

# 하수 슬러지 수거 시스템의 설계 및 운영방안에 대한 연구

최경현<sup>1</sup> · 곽호만<sup>1\*</sup> · 유영선<sup>1</sup> · 조중무<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>(주) 삼안건설기술공사

## Decision Problems for the Design and Operations of Sludge Collection System

Gyunghyun Choi<sup>1</sup> · Ho-Mahn Kwak<sup>1</sup> · Youngsun Yu<sup>1</sup> · Joongmou Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

<sup>2</sup>Sam-An Corporation

This research deals with a vehicle scheduling problem for the sludge collection strategies which might be solved via quantitative analysis and cost evaluations schemes. This problem can be modeled as a kind of capacitated vehicle routing pick-up problems. With the aim of establishing operation schedule of vehicles and analyzing the total cost under considering various assumptions and realistic restrictions of the sludge collection problem, we propose a heuristic method based on the genetic algorithm in conjunction with the sweep algorithm and the 4-opt algorithm. Finally, we present the cost effective operation schedule that can be used as the managing tool for the sludge treatment plant of the multi-purpose dam.

**Keyword:** capacitated VRP, sludge collection, sweep algorithm, genetic algorithm

### 1. 서론

깨끗하고 안전한 물의 공급과 사용 후 처리는 인간의 생존을 위한 가장 기본 조건이다. 경제성장과 도시인구 집중으로 인해 수질오염이 가속화되고 있으며, 이로부터 환경을 보호하고 공공위생을 보호하기 위한 하수 처리시설의 중요성은 더욱 높아지고 있다. 하수는 여러 단계의 침전과 정화를 거쳐 하천으로 흘러보내게 되는데, 이 과정에서 필연적으로 발생하는 부산물인 슬러지는 침전, 농축, 소화, 탈수 과정을 거쳐 부피와 무게를 감소시켜 케이크 상태로 만들어 운반과 처분을 쉽게 한다. 2004년 말 현재, 전국에는 총 21,534,745톤/일의 시설용량을 갖춘 268개소의 하수처리장과 총 83,034톤/일의 시설용량을 갖춘 마을하수도 1,153개소가 가동 중에 있으며, 하수처리시설에서는 연간 2,426,070톤의 하수슬러지가 발생되고 있다(Ministry of Environment, 2005). 특히 상수원으로 이용되고 있는 다목적댐 상류지역의 하수도 보급률이 2001년 말 현재 27%로 낮아

양질의 상수원 확보가 어려워지자 정부는 2007년까지 15개 다목적댐 상류지역의 하수도 보급률을 75.2%까지 향상시키겠다는 목표 하에 다목적댐 상류지역에 대한 하수처리장 확충사업을 추진하고 있다(Ministry of Environment, 2004).

본 연구는 이러한 사업을 추진함에 있어서 입지 선정과 설비들의 건설이 완료된 후의 운영 계획을 수립하여, 차량의 종류 및 대수, 소요 인원 등 운영 방법의 결정, 운영비용의 추산 정보를 제공하여 사업의 타당성의 근거로 활용하고자 수행되었다.

다목적댐 상류지역은 대상 지역이 넓으면서 인구밀도는 낮기 때문에, 운영의 효율화가 필수적이다. 이에 따라 시설물의 통합 활용으로 사업비를 절감하고 효율성을 제고시키고자, 소규모 하수처리장에서는 관리동과 탈수설비 설치를 생략하여 슬러지를 탱크로리 차량을 이용하여 통합처리장으로 운반하여 처리하도록 하고 있다. 하수 슬러지 수거 시스템의 운영에는 크게 슬러지의 수거, 마을 하수도 및 하수처리장의 유지보

\*연락처 : 곽호만, 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 산업공학과, Fax : 02-2296-0471, E-mail : methis@hanyang.ac.kr  
2006년 08월 접수, 1회 수정 후 2006년 12월 게재확정.

수, 수질 검사를 위한 시료채취 등이 수행되어야 한다.

슬러지 수거는 차량을 이용해 각 마을 하수도의 슬러지를 통합처리시설로 수거하는 것으로, 이를 위해서는 슬러지 수거 차량의 최적 대수의 결정과, 최소의 운영비용으로 제한된 시간동안 전체 슬러지를 수거할 수 있는 차량들의 최적 경로를 결정해야 한다. 이 때 차량의 평균 속도, 운행가능 시간 등과 같은 차량 정보와 하수처리시설간의 이동거리, 하수처리장별 수거 시간, 하수처리장에서 발생하는 슬러지 용량에 따른 필요 수거빈도 등을 고려하여 각각의 슬러지 수거 차량들의 운행경로를 결정한다.

통합처리시설과 각 하수처리장은 기본적으로 무인 운영 시스템에 의해 운영되며, 이에 대한 유지보수가 주기적으로 이루어져야 한다. 유지보수 비용을 최소화하기 위해서는 유지보수 주기, 투입되는 유지보수 인력의 수, 유지보수 작업시간, 각 하수처리시설 사이의 거리 및 비용을 고려한 유지보수 일정계획의 수립이 필요하다.

각 마을하수도와 통합처리시설은 일주일에 한 번 시료를 채취하여 수질 검사를 수행해야 하는데, 이에 따른 비용을 최소화하기 위해서는 투입되는 수질 샘플링 인력의 수, 수질검사 작업시간, 각 하수처리시설 사이의 거리를 고려한 샘플 수집 일정 및 경로가 필요하다.

슬러지 수거계획은 차량의 수거경로를 결정하는 문제로, 차량 용량 제약이 고려된 차량경로 결정문제의 한 형태로 다룰 수 있으며, 여기에 총 운행시간에 대한 제약이 추가되어 있는 형태이다. 또한 유지보수와 시료채취는 동시에 수행할 수 있기 때문에 하나의 모형으로 다룰 수 있으며, 슬러지 수거계획 문제에서 차량 용량 제약을 제외한 모형으로 표현될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 슬러지 수거계획에 대한 모델과 이에 대한 해법만을 제시한다.

본 연구는 경영과학적 기법으로 각 마을 하수도의 슬러지 수거, 유지보수 및 시료채취의 일정에 관한 전략들을 수립하고, 이러한 전략 대안들을 비교 검토하여 의사결정자가 하수 슬러지 수거 시스템을 운영하는 데 필요한 의사결정상의 기반 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2장에서는 관련 연구들을 살펴보고, 3장에서는 수리모형을 제시하며, 4장에서는 이를 풀기 위한 제안 알고리즘을 제시하며, 5장에서는 실제 사례에 대한 적용 및 분석을 제시하며, 6장에서는 결론을 제시한다.

## 2. 관련연구 고찰

차량경로 결정문제는 잘 알려진 외판원 문제(traveling salesman problem, TSP)의 확장된 형태로, 다수의 차량들이 본점에서 출발하여 고객들을 방문하여 배달 또는 수거 수요를 만족시키면서 다시 본점으로 돌아오는 최적 경로를 결정하는 문제들의 클래스이다. 이 문제들은 차량의 수, 차량의 종류, 본점

의 수, 차량용량에 대한 제약의 유무, 총 운행시간에 대한 제약의 유무, 고객주문에 대한 시간 제약의 유무 등에 따라 다양한 문제로 분류된다. 또한 운행의 목적이 고객의 주문을 본점으로 수거하는 것인가, 본점에서 고객에게 배달하는 것인가, 또는 이 두 가지 수요를 동시에 고려한 환경인가, 아니면 고객 간에 재화를 이동시키는 것인가에 따라 다양한 모형으로 분류된다.

