

**다목적 유전자알고리즘을 이용한
상수도 관망운영 펌프스케줄링에 관한 연구**
Pump Scheduling Technique for Optimal Operation of Water
Distribution System Using Multi-Objective Genetic Algorithms

우형민*, 김태순, 허준행***, 조원철******
Hyoung-Min Woo, Tae-Soon Kim, Jun-Haeng Heo, Won-Cheol Cho

요 지

본 연구는 다목적 유전자알고리즘을 이용해서 상수도관망의 펌프 스케줄링을 최적화하는 방안을 도출하기 위한 연구이다. 상수도관망의 시스템을 모의하기 위한 방법으로는 EPANET을 이용해서 각각의 결정변수에 관한 펌프운영비용을 산정하였으며, 이렇게 계산된 편익함수의 값을 다목적 유전자알고리즘의 목적함수로 이용해서, 펌프스케줄링에 관한 여러 가지 대안을 제시하였다.

상수도관망의 운영을 위해서는 안정적인 용수공급이 가능하면서도 최소한의 에너지비용을 필요로 하는 펌프운영방식을 필요로 하게 되는데, 이때 용수수요량의 변화 등 운영여건이 바뀌게 되더라도, 수리적 안정성이 확보되는 범위내에서의 최적 운영방안이 필요하게 된다. 이와 같은 펌프 운영방안의 최적화는 상당히 많은 수의 결정변수를 요구하게 되고, 결정변수의 탐색범위 또한 상당히 넓은 경우가 대부분이기 때문에, 국부최적해에 수렴하는 현상이 나타나지 않고, 넓은 범위의 결정변수 영역을 빠르게 탐색할 수 있으며, 여러 가지 대안을 효율적으로 제시할 수 있는 다목적 유전자알고리즘을 사용하였다.

본 연구를 통하여 개발된 상수도 관망 펌프 스케줄링 기법을 이용하면, 운영여건의 변화에 따른 펌프운영비용의 최소화 여부를 검토할 수 있으며, 이를 바탕으로 각 단계별 수도시설을 종합적으로 고려한 경제적 운영방안의 검토가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 다목적 유전자알고리즘, EPANET, 상수도 관망운영, 최적화기법, 펌프 스케줄링

1. 서 론

기술발전에 따라 상수도 관망시스템에 관한 관점이 단순히 설계 및 해석의 개념에서 효율적인 운영의 필요성이 커지고 있다. 본 연구는 현재 시점에서의 용수공급이 가능한 가능최소에너지 비용을 구하는 것이 목적이다. 용수수요량의 변화 등 운영여건이 바뀌게 되면, 수리적 안정성이 확보되는 범위내에서 가능한 최적의 펌프운영패턴을 도출하였다. 수리적 안정성은 관망의 수리학적 기능성의 확보 즉, 안정적인 용수공급을 그 대상으로 삼았으며, 안정적인 용수공급 여부의

* 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, E-mail : paulose@kowaco.or.kr
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사후 연구원, E-mail : chaucer@yonsei.ac.kr
*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목·환경전공 정교수, E-mail : jhheo@yonsei.ac.kr
**** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목·환경전공 정교수, E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr

판단은 압력감시점을 고려한 관망의 수리해석으로 대신하였다. 현재 국내에서는 용수공급량 변동 시 또는 연계운영 방법의 변경시와 같은 운영여건 변동에 따른 경제적 운영방안 등에 대한 연구가 많이 이루어지지 않았다. 본 연구는 관망 시스템의 최적운영을 위한 최적화 기법의 적용 및 운영방안의 도출을 수행하였다. 또한, 운영여건의 변경시 펌프장 등에서의 전력원단위 변화 등을 고려하여 경제적 운영방안을 검토할 수 있는 다목적 상수관망 최적운영모형의 프로토타입을 개발하였다.

2. 최적화 모형의 개발 및 도입

상수관망은 수리적 기능성과 경제적 효율성을 포함하는 다양한 목적을 만족시킬 수 있게 운영되고 제어되어야 한다. 수리적 기능성의 척도는 압력조건, 소화용수조건, 수질조건으로서 다양한 신뢰도 측정 방법을 사용해 측정한다. 전통적인 상수관망시스템에서 펌프장 운영비(특히, 전력비)는 전체시스템 운영비용의 가장 중요한 부분을 차지하고 있으며, 최적운영은 비용을 최소화하는 개념으로, 펌프 최적 운영방법은 주어진 기간 동안 펌프를 작동하고 정지시키는 작업 규칙(rule) 또는 예정표(schedule)를 말한다. 즉, 최적 운영방법이란 주어진 경계조건과 관로 시스템의 제약조건을 만족하는 범위에서 가장 적은 운영비용을 이끌어 내는 것이라 할 수 있다. 이러한 최적 운영 시스템은 수리해석모형, 용수수요예측모형, 최적제어모형으로 구성된다.

