

서비스 수준 제약하의 공급망 분배계획을 위한 수요선택 방안에 관한 연구

박기태¹ · 권익현^{2*} · 김성식³

A Study on Demand Selection in Supply Chain Distribution Planning under Service Level Constraints

Gi-Tae Park · Ick-Hyun Kwon · Sung-Shick Kim

ABSTRACT

In most of supply chain planning practices, the estimated demands, which are forecasted for each individual period in a forecasting window, are regarded as deterministic. But, in reality, the forecasted demands for the periods of a given horizon are stochastically distributed. Instead of using a safety stock, this study considers a direct control of service level by choosing the demand used in planning from the distributed forecasted demand values for the corresponding period. Using the demand quantile and echelon stock concept, we propose a simple but efficient heuristic algorithm for multi-echelon serial systems under service level constraints. Through a comprehensive simulation study, the proposed algorithm was shown to be very accurate compared with the optimal solutions.

Key words : supply chain distribution planning, multi-echelon serial system, service level, demand quantile, echelon stock

요약

대부분의 공급망 계획에서 사용되는 각 계획 기간 내의 예측 수요는 확정적인 것으로 간주한다. 그러나 현실에서 주어진 계획 기간 내의 수요 예측값은 확률적으로 분포를 따르는 것이 일반적이다. 본 연구는 기존의 안전재고를 통한 서비스 수준을 관리하는 방법을 대신하여 고객 수요의 분포내의 특정한 값을 수요 예측값으로 사용하는 수요선택 방법에 대해 다룬다. 수요 분위수와 계층 재고의 개념을 활용하여 서비스 수준 제약이 존재하는 시리얼 재고시스템을 대상으로 비교적 간단하지만 효과적인 수요선택을 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 시물레이션을 활용한 비교 실험을 통해 제안된 알고리즘이 최적해와 유사한 매우 정확한 결과를 보임을 입증하였다.

주요어 : 공급망 분배계획, 다단계 시리얼 시스템, 서비스 수준, 수요 분위수, 계층 재고

1. 서론

공급망은 <그림 1>에서 보듯이 원료 공급자로부터 제조, 분배, 소비자를 연결하는 네트워크를 말한다. 여기서 공급망의 분배계획이란 다양한 고객들의 수요가 기간별로 예측되면 여기에 맞추어 공급망 네트워크의 각 가지(branch)를 따라 흐르는 물류의 양을 기간별로 결정하는 것을 말한다.^[5]

2005년 8월 23일 접수, 2006년 7월 25일 채택

¹⁾ LG.Philips LCD

²⁾ 고려대학교 정보통신기술연구소

³⁾ 고려대학교 산업시스템정보공학과

주 저 자 : 박기태

교신저자 : 권익현

E-mail; queens@korea.ac.kr

이러한 공급망에서 가장 불확실하고 가변성이 높은 요소는 무엇보다 고객의 수요이다.^[10] 따라서 이 고객의 수요를 정확하게 반영하는 것이 전체 공급망의 성능 향상을 위해 필요한 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 지금까지 대부분의 연구는 계획 기간(planning horizon) 안에 있는 각 기간의 제품별 수요는 확정적(deterministic)으로 특정한 값으로 주어진다라는 생각에 기초하여 이루어지고 있다. 그러나 현실의 상황을 보면, 각 기간의 예측수요는 확률적 분포를 갖는 것이 일반적이다.

이러한 상황에서 계획에 실제로 사용되는 예측수요는 분포된 범위 내의 특정한 한 값을 의사 결정자가 선택한 것이다. 이는 실제 현장에서 적용되고 있는 MRP(material requirements planning)와 DRP(distribution requirements planning)의 계획 절차에서 널리 쓰이고 있는 방법이다.^[15]

