

2단계 공급사슬 네트워크에서 전략적 의사결정을 위한 수리적 모형[†]

정기호*

〈요 약〉

본 연구에서는 공장-물류센터-고객으로 이어지는 공급사슬 네트워크를 구축하려는 기업의 의사결정에 도움을 주기 위해 2단계 공급사슬네트워크 설계를 위한 수학적 모형을 제시하고, 현실적인 문제를 대상으로 다양한 시나리오를 통한 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 기존의 연구에서와는 달리 공장과 물류센터의 동시 입지선정, 공장과 물류센터의 용량 수준 결정, 공장과 물류센터의 설치 개수 제한과 같은 조건들을 모두 문제에 반영함으로써 현실 상황에 가장 가까운 문제를 대상으로 수학적 모형을 제시하였다.

기존의 연구들은 대부분 근사해를 찾아내는 효율적인 휴리스틱 해법 개발에 초점을 맞추었다. 그러나 본 연구에서는 공급사슬 네트워크 설계를 위해 다양한 시나리오들을 설정하고 각 시나리오별 결과를 분석하여 최적의 의사결정을 내리는데 도움을 주고자 하였다. 이를 위해 문제 크기별로 서로 다른 5×10×30, 10×10×100, 10×20×200 등 세 가지 형태의 예제 문제를 만들고 엑셀의 해 찾기 기능을 적용하여 풀어 보았다. 이 중에서 공장 후보지 10군데, 물류센터 후보지 20군데, 최종 고객 대리점 200군데인 10×20×200 문제에 대해 공장과 물류센터 설치 개수에 대한 상한 제약조건을 배제한 문제를 추가적으로 풀어 보았다. 공장의 최적 입지 선정 결과를 고정시킨 채 물류센터 설치 개수를 변화시켜 가면서 모두 7가지 시나리오를 설정하여 민감도 분석을 수행해 보았다. 물류센터 설치 개수가 늘어남에 따라 inbound 수송비와 outbound 수송비가 어떻게 변하는지를 알아봄으로써, 기업 입장에서 비용뿐만 아니라 고객의 서비스 수준도 함께 고려하여 의사결정을 내리는데 도움이 될 수 있음을 알 수 있었다.

핵심주제어 : 2단계 공급사슬 네트워크, 전략적 의사결정, 수학적 모형,
민감도분석

논문접수일: 2013년 08월 11일 수정일: 2013년 09월 12일 게재확정일: 2013년 09월 14일

[†] 2013학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음

* 경성대학교 경영정보학과 교수, khchung@ks.ac.kr

I. 서론

본 연구는 공장, 물류센터, 고객으로 이어지는 2단계 공급사슬 네트워크 설계를 위한 전략적 의사결정을 다룬다. 공급사슬관리에서 전략적 의사결정이라 함은 공급사슬 네트워크를 구성하는 공장이나 물류센터의 개수와 위치, 그리고 규모를 결정하고, 또한 고객들의 물류센터 할당과 같은 유통전략을 수립하는 것이다 (Simchi-Levi, Kaminski, and Simchi-Levi 2009). 공장이나 물류센터의 위치와 규모가 한번 정해지면 비교적 오랜 기간 동안 변경 없이 지속된다. 따라서 이러한 의사결정이 잘못 이루어지게 되면 비용이 과도하게 발생하거나, 고객 리드타임이 길어지는 등 공급사슬 관리 측면에서 볼 때 대단히 비효율적으로 운영될 수밖에 없다. 공급사슬관리에서 전략적 의사결정 과정은 선불리 진행되어서는 안 되고 체계적으로 이루어져야 한다.

이러한 전략적 의사결정을 위한 판단 기준으로 가장 중요한 것이 전체 비용 최소화이다. 고려해야 하는 전체 비용에는 공장과 물류센터의 위치에 따른 설립 비용이 당연히 포함되어야 한다. 즉 공장과 물류센터를 어느 지역에 설립하느냐에 따라 대지구입비용등이 달라지기 때문에 위치에 따라 공장과 물류센터의 설립비용이 달라진다. 또한 공장과 물류센터, 그리고

소매대리점으로 이어지는 각 유통 단계별 제품 수송과 관련된 물류비용이 포함되어야 한다. 물류비용에 영향을 미치는 가장 주요한 요인이 공장과 물류센터의 위치이다. 즉 소매대리점에서 요구하는 고객 수요를 충족시키기 위해 공장에서 물류센터로, 또 물류센터에서 소매대리점으로 제품을 수송하는 수송비는 공장과 물류센터의 위치가 영향을 미치게 된다. 그리고 물류비용에 영향을 미치는 두 번째 요인으로는 공장에서 물류센터, 그리고 소매대리점으로 이어지는 경로별 제품 수송량을 어떻게 할당할 것인가 하는 수송방법이다.

따라서 본 연구에서 다루고자 하는 공급사슬 전략적 의사결정을 위해서는 공장과 물류센터의 위치 결정에 따른 설립 비용만 고려해서는 안되고, 공장, 물류센터, 고객대리점으로 이어지는 공급사슬 각 단계별 수송방법에 따른 수송비용도 당연히 함께 고려해야 한다.

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 새로 설립하고자 하는 다수의 공장 후보지와 물류센터 후보지가 사전에 정해져 있고 소매대리점에서의 고객 수요량이 주어져 있는 상태에서 설립할 공장 개수와 위치 결정, 물류센터 설치 개수와 위치 결정, 설립할 공장의 생산 용량 결정, 설립할 물류센터의 저장용량 결정, 그리고 공장에서 물류센터로, 물류센터에서 소매대리점

으로의 수송량을 결정하는 문제를 다루고자 한다. 단 이때 고려해야 하는 기준은 전체 비용을 최소화하는 것이다. 전체 비용에는 공장과 물류센터의 설립비용 뿐만 아니라 공급사슬 각 단계별 수송비도 포함된다.

