

Optimization for Vehicle Routing Problem with Locations of Parcel Lockers

Gitae Kim[†]

Department of Industrial Management Engineering, Hanbat National University

물품보관소 위치를 고려한 차량경로문제 최적화

김기태[†]

한밭대학교 산업경영공학과

Transportation in urban area has been getting hard to fulfill the demand on time. There are various uncertainties and obstacles related with road conditions, traffic congestions, and accidents to interrupt the on-time deliveries. With this situation, the last mile logistics has been a keen issue for researchers and practitioners to find the best strategy of the problem. A way to resolve the problem is to use parcel lockers. Parcel locker is a storage that customers can pick up their products. Transportation vehicles deliver the products to parcel lockers instead of all customer sites. Using the parcel lockers, the total delivery costs can be reduced. However, the inconvenience of customer has to increase. Thus, we have to optimal solution to balance between the total delivery costs and customers' inconvenience. This paper formulates a mathematical model to find the optimal solution for the vehicle routing problem and the location problem of parcel lockers. Experimental results provide the viability to find optimal strategy for the routing problem as well as the location problem.

Keywords : Vehicle Routing Problem, Logistics, Location Problem, Parcel Lockers, Optimization

1. 서론

물류에서 많은 비중을 차지하고 있는 차량경로문제와 배송문제는 연구가 오래전부터 꾸준히 되어오고 있는 분야이다. 배송시스템의 구성이나 최적경로를 찾는 문제는 경영과학이나 최적화 분야에서 가장 많이 연구되어진 영역들 중에 하나라고 볼 수 있다. 하지만, 여전히 물류는 해결해야 될 많은 부분이 있고, 효율적인 방법을 찾고 있다. 최근에는 도시가 커지고 차량이 많아지면서 도시물류가 관심을 받기 시작했다.

지방자치단체들은 도시의 삶의 질을 향상시키기 위해

교통체증을 줄이려고 노력한다[13]. 그럼에도 불구하고, 인터넷과 온라인 주문 등의 발달로 도시에서의 배송은 더욱 증가되고 복잡성도 커지고 있다[14]. 따라서, 배송시스템의 효율화와 차량수송비용의 최소화 문제는 여전히 해결할 문제가 되고 있다. 이러한 문제의 해결방안 중에 하나로 최근에 물품보관소(Parcel locker)에 대한 관심이 증가하고 관련 연구들이 진행되고 있다.

물품보관소(Parcel locker)는 물건을 최종 수요자까지 배송하는 대신에 물품보관소까지 배송하고 접근이 가능한 최종 수요자들이 물건을 찾아가는 방식으로 운영되는 일종의 보관 창고라고 볼 수 있다. 물품보관소를 이용하면 최종수요자까지 배송을 하지 않아도 되기 때문에 차량수송비용이 줄어든다. 반면에, 최종수요자가 물건을 찾으러 가야하는 수고가 추가되는 면이 있다. 또한 물품보관소를 너무 많이 설치하면 수송비용을 줄이는 효과가 줄어들 수

있고, 최종수요지가 많지 않은 지역에 설치하는 것도 효율성이나 이용률이 낮아지는 문제가 있다. 따라서 물품보관소의 위치를 어디에, 몇 개를 설치하는 것이 가장 최적의 전략인지에 대한 문제에 대해 연구들이 진행되고 있다.

이 논문에서는 물품보관소의 최적 위치를 찾는 문제를 다루는데 차량의 경로문제와 결합한 모형을 개발한다. 기존의 대부분의 연구들은 물품보관소의 위치선정문제와 차량의 경로문제를 분리해서 문제를 해결하는 방법을 사용하였는데, 우리는 두 문제를 하나의 모형에서 최적화 시키는 모형을 개발한다. 또한 물품보관소로 최종 수요자가 물건을 가지러 오는 수송비용을 함께 모형에 추가하여 최종 수요자의 이동거리를 최소화 시키는 물품보관소의 위치를 찾고자 한다. 문제는 혼합정수계획법으로 모형화를 하고, 최적화 방법으로 문제의 해를 찾는다. 모형의 구현과 공개 데이터를 이용한 실험으로 물품보관소의 최적해와 차량경로의 최적해를 분석해본다.

2. 선행연구

물품보관소에 관한 연구는 배송시스템이나 차량경로문제에 관한 연구에 비해 오래 되지 않았다. Punakivi et al.[12]은 2001년에 최종고객에 배송하는 것이 무인으로 운영하는 물품보관소를 이용하는 것 보다 비용이 더 많이 소요된다는 것을 시뮬레이션 모형으로 통해 보여주었다.

