IE Interfaces
Vol. 19, No. 1, pp. 78-85, March 2006.

휴리스틱을 이용한 중앙창고의 수와 위치 결정

이동주† · 황인극 · 박동진

공주대학교 산업시스템공학과

Determination of Number and Location of Central Warehouses by Heuristics

Dong-Ju Lee · In-keuk Hwang · Dong-jin Park

Department of Industrial Systems Engineering, Kongju National University, Chungnam, 340-802

A centralized inventory system provides a number of stores with cost reduction, information sharing. In this paper, transportation costs are included in the inventory model. To build centralized warehouses, two things should be considered: how many warehouses are required and where these are located. The objective of this paper is to develop efficient heuristics to determine the location and the number of central warehouses by minimizing total costs. Throughout some computational experiments, the results of the heuristics are compared with an optimal solution.

Keywords: supply chain management, inventory model, warehouse location

1. 서 론

공급사슬경영(Supply Chain Management)이란 제조, 물류, 유통업체 등 유통공급망에 참여하는 모든 업체들이 협력을 바탕으로 정보기술을 활용, 재고를 최적화하여 양질의 상품 및 서비스를 소비자에게 제공함으로써 소비자 가치를 극대화하기 위한 21세기 기업의 생존 및 발전 전략 중의 하나이다. Hartman and Dror(1996), Robinson(1993), Gerchak and Gupta(1991)는 일반적인 단품종, 단일기간을 다루는 (Q, r) 재고 모델에서 스토어들이 협력하여 하나의 중앙창고(central warehouse)를 공유하면 개개의 창고를 가질 때보다 안전재고의 감소 등으로 인한 비용절감으로 이익이 발생함을 증명하였다. (Q,r) 재고 모델은 재고 수준을 항상 알 수 있고 제품 수요가 불확실할 때, 재고가 재주문점인 r 이하로 떨어지면, Q만큼 주문하는 것인데, 이때 비용을 최소화하도록 Q와 r을 결정하여야 한다.

본 논문의 문제에서는 기존의 (Q, r) 재고 모델에 운송비를 추가한 경우를 고려하였는데 하나의 중앙창고를 둘 경우 규모의 경제로 인한 이익과 먼 거리 운송을 통한 운송비의 증가가 상충되므로 손해가 발생할 수도 있기에 여러 개의 중앙창고가 필요하다. 이때에 몇 개의 중앙창고를 어디에 두어야 하는지를 결정해 보았다. <Figure 1>에 5개의 스토어(store)와 2개의 중앙창고가 있는 예가 주어져 있다. 이 예에서는 중앙창고 1과

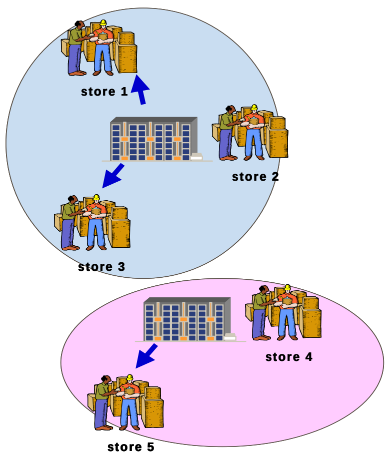

Figure 1. Example of 5 stores and 2 central warehouses.

† 연락저자 : 이동주 교수, 340-802 충남 예산군 대회리 1번지 공주대학교 산업시스템공학과, FAX : 041-330-1509, E-mail : djlee@kongu.ac.kr

2005년 8월 접수, 2회 수정 후 2006년 2월 게재 확정.

2는 각각 스토어 2와 스토어 4에 위치해 있다. 중앙창고1에서 스토어 1, 2, 3에서 필요한 재고를 관리하며 중앙창고 2는 스토어 4와 5의 재고를 관리한다. 중앙창고 1의 경우 스토어 1과 3으로 중앙창고 2의 경우 스토어5로 운송할 때 운송비가 발생한다. 기존의 (Q,r) 재고 모델에서는 이러한 운송비는 고려치 않았으므로 본 연구에서는 재고 관련 비용뿐만 아니라 운송비도 고려하였다.

본 문제는 OR 분야에서 많은 연구가 행해진 설비의 수와 위치를 결정하는 설비 위치 결정 문제(Facility Location Problem)와 유사하기에 관련 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Michel and Hentenryck(2004) 선형의 준비비와 운송비를 가지는 큰 규모의 창고 위치 결정 문제를 타부 검색 방법을 이용하여 풀었다. Sun(2005)은 위 문제를 타부 검색을 적용하였는데 목적식을 매번 다시 계산하는 대신 변화량만 업데이트함으로써 근사해를 탐색하는 데 소요되는 계산 시간을 줄였다. Cardos (2005)는 다품종 재고 모델에서 하나의 중앙창고와 여러 개의 스토어가 있는 경우에서의 차량 운행 경로에 관련된 운송비용과 재고비용(holding cost)을 최소화하는 문제를 연구하였다.

