

## 상수관망시스템에서의 장기간 모의를 위한 동역학적 모형의 개발

### The Development of Dynamic Model for Long-Term Simulation in Water Distribution Systems

박재홍\*

Park, Jae Hong

---

#### Abstract

In this study, a long-term unsteady simulation model has been developed using rigid water column theory which is more accurate than Extended-period model and more efficient comparing with water-hammer simulation model. The developed model is applied to 24-hours unsteady simulation considering daily water-demand and water-hammer analysis caused by closing a valve. For the case of 24-hours daily simulation, the pressure of each node decreases as the water demand increase, and when the water demand decrease, the pressure increases. During the simulation, the amplitudes of flow and pressure variation are different in each node and the pattern of flow variation as well as water demand is quite different than that of KYPIPE2. Such discrepancy necessitates the development of unsteady flow analysis model in water distribution network system.

When the model is applied to water-hammer analysis, the pressure and flow variation occurred simultaneously through the entire network system by neglecting the compressibility of water. Although water-hammer model shows the lag of travel time due to fluid elasticity, in the aspect of pressure and flow fluctuation, the trend of overall variation and quantity of the result are similar to that of water-hammer model. This model is expected for the analysis of gradual long-term unsteady flow variations providing computational accuracy and efficiency as well as identifying pollutant dispersion, pressure control, leakage reduction corresponding to flow-demand pattern, and management of long-term pipeline network systems related with flowrate and pressure variation in pipeline network systems

**keywords** : unsteady flow, pipe network, rigid water column theory, long-term analysis

---

#### 요 지

본 연구에서는 점진적인 유량 및 압력이 변화하는 상수관망에서 Rigid Water Column Theory를 이용하여 정상모형의 확장기간 모의해석보다 정확하고 수충격 해석보다는 계산비용 및 노력 측면에서 효율적으로 장기간 부정류 해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 실제관망에 대하여 24 시간 일 수요량을 고려한 부정류 해석 및 밸브폐쇄로 인한 수충격해석 모의에 적용하였고 해석 결과는 다음과 같다. 24 시간 일변화 모의의 경우에 수요량이 증가할 경우 모든 관로에서 압력감소가 나타났으며 수요량이 감소할 경우 압력증가가 나타났다. 그리고 일 수요량의 변화에 따라 나타난 절점에서의 유량 및 압력 변화폭은 각 절점마다 다르고 수요량과 유량의 변화양상이 반대로 나타나는 관로도 발생하고 있으며 KYPIPE2의 결과와 본 모형의 유량 및 압력차이도 발생하고 있어 상수관망의 동역

---

\* 세명대학교 토목공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Semyung Univ. Jecheon, 390-711 Korea  
(e-mail: jhpark@semyung.ac.kr)

학적 해석의 필요성이 대두되었다.

밸브폐쇄로 인한 수충격모의에 본 모형이 적용되었을 때 본 모형은 유체의 압축성을 무시함으로 인해 밸브 완전 폐쇄와 동시에 압력과 유량의 변화가 전 관망에 발생하였고 수충격모형은 유체의 탄성으로 인해 발생된 압력과의 도달시간이 필요함으로 압력과 유량변화가 지체되어 나타났으나 전체적인 변화양상 및 변화폭의 크기 등은 유사한 경향을 나타내어 본 모형의 적용성을 입증하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 장기간 점진적인 관로 부정류를 비교적 정확하게 해석할 수 있을 것으로 판단되며 이를 이용하여 관로내 오염물의 확산해석, 수요량을 고려한 절점에서의 압력제어 및 누수저감, 장기간 관로내의 유량 및 압력 변화를 고려한 관망관리 등의 분야에서 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대되었다.

**핵심용어** : 부정류, 상수관망, rigid water column theory, 장기간 유량해석

## 1. 서 론

상수관로 시스템에서의 흐름조건은 년중 혹은 매일, 매시 항상 변화하지만 이러한 변화는 일반적으로 완만하다. 시스템 내 흐름의 전형적인 변화원인은 겨울철의 적은 수요와 여름의 많은 물의 수요로 인해 변화하게 된다. 겨울철에 관로 내 비교적 느린 유속은 시스템 내부에서의 과다압력을 막기 위해 설치된 압력저감 밸브에 의해 과대한 압력 감쇠를 일으키기도 한다. 여름철 잔디의 물주기, 샤워 등으로 인해 상수 수요가 증가하는 경우, 빠른 흐름유속과 이것으로 인한 마찰 손실은 상수공급 부담을 가중 시키고 있다. 흐름조건은 단지 계절 혹은 월, 일뿐만 아니라 시간적으로도 변화하게 된다. 예를 들어 사람들이 집에서 쉬고 공장은 정지한 야간의 물 수요는 크게 감소할 것이며 낮 동안에는 반대로 물의 수요는 증가할 것이다. 이처럼 조금씩 변화하는 흐름해석을 위해 기존의 급격한 유량 및 압력 변화 해석에 사용되는 수충격 해석을 도입하는 것은 사용자의 노력과 비용 측면에서 비효율적이다. 또 정상상태 해석 모형에서는 비록 준부정류 모의기능이 포함되어 있다 할지라도 정상류 모형은 흐름의 관성력을 나타내지 못하기 때문에 일정한 기간 예를 들어 하루 혹은 48 시간동안 시스템에서의 흐름과 압력 변동을 정확하게 나타낼 수 없다. 이와 같이 부정류 흐름에서 흐름의 변동성이 점진적인 경우 RWCT(rigid water column theory, 이하 RWCT)해석이 도입될 수 있다(Wylie et al., 1993; Chaudhry, 1987). 본 연구에서는 점진적인 변화가 발생하는 상수관망에서 RWCT 해석 기법을 이용하여 정상모형의 확장기간 모의해석보다 정확하고 수충격 해석보다는 효율적으로 장기간의 부정류 해석을 실시할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하고자 하였다.

