

# 서비스 수준 제약하의 다단계 분배형 공급망에 대한 분배계획

박기태\* · 권익현\*\*

\*LG디스플레이 · \*\*인제대학교 시스템경영공학과

## Distribution Planning for a Distributed Multi-echelon Supply Chain under Service Level Constraint

Gi-Tae Park\* · Ick-Hyun Kwon\*\*

\*ERP Team LG Display

\*\*Department of Systems Management Engineering, Inje University

### Abstract

In a real-life supply chain environment, demand forecasting is usually represented by probabilistic distributions due to the uncertainty inherent in customer demands. However, the customer demand used for an actual supply chain planning is a single deterministic value for each of periods. In this paper we study the choice of single demand value among of the given customer demand distribution for a period to be used in the supply chain planning. This paper considers distributed multi-echelon supply chain and the objective function of this paper is to minimize the total costs, that is the sum of holding and backorder costs over the distribution network under the service level constraint, by using demand selection scheme. Some useful findings are derived from various simulation-based experiments.

Keywords : Multi-echelon Supply Chain, Service Level, Simulation, Demand Percentile

### 1. 서론

원료 공급자에서부터 제조, 유통, 소매점에 이르는 총체적인 네트워크의 관리를 의미하는 공급망관리는 원료조달에서 최종판매에 이르기까지 고객수요 및 상품, 자금의 흐름에 대한 정보 등을 공유하여 불필요한 시간과 경비를 제거하여 효율적인 생산 및 물류관리를 위한 토대를 제공하고 있다. 특히 세계화가 진행됨에 따라 기업의 경영구조는 복잡, 다양화되고 고객 만족을 통한 경쟁우위 확보가 치열해 지면서 공급망관리에 대한 관심이 더욱 증가되고 있다[6].

자재소요계획(Material Requirements Planning)은 수요 예측을 근거로 수립된 기준생산계획(Master Production Scheduling)을 활용하여 상위 부품에서 하위 부품까지의 세부적인 생산량과 생산시점을 결정하는 역할을 한다. 유

통소요계획(Distribution Requirements Planning)은 자재소요계획에서 계획된 계획량을 바탕으로 고객의 요구에 따라 공급망 상의 각 분배 거점에서의 수송량을 결정하는 분배계획을 수립하는 역할을 한다[13]. 이러한 일련의 생산 및 분배계획의 과정에서 가장 상위단계 의사 결정인 수요예측 값의 정확도는 전체적인 공급망의 효율성에 큰 영향을 주게 된다.

공급망 상에서의 흔히 발생하는 채찍 효과(bullwhip effect)나 잦은 생산 및 분배계획의 변경, 주어진 목표 서비스 수준을 만족하지 못하는 현상 등은 잘못된 수요예측의 결과로 나타나는 대표적인 사례로 언급될 수 있다[6]. 여기서 수요예측 값은 고정된 특정한 하나의 값으로 존재하는 것이 아니라 확률적 분포를 갖는 범위 값으로 존재한다. 일반적으로 공급망 상의 의사 결정자는 이 범위 내의 여러 대안들 가운데 하나를 자신

† 교신저자: 권익현, 경남 김해시 어방동 607 인제대학교 시스템경영공학과

TEL: 055)320-3992, E-mail: ikwon@inje.ac.kr

2009년 7월 10일 접수; 2009년 8월 28일 수정본 접수; 2009년 8월 28일 게재확정

의 판단에 근거하여 선택하고 이를 수요예측 값으로 확정하게 된다. 이러한 수요예측 값에 대한 정확성의 차이에 따라 전체 시스템의 생산 및 분배계획의 결과는 큰 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 인하여 수요예측 값의 결정은 전체 공급망 계획수립 절차에 있어서 높은 비중을 갖고 고려되어야 하는 중요한 과제이다.

최적의 수요예측 값을 기반으로 자재소요계획 및 유통소요계획이 수립되었을 경우, 전체 공급망의 효율성 증가, 비용의 감소, 주어진 고객 서비스 수준의 만족 등의 효과를 기대할 수 있다[1].

만약 분배계획에 사용되는 수요예측 값이 분포 내 다양한 대안들 중에서 지나치게 큰 값이 선택되었을 경우, 공급망 내에는 많은 양의 재고가 존재하게 된다.

이로 인해 과도한 재고유지 비용이 발생하는 반면, 재고 고갈의 기회는 줄어들어 고객에 대한 서비스 수준은 향상된다. 반대로 지나치게 작은 값을 선택한다면 고객의 수요를 만족시키지 못하는 경우가 빈번하게 발생하게 되고 많은 양의 재고이월이 발생한다. 이와 같이 실제로 어떤 값이 예측 수요로 선택되어 지는지에 따라 전체 공급망의 운영에 중요한 영향을 끼치게 되며, 이는 기존의 안전재고 수준을 정하는 문제와 유사한 개념에서 이루어지나 접근 방법이 상이한 것이라 할 수 있다. 분배계획 자체는 주어져 고정된 기간별 수요 하에서 최적의 경제적인 계획을 세우는 문제라면 본 연구에서는 이러한 분배계획 방법이 주어져 있을 때, 확률분포를 하는 실수요 예측을 고정된 기간별 수요로 정하여 분배계획에 제공하는 방법에 관한 연구이다. 또한, 분배계획의 결과가 일정 서비스 수준 이상이 되도록 하면서 동시에 전체 시스템 내에서 발생하는 비용을 최소화 하는데 본 연구의 목적이 있다.

기존의 공급망에 관한 대부분의 연구들은 하나의 창고와 여러 개의 소매점으로 구성된 2단계 분배 시스템 하에서의 연구들이 주류를 이루었다. 하지만 보다 현실적인 환경에서의 공급망은 다단계(multi-echelon) 분배 시스템의 형태를 나타낸다[4]. 기존의 2단계 분배 시스템에서 이루어졌던 연구들은 공급망 상의 단계가 확장됨에 따라 모델링과 수리적 계산의 어려움이 따르게 되어 다단계 분배 시스템에 적용하기에는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 보다 많은 현실성을 반영하기 위해 다단계 분배형 공급망을 대상으로 연구를 진행한다. 이러한 공급망 하에서 확률적인 형태의 다양한 수요 분포 형태를 정의하고, 이러한 분포 하에서 수요 선택에 영향을 주는 요소들을 규명한다. 이를 바탕으로 적절한 실험계획과 시뮬레이션을 통하여 효과적인 수요선택 방안을 도출한다. 이와 같은 접근 방법을 통해 다양한 실험 조건 하에서 공급망 내의 총 비용을 최소화 시키면서 동시에

목표 서비스 수준을 만족하는 수요선택 방안을 제시한다.

