

# 상수관망에서 수압모니터링지점 선정방법

## Determination Methods of Pressure Monitoring Location in Water Distribution System

권혁재\*

Kwon, Hyuk Jae

### Abstract

In this study, determination methods of the pressure monitoring location in water distribution system were introduced and applied to sample pipe network. The best determination method of the pressure monitoring location was suggested and applied to the real city pipe network. Three kinds of determination methods of pressure monitoring locations are categorized such as the sensitivity analysis according to changing roughness coefficient, pressure contribution analysis, and sensitivity analysis according to changing demand. Furthermore, pressure contribution analysis and sensitivity analysis from the results of unsteady analysis were conducted and compared each other. From the results, the most accurate and simplest method was selected in this study. Therefore, the best method can be applied for the pressure management or leakage detection as a determination method of pressure monitoring location in water distribution system.

**Keywords** : monitoring location, pressure contribution, sensitivity, unsteady analysis, water distribution system

### 요 지

본 연구에서는 상수관망의 수압모니터링지점 선정방법을 제시하고 이를 모의하기 위해 단순화된 샘플관망에 적용하여 최적위치를 선정하였다. 또한, 최적의 수압모니터링지점 선정방법을 도출하고 실제 도시의 상수관망에 적용하여 모니터링 지점을 선정해보았다. 모니터링 지점선정방법은 크게 세 가지로 구분하여 계산하였다. 먼저 조도계수 변화로 인한 민감도분석, 유량변화로 인한 압력기여도분석과 민감도분석을 통하여 모니터링 지점을 선정하였다. 그리고 부정류 해석결과를 이용한 압력기여도분석과 민감도분석결과를 정류해석결과와 비교하였다. 결과를 통하여 가장 효과적이고 간편한 방법을 선정하였고 실제 상수관망에 적용하였다. 본 연구에서 제시된 모니터링 지점선정방법은 상수관망의 유지관리는 물론 누수 탐지를 위한 수압관리 모니터링 지점선정방법으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 모니터링지점, 압력기여도, 민감도, 부정류해석, 상수관망

### 1. 서 론

상수관망에서 수압, 수질, 그리고 유량 등을 실시간 모니터링하기 위해서 센서를 설치하는 것은 필수적이며, 특

히 지속적인 수압관리를 위해 수압센서의 설치지점선정은 중요한 문제이다. 수많은 파이프가 도시전체에 광범위하게 매설되어 있기 때문에 모든 곳에 센서를 설치하는 것은 사실상 불가능한 일이다. 따라서 특정 지점에 모니

\* 청주대학교 이공대학 토목공학과, 조교수 (e-mail: hjkwon@cju.ac.kr, Tel: 043-229-8473)  
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University

터링지점을 선정하고 수압센서를 설치해야하는데 그 지점을 선정하고 몇 개의 지점을 선정해야하는지는 경제적 혹은 효율적 측면에서 매우 중요한 일이다. 센서의 설치와 운용에는 많은 경제적 비용이 소요되기 때문에 최적의 지점선정은 중요한 문제이지만 기존의 많은 연구에도 불구하고 수압모니터링 최적지점선정에 대한 연구결과는 아직 미약한 수준에 머무르고 있다.

Pudar and Liggett (1991)는 상수관망에서 누수 감지에 대한 기초적 연구결과를 발표하였다. 여기서 누수의 감지는 압력이나 유량의 측정치를 이용한 역추적문제 해결에 의해서 얻어질 수 있다고 소개하였다. 오리피스 유량변화에 따른 압력의 측정결과와 실제 누수로 인한 압력의 비교를 통하여 누수를 감지하게 되며 민감도 행렬이 측정 지점선정에 지대한 공헌을 하게 된다. 누수의 지점과 양은 압력측정결과와 크거나 정밀도, 그리고 조도계수가 얼마나 정확히 측정되었는가에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

Liggett and Chen (1994)은 역 부정류 해석기법을 동원하여 상수관망의 모니터링 기법을 제안하였다. 부정류 해석을 위하여 특성선법(the method of characteristics)을 사용하였으며 time-lagged calculations이라는 기법을 사용하였다. 이러한 기법을 혼합하여 누수지점을 역추적하는 방법을 개발하였다. 하지만 너무나 많은 계산과정과 노력이 필요하며 그에 따른 결과는 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

Bae (2003)는 상수관로에서 누수관측을 위한 수압관측 지점 선정에 관한 민감도 함수와 엔트로피 함수를 소개하였다. 현재까지 일반적인 수압모니터링 지점은 중요절점이나 관말등에 주관적인 방법으로 선정되었다. 그러나 신뢰성 있는 매개변수 값의 산정을 위해 수압 모니터링 지점 선정 방법으로 마찰계수 변화에 따른 수압의 민감도를 나타내는 민감도 함수와 그에 대한 검증 방법의 일환으로 엔트로피 함수를 소개하였다.

Vitkovsky et al. (2003)은 최적의 압력측정지점을 선정하는 방법을 제시하고 있다. 제시된 세 가지 방법 중 두 가지는 A-optimality 그리고 D-optimality 기준 그리고 나머지 하나는 압력수두의 민감도에 기반을 두고 있다. 이러한 방법은 두 가지 경우의 케이스 스터디에 의해 재현되었는데 첫 번째는 비교적 작은 크기의 상수관망 그리고 두 번째는 큰 상수관망으로 나뉘어 재현되었다. 큰 상수관망의 경우, 새로운 크로스오버 연산자를 갖는 유전자 알고리즘은 최적의 측정지점을 선정하기 위한 가능한 측정위치설정의 탐색을 수행한다. 또한 지점의 숫자만큼

나 각 지점의 데이터계산시간도 고려되었다.

