

포병화력 생존성지원을 위한 진지구축경로문제 연구

문정현 · 이상현[†]

국방대학교 운영분석학과

Study on Vehicle Routing Problem of Artillery Position Construction for Survivability Support

Jung-Hyun Moon · Sang-Heon Lee

Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul, 122-875

In this paper, we deal with the vehicle routing problem that could establish operational plan of military engineer for survivability support of artillery position construction. We propose VRPTW(vehicle routing problem with time-window) model of special form that considered service level to reflect the characteristics of military operations rather than the logic of economic efficiencies in the objective function. Furthermore we suggest modified particle swarm optimization algorithm for service based vehicle routing problem solution that can be possible to search in complicated and uncertain area and control relation softly between global and local search.

Keywords: Artillery Position Construction, Vehicle Routing Problem, Particle Swarm Optimization

1. 서론

첨단 과학기술과 정보통신기술, 정밀타격 기술 등의 군사과학기술 발달로 인하여 미래전쟁은 다차원, 정밀작전, 비선형 분산작전, 동시 및 통합작전 등으로 요약될 수 있다. 북한은 포병, 공군, 장거리 유도무기 등을 이용한 대량 화력전과 특수작전부대의 비정규전 등 동시성과 통합성을 유지하여 동시전투로 기습공격을 실시할 것으로 예상된다. 이러한 위협에 따라 성공적인 전투를 위해서는 화력, 기동 그리고 방호 사이에서 균형을 적절하게 유지하는 것이 관건이다(야전교범 34-1, 2008). 특히, 화력분야는 원거리에서 적의 지휘 및 타격수단 등을 집중적으로 제압하여 야 전투부대의 기동여건을 보장하는 것이 승리에 이르는 초석이라 할 수 있다. 즉, 화력전에서의 승패가 전장의 결과를 좌우한다고 할 수 있다. 이러한 포병화력의 특징으로 정밀타격전, 대량 화력전을 위한 타격수단의 정밀성 및 집중성 뿐만 아니라 타격을 위한 표적획득수단의 향상과 적의 대 화력전에 대비한 생존성 보장이 중요시 된다. 최근 북한군의 연평도 포격도발사건은 이러한 포병화력의 생존성 보장이 전장에 미치는 영향의 막중함을 보여주고 있는 대표적인

사례이다.

적의 대 화력전으로부터 생존성을 유지하기 위해서는 진지변환이 매우 중요하다. 포병부대의 빈번한 진지변환은 원활한 화력지원 임무수행에 제한요소가 될 수 있으나, 적의 공격으로부터 아군의 생존성을 보장받기 위해서 신속한 사격 및 진지변환을 실시할 수 있어야 한다. 적의 대포병 사격은 포병부대의 가장 큰 위협이며, 이에 대응한 포병진지 구축은 생존대책의 가장 중요한 요소이다. 포병부대의 생존성을 증대시키기 위해서는 적절한 소산 및 진지변환, 신속한 포상구축과 견고한 사격지휘소 등이 구비되어야 하며 이를 위해서는 신속한 토공작업이 가능하도록 공병부대의 적시적인 근접지원을 요구한다.

제한된 시간 내에 진지구축 소요를 충족하기 위해 지원능력이 초과되는 현상이 발생하여 원활한 생존지원 임무수행에 현실적으로 제한되고 있어 작전계획 수립간 최대효과를 달성하기 위한 판단이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 효과적인 포병화력 생존성지원을 위해 제한된 시간 및 지원능력 범위 내에서 최대한의 포병진지 구축 및 진지의 방호강도 달성을 위해 특수한 형태의 차량경로문제로 접근한다.

차량경로문제의 보편적인 연구는 수요지 위치와 수요량, 운

[†] 연락저자 : 이상현 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과, Tel : 02-300-2374, Fax : 02-309-6233

E-mail : leesangh@kndu.ac.kr

2011년 1월 24일 접수; 2011년 5월 27일 게재 확정.

송수단에 대한 정보 등을 인지하고 있다는 가정 하에 차량의 적재용량 제약조건하에서 운행거리 및 운행시간 등 차원(dimension)의 최소 비용으로 모든 고객 수요를 만족시키는 문제이다. 그러나 본 연구는 서비스 수준(service level)을 고려한 차량 경로문제로 접근한다.

본 문제를 해결하기 위한 알고리즘 해법은 Kennedy and Eberhart (1995)에 의해 제안된 PSO(particle swarm optimization) 기법을 변형 적용한 mPSO(modified PSO) 기법으로 VRP 문제에 적용된 Chen *et al.*(2006), Jin and Voratas(2008)와 차별하여 경로를 생성하고 개선하는 모든 기법에 PSO를 적용하는 방법을 제안하고, TSP 문제에 적용된 Pang *et al.*(2004)과는 유사한 형태로 particle의 행렬 값을 인코딩하지만, 속도와 위치 행렬을 하나의 전이행렬로 통합하여 particle의 탐색과정을 표현하며 탐색점을 확률적으로 변경시켜가는 PSO의 확률 최적화 알고리즘 특성을 반영하는 방법을 제안하여 기존 타 연구의 한계를 개선하도록 한다. 본 연구의 구성은 제 2장에서 문제 정의와 수리모형을 제시하고 제 3장에서 문제 해결을 위해 적용된 발전적 알고리즘을 설명한다. 제 4장에서 제시된 모형을 실험을 통해 분석하고 마지막으로 제 5장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 문제 정의 및 수리모형

2.1 문제 정의

본 연구에서 구성하고자 하는 문제는 전시 진지구축 개념을 적용한 차량경로문제로 전시 특수성을 반영한 개념을 일반적인 서비스 기반 차량 경로문제로 재 정의하고자 한다. 차고지(depot)는 진지구축을 지원하기 위해 장비반을 편성하고 있는 공병부대 위치로 서비스 기반 경로문제에서 서비스 센터로 정의된다. 노드는 계획된 진지위치로 고객을 말하며, 이때 각 진지는 포병 화력의 구경/형태별로 상이하고, 구축 위치의 지형 및 토질여건 등이 상이하어 동일 종류의 진지라도 설치지역에 따라 구축시간이 다르다. 차량은 진지구축 장비반으로 각 반별로 2~4종의 장비로 조합 편성되어 장비반별 구축 능력 즉, 차량별 동일 고객에 대한 서비스 시간이 상이하다. 서비스 시간은 진지구축시간으로, 서비스 수준은 진지 방호수준으로 표현되며, 진지방호수준은 현재 군에서 실시하고 있는 군단급 FTX(Field Training Exercise), 호국훈련 등 대부대 훈련 평가기준 및 위게임 모의논리 분석서를 기준으로 진지구축율에 따라 <Table 1>과 같이 구분한다. 이는 동일한 고객에 대해서 차량의 능력에 따라 그 고객에 대한 서비스 소요시간이 다를 경우 동일한 시간으로 서비스를 실시하여도 서비스 완료율이 다르게 적용된다.