다단계 재고 문제는 Forrester[10]의 연구 이후로 꾸준한 관심을 받으며 연구되어 왔다. Clark and Scarf[7]는 여러 노드들이 연속적으로 이루어진 시리얼 시스템(serial system)에서 동적계획법(dynamic programming)을 활용하는 계층재고(echelon stock) 정책을 사용하는 모델을 제안하였다. Federgruen and Zipkin[9]은 Clark and Scarf 모델의 결과를 무한기간 문제로 확장하는 연구를 수행하였으며, 이후에도 이와 관련된 많은 연구가 현재까지도 활발히 진행되고 있다[8].

서비스 수준을 고려한 공급망의 재고 문제도 꾸준한 관심을 받으며 연구되어 왔다. Zipkin[14]은 복합 포아송 분포(compound Poisson distribution)를 따르는 단일 노드에서 충족률(fill rate) 형태의 서비스 수준을 표현하였고, 이를 바탕으로 서비스 수준을 만족시키면서 재고 비용을 최소화 하는 방법을 고안하였다. Park[11]은 포아송 분포와 정규 분포를 따르는 다단계 시리얼 시스템을 대상으로 서비스 수준을 고려한 정기발주 정책에 대해 연구하였다. 다단계 분배형 시스템에 관한 연구로 Diks 등[8]은 설치재고(installation stock) 정책과 계층재고(echelon stock) 정책을 중심으로 하여 서비스 수준을 고려한 기존 연구들을 비교, 분석하여 발표하였다.

본 논문과 유사한 기존 연구로 박기태 등[2]은 수요 백분위수(demand percentile) 개념을 활용하여 시리얼 시스템에서 재고유지 비용과 재고이월 비용의 총합을 최소화하는 수요선택 방안을 제안하고 다양한 시뮬레이션 실험을 통해 제안된 방법론의 성능을 평가하였다. 박기태와 권익현[3]은 박기태 등[2]의 접근방법과 연구결과를 활용하여 시리얼 시스템을 대상으로 서비스 수준 제약하의 재고비용 최소화 문제에 적용시킨바 있다. 그러나 이러한 방법은 비교적 제한된 범위의 공급망 모델을 대상으로 적용가능하다는 문제점이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위한 목적으로 제안되었다. 따라서 본 연구에서는 수요가 정규 분포를 따를 때, 노드의 수가 늘어나게 되면 수치적으로 접근하기 어려운 다단계 공급망을 대상으로 하여 재고 비용의 총합을 최소화시키면서 목표 서비스 수준을 만족하기 위한 수요선택 방법을 시뮬레이션을 통해 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 문제 정의

본 논문에서는 다단계 분배형 공급망의 범주에 속하는  $N$ 개의 노드로 구성된 분배형 네트워크( $N$ -node

distribution system, 이하  $N$  노드 분배 시스템을 연구대상 모델로 고려한다. <그림 1>에서 나타낸 바와 같이 최상위 노드는 무한 용량을 갖는 공급자(supplier)로부터 제품을 공급 받아 하위 노드, 즉, 물류 창고(warehouse)로 분배한다. 최하위 노드는 소매점(retailer)으로서 고객의 직접적인 수요가 발생하는 노드이다.  $N$ 개의 노드로 구성된  $N$  노드 분배 시스템에서 최상위 노드부터 다음 단계 노드 순으로 <그림 1>과 같이 노드번호를 부여한다. 각각의 노드에 해당하는 재고유지 비용(holding cost)과 재고이월 비용(backorder cost)이 존재하며, 주문 비용(ordering cost)은 존재하지 않는다. 각각의 노드들은 서로 다른 조달시간(lead-time)을 가지며, 이러한 조달시간은 단위 계획기간의 정수배의 형태로 확정적으로 주어진다고 가정한다. 재고 비용의 경우 재고이월 비용이 재고유지 비용보다 크고 재고유지 비용은 네트워크상의 하위 단계에 있는 노드일수록 상위에 있는 노드들보다 상대적으로 큰 값을 갖는다고 가정한다.

본 연구에서 기간별 수요 분포의 형태는 매 기간 평균과 분산이 주어지는 정규 분포로 가정한다. 분배계획은 이러한 확률적인 형태를 갖는 수요 분포 가운데 선택된 특정한 값을 바탕으로 확정적인 형태로 수립된다.

분배계획은 목표 서비스 수준(target service level)을 만족하면서 계획기간(planning horizon) 동안의 모든 노드에서 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의

총합을 최소화 시키는 것을 목적으로 한다. 이는 서론에서 언급했던 자재소요계획 및 유통소요계획에서의 계획수립 절차와 유사한 과정으로 진행된다.

본 논문에서 사용되는 기호는 다음과 같다. 다음에서 쓰이는 예제는 <그림 1>을 참조한다.

<System parameters>

- $i$  : 노드 번호 ( $i = 1, 2, \dots, N$ )
- $T$  : 계획기간
- $M$  : 노드의 단계(stage) 번호
- $ech(i)$  : 노드  $i$ 에서의 자신의 노드를 포함한 전체 하위 노드의 집합 (ex:  $ech(6) = \{6, 7, 8, 9\}$ )
- $suc(i)$  : 노드  $i$ 에서 한 단계 하위 노드의 집합 (ex:  $suc(6) = \{7, 8, 9\}$ )
- $sucd(i)$  : 노드  $i$ 의 모든 하위 노드 가운데 수요 노드의 집합 (ex:  $sucd(2) = \{3, 4, 5\}$ )
- $X_{i,t}$  : 노드  $i$ 에서 기간  $t$ 에서의 수송 중 재고량
- $I_{i,t}$  : 노드  $i$ 에서 기간  $t$ 에서의 보유 재고량
- $\hat{D}_{i,t}$  : 노드  $i$ 에서  $t$ 기간의 수요예측 양
- $l_i$  : 노드  $i$ 의 조달시간
- $l_{i,j}$  : 노드  $i$ 의 조달시간에서 노드  $j$ 까지 조달시간의 합 (ex:  $l_{1,2} = l_1 + l_2$ )
- $\alpha_i$  : 노드  $i$ 의 서비스 수준(service level)
- $\hat{\alpha}$  : 공급망 네트워크 내의 모든 수요 노드의 목표 서비스 수준

<Cost parameters>

- $h_i$  : 노드  $i$ 의 재고유지 비용(holding cost)
- $b_i$  : 노드  $i$ 의 재고이월 비용(backorder cost)