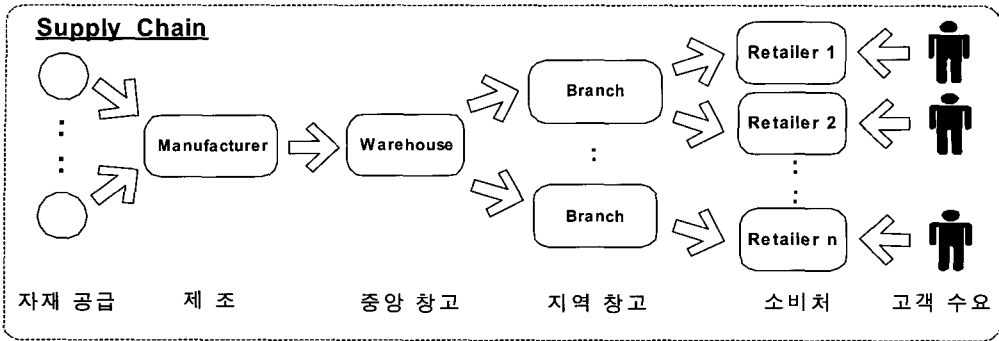


그림 1. 공급망 네트워크

이때 동일한 분배계획 방법을 사용하더라도 분배계획 수립 시 사용되는 수요예측 값이 어떠한 값으로 선택되는가에 따라 전체 시스템의 효율성은 크게 영향을 받는다. 만약 분배계획에 사용되는 수요예측 값이 분포 내 여러 대안들 중에서 지나치게 큰 값이 선택되었을 경우 공급망 네트워크상에는 많은 양의 재고가 남게 되며 이로 인해 과도한 재고유지 비용(holding cost)이 발생하게 된다. 이에 비해 재고 고갈(stock out)의 기회는 상대적으로 줄어들게 되어 고객에 대한 서비스 수준(service level)은 올라가게 된다. 반대로 지나치게 작은 값을 선택한다면 고객의 수요를 만족시키지 못하는 경우가 빈번하게 발생하여 많은 재고이월 비용(backorder cost)이 발생한다.

이와 같이 실제로 어떤 값을 예측 수요로 선택하느냐는 전체 공급망의 효과적인 운영 면에 있어서 중요한 문제가 되며, 이는 기존의 안전재고 수준(safety stock level)을 정하는 문제와 같은 개념에서 이루어지나 접근 방법이 다른 것이 된다. 분배계획 자체는 주어져 고정된 기간별 수요 하에서 최적의 경제적인 계획을 세우는 문제라면 본 연구에서는 이러한 계획 방법(일반적으로 계층 재고 정책(echelon stock inventory policy)으로 가능한 결과를 얻을 수 있다.^[4])이 주어졌을 때 확률분포를 따르는 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 재고 비용을 최소화 하는데 목적이 있다. 수요 결정은 회사의 중요 정책 중에 하나인 서비스 수준 결정 문제이며 분배계획의 방향을 결정하여 발생하는 비용에 영향을 미치게 되기에 매우 중요한 문제이나 현실적인 해결 방법이 제시되지 못하고 있는 과제이다. 본 연구에서는 시리얼(serial) 재고시스템을 대상으로 다양한 수

요 분포 하에서 효과적인 수요선택 방법에 관해 연구하고자 한다. 논리적 접근과 더불어 시뮬레이션을 통하여 사용자의 요구에 부응하는 수요선택 방안을 구하고자 한다.

2. 기존 연구

Clark와 Scarf^[6]의 연구 이후로 다양한 형태의 다단계 재고 문제(multi-echelon inventory problem)들이 현재까지 다루어져 오고 있다. 그들은 여러 노드들이 연속적으로 이루어진 시리얼 시스템에서 계층 재고 정책에 기반한 order-up-to 정책을 사용하는 비용 최소화 모델을 제안하였다. Federgruen과 Zipkin^[9]은 Clark와 Scarf 모델의 결과를 무한기간(infinite horizon) 문제로 확장하는 연구를 하였다. 그러나 수요가 정규분포를 따를 경우, 노드의 수가 늘어나게 되면 Federgruen과 Zipkin이 제시한 방법에 따른 해법으로는 수리적인 접근이 어렵기 때문에 최적해를 구하기가 힘든 것으로 알려져 있다.^[4] 박기태 등^[2]은 수요가 확률적인 형태로 주어지는 현실적인 상황을 반영하기 위해 수요를 확정적인 형태로 변형하여 적용하기 위한 접근 방법으로 수요 분위수(demand quantile)를 사용하였다. 이와 같은 방법으로 확률적인 분포를 갖는 수요정보 가운데 적절한 수요예측 값을 선택하여 이 값을 확정적인 입력정보로 사용하기 위한 시뮬레이션을 이용하는 효과적인 수요선택 방안을 제시하였다. van Houtum 등^[14]은 이와 같이 비용 최소화 모델과 관련된 기존 연구들을 체계적으로 정리하여 발표하였다.

서비스 수준을 고려한 공급망 재고 문제도 꾸준한 관심을 받으며 연구되어지고 있다.^[6] Rosenbaum^[12]은 하나의 분배 공급 센터(warehouse)와 여러 개의 소매점(retailer)으로 이루어진 다단계 분배 시스템에서 목표 서비스 수준

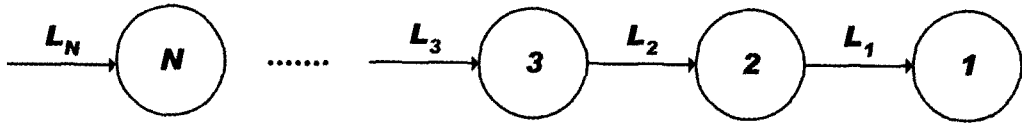


그림 2. 다단계 시리얼 시스템

을 만족시키기 위해 각 소매점이 어느 정도의 안전 재고 수준을 유지해야 하는지에 대한 연구를 시도하였다. Zipkin^[6]은 복합 포아송 분포(compound Poisson distribution)를 갖는 단일 노드에서 fill rate 형태의 서비스 수준을 표현하였고, 이를 바탕으로 서비스 수준을 만족시키면서 재고유지 비용의 합을 최소화 하는 방법을 고안하였다. van Houtum과 Zijm^[13]은 일랑 분포(Erlang distribution)를 따르는 시리얼 시스템에서 재고유지 비용과 재고이월 비용을 최소화 하는 기초 재고(base-stock) 수준을 결정하는 방법을 고안하였고, 재고이월 비용을 조정하면서 목표로 하는 서비스 수준을 만족시키는 절차에 대하여 간략하게 언급하였다. 최근에는 Kwon 등^[11]에 의해 정규분포를 따르는 다단계 시리얼 시스템에서 fill rate를 만족시키면서 재고유지 비용의 합을 최소화하는 시뮬레이션 기반의 휴리스틱 알고리즘이 제안되었다.

