

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/264151525>

Use of the Extended Kalman Filter for the Real-Time Quality Improvement of Runoff Data: 1. Algorithm Construction and Application to One Station

Article in Journal of Korea Water Resources Association · July 2012

DOI: 10.3741/JKWRA.2012.45.7.697

CITATIONS

2

READS

162

3 authors, including:



Chulsang Yoo

Korea University

181 PUBLICATIONS 1,123 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jungho Kim

Colorado State University

18 PUBLICATIONS 46 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

확장 칼만 필터를 이용한 유량자료의 실시간 품질향상:

1. 알고리즘 구축 및 단일지점에서의 적용

Use of the Extended Kalman Filter for the Real-Time Quality Improvement of Runoff Data: 1. Algorithm Construction and Application to One Station

유철상* / 황정호** / 김정호***

Yoo, Chulsang / Hwang, Jungho / Kim, Jungho

Abstract

This study applied the extended Kalman Filter, a data assimilation method, for the real-time quality improvement of runoff measurements. The state-space model of the extended Kalman Filter was composed of a rainfall-runoff model and the runoff measurement. This study divided the purpose of quality improvement of runoff measurements into two; one is to suppress the abnormally high variation of dam inflow data, and the other to amend the missing or erroneous measurements. For each case, a proper model of extended Kalman Filter was proposed, and the main difference between two models is whether only the variation is considered or both the bias and variation are considered in the estimation of covariance function. This study was applied to the Chungju Dam Basin to confirm the proposed models were effectively worked to improve the quality of both the dam inflow data and the runoff measurements with some missing and erroneous part.

Keywords : Extended Kalman Filter, runoff data, quality improvement

요 지

본 연구에서는 자료동화기법의 하나인 확장 칼만 필터를 이용하여 유량자료의 실시간 품질향상을 수행하였다. 확장 칼만 필터의 상태-공간모형은 강우-유출모형과 관측유량자료를 이용하여 구성하였다. 본 연구에서는 실시간 품질향상 목적을 댐 유입량의 비정상적 고변동성 억제 및 관측유량의 결·오측 보완으로 구분하였으며, 각각의 경우에 적절한 확장 칼만 필터 모형을 제시하였다. 이들 모형의 차이는 칼만이득 계산에 필요한 공분산 함수의 추정에 변동성만을 고려하는냐 또는 편의까지를 포함하느냐로 나타난다. 본 연구는 충주댐 유역을 대상으로 적용하였으며, 그 결과 제시된 모형들이 댐 유입량자료나 결·오측이 포함된 유량자료의 실시간 품질향상에 효과적으로 작동함을 확인하였다.

핵심용어 : 확장 칼만 필터, 유량자료, 품질향상

* 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 석사 (e-mail: hjh5237@hanmail.net)

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

*** 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 박사과정 (e-mail: bbanz2@hanmail.net)

Corresponding Author, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

1. 서론

고품질의 수문자료는 홍수와 가뭄의 피해를 경감하기 위한 각종 수공구조물의 설계 및 기준 수립에 필요한 기초자료이자, 경제·산업적으로 필수적이고 기본적인 사항이다(김충수 등, 2008). 또한 춘각을 다루는 홍수 예·경보 측면에서 실시간 고품질의 수문자료 확보는 인명 및 재산 피해를 최소화할 수 있는 방안의 초석이라 할 수 있다. 하지만 현실적으로 고품질의 수문자료 확보가 잘 이행되지 못하고 있는 것이 사실이다. 특히, 수문자료 중에서 가장 중요한 유량자료는 그 품질수준이 매우 낮아 많은 문제를 야기하고 있다(정성원 등, 2006).

유량자료는 크게 댐 지점에서 관측되는 댐 유입량과 교량에 설치된 수위계를 이용한 수위-유량 자료가 있다. 이 두 자료는 관측과정에서 발생하는 각종 문제에 의해 그 품질이 저하된다. 먼저, 댐 유입량은 저류량 변화에 평균 방류량을 합산하여 산정하는데, 이때 상당히 넓은 댐의 저수지 면적과 측정단위 1 cm로 인한 저수량 변화가 크게 발생하게 된다. 따라서 댐 유입량은 연속적으로 큰 진폭이 발생하는 형태로 관측되는 일이 빈번하며, 때로는 음의 값이 산정되기도 한다. 더욱이 홍수기간 내 호우의 영향에 의해 저수지내의 수위가 균일하지 않은 것도 유입량 산정 시 오차의 원인이 되고 있다(박노혁 등, 2000; 노재경 등, 2008; 황의호 등, 2008).

수위-유량자료는 관측장비의 상태와 주변 환경에 따라 그 정확도가 결정된다. 만일, 외부 혹은 내부적 요인에 의하여 관측장비의 오작동 및 관측범위의 한계가 발생할 경우 수위자료에 결·오측이 발생하게 된다. 이러한 원인들에 의해 발생한 결·오측 값을 단순히 제외하거나 해당시점 구간에 선형성이 존재한다는 가정 하에 평균을 활용하여 보정하기도 하지만, 이로 인하여 자료의 통계특성에 왜곡이 야기될 수 있다(강태호 등, 2009). 이처럼 품질이 낮은 유량자료를 참값으로 사용할 경우 그 목적이 무엇이든 결과의 신뢰성을 잃게 된다. 따라서 유량자료의 품질향상 및 유지 방안은 여러 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

최근 자료의 품질향상 방안으로 자료동화(Data Assimilation; DA)기법이 대두되고 있다(McLaughlin, 2002; 김경준 등, 2008). 자료동화기법은 서로 다른 두 자료를 합성하여 각 자료의 장점만을 반영할 수 있어 많이 사용되어지고 있다. 자료동화기법으로는 연속수정법(Successive Correction Method; SCM) (Bergthórsson and Döös, 1955), 너징(Nudging) (Hoke and Anthes, 1976), 칼만 필터(Kalman Filter; KF) (Kalman, 1960) 등이 있으며, 이

중 칼만 필터는 시간 영역에서 모형을 형성함으로서 시계열 자료의 적용이 용이할 뿐만 아니라 수학적으로 다루기 쉽다는 장점이 있다. 더욱이 강우-유출현상과 같은 비선형 문제를 적용할 수 있어 유출량 예측 및 보완을 목적으로 많이 적용된다.

칼만 필터를 이용한 선행연구들은 다양하다. 먼저, 국외의 경우, Mizumura and Chiu (1985)는 탱크모형과 자기회귀모형을 칼만 필터로 결합하여 융설(snowmelt)과 호우에 의한 유출량을 예측하였으며, Bidwell and Griffiths (1994)는 비선형 강우-유출현상에 대한 홍수 유출량 예측을 목적으로 ARMA 모형과 칼만 필터를 결합하여 이용하였다. 국내의 경우, 이영화(1991)는 선형저수지 모형과 탱크모형을 칼만 필터기법을 이용하여 한층 개선된 강우-유출모형을 구축하였다. 또한, 장석곤(2002)은 AR(1)모형과 탱크모형을 칼만 필터기법으로 결합하여 충주댐 유역의 일 유입량을 예측하였다. 이 밖의 칼만 필터기법을 적용한 연구로는 Lee and Singh (1998), Aubert et al. (2003), Madsen and Skotner (2005), 서병하와 강관원(1985), 이원환과 이영석(1986), 박상우(1993), 정동국과 이길성(1994), 정동국(1996), 그리고 배덕호(1997) 등이 있다.

이상과 같이 칼만 필터를 이용한 연구들은 유량자료의 품질향상보다는 예측에 그 목적을 두는 경우가 대부분이다. 자료의 품질향상을 목적으로 칼만 필터를 적용한 경우는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 실시간 유량자료의 품질향상을 목적으로 강우-유출모형과 확장 칼만 필터의 결합을 통한 자료동화를 수행하였다. 실시간 유량자료의 품질향상은 (1) 변동성이 큰 경우와, (2) 결·오측자료가 포함된 경우로 구분하였다.

본 연구는 두 편의 논문으로 나누어 구성하였다. 첫 번째 논문에서는 확장 칼만 필터를 이용한 유량자료의 실시간 품질향상 알고리즘을 구축하고, 이를 단일지점을 대상으로 적용하였다. 두 번째 논문에서는 첫 번째 논문에서 구축한 알고리즘과 단일지점을 대상으로 도출한 결과를 기반으로 수위-유량 관측지점과 댐 유입량 관측지점이 복합적으로 존재하는 다지점을 대상으로 적용하였다. 첫 번째 논문에서 단일지점에서의 적용은 다지점에서의 적용에 앞서 모형의 적용성을 높이기 위한 준비과정으로써, 확장 칼만 필터의 중요한 과정인 선형화 과정과 오차의 공분산 갱신과정을 중점적으로 다루었다. 또한 강우-유출 모형을 통한 예측결과와 관측자료의 자료동화를 통하여 참값에 근접한 유량자료의 생성을 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)

2.1 기본이론

2.1.1 칼만 필터(Kalman Filter, KF)

Kalman (1960)이 제안한 칼만 필터기법은 시계열 자료를 이용한 필터링(filtering) 기법이다. 이 기법은 k 시점의 상태를 추정하기 위해 $k-1$ 시점까지의 자료를 이용하여 각 추정시점마다 연속적으로 최적의 예측을 추구하는(optimal sequential estimator) 특성이 있다. 또한, 시간 영역에서 모형을 형성함으로써 수학적으로 다루기 쉽다는 장점이 있어 관측자료에 대한 실시간 보정 및 예측 방법으로 많이 활용되고 있다(박상우, 1993; 장석곤, 2002).

