



The Evaluation of TOPLATS Land Surface Model Application for Forecasting Flash Flood in mountainous areas

Lee, Byong Ju^{a*} · Choi, Su Min^a · Yoon, Seong Sim^a · Choi, Young Jean^a

^aWISE Institute, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

Paper number: 15-085

Received: 8 October 2015; Revised: 30 October 2015 / 6 November 2015; Accepted: 6 November 2015

Abstract

The objective of this study is the generation of the gridded flash flood index using the gridded hydrologic components of TOPLATS land surface model and statistic flash flood index model. The accuracy of this method is also examined in this study. The study area is the national capital region of Korea, and 38 flash flood damages had occurred from 2009 to 2012. The spatio-temporal resolutions of land surface model are 1 h and 1 km, respectively. The gridded meteorological data are generated using the inverse distance weight method with automatic weather stations (AWSs) of Korea Meteorological Administration (KMA). The hydrological components (e.g., surface runoff, soil water contents, and water table depth) of cells corresponding to the positions of 38 flood damages reasonably respond to the cell based hourly rainfalls. Under the total rainfall condition, the gridded flash flood index shows 71% to 87% from 4 h to 6 h in the lead time based on the rescue request time and 42% to 52% of accuracy at 0 h which means that the time period of the lead time is in a limited rescue request time. From these results, it is known that the gridded flash flood index using the cell based hydrological components from land surface model and the statistic flash flood index model have a capability to predict flash flood in the mountainous area.

Keywords: TOPLATS land surface model, statistic flash flood index model, gridded flash flood index

산지돌발홍수 예측을 위한 TOPLATS 지표해석모델 적용성 평가

이병주^{**} · 최수민^a · 윤성심^a · 최영진^a

^a한국의국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단

요 지

본 연구의 목적은 TOPLATS 지표해석모형으로부터 생산된 격자 수문기상성분과 통계적 돌발홍수지수모형을 이용하여 격자 돌발홍수지수를 생산하고 그 적용성을 평가하는데 있다. 대상유역은 2009~2012년동안 38건의 돌발홍수 구조요청 사례가 발생한 수도권 지역을 선정하였다. 지표해석모형의 시공간 해상도는 1 h, 1 km 이며 동일한 해상도의 모의를 위해 필요한 격자 기상자료는 기상청 AWS (automatic weather stations) 의 시단위 자료를 역거리법을 이용하여 구축하였다. 돌발홍수 피해사례 38건에 대해 대응되는 모의격자의 수문성분을 분석하였으며 27건(71%)에서 구조요청시점에 대해 강우량, 지표유출량, 토양수분량, 지하수면깊이가 적절하게 모의되는 것을 확인하였다. 강우조건에 따른 격자 돌발홍수 지수의 정확도는 구조요청시점 기준 선행시간 4~6시간까지 71~87%, 구조요청시점으로 한정된 0시간에서 42~52%로 나타났다. 이상의 결과로부터 지표해석모형을 이용한 격자 수문성분과 통계적 돌발홍수지수모형으로부터 산정된 격자 돌발홍수지수는 산지 돌발홍수를 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: TOPLATS 지표해석모형, 통계적 돌발홍수지수모형, 격자 돌발홍수지수

*Corresponding Author. Tel: +82-70-4617-7380
E-mail: bjlee0704@gmail.com (B.J. Lee)

1. 서론

최근 지구온난화, 엘니뇨, 라니냐 등 지구환경변화에 따른 기후변화 영향으로 기상현상의 변동폭이 증가하고 있다. 이와 관련해서 우리나라에서도 기후변화로 인해 극한 강우의 발생빈도와 강도가 지역적으로 얼마나 변화되었고 미래에 변화될 것인지에 대한 연구가 많이 수행되었다. Lee and Kwon (2004)는 두 기간(1941~1970년 vs 1971~2000년)에 대해 월 강우량을 분석한 결과 우리나라 동부와 남동부에서 8월달 강우량이 54% 증가함을 보였다. Chang and Kwon (2007)은 북부와 중서부에서 6월 강우량이 증가함으로 보였으며 Bae et al. (2008)은 1968~2001년(34년)에 대해 북부지역에서 연 강수량과 유출량이 증가함을 제시하였다. 또한 Jung et al. (2011)은 전국 AWS 관측소를 대상으로 1973~2005년동안 수집한 일 단위 강우량 자료를 이용하여 강우의 경향성 분석을 수행하였으며 일 강우량 80mm와 50mm 이상 발생한 연중 일수를 분석한 결과에서 183개 관측소 중 각각 176소(96%), 181소(98%)가 증가경향을 가지는 것을 보였다. 이상의 국내를 대상으로 극한강우를 분석한 연구결과를 살펴보면 대체로 여름철 강우량과 강우강도가 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 여름철 집중호우의 발생빈도가 증가할 수 있음을 예상할 수 있으며 이로 인한 홍수피해를 효과적으로 예방·대응할 수 있는 대책을 수립할 필요가 있다.