이상의 기존 연구들을 살펴봤을 때, 대부분의 연구들은 확률적인 수요를 갖는 공급망 네트워크를 대상으로 확률적 모델이나 해석적 모델을 이용하여 수리적인 접근 방법을 통해 정량화하는 연구를 시도하여 왔음을 알 수 있다. 이러한 연구 방법은 정확한 결과값을 제시하지만, 노드의 수가 늘어나거나 다른 제약조건이 추가될 경우 수치적으로 접근하기에 한계가 있어 비교적 제한된 범위에서 적용되어오고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 수리적인 접근 방법의 단점을 보완하면서, 보다 다양한 형태의 공급망 네트워크에 대해 전체 재고 비용을 최소화시키면서 목표 서비스 수준을 만족하기 위한 방법을 시뮬레이션을 통해 제시하고자 한다.

3. 본 론

3.1 문제의 정의 및 가정

본 논문의 연구 대상이 되는 시스템은 <그림 2>와 같은 N 개의 노드로 이루어진 시리얼 형태의 공급망으로서, 물류는 생산지에서 최하위 노드로 이동하며, 최하위 노드에서만 고객의 수요가 발생한다. 본 논문에서는 최하위 단계인 소매점에서부터 최상위 노드의 순으로 노드번호를

부여하기로 한다. 노드간의 조달시간(lead time)은 L_i , $i = 1, \dots, N$ 으로 표시하였으며, 이들은 고정되어 있으며, 각각 다른 시간을 가질 수 있다. 각 노드는 계층 재고에 기반한 order-up-to 정책을 사용하여 매 기간 필요한 물량 만큼만을 주문한다(이에 대한 보다 자세한 내용은 박기태 등^[2]의 논문을 참고바람). 최하위 노드의 재고이월 비용을 b 로 나타내었으며, 주문 비용(ordering cost)은 존재하지 않는 것으로 가정한다. 재고비용의 경우 재고이월 비용이 재고유지 비용(h_i , $i = 1, \dots, N$)보다 크며, 생산지와 가까운 노드일수록 먼 노드에 비해 상대적으로 낮은 재고유지 비용을 갖는 것으로 가정한다.^[4]

최하위 노드에서만 발생하는 수요는 안정적인(stationary) 정규분포(normal distribution)를 따르며 매기간 독립적으로 발생하는 것으로 가정한다. 분배계획은 이러한 확률적인 형태를 나타내는 수요 분포 가운데 선택된 특정한 값을 바탕으로 확정적인 형태로 계획되어진다. 분배계획 수립 시, 이러한 분포 내에 존재하는 여러 값들 중에서 관련된 재고비용을 최소화시키면서 목표 서비스 수준을 준수할 수 있도록 하는 특정 값을 수요로 선택해야 한다. 본 논문에서 제안하는 수요선택 방안은 다음절에서 자세히 설명하기로 한다.

본 논문에서는 공급망에서 발생하는 일련의 사건들은 매 기간 초에 발생하며, 다음과 같은 순서로 진행되는 것으로 가정한다.

- ① 조달시간 이전 기간 초에 주문한 물량 도착
- ② 이월된 재고(backorder)가 있을 경우 이를 먼저 보충
- ③ 이번 기간의 실제 수요 발생
- ④ 발생한 수요 만족
- ⑤ 다음 기간의 수요선택
- ⑥ 추간된 정보를 바탕으로 새로운 분배계획 수립, 이에 따른 물량 이동

본 연구에서는 확률적인 분포에서 적절한 수요예측 값을 선택하는 방법으로 기간별 수요 분위수(quantile) 값을

정하게 된다. 여기서 분위수는 임의의 범위 중에서의 한 값을 말하는데, 일반적으로 누적된 분포 값에서 백분위수 값을 가리킨다.^[8] 정규분포를 나타내는 특정한 한 기간의 평균이 μ , 표준편차가 σ 로 주어졌을 때, 만약 수요 분위수 값으로 q 를 선택했을 경우 해당기간의 수요예측 값은 $\hat{D} = z_q \cdot \sigma + \mu$ 로 계산된다. 예를 들어, 평균이 50이고 표준편차가 5인 정규분포에서 수요 분위수 값으로 0.9를 선택하였을 경우 z_q 는 $z_{0.9} = 1.28$ 이 되고, 수요예측 값은 56.4가 된다.

