

유전자 알고리즘을 이용한 배수관망의 최적 확장 설계 Genetic Algorithms for Optimal Augmentation of Water Distribution Networks

이 승 철* / 이 상 일**
Lee, Seung-Chul / Lee, Sang-Il

Abstract

A methodology is developed for designing the minimum-cost water distribution network. The method is based on network simulations and an optimization scheme using genetic algorithms. Being a stochastic optimization scheme, genetic algorithms have advantages over the conventional search algorithms in solving network problems known for their nonlinearities and herculean computational costs. While existing methods focus on the design of either entirely new or parallel augmentation of network systems, the proposed method can be applied to problems having both new branches of tree-type and parallel augmentation in loops. The applicability of the method was shown through a case study for Baekryeon water supply system. The optimized design resulted in the maximum 5.37% savings compared to the conventional design without optimization, while meeting the hydraulic constraints.

keywords: genetic algorithms, water distribution networks, parallel augmentation, minimum-cost

요 지

관망해석 시뮬레이션과 유전자 알고리즘에 기초한 최적화 모형을 이용하여 최소비용의 배수관망을 설계하는 방법론이 개발되었다. 유전자 알고리즘은 추계학적 최적화 기법의 하나로, 비선형적이고 계산량이 많은 관망설계 문제에 적용하기에 적합한 장점을 가지고 있다. 기존의 연구가 대부분 전체 관망의 신설 혹은 기존 관망의 병렬확장에만 적용하던 것에 비해 본 연구에서는 개발된 모형을 수지상(tree-type) 신설관 및 loop형 병렬증설관이 공존하는 시스템에 적용하였다. 개발된 모형을 백련 배수관로를 대상으로 적용한 결과, 수리학적 제약조건을 만족시키면서 사업비를 최대 5.37% 절감할 수 있는 설계를 제공하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 유전자 알고리즘, 배수관망, 병렬 증설, 최소비용

* 동국대학교 토목환경공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

** 동국대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Dongguk Univ. Seoul 100-715, Korea
(E-mail: slcc@dgu.ac.kr)

1. 서 론

관망은 상수도 시스템에서 비용의 약 60%, 에너지 소비의 약 80%를 차지하는 중요한 부분으로서, 해석과 설계 단계에서 최적화를 통해 비용과 에너지를 줄이려는 많은 노력이 기울여져 왔다. 그러나 상수관망의 최적화 문제는 최적해를 찾는 엄밀한 알고리즘이 존재하지 않는 소위 "NP-hard" 문제로 알려져 있다(Templeman, 1982; Yates 등 1984; Parker와 Rardin, 1988). 따라서 지금까지 관망설계에는 근사 최적화 기법이 사용되어 왔으며, 이들은 enumeration, 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법과 같은 확정본적 방법과 유전자 알고리즘(Genetic algorithms, 이하 GA) 및 simulated annealing과 같은 추계학적 방법으로 대별될 수 있다.

Enumeration은 모든 관로에 대해 선택 가능한 관경의 조합을 검토하는 방식으로 이론상으로는 최적해를 찾을 수 있으나, 막대한 계산량 때문에 실제 문제에 적용이 제한을 받는다. 예를 들어 20개의 관로에 대해 8개의 상용관을 선택할 수 있다면 820 가지의 가능한 조합이 존재하고, 이는 초당 1백만 개의 설계에 대한 비용 및 수리학적 제약조건에 대한 평가를 수행한다고 해도 전체 조합을 검토하는데는 3만 년 이상의 CPU 시간이 필요함을 의미한다. Gessler(1985)나 Loubser와 Gessler(1990)에 의해 전체 조합 중 일부를 대상으로 하는 enumeration 기법이 제안되기도 하였으나, Murphy와 Simpson(1992)은 이 방법이 최적해를 찾는데 적합하지 않음을 보인 바 있다.

Alperovits와 Shamir(1977)에 의해 원래의 문제를 일련의 작은 선형문제들로 나누어 풀으로써 미선형성에 의한 문제의 복잡성을 단순화 하려는 기법이 시도된 이래, Quindry 등(1981), Goulter와 Morgan(1985), Fujiwara와 Khang(1990), 전환돈 등(1994) 많은 연구자들에 의해 선형계획법이 관망설계에 적용되었다.

