

# 도시 홍수 예경보 시스템의 특징과 구성방향에 관하여



이 범 희 |

배재대학교 건설환경·철도공학과 부교수  
bhlee@pcu.ac.kr

## 1. 홍수의 유형 및 특성

홍수 예측의 일반적인 목적은 홍수 재해로 인한 인명 및 재산의 손실을 제거하거나 감소시키는 데 있다. 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해서는 홍수의 예측의 결과가 실제로 홍수로 인한 피해를 줄일 수 있도록 신뢰성 있는 홍수 예보 및 경보에 정확하게 전달되어야 하는데 기존 홍수방어를 위한 비구조적인 홍수 대책(non-structural flood measure) 중에서 이를 실현하기 위한 가장 효율적이면서도 크게 발전한 기법으로는 홍수 예경보 시스템(Flood Forecasting and Warning System, FFWS)의 개발을 들 수 있을 것이다.

우리나라에서도 '74년에 한강, '87년에 낙동강을 시작으로 금강, 섬진강, 영산강 등 5개 홍수 통제소에서 5대 하천 홍수 예경보 시스템이 구축되어 운영 중에 있으며, 5대강 이외에 국가 하천에 속하는 임진강 및 7개 중소하천 홍수 예경보 시스템을 설치 중에 있다. 또, 임진강 유역에서는 홍수 예경보 시스템에 국내 처음으로 C 밴드 강우 레이더를 통한 공간강우자료를 사용하고 있다.

다만 기존의 홍수 예경보 시스템이 국가 하천과 지천에서의 하천 범람을 예측하는 것을 주목적으로 운영되어 왔다면, 이에 반하여 90년대 이후로 들어와서

는 호우가 국지성 또는 계절라성 호우의 특성을 지니게 되었고 이로 인하여 산악 및 상류 소유역의 잦은 돌발홍수와 발달된 도시 지역의 홍수로 인한 피해가 급증하고 있는 현실은 돌발 호우로 인한 급경사 지역의 토사 유출 등의 관리문제 대두와 함께 새로운 홍수 예경보 시스템에 의한 통합적인 홍수 예경보가 매우 중요하다고 인식하게 되었다.

일반적으로 홍수는 크게 하천홍수(River Flood), 도시홍수(Urban Flood), 돌발 홍수(Flash Flood), 그리고 해안홍수(Coastal Flood)로 구분할 수 있다. 그러나 실제로 홍수는 지역에 따라 이러한 여러 유형이 조합하여 발생하는 복합형인 경우가 많으며 이러한 경우 그에 따르는 홍수피해는 더욱 커지게 된다. 표 1에서는 이러한 홍수의 유형 및 특성을 정리하였다.

최근 미국과 같은 선진국에서의 통합적인 홍수 예경보 시스템(Integrated Flood Forecasting and Warning System, IFFWS)은 현재의 홍수 예경보 시스템과 비교하여 크게 세 가지의 중요한 개선점을 강조하고 있다. 즉 자료 모니터링의 다변화를 통한 TM 관측망 및 이외의 Remote Sensing, Radar, 강우 및 강우 이동역 분석 자료 등 다변화된 관측망을 통한 자료의 취합 및 분석을 첫째로 들 수 있으며, 유역홍수정보(watershed flood information)와 지역홍수(local or regional flood information)의 연계, 그리고 하천홍수, 도시홍수, 돌발홍수 및 해안홍수의 지역 특성에 따른 통합적인관리 등을 들 수 있다.

