

통합 공급사슬 최적화 모델에 관한 연구†

최경현 · 이현지 · 곽호만

한양대학교 산업공학과

Integrated Supply Chain Optimization Models

Gyunghyun Choi · Hyun-Ji Lee · Ho-Mahn Kwak

In this research report, we consider multi stage supply chain optimization modeling techniques, and propose a new integrated model. The stages that are normally associated with a supply chain include procurement, production and distribution. In general, there are two distinct set of approaches which manage whole supply chain. One approach is the plant decision and subsequently distribution and inventory decision while the second approach is to address all decisions simultaneously through the integrated model. First, we present a survey of existing models that are treated by independently. And then, we propose an integrated model that is in a moderate size and easy to implement in practice. Finally, we address possible solution methodologies and present some computational test results using CPLEX to see the computational burden from which new algorithmic insight might be come up.

1. 서론

전통적으로, 경영기능들에 대한 다양한 요구들에는 서로 상충되는 것들이 존재한다고 여겨져 왔으며, 따라서 이들 영역 중 하나 또는 그 이상에서 우위를 갖는 것은 곧 다른 영역에서의 우위에 대한 희생을 의미하는 trade-off가 존재한다고 생각되어 왔다. 예를 들어, 유연성과 품질에서 우위를 갖는 조직에게는 비용은 부차적인 문제였다. 이러한 생각은 제품의 다양성과 고품질을 요구하는 고객들은 대개 그에 대한 추가적인 대가를 기꺼이 지불할 용의가 있다는 것으로부터 기인한 것이었다. 그러나 경쟁이 전 지구화되면서, 많은 기업들은 사업을 수행하는 방법을 원칙적으로 재고하도록 강요하는 시장압력을 경험하고 있다. 오늘날에는 비용, 유연성, 품질, 납기 등의 영역이 서로 trade-off 관계로 인식되지 않고, 동시에 우선시 되어야 할 필요가 있게 되었다. 이를 위해, 경영자들은 여러 가지 접근방법들에 초점을 두어왔다. 고품질을 위한 TQM, 빠른 고객 대응과 기민한 생산을 저비용으로 달성하기 위한 FMS, 그리고 낮은 재고수준으로 제품 또는 부품을 적기에 배달하기 위한 SCM 등은 모두 이러한 새로운 경쟁적 압력에 대한 대응들로 볼 수 있다. 특히 SCM의 관점에서 볼 때, 이제는 경쟁우위를 점하기

위해 개별조직에만 초점을 맞추는 것은 더 이상 가능한 것으로 보이지 않는다. 이제는 개별 조직의 성공은 자신의 공급자들과 고객들의 수행도와 신뢰성에 의존하고 있다고 인식되고 있다. 따라서, 미래의 경쟁은 개별 조직들간의 경쟁이 아니라 supply chain들간의 경쟁이 될 것이라는 전망은 어찌 널리 알려지고 받아들여지게 되었다.

전체 공급사슬 시스템은 어떤 구조인지, 가능한 향상의 기회가 더 존재하는지, 필요 없는 비용은 모두 제거되었는지 등을 고려하여, 가장 짧은 cycle time과 고객의 수요를 만족시키는 최소 재고량, 낮은 운반비용, 합리적 가격 등을 모두 만족시켜 최초 공급자로부터 최종 소비자에 이르는 네트워크 전체를 효율적으로 관리하는 공급사슬 경영이 필요하게 된 것이다.

공급사슬은 크게 기본적 원료를 공급하는 공급단계, 상품이나 서비스를 만들어내고 조립하고 변환하는 기능을 하는 생산단계, 최종상품을 생산자로부터 창고나 물류센터에 운송하고 고객이 요청할 때 적절한 양을 공급해 주는 분배단계로 나눌 수 있다. 각 단계를 최적으로 관리하는 접근방법은 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 각 단계를 독립적으로 고려하여 최적해를 찾는 방법이고, 두 번째는 전체를 통합적으로 고려하는 모델을 통해 동시에 의사결정을 하게 되는 방법이다. 이는 문에서는, 다단계의 의사결정모델을 통합한 공급사슬 통합관

† 본 연구는 1999~2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 지원에 의해 수행되었음.

리모델을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 생산, 분배, 재고 단계에 대한 몇 가지 기존의 독립적 관리 모델을 소개하고, 3장에서는 이를 바탕으로 한 통합 최적화 모델을 제시한 후에 4장에서는 알고리즘을 소개하겠다. 마지막으로 통합모델의 적합성 검정을 위한 테스트를 제시하고 앞으로의 연구방향에 대해 언급하겠다.

