

# 우수관망 시스템 설계에 있어서의 최적화기법의 비교

## Comparison of Optimization Techniques in Cost Design of Stormwater Drainage Systems

김 명 수\* / 이 창 용\*\* / 김 태 진\*\*\* / 이 정 호\*\*\*\* / 김 중 훈\*\*\*\*\*  
Kim, Myoung Su / Lee, Chang Yong / Kim, Tae Jin / Lee, Jung Ho / Kim, Joong Hoon

---

### Abstract

The objective of this research is to develop a least cost system design method for branched storm sewer systems while satisfying all the design constraints using heuristic techniques such as genetic algorithm and harmony search. Two sewer system models have been developed in this study. The SEWERGA and SEWERHS both determine the optimal discrete pipe installation depths as decision variables. Two models also determine the optimal diameter of sewer pipes using the discrete installation depths of the pipes while satisfying the discharge and velocity requirement constraints at each pipe. Two models are applied to the example that was originally solved by Mays and Yen (1975) using their dynamic programming(DP). The optimal costs obtained from SEWERGA and SEWERHS are about 4% lower than that of the DP approach.

**key words** : Genetic Algorithm, Harmony Search, Branched Storm Sewer system, Dynamic Programming, Optimal Cost

### 요 지

본 연구의 목적은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 음정탐색법(Harmony Search)과 같은 발견적 방법과 동적계획법과 같은 최적화 기법들이 분기형 우수관망시스템의 최적비용 설계법에 적용됨에 있어 효율성을 비교하는데 있다. 이 목적에 맞추어 본 연구에서는 두 개의 우수관망 설계모형을 개발하였다.. 하나는 SEWERGA이고 다른 하나는 SEWERHS로서 각각의 모형은 결정변수로 최적의 파이프 매설깊이를 채택하였다. 이 두 모형은 유량과 유속의 제약조건을 만족시키는 가운데 파이프의 적절한 매설깊이에 따른 최적관경도 결정한다. 이 두 모델을 1975년 동적계획법(Dynamic Programming)을 이용하여 Mays와 Yen에 의해 계산된 예제에 적용하였다. SEWERGA와 SEWERHS에 의해 계산된 결과는 동적계획법에 의한 연구결과보다 약 4%의 비용 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 유전자알고리즘, 음정탐색법, 분기형 우수관망, 동적계획법, 최적비용

---

\* 정희원 · 남원건설엔지니어링 수자원부 (e-mail : life999@hanmail.net)  
\*\* 한국건설기술연구원 연구원  
\*\*\* 정희원 · Texas A&M University 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 정희원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정  
\*\*\*\*\* 정희원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

최근에 이상적인 기상현상으로 이상홍수에 가까운 호우가 발생하면서 도시지역의 물관리가 매우 중요하게 인식되고 있다. 도시화로 인한 불투수 면적의 증가는 호우로 인한 직접유출량의 증가를 초래하고 그에 따른 피해는 아주 심각하다. 효율적인 우수관망의 설계는 도시홍수의 규모를 작게 하여 그 피해를 줄일 수 있으며, 이에 대부분의 도시들은 배수시설의 설계, 건설 및 운영에 엄청난 투자를 하고 있다. 하지만 우수관망 시설의 공사는 대부분 많은 돈을 필요로 하는 대규모의 SOC사업이기 때문에 최적비용 설계가 요구되고 있으며 이에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 외국에서는 과거 1970년대부터 우수관망의 최적설계에 대한 많은 연구가 있었지만 국내에서는 실무자들의 경험을 토대로 하는 설계가 아직도 행해지고 있다. 최근에 많이 사용되고 있는 최적화방법은 기존 최적화방법의 단점을 보완한 소위 발견적(heuristic) 방법이다. 발견적 방법의 대표적인 것으로는 SA(Simulated Annealing), TA(Taboo Search), GA(Genetic Algorithm) 등이 있다. 본 논문은 우수관망의 최적설계에 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 최근 개발된 음정탐색법(Harmony search)을 적용하였다. 기존의 몇몇 논문이 우수관망 설계에 GA, HS 등의 발견적 방법을 적용하여 단순히 비용 산출에 국한되고 기존의 기법(DP 등)과 비교하여 그 효율성에 대한 구체적인 비교-분석을 실시하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 과거 외국에서 사용된 전통적인 연구방법인 동적계획법(Dynamic Programming)을 이용한 결과와 비교 검토하여 우수관망 설계의 최적비용 산출에 있어서 발견적 방법의 적용성 및 효율성을 구체적으로 분석하였다.

### 1.2 연구동향

Mays and Yen(1975)은 동적계획법(DP)과 이산미분 동적계획법(Discrete Differential Dynamic Programming, DDDP)을 이용하여 우수관망의 중단 깊이와 관망설계시의 최적비용을 계산하였다. Mays and Wenzel(1976)은 Mays and Yen(1975)에서 연구된 같은 예제를 가지고 Serial approach라는 방법을 사용하여 확장된 관망 시스템 설계시의 최적비용을 계산하였다. Froese and Burges(1978)은 Mays and Wenzel의 결과보다 좀더 자세한 결과를 보여주었다.

