

제품 특성과 수요를 고려한 최적생산에 관한 연구

지요한 · 정석재 · 임석진 · 김경섭

A study on optimization production with consideration of a product characteristics and demand

Yo-Han Ji, Suk-Jae Jeong, Seokjin Lim, Kyung Sup Kim

요 약

과거 공급사슬(SCM)에 관한 연구는 재고관리, 생산계획, 물류흐름의 최적화에 대하여 개별적으로 연구가 이루어졌다. 하지만 최근의 연구는 이러한 분야들을 통합하여 관리하는 것이 더 효과적이라는 연구결과가 발표되고 있으며 특히 생산비와 물류비를 동시에 최소화하는 방안의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구는 수송시간과 재고에 대하여 제약을 가지는 공급망에서 최적의 생산을 결정하는 연구를 수행하며, 개발한 수학적 모형을 이용하여 예제를 통해 모델에 대한 최적값을 제시하였다.

1. 서론

기업환경의 글로벌화, 고객수요의 다품종 소량화, 제품의 수/배송 시간 단축 등과 같은 이슈들이 기업의 최대 관심사로 떠오름에 따라 공급사슬관리(SCM : Supply Chain Management)에 대한 관심이 갈수록 증대되고 있다.

과거에는 공급사슬에서 발생하는 외적인 불안요소를 제거하기 위해 재고나 버퍼의 개념을 도입한 경영방법이 사용되어 왔으며, 공급사슬을 대상으로 하는 연구도 공급사슬을 구성하고 있는 개별 객체에 초점을 맞추어 물류흐름의 최적화, 재고정책의 최적화, 생산계획의 최적화 등의 연구가 주류를 이루어 왔다. 하지만 최근 연구에서 공급사슬을 하나의 통합된 시스템으로 보고 분석하고 관리하는 것이, 과거 부분최적화 방법보다 효율적이라는 연구결과들이 발표되고 있으며, 이와 관련해서 공급사슬을 하나의 시스템으로 보고 원재료 구매에서부터 고객에게 이

르기까지의 모든 활동을 연속된 흐름 과정이라 여겨 이를 모델링하고 분석하는 것과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다.

Fumero and Vercellis(1999)는 개별모델과 통합모델을 제시, 비교하여 실험의 크기가 커질수록 통합모델이 더 좋은 결과를 보이는 것을 입증하였으며, Flipo and Finke (2001) 등은 multi-facility, multi-period, multi-product인 생산-분배문제를 네트워크 흐름 문제로 모델링하여 실험을 통해 그 타당성을 연구하였다.

본 연구는 원자재의 특성상 원거리에 위치한 supplier와 customer의 수요량에 의해 생산량이 결정되는 factory를 기본 모델로 삼았다. 또한 supplier는 원자재를 무한히 공급할 수 있으며 factory에서는 완제품재고를 보유할 수 없다는 조건과 customer로의 수송시간의 제약이 있다는 가정하에 해당 제품에 대한 supplier와 factory에서의 생산량을 결정하여 생산비용, 외주비용, 운송비용을 최소화 하기 위한 최적 생산모형과 예제를 통해서 그 최적값을 구하였다.

* 연세대학교 산업시스템공학과

2. 본론

2.1 연구대상

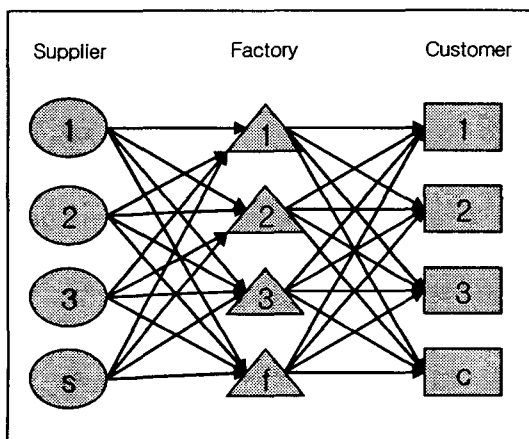
본 연구는 건설분야에서의 레미콘산업을 대상으로 하는 연구이다. 제품생산을 위한 원자재로는 시멘트, 골재, 혼화재, 물 등이 이용되며 각각의 원자재가 혼합비에 따라서 제품의 수가 결정되며, 이 원자재는 각기 다른 supplier를 통해서 무한히 공급을 받는다.

