



# 대구경 관로의 배수시간 산정을 위한 수치해석 기법

## A Numerical Method to Calculate Drainage Time in Large Transmission Pipelines Filter

신병호<sup>1</sup>·최두용<sup>2</sup>·정관수<sup>3\*</sup>

Shin, Byoung-Ho<sup>1</sup>·Choi, Doo-Yong<sup>2</sup>·Jeong, Kwansue<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국수자원공사 수도권수도건설단장, <sup>2</sup>한국수자원공사 K-water 융합연구원 수석연구원, <sup>3</sup>충남대학교 토목공학과 교수

<sup>1</sup>Korea Water Resources Corporation

<sup>2</sup>Head Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

<sup>3</sup>Professor, Chungnam National University

### ABSTRACT

Multi-regional water supply system, which installed for supplying multiple water demands, is characterized by large-sized, long-distance, tree-type layout. This system is vulnerable to long-standing service interruption when a pipe breaks is occurred. In this study, a numerical method is proposed to calculate drainage time that directly affects time of service interruption. To begin with, governing equations are formulated to embed the delayed drainage effect by the friction loss, and to resolve complicated connection of pipelines, which are derived from the continuity and energy equations. The nonlinear hydraulic equations are solved by using explicit time integration method and the Newton-Raphson method. The developed model is verified by comparing the result with analytical solution. Furthermore, the model's applicability is validated by the examples of pipelines in serial, in parallel, and complex layout. Finally, the model is utilized to suggest an appropriate actions to reduce the deviation of draining time in the C transmission line of the B multi-regional water supply system.

**Key words:** Drainage time, friction loss, Multi-regional water supply system, Time integration method, Water distribution system

**주제어:** 배수시간, 마찰손실, 광역상수도, 시간적분법, 상수관로

## 1. 서 론

우리나라는 수자원의 지역적 편중으로 인한 이수환경 개선을 위하여 수원에 가까운 지역에 대규모의 취수 및 정수시설을 설치한 후 처리된 수돗물을 도·송수관로를 이용해 다수의 수도사업자에게 공급하는 광역상수도 체계를 이용하고 있다. 광역적 용수공급 목적을 가진 수도관로는 대구경, 장거리, 수지상식 관로

형태를 나타내고 있어, 관로의 파손 등 사고 발생 시 대규모의 수용가에서 장시간의 단수 피해를 유발하는 등 용수공급의 취약성을 내포하고 있다. 대구경 관로의 경우 관로노선 상의 손상부위에 대한 복구작업을 위해서는 관로 내에 정체되어 있는 용수를 중력흐름에 의해 배수하는 데 많은 시간이 소요되며, 이로 인하여 전체 단수시간이 길어지는 문제점을 내포하고 있다.

상수관망에서 제한된 범위만을 격리시켜 배수함으로써 단수구역을 최소화하는 문제는 주로 밸브의 배

Received 11 October 2017, revised 13 October 2017, accepted 19 October 2017

\*Corresponding author: Jeong, Kwansue (E-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

치를 결정하는 모형의 개발에 중점을 두어왔다. Bouchart and Goulter (1991)는 관로의 파손시 용수의 손실을 최소화 하는 밸브배치 모형을 제안하였으며, Walski(1993)는 분절체(segment) 개념을 이용해 밸브에 의한 상수관망의 부분적 격리문제를 분석하였다. 이후 Jun(2005, 2006)은 상수관망에서 제수밸브에 의한 상수관의 부분적 격리효율 평가 및 피해범위 산정에 관한 연구결과를 발표하였다. 그러나 지금까지 배수 또는 격리와 관련하여 개발된 모형은 격자형 배수관망에서 제수밸브의 설치에 중점을 두어왔으며, 수리학적 관점에서 배수시간과 배수량에 대한 문제를 다루고 있지는 않아왔다. 국내의 상수도시설기준(MoE, 2010)에서도 도·송수관로에서 충수, 통수, 배수 등의 작업과 사고 시를 고려하여 1~3 km의 간격으로 제수밸브를 설치하고, 배수설비는 관로 종단상의 하향 굴곡부에 설치하는 등의 개략적인 기준만 제시되어 있을 뿐이다. 이러한 기준은 외국의 경우에서도 유사하며, 미국수도협회(American Water Works Association, AWWA)의 매뉴얼에도 제수밸브와 배수밸브의 개략적 설치위치에 대한 가이드라인만 있을 뿐이다(AWWA, 1986; AWWA, 1996). 따라서 제수밸브 또는 배수밸브 간의 이격거리가 장구간인 대구경의 도·송수관로를 통하여 배수되는 토출량에 대한 예측은 오리피스 공식(orifice equation)에 따른 개략적인 추정만 가능하며(MoE, 2010), 관망해석을 위하여 범용적으로 이용되는 EPANET 2.0 등의 프로그램에서조차도 상기 공식에 기반한 개략적 배수량 및 배수시간 예측 만이 가능할 뿐이다(Rossmann, 2000). 따라서 Kim 등(2013)에 의한 상수관로의 에너지 구성에서 중요한 요소를 차지하는 마찰손실이 배수시간 지연에 미치는 영향은 고려할 수 없으며, 복잡한 관로 연결상태를 가지는 관로계통의 배수시간을 예측하기 위한 수치모형의 개발이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대구경의 도·송수관로의 단수 작업시 예상되는 배수시간 예측을 위한 수치모형을 개발하고자 한다. 수치모형의 개발을 위하여 관로에서 배수 시 발생하는 마찰에 의한 배수지연 효과를 포함할 수 있도록 지배방정식을 수립하였으며, 직렬 및 병렬 연결을 포함한 복합적 관로 연결상태에서도 수위의 변화에 따른 배수시간을 예측할 수 있도록 일반화된 비선형 방정식을 제시한다. 제안된 지배방정식은 양해적 시간적분법에 따라 수위변화에 따른 배