최적화 기법이란 모든 가능한 대안에 대해 일일이 계산하고 평가해 보지 않고도 최선의 대안을 찾아내기 위한 수치계산방법이라 할 수 있다. 최적화 기법의 장점은 높은 수학적 수준을 요구하지도 않으면서도, 명확한 알고리즘과 논리를 목적함수와 제약조건식에 적용하여, 컴퓨터를 통한 반복적인 수치계산을 시행하여 최적의 값을 구할 수 있다는데 있다. 여기서 사용되는 각각의 최적화 기법은 여러 가지 제약조건식들을 범하지 않는 범위내에서 목적함수를 최소 또는 최대화시키는 결정변수의 함수로 나타난다. 이러한 목적함수와 제약조건식들은 수학적으로 결정변수들의 함수로 나타내진다. 일반적으로 수자원 문제에 적용되는 최적화 기법의 종류에는 선형계획법, 동적계획법, 비선형계획법 등 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 다목적 유전자 알고리즘을 사용하였다.

2.1 목적함수의 일반식

상수관망의 최적운영을 위한 목적함수의 일반식은 다음 식으로 표시된다. 주어진 제약조건의 범위내에서 에너지와 비용을 계산하는 식으로 구성되어 있다

$$\begin{aligned} \text{Minimize Cost} &= \text{Minimize} \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} C_t E'_{t,p}(Q_{t,p}, H_{t,p}, e_{t,p}, D_{t,p}) \\ &= \text{Minimize} \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} C_t \frac{0.746 Q_{t,p} H_{t,p}}{e_{t,p}} D_{t,p} \end{aligned}$$

여기서, D = 펌프의 운전시간(모의시간 간격내의 펌프 운전시간으로 $0 \leq D \leq 1hr$), NP = 펌프의 총 대수 (= $NPS \times NPP$)

2.2 제약조건

용수공급의 안정성을 확보하기 위해서는 수리학적 제약조건을 만족시켜야 한다. 각 절점에서의 용수수요량을 만족시키면서 적정 압력을 확보하는 것이 주요한 제약조건으로 활용된다.

① 절점에서의 연속방정식

$$\sum_{i \in NJL} q_{j,t}^i + Q_{j,t}^{EXT} = 0 \quad \text{for all } j = 1, \dots, NJ \text{ and } t = 1, \dots, NT$$

여기서, q_i = 집합 NJL의 원소인 관로 i에서의 유량, Q^{EXT} = 절점의 용수수요량, NJL = 절점과 연결되어 있는 관로들의 집합, NJ = 절점수

② 폐합관로에서의 에너지 방정식

$$\sum_{il \in NLL} h_{l,t}^{L,ip} + \sum_{ip \in NLP} h_{l,t}^{P,ip} = \Delta h_{l,t}^{FGN} \quad \text{for all } l = 1, \dots, NL \text{ and } t = 1, \dots, NT$$

여기서, $h^{L,ip}$ = 관로 ip를 따르는 손실수두, $h^{P,ip}$ = 펌프 ip에 의해 공급되는 수두, Δh^{FGN} = 독립폐합회로에서 고정수두절점 (FGN)간의 수두차, NLL = 각 독립폐합회로 (Loop)에서 관로들의 집합, NLP = 각 독립폐합회로 (Loop)에서 펌프들의 집합, NL = 독립폐합회로수

③ Tank에서의 수위계산

$$y_{s,t} = y_{s,t-1} + \frac{q_{s,t-1}^{TK}}{A_s} \Delta t \quad \text{for all } s = 1, \dots, NS \text{ and } t = 1, \dots, NT$$

여기서, y = Tank의 수위, q^{TK} = 관로를 통해 Tank로 유출입되는 유량, A = Tank의 단면적, NS = Tank수

④ 절점의 최소 및 최대 압력조건

$$P_{j,t}^{\min} \leq P \leq P_{j,t}^{\max} \quad \text{for all } j = 1, \dots, NJ \text{ and } t = 1, \dots, NT$$

