

적응 칼만필터를 이용한 상수관망의 누수감시 기법

Leakage Detection of Water Distribution System using Adaptive Kalman Filter

김성원* / 최두용** / 배철호*** / 김주환****

Kim, Seong-Won / Choi, Doo Yong / Bae, Cheol-Ho / Kim, Juhwan

Abstract

Leakage in water distribution system causes social and economic losses by direct water loss into the ground, and additional energy demand for water supply. This research suggests a leak detection model of using adaptive Kalman filtering on real-time data of pipe flow. The proposed model takes into account hourly and daily variations of water demand. In addition, the model's prediction accuracy is improved by automatically calibrating the covariance of noise through innovation sequence. The adaptive Kalman filtering shows more accurate result than the existing Kalman method for virtual sine flow data. Then, the model is applied to data from two real district metered area in JE city. It is expected that the proposed model can be an effective tool for operating water supply system through detecting burst leakage and abnormal water usage.

Keywords : water distribution system, Kalman filter, adaptive Kalman filter, leakage, pipe flow

요 지

수돗물의 공급과정에서 발생하는 상수관망의 누수는 소중한 수자원의 손실, 공급에너지의 추가적인 소요 등 사회경제적인 손실을 초래한다. 본 연구에서는 관로 상에 설치되어 실시간으로 계측되는 유량자료를 이용하여 누수를 감시하는 모형을 적응 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 비교하였으며, JE시의 2개 소블록 유량자료에 대한 현장 적용성 평가를 실시하였다. 본 연구의 결과는 관로의 파열에 의한 누수 및 비정상적인 용수사용량에 대한 감시를 통하여 상수관망의 효율적인 운영관리에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 상수관망, 칼만필터, 적응 칼만필터, 누수, 관로유량

* 한국수자원공사 K-water 연구원 (e-mail: kim_sungwon@kwater.or.kr)
Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

** 교신저자, 한국수자원공사 K-water 책임연구원 (e-mail: dooyong@kwater.or.kr, Tel: 042-870-7506)

Corresponding Author, Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, 462-1 Junmin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-370, Korea

*** 한국수자원공사 K-water 책임연구원 (e-mail: baech@kwater.or.kr)
Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

**** 한국수자원공사 K-water 수석연구원 (e-mail: juhwan@kwater.or.kr)
Head Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

1. 서 론

상수관망에서 누수는 직접적으로 소중한 수자원의 낭비를 초래할 뿐 아니라, 사회경제적으로 수도물의 생산 및 공급을 위한 에너지 및 경제적 손실을 초래한다. 환경부 상수도통계(MoE, 2012)에 따르면 우리나라의 2011년 현재 누수량은 629만 m^3 으로, 생산원가 813.4원/ m^3 를 감안하면 연간 5,110억 원의 경제적 손실이 누수로 인해 추가적으로 발생하고 있다. 그러나 상수관망은 지하에 매설되어 있어 이상 유무 및 누수를 완벽하게 파악하기는 어려운 실정이며, 누수음의 주파수 특성을 분석하는 탐지방범이 보편적으로 적용되고 있으나, 음향기술을 이용하여 직접적으로 관로의 누수를 탐사하는 기법은 많은 비용과 노력이 요구된다. 또한 누수의 발생으로부터 탐사에 많은 시간이 소요되어 상당한 양의 수도물 손실을 피할 수 없다.

이러한 문제점의 보완을 위하여 관로 상에 설치된 센서로부터 얻어지는 유량 및 압력데이터 분석을 통한 자동감시는 파열 및 누수 발생 유무에 대한 정보를 실시간으로 파악하려는 연구들이 수행되어 왔다(Mounce et al., 2003; Khan et al., 2005; Ha et al., 2006). 자동 파열누수 감시에 대한 그동안의 연구는 인공신경망(artificial neural network) 기법을 이용하여 전형적인 용수수요 패턴의 학습을 통하여 비정상적인 용수사용량 및 누수량을 예측한다. 그러나 이러한 방법들은 일반적으로 용수수요 패턴의 학습을 위한 많은 양의 데이터를 필요로 한다. 인공신경망과 함께 실시간 자료에 입각한 예측기법으로 Kalman (1960)이 제안한 칼만필터(Kalman filter; KF) 기법은 최초로 적용된 제어계측 분야 이외에도 수자원 분야에서 홍수예측 등에 활용한 사례가 발표되고 있다(Bae et al., 2009; Yoo et al., 2012). 그러나 상대적으로 용수수요 예측, 상수관망의 감시제어 등과 같은 상수도 분야에서의 연구개발 사례는 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구에서는 실시간으로 계측되는 유량자료를 이용하여 상수관망 누수감시를 위한 기존 칼만필터 기법의 적용의 한계를 분석하고, 잡음(noise)의 공분산(covariance)을 시간의 변화에 따라 자동적으로 추정하는 적응 칼만필터(Adaptive Kalman Filter; AKF)의 도입을 통하여 개선된 누수감시 모형을 제시하고자 한다. 본 연구에서 개발된 KF와 AKF 기법을 이용한 모형은 사인함수(sine function)와 잡음을 조합한 가상의 시계열 자료에 대한 예측을 통하여 검증 실시하였다. 또한 국내 JE지역의 2개 소블록(district metered area, DMA) 유량자료에 대하여 개발 모형의 적용성 평가를 실시하였다.