칼만 필터 기법은 기본적으로 상태-공간 모형(state-space model)을 기반으로 한다. 여기서, 상태-공간 모형은 상태-공간을 시스템 방정식(system equation)과 관측 방정식(measurement equation)으로 구분하여 구성한 모형을 의미한다(Box and Jenkins, 1976). 만일 시계열 모형이 주어진다면 적절한 방법으로 그에 상응하는 상태-공간 모형이 구성되어야 한다. 먼저, 시스템 방정식은 시간 k 에서 상태벡터(state vector) X_k 를 이전 시점의 상태변수인 X_{k-1} 와 상태벡터의 백색잡음 w_k 로 표현되는 식을 말한다. 입력이 따로 고려되지 않는 시스템의 시스템 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, 하단 첨자 k 는 현재시점, $k-1$ 은 이전의 시점을 각각 나타내며, x_k 는 k 시점의 상태벡터이다. ϕ_k 는 $k-1$ 시점의 상태벡터를 k 시점의 상태벡터로 전이시키는 상태 전이 행렬을 의미한다. w_k 는 상태벡터의 불확실성(uncertainty)에 의해 야기되는 상태벡터의 오차로서 일반적으로 평균이 0이고, 공분산이 Q_k 인 정규분포를 따른다고 가정한다.

시스템의 실시간 적용문제에서 상태벡터 x_k 는 관측에 의해서 추정되기 때문에 직접적으로 구하는 것은 불가능하다. 따라서 관측치를 적용할 수 있는 관측 방정식을 이용한다. 관측 방정식은 관측치에 대한 표현으로 시간 k 에서의 상태벡터 x_k 에 관측치에 대한 백색잡음 v_k 를 고려한 선형결합형태로 다음과 같다(Kalman, 1960).

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

여기서, z_k 는 관측벡터이며, v_k 은 관측 오차벡터로서 평균이 0이며 공분산이 R_k 인 정규분포로 가정한다. H_k 는 상태벡터 x_k 를 관측벡터 z_k 로 전이시키는 관측 전이행렬이

다. 상태벡터와 관측벡터의 편의가 없을 경우 H_k 는 단위 행렬 I 로 나타낼 수 있다.

칼만 필터기법의 기본 개념은 예측치(혹은 모의치)와 관측치가 가지고 있는 오차정보를 이용하여 상태변수를 추정하는데 있다. 즉, 관측치가 실시간으로 수집될 경우 예측치(혹은 모의치)와 관측치의 불확실성 규모를 비교하여 상태변수를 갱신하고 이 값은 다음 계산시간의 예측치를 산정하는 초기값이 된다(배덕효와 이병주, 2009). 이때 예측치와 관측치의 불확실성을 나타내는 인자인 시스템 오차의 공분산(Q_k)과 관측오차의 공분산(R_k)을 적용하게 되며, 이 두 오차의 공분산은 대상 자료에 대한 시계열 모형과 상태-공간 모형 결정을 통해 가능하다.

이상과 같이 결정된 각각의 오차의 공분산은 실제 칼만 필터링 과정에서 가중치의 역할을 하는 칼만 이득(Kalman gain)의 결정에 큰 기여를 한다. 이 밖에 칼만 필터링은 초기조건 설정을 시작으로 상태 예측치, 상태 예측치 오차 공분산, 상태 추정치 갱신, 상태 추정치 오차 공분산 갱신을 매 시점별로 순환하며 산정하는 알고리즘을 가지고 있다. 이에 대한 적용과정은 Kalman (1960) and Gelb (1974) 등에 자세하게 수록되어 있다.

2.1.2 확장 칼만 필터

Schmidt (1970)는 기존의 칼만 필터를 보완하고자 칼만 필터의 적용 대상을 비선형으로 확장한 확장 칼만 필터를 제안하였다. 확장 칼만 필터는 비선형 시스템을 마지막 예측치의 근방에서 1차식으로 선형화하여 칼만 필터를 적용한 것으로서 선형으로 근사화된 시스템에 대하여 칼만 필터의 특성을 이어받는 장점과 다른 비선형 필터에 비하여 연산속도가 빠르다는 장점을 지닌다(김기훈, 1999; Dan, 2006).

확장 칼만 필터 알고리즘을 설명하기 위하여 Table 1에 칼만 필터 알고리즘과 비교하여 정리하였다. 확장 칼만 필터의 알고리즘은 비선형 시스템의 적용과 이에 따른 선형화 과정의 추가를 통해 상태 예측치와 상태예측 오차 공분산이 칼만 필터와 상이하게 적용된다.

확장 칼만 필터의 시스템 방정식은 비선형 함수형태로 아래 Table 1에서 확인할 수 있다. 여기서 중요한 점은 시스템 오차벡터 w_k 의 위치이다. w_k 가 $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ 안에 위치할 경우, 입력 자료인 시스템 입력벡터 u_{k-1} 자체에 불확실성(오차)이 있는 것을 나타낸다. 만일, 비선형 시스템 방정식의 시스템 오차벡터 w_k 가 $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ 밖에 위치할 경우 입력 자료인 시스템 입력벡터 u_{k-1} 및 출력 자료인 상태벡터 x_{k-1} 모두에 불확실성(오차)이 있

는 것을 의미한다.

선형화 과정(F_k)은 칼만 필터와 확장 칼만 필터의 가장 큰 차이점이다. 선형화 과정은 Table 1에 제시된 바와 같이 상태예측치의 변화량을 상태추정치 변화량으로 나눈 값으로, 입·출력 자료에 대해서 선형화 과정을 표현하는 것이 일반적이다. 이러한 선형화 과정은 선형 시스템의 적용만이 가능하였던 기존 칼만 필터의 문제점을 보완하고자 추가된 부분으로 편미분 방법과 같은 선형화 방법을 통하여 비선형 시스템의 적용이 가능하다.

다음으로 칼만 필터와 확장 칼만 필터의 차이점으로 상태예측오차 공분산(state estimate error covariance prediction)이 있다. 확장 칼만 필터의 경우는 칼만 필터기법과는 달리 시스템 방정식의 선형화 과정 후에 상태예측오차의 공분산이 계산되어진다. 따라서 입출력 자료간의 선형화 결과가 상태 예측오차 공분산 산정에 직접적인 영향을 준다. 이후 필터의 예측오차, 칼만 이득, 상태 추정치 갱신, 상태 및 상태 추정오차 공분산 갱신은 Table 1에서와 같이 칼만 필터와 확장 칼만 필터가 동일한 과정을 반복하는 구조로 되어있다.

2.2 적응방법

2.2.1 선형화 과정

강우-유출 관계는 비선형 관계로써 확장 칼만 필터의 적용에 앞서 선형화되어야 한다. 선형화 과정에서 고려해야 될 인자로 강우량과 유출량이 있다. 실시간으로 관측되는 유량은 지상에서 관측된 강우와 과거 시점에 발생한 선행 유출량에 의해 그 규모와 유량의 증가 혹은 감소하는 방향이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 강우량과 선행 유출량을 이용하여 선형화 과정을 유량부분과 강우부분으로 구별하여 검토하였다.

강우-유출 관계의 유량부분에 대한 선형화는 선행 유출량을 고려함으로써 수행된다. 현재시점 k 에서 관측된 유량의 규모 및 방향(증가 혹은 감소하는 경향)은 과거 $k-n$ 시점에 발생한 유출량의 규모 및 방향에 의해 결정된다. 즉,

$$F_k(x_k) = \frac{\partial f}{\partial x_{k-n}} \Big|_{x=\hat{x}_k(+)} \quad (3)$$

Table 1. Comparison of Kalman Filter and Extended Kalman Filter Algorithm

Linear / Non-linear Equation		State-space model	
		Linear system	Non-linear system
System		$x_k = \phi_k x_{k-1} + w_k, w_k \sim N(0, Q_k)$	$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_k$ $w_k \sim N(0, Q_k)$
			Linearization $F_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big _{x=\hat{x}_k(+)} + \frac{\partial f}{\partial u} \Big _{x=\hat{x}_k(+)}$
Measurement		$z_k = H_k x_k + v_k$ $v_k \sim N(0, R_k)$	
KF/EKF		Kalman filter algorithm	Extended Kalman filter algorithm
0	Initial value	\hat{x}_0, P_0, R_0, Q_0	\hat{x}_0, P_0, R_0, Q_0
1	State estimate prediction	$\hat{x}_k(-) = \phi_k \hat{x}_{k-1}(+)$	$\hat{x}_k(-) = f(\hat{x}_{k-1}(+), u_{k-1})$
2	State estimate error covariance prediction	$P_k(-) = \phi_k P_{k-1}(+) \phi_k^T + Q_{k-1}$	$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_{k-1}$
3	Kalman gain	$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1}$	
4	State estimate update	$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k(-)] = \hat{x}_k(-) + K_k v_k$	
5	State estimate error covariance update	$P_k(+) = (I - K_k H_k) P_k(-)$	

위 식에서 분자의 $f()$ 함수는 선형화 대상인 상태 예측치를 나타낸다. 분모의 x_{k-n} 은 $k-n$ 시점의 선행 유출량으로 본 연구에서는 $k-n$ 시점의 자료동화 결과(상태추정치, $\hat{x}_k(+)$)로 정의하였다.

