Research Paper

A Study on the Effects of Model Structure and Demand Allocation on Water Network Modeling

Seonghan Kim¹ · Kwansue Jung² · Sukmin Yoon³ · No-Suk Park^{3,*}

¹Department of Integrated Water Management, Hanbat National University

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University

³Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

(Received January 22, 2020; Revised February 12, 2020; Accepted February 20, 2020)

Objectives : In order to reduce the uncertainty of the pipe network modeling, the model structure was basically included all distribution pipes and several models were proposed according to the location of the water meters.

Methods : For models verification, first, a steady state simulation of each model was made by constructing a model including all water supply pipes (All-meters Model), which are the bases of 3 simplified models, and considering the location of all water meters. The network analysis was performed by dividing into the steady state and the extended period simulation.

Results and Discussion : From the results of models comparison, ‘All-meters Model’ and ‘All-connections Model’ were found to obtain more accurate results for constructing a water network model for simulation of water quality events in distribution network. When constructing an ‘All-meters Model’ in all networks, the model becomes complicated and data management does difficult. Therefore this study suggests a hybrid model construction.

Conclusions : It would be reasonable to construct a detailed model (All-meters or All-connections Model) in looped network in which the water flow path can be changed according to the difference of water head, and a skeletonized model (Street-meters aggregation or Reduced-meters Model) for a branch network that does not have a significant impact on demand allocations.

Key Words : *Pipe Network Modeling, Model Structure, Demand Allocation, A Hybrid Model Construction*

* Corresponding author E-mail: nspark@gnu.ac.kr Tel: 055-772-1798 Fax: 055-772-1799

연구논문

상수관망 해석에서의 모형 구성 및 수요할당에 따른 영향분석에 관한 연구

김성한¹ · 정관수² · 윤석민³ · 박노석^{3,*}

¹한밭대학교 통합물관리학과

²충남대학교 토목공학과

³경상대학교 토목공학과 및 공학연구원

목적: 상수관망 모델링에서 불확실성을 줄이기 위해 이제까지 몇몇 모델 방법론들이 제안되어왔다. 그러나 이러한 방법들로 모델을 구성하는 경우 복잡해지고, 데이터 관리가 어려운 단점이 있었다. 이에 본 연구에서는 이를 상충할 수 있는 ‘Hybrid 모형’의 구성을 제안하고자 하였다.

방법: 모형별 검증에 위하여 먼저 간략화 모델의 비교 기준이 되는 모든 배수관과 급수관이 포함된 모형(원 모형)과 수도미터의 위치를 고려한 3가지 간략화 모형을 구축하여 모형별로 고정상태 모의(steady-state simulation)와 시간변화 모의(extended period simulation)로 구분하여 관망해석을 수행하고 그 결과에 대해 수량, 수압 및 수질을 대상으로 비교분석하였다.

결과 및 토의: 그 모델 평가 결과, ‘All-meters Model’과 ‘All-Connections Model’은 관망 내 수질 모사를 위한 관망 모델 구축에 있어 정확한 결과를 얻는 것으로 밝혀졌다. 동수두의 차이에 따라 물 흐름 경로가 달라질 수 있는 격자형 관망에서는 실제 수요가 반영된 상세모형(All-meters 또는 All-connections Model)을 구축하고, 간략화되어도 물 흐름 경로가 동일하고 수요할당의 영향이 크지 않는 수지형 관망에서는 간략화된 모형(Street-meters aggregation 또는 Reduced-meters Model)으로 구축하는 혼합형(Hybrid형) 모형구축을 제안한다.

결론: 각 모형은 고정상태 모의와 시간변화 모의로 나누어 실시한 결과 고정상태모의의 동수두 비교에서는 모든 모형에서 동수두의 차이가 크게 발생하지 않았으나 시간변화 모의의 물 연령 비교에서는 모형별로 상당한 차이를 나타내었다. 최장 시간은 All-meters 모형 66.7시간, All-connections 모형 53.6시간, Street 모형 52.4시간 및 Reduced 모형이 49.4시간으로 나타났다.

주제어: 상수관망 모델링, 모형 구성, 수요할당, Hybrid 모형 구축

1. 서론

신뢰성 높은 관망해석을 위해서는 해석기법 자체를 고도화하는 것 이외에도, 실제 관망시스템의 물리적 특성을 가늠한 정확하고 정밀하게 구성하여 해석을 위한 토대를 구축하는 것 또한 매우 중요한 요소가 된다. 관망해석에서는 여러 가지 불확실성을 극복해야 한다. 가장 중요한 불확실한 변수는 수요(demands)이다. 수요에 대한 정확한 예측도 중요하지만, 가장 먼저 정확한 위치에 수요를 할당하는 것이 무엇보다 중요하다. 그것은 해석기법의 성공적인 적용의 근간이 실제 관로시설과 수요지점의 위치를 고려한 정확한 모델구축에 있기 때문이다. 입력데이터 중에서 해석결과의 정확도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 기저 수요량(base

demands)의 정확한 할당(demand allocation)이다. 기저 수요량은 관망해석에서 유량 적용의 기초가 절점 유출량으로서 통상 수용가 소비량과 손실량을 포함한다.¹⁾

