

담수호 홍수관리를 위한 상류 유입량 실시간 예측

Real-time Upstream Inflow Forecasting for Flood Management of Estuary Dam

강민구* / 박승우** / 강문성***

Kang, Min Goo / Park, Seung Woo / Kang, Moon Seong

Abstract

A hydrological grey model is developed to forecast short-term river runoff from the Naju watershed located at upstream of the Youngsan estuary dam in Korea. The runoff of the Naju watershed is measured in real time at the Naju streamflow gauge station, which is a key station for forecasting the upstream inflow and operating the gates of the estuary dam in flood period. The model's governing equation is formulated on the basis of the grey system theory. The model parameters are reparameterized in combination with the grey system parameters and estimated with the annealing-simplex method in conjunction with an objective function, HMLE. To forecast accurately runoff, the fifth order differential equation was adopted as the governing equation of the model in consideration of the statistic values between the observed and forecast runoff. In calibration, RMSE values between the observed and simulated runoff of two and six hours ahead using the model range from 3.1 to 290.5 m³/s, R² values range from 0.909 to 0.999. In verification, RMSE values range from 26.4 to 147.4 m³/s, R² values range from 0.940 to 0.998, compared to the observed data. In forecasting runoff in real time, the relative error values with lead-time and river stage range from -23.4 to 14.3 % and increase as the lead time increases. The results in this study demonstrate that the proposed model can reasonably and efficiently forecast runoff for one to six hours ahead.

keywords : Hydrological grey Model, Annealing-simplex method, Real-time flood forecasting, Flood management of estuary dam

요지

본 연구에서는 영산호의 상류에 위치한 나주유역의 홍수시 유출량을 실시간으로 예측하기 위하여 Grey 홍수 유출모형을 개발하였다. 나주유역의 유출량은 나주수위관측소에서 실시간으로 측정하고 있으며, 이곳은 영산호의 유입홍수량을 예측과 홍수관리를 위한 주관측소이다. 모형의 지배방정식은 Grey 시스템 이론에 근거하여 구성되었으며, 모형의 매개변수는 Grey 시스템매개변수의 조합으로 구성하였다. 모형의 차수는 실측자료와 모의결과를 비교하여 다른 차수 보다 양호한 결과를 나타내는 5차로 하였다. 모형의 보정시 예측결과와 실측치간의 RMSE는 3.1~290.5 m³/sec를 나타냈으며, R²는 0.909~0.999를 나타냈다. 모형의 검정시 예측결과와 실측치간의 RMSE는 20.6~147.4 m³/sec를 나타냈으며, R²는 0.940~0.998를 나타냈다. 매개변수가 추정된 모형을 이용하여 담수호의 유입량을 하천수위 상태에 따라 예측한

* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), Daejeon, Korea
(e-mail: kmg90@kowaco.or.kr)

** 서울대학교 농업생명과학대학 교수

Professor, Department of Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, 151-921

*** Auburn University Post-doctor 과정

Research scholar, Department of Biosystems Engineering, Auburn University, Auburn, Alabama, USA

결과, 하천수위가 상승할 경우와 하강할 경우의 예측 홍수량은 예측시간이 증가할수록 커지는 경향을 나타냈다. 또한, 하천수위가 점두에 가까운 시기의 홍수량은 예측시간에 관계없이 실측자료와 비슷한 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 Grey 홍수유출모형을 홍수시 담수호 유입량을 실시간으로 정확하게 예측하는데 적용할 수 있음을 나타낸다.

핵심용어 : Grey 홍수 유출 모형, Annealing-Simplex법, 실시간 홍수 예측, 담수호 홍수 관리

1. 서 론

상류 유역으로부터 홍수시 유출되는 유량을 실시간으로 예측하는 것은 하천의 수위조절이나 수자원시설물의 관리를 위한 중요한 요소 중의 하나이다. 최근에는 세계적으로 도시화와 온실효과나 엘니뇨와 같은 기후변화에 의해서 홍수의 발생회수와 크기가 증가하고 있다. 또한, 우리나라에는 강우의 2/3 이상이 여름철에 집중하고, 하천경사가 급하여 빈번한 홍수가 발생하고 있으며, 이에 따라 매년 많은 피해가 발생하고 있다. 최근에는 이상기후에 의해 돌발적인 홍수가 발생하고 있으며, 이로 인하여 국지적 홍수 피해가 발생하고 있다. 2002년에 발생한 태풍 루사(Rusa), 2003년에 발생한 매미(Maemi)에 의한 피해가 그 예라고 할 수 있다 (Chun, 2004). 이러한 홍수를 사전에 예방하기 위해서는 홍수를 미리 예보하고 경보하는 시스템이 필요하며, 이 시스템의 정확도는 몇 시간 후의 홍수량을 얼마나 정확하게 예측하느냐에 달려 있다.

담수호는 하천의 하류부에서 해수침입에 따른 경작지의 염해방지와 유역에 필요한 담수를 확보하기 위하여 건설되어 운영된다. 또한, 홍수시에는 배수갑문의 인위적인 조작을 통해서 과다한 유입량을 외래로 배제하여 상류유역의 홍수피해를 방지하고 있다. 담수호는 하천수의 흐름을 차단하여 저류하므로 배수갑문이 폐쇄된 경우에는 하천상류 수십 km까지 배수현상(Backwater)이 나타난다. 또한, 배수갑문 조작은 내수위가 외수위보다 높은 경우에 실시하게 되므로 하천 주요 지점의 수위는 조석의 영향을 받는다. 담수호의 홍수관리는 유입된 홍수을 잠시 저류시켰다가 간조시 외래로 방류하는 것이다. 따라서, 담수호의 홍수관리는 홍수가 발생하기 전에 얼마만큼의 저류공간을 확보하느냐를 결정하는 것이며, 이는 상류유역에서 유입되는 홍수량 예측의 신뢰성에 좌우된다.

담수호, 저수지, 댐의 상류 유입량 예측과 하천 홍수량 예측 방법은 현재까지 많은 연구가 진행이 되고 있다. 최근까지는 실시간 홍수량 예측을 위해서 총괄형 강우-유출모형, 분포형 모형, 추계학적 모형 등이 적용되어 왔다. (Yapo et al., 1993; 심순보와 김만식, 1999; 김성원과 호세살라스, 2000). 그러나 유역의 물리적 특

성과 기상요소들이 비선형적으로 유출에 영향을 미치기 때문에 이를 모형으로 홍수량을 정확히 예측하는 데는 많은 어려움이 있다. 최근에는 이러한 비선형성을 고려하는 신경망이론을 이용한 홍수량 예측모형이 많이 개발되고 있으며, 다른 방법과 예측능력을 비교하는 연구가 많이 진행되고 있다 (Campolo et al., 1999; Zhang and Govindaraju, 2000; Imrie et al., 2000; Kim and Lee, 2002; Kang and Park, 2003; Laio et al., 2003). 신경망 모형은 단순하면서 예측 정확성이 다른 모형들 보다 뛰어나다는 평가를 받고 있으나, 학습을 위한 과거자료가 많이 필요하다는 단점이 있다.