복수의 수송수단을 연결해서 배송하는 복합수송을 고려한 네트워크에서 위치차량경로문제에 대한 연구가 있었다. Fazayeli et al.[3]은 차량경로문제와 함께 물류센터의 위치를 선정하는 문제를 고려한 수리모형을 개발하고 이를 유전자 알고리즘으로 해를 구하였다. 물건은 공급자에서 출발하여 물류센터들로 먼저 배송이 되고, 지역적으로 퍼져 있는 물류센터는 근거리에 위치한 소매자들에게 배송이 되는 시스템으로 구성되어 있다. 위치경로문제에서 위치는 물류센터의 최적위치를 선정하는 것이고, 경로문제는 공급자에서 물류센터로 가는 것과 물류센터에서 소매자들에게 가는 최적경로를 찾는 것이다. 이 문제는 혼합정수계획법으로 모형화 되고 유전자 알고리즘으로 해를 찾았다. 이 연구는 위치선정문제와 차량경로문제를 한 모형으로 만들었는데, 한 차량이 물류센터와 소매자들을 모두 이동하는 것이 아니고 복합수송을 이용하여 물류센터로 가는 차량과 물류센터에서 소매지로 가는 차량은 다른 운송수단을 이용하는 것이다. Enthoven et al.[2]은 도시물류에서 물품보관소와 함께 화물 바이크를 이용한 배송시스템에 대한 문제에 대해 연구하였다. 이 연구에서는 차량 경로문제를 두 계층으로 나누었는데, 첫 번째 계층은 물품보관소로 물건을 배송하는 문제이고, 두 번째 계층은 물품

보관소에서 최종수요지까지 물건의 흐름을 화물 바이크를 이용하거나 수요자가 가져가는 형태로 하는 문제이다. 이 문제는 혼합정수계획법으로 모형화를 했고 발견적기법으로 최적해를 찾았다. 물품보관소가 감당할 수 있는 수요지들을 정해서 해당 수요지는 개별 배송을 하지 않게 되어 총수송비용을 줄이면서 바이크가 다니는 것을 두 번째 계층문제에서 다루었다.

물품보관소의 범위나 종류를 확장한 형태의 연구도 진행되었는데, Orenstein et al.[9]은 자동화된 물품보관소를 이용한 유연한 배송전략을 제안했다. 일반적인 물품보관소는 지정된 위치에서만 이용이 가능한 것에 반해 유연물품보관소는 다양한 지점을 이용하는 것이다. 예를 들어, 우체국, 식료품점 등의 셀프서비스가 가능한 많은 지역이 활용된다. 이 연구에서는 물품보관소 이외의 다른 지역을 서비스 지점이라는 용어를 사용하여 정의하였고, 물건이 서비스 지점에 가는 경로를 최적화 하는 모형으로 만들어 해를 구하였다. Ghaderi et al.[4]은 라스트마일 물류에서 클라우드배송(Crowdshipping)에 대한 해를 다루었다. 클라우드 운송자들은 물건 교환 위치를 위해 물품보관소를 이용하는 시스템을 이용하였다. 이들의 연구에서는 클라우드 운송자들의 경로를 최적화 하면서 물품보관소를 적절히 이용하여 총수송비용을 줄이기 위한 모형을 제시하였는데, 클라우드 운송자에게 배송업무를 할당하는 문제와 물품보관소의 이용율을 높일 수 있는 문제에 대한 해를 구하였다.

보관소의 위치가 이동하는 형태인 이동형 물품보관소도 소개되었다. Schwerdfeger et al.[10]은 물품보관소의 위치가 변하는 이동형 물품보관소에 대한 최적해를 찾는 문제를 다루었다. 물품보관소가 이동하면서 물품보관소가 담당할 수 있는 범위가 달라지는 것을 고려하여 달라지는 위치에 따라서 범위를 다시 정의해 주었다. 혼합정수계획법으로 모형화를 진행하였으며, 주차에 대한 내용을 고려하여 차량의 크기를 최적화 하고 물품보관소의 최적경로를 찾아 수요지의 요구를 모두 충족시키는 해를 찾는 연구를 진행하였다. Li et al.[6]은 고정된 물품보관소가 아닌 이동 가능한 자율적인 이동식 물품보관소를 고려하였다. 물품보관소가 이동이 가능하면서 차량에 물건을 가져다 줄 수도 있고 차량이 출발지로 다시 돌아오는 것을 줄일 수 있기 때문에 수송비용의 절감을 생각해 볼 수도 있다. 여기에서도 문제를 두 계층으로 나누어서 큰 도로나 넓은 지역에 맞는 경로를 우선 정하고 최종 수요지까지의 경로를 다음 계층에서 찾는 방법을 사용하였다. 움직이는 물품보관소가 많은 이동을 하면 물품보관소의 역할이 의미가 없어지므로 이 연구에서는 물품보관소와 수요자들이 만나는 지점을 지정해서 해당 지점에서 물건을 가져갈 수 있는 시스템으로 구성을 하였다.

Carotenuto et al.[1]은 다중출발지용량제약 차량경로문제(Multi depot capacitated vehicle routing problem)를 이용해서 수요지에 직접 배송하는 것과 물품보관소(Parcel locker)에 배송하는 것을 모형화 하고 이들을 비교하였다. 이들은 두 단계로 문제를 해결하였는데, 물품보관소와 수요지에 대한 군집화를 먼저 수행하고, 각 군집에 대해 최적차량경로를 찾도록 하였다. 또한 차량의 배기가스로 인한 환경오염을 고려한 모형을 고려하였고, 수요지 직접배송과 물품보관소의 배송에 대한 것에서 수요자가 직접 물건을 가져가기 위해 이동하는 비율을 10%~30%로 시나리오를 설정하여 총수송에 대한 비용과 이산화탄소 배출량을 비교하였다.