수시간을 산정토록 하였으며, 개발된 수치모형의 결과는 해석해와의 비교 및 실제관로에 대한 적용을 통하여 실무적 확장성을 검토하고자 한다.

## 2. 관로의 배수시간 산정을 위한 지배방정식

### 2.1 관로의 배수시간 산정을 위한 이론식

관로로부터 배출되는 유량의 배수시간 산정을 위하여 Bernoulli 방정식이 이용된다. 즉, 수심  $h$ 를 가지는 수조에서 오리피스를 유출되는 유량은 다음의 식으로 표시된다.

$$Q = aC\sqrt{2gh} \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 오리피스 단면적,  $C$ 는 오리피스의 유출 유량계수,  $g$ 는 중력가속도이다. 연직방향 표면적(또는 단면적)  $A$ 를 가지는 균일단면의 수조 또는 관로에서 시간에 따라 감소되는 유량은 다음 식으로 표시된다.

$$Q = -A \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

일반적으로 관로는 수평 또는 경사진 지형 상에 매설된다. 따라서 위식의 표면적  $A$ 는 관로가 경사  $i$ 를 가지고 있는 일반화된 조건에서 관경  $D$ 에 대한 식으로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\sqrt{1+i^2}}{i} \quad (3)$$

위의 식 (1)과 (2)의 유량이 같다는 조건을 이용하면,

$$aC\sqrt{2gh} = -A \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

식 (4)를 적분하면, 수심  $h_1$ 으로부터  $h_2$ 까지 오리피스를 통하여 배수되는데 소요되는 시간( $t$ )은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$t = \frac{A}{aC} \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}) \quad (5)$$

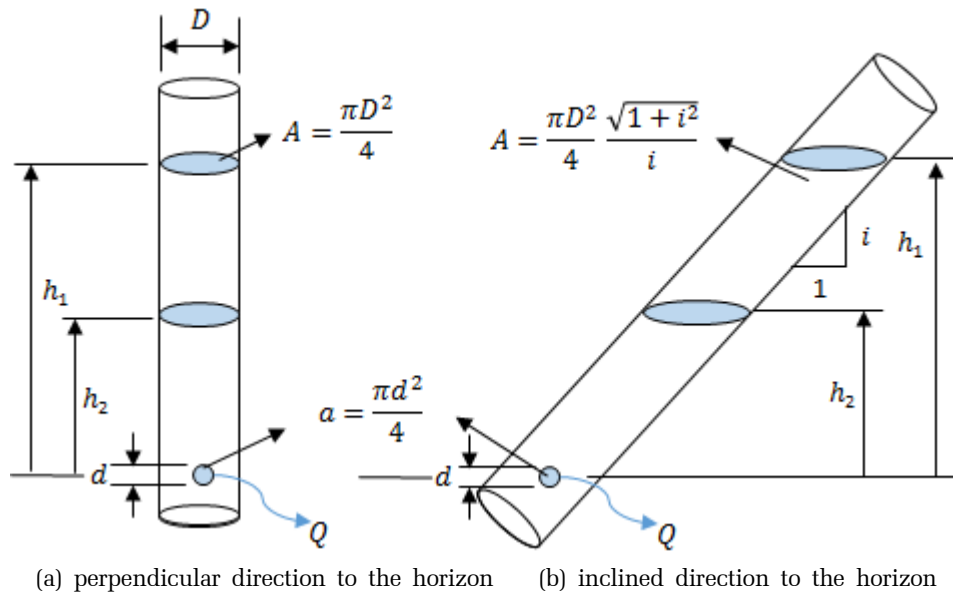


Fig. 1. Schematic diagram of pipeline drainage.