홍수량 예측 모형의 매개변수는 많은 강우사상을 이용하여 추정된다. 예측 모형의 매개변수 추정은 일반적으로 과거 강우사상을 사용하여 추정된다. 이 때, 예측의 정확성을 확보하기 위해서는 많은 자료가 필요하다. Grey 시스템 이론은 시스템에 관련된 정보가 모호하며, 예측을 위해 필요한 과거자료의 수가 적은 시스템의 미래 상황을 예측하기 위하여 제안되었다 (Deng, 1982, 1989; Xia, 1989; Yu et al., 2001 ; Hsu, 2002). 홍수량을 실시간으로 예측하기 위한 모형의 매개변수는 과거 강우사상이나 현재시점까지의 강우사상 자료를 이용하여 추정할 수 있다. 최신의 유출사상이 포함된 자료를 사용하면 유역 상태를 반영한 보다 합리적인 매개변수 추정이 가능하기 때문이다. 예측시점까지의 강우와 유출 자료는 사용이 가능한 자료의 수가 적기 때문에 많은 자료가 필요한 모형을 사용하여 높은 정확도로 홍수량을 예측하기 어렵다. 그러나 매개변수 추정에 필요한 과거 자료가 많지 않을 경우 Grey 수문모형을 이용하면 적은 수의 과거 자료를 이용하여 모형의 매개변수를 추정할 수 있기 때문에 Grey 수문모형은 최신 자료를 사용하여 홍수량을 예측하는데 적절하다. Grey 수문 모형은 이러한 장점에도 불구하고 많은 연구가 진행되지 않았다. Lee and Wang(1997)은 Grey 수문모형을 홍수시 강우-유출 관계를 해석하는데 적용한 바가 있으며, Yu et al.(2000)은 Grey 모형을 강우량을 예측하는데 적용하여 Fuzzy법과 비교한 바가 있다. 또한, Yu 등(2001)은 Grey 모형을 이용하여 강우량 예측과 홍수량 예측에 적용하여 예측결과를 실측자료와 비교하여 평가한 바가 있다.

본 연구에서는 담수호의 홍수관리를 위해서 홍수시 상류 유입량을 실시간으로 예측하기 위한 Grey 수문 모형을 개발하여 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 Grey 수문모형은 Grey 시스템이론에 근거하였으며, 지배방정식의 차수는 유역의 특성을 반영하여 결정하였다. 모형의 매개변수는 전역최적화기법인 Annealing-Simplex (A-S)법을 이용하여 추정하였다. 개발된 모형을 영산호의 홍수관리를 위한 주관측소인 나주수위관측소의 홍수량 예측에 적용하여 실시간 홍수량 예측에 대한 적용성을 평가하였다.

2. Grey 시스템 이론

2.1. 특징

시스템의 특성은 흑색(blackness), 백색(whiteness), 회색(greyness)과 같은 색깔로 구분할 수 있다. 흑색은 시스템의 구조나 성질, 매개변수 등에 대한 정보가 전혀 없는 상태를 나타내며, 백색은 시스템의 모든 정보가 분명한 것을 의미한다. 회색은 일부 정보는 명백하고, 다른 일부 정보는 모호한 상태를 의미한다. Grey 시스템은 신체, 농업, 경제, 사회, 기후시스템, 수문순환 시스템 등과 같이 시스템의 상태에 대한 정보가 결여된 시스템을 나타낸다. Grey 시스템 이론은 불명확한 시스템 특성과 제한된 자료를 사용하여 시스템의 미래를 예측하기 위하여 제안되었다(Deng, 1989).

Grey 시스템 이론은 시스템의 입력과 출력 자료를 누가하여 자료를 변환하는 누가발생연산(Accumulated Generating Operation, AGO) 절차를 시행한다. 이는 원시자료에 있는 무작위성을 줄여 규칙성이 있는 자료를 생성하기 위한 것이다. 이를 통하여 원시자료에 있는 잡음을 약화시킬 수 있다. AGO를 통하여 변환된 자료를 이용하여 미분방정식을 수립하고 예측모형을 구성한다. 수립된 미분방정식의 해와 모형의 매개변수를 이용하여 최소 4개의 과거 자료를 사용하여 실시간으로 미래 값을 예측한다.

2.2. 지배방정식

Grey 시스템 이론에 근거하여 해당 시스템이나 자료의 특성을 고려하여 적절한 차수의 미분방정식을 수립한다. 시스템의 관측자료는 누가발생연산(AGO)을 통하여 새로운 시계열로 재생성된다. 관측자료의 시계열이 $X^{(0)}(t) = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$ 일 경우, 1차 AGO를 통하여 생성되는 시계열, AGO X(1)(t)는 Eq. (1)과 같다 (Deng, 1989).

$$X^{(1)}(t) = AGO X^{(0)}(t) = \sum_{k=1}^t x^{(0)}(k), \quad t = 1, 2, 3, \dots, n \in N \quad (1)$$

Eq. (1)과 같은 1차 AGO 자료를 이용하여 수립되는 1차 미분방정식은 Eq. (2)와 같다.

$$\frac{dX^{(1)}(t)}{dt} + \otimes_a X^{(1)}(t) = \otimes_b \quad (2)$$

여기서 \otimes_a 와 \otimes_b 는 Grey 시스템 매개변수이며, Grey 시스템 이론에 의해서 도함수는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dX^{(1)}(t)}{dt} |_{t=k} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\Delta t} \\ &= x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1) = X^{(0)}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

Eq. (2)에서 변수 $X^{(1)}(t)$ 은 Eq. (4)와 같이 새로운 변수 $Z^{(1)}(k)$ 로 나타낼 수 있다.

$$X^{(1)}(t) |_{t=k} = Z^{(1)}(k) = \beta[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)] \quad (4)$$

Eq. (4)에서 β 는 0.5를 사용하며, Eq. (3)과 Eq. (4)를 Eq. (2)에 대입하여 정리하면 Eq. (5)와 같다.

$$X^{(0)}(t) + \otimes_a Z^{(1)}(k) = \otimes_b, \forall k = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

Eq. (5)를 행렬로 나타내면 Eq. (6)과 같다.

$$Y = U\theta + \epsilon \quad (6)$$

여기서 Y 와 U 는 과거 자료의 벡터이고, θ 는 Grey 시스템 매개변수, ϵ 는 오차를 나타낸다. Eq. (6)의 θ 는 Eq. (7)과 같이 최소자승법을 이용하여 추정할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_a \\ \hat{\theta}_b \end{bmatrix} = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (7)$$

여기서 $\hat{\theta}_a$ 와 $\hat{\theta}_b$ 는 추정된 Grey 시스템 매개변수이다.

