

하수처리시설의 슬러지 수거 일정계획 수립 및 수거차량 경로결정

최경현*[†] · 조중무** · 노의수* · 김민제* · 허은정*

*한양대학교 산업공학과

** (주) 삼안건설기술공사

The Sludge Collection Scheduling and Vehicle Routing Strategies

Gyung-Hyun Choi*[†] · Joong-Mou Cho** · Eui-Soo Noh* · Min-Je Kim* · Eun-Jung Heo*

*Department of Industrial Engineering, Hanyang University

**Sam-An Corporation

In this paper, we propose sludge collection strategies which allocate each sewage store of village to sewage treatment plants and decide the schedule of sludge collection in order to collect sludge efficiently. The strategies aim to decrease transportation cost with deciding proposed vehicle routing and scheduling the sludge collection. When we decide route of vehicles, we consider the collection time in sewage store of village, distance between sewage store of villages and vehicle information as average velocity of vehicle, operation time of vehicle driver. We also develop the SCMS (Sludge Collection Management System) based on windows system with real data which is used in certain circumstance. And we experiment to figure out vehicle route and transportation cost throughout changing input data.

Keywords : Vehicle Routing Problem, Scheduling, Sludge Collection System

1. 서론

상수원 보호를 위하여 다목적댐의 상류지역에는 각 집단 주거지역별로 마을하수도를 설치하여 생활하수가 상수원을 오염시키는 것을 방지하고 있다. 수자원 보호를 위하여 우리나라의 모든 다목적댐 주변의 시골 도시들은 이러한 마을하수도와 하수처리장을 설치하였거나 계획 중이다. 각 마을에 있는 마을하수도에 하수를 저장하고 저장된 하수는 침전과정을 거쳐 슬러지를 발생시킨다. 이 슬러지를 탱크로리 차량을 이용하여 수거하며 지정된 하수처리장으로 운반한다. 하수처리장으로

운반된 슬러지는 탈수처리를 하여 소각 혹은 매립할 수 있는 폐기물로 바뀌게 된다.

하수처리장은 행정구역(군 단위) 단위로 1~2개(지역 크기에 따라 상이함) 정도씩 군소재지 또는 하수량이 많은 큰 마을에 건설되어 있으며, 마을하수도는 다목적댐 주변의 주거시설이 있는 넓은 지역에 분포되어 있다. 하수 슬러지 수거에 관련된 많은 부분에서 경영과 학적 의사결정을 필요로 한다. 기본적인 문제는 각 마을하수도에서의 슬러지 수거 일정(방문 일정)과 지정된 하수처리장으로서의 탱크로리 운행경로 및 일정계획 문제이다. 이 경우 하수처리장과 마을하수도의 위치, 각기

[†] 교신저자 ghchoi@hanyang.ac.kr

다른 저장 용량 등이 결정(시설 설치 완료)되어 있는데, 슬러지를 수거하기 위해 탱크로리가 계획기간 내에 각 마을하수도를 방문하여 하수처리장으로 되돌아오는 반복적인 활동으로 이동거리비용(속도를 고려한 이동시간)을 최소화하는 방문 일정 및 운행경로를 결정하는 문제이다. 산악지대의 도로 사정상 용량이 상이한 여러 종류의 탱크로리를 사용해야 하는 경우에는 탱크로리 운영비용을 포함한 최소비용 의사결정 문제로 확장될 수 있다. 보다 더 발전적인 문제는 각 마을하수도에서 발생하는 하수량과 해당 행정구역(운영비용 집행 주무기관)내에 다수의 하수처리시설 후보지 하수 정보를 이용하여 최소비용의 하수처리시설 입지 결정과 각 마을하수도의 저장 용량, 그리고 하수 슬러지 수거 일정계획이 포함된 문제이다. 이 문제는 설비 위치 결정(Facility Location) 문제와 차량 경로(Vehicle Route) 문제를 동시에 포함하는 복합된 문제이다. 본 연구에서 고려된 문제는 앞서 설명한 운행경로와 일정계획 문제에 국한된다.

본 연구의 범위는 차량의 평균속도, 운행가능시간 등과 같은 차량정보와 하수처리시설 간의 이동거리, 마을하수도별 서비스 시간 등을 고려하여 슬러지 수거차량의 최적경로와 마을하수도별 수거 일정을 수립하고, 운영자가 데이터의 수정과 입력 등을 조작하여 하수 슬러지 수거 관리가 가능하도록 하는 자동화된 시스템의 개발이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 차량경로결정문제를 이용한 응용분야에 대하여 기존 연구 내용을 정리 요약하고, 제 3장에서는 본 연구에서 다루는 차량경로결정문제의 정의와 수리모델을 제시하고 적용된 알고리즘에 관하여 소개한다. 제 4장에서는 하수 슬러지 수거 관리의 전체적인 프로세스를 윈도우 환경의 시스템으로 구현한 결과를 보여주고, 제 5장에서는 슬러지 수거 관리 시스템을 이용한 실험 결과와 경제성분석을 한다. 마지막으로 제 6장에서는 결론 및 추후 연구 과제를 제시한다.

2. 차량경로결정문제와 응용

일반적인 차량경로결정문제(Vehicle Routing Problem: VRP)는 승객 또는 화물의 수거(pickup) 및 배달(delivery)을 최소의 비용으로 수행하기 위한 수리계획문제이다. 이러한 차량경로결정문제는 많은 연구가 이루어져 왔고 현재도 수리계획법 측면의 효율적 알고리즘 개발 부분과 함께 실제 응용 연구 및 적용 분야도 활발하게 진행되고 있다.

차량경로결정문제는 기업 및 공공분야의 재화 흐름이란 측면으로 중요하게 인식되고 있다. 이는 각종 서비스를 제공하는 기업의 입장에서는 비용의 최소화라는 측면과 서비스를 제공받는 고객의 입장에서는 서비스 만족의 극대화라는 측면에서 중요성을 가지는 것이다. 하지만 이 둘을 동시에 만족시키는 최적의 차량경로를 결정하는 것은 다양하고 복잡한 현실적 제약에 의해 쉽지 않은 의사결정사항이 되고 있다. 이에 많은 연구들을 통하여 다양한 환경에서 최적의 차량경로를 결정하여 의사결정에 도움을 주고 있으며 아직도 많은 부분들이 연구되고 있는 실정이다.

본 연구의 핵심 내용은 차량경로결정문제의 실제 적용 방안에 있으므로, 차량경로결정문제를 이용한 다양한 응용 연구에 대하여 정리 요약하였다.

