EPANET 기반의 Pressure Driven Analysis 모형 개발 및 적용

Development and Application of Pressure Driven Analysis Model based on EPANET

이호민* · 유도근** · 김동영*** · 김종훈****

Lee, Ho Min · Yoo, Do Guen · Kim, Dong Young · Kim, Joong Hoon

Abstract

Hydraulic analysis of water distribution systems (WDS) is divided into two types, one is Demand Driven Analysis (DDA) which applies to a steady state condition and other is Pressure Driven Analysis (PDA) which applies to an abnormal condition. In DDA, it is assumed that available discharge in demand nodes is always equal to the required discharge, and the assumption is suitable for a steady state condition. However, in abnormal conditions such as pipe failure or excess of demand, DDA model may produce unrealistic outputs such as negative pressure, so application of PDA model is required. The Gradient Algorithm used for DDA in EPANET was improved to develop a PDA model based on the Global Gradient Algorithm. Additionally, the developed model was applied to evaluate the emergency water supply plan of a large block system in Yeong Wol. The results showed to 66~100% of the total network demand was available in the emergency scenarios of failure in each reservoir. The developed PDA model is capable to solve negative pressure problem shown in existing DDA model and to analyse evaluation of emergency water supply plan with high reliability.

Key words : Water Distribution System, Hydraulic Analysis, Pressure Driven Analysis

요 지

상수도관망의 수리학적 해석 방법에는 주로 정상상태의 시스템 해석에 사용되는 Demand Driven Analysis (DDA)와 비정상상태 시스템 해석에 사용되는 Pressure Driven Analysis (PDA)가 있다. DDA는 각 절점의 수요량은 모두 공급된다는 가정 하에 절점의 압력수두를 계산하는 기법으로, 관망시스템이 정상상태일 경우에는 해석에 무리가 없다. 하지만 비정상상태, 즉 어떠한 원인으로 관망의 수리학적 상태가 변화했을 때에는 DDA로 해석을 할 경우 부압이 발생하는 등 비현실적인 결과를 발생시킬 수 있으며, 따라서 PDA 수리해석의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 EPANET의 DDA 수리해석 모형에 포함된 Gradient Algorithm을 분석 및 개량하여 Global Gradient Algorithm을 적용한 PDA 수리해석모형을 개발하였다. 또한 개발 모형의 적용성 평가를 위해 탑재된 PDA 기능을 이용하여 영월군 대불력 시스템의 배수지에 문제가 발생한 시나리오에 대하여 비상급수계획 분석을 시행하였고, 그 결과 각 배수지의 문제 발생시 66~100%의 비상급수가 가능한 것으로 나타났다. 기존 DDA 해석 모형에서 발생한 부압 등의 문제를 해결할 수 있었고, 공급가능 유량을 정량적으로 산정하여 보다 신뢰도 높은 비상급수계획 분석이 가능한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 상수도관망, 수리해석, Pressure Driven Analysis

1. 서 론

물 공급 시스템의 목적은 각 수요지에서 요구되는 충분한 유량을 충분한 수압과 적절한 수질을 확보하며 공급하는 것이다. 이러한 수압의 안정성과 수질의 안전성을 확보하기 위해서는 정상상태의 관망 시스템에 대한 수리해석 뿐만 아니

라, 추가적으로 관로의 파손과 갱생 및 교체를 위한 관로 교체, 화재 발생 등으로 인한 갑작스러운 수요유량의 급증과 같은 비정상상황 발생 시의 수리해석이 매우 중요하다. 다시 말해서, 실제 시스템의 거동에 근사한 수리해석을 통해 비정상상황에 따른 단수 및 수압 부족지역을 정확히 예측할 수 있어야 하며, 이를 통해 각 비정상상황에 대한 효율적인 대

*정회원. 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail : dlgh86@korea.ac.kr)

Member. Graduate Student. School of Civil, Environmental and Architecture Engineering. Korea University

**정회원. 고려대학교 공학기술연구소 연구원

Member. Researcher. Research Institute of Engineering and Technology. Korea University

*** (주)웹솔루스 융합기술연구소 연구원

Assistant Research Engineer. Fusion Research Institute. Websolus Co., Ltd

****교신저자. 정회원. 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3316, Fax: +82-2-3290-4722, E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor. School of Civil, Environmental and Architecture Engineering. Korea University

응방안을 마련함으로써 물 관리의 효율을 증대시켜야 한다. 이러한 실제적인 상수관망의 수리해석을 위해 필수적인 요소가 바로 Pressure Driven Analysis (PDA) 해석 기법이다.

Pressure Dependent Demand (PDD)라는 용어와도 혼용되는 PDA 관망해석 기법은 기존의 Demand Driven Analysis (DDA) 관망해석 기법에서 고려하지 않는 절점의 수압과 공급가능 유량의 관계를 고려하여, 수압에 따른 공급 가능한 유량을 상황에 따라 산정한다. 이러한 과정을 통해, 절점의 수요유량은 변하지 않는다는 가정을 기본으로 한 DDA 관망해석 결과가 부압이 발생하는 것으로 도출되는 등의 문제를 해결할 수 있다.

본 연구에서는 DDA 관망 해석 기법을 적용하고 있는 EPANET 수리해석 프로그램의 엔진을 분석하여 세부 구조를 파악하고, 기존 EPANET 엔진의 Gradient Algorithm (GA)를 확장한 Global Gradient Algorithm (GGA)을 적용한 PDA 수리해석 모형을 개발하였다. 또한 개발된 PDA 시뮬레이션 모듈을 검증하기 위하여 본 모형을 강원도 최남단 영월군의 대불력 시스템에 적용하였으며, 이를 통해 배수지 문제 발생 시나리오에 대하여 비상급수계획을 평가하였다.