Luo et al.[8]은 물품보관소 위치선정문제에 대해 다목적계획법을 이용하여 모형화 하였다. 목적함수는 네트워크의 총비용을 최소화 하는 것과 수요자들의 접근성을 최적화 하는 것이다. 다목적계획법의 해를 구하기 위해 진화 알고리즘인 Active learning Pareto evolutionary algorithm을 사용하였다. 이 연구는 물품보관소의 최적위치를 추천해 줄 수 있고 필요한 물품보관소의 개수를 제공해 주며, 수요자들의 접근성을 최대화 시킬 수 있는 해를 구하였다.

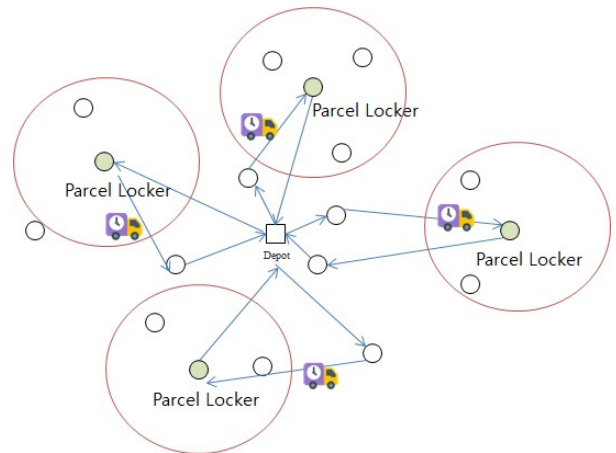
물품보관소의 운영에 있어서 가격을 어떻게 책정하는지에 관한 문제도 연구되었다. Yu et al.[11]은 물품보관소를 이용한 서비스의 가격을 책정하는 문제를 다루었다. 라스트마일 물류에서 일어나는 간단한 예제를 통해 가격책정을 도출하려고 하였는데, 이를 위해 외판원문제(TSP)를 갖고 배송의 변화와 함께 비용을 분석하여 가격을 책정하는 연구를 하였다. 물품보관소를 운영하는 비용에 대한 내용을 기반으로 가격을 추정하는 방법을 사용하였다.

배송을 하는 주체가 아닌 물품보관소에서 물건을 가져가는 수요자 측면에서의 연구도 진행되었다. Lai et al.[5]은 라스트마일 물류에서 물품보관소의 이용에 대한 고객만족도를 분석하였다. 만족도의 척도로 5 가지 차원을 갖는 SERVQUAL의 서비스 품질 지표를 활용하여 설문과 통계분석을 진행하였다. 분석결과 시기적절성(Timeliness)가 서비스 품질 차원 중에 만족도에 가장 영향을 많이 주는 항목이라는 것을 찾았으며 대부분의 차원에서 영향을 주는 것으로 파악되었다. Lin et al.[7]은 물품보관소의 위치선정문제를 다루었는데, 수요자가 물품보관소를 이용할 가능성이 있는지에 대한 문제를 예측 모형인 threshold Luce model을 이용하여 예측을 하였고 로짓모형(Logit model)을 기초로 위치선정문제를 모형화했다. 이들 연구의 결론에서 보수적이지 않은 공격적인 의사결정 성향은 불필요한 비용을 초래하여 좋지 않은 결과를 가져온다는 것을 제안했다.

3. 물품보관소를 이용한 배송문제

일반적으로 배송문제에서의 차량경로문제는 여러 대의 차량을 이용하여 지역적으로 흩어져 있는 수요지들을 차량들이 한 번씩 방문하여 수요를 충족시키면서 수송비용을 최소로 하는 경로들을 찾는 문제이다. 물품보관소의 위치선정문제는 집합덮개(Set covering)문제와 유사하게 수요지들을 담당할 최적의 물품보관소의 위치와 개수를 구하는 문제이다. 위치선정문제(Facility location problem)는 2차원 평면에서 가장 최적인 위치를 찾는 문제이지만, 현실적으로는 설비나 건물이 모든 위치에 설치되기는 불가능하다. 예를 들어, 가장 좋은 위치를 선정했는데, 연못가이거나 도로 위에 있거나 이미 다른 건물이 있거나 하는 경우에는 가장 좋은 위치이지만 비현실적인 해라고 볼 수 있다. 따라서, 일반적인 경우에는 몇 개의 가능한 위치를 찾아 두고 이들 중에서 가장 좋은 해를 제공해주는 위치를 최적값으로 한다.

이 논문에서는 차량경로문제와 위치선정문제를 함께 고려하는데, 이를 그림으로 나타내면 아래와 같다.



<Figure 1> Parcel Locker Location Routing Problem

<Figure 1>에서 보는 바와 같이, 차량들이 최종수요지와 물품보관소를 함께 방문한다. 물품보관소가 활용이 되면, 물품보관소에 근접한 최종수요자들은 물건을 물품보관소에서 가져간다. 따라서, 이들 최종수요자들은 차량이 방문할 필요가 없어진다. 물품보관소를 기준으로 동그란 원은 물품보관소가 담당할 수 있는 최종수요자들의 반경을 나타낸다. 이들 원의 안에 들어가 있는 최종수요자들은 해당 물품보관소에서 물건을 받아간다.

