

부정류 흐름에서 상수관망 수질해석을 위한 동역학적 모형의 개발

Development of a Dynamic Model for Water Quality Simulation during Unsteady Flow in Water Distribution Networks

최두용^{1*} · 조원철² · 김도환¹ · 배철호¹

Choi, Doo-Yong^{1*} · Cho, Won-cheol² · Kim, Do-Hwan¹ · Bae, Cheol-Ho¹

1 한국수자원공사 K-water 연구원 · 2 연세대학교 공과대학 토목 · 환경공학과

(2012년 5월10일 접수; 2012년 9월18일 수정; 2011년 9월24일 채택)

Abstract

A dynamic water quality model is presented in order to simulate water quality under slowly varying flow conditions over time. To improve numerical accuracy, the proposed model uses a lumped system approach instead of extended period simulation, unlike the other available models. This approach can achieve computational efficiency by assuming liquid and pipe walls to be rigid, unlike the method of characteristics, which has been successfully implemented in rapidly varying flows. The discrete volume method is applied to resolve the advection and reaction terms of the transport equation for water quality constituents in pipes. Numerical applications are implemented to the pipe network examples under steady and unsteady conditions as well as hydraulic and water quality simulations. The numerical results are compared with EPANET2, which is a widely used simulation model for a water distribution system. The model results are in good agreement with EPANET2 for steady-state simulation. However, the hydraulic simulation results under unsteady flows differ from those of EPANET2, which causes a deviation in water quality prediction. The proposed model is expected to be a component of an integrated operation model for a water distribution system if it is combined with a computational model for rapidly varying flows to estimate leakage, pipe roughness, and intensive water quality.

Key words : water distribution system, hydraulic analysis, water quality model, unsteady flow, lumped-system approach, discrete volume method

주제어 : 상수관망, 수리해석, 수질모형, 부정류, 일괄시스템 접근방법, 이산체적법

1. 서론

상수관망은 시간적으로 변화하는 수용가의 용수 사용량을 만족시키는 공급기능과 더불어 정수 처리된 수돗물의 수질을 내외부의 오염원로부터 차단하는 수질보전 기능을 가지고 있다. 이러

한 상수관망의 기능요구에 맞추어 1980년대 이래로 관망의 동수역학적 수질예측을 위한 모형들이 개발되어 왔다(Boulos et al., 1994; Liou and Kroon, 1987; Rossman et al., 1993). 그러나 이들 수질해석 모형들은 시간적으로 서

*Corresponding author : Tel.: +82-42-870-7506, Fax : +82-42-870-7549, E-mail : dooyong@kwater.or.kr (D. Y. Choi)

서히 변화하는 수리학적 부정류 흐름의 해석에서 의사 부정류 해석기법의 일종인 확장기간모의(extended period simulation) 기법을 이용함으로써 수질해석 모형을 상수관망의 운영관리에 이용할 경우 해석상의 내재적 한계가 노출되고 있는 실정이다.

관로 내 부정류 해석은 급변하는 흐름의 해석(예를 들어, 수충격 해석)에 초점을 맞추어 이론적 연구 및 실무적 적용이 이루어져 왔다. 부정류 해석을 위한 대표적인 수치해석기법으로는 전통적인 특성법(method of characteristics) 외에 파동계획법(wave plan method), 유한차분법(finite difference method), 유한체적법(finite volume method) 등이 제시되어 왔다(Toro, 1997; Wood et al., 1966; Wylie and Streeter, 1970). 최근 들어 이러한 부정류 해석 기법들은 누수위치 및 누수량 추정, 관로내 손실 계수의 보정 등에 성공적인 연구개발 사례들을 발표하고 있으며, 수질예측을 위한 부정류 해석의 적용가능성에 대한 활발한 시도를 보여주고 있다(Ghidaoui et al., 2005).

