

수문관측 기반의 청계천 홍수에측모델 구축

Development of Flood Prediction Model using Hydrologic Observations in Cheonggye Stream

배덕효* · 정창삼** · 윤성심***

Bae, Deg-Hyo · Jeong, Chang Sam · Yoon, Seong Sim

Abstract

The objectives of this study are to provide an observation-based urban flood prediction model and to evaluate their performance on a restored Cheonggye stream. The study area, which has its own unique hydrologic and flooding conditions that can be characterized the standard of flood occurrence by watergate opening and walk lane inundation, measured stream discharges at the 5 sites and watergate opening and walk lane inundation through the main stream since 2006. This study derived the relationship between precipitation intensity and watergate opening and walk lane inundation time by using the observations of 2006 and verified their performance on 2007 flood events. The result showed that the coefficients of determination are ranged on 0.57-0.75, which would be acceptable if considering the complexity of the area and the proposed model simplicity. It also suggested the continuous observation of these properties is required for further improvement of the models.

Keywords : hydrologic observation, urban flood, flood prediction, cheonggye stream

요 지

본 연구의 목적은 도시하천으로 복원된 청계천유역에 대해 수문관측기반의 홍수에측모델을 제시하고, 실측자료를 통해 모형의 적용성을 검토하는데 있다. 본 연구의 적용대상지역인 청계천유역은 분류하천 좌우측에 연결되어 있는 수문열림과 저수호안의 침수발생이 인명대피의 기준이 되는 유역 고유의 특성을 가지고 있으며, 2006년 이후 분류하천의 5개 지점에서 수위 및 유량을 측정하고 있으며, 이와 동시에 강우에 따른 수문열림 및 저수호안 침수시간을 측정하고 있다. 본 연구에서는 2006년 실측자료를 이용하여 10분 최대강우강도에 따른 수문열림과 저수호안 침수시간에 대한 모형을 개발하고, 2007년 실측자료를 이용하여 개발된 모형의 적절성을 검토하였다. 그 결과 모형의 결정계수는 0.57-0.75 범위로 나타났으며, 이는 적용대상지역의 복잡성과 개발모형의 단순성을 고려할 때 적합한 것으로 나타났다. 그러나 모형의 정확도 향상을 위해서는 지속적인 관측을 통해 개발모형을 보완하여야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수문관측, 도시홍수, 홍수에보, 청계천

1. 서 론

최근 도시유역에서는 도시화로 인한 불투수면적과 침투유량의 증가 및 홍수도달시간의 단축 등으로 인해 홍수피해가 증가하고 있다. 이러한 도시유역의 홍수피해를 방지하기 위해서는 구조적 또는 비구조적인 대책수립이 필요하다. 구조적 대책으로는 고규격 제방 건설, 하도 정비, 방수로 건설, 저류지 설치 등이 있다. 이 방법은 효과적이나 도시유역의 경우 하천 주변이 대부분 도로나 주택지로 이용되고 있으므로 구조물 건설에는 한계가 있다. 따라서 홍수발생을 사전에 예측하여 피해를 최소화할 수 있는 비구조적 대책이 필요하다. 대표적인 비구조적 대책의 일환인 홍수에보의 목적은 유역내 특정지점의 향후 유량 및 수위상승 정도를 사전에 예

측하여 위험이 예상될 경우 주민들에게 대피할 시간을 확보해줌으로 인명 및 재산피해를 최소화하는 것이다.

홍수에보의 전통적인 방법으로는 예측강우와 수문모형을 이용하여 홍수량을 예측하는 방법과 지속적으로 수집된 강우와 수위, 유량 관측자료를 이용하여 강우-수위, 강우-유량의 관계식을 산정하고 예측된 강우량이 홍수를 유발하는 값 이상이 되면 홍수에보를 발령하는 방법이 있다. 일반적으로 홍수에보에는 강우와 수문모형을 이용하는 방법이 사용되고 있으며, 최근에는 국지적인 도시유역의 정확한 홍수에보를 위해 수문관측을 통한 예보방법과 수문관측자료를 수문모형의 입력으로 활용하는 방법을 병행하여 정확도를 향상시키는 연구가 수행되고 있다. 현재까지 도시홍수에보에 관한 대표적인 국외 연구사례로는 미국의 대표적인 소규모 도시유

*정희원 · 세종대학교 물자원연구소 토목환경공학과 교수 (E-mail : dhbae@sejong.ac.kr)

**정희원 · 인덕대학 건설환경설계과 교수 (E-mail : csjeong@induk.ac.kr)

***정희원 · 교신저자 · 세종대학교 토목환경공학과 박사사료 (E-mail : lome970303@paran.com)

역인 텍사스주 휴스턴 시에서 레이더 강우자료를 HEC-HMS와 HEC-RAS에 연계하여 운영하는 시스템을 구성하고, 실시간 하천 수위변화를 CCTV로 관측하여 홍수를 감지하는 홍수예보시스템에 관한 연구를 수행한 사례가 있다(FEMA and HCFCF, 2002). 특히 수문관측 자료를 이용한 사례로는 호주에서 홍수예보를 위해 강우와 수위 관측자료를 이용하여 하천의 최고수위와 도달시간의 상관관계를 분석하고, 단위도 모형을 이용한 사례가 있다(도시홍수재해관리기술연구사업단, 2004). 미국의 캘리포니아 북부에서는 USBR(U.S. Bureau of Reclamation)이 설치한 자동 LFWS(Local Flood Warning System)을 통해 강우관측자료에 근거한 강우량과 홍수의 특정관계를 홍수예보 업무에 활용하고 있다(NWS, 1997). 또한, 미국의 Susquehanna 강 유역에서는 기존의 홍수 피해를 유역에 구축된 강우 및 수위 관측자료와 위성영상 자료를 이용하여 홍수예경보를 수행하는 SFFWS(Susquehanna Flood Forecast and Warning System)을 운영하고 있다 (<http://www.susquehannafloodforecasting.org>).

