

타부 탐색을 이용한 생산능력 제한하의 공급망 분배계획

권익현^{1†} · 백종관² · 김성식¹

¹고려대학교 산업시스템정보공학과 / ²서일대학 산업시스템경영과

Distribution Planning for Capacitated Supply Chains Using Tabu Search Approach

Ick-Hyun Kwon¹ · Jong-Kwan Baek² · Sung-Shick Kim¹

¹Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

²Department of Industrial System Management, Seoil College, Seoul, 131-702

In this paper, we present a distribution planning method for a supply chain. Like a typical distribution network of manufacturing firms, we have the form of arborescence. To consider more realistic situation, we investigated that an outside supplier has limited capacity. The customer demands are given in deterministic form in finite number of discrete time periods. In this environment, we attempt to minimize the total costs, which is the sum of inventory holding and backorder costs over the distribution network during the planning horizon. To make the best of the restricted capacity, we propose the look-ahead feature. For looking ahead, we convert this problem into a single machine scheduling problem and utilize tabu search approach to solve it. Numerous simulation tests have shown that the proposed algorithm performs quite well.

Keywords: distribution planning, multi-echelon, capacitated supply chain, tabu search, look-ahead

1. 서 론

현대의 기업은 인터넷을 비롯한 정보통신 기술의 비약적인 발전과 보급으로 인하여 과거 대량 생산체제와는 달리 단품종 소량생산을 바탕으로 적시 시장 진입을 위한 단납기 형태의 새로운 사업환경을 맞고 있다. 고객의 주문과 원자재의 구매 및 결재 등은 온라인 상에서 가능해졌으며, 완성품의 배송 또한 전문 외주업체를 이용함으로써 고객들은 보다 저렴한 가격에 질 좋은 제품을 선택할 수 있게 되었다. 제조업체들은 이러한 무한경쟁에서 생존하기 위해 끊임없는 제조공정 및 기업운용의 혁신을 추구하고 있다(Vollmann *et al.*, 2004). 빠른 시간 안에 고객의 욕구를 만족시키는 제품을 만들어내기 위하여 대부분의 기업들은 세계 전역을 대상으로 생산, 판매, 개발 등의 글로벌 비즈니스를 수행하고 있다. 이러한 기업 환경하에서 새로운 고객, 기업, 파트너, 연구기관 등으로 구성된 공급사슬 각

노드들의 신속, 정확한 정보교환과 의사결정을 가능하게 하는 공급사슬 관리(supply chain management; SCM)의 중요성이 더욱 강조되고 있다(Chopra and Meindl, 2001).

근래 국내에서도 이러한 세계 정세에 맞추어 공급사슬 관리에 관한 관심이 고조되어, 학계뿐만 아니라 기업에서도 많은 논의가 이루어지고 있으며, 많은 제조업체들은 세계 곳곳의 거점 분배센터들을 효율적으로 운영해 고객 만족과 기업 이익 향상에 힘쓰고 있으나 그에 맞는 효율적인 분배 알고리듬의 미비로 인하여 어려움을 겪고 있다. 그러므로 현실적인 공급사슬 형태를 반영할 수 있는 효율적 분배 알고리듬의 개발에 대한 요구는 더욱 높아지고 있다(Kim and Lee, 2000).

지난 수십 년 동안 공급사슬 내의 재고 문제는 상당한 주목을 받아왔다. 현실에 보다 쉽게 적용시킬 수 있는 다계층(multi-echelon) 재고 모형에 대한 최초의 연구는 Clark and Scarf(1960)에 의해 시도되었다. 이들은 여러 노드들이 연속적

† 연락처 : 권익현, 136-701 서울시 성북구 안암동 고려대학교 산업시스템정보공학과, Fax : 02-929-5888, E-mail : queens@korea.ac.kr
2004년 11월 22일 접수, 1회 수정 후 2005년 2월 18일 게재 확정.

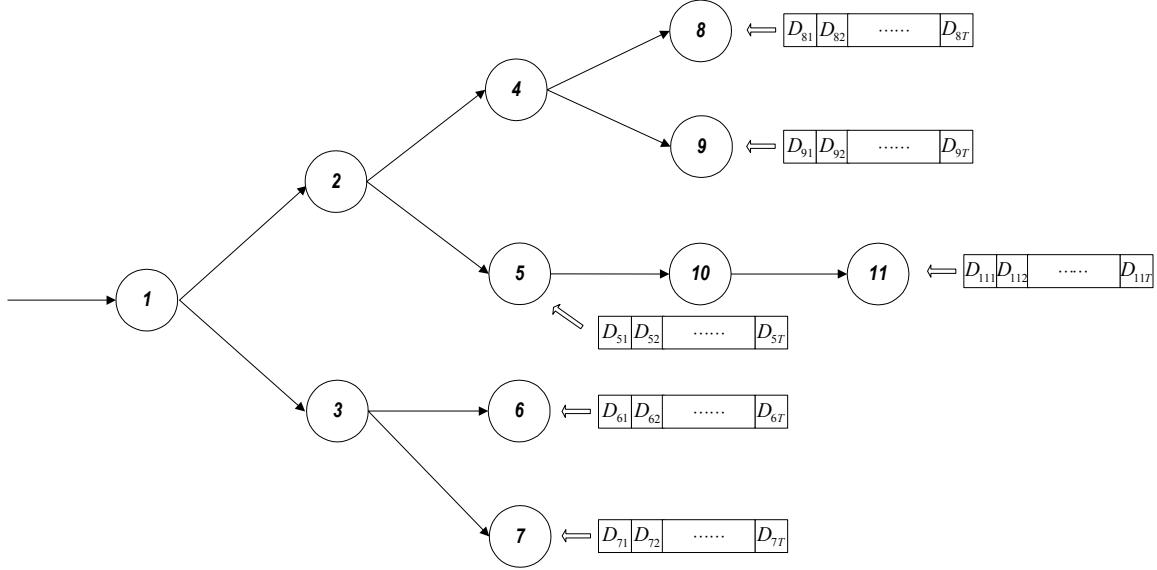


그림 1. 공급사슬 네트워크 모형.

