

☒ 연구논문

재고와 수송계획문제를 고려한 통합물류시스템 설계
 - A Design for Integrated Logistics System with Inventory
 Control and Transportation Planning Problem -

우 태희 *
 Woo, Tae Hee
 조 남호 **
 Cho, Nam Ho

Abstract

In many distribution systems important cost reductions and/or service improvements may be achieved by adopting an efficient inventory policy and proper selection of facilities. These efficiency improvements and service enhancements clearly require an integrated approach towards various logistical planning functions. The areas of inventory control and transportation planning need to be closely coordinated.

The purpose of this paper is to construct an integrated model that can minimize the total cost of the transportation and inventory systems between multiple origin and destination points, where in origin point i has the supply of commodities and in destination point j requires the commodities. In this case, demands of the destination points are assumed random variables which have a known probability distribution. Using the lot-size reorder-point policy and the safety stock level that minimize total cost we find optimal distribution centers which transport the commodities to the destination points and suggest an optimal inventory policy to the selected distribution center. We also show if a demand greater than one unit will occur at a particular time, we describe the approximate optional replenishment policy from computational results of this lot-size reorder-point policy.

This model is formulated as a 0-1 nonlinear integer programming problem. To solve the problem, this paper proposes heuristic computational procedures and a computer program with UNIX C language. In the usefulness review, we show the meaning and validity of the proposed model and exhibit the results of a comparison between our approach and the traditional approach, respectively.

1. 서론

현대 기업경영에서 최대 현안중의 하나는 물류(物流)의 효율적 관리 및 운영이며, 물자흐름의 연결점으로서 물류거점시설 혹은 물류센터는 물류현대화의 전략거점이라는 점에서 매우 중

* 서일대학 공업경영과
 ** 건국대학교 산업공학과

요하다. 물류센터는 수·배송, 포장, 보관, 가공유통 및 정보센터의 제 기능을 가지고 있으며, 이들 기능과 관련된 물류비용은 수송비, 포장비, 보관비, 하역비, 정보비 등으로 구성된다.

또한 물류시스템에서 물류비용의 대부분을 차지하는 재고 및 수송비의 절감이나 서비스의 향상은 물류센터의 수와 입지로 선정된 물류센터에서 재고정책의 효율성 여하에 따라 변동되며, 물류센터의 재고관련비용과 수요처에 대한 수송비용의 절감을 위하여 통합관리가 요청된다. 미국의 Agrico사는 통합화의 중요성을 인식하여 생산, 수송 및 재고에 대한 통합시스템을 구축한 최소물류비용 모형과 이 모형의 해법으로 PNET/LP라고 하는 선형계획법을 이용한 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며[13], JIT(Just In Time)개념을 물류시스템의 핵심적인 기능인 수송문제에 적용시킨 모형[10]과 물류네트워크 상에서 고객의 요구에 맞춰 효과적으로 제품재고를 분배하고, 불확실하게 발생하는 현상에 신속히 대응할 수 있는 제품납기스케줄에 대한 물류전략으로 DRP(Distribution Requirements Planning)에 대한 연구[14]가 있다.

물류시스템의 의사결정 지원분야에서는 수송비용과 재고관련비용 사이의 적절한 균형을 유지하기 위한 통합모형의 구축을 예로 들 수 있다. 수요가 확정적일 경우 수량할인을 고려한 모형[9], 확정적인 차량경로문제에 대하여 수송비용, 재고유지비용과 결품비용을 고려한 모형[11], 트럭에 의하여 화물을 수송하는 물류시스템에서 재고 및 수송비용이 적재량에 의존할 경우의 비용에 대한 최소화전략을 제시한 모형[8], 하나의 물류센터와 복수의 도매상에 대하여 모든 도매상이 그들의 수요를 충족할 경우 수송비용과 재고관련비용을 최소화하는 통합조달정책을 결정하기 위한 모형[4]이 있다.

이러한 모형은 수요량이 확정적인 경우가 대부분으로 불확실한 수요량에 대한 재고관리방식과 수송문제를 동시에 고려한 연구[1][20]가 제시되었지만, 横山(Yokoyama)의 모형은 조달기간 중의 결품확률에 대하여 임의로 허용결품률을 지정하여 최적성에 문제가 있다. 또 결품시 부재고(負在庫)인 경우를 가정하였으나 모형에 결품비용을 고려하지 않았으며, 재고정책에서 단위기간에 대한 구분이 모호하여 조달기간이 단위기간의 몇 배가되는 비현실적인 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 재고를 분산보유하고 있는 다수의 물류센터와 다수의 수요처가 있는 경우, 재고에 관한 비용과 수송비용의 총합을 최소화하는 통합모형을 구축한다. 이 경우 다수 수요처의 수요량이 기지(既知)의 확률분포를 갖는 확률변수인 경우를 고려하여 다수의 수요처에 수송할 물류센터의 선정문제, 부재고(負在庫)시와 유실판매(遺失販賣)시의 결품비용을 고려하여 선정된 각각의 물류센터가 연속재고모형의 발주점방식(Lot-Size Reorder-Point Policy 또는 (Q_i, r_i) 방식이라고 함.)[15]에 의한 최적발주량 및 발주점 그리고 안전재고를 결정하는 최적재고정책을 제시한다. 또 수요가 1 단위 이상 발생할 경우에 대하여 본 연구의 결과를 이용하여 임의조달방식(Optional Replenishment Policy 또는 (s, S) 방식이라고 함.)[15]에 의한 재고정책을 제시한다.

본 연구모형은 0-1 비선형정수계획법으로 정식화하며, 최적해를 구하기 위하여 발견적 방법에 의한 계산절차와 컴퓨터 프로그램을 개발한다. 그리고 유용성검토를 통하여 기존의 방법과 비교·분석하여 본 연구에서 제시된 통합모형의 타당성을 검증한다.

2. 재고와 수송계획의 통합모형 설계

2.1 재고와 수송계획의 통합 필요성

물류시스템의 통합설계에 있어 고객에 대한 서비스와 물류비용과의 득실관계를 고려한 최적관리수준을 결정하여야 하는 데 이를 위하여 물류시스템에서 발생하는 물류비용의 구성현황을 파악하여야 한다.

우리 나라를 포함한 미국, 일본의 물류비의 구성비율은 업종에 따라 다르나 제조업체의 평균 비율로 보면 수송비 및 보관비가 점유하는 비율이 전체비용의 60%에 이르고[2][18], 서로 밀접하게 연관되어 있다. 예를 들어 물류시설의 증가로 수송비용은 감소하나 반대로 재고관련비용은 증가할 것이다. 따라서 물류시스템에서 물류비용의 대부분을 차지하고 있는 비용의 절감이나 서비스의 향상은 물류센터의 수와 선정된 물류센터에서 채택하는 재고정책의 효율성 여하에 달려있다. 이러한 효율증진이나 서비스의 향상은 명백히 여러 물류기능에 대하여 통합화를 요구하며, 그 중에서도 수요처의 주문에 대비하여 재고를 배치할 물류센터의 선정과 재고 및 수송계획문제에 대한 통합화가 물류시스템 설계시 중요한 인자가 된다.

