Journal of the Korean Society of Water and Wastewater
Vol. 20, No. 3, pp. 357-366, 2006

상하수도학회지, 논문
20권 3호, pp. 357-366, 2006

관조도와 난류를 고려한 부정류와 정상류 해석의 적용 연구

Transient and Steady State Analysis considering Roughness and Reynolds Number in Water Distribution Systems

김현수 · 송용석 · 김상현*

Hyunsu Kim · Youngsuk Song · Sanghyun Kim*

부산대학교 환경공학과

(2005년 12월 30일 논문 접수; 2006년 5월 18일 최종 수정논문 채택)

Abstract

In order to compute pressure variation for a water distribution system, an expression for the friction factor as a function of Reynolds number and the relative roughness needs to be properly incorporated in computational algorithm. Considering Moody' s friction variation, Developed Unsteady Network Analyzer (UNA) has been modified to match computational results with EPANET 2.0. Substantial improvement can be found in the application of Improved UNA to both an hypothetical pipeline network and a real system located in Ulsan City. Random number generator is employed to represent the uncertainty of water use in real pipeline network. Comparisons of application between EPANET 2.0 and improved UNA 2.0 indicate advantages and potentials of this approach.

Key words: Transient analysis, Roughness, Water Distribution System
주제어: 천이류 해석, 조도, 상수관망

1. 서론

먹는 물 문제의 해결을 위해서는 양질의 수돗물 생산과 최적의 정수관리도 중요하지만 그에 못지않게 생산된 수돗물을 최종 소비자에게 안정적으로 완벽하게 공급하는 상수관로의 역할이 매우 중요하다. 그를 위해 상수도 내에서의 안정적인 상수도 공급, 상수관의 파열로 인한 오염물의 유입 방지, 누수로 인한 상수의 유출 방지 등 상수도의 적극적인 관리가 필수적이다. 이를 위해서는 상수 관에서의 정확한 유체의 수리학적 분석이 요구되나, 현실의 경우는 상수도 시설 기준에 맞춰 대략적으로 상수관망을 설계하여 관망 설계 시 효율적이지 못하거나 과도한 안전을 고려함으로써 경제적이지 못한 경우가 많다. 따라서 정확한 관망의 수리학적 분석을 통해 관망 설계 시 적용과 노후된 상수관들의 수리 및 보수에 대한 적용으로 급수시설의 최적화가 필요한 실정이다.

*Corresponding author Tel: +82-51-510-2479, FAX: +82-51-514-9574, E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr (Kim, S.H.)

지금까지 국내·외에서는 관망의 수리, 수질변화를 모의하여 상수관망을 효율적으로 유지, 관리하기 위하여 몇 가지 전산모의 체제가 개발되어 사용하고 있다(Wylie와 Streeter, 1993). 또한, 상업용 소프트웨어로는 열 유체 해석 도구인 Flowmaster, 관수로 Surge나 수충격 해석 도구인 LIQT, MWH회사의 H2OSurge나 H2ONET 등이 있다. 그러나 이들 시장에서 구입 가능한 프로그램은 원(Source) 프로그램의 변경이 불가하고, 고가의 가격과 개발 대상 환경의 상이함으로 고가의 예산으로 국내 관망을 해석하는 용도로는 활용할 수 있으나, 프로그램을 국내 관망에 맞추어서 변경하거나 추가 개발에 어려움이 있다. 대부분의 상수도 업무 종사자들이 활용하는 프로그램은 현재 선진 외국과 국내에서 널리 상용되는 프로그램 중 하나인 EPANET 2.0은 압력관망 내의 수리, 수질거동의 시간적인 시뮬레이션을 실행하는 프로그램이다(Rossman, 2000). 이 프로그램은 관로의 흐름을 정상류라는 가정에서 출발한다. 그러나 실제 상수관로는 정상류가 아닌 부정류 상태이기 때문에 관로 내에서 밸브의 개폐나 펌프의 작동 등에 따른 천이류를 구현하는 부분에는 한계가 있다. 부정류를 해석하기 위하여 개발된 UNA는 부정류 해석을 위한 방법론으로 가장 보편적으로 사용하는 특성선 방법(Method of Characteristics)을 이용하였다(Wylie와 Streeter, 1993; 김상현 외, 2003). 상업용 소프트웨어로는 열 유체 해석 도구인 Flowmaster, 관수로 Surge나 수충격 해석 도구인 LIQT, MWH회사의 H2OSurge나 H2ONET 등이 있다. 그러나 UNA를 포함한 통상적인 부정류해석 과정은 Darcy-Weisbach 마찰계수를 결정하는데 현장 관망의 흐름변화 상태를 적절히 기술하지 못하고 있다. 이는 구체적으로 EPANET 2.0 등의 해석모듈과 부정류 해석모듈사이의 정상상태 비교에서 수렴 수압의 불일치로 나타난다. 본 연구에서는 정상류를 가정한 EPANET 2.0과 부정류 해석프로그램인 UNA를 비교, 고찰하여 부정류 해석 모듈의 개발로 인한 정상류 해석의 한계를 극복하였다. 또한 UNA에서 관조도와 난류를 고려하여 마찰계수를 계산하여 실제 관망에서의 수압 등의 자료를 모의하는데 보다 실질적으로 개선되도록 개조하였다. 이와 같은 과정은 관망의 설치 및 보수 등에 적용성을 재고하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 부정류 해석

2.1. 부정류

관로내의 유체의 속도와 압력은 시간에 따라 변화한다. 순간적인 유량의 변화, 수리 구조물의 작동, 관의 파손에 의한 누수 같은 부정류 상태는 관망을 통해 음속으로 이동하는 상당한 압력파동을 야기한다. 시간이 흐름에 따라, 압력 파는 관의 마찰 때문에 감소하다가, 최종에는 사라져 다른 정상상태로 이어진다. 이와 같이 한 정상상태에서 다른 정상상태로 변하는 현상을 수리학적 천이(hydraulic transient)라 한다. 천이상태에 노출된 관망은 정기적인 압력변화를 고려할 뿐만 아니라, 예기치 않은 사고도 고려하여 설계 되어져야 한다. 정상상태분석에 의한 관망설계보다는 천이상태를 고려하는 분석이 현실적이다.