2단계 공급사슬 네트워크 설계 문제는 수학적 모형이 0-1 이진변수가 포함되는 혼합정수계획법 문제로서, 풀기가 어려운 NP-hard 문제에 속한다. 따라서 기존의 연구들은 거의 대부분이 휴리스틱 해법 개발에 초점을 맞추고 있다. 라그랑지안 완화(Lagrangian Relaxation) 기법이나 유전 알고리즘(Genetic Algorithm), 또는 공진화 알고리즘(Coevolutionary Algorithm) 등의 기법을 적용하여, 비교적 빠른 시간 내에 최적해에 가까운 근사해를 개발하는데 연구의 초점을 맞추고 있다. 연구의 목적이 대체로 컴퓨터에서의 계산 속도가 빠른 효율적 알고리즘 개발에 치중하다 보니, 현실에서 실제로 고려해야 하는 상황들을 모두 고려하지 못한 문제를 대상으로 하거나, 아니면 문제의 크기가 비현실적으로 아주 작은 예제 문제들을 대상으로 해법을 적용하고 있다. 현실적인 상황들을 모두 고려하여 수학적 모형을 만들게 되면 문제가 복잡하여 휴리스틱 알고리즘을 개발하더라도 시간이 많이 걸려 의미가 없게 되고, 또한 공장 후보지 개수와 물류센터 후보지 개수가 비교적 많고,

고객대리점의 개수가 전국적으로 아주 많은 현실적인 문제를 대상으로 해법을 적용하면 컴퓨터 계산 시간이 엄청나게 증대하게 되기 때문이다. 그러나 현실적으로 2단계 공급사슬 네트워크를 구성해야 하는 기업 입장에서는 공급사슬 구조 결정을 위한 전략적 의사결정 과정이 시간을 다룰 정도로 신속히 이루어질 필요가 없다. 오히려 현실적인 상황들이 비교적 모두 모형에 반영되고 미래 수요의 변화 등을 감안하여 여러 가지 다양한 분석을 통해 공급사슬의 구조가 결정되는 것이 훨씬 의미가 있다 하겠다.

이를 위해 본 연구에서는 공급사슬 설계를 위해 실제 기업 상황에서 현실적으로 고려할 수 있는 모든 조건들을 다 반영하여 수학적 모형을 만들었다. 공장과 물류센터 동시 입지 선정, 공장과 물류창고의 생산 및 저장 용량 수준 결정, 그리고 공장과 물류센터 설치 개수에 대한 상한 제약조건을 고려함으로써 기존 연구에서 시도하지 못했던 가장 복잡한 문제를 대상으로 하였다. 또한 해법 개발에 초점을 맞추는 것이 아니라, 민감도 분석을 위한 시나리오들을 설정하여 이에 대한 결과들을 도출하여 이를 비교 분석하는데 초점을 맞추었다. 이렇게 함으로써 공급사슬 네트워크 설계를 위한 의사결정자가 현실 상황을 모두 고려하여 최적의 의사결정을 내리는데 도움을 주고자 하였다.

II. 이론적 배경

1. 공급사슬 관리를 위한 의사결정

공급사슬 관리를 위한 의사결정에는 크게 전략적 의사결정, 전술적 의사결정, 운영적 의사결정 등 3가지 단계로 구분된다. 전략적 의사결정은 공급사슬 설계 단계에서 이루어지는데 공급사슬의 구조를 결정하는 의사결정이다. 여기에는 공장과 물류센터의 설치 개수와 규모 결정, 입지 선정 등이 포함된다. 전술적 의사결정에는 공장에서 물류센터, 물류센터에서 고객대리점으로의 수송수단을 결정하고, 재고 정책을 결정하는 것이 대표적이다. 운영적 의사결정은 공장에서 물류센터로, 물류센터에서 고객대리점으로 제품을 어떤 경로를 따라 얼마만큼 수송해야 하는지에 대한 의사결정이다. 공급사슬 운영적 의사결정은 단위 기간(1주일 또는 한 달 단위) 동안의 고객 수요량이나 주문량이 주어질 때, 이를 충족시키기 위해 어떠한 경로를 따라 수송하는 것이 전체 수송비를 최소화 하느냐에 관한 것이다. 공급사슬 운영적 의사결정 단계에서는 상위 단계인 전략적 의사결정 과정이 완료된 이후에 의사결정이 이루어진다. 다시 말하면 공장의 위치와

생산용량이 정해져 있고 물류센터의 위치와 저장용량도 이미 정해져 있는 상태에서 이루어진다. 단위 기간별로 고객 수요량이 달라지기 때문에 그때마다 수송방법은 매번 달라지게 된다 (Chopra and Meindl 2012; Sabri and Beamon 2000). 따라서 운영적 의사결정 단계에서는 단위기간별로 의사결정이 이루어지게 된다. 예를 들면 한 달 단위로 수송방법을 결정하는 경우 지난달과 이번 달의 고객 수요량이 다르기 때문에 지난달의 최적 수송방법과 이번 달의 최적 수송방법은 달라지게 된다. 비록 운영적 의사결정이 전략적 의사결정 단계 이후에 이루어지나, 전략적 의사결정 결과에 따라 운영적 의사결정 과정이 큰 영향을 받기 때문에 전략적 의사결정 단계에서 추후에 이루어지는 운영적 의사결정을 염두에 두고 의사결정이 이루어져야 한다. 따라서 전략적 의사결정 과정에서도 운영적 의사결정에 필요한 입력 데이터인 최종 고객 수요량에 대한 데이터가 필요하다. 다만 이러한 고객 수요량 데이터가 단위 기간별로 변하기 때문에 전략적 의사결정 단계에서 이를 어떻게 설정해서 반영하느냐 하는 것이 중요하다. 이를 위해 단위 기간 동안 고객 수요량에 대한 평균적인 추정치를 이용하는 것이 바람직하다.

