

Grey 모형을 이용한 다목적댐의 유입 홍수량과 하류 하천 홍수량 실시간 예측

Real-Time Forecasting of Flood Discharges Upstream and Downstream of a Multipurpose Dam Using Grey Models

강 민 구* / Cai, Ximing** / 고 덕 구***

Kang, Min Goo / Cai, Ximing / Koh, Deuk Koo

Abstract

To efficiently carry out the flood management of a multipurpose dam, two flood forecasting models are developed, each of which has the capabilities of forecasting upstream inflows and flood discharges downstream of a dam, respectively. The models are calibrated, validated, and evaluated by comparison of the observed and the runoff forecasts upstream and downstream of Namgang Dam. The upstream inflow forecasting model is based on the Grey system theory and employs the sixth order differential equation. By comparing the inflows forecasted by the models calibrated using different data sets with the observed in validation, the most appropriate model is determined. To forecast flood discharges downstream of a dam, a Grey model is integrated with a modified Muskingum flow routing model. A comparison of the observed and the forecasted values in validation reveals that the model can provide good forecasts for the dam's flood management. The applications of the two models to forecasting floods in real situations show that they provide reasonable results. In addition, it is revealed that to enhance the prediction accuracy, the models are necessary to be calibrated and applied considering runoff stages; the rising, peak, and falling stages.

keywords : Real-time flood forecasting, Grey model, Modified Muskingum flow routing model, Namgang dam

요 지

본 연구에서는 다목적댐의 효율적인 홍수관리와 조기 홍수 정보시스템의 정확성을 향상시키기 위하여 두 가지 모형이 제안되었다. 두 모형은 상류 유입 홍수량과 하류 하천의 홍수량을 실시간으로 예측할 수 있는 능력을 각각 가지고 있다. 이들 모형은 남강댐 상류와 하류 홍수량의 실측치와 모의치를 비교하여 보정 및 검증되었으며, 실제 상황에서 모형의 홍수량 예측 능력이 평가되었다. 상류 유입량 예측 모형은 Grey 시스템 이론에 근거하였으며, 모형의 예측능력을 고려하여 6차 모형을 선정하였다. 서로 다른 자료 세트를 사용하여 보정된 모형들을 사용하여 예측한 홍

* 교신저자, 미래자원연구원, 선임연구원

Corresponding Author, Senior Researcher, Future Resources Institute, Woolim Lions Valley A-1306, 371-28, Gasan-dong, Keumcheon-gu, Seoul, South Korea, 153-786
(e-mail: kmg901@hanmail.net)

** 미국 일리노이즈대학교 토목환경공학과, 조교수

Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, IL 61801-2352

*** 한국수자원공사 수자원연구원, 물정보화연구소장

Director, Hydroinformatics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(K-WATER), Daejeon, South Korea, 305-730

수량과 실측자료를 비교하여 가장 적절한 모형이 선정되었으며, 검정 결과를 검토한 결과 선정된 모형이 양호한 예측결과를 제시하는 것으로 나타났다. 댐 하류 하천 홍수량 예측 모형은 Grey 모형과 수정 Muskingum 홍수 추적 모형을 병합하여 구성되었으며, 보정 및 검정을 통해서 모형의 예측 능력이 평가되었다. 제안된 모형들을 실시간 홍수량 예측에 적용한 결과, 비교적 양호한 예측결과를 나타냈다. 또한, 모형의 정확도를 향상시키기 위해서는 유출 단계를 고려한 모형의 보정 및 적용이 필요하다는 것이 밝혀졌다.

핵심용어 : 실시간 홍수량 예측, Grey 모형, 수정 Muskingum 홍수 추적 모형, 남강댐

1. 서 론

홍수 피해를 저감하기 위해서는 조기에 홍수 위험을 감지 및 예측하고 전파하여 대비할 수 있도록 하는 조기 경보 시스템(Early Warning System)이 필요하다. 조기 경보는 위험도 사정, 경보 및 전파, 대비 등으로 구성된다(Knight and Shamseldin, 2006). 홍수 위험을 감지하기 위해서 여러 가지 관측요소들의 자료를 수집하고 이들의 위험도를 분석한다. 또한, 미래 상황을 예측하고 시스템을 분석하여 홍수 위험도를 사정한다. 위험도 사정 결과를 바탕으로 홍수 관리 의사결정을 실시하며 홍수 위험도가 관리 기준을 상회하면 홍수 경보를 시설물 관리자에게 알리고 대중 매체를 통하여 전파한다. 홍수 경보가 전파되면 피해 예상지역의 지역민들은 안전한 곳으로 대피하며, 댐이나 저수지와 같은 홍수 조절 시설물 관리자들은 홍수에 대비한다(International Strategy for Disaster Reduction, 2004 and 2007).

일반적으로 조기 경보의 실패는 전파와 대비 단계에서 발생한다. 예를 들어, 2005년 미국의 뉴올린즈에서 714 명의 인명 피해와 280억 달러의 재산 피해를 발생시켰던 허리케인 카트리나에 의한 피해는 홍수 위험과 관련된 정보가 대중이나 관리자들에게 효과적으로 전달되지 못했기 때문에 가중되었다(US Army Corps of Engineers, 2006). 따라서 홍수 피해를 저감하기 위해서는 비구조적인 대책의 일환으로 조기 홍수 경보시스템이 필요하다. 다목적댐 홍수관리는 유입 홍수를 저류한 후 하류 하천의 상태를 고려하면서 방류하는 것이며, 하류 하천의 홍수 관리는 하천수위를 고려하여 주민들에게 홍수 위험을 예·경보하고 홍수에 대응하는 것이다. 이와 같이 홍수에 대비하고 홍수 피해를 효과적으로 저감하기 위해서는 몇 시간 후의 홍수량을 정확하게 예측하는 것이 필요하며, 이는 조기 홍수 경보시스템의 필수요소 중의 하나이다.

홍수량을 예측하는 방법은 경험적인 방법과 모형에 의한 방법으로 구분할 수 있다. 경험적인 방법은 과거 발생한 폭우사상과 홍수량과의 관계를 이용해서 회귀식

이나 순간단위도를 만들어 특정 강우에 대한 홍수량을 예측하는 방법이다. 모형에 의한 방법은 총괄형 강우-유출 모형, 분포형 모형, 추계학적 모형 등과 같이 강우와 유역 사이의 비선형적인 관계를 수학적 방법으로 해석하여 홍수량을 예측하는 방법이다(Yapo *et al.*, 1993; 심순보와 김만식, 1999; 강부식 등, 2005). 그러나 유역의 물리적 특성과 기상요소들이 비선형적으로 유출에 영향을 미치기 때문에 이들 모형으로 홍수량을 실시간으로 정확히 예측하는 데는 많은 어려움이 있다. 최근에는 이러한 비선형성을 고려하는 신경망이론을 이용한 홍수량 예측모형들이 많이 개발되고 있으며, 다른 방법과 예측능력을 비교하는 연구가 많이 진행되고 있다(Imrie *et al.*, 2000; Kim and Lee, 2002; Laio *et al.*, 2003). 국내에서는 김성원과 호세(2000)가 신경망기법을 이용하여 하천 수위표의 수위를 예측한 바가 있으며, 최근에는 전계원과 안상진(2004)이 신경망 모형을 이용하여 다양한 사용자들이 Web상에서 홍수량을 예측할 수 있는 시스템을 개발한 사례가 있다.