그러나 상기의 부정류 해석기법은 높은 계산 비용으로 인하여 배급수 관망과 같이 커다란 계산영역을 가지는 유동장의 해석에 제한이 따른다. 따라서 상수관망의 운영관리에 이용될 수 있도록 장기간의 모의가 가능하며 커다란 해석영역을 가지는 흐름의 수리 및 수질적 변화를 모의할 수 있는 동역학적 모형의 개발이 필요하다. 이러한 모형의 개발은 제한된 계산영역을 가지는 흐름에 대한 집중적인 모의를 할 수 있는 상기의 부정류 해석기법과의 연계를 통하여 통합적인 상수관망의 운영관리 시스템으로도 제시될 수 있다. 시간에 따라 서서히 변화하는 상수관망의 흐름은 Holloway(1985)가 제안한 바와 같이 유체와 관벽을 강체(rigid)로 가정하는 일괄시

스템 접근방법(lumped-system approach)에 의하여 해석될 수 있다. 이 방법은 국내외의 연구개발에도 적용되어 부정류 상태의 관망 수리해석에서 적용성이 확인되었다(박재홍, 2007; Choi, 2000; Islam and Chaudhry, 1998). 한편 부정류 조건하에서 수질 인자의 변동을 모의, 보정 및 제어할 수 있는 모형의 개발 또한 활발히 이루어지고 있다(Constans et al., 2003; Fabrie et al., 2010).

본 연구에서는 시간에 따라 점진적으로 변동하는 관로 내 흐름의 수리학적 거동을 분석하고, 수질적 변화를 모의할 수 있는 부정류 수리해석 기반의 동역학적 수질해석 모형을 개발하고자 한다. 부정류 수리해석을 위한 수치해석 방법은 Holloway(1985)가 제안한 일괄시스템 접근방법을 이용하여 수치계산의 효율성을 확보하였으며, 수질해석을 위한 수치해석은 Rossman et al.(1993)이 제안한 이산체적법(discrete volume method)을 이용하였다. 개발된 모형은 정상류 수리해석, 부정류 수리해석 및 동적 수질모의 예제에 대한 모의를 통하여 적용성 평가를 실시하였다. 또한 개발모형에 의한 계산결과를 범용적으로 이용되고 있는 확장기간모의 기반의 수질해석 모형인 EPANET2 결과와의 비교를 통하여 모형의 활용성을 평가하고자 한다.

2. 지배방정식

2.1 정상류 수리해석을 위한 지배방정식

정상상태 관망해석을 위한 지배방정식은 절점($j=1, \dots, NJ$)에서의 연속방정식(continuity equation)과 폐합관로에서의 에너지방정식(energy equation)으로 구성되며 다음과 같이 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^{NP} Q_i + Q_{ext} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{NL} h_{Li} - \sum_{i=1}^{NL} h_{Pi} = \Delta h_{FGN} \quad (2)$$

여기서 Q_i = 절점으로 유출입되는 관로 i 의 유량, Q_{ext} = 외부로부터 절점으로 유입되는 공급량 및 유출되는 수요량, h_{Li} = 관로 i 에서의 수두손실, h_{Pi} = 폐합관로에서 펌프에 의해 공급되는 에너지 수두, Δh_{FGN} = 고정수두절점(fixed grade node) 사이의 동수두 차이, NP = 절점에 연결된 관로의 수, NL = 폐합회로의 수를 나타낸다. 식 (2)의 좌변 항들을 유량의 함수로 나타내면 다음의 비선형 방정식이 얻어진다.

$$\Delta h_{FGN} = \sum_{i=1}^{NL} (K_{FLi} Q_i^n + K_{MLi} Q_i^2) - \sum_{i=1}^{NL} (H_{Li} + C_i Q_i^m) \quad (3)$$

여기서 K_{FL} = 마찰손실 공식에 따른 계수, K_{ML} = 소손실 계수, n = 마찰손실 공식에 따른 지수, $H_1 + CQ^m$ 는 펌프에 의해 공급되는 에너지 수두를 펌프 특성곡선에 따라 유량의 함수로 나타낸 식으로, H_1 , C 및 m 은 회귀분석에 의하여 결정된다.