2. 선행 연구

1990년대 말부터 공급사슬에 관한 연구들이 많이 진행되어 왔다. 국내의 연구들은 주로 공급사슬 성과에 영향을 미치는 요인들을 분석하는 연구들이 주를 이루고 있다(김상조 2002; 이재식 2009; 정연주, 강낙중 2012). 본 연구에서와 같이 공급사슬 네트워크 구축을 위한 연구들은 그다지 많이 이루어지지 않았다. 2단계 공급사슬 네트워크 구조 설계를 위한 기존 연구들을 보면 대체로 다음과 같이 정리될 수 있다. 2단계 공급사슬 네트워크는 일반적으로 공장-물류센터-고객으로 이어지는 구조를 가지고 있으며, 공장에서 생산된 제품들은 물류센터로 보내어져 저장되거나 환적과정을 거쳐 최종 고객으로 전달된다.

2단계 공급사슬 네트워크 구조 설계를 위한 문제들은 대체로 다음과 같은 몇 가지 사항들의 선택에 의해 여러 가지 형태로 분류될 수 있다. 첫째, 취급하는 제품 수가 단일 제품이나, 복수 제품이나에 따라 문제 형태가 달라진다. 현실 문제에서는 복수 제품을 다루는 경우가 일반적이거나, 지금까지 수행된 많은 연구들은 문제의 복잡성을 피하기 위해 대체로 단일 제품을 다루고 있다. 둘째, 공장과 물류센터 모두 동시에 설치 여부를 결정하느냐, 아니면 공장과 물류센터 중

하나를 이미 설치되어 있고 나머지 설비에 대해서 설치 여부를 결정하느냐에 따라 문제를 분류할 수 있다. 셋째, 설치하려는 설비의 개수에 제한을 두느냐의 여부이다. 예를 들어, 공장 후보지들 중에서 실제 설치하려는 공장을 최대한 5개까지 짓는다든지 또는 정확하게 5개 지어야 한다는 조건이 있는 경우이다. 공급사슬 네트워크 구조를 설계하고자 하는 실제 기업의 현실을 고려해 볼 때 설비 개수에 제한을 두는 경우가 일반적이라 할 수 있다. 넷째, 설치하려는 공장 또는 물류센터의 용량에 제한을 두느냐의 여부에 따라 분류될 수 있다. 실제 기업 상황에서는 공장이나 물류센터의 신규 설립시 규모에 대한 제한을 고려하는 것이 현실적이거나, 수학적 모형으로 문제를 풀고자 할 경우 이러한 용량 제한을 고려하게 되면 문제의 난이도가 높아진다. 다섯째, 공장 또는 물류센터의 용량 제한이 있는 경우에 또 두 가지로 구분된다. 사전에 이미 정해진 용량이 상수값으로 주어진 경우가 있고, 또 하나는 몇 가지 용량 수준들 중에서 하나의 용량을 결정하는 경우이다. 현실적인 상황을 고려하면 당연히 후자의 경우가 일반적이거나 문제 복잡성은 훨씬 높아진다.

가장 간단한 형태의 문제는 단일 제품만을 취급하며, 제품 생산 공장이 이미 설립되어 있고, 고객 위치와 수요량이 주어졌 있는 상태에서, 물류센

터 후보지들 중에서 최종적으로 설치할 물류센터를 결정하고, 아울러 공장에서 물류센터, 그리고 고객까지의 수송량을 결정하는 문제이다. 한용호(2009)의 연구가 여기에 해당하는데, 공장이 이미 설립되어 있는 것으로 가정하고, 물류센터 설치 개수에 대한 상한 조건이 추가된 문제를 모형화하여 협력적 공진화 알고리즘으로 근사해를 구하였다. Tragantalerngsak et al.(2000)은 단일 제품을 취급하고,

공장과 물류센터 설치 개수에 대한 상한 제약이 없으며, 물류센터에 대해서만 용량제약조건이 주어진 상태에서 공장과 물류센터 입지 선정문제를 다루고 있다. 다른 연구들과 차별적인 특이점은 최종 고객은 반드시 하나의 물류센터로부터 공급받아야 하고, 물류센터도 마찬가지로 한 군데 공장에서부터 공급받아야 한다는 추가적인 제약조건을 고려하였다는 점이다.

<표 1> 기존 연구 분류

논문	제품수	입지선정		용량 제한여부		설치개수 제한여부		용량수준 결정여부	
		공장	물류 센터	공장	물류 센터	공장	물류 센터	공장	물류 센터
Jayaraman(1998)	복수	O	O	X	O	X	O	X	X
Pirkul and Jayaraman(1998)	복수	O	O	O	O	O	O	X	X
Jang et. al.(2002)	복수	O	O	O	O	O	O	X	X
Tragantalerngsak et al.(2000)	단일	O	O	X	O	X	X	X	X
한용호(2009)	단일	X	O	O	O	-	O	X	X
Amiri(2006)	단일	O	O	O	O	X	X	O	O

복수제품을 고려한 2단계 공급사슬 네트워크 문제는 Jayaraman(1998), Pirkul and Jayaraman(1998) 그리고 Jang et. al.(2002) 등이 연구한 바 있다. Jayaraman(1998)은 물류센터에 대해서만 저장용량 제약과 설치 개수에 대한 상한 제약이 주어진 2단계

공급사슬 네트워크를 다루고 있다. Jayaraman(1998)의 연구를 확장해서 Pirkul and Jayaraman(1998)은 공장과 물류센터 모두 생산 및 저장용량 제약과 설치 개수에 대한 상한 제약이 주어진 2단계 공급사슬 네트워크를 다루었다. Jang et. al.(2002)은

Pirkul and Jayaraman(1998) 연구와 유사하나, 제품별로 공장이나 물류센터에서 차지하는 용량이 다르다고 가정한 문제를 다루었다. Amiri(2006)는 비록 단일 제품을 다루고 있지만, 공장과 물류센터의 입지 선정뿐만 아니라 공장과 창고의 용량도 함께 결정하는 문제를 다루어 기존 연구들 보다 가장 복잡성이 높은 문제를 다루었다. 이러한 연구들을 정리해 보면 <표 1>과 같다. 본 연구에서는 Amiri(2006)의 연구를 확장하여 공장과 물류센터 설치 개수에 대한 상한 조건을 추가한 문제를 다루고자 한다.