물품보관소를 이용한 배송문제는 복수의 차량을 이용한 차량경로문제에 물품보관소를 방문하는 것을 포함한다. 물품보관소와 최종수요지를 방문하는 최적경로를 찾는 것과 함께 물품보관소가 가능한 많은 최종수요지를 담

당할 수 있도록 물품보관소의 최적위치를 찾는 문제라고 정의할 수 있다. 물품보관소의 최적위치는 먼저 물품보관소로 이용할 수 있는 가능한 위치들이 후보들을 설정해 두고, 이들 위치들에 대해 어떤 후보위치들을 운영했을 때 가장 많은 최종수요지들을 담당할 수 있고, 차량이 물품보관소와 최종수요지들의 방문에 최소의 비용을 가질 수 있는지를 찾는다. 이 논문에서는 이러한 문제와 함께 물품보관소로 물건을 가져가는 최종수요자들의 이동거리를 최소화 할 수 있는 물품보관소의 위치를 찾는 모형을 개발한다.

4. 물품보관소 위치를 고려한 모형

차량출발지(Depot)는 단일 출발지를 가정하고 복수의 차량으로 수요지를 한 번씩 방문하여 모든 수요지들의 수요를 충족시키는 문제를 고려한다. 문제의 모형은 아래와 같다.

<집합>

$0, n+1$: (0: 출발지의 출발위치, $n+1$: 출발지의 도착위치),

$N = \{1, \dots, k\}$: 최종수요지,

$P = \{k+1, \dots, n\}$: 물품보관소,

$V = \{0, n+1\} \cup P \cup N$: 모든 노드집합

$A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$: 아크집합,

$M = \{1, \dots, m\}$: 차량집합

$V^+(i) = \{j \in V | (i, j) \in A\}$: 노드 i 에서 나가는 아크들의 집합

$V^-(i) = \{j \in V | (j, i) \in A\}$: 노드 i 로 들어오는 아크들의 집합

<파라미터>

$[a_i, b_i]$: 노드 i 에 대한 시간제약(Time window)

s_i : 노드 i 에 대한 서비스 시간

d_i : 최종 수요지 i 의 수요

$c_{i,j}$: 노드 i 에서 노드 j 로 가는 이동시간

r_i : 최종 수요지들을 담당할 물품보관소 i 의 반지름

W : 물품보관소를 개설할 고정비용

L : 큰 수

<변수>

$x_{i,j}^m$: 이진변수, 아크 $(i, j) \in A$ 가 차량 m 에 의한 최적경로에 포함되면 1, 아니면 0

t_i^m : 차량 m 이 노드 i 에 도착하는 시간 (서비스의 시작 시간)

z_i : 이진변수, 물품보관소 i 가 개설되면 1, 아니면 0
 $y_{i,j}$: 이진변수, 최종수요자 i 가 물품보관소 j 에 할당되면 1, 아니면 0

먼저, 용량제약이 있는 차량경로문제에 수요지의 시간 제약(Time window)을 추가한 형태를 VRP-TW라고 부르는데, 이 문제는 혼합정수계획법으로 모형화 되었고, 모형은 아래와 같다.

$$(VRP-TW) \quad \text{Min} \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} c_{i,j} x_{i,j}^m \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{m \in M} \sum_{j \in V^+(i)} x_{i,j}^m = 1, \quad \forall i \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V^+(0)} x_{0,j}^m = 1, \quad \forall m \in M \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V^-(h)} x_{i,h}^m - \sum_{j \in V^+(h)} x_{h,j}^m = 0, \quad (4)$$

$$\forall h \in N, \quad \forall m \in M$$

$$\sum_{i \in V^-(n+1)} x_{i,n+1}^m = 1, \quad \forall m \in M \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in V} x_{i,j}^m \leq K, \quad \forall m \in M \quad (6)$$

$$t_i^m + (s_i + v_{i,j}) x_{i,j}^m - t_j^m \leq (1 - x_{i,j}^m) L, \quad (7)$$

$$\forall (i, j) \in A, \quad m \in M$$

$$a_i \leq t_i^m \leq b_i, \quad \forall i \in N, \quad m \in M, \quad (8)$$

$$x_{i,j}^m \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V, \quad m \in M \quad (9)$$

목적함수 (1)은 차량들의 총이동거리를 최소화 하는 것을 나타낸다. 제약식 (2)는 최종수요지는 한 차량에 의해서 한번만 방문된다는 것을 나타낸다. 제약식 (3)은 모든 차량들은 차량출발지에서 출발해야 되는 제약이다. 제약식 (4)는 네트워크 흐름의 균형 제약식으로 한 노드로 들어간 차량은 다시 그 노드를 나가야 되는 것을 의미하고, 한 노드는 하나의 차량만 거쳐가는 것도 나타낸다. 제약식 (5)는 모든 차량은 경로를 통과하고 다시 하나의 도착지로 돌아와야 된다는 제약이다. 제약식 (6)은 차량의 용량제약으로 각 최종수요지의 수요를 충족시키면서 용량제약을 갖고 운행해야 되는 제약이다. 제약식 (7)은 시간제약(Time window)으로 도착한 시간 이후에 서비스시간 동안에 그 노드에 머물고 서비스가 끝나면 다른 노드로 이동하는 것을 나타낸다. 제약식 (8)은 각 최종수요지마다 원하는 시간을 나타내는 시간제약(Time window)을 나타낸다. (9)는 이진변수의 정의를 나타낸다.