2.2. UNA 의 개발

천이문제를 해석하는 방법 중에는, 특성선 방법(MOC)이 계산상의 정확도와 편리성으로 가장 유용하게 사용되어진다(Wylie와 Streeter, 1993). 특성선 방법은 운동량방정식과 연속방정식의 편미분 방정식을 상미분 방정식으로 변형하는 방법으로 계산진행시간이 같아야 하는 단점이 있지만, 편미분 방정식을 정확하고 편리하게 해석할 수 있는 특성을 가지고 있다. 이 특성선 방법을 이용하여 관망내의 부정류를 해석하는 프로그램인 UNA를 개발하였다.

관망 시스템은 여러 가지 관로, 저수지, 펌프 등의 관 부속물의 수리요소가 복합된 네트워크의 형태를 띤다. 관로를 해석함에 있어 이러한 관 부속물에 대한 해석은 당연한 것으로 부속물을 위한 경계조건에 대한 처리부분을 구현하였으며, **Fig. 1**에서처럼 이를 입력데이터의 경계조건에 따라 주어진 부프로그램이 활용된다. 이와 같은 부프로그램의 연속적인 수행을 통한 시간 간격의 진행은 사용자가 원하는 시간제한만큼 반복 계산을 수행하고 결과를 출력한다(김상현 외, 2003).

2.3. Moody 선도 마찰항

전통적으로 수충격 해석에 정상상태의 마찰항이 많이 사용되어 왔는데 관련 연구 결과들에 의하면 초

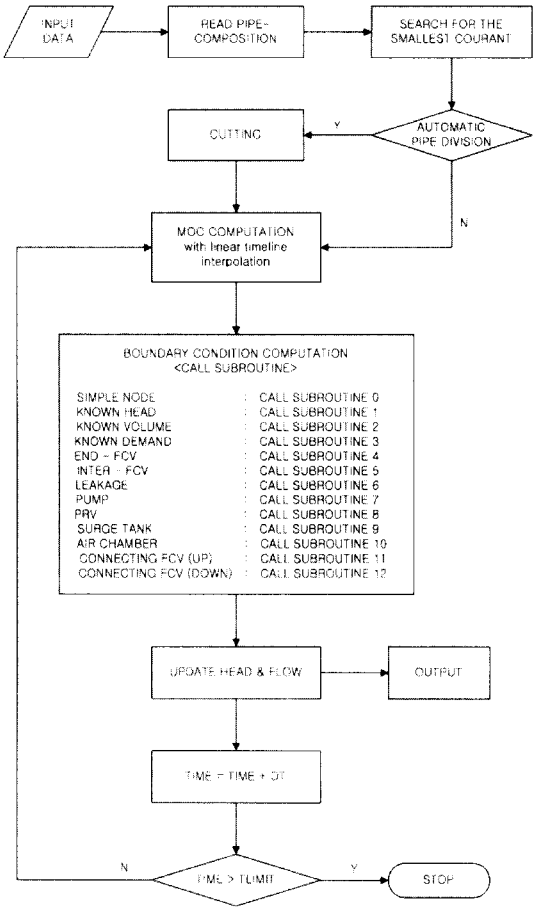

Fig 1. Flowchart of unsteady flow analysis with boundary condition.

기 수두 상승이 실측 데이터를 적절히 재현한다 하더라도 시간이 흐르면 심각한 불일치를 나타낸다. 관망내 유속에 따른 관 벽의 거친 정도에 대한 고려는 부정류 해석에 있어서 매우 중요한 사항이다. 따라서 마찰항(friction factor), f 역시 유속에 따라 변하는 요소이다. 그러나 기존 수격압 해석 프로그램에서는 관의 조도와 난류 등을 고려하지 않고 f를 입력 데이터로 설정하였다. 이는 모의 시뮬레이션에서도 첫 번째 사이클의 압력 피크가 과대하게 측정되는 결과를 도출하였다. 따라서 본 연구에서는 각관의 상대조도와 Reynolds수(Re)를 고려하여 Darcy-Weisbach 마찰항을 적용하는 방법을 모색하였다. 여기서 ε는 등가조도, D는 관경을 의미한다.

