

생산능력 제한이 있는 다계층 공급사슬에서 Look-Ahead 기법을 이용한 분배계획 수립

Look-ahead technique based distribution planning for multi-echelon supply chain with production capacity limit

박상훈*, 권익현**, 김성식***
고려대학교 산업시스템정보공학과, * : hoon@korea.ac.kr, ** : queens@korea.ac.kr,
*** : sungskim@korea.ac.kr

Abstract

본 연구에서는 생산능력의 제한이 있는 다계층(multi-echelon) 공급사슬에서의 효과적인 분배계획 수립을 목적으로 한다. 수요 정보는 계획 기간(planning horizon) 동안 확정적인 형태로 주어지고 이러한 상황 하에서 전체 공급사슬에서 발생하는 재고유지 비용(holding cost)과 재고이월 비용(backorder cost)의 합을 최소화하는 분배 문제의 해법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 총비용을 최소화하는 각 노드별 분배량을 결정하기 위해서 look-ahead 기법을 사용한다. Look-ahead 기법을 통해 분배 계획 수립 시 해당 기간의 수요 정보뿐만 아니라 미래 수요를 함께 반영함으로써 생산능력 제한에 효과적으로 대처할 수 있도록 하였다. Look-ahead 기법을 적용하기 위해 본 문제를 단일 기계 일정계획(single machine scheduling) 문제로 전환하고 이에 대한 효율적인 발견적 기법을 제시한다. 또한 제안된 발견적 기법의 성능을 평가하기 위해 다양한 실험 조건하에서 제안된 알고리즘과 기존의 미래 수도를 고려하지 않는 계층 재고 정책(echelon stock policy)의 결과를 비교하여 본 연구의 우수성을 입증하였다.

1. 서론

현대의 기업은 다품종 소량생산을 바탕으로 적시 시장 진입을 위한 단납기 형태의 새로운 사업 환경을 맞고 있다. 각종 기술의 보편화와 상품의 공급과잉으로 인하여, 급변하는 고객의 욕구를 적시에 만족시킬 수 있는 기업만이 생존할 수 있게 되었다. 20세기 공급자 중심의 경제에서 21세기 수요자 중심의 경제로의 전환이후 이러한 대세는 거의 모든 제조 산업으로 확산되었다[7]. 빠른 시간 안에 고객의 욕구를 만족시키는 제품을 만들어 내기 위하여 대부분의 기업들은 세계 전역을 대상으로 생산, 판매, 개발 등의 글로벌 비즈니스를 수행하고 있다. 이러한 기업 환경 하에서 새로운 고객, 기업, 파트너, 연구기관 등으로 구성된 공급사슬 각 노드들의 신속, 정확한 정보교환을 가능하게 하는 공급사슬 관리(Supply Chain Management, SCM)의 중요성이 더욱 강조되고 있다[3, 6].

근래 국내에서도 이러한 세계정세에 맞추어

SCM에 관한 관심이 고조되어, 학계뿐만 아니라 기업에서도 많은 논의가 되고 있으며, 많은 제조업체들은 세계 곳곳의 거점 분배센터들을 효율적으로 운영해 고객만족과 기업 이익 향상에 힘쓰고 있으나 그에 맞는 효율적인 분배 모듈의 미비로 인하여 난항을 거듭하고 있다. 때문에 기업 내 환경에서 업무 최적화와 기업 내적, 외적 시설 및 자원의 동적 관리 및 배분을 담당할 효율적 분배모듈 개발에 대한 요구가 더욱 높아지고 있다[1].

지난 수십 년 동안 공급사슬내의 재고 문제는 상당히 주목을 받아왔다[9]. 현실에 보다 쉽게 적용시킬 수 있는 다계층(multi-echelon) 재고 모형의 경우 최초의 연구는 Clark and Scarf[8]에 의해 시도되었는데, 이들은 여러 노드들이 연속적으로 이루어진 시스템(serial system)에서 주기적 재고조사(periodic review) 주문정책을 이용하는 방법에 대해 다루었다. 다단계 재고 모형에 대한 대표적인 모형으로는 Metric[10]과 Mod-Metric[13]을 들 수 있다.