Jun et al. (2008)은 상수관망이 영향행렬지수를 기반으로 한 상수관망의 실시간 모니터링 지점의 결정 알고리즘을 개발하였다. 상수관망이 노후화됨에 따라 파파나 누수와 같은 운영상의 문제가 빈번하게 발생하고 상수관망의 상태를 보다 정확히 파악하여 운영할 경우 안정적인 상수관망의 운영이 가능할 것이다. 상수관망의 실시간 모니터링 센서중 대표적인 Online 압력계를 모든 지점에 설치할 경우 과도한 초기투자 비용이 소요되며 시스템의 유지관리 측면에서도 적절치 않기 때문에 상수관망의 실시간 모니터링 지점과 압력계 대수 선정방법을 제안하였다. 제안된 방법은 영향행렬지수(Effect Index Matrix)를 기반으로 하며 영향행렬지수내 column search를 수행하여 Online 압력계의 위치를 선정한다. 제안된 방법을 미국의 Cherry Hill 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다.

Cheong et al. (2009)은 엔트로피 이론을 이용한 상수관망의 최적 압력 계측 위치 결정방법을 제안하였다. 본 연구에서는 최적 압력 계측 위치 결정에 기존 연구의 단점을 보완하기 위하여 정보이론인 엔트로피 이론을 사용하였다. 기존의 방법은 실측자료를 이용한 검, 보정이 필요로 하기에 체계적인 관리가 미흡한 지역에서는 적용이 어려운 단점이 있다. 또한 대부분의 연구가 상수관망 모형의 정확도를 높이며 측정비용을 최소화하는 절점을 제안하였으며 이는 상수관망 유지 관리를 위한 압력 계측기 위치 결정목적과는 다소차이가 있다. 본 연구에서 제안된 방법으로 특정 절점에서의 유량변화에 의한 다른 절점에서의 압력변화를 정보량인 엔트로피로 정의하여 객관적이고 정량화된 기준을 제시하였다. 절점에서 비정상상태가 발생했을 때 전체 상수관에 미치는 영향 정도를 정량화된 수치인 엔트로피로 나타내며, 각 절점에서 실제적으로 변동하는 압력을 반영하고자 EPANET의 에미터(Emitter)기능을 사용하여 실제 압력변화 패턴을 파악하였다. 최적 압력계 설치 지점은 엔트로피 기준에 의해 전체 시스템으로부터 제공받는 정보량이 가장 큰 절점을 우선으로 설치해야 한다고 제시하였다.

Yoo et al. (2012)은 엔트로피 이론을 이용하여 상수관망에서 압력계설치위치의 최적화에 대해 연구하였다. 엔트로피이론을 이용하여 특정절점에서 필요유량의 변화에 따른 결과로써 다른 절점에서의 압력변화를 규정하는 것에 의해 압력계의 최적설치위치를 선택한다. 필요유량의 변화로써 두 가지 경우가 고려되었는데 첫째 모든 절점에서의 필요유량이 최고치의 경우와 기본필요유량에 근거한 정규분포를 갖는 필요유량의 경우로 구성되어 있다. 실

제 압력변화페턴은 각 절점에서 변하는 압력을 반영하기 위해 EPANET의 에미터기능을 사용하여 결정하였다. 최적의 압력계설치위치는 엔트로피기준에 의해 전체 시스템으로부터 제일 많은 정보를 주거나 받는 절점을 우선순위로 정하는 방법으로 결정된다. 제안된 모형은 가상의 관망과 실제의 상수관망에 적용되었고 최적의 압력계 위치 조합이 민감도분석에 의해 계산되었다.

상수관망에서 수압모니터링 지점선정은 누수 혹은 이상징후의 포착을 위해서 뿐만 아니라 상수관망의 효율적 운용을 위해 매우 중요한 일이다. 다른 절점에 대한 압력의 기여도가 큰 절점과 압력과 유량변화에 대해 압력이 매우 민감하게 반응하는 절점에 대해서는 좀 더 관심을 기울여 관리해야 할 것이다. 또한 압력기여도나 민감도분석결과는 상수관망에 꼭 필요한 시설물의 설치여부나 설치위치선정을 위해서도 판단근거가 될 수 있다. 따라서 수압모니터링 지점선정은 상수관망의 수압유지관리 차원에서 상당히 중요한 문제이며 누수나 이상징후 포착을 위한 실시간 모니터링에서도 매우 중요한 문제일 것이다. 본 연구에서는 상수관망의 실시간 모니터링을 위한 지점선정방법으로 압력기여도분석과 민감도분석방법을 제시하였다. 절점에서 인위적으로 필요유량을 변화시켜 각 절점의 압력기여도와 민감도를 계산하고 우선순위를 선정하였다. 또한 부정류해석을 통하여 압력기여도 및 민감도 분석결과를 정류해석으로부터 나온 결과와 비교하였다.

## 2. 상수관망해석

### 2.1 상수관망의 정류해석(Nodal Point Method)

상수관망내의 누수 혹은 이상 징후를 감지하기 위해서는 상수관망의 수리학적 해석이 우선되어야 한다. 기존에 개발된 많은 정류해석기법인 상용프로그램들이 개발되었으며 만족할 만한 정확도를 보이고 있다. 정류상태의 상수관망의 해석방법으로는 여러 가지가 있으나 가장 많이 사용되는 것은 Hardy-Cross Method와 Nodal Point Method이다. 첫 번째 방법의 경우 수렴속도가 상당히 빠르다는 장점이 있으나 컴퓨터 프로그램상의 어려움이 있다. 두 번째 방법은 수렴속도는 상대적으로 다소 느리지만 컴퓨터 프로그램이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 따라서 본 수치해석에서는 두 번째 수치해석 방법을 사용하여 상수관망을 해석하였다. 관수로의 에너지 손실 방정식은 Darcy-Weisbach 공식과 Hazen-Williams 공식이 많이 사용되고 모든 에너지 손실 방정식은 아래 Eq. (1)과 같이 표현이 가능하다.

$$h = A Q^n \quad (1)$$

Hazen-Williams의 공식을 위식에 적용하면,  $n=1.85$ ,  $A=L/(0.85 C R^{0.63} A)^{1.85}$ 이며, 여기서 C는 Hazen-Williams 계수이다. 따라서  $Q = W h^N$  여기서  $N=1/n$  그리고  $w = \frac{1}{A^N}$  그리고 Q는 아래 Eq. (2)와 같이 표현가능하다.