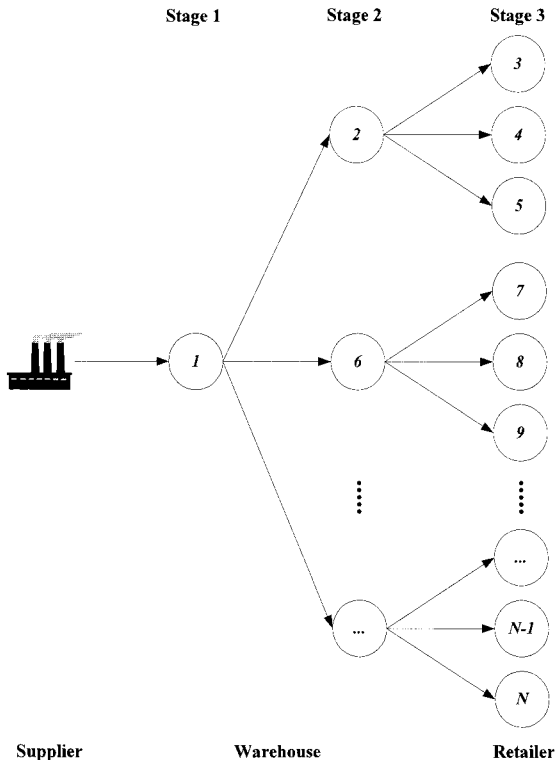
<Demand information parameters>

- $\mu_{i,t}$  : 노드  $i$ 에서 기간  $t$ 의 수요 평균
- $\sigma_{i,t}$  : 노드  $i$ 에서 기간  $t$ 의 수요 표준편차

<Control parameters>

- $q_{i,t}$  : 노드  $i$ 에서 기간  $t$ 의 수요 백분위수
- $\alpha_{-q_i}$  : 노드  $i$ 에서의 수요 백분위수 초기 값
- $\beta_{-q_i}$  : 노드  $i$ 에서의 수요 백분위수 기울기

기호에 대한 세부적인 설명은 해당되는 절에서 자세히 설명하도록 한다. 앞에서 정의 된 기호를 바탕으로 모델링하면 다음과 같다.



<그림 1>  $N$  노드 분배 시스템의 형태

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [h_i \max(I_{i,t}, 0) + b_i \max(-I_{i,t}, 0)]$$

s.t. inventory balance,  $i = 1, 2, \dots, N$   
 $\alpha_i \geq \hat{\alpha}, i \in \text{sucd}(1)$

본 논문의 목적함수는 전체 계획기간에 대하여 모든 노드에서 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의 합을 최소화 시키는 것이다. 제약 식으로 공급망의 재고균형을 맞추어주어야 한다. 이는 해당 노드에 대한  $t$  기간의 재고량은  $t-1$  기간의 재고량과  $t$  기간에 새로이 도착하는 물량의 합에서 해당 노드의  $t$  기간의 수요와 하위 노드들에 보내어 지는 물량의 합을 뺀 양과 같아야 하는 것을 의미한다. 또한 수요가 발생하는 노드  $i$  에서의 서비스 수준  $\alpha_i$ 는 목표 서비스 수준  $\hat{\alpha}$  이상을 유지해야만 한다.

## 2.2 분배계획 알고리즘

본 연구에서는 분배계획과 관련된 모든 상황이 매 기간 초에 발생하고, 전체 네트워크를 구성하는 모든 노드들에서 발생하는 일련의 사건들은 다음과 같은 순서로 진행되어진다고 가정한다.

- Step 1. 계획기간 동안의 수요를 만족시키기 위한 새로운 수송물량 결정
- Step 2. 재고이월 비용에 따른 같은 단계(stage)의 노드 우선순위 결정
- Step 3. 우선순위에 따라 현재 기간의 수요를 만족시키기 위한 수송물량 결정 및 물량 이동
- Step 4. 주어진 수요 분포에 따른 실제 수요 발생의 및 수요 백분위수에 따른 수요 정보 갱신
- Step 5. 분배계획의 결과로 발생한 재고 비용 계산

본 연구에서는 수요 백분위수(demand percentile)를 이용하여 기간별 수요예측 값을 결정하고, 이를 바탕으로 분배 계획을 수립하게 된다. 수요 백분위수를 이용한 수요 선택 방법에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명하기로 한다. 수요 백분위수에 대한 보다 자세한 내용은 박기태와 권익현[3]을 참고한다. 또한 의미 있는 공급망 분배계획이 수립되기 위해서는 최초의 공급자로부터 최하위 노드까지 도착하는데 소요되는 누적 조달시간(cumulative lead-time) 이상의 기간에 해당하는 수요 정보를 필요로 한다. 이 때, 필요한 수요 정보의 개수는 해당 노드부터 하위 수요 노드까지 이르는 누적 조달시간 보다 1기간 많은 정보를 가져야 한다[1].

### <분배계획 알고리즘>

분배계획의 결과로서 공급망 네트워크를 구성하는 노드별 수송 물량이 결정된다. 본 논문에서의 분배계획은 주기적 재고조사(periodic review) 방식에 따라 Clark and Scarff[7]가 제시한 계층재고 정책에 기반 하는 order-up-to S 정책에 따라서 이루어진다. 계층재고(echelon stock)는 해당 노드가 보유하고 있는 재고량(on-hand inventory)과 이 노드를 통해 물품을 공급받는 모든 하위 노드들에 대한 수송 중(in-transit)인 물량과 보유중인 재고의 총합에서 최하위노드의 재고이월량(backlog)을 뺀 수치로 나타낼 수 있다[5]. 각 노드에서 주문량 결정은 계층 재고량(echelon stock inventory position)에 따라 이루어지는데, 계층 재고량은 해당 노드의 계층 재고와 해당 노드로 수송중인 물량의 합으로 나타낼 수 있다. 각 수요 노드에서 분배계획에 사용 되는 누적 조달시간 동안의 수요 예측 값이 존재한다[4].

공급망 네트워크를 구성하는 모든 아크(arc) 위에는 해당 노드의 조달시간 만큼의 수송 중(in-transit)인 물량이 존재하게 된다. 이러한 수송 중인 물량은 각 노드들이 필요한 물량을 매 기간 주문을 통해 보충하는 주문 정책에 기인하는 것이다. <그림 1>에서 보이듯이 노드의 단계(stage) 번호는 최상위 노드인 노드 1부터 가장 하위 노드인 수요 노드 순으로 1, 2, ...,  $M$ 으로 매겨진다. 따라서 분배계획은  $M-1$ 단계 노드를 기준으로  $M-1$ 단계의 임의의 노드  $i$ 의 바로 하위 노드인  $j \in \text{suc}(i)$ 의 노드부터 임의의 기간  $t$ 시점에서 다음 기간  $t+1$ 에 도착하는 수송 중 재고량  $X_{j,t+l_j+1}$ 를 결정한다. 따라서 임의의 기간  $t$ 시점에서의 해당 노드를 포함한 하위 노드의 총 현재 보유 재고는  $\sum_{k \in \text{suc}(j)} I_{k,t}$ 가 되며, 이 때 해당 노드를 포함한 노드들

