

## 하천수위의 단기 예측을 위한 수위 및 강우량 계측정보의 활용\*

### Use of Gauged Water Level and Precipitation Data to Predict Short Term Water Level Changes

Seong Joon Byeon\*\*, Sung Ho Lee\*\*\*, Gye Woon Choi\*\*\*\*, Jae Kwang Jung\*\*\*\*\*

R&D Office, International Center for Urban Water Hydroinformatics Research & Innovation, 7-46  
Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

#### Abstract

Recently frequent stream flooding and flood disaster due to abnormal climate led to an increased in damage to human life and properties. The most ideal measure is the precise prediction of flood water level. And in the prediction of flood water level, it is important to reduce potential flood damage via approaches from real-time aspect in order to secure sufficient lead time for evacuation and control of citizens and protection of facilities. The Osu Stream Basin which is the first branch of Seomjin River was selected as the subject, where the rainfall and water level data which was obtained by selecting 35 heavy rain events observed between 2006 and 2013 was used. The multiple linear regression models were structured and then parameters were selected from the following 4 methods: in Case 1, hourly data of water level and basin averaged precipitation; in Case 2, 10-minute periodic data of water level and basin averaged precipitation; in Case 3, hourly data of water level and precipitation gauged 3 different stations and in Case 4, 10-minute periodic data of water level and precipitation gauged 3 different stations were used. According to the results, the precision was slightly reduced as the lead time of prediction, but the 1 hour of predicted lead time showed considerably higher precision, and the prediction results were superior until the 3 hours of predicted lead time. The simulation results showed that data that can be briefly identified may be used to predict the water level of the Osu point of the Osu Stream Basin in real

\* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었습니다.

\*\* Corresponding author. Tel. +82-32-850-5720. Fax. +82-32-851-5730. E-mail. seongjune@paran.com

\*\*\* Researcher, Hydrological Survey Center, Korea

\*\*\*\* Professor, Incheon National University

\*\*\*\*\* Research Fellow, International Center for Urban Water Hydroinformatics Research & Innovation

Submission & Publication Process

Received: Jan. 9, 2014 / Revised: Jan. 22, 2014 / Accepted: Feb. 10, 2014

time, and based on the results, the method will be helpful to protect lives and properties of those who live around the area and to reduce damage caused by flooding of the river via securing sufficient lead time for flood forecasting.

**Key words:** flood forecast, water level prediction, regression analysis, Osu stream

#### 국문초록

최근 태풍 및 집중호우에 의한 하천범람 및 홍수재해가 지구환경 변화에 따른 이상기후로 자주 발생하고 있으며 그 대책들 중 가장 최선의 대책은 정확한 홍수위 예측을 통하여 실시간 관점으로 접근하여 잠재적 홍수 피해를 저감하는 것이 중요하다. 대상유역으로는 섬진강의 제 1지류인 오수천 유역을 선정하였으며, 최적화된 매개변수를 산정하기 위하여 2006년부터 홍수통제소에서 실시간으로 제공되고 있는 수위관측소와 우량관측소의 10분 자료를 활용하였다. 이러한 목적에 따라 유역평균 시 강우자료와 예측지점의 시 수위자료를 이용하는 경우(Case1), 유역평균 10분 강우자료와 예측지점의 10분 수위자료를 이용한 경우(Case2), 우량관측소 각 지점의 시 강우자료와 예측지점의 시 수위자료를 이용한 경우(Case3), 우량관측소 각 지점의 10분 강우자료와 예측지점의 10분 수위자료를 이용한 경우(Case4)의 4가지 방법으로 다중선형회귀 모형을 구성하여 매개변수를 산정하고, 산정된 매개변수를 이용하여 검증 사상에 적용하여 매개변수의 적용성에 대한 검증을 실시하였다. 모의 결과 10분 간격의 자료를 사용하고 면적 평균강우를 사용하는 방법이 가장 정확성이 높은 것으로 나타났다. 이를 통하여 간편하게 확인 가능한 자료를 이용하여 실시간으로 오수천 유역의 오수 지점에 대한 수위를 예측 할 수 있었으며, 이를 토대로 홍수 예보시 충분한 선행시간을 확보하여 하천의 홍수범람으로 인한 대상 유역 인근 주민들의 생명과 재산의 보호와 피해를 줄이는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어:** 홍수예보, 수위예측, 회귀분석, 오수천

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 필요성

최근 지구환경 변화에 따른 이상기후의 영향으로 태풍 및 집중호우로 인한 하천범람 등 홍수 재해에 의한 인명과 재산의 피해가 증가하고 있다. 이러한 상황에서 홍수의 예측, 즉 하천의 유출량과 수위와 같은 하천 흐름을 정확히 예측하는 것은 홍수재해의 예방은 물론 유역계획이나 지속적인 수자원 관리를 위해서 매우 중요한 요소로 부각되고 있다. 특히, 잠재적 홍수 피해를 저감하기 위한 비구조적 홍수방어 대책들 중 가장 최선의 대책은 정확한 홍수위 예측이며, 높은 정확도를 가지는 단기적인 수위 예측은 주민의 대피 및 통제, 시설물의 보호 등을 위한 충분한 선행시간을 확보할 수 있는 실시간적인 관점에서의 접근이 매우 중요하다.

현재 국내 주요 하천에서는 정확한 홍수예측을 위해 수리 모형을 구축하고 있으며, 저류함수 모형(Storage Function Model)을 이용한 강우-유출 해석기법을 적용하여 홍수 예경보 시스템이 운영되고 있다. 그러나 저류함수모형을 실제 홍수 유출 현상에 적용하는데 있어서 가장 어려운 점은 매개변수를 결정하는 것이며, 특히 유역면적이 작아 홍수 도달시간이 짧은 유역에서의 수문학적 모형에 의한 홍수 예경보 업무는 짧은 유하시간, 작은 유역면적 등에 의하여 도달시간

이 매우 짧아 홍수예측 업무를 수행하는데 선행시간을 충분히 확보할 수 없다.

따라서, 수문학적 과정의 복잡성과 선행시간 확보에 어려움을 가지고 있는 기존의 강우-유출 모형의 단점을 개선한 홍수예측기법이 필요하며, 이를 위해 기존의 많은 매개변수들의 사용 없이 오직 수위 및 강우 자료만을 이용하고 통계학적 모형의 기법을 통하여 높은 정확도의 단기 수위 예측을 할 수 있는 모형의 구축하고자 한다.