2. 독립적 관리모델

2.1 생산계획단계

생산단계를 최적화하기 위한 의사결정요소로는 제품(또는 재공품) 변환 과정의 구성을 어떻게 할 것인지, 이러한 각 제품(또는 재공품) 변환 과정의 위치는 어떻게 결정할 것인지, 공장의 생산능력은 어떻게 고려할 것이며 공급자로부터의 재고의 흐름을 원활하게 하기 위한 방법은 무엇인지, 재고를 집중하여 관리하는 것과 분산시켜 관리하는 전략의 선택 등이 있다. 이 중에서 제품(또는 재공품) 변환 네트워크 모델은 원자재와 재공품의 공급사슬을 통해 완성품을 만들어내는 과정에서 생산비와 재공품의 재고비 등을 고려한 최소비용의 생산계획을 위한 모델이다. 이는 다단계 재고모형으로 표현되며 재공품 재고는 필요한 선행행 관계에 의해 연결된다. 생산고정비용과 재고보유비용을 고려하는 일반적인 제품(또는 재공품) 변환 네트워크 문제 (Transformation Network Problem)는 다음과 같다.

p 를 생산 재공품 또는 생산단계라 하고 t 를 시간, d_{jt} 를 p 단계 t 시점에서의 수요라고 할 때 목적식은 식 (1)과 같이 재고비용(재공품)과 생산고정비의 합을 최소화하는 다음과 같은 식이 된다.

$$\min z = \sum_{k,t} h_{kt} I_{kt} + \sum_{k,t} s_{kt} x_{kt} \quad (1)$$

이 때, h_{kt} 는 재공품에 대한 재고비용, s_{kt} 는 생산 고정비용이고 결정변수 I_{kt} 는 p 단계 t 시점의 재고수준, x_{kt} 는 p 단계 t 시점에 재공품을 생산하면 1, 아니면 0값을 가지는 이진변수이다. 주요 제약식으로, 이전 기간에서 넘어온 재고량과 리드타임을 고려한 생산량의 합에 다음 단계 생산에 투입될 양과 이번 기간의 재고량을 합한 양을 뺀 차를 이번 기간의 수요와 같도록 하는 것이 있다. 이를 식으로 표현하면,

$$I_{k,t-1} + P_{k,t-\lambda(k)} - \sum_{q=Q(k)} P_{qt} - I_{kt} = d_{kt} \quad \forall p, t \quad (2)$$

가 된다. 여기서 $\lambda(k)$ 는 p 생산단계의 고정리드타임, $Q(k)$ 는 p 생산단계 이후 단계들의 집합, P_{kt} 는 p 단계 t 시점에서의 생산량을 의미하는 결정변수를 나타낸다. 이 모델에서 핵심적으

로 고려되는 것은 $P_{k,t-\lambda(k)}$, 즉 p 생산단계에서 $t-\lambda(k)$ 시점에 생산되는 양인데, time period를 어떤 시간 단위의 마지막으로 할 경우 $t-\lambda(k)$ 가 어떤 time period의 중간시점이 될 수가 있다. 이때를 해당되는 time period의 최종시점으로 볼 수 있으나 이에 따라 모델이 약간 변형될 수도 있다.

여기서 상품을 생산하는데 들어가는 생산 용량에 제한이 있는 경우, 모델을 확장할 수 있다. 예를 들어, 제품(또는 재공품) 변환 네트워크의 단계들이 제한된 노동시간과 같은 하나의 자원을 공유하는 경우, 이에 관한 제약을 다음과 같이 모델에 포함시킬 수 있다.

$$\sum_p a_p P_{kt} \leq C_t \quad \forall t \quad (3)$$

여기서, C_t 는 t 기간 동안 사용 가능한 자원의 양, a_p 는 p 상품 하나를 생산하는 데 필요한 자원의 양을 나타낸다. 고정된 setup 시간을 고려하는 경우는 다음과 같이 모델에 포함될 수 있다.

$$\sum_p (a_p P_{kt} + b_p x_{kt}) \leq C_t \quad \forall t \quad (4)$$

여기서 b_p 는 p 상품을 생산하는 경우에 소요되는 고정된 setup 시간을 나타낸다.

Trigeiro *et al.*(1989)은 single machine(다품종, 1단계 네트워크)인 경우에서의 setup time의 영향을 연구하였는데, setup time이 포함된 경우 가능해를 찾는 문제조차 NP-hard 문제가 되었다.

2.2 분배/위치/할당 단계

위치/할당에 대한 의사결정은 분배단계를 최적화 하는 데 전략적으로 매우 중요한 요소이다. 할당(allocation)계획에서는 선택된 분배센터에 의해 공급받아야 하는 고객과 공급받게 되는 상품의 양을 결정하게 되며, 위치선정(location)에서는 분배센터가 어디에 위치하는 것이 가장 좋을 것인지를 결정하게 된다. 일반적으로 이러한 의사결정을 위해 두 가지 접근법이 있는데, 하나는 분배센터의 위치선정을 먼저 한 후에 그에 따라 고객과 상품의 양을 할당하는 것이고 다른 하나는 두 가지 요소를 동시에 결정하도록 하는 것이다. 첫 번째 접근법에서 전체 문제를 두 부분으로 나누어 풀게 되면, 위치선정은 배낭 문제로, 할당은 수송문제로 쉽게 풀리기 때문에 응용측면에서 볼 때 쉽다는 장점이 있지만 두 가지 의사결정간의 상호관계(분배센터의 위치에 따라 고객으로의 상품운반비용이 달라지는 등)를 고려하지 못하기 때문에 위치선정/할당을 동시에 고려하는 것이 더 많이 쓰이고 있다. 다음은 여러 종류의 상품을 생산하는 하나의 공장만을 가정하였을 때 두 가지 요소를 동시에 고려하게 되는 일반적 모델이다.