Potvin, et al.[9]은 VRP 알고리즘을 구현한 컴퓨터 시스템을 개발하고 캐나다 몬트리올 북부에 위치한 Bourassa 우체국의 우편 배달서비스에 적용하였다. 그리고 Hollis et al.[7]은 호주에 있는 우체국에 적용된 문제와 알고리즘을 소개하였다. 여기에 사용된 방법은 열생성기법(Column Generation Technique)에 기반을 둔 알고리즘으로 다수의 차고지(depot)를 고려한 차량경로결정문제와 작업자 일정계획이 혼합된 문제를 풀었다. Ruiz, et al.[10]은 첫 번째 단계에서 열거법을 통하여 차량의 경로를 구성하고 그 후 두 번째 단계에서 가능한 경로들의 집합으로부터 최적경로를 선택하는 정수계획법으로 모델링하여 해를 구했다.

차량경로결정문제는 물류회사에도 다양하게 적용되었다. Gulay and Demet[5]는 터키에 있는 유통회사의 경로 문제를 풀기 위해 차량경로결정문제에 좋은 해를 제공하는데 잘 알려진 타부 서치 알고리즘을 사용하여 최적 해에 가까운 해를 구하였다. 그리고 차량경로결정문제의 다른 형태인 트럭과 그에 부수적인 트레일러의 경로 결정에 대한 연구도 있었다. Chao[2]는 기본적인 차량경로결정문제로부터 변환시킨 21개의 문제들을 타부 서치 방법으로 실험하였고, Scheuerer[11]는 새로운 발견적 해법과 타부 서치 알고리즘을 적용하여 실험하였다. Tan et al.[13]은 수송해야 하는 물품이 적재되어 있는 컨테이너를 수송하기 위한 수송문제에 적용하였다. 차량이 제한되어 있을 때 차량이 더 필요한 경우에 아웃소싱을 하는 환경에 처음으로 적용하였으며 Hybrid Multi Objective Evolutionary Algorithm(HMOEA)을 통하여 차량경로일정과 차량수를 결정하였다. Fleischmann et al.[4]은 물류분야에 실시간 정보가 제공되고 의사소통시스템의 발전에 따라 요구된 차량의 경로를 결정하는 적합한 알고리즘을 개발하였다. 실제 도시의 교통상황에 대하여 계획된 주기마다 고객의 수송과 배송 요구가 시간 제약을 가지

며 랜덤하게 발생될 때 실시간 정보를 이용하여 차량경로를 구하였다. Tadei et al.[12]는 이탈리아 북부에 위치하는 자동차 수송회사의 실제 데이터를 가지고 자동차를 운반하는 트럭인 Auto-carrier의 차량적재방법과 적재차량선택과 Auto-carrier의 차량운행경로를 결정하는 문제에 적용하여 정수계획법 형태로 모델링하고 발견적 기법으로 해를 구하였다.

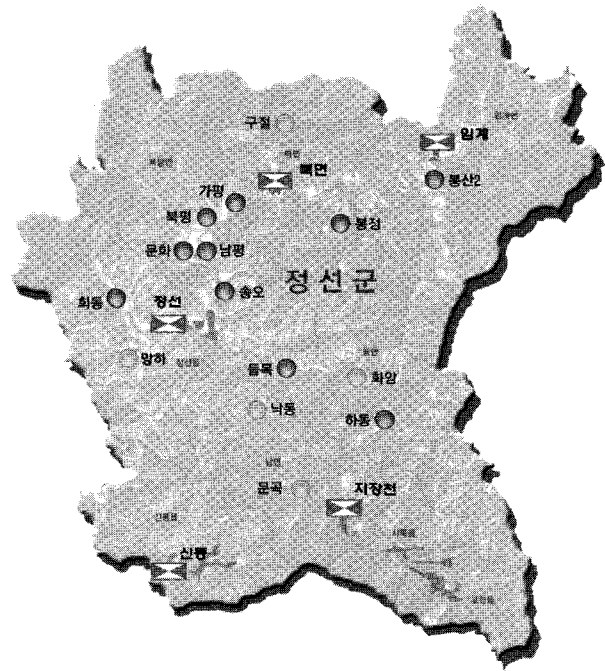
차량경로결정문제는 유지보수를 위한 분야에도 적용되었다. Blakeley and Knolmajer[1]는 Schindler Elevator 회사의 북미지역 엘리베이터 유지보수를 위한 자동화된 유지보수작업자 경로일정계획 시스템을 개발하였다. 긴급 상황에 대비하기 위하여 긴급 상황이 발생한 지역에서 가까운 작업자의 위치를 데이터베이스와의 연동을 통해 파악하여 주기적인 관리뿐 아니라 긴급 상황에 대한 대비도 가능한 시스템을 개발하였다. Perrier et al.[8]은 겨울 도로의 유지보수 문제에 대하여 적용하였다. 겨울 도로 유지보수 계획은 도로가 어는 것을 방지하기 위해 화학물질을 뿌리는 차량, 눈을 녹이기 위해 소금을 뿌리는 차량, 눈을 치우는 차량, 도로와 인도의 공사를 위한 차량 등 여러 차량들의 경로와 관련이 되는 다양한 의사결정 문제를 포함한다. 여러 가지 운행제약에 따른 의사결정을 위한 최적모델을 제시하고 차량들의 경로를 구하기 위한 해법을 제시하였다. 또한, 화학물질을 뿌리는 작업을 위한 경로결정문제 등 여러 가지 유형을 조사하였다. Hadjiconstantinou et al.[6]는 차량집단의 방문을 통하여 고객들에게 사고를 예방하는 유지보수 서비스를 제공하는 공익사업회사의 일정계획문제에 적용하였다. 이 문제에서는 각 Depot별로 서비스할 지리적인 위치의 한계를 결정하고 날짜별로 방문되는 고객들의 집합과 그에 따른 차량집단들의 경로를 구한다. 이러한 문제유형을 MDPVRP(Multi-Depot Period Vehicle Routing Problem)이라 한다. 고객들을 결정하는 과정은 여러 시나리오를 작성하여 발견적 방법으로 구했으며 경로를 결정하는 과정은 타부 서치 알고리즘을 통해 구했고 노드간 교환을 통한 단계를 거쳐 알고리즘의 성과를 향상시켰다.

3. 문제와 알고리즘

본 연구의 적용 대상이 되는 문제 환경과 수리계획 모델, 사용된 알고리즘인 Clarke and Wright[3]가 개발한 Clarke & Wright 알고리즘과 Bin Packing Problem의 해법 중에 하나인 First Fit Decreasing(FFD) 알고리즘을 수정하여 개발한 Modified First Fit Decreasing(MFFD) 알고리즘을 설명한다.