Ⅲ. 문제 정의 및 수학적 모형

1. 문제 정의

본 연구에서 다루고자 하는 2단계 공급사슬 구조를 결정하기 위한 문제에서 현실적인 상황을 고려하여 다음과 같은 사항들을 모두 고려한다.

1. 공장과 물류센터 건설시 고려하는 용량 수준의 가지 수는 각각 5가지로 한다. 즉, 어떤 공장 후보지에 공장을 건설하기로 결정하였다면 5가지 용량 수준 중 하나의 규모를 선택한다는 것이다.

2. 공장 설립시 선택가능한 용량 수준은 공장 후보지에 관계없이 모두 동일하다. 예를 들어, 공장 후보지가 다섯 군데 있고 선택가능한 용량 수준이 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 등 5가지가 있을 경우 공장 후보지에서 실제 공장 설립시 이 다섯 가지 생산 용량 중에 하나를 선택하여 공장의 규모를 결정한다는 것이다. 물류센터의 경우도 마찬가지이다.

3. 공장에서 물류센터를 거쳐 소매대리점까지 수송하는 제품은 단일제품이다.

4. 공장과 물류센터 후보지들 중에서 설립하고자 하는 공장과 물류센터 개수에 대한 상한이 주어지 있다. 예를 들어, 공장 후보지가 10개 있을 경우 이들 중 최대한 5개까지 설립할 수 있다는 조건이 현실적인 제약조건으로 주어지 있다.

5. 최종 고객 대리점의 위치는 알려져 있으며 공장과 물류센터 설치 후보지에 대한 위치도 알려져 있다.

6. 고객 대리점에서 요구하는 수요량이 알려져 있다.

2. 수학적 모형

이러한 상황들을 수학적 모형에 반영하기 위해 사용될 입력 데이터 및 결정변수는 다음과 같다.

(입력 데이터)

I : 공장 후보지 집합

J : 물류센터 후보지 집합

K : 소매대리점 집합

R : 공장 설립시 선택가능한 생산용량 수준 집합

S : 물류센터 설립시 선택가능한 저장용량 수준 집합

c_{ij} : 공장 i 에서 물류센터 j 로 제품 한 개 수송하는 비용

e_{jk} : 물류센터 j 에서 소매대리점 k 로 제품 한 개 수송하는 비용

f_{ir} : 생산용량 수준이 r 인 공장 i 의 설립 및 운영에 관한 고정비용, $r \in R$

g_{js} : 저장용량 수준이 s 인 물류센터 j 의 설립 및 운영에 관한 고정비용, $s \in S$

D_k : 소매대리점 k 에서의 제품수요량

P_{ir} : 공장 i 의 수준 r 인 생산용량

Q_{js} : 물류센터 j 의 수준 s 인 저장용량

p_1 : 공장의 최대 설치 개수

p_2 : 물류센터의 최대 설치 개수

(결정변수)

w_{ij} : 공장 i 에서 물류센터 j 로의 제품 수송량

x_{jk} : 물류센터 j 에서 소매대리점 k 로의 제품 수송량

y_{ir} : 생산용량 수준이 r 인 공장 i 가 설립되면 1, 아니면 0인 이진변수

z_{js} : 저장용량 수준 s 인 물류센터 j 가 설립되면 1, 아니면 0인 이진변수

본 연구의 수학적 모형은 다음과 같이 혼합정수계획법 문제로 표현된다.

Min

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} w_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} e_{jk} x_{jk} + \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} f_{ir} y_{ir} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} g_{js} z_{js} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} x_{jk} \geq D_k, \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} w_{ij} \leq \sum_{r \in R} P_{ir} y_{ir}, \quad i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R} y_{ir} \leq 1, \quad i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq \sum_{s \in S} Q_{js} z_{js}, \quad j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{s \in S} z_{js} \leq 1, \quad j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq \sum_{i \in I} w_{ij}, \quad j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} y_{ir} \leq p_1, \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} z_{js} \leq p_2, \quad (9)$$

$$w_{ij} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (10)$$

$$x_{jk} \geq 0, \quad j \in J, \quad k \in K \quad (11)$$

$$y_{ir} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad r \in R \quad (12)$$

$$z_{js} \in \{0, 1\}, \quad j \in J, \quad s \in S \quad (13)$$

제약조건식 (2)는 모든 물류센터에서 소매대리점 k 로 수송하는 제품의 양의 합은 소매대리점에서 요구하는

수요량을 만족시켜야 한다는 것을 의미한다. 제약조건식 (3)은 생산용량 수준이 r 인 공장 i 가 설립되면 공장 i 에서 물류센터들로 수송하는 양은 최대한 해당 생산용량까지만 가능하고, 설립되지 않으면 공장 i 에서는 어떠한 제품도 수송할 수 없음을 뜻한다. 식 (4)는 공장 i 는 기껏해야 하나의 용량 수준만을 선택해서 공장 규모를 지을 수 있음을 보여준다. 즉, 공장 i 가 설립되지 않으면 생산용량은 0이고, 설립되면 하나의 용량 수준만을 선택해서 공장을 건축할 수 있다. 제약조건식 (5)는 저장용량 수준이 s 인 물류센터 j 가 설립되면 최대한 해당 용량까지만 각 소매대리점으로 제품을 수송할 수 있고, 설립되지 않는다면 물류센터 j 에서는 어떠한 제품도 수송할 수 없음을 뜻한다. 식 (6)은 물류센터 j 는 기껏해야 하나의 용량 수준만을 선택하여 설립할 수 있음을 나타낸다. 제약식 (7)은 물류센터 j 에서 소매대리점으로 수송하는 양은 공장에서 물류센터 j 로 수송하는 양을 초과할 수 없음을 나타낸다. 제약식 (8)과 (9)는 공장과 물류센터의 최대 설치 개수에 대한 상한 제약조건을 의미한다. 식 (10), (11), (12), (13)은 결정변수를 규정하는 제약조건식으로서, 특히 (12)와 (13)은 이진변수를 나타내고 있다.