p 는 상품, k 는 분배센터, i 은 고객이라 할 때 목적식 (5)는 분배센터를 통해 고객에 공급되는 상품의 총 운반비용과 분배

센터를 설치할 때의 고정비용의 합을 최소로 하는 것이다.

$$\min \sum_{p,k,l} c_{pkl} Q_{pkl} + \sum_k f_k z_k \quad (5)$$

이때 c_{pkl} 은 상품 p 가 k 에 위치한 분배센터를 통해 고객 l 에 개 공급될 때의 운반비용, f_k 는 분배센터가 k 에 위치할 때 드는 고정비용, 결정변수 Q_{pkl} 은 상품 p 가 k 에 위치한 분배센터 를 통해 고객 l 에게 공급되는 양, z_k 는 분배센터가 k 위치에 있으면 1, 아니면 0값을 가지는 이진변수이다. 주요 제약식으 로 W_k 가 k 에 위치한 분배센터의 상품 p 를 저장하는 용량이고 d_{pl} 은 l 고객의 p 상품에 대한 수요를 의미할 때, 각 분배센 터에서 공급하는 상품의 합이 분배센터 용량을 넘지 않도록 하는 제약식,

$$\sum_l Q_{pkl} \leq W_k z_k \quad \forall p, k \quad (6)$$

과 각 고객의 수요와 상품의 공급량이 같을 것을 보장하는 제 약식,

$$\sum_k Q_{pkl} = d_{pl} \quad \forall p, l \quad (7)$$

을 고려할 수 있다.

위의 모델에서는 단 하나의 공장만을 고려하였는데 생산능 력이 한정되어 있는 여러 개의 공장을 고려하고 각 공장에서 의 상품에 대한 생산용량과 고객으로부터의 수요는 이미 알려 져 있는 고정된 값이며 각 고객은 그에 할당된 단 하나의 분배 센터로부터만 상품을 공급받을 수 있다는 가정을 추가하여 다 음과 같은 확장모델을 구현할 수 있게 된다.

이 때, 목적식은 식 (8)과 같이 각 고객에 공급된 상품의 총 운반비용과 분배센터를 설치할 때의 고정비용뿐만 아니라 분 배센터에 저장되는 상품의 양에 비례하는 분배센터 사용비용 의 합을 최소로 하기 위한 것이다.

$$\min \sum_{p,j,k,l} c_{pjkl} Q_{pjkl} + \sum_k [f_k z_k + v_k \sum_{p,l} d_{pl} y_{kl}] \quad (8)$$

이때, c_{pjkl} 은 j 공장에서 상품 p 가 k 분배센터를 통해 l 고 객에게 공급될 때 운반비용, v_k 는 상품의 양에 비례하는 분배 센터 사용비용이고 결정변수 Q_{pjkl} 은 j 공장에서 상품 p 가 k 분배센터를 통해 l 고객에게 공급될 양, y_{kl} 은 l 고객이 k 분 배센터를 통해 상품을 공급받으면 1, 아니면 0의 값을 가지는 이진변수이다.

제약식으로는 T_{pj} 가 j 공장에서 상품 p 의 생산능력을 의미할 때, 각 공장에서 생산한 상품이 그 생산능력을 넘을 수 없도록 하는 제약식,

$$\sum_{k,l} Q_{pjkl} \leq T_{pj} \quad \forall p, j \quad (9)$$

과 각 공장에서 생산된 상품과 분배센터를 통해 고객에 공급

된 상품의 양이 일치해야 함을 나타내는 제약식,

$$\sum_l Q_{pkl} = d_{pl} y_{kl} \quad \forall p, k, l \quad (10)$$

및 고객은 단 하나의 분배센터로부터 모든 상품을 공급받아 야 할 것을 제한하는 제약,

$$\sum_k y_{kl} = 1 \quad \forall l \quad (11)$$

등이 있으며, 또한 W_k, \bar{W}_k 가 k 분배센터의 용량의 하한과 상한을 의미할 때 각 분배센터에 할당된 모든 고객의 수요의 합은 분배센터의 제한된 용량의 상한과 하한을 넘을 수 없음을 의미하는 제약식,

$$W_k \leq \sum_{p,l} d_{pl} y_{kl} \leq \bar{W}_k z_k \quad \forall k \quad (12)$$

으로 이루어진다.

이러한 접근방법은 여러 가지 유형의 분배 네트워크에 대한 location/allocation 결정문제의 일반적인 유형들을 다룰 수 있는 데, 예를 들어 일반적인 서비스 시간 제약(즉, 고객과 분배센터 간에 소요되는 시간/거리 상에 최대한계가 있는 경우)은 쉽게 포함될 수 있다.