으로 이루어진 시스템(serial system)에서 주기적 재고조사(periodic review), 계층재고(echelon stock) 주문정책을 이용하는 방법에 대해 다루었고, 할인비용(discount cost)을 적용한 동적 계획법(dynamic programming)의 형태에서 계층 재고정책이 최적을 보장함을 보였다. Federgruen and Zipkin(1984)은 Clark and Scarf의 결과를 무한기간(infinite horizon)으로 확장하는 연구를 수행하였고, 이를 통해 order-up-to 정책이 최적해를 보장함을 증명하였다. Schmidt and Nahmias(1985)는 2단계 조립형 시스템(assembly system)에서 수리적인 모형을 제시하였으며, De boodt and Graves(1985)는 Clark and Scarf 모델에서 쓰였던 주기적 재고조사(periodic review) 방식을 연속적인 재고조사(continuous review) 형태로 변형한 연구를 시도하였다. Bessler and Veinott(1966)는 Clark and Scarf가 연구한 모형을 일반적인 트리 형태(arborescence)의 분배구조를 포함하는 모형으로 일반화하였다. 다계층 재고모형에 대한 대표적인 모델로는 METRIC(Sherbrooke, 1968)과 MOD-METRIC(Muckstadt, 1973)을 들 수 있으며, 이들은 수율이 낮은 제품에 대하여 $(S-1, S)$ 주문정책을 적용하였다. van Houtum *et al.*(1996)은 다계층 재고모형과 관련된 연구를 체계적으로 정리하여 발표하였다. Ahn *et al.*(2003)은 rolling horizon 환경하의 다계층 공급사슬에서의 총재고비용을 최소화하는 분배계획 수립 알고리듬을 제안하였다.

공급사슬 문제에 있어서, 대부분의 기업에서 요구되어지는 모델은 생산능력의 제약이 주어지고, 다단계의 구조를 갖는 트리 형태(arborescence)에서, 고객의 수요를 적시에 만족시키는 분배계획 수립에 관한 문제이다. 하지만 현재까지의 대부분의 연구는 생산지의 공급량 제약이 없는 환경에서, 하나의 창고와 여러 개의 소매점으로 구성된 단일창고 복수 소매점 시스템(one-warehouse multi-retailer system)에 관한 연구에 집중되어 왔다(Axsäter, 2000; Federgruen, 1993).

본 연구에서는 이와 같은 보다 현실적인 상황을 반영하기 위해 일반적인 제조회사에서 흔히 나타나는 공급사슬, 즉 창고와 물류센터, 중간창고, 도매상, 소매점 등으로 이루어지는 다계층 분배형 공급사슬(multi-echelon distribution supply chain)에서 제한된 생산능력을 최대한 활용하여 고객의 수요를 적시에 만족시키는 효율적인 분배계획 수립 방안의 고안에 초점을 두었다.

2. 기본 모형

2.1 가정

본 연구의 대상이 되는 네트워크의 모형은 <그림 1>과 같은 다계층 재고모형이며, 계획기간(planning horizon) 동안의 확정적인(deterministic) 수요 정보하에서 전체 노드에서 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의 합을 최소로 하는 분배계획 수립을 목적으로 한다. 본 논문에서의 기본적인 가정은 다음과 같다.

먼저 최상위 노드는 생산지에서 제품을 공급받아 하위 노드에 분배한다. 이러한 생산지는 생산용량의 한계로 인해 특정한 물량 이상은 공급사슬 네트워크에 제공할 수 없는 제약이 따른다. 최하위 노드는 소매점으로서 고객의 직접적인 수요가 발생하는 부분이다. 중간 노드는 제품을 임시 보관하는 중간창고의 기능과 더불어 고객의 직접적인 수요가 발생하는 소매상으로서의 역할을 할 수 있다. 각각의 노드들은 서로 다른 조달시간(leadtime)을 가지며 이러한 조달시간은 단위계획 구간(time bucket)의 정수배(multiple integer) 형태로서 확정적으로 주어진다. 재고비용의 경우 재고이월 비용(backorder cost)이 재고유지 비용(holding cost)보다 상대적으로 큰 것으로, 주문비용(ordering

cost)은 존재하지 않는 것으로 가정한다. 또한 재고유지 비용은 네트워크 상에서 하위 단계에 있는 노드일수록 상위에 있는 노드들보다 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 가정한다.

수요가 발생하는 노드는 전체 계획기간(planning horizon) 동안의 수요 예측(demand forecasting)에 기반하는 확정적인 수요 정보를 가지고 있다. 또한 이러한 수요정보가 의미 있는 분배 계획 수립에 반영되기 위해서는 각 노드들은 모든 제품에 대하여 최초의 공급자에서부터 출발해서 해당 노드까지 도착하는 데 소요되는 누적 조달시간(cumulative lead-time) 이상의 기간에 대한 수요 정보를 알고 있어야 한다.

이러한 환경하에서 최상위 노드에서 실제 수요가 발생하는 노드까지 여러 중간 노드들을 거쳐야 한다. 그러므로 실제 고객의 수요가 발생하는 노드에서는 가까운 시점에 필요로 하는 수요라 하더라도 다계층 재고모형의 구조와 각 노드 사이의 조달시간 등을 고려한다면 해당 노드에 제품을 공급하는 상위 노드들은 이보다 이전 시간에 분배계획이 수립되어져야만 한다. 공급사슬 네트워크를 구성하는 모든 아크(arc) 위에는 이처럼 앞으로 발생할 수요정보를 기반으로 미리 수립된 분배계획에 의한 수송중(in-transit)인 물량들이 존재하게 된다. <그림 1>의 모든 아크 상에는 이와 같은 수송중인 물량을 나타내고 있다. 수송중인 물량은 각 노드들이 필요한 물량을 매기간 주문을 통해 보충하는 주문정책으로 인해 해당 노드의 조달시간 만큼의 수가 존재하게 된다.

본 연구에서는 분배계획과 관련된 모든 상황은 매 기간 초에 발생하며, 전체 네트워크를 구성하는 모든 노드들에서 발생하는 일련의 사건들은 다음과 같은 순서로 진행되는 것으로 가정한다.

- ① 현재 기간의 수요를 만족시키기 위한 수송물량 도착
- ② 지난 기간의 수요를 만족시키지 못해 발생한 재고이월 (backorder)이 있을 경우, 이를 보충
- ③ 실제 수요에 따른 재고 차감
- ④ 수요 정보를 바탕으로 새로운 분배계획 수립 및 이로 인한 물량 이동
- ⑤ 분배 계획의 결과로 발생한 재고비용 계산

2.2 기호 정의

N : 노드 개수

T : 계획기간(planning horizon)

P_t : t 기간의 생산량

D_{it} : t 기간 노드 i 의 수요량

X_{it} : 기간 t 에 노드 i 로 도착하기 위해 수송중인 물량

I_{it} : 노드 i 의 t 기간 말의 재고량

s_i : 노드 i 를 통해 직접적으로 제품을 공급받는 하위 노드 (successor)들의 집합

b_i : 노드 i 의 재고유지 비용(holding cost)

b_i : 노드 i 의 재고이월 비용(backorder cost)

l_i : 상위 노드에서 노드 i 로의 조달시간

DN : 수요 발생 노드의 집합

2.3 모델링

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

subject to

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + X_{it} - \sum_{j \in s_i} X_{j(t+l_j)}, \quad i \notin DN, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + X_{it} - D_{it} - \sum_{j \in s_i} X_{j(t+l_j)}, \quad i \in DN, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$I_{it} \geq 0, \quad i \notin DN, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

$$X_{it} \geq 0, \quad \forall i, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$X_{1t} \leq P_{t-l_1}, \quad t = l_1 + 1, \dots, T \quad (6)$$