비선형계획법에 의한 관망설계는 El-Bahrawy와 Smith(1985; 1987), Su 등(1987), Lansey와 Mays(1989), Lansey 등(1989), Duan 등(1990) 김정환 등(1994)에 의해 시도되었다. 이들의 공통점은 MINOS(Murtagh와 Saunders, 1987), GINO(Libeman 등 1986), GAMS(Brooke 등1988) 등의 비선형 최적화 패키지와 KYPIPE(Wood, 1980), WATSYS(Olde, 1985), WATER(Fowler, 1990) 등의 관망모의 프로그램 연계를 하는 방식으로 최적해를 찾는다는 것이다. 한

편, 이 방법의 단점은 (1) 선형계획법과 마찬가지로 국지적 최적해만을 찾는다는 전과, (2) 관경을 연속 변수로 취급함으로써 얻어진 최적해가 실제로 선택 가능한 상용관에 대하여는 최적값을 보장하지 못한다는 것 등을 들 수 있다.

유전자 알고리즘은 전세대의 생존자(우수개체)가 새로운 세대를 형성하는 자연도태(Natural selection)의 진화론적인 메커니즘에 기초한 탐색 알고리즘으로서, 후보 해를 무작위 생성기를 이용해 확률적으로 생성한다는 측면에서 추계학적이다. 이러한 추계성 때문에 반드시 최적해에 도달한다는 보장은 없으나, Goldberg와 Kuo(1987)가 처음으로 가스 관망설계에 유전자 알고리즘을 도입한 이래 많은 연구가 성공적으로 이루어졌다. 상수관망에 관한 연구로는 Murphy와 Simpson(1992), Walters와 Lohbeck(1993), Montesinos 등(1999), Gupta 등(1999), 박영수 등(1998), Morley 등(2001) 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 전체 관망의 신설 혹은 기존 관망의 병렬확장에만 적용되던 기존의 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법을 수지상(tree type) 신설관 및 loop형 병렬증설관이 모두 공존하는 시스템으로 확대적용함으로써 그 적용 범위를 확장하였다. 개발된 기법을 실제 급수 가능 중에 있는 백린배수지의 배수관로를 대상으로 적용하고, 그 결과를 기존 설계치와 비교·분석함으로써 배수관로의 설계와 운영관리에 기여할 토대를 제공하고자 하였다.

2. 관망설계의 수학적 정형화

관망설계 문제는 많은 경우 관직경을 결정변수로 하는 최소비용 문제로 정형화 되어왔다. 이 경우 관의 배치(topology)나 절점에서의 수두조건 등은 미리 알고 있는 것으로 간주된다. 목적함수는 관직경(D_i)과 길이(L_i)의 함수로서의 비용이 된다:

$$f(D_1, \dots, D_n) = \sum_{i=1}^N c(D_i, L_i) \quad (1)$$

이때, N 은 시스템 내 관경을 결정해야 하는 관의 총 수이다. 각 절점에서는 연속방정식(식 (2))이, 그리고 각 loop에서는 에너지 보존법칙(식 (3))이 만족되어야 한다. 또한, 각 절점에서는 식 (4)와 같이 주어지는 최소 수두 조건을 만족해야 한다.

$$\sum Q_i - \sum Q_o = Q_e \quad (2)$$

$$\sum h_{L_j} - \sum E_p = 0 \quad (3)$$

$$H_j \geq H_j^{\min}, \quad j = 1, \dots, M \quad (4)$$

이때 Q_i 는 절점으로 유입유량, Q_o 는 유출유량, 그리고 Q_e 는 절점에서의 직접 유입량 혹은 수요량이다. h_L 은 손실수두로서 Hazen-Williams 혹은 Darcy-Weisbach 식으로 정량화 되며, E_p 는 펌프에 의해 제공된 수두이다. H_j 는 절점 수두, H_j^{\min} 은 최소수두, M 은 시스템 내 절점의 총 수를 나타낸다.

