

물류시스템에서 수송주기와 차량크기의 결정*

장석화

인천대학교 산업공학과

Determination of the Transportation Cycle Time and the Vehicle Size in a Distribution System

Suk-Hwa Chang

Industrial Engineering Department, University of Incheon

This paper addresses a model for the transportation planning that determines the transportation cycle time and the vehicle size to minimize the cost in a distribution system. The vehicle routing to minimize the transportation distance of the vehicles is also determined. A distribution system is consisted of a distribution center and many retailers. Products are transported from distribution center to retailers according to transportation planning. A model is assumed that the time horizon is continuous and infinite, and the demand of retailers is constant and deterministic. Cost factors are the transportation cost and the inventory cost, which the transportation cost is proportional to the transportation distance of vehicle when products are transported from distribution center to retailers, and the inventory cost is proportional to inventory amounts of retailers. A transportation cycle time and a vehicle size are selected among respective finite alternatives. The problem is analyzed, and a illustrative example is shown.

Keywords : distribution system, transportation cycle time, vehicle size

1. 서 론¹⁾

최근에 국내외적으로 기업에서 물류관리 관련 부분이 비용을 낮출 수 있고, 기업의 경쟁력을 높일 수 있는 것으로 크게 인식되고 있다. 이는 생산부분에서는 생산설비의 자동화와 생산관리 기술의 발전 등으로 비용절감을 상당히 달성하여 추가적인 비용개선에 어려움을 겪고 있지만, 재재의 수송, 보관을 중심으로 한 물류관리부분은 비용을 줄일 수 있는 여지가 많은 부분으로 평가되고 있기 때문이다. 원자재, 반제품, 완제품 등의 재재가 경제적 가치를 창출하기 위하여 기업내의 부서 사이, 기업과 기업사이, 기업과 고객 사이에 이동될 때 수송, 보관 등과 같은 활동이 필요하다. 수송과 재고관

리 부분에서 비용을 줄이고 효율을 높일 수 있는 운영 및 기법이 필요하다.

물류센터와 대리점들로 이루어진 물류시스템에서 대리점의 수요를 충족시키기 위해 물류센터에서 대리점으로 제품을 수송하게 된다. 물류센터에서 대리점으로 제품을 수송할 때 비용요소를 고려하여 적절한 수송계획이 필요하다. 연속적인 무한기간에서 물류센터는 대리점의 고객에 대한 재고부족이 발생하지 않도록 적절한 수송계획을 필요로 한다. 비용요소는 물류센터에서 대리점으로 제품을 수송할 때 발생하는 수송비용과 대리점에서 제품을 보관할 때 발생하는 재고비용이 있다. 수송비용은 차량의 단위거리 수송비용과 수송거리에 비례한다. 수송거리는 물류센터에서 여러 대리점을 순회하며 수송하는 경우에 차량경로계획과 수송횟수에 달려있다. 재고

* 본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아전자물류연구센터의 지원에 의한 것임

비용은 대리점의 평균재고량에 비례한다.

연속적 무한기간에서 수송계획으로 물류센터에서 대리점으로의 수송주기와 수송량을 결정할 필요가 있다. 이러한 결정은 수송비용과 재고비용을 최소화하는 기준을 만족시켜야 한다. 차량이 여러 대리점을 순회하며 수송하는 경우에 수송거리를 줄일 수 있는 차량경로계획을 결정해야 한다. 차량크기 내에서 제품을싣고 수송할 때에 대리점에의 수송량을 고려하여 대리점들을 차량별로 그룹화 하여 방문순서를 구한다. 물류시스템에서 수송비용과 재고비용은 서로 상충될 수 있는데 전체적인 비용을 최소로 하도록 의사결정 요소들을 결정한다.

물류관리에 대한 내용은 크게 수송전략측면, 재고전략측면, 물류시설의 위치전략측면이 있다[7]. 수송전략측면에서의 주요 연구내용은 수송차량 형태의 선택, 화물통합, 차량의 수송경로, 장비선택, 차량의 수의 결정 등이 있다. 재고전략측면에서 보관은 재고관리와 관련되어 있어 재고관리정책, product-mix, 저장위치의 수, 크기, JIT, push, pull 전략 등과 보관공간결정, 배치 및 dock 설계, 창고 구조 등의 내용이 있다. 위치전략측면은 이동을 줄일 수 있는 물류센터의 위치, 설비 위치 결정, 물류 네트워크 계획 등의 내용이 있다.

물류시스템에는 여러 형태의 구조가 있다[6]. 단일 창고, 복수 대리점 모형에서 장기적으로 구입비용과 재고비용을 최소화할 수 있도록 대리점에서의 발주량과 발주시점을 구하는 문제와 발주할 때 착수비용이 있는 경우와 없는 경우에 대리점들이 발주를 조정하는 문제를 다루었다[18, 19].

제한 차량크기의 차량경로를 구하는 문제는 경영과학에서 고전적인 연구분야의 하나이다. 이 분야와 관련된 연구는 상당히 이루어졌다([1], [2], [3]). Labbe[4]는 나무구조 물류시스템에서 제한 차량경로 구하는 문제를 연구하였다. Yang et al[5]는 단일 판매자, 단일 구매자 재고시스템, 단일 물류센터와 다수의 대리점 시스템, 단일 직렬 재고시스템, 나무 모양의 재고시스템 등에 대해 비용을 최소화하는 주문횟수를 구하는 내용을 연구하였다. 여기서 수송비용은 고려하지 않았다.

단일 물류센터 물류계획 문제는 지리적으로 흩어져 분포되어 있는 대리점에 물류센터가 서비스하는 것을 말한다[11]. 각 대리점의 수요는 확정적이고 알려져 있고, 제한된 수송용량의 차량으로 물류센터에서 대리점에 제품을 수송한다. 재고는 대리점에만 갖고 있고, 대리점에서 주문이 발생할 때마다 제품을 보낸다. 대리점의 수요를 만족시키면서 장기적으로 평균 수송비용과 재고비용을 최소화하는 재고정책과 차량경로 전략을 구하는 것이다.