지금까지 국내의 도시홍수예보는 실측수문자료의 부족 및 부정확성으로 인해 대부분의 경우 수문모형을 이용한 홍수량 예측을 주된 방법으로 사용하고 있다(건설교통부, 2005). 그러나 청계천과 같이 높은 불투수율, 짧은 도달시간, 하천 양안에 설치된 수문의 영향에 따른 복잡한 수문학적 거동 특성을 지닌 지역에서는 기존의 수문모형 기반의 홍수예측 뿐 아니라 실측 수문자료 기반의 홍수예보 기법을 병행하여 사용하는 것이 보다 효율적일 것이다. 정창삼(2007)은 복원 후의 유출거동을 방재적 관점에서 분석하고, 강우와 수문열림 및 산책로 침수 관계를 규명하여 이를 방재시스템의 개선방안으로 제시하였다. 이에 본 연구에서는 기존 연구를 고려하여 수문열림과 산책로 침수 발생을 홍수발생기준으로 설정하고, 이를 바탕으로 한 청계천 복원구간에서의 홍수예측 모델을 제시하고자 한다. 이를 위해 기존 연구에 제시된 강우와 수문열림 및 산책로 침수 관계식 개발시의 강수량 산정 오류를 수정하고, 2007년의 관측결과를 이용하여 수정된 식의 적합성을 검증·분석하였다.

2. 청계천 유역의 특수성

2.1 청계천의 유역 특성

청계천은 유역면적 50.96 km²의 중소규모 도시하천으로 시점부에는 중학천과 백운동천이 연결되어 있으며, 상류에서는 삼각동천이 유입되며, 하류에서는 성북천과 정릉천이 유입된 후 중랑천과 한강 본류의 합류점으로 연결되는 형태를 지니고 있다. 복원 전의 하천은 유역내의 우·오수를 전량 집수하여 하수관거를 통하여 배수하였으나 복원 후에는 분리하여 배수하고 있다. 청계천 유역의 본류 8.12 km 구간 가운데 5.84 km 구간이 복원공사를 통해 형태가 변화되었으며, 복원공사와 더불어 도시하천의 유출특성을 좌우하는 하수관로 변경 공사도 이루어졌다(서울특별시 시설관리공단, 2006; 정창삼, 2007). 표 1은 청계천 유역에 대한 물리적인 특성값인 유역면적, 유로연장, 평균하폭 등을 나타내고 있다. 청계천과 같은 도시하천 유역을 소유역으로 구분하기 위해서는 관망에 대한 분석이 필수적이며, 그림 1은 청계천 유

표 1. 청계천의 유역 특성

하천명	유역면적 (A, km ²)	유로연장 (L, km)	형상계수 (A/L ²)	평균하폭 (m)	하상경사
청계천	50.96	10.92	0.43	84	1/310~1/510

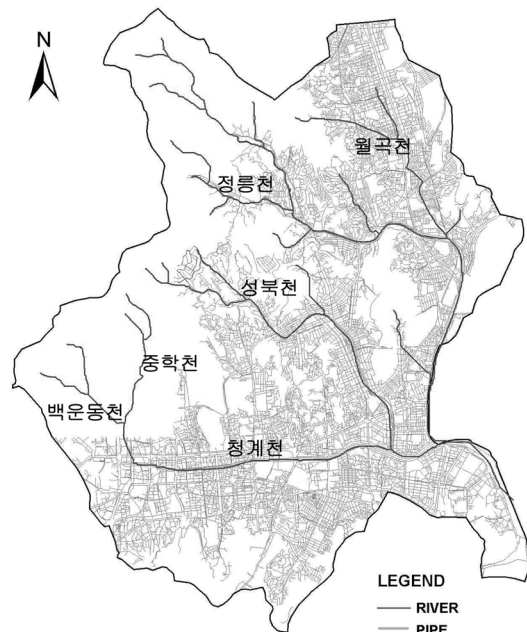


그림 1. 청계천 유역 및 하천

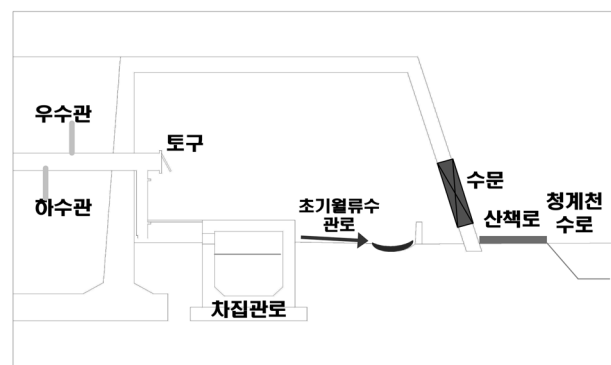


그림 2. 청계천 복개박스의 구조

역의 하천형상 및 관로현황을 나타낸다. 청계천 유역 내 토지이용현황은 총면적 50.96 km² 중 임야 20.68%, 주거지 55.69%, 아파트 3.32%, 상업지 19.72%, 운동장 0.59%이다.

2.2 청계천 복원 후의 상황

서울시는 청계천을 깨끗한 물이 흐르는 하천으로 복원하고 수중과 수변에 생물이 서식할 수 있는 여건을 만드는 등 생태공간을 조성하여 사람과 자연이 공존하는 도시로의 변화를 위해 2003년 7월부터 2005년 9월까지 2년 3개월의 복원공사를 수행·완료하였다(<http://cheonggye.seoul.go.kr/>). 복원공사를 통해 하천의 기능을 상실한 채 복개되어 하수관과 도로로 사용되던 청계천이 자연형 하천으로 복원되었으나 청계천은 자연하천과는 상이한 도시하천의 특성을 갖게 되었다. 일반적으로 도시하천은 유역의 대부분이 불투수지역으로 매우 짧은 도달시간을 갖으며, 하수관과 하천이 복잡하게 연계되는 수문학적 특성을 갖는다. 청계천 유역 자체가 서울시 중심에 위치하여 도시화가 거의 100% 이루어진 인구 밀집

지역이며, 건천인 청계천의 하천기능 유지를 위한 유지용수 관리를 위해 차수벽을 설치하였으므로 자연하천과는 상이한 특성을 갖게 되어 홍수 도달시간이 매우 짧아졌고, 이로인해 강우에 의한 급격한 유출 변화 특성을 가지게 되었다. 특히, 복원 후 청계천은 시민의 휴식처 및 관광명소로 자리매김되어 하천 저수호안에 조성된 산책로에는 복원 후 2년만에 5,600만명이 다녀갈 정도로 상시 시민들의 통행이 이루어지고 있다. 이러한 이유로 홍수기의 돌발홍수나 집중호우로 인해 급속한 수위상승이 발생할 경우 인명피해의 위험이 존재하며, 인명피해 방지를 위한 홍수예측모델의 구축이 요구된다.