3. 시뮬레이션-최적화 모형

자연생태계의 진화과정은 한 세대(Generation)를 형성하는 개체들의 집합체인 개체집단(Population) 중 환경에 대한 적합도(Fitness)가 높은 개체들이 적자 생존하여 교배(Crossover) 및 돌연변이(Mutation)를 통한 재생(Reproduction)의 과정을 거쳐 다음 세대의 개체집단을 형성함으로써 이루어진다. 이러한 생물학적 진화과정을 탐색 알고리즘화 한 것이 유전자 알고리즘이며, 이에 관한 상세한 설명은 Holland(1975)와 Goldberg(1983)에서 찾을 수 있다.

2절에서 정형화 한 관망설계의 최적화는 실무적으로는 제약조건을 만족시키면서 최소비용을 달성할 수 있도록 각 관의 직경을 결정하는 것을 의미한다. 유전자 알고리즘에서 8 가지 경우의 수는 세 자리 binary(0 혹은 1) code로 표현될 수 있으므로, 만약 앞서와 같이 20 개의 관이 있고, 각 관에 대해 8 가지 관경을 선택할 수 있다면 자리수(bit)가 $20 \times 3 = 60$ 인 string이 해를 위한 다양한 조합을 표현할 수 있다. 그러나 enumeration과 같이 $2^{60} (=8^{20})$ 가지 경우의 수를 모두 검색하는 대신 유전자 알고리즘에서는 교배와 돌연변이를 확률적으로 발생시키고 적합도가 높은 개체(string)를 선택함으로써 계산량을 줄이고 해를 개선시킨다.

그림 1은 최적해 탐색 과정을 도식화 한 것이며 다음과 같은 절차를 수행한다.

- Step 1 초기집단 생성
- Step 2 관망 시뮬레이션 모듈을 이용한 유량, 유속, 수두 계산
- Step 3 수두조건 검사
- Step 4 적합도(=1/목적함수) 평가
- Step 5 교배

Step 6 돌연변이

Step 7 새로운 집단 구성

Step 8 수렴조건 만족하면 정지, 아니면 Step 2로 이동

본 연구에서는 Amadieu와 Parisot(1997)의 유전자 알고리즘 코드와 관망모의 프로그램인 KYPIPE를 연계하여 시뮬레이션-최적화 모형을 개발하였다.

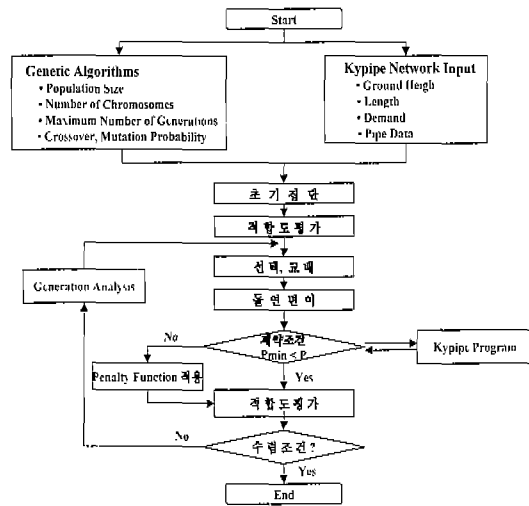


그림 1. 시뮬레이션-최적화 모형의 구조

4. 대상지역에의 적용

대상지역으로는 서울 연희동에 위치한 백련배수지로부터 서대문구와 마포구로 분기되는 배수관로를 선정하였다. 이 지역에 관한 설계자료는 백련(연희) 배수지 시설계획 보고서(서울특별시, 1992)에 수록되어 있다. 신설된 배수지(시설용량: 40,000m³)에서 정수를 공급하도록 되어 있으며, 배수지와 기존의 관망을 연결하는 관로는 신설하고 일부 지역은 기존관에 병행로 증설하는 것이 필요하다.

백련지구의 배수관망도는 그림 2와 같고, 관의 제원은 표 1, 1리고 절점별 지반고 및 수요유량은 표 2와 같다. 대상지역의 전체 관로 개수는 58개, 절점의 개수는 35개이며, 4개의 말단 수요절점(즉, 유입만 있고 유출이 없는 절점)은 21, 22, 28, 33번이다. 배수지의 수위는 IIWL(+)-64.00, LWL(+)-58.00이며, 각 수요절점의 표고는 GL(+)-10.50m ~ GL(+)-46.00m이고, 수압조건은 1.5 kg/cm²(수두 15m)이상이다. 각 관로구간의 길이는 80 ~ 900m이며, 관로의 마찰손실수두는 Hazen-

Williams 식을 사용하였다.

$$h_L = 10.69 C^{-1.85} Q^{1.85} D^{-4.87} L \quad (5)$$

여기서 h_L : 마찰손실수두(m), Q : 유량 (m³/sec), C : Hazen-Williams 계수(= 100), D : 관의 직경 (mm), L : 관의 길이 (m)이다.

