J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 50, No. 9 (2017), pp. 609-616
doi: 10.3741/JKWRA.2017.50.9.609
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Leakage experiments and applications of leakage detection algorithm in the pilot plant of water distribution system

Kwon, Hyuk Jae[a]*

[a]Department of Civil Engineering, Cheongju University

Paper number: 17-044
Received: 16 May 2017; Revised: 18 July 2017; Accepted: 18 July 2017

Abstract

In this study, algorithm for the selecting the optimum monitoring location and leakage detection algorithm based on back tracing calculation method were developed and verified by the experiments in pilot plant of water distribution system. First of all, optimum monitoring locations were selected and pressure changes were measured due to artificial leakage by pressure gauges in pilot plant. Simulations of leakage detection was performed for the verification of back tracing calculation method as a leakage detection method. From the results, it was found that leakage locations and leakage amount were exactly estimated. Various leakage amount from 0.0005 m^3/s to 0.0018 m^3/s were reproduced and leakage location was detected by back tracing calculation method. It was verified that back tracing calculation method as a leakage detection method is effective.

Keywords: Back tracing calculation method, Leakage, Pressure change, Water distribution system

상수관망 파일럿플랜트에서의 누수실험 및 누수탐지 알고리즘의 적용

권혁재[a]*

[a]청주대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 상수관망의 최적 수압모니터링 지점선정 알고리즘과 역추적 계산법을 이용한 누수탐지 알고리즘을 개발하였고 파일럿 플랜트에서 실험을 통해 검증하였다. 먼저 누수탐지를 위한 최적의 모니터링 지점선정을 선정하고 압력계를 설치하여 누수로 인한 압력변위를 측정하였다. 누수탐지를 위한 역추적계산법의 검증을 위하여 누수탐지를 수행하였고 파일럿플랜트에서 실제 재현된 누수의 지점과 누수량을 정확하게 산정하였다. 누수량을 0.0005 m^3/s로부터 0.0018 m^3/s까지 변화시키며 누수를 재현하였고 누수지점에 근접한 장소를 찾는데 성공하였다. 본 연구에서는 실험을 통해서 누수탐지기법으로 사용된 역추적계산법이 유효함을 검증할 수 있었다.

핵심용어: 역추적계산법, 누수, 압력변위, 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 한다. 하지만 상수관망은 상수관의 누수 및 파열에 따른 갑작스런 사고에 의해 항상 제 기능을 100% 발휘하지 못하고 있다. 지난 자료를 통하여 유수율을 살펴보면 2011년 정수장에서 생산된 6,021백만 m^3의 수돗물 중 요금이 징수된 유수유량은 약 4,920백만 m^3 (유수율 83.2%)로 상수도의 선진국에 비하여 매우 낮은 수준을 나타내고 있다(National Waterworks Information System, 2011). 상수관망에서의 누수는 수자원의 손실뿐 만 아니라 압력저하로 인하여 설계 시 기대하는 수압보다 낮은 압력을 나타냄으로써 가압설비가 필요하게 되고

*Corresponding Author. Tel: +82-43-229-8473
E-mail: hjkwon@cju.ac.kr (H. J. Kwon)

© 2017 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

관망의 유지관리가 어렵게 되어 경제적으로 많은 손실을 끼칠 수밖에 없다. 또한 발생가능한 모든 상황에 대한 시뮬레이션 기반의 수압, 유량모델링을 통하여 적절한 누수지점을 탐지하고 측정지점을 선정할 수도 있겠지만 이는 상당한 계산시간과 계산능력을 필요로 한다. 따라서 최소의 수압센서를 이용한 누수의 탐지기법에 대한 연구가 시급하다고 할 수 있다.

Koo et al. (2003)은 누수방지 및 저감을 위한 다양한 방법 중에서 펌프 및 감압밸브를 이용하여 수압조절로 누수량을 저감시키는 방법에 주목하여 관망해석방법을 이용하여 가능성을 검토하였다. 소블럭별로 측정한 유량을 이용하여 모델링의 보정에 이용하고 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 개발된 누수량 배분방법을 이용하여 연구대상지역에서의 누수량저감 시나리오에 적용하고 누수량의 가능 감소량을 검토하여 과학적인 배급수 관리의 기능성과 수리적 적절성을 검토하였다.