$$Q_i = W(H_j - H_i)^N \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 현 분기점 그리고  $j$ 는 다음 분기점을 의미한다. Eq. (1)에서 첫 번째 시산법을 위한 교정숫자  $\alpha$ 가 아래 Eq. (3)과 같이 필요하다.

$$Q_i = W[H_j - (H_i + \alpha)]^N \quad (3)$$

Eq. (2)에서 오른쪽 항을 Taylor 급수로 확장하면 아래와 같다.

$$Q_i = W[(H_j - H_i)^N - N(H_j - H_i)^{N-1}\alpha] \quad (4)$$

이것은 다시 간략히 아래와 같이 표현 가능하다.

$$Q_i = B - \alpha C \quad (5)$$

여기서,  $B = W(H_j - H_i)^N$  그리고  $C = W \cdot N(H_j - H_i)^{N-1}$ . 따라서  $\sum Q = \sum B - \alpha \sum C = 0$ . 여기서  $\alpha = \frac{\sum B}{\sum C}$ 이며  $\alpha$ 가 정해지면 Eq. (3)으로 돌아가서 반복계산을 한다.  $\alpha$ 가 0에 가까워지면 계산을 종료한다. 위와 같은 과정을 통하여 각 절점(junction)의 수두(head)와 각 상수관의 유량을 산정하게 된다. 계산결과로부터, 유량이 음수인 경우는 최초 가정한 흐름 방향과 반대 방향임을 나타낸다. 여기서 계산된 수두는 Piezometric head 즉, 위압수두이며 단위는 m(meter)로 나타냈다.

### 2.2 샘플 상수관망

파이프 번호는 각각의 파이프에 대한 고유번호를 의미하며, 분기점, 합류점, 혹은 절점이란 파이프와 파이프가 연결된 지점을 의미한다. Fig. 1과 같이 샘플 상수관망은 총 17개의 파이프, 1개의 배수지, 그리고 14개의 절점으로 이루어졌으며 정류프로그램으로 해석하기로 한다. Tables 1 and 2는 샘플관망의 파이프와 절점자료를 보여주고 있다.

## 3. 정류해석을 이용한 상수관망의 실시간 모니터링 지점선정

### 3.1 파이프의 조도계수 변화에 따른 압력민감도분석

먼저 기존의 연구에서 제시된 방법인 조도계수변화에

따른 각 절점의 민감도분석(Lee and Cho, 2000)을 통하여 우선순위를 선정하는 방법이다.

$$S_j = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta h_j}{\Delta c_i} / k \quad (6)$$

### 3.1.1 각 절점의 압력수두변위/조도계수변위

먼저, 누수가 없는 상태에서 절점의 압력수두와 파이프의 유량을 구했으며 수두와 유량은 Nodal Point Method를 사용하여 산정하였다. 누수량을 파악하는데 필요한 압력의 관측점을 선정해야 하는데 이 과정에서 민감도 행렬(Sensitivity Matrix)이 필요하며 Hazen-Williams의 조도계수를 변화시켜서 민감도 분석을 수행하였다. 예를 들면 1번 파이프의 조도계수를 120에서 110으로 변화시키고 나머지 모든 파이프의 조도계수는 120을 유지하면서 정류프로그램을 통해 해석한다. 이와 같은 방법으로 파이프 개수만큼의 문제를 해석하는데 민감도 분석을 계산한 식은 다음 Eq. (6)과 같다.

여기서,  $k$ =총 파이프 개수,  $j$ 는 절점이며,  $\Delta c$ 는 Hazen-Williams 조도계수의 변위,  $\Delta h$ 는 파이프의 조도계수 변화로 인한 각 절점의 압력수두 변위(m)이다. 따라서 각 파이프의 조도계수를 변화시켜서 생긴 각 절점의 수두변위를 17번에 걸쳐서 합산 후 평균하여 민감도가 큰 절점을 우선순위로 선정한다. 그 결과 우선순위가 아래 Table 3과 같이 결정되었다.

조도계수의 변화에 따른 민감도분석결과 상수관망의 실시간 모니터링 최적지점은 절점 1번과 3번 그리고 10번 순으로 나타났다. 절점 14번은 배수지의 역할을 하는 곳으로써 수압의 변화가 없다고 가정하였으므로 우선순위 결정에서 제외하였다.

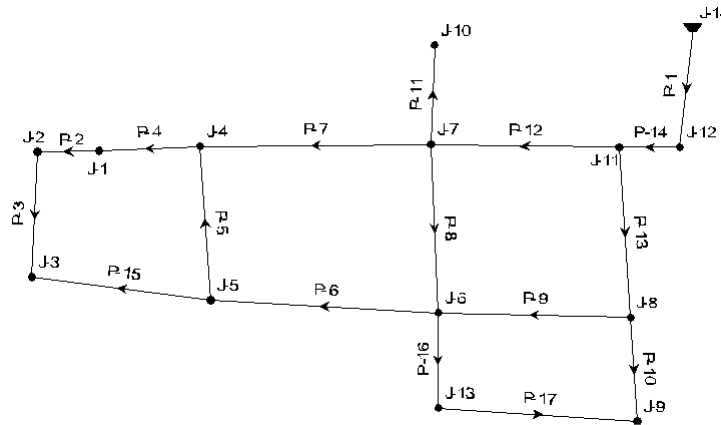


Fig. 1. Sample Pipe Network

Table 1. Pipe Properties of Sample Pipe Network

Pipe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
L (m)	300	50	300	200	300	400	400	300	300	250	200	300	300	150	300	250	300
D (cm)	80	35	35	40	30	35	35	40	40	30	30	30	25	50	25	25	25
C	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130

Table 2. Junction Properties of Sample Pipe Network

Junc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Demand (m <sup>3</sup> /s)	0.0	0.08	0.08	0.06	0.06	0.1	0.0	0.1	0.12	0.12	0.1	0.0	0.05	0.0