2. 적응 칼만필터에 의한 누수감시 기법

2.1 칼만필터 기법

칼만필터 기법은 선형 확률적 동적시스템에서 측정치 및 동적 상태정보를 활용하여 시간적으로 연속한 최적 예측을 수행하는 알고리즘이다. 본 기법은 측정되지 않은 상태변수를 추정해 내고 추정된 잡음의 영향을 최소화하는 것으로, 기본 전제는 관측 및 추정치는 정규분포(Gaussian distribution)를 따르는 오차가 있다는 것이다. KF 기법은 상태-공간 모형(state-space model)에 대한 정보가 필수적이며, 이 모형은 시스템 방정식(system equation)과 관측 방정식(measurement equation)으로 구성된다. 누수감시를 위한 유량계측 시스템의 방정식은 유량이 일정하게 변화한다는 가정, 즉 현재시점 k 의 추정치는 이전시점 $k-1$ 의 값이 같다는 가정 하에 상태변수 x 에 대한 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$x_k = x_{k-1} + w_k, \quad w_k \sim N(0, q_k) \quad (1)$$

여기서, w 는 상태변수의 불확실성(uncertainty)에 발생하는 잡음으로 평균이 0이고, 공분산이 q 인 정규분포를 따른다. 관측 방정식은 관측치에 대한 백색잡음(white noise)를 고려하여 다음의 식으로 나타낸다.

$$z_k = x_k + v_k, \quad v_k \sim N(0, r_k) \quad (2)$$

여기서, v 는 관측의 오차를 나타내며 평균이 0이고, 공분산이 r 인 정규분포를 따른다. KF기법은 이전($k-1$)의 데이터를 가지고 현재(k)의 상태값 및 공분산 x_k^-, P_k^- 를 예측(predict)하는 과정과, 예측치와 측정치로 현재의 상태값 및 공분산 x_k^+, P_k^+ 를 추정(update)하는 과정으로 크게 구분된다.

KF 기법의 전체적인 연산과정을 3단계로 살펴보면, 먼저 상태값 및 공분산의 초기치 x_0^+, P_0^+, q_0, r_0 가 주어지면 다음의 식에 의하여 상태값과 공분산을 각각 예측한다.

$$x_k^- = x_{k-1}^+, \quad P_k^- = P_{k-1}^+ + q_k \quad (3)$$

다음 단계는 위 식에서 얻어진 예측치를 이용하여 칼만이득(Kalman gain) G 를 다음과 같이 계산한다.

$$G_k = P_k^- / (P_k^- + r_k) \quad (4)$$

마지막 단계는 계산된 칼만이득, 상태값 및 공분산의 예측치 및 측정치를 이용하여 상태값 및 공분산의 추정치를 다음의 식에 의하여 각각 계산한다.

$$x_k^+ = x_{k-1}^- + G_k(z_k - x_{k-1}^-), P_k^+ = P_{k-1}^-(1 - G_k) \quad (5)$$

2.2 적응 칼만필터 기법

KF 기법이 최적의 예측을 수행하기 위해서는 상태-공간 모형이 완벽하고 잡음에 대한 확률적 특성을 사전에 알고 있어야 한다. 부정확한 모형과 잡음에 대한 정보는 예측의 질을 저하시킬 수 있다. 적응 칼만기법은 잡음의 공분산에 관한 불확실성을 감소시키기 위하여 다음의 혁신과정(innovation sequence)을 통하여 Eq. (3)의 q_k 와 Eq. (4)의 r_k 를 자동적으로 보정한다(Medha, 1970). 혁신과정에 따르면, 먼저 측정치와 상태값의 예측치 차이를 다음과 같이 정의한다.

$$s_k = z_k - x_k^- \quad (6)$$

s_k 의 자기상관에 의하여 계산되는 공분산 c_k 는 반복 횟수의 크기를 m 으로 정의할 때 다음과 같이 계산된다.