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 숫자만큼이나 각 지점의 데이터계산시간도 고려되었다.

Park et al. (2004)은 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. 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 우수하다는 것을 밝혔다.

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. 하지만 부정류해석 자체만으로 많은 계산시간이 소요되고 이를 바탕으로 한 누수탐지방법은 자칫 사용이 쉽지 않은 방법일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정류해석방법을 이용한 누수탐지기법을 소개한다.

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 산정할 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.

Ha et al. (2006)은 누수의 재발가능성을 예측하기 위한 모형을 제시하였다. 상수관망에서 누수발생의 예측을 위하여 데이터마이닝 기법의 일종인 PNN (Probabilistic Neural Network)이 사용되었다. 이 연구에서 누수의 발생요인으로 관재료, 직경, 유속계수, 압력, 설치년도등이 사용되었고 PNN모형에 적용되었다. PNN알고리즘은 상수관망의 재생 및 개선여부를 판단하는 의사결정요소로 사용가능하다는 결과를 도출하였다.

Lee et al. (2006)은 상수관망의 누수를 천이류해석을 통하여 탐지하는 방법을 제안하고 있다. 단일관로에서 많은 누수실험이 이루어졌고 천이류해석 결과와 비교분석하였다. 누수지점을 통과한 천이류는 통상적인 관로에서 발생한 천이류의 형태와 다르다. 이점을 이용하여 천이류분석 결과를 통하여 누수지점을 추적하는 방법을 제시하였다.

Jun et al. (2008)은 상수관망이 영향행렬지수를 기반으로 한 상수관망의 실시간 모니터링 지점의 결정 알고리즘을 개발하였다. 상수관망이 노후화됨에 따라 파괴나 누수와 같은 운영상의 문제가 빈번하게 발생하고 상수관망의 상태를 보다 정확히 파악하여 운영할 경우 안정적인 상수관망의 운영이 가능할 것이다. 상수관망의 실시간 모니터링 센서 중 대표적인 Online 압력계를 모든 지점에 설치할 경우 과다한 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.

Chung et al. (2009)은 엔트로피 이론을 이용한 상수관망의 최적 압력계측 위치결정방법을 제안하였다. 최적 압력계측 위치결정에 기존 연구의 단점을 보완하기 위하여 정보이론인 엔트로피 이론을 사용하였다. 기존의 방법이 실측자료를 이용한 검, 보정이 필요하기 때문에 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. Chung et al. (2009)은 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.

Park et al. (2009)은 연구대상지역에서 1992년부터 1997년 사이에 기록된 누수 위치좌표 약 8,000개를 이용하여 누수위치들 간의 공간적 상관관계에 대한 계층적 군집분석을 수행하였다. 계층적 군집분석방법 중 최단 연결법, 최장 연결법 및 평균 연결법을 적용하여 연구대상지역을 누수위치의 공간적 상관관계에 따라 분할하였으며 각 군집 방법 별로 분할된 구역들을 비교하여 연구대상지역에 가장 적절한 군집 분석방법을 제시하였다.

Yoo et al. (2012)는 엔트로피 이론을 이용하여 상수관망에서 압력계설치위치의 최적화에 대해 연구하였다. 엔트로피 이론을 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 구성되어있다. 실제 압력변화패턴은 각 절점에서 변하는 압력을 반영하기 위하여 EPANET의 에미터 기능을 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.