상기 열거한 특징들은 군사작전의 특성을 반영하는 것으로 비용을 고려하는 경제적 논리보다는 작전 요구시간 내에 최대 전투능력을 발휘하도록 적용하는 것이다. 즉, 작전 요구시간에 임무를 완수하지 못하더라도 최대의 작전효과를 기대하도록 작전계획을 수립하는 문제로 본 연구의 목적함수는 진지방

호수준의 최대화로 차량경로문제로 대비하였을 경우 서비스 만족수준(service satisfaction level)의 최대화로 적용한다.

본 논문이 기존 연구와의 상이한 점으로 첫째, 물류배송이 아닌 무형의 서비스 제공 문제이다. 따라서 차량적재용량은 고려되지 않고 고객에 대한 서비스 시간 및 서비스 수준이 반영된다. 둘째는 시간제약의 차이점이다. 각 고객별 요구되는 서비스 완료시간이 준수되어야 하는 hard time-window와 유사한 유형이지만 마감시간(deadline)을 미준수할 경우 서비스 미완료 상태에서 서비스가 종료되고 현 서비스 수준을 측정하여 목적함수에 반영되는 형태로 마감시간 이후 서비스가 완료될 때까지 벌칙(penalty)을 부여하면서 서비스를 계속 실시하는 soft time-window와 중간 형태의 특징적인 개념을 적용한다.

Table 1. 진지구축율에 따른 방호수준 적용기준

구 분	진지구축율(서비스 완료율, %)					
	35미만	35~40	41~64	65~70	71~99	100
방호수준 (서비스 수준)	0	1	2	3	4	5

이러한 차량경로문제의 모형을 구성하는 데 필요한 가정 사항은 다음과 같다.

- 전체 네트워크 상에 다수 고객(node)과 1개의 서비스 센터(depot)가 존재하고, 그 위치는 사전에 결정되어 알고 있다.
- 서비스 센터에는 서비스 제공능력이 상이한 차량을 보유하고 있다.
- 차량의 운행속도는 전 차종 동일하고, 이동시간은 유클리어 내적을 통해 계산한 값을 사용한다.
- 차량은 서비스만 제공하여 적재 용량에 대한 제약은 없다.
- 모든 차량의 출발 및 복귀는 depot에서만 이루어진다.
- 차량의 고객 방문은 1회까지만 허용한다.
- 한 고객의 서비스는 한 대의 차량에 의해서만 충족되어진다.
- 모든 고객의 서비스 소요는 확정적이며 알려져 있어 각 고객에 대한 차량별 서비스 소요시간 및 고객의 서비스 완료 요구시간(deadline)을 알고 있다.
- 고객에 대한 서비스가 100% 완료되면 서비스 수준은 5, 71~99% 완료되면 서비스 수준은 4, 65~70% 완료되면 서비스 수준은 3, 41~64% 완료되면 서비스 수준은 2, 35~40% 완료되면 서비스 수준을 1로 판단하고, 35% 미만은 서비스 수준을 0으로 설정한다.

2.2 수리모형

앞에서 정의한 모형과 가정 사항을 수리적인 모형으로 구성하기 위해 필요한 변수들을 정의하고 모형을 수립하며 제약식에 대해 설명한다.

<Notation>

- N : depot 및 고객을 포함한 모든 지점의 집합, $i \in N = \{0, 1, \dots, n\}$, $i = 0$: depot(서비스 센터)를 의미
- V : 모든 차량 집합, $k \in V = \{1, \dots, v\}$
- t_{ij} : 지점 i 에서 j 까지의 이동시간, $i, j \in N$
- d_{ik} : 고객 i 에서 차량 k 에 의한 서비스 소요(계획)시간, $i \in N \setminus \{0\}, k \in V$
- l_i : 고객 i 의 서비스 완료 요구시간(deadline), $i \in N \setminus \{0\}$
- e_{upper_m}, e_{lower_m} : 서비스 완료율을 나타내는 상한(upper) 및 하한(lower) 계수(coefficient), $m = 1, 2, 3, 4$
- M : 매우 큰 숫자 상수(big_M)

<Decision Variable>

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{지점 } i \text{에서 } j \text{까지 차량 } k \text{가 잇따라 이동시,} \\ & i \neq j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_{ijk}^0 = \begin{cases} 1, & \text{지점 } i \text{에서 } j \text{까지 차량 } k \text{가 잇따라 이동하여,} \\ & \text{서비스 소요시간}(d_{jk}) \text{을 } 100\% \text{ 만족시, } i \neq j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_{ijk}^m = \begin{cases} 1, & \text{지점 } i \text{에서 } j \text{까지 차량 } k \text{가 잇따라 이동하여,} \\ & d_{jk}e_{lower_m} \sim d_{jk}e_{upper_m} \text{ 만큼 만족시,} \\ & i \neq j, m = 1, 2, 3, 4 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- s_{ik} : 고객 i 에서 차량 k 에 의한 실제 서비스 시간, $i \in N \setminus \{0\}, k \in V$
- a_{ik} : 지점 i 에 차량 k 의 도착 시간, $i \in N, k \in V$
- y_{ik} : 고객 i 에서 차량 k 에 의한 서비스 수준(level), $i \in N \setminus \{0\}, k \in V$

$$\text{이때, } y_{ik} = \begin{cases} 5, & \text{서비스 소요시간}(d_{ik}) \text{을 } 100\% \text{ 만족시} \\ 4, & \text{서비스 소요시간}(d_{ik}) \text{의 } 71\% (e_{lower_4}) \sim 99\% (e_{upper_4}) \text{를 만족시} \\ 3, & \text{서비스 소요시간}(d_{ik}) \text{의 } 65\% (e_{lower_3}) \sim 70\% (e_{upper_3}) \text{를 만족시} \\ 2, & \text{서비스 소요시간}(d_{ik}) \text{의 } 41\% (e_{lower_2}) \sim 64\% (e_{upper_2}) \text{를 만족시} \\ 1, & \text{서비스 소요시간}(d_{ik}) \text{의 } 35\% (e_{lower_1}) \sim 40\% (e_{upper_1}) \text{를 만족시} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

