

관망운영 최적화를 위한 실시간 펌프스케줄링 기법 개발

Real-Time Pump Scheduling Technique for Optimal Operation of Water Distribution System

우형민*, 김주환**, 안효원***, 윤재흥****

Hyoung Min Woo, Ju Hwan Kim, Hyo Won Ahn, Jae Heung Yoon

요 지

생활수준의 향상과 기술발전에 따라 상수도 관망시스템에 관한 관점 또한 기존의 설계 및 해석의 개념에서 안정적이고 효율적인 용수공급 운영의 측면으로 변화하고 있다. 본 연구에서는 상수도 시스템을 효율적으로 운영하기 위한 방법을 관망운영의 측면에서 모색하였으며, 수도권 광역상수도를 대상으로 하여 시범 적용하였다. 본 연구는 현재 시점에서 안정적인 용수공급이 가능한 가능최소 에너지 비용을 구하는 것이 목적이다. 용수수요량의 변화 등 운영여건이 바뀌게 되면, 수리적 안정성이 확보되는 범위내에서 가능한 최적의 펌프운영패턴을 도출하였다. 현재 용수공급량 변동시 또는 연계운영 방법의 변경시와 같은 운영여건 변동에 따른 경제적인 운영 방안 등에 대한 연구가 미비하여 가장 최적의 운영방안 도출이 어려운 실정이므로, 본 연구를 통하여 연계운영에 최적화 기법의 적용 및 운영방안의 도출을 수행하였다. 운영여건의 변경시 펌프장 등에서의 전력원단위 변화 등 각 단계별 수도시설의 종합적 고려를 통한 경제적 운영방안을 검토할 수 있는 상수관망 최적운영모형의 실제 탑재 모델을 개발하였으며, 이를 기반으로 하여 실제 현장에서 담당자가 쉽게 사용할 수 있는 사용자 편의 환경을 개발하였다.

핵심용어 : 상수도 관망시스템, 용수공급, 펌프운영, 최적운영모형

1. 서 론

한국수자원공사는 우리나라 전체 수도 공급량의 52.8%를 공급하고 있으며, 이에 따라 상수도 시스템의 효율적인 운영에 대한 효과는 매우 크다. 전체 시스템 중 가장 규모가 큰 수도권 광역상수도는 서울을 포함한 수도권 전역에 용수를 공급하고 있다. 팔당댐에서 취수한 물을 공급 계통별로 의정부계통, 인천계통, 평택계통 등으로 관로시설로 구성되어 있으며, 서로 연결되어 복잡한 관망으로 운영이 되고 있다. 본 연구에서는 상수도 시스템을 효율적으로 운영하기 위한 방법을 관망운영의 측면에서 모색하였으며, 수도권 광역상수도를 대상으로 하여 시범 적용하였다.

* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : paulose@kowaco.or.kr
** 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : juhwan@kowaco.or.kr
*** 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : anwon@kowaco.or.kr
**** 정회원 · 한국수자원공사 총주담관리단 · E-mail : jhyoon@kowaco.or.kr

2. 본 문

2.1 최적화 기법

최적화 기법이란 모든 가능한 대안에 대해 일일이 계산하고 평가해 보지 않고도 최선의 대안을 찾아 내기 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 있다는 데 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 관망시스템 및 수자원문제에서는 이러한 최적화 기법이 매개변수의 검증 및 보정에 널리 사용되고 있으며, 이는 반복계산을 통하여 원하는 목표값에 수렴하기까지 그 변화값을 도출하는 작업을 수행하여야 하기 때문이다. 따라서, 각 최적화 기법에 따라 장단점이 존재하고 있으며, 이는 주어진 문제의 해를 도출하는데 가장 효과적인 방법을 구하는가의 여부를 판단하여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 여러 가지 방법을 사용하여 문제의 해를 결정하는 데 필요한 방법을 사용하였으며, 관망시스템과 같이 결정변수의 개수가 많고 자유도가 높은 경우에는 지역해에 빠지기 쉬워 선형계획법이나 비선형계획법을 사용할 경우 신뢰성 있는 결과를 도출하지 못하였다. 이는 선형계획법 및 비선형계획법이 미분값을 사용하여 해의 수렴에는 빠른 강점을 보이고 있으나, 미세변화에 대한 반응이 느린 것으로 판단되며, 미분값을 사용하지 않는 직접탐색법을 사용하여 본 결과 비선형계획법과 마찬가지로 해의 수렴성은 빠르나 지역해에 수렴하는 단점이 나타났다. 따라서, 여러 가지 최적화 기법중 다점탐색을 기반으로 하는 유전자 알고리즘을 사용하여 해의 정확도를 높였으며, 전역해에 좀 더 가까운 값을 도출하였다.

