

중앙창고 입지선정을 위한 회귀분석기반 해법

유재욱* · 이동주**†

*삼성전자 기술총괄 CTO전략실 개발혁신팀

**공주대학교 산업시스템공학과

A Regression-Based Approach for Central Warehouse Location Problem

Jaewook Yoo* · Dongju Lee**†

*R&D Innovation Team, Technology Strategy Office, Corporate Technology Operations, Samsung Electronics

**Department of Industrial Systems Engineering, Kongju National University

In continuous review inventory model, (Q, r) system, order quantity(Q) and reorder point(r) should be determined to calculate inventory-related cost that consists of setup, holding, and penalty costs. The procedure to obtain the exact value of Q and r is complex. In this paper, a regression analysis is proposed to get the approximate inventory-related cost without the determination of Q and r in the case that the standard deviation(σ) of the lead time demand is small or that the mean(μ) of the lead time demand is proportional to σ . To save inventory-related cost, central warehouses with (Q, r) system can be built. Central warehouse can provide some stores with products with the consideration of the tradeoff between inventory-related cost and transportation cost. The number and the location of central warehouses to cover all the stores are determined by a regression-based approach. The performance of the proposed approach is tested by using some computational experiments.

Keywords : Supply Chain Management, Regression Analysis, Continuous Review Inventory Model, Facility Location

1. 서론

기업들이 글로벌화에 박차를 가함에 따라 기업 내의 경영 및 물류효율화를 통한 비용절감뿐 아니라 여러 기업을 아우르는 통합된 공급사슬구축과 운영을 통한 비용절감이 중요하게 되었다. 본 논문에서도 하나의 스토어 내의 효율적인 재고관리를 통한 비용절감뿐 아니라 여러 개 스토어들의 재고를 통합하여 관리하는 중앙창고를 세워 비용절감을 꾀하는 방안에 대해 알아보았다.

특히 본 논문에서는 재고관련비용뿐 아니라 중앙창고

에서 스토어로의 운송비용까지 고려하여 적절한 수의 중앙창고들을 적절한 장소에 배치하는 중앙창고입지선정문제에 관심을 두었다. 중앙창고입지선정문제란 여러 곳의 스토어와 그 스토어들에 제품을 공급하는 중앙창고로 이루어지는 공급사슬에서 각 중앙창고는 연속적재고조사정책(continuous review policy)을 따를 때 비용을 최소화하는 최적의 중앙창고 개수와 어느 중앙창고가 어느 스토어들에게 제품을 공급할 지를 정하는 문제이다.

연속적 재고조사정책인 (Q, r) 재고 모델은 재고수준을 항상 알 수 있고 제품 수요가 불확실한 경우, 재고가 재

주문점인 r 이 하가 되면, Q 만큼 주문하는 것이다. 재고 관련비용을 구하기 위해서는 Q 와 r 을 결정하여야 하는데, Q 와 r 을 구하기 위해서는 Q 와 r 이 수렴하도록 반복적인 계산이 요구된다[11].

본 논문의 목적은 중앙창고입지선정문제를 선형이진정수계획법이나 비선형이진정수계획법모형으로 문제를 표현하며, 이미 해법이 잘 알려진 문제로 변환하고, 이를 통해 최적해에 가까운 근사해를 안정적으로 구하는 것이다. 해법이 잘 알려진 문제로 변환이 가능하다면 다양한 해법들을 적용하여 우수한 해를 빠른 시간 내에 구할 수 있을 것이다.

이동주 외[1], 이동주, 김진호[2]는 본 문제를 푸는 탐욕적 알고리즘(Greedy Algorithm)에 기반한 휴리스틱과 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)기법을 제안하고 이를 전체나열법(total enumeration)으로 구한 최적해와 비교하였다. 이들은 조합최적화(Combinatorial Optimization)에 기반한 해법이다.

조합최적화에 기반한 해법들은 문제에 따라 최적해와 차이가 나는 근사해를 제공하는 단점이 존재하지만, 본 논문의 해법은 재고관련비용 추정이 잘 된다면 최적해와 가까운 근사해를 안정적으로 제공할 수 있을 것이다.

이를 알아보기 위해 실험을 통해 본 논문의 해법과 조합최적화에 기반한 해법, 전체나열법을 통해 구한 최적해와 비교하였다.

중앙창고입지선정문제는 (Q, r) 재고 모형의 재고관련비용을 추정할 수 있다면 기존의 용량제약이 없는 입지선정문제(UFLP, Uncapacitated Facility Location Problem)로 변환될 수 있다. UFLP는 이미 많은 연구가 행해져 우수한 해법들이 알려져 있다[3, 7, 9, 10]. 본 논문에서는 회귀분석을 이용하여 재고관련비용을 추정하였다.

기존의 (Q, r) 재고모형의 재고관련비용을 추정하는 기법들은 Q, r 이 의사결정변수이며 이를 추정하는 것이 목적이었다.

Byrket[4], Das[5], Lau and Lau [13]는 Q 와 r 을 반복적으로 풀지 않고 추정하는 방법을 제안하였는데 Q 와 r 의 추정식이 복잡하고 추정된 Q 와 r 을 다시 비용함수에 넣어 비용을 계산하는 것은 더욱 복잡하다.

한편, 회귀분석을 통하여 Q 와 r 을 추정하는 연구들도 있었다. Dubelaar et al.[6]은 설문조사를 통해 재고, 서비스수준, 주문의 불확실성 등의 관계를 규명하고 회귀분석을 통해 경험식을 유도하였다. Ghalebsaz-Jeddi et al.[8]은 (Q, r) 재고모형에 예산제약(budget constraint)이라는 하나의 제약식이 있는 문제에 라그랑주함수를 이용한 휴리스틱을 제안하였다. 이 휴리스틱은 주기말의 기대부족수요의 예측을 위한 손실함수(Loss Function)와 누적정규분포함수를 많은 구간으로 쪼개어 회귀분석을 통해

추정하고 이를 이용하여 Q, r 을 추정하였다.