강우는 관측된 유출량의 입력으로서 강우의 규모 및 발생시간에 따라 유출현상의 특성이 좌우된다. 따라서 강우-유출 관계의 강우부분에 대한 선형화 또한 중요한 의미를 갖는다. 지체시간(basin lag-time, t_l)을 고려하여 $k-t_l$ 시점에 발생한 강우가 k 시점의 유출량 발생에 기여를 한다고 할 때, $k-t_l$ 시점에 발생한 강우의 규모와 방향(강우의 증가 혹은 감소하는 경향)은 실제 관측되는 유량과 상관관계가 매우 크다고 할 수 있다. $k-t_l$ 시점을 포함하여 그 이전에 발생한 강우의 증가 혹은 감소 패턴에 따라 k 시점에 관측되는 유량의 규모와 방향이 결정되기 때문이다. 따라서 k 시점의 상태 예측치(강우-유출모형에 의한 모의치)를 $k-n$ 시점의 상태 추정치(자료동화 결과로써 출력된 선행 유출량)로 편미분함으로써 강우-유출 관계를 선형화할 수 있다.

$$F_k(u_k) = \frac{\partial f}{\partial u_{k-t_l}} \Big|_{x=\hat{x}_k(+)} \quad (4)$$

위 식에서 $f()$ 함수는 유량부분과 동일하게 선형화 대상인 상태 예측치를, 분모의 u_{k-t_l} 는 $k-t_l$ 시점의 선행 강우량을 의미한다. 이와 같이 상태 예측치(모의치)를 강우량으로 편미분하여 선형화하는 방법은 강우량의 규모와 방향을 고려한 선형화를 뜻하며, 따라서 위 식을 통해 강우부분의 선형화 결과를 도출할 수 있다.

이상과 같은 강우-유출 관계의 강우부분과 유량부분에 대한 선형화 과정에는 자료의 특성이 잘 반영되어야 한다. 본 연구에서는 출력 자료인 유량부분에 대한 선형화를 위해 과거 시점의 선행 유출량과 현재시점 유량의 상관관계를 검토하였다. 입력 자료인 강우부분에 대한 선형화에는 유역의 지체시간을 t_l 만큼 고려하여 강우와 유량의 상관관계를 검토하였다. 결과적으로 선형화 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x_{k-n}} \Big|_{x=\hat{x}_k(+)} + \frac{\partial f}{\partial u_{k-t_l}} \Big|_{x=\hat{x}_k(+)} \quad (5)$$

Eq. (5)로 주어진 선형화 결과는 유한 차분법(finite difference method)을 적용하여 구하였다. 유한 차분법은 미분 방정식(differential equation)을 차분 방정식(difference equation)으로 근사시켜서 해를 구하는 방법이다. 유한 차분법의 특징은 유한 요소법이나 경계 요소법에 비해 미분

방정식에서 1차 연립 방정식으로의 변환 과정이 직접적이라는 점이다. 또한 유한 차분법은 선형 문제뿐만 아니라 비선형 문제에도 비교적 쉽게 대응할 수 있다는 장점이 있다.

2.2.2 오차의 공분산 갱신

시스템 방정식과 관측방정식의 오차 공분산 Q_k 와 R_k 의 결정은 칼만이득 산정에 큰 기여를 하며, 이 두 값의 규모에 따라 자료동화 결과의 추세가 결정된다. 이에 본 연구에서는 매 시점별 시스템 변화 및 안정성을 고려하여 Q_k 와 R_k 를 고려할 수 있는 방안을 검토하였다. 더 나아가 자료동화 목적에 따라 상이한 Q_k 와 R_k 갱신을 통해 목적에 부합되는 결과도출을 시도하였다. 먼저, 기존 연구에서는 대부분 확장 칼만 필터의 적용목적에 예측에 두었다. 이에 본 연구에서도 기존 연구에서 주로 다룬 예측에 대한 내용을 검토하고자 예측이란 목적성에 적절한 Q_k 와 R_k 를 적용하였다. 두 번째는 댐 유입량 자료와 같이 변동성이 극심한 경우에 적용할 수 있는 방법(자료동화(1))이며, 세 번째는 관측자료에 결·오측자료가 포함되었을 경우 적용할 수 있는 방법(자료동화(2))이다. 이에 대한 자세한 내용은 다음과 같다.

(1) 예측

예측을 목적으로 하는 경우 Q_k 와 R_k 의 갱신 과정은 관측값과 모의값의 변동성에서 기인한 오차만을 고려한다. 이 경우는 대부분의 기존 연구에서 수행한 것으로 결측 및 오측 구간이 없는 경우에 적합하다. 일반적으로 R_k 는 실시간으로 다음과 같이 산정하였다.

$$R_k = \frac{\sum_{i=k-n+1}^k (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (6)$$

여기서, x_i 는 각 i 번째에 해당하는 관측값, \bar{x} 는 n 개의 관측값의 평균, 그리고 n 은 사용된 관측값 자료의 개수를 나타낸다. Q_k 의 경우는 R_k 와 유사하게 실시간으로 다음과 같이 산정하였다.

$$Q_k = \frac{\sum_{i=k-n+1}^k (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (7)$$

여기서, y_i 는 각 i 번째에 해당하는 모의값, \bar{y} 는 n 개의 모의값의 평균을 나타낸다.

(2) 자료동화(1): 모의값에 편의가 존재하는 경우

모의값에 편의가 존재하는 경우, R_k 와 Q_k 는 예측의 문제와는 다르게 갱신되어야 한다. 먼저, Q_k 는 모의값 자체에 대한 변동성과 관측값과의 평균 차이(즉, 편의)를 함께 고려하여 다음과 같이 산정하게 된다.

$$Q_k = \frac{SSE + SSB}{n-1} = \frac{SST}{n-1} \quad (8)$$

여기서, 오차 자승의 합인 SSE (Sum of Squares Error)는 자료 자체에 대한 변동을 의미하고, 편의 자승합인 SSB (Sum of Squares Bias)은 두 값의 평균 차이로 인한 변동을 의미한다. $SSE/(n-1)$ 부분은 관측오차 v_k 의 공분산 R_k 을 산정하는 방법과 같으며 즉, 모의값 자체에 대한 변동성으로 인한 오차부분이며, $SSB/(n-1)$ 부분은 모의값(상태예측치)와 관측값의 평균 차이로 인한 편의를 고려해 준 것이다. 위 식에서 SSE 와 SSB 는 다음이 갱신된다.

$$SSE_k = \sum_{i=k-n+1}^k (y_i - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$SSB_k = \sum_{i=k-n+1}^k (\bar{y} - \bar{x})^2 = n(\bar{y} - \bar{x})^2 \quad (10)$$

여기서, y_i 는 각 i 번째에 해당하는 모의값, \bar{y} 는 n 개의 모의값의 평균, \bar{x} 는 n 개의 관측값의 평균, 그리고 n 은 사용된 모의값과 관측값 자료의 개수를 나타낸다.

반면, R_k 는 관측값의 변동성만 고려하여 갱신되며, 이는 예측에서 사용되는 Eq. (6)과 동일하다. 이처럼 모의값의 편의만을 고려하는 이유는 관측값이 참값을 중심으로

변동하고 있다고 가정했기 때문이다. 즉, 댐 유입량 자료와 같이 그 자료의 평균은 참값에 매우 근사하나, 자체의 큰 변동성으로 인해 자료의 품질이 저하된 경우에 해당한다. 따라서 편의는 포함되어 있으나 상대적으로 변동성이 적은 모의유량을 이용하여 댐 유입량 자료의 품질을 향상시키는 것이 본 자료동화의 목적이다.

(3) 자료동화(2): 관측값에 편의가 존재하는 경우

자료동화(2)는 (1)과는 반대경우로 관측값에 편의가 존재하는 경우이다. R_k 와 Q_k 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$R_k = \frac{SSE + SSB}{n-1} = \frac{SST}{n-1} \quad (11)$$

$$Q_k = \frac{\sum_{i=k-n+1}^k (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (12)$$

이 경우는 관측값의 전반적인 품질이 의심될 때 사용되는 방법으로 수위-유량자료에서 흔히 발생할 수 있는 결·오측 보완을 목적으로 한다. 즉, 결·오측이 발생한 구간에 대하여 관측값의 편의를 고려함으로써 관측값의 영향력을 감소시키고 변동성만 고려한 모의값의 영향력을 상대적으로 증가시켜 유량자료의 품질을 향상시키는 것이다.