Kim et al. (2013)은 관로상에 설치되어 실시간으로 계측되는 유량자료를 이용하여 누수를 감시하는 모형을 칼만필터 기법을 이용하여 제시하였다. 제안된 누수감시 알고리즘에서는 수돗물 사용량의 시간적 변화와 요일적 변동을 고려함으로써 예측의 신뢰도를 향상시키는 방안을 제시하였다. 또한 기존의 칼만필터 기법에 혁신과정을 추가하여 잡음의 공분산에 대한 자동보정을 통하여 예측의 정확도를 개선하였다. 개발된 모형은 사인형태의 가상 유량자료에 대한 모의실험을 통하여 적응 칼만필터 기법의 예측 정확도를 기존의 칼만필터 기법과 비교하였다. 하지만 제안된 방법은 누수를 감지할 수 있는 방법이지만 누수위치를 정확히 추적하기는 힘든 방법이다. 따라서 본 연구에서는 누수량과 누수위치를 정확히 추적할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 개발된 모니터링 지점선정방법(Kwon, 2013a)과 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. 파일럿 플랜트의 모니터링 지점선정

본 연구에서는 실제크기의 파이프와 펌프를 사용하는 대규모 파일럿 플랜트에 개발된 모니터링 지점선정방법 및 역추적계산법을 이용하여 누수를 모의하고 누수탐지를 수행하였다.

Fig. 1. Pilot plant

Fig. 1은 파일럿 플랜트(2013b)의 전경을 보여주고 있다. 파이프는 모두 100 mm의 균일한 직경을 갖는 주철관을 사용하였으며 144개의 절점과 179개의 파이프 그리고 한 개의 펌프로 이루어졌다.

먼저 개발된 모니터링 지점선정 알고리즘을 이용하여 파일럿 플랜트에서 최적의 모니터링 지점을 선정하였다. 이를 위해 앞서 개발한 다양한 알고리즘(Kwon, 2013a) 중에서 유량변화에 따른 절점의 압력기여도분석방법과 유량변화에 따른 각 절점의 압력민감도분석방법을 사용하였다. 압력기여도 계산은 한 절점에서 유량을 변화시키고 그로인해 발생하는 각 절점에서의 압력수두변위와 유량변화가 발생한 절점의 원래 압력수두와의 비를 합하고 평균한다. 압력민감도 계산은 한 절점에서 유량을 변화시키고 그로인해 발생하는 압력변위와 최초압력의 비를 합산하고 평균한다. 파일럿 플랜트에 각각의 절점에 0.0005 m^3/sec의 유량변화를 인위적으로 부여했다. 이때 발생한 압력결과를 압력 기여도 계산에 사용하여 모니터링 지점을 선정하였다(Kwon, 2013b). 그 결과, 우선순위 1, 2, 3순위는 모두 관말에서 나타났다. 하지만 이 지점에 모든 압력계를 설치하는 것은 상수관망의 운영관리상 우선설치지점은 아니다. 따라서 4, 5, 6순위를 우선순위로 정하기로 한다. 116번 절점과 140번 그리고 22번 절점이 압력기여도분석방법과 압력민감도분석방법 모두 동일한 장소로 선정되었다. 7, 8, 9순위는 약간의 차이를 보이고 있으나 대체적으로 두 방법의 결과는 비슷하게 나타났다.

