

# 상수관망의 최적운영모형 개발

○우형민\*, 김주환\*, 안효원\*

## 1. 서론

지금까지의 상수관망 해석은 원하는 지점에서의 유량 및 압력을 구하기 위해 수리해석을 실시하였으며, 이를 통하여 용수공급의 가능여부를 판단하여 왔다. 이는 현재 운영 여건에서의 용수공급 가능여부와 용수공급량 변동시 또는 운영방법의 변경시 용수공급 가능여부에 대한 판단을 위함이다. 하지만, 전력비 변동 및 저류시설 용량 등을 감안한 경제적 운영방안 등에 대한 연구는 선진외국에서는 10여년전부터 연구가 시작되어 최근들어 어느정도의 연구성과를 이루어 내는데 반하여 국내에서는 연구가 거의 이루어져 있지 않다. 본 연구에서는 상수관로를 효율적으로 운영 및 유지관리 할 수 있는 기반기술을 개발하여 이를 바탕으로 상수관로 자체만을 고립되어 평가하는 현재까지의 시각에서 벗어나 용수공급시스템 (Water Distribution System) 전체를 하나의 유기적 결합체로서의 관로 시스템을 운영관리하는 기술을 개발하고자 하는데 목적을 두고 있다.

## 2. 최적운영시스템

상수관망은 수리적 기능성 (hydraulic performance)과 경제적 효율성 (economic efficiency)을 포함하는 다양한 목적을 만족시킬 수 있게 운영되고 제어되어야 한다. 수리적 기능성의 척도는 압력조건 (pressure level), 소화용수조건 (fire protection), 수질조건 (water quality)으로서 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 기간동안 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 (Hydraulic Network Model), 용수수요예측모형 (Demand Forecast Model), 최적제어모형 (Optimal Control Model) 으로 구성된다.

수리해석모형은 펌프장 운영비용과 운영상의 제약조건을 평가하기 위한 수학적 모형으로 사용되고 있으며, 전통적으로 질량균형모형(Mass Balance Model), 회귀분석(Regression Model), 단순수리 모형(Simple Hydraulic Model) 등과 같은 모형들이 제안되어 왔다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 수리학적 시뮬레이션 모형(Hydraulic Simulation Model)이 개발되어 널리 사용되고 있다. 수요예측모형은 일반적으로 용수수요의 분배방법에 따라 분포형 모형 (Distributed Model) 과 비례형 모형 (Proportional Model) 구분하고 있지만, 수요추정기법의 종류에 따라서 다양한 방법이 사용된다. 또한 최적제어모형의 경우 사용된 최적화 기법에 따라 선형계획법(LP, Linear Programming), 동적계획법(DP, Dynamic Programming), 비선형계획법(NLP, Nonlinear Programming), 유전자알고리즘(Genetic Algorithm) 등으로 구분하였다. 그림 1에는 상수관망에서의 최적운영을 위한 최적운영모형의 개념도를 나타내었다. 용수수요예측모형이 과거의 용수공급실적을 바탕으로 향후 용수수요를 추정하여 그 결과를 수리해석모형에 전달하게 되면, 수리해석 모형은 그 결과를 바탕으로

-----  
한국수자원공사 수자원연구소 연구원  
한국수자원공사 수자원연구소 책임연구원  
한국수자원공사 수자원연구소 부장

으로 수리해석을 수행하게 되며, 전달된 값은 수리해석모형 뿐만 아니라, 최적제어모형의 제어변수로 사용이 되게 된다. 최적제어모형과 수리해석모형은 주어진 경계조건(Boundary Condition)에 합당하면서 목적함수(Object Function)의 값을 만족시키는 최적 해(Optimal Solution)를 찾기 위해 반복 연산을 수행하게 된다. 최적 제어 모형은 일반적으로 최적화 기법으로 더 많이 알려져 있는데, 주어진 경계조건과 초기조건을 만족하는 목적함수의 최적값을 구하는데 사용되는 기법 또는 모형이라고 할 수 있다. 따라서, 최적운영모형은 용수수요예측모형, 관망해석모형, 최적제어모형의 세 모형의 유기적 결합체로 생각할 수 있다. 그림 2에는 최적 제어 모형의 적용 개념도를 나타내었다.

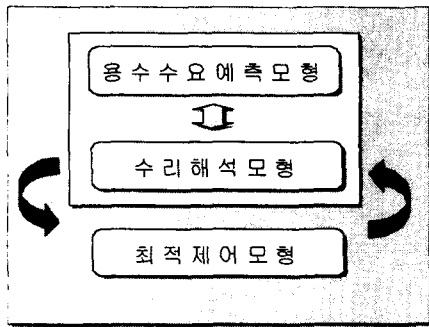


그림 1 상수관망의 최적운영 모형

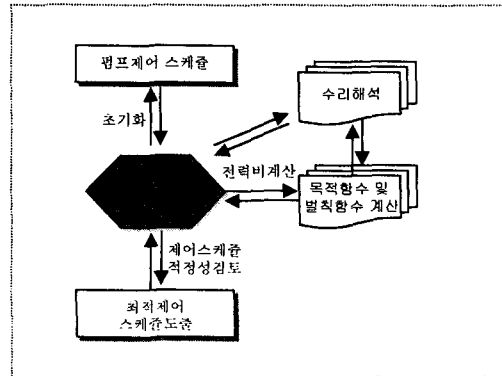


그림 2 최적제어모형의 적용 개념도

### 3. 최적화 모형의 개발 및 도입

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 수자원 문제에 적용되는 최적화 기법의 종류에는 선형계획법(LP, Linear Programming), 동적계획법(DP, Dynamic Programming), 비선형계획법(NLP, Nonlinear Programming) 등 여러 가지가 있으며, 최적화 기법을 적용하기에 앞서 각 기법별 장단점을 비교 분석하였다.