즉, 물류시스템에서 공급자는 제조공장, 창고 또는 물류센터가 되며, 고객 또는 수요처는 도매상, 대리점, 다른 물류센터 또는 다른 제조공장이 될 수 있는 데 다수의 공급처에서 다수의 수요처로 제품을 수송하는 데 발생하는 재고관련비용과 수송비용의 합을 최소화하는 시스템적 접근방법에 의한 모형개발이 필요한 것이다.

2.2 통합모형의 구축

본 연구에서 재고관리와 수송계획문제를 통합하기 위한 가정 및 기호를 제시한다.

- (1) 취급제품은 1 종류만을 고려한다.
- (2) 수요처의 주문에 따라 물류센터로부터 제품을 수송, 공급하며, 하나의 수요처에는 항상 정해진 하나의 물류센터로부터 공급된다.
- (3) 수요처의 수요량은 확률변수이며, 단위기간당 수요량의 평균과 분산은 수요처별로 또 시간경과에 따라 독립적인 기지의 정규분포에 따른다.
- (4) 결품시 손실비용이 발생하며, 부재고와 유실판매인 경우를 고려한다.
- (5) 각 물류센터는 정량발주방식에 의하여 재고수준을 관리하며, 재고유지비용, 발주비용, 결품비용 및 수송비용의 총비용을 최소화할 수 있도록 각 물류센터의 수송대상 수요처를 결정하고, 이 때 발주점, 발주량 그리고 안전재고수준의 결정을 대상으로 한다.

i : 물류센터(재고설치 후보지)의 번호 ($i=1,2, \dots, m$)

j : 수요처의 번호 ($j=1,2, \dots, n$)

C_{ij} : i 물류센터로부터 j 수요처로 수송할 경우 단위당 수송비용

r_i : i 물류센터의 발주점

Q_i : i 물류센터의 발주량

C_{hi} : i 물류센터의 연간 재고단위당 유지비용

C_{oi} : i 물류센터의 1회당 발주비용

C_{Bi} : i 물류센터의 단위결품당 부재고비용

C_{LSi} : i 물류센터의 단위결품당 유실판매비용

L_i : i 물류센터에의 납입 조달기간

D_j : j 수요처의 단위시간당 수요량(확률변수)

μ_j : j 수요처의 연간 수요량의 평균 (= EVR_j)

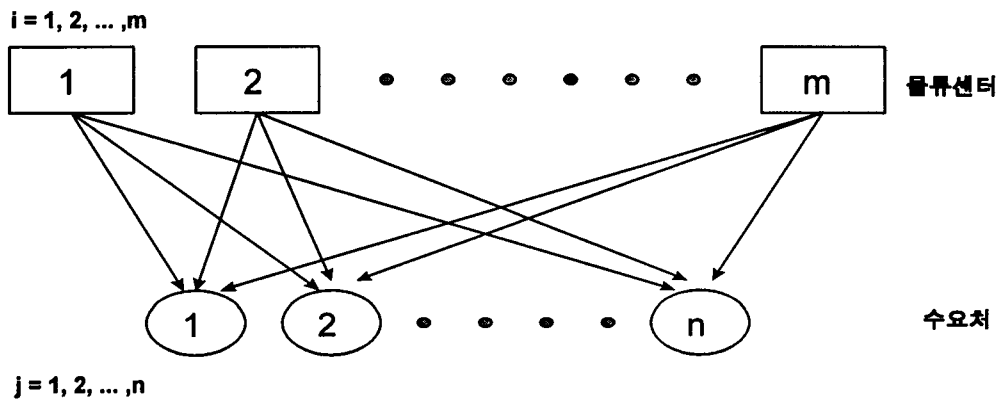
δ_j : j 수요처의 연간 수요량의 표준편차 (= STD_j)

x_{ij} : j 수요처를 i 물류센터에서 취하면 1, 그렇지 않을 경우 0 인 0-1변수

- E_i : i 물류센터로 배분된 단위시간당 수요량(확률변수)
- M_i : i 물류센터에 배분된 수요량의 평균
- V_i : i 물류센터에 배분된 수요량의 분산
- OHI_i : i 물류센터의 재고량
- B_i : i 물류센터의 결품량
- I_i : i 물류센터의 순재고량
- s_i : i 물류센터의 안전재고량
- y : 조달기간중의 수요량(확률변수)
- $E_i(y)$: i 물류센터의 조달기간중의 평균수요량 ($= EVRL_i, L, M_i$)
- $STDL_i$: i 물류센터의 조달기간중의 표준편차 ($= \sqrt{L_i V_i}$)

2.2.1 부재고(Back-Ordered)를 고려한 경우의 통합모형

(그림 2-1)과 같이 m 개의 물류센터(재고배치후보지)와 n 개의 수요처가 있는 물류시스템에서 수요처의 수요량은 확률변수이며, 단위시간당 수요량의 평균과 분산이 시간적으로 일정한 독립된 기지의 정규분포에 따를 경우 i 물류센터에서 담당하는 수요처의 수요량의 합 E_i 의 평균 M_i 와 분산 V_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(그림 2-1) 연구모형의 제품흐름 네트워크

$$E_i = \sum_{j=1}^n D_j x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m) \tag{2-1}$$

$$M_i = \sum_{j=1}^n \mu_j x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m) \tag{2-2}$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m) \tag{2-3}$$

그리고 하나의 물류센터로부터 여러 수요처로 수송할 수 있지만 하나의 수요처는 항상 정해진 하나의 물류센터로부터 제품을 공급받는 것으로 하며, 일단 각 물류센터에서 담당하는 수요처가 정해지면 i 물류센터에서 받는 수요량의 분포는 확정적이며, 기지인 경우가 되기 때문에

i 물류센터에 대한 재고정책으로 발주점방식인 (Q_i, r_i) 모형을 고려한다.