지금까지 상수관망의 동역학적 해석은 주로 수충격 해석에 집중되어왔다. 그러나 상수관망에서 발생하는

수충격 현상은 짧은 시간에 발생되고 정상상태로 혹은 장시간의 점진적인 비정상 상태로 변화하게 된다. 이에 연구자들은 장기간의 상수관망 부정류 해석기법의 필요성을 깨닫고 이러한 부정류 해석을 통하여 관망 수질해석 및 장기간 관망관리 등과 같은 분야에 적용하고자 하였다

점변하는 관망유량의 해석기법은 Wylie and Streeter(1993)가 Rigid Column Water Theory 와 유사한 Lumped Method을 이용하여 관망에 대한 연립 상미분방정식을 구성하여 해석하는 기법을 소개하였으며 Holloway(1985)는 RWCT 기법을 이용하여 폐합 상수관망에 대해 적용하여 이를 정상류 및 water hammer 모형과 비교하였다. Axworthy and Karney(2000)는 상수관망에서 밸브폐쇄 영향을 해석하기 위해 밸브폐쇄 알고리즘을 제시하였고 이를 이용한 점변류 해석모형을 수충격 모형과 비교하여 그래프로 제시하였다.

특히 상수관망의 비정상 수질해석을 위해서 Islam and Chaudhry(1998)는 관망의 오염물질의 전파양상을 규명하기 위해 동역학적 관망해석결과를 이용하여 오염물질의 농도를 EPANET의 확장기간 모의결과와 비교하여 결과를 제시하였다. 또한 Al-Omari and Chaudhry(2001)는 관망내의 오염물질의 확산계수를 결정하기 위해 오염물질 확산에 대한 역산기법을 도입하여 염소의 확산계수를 동역학적 관망모형을 이용하였다.

최근, 국내의 상수관망 분야의 연구는 상수관망의 최적개량 계획 수립을 위한 연구가 이루어졌으며 관망시스템 해석을 위한 모형개발 연구는 거의 이루어지지 않고 있다(백천우 등 2006). 관망해석을 위한 모형개발을 위해서는 박재홍 등(2001)이 외부 유출입 유량을 효율적으로 해석할 수 있는 식을 개발하여 이를 적용한 수충격 해석모형을 개발하였고 한건연 등(2002)은 정상상태에서 여러 배수지에서의 수질이 다를 경우 배수지의 영향들을 고려하여 절점에서의 수질을 해석할 수 있는

기법을 개발하였다.

이와 같이 외국에서는 비정상상태에서의 흐름해석 기법의 개발을 완료하고 이를 토대로 비정상 수질해석 및 역산해석을 통한 오염물질 확산계수 산정기법 개발 등의 분야에 연구가 이루어지고 있으나 국내의 연구는 부정류 흐름해석과 수질해석분야에서는 기초단계에 머물러 있는 실정이다. 본 연구에서는 상수관망에서 점진적으로 변화하는 비정상상태 흐름을 해석하기 위한 계산 알고리즘을 확보하고 이를 해석하는 프로그램을 개발하여 실제 관망에 적용함으로써 모형의 활용성을 입증하고자 한다. 또한 개발된 모형을 이용하여 장기간의 상수관망 해석 및 관리 모형의 개발, 일수요량 변화에 따른 압력조절 밸브를 이용한 배수지의 압력조절, 동역학적 상수관망의 수질해석 분야에 개발된 모형을 이용하고자 하였다.

## 2. Rigid Water Column Theory

일반적으로 상수관망의 비정상상태라고 알려진 과도수리현상 혹은 수충격 현상을 해석하기 위해서 특성선법이 정확도 및 효율성 측면에서 많이 이용되어진다. 그러나 과도수리현상은 단시간의 비교적 단순한 관망에 적용하여 급격한 유량 및 압력변화해석에 적용되어진다. 대부분의 경우 상수관망의 유량의 변화는 점진적으로 항상 이루어지고 있다. 이러한 점진적인 변화의 해석을 위해 특성선법의 도입은 계산비용 및 사용자의 노력측면에서 결코 효율적이지 못하다. 본 연구에서는 상수관망이 복잡하고 유량변화가 점진적인 곳에 적용 가능한 RWCT 해석기법을 도입하여 효율적이고 정확한 동역학적 유량해석모형을 개발하고자 하였다.

Slow Transient 해석 혹은 Lumped System 해석이라고 알려진 RWCT 기법은 비정상류 관로 흐름조건 중에서 압력과 유량의 변화로 인해 발생한 압력파의 전파속도에 비해 매우 느릴 경우 적용 가능하다. 이런 경우 관로내 유체의 밀도변화는 무시되어질 수 있고 유체

는 비압축성으로 고려되어 질 수 있으며 관로 벽은 완전한 강체(rigid pipe)라고 가정되어질 수 있다. 이러한 조건들을 이용하면 유량의 변화로 인한 압력파의 전파는 관 전체에 걸쳐 순간적으로 발생하고 관내에서의 유체는 고체 덩어리처럼 거동한다. 이러한 가정들은 상수관망에서 비정상 상태가 유지되는 동안 관로내에서 유체 압축성으로 인한 잦은 진동을 야기하는 수충격 해석에 필요한 계산 노력보다 훨씬 적은 노력으로 완만한 비정상류 흐름에서 만족할 만한 결과를 얻게 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 가정 사항들을 도입하여 기본 식을 유도하였고 유도된 운동량 방정식과 연속방정식은 다음 장에 제시되어 있다.

- (1) 흐름조건은 서서히 일어난다.
- (2) 관로 벽은 강체이고 유체는 비압축성이다. 그러므로 흐름변화는 순간적으로 관로전체를 통하여 발생하며 관로내의 유체는 고체 덩어리처럼 거동한다.
- (3) 관로는 항상 꽉 차 흐르며 기포가 발생하지 아니한다. 즉 어떤 관로내에서도 최소 압력은 증기압보다 항상 크다.
- (4) 비정상류 흐름상태 동안의 시스템내의 수두손실은 동일한 유속에 대한 정상상태 손실 공식을 이용하여 나타내어질 수 있다.