(VRP-TW) 모형은 시간제약을 갖는 최종수요지를 시간 안에 배송을 하면서 최적경로를 찾는 문제이다. 이 모형에 물품보관소를 추가하면 아래와 같은 모형이 된다.

$$(VRPTW-PL) \quad \text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{i,j} x_{i,j} + \sum_i W z_i \quad (10)$$

$$+ \sum_i \sum_j f_{i,j} y_{i,j}$$

$$s.t. \sum_{j \in C} x_{i,j} + \sum_{j \in P} y_{i,j} = 1,$$

$$\begin{aligned} \forall i \in N, & \quad (11) \\ \sum_{j \in V^+(0)} x_{i,j} &= 1, \quad \forall i \in N, & (12) \\ \sum_{i \in V^-(h)} x_{j,i} - \sum_{i \in V^+(h)} x_{i,j} &= 0, & (13) \\ \forall j \in N & \\ \sum_{i \in V^-(n+1)} x_{i,j} &= 1, \quad \forall j \in N & (14) \\ \sum_{i \in N} d_i x_{i,j} &\leq K, \quad \forall j \in N & (15) \\ t_i + (s_i + v_{i,j}) x_{i,j} - t_j &\leq (1 - x_{i,j}) L, & (16) \\ \forall (i,j) \in A & \\ \sum_{j \in P} y_{i,j} &\leq 1, \quad \forall i \in C, & (17) \\ y_{i,j} &\leq z_j, \quad i \in C, j \in P, & (18) \\ \sum_{j \in P_k} x_{i,j} &\leq (1 - y_{jk}) L, & (19) \\ \forall j \in C, k \in P, & \\ c_{i,j} y_{i,j} &\leq r_j z_j, \quad \forall i \in C, j \in P, & (20) \\ a_i &\leq t_i \leq b_i, \quad \forall i \in N, & (21) \\ x_{i,j}, y_{i,j}, z_k &\in \{0,1\}, \quad \forall i,j \in V, k \in P & (22) \end{aligned}$$

물품보관소를 추가한 모형(VRPTW-PL)은 (VRP-TW) 모형에 항들이 추가된 것을 볼 수 있다. 먼저 목적함수 (10)에는 두 개의 항목이 추가되었다. 중간에 있는 항은 물품보관소가 개설이 되면 개설에 필요한 비용이 들어가기 때문에 개설된 물품보관소에 대한 총고정비용을 나타낸다. 마지막 항은 개설된 물품보관소에 최종 수요자가 물건을 가지러 올 때, 이동해야 하는 거리의 총합을 나타낸다. 이 목적함수는 물건을 배송하는 배송 차량의 최적경로와 물품보관소가 최소의 개수로 개설되어야 하는 최적의 필요개수와 최종 수요자가 이동해야 하는 수고를 최소화 하는 경로와 물품보관소의 위치를 찾는 모형이라고 할 수 있다.

제약식 (11)은 차량이 노드를 방문하거나 물품보관소를 방문해야 하는 것을 나타낸다. 제약식 (12)~(16)은 (VRP-TW)모형의 제약식들과 같고, 제약식 (17)은 최종수요자가 물품보관소를 이용할 수도 있고 하지 않을 수도 있는데, 이용할 경우에는 하나의 물품보관소를 이용한다는 제약이다. 제약식 (18)은 물품보관소가 개설한 경우에만 최종 수요자가 해당 물품보관소를 이용할 수 있다는 것을 나타낸다. 제약식 (19)는 최종 수요자가 물품보관소를 이용하면 차량이 방문하지 않아도 된다는 것을 나타낸다. 제약식 (20)은 물품보관소에서 정해진 반경안에 있는 최종수요자들은 물품보관소를 이용할 수 있다는 제약이다. 제약식 (21)은 시간제약이고, 제약식 (22)는 이진변수에 대한 제약이다.

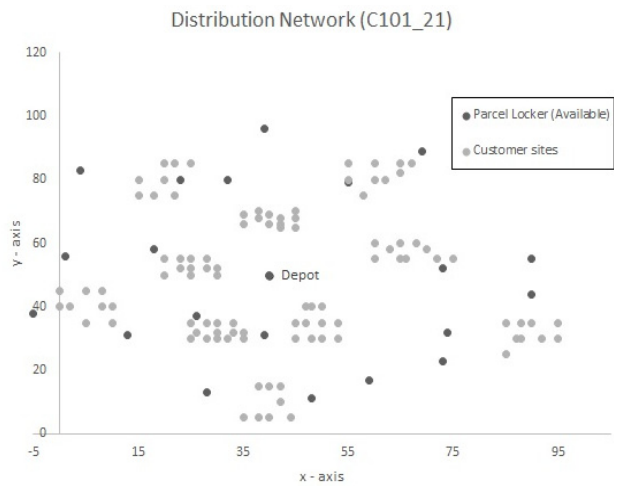
제안된 모형은 최종수요지를 방문하면서 시간제약을 만족하는 차량경로문제에 물품보관소의 최적위치를 찾는 위치선정문제를 결합한 모형이다. 이 모형에서는 최종 수요자들이 물건을 가져가야 되는 수고를 이들의 이동경로

에 비례한다고 가정하면, 최종 수요자들의 불만을 최소화 하는 경로를 찾는 모형이라고 할 수 있다.