제품의 특성상 factory는 수요가 발생하는 도시를 거점으로 형성되며 supplier를 통해서 받은 원자재를 혼합하여 반제품의 형태로 customer로 운송이 되어 customer에서 경화 과정을 통해서 완제품이 된다.

[그림 1]은 본 연구대상의 공급사슬의 관계와 본 연구대상의 특징을 보여준다.

<연구대상의 특징>

1. Supplier의 원자재의 공급은 제약이 없으며 그러므로 재고가 존재하지 않는다.
2. 제품의 특성상 원자재의 투입은 일정한 혼합비를 가진다.



[그림 1] 연구대상의 개념도

3. Supplier에서의 원자재의 생산량과 factory에서의 생산량은 customer의 수요량에 의

해서 결정된다.

4. 제품이 경화되는 특성상 factory에서 customer까지의 수송시간의 제약이 있다.
5. Factory에서는 생산능력의 제약이 있으며 재고를 보유할 수 없다.
6. Customer의 수요량이 factory의 생산능력을 초과하면 그 부족량에 대하여 외주를 고용한다.

2.2 연구방법

본 연구는 대상시스템의 특징으로 인하여 원자재의 혼합비, 운송시간의 제약을 고려하여 각 단계에서의 생산량과 생산비, 운송량과 수요량, 그리고 생산용량을 넘는 경우는 근접지역에 외주를 두어 이에 대한 비용을 산출했으며, 이러한 비용들의 total cost를 구하는 최적생산을 결정하는 수학적 모형을 개발하였고, 엑셀 스프레드시트를 통해 모형에 대한 실험을 하였다.

2.3 수학적 모형

수학적 모형은 전체공급사슬을 supplier stage, factory stage, transport stage로 구분하여 비용분석을 하였다. 다음은 기본 notation과 각 stage별로 목적식과 제약식에 대하여 간단히 설명한다.

2.3.1 Notation

Index

- i : source
- p : product
- t : period
- s : supplier
- f : factory
- c : customer

Parameters

- S_s : supplier s 에서 고정비
- S_f : factory f 에서 고정비

- P_{is}^t : period t 에 supplier s 에서 source i 의 생산량
 CP_{is} : supplier s 에서 source i 의 단위당 생산비
 M_{is} : supplier s 에서 source의 배합비율
 T_{isf}^t : period t 에 supplier s 에서 factory f 로의 source i 의 운송량
 CT_{isf} : supplier s 에서 factory f 로의 source i 의 단위당 운송비
 T_{pfc}^t : period t 에 factory f 에서 customer c 로의 product p 의 운송량
 CT_{pfc} : factory f 에서 customer c 로의 product p 의 단위당 운송비
 O_{pf}^t : period t 에 factory f 에서 product p 의 외주량
 CO_{pf} : factory f 에서 product p 의 단위당 외주비
 K_f : factory f 의 생산능력
 D_{fc} : factory f 에서 customer c 로의 운송거리
 C : factory f 에서 customer c 까지 운반할 수 있는 최장거리
 d_{pc}^t : period t 에 customer c 의 product p 에 대한 수요
 X_f : factory f 에서 customer의 수요량이 운송량보다 크면 1, 아니면 0
 Y_{fc} : customer c 가 factory f 에서 공급을 받으면 1, 아니면 0
 Z : Y_{fc} 가 1인 값들의 집합
 W_{ip}^t : period t 에 product p 에 대한 source i 의 배합량