## 3. 상수관망의 동역학적 모형의 개발

### 3.1 지배방정식

일정한 단면을 가진 한 관로에 대한 작용되는 힘은 Fig. 1과 같다. 그림에서 보여지는  $F_1$ ,  $F_2$ 은 1, 2 단면에서의 정수압이고  $F_f$ 는 관벽에서의 마찰력,  $A$ 는 관 단면적,  $Q$ 는 유량,  $L$ 은 관로길이이다. 만약 하류로의 흐름방향을 (+) 방향으로 가정한다면 유체 요소에 작용하는 전합력은  $\sum F = F_1 - F_2 - F_f$  이고 Newton의 제 2

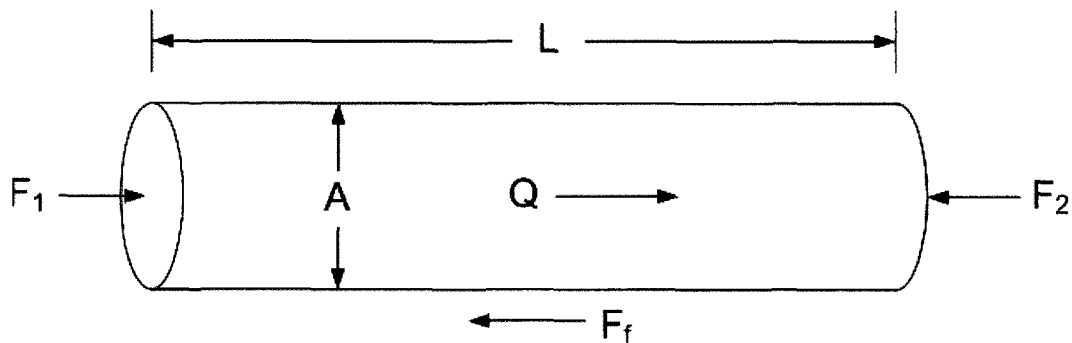


Fig. 1. Freebody Diagram for a Pipe

법칙에 의해 운동량의 변화율은 작용된 전합력과 동일하므로 운동량의 변화율은 Eq. (1)과 같다. 또한 관망단에 적용되는 연속방정식은 Eq. (2)와 같이 나타내어진다(Wylie et al., 1993; Chaudhry, 1987).

$$\frac{\gamma L}{g} \frac{dQ}{dt} = \gamma A(H_1 - H_2 - h_f) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i + Q_{ext} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $H_1, H_2$ 는 절점 1, 2에서의 압력수두,  $H_f$ 는 관로를 따른 압력손실수두,  $g$ 는 중력가속도이고  $t$ 는 시간,  $Q_{ext}$ 는 절점에서의 유출입 유량이며  $n$ 은 절점에 연결된 관들의 수이다. 마찰손실수두  $h_f = KQ|Q|^m$ 로 정의하고 역방향 흐름을 나타내기 위해 유량의 절대치를 사용하였으며  $k$ 와  $m$ 은 선택된 마찰공식에 따른 상수이다.

Eq. (1)에서 나타난 운동량 방정식은 상미분 방정식이다. 일반적으로 상미분 방정식의 해석을 위해서 Runge-Kutta 기법 중의 하나가 선택될 수 있으며 정확도를 고려하여 4차 정도의 Runge-Kutta 기법이 이용되어질 수 있다. 마찬가지로 Runge-Kutta 기법들은 단순한 관로의 운동량 방정식의 해석에는 쉽게 적용되어질 수 있다. 그러나 상수관망의 각 관로에 적용되어지는 운동량 방정식의 해는 절점에 적용된 연속방정식과 결합되어 각기 다른 절점들과 서로 연관되어 있다. 각 절점의 수두-유량 관계가 운동량 방정식을 해석하기 위해 동시에 적용되어야 하기 때문에 양해적 Runge-Kutta 기법을 연립적으로 사용하는 것 보다는 음해적으로 모든 방정식을 동시에 해석하는 것이 수월해진다. 다시말해 전체 관망에 대한 연립적인 Runge-Kutta 기법은 사용은 시스템은 음해적으로 푸는 것보다 계산적으로 좀 더 복잡해질 수 있다.

본 연구에서는 양해적 Runge-Kutta 기법보다는 계산의 효율성을 감안하여 음해적 동시해석 기법을 이용하였다. 이 기법의 사용을 위해 Eq. (3)은 먼저 관망의 각 폐합관로에 대해 합하여졌다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{gA_i} \frac{dQ_i}{dt} = \sum_{i=1}^N (H_{1_i} - H_{2_i}) - \sum_{i=1}^N h_{f_i} \quad (3)$$

여기서,  $N$ 은 각 폐합관로에서의 관로의 수이다. Eq. (3)은 다음과 같이 적분되어진다.

$$\int_{Q_k}^{Q_{k+1}} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{gA_i} dQ_i \quad (4)$$

$$= \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \sum_{i=1}^N (H_{1_i} - H_{2_i}) dt - \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \sum_{i=1}^N h_{f_i} dt$$

폐합관로를 따른 모든 관로의 손실수두의 합은 '0'이 되므로 우편항에 존재하는  $\sum_{i=1}^N (H_{1_i} - H_{2_i})$ 의 항은 '0'이 된다. 이제 왼편항을 적분하고  $k+1$  시간대의 미지유량  $Q$ 와  $k$  시간대의 기지의 유량  $Q_k$ 를 분리하면 Eq.(5)와 같이 정리된다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{gA_i} Q_{k+1_i} \quad (5)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{gA_i} Q_{k_i} - \sum_{i=1}^N \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} K_i Q_i |Q_i|^m dt$$

여기서 수두손실은 유량에 대해 비선형이며 시간 증분  $\Delta t$  동안 유량  $Q$ 의 변동치는 역시 미지수이다. 본 연구에서는 비선형 마찰손실항의 처리를 위해 Eq. (6)과 같은 근사화된 식을 이용하였다.

$$\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} KQ|Q|^m dt \quad (6)$$

$$= K[(Q_k + Q_{k+1})|Q_k + Q_{k+1}|^m / 2^{m+1}] \Delta t$$

본 연구에서 이용된 Eq. (6)은 유량방향이 역전될 경우에도 이용될 수 있을 뿐 아니라 장기간의 계산시간을 가진 경우에도 적용이 가능하였다.

또한 폐합관로를 따른 수두손실의 합의 항을 효율적으로 처리하기 위해 본 연구에서는 관망의 정상상태 해석에서 이용되고 있는 폐합관로의 자동탐색 알고리즘을 도입하였다(박재홍 등, 1998). 일반적인 수층격해석 모형들은 관로와 절점의 연결 및 경계조건의 자세한 정보를 요구하여 많은 입력자료가 필요하지만 도입된 폐합회로 탐색알고리즘의 자동화된 폐합회로 자체 생성 및 처리로 인해 정상상태 해석과 동일한 입력자료 정보를 가지고 부정류 해석이 가능하게 되었다.

