한국형 돌발홍수 예경보시스템(KoFFG) 개발

Development of Korea Flash Flood Guidance(KoFFG) System

배덕효* , 김진훈**, 조천호***

Deg-Hyo Bae, Jin-Hoon Kim, Chen-Ho Cho

요 지

본 연구에서는 한계유출량(threshold runoff), 특정 유역의 토양수분 상태 및 단기 기상예보 자료 등으로부터 한강유역의 돌발홍수능(Flash Flood Guidance, FFG)을 계산할 수 있는 한국형 돌발홍수 예경보시스템을 개발하였다. 한강유역의 DEM 자료를 이용하여 미세 소유역을 구분하고 하도단면 특성을 고려한 제방 월류유량 개념을 기초로 고해상도 미세 소유역 단위의 지속시간별 한계유출량을 산정하였고, Sacramento 토양수분 모델을 통해 임의 시간의 토양수분 상태를 실시간으로 추정할 수 있는 돌발홍수 모델의 수문학적 구성요소를 개발하였다. 또한, FFG 시스템의 기상학적 구성요소로 레이더 강우 추정을 추계 동역학적 편차보정 기법을 통해 계산하였다. 상술된 수문 및 기상학적 구성요소를 바탕으로 2003년 7월 및 2004년 8월의 호우사상에 대한 유역기반의 FFG를 산정하였고, 기상청의 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System) 단기 수치예보 자료의 지속시간별 예측강수량을 활용하여 돌발홍수 발생 가능성에 대한 사례연구를 수행하였다.

핵심용어 : 돌발홍수 예경보시스템, 한계유출량, 토양수분 모델, 레이더 강우추정, 예측강수량

1. 서 론

최근 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강우강도를 가지는 집중호우로 인한 돌발홍수의 피해가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산피해를 초래하고 있다. 이러한 돌발홍수를 사전에 예측하기 위한 기존의 홍수예측 시스템은 강우 실관치를 모형의 입력자료로 홍수유출을 계산하는데, 돌발홍수가 발생할 수 있는 악기상 조건에서는 강우가 관측될 때 이를 이용하여 유출계산을 수행하고 그 결과 위험하다고 판단될 때 홍수예경보를 하기 위해서는 시간이 매우 촉박하기 때문에 어느 정도 한계성을 지니고 있다. 이와 같은 상황에서 특정 유역의 토양수분 상태, 한계유출량(threshold runoff) 및 단기 기상예보 자료 등으로부터 돌발홍수능(Flash Flood Guidance, FFG)을 계산할 수 있는 실시간 돌발홍수 예경보시스템을 개발하여 홍수예경보 시스템에 적용한다면 악기상 감시예측기술의 향상과 더불어 재해의 방지차원에서 매우 유용한 대책이 될 것이다. 따라서, 본 연구에서는 돌발홍수 모델의 기상 및 수문학적 구성요소를 한강유역을 대상으로 개발하여 악기상 조건에서 하천제방을 월류할 수 있는 돌발홍수의 잠재적 발생 가능성을 제시할 수 있는 한국형 돌발홍수 예측시스템 개발결과를 제시하고자 한다.

2. FFG 기본이론

돌발홍수는 지형이 좁고 경사가 급한 유역에서 느리게 유역을 통과하는 호우, 동일한 국지지역 내에서 빠르게 움직이는 집중호우나 태풍으로 인하여 짧은 시간(몇 분 또는 몇 시간)내에 하천수위의 급격한 상승을 유발하는 홍수로 정의하고 있다(Georgakakos, 1986; Sweeney, 1992). 반면에 FFG는 현재의 토양수분 조건에서 특정시간 동안 하천의 제방을 월류하는 홍수가 발생할 때까지 앞으로 필요한 강우량을 의미한다. 미국의

* 정회원·세종대학교·물자원연구소·토목환경공학과 부교수·E-mail : dhbae@sejong.ac.kr
** 정회원·세종대학교 토목환경공학과 박사과정·E-mail : jhcnu@sj.ac.kr
*** 기상청·기상연구소·지구대기관측소장·E-mail: choch@metri.re.kr

경우, 돌발홍수 예경보는 특정 시간동안 FFG 값과 예측강우량의 비교를 통해 발생 유무를 판단하며, 미국기상청(NWS) 산하 WFO(Weather Forecast Office)에서 주관하고 있다. FFG 시스템은 그림 1에서와 같이 크게 한계유출량 계산 및 토양수분 모의를 위한 수문학적 부분과 강수예측을 위한 기상학적 부분으로 구성되며, 이들의 간략한 이론적 배경을 설명하면 다음과 같다.