3. 홍수량 예측 모형

3.1. Grey 수문 모형

Grey 수문 모형의 유역유출에 대한 미분방정식은 Eq. (8)과 같다 (Xia, 1989; Yu et al., 2001).

$$\begin{aligned} & \frac{d^n Q^{(k)}(t)}{dt^n} + \otimes_{a_1} \frac{d^{n-1} Q^{(k)}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \otimes_{a_n} Q^{(k)}(t) \quad (8) \\ & = \otimes_{b_0} \frac{d^m R^{(k)}(t)}{dt^m} + \otimes_{b_1} \frac{d^{m-1} R^{(k)}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + \otimes_{b_m} R^{(k)}(t) \end{aligned}$$

여기서, $Q^{(k)}(t)$ 는 $Q^{(0)}(t)$ 의 k차 누가값, $R^{(k)}(t)$ 는 $R^{(0)}(t)$ 의 k차 누가값을 나타내며, $Q^{(0)}(t)$ 는 시간 t에서 유출량, $R^{(0)}(t)$ 는 시간 t에서 면적평균 강우량을 나타내고, \otimes_{a_i} ($i=1,2,\dots,n$)와 \otimes_{b_j} ($j=1,2,\dots,m$)는 Grey 모형의 매개변수를 나타낸다.

Eq. (8)과 같은 Grey 모형의 1차 미분방정식은 Eq. (9)와 같다.

$$\frac{dQ^{(1)}(t)}{dt} + \otimes_{a_1} Z^{(1)}(t) = \otimes_{b_0} \frac{dR^{(1)}(t-1)}{dt} + \otimes_{b_1} R^{(1)}(t-1) \quad (9)$$

Eq. (9)에서 $Q^{(1)}(t)$ 의 도함수는 Eq. (10)과 같으며, $R^{(1)}(t-1)$ 의 도함수는 Eq. (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dQ^{(1)}(t)}{dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q^{(1)}(t) - Q^{(1)}(t-1)}{\Delta t} \quad (10) \\ &= Q^{(1)}(t) - Q^{(1)}(t-1) = Q^{(0)}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dR^{(1)}(t-1)}{dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R^{(1)}(t-1) - R^{(1)}(t-2)}{\Delta t} \quad (11) \\ &= R^{(1)}(t-1) - R^{(1)}(t-2) = R^{(0)}(t-1) \end{aligned}$$

Eq. (9)에서 변수 $Z^{(1)}$ 로 나타낼 수 있으며, Eq. (10), (11), (12)를 Eq. (9)에 대입하여 정리하면 Eq. (12)와 같다.

$$Q^{(1)}(t) = \otimes_{c_1} Q^{(1)}(t-1) + \otimes_{c_2} R^{(1)}(t-1) + \otimes_{c_3} R^{(1)}(t-2) \quad (12)$$

여기서 \otimes_{c_1} , \otimes_{c_2} , \otimes_{c_3} 은 Grey 시스템 매개변수, \otimes_{a_1} 와 \otimes_{a_2} 의 조합으로 재구성한 매개변수이며, Eq. (13)과 같다. 모형의 차수가 증가하면 모형의 매개변수도 증가하며, 매개변수의 구성도 복잡해진다.

$$\otimes_{c_1} = \frac{2 - \otimes_{a_1}}{2 + \otimes_{a_1}}, \quad \otimes_{c_2} = \frac{2 \otimes_{b_0} + 2 \otimes_{b_1}}{2 + \otimes_{a_1}}, \quad \otimes_{c_3} = \frac{-2 \otimes_{b_0}}{2 + \otimes_{a_1}} \quad (13)$$

모형의 매개변수 분포에 대한 특정한 분포형은 알려져 있지 않으며, Eq. (14)와 같이 상한값과 하한값으로 매개변수 구간을 나타낼 수 있다.

$$\otimes x = [\underline{\otimes} x, \overline{\otimes} x] = [x' \in x] \quad \underline{\otimes} x \leq x' \leq \overline{\otimes} x \quad (14)$$

여기서, $\underline{\otimes} x$, $\overline{\otimes} x$ 는 각각 $\otimes x$ 의 하한값과 상한값을 나타낸다. 모형의 매개변수 추정값 x' 는 $\otimes x$ 의 하한값과 상한값의 사이에 있게 된다. 따라서, Eq. (14)와 같이 매개변수 구간을 설정한 후, 설정된 구간 내에서 매개변수를 추정할 수 있다.

3.2. 매개변수 최적화

3.2.1 최적화 기법

홍수량 예측 모형의 매개변수 추정은 전역최적화 기법 중의 하나인 Annealing-Simplex (A-S)법을 사용하였다. A-S법은 전역탐색기법 중 효과적이고 효율적인 방법 중의 하나이며 Simulated Annealing법의 강력함과 Downhill Simplex법의 효율성을 결합한 방법으로 다양한 형태로 개발되어 적용이 되고 있으며 수문모형의 매개변수보정에도 적용되고 있다 (강민구 등, 2002). Simulated Annealing법은 도약을 통해서 지역최적해로부터 벗어나려는 과정을 거치며, 실행이 쉽고 강력하나 효율성이 떨어지는 단점이 있다. Downhill Simplex법은 지역 최적해 근처로 빠르게 수렴하는 장점이 있으나, 지역 최적해로부터 벗어날 수 있는 방법이 없다. A-S법은 이러한 두 가지 방법의 장단점을 상호 보완하는 방법이며, 두 가지 방법을 결합하여 새로운 전역탐색기법을 개발하는 연구가 진행되어 왔다 (Press et al., 1992; Cardoso et al., 1996; Kvaniscka and Pospichal, 1997; Pan and Wu, 1998).

본 연구에서는 Pan and Wu(1998)가 제안한 A-S법을 홍수량 예측 모형의 매개변수 최적화에 적용하였다. 강우-유출모형의 매개변수의 변화에 따른 특정 통계치의 변화 형상은 매우 복잡해서 지역해로부터 벗어나기 위해서는 몇 번의 가열냉각과정(annealing)이 필요하다. 본 연구에서는 연속적인 가열냉각과정이 동일한 값을 찾거나 두 점간의 거리가 10^{-5} 보다 작은 경우에는 전역 최적해를 탐색한 것으로 하여 탐색을 중단하도록 하였다.