집중호우로 인한 홍수피해유형은 집중호우의 지속시간, 지상에서의 피해유형에 따라 구분될 수 있다. 강우강도, 강우 지속시간, 홍수가 발생하기까지의 시간정도에 따라 홍수와 돌발홍수로 구분되며 지상의 피해지역에 따라 도시홍수, 산지홍수, 하천홍수로 구분되고 하천홍수는 하천규모에 따라 대/중/소하천홍수로 나눌 수 있다. 돌발홍수는 지상의 피해유형과는 무관하게 강우가 발생하여 홍수징후가 발생하기까지의 시간과 밀접한 관계가 있으므로 도시돌발홍수, 산지돌발홍수와 같은 표현이 가능하다. 세계기상기구(WMO), 미국기상청(NWS)은 통상 돌발홍수를 6시간 이내에 건조한 지표상태에서 집중호우로 인해 하천의 수위가 위험수위까지 상승하고 제방이 월류하는 등의 홍수징후가 시작되는 사례로 정의하고 있다. 돌발홍수는 사전예고 없이 단시간동안 홍수징후가 발생하는 경우이므로 돌발홍수 대상지역의 규모를 구체적으로 결정하기는 어렵다.

우리나라는 최근 통신기술의 발달로 인해 TM 우량계의 관측자료, 레이더와 수치모델로부터 생산된 정량적 강수량추정치(quantitative precipitation estimation; QPE)와 예측치(quantitative precipitation forecast; QPF)를 실시간으로 활

용할 수 있는 체계는 갖추고 있다. 따라서 이들 강우자료와 도시유출모형, 하천유출모형, 침수해석모형, 범람해석모형 등을 조합 또는 연계하여 유량 및 침수면적을 모의할 경우 시간의 선행시간을 갖는 실시간 홍수예측정보를 확보할 수 있다. 또한 사전에 강우시나리오별 홍수위험도를 작성하여 홍수유무를 신속하게 파악하는 방법도 가능하다. 실제로 유역면적이 중규모(유역면적 수백 km² 이상) 이상인 하천에서 예측강우의 불확실성으로 인해 홍수피해정도를 예측하기가 어렵기는 하나 유역규모에 따른 지체시간을 고려하면 관측강우 자료만을 이용하더라도 어느 정도의 예측은 가능하다고 할 수 있다. 이와 달리 산지 계곡이나 소하천과 같이 유역면적이 수십 km² 이하이며 지체시간이 매우 짧은 경우에는 강우의 불확실성은 배제하더라도 관측수문자료 부재, 상세한 지형 정보 반영의 어려움, 집중형(lumped) 수문모형 해석능력의 한계 등의 문제로 인해 위의 방법을 적용하기는 어렵다.

국내외에서 돌발홍수와 관련한 연구를 살펴보면, Sweeney (1992)가 돌발홍수능 표준 산정 알고리즘을 제시하였으며 그 이후 Carpenter and Georgakakos (1993)이 GIS 기반의 소유역 한계유출량 개념을 도입한 방법을 제안하여 미국 기상청(NWP) 현업에 활용되고 있다. 국내의 경우, Shin et al. (2004)은 지형기후학적 단위유량도를 덕천강유역(유역면적 246.152 km²)에 적용하여 모형을 보정하고 한계수심 0.5m에 대한 한계유출량을 산정하여 지형기후학적 단위유량도의 돌발홍수 모의능력을 평가하였다. Kim and Kim (2008)은 단면과 수위 자료 가용여부에 따라 제방월류량을 산정하고 Rodriguez-Iturbe et al. (1982)가 개발한 지형기후학적 순간단위유량도를 이용하여 한계유출량을 산정하였으며 HEC-HMS 모형을 이용하여 돌발홍수기준을 계산하는 방법을 제안하였다. Bae and Kim (2007)은 Manning 공식과 지형기후학적 순간단위유량도를 이용하여 한계유출량을 산정하고 현재 토양수분 상태에서 토양이 포화될 때까지 필요한 강우량은 TOPMODEL (Beven et al., 1994)로부터 모의하여 돌발홍수능을 산정하였다. 돌발홍수는 건조한 지면조건에서 홍수징후가 빠른 시간 안에 나타나는 상황이므로 돌발홍수 모의 시 현재의 토양수분 상태와 이에 따른 강우손실량을 잘 반영하는 것이 매우 중요하다. 이러한 측면에서 Bae and Kim (2007)이 제안한 방법이 돌발홍수를 가장 잘 모의할 가능성이 높다고 할 수 있다. 다만, 선행연구와 같이 Manning 공식, 지형기후학적 단위도, 집중형 연속형 유출모형을 이용하여 한계유출량과 돌발홍수능 개념을 적용할 경우는 돌발홍수 기준유량(2년빈도 홍수량, 제방월류량) 설정 문제, 산지 소하천, 계곡과 같은 간헐천에서 유출모형의 정확도, 상세 토양수분모의, 초기유량 반영의 어

려움 등에 대한 접근법의 한계 및 불확실성이 존재할 것으로 판단된다. 현재 이러한 문제점들을 모두 해결하여 돌발홍수능을 산정하기는 매우 어렵다. UCAR (2010) “Flash Flood Early Warning System Reference Guide 2010”에서는 분포형 수문모형은 고해상도 강우, 토양특성, 토지피복 특성을 고려할 수 있으므로 지형입력자료의 질이 개선되고 강우의 불확실성이 줄어들 경우에 분포형 수문모형이 기존의 돌발홍수 산정방법을 대체할 수 있음을 제시하였다.

본 연구에서는 산지 계곡이나 소하천에서 집중호우에 의해 단시간에 발생한 급류로 등산객이나 야영객이 고립되는 등의 홍수피해를 사전에 감지하기 위해 분포형 지표해석모형 (distributed land surface model)을 이용하여 격자단위 수문성분을 모의하고 이 결과와 돌발홍수 피해사례와의 상관성 분석을 통해 개발된 돌발홍수지수모형(Yoon et al., 2015)을 이용하여 산지지역에 대한 고해상도 격자 돌발홍수지수를 산정하여 그 적용성을 평가하고자 한다.