Jackson et al[20], Federgruen and Zheng[21]은 수송할

때 수송거리와는 관계없이 대리점 그룹에 차량을 보내는 고정비용을 고려하여 공동보충문제에 대하여 다루었다. Bramel and Simchi-Levi[22]는 대리점들을 지역으로 분할하여 서비스하는 고정분할정책을 사용하는 것을 분석하였다. Anily and Federgruen[23]은 지역을 중복되게 여러 개로 나누었을 때, 대리점이 여러 지역에 속하면 이 대리점은 여러 지역 수송 때 나누어서 수송되는 모형을 분석하였다. Herer and Roundy[24], Viswanathan and Mathur[25]은 각 대리점은 공통 기본계획기간의 2의 승의 곱인 일정한 간격으로 공급받는 전략에 대한 좋은 경험적 성과를 보여주었다.

차량이 물류센터에서 여러 대리점을 방문하여 수송하는 경우에 수송주기와 차량크기의 선택문제를 동시에 고려한 문제는 다루어지지 않았다. 전체적인 물류비용을 최소화할 수 있는 이러한 의사결정 문제의 연구가 필요하다.

2. 수송주기 및 차량크기의 결정

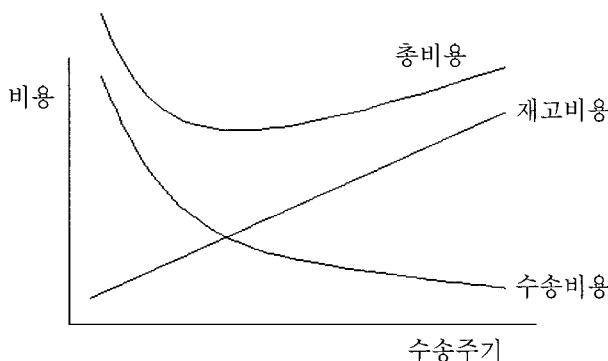
2.1 모형 형성

물류센터와 대리점으로 이루어진 물류시스템에서 물류센터에서 대리점으로 적절한 수송계획에 의해 제품을 수송하는 문제를 생각한다. 대리점들의 수요량을 충족시키도록 물류센터에서 대리점으로 제품을 수송할 때 비용을 최소화하는 수송계획을 고려한다. 연속적인 무한기간에서 물류센터에서 각 대리점으로 적절한 수송간격으로 필요한 수요량을 수송해야 한다. 이를 수송량으로 정의한다. 물류센터에서 대리점으로 수송할 때 차량크기와 대리점으로의 수송량을 고려하여 수송하게 된다. 만일 어느 대리점의 수송량이 차량크기를 초과한다면 이 대리점에는 차량크기에 해당하는 수송과 차량크기에 미달하는 일부분에 해당하는 수송으로 나누어하게 된다. 차량크기의 일부분에 해당하는 수송은 다른 대리점의 수송량과 함께 이루어지게 된다. 또한 차량크기에 미달하는 대리점들의 수송량은 다른 대리점들과 함께 수송된다.

물류비용요소는 물류센터에서 대리점으로의 수송거리에 비례하는 수송비용과 대리점의 평균재고량에 비례하는 재고비용이 있다. 이 수송비용과 재고비용의 합인 물류비용을 수송주기로 나누어 단위기간 물류비용을 구한다. 이 단위기간 물류비용을 최소화하도록 물류센터에서 대리점에의 수송주기와 수송량을 구한다. 수송비용은 차량크기의 영향을 받는다. 차량크기가 다른 이용 가능한 차량이 여러 종류가 있을 때, 가장 적은 물류비용을 발생하는 차량크기를 결정한다. 그리고 차량이 여러 대리

점을 순회 수송하는 경우 차량의 수송경로를 함께 결정 한다. 그리고 필요한 차량의 수를 구한다.

수송주기는 대리점의 수요량의 크기와 관련이 있다. 수송주기가 길어질수록 수송주기동안 대리점에의 수송량은 증가한다. 이는 수송비용은 감소하게 되고, 대리점들의 재고비용은 증가하게 된다. 반대로 수송주기가 짧아질수록 수송주기동안 대리점에의 수송량은 감소한다. 이는 수송비용은 증가하고, 대리점들에서 재고비용은 감소하게 된다. 수송주기에 대한 수송비용과 재고비용은 <그림 1>과 같은 관계가 될 것이고, 비용을 적게 할 수 있는 적절한 수송주기가 필요하다.



<그림 1> 수송주기에 대한 수송 및 재고비용

모형을 나타내기 위해 다음과 같은 가정을 정의한다.

- ① 물류시스템은 하나의 물류센터와 다수의 대리점으로 이루어지고, 차량경로는 물류센터에서 시작하여 물류센터에서 끝난다.
- ② 시간은 연속적이고 무한하다.
- ③ 대리점의 단위기간당 수요량은 일정하고 확정적이다.
- ④ 대리점에서 재고부족이 발생하지 않게 수송이 이루어지는 것으로 한다.
- ⑤ 한 종류의 차량크기 차량만 사용한다.
- ⑥ 차량에 의해 서비스되는 총 수송량은 차량크기를 초과할 수 없다.
- ⑦ 차량경로의 최대 수송시간은 주어진 시간을 초과 할 수 없다.
- ⑧ 모든 대리점의 수송주기는 동일하다.

다음과 같은 부호를 정의한다.