Misiradali (2009)는 모델구축에서 모든 수용가 급수관로를 포함하는 것은 현실적이지 못하고 많은 정보를 취득하고 처리해야하기 때문에 불가능하다고 전제하고, 직경 100 mm 또는 150 mm 이하의 관은 삭제 또는 등치관으로 대체하는 수리학적 등 관경의 등치관 법을 제시하였다. 또한 수요할당에서 모든 수도미터를 정확하게 수요절점에 할당하는 것은 매우 어렵다고 진단하고, 절점별로 가중치를 두어 전체 수요량을 할당하는 방안을 제시하였다.²⁾ Perelman 등은 수질모의를 위한 관망모형의 집합/간략화(aggregation/skeletonization) 활용에서 수질 및 수리적 집합법(aggregation method)을 기

초로 관로와 절점을 줄여 간략화하는 방안을 제시하고, 이를 All-pipes 모델의 수압과 수질농도를 대상으로 비교 검토하였다.³⁾

실제 관망을 대상으로 한 수요할당에서는 GIS 및 수도미터 DB가 정확하게 모두 구비되어 있는 경우가 드물어, 이 경우 비교적 정확하게 기저 수요량을 할당하는 방법들이 많이 제시되고 있다. 이 중에는 거리(street) 수준에서 수도미터를 집합(aggregation)시키고 이를 ‘Voronoi 다이어그램’ 등을 이용하여 수요절점에 할당시키는 방법이 최근에 제시되고 있다.⁴⁾ 특히 그들은 GIS DB가 있는 경우 기저수요량 할당방법에 대해 미터할당(meter assignment), 미터 집합, 유량 배분 및 포인트(point) 할당의 4가지 방법을 제시하였다. Guth 등은 Voronoi 구역이라는 Thiessen 망을 만들어, 그 안에 있는 수도미터를 가장 가까운 수요절점에 할당하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 급수관로의 배치를 고려하지 않았으며, GIS DB를 재분석해야하는 별도의 작업이 필요하다.⁵⁾

관망에서의 수질 모의를 위해 수요 모델링 관점에서 접근하는 사례도 있는데, Blokker는 수요 모델링을 정수장 운영을 위한 수요, 가압장의 공급량을 위한 수요, 그리고 배수관망에서의 수질 모의를 위한 이송 등에 필요한 수요로 구분하고 이를 시간 및 공간적으로 통합하는 방법을 제시하였다.⁶⁾ 실제 관망에서 불규칙하게 분포되어 있는 수용가의 급수관 위치를 고려하여 전통적으로 간략화한 모델에서의 할당된 관망을 실제 급수관의 유량 배분된 경우의 동수경사선(Hydraulic Grade Line)과 유사하게 되도록 조도계수(C값)를 조정하여 반복 계산하는 방법을 제시한 사례도 있다.⁷⁾ Giustolisi는 실제 급수관을 수요지점에 할당함에 있어 ‘Global gradient algorithm (GGA)’와 ‘Enhancing of GGA (EGGA)’ 기법을 써서 효과적으로 할당하는 방법을 수학적으로 제시하였다. 또한 실무에서는 관로의 절반씩 균등 분배하는 것이 일반적이거나, 에너지 등을 고려하여 급수관의 위치에 따라 할당할 것을 권고하였다.⁸⁾

Sayeed 등은 도시지역의 관망해석을 위한 수요배분을 ‘면적에 의한 비율배분(proportional distribution by area)’과 ‘검침 수도미터 집합(billing meters aggregation)’의 두 가지 방법을 제시하였는데, 두 방법 모두 서비스 폴리곤(service polygons)에 의한 할당방법이다.⁹⁾ Clark은 모델 구축을 위해서는 어느 수준의 관로를 포함하고 간략화할 것인지는 의사결정의 문제라고 진단하고, 고객까지의 공급관로를 모두 포함하는 것은 불가능하거나 현실적이지 못하다고 언급하고, 간략화의 필요성을 제시하였다.¹⁰⁾

관망요소의 모델구축에 있어서 최근 급속하게 발전하고 있는 컴퓨터 성능으로 인해 현재는 간략화의 필요성과 모델 구축의 한계가 많이 완화되었기 때문에 지금까지의 모형의 간략화 구축에서 관로를 대상으로 하던 관점을 바꾸어 모든

수도미터와 급수관을 포함하여 수도미터가 수요절점이 되는 모형구축을 시도하였다.

