

생산 능력 제한이 있는 다계층 공급사슬의 분배계획을 위한 발견적 기법

권익현^{1*} · 신현준² · 김성식³

¹고려대학교 정보통신기술연구소 / ²상명대학교 산업정보시스템공학과 / ³고려대학교 산업시스템정보공학과

Heuristic for Distribution Planning in Capacitated Multi-echelon Supply Chains

Ick-Hyun Kwon¹ · Hyun Joon Shin² · Sung-Shick Kim³

¹Research Institute for Information and Communication Technology, Korea University, Seoul, 136-701

²Department of Industrial Information and Systems Engineering, Sangmyung University, Cheonan, 330-720

³Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

The system under study is a single item, multi-echelon distribution system with a capacitated production facility. All the nodes at the downstream ends are demand-sites, i.e., ordered items are delivered to the customers from the node. Also any transshipment depots in the midstream can be demand-sites as well. For a given planning period, at each of demand-site, demand is forecasted and known. Our objective is to minimize the average system cost per period which is the sum of holding and backorder costs in the entire network. Due to the capacity restrictions, it is difficult to establish efficient distribution planning. To overcome such a difficulty and obtain a reasonable and better solution, we convert this problem into a single machine earliness and weighted tardiness scheduling. We propose a simple but cost-effective heuristic for this problem. The experimental results showed that the proposed heuristic obtained much better solutions compared with another approach.

Keyword: multi-echelon, capacitated supply chain, heuristic, distribution planning

1. 서론

오늘날 기업은 주문 생산 및 다품종 소량 생산을 바탕으로 단납기 형태의 새로운 사업 환경을 맞이하고 있다. 급변하는 기업 환경으로 인해 기업에 있어서 다양해진 고객의 요구에 부응하기 위해 요구되어 지는 제품의 수는 기하급수적으로 증가하였다. 이러한 환경에 적응하기 위해 기업들은 생존을 위해 보다 신속·정확한 관리 방법론이 필요하게 되었으며, 이로 인해 공급사슬 관리(supply chain management, 이하 SCM)에 대한

관심이 증가되고 있다. SCM은 지금까지 기업운영의 주된 영역을 차지하고 있던 자재소요계획(material requirements planning)이나 전사적 자원관리(enterprise resource planning) 등의 개념을 뛰어넘어 원자재 공급부터 이를 이용한 제품의 생산, 그리고 생산된 제품을 최종 소비하는 고객까지를 포함하는 방대한 기업 활동 영역을 포함하고 있다(Vollmann *et al.*, 2004).

SCM에 있어서 제품 부가가치의 상당 부분을 차지하는 것이 재고관리 비용이며, 최근의 제조업체들을 중심으로 글로벌한 여러 지역 거점 분배센터의 운용을 통한 기업 이익 향상에

*연락처 : 권익현, 136-701 서울시 성북구 안암동 고려대학교 정보통신기술연구소, Fax : 02-929-5888, E-mail : queens@korea.ac.kr
2005년 9월 접수, 1회 수정 후 2006년 3월 게재확정

대한 관심이 고조됨에 따라 효율적인 재고관리 기법에 대한 요구사항이 더욱 가속화되고 있다(Chopra and Meindl, 2003). 또한 기업에 있어서 재고관리는 기업 이익의 극대화 측면에서도 아주 중요한 의미를 가진다. 충분한 재고를 통한 고객 수요의 만족은 향후 기업 이익의 창출에 기여하기 때문이다. 그러나 필요 이상의 재고는 과도한 재고 비용을 초래하여 이익 극대화에 걸림돌이 된다. 그러므로 기업은 적정량의 재고만을 가지고 고객 수요를 충족시키면서 이와 동시에 재고 비용을 최소화시키는 것이 기업 이익의 극대화 측면에서 바람직할 것이다. 그럼에도 불구하고 각 기업들의 최적 재고 수준 결정을 통한 최소 재고 비용의 달성은 쉽게 이루어지지 않고 있다. 이는 공급사슬이 많은 복잡성과 불확실성을 내포하고 있기 때문이다. 이러한 불확실성으로 인하여 공급사슬에 대한 적절한 분배계획과 최적의 재고 수준을 결정한다는 것은 쉬운 일이 아니다(Axsäter, 2000).

본 논문에서는 이와 같이 SCM에 있어서 핵심적인 분야로 주목받고 있는 공급사슬의 재고관리를 위해, 현실적인 상황을 반영하는 공급사슬 네트워크를 대상으로 하는 분배계획 수립 방안에 대하여 다루고자 한다. 이를 위해 일반적인 제조 회사에서 흔히 나타나는 공급사슬 모형으로, 물류 센터, 중간 창고, 도매상, 소매점 등으로 이루어지는 다계층 분배형 공급사슬(multi-echelon distribution supply chain)을 기본 모형으로 한다. 부가적으로, 보다 현실성을 반영하기 위해 공급사슬에 물품을 공급하는 생산지의 생산 능력에 제약이 따르는 것으로 가정한다. 본 연구에서는 이러한 모형을 대상으로 제한된 생산 능력을 최대한 활용하여 계획 기간 동안 발생하는 재고유지 비용과 재고이월 비용의 총합을 최소화하기 위한 효율적인 분배계획 수립 방안의 개발에 초점을 맞추도록 한다.

2. 관련 연구

지금까지 공급사슬의 분배계획에 관한 다양한 연구가 진행되어져 왔다. 망 위에 있는 서로 연결된 각 노드(창고)의 재고 정책에 관한 연구가 대표적인 분야이며, 공급망에서의 당사자간의 계약(contract) 문제(e.g., Ha, 2001; Tsay et al., 1999), 정보의 가치 측정 문제(e.g., Lee, 2000; Seo et al., 2002)와 정보처리 시스템 관련 문제(e.g., Poirier et al., 1996) 등의 연구가 진행되고 있다.