- o = 물류센터를 나타내는 첨자
- k, j = 대리점을 나타내는 첨자
- s = 수송주기를 나타내는 첨자
- S = 수송주기의 수
- i = 차량크기 종류를 나타내는 첨자
- L = 차량크기 종류의 수

d_{ok} = 물류센터 o 와 대리점 k 사이의 거리

d_{jk} = 대리점 j 와 대리점 k 사이의 거리

r_k = 대리점 k 의 단위시간당 수요량

c_{1i} = 차량크기 i 의 단위시간당 수송비용

h_k = 단위당 단위시간당 대리점 k 의 재고유지비용

T_0 = 차량의 일일 이용가능시간

α = 차량의 이용률

v = 차량의 평균 운반속도

q_i = 차량 크기 i 의 수송능력

$t_{p/d}$ = 평균 pickup 및 delivery 시간

x_i = $\begin{cases} 1, & \text{차량크기 } i \text{가 선택되면,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

y_s = $\begin{cases} 1, & \text{수송주기 } s \text{가 선택되면,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

x_{rjk} = $\begin{cases} 1, & \text{수송경로 } r \text{에서 대리점 } j \text{ 방문후} \\ & \text{대리점 } k \text{를 방문하면,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

수송비용은 물류센터에서 모든 대리점에 제품을 수송하는데 걸리는 수송거리에 비례하는 비용이다. 수송거리는 차량이 물류센터를 출발하여 모든 대리점에 수송을 완료한 후에 다시 물류센터로 돌아오기까지 이동한 거리를 나타낸다. 수송거리는 여러 요인에 의해 결정된다. 수송거리는 차량크기, 대리점에의 수송량, 대리점들의 방문순서 등에 의해 결정된다. 차량크기의 제한으로 인해 한번에 수송할 수송량의 제약을 받기 때문에 차량크기에 따라 수송거리와 단위거리 수송비용이 다르다. 차량크기가 큰 차량이 적은 차량에 비해 전체적인 수송거리는 적지만, 단위거리 수송비용은 클 것이다. 대리점에의 수송량은 단위시간당 수송주기와 수요량에 의해 결정된다. 수송주기를 증가시키면, 대리점에의 수송당 수송량은 증가하게 되고, 이는 전체적인 수송횟수와 수송거리를 감소시킬 것이다. 그리고 차량의 대리점들의 방문순서를 어떻게 할 것인가에 따라 수송거리가 결정된다. 이와 같이 수송비용은 사용하는 차량크기, 대리점에의 수송주기, 물류센터에서 대리점들에의 방문순서 등의 영향을 받는다.

재고비용은 대리점들의 평균재고량에 의해 결정된다. 대리점의 평균 재고량은 물류센터에서 대리점으로의 수송당 수송량에 의해 결정된다. 그러므로 재고유지비용은 물류센터에서 대리점으로 수송량에 의해 결정된다.

수송비용과 재고비용에 영향을 미치는 이러한 요인들에 대한 최적의 의사결정을 한다. 의사결정 요인들은 차량크기, 수송주기, 물류센터에서 대리점들의 방문순서 등이다. 단위시간당 최소 물류비용을 갖는 이러한 의사

결정 요인들의 최적 대안을 적용할 때 필요한 차량의 수를 구한다.

수송주기 대안에 대해 정의한다. 연속적인 시간에서 수송주기로 택할 수 있는 시간의 대안의 수는 무한하지만, 여기서는 유한개의 이산적 시간을 갖는 대안들을 고려한다. 연속적인 시간을 적절한 시간단위로 분할하여 나눈다. 나누는 시간단위로는 시간, 일 등이 있을 것이다. 적절한 시간단위를 t_0 로 하면 수송주기를 정해 선택한다. 최소 수송주기 T_1 에서 시작하여 최대 수송주기 T_2 까지 적정한 시간단위로 나누어 수송주기 대안으로 한다. 수송주기에 대한 대안은 <표 1>과 같이 정의한다. 표에서 대안의 수 S 은 $S \geq (T_2 - T_1)/t_0 - 1$ 을 만족시키는 가장 작은 정수이다.

<표 1> 수송주기 대안

대안, s	수송주기
1	T_1
2	$T_1 + t_0$
3	$T_1 + 2t_0$
..	...
..	...
$S-1$	$T_1 + (S-2)t_0$
S	T_2

수송주기 대안에 대한 수송주기 시간 A_s 은 식 (1)과 같다.

$$A_s = \begin{cases} T_1 + (s-1)t_0, & s=1, 2, \dots, S-1 \\ T_2, & s=S \end{cases} \quad (1)$$

각 대리점의 단위시간 수요량은 일정하므로 수송주기 동안 발생한 수요량은 단위기간 수요량에 수송주기를 곱하여 나타낸다. 수송주기 s 일 때 대리점 k 의 수요량은 식 (2)과 같이 나타내진다.

$$R_{ks} = r_k A_s, \quad s=1, 2, \dots, S-1, S, \quad \forall k \quad (2)$$

수송주기가 s 이고, 차량크기가 i 일 때 수송비용과 재고비용을 구한다. 수송비용은 물류센터에서 대리점 k ($\forall k$)의 수송량이 R_{ks} 일 때 단위거리 수송비용에 모든 대리점에 최소거리로 차량경로계획을 세워 수송할 때 발생하는 수송거리를 곱하여 구한다. 차량경로계획에 따

른 최소 수송거리를 $D(y_s, x_i)$ 라 하면, 수송비용은 식(3)과 같다.

$$C_1(y_s, x_i) = c_{1i} D(y_s, x_i) \quad (3)$$

가능한 모든 수송주기와 모든 차량크기에 대해 모든 비용을 합하여 수송비용 함수를 나타내면 식 (4)과 같다.

$$TC = \sum_s \sum_i c_{1i} D(y_s, x_i) y_s x_i \quad (4)$$

하나의 수송주기와 하나의 차량크기만이 선택되기 때문에 (5), (6)와 같은 제약식이 필요하다.

$$\sum_s y_s = 1 \quad (5)$$

$$\sum_i x_i = 1 \quad (6)$$

식 (3)에 나타난 수송거리에 구하기 위한 차량경로계획을 구한다. 대리점 k 의 수송량이 R_{ks} 을 차량크기와 비교하여 대리점 k 만 수송하는 수송횟수를 구한다. 식 (7)의 B_{ksi} 는 수송량이 차량크기의 정수 곱에 해당하는 것으로 차량이 직접 대리점 k 만 방문하여 수송하는 횟수를 나타내고, 식 (8)의 O_{ksi} 는 차량크기에 미달하여 다른 대리점들의 수요량과 함께 차량경로계획에 의해 수송할 가능성이 있는 수요량에 해당한다.

$$B_{ksi} = \left[\frac{R_{ks}}{q_i} \right]^{-}, \quad \forall k, s, i \quad (7)$$

$$O_{ksi} = R_{ks} - q_i B_{ksi}, \quad \forall k, s, i \quad (8)$$

식 (7)에서 $\left[\frac{R_{ks}}{q_i} \right]^{-}$ 는 $\frac{R_{ks}}{q_i}$ 보다 크지 않는 가장 큰 정수를 나타낸다.

