

상수도 수요량 패턴분석을 통한 누수감지 모형

Leakage Monitoring Model by Demand Pattern Analysis in Water Distribution Systems

김주환*, 이두진**, 최두용***, 배철호****, 박수완*****,
Juhwan Kim, Doojin Lee, Dooyoung Choi, Cheolho Bae, Suwan Park

요 지

최근 국내외에서 기상이변에 따른 물 부족에 대응하고 먹는 물의 생산과 공급 효율성 향상을 위하여 스마트워터그리드에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 경향으로 이는 상수도 인프라시설의 운영오류, 자연재해, 사이버를 통한 의도적 공격 등에 대해 안전하고 신뢰성이 높은 시스템을 구축하기 위한 것이다. 또한 상수도 분야에서는 스마트 미터링 개념을 도입하여 상수관망에서 발생하는 각종 사고나 물 손실을 저감하기 위한 노력이 시도되고 있는 실정이다.

일반적으로 누수량이 많을 경우에는 누수의 징후가 지표면에서 확인이 가능하나 미세한 경우 탐사장비의 운영이나 인력의 투입을 통해 가능하다. 물 공급계통인 상수관망에서 물 손실을 저감시키기 위한 방법중 하나로서 수도미터로부터 기록되는 물 사용량 데이터를 이용하여 누수패턴을 추출함으로써 누수감시가 가능하도록 하는 모형을 개발하고자 하였다. 이는 탐사장비에 의한 누수감지와 상호 보완적을 활용할 수 있는 것으로서 사용량 자료를 분석하여 사전에 처리된 자료의 노이즈와 결함 있는 계측값을 필터링시키는 기법이 도입된 것이며 신속한 감지를 통해 누수 지속시간을 감소시킴으로써 누수량의 저감을 목표로 한다. 물 공급 네트워크를 보다 더 효율적 만들 수 있는 누수 감시모형은 상수관망의 운영에 필요한 정보를 도출하기 위하여 보다 정확하고 다양한 수학적 및 통계적 분석을 기반으로 구성되어 누수 외에도 각종 결함을 찾아내는 역할을 수행할 수 있다. 향후 다양한 지역을 이러한 수용가의 물 사용량 미터링 결과를 토대로 실제 사용량과 누수량을 분리하여 분석함으로써 국내 실정에 적합한 누수감시 기술개발 토대를 마련할 수 있을 것으로 판단되며, 누수저감을 위한 실질적인 상수관망의 운영관리 효율향상의 정보로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 상수관망, 누수감시, 패턴분석, 수요량

1. 서론

상수도 관망에서의 누수관리와 관련하여 연구되어온 내용은 누수량 산정 방법, 누수 위치 탐지법, 그리고 누수 제어 기법으로 대별된다. 각 연구 방법의 최근 연구사례를 들면, 누수량 산정 방법은 Top-down 방식을 사용한 Lambert and Hirner (2000)의 IWA 방법이 있으며, Bottom-up 방식을 이용한 Covas et al. (2006)의 야간최소유량 분석법이 있다. 누수 위치 탐지 법으로는 최적화

*정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : juhwan@kwater.or.kr
**정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : dooyoung@kwater.or.kr
***정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : doojin@kwater.or.kr
****정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : chbae@kwater.or.kr
*****정회원 · 부산대학교 토목공학과 · E-mail : swanpark@pusan.ac.kr

기법과 수리학적 모형(Kapelan et. al 2004; Stathis and Loganathan 1999) 또는 천이류 흐름해석 기법을 이용하는 누수 발생 판정방법이 있고, 음향 로깅 (Muggleton et al. 2006), 단계적 시험법 (Pilcher et al. 2007) 또는 지반 운동 센서와 지반 투과 레이더 (O'Brien et al. 2003)를 사용하는 누수 고립 (localisation) 방법이 있으며, 또한 누수-소음 상관관계법 (Muggleton and Brennan, 2005), 가스 투입법 (Farley and Trow 2003) 또는 피그 장착 음향 탐지법 (Mergelas and Henrich 2005)을 이용하는 정확한 누수위치 탐지 (leakage pin-pointing) 방법이 있다.