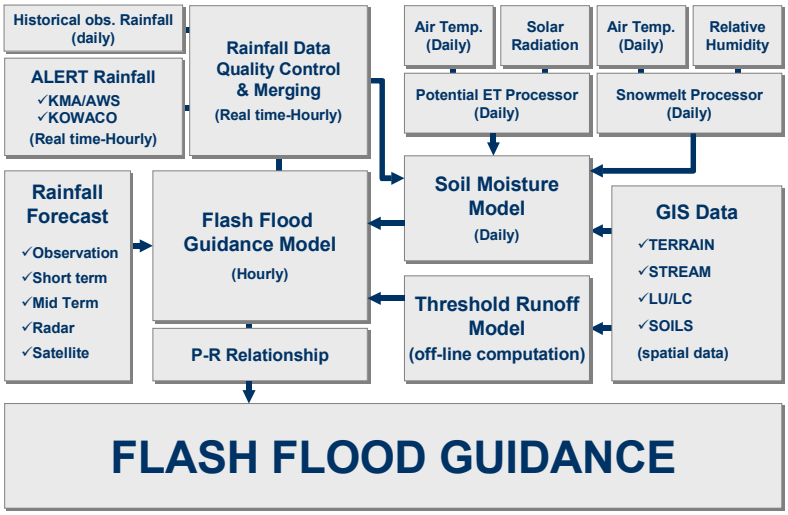

그림 1. FFG 시스템의 구성요소 및 계산절차

2.1 FFG 수문학적 모델

돌발홍수 시스템의 수문학적 모델로는 제방월류에 대한 임계치 역할을 수행하는 한계유출량(threshold runoff)과 실시간 토양수분 상태를 추정할 수 있는 강우-유출모델이다. 한계유출량은 소하천의 제방을 월류하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효우량으로 정의되며, 이는 유역과 하천의 특성에 따라 좌우된다. 단위도의 기본개념이 특정 단위시간동안 균일한 강도로 유역전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위 유효우량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이므로 한계유출량은 단위도의 첨두유량에 유역의 면적과 유효우량을 곱한 값이 유역 출구에서의 제방월류유량과 동일하다는 개념에 근거하여 산정될 수 있다(김진훈과 배덕효, 2006).

FFG 시스템에서 임의 시간의 토양수분 상태를 계산하기 위해 Georgakakos(1986)가 제안한 Sacramento 토양수분 계산 모델을 이용하였다. 한강유역의 각 소유역들을 대상으로 Sacramento 모델의 보정계산을 NOAA(1999)에서 제시한 방법으로 수행하였으며, Penman-combination 기법(Chow 등, 1988)을 활용하여 잠재증발산량을 계산하였고 연속형 모델의 동절기 융설영향을 고려하기 위해 Anderson(1973)의 융설모델을 도입하여 융설량을 계산하였다. 이들 계산결과들은 Sacramento 모델의 입력값으로 사용되어 유역내 물수지 관계를 보다 정확하게 모의하게 된다.

2.2 FFG 기상학적 모델

FFG 시스템의 기상학적 모델로는 한강유역의 고해상도 강우자료 생산을 위한 레이더 강수추정과 FFG의 발생 위험도(threat) 생산을 위한 대기 수치모델 등이 존재한다. 본 연구에서는 레이더 편차보정(bias adjustment)을 위해 칼만필터 기법을 이용한 실시간 추계 동역학적 레이더 강수산정 기법을 한강유역을 대상으로 개발하였으며 이에 대한 기본 개념을 간략히 기술하면 다음과 같다.