이에 본 연구에서는 가능한 모든 배수관을 포함하되 수요할당의 관점에서 수요절점의 간략화 방안을 제시하였으며, 각 모형별로 실제 상수관망을 대상으로 한 해석사례를 통해 간략화 방안별 민감도 분석을 실시하여 관망의 흐름과 수질에 영향을 덜 주는 범위에서의 수요절점을 줄이는 모형 구성을 검증하였다. 모든 관망에서 All-meters Model을 구축할 경우 모형이 복잡해지고 데이터의 관리가 어려워질 수 있으므로, 동수두의 차이에 따라 물 흐름 경로가 달라질 수 있는 격자형 관망에서는 실제 수요가 반영된 상세모형(All-meters 또는 All-connections Model)을 구축하고, 간략화되어도 물 흐름 경로가 동일하고 수요할당의 영향이 크지 않는 수지형 관망에서는 간략화된 모형(Street-meters aggregation 또는 Reduced-meters Model)으로 구축하는 Hybrid형 모형구축을 제안하는 바이다.

2. 적용 모형의 선정

본 연구에서 제안하는 상수도 관망해석 모형구축 방안은 기존의 연구에서 배수관망을 중심으로 간략화하는 방법에서 벗어나 기본적으로 모든 배수관로를 포함하여 구성하도록 하였다. 또한 기존의 관로의 관점에서 벗어나 절점으로 초점을 맞추어 수도미터와 급수관을 고려한 모델 구축 및 간략화 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서 모형을 비교 검토하고자 하는 구성방안은 다음 네 가지이다.

① All-meters Model. 이 모델은 수도미터가 수요절점이 되도록 구성하는 방식이다. 즉, All-meters Model에서는 해당 배수관망시스템에 있는 배수관 및 급수관을 모두 포함하는 방식으로 실제 수도시스템의 수요량 유출지점과 관망해석 모델에서 유출 지점이 동일하다. 그러므로 이 모델을 원 모형으로하고 이 모델을 대상으로 간략화 모델을 비교 검토하고자 한다.

② All-connections Model. 이 모델은 All-meters Model에서 급수관을 제외하고 급수관과 연결된 분기점을 수요절점이 되도록 한 방식이다. 즉 배수관에서 수용가로 연결된 급수관만을 제외한 것으로서 상기 원 모형에 가장 근접한 간략화 모형이다.

③ Street aggregation Model. 이 모델은 수도미터를 골목 또는 작은 마을 단위로 집합하여 수요절점을 만든 것으로서, 수도미터의 집합 간격은 약 50 m 정도로 하였다. 약 50 m 내에 있는 수도미터는 하나의 수요절점에 집합되도록 구성하였다. 수도미터의 집합간격은 모형구축 대상의 복잡성과 모의 목적에 따라 조정할 수 있을 것이다.

④ Reduced-meters Model. 이 방법은 기존에 대부분 사용하였던 변화지점을 수요절점으로 하고, 이 절점에 가까운

Fig. 1. Models of pipe network simulation.

Table 1. General status of the target area for model structure.

Water meters	Total main pipe length (m)	Total branch pipe length (m)	Base demand (m ³ /day)		
			Total	Usage	Loss
1,322	69,932	23,028	3,459	2,594	865

수도미터를 할당시키는 방식이다. 변화지점은 관경, 매설년도 및 관종 등의 변경지점과 분기점 등이다.

Fig. 1에서 실선은 관망에서 사용한 관로를 의미하고 점선은 수도미터 수요량을 수요절점으로 할당함을 의미한다.

All-meters Model은 수요절점과 수도미터가 1:1의 관계를 가진다. 따라서 실제 관망에서의 유출과 일치한다. 또한 누수량을 급수관에도 할당하므로 다른 모형에 비해 향후 급수관에서의 수압에 의한 누수량 모의와 제어에도 유용할 것으로 판단된다. 선행 연구자인 Misiradali 등이 제기한 모든 급수관을 포함시킬 경우 관망해석을 위한 모형(All-meters Model) 구성의 복잡성과 모델 구동시간 등의 어려움으로 현실적이 못하다는 평가에 대해 이 원 모형과 간략화 모형의 모의 시간을 비교 검토하였다.

3. 모형의 구성 및 관망해석

본 연구에서 제안한 모형의 구성과 기저 수요량 할당의 검증에 위해 실제 상수 관망 시스템을 대상 지역으로 국내 전라북도 J_시 급수구역을 선정하였다. 대상 급수구역은 외곽지역의 주된 관망구성 특성인 수지상식 관로망뿐만 아니라 도시지역의 관망구성 특성인 격자형 관망 형태가 혼합되

어 구축되어 있어, 각각의 관망구성에 대한 수리 및 수질 인자의 비교 검토를 위해 이 구역을 선정하였다.

이 급수구역은 일반 산업단지에 공급하는 산업용수와 인근 농촌지역에 가정용수를 주로 공급하는 지역이다. 이 구역에는 배수지 1개소와 가압장 3개소가 운영 중에 있으며, 수도미터는 1,322개소이고, 총 관로연장은 93 km이다. 다음 Table 1은 모형 구성 대상지역의 현황을 정리한 것이며, Fig. 2는 관망도와 검토구간 및 지점을 도시한 것이다.