2.2 부정류 수리해석을 위한 지배방정식

강성주(rigid column) 이론에 따른 지배방정식 유도를 위하여 Holloway(1985)가 제시한 4가지 가정(완만한 흐름조건 변화, 강성의 관체 및 비압축성의 유체, 증기압 이상의 최소압력 발생, 비정상 상태에서 정상류 손실공식의 유효성)을 도입하면, 다음의 간략화된 운동량 방정식이 유도된다.

$$\frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} = H_1 - H_2 - K_{FL} Q |Q|^{n-1} \quad (4)$$

여기서 L = 관체의 길이, g = 중력가속도, A

= 관체의 단면적, Q = 유량, t = 시간, $H_{1,2}$ = 절점 1 및 2에서의 압력수두를 나타낸다. 식 (4)를 폐합관로에 대하여 적용하면 폐합관로상의 압력수두 차의 합은 0이 되므로 다음과 같은 지배방정식이 나타난다.

$$\sum_{i=1}^{NL} \frac{L_i}{gA_i} \frac{dQ_i}{dt} = - \sum_{i=1}^{NL} K_{FLi} Q_i |Q_i|^{n-1} \quad (5)$$

2.3 동적 수질해석을 위한 지배방정식

반응성 용존물질의 수송방정식은 종방향 분산(longitudinal dispersion)을 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (6)$$

여기서 C_i = 관로 i 에서 물질의 농도로 위치(x)와 시간(t)의 함수, u_i = 관로 i 에서의 평균유속, r = 농도의 함수로 표시되는 반응속도를 나타낸다. 수질인자의 선형적 반응을 가정하면 식 (6)의 반응항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(C_i) = \alpha C_i \quad (7)$$

여기서 α = 감쇄 또는 증가 반응속도를 나타내는 계수이다. 따라서 식 (6)의 해석적 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i(x, t + \tau) = C_i(x - u_i \tau, t) e^{\alpha \tau} \quad (8)$$

여기서 τ = 수질해석을 위한 시간간격으로 x/u_i 이내로 선정되어야 한다.

또한 절점에서의 농도는 완전한 혼합을 가정하여 다음과 같이 유량가중의 농도를 계산할 수 있다.

$$C_j = \frac{\sum_{i \in \{j\}} Q_i C_{i|x=L_i} + Q_{j,ext} C_{j,ext}}{\sum_{i \in \{j\}} Q_i + Q_{j,ext}} \quad (9)$$

여기서 C_j = 절점 j 에서의 농도, $\{j\}$ = 절점 j 로 유입되는 관로의 집합, Q_i = 관로 i 에서의 유량, L_i = 관로 i 의 길이, $Q_{j,ext}$ = 절점 j 로 유입되는 외부 수원의 유량, $C_{j,ext}$ = 절점 j 로 유입되는 외부 수원의 농도를 나타낸다.

3. 수치해석 기법

3.1 선형화 기법을 이용한 정상류 수치해석

본 연구에서는 Wood and Charles(1972)가 제안한 아래의 선형화 기법(linear theory)을 이용하여 유량에 대한 비선형 항을 선형화 하였다.

$$f(Q) = f(Q_i) + \frac{\partial f}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_i} (Q - Q_i) \quad (10)$$

즉, 식 (3)의 우변에 식 (7)의 선형화기법을 적용하면,

$$\Delta h_{FGN} = \sum_{i=1}^{NL} (K_{FLi} Q_i^n + K_{MLi} Q_i^2 - H_{1i} - C_i Q_i^m) - \sum_{i=1}^{NL} [(nK_{FLi} Q_i^{n-1} + 2K_{MLi} Q_i - mC_i Q_i^{m-1})(Q - Q_i)] \quad (11)$$

식 (1)과 식 (11)은 유량을 미지수로 하는 ($NJ + NL$)개의 선형대수방정식이 형성된다. 이렇게 형성된 선형대수방정식은 직접법 또는 반복법을 이용하여 해를 구한다. 또한 관망해석 프로그램의 실용적인 적용을 위해서는 에너지방정식의 적용을 위한 독립적인 폐합관로의 형성이 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 연구(박재홍과 한건연, 1998)에서 제시된 그래프 이론(graph theory)의 상수관망에 대한 적용사례를 따라 폐합관로를 형성하였으며, 보다 자세한 폐합관로 자동탐색 알고리즘의 적용사례는 Choi(2000)에서 찾을 수 있다.

