

한강유역 돌발홍수 예측시스템



배덕호 >>
세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수
dhbae@sejong.ac.kr



김진호 >>
세종대학교 토목환경공학과 박사과정
jhcnu@sju.ac.kr

로 등으로부터 돌발홍수능(Flash Flood Guidance, FFG)을 계산할 수 있는 실시간 돌발홍수 예측시스템을 개발하여 홍수예정보 시스템에 적용한다면 악기상 감시예측기술의 향상과 더불어 재해의 방지차원에서 매우 유용한 대책이 될 것이다. 따라서 본 고에서는 돌발홍수 예보기법을 설명하고 국내 한강유역을 대상으로 개발된 한국형 돌발홍수 예측시스템을 소개하고자 한다.

1. 머릿말

최근 지구온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강도를 가진 집중호우에 의한 돌발홍수의 피해가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산피해를 초래하고 있다. 특히 지난 '98년 7월 지리산 일대에 2시간 동안 100mm 이상의 집중호우로 인해 순식간에 발생한 돌발홍수로 4백 14여 억원의 재산피해와 27명의 생명을 앗아갔다. 이러한 피해를 경감하기 위해서는 댐 및 제방 건설 등의 구조적 대책과 홍수예정보 시스템 구축과 같은 비구조적 대책을 병행하여 추진해야 될 것이다. 그러나 국내 현업에서 사용되고 있는 강우-유출 모형에 의한 홍수예정보 시스템은 강우의 실관측치를 모형의 입력자료로 요구하기 때문에 홍수 도달 시간이 매우 짧은 소유역의 돌발홍수를 예보하는데는 실효성을 거두지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 상황에서 특정 유역의 토양수분 상태, 한계유출량(threshold runoff), 레이더 및 단기 기상예보 자

2. 돌발홍수의 정의

홍수는 호우의 강도, 지속시간 및 지역적 특성에 따라 하천홍수, 도시홍수, 해안홍수, 돌발홍수 등의 4가지 유형으로 구분할 수 있다. 하천홍수는 강을 따라 발생하는 자연적인 홍수로 정의되고, 도시홍수는 도시화에 따른 불투수 지역의 증가로 침투 홍수량의 증가 및 홍수 도달시간의 단축, 도시 내수배제 불량에 따른 홍수를 말하며, 해안홍수는 태풍 및 지진 등으로 인해 지상으로 밀려오는 바닷물의 영향으로 발생한다. 마지막으로 돌발홍수는 지역적으로 경사가 급한 산악지역 소유역에 단시간의 집중호우 때문에 계곡에 모인 빗물이 쌓여 높은 수위의 홍수파를 형성한 후 순식간에 낮은 지역까지 흘러가는 홍수로 정의된다.

돌발홍수 예측 업무에서 가장 선진기술을 보유한 미국 기상청(National Weather Service, NWS)에서는 돌발홍수를 100km² 이내의 지형이 좁고 경사가 급한 유역에서 느리게 유역을 통과하는 호우, 동일한 국지지역 내에서 빠르게 움직이는 집중호우(2시간 동안 100mm 이상)나 태풍으로 인하여 짧은 시간(몇 분