최근에는, 설치되는 분배센터의 용량수준에 의해 분배센터 를 설치하는 데 소요되는 고정비를 나타내는 모델이 제시되기도 하였다. 즉, 지금까지는 어떤 위치에 분배센터를 설치할 때 한 가지 비용 f_k 가 정해져 있었던 반면에, 분배센터의 용량이 클수록 그 설치 고정비용을 더 크게 하기 위해서 이러한 고정 비용을 분배센터의 용량에 대한 함수로 나타낸다. 이러한 특 징은 다양한 종류의 물자들을 다루기 위한 서로 다른 장비들 로 인해 발생하는 분배센터 운영변동비를 제품마다 달리 하는 것으로도 확장될 수 있다. Lee(1991, 1993), Mazzola and Neebe(1998)이 이러한 문제를 다루었는데, 이를 장비 유형에 따 른 Multiproduct Capacitated Facility Location 문제로 분류하였다.

2.3 재고관리단계

재고의사결정은 가장 다양하게 연구되어온 분야이다. 일반 적으로 이 모델은 수요가 미리 알려진 값이라고 가정하였을 때, 주문량이나 보충시점 등의 의사결정구조를 이해하고 상품 주문비용과 재고보유비용을 최소로 하는 것에 초점이 맞추어 져 있다.

여러 개의 상품을 생산하며 생산능력이 제한되어 있는 여 러 개의 공장과 특정 고객집단에 상품을 공급하고 상품별로 제한된 저장용량을 가진 분배센터, 분배센터로부터 상품을 공 급받는 고객이 있는 상황을 고려하자. 여기서 고객은 최종소 비자에게 상품을 공급하기 위한 중간 소매점이 될 수도 있고 최종 소비자가 될 수도 있다. 분배센터와 고객간의 상품운송 은 각 시간에 대해 연속적으로 시행되므로 분배센터는 각 시

간의 시작점에 적절한 재고량을 보유하고 있어야 한다. 이월 주문은 허용하지 않으며 공장과 분배센터, 분배센터와 고객간 운송의 리드타임은 무시하기로 하였을 때 분배센터와 고객의 주문비용과 재고보유비용의 trade-off를 고려하여 주문량을 결정하는 일반적 재고모델은 다음과 같다.

K_k 는 분배센터 k 가 모든 상품을 공급받는 공장들의 집합, L_k 는 분배센터 k 가 상품을 공급해주는 고객의 집합, D_l 은 고객 l 이 상품을 구입하게 되는 분배센터의 집합, J_j 는 공장 j 가 상품을 공급하는 분배센터의 집합이다. 결정변수로 y_{pkt} 는 t 기에 분배센터 k 가 상품 p 를 공급받으면 1, 아니면 0의 값을 가지는 이진변수, Y_{plt} 는 t 기에 l 고객이 p 상품을 공급받으면 1, 아니면 0, I_{pkt} 는 t 기에 분배센터 k 가 가지고 있는 상품 p 의 재고량, B_{plt} 는 t 기에 고객 l 이 가지고 있는 상품 p 의 재고량, q_{pjkt} 는 t 기에 공장 j 가 분배센터 k 에 공급한 상품 p 의 공급량, Q_{pkit} 는 t 기에 분배센터 k 가 고객 l 에 공급한 상품 p 의 공급량을 의미한다. 또한 r_{pkt} 는 t 기의 분배센터의 상품주문비용이고 h_{pkt} 는 재고비용이다. R_{plt} 는 t 기의 고객의 상품주문비용이고, H_{plt} 는 t 기의 고객 l 의 상품 p 에 대한 재고비용이며, T_{pjlt} 는 t 기의 공장 j 의 상품 p 를 생산하는 능력, W_{pjlt} 는 t 기의 분배센터 k 의 상품 p 에 대한 저장용량을 의미한다. 이와 같은 변수를 사용한 일반적 재고관리 최적화 모델은 다음과 같다.

$$\min \sum_{p, k, t} [r_{pkt}y_{pkt} + h_{pkt}I_{pkt}] + \sum_{p, l, t} [R_{plt}Y_{plt} + H_{plt}B_{plt}] \quad (13)$$

subject to

$$I_{pkt-1} + \sum_{j \in K_k} q_{pjkt} - I_{pkt} = \sum_{l \in L_k} d_{plt} \quad \forall p, k, t \quad (14)$$

$$B_{plt-1} + \sum_{k \in D_l} Q_{pkit} - B_{plt} = d_{plt} \quad \forall p, l, t \quad (15)$$

$$\sum_{k \in J_j} q_{pjkt} \leq T_{pjlt} \quad \forall p, j, t \quad (16)$$

$$\sum_{j \in K_k} q_{pjkt} \leq W_{pjlt} \quad \forall p, j, t \quad (17)$$

$$\max_{k \in K_k} q_{pjkt} \leq My_{pkt} \quad \forall p, k, t \quad (18)$$

$$\max_{k \in D_l} Q_{pkit} \leq MY_{plt} \quad \forall p, l, t \quad (19)$$

$$y_{pkt}, Y_{plt} \in \{0, 1\} \quad \forall p, k, l, t \quad (20)$$

$$q_{pjkt}, Q_{pkit} \geq 0 \quad \forall p, j, k, l, t \quad (21)$$

$$I_{pkt}, B_{plt} \geq 0 \quad \forall p, k, l, t \quad (22)$$

목적식 (13)은 분배센터가 공장에 상품을 주문할 때 발생하는 재고주문비용과 분배센터가 보유하고 있는 재고량에 대한 재고비용의 합과 최종소비자 또는 소매점이 분배센터에 상품을 주문할 때 발생하는 재고주문비용과 최종소비자 또는 소매점의 재고비용의 합을 최소화 하는 것이다. 실제로 소매점이