3.1 문제 환경 및 슬러지 수거 전략 문제

본 연구에서 차량경로결정문제를 적용한 슬러지 수거 문제의 환경에 대하여 알아보도록 한다. 다목적담상류지역은 <그림 1>의 예와 같은 네트워크 환경을 갖고 있다. 탈수처리시설이 입지하는 하수처리장과 마을에서 발생하는 하수를 슬러지 형태로 변화시키는 마을하수도가 다수 존재한다. 하수처리장에서는 마을하수도에서 발생하는 슬러지를 취합하여 탈수처리를 한 후 매립을 하던지 소각을 한다. 매립과 소각은 하수처리장에서 자체적으로 하기 때문에 매립지의 위치나 소각지의 위치는 고려하지 않는다. 그리고 일정계획수립기간(1주일 이내 또는 2주일) 중 최소 한번 이상 슬러지 수거차량이 마을하수도를 방문하여 슬러지를 수거해야 한다.



<그림 1> 하수처리장과 마을하수도의 네트워크

마을하수도별로 일정계획수립기간 중 발생하는 슬러지를 저장할 수 있는 마을하수도의 하수저장소가 존재하고, 슬러지 수거차량은 탱크로리 차량만 고려하였으며 슬러지 수거차량의 용량은 일정하다고 가정하였다. 탱크로리 이외에도 자체 탈수 가능한 특수차량 등이 고려될 수도 있다. 대상 지역에는 슬러지 수거차량의 용량보다 계획기간동안의 슬러지 발생량이 많은 마을하수도가 존재할 수 있는데, 이때 발생된 슬러지량이 슬러지 수거차량의 용량보다 작아질 때까지 차량용량보다 초과된 슬러지를 슬러지 수거차량이 수거한 후 남아 있

는 양을 대상으로 경로를 결정한다(한 곳에서 탱크로리의 용량을 100% 채우는 경우에는 최단경로를 이용하여 하수처리시설로 운반 가능함).

현재 하수처리운영 현장에서는 탱크로리 운전기사의 경험에 의한 임의의 운행 방식을 취하고 있어 신규로 설치되는 마을하수도의 방문 일정을 포함하기가 어려우며 주기적으로 마을하수도 점검과 오염도 검사를 위한 시료채취 등의 작업을 병행하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 5톤, 15톤, 25톤의 탱크로리를 구분하여 사용하는 각각의 경우에 대하여 일일 8시간의 작업허용시간 내에서 최소비용(평균속도, 거리, 연비를 이용)의 최적 운행 경로와 마을하수도별 수거 일정 등이 연구 결과로 요구되었다.

3.2 수리모델

• 집합

$N=0, 1, 2, \dots, n$: 마을하수도의 집합(단, 0은 탱크로리가 출발하는 하수처리장)

$N_0=0, 1, 2, \dots, n, n+1$: 탈수처리시설이 있는 하수처리장을 포함한 마을하수도 집합(단, $n+1$ 은 탱크로리가 귀환하는 하수처리장)

$V=1, 2, \dots, v$: 슬러지 수거차량의 집합

S : N 의 부분집합

• 매개변수

c_{ij} : 마을하수도 i 에서 마을하수도 j 로 이동할 때의 이동비용(거리, 연비, 평균속도 고려)

q_i : 마을하수도 i 에서 계획기간 내의 슬러지 수거량

Q : 슬러지 수거차량의 용량

T : 슬러지 수거차량의 최대 허용시간

t_{ij} : 슬러지 수거차량이 마을하수도 i 에서 마을하수도 j 사이를 이동할 때 걸리는 이동시간

s_i : 슬러지 수거차량이 마을하수도 i 에서 슬러지를 수거하는 시간

• 결정변수

x_{ijv} : 슬러지 수거차량 v 가 마을하수도 i 와 마을하수도 j 를 이동하면 1, 이동하지 않으면 0

$$\min \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} c_{ij} x_{ijv} \dots\dots\dots (1)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in N \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{irv} - \sum_{j \in N_0} x_{rjv} = 0 \quad \forall r \in N, v \in V \dots\dots\dots (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i(n+1)v} = 1 \quad \forall v \in V \dots\dots\dots (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jv} = 1 \quad \forall v \in V \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} q_i x_{ijv} \leq Q \quad \forall v \in V \dots\dots\dots (6)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (t_{ij} + s_i) x_{ijv} \leq T \dots\dots\dots (7)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijv} \leq |S| - 1 \quad \forall v \in V \dots\dots\dots (8)$$

$$x_{ijv} = \{0, 1\} \dots\dots\dots (9)$$

이 수리모델의 목적식인 식 (1)은 이동비용 최소화를 의미한다. 즉, 이동비용은 마을하수도의 방문여부와 관련되며 이를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 식 (2)는 마을하수도의 방문제약을 의미한다. 이는 모든 마을하수도는 한 번 방문해야 한다는 제약이다. 식 (3)은 마을하수도별 유량보존제약을 의미한다. 마을하수도에 도착한 슬러지 수거차량은 그 지점에서 출발해야 한다는 유량보존제약을 나타낸다. 식 (4)는 슬러지 수거차량의 도착제약을 의미한다. 이는 슬러지 수거차량은 다시 출발지점으로 돌아와야 한다는 것을 나타낸다. 또한, 식 (5)는 슬러지 수거차량의 출발제약을 의미한다. 이것은 슬러지 수거차량은 출발지점에서 출발해야 한다는 것을 나타내는 것이다. 식 (6)은 마을하수도별 차량의 용량제약을 의미한다. 마을하수도에서 수거하는 슬러지량의 합은 슬러지 수거차량의 용량을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다. 식 (7)은 슬러지 수거차량의 운행시간 제약을 의미한다. 이는 슬러지 수거차량의 이동시간과 슬러지 수거작업시간을 합한 운행시간은 작업자의 최대 허용시간을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다. 식 (8)은 차량의 서브투어를 없애기 위한 제약식이다. 즉, 슬러지를 수거한 곳에 다시 방문하여 수거하는 상황이 발생되지 않도록 한다. 식 (9)는 결정변수의 이진변수 제약식이다.