위 수리모형의 목적식 (1)은 모든 고객에 대한 서비스 수준을 최대화하는 의미이다. 식 (2)는 모든 고객에 대한 방문은 1회까지만 허용하고, 식 (3)은 차량 흐름의 연속성을 나타낸다. 식 (4)는 모든 차량은 depot에서 1회만 나갈 수 있는 의미이고, 식 (5)는 부분경로방지 제약식(subtour elimination constraints)의 확장된 형태이다. 식 (6)은 모든 차량은 제자리에서 운행될

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{k \in V} y_{ik} \tag{1}$$

Subject to

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in V} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \tag{2}$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{3}$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \tag{4}$$

$$u_i - u_j + m \sum_{k \in V} x_{ijk} \leq m - 1 \quad \forall i, j \in N \setminus \{0\}, i \neq j, u_i, u_j : \text{arbitrary} \tag{5}$$

$$\sum_{k \in V} x_{iik} = 0 \quad \forall i \in N \tag{6}$$

$$p_{ijk}^0 + p_{ijk}^1 + p_{ijk}^2 + p_{ijk}^3 + p_{ijk}^4 = x_{ijk} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in V \tag{7}$$

$$y_{jk} = \sum_{i \in N} (p_{ijk}^1 + 2p_{ijk}^2 + 3p_{ijk}^3 + 4p_{ijk}^4 + 5p_{ijk}^0) \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{8}$$

$$s_{jk} \leq \sum_{i \in N} d_{jk} (e_{upper_1} p_{ijk}^1 + e_{upper_2} p_{ijk}^2 + e_{upper_3} p_{ijk}^3 + e_{upper_4} p_{ijk}^4 + p_{ijk}^0) \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{9}$$

$$s_{jk} \geq \sum_{i \in N} d_{jk} (e_{lower_1} p_{ijk}^1 + e_{lower_2} p_{ijk}^2 + e_{lower_3} p_{ijk}^3 + e_{lower_4} p_{ijk}^4 + p_{ijk}^0) \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{10}$$

$$a_{jk} - a_{ik} \geq t_{ij} + s_{ik} - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i \in N, \forall j \in N \setminus \{0\}, i \neq j, \forall k \in V \tag{11}$$

$$a_{ik} + s_{ik} \leq l_i \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{12}$$

$$x_{ijk}, p_{ijk}^m \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in V, m = 0, 1, \dots, 4 \tag{13}$$

$$y_{ik} \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{14}$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \tag{15}$$

$$a_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall k \in V \tag{16}$$

수 없는 의미이고, 식 (7)~식 (10)은 서비스 완료율에 따른 서비스 수준(level)을 계산한다. 즉, 식 (7)에서 binary 변수의 특성을 이용하여 x_{ijk} 가 0이면 서비스 수준을 나타내기 위한 변수인 $p_{ijk}^m (m=0, 1, \dots, 4)$ 는 모두 0이 되고, x_{ijk} 가 1이면 $p_{ijk}^m (m=0, 1, \dots, 4)$ 중 1개의 변수만 1이 된다. 식 (8)은 선택된 $p_{ijk}^m (m=0, 1, \dots, 4)$ 에 의해 각 고객에 대한 서비스 수준 값을 적용한다. 식 (9), 식 (10)은 각 차량에 의한 고객별 서비스 소요시간의 완료율에 따른 서비스 실시시간을 나타낸다. 식 (11)은 고객 j에 도착한 시간은 이전 고객 i에 도착한 시간, 실제 서비스 시간, 이동 시간의 합보다 커야 되는 의미이고, 식 (12)는 고객 i에 도착한 시간과 실제 서비스 시간의 합은 고객 i의 서비스 완료 요구시간(deadline)을 초과할 수 없는 제약 조건이다. 식 (13)~식 (16)은 결정변수의 조건이다. 상기 수리모형은 NP-hard 문제에 속하여 문제 규모(size)가 커지면 최적해를 구하기가 더욱 더 어려워진다.

3. mPSO 알고리즘

3.1 알고리즘 순서

본 연구에서 제안하는 mPSO(modified PSO) 알고리즘은 상위수준의 발견적 기법(meta-heuristic) 중 복잡하고 불확실한 영역에서의 탐색이 가능하고 전역탐색과 지역탐색 사이에서의 관계를 유연하게 조절하여 빠른 수렴과 탐색능력을 강화할 수 있는 PSO를 변형하여 서비스 기반 경로문제 해결을 위한 기법이다. mPSO의 순서는 크게 초기해 생성 → particle 표현 → 확률적 방법으로 근사 최적해 산출 → 평가 및 갱신으로 진행되고 <Figure 1>과 같이 도식화될 수 있다.

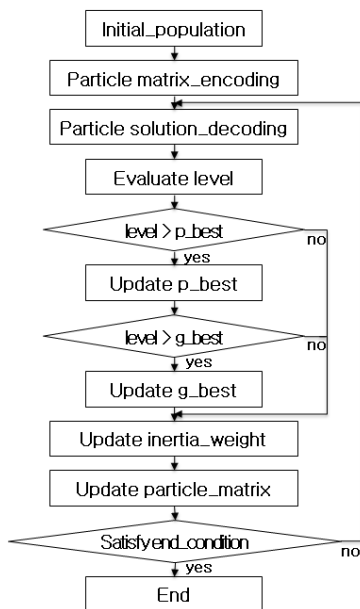


Figure 1. Flowchart

- step 1) 주어진 n개의 초기해를 생성(initialize population)한다.
- step 2) 만들어진 초기해를 이용하여 particle의 전이행렬을 구성(particle matrix encoding)하여 표현한다.
- step 3) particle의 전이행렬을 이용하여 새로운 해를 구성(particle solution decoding)한다.
- step 4) 서비스 수준을 평가(evaluate level)하여 기록한다.
- step 5) g_{best} , p_{best} 를 현 수준(level)과 비교하여 현 수준 값이 크면 g_{best} , p_{best} 를 갱신(update p_{best} , g_{best})한다.
- step 6) weight 값을 일정 비율로 감소(update inertia weight)시키고, 각 particle의 전이행렬을 갱신(update particle matrix)한다.
- step 7) 알고리즘 종료조건을 만족하였을 경우 step 8)로, 아니면 step 3)으로 이동한다.
- step 8) 알고리즘을 종료한다.