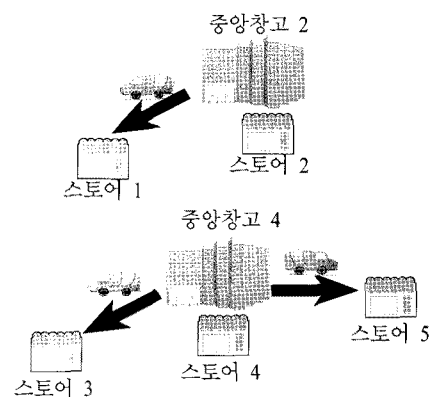
그러나 중앙창고입지선정문제에서는 Q 와 r 은 의사결정변수가 아니라 재고관련비용을 계산하기 위해 필요할 뿐이기에 Q 와 r 의 계산 없이 재고관련 비용을 직접 추정하는 방법이 필요하다.

한편, 하나의 제약식이 있고 의사결정변수에 이진정수가 없는 (Q, r) 재고모형 문제의 경우에는 라그랑주함수를 이용하여 해를 구하는 연구들[8, 14]이 있었다. 중앙창고입지선정문제는 여러 개의 제약식이 존재하여 기존의 이러한 접근법들을 적용하기에 어려움이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 이어지는 제 2장에서는 문제의 정의와 수학모형을 소개한다. 제 3장에서는 재고관련비용의 추정을 위해 적합한 선형과 비선형의 회귀모형을 찾고 그 이유에 대해 설명한다. 제 4장에서는 제시한 회귀분석을 이용하여 중앙창고입지선정문제를 UFLP 문제로 변환한다. 제 5장에서는 여러 가지 실험을 통해 회귀분석의 적합도가 높은 경우를 찾고 회귀분석을 이용한 접근법으로 해를 구하고, 이를 조합최적해에 기반한 해법, 최적해와 비교하였다. 마지막으로 제 6장에서는 결론과 미래의 연구과제에 대해 살펴본다.

2. 문제 정의와 수학 모형

중앙창고입지선정문제의 이해를 돕기 위해 2개의 중앙창고가 있고 5개의 스토어가 있는 경우에서 하나의 가능한 해를 <그림 1>에 나타내었다. 스토어 1, 2에 제품을 공급하는 중앙창고 2와 스토어 3, 4, 5에 제품을 공급하는 중앙창고 4가 있는 경우이다. 중앙창고 2는 스토어 2에 인접해 있어 스토어 2로는 운송비가 발생치 않으며, 스토어 1로의 운송에만 운송비가 발생한다. 마찬가지로 중앙창고 4는 스토어 3, 5로의 운송에는 운송비가 발생하지만 스토어 4로는 운송비가 발생치 않는다.



<그림 1> 2개의 중앙창고와 5개의 스토어가 있는 경우

특정 중앙창고에서 제품을 공급하는 스토어들의 모임을 연합(coalition)이라고 할 때, 본 논문에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- 중앙창고의 위치는 미리 정해져 있지 않고, 기존의 스토어의 위치 중 연간평균총비용을 최소로 하는 곳으로 정한다.
- 각 스토어들과 연합들은 연속적재고조사정책(Q, r)을 따른다.
- 각 연합들의 중앙창고는 동일한 주문비용(setup cost) A , 재고유지비용(holding cost) h , 유실판매 벌과비용(penalty cost) p 를 가진다.
- 각 중앙창고에서 발생하는 비용은 재고관련비와 운송비만 있다. 여기서 재고 관련비란 주문비용, 재고유지비용, 유실판매 벌과비를 의미한다.

사용되는 기호는 다음과 같다.

N : 스토어 수

U : 전체 스토어들의 집합, $\{1, 2, 3, \dots, N\}$

S : 전체 연합의 집합

j : 중앙창고 위치, $1, \dots, N$.

x_{ij} : 의사결정변수, 스토어 i 가 창고 j 로부터 제품을 받으면 1 아니면 0.

y_j : 의사결정변수, 창고 j 가 선택되면 1 아니면 0

s_j : 중앙창고 j 에서 제품을 공급받는 스토어들의 집합

d_{ij} : 중앙창고 j 로부터 스토어 i 로의 운송거리, 단 $d_{ii} = 0$.

u : 하물당 km당 운송비

$t_{ij} = ud_{ij}$: 중앙창고 j 로부터 스토어 i 로의 운송비

D_i : 스토어 i 의 연간 기대수요.

D_j : 스토어 $i \in s_j$ 에 제품을 공급하는 중앙창고 j 의 연간 기대수요, $D_j = \sum_{i \in s_j} D_i$.

μ_i, σ_i : 선행기간(lead time) 동안의 스토어 i 의 수요의 평균과 표준편차.

μ_j, σ_j : 스토어 $i \in s_j$ 에 제품을 공급하는 중앙창고 j 의 선행기간동안의 수요의 평균과 표준편차,

$$\mu_j = \sum_{i \in s_j} \mu_i \quad \sigma_j = \sqrt{\sum_{i \in s_j} (\sigma_i^2)}.$$

Q_j, r_j : 스토어 $i \in s_j$ 에 제품을 공급하는 중앙창고 j 의 주문량과 재주문점.