최적화 모듈과 시뮬레이션 모듈을 연계함에 있어서, 전체관망이 신설일 경우에는 모든 관의 관경이 변수가 되어 방대한 계산량을 피할 수 없으나, 본 연구의 경우 기존관망에 수지상(tree-type) 신설관 및 loop형 병렬 증설관이 모두 공존하는 시스템으로서 신설구간 및 병렬확장 구간의 관경만을 변수로 취급하고 나머지 구간의 관경(기존관)은 상수로 고정시킴으로써 계산량을 줄

이는 접근을 하였다.

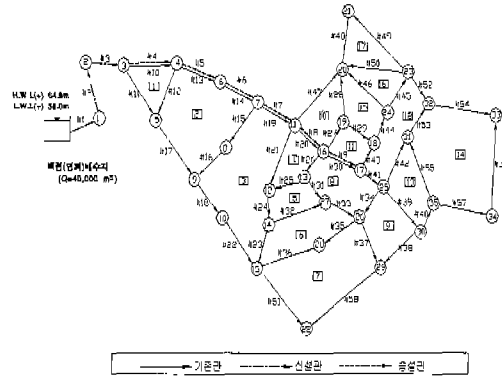


그림 2. 백련 배수관망 구역도

표 1. 백련 배수관망의 제원

관번호	관경 (mm)	관길이 (m)	관번호	관경 (mm)	관길이 (m)	관번호	관경 (mm)	관길이 (m)	관번호	관경 (mm)	관길이 (m)
*1	1,100	200	16	80	390	31	100	350	46	80	560
*2	1,100	470	17	150	510	32	300	540	47	500	900
*3	1,100	80	18	150	600	33	100	230	48	500	310
**4	900	370	19	600	530	34	100	270	49	300	300
**5	900	410	20	600	130	35	100	400	50	400	510
**6	800	540	21	400	530	36	150	620	51	700	250
**7	600	530	22	150	560	37	100	600	52	300	350
**8	500	130	23	400	440	38	400	350	53	100	380
**9	500	470	24	400	160	39	700	540	54	200	690
10	600	370	25	150	350	40	450	370	55	200	670
11	100	470	26	150	170	41	700	90	56	200	870
12	100	380	27	200	350	42	100	540	57	200	620
13	600	410	28	100	590	43	700	220	58	400	580
14	600	540	29	80	400	44	700	390	-	-	-
15	200	170	30	600	470	45	700	400	-	-	-

주) * 신설관, ** 증설관, 기타는 기존관

표 2. 절점별 수요량 및 지반고 제원

절점	지반고 (m)	수요량 (m ³ /일)	절점번호	지반고 (m)	수요량 (m ³ /일)	절점번호	지반고 (m)	수요량 (m ³ /일)
1	24.90	0	13	14.10	853	25	15.40	1,761
2	29.90	4,231	14	17.40	966	26	11.40	2,279
3	31.40	3,257	15	19.40	2,270	27	11.40	1,795
4	40.77	4,528	16	17.10	1,255	28	11.10	1,968
5	24.30	1,784	17	19.90	1,526	29	10.50	2,986
6	28.00	20,023	18	20.60	1,497	30	11.60	2,078
7	22.40	5,673	19	36.40	716	31	25.20	1,587
8	31.40	2,516	20	23.50	6,900	32	12.90	4,085
9	21.90	860	21	26.30	10,000	33	12.90	4,701
10	17.60	334	22	34.30	636	34	18.20	0
11	17.80	1,512	23	20.80	809	35	25.20	667
12	22.90	901	24	26.30	2,069	-	-	-