## 4. 실제 관망에의 적용

### 4.1 정상상태에의 적용

개발된 모형을 이용하여 Fig. 2와 같은 관망에 모형

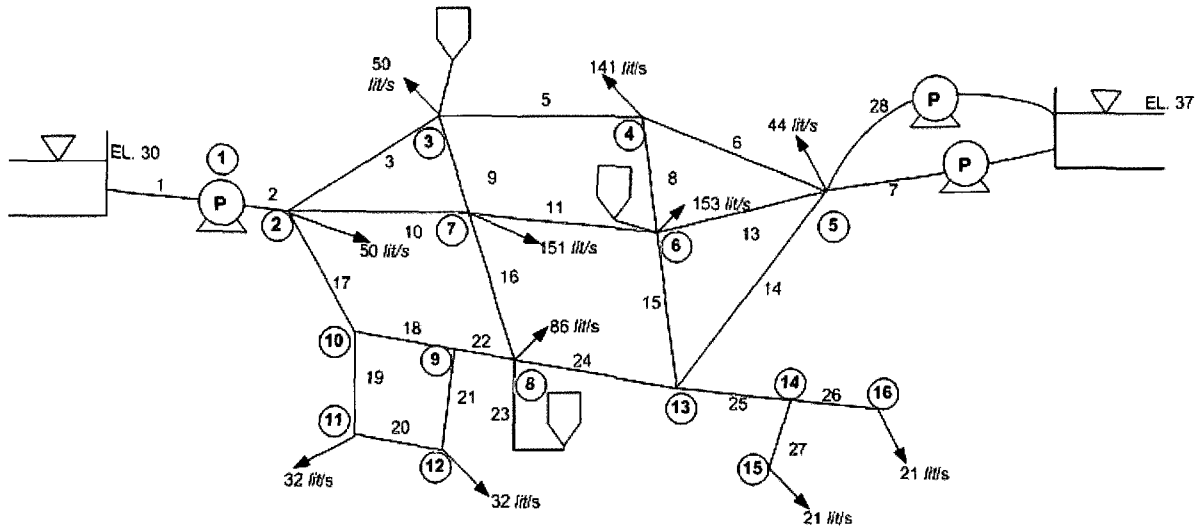


Fig. 2. Pipe Network with 26 Pipes

을 적용하였다. 모형이 적용된 관망은 관로 28개, 절점 26개, 고정절점 및 고가수조 5개로 이루어진 관망으로 각 관로 및 절점자료는 기존의 연구(박재홍 등, 1998)에 나타나 있다. 모형의 동역학적 해석특성을 파악하고자 절점에서 수요량의 변화를 주어 일수요량의 변화에 따른 각 관로의 수렴특성 및 모형의 적용성을 파악하고자 하였다.

일수요량의 변화를 고려하여 최대수요량은 06시에서 일평균수요량의 1.6배를 초과하였고 최저수요량은 18시의 평균수요량의 0.55배였다. 본 모형을 이용하여 24 시간동안 계산시간 간격 3.33분을 사용하여 모의를 수행하였고 모형과의 비교를 위해 KYPIPE2 모형을 이용하여 계산시간 1 시간 간격 및 2 시간 간격으로 준부정류 해석을 실시하였고 수요량의 변화는 본 모형에서는 일수요량의 변화값을 계산시간에 따라 보간하여 사용하였으며 KYPIPE2이 모형인 경우에도 각 시간 간격에 따라 보간하여 사용되어진 것으로 판단되었다. 주어진

관망에 대한 각 모형의 적용결과는 Figs. 3 and 4에 나타나있다.

Fig. 3에서는 일수요량의 변화에 따른 관로 11, 22에서 유량의 변화를 본 연구모형과 KYPIPE2의 계산시간 간격 2 시간 및 1 시간에 대해 도시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 관로 11에서는 침투유량값이 6시에 나타났고 본 연구모형의 침투값은 39.96 l/sec, KYPIPE2의 경우에는 모든 모의에서 40.42 l/sec의 값을 나타내었다. 모형들의 침투값은 본 모형에서는 17시에서 27.86 l/sec의 값을 나타내었고 KYPIPE2 모형은 계산시간간격 1 시간인 경우 17시에서 27.56 l/sec, 계산시간 2 시간인 경우 20시에서 27.59 l/sec의 값을 나타내었다. 관로 11의 평균유량은 본 모형의 경우 31.06 l/sec 이었으며 KYPIPE2 모형의 경우 모두 30.94 l/sec로 적용된 기법별 거의 같은 값을 가지고 있었다.

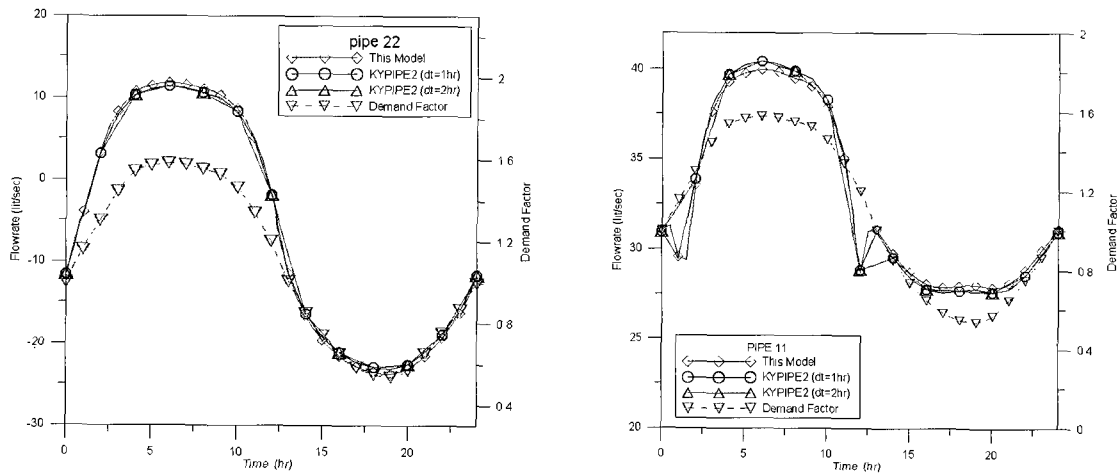


Fig. 3. Daily flowrate variation at pipe 11, 22

전체적으로 적용된 모든 기법들에서 수요량 변화에 따라 유사한 양상으로 관내 유량이 변화하고 있었으나 관 11에서는 1시와 13시 부근에서 관로내 유량변화와 수요량의 변화가 반대 양상을 나타내고 있었다. 이것은 이웃하는 관로에서 1시와 13시 부근에서 흐름방향이 역전됨에 따라 이웃 관로 유량의 흐름영향을 받아 일시적으로 일시적인 흐름의 정체를 나타낸 것으로 판단되었다. 이러한 현상은 계산간격을 너무 크게 할 경우 ( $dt=2hr$ ) 그림에서와 같이 계산하지 못한 것으로 나타났으며 비교적 긴 계산시간 간격을 이용한 준부정류 해석을 실시할 경우 짧은 시간의 유량변화를 놓칠 수가 있기 때문에 사용자의 주의가 필요하다.

