

영향행렬지수를 기반으로 한 상수관망의 실시간 모니터링 지점의 결정 알고리즘

A methodology to determine realtime monitoring locations for water distribution systems based on the effect index matrix

전환돈*, 조문수**, 백천우***, 유도근****, 김중훈*****

Hwan Don Jun, Moon Soo Cho, Chun Woo Back, Do Guen Yoo, Joong Hoon Kim

요 지

상수관망이 노후화됨에 따라 파괴나 누수와 같은 운영상의 문제가 빈번하게 발생한다. 따라서 상수관망의 상태를 보다 정확히 파악하여 운영할 경우 안정적인 상수관망의 운영이 가능할 것이며 관파괴와 같은 돌발적인 사태의 피해를 최소화 할 수 있을 것이다. 그러나 상수관망의 실시간 모니터링 센서중 대표적인 online 압력계를 모든 지점에 설치할 경우 과도한 초기투자 비용이 소요되며 시스템의 유지관리 측면에서도 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 상수관망의 실시간 모니터링을 위한 적절한 규모의 online 압력계 설치위치의 결정 방법을 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.

핵심용어 : Realtime Monitoring, Online Pressure Gage, Water Distribution System

1. 서론

현재의 상수관망 자동관리시스템은 주로 원수지에서 정수장 혹은 배수지까지를 연결하는 도·송수관에 집중되어 있으며 배수지 이하 배수블록에 대한 체계적인 관망관리시스템은 미흡한 실정이다. 최근 일부 광역시에서 수압과 수질을 원격감시하여 제어하는 시스템을 누수문제 및 급수관에 직접적인 영향을 미치는 배수블록에 설치하여 운영하고 있으나 범위가 매우 제한되어 있다(이현동 등, 2003). 일반적으로 모니터링 센서를 전체 상수관망에 설치하는 것이 상수관망 상태를 파악하고 효율적인 유지관리를 위해 가장 이상적인 방법이지만 초기비용이 과도하게 소요되며 이러한 시스템의 유지관리에 또한 많은 인력과 예산이 필요하다. 따라서 적절한 규모의 모니터링 센서를 설치하여 운영할 경우 상수관망의 유지관리와 모니터링 시스템의 운영효율을 극대화할 수 있을 것이다. 유량과 압력 측정 위치를 결정하는 관련된 연구로는 Walski (1983), Yu and Powell (1994), Bush and Uber (1998), Kapelan et al. (2003)의 연구가 있으나, 이 연구들에서 개발된 방법들은 상수관망의 파괴 지점을 파악할 수는 있지만 정확히 검·보정된 상수관망 모형을 필요로 한다. 즉, 개발된 방법들이 제시한 측정위치에 센서를 설치한 후 자료를 수집하여 검·보정을 통하여 정확한 모형을 개발한 후에 사용이 가능하기 때문에 많은 시간이 소요되며 상수관망의 주요 매개변수인 관 마찰계수는 시간이 지남에 따라 변하므로 지속적인 모형의 검·보정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존연구의 단점을 보완하여 실시간 모니터링을 위한 압력계 규모를 결정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 영향행렬지수(Effect Index Matrix)를 기반으로 하여 영향행렬지수내 column search를 통해서 수행된다. 이를 위해서 필요

* 정회원·한밭대학교 토목공학과 전임강사·E-mail : hwjun70@hanbat.ac.kr
** 정회원·대림산업 토목사업본부 사원·E-mail : msguts@daerim.co.kr
*** 정회원·고려대학교 공과대학 연구교수·E-mail : chunoo@korea.ac.kr
**** 정회원·고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정·E-mail : godqhr425@naver.com
***** 정회원·고려대학교 건축·사회환경공학과 교수·E-mail : jaykim@korea.ac.kr

자료는 관경, 관 길이, 지점의 표고, 기본 수요량, 가정된 관 마찰계수등과 같은 기본적인 상수관망 자료이며 이러한 기본적인 자료만으로 상수관망내 적절한 압력계 설치지점을 결정할 수 있도록 고안되었다. 제안된 방법을 미국의 Cherry Hill 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다.