본 연구와 같은 다계층 재고 문제(multi-echelon inventory problem)의 경우, Forrester(1961)의 연구 이래로 상당한 관심을 받으며 연구되어 왔다. Clark and Scarf(1960)는 N개의 노드가 연속적으로 이루어지고, 최상위 계층에서만 주문(ordering) 비용이 존재하는 모델에 관하여 연구하였다. 그들의 연구를 계기로 계층 재고 정책(echelon stock inventory policy)에 대한 개념이 정립되는 토대가 마련되었다. Bessler and Veinott(1966)는 Clark and Scarf 모델을 일반적인 분배형 네트워크 모형으로 확장하는 연구를 수행하였다.

생산 능력이 제한된 문제에 관한 연구는 확정적인 수요 모형과 고정된 생산율(production rate) 하에서 lot-sizing 문제를 다룬 Taft(1918)에 의해 처음으로 시도되었으며, Evans(1967)에 의해 확장된 연구가 다루어졌다. 생산 능력 제한하의 lot-sizing 문제는 Karimi et al.(2003)에 의해 체계적으로 정리되어 발표되었다. Federgruen and Zipkin(1986a, 1986b)은 확률적인 수요를 갖는 단일 노드에서 최적의 base-stock 수준을 결정하는 문제를 다루었다. Sox et al.(1997)은 대기행렬(queueing) 모델을 이용하여 생산 제약 문제를 해결하는 방안을 제시하였다.

다계층 분배형 공급사슬에 있어서 대부분의 연구는 하나의 창고와 여러 개의 소매점으로 구성된 2계층 분배형 공급사슬 모형에 집중되어져 왔다. 그러나 보다 현실적이고 일반적인 공급사슬의 형태라고 할 수 있는 트리 형태(arborescence)의 모델을 다룬 사례는 상대적으로 매우 드문 실정이다. 이러한 이유로는 대부분의 연구가 공급 사슬을 구성하는 개별 노드들에 대한 로트 크기를 결정하는 lot-sizing 문제로 국한시켰기 때문이다. 이러한 lot-sizing 문제는 공급사슬 네트워크의 계층(echelon) 수가 높아지거나 전체 공급사슬을 구성하는 노드의 수가 많아질 경우 모델링 및 해법에 소요되는 시간에 제약이 따를 수밖에 없다. 그러나 전체 공급사슬이 하나의 제조 회사로 구성된 경우의 예에서처럼 주문 비용은 크게 중요하지 않은 대신에 매기간 마다 요구되는 고객의 수요를 적시에 만족시키는 것에 초점이 맞추어진 상황이라면 매기간 주문을 통해 제품을 공급하는 간단하면서 실행 가능한 주문 정책이 효과적일 것이다. 본 연구에서는 이와 같이 주문 비용을 고려하지 않음으로 비교적 간단하지만 보다 현실적이고 일반적인 형태의 공급사슬 모형에 적용 가능한 주문 정책의 결정 방법에 관해 연구하고자 한다.

본 연구와 밀접하게 연관된 문제로, Ahn et al.(2003)은 rolling horizon 환경 하의 다계층 공급사슬에서의 재고유지 비용과 재고이월 비용의 합을 최소화하기 위한 계층 재고에 기반을 두는 분배계획 수립 알고리즘을 제안하였으며, Kwon et al.(2005)에 의해 생산 제약하의 모델로 확장되었다. 그들은 생산 제약을 고려하지 않은 Ahn et al.(2003)의 결과를 초기해로 사용하고, 타부 탐색(tabu search) 기법을 적용하여 해의 성능을 향상시키는 방안을 제안하였다. 본 연구에서는 Kwon et al.(2005)과 동일한 조건에서 기존의 타부 탐색 기법의 한계점을 극복하여 보다 개선된 분배계획 수립을 위한 효과적인 발견적 기법을 제안하고자 한다.

3. 기본 모형 및 가정

본 연구의 대상이 되는 공급사슬은 <Figure 1>에서처럼 제품을 공급하는 생산지로부터 고객에 이르기까지 여러 단계에 걸쳐 분산되어 있는 트리형태(arborescent)의 모형을 나타낸다. 이렇게 노드들이 분산되어 존재하는 상황 하에서 분배계획 수립

의 목적은 최소의 비용으로 적기에 규정된 품질의 제품을 고객에게 공급되도록 운용하는 것이다. 본 연구에서는 이를 위해 각 노드들은 필요한 물량을 매기간 주문하는 정책을 사용하고, 이와 같은 이유로 주문 비용은 고려하지 않는다.

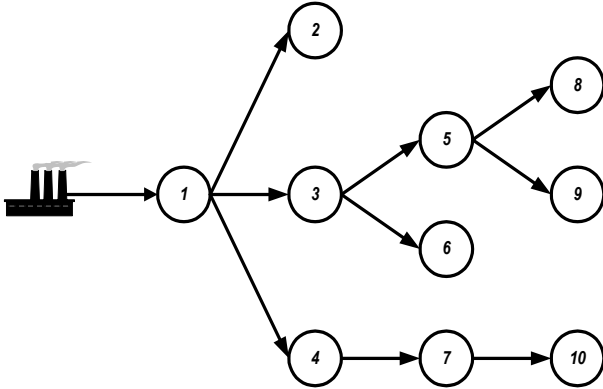


Figure 1. A multi-echelon distribution system.

고객의 수요를 담당하는 노드는 고객에게 만족할 만한 서비스를 제공하여야 하며, 각 거점 창고들은 불필요한 재고를 보유하여 재고유지 비용이 증가하는 것을 방지할 수 있는 정책을 사용하는 것이 바람직하다. 공급사슬을 구성하는 각 노드들은 공급사슬의 다른 구성단위들과 서로 유기적으로 연관되어서 서로 영향을 주고받고 상위구성 단위는 하위 구성단위의 계획 수립에 제약을 주는 특성 때문에, 한 구성단위 차원의 관점에 국한되어서는 전체 시스템의 최적화를 가져올 수 없다. 따라서 공급사슬을 효율적으로 통제하기 위해서는 다양한 요소들을 동시에 고려하는 통합된 계획 방법이 연구되어야 한다. 본 논문에서 사용되는 기호와 추가적으로 반영하는 가정 및 모델링은 각각 아래와 같다(보다 자세한 내용은 본 논문과 동일한 환경과 수식을 고려한 Kwon et al.(2005)의 논문을 참고 바람).