제약식 (5)와 (7) 대신에 다음 두 제약식으로 대체하면 실행가능영역이

훨씬 더 작아져서 최적해를 구하는 과정이 단축될 수 있어 효율적이다.

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq \sum_{i \in I} w_{ij}, j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} w_{ij} \leq \sum_{s \in S} Q_{js} z_{js}, j \in J \quad (5')$$

결국 제약조건식 (5) 대신에 (5')를 사용해서 수학적 모형을 구성하게 되면 훨씬 좋은 모형이 된다.

IV. 현실문제에의 적용

1. 해법

본 연구에서 제시한 수학적 모형은 혼합정수계획법 문제로서 일반적으로 NP-hard 문제에 해당하여 풀기가 어렵다. 지금까지 이와 같은 유형의 문제들에 대해서는 라그랑지안 완화기법이나 유전해법, 그리고 협력적 공진화 알고리즘 등의 휴리스틱 방법을 개발하여 근사적인 해를 구하고자 시도하였다. 따라서 기존 연구들은 대체로 새로운 해법 개발에 연구의 주안점을 두고, 개발된 해법이 얼마나 효율적인지를 제시하는데 초점을 맞추고 있다. 본 연구에서는 기존 연구들처럼 효율적인 해법 개발에 목적을 두는 것이 아니라, 여러 가지 다양한 시나리오들을 설정하여 각각의 경우

에 가장 최적의 구조를 도출해 봄으로써 기업 현실에서 2단계 공급사슬 구조를 설계할 때 실질적인 도움을 주고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 최적해를 구하는 해법으로서 엑셀의 최적화 도구인 해찾기(Solver) 프로그램을 활용하고자 한다. 그런데 이 해찾기 프로그램은 변수 개수가 200개 이내인 문제의 경우에만 최적해를 찾을 수 있어 현실 문제에 적용하기에 한계가 있다. 다행히 상업용 프로그램인 Premium Solver Platform이라는 추가기능 프로그램을 엑셀에 추가하여 사용하게 되면 결정변수 개수가 8000개까지의 대형 문제에 대해서도 비교적 짧은 시간 내에 최적해를 얻을 수 있다(Powell and Baker 2011; Ragsdale 2011). 본 연구에서도 Premium Solver Platform을 엑셀에 추가하여 해를 구하고자 한다.

2. 예제 문제의 생성

본 연구에서 제시하는 2단계 공급사슬모형을 적용하여 분석해 보기 위해 예제 문제를 만들어야 한다. 예제 문제를 만들 때 가장 주의해야 할 점은 데이터를 어떻게 구성하느냐에 따라 최적해 구하는 것이 아주 단순해질 수 있다는 점이다. 이렇게 되면 제대로 된 분석이 이루어지기 어렵기 때문에 가능하면 현실 문제와 유사하

게 예제 데이터를 생성하는게 중요하다. 이를 위해 Amiri(2006) 연구에서는 2단계 공급사슬 문제를 풀기 위한 예제 문제를 현실 문제와 가깝도록 데이터를 생성하는 방법을 제시하고 있는데, 본 연구에서도 Amiri가 제시한 데이터 생성방법을 활용하였다.

본 연구에서 채택한 데이터 생성을 위한 기본 절차는 다음과 같다. 기본적으로 2단계 공급사슬 각 단계를 구성하는 공장, 물류센터, 소매대리점 위치를 가로, 세로 각각 100인 정사각형 내에서 균등분포로부터 생성하고, 소매대리점 수요량은 [10, 100] 균등분포로부터 생성하였다. 그리고 용량 수준은 공장과 물류센터 각각 5개씩 주어진 것으로 하여 이들 가운데 하나를 선택하도록 하였다.

2.1 공장과 물류센터의 용량 수준

1) 공장 후보지 생산용량 수준

$$q_1 = \frac{\sum_{k \in K} D_k}{p_1}$$

$$P_{i1} = 0.5q_1, P_{i2} = 0.75q_1, P_{i3} = q_1,$$

$$P_{i4} = 1.25q_1, P_{i5} = 1.5q_1, i \in I$$

2) 물류센터 후보지 저장용량 수준

$$q_2 = \frac{\sum_{k \in K} D_k}{p_2}$$

$$Q_{j1} = 0.5q_2, Q_{j2} = 0.75q_2, Q_{j3} = q_2,$$

$$Q_{j4} = 1.25q_2, Q_{j5} = 1.5q_2, j \in J$$

2.2 공장과 물류센터 설치 및

운영 고정비

1) 공장 설치 및 운영 고정비용

f_{i3} : 가로, 세로 100인 정사각형의 중심인 좌표값 (50,50)에서 i 번째 공장 위치와의 유클리드 거리에 40을 곱해서 설정한다. 만일, 이 값이 소수값이면 소수점 이하는 버리고 정수값으로 취해서 고정비용으로 설정한다. 그리고 나머지 용량 수준의 공장 설치 및 운영에 관한 고정비는 다음과 같이 구하여 정수값을 취한다.

$$f_{i1} = 0.6 \times f_{i3}, f_{i2} = 0.85 \times f_{i3},$$

$$f_{i4} = 1.15 \times f_{i3}, f_{i5} = 1.35 \times f_{i3}$$

2) 물류센터 설치 및 운영 고정비용

g_{j3} : 좌표값 (50,50)에서 j 번째 물류센터 위치와의 유클리드 거리에 10을 곱해서 구한다. 만일, 이 값이 소수값이면 소수점 이하는 버리고 정수값으로 취해서 고정비용으로 설정한다. 나머지 용량 수준의 물류센터 고정비는 공장의 경우와 동일한 비율로 구

하여 정수값을 취한다.