본 연구에서 다루고 있는 환경은 각 마을 하수시설에서 발생하는 슬러지를 탈수처리시설로 수거해 와야 하는, 차량 용량 제약과 차량별 운행시간 제약이 있는 VRP 문제로 모델링될 수 있다. 이와 관련된 응용 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Sculli *et al.*(1987)은 홍콩의 폐기물 수거 시스템에 대한 응용 연구를 제시하였는데, 이는 2가지 유형의 차량 3대를 가지고 20개의 고객을 서비스하는 문제로, 각 고객은 3가지 컨테이너 중 한 가지를 사용하며, 차량별로 수거 가능한 컨테이너 종류가 다르며, 고객에 연결되는 도로에는 진입 가능한 차량 유형이 정해져있다. 이들은 5가지 알고리즘을 비교하였는데, Clark and Wright의 saving 알고리즘, saving 알고리즘에 perturbation을 추가한 형태, Gaskell의 saving 변형 알고리즘, Gaskell의 알고리즘에 perturbation을 추가한 형태, 3-opt를 이용한 확장 TSP 접근 방법 등이다. Taillard *et al.*(1996)은 동일한 차량이 여러 라우트를 수행하는 것을 고려한 차량경로 문제를 다루었는데, 이를 위한 타부서치를 이용한 휴리스틱 해법을 제안하였다. Taillard *et al.*(1997)은 시간창이 있는 VRP 문제에서 늦게 도착하는 것을 허용하지만 벌칙이 부과되는 경우에 대한 타부서치 휴리스틱을 제안하였는데, 이웃해들을 구하기 위해 2-opt\*와 Or-opt 교환의 일반화로 볼 수 있는 CROSS 교환이라고 이름붙인 호(edge) 교환 방법을 사용하였다. 이들은 또한 2-opt\*나 Or-opt에 비해 계산시간이 많이 드는 단점을 보완하기 위해 분할/재구축 절차를 통한 병렬 계산방법을 사용하였다. Tung and Pinnoi (2000)는 베트남 하노이에서의 폐기물 수거 문제에 대한 응용을 제시하였는데, 여기서는 여러 개의 시간창 제약과 동일 사이트에 방문하는 최소 시간 간격에 대한 제약을 고려한 차량 경로 및 스케줄링 문제를 MIP로 모델링하였다. 해법으로는 Solomon의 삼입 휴리스틱 방법을 수정한 구축 방법과, Or-opt와 2-opt\*를 함께 사용한 개선 절차를 결합한 휴리스틱 방법을 제안하였다. Sahoo *et al.*(2005)은 미국의 대규모 민간 쓰레기 수거 전문업체인 Waste Management사에서 GIS 기반 경로관리 애플리케이션을 개발하여 적용한 사례와 그 성과를 제시하였는데, 이를 위해 개발된 알고리즘에 대한 내용은 Kim *et al.* (2006)에 제시되어있다. 여기서는 시간창 제약, 다수의 disposal trips, 운전자의 점심시간 등을 고려한 문제를 VRPTW-IF(VRP with time windows and intermediate facilities)로 모델링하였고, 경로의 조밀도와 작업부하 균형을 고려하였다. 이들은 특히 상업적 폐기물 수거에 초점을 두어 고객이 원하는 수거 시간에 대한 시간창 제약을 고려하였고, 폐기물 수거에 특화된 VRPTW 벤치마크 문제들을 제공하였다. 해법으로는 Solomon의 삼입 알고

리즘을 확장한 알고리즘을 제시하고, 경로의 조밀도와 작업부하 균형을 개선하기 위한 제약이 있는 클러스터링 기반의 폐기물 수거 VRPTW 알고리즘을 개발하였다.

복잡한 현실상황에 대한 지금까지의 연구들은 대개 휴리스틱 접근방법을 사용하였다. 이는 문제의 복잡도가 크기 때문이기도 하지만, 현실에서 고려되어야 하는 제약들의 잦은 변경이 exact algorithm을 위한 모델의 수립을 복잡하게 하고 크게 변화시키기 때문인 측면도 있다.

### 3. 수리모델

#### 3.1 문제환경 및 가정사항

다목적택 상류지역인 Y군은 탈수처리시설이 입지하는 하나의 통합처리장과, 마을에서 발생하는 하수에서 슬러지를 침전시키는 다수의 마을하수도가 존재한다. 하수처리장에서는 마을하수도에서 발생하는 슬러지를 취합하여 탈수처리를 한 후 해양 투기하거나 육상 매립, 소각, 재활용 등의 방법으로 처분한다. 해양 투기, 육상 매립, 소각, 재활용 등은 하수처리장에서 별도의 차량을 이용하여 처리하기 때문에, 항구나 매립지, 소각장, 재활용 시설의 위치는 고려하지 않는다. 그리고 단위기간 중 최소 한 번 이상 슬러지 수거차량이 마을하수도를 방문하여 슬러지를 수거해야 한다는 제약이 존재한다.

또한 각 마을하수도에서 발생하는 슬러지의 양은 우천 등의 기상 조건이나 계절적 요인에 의한 변동이 존재하나, 여기서는 그 발생량이 확정적으로 사전에 주어진다고 가정한다. 각 마을 하수도의 최소 수거 주기는 일주일로 가정하고, 이에 따라 마을하수도의 슬러지 저장조의 크기는 일주일 치의 슬러지 발생량을 보관 가능하도록 설계되어있다고 가정한다. 그리고 마을 하수도 간에는 도로망이 구축되어 있고, 산간도로의 특성상 도로 사정에 따라 탱크로리 차량의 평균 운행속도가 상이하다. 하수처리장 및 마을하수도 간의 거리는 차량이 도로상을 주행하는 실제의 거리를 기준으로 하였고, 도로별 운행속도를 반영하여 운행시간을 산출하였다. 또한 슬러지 수거차량의 운전자는 하루 8시간 동안 근무를 한다고 가정한다.

슬러지 수거는 탱크로리 차량에 의해 이루어지는데, 4.5톤과 15톤의 두 가지 용량의 차량만을 고려하여, 한 가지 용량의 수거 차량을 이용하는 경우와 두 가지 차량을 복합하여 사용하는 경우에 대하여 분석을 수행한다. 특정한 마을하수도에서는 슬러지 수거차량의 용량보다 수거주기 동안의 슬러지 발생량이 많은 경우가 존재하기도 한다. 이러한 경우에는 해당 마을하수도의 수거주기 동안의 발생량을 차량 용량으로 나눈 값의 정수 부분은 방문 경로를 고려하지 않아도 되므로, 따로 배송한다고 가정하여, 남은 슬러지 용량에 대해서만 수거계획을 수립한다. 목적함수는 다음과 같이 모든 차량들의 소요시간의

합을 최소화하는 것이다.

$$\begin{aligned} \text{총 소요시간} &= \text{이동시간} + \text{슬러지 수거시간} \\ &+ \text{슬러지 하차시간} \end{aligned} \quad (1)$$

슬러지 수거시간은 슬러지 수거 준비시간과 실제로 슬러지를 수거하는 시간으로 구성되어있으며 식 (2)와 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} \text{슬러지 수거시간} &= \text{준비시간}(10\text{분}) + \text{펌핑시간}(4.2\text{분/톤}) \\ &+ \text{마무리시간}(10\text{분}) \end{aligned} \quad (2)$$

슬러지를 수거하여 통합처리장으로 돌아오는 수거차량은 수거해온 슬러지를 처리장에 하차하게 되며, 이 때 고정적으로 40분의 하차시간이 발생하게 된다고 가정한다.

#### 3.2 변수 정의

##### • Sets

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ : 전체 마을 하수도 집합

$N_0 = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ : 전체 마을 하수도 및 통합처리장의 집합

$V = \{1, 2, \dots, m\}$ : 슬러지 수거 경로(route)의 집합

##### • Parameters

$q_i$  : 마을하수도  $i$ 에서의 단위기간동안의 슬러지 발생량

$Q$  : 슬러지 수거차량의 용량

$T$  : 슬러지 수거경로의 최대 운행시간(이동시간 + 슬러지 수거작업시간,  $T = 8\text{시간}$ )

$t_{ij}$  : 슬러지 수거차량이 마을하수도  $i$ 에서  $j$ 사이를 이동할 때 걸리는 이동시간(시간 = 거리/평균속도)

$s_i$  : 슬러지 수거차량이 마을하수도  $i$ 에서 슬러지를 수거하는 시간

$W$  : 슬러지 하차시간(상수, 40분), 경로마다 발생

$T$ 는 원래 슬러지 수거 차량의 일일 최대 운행시간이며, 하나의 차량은 일일 최대 운행시간 내에서 하루에 여러 경로를 운행할 수 있다. 따라서  $T$ 는 각각의 수거경로의 최대 운행시간이기도 하다.