각 단위의 구매가는 같다고 가정하며, 구매비용은 고정적이기 때문에 총비용함수에서 제외한다. 또 선정된 물류센터에서의 재고정책은 동일하며, 여기서 $K(Q_i, r_i)$ 는 각 발주량이 Q_i 단위이고, 재발주점 r_i 에서 발주할 경우 i 물류센터의 연간기대총비용을 나타낸다. 그러면 $K(Q_i, r_i) = (\text{연평균 재고유지비용}) + (\text{연평균 발주비용}) + (\text{연평균 결품비용})$ 이다. 최적 재발주점 및 발주량을 결정하기 위하여 평균결품량은 평균재고량수준에 비해 매우 적다고 가정한다. 대부분의 경우 결품은 보통 일련의 주기중 매우 작은 기간에 발생하므로 이러한 가정은 합리적이라고 할 수 있다. 따라서 시점 t 에서의 평균순재고량 $E(I)$ 는

$$E(I) \cong \text{시점 } t \text{에서의 평균재고량 } [E(OH)] \tag{2-4}$$

을 산출할 수 있다.

연간재고유지비용은 연간 재고단위당유지비용(C_h)에 평균재고량 $[E(OH)]$ 을 곱하여 구할 수 있는 데 식 (2-4)로부터 연간 재고단위당유지비용(C_h)에 평균순재고량 $[E(I)]$ 을 곱하여 연간 재고유지비용을 근사적으로 구할 수 있다. 평균수요발생률이 일정하다고 하면 하나의 주기(Cycle) 동안의 평균순재고량 $[E(I)]$ 은 주기가 시작되는 지점에서의 평균순재고량에 주기가 끝나는 지점에서의 평균순재고량을 더하여 2로 나눈 값이 된다.

주기가 끝나는 지점에서의 재고수준은 발주량 Q_i 가 도착함에 따라 증가하며, 이 지점은 동시에 주기가 시작되는 지점이 된다. 그러므로 주기가 시작되는 지점에서 평균순재고량은 $r_i - L_i M_i + Q_i$ 가 된다. 그러면 주기동안의 평균순재고량 $[E(I)]$ 은 $Q_i/2 + r_i - L_i M_i$ 이 된다.

따라서 연평균재고유지비용은 $C_h(Q_i/2 + r_i - L_i M_i)$ 가 되며, 연평균발주비용은 회당 발주비용(C_o)에 연평균발주회수(M_i/Q_i)를 곱한 $C_o(M_i/Q_i)$ 가 된다.

연평균결품비용을 구하기 위하여 연간 발생된 평균결품량은 단순히 주기당 발생된 평균결품량에 연간 평균주기수를 곱한 것이 된다. 즉, M_i/Q_i 를 주기당 발생된 평균결품수에 곱한 것이 된다. 하나의 주기당 발생된 결품량 $B(y, r_i)$ 은 발주량이 도착할 때 장부상(帳簿上)의 결품량이 될 것이다. 만일 조달기간중의 수요량(확률변수)이 y 라면, 결품량은 식 (2-5)와 같이 된다.

$$B(y, r_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } y - r_i < 0, \\ y - r_i & \text{if } y - r_i \geq 0 \end{cases} \tag{2-5}$$

그러므로 평균결품량 $E[B(r_i)]$ 은 식 (2-6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[B(r_i)] &= \int_0^\infty B(y, r_i) h(y) dy = \int_{r_i}^\infty (y - r_i) h(y) dy \\ &= \int_{r_i}^\infty y h(y) dy - r_i H(r_i) \end{aligned} \tag{2-6}$$

여기서 $h(y)$ 는 조달기간중 수요량의 분포이고, $H(r_i)$ 은 $\int_{r_i}^\infty h(y) dy$ 이다. 그리고 $h(y)$ 가 평균 $L_i M_i$ (조달기간중의 평균수요량)와 표준편차 $\sqrt{L_i V_i}$ 를 갖는 정규분포라면 즉, $h(y) = n(L_i M_i, \sqrt{L_i V_i})$ 이고, $\phi(y)$ 가 정규분포의 밀도함수, $\Phi(y) = \int_y^\infty \phi(v) dv$ 라면,

$$\begin{aligned}
 \int_{r_i}^{\infty} yh(y) dy &= \int_{r_i}^{\infty} yn(L_iM_i, \sqrt{L_iV_i}) dy = \int_{r_i}^{\infty} \left(\frac{y}{\sqrt{L_iV_i}} \right) \phi\left(\frac{y-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) dy \\
 &= \sqrt{L_iV_i} \int_{(r_i-L_iM_i)/\sqrt{L_iV_i}}^{\infty} v\phi(v) dv + L_iM_i \int_{(r_i-L_iM_i)/\sqrt{L_iV_i}}^{\infty} \phi(v) dv \\
 &= \sqrt{L_iV_i} \phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) + L_iM_i \Phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right)
 \end{aligned} \tag{2-7}$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 연평균결품비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_{Bi}(M_i/Q_i) [\int_{r_i}^{\infty} yh(y) dy - r_iH(r_i)] \\
 = C_{Bi}(M_i/Q_i) \left\{ (L_iM_i - r_i) \Phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) + \sqrt{L_iV_i} \phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) \right\}
 \end{aligned}$$

그러므로 재고와 관련된 연간총비용 $K(Q_i, r_i)$ 는

$$\begin{aligned}
 K(Q_i, r_i) &= C_{\alpha}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_iM_i) + \\
 &\quad C_{Bi}(M_i/Q_i) \left\{ (L_iM_i - r_i) \Phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) + \sqrt{L_iV_i} \phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{2-8}$$

이 된다. 그리고 연간총수송비용은 식 (2-9)와 같다.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \mu_j x_{ij} \tag{2-9}$$

따라서 재고에 관한 비용과 수송비용의 총합을 최소화하는 재고 및 수송계획의 통합모형은 식 (2-8) 및 (2-9)를 더한 물류시스템의 연평균기대총비용을 최소화하는 모형이 된다. 이 모형은 $x_{ij}, M_i, V_i, r_i, Q_i$ 를 변수로 하고, 이를 모형화하면 [모형 1]과 같다.

[모형 1]

목적함수(최소화) :

$$\begin{aligned}
 Z &= \sum_{i=1}^m [C_{\alpha}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_iM_i) + \\
 &\quad C_{Bi}(M_i/Q_i) \left\{ (L_iM_i - r_i) \Phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) + \right. \\
 &\quad \left. \sqrt{L_iV_i} \phi\left(\frac{r_i-L_iM_i}{\sqrt{L_iV_i}} \right) \right\}] + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \mu_j x_{ij}
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

제약조건 :

$$M_i = \sum_{j=1}^n \mu_j x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m), \tag{2-2}$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m), \tag{2-3}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n), \tag{2-11}$$

$$x_{ij} = 0, 1 \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n), \tag{2-12}$$

$$r_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m), \quad (2-13)$$

$$Q_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m). \quad (2-14)$$

식 (2-11) 및 (2-12)는 하나의 수요처는 하나의 물류센터로부터 제품을 공급받는다 것을 나타내는 제약식이다. [모형 1]의 제약식을 만족하는 범위 내에서 x_{ij} (및 M_i, V_i)가 정해지면 이 모형은 선정된 물류센터마다의 r_i, Q_i 만의 최적화문제가 되며, x_{ij} 가 정해진 경우 선정된 물류센터마다의 r_i, Q_i 만을 변수로 하는 최소화문제 [모형 2]로 분해할 수 있다.