3. 실시간 품질향상 모형의 알고리즘 구축

3.1 확장 칼만 필터의 적용 알고리즘

유량자료의 품질향상을 목적으로 확장 칼만 필터의 알

Table 2. Algorithm of Extended Kalman Filter Applied in This Study

Order	Equation
System	$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-t_l}) + w_k, \quad w_k \sim N(0, Q_k)$
Linearization	$F_k = \frac{\partial f}{\partial x_{k-n}} \Big _{x=\hat{x}_k(+)} + \frac{\partial f}{\partial u_{k-t_l}} \Big _{x=\hat{x}_k(+)}$
Measurement	$z_k = x_k + v_k, \quad v_k \sim N(0, R_k)$
Initial value	\hat{x}_0, P_0, R_0, Q_0
State estimate prediction	$\hat{x}_k(-) = f(\hat{x}_{k-1}(+), u_{k-t_l})$
State estimate error covariance prediction	$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_{k-1}$
Kalman gain	$K_k = P_k(-) [P_k(-) + R_k]^{-1}$
State estimate update	$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - \hat{x}_k(-)] = \hat{x}_k(-) + K_k v_k$
State estimate error covariance update	$P_k(+) = (I - K_k) P_k(-)$

고리즘을 Table 2와 같이 정리하였다. 먼저, 시스템 방정식과 관측 방정식을 살펴보면, 시스템 방정식의 x_k 는 확장 칼만 필터의 출력 자료인 모의 유량에 해당하고, u_k 는 확장 칼만 필터의 입력 자료인 관측 강우량에 해당한다. 그리고 w_k 는 시스템 방정식의 오차로서 평균이 0이며 공분산이 Q_k 인 정규분포로 가정한다. 본 연구에서는 입력과 출력자료인 강우와 유량 모두에 불확실성이 존재한다고 가정하여 시스템 방정식을 결정하였다. 선형화 방법은 2.2.1 절에서 설명한 내용과 동일하다.

관측 방정식의 경우 z_k 는 관측 유량이고, v_k 는 관측 방정식의 오차로서 평균이 0이며 공분산이 R_k 인 정규분포를 따른다. 관측 방정식의 경우 관측 전이행렬 H_k 을 통해 관측치에 대한 편의를 고려하는 것이 일반적이나, 본 연구에서는 관측 방정식의 H_k 부분은 $E[v_k] = 0$ 와 $E[x_k] = E[z_k]$ 성립한다고 가정하여 상태벡터 x_k 와 관측벡터 z_k 의 편이가 발생하지 않는 것으로 보았다. 따라서 전치행렬 H_k 에 단위행렬 I 를 적용함으로써 소거하여 표현하였다.

다음으로 주목해야 될 사항으로 초기조건이 있다. 초기조건은 Table 2에 나타난 바와 같이 \hat{x}_0 (상태 추정치의 초기조건), F_0 (선형화 결과의 초기조건), P_0 (상태 추정오차 공분산의 초기조건), Q_0 (시스템 오차의 공분산의 초기조건), R_0 (관측 오차의 공분산의 초기조건)가 있다. \hat{x}_0 는 강우-유출모형의 초기 모의치를 의미하며, F_0 는 과거자료

의 분석을 통해 산정이 가능한 선형화 결과의 초기조건이다. P_0 는 상태예측오차 공분산의 산정과정에서 적용되는 값으로 선형화 결과와 함께 고려되어진다. 즉, 상태추정오차의 공분산은 자료동화 결과인 상태 추정치의 불확실성 규모를 의미하는 인자이다. R_0 와 Q_0 는 2.2.2 절에서 설명한 오차의 공분산 갱신방법에 과거자료를 적용하여 결정이 가능하다. 그 밖의 필터링 과정은 앞서 설명한 내용과 동일하다.

3.2 실시간 품질향상 알고리즘

본 연구에서는 실시간 홍수 유출 자료를 적용하기 위하여 Clark 단위도법을 이용하여 강우-유출모의를 수행하였다. Clark 단위도법은 집중시간-누가면적관계를 사용하여 자연하천 유역에 내리는 순간단위유효우량(instantaneous unit effective rainfall)으로 인한 유역출구에서의 직접유출수문곡선인 순간단위유량도(IUH)를 유도하는 방법으로 유수의 전이(translation)뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려하므로 자연유역에서의 적용에 적합하다(Clark, 1945). 매개변수로는 집중시간(time to concentration)과 저류상수(storage coefficient)가 있다. 이러한 강우-유출모형을 확장 칼만 필터 알고리즘과 접목시켜 다음과 같이 실시간 품질향상 알고리즘을 구축하였다.

Fig. 1을 살펴보면, 실시간 품질향상 알고리즘은 자료

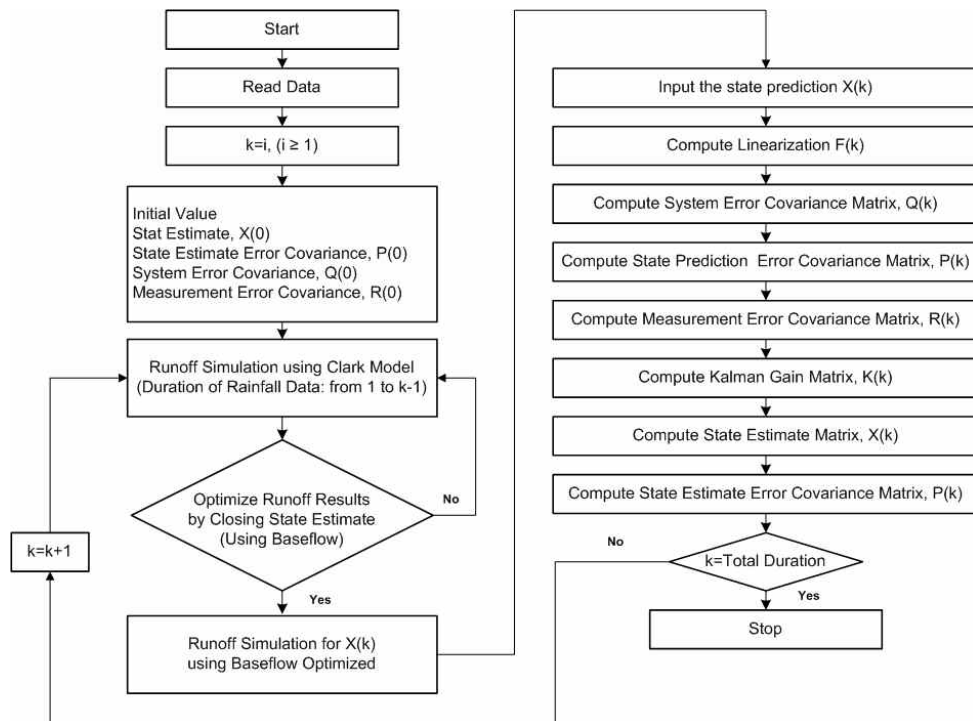


Fig. 1. Algorithm of Real-time Quality Improvement Model

의 입력, 강우-유출모형의 모의과정, 그리고 확장 칼만 필터의 필터링으로 구성되어 있다. 입력으로 강우자료, 유량자료, 그리고 확장 칼만 필터에 필요한 초기값 등이 있다.

4. 단일지점에서의 적용

4.1 대상유역 및 자료

4.1.1 대상유역

대상유역은 수위-유량자료 및 댐 유입량 자료의 수집이 가능한 충주댐 유역으로 선정하였다. 충주댐 유역은 남한강의 대표적인 댐 지점으로 유역면적이 6656.1 km², 하천연장은 260.6 km, 그리고 하천경사는 0.0034 m/m이다. Fig. 2는 충주댐 유역의 하천망 및 댐 유입량 관측소의 위치를 함께 나타낸 것이다.

충주댐 유역의 지형 자료는 국립지리정보원(www.ngi.

go.kr)에서 획득한 수치지형도(1:25,000)를 사용하여 해상도 30×30 m²의 DEM (Digital Elevation Map)을 생성하였다. 이와 같이 생성된 충주댐 유역의 DEM을 통해 유역의 지형특성인 유역면적, 유역경사, 하천연장, 하천경사 등을 산정하는데 사용하였다. 강우자료는 수자원공사 관할 34개소의 강우관측소를 대상으로 하였다.

4.1.2 선정 호우사상

본 연구에서는 1997년부터 2002년까지 총 3개의 호우사상을 선정하여 적용하였다. 이에 대한 강우형태, 호우기간, 호우의 지속시간, 그리고 누적강우량은 Table 3에 정리하였다.

