ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 5, pp. 611-619, October, 2013
http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2013.27.5.611

Back Tracing Calculation Method for the Leakage Detection in Water Distribution System

상수관망에서 누수탐지를 위한 역추적계산법

Kwon, Hyuk Jae
권혁재

청주대학교 토목공학과

Abstract : In this study, Back Tracing Calculation Method was developed to determine the leakage location and leakage amount. Previously developed determination method of monitoring location and newly developed Back Tracing Calculation Method were applied to the sample pipe network and real size pilot plant. After leakage was assumed in the pilot plant, leakage location and leakage amount could be traced by Back Tracing Calculation Method. From the results, it was found that Back Tracing Calculation Method can be applied for the leakage detection in water distribution system. Furthermore, this method can be applied for the pressure management or leakage detection as a pressure control method in water distribution system.

Key words : Back Tracing Calculation, Leakage detection, Monitoring location, Pressure management, Water distribution system
주제어 : 역추적계산, 누수탐지, 모니터링지점, 압력관리, 상수관망

1. 서 론

상수관망의 기능은 정수처리 된 양질의 물을 수용가에 안전하게 공급하는 것이며 이를 위해 상수관내에는 수용가에 충분한 양의 물을 공급할 수 있는 적정유량과 압력이 유지되어야 하고 최소기준치 이상의 잔류염소농도 유지 등의 적절한 수질을 만족시켜야 한다. 하지만 상수관망은 상수관의 누수 및 파열에 따른 갑작스런 사고에 의해 항상 제 기능을 100 % 발휘하지 못하고 있다. 이러한 상수관의 파열이나 누수사고 발생 시 신속한 대처를 위해서는 상수관망의 모든 절점에 수압센서나 유량계를 설치하여 실시간 모니터링하는 것이 바람직하겠으나 이는 경제적 측면과 유지관리의 측면에서 불가능하거나 이상적이지 않다. 또한 발생가능한 모든 상황에 대한 시뮬레이션 기반의 수압, 유량모델링을 통하여 적절한 누수지점을 탐지하고 측정지점을 선정할 수도 있겠지만 이는 상당한 시간과 계산능력을 필요로 한다. 따라서 최소의 수압센서를 이용한 누수의 탐지기법은 많은 연구가 진행되고 있으나 그 결과는 아직 미미한 상태이다.

Lee and Cho (2000)은 역산법을 이용하여 누수를 모의하고 탐지하는 방법을 제시하였다. 먼저 누수가 없는 상태에서 절점에서의 수두와 파이프 유량을 구했고 절점에서 누수면적을 알았을 때 수두값이 어떻게 변하는가를 알아보았다. 중복연립방법을 이용하여 누수면적을 구해서 가상 시나리

• Received 14 August 2013, revised 11 October 2013, accepted 14 October 2013.
* Corresponding author: Tel : 043-229-8473 Fax : 043-229-8466 E-mail : hjkwon@cju.ac.kr

오의 처음 누수면적과 비교분석하였다. 누수면적 시나리오 값을 알았을 때 완전연립문제가 되므로 연립방정식을 계산하여 누수에 의한 절점의 수두값을 계산하였다.

Bae (2003)는 상수관로에서 누수관측을 위한 수압관측지점 선정을 위한 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 검증방법의 일환으로 엔트로피 함수를 소개하였다.

Park et al. (2004)는 누수위치 탐지를 위한 최적화 기법을 비교하였다. 상수관에서 임의의 지점에 발생한 누수를 관측하고 측정한 자료는 시간에 따라 흐름 특성의 변화가 발생하는 부정류 흐름을 통하여 단위 시간별 측정자료를 추출하고 추출된 자료는 최적화 기법을 통해 누수량 및 누수위치를 추적한다. 누수위치 탐지 전산 프로그램에서 최적화 기법은 프로그램의 효율성을 지배하는 주요소가 된다. 본 연구에서는 집단진화(SCE) 기법을 이용한 관망 누수위치 탐지 프로그램과 기존의 유전자 방법(GA)을 이용한 누수위치 탐지 프로그램을 각각의 최적화 변수에 대해 분석하고 수치해석을 이용하여 두 최적화 기법에 대해 직접 비교하였다. 누수위치탐지 전산프로그램에서 최적화 기법으로 집단진화방법이 계산효율과 최적해 탐지능력 측면에서 유전자 방법보다 훨씬 더 우수한 것으로 나타났다.