2. DDA 및 PDA 관망해석 기법

상수도 시스템의 수리학적 해석 방법에는 크게 두 가지가 있으며, 하나는 주로 정상상태의 시스템 해석에 사용되는 Demand Driven Analysis (DDA)이고, 다른 하나는 비정상상태 시스템 해석에 사용되는 Pressure Driven Analysis (PDA) 분석이다. 기존에 수리해석 시 사용되던 DDA는 각 수요지점의 수요량은 항상 100% 만족시킨다는 가정 하에 연속방정식과 순환방정식을 이용하여 지점의 압력수두를 계산하는 기법으로, 이 방법은 시스템이 정상상태일 경우에는 해석에 무리가 없다. 하지만 비정상상태, 즉 어떠한 원인으로 인하여 관망의 수리학적 상태가 변화했을 경우, DDA 수리해석 결과는 절점에서 부압이 발생하는 등 비현실적인 결과를 발생시킬 수 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 새로 연구된 기법이 PDA이다. PDA는 절점의 압력 및 공급량을 모두 미지수로 하여 수치계산을 통해 비정상상태에서의 압력 및 공급량의 변화를 알아보는 분석 기법이다. DDA와 PDA의 주요 특징은 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison Between DDA and PDA

	DDA	PDA
적용	정상 운영 상태	정상, 비정상 운영 상태
정상 상태 해석에 대한 신뢰도	높음	높음
비정상 상태 해석에 대한 신뢰도	낮음	높음
가정	수요량은 항상 만족	절점의 공급량은 절점 압력수두에 영향을 받음
단점	비정상 상태 모의시 부압 발생 가능성	절점 압력수두와 공급량 간 관계식이 필요

2.1 Demand Driven Analysis (DDA)

DDA는 각 절점의 기본 수요량을 모두 알고 있고, 공급량이 수요량을 모두 충족시킨다는 가정 하에 연속방정식과 순환방정식을 사용하여 각 절점의 압력을 계산하는 해석기법으로, 미국 환경청에서 개발한 상수 관망 해석 프로그램인 EPANET과 Wood (1980)가 개발한 KYPIPE 등 여러 프로그램에서도 사용된다. 이들 기법은 정상상태 해석에는 적합하지만 비정상상태 관망의 해석에는 낮은 신뢰도를 나타내는데, 그 이유는 DDA의 기본 가정, 즉 어떠한 상황에서도 수요량을 100% 만족시킨다는 가정 때문이다. 이러한 가정으로 DDA 해석 기법에서는 관거의 차단 등으로 인해서 특정 절점으로 용수가 공급되는 경로가 기존의 경로보다 길어져 손실수두가 커지는 상황이나, 혹은 화재 진압 시와 같이 국소 지역에서 수요량의 급격한 증가가 발생하는 경우의 해석에도 모든 절점의 수요량을 모두 만족시킨 상태에서 압력을 계산하게 되고, 이 때문에 경우에 따라서는 일부 절점에서 부압이 발생하게 된다. 여러 연구자들이 이러한 DDA의 단점을 지적하였고 비정상상태에서 이런 비현실적인 결과를 도출하는 DDA를 대체하기 위하여 연구된 방법이 PDA이다.

2.2 Pressure Driven Analysis (PDA)

PDA 관망해석은 기존 DDA 해석 기법에서 고정된 값을 지니는 절점의 유량을 공급가능 유량으로 변환하는 과정을 포함하며, 이는 크게 두 가지의 방법으로 구분된다.

첫 번째 방법은 기존의 DDA 관망해석 기법을 기본으로 하며, 한 예로 Bhawe (1991)와 Ang and Jowitt (2006)의 연구에서와 같이 수압이 부족한 절점에 가상의 저수지를 생성하는 방법이 있다. 또한 Rossman (2007)은 절점의 공급가능 유량을 오리피스 형태의 에미터 유량을 적용하여 산정하였다. Kalungi and Tanyimboh (2003)는 기존의 DDA 수리해석에 유량 공급이 불가능한 절점과 부분적인 유량이 공급 가능한 절점을 추가로 모의하였다. Gupta and Bhawe (1996)는 반복적인 DDA 연산을 통하여 절점의 유량을 보정하는 기법을 제안하였다. Rossman (2007)의 연구를 제외한 나머지의 모든 기법은 절점의 공급가능 유량을 산정할 때 까지 반복적인 DDA 수리해석과 매개변수의 보정이 필요하며, 이는 큰 규모의 관망 시스템에 대한 적용성이 떨어지는 문제를 지닌다.