수송거리는 한 대리점씩만을 방문하며 수송한 거리와 여러 대리점들을 함께 연결하여 수송한 거리의 합이다. 한 대리점씩만을 방문하며 수송한 거리를 D_{1si} 이라 하고, 여러 대리점을 차량경로계획에 의한 수송의 경우 여러 개의 차량경로가 있을 때 모든 차량경로에 따라 수송한 거리를 D_{2si} 이라 하면, 수송거리는 각각 식 (9), (10)에서와 같이 나타내진다.

$$D_{1si} = 2 \sum_k d_{ok} B_{ksi}, \quad \forall s, i \quad (9)$$

$$D_{2si} = \sum_\gamma \sum_j \sum_k d_{jk} x_{\gamma jk}, \quad \forall s, i \quad (10)$$

여기서 식 (10)은 다음 제약식들을 만족하는 차량경로 계획이 되어야 한다.

$$\sum_{j \in A_r} x_{rjk} = 1, \text{ for } k \in A_r, \forall r \quad (11)$$

$$\sum_{k \in A_r} x_{rjk} = 1, \text{ for } j \in A_r, \forall r \quad (12)$$

$$\sum_{k \in A_r} Q_{ksr} x_{rjk} \leq q_i, \quad j \in A_r, \forall r \quad (13)$$

$$\sum_j \sum_k d_{jk} x_{rjk} / v + |A_r| t_{p/d} \leq T_0, \forall r \quad (14)$$

$$x_{rjk} = 0 \text{ or } 1 \quad k \in A_r, \quad j \in A_r, \forall r \quad (15)$$

$$\text{and } x_r = (x_{rjk}) \text{ is a tour assignment} \quad (16)$$

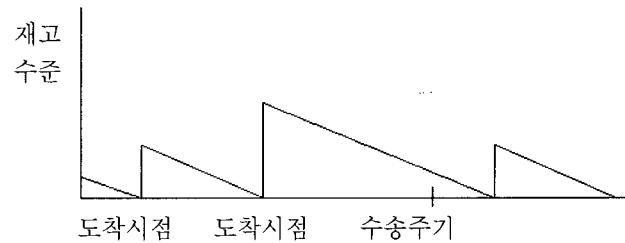
여기서 $|A_r|$ 는 차량경로계획 r 에 포함된 물류센터와 대리점의 수를 의미한다. 식 (10)에서 차량경로계획은 식 (13), (14)과 같이 차량크기 q_i 와 일일 수송시간 T_0 의 제약을 만족시키면서 이루어져야 한다.

식 (3)의 수송거리는 식 (9)과 (10)의 합으로 식 (17)과 같다.

$$D(y_s, x_i) = D_{1si} + D_{2si} \quad (17)$$

재고비용은 대리점의 단위당 재고유지비용에 평균재고량을 곱하여 나타낸다. 대리점의 평균재고량은 수송계획과 관련되어 있다. 한 수송주기에서 수요량이 차량크기를 초과하는 경우에 차량크기 수송과 차량크기미만으로 나누어 이루어진다. 예를 들어, 동일 수송주기에 차량크기 수송이 1회 차량크기 미만 수송이 1회 이루어질 때 두 수송을 동일한 시점에 대리점에 도착하게 하면 <그림 2(a)>와 같은 재고수준이 될 것이고, 재고 수준이 0인 시점에 맞추어 분산하여 수송을 한다면 <그림 2(b)>와 같은 재고수준이 될 것이다.

수송주기 내에 모든 대리점의 수송량이 차량크기보다 적어 차량경로계획에 의해 대리점에 한번씩 수송하면 수송주기마다 대리점에 방문시점을 일정하게 하여 평균재고량은 일정하게 유지할 수 있을 것이다. 그러나 수송주기 내에 수요량이 차량크기를 초과하는 대리점의



<그림 2(b)> 두 차량을 재고가 0인 시점에 분산하여 수송

경우는 일부는 차량크기만큼 수송하고 나머지는 다른 대리점과 함께 수송하게 된다. 이 두 형태의 수송을 동일한 시점에 대리점에 도착하도록 할 수도 있고, 서로 다른 시점에 도착하도록 할 수도 있다. 그러나 도착시점을 다르게 하면 차량크기의 수송시점에 따라 평균재고수준은 달라질 수 있다. <그림 2(a)>와 같이 동일한 시점에 모든 수송을 하는 경우에 대리점 k 의 평균재고수준은 최대가 되며 재고수준은 (18)과 같고, 총 재고비용은 식 (19)과 같다.

$$I_{ksi} = R_{ks}/2, \quad \forall k, s, i \quad (18)$$

$$H_{si} = \sum_k h_k R_{ks} A_s / 2, \quad \forall s, i \quad (19)$$

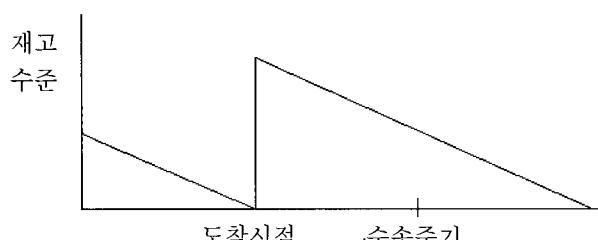
<그림 2b>와 같이 재고가 0인 시점에 맞추어 나누어 분산하여 수송할 경우에 대리점 k 의 평균재고수준은 최소가 되며 재고수준은 식(20)과 같고, 총 재고비용은 식(21)과 같다.