3.2 음해적 기법을 이용한 부정류 수치해석

식 (5)에서 제시된 상미분 방정식(ordinary differential equation)은 일반적으로 Runge-Kutter 기법에 의하여 수치적으로 해석될 수 있

다. 그러나 상수관망의 해석을 위해서는 운동량 방정식의 해가 연속 방정식을 동시에 만족하여야 한다는 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 Holloway(1985)가 제시한 음해적 기법 (implicit method)을 적용하여 부정류 해석을 실시하였다. 즉, 식 (5)를 일정한 시간간격(Δt)에 대하여 적분하고, 우변 항에 대하여 시간적 지연(lagging)에 의한 선형화 기법을 적용하면 다음의 식이 유도된다.

$$\sum_{i=1}^{NL} \frac{L_i}{gA_i} Q_{k+1,i} - \sum_{i=1}^{NL} \frac{L_i}{gA_i} Q_{k,i} = - \sum_{i=1}^{NL} K_{FLi} Q_{k+1,i} |Q_{k,i}|^{n-1} \Delta t \quad (12)$$

여기서 $k, k+1$ 은 현재시간(t) 및 다음시간($t + \Delta t$)의 단계를 나타낸다. 위 식은 소손실, 펌프에 의한 에너지 공급 또는 고정수두 절점을 포함하고 있는 경우에도 다음의 일반식에 의하여 적용이 가능하다.

$$\sum_{i=1}^{NL} \frac{L_i}{gA_i} Q_{k+1,i} - \sum_{i=1}^{NL} \frac{L_i}{gA_i} Q_{k,i} = - \sum_{i=1}^{NL} (K_{FLi} |Q_{k,i}|^{n-1} + K_{MLi} |Q_{k,i} - H_{1,i} - C_i |Q_{k,i}|^{m-1}) Q_{k+1,i} \Delta t + \Delta h_{FG} \quad (13)$$

식 (13)은 연속방정식과 함께 유량을 미지수로 하는 ($NJ + NL$)개의 선형대수방정식을 형성하며, 정상류 해석과 같은 방법으로 직접법 또는 반복법을 이용하여 해를 구할 수 있다.

3.3 이산체적법을 이용한 동적 수질해석

상수관망 동적 수질해석을 위한 수치해법은 본 연구에서 이용한 이산체적법외에 유한차분법(finite difference method), 시간기준법(time-driven method), 사상기준법(event-driven method)이 제시되어 왔으며, 각 기법별 해석원리 및 특징에 대한 분석결과는 Rossman and Boulos(1996)에서 찾아볼 수 있다. 이산체적법은 Eulerian 기법의 일종으로 관로의 수질 해석에는 Grayman et al.(1988)에 의하여 처음으로 도입되었으며 Rossman et al.(1993)에 의하여 수치적인 적용방법이 완성되었다. 이산

체적법에서는 절점과 절점 사이의 관로를 동일한 간격의 격자로 분할한다. 수질해석에 이용되는 시간간격(τ)은 각 관로별로 수리해석을 통하여 산정된 체류시간의 최소값을 선정한다. 선정된 시간간격에 대하여 각 관로 i 별로 격자의 개수(ϵ_i) 및 이산화된 체적(v_i)을 산정하며, 이송 및 반응항을 수치해석 적으로 구현하는 절차는 다음과 같다.

먼저 제 1단계에서는 수질해석 시간간격(τ) 동안 반응에 의한 수정질량(m')을 산정한다.

$$m_i^p = m_i^p e^{\alpha \tau} \quad (14)$$

여기서 i = 관로의 번호, p = 관로 i 에서 분할된 격자($p=1, \dots, \epsilon_i$)의 번호를 나타낸다. 제 2단계에서는 하류측 격자로부터 연결된 절점으로 질량을 이송시킨 후, 각 절점에서의 농도를 산정한다.

$$M_j = \sum_{i \in \{j\}} m_i^{\epsilon_i}, V_j = \sum_{i \in \{j\}} Q_i \tau, C_j = \frac{M_j}{V_j} \quad (15)$$

여기서 M_j = 절점 j 로 유입되는 질량, V_j = 절점 j 로 유입되는 체적, C_j = 절점 j 로 유입되는 농도를 나타낸다. 제 3단계에서는 격자의 질량을 하류 격자로 다음과 같이 이동시킨다.

$$m_i^{p+1} = m_i^p \quad \text{for } p=1, \dots, \epsilon_i-1 \quad (16)$$

마지막으로 절점으로부터 유출되는 질량을 첫 번째 격자에 할당한다.

$$m_i^1 = C_j Q_i \tau \quad (17)$$

4. 개발 모형의 적용

개발된 부정류 기반이 상수관망 수질해석 모형의 적용성 평가를 위하여 범용적 수리해석 모형인 EPANET2 해석결과와의 비교를 실시하였다. 모형의 검증은 정상상태 및 비정상상태의 수리해석을 실시한 후, 잔류염소 농도의 동적 변화에 대한 모의 예제를 통하여 실시하였다.