관망도에서 파란색 실선은 배수관망을 나타낸 것이며, 붉은색의 실선은 급수관을 나타낸다. 또한 관망도에 표시한 1~2 구간(section)과 1~11번 지점(point)은 모형별 해석결과와의 비교 검토를 위해 위치를 나타낸 것이다. 다음 Fig. 3은 ‘All-meters Model’, ‘All-connections Model’, ‘Street-meters aggregation Model’, 그리고 ‘Reduced-meters Model’로 구축한 관망해석 모형을 그림으로 도시한 것이며, Table 2는 적용 모형에 사용한 배수관망시스템의 입력자료 특성을 요약한 것이다.

구축한 모형의 타당성을 시험하고 각 모형 간 비교검토를 위한 방향설정을 위하여 4가지 모형에 대해 미국환경청(USEPA)에서 개발한 관망해석 프로그램인 EPANET 2.0을 이용하여 해석을 실시하였다.¹¹⁾

Fig. 2. Check sections and points on water grid network.

사전에 대상 급수구역에 대한 모델 구축의 타당성 검증과 시간별 유량 및 수압패턴을 파악하고 시간변화 모의를 위한 입력자료 추출을 위하여 구역 유입지점의 유량과 수압을 실시간 측정하였다. 24시간의 실시간 자료를 분석한 결과, 조사 기간 중 이 구역의 실시간 순시 최대 유량은 $133.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 이었으며, 최저 유량은 $33.7 \text{ m}^3/\text{h}$, 평균은 $76.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 를 기록하였다. 실시간 최대 유량은 최소 및 평균 유량의 각각 4.0배와 1.8배에 달하였다.

4. 적용 결과 및 토의

본 연구에서 제안한 All-meters Model을 원 모형으로 하고 All-connections Model, Street-meters aggregation Model 및 Reduced-meters Model의 거동을 분석하여 모델 간략화의 타당성을 비교 검토하고자 한다. 구간 검토는 비교에 방해가 되

Fig. 3. Network model structures.

Table 2. Characteristics of input data for each model.

Model	Nodes (No.)	Pipes (No.)	Total pipe length (m)	All-meters model contrast Reduction ratio (%)		
				Nodes	Pipes	Pipe length
All-meters	2,874	2,921	92,960	NA	NA	NA
All-connections	1,548	1,595	69,932	46.1	45.4	24.8
Street-meters	666	713	69,932	76.8	75.6	24.8
Reduced-meters	542	589	69,932	81.1	79.9	24.8

는 가압장 설치구간을 제외하고 자연유하로 흐르는 구간을 선정하였으며, 비교 지점은 관로의 중간, 관말, 격자형 관망 구간 등을 고려하여 **Fig.2**에 나타난 바와 같이 시스템 전체를 통해 총 11개소를 선정하였다. 원 모형과 세 개의 간략화 모형의 비교는 실제 환경에서 측정한 값과 추정 값 또는 모델이 예측한 값과의 불일치 정도를 나타낼 때 흔히 사용하는 평균 제곱근 오차(Root mean square error, RMSE)를 사용하였다.³⁾

4.1. 고정상태 모의 비교

4.1.1. 동수두 비교

고정상태 모의에서 **Fig.2** ‘1 구간’에 대해 기저 수요량을 공급하였을 때 동수두(HGL)를 비교분석하였다. 가장 절점 수가 적은 Reduced-meters Model의 절점과 대응되는 동일한 지점의 다른 모형의 절점과 동수두를 비교하였다. 이 구간의 총 길이는 약 7 km이며, Reduced-meters Model의 경우 절점이 약 32개소가 있다. 검토 결과 관로 중간 2,500 ~ 4,000 m 사이와 관말에서 동수두가 급격히 떨어지는 현상이 발생하였으나, 원 모형과 나머지 세 개의 간략화 모형의 동수가 크게 차이가 발생하지 않았다. 이는 시스템 유입 지점으로부터 주 관로에 대한 동수두 비교로써 관 직경이 크고 수요량 할당이 거의 없는 주 관로에서의 모형 간 동수두 차이는 거의 없다는 것을 의미한다(**Fig.4** 참조).

Fig.4. Kinetic pressure lines profile.

Table3은 관망 시스템 내 다양한 지점의 수압을 모형별로 비교하기 위하여 **Fig.2**에 나타난 1 ~ 11번 지점에 대한 수압과 편차를 나타낸 것이다. 관망 시스템 내에서 모형 간의 수압차는 크게 발생하지 않았다. 최대 수압 차는 7번 지점에서 1.30 m 발생하였는데, 이 지점은 50 mm 직경의 관말지점으로 All-meters 모형에서 이 구간을 흐르는 총 유량이 7.96 m³/일로 상당히 작은 반면에 급수관에 배분된 손실량의 차이로 원 모형과 All-connections 모델과의 이 구간 유량 차이가 1.68 m³/일에 달해 수압차가 발생한 것이다. 따라서 소구경 관의 관말지역의 누수를 모의할 경우에는 간략화 모형 간의 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 전체적으로는 원 모형과의 RMSE 차가

Table 3. Pressures, deviations and RMSE at nodes.

