

# 밸브 최적 조절에 의한 관로 시스템의 검증

○성창환\*, 김영일\*\*, 박남식\*\*\*, 김상현\*\*\*\*

## 1. 서 론

관로 시스템의 누수 면적과 불완전 폐쇄에 의한 물 손실량은 반복적인 두 가지 역산 과정에 의해 구할 수 있다.

관로 시스템에서의 물 손실은 관에서의 하나 혹은 여러 지점의 큰 규모의 파손에 의해 발생하거나 관로 내의 작은 구멍이나 절점 주위의 틈을 통해 발생한다. 전자의 이유로 발생하는 누수는 파손에 의한 유량이 땅위에 종종 퍼지기 때문에 비교적 쉽게 파악 할 수 있지만, 후자의 경우는 손실의 위치나 손실량이 관로 시스템의 넓은 지역에서 퍼지므로 관로 시스템 전체의 교체를 요구한다. 이에 따라 관로 시스템의 누수 발생 지역에 대한 분석이 필요하다.

## 2. 본 론

### 2.1. 기본이론

정상류 상태로 가정된 관로 시스템에서 연속 방정식과 에너지 방정식이 조합된 비선형항에 손실항과 수 요항을 추가하여 관로 시스템을 분석할 대수적인 식을 세운다.

$$\sum_{j=1}^{M_i} \frac{H_j - H_i}{\sqrt{R_{ij} |H_j - H_i|}} - \delta_i Q_i - P S_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기서  $N$  = 절점의 총수

$M_i$  = 절점  $i$  에 연결된 관의 총수

$H_j$  = 총 수두

\* 건화 엔지니어링

\*\* 동아대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 동아대학교 토목공학과 부교수

\*\*\*\* 부산대학교 환경공학과 조교수

- $Q_i$  = 절점  $i$  로 부터의 단위 시간당 누수량  
 $P$  = 총 수요량  
 $S_i$  = 절점  $i$  에서 총 수요량의 공간적인 배수 요소

$Q_i$  항은 관로 시스템의 노화에 따라 관표면의 단위 면적당 누수 면적이 일정하다는 가정에 의해 다음과 같이 사용되고 있다.

$$Q_i = (H_i - Z_i)^a \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (2)$$

여기서  $a$  = 손실 멱지수,  $L_{ij}$  = 관길이,  $D_{ij}$  = 관경,  $Z_i$  = 표고  
 $\theta_{ij}$  = 절점  $ij$ 를 연결하는 관의 단위 면적당 누수 면적

$S_i$ 항은 관로 시스템 내에서 흐름을 유지하기 위한 최소 압력 수두에 의하여 각 수요지점의 유량의 변화를 나타내는 항으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_i &= S_i^0 && \text{for } H_i - Z_i > h^0 \\
 S_i &= S_i^0 \sin^2\left(\pi \frac{H_i - Z_i}{2 h^0}\right) && \text{for } h^0 \geq H_i - Z_i > 0 \\
 S_i &= 0 && \text{for } 0 \geq H_i - Z_i
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $h^0$  = 관로 시스템내의 흐름을 유지하기 위한 최소 압력수두

Prandtl-Nikuradse 공식에 의해 절점  $i$ 에서  $j$ 로 연결된 관에서의 밸브 저항 계수와 관내 마찰 계수를 산정하였다.

$$\begin{aligned}
 R_{ij} &= R^0(V_{ij}) + 0.0826 \frac{L_{ij}}{\lambda D_{ij}^{5/4}} \\
 \lambda &= 4 \left( \log \left( \frac{\epsilon_{ij}}{3.71 D_{ij}} \right) \right)^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $R^0(V_{ij})$  = 절점  $i$ 에서  $j$ 사이에 위치한 밸브에 의한 손실을 나타낸다.

## 2.2 관망 해석 프로그램의 개발 및 검증

위에서 제시한 기본 이론에 바탕을 둔 관망 해석 프로그램을 개발하기 위해 여러 차례의 수정과 보완을 통해 비선형항의 수렴의 민감도를 호전시켰으며 범용관망 해석 프로그램인 Matrix법과 EPANET을 이용하여 개발된 프로그램에 대한 검증과 오차에 따른 문제점을 해결하였다.