관경별 단위 길이(m)당 비용은 표 3과 같다. 관경은 11 가지 상업용 수도관 (관경 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100mm) 중에서 선택할 수 있으나, 앞서 언급한대로 GA에서는 해가 0 또는 1로 이루어진 2진수 코딩에 의해 $2n = 2, 4, 8, 16, 32, \dots$ 로 표현되어야 하기 때문에 1200, 1350, 1500, 1600, 2000mm 관경을 추가하여 16가지 관경 중에서 선택할 수 있도록 하였다. 그러나 추가된 관경이 선택되지 않도록 하기 위해서 단위 길이당 비용을 매우 큰 값(9.0×10^9)으로 설정하여 자연도태 되도록 유도하였다.

하나의 관로가 16가지의 관경 중 하나를 선택할 수 있으므로, 관로마다 4비트씩 결정변수 9개(신선관 2개소, 증설관 7개소)에 대한 36개의 염색체(즉, 36-bit string)를 갖도록 하였다. 따라서 총 탐색공간은 $16^9 = 6.87 \times 10^{10}$ 이 된다.

표 3. 관경별 단위 길이당 비용

관경(mm)	비용(원/m)	관경(mm)	비용(원/m)
300	118,000	900	325,000
350	129,000	1,000	370,000
400	145,000	1,100	434,000
450	160,000	1,200	9.0×10^9
500	181,000	1,350	9.0×10^9
600	214,000	1,500	9.0×10^9
700	242,000	1,600	9.0×10^9
800	285,000	2,000	9.0×10^9

적합도는 식 (1)에서와 같은 관경과 관 길이의 비용 함수의 합으로 표현되는 총비용을 최소화 하는 것으로 설정할 수 있다. 한편, 모든 해는 식 (4)의 절점수두 조건을 만족해야 하므로 식 (4)를 만족시키지 못하는 해(infeasible solution)는 고려대상에서 제외되어야 한다. 그러나, 이러한 해를 제외하는 대신 일정한 벌칙(penalty)과 함께 고려대상에 포함하여 탐색을 수행할 수도 있다.

본 모형에서도 각 절점의 수두(H_j)가 설계조건인 최소수두(H_j^{\min})를 만족하지 못하면 벌칙계수 δ_j 를 적용하여 벌칙비용을 크게 함으로써 자연도태 되도록 하였다. 벌칙계수의 값은 경험적인 시행착오를 거쳐서 각 개체집단에 대해 민감도를 분석한 후 개체의 수에 따라 $\delta_j = 9.0 \times 10^{10} \sim 9.0 \times 10^{12}$ 값으로 설정하였다. 결국 수두 제약조건을 포함하도록 확장된 목적함수는 다음과

같다.

$$f(D_1, \dots, D_n) = \sum_{i=1}^N c(D_i) L_i + \sum_{j=1}^N \delta_j |H_j - H_j^{\min}| \quad (6)$$

여기서, $c(D_i)$ 는 관경별 단위 길이당 비용, r 은 구속집합의 수를 나타낸다.

해석은 개체집단의 수를 10, 30, 50, 100으로 변화시키면서 최대 5,000 세대까지 수행하였다. 개체집단의 크기는 대개 30-200 사이가 많이 이용되나(Goldberg와 Koza, 1990), 이보다 적은 개체집단의 경우 어떠한 설계가 얻어지는지를 관찰하기 위해 개체수 10을 포함시켰다. 돌연변이율은 Amadiou와 Parisot(1997)가 제시한 1/Population 즉, 0.10, 0.03, 0.02, 0.01으로, 교배율은 0.3, 0.5, 0.7으로 변화시켜 해에 미치는 영향을 관찰하였다.

5. 결과 및 토론

표 4는 유전연산자 및 매개변수 변화에 따른 최적화 실행결과를 나타낸다. 개체집단의 크기를 변화시키면서 돌연변이율, 교배율 및 벌칙계수(δ_j)의 변화에 대한 수렴결과를 수록하였다. 최대발생횟수는 어느 경우나 5,000 세대로 고정하였다. 유전연산자 및 매개변수 적용 값에 따라 수렴시기가 다르나, 수렴발생시기는 개체집단이 커질수록 짧아지는 경향을 보였다. 이는 초기 개체집단이 상대적으로 큰 경우에 다양한 해에 대한 적합도를 검토할 수 있기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 최적비용은 CASE 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10에서 903,620,000원으로 나타났다.

