

불확실한 수요를 고려한 공급사슬의 공장생산용량 결정에 관한 연구

지요한*, 임석진**, 김경섭***

A Study on Determination of Factory Production Capacity in the Supply Chain Considering Uncertain Demand

Yo Han Ji, Seok Jin Lim, Kyung Sup Kim

Abstract

This paper suggests the long-term strategy of the production distribution planning considering the capacity of factory production and the uncertain demand in a supply chain. This paper determines the near optimal capacity of factory production by using the advantages of mathematical and simulation models. Also, the relationship between the capacity from the suggested model and the strategy of production and distribution in a supply chain is studied. Arena is used for modeling and analysis.

Key Words: Supply Chain, Uncertain Demand, Factory Production Capacity, Simulation

* 연세대학교 컴퓨터·산업시스템공학과 석사

** 연세대학교 컴퓨터·산업시스템공학과 박사과정

*** 연세대학교 컴퓨터·산업시스템공학과 교수

1. 서론

1.1 연구배경

기업환경의 글로벌화, 고객 수요의 다품종 소량화, 제품의 수배/송 시간 단축 등과 같은 이슈들이 기업의 최대 관심사로 떠오름에 따라 공급사슬관리(SCM: Supply Chain Management)에 대한 관심이 갈수록 증대되고 있으며, 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 이르기까지의 모든 활동을 연속된 흐름 과정이라 여겨 이를 모델링하고 분석하는 것과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구에는 수리적 접근 방법과 시물레이션을 이용한 방법이 사용되고 있는데 공급사슬은 불확실성을 포함한 복잡한 시스템이다. 그러므로 공급사슬은 수리적 접근방법을 사용하기에는 한계가 있다. 따라서 최근 들어 공급사슬을 시물레이션을 사용해 모델링하고 분석하는 것에 대한 관심이 증가하고 있으며 공급사슬을 시물레이션과 수리적 모델의 Hybrid Analytic-Simulation Approach를 통해서 생산분배계획을 다루는 연구들까지 주요 관심의 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존의 수리적 접근방법과 시물레이션의 방법론을 기본으로 건설분야에서의 레미콘산업에 대한 통합공급사슬의 생산분배를 연구하였다. 특히 개발한 수리적 모델은 기존 연구에서는 고려치 못한 현실적인 운영전략인 외주에 관해서 접근하였으며 통합공급사슬에 대한 목적함수와 모든 제약조건을 표현한 수리적

모델은 효과적인 비용분석을 위해 전체 공급사슬을 공급자 단계, 공장 단계, 운송 단계로 구분하였다. 또한 계절적이며 불확실한 수요 즉, 확률적인 수요를 고려한 시물레이션은 C++기반의 범용 언어인 Arena를 사용하였다. 그러나 시물레이션 만으로는 확률적인 수요를 만족하는 공장의 생산용량을 결정할 수 없다. 그러므로 이에 대안으로, 실제 공급사슬내에서 변화하는 환경을 묘사하지 못하는 단점이 있지만 최적값을 제시할 수 있는 장점이 있는 수리적 모델의 실험을 통해서 얻어진 초기 공장생산용량을 시물레이션 모델에 투입하는 해법을 통해 불확실한 수요를 만족하는 공장의 생산용량을 결정하였으며 최소의 총비용을 가지는 통합공급사슬의 생산분배를 연구하였다.

1.2 기존 연구 고찰

1.2.1 생산분배계획

공급사슬의 주요 프로세스로는 생산 계획과 분배의 통제 그리고 물류에 관한 것이다. 생산계획과 통제는 재고관리, 스케줄링, Material Handling 과 같은 전체 제조과정의 관리와 설계의 과정이다. 분배 관리는 어떤 제품을 얼마만큼 공장 또는 물류업체로부터 소비자에게 운송할지를 결정하는 과정이다.

먼저 기존 연구들에서 생산분배에 관한 연구로는 [12]에서 Combined Assembly-arborescence Network를 이용하여 기간에 대한 평균재고유지비용과 평균고정비용의 합을 최소화하기 위해 Batch Size를 결정하는 Heuristic 알고리즘을 개발하였다. 또한 [3]에서는 단순화된 제조시스템에서의 유지비용, 생산비용, 운송비용의 최소화를 연구하였으며 [8]의 연구에서는 화학 공장을 대상으로 Multi Time Period, Multiple Commodity에 기초한 수리적 모델을 이용한 최적화문제를 다루었다. [5]에서는 다단계 생산과 분배 시스템에서의 확률적 수요에 관한 모델을 연구하였다.

다음으로 [14]에서는 대규모 농업의 생산과 분배에서 생산 공장에 제품을 할당하는 Heuristic 모델을 연구하였으며 [4]에서는 Single Productio

n Facility와 Multi-Product에서의 고정비용, 재고비용, 운송비용을 최소화하기 위한 생산 스케줄링과 Vehicle Routing 문제를 연구하였다.

1.2.2 시뮬레이션

기존 연구들 중에서 공급사슬관리를 시뮬레이션 기법을 통해서 연구한 것들은 그리 많지 않다. [11]에서는 고객과 공장 사이에 있는 분배센터(D/C)의 다양한 역할(Holding, Material Handling etc)에 관해서 시뮬레이션을 사용하여 모델링하였다. [6]의 연구는 불확실한 환경에서의 시뮬레이션을 수행하기 위하여 SCSIM을 사용하여 공급사슬을 분석하였다. 실험은 원자재 재고, 최종제품 재고, 가공중인 제품의 재고 그리고 이들 사이의 생산설비등을 연구하였다. [7]의 연구는 Catering Supply Chain의 특수한 상황에서 모든 제품을 Performance Indicator의 범주로 분류하여 시나리오에 따라서 시뮬레이션을 사용하여 모델링하였으며 시나리오에 따른 비용의 변화를 연구하였다.

