

상수관망의 수격현상 모의를 위한 외부 유출입 유량의 효율적 해석

Efficient Calculation of External Flow for Transient Simulation in Pipe Networks

박 재 흥* / 한 건 연**

Park, Jae Hong / Han, Kun Yeun

Abstract

A numerical model to analyze the unsteady flow in water distribution system was developed by using wave adjustment method. When analyzing the unsteady flow in the real water distribution system, the computational procedures are very complex due to the various boundary condition. Wave adjustment method, which can solve the boundary condition more simply and accurately, was introduced to overcome this difficulty and related equations to solve external flow directly were presented. Using these equations, the numerical model was developed to analyze water hammer. The suggested model was applied to a hypothetical distribution system and a real system with 26 pipes with various external flow boundary condition to evaluate the applicability of the developed model. The simulation results by this model agree with those by Karney's analysis in terms of discharge and pressure.

keywords : pipe networks, transient flow, water hammer, wave adjustment method

요 지

본 연구에서는 상수관망의 비정상 상태 흐름을 해석하기 위하여 파속조절법을 이용하여 관망해석모형을 개발하였다. 특성선법을 이용한 실제 상수관망에서의 부정류 해석시 다양한 경계조건의 존재로 인해 해석과정이 매우 복잡하게 된다. 이러한 특성선법 해석의 어려움을 극복하고자 보다 간단하고 정확하게 경계조건을 처리할 수 있는 기법을 도입하였고 외부 유출 유량을 직접적으로 해석할 수 있는 방정식을 유도하였다. 또한 유도된 방정식을 이용하여 수격해석 모형을 개발하였으며 모형의 적용성 검토를 위해 여러 가지 외부유출 유량 경계조건을 가진 가상관망 및 26 개 관로를 가진 실제관망에 개발된 모형을 적용하였다. 본 모형의 모의결과는 Karney의 해석 결과와 비교되었고 모든 시간대의 유량과 압력들이 잘 일치하고 있었다.

핵심용어 : 상수관망, 과도수리현상, 수격현상, 파속조절법

* 세명대학교 건설공학부 토목공학전공, 조교수
Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Semyung Univ. Chungbuk 390-711, Korea
(E-mail : jhpark@venus.semyung.ac.kr)

** 경북대학교 공과대학 토목공학과, 교수
Prof., Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ. Daegu 702 701, Korea

1. 서 론

상수관망에서 수리학적 조건들은 대개 연속적인 상태의 변화이다. 공업용 및 가정용 사용자의 수요량은 끊임없이 변화한다. 저수지의 수위와 저장탱크 저장량의 변화 그리고 여러 종류의 펌프들이 켜지고 꺼짐에 따라서 공급조건들은 조절된다. 만약 흐름조건이 변화가 완만하게 발생한다면 압력수두나 유속의 급격한 변화없이 어느 정상상태에서 다른 정상상태 조건으로 점차 옮겨가는 것이 가능하다. 그러나 일반적으로 상수관망의 운영과정에서 발생하는 동력공급의 중단이나 관로의 파괴와 같은 사고로 인해 급격한 흐름조건이 변화가 일어난다면 관로내 흐름은 유량과 압력수두의 큰 변동이 발생하게되며 이러한 부정류상태를 과도수리현상(hydraulic transient) 혹은 수격현상(water hammer)이라고 한다. 일단 수격현상이 발생하면 발생하는 압력수두 변화의 크기는 시스템의 구성형태와 수격현상을 야기한 조건에 달려 있으며 수격현상을 고려한 관로의 종류와 강도가 합리적으로 선택되기 위해서는 상수관로의 설계과정에서 압력 변동의 크기에 대한 해석이 필요하게 된다.

본 연구에서는 여러 가지 장치를 통해 외부 유출입 유량을 갖는 절점에서 효율적인 경계조건을 해석을 통해 보다 간단하고 정확하게 수격현상을 모의할 수 있는 기법을 도입하였고 이를 이용하여 컴퓨터 프로그램을 개발하고자 하였다. 이를 위해 경계조건이 해석되어야 할 절점에 부착된 펌프, 각종 밸브, 조압수조 및 수조와 연결된 관 등과 같은 여러 가지 외부유출 장치들의 조합들을 모형화하였다.

개발된 수격해석모형의 적용성과 효율성을 검증하기 위해 다양한 경계조건을 가진 가상관망 및 26 개의 관로를 가진 실제 관망에 대하여 밸브의 폐쇄 및 외부 유출량의 변화로 인한 관로내의 압력의 변화 및 과도 압력 안전장치의 거동을 모의하였다.

선진국에서의 상수관망에서의 동역학적 모의 연구는 다양하게 수행되었다. 관망의 수격현상의 모의모형은 여러 가지 모형들이 개발되어 상용화되었으며 복잡한 경계조건을 처리 및 이들의 효율적 계산을 위한 개선된 기법들이 개발되어 적용되고 있다. Wylie 와 Streeter(1993)은 수격현상의 이해 및 해석을 위한 기초적인 토대를 구축하였고 수격작용 해석 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 알고리즘은 단순하지만 상세한 입력 자료가 필요하며 프로그램의 개선을 통해

실제 방대한 크기의 관망해석을 위해 확장될 수 있다. Karney(1984)는 수격모형의 대형 관망적용을 위해 경계조건들을 체계적으로 분류하였고 Karney와 McInnis (1993)는 수격모형에 다양한 경계조건을 도입하여 수격현상을 해석하였다. Chen 과 Liggett (1995)는 역산기법을 이용하여 관로내 마찰계수와 같은 불확실한 요소의 검증 및 관로내의 누수탐지를 위해 최적화기법을 이용하였다.