Kim et al. (2005)은 천이류와 주파수분석을 이용한 누수탐지 기법을 연구하였다. 신호처리기법에서 가장 잘 알려진 푸리에변환(Fourier Transform)을 이용하여 기존의 시계열자료에서 표현되지 못했던 관의 특성을 주파수자료로 변환하여 획득할 수 있다. 상수관망에서 누수가 일어나면 누수지점에 의해 파속의 변화가 일어난다. 이런 변화를 주파수분석을 통해 해석하여 누수지점을 찾아냄으로써 부정류해석의 단점을 보완할 수 있다. 이와 같은 누수문제를 부정류해석과 신호처리기법(Frequency Analysis)을 이용하여 그 위치를 알아내는 방법을 제시하였다.

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

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

미국에 대한 9.11 테러사건을 계기로 북미 지역은 물론 유럽의 여러 국가들이 상수관의 보안(security)과 안전성확보에 대한 많은 연구를 추진하고 있다. Ostfeld and Salomons(2004, 2005)의 논문이 바로 그 대표적 예이다. 예를 들면 테러리스트들에 의한 독극물 주입이 가능할 것으로 판단하고 이러한 테러에 즉각 대응할 수 있는 시스템의 구축을 추진하고 있다. 경보시스템의 구축은 물론 관의 흐름을 즉각 차단할 수 있는 방식에 대해 연구가 진행되고 있다.

Misiunas et al.(2005)는 상수관에서 발생하는 누수나 파열을 부정류를 발생시켜서 관측하는 방법을 제시하였다. 누수지점의 정확한 산정을 위하여 부정류 고유압력파의 속도가 이용되며 이를 역추적하여 정확한 위치 산정을 가능케 하였다. 부정류 파의 크기는 누수의 크기를 산정

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 5, pp. 611-619, October, 2013

할 수도 있으며 갑작스런 파열로 발생하는 고유한 압력파의 형태도 감지할 수도 있었다. 하지만 단일관로에서는 추적이 가능하지만 복잡한 일반적인 도시 상수관망에서는 추적이 힘들 것으로 판단되며 험을 통하여 제시된 연구결과는 실제 상수관망에 적용이 힘들 것으로 판단된다.

Vitkovsky et al. (2007)은 새로운 누수감지방법과 관조도계수 검증방법을 제시하였다. 누수지점, 누수량, 누수감지를 부정류 압력파와의 상호작용을 통하여 산정하며 이를 위하여 ITA(Inverse Transient Analysis)기법을 사용하였다. 또한 결과 검증을 위하여 누수를 재현한 실내실험을 수행하였고 누수를 관측하였다. 부정류의 모양은 ITA의 성공적인 적용을 위하여 상당히 중요하며 빠른 입력 부정류파는 시스템에서 가장 크고 중요한 정보를 제공하게 된다. 실험실에서 관측된 상수관의 실제 누수 실험결과는 누수의 지점을 적절히 선정하였고 누수의 양도 역시 성공적으로 측정하였음을 보여주었다.

본 연구에서는 먼저 개발된 모니터링 지점선정방법(Kwon, 2013)과 본 연구에서 개발된 누수탐지를 위한 역추적계산법을 파일럿 플랜트에 적용하여 누수를 모의하고 탐지하는 방법을 제안한다. 간단한 샘플상수관망에 대한 적용에서 누수모의 및 누수탐지를 수행하여 결과를 확인하였고 실제 크기의 파일럿 플랜트에 적용하여 누수탐지를 수행하였다.