또한 통합공급사슬의 생산분배문제를 Hybrid Analytic-Simulation Approach에 의해 적용한 기존 연구로 [10]에서는 수리적 모델과 시뮬레이션 모델을 Hybrid Analytic-Simulation Approach와 시뮬레이션 모델링을 통해서 각각의 장점과 단점에 대해서 연구하였다.

[9]에서는 제조시스템에서의 Multi-period, Multi-product 환경에서 생산문제를 Hybrid Analytic-Simulation Approach를 사용하여 최적의 작업시간을 구하였으며 특히 [2]의 연구에서의 수리적 모델은 기존의 [9]의 연구를 확장하였는데 Feasible한 작업시간을 구하기 위해 수리적 모델에 Effective Loading Ratio과 Effective Utilization을 추가하였다.

마지막으로 [13]에서는 기존의 연구와는 다르게 Hybrid Analytic-Simulation Approach를 적용하여 주어진 기간에 소매점의 수요를 만족하는 통합공급사슬 환경의 최적 작업시간과 생산분배를 구하는 연구를 진행하였다.

2. 모델의 설정

본 연구는 건설분야에서의 레미콘산업을 대상으로 하는 연구이며 다른 산업과는 달리 계절적인 수요에 민감한 산업이며 각 계절마다 주력으로 생산되는 제품이 달라지는 경향이 있다. 또한 제품생산을 위한 원자재로는 시멘트, 골재, 혼화재, 물 등이 이용되며 각각의 원자재가 혼합비에 따라서 제품의 수가 결정되며, 이 원자재는 각기 다른 공급자를 통해서 무한히 공급을 받으며 제품의 특성상 공장은 수요가 발생하는 대도시를 거점으로 형성되며 공급자를 통해서 받은 원자재를 혼합하여 반제품의 형태로 고객으로 운송이 되어 고객에서 경화 과정을 통해서 완제품이 된다.

<연구대상의 특징>

1. 공급자의 원자재 공급은 제약이 없으므로 재고를 고려하지 않는다.
2. 제품 특성상 원자재의 투입은 일정한 혼합비를 가진다.
3. 공급자에서 원자재의 생산량은 공장에서의 생산량에 의해 결정되며 공장에서의 생산량 역시 고객의 수요량에 의해서 결정된다.
4. 제품이 경화되는 특성으로 인해 공장에서 고객까지의 운송시간의 제약(120km/1.5hr)이 있다.
5. 공장에서는 생산용량의 제약이 있으며 재고를 보유할 수 없다.
6. 고객의 수요량이 공장의 생산용량을 초과하면 그 부족량에 대하여 외주를 할당한다.
7. 공장에서의 외주량에 대한 단위당 외주비용은 고비용을 초래한다.

2.1 수리적 모델

수리적 모델은 기존연구와 마찬가지로 전체공급사슬을 비용분석을 위해 공급자 단계, 공장 단계, 운송 단계로 구분하였다. 그러나 기존연구와

다른점은 본 연구의 제품 특성상 재고를 고려치 못하는 제약조건을 고려하여 공장의 생산용량을 초과하는 경우의 외주를 고려하는 현실적인 상황을 수리적 모델을 통해서 구현하였다. 다음은 기호정리와 각 단계별로 목적식과 제약식에 대하여 설명한다.

2.1.1 기호정리

Indices

- i : 원자재
- p : 제품
- t : 기간
- s : 공급자
- f : 공장
- c : 고객

Parameters

- P_{is}^t : 기간 t 에 공급자 s 에서 원자재 i 의 생산량
- CP_{is} : 공급자 s 에서 원자재 i 의 단위당 생산비
- P_{pf}^t : 기간 t 에 공장 f 에서 제품 p 의 생산량
- CP_{pf} : 공장 f 에서 제품 p 의 단위당 생산비
- M_{ip} : 제품 p 에 대한 원자재 i 의 배합비율
- T_{isf}^t : 기간 t 에 공급자 s 에서 공장 f 로의 원자재 i 의 운송량
- CT_{isf} : 공급자 s 에서 공장 f 로의 원자재 i 의 단위당 운송비
- T_{pfc}^t : 기간 t 에 공장 f 에서 고객 c 로의 제품 p 의 운송량
- CT_{pfc} : 공장 f 에서 고객 c 로의 제품 p 의 단위당 운송비
- O_{pf}^t : 기간 t 에 공장 f 에서 제품 p 의

외주량

- CO_{pf} : 공장 f 에서 제품 p 의 단위당 외주비
- K_f : 공장 f 의 생산용량
- D_{fc} : 공장 f 에서 고객 c 로의 운송 거리
- C : 공장 f 에서 고객 c 까지 운반할 수 있는 최장거리
- d_{pc}^t : 기간 t 에 고객 c 의 제품 p 에 대한 수요
- X_f : 공장 f 에서 고객의 수요량이 운송량보다 크면 1, 아니면 0
- Y_{fc} : 고객 c 가 공장 f 에서 공급을 받으면 1, 아니면 0
- Z : Y_{fc} 가 1인 값들의 집합

2.1.2 공급자 단계

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

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

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

공급자 단계에서의 목적함수는 원자재에 대한 생산비의 합을 최소화하는 것이다.

제약식 (1)은 기간 t 에 공급자에서의 생산량은 공장으로의 운송량과 같아야 한다는 식이며 제약식 (2)는 생산량과 운송량에 대한 비음조건이다.