PDA 관망해석의 두 번째 방법은 Head-Outflow Relation (HOR) 관계식을 통해 절점의 공급가능 유량을 산정한다. HOR 관계식은 Tanyimboh and Templeman (2004, 2010), Udo and Ozawa (2001), Germanopoulos (1985), Gupta and Bhawe (1996), Fujiwara and Ganesharajah (1993), Cullinane et al. (1992)과 Wagner et al. (1988) 등의 연구에서 적용되었다. 일반적으로 이러한 HOR 관계식은 총족수두와 최소수두의 개념을 포함하며, 총족수두 이상의 수압 조건에서는 절점의 수요유량이 모두 공급 가능하고 최소수두 이하의 수압 조건에서는 해당 절점에 유량 공급이 불가능함을 의미한다. HOR 관계식을 적용한 PDA 해석기법의 장점은 비선형적인 관계에 있는 수압과 공급가능 유량을 동시에 계산할 수

있다는 점이다. Tanyimboh and Templeman (2010)은 Newton Raphson 기법에 기반한 PDA 해석 모형인 PRAAWDS (Program for the Realistic Analysis of the Availability of Water in Distribution Systems)를 제안하였으며 Giustolisi *et al.* (2008a, 2008b)은 Wagnr *et al.* (1988)의 방정식을 Global Gradient Algorithm에 추가한 해석 기법을 개발하였다. 마찬가지로 Wu *et al.* (2009)는 Global Gradient Algorithm 기법을 적용한 PDA 수리해석 모형을 제안하였다. 또한 Tanyimboh and Templeman (2004, 2010)은 충족수두와 최소수두 조건에서 PDA 해석의 수렴성을 개선하기 위하여 연속성이 있는 HOR 관계식을 제안하였다. Bentley사 (2006)는 WaterGEMS (V8i) 모형에 Gradient Algorithm을 수정한 Modified Gradient Algorithm을 적용하여 모의시간을 단축시킨 PDA 해석 모듈을 추가모듈로 개발하였으며 Power Function 형태의 HOR 관계식을 적용하였다.

국내의 경우 백천우 등 (2007, 2010a, 2010b)은 최적화 기법인 Harmony Search Algorithm (HS)과 EPANET을 이용한 HSPDA 모형을 개발, 비정상상태 시스템에 적용하였으며, 상수관망의 신뢰성 분석 모형을 제안하였다. 또한 백천우 등 (2008)은 WaterGEMS (V8i)를 통해 국내 J시의 비상급 수계획을 평가하였으며, 서민열 등 (2009)은 HOR 관계식 대신 유효유량 개념을 적용하여 Subsystem 중요도 지수를 산정하는 모형을 제시하였고, 윤정수 등 (2012)은 EPANET의 에미터 유량을 기능을 활용한 Semi-PDA 모형을 통해 상수관망 최적 누수탐지 기법을 제안하였다.

한편, Shirzad and Tabesh (2012)는 Wagner *et al.* (1988)에서 제안된 HOR 관계식을 포함한 총 6 종류의

HOR 관계식을 Urmia water distribution network에 적용하였고, HOR 실측자료와 비교하여 각각의 HOR 관계식의 적합도를 평가하였다. 연구 결과 오리피스 형태의 관계식과 Wagner *et al.* (1988)의 HOR 관계식이 기타 관계식에 비해 실측 데이터와 근사한 것을 확인할 수 있었고, 보다 현실적인 PDA 해석 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 PDA 연구에 대해, 오리피스 형태를 나타내는 Wagner *et al.* (1988) 방정식의 적용이 실무적인 측면과 시스템의 수리해석 적합도 측면에서 타당할 것으로 판단되어 이를 해당 프로그램의 HOR 관계식으로 선정하였다.

3. PDA 수리해석 모형의 개발

3.1 EPANET 수리해석 엔진 구조 분석

Todini와 Pilati (1988)는 연속적인 관망의 유량과 수두를 구하기 위한 Newton-Raphson 법을 응용한 형태의 Gradient Algorithm을 제안하였다. 이 Gradient Algorithm은 Newton-Raphson 법에서 더 이상의 유량과 수두 값의 변화가 없을 때까지 반복되던 연산을 통한 보정과정 없이 직접 유량과 수두의 값을 구할 수 있으며 Linear Theory Method와 마찬가지로 계산과정을 시작하기 위한 각 절점별 유량이 연속방정식을 만족하는지에 대한 평가과정이 없다. 또한 이 방법은 가장 널리 사용되고 있는 관망해석 모델인 EPANET의 DDA 수리해석 알고리즘으로 사용되고 있다.

미지의 관로별 유량 Q 와 절점별 수두 H , 배수지 또는 펌프와 같은 기지의 수두값 H_0 와 절점별 수요량 q_0 로 구성된 회로형 상수관망의 수리해석을 위한 Gradient Algorithm을 행렬의 형태로 나타내면 식 (1)과 같다.

Fig. 1 Structure Chart of Hydraulic Analysis Parts of EPANET

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_{10}H_0 \\ q_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 행렬 A_{11} 은 관로별 손실수두의 정보를 포함하며, A_{12} 와 A_{21} 은 미지의 수두 및 유량값을 갖는 절점 및 관로들의 실제 위상을 나타내는 접속행렬을 의미한다. 행렬 A_{10} 은 배수지, 물탱크 등과 같은 고정절점수두를 갖는 절점들의 접속행렬을 의미하며, A_{22} 는 0행렬로 구성된다.

EPANET에서는 Gradient Algorithm을 통해 식 (1)의 해를 찾으며, 최종적으로 미지의 관로별 유량 Q 와 절점별 수두 H 를 산정한다. EPANET의 Gradient Algorithm은 기지의 절점별 수요량 q_0 를 고정된 값으로 모의한 DDA 해석기법이므로, PDA 수리해석으로의 개량을 위해서는 새로운 매개변수와 관계식의 추가가 필요하다.