식 (1)은 공급사슬에 속해 있는 모든 노드들의 전체 계획기간 동안 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의 합을 최소화시키는 목적식을 나타내고 있다. 식 (2)는 해당 노드가 수요 노드가 아닐 경우, 식 (3)은 해당 노드가 수요 노드일 경우, 해당 기간말의 재고량을 나타내는 재고균형(inventory balance) 식이다. 식 (4)는 해당 노드가 수요 노드가 아닐 때 재고이월이 나타날 수 없음을 보여주는 식이다. 식 (5)는 비음수제약을 나타내며, 식 (6)은 최상위 노드가 생산지로부터 공급받는 물량은 생산지의 능력 이상을 초과할 수 없음을 나타내는 제약식이다.

3. 타부 탐색을 이용한 분배계획 수립

실제 환경하에서는 생산능력에 대한 제약이 따르기 마련이고 이런 생산능력의 제한으로 인해 분배계획을 수립하는 데 있어 많은 어려움이 따른다. 이렇게 제한된 생산능력이 존재하는 환경하에서 효과적인 계획을 하기 위해서는 분배계획을 수립함에 있어서 각 노드들은 해당 기간의 수요뿐만 아니라 이후 시점에 필요로 하는 수요에 대한 정보 또한 반영할 수 있어야 한다. 즉, 현 시점에서 필요로 하는 수요의 총합이 해당 기간의 생산용량보다 작은 양일지라도 다음 기간에 필요로 하는 물량의 합이 생산용량보다 크다면 다음 기간에서 발생하게 될 재고 부족을 줄여주기 위한 방법으로 현시점에서 다음 기간에서 필요로 하는 물량의 일부를 미리 주문하는 것이 효과적일 수

있을 것이다. 본 연구에서는 이와 같이 다음 기간들의 수요정보를 미리 반영할 수 있는 look-ahead 기법으로서 타부 탐색(tabu search)을 이용한 분배계획 방안을 제안한다.

먼저 본 연구에서 제안하는 look-ahead 기법의 필요성을 설명하기 위해 아래 <그림 2>와 같이 3개의 노드로 구성된 공급사슬 네트워크를 예로 들어 살펴보도록 한다. 그림에서 노드 1은 생산지에서 제품을 받아오는 창고(warehouse) 역할을 하며, 노드 2와 3은 계획기간 동안의 수요가 발생하는 소매점(retailer)에 해당한다. 각 노드에 대한 재고비용과 초기 재고, 기간별 수요량, 조달시간 및 수송중인 물량에 대한 정보는 <표 1>에 자세하게 나타내었다. 또한 생산용량은 매 기간 30으로 동일하다고 가정한다.

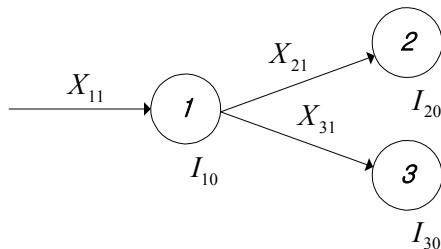


그림 2. 공급사슬 네트워크 예.

표 1. 각 노드의 기본 정보

노드 i	h_i	b_i	I_{i0}	D_{it}					X_{it}
				1	2	3	4	5	
1	1	-	0	-	-	-	-	-	30
2	2	10	0	15	15	10	20	35	15
3	2	5	0	15	15	10	20	5	15

그림에서 노드 1에서부터 노드 2와 3까지의 누적 조달시간이 2기간이며, 각 노드의 초기 재고와 아크 상의 수송중인 물량을 고려했을 때, 노드 2와 3의 1, 2기간 동안의 수요를 정확하게 만족시킬 수 있다. 즉, 노드 2와 3의 1기간 말의 재고량은 $I_{it} = I_{i0} + X_{it} - D_{it}$, $i = 2, 3$ 은 0이 된다. 또한 노드 1의 1기간 말에 도착할 물량(X_{11})이 30이고 이는 노드 2와 3의 2기간 동안의 수요량의 합($D_{22} + D_{32}$)과 같으므로 X_{22} 와 X_{32} 는 각각 15가 된다.

그러므로 이 문제는 생산능력 제약하에서 노드 2와 3의 3, 4, 5기간의 수요를 만족시키기 위한 각 노드별 수송물량을 결정하는 것이다. 각 노드의 조달시간을 고려했을 때, 기존의 Ahn *et al.*(2003)이 제안한 분배계획 방법과 같이 해당 기간의 수요정보만을 반영할 경우 <그림 3>의 (a)에서와 같은 계획 결과가 나타나게 된다. 즉, 3기간에 해당하는 수요는 D_{13} 과 D_{23} 이고 이는 생산용량보다 작으므로 노드 1은 2기간에 D_{13} 과 D_{23} 의

합인 20만큼을 주문하고, 이는 3기간에 노드 1과 2의 수요를 만족시키게 된다. 한편 4, 5기간의 수요의 합은 각각 40으로 생산용량보다 많으므로 재고이월이 발생하게 된다. 이렇게 해당 기간의 수요정보만을 고려하여 계획을 수립할 경우, 생산용량의 한계를 미리 반영하여 재고이월을 줄일 수 있는 기회가 있음에도 불구하고 이를 반영하지 못하는 한계가 뒤따를 수 있다.

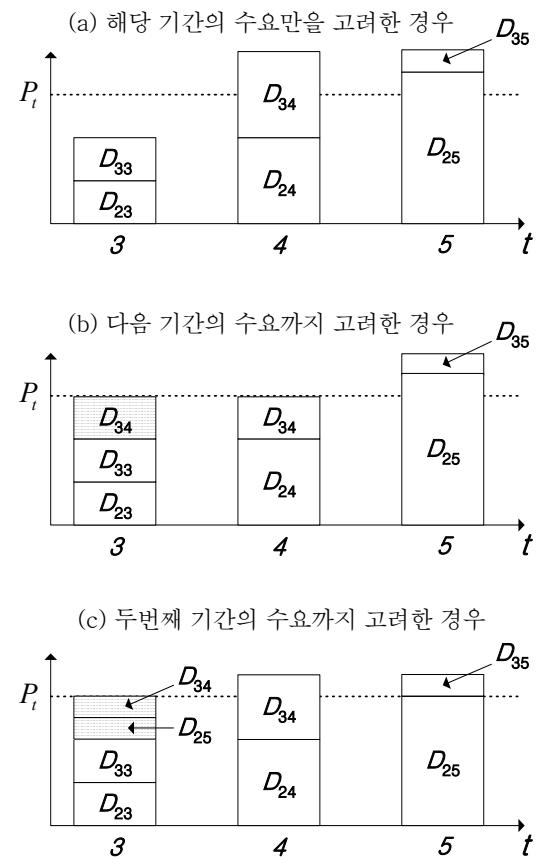


그림 3. Look-ahead 기법의 적용 예.