의 조달시간 동안의 수송 중인 물량은  $\sum_{k \in \text{suc}(j)} \sum_{s=t+1}^{t+l_k} X_{k,s}$

가 된다. 이 때,  $X_{j,t+l_j+1}$ 의 값은 앞서 설명한 계층재고 정책에 기반 하는 order-up-to S 정책에 의해 계산되는데, 우선  $X_{j,t+l_j+1}$ 는 해당 노드의 누적 조달시간 보다 한 기간 많은 만큼의 수요를 만족시키기 위한 양으로써, 해당 노드의 하위 노드 중에서 수요 노드인  $j \in \text{sucd}(i)$ 에서 수요 백분위수에 의해 구해진 값,

$\hat{D}_{j,s}$ 의 합인  $\sum_{j \in \text{sucd}(i)} \sum_{s=t+1}^{t+l_k+1} \hat{D}_{j,s}$ 가 된다. 따라서 계층재고

량  $\sum_{k \in \text{suc}(j)} I_{k,t} + \sum_{k \in \text{suc}(j)} \sum_{s=t+1}^{t+l_k} X_{k,s}$ 과  $X_{j,t+l_j+1}$ 의

합이 누적 조달시간보다 한 기간 많은 만큼의 기간 동안의

수요의 총합과 같아야 한다. 즉,  $X_{j,t+l_j+1}$ 는 아래 식을 만족시키는 값으로 정의할 수 있다.

FOR  $\forall i \in M-1, M-2, \dots, 1$   
 FOR  $\forall j \in \text{suc}(i)$

$$\sum_{k \in \text{ech}(j)} I_{k,t} + \sum_{k \in \text{ech}(j)} \sum_{s=t+1}^{t+l_k} X_{k,s} + X_{j,t+l_j+1} = \sum_{k \in \text{sucd}(j)} \sum_{s=t+1}^{t+l_{i,k}+1} \hat{D}_{k,s}$$

그러나 노드  $i$ 의  $t$ 기간 말에서의 가용 재고량은  $I_{i,t} + X_{i,t+1}$ 으로 한정되어 있기 때문에 노드의  $i$ 의 하위 노드의 집합  $j \in \text{suc}(i)$ 의 재고이월 비용을 오름차순으로 정렬한 뒤, 우선순위에 따라  $t+1$ 기간의 계획량  $X_{j,t+l_j+1}$ 을 결정한다. 따라서 실제로 노드  $i$ 에서 하위 노드들로 보내줄 수 있는 양은 다음과 같다.

$$\hat{I}_{i,t+1} = I_{i,t} + X_{i,t+1}$$

FOR  $\forall j \in \text{suc}(i)$

$$X_{j,t+l_j+1} = \min(\hat{I}_{i,t+1}, \sum_{k \in \text{sucd}(j)} \sum_{s=t+1}^{t+l_{i,k}+1} \hat{D}_{k,s} - \sum_{k \in \text{ech}(j)} I_{k,t} - \sum_{k \in \text{ech}(j)} \sum_{s=t+1}^{t+l_k} X_{k,s}) \quad (1)$$

$$\hat{I}_{i,t} = \hat{I}_{i,t} - X_{j,t+l_j+1}$$

공급망 네트워크에서 가장 상위 단계에 존재하는 노드는 외부의 무한 용량을 갖는 공급자에게서 충분히 많은 물품을 공급받을 수 있기 때문에 노드 1에 대해서는 (1)식과 같은 제약이 따르지 않는다. 따라서  $X_{2,l_2+1}$ 은 총 누적 조달시간 보다 한 기간 많은 만큼의 수요를 만족시키기 위한 양으로써 최상위 노드의 계층 재고량인  $\sum_{j \in \text{ech}(1)} I_{j,t} + \sum_{j \in \text{ech}(1)} \sum_{s=t+1}^{t+l_j} X_{j,s}$ 과  $X_{1,t+l_1+1}$ 의 합이 그 기간 동안의 수요의 총합과 같아야 한다. 즉,  $X_{0,t+l_0+1}$ 는 아래 식 (2)를 만족시키는 값으로 정의할 수 있고 이를 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\sum_{j \in \text{ech}(1)} I_{j,t} + \sum_{j \in \text{ech}(1)} \sum_{s=t+1}^{t+l_j} X_{j,s} + X_{1,t+l_1+1} = \sum_{j \in \text{sucd}(1)} \sum_{s=t+1}^{t+l_{i,j}+1} \hat{D}_{j,s} \quad (2)$$

$$X_{1,t+l_1+1} = \sum_{j \in \text{sucd}(1)} \sum_{s=t+1}^{t+l_{i,j}+1} \hat{D}_{j,s} - \sum_{j \in \text{ech}(1)} I_{j,t} - \sum_{j \in \text{ech}(1)} \sum_{s=t+1}^{t+l_j} X_{j,s} \quad (3)$$

### 2.3 수요선택과 서비스 수준

본 연구의 궁극적인 목적은 목표로 하는 서비스 수준을 만족하면서 동시에 공급망 내의 재고비용의 총합을 최소화 할 수 있도록 하는 수요 백분위수 대안을 선택하는 것이다. 이 때, 서비스 수준을 만족하는지에 대한 결과는 서비스 수준의 정의에 따라 차이가 있을 수 있다. 일반적으로 사용 하는 서비스 수준의 정의는 다음과 같다[5].

- non-stockout probability : 주문 사이클 동안 재고가 부족하지 않을 확률.
- fill rate : 현재 보유 재고로부터 즉시 만족할 수 있는 수요의 비율.
- ready rate : 현재 보유 재고가 양수인 재고를 갖는 시간의 비율

본 논문에서 사용하는 서비스 수준의 척도는 위의 정의 가운데 첫 번째로, 주문량 이상의 물량이 고객 주문 시간 안에 도착하는 확률로 볼 수도 있다. 이 정의에 의한 서비스 수준은 적용하기 비교적 간편한 방법이며, 궁극적으로 위에서 설명한 정의에 의한 서비스 수준들은 긴 기간(long-run)으로 보았을 때 거의 비슷한 결과를 보이기 때문에 재고부족 확률을 본 연구에서의 서비스 수준의 척도로 사용하기로 한다.

For  $j \in \text{sucd}(1)$

$$IF_{j,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } (I_{j,t} \geq 0) \\ 0, & \text{if } (I_{j,t} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_j = \frac{\sum_{t=1}^T IF_{j,t}}{T} \quad (5)$$

(4)식에서 서비스 수준을 구할 수 있는 모든 수요 노드  $j \in \text{sucd}(1)$ 에 대하여 기간  $t$ 시점의 현 재고  $I_{j,t}$ 가 0보다 클 때는 지시함수(indicator function)  $IF_{j,t}$ 가 1이 되고, 그 반대의 경우에는 0이 된다. 따라서 구하고자 하는 서비스 수준  $\alpha_j$ 는 (5)식과 같이 표현 된다. 위와 같은 방법에 따라 전체 계획 구간  $T$  동안의 서비

스 수준을 구할 수 있으며, 구해진 서비스 수준을 앞에서 설명한 제약 식에서처럼 목표로 하는 서비스 수준( $\hat{\alpha}$ )을 만족시켜야 한다.