본 모형과 KYPIPE2 모형과의 비교에서는 시간간격이 1 시간의 KYPIPE2 모형결과가 비교적 정확하게 나타나고 있으나 1시 및 13시 부근에서 본 모형의 결과는 KYPIPE2의 결과와 비교하여 지체 혹은 앞선 흐름 변화를 발생하고 있다. 이것은 본 모형의 결과가 관성력의 영향으로 인해 관성력이 크게 나타날 수 있는 흐름가속이 크게 나타나는 시간대에서 KYPIPE2의 결과와 본 모형의 결과의 차이가 발생하고 있다고 판단된다.

또한 첨두치 및 첨저치 부근에서는 KYPIPE2 모형의 결과들은 서로 유사하게 나타났지만 본 연구모형은 유량의 변화폭이 약간 줄어든 평균값에 가까운 값을 나타내었다.

관로 22에서는 계산초기 흐름이 역방향 흐름으로 계산이 시작되어 수요량이 증가하면서 관로내의 유량은 줄어들다가 좀 더 수요량이 증가하면 흐름이 역전되어 순방향 흐름이 발생하게 된다. 이때 초기에는  $-11.67 \text{ l/sec}$ 의 유량으로 흘렀으며 최대수요가 발생하는 6시경에는 방향이 반대가 되어 본 연구모형의 경우  $11.79 \text{ l/sec}$ , KYPIPE2의 경우 모두 6시에서  $11.35 \text{ l/sec}$ 의

유량이 흘렀다. 첨저치 유량은 본 모형이 19시에서  $-23.63 \text{ l/sec}$ , KYPIPE2의 경우 1시간 간격의 경우 19시에서  $-23.08 \text{ l/sec}$ , 2시간 간격의 경우 18시에서  $-22.90 \text{ l/sec}$ 의 유량으로 흘렀다. 각 적용된 경우별 변화된 유량폭은 첨두치가 발생할 경우 본 모형  $23.46 \text{ l/sec}$ , KYPIPE2의 경우는 모두  $22.92 \text{ l/sec}$  이고 첨저수요가 발생할 경우에는 본 모형  $11.67$ , KYPIPE2의 1, 2 시간의 경우  $11.51, 11.33 \text{ l/sec}$ 의 유량변화가 발생하여 수요가 크게 발생하는 시간에서 수요유량 변화폭을 감안하더라도 유량의 변화폭이 큼을 알 수 있다.

그러나 관로 22에서는 본 모형과 KYPIPE2 모형과 유량비교에서 관로 11의 결과와 반대의 경향을 나타내고 있었는데 관로 11에서는 본 모형의 경우 첨두유량이 발생할 경우에는 KYPIPE2 경우보다 작은 유량이 첨저유량이 발생할 경우에는 KYPIPE2 보다 큰 유량이 발생하고 있었으나 관로 22에서는 첨두유량에서는 KYPIPE2 보다 큰 유량이 발생하였고 첨저유량에서도 마찬가지로 더 작은 흐름(즉 절대값이 더 큰 반대방향의 흐름이 발생)이 발생하여 진폭이 더욱 큰 일 흐름유량이 되었다.

Fig. 3에서 보여지듯 관로내의 유량은 일수요량 변화에 비례하여 유량이 결정되는 것이 아니라 관로의 배치 및 관경, 마찰손실 등의 여러 인자에 따라 각 관들의 유량 변동폭 다르게 결정되어 질 수 있다. 또한 KYPIPE2를 사용한 준부정류 해석의 경우 관성력의 영향을 고려할 수 없어 관성력이 크게 영향을 나타낼 수 있는 흐름의 급변 시간대에서는 정확한 유량값을 제시할 수 없다고 판단되었다.

Fig. 4에서는 절점 7, 9에서 24시간 동안의 동수압력 변화가 나타나 있다. 절점 7에서는 수요량이 가장 많은 6시에서 본 모형은  $75.24 \text{ m}$ , KYPIPE2의 1, 2 시간 적용에서는 모두  $75.09 \text{ m}$ 의 압력수두를 나타내었고 수요