2. 돌발홍수지수 산정방법

본 연구에서 제안하는 산지지역 돌발홍수 예측기법은 Fig. 1과 같이 분포형 지표해석모형과 돌발홍수지수모형을 이용하는 방법이다. 분포형 지표해석모형을 이용하여 격자 단위의 지표수문성분(지표유출량, 토양수분량, 증발산량 등)을 산정하고 돌발홍수지수모형을 이용하여 격자 단위의 돌발홍수지수를 산정할 수 있다. 분포형 지표해석모형은 Famiglietti and Wood (1994)가 개발한 TOPLATS (TOPMODEL based Land Atmosphere Transfer Scheme) 모형을 이용하였다. 이 모형은 물수지와 에너지수지를 통해 단위격자에 대한 실제증발산량, 토양수분량, 지하수면깊이, 지표유출량, 잠열, 현열,

지열, 순복사량 등을 모의하며 소유역단위로 지하수면깊이를 재분포시키는 특징을 가지고 있다. TOPLATS 지표해석모형의 국내 적용사례로는, Lee and Choi (2012)가 안동댐 상류유역에 대해 TOPLATS 모형을 구축하고 모의토양수분과 유출량을 관측치와 비교하였으며 Ji et al. (2014)는 낙동강유역에 대해 물수지와 에너지수지 분석을 수행하고 플럭스 관측자료의 비교를 통해 적용성을 제시한 바 있다. TOPLATS 모형을 적용하기 위해서는 대상지역에 대한 시간위 격자 기상자료와 지형자료가 필요하다. 기상자료는 지표에서의 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 기압, 입사 장/단파 복사량, 순복사량이 필요하며 지형자료는 유역도, 토지피복도, 토양도, 지형지수, 투수량계수 자료가 구축되어야 한다. 돌발홍수지수모형은 지표해석모형에서 생산된 대상지역의 격자 지표수문성분과 돌발홍수 피해사례와의 상관성 분석을 통해 개발되었다(Yoon et al., 2015). 이러한 과정을 통해 대상지역에 대한 격자 단위의 돌발홍수지수를 산정할 수 있다.

3. 대상지역 및 자료구축

본 연구에서는 수도권 지역(서울, 경기, 인천)에 대한 돌발홍수지수를 생산하여 평가하고자 한다. 수도권 면적은 11,930.06 km²으로 전국면적의 11.8%에 불과하지만 전국인구의 약 48%가 수도권에 거주하고 하고 있다. 국민안전처 국가재난정보센터(www.safekorea.go.kr)에서 제공하는 일일 재난 상황자료를 통해 수도권지역에서 2009~2012년(4년) 동안 홍수로 인한 구조요청사례를 조사한 결과 45건이 발생하였으며 이중 위치정보가 모호하거나 과실로 인한 피해의 경우를 제외한 38건을 연구에 활용하였다. 38건의 지리적 위치는 Fig. 2와 같으며 상세한 구조요청시간 및 피해규모는 Table

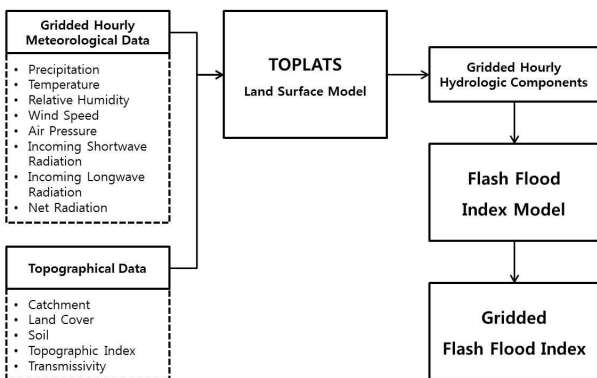


Fig. 1. The Concept of Flash Flood Index Forecast

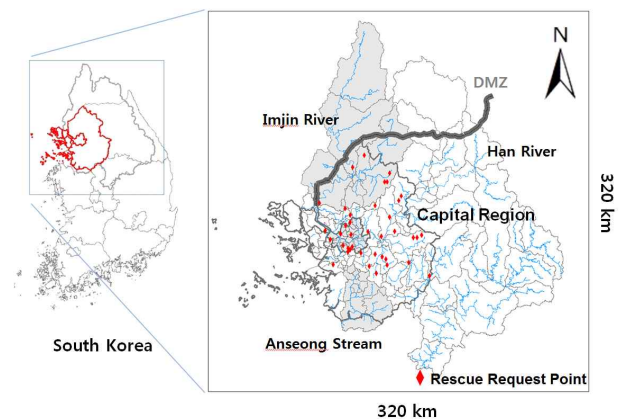


Fig. 2. Study Area

Table 1. The Case of Flash Flood Casualties in Metropolitan Region (Period: 2009~2012)