또한 Mays가 구한 최적 상용관경을 보다 쉽게 구할 수 있으며, 목적함수와 제약조건에 의해 제한되지 않는 방법을 제안하였다. Brown and Koussiss(1987)은 우수관망 설계시 필요한 수리계산들을 작업지(worksheet)를 이용하여 좀더 효과적으로 계산하였다. 또한, Miles and Heaney(1988)은 기존의 우수관망설계법을 좀 더 발전시키기 위하여 Lotus 1-2-3 worksheet package를 사용하였다. Charalambous and Eliman(1990)은 하수관망 설계에 귀납적 접근을 시도하였다. 이 방법은 모든 수력 구조물에 적합하였고 두 개의 큰 관망의 설계에 이용되어 타당성의 검증되었다. Li and Matthew(1990)은 도시배수조직의 최적 배열에 방향탐색법(Searching direction method)을 이용하였다. Kuo et al(1991)은 우수관거 최저 비용 설계시 펌프장의 운영 및 건설비용을 포함한 운영모형을 개발하였다. 이 방법은 저지대의 우수관거에 적용되었으며 DDDP와 조화를 이루도록 전단계에 펌프장이 있다는 몇 가지 가정을 두었다. Greene et al(1999)는 관망설계 프로그램과 GIS의 공간분석기능을 결합하였다. 이 프로그램을 통하여 하수망을 구성하는데 필요한 맨홀의 위치 선정 프로그램을 개발하였다.

Rauch and Harrenoes(1999)는 천이지역의 오염도의 최소화에 유전자 알고리즘을 적용하였다. S. Yagi and S. Shiba(1999)는 fuzzy 이론과 유전자 알고리즘을 이용한 펌프장 운영에 적용하였다. 이를 통하여 유역면적의 홍수와 유입되는 유량의 오염도의 감소를 가능케 하였다.

김중우(2000)는 음정탐색법(Harmony Search, HS)을 개발하여 최소관경설계계와 파이프망 설계에 적용하여 이전의 알고리즘보다 좋은 결과를 보였다. 백경록(2000)은 음정탐색법을 이용한 영월댐의 공사비 및 운영비에 적용하여 설계의 편이성의 증대 및 비용면에서도 절감을 가능하게 하였다.

## 2. 우수관망 설계와 최적화 기법의 이론

### 2.1 우수관망설계

우수관망 설계는 크게 유출량 계산과 시스템 설계로 나눌 수 있다. 먼저 유출량을 계산하는 방법으로는 합리식을 들 수 있고 이 식은 매우 간편하여 다른 몇 가지의 향상된 공식이 나왔음에도 불구하고 현재에 가장 많이 쓰여지고 있다. 하지만, 본 연구에서는 합리적인 유출량이 이미 구해져 있다는 가정 하에 주어진 유출량 상수값을 우수관망 시스템의 입력자료로 사용하였다. 다른 하나는 우수관망 시스템의 설계이다. 본 연

구에서의 최적비용설계라 함은 본 시스템이 담당해야 하는 조건하에서 그 시스템의 설치비용의 최소값을 찾는 것이라 할 수 있다. 관망 시스템에서의 비용은 관의 직경과 하수도의 깊이에 의해 좌우된다. 설계된 모든 파이프는 모든 제한조건을 만족시키면서 최대 설계유량을 송수할 수 있게 설계되어야 한다. 우수의 최대 최소 유속 또한 제약조건으로 들어가며 속도의 조건을 만족시키고 동시에 파이프 매설깊이 또한 만족되어야 한다. 설계유량을 적절히 파이프로 유하시키는 방법에는 두 가지 방법이 있다. 우선 큰 파이프 관경과 완경사를 가지게 할 수 있다. 이 방법은 굴착비용을 줄일 수 있으나 파이프 비용이 많이 든다. 다른 방법은 작은 파이프 관경과 급경사를 가지게 하는 것이다. 이 방법은 파이프 비용을 줄일 수 있으나 굴착 비용이 크다. 따라서 두 맨홀사이에 위치한 관의 경사가 결정되면 파이프의 관경을 정할 수 있기 때문에 두 맨홀의 매설깊이가 총공사비를 좌우하는 매개변수가 된다.

## 2.2 최적화기법

본 연구에서 적용한 최적화방법은 기존 최적화방법의 단점을 보완한 발견적 방법이다. 기존의 방법인 선형계획법, 동적계획법 등에서는 가능성을 모두 열거하기 때문에 문제의 크기가 증가하게 되면 그에 따른 계산시간과 계산기의 공간이 기하급수적으로 늘어난다. 그리고 경우에 따라서는 계산이 불가능한 일도 생기지만 발견적 방법에서는 문제의 크기가 증가해도 시간과 공간이 적절히 증가하기 때문에 계산이 가능하게 되며 또한 전체 최적해에 가까운 해를 제시한다. 이 중에서 유전자 알고리즘은 인간의 진화과정을 본떠 자연선택 과정에 의해 우리가 원하는 해를 찾아가는 방법이며, 음정탐색법은 음악의 3요소인 멜로디, 리듬, 화음에서 화음하나를 놓고 봤을 때 그 조화를 이루는 과정을 묘사한 것이다(Geem et al., 2001).