X_j : 평균이 $\mu_j = \sum_{i \in s_j} \mu_i$ 이고 표준편차가

$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i \in s_j} (\sigma_i^2)}$ 인 중앙창고 j 의 선행기간동안의 총 수요의 분포.

$R_j(r_j)$: 스토어 $i \in s_j$ 에 제품을 공급하는 중앙창고 j 의 주기말의 기대부족 수요,

$$R_j(r_j) = E[(X_j - r_j)^+] \\ = \int_{r_j}^{\infty} (X_j - r_j) g_j(x_j) dx_j$$

단, $(X_j - r_j)^+ = \max[0, X_j - r_j]$ 이며 $g_j(x_j)$ 는 리드타임동안의 수요의 확률밀도함수이다.

주문당 주문비를 A , 제품 단위당 재고유지비를 h , 제품 단위당 유실판매 벌과비를 p 라고 하면 중앙창고 j 에 대한 재고관련비용은 식 (1)과 같다.

$$C_j(Q_j, r_j) = AD_j/Q_j + h(Q_j/2 + r_j - \mu_j) \\ + pD_jR_j(r_j)/Q_j \quad (1)$$

그러므로 수학 모형(F1)은 다음과 같다.

F1 :

$$\text{Min } \sum_j [A \sum_i D_i x_{ij} / Q_j + h(Q_j/2 + r_j - \sum_i \mu_i x_{ij}) \\ + p \sum_i D_i R_j(r_j) x_{ij} / Q_j y_j + \sum_i t_{ij} D_i x_{ij}] \quad (2)$$

subject to

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (5)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \quad (6)$$

식 (2)는 목적식으로 재고관련 비용과 운송비용의 최소화이다. 식 (3)은 창고 j 가 사용되지 않으면 스토어들은 창고 j 로부터 제품을 받을 수 없도록 한다. 식 (4)는 각 스토어는 하나의 창고로부터 제품을 받을 수 있도록 한다. 식 (5)와 식 (6)은 의사결정변수가 비음조건 혹은 이진정수임을 나타낸다.

F1은 현재 상태로는 풀 수가 없다. 왜냐하면, Q_j 와 r_j 의 값이 구해지지 않았고 기대부족수요를 구하기 위해서는 정규분포의 기댓값을 구해야 하기 때문이다.

3. 회귀분석을 이용한 재고관련비용의 추정

식 (2)의 마지막항인 운송비용은 선형으로 명확하므로 제외하고, 나머지 항들인 중앙창고 j 의 재고관련비용은 다음과 같다.

$$C_j = \sum_j A \sum_i D_i x_{ij} / Q_j + h(Q_j/2 + r_j - \sum_i \mu_i x_{ij}) \\ + p \sum_i D_i R_j(r_j) x_{ij} y_j / Q_j y_j$$

본 장에서는 위 식을 선형모형과 비선형모형으로 추정하며 그 이유를 밝히고자 한다. 선정된 선형모형인 Type 1과 비선형모형인 Type 2는 다음과 같다.

$$\text{Type 1 : } \hat{C}_j = \alpha y_j + \beta \sum_{i \in s} \mu_i x_{ij} \quad (7)$$

$$\text{Type 2 : } \hat{C}_j = \beta \sum_{i \in s} (\mu_i x_{ij})^{1/2} \quad (8)$$

Type 1과 Type 2는 모두 재고관련비용을 중속변수로 하고 리드타임동안의 평균수요인 μ 를 독립변수로 하였다. 중앙창고 j 가 제품을 공급할 스토어들의 연합 s_j 가 정해졌다고 하자. 이때 연합 s_j 에 속한 스토어들의 리드타임동안의 평균수요의 합을 대입하면 중앙창고 j 의 재고관련비용이 Q 와 r 의 계산 없이 추정될 수 있다.

Type 1과 Type 2가 선택된 이유는 다음과 같다. 우선 Type 1은 선형회귀모형으로 손쉽게 UFLP 문제의 목적식으로 변환이 가능하기에 선택하였다.

Type 2는 제공근의 비선형모형이다. 재고관련 비용인 식 (1)에서 σ 가 아주 작다면 리드타임동안의 수요가 거의 확실하므로 안전재고가 필요없고 연간총주문비와 연간총재고유지비만 고려하면 된다. 즉, 경제적 주문량(EOQ) 모형인 식 (9)와 동일하다.

$$C_j(Q_j) = AD_j/Q_j + hQ_j/2 \quad (9)$$

$Q_j = \sqrt{2AD_j/h}$ 이므로 이를 식 (9)에 대입하면 $C_j(D_j) = \sqrt{2hAD_j}$ 가 된다. 리드타임을 L 주라고 하면 1년이 52주이므로 연간수요율과 리드타임동안의 수요율이 동일하므로 $D_j = (52/L)\mu_j$ 이다. 이를 대입하면 $C_j(D_j) = \sqrt{104hA\mu_j/L}$ 이 된다. 즉, σ 가 작은 경우 리드타임동안의 수요(μ)와 재고관련비용(C)의 관계는 다음과 같다.

$$\sqrt{\mu} \propto C_j$$

그러므로 제공근 모형인 Type 2가 선택되었다.

Type 2에서는 α 가 없는데, 그 이유는 α 가 음수인 경우가 있으며, α 가 없어도 높은 R^2 값을 가지며, α 가 없으면 고정비와 관련된 이진정수(Type 1의 y_j)가 불필요하므로 수학적모형을 통한 해법의 적용이 용이하다. 반면 Type 1에서 α 가 없으면 R^2 값이 너무 낮으므로 생략할 수 없었다.