본 연구에서 의미 있는 분배계획이 수립되기 위해 최초의 공급자로부터 최하위 노드까지 도착하는데 소요되는 누적 조달시간(cumulative lead time) 이상의 기간에 해당하는 수요예측 값이 결정되어야 한다. 이 때, 필요한 수요 분위수의 개수는 본 연구에서와 같이 수요가 안정적일 경우에는 노드 개수와 각 노드의 조달시간의 합에 의해 결정된다. 노드의 개수가 N 이고 최상위 노드로부터 최하위 노드까지의 누적 조달시간이 L 기간, 즉 $L_1 + L_2 + \dots + L_N = L$ 이라고 할 경우 본 연구에서 최종적으로 결정해야 할 수요 분위수의 개수는 $L+1$ 이 된다.^[2]

수요예측을 통해 확정적인 형태의 수요 분위수가 선택 되어지면 이를 바탕으로 분배계획을 수립하게 되는데, 이 때 각 노드의 주문량은 계층 재고를 고려하여 결정한다. 이러한 계층 재고를 고려하는 이유는 상위 노드의 주문량을 결정하는데 있어 하위 노드가 재고를 많이 가지고 있는 경우 상위 노드의 주문량을 낮춰주고 하위 노드의 재고가 적을 경우 상위 노드의 주문량을 높임으로써 공급망의 모든 노드의 재고량을 효과적으로 유지할 수 있기 때문이다.^[4]

본 연구에서는 무한기간(infinite horizon) 동안 전체 시스템에서 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의 총합을 최소화하는 공급망 분배계획 수립을 목적으로 한다. 제약식은 해당 노드의 현재 기간 재고량은 지난 기간의 재고량과 현재 기간 초에 도착한 물량의 합에서 수요와 하위 노드가 요청한 물량을 뺀 것과 같아야 한다는 재고 균형(inventory balance) 제약, 수요 발생지가 아닌 경우 재고 이월이 발생할 수 없다는 제약, 실제 서비스 수준이 목표 서비스 수준 이상을 유지해야 한다는 제약 그리고, 비음수 제약 등으로 이루어져 있다. 이에 대한 세부적인 모델링 및 분배계획 수립 절차는 윤병희 등^[3]에 의해 자세히 다루어진 바 있다. 본 연구와 같이 서비스 수준 제약이 있을 경우, 무한기간 동안의 평균 재고비용을 최소로 하는 공급망 문제는 예측 수요와 재고수준의 상관관계 등의 내재된 복잡성으로 인하여 수리적인 해법을 찾기가 매우 어려운

것으로 알려져 있다.^[1,2] 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 시뮬레이션을 통한 휴리스틱 방법을 고안하는데 초점을 맞추도록 한다.

3.2 서비스 수준

본 연구에서 궁극적으로 알아내고자 하는 것은 목표로 하는 서비스 수준(target service level)을 만족하면서 동시에 공급 사슬에서 발생하는 재고비용의 총합을 최소화 할 수 있도록 하는 수요 분위수 대안이다. 이 때, 서비스 수준을 만족하는지에 대한 결과는 서비스 수준의 정의에 따라 차이가 있을 수 있다. 일반적으로 사용하는 서비스 수준의 정의는 다음과 같다.^[4,7]

- non-stockout probability : 주문 주기마다 재고가 부족하지 않을 확률
- fill rate : 수요 발생시 수요에 대한 재고의 즉시 만족 비율
- ready rate : 0보다 큰 재고량을 갖는 시간의 비율

본 연구에서 채택하는 서비스 수준은 위의 정의 가운데 첫 번째로, 주문량 이상의 물량이 고객 주문 시간 안에 도착하는 확률로도 볼 수 있다. 이 정의에 의한 서비스 수준은 적용하기 비교적 간편한 방법이나, 단위 주문(batch size) 방식에는 적합하지 않은 단점을 가지고 있다.^[4] 그러나 첫 번째 형태의 서비스 수준은 고객의 주문이 빈번히 일어날 때 고객 서비스 만족도를 잘 표현할 수 있어서, 기간별 주문이 꾸준히 일어나는 본 연구의 문제 상황에 적용하기에 적합한 방법이라고 할 수 있다.^[4] 또한, 위에서 설명한 정의에 의한 서비스 수준들은 긴 기간(long run)으로 보았을 때 거의 비슷한 경향을 나타내기 때문에 첫 번째 형태의 서비스 수준을 본 연구의 서비스 수준의 척도로 사용하기로 한다.