### 2.2.1 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

Goldberg(1989)에 의하면 유전자 알고리즘은 적합도 함수(Fitness Function)라는 목적함수를 재생(Reproduction), 교배(Crossover; 교차) 및 돌연변이(Mutation)의 큰 3가지 과정이 반복되면서 생물학적인 적자 생존의 법칙의 유전적인 체계에 기초한 탐색 알고리즘이다. 전(前)세대의 생존자(우수개체)로부터 새로운 세대의 개체들의 집합이 형성된다. 재생은 적합도 함수값(fitness function value)의 큰 기호열(string)이 다음 세대로 진행됨에 따라 더 많은 자손을 남길 수 있게 된다. 부모 세대는 현재의 세대로부터 무작위 선

택되고, 차세대는 선택된 부모 세대의 유전자 재결합, 교차, 돌연변이를 거쳐 만들어진다. 교배는 미지의 해 공간에 대한 탐색의 개념에서 볼 때 상호 교차가 탐색의 주된 연산자(operator)이다. 두 부모해의 유전 정보를 임의의 위치에서 부분적으로 교환함으로써 새로운 자손해를 생성하도록 하는 조작법이다. 돌연변이는 부모해로부터 자손해로 전달되는 특정한 유전 정보에 대하여 무작위적인 변형을 시도함으로써 전체 해 집단에서 배제된 새로운 개체를 발생시키거나 진화과정에서 상실된 특정 유전 정보의 재현을 시도하는 조작 방법이다. 이 방법을 통해 집단의 다양성을 보존한다. 적합도는 개체가 환경에 적응하여 도태되지 않고 살아남을 수 있는 능력을 나타낸다. 목적 함수(objective function) 즉, 최적화 하고자 하는 함수는 각 개체의 적합도를 평가하는 기반이다. 그러나 목적함수의 값의 범위는 문제마다 다르기 때문에 보통 정해진 구간 사이의 양수 값을 갖도록 표준화된 값을 사용한다. 즉, 표준화하기 이전의 적합도의 값을 raw fitness라고 하며 표준화되어서 실제로 개체 선택의 기준이 되는 함수를 적합도 함수(fitness function)라고 한다. 이렇게 유전자 알고리즘은 세대(generation)를 거듭함에 따라 어떤 최적화 하는 해에 수렴하고 도달하는 탐색 알고리즘이다. 본 연구에서는 변수를 유한한 길이의 기호열(string)로 부호화하여 각 변수에 대응하는 2진수 값을 기호열로 부호화한 다음 그 기호열을 대상으로 최적화 작업을 수행하게 되는 단순 유전자 알고리즘(Simple Genetic Algorithm)을 이용하였다.

### 2.2.2 음정탐색법(Harmony Search)

최근에 새로운 발견적 방법으로 개발된 것이다. 음악에서 화음에 해당하는 것이 공학에서는 최적해라고 볼 수 있다. 음정탐색법은 기존의 방법인 SA 나 TS 와 달리 해를 군탐색하고 있다. 즉, 각 악기(각 변수)가 어떤 음(어떤 값)을 가짐에 있어서 기존의 많은 경험들이 영향을 미치게 된다. 이는 바로 이전의 화음만이 영향을 미치는 것이 아니라 과거부터 축적된 상당량의 화음집합이 새로이 만들어 내는 화음에 영향을 미치는 것이기 때문에 군탐색이라 볼 수 있고 광대한 영역을 탐색하는 것이라고 볼 수 있다. 그러면서도 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서 TS의 특징을 지는 것이고 또한 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서 SA의 특징도 지니고 있는 것이다. 같은 군탐색의 특징을 가지고 있는 유전자 알고리즘과 비교해보면, 유전자 알고리즘의 경우 새로운 해를 만들어 냄에 있어

서 오직 부모세대의 두 유전자가 새로운 유전자에 영향을 미친다. 그러므로 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 되는 것이다. 그러나 음정탐색법은 과거의 모든 화음에서부터 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 보다 풍부한 정보를 얻게 되는 것이다.

HS에서도 다른 기법과 같이 몇 가지의 인자들을 사용하는데 이러한 인자로는 HM(harmony memory), HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjusting Rate)가 있으며 구조도는 그림 1과 같다.

### 3. 최적화기법을 이용한 우수관망설계 모형의 개발 및 적용

본 연구에서는 우수관망의 최적비용설계를 할 수 있는 두 가지 모형을 개발하였다. 하나는 유전자 알고리즘을 적용한 SEWERGA이고, 다른 하나는 음정탐색법을 적용한 SEWERHS이다. 두 가지 모형을 개발한 후 Mays and Yen(1975)이 동적계획법에 적용한 같은 예제를 이용하여 서로의 결과를 비교하였으며,

각 모형별 최적비용의 직접 비교를 위하여 Meredith(1971)가 제안한 비용산정식을 공통적으로 적용하였다.