누수 발생 판정방법 중 천이류 흐름해석 기법을 이용하는 방법은 다시 leak reflection method (Brunone and Ferrante 2004), inverse transient analysis (Soares et al. 2007), impulse response analysis (Kim 2005), transient damping method (Wang et al. 2003), 및 frequency domain response analysis (Zecchin et al. 2006)로 구분할 수 있다. 한편 확률론적 방법을 이용하여 누수 발생 판정 방법을 개발한 사례는 많지 않으나 Bayesian 기법을 누수 발생 판정에 이용한 Puust et al. (2006)이 있다.

누수 제어 기법은 크게 수동적 누수 제어와 능동적 누수제어로 나눌 수 있으며, 능동적으로 누수를 제어하기 위하여 압력관리와 같은 기법이 많이 개발되어 왔다. 최근 들어서는 효율적인 누수 관리를 위하여 수리학적 모델링 소프트웨어와 GIS 및 SCADA를 통합하여 하나의 패키지(Tabesh and Delavar 2003)로 만들려는 시도가 있었으며, 인공지능의 한 분파인 인공 신경망을 이용하여 수요량을 예측(Bougadis et al. 2005)한다거나, 관로 파손사건을 탐지하기 위하여 방대한 양의 관망 운영 자료와 과거기록을 탐색(Mounce et al. 2009)한 사례도 누수 제어 기법 개발의 하나로 볼 수 있다.

본 연구에서는 관망의 누수를 효율적으로 제어하기 위하여 최근 세계적으로 시도되고 있는 관망의 스마트 미터링 시스템에 대해 조사하고, 누수를 탐지하기 위한 기법 중에서 관망에서 관측된 유량자료에 인공지능과 통계적 기법을 적용한 사례를 분석하였다. 또한 시범 자료에 대한 누수감지 알고리즘을 적용하고 그 결과를 분석하였다.

2. 상수관망의 누수량 산정기법

누수량 산정을 위한 기법들은 누수량을 누수가 발생한 위치는 고려하지 않은 상태에서 시스템 내에서 발생한 누수량을 추정하는데 초점이 맞추어져 왔다. 누수량 산정기법은 크게 2가지 방법으로 나눌 수 있는데, 하나는 하향식 누수량 평가(top-down leakage assessment) 방법, 다른 하나는 상향식 누수 평가(bottom-up leakage assessment) 방법이다. 하향식 누수량 평가법은 사용 목적별 물 사용량을 주로 고려한 전체적인 물 수지(water balance)의 구성 요소를 평가하여 특정 시스템의 누수를 추정한다. 가장 많이 쓰이는 기법으로 IWA 기법 (Lambert and Hirner 2000)과 영국의 OFWAT 기법이 있다. 하향식 누수량 평가법은 그 기법이 간단한 장점이 있으나, 이 방법을 통해 얻은 누수 추정량은 비교적 정확하지 않은 것으로 알려져 있다. 상향식 누수 평가법의 목적은 배수관망의 효율을 분석하고, 효율성을 향상시키기 위한 방안들을 파악하기 위한 것이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 최근에 수집된 정확한 데이터가 필요하다. 상향식 누수 평가법은 (a) 24 시간 zone 측정 (HZM) 또는 (b) 야간 최소 유량 (MNF) 분석의 두 가지 다른 방법으로 진행될 수 있다. HZM은 하나 또는 둘의 유입 지점에서 공급되는 배수관망에서 일시적으로 격리된 지역이 필요하다. 격리된 지역에서는 24시간 유입량과 압력이 함께 기록되어야 한다. 도시인 경우에는 MNF가 보통 이른 아침 기간 동안, 일반적으로 2시와 4시 사이에 발생한다.

Lambert(2001)는 누수 지점의 개구 부분이 고정된 경우와 가변인 경우에 대해 압력수두에 따

른 누수량을 추정할 수 있는 fixed and variable area discharges(FAVAD)라는 방법을 제안하였다. 이러한 방법에 따라 압력수두의 비율에 따른 누수량 추정이 가능하게 되었으나, 모형에 사용된 계수의 정확한 추정은 여전히 문제점으로 남아있다.