Case	Date	Report Time	coordinate (lon, lat)	Type	Casualties
1	2009.07.09	13:44	(126.96, 37.44)	valley	isolation: 3
2	2009.07.09	12:46	(126.80, 37.53)	heavy rain	isolation: 11
3	2009.07.14	13:40	(126.80, 37.53)	stream	isolation: 4
4	2010.08.10	17:21	(126.94, 37.64)	valley	isolation: 32
5	2010.08.10	18:33	(126.90, 37.57)	heavy rain	wet vehicle: 3
6	2010.08.14	22:40	(127.14, 38.21)	heavy rain	rescue
7	2010.08.15	14:05	(127.43, 37.88)	valley	rescue: 52
8	2010.08.15	19:13	(127.39, 38.07)	valley	rescue: 100
9	2010.09.02	15:12	(127.32, 37.96)	stream	isolation: 16
10	2010.09.10	13:55	(127.43, 37.60)	stream	isolation: 2
11	2010.09.11	07:02	(127.44, 37.86)	stream	isolation: 10
12	2010.09.11	19:16	(127.54, 37.33)	stream	isolation: 24
13	2010.09.12	10:46	(126.99, 37.71)	valley	isolation: 20
14	2010.09.21	21:17	(127.09, 37.43)	valley	isolation: 5
15	2010.09.21	13:55	(126.99, 37.57)	valley	isolation: 9
16	2010.09.21	18:47	(127.38, 37.72)	valley	isolation: 4
17	2011.07.25	20:07	(126.99, 37.45)	stream	isolation: 12
18	2011.07.26	18:24	(127.25, 37.42)	stream	missing: 2
19	2011.07.27	10:05	(127.26, 37.42)	stream	death: 1
20	2011.07.27	14:03	(127.34, 37.39)	stream	death: 1
21	2011.07.27	14:15	(127.74, 37.28)	stream	death: 1
22	2011.07.27	16:20	(127.58, 37.56)	landslide	burying: 1
23	2011.07.27	09:50	(127.17, 37.32)	stream	missing: 1
24	2011.07.27	16:45	(126.70, 37.80)	stream	missing: 1
25	2011.07.27	16:45	(127.32, 37.96)	landslide	missing: 1
26	2011.07.27	18:32	(127.00, 37.66)	landslide	death: 2, injury: 3
27	2011.07.27	22:29	(127.67, 37.54)	landslide	death: 3, injury: 2, burying: 2
28	2011.07.31	17:25	(126.95, 37.48)	valley	isolation: 4
29	2011.07.31	18:07	(127.15, 37.60)	valley	isolation: 7
30	2011.08.03	17:34	(127.02, 38.09)	valley	isolation: 3
31	2011.08.12	16:33	(127.23, 37.79)	heavy rain	isolation: 7
32	2011.08.14	12:41	(127.30, 37.54)	heavy rain	isolation: 80
33	2012.07.13	20:33	(127.61, 37.58)	stream	isolation: 1
34	2012.07.15	14:10	(127.43, 37.88)	stream	isolation: 3
35	2012.07.19	09:56	(127.44, 37.86)	stream	isolation: 1
36	2012.08.15	13:36	(126.99, 37.71)	valley	isolation: 12
37	2012.08.15	13:59	(126.99, 37.71)	valley	isolation: 18
38	2012.08.15	15:34	(127.00, 37.66)	valley	isolation: 8

1과 같다. 전체 38건 중 계곡이나 하천에서 급류나 수위상승으로 인한 고립이나 사망 및 침수피해사례는 34건(89.5%)이며 나머지 4건(10.5%)는 산사태 피해사례이다. 계곡이나 하천

에서 집중호우로 인해 고립되거나 사망한 경우는 강우발생시점부터 위험을 감지하기까지의 시간이 매우 짧고 이러한 피해사례는 대부분 산지 소하천 또한 계곡에서 발생될 가능성이