### 3.1 적용예제(Mays and Yen, 1975)

이 예제는 관망과 맨홀의 위치를 정할 때 비용을 최소화시킬 수 있는 파이프의 크기와 경사를 결정하는 것이다. 본 모형에 적용된 예제는 기존 연구되었던 예제로서 그림 2와 같이 21개의 맨홀과 20개의 파이프로 구성되어 있다. 그림 2에 구체적인 구성도를 나타내었고 구체적인 상수 값들은 표 1에 나타내었다. 이해의 편리함을 위해서 전체 시스템을 Main, Branch A, Branch B, Branch C 와 Branch D의 5개의 작은 시스템으로 분리하였다. 여기에서 Main 하수관은 M2, M4, ... M18 이고 맨홀은 M1, M3, ..., M19이다. Main, Branch A, Branch B, Branch C 와 Branch D는 맨홀 M7, M9, M11, M13에 각각 연결되어 있다. 그림 2-b는 각 흐름의 경사에 따라 9개의 stage로 나눈 것이다.

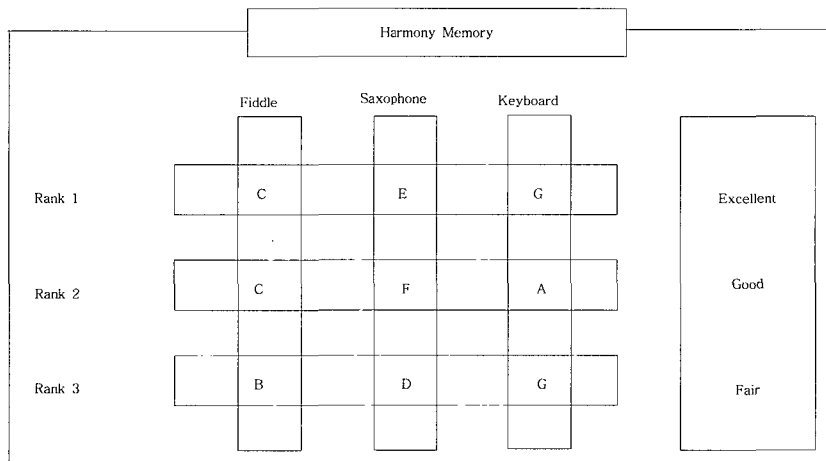


그림 1. Harmony Memory의 구조

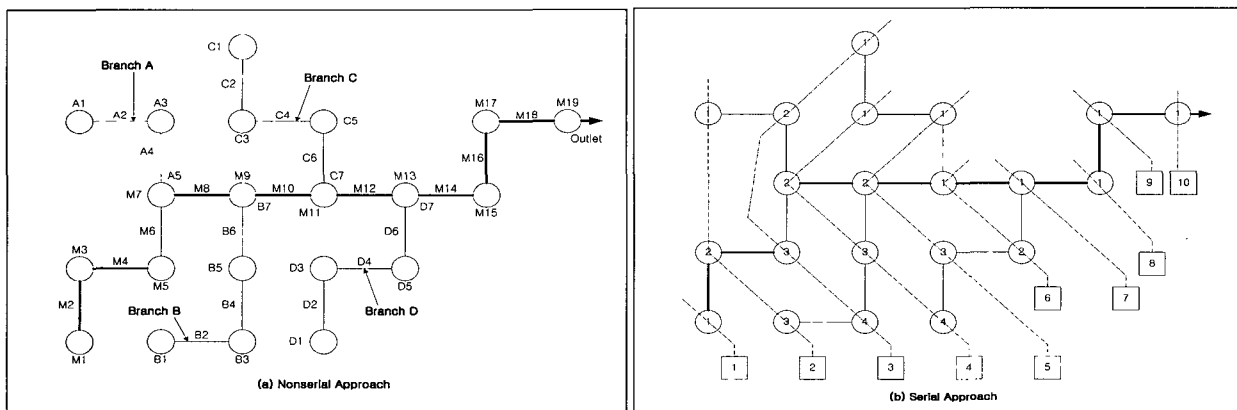


그림 2. 예제 분기형 우수관망 시스템의 구성도

표 1. 분기형 우수관망 시스템의 자료

	파이프 #	맨홀 #	파이프 길이 (ft)	표면 표고 (ft)	유입량 (cfs)		파이프 #	맨홀 #	파이프 길이 (ft)	표면 표고 (ft)	유입량 (cfs)
Main		M1		500.0	4.0	Branch B		BM1		490.0	8.0
	MP1		350				BP1		500		
		M2		495.0	3.0			BM2		485.0	4.0
	MP2		400				BP2		450		
		M3		487.0	2.0		BM3		475.0	4.0	
	MP3		350			BP3		350			
		M4		480.0	5.0		BM4		470.0	0.0	
	MP4		550			Branch C		CM1		485.0	9.0
		M5		470.0	6.0			CP1		500	
	MP5		500					CM2		475.0	7.0
		M6		465.0	7.0			CP2		350	
	MP6		600				CM3		470.0	4.0	
		M7		455.5	7.0		CP3		350		
	MP7		400				CM4		465.0	0.0	
	M8		451.0	2.0	Branch D		DM1		468.0	4.0	
MP8		500				DP1		400			
	M9		448.0	5.0			DM2		464.0	2.0	
MP9		600				DP2		300			
			445.0	0.0			DM3		460.0	3.0	
Branch A		AM1		490.0	4.0		DP3		35		
	AP1		400				DM4		455.0	0.0	
		AM2		485.0	4.0						
	AP2		430								
		AM3		480.0	0.0						

각 맨홀의 위치, 맨홀 표고, 맨홀간 거리, 총 공사비의 비용 공식 및 설계 최대유량은 상수로 주었다.

