

# 통계학적 기법을 이용한 도시홍수 예·경보모형의 개발

Development of Urban Flood Forecasting Model  
using Statistical Method

이범희\*, 임종일\*\*

Beum Hee Lee, Jong il Lim

## 요지

최근 도시의 발달은 하상공간에 대한 이용도를 높이는 방향으로 개발이 진행되어가는 추세이며, 하상도로 및 하상주차장의 이용은 이제 도시 내에서 이용 가능한 마지막 여유 공간으로 인식될 정도로 그 의존도가 높아져가고 있다. 그러나 하상공간의 활용도가 높아져갈 수록 도시홍수의 발생으로 인한 대피문제가 발생하게 되고 돌발홍수로 인하여 하상도로의 차단 혹은 하상 주차장에 주차된 차량의 소거가 늦어지는 경우 고스란히 피해를 보게 되는 등 그 부작용도 계속 증가되고 있다. 도시홍수의 특성을 살펴보면 국지성 돌발 강우에 의한 유량의 급격한 증가와 짧은 유하시간, 작은 유역면적 등에 의하여 주요 예보지점까지의 도달시간이 매우 짧아 수문학적 홍수예측 모형을 이용하여 홍수예측 업무를 수행하는데 선행 시간을 충분히 확보할 수 없다는 단점을 지니고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 하천시스템에 대한 설계 등을 목적으로 하여 모형의 적용을 통한 시뮬레이션 기법을 적용하고 이를 통하여 홍수 예경보를 발령하기에는 선행시간의 확보(대피시간의 확보)라는 측면에서 상당한 어려움을 지닐 수 있으므로 시시각각으로 측정되는 실시간 수위측정 자료 및 실시간 강우자료를 이용하여 모형의 수행과정을 생략하고 하천의 수위변동을 직접 예측하고 대피할 수 있는 시나리오 기반의 수문모형을 개발하였다. SPSS를 사용한 통계학적 모형을 대전광역시 3대 하천에 대하여 적용한 결과 예측자료가 실측자료를 고수위 및 저수위 부근에서 정확히 모의하지 못하는 경향이 나타났으나 경계 및 위험수위를 설정하고 이를 넘어가는 시점에 대한 예측을 하는 홍수경보 시점 예측에는 효율적인 적용성을 나타내었다.

## 1. 도시홍수 유발 인자와 홍수량과의 상관성 분석

회덕 수위관측소 지점을 대상으로 수위자료에 의한 경보 발령가능성을 파악하였다. 즉, 홍수 경계 및 위험 수위를 기준으로 이의 80 % (3.5 m 의 경우 2.8 m) 혹은 60 % 수위 (2.1 m) 도달을 기준으로 예보를 내릴 경우 경계 및 위험수위에 도달할 때까지의 시간이 Case 1 (2002년 8월 5일 ~ 8월 10일 강우사상)의 경우 40분 및 1시간 30분 정도가 소요되었으며, Case 2 (2002년 8월 31일 ~ 9월 2일 강우사상)의 경우에는 3시간 및 4시간이 소요되었다.

\* 정회원 · 배재대학교 건설환경철도공학과 교수 · E-mail : [phlee@pcu.ac.kr](mailto:phlee@pcu.ac.kr)

\*\* 학생회원 · 배재대학교 건설환경철도공학과 석사과정

### 1.1 수문모형을 위한 시나리오의 기초 구성 및 적용

회귀분석 기법을 적용하여 도시하천에서의 수위 상승을 예측하고, 가용한 한정된 정보(현재까지의 강우, 현재수위 및 상류지역의 수위)를 기반으로 장래 수위 및 유출을 예측하고, 이를 홍수 경계 및 위험수위 근접 혹은 초과여부를 판단하여 홍수 예경보를 제시할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 대전광역시의 갑천, 유동천, 대전천 등 3대 도심하천 구간에서 각 수위 및 강우관측소들 간의 자료들을 활용하고, 현재까지의 관측 자료들을 이용하여 1시간, 2시간, 3시간, 4시간 후의 수위변화를 예측할 수 있는 모형을 구성하였다. 여기에서 기상청의 강우예보 자료를 활용하지 못한 이유로는 강우에 대한 예측이 총량예보에 의한 방식으로 이루어지고 있어 본 예측 강우의 지속시간이 얼마인지를 정확히 추정하기 어려웠다는 점을 들 수 있으며, 기존의 강우-유출 모형이 아닌 통계적 모형을 이용하여 홍수예경보 모형의 구성을 시도한 것은 강우의 형태, 강우 강도 등에 대한 정보가 없는 경우 기존의 강우-유출모형을 적용하기 어렵고, 이러한 모형을 적용하고자 하는 경우에는 각종 매개변수의 추정과정이 복잡하고, 모형의 수행 및 분석과정을 통하여 예경보를 시행할 경우 돌발 홍수의 특성을 지니고 있는 도시홍수에 대한 충분한 예비시간(대피를 위한 선행시간)의 확보가 어렵다는 점을 들어 측정된 현재까지의 자료로부터 원하는 선행시간 이후의 수위변화를 직접적으로 제시할 수 있는 모형의 구성을 구성하고자하는 목표를 이유로 들 수 있다.