2.2 모형의 구성

상수관망의 최적설계 및 최적 운영에 있어 가장 문제시되고 기존의 프로그램을 복잡하게 만들었던 부분이 최적화 모형과 수리해석 모형의 인터페이스(interface) 부분이었다. 그동안 상수관망의 수리해석 모형으로 가장 많이 쓰여진 프로그램으로는 소스 프로그램이 공개된 KYPIPE 1.0 와 EPANET이었다. 그 동안의 대부분의 연구자들은 최적화 모형과 수리해석 모형의 입출력과 관련된 서브루틴을 수정함으로써 인터페이스 부분을 해결해 왔다. 그러나, 본 연구에서 적용된 최적화 기법은 기존 모형의 주 입력 및 출력을 변화시키지 않고, 일종의 모듈(module)의 형태를 이용하여 탑재하였다. 수리적 해석 모형의 주 프로그램에서 최적화 모형 모듈을 호출하면 최적화 모형에서는 결정된 매개변수 값을 주 프로그램으로 넘겨주도록 되어 있으며, 이때 목적함수의 값을 만족시킬 때까지 이 과정을 반복하게 된다. 최적화 과정을 통해 어떠한 값, 즉 목적함수의 값이 오차의 한계 내에서 수렴하게 되면 계산된 결과를 주 프로그램으로 넘겨주게 되고 최적화 모형의 역할은 끝나게 된다. 시스템의 구성을 위하여 Compaq Digital Visual Fortran 6.5이 제공하고 있는 동적 연결 라이브러리(Dynamic Linking Library, DLL)을 이용하였으며, 윈도우 화면처리는 Resource의 형태로 추가하였다. 각각의 Resource에는 ID를 부여하였으며, 윈도우의 기능을 충분히 사용할 수 있도록 구성하였다.

본 연구에서 개발된 모형은 먼저 수요변화 패턴을 설정하여 시뮬레이션 모형의 입력자료를 구성한다. 각 절점의 압력값의 상한값과 하한값을 모형의 명시적 제약조건으로 입력하게 되고, 배

수지의 수위조건이 또 다른 명시적 제약조건으로 사용된다. 최적화 모형으로는 비선형계획법, 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 전력비가 계산 되며, 각 경우를 판단하여 전력비가 최소가 되는 경우를 찾는 작업을 반복하게 된다. 최소의 전력비가 선택된 경우에도 펌프의 운전가동이 실제로 적용가능성이 있는지 없는지를 판단하게 된다.

2.3 적용방법

수도권 광역상수도는 각 단계가 복잡하게 얽혀있어, 전체를 한꺼번에 모의하기 보다 일부의 광역상수도 구간을 선택하여 실제 운영결과를 반영한 모의를 실시하고자 하였으며, 광역상수도 3단계, 4단계, 5단계가 서로 연계되어 있는 평택계통을 대상으로 우선 모의대상구간으로 설정하여 운영모의를 실시하였다. 전체 관망도에서 평택계통을 분리하는 작업을 먼저 실시하였으며, 그림 1에 분리된 관망도를 나타내었다.