수요 백분위수(demand percentile)의 개념을 활용한 수요 선택 접근방법은 박기태 등[1]이 조합 최적화(combinatorial optimization)의 한 방법으로 노드별 가능한 모든 수요 백분위수의 조합을 나열하고 이를 바탕으로 최적 수요 백분위수 조합을 구한바 있다. 조합 최적화를 통한 접근방법은 비교적 정확한 수요 백분위수 값을 얻어낼 수 있는 장점이 있지만, 노드의 수가 많아지거나 조달시간이 길어질수록 구해야 할 기간별 수요 백분위수의 개수가 급격하게 증가하기 때문에 고려해야 할 대안의 수가 늘어나게 된다. 따라서 대안의 수가 많아짐에 따라 수행시간이 기하급수적으로 증가하기 때문에, 실제적인 공급망 문제에 대해 제한된 시간 내에 해를 구하기에 한계가 있다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 박기태 등[2]이 제안한 기간별 수요 백분위수를 임의의 노드  $i$ 에 대한 초기 수요 백분위수  $\alpha_{-q_i}$ 와 수요 백분위수 기울기  $\beta_{-q_i}$ 를 이용한 선형(linear) 수요 백분위수를 통한 근사적인 방법을 활용한다. 이와 같은 접근 방법의 기본적인 아이디어는, 박기태 등[1]의 연구 결과에서 알 수 있듯이, 최적의 수요 백분위수 조합은 근사적으로 선형의 형태에 가깝게 나타난다는 것이다. 또한 이러한 접근방법은 이미 박기태 등[2]의 연구를 통하여 시리얼 시스템에 대해서는 그 성능의 우수성이 입증된 바 있다.

선형 수요 백분위수 방법을 통해,  $t$ 기간의 수요예측 백분위수 값은 아래의 식을 통해 계산한다.

$$q_{i,t} = \alpha_{-q_i} + \beta_{-q_i} \times t$$

예를 들어, 최상위 노드로부터 임의의 노드  $i$ 까지의 누적 조달시간이 3기간, 초기 수요 백분위수 값이 0.9, 수요 백분위수 기울기가 -0.1이라고 하면,  $t$ 기간의 수요예측 백분위수의 값은 위의 식을 통해  $q_{i,t} = 0.9 - 0.1 \times 0 = 0.9$ ,  $q_{i,t+1} = 0.8$ ,  $q_{i,t+2} = 0.7$ ,  $q_{i,t+3} = 0.6$ 이 된다. 단, 수요 백분위수  $q_{i,t}$ 는 확률적인 값이기 때문에 항상 0과 1사이의 값을 가져야 한다. 또한 목표 서비스 수준의 제약을 만족해야 하기 때문에, 수요 백분위수 대안을 수립 할 때 초기 수요 백분위수는 공급망 네트워크의 목표 서비스 수준( $\hat{\alpha}$ )보다 항상 같거나 큰 범위 내에서 설정해야 한다. 예를 들어, 목표 서비스 수준이 0.95라면, 목표 서비스 수준보다는 같거나 커야하고 확률적인 값이기 때문에 1보다는 작아야 한다. 즉, 초기 수요 백분위수의 대안이 될 수 있는 값은

[0.95, 1) 사이의 값이 된다. 따라서 선형 수요 백분위수를 이용한 방법은 아래와 같은 두 식을 만족해야만 한다. 선형 수요 백분위수에 대한 보다 자세한 설명은 박기태 등[2]의 논문을 참조한다.

$$0 < \alpha_{-q_i} + \beta_{-q_i} \times t < 1 \quad (6)$$

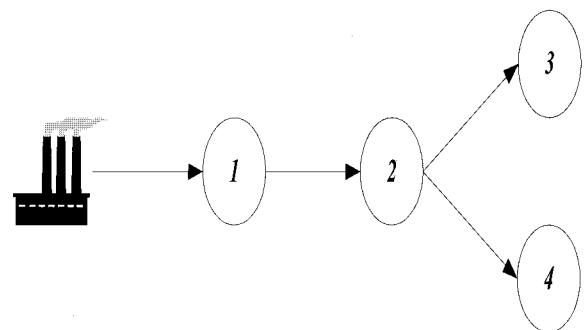
$$\hat{\alpha} \leq \alpha_{-q_i} < 1 \quad (7)$$

### 3. 실험 및 결과 분석

#### 3.1 시뮬레이션을 위한 실험계획

시뮬레이션을 이용한 모델은 확률적 모델이나 해석적 모델처럼 수학적인 제약을 받지 않는다. 이와 같은 이유로 분석하고자 하는 시스템이나 그 구성 개체들의 특징을 실제 상황에서의 유사하게 표현 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 시뮬레이션은 본 연구에서 알아내고자 하는 수요 백분위수의 특성을 여러 가지 실험을 통하여 효과적으로 반영 할 수 있기 때문에 주어진 문제 상황에 적합한 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는  $N$  노드 분배 시스템에서 수요의 형태 및 공급망 내의 각 노드들에 해당하는 비용이 수요 백분위수의 선택에 미치는 영향에 관한 실험을 시행한다.  $N$  노드 분배 시스템의 경우 수요 노드의 개수에 따라 시리얼 시스템 보다 복잡한 분배계획 과정을 필요로 한다. 즉 수요 노드의 재고이월 비용에 따라 노드를 정렬하고 정렬된 노드 순으로 재고를 분배한다. 본 연구에서는  $N$  노드 분배 시스템에 있어서 비교적 단순한 구조를 갖는 <그림 2>와 같은 형태의 공급망 네트워크를 대상으로 하여 <표 2>와 같이 기본 문제를 설정하고, 시뮬레이션에 사용 될 인자(factor)들의 값은 <표 1>에서 계획한 인자들의 범위 값 내에서 인자들의 값을 변화시켜 시뮬레이션을 시행하도록 한다.



<그림 2> 실험대상 공급망의 형태

<표 1> 실험 계획법에 의한 실험 설계

인 자(factor)	인자의 범위
노드 수( $N$ )	4
조달시간( $l_i$ )	1~3
재고유지 비용( $h_i$ )	1~25
재고이월 비용( $b_i, i \in \text{ched}(1)$ )	25~300
표준편차( $\sigma_{i,t}, i \in \text{ched}(1)$ )	10~20

<표 2> 기본 문제 설계

$i$	$l_i$	$h_i$	$b_i$	$\mu_{i,t}$	$\sigma_{i,t}$
1	1	1	-	-	-
2	1	3	-	-	-
3	1	9	50	100	15
4	1	9	50	100	15

시뮬레이션의 결과가 되는 수요 백분위수의 초기 값과 기울기는 앞 절에서 설명한 식 (6)과 (7)을 만족하는 범위 내의 0.01 단위의 모든 값을 대안으로 한다.