신경망 모형은 단순하면서 예측 정확성이 다른 모형들 보다 뛰어나다는 평가를 받고 있으나, 학습을 위한 과거 자료가 많이 필요하다는 단점이 있다. 최근에는 예측에 필요한 자료가 많이 필요로 하지 않는 Grey 시스템 이론에 기반한 홍수량 예측 기법에 대한 연구가 진행되고 있다(Yu *et al.*, 2001; Yu and Chen, 2005; 강민구 등, 2005). Grey 시스템 이론은 시스템에 관련된 정보가 모호하며, 예측을 위해 필요한 과거자료의 수가 적은 시스템의 미래 상황을 예측하기 위하여 제안되었다(Yu *et al.*, 2000; Hsu, 2003). Yu *et al.*(2001)은 Grey 시스템 이론을 강우량과 홍수량의 실시간 예측에 적용하여 예측결과를 실측자료와 비교하여 적용성을 평가한 바가 있다. Yu and Chen(2005)은 Grey 강우량 예측 모형, Grey 홍수량 예측 모형, 수정 Muskingum 흐름 추적 모형으로 구성된 실시간 홍수량 예측 시스템을 개발하여 적용성을 평가한 바가 있다. 강민구 등(2005)은 Grey 모형을 담수호의 실시간 유입 홍수량을 예측하는데 적용한 바가 있으며, Kang *et al.*(2006)은 신경망 모

형과 Grey 모형의 예측능력을 비교한 바가 있다.

본 연구에서는 다목적댐의 홍수관리를 위해서 홍수 시 댐 상류 유입량과 댐 방류량의 영향을 받는 하류 하천 홍수 조절 지점의 홍수량을 실시간으로 예측하기 위한 Grey 홍수량 예측 모형을 각각 개발하여 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 Grey 홍수량 예측 모형은 Grey 시스템 이론에 근거하였으며, 모형의 매개변수는 전역 최적화기법인 Annealing-Simplex법을 이용하여 추정하였다. 개발된 모형을 남강댐의 홍수관리를 위한 상류 유입량 예측과 남강댐의 하류에 위치한 정암 수위관측소의 홍수량 예측에 적용하여 다목적댐 홍수관리를 위한 실시간 홍수량 예측에 대한 모형의 적용성을 평가하였다.

2. 실시간 홍수량 예측 모형의 구성 및 매개변수 최적화

2.1 지배방정식

Grey 시스템 이론은 시스템의 특성이 불명확하고 자료가 제한된 경우에 시스템의 미래를 예측하기 위하여 사용되어 왔다(Deng, 1989; Hsu, 2003; 강민구 등, 2005). Grey 모형의 지배방정식을 만들기 위해서는 해당 시스템이나 자료의 특성을 고려하여 적절한 차수의 미분방정식을 수립한다. 시스템의 관측자료는 자료의 무작위성을 줄이기 위하여 누가발생연산(Accumulated Generating Operation, AGO)을 통하여 새로운 시계열로 재생성된다.

관측 자료의 시계열이 $Q^{(0)}(t) = [q^{(0)}(1), q^{(0)}(2), \dots, q^{(0)}(n)]$ 일 경우, 1차 AGO를 통하여 생성되는 시계열, AGO $Q^{(1)}(t)$ 는 Eq. (1)과 같다(Deng, 1989).

$$Q^{(1)}(t) = AGO Q^{(0)}(t) = \sum_{i=1}^n q^{(0)}(t), \quad (1)$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, n \in N$$

Grey 수문 모형의 유역유출에 대한 미분방정식은 Eq. (2)와 같다(Xia, 1989; Yu *et al.*, 2001).

$$\frac{d^n Q^{(k)}(t)}{dt^n} + \otimes_{a_1} \frac{d^{n-1} Q^{(k)}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \otimes_{a_n} Q^{(k)}(t) \quad (2)$$

$$= \otimes_{b_0} \frac{d^n R^{(k)}(t)}{dt^n} + \otimes_{b_1} \frac{d^{n-1} R^{(k)}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \otimes_{b_m} R^{(k)}(t)$$

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 나타

내고, $\otimes_{a_i} (i=1,2,\dots,n)$ 와 $\otimes_{b_j} (j=1,2,\dots,m)$ 는 각각 Grey 모형의 매개변수를 나타낸다.

2.2 실시간 홍수량 예측 모형

Eq. (2)와 같은 Grey 모형의 1차 미분방정식의 해는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q^{(1)}(t) = \otimes_{c_1} Q^{(1)}(t-1) + \otimes_{c_2} R^{(1)}(t-1) + \otimes_{c_3} R^{(1)}(t-2) \quad (3)$$

여기서, \otimes_{c_1} , \otimes_{c_2} , \otimes_{c_3} 은 Grey 시스템 매개변수이며, 모형의 차수가 증가하면 모형의 매개변수의 수도 증가하며, 매개변수의 구성도 복잡해진다.

댐 하류 하천의 홍수량은 댐 방류량의 영향을 받으므로 이곳의 홍수량을 예측하기 위해서는 댐 방류량을 고려해야 한다. 댐 하류 하천의 홍수조절 지점의 홍수량은 Eq. (4)와 같이 Muskingum 홍수 추적 모형을 변형한 모형으로 예측하며, 강우량은 유역 우량관측소들의 우량에 Thiessen법을 적용하여 산정한 평균 강우량을 사용한다.

$$Q_{down}^{(1)}(t+1) = \otimes_{d1} Re^{(1)}(t+1) + \otimes_{d2} Re^{(1)}(t) \quad (4)$$

$$+ \otimes_{d3} Re^{(1)}(t-1) + Q_{up}^{(1)}(t+1)$$

여기서, $Q_{down}^{(1)}(t+1)$ 는 시간 t+1에서 예측지점 유출량 자료의 1차 AGO 시계열, $Re^{(1)}(t+1)$ 는 시간 t+1에서 방류량 자료의 1차 AGO 시계열, $Q_{up}^{(1)}(t+1)$ 는 Grey 홍수 예측 모형을 사용하여 모의한 상류유역 홍수량 자료의 1차 AGO 시계열, \otimes_{d1} , \otimes_{d2} , \otimes_{d3} 은 모형의 매개변수를 나타낸다.

2.3 매개변수 최적화

모형의 매개변수 한계는 Eq. (5)와 같이 상한값과 하한값으로 나타낼 수 있다.

$$\otimes x = [\underline{\otimes} x, \overline{\otimes} x] = [x' \in x \mid \underline{\otimes} x \leq x' \leq \overline{\otimes} x] \quad (5)$$

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. Eq. (5)와 같은 매개변수의 구간을 설정한 후, 설정된 구간 내에서 최적화 기법을 이용하여 매개변수를 추정한다.

홍수량 예측 모형의 매개변수 추정은 전역 최적화 기법 중의 하나인 Annealing-Simplex(A-S)법을 사용

하였다. 이 기법은 전역 탐색기법 중 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 다양한 형태로 개발되어 적용이 되고 있다(강민구 등, 2002). 본 연구에서는 Pan and Wu(1998)가 제안한 A-S법을 홍수량 예측 모형의 매개변수 최적화에 적용하였다. 강우-유출모형의 매개변수 변화에 따른 특정 통계치의 변화 형상은 매우 복잡하므로 지역해로부터 벗어나기 위해서는 몇 번의 가열냉각 과정(annealing process)이 필요하다. 본 연구에서는 강민구 등(2002)의 연구에서 적용한 것과 같이 연속적인 가열냉각과정이 동일한 값을 찾거나 두 점간의 거리가 10-5 보다 작은 경우에 전역 최적해를 탐색한 것으로 간주하여 탐색을 중단하도록 하였다.

