

Ubiquitous 환경의 U-City 홍수에측시스템 개발 A Development of Real-time Flood Forecasting System for U-City

김형우*
(Hyung-Woo Kim)

Abstract: Up to now, a lot of houses, roads and other urban facilities have been damaged by natural disasters such as flash floods and landslides. It is reported that the size and frequency of disasters are growing greatly due to global warming. In order to mitigate such disaster, flood forecasting and alerting systems have been developed for the Han river, Geum river, Nak-dong river and Youngsan river. These systems, however, do not help small municipal departments cope with the threat of flood. In this study, a real-time urban flood forecasting service (U-FFS) is developed for ubiquitous computing city which includes small river basins. A test bed is deployed at Tan-cheon in Gyeonggi-do to verify U-FFS. Wireless sensors such as rainfall gauge and water level gauge are installed to develop hydrologic forecasting model and CCTV camera systems are also incorporated to capture high definition images of river basins. U-FFS is based on the ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) that is data-driven model and is characterized by its accuracy and adaptability. It is found that U-FFS can forecast the water level of outlet of river basin and provide real-time data through internet during heavy rain. It is revealed that U-FFS can predict the water level of 30 minutes and 1 hour later very accurately. Unlike other hydrologic forecasting model, this newly developed U-FFS has advantages such as its applicability and feasibility. Furthermore, it is expected that U-FFS presented in this study can be applied to ubiquitous computing city (U-City) and/or other cities which have suffered from flood damage for a long time.

Keywords: flash flood, flood forecasting, ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), water-level prediction, U-FFS (Urban Flood Forecasting Service), U-City

I. 서론

급속한 도시화 및 지구온난화로 인한 집중호우로 홍수피해가 해마다 증가하고 있다. 홍수피해를 최소화하기 위한 방법으로 홍수조절용 댐, 저류지 등의 수자원시설물 건설을 통한 구조적인 대책과 홍수예보시스템과 같이 사전에 홍수를 예측하고 전파하여 피해를 저감시키는 비구조적 대책이 있다[1]. 구조적인 대책은 예산확보나 환경문제 등의 난제들을 극복해야 하는 어려움이 있어 최근에는 홍수의 규모와 발생시간을 예측하여 사전 정보로 제공함으로써 그 피해를 최소화하는 홍수예보시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 홍수예보시스템은 각종 장비와 분석 소프트웨어가 통합된 하나의 시스템에서 현재의 기상자료를 바탕으로 홍수 유출수문곡선을 예측하여 관련정보를 제공하는 일련의 과정으로 이루어진다. 지난 1974년 이래로 한강, 낙동강 등의 4대강 홍수통제소가 설립되어 대하천의 홍수예보가 이루어지고 있고 임진강을 비롯한 주요 중소하천 홍수예보시스템, 국지성 집중호우를 대비한 돌발홍수예보시스템 등이 개발되어 운영 중이다. 국가기관을 중심으로 운영되고 있는 이러한 시스템들은 지속적인 연구를 바탕으로 그 기능이 향상되어 홍수 재해 방지의 유용한 대책으로 사용되고 있지만 유역면적이 비교적 작은 도시하천의 홍수예보에는 다소 적합하지 않다. 도시하천 유역은 상대적으로 불투수 면적이 높기 때문에 홍수 도달시간이 매우 짧다. 짧은 도달시간으로 인해 호우에 따른 하천유량의 변동폭이 크고 이는 홍수 피해를 미연에 방지하기 위해서는 신속한 대처가 필요함을

의미한다[2].

본 연구에서는 이와 같은 문제인식을 바탕으로 중소 도시 하천에 적용할 수 있는 실시간 도시홍수예측서비스 시스템 (Realtime Urban Flood Forecasting Service, U-FFS)을 개발하였다.

II. 홍수 예경보 시스템

1. 홍수 예경보 시스템 개요

일반적으로 홍수 예경보 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 홍수관련 자료를 수집하고 홍수예측을 위한 입력자료를 생성하는 모니터링 시스템(monitring system), 실시간으로 강우량 및 강우 이동방향을 예측하고, 이를 이용하여 기존에 구축된 강우-유출 모형에 의하여 홍수 예측을 수행하는 예측 시스템(forecasting system), 그리고 홍수예측 및 홍수기준, 그리고 다양한 행정적인 상황 등의 정보를 확률론적인 기법 (statistical method) 또는 퍼지이론(fuzzy theory) 등의 다양한 의사결정기법을 사용하여 홍수발생 여부 및 대책 수립, 그리고 궁극적으로 홍수관리자가 합리적이고 최적의 대처를 할 수 있도록 도와주는 의사결정시스템(decision making system)으로 구성된다[3]. 이 가운데 가장 중요한 요소는 관측 또는 예측된 강우 입력자료를 이용하여 하천 유출량을 예측하는 홍수 예측시스템이라 할 수 있으며, 홍수를 예측하기 위한 수문학적 모형(hydrological forecasting model)연구는 이미 상당히 많이 수행되어 왔다. 홍수예측을 위한 강우-유출모형에는 공간적 관점의 개략 모형(lumped model)과 분포형 모형(distributed model)이 있으며 시간적 관점의 단일사상 모형과 연속모형이 있다. 그리고 모의기법 과정에 의해 확정론적(deterministic) 모형 및 추계학적(stochastic) 모형, 그리고 이들 두 모형 기법을 복합한 복합모형으로 크게 나눌 수 있다. 최근에는 블랙박스 모형 개념의 신경망 기법이 홍수예측에 널리 적용되고 있다.

