

유동인구를 고려한 확률적 최대지역커버문제

최명진* · †이상헌*

Stochastic Maximal Covering Location Problem with Floating Population

Myung-Jin Choi* · †Sang-Heon Lee*

■ Abstract ■

In this paper, we study stochastic maximal covering location problem considering floating population. Traditional maximal covering location problem assumed that number of populations at demand point is already known and fixed. In this manner, someone who try to solve real world maximal covering location problem must consider administrative population as a population at demand point. But, after observing floating population, appliance of population in steady-state is more reasonable. In this paper, we suggest revised numerical model of maximal covering location problem. We suggest heuristic methodology to solve large scale problem by using genetic algorithm.

Keywords : Maximal Covering Location Problem, Floating Population, Genetic Algorithm, Steady-state

1. 서 론

Maximal Covering 문제(MCP)는 $m \times n$ 행렬이 주어진 경우 n 개의 열로부터 주어진 p 개의 열을 선택하되 가장 많은 행을 커버하는 문제로 정의된

다[8]. 이러한 개념을 적용하여 제한된 수의 설비로 서비스 받는 인구를 최대화하는 것을 목적으로 하는 최대 지역커버문제(MCLP, maximal covering location problem)는 설비가 수요지로부터 일정거리 s 내에 있어야 수요를 커버하게 될 경우 커버하

논문접수일 : 2009년 01월 14일 논문수정일 : 2009년 03월 11일 논문게재확정일 : 2009년 03월 12일

* 국방대학교 운영분석학과

† 교신저자

는 인구를 최대화하면서 미리 정해진 p 개의 설비 위치를 선정하는 문제이다.

MCLP는 소방서 위치 선정[17], 앰블런스 위치 선정[16]에 적용된 바 있고, Daskin[9, 10]은 최대 지역 기대커버문제(maximal expected covering location problem)를 제시하여 확률적 최적화 모형에서의 서버 혼잡에 대해 중점적으로 다룬 바 있다. 또한 MCLP(혹은 MCP)의 해결을 위한 방법론적 측면에서는 정수계획법[11]과 Lagrangian Relaxation 기법[12, 13]이 많이 연구되었고 MCP와 매우 유사한 문제인 Set Covering Problem(SCP)의 해결을 위해 유전자 알고리즘(genetic algorithm)이 적용된 사례[6]도 있다. 국내의 경우에도 수도권 지역 소방서의 최적입지 평가에 MCLP가 적용된 사례가 있고[2], MCLP에 비용제약 개념을 추가한 연구가 수행된 바 있다[1, 3, 4].

지금까지의 연구에서 다룬 MCLP는 수요지에서의 인구가 고정되고 사전에 알려져 있음을 가정한 다. 이러한 관점에서 기존 MCLP를 실제 문제에 적용할 경우 수요지 인구는 해당 지역의 행정구역상 인구를 적용할 수밖에 없다. 그러나 하루 중 정해진 시간동안 운영되는 은행, 관공서 등 대부분 설비의 서비스 대상은 고정된 인구가 아닌 수요지 간 유동인구까지 포함하여 고려하는 것이 합리적이다. 예를 들어, 기존 MCLP에서는 신규 은행 설립시 일정거리 내 수요지의 행정구역상 인구를 고려하게 되나 본 연구에서는 해당 수요지의 고정된 인구뿐만 아니라 어떠한 이유에서건 해당 수요지를 방문한 시스템 내 타 수요지 거주자도 해당 노드에서의 서비스 대상에 포함한다.

즉, 평균 업무시작시간(9:00 A.M.)에서의 수요지별 인구를 행정구역상 인구로 하고 업무종료시간(6:00 P.M.)까지의 유동인구를 고려하여 업무종료시간에서의 수요지별 인구를 산출한다. 이 기간을 이산시간 마코브체인(discrete-time markov chain)에서의 단위시간(unit time)으로 하고 각 수요지별 인구 이동에 대한 전이확률(transition probability)을 구하여 안정상태확률(steady-state pro-

bability)을 구한다면 이는 안정상태(steady-state)에서 각 수요지가 인구를 유입하는 강도 혹은 영향력이라 볼 수 있다. 이러한 확률에 초기 시스템 내 전체 인구수를 곱하면 각 수요지가 안정 상태에서 전체 인구에 대해 가지는 영향력(인구 흡입력)의 크기를 반영하는 인구를 판단할 수 있다.

본 연구에서는 기간 초에 미리 알려진 수요지 인구수를 기준으로 단위시간 동안 인구 이동후 기간 말에 각 수요지에 존재하는 인구를 고려하여 기존 MCLP의 수리 모형을 더욱 현실성 있게 설정하였다. 또한 MCLP(혹은 MCP)는 NP-hard 문제로 서[14], 수요지와 설비후보지의 수가 방대하고 다양한 제약조건을 만족해야 하는 대규모 실세계 문제가 주어질 경우 최적해를 찾는 것이 사실상 불가능하므로 메타휴리스틱 기법의 하나인 유전자 알고리즘(GA)을 적용하여 대규모 문제 해결을 위한 해법을 제시한다.

2. 수리 모형

2.1 고전적 MCLP

Church and ReVell[8]이 제시한 MCLP의 고전 수리모형은 다음과 같다.