Re수가 2000 이하인 층류일 때는 식 (1)을 적용하였다.

$$f = \frac{64\mu}{\rho V D} = \frac{64}{\mathrm{Re}} \tag{1}$$

ρ는 유체의 밀도, μ는 점성계수, V는 유속을 나타낸다. 난류 유동일 경우는 colebrook 식을 적용하였다. 1935년에 L. Prandtl은 매끈한 관에서의 난류에 대해 아래와 같은 마찰계수의 식 (2)을 추론하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0\log(\mathrm{Re}\sqrt{f}) - 0.8 \tag{2}$$

Von Karman은 완전난류(매우 거친 관)에 대한 마찰계수의 관계식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0\log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right) \tag{3}$$

1939년에 Colebrook는 매끈하고 거친 두 개의 식을 조합한 공식을 제시하였다(Colebrook, 1939).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0\log\left(\frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.7D}\right) \tag{4}$$

Prandtl 식을 양해법으로 다시 간략화 하면

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.8\log\left(\frac{\mathrm{Re}}{6.9}\right) \tag{5}$$

식 (5)는 식 (3)과 결합하면 난류 흐름에서 마찰항에 대한 다음과 같은 일반적인 공식 (6)이 도출된다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.8\log\left[\frac{6.9}{\mathrm{Re}} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right)^{1.11}\right] \tag{6}$$

위 식은 양해법으로 쉽게 해를 구할 수 있고 매끄러운 관과 거친 관에 대한 제한을 감소시킬 수 있는 등의 이유로 가장 적절하다고 평가 받아왔다(Haaland, 1981).

2.4. Moody 선도 마찰항을 고려한 UNA 의 개선

기존의 UNA는 각 관의 마찰계수를 처음부터 지정하도록 되어 있었다. 하지만 위의 연구내용에서와 같이 관의 조도계수와 Reynolds 수에 따라 마찰계수는 변화한다. 따라서 이를 프로그램에 적용하여 부정류 해석모듈인 UNA를 개선시켰다. **Fig. 2**와 같이 UNA 프로그램에 Moody 선도 마찰항을 도입하였다. 관망

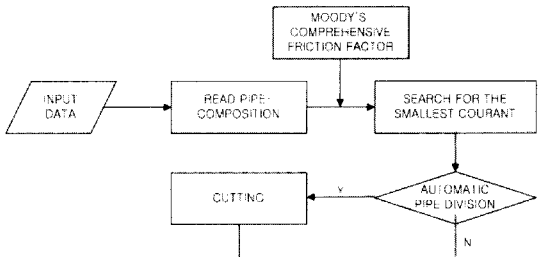

Fig. 2. Importation Moody's friction factor in UNA.

의 주요재원을 입력한 후 식 (1)과 식 (6)에 의거하여 마찰계수를 계산하여 부정류 현상의 해석을 개선하였다.

3. EPANET 2.0

EPANET 2.0은 압력 관망에서 수리, 수질 거동의 시간적인 시뮬레이션을 실행하는 컴퓨터 프로그램으로 관망의 물리적 특성인 관경, 길이, 조도계수, 수요량을 이용하여 관망의 각 절점별, 시간별 수리학적 특성인 유량, 유속, 수압, 손실수두와 수질변화를 시뮬레이션 할 수 있다(Rossman, 2000). EPANET 2.0 모델의 입력 자료는 관망을 이루는 물리적 구성요소인 링크(관, 펌프, 밸브), 노드(정션, 저장탱크, 배수지)와 상수관로 시스템의 동작에 관여하는 비물리적인 구성요소인 운전곡선, 운전패턴, 제어기준 등으로 이루어져 있다. 이러한 입력 자료를 이용하여 초기의 수리특성 조건에 따라 관로의 정상 상태를 가정하여 초기의 수리조건을 계산한다. 이 초기 값에서 시간을 증가시키며 이에 따른 수리상황, 제어, 운전주기를 적용하여 시간에 따른 수리적 조건을 계산한다. 더욱이 여러 가지 분석을 통하여 샘플링 계획의 설계, 수리학적 모델의 검정, 잔류 염소 해석, 물소비자의 폭로평가 등 다양한 측면으로 응용이 가능하다.

4. 실험 및 결과

4.1. 연구대상지역

연구대상지역은 울산시 남구 달동 및 삼산동의 일부분을 지정하였다. 급수구역 앞에 왕복 8차선 도로가 있고, 그 도로를 따라 대형 상업건물들이 줄지어 서 있다. 또한 반대편에 고속시외버스 터미널과 롯데백화점 등이 접해 있는 신시가지에 속해 있는 구역이 있다. 구역안쪽으로는 중소형 빌딩과 소규모 주거단지가 혼재해 있으며, 소규모 공원이 존재한다(상하수도협회, 토지공사, 2004). 연구대상구역의 급수 구역도를 다음의 **Fig. 3**에 나타내었다.

Fig. 4는 연구대상지역의 관망 CAD파일을 사용하여 EPANET 2.0을 통해 관망도를 모식화한 것이다. 관의 총 연장길이는 6245m 로 1개의 Reservoir, 112개의 Node, 138개의 Pipe으로 구성되어졌다. Reservoir는 울산광역시 야음동에 위치한 야음배수지로서 수두값을 50m 로 설정하였다. 배수관은 관경을 100mm 로 하였고, 각 수전으로 들어가는 급수관의 경우는 30mm 로 정하였다. 이는 배수관과 급수관의 평균관경과 급수관의 통합 등의 변수를 고려해 가장 현실적으로 지정한 것이다.

Table 1는 각 수전으로 들어가는 급수관에서의 상수사용량을 나타낸 것이다. 이는 울산광역시 상수도시설관리사업소의 2004년 2월 검침량 자료를 토대로 하였다.