예를 들어, 목표 서비스 수준이 90%라면 대안이 될 수 있는 수요 백분위수의 초기 값은 0.9, 0.91, 0.92, ..., 0.99가 되며 수요 백분위수의 기울기는 -0.9, -0.89, -0.88, ..., 0.1까지의 값 중에서 식 (6)과 (7)을 만족하는 값이 대안이 된다.

시뮬레이션에서 사용되는 인자 수준은 실험 계획법에 따라 입력된다. 실험결과와 신뢰성을 위하여 20회의 반복실험을 수행하였으며, 실험이 안정화 될 때까지의 초기 데이터(pilot data)를 제거하여 모든 통계적 수치를 초기화하고, 안정 상태에 도달한 후 10,000회의 실제 수요(realized demand)가 발생할 때까지 실험을 수행하였다. 이러한 절차를 반복하여 대안이 될 수 있는 수요 백분위수의 초기 값과 기울기 값을 변화시켜 가면서 모든 대안에 대하여 시뮬레이션을 시행한다.

### 3.2 결과 분석

본 절에서는  $N$  노드 분배 시스템에서 앞 장에서 계획된 실험 계획법에 따라 인자 값을 변화 시켜가면서 그에 따른 수요 백분위수 대안의 결과를 알아본다. 목표 서비스 수준이 90%, 95%일 때의 결과 값은 <표 3>에서 <표 8>과 같다.

<표 3>은 목표 서비스 수준이 90%일 때, 표준편차에 따른 수요 백분위수의 초기 값, 기울기, 평균 비용과 서비스 수준을 나타낸다. 수요 노드의 표준편차 값

이 큰 수요 노드일수록 수요의 불확실성이 높아지기 때문에 재고를 더 많이 보유하는 것이 비용 측면에서 더 유리하다. 따라서 수요의 표준편차가 더 큰 노드의 기울기 값 또는 초기 수요 백분위수 값이 크게 나타나고 수요 백분위수의 기울기 값 또한 완만한 경향을 나타낸다.

목표 서비스 수준이 95%일 경우에는 <표 4>와 같다. 이 경우에도 목표서비스 수준이 90%일 때와 동일하게 수요의 표준편차가 큰 수요 노드의 기울기가 완만하게 나타난다. 그러나 수요 백분위수의 기울기는 목표 서비스 수준이 높기 때문에 목표 서비스 수준이 90%일 때와 비교해서 작아진다.

<표 3> 표준편차의 변화에 따른 수요 백분위수 변화(서비스 수준 90%)

목표 서비스 수준 $\hat{\alpha}=0.90$					
실험	표준편차 ( $\sigma_{3,t}, \sigma_{4,t}$ )	수요 백분위수 초기 값 ( $\alpha_{-q_3}, \alpha_{-q_4}$ )	수요 백분위수 기울기 ( $\beta_{-q_3}, \beta_{-q_4}$ )	서비스 수준 ( $\alpha_3, \alpha_4$ )	평균 재고 비용
1	$\sigma_{3,t} = 15$	0.93	-0.16	0.91	598.00
	$\sigma_{4,t} = 10$	0.91	-0.20	0.91	
2	$\sigma_{3,t} = 15$	0.91	-0.08	0.91	727.52
	$\sigma_{4,t} = 15$	0.91	-0.20	0.91	
3	$\sigma_{3,t} = 20$	0.91	-0.06	0.90	846.25
	$\sigma_{4,t} = 15$	0.91	-0.20	0.91	

<표 4> 표준편차의 변화에 따른 수요 백분위수 변화(서비스 수준 95%)

목표 서비스 수준 $\hat{\alpha}=0.95$					
실험	표준편차 ( $\sigma_{3,t}, \sigma_{4,t}$ )	수요 백분위수 초기 값 ( $\alpha_{-q_3}, \alpha_{-q_4}$ )	수요 백분위수 기울기 ( $\beta_{-q_3}, \beta_{-q_4}$ )	서비스 수준 ( $\alpha_3, \alpha_4$ )	평균 재고 비용
1	$\sigma_{3,t} = 15$	0.96	-0.10	0.96	698.62
	$\sigma_{4,t} = 10$	0.95	-0.10	0.95	
2	$\sigma_{3,t} = 15$	0.96	-0.12	0.96	807.41
	$\sigma_{4,t} = 15$	0.96	-0.20	0.95	
3	$\sigma_{3,t} = 20$	0.96	-0.06	0.96	970.79
	$\sigma_{4,t} = 15$	0.96	-0.10	0.95	

<표 5>는 목표 서비스 수준이 90%일 때, 재고이월 비용에 따른 수요 백분위수의 결과를 나타낸다. 재고이월 비용이 커짐에 따라 재고이월 비용이 큰 노드에서 수요 백분위수의 초기 값은 커지고, 수요 백분위수의 기울기는 완만해진다. 재고이월 비용이 커지면 현 시점에서 최대한 가까운 기간의 재고를 더 많이 유지시켜야만 비용적인 측면뿐만 아니라 서비스 수준도 향상된다. 따라서 두 수요 노드 중 한 노드의 재고이월 비용이 커짐에 따라 해당 노드의 수요 백분위수의 기울기 보다는 초기 값을 더 크게 하는 것이 서비스 수준이나 전체 평균재고 비용을 효과적으로 향상시킬 수 있다.

<표 6>은 목표 서비스 수준이 95%일 때의 수요 백분위수의 변화, 평균 재고비용과 서비스 수준을 나타낸다. 목표 서비스 수준이 95%일 경우에도 목표 서비스 수준이 90%일 때와 비슷한 결과를 나타내지만, 목표 서비스 수준이 90%일 때와 비교해 수요 백분위수의 기울기 값의 변화가 매우 완만해진 것을 알 수 있다. 이는 수요 백분위수의 초기 값을 크게 하여도 목표 서비스 수준을 만족시킬 수 없기 때문에 수요 백분위수의 기울기 값을 완만하게 조정하여 재고이월 비용이 큰 노드의 재고를 상향 조정하기 때문이다.