2. 상수관망의 해석

2.1 상수관망의 정류해석

상수관망의 누수탐지 혹은 누수해석을 위해서는 정확한 상수관망의 수리학적 해석이 우선되어야 한다. EPANET이나 WaterCAD등과 같이 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 연구에서는 두 번째 수치해석 방법을 사용하여 상수관망을 해석하였다. 관수로의 에너지 손실 방정식은 Darcy-Weisbach 공식과 Hazen-Williams 공식이 많이 사용되고 모든 에너지 손실 방정식은 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$h = kQ^n \quad (1)$$

Hazen-Williams의 공식을 위식에 적용하면, n=1.85, $k=L/(0.85CR^{0.63}A)^{1.85}$ 이며, 여기서 C는 Hazen-Williams계수이다. 따라서, $Q=Wh^N$ 여기서 N=1/n 그리고 $W = \frac{1}{k^N}$

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

여기서 i 는 현 분기점 그리고 j는 다음 분기점을 의미한다.

식(1)에서 첫 번째 시산법을 위한 교정숫자 α가 아래와 같이 필요하다.

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

식(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.

$Q_j = A - \alpha C$ 여기서, $A = W(H_j-H_i)^N$

그리고 $C = W \cdot N(H_j-H_i)^{N-1}$.

따라서, $\Sigma Q = \Sigma A - \alpha \Sigma C = 0$. 여기서 $\alpha = \frac{\Sigma A}{\Sigma C}$

이며 α가 정해지면 식(3)으로 돌아가서 반복계산을 한다. α가 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. 또한 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. 그리고 알고리즘의 적용을 위하여 Fig. 1과 같은 아주 간단한 샘플상수관망을 사용하였다. Fig. 1과 같이 샘플상수관망은 총 17개의 파이프, 1개의 배수지, 그리고 14개의 절점으로 이루어졌으며 위에서 설명한 Nodal Point Method로 해석하기로 한다. 샘플관망의 절점과 파이프 정보는 Table 1과 2에서 보는 바와 같다.

2.3 상수관망의 모니터링 지점

관망의 누수를 해석하고 실시간 모니터링을 하기 위해서는 센서의 설치가 필요하다. 하지만 많은 숫자의 파이프가 도시 전체에 광범위하게 매설되어 있기 때문에 모든 곳에 센서를 설치하고 모니터링 한다는 것은 사실상 불가능할 것이다. 따라서 특정 위치 혹은 절점에 압력센서나 누수와 관련한 센서를 부착해야하며 그 지점을 선정하는 것은 경제적인 면이나 효율적인 면에서 매우 중요한 일이다. 그리고 몇 개의 센서를 설치해야 하는가도 중요한 관건일 것이다. 본 연구에서는 기존의 연구(Kwon, 2013)에서 제안된 모니터링 지점선정 방법 중 부정류효과를 고려한 모니터링지점 선정방법 중 압력기여도분석방법을 택하여 절점 3번과 9번을 선정하였다. 또한 절점 11번은 배수지와 가까운 곳으로써 상수관망의 모양을 고려하여 모니터링의 위치적 중요도 부분에서 가점을 주어 선정하였다. 하지만 부정류 해석은 상수관망의 크기가 커지고 파이프의 숫자가 늘어나면 해석에 너무 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 모니터링 지점선정방법은 기존 연구를 통해 정류해석결과를 이용한 압력기여도 분석방법이 부정류 해석결과와 비슷한 결과를 보여주고 있으므로 향후 정류해석결과를 통한 압력기여도 분석방법을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. Fig. 2는 모니터링 지점선정방법으로써 압력기여도 계산을 위한 흐름도(Flow chart)를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 모니터링 지점선정을 위하여 먼저 정상상태의 상수관망의 해석결과가 필요하며 각 절점에 가정한 추가소요유량을 합하여 상수관망 해석을 수행한다. 모든 절점에 대해서 추가소요유량을 합한 후 관망해석이 마무리되면 그 결과를 사용하여 절점의 최초압력과 유량변화로 인한 압력변위의 비를 합산하여 압력기여도를 분석하는데 압력기여도가 높은 절점을 우선순위로 정하게 된다.