여기서, P^{\min} , P^{\max} = 절점별 최소 및 최대 압력

⑤ Tank의 최소 및 최대 수위조건

$$y_{s,t}^{\min} \leq y \leq y_{s,t}^{\max} \quad \text{for all } s = 1, \dots, NS \text{ and } t = 1, \dots, NT$$

여기서, y^{\min} , y^{\max} = Tank별 최소 및 최대 수위

동력은 펌프장에서의 유량(Q_{pt}), 양정(H_{pt}), 효율(e_{pt}), 운전시간(D_{pt})의 함수이다. 여기서 효율은 Q_{pt} 및 H_{pt} 가 결정되면 구해질 수 있는 값이며, Q_{pt} 및 H_{pt} 또한 관로의 유량(q_{mt})과 절점의 압력(H_{jt})에 의해 표현된다. 또한 제약조건에 포함된 Tank 수위(y_{st})가 결정변수로 포함되어 결정변수 (decision variables)는 q_{mt} , H_{jt} , y_{st} , D_{pt} 가 된다. 이중 제어변수를 D_{pt} , 상태변수를 q_{mt} , H_{jt} , y_{st} 로 설정한다. 수리적 제약조건은 관망해석모형을 실행함으로써 만족시킬 수 있으며, 제어변수 (D_{pt})의 변화에 따른 상태변수 (q_{mt} , H_{jt} , y_{st})의 값을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 상태변수는 내재적 제약조건과의 적합성 여부를 점검하게 된다.

2.3 비용함수

관망 시스템의 운영에 대한 비용의 산정은 명확히 추정하기가 곤란하며, 더욱이 이를 일반화

시키는 작업은 각 관망시스템이 지니고 있는 특수성, 즉 비선형성 때문에 많은 노력을 필요로 한다. 그러나 이러한 경우 직접적으로 사용되는 비용과 간접적으로 사용되는 비용의 합으로 단위비용(Unit Cost)을 ① 유사한 특성을 갖는 수도시설 운영비 이용하여 추정 ② 비용자료 분석에 의한 관계식의 추정 ③ 일반적으로 사용되는 비용함수공식의 이용과 같이 추정할 수 있다. 용수공급을 위한 비용에는 광역상수도의 경우 직접비, 노무비, 그리고 수선유지비 등의 계정으로 나눌수 있다. 하지만, 유지관리에 관한 모든 직접비 및 간접비를 한꺼번에 고려하는 것은 어려운 일이므로 본 연구에서는 안정적인 용수공급이 가능한 최소의 비용을 비용함수로 설정하여 목적함수로 구성하였다.

2.4 시간대별 펌프 Switch 한계조건

$$SW_t \leq SW_{Tmax} \quad \text{for all } t = 1, \dots, NT$$

여기서, SW_{Tmax} = 시간 t에서 펌프 Switch가 가능한 최대 펌프수, SW_t = 시간 t에서 펌프의 Switch 수 (즉, 이전 시간에 운전되고 있지 않은 펌프를 가동시키는 것)를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

2.5 펌프의 on/off 정수조건

$$X_{p,t} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for all } p = 1, \dots, NP \text{ and } t = 1, \dots, NT$$

상수관망의 최적운영을 위한 목적함수의 일반식은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\text{Minimize Cost} = \text{Minimize} \sum_{t=1}^{NT} \sum_{f=1}^{NPS} \sum_{j=1}^{NPP} C_t E_{t,i,j} (Q_{t,i,j} H_{t,i,j} e_{t,i,j} n_{t,i,j} V_{t,i,j} X_{t,i,j}) \Delta t$$

여기서, C = 단위비용 (₩/kWh) E = 소요동력 (kW) Q = 펌프의 토출유량 (m³/h) H = 펌프의 양정 (m) e = 펌프의 효율 n = 펌프의 회전수 (rpm) V = 펌프의 토출측 밸브 개도 X = 펌프의 on/off 정수형 변수 (on일 경우 1, off일 경우 0) Δt = 모의시간 간격 NT = 모의시간 수 (통상 24 hr) NPS = 펌프장 수 NPP = 각 펌프장의 펌프수