##### • Variables

$x_{ijv}$  : 슬러지 수거경로  $v$ 에서 마을하수도  $i$ 에서  $j$ 로 이동하면 1, 아니면 0인 이진변수

$y_v$  : 슬러지 수거경로  $v$ 가 수거에 사용되면 1, 아니면 0인 이진변수

$Z_{iv}$  : 슬러지 수거경로  $v$ 에서 마을하수도  $i$ 를 떠날 때 수거차량에 실린 슬러지 용량

$y_v$ 는 슬러지 하차시간 계산을 위해 필요한 변수이다.

### 3.3 수리모형

$$\min \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} (t_{ij} + s_j) x_{ijv} + \sum_{v \in V} W y_v \quad (3)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{irv} - \sum_{j \in N_0} x_{rjv} = 0 \quad \forall r \in N, v \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{i0v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N_0} x_{0jv} = 1 \quad \forall v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} q_i x_{ijv} \leq Q \quad \forall v \in V \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} (t_{ij} + s_i) x_{ijv} \leq T \quad \forall v \in V \quad (9)$$

$$Z_{iv} + q_j - Z_{jv} \leq Q(1 - x_{ijv}) \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jv} = y_v \quad \forall v \in V \quad (11)$$

$$0 \leq Z_{iv} \leq Q \quad \forall i \in N_0, v \in V \quad (12)$$

$$x_{ijv} = \{0,1\} \quad (13)$$

$$y_v = \{0,1\} \quad (14)$$

목적함수 식 (3)은 총 활동시간을 최소화하는 것을 의미한다. 본 연구에서의 모델에는 슬러지 수거 차량의 운행시간 제약이 존재하기 때문에 운행시간과 슬러지 수거시간, 그리고 슬러지 하차시간을 모두 고려한 총 활동시간을 최소화하고자 하였다.

식 (4)는 모든 마을하수도를 한 번씩 방문해야 한다는 제약식이다. 이 제약식은 수거주기 동안의 슬러지 발생량이 슬러지 수거차량의 용량보다 작거나 같다는 것을 의미하며, 이를 위해 가정사항에서 언급한 사전처리가 필요하다. 또한 남아 있는 차량 용량보다 마을 하수도의 슬러지 양이 적을 때 여러 번에 나누어 가져오지 않는다는 가정을 고려한 식이다.

식 (5)는 하나의 경로 내에서 마을하수도에 도착한 슬러지 수거차량은 그 지점에서 출발해야 한다는 유량보존 제약을 나타낸다. 식 (6)과 식 (7)은 슬러지 수거 경로가 통합처리장에서 출발해야 하며 마지막엔 통합처리장으로 돌아와야 한다는 조건을 나타낸다. 또한 식 (8)은 슬러지 수거차량의 용량제약이며, 이는 하나의 경로 내에서 슬러지 수거차량이 마을하수도에서 수거하는 슬러지 양의 합은 슬러지 수거차량의 용량을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다.

식 (9)는 수거 경로별 운행시간에 대한 제약으로, 슬러지 수거 경로상의 이동과 슬러지 수거작업에 걸린 시간의 합이 작업자의 근무시간을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다. 식 (10)은 통합처리장이 연결된 경로 이외에 다른 경로가 생성되지 않도록 하는 제약식이다.

식 (11)은 실제로 사용된 수거 경로의 수를 구하기 위한 식이며, 식 (12)는 각 마을을 떠날 때 슬러지 수거 차량에 실린 총 슬러지의 양은 차량 용량을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다.

### 4. 제안 알고리즘

일반적으로 차량 경로문제는 그 본질적인 조합적 특성에 의하여 수리모형으로 정식화가 가능하지만, 계산의 복잡도에 있어서 NP-hard 분류에 속하므로(Lenstra and Rinnooy Kan, 1981), 문제의 크기가 증가함에 따라 이를 풀기 위한 계산 노력이 급속히 증가하기 때문에, 휴리스틱 접근방법들이 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 유전자 알고리즘에 기반한 휴리스틱 방법을 제안한다. 유전자 알고리즘은 동일 유전자 구조를 가진 염색체 개체(Chromosome)들의 유전자 값을 서로 교환시켜 새로운 유전자 개체를 만들어 우월한 개체가 살아남는다는 자연의 원리를 응용한 것으로 생물의 진화과정, 즉 자연선택(Natural Selection)과 유전법칙을 모방한 확률적 탐색기법이다.

유전자 알고리즘은 초기 모집단 생성, 교배, 돌연변이 발생, 선택의 단계로 이루어진다. VRP에 대한 해의 비트 열(string) 표현방법은 자연스럽지 못하며, 대개는 정수 열을 사용한 경로 표현방법으로 대체되어 사용되었는데, 여기서 각 정수는 특정한 노드를 나타내며, 열에서의 각 정수의 위치는 경로에서의 노드의 순서를 나타낸다.

VRP에 대한 교배과정에 있어서, 전통적인 교배 연산자들, 예를 들어 일점교배(one point crossover)는 노드가 반복되어 나타나거나 빠져있는 유효하지 않은 해들을 만들어낸다. 따라서 부모로부터 새로운 자손들을 만들어내기 위해서는 특별한 순서 기반 교배와 돌연변이 연산자가 개발되어야 한다. 기존에 제안된 교배 방법으로는 OX(order crossover) 등이 있으며, 돌연변이 방법으로는 간단한 삭제 후 재삽입(remove-and-reinsert, RAR) 또는 교환 연산자(swap operators)가 있다.

유전자 알고리즘은 TSP나 VRPTW, 선행제약이 있는 VRP 등에 대해서는 많은 연구가 이루어졌으나, 일반적인 CVRP(Capacitated VRP)에 대해 유전자 알고리즘을 적용한 연구들은 그리 많지 않다.

유전자 알고리즘은 다른 방법으로는 해를 구하기 힘든 복잡한 제약들을 가진 VRP 문제들에 있어서 상대적으로 강건한(robust) 특징으로 인해 강점을 가진다고 알려져 있다. 특히 본 연구에서의 경우와 같이, 현실에서의 다양한 고려사항들에 대한 요구가 빈번하게 변화하는 경우에는 유전자 알고리즘이 큰 장점을 갖는다. 거리나 시간 제약이 있는 VRP의 경우, 대부분의 연구들은 탐색의 효율성에 대해 유전자 알고리즘의 서로 다른 요소들이나 파라미터들의 효과를 평가하는 것을 목표로 하였다.

CVRP에 대한 유전자 알고리즘의 응용을 다룬 몇몇 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Van Breedam(1996)은 유전자 알고리즘과 타부서치, 시뮬레이티드 어닐링을 비교하였는데, 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링의 다양한 파라미터들의 효과를 통계적으로 분석하였다. 유전자 알고리즘에서는 경로 표현방법을 이용하였고, 본점의 복사본을 여러 개 만들어서 경

로 간의 분리자 역할을 하도록 하였으며, PMX로 알려져 있는 전통적인 순서 기반 교배 연산자와 RAR 돌연변이 연산자를 사용하였다.

시간 제약이 있는 CVRP에 대한 또 다른 연구는 Schmitt(1994, 1995)에 의해서 이루어졌다. 이 연구의 특징은 선 경로 후 군집화 접근방법을 사용하여, 분리자가 없는 전통적인 경로 표현 방법을 사용할 수 있도록 하였다. 또한 OX 교배방법을 사용하였고, 임의로 선택된 두 개의 노드 위치를 교환하는 교환 돌연변이 연산자를 사용하였다. 유전자 알고리즘의 효율을 높이기 위해 이 돌연변이 연산자를 2-opt 지역탐색 방법으로 교체하여 각 자손에 대해 0.15의 확률로 적용한 방법은 Christofides, Mingozzi and Toth(1979)의 테스트 문제에 대해 실험되었다. 이 방법은 Clark and Wright 휴리스틱 방법(Clark and Wright, 1964)보다는 좋은 해를 산출하지만, 개선 절차와 결합된 간단한 구축 휴리스틱보다는 좋지 않은 결과를 보여주었고, 다른 방법들에 비해 많은 계산시간을 필요로 하였다.