<입력변수>

I : 수요지 집합

J : 설비후보지 집합

S_i : 수요지 i 를 커버할 수 있는 거리

d_{ij} : 수요지 i 와 설비후보지 j 간의 최단거리

$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq S_i\}$, 수요지 i 를 커버할 수 있는 설비후보지 집합

a_i : 수요지 i 에서 서비스 받는 인구

p : 건립될 설비수

<결정변수>

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{설비가 후보지 } j \text{에 건립될 경우} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{수요지 } i \text{가 커버되지 않을 경우} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

<수리모형>

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j \in N} x_j + y_i \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3)$$

$$x_j = (0, 1), \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$y_i = (0, 1), \quad \forall i \in I \quad (5)$$

식 (1)은 목적함수로 커버되지 않는 인구를 최소화한다는 의미이다. 식 (2)는 설비가 건립되어야만 수요지가 커버된다는 의미이며, 식 (3)은 건립될 설비 수가 p 개임을 나타낸다.

2.2 유동인구를 고려한 MCLP

고전적 MCLP는 수요지 인구가 고정되어 있어 하루 동안의 잦은 인구 이동을 반영하지 못한다. 즉, 서비스 받지 못하는 인구수를 최소화하기 위한 설비의 입지선정에 있어 각 수요지에 거주하는 행정구역상 인구 대신 유동인구를 고려하여 안정상태에서 각 수요지에 존재할 인구를 적용하는 것이 더욱 합리적이다.

인구이동 개념을 MCLP에 적용시 인구의 이동은 정해진 시스템 내부의 수요지간에만 이루어지고 시스템 외부로의 유출 및 외부 시스템으로부터의 유입은 없는 것으로 가정한다.

기간 초 각 수요지별 인구를 나타내는 행렬을 A 라고 하면 A 는 대각 원소(diagonal elements)가 수요지 i 에서의 기간 초 인구를 나타내는 a_{ii} ($i = 1, \dots, I$)이고 나머지 원소는 0으로 구성되는 행렬이다. 단위시간 동안 수요지 i 에서 수요지 $i' (\neq i)$ 로 이동한 유동인구를 $a_{ii'}$ 라고 하면 기간 말의 인구수를 나타내는 행렬 A' 는 대각 원소가 $a_{ii} - \sum_{i' \in I} a_{ii'}$ 이고, 나머지 원소는 $a_{ii'}$ 로 구성된다. A' 의 각 행의

원소를 a_{ii} 로 나누어 정규화(normalization)하면 각 수요지간 전이확률을 나타내는 행렬 P_{mn} 을 얻을 수 있다. 여기서, $m, n (\in I)$ 은 수요지를 나타내며 마코브 체인에서의 상태(state)로 정의된다. P_{mn} 에서 각 상태는 모두 교통가능(communicate)하고 비주기적(aperiodic)이며 모든 전이확률이 비음(non-negative)이므로, 기약(irreducible)이며 에르가딕(ergodic)한 마코브 체인이다. 따라서 안정상태확률 π_i 가 유일하게 존재한다[15]. 식 (6)과 같이 π_i 에 시스템 내 기간 초 전체인구 $\sum_{i \in I} a_{ii}$ 를 곱하면 안정상태에서의 각 수요지별 인구 b_{ii} 를 구할 수 있다.

$$b_{ii} = \pi_i \times \sum_{i=1}^I a_{ii} \quad (6)$$

b_{ii} 를 대각 원소로 하고 나머지 원소가 0으로 구성되는 행렬 B 는 안정상태에서의 각 수요지 인구를 나타내는 행렬이다.

안정상태확률은 에르가딕한 마코브 체인이 전이를 계속하여 초기상태의 영향력이 소멸된, 초기상태에 관계없이 일정하게 갖게 되는 확률값이다. 이는 오랜 시간이 지난 후 해당 수요지에 인구가 머물 확률이므로 결국 각 수요지가 인구를 유인하는 강도로 해석 가능하다.

예를 들어, 5개의 수요지로 이루어진 시스템에서 기간 초 각 수요지에 거주하는 인구를 나타내는 5×5 행렬 A 가 식 (7)과 같다고 가정한다.

$$A = \begin{pmatrix} 433 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 432 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 487 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 842 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 783 \end{pmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 A 의 대각 원소는 각 수요지에 거주하는 기간 초 인구를 의미한다. 단위시간 동안 각 수요지간 이동 인구를 고려한 기간말의 인구를 나타내는 행렬 A' 는 식 (8)과 같다.

$$A' = \begin{pmatrix} 254 & 30 & 18 & 97 & 34 \\ 24 & 195 & 56 & 83 & 74 \\ 63 & 69 & 336 & 13 & 6 \\ 37 & 51 & 40 & 658 & 56 \\ 43 & 99 & 49 & 79 & 513 \end{pmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서 행렬 A' 의 1행의 의미는 기간 초 수요지 1에 433명의 인구가 존재했으나 기간 말에 수요지 2, 3, 4, 5로 각각 30, 18, 97, 34명이 이동했음을 나타낸다. 실제로 이러한 인구 이동은 버스 및 지하철에 사용되는 교통카드 시스템, 도로상 교통상황 감시카메라 등을 통해 측정 가능하다. 이러한 기간 말의 인구 이동을 나타내는 행렬 A' 의 각 행의 원소를 기간 초 각 수요지 인구로 나누면 식 (9)과 같은 전이확률행렬 P_{mn} 을 얻을 수 있다.