매개변수의 자동보정을 위해서는 적절한 목적함수를 선정해야 하며, 본 연구에서는 Eq. (6)과 같은 HMLE (Heteroscedastic Maximum Likelihood Estimator)를 목적함수로 사용하였다. HMLE는 실측치와 모의치 사이의 오차가 상관성이 없고 균일하지 않은 경우에 적용이 되며, 하천유출량 자료에 나타나는 것처럼 오차분산이 유량크기에 따라 변한다는 가정을 한다. 또한, HMLE는 RMSE(Root Mean Squared Error)와 달리 유량의 크기와 관계없이 전기간에 걸쳐 만족할 만한 보정 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(강민구 등, 2002).

$$\underset{\theta, \lambda}{\text{Minimize}} \quad \text{HMLE}(\theta, \lambda) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i(\lambda) \{q_i^{\sim}(\theta) - q_i^{\text{obs}}\}^2}{\left\{ \prod_{i=1}^n w_i(\lambda) \right\}^{1/n}} \quad (6)$$

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

3. 모형의 적용

3.1 대상 댐 및 하천 유량 예측 지점

댐의 홍수관리를 위한 유입 홍수량 예측에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위한 대상 댐으로 낙동강 수계에 위치한 남강댐을 선정하였다. 또한, 댐 방류량의 영향을 받는 하류 하천의 홍수량을 예측하기 위하여 남강댐 하류에 위치한 정암수위관측소를 대상 지점으로 선정하였다. 남강댐의 유역면적은 2,285.0 km²이며, 유역의 유로연장은 110.84 km, 유역경사는 35.36 %이다. Fig. 1과 같이 남강댐은 낙동강 본류에 유입하는 남강의 상류에 위치하고 있으며, 낙동강 홍수 조절에 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 Eq. (7)과 같은 홍수량 예

측 모형을 사용하였다. Eq. (7)은 1시간 후의 홍수량을 예측하기 위한 모형의 지배방정식을 나타낸 것이며, 강우량은 댐 상류 유역의 평균 강우량 자료를 사용한다.

$$\begin{aligned} Q^{(1)}(t+1) = & \otimes_{c_1} Q^{(1)}(t) + \otimes_{c_2} Q^{(1)}(t-1) + \otimes_{c_3} Q^{(1)}(t-2) \\ & + \otimes_{c_4} Q^{(1)}(t-3) + \otimes_{c_5} Q^{(1)}(t-4) + \otimes_{c_6} Q^{(1)}(t-5) \\ & + \otimes_{c_7} Q^{(1)}(t-6) + \otimes_{c_8} R^{(1)}(t) + \otimes_{c_9} R^{(1)}(t-1) \\ & + \otimes_{c_{10}} R^{(1)}(t-2) + \otimes_{c_{11}} R^{(1)}(t-3) + \otimes_{c_{12}} R^{(1)}(t-4) \\ & + \otimes_{c_{13}} R^{(1)}(t-5) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $Q^{(1)}(t)$ 는 시간 t 에서 과거 유출자료의 1차 AGO 시계열, $R^{(1)}(t)$ 는 시간 t 에서 과거 강우자료의 1차 AGO 시계열, $\otimes_{c_1}, \dots, \otimes_{c_{13}}$ 은 모형의 매개변수를 나타낸다. 모형에 사용된 남강댐 상류 유역의 평균 우량은 Thiessen 면적가중법을 적용하여 산정하며, 본 연구에서는 한국수자원공사에서 관리하는 댐 평균우량 자료를 사용하였다. 남강댐 하류에 위치한 남강 유역의 범위는 남강댐에서부터 낙동강 본류와 합류하는 지점까지이다. 이 유역의 면적은 1,185.1 km²이며, 유역의 평균 경사는 28.68 %이다. 정암수위관측소는 Fig. 2와 같이 남강댐 하류에 위치하고 있다. 유역면적은 3,283.0 km²이며, 남강댐 상류 유역을 제외한 유역면적은 998.0 km²이다. 남강댐 하류 하천의 홍수량은 남강댐 방류량의 영향을 받으므로 정암수위관측소의 홍수량을 예측하기 위해서는 이를 고려해야 한다. 정암수위관측소의 상류 유역의 홍수량은 Eq. (4)와 같은 모형을 사용하며, 강우량은 진양, 정암, 칠곡 강우관측소의 강우량에 Thiessen법을 적용하여 산정한 평균 강우량을 사용하였다.

3.2 댐 유입량 및 하천 홍수량 자료

남강댐 유입 홍수량 예측모형의 매개변수 보정과 검정은 Table 1와 같이 각각 3개 자료를 사용하여 실시하였다. 모형의 보정을 위해 선정된 홍수사상의 유출시간은 101~145 시간, 첨두유량은 1,549.2~12,081.7 m³/sec의 범위를 나타낸다. 모형의 검정에 사용된 홍수사상의 유출시간은 90~239 시간, 첨두유량은 2,506.3~6,069.5 m³/sec의 범위를 나타낸다.

남강댐 하류의 정암수위관측소 홍수량 예측 모형의 보정과 검정은 Table 2와 같이 각각 2개 자료를 사용하여 실시하였다. 모형의 보정을 위해서 사용된 홍수사상의 유출시간은 190~287 시간, 첨두유량은 807.5~1,317.4 m³/sec의 범위를 나타낸다. 모형의 검정에는 사용된 홍수사상의 유출시간은 각각 164 시간, 첨두유량은 929.7~1,518.6 m³/sec의 범위를 나타낸다.

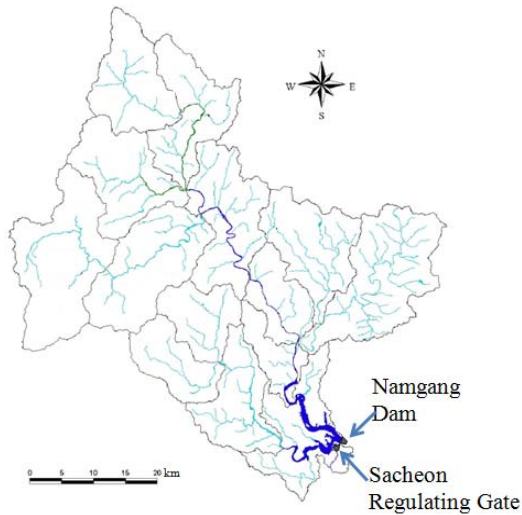


Fig. 1. Boundary Map of the Watershed Upstream of Namgang Dam

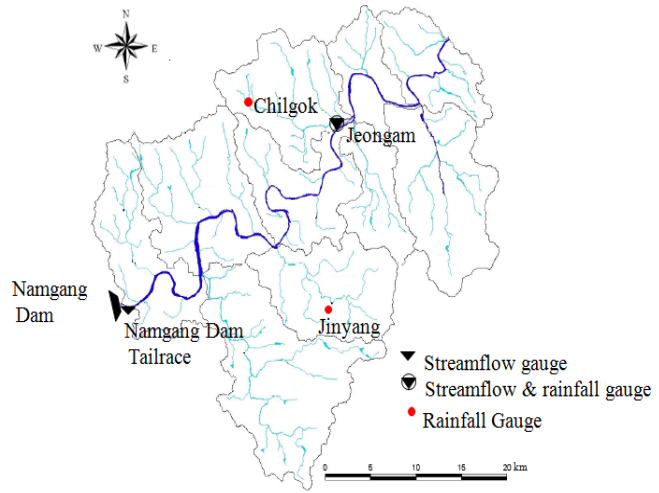


Fig. 2. Boundary Map of the Watershed Downstream of Namgang Dam and Gauge Stations

Table 1. Selected Storm Events for Calibration and Validation of Models for Forecasting Inflows of Namgang Dam

Storm event	Date	Runoff duration (hr)	Peak flow (m ³ /sec)	Remarks
HY0203	May 29, 2003	101	3,778.6	Calibration
HY0403	Agu. 15, 2003	145	1,549.2	Calibration
HY0503	Sep. 10, 2003	120	12,081.7	Calibration
HY0104	Aug. 18, 2004	239	6,069.5	Validation
HY0204	Jun. 17, 2004	164	2,506.3	Validation
HY0304	Jul. 23, 2004	90	2,996.1	Validation

Table 2. Selected Storm Events for Calibration and Validation of Models for Forecasting Discharges of the Jeongam Streamflow Gauge Station

Storm event	Date	Runoff duration (hr)	Peak flow (m ³ /sec)	Remarks
JA0403	Aug. 15, 2003	287	807.5	Calibration
JA0503	Jul. 10, 2003	190	1,317.4	Calibration
JA0104	Jun. 17, 2004	164	929.7	Validation
JA0204	Aug. 18, 2004	164	1,518.6	Validation