본 연구에서는 EPANET 소스코드를 개량하기 위하여 엔진의 구조도를 파악하는 작업을 진행하였고, Gradient Algorithm으로 구성된 Fig. 1과 같은 수리해석 파트를 포함하는 것으로 나타났다. 특히 주요 수리해석 알고리즘을 포함하는 haydraul.c와 statrx.c에 해당하는 부분의 세부 구조를 분석하였으며, 그 결과 각각의 행렬 요소 및 시스템 구성 인자의 관계를 파악할 수 있었고 알고리즘 개량을 위한 방법론을 설정할 수 있었다.

3.2 EPANET 기반의 PDA 모형 개발

Todini (2003, 2006)는 자신이 개발한 EPANET의 수리해석 알고리즘으로 사용되고 있는 기존의 Gradient Algorithm을 확장하여 수압의 변화에 따른 절점별 수요량 또는 누수량을 고려할 수 있는 Global Gradient Algorithm 모델을 제안하였다. 이를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_{10}H_0 \\ -q^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기에서, Global Gradient Algorithm 모델이 기존의 Gradient Algorithm과 다른 점은 행렬 A_{22} 가 0행렬이 아닌 대각 행렬로 구성되며, 관련 절점의 수요량이 비선형의 Head-Driven 식으로 표현되어 있고, q^* 의 정의가 다르다는 것이다. Todini (2006)는 A_{22} 행렬에 식 (3)과 같은 Head-

Driven 공식을 적용하였다. 해당 식에서 H_i 는 절점의 수압, q_i 는 절점의 수요량, Z_i 와 H_i^* 는 각각 절점의 표고 및 충족수두를 의미한다.

$$A_{22}(i,j) = \begin{cases} 0 & H_i < Z_i \\ \frac{q_i(H_i - Z_i)^{1/2}}{H_i(H_i^* - Z_i)^{1/2}} & Z_i \leq H_i < H_i^* \\ \frac{q_i}{H_i} & H_i \geq H_i^* \end{cases} \quad (3)$$

이후의 연구에서는 A_{22} 행렬에 Head-Driven 공식의 적용을 달리하고, A_{22} 행렬의 요소들을 수압에 따른 수요량과 누수량의 2개 부분으로 더욱 확장시킨 관망해석 알고리즘들이 발표되고 있다.

본 연구에서는 EPANET 개량을 통한 PDA 기능 적용을 위하여, Gradient Algorithm 기반의 기존 소스코드를 Global Gradient Algorithm로 확장하였다.

Table 2와 같이 인터페이스 프로그램은 현재 가장 많이 사용되며 효율성이 높은 C#으로 개발하였고, 엔진 프로그램은 C를 이용하여 개발하였다. 또한 프로그램의 개발 환경은 .NET Framework를 구축하였으며, 소스의 관리를 위해 SubVersion을 이용하였다. 프로그램 개발의 툴과 버전은 Table 3과 같다.

Table 2. Development Programming Language

세부 모듈	개발도구	비고
PDA관망해석 엔진	C	EPANET엔진 분석 후 PDA 관련 요소 추가
관망해석 인터페이스	C#.Net	

Table 3. Development Tool and Version

분류	버전	비고
Visual Studio 10.0	Ver 10.0	Visual Studio.NET 2010
ChartFX 7.0	Ver 7.0	
Infragistics 11.01	Ver 11.0	Infragistics 2011. Ver 01 NetAdvantage
SubVersion	Ver 3.0	

Table 4. Corrections of Header Files

엔진 파일명	설명	엔진수정사항
TOOLKIT.H	내보낸 DLL 함수의 함수 프로토 타입	
FUNCS.H	기타 모든 함수의 프로토 타입	
TYPES.H	전역 변수 및 데이터의 구조 선언	- PDA Section Type의 설정 - Snode Struct에 PDA Member 추가
VARS.H	전역 변수의 선언	- PDA 전역 변수의 추가
HASH.H	해시 테이블 루틴을 위한 헤더 파일	
MEMPOOL.H	메모리 풀 루틴을 위한 헤더 파일	
ENUMTXT.H	문자열 상수 열거 형식	- PDA 문자열 상수 형식 설정
TEXT.H	기타 모든 문자열 상수의 선언	- PDA 관련 Section Name의 추가 - PDA 관련 Keyword의 추가

EPANET의 세부구조 파악 이후 실제 수리해석엔진이 포함된 `hydraul.c`를 수정하여 프로그램을 개발하였으며, 주요하게 수정된 부분은 1) PDA 관련 새로 추가된 입출력 데이터를 관리하는 부분, 2) 엔진 내부적으로 PDA 관련 정보를 저장할 변수들을 추가, 그리고 3) 파악된 구조 정보를 바탕으로 데이터 연산에 필요한 행렬 관련 함수와, 4) 마지막으로 실제 엔진을 수행하는 Solver 파트이다.

입력 자료에서는 공급가능 유량과 최소 및 충족수두, 오리피스 형태의 유출방정식의 지수 등을 추가 매개변수로 구성하였으며, 헤더 파일의 수정 및 추가 사항은 Table 4와 같고 기존 EPANET 엔진에 PDA 관련 추가 변수와 구성 요소를 설정한다. 또한 실제로 수리해석 연산이 수행되는 소스 파일의 주요 수정 부분은 각각 Table 5와 같으며 Global Gradient Algorithm을 적용하여 PDA 관망해석이 가능하도록