통계학적 모형의 기법으로는 회귀분석, 인공신경망, 퍼지추론 시스템 등이 있는데, 통계학적 모형은 Jamieson, *et. al.*(1972)과 Natale, *et. al.*(1974), Tao, *et. al.*(1975)에 의해 제안되어 연구가 활발히 이루어졌다[1][2][3]. Keefer 등(1976)은 기존의 수리학적 홍수추적과 통계학적 홍수예보모형에 대한 비교를 통해 통계학적 홍수예보모형의 적용 가능성을 검증한 바 있으며, Huynh, *et. al.*(2003)은 다중선형회귀모형 구성에서 주요지점의 수위를 종속변수로 하여 주요지점과 상류지점의 이전시간 수위와 이전시간 강우량 자료를 독립변수로 하여 베트남의 홍강(Red river)에 적용결과 정확도 높은 예측 값을 얻어 적용성을 입증한 바 있다[4][5]. Mousavi, *et. al.*(2007)은 저수지 운영 규칙에 대하여 최소자승법, 퍼지 회귀분석 기법과 적용 뉴로-퍼지추론 시스템(ANFIS)을 적용하여 그 결과를 비교, 분석하고, 저수지 운영 규칙을 추론하였다[6]. Zahraie, *et. al.*(2009)은 저수지 운영 방법에 대하여 저수량, 유입량, 용수요구량을 독립변수로 구성하여 퍼지 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과로 최적의 저수지 운영 방법을 제시하였다[7].

국내에서는 윤용남 외(1991)는 미계측 중소유역의 월 유출량 산정을 위해 다중회귀분석으로 유역별 모형, 전체 모형, 평균지 모형, 개별자료 모형으로 구분하여 회귀모형을 수립하였으며, 검증결과 전체모형이 가장 적절한 모형으로 판단되며, 다중회귀모형이 월별유출량의 변화성향을 매우 잘 나타내고 있다고 하였다[8]. 윤강훈 외(1994)는 한강 인도교 수위와 영향인자간의 다중회귀분석을 통해 다변수 모형(MM 모형)과 수위구간별 다중회귀분석에 의한 다수준 다변수 모형(MMP 모형), 수위의 구간에 따른 다변수 모형(2MM 모형)을 제시하고 홍수위 예측을 수행하였으며, 수위의 구간에 따른 다변수 모형이 예측정도가 가장 높다고 하였다[9]. 손민우 등(2003)은 Backpropagation 알고리즘, Fletcher-Reeves 알고리즘, BFGS 알고리즘, 회귀분석 방법을 이용하여 강원도 인북천에 대한 홍수위의 예측을 수행하였으며, 실제 값과 비교하여 만족할만한 결과를 보였으며 강우량이 많은 경우 Fletcher-Reeves 알고리즘이 다른 알고리즘보다 더욱 좋은 결과를 보인다고 하였다[10]. 김법준(2007)은 저류함수모형과 SSARR 모형을 이용해 금강 미호천 유역에 대하여 홍수모의를 수행하여 통계적 기법인 다중선형회귀분석과 인공신경망모형을 이용하여 홍수예측을 수행하고 비교, 분석하여 홍수예측을 할 경우 다중선형회귀분석이 인공신경망에 비하여 상대적으로 적합하다고 하였다[11]. 임운수(2010)는 수위표를 이용한 하류지역의 수위변동 예측기법에 대하여 상관분석을 통하여 예측지점에 영향을 주는 수위표를 선별하고 선별된 수위표를 이용하여 회귀분석을 실시하여 통계적으로 신뢰할 수 있는 회귀식을 산정하였다[12]. 최승용 외(2012)는 중량천 유역을 다중선형회귀모형을 이용하여 회귀계수 선정 방법에 따른 홍수예측 성능을 비교, 검토하기 위하여 최소자승법, 가중 최소자승법, 단계별 선택법을 이용하여 홍수예측 모형을 구축하였으며, 단계별 선택법을 이용한 다중선형회귀 홍수예측 모형이 가장 정확한 예측 결과를 보였다고 하였다[13]. 변성준 외(2013)는 이러한 예측 시스템의 활용에 대한 내용을 정책적인 부분을 포함하여 논하였고, 김형산 외(2013)는 홍

수기 하천흐름의 수문특성에 대하여 그 활용성과 모형선정 등에 대한 내용을 연구하였다[14][15]. 또한 김주철 외(2011)는 이러한 확률론적인 모의 방식을 해외에 적용한 사례에 대하여 연구한 사례가 있다[16].

위의 연구 동향을 바탕으로 데이터 기반 모형은 강우-유출 모형이 요구하는 광범위한 경계조건 및 초기조건 자료의 필요 없이 시시각각으로 측정되는 실시간 수위측정 자료 및 실시간 강우자료 등을 이용한 통계학적 기법으로 홍수예보 업무를 실시함에 있어서 선행시간 확보 등 기존의 홍수예보가 가지고 있는 문제점을 해결 하고자 하였다.

## 2. 연구의 목적

본 연구에서는 기존 홍수예보에서의 선행시간을 충분히 확보할 수 없는 단점을 해결하고자 간단한 입력자료 만으로도 홍수예측을 수행할 수 있는 통계학적인 기법을 활용하였다. 수위 예측방법의 최적화를 위해서 2006년부터 영산강 홍수통제소에서 실시간으로 제공되고 있는 수위 관측소와 우량관측소의 10분 자료를 이용하고, 독립변수인 입력강우의 형태를 면적 강우량으로 하여 최근 국지성 호우가 자주 발생하는데 대한 시간 분포의 왜곡이 수위 예측에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 또한, 하천수위의 상승과 하강과 같은 변화에 따라서 매개변수의 인자들이 크게 변할 것으로 판단하여 첨두 수위를 기준으로 매개변수를 분리하는 방법 등을 이용하여 지방하천에서 실시간으로 지점 하천수위를 예측할 때 정확성 높은 적절한 매개변수를 산정하고자 하였다.

## II. 이론적배경

### 1. 다중회귀분석에 대한 이론적 배경

회귀분석에는 하나의 독립 변수를 가지는 단순한 회귀분석 형태를 단순회귀분석(Simple Regression Analysis)이라고 하고 여러 개의 독립 변수가 있는 회귀분석을 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)이라고 한다.