2. 압력계 설치위치의 우선순위 결정방법

2.1 영향지수행렬(Effect Index Matrix) 구성

영향지수행렬(Effect Index Matrix)은 상수관망의 각 지점이 다른 지점에 영향을 미치는 정도(열 요소)와 각 지점이 다른 지점의 영향을 받는 정도(행 요소)를 나타낸 행렬이다. Online 압력계 설치 위치의 우선순위를 결정하기 위해서는 열 요소가 사용되며 영향지수행렬은 식 1과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial p_{1,1}}{\partial p_1} & \frac{\partial p_{1,2}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial p_{1,j}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial p_{1,n}}{\partial p_1} \\ \frac{\partial p_{2,1}}{\partial p_2} & \frac{\partial p_{2,2}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_{2,j}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_{2,n}}{\partial p_2} \\ \frac{\partial p_2}{\partial p_2} & \frac{\partial p_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{i,1}}{\partial p_i} & \frac{\partial p_{i,2}}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial p_{i,n}}{\partial p_i} \\ \frac{\partial p_i}{\partial p_i} & \frac{\partial p_i}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial p_i}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial p_i}{\partial p_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{n,1}}{\partial p_n} & \frac{\partial p_{n,2}}{\partial p_n} & \dots & \frac{\partial p_{n,j}}{\partial p_n} & \dots & \frac{\partial p_{n,n}}{\partial p_n} \\ \frac{\partial p_n}{\partial p_n} & \frac{\partial p_n}{\partial p_n} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial p_n} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial p_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, i = 영향을 주는 Node ID, 즉 수요량을 변화시킨 지점 ($i = 1,2,3, \dots, n$)
 j = 영향을 받는 Node ID, 즉 기본수요량으로 고정시킨 지점 ($j = 1,2,3, \dots, n$)
 $\frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i}$ = i 지점의 변화에 따른 j 지점의 최대압력과 최소압력의 차, $Max(p_{i,j}) - Min(p_{i,j})$
 $\frac{\partial p_i}{\partial p_i}$ = 수요량의 변화에 따른 i 지점의 최대압력과 최소압력의 차, $Max(p_i) - Min(p_i)$
 $\frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i}$ = i 지점의 압력변동폭에 대한 j 지점의 압력변동폭(i 지점에 대한 j 지점의 민감도)

관망을 구성하는 각각의 절점에 발생 가능한 수요량의 조합을 다양하게 가정하여 구성하고, 구성된 수요량에 대한 수리 모델링을 통해서 영향행렬지수의 각 항을 구하게 된다.

2.2 Online 압력계 설치위치의 우선순위 결정

Online 압력계 설치위치의 우선순위를 결정하기 위해서는 "Step 1, Online 영향지수산정" 및 "Step 2. 구역별 Online 압력계 위치선정"과 같은 2단계의 과정을 수행한다. Step 1은 식 (1)과 같은 영향지수행렬의 각 행의 값을 평균한 값인 online 영향지수를 산정하는 단계이며, online 영향지수는 다음 식 (2)를 이용하여 산정된다.

$$\begin{aligned} On(EI_1) &= E \left(\frac{\partial p_{1,1}}{\partial p_1} \frac{\partial p_{1,2}}{\partial p_1} \frac{\partial p_{1,3}}{\partial p_1} \dots \frac{\partial p_{1,j}}{\partial p_1} \dots \frac{\partial p_{1,n}}{\partial p_1} \right) \\ On(EI_2) &= E \left(\frac{\partial p_{2,1}}{\partial p_2} \frac{\partial p_{2,2}}{\partial p_2} \frac{\partial p_{2,3}}{\partial p_2} \dots \frac{\partial p_{2,j}}{\partial p_2} \dots \frac{\partial p_{2,n}}{\partial p_2} \right) \\ &\vdots \\ On(EI_i) &= E \left(\frac{\partial p_{i,1}}{\partial p_i} \frac{\partial p_{i,2}}{\partial p_i} \frac{\partial p_{i,3}}{\partial p_i} \dots \frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i} \dots \frac{\partial p_{i,n}}{\partial p_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $On(EI_i)$ = i 지점이 상수관망 전체에 미치는 영향지수($\frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i}$ 의 평균값)

Step 2에서는 산정된 online 영향지수를 이용하여 구역별 online 압력계의 위치를 선정한다. 압력계의 위치를 결정할 때, 소규모의 상수관망에서는 큰 상관성이 없으나 중규모 이상의 상수관망의 경우 영향지수가 높게 나타나는 지점은 한 곳에 집중되는 현상을 나타내게 된다. 이러한 이유는 영향지수가 상수관망에서 각 지점들의 수요량과 각 관들의 마찰계수보다는 상수관망 자체의 기하학적 형태에 많은 영향을 받기 때문이다. 따라서 상수관망내 모든 지점을 대상으로 가능한 일정한 정도의 중요도를 부여하여 중요지점을 결정하기 위해 Column Search를 수행한다. Column Search는 상수관망의 기하학적 형태(network topology)에 따른 영향을 감소시키기 위해 실행되며, 영향지수행렬의 각 열마다 가장 큰 값을 찾고 이 값이 속해 있는 행에 해당하는 지점이 각 열의 결과 지점이 되는 과정을 통해 수행된다. 각 열마다 행 번호와 열 번호가 같은 요소를 제외한 가장 큰 값은 해당 지점(열 번호에 해당하는 지점)에 영향을 가장 많이 미치는 지점에 대한 민감도이며 이 값이 속해있는 행에 해당하는 지점은 각 열에 해당하는 지점에 가장 영향을 많이 미치는 지점이다. Column Search를 통하여 찾은 결과지점이 동일한 행의 개수를 파악하여 개수가 많은 순으로 결과지점을 나열하고 이 순위가 최종적인 압력계 설치 우선순위가 된다. 결과지점의 개수가 같은 경우에는 online 영향지수가 큰 순으로 순위를 결정한다.