최소 압력 수두와 밸브 손실계수를 고려한 수두 계산에 대한 프로그램의 최종 수정과 검증으로 관망 해석 프로그램의 개발이 이루어졌다.

## 2.3 관망 검증을 위한 2단계 최적화 기법

두 가지 역산 기법에서 모델링을 통한 매개 변수의 평가는 식(5)의 우도함수의 최소값에 의하여 구할 수 있고, 밸브의 최적 조절에 의한 관로 시스템에서의 누수분석은 식(6)에서 가능하다..

1단계 : 매개 변수의 평가

완전 개방 실험을 통해  $H_{1,j}^*$ 를 측정하여 누수량 계수와 마찰 계수를 추출하고  $H_{1,j}$ 를 계산 후 식(5)에서  $OF_1$ 을 최소화시키는 누수량 계수와 마찰 계수 결정

$$Minimize_z OF1 = \sum_{j=1}^{N_j} \left[ \sum_{h=1}^{N_h} W_h \frac{(H_{t,j} - H_{t,j}^*)^2}{(\sum_{i=1}^{N_i} H_{t,i}^*)^2} + \sum_{f=1}^{N_f} W_f \frac{(F_{t,j} - F_{t,j}^*)^2}{(\sum_{i=1}^{N_i} F_{t,i}^*)^2} \right] \quad (5)$$

2단계 : 밸브 최적 조절

정상류 상태에서는 측정되는 한 지점에 대하여 하나의 정보만을 얻을 수 있지만 다양한 밸브 조절을 통해 발생하는 여러 흐름에서, 보다 많은 정보를 수집하여 발전된 방향으로의 매개 변수의 평가를 도모한다. 식(6)을 통해 가장 효과적인 정보를 얻기 위해선 이전에 실험한 정상류 흐름 상태와 가장 다른 흐름을 밸브 조작을 통해 유발하여 그 흐름에 대한 정보를 수집하는데 있다. 앞선 실험들과 가장 다른 관로 시스템의 흐름 변화는 식(6)의 결정 변수  $R_0$ 의 최대화를 통해 발생 시킬 수 있다.

$$Maximize_{R_0} OF2 = Min_t \left[ \sum_{j=1}^{N_j} W_h \frac{(H_{N,j} - H_{t,j}^*)^2}{(\sum_{i=1}^{N_i} H_{t,i}^*)^2} + \sum_{f=1}^{N_f} W_f \frac{(F_{N,j} - F_{t,j}^*)^2}{(\sum_{i=1}^{N_i} F_{t,i}^*)^2} \right] \quad (6)$$

1, 2단계의 반복적인 역산과정에 의해 관로 시스템에서의 실제의 누수량 계수와 마찰 계수를 산정한다.

개발된 관망 해석 프로그램은 유전적인 메커니즘에 기초한 유전자 알고리즘기법을 이용하여 반복적인 두 가지 역산 기법의 최적화를 수행하였다.

역산 기법에서는 결정 변수의 수보다 측정의 수가 많더라도 식(5)의 경우에는 수두와 유량이 여러 다른 매개 변수의 다양한 조합에 의해 결정 될 수 있기 때문에 그 해는 불안정하다. 안정된 값을 얻기 위한 방법으로 관로 시스템에서 같은 기간에 시공된 동일한 재질의 관로가 설치된 지역은 누수량 계수와 마찰 계수가 일정하다는 구역 개념에 도입과 총수요는 총 측정 시간 동안은 변화가 발생하지 않는다는 가정하에 매개 변수의 단순화로 보다 안정된 해를 구한다.

### 3. 관로 수리 모델의 적용

관로 시스템에서의 누수 분석을 위한 그림 1.에서 5번 절점에는 0.05cms의 수요를 지정하였다. 6번 절점에서 밸브에 의한 수두의 조정으로 4번 절점에 수두 변화를 관측하였으며, 마찰 계수에 의한 구역은 전관에 대해서 지정하고 누수 지역은 ⑤, ⑥, ⑧, ⑨관에만 지정하여 총 2개의 구역으로 관로 수리 모델을 분석하였다.