4.2. 정상상태에서의 시뮬레이션

위와 같은 조건으로 UNA 2.0과 EPANET 2.0을 각각 구동하였고 비교를 위해 14번 노드의 수두변화를 비교하였다. EPANET 2.0은 초기부터 같은 수두값을 보인 반면 UNA 2.0에서는 부정류 해석을 통해 초기 진동을 나타내었다. 정상류 해석을 가정한 EPANET 2.0의 경우 유출노드에서의 유량이 같기 때문에 모의시간동안 일정한 수두값을 나타내었다. 하지만 실제 관망은 유량의 변화가 있을 때 초기 수압진동이 필연적으로 나타난다. UNA 2.0의 경우 부정류 해석을 통해 초기 정상상태로 수렴하기 까지 약 1분간의 시간이 소요되었다. UNA 2.0의 구동은 마찰항을 지정하였던 기존의 UNA와 Moody 마찰항을 도입한 개선된 UNA(Moody)를 각각 구동하였다. **Fig. 5**에서는 14번 노드의 수압변화를 EPANET 2.0과 마찰항을 지정한 UNA, 그리고 Moody 마찰항을 도입한 개선된 UNA에 따라 나타내었다. 모의를 한 결과 EPANET 2.0의 수두값은 49.24m로 계산되었으며, 기존의 UNA의 경우 48.9415m로 계산되었고, 개선된 UNA의 경우는 49.2401m로 계산되었다. 또한 일반적인 주철관의 경우 관의 마찰항이 0.04이나 마찰계수 값의 변화에 따

상하수도학회지. 논문
20권 3호, pp. 357-366, 2006

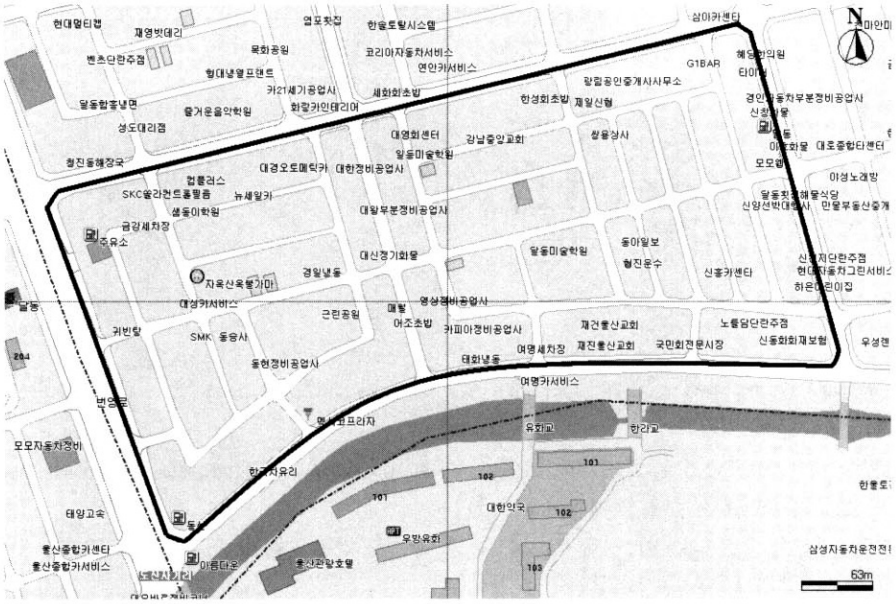

Fig. 3. Water supply map of Study area.

Table 1. Demand of Water supply node

Node No.	Demand (m^3/d)	Node No.	Demand (m^3/d)	Node No.	Demand (m^3/d)
83	90	95	16	107	20
84	30	96	10	108	44
85	30	97	14	109	15
86	25	98	10	110	27
87	40	99	13	111	51
88	2	100	10	112	20
89	7	101	10	113	38
90	6	102	10	114	30
91	0	103	15	115	30
92	10	104	30	116	50
93	10	105	30		
94	10	106	30		

출처: 울산시 2004년 2월 상수도 검침량, 상수도시설관리사업소

른 민감도를 비교해 보기 위해 마찰항을 0.02로 가정하였을 경우는 49.4708m로 계산되었다. 기존의 UNA의 경우는 EPANET 2.0보다 약 0.3m 정도 낮은 값을 보였으며, 마찰항을 0.02로 가정했을 경우는 EPANET 2.0보다 약 0.23m의 높은 값을 보였다. 하지만 관의 조도와 Reynolds 수에 따른 마찰계수를 도입한 개선된 UNA에서는 EPANET 2.0과 거의 일치하는 49.2401m로 수렴하였다. 이는 부정류 해석프로그램에서의 Moody 선도 마찰항 도입의 필요성을 증명한다.

Fig. 6은 대상연구지역의 모든 노드에서 EPANET 2.0과 마찰항을 지정한 UNA, 그리고 Moody 선도 마찰항을 고려한 UNA 2.0에서의 수두값을 비교한 것이다. 기존의 UNA의 경우 모든 노드에서 EPANET 2.0의 경우보다 낮은 수두값을 나타낸다. 이는 마찰항을 지정한 UNA 2.0의 경우 마찰계수로 지정한 0.04가 실제 관망의 마찰계수보다 전체적으로 높다는 것을 보인다. 하지만 Moody선도 마찰항을 고려한

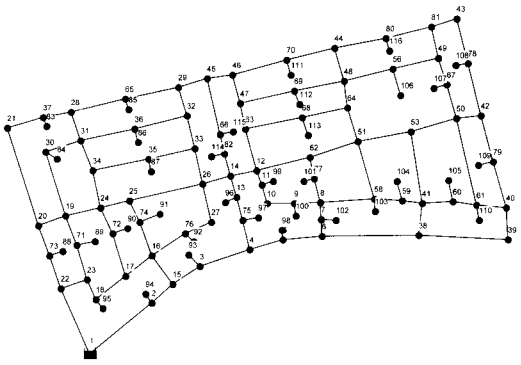

Fig. 4. Pipe network of Dal-dong, Ulsan.