$$I_{ksi} = \frac{q_i^2 B_{ksi} + (R_{ks} - q_i B_{ksi})^2}{2R_{ks}}, \quad \forall k, s, i \quad (20)$$

$$H_{si} = \sum_k h_k \frac{q_i^2 B_{ksi} + (R_{ks} - q_i B_{ksi})^2}{2R_{ks}} A_s, \quad \forall s, i \quad (21)$$

대리점에서의 재고비용의 범위는 최소 식(21)의 값에서 최대 식 (19)의 값 사이에 존재하게 된다. 양 경우에 차량크기에 해당하는 수송은 특정한 시간에 도착하여야 한다. 이는 차량의 사용시점에 제한적인 요인이 된다. 재고부족이 발생하지 않도록 임의의 시점에 도착하는 것으로 할 경우 도착시점을 정의하지 않으면 정확한 재고비용을 구할 수 없다. 따라서 최소와 최대 재고비용의 중간 값을 재고비용으로 고려하면 재고비용은 식 (21)과 같다.

$$H_{si} = [\sum_k \frac{h_k R_{ks}}{2} A_s + \sum_k h_k \frac{q_i^2 B_{ksi} + (R_{ks} - q_i B_{ksi})^2}{2R_{ks}} A_s]/2, \quad \forall s, i \quad (22)$$



<그림 2(a)> 두 차량을 동일한 시점에 수송

수송주기 s 이고 차량크기가 i 일 때, 수송기간 A_s 동안 물류비용은 식 (23)과 같이 나타내지고, 단위시간동안 평균 물류비용은 식 (24)과 같이 나타낸다.

$$LC(y_s, x_i) = c_{1i}D(y_s, x_i) + H_{si}, \quad \forall s, i \dots \dots \dots (23)$$

$$ULC(y_s, x_i) = [c_{1i}D(y_s, x_i) + H_{si}] / A_s, \quad \forall s, i \dots \dots \dots (24)$$

물류센터에서 대리점에의 수송비용과 대리점에서의 재고비용을 한한 총 물류비용을 최소화하면서 수송주기 y_s , 차량크기 x_i 를 구하는 수리적 모형은 P1과 같이 나타내진다. 수송비용을 최소화하기 위해서는 최소 수송거리 차량경로계획을 함께 구한다.

$$\begin{aligned} P1 : \text{minimize } & LC = \sum_s \sum_i c_{1i} [2 \sum_s \sum_i \sum_k d_{ok} B_{ksi} \\ & + \sum_r \sum_j \sum_k d_{jk} x_{rjk}] y_s x_i + \sum_s \sum_i H_{si} y_s x_i \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_{j \in A_r} x_{rjk} = 1, \quad \text{for } k \in A_r, \quad \forall r$$

$$\sum_{k \in A_r} x_{rjk} = 1, \quad \text{for } j \in A_r, \quad \forall r$$

$$\sum_{k \in A_r} Q_{ksr} x_{rjk} \leq q_i, \quad j \in A_r, \quad \forall r$$

$$\sum_j \sum_k d_{jk} x_{rjk} / v + |A_r| t_{pld} \leq T_0, \quad \forall r$$

$$x_{rjk} = 0 \text{ or } 1 \quad k \in A_r, \quad j \in A_r, \quad \forall r$$

and $x_r = (x_{rjk})$ is a tour assignment

차량경로계획을 구하는 방법으로는 Gillett and Miller[15]의 the sweep 알고리듬과 Wright and Clarke[16]의 savings heuristic 알고리듬 등이 있다. 계속하여 이 분야의 알고리듬의 개발에 많은 연구가 되어왔다[8, 9, 11, 12, 13, 14, 17]. 알고리듬 중에서 savings heuristic 알고리듬에 바탕을 두고, 차량의 수송시간에 시간제약을 추가적으로 고려한 알고리듬은 다음과 같다.

(가) 차량경로계획 알고리듬

단계 1: 각 대리점은 독립적인 차량에 의해 수송되는 해로 시작한다.

단계 2: 대리점 k 와 j 의 모든 쌍에 대해 물류센터부터의 거리를 적용하여 savings $s_{kj} = d_{ok} + d_{oj} - d_{kj} \geq 0$ 을 계산한다.

단계 3: savings s_{kj} 을 큰 값부터 감소하는 순서로 나열 한다.

단계 4: savings 목록에서 첫 번째 실현가능한 선 (k, j) 을 찾는다. 선은 다음을 만족한다.

(a) k 와 j 가 다른 경로에 있다.

(b) k 와 j 는 각각의 경로에서 방문하게 될 첫 번째 혹은 마지막이다.

(c) 경로 k 와 j 의 수요의 합이 q_i 보다 크지 않다.

(d) 경로 k 와 j 의 경유하여 물류센터로 돌아오는 수송시간이 T_0 보다 크지 않다.

선 (k, j) 을 현재의 해에 넣고, 선 (o, k) 와 (j, o) 을 제거한다. 그리고 savings 목록에서 s_{kj} 을 제거한다.

단계 5: 조건을 만족하는 어떠한 더 이상의 대리점이 없을 때까지 단계 4를 반복한다.

2.2 알고리듬

수송비용과 재고비용의 합인 물류비용을 최소로 하는 의사결정 기준을 적용하여 대리점에의 수송주기와 차량크기를 구하는 알고리듬은 다음과 같다.

단계 1: $s=1$ 로 놓는다. 최소물류비용 $LC=\infty$, 단위시간 최소물류비용 $ULC=\infty$, 최적수송주기 $s^*=1$, 최적 차량크기 $i^*=1$ 로 놓는다.