$$c_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m+1}^k s_i^2 \quad (7)$$

여기서, 반복횟수의 크기는 예측의 정확도에 대한 평가를 통하여 결정되며, 본 연구에서는 5회의 반복횟수 크기를 이용하였다. Eq. (7)에서 계산된 c_k 를 이용하면 잡음의 공분산은 다음과 같이 자동적으로 계산된다.

$$q_k = G_k^2 c_k, r_k = c_k + P_k^- \quad (8)$$

2.3 개발기법을 이용한 누수감시 모형 구축

일반적으로 상수도 사용량은 1일에 2개의 첨두유량(peak flow)을 가지는 곡선의 형태를 나타내며, 사람들의 활동이 많아지는 아침과 저녁 시간대에 최대의 유량이 관측된다. 용수요량은 시간대별 변동과는 별도로 요일별로 편차를 나타내는 경향이 있다. 다시 말하면, 현재 시점의 유량값은 일주일전 동일 시간대의 유량값과 밀접한 상관성을 나타낸다. 본 연구에서는 시계열 유량자료의 패턴(pattern) 유사성을 고려하여 누수감시 모형을 구축하고자 하였다. 즉, 일주일간의 유량 측정치(또는 추정치) 개수를 N 이라 하면, 현재 상태 k 의 추정에 이용되는 이전의 유량 추정치 및 공분산은 x_{k-1}^+, P_{k-1}^+ 대신 x_{k-N}^+, P_{k-N}^+ 이 이용된다. 모의 초기 패턴의 학습을 위한 충분한 시간이 확보되지 않은 경우에는 유량의 추정치(x_k^+)는 측정치(z_k)에 1.01을 곱한 값을 사용하도록 설정하였다.

KF 또는 AKF를 이용하여 추정된 값은 관측값과의 차

이를 다음 식에 의하여 잔차 R_k 를 계산하게 된다.

$$R_k = z_k - x_k^+ \quad (9)$$

이렇게 계산된 잔차에 의하여 과열누수의 발생 유무를 판단하는 경우 측정치의 잡음 만에 의해서도 빈번하게 누수발생 신호를 발생시키는 문제점을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다음의 저주파 통과필터(Low Pass Filter, LPF)를 이용하여 평탄한 모양의 잔차곡선을 정규화된 형태로 유도할 수 있도록 하였다.

$$LFR_k = (LFz_k - LFx_k^+)/LFz_k \quad (10)$$

여기서, LF 는 이동평균에 의한 저주파 통과필터를 통과한 값을 의미한다. Eq. (10)에 의해 계산된 잔차 중 1% 미만의 오차와, (-)값을 가지는 잔차는 다음의 식에 의하여 0으로 표시하도록 하였다.

$$LFR_k = \begin{cases} LFR_k & \text{if } LFR_k \geq 0.01 \\ 0 & \text{if } LFR_k < 0.01 \end{cases} \quad (11)$$

이상의 누수감시 모형의 수행절차는 Fig. 1에 나타내었다.

3. 누수감시 모형의 적용 및 결과

본 연구에서 개발된 모형은 먼저 사인함수 형태를 가지는 유량 시계열 자료에 가상의 누수를 중첩시켜 KF 및 AKF 기법의 잡음제거 효과에 대한 검증은 실시하였다. 또한 국내 JE시의 2개 소블록 유량자료에 대하여 개발 모형의 현장 적용성을 평가하였다.

3.1 가상의 유량 시계열 자료에 대한 모의실험

개발된 누수감시 모형의 검증을 위해 가상의 유량 시계열 자료를 모의 발생시켰다. 사인함수를 이용한 유량 시계열 자료의 곡선식은 다음과 같이 구성된다.

$$z(t) = 40 \sin(2\pi \times t/24) + 100 \quad (12)$$

여기서, t 는 시간을 나타내며, 유량 관측치 z 는 시간에 따라 평균유량 100, 진폭 40으로 변동하도록 설정하였다(Fig. 2(a)). 모의유량 평균의 25% 및 40%에 해당되는 사다리꼴 형태의 가상누수는 Fig. 2(b)에, 모의유량 평균의 $\pm 5\%$ 에 상당하는 난수(random number) 발생에 의한 측정잡음은 Fig. 2(c)에 나타내었다. 이렇게 모의로 발생된 유량 시계열 자료는 Fig 2(d)와 같이 실시간으로 15분 간격으로 계측하였다.