## 2.2 마찰을 고려한 배수시간 산정식의 유도

식 (5)는 배수시간에 대한 연구가 거의 없었던 점을 고려할 때 마찰이 없는 상태에서 배수시간 산정을 위해 유용하게 이용되어 왔다. 그러나 중력흐름 발생 시 도송수관로와 같이 관로의 노선이 길어지는 대구경 관로의 경우 마찰에 의한 배수시간 지연효과를 고려하는 것이 필요하다. 따라서 식 (1)에서 마찰에 의한 수두손실( $h_L$ )을 고려하면 다음과 같은 식이 유도될 수 있다.

$$Q = aC\sqrt{2g(h-h_L)} \quad (6)$$

이 때 관로로부터 배수시 발생하는 수두(또는 에너지) 손실은 중력상태 흐름에서 발생되며 다음과 같은 일반식으로 표시될 수 있다.

$$h_L = K_L Q^n \quad (7)$$

여기서,  $K_L$ 는 관로의 마찰손실 특성을 나타내는 계수로 관로길이, 관경, 조도계수의 함수이다.  $n$ 은 마찰손실공식에 따른 지수로서 실무적으로 많이 이용되는 Hazen-Williams 식에서는 1.852, Manning 식에서는 2.0을 이용한다. 식 (7)을 식 (6)에 대입하면 다음의 유량에 관한 비선형 방정식이 유도된다.

$$f(Q) = Q^2 + 2ga^2 C^2 K_L Q^n - 2ga^2 C^2 h = 0 \quad (8)$$

## 2.3 복합 연결상태를 가지는 관로에 적용을 위한 일반식의 유도

관로 중간에 설치된 배수밸브를 통하여 배수를 발생시키는 경우 수리적 마찰손실 특성이 서로 다른 관로들이 직렬 연결상태와 병렬 연결상태로 유량을 배출시키는 경우가 발생한다. 또한 직렬과 병렬의 연결이 복합적으로 이루어진 관로들의 집합을 나타내기도 한다. 따라서 범용적으로 적용이 가능한 배수시간 산정모형을 개발하기 위하여 배출유량에 대한 일반식이 유도되어야 한다.

먼저 관로의 마찰손실 특성이 다른  $m$ 개의 관로가 직렬로 연결된 경우, 식 (7)에서 일련의 관로들을 통하여 배출되는 유량( $Q$ )은 동일한 반면 배수시 발생하는 수두손실( $h_L$ )은 직렬로 연결된 관로들에 의한 마찰손실의 합으로 이루어진다. 따라서 식 (8)은 다음과 같은 유량에 관한 비선형의 관계를 이룬다.

$$f(Q) = Q^2 + 2ga^2 C^2 \left( \sum_{i=1}^m K_L \right) Q^n - 2ga^2 C^2 h = 0 \quad (8)$$

배수밸브로 연결된 관로가 병렬의 연결상태를 가지는 경우는 관로상에서 빈번히 발생되고 있다. 즉 배수

pp. 481-490  
pp. 491-499  
pp. 501-510  
pp. 511-519  
pp. 521-527  
pp. 529-537  
pp. 539-549  
pp. 551-566  
pp. 567-575  
pp. 577-586  
pp. 587-597  
pp. 599-609  
pp. 611-618  
pp. 619-628

밸브를 개방하면 상하류에 충수되어 있었던 물은 배수밸브를 향하여 서로 반대방향으로부터 흐름이 발생되고, 상류측 또는 하류측으로부터 배출되는 유량의 합이 배수량이 된다. 이 때 상류측으로부터 배출되는 유량과 하류측으로부터 배출되는 유량의 크기는 상하류측의 수위와 상하류측 관로의 마찰손실 특성에 따라 달라지게 된다. 이 때 관로의 중간에 설치된 배수밸브 구경이 작은 경우 수위가 큰 쪽에서 수위가 작은 쪽의 흐름이 발생될 수 있으나 본 연구에서는 이러한 영향을 미소하다고 가정하였다. Fig. 2에서 초기수위가 각각  $h_1, h_2$  인 병렬연결 관로가 있을 경우 상대적으로 높은 수위에 물이 양쪽의 수위가 같아질 때까지 배수되고, 이후에는 상하류 측으로부터 동시에 배수가 이루어지는 상태가 이루어지도록 식 (7)을 수정 제시 하였다.

$$h_L = \begin{cases} K_{L,2}Q^n & \text{if } h_2 > h_1 \\ K_{L,1}Q_1^n + K_{L,2}Q_2^n & \text{if } h_2 = h_1 \end{cases} \quad (9)$$

식 (9)의 아래 식에 포함된 유량은 배수되는 유량  $Q$ 가 아닌 병렬연결 관로를 통하여 배출되는 부분유량인  $Q_1$  및  $Q_2$ 이다. 따라서 전체 배수유량에 대한 식으로의 환산이 필요하다.  $p$  개의 계통으로 병렬연결되어 있는 경우 손실수두는 같다는 조건으로부터 다음의 식이 유도된다.

$$K_{L,1}Q_1^n = K_{L,2}Q_2^n = \dots = K_{L,k}Q_k^n = \dots = K_{L,p}Q_p^n \quad (10)$$

식 (10)으로부터 서로 다른 부분유량은 1개의 부분유량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_p = \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,p})} Q_k \quad (11)$$

연속방정식에 따라 전체 배수유량은 부분유량의 합과 같다는 조건으로부터 다음의 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k + \dots + Q_p \\ &= \left[ \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,1})} + \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,2})} + \dots + 1 + \dots + \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,p})} \right] Q_k \\ &= \left[ \sum_{j=1}^p \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,j})} \right] Q_k \end{aligned} \quad (12)$$