5. 실험결과

이 논문에서 제안된 모형에 대한 검증을 위해 차량경로 문제의 Benchmark 데이터로 잘 알려져 있는 Solomon 문제 중에 하나를 이용하여 실험을 진행하였다. 문제 C101 문제는 수요지가 100개인 문제인데, 여기에 물품보관소가 될 수 있는 후보지 21개를 추가하여 만든 C101-21 문제를 이용하였다.

모형의 구현은 C# 프로그램에서 Concert technology를 이용하였고, 해법은 CPLEX 12.6.1을 이용하여 최적화 알고리즘(Exact algorithm)을 적용하였다. 실험에 이용된 데이터는 차량출발지(Depot)가 1개이고 해당 출발지에서 차량들이 출발하여 다시 출발지로 돌아오는 문제이다. 차량의 용량제약이 있고 이 용량들은 모두 동일하다고 가정한다. 수요지들 별로 수요량은 모두 다르고 값은 10~50으로 차이는 크지 않다. 또한 수요지마다 배송을 원하는 시간이 있어 시간제약(Time window)을 갖는다. 물품보관소가 될 수 있는 물품보관소 후보들은 수요지들이 위치한 곳에 고르게 분포되어 있도록 하였는데, 수요지와 가능한 물품보관소 위치들은 아래 그림과 같다.

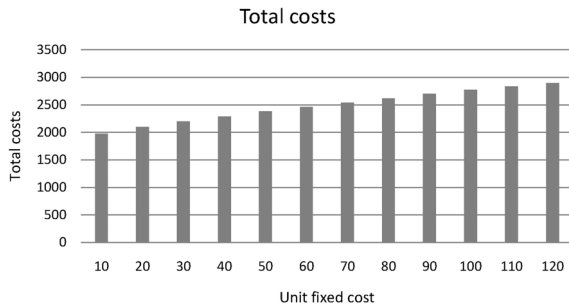


<Figure 2> Distribution Network with Parcel Lockers

<Figure 2>에서 보는 것처럼 수요지들 사이에 가능한 물품보관소들이 고르게 분포되어 있다. 중간에 차량출발지(Depot)가 위치해 있다. 운송이 가능한 차량대수는 10개라고 가정하였다.

실험은 물품보관소 하나를 개설하는 단위고정비용이

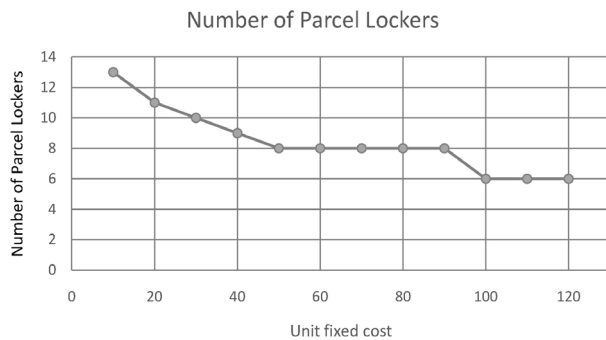
달라지면 어떻게 차량의 경로와 물품보관소의 개설 개수가 달라지며 총 운송비용은 어떻게 되는지를 살펴봤다.



<Figure 3> Total Cost by Fixed Cost

<Figure 3>의 결과를 보면, 물품보관소의 개설비용이 증가하면서 총비용도 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 가파르게 증가하지는 않고 완만하게 증가하는 것은 차량의 운송비용 감소가 있기 때문이다.

또한 개설하는 물품보관소의 개수도 달라지기 때문인데, 물품보관소의 개설비용이 증가하면 목적함수에 있는 개설비용의 최소화로 인해 가능한 물품보관소를 적게 개설하려고 하는 것이 총비용의 증가를 완만하게 만들었다고 볼 수 있다.

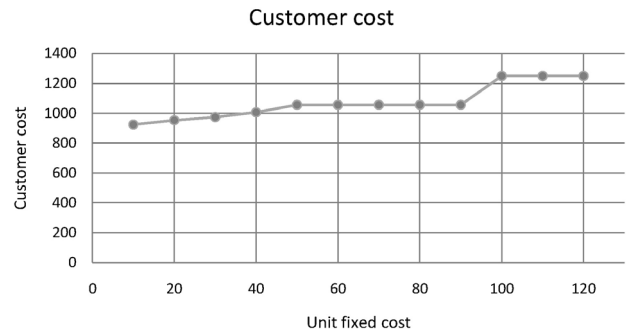


<Figure 4> Number of Parcel Lockers Opened by Fixed Cost

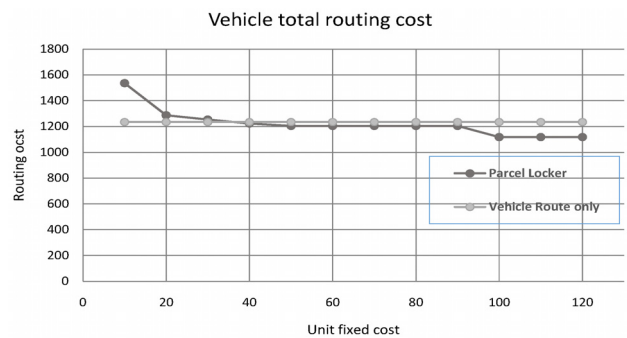
물품보관소의 개설비용에 따른 개설 개수를 Figure 4의 결과에서 보여준다. 개설비용이 증가하면서 물품보관소의 개설 개수는 감소하는데, 어느 시점에서는 감소폭이 감소하며 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이것은 차량의 운송비용과 개설비용의 균형을 맞추기 위해 일정 개수의 물품보관소가 개설되는 것이 유리하기 때문이다.