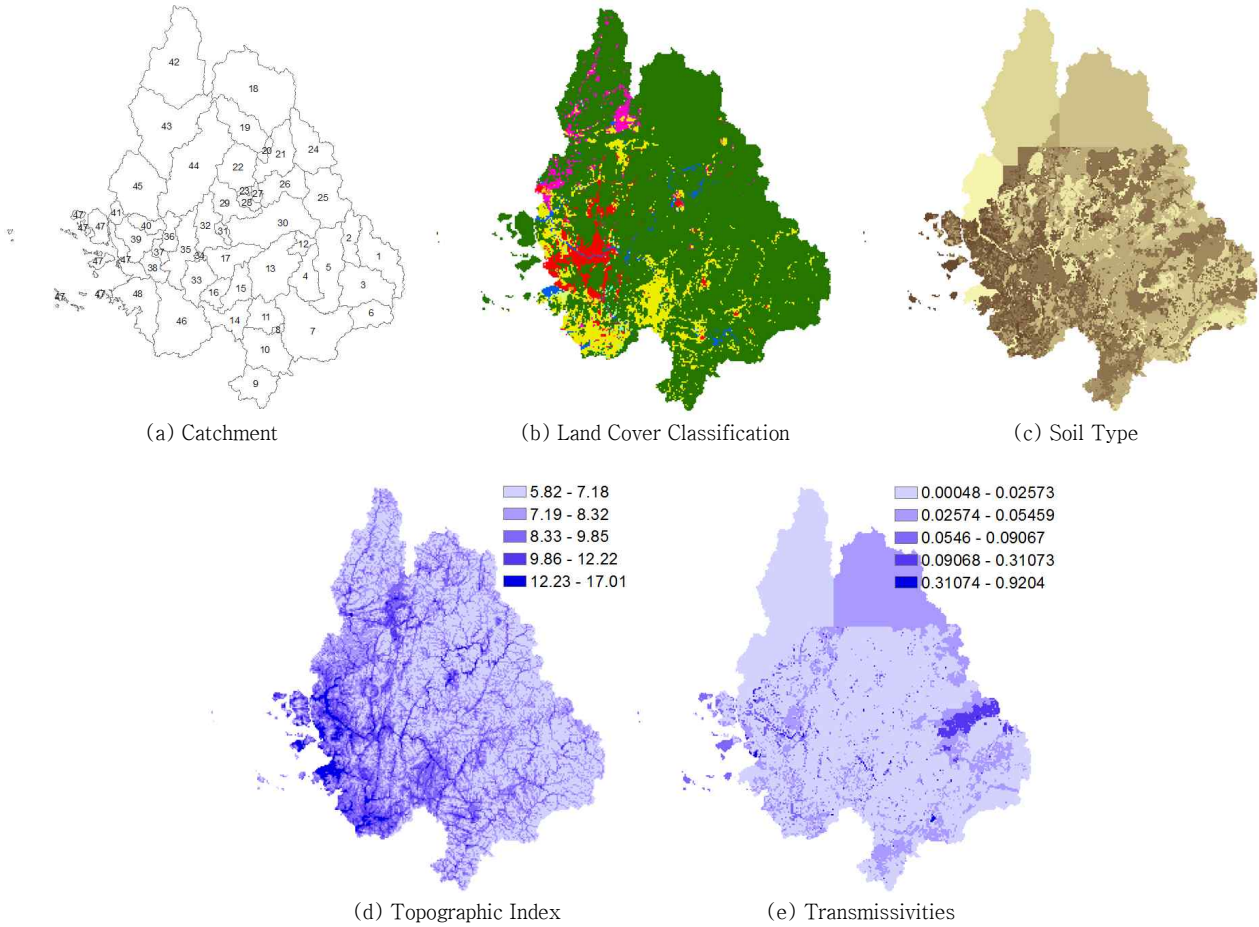


Fig. 3. Image Input Data

높음을 예상할 수 있다. TOPLATS 모형은 지하수면깊이를 유역단위로 재분배하기 때문에 격자기반 연직모형(column model)이기는 하나 유역단위로 모형을 구축해야 한다. 수도권 영역은 Fig 2에서 보듯이 한강, 임진강, 안성천 유역에 부분적으로 포함되어 있으므로 수도권 지역 전체에 대한 모의를 위해서는 해당유역을 모두 고려하였다.

대상지역의 경계는 TM 좌표기반 좌하단(320,000, 80,000), 우하단(640,000, 80,000), 우상단(640,000, 400,000), 좌상단(320,000, 400,000)이며 가로와 세로 경계길이는 모두 320 km이다. 격자해상도는 1×1 km²이다.

기상조건에 대한 지표에서의 수문반응을 잘 모의하기 위해서는 정확한 지형정보 구축이 필요하다. 1×1 km² 해상도로 TOPLATS 모형을 구축하기 위해서는 동일한 해상도를 갖는 격자형태의 유역도, 토지피복도, 토양도, 지형지수, 투수량계수 자료가 필요하며, 구축한 결과는 Fig. 3(a)~(e)와 같다. 유역도는 한강 단위유역도를 기준으로 구축하였으며 소유역은 48개로 분할하였다. 토지피복도는 국토교통부에서 제공하

는 30×30 m² 자료를 이용하였으며 수역, 도심지, 나지, 습지, 초지, 산림, 논, 밭의 8개 항목으로 구성되어있다. 지표해석모형을 이용하여 격자단위 물수지를 잘 모의하기 위해서는 토양 특성을 상세하게 반영하는 것이 매우 중요하다. Lee and Choi (2012)의 TOPLATS 모형 민감도 분석 결과에서도 토양특성과 관련된 포화수리전도도, 기포압력수두, 기공크기 분포지수, 최대 근권역 깊이가 다른 변수에 비해 민감하게 나타남을 확인할 수 있다. 국립농업과학원에서 남한지역을 1300여개의 세부 토양통(soil series)으로 분류한 정밀토양도(1:25,000)를 작성하여 배포하고 있으며 본 연구에서는 이를 이용하여 토양특성분포 및 속성DB를 구축하였다. 대상지역에는 379개 토양통이 분포하는 것으로 나타났다. 지형지수와 투수량계수는 유역 내 지하수면깊이를 재분포시키는데 활용된다.

TOPLATS 모형을 이용한 유역 물수지를 모의하기 위해서는 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 기압에 대한 격자 형태의 기상자료가 필요하다. 본 연구에서는 1×1 km² 격자에 대해 시단위 수문성분을 생산하는 것이 목적이므로 기상청에