관측된 유량자료의 상태를 3가지로 구분하여 호우사상을 선정하였다. 3가지 상태는 관측된 유량자료의 대표적인 문제를 내포한 경우로서, 각각 변동성이 큰 경우와 그렇지 않은 경우, 그리고 결·오측이 관측된 경우이다. 이

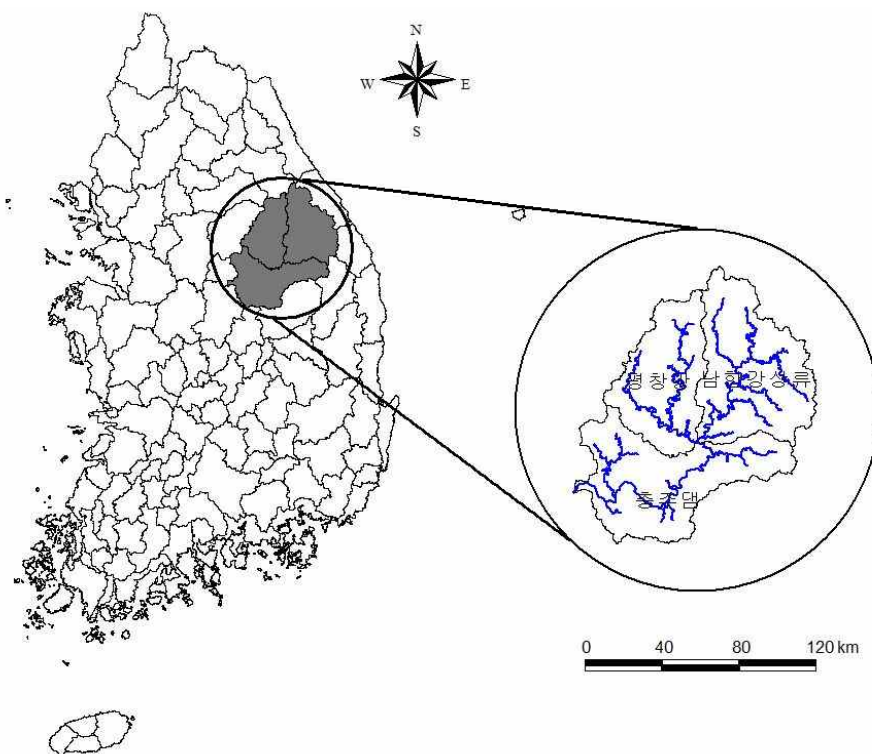


Fig. 2. Chungju Dam Basin

Table 3. Characteristics of events

Event	Type	Time	Duration (hr)	Total rainfall (mm)
1	Typhoon	2002/08/30 24:00 ~ 2002/09/01 07:00	31	158.3
2	Convective	1997/07/15 12:00 ~ 1997/07/17 11:00	49	55.8
3	Convective	1999/08/01 21:00 ~ 1999/08/04 05:00	56	219.8

중 호우사상 3의 경우 관측유량에 결·오측시점이 존재하나 보다 확실한 적용결과를 검토하기 위하여 해당 결·오측구간을 확대하여 적용하였다.

4.2 선형화 과정

4.2.1 유량에 대한 강우-유출 모형의 선형화

현재시점의 유량은 과거에 발생한 유량에 의해 그 규모가 결정된다고 할 수 있다. 과거시점 유량의 증가경향이 뚜렷한 경우 현재시점의 유량 또한 증가할 가능성이 크기 때문이다. 선형화는 이러한 과거시점 유량의 증가 혹은 감소경향을 고려하여 정확한 현재시점 유량의 방향을 추정하는데 그 목적이 있다. 유량자료의 경우 과거시점(전 시점)의 경향에 따라 현재시점 유량의 방향이 결정되므로, 현재시점과 전 시점 유량의 상관성이 큰 경우만을 고려하여 적용이 이루어져야 한다. 이는 물론 상관성이 큰 과거시점 자료의 적용을 통해 비선형 시스템 방정식을 보다 명확하게 선형화하기 위함이다. 이에 본 연구에서는 현재시점 유량과 과거시점 유량의 관계비교를 통하여 상관성이 가장 큰 시점유량을 검토하였다. Fig. 3은 과거시점 유량과 현재시점 유량의 관계를 나타낸 것으로써, x 축은 과거시점 유량을 y 축은 현재시점 유량을 의미한다.

Fig. 3을 살펴보면, 과거시점에 해당하는 $k-n$ 시점 유량의 n 이 증가할수록 현재시점 유량과 과거시점 유량의 상관성이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 3(a)~(f)를 비교하면, $k-1$ 시점 유량과 현재시점 유량의 관계는 상대적으로 선형성이 큰 것을 알 수 있다. 반면, $k-6$ 시점 유량과 현재시점 유량과의 관계는 $k-1$ 을 적용한 경우와 비교하여 비선형적인 거동특성이 큰 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 적용한 3개의 호우사상 모두에서 일관되게 나타났다. 따라서 유량부분의 선형화 과정에서는 $k-1$ 시점 유량을 이용한 선형화가 적절한 것으로 판단된다.

4.2.2 강우에 대한 강우-유출 모형의 선형화

현재시점 유량은 직접유출량이 유역출구에 도달하기 이전에 발생한 강우에 의해 발생하는 것으로, 지체시간만큼 지체된 강우량과 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 선형화 과정에 적용할 지체시간의 선정은 매우 중요하다.

본 연구에서는 유철상과 신정우(2010)가 추정한 충주댐 유역의 대표 집중시간인 15.2시간보다 지체시간이 작을 것이라는 가정아래 현재시점 유량과 15시간 이하로 지체된 강우량과의 관계를 살펴보았다. Fig. 4는 현재시점 유량을 y 축에, 과거시점 강우량을 x 축에 설정하여 두 자료의 관계를 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, 13시간 지체

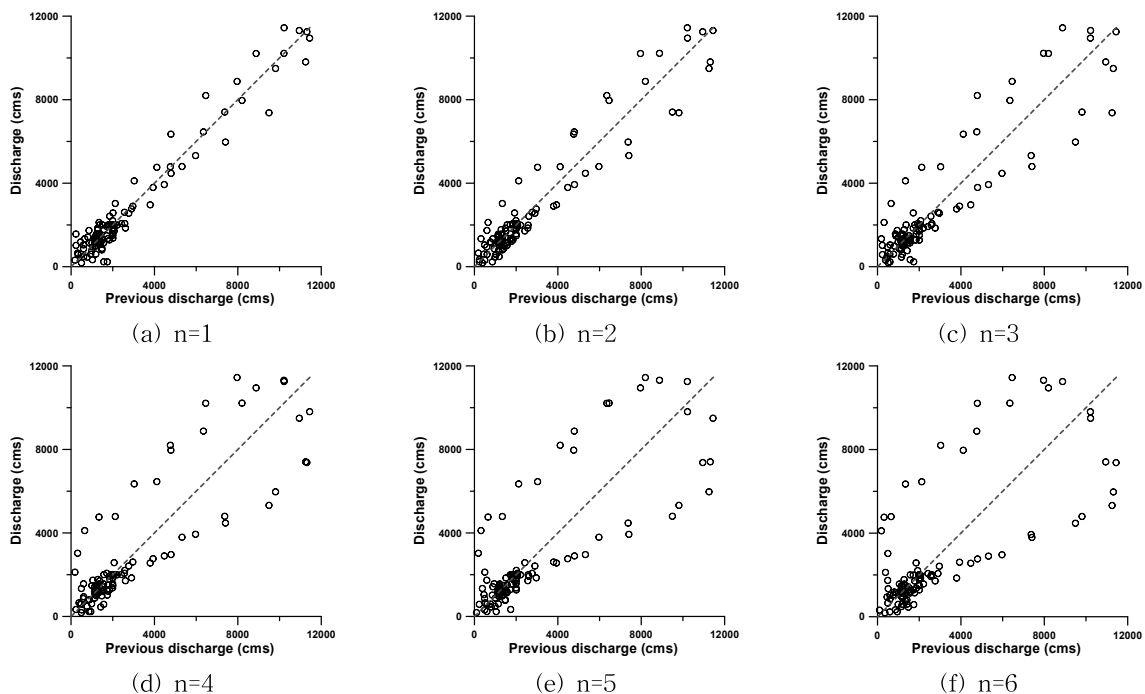


Fig. 3. Relation between (k) Time Point Discharge and (k-n) Time Point Discharge

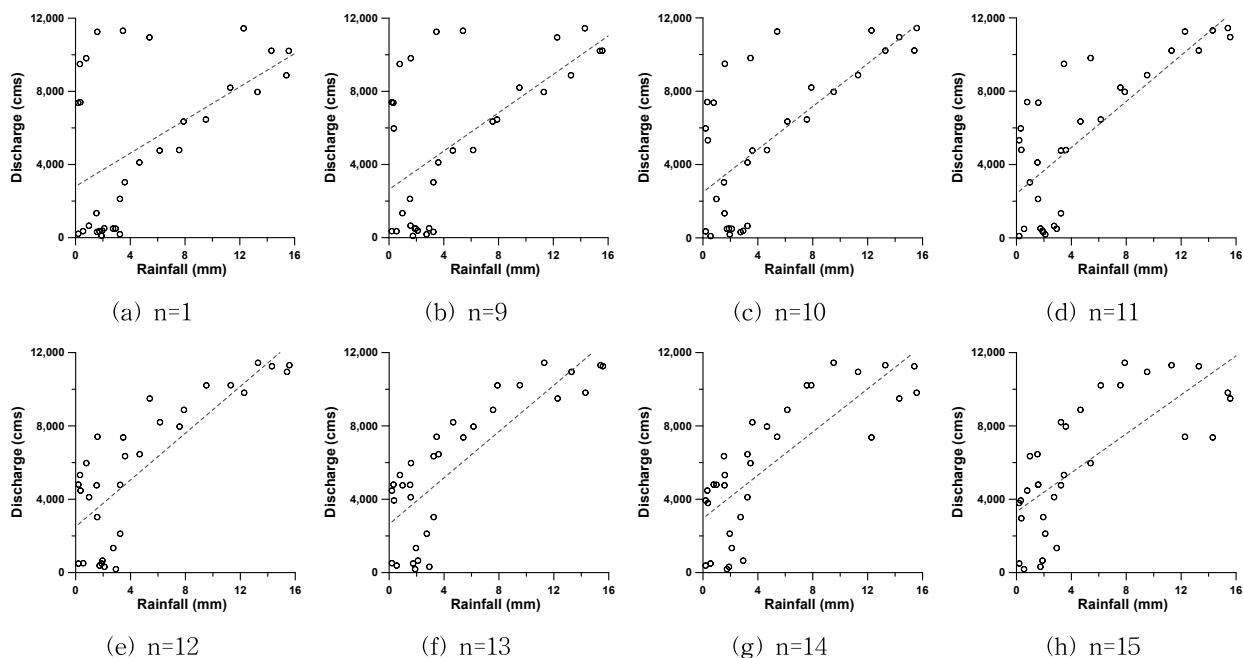


Fig. 4. Relation between (k) Time Point Discharge and (k-n) Time Point Rainfall

된($k-13$) 강우량과 현재시점 유량의 관계는 다른 시점과의 관계와 비교하여 상대적으로 선형적인 것으로 나타났다. 그러나 전체적으로는 13시간 주변에서 유사한 결과를 주는 것으로 판단하여 선형화 과정에는 13시간의 지체시간을 고려하는 것으로 결정하였다.