3.3 적용 알고리즘

일반적인 차량경로결정문제를 살펴보면 본점에서 처리를 담당하는 대상 노드가 정해져 있다. 그리하여 대상이 되는 노드에서의 발생량과 차량의 용량을 고려하여 차량경로를 결정하도록 하였다. 그러나 본 연구에서 적용한 슬러지 수거지역에서는 각 하수처리장에서 방문해야할 대상이 되는 마을하수도가 정해지지 않았다. 그래서 각 하수처리장에서 슬러지를 수거해야 하는 마을하수도를 할당하는 작업이 필요하다. 또한, 일반적인 차

량경로결정문제에서는 노드에서 필요로 하는 수요량이나 노드에서 수거해야 하는 수거량의 용량이 차량의 용량보다 작다는 가정이 존재한다. 그러나 본 연구에서 차량경로결정문제를 적용한 슬러지 수거 지역은 수거차량의 용량보다 슬러지의 발생량이 큰 마을하수도가 존재한다. 따라서 연구대상이 되는 지역에 차량경로결정문제를 적용하기 위해 전처리 작업이 필요하다. 이러한 할당작업과 전처리 작업이 실행된 후에 Clarke and Wright 알고리즘을 적용하여 수거차량의 경로를 결정하고, MFFD 알고리즘으로 일정계획을 수립하도록 한다. 이러한 과정을 각 단계별로 표현해 보면 다음과 같다.

Stage 1. 하수처리장별 마을하수도 할당

모든 마을하수도에서 각 하수처리장까지의 거리를 비교하여 이동비용이 적게 드는 가까운 하수처리장에 마을하수도를 할당한다.

Stage 2. 수거슬러지량 전처리 작업

차량의 용량보다 슬러지 발생량이 많은 마을하수도는 우선적으로 방문하여 차량의 용량만큼 수거하여 남은 슬러지량이 차량의 용량보다 적게 만든다.

Stage 3. 차량경로 결정

Clarke and Wright 알고리즘을 적용하여 슬러지 수거차량의 경로를 결정한다.

Stage 4. 일정계획 수립

MFFD 알고리즘을 적용하여 계획기간 동안 슬러지 수거차량의 방문 일정계획을 수립한다.

Stage 3의 Clarke & Wright 알고리즘 적용하기 위해서는 모든 노드가 연결된 거리정보가 필요하다. 그러나 실제 거리정보에서는 연결되지 않은 하수처리장과 마을하수도의 거리가 누락되어 있다. 그래서 현실점에서 볼 때 현재 노드와 연결된 곳 중 가장 짧은 노드를 찾고, 출발노드에서 어떤 노드까지의 거리를 저장해서 그 저장한 거리를 이용해 더 먼 노드까지의 최단경로를 알려주는 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘을 사용하여, 연결되지 않는 하수처리장과 마을하수도간의 거리를 구하였다. 다음은 마을하수도 할당, 수거 슬러지량 전처리 및 모든 노드간의 거리 정보를 이용하여 차량의 경로를 결정하는 Clarke and Wright 알고리즘의 절차이다.

Step 1. Saving Value 계산

탈수처리시설이 위치한 하수처리장에서 마을하수도 i 까지 다녀왔을 때의 거리와 출발지에서 다른 마을하수도 j 까지 다녀왔을 때의 거리를 구하고 두 마을하수도간의 거리를 구하여 차량

이 두 노드를 한 번에 방문하였을 때 절약되는 거리를 구한다. 절약되는 값은 $s(i, j)$ 라고 한다. $s(i, j)$ 를 구하는 식은

$$s(i, j) = d(0, i) + d(j, 0) - d(i, j)$$

와 같다. '0'은 탈수처리시설이 위치한 하수처리장을 의미하고, $d(i, j)$ 는 i 에서 j 까지의 거리를 나타낸다.

Step 2. 내림차순 정렬하여 Saving List 생성

모든 마을하수도를 대상으로 $s(i, j)$ 를 계산하여 구한 절약되는 값을 큰 순서대로 내림차순으로 정렬하여 Saving List를 생성한다.

Step 3. Saving List 끝까지 연결여부 검색

탈수처리시설이 위치한 하수처리장에서부터 $s(i, j)$ 값이 큰 순서대로 연결하고 차량용량제약과 시간제약을 고려하여 가능해로 판단되면 차량의 경로에 마을하수도를 추가하고 Saving List에서 해당 마을하수도 쌍을 삭제한다. 그 후 다시 Saving List를 탐색하여 차량용량제약과 시간제약이 위반될 때까지 연결한다. 만약 위반이 되는 마을하수도가 발생되면 연결하지 않고, 다른 차량으로 수거하기 위해 출발지부터 다시 연결하여 새로운 경로를 생성한다.

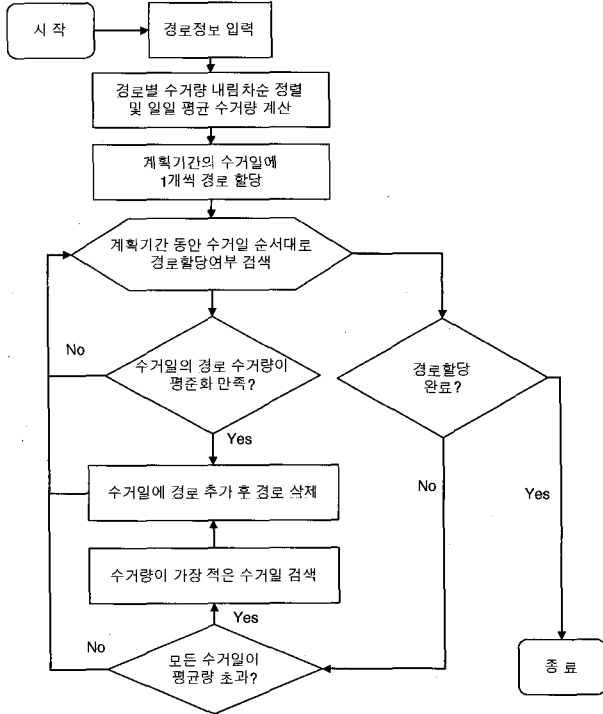
Step 4. 수거완료 여부 탐색

하수처리장에서 출발한 차량이 할당된 마을하수도를 모두 방문하여 슬러지 수거가 완료되었는지 여부를 탐색하여 모든 마을하수도에서 슬러지 수거가 되지 않았을 때는 다시 Step 3으로 가서 Step 3을 수행하고 슬러지 수거가 완료되었을 때는 알고리즘을 종료한다.

Stage 3에서 차량경로결정을 위해 사용한 Clarke & Wright 알고리즘은 생성 알고리즘(constructive algorithm)으로 다른 반복적 알고리즘(iterative algorithm) 보다 빠른 해를 구할 수 있고, 알고리즘 실행시 설정해야 할 파라미터가 없어서, 실제 시스템의 사용 경험이 없는 관리자가 편리하게 사용할 수 있다. 이후, 시스템에서는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 추가하여 숙련된 관리자가 파라미터를 설정하면서 시스템을 사용할 있도록 하였다. 그래서 사용자의 숙련도에 따라 시스템에서 알고리즘을 선택가능하게 개발하였다.