3.3 알고리즘

수요 분위수를 이용한 수요선택 문제는 박기태 등^[2]이 조합 최적화(combinatorial optimization)의 한 방법으로 노드별 가능한 수요 분위수의 조합을 완전 전개(complete enumeration)를 통해 나열하고 이들 가운데 최적 수요 분위수 조합을 구하는 방법을 제안한 바 있다. 조합 최적화를 통해 얻어진 결과는 최적의 수요 분위수 값을 얻어낼 수 있지만, 노드의 수가 많아지거나 조달시간이 길어질수록 구해야 할 기간별 수요 분위수의 개수가 증가하기 때문에 고려해야 할 대안의 수가 무수히 많아지게 된다. 따라서

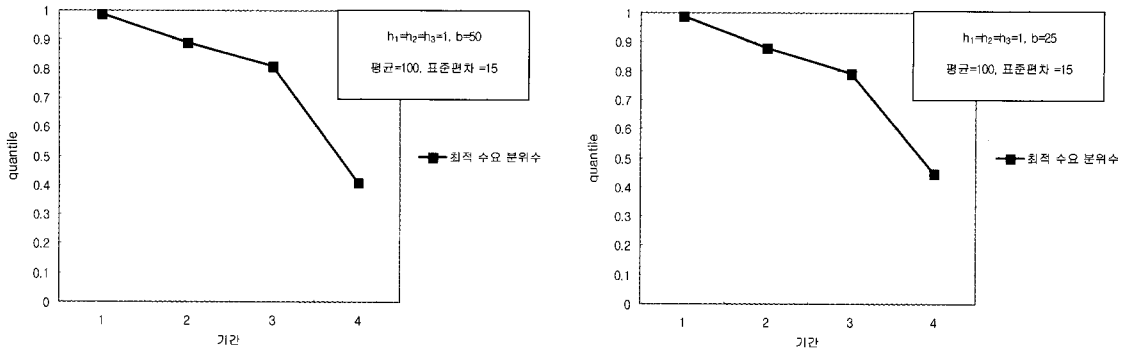


그림 3. 최적의 수요 분위수 그래프

대안의 수가 많아짐에 따라 계산에 소요되는 수행시간 (run time) 또한 기하급수적으로 증가하기 때문에, 실제적인 문제에 대해서 제한된 시간(polynomial time) 내에 해를 구하기에는 한계가 있다. 또한 이러한 방법은 재고비용적인 측면만을 고려할 뿐, 주어진 고객 서비스 수준에 대한 제약조건을 반영하지 못하는 단점 또한 존재한다.

본 연구에서는 이와 같은 기존 연구의 문제점을 해결하기 위해서 초기 수요 분위수 β_0 와 수요 분위수 기울기 β_{slope} 를 이용한 선형 수요 분위수(linear demand quantile) 기법을 적용하여 기간별 수요 분위수를 결정하는 근사적인 방법을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 접근 방법의 기본적인 아이디어는 최적의 수요 분위수의 조합은 근사적으로 선형(linear)의 형태에 가깝게 나타난다는 박기태^[2]의 연구에 기초하며, 이러한 결과는 박기태^[1]에 의해 검증된 바 있다.

<그림 3>은 각 노드의 조달시간과 재고유지 비용이 동일하며, 재고이월 비용을 제외한 모든 조건이 동일한 3개의 노드로 구성된 두 가지 형태의 시리얼 시스템에 대한 최적의 수요 분위수 조합을 나타낸다. <그림 3>에서 두 가지 실험에 대한 최적 수요 분위수 조합의 개략적인 그래프 형태는 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이 결과를 보다 자세히 분석해보면, 상대적으로 재고이월 비용이 큰 좌측 시스템에 대한 기간 2, 3의 수요 분위수는 우측보다 큰 반면 기간 4의 경우 우측에 비해 작음을 알 수 있다. 이는 재고이월 비용이 클수록 재고이월을 줄이는 것이 유리하며, 이를 위해 좌측 시스템에서는 고객 수요에 보다 직접적인 영향을 주는 노드 2와 3의 수요 분위수를 증가시키지만 전체 시스템에 존재하는 계층 재고의 급격한 변화를 방지하기 위해 노드 4의 분위수 값을 완만하게 감소시킨

결과로 해석될 수 있다.

본 논문에서는 선형 수요 분위수 기법을 통해 j 번째 ($j=1,2,\dots,L+1$) 기간의 수요 분위수 값은 아래의 식 (1)을 통해 계산하기로 한다.

$$q_j = \beta_0 - \beta_{slope} \cdot (j-1) \quad (1)$$

예를 들어 최상위 노드로부터 최하위 노드까지의 누적 조달시간을 $L=3$, 초기 수요 분위수 값을 $\beta_0=0.9$, 수요 분위수 기울기를 $\beta_{slope}=0.1$ 이라고 하면, j 번째 기간 ($j=1,2,3,4$)의 수요 분위수 값은 식 (1)을 통해 각각 $q_1 = 0.9 - 0.1 \cdot 0 = 0.9$, $q_2 = 0.8$, $q_3 = 0.7$, $q_4 = 0.6$ 이 된다. 여기서 수요 분위수 q_j 는 확실적인 값이기 때문에 항상 0과 1사이의 값으로 존재하여야 한다. 또한, 목표 서비스 수준의 제약을 만족해야 하기 때문에 수요 분위수 대안을 수립 할 때 초기 수요 분위수는 공급망 네트워크의 목표 서비스 수준을 $\hat{\alpha}$ 라고 정의하면, 항상 $\hat{\alpha}$ 과 같거나 큰 범위 내에서 설정되어야 한다. 예를 들어 목표 서비스 수준이 0.95라면, 초기 수요 분위수는 목표 서비스 수준보다는 커야하고 확실적인 값이기 때문에 1보다는 작아야 한다. 즉, 초기 수요 분위수의 대안이 될 수 있는 값은 [0.95, 1) 사이의 값이 된다. 따라서 선형 수요 분위수를 이용한 방법은 아래와 같은 두 가지 제약식을 만족해야만 한다.