## 2. 홍수 예경보 시스템의 구조

홍수 예경보 시스템은 일반적으로 그림 1과 같이

표 1. 홍수 유형 및 특성

유형	원인	특성
하천홍수 (River Flood)	태풍 또는 집중 호우에 의한 하천의 범람	공간적으로 넓은 지역에 장기간(daily) 발생하여 그 피해가 광범위하며 제방의 월류 및 붕괴에 의한 피해가 지배적
도시 홍수 (Urban Flood)	도시의 주차장, 건물, 도로 등의 불 투수 지역의 증가	불투수역의 증가로 인한 침투 홍수의 증가 및 도달 시간의 단축, 도시 내수 배제의 불량으로 인한 주택지, 상가, 공장지 등의 침수에 의한 피해가 지배적
돌발 홍수 (Flash Flood)	지형적으로 급경사 소 유역(산악지역)에의 집중호우	공간적으로 좁은 지역에 짧은 기간(minutely) 동안 발생하며, 상류하천 유량의 급격한 증가, 유사 밀도류의 형성, 산사태, 상류 소형 댐의 붕괴에 의한 피해가 지배적
해안홍수 (Coastal Flood)	태풍 또는 호우 시 저기압 형성에 의한 해수면의 상승 및 높은 파랑의 형성	높아진 해수면 및 파랑에 의해 해안이 저지대에서 바닷물에 의한 침수 피해가 지배적이며, 하천 하류 지역에는 만조 시 해수 유입으로 인한 하천의 범람에 의한 피해가 지배적