<표 5> 재고이월 비용의 변화에 따른 수요 백분위수 변화(서비스 수준 90%)

목표 서비스 수준 $\hat{\alpha}=0.90$					
실험	재고이월비용 ( $b_3, b_4$ )	수요 백분위수 초기 값 ( $\alpha_{q_3}, \alpha_{q_4}$ )	수요 백분위수 기울기 ( $\beta_{q_3}, \beta_{q_4}$ )	서비스 수준 ( $\alpha_3, \alpha_4$ )	평균 재고 비용
1	$b_3 = 50$	0.91	-0.08	0.91	727.52
	$b_4 = 50$	0.91	-0.20	0.91	
2	$b_3 = 100$	0.93	-0.12	0.92	775.59
	$b_4 = 50$	0.91	-0.20	0.91	
3	$b_3 = 300$	0.96	-0.10	0.95	871.99
	$b_4 = 50$	0.91	-0.20	0.91	

<표 6> 재고이월 비용의 변화에 따른 수요 백분위수 변화(서비스 수준 95%)

목표 서비스 수준 $\hat{\alpha}=0.95$					
실험	재고이월비용 ( $b_3, b_4$ )	수요 백분위수 초기 값 ( $\alpha_{q_3}, \alpha_{q_4}$ )	수요 백분위수 기울기 ( $\beta_{q_3}, \beta_{q_4}$ )	서비스 수준 ( $\alpha_3, \alpha_4$ )	평균 재고 비용
1	$b_3 = 50$	0.96	-0.12	0.96	807.41
	$b_4 = 50$	0.96	-0.20	0.95	
2	$b_3 = 100$	0.97	-0.04	0.95	960.99
	$b_4 = 50$	0.96	-0.18	0.97	
3	$b_3 = 300$	0.97	-0.03	0.95	980.65
	$b_4 = 50$	0.98	-0.20	0.96	

<표 7>은 재고유지 비용의 변화에 따른 실험 결과를 나타낸다. 재고유지 비용이 적을 경우가 클 경우에 비해 재고를 유지하고 있는 것이 상대적으로 보다 유리하기 때문에 수요 백분위수의 초기 값은 크고, 기울기는 완만한 것을 볼 수 있다. 이와 반대로 재고유지 비용이 커질수록 수요 백분위수의 초기 값은 목표 서비스 수준을 만족해야 하기 때문에 일정한 수준으로 유지되지만 수요 백분위수의 기울기는 조금 커지는 것을 알 수 있다.

<표 8> 재고유지 비용의 변화에 따른 수요 백분위수 변화(서비스 수준 90%)

목표 서비스 수준 $\hat{\alpha}=0.90$					
실험	재고유지비용 ( $h_1, h_2, h_3, h_4$ )	수요 백분위수 초기 값 ( $\alpha_{q_3}, \alpha_{q_4}$ )	수요 백분위수 기울기 ( $\beta_{q_3}, \beta_{q_4}$ )	서비스 수준 ( $\alpha_3, \alpha_4$ )	평균 재고 비용
1	$h_1 = 1$	0.96	-0.01	0.96	151.18
	$h_2 = 1$				
	$h_3 = 1$	0.93	-0.02	0.93	
	$h_4 = 1$				
2	$h_1 = 1$	0.91	-0.08	0.91	727.52
	$h_2 = 3$				
	$h_3 = 9$	0.91	-0.20	0.91	
	$h_4 = 9$				
3	$h_1 = 1$	0.91	-0.08	0.91	1754.79
	$h_2 = 5$				
	$h_3 = 25$	0.91	-0.18	0.91	
	$h_4 = 25$				

<표 9> 재고유지 비용의 변화에 따른 수요 백분위수 변화(서비스 수준 95%)

목표 서비스 수준 $\hat{\alpha}=0.95$					
실험	재고유지비용 ( $h_1, h_2, h_3, h_4$ )	수요 백분위수 초기 값 ( $\alpha_{q_3}, \alpha_{q_4}$ )	수요 백분위수 기울기 ( $\beta_{q_3}, \beta_{q_4}$ )	서비스 수준 ( $\alpha_3, \alpha_4$ )	평균 재고 비용
1	$h_1 = 1$	0.96	-0.10	0.96	155.04
	$h_2 = 1$				
	$h_3 = 1$	0.96	-0.10	0.96	
	$h_4 = 1$				
2	$h_1 = 1$	0.96	-0.12	0.96	807.41
	$h_2 = 3$				
	$h_3 = 9$	0.96	-0.20	0.95	
	$h_4 = 9$				
3	$h_1 = 1$	0.96	-0.12	0.96	2070.41
	$h_2 = 5$				
	$h_3 = 25$	0.96	-0.20	0.95	
	$h_4 = 25$				



<표 8>은 서비스 수준이 95%일 때, 재고유지 비용에 따른 실험 결과를 나타낸다. 서비스 수준이 90%일 때와 비교해서 수요 백분위수의 초기 값이 커졌지만, 기울기는 비슷한 결과를 나타낸다. 또한, 재고유지 비용에 따른 수요 백분위수의 초기 값과 기울기의 변화폭도 목표 서비스 수준이 90%일 때와 비슷한 결과를 보여준다.

$N$  노드 분배 시스템의 경우에는 수요 노드의 재고이월 비용 차이에 따라 분배 계획이 이루어지기 때문에 시리얼 시스템 보다는 보다 복잡한 분배계획 과정이 이루어지게 된다. 따라서 수요 노드의 재고이월 비용에 따라 시리얼 시스템 보다는 보다 많은 영향을 받게 된다. 수요 노드 중 재고이월 비용이 가장 큰 노드의 수요 백분위수의 초기 값은 상향 조정되고, 기울기는 완만하게 조정해야 목표 서비스 수준을 만족하고, 평균 재고 비용을 최소화 시키는데 유리하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다단계 분배형 구조를 갖는  $N$  노드 분배 시스템을 가지는 공급망을 대상으로 하였다. 수요가 확률적인 형태로 주어지는 현실적인 상황을 반영하기 위해 확률적인 수요를 확정적인 형태로 변형하여 적용하기 위한 접근 방법으로 수요 백분위수를 사용하였다. 이와 같은 방법으로 확률적인 분포를 갖는 수요 정보 가운데 목표 서비스 수준을 만족하는 적절한 수요예측 값을 선택하여 이 값을 확정적인 입력정보로 사용하기 위한 효과적인 수요 선택 방안을 제시하였다.

본 논문에서는 기간별 수요 백분위수를 선택하는 방법으로 수요 백분위수의 초기 값과 기울기를 가지는 선형 수요 백분위수(linear demand percentile) 방법을 활용하였다. 이러한 해법은 수요가 정규 분포를 따를 경우, 노드의 수가 늘어나게 되면 수리적인 접근 불가능했던 문제에 대하여 최적 해는 아니지만 근사 최적해(near optimal)에 도달 할 수 있었다.