<기호>

- N : 노드 개수
- T : 계획 기간(planning period)
- P_t : t 기간의 생산 가능 용량
- 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 기간말의 재고량
- h_i : 노드 i 의 재고유지 비용
- b_i : 노드 i 의 재고이월 비용
- l_i : 노드 i 의 조달시간
- L_i : 생산지로부터 노드 i 까지의 누적 조달시간
- $succ(i)$: 노드 i 를 통해 직접적으로 제품을 공급받는 모든 하위(successor) 노드들의 집합
- DN : 수요 발생 노드의 집합

<추가 가정>

- (a) 공급사슬에 물품을 공급하는 생산지의 생산 능력은 제약이 따르며, 최상위 노드는 생산지에서 제품을 공급받아 하위 노드에 분배한다.
- (b) 수요가 발생하는 노드는 계획 기간 동안의 확정적인 수요 정보를 가지고 있다.
- (c) 최하위 노드는 소매점으로서 고객의 직접적인 수요가 발생하는 부분이며, 중간 노드는 제품을 임시 보관하는 중간 창고의 기능과 더불어 고객의 직접적인 수요가 발생하는 소매점으로서의 역할을 할 수 있다.
- (d) 해당 기간에 만족시키지 못한 수요는 다음 기간으로 이월(backlog)된다.
- (e) 모든 노드의 조달시간은 확정적인 형태로 주어진다.
- (f) 재고유지 비용은 네트워크상에서 하위 단계에 있는 노드일수록 상위에 있는 노드들 보다 상대적으로 큰 값을 갖고, 재고이월 비용이 재고유지 비용보다 상대적으로 크다.
- (g) 분배계획과 관련된 모든 상황은 매 기간 초에 발생한다.
- (h) Lot-sizing은 허용되지 않는다.

<모델링>

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

s.t.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + X_{it} - \sum_{j \in succ(i)} X_{j,t+l_j} \quad (2)$$

$i \notin DN, t=1,2,\dots,T$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + X_{it} - D_{it} - \sum_{j \in succ(i)} X_{j,t+l_j} \quad (3)$$

$i \in DN, t=1,2,\dots,T$

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

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

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

본 연구에서는 계획 기간 동안 전체 시스템에서 발생하는 기간별 평균 재고 비용의 총합을 최소화하는 공급사슬 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 재고이월이 발생할 수 없다는 제약, 생산지로부터 최초로 제품을 공급받는 최상위 노드의 분배량이 해당 기간의 생산 능력을 초과할 수 없다는 제약 그리고, 비음수 제약 등으로 이루어져 있다.

4. 분배계획 수립 알고리즘

4.1 개요

생산 능력이 제한됨으로 인하여 발생할 수 있는 재고 비용

의 증가에 대처하여 효율적인 분배계획을 수립하기 위해서는 전체 계획 기간 동안의 수요 정보를 반영할 수 있도록 하는 것이 필수적이다. 이를 위해 Kwon *et al.*(2005)은 미래의 수요 정보를 반영할 수 있는 look-ahead 기법(e.g., Callarman and Whybark, 1981)으로써 타부 탐색을 이용한 분배계획 수립 방안을 제안하였다. 그들은 look-ahead 기법을 적용하기 위해서, 주어진 분배계획 모델을 단일 기계 일정계획 문제(single machine scheduling problem)로 전환하였다. 즉, 주어진 문제를 기간별로 생산 용량이 제한된 단일 기계에서 earliness와 weighted tardiness의 합을 최소화하는 일정계획 수립 문제로 전환하기 위해, 생산지의 기간별 생산 능력은 기계의 기간별 생산 능력으로, 각 수요지의 기간별 수요량은 제품별 납기(due-date)로 전환하였다. 또한 각 수요지의 수요 시점을 수요지까지의 누적 조달시간을 고려하여 단일 기계의 생산 시점으로 변환시켰다.

그러나 Kwon *et al.*(2005)의 연구결과는 계획기간이 길어지거나 고객의 수요가 불안정적인(lumpy) 경우, 또는 수요가 발생하는 노드의 수가 많거나 재고이월 비용의 편차가 큰 문제 환경 등에서는 만족할 만한 결과를 얻기에 한계가 있다. 이는 타부 탐색과 같은 메타 휴리스틱을 이용한 탐색에 있어서 전체 탐색 영역 가운데, 최적지점에서 가까운 곳에서 출발하는 것이 짧은 시간 안에 비교적 좋은 지점에 도달하는 것으로 알려져 있기 때문이다(Glover and Laguna, 1997). 이와 같은 이유에서 Kwon *et al.*(2005)의 연구에서 입력값으로 사용되는 초기해의 성능은 생산 용량 제약을 반영하지 못하므로, 문제의 크기가 커지거나 시스템의 모수나 환경 변수 등의 변동 폭이 클 경우 비교적 열등한 결과를 나타내게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 기존 연구의 한계점을 극복하고 보다 명확하면서도 직관적인 분배계획 수립을 위해 Kwon *et al.*(2005)과 동일한 접근 방법을 사용하여 먼저 주어진 문제를 단일 기계 earliness/tardiness(이하 E/T) 문제로 변형하고(보다 자세한 내용은 Kwon *et al.*(2005)의 논문을 참고 바람), 이를 위한 효과적인 발견적 기법을 제안한다.