2.3 단위당 수송비

공장에서 물류센터로 제품 한 단위 수송하는데 드는 수송비 c_{ij} 는 공장 i 와 물류센터 j 사이의 유클리드거리를 5로 나누어 정수를 취한 뒤 1을 더하여 구한다. 1을 더하는 이유는 정수값을 취했을 때 단위당 수송비가 0이 되는 것을 막기 위해서 이다. 물류센터에서 고객대리점으로 제품 한 단위 수송하는데 드는 수송비 e_{jk} 는 마찬가지로 방법으로 물류센터 j 와 고객대리점 k 사이의 유클리드거리를 5로 나누어 정수를 취한 뒤 1을 더하여 구한다.

3. 해법 적용 결과

본 연구에서 제시한 수학적 모형의 현실 적용가능성을 알아보기 위해 <표 2>와 같이 모두 3개의 예제 문제를 설정하고 각 문제에 대해 해찾기를 적용해 보았다.

<표 2> 예제 문제

문제	후보지 개수		대리점 개수	최대 설치 수		용량 수준		총변수 개수
	공장	물류센터		공장	물류센터	공장	물류센터	
1	5	10	30	3	6	5	5	425
2	10	10	100	5	6	5	5	1200
3	10	20	200	6	10	5	5	4350

기본적인 엑셀 해찾기 기능에 Premium Solver Platform을 추가하게 되면 문제 3과 같이 변수 개수가 4천개를 넘는 대형 문제도 비교적 짧은 시간 안에 풀 수 있었다. 문제 1,

2, 3 각각에 대하여 해찾기를 적용하여 최적해를 구한 결과, 총비용, 설립된 공장과 물류센터, 설립된 공장과 물류센터의 생산/저장 용량 수준은 <표 3>과 같다.

<표 3> 해찾기 실행 결과

문제	총비용	설립		생산/저장 용량 수준	
		공장	물류센터	공장	물류센터
1	24750	2, 3, 5	3, 4, 5, 6, 8, 10	5, 3, 2	3, 5, 2, 5, 1, 3
2	53072	2, 4, 6, 7, 8	1, 3, 4, 5, 6, 9	3, 3, 1, 5, 4	1, 1, 4, 4, 4, 5
3	76913	4, 5, 6, 7, 9, 10	4, 5, 6, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 18	4, 2, 4, 4, 2, 3	2, 4, 4, 4, 5, 3, 1, 1, 5, 2

V. 시나리오 분석

전략적 의사결정은 네트워크 설계 즉, 공급사슬 네트워크의 구조와 관련된 의사결정이다. 전략적 의사결정에는 상충관계가 존재한다. 즉, 공장과 물류센터들의 개수를 늘리면 고객서비스 수준과 비용 측면에서 다음과 같은 장단점이 존재한다. 먼저 장점으로는 고객들에게 제품을 배송하는 시간이 짧아져 고객서비스 수준이 개선된다. 그리고 물류센터에서 고객까지의 수송비가 감소한다. 한편 단점으로는 각각의 물류센터에 일정 규모 이상의 제품을 재고로 저장해 두어야 하기 때문에 재고비용이 증대한다. 또한 공장과 물류센터 운영에 필요한

고정비용이 증대하고, 공장으로부터 물류센터까지의 수송비가 증대된다.

따라서 공장과 물류센터의 개수 및 위치 결정에 관한 의사결정은 고객서비스 수준과 물류비용에 결정적인 영향을 미치기 때문에 공급사슬이 얼마나 효율적으로 운영되느냐 여부에 결정적인 요인으로 작용하게 된다 (Simchi-Levi, Kaminski, and Simchi-Levi 2009).

본 연구에서는 물류센터의 설치 개수 변화에 따라 공장에서 물류센터까지의 수송비와 물류센터에서 고객까지의 수송비가 어떻게 변하는지 알아보기 위해 몇 가지 시나리오를 설정하여 문제를 풀어 보고자 하였다. 먼저 문제 3인 10×20×200 문제에 대해

공장 설치 개수와 물류센터 설치 개수에 대한 상한값 제약을 두지 않은 문제(이를 문제 4라고 표기한다)를 새로 풀어 보았다. 문제 4를 풀어 본 결과를 문제 3의 경우와 비교해 보면, 공장 설치 개수는 6개로 동일하나, 물류센터 설치 개수는 13개가 최적해로 나타났다. 그리고 총비용은 75,819로 문제 3의 총비용 76,913보다 줄어들었다. 이는 물류센터 최적 설치 개수가 13개 인데 반해, 문제 3에서는 물류센터 최대설치 개수를 10개로 제한하는 제약식이 추가되었기 때문이다.

문제 4의 최적해 결과에 의하면 설치된 공장은 4, 5, 6, 7, 9, 10이다. 지금부터 공장은 4, 5, 6, 7, 9, 10이 이

미 설치되어 있다고 가정하고, 물류센터 설치 개수에 대한 민감도 분석을 수행해 보고자 한다. 물류센터 설치 개수를 10에서 16까지 모두 7개를 설정하여 각각의 시나리오에 대해 문제를 풀어 비용의 변화를 비교 분석해 보았다. 분석 대상이 되는 비용에는 총비용뿐만 아니라 inbound 수송비, outbound 수송비, 공장 고정비, 물류센터 고정비이다. 여기서 inbound 수송비는 공장에서 물류센터로 가는 수송비를 뜻하고, outbound 수송비는 물류센터에서 소매대리점으로 가는 수송비를 의미한다. 그 결과는 다음 <표 4>와 같다.