3.2.2 목적함수

목적함수는 모형기동의 측정치 역할을 하며, 그 값은 참 값에 대한 추정값의 근접정도를 나타낸다. 그러나 특정한 목적함수가 다른 목적함수 보다 모형보정에 더 적절하다고 명확하게 주장할 수 없으며, 목적함수에 따라서는 대상유역에 대한 최상의 매개변수를 찾을 수 없는 경우도 있다. 따라서 매개변수 자동보정은 적절한 목적함수의 선정이 필요하며, 본 연구에서는 고수위와

저수위의 전 기간에 걸쳐 만족할 만한 보정결과를 나타내는 HMLE (Heteroscedastic Maximum Likelihood Estimator)를 목적함수로 선정하였다. HMLE는 실측치와 모의치 사이의 오차가 상관성이 없고 균일하지 않은 경우에 적용이 되며, 하천유출량 자료에 나타나는 것처럼 오차분산이 유량크기에 따라 변한다는 가정을 한다. HMLE는 Eq. (15)와 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$\underset{\theta, \lambda}{\text{Minimize}} \quad \text{HMLE}(\theta, \lambda) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i(\lambda) \{q_i^-(\theta) - q_i^{obs}\}^2}{\left\{ \prod_{i=1}^n w_i(\lambda) \right\}^{1/n}} \quad (15)$$

여기서 $w_i = f_i^{2(\lambda-1)}$ 는 시간 i의 가중치, $f_i = q_i^{true}$ 는 시간 i의 참값으로 실측값 q_i^{obs} 을 사용하여 λ 는 자료로부터 추정되는 자료변환 매개변수를 나타낸다.

4. 모형의 적용

4.1. 대상 담수호 및 유입량 예측 지점

담수호 유입 홍수량 예측에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 영산강 하구에 위치한 영산호를 선정하였다. 영산호는 영산강 하류지역의 염해 및 홍수 피해방지, 수자원 확보 등을 목적으로 1982년에 건설되었다. 영산호의 유역면적은 3,470 km²이며 전체 유역면적의 58 %인 2,063 km²가 나주지점의 상류에 위치하고 있으며, 나머지는 나주에서 하구둑에 이르는 구간을 차지하고 있다. 영산강 본류 하천의 유로연장은 130.0 km이며, 이중 나주까지가 66 km로 총연장의 50 %를 차지하고

있다. 따라서 영산호의 유역은 나주지점을 중심으로 거의 양분되어 있다고 볼 수 있다.

영산호의 유입홍수는 나주지점을 지나온 홍수와 지류에서 발생한 홍수가 합쳐져서 형성된다. 나주지점 상류유역은 형상계수가 0.467로서 전체유역의 형상계수인 0.204 보다 크며, 둑근 형상을 하고 있어 집중호우시 홍수가 급격하게 발생할 수 있다. 유역의 경사도 나주지점 상류유역에 급한 산지가 분포되어 있어 하류 유역보다 급하다. 또한, 최근에 나주 상류 유역에서 도시화에 의해 불투수면적이 증가하고, 논이나 밭과 같은 토수면적이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 유출량과 첨두유량을 증가시키고 첨두유량의 도달시간을 단축시켜 하류에 홍수피해를 증가시킬 수 있다(이재웅 등, 2001). 이러한 유역특성을 때문에 나주지점의 홍수추정이 영산호의 홍수 관리의 신뢰성을 좌우하는 중요한 요인이 되고 있다.

Fig. 1과 같이 나주 수위관측소는 영산강 유역의 중류부에 위치하고 있으며, 영산강 홍수예경보에 중요 역할을 하고 있다. 이 수위관측소에서 실시간으로 측정한 수위자료는 영산강호수통제소와 영산강 하구둑 관리소로 전송된다. 나주수위관측소의 지배우량관측소는 Thiessen망을 작성하여 선정하였다. 나주수위관측소의 지배우량관측소로 삼서, 광주, 장성댐 우량관측소가 선정되었으며, 평균유량은 Thiessen 면적가중법을 적용하여 산정하였다.

홍수량 예측모형의 매개변수 추정과 검정은 7개 자료를 사용하여 실시하였다. 모형의 보정을 위해서 5개의 유출자료를 사용하였으며, 이들의 유출시간은 88~319 시간, 첨두유량은 530~4,127 m³/sec의 범위를 나타



Fig. 1. Location map of Naju watershed and gauge stations

Table 1. Storm events selected in this study for model calibration and validation

Storm event	Date	Runoff duration (hr)	Peak flow (m ³ /sec)	Remarks
NA 980928	28 September, 1998	280	4,127	Calibration
NA 990701	1 June ,1999	88	1,141	Calibration
NA 990919	19 September, 1999	319	2,478	Calibration
NA 010711	11 June , 2001	226	1,304	Calibration
NA 010914	14 September, 2001	108	530	Calibration
NA 000714	14 June, 2000	206	2,332	Validation
NA 000816	16 August , 2000	551	1,924	Validation

낸다. 모형의 검정에는 2개의 유출자료를 사용하였으며, 이들의 유출시간은 206~551 시간, 최대유량은 1,924 ~2,332 m³/sec의 범위를 나타냈다. 이들 7개의 폭우사상은 6월에서 9월 사이에 발생한 것들이며, 이 기간에는 많은 강우를 동반한 태풍이 한반도를 지나가는 기간이다.

4.2 모형의 적정 차수 선정

Grey 홍수 유출 모형의 적용을 위해서는 유역의 유출특성을 고려하여 지배방정식의 차수를 선정해야한다. 유역의 유출이 강우에 대하여 빠르게 반응하여 도달시간이 짧은 경우에는 낮은 차수의 지배방정식을 선정하고, 그 반대의 경우에는 높은 차수의 지배방정식을 사용한다. 모형의 차수는 실측자료와 예측결과간의 통계치를 비교하여 보다 양호한 결과를 나타내는 것으로 선정된다.

Table 2는 모형의 차수에 따른 실측치와 예측치 간의 통계값을 비교한 것이다. 통계치는 모형의 보정과 검정으로 구분하여 비교하였다. 보정시 차수에 따른 RMSE와 R²는 차수가 증가함에 따라 양호한 결과를 나타냈다. 차수가 증가함에 따라 RMSE는 감소하고, R²는 증가하였으며, 검정에서도 동일한 결과를 나타냈다. Fig. 2는 차수에 따른 6시간 이후의 유출량을 예측한 결과를 실측치와 도식적으로 비교한 것이다. 차수가 증가할수록 1:1 선에 밀집하고 있으며, 예측치가 실측치에

근사한 결과를 나타내고 있다.