Table 3. Results of Sensitivity Analysis according to Change of Roughness Coefficient (1)

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Junc.	1	3	10	9	2	13	5	4	8	6	7	11	12

### 3.1.2 각 절점의 압력수두변위/최초압력수두

두 번째 방법은 누수가 없는 상태에서 절점의 압력수두와 파이프의 유량을 구한다. 위와 동일한 방법으로 수두와 유량을 산정한 후 Hazen-Williams 식의 조도계수를 변화시켜서 민감도분석을 수행하였다. 예를 들면 1번 파이프의 조도계수를 120에서 110으로 변화시키고 나머지 모든 파이프는 120을 유지하면서 정류프로그램을 통해 해석한다. 이와 같은 방법으로 파이프 개수만큼의 해석을 수행한다. 조도계수 변화로 발생한 압력수두의 변위와 원래 압력수두의 비를 합산하고 절점수로 평균하여 민감도를 계산한다. 민감도 분석을 계산한 식은 다음 Eq. (7)과 같다.

$$S_j = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta h_{ji}}{h_j} / k \quad (7)$$

여기서,  $k$ 는 총 파이프 개수,  $j$ 는 절점이며,  $h_j$ 는 각 절점에서의 최초압력수두,  $\Delta h_{ji}$ 는  $i$ 번 파이프의 조도계수변화로 인한 각 절점의 압력수두변위(m)이다. 따라서 파이프의 조도계수를 변화시켜서 생긴 각 절점의 압력수두변위를 최초 압력수두로 나누고 17번에 걸쳐서 합산 후 평균하여 민감도가 큰 절점을 우선순위로 선정한다. 그 결과 우선순위가 아래 Table 4와 같이 결정되었다.

Table 4에서 보는 바와 같이 분석 결과 Table 3과는 비슷한 결과를 나타냈다. 우선순위는 절점 1번과 절점 3번이 1순위와 2순위로 분석결과 Table 1과 동일한 결과를 나타냈고 3순위는 절점 2번으로 Table 3과 다른 결과를 나타냈다.

### 3.2 유량변화에 따른 각 절점의 압력기여도분석

다음은 한 절점에서 유량을 변화시키고 그로인해 발생하는 각 절점에서의 압력수두변위와 유량변화가 발생한 절점의 원래 압력수두와의 비를 합하고 평균하여 압력기여도분석을 수행하였다. 이 방법은 특정 절점에서 유량변화로 발생한 압력의 변화가 다른 절점에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 기여도를 정량적으로 산정하는 방법이

다. 앞서 설명한 유량변화는 각 절점에서 유출유량을 0.02 m<sup>3</sup>/sec 씩 추가로 배출하는 조건으로 13회에 걸쳐서 정류 해석을 수행한다. 추가 유출유량은 기존에 가정된 기본 유출유량과 같은 양으로써 다소 과다한 양임을 알 수 있다. 그러나 실제 방법의 적용성을 가늠하기 위해 다소 과다한 양을 유출량으로 가정하여 산정하였다. 추가 유출로 인하여 특정 절점에서 유량의 변화가 생겼으므로 정류해석후의 결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 압력수두와 각 파이프에서의 유량이 변하게 된다. 각 절점에서의 압력수두변위와 유량변화가 발생한 절점의 최초압력의 비를 합산하고 평균한 값을 비교하여 Eq. (8)과 같이 한 절점의 압력이 다른 모든 절점의 압력에 기여하는 정도를 정량적으로 산정하여 비교하였다.

$$S_i = \sum_{j=1}^m \frac{\Delta h_j}{h_i} / m \quad (8)$$

여기서,  $m$ =절점수,  $j$ 는 절점이며,  $\Delta h_j$ 는 특정 절점에서 발생한 유량변화로 인한 각 절점에서의 압력수두변위,  $h$ 는 특정 절점의 최초 압력수두이다. 따라서 각 절점에서 유량을 변화시킨 후 그로인해 생긴 각 절점의 압력수두변위와 유량변화가 생긴 절점에서의 압력수두의 비를 합산 후 평균하여 각 절점의 압력기여도를 분석하고 기여도가 큰 절점을 우선순위로 선정한다. 그 결과 우선순위가 아래 Table 5와 같이 결정되었다. Table 5에서 보는 바와 같이 우선순위는 13번과 3번이 1순위와 2순위, 그리고 2번과 1번이 그 뒤를 따르는 순서였고 앞서 설명한 방법과는 약간 다른 결과를 나타냈다.

### 3.3 유량변화에 따른 각 절점의 압력민감도분석

이 방법은 앞서 설명한 유량의 변화에 따른 압력변위를 산정하는 방법으로는 흡사하지만 유량변화가 발생한 절점의 압력변위와 그 절점의 최초압력의 비를 산정하는 방법은 3.1의 (2)와 같다. 한 절점에서 유량을 변화시키고 그로인해 발생하는 압력변위와 최초압력의 비를 합산하고 평균하여 민감도 분석을 수행한 것이다. 각 절점에서

Table 4. Results of Sensitivity Analysis according to Change of Roughness Coefficient (2)

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Junc.	1	3	2	9	10	13	5	4	8	6	7	11	12

Table 5. Results of Pressure Contribution Analysis according to Change of Demand

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Junc.	13	3	2	1	4	5	9	6	10	8	7	11	12

한차례 유량변화를 발생시키고 압력변위를 계산하기 때문에 절점의 숫자만큼 계산이 이루어지게 된다. 따라서 절점 수만큼 유량변화에 따른 압력변위가 발생하고 그것을 합산하고 평균하여 그 수치가 가장 큰 절점을 우선순위로 결정하게 된다. 앞서 설명한 유량변화는 각 절점에서 유출유량을 0.02 m<sup>3</sup>/sec씩 추가로 배출하는 조건으로 13회에 걸쳐서 정류해석을 수행한다. 이때 특정 절점에서 유량의 변화가 생겼으므로 정류해석후의 결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 위압수두와 각 파이프에서의 유량이 변하게 된다. 이때 변한 각 절점에서의 수두변위와 유량변화가 발생한 절점의 최초압력의 비를 계산하고 계산 횟수만큼 합산 후 평균한 값을 비교하여 Eq. (9)와 같이 한 절점의 압력변위와 최초압력의 비를 민감도로 규정하고 정량적으로 산정하여 비교하였다.

$$S_j = \sum_{j=1}^m \frac{\Delta h_j}{h_j} / m \quad (9)$$

여기서, m=절점수, j는 절점이며, Δh<sub>j</sub>는 특정 절점에서 발생한 유량변화로 인한 각 절점에서의 압력수두변위, h는 특정 절점의 최초압력수두(m)이다. 계산결과 우선순위가 아래 Table 6과 같이 결정되었다.