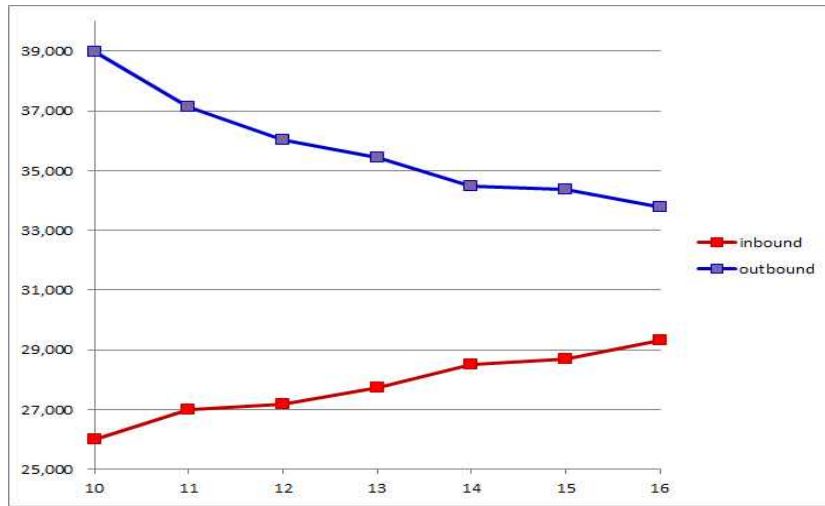
<표 4> 물류센터 설치 개수 변화에 따른 비용 변화

물류센터 설치 수	총비용	수송비		고정비	
		inbound	outbound	공장	물류센터
10	76950	25986	38973	8437	3554
11	76515	26993	37151	8437	3934
12	76092	27197	36046	8892	3957
13	75819	27745	35443	8699	3932
14	76051	28511	34472	9016	4052
15	76087	28702	34367	8699	4319
16	76116	29315	33766	8699	4336

총비용은 물류센터가 13개 설치될 때 최소가 됨을 알 수 있다. 여기서 총비용을 수송비와 고정비로 나누어서 살펴보자. <그림 1>에서 보는 바와 같이 물류센터 개수가 증가함에

따라 inbound 수송비는 증가하나 outbound 수송비는 감소하고 있다. 이는 앞에서 언급한 내용과 일치한다. 즉, 물류센터 설치 개수를 늘리면 물류센터에서 고객까지의 수송비는 감

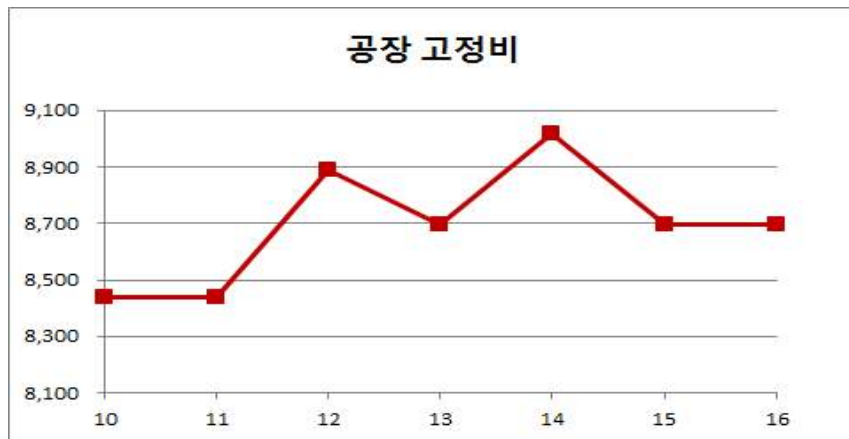
소하고 공장으로부터 물류센터까지의 수송비가 증대됨을 확인할 수 있다.



<그림 1> inbound 수송비와 outbound 수송비 변화

한편 고정비 측면을 살펴보면, 공장 고정비는 생산용량 수준이 달라짐에 따른 약간의 변화만 있을 뿐, 물류센터 설치 개수와 무관함을 알 수 있다.

그러나 물류센터 고정비는 물류센터의 설치 개수가 늘어남에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다. <그림 2>와 <그림 3>에서 이를 확인할 수 있다.



<그림 2> 물류센터 설치 개수에 따른 공장 고정비 변화



<그림 3> 물류센터 설치 개수에 따른 물류센터 고정비 변화

VI. 결 론

본 연구에서는 2단계 공급사슬 네트워크 설계를 위한 수학적 모형을 제시하고 엑셀 해찾기 기능을 이용하여 몇 가지 예제 문제들을 풀어 보았다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 고려하지 않았던 현실적 제한조건들을 모두 반영하였다. 공장과 물류센터의 동시 입지선정, 공장과 물류센터의 용량 수준 결정, 공장과 물류센터의 설치 개수 제한과 같은 조건들을 모두 문제에 반영함으로써 문제의 복잡성이 가장 높은 문제를 대상으로 수학적 모형을 제시하였다.

기존의 연구들은 대부분 최적해에 가까운 근사해를 찾아내는 효율적인 휴리스틱 해법 개발에 초점을 맞추었

다. 그리고 문제가 복잡해질수록 해법 개발이 어려워지기 때문에, 문제의 복잡성을 완화시키기 위해 현실에서 반드시 고려해야 하는 조건들을 한두 가지 배제한 문제들을 대상으로 하였다. 그러나 이와 같은 이론적인 연구들은 현실적으로 공급사슬 네트워크를 구성하고자 하는 기업 입장에서 큰 도움이 되지 못한다. 공급사슬 네트워크 설계는 전략적 의사결정 문제로서 의사결정이 한 번 이루어지면 비교적 오랜 기간 동안 변경을 할 수 없어, 여러 가지 시나리오들을 검토하여 아주 신중하게 이루어져야 하기 때문이다. 또한 이러한 연구들에서 다루고 있는 문제들에 대한 최적해를 구하는 상업용 프로그램들을 쉽게 이용할 수 있는 오늘날 상황에서 보면

효율적 해법 개발에 대한 이론적 연구가 예전에 비해 그 중요성이 많이 줄어들었다고 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 연구가 의미있게 되려면 실제 기업 입장에서 공급사슬 네트워크를 구축하고자할 때 고려해야 하는 현실적인 사항들을 모두 반영해야 한다. 공장이나 물류센터의 위치와 개수는 한 번 결정되면 또다시 변경할 수 없기 때문에 공급사슬 네트워크 설계를 위해 다양한 시나리오들을 설정하고 각 시나리오별 결과를 충분히 분석하여 최적의 의사결정을 내리는데 도움이 되어야 한다는 것이다.