하지만, 일반적으로 신뢰도 100%의 도시홍수 예측은 불확실성이 높은 다양한 기상과 지형학적인 변수들로 인하여 사

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2007. 8. 13, 채택확정: 2007. 8. 20

김형우: KT 미래기술연구소 연구전문그룹

(hyungwoo@kt.co.kr)

실상 불가능하다. 그러나 도시홍수 예측 모형의 입력자료로 사용되는 강우와 수위자료를 신속하고 정확하게 수집할 수 있다면 그 신뢰도를 상당 수준 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 센서를 이용한 현장 계측기술과 첨단 정보통신 기술을 바탕으로 한 실시간 강우 및 수위 모니터링 시스템이 요구되며, 실제로 최근에 CDMA, Bluetooth, ZigBee와 같은 무선통신을 바탕으로 도시 홍수 예측의 신뢰성을 높이는 연구가 활발히 이루지고 있다.

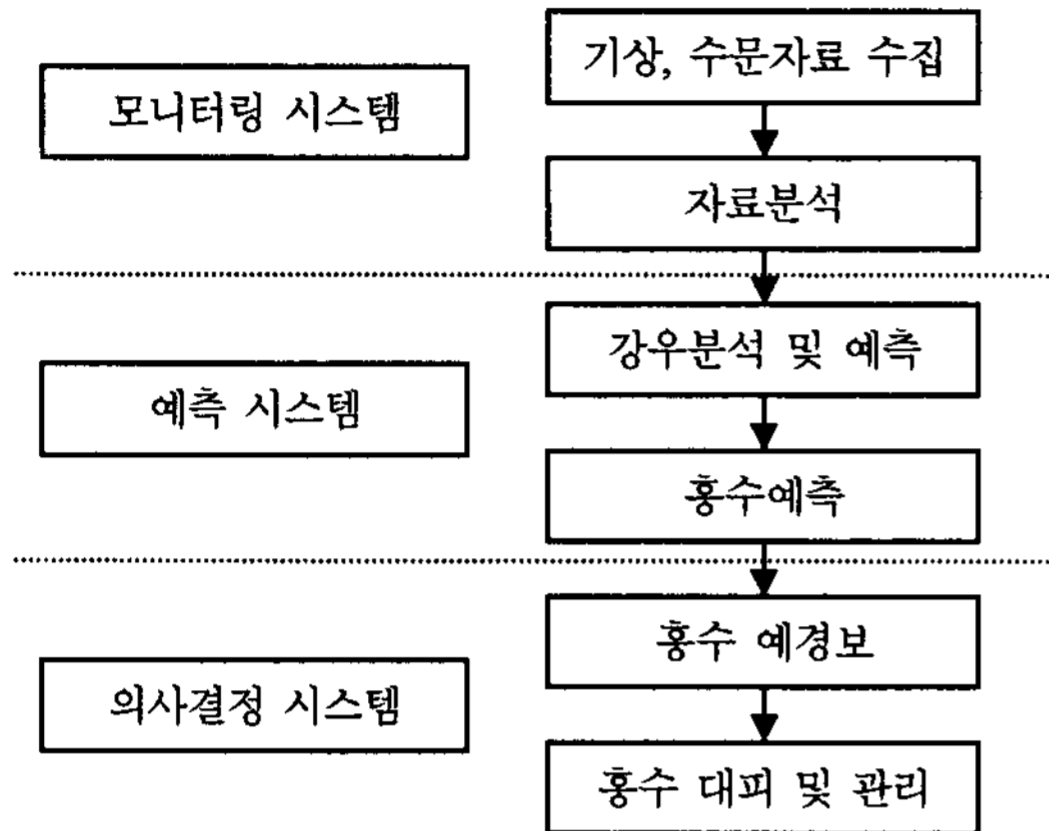


그림 1. 홍수 예경보 시스템

도시유역 내에서 집중호우와 돌발홍수로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 대상 유역의 강우-유출 특성을 정확히 해석하여 홍수유출 특성을 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해서 자연 현상을 모형화하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만 수문시스템의 경우에는 강우발생, 침투, 차단, 증발산 등의 수많은 변수들과 비선형적(nonlinear)이고 동적인 유출거동을 모두 고려해야 하는 어려움이 있다. 따라서, 이러한 변수들의 오차요인들을 최소화하고 도시유역의 홍수예측을 보다 정확하게 수행하기 위한 도시홍수 예측기법을 개발할 필요성이 있다.