이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 5차 모형을 홍수량 예측 모형으로 선정하였다. 이는 나주 상류유역의 유역면적이 넓어 강우량과 수문곡선의 상승부 사이의 시간이 길고 강우량에 대하여 유역의 반응이 다소 느리다는 점을 반영한 것이다. Eq. (16)은 1시간 후의 홍수량을 예측하기 위한 모형의 지배방정식을 정리한 것이며, 강우량은 삼서, 장성댐, 광주 강우관측소의 유역평균 강우자료를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 Q^{(1)}(t+1) = & \otimes_{c_1} Q^{(1)}(t) + \otimes_{c_2} Q^{(1)}(t-1) \\
 & + \otimes_{c_3} Q^{(1)}(t-2) + \otimes_{c_4} Q^{(1)}(t-3) \\
 & + \otimes_{c_5} Q^{(1)}(t-4) + \otimes_{c_6} R^{(1)}(t) \\
 & + \otimes_{c_7} R^{(1)}(t-1) + \otimes_{c_8} R^{(1)}(t-2) \\
 & + \otimes_{c_9} R^{(1)}(t-3) + \otimes_{c_{10}} R^{(1)}(t-4) \\
 & + \otimes_{c_{11}} R^{(1)}(t-5)
 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $Q^{(1)}(t)$ 는 시간 t에서 과거 유출자료의 1차AGO 계열, $R^{(1)}(t)$ 는 시간 t에서 과거 강우자료의 1차AGO 계열, $\otimes_{c_1}, \dots, \otimes_{c_{11}}$ 은 모형의 매개변수를 나타낸다.

Table 2. Statistic values between observed and forecast runoff varying with order of governing equation

Order	Calibration		Validation	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
1st	162.3	0.906	133.3	0.882
2nd	94.2	0.968	92.4	0.943
3th	84.5	0.975	83.6	0.953
4th	75.3	0.980	77.9	0.960
5th	69.6	0.983	75.7	0.962

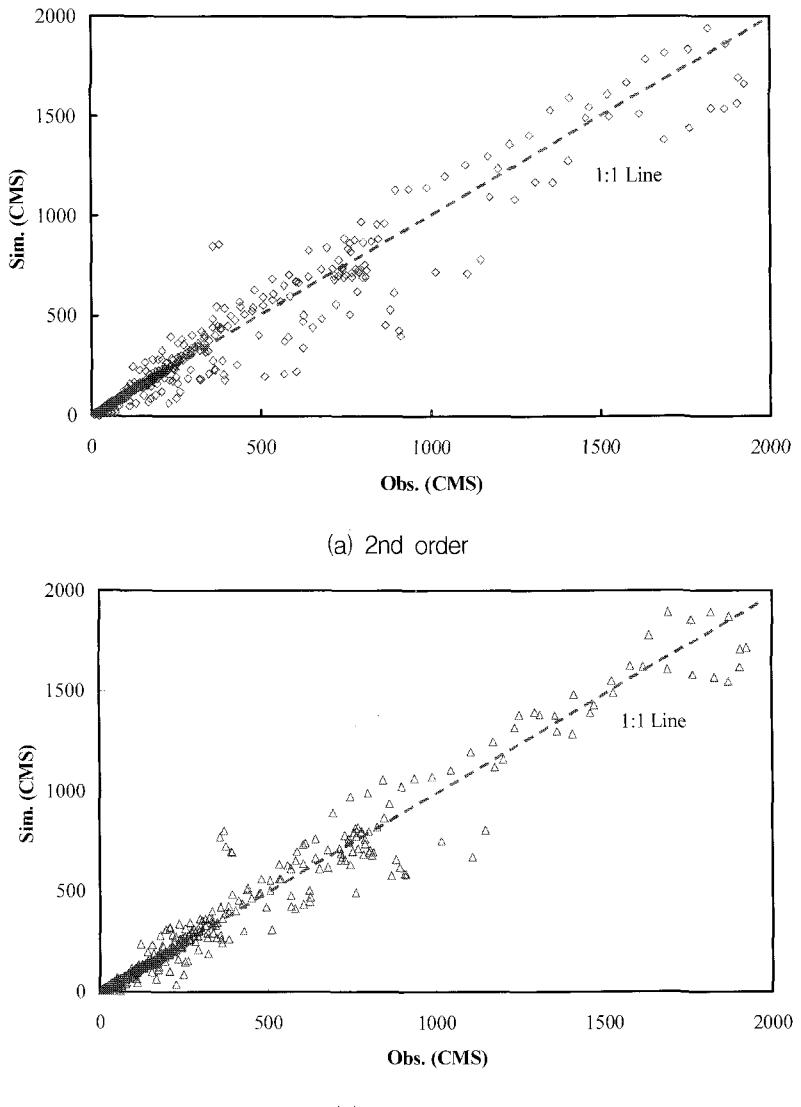


Fig. 2. Scatter plots comparing observed and forecast values for six hours of lead-time varying with order of governing equation in validation

4.3 모형의 보정

모형의 보정은 5개의 강우사상을 사용하여 시행하였다. 선정된 강우사상의 첨두유량은 $530\sim4,127 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 다양한 범위를 나타내고 있으며, 이는 모형의 매개 변수가 고수위에 맞춰지는 것을 방지하기 위한 것이다. Table 3은 예측시간별 보정결과를 나타낸 것이다. 2시간 이후의 홍수량을 예측한 결과의 RMSE는 $3.1\sim75.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 $0.980\sim0.999$ 를 나타냈다. 4시간 이후의 홍수량을 예측한 결과의 RMSE는 $4.8\sim162.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 $0.927\sim0.999$ 를 나타냈다. 6시간 이후의 홍수량을 예측한 결과의 RMSE는 $6.3\sim290.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 $0.63\sim290.5, 0.909\sim0.999$ 를 나타냈다. 이는 예측시간이 증가할수록 예측결

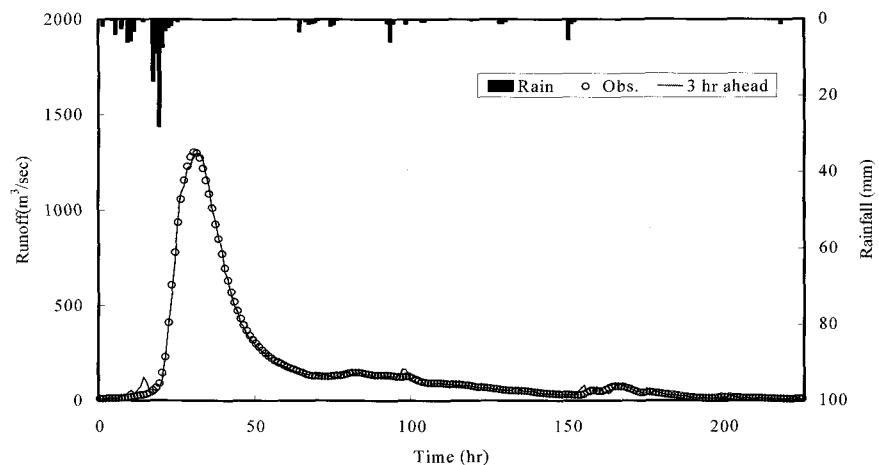
과의 정확도가 떨어진다는 것을 나타낸다. Fig. 3은 3시간 이후의 예측결과와 6시간 이후의 예측결과를 실측자료와 도식적으로 비교하여 나타낸 것이다. 두 가지 모두 실측자료와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 예측시간이 짧은 경우의 예측결과가 실측자료에 더 근접한 결과를 나타내고 있다.