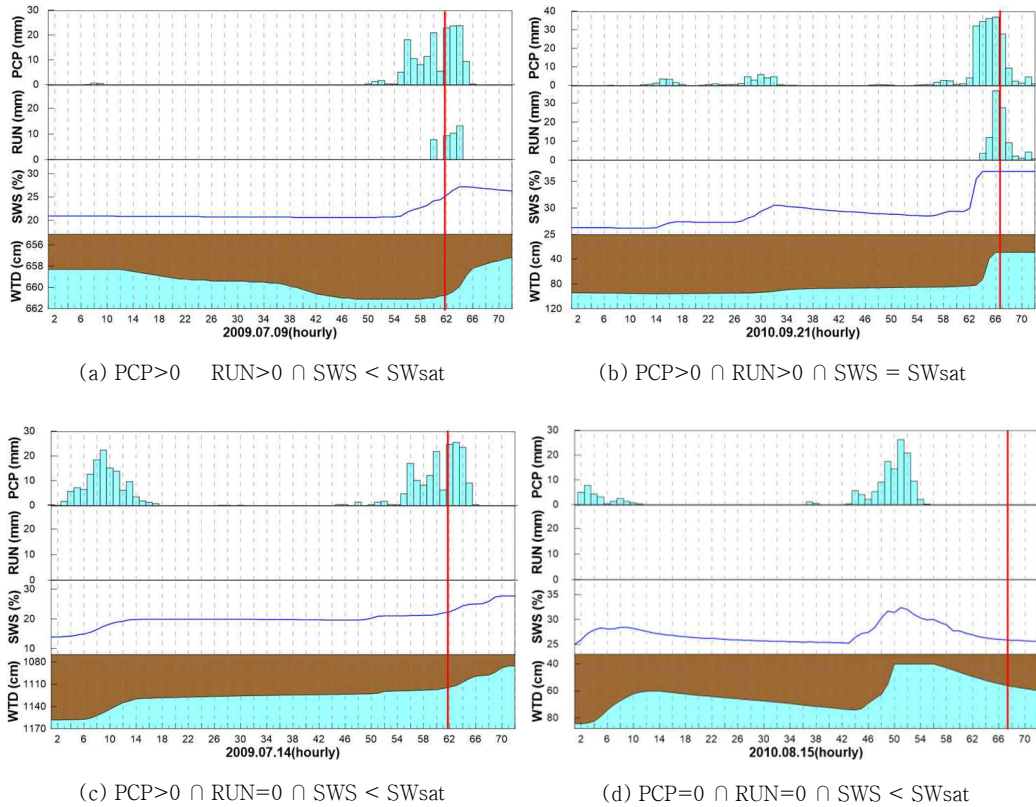


Fig. 4. Patterns of Behavior of Rainfall, Surface Flow, Soil Water Content, and Water Table Depth on Cells Corresponding to the Rescue Request Places

서 운영하고 있는 AWS 600소와 ASOS 72소의 시단위 관측 자료를 수집하고 역거리 가중법(inverse distance weight method)을 이용하여 지점자료를 격자단위로 변환하여 모형에 적용하였다.

4. 격자 수문성분 분석

지표해석모형으로부터 생산된 격자수문성을 이용하여 산지돌발홍수를 예측하는데 있어서 가장 중요한 부분은 모의된 격자수문성분이 돌발홍수가 발생 가능한 수문반응을 얼마나 잘 표현할 수 있는가이다. 이를 뒷받침하기 위해서는 많은 돌발홍수 피해사례를 수집해야 하나 집중호우로 인해 많은 곳에서 돌발홍수피해가 발생할 가능성이 높은 지역이 생기더라도 피해가 발생하지 않으면 돌발홍수 피해지역을 파악하기가 어렵기 때문에 돌발홍수를 관측하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 앞서 소개한 2009~2013년(5년)동안 수도권 지역에서 실제 돌발홍수로 인한 구조요청사례 38건에 대해 분석을 수행하였다.

Fig. 4(a)~(d)는 구조요청지점에 대응하는 모의격자의 강우량(PCP), 지표유출량(RUN), 토양수분량(SWS), 지하수면깊이(WTD)의 시계열 값과 구조요청시점을 나타낸 결과이다. (a)는 발생한 강우에 대해서 토양이 비포화된 상태에서 침투능보다 강우강도가 크므로 인해 지표유출량이 발생한 경우, (b)는 강우로 인해 침투량이 증가하여 토양수분이 포화되고 그 이후 발생한 강우량은 지표유출량으로 변환된 경우, (c)는 초기 지하수면깊이가 매우 낮은 조건에서 강우량은 모두 침투량으로 변환되어 지하수면깊이와 토양수분량이 증가 상승하고 지표유출량은 발생하지 않는 경우, (d)는 강우발생 시점과 구조요청 시점의 시차가 발생한 경우라 할 수 있다. a)와 b)는 격자 수문성분이 구조요청시점을 이상적으로 표현하는 경우이며, c)는 지표유출량이 발생하지 않음에도 불구하고 강우량만으로 구조요청시점을 추정할 수 있는 경우이다. d)는 강우량이 AWS 지점 강우자료를 역거리법으로 내삽하여 만들어진 격자강우량의 불확실성과 돌발홍수에 대한 구조요청이 개인의 판단여하에 따라 그 시점이 다를 수 있음을 감안하더라도 10시간 이상 시차가 발생하는 것은 설명하기 어렵다. 구조요청시점이 틀리지 않음을 가정할 때 강우의 오차

원인이 지배적일 것으로 판단된다.

모의격자단위에서 주어진 시계열 강우량에 대해 지표유출량, 토양수분량, 지하수면깊이가 잘 모의되는 것을 확인할 수 있으며 이는 TOPLATS 분포형 지표해석모형의 물수지해석이 격자단위에서도 적절하게 이루어지는 것을 의미한다. 다만, 구조요청시점 기준 선행시간에 대해 강우량이 절대적으로 부족하여 수문성분의 변화가 나타나지 않는 것은 AWS 관측강우 기반 QPE의 오차에 기인한 것으로 지표해석모형의 물수지 과정에서 개선하기는 어렵다. 본 연구에서는 AWS 관측강우 기반 QPE와 TOPLATS 분포형 지표해석모형을 연계한 격자수문성분이 돌발홍수지수모형을 통해 돌발홍수를 어느 정도 잘 감지할 수 있는지를 분석하여 그 적용성을 평가하고자 한다.