4.3 품질향상 목적에 따른 오차 공분산 갱신방법의 적용

4.3.1 예측

본 연구에서는 유량자료의 예측을 목적으로 관측값과 모의값의 변동성에서 기인한 오차만을 고려하여 Q_k 와 R_k 를 갱신하였다. 예측에 대한 결과는 Fig. 5에 정리하였으며, 결과비교를 위하여 호우사상 1과 2를 함께 적용하였다. 호우사상 1에 의해 발생된 관측유량은 대체적으로 완만하고 변동이 거의 없는 일반적인 수문곡선형태이며, 호우사상 2에 의해 발생된 관측유량은 극심한 변동성을 동반한 형태이다. Fig. 6에서 z_k 은 관측값, $x_k(-)$ 은 상태예측치인 예측값, F_k 는 선형화 결과, Q_k 와 R_k 은 시스템오차의 공분산과 관측오차의 공분산, $P_k(-)$ 은 상태예측오차의 공분산, K_k 은 칼만 이득, $x_k(+)$ 은 상태추정치인 관측값과 예측값의 합성값, 그리고 $P_k(+)$ 은 상태추정오차의 공분산을 나타낸다.

먼저, Fig. 5의 (a)를 살펴보면, 예측 결과에 해당하는

상태예측치(또는 모의값) $x_k(-)$ 가 관측값 z_k 과 상태추정치 $x_k(+)$ 와 큰 차이 없이 유사하게 거동하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 오차 공분산 그래프를 통해 설명할 수 있다. 오차 공분산 Q_k 와 R_k 의 그래프를 살펴보면, 전반적으로 Q_k 와 R_k 가 비슷한 수준으로 결정된 것을 알 수 있다. 이는 예측을 위해 관측값과 모의값의 변동성만을 고려하였기 때문에 호우사상 1과 같이 관측자료에 결측이 없고 변동성이 적은 경우 Q_k 와 R_k 의 규모 차이가 크게 발생하지 않기 때문이다. 따라서 상태추정치는 관측값과 모의값에서 크게 벗어나지 않는 값으로 추정이 가능하며, 상태예측치 또한 안정적으로 결정할 수 있는 것이다. 결과적으로 상태추정치 $x_k(+)$ 에 관측값 z_k 과 모의값 $x_k(-)$ 의 특성(오차공분산 R_k 와 Q_k 의 비율)이 적절하게 반영된 예측결과이다.

반면, Fig. 5의 (b) 결과는 호우사상 1과는 달리 오차 공분산 R_k 가 Q_k 보다 상당히 큰 값으로 갱신되었다. 특히, 관측값의 변동성이 극심한 27 시간과 60~75시간 부근에서 확인할 수 있다. 이러한 결과는 관측값의 변동성이 큰 시점구간에서 상대적으로 크게 증가된 R_k 와 동일한 시점구간에서 선형화 결과가 비정상적인 값으로 갱신되었기 때문이다. 이로 인한 칼만이득 K_k 또한 변동성이 큰 형태로 갱신되었다. 결과적으로, 예측을 목적으로 적용된 오차 공분산의 갱신방법은 모의값의 편의를 고려함으로써 비정상적인 상태추정치가 갱신되고, 이로 인하여 상태예측

치 또한 그 값의 신뢰도가 떨어졌다.

4.3.2 자료동화(1)

자료동화(1)은 확장 칼만 필터의 오차 공분산 R_k 와 Q_k 의 갱신과정에서 모의값의 편의만을 고려하는 경우이다. 이 경우는 자료동화의 한 부분으로써, 호우사상 2와 같이 변동성이 큰 관측값의 품질향상을 목적으로 한다. 자료동화(1)에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 적용목적에 따른 결과차이를 비교하기 위하여 호우사상 2와 3을 적용하였다. 여기서, 호우사상 3은 관측 유량자료에 결·오측이 포함된 경우이다.

호우사상 2에 대한 결과를 살펴보면, 전반적으로 상태 추정치 $X_k(+)$ 가 변동성이 큰 관측유량과는 달리 상대적으로 매끄러운 상태로 갱신된 것을 확인할 수 있다. 특히, 관측유량의 변동성이 극심한 27시간과 60~75시간 부근에서 두드러지게 나타났다. 이는 모의값의 변동성뿐만 아

니라 편의를 함께 고려함으로써 관측값의 변동성을 모의값으로 보완한 결과이다. 아울러, 오차 공분산 Q_k 와 R_k 에 의해 결정된 칼만이득 K_k 이 예측결과(Fig. 6(b))와는 달리 비교적 일정하고, 관측유량의 변동성이 큰 시점에서 0.5에 근사하게 갱신되었기 때문이다. 즉, 칼만이득이 0.0 또는 1.0에 치우치지 않고 관측유량과 모의유량의 특성을 적절하게 반영하여 자료동화가 된 것이다. 결과적으로 모의유량의 편의만을 고려함으로써 상대적으로 변동성이 적은 모의유량의 영향으로 관측유량의 변동성을 감소시킨 것이다.

호우사상 3은 관측값에 결·오측 구간이 있는 사상으로, 호우발생 53시간 부근(50~60시간 구간)에서 관측값의 결·오측을 확인할 수 있다. 자료동화(1) 방법을 적용한 결과, 결·오측 구간의 상태추정치 $x_k(+)$ 가 관측값에 근사한 비정상적인 값으로 갱신되었다. 이는 결·오측 구간에서 모의값의 편의가 매우 크게 증가하게 되어 Q_k 와 R_k