$$P_{mn} = \begin{pmatrix} 0.5866 & 0.0693 & 0.0416 & 0.2240 & 0.0785 \\ 0.0556 & 0.4514 & 0.1296 & 0.1921 & 0.1713 \\ 0.1294 & 0.1417 & 0.6899 & 0.0267 & 0.0123 \\ 0.0439 & 0.0606 & 0.0475 & 0.7815 & 0.0665 \\ 0.0549 & 0.1264 & 0.0626 & 0.1009 & 0.6552 \end{pmatrix} \quad (9)$$

전이확률행렬이 P_{mn} 인 이산시간 마코브 체인에서의 각 수요지별 안정상태확률 π_i 를 원소로 가지는 벡터 Π 는 식 (10)과 같이 도출된다.

$$\Pi = (0.1360 \ 0.1436 \ 0.1712 \ 0.3695 \ 0.1797) \quad (10)$$

안정상태확률은 오랜 시간이 지난 후 해당 수요지에 인구가 머물 확률이므로 결국 각 수요지가 인구를 유인하는 강도로 해석 가능하고 식 (10)에서 각 수요지는 초기 인구에 관계없이 수요지 4, 5, 3, 2, 1의 순으로 인구가 존재할 확률이 높다. 수요지별 안정상태확률에 기간 초 시스템 내 전체 인구 수 2,977명을 곱하면 식 (11)과 같이 안정상태에서의 각 노드별 인구수를 나타내는 행렬 B 가 도출된다.

$$B = \begin{pmatrix} 405 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 427 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 510 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 535 \end{pmatrix} \quad (11)$$

기간 초 각 수요지 인구는 식 (7)의 행렬 A 의 대각 원소와 같지만 단위시간 동안 인구이동을 고려한 안정상태에서 각 수요지별 인구는 식 (11) 행렬 B 의 대각 원소가 된다.

각 수요지에서의 안정상태확률 π_i 를 각 수요지의 인구 유인강도라 정의하고 이를 최대화 문제로 전환한 Church and ReVell[8]의 수리모형에 적용한 유동인구를 고려한 확률적 MCLP의 수리모형은 다음과 같다.

<입력변수>

I : 수요지 집합

J : 설비후보지 집합

S_i : 수요지 i 를 커버할 수 있는 거리

d_{ij} : 수요지 i 와 설비후보지 j 간의 최단거리

$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq S_i\}$, 수요지 i 를 커버할 수 있는 설비후보지 집합

a_i : 수요지 i 의 기간 초 인구 수

A^* : 시스템 내 기간 초 전체 인구 수

π_i : 인구 이동 후 수요지 i 에서의 안정상태확률

p : 건립할 설비 수

<결정변수>

$x_j = \begin{cases} 1 & \text{설비가 후보지 } j \text{에 건립될 경우} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

$y_i = \begin{cases} 1 & \text{수요지 } i \text{가 커버될 경우} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

<수리모형>

$$\text{Max } Z = \sum_{i \in I} A^* \pi_i y_i \quad (12)$$

Subject to

$$\sum_{j \in N_i} x_j - y_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (14)$$

$$x_j = (0, 1), \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$y_i = (0, 1), \quad \forall i \in I \quad (16)$$

식 (12)는 목적함수로 안정상태에서 서비스 받는

인구의 합을 최대화 한다는 의미이다. 식 (13)은 설비가 건립되어야 각 수요지가 서비스 받을 수 있다는 의미이며 식 (14)는 건립할 설비의 수가 p 개라는 의미이다. 식 (15), 식 (16)은 결정변수의 이진정수(binary integer) 조건을 나타낸다.

3. 실험 및 결과분석

NP-hard 문제인 MCLP의 해결을 위해서는 발전적 기법의 적용이 필요하고, 그 중 유전자 알고리즘(GA)은 복잡한 해공간에 대한 탐색능력이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제를 푸는데 적합하다는 장점을 가지고 있어 본 연구에서는 GA를 적용하였다. 축소실험에서 문제의 최적값과 GA로 산출된 결과를 비교하여 알고리즘의 정확도(accuracy)를 검증한 후 확대실험에서 대형문제(large scale problem)에 적용하였다.

3.1 유전자 알고리즘

본 문제 해결을 위한 GA 적용 방법은 다음과 같으며 특히, MCLP의 문제 특성에 맞추어 일반적 교차(crossover) 연산에 보수(repair) 과정을 추가한 p -fixed crossover를 적용하였다.

3.1.1 유전자 표현(Representation Scheme)

본 문제 해결에 GA를 적용하기 위해 각 염색체가 설비후보지 수(J)와 동일한 크기의 비트(bit)를 갖도록 하고, 각 비트를 설비후보지에 대한 건립 여부를 나타내는 0과 1의 이진문자열(binary-string)로 표현한다. 즉, 한 개의 비트는 하나의 입지후보지를 나타내고, j 번째 비트의 값이 1이면 해당 설비후보지에 설비를 건립함을 의미하며, 0은 건립하지 않음을 나타낸다. 예를 들어, 6개의 후보지 가운데 1, 3, 6번에 설비를 건립한다면 염색체 표현은 <그

1	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---

 : 설비 건립여부

<그림 1> 염색체 표현

림 1>과 같다.