3.3 댐 유입 홍수량 예측 모형의 보정 및 검정

(1) 모형의 차수 결정

Grey 유출 모형을 수립하기 위해서는 유역의 유출특성을 고려하여 지배방정식의 차수를 선정해야한다. 유역의 유출이 강우에 대하여 빠르게 반응하고 도달시간이 짧은 경우에는 낮은 차수의 지배방정식을 선정하고, 그 반대의 경우에는 높은 차수의 지배방정식을 사용한다(Yu *et al.*, 2001). 일반적으로 모형의 차수는 실측자료와 예측결과간의 통계치를 비교하여 보다 양호한 결

과를 나타내는 것으로 선정된다(강민구 등, 2005). Eq. (7)은 댐 상류 유입 홍수량을 예측하기 위하여 개발된 6차 Grey 모형이다. 댐 상류유역은 유역면적이 넓어 강우량에 대한 유역의 반응이 다소 느리다는 점을 반영한 것이다. Fig. 3은 모형의 차수에 따른 보정과 검정결과를 상관계수(r)과 RMSE로 비교한 것이다. 모형의 예측 결과는 6차 Grey 모형이 가장 양호한 값을 나타냈으며, 차수가 6차에 가까워질수록 모형의 예측 능력이 크게 향상되지 않는 것을 알 수 있다.

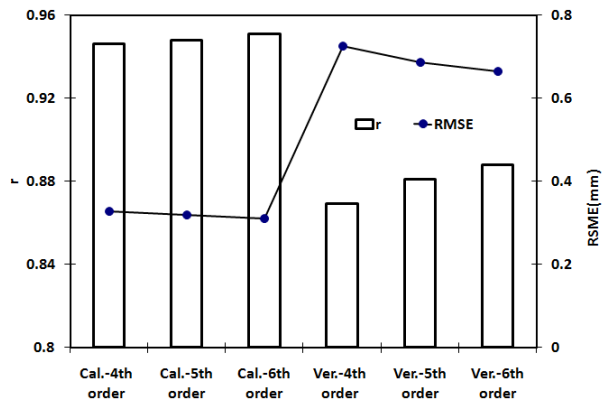


Fig. 3. Comparison of Correlation Coefficients(r) and RMSE Values in Calibration and Validation According to Orders of Models

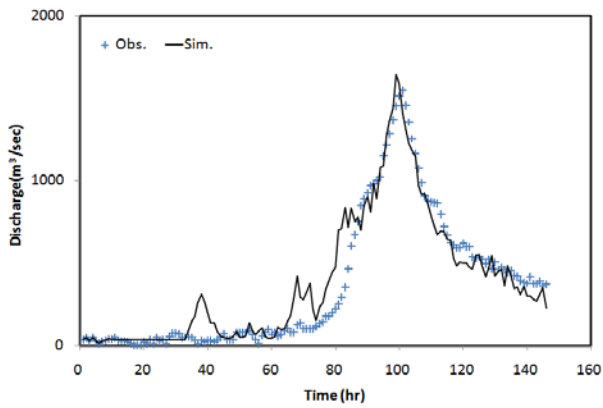
(2) 모형의 보정

남강댐 유입 홍수량 예측 모형을 보정하기 위하여 2003년 홍수사상인 HY0203, HY0403, HY0503을 단독으로 사용하는 것들과 이들을 조합한 것들로 Table 3과 같이 보정 자료 세트를 구성하였으며, 이들 자료 세트를 각각 사용하여 7개의 모형을 보정하였다. Table 3은 각 모형별로 예측시간에 따른 보정결과를 상관계수를 사용하여 나타낸 것이다. 보정 결과를 살펴보면, 홍수사상의 조합을 사용한 모형의 보정 결과가 단일한 홍수사상을 사용하여 보정된 모형들보다 양호한 결과를 제시하지 않음을 알 수 있다. 특히, HY0503 홍수사상을 포함한 자료를 사용하여 보정한 모형들은 HY0503 사상을 모의하는데 양호한 결과를 나타냈으나, HY0503 홍수사상과 다른 홍수사상을 조합한 자료 세트를 보정한 모형들은 단일 홍수사상 자료를 사용하여 보정한 모형들 보다 다소 불량한 결과를 나타냈다. 이는 HY0503

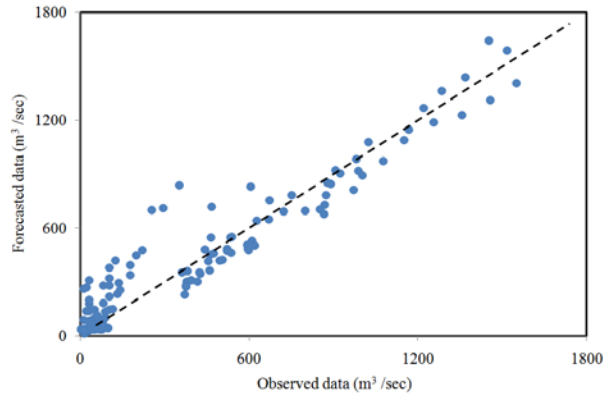
홍수사상의 침투 유량이 다른 홍수사상 보다 크기 때문에 모형의 매개변수가 HY0503 홍수 사상의 실측자료와 예측결과 사이의 오차를 줄이는 방향으로 보정되었기 때문으로 판단된다. 홍수사상들을 조합하여 만든 자료 세트를 사용하여 보정된 모형의 예측결과를 비교해 보면, HY0203와 HY0403으로 조합으로 구성된 자료 세트를 사용하여 보정한 모형이 다른 모형들 보다 양호한 결과를 나타냈다. Fig. 4는 HY0203와 HY0403 홍수 사상을 조합하여 만든 자료 세트를 사용하여 보정된 GHY4 모형을 사용하여 4 시간 후의 홍수량을 모의한 결과를 실측자료의 수문곡선과 1:1 그래프로 비교한 것으로, 예측한 결과가 유량의 전범위에서 실측자료에 근접한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 보정된 모형들의 매개변수를 나타낸 것으로 자료에 따라 최적화된 매개변수가 다른 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 과거 유량과 관련된 c1, c2, c3, c4와 과거 강우량과 관련된 c8, c9, c10, c11의 값들의 범위가 다소 넓게 분포하고 있다. 모형의 매개변수들은 Eq. (5)와 같이 상한값과 하한값을 정해서 A-S 법을 사용하여 매개변수들을 탐색하며, 매개변수들의 최초 범위는 Kang *et al.*(2006), 강민구 등(2005)의 연구 결과로부터 얻은 것으로 설정하였으며, 매개변수를 최적화한 결과 매개변수 값이 상한값이나 하한값을 나타내는 경우에는 매개변수 범위를 넓혀서 최적해 탐색 과정동안 이의 영향을 받지 않도록 하였다. 본 연구에서 사용된 A-S 법은 강민구 등(2002)의 연구에 의해서 매개변수의 초기값에 상관없이 최적해를 탐색하는 것으로 알려졌으며, 본 연구에서도 이와 같은 특성을 이용하여 매개변수의 최적 값을 결정하였다.