[모형 2]

목적함수(최소화) :

$$K_i = C_{oi}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_i M_i) + C_{Bi}(M_i/Q_i) \left\{ (L_i M_i - r_i) \phi \left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) + \sqrt{L_i V_i} \phi \left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) \right\} + \sum_{j=1}^n C_{ij} \mu_j x_{ij} \quad (2-15)$$

제약조건 :

$$0 \leq Q_i \leq \infty, \quad 0 \leq r_i \leq \infty \quad (2-16)$$

[모형 2]의 최적해인 Q_i^* 와 r_i^* 는 $\frac{dK_i}{dQ_i} = 0$ 와 $\frac{dK_i}{dr_i} = 0$ 을 동시에 만족하는 Q_i 와 r_i 이다. 편의를 위해 $\phi(r_i)$ 와 $\Phi(r_i)$ 대신에 $h(r_i)$ 와 $H(r_i)$ 를 사용하면

$$\frac{dK_i}{dQ_i} = \frac{-C_{oi}M_i}{Q_i^2} + \frac{C_{hi}}{2} - \frac{C_{Bi}M_i E[B(r_i)]}{Q_i^2} = 0 \quad (2-17)$$

$$\frac{dK_i}{dr_i} = C_{hi} + \frac{C_{Bi}M_i [-r_i h(r_i) + r_i H(r_i) - H(r_i)]}{Q_i} = 0 \quad (2-18)$$

식 (2-17) 및 (2-18)을 Q_i^* 와 r_i^* 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{2M_i \times (C_{oi} + C_{Bi}M_i E[B(r_i)])}{C_{hi}}} \quad (2-19)$$

$$\Phi(r_i^*) = H \left(\frac{r_i^* - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) = \frac{Q_i C_{hi}}{C_{Bi} M_i} \quad (2-20)$$

식 (2-19)에서 EOQ(Economic Order Quantity)가 조달기간중의 수요량의 표준편차보다 작지 않는 한 EOQ 값이 Q_i^* 값과 거의 일치한다[7][17]. 따라서 최적발주량을 구하는 데 식 (2-21)과 같이 EOQ 공식을 이용한다.

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{2M_i C_{oi}}{C_{hi}}} \quad (2-21)$$

식 (2-20)은 조달기간 동안의 수요가 재주문점보다 클 확률로서 결품확률을 의미한다. 따라

서 발주점(r_i)을 구하기 위해서는 곁품확률을 이용하여야 하며, 이는 발주점이 한계이익(Marginal Benefit)과 한계비용(Marginal Cost)이 같아지는 점에서 결정되어야 한다. 식 (2-20)의 곁품확률은 표준정규밀도(Standard Normal Density)에서 z 부터 ∞ 까지의 면적 값을 나타내는데 이는 누적정규분포표에서 쉽게 찾을 수 있지만 컴퓨터로 문제수행시 직접 값을 구하여야 한다. 따라서 다음 식과 같이 오차함수(Error Function)에 대하여 뉴턴-랍슨(Newton-Raphson) 방법을 이용하여 z 값을 구한다[3][16].

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \tag{2-22}$$

$$\Phi(z) = \int_z^{\infty} \phi(t) dt \tag{2-23}$$

$$\Phi\left(\frac{r-EVRL}{STDL}\right) = \frac{[1+\gamma(1/2, z^2/2)/\Gamma(1/2)]}{2} = H(r) \tag{2-24}$$

여기서 $erf(z) = \frac{\gamma(1/2, z^2/2)}{\Gamma(1/2)}$ 이며, 불완전감마함수의 형태를 갖는다.

식 (2-24)를 만족하는 z 값을 구한 다음 식 (2-25)와 같이 발주점을 계산하며, 식 (2-26)과 같이 안전재고수준을 계산한다.

$$r_i^* = EVRL_i + z_i \times STDL_i \tag{2-25}$$

$$SSL_i^* = r_i^* - EVRL_i \tag{2-26}$$

2.2.2 유실판매(Lost-Sales)를 고려한 경우의 통합모형

유실판매비용이 유실이익(Lost Profit)을 포함하는 비용함수에서 연평균비용의 최소화는 연평균이익의 최대화와 등가(等價)이다. 일반적으로 연간 평균주기회수(Average Number of Cycles Per Year)는 이 시스템이 곁품되는 주기당 평균시간길이를 T 라고 할 때 M_i/Q_i 대신에 $M_i/(Q_i + M_i T)$ 로 나타낸다. 그러나 실제적으로 T 는 주기의 총기간에 비해 매우 작은 부분을 차지하는 것이 일반적이며, 분석시 T 를 포함하는 것은 불편하므로 다음과 같이 가정하여 분석한다.

[가 정] T 의 값은 무시할 만큼 아주 적기 때문에 연간 평균주기회수는 M_i/Q_i 로 한다. 또 유실판매비용은 C_{LSi} 로 하며, 이는 시간에 비례하지 않으나 C_{LSi} 는 재고판매이익(기회비)을 포함하는 것으로 가정한다.

부재고시와 유실판매의 차이점은 안전재고의 평가에 있다. 발주품이 도착하기 직전의 재고량은 평균적으로 안전재고 s_i 가 될 것이며, 발주품이 도착하는 즉시 재고량은 평균적으로 $Q_i + s_i$ 가 될 것이다. 그러므로 평균재고량은 주기 내에서 $Q_i + s_i$ 와 s_i 사이에서 변할 것이며, 평균은 $Q_i/2 + s_i$ 가 된다. 조달기간중의 수요량을 y 라고 하고, 발주량이 도착할 경우의 재고수준을 $\epsilon(L_i M_i, r_i)$ 라고 하면,

$$\epsilon(L_i M_i, r_i) = \begin{cases} r_i - y & \text{if } r_i \geq y \\ 0 & \text{if } r_i < y \end{cases} \tag{2-27}$$

발주량이 도착할 때 안전재고량(s_i)은 식 (2-28)과 같다.

$$\begin{aligned}
 s_i &= \int_0^{\infty} \varepsilon(L_i M_i, r_i) h(y) dy = \int_0^{r_i} (r_i - y) h(y) dy \\
 &= \int_0^{\infty} (r_i - y) h(y) dy - \int_{r_i}^{\infty} (r_i - y) h(y) dy \\
 &= r_i - L_i M_i + \int_{r_i}^{\infty} y h(y) dy - r_i H(r_i)
 \end{aligned} \tag{2-28}$$

따라서 주문재고의 연평균비용은 다음의 식 (2-29)와 같다.

$$C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_i M_i) + C_{hi} \left(\int_{r_i}^{\infty} y h(y) dy - r_i H(r_i) \right) \tag{2-29}$$

그리고 연평균발주비용은 회당발주비용(C_{oi})에 연평균발주회수(M_i/Q_i)를 곱한 $C_{oi}(M_i/Q_i)$ 가 된다.