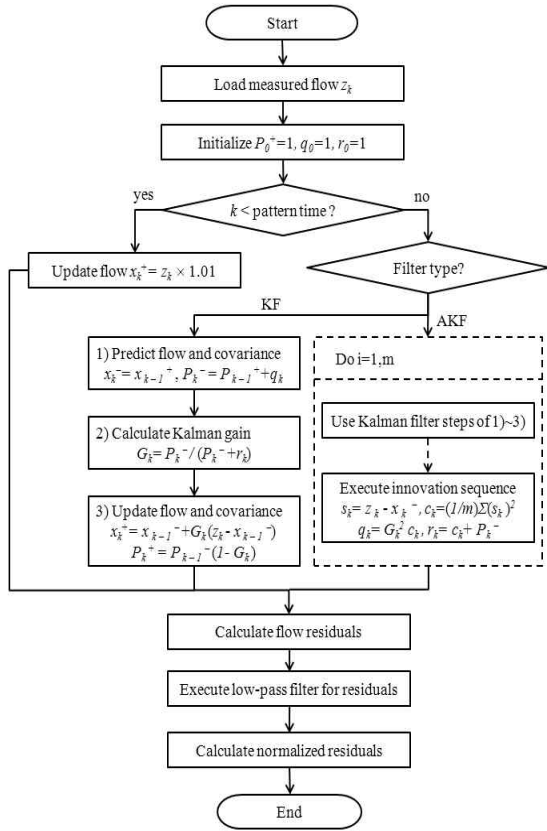


Fig. 1. Flowchart of Leakage Detection System Using Kalman and Adaptive Kalman Filter

모의유량에 대한 KF 및 AKF 적용결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 가상누수가 발생된 지점에서의 KF와 AKF 추정치는 관측치와 상이함을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)에 보이는 바와 같이 Eq. (9)에 의한 잔차 R_k 의 초기치는 나중의 시간대와 달리 "0"에 근접한 값을 나타낸다. 그 이유는 최초 1주기(24시간)에 유량패턴 설정을 위하여 관측치의 1.01배로 추정치를 설정한 것으로 설명될 수 있다. 또한 사다리꼴 형태의 가상누수 지점에서 AKF와 KF 모두 발생시점에 대하여 일치된 추정 결과를 나타낸다. 누수량의 크기에서는 AKF 추정치가 평균유량 100의 25% 및 40%에 상당하는 모의발생 누수와 근접한 크기의 누수를 예측하는 반면, KF는 약 15% 및 20%로 추정함으로써 입력치와 차이를 나타냄을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 3(b)의 모의발생 누수가 없는 구간에서 $\pm 10\%$ 의 정규화된 잔차를 발생시킴으로서 입력된 $\pm 5\%$ 의 측정잡음보다 큰 잡음으로 인하여 누수발생 신호를 빈번하게 발생시킬 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 반면 저주파 필터를 통과한 후에 Eq. (10)에 의해 계산된 정규화된 잔차는 Fig. 3(c)와 같이 잡음에 의한 빈번한 누수신호