표 5는 최적화 과정 없이 전통적인 방법에 의해 설계된 관경(백련(연회) 배수지 실시설계 보고서, 1992)과 최적화 결과 얻어진 관경을 비교한 것이다. 개체집단이 10, 30개인 경우(Case 2, 4)에는 관로 6번이 900mm로 상위관로인 5번의 800mm보다 크게 나타나 불합리한 것으로 판단된다. 비용면에서는 모든 경우에서 기존설계보다 경제적인 설계를 제시하고 있다. 즉, 기존설계에 비해 최소 21,320,000원부터 최대 51,300,000원까지 비용을 절약하는 설계가 도출되었으며, 이는 2.23~5.37%의 사업비 절감을 의미한다.

표 6은 고지대(4, 19번) 및 관 말단부(21, 22, 28, 33번) 수요절점에서의 압력수두를 나타낸 것으로 모든 절점에서 수압조건 1.5 kg/cm² (수두 15m)를 만족함을 알 수 있다.

표 4. 유전연산자 및 매개변수 변화에 따른 최적화 실행결과

CASE	연산자 개체집단의 크기	돌연변이율	교배율	벌칙계수 (δ_i)	최대발생횟수	수렴발생시기	비용(원)
1	10	0.10	0.3	9.0×10^{10}	5,000	1,386	931,210,000
				9.0×10^{11}	5,000	1,433	903,620,000
				9.0×10^{12}	5,000	2,698	915,510,000
2	10	0.10	0.5	9.0×10^{10}	5,000	2,973	915,300,000
				9.0×10^{11}	5,000	934	925,390,000
				9.0×10^{12}	5,000	2,217	923,720,000
3	30	0.03	0.3	9.0×10^{10}	5,000	972	903,620,000
				9.0×10^{11}	5,000	466	903,620,000
				9.0×10^{12}	5,000	1,540	903,620,000
4	30	0.03	0.5	9.0×10^{10}	5,000	1,311	933,600,000
				9.0×10^{11}	5,000	685	925,390,000
				9.0×10^{12}	5,000	1,765	933,600,000
5	30	0.03	0.7	9.0×10^{10}	5,000	276	937,450,000
				9.0×10^{11}	5,000	296	933,600,000
				9.0×10^{12}	5,000	148	903,620,000
6	50	0.02	0.3	9.0×10^{10}	5,000	195	903,620,000
				9.0×10^{11}	5,000	688	915,850,000
				9.0×10^{12}	5,000	2,319	933,600,000
7	50	0.02	0.5	9.0×10^{10}	5,000	112	903,620,000
				9.0×10^{11}	5,000	768	903,620,000
				9.0×10^{12}	5,000	304	933,600,000
8	50	0.02	0.7	9.0×10^{11}	5,000	935	903,620,000
				9.0×10^{12}	5,000	1,251	903,620,000
9	100	0.01	0.5	9.0×10^{11}	5,000	487	907,470,000
				9.0×10^{12}	5,000	304	933,600,000
10	100	0.01	0.7	9.0×10^{11}	5,000	925	903,620,000
				9.0×10^{12}	5,000	887	933,600,000

표 5. 기존설계와 최적화 결과의 관경 및 비용 비교

관로번호 (LINE)	기존설계 (mm)	개체집단 10,30 CASE 2,4 (mm)	개체집단 10,30,50,100 CASE 1,3,5,6,7,8,10 (mm)	개체집단 30,50,100 CASE 4,5,6,7,9,10 (mm)	비 고
1	1,100	1,100	1,100	1,100	신설관
2	1,100	1,100	1,100	1,100	신설관
3	1,100	1,000	1,000	1,000	중설관
4	900	900	900	900	중설관
5	900	800	900	900	중설관
6	800	900	700	900	중설관
7	600	600	700	600	중설관
8	500	500	300	300	중설관
9	500	300	300	300	중설관
비용(원)	954,920,000	925,390,000	903,620,000	933,600,000	