단계 2: $i=1$ 로 놓는다.

단계 3: 수송량 R_{ki} 를 구하고, B_{ksi} 와 O_{ksi} 를 계산한다.

B_{ksi} 의 수송횟수에 해당하는 수송거리 D_{1si} 을 구하고, 수송량 O_{ksi} 에 대해 차량크기 q_i , 일일 수송시간 T_0 을 제약으로 하는 차량경로계획 알고리듬을 적용하여 D_{2si} 을 구한다. 수송비용과 재고비용을 구하여 물류비용 $LC(y_s, x_i)$ 와 $ULC(y_s, x_i) = LC(y_s, x_i) / A_s$ 을 계산한다.

단계 4: 만일 $ULC < ULC(y_s, x_i)$ 이면, ULC

$= ULC(y_s, x_i)$, $s^*=s$, $i^*=i$ 놓고 차량경로계획을 기록하고, 그렇지 않으면, $ULC = ULC$, $s^*=s^*$, $i^*=i^*$ 놓는다.

단계 5: $i \leq L$ 이면, $i = i+1$ 놓고 단계 2로 가고, 그렇지 않으면 단계 6으로 간다.

단계 6: $s \leq S$ 이면, $s = s+1$ 놓고 단계 2로 가고, 그렇지 않으면 멈춘다.

최소비용 수송주기와 차량크기는 모든 알고리듬이 종료되었을 때 단계 3에 기록된 값이 된다.

2.3 차량의 수 결정

최소비용을 나타내는 수송주기와 차량크기가 구해지

면, 이 차량크기에 해당하는 차량의 필요한 수를 구한다. 해에는 다수의 차량경로가 존재한다. 이 다수의 차량경로를 수송주기 동안에 균등하게 나누어 수송하여 필요한 차량의 수를 최소화한다.

단위기간 동안 최소물류비용을 갖는 해에 해당하는 필요한 차량의 수를 구한다. 수송주기는 A_s^* 이고, 발생된 차량경로의 수는 N 개이고 이 차량경로에 차례로 번호를 부여하였을 때 차량경로 n 의 수송시간이 t_n 이면, 이 N 개의 차량경로수송은 수송주기 A_s^* 내에 모두 수송하여야 한다. m 을 차량 번호로 한다. 필요한 차량의 수는 최소 1대에서 최대 N 이 된다. 다음의 부호를 정의 한다.

$$w_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{차량경로 } n\text{이 차량 } m\text{에 의해 수송되면,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$z_m = \begin{cases} 1, & \text{차량 } m\text{이 사용되면,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

기간 A_s^* 동안 수송할 차량의 수를 구하는 수리적 모형은 P2와 같다.

$$P2 : \text{minimize } Z_1 = \sum_{m=1}^N z_m \quad (25)$$

subject to

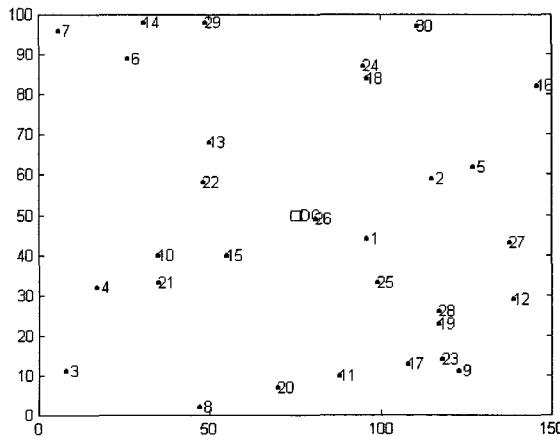
$$\sum_n t_n w_{nm} \leq \alpha T_0, \quad \forall m \quad (26)$$

$$w_{nm} \leq z_m, \quad \forall n, \forall m \quad (27)$$

$$\sum_m w_{nm} = 1, \quad \forall n \quad (28)$$

$$w_{nm} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall n, \forall m \quad (29)$$

$$z_m = 0 \text{ or } 1, \quad \forall m \quad (30)$$



<그림 2> 물류센터 및 대리점의 배치

식 (26)은 차량의 일일 수송시간에 대한 제한을 의미하고, 식 (27)은 차량 m 이 차량경로 n 에 사용되면 차량이 해당 차량이 사용됨을 의미하고, 식 (28)은 각 차량경로는 하나의 차량에만 할당되어야 함을 의미한다.

모형 P2에서 구한 해 Z_1 은 수송주기 A_s^* 동안 필요한 차량의 수다. 따라서 일일 필요한 차량의 수 M 은 식 (31)을 만족하는 가장 적은 정수가 된다.

$$M \geq Z_1 / A_s^* \quad (31)$$

3. 수치적 예제

하나의 물류센터와 30개의 대리점으로 이루어진 그림 2와 같은 물류시스템을 생각한다. 그림에서 □는 번호 0으로 물류센터의 위치를, 번호 1부터는 대리점의 위치를 나타낸다. 대리점들이 위치하고 있는 좌표는 가로 150km, 세로 100km인 평면에서 균일하게 임의로 난수를 이용하여 만든 것이다. 물류센터에서 대리점으로 제품을 수송한다.

10시간을 단위시간으로 일일 대리점들의 수요량은 표 2와 같다. 각 대리점의 수요량은 [5, 25]사이에서 균일분포로 생성된 것을 정수부분으로 반올림한 것이다. 표 2는 대리점의 위치좌표와 단위시간인 10시간동안 수요량을 나타낸 것이다. 물류센터에서 대리점으로 수송주기는 1일, 2일, 3일, 4일, 5일의 5가지로 한다. 물류센터에서 사용하려는 차량크기는 50, 100, 150으로 3종류이고, 차량의 단위거리 수송비용은 60/km, 100/km, 135/km이다. 재고유지비용은 대리점에 관계없이 10시간에 개당 30이다. 차량의 평균 속도는 50km/hour이다. 물류센터에서 화물을 싣는데 소요되는 시간은 20분이고, 각 대리점에서 화물을 내리는데 소요되는 시간은 20분으로 한다. 차량의 이용률은 1로 한다.