또한 비정상 흐름인자들을 도입하여 관로내 수질을 해석하기 위한 시도도 이루어지고 있으며(Chaudhry 와 Islam, 1994) 수격현상시 발생한 과도압력의 영향을 고려한 관로 비용최적화에 관한 연구도 이루어지고 있다(Zhang, 1999)

국내 상수관망 해석연구는 주로 정상상태에서 관로내의 흐름을 해석하기 위한 연구가 주로 수행되었으며(박재홍과 한건연, 1996), 부정류 관수로에 관한 연구로는 박 남식 등(1999)에 의한 수도권 광역상수도 수격해석을 위해 단순화된 관망에 적용된 사례가 있으며 최적화 모형을 이용하여 밸브의 개폐시간을 결정하기 위한 연구(정 봉석 등, 2000)가 있으나 본격적인 부정류 관수로에 대한 연구는 극히 미약하며 복잡한 관망에서의 수격현상 발생시 이를 해석할 수 있는 모형의 개발은 전무하여 관련분야의 본격적 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

2. 지배방정식과 특성선법

상수관망의 부정류 현상을 모의하기 위해 일반적으로 이용되는 기본방정식은 식 (1), (2)와 같이 연속방정식과 운동량 방정식으로 나타내어진다(Watters, 1984, Chaudhry, 1987, Wylie 와 Streeter, 1993).

$$V_t + g H_x + \frac{f_p V |V|}{2D_P} = 0 \quad (1)$$

$$H_t + \frac{a^2}{g} V_x = 0 \quad (2)$$

여기서 H 는 관을 따른 거리 x 와 시간 t 에 대한 함수로써 수두를 나타내며 V 는 유체의 속도, D 는 관의 내경, f_p 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, a 는 압력의 파속 g 는 중력가속도, 첨자 P 는 관로를 나타내고 t 와 x 는 각각의 편미분을 의미한다.

수격현상의 모의를 위해 주로 이용되는 방법은 특성

선법(method of characteristics)을 이용하여 식 (1), (2)의 해석하는 것이다. 특성선법은 운동량 방정식과 연속방정식을 식 (3) 과 같이 유량 Q 와 수두 H의 함수로 된 상미분방정식인 적합방정식(compatibility equation)으로 변환한다.

$$dH \pm B dQ \pm \frac{R}{\Delta x} Q dQ = 0 \quad (3)$$

여기서, B 는 a/gA_p , A_p 는 관의 단면적, $R = f_p \Delta x / 2gD_p A_p^2$, a 는 관로내 파속(wave celerity)이다. 식 (3)은 $dx/dt = \pm a$ 로 정의되는 C^+ 와 C^- 특성선을 따라 유효하기 때문에 특성선법의 적합방정식을 만족하기 위해서 대개 공간-시간 격자가 $\Delta x = \pm a \Delta t$ 를 보장하기 위해 선택되어진다. 일단 초기조건과 공간-시간 격자가 주어지면 식 (3)은 C^+ 와 C^- 특성선을 따라 적분되어질 수 있으며 각 격자점에서의 수두 H 와 유량 Q 는 결정될 수 있다.

그러나 복잡한 관망시스템인 경우 여러 종류의 관경 및 제질들로 이루어진 관로들로 구성되어지고 동일하게 주어진 계산시간으로 인해 모든 관로에서 적용될 수 있는 일정한 Courant 수를 결정할 수 없게 된다. 이로 인해 여러 가지 공간 및 시간 보간방법(interpolation method)들과 파속조절법(wave adjustment method)이 개발되었다. 상수관망에서 사용되는 공간 및 시간 보간기법들은 먼저 주어진 Courant 수를 통하여 임시적인 수위, 유량값을 계산하고 이 임시적인 값을 이용하여 격자점에서의 수위, 유량값을 계산하기 때문에 계산시간의 비효율성 및 수치적 오차 및 특성영역(characteristic domain)의 왜곡이 발생하고 있다. 또한 보다 정확하다고 알려진 교차의 보간기법을 사용할 경우 경계절점에서의 미분 경계조건을 요구하게된다. 그러나 실제 상수관로의 경계절점에서는 비연속적인 경계조건이 많이 나타나고 있으며 이 경우 미분 경계조건의 도입을 위한 연속조건의 만족이 어렵게 된다(Ghidaoui와 Karney, 1998)

본 연구에서는 파속(wave speed)의 불확실성을 고려하여 식 (4)와 같이 파속을 합리적 범위내에서 조정하는 기법인 파속조절법을 이용하였다(Wylie 와 Streeter, 1993). 이 기법은 공간 및 시간 보간 방법과 마찬가지로 특성영역의 왜곡이 어느정도 발생하지만 프로그램이 간단하게 작성되어 계산시간이 짧고 정

확한 결과를 나타낼 수 있다(Karney 와 McInnis, 1997).

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_j(1 \pm \psi_j)N_j} \quad (4)$$

여기서, 점자 j 는 관로번호, ψ_j 는 파속의 허용 조정범위, L_j 는 관로의 길이이다.

3. 외부 유출입 유량의 수식화

특성선법은 관로내에서의 수격 조건들을 해석하는 순차적이고 체계적인 기법이다. 그러나 특성선법이 실제 관망에 적용될 경우 관망내에 설치된 다양한 수리장치(hydraulic device)의 해석을 위해 각 장치들의 보조방정식 도입으로 특성선법 해석과정은 매우 복잡하게 되어 좀 더 간결한 프로그램의 알고리즘과 정교한 구성이 요구된다. 본 연구에서는 간단하고 양해적으로 계산가능한 경계조건식의 도입을 통하여 혼란한 알고리즘의 개발, 복잡한 디버깅이나 미세한 곳에 과도한 노력의 집중과 같은 임의적이고 불필요한 요소들을 지양하고 좀 더 해석과정이 명확하며 프로그램의 작성이 쉽고 디버깅 작업이 효율적으로 이루어 질 수 있는 해석기법을 제시하고자 하였다.

모든 경계조건들에 대한 상세한 해석과정의 기술은 반복적인 설명이 될수 있고 제한된 지면공간에서는 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 외부 에너지 감쇠장치(external energy dissipator)이라고 불리는 복합적인 유체 저장장치(composite storage element)의 에너지 손실 및 외부 유출입 유량을 직접적으로 계산할 수 있는 양해적 방정식(explicit equation)을 제시하였다.

3.1 단순 절점 및 선형저수지 경계조건

가장 간단한 경계조건은 외부유출입 유량(Q_{ext})이 일정하거나 시간에 따른 함수인 기지값일(예, 일정 유량 양수펌프 혹은 고정된 수요량) 경우이다. 이때 절점수두는 외부 유출입 유량값이 기지이기 때문에 식 (5)를 이용하여 계산될 수 있다(Wylie 와 Streeter, 1993).

$$H_P = C_C - B_c Q_{ext} \quad (5)$$

여기서, B_c 와 C_C 는 절점과 연결된 관로들의 흐름특성을 나타내는 계수이다. 특히 유출입 유량이 0 인 단

순절점의 경우 식 (5)는 $H_P = C_C$ 가 된다.