2.3 청계천의 구조적 특수성

복원된 청계천 유역은 하천 양안에 도시 하수처리 및 우수처리를 위한 복개박스가 존재한다. 복개박스의 측면에는 청계천 전구간에 걸쳐 그림 2와 같이 수문이 설치되어 있다. 이 수문을 통해 호우에 따른 하수 유량의 증가가 발생할 경우 일부 유량이 하천으로 방류되거나, 하천 수위가 수문보다 높아졌을 경우 수문을 통해 하천유량이 하수관으로 유입되어 하수처리장으로 이동되는 구조적인 특수성이 있다. 이런 구조적인 특수성으로 인해 청계천 유역의 유출은 크게 비강우시 유출과 강우시 유출로 구분된다(서울특별시 시설관리공단, 2006; 정창삼, 2007). 비강우시 모든 청계천 유량은 유지유량과 성북천, 정릉천 등과 같은 하천직접유출유량에 의해 결정된다. 이때 하수관망에서 유입되는 유량은 차집관로를 통해 하수처리장으로 직접 들어가서 청계천 본류의 하천유량에 아무런 영향을 미치지 않는다. 그러나, 강우가 발생하면 직접 유출은 비강우시와 동일하며, 차집관로에서만 해석이 달라지는데 합류식관을 통한 우수의 차집관로 유입에 따른 CSO관로 월류가 이루어진다. 강한 강우로 인해 CSO관의 유량이 월류되면서 복개박스로 유량이 유입되어 월류할 경우 일부 수문에서는 열림현상이 발생한다. 특히, 산책로 주변에 위치한 수문에서 열림현상이 발생할 경우 이용 시민의 안전을 위협할 수 있어 이에 대한 예측과 대책마련이 무엇보다 중요하다(서울특별시 시설관리공단, 2007). 따라서, 본 연구에서는 청계천 유역의 홍수기준을 수문열림과 저수호안의 산책로 침수로 설정하였으며, 이러한 기준을 바탕으로 강우, 수위, 수문열림 및 산책로 침수 관측 자료를 기반으로한 홍수예측모델의 구축방안을 제시하고자 하였다.

3. 수문관측 현황

3.1 강우 및 수위 관측 현황

수문열림과 저수호안 산책로의 침수를 홍수기준으로한 청계천의 홍수예측모델 구축을 위해서는 실시간 관측을 통한 강우자료의 확보가 필요하다. 실시간 관측자료는 홍수예측의 기준 자료로 활용되고, 실시간 홍수상황의 확인을 가능하게 한다. 청계천 유역의 강우관측소는 서울시에서 운영중인 구청 및 동사무소의 강우계 자료와 기상청에서 운영중인 자동관측망(AWS)의 자료가 있다. 본 연구에서는 특히 청계천과 같이 도달시간이 짧은 유역의 관리를 위해서는 1분단위의 측정시간을 갖는 AWS가 활용가치가 높으므로, 이를 홍수예측을 위한 강우자료로 활용하였다. 기상청에서는 청계천 유

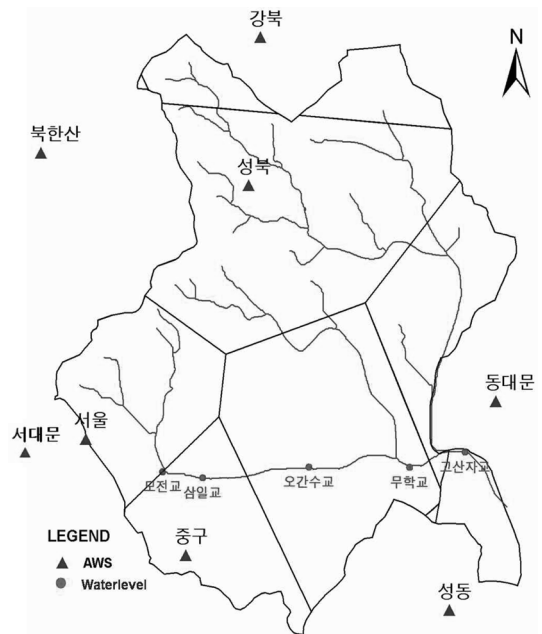


그림 3. 청계천 유역내 AWS 및 수위 관측소

역 인근의 8개 지점(그림 3)에서 AWS를 사용하여 1분단위의 강우자료를 수집하고 있다. AWS는 대체로 수감부(sensor) 부분, 신호변환처리(SCPU; Signal Condition and Processing Unit)부분의 복잡한 전자장치의 과정을 거쳐 풍향, 풍속, 기온, 상대습도, 강우량 등의 기상요소들을 자동적으로 수집할 수 있는 최신 첨단 기상관측장비이다.

또한, 청계천 유역과 같이 저수호안이 산책로로 조성되어 인명피해의 위험이 존재하는 유역에서는 저수호안의 범람이 발생하는 수위를 방재개념의 홍수위로 정의할 수 있다. 이러한 이유로 수위자료는 청계천 홍수예보를 위해 홍수의 발생을 정의할 수 있는 기준이 되므로 실시간 수위관측은 필수적이다. 청계천에서는 그림 3의 원으로 표시된 5개 지점에 초음파 수위계를 설치하여 수위관측을 실시하고 있다. 수위 측정지점 가운데 최상류인 모전교의 경우 2005년 11월 26일부턴 1분 단위 수위 측정자료가 축적되어 있으며, 삼일교와 무학교의 경우 2005년 6월 30일 이후, 고산자교와 오간수교의 경우 2005년 6월 14일 이후부터 현재까지의 수위자료가 지속적으로 관측되고 있다.