3.2 세부 알고리즘

3.2.1 초기해 생성

초기해를 생성하는 기법은 크게 임의생성(random generate)을 통한 잠재해 생성과 발견적 기법(heuristic)을 적용하여 잠재해를 구성하는 두 가지 방법이 있다. 기존의 연구에서는 해공간의 다양한 탐색을 방해하는 경향 때문에 발견적 기법을 통한 초기해 생성보다는 임의생성 기법을 흔히 사용하였지만, 이는 좋은 초기해가 우수한 최종해를 산출한다는 점을 간과하고 있으므로 본 연구에서는 확률에 의한 임의생성 기법과 우수한 해를 조기에 유도할 수 있는 발견적 기법에 의한 초기해 생성을 혼합 적용하여 각각의 장점을 동시에 가질 수 있도록 하였다.

임의생성 기법에 의한 초기해의 생성은 각 차량에서 depot 이후의 첫 번째 방문 가능한 고객을 전역공간에 골고루 분포시키고, 발견적 기법에 의해 수요지별 차량을 할당하여 효율성을 높였다. 초기해 생성 절차는 본 연구의 특성을 반영하여 각 고객의 서비스 소요시간과 서비스 완료 요구 시간이 존재하는 형태로 다음의 단계와 같다.

step 1-1) [0, 1]의 난수를 발생하여 각 차량별 첫 번째 node 선정

step 1-2) 진지구축 완료요구 시간에서 현재 시간에 이동 및 진지구축 시간을 합하여 차감한 것 중에 가장 최소 시간을 갖는 노드선택

$$Select\ node\ j\ s.t\ \min[l_j - (current_time + t_{ij} + d_{jk})]$$

step 1-1)에서 각 차량별 첫 번째 노드를 random으로 선정하는 이유는 전체 population 공간에서 각 particle이 최대한 골고루 분포되기 위함으로 복수 병렬탐색 특성을 가진 PSO 알고리즘의 핵심이라고 할 수 있다. step 1-2)에서는 널리 알려진 휴리스틱 기법 중 NNS(nearest neighborhood search) 기법과 Simon

French(1982)의 CR(critical ratio) rule의 개념을 변형한 UNNS(urgent NNS) 기법을 적용하여 인접한 각 노드의 서비스 소요 시간과 서비스 완료 요구시간을 이용하여 차량이 도착하지 않은 노드 중에서 가장 긴급한(urgent) 노드를 선정한다.

3.2.2 전이행렬 구성

각 particle에서 노드들 사이의 전이될 수 있는 확률적 관계를 행렬로 나타낸다. 본 연구에서는 하나의 depot와 n개의 노드가 존재하는 경우 (n+1)×(n+1) 행렬의 형태로 전이행렬을 구성한다. 이때 각 요소(element)는 확률적 값을 의미하므로 [0, 1] 사이의 실수 값을 부여하고, 각 행의 합은 1로 구성한다. 예를 들어 초기 경로가 <Figure 2>와 같이 1번 차량은 'depot-4-3-1-2-depot', 2번 차량은 'depot-5-6-7-8-depot'의 두 개의 경로로 표현된다고 가정한다. 네트워크 상의 모든 호(arc)는 undirected 즉, symmetric 형태로 가정함으로 노드 4에서 노드 3으로 경로가 형성되듯이 노드 3에서 노드 4로도 경로가 형성된다는 것을 가정하였다.

따라서 두 노드 사이의 경로가 형성되지 않으면 해당 요소에는 0을, 경로가 형성되면 각 요소의 확률적 값을 동일하게 부여하고 행의 합을 1로 구성하기 위해 1/(경로가 형성되는 노드의 수)를 해당 요소에 부여한다. <Figure 2>의 네트워크 초기 경로를 전이행렬로 표현하면 <Table 2>와 같이 구성되어, depot와 경로가 형성되는 노드 2, 4, 5, 8에는 각각 1/4 즉, 실수 값 0.25를 확률적 값으로 표현하고, 노드 3과 경로가 형성되는 노드 1, 4에는 각각 1/2 즉, 실수 값 0.5를 확률적 값으로 표현한다. 이러한 방법으로 각 particle의 초기 생성된 경로를 전이행렬로 표현하여 다음 단계에서 mPSO의 확률적 탐색기법의 틀을 구성한다.

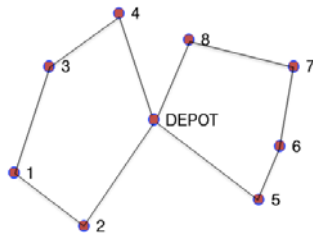


Figure 2. 경로 구성(예)

Table 2. particle의 전이행렬 구성(예)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0.25	0	0.25	0.25	0	0	0.25
1	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0
2	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0
4	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	0
5	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0
6	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0
7	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5
8	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	0

Note) 0 : depot.

3.2.3 새로운 해 구성

각 particle의 전이행렬을 이용하여 확률적으로 새로운 경로를 구성하는 단계이다. 현재 노드에서 다음 노드를 선정함에 있어서 난수를 발생하여 확률적으로 탐색하는 기법으로 한번 선정된 노드는 최초 가정 사항에 의거 재방문이 불가함으로 기 선정된 노드가 재 선택될 확률 값을 0으로 유지한다. 이때, 전이행렬의 특성상 각 행의 합은 1로 유지해야 함으로 일정한 법칙에 의거 각 요소(element)의 확률 값을 갱신하는 것이 중요하다. 이를 위한 세부절차는 다음과 같다.

