

상수관망에서 부정류 해석을 이용한 실시간 모니터링지점 선정

Determination of real-time monitoring places in water distribution system using unsteady analysis

권혁재*

Kwon, Hyuk Jae

요 지

부정류 해석프로그램을 이용하여 각 절점에서 갑작스런 유량의 변화가 일어났다고 가정하여 부정류 해석을 수행하였다. 각 절점에서 소요유량(demand)이 추가로 발생할 경우에 대해서 부정류 해석을 수행하였다. 추가 소요유량이 발생하였다는 것은 그 절점에서의 누수량으로 간주할 수 있으므로 실제 일어날 수 있는 누수에 대한 민감도 분석을 하여 센서의 설치지점을 선정한다면 보다 더 정확한 모니터링 지점선정이 될 것으로 판단된다. 다음과 같은 두 가지 방법을 통하여 모니터링 최적지점 선정방법을 비교하였다.

첫 번째는 한 절점에서 갑작스런 소요유량의 변화가 발생하면 그로인해 부정류가 발생한다. 이때 각 절점에서의 압력변위와 유량변화가 발생한 절점의 압력비를 합하고 절점의 수로 평균하여 민감도 분석을 수행한다. 특정 절점에서 유량변화로 발생한 압력의 변화가 다른 절점에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 기여도를 부정류 해석결과를 이용하여 정량적으로 산정하는 방법이다. 특정 절점에서 유량의 변화가 생겼으므로 부정류해석 결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 압력이 크게 유동하게 된다. 이때의 최고치와 최저치의 차는 압력변위이고 최초압력과 비를 합산하고 절점의 수로 평균한 값을 비교하였다. 이렇게 계산된 값이 가장 큰 절점이 모니터링 지점으로 우선 선정된다.

두 번째 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. 어느 절점의 압력변위와 최초압력의 비를 정량적으로 산정하여 민감도를 분석하고 비교하였다.

핵심용어 : 상수관망, 모니터링, 부정류 해석, 압력변위, 민감도 분석

1. 서론

상수관망의 누수를 해석하고 실시간 모니터링을 하기 위해서는 센서의 설치가 불가피하다. 하지만 많은 숫자의 파이프가 도시 전체에 광범위하게 매설되어 있기 때문에 모든 곳에 센서를 설치하고 모니터링 한다는 것은 사실상 불가능할 것이다. 따라서 특정 지역 혹은 지점에 압력센서나 누수와 관련된 센서를 부착해야 하며 그 지점을 선정하는 것은 경제적으로 혹은 효율적으로 상당히 중요한 일이다. 또한 몇 개의 센서를 설치해야 하는가도 중요한 관건일 것이다.

배정용(2003)은 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.

박풍일 등(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 전

* 청주대학교 이공대학 토목공학과, 전임강사, E-mail: hjkwon@cju.ac.kr

산 프로그램에서 최적화 기법은 프로그램의 효율성을 지배하는 주요소가 된다. 이 연구에서 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.

김형근 등(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.

전환돈 등(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 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 이용하여 적용성이 검증되었다.

정건희 등(2009)은 엔트로피 이론을 이용한 상수관망의 최적 압력계측 위치결정방법을 제안하였다. 본 연구에서는 최적 압력계측 위치결정에 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 실제로 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.

2. 상수관망의 부정류해석

부정류의 전형적인 형태인 수격현상은 많은 과학자들이 수백 년 동안 주목해온 흥미로운 현상이다. 근래 컴퓨터의 급속한 발전으로 많은 부정류 해석모형들이 개발되고 있고 초보적이지만 많은 시도가 이루어지고 있다. 상수관망의 부정류 해석을 위한 연구가 계속 진행되고 있으나 너무 긴 계산 소요시간, 수리구조물들을 위한 불분명한 경계조건들, 그리고 불확실한 마찰손실계수 등으로 인해서 상수관망의 부정류 수치해석이란 아직까지 힘든 작업으로 알려져 왔다.