<그림 2>는 Stage 4에서 슬러지수거차량의 일정계획을 수립하기 위해 적용한 MFFD 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. MFFD 알고리즘은 Bin에 들어갈 Item들의 Weight를 내림차순 정렬하여 하나씩 Bin에 채우는 FFD 알고리즘을 수정하여 개발한 알고리즘이다. 다음은 차량경

로 정보를 이용하여 일정계획을 수립하는 MFFD 알고리즘의 절차이다.



〈그림 2〉 MFFD 알고리즘의 흐름도

- Step 1. 경로별 수거량 내림차순 정렬 및 평균량 계산**
Clarke and Wright 알고리즘으로 발생한 경로들의 수거량을 내림차순으로 정렬하고, 일일 평균량을 계산한다. 이는 계획기간 동안 수거량을 평균하게 수거하기 위한 전처리작업이다.
- Step 2. 계획기간의 수거일에 1개씩 경로 할당**
초기에 계획기간의 수거일에 정렬한 경로를 순서대로 경로를 할당해 준다. 즉, 수거일을 Bin으로 보고 계획기간 만큼 생성 후 경로를 하나씩 넣어주어 FFD 알고리즘이 가능하도록 만들어 준다.
- Step 3. 계획기간 동안 수거일에 경로할당검색**
일일 평균 수거량 보다 커지지 않게 수거일에 순서대로 경로를 할당해 준다.
- Step 4. 경로할당 완료 여부 탐색**
모든 경로가 수거일에 할당되었으면 알고리즘을 종료한다. 그렇지 않은 경우는 모든 수거일이 평균량을 초과하는지 탐색 후 Step 3으로 간다. 이때, 초과하면 수거량이 가장 작은 수거일에 경로를 할당하고 Step 3으로 간다.

본 연구에서 제안하는 MFFD 알고리즘과 기존 FFD

알고리즘의 차이점은 다음과 같다.

- **사용 목적** : 본 연구에서는 Bin을 일정계획기간의 수거일로, Weight를 각 경로의 수거량으로, Item을 경로로 가정하였다. FFD 알고리즘은 다양한 Weight를 가진 Item 들을 용량이 정해진 Bin에 넣어 Bin의 개수를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 그러나 MFFD 알고리즘은 정해진 일정계획기간 동안 경로별로 발생한 수거량을 평균화하는 것을 목적으로 있다. 즉, Bin의 개수가 정해져있고, 각각의 Bin에 들어있는 Weight 합의 차이를 최소화하는 것이 목적이다.
- **평균화 개념** : FFD 알고리즘은 Bin에 들어있는 Weight 합의 차이에 대해서는 고려하고 있지 않지만, MFFD 알고리즘에서는 Weight의 평균값을 구하여 Bin에 비슷한 양의 Weight가 들어갈 수 있게 평균화하면서 알고리즘이 진행된다. 그리고 평균값을 초과하는 시점에서는 First Fit Decreasing 개념이 아니라 First Fit Increasing 개념으로 Weight가 작은 Item을 Weight의 합이 작은 Bin에 할당한다. 이로써 일정계획기간 동안 경로별로 발생한 수거량을 평균화할 수 있다.

위와 같이 본 연구에서 제안한 MFFD 알고리즘은 FFD 알고리즘보다 더 좋은 해를 찾는 해 개선의 관점이나 빠른 시간에 해를 찾는 알고리즘 수행 속도의 관점으로 개발한 것이 아니라 실제 현실문제에서 주어진 일정계획수립기간에 관한 제약사항을 처리하기 위해 제안하는 알고리즘이다.

4. 슬러지 수거 관리 시스템

본 절에서는 Visual C++ 6.0과 Visual Basic 6.0, Microsoft Access 2000을 이용하여 구현한 본 연구의 산출물인 슬러지 수거차량의 운영 시스템을 보여준다. 차량의 평균 속도, 운행가능시간 등과 같은 차량정보와 하수처리시설간의 이동거리, 하수처리장별 서비스 시간 등 관련 정보를 입력하면 앞에서 언급한 알고리즘을 통하여 슬러지 수거차량의 방문경로정보와 일정계획이 표로 출력되고 지도상으로 경로가 표현된다.

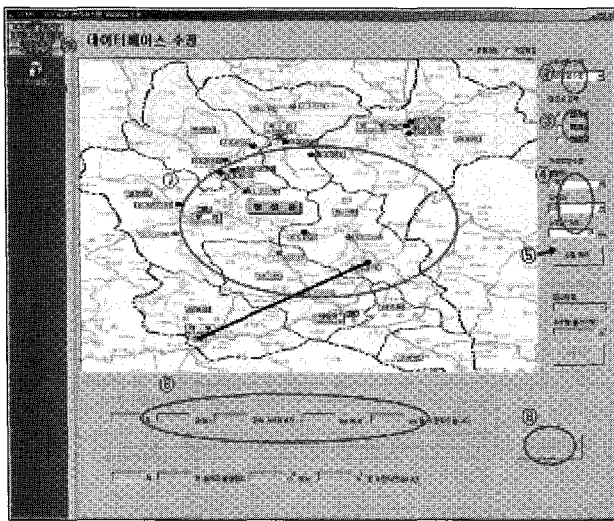
슬러지 수거 관리 시스템은 기본적으로 입력되어 있는 데이터베이스에서 하수처리시설간의 거리와 슬러지를 수정할 수 있도록 거리정보와 슬러지정보를 수정하는 부분이 있다. 그리고 슬러지 수거차량이 이동할 때 필요한 하수처리시설간의 최단경로를 검색하는 부분이 포함된다. 또한, 슬러지 수거차량의 이동경로를 결정하기 위해 차량정보와 관련정보를 입력하는 부분과 슬러

지 수거차량의 이동경로를 경로별로 나타내어 주는 표 형태와 대상지역에 그래픽으로 나타내는 부분으로 구성되어 있다. 즉, 슬러지 수거 관리 시스템은 지점간의 거리정보와 지점에서 슬러지 발생량을 수정하는 데이터베이스 수정 부분과 지점간의 최단경로를 탐색하여 알려주는 부분과 탈수처리시설의 위치에 따른 수거차량의 최적경로와 일정계획을 결정하는 부분으로 구성되어 있다. 다음 절에서는 슬러지 수거 관리 시스템 화면과 구성에 관하여 알아보도록 한다.