병렬연결 상태에서 수두손실의 크기가 같으므로 식 (7)과 (8)은 식 (12)의 관계를 이용하면 다음과 같은 전체 배수유량의 함수로 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} Q &= aC\sqrt{2g(h-h_{L,k})} = aC\sqrt{2g(h-K_{L,k}Q_k^n)} \\ &= aC\sqrt{2g\left(h - \left[ K_{L,k} / \sum_{j=1}^p \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,j})} \right] Q^n \right)} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 정리하면 다음의 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} f(Q) &= Q^2 + 2ga^2C^2 \left[ K_{L,k} / \sum_{j=1}^p \sqrt[n]{(K_{L,k}/K_{L,j})} \right] \\ Q^n - 2ga^2C^2h &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)와 식 (8)로부터 복합 연결상태를 가진 관로에 적용을 위한 일반식이 유도될 수 있다. 즉,  $p$  개의 병렬관로 계통이 존재하고, 각각의 병렬관로 계통이  $n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_p$  개의 직렬관로로 이루어진 관로에서 각 병렬계통의 마찰손실 계수는  $K_{L,k} = \sum_{i=1}^{n_k} K_{L,k,i}$  로 표시함으로써 직렬관로가 연결된 일반화된 배수량 함수의 유도가 가능하다.

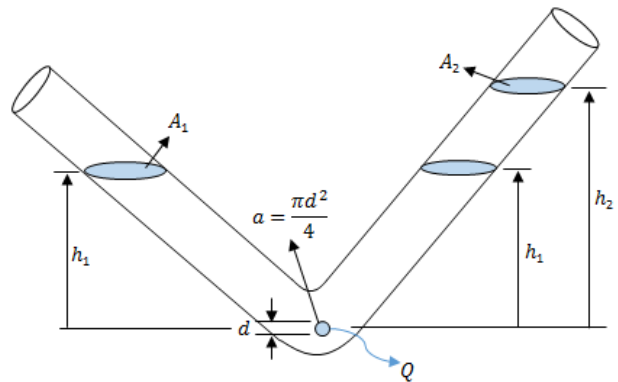


Fig. 2. Drainage layout connected to pipes in parallel.

### 3. 시간적분법을 이용한 배수시간 산정모형 개발

#### 3.1 비선형 방정식의 수치근사해 결정

관로내 마찰에 의한 손실을 고려한 배수량과 수심 사이의 비선형 관계를 나타내는 식 (14)는 더 이상 식 (2)와 연립하여



배수시간에 대한 해석해를 구할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 수치해석 기법을 이용하여 수치 근사해를 구할 수 있는 방법인 Newton-Raphson 방법을 이용하여 수심  $h$ 를 가지는 특정한 시점에서의 배수량  $Q$ 를 산정하였다. Newton-Raphson 방법은 비선형 방정식의 수치해를 구하는 방법 중에 가장 광범위하게 이용되는 방법으로 근에 대한 초기 가정 값이  $x_i$ 라고 하면 점  $[x_i, f(x_i)]$ 에 접하는 접선을 구할 수 있고, 이 접선이  $x$ 축과 교차하는 점이 개선된 근이 된다. 이러한 과정을 반복하면 근사적인 수치해를 구할 수 있고 개선된 근을 구하는 식은 다음과 같이 표시된다.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (14)$$

Newton-Raphson 방법의 적용을 위해 필요한 도함수는 식 (13)으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$f'(Q) = 2Q + 2ga^2 C^2 n \left[ K_{L,k} / \sum_{j=1}^n \sqrt{(K_{L,k} / K_{L,j})} \right] Q^{n-1} \quad (15)$$

따라서 유량  $Q$ 의 수치근사해는 식 (13)과 식 (15)로부터 다음의 개선된 근사해를 구하는 식으로 반복적인 과정을 거쳐 구할 수 있다.

$$Q_{i+1} = Q_i - \frac{f(Q_i)}{f'(Q_i)} \quad (16)$$

### 3.2 시간적분법을 이용한 배수시간의 수치해석

시간에 따라 변하는 유체의 거동을 수치해석을 통하여 구하기 위해서는 전체 시간 구간을 유한개의 시점으로 나누는 다음, 초기 값을 이용하여 각 시점에서 물체의 거동을 순차적으로 계산해 나가야 한다. 다시 말해,  $t$ 번째 시점에서의 거동 값을 계산하여 알고 있다면, 이 값을 방정식에 대입하여  $t+1$ 번째 시점에서의 거동 값을 계산한다. 이렇게 순차적으로 각 시점에서의 거동 값을 계산해 나가는 수치기법을 시간적분(time integration)이라고 한다. 수학적 표현식을 어떤 시점에 두고 계산하는가에 따라 크게 두 가지 적분 방식, 즉 음해적 시간적분(implicit time integration)과 양해적 시간적분(explicit time integration)으로 구분될 수 있다.