이 시스템을 최적화 문제로 구성하기 위해서는 주어진 변수 및 상수들을 이용하여 목적함수식을 만들어야 한다. 본 설계문제에서는 모든 제약조건을 만족시키면서 비용이 가장 작은 관경을 가지는 맨홀 매설 깊이, 파이프 및 맨홀의 설치비용을 목적함수로 정하는 것이 타당할 것이다. 목적함수는 다음 식과 같다 (Mays and Yen, 1975).

$$Min. Cost = \sum_{i=0}^N (C_{P_i} + C_{M_i}) \quad (1)$$

여기서,  $C_{P_i}$  은 파이프 설치 시 단위 길이 당 비용 (dollars/feet)이며  $C_{M_i}$  은 맨홀 설치비용을 나타낸다. 위의 목적함수를 통해 최소 비용 산정하기 위해서는 Manning 공식을 사용하여 주어진 유량을 유하시킬 수 있는 각 관의 최소관경을 구할 수 있으며 식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{0.463}{n} s^{\frac{1}{2}} d^{\frac{8}{3}} \quad (2)$$

여기서,  $Q$ 는 설계유량,  $s$ 는 길이 각 맨홀사이의 파이프 경사,  $d$ 는 상업용 관경, 그리고  $n$ 은 조도계수(예제의 모든 파이프는 0.013으로 가정)를 나타낸다.

이번 연구에서 사용된 파이프 설치비용 및 맨홀 설치비용 산정을 위한 식은 Meredith(1971)에 의해 제안된 다음의 식을 사용하였다.

$$C_p = 10.98d + 0.8H - 5.98 \quad d \leq 3' \quad H \leq 10' \quad (3)$$

$$C_p = 5.94d + 1.166d + 0.504Hd - 9.64 \quad d \leq 3' \quad H \geq 10'$$

$$C_p = 30.0d + 4.9H - 105.9 \quad d \geq 3'$$

$$C_m = 250 + h^2$$

여기서,  $H$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다

$$H = 0.5 * [(G_i - S_i) + (G_{i+1} - S_{i+1})] + d \quad (G : \text{지반고}, S : \text{유입구 높이})$$

여기서,  $H$ 는 맨홀에 접합하는 파이프의 최저부의 높이에 의해 결정되는 맨홀깊이(feet)이다.

따라서 총공사비를 결정하는 변수는 상업용 관경, 윗 높이, 최저부 높이를 들 수 있으며 이는 맨홀의 매설깊이에 의해 결정된다. 또한, 이 시스템의 연구에서

만족시켜야 하는 제약조건은 다음과 같다. 파이프 설치시 최소 매설 깊이 8ft를 만족시켜야 하고 선택된 파이프의 유하기능 유량은 설계유량보다 같거나 커야 하며, 파이프에서의 흐름은 최소(2ft/sec), 최대 유속 조건(10ft/s)을 만족 시켜야 한다. 또한, 맨홀에서 역류를 방지하기 위하여 부시스템(Branched System)의 수위와 주시스템(Main System)의 수위를 비교하여 낮은 수위를 채택하여야 한다.

### 3.2 모형의 개발

#### 3.2.1 SEWERGA

우수관망 설계에서 최적화 대상으로 설정된 변수 D는 매설깊이이며 그 변수를 할당된 이진비트로 부호화한다(Coding). 본 모형에서 설정된 변수의 범위를 할당된 비트수로 나누어서 그 범위만큼 변수 값을 변화시키며 최적화를 실행한다. 한 개의 세대를 구성하는 기호열의 집단(population)은 30~100사이의 값을 설정하였으며 세대는 1000~10,000사이의 값을 설정하였다. 그리고 유전연산자들 중 교배율은 0.5~1.0의 확률 값으로 하고 돌연변이율은 0.01~0.05사이의 확률 값을 채택하였다. 그리고 초기 유전 연산자의 확률 값은 본 모형을 여러번 조합하여 실행하였을 경우 최적 값이 나올 때의 연산자 값을 산정하여 적절한 유전 연산자의 확률 값으로 범위를 설정하였다. 본 모형에서 적용된 예제(Mays and Yen, 1975)의 경우는 맨홀의 개수가 21개이고 하나의 맨홀당 216(28)개의 후보깊이를 사용하였고 그 범위는 0에서 5.1ft로 가정하여 각 후보의 깊이의 간격이 균등하다 가정하여 따라서 SEWERGA모형으로 해석한 예제에서는 21개의 최적변수와 4536개의 이진수로 이루어진 기호열을 갖게 되는 것이다. 유전알고리즘을 이용한 최적화에서 중요한 것은 각각의 연산자이며 최적설계에서 최적값을 향상시키기 위한 연산자는 재생(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 연산자의 확률 값 들이다. 본 모형의 유전

연산자의 값들은 확률적인 값으로 적정 범위 내에서 설정하여 결정변수들의 최적 값을 시행착오법으로 산출하였다. 표 2는 산정된 유전 연산자들을 나타낸 것이다.