4.1 데이터베이스 수정

4.1.1 거리 정보 수정

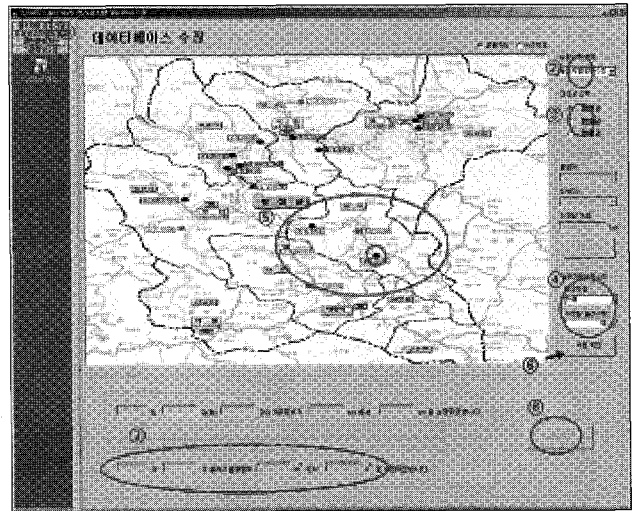
①은 데이터베이스 수정을 시작하는 부분이고, ②에서 거리정보 수정을 선택한다. ③에서 대상지역 선택하고, ④에서 출발지와 도착지를 선택하여 수정할 거리를 입력한다. ⑤를 누르면 프로그램 실행되고 ⑥에서 수정된 거리정보를 다시 확인할 수 있으며, ⑦에서 출발지와 도착지의 위치와 거리가 지도 위에 표현된다. ⑧은 다시 실험하고 싶을 때 선택하고 ⑨는 다른 메뉴로 이동할 때 선택한다.



<그림 3> 거리 정보 수정 화면

4.1.2 슬러지 정보 수정

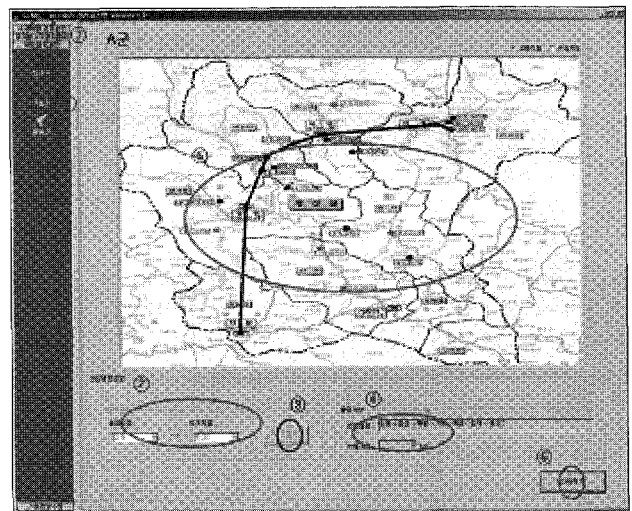
①은 데이터베이스 수정을 시작하는 부분이고, ②에서 슬러지 정보 수정을 선택한다. ③에서 대상지역 선택하고 ④에서 슬러지 발생량을 변경할 대상지점을 고르면 ⑤에서 대상지점을 지도 위에서 표현한다. ⑥에서 프로그램을 실행하고 ⑦에서 수정한 슬러지 발생량을 다시 확인할 수 있다. ⑧은 다시 실험하고 싶을 때 선택하고 ⑨는 다른 메뉴로 이동할 때 선택한다.



<그림 4> 슬러지 정보 수정 화면

4.2 최단경로 검색

①에서 대상지역을 선택하고 ②에서 출발지점과 도착지점을 고른 후, ③에서 실행버튼을 클릭하여 프로그램을 실행한다. ④에서 출발지점에서 도착지점까지 이동경로와 이동거리 출력이 되고 ⑤에서 이동경로를 지도에 표현한다. ⑥은 다시 실험하고 싶을 때 선택하고 ⑦은 다른 메뉴로 이동할 때 선택한다.



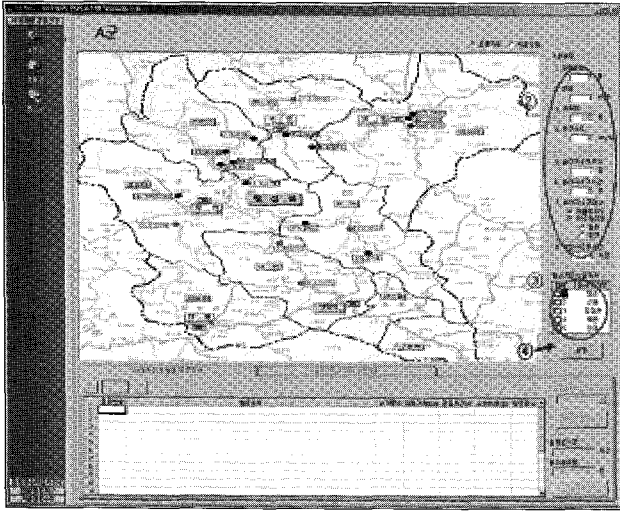
<그림 5> 최단거리 검색 화면

4.3 탈수처리시설의 위치에 따른 수거차량 경로 및 일정계획 결정

4.3.1 입력화면

①에서 대상지역을 선택하고 ②에서 수거차량 정보 및 작업자 정보 입력한다. ③에서 탈수처리시설을 설치

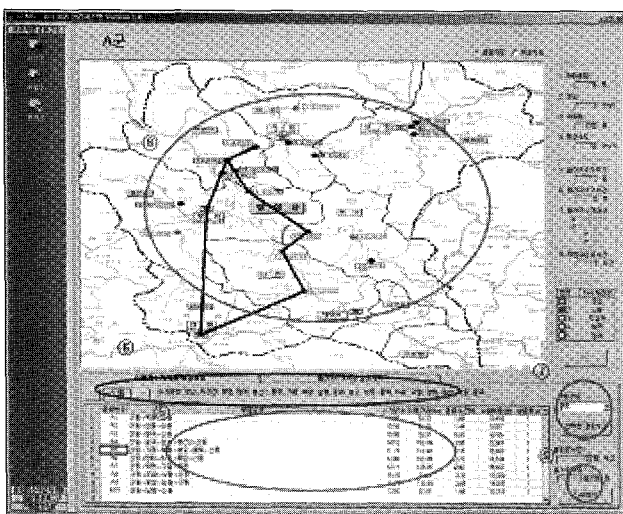
하는 하수처리장 선택하고 ④에서 실행버튼을 클릭하여 프로그램을 실행한다.