Table 6은 Table 5와 비슷한 결과를 보여주고 있으나 1순위로 선정된 절점 13번은 7순위로 큰 차이를 나타내고 있다. Table 6에서 볼 수 있듯이 1순위는 절점 3번, 2순위는 절점 1번, 그리고 절점 2번, 절점 4번이 그 뒤를 따르고 있다.

#### 4. 부정류해석을 이용한 모니터링지점 선정

##### 4.1 상수관망의 부정류 수치해석(The method of characteristics)

파이프 흐름에서 부정류 수치해석은 압력과 유속이 어느 지점에서나 시간의 함수로 결정되어야 한다. 해석에 쓰이는 두 개의 지배방정식은 잘 알려진 연속방정식과 운동방정식이며 두 개의 지배방정식을 푸는 여러 가지 해법들(Kwon, 2005)이 제시되고 있으나 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 상수관의 부정류 해석에서 가장 사용이 간편하고 안정적인 특성선법(the method of characteristics)을 이용한 수치모형이 사용되었다. 파이프의 부정류 해석을 위한 지배방정식으로 Eqs. (10) and

(11)은 다음 식과 같다(McInnis and Karney, 1995).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (10)$$

$$\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

여기서, H는 위압수두(piezometric head), Q는 유량, c는 압력파의 속도, A는 파이프의 단면적, D는 관경, g는 중력가속도, 그리고 f는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. L<sub>1</sub>이 운동방정식을 L<sub>2</sub>가 연속방정식을 의미한다면, 이들의 선형방정식, L = L<sub>1</sub> + λL<sub>2</sub> (λ는 라그랑지안 멀티플라이어)은 다음 Eq. (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (12)$$

여기서, H = f<sub>1</sub>(x, t) 그리고 Q = f<sub>2</sub>(x, t)이며 다음 Eqs. (13) and (14)의 체인법칙이 적용될 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (14)$$

따라서 Eqs. (12), (13), and (14)를 통해서 λ가 다음과 같이 결정된다. 만약, dx/dt = λc<sup>2</sup>라면 Eq. (12)의 좌변 첫 항은 정확히 Eq. (13)과 일치하고, dx/dt = 1/λ라면 Eq. (12)의 좌변 두 번째 항의 괄호는 정확히 Eq. (14)와 일치한다. 따라서 1/λ = dx/dt = λc<sup>2</sup>이며 λ는 다음 Eq. (15)와 같이 된다.

$$\lambda = \pm \frac{1}{c} \quad (15)$$

따라서 Eq. (12)은 아래의 Eqs. (16) and (17)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (17)$$

그리고 Eqs. (16) and (17)은 유한차분법을 사용하여

Table 6. Results of Sensitivity Analysis according to Change of Demand

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Junc.	3	1	2	4	5	9	13	10	6	8	7	11	12

각각 다음 Eqs. (18) and (19)와 같이 수립되었다.

$$(Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n) + \frac{gA}{c}(H_i^{n+1} - H_{i-1}^n) + \frac{f\Delta t}{2DA} Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| = 0 \quad (18)$$

$$(Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^n) - \frac{gA}{c}(H_i^{n+1} - H_{i+1}^n) + \frac{f\Delta t}{2DA} Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| = 0 \quad (19)$$

## 4.2 부정류 해석결과

먼저 개발된 부정류해석 프로그램(Kwon, 2005)을 이용하여 각 절점에서 갑작스런 유량의 변화가 일어났다고 가정하여 해석을 수행하였다. 각 절점에서 소요유량이  $0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$ 가 추가로 유출될 경우에 대해서 해석을 하였다. 첫 번째 계산에서는 1번 지점에서  $0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 갑작스런 유출이 일어날 때를 가정하였다. 원래 1번 지점은 수요량(demand)이 없는 절점이지만 갑작스런 유출이 일어났다고 가정하고 부정류 해석을 수행하였다. 두 번째는 2번 절점에서  $0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 추가 수요가 발생했다고 가정하고 부정류 해석을 수행하였다. 원래 2번 절점은  $0.08 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 수요량이 항상 존재하는 절점이지만  $0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 추가 수요가 발생할 때를 가정하여 부정류 해석을 수행하였다. 추가 수요량이 발생하였다는 것은 그 절점에서의 누수량으로 간주할 수 있으므로 실제 일어날 수 있는 누수에 대한 민감도 분석을 하여 센서의 설치지점을 선정한다면 보다 더 정확한 지점선정이 될 것으로 판단된다. 이와 같은 시나리오를 통해서 총 13회에 걸친 부정류 해석이 수행되었고 14번 절점은 배수지로 간주되어 절점에서의 수두변화가 없는 곳이다. 부정류해석을 위한 기본적인 조건으로  $\Delta t=0.008 \text{ sec}$ ,  $\Delta x=10 \text{ m}$ ,  $c=1250 \text{ m}/\text{sec}$ , 따라서

Courant No.=1.0, 그리고 Darcy-Weisbach 마찰계수는 모든 관에 대하여 0.015를 적용하였다. Fig. 2는 부정류해석 결과의 예로써 유량변화로 발생한 7번과 13번 절점의 압력 변동을 보여주고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 13번 절점이 유량변화에 대해 상대적으로 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 한 절점에서 유량이 변화할 때 13개의 모든 절점에서 부정류해석을 수행하였고 13개의 모든 절점에서 유량의 변화를 가정하여 계산하였으므로 총 13번의 계산이 이루어졌다. Table 7은 부정류 해석결과 각 지점에서의 압력수두의 변위를 나타내고 있다. 즉, Table 7의 수치들은 갑작스런 유량변화로 인해서 각 절점에서 발생한 압력의 최고치와 최저치의 차를 의미한다.