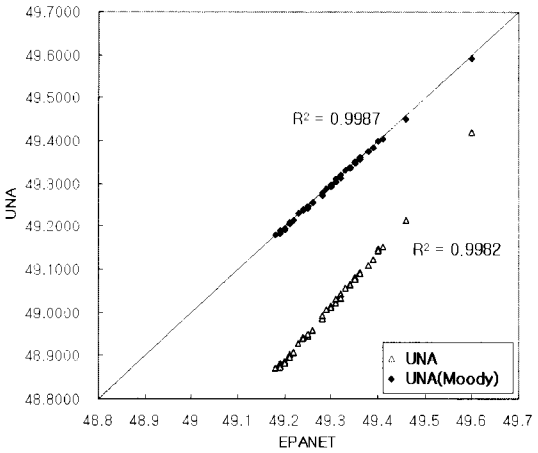

Fig. 6. Comparison of EPANET with UNA in entire nodes.

UNA 2.0에서는 EPANET 2.0과 거의 일치하였다. 이는 각 관의 조도와 Reynolds 수를 고려하여 Moody 선도 마찰항을 계산한 UNA의 정당성을 보여준다. 부정류 해석 프로그램인 UNA에서 마찰계수를 계산함으로서 정확한 관망 해석을 가능하게 하였다.

4.3. 시간에 따른 유량의 변화 시 수두 변화

실제 관망에서의 상수 사용은 시간에 따른 변화가 존재한다. 앞의 수치 시뮬레이션에 사용된 각 노드에서의 유출량은 대상지역의 일일평균 상수사용량을 토대로 수치 시뮬레이션을 한 것이다. 하지만 실제 상수 사용은 시간에 따라 매우 급격한 변화를 나타낸다. 따라서 이번 수치 시뮬레이션에서는 유출량의 변화 시 노드에서의 수두변화를 나타내기 위해 연구대상지역의 유출노드에서 유출량을 변화시켰다. 83번 노드부터 116번 노드까지 총 34개의 관말 노드에서 유출이 되었고 유출량은 상수도 시설관리 사업소의 상수도 검침량을 바탕으로 변화시켰다.

4.3.1. 완폐에 의한 시뮬레이션

울산광역시 남구 달동 지역의 일일평균 상수도 사용량을 평균보다 5배로 배출량을 늘려 모의 시뮬레이션을 수행하였다. 5분간의 모의 시뮬레이션 중 총 34개의 유출노드에서 같은 조건으로 유출량을 늘렸다. 0초부터 60초까지는 평균 유량을 유출시켰고, 60 초에서 유출량을 늘이기 시작해 120초에서 평균 유량의 5배를 유출시켰다. 그리고 다시 유출량을 줄여 180초에서 평균 유량을 유출시켰다. 그리고 300초까지 유량을 일정하게 유지하였다. 먼저 EPANET 2.0을 사용하여 모의하였고, 기존의 UNA 2.0 및 관조도와 Reynolds 수를 고려한 Moody 선도 마찰항을 도입한 UNA 2.0을 사용하여 모의 시뮬레이션을 실행하였

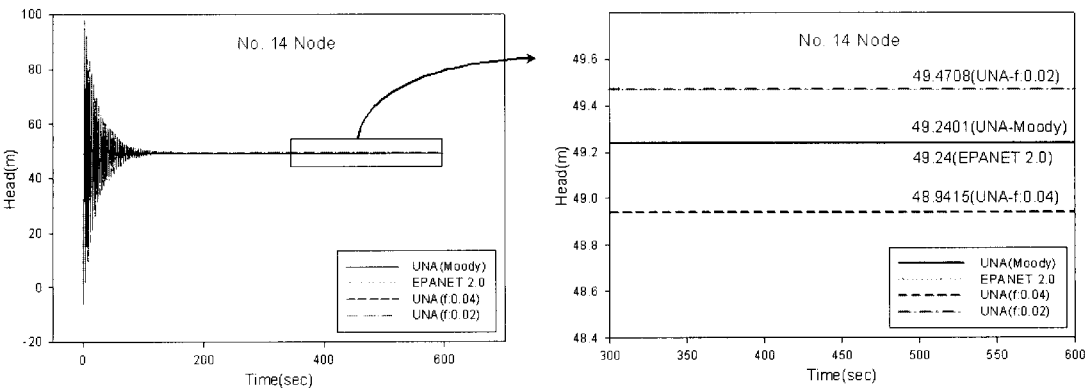

Fig. 5. Comparison of EPANET with UNA in 14 node.

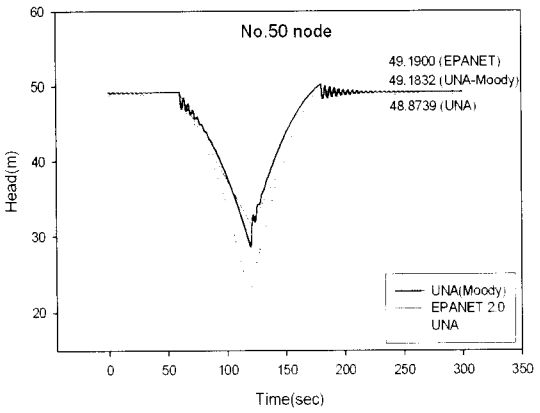

Fig. 7. Head of 50 node in slow change of demand.