저수지 표면수위의 변화율 V_r 을 고려하면 저수지에 대한 연속방정식은 $Q_{ext} = A_r V_r$ 이다. 여기서, A_r 은 저수지의 단면적이다. 만약 각 계산 시간단계 Δt 의 평균값이 이용된다면 결과식은 식 (6)과 같다.

$$H_r = H_0 + B_0(Q_e + Q_{ext}) \quad (6)$$

여기서 H_r 은 저수지의 표면에서의 등수경사선의 높이, H_0 = 초기 시간단계의 저수지 수두, Q_e = 초기 외부유출입 유량, 그리고 $B_0 = \Delta t/2A_r$ 이다. 만약 상수 B_0 가 0 이면 저수지 수두는 외부 유출입 유량에 대해 독립적이 되며 고정수두 절점이 된다는 것을 알 수 있다.

만약 저수지와 관로 절점 사이에 수두 손실을 무시할 수 있다면 절점 수두는 저수지의 표면 수위와 동일하다. 그러므로 외부 유출입유량에 대한 관계식을 만들기 위해 식 (5)와 (6)을 연립적으로 풀면 식 (7)과 같다.

$$Q_{ext} = \frac{C_C - H_0 - B_0 Q_e}{B_C + B_0} \quad (7)$$

식 (7)은 고정수두 저수지들과 저장탱크(storage tank)같은 단순 조압탱크(simple surge tank)를 나타내는데 이용될 수 있으며 이런 장치들은 단순 저수지(simple reservoir)라고 불려진다.

저수지의 단면적이 작을 경우 수조내에서의 수조 벽면마찰로 인한 수두손실과 유체운동으로 인한 관성력의 영향을 나타내어야 한다. 이때 일괄 관성요소(lumped inertia element)를 도입하면 저수지 표면 수위와 바닥과의 수위차를 식 (8)과 같이 선형적으로 편리하게 나타낼 수 있다(Wylie 와 Streeter, 1993).

$$H_b - H_r = C_1^r + C_2^r Q_{ext} \quad (8)$$

여기서, H_b = 탱크바닥에서의 수두, H_r = 수표면의 수위, 그리고 C_1^r 과 C_2^r 은 관성력과 마찰력의 영향과 관련된 상수들이다.

저수지의 저수방정식(storage equation)인 식 (6)과 관성력-수두손실 관계식인 식 (8)은 결합되어 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_b = C_b + B_b Q_{ext} \quad (9)$$

여기서, $C_b = C_1^r + H_0 + B_0 Q_e$, $B_b = C_2^r + B_0$ 이다. 식 (9) 역시 선형방정식이기 때문에 직접적으로 계산가능하다. 만약 수조와 절점을 연결하는 연결관에서의 마찰 손실이 작다면 절점수두 H_P 는 저수지 바닥에서의 수두 H_b 와 같다. 이 경우에 식 (5)과 식 (9)를 연립하면 다음과 같다.

$$Q_{ext} = \frac{C_C - C_b}{B_C + B_b} \quad (10)$$

단순저수지에 관한 식 (7) 은 식 (9)의 C_1^r 과 C_2^r 을 0 로 설정함으로써 만들어질 수 있다. 만약 $B_0 = 0$ 이면 일정수두 저수지가 만들어진다. 그러므로 식 (10)은 일반적인 저류장치를 나타내는 식이며 선형저수지(linear reservoir) 라고 불린다.

3.2 에너지 소산을 발생하는 외부 유출입 유량

만약 외부 유출입 유량이 흐름을 제한할 수 있는 장치들을 통하여 흐름 경우에도 일반적인 에너지 손실과 저류방정식이 유도 될 수 있다. 이와같이 여러 장치들이 결합되어 외부 유출 유량을 통해 압력과의 감쇠를 발생시키는 장치들을 외부 에너지소산장치(external energy dissipator)라고 부르며 선형저수지에 부착된 오리피스나 밸브, 유량을 조절할 수 있는 오리피스를 가진 조압 탱크(restricted orifice surge tank)나 단방향 조압탱크(one-way surge tank) 혹은 압력 안전밸브(pressure relief valve)를 나타내는데 이용될 수 있다.

그림 1 은 일반적인 외부 에너지소산장치 경계조건을 나타내고 있다. 이 선형저수지는 오리피스를 가진 짧은 연결관을 통해 절점으로 방류되어지며 이 절점은 임의의 관로들과 연결될 수 있다. 또한 수두손실과 관성력이 탱크와 연결관에서 발생하고 있다. 외부 유출입 유량은 식 (11)와 같이 절점수두와 연결된 밸브 방정식으로 나타내어진다.

$$Q_{ext} = sE_s \sqrt{s(H_P - H_b^c)} \quad (11)$$

여기서, H_b^c = 연결관의 절점쪽에서의 수두, s 는 외

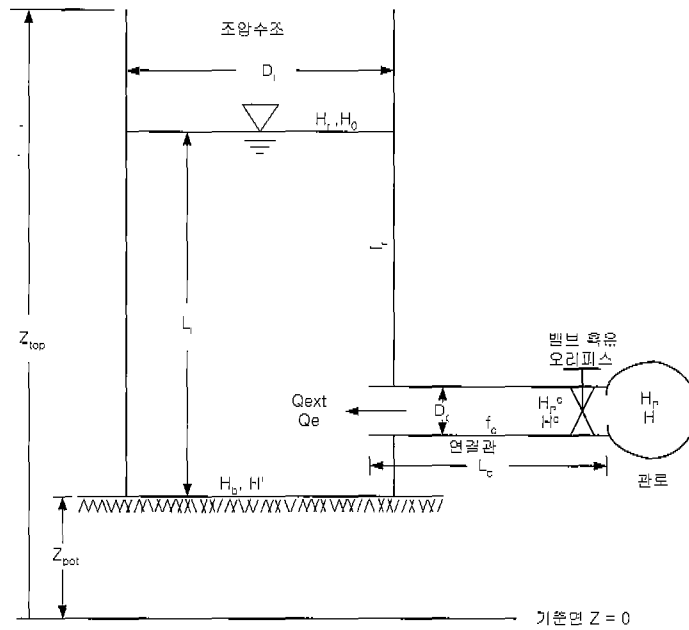


그림 1. 저압수조, 밸브 및 연결관이 조합된 절점의 경계조건

부 유출입 유량방향을 나타낸다(즉 $s = \text{sign}(Q_{ext}) = \pm 1$). 식 (11)에서 τ 와 E_s 항은 밸브나 오리피스와 관계된 인자로써 τ 는 밸브의 개방도를 나타내며 밸브상수 E_s 는 정상상태에서 수두손실에 대한 밸브를 통과하는 유량을 나타내는 값이다.