<그림 6> 차량경로결정 및 일정계획 입력화면

4.3.2 출력화면

⑤부분은 알고리즘에 의해 경로별 방문순서, 슬러지 수거량, 차량의 이동거리, 경로시간, 이동비용, 발생횟수의 경로정보와 수거일별 운행경로번호, 일일수거량, 일일이동거리, 일일경로시간, 일일이동비용, 일일필요차량의 일정계획이 출력되는 부분이다. ⑥부분은 선택한 탈수처리시설에 할당된 마을하수도를 보여주는 부분이다 (화살표를 누르면 탈수처리시설이 설치된 다른 하수처리장에 할당된 마을하수도를 나타냄). 또한, 여기서 경로정보와 일정계획을 전환할 수 있다. ⑦은 ⑤번 부분에 출력된 경로들 중에서 지도 위에 경로를 도시화할



<그림 7> 차량경로결정 및 일정계획 출력화면

때 콤보박스에서 원하는 경로를 선택하는 부분이다. ⑧은 ⑦에서 선택된 경로를 지도에서 보여주는 부분이다. ⑨는 다시 실험하고 싶을 때 선택하고 ⑩은 다른 메뉴로 이동할 때 선택한다.

5. 실험결과 분석 및 평가

본 연구는 탈수처리시설을 설치할 하수처리장에 관한 건설 프로젝트를 제안하는 과정에서 슬러지 수거전략의 가이드라인으로 시스템을 개발하였다. 하수처리장의 건설이 계획단계에 있기 때문에 기존의 마을하수도에서 하수처리장으로 슬러지를 수거한 실험결과가 없어서 기존의 방법과 제안하는 방법과의 비교가 어렵다. 그래서 본장에서는 실제 데이터를 가지고 제안하는 슬러지 수거 관리 시스템을 이용한 실험과 경제성 분석을 위한 이동비용비교에 관한 실험을 하여 관리자가 차량경로를 결정하고 일정계획을 수립할 수 있는 가이드라인을 제공하는데 중점을 두었다.

5.1 적용 알고리즘 실험

제시한 수리모델과 알고리즘으로 구현한 슬러지 수거 관리 시스템을 이용하여 <그림 1>의 A군 슬러지 수거 지역에서 수집한 실제 데이터로 실험을 하였다. 실험환경은 차량용량은 7.5톤, 차량속도는 60km/h, 슬러지 수거 계획기간은 7일, 수거 작업시간은 20분, 작업자 근무시간은 8시간으로 가정하였다. A2와 A5 하수처리장에 탈수처리시설이 위치할 때 할당되는 마을하수도를 알아보고, 할당된 마을하수도를 대상으로 차량경로를 결정하고 수거 일정계획을 수립하였다.

<표 1>는 A군 슬러지 수거지역을 대상으로 3.3절의 Stage 1을 수행한 결과이다. A2 하수처리장에는 7개, A5 하수처리장에는 10개의 마을하수도가 할당되었다.

<표 1> 하수처리장별 할당된 마을하수도

하수처리장	할당된 마을하수도
A2	A1, A3, A13, A14, A15, A17, A18
A5	A4, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A16

<표 2>는 하수처리장별로 할당된 마을하수도를 대상으로 3.3절의 Stage 3을 수행한 결과이다. <표 2>는 경로별 방문순서, 수거량, 이동거리, 이동시간을 나타내고 있으며, 3.3절의 Stage 2에서 차량용량보다 수거해야 할 슬러지 발생량이 많은 방문지점의 경로를 발생횟수로

나타내고 있다. <표 2>의 결과를 분석해보면 계획기간 7일 동안 A2 하수처리장에 할당된 마을하수도의 슬러지를 수거하기 위해서 수거차량을 6번 운행하고, A4 하수처리장의 경우는 수거차량을 8번으로 운행해야 한다.

<표 2> 하수처리장별 수거차량의 경로정보

하수처리장	경로	방문순서	수거량(t)	이동거리(km)	경로시간(h)	발생횟수
A2	R1	A2-A13-A2	7.50	66.28	1.44	3
	R2	A2-A3-A2	7.50	28.97	0.82	2
	R3	A2-A14-A1-A2	7.00	64.22	1.74	1
	R4	A2-A15-A3-A2	5.23	57.93	1.63	1
	R5	A2-A17-A2	4.41	60.52	1.34	1
	R6	A2-A18-A2	5.18	67.82	1.46	1
A5	R1	A5-A4-A5	7.50	34.39	0.91	7
	R2	A5-A9-A5	7.50	52.71	1.21	2
	R3	A5-A10-A5	7.50	61.30	1.36	2
	R4	A5-A8-A9-A5	6.91	52.71	1.55	1
	R5	A5-A4-A16-A5	6.09	50.79	1.51	1
	R6	A5-A6-A12-A5	5.32	5.32	1.94	1
	R7	A5-A7-A5	4.90	50.88	1.18	1
	R8	A5-A11-A5	6.51	59.33	1.32	1

<표 3> 계획기간동안의 하수처리장별 수거차량의 일정정보

하수처리장	수거일	운행경로번호	일일수거량(t)	일일이동거리(km)	일일경로시간(h)
A2	D1	R1, R6	12.68	134.09	2.90
	D2	R1, R5	11.91	126.79	2.78
	D3	R1	7.50	66.28	1.44
	D4	R2	7.50	28.97	0.82
	D5	R2	7.50	28.97	0.82
	D6	R3	7.00	64.22	1.74
	D7	R4	5.23	57.93	1.63
A5	D1	R1, R2, R6	20.32	163.61	4.06
	D2	R1, R2, R7	19.90	137.97	3.30
	D3	R1, R3	15.00	95.69	2.26
	D4	R1, R3	15.00	95.69	2.26
	D5	R1, R4	14.41	87.09	2.45
	D6	R1, R8	14.01	93.72	2.23
	D7	R1, R5	13.59	85.18	2.42

<표 3>은 3.3절의 Stage 3에서 일정계획을 수립하기 위해 적용한 MFFD 알고리즘을 수행한 결과이다. 근무자의 하루 근무시간이 8시간이므로 <표 2>에서 각 하수처리장에서 발생한 경로를 하루에 다 처리 할 수가 없다. 그래서 각 하수처리장은 계획기간동안에 수거일별로 비슷한 슬러지를 운반할 수 있도록 수거량으로 평균화하였다. 이 때, 이틀에 걸쳐서 수거작업을 수행하는

경우와 하루에 작업자를 두 명으로 늘려서 수거작업을 수행할 수 있는데 여기서는 작업자가 한 명일 경우에 대한 일정을 나타낸다.