야간 최소 유량 분석법의 관망의 구성 방식에 따라 다른 누수량 산정법도 적용될 수 있다 (Puust 2007). 또한 Buchberger and Nadimpalli (2004)와 같은 통계적 기법을 이용하여 누수량을 산정한 연구도 보고되고 있다. 이러한 방법은 다른 기법에 비해 보다 정확할 것으로 예상되지만 DMA(District Metering Area) 내의 하나 이상의 지점에서 지속적이며 정확한 유량자료가 필요하다. 그러나 이러한 방법을 적용하는데는 DMA 내에서 측정되는 자료는 고해상도가 아닐 수 있고, 자료 측정 시스템의 위치를 최적화해야 하는 문제가 있을 수 있다.

3. 누수감지 기술

본 연구에서는 상수관로에서 실시간으로 관망의 운영자료를 수집, 분석함으로써 관망의 누수를 감지하는 기술개발은 선진국이 상품화된 기술을 개발하고 있는데 반하여 국내에서는 시험개발 연구 및 Pilot Test에 머물고 있는 실정이다. 관망 분야에서 실시간 감시 및 운영시스템 개발과 관련된 기술현황을 조사하였다. 상하수도, 가스관, 송유관의 누수, 파손발생에 대한 실시간 정보, 노후화 진행에 의한 상태정보 제공, 교체 및 파손시기 예측 등 효율적인 관로상태 분석 및 운영이 가능한 스마트 파이프의 개발을 국내 및 국외에서 추진 중에 있으며, 특히 선진국에서는 광섬유센서, 전기테이프 등을 이용하여 관체와 함께 매설함으로써 관로의 누수, 변형 등을 감시하는 시스템을 구축하여 운영하는 사례가 발견되고 있다. 선진국은 누수탐사 분야에서 탄성파, 음향, 진동 등에 의한 누수 감지장치를 개발하여 누수를 감지하고 위치를 정확하게 탐지하는 기술을 개발하여 누수저감에 활용 중에 있으나, 국내에서는 외국에서 개발된 상관식, 전자침음식 누수탐지기 등을 수입하여 유수율 제고사업에 활용중이며 국내에서 자체 개발되어 생산중인 누수감지 장치는 없는 실정이다.

표 1 상수관망에서 누수감지기술의 분류

분 야	기술내용	비고
누수탐사장비 (Leakage Detection Equipment)	- 외부 다지점 음파측정을 통한 구간 누수 측정 장비 - 내부 유영 음파 측정 장비(Pig, floating)	
누수위치 및 누수량 산정 (Location and Quantity)	- 실시간 유량분석을 통한 누수위치 - 실시간 누수 저감량 산정	
정밀 누수감지 및 산정	- 음파 정밀해석을 통한 nose filtering 기술 - 가스 투입법 (Farley and Trow, 2003)	
누수감시 및 진단	- 실시간 유량 Data filtering, 분석 및 인공지능에 의한 누수패턴 분류	

누수감지를 위한 기술로서 2010년 영국의 Sheffield 대학에서 개발 제시된 Automated Data Analysis(ADA) 시스템이 구축된 사례가 있다. ADA는 누수나 관파손으로 인한 유량의 변화를 예측함으로써 급수관망에서의 온라인으로 인공 지능(AI) 접근을 통한 자동 데이터 분석기능을 개발하는 것을 목적으로 하고 있으며 DMA(District Metering Area) 유입유량과 수용가 사용량을 분석하여 관파손으로 인한 누수를 감지하는 프르토타입으로 개발되었다. 인공지능시스템은 최근의 기록한 데이터 분석을 함으로써 미래의 흐름 시나리오의 범위를 예측하고, 실제흐름과 퍼지 로직

규칙을 사용함으로써 이런 예측치와 비교하는 것이다. 평상시 흐름패턴과 다른 일반적이지 않은 흐름 패턴이 발생할 경우 흐름양을 판단하여 경보를 발생시키며 수압의 저하, 불출수량, 누수와 많은 운영상의 방해요소에 대해 온라인을 통한 수도공급시스템 정보의 제공이 가능하게 한 것이다.