No	All meters pressure (m)	All-connections		Street-meters		Reduced-meters	
		Pressure (m)	Deviation (m)	Pressure (m)	Deviation (m)	Pressure (m)	Deviation (m)
1	40.82	40.83	0.01	40.83	0.01	40.83	0.01
2	47.04	46.92	0.12	46.91	0.13	46.93	0.11
3	14.68	15.07	0.39	15.06	0.38	15.09	0.41
4	43.21	43.12	0.09	43.11	0.10	43.10	0.11
5	27.55	27.60	0.05	27.59	0.04	27.57	0.02
6	20.59	20.61	0.02	20.60	0.01	20.58	0.01
7	38.27	39.57	1.30	39.52	1.25	39.56	1.29
8	34.00	34.01	0.01	33.98	0.02	22.91	0.09
9	74.12	74.88	0.76	74.64	0.52	74.50	0.38
10	22.48	23.21	0.73	23.00	0.52	22.82	0.34
11	36.75	36.86	0.11	36.83	0.08	36.76	0.01
RMSE			0.27		0.21		0.19

Table 4. Kinetic pressures, deviations and RMSE in section 2.

Distance	All meters kinetic pressure (m)	All-connections		Street-meters		Reduced-meters	
		Kinetic pressure (m)	Deviation (m)	Kinetic pressure (m)	Deviation (m)	Kinetic pressure (m)	Deviation (m)
353	75.07	75.06	0.01	75.06	0.01	74.98	0.09
1,043	73.57	73.59	0.02	73.64	0.06	71.94	1.63
1,070	73.56	73.58	0.02	73.62	0.06	71.93	1.63
1,088	73.56	73.57	0.02	73.62	0.06	71.93	1.63
1,337	73.50	73.52	0.02	73.57	0.07	71.88	1.63
1,987	73.40	73.42	0.02	73.47	0.07	71.78	1.62
2,082	73.37	73.39	0.02	73.44	0.07	71.75	1.62
2,459	72.71	72.73	0.02	72.79	0.08	70.91	1.79
3,000	72.65	72.68	0.02	72.73	0.08	70.84	1.81
RMSE			0.02		0.07		1.62

Fig. 5. Demand status and direction of water flow in the grid network.

최대 0.27 m로 전반적으로 순간해석인 고정상태 모의에서 배수관의 길이를 줄이지 않고 절점만을 줄여 간략화한 모형에서는 동수두의 편차는 크지 않다고 결론지을 수 있다.

다음 **Table 4**는 시스템 내 2 구간(section 2)의 관 파열에 대하여 각 모형별 모의 결과를 중요 지점에 대한 동수두, 절대 편차 그리고 RMSE(평균 제곱근 오차, Root mean Squared Error)를 나타낸 것이다. 본 연구의 비교검토를 위하여 직경 200 mm 배수관로 본관에 30 mm 직경의 파열이 발생한 것으로 가정하였다. 이 경우 유출계수는 189로 계산하였다. 여기서 ‘편차’는 원 모형과 간략화 모형 간의 동수두 차를 나타낸

것이며, 거리는 2구간의 시작에서 주 관로의 누적거리로 나타낸 것이다. 원 모형인 All-meters Model과 All-connections Model 및 Street-meters aggregation Model의 RMSE는 각각 0.02 m, 0.07 m로 원 모형과 거의 일치하게 나타났고, 가장 간략화 된 모형인 Reduced-meters Model의 편차는 최대 1.81 m이고 RMSE는 1.62 m로 동수두가 1 m 이상의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

4.1.2. 물 흐름 방향의 비교

Fig. 5는 공단 지역의 격자형 관망 중에서 좌측 하부에 속

하는 두 블록의 관망도로써 대수용가와 물 흐름 방향이 원 모형과 Reduced 모형이 서로 다른 대표구간을 비교한 것이다(Fig. 2내 점선 박스 참조). 여기서 숫자는 기저수요량을 표시한 것이며, 화살표는 물의 흐름 방향을 나타낸 것이다. 대수용가가 위치한 지점에서는 물이 대수용가를 중심으로 양쪽 관로에서 흘러 유출되는 것으로 나타났으나 모형을 단순화하면 양쪽 분기점이 수요절점으로 할당되어 실제 관에서의 유량은 상당한 차이를 나타낼 수 있기 때문이다. 예를 들어 Fig. 5(b)의 3번과 4번 지점 사이의 수용가의 기저수요량($162.22 \text{ m}^3/\text{일}$)은 실제 수요지점 대신 4번 지점에 할당되게 되어 흐름의 오류를 유발하게 된 것이다. 또한 물 흐름의 방향은 중간에 있는 수용가의 물 사용량에 의해서만 결정되는 것이 아니라 전체적인 동수두 차이에 따라 결정되기 때문에 중간의 수요절점을 일반화하기는 어려울 것이다. 따라서 이와 같은 상황을 미리 예측하지 못하고 모형을 간략화할 경우 실제와 상이한 결과는 도출할 수도 있다.