유전자 알고리즘을 이용한 우수관망 최적비용설계의 계산과정을 설명하면 우선 개체집단의 유전연산을 통하여 각 노드의 후보 매설깊이를 설정하고 맨홀간의 고도차에 의한 경사를 결정한다. 경사가 결정되며 흘러보내야 하는 최대유량을 가지고 Manning 공식을 가지고 두 맨홀을 이어줄 파이프의 관경을 계산한다. 계산된 관경을 다시 상업용 관경으로 전환하고 최종 공사비를 계산할 수 있다. 이 계산과정에서 모든 과정이 주어진 제한 조건, 유속, 최소매설깊이 등을 만족시키는지 확인한다. 이러한 과정을 각 세대간의 유전성질의 세습과 돌연변이, 생존 등을 통하여 새로운 개체의 후보집단을 형성하고 집단의 후보해들이 일련의 시스템 계산과정을 거치면서 새로운 진화된 개체를 생성하는 식의 진화단계를 거쳐 최적의 해를 찾아나가는 것이다.

#### 3.2.2 SEWERHS

SEWERHS의 모형에서도 매개변수는 맨홀의 깊이, 즉 파이프의 매설깊이이다. 그 변수는 각 맨홀의 지반고와 최저 맨홀 지반고의 차를 가능 매설깊이 구간으로 선정하였다. 최저 지반고를 가진 맨홀의 매설깊이는 5ft로 가정하였다. 그리고 각각의 매설깊이는 0.5~1사이의 값을 설정하였다. 또한 HM은 200으로 하였고 HMCR은 0.9~0.95의 확률값으로 하였고 PAR은 0.3~0.35의 확률값을 채택하였다(백경록, 2001). 음정탐색법을 이용한 최적값에서 중요한 것은 각각의 HMCR과 PAR값이다. 또한 각 노드의 구간의 매설간격은 0.5~3의 범위로 하였다. 본 모형의 유전 연산자의 값들은 확률적인 값으로 적정 범위내에서 설정하여 결정변수들의 최적값은 시행착오법으로 산정하였다. 표 3은 산정된 Harmony 연산자들을 나타낸 것이다.

표 2. 산정된 유전 연산자

유전 연산자	유전 연산자 값
염색체의 길이	50
개체집단의 크기	10
최대 발생 횟수	3000
교배율	0.5
돌연변이율	0.02

표 3. 산정된 유전 연산자

Harmony 연산자	Harmony 연산자 값
Harmony memory	200
HMCR	0.95
PAR	0.3
파이프 매설 구간	0.75

음정탐색법을 이용한 우수관망 최적비용설계의 계산과정도 SEWERGA의 계산과정과 동일하다. 즉, 프로그램상에서 각 노드의 매설깊이의 범위를 결정한 후 매설깊이를 산정하고 맨홀간의 고도차에 의한 경사를 결정한다. 경사가 결정되며 흘러보내야 하는 최대유량을 가지고 Manning 공식을 가지고 두 맨홀을 이어줄 파이프의 관경을 계산한다. 계산된 관경을 다시 상업용 관경으로 전환하고 최종공사비를 계산할 수 있다.

4. 실제 모형의 적용을 통한 모형의 적합성 검증

4.1 모형의 계산결과 및 비교·분석

표 4에 예제 시스템에 본 연구의 두 가지 모형을 적용한 결과를 DP와 비교해서 나타내었으며, 표 5의 각 모형들의 유속의 결과를 보면 SEWERGA와 SEWERHS는 유속조건(2ft~10ft)를 만족하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Mays and Yen(1975)의 논문에는 유속결과가 나와 있지 않아 Manning 공식으로 유속을 구하여 세가지 모형의 유속결과를 비교하였다.

표 6에서는 3가지 모형의 최종적인 설계비용을 나타내었다. Mays and Yen(1975)에 의해서 구해진 최적비용은 \$267,643로 나타났고 유전자알고리즘을 이용한 SEWERGA는 최적비용으로 \$256,201을 나