step 3-1) vehicle ← 1

step 3-2) start node ← depot

step 3-3) If [start node의 행 요소 합 = 1], then [go to step 3-4]
 else if [(start node의 행 요소 합)×2>1], then [각 요소를 행 요소의 합으로 나누어 행의 합을 1로 만든 뒤, go to step 3-4]

else if [0 < (start node의 행 요소 합)×2 ≤ 1], then [미 선정 node의 요소에 일정한 값을 더하여 행의 합을 1로 만든 뒤, go to step 3-4]

else [start node의 행 요소 합 = 0], then [go to step 3-7]
 ※ depot로 이동할 확률 값에는 [0, 1]의 난수를 곱하여 확률을 낮춰줌

step 3-4) 난수 생성 후 start node의 행에서 확률적으로 next node 선정

step 3-5) next node에 해당하는 열의 모든 요소 ← 0

※ next node가 depot일 때,
 i) 다음 차량이 마지막 차량이 아니면 depot에 해당하는 열의 요소를 0으로 갱신하지 않고,
 ii) 다음 차량이 마지막 차량이면 depot에 해당하는 열의 모든 요소를 0으로 갱신

step 3-6) If [next node = depot], then [차량 변경 후 go to step 3-2]
 else [start node ← next node, go to step 3-3]

step 3-7) If [∇ element = 0], then [stop and next particle]
 else [차량 변경 후, go to step 3-2]

3.2.4 서비스 수준 평가 및 pbest, gbest 최신화

각각의 particle로부터 구성한 경로에 대한 적합도(fitness)를 평가하는 단계로서 일반적으로 목적함수 값이 적합도로 이용된다. 따라서 본 연구는 서비스 수준의 최대화문제이므로 적합도는 서비스 수준으로 평가하고 각 경로에 대한 노드별 평가 방법은 아래와 같다.

If [$l_j \geq current_time + t_{ij} + d_{jk}$], then [$level_j = 5$]
 else if [$l_j \geq current_time + t_{ij} + (0.71)d_{jk}$], then [$level_j = 4$]
 else if [$l_j \geq current_time + t_{ij} + (0.65)d_{jk}$], then [$level_j = 3$]
 else if [$l_j \geq current_time + t_{ij} + (0.41)d_{jk}$], then [$level_j = 2$]
 else if [$l_j \geq current_time + t_{ij} + (0.01)d_{jk}$], then [$level_j = 1$]
 else [$level_j = 0$ and node $j \leftarrow$ 경로에서 제외]

각 노드별 평가가 완료되면 경로 전체에 대한 서비스 수준은 노드별 수준의 합으로 식 (17)과 같이 계산한다.

$$current_level_{particle\ i} = \sum_j level_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad \forall j \in \{\text{전체 노드 집합}\} \quad (17)$$

각 particle의 현재 수준이 평가되면 이 수준을 *pbest* 및 *gbest*와 비교 후 아래와 같이 조건을 만족하면 *pbest*와 *gbest*를 갱신한다. 이때 본 연구는 최대화 문제이므로 서비스 수준이 크면 클수록 최적해에 근접함을 알 수 있다.

If [*current_level_{particle i}* > *pbest_{particle i}*], then
 [*pbest_matrix_{particle i}* = *current_level_matrix_{particle i}*]
 If [*current_level_{particle i}* > *gbest*], then
 [*gbest_matrix* = *current_level_matrix_{particle i}*]

3.2.5 전이행렬 갱신

각 particle은 다음 반복 수행때 *pbest*와 *gbest*의 정보를 반영하여 경로를 설정하기 위해 전이행렬을 식 (18)과 같이 갱신한다.

$$current_level_matrix_{particle\ i} = w \cdot current_level_matrix_{particle\ i} + w_1 \cdot pbest_matrix_{particle\ i} + w_2 \cdot gbest_matrix, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

*w*는 현재 particle의 확률을 다음 반복수행 때 얼마나 반영할 것인지를 결정하는 가중치(inertia weight)로 사용자가 설정할 수 있다. *w₁*과 *w₂*는 *w*, *w₁*, *w₂*의 합이 1이 되도록 임의의 값을 갖도록 하였다. 이때 모든 반복수행 단계에서 동일한 *w* 값을 갖지 않고, 반복수행이 진행될수록 *w*를 일정하게 감소시켜주어서 *w₁*과 *w₂*의 값을 높여주는 일반적인 방법을 사용하였다.

4. 실험 및 결과분석

본 연구에서 제안한 알고리즘은 C++언어로 구현하였고, 알

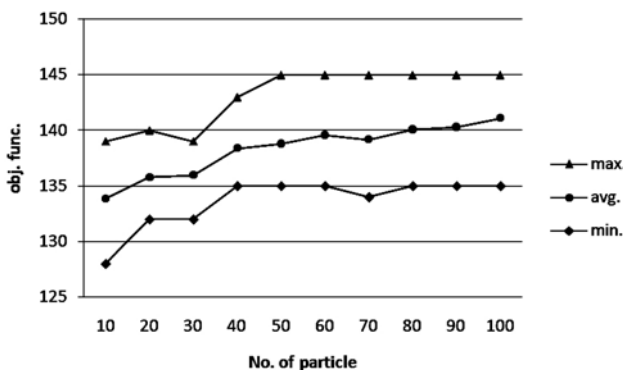


Figure 3. 실험 1 결과 : objective function(level)

고리즘의 효율적인 파라메타 적용을 위해 핵심 파라메타를 변경하면서 적정 값을 도출하며 도출된 값을 적용한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 임의예제를 생성하여 제 2장에서 제시한 수리모형을 CPLEX(Ver. 11.1)로 산출한 최적해 값과 결과를 비교한다. 이후 최초 문제 제기한 현실모형에 알고리즘을 적용하여 결과 값을 도출하여 현실 적용 가능성을 판단한다. 실험은 Microsoft Visual C++ 6.0을 이용하여 Pentium IV Core 2(2.13GHz, 2.00GB RAM) 환경에서 수행하였다.

4.1 파라메타 분석 실험

최초 파라메타 값은 기존 연구에서 일반적으로 사용하는 값 중에서 적정 수준을 택하여 적용하고 분석 범위는 <Table 3>과 같다. 기본 가정 사항은 제 2장에서 명시한 가정 사항과 동일하고, depot 수는 1이며 고객(노드) 수는 30, 차량 수는 5로 설정하며 100×100 2차원 유클리드 평면상에 위치 좌표를 일양분포(uniform distribution)에 따라 무작위로 생성하여 적용한다. 실험은 10회 반복하여 최대 값, 평균 값 및 최소 값을 비교한다.