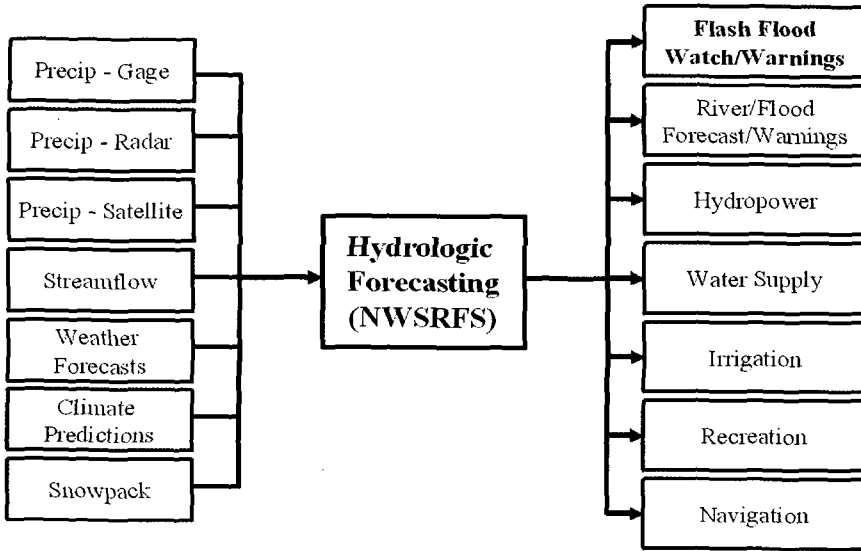


그림 1. 미국 NWS 홍수 예경보시스템의 구조

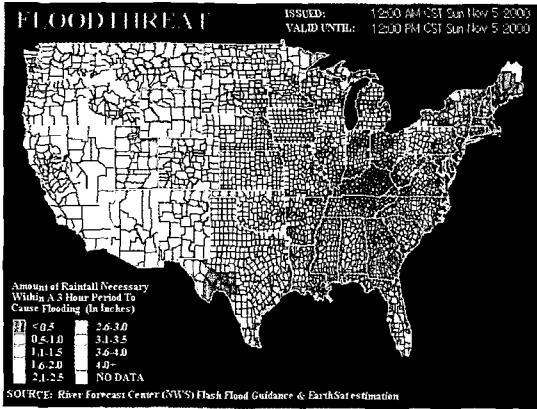


그림 2. 미국의 돌발홍수 예경보 사례

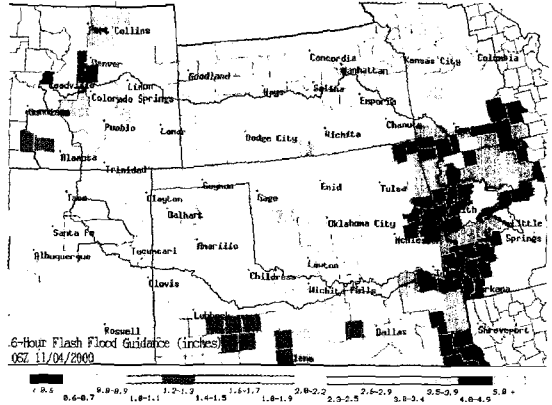


그림 3. 미국의 유역별 돌발홍수 예경보 사례

또는 몇 시간) 내에 소하천 수위의 급격한 상승을 유발하는 홍수로 정의한다. 미국 국립기상청의 홍수예경보시스템(NWSRFS)에서는 그림 1과 같이 강우와 유량 등의 자료를 수집하여 돌발홍수예경보, 일반홍수예경보, 기타 이·치수 사업을 수행하고 있다. 미국에서는 돌발홍수예경보를 위한 지표로 돌발홍수능을 1970년대 중반 NWS에서 처음 적용한 이래 지금까지 사용해 오고 있다. 돌발홍수능은 강우의 관측 및 예측과 함께 기상예보실(Weather Forecast Offices, WFO)의 예보관들이 돌발홍수주의보와 돌발홍수경보

의 발표 시기를 결정하는데 사용되어져 왔다.

그림 2는 미국의 3시간 돌발홍수능을 나타낸 것으로 그림의 값들은 3시간 이내에 돌발홍수를 일으키기 위해 필요한 강우량을 나타낸다. 그림에서 돌발홍수능의 값이 작은 지역일수록 호우 사상 중에 돌발홍수가 일어날 가능성이 크다는 것을 의미한다. 이와 같은 돌발홍수 예보정보 제공사례는 인터넷을 통해 손쉽게 확인이 가능하며 특정유역에 대한 자세한 정보는 그림 3과 같다.

3. 돌발홍수 예측기법

돌발홍수 예측시스템은 크게 기상학적인 부분과 수문학적인 부분으로 구성되어 있다. 기상학적인 부분은 레이더 및 위성영상으로부터의 강우산정 및 대기 수치모형으로부터 1, 3, 6시간 등의 강우의 지속 시간별 누적 예측강수량을 산정하는 부분이며, 수문학적인 부분은 돌발홍수능을 산정하는 부분과 한계유출량을 산정하는 부분으로 구성되어 있다. 돌발홍수능은 현재의 토양수분 조건에서 특정시간 동안 하천의 제방을 월류하는 홍수가 발생할 때까지 앞으로 필요한 누적강수량을 의미하여, 돌발홍수능 산정은 토양수분을 모의할 수 있고 유량의 흐름을 추적할 수 있는 강우-유출 연속모델을 이용하여 산정한다.