편차 제거를 위한 알고리즘으로는 대상 시간에 대한 가용 강우계 값의 합과 이에 대응하는 레이더 픽셀 강우값을 비교하여 미래 시간의 레이더 강우량 자료를 수정하고 그들의 편차를 제거할 수 있는 보정계수를 산정하였다. 이러한 합산 계산에서 유강수 값의 수가 통계학적으로 현저하게 많을 수 있도록 그 대상 기간을 충분히 길게 하는 것이 중요하다. 본 연산에 필요한 또 다른 매개변수는 편차산정에서 강수를 포함하는 강우계의 최소수와 유강수를 정의하는데 사용되는 최소 강수의 임계값이다. 레이더 강우와 강우계 자료의 통계적 특성으로 인해 대수(logarithmic) 편차를 계산하였고 편차의 분산(variance) 분석이 이루어진다. 추계학적 대수 편차모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 이에 대한 관측 방정식(observation equation)은 식 (2), 대수 편차 β_t는 식 (3)과 같다.

$$\beta_{t+1} = \beta_t + w_{t+1} \quad (1)$$

$$z_{t+1} = \beta_{t+1} + v_{t+1} \quad (2)$$

$$\beta_t = \ln\left[\sum_{j=0}^{N_g} R_g(t,j) / \sum_{j=0}^{N_g} R_r(t,j)\right] \quad (3)$$

여기서, R_g와 R_r은 강우계 강우량과 이에 대응하는 레이더 픽셀 강우량을 의미하고, N_g는 시간 t에서 사용되는 강우계-레이더 픽셀 쌍(pair)의 수이다. 식 (1) 및 (2)에서 w_{t+1}와 v_{t+1}는 대수 편차모델에서 모델 및 관측의 오차항을 나타낸다. 이들 오차항들은 평균(Q_t)과 분산(R_t)이 0인 독립적 백색잡음(white noise)으로 작용한다.

3. 사례연구

본 연구의 한계유출량 계산, 토양수분 산정 및 돌발홍수능 산정을 위해 우리나라의 5대강 유역 중 한강유역을 선택하였다. 한강유역은 북위 36°30′~38°55′, 동경 126°24′~129°02′에 걸쳐 한반도 중앙부에 위치하고 있으며, 유역면적 34,473km^2(임진강유역 8,118km^2 포함 및 북한지역 8,455km^2 포함), 유로연장 481.7km, 유역평균폭 55.8km, 유역형상계수 0.119인 남한 제 1의 하천이다. 한강유역에는 건교부에서 운영하는 158개의 TM 강우관측소가 존재하고, 수위관측을 위한 67개의 관측소 및 댐지점이 존재한다. 또한 증발산량과 같은 기상자료들은 기상청에서 운영하는 8개의 기상관측소로부터 획득할 수 있다.

Carpenter 등(1999)이 제시한 계산절차를 바탕으로 한강유역 전역에 걸친 30m 해상도의 DEM 자료를 활용하여 2,820개 미세 소유역에 대한 한계유출량 계산을 수행하였다. 그림 2 및 3은 1시간 및 6시간 단위의 한계유출량 계산결과를 나타낸 것으로, 여기에 사용된 하도매개변수는 소규모 자연하천 유역에서의 하도단면 매개변수와 그 상류유역의 지형학적 특성으로부터 유도되었다. 그림 2의 지속시간 1시간 단위의 한계유출량 값은 2.5~20cm/hr의 범위로 계산되었고 대부분의 소유역들은 4~8cm/hr의 한계유출량 값을 가진다. 또한 지속시간 6시간의 한계유출량 값은 4.4~50cm/hr의 범위를 보이고 그 평균값이 15cm/hr로 계산되었다.