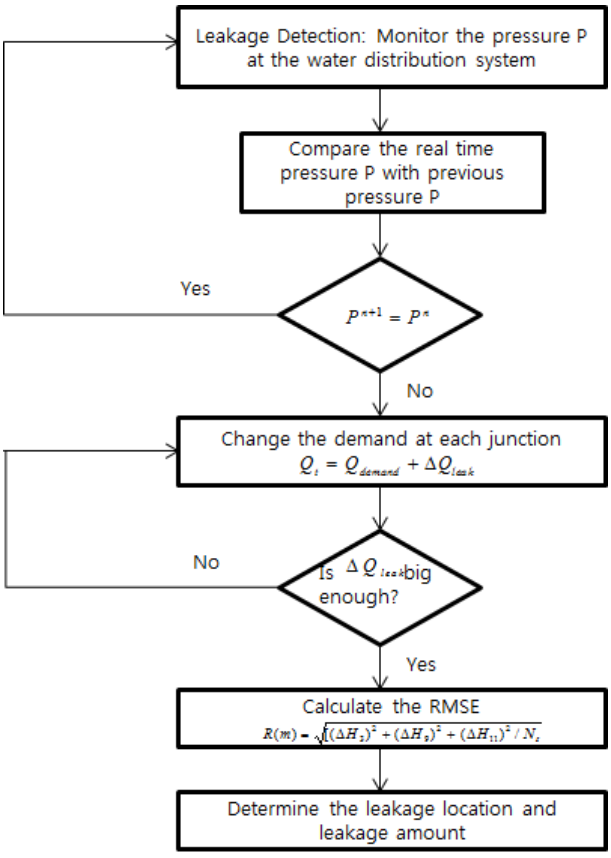

Fig. 2. Flow chart for Back Tracing Calculation Method

3. 파일럿 플랜트의 누수탐지

3.1 역추적계산법(Back Tracing Calculation Method)

역추적계산법이란 누수탐지를 위해 상수관망의 정류해석 과정에서 절점의 평상시 소요유량(demand)에 가정한 누수량을 더하여 Eq. (1)과 같이 계산하고 그 계산과정을 반복하는 것을 의미한다. Fig. 2는 역추적계산법의 순서도를 나타내고 있다. 예를 들면, 절점 1번과 2번의 평상시 소요유량은 각각 0 m^3/sec와 0.08 m^3/sec이다. 정류해석으로부터 절점 1의 소요유량을 0에서 0.001 m^3/sec, 0.002 m^3/sec 그리고 절점 2의 소요유량을 0.08 m^3/sec에서 0.081 m^3/sec, 0.082 m^3/sec와 같이 변화시켜가며 상수관망의 정류해석을 수행한다. 이때 절점에서의 추가 소요유량은 누수량으로 간주하였고 양을 계속 증가하면 그 절점에서의 압력은 하강하게 되는데 센서가 설치된 절점의 압력과 가장 근접했을 때의 누수량을 계산하고 절점을 추적하게 된다.

$$Q_{t_i} = Q_{Demand} + \Delta Q_{L_i} \tag{1}$$

여기서, Q_{Demand}는 절점에서의 원래 소요유량이고 ΔQ_L은 절점에서의 추가소요유량(누수량)이다. Eq. (2)와 같이 센서가 설치된 절점의 압력과 가장 근접한 RMSE (Root Mean Square Error)를 갖는 절점을 찾고 그 절점에서의 누수량을 계산하게 된다.

$$R(m) = \sqrt{((\Delta H_{22})^2 + (\Delta H_{116})^2 + (\Delta H_{140})^2)/N_s} \tag{2}$$

여기서, ΔH는 센서절점의 누수로 인한 압력변위, N_s는 센서절점의 수이다. 본 연구에서는 파일럿 플랜트에 누수량을 0.00001 m^3/sec 간격으로 각 절점마다 100번의 누수량 변화를 가정하여 계산을 수행하였다. 예를 들면, ΔH_{22}은 22번 절점의 누수가 발생하기 전의 압력에서 누수발생 후 압력의 차를 나타낸다. 실제 상수관망에서 압력에 대한 실시간 모니터링이 이루어진다면 누수발생 후 압력의 변화가 발생하였음을 감지할 수 있다. 순서도에서 P^{n+1}은 현재의 압력을 나타내고

P^n 은 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 RMSE를 갖는 절점과 그 절점에서의 누수량을 추정하게 된다.

3.2 역추적계산법을 이용한 누수탐지

아래 Fig. 3과 같은 파일럿 플랜트에서 절점 65번에 0.0005 m^3/sec (30 liter/min)의 누수량이 갑작스럽게 발생하였다고 가정하여 누수를 재현하였다(2013b). 이때 앞서 모니터링 지점으로 선정된 116번, 140번 그리고 22번에 압력센서를 설치하였다고 가정하고 역추적계산법을 사용하여 누수탐지를 수행하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 22번 절점은 유입구와 근접한절점이고 116번 절점은 유입구로부터 40 m지점, 그리고 140번 절점은 약 60 m지점이다. 각 절점에서 평상시 소요유량에 가정누수량 $\triangle Q$를 0.00001 m^3/sec의 단위로 계속 증가하여 누수탐지를 하였다. 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 나타난 압력과 가장 일치하는 누수지점과 누수량을 추적하였다. Fig. 3은 누수지점과 모니터링 지점을 나타내고 있다. 각 절점에서의 누수탐지 모의결과를 아래 Fig. 4와 같이 나타났다.

