상수관망 파이프라인플랜트에 대한 수압모니터링 지점선정방법의 적용

Application of Determination Method of Monitoring Location in Pilot Plant for Water Distribution System

권혁재*

Kwon, Hyuk Jae

Abstract

In this study, determination method of pressure monitoring location in water distribution system was suggested and applied to the pilot plant for the experimental verification. Monitoring location was estimated by two methods such as pressure contribution analysis and pressure sensitivity analysis. Pressure change due to change of demand was calculated for each junctions. Results of the calculation were used to determine which junction has high pressure sensitivity and pressure contribution to another junctions. Furthermore, results of analysis were compared with the results of experiment. Real leakage was reproduced and pressure change was measured in pilot plant. Pressure change was measured by four pressurer sensors with five different sensor locations. From the results, it was found that the results of determination methods of monitoring location are well matched with the results of experiment.

Key words : Leakage, Pilot plant, Pressure contribution, Pressure monitoring, Pressure sensitivity

요 지

본 연구에서는 상수관망의 최적의 수압모니터링지점 선정방법을 제시하고 이를 모의하기 위해 구축된 파이프라인플랜트에 적용한 실험결과와 비교분석하였다. 모니터링 지점선정방법은 압력기여도분석과 민감도분석으로 구분하여 계산하였다. 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 발생시키는지 확인하는 방법으로써 압력기여도와 필요유량변화로 인한 압력의 민감도 분석을 통하여 지점을 선정하였다. 또한 파이프라인플랜트에서 실험을 통하여 압력기여도분석결과와 민감도분석결과와 비교하였다. 누수를 실제 재현하고 여러 절점에서의 압력변위를 측정하여 그 결과를 바탕으로 모니터링 지점선정방법을 비교하였다. 네 개의 압력센서를 이용하여 다섯 번 압력센서의 설치위치를 변경하면서 누수에 대한 압력변위를 측정하였다. 실험결과 두 가지 해석방법이 모두 수압모니터링 지점선정방법으로 적합함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 누수, 파이프라인플랜트, 압력기여도, 압력모니터링, 압력민감도

1. 서 론

상수관망에서 실시간 압력모니터링은 누수 혹은 이상징후의 포착을 위해서 뿐만 아니라 상수관망의 효율적 운용을 위해서도 중요한 일이다. 하지만 상수관망의 모든 절점에 압력센서를 설치하여 실시간 모니터링 하는 것은 불가능한 일이기 때문에 최적의 모니터링 지점선정방법이 개발되어야 한다. 또한 모니터링 최적지점선정을 통해 상수관망에서 누수나 이상징후의 포착뿐만 아니라 다른 절점에 대한 압력의 기여도가 큰 절점과 압력과 유량변화에 대해 압력이 매우 민감하게 반응하는 절점에 대해서는 좀 더 관심을 기울일 수 있을 것이다.

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. 오리피스 유량변화에 따른 압력의 측정결과와 실제 누수로 인한 압력의 비교를 통하여 누수를 감지하게 되며 민감도 행렬이 측정지점선정에 지대한 공헌을 하게 된다. 누수의 지점과 양은 압력측정결과와 크기나 정밀도, 그리고 조도계수가 얼마나 정확히 측정되었는가에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

Liggett and Chen(1994)는 역 부정부류 해석기법을 동원하여 상수관망의 모니터링 기법을 제안하였다. 부정부류 해석을 위하여 특성선법(the method of characteristics)을 사용하였으며

*교신저자. 정회원. 청주대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-43-229-8473, Fax: +82-43-229-8466, E-mail: hjkwon@cju.ac.kr)
Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University

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.

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 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 나머지는 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)는 누수위치 탐지를 위한 최적화 기법을 비교하였다. 상수관에서 임의의 지점에 발생한 누수를 관측하고 측정자료는 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 전산 프로그램에서 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.

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 실험을 통하여 제시된 연구결과는 실제 상수관망에 적용이 힘들 것으로 판단된다.

Vitkovsky *et al.* (2007)은 새로운 누수감지방법과 관조도 계수 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.

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 센서중 대표적인 Online 압력계를 모든 지점에 설치할 경우 과도한 초기투자비용이 소요되며 시스템의 유지관리 측면에서도 적절치 않기 때문에 상수관망의 실시간 모니터링 지점과 압력계 대수 선정방법을 제안하였다. 제안된 방법은 영향행렬지수(Effort 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 설치

해야 한다고 제시하였다.