공급사슬 문제에 있어서, 대부분의 기업에서 요구되어지는 모델은 생산능력의 제약이 주어지고, 다단계의 구조를 갖는 트리형태(arborescence)에서, 고객의 수요를 적시에 만족시키는 분배계획 수립에 관한 문제이다. 하지만 현재까지의 대부분의 연구는 공급량의 제약이 없이, 하나의 창고와 여러 개의 소매점으로 구성된 단일창고 복수 소매점 시스템(one-warehouse multi-retailer system)에서의 연구에 집중되어 왔다[1, 3, 11, 12].

본 연구에서는 이와 같은 상황을 반영하여 일반적인 제조 회사에서 흔히 나타나는 공급사슬, 즉 창고와 물류 센터, 중간창고, 도매상, 소매점 등으로 이루어지는 다계층 분배형 공급사슬(multi-echelon distribution supply chain)에서 제한된 생산 능력을 최대한 활용하여 고객의 수요를 적시에 만족시키는 효율적인 분배계획 수립방법 고안에 초점을 두었다.

2. 기본 모형

2.1 가정

본 연구의 대상이 되는 네트워크의 모형은 [그림 1]과 같은 다계층 재고모형이며, 기본적인 가정은 아래와 같다.

- 최상위 노드는 생산지에서 제품을 공급받아 하위 노드에 분배한다.
- 최하위 노드는 소매점으로서 고객의 직접적인 수요가 발생하는 부분이다.
- 가지 노드(중간 노드)는 제품을 임시 보관하는 중간 창고의 기능과 더불어 고객의 직접적인 수요가 발생하는 소매상으로서의 역할을 할 수 있다.
- 각각의 노드들 사이에는 서로 다른 조달시간(lead-time)을 가지며 이러한 조달시간은 단위 계획구간(time bucket)의 정수배(multiple integer) 형태로 확정적(deterministic)으로 주어진다.
- 재고비용의 경우 재고이월 비용(backorder cost)이 재고유지 비용(holding cost)보다 크다.
- 재고유지 비용은 네트워크상에서 하위 단계에 있는 노드일수록 상위에 있는 노드들 보다 상대적으로 큰 값을 갖는다.
- 수요가 발생하는 노드는 계획 구간(planning horizon)동안의 수요 예측(demand forecasting)에 기반 하는 확정적인 수요 정보를 가지고 있다.
- 각 노드들은 모든 제품에 대하여 최초의 공급자에서부터 출발해서 해당 노드까지 도착하는데 소요되는 누적 조달시간(cumulative lead-time)이상의 기간에 대한 수요정보를 알고 있다.
- 최상위 노드에서 실제 수요가 발생하는 노드까지 여러 중간노드들을 거쳐야 한다.
- 분배계획과 관련된 모든 상황은 매 기간 초에 발생한다.
- 전체 네트워크를 구성하는 모든 노드들에서 발생하는 일련의 사건들은 다음과 같은 순서로 진행된다.

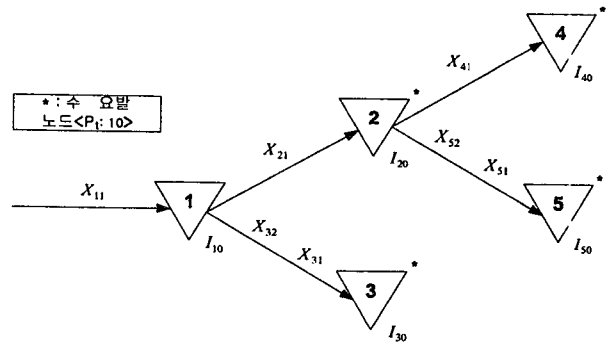
- ① 현재 기간의 수요를 만족시키기 위한 수송 물량 도착
- ② 지난 기간의 수요를 만족시키지 못해 발생한 재고이월(backorder)이 있을 경우 이를 보충
- ③ 실제 수요 발생
- ④ 추가된 수요 정보를 바탕으로 새로운 분배 계획 수립 및 이로 인한 물량 이동
- ⑤ 분배계획의 결과로 발생한 재고비용 계산