수요 분포의 평균과 표준편차가 변해도 수요 백분위수 초기 값과 기울기 결정에 영향은 있지만, 그 차이가 작기 때문에 거의 영향을 받지 않는다. 재고이월 비용과 재고유지 비용이 증가함에 따라 수요 백분위수의 초기 값은 상향 조정되고, 기울기는 완만해지는 경향을 가진다. 재고이월 비용의 증가는 재고유지 비용이 증가할 때와 비교하여 수요 백분위수의 초기 값과 기울기에 더 민감하게 나타난다. 또한 비용이 증가할 때 수요 백분위수의 초기 값 보다는 기울기를 조정하는 것이

목표 서비스 수준을 만족하는 것에는 효과적이거나 공급망 내의 평균 재고 비용이 상승하게 된다. 공급망 내의 노드 수가 많을 때와 조달시간이 긴 경우에 수요 백분위수의 초기 값과 기울기는 대략 일정하지만, 노드 수가 많을 때보다는 노드의 조달시간이 긴 경우에 평균 재고 비용이 더 높게 나타난다. 이는 조달시간 동안의 수송 중인 물량은 유연하게 재고 분배가 이뤄지지 못하기 때문에 공급망 내의 불확실성은 높아지고, 그 만큼 재고 비용은 증가하게 된다. 수요 노드 중 재고이월 비용이 가장 큰 노드의 수요 백분위수의 초기 값은 상향 조정되고, 기울기는 완만하게 조정해야 목표 서비스 수준을 만족하고, 평균 재고 비용을 최소화 시키는데 유리하다.

본 연구에서는 비용적인 측면뿐만 아니라 목표 서비스 수준을 고려하여 수요 백분위수 대안 값을 제시하였다. 수요 백분위수의 대안으로 선형 수요 백분위수 방법을 활용함으로써 근사 최적해(near optimal)에 빠른 시간 내에 다가갈 수 있는 보다 실현 가능한 해법을 제시하였다. 그러나 본 연구에서는 비교적 단순한 형태의 다단계 분배형 공급망에 대한 성능평가로 범위가 제한된 한계점이 존재한다. 이는 보다 복잡한  $N$  노드 분배 시스템, 즉 단계의 수나 수요 노드의 수가 많을 경우 보다 많은 수요 노드에 대해 효과적인 대안을 수립하여야 하기 때문에 적절한 해를 탐색하는데 소요되는 계산시간이 기하급수적으로 늘어나는 한계가 존재한다. 또한 단계의 수가 많아질수록 수요 백분위수의 대안을 선형(linear)으로 가정한 이유로 인하여 많은 오차를 발생할 가능성이 존재하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해 비선형(non-linear)성을 반영하는 보다 효과적인 탐색 방법의 개발이 필요하다. 또한 분배형 시스템에서 고려해야 할 사항으로 하위 노드에서 발생하는 imbalance를 최소화하고 이를 통해 전체 네트워크의 비용 최소화 및 서비스 수준 준수를 위한 효과적인 balanced stock rationing rule[12]에 관한 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

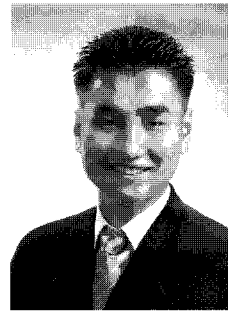
본 연구에서 제시한 공급망 네트워크 모형보다 보다 현실적이기 위해서는 노드와 노드 사이의 수송제약이나 노드의 용량에 대해 제한을 두는 것도 필요하다. 또한 본 연구의 결과를 바탕으로 최적 수요 백분위수를 쉽고 빠르게 찾아낼 수 있는 휴리스틱 알고리즘에 관한 연구도 추가적으로 진행된다면 보다 복잡한 상황을 가진 공급망 네트워크 구조에서도 쉽게 접근할 수 있는 방향을 제시할 수 있으리라 생각된다.

## 5. 참고문헌

- [1] 박기태, 권익현, 김성식, “시물레이션을 통한 공급 사슬내의 효과적인 수요 선택 방안에 관한 연구”, 한국SCM학회지, 4권, 1호 (2004) : pp. 61-69.
- [2] 박기태, 권익현, 김성식, “서비스 수준 제약하의 공급망 분배계획을 위한 수요선택 방안에 관한 연구”, 한국시물레이션학회 논문지, 15권, 3호 (2006) : pp. 39-47.
- [3] 박기태, 권익현, “공급망의 목표 서비스 수준만족을 위한 효과적인 수요선택 방안”, 대한안전경영과학회지, 제11권, 1호, (2009) : pp. 205-211.
- [4] 안재성, 권익현, 김성식, “Rolling horizon 환경하에서 다단계 재고 모형의 분배계획 수립에 관한 연구”, IE Interfaces, 16권, 4호 (2003) : pp. 441-449.
- [5] Axsater, S., Inventory Control, Springer (2006).
- [6] Chopra, S. and Meindl, P., Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation, Prentice-Hall (2006).
- [7] Clark, A.J. and Scarf, H., “Optimal policies for a multi-echelon inventory problem”, Management Science, Vol.6 (1960) : pp. 475-490.
- [8] Diks, EB, de Kok, AG and Lagodimos, AG, “Multi-echelon systems : A service measure perspective”, European Journal of Operational Research, Vol.95 (1996) : pp. 241-263
- [9] Federgruen, A. and Zipkin, P.H., “Computational issues in an infinite-horizon multiechelon inventory model”, Operations Research, Vol.32 (1984) : pp. 818-836.
- [10] Forrester, J.W., Industrial Dynamics, MIT Press (1961).
- [11] Park, C., “Simulation-based heuristic algorithm minimizing average inventory costs on a multi-stage serial inventory system A service measure perspective”, International Journal of Industrial Engineering, Vol.11 (2004) : pp. 160-168
- [12] Van der Heijden, MC., “Near cost-optimal inventory control policies for divergent networks under fill rate constraints”, International Journal of Production Economics, Vol.63 (2000) : pp. 161-179.
- [13] Vollmann, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C. and Jacobs, F.R., Manufacturing Planning and Control Systems for Supply Chain Management, McGraw-Hill (2004).
- [14] Zipkin, P.H., Foundations of Inventory Management, McGraw-Hill (2000).

## 저자 소개

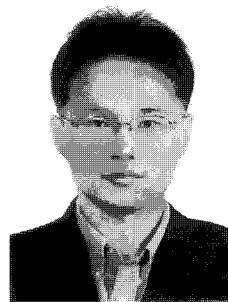
## 박기태



명지대학교 산업공학과에서 공학사, 고려대학교 산업시스템정보공학과에서 공학석사 학위를 각각 취득하였으며, 현재 LG 디스플레이에 재직 중에 있다. 주요 관심분야는 ERP/SCM, 생산관리 등이다.

주소: 경기도 파주시 월릉면 덕은리 LG 디스플레이 ERP 2팀

## 권익현



고려대학교 산업공학과에서 학사, 석사 및 박사학위를 취득하였으며, 동대학 정보통신기술연구소 연구조교수와 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign 박사후 과정을 거쳐 현재 인제대학교 시스템경영공학과 전임강사로 재직 중에 있다. 연구 관심분야는 물류 및 공급망관리, 수요예측, 생산계획 및 통제, e-Business 등이다.

주소: 경남 김해시 어방동 인제대학교 시스템경영공학