2.3.2 Supplier Stage

$$\text{Min } Z = \sum_s S_s + \sum_t \sum_s \sum_i CP_{is} P_{is}^t$$

$$\text{s.t } P_{is}^t = \sum_f T_{isf}^t \quad \forall i, \forall s, \forall t \quad \dots(1)$$

$$T_{pfc}^t, P_{is} \geq 0 \quad \forall i, \forall s, \forall f, \forall t \quad \dots(2)$$

Supplier stage에서의 목적함수는 원자재에 대한 생산비와 고정비의 합을 최소화하는 것이다. 제약식 (1)은 period t 에 supplier 에서의 생산량은 factory로의 운송량과 같아야 한다는 식이다. 제약식 (2)는 생산량과 운송량은 비음조건을 만족해야 한다는 것을 보여준다.

2.3.3 Factory Stage

$$\text{Min } Z = \sum_f S_f + \sum_f O_{pf}^t CO_{pf} X_f + \sum_f \sum_c T_{pfc}^t CT_{pfc} Y_{fc}$$

$$\text{s.t } \sum_p \sum_c T_{pfc}^t \leq K_f \quad \forall f, \forall t \quad \dots(3)$$

$$\sum_f T_{pfc}^t = d_{pc}^t + O_{pf}^t \quad \forall f, \forall c \quad \dots(4)$$

$$\sum_f M_{ip} = 1 \quad \forall i, \forall s \quad \dots(5)$$

$$\sum_f M_{ip} \times W_{ip}^t = T_{pfc}^t \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad \dots(6)$$

$$Y_{fc} \times D_{fc} \leq C \quad (Y_{fc} \in Z) \quad \dots(7)$$

$$X_f \in \{0, 1\} \quad \forall f \quad \dots(8)$$

$$Y_{fc} \in \{0, 1\} \quad \forall f, \forall c \quad \dots(9)$$

$$T_{pfc}^t, d_{pc}^t, O_{pf}^t, W_{ip}^t, K_f, D_{fc}, C \geq 0 \quad \forall f, \forall c, \forall t, \forall p \quad \dots(10)$$

Factory stage의 목적함수는 factory에서 생산과 관련된 고정비와 customer의 수요량이 운송량을 초과하는 경우의 외주비용과 factory에서 customer까지의 운송비의 합을 최소화 하는 것이다. 제약식 (3)은 factory에서 customer로의 운송량은 factory의 생산용량 이내에 있어야 한다는 식이다. 제약식 (4)는 만약 customer의 수요량이 factory에서 customer로의 운송량보다 클 경우 운송량은 외주량을 포함한다는 것을 의미한다. 제약식 (5)는 제품은 원자재의 배합비에 의해 만들어진다는 것을 의미하는 식이다. 제약식 (6)은 배합비에 의해 만들어진 제품이 customer로 가는 운송량과 같아야 한다는 식이다. 즉 supplier에서 생산된 원자재가 factory에

서 제품이 되어 최종적으로 customer로 가는 운송량과 같아야 한다는 것을 보여주는 것이다. 제약식 (7)은 factory에서 customer로의 운송거리가 최장운송거리안에 있어야 한다는 조건이다. 제약식 (8)은 이진변수로 factory에서 외주비용의 발생하는 조건에 관한 식이다. 제약식 (9)는 이진변수로 customer가 어떤 factory에서 제품을 할당 받았는지를 보여준다. 제약식 (10)은 운송량, 수요량, 외주량, 배합량, 생산능력, 운송거리, 운송최장거리가 비음조건을 만족해야 한다는 식이다.

