고정책(정량발주, 정기발주, 절충발주, LT정량발주, 혼합발주)을 제시하고, AweSim 시뮬레이션을 이용하여 이

들의 수행도를 비교 평가한 내용을 소개하였다. 재고정책들의 수행도는 공급체인 물류비, 고객 서비스수준, 고객주문 리드타임을 기준으로 평가하였으며, 특히 리드타임, 재고유지비, 운송비, 품절비의 변화에 대한 재고정책들의 민감도를 공급체인 물류비의 관점에서 자

세히 분석하였다.

시물레이션을 이용하여 예제에 대한 실험과 주요 변수들에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 다음과 같이 몇 가지 중요한 사항을 정리할 수 있다.

- (1) 예제에서는 물류비, 고객주문 리드타임, 고객 서비스수준의 3가지 평가척도 관점에서 모두 혼합발주 재고정책이 가장 뛰어났으며, 이어서 정기발주, 절충발주, 정량발주, LT정량발주 재고정책 순으로 나타났다.
- (2) 거의 모든 경우의 실험문제에서 혼합발주 재고정책이 가장 뛰어났으나, 개당 품질비가 재고유지비와 운송비에 비교하여 어느 한계 이상으로 커지면 혼합발주정책에 의한 물류비가 가장 큰 폭으로 증가하면서 다른 재고정책들의 물류비 보다 더 커진다.
- (3) 리드타임의 증가에 따라 정량발주, LT정량발주, 절충발주 재고정책의 물류비가 가파르게 증가하였다. 그러나 리드타임이 짧은 경우 정량발주와 LT정량발주 재고정책은 혼합발주 재고정책과 비교하여 큰 차이 없이 우수한 성능을 보였다.
- (4) 품질비의 증가에 대하여 혼합발주 재고정책이 가장 민감하게 반응을 보이면서 물류비가 급격히 증가하였으며, 품질비의 변화에 정량발주 재고정책이 가장 안정적으로 우수한 수행도를 보였다.
- (5) 개당 재고유지비와 운송비의 증가에 대해 LT정량발주 재고정책이 가장 민감하게 반응을 보이면서 물류비가 급격히 증가하였다.

다단계 공급체인 재고시스템에서 사용할 수 있는 재고정책들의 수행도를 좀 더 정확하고 신뢰도 높게 비교 평가하기 위해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요하다. 우선, 공급체인 네트워크에서 존재하는 공급능력, 고객수요, 리드타임, 공급창고 선정, 제품조합(product mix) 등에 대한 불확실적 요소를 반영한 다양한 운영환경에서의 연구가 수행되어야 한다. 그리고 주요 변수들을 복합적으로 함께 변화하면서 재고정책의 수행도를 평가하는 상세 민감도분석이 요망된다. 특히, 본 연구에서 보여진 혼합발주 재고정책의 우수성을 뒷받침하기 위해 다단계 공급체인에서 정량발주와 정기발주의 최적 구성(조합)에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 끝으로, 다단계 공급체인에서 재고정책들에 대한 평가에는 본 연구에서 다룬 정량적 척도 외에도, 실제 운영상 존재하는 장·단점(예; 대량주문, 지속적 재고조사 등)도 함께 고려되어야 함을 지적해 둔다.

참고문헌

- [1] S. Axsater, "Continuous Review Policies for Multi-Level Inventory Systems with Stochastic Demand," in S.C. Graves, A.R. Kan, P. Zipkin (eds.), *Handbook in Operations Research and Management Science*, Vol. 4, Logistics of Production and Inventory, 1993, pp. 175-197.
- [2] S. Axsater and W. Zhang, "A Joint Replenishment Policy of Multi-Echelon Inventory Control," *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, 1999, pp. 243-250.
- [3] C.S. Beightler, D.T. Phillips, and D.J. Wilde, *Foundation of Optimization*, Prentice Hall, 1979.
- [4] E.B. Diks and A.G. de Kok, "Optimal Control of a Divergent Multi-Echelon Inventory System," *European Journal of Operational Research*, Vol. 111, 1998, pp. 75-97.
- [5] E.B. Diks and A.G. de Kok, "Computational Results for the Control of a Divergent N-Echelon Inventory System," *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, 1999, pp. 327-336.
- [6] R. Ganeshan, "Managing Supply Chain Inventories: A multiple Retailer, One Warehouse, Multiple Supplier Model," *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, 1999, pp. 341-354.
- [7] R.B. Handfield and E.L. Nichols Jr., *Introduction to Supply Chain Management*, Prentice Hall, 1999.
- [8] M.C. van der Heijden, E.B. Diks, and A.G. de Kok, "Stock Allocation in General Multi-Echelon Distribution Systems with (R,S) Order-up-to-Policies," *International Journal of Production Economics*, Vol. 49, 1997, pp. 157-174.
- [9] P. Kelle and A. Milne, "The Effect of (s,S) Ordering Policy on the Supply Chain," *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, 1999, pp. 113-122.
- [10] S. Nahmias, *Production and Operations Analysis*, 3rd ed., Richard D. Irwin, Burr Ridge, IL, 1997.
- [11] S. Nahmias and S.A. Smith, "Optimizing Inventory Levels in a Two-Echelon Inventory System with Partial Lost Sales," *Management Science*, Vol. 40, No. 5, 1994, pp. 582-596.
- [12] A.A.B. Pritsker, J.J. O'Reilly, and D.K. Laval, *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, John Wiley & Sons., 1997.
- [13] D. Simchi-Levi, P. Kaminski, and E. Simchi-Levi, *Designing and Managing the Supply Chain*, Chap. 2, McGraw Hill, 2000.
- [14] J.H.C.M. Verrijdt and A.G. de Kok, "Distribution Planning for a Divergent N-Echelon Network without Intermediate Stocks under Service Restrictions," *International Journal of Production Economics*, Vol. 38, 1995, pp. 225-243.
- [15] Y. Yoo, W. Kim, and J. Rhee, "Efficient Inventory Management in Multi-Echelon Distribution Systems," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 33, 1997, pp. 729-732.

● 저자소개 ●



김흥남

경희대학교 산업공학과 학사

경희대학교 산업공학과 석사

현재: LG-EDS 제조사업본부 Solution 지원부문 ERP팀

관심분야: ERP, 물류시스템, 컴퓨터 시뮬레이션



박양병

한양대학교 산업공학과 학사

Pennsylvania State University 산업공학과 석사

Oklahoma State University 산업공학과 박사

Northeastern University 산업 및 정보공학과 교수

현재: 경희대학교 기계·산업시스템공학부 교수

관심분야: SCM, 생산/물류관리, 컴퓨터 시뮬레이션