유전자 알고리즘은 아직까지는 최근에 개발된 타부 서치 방법들에 비해 경쟁력이 부족하다고 할 수 있을 것이다. 그러나 유전자 알고리즘에 대한 대부분의 연구 노력들이 TSP나 시간 제약이 있는 VRP 문제들에 집중되어왔고, 시간 제약이 있는 VRP에 대해 유전자 알고리즘이 성공적인 결과를 보여주었음을 고려할 때, CVRP에 대해 유전자 알고리즘을 적용하기 위한 연구가 좀 더 이루어진다면 더욱 경쟁력있는 결과를 얻을 수 있을 것이라고 기대할 수 있을 것이다.

최근에는 좀 더 다양하고 효율적인 교배방법 등의 제안으로 유전자 알고리즘의 개선이 시도되고 있다. Ombuki *et al.*(2006)은 BCRC(Best Cost Route Crossover)라는 새로운 교배방법을 제안하였는데, 이 방법은 해를 가능해의 형태로 유지시킬 수 있어 교배 후에 불가능해가 생성됨으로 인한 비효율을 개선시켰고, 더욱 다양한 해를 탐색할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 전체 노드에 대해 Sweep 알고리즘으로 초기 해를 생성시킨 뒤, 생성된 각 경로에 대해 4-Optimal 알고리즘으로 경로상의 방문순서를 개선시키고, 유전자 알고리즘을 통한 경로 간의 노드 교환으로 군집을 변화시킨 후, 변화된 군집에 대해 4-Optimal 알고리즘을 이용해 경로를 개선시키는 방법을 사용하였다. Sweep 알고리즘을 이용한 초기해에서는 경로별 방문순서 정보를 포함하고 있지만, 이는 4-Optimal 알고리즘을 통해 갱신되므로, 실제로는 군집화의 용도로 사용된다.

유전자 알고리즘을 CVRP에 적용하기 위해서는 해의 표현방법, 교배 방법, 돌연변이 방법 등에서 여러 가지 사항들이 고려되어야 한다. 본 연구에서 사용한 알고리즘의 각 단계에서 고려된 사항들은 아래의 세부 절차에서 설명한다.

#### 4.1 염색체 표현(Chromosome Representation)

VRP를 위한 유전자 알고리즘에서 염색체(Chromosome)를 표현하는 방법은 여러 가지가 있다. 예를 들어 10개의 마을하수

도가 존재할 경우, Baker and Ayeche(2003)에서 사용한 염색체 표현은 <그림 1>과 같이 어떠한 노드가 어떤 경로에 할당되어있는지의 정보만 가지고 있는 표현이다. 하지만 이 같은 표현으로는 경로상의 방문순서를 표현할 수 없기 때문에, 이를 기억해 두는 별도의 공간을 필요로 한다.

노드번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
경로번호	1	1	3	2	1	3	2	3	4	4

그림 1. Baker and Ayeche(2003)의 염색체 표현

따라서 본 연구에서는 <그림 2>와 같이 하나의 염색체에서 경로정보와 할당된 차량정보 등을 함께 표현할 수 있는 표현 방법을 사용한다. 이와 같은 염색체 표현을 사용하면 각각의 차량이 이동하는 순서대로 노드를 저장하여 차량의 경로에 대한 정보를 표현할 수 있다.

경로번호	1			2			3			4
노드번호	2	5	1	4	7	8	6	3	9	10

그림 2. 본 논문에서 사용된 염색체 표현

#### 4.2 Sweep 알고리즘을 이용한 초기해 생성

먼저 유전자 알고리즘을 시작하기 전에 마을 하수도를 경로에 할당하기 위해 거리 제약과 차량용량제약을 만족시키는 초기 군집들이 필요하다. 이는 보통 데이터들을 군집화하는 방법을 적용하여 구할 수 있으며 대표적인 방법으로 K-means 알고리즘과 Sweep 알고리즘 등이 있다. K-means 알고리즘은,  $k$ 개의 임의의 중심점으로부터 출발하여 중심점이 아닌 점들을 가장 가까운 중심점에 포함시켜나가면서, 중심점을 옮겨가며 이와 같은 과정을 반복해가는 방법이다. 하지만 중심점의 개수인  $k$ 가 사전에 정해져있어야 하며, 필요한 경로 수를 함께 구해야 하는 본 연구의 경우에는 적합하지 않으며, 군집 수가 정해진 경우에도 어떤 노드를 어느 군집에 포함시킬지에 있어서 시간 제약 및 용량 제약을 고려한 군집을 만드는 것이 용이하지 않다는 단점이 있어 유전자 알고리즘의 초기해를 구하는데 적합하지 못하다.

따라서 본 연구에서는 초기 모집단을 구하기 위해 각도를 이용하여 각 노드들을 차량별로 할당하는 방법인 Sweep 알고리즘을 사용한다. 하지만 일반적인 Sweep 알고리즘은 용량만을 고려하고 있어 본 연구에서 고려하는 시간제약을 반영하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 이를 수정하여 군집화 시 용량 제약 뿐만 아니라 시간제약도 고려한 Sweep 알고리즘을 제안한다. 일반적인 Sweep 알고리즘은 <그림 3>과 같이 먼저 본점(depot)과, 본점을 제외한 노드들 중 기준으로 선택된 노드를 잇는 선을 그린 후, 이를 차고지를 중심으로 시계방향 또는 반시계방

향으로 움직이면서 노드들을 용량이 만족될 때까지 군집화하는 방법이다. 하지만 여기서는 용량과 함께 시간도 고려하여야 하므로, 노드를 해당 군집에 포함시킬 때, 해당노드에서의 슬러지 용량을 합한 총 슬러지 용량과 해당노드를 거쳐 본점으로 돌아올 때까지의 시간이 모두 차량용량제약과 차량별 운행시간제약에 위반되지 않을 때 군집으로 포함시키며, 만일 둘 중 하나라도 위반할 경우 새로운 군집을 구성한다.

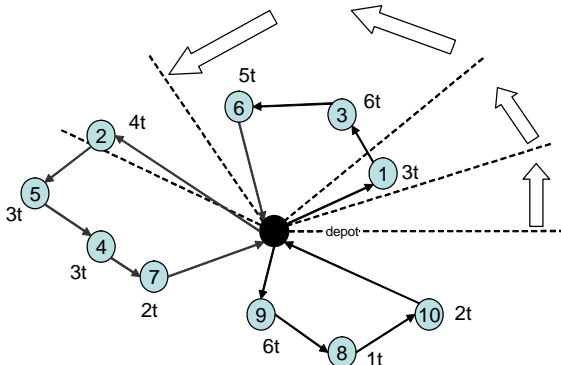


그림 3. Sweep 알고리즘

또한 시계방향과 반시계방향의 Sweep 알고리즘을 모두 고려하여 항상 모집단의 수가 짝수 개를 유지할 수 있도록 하였다. 이는 두 개씩 짝지어서 교배하는 과정에도 도움이 된다.

4.3 적합도 평가(Fitness Evaluation)

VRP에서는 흔히 거리 최소화 또는 비용 최소화를 목적식으로 한다. 하지만 본 연구에서 다루는 문제의 경우, 도로별 평균 운행속도가 상이하며, 차량별 운행시간 제약에서 슬러지 수거 시간, 하차 시간 등도 함께 고려해야 하기 때문에, 거리 최소화가 아닌 시간 최소화를 목적함수로 하였다.