Fig. 4는 각 절점에서 가정누수량을 증가함에 따라 센서절점에서의 압력변위에 따른 RMSE를 보여주고 있다. 위 그림

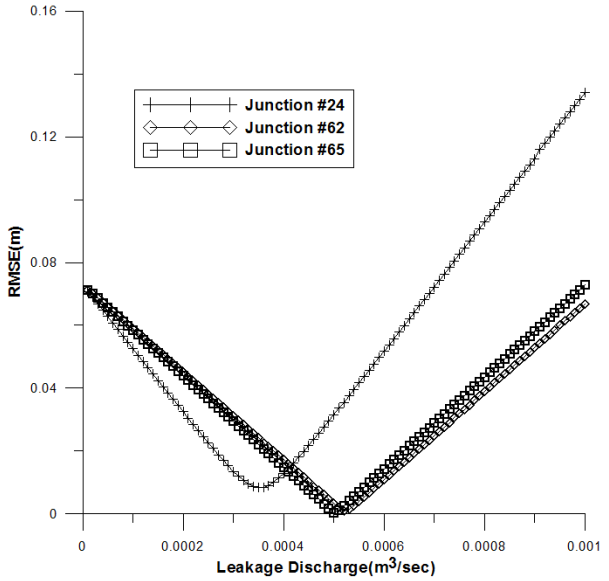

Fig. 4. Results of calculation using the Back Tracing Calculation Method

에서 볼 수 있듯이 가정누수량을 변화시키며 RMSE를 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 변화에 따라 RMSE가 감소하다가 일정한 단계를 지나면 다시 증가하므로 각 절점에서의 최소 RMSE를 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 변화

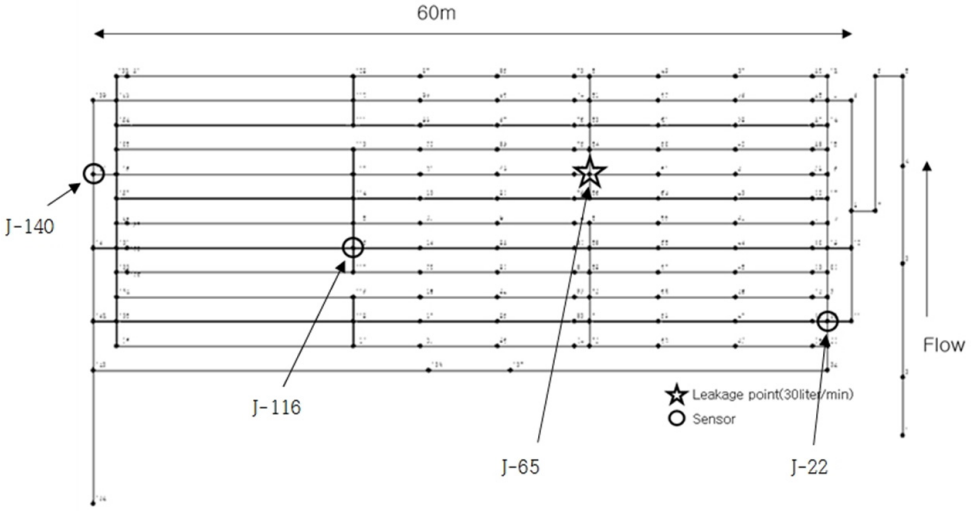

Fig. 3. Leakage simulation

Table 1. Results of leakage detection

Junction no.	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

를 준 것이다. 각 절점의 최소 RMSE를 열거해 본 결과 다음 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있었으며 65번 절점에서 누수량을 0.0005 m^3/sec로 가정하였을 때 RMSE가 약 0.0003 m로 최소를 나타냈다.