Table 3. 주요 parameter 분석 범위

구분	최초 적용 값	분석 범위
실험 1	particle 수	50
실험 2	iteration 횟수	10~100
실험 3		50
실험 4	inertia weight	초기 0.7 ~ 종료 0.3 (일정비율로 감소)
		일정 값 고정 적용 / 초기/종료 값 변경 (일정비율로 감소 또는 증가)

실험 1에서 particle 수를 가변적으로 적용한 결과 목적 값(level)은 <Figure 3>과 같이 particle 수 50까지는 증가되는 현상을 보이고, particle 수 50부터는 변화가 둔감하고 알고리즘의 실행시간은 <Figure 4>와 같이 particle 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가되는 현상을 볼 수 있다. 따라서 최적의 particle 수는 50으로 분석되어 실험 2부터는 particle 수를 50으로 적용하여 실험한다.

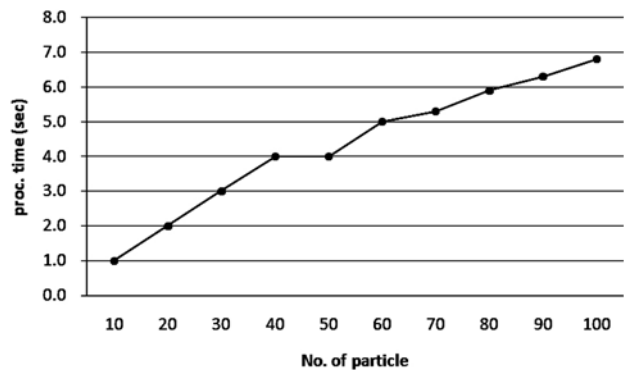


Figure 4. 실험 1 결과 : process time

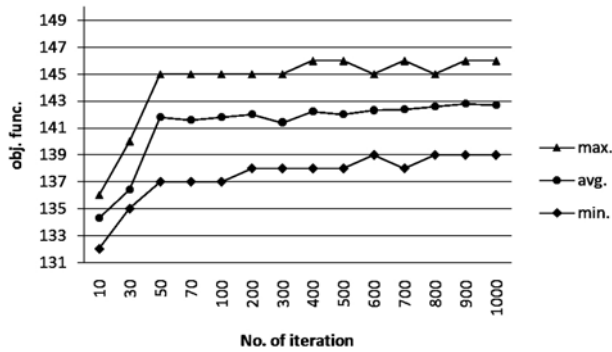


Figure 5. 실험 2 결과 : objective function(level)

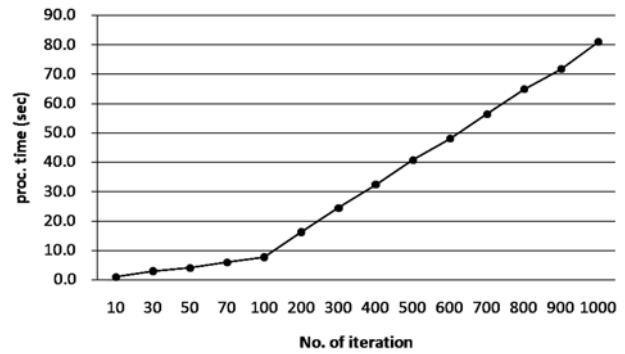


Figure 6. 실험 2 결과 : process time

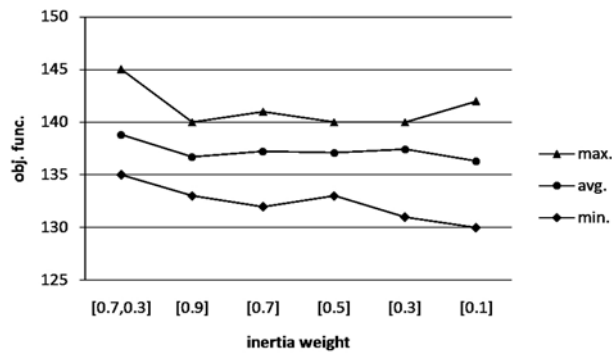


Figure 7. 실험 3 결과 : objective function(level)

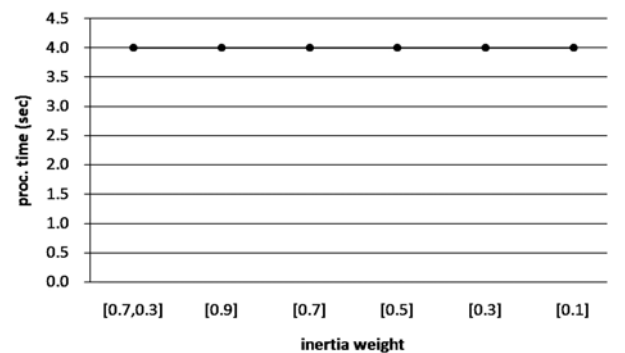


Figure 8. 실험 3 결과 : process time

실험 2에서 반복수행 횟수를 가변적으로 적용한 결과 <Figure 5>와 같이 반복수행 횟수가 증가함에 따라 목적값이 증가되는 현상을 보이지만 50회부터는 경미한 증가와 감소를 반복하며 큰 차이는 보이지 않고 있다. 실행시간은 <Figure 6>과 같이 반복수행 횟수가 증가함에 따라 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 최적의 반복수행 횟수는 목적 값과 실행시간을 고려하였을 때 전시상황을 고려하여 최소의 시간에 근사 최적해를 도출할 수 있는 50회의 반복수행 횟수가 적절한 것으로 판단된다.

실험 3에서는 가중치(inertia weight)를 기존 연구에서 일반적으로 적용하는 최초 0.7에서 일정하게 줄여 마지막 0.3을 적용하는 [0.7, 0.3]의 값과 일정한 값으로 고정하여 적용한 결과를 비교한다. 실험결과 <Figure 7>, <Figure 8>과 같이 가중치를 고정하여 적용할 때 보다 일정하게 변화시켜 적용한 경우가 더욱 우수한 해를 탐색함을 알 수 있다.