2.1 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 지배방정식으로써 운동방정식(1)과 연속방정식(2)은 다음 식과 같다 (McInnis and Karney, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (1)$$

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

여기서, H 는 위압수두(piezometric head), Q 는 유량, v 는 압력파의 속도, A 는 파이프의 단면적, D 는 관경, g 는 중력가속도, 그리고 f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. 그리고 식 (1)과 (2)는 Lagrangian Multiplier를 사용하여 아래 식 (3)과 (4)와 같은 두 개의 유한차분식으로 만들 수 있다.

$$(Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n) + \frac{gA}{c}(H_i^{n+1} - H_{i-1}^n) + \frac{f\Delta t}{2DA} Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| = 0 \quad (3)$$

$$(Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^n) - \frac{gA}{c}(H_i^{n+1} - H_{i+1}^n) + \frac{f\Delta t}{2DA} Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| = 0 \quad (4)$$

2.2 Sample 관망

파이프 번호는 각각의 파이프에 대한 고유번호를 의미하며, 분기점, 합류점, 혹은 절점이란 파이프와 파이프가 연결된 지점을 의미한다. 그리고 프로그램 특성상 많은 수의 파이프를 해석하기에는 어려움이 있어 그림 1과 같이 샘플 상수관망은 총 17개의 파이프, 1개의 배수지, 그리고 14개의 절점으로 이루어졌다.

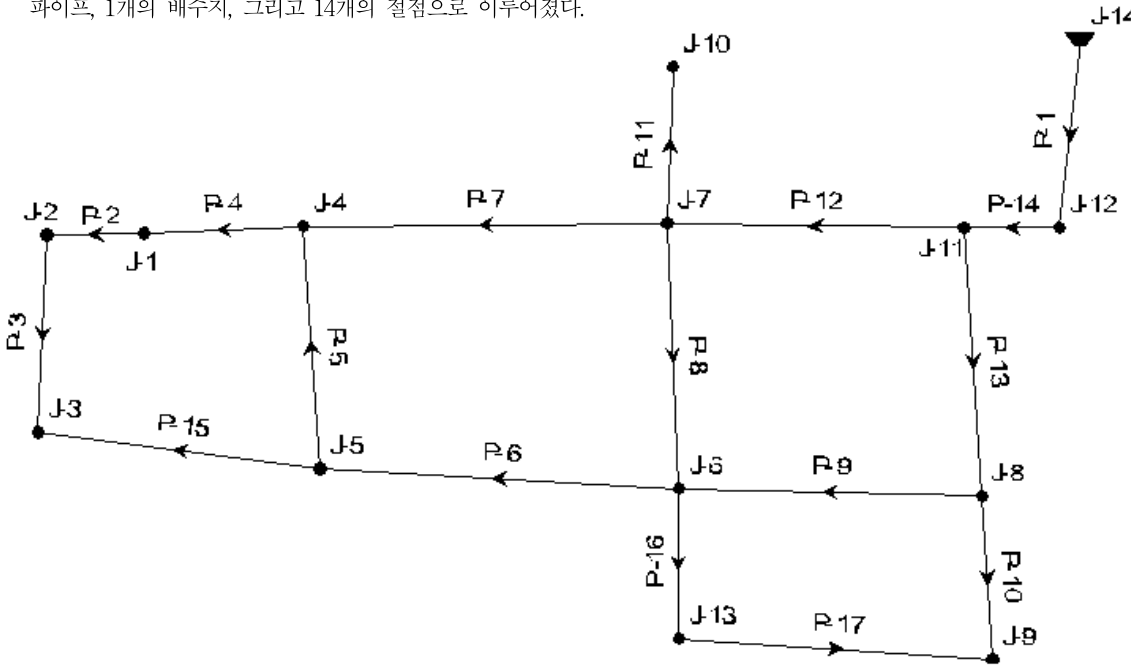


그림 1. Sample 상수관망

3. 부정류 해석결과를 이용한 센서최적설치지점 선정

앞서 개발된 부정류 해석프로그램을 이용하여 각 절점에서 갑작스런 유량의 변화가 일어났다고 가정하여 해석을 수행하였다. 각 절점에서 소요유량이 0.02m³/sec가 추가로 유출될 경우에 대해서 해석을 하였다. 첫 번째 계산에서는 1번 지점에서 0.02m³/sec의 갑작스런 유출이 일어날 때를 가정하였다. 원래 1번 지점은 수요량(demand)이 없는 절점이지만 갑작스런 유출이 일어났다고 가정하고 부정류 해석을 수행하였다. 두 번째는 2번 절점에서 0.02m³/sec의 추가 수요가 발생했다고 가정하고 부정류 해석을 수행하였다. 원래 2번 절점은 0.08m³/sec의 수요량이 항상 존재하는 절점이지만 갑작스럽게 0.02m³/sec의 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 펌프장 혹은 배수장으로 간주되어 절점에서의 수두변화가 없는 곳이므로 시뮬레이션에서 제