<그림 3>의 (b)와 (c)에서는 이러한 기존 방법의 문제점을 해결하기 위해 분배계획 수립 시에 이후 시점의 수요정보를 함께 반영했을 경우의 계획결과를 보여준다. (b)는 3기간의 계획수립 시 4기간의 수요정보도 함께 반영하는 절차를 나타낸 것이다. 3기간의 수요의 총합은 생산용량보다 적고 4기간은 생산용량보다 많을 때, 4기간의 수요 가운데 생산용량을 초과하는 부분 가운데 이전 기간의 여유 용량이 충당 가능한 양만큼 미리 주문하게 된다. 결과적으로 노드 1은 2기간에 생산용량의 한계인 30만큼의 물량을 받아서 3기간의 수요를 만족시키기 위해 하위 노드에 20을 보내고, 나머지 10은 4기간의 부족한 물량을 대비하기 위하여 해당 노드에 유지하게 된다. 이런 결과로 재고유지 비용이 늘어나겠지만 재고이월 비용이 재고유지 비용에 비하여 상대적으로 높은 점을 감안하면 전체적인 총비

용은 감소하는 효과를 나타내게 된다. (c)는 3기간의 계획수립 시 4, 5기간의 수요정보를 모두 반영하였을 경우의 계획 결과를 나타낸다. (c)는 (b)의 결과에서 많은 재고이월 비용을 발생하는 노드 2의 5기간 수요(D_{25})의 일부를 3기간에 계획함으로써 보다 효과적인 계획결과를 보이고 있다.

따라서 생산능력의 제한으로 인해 발생하는 재고이월을 줄이기 위해서는 현재의 분배계획을 수립하는 시점에서 전체 계획기간의 수요에 대한 정보를 모두 반영할 수 있도록 하는 look-ahead한 접근방법의 필요성이 대두되는데 본 연구에서는 타부 탐색 기법의 적용을 통해 이를 해결하고자 한다.

3.1 타부 탐색의 개요

본 연구에서 제시하는 생산능력 제한하의 공급망 분배계획은 단일 기계의 일정계획 수립문제(single machine scheduling problem)와 유사한 형태로 나타낼 수 있다. 단일 기계는 생산을 담당하는 외부의 공급자로부터 직접적으로 물품을 공급받는 최상위 노드에 해당한다. 단일 기계의 기간별 생산용량은 최상위 노드가 기간별로 가질 수 있는 양만큼으로 제한되는데 이 양은 외부 공급자의 생산능력 제한과 일치한다. 본 연구에서는 생산지의 생산능력은 단일 기계의 생산능력으로, 각 수요지의 기간별 수요량은 납기(due-date)를 갖는 각각의 작업(job)으로 전환하였으며, 각 수요지의 수요시점을 수요지까지의 조달시간을 고려하여, 단일 기계의 생산 시점으로 전환하여 접근하였다. <그림 4>에서는 앞서 <그림 2>와 <표 1>의 네트워크 형태와 기본 정보하에서 본 연구에서 제시하는 단일 기계 일정계획 문제의 결과에 대한 한 예를 간트 차트(Gantt chart) 형태로 나타내고 있다.

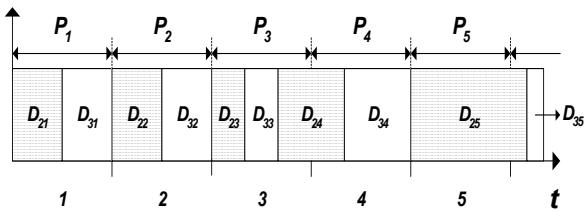


그림 4. 단일 기계 일정계획 문제 예.

<그림 4>에서 D_{it} , $i=1, 2, \dots, 5$, $t=1, \dots, 5$ 는 납기가 t 인 각각의 작업으로 볼 수 있다. 현재 기간만을 고려해서 계획을 하게 되면 생산용량의 제약으로 인해 납기를 맞추지 못하는 작업이 발생할 수 있고, 이에 따른 납기지연이 발생할 가능성 이 높다. 또한 이러한 납기지연은 다음 기간의 계획에까지 영향을 미치게 된다. 하지만 여유가 있는 기간에 미리 일부 작업량을 분할해서 계획을 한다면 이러한 납기지연을 줄일 수 있으므로 더욱 효과적인 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 상황을 보다 체계적으로 반영할 수 있도록 타부 탐색(tabu

search) 기법을 적용하여 주어진 문제를 해결하고자 한다. Glover(1989, 1990)에 의해 체계화된 타부 탐색 기법은 일반적으로 조합 최적화(combinatorial optimization)나 일정계획 수립 문제 등의 현실적인 문제 해결에 있어서 광범위하게 적용되고 있다. 타부 탐색은 그 특성상 해를 탐색하는 과정을 기억하여 중복탐색을 금지하고 해의 순환을 방지함으로써 지역 최적해에 머무르지 않고 근사 최적해에 빠르게 도달할 수 있도록 하는 메타 휴리스틱 기법으로, 본 문제와 같은 look-ahead한 접근방법을 적용하기에 적합한 기법이라 할 수 있다.

타부 탐색을 통해 생산능력을 초과하는 기간에 해당하는 작업의 초과 물량을 줄이면서 전체 네트워크에서 발생하는 총비용을 최소화하는 분배량을 결정할 수 있게 한다. 따라서 본 연구에서는 전체 계획기간의 수요정보를 반영하기 위해 미래 수요를 반영하는 분배계획을 수립하는 데 있어서 주어진 문제를 단일 기계 일정계획 문제로 변형시킨 다음, 타부 탐색 기법을 적용하여 개선시키는 방법을 적용하도록 한다. 분배계획을 수립함에 있어서 미리 계획을 세움으로써 재고유지 비용이 발생하는 경우는 일정계획에서의 earliness라 하고, 생산 능력의 제약으로 인해 납기를 맞추지 못하여 재고이월이 발생하는 경우는 tardiness라고 할 수 있다. 예를 들어, <그림 4>에 있어서 D_{24} 의 일부분은 납기가 4기간이지만 3기간에 미리 할당하는 일정계획이 수립됨으로써, 최상위 노드에서 1기간 동안 재고로 유지하게 되어 earliness가 발생한 것이라 볼 수 있다. 반면에 D_{25} 의 일부와 D_{35} 는 5기간에 필요한 물량이지만 5기간에서의 생산용량 제약을 초과하여 6기간으로 이월되어 할당된 것으로 tardiness가 발생한 경우라 할 수 있다. 본 문제에서 earliness가 발생하였을 경우 반영되는 재고유지 비용은 최상위 노드에서 발생하는 재고유지 비용이므로 모든 경우 동일한 값을 갖게 되며, tardiness가 발생하였을 때 반영되는 재고이월 비용은 실제로 재고이월이 나타나는 각 노드의 재고이월 비용에 따라 달라진다. 그러므로 본 연구는 기간별로 생산용량이 제한된 단일 기계에서 earliness와 weighted tardiness의 합을 최소화하는 일정 계획을 수립하는 문제와 동일하다고 볼 수 있다.