$$0 < \beta_0 - \beta_{slope} \cdot (j-1) < 1 \quad (2)$$

$$\hat{\alpha} \leq \beta_0 < 1 \quad (3)$$

표 1. 선형 분위수 방법과 조합 최적화 방법의 수행도 비교

h_1	h_2	h_3	b	dq_1	dq_2	dq_3	dq_4	CR
1	1	1	25	0.01	0.07	0.15	0.02	0.97
9	3	1	25	0.01	0.07	0.13	0.03	0.98
25	5	1	25	0.02	0.05	0.12	0.04	0.99
1	1	1	50	0.01	0.06	0.15	0.03	0.98
9	3	1	50	0.01	0.05	0.13	0.02	0.96
25	5	1	50	0.01	0.07	0.14	0.04	0.98

시물레이션을 위한 입력 값이 되는 수요 분위수의 초기 값과 기울기는 식 (2)와 (3)을 만족하는 범위 내의 0.01 단위의 모든 값이 대안으로 선정된다. 예를 들어, 목표 서비스 수준이 90%라면 대안이 될 수 있는 수요 분위수의 초기 값은 0.9, 0.91, 0.92, ..., 0.99가 되며 수요 분위수의 기울기는 0, 0.01, 0.02 등의 값 가운데에서 식 (2)와 (3)을 동시에 만족하는 모든 값이 대안이 된다.

본 논문에서 제안하는 선형 수요 분위수를 통한 접근 방법의 타당성을 검증하기 위해 조합 최적화 방법^[2]으로 구해진 최적 수요 분위수 조합과 비교하기로 한다. 그러나 조합 최적화에 의한 방법은 서비스 수준을 고려하지 않기 때문에 본 연구와 동일한 조건하에서 비교하기는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 선형 수요 분위수 방법의 타당성 검증을 위한 수단으로서 먼저 조합 최적화 방법에 의해 얻어지는 최적 수요 분위수와 그때의 서비스 수준을 구한다. 다음으로 앞서 조합 최적화에 의해 구해진 서비스 수준을 목표 서비스 수준으로 설정하고, 본 논문에서 제안하는 선형 수요 분위수 방법에 의해 기간별 수요 분위수 결과를 구하는 방식으로 진행한다.

4. 시물레이션 및 결과 분석

본 장에서는 본 연구에서 제안한 알고리즘의 성능 평가를 위해서, 공급망에 영향을 미치는 요소들을 대상으로 하여 시물레이션을 수행하였다. 시물레이션의 준비 기간(warm-up period)은 50기간으로 설정하였으며, 한 번의 시물레이션은 10,000기간만큼 시행되었다. 50기간의 준비 기간을 둔 이유는 시물레이션의 초기 상태(예: 각 노드별 초기 재고 및 이동 중인 재고량)에 독립적인 결과를 도출하기 위한 목적과 함께, 해당 기간 동안에 시스템이 안정 상태(steady state)에 도달할 수 있도록 하기 위함이다. 이 기간 동안의 결과는 절단(truncate)되어 실험 결과에는 반영되지 않는다. 또한 10,000기간의 시행시간은 시물레

이션의 정확도와 수행시간을 함께 고려한 것으로서, 공급망에 대한 시물레이션에서 일반적으로 사용되는 값이다.^[2,11] 즉, 이 값이 지나치게 짧을 경우 수요 분포의 특성을 정확히 반영하지 못할 수 있으며, 반면에 지나치게 길 경우 과도한 시물레이션 수행시간으로 인해 실험의 효율성을 저해할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 이러한 실험을 20회 시행하였으며, 동일한 환경에서 제안된 방법과 기존의 조합 최적화 방법^[2]을 적용한 결과를 비교·분석하였다.

위의 <표 1>은 노드의 수가 3개, 수요의 평균과 표준편차가 각각 100과 15, 노드별 조달시간이 1기간인 시리얼 형태의 공급망 네트워크 구조에서 각 노드별 재고유지 비용과 수요 노드의 재고이월 비용을 변화시켜가면서 본 연구에서 제안하는 선형 수요 분위수 방법(linear demand quantile; 이하 LDQ)과 최적 수요 분위수(optimal demand quantile; 이하 OPT)에 대한 비교 실험 결과를 타나낸 것이다. 실험에서 수요의 평균과 표준편차를 고정하여 사용한 이유는 박기태 등^[2]의 연구 결과에서 보이듯이 수요의 평균과 표준편차는 최적 수요 분위수의 결정에 영향을 미치지 않기 때문이다. LDQ와 OPT에 의해 계산된 j 번째 기간의 수요 분위수를 각각 q_j^{LDQ} , q_j^{OPT} , 그때의 평균 비용을 각각 Avg_LDQ와 Avg_OPT라 하고, <표 1>에서 dq_j 와 CR(cost ratio)을 각각 $dq_j = |q_j^{LDQ} - q_j^{OPT}|$, $CR = (Avg_OPT / Avg_LDQ)$ 로 타나내었다. 이와 같은 비교 실험에서 dq_j 가 0에 가까울수록, CR이 1에 가까울수록 제안된 방법을 통해 구해지는 해의 성능이 우수함을 나타내게 된다.