4. 회귀분석을 UFLP로의 변환

먼저 Type 1을 고려하여 식 (7)을 식 (2)에 대입하면

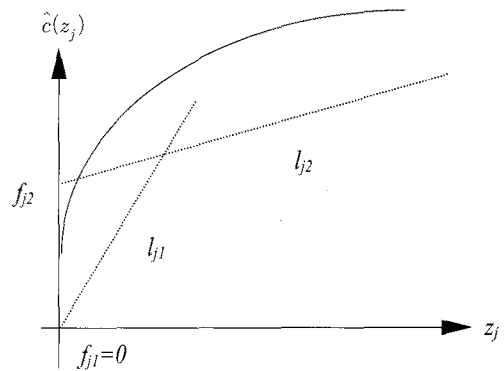
$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_j (\alpha y_j + \beta \sum_i \mu_i x_{ij}) + \sum_i t_{ij} D_i x_{ij} \\ & = \sum_j \alpha y_j + \sum_i \sum_j (\beta \mu_i + t_{ij} D_i) x_{ij} \end{aligned}$$

그러므로 다음과 같은 수학적모형(F2)이 된다.

$$\begin{aligned} \text{F2 : } & \text{Min } \sum_j \alpha y_j + \sum_i \sum_j (\beta \mu_i + t_{ij} D_i) x_{ij} \quad (10) \\ & \text{subject to } \text{식 (3)~식 (6)} \end{aligned}$$

이 수학적모형은 용량제약이 없는 입지선정문제(UFLP)와 동일하다. 여기서 식 (5)는 $x_{ij} \geq 0, \forall i, \forall j$ 로 대체가 가능하다[9, 12].

F2는 비선형문제이므로 piecewise linear함수로 추정하여 풀 수 있다. $z_j = \sum_i \mu_i x_{ij}$ 라고 하면 $\hat{c}_j(z_j) = \beta(z_j)^{1/2}$ 인데 이것을 piecewise linear함수로 추정할 경우는 아래 그림과 같다. <그림 2>는 두 개의 직선을 이용하여 $\hat{c}_j(z) = \beta\sqrt{z_j}$ 를 추정한 예를 보여주고 있다. k 번째 직선과 y 축과의 교점을 $f_{j,k}$ 라 하고 이 때 직선의 기울기는 $l_{j,k}$ 라 하자. 함수가 오목함수(concave function)이므로 $f_{j,k} < f_{j,k+1}$ 이라면 기울기는 $l_{j,k} > l_{j,k+1}$ 이다.



<그림 2> piecewise linear를 이용한 제공근함수의 추정

창고 j 에서의 가상설비 k 를 사용할 때의 고정비를 $f_{j,k}$ 라 하면 한 창고에 여러 개의 가상설비를 가지는 입지선정문제와 동일한 문제로 표현된다[12].

x_{ijk} 를 스토어 i 가 창고 j 에 있는 가상의 설비 k 에서 제품을 공급받으면 1 아니면 0인 값을 가지는 이진정수라 하자. y_{jk} 는 중앙창고 j 의 설비 k 가 사용되면 1 아니면 0이라 하자. 목적식은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_j \beta (\sum_{i \in s} \mu_i x_{ij})^{1/2} + \sum_i t_{ij} D_i x_{ij} \\ & \cong \sum_j \sum_k f_{jk} y_{jk} + \sum_i \sum_j \sum_k l_{jk} \mu_i x_{ijk} + \sum_i t_{ij} D_i x_{ij} \\ & = \sum_j \sum_k f_{jk} y_{jk} + \sum_i \sum_j \sum_k (l_{jk} \mu_i + t_{ij} D_i) x_{ijk} \end{aligned}$$

나머지 제약식은 첨자 k 가 추가되는 것 외에는 수학적모형 F2와 동일하므로 다음과 같다.

F3 :

$$\text{Min } \sum_j \sum_k f_{jk} y_{jk} + \sum_i \sum_j \sum_k (l_{ijk} \mu_i + t_{ij} D_i) x_{ijk} \quad (11)$$

subject to

$$x_{ijk} \leq y_{jk}, \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (12)$$

$$\sum_j \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \forall i \quad (13)$$

$$x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (14)$$

$$y_{jk} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, \forall k \quad (15)$$

식 (11)은 제곱근 함수를 piecewise linear로 표현한 목적식이며 제약식들 식 (12)~식 (15)에 대한 설명은 수학 모형 F1의 설명과 동일하므로 생략한다. 이 문제도 첨자 k 가 추가된 것외에는 UFLP 문제와 동일하다. 단, Karup and Pruzan[12]은 하나의 중앙창고에 있는 여러 개의 가상설비 중 하나의 가상설비만 항상 선택되므로 하나의 중앙창고에 하나의 가상설비만 선택되게 하는 제약식을 추가할 필요는 없다고 하였다.

5. 실험 및 실험결과

본 장에서는 μ 와 σ 가 비례하는 경우, σ 가 작은 경우, 스토어 수가 많은 경우들에 있어 회귀곡선이 원함수를 잘 추정할 수 있음을 실험을 통해 보여주었다. 또한, 본 연구에서 제안한 회귀추정에 기초한 해법의 우수함을 실험을 통해 입증하였다.

5.1 μ 와 σ 가 비례하는 경우

리드타임 동안의 수요의 평균(μ)가 100에서 1000사이

이고, 표준편차(σ)는 10에서 100사이의 임의의 값을 가지는 10개의 스토어를 발생시켰다. 이 때 h, p, A 가 각각 20, 30, 14이다. 이 10개의 스토어들의 $2^{10}-1=1023$ 개의 연합들에 대해서 Q^*, r^* 를 구한 후 이를 이용하여 각각의 비용을 구하였다. <그림 3>의 (a)는 이 예에 대해 가로 축은 모든 연합의 리드타임동안의 평균을 세로 축은 이러한 연합들의 재고관련비용이며 1023개의 데이터를 이용한 산점도(scatter plot)이다. 제일 오른쪽 위의 데이터는 10개의 모든 스토어들이 참여하는 연합(Grand Coalition)인 경우로 $\mu_j = 4845$ 이며 이 때의 재고관련 비용은 $C_j(Q_j, r_j)=6904$ 이다.