이에 따라 대전광역시 유역에서의 관측 및 이용 가능한 수위 자료, 강우자료들은 앞에서 제시하였던 강우 및 수위관측소들의 자료를 활용하도록 하였으며, 대전광역시 수위관측소들의 배치상황으로부터 예측하고자 하는 대상지점의 수위예측은 자신의 현재까지의 수위 자료와 상류에 위치한 수위관측소들의 자료, 그리고 주위의 강우자료들을 활용하여 예측하도록 하였다. 이에 따라 회귀분석에 의하여 수위의 변화를 예측하려는 식의 형태로는

$$h_{i,n} = b_{i,n} + \sum_{t=0}^{p_i} \Phi_{i,i,t,n} h_{i,t} + \sum_{j=1}^{u_i} \sum_{t=0}^{p_j} \Phi_{i,j,t,n} h_{i,t}$$

을 사용하도록 하였다. 여기에서,

$b_{i,n}$  : 수위를 예측하고자 하는 대상지점 i에서 n 시간 후의 수위

$\Phi_{i,j,t,n}$  : 대상지점 i에서 n 시간 후의 수위를 예측하기 위한 선형회귀모형에서의 상수

$\Phi_{i,j,t,n}$  : 대상지점 i의 상류에 위치한 j 지점의 t 시간 수위자료와 i 지점에서의 n 시간 후의 수위자료의 회귀계수

$t$  : 기존에 관측된 자료의 관측시간. 현재시간을 0으로 두었을 때 회귀식 계산을 위하여 사용된 i 지점에서의  $p_i$  시간까지의 선행자료 시간 ( $t = 1, 2, \dots, p_i$ )

$u_i$  : i 지점 상류에 위치하고 있는 수위관측소의 수이다.

### 1.2 유성 지점 수위변동 예측모형의 구성

갑천 유역의 유성지점에서 수위변동을 모의하기 위하여 용촌-가수원-유성지점에 대한 강우-수위 변동 현황을 살펴보았다. 용촌지점 및 가수원, 유성지점은 각각 5km 내외의 거리를 두고 위치하고 있어 첨두간의 시간차이가 30분 내외에서 이동할 것으로 예측하였으나 2006년 7월 9일부터 13일까지의 자료를 살펴보면 그 첨두 위치가 각각 전반부 첨두에서는 2시간 간격을 두고 발생하며, 후반부의 첨두부분에서는 2시간(가수원-유성) 및 1시간(용촌-가수원) 차이를 두고 첨두가 발생되고 있다. 이는 단순히 용촌지점에서 가수원지점으로

다시 유성지점으로 이동하는 효과만이 아니고 진잠천 및 두계천의 합류로 인하여 첨두시간 간에 차이가 발생하는 것으로 보인다. 이에 따라 단순히 대상지점에서의 수위 변화 및 강우자료를 통하여 미래의 수위변동을 예측하는 것보다는 상류 수위의 변화까지 고려하여 예측하는 것이 양질의 정보를 얻어낼 수 있을 것으로 판단하였다.

이에 따르면, 용촌-유성 구간에 대하여

$$Q_{1,1} = F(h_{1,1}, h_{2,1}, R_{3,1}) = \Phi_{1,1} h_{1,1} + \Phi_{2,1} h_{2,1} + \Phi_{3,1} R_{3,1}$$

I

$Q_{1,1}$  = 유성 지점의 다음 시간 단계의 수위,  $h_{1,1}$  = 용촌 지점에서의 현 시간 단계 수위  
 $h_{2,1}$  = 가수원 지점에서의 현 시간 단계 수위,  $R_{3,1}$  = 대상 지점에서 현 시간단계의 강수량,

$F$  = 전달 함수의 관계로 가정할 수 있으며, 전달함수는 입출력 자료계열의 회귀분석으로부터 예측수위와 실측수위와의 차이를 최소화하도록 결정되며, 그 형태는 입출력자료의 분석결과에 따라 결정되는 것으로 이후에는 이를 다변수 모형이라 지칭한다. 한편 회귀식에 포함되는 독립변수 즉, 이미 알고 있는 정보 가운데 가장 늦은 시점과 예측하고자하는 종속변수, 즉 미지수의 시점 차이는 예측 선행시간이라 지칭하며, 식(1)의 각 독립변수와 종속변수의 시점은 예측 시 결정되는 예측 선행시간에 따라 달라질 수 있다.