<표 1>에서 본 연구에서 제안하는 방법으로 계산된 기간별 수요 분위수는 최적 값에 평균적으로 대략 0.06 정도 차이가 나며, 평균 비용의 경우 96~99% 정도 근사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 본 실험의 결과를 통해 본 연구에서 제안하는 선형 분위수를 통한 접근 방법이 해의 성능 면에서 근사 최적해를 보장함을 알 수 있다. 또한 이러한

표 2. 노드 수에 대한 실험을 위한 대한 모수 설정

N	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	b	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
3	10	6	2			25	1	1	3		
4	10	7	5	2		25	1	1	1	2	
5	10	8	6	4	2	25	1	1	1	1	1

표 3. 노드 수에 대한 수행도 비교

N	$d_{q_j}(j=1, \dots, 6)$ 의 평균	CR
3	0.07	0.95
4	0.08	0.94
5	0.08	0.92

결과는 공급망을 구성하는 각 노드에 대한 비용 구조(cost structure)에 영향을 받지 않으면서 일관되게 나타남을 알 수 있다.

다음으로 노드 수에 따른 실험 결과를 분석하였다. 앞서 실험과 마찬가지로 수요의 평균과 표준편차는 각각 100과 15로 설정하였고, 노드 수의 변화에 따르는 각 노드별 재고 비용과 조달시간은 <표 2>에 나타내었다. 이때 전체 시스템에서의 누적 조달시간은 모든 경우 5로 고정하였다. 이에 대한 실험 결과는 <표 3>에 나타내었다. 수요 분위수와 평균 비용의 편차는 실험 조건에 따라 다소간의 차이가 있었지만 대략적으로 각각 0.08과 92%를 넘지 않는 결과를 보임을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 본 논문에서 제안하는 접근 방법의 타당성 및 우수성을 입증할 수 있다.

또한 두 알고리즘을 수행 시간의 측면에서 비교해 보기로 한다. OPT에 의한 실험의 경우, k 기간의 수요 분위수를 결정하기 위해서는 먼저 0.1~0.9까지 0.1단위로 모든 가능한 조합의 수를 대상으로 분배계획을 실행시킨다. 이 경우 9^k 가지의 가능한 조합이 생성되며, 이 가운데 평균 재고비용을 최소로 하는 수요 분위수의 조합을 찾게 된다. 예를 들어 (0.8, 0.7, 0.6, ..., 0.5)에 해당하는 값이 0.1단위에 대한 최적의 수요 분위수 조합이라면, 다음으로 0.7~0.9, 0.6~0.8, 0.5~0.7, ..., 0.4~0.6 사이의 값을 0.01단위로 세분화하여 수요 분위수 조합을 찾는 과정이 뒤따름으로 20^k 가지의 조합이 추가로 생성된다. 그러므로 가능한 모든 대안 수의 총합은 $9^k + 20^k$ 이다.^[2]

반면에 LDQ의 경우 OPT를 통해 계산된 서비스 수준인 $\hat{\alpha}$ 에 다소간의 영향을 받으나 0.9 이상의 $\hat{\alpha}$ 과 $4 \leq k \leq 6$ 에 대해 주어진 제약식 (2)와 (3)을 만족하는 대안의 수

는 최대 320가지를 넘지 않으며, 이는 OPT에 비해 매우 적은 수임을 알 수 있다. 예를 들어 $k=4$ 일 경우, OPT는 166,561가지의 조합을 생성하며, $\hat{\alpha}=0.95$ 에서 LDQ는 대략 160가지를 생성한다. 이와 같은 결과를 통해 제안된 알고리즘의 수행 속도 측면에서의 효율성 또한 입증할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고객의 수요가 정규분포를 따르는 시리얼 시스템을 대상으로, 주어진 목표 서비스 수준을 준수하면서 동시에 계획기간 동안 전체 시스템에서 발생하는 평균 재고비용의 총합을 최소화시키는 방법으로 수요 분위수 개념을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 확실적인 분포를 갖는 수요정보 가운데 목표 서비스 수준을 만족하는 적절한 수요예측 값을 선택하여 이 값을 확정적인 입력정보로 사용하였다.