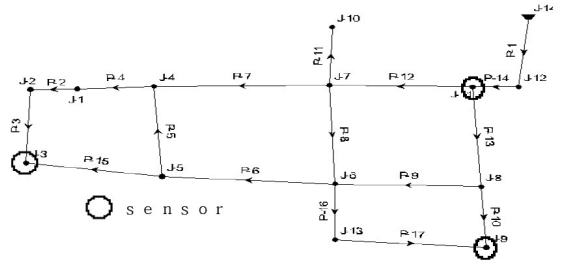


Fig. 1. Sample pipe network and location of pressure sensors

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^3/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

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 5, pp. 611-619, October, 2013

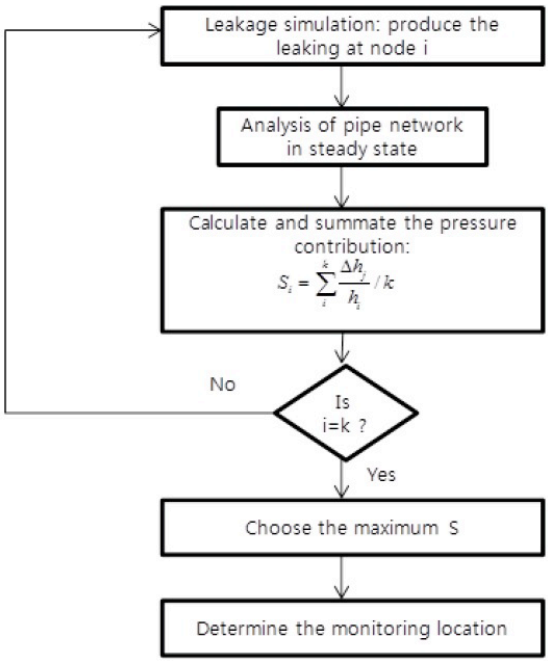


Fig. 2. Flow chart for the determination of monitoring location

2.4 역추적계산법 (Back Tracing Calculation Method)

역추적계산법이란 누수탐지를 위해 상수관망의 정류해석과정에서 절점의 평상시 필요유량(demand)에 가정한 누수량을 더하여 식 (4)과 같이 계산하고 그 계산과정을 반복하는 것을 의미한다. 즉, 절점 1번과 2번의 평상시 필요유량은 각각 0 m^3/sec와 0.08 m^3/sec이다.

Fig. 3은 역추적계산법의 흐름도를 나타내고 있다.

정류해석으로부터 절점 1의 필요유량을 0에서 0.001 m^3/sec, 0.002 m^3/sec 그리고 절점 2의 필요유량을 0.08 m^3/sec에서 0.081 m^3/sec, 0.082 m^3/sec와 같이 변화시켜가며 상수관망의 정류해석을 수행한다. 이때 절점에서의 필요유량이 증가하면 그 절점에서의 압력은 하강하게 되는데 센서절점의 압력과 가장 근접한 누수량을 계산하고 절점을 추적하게 된다.