연평균결품비용을 구하기 위하여 평균유실판매수는 주기당 평균부재고수와 같다. 만일 조달기간중의 수요량(확률변수)이 y 라면, 유실판매의 수(결품량)는 $y - r_i \geq 0$ 이면 $y - r_i$ 가 되고, 그렇지 않으면 0이 될 것이다. 이는 식 (2-6)과 같다. 따라서 유실판매시의 연평균재고비용은

$$\begin{aligned}
 K(Q_i, r_i) &= C_{oi}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_i M_i) + \\
 &\quad (C_{hi} + C_{LSi}(M_i/Q_i)) \left(\int_{r_i}^{\infty} y h(y) dy - r_i H(r_i) \right) \\
 &= C_{oi}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_i M_i) + \\
 &\quad (C_{hi} + C_{LSi}(M_i/Q_i)) \left\{ (L_i M_i - r_i) \Phi \left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) + \sqrt{L_i V_i} \phi \left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{2-30}$$

이 되며, 연간총수송비용은 식 (2-9)와 같다.

유실판매를 고려한 경우의 통합모형은 식 (2-30) 및 (2-9)를 더한 물류시스템의 연평균기대총비용을 최소화하는 모형이 되며, 이 모형은 $x_{ij}, M_i, V_i, r_i, Q_i$ 를 변수로 한다. 이를 모형화하면 [모형 3]과 같다.

[모형 3]

목적함수(최소화) :

$$\begin{aligned}
 Z &= \sum_{i=1}^m [C_{oi}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_i M_i) + \\
 &\quad (C_{hi} + C_{LSi}(M_i/Q_i)) \left\{ (L_i M_i - r_i) \Phi \left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) + \sqrt{L_i V_i} \phi \left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}} \right) \right\}] + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \mu_j x_{ij}
 \end{aligned} \tag{2-31}$$

제약조건 : 식 (2-2), (2-3), (2-11), (2-12), (2-13), (2-14).

2.2.1의 경우와 마찬가지로 x_{ij} (및 M_i, V_i)가 [모형 3]의 제약식을 만족하는 범위 내에서 정해지면 이 모형은 선정된 물류센터마다의 r_i, Q_i 만의 최적화문제가 되며, x_{ij} 가 정해진 경우

선정된 물류센터마다의 r_i, Q_i 만을 변수로 하는 최소화문제 [모형 4]로 분해할 수 있다.

[모형 4]

목적함수(최소화) :

$$\begin{aligned}
 K_i = & C_{oi}(M_i/Q_i) + C_{hi}(Q_i/2 + r_i - L_i M_i) + \\
 & (C_{hi} + C_{LSi}(M_i/Q_i)) \left\{ (L_i M_i - r_i) \phi\left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}}\right) + \right. \\
 & \left. \sqrt{L_i V_i} \phi\left(\frac{r_i - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}}\right) \right\} + \sum_{j=1}^n C_{ij} \mu_j x_{ij}
 \end{aligned} \tag{2-32}$$

제약조건 : 식 (2-16)

[모형 4]를 만족하는 최적해 Q_i^* 와 r_i^* 는 $\frac{dK_i}{dQ_i} = 0$ 과 $\frac{dK_i}{dr_i} = 0$ 을 동시에 만족하는 Q_i 와 r_i 이다. Q_i^* 와 r_i^* 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{2M_i C_{oi}}{C_{hi}}} \tag{2-21}$$

$$\phi(r_i^*) = H\left(\frac{r_i^* - L_i M_i}{\sqrt{L_i V_i}}\right) = \frac{Q_i C_{hi}}{(C_{LSi} M_i + Q_i C_{hi})} \tag{2-33}$$

그리고 (2-25)와 같이 발주점(r_i^*)을 계산하며, 식 (2-26)과 같이 안전재고수준을 계산한다.

2.3 임의조달방식의 적용

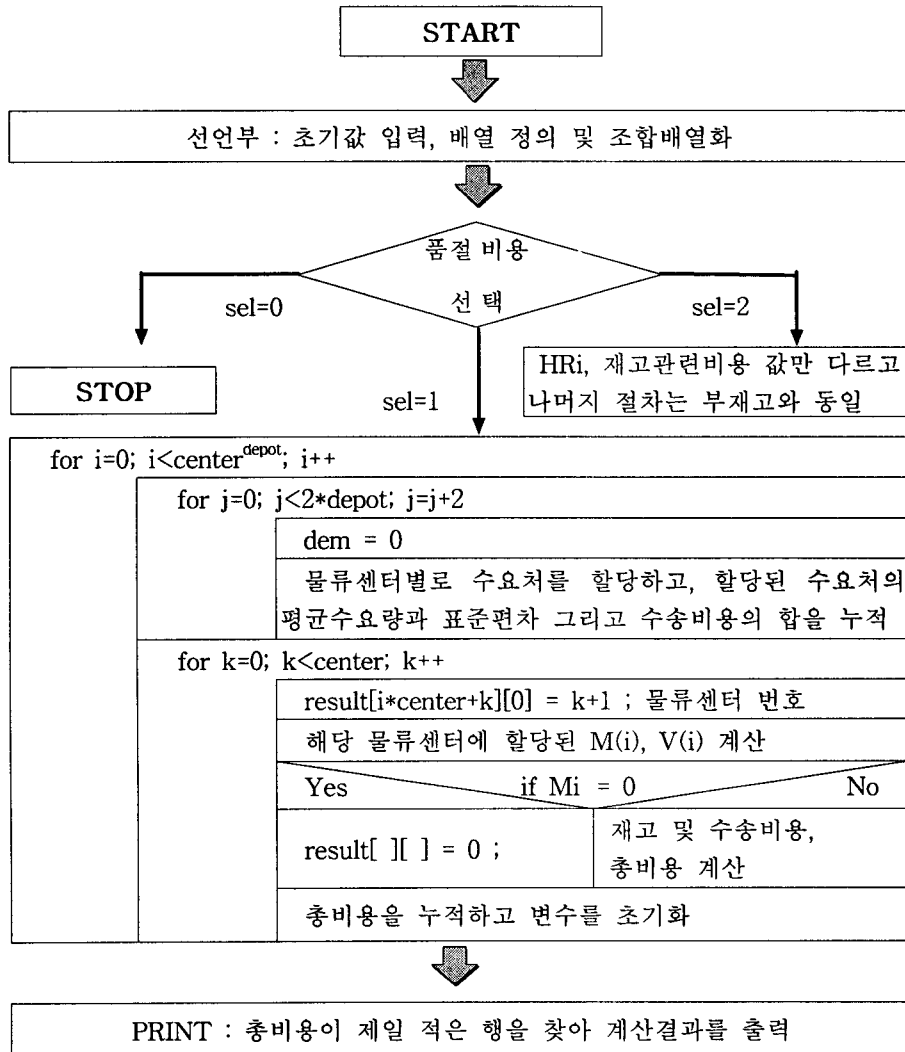
본 연구는 발주점방식인 (Q_i, r_i) 재고정책에서 재고수준이 재발주점 r_i 에 도달하였을 때 주문이 정확히 이루어진다고 가정하였고, 이에 따라 하나의 주기가 시작되는 지점과 끝나는 지점에서 기대재고수준을 계산하였다. 그러나 어느 특정기간에 수요가 1 단위 이상 발생한다고 하면, 발주시기는 재고수준이 r_i 보다 적을 때 이루어질 것이다. 이 경우 하나의 주기가 시작되는 지점과 끝나는 지점에서의 재고수준에 대한 계산이 다르게 된다. 따라서 1 단위보다 크게 수요가 발생한다면 본 연구의 (Q_i, r_i) 모형으로 연간기대총비용을 최소화하는 재고정책을 계산할 수 없기 때문에 임의조달방식인 (s, S) 재고정책을 사용하여야 한다.