저수와 밸브를 연결하는 연결관에 대해서도 저수지와 마찬가지로 방법으로 연결관을 일괄 관성요소(lumped inertia element)를 이용하여 모형화할 수 있으며 적절한 부호를 이용하여 그림 1을 참조하면 식 (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_P^c - H_b = C_1^c + C_2^c Q_{ext} \quad (12)$$

여기서,

$$C_1^c = H' - H^c - \frac{2L_c}{gA_c \Delta t} Q_e \quad (13)$$

$$C_2^c = \frac{2L_c}{gA_c \Delta t} + \frac{f_c L_c}{gD_c A_c^2} |Q_e| \quad (14)$$

H' , H^c , H 는 수조바닥, 연결부와 밸브나 오리

피스의 연결부, 관로내에서의 전번 계산시간단계에서의 수두를 나타내고 H_b , H_P^c , H_P 는 현재 시간단계의 수두, 첨자 c는 연결관, D는 직경, A는 단면적, L은 길이를 나타낸다. 만약 연결관이 존재하지 않으면 상수 C_1^c 와 C_2^c 는 0으로 결정되어 진다.

대기중 혹은 고정수두를 가진 저수지로 방류할 경우 H_b 는 상수이다. 그러나 H_b 가 선형저수지이면 다음과 같이 선형적인 식이 유도되어 직접적인 계산이 가능하다. 식 (11)을 제곱하고 식 (5), (9)과 (12)를 대입하여 식전히 정리함으로써 외부 유출입 유량 Q_{ext} 를 식 (15)와 같이 얻을 수 있다.

$$Q_{ext} = -m + s\sqrt{m^2 - n} \quad (15)$$

여기서,

$$m = \frac{(\tau E_s)^2}{2} \cdot s(B_b + B_c + C_c^2) \quad (16)$$

$$n = (\tau E_s)^2 \cdot s(C_b + C_1^c - C_c) \quad (17)$$

$$s = \text{sign}(C_c - C_b - C_1^c) \quad (18)$$

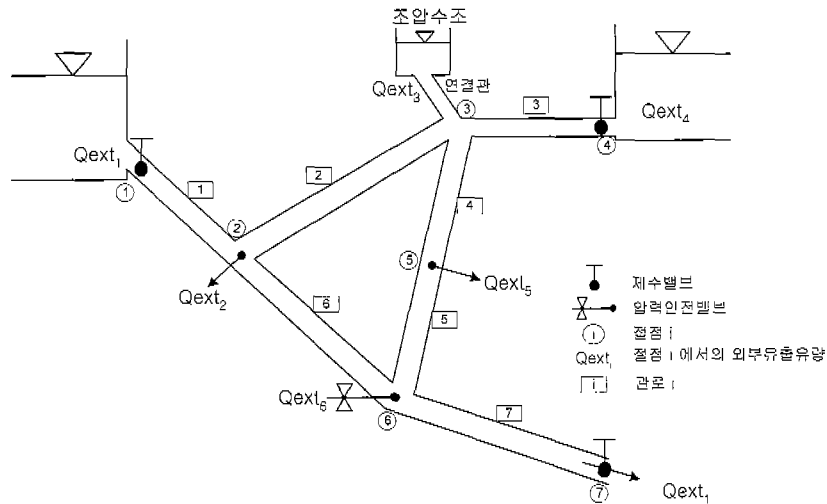


그림 2. 7 개 관로를 가진 가상관망

식 (15) 는 일반적인 절점으로부터 에너지 감쇠 장치를 통하여 선형저수지로 유출되는 유량을 직접적으로 결정할 수 있다. 식 (15)에서의 유량 저장장치인 저수지는 임의의 모양이나 구조를 나타낼 수 있어 일정수두 저수지나 저장탱크, 단순저수지(simple reservoir), 선형저수지, 지표 혹은 대기중으로의 방류 등에도 적용될 수 있어 다양한 외부 유출장치에 도입 가능하다. 또한 식 (15) 속에 도입된 압력감쇠장치는 제수밸브(control valve)나 오리피스 그리고 역류방지 밸브(check valve) 등과 같은 장치들을 나타낼 수 있으며 기술되지 않은 많은 유사한 여러 가지 장치들 또한 적절한 보조방정식들의 도입을 통하여 본 연구에서 제시된 과정과 동일하게 경계조건식이 유도될 수 있다.

4. 실제 관망에의 적용

식 (15)를 이용하여 외부유출 절점에서의 경계조건을 직접적으로 해석할 수 있는 수격해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위해 여러 가지 형태의 외부 유출경계조건을 가진 가상관망과 실제 관로에 본 모형을 적용하여 적용성을 검증하였다.

4.1 가상관망에의 적용

식 (15)를 이용하여 개발된 모형의 적용성 검증을 위해 7 개의 관로와 7 개의 절점으로 이루어 가상관망에 대해 본 모형이 적용되었다. 주어진 관망은 관로의 구성형태는 비교적 간단하지만 2 개의 고정 수위

절점과 5 개의 각기 다른 외부 압력감쇠 경계조건이 도입되었다. 일반적으로 도시상수관망의 수격현상모의를 위한 관망부정류 해석의 복잡성은 많은 종류의 경계조건을 처리하기 위한 각종 보조방정식의 도입 등으로 발생하기 때문에 주어진 경계조건들의 다양한 종류들을 고려하면 주어진 관망의 수격현상 해석 자체는 간단한 문제는 아니다.