이와 같은 earliness와 tardiness의 합을 최소화하는 earliness/tardiness(E/T) 문제는 비교적 최근에 다루어지고 있는 영역으로, 실제 현장에서도 Just-In-Time(JIT) 방식의 생산을 포함하여 오늘날 대부분의 제조업체에서는 납기지연뿐만 아니라 납기보다 빨리 생산되는 경우 발생하는 재고유지 비용을 함께 고려하는 문제에 보다 많은 관심을 기울이고 있다(Mazzini and Armentano, 2001). E/T 문제에 관한 연구는 Baker and Scudder(1990)에 의해 체계적으로 정리되어 발표되었는데, 일반적으로 단일 기계에서의 E/T 문제는 NP-hard로 알려져 있으며, 이로 인하여 기존 대부분의 연구는 발견적 기법의 적용에 초점을 맞추고 있다(Mazzini and Armentano, 2001).

본 연구에서 타부 탐색을 적용하기 위해 필요한 초기해로는 Ahn *et al.*(2003)이 제안한 미래의 수요를 고려하지 않고 해당 기간의 수요 정보만을 고려하여 수립된 분배계획 결과를 사

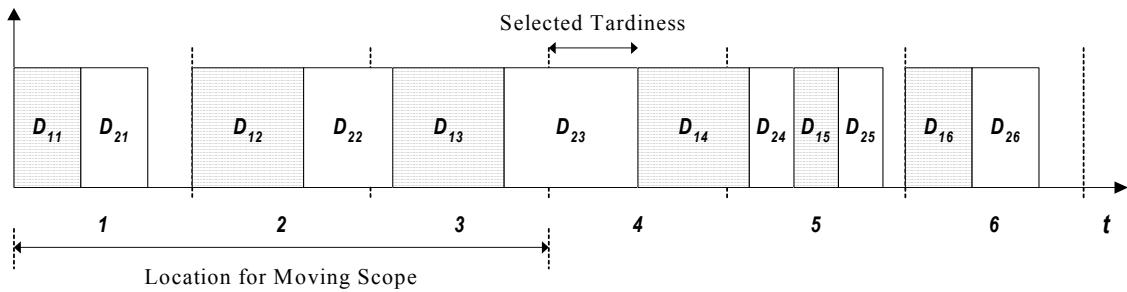


그림 5. 이웃해 생성방안.

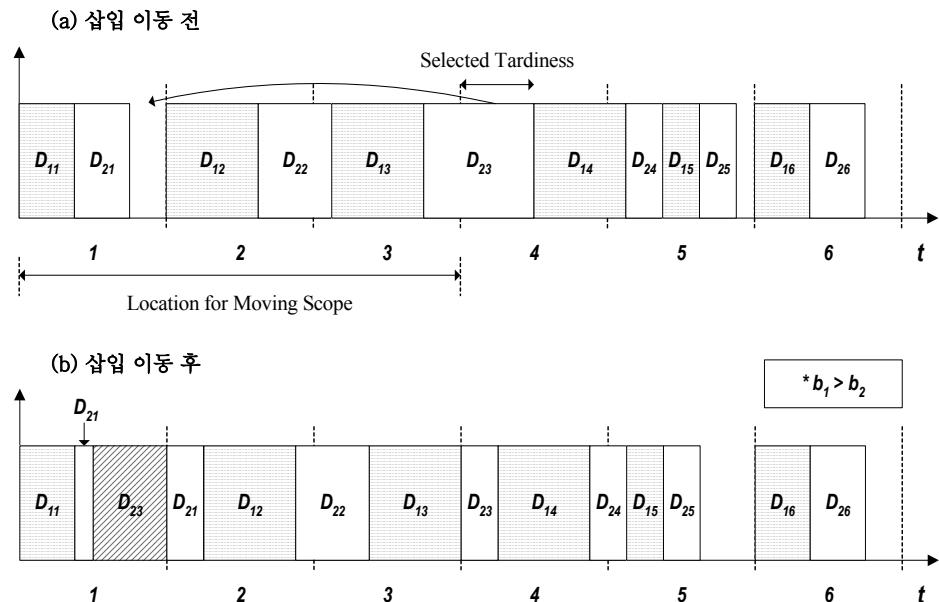


그림 6. 삽입 이동방법.

용한다. 미래 수요를 고려하지 않은 분배계획을 통한 초기해는 생산능력의 제한을 고려하지 않음으로써 좋은 해를 보장해 주지 못한다. 따라서 본 연구는 초기해 생성단계에서 얻은 초기해를 타부 탐색을 통해 개선한다.

3.2 이웃해 생성방안

타부 탐색은 기본적으로 이웃해 탐색기법이며, 이웃해를 생성해내는 방안은 다음과 같다. 현재해를 Π_{cur} 라고 하면, 타부 탐색은 Π_{cur} 내의 작업들의 위치를 바꿈으로써 얻어진 이웃해 집합 $N(\Pi_{cur})$ 중에서 가장 좋은 최우수해 Π^* 를 찾아가는 기법이다. 이웃해는 Π_{cur} 내의 특정 작업을 새로운 위치로 삽입하거나, 두 작업을 교환함으로써 얻어진다. 타부 탐색은 다시 최우수해 Π^* 로부터 출발하여 정해진 이웃해 생성방안을 적용하여 사용자가 정의한 종료조건이 만족될 때까지 계속 반복 진행된다. 이와 같은 탐색의 결과로 인해 생성되는 이동경로를 타부 목록(tabu list)에 일정기간 동안 기억해 둠으로써, 탐색과

정에서 지역 최적해에 머무르는 것을 방지하고 탐색의 다각화를 이끌어 낼 수 있도록 한다(Glover and Laguna, 1997).