2.2 기호 정의

- N : 노드 개수
 T : 계획 기간(planning horizon)
 P_i : i 기간의 생산량
 D : i 기간 노드 i 의 수요량
 X : 기간 t 에 노드 j 로 도착하기 위해 수송중인 물량
 I : 노드 i 의 t 기간말의 재고량
 S_i : 노드 i 를 통해 직접적으로 제품을 공급받는 하위 노드(successor)들의 집합
 h_i : 노드 i 의 재고유지 비용(holding cost)
 b_i : 노드 i 의 재고이월 비용(backorder cost)
 L_{ij} : 노드 i 에서 노드 j 까지 조달시간
 \mathcal{C}_i : 최상위 공급자로부터 노드 i 까지 누적 조달시간(cumulative lead-time)
 DN : 수요 발생 노드 집합

Stage : 1 2 3

그림 1. 3단계 분배 네트워크 표현의 예



2.3 모델링

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

subject to

$$I = I_{i(t-1)} + X - \sum_{j \in S_i} X_{i(t+L_{ij})} \quad i \in DN, t = 1, 2, \dots, T + \mathcal{C}_i \quad (2)$$

$$I = I_{i(t-1)} + X - D_{it} - \sum_{j \in S_i} X_{i(t+L_{ij})} \quad i \in DN, t = 1, 2, \dots, T + \mathcal{C}_i \quad (3)$$

$$I \geq 0, \quad i \in DN \quad (4)$$

$$X \geq 0, \quad \forall i, t = 1, 2, \dots, T + \mathcal{C}_i \quad (5)$$

$$X_{i(t+L_{ij})} \leq P_{ij}, \quad \forall t \quad (6)$$

(1)식은 공급사슬에 속해있는 모든 노드들의 전체 계획 구간 동안 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의 합을 최소화 시키는 목적식을 나타내고 있다. (2)식은 해당 노드가 수요 노드가 아닐 경우, (3)식은 해당 노드가 수요 노드일 경우, 해당 기간말의 재고량을 나타내는 재고 균형(inventory balance) 식이다. (4)식은 해당 노드가 수요 노드가 아닐 때 재고이월이 나타날 수 없음을 보여주는 식이다. (5)식은 비음수 제약을 나타내며, (6)식은 생산지의 최초 공급을 받는 노드의 분배량이 생산 능력 이상을 초과 할 수 없음을 나타내는 제약식이다.

3. 생산능력 제한이 있는 다계층 공급사슬에서 look-ahead 기법을 활용한 분배계획 수립

3.1 개요

생산 능력이 제한됨으로 인하여 발생할 수 있는 전체 재고비용의 합을 최소화하기 위해서는 전체 계획 구간 동안의 수요정보를 반영할 수 있도록 하는 것이 필수적이다. 본 알고리즘에서는 각 수요 노드에서 계획 구간 동안 미래수요가 확정적으로 정해진 상황에서 예상되는 재고이월 비용과 재고유지 비용의 비율을 계산하여 해당 기간에 재고이월을 할 것인지 또는 이전의 다른 기간에 수요량을 늘려서 재고를 늘릴 것인지 고려하여 분배계획을 수립했다.

본 연구에서는 look-ahead 기법[4, 5]을 적용하기 위해서, 주어진 분배계획 모델을 단일 기계 일정 계획 문제(single machine scheduling problem)로 전환하였다. 생산지의 생산 능력은 기계의 생산 능력으로, 각 수요지의 기간별 수요량은 제품별 납기

(duedate)로 전환하였으며, 각 수요지의 수요 시점을 수요지까지의 조달시간을 고려하여, 단일 기계의 생산 시점으로 전환하여 접근하였다.