나 분배센터의 경우와 달리 최종소비자의 재고보유비용은 0의 값을 갖도록 함으로써 고려하지 않는 것이 일반적이다. 식 (14)는 분배센터에 대해 이전기간의 재고량과 주문량의 합에 이번 기간에 확보해야 할 재고량을 뺀 차는 모든 고객의 수요를 만족해야 함을 의미하며, 식 (15)는 최종소비자나 소매점으로 이루어진 고객의 재고보유량과 분배센터에 주문한 상품주문량의 합이 고객의 수요와 같을 것을 의미한다. 식 (16)은 분배센터로부터의 주문량의 합이 공장의 생산능력을 넘지 않아야 함을 의미하고, 식 (17)은 공장에서부터의 운송량의 합이 분배센터의 저장용량을 넘지 않을 것을 의미한다.

이 외에도 Veinott(1969), Kalymon(1972), Schwarz (1973), Williams(1981), Roundy(1985), Maxwell and Muckstadt(1985), McGavin *et al.*(1993), Lu and Posner(1994) 등은 하나의 분배센터, 하나의 상품 및 여러 고객을 고려하였고, Muckstadt and Roundy (1987), Atkins and Iyogun(1993)은 여기에 여러 개의 상품을 고려하는 것을 가정하였으며, Anily and Federgruen(1990), Hodder and Jucker(1985), Burns *et al.*(1985), Cohen and Lee(1988, 1989), Cohel and Pyke(1990)는 물류 문제를 고려하는 것의 효과에 관하여 연구하였으며, Badinelli *et al.*(1985)은 fill rate를 최적화하도록 하였다. Cohen and Ernst(1993)는 도매상의 재고시스템에 관해, Nahmias and Smith (1994)는 lost sale의 효과에 대해서, Pasternack and Drezner(1991)는 대체상품에 대해서, Weng(1997)은 가격과 주문의 통합적 의사결정에 관해서 연구하였다.

3. 통합관리모델

2장에서 생산, 분배, 재고의 독립된 모델을 소개하였던 것처럼 실제로 기업에서는 각 업무과정을 지리적 또는 기능적 요소로 분리하여 의사결정을 하고 있다. 이러한 방법을 사용하면 각 요소들이 독립적으로 다루어지므로 복잡성이 크게 감소하게 된다. 또한 각 요소들 사이의 상호관계를 고려하지 못해 발생하는 오차는 안전재고량이나 리드타임과 같은 버퍼를 사용하여 극복하게 되는데, 이것은 관리비용을 증가시키고 업무상 오차발생의 원인을 제공한다.

따라서, 통합적인 관점에서 네트워크 전체의 의사결정을 동시에 하게 되면 서비스 수준이 향상하고 재고, 재공품, 셋업, 운반에 해당하는 총비용이 실질적으로 감소하게 된다.

이와 관련하여 Blanco *et al.*(1998)에서는 통합모델을 통해 생산량, 노동력 할당, 분배센터 간의 재공 할당, 분배센터와 고객으로의 운송경로와 운송량 등을 동시에 결정하는 것이 각각을 독립적으로 의사 결정하는 경우보다 비용절감효과가 있는 것을 실험을 통해 보였으며, Fumero and Vercellis(1999)에서도 제한된 원재료 하에서 여러 종류의 생산품을 생산하여 고객에게 운반하는 하나의 공장을 가지는 물류 시스템을 표현한 통합모델과 분리모델을 제시, 비교하여 실험의 크기가 커질수록 통합모델이 더 좋은 결과를 보이는 것을 입증하였다.

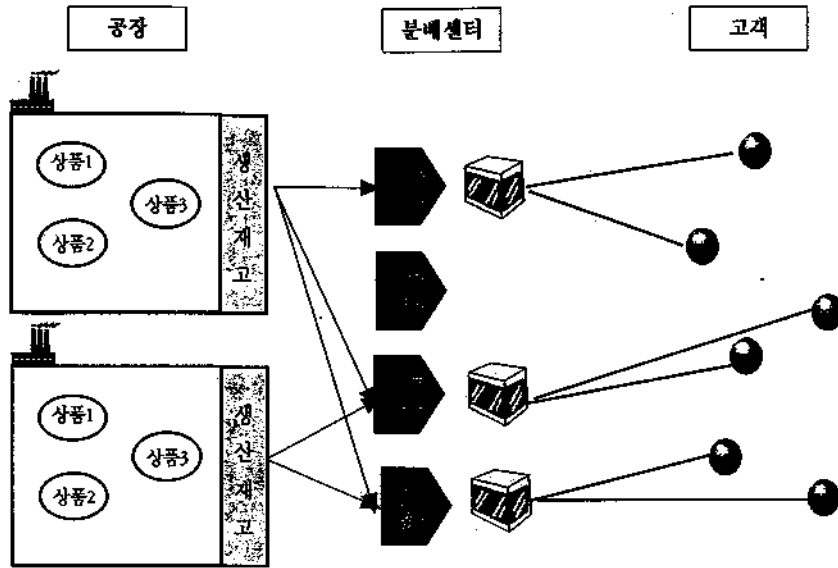


그림 1. SCM 통합 관리 모델.