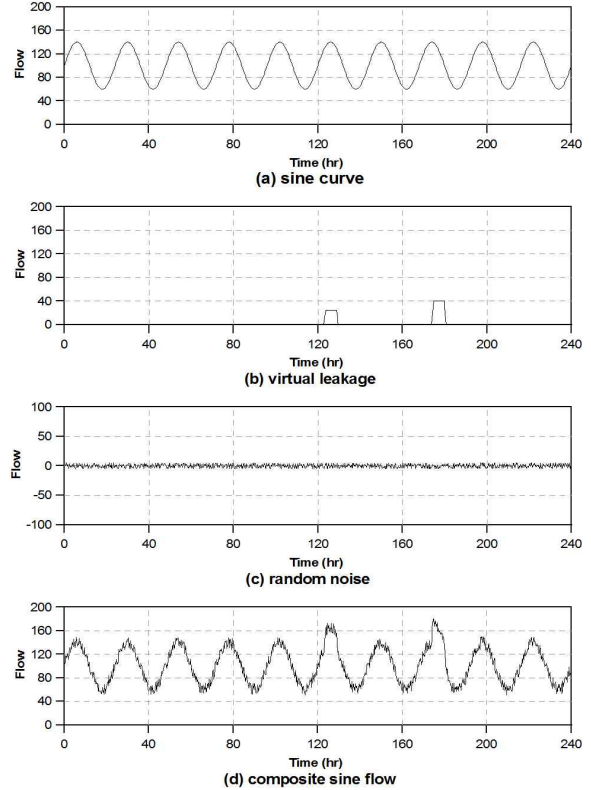


Fig. 2. Virtual Flow Data Using Sine Function

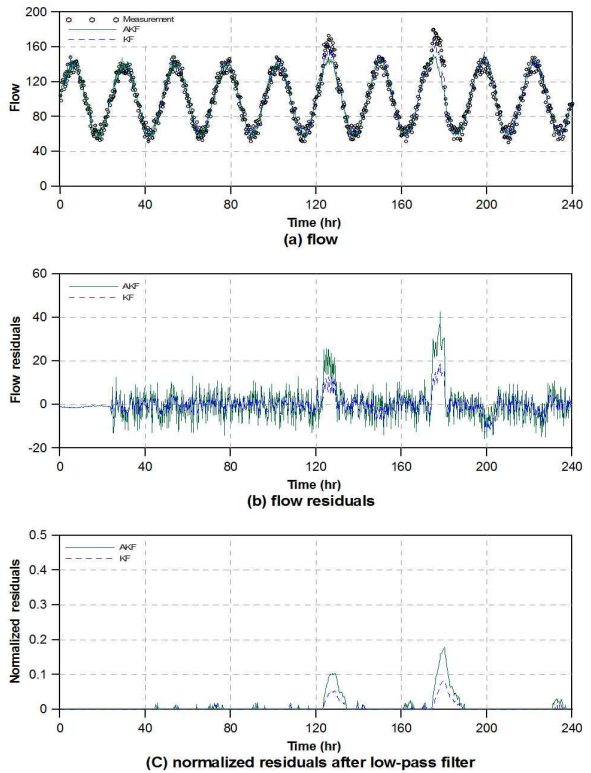


Fig. 3. Flow Data and Leakage Detection Results in Virtual Sine Flow

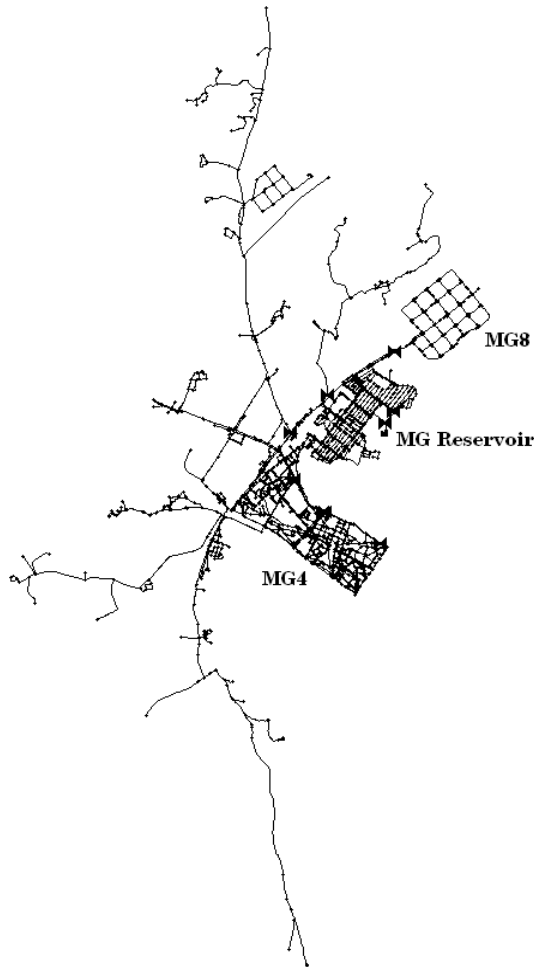


Fig. 4. Schematic Diagram of MG Water Supply Network

발생을 제거할 수 있는 장점을 가지고 있다. 누수 크기의 예측에서는 AKF 적용 시 10% 및 18%, KF 적용 시 5% 및 8%로 입력치로 사용된 가상누수의 크기에 비하여 적은 값을 추정하나, AKF가 KF에 비하여 LPF 통과 이후에도 누수량 크기를 추정하는 데 있어 비교 우위에 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 실제 유량 시계열 자료에 대한 적용

누수감시 모형의 현장 적용성 평가를 위하여 JE시의 2개 소블록(MG4, MG8)에 설치된 유량계를 통하여 실시간으로 계속되는 15분 간격의 유량자료를 이용하여 소블록내 비정상적인 사용량 변화 및 과열누수에 대한 적용성을 평가하였다. 본 연구의 대상지역은 광역상수도 정수장으로부터 공급되는 정수를 MG 배수지에서 저류한 후 10개 소블록에 분배하는 관로계통을 가지고 있다(Fig. 4). 본 연구에서 분석을 위한 유량 시계열 자

료는 2011.8.1~2012.9.30의 13개월 동안 계속된 자료로, 초기 1개월은 수도물 사용량 패턴을 추출하기 위한 자료로 이용하였다. 대상지역인 2개 소블록에 대하여 1년간 15분 간격의 시계열 자료를 1주일 단위로 구분하여 나타낸 용수사용량 패턴은 Figs. 5 and 6과 같다. 평균 유량을 나타낸 Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)를 비교하여 살펴