돌발홍수능의 결정은 이전의 강우 관측자료와 앞으로 필요한 각 지속시간별 예측강수량을 연속적으로 구성하고 이를 강우-유출 연속모델에 입력하여 계산을 수행한 유출량이 한계유출량과 같아질 때까지의 강우량을 돌발홍수능으로 결정한다. 이와 같이 돌발홍수능을 결정하는데 있어서 핵심은 한계유출량의 결정이다. 한계유출량은 토양수분이 완전히 포화된 상태에서 유량이 하천의 제방을 월류할 때까지 필요한 직접유출량이다. 이러한 한계유출량으로부터 산정된 강우 지속시간별 돌발홍수능과 기상학적인 측면의 예측강수량과의 상대적인 대소를 비교하여 돌발홍수경보, 돌발홍수주의보 및 돌발홍수해제 등의 돌발홍수예경보를 실시한다. 그림 4는 위에서 설명한 돌발홍수 예측시스템의 구성요소를 개념적으로 나타낸 것이다.

4. 한국형 돌발홍수 예측시스템 개발

국내에서도 돌발홍수의 피해를 줄이고자 구조적 및 비구조적 대책이 도입되어 운영 중인 상태이다. 특히, 그림 4와 같은 기상예보자료 및 수문학적 기법이 혼합된 비구조적 시스템의 개발을 위해 선진기술의 도입이 이미 이루어지고 있고, 수도권이 위치한

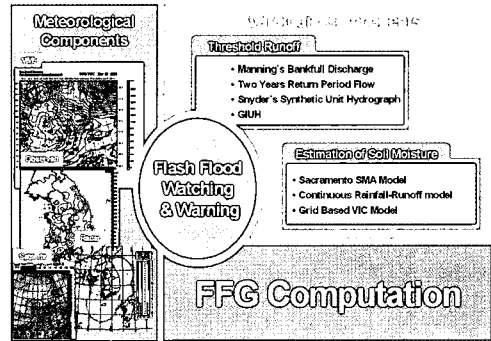


그림 4. 돌발홍수 예보시스템의 구성요소

한강유역을 대상으로 국내 수문기상 특성에 부합하는 한국형 실시간 돌발홍수 예측시스템을 체계적으로 구축하였다. 본 시스템의 구축체계 및 개발결과를 간략히 소개하면 다음과 같다.

4.1 돌발홍수 예측시스템 구성요소 개발

FFG 수문학적 구성요소 중 한계유출량을 계산하기 위해 GIS/GUI 시스템을 활용하여 미세 소유역(50km² 이하) 분할, 상세 하천도 및 하천경사를 추출하였다. 이러한 GIS 기초자료 생성을 위해 한강유역 3"DEM(Digital Elevation Mode) 자료를 사용하였고, 추출된 미세 소유역은 0.89~48.89km²의 범위를 가지고 있으며, 한강유역 전체를 2,820개의 소유역으로 구분하였다. 한계유출량 계산에서 한강유역과 같이 다수의 저수지를 포함하는 대유역의 경우는 저수지 하류부의 자연유량을 고려할 수 있는 기법을 반복적으로 적용하여 유역 최종출구점까지 계산하여 내려오게 된다. 본 계산과정에서 2,820개로 구분된 한강유역의 각 소유역별 한계유출량은 김진훈과 배덕효(2006)의 연구와 같이 Manning의 제방월류 유량 및 GeIUH 기법을 통해 계산되어진다. 그림 5는 1, 3시간 지속시간을 가지는 한계유출량 계산결과를 대표적으로 나타낸 것이다.