본 연구에서의 타부 탐색에 의한 이웃해 생성방안은 삽입 이동(insert move)을 통해 이루어지는 것으로 한정하도록 한다. 삽입이동은 earliness나 tardiness가 발생하는 작업 가운데 하나를 선택하여 다른 기간에 삽입하여 이웃해를 생성해 내는 방법이다. 삽입이동에 의해 이웃해를 생성해 내기 위해서는 옮길 작업과 옮겨갈 위치를 결정해 주어야 한다. 옮길 작업은 모든 탐색영역(전체 계획기간) 범위 중에서 earliness가 발생하거나 tardiness가 발생한 작업이 해당된다. 또한 옮겨갈 위치는 earliness가 발생한 작업의 경우, 전체 계획기간 중에서 해당 작업이 할당된 기간 이후부터 전체 계획기간의 마지막까지가 해당되고, tardiness가 발생한 작업의 경우 계획기간의 시작 시점부터 해당 작업이 할당된 기간까지를 포함한다. 또한 타부 목록에 의해 금지된 이동이 아니어야만 한다. 본 연구에서는 특정한 작업이 여러 기간에 분할(split)되어 할당되는 것을 허용하는 것으로 가정한다.

이런 삽입이동에 대한 예를 들어, <그림 5>의 경우에

earliness는 발생하지 않고 tardiness만이 발생했으므로 earliness는 옮길 대상에 존재하지 않고, tardiness가 발생한 작업만이 옮길 대상에 해당된다. 따라서 전체 계획기간 내에서 tardiness가 발생한 모든 작업이 옮길 대상이 되므로 D_{22} , D_{23} , D_{14} , D_{24} 가 이에 해당된다. 그 중에서 D_{23} 의 tardiness 비용이 가장 크다면 첫 번째 옮길 대상이 된다. 4기간에 할당된 D_{23} 은 tardiness가 발생하였으므로 옮길 위치는 기간 1부터 3까지의 위치 중에서, 타부 목록에 의해 금지되지 않은 곳들에 해당한다. 이렇게 옮길 위치의 범위는 선택된 옮길 대상 작업에 따라 달라지는데, 만일 tardiness가 기간 t 에 발생하였으면 한 번의 이동을 위해 생성되고 평가받는 이웃해의 수는 $(t-1)$ 번이고, earliness가 발생했다면 기간 $(t+1)$ 에서 계획기간의 마지막까지로 $(T-t+1)$ 번의 이웃해를 평가한다.

이와 같이 삽입에 의한 이동은 이동위치에 따라 타부 탐색의 프레임워크의 구조가 달라진다. 예를 들어, <그림 6>의 (a)에서 첫 번째로 옮길 대상 작업이 4기간에 할당된 tardiness가 발생하는 D_{23} 의 일부 작업이라면 기간 1에서 3의 범위 안에서 이동하게 된다. 그 중에서 기간 1로 이동한다면 그림 (b)와 같은 결과가 발생할 것이다. 그림에서 보이는 것처럼 D_{23} 을 1기간으로 옮기는 과정은 1기간의 생산능력 내에서 할당되도록 하는 것이다. 만약 해당 기간의 여유능력이 새로이 삽입되는 작업보다 크다면 대상 작업을 할당하는 데 문제점이 없다. 그러나 여유능력이 부족하다면 기존에 할당된 작업 중 일부분이 다음 기간으로 밀려서 할당되게 된다. 이 경우 원래 할당된 작업들 가운데 이러한 이동으로 인해 추가적으로 발생하게 될 재고이월 비용이 가장 적은 작업이 그 대상이 된다. 또한 삽입 대상 작업이 옮겨감으로써 발생하는 이전 기간의 여유능력 공간에는 이후 작업 가운데 재고이월 비용을 가장 크게 감소시킬 수 있는 작업들이 당겨져서 할당된다.

<그림 6>에서는 D_{23} 의 크기가 1기간의 여유능력보다 크므로 기존에 할당된 작업 가운데 일부분이 다음 기간으로 밀려서 할당될 수밖에 없다. 그림에서 노드 1의 재고이월 비용이 노드 2보다 크므로 D_{21} 의 일부분이 기간 2에 할당된 결과를 보인다. 또한 D_{21} 의 2기간으로 할당은 2기간의 생산능력의 초과를 발생시키고, 이로 인해 기존의 다른 작업이 연쇄적으로 이동되는 현상이 발생한다. 이 경우에도 마찬가지로 재고이월 비용의 크기에 따라 뒤로 밀리는 작업을 결정하게 된다. 또한 <그림 6> (b)의 기간 4에서 보이듯이 D_{23} 의 이동으로 발생한 여유능력 공간에 D_{14} 와 D_{24} 의 일부가 당겨져서 할당된 것을 볼 수 있다.

Earliness가 발생한 작업의 경우에도 위에 설명한 tardiness의 경우와 유사한 방법으로 삽입이동이 진행된다.

3.3 타부 목록 관리 및 열망 수준

타부 탐색에서 타부 목록(tabu list)은 이동의 순환을 방지하

는 역할을 한다. 타부 탐색이 적용된 기존 연구들에서 타부 목록의 크기는 대체적으로 6에서 10 사이의 값이 사용되었다 (Laguna *et al.*, 1991). 본 연구에서는 이러한 기존 연구와 실험 경험을 바탕으로 타부 목록의 크기를 7로 고정하여 사용하기로 한다.

삽입 이동 시에는 옮길 작업의 인덱스와 크기, 기준에 할당된 기간, 새로이 옮겨갈 기간을 타부 목록에 기억해 둘 속성으로 정하였다. 즉, 최근의 이동에서 옮길 작업이 t_1 기간에 할당된 D_{it} 이고, 그 크기가 α , 새로이 이동할 기간이 t_2 (단, $t_1 \neq t_2$)라면 $\{D_{it}, \alpha, t_1, t_2\}$ 형식의 속성으로 기억해 둔다. 이로 인해 타부 목록의 크기 동안의 이웃해 생성 시 크기 α 인 D_{it} 가 기간 t_2 에서 t_1 으로 되돌아오는 이동을 금한다. 새로이 추가되는 타부 속성이 타부 목록에 없으면 뒤에서부터 하나씩 삭제하여 전체 타부 목록의 크기는 7로 유지되도록 한다.

열망 수준(aspiration level)이란 현재해 Π 로부터 생성된 특정 이웃해가 타부 목록에 의해 금지된 해일지라도 더 좋은 해를 찾아나가기 위하여 선택될 수 있는 기준을 의미한다 (Glover, 1989; Glover, 1990). 본 연구에서는 현 시점까지 구해진 최적해 Π_{best} 의 목적함수 값을 $C(\Pi_{best})$ 라 하면, 이를 열망 수준으로 설정한다. 이웃해 중에서 타부 목록에 의해 금지된 후보해가 있다 하더라도 이 열망 수준을 만족한다면 이웃해로 채택되도록 하였다.