<Figure 5>의 결과는 최종 수요자들이 물품보관소에 물건을 가져가기 위해 이동하는 총이동거리를 나타낸다. 물품보관소의 개설비용이 증가하면서 물품보관소의 개수가 감소하고 이를 이용하는 최종수요자들의 총이동거리는 증

가하고 있다.



<Figure 5> Total Customer Costs by Fixed Cost



<Figure 6> Total Routing Costs by Fixed Cost

<Figure 6>은 물품보관소의 개설비용에 따른 총운송비용의 변화를 보여준다. 또한 물품보관소를 이용하지 않은 단순차량경로문제의 경우에 대한 총운송비용과의 비교를 보여준다. 단순차량경로문제는 물품보관소의 노드들이 없이 수요지 100개만을 갖는 문제이고(VRP-TW)의 문제를 풀 결과를 나타낸다. 이것은 흥미로운 결과를 보여주는데, 물품보관소의 개설비용이 작을 때에는 단순차량경로문제의 총운송비용이 물품보관소를 이용하는 경우의 총운송비용보다 크다는 것을 볼 수 있다. 이 경우에는 물품보관소의 개설 개수가 많고 방문해야 되는 물품보관소의 거리가 있기 때문에 오히려 물품보관소를 이용하지 않는 경우가 더 유리하다는 것을 볼 수 있다.

하지만, 물품보관소의 개설비용이 증가하면서 물품보관소를 이용하는 것이 총운송비용을 줄일 수 있다는 것을 보여준다. 또한 실험을 통해 알 수 있는 결과는 물품보관소의 개설 비용이 40을 기준으로 40보다 크면 물품보관소를 이용하는 것이 유리하고 40보다 작으면 물품보관소를 이용하는 것이 더 불리하다는 것을 보여준다. 따라서, 이 모형을 통해 물품보관소의 개설 비용이 유리한 경우에 대한 개설비용 하한선을 제시해 줄 수 있다.

이 실험에서 가정한 것은 배송차량의 이동거리와 최종

수요자들의 이동거리를 같은 단위로 하였다. 이것은 최종 수요자들이 물품보관소에서 물건을 가져가는 것이 배송차량이 물건을 배송하는데 사용되는 비용과 동일하다는 가정을 하고 있는 것이다. 만일 최종수요자들이 관대하다면, 배송차량의 이동에 필요한 비용보다 적은 비용을 발생시킬 수 있다. 반대로, 만일 최종수요자들이 까다롭거나 관대하지 않은 경우에는 배송차량의 운행비용보다 최종수요자들이 이동하는 수고로 인한 비용이 클 수도 있다. 이것은 최종수요자들이 어떤 성향인지와 어떻게 반응하는지에 대한 정보를 알고 있으면 모형에 반영하여 물품보관소의 위치와 개수를 조절할 수 있다.

실험결과에서 보여주는 비용의 변화들을 보면, 급격한 변화나 가파른 증감을 볼 수는 없고 어떤 경우에는 값의 변화가 없이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 물품보관소 주변에 최종수요자의 수가 무한히 많이 분포되어 있는 것이 아니기 때문에 일정수준 이상에서는 물품보관소의 개설비용이 증가하더라도 최적해는 일정 구간에서 동일하게 유지될 수 있다.

개설이 가능한 물품보관소의 위치들에 따라서도 최적해가 변화될 수도 있다. 위치선정문제에서 찾을 수 있는 위치는 가능한 지점에서 찾는 조합최적화 문제가 아닌 블록최적화 문제의 해라고 보면, 물품보관소의 위치를 찾는 것은 가능한 물품 보관소 중에서 최적의 위치를 찾고 이와 함께 총이동거리를 최소화하는 경로를 찾기 때문에 조합최적화 문제의 유형이라고 볼 수 있다. 이러한 이유로, 물품보관소를 고려한 최적위치와 차량의 최적경로를 찾는 문제는 복잡한 최적화 문제라고 할 수 있다.

제시한 모형에서는 최종수요자는 가장 가까운 물품보관소를 선택하는 것으로 가정하였다. 이 가정은 경우에 따라서는 변경할 수도 있다. 시간대에 따라서 최종수요자가 다른 직장에 위치해 있을 경우에는 직장에 가까운 물품보관소를 이용할 수도 있고, 쇼핑을 하려는 시간과 일치하면 쇼핑몰에 가까운 물품보관소를 활용할 수도 있을 것이다. 따라서, 최종수요지에 가장 가까운 물품보관소가 항상 이용되는 것은 아닐 수 있다. 이렇게 문제를 변형하면 최종수요지에 대한 네트워크의 구성을 다르게 변형시켜서 문제를 풀어야 한다.