Table 5. Corrections of Source Files

엔진 파일명	설명	엔진수정사항
EPANET.C	엔진 제어 메인 모듈	- PDA 데이터 포인터 초기화 : <code>initPDA()</code> 추가 - 데이터 포인터 메모리 할당 : <code>AllocPDA()</code> 추가 - 데이터 메모리 해지 : <code>freedata()</code> 수정
INPUT1.C	입력 데이터의 제어 처리	
INPUT2.C	입력 파일에서 데이터 추출	
INPUT3.C	입력 데이터의 개별 구문 분석	- PDA 관련 절점 데이터 추출 : <code>juncdata()</code> 수정 - PDA 관련 옵션 추출 : <code>PDAdata()</code> 추가
INPFILE.C	수정한 입력 데이터를 텍스트 파일에 저장	
RULES.C	관망 시스템을 이루는 요소의 제어	
HYDRAUL.C	수리해석	- 공급가능 유량의 설정 : <code>newPDACoeffs()</code> 추가 - HOR 방정식 미분행렬의 구성 : <code>addDD()</code> 추가
QUALITY.C	수질해석	
OUTPUT.C	바이너리 파일과 데이터의 전송	
REPORT.C	결과를 텍스트 파일로 표출	
SMATRIX.C	행렬 선형 방정식 솔버 루틴	
MEMPOOL.C	메모리 풀 관리 루틴	
HASH.C	해시 테이블 루틴

Fig. 2 Structure Chart of Revised Parts

구성하였고 최종적으로 개량된 엔진의 구조는 Fig. 2와 같다.

이를 통해, 본 연구에서 개발한 PDA 수리해석 프로그램은 수리 및 수질해석 모의가 가능하며, 주어진 관망 시스템에 대해 손실수두 산정 기법, 펌프 곡선 및 효율, 밸브 구성, 배수지 및 탱크 구성, 제어규칙, HOR 관계식 매개변수 설정 등에 따라 해석을 시행하게 된다. 본 PDA 수리해석 모형을 통해 해석 가능한 수리 및 수질해석의 범위는 Table 6과 같다.

개발한 모형의 실행 과정에서 새로 추가된 부분은 크게 PDA 수리해석에서 사용하는 입력부분과, PDA 수리해석의 결과를 볼 수 있는 출력부분으로 나눌 수 있다. 또한 본 모형에서는 신규 관망도를 직접 구성 및 설계가 가능하며, Fig. 3과 같이 기존 EPANET .inp 파일을 Import하여 관망 정보를 구성할 수 있다.

Fig. 4와 같이 본 PDA 모형의 옵션 중 최소수두(Minimum Pressure), 충족수두(Required Pressure), 오리피스방정식 지수 (Alpha) 부분을 세팅하면 프로그램의 기본 값으로 입력이 되고, 그 후 특정 절점에 대한 정보를 수정하고자 할 경우에는 관망 정보를 로드 후 변경 할 수 있다.

또한 PDA 관망해석을 위해서는 Fig. 5와 같이 정확도

Table 6. Modeling Capabilities

수리해석
<ul style="list-style-type: none"> - 해석하고자 하는 관망의 크기에 제한이 없음 - 손실 공식으로 Hazen-Williams, Darch-Weisbach, Manning 식 사용 - 각종 펌프(정속 또는 변속 등)의 마력, 특성곡선에 의한 해석 - 펌핑에너지와 비용계산 - 다양한 밸브(유량제어, 역지, 압력제어)포함 - 여러 형태의 배수지(급수탱크) 포함 - 시스템 제어규칙(Rule)에 의한 모의 - HOR 관계식 설정에 따른 모의
수질해석
<ul style="list-style-type: none"> - DDA 및 PDA 수리해석 결과를 통한 수질해석 모의 가능 - 비반응 추적자(Non-Reactive Tracer) 물질의 이동모의 - 시간별 증가(소독부산물) 또는 감소(잔류염소)하는 반응물질의 이동과 반응해석 - 물의 이동시간 계산 - 취수원이 여러 곳일 때 관망에서의 혼합시 취수원별 물의 비율계산

Fig. 3. Visualization of Network

(Accuracy)와 반복시행 수(Trials)의 조건을 입력해야 하며, 이는 Global Gradient Algorithm의 각 시행 별 종결조건을 의미한다.

수리해석이 완료된 이후 각 절점과 관로별 해석 결과는

Fig. 4 Defaults Setting

Fig. 5 Analysis Options

Fig. 6. Frequency Plot Example of Nodes

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality mg/L	Pressure Dependent Demand LPS	Pressure Mode
Junc J1	0.00	59.89	32.46	0.00	0.00	Adequate Flow
Junc J2	212.40	59.44	25.91	0.00	212.40	Adequate Flow
Junc J3	212.40	55.97	27.01	0.00	212.40	Adequate Flow
Junc J4	640.80	54.74	22.74	0.00	640.80	Adequate Flow
Junc J5	212.40	54.76	24.28	0.00	212.40	Adequate Flow
Junc J6	684.00	48.95	17.56	0.00	684.00	Adequate Flow
Junc J7	640.80	48.97	19.41	0.00	640.80	Adequate Flow
Junc J8	316.94	45.43	14.04	0.00	316.94	Adequate Flow
Junc J9	0.00	41.15	8.54	0.00	0.00	Adequate Flow
Junc J10	0.00	41.15	7.01	0.00	0.00	Adequate Flow
Junc J11	36.56	36.77	1.72	0.00	36.56	Adequate Flow
Junc J12	41.68	38.81	2.23	0.00	41.68	Adequate Flow
Junc J13	0.00	50.88	17.35	0.00	0.00	Adequate Flow
Resrv R1	-2078.70	60.96	0.00	0.00	#N/A	#N/A
Resrv R2	-919.29	60.96	0.00	0.00	#N/A	#N/A

Fig. 7. Example Table of Node Results

Fig. 8. Results of a Map Query

Table 7. Entries of PDA Result

Nodes	Links
- ID	- ID
- Base Demand	- Diameter
- Initial Quality	- Roughness
- Demand	- Bulk Coefficient
- Quality	- Wall Coefficient
- Minimum Pressure	- Flow
- Required Pressure	- Velocity
- Pressure	- Unit Headloss
- Head	- Friction Factor
- Pressure Dependent Demand	- Reaction Rate
- Pressure Mode	- Quality
	- Status

Fig. 6, 7, 8과 같이 그래프, 표, 관망도 상에서 선택적으로 확인이 가능하며 절점과 관로에 대해 표출 가능한 정보는 Table 7과 같다.