본 연구에서는 이를 위해 문제 크기가 서로 다른 $5 \times 10 \times 30$, $10 \times 10 \times 100$, $10 \times 20 \times 200$ 등 세 가지 형태의 예제 문제를 만들고 엑셀의 해찾기 기능을 적용하여 풀어 보았다.

특히 공장 후보지 10군데, 물류센터 후보지 20군데, 최종 소매대리점 200군데인 문제에 대해서는 공장과 물류센터 설치 개수에 대한 상한 제약조건을 배제한 문제를 추가로 풀어 보았다. 여기서 구한 최적해를 바탕으로 공장의 최적 입지 선정 결과는 고정시킨 채 물류센터 설치 개수를 변화시켜가며 모두 7가지 시나리오를 설정하여 민감도 분석을 수행해 보았다. 그 결과 물류센터 설치 개수가 늘어남에 따라 inbound 수송비는 늘어나

는 반면에 outbound 수송비는 감소함을 알 수 있었다.

이러한 연구 결과로부터 얻을 수 있는 현실적인 시사점은 다음과 같다. 첫째, 물류센터의 수가 늘어난다는 것은 물류센터가 고객에게 가까워진다는 것을 뜻한다. 따라서 물류센터가 많아질수록 기업의 총비용은 늘어나게 되지만 고객의 서비스 수준은 증대된다는 것을 의미한다.

둘째, 기업이 공급사슬을 구축할 때 비용 측면과 고객의 서비스 수준 측면을 함께 고려하고자 한다면 물류센터 설치 개수의 변화에 따른 민감도 분석 결과는 기업의 의사결정에 상당한 도움을 줄 수 있다는 점이다. 그런 점에서 본 연구에서 제시하는 내용이 의미가 크다고 할 수 있을 것이다.

다만 본 연구에서는 outbound 수송비용으로 고객 서비스 수준을 간접적으로 판단할 수밖에 없는 한계가 있다. 향후 비용과 별도로 리드타임을 함께 고려한 연구가 진행되면 더욱 정확한 분석이 이루어지리라 생각된다. 또한 본 연구에서는 단일제품을 대상으로 국한시켰는데, 복수제품을 취급하는 문제로 확장하면 변수 개수가 늘어나 문제의 복잡성이 증대된다. 추후에 복수제품을 다루는 2단계 공급사슬 네트워크 설계를 위한 연구도 의미가 있으리라 생각된다.

참고문헌

1. 김상조(2002), 공급체인리더십이 SCM 성과에 미치는 영향, 경영정보연구, 11, 111-135.
2. 이재식(2009), 공급사슬관리(SCM)의 핵심성공요인과 추진유형이 기업의 경영성과에 미치는 영향-균형성과표(BSC)를 활용한 성과측정, 경영정보연구, 28(1), 45-69.
3. 정연주, 강낙중(2012), 공급사슬의 관계적 내재성과 재무적 성과와의 관계, 경영정보연구, 32(3), 1-20.
4. 한용호(2009), 2단계 수송문제에 대한 협력적 공진화 알고리즘 기반의 혁신적 해법, 산업혁신연구, 25(4), 227-251.
5. Amiri, A.(2006), Designing a Distribution Network in a Supply Chain System: Formulation and Efficient Solution Procedure, European Journal of Operational Research, 171, 567-576.
6. Chopra, S. and Meindl, P.(2012), Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation, 5th edition, NJ: Pearson Prentice Hall.
7. Jang, Y., Jang, S., Chang, B. and Park, J.(2002), A combined Model of Network Design and Production/distribution Planning for a Supply Network, Computers & Industrial Engineering, 43, 263-281.
8. Jayaraman, V.(1998), An Efficient Heuristic Procedure for Practical-sized Capacitated Warehouse Design and Management, Decision Science, 29, 729-745.
9. Pirkul, H. and Jayaraman, V.(1998), A Multi-commodity, Multi-plant, Capacitated Facility Location Problem: Formulation and Efficient Heuristic Solution, Computers and Operations Research, 25, 869-878.
10. Powell, S.G. and Baker, K.R.(2011), Management Science: The Art of Modeling with Spreadsheets, 3rd Ed., Wiley.
11. Ragsdale, C.(2011), Spreadsheet Modeling & Decision Analysis: A Practical Introduction to Management Science, 6th Ed., Cengage Learning.
12. Sabri, E.H. and Beamon, B.M.(2000), A Multi-objective

- Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain Design, *Omega*, 28, 581-598.
13. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. and Simchi-Levi, E.(2009), *Designing and Managing the Supply Chain-Concepts, Strategies, and Case Studies*, 3rd Ed., McGraw-Hill.
14. Tragantalerngsak, S., Holt, J. and Ronnqvist, M.(2000), An Exact Method for the Two-echelon, Single-source, Capacitated Facility Location Problem, *European Journal of Operational Research*, 123, 473-489.

Abstract

A Mathematical Model for Strategic Decision Making in Two Level Supply Chain Network Design[†]

Chung, Ki-Ho*

This study deals with a strategic decision making in two level supply chain network design. This study presents more realistic mathematical model than the previous studies by considering simultaneous location of plants and distribution centers, determination of capacity level for both plants and distribution centers, and upper limit condition for numbers of locating plants and distribution centers.

This paper tries to help the strategic decision making for two level supply chain network design. For this purpose, three different sized numerical examples are generated and optimal solutions are obtained by applying Excel Solver program. And sensitivity analysis is performed for the biggest sized example problem, which has 10 potential plants, 20 potential distribution centers, and 200 customer zones. After the plants being located are fixed, optimal minimum costs are obtained and compared for each of 7 different numbers of distribution centers to be located. As the number of distribution centers increases, changes in inbound transportation cost and outbound transportation cost can be derived. In case of considering cost as well as customer satisfaction level for two level supply chain network design, the analysis of this changes may help more sophisticated decision making.

Key Words : Two level supply chain network, Strategic decision making, Sensitivity analysis

[†] This research was supported by Kyungsung University Research Grants in 2013.

* Professor, Dept. of Management Information Systems, Kyungsung University, khchung@ks.ac.kr