실험 4에서는 가중치를 가변적으로 적용할 때, 초기값과 종료 값을 변경하고 일정비율로 감소하는 경우와 일정하게 증가하는 경우로 구분하여 실험하였다. 실험결과 실행시간은 모두 동일한 값을 나타내고 목적 값(level)은 <Figure 9>와 같이 [0.7, 0.1]이 [0.7, 0.3]보다 평균값은 작지만 최대 값이 더 높게 도출되어 가중치는 [0.7, 0.1]이 적절한 것으로 판단된다. 종합하면 주요 파라메타의 적용 범위를 실험한 결과 particle 수는 50, 반복수행 횟수는 50, 가중치는 [0.7, 0.1]로 반복수행이 진행됨에 따라 일정한 비율로 감소하여 적용한 값이 적절한 것으로 분석되었다.

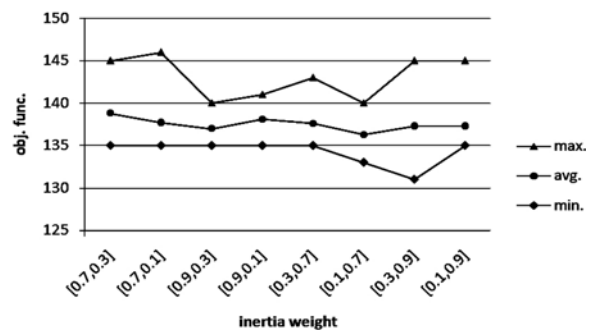


Figure 9. 실험 4 결과 : objective function(level)

4.2 알고리즘 검증 실험

시간 제약에 따른 서비스 수준설정에 관한 차량 경로문제의 비교 대상의 부재로 인하여 본 논문에서 제시한 수리모형을 CPLEX(Ver. 11.1)로 산출한 최적해 값과 비교하여 실시한다. 예제는 총 3가지로 구성하고 고객(노드)의 수는 n 으로 실험 5는 5, 실험 6은 10, 실험 7은 20을 적용하며, depot에서 보유하고 있는 차량의 수는 k 로 역시 값을 변경하며 실험한다. 기타 가정 사항 및 조건은 상기 실험과 동일하고, 파라메타 값은 상기 결과를 적용한다. 본 실험 역시 10회 반복하여 최대 값, 평균 값, 최소 값을 비교하고, CPLEX 구동결과 1시간 경과 시에는 실험을 중단하고 현재의 값을 최적해로 간주하여 사용한다. Particle 수는 50, 알고리즘 종료 조건은 반복수행 횟수 50, 초기 w 는 0.7, 종료 w 는 0.1로 적용한 결과는 <Table 4>와 같다.

Table 4. 알고리즘 검증 실험 결과

실험	노드 수	차량 수	목적함수		계산시간(sec)	
			CPLEX	mPSO	CPLEX	mPSO
5	5	1	20	max : 20 avg : 20 min : 20	3.31	4.0
6	10	2	50	max : 50 avg : 49.4 min : 48	2,081.95	4.0
7	20	3	85	max : 90 avg : 88.5 min : 86	over 1 hour	4.0

실험 5(node 5)에서는 수리모형의 CPLEX 최적해와 제안한 mPSO 알고리즘의 목적값이 동일하고, 실행시간은 큰 차이가 없고, 실험 6(node 10)에서는 mPSO 목적 값의 최대 값은 CPLEX 최적해와 동일한 반면 10회 실행한 모든 값이 동일한 최적해의 값을 갖지는 않았다. 그러나 실험 7(node 20)은 노드의 수가 증가함에 따라 CPLEX의 실행시간이 급격히 증가하고 1시간 이상 소요되어 정상적인 실험이 제한되어 최적해의 값을 도출하

지 못하여 1시간 경과시의 목적 값을 적용하였다. mPSO는 매우 짧은 실행시간 하에서 우수한 결과를 도출하였다.

4.3 현실모형 적용 실험

전 절에서 검증한 mPSO를 육군 군단급에서 포병진지구축을 위한 작전계획 수립을 위한 실 상황에 적용한다. 군단에서 각 공병대대별로 임무를 하달한다. 작전임무를 부여받은 공병대대는 예하 부대의 능력을 고려하여 필요시 진지구축을 위한 TF팀을 구성하여 임무할당으로 작전계획을 수립한다. 모형은 군사보안의 제한사항으로 유사한 형태의 모형을 임의 생성하여 구성한다. 포병부대는 작전지역 편성을 포대 단위로 통합(package)하여 편성하는 개념으로 가정하여 1개 공병대대가 평균 60개소의 통합된 진지를 구축한다. 이때 공병대대급에서 보유하고 있는 편제장비를 고려하면 통상 4~6개 팀을 구성할 수 있고, 전시 동원된 민수용 장비를 포함하면 10~12개 팀을 구성할 수 있으므로 기본 편제장비 5개 팀과 동원장비를 포함한 11개 팀으로 구분하여 적용하여 비교한다.

mPSO를 이용하여 가상의 현실모형에 적용한 결과는 <Table 5>와 같다. 본 연구의 방법론 및 결과는 평시 작전계획 수립뿐만 아니라 전시 긴급임무 하달시 빠른 시간 내에 최대의 작전