2.1.3 공장 단계

$$\text{Min } Z = \sum_p \sum_f \sum_t O_{pf}^t CO_{pf} X_f + \sum_t \sum_f \sum_p CP_{pf} P_{pf}^t$$

$$\text{s.t. } \sum_p \sum_f P_{pf}^t \leq K_f \quad \forall f, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_c \sum_p d_{pc}^t = \sum_p \sum_f P_{pf}^t + \sum_p O_{pf}^t X_f$$

$$\forall c, \forall t \quad (4)$$

$$T_{isf}^t / M_{ip} = P_{pf}^t \quad \forall f, \forall t, \forall i, \forall p \quad (5)$$

$$P_{pf}^t = \sum_c T_{pfc}^t \quad \forall f, \forall t, \forall p \quad (6)$$

$$X_f \in \{0, 1\} \quad \forall f \quad (7)$$

$$T_{isf}^t, P_{pf}^t, d_{pc}^t, O_{pf}^t, K_f \geq 0 \quad \forall f, \forall c, \forall t, \forall p \quad (8)$$

공장 단계의 목적함수는 공장에서 고객의 수요량이 운송량을 초과하는 경우의 외주비용과 공장에서의 완제품을 생산하기 위한 생산비의 합을 최소화 하는 것이다.

제약식 (3)은 공장에서의 생산량은 공장의 생산용량 이내에 있어야 한다는 식이다. 제약식 (4)는 고객의 수요량은 공장에서의 생산량과 외주량을 포함한다는 의미와 수요량이 생산용량을 초과하여 발생하는 외주량은 수요량에서 생산량을 제외한 값이 된다는 식이다. 제약식 (5)에서의 생산량은 공급자에서 공장으로 운송량과 원자재 배합비에 의해 만들어진다는 것을 의미하는 식이다. 제약식 (6)은 공장에서의 생산량은 고객으로 가는 운송량과 같아야 한다는 식이다. 제약식 (7)은 이진변수로 공장에서 외주비용의 발생하는 조건에 관한 식이다. 제약식 (8)은 생산량, 수요량, 외주량, 생산용량에 대한 비음조건이다.

2.1.4 운송 단계

$$\text{Min } Z = \sum_t \sum_i \sum_s \sum_f CT_{isf} T_{isf}^t + \sum_t \sum_p \sum_f \sum_c CT_{pfc} T_{pfc}^t Y_{fc}$$

$$\text{s.t. } \sum_s T_{isf}^{t-1} - \sum_c T_{pfc}^t = 0 \quad \forall f, \forall t \quad (9)$$

$$Y_{fc} \times D_{fc} \leq C \quad (Y_{fc} \in Z) \quad (10)$$

$$Y_{fc} \in \{0, 1\} \quad \forall f, \forall t \quad (11)$$

$$T_{isf}^t, T_{pfc}^t, Y_{fc}, D_{fc}, C \geq 0$$

$$\forall i, \forall p, \forall s, \forall f, \forall c, \forall t \quad (12)$$

운송 단계의 목적함수는 공급자에서 공장으로서의 운송비와 공장에서 고객으로의 운송비의 합을 최소화하는 것이다.

제약식 (9)는 기간 t-1 에 공급자에서 공장으로 들어온 양과 기간 t 에서의 운송하는 양이 같아야 한다는 것이다. 즉 재고가 발생하지 않고 수요량을 만족시켜 준다는 것이다. 제약식 (10)은 공장에서 고객으로의 운송거리가 최장운송거리안에 있어야 한다는 조건이다. 제약식 (11)은 이진 변수로 고객이 공장 f 에서 공급을 받는 조건에 관한 식이다. 제약식 (12)는 공급자, 공장, 고객에서의 운송량과 운송거리, 그리고 최장거리에 관한 비음조건이다.

이상의 각 단계에서 정의한 목적식과 제약식을 전체를 단일 모델로 통합하여 풀면 공급사슬에서의 외주비용, 생산비용, 그리고 운송비를 최소화 할 수 있는 최적 생산분배 모형이 된다.

3. 실험 및 적용 결과

3.1 시뮬레이션 모델

시뮬레이션의 목적은 수리적 모델에서 표현이 어려운 동적인 현실 시스템에 대한 다양한 요소를 반영하기 위함이다. 실험에 쓰인 데이터는 과거 3년간의 실제 데이터를 분석하여 입력데이터로 설정을 하였다.

본 연구에서 제시한 모델은 공급자와 고객은 각각 4개로 구성되며 공장은 2개로 구성되었다. 시뮬레이션 Runtime은 일반적인 1일 작업시간인 8시간으로 하였으며 실제 입력데이터를 월별로 분석하였으므로 30일을 기준으로 하였다. 시뮬레이션 반복횟수는 20회, 즉, 20개월을 임의로 설정하였다. 이중 최초 1개월은 준비기간(Warm-up Period)이며, 나머지 19개월간의 안정상태의 평균값만을 사용하였다.

실험을 통한 결과는 각 공급자에서 각 개별 공장으로 분배하게 되는 원자재의 평균 생산량과

공장에서 혼합과정을 거친 반제품 형태의 생산량이다. 이러한 생산량과 단위당 생산비용 그리고 운송비용을 포함한 총비용을 시물레이션을 통해서 도출하였다.

3.1.1 입력데이터 설정

3.1.1.1 고객의 주문간격 및 수요량

본 연구에서 사용한 주문간격 및 수요량에 대한 입력데이터는 실제 레미콘산업의 수요량을 바탕으로 입력값에 대한 분석을 하였다. 공장에 도착하는 수요량을 수집하여 Arena에서 제공하는 Input Analyzer를 이용하여 분석한 결과, 고객의 평균주문간격은 지수분포를 따르며 <표 1>과 같다.