따라서 각각의 모집단들의 적합도를 측정하기 위하여 식 (15)와 같이 해당 모집단을 서비스하는데 소요되는 시간과 이동시간, 그리고 슬러지 하차시간을 합한 총 운행시간을 이용하였다.

$$P_k = \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} (t_{ij} + s_j) x_{ijv} + \sum_{v \in V} W y_v \quad (15)$$

$t_{ij}$ 는 운송시간을 나타낸 변수로  $i$ 에서  $j$ 로 이동시 걸리는 시간을 의미하며,  $s_j$ 는  $j$ 에서의 슬러지 수거시간을 의미한다. 슬러지 수거시간은 해당 마을 하수도에 적재되어있는 슬러지의 용량에 따라 비례하며, 수거를 위한 준비시간과 실제로 수거를 하는 시간으로 구성되어있다. 슬러지 양은 사전에 주어지므로, 슬러지 수거시간을 미리 계산할 수 있다.

하차시간은 차량에 실려있는 슬러지 용량에 상관없이 일정한 시간  $W$ 로 소요되기 때문에, 사용된 경로의 수에 따라 변하게 된다.

본 연구의 모델은 총 운행시간을 최소화시키고자 하므로, 총 운행시간을 적합도로 이용하는 것이 타당하다. 각 모집단들의 적합도를 정확하게 측정하기 위해서는 군집화된 노드들의 최적 경로를 산출하는 알고리즘을 이용하여 총 운행시간을 산출하여야 하지만, 유전자 알고리즘을 실행하는 도중 이 같은 작업을 반복하게 되면 실행시간이 오래 걸린다는 단점이 있고, 사전에 차량 한 대분으로 미리 군집화를 했으므로 한 번에 고려해야할 노드 수가 상당히 줄어들기 때문에 발전적 기법과 최적화 기법간의 해의 차이가 거의 발생하지 않는다는 것을 사전실험을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 실행하는 도중 각 모집단들의 적합도를 측정하기 위해 간단하고 효율적이라고 알려진 4-Optimal 알고리즘을 사용하였다.

4.4 교배(Crossover)

교배는 새로운 세대를 생성하기 위해 부모세대의 유전정보를 서로 교환시켜 새로운 자녀세대를 만들어내는 방법이다. 잘 알려진 교배 방법으로는 하나의 절단점을 가진 일종교배, 두 개의 절단점을 가진 이중교배 등이 존재하며, 이런 절단점을 중심으로 각각의 모집단간의 유전 정보가 교환된다. 이외에도 다양한 교배 방법들이 고안되어있다. 하지만 슬러지 수거 시스템의 경우 일반적인 교배로 유전 정보를 교환할 경우, 차량 용량제약과 시간 제약이 위반되는 경우가 생길 수 있기 때문에, Ombuki *et al.*(2006)에서 제안한 BCRC(Best Cost Route Crossover) 방법을 사용하였다.

이 방법은 먼저 모집단들을 적합도 기준으로 정렬한 후, 순서대로 두 개씩 서로 짝을 만든다. 이렇게 짝지어진 각각의 모집단에서 임의로 각각 하나씩의 경로를 선정하여 그 안에 있는 노드들을 상대 모집단에서 제거한 후, 제거된 노드들을 다시 경로상의 적당한 위치에 삽입시키게 되는데, 이 때 삽입 위치는 여러 경로 중에서 해당 노드를 추가시켜도 시간제약과 용량제약을 위반하지 않으면서 총 활동시간이 가장 적게 되는 경로에 차례로 삽입시킨다.

<그림 4>는 이러한 교배과정을 예시한 것으로, 먼저 모집단 1과 모집단 2에 포함되어 있는 경로 중 임의로 하나씩의 경로를 선택한다고 가정하자. 이 때 선택된 경로가 모집단 1에서는 5번과 6번 노드를 거쳐 오는 경로, 모집단 2에서는 7번과 3번 노드를 거쳐 오는 경로라고 하자. 그러면 모집단 1에서 선정된 경로에 포함된 5번, 6번 노드들을 모집단 2에서 제거하고, 모집단 2에서 선정된 경로에 포함되어 있는 7번, 3번 노드들을 모집단 1에서 제거한다. 그리고 모집단 1에서 삭제된 3번과 7번 노드를 다시 새로운 경로에 삽입하게 된다. 이 때 노드를 삽입하는 순서는 임의의 순서를 따른다. 만약 3번 노드를 먼저 삽입하게 되는 경우 모집단 1에 있는 모든 경로에 각각 3번 노드를 삽입시켜 4-Optimal 알고리즘을 이용하여 새로운 경로를 구한 후, 경로값이 가장 적게 증가되는 경로에 포함시키게 된

다. 이 같은 과정을 이용하여 7번 노드도 삽입을 하게 되며, 모집단 2에서도 같은 방법을 사용하여 교배를 마치게 된다.

이 같은 방법을 사용하면 유전자 알고리즘이 수행되는 동안 항상 용량제약과 시간제약을 만족시키는 가능해를 유지할 수 있기 때문에, 가능해를 구하기 위한 별도의 과정이 필요하지 않은 장점이 있다.

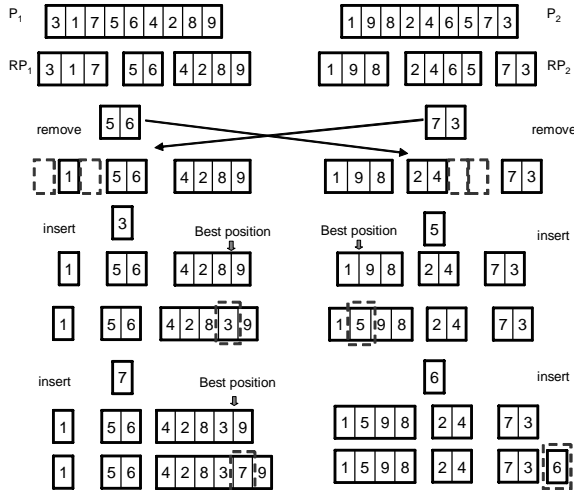


그림 4. Best Cost Route Crossover(BCRC)

4.5 돌연변이 (Mutation)

유전자 알고리즘에서 돌연변이는 염색체에 임의적인 변화를 주어 지역 최적해에서 빠져나올 수 있게 하는 과정이다. 흔히 사용되는 돌연변이 방법으로는, 교배가 끝난 후 생성된 자손세대에서 임의적으로 노드를 교환하는 방법과, 방문순서를 뒤바꾸는 방법 등이 있다. Ombuki *et al.*(2006)에서 제안한 BCRC 방법은 시간차 제약이 있는 VRP 문제를 위한 것으로, 경로상의 방문순서가 결정된 경로에서 임의의 두 노드를 선택하여 방문순서를 뒤바꾸는 방법을 사용하여 돌연변이를 구현하였다. 그러나 본 연구에서의 CVRP 문제에서는 이 돌연변이 방법은 동일한 경로 상에서 방문순서를 바꾸더라도 용량제약에 변화가 발생하지 않으므로 지역최적해에 빠질 수 있다. 또한 일반적으로 사용되는 노드를 교환하는 방법은 불가능해를 산출하는 경우가 발생할 수 있다. 예를 들어, 차량용량이 15톤이고, 돌연변이를 위해 교배과정이 끝난 <그림 4>의 왼쪽 하단에 있는 염색체에서 임의로 선택된 경로 2에서의 5번 노드와 경로 3에서의 7번 노드를 교환하는 경우, <그림 5>와 같이 차량 3의 용량이 차량용량제약인 15톤을 넘게 되어 불가능해가 발생하게 된다. 따라서 가능해가 나올 때까지 이 과정을 반복해야 하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 새로운 방법을 제시한다. 이 방법은 교배 단계에서 사용된 BCRC(Best Cost Route Crossover)를 수정한 방법으로, BCRC에서는 제거된 노드를 삽입하

는 과정에서 총 운행시간이 가장 적게 되는 경로에 노드를 추가시켰으나, 돌연변이를 적용할 때에는 <그림 6>과 같이 용량제약과 시간제약을 위반하지 않는 경로 중 임의의 위치에 삽입시키게 된다.