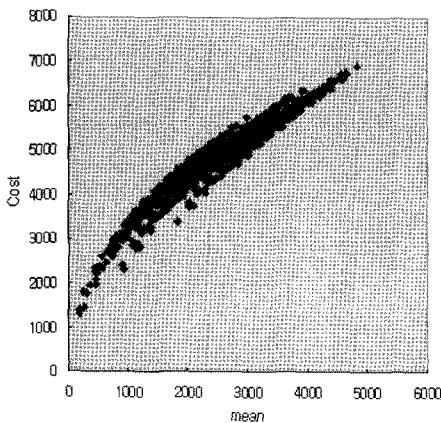
<그림 3>의 (b)는 μ 와 σ 가 비례관계인 경우 즉 μ 가 100~400이면 σ 는 10~40이고, μ 가 401~700이면 σ 는 41~70이고, μ 가 701~1000이면 σ 는 71~100의 임의의 값을 가지는 10개의 스토어들을 발생시킨 경우의 산점도이다. 나머지는 (a)의 조건과 동일하다.

<그림 3>의 (a)와 (b)를 비교해보면 (b)의 산점도가 덜 퍼져있고 R^2 의 값도 높을 것으로 보인다. 그러므로 본 논문에서는 μ 와 σ 가 비례관계인 경우에 한정하고 회귀분석을 이용하여 비용을 추정하여 예제 문제를 풀고 최적해와 비교하였다.

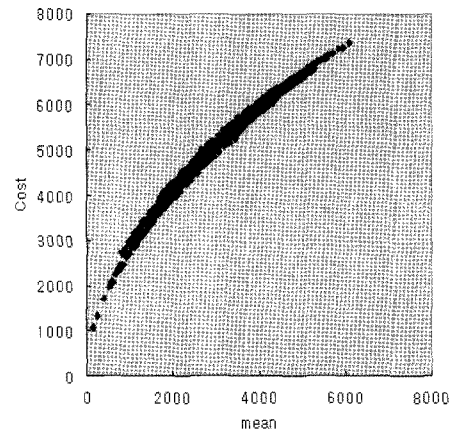
5.2 σ 가 작은 경우

<그림 4>는 μ 와 σ 가 무관한 경우 σ 의 범위가 10~80, 10~60, 10~40, 10~20인 경우의 각각의 산점도이다. 나머지 조건은 <그림 3>의 경우와 동일하다. σ 의 범위가 줄어들수록 산점도의 퍼져 있는 정도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

특히, σ 의 범위가 10~40인 경우인 (c)는 <그림 3>(a)



(a) 리드타임동안의 평균과 표준편차의 크기가 무관한 경우



(b) 리드타임동안의 평균과 표준편차가 비례하는 경우

<그림 3> 리드타임동안의 평균과 표준편차가 무관한 경우와 비례하는 경우의 평균과 비용의 산점도

와 거의 유사한 산점도를 보여주고 있다.

<그림 3>의 (a)와 <그림 4>의 예제에 있어 σ 의 범위에 따른 Type 1과 Type 2의 R^2 값은 <표 1>과 같다.

<표 1> σ 의 범위에 따른 Type 1과 Type 2의 R^2 값

σ 의 범위	$R^2(\text{Type 1})$	$R^2(\text{Type 2})$
10~20	0.9778	0.9980
10~40	0.9717	0.9908
10~60	0.9595	0.9783
10~80	0.9417	0.9577
10~100	0.9357	0.9524

σ 가 작아질수록 Type 1과 Type 2 모두에 있어 R^2 값이 향상되었다. 이상으로 볼 때 본 논문의 접근법은 σ 가 작거나 μ 와 σ 가 비례관계인 경우에 적합함을 알 수 있다.

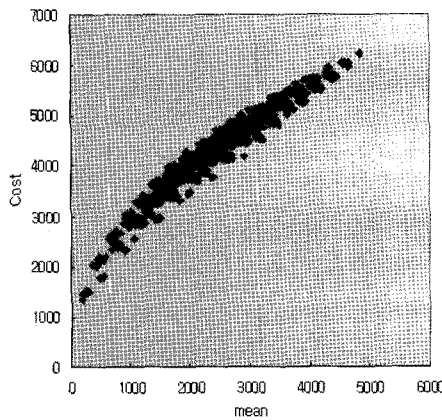
5.3 스토어 수가 많은 경우

리드타임동안의 평균과 표준편차의 크기가 무관하고 스토어 수가 100개인 경우를 고려하였다. 이때 연합의 수가 너무 많으므로 약 2000개의 연합을 무작위로 선택하여 <그림 5>의 (a)에 나타내었다. 나머지 조건은 <그림 3>의 (a)와 동일하다.

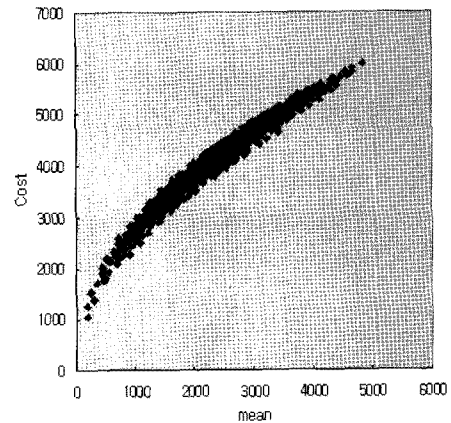
<그림 5>의 (b)에는 리드타임동안의 평균과 표준편차가 비례하고 스토어 수가 100개인 경우의 산점도이다. 나머지 조건은 <그림 3>의 (b)와 동일하며 약 2000개의 연합을 무작위로 선택하여 나타내었다.