<표 1> 월간 평균 주문간격

월별	일반제품주문간격	특수제품주문간격
1월	EXPO(3)	1+EXPO(6.3)
2월	EXPO(0.553)	0.28+EXPO(1.69)
3월	EXPO(0.453)	EXPO(1.71)
4월	EXPO(0.164)	EXPO(1.94)
5월	EXPO(0.391)	EXPO(1.73)
6월	EXPO(1.32)	0.16+EXPO(0.74)
7월	EXPO(1.29)	0.29+EXPO(0.571)
8월	EXPO(1)	EXPO(1.85)
9월	EXPO(0.962)	EXPO(1.49)
10월	EXPO(0.399)	EXPO(1.73)
11월	EXPO(0.24)	EXPO(2.3)
12월	EXPO(0.254)	EXPO(2)

고객의 평균 수요량 분포는 정규분포를 나타내며 <표 2>와 같으며 <표 1>과 마찬가지로 수요량 역시 일정한 패턴이 있음을 알 수 있다. 이런 현상은 본 연구의 대상이 계절적이며 불확실한 수요를 보이기 때문이다.

3.1.1.2 공장 및 공급자의 입력데이터

공급사슬에 대한 시물레이션을 수행하기 위해 공장 및 공급자에서 필요한 데이터로는 공장의 생산용량과 공장에서 고객으로의 운송거리 그리고 공급자에서의 제품별 혼합비가 있으며 <표

3>~<표 5>과 같다. 공장의 생산용량은 과거의 데이터로부터 개략적으로 설정한 값이다. 그리고 운송거리와 혼합비는 다음과 같이 설정하였다.

<표 2> 월간 제품별 평균 수요량

월별	일반제품 수요량	특수제품 수요량
1월	NORM(63.3, 146)	NORM(15.7, 21.3)
2월	NORM(64.4, 115)	NORM(16.7, 25.3)
3월	NORM(57.1, 106)	NORM(20, 34.8)
4월	NORM(53, 109)	NORM(20.1, 31.8)
5월	NORM(52.4, 109)	NORM(19.2, 28.2)
6월	NORM(52.8, 109)	NORM(17, 29.1)
7월	NORM(50.3, 97.2)	NORM(16.9, 26.1)
8월	NORM(50, 96.3)	NORM(18.4, 31)
9월	NORM(53.4, 106)	NORM(22.8, 41.3)
10월	NORM(49.6, 101)	NORM(20.1, 33.5)
11월	NORM(47.8, 90.8)	NORM(21.6, 37.6)
12월	NORM(51.6, 103)	NORM(19.4, 39.7)

<표 3> 공장의 생산용량(단위:ton)

	공장 1	공장 2
일반제품	45.175	45.175
특수제품		

<표 4> 공장에서 고객으로의 운송거리(단위:Km)

	고객 1	고객 2	고객 3	고객 4
공장 1	100	140	90	70
공장 2	120	100	80	80

<표 5> 제품별 혼합비

	공급자 1 (시멘트)	공급자 2 (골재)	공급자 3 (혼화재)	공급자 4 (물)
일반제품	0.24	0.59	0.05	0.12
특수제품	0.2	0.63	0.12	0.05

<표 6>은 모든 공급자와 공장에서의 원자재와 제품의 생산시간을 나타내는 데이터이다.

<표 6> 공급자와 공장의 생산시간(단위: hr)

	공급자	공장
생산시간	24	3

3.1.1.3 비용관련 입력데이터

본 연구에서 시뮬레이션을 위한 비용 데이터는 현실에 가깝도록 임의로 설정한 값이며 <표 7>과 <표 8>에서와 같이 제품별 단위당 생산비용과 제품을 운송하는데 소비되는 제품별 운송비가 있다. 또한 공장에서는 고객으로 운송하는데 드는 물동량비도 고려하여 운송비에 포함하였으며 공장의 생산용량을 초과하여 외주업체에게 생산을 할당하는 단위당 외주비용도 고려하였다.

<표 7> 공급자의 비용(단위: 원)

	일반제품 생산비	특수제품 생산비	운송비
공급자 1	3,000	2,500	1,000
공급자 2	1,300	1,400	1,000
공급자 3	6,000	20,000	1,000
공급자 4	500	210	1,000

<표 8> 공장의 비용(단위: 원)

	일반제품 생산비	특수제품 생산비	운송비	물동 량비	외주 비용
공장 1	3,000	3,000	1,000	1,000	59,390
공장 2	3,000	3,000	1,000	800	47,710

3.1.2 적용결과 및 분석

실험 결과의 모든 값은 평균값을 의미하며 먼저 수리적 모델에서 정의한 모든 수식에 대한 입력값을 기본으로 하여 실제 공급사슬에서 이루어

지고 있는 현상에 대해서 실험을 하였다.

3.1.2.1 생산과 분배에 관련된 결과

<표 9>는 공급자에서의 일반제품(P1)과 특수제품(P2)의 생산량에 관한 결과값이다. 공급자에서의 생산은 공장에서의 주문에 의한 원자재의 생산량을 의미한다. 즉, 공급자에서 각 공장별로 분배할 수 있는 원자재를 의미한다. 또한 생산량은 일정한 패턴이 존재함을 알 수 있는데 일반제품의 경우는 수요가 봄과 가을에 증가하다가 여름에는 감소함을 알 수 있다. 특수제품의 경우 제품의 특성상 봄에는 감소하는 경향을 보이다가 여름에 폭발적으로 수요가 증가함을 보이고 있으며 가을 역시 감소하는 경향을 보이며 겨울에는 다시 증가함을 알 수 있다.