본 연구에서는 모니터링 지점선정방법 중 압력기여도분석 방법과 민감도분석방법을 이용하여 파일럿플랜트에서 최적의 수압모니터링지점을 선정하였다. 그리고 선정결과를 확인하기 위해 실제 크기의 파일럿플랜트에서 누수로 인한 압력변화를 측정하는 실험을 수행하였다. 한 절점에서 누수를 재현하고 그로 인한 압력변위를 여러 절점에서 측정하였고 그 결과를 압력기여도분석과 민감도분석결과로부터 선정된 모니터링 지점선정결과와 비교하였다. 본 연구에서 제시된 압력기여도분석과 압력민감도분석방법은 상수관망의 누수나 이상징후 포착뿐만 아니라 상수관망에 꼭 필요한 시설물의 설치여부나 설치위치선정을 위한 판단근거가 될 수 있을 것이다.

2. 상수관망의 모니터링 지점선정방법

2.1 유량변화에 따른 각 절점의 압력기여도 분석방법

이 방법은 한 절점에서 필요유량(demand)을 변화시키고 그로 인해 발생하는 각 절점에서의 압력변위와 필요유량변화가 발생한 절점의 압력비를 합하고 평균하여 압력기여도를 분석하는 방법이다. 특정 절점에서 필요유량변화로 발생한 압력의 변화가 다른 절점에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 압력기여도를 정량적으로 산정하는 방법이다. 앞서 설명한 유량변화는 각 절점의 기존필요유량에 추가로 배출하는 조건으로 모든 절점에 대하여 변화를 주어 정류해석을 수행한다. 이때 특정 절점에서 필요유량의 변화가 생겼으므로 정류해석후의 결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 압력수두가 변하게 된다. 각 절점에서의 수두변위와 필요유량변화가 발생한 절점의 최초압력수두의 비를 합산하고 평균한 값을 비교하게 된다. 식 (1)과 같이 한 절점의 압력이 다른 모든 절점의 압력에 기여하는 정도를 정량적으로 산정하여 비교한다.

$$S_j = \left[\sum_{i=1}^k \frac{\Delta h_j}{h_i} \right] / k \quad (1)$$

여기서 k =절점수, j 는 절점이며, Δh_j 는 j 번 절점에서 발생한 유량변화로 인한 j 번 절점의 압력변위, h_i 는 i 절점의 최초압력수두(m)이다. 따라서 각 절점에서 유량을 변화시킨 후 그로 인해 생긴 각 절점의 압력수두변위와 필요유량변화가 생긴 절점에서의 압력수두의 비를 합산 후 평균하여 각 절점의 압력기여도를 분석한다. 그리고 기여도가 큰 절점을 우선순위로 선정한다. 실제 이 방법은 부정류해석을 통한 실시간 모니터링 지점선정방법(Kwon, 2012)과 비교를 통하여 검증된 바 있다.

2.2 유량변화에 따른 각 절점의 압력민감도 분석방법

이 방법은 앞서 설명한 필요유량의 변화에 따른 압력변위를 산정하는 방법으로는 흡사하지만 필요유량변화가 발생한 절점의 압력변위와 그 절점의 최초압력의 비를 산정하는 방법은 약간 상이한 방법이다. 한 절점에서 필요유량을 변화시키고 그로 인해 발생하는 압력변위와 최초압력의 비를 합산하

Table 1. Example of Pressure at Each Junction According to Simulation Number

Simulation No.	Pressure at J-1	Pressure at J-2	Pressure at J-3
0	P1	P2	P3
1	A	D	G
2	B	E	H
3	C	F	I

고 평균하여 민감도 분석을 수행한 것이다. 각 절점에서 한 차례 유량변화를 발생시키고 압력변위를 계산하기 때문에 절점의 숫자만큼 정류해석이 이루어지게 된다. 따라서 절점 수만큼 필요유량변화에 따른 압력변위가 발생하고 그것을 합산하고 평균하여 그 수치가 가장 큰 절점을 우선순위로 결정하게 된다. 앞서 설명한 필요유량변화는 각 절점에서 필요유량에 추가로 유량을 배출하는 조건으로 모든 절점에 대해 변화를 주며 정류해석을 수행한다. 이때 특정 절점에서 필요유량의 변화가 생겼으므로 정류해석후의 결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 압력수두가 변하게 된다. 이때 변한 각 절점에서의 수두변위와 절점의 최초압력수두의 비를 계산하고 평균한 값을 비교하여 식 (2)와 같이 한 절점의 압력변위와 최초압력의 비를 민감도로 규정하고 정량적으로 산정하여 비교하였다.