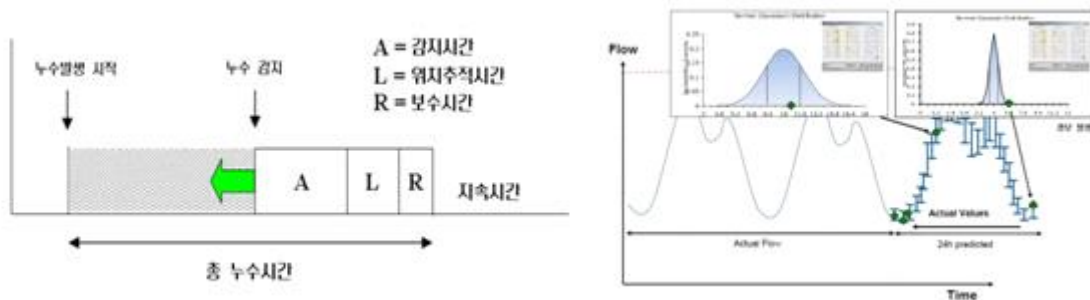


그림 2 누수감지를 통한 누수저감 개념도

여기서 적용된 인공지능 이론은 신경망(Neural Network)과 퍼지론(Fuzzy Inference System)을 기반으로 한 누수 및 관 파손 사고시 사고 범위와 사고 발생지점을 분석하기 위한 자동 온라인 시스템이다. 이를 통하여 최대 DMA내에서 유량의 약 2%~5%를 감지할 수 있는 것으로 누수와 관 파손에 의해 발생한 것을 정확히 검증하여 증명하였다.

또한 2010년 Door 등에 의하여 수행되고 있는 Neptune 프로젝트(Integrated Solutions for Water Supply Operation)에서는 에너지 소비와 누수감소를 위한 관로의 수압관리 기술의 혁신적인 실험과 상수관망에서의 지속성, 효율성, 고객서비스를 증진시키기 위한 새로운 접근과 실용적인 압력관리기술 개발을 목적으로 기술개발이 이루어진 사례이다. 이는 지속적인 관망 운영정보의 분석을 통하여 평가하고 위험요소를 감지하고 이를 근거로 운영 및 유지관리에 대한 의사결정을 지원하는 통합시스템이다. 이를 위하여 다음과 같이 3가지 기술을 분류하여 개발된 것이다.

(1) 데이터, 센서, 지식

- 실시간 감시 센서, 통신 기술을 적용하여 전력량과 비용을 최소화하는 관망시스템을 구축
- 통합인공지능과 수학적 시뮬레이션 기술을 개발하여 효율성, 온라인, 운영과 사고 모니터링, 해석, 보고시스템을 가능하게 함

(2) 압력관리

- 압력조절계획의 설계를 위한 방법론과 소프트웨어 기술의 개발 : 장기간 계획과 압력관리를 위한 운영 계획
- 넓은 지역을 걸치는 수압관리 시스템을 개발 : 고객피해, 에너지소비, 누수를 최소화하는 압력조절시스템을 도입
- 감독 조절 시스템 도입을 통한 누수와 관 파손 사고를 발견하는 자동 모니터링 시스템 : 진보된 지역적 관파손 해결 절차를 통하여 물과 에너지 손실을 낮춤

(3) 위험요소를 기반으로 하는 의사지원결정(DSS)

- DSS 체제 개발 : 전략적 결정과 실시간 지원
- DSS 프로토타입 개발과 수행 : 연구대상지역에 프로토타입 DSS를 개발, 테스트와 적용

개발된 기술은 영국의 Yorkshire Water가 관리중인 지역을 대상으로 수행되었는데 목표는 실시간 자료를 정보로 변환하는 것으로 RTnet라는 시스템으로 실 적용되었다. RTnet은 자료의 로거에서 GPRS(Ground Penetrating Radar System)를 가능하게 하는 장치로의 대체되었는데, 미래의

수요예측을 통하여 관 파손에 따른 패턴을 분석함으로써 누수나 사고의 신속한 발견이 가능하게 한 것이다. 관 파손을 예측하기 위해 인공망(Neural network)을 사용하여 24시간 이후 우량을 예측하고 파괴 범위와 안정 한계를 지정하여 누수감지의 인식을 향상시킨 것이다. 따라서 신속한 반응을 통해 누수로 인한 민원을 감소시켰을 뿐만 아니라 대규모 및 소규모 관로사고로 인한 누수를 발견하고 누수범위에 대한 평가도 가능토록 개발되었다. 다음 그림은 사용량변화에 따른 누수량 패턴을 나타낸 것으로 누수가 발생한 경우와 비교한 것이다. 이를 위해서는 사용량의 변화패턴을 분석하여 누수로 인한 이상여부를 판단할 수 있는 기준이 필요하며 이에 대해서는 추가적으로 자료분석 알고리즘을 비교, 평가하여 설정하여야 할 것이다.