2. 유비쿼터스 환경의 홍수 예경보 시스템

최근에 신경망(neural network)이론과 퍼지(fuzzy) 이론을 이용하여 민감도가 큰 매개변수를 적절히 조절하면 수문현상과 같은 복잡한 비선형 모형에서도 오차를 최소화할 수 있다는 학계의 연구 결과가 보고되고 있다[4-5]. 즉, 도시 유역 내에 과거 강우와 수위자료가 풍부히 축적되어 있다면 시간적으로 변동하는 매개변수를 퍼지와 신경망 이론과 같은 첨단 기법을 이용하여 적절히 조절함으로써 강우발생 2-3시간 후 유역출구지점의 홍수위를 예상할 수 있다.

유비쿼터스 환경의 도시홍수 예측 기법의 궁극적인 목적은 시민들에게 최대한 신속하고 정확하게 홍수 예경보를 제공함으로써 홍수 발생 시 인적, 경제적 피해를 최소화하는 것이다. 이를 위하여 서비스 지향 아키텍처(Service Oriented Architecture, SOA) 개념을 구현한 웹 서비스 기술을 실시간 도시홍수 의사결정지원시스템에 적용할 필요가 있다. 이러한 웹 서비스 기술은 웹 상에 산재되어 있는 각각의 서비스를

융합하여 복합적인 서비스를 가능하게 하므로 대상 유역으로부터 실시간으로 전송된 수문자료를 데이터베이스화 하고 이를 공학적으로 처리하여 도시홍수 정보를 시각적으로 제공할 수 있을 뿐만 아니라 현재 및 향후 2-3시간 후의 홍수위 정보를 예측할 수 있다. 그리고 최종적으로 도시유역에 거주하는 시민들에게 언제, 어디서나 접근 가능한 실시간 웹 서비스 형태로 제공되며, 집중호우로 인한 홍수피해 예방 시 시민들에게 단문메시지(SMS) 형태의 경보서비스를 발령하여 신속히 대처할 수 있도록 해야 한다. 그림 2는 무선센서 네트워크에 의한 홍수 모니터링 시스템의 구축사례를 나타낸 것으로 다수의 센서노드, 게이트웨이 및 해석서버로 구성되어 있으며 홍수발생 시에는 인터넷 또는 방송에 의해 시민들에게 위급상황을 신속히 알릴 수 있도록 되어 있다[6].

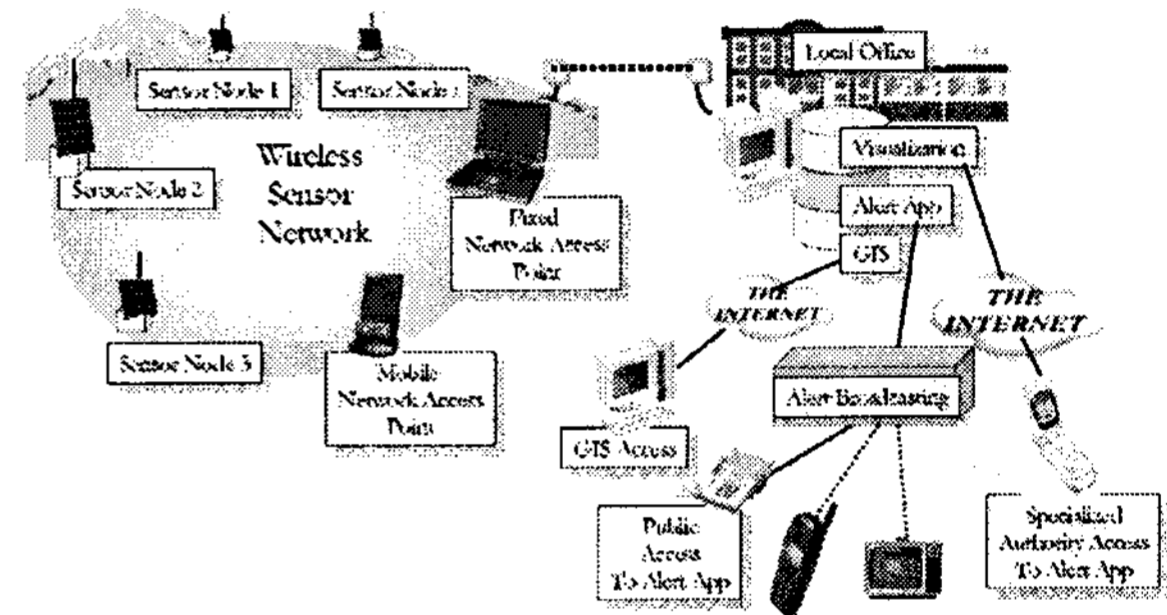


그림 2. 외국의 홍수 모니터링 시스템 (예)