3. 모의관망에의 적용 결과

본 연구에서 개발된 최적운영 모형은 수요변화 패턴을 설정하여 시뮬레이션 모형의 입력자료를 구성한다. 각 절점의 압력값의 상한값과 하한값을 모형의 명시적 제약조건으로 입력하게 되고, 배수지의 수위조건이 또 다른 명시적 제약조건으로 사용된다. 최적화 모형으로는 NSGA-II 다목적 유전자알고리즘 등을 사용하였고 내재적 제약조건을 목적함수에 벌칙함수로 포함시켜 프로그램을 수행하였다. 벌칙함수로는 브라킷 벌칙함수를 사용하였으며, 반복계산을 통하여 전역적 최적해를 구하게 된다. 운영하고자 하는 대상 펌프를 사용자가 설정하면, 초기 수리해석을 통하여 운영가능여부를 판단하게 된다. 일단 운영가능여부가 판단된 경우에는 수리해석모형과 최적제어모형이 결합하여 목적함수와 벌칙함수를 계산하게 된다. 수리해석이 한번 실시 될 때마다 각각의 전력

비가 계산되며, 각 경우를 판단하여 전력비가 최소가 되는 경우를 찾는 작업을 반복하게 된다. 최소의 전력비가 선택된 경우에도 펌프의 운전가동이 실제로 적용가능성이 있는지 없는지를 판단하게 된다. 그림 1과 2는 모의대상 관망을 나타내었다. 그림 3은 유전자알고리즘을 이용한 모의과정을 나타내었다. 그림 4는 유전자알고리즘을 사용하였을 경우의 최적화 결과를 나타내었다.

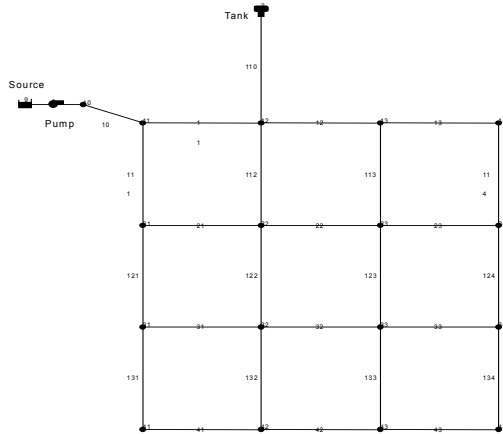


그림 1 단일펌프와 단일탱크가 있는 경우

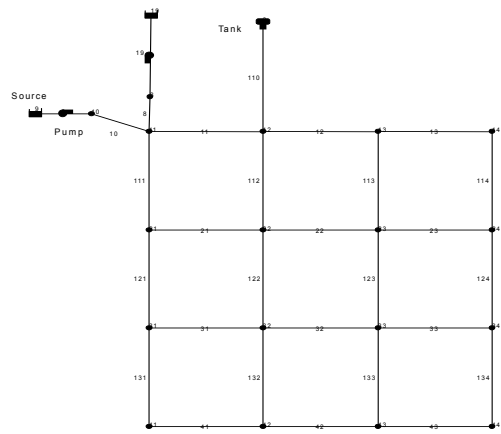


그림 2 단일펌프와 단일탱크가 있는 경우

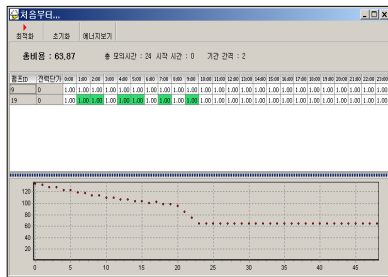


그림 3 유전자 알고리즘의 적용에

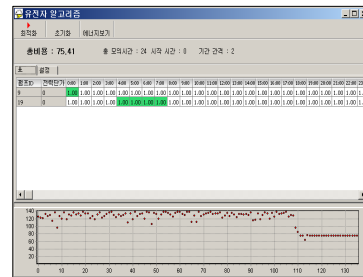


그림 4 최적화 결과

감 사 의 글

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project인 수처리선진화사업단(과제번호: I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Brion, L. M., and Mays, L. W. (1991). Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(11), 1551-1569.
2. Goldman, F. E. (1998). The application of simulated annealing for optimal operation of water distribution systems. PhD dissertation, Arizona State University, Tempe, Ariz.
3. Lansey, K. E., and Awumah, K. (1994). Optimal pump operations considering pump switches. J. Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE, 120(1) 17-35.
4. Ormsbee, L. E., and Lansey, K. E. (1994). Optimal control of water supply pumping systems. J. Water Reso