$$Q_{t_i} = Q_{Demand} + \Delta Q_{L_i} \quad (4)$$

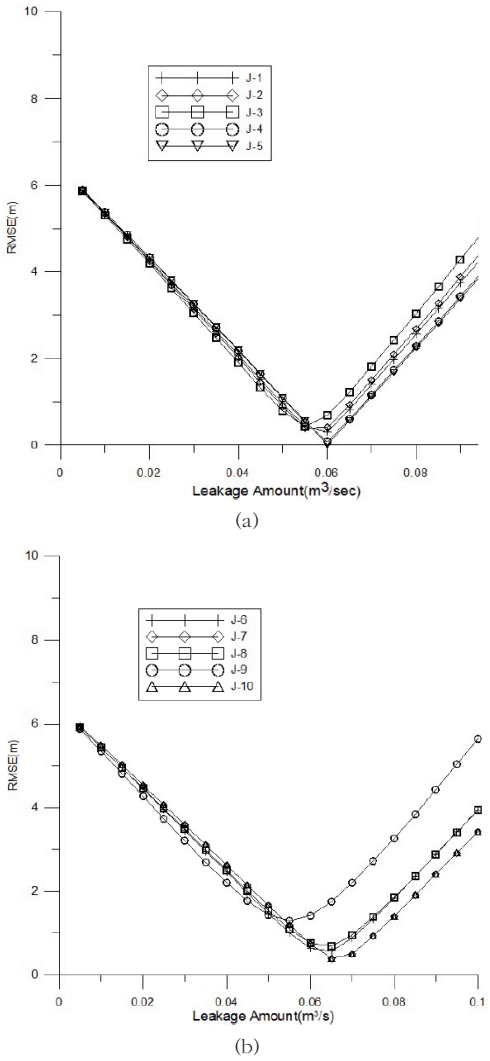


Fig. 3. RMS error of each junctions according to assumed leakage amount

여기서 Q_{Demand}는 절점에서의 원래 필요유량이고 ΔQ_L은 절점에서의 추가소요유량이다.

식 (5)와 같이 센서절점의 압력과 가장 근접한 RMS error를 갖는 절점을 찾고 그 절점에서의 누수량을 계산하게 된다.

$$R(m) = \sqrt{((\Delta H_3)^2 + (\Delta H_9)^2 + (\Delta H_{11})^2)/N_s} \quad (5)$$

여기서, ΔH는 센서절점의 누수로 인한 압력변위, N_s는 센서절점의 수이다. 본 연구에서는 샘플상수관망에는 누수량을 0.001 m^3/sec 간격

으로 각 절점마다 100번의 누수량 변화를 가정하여 계산을 수행하였고 파일럿 플랜트에는 누수량을 0.00001 m^3/sec 간격으로 각 절점마다 100번의 누수량 변화를 가정하여 계산을 수행하였다. 예를 들면, ΔH_3은 누수가 발생하기 전의 압력에서 누수발생 후 압력의 차를 나타낸다. 실제 상수관망에서 압력에 대한 실시간 모니터링이 이루어진다면 누수발생 후 압력의 변화가 발생하였음을 감지할 수 있다. 이때 기존의 압력에서 많은 차이가 발생하였다면 누수탐지를 수행하여 누수발생 지점을 가정하여 압력을 비교하여 누수를 추적하는 것이다. Fig. 4는 샘플상수관망에 적용한 계산 결과를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 절점 1, 2, 3, 4, 5의 누수량 변화에 따른 RMS Error가 상대적으로 6, 7, 8, 9, 10번 절점의 누수량 변화에 대한 RMS Error보다 작은 것을 알 수 있다. 그중에서도 Table 3에서 볼 수 있듯이 절점 5번이 누수량 0.06 m^3/sec에서 RMS Error가 최소로 나타났다. Fig. 4는 역추적계산법을 위한 흐름도를 보여주고 있다. 순서도에서 P^{n+1}은 현재의 압력을 나타내고 P^n은 이전시간의 압력을 의미한다. 실시간 압력모니터링 중 P^{n+1}이 P^n와 상이한 현상이 지속된다면 누수탐지를 수행하게 되며 ΔQ_L를 증가시키면서 상수관망의 정류해석을 수행하게 된다. 이때 ΔQ_L를 충분히 증가시키고 모든 절점에 대해서 변화된 소요유량을 사용하여 관망해석이 끝나면 최소 RMS error를 갖는 절점과 그 절점에서의 누수량을 추정하게 된다.