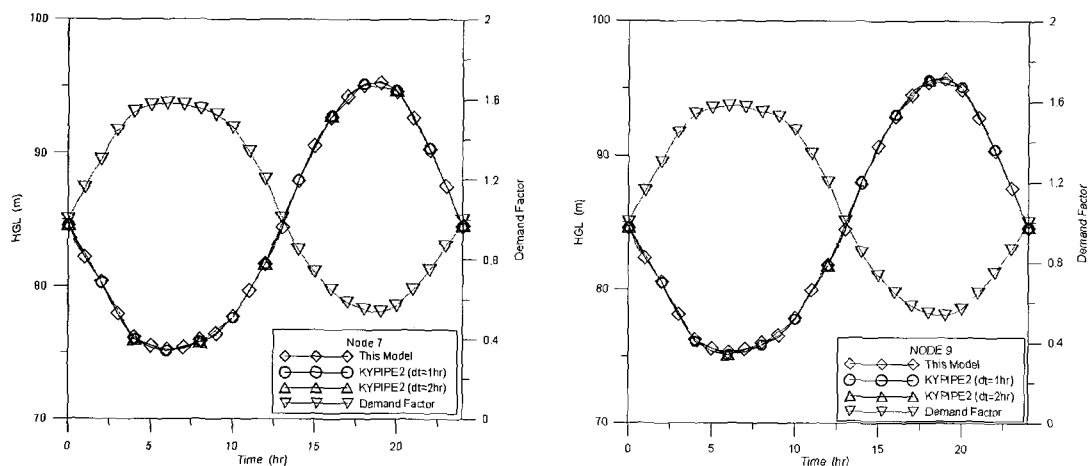


Fig. 4. Daily Hydraulic Grade Pressure Variation at Node 7, 9

량이 가장 적은 경우 본 모형은 19 시에서 95.34 m 이었고 KYPIPE2의 1 시간간격은 역시 19 시에서 95.12 m, 2 시간간격에서는 18 시에서 95.12 m 의 값을 나타내고 있었다. 절점 9에서는 최저압력은 절점 7과 마찬가지로 6시에서 본 형이 75.32 m, KYPIPE2 의 1, 2 시간은 75.12 m의 수두를 나타내었고 최고압력은 본 모형은 19시에 95.65 m, KYPIPE2의 1시간의 경우 19 시에 95.84 m, 2 시간의 경우 18 시에 20.49의 값을 나타내었다. 그림들에서 나타난 바와 같이 적용된 모형들 모두가 수요량과 반비례하여 압력값이 나타나고 있으며 일수요량이 변화에 따라 절점에서 일 압력의 변화폭은 상당하였으며 최대진폭은 본 모형이 절점 7과 9에서 20.1, 20.33 m 를 나타내었다. KYPIPE2의 1시간은 20.03, 20.72 m, 2시간인 경우 20.03, 20.49 값을 나타내

고 있었다. 최대진폭의 범위도 절점 7에서 KYPIPE2가 컸으나 절점 9에서는 본 연구모형이 커 압력도 유량과 마찬가지로 관로배치, 마찰손실, 상수 수요량 등의 요인들이 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다.

#### 4.2 비정상상태의 적용

Fig. 5와 같은 국내 모 광역시 상수관망에 개발된 모형의 부정류 적용성을 검토하였다. 대상지역은 배수면적 넓고 복잡한 상수관망 지역이었으나 적용된 관망은 주요 간선관로들만 적용하여 26개 관로, 16 개 절점과 2 개의 고정절점으로 이루어지게 되었다. 모형의 부정류 적용을 위해 정상적으로 운영되는 상수관망에 관로 13에 위치한 제수밸브를 이용하여 급격한 수충격현상을 발생시켰다. 발생된 압력파로 인해 전체 관망에 압력파

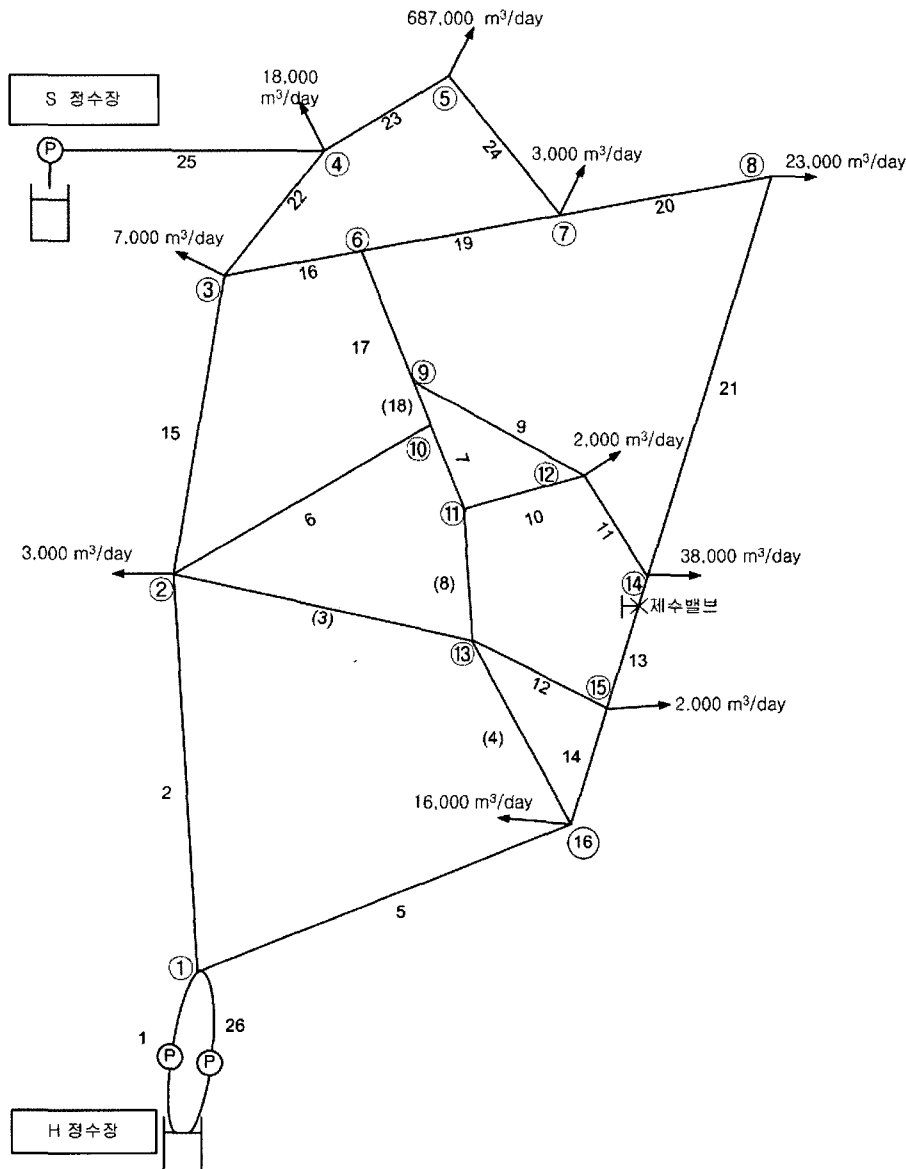


Fig. 5. Pipe Network Applied Unsteady Flow Condition

의 영향을 미쳤으며 이 압력과의 전파양상을 본 모형을 이용하여 모의하러 의도하였다. 압력과의 발생 시나리오는 수충격해석 모형에서 밸브의 운영사항을 고려하여 계수밸브를 완전개방된 상태에서 모의시간 3 초 동안 그대로 유지하였다가 모의 5초에 점진적으로 밸브의 90%를 폐쇄하였고 그 후 20 초 동안 나머지 10%의 밸브개방공간을 전부 폐쇄하였다. 계산시간 간격은 밸브의 작동 시간간격을 충분히 고려하기 위해 본 연구모형은 1 초로 하였고 수충격 모형은 0.895 초로 설정하였다. 밸브 폐쇄기간 동안 밸브를 통과하는 유량식은 Eq. 1과 같다.

$$Q_{valve} = s\tau E_s \sqrt{sH_0} \quad (1)$$

여기서  $s$ 는 유량방향을 나타내며  $H_0$ 는 정상상태에서 유량이 밸브 통과할때의 발생하는 손실(m),  $\tau$ 와  $E_s$ 는 밸브의 개방도, 정상상태에서 유량에 대한 밸브손실을 나타내는 계수이다.