이에 따라

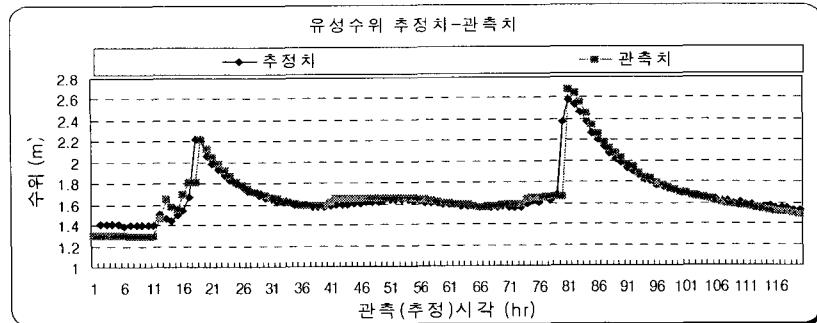
$$Q = -2.224 - 0.221 h_{1,1} + 2.024 h_{2,1} + 0.002498 R_{3,1} \text{ 로 구성하였다.}$$

## 2. 수문모형을 위한 시나리오의 기초 적용 및 평가

앞에서 구성된 예측 모형을 실제 기간 동안의 자료를 활용하여 예측해보고, 실제 강우 및 유출양상과 비교해보도록 하였다. 1시간 예측 선행시간을 적용한 경우는 [그림 1]과 같다.

현재의 유성, 용촌, 가수원 수위관측 값과 현재의 강우량을 이용하여 유성지점에 대한 예측 선행시간 이후의 수위를 예측하고, 이를 실제수위와 비교해보았다. 이에 따르면, 전반의 첨두시간 및 첨두수위는 예측 수위 값이 2.227 m, 실제 수위가 2.21 m로 수위 예측 값의 오차는 0.01661 m (오차 0.75 %)만큼 과다 추정하였고 첨두시간은 모의 18시 및 실제 19시로 1시간 먼저 첨두에 도달하는 것으로 예측하였다. 후반의 첨두시간 및 첨두값은 예측 수위 값이 2.57837 m, 실제 수위가 2.68 m로 수위 예측 값의 오차는 0.10163 m (오차 3.79 %)이었으나 첨두 발생시각은 공히 모의 후 81시로서 일치하였다.

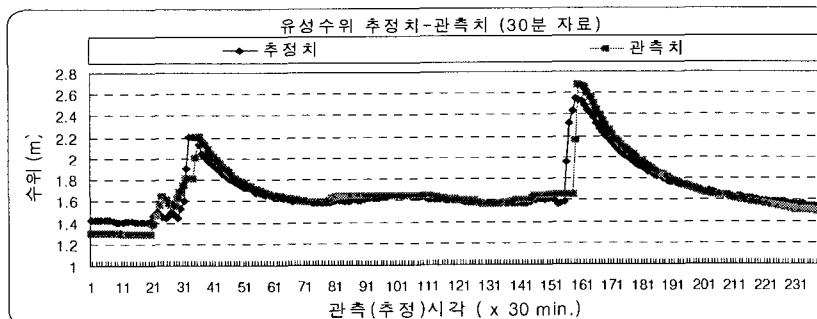
30분 예측 선행시간을 적용한 경우에는 30분 자료를 사용하여 유성지점에 대한 예측 선행시간 이후의 수위를 예측하고, 이를 실제수위와 비교해보았다. 이에 따르면, 전반의 첨두시간 및 첨두 수위는 예측 수위 값이 2.206 m, 실제 수위가 2.21 m로 수위 예측 값의 오차는 0.004 m (오차 0.08 %)만큼 과소 추정하였고 첨두시간은 모의 17.5시 및 실제 19시로 1시간 30분 먼저 첨두에 도달하는 것으로 예측하였다. 후반의 첨두 시간 및 첨두 값은 예측 수위 값이 2.55393 m, 실제 수위가 2.68 m로 수위 예측 값의 오차는 0.12607 m (오차 4.7 %)이었으나 첨두 발생시각은 모의 예측 첨두시간의 경우 80.5시, 실제 첨두 발생은 모의 후 81시로서 [그림 2]에서와 같이 30분 먼저 첨두에 도달하는 것으로 예측하였다.



