

생산원가를 이용한 물류 네트워크 구성에 관한 연구

A study on logistic network using production cost

변태상, 한주윤, 정봉주

연세대학교 산업시스템공학과

bts76@msa.yonsei.ac.kr

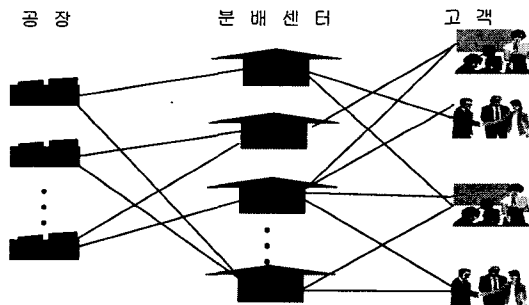
Abstract

본 연구의 목적은 물류 네트워크의 구성을 원가 관점으로 최적화하는 것이다. 원가 관점에서 최적 물류 네트워크를 구성하기 위해서 제시한 모델링은 다음과 같이 구성되어있다. 먼저 각 공장의 생산 제품별 데이터를 기본으로 생산원가를 산출하고 혹은 가상(생산이 가능하지만 현재 생산하지 않은) 제품에 대해 생산원가를 추정한다. 둘째, 전 단계에서 산출한 생산원가 및 지역창고의 제품별 재고비, 거리에 따른 수송비용 등과 같은 물류 관련 비용 등을 이용하여 효과적인 수배송 양과 주어진 환경 하에서의 최적 네트워크 경로에 대한 모델링을 제시한다.

본 논문에서는 원가비용을 고려하여 생산단계에서 생산량을 구하고, 생산단계에서 구해진 생산량을 이용하여 네트워크 단계에서 최적의 경로를 결정하는 모델링을 제안하였다.

1. 서론

물류 네트워크는 물품 또는 서비스의 공급지점으로부터 수요 지점까지의 수송과 관련된 문제로, 물품 또는 서비스의 흐름 단계와 특성에 따라 다양한 형태로 나타난다. 물류 네트워크의 운영은



<그림 1> 일반적인 물류 네트워크 구조

조달, 생산, 수송, 저장, 판매, 재무, A/S 등 기업의 여러 기능과 관계를 가지면서 비용과 고객 서비스에 영향을 미친다. 물류 네트워크의 설계 및 계획에 있어서 분배센터의 수 및 위치, 고객 및 제품할당, 수송수단, 차량경로, 공급자, 재고 정책, 고객

서비스 수준 등을 결정하는 다양한 의사 결정문제를 포함한 많은 확률적 요소가 존재하고 관련 비용들 사이에 복잡한 트레이드 오프(trade-off) 분석과 여러 비계량적 요소들의 평가를 필요로 하기 때문에 통합적 차원에서 최적의 해를 구하기가 매우 어렵다.

일반적으로 물류 네트워크가 <그림 1>과 같다고 할 때, 공장에서 생산할 최적 생산량과 재고수준, 분배센터에서의 분배량과 재고수준 및 물류 비용 등을 고려하여 효율적인 네트워크를 구축을 위해 생산단계의 최적화, 분배센터의 최적화, 통합적인 최적화에 관한 연구들이 진행되었다.

본 논문에서는 원가비용을 고려하여 생산단계에서 생산량을 구하고, 생산단계에서 구해진 생산량을 이용하여 네트워크 단계에서 최적의 경로를 결정하는 모델링을 제안하였다.

2. 관련연구 현황

생산량에 영향을 주는 변수들을 고려한 생산단계에서의 최적 생산량 결정, 분배센터의 위치선정 및 할당량의 최적화, 물류비용을 고려한 네트워크 구축 등과 같은 관점으로 많은 연구가 진행되었다.