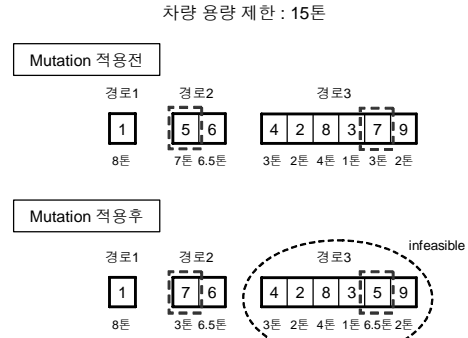


그림 5. 기존의 돌연변이 방법

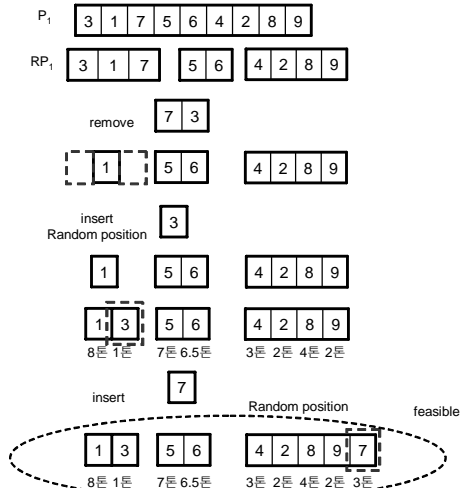


그림 6. 제안된 돌연변이 방법

이러한 방법으로 돌연변이를 수행하면 교배 과정에서 체크된 가능 경로(feasible route)의 정보를 이용하기 때문에 별도의 가능해를 찾기 위한 과정을 필요로 하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 일정한 세대가 지나도 우수해(best solution)가 갱신되지 않을 경우 위와 같은 방법으로 돌연변이를 발생시키는 방법을 사용하였다.

4.6 선별 (Fitness based Selection)

선별은 적자생존의 자연법칙에 기초하여, 환경에 대한 적응도에 의해 현 세대의 모집단으로부터 다음 세대에 생존할 개체를 선택하는 과정이다. 유전 알고리즘에서 선별은 모집단의 다양성과 선별압력이 조화를 이룰 수 있어야 한다. 일반적인 선별 방법으로 확률바퀴(Roulette Wheel), 순위선별(Ranking Selec-

tion), 토너먼트 선별(Tournament Selection)등이 있다.

이 같은 방법들은 파라미터 값을 이용하여 상대적으로 좋은 해가 선별될 확률을 높여주고 상대적으로 좋지 못한 해가 선별될 확률을 낮춰주는 방식을 채택하고 있다. 이 방법은 진화가 빠르게 이루어지는 반면에 지역 최적해에 빠질 수 있는 단점이 있다. 따라서 문제에 따라 적절한 파라미터를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다.

하지만 슬러지 수거 시스템의 경우 다양한 환경 변화에 신속하고 유연하게 대응하기 위하여 파라미터를 사용하는 기존의 방식이 아닌 파라미터를 사용하지 않는 선별방법(Baker and Ayechev, 2003)을 사용하였다. 이 방법은 모집단을 선별할 때 파라미터 값을 이용하지 않기 때문에 다양한 문제를 비교 검토하거나 슬러지 양 또는 차량의 속도 등이 변화할 때 그 문제에 적합한 파라미터 값을 계속해서 찾지 않아도 되는 장점을 가지고 있다. 이 방법은 모집단을 생성한 후에 선별을 하는 것이 아니라 교배와 돌연변이 과정을 모두 거쳐 생성된 자녀 세대와 각각에 해당되는 부모 세대끼리 경쟁시켜 보다 좋은 적합도를 가진 세대가 다음 세대에 살아남는 방법을 사용하였다.

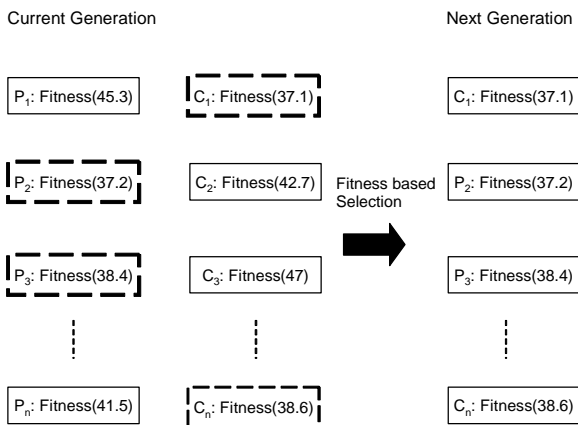


그림 7. 선별과정

<그림 7>의 경우 모집단  $P_n$ 들과 교배를 통해 생성된  $C_n$ 을 각각 경쟁시켜 둘 중 거리가 짧은 모집단이 다음 세대에 살아남는 방식으로, 예를 들어 모집단  $P_1$ 과 교배 후 생성된 모집단  $C_1$ 을 경쟁시킬 경우 모집단  $C_1$ 이 모집단  $P_1$ 보다 적합도가 좋으므로 다음 세대에 살아남게 된다. 이와 같은 과정을 반복해 모든 모집단과 그에 해당하는 자녀세대가 모두 경쟁을 완료하게 되면 다음 세대에 살아남는 것이 모두 선정되어 선별과정이 끝나게 된다.

따라서 본 논문에서 사용된 유전자 알고리즘은 <그림 8>과 같은 순서로 진행된다. 먼저 Sweep 알고리즘을 이용하여 초기 모집단을 생성한 후, 이에 대한 경로들을 4-Optimal 알고리즘으로 개선시킨다. 그리고 일정 세대수만큼 교배와 돌연변이,

선별과정을 반복하게 된다. 이 때 일정 세대수만큼 우수해가 갱신이 되지 않을 경우 돌연변이를 발생시키게 된다.

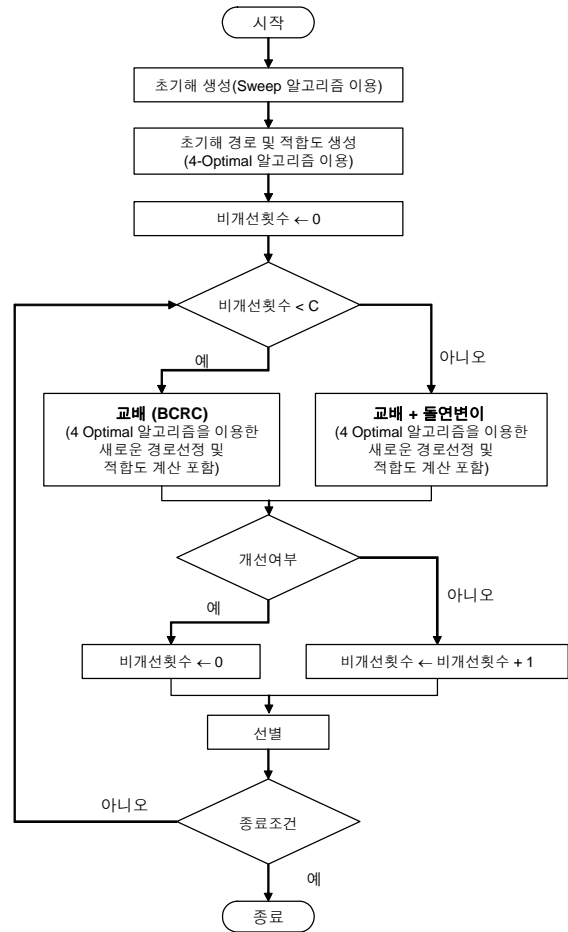


그림 8. 유전자 알고리즘 순서도

### 5. 적용(Implementation)

이번 장에서는 4장에서 제안한 알고리즘을 이용하여 <그림 9>에서와 같이 Y군의 28개의 마을 하수도에서 발생하는 슬러지를 일주일 간격으로 수거하는 현실문제에 대하여 적용한 결과를 제시한다.

거리 데이터는 실제 Y군의 도로 상 거리를 사용하였으며, 슬러지 수거차량 용량은 각각 4.5톤과 15톤을 사용하였으며, 일일 총 운행시간 제약은 8시간, 주당 근로일수는 5일로 가정하였다. 유전자 알고리즘에서의 세대 수는 2,000세대로 설정하였는데, 그 이상에 대하여서도 테스트하여 보았으나 큰 차이를 보이지 않았다. Population 수는 노드 개수의 두 배인 56개를 사용하였고, 돌연변이는 해의 갱신이 15세대 동안 이루어지지 않았을 경우 발생시켰다.