3.1.2 초기해 생성(Initial Population Generation)

일반적으로 GA 탐색을 위한 초기 해집단은 임의로 생성하므로 해집단내 염색체 중에는 실행불가능한(infeasible) 해들이 다수 존재하게 된다. 이러한 절차를 따르게 될 경우 실행가능한(feasible) 해로부터 탐색을 시작하는 것보다 많은 시간을 요구하게 된다. 따라서 본 연구에서는 초기해 생성에 있어 GA의 일반적 절차를 따르지 않고 실행가능해만으로 해집단을 구성하였다. 건립할 설비의 수가 p 개 이므로 임의성(randomness) 보장을 위해 난수를 발생시켜 약 10%의 확률로 전체 J 개 후보지중 건립대상 후보지를 선정한다. 다음 단계에서는 약 20%의 확률로 전체 건립대상 설비수 p 개가 충족될 때까지 선택과정을 반복한다. 이러한 과정은 초기 해집단을 실행가능해만으로 구성시킴과 동시에 하나의 염색체 내에서 건립대상 후보지(bit) 선정에 임의성을 보장하여 탐색공간을 확장하는 효과를 제공한다.

3.1.3 적합도 평가(Fitness Evaluation)

새로운 해집단 생성시마다 각 염색체에 대한 적합도를 계산한다. 적합도 f 는 서비스 받는 총 인구수로 해당 염색체에서 1의 값을 가진 p 개의 건립대상 후보지가 커버하는 수요지에 존재하는 인구의 합으로 식 (17)과 같다.

$$f = \sum_{i \in N^p} population_i \tag{17}$$

(여기서, $population_i$: 수요지 i 의 인구, N^p : p 번째 건립대상 후보지에 의해 커버되는 수요지 i 의 집합)

이때, 엘리트 전략(elite strategy)을 적용하여 해당 세대에서 가장 높은 적합도를 가지는 우수 염색체의 유전 정보가 유지되도록 한다.

3.1.4 선택 및 재생산(Selection and Reproduction)

선택연산에서는 GA에서 일반적으로 많이 사용되는 룰렛 휠(roulette wheel) 기법을 이용하여 현재 해집단에서 다음세대 해집단을 구성할 염색체를 선정한다. 각 염색체의 선택확률 P_k 는 식 (18)을 통해 산출한다. 이때, 선택연산은 해집단의 크기만큼 반복하고 선택된 염색체로 해집단을 재생산되 마지막 염색체는 현재 세대에서 가장 좋은 적합도를 가지는 엘리트 염색체로 구성한다.

$$P_k = f_k / \sum_{i=1}^N f_i \quad (18)$$

(여기서, f_k : k 번째 염색체의 적합도, N : 총 염색체 수)

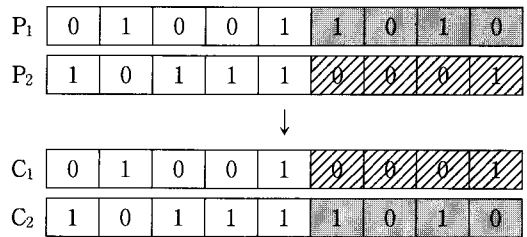
3.1.5 교차 및 보수(Crossover and Repair)

MCP(혹은 MCLP)를 일반적 GA를 통해 해결할 경우 교차연산 후 1의 값을 가지는 비트 수가 p 개가 되어야 한다는 제약은 만족하지 못해 교차연산을 통한 해의 개선을 보장할 수 없다. 따라서 기존의 연구에서는 GA를 통한 MCP 해결을 위해 그리디(greedy) 교차 연산자[5], MCP와 유사한 SCP 해결을 위해 일반화된 적합도 기반(generalized fitness-based) 교차 연산자[6]를 적용한 바 있다. 본 연구에서는 일반적 일점교차를 적용하되 교차 후 자식해의 1의 값을 가진 비트 수가 p 개가 되도록 보수과정을 추가한 p -fixed 교차연산을 적용하였다.

p -fixed 교차연산에서는 먼저 일반적인 일점교차를 적용한다. 예를 들어, <그림 2>와 같이 두 부모염색체(P_1, P_2)가 선택되면 난수를 임의 생성하여 교차지점을 정하고 교차지점 이후의 두 부모염색체의 비트를 교차시켜 두개의 자식염색체(C_1, C_2)를 생성한다.

다음으로, 교차 후 자식염색체의 1값을 가진 비트가 p 개 이하이면 교차지점 이전의 0값을 가진 비트 중에서 임의의 비트를 선정하여 1값을 부여

하여 1값을 가진 비트 수를 p 개로 조정한다. 마찬가지로 교차 후 자식염색체에서 1값을 가진 비트 수가 p 개 이상이면 교차지점 이전의 1값을 가진 비트중 임의 선정된 비트의 값을 0으로 조정하여 1값을 가진 비트 수를 p 개로 조정한다. 이와 같이 교차 및 보수의 과정을 거쳐 생성된 두 자식염색체를 해당 부모염색체와 대체(replacement)하여 새로운 해집단을 생성하면 부모염색체의 유전 정보를 보존하면서 건립할 설비수가 p 개라는 제약조건을 만족할 수 있다.



<그림 2> 일점교차

3.1.6 돌연변이(Mutation)

돌연변이는 의도적으로 부모염색체에 없는 형질을 갖게 하여 염색체를 재생산하는 과정으로, 국지 최적해(local optimal solution)에 빠지거나 열등한 개체집단으로 수렴하는 것을 방지한다. 본 연구에서는 단순돌연변이(simple-mutation)를 적용하여 순차적으로 염색체의 비트마다 $U[0, 1]$ 범위의 난수를 발생시켜 미리 정해진 돌연변이율(mutation rate, P_m)보다 작은 값을 가지는 비트를 반전한다. 이때, 미리 정한 총 k 개의 비트를 $k/2$ 개는 0을 1로, $k/2$ 개는 1을 0으로 반전한다.