<표 9> 공급자의 제품별 생산량(단위: ton)

	공급자의 P1 생산량	공급자의 P2 생산량
1월	79.87	27.10
2월	95.25	24.47
3월	69.89	10.19
4월	23.99	82.63
5월	59.46	35.99
6월	22.92	46.88
7월	23.99	156.89
8월	56.14	56.73
9월	44.53	69.89
10월	58.87	23.99
11월	125.79	25.12
12월	54.78	70.69

<표 10>은 제품별로 공장 1(F1)과 공장 2(F2)에 도착한 운송량을 나타낸다. 즉, 공장에서 고객으로 운송할 수 있는 최대 운송량을 의미한다. 그러나 공급자의 생산량에 비해 공장에서의 운송량이 차이가 일어남을 알 수 있는데 이런 현상은 공급자에서 공장에서의 생산시간이 존재하기 때문이다.

<표 10> 공장의 제품별 운송량(단위: ton)

	F1 P1 운송량	F1 P2 운송량	F2 P1 운송량	F2 P2 운송량
1월	43.39	14.39	41.30	11.74
2월	36.27	13.25	36.81	10.97
3월	33.25	4.26	32.56	5.21
4월	29.26	15.66	23.01	14.91
5월	30.71	23.40	31.95	11.53
6월	19.53	26.24	13.54	16.43
7월	19.23	34.49	26.15	39.56
8월	38.53	34.74	37.71	19.88
9월	36.60	32.21	36.57	30.19
10월	35.55	10.46	35.73	13.19
11월	27.74	40.32	14.83	36.32
12월	17.34	19.54	26.15	17.64

3.1.2.2 공장의 외주에 관련된 결과

<표 11>은 공장의 제품별 외주에 관한 결과 값이며 전월에 걸쳐서 외주가 발생함을 알 수 있다. 그러나 일반제품의 경우 공급자에서의 생산량과 같은 추세를 보이지만 특수제품의 경우 제품의 특성상 여름과 겨울에 증가함을 알 수 있다.

<표 11> 공장의 제품별 외주량(단위: ton)

	P1 외주량	P2 외주량	총외주량
1월	42.64	11.33	53.97
2월	25.44	5.97	31.40
3월	44.04	4.89	48.93
4월	32.86	4.27	10.94
5월	12.08	3.21	15.29
6월	7.86	16.71	24.57
7월	4.53	20.64	25.17
8월	33.41	8.88	42.29
9월	16.00	18.89	34.79
10월	13.56	3.60	17.16
11월	5.60	1.49	7.09
12월	37.34	23.87	61.22

3.1.2.3 비용에 관련된 결과

<표 12>는 통합공급사슬에서의 비용에 관련된 결과이다. 총비용은 외주비용을 포함한 값이다. 결국 총비용에서 대부분을 외주비용이 차지함을 알 수 있다.

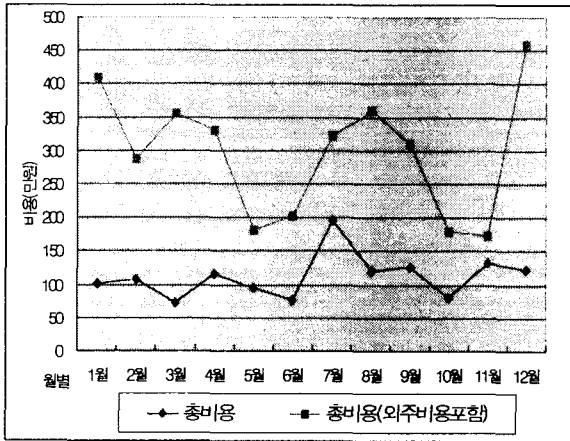
<표 12> 외주비용 및 총비용(단위: 원)

	외주비용	총비용
1월	3,073,037	4,090,928
2월	1,795,329	2,863,896
3월	2,848,698	3,562,150
4월	2,154,974	3,302,382
5월	870,684	1,816,438
6월	1,263,908	2,033,058
7월	1,253,903	3,213,604
8월	2,407,726	3,602,931
9월	1,846,920	3,103,881
10월	976,980	1,791,992
11월	403,747	1,726,664
12월	3,356,773	4,585,212
합계	22,252,679	35,693,134

<그림 1>은 외주비용을 포함한 총비용과 그렇지 않은 경우의 총비용을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 외주비용이 총비용에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 특히 1월, 3월, 8월 그리고 12월의 경우 총비용이 외주비용에 의해 차이가 많이 남을 알 수 있는데 이 기간 중에서도 1월과 3월 그리고 8월의 경우는 일반제품의 수요량에 대한 외주량이 증가하며 12월의 경우는 특수제품의 외주량이 증가함을 알 수 있다.

그러나 본 연구의 대상 공급사슬의 경우는 제품의 특성상 재고를 보유할 수 없기 때문에 이 기간에는 많은 외주량이 생김에도 불구하고 총비

용이 증가할 수 밖에 없다. 결국 본 연구에서 제시한 모델의 경우 <표 12>에서와 같이 총외주비용은 22,252,679원으로 총비용의 대부분을 차지하므로 공급사슬의 비용과 관련하여 비효율성이 존재함을 알 수 있다.



<그림 1> 외주비용과 총비용의 관계

본 연구의 대상뿐만 아니라 계절적이며 불확실한 수요를 띄는 제품을 가진 공급사슬의 경우는 외주량이 존재할 수 밖에 없다. 그러나 문제는 이러한 예측하지 못하는 외주량에 대해 얼마나 유연하게 공장생산용량을 준비하느냐 하는 것이 총비용을 감소시킬 수 있는데 중요한 관건이다.