Table 7에서 가장 윗줄은 각 절점을 의미하고 절점에서의 유량변화에 의한 압력수두변위를 나타내고 있다. 가장 좌측 칸은 각 절점에서 정류해석으로 얻어진 원래의 위압수두를 나타내고 있다.

## 4.3 부정류해석 결과를 이용한 모니터링 지점선정

### 4.3.1 부정류해석을 이용한 압력기여도 분석에 따른 모니터링 지점선정

한 절점에서 유량을 변화시키면 그로인해 부정류가 발생한다. 이때 각 절점에서의 압력변위와 유량변화가 발생한 절점의 압력비를 합하고 절점의 수로 평균하여 압력기여도분석을 수행한 것이다. 특정 절점에서 유량변화로 발생한 압력의 변화가 다른 절점에 얼마나 영향을 미치는지

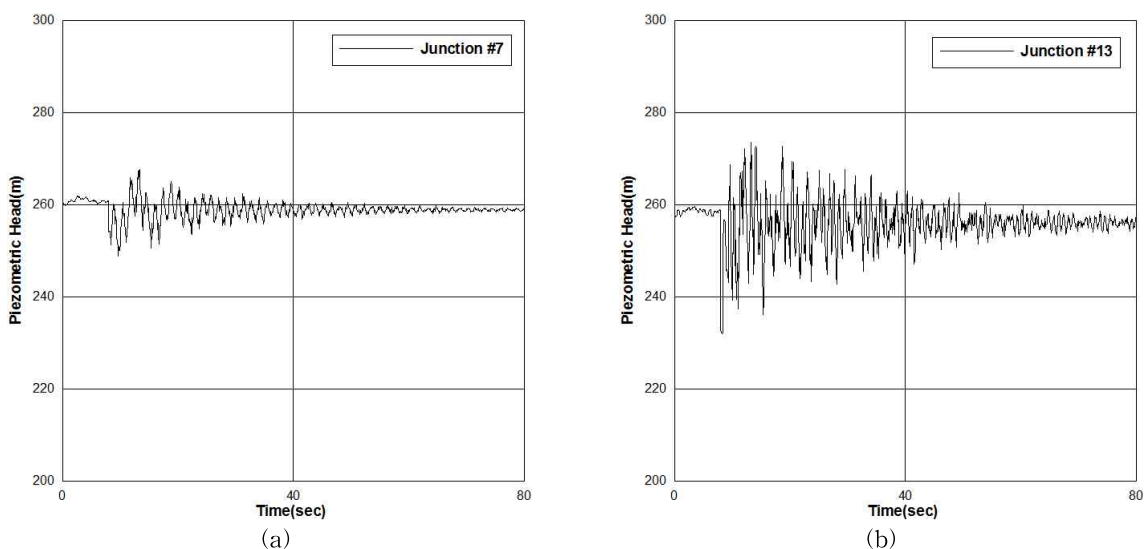


Fig. 2. Pressure Oscillation at (a) J-7 and (b) J-13 according to Sudden Change of Demand

에 대한 기여도를 부정류해석결과를 이용하여 정량적으로 산정하는 방법이다. 특정 절점에서 유량의 변화가 생겼으므로 부정류해석결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 압력수두는 크게 유동하게 된다. 이때의 최고치와 최저치의 차는 압력변위이고 최초압력과 비를 합산하고 절점의 수로 평균한 값을 비교하였다. Eq. (8)에 부정류 해석결과를 이용하여 한 절점의 압력이 다른 모든 절점의 압력분포에 기여하는 정도를 정량적으로 산정하고 비교분석하였다. 따라서 각 절점에서 유량을 변화시킨 후 그로인해 생긴 각 절점의 압력수두변위와 유량변화가 생긴 절점에서의 압력수두의 비를 합산 후 평균하여 각 절점의 압력기여도를 분석한다. 그리고 기여도가 큰 절점을 우선순위로 선정한다. 그 결과 우선순위가 아래 Table 8과 같이 결정되었다.

Table 8에서 보는 바와 같이 우선순위는 절점 3번과 절점 9번이 1순위, 2순위, 그리고 절점 13번과 절점 10번이

그 뒤를 따르는 순서였다.

#### 4.3.2 부정류해석을 이용한 압력 민감도분석에 따른 모니터링 지점선정

이 방법은 유량변화로 발생한 절점의 압력변위와 그 절점의 최초압력의 비를 산정하는 방법이며 부정류해석결과를 이용하였다. 한 절점에서 유량을 변화시키고 부정류로 인해 발생하는 압력변위와 최초압력의 비를 합산하고 절점수로 평균하여 민감도 분석을 수행한 것이다. Eq. (9)를 사용하여 어느 절점의 압력변위와 최초압력의 비를 민감도로 규정하고 정량적으로 산정하여 비교하였다.