단순회귀분석은 식(1)과 같이 종속변수  $y$ 를 1개의 독립변수  $x$ 의 1차식으로 나타내는  $x$ 와  $y$ 의 관계식을 구하는 방법이다.

$$y = a + b_1x \quad (1)$$

다중회귀분석이란 식(2)와 같이 종속변수  $y$ 를  $n$ 개의 독립변수  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 의 1차식으로 나타내는  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 과  $y$ 의 관계식을 구하는 방법이다.

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

회귀분석에서는  $a$ 를 절편 혹은 상수항이라 부르고,  $b_1, b_2, \dots, b_n$ 을 회귀계수 혹은 매개변수라고 부른다.  $x$ 와  $y$  두 변수에 대해서  $n$ 개의 데이터가 있다고 가정하고,  $x$ 로부터  $y$ 를 예측하는 식을 만들면, 식(3)과 같이  $n$ 개의 데이터 즉  $x_i, y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )에

$$y_i = a + b_1 x_i \tag{3}$$

라고 하는 식이 만들어진다. 구해야 하는 것은  $a$ 와  $b_1$ 이다. 따라서 실제의  $y$ 값과  $y$ 의 예측치  $y_i$ 의 차  $e$ 는 식(4)와 같이

$$e_i = y_i - (a + b_1 x_i) \tag{4}$$

로 나타낼 수 있다. 실제의  $y$  값이 예측치보다 클 때의  $e$ 는 양(+)이 되고, 작을 때의  $e$ 는 음(-)이 된다.  $e$ 를 잔차(Residual)라고 한다.

데이터에 가장 잘 들어맞는 직선이란 “잔차  $e$ 의 합계가 최소가 되는 직선”이라고 생각할 수도 있지만, 이와 같은 직선은  $y$ 의 평균을 말하는 것으로 이것은  $x$ 와 무관하고 의미가 없다. 그래서 잔차  $e$ 를 거리처럼 생각해서 +, -의 부호가 사라지도록  $e$ 를 자승해서 평가하여, “ $e$ 의 자승의 합계가 최소가 되는 직선”이 데이터가 가장 잘 들어맞는 직선이라고 할 수 있다. 이와 같은 방법을 최소자승법(Least Square Method)이라 부르고 이것이 회귀분석의 기본 배경이다[17]. 다중선형회귀모형은 종속변수  $Y$ 에 독립변수  $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(m)}$ 이 있는 다변수 선형 모형으로 식(5)와 같은 선형함수로 표현된다.

$$Y_i = a + b_1 X_i^{(1)} + b_2 X_i^{(2)} + \dots + b_m X_i^{(m)} + \epsilon_i \tag{5}$$

여기서,  $\epsilon_i$ 는 확률변수이며, 평균 0과 분산  $\sigma^2$ 를 가지는 정규분포형태를 띠고 있다고 가정한다. 따라서,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ 과  $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_N^{(1)}$ 이 주어졌을 때( $i=1, 2, \dots, m$ ), 다변수 선형 모형은 벡터, 행렬을 이용하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_1^{(1)} & X_1^{(2)} & \dots & X_1^{(m)} \\ 1 & X_2^{(1)} & X_2^{(2)} & \dots & X_2^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_N^{(1)} & X_N^{(2)} & \dots & X_N^{(m)} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix} \tag{6}$$

따라서 선형함수는 식(7)과 같은 형태로 정의 할 수 있다[18].

$$Y = XB + \epsilon \tag{7}$$

## 2. 개발 모형에 대한 검증

다중회귀분석을 통하여 단기 수위 예측을 위한 회귀모형을 개발하게 되면 수위 예측의 정확도를 평가하기 위해서 수정 결정계수(ACD)와 평균제곱근오차(RMSE), 효율계수(NSEC), 평균절대편차(MAD), 오차의 양적 개념을 표현하는 평균절대편차와 관측 평균값의 비(RAD), 상관계수(CC)와 같은 통계지표를 사용하였다.

수정결정계수(ACD)는 식(8)과 같으며 결과가 1에 가까울수록 통계적으로 적절한 것으로 판단할 수 있으며, 평균제곱근오차(RMSE)는 식(9)의 형태로 나타낼 수 있고 수치가 0에 가까워야 통계적으로 적합하다 할 수 있다.

$$1 - \frac{n-1}{n-k-1} \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{8}$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{9}$$

식(10)으로 보여지는 효율계수(NSEC)는 0.9이상이면 매우 밀접한, 0.8 ~ 0.9는 밀접한, 0.8이하의 신뢰할 수 없음을 의미한다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{10}$$

다른 방식으로는 식(11)의 평균절대편차(MAD)와 식(12)에서 나타내고 있는 MAD와 관측 평균값의 비는 오차의 양적 개념을 표현하기 위해서 주로 사용한다.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{11}$$

$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\bar{y}} \tag{12}$$

여기서  $n$ 은 자료의 수,  $k$ 는 매개변수의 수,  $y_i$ 는 관측수위,  $\hat{y}_i$ 는 예측수위,  $\bar{y}_i$ 는 관측수위의 평균,  $\bar{\hat{y}}_i$ 는 예측수위의 평균,  $e_i$ 는 관측수위와 예측수위의 차를 말한다.

## III. 연구 대상유역

1. 대상유역 일반현황

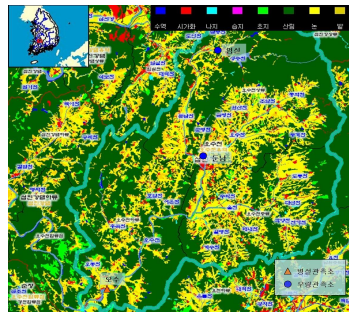
이 연구의 대상 유역인 오수천은 섬진강 본류의 좌안에서 유입되는 섬진강의 제 1지류로서, 섬진강 하구로부터 약 110.9km에 위치하고 있으며, 유역면적은 368.9km<sup>2</sup>, 유로연장은 43.8km 이다. 오수천 유역은 섬진강 수계의 상류인 동경 127°12'38" ~ 127°27'27", 북위 35°25'00" ~ 35°39'40" 사이에 위치하고 있으며, 유역의 중심부는 전주시에서 남동쪽으로 약 35km, 남원시에서는 북동쪽으로 약 20km 정도의 거리에 있다. 유역형상은 대체적으로 수지상을 이루고 있으며, 유역의 북쪽과 서쪽은 섬진강 본류 유역인 섬진강댐 유역과 접경을 이루고 있고, 남쪽과 동쪽은 섬진강 수계의 요천 유역과 접해 있다.