3.2 수문열림 및 산책로 침수 관측 현황

청계천유역의 복개내부와 하천본류간의 원활한 흐름을 유지하기 위하여 본류구간에는 54개 지점에 249개의 수문이 설치되어 있다. 이외에도 수문설치는 복개구간에 대한 악취방지와 우변화를 방지하기 위한 목적도 있다. 수문은 평소에는 열리지 않으나 강우 발생시 차집관로에 물이 가득차게 되면 토구 덮개를 월류하여 BOX 관로를 채우며, 일정 수압 이상이 발생되면 수문이 열리게 된다. 본 연구에서는 청계천 유역의 홍수기준인 수문열림과 산책로 침수 현상을 분석하고자 하였다.

이를 위해 2006년의 11개 호우사상과 2007년의 22개 호우사상동안 수문열림 현상을 관측하였다. 2006년 수문관측 결과에 의하면 강우에 따른 수문열림현상이 일정한 규칙을 가지고 발생함을 규명하였으며, 이를 그룹화하여 나타내면

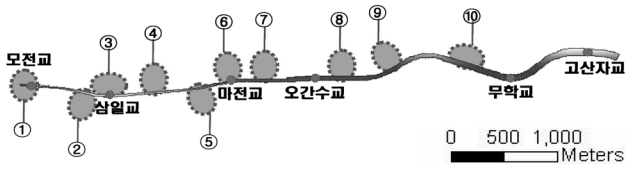


그림 4. 수문열림 관측의 구분

그림 4와 같다. 그림 4의 숫자는 그룹화된 지역명을 나타내며, 1번은 시점부 박스, 3번은 삼일교 부근, 6번은 마전교 부근을 나타내며, 6번부터 오간수교 사이는 산책로 침수 관측지역에 해당된다. 2006년 수문관측 기간 동안 비교적 열림현상 발생이 빈번하여 강우와 수문열림간의 관계식 도출이 가능한 지역에 대해 관계식을 도출하였으며, 2007년 관측결과를 이용하여 관계식의 정확도를 검증하였다. 수문열림 관측 방법은 수문 인근에 위치한 관측요원이 수문이 열리는 시간과 상황, 산책로의 침수 현황 등을 기록하는 방법을 사용하였다. 수문의 경우 한번 열린 수문은 일정시간이 지나면 강우의 형태에 따라 닫혔다가 다시 열리는 현상이 반복되기도 한다. 또한, 수문열림의 시점을 언제로 정의하느냐에 따라 분석결과가 달라질 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 정창삼(2007)의 논문에서 제시한 바와 같이 수문에서 물이 최초로 유출되는 경우를 수문이 열리는 시간으로 설정하였다.

4. 수문관측자료의 홍수예보 활용

4.1 최초 및 주요지점 수문열림 관계식 개선

청계천에서의 도달시간은 방재활동을 위한 기본 자료로 활용되므로 신중하게 산정되어야 한다. 일반적으로 수문학의 도달시간 개념처럼 최원점의 비가 유역출구를 도달하는 시간이 되고 나면 이미 청계천과 같은 특수한 도시하천에서는

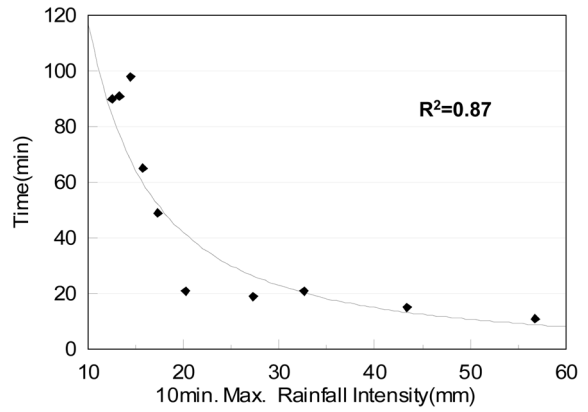
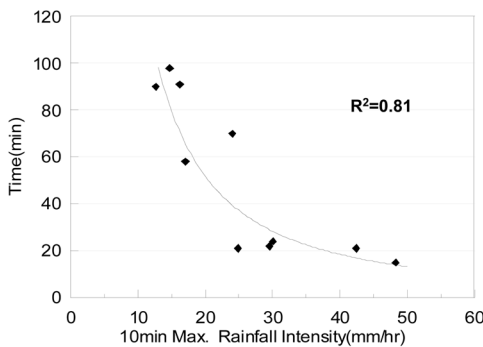


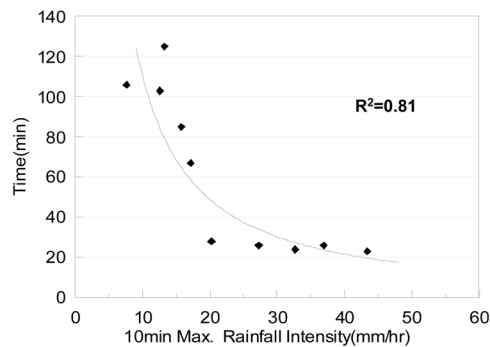
그림 5. 최초수문열림 지점의 강우별-수문열림 관계 분석

방재 대응시간이 지나가버린다. 이러한 관점에서 본 연구는 청계천에서의 도달시간을 일반적인 수문학적인 도달시간과는 달리 강우로 인해 유역내 최초수문열림 또는 산책로 침수가 발생하는 시간으로 설정하고 이를 청계천 방재 및 홍수예보에 활용하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 수문열림 및 저수호안 침수와 강우 관측결과와의 상관관계를 도출하였다.