Wu *et. al* (2006)는 준비비용이 오목함수(concave function)인 경우의 설비 위치 결정 문제를 라그랑쥐 휴리스틱(Lagrangian Heuristic Algorithm)을 이용하여 풀었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용되는 기호와 문제를 정의하고 3장에서는 최적해를 구하는 방법과 시간 제약과 메모리 제약으로 인해 최적해 대신 휴리스틱을 제안했음을 설명하고 5개의 휴리스틱을 제안한다. 4장에서는 예제를 통해 문제의 이해를 돕고, 실험을 통해 제안된 휴리스틱을 검증한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 미래의 연구과제에 대해 알아보았다.

2. 기호와 문제정의

하나의 중앙창고와 그와 연결된 스토어들을 **"연결그룹"**이라고 하자. 각 스토어의 창고와 각 연결그룹들의 중앙창고는 같은 주문비용(setup cost) A, 재고 유지비용(holding cost) h, 유실 판매 벌과비용(penalty cost) p를 가지며 각 스토어들과 연결그룹들은 (Q,r) 재고 모델을 따른다. 또한, 중앙창고의 위치는 미리 정해져 있지 않고, 기존의 스토어의 위치 중 연간 평균 총비용을 최소로 하는 곳으로 정하도록 한다. 본 논문에서 사용된 기호들은 다음과 같다.

기호(Notation)

N: 스토어 수

U: 전체 스토어들의 집합, {1,2,3,⋯,N}

d_{ij}: i에 위치한 중앙창고로부터 스토어 j로의 운송거리, 단 d_{ii}=0.

t: 하물당 km당 운송비

D_i: 스토어 i의 연간 기대 수요.

D_s: 연결그룹 s가 만드는 중앙창고의 연간 기대 수요,

$$D_S = \sum_{i \in S} D_i$$

μ_i, σ_i: 선행기간(lead time) 동안의 스토어 i의 수요의 평균과 표준편차

μ_S, σ_S: 선행기간(lead time) 동안의 연결그룹 s의 수요의 평균과 표준편차

$$\mu_s = \sum_{i \in S} \mu_i \quad \sigma_s = \sum_{i \in S} \sqrt{\sigma_i^2}$$

Q_S, r_S: 연결그룹 s의 주문량과 재주문점

$R_S(r_S)$: 연결그룹 s의 주기말의 기대 부족 수요

$$R_s(r_s) = E[(X_s - r_s)^+] = \int_{r_s}^{\infty} (X_s - R_s) g_s(x_s) dx_s \quad (1)$$

단, $(X_S\text{-}r_S)+=\max[0, X_S\text{-}r_S]$.

(Q,r) 재고 모델에서 연결그룹 s에 대한 비용함수는 식 (2)와 같다. 첫 번째 항은 연간 총주문비(setup cost)이고 두 번째 항은 연간 총재고유지비(holding cost), 세 번째 항은 선행기간 동안의 수요가 재고량을 초과할 경우 발생하는 연간 총유실판매 벌과비(penalty cost)이다.

$$C(Q_S, r_S) = A\frac{D_S}{Q_S} + h\left(\frac{Q_S}{2} + r_S - \mu_S\right) + p\frac{D_S R_S(r_S)}{Q_S} \quad (2)$$

중앙창고는 기존의 스토어가 있는 곳에만 위치할 수 있다고 가정할 때, 연결그룹 s에 대한 중앙창고의 위치는 운송비용을 최소화하도록 다음 식을 만족하는 i에 둔다.

$$\underset{i \in s}{argmin} \sum_{j \in s} t_{ij} D_j \quad (3)$$

운송비는 중앙창고의 위치와는 밀접한 관계가 있지만 식 (2)의 비용들인 연간 총주문비, 연간 총재고유지비, 연간 총유실판매 벌과비와는 무관하다. 그러므로, 식 (2)를 최소화하는 Q_s*와 r_s*를 먼저 구한 후 식 (3)을 최소화하는 곳에 중앙창고를 두면 된다.

$C(Q_S, r_S)$를 최소로 하는 Q_S*, r_S*를 도출하는 방법은 재고 관련 책들에 설명이 되어 있는데(Johnson and Montgomery, 1974) $C(Q_S, r_S)$를 Q_S 와 r_S에 대해 각각 편미분하여 0으로 놓고 풀면 식(4)와 식 (5)를 도출할 수 있다.

$$Q_S{*} = \sqrt{\frac{2D_S(A + pR_S(r_S{*}))}{h}} \quad (4)$$

$$1 - G_i(r_i{*}) = \frac{hQ_S{*}}{pD_S} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 Q_S 와 r_S 가 수렴할 때까지 반복적으로 풀면 Q_S*,

r_S*를 구할 수 있다. <Figure 2>에 스토어 1, 2, 3이 연결그룹 s를 구성할 때 Q_S*, r_S*를 결정하는 경우를 보여주고 있다. <Figure 1>에서는 2개의 중앙창고가 존재하므로 2개의 각 중앙창고에 적절한 Q_S*, r_S*를 구하여야 한다.