수송주기가 2, 3, 4, 5일 경우의 수요량은 수송주기가 1인 표 2의 수요량에 2, 3, 4, 5를 곱하여 구한다. 알고리듬에 대한 프로그램을 개발하여 해를 구하면, 수송주기와 차량크기에 따른 물류비용(수송비용+재고비용)과 일일 평균비용은 <표 3>과 같다. <표 3>에서 물류비용은 수송주기 동안 발생한 총 물류비용을 나타내고, 평균 물류비용은 단위기간인 일일동안 발생한 총 물류비용을 나타낸다. 표에서 2행으로 표시된 부분은 재고수준이 최소일 때와 최대일 때의 재고비용을 반영하여 구해진 물류비용이다. 예를 들어 설명하면, 수송주기가 3이고 차량크기가 50일 때 물류비용은 최소 241,471, 최대 250,902

<표 2> 대리점의 위치 좌표 및 수요량

대리점	위치좌표(X, Y)	수요량/일	대리점	위치좌표(X, Y)	수요량/일
1	(96, 44)	9	16	(146, 82)	21
2	(115, 59)	13	17	(108, 13)	21
3	(8, 11)	19	18	(96, 84)	13
4	(17, 32)	12	19	(117, 23)	22
5	(127, 62)	23	20	(70, 7)	12
6	(26, 89)	20	21	(35, 33)	9
7	(6, 96)	13	22	(48, 58)	15
8	(47, 2)	9	23	(118, 14)	9
9	(123, 11)	13	24	(95, 87)	17
10	(35, 40)	8	25	(99, 33)	25
11	(88, 10)	6	26	(81, 49)	14
12	(139, 29)	7	27	(138, 43)	21
13	(50, 68)	6	28	(117, 26)	14
14	(31, 98)	22	29	(49, 98)	10
15	(55, 40)	13	30	(111, 97)	18

이고, 평균물류비용은 최소 80,490, 최대 83,634 이다. 표에서 1행으로 표시된 부분은 하나의 비용만이 존재한다.

동일한 차량크기에 대해 평균물류비용은 수송주기가 증가할수록 감소하다가 증가하는 아래로 불룩한 형태임을 볼 수 있다. 차량크기가 50일 때 최소 평균물류비용을 나타내는 경우는 수송주기가 5이며, 차량크기 수송과 차량크기 미달 수송을 재고가 0이 시점에 맞추어 분산하여 수송하는 경우로 79,507이다. 이 경우는 재고비

용을 가장 적게 할 수 있을 때이다. 수송량이 차량크기의 정수 배수를 초과하는 대리점의 경우 차량크기 수송과 차량크기 미달 수송을 여러 시점에 나누어 하는 것이 동일 시점에 하는 것에 비해 재고비용을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이는 수송정책에 따라 재고비용에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다.

가능한 최소 재고비용과 최대 재고비용의 중간값을 재고비용으로 사용하는 경우에 최소비용을 나타내는 의사결정변수의 값은 차량크기가 50일 경우는 수송주기 3일에 비용은 $82,062((80,490+83,634)/2 = 82,062)$, 차량크기가 100일 경우는 수송주기 2일에 비용은 79,833, 차량크기가 150일 경우는 수송주기 3일에 비용은 80,234이다. 하나의 수송주기에서 다수의 차량크기 수송과 하나의 차량크기 미달 수송을 동일한 시점에 모두 하는 경우에 수송주기가 짧은 경우에는 차량크기가 적은 것이 평균물류비용이 적고, 수송주기가 긴 경우에는 차량크기가 큰 것이 평균물류비용이 적게 나타남을 알 수 있다. 그러나 다수의 수송을 나누어 분산하여 하는 것이 JIT 개념을 사용하여 수송한 것과 같이 물류비용을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이는 적절한 수송정책을 통하여 재고비용을 줄여 물류비용을 줄일 수 있음을 의미한다.

<표 3>에 의하면 가능한 모든 경우에 대해 최소 평균물류비용을 나타내는 수송주기는 2일이고, 차량크기는 100임을 알 수 있다. 최소 평균비용을 갖는 경우 차량경로와 수송시간은 <표 4>와 같다. <표 4>에서 차량경로에 0으로 표시된 부분은 물류센터를 의미한다.

<표 4>의 자료를 사용하여 필요한 차량의 수를 구하기 위하여 선형정수계획으로 해를 구하면, 수송을 위해 필요한 차량의 수는 2일에 5대이고, 일일 평균 3대가 필요함을 의미한다. 이 문제의 차량경로의 수송일정계획은 다수가 있으며, 그중 하나를 나타내면 <표 5>와 같다.

<표 3> 수송주기와 차량크기에 따른 물류비용

수송주기(일)	차량크기(50)			차량크기(100)			차량크기(150)	
		물류비용	평균물류비용/일		물류비용	평균물류비용/일	물류비용	평균물류비용/일
1		86,685	86,685		96,525	96,525	107,246	107,246
2		166,625	83,312		159,666	79,833	171,730	80,865
3	최소	241,471	80,490		247,585	82,528	240,701	80,234
	최대	250,902	83,634					
4	최소	330,688	82,672		332,962	83,240	324,750	81,188
	최대	360,058	90,014					
5	최소	397,534	79,507	최소	431,191	86,238	439,232	87,864
	최대	462,818	92,564	최대	441,021	88,204		

<표 5>에서 번호 1의 수송일정계획은 하나의 차량이
 <표 4>에서 번호 1, 5, 10의 3개의 차량경로를 10시간
 동안 수송함을 의미한다.