III. 실시간 도시홍수예측서비스

1. U-FFS 개요

실시간 도시홍수예측서비스 시스템인 U-FFS의 구축과정을 그림 3에 제시하였다. U-FFS에 적용된 예측모형은 이미 국내의 학계에서 그 정확도가 입증된 바 있는 Data-driven 모형의 일종인 ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)이며 지정된 시간에 자동으로 작동 가능한 실행파일로 프로그래밍되어 유출지점의 예측수위 값을 생성한다. U-FFS는 집중호우 발생 시 최종 유출지점에서의 30분, 1시간, 2시간 후 예측 수위 값을 웹을 통해 제공함으로써 언제 어디서나 홍수예측 정보를 사용자가 이용할 수 있다. 또한 해당 유역의 실시간 강우 및 수위자료뿐만 아니라 최종 유출지점의 영상자료를 제공하고 있어 유역의 전반적인 상태를 파악할 수 있는 장점이 있다[2].

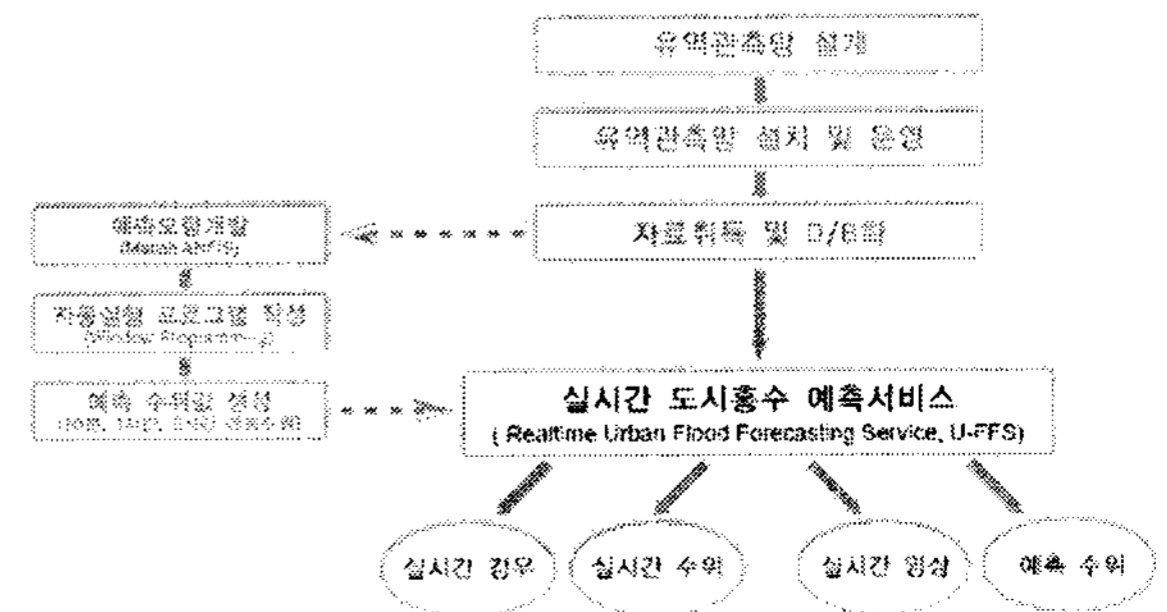


그림 3. U-FFS의 구축과정

2. 유역선정 및 관측망 구축

가. 시범유역 선정

신도시 분당에 위치한 탄천 유역은 하천을 중심으로 도시가 형성되어 있기 때문에 홍수 피해에 대한 민감도가 상대적으로 높은 곳이다. 또한 도시화 및 정보화 진행 측면에서 볼 때 향후 건설된 U-City와 유사한 면이 많을 것으로 예상된다. 이러한 측면을 고려하여 탄천 유역을 본 연구의 시범유역으로 선정하였다.