Table 3. Comparison Results between Observed and Forecasted Inflows of Namgang Dam in Calibration, Varying with Calibration Data Sets, Lead-Times, and Storm Events

Models	Calibration data sets	Calibration results (r)						
		Events	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr	5 hr	6 hr
GHY1	HY0203	HY0203	0.997	0.991	0.983	0.970	0.958	0.950
GHY2	HY0403	HY0403	0.997	0.994	0.989	0.984	0.979	0.973
GHY3	HY0503	HY0503	0.991	0.973	0.956	0.934	0.895	0.850
GHY4	HY0203+ HY0403	HY0203	0.995	0.981	0.961	0.944	0.938	0.938
		HY0403	0.996	0.989	0.972	0.958	0.939	0.921
GHY5	HY0203+ HY0503	HY0203	0.988	0.938	0.841	0.771	0.777	0.787
		HY0503	0.990	0.971	0.951	0.927	0.888	0.849
GHY6	HY0403+ HY0503	HY0403	0.972	0.876	0.760	0.669	0.627	0.597
		HY0503	0.991	0.972	0.953	0.932	0.892	0.843
GHY7	HY0203+ HY0403+ HY0503	HY0203	0.989	0.946	0.862	0.801	0.802	0.842
		HY0403	0.976	0.902	0.814	0.736	0.688	0.661
		HY0503	0.990	0.969	0.947	0.922	0.883	0.835



(a) Hydrograph(HY0403)



(b) Scatter plot(HY0403)

Fig. 4. Comparison of Observed Inflows of Namgang Dam and Values Forecasted by the GHY4 Model for Lead-Time 4 Hours in Calibration

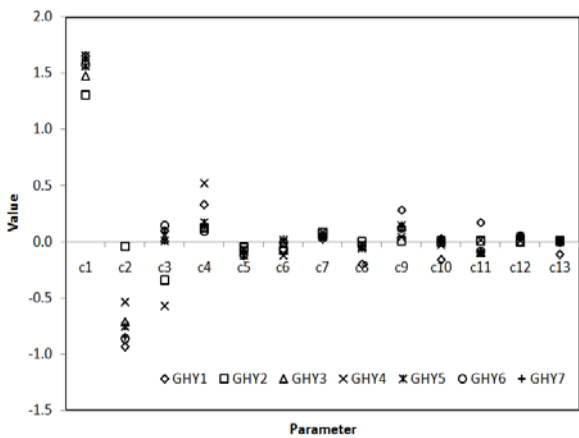
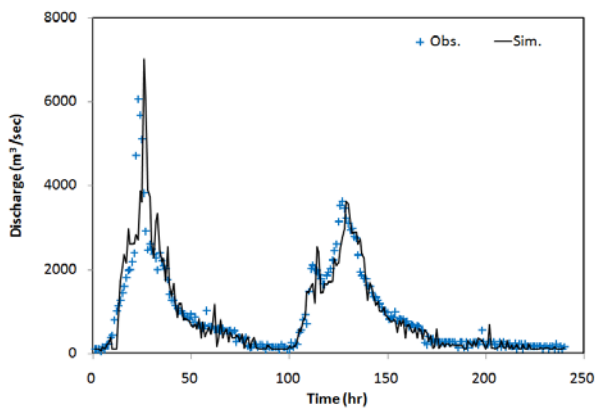


Fig. 5. Parameter Sets of Models Calibrated for Forecasting Inflow of Namgang Dam

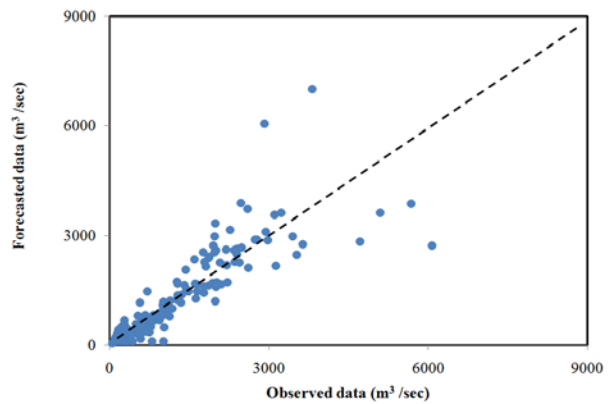
(3) 모형의 검정

모형을 검정하기 위하여 보정된 7개의 모형들로 2004년의 3개 홍수사상을 예측시간별로 모의하여 실측자료와 비교하였다. 모형의 검정을 위해 선정된 홍수사

상은 HY0104, HY0204, HY0304이다. Table 4는 예측시간별 예측 결과를 상관계수를 사용하여 비교한 것이다. 단독 수문사상을 사용하여 보정한 모형들 중에서는 GHY2 모형이 세 홍수사상에 대하여 다른 모형들 보다 양호한 예측 결과를 나타냈다. 조합한 수문사상을 사용하여 보정한 모형들 중에서는 GHY4 모형의 검정결과가 세 수문사상에 대하여 다른 모형들보다 양호한 결과를 나타냈다. 7가지 모형들의 예측결과를 비교해 본 결과, GHY4 모형이 다른 모형들 보다 세 홍수사상에 대하여 실측값에 보다 가까운 모의 결과를 나타냈다. Fig. 6은 GHY4 모형으로 HY0104 홍수 사상에 대하여 예측한 결과를 수문곡선과 1:1 그래프를 사용하여 실측자료와 비교한 것이다. Fig. 6 (a) and (b)를 비교해 보면, 고수위에서 실측자료와 예측 자료가 차이를 나타내고 있으나 전반적으로 양호한 예측결과를 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) Hydrograph(HY0104)



(b) Scatter plot(HY0104)

Fig. 6. Comparison of Observed Inflows of Namgang Dam and Values Forecasted Using the GHY4 Model for Lead-Time 4 Hours in Validation

Table 4. Comparison Results between Observed and Forecasted Inflows of Namganag Dam in Validation, Varying with Models, Lead-Times, and Storm Events

Models	Validation results (r)						
	Events	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr	5 hr	6 hr
GHY1	HY0104	0.945	0.808	0.736	0.696	0.716	0.749
	HY0204	0.910	0.743	0.725	0.756	0.766	0.773
	HY0304	0.906	0.803	0.773	0.724	0.709	0.688
GHY2	HY0104	0.975	0.924	0.861	0.812	0.801	0.797
	HY0204	0.989	0.975	0.953	0.935	0.922	0.909
	HY0304	0.948	0.866	0.770	0.704	0.689	0.677
GHY3	HY0104	0.971	0.922	0.887	0.851	0.819	0.716
	HY0204	0.949	0.845	0.751	0.670	0.640	0.576
	HY0304	0.900	0.720	0.647	0.660	0.705	0.646
GHY4	HY0104	0.974	0.932	0.896	0.887	0.885	0.884
	HY0204	0.985	0.969	0.943	0.923	0.899	0.881
	HY0304	0.942	0.865	0.820	0.806	0.822	0.823
GHY5	HY0104	0.973	0.931	0.904	0.885	0.856	0.774
	HY0204	0.956	0.867	0.795	0.725	0.693	0.643
	HY0304	0.903	0.724	0.667	0.715	0.781	0.722
GHY6	HY0104	0.974	0.932	0.898	0.868	0.838	0.778
	HY0204	0.958	0.867	0.781	0.703	0.674	0.657
	HY0304	0.910	0.742	0.665	0.683	0.738	0.706
GHY7	HY0104	0.975	0.936	0.913	0.894	0.871	0.832
	HY0204	0.962	0.883	0.817	0.753	0.725	0.720
	HY0304	0.912	0.748	0.691	0.735	0.806	0.795

3.4 댐 하류 하천의 실시간 홍수량 예측

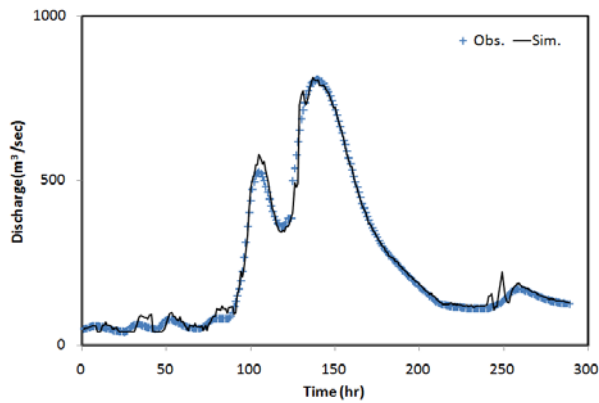
(1) 모형의 보정

댐 하류 하천 홍수량 예측 모형의 보정을 위하여 2003년에 발생한 2개의 홍수사상을 선정하고 보정자료에 따라 총 3개의 모형을 구성하였다. 각 모형은 선정된 자료를 사용하여 보정되었으며, 보정결과를 상호 비교하여 적합한 모형을 선정하였다. Table 5는 모형의 보정결과를 예측시간별로 비교한 것이다. 이들 모형들의 보정결과를 비교해 보면, 단일 홍수사상을 사용하여 보정한 모형들이 보정에 사용되지 않은 홍수사상을 모