부정류 해석을 통한 각 절점의 압력 민감도분석결과, 우선순위가 아래 Table 9와 같이 결정되었다. Table 9에서 보는 바와 같이 분석 결과 압력기여도분석결과와 비슷한 결과를 나타냈다. 1순위는 Table 8과 같은 절점 3번이 선정되었고 그 뒤를 절점 13번, 절점 9번, 절점 10번 절점

Table 7. Pressure Change at Each Junctions from the Results of Unsteady Analysis

Head (m)	No.	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9	J-10	J-11	J-12	J-13
256.93	1	27	28	29	22	23	24	19	28	33	31	11	6	33
256.71	2	28	31	29	23	20	27	20	25	36	32	8	5	35
256.55	3	28	29	35	29	26	24	26	30	40	42	11	7	37
257.37	4	19	22	32	20	21	22	20	23	26	26	6	6	25
257.42	5	22	22	26	20	30	22	16	21	29	21	12	8	31
258.97	6	25	26	25	22	21	17	12	15	22	17	8	4	25
260.48	7	19	19	26	19	17	11	19	16	19	18	9	6	20
259.35	8	28	28	25	23	20	14	17	23	27	21	8	6	30
257.41	9	33	36	40	26	29	18	24	27	38	36	15	7	35
258.68	10	30	31	41	26	19	16	23	20	35	51	14	9	35
294.69	11	11	13	12	11	13	7	9	8	12	14	14	9	12
299.1	12	7	6	8	6	8	5	6	6	7	9	9	7	9
257.47	13	31	34	38	26	29	21	20	30	35	36	13	9	40

Table 8. Results of Pressure Contribution Analysis from the Results of Unsteady Analysis

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Junc.	3	9	13	10	2	1	5	4	8	6	7	11	12

Table 9. Results of Sensitivity Analysis from the Results of Unsteady Analysis

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Junc.	3	13	9	10	2	1	5	4	8	7	6	11	12



이 선정되었다. Table 8과는 2번 순위와 3번 순위가 뒤바뀐 결과를 보이고 있지만 대체적으로 비슷한 결과라고 할 수 있다.

가상의 소규모 상수관망을 이용하여 여러 가지 시나리오를 가지고 부정류해석을 수행하였다. 가상의 상수관망은 한 개의 배수지에서 물을 공급하며 이때 각 절점에서 갑작스런 추가소요유량이 발생한다는 시나리오로 부정류를 재현하였다. 여기서 갑작스런 추가소요유량의 필요로 인해서 각 절점에서 압력의 변위가 생기며 상수관망 전체에 급속히 확산되어 큰 압력변화를 목격하게 된다. 이러한 부정류 해석결과를 이용하여 상수관망의 모니터링 지점 선정방법을 비교분석하였다.

## 5. 실제 도시상수관망에 적용

본 연구에서는 앞서 제시한 압력기여도분석방법을 이용하여 실제 도시 상수관망에서 모니터링 지점을 선정하였다. 사용된 실제도시 상수관망은 Fig. 3과 같이 349개의 절점과 365개의 파이프로 이루어졌으며 한 개의 배수지를 갖추고 있다. 압력기여도분석방법을 통한 모니터링 지점 선정 결과 아래 Table 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 실제 상수관망의 해석에는 샘플관망과는 다르게 많은 절점의 압력과 파이프의 유량을 계산해야하므로 상당히 많은 시간이 소요되었다. 각각의 절점에서 필요유량에  $0.0005 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 소요유량을 첨가하여 압력변위를 측정하고 이에 따른 다

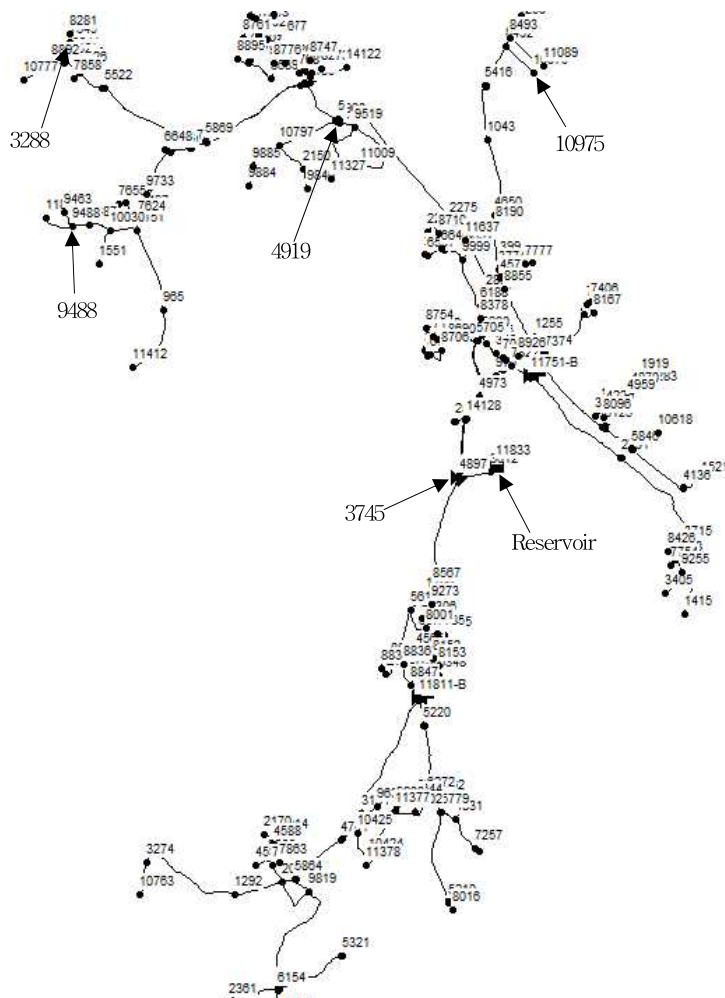


Fig. 3. K City Water Distribution System

Table 10. Determination of Pressure Monitoring Location in K City Water Distribution System

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Junc.	4919	5959	5941	3288	3294	10975	9488	3745	3725	11089

른 절점의 압력변화를 측정하여 압력기여도를 계산하였다. 추가로 가정한 필요유량  $0.0005 \text{ m}^3/\text{sec}$ 는 349개의 절점에서의 필요유량은 크게는  $0.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 부터 적게는  $0.005 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 나타났다. 여기서 가장 작은 유출유량의 10%에 해당하는 양을 유출유량으로 가정하여 계산하였다. 그 결과 최우선순위로 4919번 절점이 선정되었고 나머지 2, 3순위는 4919와 비슷한 위치였다. 다음으로는 3288, 9488, 10975 등과 같이 관말에서 압력기여도가 큰 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 샘플관망을 통한 결과와 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 다음으로는 배수지 근처에서 압력기여도가 큰 3745번 절점을 찾을 수 있었다. 따라서 우선순위에 나타난 바와 같이 압력기여도가 큰 절점에 압력센서를 설치하되 순위가 앞서더라도 비슷한 위치에 많은 압력센서를 설치할 필요는 없으므로 압력기여도 분석결과를 토대로 운영자가 판단하여 센서설치위치를 최종 선정해야 할 것이다. 계산결과, 349개 절점에서 압력기여도는 최고 0.808 그리고 최저 0.142로 나타났고 349개 절점의 압력기여도 평균은 0.467 그리고 표준편차는 0.483으로 나타났다.