<그림 5>는 <그림 3>보다 폭이 좁은 산점도를 보여주고 있다.

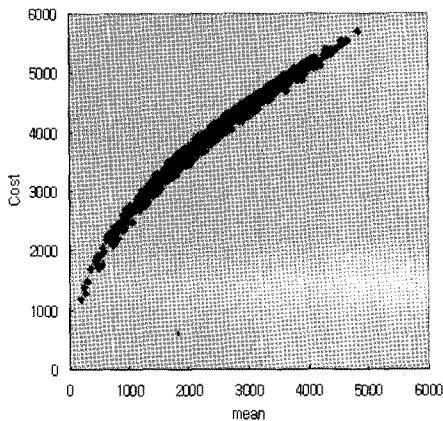
μ 와 σ 가 무관한 경우와 비례관계인 경우 Type 1은 R^2 값이 각각 0.9636, 0.9646이며 Type 2는 R^2 값이 각각 0.9987, 0.9994이었다. 데이터 수가 많을수록 회귀분석을 통한 추정치가 더 적합하므로 제 4장에서 소개한 접근법으로 최적해에 더욱 근사한 해를 구할 수 있을 것으로 예상된다.



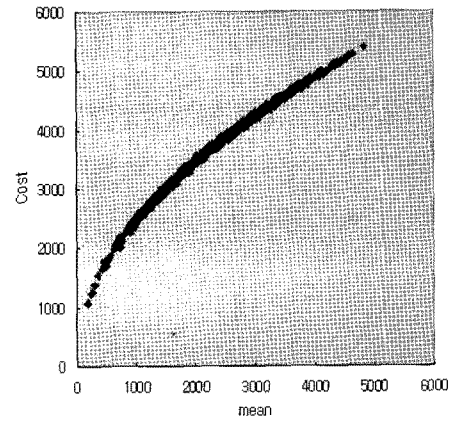
(a) σ 가 10에서 80사이인 경우



(b) σ 가 10에서 60사이인 경우

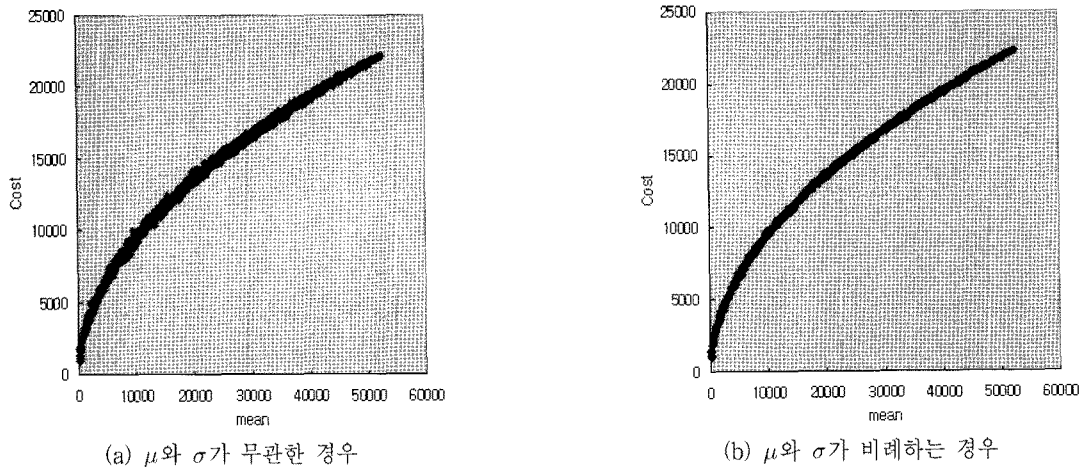


(c) σ 가 10에서 40사이인 경우



(d) σ 가 10에서 20사이인 경우

<그림 4> μ 와 σ 가 무관한 경우 σ 의 범위가 10~80, 10~60, 10~40, 10~20인 경우의 평균과 비용의 산점도



<그림 5> 스토어 수가 100개인 경우의 평균과 비용의 산점도

5.4 회귀추정식을 이용한 해법의 실험

μ 와 σ 가 비례하는 경우 회귀분석이 재고관련비용을 얼마나 잘 추정하고 또 실제 문제에 있어 얼마나 좋은 근사해를 제공하는지 실험을 통해 알아보하고자 한다.

패러미터인 A, h, p 의 변화가 회귀모형과 근사해에 어떤 영향을 미치는지 알아보하고자 한다. 이를 위해 각 10개의 예제가 있는 2종류의 데이터셋이 생성되었다. 데이터 셋 1은 예제에 따라 A, h, p 각각 일양분포인 U[\$1, \$100]에서 임의의 수를 발생시켰다(단, $h \leq p$). 데이터 셋 2는 좀 더 실제적인 경우에 적합하도록 A, h, p 각각에 대해 U[\$50, \$100], U[\$1, \$5], U[\$5, \$15]이다. 데이터 셋 1과 2 모두에 있어 스토어들의 위치는 X와 Y의 좌표가 각각 U[0km, 100km]이며, 제품 단위당 거리당 운송비용인 $u = 1\$/km$ 이며 리드타임은 3주로 하였고, 스토어 i 의 연간 기대수요는 $D_i = (52\text{주}/3\text{주}) \times \mu_i$ 이다. 본 논문에서는 μ 와 σ 가 비례하는 경우를 고려하였으므로 μ 가 100~400인 경우 σ 는 10~40에서, μ 가 401~700인 경우 σ 는 41~70에서, μ 가 701~1000이면 σ 는 71~100에서 무작위로 추출하였다.