연결그룹 s의 연간 평균 총비용은 다음과 같다.

$$C(Q_S, r_S) = A\frac{D_S}{Q_S} + h\left(\frac{Q_S}{2} + r_S - \mu_S\right) + p\frac{D_S R_S(r_S)}{Q_S} + \min_i \sum_{j \in s} td_{ij} D_j \quad (6)$$

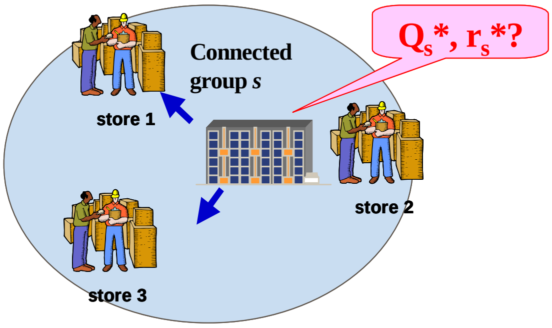

Figure 2. Determination of Qs*, rs* in connected group s(store 1, 2, 3).

3. 최적해와 휴리스틱

3.1 대안의 수와 최적해

비용을 최소화하는 중앙창고의 위치와 개수를 정하기 위해서는 스토어들이 형성할 수 있는 모든 연결그룹들의 조합을 고려하여야 한다. 이것은 일반적인 군집화 문제에서 해의 대안 수를 계산하는 것과 동일한데 Bhuyan *et al*. (1991)에 따르면 해의 대안 수는 다음과 같다.

$$\frac{1}{M!}\sum_{j=1}^{M}(-1)^{M-j} \times {}_M C_j \times j^N \quad (7)$$

여기서 M은 연결그룹(혹은 중앙창고)의 수이며, N은 스토어 수이다. 만약 10개의 스토어들이 있고 5개의 중앙창고를 가지는 연결그룹들을 가지는 해의 대안 수를 식 (7)을 이용하여 계산하면 20250개가 존재한다. 필요한 중앙창고의 수도 결정하여야 하기에 이 이외에도 1개, 2개, ... , 10개의 중앙창고를 가지는 각각의 경우의 해의 대안 수를 고려하여야 한다.

100개의 스토어들이 있고 5개의 중앙창고를 가지는 연결그룹들인 경우의 해의 대안 수는 약 1068 개이다. 스토어의 수가 많아질수록 가능한 해의 대안 수는 기하급수적으로 증가하기에 최적해를 구하는 방법보다는 짧은 시간 안에 근사해를 구하는 휴리스틱 방법이 더욱 의미가 있다.

본 논문에서는 최대 10개의 스토어들에 대한 문제를 풀기 위해 전체 나열법(total enumeration)을 통하여 최적해를 구하였다. 즉, 1개, 2개, 3개, ..., 10개의 중앙창고가 필요한 각각의 모든 경우의 비용 중 가장 비용이 최소인 해를 찾았다. 물론, 모든 대안의 비용은 Qs, rs와 중앙창고의 위치가 결정되고 난 후에 계산 가능하다.

3.2 휴리스틱

본 장에서는 5개의 휴리스틱을 제안한다.

3.2.1 휴리스틱 1(H1)

개개의 창고를 가질 때와 비교하여 스토어들의 연결그룹이 중앙창고를 갖게 됨으로써 생기는 비용절감이 크면 클수록 전체적으로 큰 비용절감을 가질 가능성이 크게 된다. 그러므로, 첫 번째 방법은 가장 큰 비용절감을 발생시키는 연결그룹에 중앙창고를 먼저 할당하고, 그 다음으로는 선택되지 않은 스토어들로 구성된 연결그룹 중 가장 큰 비용절감을 발생시키는 연결그룹의 중앙창고를 할당한다. 이를 모든 스토어들이 다 할당될 때까지 반복한다. 이 방법의 단점은 연결그룹에 참석하는 스토어가 많을수록 더 많은 비용절감을 가질 가능성이 커지므로 항상 많은 스토어를 가지는 연결그룹을 먼저 할당하게 된다.

자세한 휴리스틱의 단계는 다음과 같다.

<u>Heuristic 1.</u>

Step 1. 전체 스토어들의 집합을 U= {1,2,...,n}이라 하고, 모든 연결그룹들(2^U)의 비용을 구한다. T=∅, Z=∅으로 초기화 한다.