4.2. 시간변화 모의 비교

4.2.1. 물 연령(water age) 비교

관망에서의 물 연령은 물이 생산되어 특정 지점에 도달하기까지의 시간을 나타내며, 관망에서 수질평가의 중요한 지표가 된다. 저유량으로 인해 유속이 느려지면 관내 부유물이 정체 구간과 같은 특정 지점에서 퇴적하게 되고, 물 수요가 변하며 유속이 바뀌면 침강되었던 탁질이 재부상하여 탁수민원을 유발하게 된다.⁴⁾ 본 연구 대상 지역에 대한 최장시간의 물 연령을 고려하였을 때, 모델에 주어진 100시간의 모의시간(total duration)의 running time이 2초 정도에 불과하여 모형 간의 모델수행 시간을 비교하기 위하여 극단적인 값인 100일을 모의시간(2,400시간)으로 주었을 때 모형 간의 running time은 All-meters Model (All-meters)이 46초, All-connections Model (All-conn.)이 40초, Street-meters aggregation Model (Street)이 16초, Reduced-meters Model

Table 5. Water age comparison.

Division	Water age	
	Max.	50% frequency
All-meters (A)	66.7	7.7
All-connections (B)	age (h)	53.6
	percent. (B/A) %	80.4
Street-meters (C)	age (h)	52.4
	percent. (C/A) %	78.6
Reduced-meters (D)	age (h)	49.4
	percent. (D/A) %	72.6

(Reduced)이 12초가 소요되었다.

다음 Table 5는 대상 급수 시스템에 대한 모형별 최장의 물 연령과 50% 빈도에 해당하는 물 연령에 대해 모의 결과를 비교한 것이다. 최장의 물 연령은 원 모형에 비해 All-connection Model은 80.4%의 시간, Street-meters Model은 78.6%, 그리고 Reduced-meters Model은 72.6%의 시간으로 각 모형별로 차이가 발생하였으며, 50% 빈도의 경우 Reduced Model을 제외하고 비슷한 것으로 모의되었다.

Fig. 6는 All-connections Model과 가장 단순한 Reduced-meters Model과의 물 연령에 대한 빈도분포 모의 결과를 비교하였다. 그 결과 All-connections Model이 경우 90% 빈도가 14.3시간으로 분석되었으며, 두 개의 절점이 40.9시간 및 53.6시간으로 증가하고 있다. 또한 Reduced-meters Model이 경우 90% 빈도가 12.8시간인 반면에 마지막 2개의 절점에서 33.6시간 및 49.3시간으로 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있었다.

4.2.2. 수질 사고(event)의 비교

본 연구에서는 가상으로 사고에 의해 관망에 유입되는 망간의 농도는 수질기준의 10배인 0.5 mg/L 로써 오전 4시부터 오전 9시까지 농도가 다르게 유입되는 것으로 가정하였

(a) All-connections Model

(b) Reduced-meters Model

Fig. 6. Water age frequency plot.

Fig. 7. Changes in Mn concentration over time for water quality events at No. 1 and 2 node.

다. 모형별 검증은 대상이 되는 상수관망의 관경, 위치 등을 고려하여 Fig. 2에 표시한 11개소를 선정하고 이 절점에서의 시간별 망간 거동을 모의하여 비교 검토하였다. 그 결과 1번 지점(No. 1)은 배수본관으로 200 mm 직경 관로의 끝 지점이며, 2번 지점은 50 mm 직경의 배수관망의 관말지점이다. Fig. 7에 나타낸바와 같이 배수본관의 경우 All-meters Model과 All-connections Model 모형이 거의 유사하게 나타났으며, Street Model과 Reduced Model이 유사하게 거동하였다. 두 그룹 간에는 약 1시간의 물질 이송의 차이가 발생하였으며, 단순 모형이 더 빨리 도착한 것으로 나타났다.

관말에서의 수질거동은 배수본관에서의 거동과 상이하게 나타났다. No. 2지점에서는 각 모형별로 시간차가 많이 발생하였으며, 특히 가장 단순화된 Reduced Model이 상당히 빠른 시간에 도달한 것으로 나타났다. 이는 관말의 해당 수요절점에서 절점 수요량 배분의 차이가 있어 구간 유량과 물 연령이 빠르게 모의된 것에 기인한다. 즉 수질 모의의 경우 관망 모형을 단순화할수록 수질 이벤트에 대한 거동 왜곡이 심해질 수 있음을 의미한다.