Table 5. 현실모형 실험 결과

구 분	총 방호수준 (proc. time)	반별 경로(진지 방호수준)
실험 8 (편제장비만 고려시) No. depot : 1 No. node : 60 No. veh. : 5	max : 274 avg : 261.6 min : 251 (4.0sec)	1반 : 0 → 37(5) → 22(5) → 36(5) → 26(5) → 38(5) → 42(5) → 43(5) → 28(5) → 45(5) → 0
		2반 : 0 → 10(5) → 5(5) → 4(5) → 25(5) → 3(3) → 35(5) → 34(5) → 31(5) → 49(5) → 17(5) → 60(5) → 57(5) → 0
		3반 : 0 → 13(5) → 12(5) → 24(5) → 20(5) → 18(5) → 33(5) → 32(5) → 16(5) → 54(5) → 23(5) → 46(5) → 44(5) → 56(5) → 55(5) → 53(5) → 52(5) → 51(5) → 50(1) → 0
		4반 : 0 → 29(5) → 14(5) → 15(5) → 30(5) → 0
		5반 : 0 → 1(5) → 2(5) → 11(5) → 7(5) → 9(5) → 21(5) → 39(5) → 40(5) → 47(5) → 48(5) → 59(5) → 58(5) → 41(5) → 0
		※구축 미실시 진지 : 6, 8, 19, 27
실험 9 (민수장비 동원시) No. depot : 1 No. node : 60 No. veh. : 11	max : 300 avg : 292.8 min : 286 (4.0sec)	1반 : 0 → 15(5) → 13(5) → 12(5) → 11(5) → 0
		2반 : 0 → 41(5) → 42(5) → 3(5) → 5(5) → 4(5) → 25(5) → 29(5) → 24(5) → 0
		3반 : 0 → 35(5) → 45(5) → 32(5) → 33(5) → 16(5) → 0
		4반 : 0 → 55(5) → 53(5) → 52(5) → 51(5) → 50(5) → 49(5) → 47(5) → 48(5) → 17(5) → 0
		5반 : 0 → 1(5) → 59(5) → 60(5) → 0
		6반 : 0 → 58(5) → 31(5) → 46(5) → 54(5) → 23(5) → 0
		7반 : 0 → 10(5) → 28(5) → 43(5) → 18(5) → 22(5) → 36(5) → 38(5) → 0
		8반 : 0 → 39(5) → 40(5) → 44(5) → 30(5) → 2(5) → 56(5) → 0
		9반 : 0 → 14(5) → 9(5) → 6(5) → 27(5) → 20(5) → 0
		10반 : 0 → 21(5) → 57(5) → 7(5) → 8(5) → 19(5) → 37(5) → 0
		11반 : 0 → 26(5) → 0
※구축 미실시 진지 : 없음		

효과를 달성할 수 있고 예하부대에 대한 명확한 임무할당을 가능하게 할 수 있다고 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 전시 포병화력 진지구축을 위한 경로문제를 서비스 수준을 고려한 시간제약이 있는 차량 경로문제의 모형으로 정의하여 해법을 연구하였다. 또한, 기존의 대부분 연구들은 차량의 용량제약 하에서 비용을 최소화하는 문제를 주로 다루어 왔으나, 본 연구에서는 전시 군사작전의 특성을 반영하여 서비스를 실시함에 있어 시간제약의 특수한 형태를 적용하여 총 서비스 수준을 최대화하는 문제로 취급하였다. 또한 불확실한 영역에서의 탐색이 가능하고 전역탐색과 지역탐색 사이에서의 관계를 유연하게 조절하여 빠른 수렴과 탐색능력을 강화할 수 있는 PSO를 변형하여 기존의 속도와 위치벡터를 하나의 전이행렬로 통합하여 별도의 추가 알고리즘 없이 제안한 mPSO만을 이용하여 경로를 생성하고 개선할 수 있다는 점에서 기존 연구들과 차별성이 존재한다. 본 연구에서 제안한 mPSO를 적용함에 있어 적절한 파라메타 값을 분석하여 알고리즘의 파라메타를 적용하는 방법을 제시하고 수리모형의 CPLEX 최적해와 비교를 통한 알고리즘의 우수성을 검증하고, 또한 현실적인 군사문제에 적용하여 본 알고리즘의 활용성을 제시하였다.

현재까지 포병화력의 표적타격 계획수립에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔으나, 생존의 중요성을 인지하면서도 이를 위한 연구는 이루어지지 않고 있다. 본 연구를 계기로 생존지원 및 전투지원, 전투근무지원 분야에서의 연구가 더욱 더 활발히 진행되어 군의 각 분야에서 균형 잡힌 발전을 이루어야 할 것이다. 또한 본 연구의 기본 개념을 바탕으로 긴급한 복구지원 및 서비스 지원을 필요로 하는 민간분야에서도 응용하여 더욱 발전된 기법으로 활용할 수 있는 방안도 연구함이 바람직하다.

연구에서 제안된 mPSO 알고리즘의 효율성은 입증되었으나, 기존 PSO 문제들과의 상이함으로 인하여 발생하는 비교분석은 실시하지 않았다. 그러나 PSO에서 사용하는 다양한 파라메타를 가변적으로 적용하면서 효과적으로 설정하는 기본적인 실험을 통해 PSO의 파라메타 특성을 살펴볼 수 있는 기회였다. 향후에도 다양한 최적화분야에서 PSO를 적용하고 응용하여 PSO를 더욱 효과적으로 적용하는 방법론 등에 대한 추가 연구가 활성화 되어야 할 것이다. 또한 시간제약이 있는 서

비스 수준을 고려한 차량 경로문제에서 multi-depot 조건을 접목할 경우 기존에 일반적으로 적용하는 군집화(clustering) 방법만으로는 효과적인 전역탐색의 부족함을 인식하여 본 문제에 적용할 수 있는 군집화 기법을 연구하여 적용한다면 더욱 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Ai, T., Kachitvichyanukul, V. (2008), Particle Swarm Optimization and Two Solution Representations for Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem, *Computers and Industrial Engineering*, **56**, 380-387.
- Chen, A., Yang, G., and Wu, Z. (2006), Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problem, *Journal of Zhejiang University Science A*, **7**, 607-614.
- Daniel, N. Wilke (2005), Analysis of the Particle Swarm Optimization Algorithm, *University of Pretoria, Electronic Theses and Dissertations(ETD)*.
- Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995), A New Optimizer using Particle Swarm Theory, *Proceedings of Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science*, 39-43.
- Field Manual (2002), Field Artillery Operation, ROK Army Headquarters, 2-2.
- Field Manual (2008), Field Engineer Operation, ROK Army Headquarters, 34-1.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995), Particle Swarm Optimization, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942-1948.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (2001), *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin, R. A. (1960), Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems, *Journal of Association for Computing Machinery*, **7**, 326-329.
- Lee, S. H. and Hwang, S. H. (2009), Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Customer Restriction using Particle Swarm Optimization, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **35**, 1-10.
- Pang, W., Wang, K., Zhou, C., and Dong, L. (2004), Fuzzy Discrete Particle Swarm Optimization for Solving Traveling Salesman Problem, *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer and Information Technology(CIT'04)*, 796-800.
- Shelokar, P. S. (2007), Particle Swarm and Ant Colony Algorithms Hybridized for Improved Continuous Optimization, *Applied Mathematics and Computation*, **188**, 129-142.
- Simon French (1982), Sequencing and Scheduling : an Introduction to the Mathematics of the Job-Shop, *Ellis Horwood Limited*, 34-47.
- Yan Jiang *et al.* (2007), An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm, *Applied Mathematics and Computation*, **193**, 231-239.