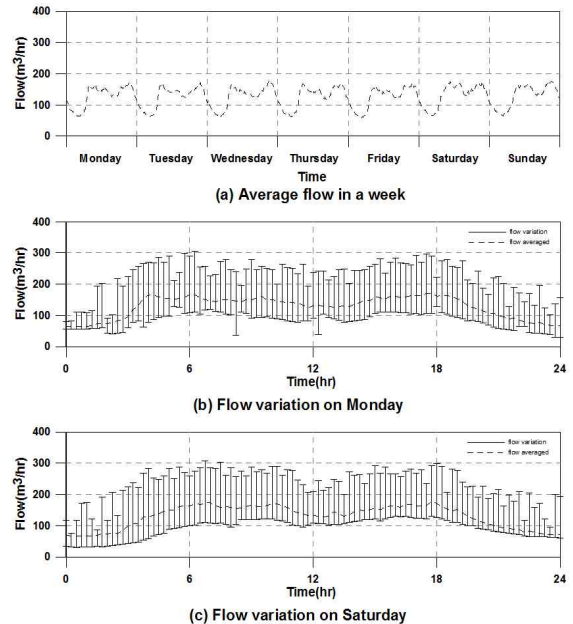


Fig. 5. Weekly Flow Pattern in MG4 DMA of JE City

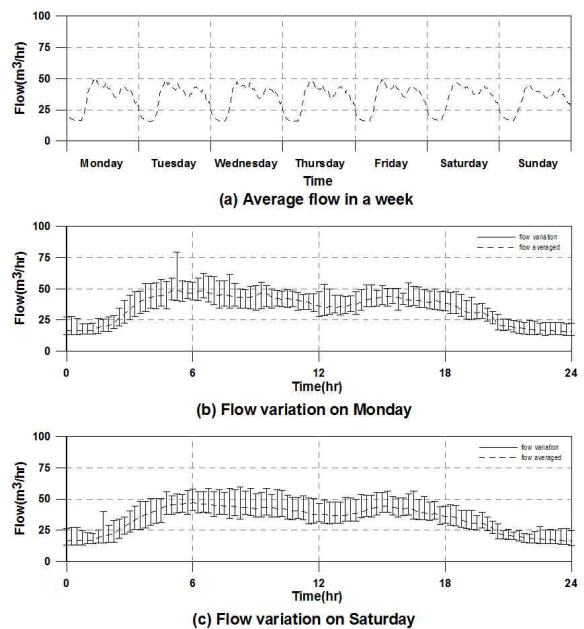


Fig. 6. Weekly Flow Pattern in MG8 DMA of JE City

보편 유량패턴은 1일 2개의 피크를 가지는 전형적인 사용량 형태를 보여주고 있으나, MG4 블록은 저녁 시간대의 사용량이 큰 반면 MG8 블록은 아침 시간대의 사용량이 큰 것으로 나타났다. 평일인 월요일과 주말인 토요일에 대하여 평균유량과 함께 최대 및 최소치를 나타낸 그림에 따르면, MG4 블록은 MG8 블록에 비하여 유량의 변동성이 심하다는 것을 알 수 있다. 또한 MG4 블록과 MG8 블록에 대하여 관측된 유량 시계열 자료의 통계적 특성은 Table 1에 수록하였다.

MG4 블록에 대하여 AKF 및 KF에 의한 모의결과를 적용한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)에서 나타낸 바와 같이 MG4 블록의 측정자료는 간헐적으로 250 m³/hr 이상의 과다유량과 0 m³/hr의 유량이 관측되는 등 측정자료에 상당한 양의 잡음이 나타나 있음이 확인되었다. 따라서 AKF 및 KF 기법에 의한 유량잔차는 ±100 m³/hr까지 계산되어

과열누수 및 비정상적인 용수사용 유무를 확인하기가 곤란하며, 잔차항에 대하여 저주파 필터를 통과시킨 후에야 누수 및 비정상 사용량의 감지가 용이함을 확인할 수 있었다. 저주파 통과 필터 이후의 정규화된 잔차곡선인 Fig. 7(c)에서 확인된 바로는 AKF에서는 2012년 2월과 5~8월 사이에 4% 정도의 과열누수 또는 비정상 사용량으로 추정되는 이상유량이 감지되었다. 반면 KF에서는 이상유량 발생 초기에는 2% 정도의 정규화된 잔차를 예측하여 발생 시점에 대하여 AKF와 동일한 예측정확도를 나타내나, 이상유량 발생 후 일정시간 이후에는 Eq. (11)에 의하여 1% 미만의 값으로 "0"으로 표시되는 것으로 나타났다. MG8 블록의 경우에는 MG4 블록과 달리 Fig. 8(a)에서 도시한 바와 같이 유량자료의 잡음이 크지 않은 것으로 확인되었다. 다시 말하면 0 m³/hr의 유량이 관측된 경우에 간헐적으로 잔차의 크기가 -35 m³/hr이 발생하는 것을 제외하면