나. 유역관측망 구축

적용 대상유역은 구미교가 위치한 동막천과 탄천 본류의 합류지점부터 대곡교가 위치한 세곡천을 포함한 지역이다. 구미동, 서현동, 하대원동, 운중동, 복정동(대곡교)의 5개소를 강우관측소로 선정하고 수위관측소는 상류의 구미교와 최종 유출구인 대곡교로 선정하였다. 즉, 대상유역 전체의 강우 양상을 파악할 수 있도록 유역의 면적과 형상을 고려하여 5개 지점의 강우관측소를 효율적으로 배치하였으며 최종 유출구인 대곡교와 유역입구인 구미교에 수위관측소를 설치하여 유역의 유출양상을 파악할 수 있도록 관측망을 설계하였다. 각 관측망의 자료는 CDMA 무선데이터 통신을 이용하여 매 30분마다 10분 자료의 형태로 지정된 서버로 전송하도록 설계하였다. 최종 구축된 유역관측망의 현황을 표 1 및 그림 4에 제시하였다.

표 1. 유역관측망 현황

	강우관측소	수위관측소	영상관측소
설치 지점	구미동, 서현동, 하대원동, 운중동, 복정동 (5개소)	구미교, 대곡교 (2개소)	대곡교 (1개소)
센서 타입	전도형 우량계 (0.5mm 버킷)	초음파 수위센서	디지털카메라
데이터 전송방식	CDMA 무선데이터 통신		