오수천 유역의 수문관측소 현황을 살펴보면 유역 내의 수위관측소는 2013년 현재 오수 수위관측소, 신기 수위관측소 총 2개소가 운영되고 있다. 그러나 신기 관측소의 경우 2012년에 신설되었으며 과거자료가 존재하지 않기 때문에 이 연구에서는 배제하였다. 2013년 현재 오수천 유역의 우량관측소는 임실 우량관측소, 둔남 우량관측소, 오수 우량관측소 총 3개소가 운영되고 있다.

이번 연구의 대상유역인 오수천 유역 및 티센망을 <Fig 1>에 표시하였다. <Fig 1>에 나타낸 것과 같이 오수천 유역은 우량관측소가 3개(임실, 둔남, 오수)가 위치하고 있으며, 오수 우량관측소는 수위관측도 같이 하는 병설관측소이다. 면적 비중을 보면 둔남 관측소의 면적 비중이 크다는 것을 알 수 있다. 이 연구를 통하여 산정된 둔남 우량관측소의 티센 계수는 0.580으로 0.268인 임실 우량관측소, 0.152인 오수 우량관측소에 비해 큰 영향력을 가지고 있다. 또한 <Fig 2>에서 나타난 바와 같이 오수천 유역의 토지 이용 현황은 평탄지가 발달한 둔남천 합류전과 율천에 논, 밭과 같은 경작지가 많은 면적을 차지하고 있으며, 그 외 지역은 대부분 산림이 자리하고 있음을 알 수 있다.



<Fig 1> Thiessen polygons for Osu stream basin



<Fig 2> Land Use Map for Osu Stream Basin

2. 대상유역 수위 및 강우자료의 수집

대상 유역의 수위예측을 하기 위하여 수위관측소와 우량관측소를 선정하였다. 대상 유역의 수위 및 강우 자료는 2006년부터 영산강홍수통제소 홈페이지에서 실시간으로 10분 단위 자료로 제공되고 있다. 기존의 미래 수위예측에 대한 연구는 1시간 단위 자료와 30분 단위 자료들을 이용하였다. 이에 따라 10분 단위 자료의 활용성을 기존의 연구 방법인 1시간 단위 자료와 비교·분석하기 위하여 10분 단위 자료가 제공되기 시작된 2006년부터 2013년까지 총 8년 동안의 대상 유역에 대한 1시간 단위와 10분 단위의 수위 및 강우 자료를 수집 하였다.

IV. 하천수위의 단기예측 모형의 구축 및 결과

1. 하천수위의 단기예측 모형의 구성 방법

본 연구에서는 단기 예측 수위인 60분 경과 후 수위(H60A), 120분 경과 후 수위(H120A) 및 180분 경과 후 수위(H180A)를 각각 종속변수로 결정하고 예측을 수행하기 위한 독립변수를 다양화 하여 총 4가지 방법을 구성하여 비교하였다. 시간의 간격은 활용이 가능한 가장 작은 측정 시간단위인 10분과 종속변수의 경과시간 변동 간격인 60분의 두가지 간격의 자료를 사용하였다. 독립변수 구성에 따른 4가지 방법은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Case Definition for this Study

Case	Observed Water Level Data		Observed Rainfall Data			Remarks
	Time Interval(Min.)	Duration	Time Interval(Min.)	Observation Point	Duration	
Case1	60	-180 min ~ 0 min	60	Areal average	-180 min ~ 0 min	
Case2	10	-180 min ~ 0 min	10	Areal average	-180 min ~ 0 min	
Case3	60	-180 min ~ 0 min	60	Dunnam, Imsil, Osu	-180 min ~ 0 min	
Case4	10	-180 min ~ 0 min	10	Dunnam, Imsil, Osu	-180 min ~ 0 min	

2. 수위예측을 위한 회귀계수의 산정

본 연구에서는 회귀분석을 통하여 오수천 유역의 현재까지의 강우와 오수 수위관측소 지점의 수위를 기반으로 회귀계수를 산정하여 오수 지점에서의 수위변동을 예측할 수 있는 예측할 수 있는 관계식을 구하고자 하였다. 이를 위하여 단계별 선택법을 통해 독립변수가 종속변수의 예측에 기여하는지를 판단하여 독립변수의 추가와 제거를 수행하여 회귀계수를 산정하였다. 회귀

계수의 값이 작다고 해서 종속변수에 대한 독립변수의 영향력이 작은 것이 아니며, 독립변수의 단위 등에 따라서 크게 달라진다. 따라서 종속변수에 대한 독립변수의 영향력을 판단하기 위하여 사용되는 상수( $t$ ) 값이 높은 변수일수록 종속변수에 대한 영향력이 크다고 판단할 수 있다. 다음 <Table 2> ~ <Table 5>는 Case 1에서 ~ Case 4의 방법으로 수위예측 회귀모형을 구축하여 선행 예측시간 H60A, H120A, H180A에 대하여 선정된 독립변수의 회귀계수와  $t$ 값을 나타내었다. 여기서 H는 수위자료, R은 유역 평균 강우자료를 나타내며, H와 R의 숫자는 시간을 의미한다. 과거 시간을 표시하기 위하여 B(Before)를 사용하였으며, 미래 시간을 표시하기 위해서 A(After)를 사용하였다. 그리고 지점강우를 사용하는 경우에는 우량관측소 각 지점을 구분하기 위해서 둔남 우량관측소는 Rd, 임실 우량관측소는 Ri, 오수 우량관측소는 Ro로 표시하였다.

<Table 2> Regression Coefficient of Multiple Linear Regression Analysis Model for Case 1

Case1(When Water Level Raising)			Case1(When Water Level Drawdown)		
Independent Variable	Regression coefficient	t	Independent Variable	Regression coefficient	t
Constant	0.03100	1.71308	Constant	0.09334	9.85407
H0B	1.46194	31.00429	H0B	1.43622	38.52169
H60B	-0.65458	-10.51796	H60B	-0.63898	-12.14063
H180B	0.17088	5.45862	H120B	0.13987	7.24403
R0B	0.00800	8.28023	R0B	0.00376	3.29888
R60B	0.00444	4.04372	R60B	0.00481	4.99055
R120B	0.00629	5.56560			

<Table 2>의 Case2(상승)의 경우를 살펴보면, H120B와 R180B의 독립변수들이 제거된 상태로 수위예측 모형이 구축되었다. Case2(하강)의 경우는 대부분 강우가 끝나고 난 후의 사상들로 선정되었기 때문에 R120B와 R180B에 대한 독립변수가 제거 되었으며, 전체적으로 강우 독립변수의 영향력이 크지 않는 것으로 나타나고 있다.