Step 2. 구한 연결그룹들 중 최대의 비용절감($v_S = \sum_{i \in S} C_i - C_S$)을 이루는 연결그룹 s를 찾는다. 여기서 C_i는 하나의 스토어 i가 하나의 창고를 가지는 경우 식 (6)을 이용하여 구한 총비용이며 C_s는 연결그룹 s⊂U가 하나의 중앙창고를 가지는 경우 식 (6)을 이용하여 구한 최소비용이다.

Step 3. 집합 Z에 Step 2에서 구한 연결그룹 s를 추가하고, T에 s에 속한 스토어들을 추가한다. 만약 U\T=∅이면 Step 4로 가고, 아니면 U\T인 스토어들로 이루어진 모든 연결그룹들을 구하고 Step 2로 돌아간다.

Step 4. 집합 Z에 속하는 연결그룹들의 조합이 구한 해이며 종료한다.

3.2.2 휴리스틱 2(H2, H2-1)

휴리스틱2에서는 스토어당 비용절감액, 즉 특정 연결그룹을 위한 중앙창고의 비용절감액을 연결그룹에 참여하는 스토어 수로 나눈 값을 최고로 하는 연결그룹을 먼저 할당하고 이를 모든 스토어들이 할당될 때까지 계속한다. 이 방법의 단점은

어떤 스토어는 많은 주문을 하여 많은 비용절감을 발생시키지만 어떤 스토어는 적은 주문을 하여 적은 비용절감을 발생시키는데, 이는 스토어들의 차이를 고려치 않고 모든 스토어를 동일하게 취급한다는 것이다.

Heuristic 2(H2).

Heuristic 2는 Heuristic 1의 Step 2에서 $\sum_{i \in S} C_i - C_S/|s|$가 가장 큰 연결그룹을 찾는 것만 다르고 나머지 단계는 동일하다.

실험 결과에서 살펴보겠지만, H2는 스토어의 수가 작은 연결그룹을 먼저 선택하여 중앙창고를 할당하는 경향이 있다. 또한, 이때 선택된 연결그룹들은 다른 스토어나 연결그룹들과 합쳤을 때 더 많은 비용절감을 발생시킬 소지가 있다.

H2에서 이미 각각의 중앙창고가 할당된 연결그룹들 중 임의의 두 연결그룹들과 합쳐서 하나의 연결그룹을 형성하였을 때 더 큰 비용절감이 있는 연결그룹이 있다면 합치고 아니면 원래대로 각각의 연결그룹으로 두는데, 이 휴리스틱을 H2-1로 부르기로 한다. 이때 다수의 연결그룹이 더 큰 비용절감을 발생시킨다면 그 중 가장 큰 비용절감을 발생시키는 연결그룹을 현재 선택된 연결그룹과 합친다. H2-1의 자세한 단계는 다음과 같다.

Heuristic 2-1(H2-1).

Step 1. 전체 스토어들의 집합을 U= {1,2,...,n}이라 하고, 모든 연결그룹들(2^U)의 비용을 구한다. T=∅, Z=∅으로 초기화한다.

Step 2. 구한 연결그룹들 중 $\sum_{i \in S} C_i - C_S/|s|$이 가장 큰 연결그룹 s를 찾는다. 여기서 C_s는 연결그룹 s⊂U가 하나의 중앙창고를 가지는 경우의 최소비용이다.

Step 3. 집합 Z에 속하는 연결그룹(이미 할당된 연결그룹)중 현재 찾은 연결그룹 s와 합쳤을 때 더 큰 비용절감이 발생하는 연결그룹 s'($(C_S + C_{S'}) - C_{S \cup S'} > 0$)이 있는지 확인하고 여러 개가 있다면 가장 큰 비용절감을 발생시키는 연결그룹(s∪s'=W)를 구한다.

Step 4. W가 존재하면 s를 집합 Z에서 삭제하고 W를 Z에 추가한다. 존재하지 않으면 집합 Z에 Step 2에서 구한 연결그룹 s를 추가한다. T에 s에 속하는 스토어들을 추가한다. 만약 U∖T=∅이면 Step 5로 가고, 아니면 U∖T인 원소들로 이루어진 모든 연결그룹들을 구하고 Step 2로 돌아간다.

Step 5. 집합 Z에 속하는 연결그룹들의 조합이 구한 해이며, 종료한다.

H1에 대해서는 연결그룹들을 합치는 경우를 고려할 필요가 없다. 왜냐하면 H1에서는 비용절감이 최대인 것을 고려하므로 만약 이미 할당된 연결그룹과 지금 선택된 연결그룹을 합치는 경우의 비용절감이 더 컸다면, 이전에 이미 합친 경우가 할당되었을 것이기 때문이다. 즉, H1은 연결그룹들을 합치는 경우가 합치지 않는 경우보다 항상 못하다.