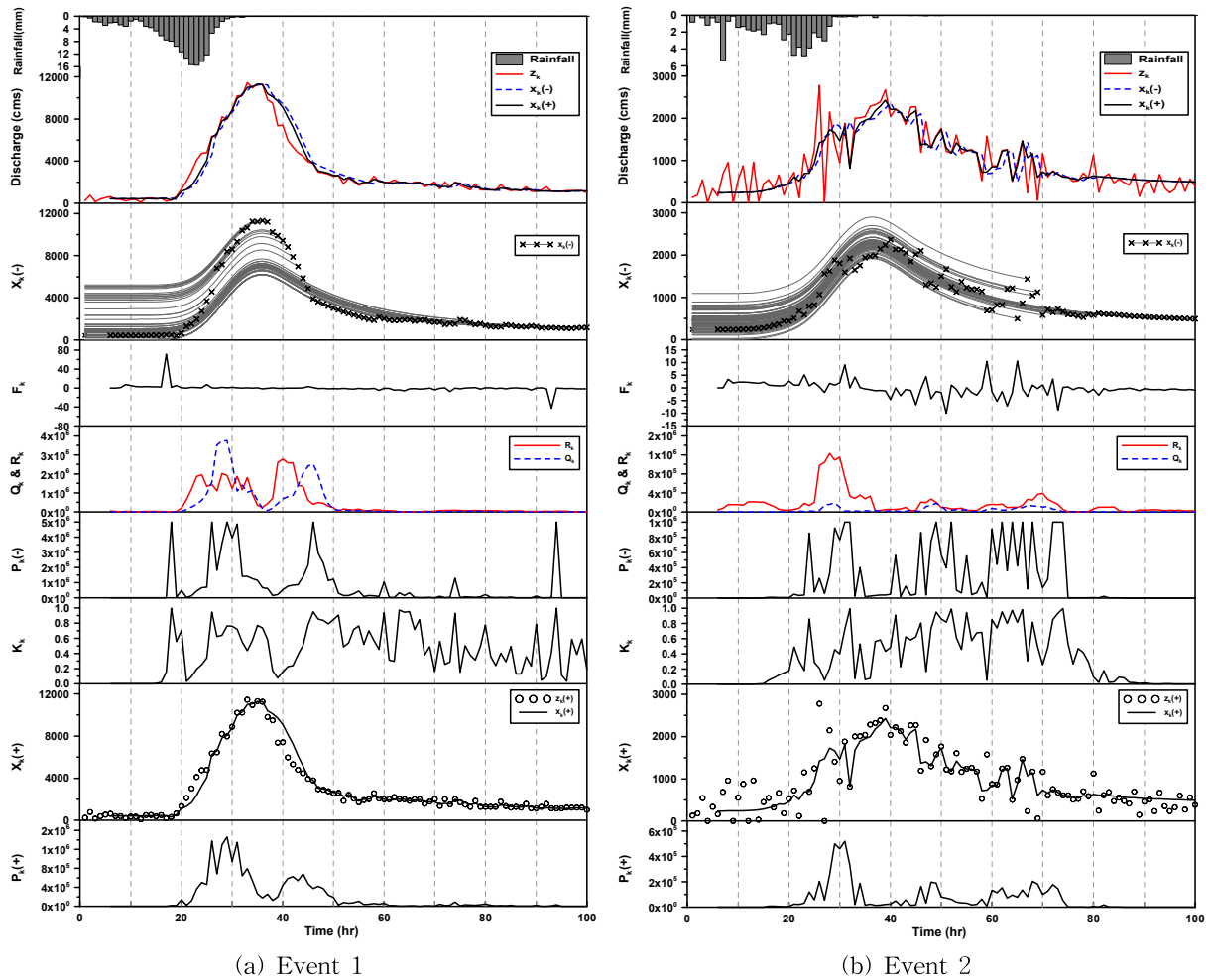


Fig. 5. Extended Kalman Filtering Results for Forecasting

보다 큰 값으로 갱신되었기 때문이다. 즉, 이러한 적용방법은 호우사상 3과 같이 관측값의 신뢰도가 의심되는 자료의 보완 목적으로는 그 적용이 어려울 것으로 사료되며, 이러한 유량자료의 품질향상을 위해서는 상태추정치에 관측값보다 모의값의 영향이 크게 반영되어야 할 것으로 판단된다.

4.3.3 자료동화(2)

자료동화(2)는 관측값에 편이가 존재하는 경우로 그 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 먼저, 호우사상 2를 자료동화(2)에 적용한 결과, 상태추정치 $x_k(+)$ 가 호우발생 32시간, 57시간, 그리고 65시간 부근에서 변동성이 큰 관측값 z_k 을 따라 거동한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7의 (a)에서 볼 수 있듯이 R_k 의 규모가 Q_k 와 비교하여 상대적으로 매우 크게 갱신되어 관측값의 영향이 상태추정치에 거의 반영되지 않은 결과이다. 따라서 결정된 칼만

이득 또한 자료동화(1)의 적용결과와 비교하여 그 변동성이 큰 것을 알 수 있다. 결과적으로 자료동화(1)과 같이 관측유량과 모의유량의 특성이 적절하게 고려된 결과가 아닌 것이다.

다음으로 호우사상 3에 대한 자료동화(2)의 적용결과는 Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)를 비교를 통하여 살펴볼 수 있다. Fig. 7(b)를 살펴보면, Q_k 와 R_k 의 갱신결과가 자료동화(1)을 적용하였던 Fig. 6(b)의 결과와는 정반대로 R_k 의 규모가 Q_k 와 비교하여 상대적으로 큰 값으로 갱신된 것을 알 수 있다. 이는 자료동화(2)의 적용목적에 부합되도록 R_k 에 관측값의 편이를 함께 고려하였기 때문이다. 따라서 결·오측이라 의심되는 구간에서 관측값의 영향보다 모의값의 영향이 지배적으로 작용하게 되어 해당 구간의 유량자료가 개선되었다. 결과적으로 관측값의 결·오측구간이 모의값과의 자료동화를 통하여 전반적으로 품질이 향상되었다.

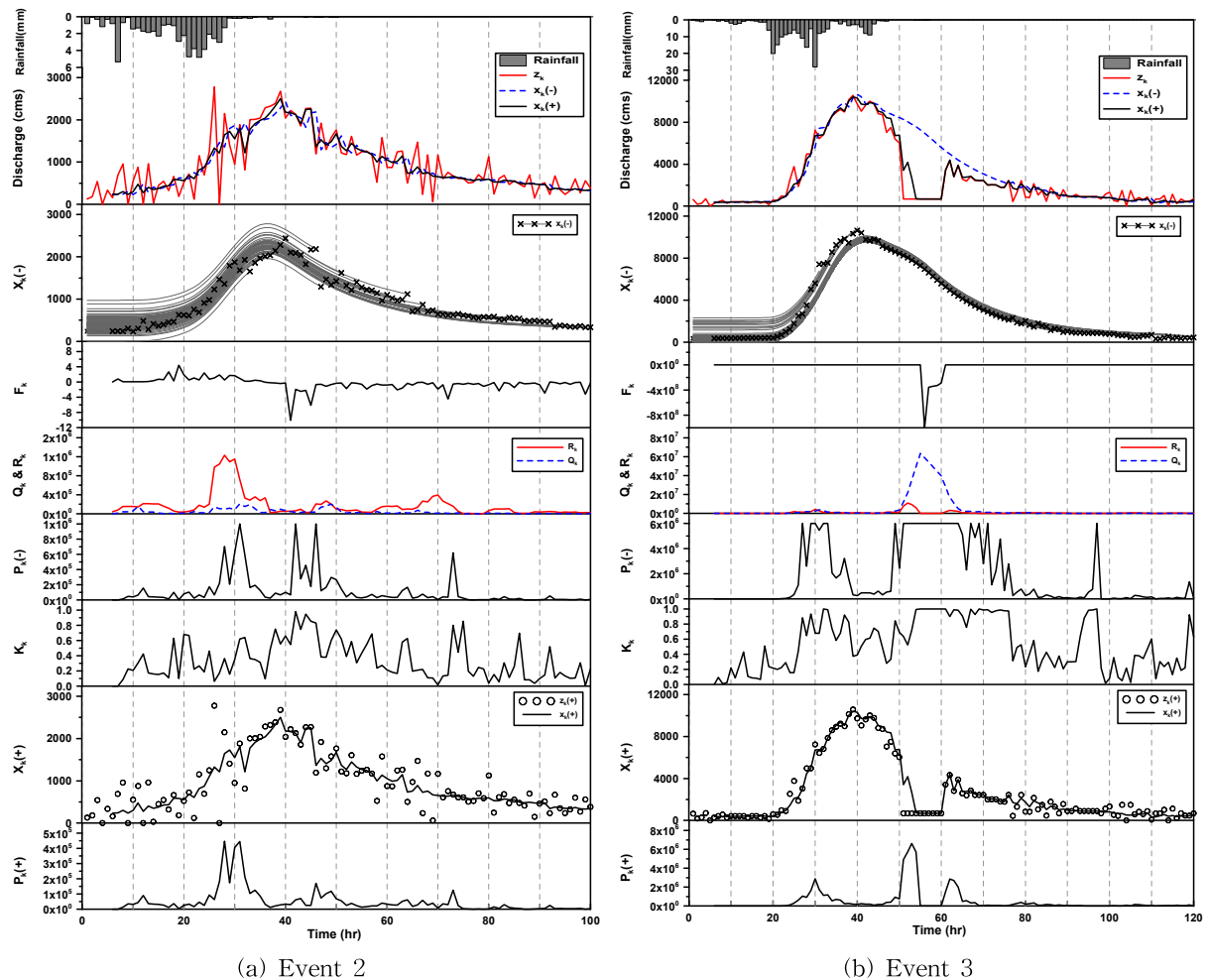
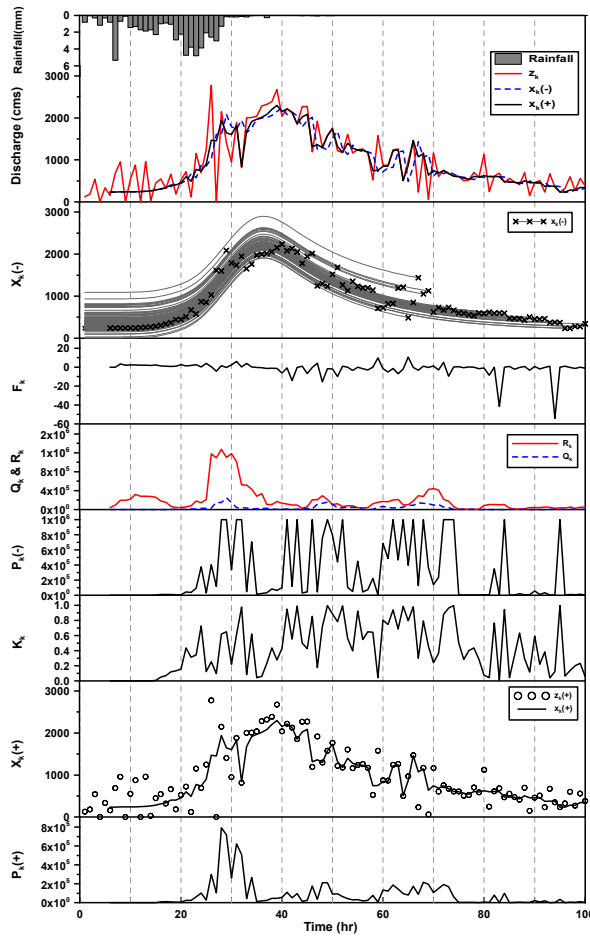
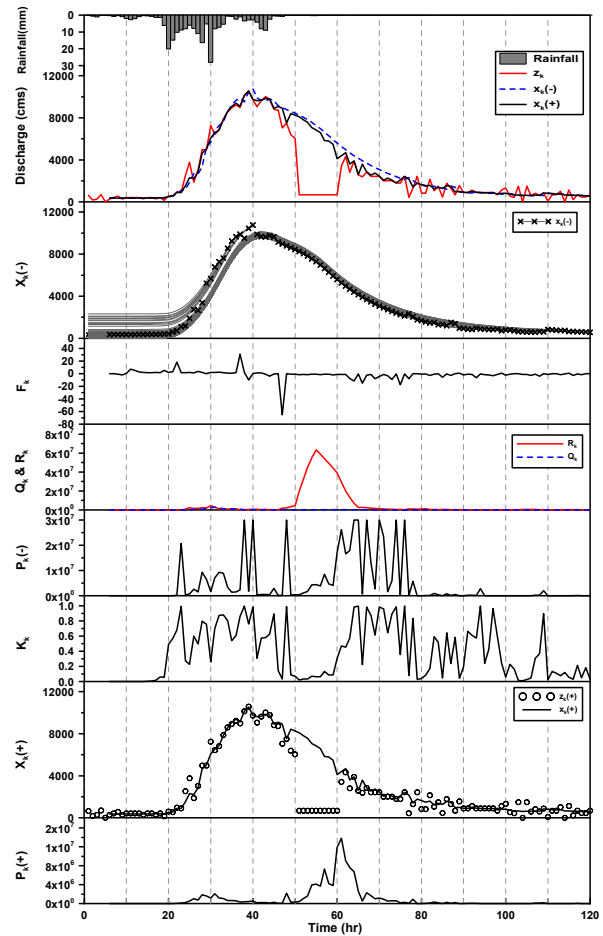