물류 네트워크를 구축하기 위한 각 단계별 모델링을 제시한 연구는 Erenguc, Simpson 와 vakharia[3]의 연구가 있다. Erenguc, Simpson 와 vakharia[3]은 공급사슬의 구조를 수학적 분류를 통하여 공급자, 공장, 분배센터, 고객 등으로 나누었다. 각 계층에 대해 정수 계획법을 이용한 수학적 모델로 표현하였으며, 각 단계는 독립적으로 최적해를 구하는 방식으로 물류 네트워크를 구성하고 있다. 독립적으로 각 단계의 최적해를 구하기 때문에 복잡성의 감소, 계산의 용이성 등의 장점이 있지만, 각 단계의 상호관계를 고려하지 않아 생기는 오차에 대한 단점을 갖고 있으며, 통합적인 모델에 관한 향후 연구를 지적하고 있다.

최경현, 이현지와 곽호만[5]은 Erenguc, Simpson와 vakharia[3]이 제시한 생산단계, 분배단계, 재고단계에 대한 독립적인 모델에 대해 통합된 공급사슬 관리모델을 제안하였다.

물류네트워크를 결정하는 변수 중에서 수송문제에 관점을 둔 논문으로 Bertazzi와 Speranza[1]이 제시한 모델은 EOQ 모델을 기반으로 운송의 발생 빈도에 의해 발생하는 운송비용과 다품종 제품에 대한 재고비용의 최소화를 다루는 모델을 제시하였다. 이 모델의 검증을 위해 몇가지 발견적

알고리즘 기법을 제안하였다.

본 논문에서 제시한 물류 네트워크는 기본적으로 생산량과 분배센터의 위치 및 운송비 등을 고려하여 모델링되었다. 분배 센터에 관한 모델링은 Erenguc, Simpson 와 vakharia[3]의 분배 단계에 대한 모델링을 기본으로 작성하였으나, 통합적인 네트워크의 구축을 위하여 생산단계에서 결정되는 의사 결정문제를 통합 네트워크의 모델링에 포함시켰다. 또한 물류비에 대한 내용을 첨가하여 통합된 모델링에서 물류 네트워크의 구조에 대한 많은 부분을 보완하였다.

3. 수리 모델

본 논문에서 제안한 모델링에 대한 가정은 다음과 같다. 여러 제품을 생산하는 복수 공장과 복수의 분배센터가 존재하며 각 지점간의 운송비는 상이하다. 제조 원가는 직접비(노무비, 공정비, 재료비)와 간접비로 이루어져 있으며, 개별 생산라인에 따라 생산되는 제품은 정해져 있다. 각 공장은 이미 설치된 생산라인에 따라 제품을 생산하며 생산라인에서 생산이 가능한 제품이라 하여도 현실적인 상황에 의하여 생산되지 않는 제품도 존재한다. 이러한 가정을 통하여 생산량이 증가하면 원가가 감소한다는 기본적인 가정이 있으며 생산량의 증가에 따른 원가의 감소는 학습 곡선 이론을 따른다고 가정하였다.

이러한 방식으로 생산에 관련된 비용을 고려하여 최적 생산량을 결정하게 된다. 즉 생산원가 추정 단계에서는 학습 곡선 이론을 이용하여 생산설비는 갖추고 있지만, 실제로 생산하지 않는 제품에 대한 생산비용을 추정한다. 학습 곡선 이론을 이용해 구해진 생산량을 이용하여 각 분배센터로 보내질 수송량을 결정하고 결정된 수송량을 이용하여 각 분배센터에서 고객에게 보내질 분배량을 결정한다.

다음 절에서는 네트워크 문제를 위한 일반적인 모델링과 이 모델의 문제점을 보완한 제안된 모델에 대하여 설명하였다.

3.1 네트워크 모델

3.1.1 일반적인 네트워크 모델

먼저 Erenguc, Simpson 와 vakharia[3]이 제시한 네트워크 모델링을 살펴보면 다음과 같다. 이 모델은 대부분의 네트워크 문제에서 일반적으로 쓰여지는 모델로써 약간의 추가와 변형을 통하여 많은 문제에 적용되고 있다.