4.1 정상상태 수리해석에의 적용

정상상태 수리해석을 위한 예제는 Jeppson (1976)의 관망을 이용하였다(Fig. 1 참조). 관망은 7개의 관로, 4개의 절점, 3개의 저수지, 그리고 3개의 펌프로 구성되어 있다. 3개의 펌프는 동일한 운영특성을 가지는 것으로 가정하였으며, 관내벽의 마찰계수(Hazen-Williams의 C_{HW})는 100을 사용하였다. 해석결과를 관로별로 나타내면 Fig. 2와 같으며, 정상류 수리해석 시 개발모형은 EPANET2와 동일한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

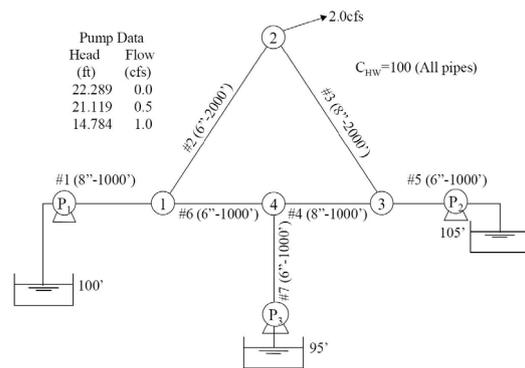


Fig. 1. Pipe network for steady-state hydraulic simulation

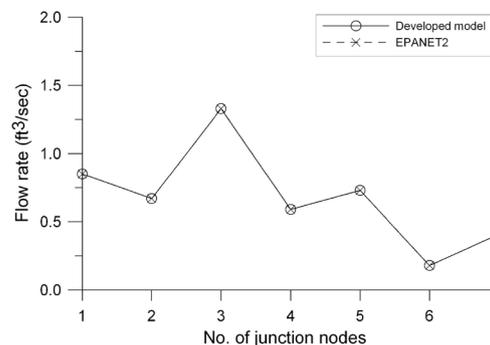


Fig. 2. Flow rate at junction nodes in steady-state hydraulic simulation

4.2 비정상상태 수리해석에의 적용

비정상상태 수리해석을 위한 예제는 Wood (1993)의 관망 및 용수사용량 조건을 이용하였다

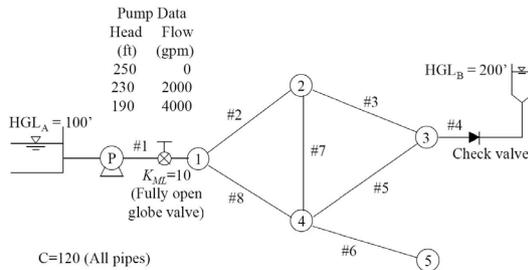


Fig. 3. Pipe network for unsteady hydraulic simulation

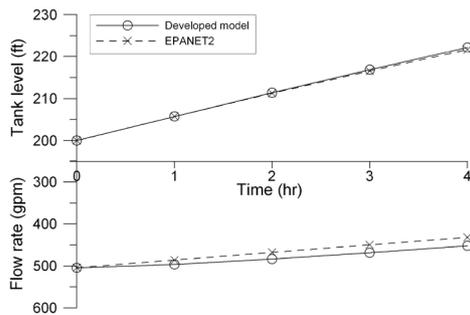


Fig. 4. Hourly variation in flow rate in pipe 4 and level of storage tank

(Fig. 3 참조). 관망은 8개의 관로, 5개의 절점, 1개의 저수지와 1개의 가변수위 저류조로 구성되어 있으며, 관로 및 절점의 입력자료는 Table 1에 정리되었다. 용수공급을 위한 펌프는 3개의 운영점을 가지는 특성곡선에 의하여 나타낼 수 있으며 펌프 유출측 글로브 밸브(globe valve)의 손실은 $K_{ML} = 10$ 으로 설정하였다. 관내벽의 마찰계수(Hazen-Williams의 C_{HW})는 120을 사용하였으며, 저류조로부터 역류를 방지하기 위한 역지 밸브(check valve)가 설치되었다.