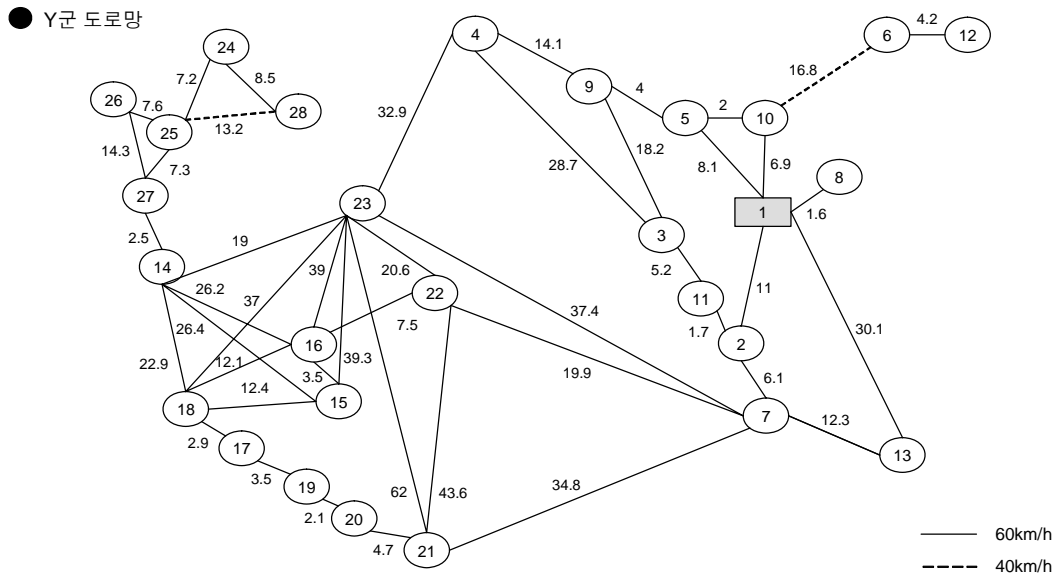


그림 9. Y군 도로망

표 1. 운영전략 및 공통조건

운영전략	항목	내용	비고
전략 1	수거차량	4.5톤 탱크로리	전체를 4.5톤 이용
전략 2		15톤 탱크로리	전체를 15톤 이용
전략 3		4.5+15톤 탱크로리	<ul style="list-style-type: none"> <li>24, 25, 26, 27, 28번 마을 하수도의 슬러지는 4.5톤 탱크로리로 23번 마을 하수도로 수거</li> <li>15, 17, 18, 19, 20, 21번 마을 하수도의 슬러지는 4.5톤 탱크로리로 16번 마을하수도로 수거</li> <li>나머지 마을하수도와 23번, 16번 마을 하수도는 15톤 탱크로리를 이용하여 통합처리장으로 수거</li> </ul>
공통조건	수거주기	1회 이상/주	
	주당근무 일수	5일/주	인건비: 368.095원/주
	근무시간	8시간/일	
	슬러지 수거 시간	1) 준비시간 2) 펌핑 시간 3) 마무리 시간 4) 슬러지 하차시간	1) 준비시간: 10분 2) 펌핑 시간: 슬러지 양에 비례 3) 마무리 시간: 10분 4) 슬러지 하차시간: 40분/회(20분 + 여유시간 20분)
	차량운행 속도	40~60km/h	구간별 속도 차이 고려

테스트를 위한 시스템 환경은 펜티엄4 3GHz CPU와 1GB RAM을 가진 PC에서 C++언어를 사용하여 구현하였다. 유전자 알고리즘을 통해 변화된 군집에 대해 최적 경로를 구하는 방법으로 본 연구에서 사용한 4-Optimal 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 상용패키지인 CPLEX 9.0 라이브러리를 사용하여 얻은 결과와 비교하여 보았으나 주어진 군집에 대하여 두 방법 간에 해의 차이가 거의 없었다.

Y군의 하수 슬러지 시스템을 운영하기 위하여 <표 1>과 같은 운영전략을 사용하여 적용해보았다. 운영전략 1, 2의 경우 슬러지 수거를 위해 사용되는 탱크로리 차량이 각각 4.5톤 탱크로리 차량과 15톤 탱크로리 차량을 사용한다. Y군의 지역적

인 특성상 산간지역이기 때문에 일부 지역이 15톤 탱크로리 차량으로 운행 시 다소 위험하거나 운행이 어려운 경우가 발생할 수 있다. 이러한 도로들은 <그림 9>의 Y군 도로망 중에서 점선으로 표시된 도로들이다. 이들 도로들은 차량의 종류에 관계없이 40Km/h의 저속으로 운행하는 것으로 가정한다. 전략 3의 경우는 통합 처리장에서 지리적으로 먼 일부 마을하수도들의 슬러지를 4.5톤 수거차량을 이용하여 중간집하장 역할을 하는 마을하수도로 수거한 후, 이렇게 모아진 슬러지들을 15톤 수거차량을 이용하여 통합 처리장으로 수거하는 대안 전략이다.

따라서 <그림 10>과 같이 23번과 16번 마을 하수도를 중간 집하장으로 하는 네트워크와 이렇게 수거된 23번, 16번 마을

하수도의 슬러지와 나머지 마을하수도의 슬러지를 15톤 탱크로리 차량을 이용하여 통합처리장으로 수거하는 네트워크로 나누어 운영하는 운영전략도 고려하였다.

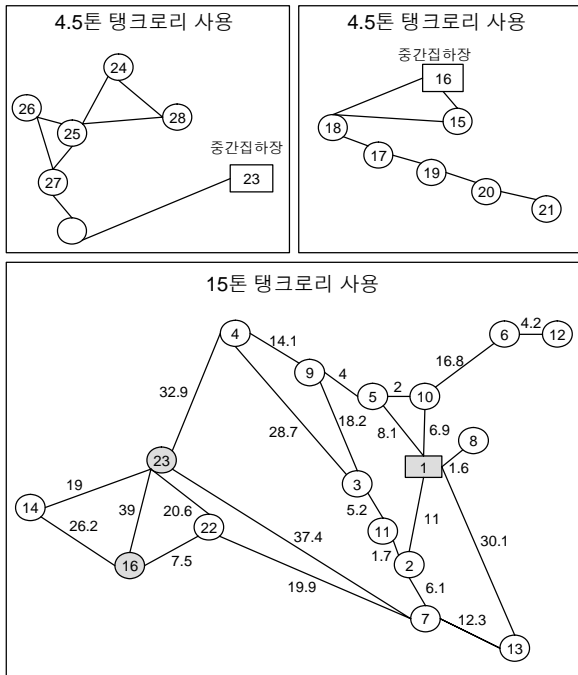


그림 10. 중간집하장을 고려한 네트워크 모델

표 2. 슬러지 수거 차량별 비용 비교

	4.5톤	15톤
운영비용	121원/km	381원/km
고정비용	134,842원/대·주	149,992원/대·주

표 3. 운영전략 별 적용결과 비교

Y군	4.5톤 이용 시	15톤 이용 시	4.5+15톤 이용 시	
			4.5톤	15톤
총 운행거리 (km)	2327.2	799.9	4.5톤	701.7
			15톤	655.5
총 활동시간 (시간)	72.2	33.8	4.5톤	28.6
			15톤	27.9
총 경로 수 (개)	23	7	4.5톤	5
			15톤	7
일일 최대 소요차량(대)	3	2	4.5톤	1
			15톤	1
운영비용	₩281,519.2	₩304,761.9	₩334,651.2	
인건비용	₩1,104,285	₩736,190	₩736,190	
고정비용	₩404,526	₩299,984	₩284,834	
총 운영비용	₩1,790,402.2	₩1,340,935.9	₩1,355,675.2	

<표 2>는 슬러지 수거차량의 종류에 따른 비용을 나타낸다. <표 3>은 3가지 운영전략으로 일주일간 운영할 때의 총

운영비용을 비교한 결과로, 비용측면에서는 15톤 탱크로리 차량을 이용하는 것이 가장 경제적이다. 그러나 중간집하장을 이용하면서 4.5톤과 15톤 차량을 함께 이용하는 경우에도 비용이 크게 차이가 나지 않으므로, 운영상의 다른 요소들을 함께 고려하여 운영전략을 선택하여야 할 것이다.