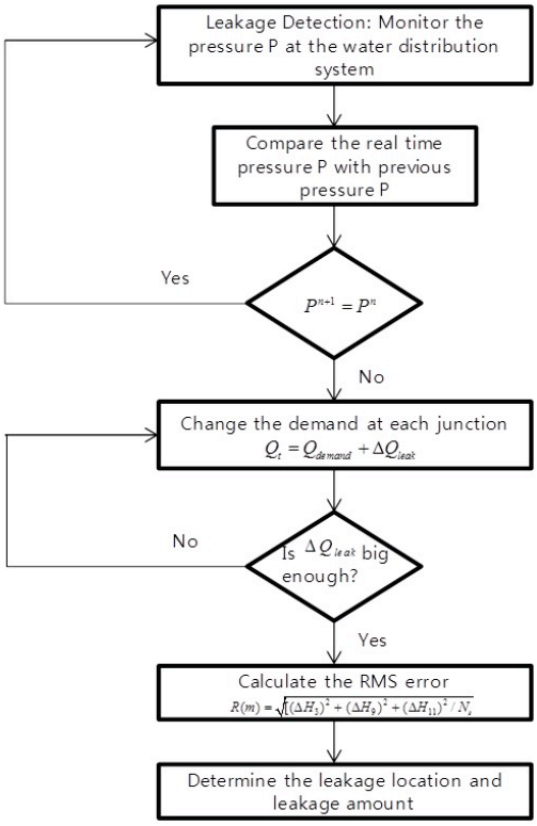


Fig. 4. Flow chart for Back Tracing Calculation Method

Table 3. Results of calculation using Back Tracing Calculation Method

Junction	1	2	3	4	5
Leakage amount(m^3/s)	0.058	0.057	0.056	0.06	0.06
RMSE(m)	0.1999	0.2658	0.4179	0.0673	0.00297

3. 파일럿 플랜트 적용

3.1 파일럿 플랜트

본 연구에서는 실제크기의 파이프와 펌프를 사용하는 대규모 파일럿 플랜트에 기 개발된 모니터링 지점선정방법 및 역추적계산법을 이용하여 누수를 모의하고 누수탐지를 수행하였다. Fig. 5는 파일럿 플랜트의 전경을 보여주고 있다. 파이프는 모두 100 mm의 균일한직경을 갖는 주철관

Fig. 5. Pilot plant

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 5, pp. 611-619, October, 2013

을 사용하였으며 144개의 절점과 179개의 파이프 그리고 한 개의 펌프로 이루어졌다.

3.2 파일럿 플랜트의 누수모의 및 누수탐지 결과

3.2.1 모니터링 지점선정

먼저 개발된 모니터링 지점선정 알고리즘을 이용하여 파일럿 플랜트에서의 최적 모니터링 지점선정을 하였다. 이를 위해 앞서 개발한 다양한 알고리즘(Kwon, 2013) 중에서 유량변화에 따른 절점의 압력기여도 분석방법과 유량변화에 따른 각 절점의 민감도 분석방법을 사용하였다. Fig. 5와 같은 파일럿 플랜트에 각각의 절점에 0.5 liter/sec의 유량변화를 인위적으로 주었다. 이때 발생한 압력결과를 Fig. 2와 같은 순서로 계산하여 모니터링 지점을 선정하였다. 그 결과는 아래 Table 4와 같다. 표에서 Pressure contribution은 압력기여도분석을 통한 결과를 나타내고 있고 Pressure sensitivity는 압력민감도분석을 통한 결과를 나타내고 있다.

위 표에서 볼 수 있듯이 우선순위 1, 2, 3순위는 모두 관말에서 나타났다. 하지만 이 지점에 모든 압력계를 설치하는 것은 상수관망의 운영관리자가 원하는 설치지점은 아닐 것이다. 따라서 4, 5, 6순위를 우선순위로 정하기로 한다. 116번 절점과 140번 그리고 22번 절점이 압력기여도분석방법과 민감도분석방법 모두 동일한 장소로 선정되었다. 7, 8, 9순위는 약간의 차이를 보이고 있으나 대체적으로 두 방법의 결과는 비슷하게 나타났다.

3.2.2 역추적계산법을 이용한 누수탐지

아래 Fig. 6과 같은 파일럿 플랜트에서 절점 65번에 0.0005 m^3/sec(30 liter/min)의 누수량이 갑작스럽게 발생하였다고 가정하여 누수를 모의하였다. 이때 앞서 모니터링 지점으로 선정된 116번, 140번 그리고 22번에 압력센서를 설치하였다고 가정하고 역추적계산법을 사용하여 누수탐지를 수행하였다.