#### 3.1 목적함수의 일반식

상수관망의 최적운영을 위한 목적함수의 일반식은 다음과 같은 Mixed Integer Nonlinear Problem으로 표시된다.

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

여기서,  $C$  = 단위비용 (₩/kWh)     $E$  = 소요동력 (kW)     $Q$  = 펌프의 토출유량 (m<sup>3</sup>/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)     $\Delta t$  = 모의시간 간격     $NT$  = 모의시간 수 (통상 24 hr)

$NPS$  = 펌프장 수  $NPP$  = 각 펌프장의 펌프수

위의 목적함수는 상수관망의 최적운동을 위한 모든 변수를 포함하고 있으나, 현실적으로 문제를 풀기가 곤란하므로 문제의 단순화를 위하여 가정의 도입이 필요하다.

### 3.2 제약조건

제약조건은 일반적으로 수리적 조건 (hydraulic system constraints), 내재적 제약조건 (implicit bound constraints), 명시적 제약조건 (explicit bound constraints)로 나눌 수 있다.

## 4. 수리해석 모형과 연계

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 KYPIPE와 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. 그림 3 은 최적화 모형과 수리해석에 관한 관망해석 모형의 접속구성을 나타내었다. 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 6.0이 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.

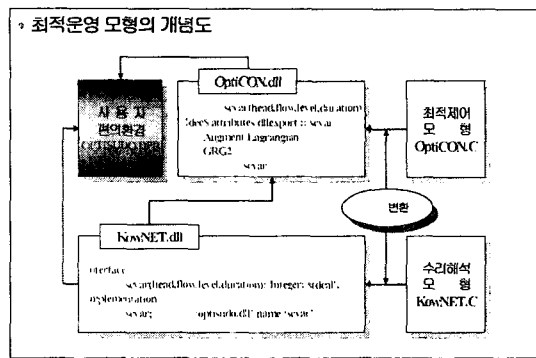


그림 3 최적화 모형과 수리해석 모형의 연계

### 5. 최적운영 모형의 실행 흐름도

본 연구에서 개발된 최적운영 모형은 각각의 사용된 모형의 적용기법에 따라 그 결과가 다를 수 있지만, 기본적으로 그림 4와 같은 실행 흐름도를 가지게 된다. 주요변화 패턴을 설정하여 시뮬레이션 모형의 입력

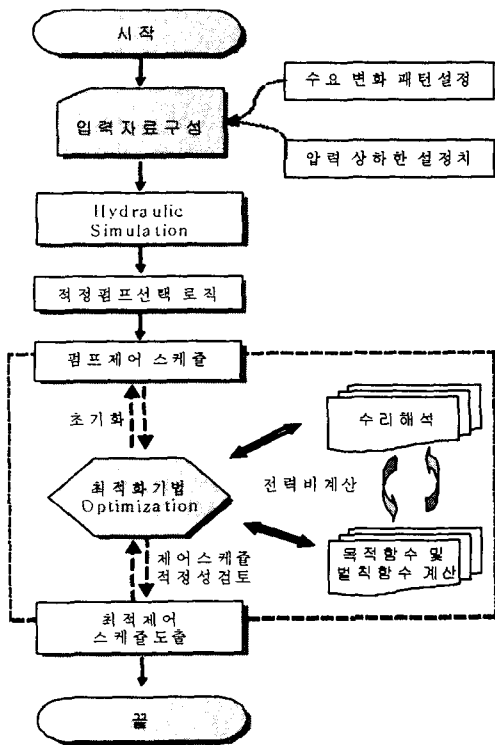


그림 4 최적운영모형 실행흐름도

자료를 구성한다. 각 절점의 압력값의 상한값과 하한값을 모형의 명시적 제약조건으로 입력하게 되고, 배수지의 수위조건이 또 다른 명시적 제약조건으로 사용된다. 최적화 모형으로는 비선형계획법, 유전자알고리즘 등을 사용하였고 내재적 제약조건 (Implicit Bound Constraints)을 목적함수에 벌칙함수 (Penalty Function)로 포함시켜 프로그램을 수행하였다. 벌칙함수로는 브라킷 벌칙함수 (Bracket Penalty Function)을 사용하였으며, 반복계산을 통하여 전역적 최적해 (global optimum)를 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 계산되며, 각 경우를 판단하여 전력비가 최소가 되는 경우를 찾는 작업을 반복하게 된다. 최소의 전력비가 선택된 경우에도 펌프의 운전가동이 실제로 적용가능성이 있는지 없는지를 판단하게 된다.

참고문헌

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.
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.