3.2.3 휴리스틱 3(H3, H3-3)

휴리스틱 3은 연결그룹의 비용절감액을 연결그룹의 스토어들이 개개의 창고를 가질 때의 비용의 합으로 나눈 값이 최고인 연결그룹을 먼저 할당하고 이를 모든 스토어가 다 할당될 때까지 계속하는 것이다.

Heuristic 3(H3).

Heuristic 3은 Heuristic 1의 Step 2에서 $(\sum_{i \in S} C_i - C_S)/\sum_{i \in S} C_i$가 가장 큰 연결그룹을 찾는 것만 다르고 나머지 단계는 동일하다.

H2와 마찬가지로 연결그룹들끼리 합치는 것을 고려한 H3-1도 유용하다.

Heuristic 3-1(H3-1).

H2-1의 Step 2중 $\sum_{i \in s} C_i - C_s/|s|$ 대신 $(\sum_{i \in s} C_i - C_s)/\sum_{i \in s} C_i$가 가장 큰 연결그룹을 찾는다는 것만 다르고 나머지는 동일하다.

종합해 보면 Heuristic 1은 연결그룹을 선택하는 기준이 비용절감액이 가장 큰 것부터이며, Heuristic 2는 스토어당 비용절감액이 가장 큰 것부터이며, Heuristic 3은 연결그룹의 비용절감액을 연결그룹의 스토어들이 개개의 창고를 가질 때의 비용의 합으로 나눈 값이 최고인 것이다. H2-1과 H3-1은 기존의 H2와 H3에 연결그룹들끼리 합치는 것을 고려하는 휴리스틱이다.

4. 예제 및 실험 결과

본 장에서는 예제를 통해 중앙창고의 수와 위치 결정을 보여주고 총 20개의 데이터를 이용한 실험을 통해 중앙창고의 수와 위치결정과 그에 따른 비용절감효과를 알아보았다.

4.1 예제

총 6개의 스토어가 있으며 모든 스토어는 동일한 하나의 품목만 취급하고, 1년중 250일간 일을 하며, 선행기간은 모든 스토어들에 대해 50일이다.

Table 1. μ,σ, and Dj of Each Store

Store	Dj	(μ,σ)
1	1000	(200,30)
2	2000	(400,20)
3	3000	(600,15)
4	4000	(800,30)
5	5000	(1000,50)
6	4000	(800,40)

Table 2. Distance (unit: km)

Store	1	2	3	4	5	6
1	0	56	38	48	57	35
2	56	0	19	35	43	47
3	38	19	0	28	38	36
4	48	35	28	0	10	62
5	57	43	38	10	0	72
6	35	47	36	62	72	0

각 스토어의 창고와 중앙창고는 같은 주문비용(setup cost) A, 재고 유지비용(holding cost) h, 유실판매 벌과비용(penalty cost) p를 가지는데, A=$120, h=$4, p=$6이다. 각 스토어의 연간 수요와 선행기간 동안의 수요의 평균과 표준편차는 <Table 1>과 같고, 각 스토어 간 거리(t_{ij})는 <Table 2>와 같으며 이때 하물당 km당 운송비용 t=$0.01이다.

Table 3. Results of the illustrated example

	Solution	Total Cost($)	Cost Saving($)
Opt.	{2,3,4,5}, {1,6}	9,161	2,327
H1	{1,2,3,4,5}, {6}	9,166	2,322
H2	{4,5},{1,3},{2,6}	10,083	1,405
H3	{1,2,3,4,5}, {6}	9,166	2,322

연간 총비용 중 운송비를 제외한 비용은 식 (4)와 식 (5)를 Q와 r이 수렴할 때까지 반복적으로 풀면 구할 수 있고, 운송비를 최소화하는 중앙창고의 위치와 비용은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. <Table 3>에 결과가 주어져 있으며, 진하게 표시된 숫자는 중앙창고의 위치이다.

<Table 3>의 마지막 열에 주어진 비용절감액은 각 스토어들이 개개의 창고를 가졌을 때의 비용과 주어진 해를 가졌을 때의 비용의 차이이다. <Table 3>에서 최적해인 경우의 비용절감액을 계산하기 위해 몇 연결그룹들의 계산결과가 <Table 4>에 주어져 있다. 각 스토어가 개개의 창고를 가진다면 운송비는 0이며, 주문비용, 재고 유지비용, 유실판매 벌과비만 발생하는데 이 때의 각 스토어들의 비용은 1,160 + 1,520 + 1,804 + 2,181 + 2,569 + 2,254 = 11,488이며, 최적해인 경우의 {2, 3, 4, 5}, {1, 6}의 연결그룹들의 비용은 6,242+2,919=9161이다. 그러므로, 비용절감액은 11,488-9161=2,327이다.