이에 본 연구에서는 이러한 공장의 생산용량에 따라서 공급자와 공장의 생산량과 분배량이 결정되므로 다음절에서 이러한 공장의 생산용량의 결정을 위한 해법을 설명하도록 하겠다.

3.2 공장생산용량 결정

생산용량의 정의는 여러 가지가 있을 수 있는데, 첫째, 생산용량을 설비의 수로 볼 수 있다. 설비의 숫자는 의사결정자의 입장에서 현재의 설비로 수요량을 충족시키지 못할 경우 Trade-off의 관계로 설비를 증설할 것인가 그렇지 않을 것인가에 대한 것을 비용적인 면으로 접근한 것이

다. 둘째로 생산용량의 정의는 작업자 및 설비의 작업시간으로 보는 연구인데 즉, 원하는 수준까지 생산을 하기 위한 최적 작업시간이라고 보는 것이다[9]. 그러나 이러한 작업시간은 비용과 연관되기 때문에 쉽게 의사결정을 내리기가 어려운 것이 현실이다. 마지막으로 본 연구에서의 생산용량에 대한 관점은 초기 의사결정 단계에서 얼마만큼의 용량을 증설 해야 할 것인가에 대한 것이다. 즉, 공장이 생산을 할 수 있는 설비의 용량으로서 단순히 과거와 동일한 크기의 설비의 수를 증설하는 것이 아니라 현재의 공장생산용량과 전체평균외주량을 고려하여 공장생산용량을 증설하는 것이다.

3.2.1 공장생산용량 결정을 위한 해법

본 연구에서의 수리적 모델은 MIP(Mixed Integer Planning)문제이며 만약 수리적 모델의 실험을 통해서 공장의 초기 생산용량을 할당하지 않으면 시뮬레이션의 공장생산용량은 임의로 정해진 입력값을 받게 되고 이렇게 넣은 입력값은 무한한 Iteration의 반복 수행을 하게 될 수 있다. 그러므로 수리적 모델 실험의 목적은 시뮬레이션의 반복 수행의 복잡성을 없애고 현실에 근접한 정확한 초기 공장생산용량의 값을 구하기 위해서이다.

본 연구에서의 공장의 생산용량을 결정하기 위한 절차는 먼저 수리적 모델을 통해서 구해진 생산량이 최적의 초기 공장생산용량이 되며 이 값을 시뮬레이션 모델의 초기 입력값으로 투입한다. 다음으로 현실 운영전략이 반영된 시뮬레이션을 행한 후 외주비용이 발생하는 경우는 공장의 생산용량을 수정시킨 후 다시 Feed back을 통해서 시뮬레이션에 투입을 한다. 이러한 Iteration 과정을 반복하여 원하는 결과, 즉 외주가 발생하지 않을 때 까지 반복 실행한다.

다음은 공장의 생산용량을 결정하기 위한 해법에 대한 절차이다.

Step 1. 초기 생산계획으로부터 수리적 모델을

- 통한 최소비용을 가지는 공장의 생산용량을 구한다
- Step 2. Step 1로부터 얻은 결과를 시물레이션모델에 투입
 - Step 3. 현실적인 운영 Policy 를 반영하며 독립적으로 개발된 통합 생산분배시스템의 시물레이션을 실행
 - Step 4. 만약 외주가 발생한다면 Step 5로 가고 그렇지 않으면 Step 6으로 간다.
 - Step 5. 공장의 생산용량을 수정시키고 Step 2로 간다
 - Step 6. 시물레이션에 의해 정해진 공장의 생산용량에 의한 생산분배계획이 최적해라고 간주하며 Step 7로 간다
 - Step 7. STOP

Step 5에서는 아래의 Formulation에 의해서 공장의 생산용량이 수정된다.

K_f : 공장 f 의 생산용량

α_f : 공장 f 에서의 외주발생횟수

$\sum_f O_{bf}^t$: 기간 t 에서 완제품 b 에 대한 공장 f 에서의 총외주량

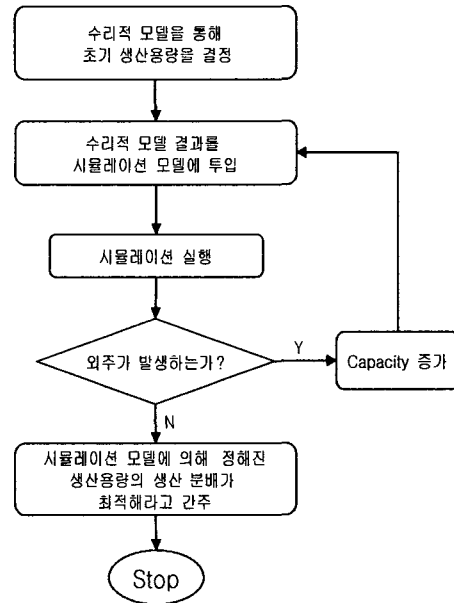
$$K_f = K_f + \sum_t \sum_b O_{bf}^t / \alpha_f$$

수정된 공장생산용량은 시물레이션을 통해서 얻은 전체평균외주량과 현재 공장생산용량의 합을 나타내며 수리적 모델의 제약식 (3)의 K_f 가 된다. <그림 2>는 공장생산용량을 결정하기 위한 해법에 대한 흐름도를 보여준다.

3.2.2 적용 결과 및 분석

공장생산용량을 결정하기 위한 해법은 통합공급사슬에서 생산분배는 최대화하며 총비용은 최소화하는 최적에 가까운 공장생산용량 결정에 적용하였다.