주어진 관망에 대한 부정류 해석을 위해서 주어진 종류의 경계조건 해석을 위한 5 개의 외부 감쇠 장치를 위한 부프로그램이 필요하였고 식 (15)를 이용하여 각 감쇠장치에 대한 합리적인 부프로그램을 작성하였다. 본 연구에서 개발된 각 절점의 외부유출로 인해 반응하는 시스템의 해석을 위한 알고리즘은 표 1과 같다. 먼저 현재 시간단계의 외부 유출량이 발생하는 각 장치의 각종 외부 유출입량의 계산을 위해 계수들을 계산한 후 식 (15)를 이용하여 각 유출절점에서의 외부유출 유량을 결정한다. 일단 외부유출 유량이 결정되어지면 모든 절점에서 식 (5)를 이용하여 주어진 유출 유량을 대입하여 절점의 압력수두를 결정하며 이어서 각 관로의 특성선 방정식을 해석하여 관로내 구간의 유량 및 수두를 계산한다.

본 모형의 입력자료는 관망 시스템을 구성하기 위해 세 부분 - 절점 자료, 관로 자료, 경계 조건 자료 - 으로 나누어지며 관경, 관로의 길이, 지반고, 파속, 마찰계수와 같은 물리적 인자와 관망해석을 위한 초기조건들이 주어져야 한다.

표 1. 부유출을 가진 관망의 유량해석을 위한 흐름도

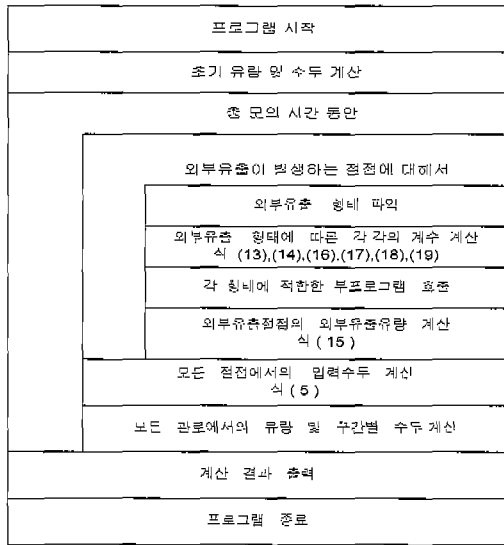


표 2 는 각 절점의 지반고와 외부 유출량, 절점에서의 외부유출 장치들을 제시하였다. 외부수요량의 양의 값은 관망 외부로의 유출을 음의 값은 관망으로 유입되는 유량을 나타낸다.

시스템의 연결상태와 각 관에서의 초기 유량은 표 3 에서 제시되었다. 필요한 관로인자들은 관의 길이, 직경, 파속과 관의 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. 양의 유량은 흐름방향이 관로의 방향과 일치한다는 것을 의미한다.

절점 7에서의 제수밸브와 절점 6의 압력안전밸브를 제외하고 모든 밸브들은 완전개방 ($\tau = 1$)으로 가정하였다. 안전밸브는 초기에 닫혀있다가 절점 수두가 210

표 2. 가상관망 절점자료

절점번호	절점 지반고 (m)	외부 유출유량 (m^3/sec)	도입된 경계조건장치
1	150	-6.211	고정절점 저수지
2	100	2.000	일정 수요유량
3	150	0.000	조압수조
4	150	1.183	고정절점수두
5	100	1.000	일정수요유량
6	50	0.000	압력안전밸브
7	25	2.208	대기중으로 유출되는 제수밸브

m를 초과하면 개방되어진다. 이 경우 밸브는 선형적으로 3 초동안 열려졌다가 60 초 동안 역시 선형적으로 닫힌다. 이 관망에 대한 수격모의는 절점 7의 제수밸브를 폐쇄함으로 시작되었다. 절점 7에서의 밸브 개방도 τ 를 초기에는 $\tau = 0.6$ 으로 부분적으로 개방하다가 $\tau = 0.2$ 까지 10 초 동안 선형적으로 감소하여 전체 모의기간동안 그 상태를 유지하였다. 주어진 시스템의 수격현상 모의 결과가 그림 3 ~ 8에서 제시되었다.

주어진 가상관망의 수격해석을 위한 모의 시나리오에 의해 절점 7에서 발생된 고압력파들은 시스템 전체로 전파되어졌다. 전파된 고압력과 강도는 시간이 경과함에 따라 더욱 상승하여 모의시작후 6.43 초에서 절점 6의 압력안전밸브 개방기준 압력을 초과하였다. 안전밸브가 초과압력으로 인해 개방되었을 때 절점 6에서의 유체의 방출은 과도압력을 안전밸브가 개방되는 약 3 초 동안 감소시켰다. 그러나 지속된 절점 7에서의 밸브폐쇄와 안전밸브의 폐쇄 시작으로 관망 시스템

표 3. 가상관망 관로자료

관로번호	상류단 절점	하류단 절점	초기유량 (m^3/s)	관로길이 (m)	관로직경 (m)	파속 (m/s)	마찰계수
1	1	2	6.212	1001.2	1.50	996.3	0.012
2	2	3	1.708	2000.0	1.00	995.3	0.013
3	3	4	1.183	2000.0	0.75	995.3	0.014
4	3	5	0.524	502.5	0.50	1000.0	0.015
5	6	5	0.476	502.5	0.50	1000.0	0.015
6	2	6	2.503	1001.2	1.00	996.3	0.014
7	6	7	2.028	2000.2	0.75	995.1	0.013