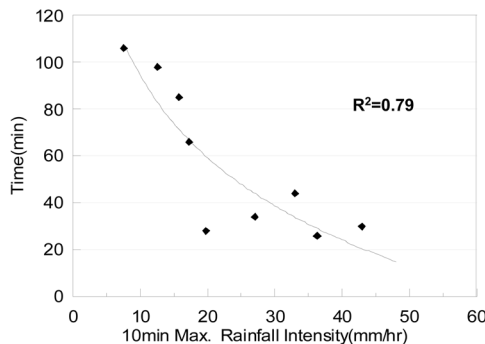
기존의 연구를 통해 규명된 청계천 수문열림과 강우 관계식의 경우, 최초수문열림과 10분 최대강우강도 관계식의 결정계수가 0.71로 제시되었다(서울특별시 시설관리공단, 2006; 정창삼, 2007). 그러나, 관계식 산정에 사용한 강우자료의 일부 오류가 확인되어 이를 보정하여 관계식을 재산정하는 것이 필요하였다. 본 연구에서는 이를 위해 2006년의 보정된 강우와 수문열림 관측결과를 바탕으로 청계천 본류 전 구간에서 최초로 수문열림이 발생하는 지점과 주요지점인 시점부 박스, 삼일교 부근, 마전교 부근의 수문열림에 대한 분석을 수행하였다. 일지별 수문열림 발생 지점을 대상으로 유관한 인자로 판단된 10분 최대강우강도와 수문열림 발생시



(a) 시점부 박스



(b) 삼일교 부근



(c) 마전교 부근

그림 6. 주요지점의 10분 최대강우강도-수문열림 관계

간과의 관계를 분석하였다. 본 분석에 사용된 강우자료는 AWS를 통해 1분간격으로 관측된 강우를 티센다각망을 통해 계산한 유역면적 강우이다. 10분 최대강우강도는 발생 강우 시계열자료에서 10분 누적 강우를 1분단위로 이동시키면서 가장 큰 값을 산정하고, 이를 강우강도의 일반단위인 mm/hr로 환산하기 위해 6을 곱하여 산정하였다.

재산정된 최초수문열림 발생시간과 10분 최대강우강도 관계는 그림 5와 같으며, 결정계수가 0.87로 개선되었다. 또한, 시점부 박스와 삼일교 부근, 마전교 부근 지역의 수문을 대상으로 재산정된 10분 최대강우강도와 주요지점의 수문열림 발생시간관계는 그림 6과 같이 분석하였다. 재산정된 10분 최대강우강도와 최초수문열림 및 주요지점별 수문열림 발생시간의 관계식은 다음과 같다.

$$y_t = 3602.3 \times x_{10t}^{-1.487} \quad (1)$$

$$y_{t_1} = 4442.3 \times x_{10t}^{-1.4858} \quad (2)$$

$$y_{t_2} = 1647.8 \times x_{10t}^{-1.1745} \quad (3)$$

$$y_{t_3} = -50.64 \times \ln(x_{10t}) + 210.99 \quad (4)$$

여기서 x_{10t} 는 10분 최대강우강도(mm/hr)를 나타내며, 식(1)의 y_t 는 강수발생 후 청계천 복원 전구간에서 최초수문이 열리는 시간(분), 식(2)의 y_{t_1} 은 시점부 박스의 수문이 열리는 시간(분), 식(3)의 y_{t_2} 는 삼일교 부근의 수문이 열리는 시간(분), 식(4)의 y_{t_3} 은 마전교 부근의 수문이 열리는 시간을 나타낸다. 관계식별 결정계수를 산정한 결과, 최초수문열림 관계식은 0.87, 시점부 박스와 삼일교 부근 수문열림 관계식은 0.81, 마전교 부근 수문열림 관계식은 0.79로 산정되었다.

4.2 저수호안 산책로의 침수 관계식의 개선

청계천 홍수예보기준인 저수호안 산책로의 침수에 대한 대피기준을 마련하기 위해 2006년의 마전교-오간수교 부근 산책로 침수 관측결과를 이용하여 강우와 산책로 침수의 관계를 재분석하였다. 표 2는 마전교-오간수교 부근 산책로 침수 발생시간을 관측한 결과이며, 그림 7은 10분 최대강우강도와 침수발생시간의 관계를 분석한 그림이다. 10분 최대강우강도가 증가할수록 침수발생시간이 감소하는 적절한 결과를 얻을 수 있었으며, 결정계수가 0.65인 관계식(식 5)을 유도할 수 있었다.

$$y_w = -119.55 \times \ln(x_{10t}) + 470.9 \quad (5)$$

표 2. 마전교-오간수교 부근 산책로 침수 발생시간 분석

일자	강우시작 시간	침수시간	10분 최대강우강도 (mm/hr)	침수발생 시간(분)
6월8일	11:21	12:08	33	47
6월10일	13:23	13:58	19.8	35
6월14일	10:47	15:31	8.64	224
6월25일	22:36	23:15	27.06	39
6월29일	22:25	23:10	42.96	45
7월10일	11:35	14:21	21.66	166
7월12일	02:59	03:30	36.66	31
7월15일	13:36	15:45	23.28	129

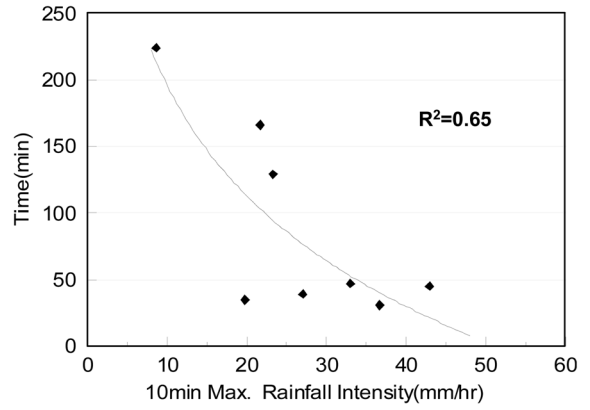


그림 7. 10분 최대강우강도와 저수호안 산책로 침수 관계식

여기서 y_w 는 마전교-오간수교 부근의 산책로 침수발생시간(분)이며, x_{10t} 는 10분 최대강우강도(mm/hr)이다.