표 6. 주요 절점에서의 압력수두

절 점	기존설계 (m)	개체집단 10,30 CASE 2,4 (m)	개체집단 10,30,50,100 CASE 1,3,5,6,7,8,10 (m)	개체집단 30,50,100 CASE 4,5,6,7,9,10 (m)
4	15.10	15.00	15.00	15.00
19	15.20	15.00	15.00	15.30
21	24.30	23.80	23.90	24.10
22	16.30	15.80	15.90	16.10
28	29.50	29.00	29.10	29.30
33	30.40	29.80	29.80	30.10

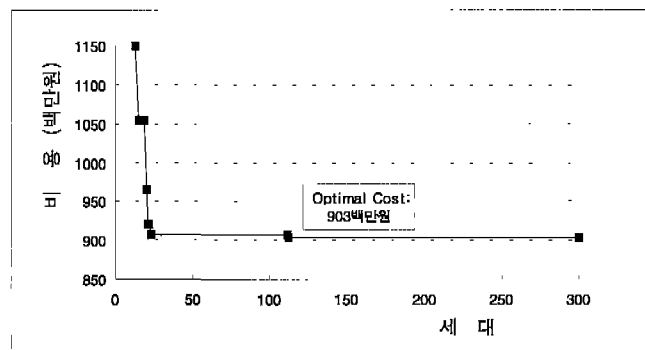


그림 3. 세대 진행에 따른 비용 감소

그림 3은 CASE 7의 경우 세대가 거듭됨에 따라 비용이 감소하는 과정을 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기의 가파른 기울기의 목적함수 감소를 거쳐 112세대(적합도 평균: 5,600회)에서 최소비용 903,620,000원이 얻어져 수렴함을 알 수 있다.

(2) 본 모형을 실제 운영중인 백련배수지의 배수관로에 적용한 결과, 일부 관의 관경이 기존 설계보다 100~200mm 작게 채택되었다. 그에 따른 비용절감 효과는 전체 사업비의 최대 5.37%에 해당하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

감사의 글

최적 관망시스템의 설계는 비용 절감은 물론 효율적인 물 공급 체계의 확보라는 측면에서 매우 중요하다. 그러나 현장에서의 관망설계는 객관적이고 과학적인 방법보다는 주로 실무전문가의 경험과 직관에 의존하는 경우가 많아 개선이 요구되고 있다.

본 연구는 동국대학교 논문게재 연구비 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사합니다.

본 연구에서는 관망 시뮬레이션과 유전자 알고리즘(GA)에 의한 최적화에 기반을 둔 설계방법론을 제시하고, 현장에 적용시켜 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 기존의 모형이 전체 관망의 신설 혹은 기존 관망의 병렬확장에만 적용되던 것에 비해 본 연구에서는 수지상(tree-type) 신설관 및 loop형 병렬중설관이 공존하는 시스템에도 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

김정환, 김태균, 김중훈, 윤용남 (1994). "비선형계획법을 이용한 상수도 관망설계에 관한 연구", 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권, 제4호, pp. 59~67.

박영수, 김중훈, 김종우 (1998). "유전자 알고리즘을 이용한 관망시스템의 최적비용설계." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제32권 제1호, pp. 71~81.

서울특별시 (1992). 백련(연회) 배수지 실시설계보고서, pp. 31~148.