3.4 타부 탐색 알고리듬

지금까지 설명한 타부 탐색 절차를 정리해 보면 다음과 같다.

<타부 탐색 절차>

- Step 0: (초기 설정) 현재 탐색 횟수(current search number) 값을 1로 초기화한다.
- Step 1: (초기해 생성) 미래 수요를 고려하지 않고 현재 수요만을 고려한 알고리듬을 통해 현재해 Π_{cur} 와 $C(\Pi_{cur})$ 및 최우수해(best schedule) Π_{best} 와 $C(\Pi_{best})$ 로 설정한다.
- Step 2: (이웃해 생성) Π_{cur} 에 의해 계획된 작업들 가운데 earliness 또는 tardiness가 발생하는 작업들에 대해 이동 범위 내에서 삽입이동을 이용하여 가능한 모든 이웃해 $N(\Pi_{cur})$ 을 생성하고 생성된 이웃해들의 목적함수 값을 계산한다.
- Step 3: (이동 및 타부 목록의 관리) $N(\Pi_{cur})$ 가운데서 목적함수 값이 가장 작은 이웃해 Π^* 를 현재해 Π_{cur} 로 바꾸고, 이때의 이동을 해당 이동 방법의 타부 목록에 저장해 둔다. 만약 $C(\Pi^*)$ 값이 $C(\Pi_{best})$ 보다 작다면, Π_{best} 와 $C(\Pi_{best})$ 를 각각 Π^* 와 $C(\Pi^*)$ 로 치환한다.
- Step 4: (탐색 횟수 및 종료 조건 점검) 탐색 횟수를 1만큼 증가

시키고 Step 2로 되돌아간다. 만일 증가시킨 현재의 탐색 횟수 값이 미리 설정된 탐색 반복 횟수 값보다 크다면 타부 탐색을 종료시킨다.

4. 실험 및 결과 분석

본 연구에서는 생산능력 제약이 존재하는 경우에 전체 계획기간의 수요정보를 반영한 개선된 알고리듬을 제시하였다. 알고리듬의 효율성 및 타당성을 검증하기 위해 look-ahead 기법을 적용하지 않은 기존의 계층 재고정책(echelon stock policy)에 기반을 둔 분배 알고리듬(Ahn *et al.*, 2003)의 결과와 비교 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 알고리듬의 우수성을 입증하였다. 비교 실험을 위해 본 연구에서는 아래의 <표 2>와 같이 실험을 계획하였다. 본 연구에서 제시한 알고리듬은 모두 C⁺⁺를 사용하여 실험환경이 펜티엄 IV 2.4G인 컴퓨터에서 구현되었다.

표 2. 실험계획

항 목	사용 값
탐색 반복 횟수	100
계획기간 (T)	10, 20, 50, 100
노드 수 (N)	5, 10, 20, 30, 50
수요범위 (R)	5, 10, 20, 30, 50

위의 <표 2>에서 수요 범위는 균일분포(uniform distribution)에서 상한 값과 하한 값을 나타내는 데 사용된다. 즉, 만일 평균이 μ 이고 $R = 10$ 이면 수요는 균일분포 $U(\mu - 10, \mu + 10)$ 를 근거로 하여 발생하게 된다. 본 비교 실험에서는 본 연구에서 제안된 알고리듬으로 실험하여 얻은 총비용을 초기해로 나누어 준 비교 비율을 통해 해의 질을 기준하는 척도로 사용하였다. 즉, 비교 비율이 1보다 작은 경우 제시한 알고리듬의 결과가 초기해보다 좋다는 것을, 반대로 1보다 클 경우 좋지 않다는 것을 의미한다.

$$\text{비교 비율} = \frac{\text{제안된 알고리듬}}{\text{초기해}}$$

본 연구에서는 두 알고리듬에 대한 수행도 평가를 위해서 $TC(T, N, R)$ 를 정의하였다. $TC(T, N, R)$ 는 계획기간 T 를 10에서 100까지 변화시키면서 이에 따른 노드 수 N 과 범위 R 이 주어질 경우의 알고리듬 간 비교 비율을 나타낸 것이다. 이러한 값들을 기준으로 하여 실험한 결과는 <표 3>에 정리하여 나타내었다.

<표 3>을 통해 지금까지 분석한 결과들을 살펴보면, 본 연

구에서 제안한 분배 알고리듬은 해의 비용 면에서 미래 수요를 고려하지 않은 기존의 알고리듬보다 우수한 성능을 나타내었음을 알 수 있다. 또한 실험항목의 변화에 따른 해의 결과를 보면, 계획기간의 길이가 길어질수록, 노드 수가 많아질수록, 수요범위 값의 증가에 따른 분산이 증가할수록 해의 결과가 좋아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과 값을 보이는 이유를 분석해 보면, 계획기간이 길어지거나 노드 수가 많아질수록 생산능력 제약에 따른 분배량이 결정될 기회가 많아지고, 미래 수요를 고려한 조정을 통하여 분배계획을 실시할 수 있기 때문이다. 또한 수요범위가 커질수록 해의 성능이 좋아지는 이유는 수요의 변동 폭이 커지므로 납기를 지키지 못하는 경우가 많아졌기 때문으로 해석된다. 이렇게 변동이 큰 수요를 효과적으로 반영하기 위해서는 전체 계획기간을 함께 고려해야 할 필요성이 증가하게 되고, 이로 인해 보다 향상된 계획수립 결과가 나타나게 된다.

표 3. 알고리듬 간의 비교 비율

$T = 10; \text{TC}(10, N, R)$				
$N \backslash R$	5	10	20	50
5	0.83	0.78	0.69	0.51
10	0.77	0.68	0.52	0.46
20	0.68	0.57	0.45	0.37
50	0.63	0.55	0.40	0.30
$T = 20; \text{TC}(20, N, R)$				
$N \backslash R$	5	10	20	50
5	0.81	0.77	0.67	0.48
10	0.76	0.66	0.49	0.41
20	0.68	0.55	0.42	0.32
50	0.57	0.49	0.39	0.28
$T = 50; \text{TC}(50, N, R)$				
$N \backslash R$	10	20	30	50
10	0.79	0.73	0.63	0.46
20	0.72	0.62	0.45	0.39
30	0.64	0.53	0.38	0.29
50	0.51	0.42	0.34	0.24
$T = 100; \text{TC}(100, N, R)$				
$N \backslash R$	10	20	30	50
10	0.73	0.70	0.62	0.41
20	0.69	0.61	0.40	0.31
30	0.58	0.50	0.32	0.23
50	0.44	0.41	0.26	0.21

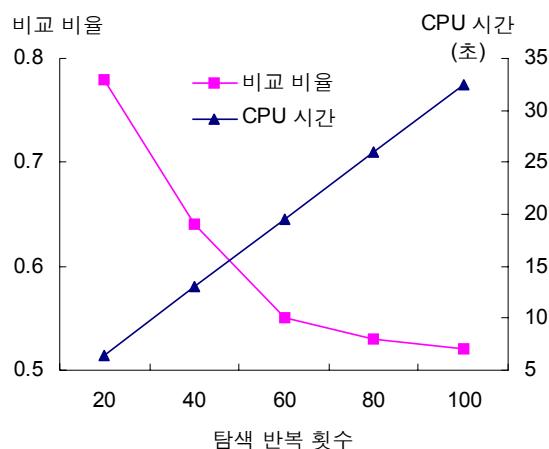


그림 7. 탐색 반복 횟수에 따른 성능 및 수행속도 비교.