Fig. 7에서 물질의 침투(peak) 농도 도달 시간의 원 모형(All-meters Model)과 간략화 모형의 도달 시간차는 배수본관인 No. 1의 절점에서 All-connections Model은 원 모형보다 10분, Street Model과 Reduced Model은 모두 1시간 20분 빨리 도달하였다. 50 mm 소형관의 관말인 No. 2 절점에서는 원 모형에 대한 간략화 수서 모형별로 각 5시간 50분, 7시간 40분 및 16시간 30분으로 도달 시간에 큰 차이가 발생하였다. 이와 같은 차이는 간략화 모형의 경우 수요절점에 따라 수요량 배분의 차가 크기 때문이었다. 실제로 해당되는 수요절점에 원 모형의 경우 0.47 m³/일, 그리고 가장 간략화된 모형(Reduced Model)의 경우 4.6 m³/일로 약 10배의 수요할당 차이가 발생하였다. 따라서 수요절점의 배치와 할당이 수질모의와 같은 정밀한 관망해석에는 큰 차이를 발생시킬 수 있다.

다음 Fig. 8은 No. 2 절점에서의 원 모형과 Reduced Model의 시간별 수압분포를 비교한 것이다. 이 결과에 의하면 두 모형

Fig. 8. Hourly pressure distributions of All-meters and Reduced models at No. 2 Node.

의 최대 및 최소 수압이 각각 48.7 m와 46.6 m로 동일하고, 두 모형 간의 최대 수압 편차는 0.12 m에 불과하여 두 모형 간 최대, 최소 및 시간별 편차가 거의 없는 것으로 모의되었다. 즉, 모형별로 수질모의에 큰 차이를 나타내는 경우에도 수관에서는 물론이고 관말에서 수압의 편차는 거의 없어, 수압으로 모형 간의 관망 간략화의 차이점을 분석하거나 평가하기 위한 인자로서 큰 의미가 없는 것으로 나타났다.

4.2.3. 잔류염소 농도 비교

잔류염소 농도에 대한 모형별 상호 비교를 위하여 유입점(reservoir)에 염소를 0.6 mg/L 투입하는 것을 가정하여 입력하였고, Fig. 2에 표시한 지점에 대해 평균 24시간 평균 잔류염소 농도의 차이를 모의하였다. 모의 시간은 염소의 도달 시간을 고려하여 48시간 모의 후 이틀째 24시간 평균을 사용하였다. 이는 염소가 해당 절점에 도달한 후 평균적인 잔류염소를 분석하여 각 모형별 차이를 규명하고자 함이다. 그 결과 No. 1 지점은 수질 사고 모의 결과와 유사하게 All-meters와 All-connections Model이 거의 같게 거동하고, 나머지 두 단순 모형이 유사한 거동을 보였다(Fig. 9 참조). 관말인 No. 2 지점에서의 잔류염소 농도는 원 모형이 가장 낮은 잔류염소 농도 거동을 보였으며, 단순화 정도에 따라 순차적으로 잔류염소가 높아졌다. 이것은 단순 모형의 경우 실제 관망에서의 잔류염소 농도보다 과다하게 모의될 수 있

Fig. 9. Changes in residual chlorine concentration over time at No. 1 and 2 node.

Fig. 10. Comparison of flow velocity on pipeline (between nodes).

음을 의미한다.

4.2.4. 구간 유속 비교

구간 유속을 비교한 결과 Fig. 10에 나타난 바와 같이 가장 간략화된 Reduced Model을 제외한 세 모형의 시간별 유속 분포는 0.12 ~ 0.34 m/s로 거의 유사하게 변화하고 있으나, Reduced 모형은 나머지 모형보다 유속이 상당히 느린 0.02 ~ 0.06 m/s 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 All-meters, All-connections 및 Street 모형이 이 구간 관로 중간에 수요 절점이 있어 대수용가의 수요량이 그 절점에 할당되어 유속이 높게 나타났으나, Reduced 모형의 경우 격자형 관로의 절점에 할당되어, 실제와 다르게 물이 거의 흐르지 않는 정체 구간으로 모의되었기 때문이다. Fig. 10과 같이 격자형 관로에서는 모형의 간략화하여 수요를 할당할 경우 실제 관망의 거동과 상이한 결과를 얻을 수 있어 주의를 요하는 것으로 나타났다. 따라서 격자형 관로에서는 수요가 발생하는 지점에 수요절점을 배열하는 상세 관망모형의 구축이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 가능한 모든 배수관을 포함하되 수요할당