<Table 3> Regression Coefficient of Multiple Linear Regression Analysis Model for Case 2

Case2(When Water Level Raising)			Case2(When Water Level Drawdown)		
Independent Variable	Regression coefficient	t	Independent Variable	Regression coefficient	t
Constant	0.01036	1.48560	Constant	0.16749	22.67847
H0B	3.12469	27.82761	H0B	2.87031	29.61488
H10B	-0.91917	-4.72444	H20B	-0.41075	-2.19338
H20B	-0.76264	-3.89211	H30B	-0.77948	-4.11540
H30B	-0.60136	-4.92378	H40B	-1.09528	-7.06572
H170B	0.15596	12.59731	H100B	0.49340	7.82174

<Table 3> Regression Coefficient of Multiple Linear Regression Analysis Model for Case 2(Continue)

Case2(When Water Level Raising)			Case2(When Water Level Drawdown)		
Independent Variable	Regression coefficient	t	Independent Variable	Regression coefficient	t
R0B	0.01482	7.00827	H130B	-0.27633	-5.55945
R10B	0.00827	3.36852	H180B	0.08510	6.51179
R20B	0.00672	2.76005	R0B	0.02498	5.93940
R30B	0.00599	2.44794	R10B	0.01656	3.65798
R40B	0.00689	3.22433	R20B	0.01902	4.21186
R90B	0.00706	3.84090	R30B	0.01513	3.45498
R110B	0.00725	3.29346	R40B	0.01079	2.79612
R120B	0.00883	3.99281	R100B	0.00876	3.32063
R140B	0.00719	3.60512	R120B	0.00835	3.33610
R160B	0.00571	2.79514	R140B	0.01261	5.63062
R180B	0.00563	2.83298	R180B	-0.01275	-8.14475

<Table 3>에서 나타난 Case 2의 경우에도 Case 1과 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러나 지점강우를 사용하는 <Table 4>와 <Table 5>의 Case 3, Case 4에서 나타나는 경우에는 모형 구축을 위해 사용된 우량관측소 독립변수가 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이는 모형 구축에 사용되는 각 관측소와 시간분포가 많이 다르기 때문에 나타나는 현상이다.

<Table 4> Regression Coefficient of Multiple Linear Regression Analysis Model for Case 3

Case3(When Water Level Raising)			Case3(When Water Level Drawdown)		
Independent Variable	Regression coefficient	t	Independent Variable	Regression coefficient	t
Constant	0.03252	1.81996	Constant	0.21256	12.59118
H0B	1.45128	31.59315	H0B	1.59750	23.89713
H60B	-0.60861	-9.85377	H60B	-0.99134	-10.73070
H180B	0.13366	4.42034	H120B	0.25034	7.33078
Rd0B	0.00439	3.92522	Rd0B	0.01101	5.87794
Ri60B	0.00403	4.22542	Rd60B	0.00885	5.57359
Ri120B	0.00549	5.60492	Rd120B	0.00404	3.99201
Ro0B	0.00388	3.96432	Ro120B	-0.00399	-5.48226

<Table 4>의 Case 6(상승)에서는 둔남 우량관측소의 현재 강우량 Rd0과 오수 우량관측소의 현재 강우량 Ro0이 독립변수로 선택되어 모형 구축이 이루어진 반면, 임실 우량관측소는 현재 강우량인 Ri0은 제거되고, Ri60, Ri120이 독립변수로 선택되어 모형이 구축되었다.

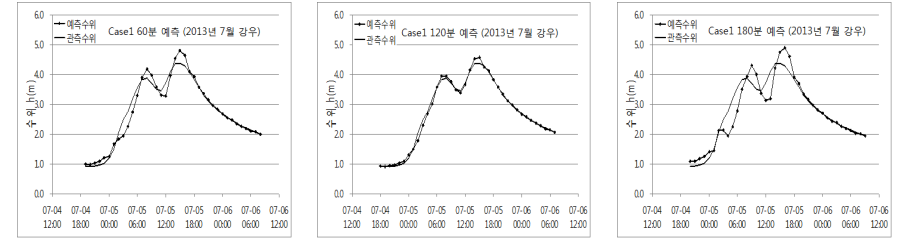
<Table 5> Regression Coefficient of Multiple Linear Regression Analysis Model for Case 4

Case4(When Water Level Raising)			Case4(When Water Level Drawdown)		
Independent Variable	Regression coefficient	t	Independent Variable	Regression coefficient	t
Constant	0.00637	0.93746	Constant	0.26114	24.86960
H0B	3.01905	26.69465	H0B	3.53339	23.88430
H10B	-0.91569	-4.66302	H20B	-1.00363	-3.70550
H50B	-0.18847	-2.34552	H80B	0.59606	3.18911
H160B	0.18278	12.08333	H100B	0.44291	2.99392
Rd0B	0.00751	4.64257	H130B	-0.41795	-5.06793
Rd10B	0.00520	3.08261	H170B	0.16513	6.38046
Rd20B	0.00475	2.86886	Rd0B	0.01222	2.34396
Rd90B	0.00450	3.18203	Rd20B	0.01437	3.04512
Ri20B	0.00437	2.75951	Rd100B	0.01172	3.91855
Ri130B	0.00411	2.83329	Ri10B	0.01766	4.68727
Ri150B	0.00379	2.42425	Ri170B	-0.00716	-3.95129
Ri160B	0.00572	3.59644	Ro0B	0.02285	4.13976
Ri180B	0.00779	5.28770	Ro10B	0.01765	3.20027
Ro0B	0.00703	4.68987	Ro170B	-0.00599	-3.12181

<Table 5>의 Case 4의 경우에도 각 우량관측소에 따라서 예측 시간에 대한 시간분포 영향이 다르다는 것을 나타내고 있으나, 이것이 유역 평균 강우량을 사용하여 공간 분포를 일정하게 가져가며 생기는 강우의 시간적·공간적 분포의 왜곡으로 인한 오차가 발생하면서 발생한 것으로 보인다.