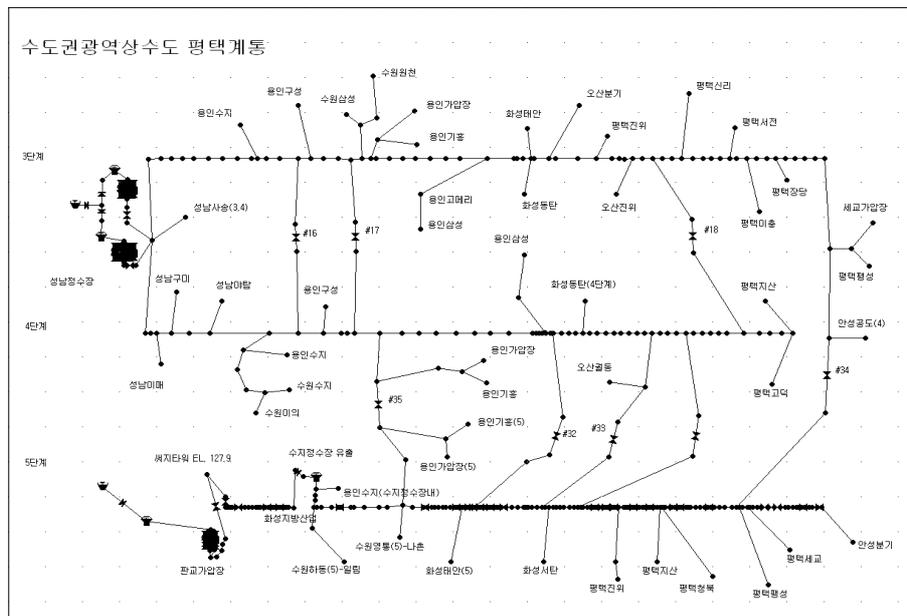


그림 1. 수도권광역상수도 평택계통 상세관망도

펌프조합 1의 경우에는 펌프의 On/Off가 첫 번째 시간부터 점차적으로 이루어지는 방법이다. 이를 위해서는 우선 환경설정항목에서 해석에 필요로 하는 항목을 입력한 후, 최적화 방법으로 '펌프조합 1'을 선택하도록 한다. 펌프조합(1)의 실행결과는 하루 운영 비용이 대략 일천만원 정도 인 것으로 나타났으며, 그림 2의 그림은 펌프의 단위 운영 시간을 한 시간으로 했을때의 그림이다. 전력원단위는 대략 0.21원~0.36원이지만, 2.22원인 경우도 나타났다.