$$S_j = \left[\sum_{i=1}^m \frac{(h_j - h_i)}{h_j} \right] / m \quad (2)$$

여기서 m =정류계산횟수, j 는 절점이며, h_i 는 특정 절점에서 발생한 필요유량변화로 인한 j 절점의 i 번째 계산에서의 압력수두, h_j 는 j 절점의 최초압력수두(m)이다. Table 1은 압력기여도 분석과 민감도분석의 이해를 돕기 위한 표이다. 아래 표에서 P1, P2, P3는 1번 절점, 2번 절점, 3번 절점의 원래 압력이다. 그리고 A부터 I는 세 절점의 세 번의 필요유량 변화에 따른 해석결과에서 나온 변화된 압력을 뜻한다.

따라서 1번 절점의 압력기여도는 식 (3)과 같고 1번 절점의 압력민감도는 식 (4)과 같이 계산된다. 절점수는 3이고 계산횟수도 역시 3이다.

$$P_{P1} = \left[\frac{(P1-A) + (P2-D) + (P3-G)}{P1} \right] / 3 \quad (3)$$

$$P_{S1} = \left[\frac{(P1-A) + (P1-B) + (P1-C)}{P1} \right] / 3 \quad (4)$$

이렇게 두 가지 분석방법은 부정류해석결과를 통한 모니터링 지점선정결과(Kwon, 2012)와 같은 결과를 얻을 수 있었고 특히 계산의 편이성과 계산시간의 현저한 단축으로 그 우수성이 입증되었다. 먼저, 모니터링 지점선정 알고리즘을 이용하여 파일럿플랜트에서의 최적 모니터링 지점선정을 하였다. 이를 위해 앞서 개발한 다양한 알고리즘 중에서 필요유량변화에 따른 절점의 압력기여도 분석방법과 필요유량변화에 따른 각 절점의 민감도분석방법을 사용하였다. 이때 발생한 압력변위를 Fig. 1과 같은 순서(Kwon, 2013)로 계산하여 모니터링 지점을 선정하였다. 파일럿플랜트에 각각의 절점에 0.5liter/

Fig. 1. Flow Chart for the Determination of Monitoring Location Using Pressure Contribution Analysis

sec의 필요유량변화를 인위적으로 주었다. 본 연구에서는 압력 기여도분석과 민감도분석방법을 파일럿플랜트의 모니터링 지점선정에 사용하였는데 20개의 절점으로 간략화하여 적용하였다. 왜냐하면 모든 절점에 압력계를 위한 밸브를 설치할 수 없어서 파일럿플랜트 전반에 걸쳐 고르게 20개의 절점에 압력계 설치를 위한 볼 밸브(Ball valve)를 설치하였다. 이렇게

파일럿플랜트를 간략화의 이유로써 Fig. 2와 같이 파일럿플랜트는 절점의 수는 많지만 사실 균일한 직경에 직선으로 연결되어 관의 이음부를 절점으로 인식하였기 때문이다. 60미터 가까운 길이의 관은 하나의 관으로 봐도 무리가 없을 것으로 판단된다. 해석결과는 아래 Table 2와 같다. 표에서 Pressure contribution은 압력기여도분석을 통한 결과를 나타내고 있고 Pressure sensitivity는 압력민감도분석을 통한 결과를 나타내고 있다.

Table 2에서 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, 6, 7순위를 우선순위로 정하기로 한다. 116번 절점과 140번 그리고 22번 절점이 압력기여도분석방법과 민감도분석방법 모두 동일한 장소로 선정되었다. 9순위부터는 약간의 차이를 보이고 있으나 대체적으로 두 방법의 결과는 비슷하게 나타났다.