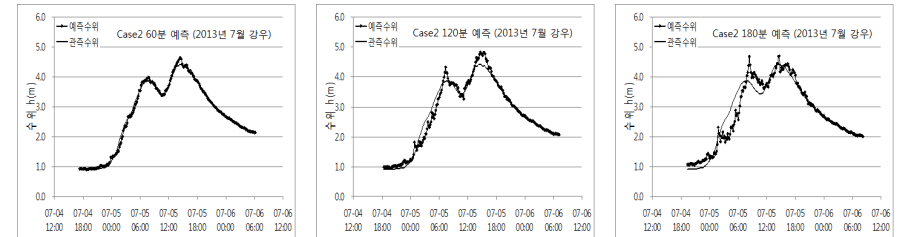
3. 모형을 이용한 단기예측 결과

앞의 과정들을 통하여 오수천 유역의 오수 수위관측소 지점에 대한 실시간 수위예측 다중선형회귀모형을 구축하고 회귀계수를 산정하였다. 위의 <Table 2>~<Table 5>에서 보는 바와 같이 독립변수의 회귀계수를 이용하여 오수 지점의 수위변동을 예측하는 관계식을 산정할 수 있다. 이와 같이 Case 1부터 Case 4까지 각 선행시간 60분, 120분 및 180분에 대한 회귀계수를 이용하여 관계식을 산정할 수 있었으며, 수위예측 회귀모형의 구축 결과를 확인하기 위하여 검증자료에 적용 하였다. 경우는 해당 지역에 2013년 7월에 발생한 사상을 사용하였으며 <Fig 3>~<Fig 6>은 각 방법에 대한 해석 결과를 보여준다.



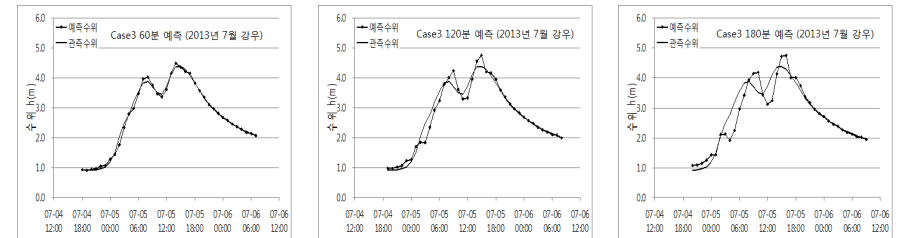
(a) 60 minutes prediction lead time (b) 120 minutes prediction lead time (c) 180 minutes prediction lead time

<Fig 3> Result of Water Level Prediction at Case 1



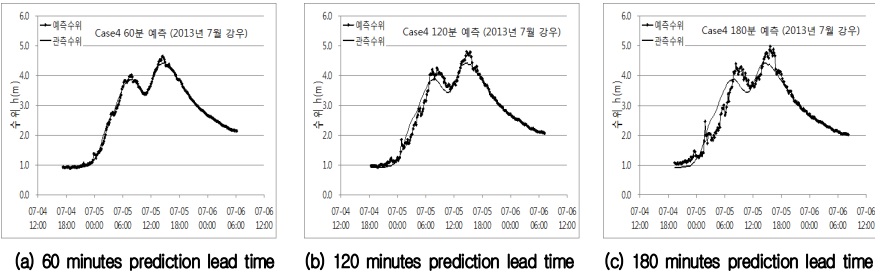
(a) 60 minutes prediction lead time (b) 120 minutes prediction lead time (c) 180 minutes prediction lead time

<Fig 4> Result of Water Level Prediction at Case 2



(a) 60 minutes prediction lead time (b) 120 minutes prediction lead time (c) 180 minutes prediction lead time

<Fig 5> Result of Water Level Prediction at Case 3



<Fig 6> Result of Water Level Prediction at Case 4

<Fig 3>-<Fig 6>에서 보는 바와 같이 선행시간이 길어질수록 오차가 커지며 예측 정확도가 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 상당히 높은 예측 결과를 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 또한, 시 자료를 이용한 <Fig 3>의 Case 1과 10분 자료를 이용한 <Fig 4>의 Case 2를 서로 비교해 보면 수위의 패턴이 변화하는 곡선의 부분에서 시 자료를 이용한 Case 1의 경우 이를 부드럽게 처리하지 못하였으며, 이에 따라 다소 큰 오차를 발생시키고 있음을 알 수 있다. 특히, 짧은 시간에 많은 강우가 내릴 경우에 홍수 예경보의 실시간적 관점에서 시 자료를 이용할 경우 많은 문제를 포함하고 있으며, 홍수 예경보에서 가장 중요한 침투 수위의 경우 유역면적이 작은 하천은 침투 수위의 지속시간이 길지 않으며 도심하천의 경우 더욱 짧아지는 특성을 보이고 있다. 따라서 시 자료를 이용할 경우 수위의 패턴변화에 유연하게 대처하지 못하여 발생하는 오차가 더욱 커지게 된다. 즉, 10분 자료를 활용함으로써 시 자료를 이용할 경우보다 홍수에 더욱 빠르게 대처할 수 있으며 오차도 상당부분 줄여 정확도가 향상 하였다.

최근 지구환경 변화에 따른 이상기후의 영향으로 자주 발생하고 있는 국지성 돌발호우의 영향성과 유역 평균 강우량을 사용하여 공간 분포를 일정하게 가져가며 생기는 강우의 시간분포의 왜곡의 영향성을 보기 위한 방법으로 각 우량관측소의 강우량자료를 각 각의 독립변수로 산정한 방법을 Case 3-Case 4에 사용함으로써 Case 1-Case 2 와 비교해보았다. 우량관측소의 강우량자료를 각 각의 독립변수로 사용함으로써 국지성 호우, 즉 전체 유역에 비가 내리는 것이 아니라 유역의 일부 특정 부분에서만 강우가 발생하고 그 비구름이 천천히 다른 지역으로 이동하면서 강우량의 각 우량관측소의 위치에 따라 강우의 발생 및 강우강도에 대한 시간차가 발생하게 되는데, 이와 같은 영향에 따라서 유역 평균 강우량을 사용하면서 발생하는 시간분포의 왜곡의 영향성은 <Fig 4>의 Case 2와 <Fig 6>의 Case 4을 살펴보면 뚜렷한 정확도 향상을 나타내지 못하였다. 또한, Case 4의 경우 독립변수가 많아지면서 예측 수위의 진동 폭이 커지면서 오차가 증가하고 있었으며 이에 따라서 정확도가 Case 2에 비해 줄어들었다. 이것은 실제 홍수 시 유역면적이 작은 곳에서는 국지성 돌발호우의 영향성이 크지 않기 때문으로 판단된다.