3.1.7 변동 돌연변이(Exchange Mutation)

일반적인 GA의 경우 해의 집단을 운용하므로 전역 탐색 능력은 뛰어나지만 국지해에 도달했을 경우 이를 벗어나기 위해 상대적으로 아주 작은 돌연변이에 의존할 수밖에 없어 국지해 탈출능력이 부족하다[7]. 따라서 본 연구에서는 일정 세대수가 지나도 해의 개선이 없다면 단계적으로 돌연변이

율을 높여 국지해를 벗어날 확률을 높여주는 변동 돌연변이를 적용한다.

3.1.8 종료 조건(Termination Condition)

전체 세대수 N 의 10%가 진행되어도 해의 개선이 없으면 P_m 을 0.01씩 상향 조정하도록 설정하였다. P_m 이 0.05가된 상태에서도 $0.1N$ 세대 동안 해의 개선이 없으면 해가 수렴한 것으로 판단하여 N 세대 전이라 하더라도 알고리즘을 종료시킨다.

3.2 축소실험

축소실험에서는 문제의 최적해를 구하여 유전자 알고리즘에 의해 도출된 결과치와 비교하여 유전자 알고리즘의 정확도(accuracy)를 검증한다. 수요지 수 50개, 설비후보지 수 20개, 건립할 설비 수는 10개로하여 100×100 2차원 평면상에 수요지와 설비후보지 좌표를 임의로 생성하여 실험하였다. 실험 도구로 행렬연산에 유용한 MATLAB v6.5를 사용하여 50개 수요지 인구에 대한 안정상태확률을 구하고 ILOG Cplex(OPL-STUDIO)를 통해 최대커버가능 인구의 최적값을 산출했다. GA는 Pentium IV(3.0GHz, 512M RAM) 환경에서 Visual C++를 활용하여 구현하였다.

<표 1> 축소실험 조건

구 분	내 용
초기 수요지별 인구수	(500, 1000) 구간에서 임의 생성
수요지별 유동인구수	(5, 20) 구간에서 임의 생성
커버가능 거리	30
수요지 좌표	[1, 100] 구간에서 임의 생성
설비후보지 좌표	[20, 80] 구간에서 임의 생성

<표 1>은 실험조건을 나타내는 것으로 초기 수요지별 인구는(500, 1000) 구간에서, 수요지별 유동인구는(5, 20) 구간에서 임의 생성하였고 특정 수

<표 2> 수요지 좌표 및 인구

구 분	수요지 좌표		초기 인구 (a_i)	안정상태 확률 (π_i)	안정상태 인구 ($A * \pi_i$)
	x	y			
1	45	28	869	0.0182	713
2	75	28	833	0.0223	873
3	26	10	861	0.0189	740
4	33	79	804	0.0137	536
5	24	49	572	0.0288	1,128
6	35	5	536	0.0185	724
7	21	87	735	0.026	1,018
8	76	93	584	0.024	940
9	55	9	866	0.0176	689
10	42	96	784	0.0257	1,006
11	92	62	762	0.0157	615
12	16	49	514	0.0153	599
13	99	14	522	0.0215	842
14	35	55	773	0.0175	685
15	54	41	762	0.0265	1,038
16	83	68	623	0.0263	1,030
17	100	35	870	0.017	666
18	42	70	913	0.0224	877
19	43	55	801	0.0251	983
20	55	43	933	0.0261	1,022
21	24	62	841	0.0257	1,006
22	68	89	696	0.0133	521
23	31	30	677	0.0171	669
24	53	23	714	0.014	548
25	37	88	747	0.0218	854
26	20	69	909	0.0173	677
27	62	78	691	0.0198	775
28	81	21	755	0.0222	869
29	8	7	781	0.0154	603
30	39	47	852	0.021	822
31	12	18	935	0.0144	564
32	72	54	792	0.0275	1,077
33	22	47	601	0.0166	650
34	75	40	954	0.0228	893
35	75	10	794	0.0156	611
36	72	3	974	0.0163	638
37	41	28	953	0.0253	991
38	80	70	951	0.0243	951
39	74	28	632	0.0149	583
40	44	95	606	0.018	705
41	65	35	937	0.0214	838
42	19	9	747	0.0187	732
43	96	55	853	0.0147	576
44	97	23	791	0.0157	615
45	40	29	756	0.016	626
46	15	52	912	0.0216	845
47	56	91	893	0.0221	865
48	45	70	677	0.0156	610
49	76	70	923	0.0235	920
50	16	23	891	0.0203	794
합계	-	-	39,152	1	39,152

요지*i*에서의 유출인구가 많아 인구이동 후 수요지 *i*에서의 잔류인구가 음이 되는 경우는 발생하지 않도록 설정하였다. 커버가능 거리는 30으로 설정하였으며 수요지 좌표는 [1, 100] 구간에서, 설비 후보지 좌표는 [20, 80] 구간에서 임의 생성하였다.

<표 2>는 실험조건에 따라 임의 생성시킨 1~50번까지의 수요지 좌표 및 인구수를 나타낸다. 초기 인구 a_i 및 수요지별 유동인구를 임의 생성한 후, 각 수요지에 대한 안정상태확률 π_i 를 계산하였다. 시스템 내 전체 초기 인구 A^* 는 39,152명으로 산출되었고, A^* 에 각 수요지의 안정상태확률을 반영하여 각 수요지에서의 안정상태 인구 $A^*\pi_i$ 를 산출하였다. 이 때, 수요지별 안정상태 인구는 안정상태에서 각 수요지가 인구를 유인하는 강도로 해당 수요지의 인구 흡입력을 반영한 수치이다.