본 연구에서는 양해적 시간적분 방법을 이용하여 각 시점에서의 유량( $Q_t$ )을 계산한 후, 일정시간 간격( $\Delta t$ ) 동안의 배수량( $\Delta V_t$ )을 유량 값으로부터 산정한 후, 배수량 차감을 통하여 낮아지는 수위( $\Delta h_t$ )를 계산하는 반복적인 방법으로 배수시간을 산정토록 하였다. 수위가 낮아짐에 따라 유량 및 배수량이 작아져 무한한 시간이 소요되는 상황이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 배수밸브가 설치된 지점의 관로 관경의 1/2로 낮아지는 시점까지를 배수시간으로 간주하였다. 이는 실제 배수작업에서 유량의 크기가 적을 경우 펌프를 이용한 강제배수를 이용하고 있는 상황을 감안하면 합리적인 배수종료 조건이라 할 수 있다. 이상의 해석절차는 Fig. 3에 나타내었다.

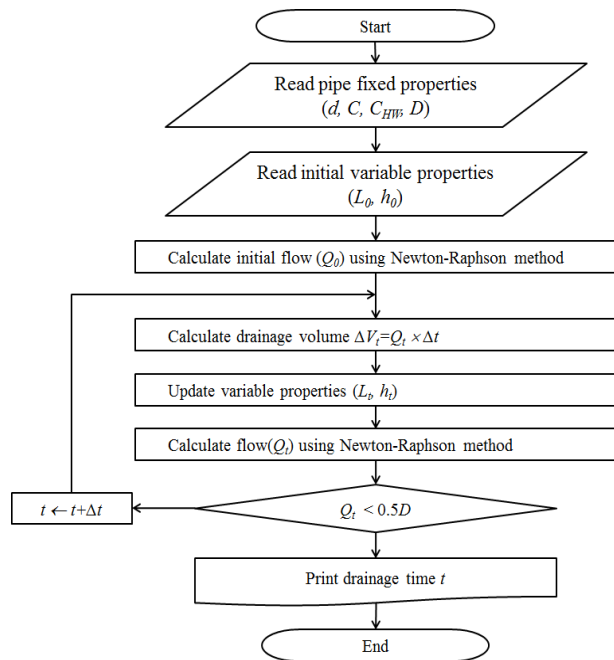


Fig. 3. Procedure to calculate drainage time using time integration method.

## 4. 배수시간 산정 수치해석 모형의 검증 및 적용

### 4.1 단일관로 해석해와의 검증

관로길이 5,000 m, 관경 1.0 m, 초기 수위차 10.0 m의 조건을 가지는 경사진 1개의 단일관로에 대하여 관로의 마찰이 없는 상태에서 구한 해석해와 관로의

pp. 481-490  
pp. 491-499  
pp. 501-510  
pp. 511-519  
pp. 521-527  
pp. 529-537  
pp. 539-549  
pp. 551-566  
pp. 567-575  
pp. 577-586  
pp. 587-597  
pp. 599-609  
pp. 611-618  
pp. 619-628

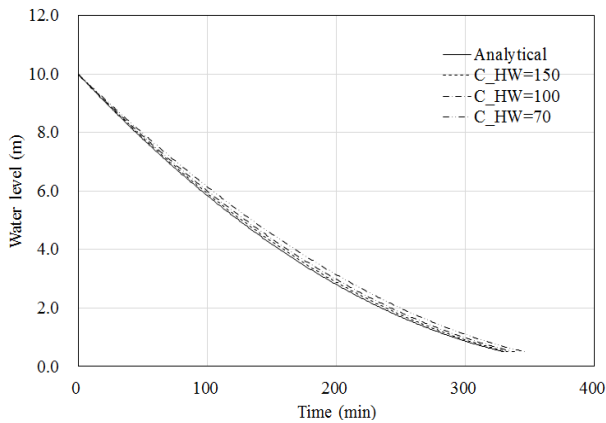


Fig. 4. Drainage time of simple pipe.

Hazen-Williams의 마찰손실계수  $C_{HW}$ 를 150, 100, 70으로 변화시켜 수치 해석한 결과를 나타내면 Fig. 4와 같다. 관로의 배수시간은 초기 수위로부터 관경의 1/2 지점인 0.5 m의 수위가 도달할 때 까지 해석을 실시하였다. 해석결과에 따르면 해석하는 330 min의 배수시간이 소요되었으며,  $C_{HW}=150$ 인 수치해는 334 min,  $C_{HW}=100$ 인 수치해는 338 min,  $C_{HW}=70$ 인 수치해는 346 min의 배수시간이 소요됨을 알 수 있다. 즉, 마찰에 의한 손실이 적을수록 수치해석 결과는 해석해에 접근하는 것으로 나타났으며, 이로써 본 해석모형의 유효성을 검증할 수 있었다.