5. 격자 돌발홍수지수 산정

본 연구에서는 Yoon et al. (2015)이 제안한 돌발홍수지수모형을 이용하여 TOPLATS 지표해석모형으로부터 생산된 격자수문성분으로부터 돌발홍수지수를 산정하였다. 이 방법은 목표시점 기준 선행 6시간의 지표유출량, 강우량을 요인 분석과 회귀분석한 결과와 토양수분 상태변수를 일차선형함수식 형태로 표현한 것이다. 관련 식은 Eqs. (1)~(10)과 같다.

와 Q_x 는 선행 시간에서의 시간강우량(mm/hr)과 지표유출량(mm/hr), SW 와 SW_{AT} 는 목표시점의 토양수분량(%)과 포화토양수분량(%)이다. $F_{PCP,S}$, $F_{PCP,M}$, $F_{PCP,L}$ 은 단기, 중기, 장기의 강우량 요인값, $F_{RUN,S}$, $F_{RUN,M}$, $F_{RUN,L}$ 은 단기, 중기, 장기의 지표유출량 요인값이다. F_{PCP} , F_{RUN} , F_{SWS} 는 각각 강우량, 지표유출량, 토양수분량의 요인값이다. FFI 는 격자수문성분으로부터 산정된 격자 돌발홍수지수이다. 이때 가중치의 합이 80이 되도록 하여 40~60은 돌발홍수주의보, 60이상은 돌발홍수경보가 되도록 설계하였다. 돌발홍수지수와 관련한 상세한 내용은 Yoon et al. (2015)에 기술되어 있다.

$$F_{PCP,S} = \frac{0.90 \times P_1 + 0.93 \times P_2 + 0.64 \times P_3}{0.90 + 0.93 + 0.64} \quad (1)$$

$$F_{PCP,M} = P_4 \quad (2)$$

$$F_{PCP,L} = \frac{0.71 \times P_5 + 0.93 \times P_6}{0.71 + 0.93} \quad (3)$$

$$F_{RUN,S} = \frac{0.86 \times Q_1 + 0.94 \times Q_2}{0.86 + 0.94} \quad (4)$$

$$F_{RUN,M} = Q_3 \quad (5)$$

$$F_{RUN,L} = \frac{0.84 \times Q_4 + 0.92 \times Q_5 + 0.94 \times Q_6}{0.84 + 0.92 + 0.94} \quad (6)$$

$$F_{PCP} = 0.025F_{PCP,S} + 0.022F_{PCP,M} + 0.006F_{PCP,L} \quad (7)$$

$$F_{RUN} = 0.0037F_{RUN,S} - 0.011F_{RUN,M} + 0.013F_{RUN,L} \quad (8)$$

$$F_{SWS} = SW / SW_{SAT} \quad (9)$$

$$FFI = 61.5 \frac{0.836F_{PCP} + 0.613F_{RUN}}{1.449} + 18.5F_{SWS} \quad (10)$$

이상의 돌발홍수지수모형을 이용하여 대상지역에 대해 1h과 1 km의 시공간해상도를 갖는 돌발홍수지수를 산정하였다. Fig. 5는 구조요청시점에 대응하는 모의격자에 대해서 다양한 수문성분 발생조건에 따른 돌발홍수지수를 시계열로 나타낸 결과이다. Fig. 5(a)에서 시간당 50 mm 이상의 강한 강우로 인해 지표유출량이 30 mm 이상 발생하고 토양수분이 포화되며 이로 인해 돌발홍수지수가 경보기준(60)을 초과하여 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 구조요청시점(rescue request time; RRT)에서 강우량과 지표유출량은 10 mm 미만으로 줄어들었으나 돌발홍수지수는 선행 6시간의 수문성분 값을 반영하여 모의되므로 60을 초과하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 토양수분이 부족한 조건에서 강우로 인한 지표유출량은 발생하지 않으나 누적강우량의 영향으로 돌발홍수지수가 주의보기준(40)을 초과하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 격자 강우량이 크지 않고 이로 인해 토양수분 변화가 거의 없고 지표유출량도 발생하지 않아 돌발홍수지수는 40 미만으로 발생하였다. 이 경우는 강우량 부족으로 인해 모의수문성분의 변화가 없는 경우이기 때문에 격자 강우량의 불확실성에 기인한 결과라 하겠다.

Table 2은 돌발홍수 구조요청사례 38건이 발생한 장소에 해당하는 격자에 대해 구조요청시간(RRT)을 기준으로 선행 6시간의 돌발홍수지수를 산정한 결과이다. 셀(cell)은 대상지역 영역에서 좌상단을 기준으로 계산된 격자의 순번을 의미한다. ‘1’은 돌발홍수주의보, ‘2’는 돌발홍수경보이다. 예를 들어 -6 시점은 -12~-7시간의 격자 강우량, 지표유출량과