<표 4> 차량경로계획 및 수송시간

번호	차량경로	시간(분)	번호	차량경로	시간(분)
1	0-2-28-19-0	232	6	0-18-30-24-0	224
2	0-5-16-0	250	7	0-21-4-3-8-0	325
3	0-10-6-7-13-0	334	8	0-22-14-29-0	53
4	0-17-11-20-0	237	9	0-23-9-12-27-0	296
5	0-15-0	93	10	0-26-1-25-0	155

<표 5> 차량의 수송일정

번호	수송차량	차량경로번호	수송시간
1	1일 차량 1	1, 5, 10	480
2	1일 차량 2	2, 7	575
3	1일 차량 3	3	334
4	2일 차량 1	4, 8	490
5	2일 차량 3	6, 9	520

4. 결 론

본 논문에서는 물류센터와 대리점으로 이루어진 물류시스템에서 물류센터에서 대리점으로 제품을 수송할 때 수송비용과 재고비용을 합한 물류비용을 최소화하는 수송계획을 구하는 문제를 연구하였다. 비용을 최소화하는 수송주기와 차량크기를 구하는 내용을 다루었다. 수송비용을 구할 때 수송거리를 최소화하는 차량경로계획을 함께 구하였다. 또한 구해진 차량크기에 대해 수송일정계획을 적용하여 필요한 차량의 수를 구하는 문제도 다루었다.

향후 연구방향으로 첫 번째는 대리점마다 수송주기를 다르게 하는 경우이다. 가능한 몇 개의 수송주기를 가정하고, 각 대리점은 가정한 수송주기 중에서 하나의 수송주기를 선택하여 수송한다. 장기적으로 비용을 최소화하도록 각 대리점별로 수송주기를 결정한다. 두 번째는 물류시스템에서 사용되는 차량의 크기를 다양하게 허용하는 것이다. 허용된 여러 차량크기 중에서 합리적이고 경제적으로 몇 개의 차량크기를 선택한다.

참고문헌

- [1] Turner, W.G., Ghare, P.M. and Foulds, L.R., "Transportation routing problem : a survey." *AIEE Transactions*, Vol. 6, 288-301, 1974
- [2] Basnet C., Clark D.N. and Foulds, L.R., "A decision support system approach to vehicle routing," *Control and Cybernetics*, Vol. 22, 131-144, 1993
- [3] Golden, B.L and Assad, A.A., *Vehicle routing : methods and studies*, North-Holland : Amsterdam, 1988
- [4] Labbe, M., Laporte, G. and Mercure, H., "Capacitated vehicle routing on trees," *Operations Research*, Vol. 39, 616-622, 1991
- [5] Yang, P.C and Wee H.M., "An arborescent inventory model in a supply chain system," *Production Planning & Control*, Vol. 12, 728-735, 2001.
- [6] Fleischmann, B., "Design of freight traffic networks," *Advanced in Distribution Logistics*, 55-81, 1998
- [7] Ballou, R.H., *Business Logistics Management*, 4th edition, Prentice-Hall, Inc, 1999
- [8] Kasilingam, R.G., *Logistics and transportation : design and planning*, Kluwer academic publishers, 1998
- [9] Bramel, J. and Simchi-Levi, D., *The logic of logistics*, Springer-Verlag New York, Inc, 1997
- [10] Daganzo, G.F., *Logistics Systems Analysis*, Springer, 1999
- [11] McGavin, E., Schwarz, L.B. and Ward, J., "Two-interval inventory-allocation policies in a one-warehouse N-identical-retailer distribution system," *Management Science*, Vol.39, 1092-1107, 1993
- [12] Chopra, S. and Meindl, P., *Supply Chain Management*, Upper Saddle River, New Jersey, 2001
- [13] Bertsimas, D. and Simchi-Levi, D., "The new generation of vehicle routing research : robust algorithms addressing uncertainty." *Operations Research*, Vol.44, 286-304, 1995
- [14] Christofides, N., Vehicle routing, In *The Traveling Salesman Problem : a Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Lawler, E.L.,J.K., Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan and D.B. Shmoys(eds), John Wiley & Sons Ltd., New York, 431-448, 1985
- [15] Gillett, B.E. and Miller, L.R., "A heuristic algorithm for the vehicle dispatching problem," *Operations Research*, Vol. 22, 340-349, 1973
- [16] Clarke, G. and Wright, J.W., "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points,"

- Operations Research*, Vol. 12, 568-581, 1964
- [17] Fisher M.L., Vehicle Routing. In *Handbook in Operations Research and Management Science*, the volume on Network Routing, Ball, M., T. L. Magnanti, C.L. Monma and G.L. Nemhauser (eds), North-Holland, Amsterdam, 1-33, 1995
- [18] Graves, S.C. and Schwarz, L.B., "Single cycle continuous review policies for arborescent production/inventory systems," *Management Science*, Vol. 23, 529-540, 1977
- [19] Roundy, R., "98%-effective integer-ration lot sizing for one-warehouse multi-retailer systems," *Management Science*, Vol. 31, 1416-1430, 1985
- [20] Jackson, P.L., Maxwell, W.L. and Muckstadt, J.A., "The joint replenishment problem with powers of two restrictions," *AIEE Transactions*, Vol.17, 25-32, 1985
- [21] Federgruen, A. and Zheng, Y.S., "The joint replenishment problem with general joint structures," *Operations Research*, Vol. 40, 384-403, 1992
- [22] Bramel, J. and Simchi-Levi, D., "A location based heuristic for general routing problems," *Operations Research*, Vol. 43, 649-660, 1995)
- [23] Anily, S. and Federgruen, A., "One warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs," *Management Science*, Vol. 36, 92-114, 1990
- [24] Herer, Y. and Roundy, R., "Heuristics for a one warehouse multi-retailer distribution problem with performance bounds," Technical reports No. 916, Cornell university, Ithaca, NY, 1990
- [25] Viswanathan, S. and Mathur, K., "Integrating routing and inventory decision in one warehouse multi-retailer multi-product distribution systems," working paper, 1993