E/T 문제는 JIT(Just-in-time) 생산 방식에 물품을 공급하는 공급자를 위한 모델, 또는 PERT/CPM이나 부패하기 쉬운(perishable) 제품의 생산 등의 환경을 고려하기 위한 모델로부터 시작하여 최근에는 다양한 산업 현장이나 연구 논문에서 적용되고 있는 분야이다(Li, 1997). Baker and Scudder(1990)는 E/T 문제와 관련된 기존 연구를 체계적으로 정리하여 발표하였다. 본 논문에서 고려하는 E/T 문제는 기존의 대부분의 연구와 달리 일종의 time window의 개념이 적용되는 문제(e.g., Koulamas, 1996)로 볼 수 있다. 즉, 작업의 완료 시점(completion time)이 특정한 기간 내에 속할 경우 그 시점에 상관없이 earliness 또는 tardiness 비용이 부과되지 않는 특별한 형태를 나타낸다. 또한 본 연구에서는 특정한 작업이 여러 기간에 분할(split)되어 할당되는 것을 허용하는 것으로 가정한다. 이와 같은 이유로 인해 기존 연구에서 제안된 발견적 기법을 직접적으로 적용하는 것은 용이하지 않으며, 본 연구의 문제 상황에 적합한 새로운 발견적 기법

을 개발할 필요가 있다.

4.2 알고리즘 절차

개발된 발견적 기법의 핵심은 발생하는 전체 비용 가운데 많은 부분을 차지하는 재고이월 비용을 보다 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 할당 방법을 고안하는 것이다. 이를 위해 재고이월 비용이 큰 노드의 수요를 우선적으로 만족시키는 방안으로 LBC(largest backorder cost) 우선할당 규칙을 제안하고, 생산 용량의 제약으로 인하여 해당 기간에 할당되지 못할 경우 earliness와 weighted tardiness 비용을 고려하여 미리 할당할 것인지 아니면 재고이월을 발생시킬지를 결정한다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 절차는 다음과 같다.

- Step 0 : 각 노드의 수요 정보를 누적 조달시간을 고려하여 변환하고, 재고이월 비용이 큰 순서대로 각각의 수요 노드에 j 인덱스를 부여한다. 또한 t 기간에 남아 있는 여유 용량을 \tilde{P}_t 로 정의한다. 즉, $\tilde{D}_{jt} \leftarrow D_{i,t-L_i}$
 $\tilde{b}_j = b_j, \tilde{P}_t = P_j, j = 1, 2, \dots, |DN|, t = 1, 2, \dots, T$
- Step 1 : $j = 1, t = 1$ 설정
- Step 2 : If $\tilde{D}_{jt} > 0$, goto Step 3
- Else, goto Step 4
- Step 3 : If $\tilde{P}_t > 0$, goto Step 3.1
- Else, goto Step 3.2
- 3.1 : If $\tilde{P}_t \geq \tilde{D}_{jt}$, \tilde{D}_{jt} 를 t 기간에 할당하고 $\tilde{P}_t = \tilde{P}_t - \tilde{D}_{jt}$, $\tilde{D}_{jt} = 0$ 로 설정 후, goto Step 4
- Else, \tilde{D}_{jt} 가운데 \tilde{P}_t 만큼을 t 기간에 할당하고 $\tilde{D}_{jt} = \tilde{D}_{jt} - \tilde{P}_t$, $\tilde{P}_t = 0$ 으로 설정 후, goto Step 3.2
- 3.2 : $\tilde{D}_{jt} = 0$ 이 될 때까지 Step 3.2.1에서 3.2.3 반복 후, goto Step 4
- 3.2.1 : $(t-1)$ 에서 1기간 중에서 $\tilde{P}_t > 0$ 인 t 의 최대값을 t' 으로 설정하고 $EC = (t-t') \times h_1$ 계산
- 3.2.2 : $(t+1)$ 이후 기간 중에서 처음으로 $\tilde{P}_t > 0$ 을 만족하는 기간을 t'' 으로 설정하고 $WTC = (t'' - t) \times \tilde{b}_j$ 계산
- 3.2.3 : If $EC < WTC$, goto Step 3.2.3.1
- Else, goto Step 3.2.3.2
- 3.2.3.1 : If $\tilde{P}_t \geq \tilde{D}_{jt}$, \tilde{D}_{jt} 를 t 기간에 할당하고 $\tilde{P}_t = \tilde{P}_t - \tilde{D}_{jt}$, $\tilde{D}_{jt} = 0$ 으로 설정 후, goto Step 4
- Else, \tilde{D}_{jt} 가운데 \tilde{P}_t 만큼을 t 기간에 할당하고 $\tilde{D}_{jt} = \tilde{D}_{jt} - \tilde{P}_t$, $\tilde{P}_t = 0$

3.2.3.2 : If $\tilde{P}_{t'} \geq \tilde{D}_{jt}$ \tilde{D}_{jt} 를 t' 기간에 할당하고 $\tilde{P}_{t'} = \tilde{P}_{t'} - \tilde{D}_{jt}$
 $\tilde{D}_{jt}=0$ 으로 설정 후, goto Step 4
 Else, \tilde{D}_{jt} 가운데 $\tilde{P}_{t'}$ 만큼을 t' 기간에 할당하고 $\tilde{D}_{jt} = \tilde{D}_{jt} - \tilde{P}_{t'}$, $\tilde{P}_{t'} = 0$

Step 4: $t = t + 1$ 로 설정
 If $t > T$, goto Step 5
 Else, goto Step 2

Step 5: $j = j + 1$
 If $j > |DN|$, 알고리즘 종료
 Else, $t = 1$ 로 설정 후, goto Step 2

Step 0은 초기화 과정으로 주어진 문제를 단일기계 E/T 문제로 변환하는 과정이다. 먼저 수요 시점을 단일 기계 일정계획 문제의 기간별 생산 능력과 맞추기 위하여 각 노드별 누적 조달시간을 고려하여 수요 정보를 수정한다. 다음으로 LBC 우선 할당 규칙을 적용하기 위하여 수요 노드의 재고이월 비용이 큰 순서로 노드별로 새로운 j 인덱스(index)를 부여한다. 만약 재고이월 비용이 동일한 노드가 존재한다면 이들 노드에 임의의 순서로 인덱스를 부여하여도 계획 결과에 영향을 미치지 않는다. Step 1은 LBC 우선할당 규칙을 위해 j 인덱스와 계획 시점을 초기화하는 과정이며, Step 2에서는 해당 노드의 해당 기간에 요구되는 수요량이 있는지를 확인한다.