5.2 경제성 분석을 위한 이동비용비교 실험

<그림 1>의 A군을 대상으로 적재용량이 다른 탱크로리차량을 사용하여 계획기간을 5일에서 마을하수도의 최대저장가능 기간인 10일까지 변화시키면서 이동비용을 비교하였다. 이동비용은 거리에 비례한다고 가정하여

$$\text{이동비용} = \frac{\text{거리}}{\text{연비}} * \text{유류비}$$

과 같이 산출하였다. 연비는 탱크로리 차량의 종류마다 5톤 차량은 9km/h, 15톤 차량과 25톤 차량은 8km/h이며, 유류비는 리터당 1,300원으로 일정하다고 가정하였다.

계획기간이 다르기 때문에 이동비용을 동일한 기준으로 비교하기 위해 이동비용을 계획기간으로 나누는 일일 이동비용을 구하였다. <표 4>의 결과를 분석해보면 수거 계획기간에 상관없이 차량용량이 커질수록 일일 이동비용은 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 계획기간이 길어질수록 일일이동비용은 감소되는 것을 알 수 있다. 5일에서 10일의 계획기간에서 차량용량과는 상관없이 계획기간이 9일일 때 이동비용이 가장 적게 나왔다. 즉, 25톤 탱크로리 차량으로 계획기간을 9일로 슬러지를 수거할 때 이동비용이 가장 적게 든다는 것을 알 수 있다.

<표 4> 계획기간과 차량용량 변화에 따른 이동비용비교

계획기간	차량용량	이동시간(h)	이동비용(원)	*일일이동비용(원)
5일	5t	19.34	90,052	18,010
	15t	12.46	47,690	9,538
	25t	25.96	42,810	8,562
6일	5t	21.56	102,060	17,010
	15t	13.85	59,687	9,948
7일	25t	26.08	43,797	7,300
	5t	23.73	111,109	15,873
8일	15t	13.33	55,223	7,889
	25t	26.23	45,086	6,441
	5t	25.23	114,981	14,373
9일	15t	14.31	60,792	7,599
	25t	26.51	47,497	5,937
	5t	26.49	124,653	13,850
10일	15t	14.54	62,800	6,978
	25t	26.48	47,285	5,254
	5t	30.82	145,238	14,524
10일	15t	16.06	75,915	7,592
	25t	27.92	59,687	5,969

주) *일일이동비용 = 이동비용 / 계획기간.

6. 결론 및 추후 연구과제

본 연구를 통하여 슬러지 수거차량의 경로를 결정한 분야에 대해 차량용량 제약이 있는 차량경로결정문제를 적용하여 수리적인 모델을 제시하고 알고리즘을 통해 해를 구하는 시스템 개발에 성공하였다. 그리고 슬러지 수거 대상지역에서 차량경로에 따른 슬러지 수거 일정 계획을 수립하였으며, 계획기간과 차량용량 변화에 따른 이동비용 비교도 하였다.

본 연구의 결과물인 슬러지 수거 관리 시스템은 다양한 수거조건으로 여러 지역에 대하여 이동비용을 비교함으로써 실제 관리자가 슬러지 수거차량의 경로결정과 일정계획에 대하여 직접적으로 사용할 수 있다. 건설 분야에서 계획기간에 따른 이동비용의 비교 분석으로 경제적 평가를 수행하는 LCC(Life Cycle Cost)의 중요요소로 사용할 수 있으며, 또한, 유지관리 분야에서 의사결정에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

향후에는 본 연구에서의 사용한 알고리즘이 발견적 기법이므로 최적해를 보장하지 않기 때문에 Exact Algorithm의 개발이 필요하다. 또한, k-opt와 타부 서치 알고리즘 등의 반복적 발견적 해법을 추가함으로써 차량경로결정 방법을 개선할 수 있을 것이다.

본 연구에서 다루지 않았지만 현실적으로 고려할 수 있는 복잡한 문제 상황이 많이 남아 있다. 마을하수도 저장 용량이 고정되어 있을 경우와 마을하수도마다 다를 경우에 대한 최적화 모델의 개발이나 하수처리장에 설치된 탈수처리시설의 처리량을 고려한 최적화 모델의 개발에 대한 연구가 가능할 것이다. 또한, 용량이 다른 탱크로리 차량이 복합적으로 고려된 모델에 관한 연구를 할 수 있을 것이라 생각한다. 나아가 하수처리시설의 최적입지 결정문제에 관한 접근을 생각할 수 있으며, 수거전략을 수립하는데 있어서 방문지 결정과 차량 경로결정을 동시에 할 수 있는 통합 모델에 대한 연구를 할 수 있을 것이라 생각한다.

참고문헌

- [1] Blakeley, F., Bozkaya, B., Cao, B., Hall, W. and Knolmayer, J.; "Optimizing periodic maintenance operations for schindler elevator corporation," *Interfaces*, 33(1) : 67-79, 2003.
- [2] Chao, I. M.; "A tabu search method for the truck and trailer routing problem," *Computers & Operations research*, 29 : 33-51, 2002.
- [3] Clarke, G. and Wright, J.; "Scheduling of Vehicles form a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Operations Research*, 12 : 568-581, 1964.
- [4] Fleischmann, B., Gnuzmann, S., and Sandvof, E.; "Dynamic vehicle routing based on online traffic information," *Transportation Science*, 38(4) : 420-433, 2004.
- [5] Gulay, B. and Demet, O.; "A tabu search algorithm for the vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, 26 : 255-270, 1999.
- [6] Hadjiconstantinou, E. and Baldacci, R.; "A Multi-Depot period Vehicle Routing Problem arising in the Utilities Sector," *Operational Research Society*, 49(12) : 1239-1248, 1998.
- [7] Hollis, B. L., Forbes, M. A. and Douglas, B. E.; "Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at Australia Post," *European Journal of Operational Research*, 2005.
- [8] Perrier, N., Langevin, A., and Campbell, J. F.; "A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV : vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal," *Computers & Operations Research*, 2005.
- [9] Potvin, J., Lapalme, G., and Rousseau, J.; "A computer system for the design of vehicle routing algorithms," *Computers & Operations Research*, 16(5) : 451-470, 1989.
- [10] Ruiz, R., Maroto, C., and Alcaraz, J.; "A decision support system for a real vehicle routing problem," *European Journal of Operational Research*, 153 : 593-606, 2004.
- [11] Scheuerer, S.; "A tabu search heuristic for the truck and trailer routing problem," *Computer & Operations Research*, 2004.
- [12] Tadei, R., Perboli, G., and Croce, F. D.; "A heuristic algorithm for the auto-carrier transportation problem," *Transportation Science*, 36(1) : 55-62, 2002.
- [13] Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L. and Ou, K.; "Heuristic Methods for Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(3) : 281-295, 2001.