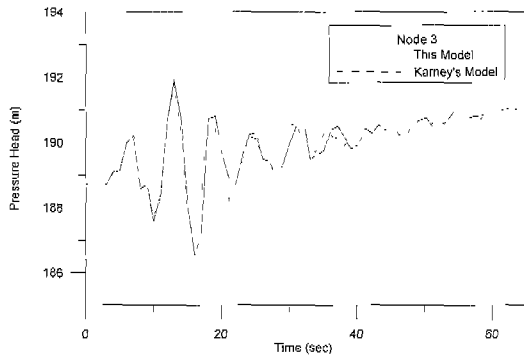


그림 3. 절점 3에서의 수두 변화

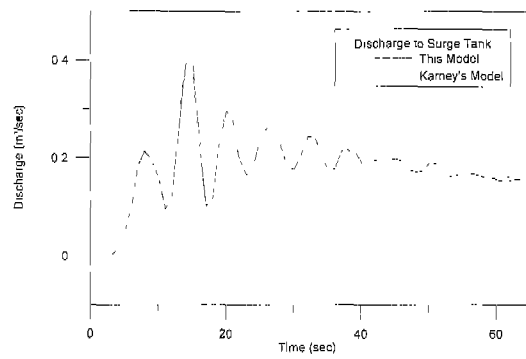


그림 4. 절점 3에서의 유출유량 변화

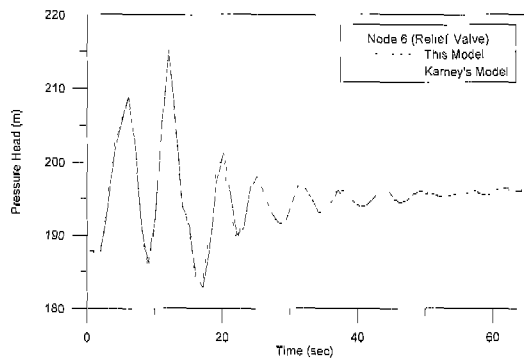


그림 5. 절점 6에서의 수두 변화

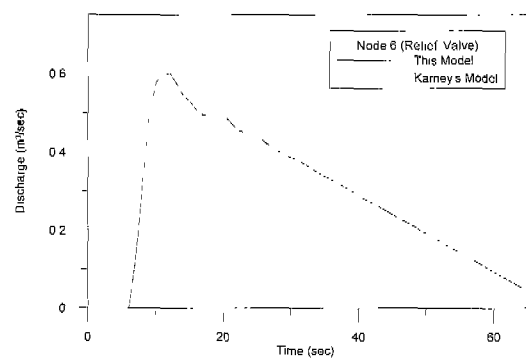


그림 6. 절점 6에서의 유출유량 변화

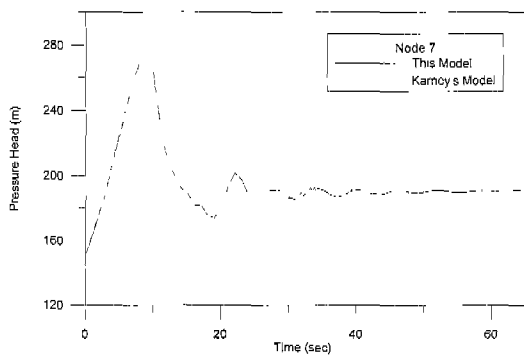


그림 7. 절점 7에서의 수두 변화

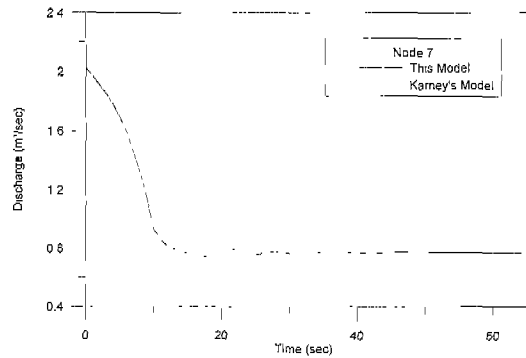


그림 8. 절점 7에서의 유출유량 변화

의 압력은 계속적으로 증가되었으며 모의 시작후 12.06 초에서 절점 6에서 압력수두가 215.2 m 로 최대가 됨을 알 수 있었다(그림 5). 고압력파는 시스템 전체에 전파되어 절점 3 에서는 13.06 초에서 최대압력수두 191.89 m를 나타내었고 이때 절점에서의 높은 압력으로 인한 조압수조로의 유출유량이 최대가 되었다(그림 5,6). 또한 절점 3 에서의 압력이 상승, 하강을 반복함에 따라 조압수조로 유출되는 유량도 유사한

형태로 증가 및 감소하고 있었다. 그림들에서 보여지듯이 절점 3 및 6의 외부유출로 인해 관망 시스템의 고압력 분포가 감쇠되고 있었으며 이들 장치들의 에너지 감쇠 특성을 파악할 수 있었다.

모의결과는 Karney 의 연구결과(Karney와 McInnis, 1993)와 비교되었으며 비교된 모든 절점에서 압력과 유출유량이 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 압력수두의 비교에서 미소한 편차가 발생

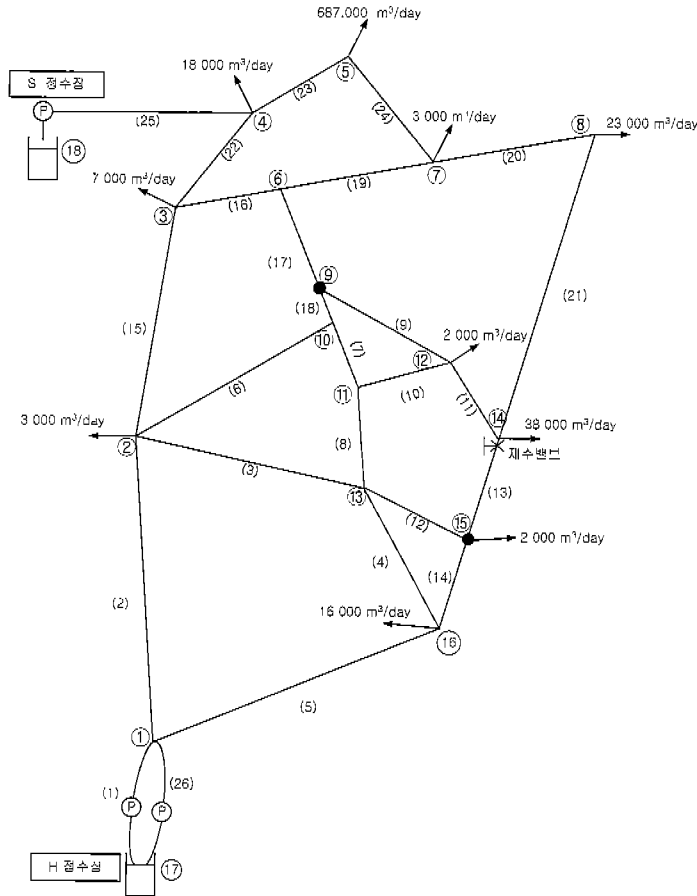


그림 9. 26 개 관로를 가진 실제 관망도

하는 것은 파속조질법을 이용하여 모형을 구성할 경우 각 관로에서 어느정도 파속의 수정이 요구된다. 이때 본 모형과 비교된 모형의 파속의 값이 달라 편차가 발생한 것으로 압력 침투치의 미소한 시간지체가 발생하고 있으나 유출입 유량, 압력파의 크기 및 압력파의 변화 양상 등은 Karney의 모형과 일치하고 있어 본 연구에서 개발된 모형은 주어진 관망에서의 부정류 상태를 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다.