Table 4. Q, r, Transportation cost, and total cost of some connected groups for the calculation of cost saving of optimal solution.

Connected group	Q	r	Trans. cost($)	Total cost($)
{1}	261.9	228.2	0	1160
{2}	356.4	423.6	0	1520
{3}	431.3	619.7	0	1804
{4}	503.8	841.4	0	2181
{5}	570.7	1071.5	0	2569
{6}	508.7	854.8	0	2254
{2,3,4,5}	942.7	2907.9	2040	6242
{1,6}	570.7	1071.5	350	2919

Table 5. Optimal solution and heuristic solutions of 8-stores instances

Data	Optimal	H1	H2	H2-1	H3	H3-1
1	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{2,3,4},{5,6},{7,8},{1}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{1,3,5,7},{2,4,6,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}
2	{1,2,5},{3,4,6,7},{8}	{1,3,4,5,6,7},{2},{8}	{4,6},{1,2},{3,7},{5},{8}	{1,2,5},{3,4,6,7},{8}	{4,6},{1,5},{3,7},{2},{8}	{1,2,5},{3,4,6,7},{8}
3	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{2,6,8},{1,3,4},{5,7}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{2,6,8},{1,3,4,5,7}	{1,2,3,4,5,6,7,8}
4	{1,6},{4,7},{3,5,8},{2}	{1,3,5,8},{4,7},{2},{6}	{1,6},{5,8},{4,7},{2},{3}	{1,6},{4,7},{3,5,8},{2}	{1,3,5},{4,7},{2},{6},{8}	{1,3,5,8},{4,7},{2},{6}
5	{1,2,4},{5,7,8},{3,6}	{1,2,3,4,5,6},{7,8}	{1,4},{2,5},{3,6},{7,8}	{1,2,4,5},{3,6},{7,8}	{1,3},{2,5},{7,8},{4},{6}	{1,3,6},{2,4,5},{7,8}
6	{2,5},{3,4},{1,6,7,8}	{1,3,5,6,7,8},{2},{4}	{6,8},{3,4},{2,5},{1},{7}	{1,6,7,8},{3,4},{2,5},{7}	{6,7,8},{3,4},{2,5},{1}	{1,6,7,8},{3,4},{2,5}
7	{1,6},{4,7},{3,5,8},{2}	{3,4,7},{1,6},{5,8},{2}	{3,4},{1,6},{5,8},{2,7}	{3,4},{1,6},{5,8},{2,7}	{3,4,7},{1,6},{5,8},{2}	{3,4,7},{1,6},{5,8},{2}
8	{1,8},{2,6},{3,4,7},{5}	{2,6,7,8},{3,4},{1},{5}	{2,6},{4,7},{1,8},{3},{5}	{1,8},{2,6},{3,4,7},{5}	{2,6,7},{3,4},{1,8},{5}	{2,6,7},{3,4},{1,8},{5}
9	{1,2,3,6,7},{4,5,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{2,6},{4,8},{1,3},{5},{7}	{1,2,3,6,7},{4,5,8}	{1,3,7},{2,6},{4,5,8}	{1,2,3,6,7},{4,5,8}
10	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{2,3,8},{4,6},{7},{1,5},{7}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}	{1,2,3,4,5,6,7,8}

<Table 4>에서 볼 수 있듯이, 스토어들이 개개의 창고를 가지는 경우보다 연결그룹을 형성할 경우 주문량과 재주문점이 줄어드는 것을 알 수 있는데 이로 인한 안전재고의 감소로 인해 비용절감이 발생한다. 또한, 두 개 이상의 스토어로 구성된 연결그룹을 형성하는 것이 총 주문횟수의 감소로 이어져 비용절감이 발생한다. 이러한 비용절감이 운송비 발생 비용보다 클 경우 두 개 이상의 스토어로 구성된 연결그룹을 형성하는 것이 유리하다고 할 수 있겠다.

4.2 실험과 실험 결과

총 8개의 스토어가 있는 10개의 예제와 10개의 스토어가 있는 10개의 예제를 생성하였다. 모든 예제에서 스토어는 동일한 하나의 품목만 취급하고, 선행기간(lead time)은 모든 스토어들에 대해 3주이며 제품단위당 운송비는 km당 $0.01이다. 각 스토어의 창고와 중앙창고는 같은 주문당 주문비용(setup cost), 제품단위당 재고 유지비용(holding cost), 유실판매 벌과비용(penalty cost)을 가지며 예제에 따라 각각 $50-100, $1-5, $5-15이다.

또한, 선행기간 동안의 수요의 평균은 100에서 1000 사이이며, 표준편차는 20에서 100 사이이다. 마지막으로, 각 스토어간의 거리는 x축 y축 각각에 대해 0에서 100km 사이이다. 예제에 따라 이러한 값들은 random number를 발생시켜 구하였다. 최적해와 휴리스틱은 'C 언어'로 구현되어 800MHz p/c로 실행되었다.