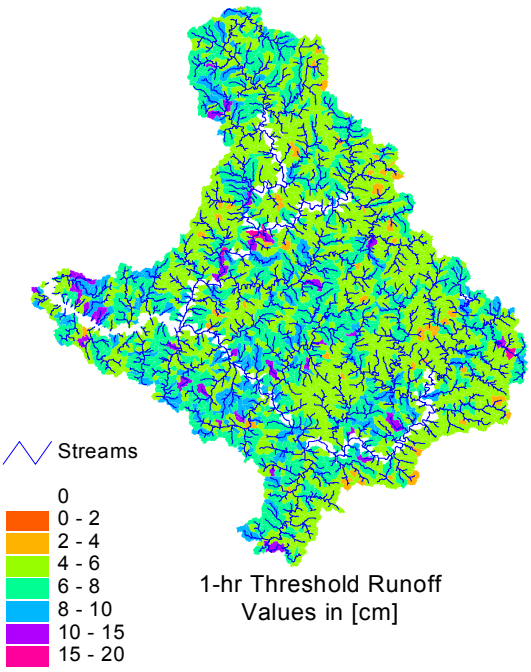

그림 2. 지속시간 1시간 한계유출량

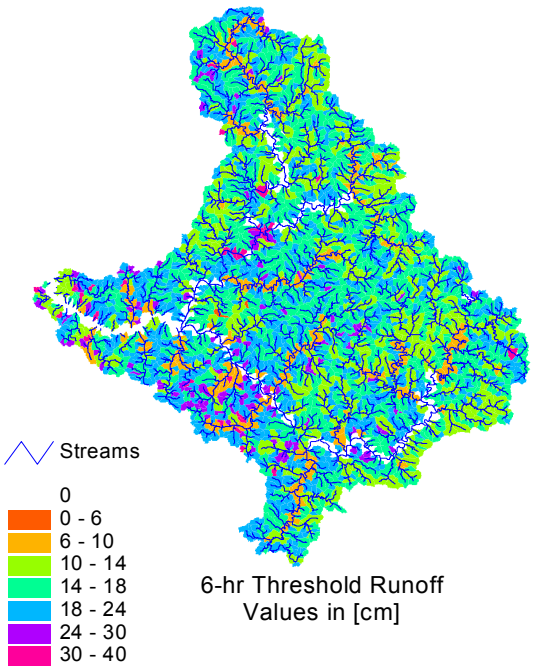

그림 3. 지속시간 6시간 한계유출량

또한, FFG 시스템에 필요한 토양수분 산정을 위해 한강유역의 각 소유역들을 대상으로 개발된 Sacramento 토양수분 모델의 보정계산을 수행하였다. 이를 위해 Penman-combination 기법을 활용하여 잠재

증발산량을 계산하였고, 연속형 모델의 동절기 융설의 영향을 고려하였다. 본 모델의 매개변수를 추정하기 위해 1976~2000년까지의 일단위 입력자료를 바탕으로 모델의 보정 및 검증계산을 수행하였으며, 이들의 일부 결과인 소양강댐 및 충주댐 상류유역의 유출결과를 나타내면 그림 4 및 5와 같다.