- p : 제품
- j : 공장
- k : 분배센터
- l : 고객
- C_{pjkl} : 공장과 분배센터의 운송비용
- x_{pjkl} : 공장과 분배센터의 운송비용
- f_k : 분배센터의 고정 비용
- v_k : 운송량에 따른 변동비
- d_{pl} : 고객의 수요
- z_k : 이진변수(분배센터의 설립 여부)
- y_{kl} : 이진변수(고객에게 제품 배송의 여부)

$$\min Z = \sum_{p,j,k,l} C_{pjkl} x_{pjkl} + \sum_k [f_k z_k + v_k \sum_{p,l} d_{pl} y_{pl}] \quad [1]$$

식[1]은 공장에서 분배센터를 거쳐 고객까지 제품을 운송하는데 사용되는 운송비용과 분배센터의 고정비용을 최소화하는 목적함수이다.

$$\sum_{k,l} x_{pjkl} \leq s_{pj} \quad \forall p, j \quad [2]$$

$$\sum_{k,l} x_{pjkl} = d_{pl} y_{pl} \quad \forall p, k, l \quad [3]$$

$$\sum_k y_{kl} = 1 \quad \forall l \quad [4]$$

$$v_k z_k \leq \sum_{p,l} d_{pl} y_{pl} \leq v_k z_k \quad \forall k \quad [5]$$

$$z_k, y_{kl} \in \{0, 1\} \quad \forall k, l \quad [6]$$

$$x_{pjkl} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \quad [7]$$

식[2]는 공장에서 분배센터를 거쳐 고객에게 보내지는 제품의 양은 각 공장의 가용량을 넘지 않는다는 제약식이다. 식[3]은 고객에게 보내지는 제품의 총량은 수요로 모두 충족된다는 제약식이다. 식[4]는 독점정책으로 고객은 한 분배센터에 의해 제품을 받을 수 있음을 나타낸다. 식[5]는 분배센터의 제품에 대한 상한과 하한값을 정해놓고 수요가 그 사이에 존재한다는 것을 나타내는 제약식이다. 식[6]은 분배센터의 설립여부, 고객에게 제품을 제공 여부를 나타내는 이진변수이다. 식[7]은 운송되는 제품의 양은 0보다 크다는 것을 나타내는 제약식이다.

위의 모델은 네트워크를 구축하는데 있어, 공장에서 분배센터로, 분배센터에서 고객으로 제품을 수송하는데 사용되는 운송비용과 분배센터를 설립하는데 드는 고정비용을 이용하여 문제를 모델링하였다. 그러나 위의 모델링은 공장에 대한 생산량에 대한 제약이 없어 전체 비용이 최소화 된다면 특정 공장에서 제품을 전혀 생산하지 않을 수도 있다는 문제점을 지니고 있다. 즉, 운송비용과 고정비용을 최소로 하는 네트워크 문제를 풀었을 때, 공장에서 생산하는 제품의 양이 각 100개씩 생산을 하는 것이 최적이라고 하자. 운송비용을 이용해 네트워크를 구축하였기 때문에 어떤 공장에서 200개를 만들고 다른 한 공장은 제품을 생산하지 않는 경우에도 총 생산량에는 변화가 없기 때문에 물류 네트워크가 구축될 수 있다. 이런 경우 공장별로 한계치를 정하지 않는다면 생산을 하지 않는 공장이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 공장을 운영하기 위해 필요한 최소 생산량에 대한 제약식이 추가될 필요가 있다. 또한 본 모델에서의 생산 단계에서는 생산량의 증가에 따른 원가의 감소를 이용하여 생산량을 결정하기 때문에 최소 생산량에 대한 제약은 꼭 필요한 요소이다.

제안된 네트워크 모델링에서는 이런 문제점과 생산량에 따른 생산원가 절감효과를 고려한 모델링을 제시한다.

3.1.2 제안 네트워크 모델

제안된 네트워크 모델은 생산은 가능하지만 생산하지 않는 제품에 대한 수요가 발생하였을 때,

다른 공장에서 동일한 제품을 생산하는데 사용되는 제품의 생산원가에 대한 비율을 이용하여 새로운 수요에 대한 제품의 생산원가를 추정하는 모델을 제시한다.