#### 4.2 직렬연결 관로의 수치해석 결과

관로길이 5,000 m, 관경 1.0 m, 관로의 마찰손실계수  $C_{HW}=100$ 인 2개의 관로가 직렬로 연결되어 있고 초기의 수위차가 40 m인 조건을 가지는 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 이 때 2개의 관로의 경사가 완경사(수위차 10 m)로부터 급경사(수위차 30 m)로 연결된 경우와 급경사로부터 완경사로 연결되어 배수되는 경우에 대한 해석결과를 나타내면 아래의 그림과 같다. 단일관로의 경우와 같이 수치모형의 해석 종료조건은 수위가 0.5 m인 지점으로 선정하였다. Fig. 5의 해석결과로부터 동일한 관로길이 및 마찰조건을 가지고 있음에도 배수시간에는 커다란 차이가 발생함을 알 수 있다. 완경사로부터 급경사로 변화하는 관로계통의 경우 배수에 소요되는 시간이 335 min이지만, 급경사로부터 완경사로 배수되는 관로계통의 경우 483 min이 소요됨을 알 수 있다. 이러한 차이는 이는 급경사-완경사의

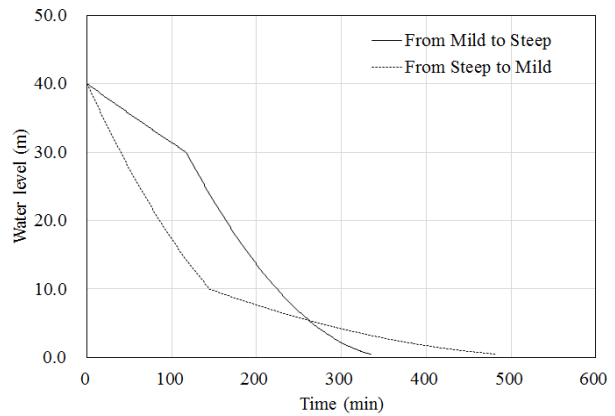


Fig. 5. Drainage time depending on the slope of pipes in series.

조합의 경우 배수밸브에 가깝게 있는 급경사 지역은 신속히 배출될 수 있으나 멀리 있는 완경사 지역의 중력 배출 특성상 서서히 배출되므로 시간이 소요되는 반면, 완경사-급경사 조합의 경우는 멀리 있는 급경사 지역의 중력 에너지가 완경사 지역에 영향을 미치게 되므로 완경사 지역 배출이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

#### 4.3 직렬과 병렬 관로가 혼합하여 연결된 관로의 수치해석 결과

직렬연결 2개 관로에 추가하여 배수밸브와의 수위차가 20 m인 병렬연결 관로가 관로길이 5,000 m, 관경 1.0 m, 관로의 마찰손실계수  $C_{HW}=100$ 의 특성을 가지고 연결된 경우에 대하여 해석을 실시하였다. Fig. 6으로부터 병렬로 연결된 관로로 인하여 수위차 20 m이후에 관로계통의 배수특성이 완만하게 변화되며, 총 배수시간의 경우 완경사로부터 급경사로 변화하는 경우 587 min, 급경사로부터 완경사로 변화하는 경우 731 min으로 크게 증가됨을 알 수 있다. 특히 병렬연결 관로에 의해 양방향에서 배출유량이 공급되는 경우 각 병렬계통별 수두손실 비율(resistance ratio, 식 (13)의  $\sum_{j=1}^p \sqrt{(K_{L,k}/K_{L,j})}$ )를 수위변화에 따라 표시하면 Fig. 7과 같다. 즉, 완경사로부터 급경사로 변화하는 경우 2개의 병렬계통간 에너지 손실비율 1:0.803으로 일정한 값을 가지는 반면, 급경사로부터 완경사로 변화하는 경우 병렬계통간 에너지 손실비율은 수위차가 10-20 m 사이에서는 변화하며, 수위차가 10 m 이하에서는 1:1.454로 일정한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

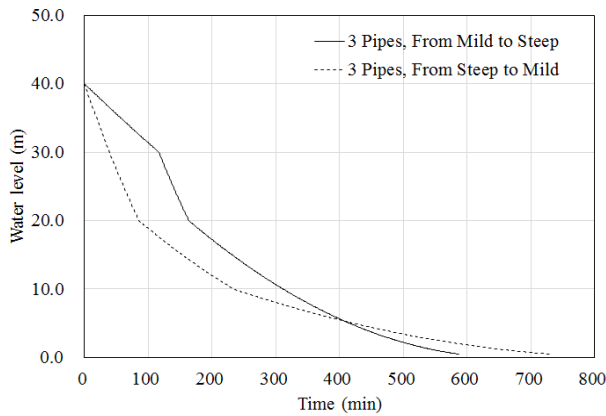


Fig. 6. Drainage time in pipes in series and parallel.

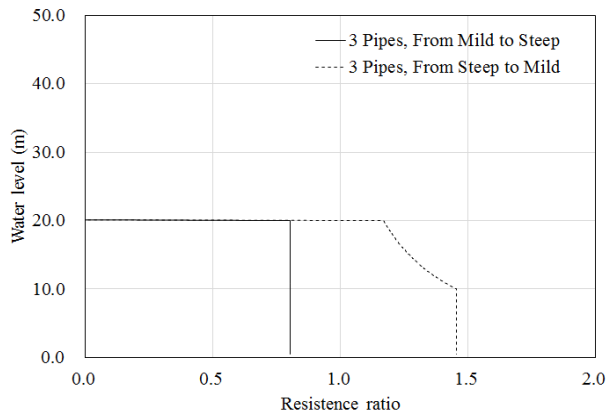


Fig. 7. Resistance ratio in pipes in parallel.