전환돈, 김태균, 김중훈, 윤용남 (1994). "선형계획법을

- 이용한 분기형 관망 시스템의 최적설계”, 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권 제3호, pp. 135~143.
- Alperovits, A., and Shamir, U. (1977). “Design of optimal water distribution systems.” *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 885~900.
- Amadiou, O. and Parisot, C. (1997). “Advanced genetic algorithms in fortran90”, <http://www.essi.fr/~parisot/GA200/ga/html>.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. (1988). *GAMS : a user's guide*, The Scientific Press, Redwood City, Calif.
- Duan, N., Mays, L. W., and Lansey, K. E. (1990). “Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 249~268.
- El-Bahrawy, A., and Smith, A. A. (1985). “Application of MINOS to water collection and distribution networks.” *Civ. Engrg. Systems*, Vol 2, pp. 38~49.
- El-Bahrawy, A., and Smith, A. A. (1987). “A methodology for optimal design of pipe distribution networks.” *Can. J. of Civ. Engrg.*, Vol 14, pp. 207~215.
- Fowler, A. J. (1990). *Water*. Municipal Hydraulics, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Fujiwara, O., and Khang, D. B. (1990). “A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks.” *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 539~549.
- Gessler, J. (1985). “Pipe network optimization by enumeration.” *Proc., Computer Applications for Water Resources*, ASCE, New York, N. Y., pp. 572~581.
- Goldberg, D. E. (1983). *Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning*. Ph.D. dissertation, Univ. of Michigan.
- Goldberg, D. E., and Kuo, C. H. (1987). “Genetic algorithms in pipeline optimization.” *J. Computing in Civ. Engrg.*, ASCE, Vol. 1, No. 2, pp. 128~141.
- Goldberg, D. E., and Koza, J. R. (1990). “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.” *Workshop Notes*, Computer Science Department, Stanford University, August pp. 6~10.
- Goulter, I. C., and Morgan, D. R. (1985). “An integrated approach to the layout and design of water distribution networks.” *Civ. Engrg. System*, Vol 2, No. 2, pp. 104~113.
- Gupta, I., Gupta, A., and Khanna, P. (1999). “Genetic algorithm for optimization of water distribution systems.” *Environmental Modeling & Software*, Vol. 14, pp. 437~446.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich.
- Lansey, K. E., and Mays, L. W. (1989). “Optimization model for water distribution system design.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 10, pp. 1401~1418.
- Lansey, K. E., Duan, N., Mays, L. W., and Tung, Y. K. (1989). “Water distribution system under uncertainties.” *J. Water Resources Plng. and Mgmt.*, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 630~644.
- Liebman, J. S., Lasdon, L., Schrage, L., and Waren, A. (1986). *Modeling and optimization with GINO*. The Scientific Press, Palo Alto, Calif.
- Loubser, B. F., and Gessler, J. (1990). “Computer-aided optimization of water distribution networks.” *The Civ. Engrg. in South Africa*, (Oct.), pp.413~422.
- Montesinos, P., Garcia-Guzman, A., and Ayuso, J.L. (1999). “Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm.” *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 11, pp. 3467~3473.
- Morley, M. S., Atkinson, R. M., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2001). “GANet: genetic algorithm platform for pipe network optimisation.” *Adv. in Engrg. Software*, Vol. 32, pp. 467~475.
- Murphy, L. J., and Simpson, A. R. (1992). “Pipe optimization using genetic algorithms.” *Res. Rep. No. R93*, Department of Civil Engineering, University of Adelaide, Australia.

- Murtagh, B. A., and Saunders, M. A. (1987). *MINOS 5.1 User's guide*. Systems Optimization Laboratory, Dept. of Operations Research, Stanford University, Stanford, Calif.
- Olde, M. (1985). *WATSYS user's manual*. HCP Pty Ltd., Sydney, Australia.
- Parker, R. D., and Rardin, R. L. (1988). *Discrete optimizations*, Academic Press, Inc Ltd.
- Quindry, G. E., Brill, E. D., and Liebman, J. C. (1981). "Optimization of looped water distribution systems." *J. Envir. Engrg.*, ASCE, Vol. 107, No. 4, pp. 665~679.
- Su, Y. C., Mays, L. W., Duan, N., and Lansey, K. E. (1987). "Reliability-based optimization model for water distribution systems." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 114, No. 12, pp. 1539~1556.
- Templeman, A. B. (1982). "Discussion of optimization of looped water distribution systems, by G.E. Quindry, E.D. Brill, and J.C. Liebman." *J. Envir. Engrg.*, ASCE, Vol. 108, No. EE3, pp. 599~602.
- Wood, D. J. (1980). *User's manual computer analysis of flow in pipe networks including extended period simulations*. University of Kentucky, Lexington, Ky.
- Walters, G. A., and Lohbeck, T. (1993). "Optimal layout of tree networks using genetic algorithms." *Engrg. Optimization*, Vol. 22, No. 1, pp. 27~48.
- Yates, D. F., Templeman, A. B., and Boffey, T. B. (1984). "The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks." *Engrg. Optimization*, Vol. 7, No. 2, pp. 142~155.

(논문번호:01-047/접수:2001.06.19/심사완료:2001.08.29)