4.4 모형의 검정

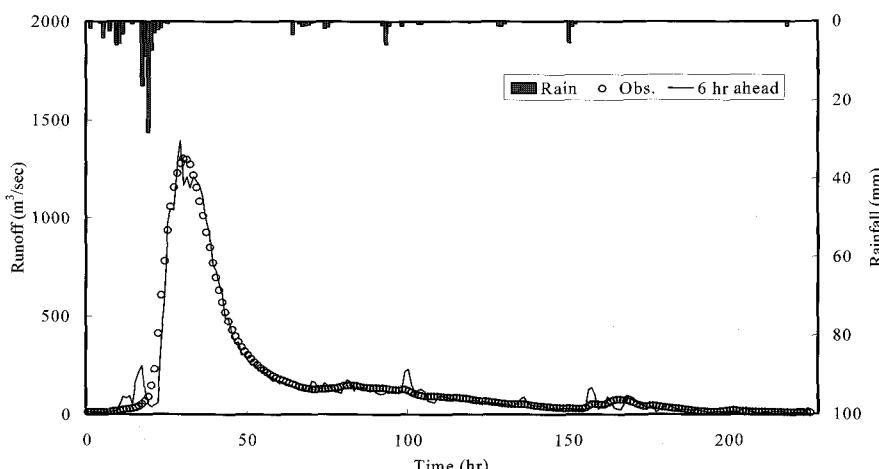
모형의 검정은 2개의 강우사상을 사용하여 시행하였다. 선정된 강우사상의 첨두유량은 $1,924\sim2,332 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 모형의 보정에 사용되지 않은 크기의 첨두유량을 갖는 강우사상을 선정하였다. Table 4는 예측시간별 검정결과를 나타낸 것이다. 2시간 이후의 홍수량을 예측한 결과의 RMSE는 $20.6\sim28.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며,

Table 3. Statistical results between observed and forecast runoff for one to six hours of lead-time in calibration

Storm event	2 hr		4 hr		6 hr	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
ST980928	75.7	0.996	162.7	0.983	290.5	0.948
ST990701	49.3	0.980	96.0	0.927	107.6	0.909
ST990919	25.0	0.998	46.2	0.992	69.6	0.983
ST010711	9.1	0.999	23.3	0.993	49.5	0.969
ST010914	3.1	0.999	4.8	0.999	6.3	0.999



(a) 3 hours of lead-time



(b) 6 hours of lead-time

Fig. 3. Hydrographs of observed and forecast runoff for three and six hours of lead-time at Naju streamflow gauge station in calibration

Table 4. Statistical values between observed and forecast runoff for two to six hours of lead-time in validation

Storm event	2 hr		4 hr		6 hr	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
ST000714	28.1	0.998	81.4	0.982	147.4	0.940
ST000816	20.6	0.997	47.7	0.985	75.7	0.962

R^2 는 0.997~0.998를 나타냈다. 4시간 이후의 홍수량을 예측한 결과의 RMSE는 $47.7\sim81.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 0.982~0.985를 나타냈다. 6시간 이후의 홍수량을 예측한 결과의 RMSE는 $75.7\sim147.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 0.940~0.962를 나타냈다. 이는 예측시간이 증가할수록 예측결과의 정확도가 떨어진다는 것을 나타낸다. Table 5는 예측시간별 첨두유량의 예측값과 실측값의 상대오차를 비교한 것이다. 두 강우사상 모두 예측시간이 증가할수록 첨두유량이 감소하는 경향을 보이고 있으며 실측자료와의 상대오차가 커지는 경향을 나

타내고 있다. Fig. 4는 3시간 이후의 예측결과와 6시간 이후의 예측결과를 실측자료와 도식적으로 비교하여 나타낸 것이다. 두 가지 모두 실측자료와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 예측시간이 짧은 경우의 예측결과가 실측자료에 더 근접한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 두 강우사상에서 모두 나타나고 있다. 이는 예측시간이 증가함에 따라 강우량의 영향이 없어지기 때문이며, 본 모형에서는 미래의 강우량은 고려하지 않는다. 따라서 보다 정확하고 합리적으로 장래 홍수량을 예측하기 위해서는 강우량 예측이 필요하다고 판단된다.