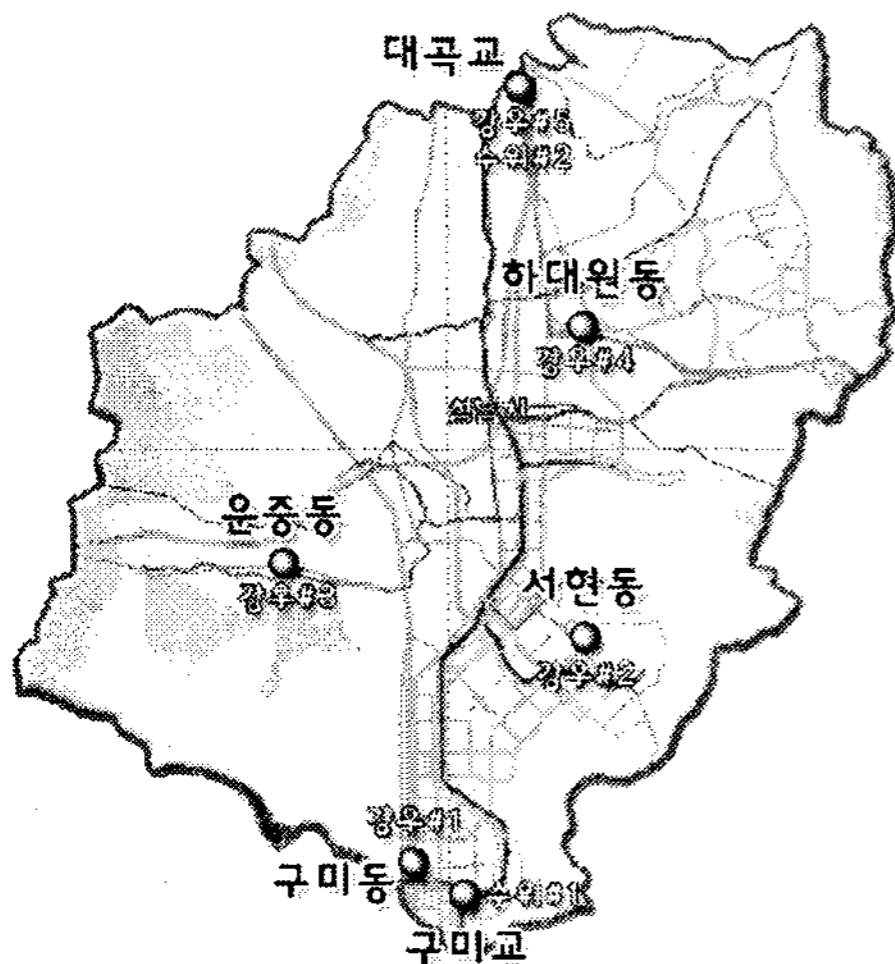


그림 4. 유역 현황도

3. 수위에측 모형 개발

가. ANFIS 모형

유역의 유출량을 모의하고 홍수를 예측하기 위한 전통적인 기법인 수문모형을 이용한 유출모의기법은 유역의 매개변수 산정 과정과 모형 알고리즘에 많은 불확실성을 포함한다. 따라서 이와 같은 불확실성을 제거하기 위하여 유역특성 및 유출과정의 매개변수들을 실측자료에 근거하여 보정하고 모형을 검증하는 등 신뢰성 있는 예측결과를 획득하기 위한 과정을 거치게 된다. 하지만, 최근에는 이러한 불확실성을 수학적으로 해석하기 위하여 신경회로망 이론이나 퍼지이론에 신경망을 도입한 뉴로-퍼지이론과 같은 기법을 수자원 연구 분야에 적용하는 시도들이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 신경회로망 이론과 퍼지 이론이 결합된 적응형 신경망-퍼지 추론 모형인 ANFIS를 도입하여 수위 예측모형을 구축하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 ANFIS는 신경망 이론의 구조와 학습능력을 이용하여 제어환경으로부터 얻은 입출력 정보의 소속함수와 제어규칙을 제어 대상에 맞게 자동 조절하는 Data-driven 모형의 일종이다. ANFIS 모형 구축을 위해 수치연산 전문 프로그램인 MATLAB®에서 제공하는 'Fuzzy Logic Toolbox'를 이용하였으며[7], 모형의 입력자료는 대상유역의 2006년 강우 및 수위 자료이며 출력자료는 최종 유출지점의 30분, 60분, 120분 후의 수위 값이다. 그 동안의 연구 결과를 보면 ANFIS 모형의 우수한 신뢰도를 확인할 수 있으며[8], Data-driven 모형의 특성상 데이터 축적상태에 따라 정확도가 향상되므로 앞으로 있을 호우사상에 따른 검증과정을 거친다면 본 모형의 신뢰성도 충분히 확보될 것으로 판단된다.

나. 실시간 모형 연동

U-FFS는 홍수예측 정보를 간단한 웹 접속에 의해 언제, 어디서나 실시간으로 제공할 수 있어야 하므로 예측 모형을 자동화하고 웹 사이트와 연동하는 과정이 필요하다. 따라서 예측모형의 실행에 필요한 입력자료를 자동 생성하고 개발된 ANFIS 모형을 독립환경에서 실행가능 하도록 프로그래밍을 수행하였다. 또한 예측수위 값을 포함한 출력파일을 D/B화하여 최종적으로 웹 사이트와의 연동을 가능하게 하였다.

4. 실시간 홍수예측서비스 웹 모니터링 시스템 구축

유역 관측망의 실시간 데이터와 ANFIS 자동실행 프로그램을 통해 생성된 예측수위 데이터를 바탕으로 실시간 홍수예측서비스 웹 모니터링 시스템을 구축하였다[9]. 구축된 웹 모니터링 시스템에서는 유역정보, 유역의 실시간 강우, 수위 및 영상 정보와 홍수예측의 가장 중요한 요소인 예측수위 정보를 제공한다. 그림 5는 U-FFS의 디스플레이 화면 중 일부를 나타낸 것으로서 유역 출구지점의 실시간 수위 데이터와 5개 지점의 강우 데이터 (10분 강우 및 일 누적강우)를 볼 수 있다. 또한, 유역 출구지점에 설치된 고해상 영상카메라에 의해 하천 이미지 및 하천의 상태를 파악할 수 있다. 또한, 그림 6은 실제 2006년 7월 14일부터 7월 24일까지의 홍수기록을 나타낸 것으로서 10분당 최고 13mm 이상의 집중호우에 의해 하천 수위가 상승하였다가 다시 하강하는 것을 확인할 수 있다.