저류조에서의 수위 및 유입량 변화를 관측하기 위하여 절점에서의 용수사용량은 총 모의기간인 4 hr 동안 일정한 것으로 가정하였다. 비정상상태 해석을 위한 시간간격은 1 hr로 설정하였다. 저류조의 직경은 30 m의 원통형으로 150 ~ 250 ft의 수위에서 운영되는 것으로 설정하

Table 1. Pipeline and junction data for unsteady hydraulic simulation

Pipe No.	Length(ft)	Diameter(in)	Junction No.	Elevation(ft)	Demand(gpm)
1	600	12	1	90	0
2	570	10	2	80	1000
3	650	6	3	80	200
4	390	4	4	86	0
5	675	6	5	75	1200
6	510	6			
7	680	6			
8	590	8			

Table 2. Pipeline and junction data for dynamic water quality simulation

Pipe No.	Length(ft)	Diameter(in)	Junction No.	Elevation(ft)	Demand(gpm)
1	10330	18	1	710	150
2	5280	14	2	700	150
3	5280	10	3	695	100
4	5280	10	4	700	150
5	5280	12	5	695	200
6	5280	6	6	690	150
7	5280	10	7	700	100
8	5280	12	8	710	100
9	5280	8	9	800	0
10	5280	8			
11	5280	6			
12	200	18			
13	200	18			

였다. Fig. 4의 부정류 해석결과에 따르면 초기 정상상태($t = 0 \text{ sec}$)에서 개발모형의 해석결과 는 EPANET2와 일치하는 결과를 나타내었다. 반면 시간에 따라 관성효과로 인하여 관로 4를 통하여 저류조로 유입되는 유량은 개발모형에서 21 gpm이 큰 것으로 나타났다. 이로 인한 저류조 수위증가 또한 EPANET2의 결과보다 0.5 ft 가 큰 것으로 확인되었다.

4.3 동수역학적 수질해석에의 적용

동수역학적 수질해석을 위한 예제는 EPANET2 (2000)의 잔류염소 농도 이송 및 반응에 따른 감쇄과정을 모의하였다(Fig. 5 참조). 관망은 13개의 관로, 9개의 절점, 1개의 저수지, 1개의 가변수위 저류조로 구성되어 있으며, 관로 및 절점의 입력자료는 Table 2에 정리되었다. 용수공급을 위한 펌프는 3개의 운영점을 가지는 특성곡선에 의하여 나타낼 수 있으며, 저수지로부터 양수된 유량은 저류조를 포함하는 관로계통에 공급된다. 모든 관로의 마찰계수는 EPANET2 조건과 동일하게 Hazen-Williams의 계수(C_{HW})를 100으로 설정하였다. 저류조의 직경은 50.5 ft의 원통형으로 950 ~ 1000 ft의 수위에서 운영되며, 모의 초기 수위는 970 ft로 설정하였다. 저수지와 저류조의 초기 잔류염소농도는 1.0 mg/L이며, 다른 용수수요 절점의 농도는 0.5 mg/L의 값을 가진다. 잔류염소의 반응은 $-0.5 / \text{day}$ 의

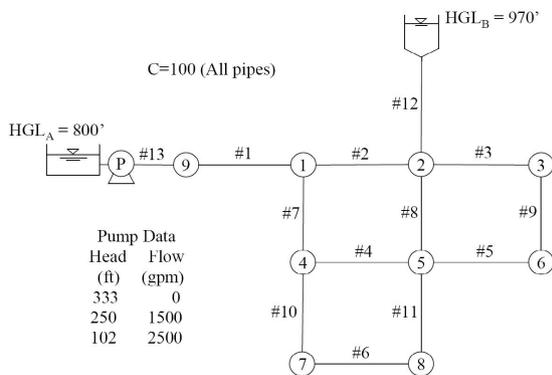


Fig. 5. Pipe network for dynamic water quality simulation

수체(bulk) 감쇄상수를 가지는 1차 반응으로 가정하였으며, 관벽(wall)에서의 감쇄상수는 -1.0 ft/day 로 설정하였다. 총 모의시간은 6 hr이며, 비정상상태 해석을 위한 시간간격은 1 hr로 설정하였다. 용수수요 절점 1 ~ 8에서의 수요량 계수가 1.0, 1.2, 1.4, 1.6을 가지는 것으로 가정하였다.