수리적 모델은 생산비와 운송비 그리고 외주비의 합을 최소화하는 최적의 공장생산용량으로서 시물레이션의 초기 입력 값으로 사용된다. 수리적 모델의 실험을 통해서 구한 초기 공장생산용량은 공장 1과 공장 2가 각각 (141, 151)/ton이다.



<그림 2> 공장생산용량 결정을 위한 흐름도

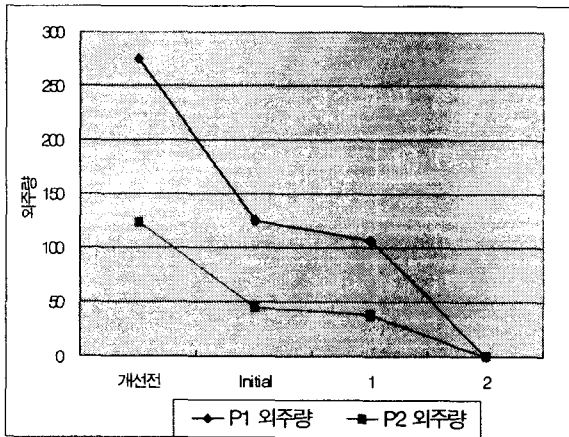
<표 13>은 개선전 즉, 앞절에서 시물레이션만으로 실험한 결과값과 공장생산용량 결정 해법을 통해 반복수행한 결과를 전체 월별 운송량, 생산량, 외주량, 그리고 총비용의 합으로 나타내었다. 또한 개선전은 개괄적으로 설정한 공장의 생산용량을 나타낸다.

<그림 3>과 같이 공장생산용량이 증가함에 따라 외주량이 현저히 감소함을 알 수 있는데 일반제품과 특수제품 모두가 감소함을 알 수 있다. 이는 공장생산용량이 얼마나 중요한가를 나타낸다. 특히 Iteration 2의 생산용량에 의해서는 외주량이 발생하지 않음을 알 수 있다.

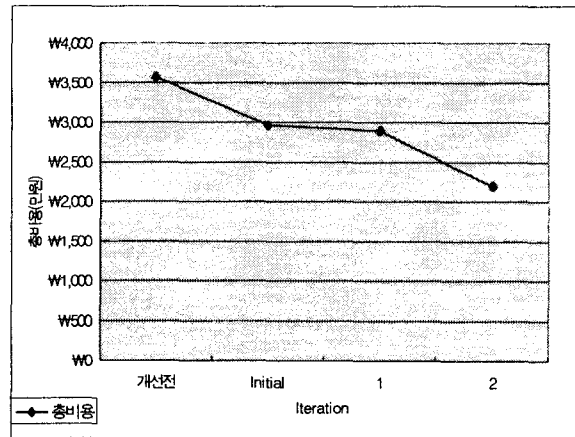
<표 13> 공장생산용량 결정 해법을 이용한 생산용량별 결과(단위: ton, 원)

	공장생산용량	F1 P1 운송량	F1 P2 운송량	F2 P1 운송량	F2 P2 운송량
개선전	(45.18, 45.18)	367	268.96	356.31	227.57
Initial	(141, 151)	1004.31	357.90	1110.71	328.98
1	(232.87, 229.46)	1129.40	366.84	1057.57	332.77
2	(330.10, 276.79)	1432.94	488.88	1336.76	546.82

공급자의 P1 생산량	공급자의 P2 생산량	P1 외주량	P2 외주량	외주비용	총비용	총비용 감소율
715.49	630.56	275.35	123.66	22,252,679	35,693,134	
1140.46	723.13	125.31	45.02	9,590,017	29,618,156	17.02 %
1297.59	723.13	106.96	37.60	8,146,300	28,867,124	2.54 %
1370.08	723.13	0.00	0.00	0	22,044,760	25.57 %



<그림 3> 생산용량과 외주량과의 관계



<그림 4> 생산용량과 총비용과의 관계

<그림 4>는 생산용량이 증가함에 따라 총비용의 변화도 감소함을 알 수 있다. 결국 개선전 경우의 외주비용은 22,252,679원이었지만 수리적 모델에 의한 최적의 초기 공장생산용량인 Initial Iteration의 경우는 9,590,017원으로 약 56.9%가 감소함을 알 수 있다. 또한 개선전과 Iteration 1의 경우는 약 63.39%의 비용이 절감됨을 알 수 있다.

결국, 공장생산용량 결정 해법을 사용하여 최적의 가까운 근사값의 총비용을 구하였다. 즉, Iteration 즉, Iteration 2에서 (330.10, 276.79)/ton의 공장생산용량이 수리적 모델을 통한 Initial 단계의 공장생산용량보다 25.57%의 총비용 감소가 있으며 최적에 가까운 생산분배를 하는 공장의 생산용량임을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구 과제