3. 파일럿 플랜트 실험결과

3.1 파일럿 플랜트

Fig. 3은 파일럿플랜트의 전경을 보여주고 있다. 파이프는 모두 100 mm의 균일한 직경을 갖는 주철관을 사용하였으며 144개의 절점과 179개의 파이프 그리고 한 개의 펌프로 이루어졌다. 전체크기는 축구장 반 정도의 크기이며 긴 변이 약 60미터 길이다. 펌프를 통하여 첫 번째 물탱크에서 관망전체에 급수되며 관말에서 두 번째 물탱크로 배수되고 두 번째 물탱크는 첫 번째 물탱크로 연결되어 물이 순환하게 된다.

Fig. 2. Junctions of Pilot Plant

Table 2. Results of determination of monitoring location

Method	1st rank	2nd rank	3rd rank	4th rank	5th rank	6th rank	7th rank	8th rank	9th rank
Junction	143	142	141	116	140	22	68	139	19
Pressure contribution	0.163	0.072	0.059	0.053	0.052	0.051	0.049	0.049	0.048
Junction	143	142	141	116	140	22	68	139	65
Pressure sensitivity	0.164	0.073	0.060	0.055	0.053	0.050	0.050	0.050	0.049

Fig. 3. Pilot Plant

3.2 실험방법

본 연구에서는 실제크기의 파이프와 펌프를 사용하는 대규모 파일럿플랜트에 실제 누수를 재현하고 임의의 지점 네 곳에 압력센서를 설치하여 누수로 인한 압력변위를 측정하였다. 개발된 모니터링 지점선정방법을 이용하여 압력센서의 설치 위치가 선정되었고 지점선정결과에 대한 신뢰성을 분석하기 위하여 누수로 인한 압력변위를 측정하고 각 절점의 압력기

여도 및 민감도분석을 수행하였다. 먼저 압력기여도분석결과와 민감도분석결과로 나타난 모니터링지점의 우선순위는 116, 140, 22, 그리고 68번 절점이었다. 따라서 아래 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 첫 번째 케이스는 116, 140, 22, 그리고 68번 절점에 압력계를 설치한 후 53번 절점에서 누수를 인위적으로 발생시켜서 압력의 변위를 측정하였다.

총 다섯 가지 경우(case)의 다른 절점에 네 개의 압력계를 설치하여 각각의 압력변위를 측정하였다. Table 3은 실험조건을 나타내고 있다. 표에서 볼 수 있듯이 다섯 가지 경우에만 압력계 위치변화가 있었으며 각 case별로 두 번의 다른 누수조건을 통하여 압력변위를 측정하였다. 누수재현의 경우 압력이 시간에 따라 약간의 변동이 발생하여 누수밸브를 열었을 때 똑같은 누수량을 재현하기는 힘들었다. 따라서 두 가지 경우의 누수량에 따른 압력변위 측정결과를 토대로 압력기여도 및 민감도분석을 수행하였다. 상수관망의 상류부 위치의 압력수두는 9미터를 유지하는 것으로 나타났다. 하지만 각각의 경우 파일럿 플랜트에 급수되는 유량데이터가 약간 다른 것으로 미루어 압력계에서는 구분하기 힘들었지만 상수관망 전체의 압력도 역시 약간의 변동이 있었음을 알 수 있다. 따라서 누수밸브의 개폐정도가 같아도 누수량은 약간의

Fig. 4. Plan View of Pilot Plant

Table 3. Conditions of Experiment

No.	Line pressure (m)	Water supply (m ³ /s)	Leakage point	Leakage amount (m ³ /s)	Sensor location				Case
1	9.0	12.4	53	0.000244	116	140	22	68	Case 1
2	9.0	12.0	53	0.000432	116	140	22	68	
3	9.0	12.5	53	0.000269	27	74	113	70	Case 2
4	9.0	12.4	53	0.000400	27	74	113	70	
5	9.0	12.6	53	0.000211	74	114	119	70	Case 3
6	9.0	12.4	53	0.000476	74	114	119	70	
7	9.0	12.3	53	0.000200	70	114	119	27	Case 4
8	9.0	12.1	53	0.000417	70	114	119	27	
9	9.0	12.6	53	0.000249	113	134	140	68	Case 5
10	9.0	12.5	53	0.000364	113	134	140	68	

차이를 보일 수밖에 없었다. Case마다 두 번에 걸친 실험에서 누수량의 합은 약 $0.00061\sim0.00067\text{ m}^3/\text{sec}$ 이었다. 똑같은 누수량에 대해서 압력변위를 측정하기는 불가능하여 두 번에 걸친 누수재현을 통해 누수량을 유사하게 맞추는 노력을 하였다.