4.3 개발 모델의 검정

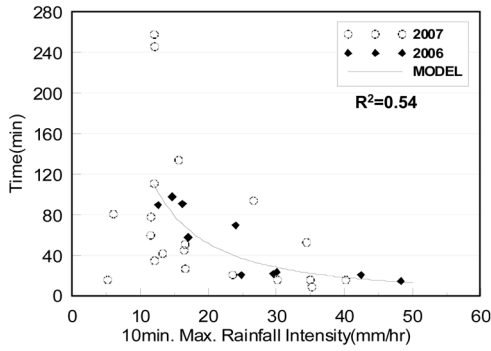
개선된 10분 최대강우강도와 수문열림 관계식 및 산책로 침수 관계식의 적합성을 검토하기 위해 2007년의 강우에 대한 수문관측결과를 이용하였다. 주요 3개 지점(시점 박스, 삼일교 부근, 마전교 부근)에 대한 수문열림 분석을 실시하였고, 강우 자료도 모델의 개발과 동일한 AWS 1분 강우자료를 이용하여 유역면적 강우량을 산정하여 분석하였다.

적합성 분석을 위해 2006년의 수문열림 관측결과 및 2006년의 관계곡선식과 2007년의 관측결과를 그림 8(a)~(c)와 같이 표출하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 일부 사상은 2006년의 관계식이 적합한 것으로 판단되나, 일부 사상의 경우 부적합한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 관계식을 통해 계산된 수문열림시간과 실제 수문열림시간이 50% 이상 차이가 나는 사상을 관계식 적용시 부적합한 것으로 규정하였다. 하지만 이러한 오차를 고려하더라도 시점박스의 수문열림 관계식은 전체 검증사상 20개 가운데 15개가 오차 범위에 들어 활용이 가능한 것으로 판단되어지며, 75% 가량의 적용성을 나타내었다. 삼일교 지점은 전반적으로 전체 검증사상 10개 가운데 7개가 오차 범위에 들어 70% 가량의 적용성을 나타내었다. 마전교 지점은 전체 검증사상 16개 가운데 9개가 오차 범위에 들었으며 56% 가량의 적용성을 나타내었다. 주요지점의 10분 최대강우강도와 수문열림 관계식을 활용한 수문열림시간의 검정결과, 일부 호우사상에서 부적합것으로 판단되었으나, 대체적으로 56~75%의 적용성을 보여 홍수예보를 위해 활용이 가능할 것으로 판단된다.

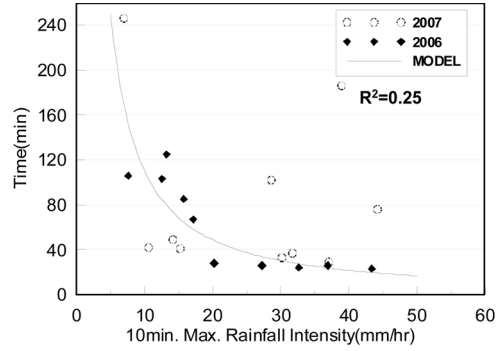
본 연구에서 제시한 10분 최대강우강도와 산책로 침수관계식의 검정을 위해 2007년 산책로 침수 관측결과를 사용하여 관계식의 적합성을 분석하였다. 그림 8(d)는 마전교-오간수교 산책로 침수 관계식의 검정 결과를 나타내고 있다. 산책로 지점은 전체 검증사상 17개 가운데 11개가 오차 범위에 들어 65% 가량의 적용성을 나타내었다.

4.4 분석 및 토의

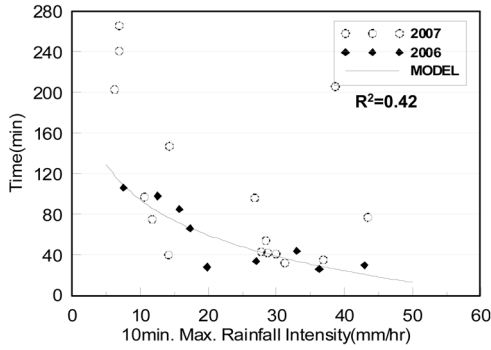
본 연구에서 제시한 10분 최대강우강도와 수문열림 및 침수 관계식의 적용결과를 분석하였다. 이를 위해 표 3과 같이 모형의 적용한계를 벗어난 경우(부적합한 경우)를 선정하



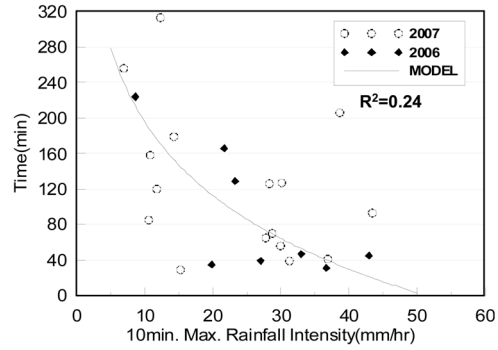
(a) 시점부 박스 수문열림



(b) 삼일교 부근 수문열림



(c) 마전교 부근 수문열림



(d) 산책로(마전-오간수교) 침수

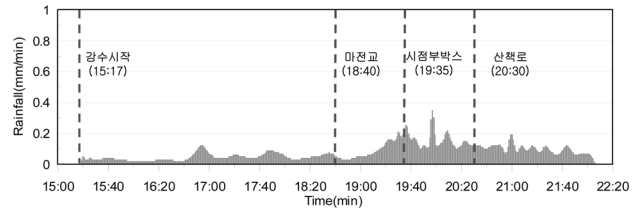
그림 8. 주요지점 10분 최대강우강도-수문열림 및 산책로 침수 관계식 검정