표 4. Mays and Yen 모형, SEWERGA 및 SEWERHS의 관망설계에 결과비교

파이프 #	맨홀 #	직경 (ft)			매설깊이 표고(ft)			파이프 #	맨홀 #	직경 (ft)			매설깊이 표고(ft)		
		DP	SG	SH	DP	SG	SH			DP	SG	SH	DP	SG	SH
	M1				500.00	500.00	500.00		BM1				490.00	490.00	490.00
MP1		1.00	1.00	1.00	491.00	492.00	491.00	BP1		1.50	1.50	1.5	480.50	482.00	480.50
	M2				486.00	487.00	485.75		BM2				475.50	476.00	475.25
MP2		1.25	1.25	1.25	485.75	486.00	485.75	BP2		1.50	1.50	1.5	475.50	476.00	475.25
	M3				477.75	479.00	477.50		BM3				465.50	466.00	465.50
MP3		1.25	1.25	1.25	477.5	479.00	477.50	BP3		1.75	1.75	1.5	465.25	465.00	465.50
	M4				470.75	471.36	470.00		BM4				460.25	460.98	457.28
MP4		1.75	2.00	1.75	470.25	470.36	470.00		CM1				485.00	485.00	485.00
	M5				459.56	461.98	458.75	CP1		1.25	1.00	1.25	475.75	477.00	475.25
MP5		2.50	3.00	2.50	458.81	460.98	458.75		CM2				465.75	466.00	465.50
	M6				452.82	456.68	452.75	CP2		1.75	1.50	1.75	465.25	465.00	464.75
MP6		3.50	3.00	3.50	448.47	455.68	449.75		CM3				460.25	461.92	460.25
	M7				443.50	446.99	443.00	CP3		1.75	1.75	1.75	460.25	461.92	460.25
MP7		3.50	3.50	3.50	442.89	446.99	443.00		CM4				454.13	455.68	454.25
	M8				439.50	443.00	439.25		DM1				468.00	468.00	468.00
MP8		3.50	3.50	3.50	439.50	438.72	439.25	DP1		1.00	1.00	1.00	459.00	460.00	458.75
	M9				439.49	438.72	434.75		DM2				453.93	456.00	452.75
MP9		4.00	4.00	4.00	434.99	435.68	434.75	DP2		1.25	1.25	1.25	453.68	456.00	452.75
					431.00	431.00	431.75		DM3				450.73	452.00	449.75
	AM1				490.00	490.00	490.00	DP3		1.50	1.50	1.25	450.50	451.00	449.75
AP1		1.00	1.00	1.00	481.00	482.00	480.50		DM4				445.50	446.99	441.50
	AM2				474.94	476.92	475.25								
AP2		1.50	1.25	1.25	474.43	475.92	475.25								
	AM3				470.50	470.52	468.50								

표 5. 관망설계시 속도 결과 비교

파이프 #	Manning V(ft/s)	SEWERGA V(ft/s)	SEWERHS V(ft/s)	파이프 #	Manning V(ft/s)	SEWERGA V(ft/s)	SEWERHS V(ft/s)
MP1	5.10	5.10	5.43	BP1	4.53	6.66	5.95
MP2	5.71	5.71	7.46	BP2	6.79	6.76	9.78
MP3	7.35	7.34	7.41	BP3	9.05	4.53	6.65
MP4	9.15	7.01	9.15	CP1	7.33	8.32	7.44
MP5	8.96	8.97	8.96	CP2	6.66	6.66	7.88
MP6	8.42	9.77	9.70	CP3	8.31	7.34	8.32
MP7	10.09	9.05	9.55	DP1	5.09	5.39	7.23
MP8	10.29	9.26	9.25	DP2	4.89	5.50	7.64
MP9	8.28	7.48	9.77	DP3	5.09	6.89	3.74
AP1	5.0	5.10	5.09				
AP2	4.53	4.53	6.38				

표 6. 각 모형의 최적 설계 비용 비교

알 고 리 즘	최적 비용(\$)	비용절감률(DP와 비교)
동적계획법(Mays and Yen, 1975)	267,643	.
유전자 알고리즘(SEWERGA)	256,201	4.3%
화음 탐색법(SEWERHS)	257,645	3.7%

다했으며, 음정 탐색법을 이용한 SEWERHS 모형은 \$257,645를 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 개발된 두 가지 모형 모두가 기존의 동적계획법을 이용한 결과 보다 각각 약 4.3%, 3.7%의 비용절감 효과를 가져 오는 것으로 나왔다. 이는 동적계획법이 이 예제에 적용될 당시 컴퓨터의 한계로 인하여 적은 수의 후보매설깊이를 채택하였기 때문에 여러 가지 경우의 수의 최적해를 찾는 것이 힘들었던 데에도 기인할 것이다. 이에 반해 SEWERGA 경우는 동적계획법에 비해 엄청난 수의 후보해를 가지고 실행하였기 때문에 더 나은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 SEWERGA는 다점탐색을 함으로써 지역해(Local Optimum Solutions)에 빠질 경우에도 모델의 유전 연산자 중에서 돌연변이를 일으킴으로써 최적 환경을 구축하여 지역 해에서 빠져 나올 수 있기 때문에 전역해(Global Optimum Solutions)에 도달 될 수 있는 확률이 다른 모형보다 더 높기 때문에 더 좋은 결과를 가져왔다. 또한 SEWERHS 경우는 파이프 매설 가능 깊이의 범위와 매설깊이 구간을 정한 후 실행하였을 때 DP보다 조금 더 좋은 결과를 가질 수 있었다. 이는 유전자 알고리즘의 돌연변이와 비슷한 기능을 가지고 있는 HMCRO로 인하여 전역해(Global Optimum Solutions)에 도달 될 수 있는 확률이 다른 모형보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

지금까지 우수관망의 최적비용을 설계하는 문제가 있어서는 대부분의 연구가 동적계획법, 이산미분 동적 계획법 등에 국한되어 있었다. 최근의 몇몇 연구에서 우수관망 설계에 발견적 방법을 적용한 예가 있으나 적용 기법에 따른 그 효용성의 직접적인 비교·분석을 수반하지 않고 있다.