본 예제의 부정류 수리해석 결과 중 관로 1 및 12에서의 유량을 Fig. 6에 EPANET2 결과와 함

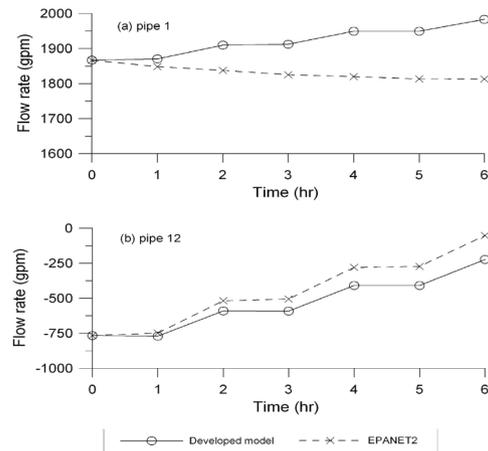


Fig. 6. Hourly variation in flow rate in pipe 1 and pipe 12

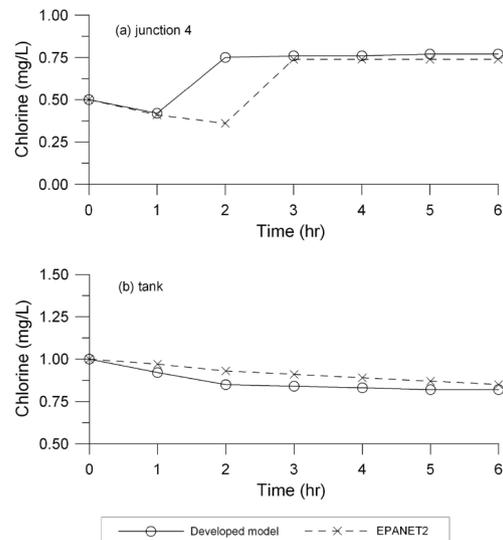


Fig. 7. Hourly variation in chlorine concentration at junction 4 and in storage tank

계 나타내었다. 모의결과에 따르면 관로 1에서 개발모형은 EPANET2보다 큰 값의 유량값(시간 6 hr에서 170 gpm의 차이)을 나타내고 있다. 반면에 저류조로 유입되는 유량은 반대의 결과가 예측되었다. Fig. 7에 도시된 잔류염소 농도에 대하여 살펴보면 절점 4에서 개발모형은 잔류염소 농도의 예측에서 시간적 편차를 나타내고 있다. 이는 수질해석에 있어서 서로 다른 알고리즘을 사용하는 데에 기인하는 것으로 추정될 수 있다. 반면 저류조에서의 잔류염소 농도는 수질해석 알고리즘과 더불어 유량 변화에 의한 영향이 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 관로로부터 저류조로 유입되는 유량이 많은 개발모형의 경우, 모의 초기 관로 내에 분포된 저농도의 잔류염소에 의하여 저류조의 잔류염소 농도를 희석시키는 결과를 나타내어 시간 2 hr에서 최대 0.07의 편차를 보여주고 있다. 이러한 해석 결과는 부정류 상태 유량해석의 차이가 수질예측에 커다란 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주고 있다.

5. 결론

- (1) 본 연구에서는 상수관망에서 시간에 따라 점진적으로 변화하는 비정상 상태의 수리 및 수질 변화를 모의하기 위하여 일괄시스템 접근 방법 및 이산체적법을 이용한 동역학적 수질 해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 정상류 수리해석, 부정류 수리해석 및 동적 수질해석 모의를 실시하여, 범용적으로 이용되고 있는 확장기간모의 기반의 EPANET2와의 비교를 통하여 모형의 적용성을 평가할 수 있었다.
- (2) 본 연구의 모의 결과에 따르면 Jeppson (1976)의 관망을 이용한 정상상태 해석에 있어서는 개발모형과 EPANET2는 일치하는 결과를 나타내었다.
- (3) 그러나 Wood(1993)의 상수관망을 이용하여

시간적으로 변화하는 부정류 흐름의 해석 시에는, 관성력의 영향으로 인하여 개발모형과 EPANET2은 유량해석 결과에서 편차를 나타냈었다. 개발모형의 모의결과에서는 최대 21 gpm이 저류조로 더 많이 유입되며, 이로 인하여 저류조의 수위증가 또한 0.5 ft 더 커지는 것으로 예측되었다.