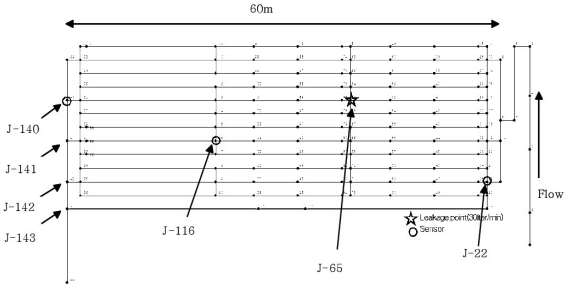


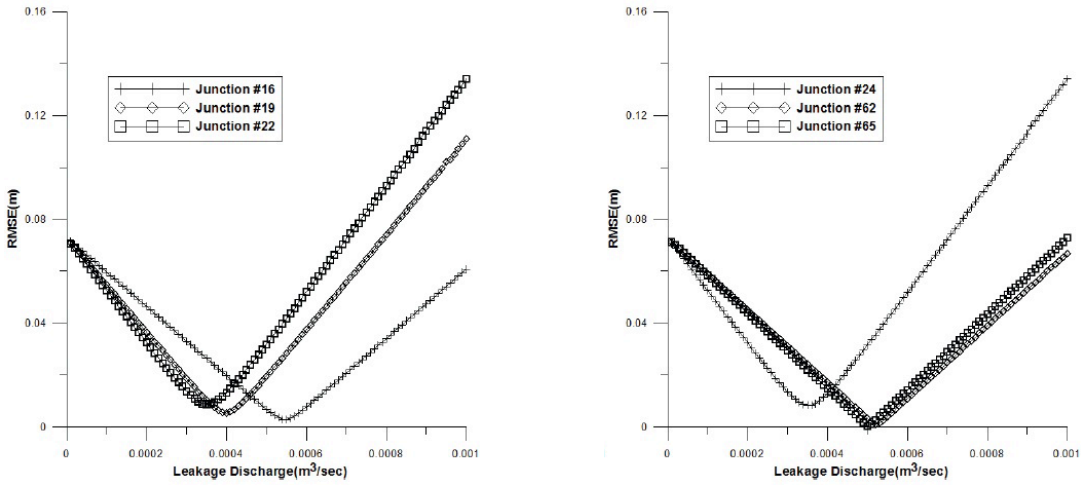
Fig. 6. Leakage simulation

각 절점에서 평상시 필요유량에 가정누수량 ΔQ를 0.00001 m^3/sec의 단위로 계속 증가하여 상수관망 해석을 수행하였다. 예를 들면 1번 지점에서 가정누수량을 변화시키며 압력변위를 환산하고 다음 지점에서 가정누수량을 변화시키며 압력변위를 환산하는 방법으로 144개 절점 모두에 적용하여 상수관망 누수해석을 수행하였다. 이때 세 개의 모니터링 지점에서 누수발생 후에 나타낸 압력과 가장 일치하는 누수지점과 누수량을 추적하였다. 각 절점에서의 누수탐지 모의 결과를 아래 Fig. 7과 같이 나타내었다.

Fig. 7은 각 절점에서 가정누수량을 증가함에 따라 센서절점에서의 압력변위에 따른 RMS error를 보여주고 있다. 위 그림에서 볼 수 있듯이 가정누수량을 변화시키며 RMS error를 계산한 결과 65번 절점에서 약 0.0005 m^3/sec의 누수량을 가정하였을 때 최소의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 모든 절점에서 누수량을 변화시키며 계산을 한 결과 어느 지점까지는 누수량을

Table 4. Results of determination of monitoring locationMethod

Method	1st rank	2nd rank	3rd rank	4th rank	5th rank	6th rank	7th rank	8th rank	9th rank
Pressure contribution	143	142	141	116	140	22	139	68	65
Pressure sensitivity	143	142	141	116	140	22	68	139	19



(a) (b)

Fig. 7. Results of calculation using the Back Tracing Calculation Method

Table 5. Results of leakage detectionJunction no.