3. 적용 및 결과

3.1 Cherry Hill 상수관망

본 연구에서는 실제 용수공급시스템인 미국 코네티컷주에 위치한 Cherry Hill 상수관망을 선정하여 online 압력계 설치위치의 우선순위를 결정하였다. 대상관망은 같이 88개의 지점과 104개의 관, 94개의 밸브 그리고 2개의 수원(지점 7에 위치한 펌프와 배수지, 지점 117 근처에 위치한 탱크)로 구성되어 있으며 관경의 분포는 12, 8, 6인치 관으로 구성되어 있고 총연장은 68,192ft(20,784m)이다.

3.2 Online 압력계 설치위치 우선순위 결정

제안된 알고리즘을 적용하기 위하여 대상관망의 현황을 두 가지 경우로 구분하였다. 우선 Case 1은 설계시 반영된 상수관망 자료를 적용한 경우이며, case 2는 관 매설후 시간이 경과하여 관 마찰계수가 30% 감소한 상황에 대한 상수관망 자료를 적용한 경우이다. 표 1과 표 2에는 각각 case 1과 case 2에 대하여 알고리즘을 적용하여 압력계 설치 위치의 우선순위를 결정한 결과를 나타내었다.

표 1에서 영향지수에 의한 online 압력계 설치 위치의 1순위는 117번 지점(저장 탱크와 연결된 지점)이며 이 지점의 영향지수는 0.94이다. 이는 117번 지점의 압력이 1m 변하면 전체 상수관망의 평균 압력변화폭이 0.94m임을 의미한다. 지점별 영향지수를 산정한 후 영향지수행렬의 column search를 통하여 최종적인 online 압력계 위치를 선정하였으며 선정결과를 그림 1에 나타내었다.

표 2의 결과를 살펴보면 관 마찰계수는 상수관망 모형을 검·보정하는 매개변수로 관 마찰계수 값이 100에서 70으로 바뀌었지만 영향지수와 column search의 순위는 몇 지점을 제외하고 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 그림 1에 나타난 것과 같이 online 압력계의 설치위치도 크게 변하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 모형이 관마찰계수 값에 민감하지 않기 때문에 압력계의 설치위치 우선순위를 결정할 때 정확히 검·보정된 상수관망 모형이 필요 없고 상수관망이 시간이 지남에 따라 관 마찰계수 값이 감소하여도 online 설치위치를 변경하지 않아도 됨을 의미한다.

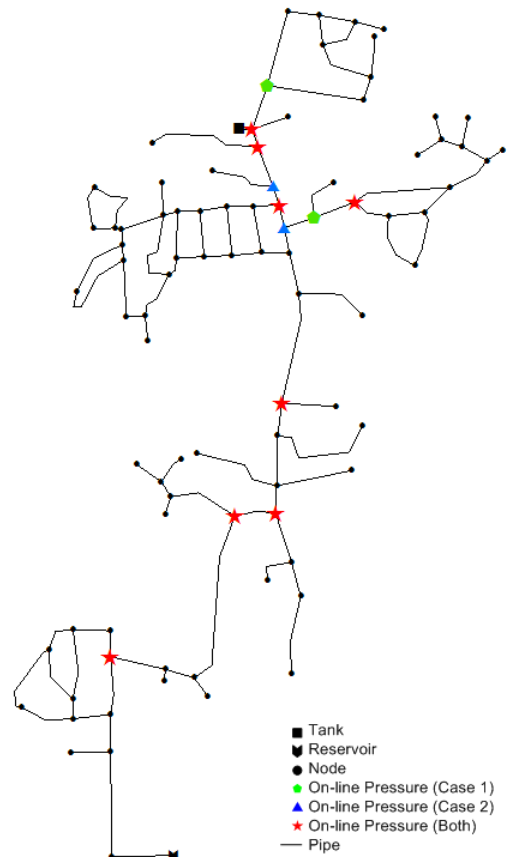


그림 1. Cherry Hill Network 현황 및 압력계 위치 선정 결과

표 1. Online 압력계 설치 위치의 우선순위 선정결과(Case 1)