- (4) EPANET2 예제를 이용한 동역학적 잔류염소 감쇄모의에서는 관성 효과에 의한 유량의 차이는 저수지 유출측에서 최대 170 gpm까지 발생하였으며, 유량해석의 차이로 인하여 저류조의 수질 예측치에서도 최대 0.07까지 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 모의 초기 관로로부터 저류조로 유입되는 유량이 많은 개발모형의 경우, 저농도의 잔류염소에 의하여 저류조의 잔류염소 농도가 희석되는 것으로 해석될 수 있다.
- (5) 본 연구에서 개발된 수치모형은 점진적으로 변화하는 상수관망의 부정류 수리 및 수질모의를 비교적 정확하게 해석할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 관로 내 오염물의 종방향 확산해석, 용수수요량 변화를 고려한 관망의 압력제어 및 누수관리, 관로내 마찰손실계수의 추정 등 급변 부정류 해석기법과의 연계를 통하여 통합화된 상수관망 운영관리 시스템으로의 활용도가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(과제번호 : GT-11-G-02-001-4)”의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 박재홍 (2007) 상수관망시스템에서의 장기간 모의를 위한 동역학적 모형의 개발, *한국수자원학회논문집*, 40(4), 325-334.
- 박재홍, 한건연 (1998) 상수관망 해석을 위한 도학의 적용, *한국수자원학회논문집*, 31(4), 439-448.

- Choi, D. Y. (2000) *A study on the modeling of chlorine concentration in water distribution systems*. M.Sc. Thesis, Yonsei Uni., Seoul, Korea.
- Constans, S., mond, B., and Morel, P. (2003) Simulation and control of chlorine levels in water distribution networks, *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **129**(2), 135-145.
- Boulos, P. F., Altman, T., Jarrige, P. A., and Collevati, F. (1994) An event-driven method for modeling contaminant propagation in water networks, *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **18**(2), 84-92.
- Fabrie, P., Gancel, G., Mortazavi, I., and Piller, O. (2010) Quality modeling of water distribution systems using sensitivity equations, *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, **136**(1), 34-44.
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M. McInnis, D. A., and Axworthy, D. H. (2005) A review of water hammer theory and practices, *Appl Mech Rev*, **48**(1), 49-76.
- Grayman, W. M., Clark, R. M., and Males, R. M. (1988) Modelling distribution system water quality: dynamic approach, *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **114**(3), 295-312.
- Holloway, M. B. (1985) *Dynamic pipe network computer model*. Ph.D. Thesis, Washington State University, Pullman, WA.
- Islam, M. R., and Chaudhry, M. H. (1998) Modeling of constituent transport in unsteady flows in pipe networks, *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, **124**(11), 1115-1124.
- Jeppson, R. W. (1976) *Analysis of flow in pipe networks*. Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan.
- Liou, C. P., and Kroon, J. R. (1987) Modelling the propagation of waterborne substances in distribution network, *J. AWWA*, **79**(11), 54-58.
- Rossman, L. A. (2000) *EPANET2 users manual*. USEPA, Cincinnati, Ohio.
- Rossman, L. A., and Boulos, P. F. (1996) Numerical methods for modeling water quality in distribution systems, *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **122**(2), 137-146.
- Rossman, L. A., Boulos, P. F., and Altman, T. (1993) Discrete volume element method for network water quality models, *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **119**(5), 505-517.
- Toro, E. F. (1997) *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Wood, D. J. (1993) *KYPIPE2-version 1.0 user's guide*. Haestad Methods, Inc., Waterbury.
- Wood, D. J. and Charles, C. (1972) Hydraulic network analysis using linear theory, *J. Hydraul. Div.-ASCE*, **98**(7), 1157-1170.
- Wood, D. J., Dorsch, R. G., and Lightnor, C. (1966) Wave-plan analysis of unsteady flow in closed conduits, *J. Hydraul. Div.-ASCE*, **92**(12), 83-110.
- Wylie, E. B. and Streeter, V. L. (1970) Network system transient calculations by implicit method, No. 2963, *45th Annual Meeting of the Soc. of Petrol. Eng. of AIME*, Houston, Texas.