본 연구에서는 우수관망의 설계에 다양한 최적화 기법을 적용하여 산출된 최소비용의 직접 비교를 통하여 향후 관망 설계에 적합한 보다 효용성 있는 설계 기법을 제시하고자 하였다. 다양한 기법의 적용을 위하여 본 연구에서는 대표적 발견적 방법인 유전자알고리즘(GA)과 음정탐색법(HS)을 이용한 관망 설계 모형인 SEWERGA 및 SEWERHS 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 효용성 검증을 위하여 Mays and Yen(1975)이 동적계획법(DP)을 이용하여 설계한 관망에 동일한 조건하에서 적용되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 유전자알고리즘(GA)를 이용한 우수관망 설계모형인 SEWERGA에 의하여 산출된 최적비용은 Mays and Yen(1975)에 의하여 동적계획법(DP)로 산출된 설계비용에 비하여 4.3%의 절감된 결과를 보였다.



2. 음정탐색법(HS)를 이용한 SEWERHS의 경우 동적계획법(DP)에 의하여 동일한 관망에 적용한 결과 최저비용이 3.7% 절감되는 것으로 나타났다.
3. 따라서, 발견적 방법을 적용하여 관망의 설계비용을 산출할 경우 기존의 동적계획법(DP)에 의한 결과와 비교하여 약 4.0%의 비용절감효과를 나타내며, 이것은 관망 설계 시 발견적 방법의 적용 효율성이 검증되었음을 나타낸다.

이상의 결과에서 기존의 최적화방법이나 경험적이고 시행착오적인 설계방법에 의한 것보다 발견적 방법에 의한 설계 시 보다 경제적이고 효율적인 설계가 가능해짐이 검증되었다. 또한, 본 연구에서 발견적 방법을 적용한 설계모형인 SEWERGA 및 SEWERHS는 그 입력형식이 간단하므로 실무에 적용하기가 쉬우며, 후보 해들에 대한 확률적 탐색 및 군 탐색을 수반하는 모형이므로 규모가 큰 설계문제에서도 최적설계 및 해석에 용이하다 할 수 있다.

향후, 보다 효율적인 우수관망 설계를 위해서는 다양한 최적화기법의 적용성 검증 및 설계모형의 개발을 통하여 보다 좋은 해를 구할 수 있는 가능성을 넓혀나갈 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2003년도 고려대학교 교내 특별연구비 지원에 의하여 수행하였으며 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 백경록 (2000). Harmony Search를 이용한 가물막이 댐 가배수관의 최적설계, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, Vol. 21, No. 2, pp. 161-164.
- Brown, K. G. and Koussis, A. D. (1987). Lotus Spreadsheet Desing for Storm Drain Networks, *J. of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 1, No.3, pp. 197-213
- Charalambous, C. and Eliman, A. A. (1990). Heuristic Design of Sewer Networks, *J of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 114, No.1, pp. 75-92.
- Frolse, S. and Burges, S. G. (1978). Least-Cost Design of Urban-Drainage Networks, *J of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 114, No.1, pp. 75-92.
- Geem, Z. W. (2000). *Optimal Design of Water Distribution Networks using Harmony search*, ph.D. dissertation, Korea University.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm : Harmony Search. *SIMULATION*, Vol. 76
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimazation and Machine Learning*, Addison-Welsley, Reading, MA.
- Green, R., Agebenowosi, N. and Loganathan, G. V. (1999). Gis-Based Approach to Sewer System Design, *J of Surveying Engineering*, ASCE, Vol.125, No.1, pp. 36-57.
- Kuo, J.T., Yen. B. C., and Hwang, G. P (1991). Optimal Design of For Storm System with Pumping Stations, *J of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 117, No.1, pp. 11-27.
- Li, G. and Matthew, R. G. S. (1990). New Approach for Optimization of Urban Drainage Systems, *J of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 116, NO.5, pp. 927-944.
- Mays. W. L and Yen, B. C. (1975). Optimal Design of Branched Sewer Systems, *Water Resources Research*, AGU. Vol. 11, No.1, pp. 37-47.
- Mays. W. L and Wenzel, H. G. (1976). Optimal Design of Multilevel Branching Sewer Systems, *Water Resources Research*, AGU. Vol. 12, No.5, pp. 913-917.
- Meredith, D. D. (1971). *Dynamic Programmong with Case study on Planning and Design of Urban Water Facilities*, Trastise on Urban Water System, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., pp. 37-47.
- Miles, W. S. and Heaney, J. P. (1988). Better Than "Optimal" Method for Designing Drainage Systems, *J of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 114, No.5, pp. 477-499.
- Paik, K. R. (2001). *Development of Seasonal Tank Model and Comparison of Optimization*

*Algorithms for Parameter Calibration*, Master Thesis, Korea University

S. Yagi and S. Shiba (1999). Application of Genetic Algorithm and Fuzzy Control to a Combined Sewer Pumping Station, *Water Science and Technology*, Vol. 39 ,Issue 9, pp. 217-224.

Rauch W. and Harrenoes P (1999). Genetic Algorithms in Real Time Control Applied to

Minimize Transient Pollution from Urban Wastewater Systems, *Water Research*, ASCE, Vol. 33, issue 5, pp. 1265-1277.

© 논문접수일 : 2006년 03월 08일

© 심사의뢰일 : 2006년 03월 10일

© 심사완료일 : 2006년 04월 14일