Step 3에서는 기간 t 에 공급 가능한 생산 용량 \tilde{P}_t 가 존재한다면, Step 3.1로 이동하여 j 인덱스를 갖는 노드의 t 기간 수요량인 \tilde{D}_{jt} 를 할당한다. Step 3.1에서 \tilde{P}_t 가 \tilde{D}_{jt} 를 모두 할당 받을 수 있을 만큼의 충분한 여유 용량을 가지고 있다면 \tilde{D}_{jt} 를 t 기간에 모두 할당하고, 새로이 할당된 물량을 반영하여 $\tilde{P}_t = \tilde{P}_t - \tilde{D}_{jt}$ 를 새로이 계산한 후 Step 4로 이동한다. 만약 모두 할당할 수 없다면 남은 여유 용량만큼만을 우선 할당한다. 다음으로 할당하지 못하고 남은 수요량을 $\tilde{D}_{jt} = \tilde{D}_{jt} - \tilde{P}_t$, t 기간의 여유 용량을 $\tilde{P}_t = 0$ 으로 각각 설정한 후 Step 3.2로 이동한다.

만약 해당 기간의 $\tilde{P}_t < 0$ 일 경우 Step 3.2에서 재고유지 비용을 감수하고 이전 기간에 미리 할당할 것인지 아니면 재고이월 비용을 발생시킬 것인지를 결정한다. 이를 위해 Step 3.2.1과 3.2.2에서 재고를 유지할 경우 발생할 비용 EC (earliness cost)와 재고 이월시 발생할 비용인 WTC (weighted tardiness cost)를 비교하여 적은 비용이 발생하는 기간에 남은 수요량을 할당한다. 만약 Step 3.2.1의 조건을 만족하는 t' 이 존재하지 않는다면 $EC = \infty$ 로 설정하여 tardiness만을 고려하도록 한다.

Step 4와 5는 모든 계획 대상 수요 노드에 있어서 전체 계획

기간 동안에 대한 할당이 끝났는지를 체크하고, 남아있는 계획 대상 작업이 존재한다면 다음 계획 대상 노드와 기간을 선택한 후 할당 절차를 반복한다.

4.3 수치 예제

본 절에서는 <Figure 2>와 같이 4개의 노드로 구성된 3단계 네트워크 모형에 대하여, 본 연구에서 제안된 발견적 기법을 적용하여 분배계획을 수립하는 절차를 보이고자 한다. 문제를 단순화하기 위하여 생산지에서 기간마다 공급받을 수 있는 양은 동일하게 30으로 고정하였으며 각 노드들은 1기간의 조달시간을 갖는 것으로 하였다. 또한 각 노드의 수송 중재고와 초기 재고는 0으로 설정하였다. 각 노드에 대한 재고비용과 기간별 수요량 등에 대한 정보는 <Table 1>에 자세하게 나타내었다.

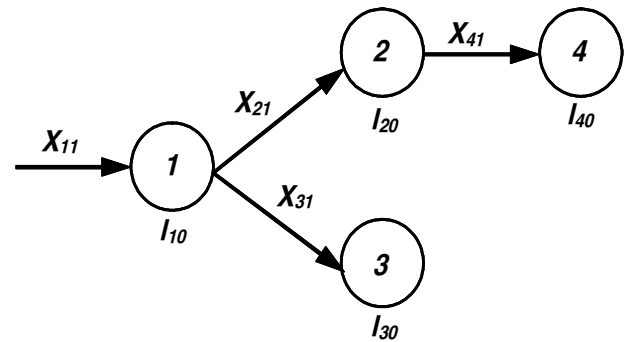


Figure 2. Example of a three-echelon model.

Table 1. Parameter values in the example problem

i	h _i	b _i	D _{it}							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	4	5	-	-	5	5	10	10	10	-
3	4	10	-	-	10	5	5	20	15	-
4	5	8	-	-	-	5	10	5	15	20

Step 0의 초기화 과정을 통해 각각의 재고이월 비용의 순서대로 수요노드를 정렬하고 기간별 수요에 맞도록 누적 조달시간을 고려하여 수요 정보를 변환한 결과는 아래 <Table 2>와 같다. 예를 들어 노드 3의 재고이월 비용이 수요노드 가운데 가장 크기 때문에 $j = 1$ 의 인덱스를 부여한다. 노드 3의 누적 조달시간은 $L_3 = 2$ 이므로 $t = 3$ 에서 필요한 물량의 경우 $t = 1$ 에서 생산지로부터 물량을 공급 받아야하기 때문에 $\tilde{D}_{1,t} \leftarrow D_{3,t-2}$ 의 관계가 성립하게 된다. 또한 모든 기간에 대해 $\tilde{P}_t = 30$ 으로 설정한다.

Table 2. Modified parameter values

i	j	\tilde{b}_j	\tilde{D}_{jt}				
			1	2	3	4	5
3	1	10	10	5	5	20	15
4	2	8	5	10	5	15	20
2	3	5	5	5	10	10	10

LBC 우선할당 규칙에 의해 먼저 재고이월 비용이 가장 큰 $j=1$ 인 노드에 대해서 제안된 알고리즘의 절차를 적용한다. $j=1$ 인 노드에서는 모든 t 에 대하여 $\tilde{P}_t > \tilde{D}_{jt}$ 이므로 Step 3과 Step 3.1에 의해 계획 대상이 되는 모든 수요는 해당 기간에 할당되며, 할당의 결과를 <Figure 3>의 (a)와 같은 칸트 차트(Gantt chart) 형태로 나타낼 수 있다.