돌발홍수 예측시스템에서는 이상과 같은 한계유출량과 함께 수문학적 구성요소로 대상유역의 토양수분 상태를 추정하여 임의 상태의 토양수분 상태에서부터

한계유출량을 넘어서는 FFG를 계산하게 된다. 이러한 토양수분 상태는 일반적으로 토양수분을 모의할 수 있는 연속형 강우-유출모형을 이용하여 계산할 수 있으며, 개발된 시스템에서는 두개의 옵션으로 Sacramento SMA(Soil Moisture Accounting) 모델(Burnash et al., 1973; Georgakakos, 1986)과 준분포형(semi-distributed) TOPMODEL(배덕효와 김진훈, 2005)이 동시에 고려되어 한강유역의 유출량 모의를 통한 모델 검·보정 계산이 이루어 졌고, 소양강 및 충주 다목적댐에서의 저수지 운영률을 적용하여 저수지 하류부의 댐방류량 영향을 고려하였다. 이렇게 계산된 한강유역의 각 소유역별 유출량 결과로부터 각 모델이 생산하는 토양내 저류량(storage) 변수를 추출하여 토양수분 포화정도를 계산하였다.

돌발홍수 예측시스템의 기상학적 구성요소로는 고해상도 레이더 강우추정 및 단기 수치예보자료를 이용한 지속시간별 예측강수량 산정 등이 존재한다. 레이더 강우추정 결과는 앞서 설명한 연속형 강우-유

출모델에 시간적 및 공간적 고해상도 강우입력자료를 제공하여 모델기반 토양수분을 산정하게되고, 지속시간별 예측강수량은 FFG 계산결과와의 상대적 비교를 통해 돌발홍수 예·경보자료를 생산가능하게 한다. 즉, 예측강수량이 FFG보다 크면 돌발홍수 발생 가능성이 큰 것으로 볼 수 있고, 반대의 경우는 돌발홍수로부터 안전하다는 의미이다.

본 시스템 개발에 사용된 레이더 강우추정 절차는 그림 6과 같이 현재 기상청에서 운영중인 9개 지점의 10분간격 레이더 합성(composite)자료를 수집하여 레이더 오자료 제거를 위한 POD(Probability of Detection) 분석을 수행하고, Kalman filter 기법을 활용한 추계 동역학적 편차(bias) 추정방법(Anagnostou et al., 1998)으로 레이더와 AWS(Automatic Weather Station) 관측자료의 편차를 제거하여 최적 레이더 강우를 추정하였다. 또한, 지속시간별 예측강수량을 산정하기 위해 국내 기상청의 단기 수치예보자료인 RDAPS 5km 자료의 강수 예측장을 추출하