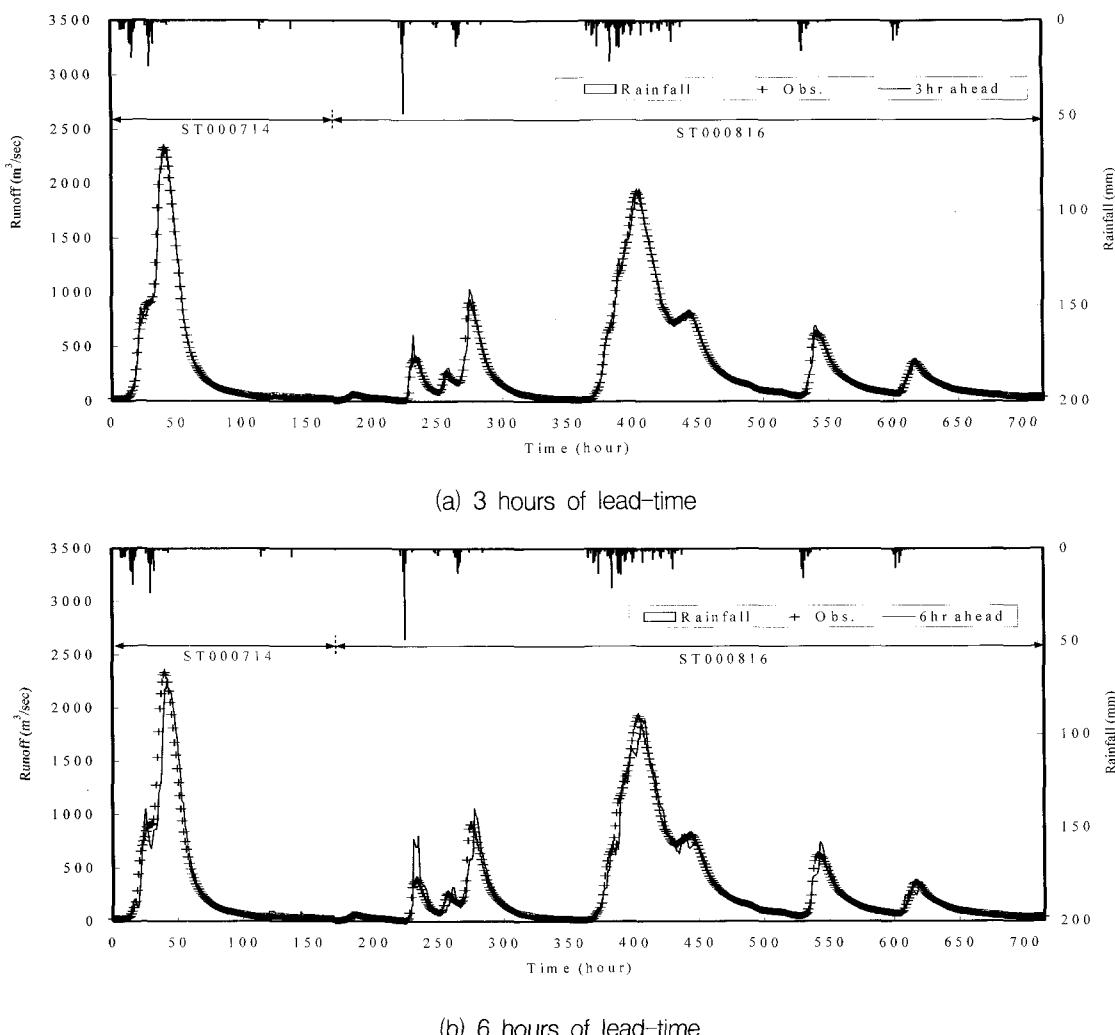


Fig. 4. Hydrographs of observed and forecast runoff for three and six hours of lead-time at Naju streamflow gauge station in validation

Table 5. Comparison of peak flow of observed and forecast runoff with lead-time in validation

Storm events	Obs. (m^3/sec)	2 hr		4 hr		6 hr	
		Sim. (m^3/sec)	RE (%)	Sim. (m^3/sec)	RE (%)	Value (m^3/sec)	RE (%)
ST000714	2,331.8	2,349.2	0.75	2,317.7	-0.60	2,281.5	-2.15
ST000816	1,924.0	1,955.4	1.63	1,941.4	0.90	1,893.4	-1.59

5. 실시간 유입량 예측

댐수호 실시간 유입량 예측에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 나주수위관측소 지점의 홍수량 실시간 예측에 모형을 적용하였다. 유입 홍수량을 실시간으로 예측하기 위해서는 대상유역의 강우자료와 하천의 수위 자료를 실시간으로 수집해야 한다. 대상지점의 수문자료는 실시간으로 측정되어 전기적 신호를 통하여 영산강 하구둑 관리소에 전송되며, 자료는 실시간으로 보완 및 보충된다. 이들 자료를 이용하여 상류유역의 홍수량을 실시간으로 예측한다. Fig. 5는 2000년 9월 12일에 발생한 강우에 대하여 실시간으로 홍수량을 예측한 결과를 실측자료와 비교한 것이다. 예측단계는 유출이 발생하여 수위가 상승하는 시기, 첨두유량 발생시기, 수위가 하강하는 시기로 구분하였다. Fig. 5와 같이 각 시기

별로 실측자료와 예측결과는 차이를 나타내고 있으며, 예측시간이 증가할수록 예측결과의 정확도가 낮아지는 것을 알 수 있다. Table 6은 예측단계별 예측결과와 실측자료간의 상대오차를 나타낸 것이다. 하천수위가 계속 상승하는 시기의 예측결과는 예측시간이 증가할수록 실측값보다 작아지는 경향을 나타냈으며, 상대오차는 -23.4~1.0 %를 나타냈다. 하천수위가 계속 하강하는 시기의 예측결과는 예측시간이 증가할수록 실측값 보다 커지는 경향을 나타냈으며, 상대오차는 0.7~14.3 %를 나타냈다. 이와 다르게 유출이 첨두에 도달한 시기의 예측결과는 실측자료와 큰 상대오차를 나타내지 않았다. 따라서 본 연구에서 제안된 모형은 영산호의 실시간 유입량을 예측하는데 적절하며, 특히, 나주 수위관측소의 첨두 유출량을 실측치와 가깝게 예측한 결과를 나타냈다.

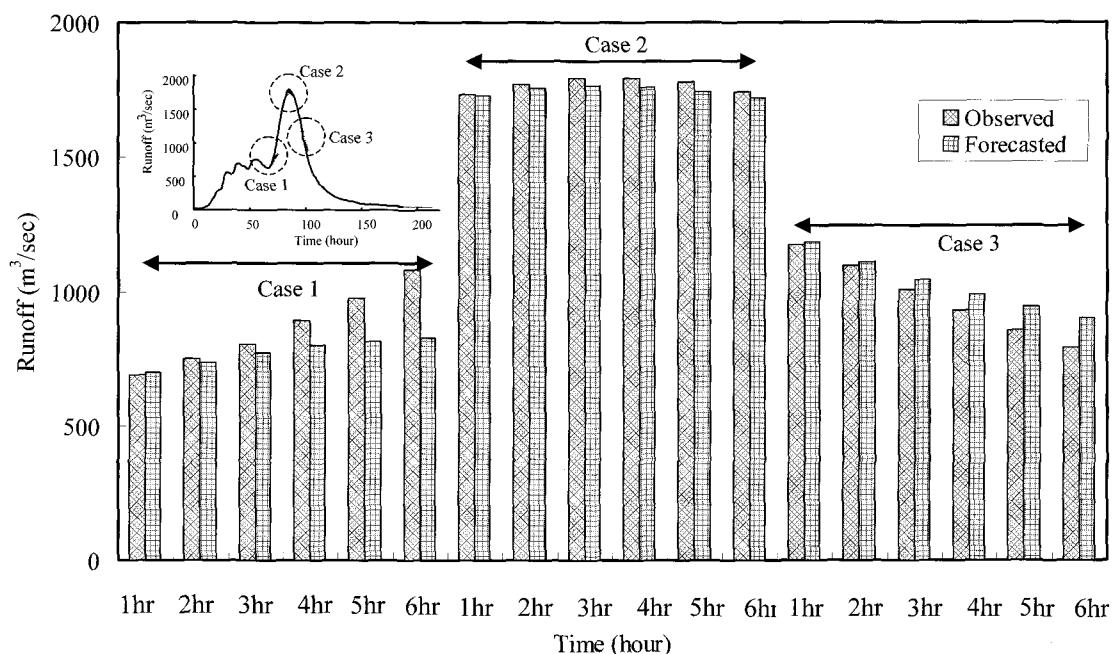


Fig. 5. Comparison of observed and forecast runoff for one and six hours of lead-time with runoff stages such as rising, peak, and falling