다음으로 $j=2$ 인 노드에 대해 알고리즘을 적용한다. $t=1, 2, 3$ 에서는 앞서 $j=1$ 인 노드에서와 마찬가지로 $\tilde{P}_t > \tilde{D}_{jt}$ 인 관계가 성립하므로 Step 3과 Step 3.1을 통해 해당 기간에 할당한다. $t=4$ 에서는 Step 3.1에서 $\tilde{P}_4(=10) < \tilde{D}_{24}(=15)$ 이므로 우선 \tilde{D}_{24} 가운데 10만큼을 4기간에 할당하고 $\tilde{D}_{24}=5$ 로 설정한 후 Step 3.2로 이동한다. Step 3.2.1에서 $t'=3$ 이고 $EC=(4-3) \times 3=3$, Step 3.2.2에서 $t'=5$ 이고 $WTC=8$ 이 된다. Step 3.2.3에서 $EC < WTC$ 이고, Step 3.2.3.1에서 $\tilde{P}_3(=20) > \tilde{D}_{24}(=5)$ 이므로 \tilde{D}_{24} 를 3기간에 할당하고 $\tilde{P}_3=15$ 로 갱신한다. $t=5$ 에서도 $t=4$ 에서와 유사한 절차를 통해 $\tilde{D}_{25}=20$ 중에서 5기간에 15, 3기간에 나머지 5의 물량을 할당한다. <Figure 3>의 (b)에서는 위의 절차에 따른 결과를 칸트 차트(Gantt chart) 형태로 나타내고 있다.

마지막으로 $j=3$ 인 노드에 대해 알고리즘을 적용한다. $j=2$ 인 노드에서와 마찬가지로 $t=1, 2, 3$ 에서는 재고유지나 재고이월의 발생 없이 각각의 \tilde{D}_{jt} 는 t 기간에 할당된다.

$t=4$ 에서는 Step 3.1에서 $\tilde{P}_4(=0) < \tilde{D}_{34}(=10)$ 이므로 Step 3.2로 이동한다. Step 3.2.1에서 $t'=2$ 이고 $EC=(4-2) \times 3=6$, Step 3.2.2에서 $t'=6$ 이고 $WTC=(6-4) \times 8=16$ 이 된다. Step 3.2.3에서 $EC < WTC$ 이고, Step 3.2.3.1에서 $\tilde{P}_2(=20) > \tilde{D}_{34}(=10)$ 이므로 \tilde{D}_{34} 를 3기간에 할당하고 $\tilde{P}_2=0$ 로 갱신한다. $t=5$ 에서는 Step 3.1에서 $\tilde{P}_5(=0) < \tilde{D}_{35}(=10)$ 이므로 Step 3.2로 이동한다. Step 3.2.1에서 $t'=1$ 이고 $EC=(5-1) \times 3=12$, Step 3.2.2에서 $t'=6$ 이고 $WTC=(6-5) \times 8=8$ 이 된다. Step 3.2.3에서 $EC > WTC$ 이고, Step 3.2.3.2에서 $\tilde{P}_6(=30) > \tilde{D}_{35}(=10)$ 이므로 \tilde{D}_{35} 를 6기간에 할당하고 $\tilde{P}_6=20$ 으로 갱신한 후 알고리즘을 종료한다.

<Figure 3>의 (c)는 알고리즘의 절차에 따른 최종 결과를 나타낸다. 칸트 차트에서 알 수 있듯이, $j=1$ 인 노드의 경우 모든 수요가 납기를 정확히 맞추는 결과를 나타내고 있다. $j=2$ 인 노드는 \tilde{D}_{24} 와 \tilde{D}_{25} 의 5만큼에 해당하는 물량이 3기간에 미리 할당되어 재고유지 비용이 발생하였다. $j=3$ 인 노드의 경우 \tilde{D}_{34} 에 해당하는 10만큼의 물량이 2기간에 할당되어 재고유지 비용이 발생하였으며, \tilde{D}_{35} 는 6기간에 할당되어 재고이월 비용이 발생하였음을 알 수 있다.

5. 실험 및 결과 분석

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 본 연구와 동일한 환경에서 타부 탐색을 통한 look-ahead 기법을 적용한 기존의 알고리즘(Kwon et al., 2005)을 비교대상으로 놓고 다양한 실험을 실시하여 그 결과를 분석하였다. 비교 실험을 위해 아래의 <Table 3>와 같이 실험 계획을 구성하였다.

Table 3. Experimental design

Parameter	Values
Planning period(T)	20, 50, 100, 200
Number of nodes(N)	5, 10, 20, 30
Coefficient of variation(CV)	0.1, 0.2, 0.5, 0.8

실험에 적용되는 공급사슬은 3~5단계 분배형 네트워크를 이루고, 이러한 공급사슬을 구성하는 모든 노드들의 조달시간은 1기간으로 고정하여 사용하였다. 최상위 노드의 재고유지 비용은 1로 고정하였으며, 모든 노드에서 수요가 발생하는 것으로 설정하였다. 각 노드별 재고이월 비용은 균일분포(uniform

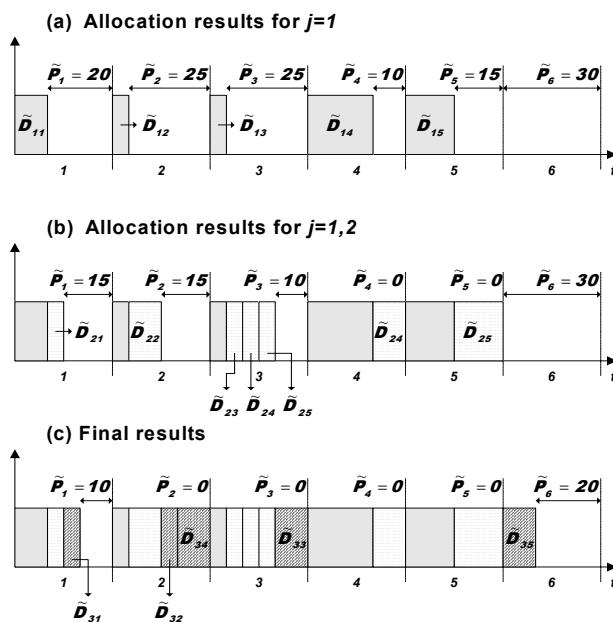


Figure 3. Results of the allocation procedure.

distribution) $U(2,10)$ 을 근거로 하여 생성하였다. 각 노드에 대한 수요는 정규 분포에 의해 생성되며 평균이 100, 표준편차는 <Table 3>의 변동 계수(coefficient of variation; CV)에 의해 결정되는 것으로 하였다. 변동 계수는 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 정의되며, 변동 계수의 값이 클수록 발생하는 수요의 변동폭이 증가하게 된다. 기간별 생산 가능 용량(P_t)은 노드별 수요 평균값인 100과 노드 수의 곱으로 나타내었다. 예를 들어, 노드의 수가 5개인 공급사슬을 대상으로 하는 실험에서의 P_t 는 500이 된다.