본 연구에서는, 여러 공장에서의 다품종 생산환경에서 분배센터의 결정을 포함하는 생산과 분배계획 및 재고관리를 통합적으로 관리하는 통합 공급사슬 최적화 모델을 제시한다(〈그림 1〉 참조).

앞에서와 같이, p 는 상품, j 는 공장, k 는 분배센터, l 은 고객, t 는 시간이라 하고, 변수들을 정리하면 다음과 같다.

Decision variables

- I_{jpt} : j 공장의 p 상품 재고
- P_{jpt} : j 공장의 p 상품 생산량
- q_{pjkt} : j 공장에서 k 분배센터로의 공급량
- Q_{pklt} : k 분배센터에서 l 고객까지의 공급량
- x_{jpt} : j 공장에서 p 상품이 생산되면 1, 아니면 0
- z_k : 분배센터가 k 에 위치하면 1, 아니면 0

Parameters

- h_{jpt} : j 공장의 p 상품 재고보유비용
- s_{jpt} : j 공장 p 상품의 생산고정비용
- c_{pjkt} : j 공장에서 k 분배센터로의 p 상품의 운송비
- C_{pklt} : k 분배센터에서 l 고객으로의 p 상품의 운송비
- f_k : 분배센터가 k 에 위치할 때 드는 고정 비용
- d_{pilt} : l 고객의 p 상품에 대한 수요
- T_{jpt} : j 공장 p 상품 생산능력
- W_{pk} : k 분배센터의 p 상품 저장능력
- $L(p, s, j)$: j 공장 p 상품의 s 단계의 고정리드타임

$$\min \sum_{p,j,t} h_{jpt} I_{jpt} + \sum_{p,j,t} s_{jpt} x_{jpt} + \sum_{p,j,k,t} c_{pjkt} q_{pjkt}$$

$$+ \sum_{p,k,l,t} C_{pklt} Q_{pklt} + \sum_k f_k z_k \tag{23}$$

subject to

$$I_{jpt,t-1} + P_{jpt-L(p,s,j)} - I_{jpt} = \sum_k q_{pjkt} \quad \forall p, j, t \tag{24}$$

$$\sum_j q_{pjkt} = \sum_l Q_{pklt} \quad \forall p, k, t \tag{25}$$

$$\sum_k Q_{pklt} = d_{pilt} \quad \forall p, l, t \tag{26}$$

$$\sum_j q_{pjkt} \leq W_{pk} z_k \quad \forall p, k, t \tag{27}$$

$$0 \leq P_{jpt} \leq T_{jpt} x_{jpt} \quad \forall p, j, t \tag{28}$$

목적식 (23)은 공장에서의 재고보유비용, 생산고정비용, 공장과 분배센터간 분배센터와 고객간의 운송비용, 분배센터 고정비용의 합을 최소로 하는 것이다. 식 (24)는 공장에서 상품의 생산량, 재고량은 분배센터의 주문량과 일치해야 한다는 의미이고, 식 (25)는 각 분배센터에 대해 공장으로부터의 공급량은 그 분배센터가 고객에게 공급하는 양의 총합과 일치해야 한다는 의미이다. 마찬가지로 식 (26)은 분배센터로부터의 공급량은 고객의 수요와 일치한다는 제약이며, 식 (27)은 각 분배센터의 상품에 대한 저장능력 제한을 위한 것이고 식 (28)은 공장의 각 상품에 대한 생산능력을 제한하는 것이다.

Blanco *et al.*(1998)은 매우 많은 요소를 고려하여 모델에 반영하고 있으나 그만큼 모델이 복잡해져서 실제 문제에 적용하기에 계산상에 어려움이 있다. Fumero and Vercellis(1999)는 이러한 어려움을 극복하기 위해 Lagrangian Relaxation을 사용하는 알고리즘을 제안하여 크기가 큰 문제에도 적용이 가능하도록 하였다. 그러나 이 모델은 하나의 공장만을 고려하고 있으므로 여러 개의 공장에서 다양한 상품을 공급받는 공급사슬 구조에는 적절하지 않은 모델이다. 본 연구에서 제안하는 모델은 Blanco *et al.*(1998)의 모델을 실제 적용이 가능토록 단순화하면서, 공급사슬 경영에 필수적인 요소들의 의사결정을 가능하게

한다. 예를 들어, 공장으로부터의 공급량과 고객으로 공급하는 양을 일치시킴으로써 분배센터의 재고비용을 고려하지 않았다(실제로, 분배센터의 고정운영비에 포함될 수 있음). 따라서, 이 모델은 기존의 모델보다 간결하면서도 실제 여러 개의 공장으로부터 상품을 공급받게 되는 공급사슬 네트워크에 적용이 쉬운 모델이라 할 수 있다. 그러나, 사전에 예측할 수 있듯이 이러한 형태의 모델은 문제의 크기가 기하급수적으로 증가한다.