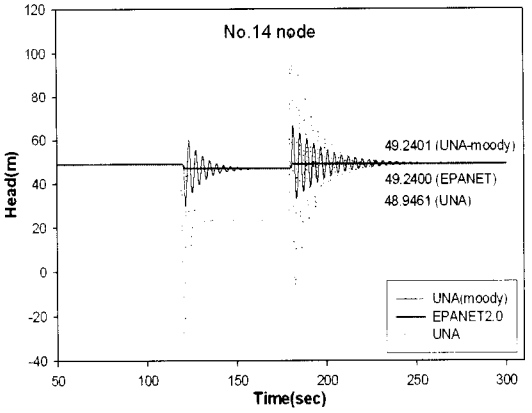

Fig. 8. Head of 14 node in fast change of demand.

다. **Fig. 7**은 50번 노드에서의 수두 변화를 나타낸 것이다.

Moody 마찰항을 도입한 UNA는 초기수두값과 180초 이후의 수두값은 49.1832m로 수렴하였고, EPANET 2.0 역시 49.19m로 같은 결과를 보인 반면, 기존의 UNA는 48.8739m로 약 0.3m의 수두차를 보였다. UNA의 경우 부정류 해석을 하였기 때문에 유량의 변화 시점에서 수두의 진동이 나타났다. 60초 이후 시점과 180초 이후 시점에서 일정한 수두의 진동을 볼 수 있다. 모든 유출 노드에서 유출량이 5배가 되는 시점인 120초 구간에서는 수두의 감소가 나타났다. EPANET 2.0의 경우 32.77m로 수두의 감소가 나타났으나, UNA 2.0의 경우 유출량의 변화 때문에 수두가 더 낮아지는 것을 볼 수 있다.

4.3.2. 급폐에 의한 시뮬레이션

이번에는 1초 만에 유량의 변화를 일으키는 모의 시뮬레이션을 실행하였다. 0초부터 120초까지는 상수도 평균 유량을 유출시켰고, 121초부터 180초까지는 평균 유량의 2배를 유출시켰다. 그리고 181초부터 300초까지는 다시 평균 유량을 유출시켰다.

Fig. 8에서 보면 상수도 일일평균량을 유출시킨 0초에서 120초 구간, 180초에서 300초 구간의 수두 값은 UNA 2.0의 경우 49.2401m로 나타났고, EPANET 2.0의 경우 49.24m로 나타났으며, 기존의 UNA는 약 0.3m의 차이를 나타내었다. 그러나 유량이 급격하게 변한 120초와 180초에서는 유량변화 이후 급격한 수압의 진동을 나타내었다. 평균유량의 2배라는 적은 유량으로도 아주 많은 수격압을 나타내었다. 하지만 실제 관망에서는 이러한 모든 노드에서의 수압의 일시적인 변화는 사실상 불가능하고 각 상수의 사용은 임의성으로 움직이기 때문에 시뮬레이션은 가상적인 경우에 해당된다.

4.4. 배출량의 임의성 부여

실제 상수관망에서는 상수의 사용이 아주 임의적이기 때문에 그에 맞는 수치 시뮬레이션이 필요하다. 따라서 배출노드에서의 배출시간에 임의성을 부여하여 수치 시뮬레이션을 실시하였다. 대상관망내의 총 34개의 배출노드에서 배출량을 1시간의 모의시간동안 임의적으로 변동시켰다. 시뮬레이션시간 동안 상수의 사용횟수를 5에서 10회에 걸쳐 난수를 발생시켰다. 그리고 물 사용의 시작시간은 1분에서 60분까지 1분단위로 난수를 발생시켰고, 사용시간은 1분에서 10분으로 난수를 발생시켜 실제 상수 사용 패턴과 근접한 시뮬레이션을 실시하였다. 이와 같이 난수를 발생시키기 위해 Fortran을 사용해서 난수발생 프로그램을 만들어 실행시켰다(Press 외, 1994).

Fig. 9는 34개의 노드에서 상수사용의 시작시간에 대해 난수를 발생시킨 후 그 결과를 나타낸 것이다. 그리고 **Fig. 10**은 상수사용의 지속시간을 1분에서 10분간 난수발생을 한 후 그 결과를 나타낸 것이다.

시뮬레이션 관망에서의 모든 유출노드에서 임의성을 도입하여 UNA 2.0과 EPANET 2.0을 각각 구동하였다. 시뮬레이션의 모의시간은 1시간으로 총 34개의 유출노드에서 임의적으로 유량을 변화시켜 실제

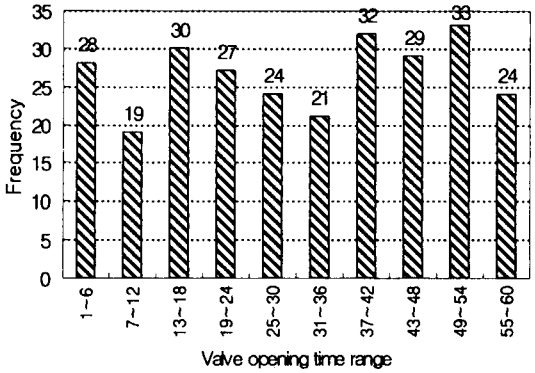

Fig. 9. Random number generation of the opening time.