표 3. 모형적용 부적합 발생지점 및 사상

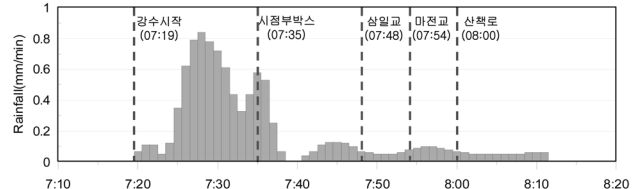
시점부 박스	삼일교 부근	마전교 부근	산책로 침수
-	-	2007.03.02	-
2007.03.04	-	2007.03.04	2007.03.04
2007.03.28	2007.03.28	2007.03.28	-
2007.03.31	-	2007.03.31	2007.03.31
2007.04.20	2007.04.20	2007.04.20	2007.04.20
-	2007.05.12	-	-
2007.05.24	-	2007.05.24	2007.05.24
2007.06.28	2007.06.28	2007.06.28	2007.06.28
2007.07.01	2007.07.01	2007.07.01	2007.07.01
2007.07.02	2007.07.02	2007.07.02	2007.07.02
2007.07.04	-	2007.07.04	2007.07.04
2007.07.11	-	-	2007.07.11
2007.07.16	-	-	-
2007.07.19	-	2007.07.19	2007.07.19
2007.07.24	2007.07.24	2007.07.24	2007.07.24
2007.07.29	2007.07.29	-	2007.07.29
2007.08.03	-	-	2007.08.03
2007.08.07	-	-	-
2007.08.08	2007.08.08	2007.08.08	2007.08.08
2007.08.09	2007.08.09	2007.08.09	2007.08.09
2007.08.14	-	2007.08.14	2007.08.14
2007.08.15	-	2007.08.15	2007.08.15

주) 음영부분은 모형적용 부적합 발생일

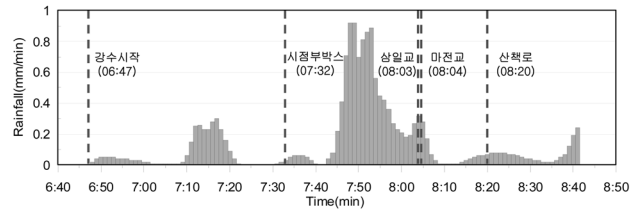
후, 발생 사례를 모든 지점에서 부적합이 발생한 경우, 모든 지점에서 부적합이 발생하지 않는 경우, 시점 박스를 제외한 모든 지점에서 부적합이 발생한 경우, 산책로 지점만 부적합



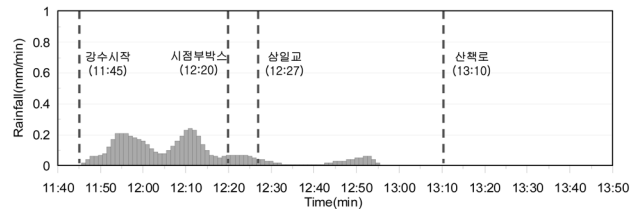
(a) 2007년 3월 4일 강우사상



(b) 2007년 6월 28일 강우사상



(c) 2007년 8월 8일 강우사상



(d) 2007년 7월 29일 강우사상

그림 9. 오차 발생 사상별 강우 시계열 분석

이 발생한 경우와 같이 4가지로 구분하였다. 구분된 결과를 이용하여 그림 9와 같이 대표적인 호우사상에 대한 강우 시계열 분석을 수행하고 구체적인 원인을 분석하였다.

표 4. 개발 모델 적용을 위한 기준

지점명	적용 기준	비고
시점부 박스	강우시작 후 0.2 mm/min 이상 강우가 60분 이내 발생시	
삼일교, 마전교	강우시작 후 0.2 mm/min 이상 강우가 30분 이내 발생시	
산책로	침수가 발생할 때 까지 강우가 지속되는 경우	마전, 오간수교 구간

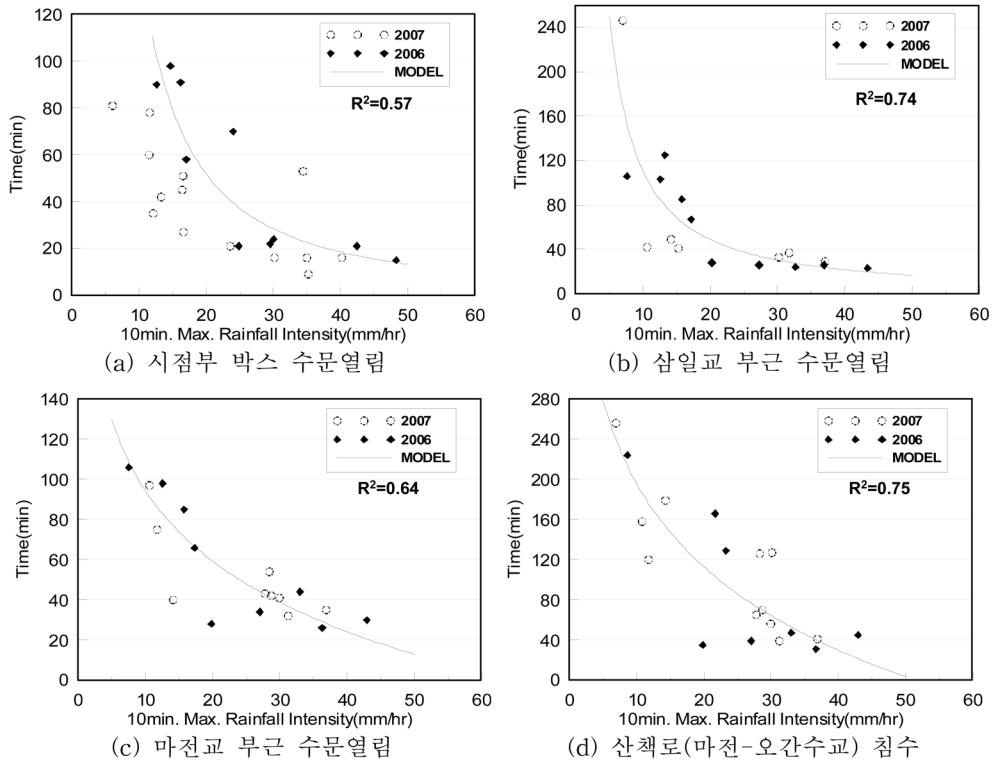


그림 10. 주요지점 10분 최대강우강도-수문열림 및 산책로 침수 관계 분석(기준 적용)