(s, S) 재고정책은 재고수준이 s 보다 작거나 같을 경우에 발주가 이루어지며, 발주량의 크기는 재고수준 S 에 이를 만큼 충분히 한다. 최적 (s, S) 재고정책의 정확한 계산은 어려우나 근사적으로 최적재고정책을 구하는 경우는 $S - s$ 를 경제적 발주량 Q_i 와 같게 하고, s 는 식 (2-25)에서 구한 r_i 와 같게 하여 $S = r_i + Q_i$ 를 구한다.

3. 재고관련비용과 수송비용을 고려한 통합모형의 해법

본 연구모형은 x_{ij} 만을 변수로 하는 경우 0-1 변수만으로 결정되는 문제임에도 불구하고 복잡한 비선형함수가 포함되어 있기 때문에 최적해를 구하는 데 해법의 연구가 필요하다. 비선형 계획문제에 대한 사례와 이를 해결하는 여러 알고리즘이 있으나[5][6][12][19], 본 연구에서는

제약조건을 만족하는 가능한 수송형태의 배열조합을 구성하고, 각 조합에 대하여 계산을 행하여 비교하는 발견적 방법에 의하여 해를 구한다. 최적해를 구하기 위하여 사용된 컴퓨터 기종은 MIRACLE 20000으로 8 MIPS(Million Instruction Per Second)의 슈퍼미니컴퓨터이며, 운영체제는 UNIX System V Rel. 3.1로 C언어를 이용하여 다음의 해법절차에 따른 프로그램을 개발한다. 본 연구모형의 알고리즘 흐름도는 (그림 3-1)과 같다.



(그림 3-1) 통합모형 알고리즘의 흐름도

[절차 1] 물류센터와 수요처의 할당 가능한 조합을 배열화 하며, 초기값을 입력한다.

물류센터의 수가 m 이고, 수요처의 수가 n 인 물류시스템에서 각각의 수요처는 하나의 물류센터에서만 제품을 공급받는다는 조건하에서 가능한 배열조합의 수는 m^n 개이며, 이들 각 조합은 물류센터에서 수요처에 대한 할당여부를 표현한다.

[절차 2] 배열의 해당 행에 대하여 각 물류센터에 할당된 수요처를 찾는다

[절차 3] 수요처가 할당된 각 물류센터에 대하여 식 (2-2) 및 (2-3)에 의하여 평균수요량과 분산을 구하고, 조달기간중의 수요량 및 표준편차를 계산한다.

[절차 4] 결품이 발생할 경우 부재고인 경우와 유실판매인 경우를 선택하며, 부재고인 경우 식 (2-21)에 의하여 Q_i^* 값을 구하고, 식 (2-24), (2-25), (2-26)으로부터 r_i^* , SSL_i^* 을 계산하며, 절차 5로 간다. 유실판매인 경우 식 (2-21) 및 (2-33)에 의하여 Q_i^* , r_i^* , SSL_i^* 을 계산하고, 절차 6으로 간다.

[절차 5] 식 (2-10)에 의하여 물류센터의 재고관리비용과 수송비용의 합계를 구하고, 최종 물류센터까지 계산을 수행했는지 확인한다. 최종 물류센터까지 계산이 수행되었으면 절차 7로 가고, 아니면 절차 3으로 간다.

[절차 6] 식 (2-31)에 의하여 물류센터의 재고관리비용과 수송비용의 합계를 구하고, 최종 물류센터까지 계산을 수행했는지 확인한다. 최종 물류센터까지 계산이 수행되었으면 절차 7로 가고, 아니면 절차 3으로 간다.

[절차 7] 물류센터마다의 비용을 더하여 배열의 행에 해당하는 총비용(K_i)을 구한 다음 배열 조합의 실행순서 값이 m^n 보다 작으면 다음 순서의 행을 계산하기 위하여 절차 2로 가고, 아니면 절차 8로 간다.

[절차 8] 전체의 배열조합에 대하여 계산이 수행되었으면 각 행에서 구한 총비용 값을 비교하여 최소값을 갖는 행을 찾아 최적재고정책 및 총비용을 출력한다.

4. 유용성검토

구체적인 사례에 근거하여 수치검증을 실시하여야 하지만 본 연구는 수송계획과 재고관리의 통합화에 관한 이론연구를 지향하고 있기 때문에 다음의 수치를 이용하여 본 연구의 의의와 타당성을 명확하게 하려고 한다. 즉, 물류센터의 수(m)는 3, 수요처의 수(n)는 10인 경우에 전체의 i 에 대하여 단위당 재고유지비용 $C_{hi}=50$ 원, 회당 발주비용 $C_{oi}=10,000$ 원, 단위결품당 부재고비용 $C_{Bi}=100$ 원, 단위결품당 유실판매비용 $C_{LSi}=200$ 원, 조달기간 $L_i=14$ 일이다. 그리고 수요처의 수요량 및 수송비용은 <표 4-1> 및 <표 4-2>와 같다.