제시한 기법의 성능을 평가하기 위해 오차율을 이용하였다. 오차율은 최적해(Opt)와 제시한 기법의 해(Pro)의 차이를 최적해로 나눈 백분율이다.

또한, 회귀모형 성능을 평가하기 위해 평균회귀적합율과 최악회귀적합율을 이용하였다. 평균회귀적합율은 원재고관련비용함수와 회귀분석의 차이를 모든 스토어들이 참여하는 연합(Grand Coalition)의 재고관련비용(C_{grand})으로 나눈 후 스토어 수로 다시 나눈 평균백분율이다. 최악회귀적합율은 회귀분석의 값(\hat{C}_{worst})과 원함수(C_{worst})의 차이가 가장 많은 연합의 경우의 백분율이다.

$$\text{오차율} = (|\text{Opt-Pro}|/\text{Opt}) \times 100(\%)$$

평균회귀적합율

$$= \sum_{s \in S} (|\hat{C}_s - C_s| / C_{grand}) / |S| \times 100(\%)$$

$$\text{최악회귀적합율} = |\hat{C}_{worst} - C_{worst}| / C_{grand} \times 100(\%)$$

<표 2>와 <표 3>에는 데이터 셋 1과 2의 결과가 요약되어 있다. 수학적모형 F2와 F3는 LINDO 6.1을 이용하여 해를 구하였다. 모든 경우에 있어 F2 보다 F3가 더 나은 결과를 보이며 Type 1과 Type 2 모두 높은 R^2 값을 가진다. 이동주 외[1]에서 가장 좋은 결과를 보여준 H3-1은 수학적모형 F2보다 평균적으로는 못한 결과를 보이지만 예제에 따라 서로 다른 결과를 보이므로 어느 방법이 더 나은 결과를 보인다고 할 수는 없다. H3-1은 탐욕적 휴리스틱기법의 하나로 가능한 모든 연합을 고려하므로 데이터 수가 큰 경우에는 부적합한 휴리스틱이다. 하지만 본 논문의 기법은 H3-1보다는 데이터 수가 어느 정도 큰 경우에도 적용할 수 있는 기법이다.

H3-1의 경우에는 데이터 셋 1에서 예제 5와 예제 9에서 오차율이 15.1과 5.8로 예제에 따라 오차율에 많은 편차가 있는 것으로 보인다. 그렇지만, 수학적모형 F3의 경우에는 모든 경우에 있어 오차율에 큰 편차는 없어 보여 안정적으로 우수한 해를 제공하는 것으로 보인다.

데이터 셋 2가 데이터 셋 1보다 모든 경우에 나은 결과를 보여준다. 특히, R^2 는 모든 경우에 있어 나은 값을 가지며 오차율도 나은 결과를 보여줌을 알 수 있다. 그러므로 A, h, p 의 값이 결과에 영향을 미침을 알 수 있고 A 가 크고, h 가 작은 경우인 데이터 셋 2에서 나은 결과를 보인다.

데이터 셋 2의 R^2 가 높은 이유는 다음과 같다. A 가 크면 주문비용이 커지므로 한 번 주문시 많은 양을 주문

하러 할 것이므로 Q 가 커진다. 또한, Q 가 커지면 식 (1)의 마지막 항인 연간 총 유실판매 벌과비는 작아진다. 연간 총 유실판매 벌과비가 작아지면 산점도의 퍼져있는 정도가 줄어들어 EOQ 모형과 유사하게 될 것이다. 또한 h 가 작으므로 더욱 더 EOQ 모형과 유사하게 되어 제 3장에서 언급하였듯이 제공급모형인 Type 2와 적합하게 될 것이다.

6. 결론 및 미래의 연구과제

본 논문에서는 리드타임동안의 수요의 표준편차(σ)가 작거나 리드타임동안의 수요의 평균(μ)과 표준편차(σ)

가 비례관계인 경우에 중앙창고입지선정문제를 효과적으로 푸는 회귀분석을 이용한 해법을 제시하였다.

회귀분석을 적용하여 Q 와 r 을 계산하지 않고 μ 를 독립변수로 하여 재고관련비용을 직접 추정하고, 이를 통해 중앙창고입지선정문제를 해법이 잘 알려진 용량제약이 없는 입지선정문제(UFLP)로 변환하였다. 알려진 해법을 통해 안정적으로 우수한 근사해를 구하였다. 기존의 조합최적화에 기반한 휴리스틱과 달리 본 논문의 해법이 안정적으로 우수한 해를 구함은 제 5장의 실험을 통해 알 수 있었다.

여러 가지 경우에 있어 회귀분석을 이용하여 재고관련비용 추정의 적합성을 알아본 결과 다음과 같은 경우 적합도가 높은 것으로 보인다.