우선 생산원가를 계산하기 위해 다음과 같은 몇 가지를 가정한다. 제품 형태는 한 라인에서 기계와 설비의 변경이 없다는 전제 하에 생산이 가능한 다품종 제품을 생산한다. 수요는 일정량이 정해져 있다고 가정한다. 생산량과 가격에 대한 관계는 비용/시간 관계 모델을 따른다고 가정한다.

제시한 생산량 추정모델은 학습 곡선의 학습률을 이용한다.

$$S = \frac{\ln L}{\ln 2} \quad [7]$$

$$C_j = K_j Q_j^{S_j} \quad [8]$$

S : 각 학습률을 나타내는 지수

L : 학습률

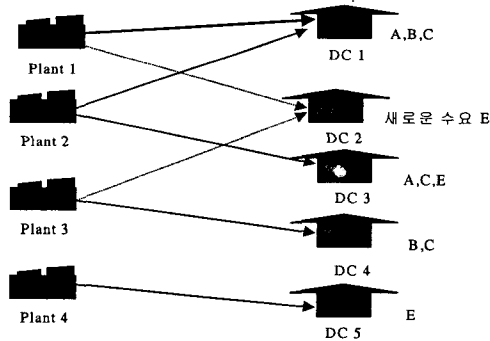
K_j : j 번째 공장에서의 제품 첫 단위 생산시 인건비용

Q_j : j 번째 공장에서의 생산량

C_j : j 번째 공장에서의 인건비용

S_j : j 번째 공장에서의 학습효과 지수

식[7]은 학습 지수를 구하는 공식이며, 식[8]은 식[7]에서 구해진 학습지수를 이용하여 생산량에 따른 생산비용의 절감효과를 고려한 생산원가를 구하는 식이다.



<그림 2 생산단계 네트워크의 예 >

예를 들어, <그림 2>에서 보는 것과 같이 생산은 가능하지만 생산하지 않는 공장(공장1)에 대해 수요가 발생하여 제품(제품E)을 생산한다고 가정하였을 때, 공장2에서의 제품E에 대한 생산원가를 추정하게 된다. 추정하는 방식은 다음과 같다

$$S_p = S_q \frac{\sum_j S_{qj}}{\sum_j S_{pj}} \quad [9]$$

S_p : 특정 공장에서의 제품p의 생산원가

S_q : 특정 공장에서의 제품q의 생산원가

S_{pj} : j번째 공장에서의 제품p의 생산원가

S_{qj} : j번째 공장에서의 제품q의 생산원가

$$\sum_{p,j,k} Q_{p,j,k} (a_p Q_{pj} - K_{pj} M_{pj}^n + a_p M_{pj}) \quad [10]$$

식[10]은 식[9]에서 구해진 각 공장별 학습효과를 이용해 생산량에 따른 생산원가를 구하는 식이다. 네트워크 모델에서는 위의 식과 함께 분배센터의 위치선정 문제 및 할당문제를 동시에 고려한다. 또한 일반적인 모델링에서 고려하지 않았던 공장에서의 최소 생산량의 제약을 둔다.

3.2 통합 네트워크 모델

위에서 일반적 네트워크 모델로 제시되었던 Enguc, Simpson 와 vakharia[3]의 네트워크 문제는 운송비용과 분배센터를 설립할 때 소요되는 고정비용의 총합이 최소가 되는 것이다. 우선, 분배센터에서 중요한 문제는 분배량과 분배센터의 위치를 선정하는 문제이다.

이 문제를 해결하기 위해 첫째로, 분배량에 대한 문제를 일반적인 수송문제로 풀고, 둘째로, 위치 선정을 배낭 문제로 푸는 접근방법과 이 문제를 동시에 고려하는 접근방법이 있다. 또한 운송비용과 분배센터의 고정비용과 변동비용을 고려하지 않고 분배센터와 고객의 측면에서 주문비용과 재고비용만을 고려한 네트워크 구성 모델링이 있다.