4. 알고리즘

공급사슬 최적화 문제들을 풀기 위한 알고리즘들은 대략 다음과 같이 제시되어 왔다.

고정된 수요를 갖는 제품 (또는 재공품) 변환 네트워크 문제에 대해서, Crowston *et al.*(1973)은 assembly structures에 대해 동적계획법을 제시하였고, 반면에 Schwartz and Schrage(1975)는 분지한계법(Branch & Bound)을 제안하였다. 시간에 따라 수요가 달라지도록 고정수요 가정을 완화한 경우의 해법에 대해서는 Crowston *et al.*(1973)이 동적계획법을 이용하였고, Afentakis *et al.*(1984), Afentakis and Gavish(1986)는 Lagrangian Relaxation을 이용한 분지한계법을 개발하였다.

장비 유형에 따른 Multiproduct Capacitated Facility Location 문제에 대한 해법으로는, Lee (1993)가 Cross Decomposition을 이용하였고, Mazzola and Neebe(1998)는 Lagrangian Relaxation을 이용하였다.

생산, 분배, 재고의 통합 모델에 대해서는 Fumero and Vercellis(1999)가 Lagrangian Relaxation을 이용하여 문제를 생산과 분배문제로 분리하여 각각이 capacitated lot-sizing 문제와 다기간 차량경로문제(multiperiod vehicle routing problem)가 되도록 하면서 통합적인 문제는 dual master 문제를 통해 고려하는 방법으로 해를 구하는 방법을 제안하였다. 이와 유사하게, decomposition 테크닉은 물류문제에 있어서 휴리스틱 방법들을 개발하는 데에 자주 이용되어왔는데, 이는 문제에 내재된 네트워크 구조가 decomposition method를 통해 효율적으로 이용될 수 있기 때문이다. 이와 같은 대표적인 연구들은 Sharp *et al.*(1970), Bell *et al.*(1983), Federgruen and Zipkin(1984), Cohen and Lee(1988), Benjamin(1989), Chien *et al.*(1989) 등이 있다. 또한 문제 (5)~(12)와 같은 복잡한 형태는 Benders' Decomposition 기반의 알고리즘도 제시되었다.

5. 테스트

본 연구의 초점은 관리운영이 가능한 통합모델의 수립에 있으므로, 구체적인 해법은 이후의 연구과제로 남긴다. 따라서, 제시된 모델의 검증과 신규 알고리즘의 개발 아이디어 도출을 위한 샘플 테스트를 실시한다.

표 1. 테스트 결과

번호	모델크기					문제크기		CPU time (sec)
	상품	공장	분배	고객	시간	변수	계약식	
1	2	2	2	2	2	58	40	0.33
2	5	2	3	5	2	273	150	0.23
4	2	2	5	5	2	169	76	0.18
5	2	2	5	10	2	269	96	0.26
6	3	2	5	15	3	824	261	0.18
7	3	2	5	20	3	1049	306	0.22
8	3	2	5	30	3	1499	396	0.31
9	5	5	5	10	5	2255	750	10.86
10	5	5	5	15	5	2880	875	10.19
11	5	5	5	20	5	3505	1000	17.58
12	5	5	5	10	10	4505	1500	22.86
13	5	5	5	15	10	5755	1750	21.66
14	5	5	5	20	10	7005	2000	23.77

제3장에서 수립된 모델의 타당성과 계산량의 검토를 위해서 58개부터 7005개까지의 변수, 40개에서 2000개까지의 제약식을 가지는 여러 종류의 문제를 발생시켜, Pentium II 400MHz, 128MB RAM 사양의 PC에서 CPLEX 6.5 MIP option을 사용하여 테스트를 수행하였으며, 그 결과는 <표 1>과 같다. 이 계산결과로 미루어 보아, 이와 같은 평범한 규모(문제 14번)의 문제는 기존 상용 패키지를 이용하여 적당한 시간 안에 풀 수 있을 것으로 전망할 수 있다. 그러나, 전자제품, 자동차 부품 등 취급하는 제품의 종류가 많은 경우는 이를 위한 알고리즘 개발이 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

우리는 앞에서 생산, 재고, 분배문제의 독립모델과 통합모델에 대한 연구들을 살펴보고, 공급사슬 통합관리모델을 제안하였다.

전체 공급사슬을 효율적으로 운영하는 것이 기업의 주요 전략과제로 고려되는 상황에서, 지금까지 제시되어 온 통합모델들은 여전히 너무나 불충분하다. 계산상의 어려움으로 인해 많은 비현실적인 가정들을 전제하고 있거나 그렇지 않고 현실에 가까운 모델을 구현한 경우에는 실제 문제에 적용하여 해를 구할 수가 없기 때문이다. 좀더 일반적이고 현실적인 모델의 개발과 이를 풀기 위한 해법들이 개발되어야 할 것은 자명하다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 모델이 비교적 적용이 쉬운 단순한 형태이면서, 공급사슬의 주요한 의사결정을 가능케 하는 실제적인 기업의 요구에 부응하고 있다고 할 수 있다.