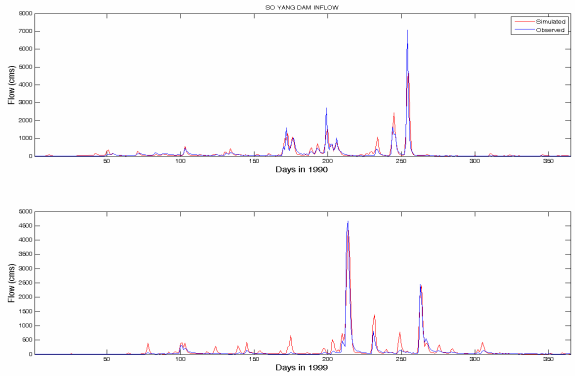

그림 4. 1990 및 1999년 소양강댐 유출결과

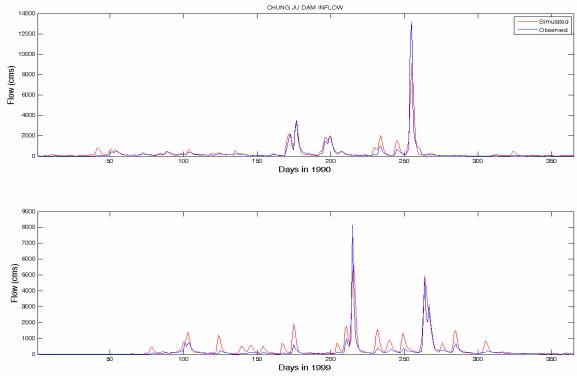

그림 5. 1990년 및 1999년 충주댐 유출결과

한편, 본 연구에서는 FFG 시스템의 기상학적 구성요소로 레이더 강우를 추정하기 위해 기상청 합성레이더 CAPPI 자료를 이용하여 무신호 자료와 지형클러터라 판단되는 비교적 높은 반사도 값은 에러자료로 판단하여 원시자료에서 제거하고, 미리 결정된 Z-R 관계식을 이용하여 레이더 강우량을 추정한 후 기상청 AWS(Automatic Weather Station) 관측지점 강우량과 편차(bias)를 칼만필터 기법의 추계 동역학적 기법을 활용하여 실시간으로 보정함으로써 Sacramento 토양수분 모델에 입력하여 사용하였다. 이렇게 추정된 한강유역 미세 소유역 기반 유역 평균강우량은 그림 6과 같고, 이를 이용한 FFG는 그림 7과 같다. 본 사례는 2004년 7월 15일 00UTC에 계산된 3시간 지속시간의 예측 결과로써, 그림 7의 FFG 계산결과는 한계유출량 및 모델기반 토양수분 상태를 이용한 결과이다.

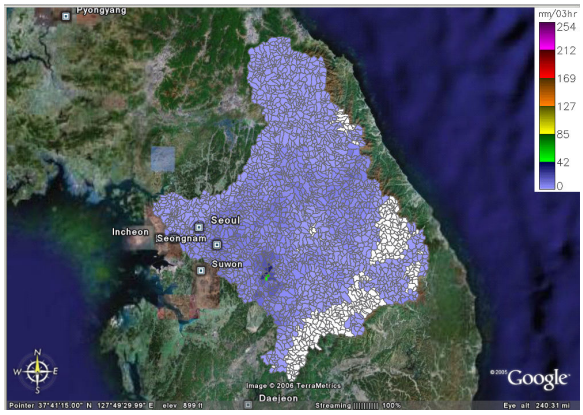

그림 6. 레이더 유역 평균강우량(2004071500UTC)

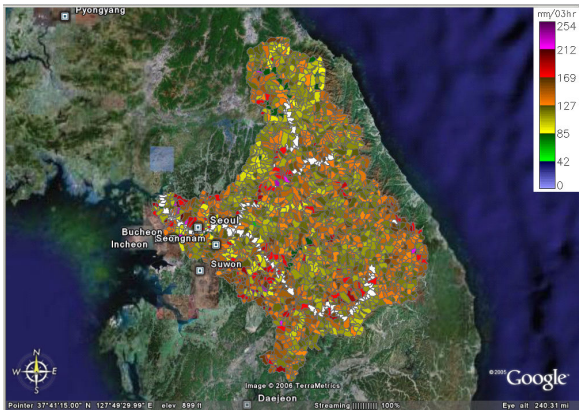

그림 7. FFG 계산결과(2004071500UTC)

상술한 계산결과를 바탕으로 한강유역의 돌발홍수에 대한 위험도(FFFT, Future Flash Flood Threat)를 계산할 수 있다. 본 과정에서는 기상청 현업의 대기수치모형인 RDAPS(5km) 강수 예측자료가 1, 3, 6 시간 등의 지속시간별로 FFG 시스템에 입력되어 앞서 계산된 FFG와의 비교를 통하여 돌발홍수경보, 돌발홍수주의보 및 돌발홍수해제 등의 돌발홍수 예경보를 보다 수월하게 수행할 수 있도록 구성된 돌발홍수 예측의 참고자료이다. 그림 8은 동일시간에서의 RDAPS 예측강수의 유역 평균값을 나타낸 것이고, 그림 9는 그림 7의 FFG 결과로부터 계산된 FFFT값을 나타낸 것으로 팔당댐 상류의 북한강유역 일부지역에서 돌발홍수 발생의 위험이 다소 존재하는 것으로 검토되었다.