3.2 알고리즘 절차

Step 0 : 각 노드의 수요정보를 조달시간을 고려하여 변환, 재고이월 비용이 큰 순서대로 각각의 수요 노드에 j 인덱스 부여 ($j=1, 2, \dots, |DN|$), $E_t = P_t$ ($t=1, 2, \dots, T$), $Y_{jt} = D_{jt}$ ($t=1, 2, \dots, T$, $j=1, 2, \dots, |DN|$)

Step 1 : $j = 1$

Step 2 : $t = 1$

Step 3 : If $E_t > 0$, Step 3.1로 이동
 else, Step 3.2로 이동

3.1 : If $E_t \geq Y_{jt}$, $E_t = E_t - Y_{jt}$, $a_{jt} = Y_{jt}$ 로 설정 후 Step 4로 이동
 else, $a_{jt} = E_t$, $Y_{jt} = Y_{jt} - a_{jt}$, $E_t = 0$ 로 설정 후 Step 3.2로 이동

3.2 : Z 에 $b_j / (b_{j+1} + h_j)$ 보다 작은 가장 큰 정수 할당

3.3 : If $Z \geq 1$, 기간 ($t-n$, $n=1, 2, \dots, Z$) 순서로 $Y_{jt} = 0$ 또는 $n=Z$ 가 될 때까지 Step 3~3.1 반복 후 Step 3.4로 이동
 else, 기간 ($t+n$, $n=1, 2, \dots, Z$) 순서로 $Y_{jt} = 0$ 또는 $n=Z$ 가 될 때까지 Step 3~3.1 반복 후 Step 4로 이동

3.4 : If $Y_{jt} = 0$, Step 4로 이동
 else, 기간 ($t+n$, $n=1, 2, \dots, Z$) 순서로 $Y_{jt} = 0$ 또는 $n=Z$ 가 될 때까지 Step 3~3.1 반복 후 Step 4로 이동

Step 4 : $t=t+1$ 로 설정
 If $t \geq T$, Step 5로 이동
 else, Step 3으로 이동

Step 5 : $j=j+1$
 If $j > |DN|$, 알고리즘 종료
 else, Step 2로 이동

Step 0에서는 알고리즘 수치 예제에서 [표 1]을 [표 2]로 변환한 것과 같이, 수요 시점을 단일 기계 일정계획 문제의 생산 시점과 맞추기 위하여, 조달시간을 고려하여 수요 정보를 수정한다. 또한, 수요 노드의 재고이월 비용이 큰 순서대로 각 노드에 $j(j=1, 2, \dots, |DN|)$ 인덱스(index)를 할당한다. Step 3에서는 기간 t 에 공급할 수 있는 양 E_t 가 존재한다면, j 인덱스를 갖는 노드의 t 기간의 수요량인 Y_{jt} 을 할당한다. 이때 기간 t 에 E_t 가 Y_{jt} 을 모두 할당할 수 있으면 $E_t = E_t - Y_{jt}$ 을 계산한 후 Step 4로 이동한다. 만일 모두 할당할 수 없다면 부족한 양 $Y_{jt} - a_{jt}$ 을 계산하고 Step 3.2로 이동한다. 해당 기간의 수요량이 공급량을 초과할 경우, 재고이월 비용을 발생시킬 것인지, 아니면 재고유지 비용을 감수하고, 이전 기간에 미리 할당할 것인지를 결정하기 위해 RC(Ratio of Cost) = $b_j / (b_{j+1} + h_j)$ 라는 비율을 사용하고 Z 를 RC보다 작은 가장 큰 정수로 정의한다.

3.3 알고리즘 수치예제

본 절에서는 앞의 [그림 1]과 같이 5개의 노드로 구성된 3단계 네트워크 모형에 대하여, 본 연구에서 제안된 알고리즘을 적용하여, 분배계획을 적용하는 절차를 보이고자 한다. 각 노드들은 서로 다른 조달시간(lead-time)을 가지며 각 노드에 대한 재고비용과 초기 재고, 기간별 수요량, 조달시간에 대한 정보는 [표 1]에 자세하게 나타내었다. 대상 네트워크는 수요 노드가 4개이므로 작업 종류가 4개인 작업 할당 문제로 변환하여 풀면 다음과 같다.