Junction	13	19	24	65	71	110	116	139	140
RMSE(m)	0.0140	0.0054	0.0082	0.0003	0.0048	0.0041	0.0038	0.0066	0.0072

변화에 따라 RMS error가 감소하다가 일정한 단계를 지나면 다시 증가하므로 각 절점에서의 최소 RMS error를 계산할 수 있었다. 하지만 계산 소요시간이 오래 걸리는 문제가 발생하였는데 본 연구에서 사용한 가정누수량의 계산단위는 0.00001 m^3/sec 이었고 각 절점별 100회의 변화를 주어 계산하였다. 즉, 누수량은 0.00001 m^3/sec로부터 0.001 m^3/sec까지 변화를 준 것이다. 이때 계산 소요시간은 CPU 3.3 Ghz의 PC를 사용하여 약 4분 이상의 시간이 소요되었다. 각 절점의 최소 RMS error를 열거해 본 결과 다음 Table 5와 같은 결과를 얻을 수 있었으며 65번 절점에서 누수량을 0.0005 m^3/sec로 가정하였을 때 RMS error가 약 0.0003으로 최소를 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 역추적계산법을 이용하여 간단한 가상의 상수관망 그리고 실제 파일럿 플랜트에 적용하여 누수를 모의하고 누수탐지를 수행하였다. 가정한 절점의 누수와 누수량을 갖고 상수관망 해석을 하여 센서절점에 서의 압력변위와 가장 일치하는 절점위치를 추적하고 누수량을 계산할 수 있었다. 먼저 모니터링지점선정을 위해 기존에 개발된 압력기여도분석방법과 압력민감도분석방법을 이용하였다. 두 방법의 결과를 토대로 파일럿 플랜트에서는 116번 절점, 140번 절점, 그리고 22번 절점이 모니터링지점으로 선정되었다. 이렇게 세 지점에서의 압력변위를 누수지점과 누수량에 따라 역추적계산법을 사용하여 비교한 결과 RMS error가 최소가 되는 지점과 누수량을 산정할 수 있었다. 본 연구에 적용한 파일럿 플랜트는 144개의 절점과 179개의 파이프로 이루어진 균일한 100 mm주철관으로써 향후 실제 누수실험을 통하여 누수를 모의하고 역추적계산법을 통한 누수탐지결과에 대한 확인을 위해 실시간 모니터링 시스템구축이 필요하다. 또한 누수를 모의한 결과 계산 소요시간이 오래 걸리는 문제가 발생하였는데 사용한

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 5, pp. 611-619, October, 2013

가정누수량의 계산단위는 0.00001 m^3/sec 이었고 각 절점별 100회의 변화를 주어 계산한 결과 약 4분이상의 시간이 소요되었다. 본 연구에서 사용한 가정 누수량은 상당히 많은 양으로써 앞으로 더 복잡하고 규모가 큰 상수관망에 적용하고 더 작은 누수량에 대한 탐지가 가능한지 확인해야 할 것이다.

참고문헌

Bae, J. Y. (2003). "Determination of monitoring location in water distribution system." Master's thesis, Donga University.

Kim, H. K., Kim, H. S., Lee, M. H., Son, M. N., and Kim, S. H. (2005). "A study of leakage detection methods using frequency analysis and transient flow." Conference of Korean Society of Civil Engineers, KSCE pp. 2688-2691.

Kwon, H. J. (2013). "Methods of determination of optimum pressure monitoring location for the leakage detection in water distribution system." Conference of Korean Water Resources Association, KWRA, pp. 297.

Lee, K. S. & 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.

Misiunas, D., Vitkovsky, J., Olsson G., Simpson, A., and Lambert, M. (2005). "Pipeline break detection using pressure transient monitoring." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 4, pp. 316-325.

Ostfeld, A. and Salomons, E. (2004). "Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 5, pp. 377-385.

Ostfeld, A. and Salomons, E. (2005). "Securing water distribution systems using online contamination monitoring." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 5, pp. 402-405.

Park, P. I., Hong, S. H., Park, N. S., and Jeon, S. Y. (2004). "Comparison of optimization methods for the leakage detection." Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE Vol. 24, No. 6, pp. 529-536.

Preis, A. and Ostfeld, A. (2009). "Multiobjective of contamination sensor network design for water distribution system." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, Vol. 134, No. 4, pp. 366-377.

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., Lambert, M. F., Simpson, A. R., and Liggett, J. A. (2007). "Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 6, pp. 519-530.