| Rank | 영향지수 | | column search | |
|------|---------|--------------|---------------|-------------------|
| | Node ID | Effect Index | Node ID | 가장 큰 영향을 받는 지점의 수 |
| 1 | 117 | 0.94 | 117 | 19 |
| 2 | 110 | 0.89 | 84 | 11 |
| 3 | 106 | 0.86 | 17 | 7 |
| 4 | 84 | 0.86 | 86 | 5 |
| 5 | 85 | 0.76 | 89 | 5 |
| 6 | 50 | 0.64 | 26 | 5 |
| 7 | 86 | 0.62 | 24 | 5 |
| 8 | 109 | 0.52 | 41 | 4 |
| 9 | 49 | 0.49 | 110 | 3 |
| 10 | 89 | 0.46 | 119 | 3 |
| - | - | - | 총합 | 67 |

표 2. Online 압력계 설치 위치의 우선순위 선정결과(Case 2)

| Rank | 영향지수 | | | column search | | |
|------|---------|--------------|-----------|---------------|-------------------|-----------|
| | Node ID | Effect Index | Case 1 순위 | Node ID | 가장 큰 영향을 받는 지점의 수 | Case 1 순위 |
| 1 | 117 | 0.91 | 1 | 84 | 15 | 2 |
| 2 | 110 | 0.87 | 2 | 85 | 11 | 12 |
| 3 | 106 | 0.83 | 3 | 117 | 8 | 1 |
| 4 | 84 | 0.82 | 4 | 106 | 6 | 17 |
| 5 | 85 | 0.77 | 5 | 17 | 6 | 3 |
| 6 | 50 | 0.67 | 6 | 24 | 5 | 7 |
| 7 | 86 | 0.67 | 7 | 41 | 4 | 8 |
| 8 | 109 | 0.58 | 8 | 26 | 4 | 6 |
| 9 | 49 | 0.52 | 9 | 110 | 3 | 9 |
| 10 | 89 | 0.52 | 10 | 89 | 3 | 5 |
| - | - | - | - | 총합 | 65 | - |

4. 결론

상수관망이 노후화됨에 따라 파괴나 누수와 같은 운영상의 문제가 빈번하게 발생한다. 따라서 상수관망의 상태를 보다 정확히 파악하여 운영할 경우 안정적인 상수관망의 운영이 가능할 것이며 관파괴와 같은 돌발적인 사태의 피해를 최소화 할 수 있을 것이다. 그러나 상수관망의 실시간 모니터링 센서중 대표적인 online 압력계를 모든 지점에 설치할 경우 과도한 초기투자 비용이 소요되며 시스템의 유지관리 측면에서도 적절하지 않다. 본 연구에서는 상수관망의 실시간 모니터링을 위한 적절한 규모의 online 압력계 설치위치의 결정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 상수관망의 각 지점이 다른 지점에 영향을 미치는 정도(열 요소)와 각 지점이 다른 지점의 영향을 받는 정도(행 요소)를 나타낸 영향지수행렬을 구성하고, 상수관망의 구조적 특성을 최소화하여 각 지점이 다른 지점에 대하여 가능한 동일한 영향을 가질수 있도록 column search를 수행하여 적절히 분포되는 online 압력계의 위치를 선정한다. 제안된 방법을 미국의 Cherry Hill 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다. Cherry Hill 상수관망의 88개의 지점 중 10개의 지점에 online 압력계를 Case 1의 기준으로 설치할 경우 67개(76%), Case 2의 기준으로 설치할 경우 65개(74%)의 지점의 운영상황을 파악하여 발생가능한 피해를 최소화할 수 있다. 또한 센서 설치위치의 우선순위 결정방법은 설계시의 자료만으로도 우선순위 결정이 가능하고 주어진 예산과 인력으로 구현된 상수관망 모니터링 시스템을 운영할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 이현동, 주충남, 최철식, 김주인, 전제철 (2003). "상수도 배수관망에서 SCADA 시스템의 적용." **2003 대한환경공학회 춘계학술연구발표회**, 대한환경공학회, pp. 957-963.
2. Bush, C. A and Uber, J. G. (1998). "Sampling design method for water distribution model Calibration." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, Vol 124, No. 6, pp. 334~344.
3. Kapelan, Z. S., Savic, D. A. and Walters G. A. (2003). "Multiobjective Sampling Design for Water Distribution Model Calibration." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, Vol 129, No. 6, pp. 466-479.
4. Walski, T. M. (1983). "Technique for Calibrating Network Model." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, Vol 109, No.4, pp. 360-372.
5. Yu, G., and Powell, R. S. (1994). "Optimal design of meter placement in water distribution systems" *Int. J. Syst. Sci.*, Vol. 25, No. 12, pp.2155-2166.