4.2 실제 관망에의 적용

개발된 본 모형을 모 방역시 상수관망에 적용하였다. 그림 9에서 나타난 바와 같이 관로 26 개, 절점 18, 고정절점으로 고려된 정수장 2 곳이 위치하고 있으며 상수관망의 제원은 표 4 와 같다. 실제 상수관망은 H 정수장과 절점 1 사이의 하나의 관로(관로 1)로만 구

성되어 있었다. 주어진 관망조건을 이용하여 유량해석을 실시한 결과 절점 1 과 H 정수장사이의 유량이 과대하여 하나의 관로만으로는 정수장과 절점 1 사이에서 큰 수두손실이 발생하였고 주어진 관망조건으로는 합리적인 정상상태 및 부정류 관모해석이 부적당하였다. 본 연구에서는 관로 1과 같은 제원의 관로 27은 정수장과 절점 사이에 추가하였으며 이렇게 추가된 관망의 형태는 H 정수장과 절점 1 사이에 여분의 관로를 가진 실제 상수관망보다 더 복잡한 형태의 관망이 되어 본 모형을 검증하는데 무리가 없는 것으로 판단되었다.

본 모형의 초기조건은 선형화 기법을 이용하여 계산된 관로의 유량 및 절점수두를 이용하였으며 표 5 에 서 나타나 있다.

본 모형을 검증하고자 절점 14와 연결된 관로 13의

표 4. 실제관망의 관로자료

관로 번호	상류단 절점	하류단 절점	관경 (m)	관로 길이 (Km)	미찰손실계수	정상류 해석		부정류 해석	
						유량 (m^3/s)	손실수두 (m)	유량 (m^3/s)	손실수두 (m)
1	17	1	1.20	45	0.024	0.654	14.97	0.646	14.96
2	1	2	0.80	33	0.033	0.214	12.22	0.210	12.17
3	2	13	0.35	22	0.028	0.044	18.47	0.044	18.42
4	16	13	0.60	16	0.022	0.124	5.53	0.121	5.44
5	1	16	1.20	27	0.024	1.095	25.15	1.081	25.14
6	2	10	0.45	20	0.033	0.084	20.48	0.083	20.37
7	11	10	0.80	7	0.028	0.030	0.04	0.027	0.03
8	13	11	0.80	8	0.028	0.189	1.97	0.185	1.92
9	9	12	0.60	16	0.033	0.023	0.33	0.024	0.32
10	11	12	1.00	10	0.035	0.159	0.73	0.157	0.72
11	12	14	1.00	10	0.024	0.159	0.51	0.158	0.50
12	15	13	0.40	12	0.024	0.020	1.08	0.020	0.97
13	15	14	1.20	7	0.033	0.742	4.08	0.731	4.12
14	16	15	1.20	8	0.028	0.785	4.46	0.775	4.46
15	2	3	0.35	23	0.035	0.050	30.73	0.049	30.64
16	6	3	0.40	11	0.024	0.065	7.91	0.061	9.72
17	9	6	0.70	18	0.030	0.091	1.99	0.087	1.99
18	10	9	0.70	2	0.030	0.115	0.36	0.110	0.38
19	6	7	0.30	18	0.028	0.026	11.25	0.026	11.24
20	8	7	0.90	18	0.028	0.195	2.36	0.183	2.37
21	14	8	1.10	44	0.022	0.461	10.03	0.450	10.04
22	3	4	0.70	13	0.022	0.035	0.12	0.029	0.12
23	4	5	1.20	14	0.033	0.601	5.78	0.613	5.763
24	7	5	0.80	14	0.024	0.186	2.56	0.174	2.562
25	18	4	1.20	90	0.022	0.774	41.40	0.792	40.35
26	19	1	1.20	45	0.024	0.655	14.97	0.646	14.96

표 5. 실제관망의 절점자료

절점 번호	지반고 (m)	수요유량 (m^3/s)	정상류해석 절점수두 (m)	부정류해석 압력수두 (m)	비 고
1	20.0	0.000	83.63	83.59	
2	15.0	0.035	71.42	71.42	
3	13.0	0.081	40.68	40.78	
4	20.0	0.208	40.57	40.66	
5	30.0	0.787	34.78	34.89	
6	7.0	0.000	48.59	48.70	
7	15.0	0.035	37.34	37.46	
8	8.0	0.266	39.70	39.83	
9	10.0	0.000	50.58	50.69	
10	10.0	0.000	50.94	51.06	
11	8.0	0.000	50.98	51.09	
12	10.0	0.023	50.25	50.37	
13	10.0	0.000	52.95	53.01	
14	20.0	0.440	49.74	49.87	
15	25.0	0.023	54.03	53.98	
16	20.0	0.185	58.48	58.45	
17	14.0	-1.292	98.55	98.54	
18	25.0	-0.792	81.97	81.92	제수밸브($E_s = 10$) 펌프 특성곡선식(펌프 2대) $h = 80. - 9.41Q - 0.92Q^2$ 펌프 특성곡선식 $h = 55. + 0.68Q - 5.78Q^2$