<표 3>은 1~20번까지의 설비 후보지 좌표, <표 4>는 GA 적용에 있어서의 유전 파라미터를 나타낸다. 해집단의 크기는 30, 염색체의 크기는 설비 후보지 수와 동일한 20, 교차율 P_c 는 0.8, 돌연변이율 P_m 은 0.01~0.05로 적용하였다. 종료 세대수 N 은 1,000세대로 설정하였으나 초기에 P_m 이 0.01부터 시작하여 100세대가 지나도 해의 개선이 없으면 0.01단위씩 증가하고 0.05가 된 상태에서 100세대 동안 해 개선이 없어도 알고리즘을 종료하도록 설정하였다.

<표 3> 설비 후보지 좌표

구분	수요지 좌표		구분	수요지 좌표	
	x	y		x	y
1	23	48	11	23	37
2	64	65	12	78	40
3	69	33	13	59	42
4	48	72	14	42	40
5	70	45	15	33	33
6	48	41	16	45	57
7	35	68	17	34	61
8	53	52	18	55	56
9	58	25	19	25	23
10	63	35	20	29	35

<표 4> 축소실험시 유전 파라미터

구분	값
해집단 크기	30
염색체 크기	20
교차율(P_c)	0.8
돌연변이율(P_m)	0.01~0.05
종료 세대수(N)	1,000

축소실험의 결과는 <표 5>와 같다. Cplex로 산출된 최적해(최대 커버가능 인구)는 초기인구 고려시 38,630명, 안정상태 인구 고려시 38,310명으로 도출되었다. 이는 전체 인구와 수요지, 설비 후보지의 좌표는 동일하나 수요지별 인구수가 변동되어 결과적으로 상이한 시스템이 고려되었기 때문이다. 즉, 기존의 모형을 적용할 경우 최대 커버가능 인구를 38,630명으로 하여 13번 후보지를 포함한 2~20번까지 10개의 후보지에 설비를 건립하는 것이 최상의 정책이지만 유동인구를 고려한 본 모형에서는 안정상태에서 인구 유인강도가 적용되어 변경된 수요지 인구가 반영된 38,310명이 최적해가 되고 설비 건립대상 후보지도 11번이 13번을 대체하게 된다.

또한 GA를 이용한 해법의 타당성 검증을 위해 축소 실험에서의 최적해와 GA를 통해 산출된 근사 최적해를 비교하였다. 해의 정확도(accuracy)는 Cplex를 통해 산출된 값을 100%로 설정했을 때 GA로 산출된 값의 비율로 식 (19)와 같다.

$$Accuracy (\%) = \frac{GA \text{ 산출값}}{Cplex \text{ 산출값}} \times 100 \quad (19)$$

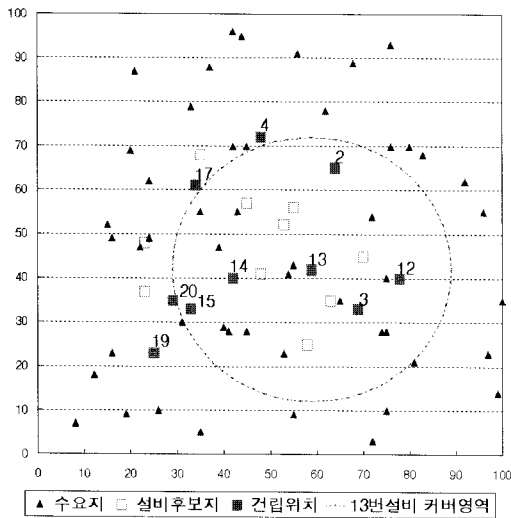
초기인구를 대상으로 한 실험에서는 GA 산출값의 정확도가 98.5%, 안정상태 인구 고려 시에는 97.5%로 계산되어 두 경우 모두 근사 최적해가 오차범위 2.5% 내에서 최적해에 근사하였다.

<그림 3>은 초기인구를 고려한 시스템에서의 수요지, 설비 후보지, 그리고 건립위치 좌표를 2차

<표 5> 축소실험 결과

구분	방법	최대커버 인구(명)	설비건립 위치	정확도 (%)	계산시간 (sec)
초기인구 고려시	Cplex	38,630	2, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20	100	0.93
	GA	38,046	1, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 17, 18	98.5	1미만
안정상태 인구 고려시	Cplex	38,310	2, 3, 4, 11, 12, 14, 15, 17, 19, 20	100	0.88
	GA	37,370	2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 16, 18	97.5	1미만

원 평면상에 나타낸 것이다. 삼각형(▲)은 50개의 수요지, 사각형(□)은 20개의 설비 후보지, 노드번호가 표시된 사각형(■)은 설비 후보지중에서 선정된 10개의 설비 건립위치를 각각 의미한다. 점선으로 표시된 원은 13번 노드에 설치된 설비의 커버영역을 나타낸다.