## 6. 결 론

가상의 소규모 상수관망을 이용하여 소요유량변화에 대한 시나리오를 가지고 정류 및 부정류 수치해석을 수행하였다. 먼저 수압모니터링 지점선정을 위하여 조도계수의 변화로 인한 절점의 압력민감도분석을 수행하였다. 파이프의 조도계수변화에 의해 발생한 압력의 변위를 계산하여 가장 민감한 절점을 찾을 수 있었다. 두 번째로 가상의 상수관망은 한 개의 배수지에서 물을 공급하며 이때 각 절점에서 갑작스런 추가소요유량이 발생한다는 가정으로 정류상태에서의 변화를 계산하였다. 유량변화로 인한 각 절점의 압력변위를 계산하고 이를 통해 절점의 압력기여도 분석으로 모니터링지점을 선정하였다. 각 절점마다 일정한 유량을 필요유량에 합산하여 유량에 변화를 주었으며 이로 인한 다른 나머지 모든 절점의 압력변위를 계산하였다. 이렇게 계산된 결과는 어느 절점에서의 유량변화가 나머지 절점에 어느 정도의 압력변위를 발생시키는 지 확인하는 방법으로써 압력기여도가 큰 절점을 우선순위로 선정한다. 세 번째로 유량변화로 인한 각 절점의 압력변위를 계산하고 이를 통해 절점의 압력민감도분석으로 모니터링지점을 선정하였다. 각 절점마다 일정한 유량을 필요유량에 합산하여 유량에 변화를 주었으며 이로 인한 각 절점의 압력변위를 계산하고 압력변위가 발생하

기전의 압력과 비교하여 가장 민감하게 반응한 절점을 우선순위로 선정하게 된다. 마지막으로 부정류 해석결과를 이용한 압력기여도분석과 민감도분석방법이다. 먼저 갑작스런 추가소요유량의 필요로 인해서 각 절점에서 압력의 유동이 발생하며 상수관망 전체에 급속히 확산 된다. 이러한 부정류해석결과를 이용하여 상수관망의 모니터링 최적지점 선정방법을 비교 분석하였다. 정류해석결과와 부정류해석결과를 이용한 압력기여도 및 민감도분석을 통한 모니터링 지점선정결과에서 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 정류해석결과에서 압력기여도분석방법을 통한 모니터링 지점선정방법이 부정류해석결과와 비교하여 가장 근사한 결과를 얻었다. 부정류해석결과를 통해 모니터링 지점을 선정하기 위해서는 상수관망의 크기가 큰 경우 부정류해석에 너무 많은 시간이 소요되어 상수관망 운영에 큰 부담이 될 수 있다. 하지만 정류해석결과, 압력기여도 분석방법을 통한 모니터링 지점선정방법이 부정류 해석결과를 이용한 방법과 비슷한 결과를 보여주고 있으므로 향후 정류해석을 통한 압력기여도분석방법으로 모니터링 지점선정을 하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 압력기여도분석방법을 통하여 K시의 실제상수관망에 적용하여 모니터링지점을 선정하였다. 샘플관망의 경우 정류해석결과와 부정류해석결과에서 3번, 9번, 13번 절점 등 모두 관말에서 모니터링 우선순위가 결정되었으며 실제 K시의 상수관망에서도 4919번, 5959번, 5941번, 그리고 3288번 절점 순으로 관말에서 우선순위가 결정되었다. 모니터링 지점이 관말에 집중되는 현상은 지극히 정상적이고 예측했던 결과이다. 하지만 상수관망의 여러 관말의 절점들 중에서 보다 더 효과적인 최적지점을 선정하는 일은 상수관망의 수압관리 및 누수 감시에 꼭 필요한 과업일 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 EIS사업”으로 지원받은 과제임(GT-02-G-1).

## References

- Bae, J.Y. (2003). *Optimal monitoring locations in water distribution systems*. Master's Thesis, Donga University.
- Chung, G.H., Chang, D.I., Yoo, D.G., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2009). “Determination of Optimal Pressure Monitoring Locations for Water Distribution.” *Journal of*

- Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 7, pp. 537-546.
- Jun, H.D., Cho, M.S., Back, C.W., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2008). "A methodology to determine realtime monitoring locations for water distribution systems based on the effect index matrix." *KWAR Annual Conference, Korea Water Resources Association*, pp. 1428-1432.
- Kwon, H.J. (2005). *Transient flow in water distribution system* Ph.D. Thesis, University of Southern California, Los Angeles, CA.
- Lee, K.S., and Cho, B.J. (2000). *Leak detection in pipe networks using inverse problem*. KWRA Annual Conference, Korea Water Resources Association. pp. 873-878.
- Liggett, J.A., and Chen, L. (1994). "Inverse transient analysis in pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 8, pp. 934-955.
- McInnis, D., and Karney, B.W. (1995). "Transients in distribution networks: Field tests and demand models." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 3, pp. 218-231.
- Pudar, P.S., and Liggett, J.A. (1991). "Leaks in pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 7, pp. 1031-1046.
- Vitkovsky, J.P., Liggett, J.A., Simpson, A.R., and Lambert, M.F. (2003). "Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 6, pp. 480-492.
- Yoo, D.G., Chang, D.E., Jun, H., and Kim, J.H. (2012). "Optimization of pressure gauge locations for water distribution systems using entropy theory." *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 184, No. 12, pp. 7309-7322.

논문번호: 13-064	접수: 2013.08.08
수정일자: 2013.10.04	심사완료: 2013.10.04