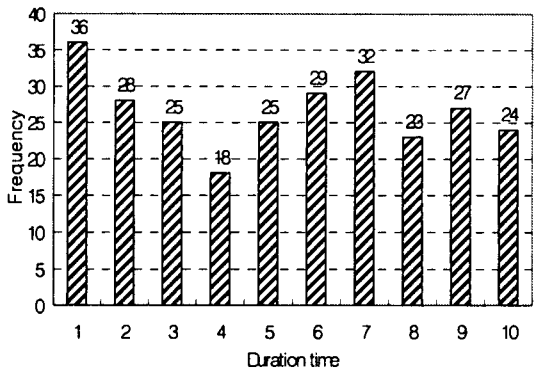

Fig. 10. Random number generation of the duration time.

관망과 유사한 시뮬레이션을 실시하였다. 1시간의 모의시간동안 수압변화를 UNA 2.0와 EPANET 2.0의 비교를 통해 분석하였다. 관망의 임의의 노드 2번, 14번, 50번 노드에서의 수두를 두 프로그램을 통해 비교하였다.

Fig. 11은 1시간 동안 상수의 사용에 임의성을 도입한 후 2번, 14번, 50번 노드에서의 수두변화를 나타낸 것이다. **Fig. 11(a)**는 각 유출노드에서 유출특성을 임의적으로 실행하였지만 유량의 변화시간 즉 가정에서의 밸브의 작동시간은 1분으로 동일하게 실시한 14번 노드에서의 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 밸브의 느린 작동시간을 통한 부정류 해석은 약간의 수격압의 발생을 제외하고 정상류 해석과 거의 유사한 결과를 나타내었다. 밸브의 느린 작동으로 적은 수격압이 발생하여 정상 분석과 유사함을 보였다. **Fig. 11(b)**는 밸브의 작동시간을 3초로 하여 2번 노드에서 모의를 실시한 결과이고, **Fig. 11(c)**는 밸브의 작동시간을 1초로 짧게 하여 50번 노드에서 모의를 실시한 결과를 나타내고 있다. 그 결과 1분간에 걸쳐 변화한 경우에서 보다 훨씬 큰 수격압을 보였다. 밸브의 작동시간을 3초로 한 경우는 최대 3m 정도의 수격압을 차이를 보였다. 3초보다 더 짧은 1초의 작동시간을 고려한 시뮬레이션에서는 최대 20m로 더 큰 수격압을 나타내었다. 위 시뮬레이션에서 가정에서의 밸브의 작동시간을 1분(a) 그리고 3초(b)와 1초(c)로 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 하지만 밸브의 작동시간 역시 실제 가정에서 사용할 때에는 매우 임의적이다. 그래서 밸브의 작동시간 역시 난수발생을 통해 임의적으로 설정하였다. 밸브를 열고 닫는 시간을 0.5초에서 5초 사이에 0.5초 단위로 난수를 발생하였다. 그리고 그 결과를 프로그램을 구동하는데 사용하였다. 그 결과를 **Fig. 11(d)**에 나타내었다. 모든 요소들을 임의적으로 설정하였기 때문에 실제 관망에서의 흐름과 유사하다고 판단된다. 그 결과 14번 노드에서 20m 정도의 수격압 차이를 보인다.

위의 시뮬레이션 결과에서처럼 상수관망의 수리해석 모델로 많이 사용되고 있는 EPANET 2.0과 부정류 해석모듈인 UNA 2.0는 수압의 변화에서 많은 차이점을 보인다. EPANET 2.0의 경우 유출량의 변화에 따라 수두의 값이 변하지만 밸브의 작동시간에 따른 값의 변화는 전혀 발견되지 않는다. 또 유출량이 변화하였을 때 나타나는 수격현상을 전혀 나타내지 못하고 있다. 하지만 부정류 해석을 기반으로 하는 UNA 2.0의 경우는 수격현상을 감지하며, 밸브의 작동시간에 따라 수격현상의 진동 폭이 변하는 것을 나타낼 수 있었다. 밸브의 작동시간이 짧아짐에 따라 더 큰 수격압을 탐지하였고, 밸브의 작동시간에 임의성을 도입하여 실제관망에서 일어나는 수격압의 정도를 알 수 있었다. 따라서 모의 결과 나타난 수격압을 통해 정확한 상수관망의 설계 및 보수가 가능하도록 하였다.

5. 결론

1. 본 연구에서는 상수관망에서 유체의 흐름에 대한 부정류 해석을 통해 수격현상을 해석하는 프로그램의 개선을 시도하였다. 현재 관망에서의 수격방지 또는 완화 시설물의 설계 반영은 설계자의 주관적인