Table 6. Relative error between observed and simulated values with lead-time in forecasting runoff in real time

Lead-time (hr)	Case 1* (%)	Case 2** (%)	Case 3*** (%)
1	1.0	-0.3	0.7
2	-1.7	-0.8	1.1
3	-4.1	-1.6	3.6
4	-10.7	-2.0	6.6
5	-16.5	-2.0	10.2
6	-23.4	-1.2	14.3

* : rising stage, **: peak stage, ***: falling stage

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 담수호의 홍수관리를 위해서 홍수시 상류유입량을 실시간으로 예측하기 위한 Grey 홍수유출모형을 개발하여 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 모형은 Grey 시스템이론에 근거하였으며, 지배 방정식의 차수는 유역의 유출특성을 반영하여 결정하였다. 모형의 매개변수는 전역최적화기법인 Annealing-Simplex(A-S)법 이용하여 추정하였다. 개발된 모형을 영산강 하구둑의 홍수관리를 위한 주관측소인 나주수위 관측소의 홍수량 예측에 적용하여 홍수시 담수호의 실시간 유입량 예측에 대한 적용성을 평가하였다.

제안된 모형의 차수는 실측자료와 모의결과를 비교하여 보다 양호한 결과를 나타내는 것으로 선정하였다. 대상유역의 유역면적이 크고, 하도길이가 길어서 도달 시간이 길고, 강우에 대한 유출반응이 다소 느려서 본 연구에서는 5차 모형을 선정하였다. 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 5개 강우사상을 이용하였으며, 다양한 유출형태가 포함되도록 하였다. 모형의 보정시 예측결과와 실측치간의 RMSE는 $3.1\sim290.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 $0.909\sim0.999$ 를 나타냈다. 모형의 검정시 예측결과와 실측치간의 RMSE는 $20.6\sim147.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈으며, R^2 는 $0.940\sim0.998$ 을 나타냈다. 이는 모형의 보정이 만족스럽게 이뤄졌다는 것을 나타내며, 검정결과도 실측치와 유사하다는 것을 나타냈다.

매개변수가 추정된 모형을 이용하여 담수호의 유입량을 하천수위에 따라 예측한 결과, 하천수위가 상승할 경우와 하강할 경우의 예측 홍수량은 예측시간이 증가 할수록 커지는 경향을 나타냈다. 또한, 하천수위가 첨두에 가까운 시기의 홍수량은 예측시간과 관계없이 실측자료와 비슷한 결과를 나타냈다. 이상의 결과는 Grey 홍수유출모형을 홍수시 영산호 상류 유입량을 실시간으로 정확하게 예측하는데 적용할 수 있음을 나타낸다.

참 고 문 헌

- 강민구, 박승우, 임상준, 김현준 (2002). 전역최적화 기법을 이용한 강우-유출모형의 매개변수 자동보정, **한국수자원학회 논문집**, 제 35권, 제 5호, pp. 541-552.
- 김성원, 호세 살라스 (2000). 하천수위표 지점에서 신경망기법을 이용한 홍수위의 예측, **한국수자원학회 논문집**, 제 33권, 제 2호, pp. 247-262.
- 심순보, 김만식 (1999). 유입량 예측을 위한 신경망 모형과 저류함수 모형의 비교연구, **대한토목학회 논**

문집

이재웅, 정재욱, 윤세의 (2001). 영산강 유역의 홍수피해 분석, **2001년 대한토목학회 정기 학술발표회 논문집**.

Campolo, M., Andreussi P., and Soldati A. (1999). River flood forecasting with a neural network model, *Water Resour. Res.*, Vol.35, No. 4, pp. 1191-1197.

Chun B. H. (2004). Evaluation of disaster risk of storms and measures to prevent them, *International Symposium on Living with Risk: Dealing with Typhoon-related Disaster as part of Integrated Water Resources Management*, pp. 10-23.

Deng, J. (1989). Introduction to grey system theory, *J. Grey System*. Vol. 1, No. 1, pp. 1-24.

Deng, J. (1982). Control problems of grey systems, *Systems and Control Letters*, Vol.5, pp. 1-24.

Hsu, L. C. (2003). Applying the grey prediction model to the global integrated circuit Industry, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 70, pp. 563-574.

Imrie, C. E., Durucan S., and Korre A. (2000). River flow using artificial neural networks: Generalization beyond the calibration range, *J. Hydrol.*, Vol. 233, pp. 138-153.

Kang, M. S. and Park S. W. (2003). Short-term flood forecasting using artificial neural networks, *J. The Korea Society of Agricultural Engineers*, No. 45, Vol. 2, pp. 45-57. (In Korean)

Kim, G. S. and Lee J. S. (2002). Flash flood forecasting using remotely sensed information and neural networks part II: Model application, *Water Eng. Res.*, Vol.3, No. 2, pp. 123-134.

Laio F., Porporato A., Revelli R., and Ridolfi L. (2003). "A comparison of nonlinear flood forecasting methods, *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 5, pp. 21-24.

Lee R. H and Wang R. Y. (1998). Parameter estimation with colored noise effect for differential hydrological grey model, *J. Hydrol.*, pp. 1-15.

Pan L. and Wu L. (1998). A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters : Annealing-simplex method, *Water Resour. Res.*, Vol. 34, No. 9, 2261-2269.

- Yapo, P., Sorooshian S., and Gupta V. (1993). A Markov-chain flow model for forecasting, *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 7, pp. 2427-2436.
- Yu, P. S., Chen C. J., and Chen S. J. (2000). Application of gray and fuzzy methods for rainfall forecasting, *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 5, No. 4, pp. 339-345.
- Yu, P. S., Chen C. J., Chen S. J., and Lin S. C.(2001). Application of grey model toward runoff forecasting, *J. The American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 1, pp. 151-166.
- Xia J. (1989). Research and application of grey system theory to hydrology, *J. Grey System*, Vol. 1, pp. 43-52.
- Zhang, B. and Govindaraju R. S. (2000). Prediction of watershed runoff using Bayesian concepts and modular neural networks, *Water Resour. Res.*, Vol. 36, No. 3, pp. 753-762.

(논문번호:05-36/접수:2005.02.28/심사완료:2005.10.21)