4. 각 방법별 모형의 검증

구축된 모형별 수위예측 결과의 오차율을 계산하여 모형별 정확도를 정량적으로 표현하고자

하였다. 수위 예측의 정확도를 평가하기 위해서 수정 결정계수(ACD)와 평균제곱근오차(RMSE), 효율계수(NSEC), 평균절대편차(MAD), 오차의 양적 개념을 표현하는 평균절대편차와 관측 평균값의 비(RAD)와 같은 통계지표를 사용하여 각 선행시간에 대한 수위예측 모형 검증을 실시하여 <Table 6>에 나타내었다.

<Table 6> Values of Statistics Index for Prediction Results from Each Case

Prediction Lead Time	Statistics Index	Case1	Case2	Case3	Case4
60min.	ACD	0.99266	<b>0.99566</b>	0.99277	0.99470
	RMSE	0.08478	<b>0.07092</b>	0.08415	0.07659
	NSEC	0.99405	<b>0.99597</b>	0.99414	0.99530
	MAD	0.05571	<b>0.04628</b>	0.05735	0.05015
	RAD	0.02036	<b>0.01686</b>	0.02096	0.01827
120min.	ACD	0.95051	0.96866	0.94819	<b>0.96342</b>
	RMSE	0.21316	<b>0.18373</b>	0.21070	0.19455
	NSEC	0.95987	<b>0.97107</b>	0.96079	0.96756
	MAD	0.14552	<b>0.12045</b>	0.13946	0.13006
	RAD	0.05264	<b>0.04338</b>	0.05044	0.04685
180min.	ACD	0.83796	<b>0.91333</b>	0.84112	0.89615
	RMSE	0.37274	<b>0.29625</b>	0.35337	0.31712
	NSEC	0.86862	<b>0.91921</b>	0.88192	0.90743
	MAD	0.24217	<b>0.19277</b>	0.22797	0.21714
	RAD	0.08673	<b>0.06869</b>	0.08164	0.07737

정량적 통계지표의 산정 값을 살펴보면 사상별로 다소 차이는 있으나 유역평균 10분 강우와 예측지점의 10분 수위자료를 이용하고 면적강우량을 이용한 경우인 Case 2에서 가장 정확도가 높은 예측 성능을 보이고 있는 것으로 나타났다.

수정결정계수가 0.970~0.996, 평균제곱근오차는 0.071m~0.114m, 효율계수는 0.975~0.996, 평균절대편차는 0.046m~0.073m, 오차의 양적 개념을 나타내는 평균절대편차와 관측 평균값의 비는 0.017~0.035, 상관계수는 0.993~0.998 으로 매우 우수한 예측 성능을 나타내고 있다. 특히 Case 2는 수정결정계수 0.987~0.996, 평균제곱근오차 0.071m~0.106m, 효율계수 0.988~0.996, 평균절대편차 0.046m~0.056m, 평균절대편차와 관측 평균값의 비 0.017~0.027, 상관계수 0.994~0.998 으로 다른 방법에 비하여 전체적으로 정확도 높은 결과를 보이고 있음을 확인 할 수 있다.

효율계수는 0.80 이상이면 자료가 밀접한 관계이며, 0.90 이상이면 매우 밀접한 결과를 가지는 것으로 판단하므로 작게는 0.919, 크게는 0.940의 값을 가지는 Case 2는 매우 밀접한 좋은 결과라는 것을 알 수 있다. 따라서 가장 우수한 예측 정확도를 보이는 Case 2의 매개변수를 이용하여 오수천 유역의 오수 지점에 대해서 실시간 수위 예측을 실시하면 선행 예측시간 3시간 까지 도 홍수예보에 충분히 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

## V. 결론

이 연구에서는 현재 국내 주요 하천의 홍수 예 경보 시스템에서 사용되는 저류함수모형을 유역면적이 작은 유역에 적용하여 발생하는 짧은 유하시간으로 인한 홍수예보의 선행시간 확보의 문제점을 해결하고 대상 유역의 오수 지점에 대한 단기적 수위예측을 실시하였다. 수문학적 과정의 복잡성으로 인한 기존의 강우-유출 모형의 단점을 개선하고자 실시간으로 관측되고 있는 강우와 수위 자료만을 이용하고 통계학적 방법 중에 하나인 다중선형회귀모형을 통하여 실제 발생한 검증 사상과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 강우량 및 수위를 이용하여 미래의 수위를 예측하는 모델을 개발하였다. 본 모델은 수위 상승 및 수위 하강시에 다르게 적용되도록 개발하였으며 대상유역인 오수천에 잘 적용되었다.

둘째, 시간변화에 따른 정확도를 예측한 결과 시간이 경과됨에 따라서 정확도가 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 대상유역에서는 선행시간 3시간까지도 정확도가 높아 홍수예보에 활용이 가능하다.

셋째, 본 연구에서는 수위의 상승과 하강에 대하여 첨두수위를 기점으로 분리하여 산정하는 방식을 사용하였으며, 2006년부터 각 홍수통제소에서 제공되고 있는 10분 단위 자료를 이용하였다. 또한, 유역의 평균값으로 적용되는 면적강우량을 사용하여 강우량 자료의 항목수를 감소시켜 독립변수의 과다현상에 의한 과적 발생을 막아 정확도의 상승을 도모하였으며, 이러한 선택은 반대의 경우에 비하여 확연히 높은 정확도의 결과값을 보여주었다.

지구환경 변화에 따른 이상기후의 영향으로 홍수재해에 의한 피해가 증가하고 있는 현 시점에서 비 구조물적 대책인 홍수예보는 매우 중요하며, 홍수예측모형의 실시간적 관점에서 충분한 선행시간의 확보와 정확도 향상은 홍수피해를 줄이며 대상 유역 인근 주민들의 생명과 재산의 보호에 많은 도움이 될 것이다. 강우사상은 사상별로 조금씩 다른 특성을 가지고 있기 때문에 통계학적 모형의 정확도를 높이기 위해서는 정확한 실측 자료의 확보와 오랜 기간의 호우사상을 대상으로 분석을 시행해야 할 것이며, 추후 기상 레이더관측 자료를 활용한 예측 강우량 분석 자료의 정확도가 더욱 향상되어 통계모형에 적용 가능하고, 강우량의 실측 데이터 품질이 개선된다면 향후 현재보다 긴 예측 선행시간의 확보와 홍수예측모형의 정확도 향상이 가능할 것으로 기대된다.