복잡해져 가는 기업 경영환경을 고려할 때, 현실 적용이 용

이한 복합모델의 개발이 계속되어야 할 것이다. 그러나, 이러한 모델의 확장은 필연적으로 대규모 최적화 문제를 유발하게 되어, 이를 위해 대규모 최적화 알고리즘의 적용이 필요할 것으로 보이며, decomposition method나 Lagrangian Relaxation 등의 응용에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

- Afentakis, P. and Gavish, B. (1986), Optimal lot sizing algorithm for complex product structures, *Operations Research*, 34, 237-244.
- Afentakis, P., Gavish, B. and Karmarkar, U. (1984), Computationally efficient solutions to the lot sizing problem in multistage assembly systems, *Management Science*, 30, 222-239.
- Badinelli, R. D., Deuremeyer, B. L. and Schwarz, L. B. (1985), Fill-rate optimization in a warehouse N identical retailer distribution system, *Management Science*, 31(4), 488-498.
- Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L. et al. (1983), Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer, *Interfaces*, 13, 4-13.
- Benjamin, J. (1989), An analysis of inventory and transportation costs in a constrained network, *Transportation Science*, 23, 177-183.
- Blanco, E. E., Clarke, L. W. and Griffin, P. M. (1998), The impact of coordinated production and distribution in supply chain management, *working paper, industrial engineering department, Universidad de los Andes, Bogota, Colombia*.
- Chien, T. W., Balakrishnan, A. and Wong, R. T. (1989), An integrated inventory allocation and vehicle routing problem, *Transportation Science*, 23, 67-76.
- Cohen, M. A. and Ernst, R. (1993), Dealer Inventory management systems, *IIE Transactions*, 25(5), 36-49.
- Cohen, M. A. and Lee, H. L. (1988), Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods, *Operations Research*, 36, 216-228.
- Crowston, W. B., Wagner, M. H. and Williams, J. (1973), Economic lot size determination in multistage assembly systems, *Management Science*, 19, 517-526.
- Erenguc, S. S., Simpson, N. C. and Vakharia, A. J. (1999), Integrated production / distribution planning in supply chains: An invited review, *European journal of operational Research*, 115, 229-236.
- Federgruen, A. and Zipkin, P. (1984), A combined vehicle routing and inventory allocation problem, *Operations Research*, 32, 1019-1037.
- Fumero, F. and Vercellis, C. (1999), Synchronized development of production, inventory, and distribution schedules, *Transportation Science*, 33(3), 330-340.
- Kalymon, B. (1972), A decomposition Algorithm for arborescence inventory systems, *Operations Research*, 20, 860-873.
- Lee, C. Y. (1993), A cross decomposition algorithm for a multifacility-multitype facility location problem, *Computers and Operations Research*, 36(1), 92-114.
- Lu, -L. and Posner, M. E. (1994), Approximation procedures for the one-warehouse multiretailer system, *Management Science*, 40(10), 1304-1316.
- Maxwell, W. L. and Muckstadt, J. A. (1985), Establishing consistent and realistic reorder intervals in production-distribution systems, *Operations Research*, 33, 1316-1344.
- Mazzola, J. and Neebe, A. (1998), Lagrangian relaxation based solution procedures for a multiproduct capacitated facility location problem with choice of facility type, *Working paper, Fuqua school of business, Duke University*.
- McGavin, E. J., Schwarz, L. B. and Ward, J. E. (1993), Two interval inventory allocation policies in a one-warehouse N identical retailer distribution system, *Management Science*, 39(9), 1092-1107.
- Sharp, J. F., Snyder, J. C. and Greene, J. H. (1970), A decomposition algorithm for solving the multifacility production-transportation with nonlinear production costs, *Econometrica*, 38, 490-506.
- Weng, Z. K. (1997), Pricing and ordering strategies in manufacturing and distribution alliances, *IIE Transaction*, 29, 681-692.



최경현

서강대학교 수학과 학사

서강대학교 수학과 석사

Virginia Tech. IOR 석사

Virginia Tech. ISE 박사

현재: 한양대학교 산업공학과 조교수

관심분야: 최적화 이론 및 응용, 경영전략/정보전략 수립, ERP, SCM, CRM 등



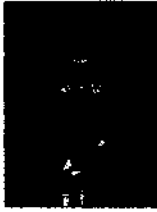
이현지

한양대학교 산업공학과 학사

현재: 한양대학교 산업공학과 석사과정

관심분야: 최적화 알고리즘 개발, 물류관리,

SCM 등



곽 호 만

한양대학교 산업공학과 학사

한양대학교 산업공학과 석사

현재: 한양대학교 산업공학과 박사과정

관심분야: 대규모 최적화 알고리즘 개발, 통신
네트워크 설계, SCM 등