스토어 수가 8개인 경우의 최적해, H1, H2, H2-1, H3, H3-1가 찾은 해를 <Table 5>에 나타내었다. 스토어 수가 10개인 경우의 해는 복잡하므로 생략한다. <Table 5>에서 H2와 H2-1의 해를 비교해보면 H2의 해에 속한 각 연결그룹들 중 몇 개를 합친 것이 H2-1의 해가 된다. 예를 들어 데이터 1을 보면 H2에서 연결그룹{1,2}와 {5}, {3,7}과 {4,6}을 합친 {1,2,5}, {3,4,6,7}이 H2-1에 있고 나머지 연결그룹은 동일하다. H3와 H3-1의 관계도 동일하다.

최적해와 각 휴리스틱이 찾은 해의 비용을 <Table 6>과 <Table 7>에 나타내었다. 스토어 수가 8개인 경우에는 최적해를 찾는 데 약 3초의 CPU time이 걸렸으며, 스토어 수가 10개인 경우에는 146초 이내의 CPU time이 걸렸다. 8개보다 10개의 스

Table 6. Total cost and CPU time for optimal solution and total cost for heuristic solution of 8-Stores instances

Data	Opt ($)	Time (sec)	H1 ($)	H2 ($)	H2-1 ($)	H3 ($)	H3-1 ($)
1	95,343	3	95,343	112,240	95,343	101,659	95,343
2	30,531	3	31,024	32,409	30,531	32,519	30,531
3	112,428	3	112,428	125,946	112,428	120,774	112,428
4	13,374	3	13,475	13,479	13,374	13,931	13,475
5	22,187	2	22,489	22,277	22,247	22,960	22,277
6	10,367	3	10,561	10,602	10,367	10,403	10,367
7	12,747	3	12,747	12,763	12,763	12,747	12,747
8	11,886	3	11,915	11,968	11,886	11,906	11,906
9	17,315	3	17,570	18,779	17,315	18,155	17,315
10	44,220	2	44,220	54,570	44,220	44,220	44,220

Table 7. Total cost and CPU time for optimal solution and total cost for heuristic solution of 10-Stores instances

Data	Opt($)	time (sec)	H1 ($)	H2 ($)	H2-1 ($)	H3 ($)	H3-1 ($)
1	25,827	146	26,214	27,361	26,399	27,504	26,214
2	32,850	143	33,426	35,021	32,927	34,353	33,702
3	36,255	143	36,513	39,426	36,255	39,078	36,513
4	14,663	143	14,926	14,918	14,741	14,669	14,663
5	26,537	144	27,060	28,029	26,975	27,652	26,749
6	15,699	143	15,699	16,149	15,824	15,699	15,699
7	13,786	113	13,843	14,533	14,533	13,843	13,843
8	10,930	100	11,239	11,387	11,230	10,930	10,930
9	23,330	100	23,537	23,330	23,330	23,673	23,673
10	24014	101	24,842	24,406	24,332	24,274	24,274

토어가 있는 경우가 훨씬 많은 계산시간을 요한다는 것을 알 수 있다. 모든 휴리스틱은 1초 이내에 해를 찾았다. H1이 많은 경우 최적해를 찾아내었고, 대체로 H2와 H3보다 좋은 해를 구했다. H2-1과 H3-1이 가장 좋은 해를 구했으며 특히 H2와 H3보다 훨씬 개선된 해를 구하였다. 평균 오차율을 Heuristic의 비용의 총합과 최적해 비용의 총합의 차이를 최적해 비용의 총합으로 나누었을 때의 비율이라고 할 때 각 휴리스틱에 대한 결과를 <Table 8>에 나타내었다. H1이 H2, H3보다 낮은 평균 오차율을 보여 주었으나, H2-1과 H3-1보다는 높은 평균오차율을 나타내고 있다. 특히, H2-1과 H3-1은 1.5% 이내의 평균오차율을 나타내고 있다.

Table 8. Average error rate (%)

	H1	H2	H2-1	H3	H3-1
8-Stores instances	0.73	7.20	0.04	3.36	0.13
10-Stores instances	1.53	4.28	1.49	2.61	0.86

Table 9. Cost saving of H2-1 and ratio of cost saving to total cost of H2-1 for 8-Stores instances

Data	Cost saving of H2-1($)	Ratio of cost saving to total cost of H2-1(%)
1	28,011	29.4
2	4,802	15.7
3	42,035	37.4
4	954	7.1
5	1,987	8.9
6	950	9.2
7	827	6.5
8	929	7.8
9	3,829	22.1
10	21,102	47.7
Avg.	10,543	19.2

Table 10. Cost saving of H3-1 and ratio of cost saving to total cost of H3-1 for 10-stores instances