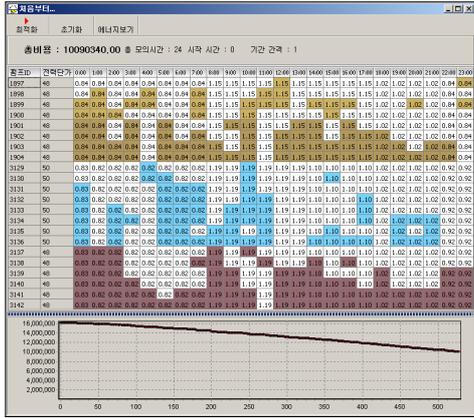


그림 2. 펌프조합(1)의 실행결과

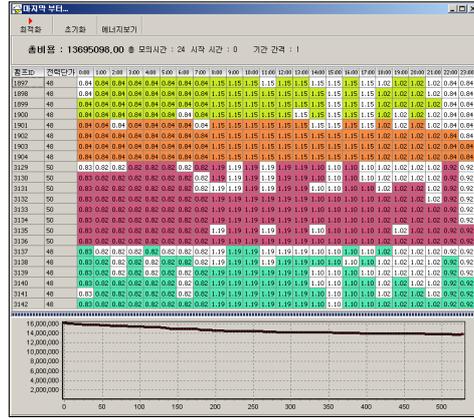


그림 3. 펌프조합(2)의 실행결과

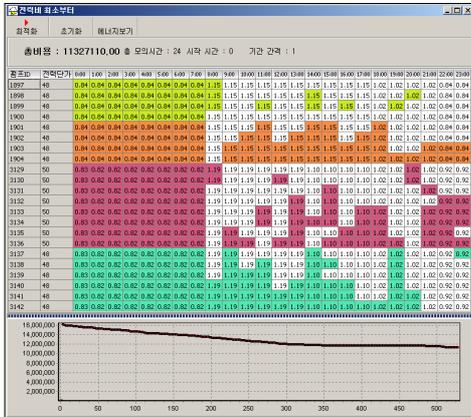


그림 4. 피크전력비 고려 실행결과



그림 5. 유전자알고리즘 사용시 실행결과

펌프조합 1의 경우와 마찬가지로의 환경설정하에서 펌프조합 2의 경우를 실행하였다. 그림 3은 펌프조합 2의 경우에 대하여 운영결과를 나타내었다. 동일한 관망에 관하여 사용된 총비용은 대략 일천삼백칠십만원으로 추정되었으며, 이는 앞의 펌프조합 1의 경우와 비교하였을 때 보다 효율이 나쁜 것으로 나타났다. 피크 전력비 고려하는 것은 시간대별 전력비가 서로 다르기 때문에 발생한다. 그림 4에는 주간, 저녁, 심야의 피크 전력비를 고려하여 운영하였을 경우에 펌프운영을 나타내었다. 그 결과 펌프운영의 총비용은 대략 천백만원 정도가 소요되며, 운전시간은 심야시간을 많이 활용하는 쪽으로 나타났다. 유전자 알고리즘을 사용하여 본 결과를 그림 5에 나타내었다. 유전자 알고리즘을 사용한 경우 총비용은 대략 천백만원으로 나타났다. 그림의 하단에 있는 그래프는 무수히 반복되는 해석 회수중 1초 간격으로 비용을 화면에 나타내었다. 유전자 알고리즘의 특성상 여러 가지 조건에 대하여 임의발생을 통하여 전체 해의 영역을 설정하였음을 알 수 있다. 어느 정도의 발생회수 후에는 어느 정도의 값으로 수렴하여 가는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 최적운영을 위한 기본 모형을 개발하여 실제 관망에 적용을 해보았다. 이는 모형 개발자에 익숙하게 만들어져 있으므로, 향후 그래프 사용자 인터페이스를 채용하여 이를 개선

할 필요가 있으며, 수치모의를 위한 다양한 조건을 포함시켜 실제 운영자가 사용하는데 무리가 없도록 개선할 필요가 있다. 또한, 본 연구를 통해서 개발된 모형은 범용모형으로 적용대상이 바뀌어도 적용이 가능하므로 이에 대한 지속적인 보완을 통해서 업그레이드 하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 수리해석모형과 최적화 모형이 결합되어 최적운영모형을 개발하였으며, 현장에서의 실제 테스트를 통해서 매개변수의 현장보정, 그리고 모형을 안정화한 다음 운영시나리오 작성 및 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 운영여건 변경시 펌프장 등에서의 전력원단위 변화 등 각 단계별 수도시설의 종합적 고려를 통한 경제적 운영방안 검토, 연계운영에 최적화 기법의 적용 및 운영방안 도출, 변동요인 발생시 합리적, 경제적 운영방안의 도출을 포함하고 있으며, 이로 인한 신속한 의사결정, 수도권 광역상수도 시설별 최적 관리방안 도출, 운영경비 절감 방안 도출 등을 수행하는데 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., Rossman, L. A., Zierolf, M. L., and Polycarpou, M. M. (1998). Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *J. Water Resour. Plng. And Mgmt.*, ASCE, 124(2), 99-111.
2. 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.
3. Goldman, F. E. (1998). The application of simulated annealing for optimal operation of water distribution systems. PhD dissertation, Arizona State University, Tempe, Ariz.
4. Homwongs, chatree. (1995), Adaptive forecasting system of hourly municipal water consumption with optimum pump scheduling for water distribution systems. PhD dissertation, Texas a&m university
5. Lansey, K. E., and Awumah, K. (1994). Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plng. And Mgmt.*, ASCE, 120(1) 17-35.
6. Lansey, K. E., and Mays, L. W. (1989). Optimization model for water distribution system design. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 115(10), 1401-1418.
7. Lasdon, L. S., and Waren, A. D. 1986). GRG2 users guide, Dept. of General Business, Univeristy of Texas at Austin, Austin, Tex.
8. Mays, L. W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*, AWWA
9. Nitivattananon, V. (1994). Optimization of real-time operation in water supply systems incorporating demand charges. PhD dissertation, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pa.
10. Ormsbee, L. E., and Lansey, K. E. (1994). Optimal control of water supply pumping systems. *J. Water Resour. Plng. And Mgmt.*, ASCE, 120(2), 237-252.
11. Pelletier, genevieve. (1995) Pump scheduling and reservoir releases for the optimization of water supply system operating costs. PhD dissertation, University of ottawa (canada).
12. Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2.0 users guide*, Drinking Water Res. Div., Risk Reduction Engrg. Lab., Ofc. Of Res. And Devel., U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
13. Sakarya, A. B. (1998). Optimal operation of water distribution systems for water quality purposes. PhD dissertation, Arizona State University, Tempe, Ariz.