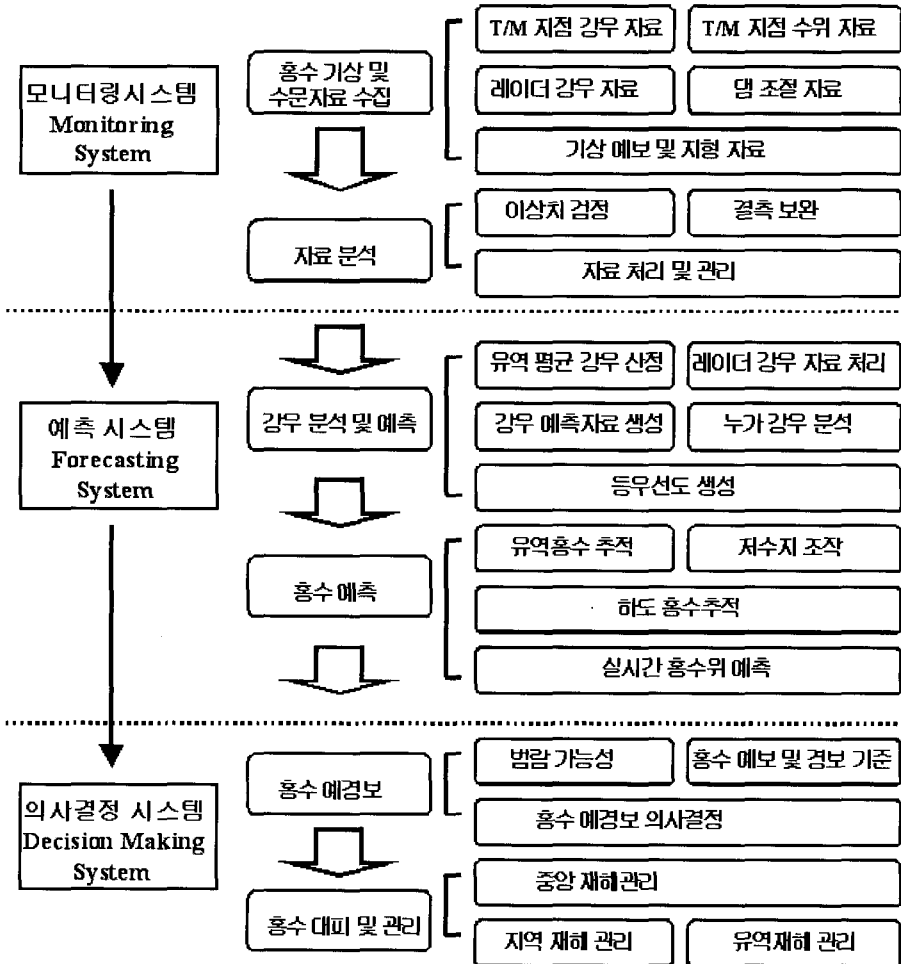


그림 1. 홍수 예경보 시스템 구조

구성되어 운영되어 진다. 이론적인 홍수 예경보 시스템은 세 가지 부 시스템으로 구성될 수 있다. 우선 홍수 관련 자료를 수집하고 홍수 예측을 위한 입력 자료를 생성하는 모니터링 시스템(monitring system), 실시간으로 강우량 및 강우 이동방향을 예측하고, 이를 이용하여 기존에 구축된 강우-유출-수위 모형에 의하여 홍수 예측을 수행하는 예측 시스템(forecasting system)이 있다. 홍수 예측 기법은 지역에 따라서 하천홍수, 도시홍수, 돌발홍수, 그리고 해안홍수예측 기법으로 나눌 수 있으며, 이는 적절한 강우-유출 모형의 선정 및 검증에 그 정확도가 지배적이다. 마지막 단계는 홍수 예측 및 홍수 기준, 그리고 다양한 행정적인 상황 등의 정보를 확률론적인 기법(Statistical or Baysian method) 또는 퍼지 이론(Fuzzy theory) 등의 다양한 의사결정기법을 사용하여 홍수 여부 및 대책, 그리고 궁극적으로 홍수관리자가 합리적이고 최적의 대처를 할 수 있도록 도와주는 의사결정시스템(decision-making system)으로 구성되어 진다.

### 3. 홍수 예경보 모형 조사

#### 3.1 홍수 예경보 모형의 분류 및 적용

홍수 예경보 시스템에서 가장 중요한 요소는 관측되거나 예측된 강우 입력 자료를 이용하여 하천 유출량을 예측하는 홍수예측시스템이다. 홍수를 예측하기 위한 수문 모형연구는 이미 상당히 많이 수행되어 왔으며, 홍수예측을 위하여 사용될 수 있는 강우-유출 모형은 일반적으로 그림 2와 같이 분류할 수 있다. 일반적으로 공간 스케일(space sale)에 의해 개략 모형(lumped model)과 분포형 모형(distributed model), 시간 스케일(time scale)에 의해 단일사상 모형과 연속 모형, 그리고 모의기법과정(process)에 의해 확정론적 모형, 추계학적 모형과 이들 두 모형 기법의 복합모형으로 크게 나눌 수 있다. 최근에는 블랙박스(Black-box) 모형 개념의 비선형적인 예측 기법인 신경망 기법이 홍수 예측에서 다양하게 실험되고 있다.