Table 1. Statistical Characteristics of Applied Data in MG4 and MG8

Variable	Mean	StDev	Variance	Min.	Q1	Median	Q3	Max.	Skew.
MG4	126.02	49.10	2411.22	0.000	87.09	127.67	152.21	355.60	0.34
MG8	33.950	11.855	140.547	0.000	23.171	37.485	42.967	79.167	-0.64

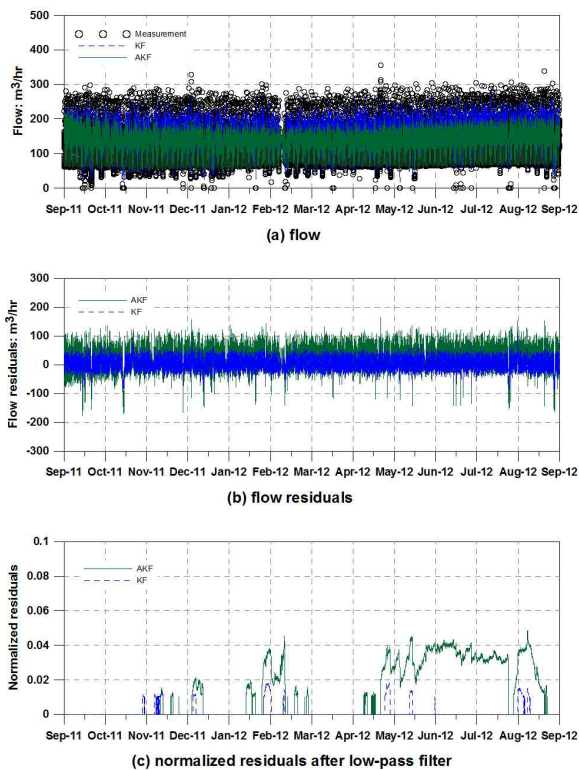


Fig. 7. Flow Data and Leakage Detection Results in MG4 DMA of JE City

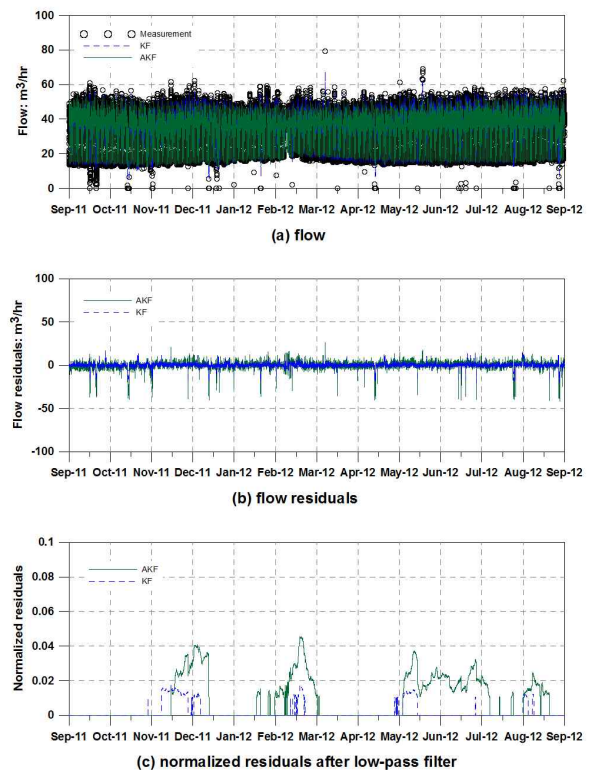


Fig. 8. Flow Data and Leakage Detection Results in MG8 DMA of JE City

유량잔차의 크기가 $\pm 5 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이내로 계산되어 MG4 블록의 $\pm 100 \text{ m}^3/\text{hr}$ 에 비하여 적은 잔차가 발생됨에서 확인할 수 있었다. MG8 소블록의 경우 AKF에 의한 결과에서는 2011년 11월, 2012년 2월 및 5월에 4%에 이르는 이상유량이 관측되었다. KF의 예측특성 또한 MG4 소블록과 유사하게 발생지점에 대해서는 AKF와 예측의 유사성을 확인할 수 있었다. JE시의 2개 소블록에 대한 현장적용성 평가 결과에서도 가상의 사인 유량 추정결과와 마찬가지로 AKF가 KF에 비하여 파열누수, 비정상 사용량 등의 이상유량 발생에 대한 민감도가 높음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 상수관망의 유수율 관리를 위하여 설치된 실시간 블록별 유량자료를 이용한 적응 칼만필터 기반의 누수감시 모형을 제시하였다. 개발된 모형은 비정상적 수돗물 사용량의 증감이 미소하다는 가정 하에 누수를 감시할 수 있는 시스템으로서 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 선형 확률적 동적시스템에 이용되는 칼만필터 기법을 통하여 용수 공급유량 자료로부터 상수관망의 시간적으로 연속한 누수를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 용수수요량의 시간적 변화와 요일적 변동을 고려함으로써 예측의 신뢰도를 향상시켰다.
- 2) 기존의 칼만필터 기법에 혁신과정을 추가함으로써 잡음의 공분산을 자동적으로 보정하는 적응 칼만기법을 도입, 적용하였으며, 본 연구에서 도입된 혁신 과정은 sine 형태의 가상유량 자료에 대한 검증을 통하여 기존의 칼만필터 기법에 비하여 향상된 예측 기능을 수행함을 확인하였다.
- 3) 개발된 누수감시 모형은 JE시의 2개 소블록(MG4, MG8) 유량자료에 대한 적용성 평가를 실시하였다. 현장적용 결과에 따르면 AKF 및 KF만으로 추정된 잔차의 경우 과도한 잡음으로 인하여 단독으로 파열누수를 포함하는 이상유량을 감시하는 데 적합하지 않은 것으로 확인되었다. 즉, AKF 및 KF에 의하여 예측된 유량잔차에 대하여 LPF 통과시킨 후에는 파열누수를 예측할 수 있을 것으로 평가되었다.
- 4) 본 연구에서 개발된 기법은 용수사용의 비정상적인 증감을 누수와 구분하여 예측할 수 없는 한계를 내

재하고 있으나, 용수사용량이 많은 대수용가 등에 대한 실시간 계측시스템 구축을 통하여 누수감시에 보다 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