## References

- [1] Jamieson, D. G., J. C. Wilkinson, and R. P. Ibbitt. 1972. Hydrologic Forecasting with Sequential Deterministic and Stochastic Stages. *Proceedings of the International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resource Systems*. Arizona, USA: Tucson.
- [2] Natale, L. and E. Todini. 1974. *A Constrained Parameter Estimation Technique for Linear Models in Hydrology*. Publication No. 13, Institute of Hydraulics, University of Pavia,

Pavia, Italy.

- [3] Tao, P. C., A. R. Rao, and C. Rukvichai. 1975. *Stochastic Forecasting Models of Reservoir Inflows for Daily Operation, I. Model Development and Application to Rough River Reservoir Inflows*. Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, Report CE-HYD-75-8.
- [4] Keefer, T. N. 1976. Comparison of Linear Systems and Finite Difference Flow Routing Techniques. *Water Resources Research* 12(5): 997-1006.
- [5] Huynh Ngoc Phien and Nguyen Duc Anh Kha. 2003. Flood Forecasting for the Upper Reach of the Red River Basin, North Vietnam. *Water Research Commission SA*. 29(3): 267-272.
- [6] Mousavi, S. J., K. Ponnambalam, and F. Karray. 2007. Inferring Operating Rules for Reservoir Operations Using Fuzzy Regression and ANFIS. *Fuzzy Sets and Systems*. 158(10): 1064-1082.
- [7] Zahraie, B. and S. Mossa Hosseini. 2009. Development of Reservoir Operation Policies Considering Variable Agricultural Water Demands. *Expert Systems with Applications*. 36(1): 4980-4987
- [8] Yoon, Y. N. and S. Y. Won. 1991. A Multiple Regression Model for the Estimation of Monthly Runoff from Ungaged Watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association*. 24(3): 71-81.
- [9] Yoon, K. H. and H. M. Shin. 1994. The Flood Forecasting Model for the In-do Brg. by the Multi-Regression Analysis between the Water-level and the Influence Parameters. *Journal of Korea Water Resources Association*. 27(3): 55-69.
- [10] Son, M. W. and G. S. Lee 2003. Forecasting of Flood Stage Using Neural Networks and Regression Analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 23(3): 147-155.
- [11] Kim, Bum Jun. 2007. *Comparative Study of Storage Function and SSARR Models for the Flood Hydrograph Forecasting of a Miho Stream*. Master Dissertation, Inha University, Korea.
- [12] Lim, Yun Soo. 2010. *The Forecasting a High Water Level of Downstream at The Stage Table PF UP Stream for the Take Advantage*. Master Dissertation, Kangwon National University, Korea.
- [13] Choi, Seung Yong, et al. 2012. Comparison of Different Multiple Linear Regression Models for Real-time Flood Stage Forecasting. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 32(1): 9-20.
- [14] Byeon, Seong Joon, et al. 2013. A Study on the Improvements of Smart Water Grid on

Water Policy Direction for Local Government. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 9(3): 27-42.

- [15] Kim, Hyung San, et. al. 2013. Selection of Unit Hydrograph in Soyang Stream During Flood Season. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 9(4): 103-116.
- [16] Kim, Joo Cheol, et. al. 2011. The Simulation and Probabilistic Prediction of Rainfall-Runoff for Citarum River Basin. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 7(5): 99-108.
- [17] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement. 2009. *The Flood Alert System in Urban Area*. Urban Flood Disaster Management Research Center.
- [18] Han River Flood Control Office. 2005. *Improvement to Flood Forecasting Program for Major Branch*. Korea Institute of Construction Technology. Korea.

**변성준:** 인천대학교 건설환경공학과에서 석사학위(논문:우수유출을 고려한 해수욕장 수질 영향 분석)를 취득한 후, 박사과정을 수료하였다. 현재 (재)국제도시물정보과학연구원에서 선임연구원으로 재직 중이다. 주요논문으로는 강우발생 시 해안지역 대장균 유출에 관한 연구 외 다수의 논문이 있다(seongjune@paran.com).

**이성호:** 유량조사사업단 유량조사실 영상강그룹 소속 연구원으로 인천대학교 건설환경공학과에서 석사학위과정에 있다(summer1@hsc.re.kr).

**최계운:** 콜로라도 주립대학교에서 박사학위를 취득한 후, 인천대학교 건설환경공학과 교수로 재직 중이다(gyewoon@incheon.ac.kr).

**정재광:** 인천대학교 토목환경공학과에서 박사학위를 취득한 후, (재)국제도시물정보과학연구원에서 연구위원으로 활동 중이다(kill0713@hanmail.net).

#### 참고문헌 (References in Non-roman Script)

- [8] 윤용남, 원석연. 1991. 미계측 증소유역의 월유출량 산정을 위한 다중회귀모형 연구. 한국수문학회지. 24(3): 71-81.
- [9] 윤강훈, 신현민. 1994. 한강인도교 수위와 영향인자간의 다중회귀분석에 의한 홍수위 예측모형. 한국수문학회지. 27(3): 55-69.
- [10] 손민우, 이길성. 2003. 신경망 이론과 회귀분석을 통한 홍수위 예측. 대한토목학회논문집. 23(3): 147-155.
- [11] 김범준. 2007. 미호천유역 홍수모의예측을 위한 지류합수모형과 SSARR 모형의 비교 연구. 인하대학교 석사학위논문.
- [12] 임윤수. 2010. 상류수위표를 이용한 하류홍수위 예측기법. 강원대학교 석사학위논문.
- [13] 최승용, 한건연, 김병현. 2012. 실시간 수위 예측을 위한 다중선형회귀 모형의 비교. 대한토목학회논문집. 32(1): 9-20.
- [14] 변성준, 정재광, 최계운, 장동우. 2013. Smart Water Grid 기술 도입을 위한 지방자치단체 물정책 개선방향 연구. 한국위기관리논집. 9(3): 27-42.
- [15] 김형산, 맹승진, 심지훈, 김태우. 2013. 홍수기 소양천 유역의 단위유량도 선정. 한국위기관리논집. 9(4): 103-116.
- [16] 김주철, 김정근, 이상진, 맹승진. 2011. 저타름 유역의 수해 방재를 위한 강우-유출 모의 및 확률론적 예측. 한국위기관리논집. 7(5): 99-108.
- [17] 국토해양부 한국건설교통기술평가원. 2009. 도시홍수 예경보 시스템. 도시홍수재해관리기술연구단.
- [18] 건설교통부 한강홍수통제소. 2005. 주요지천 홍수예보프로그램 개선. 한국건설기술연구원.