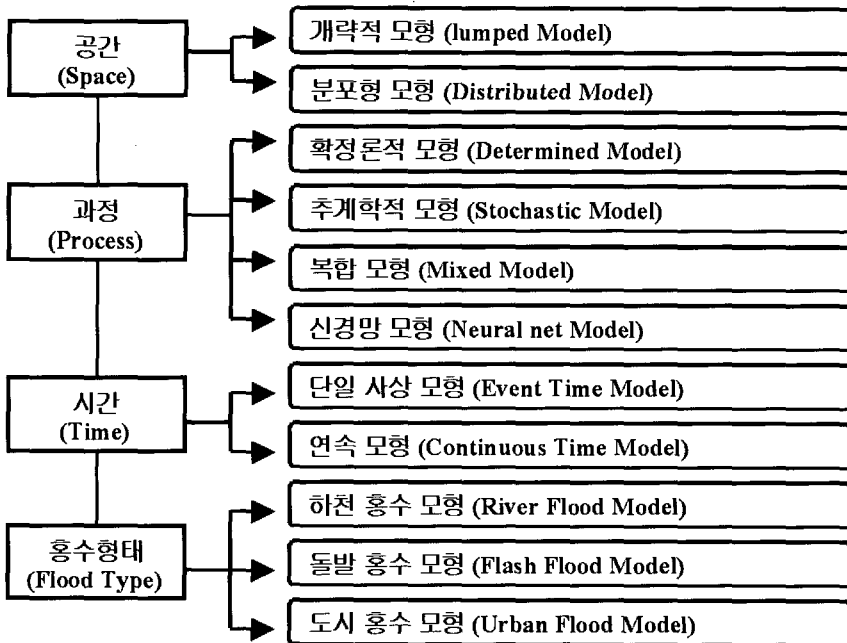


그림 2. 홍수예측 모형 분류

홍수 예경보 시스템을 구축하기 시작한 것은 외국에서도 1970년대 이후로서 단위도 및 머스킹검(Muskingum) 기법 등의 개략적인 수문 모형을 사용한 홍수 예측을 수행하였다. 최근에는 많은 강우-유출 또는 홍수 예측 모형들이 다양한 유역에서 레이더 강우 자료를 이용하고 있는데 일부는 개략형 선형 강우-유출 모형(lumped linear rainfall-runoff model)을 사용하기도 하였고, 좀 더 복잡한 분포형 비선형 강우-유출 모형(distributed nonlinear rainfall-runoff model)을 이용하기도 하였다. James 등(1993)은 레이더와 지상 강우를 이용한 홍수 예측 연구를 미시시피강의 소유역에 대하여 수행하였는데, 이때 유출 모형으로는 SCS 모형을 사용하였다. 또한, Pessoa 등(1993)은 분포형 DBS(Distributed Simulation model)모형을, Mimikou와 Baltas(1996)는 레이더와 지상 강우 자료를 HEC-1 모형에 사용하였다.

최근에는 미국 오클라호마의 NEXRAD(WSR-88D)에서 생성된 레이더 강우 자료와 GIS기법을 이용한 분포형 자료가 HEC 모형내의 수정 클락(Clark) 기법에 의하여 홍수 예측 성능이 검토되기도 하였다.

Kouwen(1998)은 100~10,000km<sup>2</sup> 유역에 적용할 수 있는 홍수 예측 모형을 개발 하였으며, 영국에서는 FRONTIER 시스템이 실시간 강우 예측 및 홍수 예측을 위하여 구축되었으며, 다년간 레이더 강우를 이용한 예측 연구를 수행하여 왔다. 미국 NWS의 경우 하천예측 모형인 SAC-SMA(SACramento Soil Moisture Accounting) 모형을 적용하였으며, 결과적으로 지표면 유출, 중간 유출 및 기저 유출 순으로 강우 자료에 민감함을 밝혔다.

근래에는 강우 자료를 분포형 모형에 적용하는 연구가 활발하게 수행 중이며(Carpenter 등, 2001). 새로 개발되는 HRCDHM(Hydrologic Research Center Distributed Hydrologic Model) 모형은 격자 기반이 아닌 유역기반의 분포형 모형으로서 NEXRAD 강우를 이용한 유역 평균강우 산정,

SAC-SMA에 의한 소유역 유출모의, 지형학적 단위 수문곡선(geomorphologic unit hydrograph)을 이용한 지표면 유출모의, 그리고 하도 추적으로 구성된다. 일반적으로 확정론적인 모형이 강우-유출 관계에 사용되어 왔으나, 최근 들어 추계학적인 모형 및 신경망 모형이 지주 사용되기도 하며, 이들의 예측 성과가 확정론적 모형의 결과와 비교되기도 한다. 이러한 유형의 모형으로는 선형 추계학적 자기상관평균 이동모형(Linear Autoregressive Moving-Average Model, ARMA), 신경망 모형(Artificial Neural Network, ANN), 그리고 K-최근접법(K-nearest-neighbor method) 등이 있다.