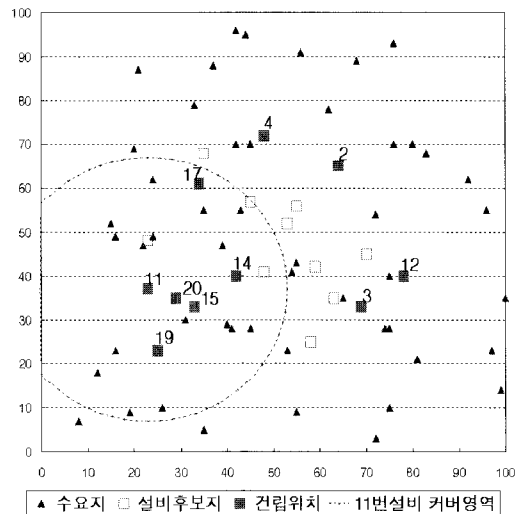


<그림 3> 초기인구를 고려한 설비위치

<그림 4>는 안정상태인구를 고려한 시스템에서의 수요지 및 설비 위치로 <그림 3>의 13번 설비를 대체하여 11번 설비가 건립대상으로 선정되었다.

축소실험에서는 50개 수요지, 20개 설비 후보지만을 고려하여 Cplex를 통해 최적값을 도출하였다. 그러나 NP-hard 문제인 MCLP를 대규모 실제문제에 적용할 경우 최적해를 찾는 것이 사실상 불가

능하므로 메타휴리스틱 기법의 적용이 필요하다. 따라서 확대실험에서 GA를 이용하여 대규모 문제에서의 근사해 도출에 대해 다룬다.



<그림 4> 안정상태인구를 고려한 설비위치

3.3 확대실험

확대실험에서는 문제 크기를 확장하여 수요지 노드를 500개, 설비후보지 노드를 100개, 건립할 설비 수는 20개로 각각 설정하였다. 이 때 세부 실험조건은 <표 6>과 같다.

임의 생성한 초기 인구의 합 A^* 는 3,801,886명이며 안정상태확률이 1이므로 안정상태에서의 전체 인구도 이 값과 동일하다.

확대실험시 유전 파라미터는 <표 7>과 같다. 해

집단의 크기는 50, 염색체의 크기는 설비후보지 수와 동일한 100을 적용하였고, 나머지 조건은 축소 실험과 동일하다.

<표 6> 확대실험 조건

구 분	내 용
초기 수요지별 인구수	(5,000, 10,000)구간 임의 생성
수요지별 유동인구수	(5, 20)구간 임의 생성
커버가능 거리	25
수요지 좌표	[1, 100]구간 임의 생성
설비후보지 좌표	[20, 80]구간 임의 생성

<표 7> 확대실험시 유전 파라미터

구 분	값
해집단 크기	50
염색체 크기	100
교차율(P_c)	0.8
돌연변이율(P_m)	0.01~0.05
종료 세대수(N)	1,000

확대실험의 결과는 <표 8>과 같다.

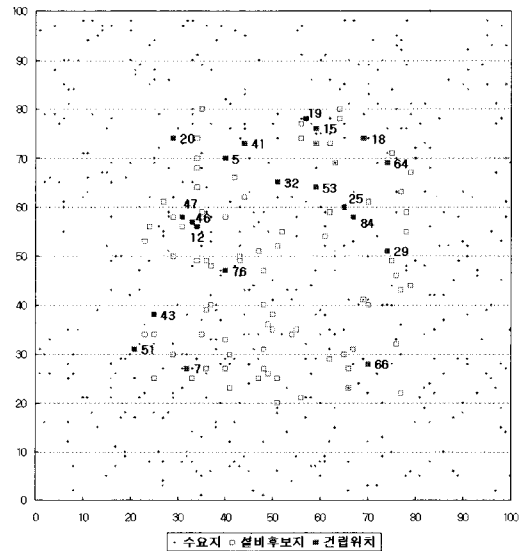
<표 8> 확대실험 결과

구 분	커버가능 인구(명)	설비건설 위치	계산 시간
초기인구 고려시	3,570,177	5, 7, 12, 15, 18, 19, 20, 25, 29, 32, 41, 43, 46, 47, 51, 53, 64, 66, 76, 84	8초
안정상태 인구 고려시	3,583,683	10, 11, 12, 13, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 31, 32, 40, 43, 50, 66, 73, 82, 84	7초

<표 8>에서 커버가능 인구는 초기인구를 고려한 실험에서 3,570,177명, 안정상태인구를 적용한

실험에서 3,583,683명으로 산출되었다. 이는 축소 실험에서 설명한 바와 같이 수요지와 설비 후보지의 좌표는 동일하나 수요지 인구가 안정상태에서 변동되어 상이한 시스템이 되었기 때문이다.

<그림 5>는 초기인구를 고려한 설비위치를 나타낸다. 이는 기존 MCLP에 대해 GA로 도출한 설비건설 정책으로 <표 8>의 실험 결과에서와 같이 5번부터 84번 노드까지 총 20개의 선택된 후보지에 설비가 건립된다.