본 모형은 기존 EPANET을 기반으로 하여 엔진을 개량하였으므로, EPANET의 모든 수리 및 수질해석 요소와 결과 표출 구성을 포함하고 있으며 추가로 PDA 관련 항목에 대하여 수정, 시행, 확인 등이 가능하다.

4. 모형의 적용

상수도 시스템을 구성하는 주요 배수관, 배수지 등에 문제가 발생할 경우 전체 시스템에 미치는 파급효과가 매우 크며, 국내에서 10년마다 수립되는 수도정비 기본계획에서는 용수 공급의 안전성을 확보하기 위해 가뭄, 수질사고, 관거파괴 등과 같은 비상상황에 대한 비상급수계획은 수립하여 대책을 마련한다. 일반적으로 비상급수계획은 인접한 수원지, 배수지 및 소불력 등과의 연계를 통해 수립되며, 이때에는 필요한 용수량의 공급 가능여부, 최소압력수두 보장여부 등을 관망의 수리해석을 이용하여 검토한다.

현재 국내에서 수행되고 있는 대부분의 수도정비기본계획에서는 DDA 수리해석 모형을 이용하여 비상급수계획의 적정성을 평가하고 있으나, 비상급수계획은 관파괴상황과 같은 비정상운영조건에 해당하므로 PDA의 적용을 통한 비상급수

Fig. 9. Layout of WDS in Yeong Wol

계획의 적정성 평가가 필수적이다.

본 연구의 대상지인 영월군은 강원도의 최남단에 위치하며 태백시, 원주시, 횡성군, 영주시, 제천시, 단양군, 평창군 등과 인접해 있다. 행정구역은 2읍 7면으로 구성되며 면적은 1,127.46 km²이다. 용도지역 현황은 관리지역 52.1%와 농림지역 44.5%가 면적의 대부분을 차지하며 이외에 주거지역, 공업지역, 녹지지역, 자연환경 보전지역 등으로 구성되어 있다. 영월의 지질은 주로 선캠브리아기 울리층군과 화강관미암이 주를 이루며, 상부에 고생대 퇴적암이 분포되어 있다. 지형의 고도는 EL(+129~1,495m)의 범위를 보이며 지형경사는 0~65°로 이루어져있다.

Fig. 9와 같이, 영월 대불력의 관망 시스템은 총 1,648개의 절점과 1,728개의 관로, 9개의 저수지(영월배수지1~3지, 남면배수지(미사용), 북면배수지, 덕포배수지, 팔괴배수지, 영월배수지, 소나기재배수지)로 구성되어 있으며 총 7개의 배수 구역(영월배수지 1, 2지, 영월배수지 3지, 북면배수지, 덕포배수지, 팔괴배수지, 영월배수지, 소나기재배수지 배수구역)으로 구분된다. 해당 시스템의 정상 상태에서 각각의 저수지는 하나의 배수 구역에 대해 용수를 공급하며, 담당 배수지로부터 유량 공급에 문제가 발생할 경우 인접한 배수지로부터 비상급수를 실시한다.

본 연구에서는 영월 대불력 내의 7개의 배수구역에서 각각 비상상황 발생으로 인해 해당 배수지로부터 급수가 불가능한 경우를 가정하여 인접한 배수지로부터 비상급수를 실시하는 상황을 개발된 PDA 수리해석 프로그램을 통해 모의하였다. 각각의 배수구역은 주변에 위치한 1~2개의 배수구역과 연계 가능하며 PDA 분석을 위해 적용한 최소수두는 각 절점의 고도, 충족수두는 15 m를 기본으로 하였고, 정상상태에서의 절점 수압이 15 m 이하인 절점에 대해서 정상상태의 수압 조건을 충족수두 조건으로 설정하였다.

이러한 조건에서 PDA 수리해석 시뮬레이션을 통해 비상급수계획을 평가하였다. 예를 들어 영월배수지 1, 2지에 비상상

Table 8. Evaluation of Emergency Water Supply Plan

문제발생배수지	연계 배수지	가능 공급량 (CMD)	가능 공급량 (%)
영월배수지 1, 2지	덕포배수지	5,546.060	66.09
	영흥배수지	5,664.030	67.49
영월배수지 3 지	팔괴배수지	5,825.350	69.41
	소나기재배수지	6,449.480	76.85
북면배수지	소나기재배수지	8,391.630	99.99
덕포배수지	영월배수지 1,2지	8,391.660	100.00
팔괴배수지	영월배수지 3지	8,391.660	100.00
영흥배수지	영월배수지 1,2지	8,391.660	100.00
소나기재배수지	영월배수지 3지	6,480.810	77.22
소나기재배수지	북면배수지	7,980.760	95.10

황이 발생하여 해당 배수지를 통한 급수가 불가능한 상황에서 연계가 가능한 배수지는 덕포배수지와 영흥배수지가 있으며, 덕포배수지를 통하여 문제발생배수지의 배수구역에 수요량을 공급할 경우, 가능공급량은 전체 수요유량의 약 66%로 산정된다.