[그림 1] 유성수위 추정치-관측치 관계 (60분 선행모의 결과)

이러한 결과를 이용하여 실제 대전광역시 유역에 대하여 2006년 홍수사상에 대하여 신뢰도를 검토하였으며, 신뢰도의 검토기준으로는 본 연구가 수위의 정확한 모의에 목적을 두는 것이 아니고 위험수위를 넘는 시간을 예측하고 이를 통하여 대피시간(선행시간)을 확보할 수 있도록 홍수 예경보를 발령하는 것이 목적이므로

- ① 홍수 예경보의 발령 후 실제로 위험수위에 도달하였는지의 검토
- ② 홍수 예경보를 발령할 만한 조건에 이르지 못하였는데(즉, 위험수위를 넘을 것으로 예측하지 못한 경우) 위험수위를 넘는 경우 역시 홍수 예경보 모형이 실패한 것으로 보았다.



[그림 2] 유성수위 추정치-관측치 관계 (30분 선행모의 결과)

이러한 조건에 따라 대전광역시 3대 하천에 대하여 홍수 예경보 모형을 2006년 홍수기(6월부터 9월)의 유량, 강우 조건에 적용한 결과 ②번 조건에 대한 경우는 발생하지 않았으나 [그림 1] 및 [그림 2]에서도 나타나는 바와 같이 위험 수위에 도달할 것으로 예측한 시간보다 위험수위에 도달한 시간이 늦게 발생하는 현상(즉, 위험수위 도달 예측 시간이 실제 위험수위 도달 시간보다 선행하는 현상)이 전반적으로 나타나고 있으나 앞의 조건들의 경우로 판단할 때에는 상당한 효과를 보여주고 있음을 알 수 있었다.

## 2.1 수위관측소가 없는 지역에 대한 홍수예경보 시스템의 구성

실제로 우리가 관심을 갖고 있는 부분은 수위관측소가 존재하는 지점이 아닌 미계측 지점들에 대한 수위변동을 예측하는 것일 것이다. 이에 따라 미계측 지역의 수위변동을 계측지점의 자료들을 이용하여 예측해낼 수 있는 방법들을 찾아내어야 할 것이며, 그러기 위해서는 앞에서 진행하였던 방법들과 같이 수위의 관측이 계측 수위관측소와 함께 일정기간 진행 됨으로써 이를 자료들간의 상호관계를 작성하여야 할 것이나 모든 지역에 대하여 동

시 관측이 시행된다는 것은 어려운 일일 것으로 보아 기존의 수위관측소 자료들을 활용하여 이들 자료를 기지점으로 두고 미지점들의 수위를 하천 수위모의 모형을 사용하여 간접 모의해 내는 방법을 사용하도록 하였다.

### 3. 결 론

선형 및 비선형 회귀모형을 적용하여 실시간 관측 자료를 통한 홍수예보지점의 수위변동을 예측하였다. 2002년부터 2005년까지 최근 3년간의 자료를 활용하여 매개변수 추정 및 회귀식을 산정하였으며, 2006년의 홍수기 자료를 활용하여 본 모형이 예 경보 신뢰성 판단 규정에 적합하게 운영될 수 있다는 가능성을 보여주었다. 그러나 본 모형의 검증에 사용된 2006년의 자료가 실제 위험수위에 접근한 현상이 5 ~ 6회에 불과하여 이러한 결과만으로 본 모형이 충분한 신뢰성을 갖는다고 판단하기에는 어려울 것으로 보이므로 이전의 다양한 홍수사상 및 모의자료 등을 통하여 신뢰성 확보 방안을 추가적으로 시행하여야 할 것으로 보았다.

대전천 지점들에 대하여 HEC-RAS를 적용하고, 이의 결과들을 이용하여 복수 수위관측소를 기지점으로 대전천의 유동천 진입 구간에 대한 수위예측 모형을 구성하여 보았다. 이를 위하여 기지점으로 복수 수위관측소의 자료를 활용하였고, 미지점들의 수위자료는 HEC-RAS에서 모의된 모의 수위자료를 활용하여 회귀분석하였다. 이러한 과정을 통하여 모의하는 경우 기지점인 수위관측소와 이 지점의 자료로부터 모의된 대상지점간의 상관도가 매우 높을 것으로 예측하였으나 강우 등 모의모형에 포함되지 않았던 자료, 시간 변화에 따른 수위의 변동 등의 연향에 의해서인지 다른 경우에 비하여 높은 경향을 보여주었으며, 생각보다 상관도가 아주 높지 않은 결과를 보여주었다. 다만, 이러한 과정을 통하여 실제 수위변동 모의 결과를 제시하고도 실제 관측 자료가 없어 이를 검증하지 못하였다는 점이 아쉬운 점으로 보인다.

### 감 사 의 글

본 연구(보고서)는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업 (06산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구 사업단의 연구성과입니다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부 한강홍수통제소 (2005). 주요지천 홍수예보프로그램 개선.
2. 국가수자원관리 종합정보홈페이지, <http://www.wamis.go.kr/>, 수자원공사.
3. 금강홍수통제소 홈페이지, <http://www.geumriver.go.kr/>, 건설교통부 금강홍수통제소