본 연구 모형을 이용한 압력과 해석결과는 Fig. 6에 나타나있다.

Fig. 6에서 밸브폐쇄로 인한 500 초 동안 관로 13, 9의 유량변화가 도시되었다. 그림에서 보여지는 것과 같이 전체적인 변화양상 및 시간 평균된 유량 등에서 본 모형과 수충격 모형이 유사하게 나타나고 있다. 그러나 본 연구모형의 가정사항인 전체 시스템이 하나의 강체로 가정됨으로 해서 밸브폐쇄에 따라 관망 전체가 순간적으로 유량변화가 발생하고 있다. 관로 13에서는 폐쇄된 밸브가 위치한 관로이기 때문에 본 모형에서는 밸브 폐쇄와 더불어 유량이 더 이상 존재하지 않는다. 그러나 수충격 모형에서는 유체의 압축성 때문에 발생한 압력과의 주기적인 이동으로 유체의 이동이 나타나고 있으며 압력과의 이동시간이 관로 13에서는 짧아 본 모형과 수충격 모형과의 지체시간은 거의 나타나지 않고 있다. 그러나 관 9에서는 본 모형은 밸브폐쇄와 동시에 유량의 변화가 발생하고 있으나 수충격 모형은 유체의 탄성효과로 인해 압력과의 전달시간이 필요하게 되

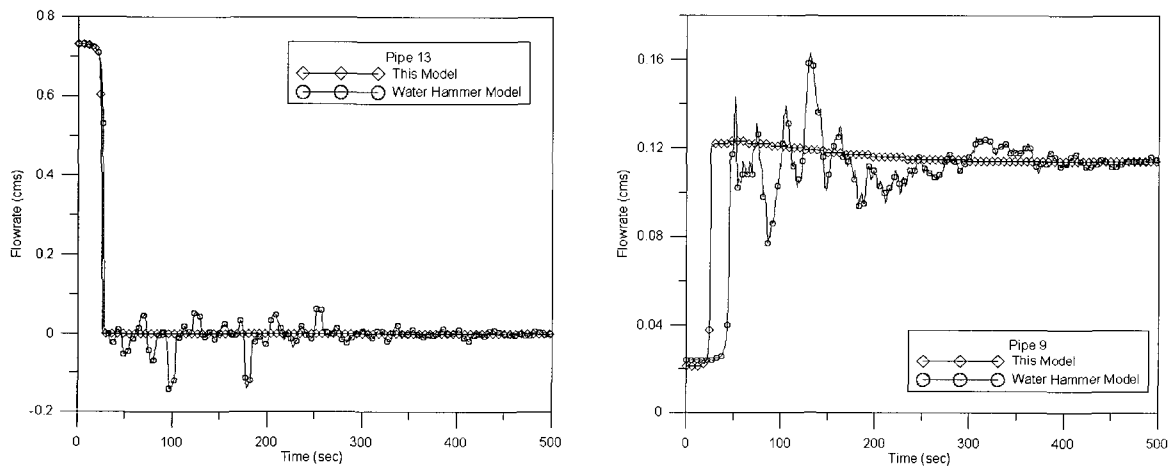


Fig. 6. flowrate Variation at pipe 13, 9 caused by closing valve

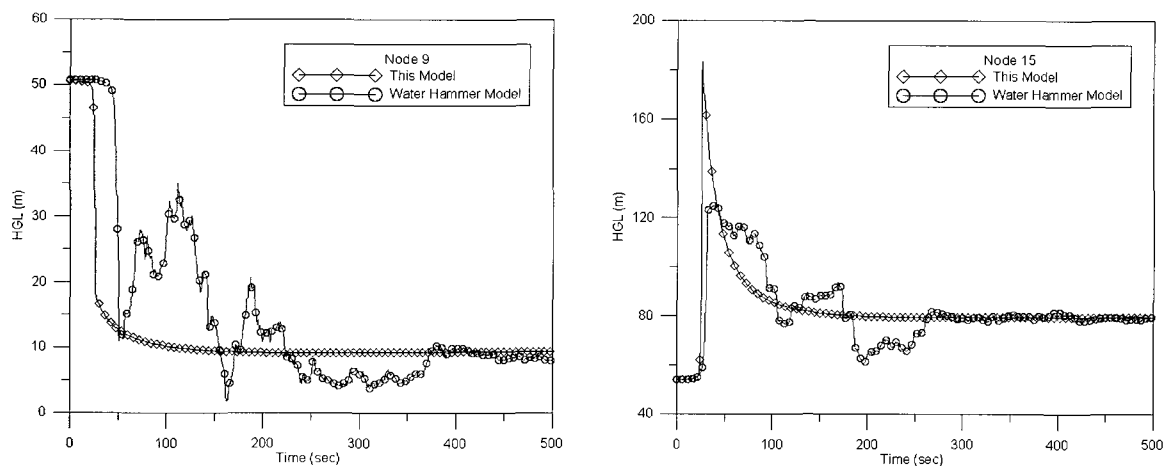


Fig. 7. Pressure Variation at pipe 13, 9 caused by closing valve



고 이에 따라 약간의 지체가 발생하여 유량변화가 나타나고 있다. 또한 본 모형의 해들은 유체의 압축효과를 고려하지 않기 때문에 매끈하게 정상상태에 수렴하고 있으나 수충격모형은 유체의 압축효과로 인해 관로내에서 진동이 발생하고 있다. 이러한 결과는 본 연구모형의 적용대상이 본 경우에 적용된 밸브폐쇄로 인한 급격한 부정류 같은 과도수리현상을 모의하는 것이 아니라 점진적인 유량변화를 해석하며 이경우의 적용에서도 본 모형의 결과 또한 수충격 해석모형의 결과와 비교하여 변화양상 및 전체적인 변화의 크기, 유량변화 발생시간 등에서 합리적인 결과를 제시하고 있어 충분히 점진적인 부정류에 적용 가능한 것으로 기대되어진다.