3.3 실험결과

누수지점은 고정하고 다섯 번의 압력계 위치변경을 하여 네 개의 압력계로부터 누수로 인한 압력변위를 측정할 수 있었다. 압력기여도분석과 민감도분석을 수행하기 위해 고정된 누수절점에 누수를 재현하고 다섯 가지 경우에 대해서 네 개 센서의 위치를 변경해가면서 압력을 측정하였다. 먼저 Case 1은 압력기여도 및 민감도분석결과에 의해 선정된 지점의 조합으로써 116, 140, 22, 68번 절점은 고정되었다. 나머지 네 가지 case는 파일럿플랜트에서 무작위로 선정하였다. 누수지점 53번 절점과 상대적으로 가까운 절점은 68, 27, 그리고 70번 절점으로 53번 절점에서 세 절점까지의 길이는 비슷하다. 따라서 어느 한 case에 누수절점과 가까운 절점만으로 설치위치가 중복되지 않게 하려고 가까운 절점들을 균등하게 분배하여 조합하였다. Table 4는 누수전과 누수후의 네 개 위치에서 측정된 압력을 나타내고 있다. P_b 는 누수전의 센서 설치 절점에서의 압력수두를 나타내고 P_a 는 누수후의 압력수두를 나타낸다. 누수후의 압력은 현저히 저하되는 것을 확인

할 수 있었으며 누수전의 압력에 비해 상대적으로 큰 차이를 나타내는 곳과 누수전의 압력에 비해 작은 차이를 나타내는 곳도 확인할 수 있었다.

Table 4 결과로부터 나온 데이터를 앞서 설명한 두 가지 모니터링 지점선정방법에 적용하여 압력기여도와 민감도분석을 수행하였다. Table 5는 case 별로 누수로 인한 네 개의 압력계에서 측정된 압력변위, 압력기여도분석, 그리고 민감도 분석결과를 나타내고 있다.

압력기여도분석방법은 절점에서 누수를 재현하고 그로 인해 누수절점에서 일어난 압력에 대한 각 절점의 압력변위의 합을 의미한다. 하지만 본 실험에서는 누수절점에 압력을 측정할 수 있는 밸브의 설치가 불가능하여 누수절점에 대한 압력기여도를 측정할 수는 없었다. 따라서 한 절점(53번 절점)에서 누수를 재현하고 어떤 절점이 누수로 인해 변한 압력이 상수관망에 많은 영향을 미치는지를 해석하였다. Fig. 5의 모식도와 같이 누수가 생긴 절점에서 일어난 압력변화는 옆에 절점(J-3)의 압력에 우선 영향을 주게 되고 영향을 받은 절점 역시 바로 옆 절점(J-4)의 압력에 영향을 미치게 된다. 따라서 압력기여도분석은 절점에 누수를 발생시키고 그 절점에 대한 압력기여도를 분석해야하지만 누수지점(Leakage point)이 아닌 다른 절점(J-1, J-2, J-3, J-4)에 대해서도 압력기여도분석은 가능하다 할 수 있다.

본 연구에서는 누수지점을 53번 절점에 고정하였고 압력기

Table 4. Pressure Head before and after the Leak

Case	Sensor location				Pressure head(m) before & after the leak							
					P_b	P_a	P_b	P_a	P_b	P_a	P_b	P_a
Case 1	116	140	22	68	7.68	7.62	7.61	7.53	7.78	7.72	7.87	7.79
	116	140	22	68	7.62	7.53	7.51	7.41	7.70	7.60	7.79	7.70
Case 2	27	74	113	70	8.50	8.45	8.45	8.34	8.68	8.61	8.79	8.73
	27	74	113	70	8.46	8.40	8.35	8.22	8.60	8.50	8.74	8.65
Case 3	74	114	119	70	8.25	8.19	8.19	8.11	8.19	8.16	8.50	8.45
	74	114	119	70	8.19	8.10	8.10	7.99	8.15	8.04	8.44	8.37
Case 4	70	114	119	27	8.03	7.94	7.66	7.59	7.91	7.87	8.10	8.07
	70	114	119	27	7.94	7.84	7.59	7.49	7.84	7.75	8.06	7.98
Case 5	113	134	140	68	8.69	8.63	8.59	8.55	8.47	8.42	8.77	8.70
	113	134	140	68	8.62	8.52	8.56	8.47	8.43	8.30	8.72	8.61