본 논문에서는 위치 선정과 분배량을 동시에 결정하는 접근방법에 학습 지수와 공장과 분배센터간, 분배센터와 고객간의 운송량에 대한 변수를 분리하여 추가하였다. 우선 모델링을 위해 몇 가지 가정을 세우면 다음과 같다. 생산량이 수요로 모두 충당되며, 운송비는 운송량에 비례해 선형으로 증가한다고 가정한다.

네트워크 구성을 위해 분배센터의 고정비용과 고객에의 수요에 대한 변동비용과 운송비용을 고려한 모델에 몇 가지 변수를 추가했다. 운송비 부분에 대해 공장에서 분배센터간 운송비와 분배센터에서 고객간 운송비를 고려했다.

p : 제품

j : 공장

k : 분배센터

l : 고객

C_{pjk} : 공장과 분배센터의 운송비용

Q_{pjk} : 공장과 분배센터의 운송량

C_{pkl} : 분배센터와 고객의 운송비용

Q_{pkl} : 분배센터와 고객의 운송량

f_k : 분배센터의 고정 비용

Z_k : 이진변수(분배센터의 설립 여부)

X_{pj} : 이진변수(생산 여부)

$$\min \sum_{p,j,k} Q_{pjk} (a_p Q_{pj} - K_{pj} M_{pj}^n + a_p M_{pj}) X_{pj} + \sum_{p,j,k} C_{pjk} Q_{pjk} + \sum_{p,k,l} C_{pkl} Q_{pkl} + \sum_k f_k Z_k \quad [11]$$

식[11]은 공장측면에서의 생산원가와 공장에서 분배센터를 거쳐 고객까지 운반되는 운송량에 따른 운송비용 및 분배센터를 설립하는데 소요되는 고정비용의 총합을 최소화하는 식이다. 이 식에서 생산원가를 산출하는 부분에서는 학습 곡선이론을 바탕

으로 생산량에 따른 생산원가 절감효과를 감안하였다.

$$\sum_{pj} Q_{pj} = D_{pk} \quad \forall j, k \quad [12]$$

$$Q_{pj} = \sum_k D_{pk} \quad \forall j, k \quad [13]$$

$$\sum_k Q_{pj} = \sum_t q_{pkt} \quad \forall p, k, t \quad [14]$$

$$\sum_{k,t} Q_{pj} \leq M_{pj} \quad \forall p, j \quad [15]$$

$$Z_k \in 0, 1 \quad \forall k \quad [16]$$

$$D_{pk}, M_{pj}, Q_{pj}, q_{pkt} \geq 0 \quad \forall p, j, k, t \quad [17]$$

식[12]는 공장에서 만들어진 제품의 총량은 분배센터의 입고량(수요)과 같다는 것을 나타낸다. 식[13]은 공장j의 p제품의 양은 분배센터들로 들어가는 제품p의 총량과 같다는 것을 나타낸다. 식[14]는 분배센터로 들어온 제품의 양은 공장의 용량을 넘을 수 없다는 것을 나타낸다. 식[15]는 입고량과 출고량이 같다는 제약식이다. 식[16]은 분배센터별 설립유무를 나타내는 이진변수이다. 식[17]은 수요와 총용량과 입고량, 출고량은 0보다 크다는 것을 나타내는 제약식이다.