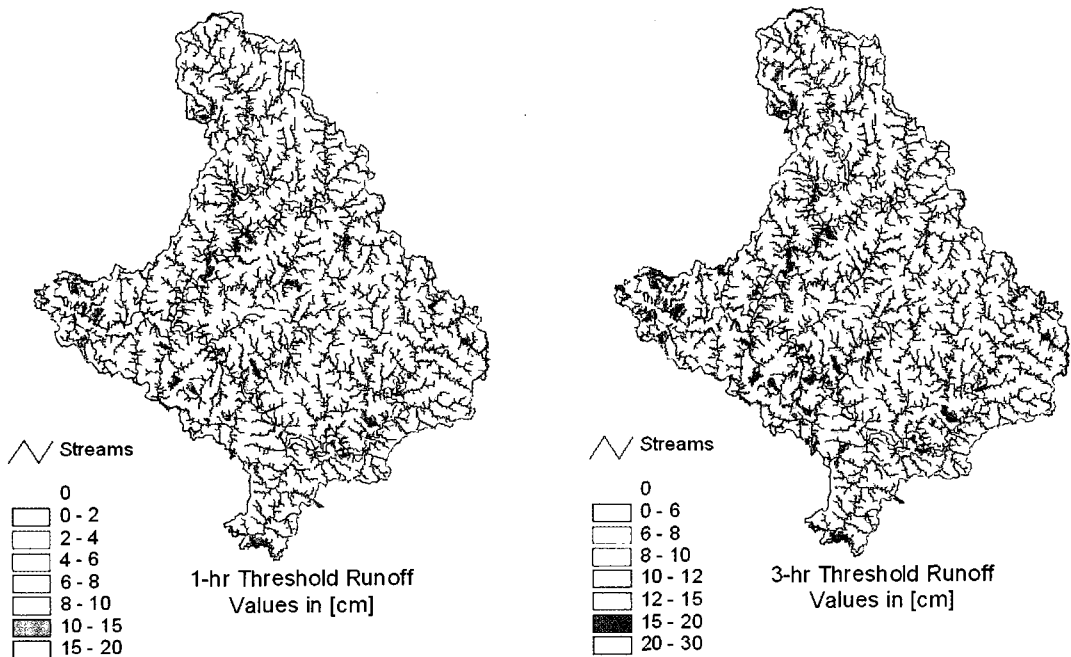


그림 5. 한계유출량 계산결과

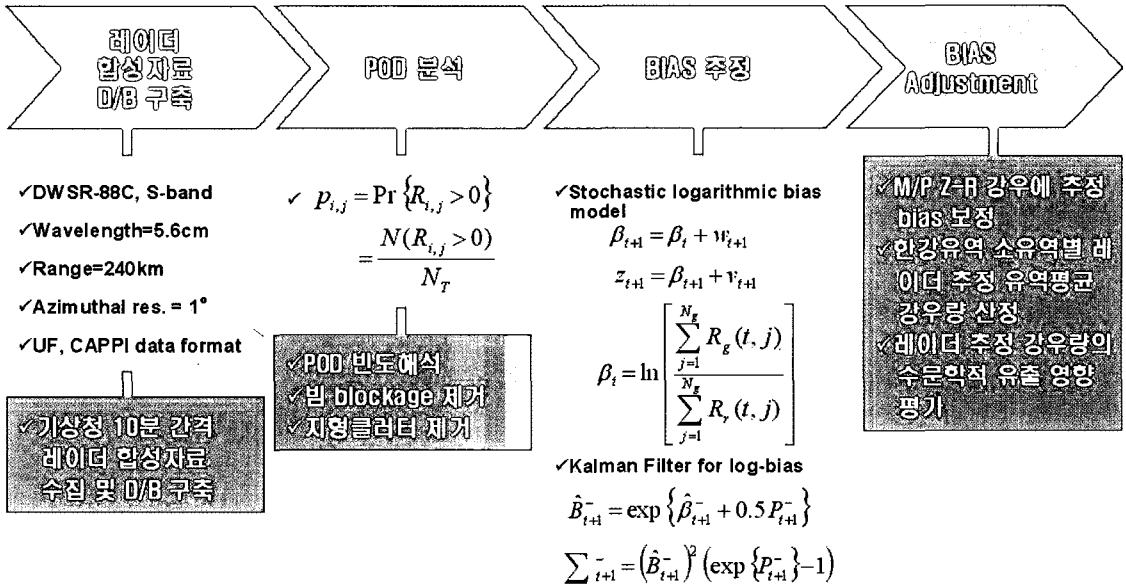


그림 6. 레이더 합성자료를 이용한 강수추정 절차

여 돌발홍수 예경보에 활용하였다.

4.2 실시간 KoFFG 시스템

한국형 실시간 FFG 운영시스템(KoFFG, Korea FFG)의 현업운용을 위해 시스템에 필요한 구성요소를 파악하고 주요 핵심기술들을 연계할 수 있는 방안을 설계하는 것은 매우 중요한 사안이다. 실시간 운영시스템은 그림 7과 같이 크게 전처리(pre-process), FFG 계산 핵심모듈(core module), 후처리(post-process) 과정으로 구성되며, 전처리 과정에서는 국내 기상청 및 건교부의 레이더, AWS, RDAPS 수치예보, 토양수분, 수위 등의 수문기상자료의 D/B를 수집·구축하는 단계이고, FFG 계산 핵심모듈은 지금까지의 연구결과인 한계유출량, 모델기반 토양수분 산정결과, 레이더 및 RDAPS의 강수산정 결과 등을 연계하여 돌발홍수가 발생하는데 필요한 강우량인 돌발홍수능을 계산하는 과정이다. 이때, 전처리 과정에서 수집하고 구축된 각종 수문기상자료와 GIS 구축자료들은 FFG 각 구성요소에 입력되어

지도로 설계되었다.