Table 5. Results of Pressure Contribution and Sensitivity Measurement

No.	Pressure change(m) after leak				Pressure contribution S_i	Pressure sensitivity S_j	Case
1	0.06	0.08	0.06	0.08	0.259	0.064	Case 1
2	0.09	0.1	0.1	0.09			
3	0.05	0.11	0.07	0.06	0.236	0.061	Case 2
4	0.06	0.13	0.1	0.09			
5	0.06	0.08	0.03	0.05	0.220	0.058	Case 3
6	0.09	0.11	0.11	0.07			
7	0.09	0.07	0.04	0.03	0.230	0.062	Case 4
8	0.1	0.1	0.09	0.13			
9	0.06	0.04	0.05	0.07	0.228	0.055	Case 5
10	0.1	0.09	0.13	0.11

Fig. 5. Pressure Contribution to Adjacent Junction

여도분석을 위한 절점을 압력센서의 설치위치로 정하고 실험 결과를 해석하였다. 또한 실험결과로부터 흐름방향에 대해서 압력의 변화는 하류부로 많은 영향을 미치게 되고 상류로의 영향은 작은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 센서설치지점으로 상류부와 하류부의 절점을 고르게 선정하여 case를 조합하였다. 표에서 볼 수 있듯이 실험을 통한 압력기여도분석결과와 압력민감도분석결과는 모두 Case 1에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 실험을 통해서 압력기여도 및 민감도분석결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 압력기여도분석결과 나타난 최우선순위 Case 1과 두 번째 우선순위 Case 2의 차이가 민감도분석결과로 나타난 최우선순위 Case 1과 두 번째 우선순위 Case 4의 차이보다 큰 것을 알 수 있다. 즉 압력기여도 1순위와 2순위의 차는 $8.88\% \{ (0.259 - 0.236) / 0.259 \} \times 100$ 로 민감도 1순위와 2순위의 차인 $3.12\% \{ (0.064 - 0.062) / 0.064 \} \times 100$ 보다 크다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상수관망의 파일럿플랜트를 구축하고 실험 결과를 모니터링 지점선정방법으로 계산된 결과와 비교분석하였다. 먼저, 계산을 통한 모니터링 지점선정방법으로 압력기여도분석방법과 압력민감도분석방법을 이용하여 파일럿플랜트의 압력모니터링지점을 선정하였다. 선정결과, 파일럿플랜트에서 모니터링 지점으로 1, 2, 3순위는 모두 관말에 집중된 현상을 나타냈다. 따라서 1, 2, 3순위 절점은 배제하고 4, 5, 6, 7순위로 116, 140, 22, 68번 절점이 모니터링 지점으로 선정되었다. 실험을 통한 증명을 위해 53번 절점에 실제 누수를 재현하고 다섯 가지 경우에 대해서 네 개의 압력센서의 위치를 변경해가며 압력변화를 측정하였다. 53번 절점의 누수로 인해서 발생한 압력변위는 여러 절점에서 관측이 가능하겠지만 가장 압력기여도가 크고 압력민감도가 큰 절점의 조합을 찾기 위하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 최우선순위로 결정한 116, 140, 22, 68번 절점의 모니터링 지점조합이 압력기여도와 압력민감도가 가장 큰 것으로 나타났으며 압력기여도분석방법이 좀 더 우수한 것으로 나타났다. 앞으로 더 많은 실험데이터를 통하여 센서의 설치지점뿐만 아니라 설치대수에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Bae, J.Y. (2003) *Determination of optimum monitoring location in water distribution system*, 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.
- Kim, H.G., Kim, H.S., Lee, M.H., Son, M.N., and Kim, S.H. (2005) A study of leakage detection method using frequency analysis and transient flow, *Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, pp. 2688-2691.
- Kwon, H.J. (2012) Determination of real-time monitoring places in water distribution system using unsteady analysis, *Annual Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 265.
- Kwon, H.J. (2013) Method of determination of optimum pressure monitoring location for the leakage detection in water distribution system, *Annual Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 297.
- 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.
- Park, P.I., Hong, S.H., Park, N.S., and Jun, S.Y. (2004) A comparison of optimization methods for the leakage detection, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24.
- 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, 480-492.
- 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.

© Received September 4, 2013

© Revised September 5, 2013

© Accepted October 11, 2013