<표 2> 데이터 셋 1의 결과

예제	수학모형 F2				수학모형 F3				H3-1
	R ²	평균회귀 적합율(%)	최악회귀 적합율(%)	오차율(%)	R ²	평균회귀 적합율(%)	최악회귀 적합율(%)	오차율(%)	오차율(%)
1	0.969	2.8	60.5	13.2	0.982	2.2	12.3	1.1	0.0
2	0.941	5.1	178.9	11.0	0.942	4.9	46.7	2.7	0.0
3	0.957	4.1	162.3	6.5	0.965	3.7	39.4	0.2	3.2
4	0.931	5.3	188.9	14.3	0.926	5.4	22.7	0.0	1.5
5	0.947	4.2	110.6	18.4	0.958	3.7	20.9	0.0	15.1
6	0.968	3.5	191.2	8.9	0.986	2.3	8.6	0.0	1.9
7	0.946	4.3	96.3	11.2	0.957	3.7	11.6	0.0	2.9
8	0.939	5.1	122.7	14.7	0.954	4.4	36.8	0.0	0.0
9	0.967	3.0	78.3	15.0	0.979	2.7	9.1	0.0	5.8
10	0.971	3.1	56.3	0.0	0.958	3.7	24.8	0.0	0.0
평균	0.953	4.0	124.6	11.3	0.961	3.7	23.3	0.4	3.0

<표 3> 데이터 셋 2의 결과

예제	수학모형 F2				수학모형 F3				H3-1
	R ²	평균회귀 적합율(%)	최악회귀 적합율(%)	오차율(%)	R ²	평균회귀 적합율(%)	최악회귀 적합율(%)	오차율(%)	오차율(%)
1	0.975	2.6	122.0	7.6	0.991	1.6	6.9	0.0	0.7
2	0.978	2.4	141.4	7.9	0.996	1.1	5.8	0.0	0.0
3	0.977	2.3	107.6	5.7	0.993	1.4	7.6	0.4	0.0
4	0.980	2.2	75.5	10.8	0.998	0.7	4.4	0.0	0.0
5	0.977	2.6	88.3	8.7	0.996	1.2	12.3	0.0	0.9
6	0.982	1.9	49.2	1.2	0.998	0.8	3.3	0.0	0.0
7	0.977	2.4	117.6	4.4	0.997	1.0	4.2	0.0	0.0
8	0.977	2.6	140.7	4.0	0.996	1.1	6.7	0.0	0.0
9	0.974	2.5	101.9	7.4	0.989	1.7	6.1	0.0	0.0
10	0.977	2.7	87.1	8.5	0.996	1.1	9.7	0.2	0.0
평균	0.977	2.4	103.1	6.6	0.995	1.2	6.7	0.1	0.2

- σ 가 작은 경우
- μ 와 σ 가 비례관계인 경우
- A 가 크고, h 가 작은 경우
- 스토어 수가 많은 경우

또한, 선형회귀 모형(Type 1)보다는 제곱근형태의 비선형회귀모형(Type 2)의 적합성이 높다.

10개의 스토어가 있는 경우를 회귀분석을 이용한 접근법으로 해를 구하니 많은 경우에 있어 최적해를 구할 수 있었고 대체적으로 우수한 근사해를 구할 수 있었다.

(Q, r) 재고모형의 재고관련비용을 Q 와 r 을 계산하지 않고 추정하는 회귀분석 접근법은 본 논문의 문제인 중앙창고입지선정문제에 국한되지 않고 (Q, r) 재고모형을 기반으로 하는 다양한 문제에 적용될 수 있어 그 응용분야가 많을 것으로 보인다. 이러한 관련문제들에 대한 연구가 필요하며 또한, 단일제품이 아니고 다수의 제품이 있는 경우에 적당한 접근법들은 무엇일지에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 이동주, 황인극, 박동진; “휴리스틱을 이용한 중앙창고의 수와 위치 결정”, 산업공학, 19 : 78-85, 2006.
- [2] 이동주, 김진호; “중앙창고의 수와 위치결정을 위한 거리기반 Simulated Annealing 알고리즘”, 한국산업경영시스템학회지, 30(3) : 44-53, 2007.
- [3] Beasley J. E.; “Lagrangean heuristics for location problems,” *European Journal of Operational Research*, 65 : 383-399. 1993.
- [4] Byrket, D. L.; “An empirical evaluation of further approximations to an approximate continuous review inventory model,” *Naval Research Logistics Quarterly*, 28 : 169-180, 1981.
- [5] Das, C.; “On the solution of some approximate continuous review inventory models,” *Naval Research Logistics Quarterly*, 32 : 301-313, 1985.
- [6] Dubelaar, C.; “Relationships between inventory, sales and service in a retail chain store operation,” *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 31(2) : 96-108, 2001.
- [7] Erlenkotter D. A.; “dual-based procedure for uncapacitated facility location,” *Operations Research*, 26 : 992-1009, 1978.
- [8] Ghalebsaz-Jeddi, B., Shultes B. C., and Haji R.; “A multi-product continuous review inventory system with stochastic demand, backorders, and a budget constraint,” *European Journal of Operational Research*, 158 : 456-469, 2004.
- [9] Hackness, J. and ReVelle, C.; “Facility location with increasing production costs,” *European Journal of Operational Research*, 145 : 1-13, 2003.
- [10] Holmberg K.; “Exact solution methods for uncapacitated location problems with convex transportation costs,” *European Journal of Operational Research*, 114 : 127-140, 1999.
- [11] Johnson, A. and Montgomery, D. C.; *Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control*, Wiley, New York. 1974.
- [12] Karup, J. and Pruzan, P. M.; “The simple plant location problem : Survey and synthesis,” *European Journal of Operational Research*, 12 : 36-81, 1983.
- [13] Lau, A. H. and Lau, H-S.; “A simple cost minimization procedure for the (Q, r) inventory model: Development and Evaluation,” *IIE Transactions*, 25(2) : 45-53, 1993.
- [14] Wang, T-Y. and Hu, J-M.; “An inventory control system for products with optional components under service level and budget constraints,” *European Journal of Operational Research*, 189 : 41-58, 2008.