운영전략 3을 적용할 때 23번 중간 집하장과 16번 중간 집하장을 하나의 차량으로 수거하는 것이 가능하므로 두 개의 합을 계산하여 적용하였으며, 모든 운영전략의 일일 최대 소요 차량 대수는 Bin Packing 알고리즘을 이용하여 구하였다.

본 연구에서는 하나의 군에 한정하여 수행한 분석 결과만을 제시하였으나, 여러 군에 걸친 통합 계획을 통해 비용이나 효율성 측면에서 더 나은 대안을 찾는 것도 가능하다. 이러한 대안에 대한 분석 결과를 제시하기 위해 인접한 두 개 군에 대해 행정구역상 다른 군에 속하더라도 지리적으로 더 가까운 마을 하수도의 슬러지 수거를 서로 대신하거나 비용을 지불하고 대행하는 경우 등의 대안을 검토하여 현실적으로 선택 가능한 대안들을 제시할 수 있었다. 이러한 분석에 사용된 방법론은 앞서 설명한 것과 동일하게 적용할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 하수 슬러지 수거 문제에서 발생하는 의사결정 문제에 대한 경영과학적 접근을 통해 선택 가능한 대안들을 제시하여 의사결정자에게 운영전략에 대한 기반 정보를 제공하였다.

하수처리 시스템에서의 추후 이슈들은 다음과 같다.

현재 발생하는 슬러지는 재활용(9.8%), 육상매립(1.4%), 소각(11.7%) 및 해양배출(77.1%)의 방법으로 처리하고 있어 해양투기에 의존하는 비율이 높으나(Ministry of Environment, 2005), 국제 환경협약인 런던협약 96의정서에 따라 이러한 해양투기는 점차적으로 줄여나가 2012년부터는 전면 금지될 계획이며, 슬러지의 육상 직접 매립도 금지되고 있다. 따라서 슬러지를 소각하거나 재활용하는 방안을 적극적으로 모색해야 하는데, 이때 소각시설이나 재활용 처리시설로의 슬러지 운반을 함께 고려한 전략을 통해 효율성을 높일 수 있다. 또한 현재 군별로 분리하여 운영 중인 슬러지 수거 및 처리를 광역 통합 운영화하여 물류 자원의 공동 활용 및 통합 스케줄링을 통한 비용 절감의 기회를 다각적으로 모색하는 것이 필요할 것으로 보인다.

알고리즘 측면에서 본 연구에서는 전체 노드를 Sweep 알고리즘을 이용하여 초기해를 구한 후 이를 유전자 알고리즘으로 군집 간에 노드를 이동시켜 향상시키는 방법을 제안하였다. 이 때 유전자 알고리즘 중 교배와 돌연변이 과정에서 차량용량 제약과 전체 운행시간 제약을 위반하는 경우가 생길 수 있으므로 사전에 교배나 돌연변이 과정에서 제약을 위반하지 않도록 하였다. 유전자 알고리즘에서 중요한 부분을 차지하고 있는 선별과정에서는 일반적으로 파라미터 값을 이용하는 선

별 방법을 사용하지만, 여러 가지 종류의 차량에 대한 해를 비교 검색하기 위해서는 매번 새로운 파라미터 값을 찾아야하는 단점이 있다. 또한 잘못된 파라미터 설정으로 인해 알고리즘의 성능이 크게 악화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선별과정에서 파라미터 값을 이용하지 않는 방법을 사용하여 사용자가 동일한 조건에서 결과를 비교할 수 있도록 하였다. 이 방법은 특정한 문제에 있어서는 적절하게 설정된 파라미터를 이용하는 선별방법에 비해서는 해의 품질이 떨어질 수 있으나, 현실적으로 변화가 많은 슬러지 발생량을 고려할 때 이러한 상황에 보다 빠르고 유연하게 대응할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서 제시한 발견적 기법은 보다 빠른 시간에 해를 구할 수 있지만 노드를 군집화 하는 과정에서 최적해를 보장하지 못하는 단점이 있다. 따라서 차후 군집화 하는 부분을 좀 더 빠른 시간 내에 보다 효율적으로 향상시키는 방법에 대한 연구가 필요하다.

또한 다중 차량을 동시에 이용하는 경우에 대한 연구로의 확장도 추후 연구가 필요한 부분이다. 이러한 문제의 경우에는 복잡도가 크게 증가하여 아직까지 관련된 연구는 미미한 실정이다.

## 참고문헌

- Baker, B. M. and Ayechev, M. A. (2003), A Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem, *Computers & Operations Research*, 30(5), 787-800.
- Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P. (1979), The vehicle routing problem, In Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. and Sandi, C., editors, *Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, UK, 315-338.
- Clark, G. and Wright, J. V. (1964), Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations Research*, 12, 568-581.
- Kim, B-I., Kim, S., and Sahoo, S. (2006), Waste collection vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research*, 33, 3624-3642.
- Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1981), Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems, *Networks*, 11, 221-227.
- Ministry of Environment (2005), 2004 Statistics of Sewerage, Ministry of Environment, Republic of Korea.
- Ministry of Environment (2004), Modified Plan for the Sewerage Expansion Project of the Upstream Region of Multi-purpose Dams, Ministry of Environment, Republic of Korea.
- Ombuki, B., Ross, B. J. and Hanshar, F. (2006), Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows, *Applied Intelligence*, 24, 17-30.
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B-I., Kraas, B. and Popov, Jr. A. (2005), Routing optimization for waste management. *Interfaces*, 35(1), 24-36.
- Schmitt, L. J. (1994), An empirical computational study of genetic algorithms to solve order based problems: An emphasis on TSP and VRPTC, *Ph.D. dissertation*, Fogelman College of Business and Economics, University of Memphis, TN.
- Schmitt, L. J. (1995), An evaluation of a genetic algorithmic approach to the vehicle routing problem, *Working Paper*, Department of Information Technology Management, Christian Brothers University, Memphis, TN.
- Sculli, D., Mok, K. C. and Cheung, S. H. (1987), Scheduling Vehicles for Refuse Collection, *Journal of the Operational Research Society*, 38(3), 233-239.
- Taillard, E. D., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F. and Potvin, J. Y. (1997), A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows, *Transportation Science*, 31(2), 170-186.
- Taillard, E. D., Laporte, G. and Gendreau, M. (1996), Vehicle routing with multiple use of vehicles, *Journal of the Operational Research Society*, 47, 1065-1070.
- Tung, D. V. and Pinnoi, A. (2000), Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi, *European Journal of Operational Research*, 125, 449-68.
- Van Breedam, A. (1996), An analysis of the effect of local improvement operators in genetic algorithms and simulated annealing for the vehicle routing problem, *RUCA Working Paper 96/14*, University of Antwerp, Belgium.



### 최경현

서강대학교 수학과 이학사  
서강대학교 수학과 이학석사  
Virginia Tech. IEOR 석사  
Virginia Tech. ISE 박사  
현재: 한양대학교 산업공학과 부교수  
관심분야: 최적화 이론 및 응용, OR, 수리계획



### 유영선

한양대학교 산업공학과 학사  
현재: 한양대학교 산업공학과 석사과정  
관심분야: 수리계획, SCM, VRP



### 곽호만

한양대학교 산업공학과 학사  
한양대학교 산업공학과 석사  
현재: 한양대학교 산업공학과 박사과정  
관심분야: 수리계획, Large scale optimization, SCM



### 조중무

중앙대학교 토목공학과 학사  
중앙대학교 토목공학과 석사  
중앙대학교 토목공학과 박사  
현재: (주)삼안건설기술공사