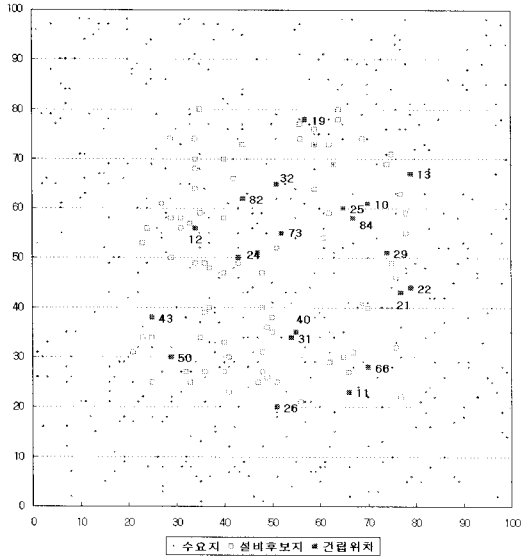


<그림 5> 초기인구를 고려한 설비위치

<그림 6>은 <그림 5>와 동일한 좌표 공간 내에서 안정상태인구를 고려한 실험에서의 설비건설 위치 변화를 나타낸다. <그림 5>에서의 설비건설 위치는 유동인구를 고려한 확률적 MCLP의 결과를 나타내는 <그림 6>에서 <표 8>에서와 같이 10번부터 84번 노드까지 총 20개의 후보지로 변경된다. 12, 19, 25, 29, 32, 43, 66, 84번 후보지에는 동일하게 설비를 건립하되 5, 7, 15, 18, 20, 41, 46, 47, 51, 53, 64, 76번 후보지가 10, 11, 13, 21, 22, 24, 26, 31, 40, 50, 73, 82번 후보지로 대체된다.

결국, 현재의 수요지 인구분포만을 고려하여 설비위치를 정한다면 <그림 5>에 표시된 위치에 설

비를 건립하는 것이 대안이라 할 수 있겠으나 확률적으로 계산된 시스템 내 수요지간의 인구이동 흐름을 반영한 미래의 예상 인구수를 고려하여 설비 위치를 정한다면 <그림 6>의 위치에 설비를 건립하는 것이 합리적이다.



<그림 6> 안정상태인구를 고려한 설비위치

4. 결 론

본 연구에서는 고전적 MCLP에 유동인구를 고려하여 각 수요지별 안정상태에서의 인구 유인강도를 적용한 확률적 MCLP에 대해 다루었다. 유동인구를 고려한 MCLP에 대한 수리모형을 수립하였고 축소실험에서 Cplex를 이용하여 최적해 산출 후 GA로 계산된 근사 최적해와 비교하여 GA의 정확도를 검증하였으며 오차범위 2.5% 내에서 최적해에 근사함을 확인하였다. 확대실험에서도 합리적 시간 내에 근사 최적해를 산출하였으며 고전적 문제에서의 설비건립 위치를 도출하여 수요지 인구 유인 강도가 반영된 본 모형에서의 설비건립 위치와 비교하였다.

향후에는 본 모형에 설비의 고정비와 운영비 등 예산을 추가로 고려한 예산제약 하 최대 지역커버

문제에 대한 연구가 필요하며, GA 외에 PSO(particle swarm optimization), SA(Simulated Annealing), TS(tabu search) 등의 메타휴리스틱 기법을 적용하여 GA와 그 효율성을 비교하는 연구도 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 권창모, 이영훈, “비용제약하 일반화된 최대지역커버문제에 대한 계층적 입지선정 연구”, 「대한산업공학회 추계학술대회」, 2005.
- [2] 김근영, 송철호, 김성일, “수도권지역의 최대수용인구 입지이론에 의한 소방서 입지선정”, 「대한국토·도시계획학회지」, 제38권, 제3호(2003), pp.317-324.
- [3] 홍성학, 이병기, 이영훈, “비용제약 조건하에서의 최대지역커버문제에 관한 연구”, 「한국경영과학회/대한산업공학회 추계공동학술대회」, 2003.
- [4] 홍성학, 이영훈, “비용제약하에서 서비스 수준을 최대화하는 설비입지선정에 관한 연구”, 「대한산업공학회지」, 제30권, 제2호(2004), pp.93-106.
- [5] 황준하, “휴리스틱 탐색기법과 정수계획법의 결합에 의한 승무일정계획의 최적화”, 박사 학위논문, 부산대학교, 2002.
- [6] Beasley, J.E. and P.C. Chu, “A Genetic Algorithm for the Set Covering Problem,” *EJOR*, Vol.94(1996), pp.392-404.
- [7] Christofides, N., A. Mingozzi, and P. Toth, “The vehicle routing problem,” *Combinatorial Optimization, Sandi(Eds.)*, Wiley, Chichester, (1979), pp.315-338.
- [8] Church, R.L. and C.S. Revelle, “The Maximal Covering Location Problem,” *Papers of the Regional Science Association*, Vol.32(1974), pp.101-118.
- [9] Daskin M.S., “A maximal expected covering location model : Formulaion properties and heuristic solution,” *Transportation Science*,

- Vol.17(1983), pp.48-69.
- [10] Daskin M.S., "Application of an expected covering location model to emergency medical service system design," *Decision Sciences*, Vol.13(1982), pp.416-439.
- [11] Downs, B.T. and J.D. Camm, "An Exact Algorithm for the Maximal Covering Problem," *Naval Research Logistics*, Vol.43(1996), pp. 435-461.
- [12] Galvao, R. and C. Revelle, "A comparison of lagrangian and surrogate relaxation for the maximal covering location problem," *EJOR*, Vol.124(2000), pp.377-389.
- [13] Galvao, R. and C. Revelle, "A lagrangian Heuristic for the Maximal Covering Location Problem," *EJOR*, Vol.88(1996), pp.114-123.
- [14] Garey M.R. and D.S. Johnson, *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, San Francisco, 1979.
- [15] Hiller, F.S. and G.J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill, New York, 2001.
- [16] Revell, C., R. Church, and D. Schilling, "Application of the location set covering problem," *Geographical Analysis*, Vol.8(1976), pp.65-76.
- [17] Shilling, D.A., C. Revelle, J. Cohon, and D.J. Elzinga, "Some models for fire protection locational decisions," *EJOR*, Vol.5(1980), pp.1-7.