### 3.2 외국 홍수 예경보 시스템

최근 미국의 NWS에서는 WFO, RFC와 공동으로 차세대 통합 홍수관리를 목적으로 선진개념의 웹기반 하천예보 및 수문예측을 위한 시스템을 개발하였으며, 이를 선진수문예측서비스(Advanced Hydrologic Prediction Services, AHPS)라고 한다. 이 프로그램은 선진 홍수예측시스템을 현재 하천에 적용하고 NWS와 홍수관리 관련 기관과의 자료 교류를 활성화 하며, 효율적인 하천홍수 예경보 서비스를 제공하는데 있다. 이는 2003년 개발이 완료되어 미국 내 13개 하천예보센터와 121개 기상예보국의 시스템에 동시에 가동되고 있다. 이는 통합적인 하천홍수 예경보로서 좀 더 정확한 하천유량 예측과 홍수경보, 홍수 및 가뭄의 대비시간 확보, 그리고 하천관리자에게 보다 풍부하고 정확한 의사결정정보의 제공에 목적이 있다. 미국에서 AHPS는 1993년에 발생한 중서부 Des Moines 유역의 중요한 홍수 분석을 수행하는 과정에서 성공적으로 개발되어 2001년에는 적용 유역을 확대하였으며, 신기술을 이용하여 보다 선진화된 시스템을 개발하였다. AHPS에 의해 생성되는 가장 기본적인 자료는 하천에서의 수위 실측 및 예측 자료로서 이는 홍수 예경보 발령 및 대피 등에 직접 사용되고 있다. 또한 하천홍수 예경보에 신뢰도 개념을 도입하여

보다 정량적인 홍수자료를 생성하고 있으며, 대표적으로 확률홍수(probability flood occurrence) 개념 및 하천 GIS 정보를 유기적으로 연계하여 다음과 같은 하천 홍수를 관리하기 위한 신개념의 자료들을 생성하고 있다. 즉, (a) 약한 홍수, 중간 홍수, 강한 홍수가 하천 기준수위를 초과할 확률, (b) 임의 하천수위 및 유량을 초과할 확률, (c) 예측 지점 주위의 도로, 철도 및 지형지물, 홍수 연혁, 예측 범람지도 등으로 여기서 약한 홍수(minor flooding)는 홍수피해는 거의 없으나 주의를 요하는 홍수, 중간 홍수(moderate flooding)는 하천이 범람하여 간선 도로를 점유하는 홍수로서 고지대로의 대피가 요구되는 홍수, 그리고 강한 홍수(major flooding)는 하천이 범람하여 주요 도로가 침수하고 막대한 재산 피해가 예측되는 경우로서 주민의 대피 계획이 필수적인 홍수로 분류되어 정의되며, 홍수예측을 3개로 구분하여(홍수위 이하, 홍수위 임박, 그리고 홍수위 이상) 하천모식도상에서 보여주는 등 홍수 예경보의 기준으로 사용되고 있다.

#### 4. 맺음 말

이상의 내용들을 통하여 홍수의 유형과 특징, 홍수

예경보 시스템의 특징 등에 대하여 일반적으로 살펴 보았다. 여러 문헌 및 자료들을 통하여 실제로 현재 운영 중인 외국의 홍수 예경보 시스템 운영을 살펴보면, 미국뿐만 아니라 일본, 영국, 독일, 이탈리아, 중국, 캐나다, 호주 등에 걸쳐 도시홍수 및 돌발 홍수에 대비한 홍수 예경보 시스템들이 다양하게 구성되어 운영되고 있는 것을 살펴볼 수 있었다. 다만 이러한 외국의 우수한 사례들이 우리나라에 대해서도 그대로 적용될 수 있을 것인가에 대한 문제와 함께 과연 벤치마킹을 하여 우리나라에 적합한 모형을 구현해 낼 수 있는 요소들로는 과연 무엇이 있는가에 대한 검토, 강우 개시로부터 실제 위험한 상태로의 유출이 발생하기 이전에 예경보를 발행하기 위해서는 오히려 모형의 정밀도를 높이는 방안보다는 모의 과정을 생략하여 강우, 수위자료로부터 직접 예경보 시나리오와 연계할 수 있는 각종 방안은 없을 것인가에 대한 고민 등은 앞으로의 연구를 통해 개선해야할 방향이자 과제가 아닌가 생각된다.

※ 본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심 기술연구 개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리 기술연구사업단의 연구 성과입니다.