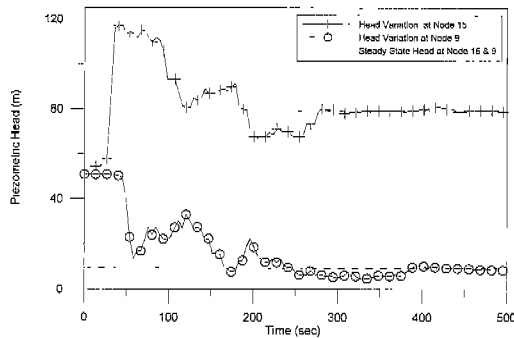


그림 10. 절점 15, 9 에서의 수두변화

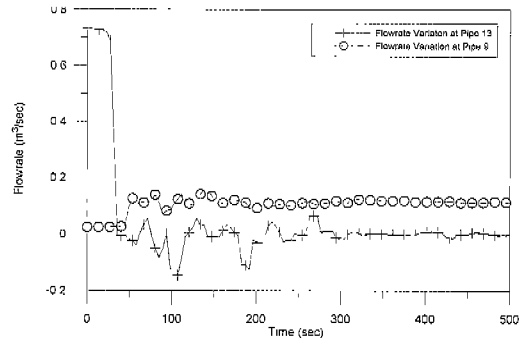


그림 11. 관로 13, 9 에서의 유량변화

말단에 설치된 제수밸브(control valve)를 폐쇄했을 경우 발생하는 관망의 수격현상을 모의하였다. 이 때 제수밸브는 처음 1 초에 10 % 개방 및 20 초에 완전 폐쇄 조건에 대해 500 초까지의 모의 결과를 도시한 것이다. 부정류 해석을 시작하기전 본 수격해석 모형을 이용한 정상상태 해석을 다시 수행하였다. 이는 정상류 해석결과를 초기조건으로 이용하여 부정류해석을 시작할 경우 해석 초기에 압력 및 유량의 동요(perturbation)를 나타내어 수치적 동요를 방지하고자 정상해석을 수행하였고 정상 해석결과는 표 4에서 역시 나타나 있다. 표 4에서 보여지는 바와 같이 부정류 모형을 이용한 초기조건의 결과와 정상상태 해석결과 정상해석 모형과 해석결과가 거의 일치하고 있었으며 이를 통해 본 모형의 수렴성을 다시 확인하게 되었다.

정상해석과 본 모형을 이용한 부정류 해석 결과의 약간의 편차는 정상해석과 특성선법과의 수치해석 기법간의 차이와 펌프 특성곡선을 이용한 수위-유량의 보간 방법의 차이 등으로 인해 발생하였다.

본 수격모의는 펜티엄 500, 노트북 컴퓨터에서 수행되었다. 컴퓨터의 계산시간은 정상해석을 위한 시간을 포함하여 약 3 초 정도 소요되었고 엄청난 계산결과를 위한 저장장치의 기록시간을 제외하면 순수 계산시간은 훨씬 짧은 것으로 예상된다.

절점 9, 15의 압력 변화가 그림 10 에서 도시되었다. 폐쇄된 관로흐름의 상류단에 위치한 절점 15 에서의 압력은 관로 폐쇄 초기에 급격하게 증가하였다가 점차 안정되어가고 있었으며 상대적으로 폐쇄관로의 하류단인 절점 9에서의 압력은 증가된 유량수요로 인해 압력이 감소되고 있었다. 그림에서의 점선은 관로폐쇄시 절점 15, 9에서의 정상상태 해석 압력결과이다. 계산 시작 300 초를 지나면서 본 모형의 결과는 정상

상태에 어느정도 수렴하는 결과를 나타내고 있어 밸브 폐쇄로 인해 발생된 과도압력의 발생과 시간의 경과로 인한 과도압력의 감쇠를 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다. 또한 관로 13 과 9 에서의 유량이 그림 11 에서 보여졌다. 관로 13에서는 관로의 폐쇄로 인해 유량이 감소되었고 관로 9 에서는 관로내 유량이 증가됨을 보였다. 이는 관로의 폐쇄로 인한 상류단의 유량 감소와 절점에서의 압력의 상승, 하류단의 수요유량의 부담증가 및 이로 인한 압력의 감소 등은 합리적인 결과로 판단되어진다.

5. 결 론

본 연구는 상수관망의 비정상 상태 흐름을 해석하기 위하여 과속조절법을 이용하여 관망해석모형을 개발하였다. 특성선법을 이용한 실제 상수관망에서의 부정류 해석시 다양한 경계조건 존재로 인해 해석과정이 매우 복잡하게 된다. 본 연구에서는 이러한 특성선법 해석의 어려움을 극복하고자 보다 간단하고 정확하게 경계조건을 처리할 수 기법을 도입하였고 이 기법을 이용하여 외부 유출 유량을 직접적으로 해석할 수 있는 방정식을 유도하였다. 또한 유도된 방정식을 이용하여 수격해석 모형을 개발하였으며 모형의 적용성 검토를 위해 여러 가지 외부유출 유량 경계조건을 가진 가상 관망 및 26 개 관로를 가진 실제관망에 개발된 모형을 적용하였다. 적용결과 본 연구에서 개발된 모형은 기존의 연구결과와 유량 및 압력 등에서 잘 일치하고 있었으며 실제 관망의 적용에도 합리적인 결과를 나타내고 있어 복잡한 도시상수관망의 부정류 해석에 적용성이 있음이 판단되었다.

본 연구모형은 좀 더 많은 실제관망 및 경계조건을 가진 관망의 적용을 통해 모형의 적용성이 입증된다면

부정류 해석을 이용한 관로의 설계 및 관로내 오염물의 이송 해석 등에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 박남식, 김상현, 유중권, 강주영 (1999) “수도권 광역상수도 1·2단계 관망의 수격현상 전산해석.” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제19권, 제 II-3호, pp. 309~316.
- 박제홍, 한건연 (1996) “Frontal 기법을 이용한 상수관망의 흐름해석 모형.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 대한토목학회, 제29권, 제1호, pp. 141~150.
- 정봉석, 김주인, 김상현, 박남식 (2000) “유전자 알고리즘을 이용한 서변 가압장 수리구조물의 최적설계.” 한국수자원학회 논문집, 대한토목학회, 제33권, 제3호, pp. 289~298.
- Chaudhry, M. H. (1987) *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 27~88.
- Chaudhry, M. H., Islam, M. R., (1995) “Water quality modeling in pipe networking”, *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution System*, Edited by Cabrera, E., Vela, A. F., Kluwer Academic Publisher. No. 16. pp. 369~394.
- Ghidaoui, M. S., Karney, B. W. (1998) “Energy estimates for discretization errors in water hammer problems”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124. No. 4, pp. 384~393.
- Karney B. and McInnis, (1992). “Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7. pp. 1014~1030.
- Liggctt, J. A., Chen, Li Chung, (1995), “Monitoring water distribution systems -The inverse method as a tool for calibration and leak detection”, *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution System*, Edited by Cabrera, E., Vela, A. F., Kluwer Academic Publisher. No. 16. pp. 369~394.
- Watters, G. Z. (1984). *Analysis and control of unsteady flow in pipelines*. Butterworth Publishing, Stoneham, Mass., pp. 111-149.
- Wylie, E. B., Strceter, V. L. (1993) *Fluid Transients in System*. Prentice Hall, pp. 37~79.
- Zhang, Z. Q. (1999), *Fluid transients and pipeline optimization using genetic algorithms*, M.s. dissertation, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, pp. 19~48.

(논문번호:01-026/접수:2001.03.31/심사완료:2001.06.26)