3.3 누수탐지 실험

Fig. 5와 같이 파일럿플랜트의 네 지점에 센서를 설치하였다. 센서설치 지점은 앞서 검증된 모니터링 지점 최우선 순위 22, 68, 116, 그리고 140절점 4곳으로 선정하였다. 다음은 55번 절점에 인위적으로 누수를 발생시켰다. 55번 절점은 네 곳의 센서설치지점 중 68번 절점이 가장 가까운 절점이다. 네 곳의 센서절점에서 누수로 인한 압력변위를 관측하고 역추적계산법를 이용하여 누수탐지를 수행하였다. 아래 Fig. 6은 누수탐지를 수행한 결과를 나타내고 있다. 누수량의 변화에 따른 RMSE값을 보여주고 있는데 68번 절점에서 누수량을 0.0008 m^3/sec로 가정하였을 때 최소의 RMSE를 갖는 것으로 나타났다. 이때 상류부 수압은 14.5 m이었고 실제 재현된 누수량은 0.001 m^3/sec였다. 68번 절점은 55번 절점과 가장 인접한 절점으로써 16번 절점과 116번 절점의 RMSE보다 작게 나타났다.

다음은 Fig. 7과 같이 159번 절점에 인위적으로 누수를 발생시켰다. 그리고 네 곳의 센서절점에서 누수로 인한 압력변위를 관측하고 역추적계산법을 이용하여 누수탐지를 수행하였다. Fig. 8은 누수탐지를 수행한 결과를 나타내고 있다. 159

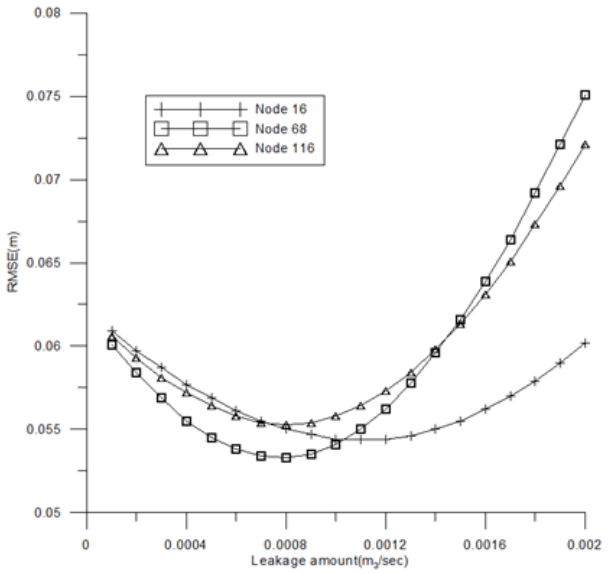

Fig. 6. Results of leakage detection I

번 절점에서 누수를 재현하였고 누수량은 0.0018 m^3/sec이었다. 그리고 22번, 110번, 그리고 119번 절점을 의심지점으로 가정하고 누수탐지 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 159번 절점과 가장 가까운 절점인 119번 절점에서 최소 RMSE를 나타냈다. 그래프는 누수량의 변화에 따른 RMSE값을 보여주고 있는데 119번 절점에서 누수량을 0.0018 m^3/sec로 가정하