Fig. 6. Extended Kalman Filtering Results for Data Assimilation (1)



(a) Event 2



(b) Event 3

Fig. 7. Extended Kalman Filtering Results for Data Assimilation (2)

5. 결론

본 연구에서는 유량자료의 실시간 품질향상을 목적으로 확장 칼만 필터를 이용하여 자료동화를 수행하였다. 확장 칼만 필터는 비선형 문제를 처리할 수 있는 자료동화기법으로 강우-유출현상을 대상으로 적용이 가능하다. 실시간 유량자료의 품질향상은 (1) 변동성이 큰 경우와, (2) 결·오측자료가 포함된 경우로 구분하였으며, 이와 같이 구분된 각 경우의 결과를 검토하기 위하여 댐 유입량 자료와 수위-유량 자료가 공존하는 충주댐 유역을 대상 지역으로 선정하였다. 아울러 실측자료가 가지는 문제의 특성을 이해하고 그에 따라 확장 칼만 필터를 달리 적용하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 관측유량과 모의유량의 특성을 활용하여 두 자료간의 평균적 차이인 편의를 고려함으로써, 기존 연구에서 적용한 유량자료의 예측방법으로 수행이 곤란

하였던 유량자료의 실시간 품질향상이 가능한 알고리즘을 구축하였다. 적용범위는 유량자료의 예측, 댐 유입량과 같이 변동성이 큰 유량자료의 품질향상, 그리고 수위-관측 유량자료의 결·오측구간 품질향상이다.

- 2) 기존연구방법과 동일하게 관측유량과 모의유량의 변동성만을 고려하여 유량자료를 예측한 결과, 비교적 유량자료의 변동성이 적은 호우사상에 대해서는 안정적인 예측이 수행되었다. 반면, 변동성이 큰 유량자료에 대해서는 관측유량자료의 변동성 영향으로 인하여 그 결과를 판단하기 어려웠다. 즉, 관측유량자료의 상태에 따른 조건별 적용이 필요할 것으로 판단되었다.
- 3) 유량자료의 품질향상 목적에 따른 실시간 품질향상 결과, 변동성이 큰 관측유량자료는 상대적 변동성이 적은 모의유량의 변동성과 편의를 함께 고려하여

그 변동성 정도가 최소화되었다. 결·오측으로 인하여 관측유량자료의 품질이 의심되는 구간에 대해서는 관측유량의 편의를 고려하여 모의유량의 영향을 극대화시켜 관측유량자료의 품질을 향상시킬 수 있었다. 이러한 결과는 품질향상이 필요시 되는 관측유량자료의 특성과 이를 보완할 수 있는 모의유량의 특성을 품질향상 목적에 부합되도록 고려하여 적용한 결과로써 그 의미가 크다고 할 수 있다.

본 논문에서 수행한 단일지점에서의 적용은 다지점에서의 적용에 앞서 모형의 적용성을 높이기 위한 준비과정이다. 따라서 이와 같이 구축한 알고리즘과 단일지점을 대상으로 도출한 결과를 기반으로 수위-유량 관측지점과 댐 유입량 관측지점이 복합적으로 존재하는 다지점을 대상으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. KRF-2008-313-DOI083) 및 2010년도 한국연구재단(No. 2010-0014566)의 지원을 받아 수행된 것입니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

강태호, 홍일표, 김영오 (2009). "Imputation Method를 활용한 수문 결측자료의 보정." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1254-1259.

김경준, 최정호, 유철상 (2008). "연속수정법을 이용한 레이다 자료와 지상 강우자료의 합성." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제7호, pp. 681-692.

김기훈 (1999). 칼만 필터를 이용한 유도전동기의 센서리스 벡터 제어. 석사학위논문, 고려대학교.

김충수, 김형섭, 조효섭, 김휘린 (2008). "국가 수문자료 품질관리시스템 구축." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1823-1827.

노재경, 이한규, 이태삼 (2008). "댐 유입량 산정 개선의 한미 사례 비교 연구." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 689-694.

박노혁, 양재린, 윤재홍, 조용식 (2000). "충주댐 저수지의 파랑특성 분석에 의한 수위변동 감소 대책." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제S1호, pp. 422-427.

박상우 (1993). 전이함수계 모형과 필터링 알고리즘을 적

용한 실시간 홍수예측. 박사학위논문, 동국대학교.

배덕효 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 449-457.

배덕효, 이병주 (2009). "양상불 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 (I) : -모형 개발-" **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 953-961.

서병하, 강관원 (1985). "홍수 예경보를 위한 하천유출의 수문학적 예측." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제18권, 제2호, pp. 153-161.

유철상, 신정우 (2010). "Nash 모형의 구조를 이용한 관측유역의 저류상수 및 집중시간 결정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제6호, pp. 559-569.

이영화 (1991). Kalman Filter에 의한 하천유역의 강우유출 모델에 관한 연구, 박사학위논문, 영남대학교.

이원환, 이영석 (1986). "Kalman Filter에 의한 Online 유출예측." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제6권, 제2호, pp. 57-65.

장석곤 (2002). "Kalman Filter를 이용한 충주댐 유입량 예측기법의 결합." 석사학위논문, 서울대학교.

정동국 (1996). "강우-유출모형을 이용한 실시간 홍수예측: II. 유역의 적용." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권, 제1호, pp. 151-161.

정동국과 이길성 (1994). "강우-유출모형을 이용한 실시간 홍수예측(I): 이론과 모형화." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제27권, 제1호, pp. 88-89.

정성원, 한명선, 황석환, 김치영, 이찬주, 김동구 (2006). "2004년 건설교통부 유량자료의 평가." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1343-1347.

황의호, 권형중, 이근상, 이을래 (2008). "용담호 홍수기 유입량 산정 개선을 위한 수면곡선 추적." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 2233-2237.

Aubert, D., Loumahne, C., and Oudic, L. (2003). "Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model." *Journal of Hydrology*, Vol. 280, pp. 145-161.

Bergthórsson, P., and Dóss, B. (1995). "Numerical weather map analysis." *Tellus*, Vol. 7, No. 3, pp. 396-340.

Bidwell, V.J., and Griffiths, G.A. (1994). "Adaptive Flood Forecasting: An Application to The Waimakariri River." *Journal of Hydrology*, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15.

Box, G.E.P., and Jenkins, G.M. (1976). Time series

- analysis; forecasting and control. revised edition, holden-day.
- Clark, C.O. (1945). Storage and the unit hydrograph, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Dan, S. (2006). *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*, Wiley.
- Gelb, A. (1974). *Applied optimal estimation*. The MIT Press.
- Hoke, J.E., and Anthes, R.A. (1976). "The initialization of numerical models by a dynamic initialization technique." *Monthly Weather Review*, Vol. 104, pp. 1551-1556.
- Kalman, R.E. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems." *Transactions of the ASME -Journal of Basic Engineering*, No. 82 (Series D), pp. 35-45.
- Lee, Y.H., and Singh, V.P. (1998). "Application of the Kalman Filter to the Nash model." *Hydrological Processes*, Vol. 12 pp. 755-767.
- Madsen, H., and Skotner, C. (2005). "Adaptive state updating in real-time river flow forecasting-a combined filtering and error forecasting procedure." *Journal of Hydrology*, Vol. 308, pp. 302-312.
- McLaughlin, D. (2002). "an integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1275-1286.
- Mizumura, K., and Chiu, C.L. (1985). "Prediction of Combined Snowmelt and Rainfall Runoff." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No. 2, pp. 179-193.
- Schmidt, S.F. (1970). *Computational techniques in Kalman Filtering, in Theory and Applications of Kalman Filtering*, AGARDograph 139, NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development, London.

논문번호: 12-018	접수: 2012.02.17
수정일자: 2012.04.10/05.07	심사완료: 2012.05.07