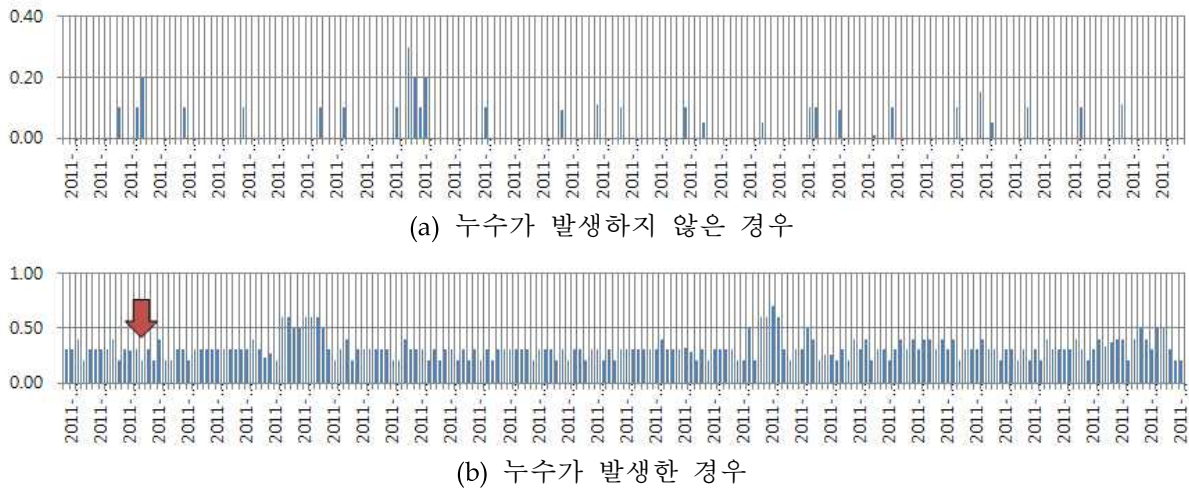


그림 3 누수의 발생여부에 따른 사용량 변화

4. 결론

본 연구에서는 지금까지 상수관망에서 발생될 수 있는 누수를 감지하기 위하여 지금까지 국외에서 개발된 감지기술을 조사하여 국내에서 적용될 수 있는 기술을 평가하였다. 이 중에서 최근의 ICT기술을 접목시켜 관내의 유량과 수압을 실시간으로 분석하여 인공지능 이론을 도입한 데이터, 센서 및 정보지식의 추출하여야 한다. 또한 추출된 정보로부터 관망 감시목적의 하나인 누수의 판단기준을 판단하는 분석알고리즘을 비교, 평가함으로써 활용코자 하는 것이다. 향후 실시간으로 취득되는 자료의 분석과 누수판단기준을 설정하여 상수관망의 이상상태나 누수징후를 예측할 수 있는 운영관리시스템의 개발이 기대된다.

참고문헌

Mounce, S.R., Day, A.J., Wood, A.S., Khan, A., Widdop, P.D., and Machell, J., 2002. A neural network approach to burst detection, *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 4-5, pp. 237-246.

Mounce, S.R., Boxall, J., and Machell, J., 2010. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 136, No. 3, May/June 2010, pp. 309-318.

Xia, L. and Guo-jin, L., 2010. Leak Detection of Municipal Water Supply Network Based on the Cluster-analysis and Fuzzy Pattern Recognition, *International Conference on E-ProductE-Service and E-Entertainment(ICEEE)*.

Ye, G. and Fenner, R. A., 2011. Kalman Filtering of Hydraulic Measurements for Burst Detection in Water Distribution Systems, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 2, No. 1, February 2011, pp. 14-22