2.3.4 Transport Stage

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_t \sum_i \sum_s \sum_f CT_{isf}^t T_{isf}^t \\ &+ \sum_t \sum_p \sum_f \sum_c CT_{pfc}^t T_{pfc}^t \\ \text{s.t } \sum_s T_{isf}^{t-1} - \sum_c T_{pfc}^t &= 0 \quad \forall f, \forall t \quad \dots(11) \\ T_{isf}^t, T_{pfc}^t &\geq 0 \\ \forall i, \forall p, \forall s, \forall f, \forall c, \forall t &\quad \dots(12) \end{aligned}$$

Transport stage의 목적함수는 supplier에서 factory로의 운송비와 factory에서 customer로의 운송비의 합을 최소화하는 것이다. 제약식 (11)은 period t-1에 supplier에서 factory로 들어온 양과 period t에서의 운송하는 양이 같아야 한다는 것이다. 즉 재고가 발생하지 않고 수요량을 만족시켜 준다는 것이다. 제약식 (12)는 supplier, factory, customer에서의 운송량은 비음조건을 만족해야 한다는 것을 보여준다.

이상의 각 stage에서 정의한 목적식과 제약식을 통합하여서 풀면 전체 공급사슬에서의 외주비용과 고정비용을 포함한 생산비용과 운송비를 최소화 할 수 있는 최적 생산 모형이 된다.

3. 수식을 적용한 결과 분석

본 연구의 초점은 관리운영이 가능한 특수한 통합모델의 개발에 있으며 다단계 공급체인에서

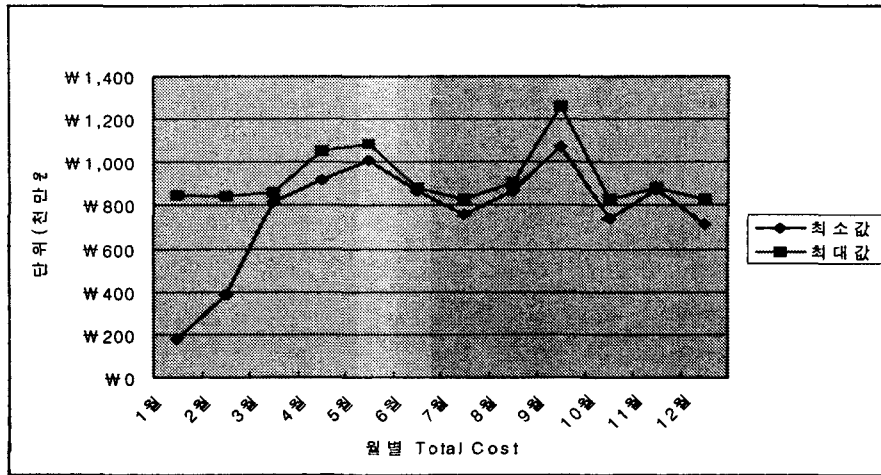
최적값을 구하기 위해서 4개의 supplier, 4개의 factory, 4개의 customer, 그리고 단일제품을 기본으로 수요량에 따라서 생산비, 운송비, 외주비가 어떻게 변하는지 살펴보았으며 모든 비용을 포함하는 최적 total cost를 구하였다. 모델의 예제에서의 최적값은 엑셀 스프레드시트의 해찾기 기능을 이용하였으며 실측치인 월별수요량을 제외한 모든 변수값들은 임의로 설정하였다. 다음은 주요 변수값들을 정리한 것이다.

- Supplier
 - 고정비용: 30,000,000원/개
 - 시멘트 생산비용: 300원/ton
 - 골재 생산비용: 130원/ton
 - 혼화재 생산비용: 600원/ton
 - 물 생산비용: 50원/ton
 - 운송비용: 100원/km
 - 혼합비율: 시멘트:골재:혼화재:물 = 0.24: 0.59: 0.05: 0.12
- Factory
 - 고정비용: 10,000,000원/개
 - 생산비: 8,000~12,000원/ton
 - 외주비: 3,000원/ton
 - 거리제약: 120km/1.5hr
 - 생산능력: 약 67,000ton/개
- Customer
 - 수요량: 281,837ton/3

[표 1] 수식 적용 최적값

외주비용	47,223,000원
Supplier 생산비용	52,055,294원
Factory 생산비용	2,011,460,994원
S→F 운송비용	3,792,129,524원
F→C 운송비용	2,178,146,244원
Supplier 고정비용	76,000,000원
Factory 고정비용	31,000,000원
Total Cost	8,188,015,055원

[표 1]은 3월의 수요량에 따른 최적생산비를 보여주고 있는데 각 단계에서의 생산비와 외주



[그림 2] 월별생산비에 따른 최소값과 최대값의 변화

비용, 운송비 그리고 고정비용이 total cost를 이루고 있으므로 제시한 통합모델이 유효함을 알 수 있다.