비교 실험에서는 본 연구를 통해 새로이 제안된 알고리즘을 사용하여 구한 총비용을 기존의 알고리즘으로 나눈 값을 비교 비율(comparison ratio)로 정의하고, 이를 통해 해의 질을 가늠하는 척도로 사용하였다. 즉, 비교 비율이 1보다 작은 경우 제안한 알고리즘의 결과가 기존 알고리즘보다 우수하다는 것을, 반대로 1보다 클 경우 열등하다는 것을 의미한다.

$$\text{비교 비율} = \frac{\text{본 연구에 제안하는 알고리즘의 총비용}}{\text{기존 알고리즘의 총비용}}$$

<Table 3>의 실험 계획을 기준으로 하여 실험한 결과를 <Table 4>에 정리하여 나타내었다. 또한 <Figure 4>, <Figure 5> 및 <Figure 6>에서는 계획 기간, 노드 수 및 변동 계수에 따른 실험 결과를 보여준다. 본 연구에서 두 알고리즘에 대한 수행도 평가를 위해서 Kwon *et al.*이 분석했던 방법을 참고로 하여 $Avg(T, N, CV)$ 을 새로이 정의하였다. $Avg(T, N, CV)$ 은 계획 기간 (T), 노드 수(N) 그리고 변동 계수(CV)가 주어질 경우의 두 알고리즘간의 비교 비율을 나타낸다. 그림에서 $Avg(T^*, *)$ 은 특정한 T 값이 주어졌을 때 모든 노드 수 N 과 변동 계수 CV 에 대한 비교 비율을 의미하며, $Avg(*, N^*)$ 와 $Avg(*, *, CV^*)$ 도 이와 마찬가지로 해석된다.

Table 4. Comparison results

T		20	50	100	200
N	CV				
5	0.1	0.97	0.95	0.89	0.79
	0.2	0.92	0.88	0.81	0.71
	0.5	0.81	0.73	0.68	0.60
	0.8	0.64	0.62	0.55	0.48
10	0.1	0.92	0.87	0.80	0.71
	0.2	0.86	0.77	0.71	0.60
	0.5	0.73	0.65	0.59	0.48
	0.8	0.60	0.52	0.47	0.40
20	0.1	0.83	0.79	0.72	0.65
	0.2	0.72	0.69	0.61	0.54
	0.5	0.61	0.52	0.50	0.40
	0.8	0.49	0.41	0.38	0.29
30	0.1	0.69	0.65	0.60	0.53
	0.2	0.62	0.59	0.51	0.46
	0.5	0.53	0.48	0.44	0.31
	0.8	0.39	0.34	0.31	0.26

<Figure 4>에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 모든 실험 조건에서 기존의 비교대상 알고리즘보다 좋은 결과를 얻고 있다. 또한 <Figure 4> ~ <Figure 6>에서 보이는 실험 항목의 변화에 따른 해의 결과를 살펴보면, 계획 기간의 길이가 길어질수록, 노드 수가 많아질수록, 변동 계수가 증가할수록 해의 성능이 보다 많이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 특히 변동 계수의 변화에 따른 해의 성능의 변화가 다른 실험 조건보다 민감하게 반응함을 알 수 있다.

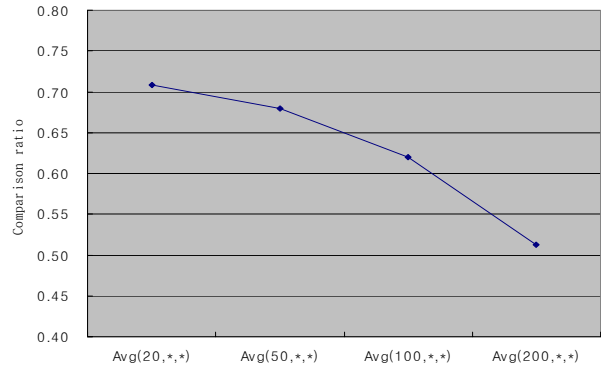


Figure 4. Comparison ratio for planning period.

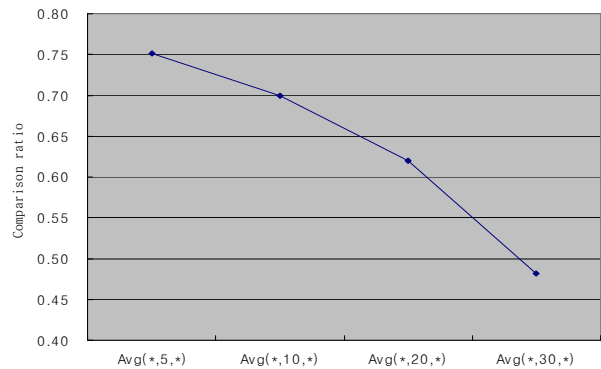


Figure 5. Comparison ratio for number of nodes.

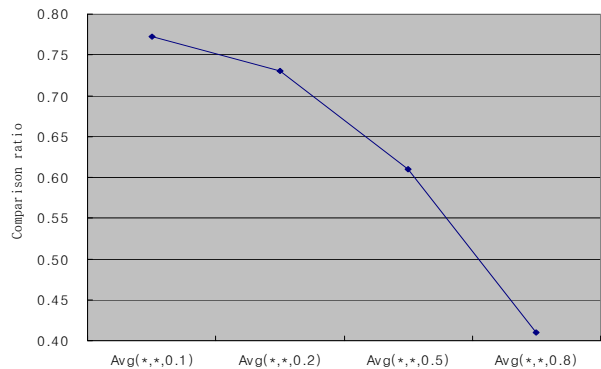


Figure 6. Comparison ratio for CV.