표 1. 각 노드의 기본정보

| 노드 번호 | h_i | b_i | I_0 | D_{it} | | | | |
|-------|-------|-------|-------|----------|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | - | 0 | - | - | - | - | - |
| 2 | 2 | 7 | 0 | 3 | 3 | 5 | - | - |
| 3 | 2 | 8 | 0 | 6 | 6 | 4 | 3 | - |
| 4 | 4 | 5 | 0 | 4 | 4 | 5 | 5 | - |
| 5 | 3 | 10 | 0 | 6 | 4 | 7 | 6 | 3 |

생산지에서 기간마다 공급받을 수 있는 양은 15이고 각각의 재고이월 비용의 순서대로 수요노드 4개를 정렬하면 아래 [표 2]와 같이 된다. 또한 각 노드별로 기간별 수요에 맞도록 조달시간을 고려하여 변환해야한다.

표 2. 각 노드의 재고이월 비용 우선순위별 수요정보로 변환

| 노드 번호 | j | h_j | b_j | I_0 | D_{jt} | | | | |
|-------|-----|-------|-------|-------|----------|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5 | 1 | 3 | 10 | 0 | 6 | 4 | 7 | 6 | 3 |
| 3 | 2 | 2 | 8 | 0 | - | 6 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 3 | 2 | 7 | 0 | - | - | 3 | 3 | 5 |
| 4 | 4 | 4 | 5 | 0 | - | 4 | 4 | 5 | 5 |

[그림 2]는 분배 알고리즘을 적용해 위의 문제를 푼 후 간트 차트(gantt chart) 형식으로 풀이 과정을 간략히 나타낸 것이다.

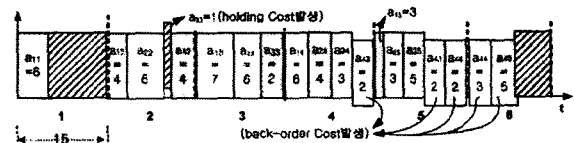


그림 2. 미래 수요를 고려한 분배 알고리즘

4. 실험 및 결과 분석

본 연구에서는 공급 능력 제약이 존재하는 경우에 전체 계획 기간의 수요 정보를 반영한 개선된 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘의 효율성 및 타당성을 검증하기 위해 look-ahead 기법을 적용하지 않은 기존의 계층 재고 정책(echelon stock policy)에 기반을 둔 분배 알고리즘[2]의 결과를 비교 실험하여 본 연구에서 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하였다. 비교 실험을 위해 본 연구에서는 아래와 같은 [표 3]과 같이 실험계획을 하였다.

표3. 실험 조건

| 항목 | 사용 값 |
|---------|---------|
| 계획 기간 | 10 ~ 30 |
| 노드 개수 | 5 ~ 20 |
| 재고이월 비용 | 10 ~ 30 |
| 재고유지 비용 | 1 ~ 10 |

본 연구에서는 두 알고리즘에 대한 수행도 평가를 위해서 $TC(N, T)$ 을 정의하였다. $TC(N, T)$ 은 노드 수 N 계획기간 T 에 대한 아래와 같은 비교 비율을 말한다.

$$\text{비교비율} = \frac{\text{본 연구의 알고리즘의 총비용}}{\text{미래수요를 고려하지 않은 분배알고리즘의 총 비용}}$$

[표 4]와 [그림 3]을 통해 지금까지 분석한 결과들을 종합해 보면, 본 연구에서 제한한 분배 알고리즘은 해의 비용 면에서 미래 수요를 고려하지 않은 알고리즘 보다 우수한 성능을 나타내었음을 알 수 있다. 또한 계획기간 길이에 따른 해의 결과를 보면, 계획 기간의 길이가 길어질수록 해가 좋아짐을 알 수 있고, 노드 수가 많아질수록 결과 값이 나아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과 값을 보이는 이유를 분석해 보면, 계획기간이 길어질수록 생산능력에 따른 분배량이 결정될 기회가 많아지고, 미래 수요를 고려해 조정을 통한 분배 계획을 실시할 수 있기 때문이다. 또한 노드의 개수에 따라 약간의 해의 향상이 있었는데 이는 계획 기간과 마찬가지로 노드의 개수가 늘어남에 따라 좀 더 다양한 분배 결정을 할 수 있기 때문이다.