4.1 결론

본 연구에서는 다품종의 원자재가 공급자에서 일정한 혼합비를 통해서 생산이 되며 공장을 거쳐서 최종적으로 고객으로 가기까지의 불확실한 수요, 운송시간의 제약, 그리고 공장생산용량의 제약과 같은 제한 조건이 있는 경우에 최적의 공장생산용량을 결정하여 최소의 총비용을 가지는 통합공급사슬의 생산분배계획을 도출하는 것이다. 또한 본 연구는 Multi-facility, Multi-product, Multi-period Production-Distribution에 대한 수리적 모델을 개발하였으며 수식에서 보듯이 공급자 단계에서의 생산비의 최소화, 공장 단계에서의 생산비와 외주비용의 최소화 그리고 운송 단계에서의 운송비의 최소화를 시물레이션과 공장생산용량을 결정하기 위한 해법을 통해서 그 수식의 타당함을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행한 시물레이션을 통한 결과는 과거 3년 동안의 실제데이터를 입력데이터로 사용하였다. 그 결과 개략적으로 정한 공장생산용량으로는 생산량 및 분배량이 수요량을 만족치 않으며 생산용량에 비해 외주량이 현저히 증가함을 알 수 있었다. 결국 계절적이며 불확실한 수요량을 가지는 제품의 경우 외주량의 생성이 불가피하지만 전체 공급사슬의 입장에서 외주비용에 의한 총비용의 상승은 바람직하지 않은 일이라 생각된다. 결국 이런 현상을 극복할 수 있는 방법으로는 새로운 공장의 설립을 추진하는 일이지만 이러한 과정 역시 쉽게 의사결정을 내리기 어려우므로 공장의 설립 초기에 중장기적 관점에서 불확실한 수요를 만족할 수 있는 공장생산용량을 결정하는 것이 중요하다. 이에 대안으로 쓰인 공장생산용량 결정 해법은 제품의 불확실한 수요의 특성과 모든 제약조건을 만족하는 최적에 가까운 공장생산용량을 결정하였으며 결국 통합공급사슬의 외주비용과 총비용을 감소시키는 결과를 나타내었다.

4.2 향후 연구 과제

향후 연구에서는 본 연구에서 제시한 운송수단의 무제한이라는 가정을 배제한 현실적인 운송 전략에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이며 현실에서 일어나고 있는 생산시간, 확실적인 운송시간, 그리고 각 사이트들에서의 리드타임을 통한 생산분배계획에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다. 또한 본 연구에서 설정한 외주업체는 자사의 제품을 무한히 만족한다는 조건으로 설정되었지만 현실을 감안할 때 그렇지 않은 경우와 자사도 외주를 수용할 수 있는 관점에서의 접근이 필요하다. 마지막으로 본 연구에서 이용한 공장생산용량을 결정하기 위한 해법을 휴리스틱의 관점에서 개발해 운송전략과 생산시간 그리고 리드타임등을 최적화하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Beamon, B. M., "Supply chain design and a analysis: model and method", *International Journal of Production Economics*, 55, pp. 281-284, 1998
- [2] Kim, Bokang, Kim, Sooyoung., "Extended for a hybrid production planning approach", *International Journal of Production Economics*, 73, pp. 165-173, 2001
- [3] Burns, L., Hall, W., Blumenfeld, D and Dazango, C., "Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs", *Operations Research*, 31, pp. 361-380, 1985
- [4] Chandra, P. and Fisher, M., "Coordination of production and distribution planning", *European Journal of Operational Research*, 72, pp. 503-517, 1994
- [5] Cohen, M. and Lee, H., "Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods". *Operations Research*, 36, pp. 216-228, 1988
- [6] Dobrila Petrovic., "Simulation of Supply Chain"

- ain Behaviour and Performance in an Uncertain Environment", *International Journal of Production Economics*, 71, pp. 429-438, 2001
- [7] Jansen, Weet, Beulens, Huirne., "Simulation model of multi-compartment distribution in the catering supply chain", *European Journal of Operational Research*, 133, pp. 210-224, 2001
- [8] Klingman, D., More, J. and Phillips, N., "A logistics planning system at W. R Grace", *Operations Research*, 36, pp. 811-822, 1998
- [9] M.D. Byrne, M.A. Bakir., "Production planning using a hybrid simulation-analytical approach", *International Journal of Production Economics*, 59, pp. 305-311, 1999
- [10] Shanthikumar, J. G., and Sargent, R. G., "A unifying view of hybrid simulation/analytic models and modeling", *Operations Research*, 31, pp. 1030-1052, 1983
- [11] Soemon Takakuwa, Hiroki Takizawa, Kumiko Ito, Shinichiro Hiraoka., "Simulation and Analysis of Non-Automated Distribution Warehouses", *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1177-1184, 2000
- [12] Williams, j., "Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures : theory and empirical comparisons", *Management Science*, 27, pp. 336-351, 1981
- [13] Lee, Young Hae, Kim, Sook Han., "Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints", *Computers & industrial engineering*, 43, pp. 169-190, 2002
- [14] Zou, M., Kuo, W. and McOrberts, K., "Application of mathematical programming to a large-scale agricultural production and distribution system", *Journal of the Operational Research Society*, 42(8), pp. 639-648, 1991
- [15] David Kelton, W., Sadowski, R.P., Sadowski, D.A., *Simulation with Arena*, second ed, McGraw-Hill, New York, 2002

● 저자소개 ●

지요한



2001 숭실대학교 산업정보시스템공학과 학사
 2003 연세대학교 컴퓨터과학·산업시스템공학과 석사
 관심 분야 : SCM, 시물레이션 모델링 및 분석

임석진



1995 인천대학교 산업공학과 학사
 1997 고려대학교 산업공학과 석사
 현재 연세대학교 컴퓨터과학·산업시스템공학과 박사과정
 KIST CAD/CAM센터 학생연구원
 관심 분야 : SCM, 시물레이션 생산시스템

김경섭



1982 연세대학교 기계공학과 학사
 1986 Univ. of Nebraska-Lincoln, Industrial & Management
 Systems Engineering, M.S.
 1993 North Carolina State University, Industrial Engineering, Ph.D.
 현재 연세대학교 컴퓨터·산업시스템공학과 부교수
 관심 분야 : 물류시스템, 시물레이션 모델링 및 분석, SCM