이러한 결과 값을 보이는 이유는 다음과 같다. 문제의 크기

가 커지거나 시스템의 모수나 환경 변수의 변동 폭이 증가할 경우 기존의 알고리즘의 초기해는 전체 계획 기간을 모두 고려하지 못함으로써 좋지 않은 결과를 보이게 되고, 이로 인해 타부 탐색을 통해 해를 향상시키더라도 그 결과는 열등하게 된다. 반면 본 논문에서 제안한 알고리즘은 발생하는 전체 비용 가운데 많은 부분을 차지하는 재고이월 비용을 보다 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 방안으로 LBC(largest backorder cost) 우선 할당 규칙을 사용하였고, 이러한 방법이 전체 공급사슬의 상황을 효과적으로 반영함으로써 보다 향상된 계획 수립 결과가 나타나게 되었다.

6. 결론

본 연구에서는 생산 능력 제한이 있는 다계층 분배형 공급사슬에서 재고유지 비용과 재고이월 비용의 총합을 최소화하는 분배계획 수립을 위한 발견적 기법을 제시하였다. 제안된 발견적 기법은 생산 능력 제약으로 인한 분배계획 수립시의 어려움을 해결하기 위한 방안으로 주어진 문제를 단일기계 일정 계획 문제로 전환하였다. 일정계획 수립시 LBC(largest backorder cost) 우선 할당 규칙에 기반을 두는 새로운 할당 알고리즘을 제안하였으며, 제안된 알고리즘의 객관적인 성능평가를 위해 기존에 알려진 알고리즘과의 비교 실험을 수행하였고 다양한 실험을 통해 제안된 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

본 연구에서는 주문 비용을 고려하지 않기 때문에 다계층 분배 문제에 있어서 다계층적인 요소를 완전하게 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 그러므로 보다 의미 있는 연구 결과를 위하여 각 노드의 수송 용량이나 물품을 보관하는 창고 용량에 대한 제한을 두는 등의 보다 현실성을 반영하는 연구가 반드시 필요하리라 생각된다. 이와 함께 단일 제품이 아닌 복수 제품을 다루는 것으로, 하위 노드는 특정한 하나가 아닌 여러 개의 상위 노드로부터 물품을 공급받는 것이 가능한 일반적인 네트워크 모형으로의 확장에 관한 연구 등이 추가적으로 필요하다.

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 Interfaces*, 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(4), 355-390.
 Callarman, T. F. and Whybark, D. C.(1981), Determining purchase quantities for MRP requirements, *Journal of Purchasing and Materials Management*, 17(3), 25-30.
 Chopra, S. and Meindl, P.(2003), *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.
 Evans, R.(1967), Inventory control of a multi-product system with a limited production resource, *Naval Research Logistics Quarterly*, 14(2), 173-184.
 Federgruen, A. and Zipkin, P. H.(1986a), An inventory model with limited production capacity and uncertain demands I. The average-cost criterion, *Mathematics of Operations Research*, 11(2), 193-207.
 Federgruen, A. and Zipkin, P. H.(1986b), An inventory model with limited production capacity and uncertain demands II. The discounted-cost criterion, *Mathematics of Operations Research*, 11(2), 208-215.
 Forrester, J. W.(1961), *Industrial dynamics*, MIT Press, Cambridge, MA.
 Glover, F. and Laguna, M.(1997), *Tabu search*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
 Ha, Y. A.(2001), Supplier-buyer contracting: Asymmetric cost information and cutoff level policy for buyer participation, *Naval Research Logistics*, 48(1), 41-64.
 Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T. and Wilson, J. M.(2003), The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms, *Omega*, 31(5), 365-378.
 Koulamas, C. (1996), Single-machine scheduling with time windows and earliness/tardiness penalties, *European Journal of Operational Research*, 91, 190-202.
 Kwon, I. H., Baek, J. K. and Kim, S. S.(2005), Distribution planning for capacitated supply chains using tabu search approach, *IE Interfaces*, 18(1), 63-72.
 Lee, H. L., So, K. C. and Tang, C. S.(2000), The value of information sharing in a two-level supply chain, *Management Science*, 46(5), 626-643.
 Li, G.(1997), Single machine earliness and tardiness scheduling, *European Journal of Operational Research*, 96(3), 546-558.
 Poirier, C., Reiter, C. and Stephen, R.(1996), *Supply chain optimization*, Berrett-Koehler.
 Seo, Y., Jung, S. and Hahn, J.(2002), Optimal reorder decision utilizing centralized stock information in a two-echelon distribution system, *Computers & Operations Research*, 29(2), 171-193.
 Sox, C., Thomas, L. J. and McClain, J. O.(1997), Coordinating production and inventory to improve service, *Management Science*, 43(9), 1189-1197.
 Taft, E. W.(1918), Formulas for exact and approximate evaluation-handling cost of jigs and interest charges of product manufactured included, *Iron Age*, 101, 1410-1412.
 Tsay, A. A., Nahmias, S. and Agrawal, N.(1999), Modeling supply chain contracts: A review, Tayur, S., Ganeshan, R. and Magazine, M., eds. *Quantitative models for supply chain management*, Kluwer Academic Publisher, Boston, MA.
 Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C. and Jacobs, F. R.(2004), *Manufacturing planning and control for supply chain management*, McGraw Hill.

**권익현**

고려대학교 산업공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 고려대학교 산업공학과 박사
 현재 : 고려대학교 정보통신기술연구소 연구
 조교수
 관심분야 : 생산 및 물류관리, 시스템 최적화,
 경영정보시스템

**김성식**

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

**신현준**

고려대학교 산업공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 고려대학교 산업공학과 박사
 Texas A&M 대학교 산업공학과 Post-Doc.
 삼성전자 LCD총괄 책임연구원
 현재 : 상명대학교 산업정보시스템공학과
 전임강사
 관심분야 : 휴리스틱 최적화, SCM, 스케줄링,
 금융공학