<표 4-1> 수요처의 수요량

[개/년]

수요처번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
평균 μ_j	2500	1500	1700	2000	2700	2500	2200	2000	2000	1500
표준편차 σ_j	100	70	90	60	80	90	80	90	90	60

<표 4-2> 수송비용

[원/개]

물류센터	수요처	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	30	28	39	14	20	22	30	7	13	26
	2	10	14	10	10	6	18	9	17	28	13
	3	17	14	8	12	9	9	18	8	14	20

4.1 부재고를 고려한 경우

컴퓨터로 수행한 계산결과 배열조합의 행순서가 31,804번째에서 총비용이 최소값을 갖는다. 이 경우 물류센터 2에 수요처 1,2,4,5,7,10이 할당되고, 물류센터 3에 수요처 3,6,8,9가 할당되어 물류센터 2, 3이 선택되며, 이 물류시스템의 연간기대총비용은 409,818원/년이 된다. 선정된 각 물류센터의 최적재고정책을 포함한 계산결과를 <표 4-3>에 종합하여 나타내면 다음과 같다.

<표 4-3> 부재고인 경우의 최적해

물류센터	할당된 수요처	수요량 평균(M_i)	수요량 분산(V_i)	조달기간		최적재고정책		
				수요량 ($EVRL_i$)	표준편차 ($STDL_i$)	발주량 (Q_i^*)	발주점 (r_i^*)	안전재고 (SSL_i^*)
2	1, 2, 4, 5, 7, 10	12,400	34,900	477	36.6	2,227	526	49
3	3, 6, 8, 9	8,200	32,400	315	35.3	1,811	358	43

물류센터	재고관련비용	수송비용	물류센터별 총비용	총비용
2	114,663	121,500	236,163	409,818
3	93,555	80,100	173,655	

<표 4-3>에서와 같이 물류센터 2에서 최적재고정책은 발주점(r_2^*)이 526개 일 때 최적발주량(Q_2^*) 2,227개를 발주하며, 안전재고량(SSL_2^*)은 49개가 된다. 그리고 물류센터 3에서 발주점(r_3^*)이 358개 일 때 최적발주량(Q_3^*) 1,811개를 발주하며, 안전재고량(SSL_3^*)은 43개가 된다.

여기서 비교를 위하여 수송비용의 합만을 목적함수로 하여 물류센터를 선택하고, 계속하여 재고관련비용의 최적화를 구한 경우의 결과는 <표 4-4>와 같다. 즉, 기존의 방법으로 최적화를 구하는 경우에는 물류센터 1, 2, 3이 선정되고, 연간기대총비용은 447,983원/년이 된다. 따라서 본 연구의 통합모형을 적용하여 물류정책을 수립할 경우 기존모형보다 연간 약 10%의 비용절감이 기대된다.

<표 4-4> 부재고인 경우 기존모형의 결과

물류센터	할당된 수요처	수요량 평균(M_i)	수요량 분산(V_i)	조달기간		최적재고정책		
				수요량 ($EVRL_i$)	표준편차 ($STDL_i$)	발주량 (Q_i^*)	발주점 (r_i^*)	안전재고 (SSL_i^*)
1	8, 9	4,000	16,200	154	25	1,265	179	25
2	1, 4, 5, 7, 10	10,900	30,000	419	34	2,088	464	45
3	2, 3, 6	5,700	21,100	219	29	1,519	251	32

물류센터	재고관련비용	수송비용	물류센터별 총비용	총비용
1	65,159	40,000	105,159	447,983
2	107,407	100,500	207,907	
← 3	77,817	57,100	134,917	

4.2 유실판매를 고려한 경우

유실판매인 경우 물류센터 3에 수요처 모두가 할당되어 물류센터 3만이 선택되고, 이 물류시스템의 연간기대총비용은 410,674원/년이 된다. 선정된 물류센터의 최적재고정책을 포함한 계산결과를 <표 4-5>에 종합하였다. <표 4-5>에서 물류센터 3에서의 최적재고정책은 발주점 (r_3^*)이 883개 일 때 최적발주량 (Q_3^*) 2,871개를 발주하며, 안전재고량 (SSL_3^*)은 93개가 된다. 기존모형과의 비교를 위하여 수송비용의 합만을 목적함수로 하여 물류센터를 선택하고, 재고관련비용의 최적화를 구한 경우의 결과는 <표 4-6>과 같이 물류센터 1, 2, 3이 선정되고, 연간기대총비용은 449,340원/년이 된다.

<표 4-5> 유실판매인 경우의 최적해

물류센터	할당된 수요처	수요량 평균(M_i)	수요량 분산(V_i)	조달기간		최적재고정책		
				수요량 ($EVRL_i$)	표준편차 ($STDL_i$)	발주량 (Q_i^*)	발주점 (r_i^*)	안전재고 (SSL_i^*)
3	1 ~ 10	20,600	67,300	790	51	2,871	883	93

물류센터	재고관련비용	수송비용	물류센터별 총비용	총비용
← 3	149,174	261,500	410,674	410,674

<표 4-6> 유실판매인 경우 기존모형의 결과

물류센터	할당된 수요처	수요량 평균(M_i)	수요량 분산(V_i)	조달기간		최적재고정책		
				수요량 ($EVRL_i$)	표준편차 ($STDL_i$)	발주량 (Q_i^*)	발주점 (r_i^*)	안전재고 (SSL_i^*)
1	8, 9	4,000	16,200	154	25	1,265	189	35
2	1, 4, 5, 7, 10	10,900	30,000	419	34	2,088	476	57
3	2, 3, 6	5,700	21,100	219	29	1,510	262	43

물류센터	재고관련비용	수송비용	물류센터별 총비용	총비용
1	65,581	40,000	105,581	449,340
2	107,908	100,500	208,408	
← 3	78,251	57,100	135,351	

4.3 임의조달방식에 의한 재고정책을 고려한 경우

본 연구의 유용성검토에서 부재고를 갖는 경우 (s, S) 재고정책은 물류센터 2에서 $s=526$ 이고, $S=526+2,227=2,753$ 이며, 물류센터 3에서 $s=358$ 이고, $S=358+1,811=2,169$ 이 된다. 따라서 (s, S) 최적재고정책을 적용할 경우 물류센터 2는 (526, 2753)이 되고, 물류센터 3

은 (358, 2169)가 된다. 또 유실판매인 경우 물류센터 3에서의 (s, S) 최적재고정책은 (883, 3754)가 된다.