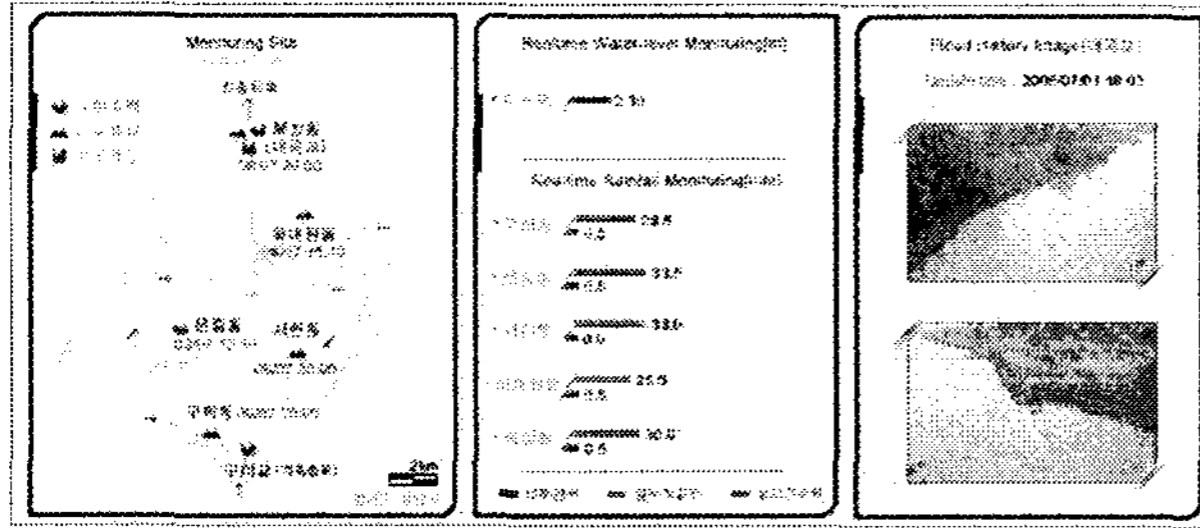


그림 5. U-FFS의 실시간 수위, 강우량 및 영상 데이터 화면

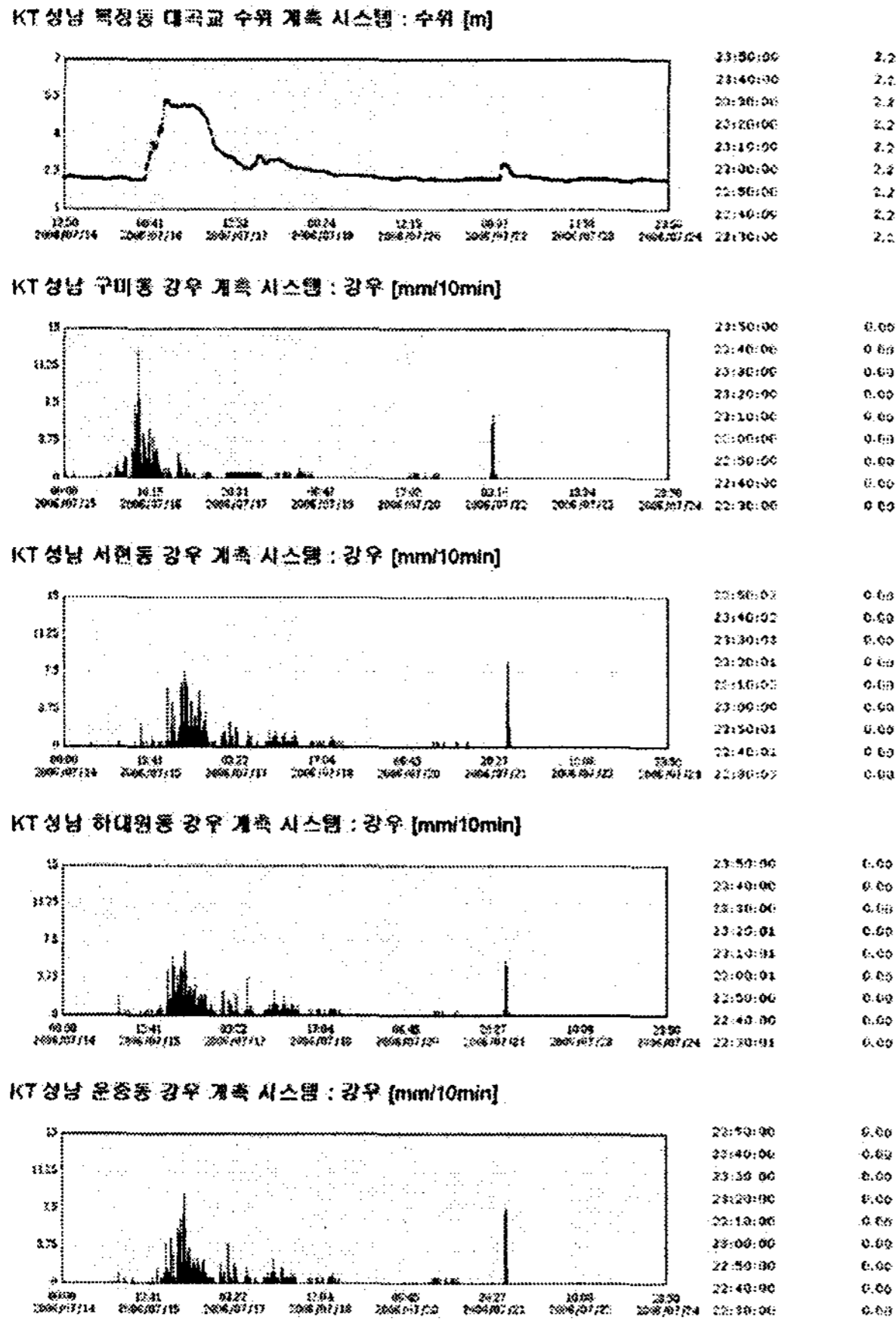


그림 6. U-FFS의 수위 및 강우그래프

한편, 홍수 판단의 기준이 되는 수위예측 정보는 그림 7과 같은 형태로 제공되는데, 즉 최종 유출지점의 현재 수위와 30분 후, 60분 후, 및 120분 후의 예측수위를 홍수통제소에서 제공하는 주의보 수위와 경보 수위와 비교한 후 홍수피해 가능성을 “안전”, “주의”, “위험”으로 화면에 표시한다. 또한, 이와 함께 현재 수위 값과 예측 수위 값을 차트로 표현하여 수위의 상승 및 하강 추세를 판단하는 근거를 제공하고 있다.