이상과 같은 KoFFG 프로세스 서버에서 전처리 및 FFG 핵심모듈의 계산수행이 끝나게 되면 한강유역의 돌발홍수 예보결과가 맵 및 테이블 형식으로 산출되며, 이러한 결과는 웹(web)과 같은 실시간 확인 매체물로 디스플레이 될 것이고 하천관련 연계기관과 자료의 공유가 요망된다. KoFFG 시스템의 후처리 과정을 구축하기 위해 무료로 공개된 Google Earth 소프트웨어(<http://earth.google.com>)를 활용하였다. 본 프로그램은 실좌표의 지형도 속에 생산된 표출자료를 중첩시킬 수 있으며, 지명서비스 및 3차원 검색 서비스 등을 제공하여 돌발홍수 예보자가 보다 쉽고 정확하게 계산결과를 확인할 수 있고, 위험하다고 판단될 때 신속하게 경보발령을 발표할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 8은 이러한 Google Earth 표출시스템을 통한 FFG 예측시스템의 실제 산출물을 나타낸 것으로, 본 그림들은 2004년 7월 호우사상(2004071500UTC)을 대상으로 계산된 KoFFG 시스템의 결과들로, 레이더 유역평균 강수량, 모델기반 평균 토양수분 상태, 돌발홍수능 산정결과 및 돌