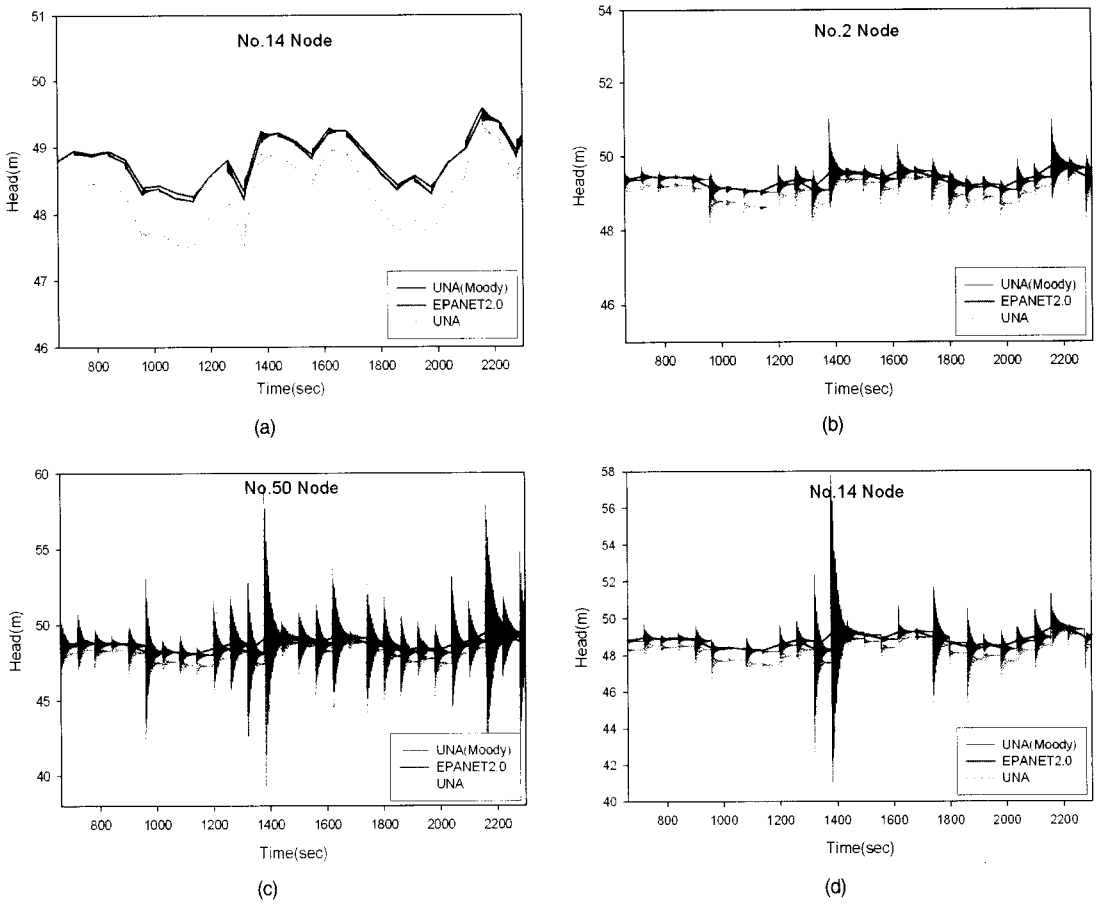

Fig. 11. Head of 14 Node.

판단과 대부분 시행 착오법에 의존하고 있으며, 그리하여 최종 결정된 시설물도 상수관망의 최적화라 볼 수 없다. 따라서 관망 내에서 수격현상을 정확히 모의할 수 있는 부정류 해석 모델을 제시하고, USEPA에서 개발한 EPANET 2.0과 비교 분석하여 각 관의 조도계수와 Reynolds 수를 고려한 마찰계수를 계산함으로써 기존의 부정류 해석 프로그램(UNA)이 EPANET 2.0과도 정상상태의 모의 수렴결과를 일치시킬 수 있는 모듈을 구현하였다. 또한 정확한 수격현상의 수압범위를 찾음으로써 실제 관망의 설계 시 객관적 지표를 구할 수 있는 기능을 제공하였다.

2. 실제 관망인 울산시 남구 일부지역을 대상으로 시뮬레이션을 하여, EPANET 2.0과 기존의 UNA, 그리고 Moody 선도 마찰항을 도입한 개선된 UNA 2.0를 각각 비교 분석하였다. 그 결과 개선된 UNA 2.0의 결과와 EPANET 2.0의 결과가 일치함을 보였다. 그리하여 관조도와 Reynolds 수에 따른 마찰계수를 부정류 해석모듈에 도입함으로써 UNA를 개선하였다.

3. 실제 관망의 흐름을 고려하여 시간에 따른 유량을 변화시켜 개선된 UNA 2.0와 EPANET 2.0을 비교 분석하였다. 정상류를 가정하는 EPANET 2.0과는 다르게 부정류 해석 모듈인 UNA 2.0의 경우 유량의 변화시 수격압이 구현되었다. 이는 상수관망을 예측하는데 실용적인 자료가 되며, 수격압을 고려하여 관망을 설계하고 그 재질을 정한다면 관망의 파손, 누수 등을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또 실제 관망에서의 상수 사용과 근접한 시뮬레이션을 위해 난수발생 프로그램을 사용해 임의성을 도입하였다. 그리하여 상수의 사용에 따른 여러 변수들을 다양하게 임

의적으로 변화시켜 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 실제 관망에서 부정류 해석을 통한 수격압의 범위를 파악함으로써 관망의 설계시 구체적인 수압범위를 결정하는데 지표가 될 수 있도록 하였다.

참고문헌

1. 김상현, 김봉기, 조임영, 이현동 (2003) 관로시스템의 천이류 해석에 의한 부정류 마찰항 고려방법에 대한 비교 연구, *대한환경공학회지*, Vol. **25**, Issue. 5, pp. 602-608
2. 한국토지공사 (2004) *주택단지내 적정 상수량 산정에 관한 연구*, 상하수도협회.
3. *울산시 2004년 2월 상수도 검침량* (2004) 상수도시설관리사업소.
4. Haaland S.E. (1981) Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow. *Journal of Fluids Engineering. ASME*, vol **105**, pp. 89-90.
5. Rossman L.A. (2000) "EPANET2 Users Manual", EPA United States Environmental Protection Agency.
6. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (1994), Numerical Recipes in Fortran, 2nd Edition, Cambridge University Press, p. 266-319.
7. Colebrook, C.F., (1939), Turbulent Flow in Pipes, With Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws. *J. Inst. Civ. Eng.*, vol. **11**, pp. 133-156.
8. Wylie. E. B., Streeter V. L. (1993) Fluid transients in systems. Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J.