<그림 7>은 탐색 반복 횟수에 따른 해의 성능을 나타내는 비교 비율과 수행속도를 나타내는 CPU 시간을 나타낸다. 이때 특정 탐색 반복 횟수에서의 비교 비율과 CPU 시간은 <표 2>의 계획기간, 노드 수와 수요범위에 대한 가능한 모든 조합의 수($4 \times 5 \times 5$)만큼 실험한 평균값을 나타낸다. <그림 7>에서 알 수 있듯이 탐색 반복 횟수가 증가할수록 해가 향상되지만 그 폭이 점차적으로 감소하게 되며, 탐색 반복 횟수가 특정한 값에 도달하게 되면 해의 향상이 거의 없음을 보여주고 있다. 또한 수행속도 측면에서 보면 탐색 반복 횟수가 증가할수록 CPU 시간은 거의 선형적으로 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 해결하고자 하는 문제의 크기에 맞는 적절한 탐색 반복 횟수를 설정하여 실험한다면 해의 성능과 수행도 측면에서 효과적일 수 있다.

지금까지 분석한 결과들을 종합해 보면, 본 연구의 타부 탐색 방법을 적용한 생산 제약하의 분배계획 수립 알고리듬은 기존의 미래 수요를 고려하지 않는 알고리듬보다 해의 성능 면에서 우수하다. 특히, 계획기간이 길어질수록, 수요가 불안정할수록 또한 노드 수가 많아질수록 제안된 알고리듬은 기존에 제시된 알고리듬보다 탁월한 성능을 보여준다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 타부 탐색 기법을 이용하여 생산능력의 제한이 존재하는 다계층 공급사슬에서 발생하는 총비용을 최소화하는 분배계획 수립방안을 제시하였으며, 기존의 미래 수요를 고려하지 않은 분배 알고리듬과의 다양한 비교 실험을 통해 제안된 알고리듬의 효율성을 입증하였다.

본 연구에서는 기본적인 가정으로 수요예측을 통하여 얻어지는 확정적인(deterministic) 수요정보를 바탕으로 미래 수요를 고려하여 분배계획을 수립한다. 하지만 예측된 수요는 실제로

발생하는 수요와 항상 일치하지 않으며, 이러한 차이는 알고리듬의 효율성을 저해시킨다. 따라서 추후 연구과제로는 보다 실제적인 상황을 반영하여 알고리듬의 효율성을 높이기 위한 확률적(stochastic)인 값 형태의 수요정보를 가정하여 접근하는 방법에 관한 연구가 필요하겠다.

참고문헌

- Ahn, J. S., Kwon, I. H. and Kim, S. S. (2003), Distribution planning in a multi-echelon inventory model under rolling horizon environment, *IE Interface*, 16(4), 441-449.
- Axsäter, S. (2000), *Inventory control*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Baker, K. R. and Scudder, G. D. (1990), Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review, *Operations Research*, 38(1), 22-36.
- Bessler, A. A. and Veinott, A. F. (1966), Optimal policy for a dynamic multi-echelon inventory model, *Naval Research Logistics Quarterly*, 13, 355-389.
- Chopra, S. and Meindl, P. (2001), *Supply chain management: strategy, planning, and operation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Clark, A. J. and Scarf, H. (1960), Optimal policies for a multi-echelon inventory problem, *Management Science*, 6(4), 475-490.
- Debott, M. and Graves, S. C. (1985), Continuous review policies for a multi-echelon inventory problem, *Management Science*, 6, 475-490.
- Federgruen, A. and Zipkin, P. H. (1984), Computational issues in an infinite-horizon multi-echelon inventory model, *Operations Research*, 32, 818-836.
- Federgruen, A. (1993), Centralized planning models for multi-echelon inventory systems under uncertainty, in Graves, S. C., Rinnooy Kan, A. H. G. and Zipkin, P. H. (Eds.), *Logistics of production and inventory*, North-Holland, Amsterdam, 133-174.
- Glover, F. (1989), Tabu search-Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1, 190-206.
- Glover, F. (1990), Tabu search-Part II, *ORSA Journal on Computing*, 2, 4-32.
- Glover, F. and Laguna, M. (1997), *Tabu search*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Kim, S. H. and Lee, Y. H. (2000), Current status and future research directions in supply chain management, *IE Interface*, 13(3), 288-295.
- Laguna, M., Barnes, J. W. and Glover, F. (1991), Tabu search methods for single machine scheduling problem, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2, 63-74.
- Mazzini, R. and Armentano, V. A. (2001), A heuristic for single machine scheduling with early and tardy costs, *European Journal of Operational Research*, 128, 129-146.
- Muckstadt, J. A. (1973), A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system, *Management Science*, 20, 472-481.
- Schmidt, C. P. and Nahmias, S. (1985), Optimal policy for a two-stage assembly system under random demand, *Operations Research*, 33, 1130-1145.
- Sherbrooke, C. C. (1968), METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control, *Operations Research*, 16, 122-141.
- Van Houtum, G. J., Inderfurth, K. and Zijm, W. H. M. (1996), Material coordination in stochastic multi-echelon systems, *European Journal of Operational Research*, 95(1), 1-23.
- Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C. and Jacobs, F. R. (2004), *Manufacturing planning and control for supply chain management*, McGraw Hill.

**권 익 현**

고려대학교 산업공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 현재 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정
 관심분야 : 생산 및 물류관리, 시스템 최적화,
 e-Business

**김 성 식**

고려대학교 기계공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 Southern Methodist University 산업공학과 석사
 Southern Methodist University 산업공학과 박사
 현재 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수
 관심분야 : 생산 및 재고관리 시스템, CIM/
 ERP/SCM, APC

**백 종 관**

고려대학교 산업공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 고려대학교 산업공학과 박사
 현재 : 서일대학 산업시스템경영과 교수
 관심분야 : 생산관리, 생산자동화, ERP/SCM