의하였다. 부정류 해석을 위한 기본적인 경계조건으로는 $t=0.008\text{sec}$, $\Delta x=10\text{m}$, wave speed=1250m/sec, 그리고 Darcy-Weisbach 마찰계수는 모든 관에 대하여 0.015를 적용하였다. 그림 2는 유량변화로 발생한 압력 변동을 보여주고 있다.

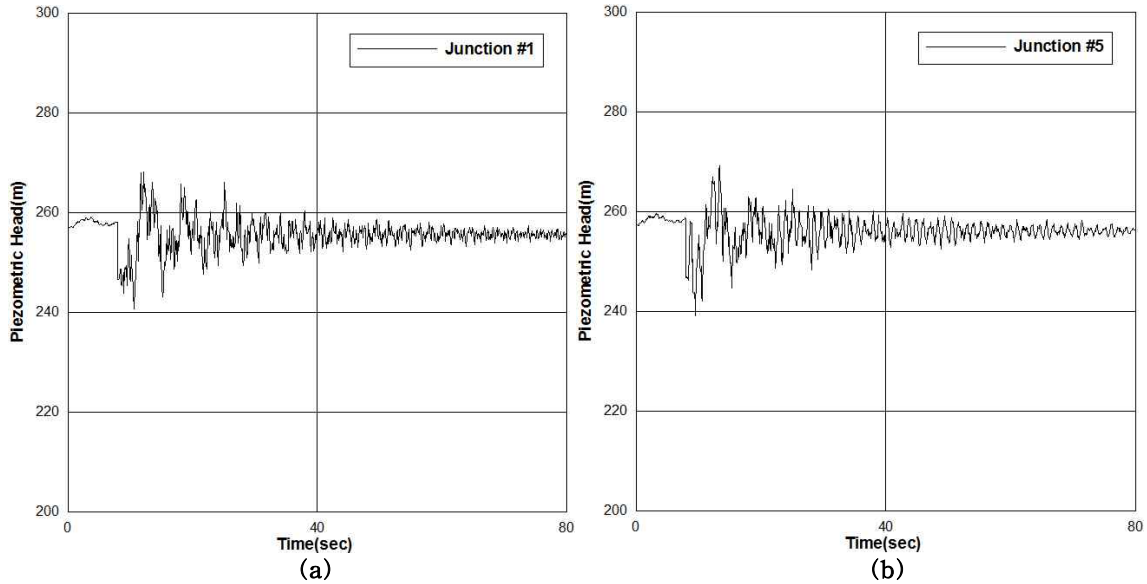


그림 2. 각 절점의 수요유량의 변화에 따른 수두변화 (a)절점 1 (b)절점 5

3.1 부정류해석을 이용한 기여도 분석에 따른 모니터링 최적지점 선정

한 절점에서 유량을 변화시키면 그로인해 부정류가 발생한다. 이때 각 절점에서의 압력변위와 유량변화가 발생한 절점의 압력비를 합하고 절점의 수로 평균하여 민감도 분석을 수행한 것이다. 특정 절점에서 유량변화로 발생한 압력의 변화가 다른 절점에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 기여도를 부정류 해석결과를 이용하여 정량적으로 산정하는 방법이다. 특정 절점에서 유량의 변화가 생겼으므로 부정류해석 결과는 누수가 없을 때 최초 계산하였던 각 절점에서의 위압수두는 크게 변동하게 된다. 이때의 최고치와 최저치의 차는 압력변위이고 최초압력과의 비를 합산하고 절점의 수로 평균한 값을 비교하였다. 식 (5)와 같이 부정류 해석을 통해서 한 절점의 압력이 다른 모든 절점의 압력에 기여하는 정도를 정량적으로 산정하고 비교분석하였다.

$$\sum_{j=1}^k \frac{\Delta h_j}{h_i} / k \quad (5)$$

여기서 k=절점수, j는 절점이며, Δh_j 는 특정 절점에서 발생한 유량변화로 인한 각 절점에서의 압력수두변위, h_i 는 각 절점의 최초압력수두(m)이다. 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 표 1과 같이 결정되었다.