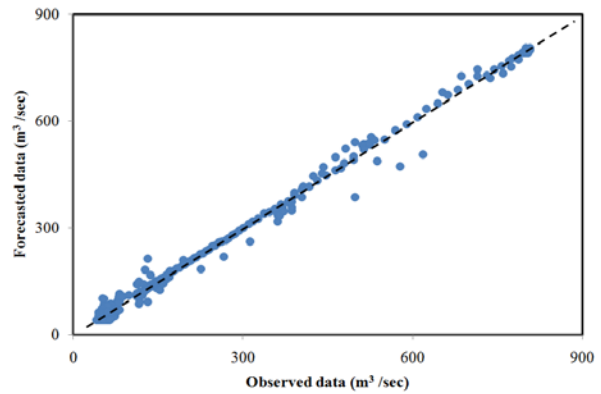
의한 결과는 두 홍수사상을 조합하여 보정한 모형의 예측결과와 거의 비슷한 결과를 나타냈다. Table 5에 나타난 예측시간별 상관계수를 비교해 보면, 두 수문사상의 조합 자료를 사용한 모형이 단독 수문사상 자료를 사용한 보정결과 보다 큰 값을 나타내고 있다. 이는 보정에 사용된 두 홍수사상의 자료 질이 양호하며, 선정된 두 홍수사상이 유사한 경향을 갖는다는 것을 나타낸다. Fig. 7은 JA0403+JA0503으로 보정된 GJA3 모형의 보정결과를 실측 자료와 비교한 것으로 실측자료와 모의결과가 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, 고유량에서도 모의 결과가 양호함을 알 수 있다.

Table 5. Comparison Results between Observed and Forecasted Inflows of the Jeongam Streamflow Gauge Station in Calibration, Varying with Models, Lead-Times, and Storm Events

Models	Calibration data sets	Calibration results (r)						
		Event	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr	5 hr	6 hr
GJA1	JA0403	HY0403	0.999	0.999	0.997	0.995	0.992	0.988
		HY0503	0.999	0.999	0.999	0.998	0.996	0.993
GJA2	JA0503	HY0403	0.999	0.997	0.994	0.989	0.981	0.971
		HY0503	1.000	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998
GJA3	JA0403+JA0503	JA0403	0.999	0.998	0.997	0.995	0.991	0.987
		JA0503	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.996



(a) Hydrograph(JA0103)



(b) Scatter plot(JA0103)

Fig. 7. Comparison of Observed Discharges of the Jeongam Streamflow Gauge Station and Values Forecasted Using the GJA3 Model for Lead-Time 4 Hours in Calibration

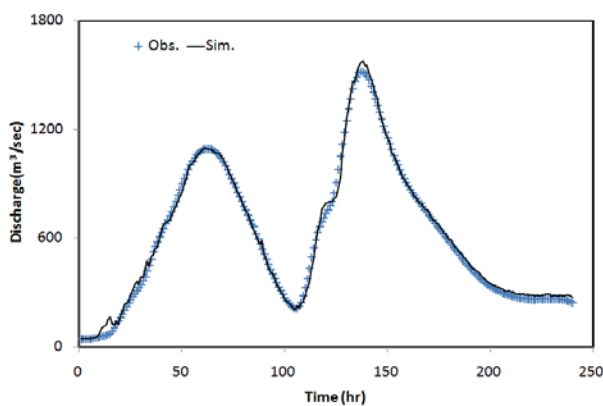
(2) 모형의 검증

모형의 검증은 2004년의 JA0104와 JA0204 홍수사상을 대상으로 하여 시행하였다. 모형 보정 단계에서 구성된 3개의 모형을 사용하여 각각 선정된 홍수사상을 예측시간별로 모의하여 실측자료와 비교하였다. Table 6은 각 모형의 예측시간별 모의결과를 실측자료와 비교한 것이다. 각 모형을 사용하여 예측시간별로 JA0104와

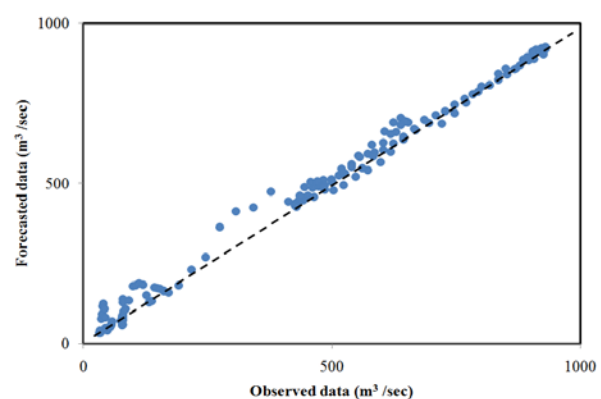
JA0204 홍수사상을 모의한 결과는 모두 실측자료와 유사한 결과를 나타냈다. 특히, JA0403+JA0503 자료를 사용하여 보정한 GJA3 모형은 단독 수문사상을 사용하여 보정한 모형보다 우수한 예측결과를 나타냈다. Table 6에서와 같이 세 가지 모형 모두 예측시간이 증가할수록 실측자료와 모의치의 차이가 커지는 경향을 나타내고 있다. Fig. 8은 GJA3 모형으로 4시간 후의 홍수량을 예

Table 6. Comparison Results between Observed and Forecasted Discharges of the Jeongam Streamflow Gauge Station in Validation, Varying with Models, Lead-Times, and Storm Events

Model	Validation results (r)						
	Event	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr	5 hr	6 hr
GJA1	JA0104	0.999	0.999	0.998	0.997	0.994	0.990
	JA0204	0.999	0.999	0.998	0.997	0.994	0.989
GJA2	JA0104	0.999	0.999	0.998	0.996	0.992	0.984
	JA0204	0.999	0.999	0.999	0.998	0.996	0.993
GJA3	JA0104	0.999	0.999	0.998	0.997	0.994	0.990
	JA0204	0.999	0.999	0.998	0.997	0.995	0.992



(a) Hydrograph(JA0204)



(b) 1:1 graph(JA0204)

Fig. 8. Comparison of Discharges of the Jeongam Streamflow Gauge Station and Values Forecasted Using the GJA3 Model for Lead-Time 4 Hours in Validation

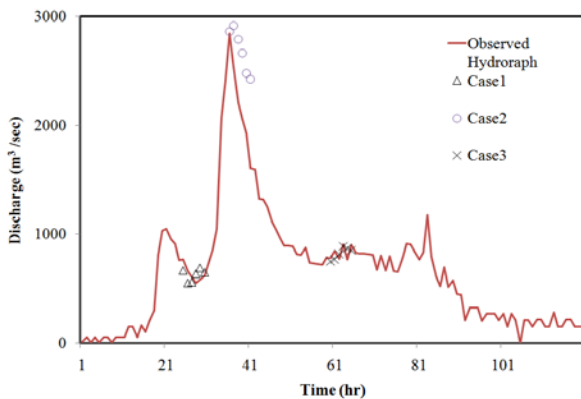
측한 결과와 실측자료를 도식적으로 비교한 것으로 예측결과는 모두 실측자료와 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, 1:1 비교에서 보이듯이 고유량에서도 모의 결과가 양호함을 알 수 있다.