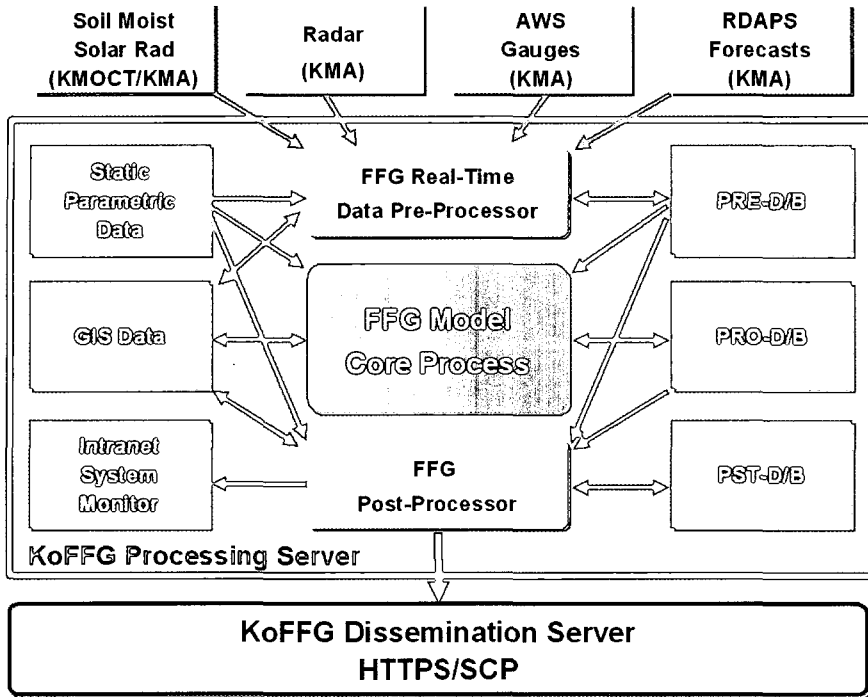


그림 7. 실시간 돌발홍수 예측시스템 설계도

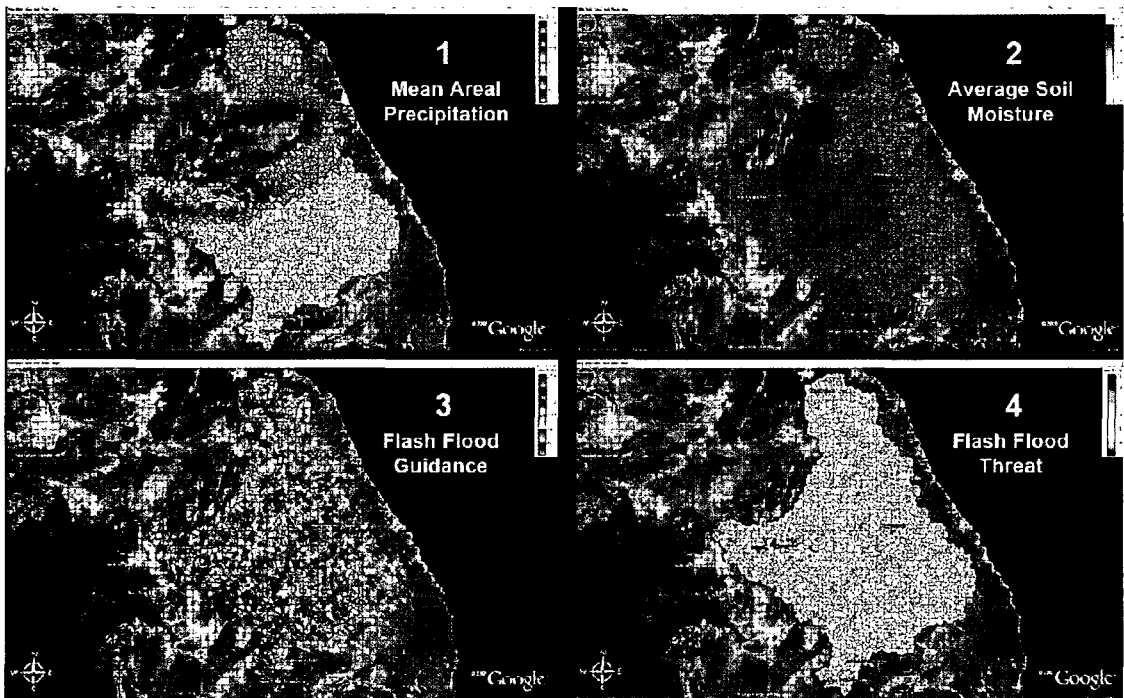


그림 8. 실시간 KoFFG 시스템 표출결과

발홍수 위험도(Flash Flood Threat) 등을 차례로 나타내었다.

5. 맺음말

1990년대 이후 이상기상 현상으로 인해 집중호우가 빈번해지고 대규모 돌발홍수가 발생하여 많은 인명과 재산피해를 유발시키고 있다. 이러한 돌발홍수 피해를 사전에 방지할 수 있는 비구조적 대책의 일환으로 기상학적 예측강우와 수문학적 해석모형으로 구성되어 있는 실시간 돌발홍수 예측시스템의 국내 개발현황을 소개하였다. 궁극적으로 돌발홍수 예경보시스템은 약 10km² 이내의 소유역 하천범람을 예측하므로 대하천의 주요 지점뿐 아니라 소하천의 범람예측에 매우 유용한 시스템이다. 따라서 이들 돌발홍수 예경보시스템은 국가재난관리시스템의 중요한 요소가 될 수 있을 것이며, 또한 행정자치부에서 시행하고 있는 소하천 정비사업에서 획득되는 결과물들은 향후 본 시스템의 정확도 향상에 결정적인 역할을 수행할 것으로 기대된다.

매년 반복되는 집중호우로 발생할 수 있는 돌발홍수로부터 국민의 생명과 재산이 위협받고 있는 이 시점에서 보다 빠르고 신뢰성 있는 돌발홍수예측이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 돌발홍수 대비책에 대한 국민과 정부의 관심이 더욱 증대되어야 할 것이다.

참고문헌

- 김진훈, 배덕효 (2006). “한강유역 한계유출량 산정.” 한국수자원학회논문집, 제39권, 제2호, pp. 151-160.
- 배덕효, 김진훈 (2005). “준분포형 TOPMODEL 개발.” 한국수자원학회논문집, 제38권, 제10호, pp. 895-906.
- Anagnostou, E. N., Krajewski, W. F., Seo, D.-J., and Johnson, E. R. (1998). "Mean field rainfall bias studies for WSR-88D." ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 3(3), pp. 149-159.
- Burnash, R. J., Ferral, R. L., and McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system: conceptual modeling for digital computers, Tech. Rep., Joint Federal-State River Forecast Center, U.S. National Weather Service and California Department of Water Resources, Sacramento, CA, 204 pp.
- Carpenter, T. M., Sperflage, J. A., Georgakakos, K. P., Sweeney, T., and Fread, D. L. (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems." J. of Hydrology, Vol. 224, pp. 21-44.
- Georgakakos, K. P. (1986). "A Generalized Stochastic Hydrometeorological Model for Flood and Flash-Flood Forecasting, 1, Formulation." Water Resources Research 22(13), 2083-2095.
- Georgakakos, K. P. (2006). "Analytical results for operational flash flood guidance." J. of Hydrology, Vol. 317, pp. 81-103.