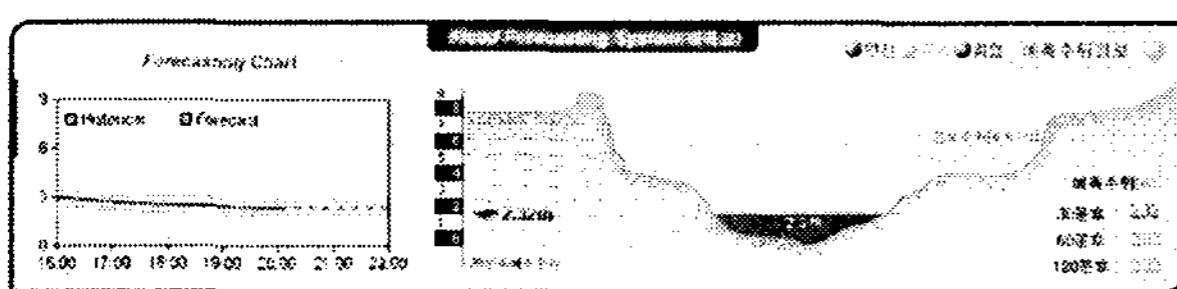


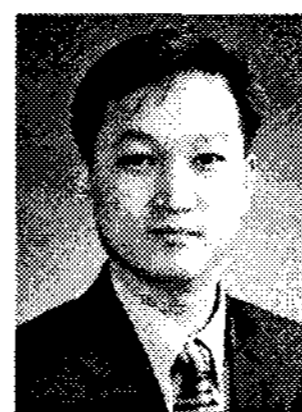
그림 7. U-FFS의 홍수예측 화면

IV. 결론

중소 도시하천의 홍수 가능성을 수위예측을 통해 정보화 하고 이를 효과적으로 다수의 사용자들에 제공함으로써 홍수피해를 최소화할 수 있는 U-FFS를 개발하고 탄천 유역에 시범적으로 적용하였다. 본 연구에서 개발된 U-FFS는 기존의 모형 구축과정에서 필수적인 유역의 물리적, 지형 자료와 같은 방대한 자료를 입력할 필요가 없으며 오로지 유역의 강우 자료와 수위 자료만을 이용하여 홍수위를 예측할 수 있는 장점이 있다. 또한, 유역특성을 반영하는 복잡한 매개변수가 필요 없는 Data-driven 방식의 모형구축은 개발이 비교적 간단할 뿐만 아니라 단시간 내에 신뢰성 높은 결과를 획득할 수 있으며 유역 내의 상황이 변하더라도 모형을 쉽게 업데이트 할 수 있는 장점이 있다. 정보의 전달 방식이 웹 사이트를 통해 다양한 형태로 제공되기 때문에 전문가뿐만 아니라 홍수에 관심 있는 모든 시민들에게도 친숙하게 홍수예보 정보를 전달할 수 있다. 본 연구에서 개발된 U-FFS를 활용하면 홍수피해가 빈번한 소규모 도시하천 및 향후 건설될 U-City에 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 강민구, 고덕구, “실시간 유입 홍수량 예측을 통한 홍수 피해 저감,” 한국수자원학회지, 제38권, 제6호, pp. 56-62, 2005.
- [2] 김형우, 이종국, 하상민, “도시하천의 실시간 홍수예측서비스 개발,” 한국수자원학회 정기학술발표회 논문집, 2007.
- [3] 이범희, “도시 홍수 예경보 시스템의 특징과 구성방향에 관하여,” 물과 미래, 2003.
- [4] 이재웅, 최창원, “ANFIS를 이용한 수위예측,” 2007년 한국수자원학회 학술발표회, 2007.
- [5] ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, “Artificial Neural Networks in Hydrology II: Hydrologic Applications,” *Journal of Hydrologic Engineering*, pp.124-137, April 2000.
- [6] Mauricio et al., “Wireless sensor networks for flash-flood alerting,” *Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, Dominican Republic, Nov. 3-5, 2004.
- [7] “Fuzzy Logic Toolbox for use with MATLAB®, User’s Guide,” The MathWorks, Inc., 2006.
- [8] 안상진, 전계원, 김진극, “중소하천의 유출수문곡선 예측을 위한 ANFIS의 적용,” 건설기술연구소 논문집, 제20권 제2호, pp. 95-104, 2001.
- [9] 웹 사이트: <http://host.datapcs.co.kr/flood>



김형우

1986년 연세대학교 토목공학과 (공학사). 1988년 연세대학교 토목공학과 (공학석사). 2003년 KAIST 건설및환경공학과 (공학박사). 1990년~현재 KT미래기술연구소 연구전문그룹 수석연구원. 관심분야는 IT를 활용한 구조물상태모니터링 및 방재모니터링 임.