4. 댐 유입 홍수량과 하류 하천 홍수량의 실시간 예측

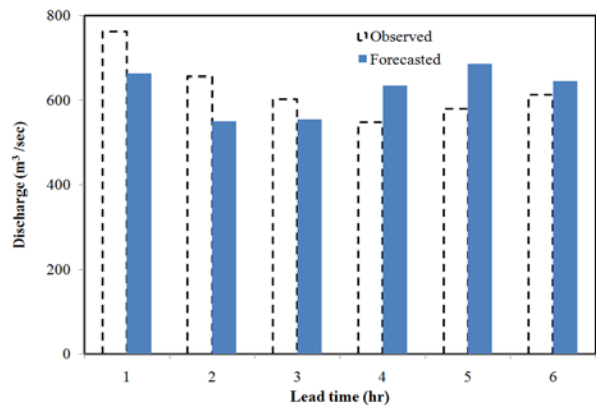
4.1 실시간 댐 유입 홍수량 예측

남강댐의 실시간 유입량 예측에 대한 개발된 모형의 적용성을 평가하기 위하여 Fig. 9(a)와 같이 2005년 7월 1일 01:00 부터 7월 5일 24:00까지의 남강댐 유입량 자료를 사용하여 유출량 상태에 따라 홍수량을 예측한 결과와 실측자료를 비교하였다. 유입 홍수량을 실시간으로 예측하기 위해서는 댐 상류 유역의 강우자료와 댐 관리 정보를 실시간으로 수집해야 한다. 대상 댐의 수문자료는 한국수자원공사에 의해 실시간으로 측정되며, 이들 자료를 이용하여 상류유역의 홍수량을 실시간으로 예측한다. Fig. 9(b)~9(d)는 대상 기간 동안 발생한 강우 자료를 사용하여 실시간으로 홍수량을 예측한 결과

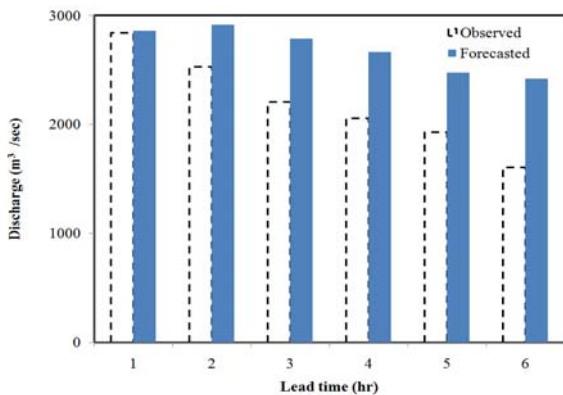
를 실측자료와 비교한 것이다. 예측단계는 유출량이 증가하는 단계, 첨두유량 단계, 유출량이 감소하는 단계로 구분하였다. 각 단계별로 실측자료와 예측결과는 차이를 나타내고 있으며, 예측시간이 증가할수록 예측결과의 정확도가 낮아지는 경향을 나타냈다. Fig. 9에서 유출량이 증가하는 단계의 상대오차는 -13.2~18.3 %를 나타냈다. 유출량이 첨두유량인 단계의 예측결과는 예측시간이 증가할수록 실측값 보다 커지는 경향을 나타냈으며, 상대오차는 0.6~50.9 %를 나타냈다. 유출량이 감소하는 단계의 예측결과와 실측치의 상대오차는 -9.3~13.8 %로 유출량이 증가하는 단계와 유사한 결과를 나타냈다. 유출량이 첨두유량인 단계에서 예측결과가 다른 두 단계 보다 상대오차가 크게 나타난 것은 대상 홍수사상이 모형의 보정시에 사용된 홍수사상과 다른 유출특성을 나타냈기 때문으로 사료된다. 또한, 댐 유입량 자료의 신뢰성이 하천 유량 자료 보다 다소 낮다는 것도 하나의 원인인 것으로 사료되며, 이를 개선하기 위하여 유출량의 크기와 유출 단계를 고려한 모형의 보정 및 적용이 필요할 것으로 판단된다.



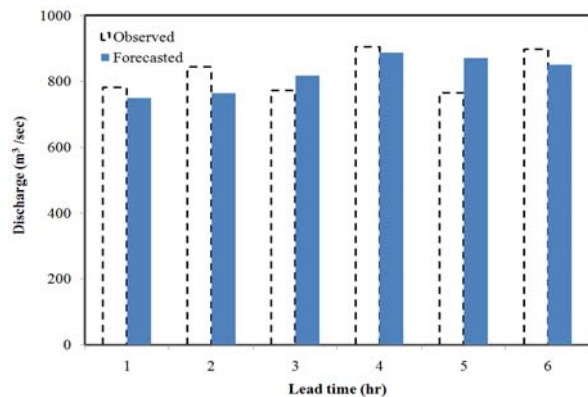
(a) Selected Inflow Hydrograph



(b) Case 1: Rising Stage



(c) Case 2: Peak Stage



(d) Case 3: Falling Stage

Fig. 9. Comparison of Observed and Forecasted Inflows of Namgang Dam from One to Six Hours of Lead-Time According to Runoff Stages

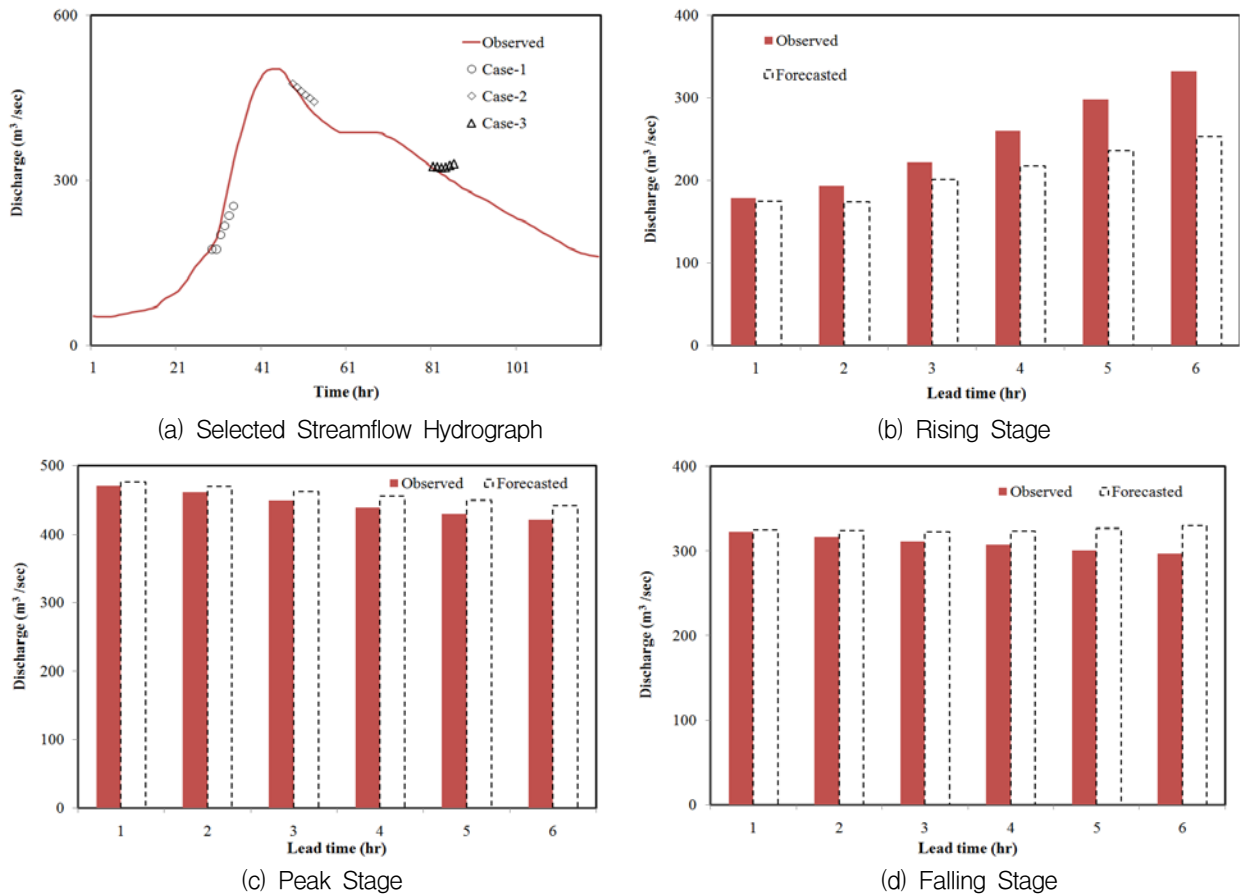


Fig. 10. Comparison of Observed and Forecasted Discharges of the Jeongam Streamflow Gauge Station from One to Six Hours of Lead-Time According to Runoff Stages