[그림 2]는 1년동안의 수요량을 최소값과 최대값으로 구분하였는데 이는 기업의 입장에서 월별 수요량에 따른 total cost의 흐름을 알 수 있는 지표가 될 수 있다. [그림 2]에서 보듯이 total cost가 대체로 겨울과 여름보다는 봄, 가을에 급격히 증가함을 알 수 있는데 이는 이기간에 모델의 특성상 가장 수요가 많아 지므로 이 기간에는 생산능력을 초과하는 수요가 발생하여 외주비용으로 인한 total cost를 증가시키는 요인이 된다. 또한 이기간에는 최대값과 최소값의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이기간에는 factory에서 customer로의 운송이 다른 기간보다 더 많이 나타나기 때문인데 이는 수요량이 생산용량을 초과하므로 가용할 수 있는 운송자원을 모두 사용했기 때문이다. 본 연구에서는 단일제품과 단일기간만을 모델에 적용한 결과값을 보여주었기 때문에 향후 multi-product 와 multi-period 대한 수식의 적용을 통한 분석이 뒤따라야 할 것으로 보인다.

서 일정한 혼합비를 통해서 생산이 되며 factory를 거쳐서 최종적으로 customer로 가기까지 생산용량의 제약과 운송시간의 제약과 같은 제한 조건이 있는 경우에서의 통합공급사슬의 최적생산비의 결정에 관한 연구이다. 개발한 수식에서 보듯이 supplier에서의 생산비의 최소화, factory에서의 생산비와 외주비용의 최소화 그리고 transport에서의 운송비의 최소화를 간단한 예제를 통해서 그 수식의 타당함을 알 수 있었다.

본 연구에서 적용한 예제에서는 단일 제품과 단일기간만을 고려하였는데 향후 연구에서는 multi-product 와 multi-period 로의 확장을 통해 좀 더 현실에 근접한 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 본 연구에서 쓰인 수요량은 실제 data를 바탕으로 하였지만 향후연구에서는 확실적인 수요량을 가진 실험을 통해서 실제 기업에서 경쟁력 향상에 유용하게 쓰일 수 있는 연구가 뒤따라야 한다고 본다. 마지막으로 향후 연구에서는 제품의 입장에서 비용을 최소화 할 수 있는 것 뿐만 아니라 transport의 변수에 따른 최적값을 얻을 수 있는 알고리즘의 개발이 뒤따라야 한다고 생각한다.

4. 결론 및 향후 연구방향

참고문헌

본 연구에서는 다품종의 원자재가 supplier에

1) Flipo, C-D., Finke, G.(2001), An integrated

- model for an industrial production-distribution problem, *IIE Transactions*, 33, 705-715.
- 2) Fumero, F. and Vercellis, C.(1999), Synchronized development of production, inventory and distribution schedules, *Transportation Science*, 33, 330-340.
- 3) Chandra, P. and Fisher, M.(1994), Coordination of production and distribution planning, *European Journal of Operational Research*, 72, 503-517.
- 4) Thomas, Griffin.(1996), Coordinated Supply Chain Management, *European Journal of Operational Research* 94, 1-15.
- 5) 최경현, 이현지, 곽호만.(2000), 통합 공급사슬 최적화 모델에 관한 연구, *IE Interfaces*, 113, 320-327
- 6) 서석주, 김경섭.(2000), 공급사슬경영과 시뮬레이션, *IE Interfaces*, 113, 328-338