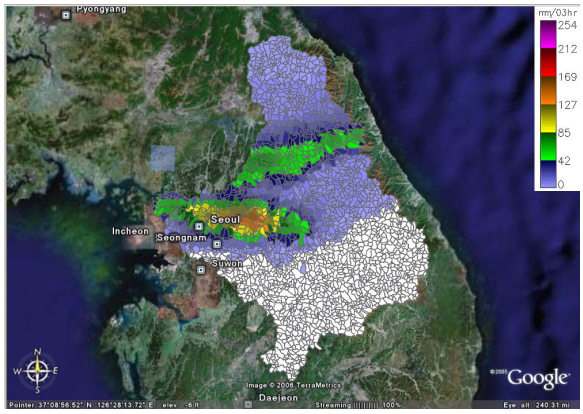

그림 8. RDAPS 예측 강수량(2004071500UTC)

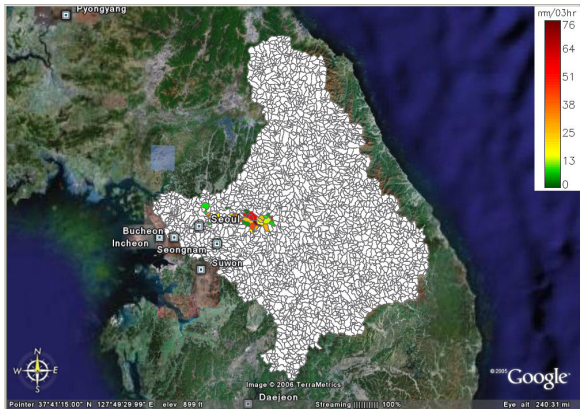

그림 9. FFFT 적용사례(2004071500UTC)

4. 결 론

돌발홍수예보 시스템은 악기상 및 재해를 사전에 감시하고 예측할 수 있는 시스템으로 돌발홍수재해 경감에 필수적이다. 돌발홍수능(FFG)은 소하천 유역에서 주어진 지속시간내에 홍수를 유발하는데 필요한 강우량을 의미하는 것으로, 이를 통해 돌발홍수 발생 가능성에 대한 경보를 사전에 발령할 수 있다. FFG 시스템은 한계유출량 계산 및 모델 기반의 토양수분 추정의 수문학적 부분과 정량적 강수량 산정 및 예보의 기상학적 부분으로 구성된다. 본 연구에서는 한강유역을 대상으로 한국형 FFG 시스템의 개발결과들을 검토하였으며, 그 결과 수문학적 구성요소로 지속시간별 한계유출량을 계산하였고 Sacramento 토양수분 모델을 통해 임의 상태의 토양수분을 추정하였다. 또한, FFG 시스템의 기상학적 구성요소로 레이더 추정강우를 추계 동역학적 편차보정 기법을 통해 계산하였다. 상술된 계산결과를 바탕으로 2004년 7월의 호우사상에 대한 FFG 및 FFFT를 계산하여 개발 시스템의 전반적 결과들을 제시하였다. 개발된 FFG 시스템은 기상 및 수문학적 기법을 연계한 종합적이고 체계적인 돌발홍수 방재기술로 사용될 수 있을 것이고, 앞으로 실시간 FFG 시스템을 구축하여 보다 다양한 사례연구를 통해 그 정확도 향상에 대한 연구를 수행할 예정이다.

감 사 의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 한반도 악기상(집중호우) 감시 및 예측 기술개발로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

김진훈, 배덕효 (2006). “한강유역 한계유출량 산정”, **한국수자원학회논문집**, 제39호, 제2권, pp. 151-160.

Anderson, E.A. (1973). National Weather Service River Forecast System-Snow accumulation and ablation model.NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17, Office of Hydrology, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.

Carpenter, T.M, Sperfslage, 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", *Journal of Hydrology*, Vol. 224, pp. 21-44.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, 572 pp.

Georgakakos, K.P. (1986). "On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific flash-flood forecasts", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(10), pp. 1233-1239.

Sweeney, T.L. (1992). Modernized areal flash flood guidance. NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD, October, 21pp. and an appendix.