주어진 제약식에 공장측면에서의 생산량의 상한과 하한치의 제약식[18]을 추가되었고, 분배센터로 들어오는 제품의 입고량에 대해서도 상한치와 하한치에 대한 제약식[19]을 추가하였다.

$$\underline{V}_j X_{pj} \leq Q_{pj} X_{pj} \leq \overline{V}_j X_{pj} \quad [18]$$

$$\underline{W}_k Z_k \leq D_k \leq \overline{W}_k Z_k \quad [19]$$

이런 한계치를 주는 이유는 일반적인 모델링 부분에서 언급했던 것처럼 운송비에 따른 네트워크를 구축하기 때문에 생산을 하지 않는 공장이 발생할 수 있다. 이런 경우에도 네트워크는 구축되지만 각 공장별로 운영이 가능한 최소의 제품 생산량은 생산해야하기 때문에 식[18]과 같은 제약식을 추가 하였다. 또한 분배센터의 경우에도 설립된 분배센터의 입고량이 적절량, 즉 분배센터를 운영하는데 필요한 최소량을 분배받지 않으면 안되기 때문에 식[19]와 같은 입고량 한계치 제약식을 추가 하였다.

일반적으로 공장과 분배센터의 네트워크를 구축할 때, 생산고정비용과 운송비용 등을 고려한다. 이런 모델링의 경우 생산원가가 고정되어 있기 때문에 현실적이지 못한 면이 있다. 본 논문에서 제시한 모델링은 현실적으로 생산량이 증가함에 따라 생산원가가 절감되는 학습 곡선이론을 이용하여 생산량을 구하였으며, 운송비용을 고려하여 네트워크를 구축하게 됨으로써 발생할 수 있는 유향 공장에 대해서 최소생산량에 대한 제약식을 추가하였다. 이것은 공장의 운영에 필요한 최소 생산량은 생산되어야 하기 때문이다. 분배센터의 경우에도 설립 공장의 경우와 유사하게 상한치와 하한치를 주워 분배센터를 운영할 수 있는 최소 입고량에 대한 제약식을 추가하였다.

4. 결론 및 향후 연구방향

지금까지 제안한 모델은 생산원가를 고려하여 생산량과 물류네트워크를 구성하는 것을 목적으로 하였다. 생산량은 학습 곡선 이론을 이용하여 결정하였고 이러한 방식으로 결정된 생산량을 이용하여 전체 물류 네트워크의 구성에 대한 모델링을 하였다. 또한 네트워크를 구성하는데 있어 공장, 분배센터의 한계치에 대한 제약식을 추가하였다.

일반적인 네트워크 모델에 대한 해법의 알고리즘에 대한 연구로 Fumero와 Vercellis[5]가 라그랑지안 릴랙세이션(Lagrangian Relaxation)을 제시하였으며, 물류문제에 있어 복잡한 형태들은 발견적 기법의 방법으로 분해(Decomposition) 기법을 제시하였다. 따라서 향후 연구방향으로는 제안한 모델의 검증에 대해 위에서 제시한 기법들 및 발견적 기법을 통한 문제 해결에 대한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 수요가 정해졌다는 가정하에서 물류 네트워크의 모델을 제안했지만, 수요가 불규칙적으로 변할 때의 생산량을 결정하는 모델에 대한 연구가 후행되어야 하며, 제시한 모델에 대해 재고에 대한 변수, 운송의 빈도에 대한 변수 등 네트워크 구성에 영향을 주는 변수들을 추가하여 발전된 모델의 연구가 진행되어야 할 것이다.

5. 참고 문헌

- [1] Bertazzi, L., Speranza, M.G., "Inventory control on sequences of links with given transportation frequencies", *International Journal of Production Economics*, Vol 59, pp 261~270, 1999.
- [2] Erenguc, S.S., Simpson, N.C. and Vakharia, A.J., "Integrated production/distribution planning in supply chain : An invited review", *European Journal of Operation Research*, Vol 115, pp 219~236, 1999.
- [3] Geoffrion, A.M., Graves, G.W., "Multicommodity distribution system design by Bender's decomposition", *Management Science*, Vol 20, No 5, pp 822~844, 1999.
- [4] Fumero, F., Vercellis, C., "Synchronized development of production, inventory, distribution schedules", *Transportation Science*, Vol 33, No 3, pp 330~340, 1999.
- [5] 최경현, 이현지, 곽호만, "통합공급사슬 최적화 모델에 관한 연구", *IE Interface*, Vol 13, No 3, pp 320~327, Sep 2000.