마찬가지의 과정을 통해 각 문제발생 배수지에 대해 연계 가능한 인접 배수지 조건을 모두 고려하여 수리해석을 시행하였고, 그 결과 각 배수지의 비상상황 별, 연계한 배수지 별로 Table 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

각각의 경우를 살펴보면, 우선 영월배수지 1, 2지와 3지는 기본적으로 넓은 배수구역에 유량을 공급하기 때문에 평시의 공급량이 크므로, 해당 배수지에 비상상황이 발생하여 유량 공급이 불가능한 경우, 인접 배수지와의 연계를 통해 비상급수를 실시하여도 약 66~69%의 공급가능 유량을 나타낸다. 반면 북면배수지, 덕포배수지, 팔괴배수지, 영흥배수지의 경우 비상상황발생시 인근배수지와의 연계를 통한 비상급수를 통해 약 99~100%의 수요량을 공급할 수 있는 것으로 나타났다. 소나기재배수지의 경우 가능한 비상급수 연계 배수지는 영월배수지 3지와 소나기재배수지 두 곳인데, 어떠한 배수지를 선택하여 비상급수를 시행하느냐에 따라서 약 77%와 95%로 공급가능 유량이 다르게 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 연계한 배수지에 따라 소나기재배수지에 대한 공급가능 유량 결과가 차이를 나타내는 원인은 크게 두 가지로 판단된다. 먼저 소나기재배수지 문제 발생 상황에서 연계 가능한 두 배수지 중, 북면배수지의 경우 전수두가 275.00 m이며, 영월배수지 3지의 경우 249.00 m로 두 배수지 간에 26 m의 수두 차이를 나타낸다. 또한 영월배수지 3지는 북면배수지에 비하여 소나기재배수지 배수구역으로 비상급수를 하는 경로가 길고 수두손실이 크며, 이에 따라 충분한 수압을 확보하지 못하여 공급가능 유량이 작게 산정된 것으로 판단된다.

기존 EPANET의 DDA 해석 기법을 통한 해석 결과는 시스템 내의 절점에 부압이 발생하는 등 신뢰도의 문제를 나타냈으나, 개발한 PDA 모형을 적용한 결과 부압 발생 문제를 해결할 수 있었고 공급가능 유량을 정량적으로 산정하여 보다 신뢰도 높은 비상급수계획 분석이 가능한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 관망 시스템에 비상상황이 발생한 경우, 그 수리해석 결과의 신뢰도가 낮으며 실제 시스템의 거동과 상이한 결과를 나타내는 기존 DDA 해석의 문제점을 파악하고, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 PDA 수리해석 모형을 개발하였다. 이는 기존 Gradient Algorithm 탐색 기법을 기반으로 한 EPANET 엔진의 세부구조를 분석, 파악하여 HOR 관계식 적용을 통해 Global Gradient Algorithm 탐색 기법으로 확장시킨 PDA 수리해석 모형이다. 또한 개발한 모형을 통한 수리해석 결과의 적합도를 평가하기 위해 실제 관망시스템인 영월 대블럭 관망시스템의 비상급수계획 평가에 적용하였다.

그 결과 PDA 수리해석 모형의 적용으로 기존 DDA 모형의 부압 발생 및 수렴 불가능 등의 문제를 해결할 수 있었고 절점의 수압과 수요유량을 동시에 계산할 수 있었다. 이를 통해 공급가능 유량을 정량화할 수 있었으며, 비정상상황 발생시 수압 부족 지역을 정확하게 예측할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 PDA 수리해석 모형은 오픈소스 기반의 EPANET을 수정, 확장하여 개발되었으므로 고가인 기타 국외 상용 PDA 수리해석 프로그램을 효과적으로 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 기존 EPANET DLL Toolkit에 PDA 추가 요소를 확장하여 PDA 관망 해석의 반복수행을 통해 관망 최적설계 등에 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 실제 용수공급시스템에서 하나의관이 파손되었을 경우, 이를 수리 및 교체하기 위해서 주변 밸브의 위치에 따라 추가적으로 차폐되는 구역인 Segment가 발생한다. 따라서 이러한 Segment를 자동으로 탐색하는 과정을 개발한 PDA 수리해석 프로그램에 적용하여 해석의 적합도와 효율성을 증대시키고, HOR 관계식의 매개변수 및 형태에 따른 수리해석 결과의 불확실성을 고려하여 매개변수의 최대, 최소값 등을 추가 변수로 설정, 매개변수의 변화에 따른 공급가능 유량과 수압에 대한 민감도 분석을 도시화하는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이를 통해 다양한 시나리오를 통한 상수관망 내의 수리학적 거동을 정량화하여 사용자의 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

현재 국내의 경우 기술력 및 사용성, 신뢰도 등의 문제로 인하여 상수관망 설계 최적화와 PDA 상수관망 해석 등의 적용이 활발히 이루어지지 못하고 있다. 실제 상수관망에 대한 비정상상태 수리해석 프로그램 적용 결과, S/W의 상용화 이후 기대되는 물 관리의 효율성 증대가 클 것으로 판단된다. 따라서 지속적으로 다양한 실제 상수관망 시스템에 적용하여 프로그램을 검증하고, 기타 연구진 및 기관과의 협력을 통해 개발한 프로그램의 실무적인 적용이 가능하도록 상용화할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 E사업(코드번호: GT-11-G-02-001-2)”의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