#### 4.4 광역상수도 실제운영 사례에 대한 적용결과

본 연구에서 개발된 배수시간 산정 모형을 실제 운영 중인 B광역상수도 C계통에 대해 적용하였다. C계통의 송수관로는 45,261 m의 관로연장을 가지고 있으며, 배수시간 산정을 위한 관로의 길이는 9.3~2381.4 m의 범위에 있으며, 관경은 0.3~2.5 m의 범위에 있다. 관로내의 마찰손실 특성을 나타내는  $C_{HW}$ 값은 100~120 사이에 있는 것으로 나타났다. 관로노선 상에는 31개의 배수구간(D1~D31)에 구경 0.4 m 와 0.2 m의 배수 밸브 35개(Fig. 7에 원형점으로 표시됨)가 설치되어 있는 것으로 조사되었다.

각각의 배수구간에 해당되는 관로 및 절점 정보와 배수밸브에 대한 정보(구경 및 오리피스 유출유량 계수)를 이용하여 배수시간 산정모형을 적용한 결과를 나타내면 Fig. 8과 같다. B광역상수도 C계통의 경우 지형의 기복으로 인하여 전반적으로 60 min 이내의

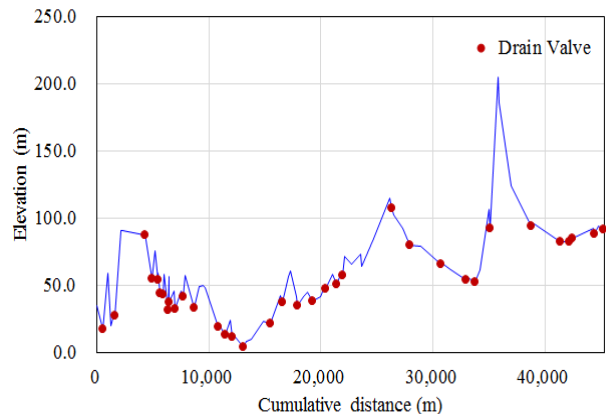


Fig. 8. Longitudinal profile of C transmission line in B multi-regional water supply system.

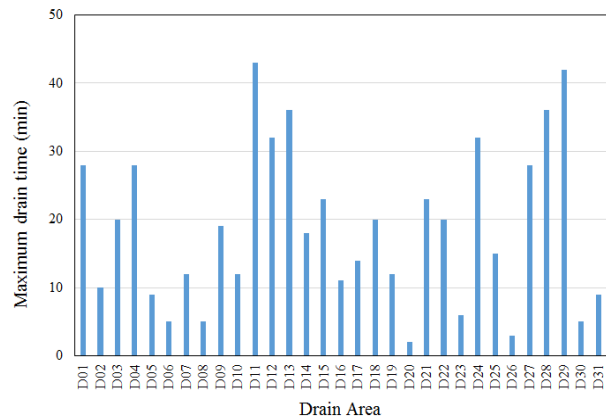
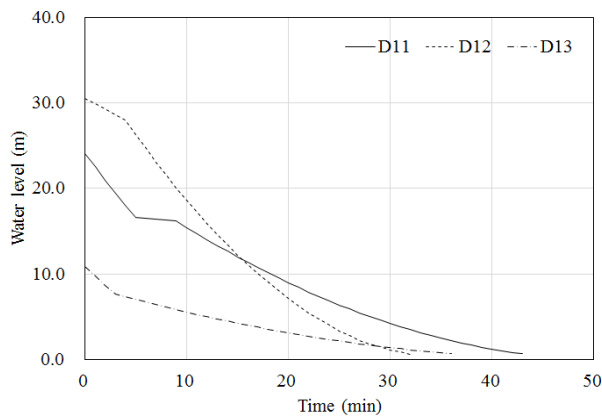


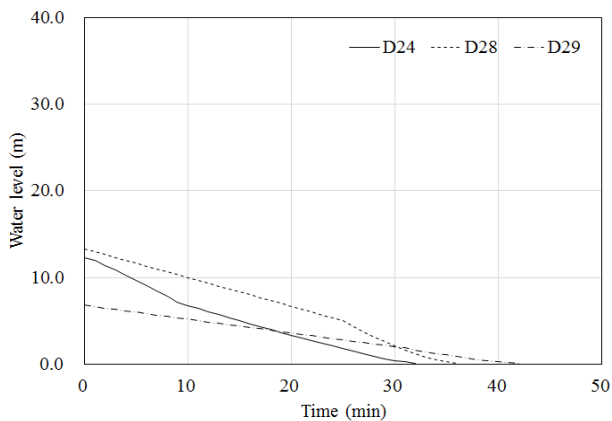
Fig. 9. Maximum drainage time in drain areas of C transmission line.