본 논문에서는 기간별 수요 분위수를 선택하는 방법으로 수요 분위수의 초기 값과 기울기를 가지는 선형 수요 분위수 방법을 제안하였다. 이러한 해법은 수요가 정규분포를 따를 경우, 노드의 수가 늘어나게 되면 수리적인 접근이 불가능하거나 지나치게 많은 계산시간을 필요로 하는 기존 연구의 문제점을 극복하였으며, 최적해는 아니지만 근사 최적해에 빠른 시간 내에 도달하는 결과를 보였다.

본 논문에서는 공급망 모형 가운데 비교적 간단한 형태인 시리얼 시스템에 한정된 연구 결과를 제시하였으나, 본 논문에서 사용한 기본적인 접근 방법을 효과적으로 활용한다면 보다 복잡한 환경의 공급망 모형에 대해서도 쉽게 접근할 수 있는 방향을 제시할 수 있으리라 생각된다. 추후 연구로는 본 연구를 보다 다양한 실험 환경에 적용하여 각 실험 요소들 간의 상관관계를 분석하고 이들 간에 내재하는 일반적인 경향을 도출하고자 한다. 또한 수요 분위수를 선형적인 형태로 한정하지 않고 보다 현실성을 반영할 수 있도록 하는 접근 방법을 통해 수행 속도 측면에서나 해의 질 측면에서 보다 효과적인 탐색이 가능한 휴리스틱

알고리즘을 개발하는 연구가 필요하리라 생각된다. 부가적으로, 본 연구를 분배형(distribution) 시스템이나 조립형(assembly) 시스템과 같은 보다 일반적이고 현실적인 형태의 모형으로 확장하는 문제 또한 고려하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 박기태 (2005), *시뮬레이션을 통한 공급사슬내의 효과적인 수요 선택에 관한 연구*, 석사학위논문, 고려대학교.
2. 박기태, 권익현, 김성식 (2004), “시뮬레이션을 통한 공급사슬내의 효과적인 수요 선택 방안에 관한 연구”, *한국SCM학회지*, 제4권, 1호, pp. 61-69.
3. 윤병희, 권익현, 김성식 (2004), “예측 수요분포가 변하는 환경 하에서의 공급사슬 계획”, *한국SCM학회지*, 제4권, 2호, pp. 1-12.
4. Axsater, S. (2000), *Inventory Control*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
5. Chopra, S. and Meindl, P. (2001), *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
6. Clark, A. J. and Scarf, H. (1960), “Optimal Policies for a Multi-echelon Inventory Problem”, *Management Science*, Vol.6, No.4, pp. 475-490.
7. Diks, E. B., de Kok, A. G. and Lagodimos, A. G. (1996), “Multi-echelon Systems: A Service Measure Perspective”, *European Journal of Operational Research*, Vol.95, No.2, pp. 241-263.
8. Evans, M., Hastings, N. and Peacock, B. (2000), *Statistical Distributions*, Wiley, New York.
9. Federgruen, A. and Zipkin, P. H. (1984), “Computational Issues in an Infinite-horizon Multiechelon Inventory Model”, *Operations Research*, Vol.32, No.4, pp. 818-836.
10. Forrester, J. W. (1961), *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, MA.
11. Kwon, I. H., Kim, S. S. and Baek, J. G., “A Simulation Based Heuristic for Serial Inventory Systems under Fill-rate Constraints”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, in press.
12. Rosenbaum, B. A. (1981), “Service Level Relationships in a Multi-echelon Inventory System”, *Management Science*, Vol.27, No.8, pp. 926-945.
13. Van Houtum, G. J. and Zijm, W. H. M. (1991), “Computational Procedures for Stochastic Multi-echelon Production Systems”, *International Journal of Production Economics*, Vol.23, No.1-3, pp. 223-237.
14. Van Houtum, G. J., Inderfurth, K. and Zijm, W. H. M. (1996), “Material Coordination in Stochastic Multi-echelon Systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol.95, No.1, pp. 1-23.
15. Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C. and Jacobs, F. R. (2004), *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*, McGraw-Hill.
16. Zipkin, P. H. (2000), *Foundations of Inventory Management*, McGraw-Hill, New York.



박 기 태 (start176@hanmail.net)

2003 명지대학교 산업공학과 학사
2005 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사
2005~현재 LG.Philips LCD, LCD Process Innovation팀

관심분야 : SCM, 시뮬레이션, 시스템 최적화, e-Business



권 익 현 (queens@korea.ac.kr)

1998 고려대학교 산업공학과 학사
2000 고려대학교 산업공학과 석사
2006 고려대학교 산업공학과 박사
2006~현재 고려대학교 정보통신기술연구소 연구조교수

관심분야 : 생산 및 물류관리, 시스템 최적화, 메타 휴리스틱, e-Business



김 성 식 (sungskim@korea.ac.kr)

1972 고려대학교 기계공학과 학사
1974 고려대학교 산업공학과 석사
1976 Southern Methodist University 산업공학과 석사
1979 Southern Methodist University 산업공학과 박사
1979~현재 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수

관심분야 : Advanced Process Control, FDC, ERP/SCM, 시뮬레이션