Fig. 7에서 절점 15, 9에서 수충격 발생기간 동안 압력변화를 도시하였다. 절점 15에서의 동수압력의 변화는 제수 밸브가 폐쇄됨에 따라 압력이 증가하다가 완전폐쇄 상태가 됨과 동시에 본 모형은 183.3 m, 수충격 모형은 약간의 지체를 가지고 125.198 m 의 최고 동수압을 나타내었다. 절점 9 에서는 모의 기간동안 밸브 폐쇄로 인해 초기상태에 비하여 압력이 감소하였다. 압력의 감소양상은 절점 15 와 마찬가지로 본 모형은 밸브 폐쇄가 일어남에 따라 완만하게 압력이 감소하다가 완전폐쇄와 동시에 초기 50.56 m 수두에서 18.21 m 로 급강하하였으나 수충격모형은 밸브의 점진폐쇄 및 완전폐쇄로 인한 압력과의 변화는 52.69 초에 이르러서야 동수두가 10.93 m 로 강하되었다. 유량변화와 마찬가지로 본 모형의 압력변화는 매끈하게 수렴하여 가는 양상을 나타내지만 수충격 모형은 압력과의 왕복 이동으로 인해 진동하는 것을 나타낸다. 특히 절점 9는 관망시스템의 가운데 위치하고 있으므로 인해 폐쇄된 밸브 가까이에 위치한 절점 15 보다 압력과의 이동이 자유로워 압력수두의 변동이 오래까지 지속되고 있음을 알 수 있다.

수충격현상 모의를 통한 본 모형의 부정류 모의 능력은 합리적인 결과를 나타내고 있으며 특히 유체의 탄성력을 무시함으로 관로내의 압력과 발생과 이로 인한 진동현상은 재현하지 못하지만 압력 및 유량의 평균적인 거동은 모의가능한 것으로 판단되었고 상수관망의 일수요 변화와 같은 점진적인 부정류의 해석은 기존의 준부정류 해석보다 유량의 변화크기 및 변화시간에 있어 정확한 것으로 판단되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 장기간 상수관망의 유량 및 압력 변화를 예측하기 위하여 rigid water column theory를 도

입하여 동역학적 상수관망 해석프로그램을 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 실제관망에 대하여 24 시간 일 수요량을 고려한 부정류 해석 및 밸브폐쇄로 인한 수충격해석 모의에 적용하였고 해석 결과는 다음과 같다.

- 1) 24 시간 일 수요량 변화를 고려한 점진적 부정류 해석에 본 모형을 적용한 결과 비교대상인 KYPIPE2의 2 시간 계산간격 준정상류 해석으로는 정확한 흐름해석이 불가능하였고 1 시간 계산 시간간격을 가진 결과와 비교하였을 때 전반적으로 유사한 결과를 나타내고 있었으나 관성력의 영향이 크게 나타날 수 있는 시간대에서는 유량 변화의 지체 및 반대현상이 발생하였다.
- 2) 24 시간 일변화 모의의 경우에 수요량이 증가할 경우 모든 관로에서 압력감소가 나타났으며 수요량이 감소할 경우 압력증가가 나타났다. 그리고 일 수요량의 변화에 따라 나타난 절점에서의 압력 변화폭은 각 절점마다 다르며 수요량과 유량의 변화양상이 반대로 나타나는 관로도 발생하고 있으며 KYPIPE2와 본 모형의 유량 및 압력차이도 발생하고 있어 상수관망의 동역학적 해석의 필요성이 대두되었다.
- 3) 밸브폐쇄로 인한 수충격모의에 본 모형이 적용되었을 때 본 모형은 유체의 압축성을 무시함으로 인해 밸브 완전폐쇄와 동시에 압력과 유량의 변화가 전 관망에 발생하였고 수충격모형은 유체의 탄성으로 인해 발생된 압력과의 도달시간이 필요함으로 압력과 유량변화가 지체되어 나타났으나 전체적인 변화양상 및 변화폭의 크기 등은 유사한 경향을 나타내어 본 모형의 적용성을 입증하였다.
- 4) 본 연구에서 개발된 프로그램은 장기간 점진적인 관로 부정류를 비교적 정확하게 해석할 수 있을 것으로 기대되며 이를 이용하여 관로내 오염물의 확산해석, 수요량을 고려한 절점에서의 압력제어 및 누수저감, 24 시간 이상의 관로내의 유량 및 압력 변화를 고려한 관망관리 등의 분야에서 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대되었다.

## 감사의 글

본 연구는 2002년도 세명대학교 교내학술연구지원사업에 의한 연구성과입니다. 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 박재홍, 한건연 (2001). "상수관망의 수격현상 모의를 위한 외부 유출입 유량의 효율적 해석." **한국수자원학회 논문집**, 제34권, 제5호, 한국수자원학회, pp. 427-438.
- 박재홍, 한건연 (1998). "상수관망해석을 위한 도학의 적용." **한국수자원학회 논문집**, 제31권, 제4호, 한국수자원학회, pp. 439-448.
- 백천우, 김석우, 김응석, 김중훈, 박무종 (2006). "상수관망의 구역별 최적개량 의사결정 시스템의 개발." **한국수자원학회 논문집**, 제39권, 제6호, 한국수자원학회, pp. 545-552.
- 한건연, 최혁준, 박재홍, 김광섭 (2002). "수원기여도를 고려한 상수도관망에서의 오염물질 전달해석." **대한토목학회 논문집**, 제22권 제2-B호, 대한토목학회, pp. 135-142.
- Al-Omari, A. S., Chaudhry, M. H. (2001). "Unsteady-State Inverse Chlorine Modeling in Pipe Network." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 669-677.
- Axworthy, D. H., Karney, B. W. (2000). "Valve Closure in Graph-Theoretical Models for Slow Transient Network Analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 304-309.
- Chaudhry, M. H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, pp. 27-88.
- Haested Methods Inc. (1993). *KYPIPE2 User's Guide. Version 1.0*.
- Holloway, M.B. (1985). *Dynamic pipe network computer model*. Ph.D thesis, Washington State University.
- Islam, M. R., Chaudhry, M. H. (1996). "Modeling of Constituent Transport in Unsteady Flows in Pipe Networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 11, pp. 1115-1124.
- Wylie, E. B., Streeter, V. L. (1993). *Fluid Transients in System*. Prentice Hall, pp. 37-79.

(논문번호:06-96/접수:2006.09.21/심사완료:2007.03.30)