5. 결론

물류시스템을 설계할 경우 운영할 물류센터의 수와 선정된 물류센터에서 어떠한 효율적인 재고정책을 갖느냐에 따라 물류비용의 절감이나 고객에 대한 서비스가 달라질 수 있다. 이러한 효율증진이나 서비스의 향상은 여러 물류기능에 대하여 통합화를 필요로 하며, 그 중에서도 재고관리와 수송계획문제는 상호 밀접하게 연관되어 있다.

본 연구는 이러한 배경을 전제로 재고를 분산하여 보유하고 있는 m 개의 물류센터와 n 개의 수요처를 갖는 물류시스템을 고려했다. 즉, 수요처의 수요량은 확률변수이며, 단위기간당 수요량의 평균과 분산은 수요처별로 또 시간경과에 따라 독립적인 기지의 정규분포에 따를 경우, 수요처의 주문에 따라 물류센터로부터 제품을 수송하며, 하나의 수요처에는 항상 정해진 하나의 물류센터로부터 공급되는 물류시스템에서 재고에 관한 비용과 수송비용의 총합을 최소화하는 통합물류모형을 구축하였다. 그리고 재고품으로 수주에 정상적으로 응할 수 없을 때 발생하는 결품비용으로 부재고비용과 유실판매비용을 고려하였으며, 이 경우 재고관련비용 및 수송비용을 고려하여 다수의 수요처에 선택적으로 수송할 물류센터를 선정하였다.

선정된 각각의 물류센터에 대하여 연속재고모형인 발주점방식 (Q_i, r_i) 에 의한 최적발주량 및 발주점 그리고 안전재고를 결정하는 최적재고정책모형을 제시하여 Yokoyama모형이 가지고 있는 한계 즉, 부재고시 임의로 허용결품률을 제약하여 최적성에 무리가 있고, 결품시 총비용 함수에 결품비용을 고려하지 않은 것과 주기와 연간재고정책과의 개념이 없어 조달기간중 수요량이 비현실적이 되는 한계를 극복하였다. 그리고 어느 특정기간에 수요가 1 단위 이상 발생할 경우, (Q_i, r_i) 재고관리방식으로 연간기대총비용을 최소화하는 재고정책을 계산할 수 없으므로 본 연구의 결과를 이용하여 임의조달방식인 (s, S) 재고정책을 구축하였다.

본 연구모형은 재고에 관한 비용과 수송비용의 연평균기대총비용을 최소화하는 모형이 되며, 0-1 비선형정수계획법으로 정식화하였으며, 이를 해결하기 위하여 제약조건을 만족하는 가능한 수송형태의 배열조합을 구성하고, 각 조합에 대하여 계산을 행하여 비교하는 발견적 방법에 의한 계산절차를 제시하였다. 최적해를 구하기 위하여 UNIX시스템의 C언어를 이용하여 해법절차에 따른 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

또 유용성검토를 통하여 부재고를 갖는 경우와 유실판매를 갖는 경우 기존의 방법과 본 연구방법의 결과를 비교하여 본 연구에서 제안한 모형의 효율성을 보여주었다. 본 연구의 통합모형을 적용하여 물류정책을 수립할 경우, 수송계획문제에 의하여 각 물류센터가 담당하는 수요처를 결정하고, 결정된 각각의 물류센터에 대하여 재고관리정책을 사용하는 기존모형보다 연간 약 10%의 비용을 절감할 수 있는 것을 제시하였다.

그러나 본 연구는 배열조합 모두에 대한 계산실시로 컴퓨터용량을 많이 차지하며, 컴퓨터 수행시간(유용성검토에 대한 프로그램 실행시간이 15분 40초 임.)이 오래 걸리는 한계가 있다. 따라서 최적해를 보다 적은 노력으로 찾을 수 있는 연구가 진행되어야 한다. 그리고 본 연구에서는 수요처의 수요량 분포가 정규분포에 따르는 것을 가정하였지만, 포아송분포에 따르는 경우 등 보다 현실적인 문제를 다루기 위하여 앞으로도 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 우 태희, 조 남호, "부재고를 갖는 재고·수송시스템의 최적모형설계," 공업경영학회지, Vol. 20, No. 43, pp. 25-36, 1997.
2. 정 준석, 유 영창, 장 윤종, 물류정책 매뉴얼, (주)비북스, 1996.
3. Akai, T. J., *Applied Numerical Methods for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
4. Anily, S. and Federgruen, A., "One Warehouse Multiple Retailer Systems with Vehicle Routing Costs," *Management Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 92-114, 1990.
5. Bazaraa, M. S. and Jarvis, J. J., *Linear Programming and Network Flows*, John Wiley & Sons, Inc., 1977.
6. _____ and Shetty, C. M., *Nonlinear Programming : Theory and Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., 1979.
7. Brown, R. G., *Decision Rules for Inventory Management*, New York : Holt, Rinehart and Winston, 1967.
8. Burns, L. D., Hall, W., Blumenfeld, D. E. and Daganzo, C. F., "Distribution Strategies That Minimize Transportation and Inventory Costs," *Operations Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 469-490, 1985.
9. Coyle, J. J. and Bardi, E. J., *The Management of Business Logistics*, West Publishing Co., 1984.
10. Daugherty, P. J. and Spencer, M. S., "Just In Time Concepts : Applicability to Logistics/Transportation," *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, Vol. 20, No. 7, pp. 12-18, 1990.
11. Federgruen, A. and Zipkin, P., "A Combined Vehicle Routing and Inventory Allocation Problem," *Operations Research*, Vol. 32, No. 5, pp. 1019-1037, 1984.
12. Garfinkel, R. S. and Nemhauser, G. L., *Integer Programming*, John Wiley & Sons, Inc., 1972.
13. Glover, F., Jones, G., Karney, D., Klingman, D. and Mote, J., "An Integrated Production, Distribution and Inventory Planning System," *Interfaces*, Vol. 9, No. 5, pp. 21-35, 1979.
14. Ho, C. J., "Distribution Requirements Planning : A Generalized System for Delivery Scheduling in a Multi-Sourcing Logistics System," *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, Vol. 20, No. 2, pp. 3-8, 1990.
15. Love, S. F., *Inventory Control*, McGraw-Hill Book Company, 1979.
16. Nakamura, S., *Applied Numerical Methods with Software*, Prentice-Hall, Inc., 1991.
17. Winston, W. L., *Operations Research Application and Algorithm*, Pws-Kent, 1991.
18. 河西健次, 物流コスト計算の實際, 日本能率協會, 1989.
19. 今野 浩, 山下 浩, 非線形計画法, 日本科學技術聯盟, 1978.
20. 橫山雅夫, "物流·配送システムの統合的最適化," 日本經營工學會誌, Vol. 46, No. 1, pp. 63-69, 1995.