6. 결론

전 세계적으로 도시 지역은 넓어지고 있고, 차량은 증가하고 있다. 이러한 이유로 도시에서의 차량을 이용한 배송은 더욱 어려워져 가고 있다. 또한 비대면 서비스에 대한 선호도 높아지고 있고, 최종 수요자들에 대한 요구사항도 증가하고 있기 때문에, 도시차량경로문제의 복잡성이 커

지고 있지만 이 문제에 대한 효율적인 해결방안은 여전히 해결해야 될 문제이다.

본 연구에서는 도시물류에서 차량을 이용한 배송문제에 물품보관소를 이용하는 문제를 다루었다. 물품보관소는 물건을 보관하는 장소로 최종수요자가 물건을 직접 가져갈 수 있게 하여 배송차량이 최종수요자의 주소까지 배송하지 않고 물품보관소까지 배송하면 되기 때문에 총수송비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만, 최종수요자가 물건을 가져가기 위한 이동이 최종수요자의 불만이 될 수도 있고 이를 비용으로 간주될 수 있다.

이 연구는 물품보관소의 최적의 위치를 찾는 위치선정 문제와 차량의 경로문제를 결합하여 하나의 모형을 개발하였고, 최종수요자의 이동경로를 최소화 시키면서 만족도를 높이는 최적경로를 찾는 모형을 제시하였다. 이 문제는 혼합정수계획법으로 모형화를 하였으며, 최적화 기법으로 해를 구하였다.

실험결과를 통해, 물품보관소의 개설비용이 증가하면서 물품보관소의 개설 수가 감소하고 총운영비용은 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 최종수요자의 이동경로에 따른 고객비용도 물품보관소의 개설비용이 증가하면서 함께 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한, 차량의 운송비용은 물품보관소의 개설비용이 증가하면서 개설되는 물품보관소의 수가 감소함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 물품보관소의 특정 개수 이하에서는 단순차량경로문제가 유리하고, 특정 개수 이상에서는 물품보관소를 이용하는 것이 유리하다는 것을 제시하였다. 이것은 물품보관소를 개설하는 비용의 하한선을 제시하여 비용에 따라 개설할지를 결정하는 정책선정에 활용될 수 있다.

Acknowledgement

This study has not been supported by any Research Fund.

References

- [1] Carotenuto, P., Ceccato, R., Gastaldi, M., Giordani, S., Rossi, R., and Salvatore, A., Comparing home and parcel lockers' delivery systems: A math-heuristic approach, *Transportation Research Procedia*, 2022, Vol. 62, pp. 91-98.
- [2] Enthoven, D.L.J.U., Jargalsaikhan, B., Roodbergen, K.J., Broek, M.A.J., and Schrottenboer, A. H., The two-echelon vehicle routing problem with covering options: City logistics with cargo bikes and parcel lockers, *Computers & Operations Research*, 2020, Vol. 118, p. 104919.
- [3] Fazayeli, S., Eydi, A., and Kamalabadi, I.N., A model

- for distribution centers location-routing problem on a multimodal transportation network with a meta-heuristic solving approach, *Journal of Industrial Engineering International*, 2018, Vol. 14, p327-342.
- [4] Ghaderi, H., Zhang, L., Tsai, P.W., and Woo, J., Crowdsourced last-mile delivery with parcel lockers, *International Journal of Production Economics*, 2022, Vol. 251, pp. 108549.
- [5] Lai, P.L., Jang, H., Fang, M., and Peng, K., Determinants of customer satisfaction with parcel locker services in last-mile logistics, *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 2022, Vol. 38, No. 1, pp. 25-30.
- [6] Li, J., Ensafian, H.G.H., Bell, M., and Geers, D.G., Deploying autonomous mobile lockers in a two-echelon parcel operation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, Vol. 128, p. 103155.
- [7] Lin, Y., Wang, Y., Lee, L.H., and Chew, E.P., Profit-maximizing parcel locker location problem under threshold Luce model, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, Vol. 157, p. 102541.
- [8] Luo, R., Ji, S., and Ji, Y., An active-learning Pareto evolutionary algorithm for parcel locker network design considering accessibility of customers, *Computers & Operations Research*, 2022, Vol. 141, 105677.
- [9] Orenstein, I., Raviv, T., and Sadan, E., Flexible parcel delivery to automated parcel lockers: models, solution methods and analysis, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2019, Vol. 8, pp. 683-711.
- [10] Schwerdfeger, S. and Boysen, S.N., Optimizing the changing locations of mobile parcel lockers in last-mile distribution, *European Journal of Operational Research*, 2020, Vol. 285, No. 3, pp. 1077-1094.
- [11] Yu, Y., Lian, F., and Yang, Z., Pricing of parcel locker service in urban logistics by a TSP model of last-mile delivery, *Transport Policy*, 2021, Vol. 114, p. 206-214.
- [12] Punakivi, M., Yrjölä, H., and Holmström, J., Solving the last mile issue: reception box or delivery box?, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2001, Vol. 31 No. 6, pp. 427-439.
- [13] Demir, E., Huang, Y., Scholts, S., and Woensel, T.V., A selected review on the negative externalities of the freight transportation: Modeling and pricing, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, Vol. 77, pp. 95-114.
- [14] Savelsbergh, M., and Van Woensel, T., 50th anniversary invited article city logistics: challenges and opportunities, *Transportation Science*, 2016, Vol. 50, No. 2, pp. 579-590.

ORCIDGitae Kim | <https://orcid.org/0000-0001-7522-2888>