양호한 배수특성을 나타내고 있었다. 그러나 구간별 배수시간 편차는 큰 것으로 나타났으며, 가장 작은 배수시간은 2 min으로 D20 배수구간에 해당되며, 가장 큰 배수시간은 D11 배수구간에서 43 min을 기록하였다. 배수시간 산정에서 주목하여야 할 배수구간은 현재 배수를 위한 밸브가 설치되어 있지 않은 D2, D21, D22 구간이다. 본 구간에서의 배수시간은 각각 10 min, 23 min, 20 min으로 상당한 시간의 배수가 요구된다. 따라서 본 구간에 대한 배수밸브 등의 시설개선이 필요하다는 것을 알 수 있다. 특히 배수시간이 30 min 이상 소요되는 배수구간은 D11, D12, D13, D24, D28, D29구간으로 이들 배수구간에서의 시간에 따른 수위변화를 Fig. 9에 나타내었다. 그림으로부터 각 배수구간은 시간에 따라 비교적 선형적인 수위감소 경향을 나타내고 있으나, 배수구간이 가지는 병렬연결

pp. 481-490  
pp. 491-499  
pp. 501-510  
pp. 511-519  
pp. 521-527  
pp. 529-537  
pp. 539-549  
pp. 551-566  
pp. 567-575  
pp. 577-586  
pp. 587-597  
pp. 599-609  
pp. 611-618  
pp. 619-628



(a) In drain areas of D11, D12, and D13



(b) In drain areas of D24, D28, and D29

Fig. 10. Drainage time in C transmission line of B multi-regional water supply system.

특성 및 마찰손실 특성에 따라 배수시간이 영향을 받고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대구경 관로의 단수 작업 시 발생할 수 있는 대구경 관로의 배수시간 예측을 위한 수치해석 모형을 개발하였다. 제안된 수치해석 모형은 이론적 해석해에서 고려할 수 없었던 관로 내 마찰손실에 의한 영향을 중력 흐름의 수심변화에 따른 배수시간의 지연효과를 분석할 수 있고 복잡한 연결상태를 가지는 관로에 적용이 가능한 실무적인 모형으로서 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 관로내 마찰손실에 의한 배수시간 지연효과를 고려할 수 있는 지배방정식을 유도하였으며, 복잡적

인 배관상의 연결상태에서도 마찰에 의한 수두손실을 계산할 수 있는 일반적인 형태로 지배방정식을 확장시켰다. 또한 배수량에 대한 비선형 방정식을 수치해석적 방법으로 구할 수 있는 방법을 제시하였으며, 양해적 시간적분 방법에 의해 수위의 변화에 따라 누적되는 배수시간을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2) 개발된 시간적분 방법에 기반한 수치해석 모형의 결과를 단수관로 예제에 적용하여 모형의 유효성을 검증하였으며, 관로내 마찰손실 특성이 배수시간을 지연시키는 효과에 대하여 제시하였다. 또한 실제 운영되고 있는 대구경의 B광역상수도 C계통 송수관로에 개발모형을 적용함으로써 구간별로 2 min에서 43 min까지 큰 배수시간의 편차를 나타내는 것을 확인하였으며, 배수시간 균등화를 통한 광역상수도 운영관리 효율화 필요성을 제시하였다.

3) 본 연구에서 개발된 모형은 향후 대구경의 장거리 관로를 설계, 운영하는데 실무적으로 유용한 방법으로 기대할 수 있으며, 관망해석 모형과의 연계를 통하여 상수관망의 배수시간 산정을 위한 도구로서 확장이 기대된다.

## References

American Water Works Association(AWWA) (1986). *Introduction to Water Distribution*, Volume 3. AWWA, Denver, CO.

American Water Works Association(AWWA) (1996). *Water Transmission and Distribution*, Second Edition. AWWA, Denver, CO.

Bouchart, F. and Goulter, I. (1991). "Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 12, pp. 3029-3040.

Jun, H. D. (2005). "Isolating subsystems by valves in a water distribution system and evaluating the system performance." *J. of Korea Water Res. Assoc.*, KWRA, Vol. 38, No. 7, pp. 585-593 (in Korean).

Jun, H. D. (2006). "An evaluation of the pipe failure impact in a water distribution system considering subsystem isolation." *J. of Korea Water Res. Assoc.*, KWRA, Vol. 39, No. 2, pp. 89-98 (in Korean).

Kim, S.-W., Kim, D., Choi, D. Y., Kim, J. (2013). "A study on the method of energy evaluation in water supply networks." *J. of Korea Water Res. Assoc.*, KWRA, Vol.





- 46, No. 7, pp. 745-754 (in Korean).
- Lee, D. H., Kim, J. H., Chung, G. (2017). "Friction loss of multi-purpose stormwater tunnel simulated by Flow 3D." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 14-21 (in Korean).
- Ministry of Environment(MoE) (2010). Korean Standard for Waterworks Facilities. Seoul, Korea (in Korean).
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET2: User's manual*. U.S. EPA, Cincinnati, OH.
- Walski, T. M. (1993). "Water distribution valve topology for reliability analysis." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 42, pp. 21-27.
- Walski, T. M. (2002). "Issues in providing reliability in water distribution systems" *Proceedings of the ASCE Environmental and Water Resources Institute(EWRI) Annual Conference*, Reston, VA.

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628