4.2 댐 하류 하천의 실시간 홍수량 예측

댐 방류량의 영향을 받는 하류 홍수 조절지점의 홍수량 예측에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 남강댐 하류에 위치한 정암수위관측소의 실시간 홍수량 예측에 모형을 적용하였다. 대상지점의 수문자료는 실시간으로 측정되어 전기적 신호를 통하여 낙동강 홍수 통제소에 전송되며, 자료는 실시간으로 보완 및 보충된다. 이들 자료를 이용하여 정암수위관측소지점의 홍수량을 실시간으로 예측하여 실측자료와 비교하였다. Fig. 10(a)는 2005년 7월 1일 01:00 부터 7월 5일 24:00 사이에 발생한 홍수사상에 대하여 실시간으로 예측한 결과와 실측자료와 비교한 것이다. 예측단계는 유출량이 증가하는 단계, 첨두 유량이 발생한 단계, 유출량이 감소하는 단계로 구분하였다. Fig. 10(b)~(d)와 같이 예측시간이 증가할수록 예측결과의 정확도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한, 하천 홍수량이 증가하는 단계의 예측결과가 다른 단계의 예측결과 보다 상대오차가 다소 큰 값을 나타냈다. 이는 모형의 보정이 유량이 큰 실측자료와 예측결과 사이의 오차를 감소시키는 방향으로 수

행되었기 때문으로 사료되며, 이를 개선하기 위하여 하천 유출량의 크기와 유출 단계를 고려한 모형의 보정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 다목적댐의 홍수관리를 위하여 댐 유입 홍수량과 하류 하천의 홍수량을 실시간으로 예측하기 위한 Grey 홍수 예측 모형을 각각 개발하였다. 모형의 적용성을 평가하기 위하여 낙동강 수계의 남강댐과 정암수위관측소를 선정하였다. 과거 홍수사상 자료를 사용하여 모형을 보정 및 검증하였으며, 구성된 모형의 실시간 예측 능력을 평가하기 위하여 실제 홍수사상에 적용하여 예측능력을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 댐 유입 홍수량을 실시간으로 예측하기 위하여 6차 Grey 모형 개발하고, 3개 홍수사상의 조합을 보정 자료 세트로 각각 사용하여 매개변수를 보정한 7개 모형을 구성하였다. 보정한 모형들을 3개의 홍수사상에 적용하여 검증한 결과, 2개의 홍수

- 사상을 조합한 자료 세트를 사용하여 보정된 모형이 다른 모형들 보다 양호한 예측결과를 나타냈다.
- 2) 댐 방류량의 영향을 받는 하류 하천의 홍수량을 실시간으로 예측하기 위하여 Grey 모형과 수정 Muskingum 홍수 추적 모형을 병합한 모형을 개발하였다. 2개 홍수사상의 조합을 보정자료 세트로 각각 사용하여 매개변수를 보정한 3개 모형을 구성하였다. 보정한 모형들을 2개의 홍수사상을 이용하여 검정한 결과, 2개 홍수사상을 조합한 자료 세트를 사용하여 보정한 모형이 다른 모형들 보다 예측 시간별로 양호한 결과를 나타냈다.
 - 3) 다목적댐 유입 홍수량과 하류 하천 홍수량 예측 모형의 실시간 예측에 대한 적용성을 평가하기 위하여 동일한 홍수 사상이 발생한 기간을 선정하여 유입 홍수량과 하류 하천 홍수량을 실시간으로 예측하였다. 댐 유입 홍수량 예측결과를 실측자료와 비교한 결과, 유입량이 증가하는 단계와 감소하는 단계에서는 유입량이 침두유량인 단계 보다 예측 값이 실측값에 더 가까운 결과를 나타냈다. 하류 하천의 홍수량 예측결과를 실측 자료와 비교한 결과, 홍수량이 침두유량인 단계와 감소하는 단계에서 홍수량이 증가하는 단계 보다 다소 양호한 예측결과를 나타냈다.

본 연구의 결과는 Grey 홍수 유출 모형이 예측 시점으로부터 1시간부터 6시간 이후의 다목적댐 유입 홍수량과 하류 하천의 홍수량 예측에 적용성이 있음을 나타냈다. 제안된 모형들을 실시간 홍수량 예측에 적용한 결과는 예측단계에 따라 상이한 예측 정확도를 나타냈다. 이는 모형의 보정에 사용된 자료의 크기와 자료 질이 실제 상황의 자료 특성과 상이하기 때문으로 판단된다. 따라서 이들 모형의 예측 능력을 향상시키기 위해서는 홍수량의 크기와 유출 단계를 고려한 모형의 보정 및 적용이 필요한 것으로 판단된다. 또한, 향후 연구에서는 예측된 강우량 자료를 이용하여 개발된 모형의 적용성을 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

“이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(KRF-2006-352-D00191)

참 고 문 헌

강민구, 박승우, 강문성 (2005). “담수호 홍수관리를 위한 상류 유입량 실시간 예측.” **한국수자원학회논문**

집, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1061-1072.

강민구, 박승우, 임상준, 김현준 (2002). “전역최적화 기법을 이용한 강우-유출모형의 매개변수 자동보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 541-552.

강부식, 김서영, 고익환 (2005). “레이다강우를 이용한 격자기반의 저수지 홍수 유입량 모의.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 183-188.

김성원, 호세 살라스 (2000). “하천수위표 지점에서 신경망기법을 이용한 홍수위의 예측.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제2호, pp. 247-262.

심순보, 김만식 (1999). “유입량 예측을 위한 신경망 모형과 저류함수 모형의 비교연구.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-1호, pp. 79-90.

전계원, 안상진 (2004). “Web기반 홍수유출 및 수질예측 시스템의 개발-I. 모형의 구축.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제4B호, pp. 321-331.

Deng, J. (1989). “Introduction to grey system theory.” *J. Grey System*, Vol. 1, No. 1, 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.

International Strategy for Disaster Reduction (2004). *Guideline for reducing flood losses.*

International Strategy for Disaster Reduction (2007). *Words into action: A guide for implementing the Hyogo framework.*

Kang, M.S., Kang, M.G., Park, S.W., Lee, J.J., and Yoo, K.H. (2006). “Application of grey model and artificial neural networks to flood forecasting.” *J. of The American Water Resources Association*, AWRA, Vol. 42, No. 2, pp. 473-486.

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.

Knight, D.W. and Shamseldin, A.Y. (2006). *River basin modelling for flood risk mitigation*, Taylor &

- Francis Group plc, London, UK.
- 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.
- 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, pp. 2261-2269.
- US Army Corps of Engineers (2006). *Performance evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane protection system.*
- Xia, J. (1989). "Research and application of grey system theory to hydrology." *J. Grey System*, Vol. 1, pp. 43-52.
- 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. and Chen, S.T. (2005). "Updating real-time flood forecasting using a fuzzy rule-based model." *Hydrological Sciences*, Vol. 50, No. 2, pp. 265-278.
- Yu, P.S., Chen, C.J., and Chen, S.J. (2000). "Application of gray and fuzzy methods for rainfall forecasting." *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, 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*, AWRA, Vol. 37, No. 1, pp. 151-166.

(논문번호:08-77/접수:2008.06.30/심사완료:2008.12.23)