의 관점에서 수요절점의 간략화 방안을 제시하였으며, 각 모형별로 실제 상수관망을 대상으로 한 해석사례를 통해 간략화 방안별 민감도 분석을 실시하여 관망의 흐름과 수질에 영향을 덜 주는 범위에서의 수요절점을 줄이는 모형 구성을 검증하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 관망 해석 모형의 간략화 타당성을 검증하기 위한 모형은 고정상태 모의와 시간변화 모의로 나누어 실시한 결과 고정상태모의의 동수두 비교에서는 모든 모형에서 동수두의 차이가 크게 발생하지 않았다. 본 연구의 검토대상 급수구역의 1구간에서는 RMSE가 최대 0.30 m의 차이에 불과하였다. 고정상태 모의에서의 관 파열 이벤트 모의에서는 대상 시스템의 2구간의 RMSE가 원 모형과 Reduced 모형이 최대 1.62 m로 나타났으나, All-connection 및 Street 모형은 각각 0.02 m와 0.07 m로 원 모형과 거의 유사한 결과를 나타내었다.
- 2) 그러나 시간변화 모의의 물 연령 비교에서는 모형별로 상당한 차이를 나타내었다. 최장 시간은 All-meters 모형 66.7시간, All-connections 모형 53.6시간, Street 모형 52.4시간 및 reduced 모형이 49.4시간으로 나타났다. 수질이벤트 모의에서는 관 중간, 관말 등 각 지점별로 상당한 차이를 보였으나, All-meters 모형과 All-connection 모형이 유사하고, Street 모형과 Reduced 모형이 유사한 거동을 보였다. 잔류염소 모의에서는 All-meters 모형과 All-conn. 및 Street 모형의 최대 RMSE가 각각 0.04 mg/L와 0.06 mg/L, 0.04 mg/L로 유사하게 나타났으나 Reduced와의 최대 RMSE는 0.14 mg/L로 큰 차이를 보였다. 이와 같은 모의를 바탕으로 계획 및 설계를 위한 모의와 고정상태 모의를 위해서는 Reduced Model을 사용해도 큰 오차를 나타내지 않을 것으로 결론지을 수 있다.
- 3) 격자형 관망에서는 모형별로 물 흐름의 방향이 상이하고 유속이 상당한 차이를 나타내는 구간이 있는 것으로 모의되었다. 이는 수요량의 할당에 따라 동수두 차이가 발생하고 실제와 다르게 물이 거의 흐르지 않게 모의되는 구간이 발생하기 때문이다.

- 4) 모든 관망에서 All-meters Model을 구축할 경우 모형이 복잡해지고 데이터의 관리가 어려워질 수 있으므로, 동수두의 차이에 따라 물 흐름 경로가 달라질 수 있는 격자형 관망에서는 실제 수요가 반영된 상세모형(All-meters 또는 All-connections Model)을 구축하고, 간략화되어도 물 흐름 경로가 동일하고 수요할당의 영향이 크지 않는 수지형 관망에서는 간략화된 모형(Street-meters aggregation 또는 Reduced-meters Model)으로 구축하는 혼합형(Hybrid형) 모형구축을 제안하는 바이다.

References

1. T. M. Walski, D. V. Chase, D. A. Savic, W. Grayman, S. Beckwith, E. Koelle, Advanced Water Distribution Modeling and Management, 1st ed., Bentley Institute Press, USA(2007).
2. M. Misiradali, Hydraulic System Reliability of Water Distribution Networks, VDM Verlag Dr. Muller, Germany (2009).
3. L. Perelman, M. Maslia, A. Ostfeld, J. B. Sautner, Using aggregation/skeletonization network models for water quality simulations in epidemiologic studies, Journal of AWWA, 100(6), 122-133(2008).
4. V. Konakoudis, K. Gonelas, Accurate water demand spatial allocation for water networks modelling using a new approach, Urban Water Journal, 12(5), 362-379(2015).
5. N. Guth, P. Klingel, Demand allocation in water network modelling-A GIS-based approach using voronoi diagrams with constraints, Application of Geographic Information Systems, B. M. Alam (Ed.), INTECH, London, UK(2012).
6. E. J. M. Blokker, Stochastic Water Demand Modelling-Hydraulics in Water Distribution Networks, IWA Publishing, London, UK(2011).
7. G. Farina, E. Creaco, M. Franchini, Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes, Civ. Eng. Environ. Syst., 31(1), 36-50(2014).
8. O. Giustolisi, Considering actual pipe connections in water distribution network analysis, J. Hydraul. Eng., 136(11), 889-900(2010).
9. S. A. Sayeed, S. Hossain, M. Sharmin, Water demand allocation and supply characteristics for a populated urban area like Dhaka city, in Proceedings of 2nd International Conference on Advances in Civil Engineering 2014, ICACE-2014, Chittagong, Bangladesh, pp. 26-28(2014).
10. R. M. Clark, Modeling Water Quality in Distribution Systems, 2nd ed., American Water Works Association, Denver, USA(2012).
11. L. A. Rossman, EPANET 2 Users Manual, National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency(2000).

Authors

Seonghan Kim

Department of Integrated Water Management, Hanbat National University, Professor, ORCID[®] 0000-0001-6397-2673

Kwansue Jung

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Professor, ORCID[®] 0000-0002-4064-9766

Sukmin Yoon

Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Research Professor, ORCID[®] 0000-0002-5304-1207

No-Suk Park

Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Professor, ORCID[®] 0000-0002-5396-1636