표 1. 부정류 해석을 통한 각 절점의 압력기여도 분석 결과

순위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
절점	3	9	13	10	2	1	5	4	8	6	7	11	12

표 1에서 보는 바와 같이 우선순위는 3번과 9번이 1순위 2순위, 그리고 13번과 10번이 그 뒤를 따르는 순서이다.

3.2 부정류해석을 이용한 압력 민감도 분석에 따른 모니터링 최적지점 선정

이 방법은 유량변화로 발생한 절점의 압력변위와 그 절점의 최초압력의 비를 산정하는 방법이며 부정류해석 결과를 이용하였다. 한 절점에서 유량을 변화시키고 부정류로 인해 발생하는 압력변위와 최초압력의 비를 합산하고 절점수로 평균하여 민감도 분석을 수행한 것이다. 식 (6)과 같이 어느 절점의 압력변위와 최초압력의 비를 민감도로 규정하고 정량적으로 산정하여 비교하였다.

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

여기서 k=절점수, j는 절점이며, Δh_j 는 특정 절점에서 발생한 유량변화로 인한 각 절점에서의 압력수두변위, h_j 는 유량변화가 생긴 절점의 최초압력수두(m)이다. 부정류 해석을 통한 각 절점의 압력 민감도 분석결과, 우선순위가 아래 표 2와 같이 결정되었다.

표 2. 부정류 해석을 통한 각 절점의 압력 민감도 분석 결과

순위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
절점	3	13	9	10	2	1	5	4	8	7	6	11	12

표 2에서 보는 바와 같이 분석 결과 압력 기여도 분석결과와 비슷한 결과를 나타냈다. 1순위는 표 1과 같은 3번 절점이 선정되었고 그 뒤를 13번, 9번, 10번 절점이 선정되었다. 표 9와는 2번 순위와 3번 순위가 뒤바뀐 결과를 보이고 있지만 대체적으로 비슷한 결과라고 할 수 있다.

4. 결론

가상의 소규모 상수관망을 이용하여 여러 가지 시나리오를 가지고 부정류 수치해석을 수행하였다. 가상의 상수관망은 한 개의 펌프장이 물을 공급하며 이때 각 절점에서 갑작스런 추가소요유량이 발생한다는 가정으로 부정류를 재현하였다. 여기서 갑작스런 추가소요유량의 필요로 인해서 각 절점에서 압력의 변위가 생기며 상수관망 전체에 급속히 확산되며 많은 압력변화를 목격하게 된다. 이러한 부정류 해석결과를 이용하여 상수관망의 모니터링 최적지점 선정방법을 비교 분석하였다. 첫 번째 방법은 특정절점에서의 유량변화와 그로 인한 각 절점의 압력변위와 유량변화지점의 최초압력비를 합산하여 각 절점의 압력기여도를 분석하였다. 두 번째는 특정절점에서의 유량변화로 인한 그 절점의 압력변위와 그 절점의 최초압력비를 계산하여 민감도 분석을 하였다. 본 연구에서 사용된 샘플 상수관망에서 두 가지 방법으로 우선순위를 선정한 결과 1순위의 모니터링 지점은 3번 절점으로 나타났다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김형근, 김현수, 이미현, 손미나, 김상현 (2005). “천이류와 주파수분석을 이용한 누수탐지 기법의 연구.” 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2688-2691.
2. 박풍일, 홍성훈, 박남식, 전시영 (2004). “누수위치 탐지를 위한 최적화 기법의 비교.” 대한토목학회논문집, Vol. 24, No. 6, pp. 529-536.
3. 배정용 (2003). “상수관로의 최적모니터링 지점 선정.” 석사학위 논문, 동아대학교 대학원. 환경부 상하수도 통계 2007.
4. 전환돈, 조문수, 백천우, 유도근, 김중훈 (2008). “영향행렬지수를 기반으로 한 상수관망의 실시간 모니터링 지점의 결정 알고리즘.” 한국수자원학회 정기학술대회, 한국수자원학회, pp. 1428-1432.
5. 정건희, 장동일, 유도근, 전환돈, 김중훈 (2009). “엔트로피 이론을 이용한 상수관망의 최적 압력 계측 위치 결정.” 한국수자원학회논문집, Vol. 42, No. 7, pp. 537-546.