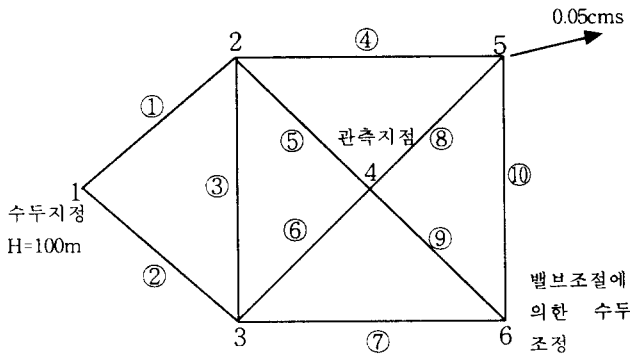


그림 1. 저수지에 연결된 관로 시스템

표 1. 관로 수리 모델의 제원

관경(D)	전 관에서 0.15m
표고(Z)	전 절점에서 10m
관길이(L)	①,②,⑤,⑥,⑧,⑨=212.1m
	③,④,⑦,⑩=300m
마찰계수(Cw)	110(Hazen 공식에서)
누수량계수(θ)	2*10**(-7)

### 3.2 결과

위에서 제시한 관망 해석 프로그램의 최적화 순서에 따라 밸브의 완전 개방 실험을 통해 수두를 측정하고 1단계 최적화에서  $OF_1$ 을 최소화시키는 마찰 계수와 누수량 계수를 2단계 최적화 과정에 포함시켜 최적화된  $R_0$ 값을 가지고 관측점의 수두를 계산한다. 실험의 반복을 통해 다양한 밸브 최적 조절의 결과를 표 2.에서 볼 수 있다.

표 2. 최적화 결과에 따른 다양한 수두 분포

실험횟수	누수량계수	마찰계수	수두(m)	실험횟수	누수량계수	마찰계수	수두(m)
1	0.2038E-06	110.57	0.00	5	0.2031E-06	110.11	7.1289
2	0.2031E-06	110.07	18.5677	6	0.2031E-06	110.11	27.3437
3	0.2031E-06	110.08	39.8437	7	0.2031E-06	110.12	72.8212
4	0.2031E-06	110.08	59.0851	8	0.2031E-06	110.12	12.0921

#### 4. 결 론

위에서 제안된 밸브의 최적 조절에 의한 관로 시스템에서 검증은 두 가지 역산 과정의 반복으로 다루어진다. 이러한 과정의 최종 목표는 관로 시스템에서의 수리 매개 변수를 구하는데 있다. 주어지는 정보를 최대한 사용하여 정확하고 안정된 역산 문제의 해를 구하는 것이고, 이것으로 인해 최적의 관로 시스템의 유지, 보수에 많은 도움을 주리라 생각된다. 위에서 제시한 방법은 전체 관로 시스템에서 매개 변수의 구역화를 도모하여 역산 문제에서 발생하는 해의 불안정을 개선하였으며 그런 구역 개념은 광역 관로 시스템에서의 적용성 검증에 상당히 유효할 것이라 판단 되어 이에 대한 연구를 진행 중이다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발 연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호 99-10-02-99-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드린다.

#### 참 고 문 헌

1. T. Tucciarelli, A. Criminisi, and D. Termini (1999) "Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation" J. of Hydraulic Engineering.
2. Boulos, P. F., and Wood, D. J. (1990) "Explicit calculation on pipe-network parameters." J. of Hydraulic Engineering. ASCE, 116(11), 1329-1344.
3. Germanopoulos, G. (1985) "A technical note in the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models." Civ. Engrg. Sys., 2, 171-179.
4. Liggett, J. A., AND Chen, L. (1994) "Inverse transient analysis in pipe-networks." J. Hydr. Engrg., ASCE, 120(8), 934-955.
5. Pudar, R. S., and Liggett, J. A. (1992) "Leaks in pipe networks." J. Hydr. Engrg., ASCE, 118(7), 1031-1045.