Data	Cost saving of H3-1($)	Ratio of cost saving to total cost of H3-1(%)
1	3,723	14.2
2	5,871	17.4
3	11,764	32.2
4	1,521	10.4
5	4,890	18.3
6	1,487	9.5
7	1,566	11.3
8	1,213	11.1
9	1,144	4.8
10	1,718	7.1
Avg.	3,490	13.6

각 스토어가 중앙창고를 두지 않고 개개의 창고를 두었을 때의 비용과 휴리스틱으로 구한 비용의 차이를 비용절감액이라 할 때 <Table 8>에서 가장 좋은 결과를 보여주는 H2-1과 H3-1에 의한 비용절감액과 그 때의 비용절감액과 비용의 비율은 <Table 9>, <Table 10>과 같다.

스토어 수가 8개인 경우의 비용절감액 대 최적해의 비용비율이 평균 19.2%이며 스토어 수가 10개인 경우에는 13.6%로 나타났다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 일반적인 단품종, 단일기간의 재고모델에 운송비가 추가된 경우를 고려하였다. 총 20개의 데이터를 이용하여 전체 나열법을 통하여 구한 최적해와 여러 개의 휴리스틱에서 구한 해와 비교하여 보았다. 제시된 휴리스틱 중 H2와 H3은 스토어 수가 작은 연결그룹들에게 중앙창고를 할당하는 경우가 많은 것에 착안하여 스토어 수가 작은 연결그룹들을 합쳤을 때 더 큰 비용절감이 있다면 합치게 하는 H2-1과 H3-1을 개발하였다. H2-1과 H3-1은 최적해와의 평균오차율이 1% 이내의 좋은 근사해를 제시해 주었다. 중앙창고를 둠으로써 비용절감액 대비 휴리스틱에 의한 비용의 비율이 스토어의 수가 8개인 경우 평균 19.2%, 스토어의 수가 10개인 경우 13.6%라는 큰 비용절감효과를 보았다.

보다 많은 스토어를 고려한 경우에 적절한 휴리스틱이나 Simulated Annealing, Tabu Search, Genetic Algorithm 등과 같은 메타휴리스틱을 개발하여 적용해 보는 것이 필요할 것이라 생각된다.

참고문헌

Aumann, R.J. and Shapley, L.S.(1974), *Values of Non-Atomic Games*, Princeton University Press, Princeton, NJ., .

Bhuyan, J.N., Raghavan, V. V., Elayavalli, V.K. (1991), Genetic Algorithm for Clustering with an Ordered Representation, Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, CA, 408-415.

Cardos, M., Garcia-Sabater J.P. (2005), Designing a consumer products retail chain inventory replenishment policy with the consideration of transportation costs. International Journal of Production Economics, 1-11.

Gerchak, Y. and Gupta, D.(1991), On Apportioning Costs to Customers in Centralized Continuous Review Inventory Systems, *Journal of Operations Management*, 10, 546-551.

Hartman, B.C. and Dror, M.(1996), Cost Allocation in Continuous-Review Inventory Models, *Naval Research Logistics*, 43, 549-561.

Hartman, B.C., Dror, M., and Shaked M.(2000), Cores of Inventory Centralization Games, *Games and Economic Behavior*, 31, 26-49.

Johnson, A. and Montgomery, D.C.(1974), *Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control*, Wiley, New York.

Michel, L. , Hentenryck, P.V. (2004), A Simple Tabu Search for Warehouse

Location, *European Journal of Operational Research*, 157, 576-591.
Robinson, L.W.(1993), A Comment on Gerchak and Gupta's On Apportioning Costs to Customers in Centralized Continuous Review Inventory Systems, *Journal of Operations Management*, 11, 99-102,
Sun, M. (2005), Solving the uncapacitated facility location problem using tabu search, *Computers & Operations Research*, 1-27.
Wu, L.Y., Zhang, X.S., Zhang, J.L. (2006), Capacitated facility location problem with general setup cost, *Computers & Operations Research*, 33, 1226-1241.

이 동 주
동아대학교 산업공학 학사
Texas A&M University 산업공학 석사
Texas A&M University 산업공학 박사
현재: 공주대학교 산업시스템공학과 조교수
관심분야: 최적화, 물류관리

황 인 극
아주대학교 산업공학 학사
The University of Iowa 산업공학 석사
Texas A&M University 산업공학 박사
현재: 공주대학교 산업시스템공학과 부교수
관심분야: 품질공학(다꾸지 방법), AS/RS, CIM, FMS, 실험계획법

박 동 진
아주대학교 산업공학 학사
한국외국어대학교 경영정보학 석사
아주대학교 경영정보학 박사
현재:공주대학교 산업시스템공학과 부교수
관심분야:SCM 성과측정, 비즈니스 프로세스 모델링, ERP, MES