모든 지점에서 모형적용 부적합이 발생하는 사상인 2007년 3월 4일에 대한 강우 시계열을 보면(그림 9(a)), 이 사상의 특징은 강우 시작 후 60분 이내에 0.2 mm/min 이상의 강우강도가 발생하지 않았다는 특징이 있다. 그림 9(b)는 모든 지점에서 부적합이 발생하지 않는 사상인 6월 28일에 대해 강우 시계열을 분석한 결과이다. 이 사상은 강우 시작 후 30분 이내에 0.2 mm/min 이상의 강우강도가 발생했다는 특징이 있다. 그림 9(c)는 시점 박스를 제외한 모든 지점에서 부적합이 발생하는 사상에 대해 강우 시계열을 분석한 것이다. 이 사상은 강우 시작 후 30분 이상 60분 이내에 분당 0.2 mm/min 이상의 강우가 발생했다는 특징이 있다. 이를 통해 시점부 박스의 모형적용기준은 0.2 mm/min 이상의 강우가 60분 이내 내릴 경우인 것으로 판단되며, 나머지 지점은 0.2 mm/min 이상의 강우가 30분 이내 내릴 경우인 것으로 판단된다. 이를 통해 시점부 박스와 다른 지

점들에 대해 각각 다른 기준을 정해야 수문열림 관계식의 정확한 활용이 가능하다는 결과를 도출하였다. 또한 산책로 관계식 적용에 부적합이 발생한 원인을 그림 9(d)와 같이 부적합이 발생한 사상인 2007년 7월 29일의 시계열 강우의 분석을 통해 확인하였다. 그 결과, 이 사상은 산책로 침수 발생 전에 강우가 중단 되었다는 특징이 있었다.

오차원인을 분석한 결과, 수문열림 및 산책로 침수관계식을 적용하기 위한 기준은 다음 표 4와 같으며, 적용기준을 고려하여 강우를 관계식에 적용하면 다음 그림 10과 같이 수문열림에 대한 예측의 결정계수가 0.24~0.54에서 0.57~0.75로 보다 정확해진다.

청계천 복원건설 초기의 청계천 방재는 지속시간 10분에 대해 4 mm 이상의 강우가 예측되면 비상근무와 통제를 실시하는 것이었다. 하지만, 이 경우 파이프통제 혹은 통제시점의 지연으로 사고 발생의 계기가 될 수 있는 불안감을 가지

표 5. 강우강도에 따른 수문열림 및 산책로 침수 시간

10분최대강우강도 (mm/hr)	최소수문열림시간 (분)	그림지점별 수문열림 시간(분)			마전교-오간수교 산책로 침수시간(분)
		시점부 박스	삼일교 부근	마전교 부근	
10	-	145	110	94	196
20	42	52	48	59	113
30	23	28	30	39	64
40	15	19	22	24	30
50	11	13	17	13	3

고 있다. 이에 본 연구에서는 실측자료에 근거한 홍수예측모델을 이용하여 강우강도에 따른 수문열림시간 및 산책로 침수시간을 계산하여 제시하였다. 도출된 최초수문열림 관계식, 주요지점별 수문열림 관계식, 산책로 침수 관계식을 홍수예측모델로 이용하여 10분 강우강도(mm/hr)가 10, 20, 30, 40, 50 mm/hr일 때의 수문열림 시간을 계산하여 표 5에 제시하였다.

다만 본 연구의 청계천 홍수예측모델에 대한 분석은 청계천 복원 후 수문열림과 산책로 침수 관측을 시작한 2006년의 모델개발 결과를 2007년 관측자료로 검증하여 연차별 변동성과 특성을 제시한 것이다. 따라서 이를 보다 일반화하기 위해서 향후 지속적으로 수문관측자료를 확보하여 분석을 수행하는 것이 필요하다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 복원된 청계천유역의 홍수예보 활용을 위해 수문관측기반의 청계천 홍수예측모델을 구축한 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 청계천 홍수발생기준을 하천양안의 수문열림 발생과 산책로 침수로 설정하였고, 수문열림 및 산책로 침수와 10분 최대강우강도간의 관계 식을 개선하였다. 또한, 개선된 관계식의 적합성 검토를 위해 2007년의 청계천 수문관측결과를 이용하여 관계식을 검증하였으며, 관계식을 보다 효율적으로 적용할 수 있도록 오차발생 형태를 4가지로 구분하여 검증결과를 분석하고 관계식별 적용기준을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 10분 최대강우강도와 수문열림 및 산책로 침수관계식을 적용한 결과, 결정계수가 0.57~0.75로 개선되었다.

향후 본 연구에서 제시한 모델의 적용성을 향상하기 위해

서는 주요 지점에 대한 수위 및 유량관측뿐 아니라 강우에 따른 수문열림 및 저수호안 침수상황에 대한 지속적인 관측이 요구되며, 이를 통한 모델의 개선 및 검증이 요망된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 건설교통부, 한강홍수통제소(2005) 주요지천 홍수예보프로그램 개선.
 도시홍수재해관리기술연구사업단(2004) 국내외 도시홍수예경보 기법의 조사 및 평가(FFC03-07), 기술보고서.
 서울특별시 시설관리공단(2005) 돌발강우대비 청계천 방재시스템 구축방안 연구. 연구보고서.
 서울특별시 시설관리공단(2006) 청계천 하천 모니터링 연구용역 연구보고서.
 서울특별시 시설관리공단(2007) 청계천 하천 모니터링 연구용역 연구보고서.
 정창삼(2007) 방재적 관점에서의 청계천 유출 거동에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권 제5호, pp. 543-551.
 FEMA, and HCFCF (2002) Off the Charts T.S. Allison Public Report, Harris County Flood Control District, Texas.
 NWS (1997) Automated Local Flood Warning Systems Handbook Weather Service Hydrology Handbook No.2, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Hydrology:Silver Spring, Maryland.

(접수일: 2008.6.13/심사일: 2008.7.17/심사완료일: 2008.9.17)