표 4. 비교 대안에 대한 결과 값

| 비교 대안 : $TC(N, T)$ | | | | | |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| N | T | 10 | 20 | 30 | 50 |
| 5 | | 0.656 | 0.420 | 0.278 | 0.185 |
| 10 | | 0.532 | 0.308 | 0.209 | 0.087 |
| 15 | | 0.513 | 0.300 | 0.167 | 0.086 |
| 20 | | 0.456 | 0.285 | 0.138 | 0.083 |

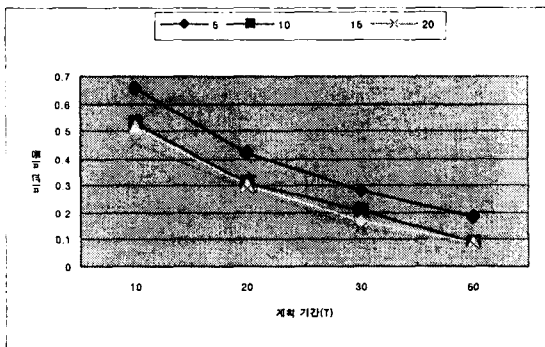


그림 3. 계획 기간에 따른 비교비율 변화

5. 결론

본 연구에서는 생산능력의 제한이 있는 다계층 공급사슬에서 발생하는 총 비용을 최소화하는 분배 계획 수립방법을 제시하였으며, 미래 수요를 고려하지 않은 분배 알고리즘과의 다양한 비교 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 효율성을 입증하였다.

본 연구에서는 기본적인 가정으로 수요예측을

통하여 얻어지는 확정적인(deterministic) 수요정보를 바탕으로 미래수요를 고려하여 분배계획을 수립한다. 하지만 예측된 수요는 실제로 발생하는 수요와 항상 일치하지 않으며, 이러한 차이는 알고리즘의 효율성을 저해시킨다. 따라서 추후 연구 과제로는 보다 실제적인 상황을 반영하여 알고리즘의 효율성을 높이기 위한 확률적(stochastic)인 값 형태의 수요정보를 가정하여 접근하는 방법에 관한 연구가 필요하겠다.

참고문헌

- [1] 김숙한, 이영해, 공급사슬경영 연구의 현황 및 향후 연구방향, *IE Interfaces*, 제13권, 제3호(2000), 288-296.
- [2] 안재성, 권익현, 김성식, Rolling horizon 환경하에서 다단계 재고 모형의 분배계획 수립에 관한 연구, *IE Interfaces*, 제16권, 제4호(2003), 441-449.
- [3] Axsäter, S., *Inventory Control*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.
- [4] Blackburn, J. D. and R. A. Millen, Improved heuristic for multi-stage requirements planning systems, *Management Science*, Vol.28, No.2 (1982), 44-56.
- [5] Chand, S., A note on dynamic lot sizing in a rolling-horizon environment, *Decision Sciences*, Vol.13, No.1(1982), 113-119.
- [6] Chopra, S., and Meindi, P., *Supply chain management: strategy, planning, and operation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [7] Cohen, M. A. and Huchzermeir, A., Global supply chain management: A survey of research and applications, *International Series in Operations Research and Management Science*, Vol.17 (1999), 669-702.
- [8] Clark, A. J. and Scarf, H., Optimal policies for a multi-echelon inventory problem, *Management Science*, Vol.6, No.4(1960), 475-490.
- [9] Diks, E. B. and De Kok, A. G., Computational results for the control of a divergent N-echelon inventory system", *International Journal of Production Economics*, Vol.59, No.1(1999), 327-336.
- [10] Sherbrooke, C. C., METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control, *Operations Research*, Vol.16, No.1(1968), 122-141.
- [11] Vakharia, A. J., Integrated production/distribution planning in supply chains, *European Journal of Operational Research*, Vol.115, No.2(1999), 219-236.
- [12] Federgruen, A., 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, 1993.
- [13] Muckstadt, J. A., A model for a multi-item multi-echelon, multi-indenture inventory system *Management Science*, Vol.20, No.1(1973), 472-481.