- Ang, W.H. and Jowitt, P.W. (2006) Solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions, *J. Water Resour Plann Manag*, ASCE, Vol. 132, No. 3, pp. 175-182.
- Baek, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2007) Development of HSPDA Model for Water Distribution System under Abnormal Operating Condition, *J. Korean Soc. Civ. Eng*, Vol. 27, No. 5, pp. 475-488.
- Baek, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2010a) Estimating the Reliability of Water Distribution Systems Using HSPDA Model and Distance Measure Method, *J. Korea Water Resour Association*, Vol. 43, No. 9, pp. 769-780.
- Baek, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2010b) Estimation of the Reliability of Water Distribution Systems using HSPDA Model and ADF Index, *J. Korea Water Resour Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 201-210.
- Baek, C.W., Jun, H.D., Kim, J.H., Yoo, D.G., and Lee, K.C. (2008) Evaluation of Emergency Water Supply Plan for Block System of Water Network using WaterGEMS, *J. Korea Soc. Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 6, pp. 15-20.
- Bentley Systems, Inc (2006) WaterGEMS v8 User Manual. 27 Siemon Co Dr, Suite200W, Watertown, CT06795, USA
- Bhave, P.R. (1991) Analysis of flow in water distribution networks. Technomic Publishing, Lancaster.
- Cullinane, M.J., Lansey, K.E., and Mays, L.W. (1992) Optimisation-availability-based design of water distribution networks. *J. Hydraul. Eng.* Vol. 118, No. 3, pp. 420-441.
- Fujiwara, O. and Ganesharajah, T. (1993) Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. *Water Resour Res*, Vol. 29, No. 8, pp. 2917-2924.
- Germanopoulos, G. (1985) A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models., *Civ. Eng. Syst.*, 2, pp. 171-179.
- Giustolisi, O., Kapelan, Z., and Savic, D.A. (2008a) Extended period simulation analysis considering valve shutdowns, *J. Water Resour Plann Manag.*, Vol. 134, No. 6, pp. 527-537.
- Giustolisi, O., Savic, D.A., and Kapelan, Z. (2008b) Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 134, No. 5, pp. 626-635.
- Gupta, R. and Bhave, P.R. (1996) Comparison of methods for predicting deficient network performance. *J. Water Resour. Plann. Manag.* Vol. 122, No. 3, pp. 214-217.
- Kalungi, P. and Tanyimboh, T.T. (2003) Redundancy model for water distribution systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, Vol. 82, No. 3, pp. 275-286.
- Rossman, L.A. (2007) Discussion of ‘Solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions’. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, Vol. 133, No. 6, pp. 566-567.
- Seo, M.Y., Yoo, D.G., Kim, J.H., Jun, H.D., and Chung, G. (2009) Evaluation of Subsystem Importance Index considering Effective Supply in Water Distribution Systems, *J. Korea Soc. Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 6, pp. 133-141.
- Shirzad, S. and Tabesh, M. (2012) “Study of Pressure-Discharge Relations in Water Distribution Networks Using Field Measurements” Ph.D Candidate, University of Tehran Oroumieh, West Azerbaijan IRAN.
- Tanyimboh, T.T. and Templeman, A.B. (2004) A new nodal out-flow function for water distribution networks. In: Topping BHV, Mota Soares CA (eds) Proceedings of the 4th International Conf. on Eng. Computational Technology. Civil-Comp Press, Stirling, UK, ISBN 0-948749-98-9, Paper 64, pp. 12, CD-ROM
- Tanyimboh, T.T. and Templeman, A.B. (2010) Seamless pressure-deficient water distribution system model, *J. Water Manag ICE*, Vol. 163, No. 8, pp. 389-396.
- Todini, E. (2003) A more realistic approach to the “extended period simulation” of water distribution networks. Advances in water supply management, Maksimovic C., Butler D., Memon F.A., eds., A.A.Balkema, Lisse, The Netherlands, pp. 173-183.
- Todini, E. (2006) On the convergence properties of the different pipe network algorithms. Proc. of 8th Water Distribution System Analysis Symp. ASCE, Cincinnati, Ohio, USA.
- Todini, E. and Pilati, S. (1988) A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: Coulbeck B, Orr C-H (eds) Computer applications in water supply, vol 1. Research Studies Press, England.
- Udo, A. and Ozawa, T. (2001) Steady-state flow analysis of pipe networks considering reduction of flow in the case of low water pressures. In: Ulanicki B, Coulbeck B, Rance J (eds) Water software systems: theory and applications, Vol. 1. Research Studies Press, Taunton, pp. 73-182.
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1988) Water distribution reliability: simulation methods, *J. Water Resour Plann Manag*, Vol. 114, No. 3, pp. 276-294.
- Wu, Y.W., Wang, R.H., Walski, T.M., Yang, S.Y., Bowdler, D., and Baggett, C.C. (2009) Extended global-gradient algorithm for pressure-dependent water distribution analysis, *J. Water Resour Plann Manag*, Vol. 135, No. 1, pp. 13-22.
- Yoon, J.S., Yoo, D.G., Lee, H.M., and Kim, J.H. (2012) Optimal Leakage Detection Model of Water Distribution Systems Using Semi-Pressure Driven Analysis and Harmony Search, *J. Korea Soc Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 3, pp. 23-31.

© Received April 1, 2013

© Revised April 5, 2013

© Accepted June 14, 2013