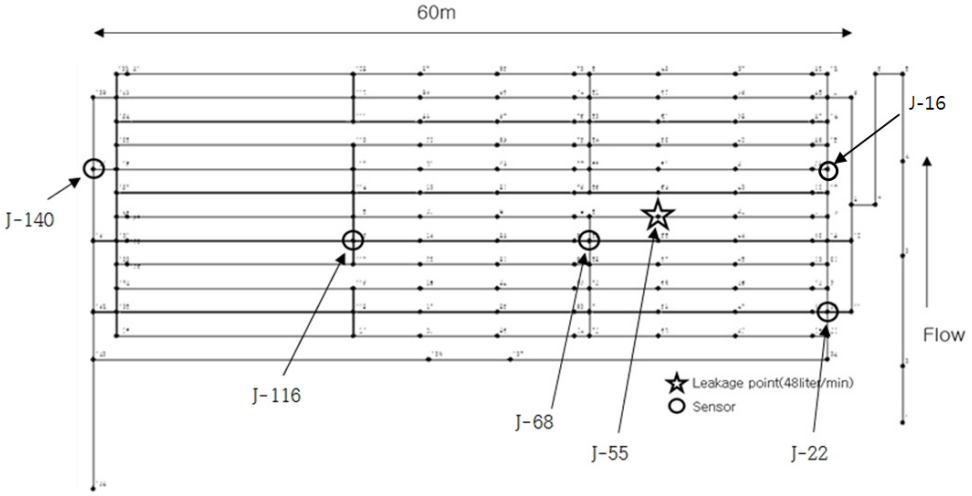

Fig. 5. Leakage simulation scenario I

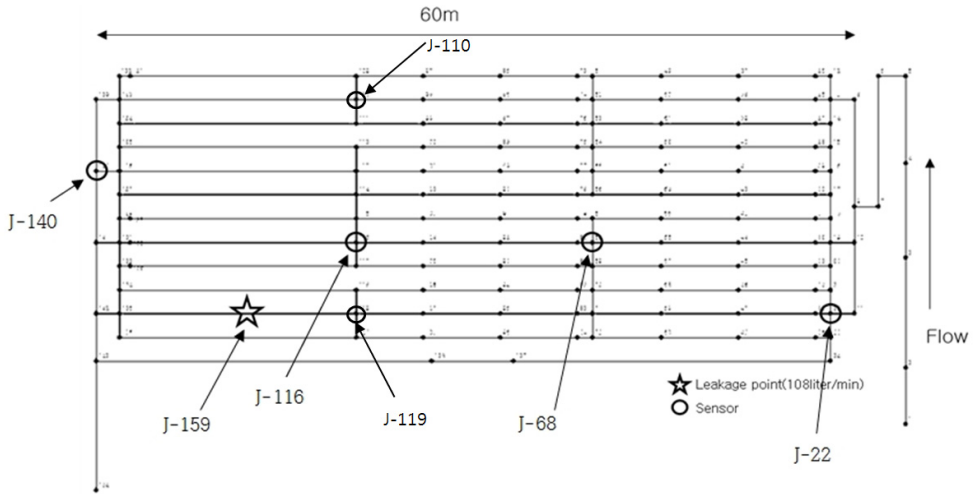

Fig. 7. Leakage simulation scenario II

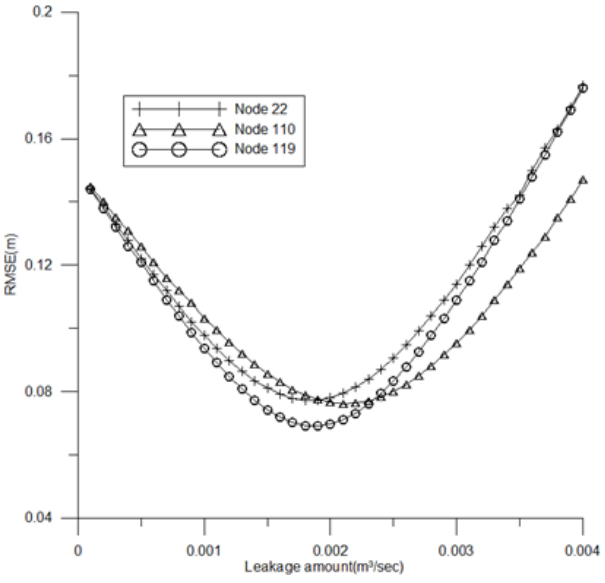

Fig. 8. Results of leakage detection II

였을 때 최소의 RMSE를 갖는 것으로 나타났다. 이때 상류부 수압은 30 m이었다. 119번 절점은 22, 110, 119 세 절점 중 159번 절점과 가장 가까운 절점으로서 누수탐지가 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 상수관망 파일럿플랜트에서 누수를 모의하고 역추적계산법을 이용한 누수탐지를 수행하여 그 결과를 비교하였다. 누수절점과 누수량을 가정하고 상수관망 해석을 하여 센서절점에서의 압력변위와 가장 일치하는 절점 위치를 추적하고 누수량을 계산할 수 있었다. 실제 누수실험을 통하여 누수를 모의하고 역추적계산법을 통한 누수탐지결과에 대한 확인을 위해 실시간 모니터링시스템이 구축되었다. 누수실험은 상당히 많은 누수량을 재현해야만 압력계가 반응을 하는 굉장히 민감한 실험이다. 또한 수압이 생각보다 일정하지 않아서 누수로 인한 압력변위인지 상수관의 자체적인 압력변화인지도 가늠하기 힘든 상황이 많았다. 이러한 문제들이 정확히 해결되지 않은 상태에서 누수량이 상당히 많을 때 누수탐지가 가능한 것으로 파악되었다. 이러한 문제를 극복할 수 있는 또 다른 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되며 본 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 본 연구에서는 파일럿 플랜트에서 누수를 재현하였고 누수량은 약 0.0005 m^3/s에서 0.0018 m^3/s로써 누수장소를 변경해가며 누수실험을 하였다. 누수로 발생한 압력변위를 측정하였고 이 데이터를 토대로 역추적계산법을 이용한 누수탐지 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 누수량과 누수지점을 거의 정확히 추적할 수 있었으며 이를 통해 역추적계산법을 이용한 누수탐지 알고리즘이 효과적임을 알 수 있었다.
2) 본 연구에서는 가정누수량의 계산단위를 0.00001 m^3/sec로 하고 각 절점별 100회의 계산을 수행한 결과 계산시간이 많이 소요되는 단점을 보였다. 본 연구에서 사용된 역추적계산법은 상수관망의 압력분포에 대한 정보가 명확하게 주어질 때 그 정확성이 높아진다. 따라서 실제 상수관망의 해석에서 관로의 유속계수와 소손실(minor loss)을 일으키는 여러 가지 인자들을 정확히 파악하고 해석을 수행

하여야 실제 압력분포를 해석할 수 있으며 이 결과는 곧바로 누수탐지의 정확도에 영향을 미치게 된다.

3) 본 연구에서 사용한 가정 누수량은 상당히 많은 양으로써 앞으로 더 복잡하고 규모가 큰 상수관망에 적용하고 더 작은 누수량에 대한 탐지가 가능한지 확인해야 할 것이다. 그리고 향후 모니터링 지점선정방법과 누수탐지기법을 테스트베드에 적용하여 실제 상황에서 검증한다면 실제 상수관망의 운영관리에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 (2017)학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

References

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.

Ha, S. R., Ryu, Y. H., and Park, S. Y. (2006). “Probabilistic neural network for prediction of leakage in water distribution network.” *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 20, No. 6, pp. 799-811.

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.

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.

Kim, S. W., Choi, D. Y., Bae, C. H., and Kim, J. H. (2013). “Leakage detection of water distribution system using adaptive Kalman filter.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 969-976.

Koo, J. Y., Kim, Y. H., and Kim, S. G. (2003). “A study on leakage control by regulating water pressure in a water distribution system.” *2003 Annual Conference*, Korean Society of Water and Wastewater.

Kwon, H. J. (2013a). “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.

Kwon, H. J. (2013b). “Back tracing calculation method for the leakage detection in water distribution system.” *Conference of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW.

Lee, M. H., Song, Y. S., and Kim, S. H. (2006). “Transient analysis and experiment considering unsteady friction and leakage in a pipeline system.” *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 20, No. 2, pp. 207-214.

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.

National Waterworks Information System (2015). http://www.waternow.go.kr/.

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.

Park, S. W., Im, G. C., Choi, C. L., and Kim, K. L. (2009). “Hierarchical clustering analysis of water main leak location data.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 177-190.

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.