- 5) 누수감시 시스템의 적합성 검증을 위해서는 시범지역에 대한 장기적이고 집중적인 실험 및 분석이 수반되어야 한다. 또한 본 연구의 결과는 관로 상에 설치된 압력계에서 취득된 시계열 압력자료와 부정류 해석기법을 연계하여 누수발생 지점의 추정에 유용하게 이용될 수 있으며 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(과제번호 : GT-11-G-02-001 -6)”의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bae, D.H., Lee, B.J., and Georgakakos, K.P. (2009). “Stochastic continuous storage function model with ensemble Kalman filtering (I): Model development.” *J. of Korea Water Res. Assoc.*, KWRA, Vol. 42, No. 11, pp. 953-961.
- Ha, S.-R., Ryu, Y.-H., and Park, S.-Y. (2006). “Probabilistic neural network for prediction of leakage in water distribution network.” *J. of Korean Soc. of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 20, No. 6, pp. 799-811.
- Kalman, R.E. (1960). “A new approach to linear filtering and prediction problems.” *Trans. ASME J. Basic Engineering*, Vol. 82, pp. 35-45.
- Khan, A., Widdop, P.D., Day, A.J., Wood, A.S., Mounce, S.R., and Machell, J. (2005). “Artificial neural network model for a low cost failure sensor: Performance assessment in pipeline distribution.” *Int. J. Math. Comp. Sci.*, Vol. 1, No. 1, pp. 27-33.
- Medha, R.K. (1970). “On the identification of variances and adaptive Kalman filtering.” *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 15, pp. 175-184.
- Ministry of Environment (MoE)-Korea (2012). *2011 Statistics of Waterworks*. Seoul.

Mounce, S.R., Khan, A., Wood, A.S., Day, A.J., Widdop, P.D., and Machell, J. (2003). "Sensor-fusion of hydraulic data for burst detection and location in a treated water distribution system." *Inf Fusion*, Vol. 4, No. 3, pp. 217-229.

Yoo, C., Hwang, J., and Kim, J. (2012). "Use of the extended Kalman filter for the real-time quality impro-

vement of runoff data: 1. Algorithm construction and application to one station." *J. of Korea Water Res. Assoc.*, KWRA, Vol. 45, No. 7, pp. 697-711.

논문번호: 13-051	접수: 2013.05.22
수정일자: 2013.07.11/08.08	심사완료: 2013.08.08