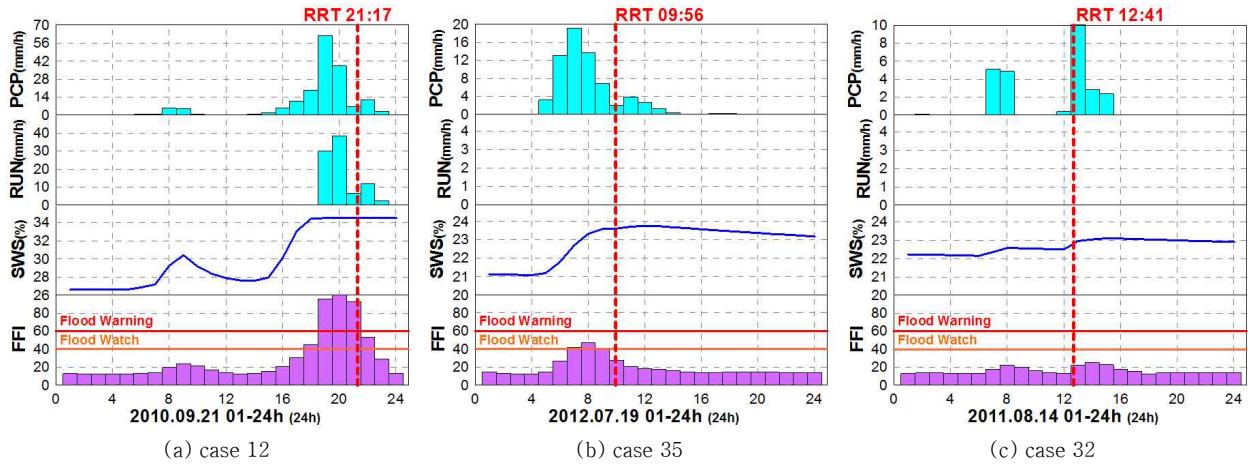


Fig. 5. The Result of the Time Series of Simulated Hydrological Components (PCP: Rainfall, RUN: Surface Runoff, SWS: Soil Water Contents) and FFI: The Case xx is Referred in Table 1

-6 시점의 토양수분량을 이용하여 산정된 돌발홍수지수이다. 열은 회색과 짙은 회색으로 표현된 사례는 구조요청시점을 기준으로 선행 6시간동안 누적강우량이 각각 5 mm와 10 mm 미만인 경우를 나타낸 것이다.

산지돌발홍수로 인한 피해는 대부분 소하천 또는 계곡에서 급류가 발생함으로 인해 등산객 또는 야영객이 고립되어 발생한다. 이런 산지지역에 대한 지표수문현상을 정확하게 모수화하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 상세한 하천수위 또는 침수면적을 모의하기 보다는 선행시간별 돌발홍수 발생 유무를 예측하는 것이 보다 현실적인 접근법이라 할 수 있다.

돌발홍수 구조요청시점은 동일한 홍수상황에서도 개인차가 있기 때문에 구조요청 시점에서의 돌발홍수지수 값 뿐만 아니라 구조요청시점에 선행해서 돌발홍수 징후를 얼마나 잘 모의하느냐가 중요하다고 할 수 있다. 표에서 구조요청시점 기준 선행 6시간의 강우량이 5~10 mm 이하인 사례를 제외한 모든 사례에서 6시간 이내에 돌발홍수주의보 또는 경보가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 TOPLATS 지표해석모형 기반의 격자수문성분과 돌발홍수 피해사례의 상관성 분석을 통해 산정된 돌발홍수지수가 돌발홍수지역을 예측하는데 활용될 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

Fig. 6은 구조요청시점을 기준으로 선행시간별로 구조요청시점까지 돌발홍수주의보 또는 경보가 발생한 사례에 대해 정확도를 산정한 결과이다. 정확도 산정식은 Eq. (11)과 같다.

C^i 는 구조요청시점으로부터 선행 시간까지 발생시점과 무관하게 돌발홍수주의보 또는 경보가 한번 이상 발생한 경우는 1, 발생하지 않은 경우는 0의 값을 가지며 N 은 전체 돌발홍수 피해사례 수이다.

$$ACC_t^i(\%) = \frac{HC_t^i}{N} \times 100 \quad (11)$$

Fig. 6에서 Case1은 전체 돌발홍수 피해사례 수(38건), Case2는 해당격자에 강우량이 발생하지 않은 사례(7, 8번 사례)를 제외한 피해사례 36건, Case3은 6시간 누적강우량이 5 mm 이하인 사례(7, 8, 9, 31번 사례)를 제외한 피해사례 34건, Case4는 6시간 누적강우량이 10 mm 이하인 사례(7, 8, 9, 13, 17, 31, 33번 사례)를 제외한 피해사례 31건에 대해서 정확도를 분석한 결과이다. 돌발홍수피해가 발생한 목표시점을 기준으로 선행 6시간의 정확도가 가장 높고 목표시점에 가까워질수록 정확도가 감소하는 이유는 6시간 이내에서 발생시점과 상관없이 돌발홍수 주의보 또는 경보가 발생한 경우에 예측을 정확하게 한 것으로 결과에 반영되기 때문이다. 선행 6~4시간까지 71~87%의 정확도를 보이고 선행시간이 줄어들수록 정확도가 감소하여 0시간에서 42~52%의 정확도를 갖는 것으로 나타났다. 선행시간이 줄어들수록 정확도가 낮아지는 이유는 구조요청시점과 모의된 돌발홍수지수의 주의/경보가 발생한 시점과의 오차가 상대적으로 제한된 조건에서의 결과이기 때문이다. 물론, 현재의 결과는 AWS 지점강우량을 내삽하여 만든 QPE이므로 예측시간 증가에 따른 강우오차의 증가는 발생하지 않는다.

이상의 결과로부터 수도권지역에 구축한 1h과 1km의 시공간 해상도를 갖는 돌발홍수지수정보가 선행 6시간 내에서 70% 이상의 정확도를 갖는 것을 확인하였다. 이는 레이더또는 수치모델로부터 모의된 QPE와 QPF 자료의 정확도가 수도권 지역에 대해 AWS 지점강우량을 내삽하여 만든 QPE와

Table 2. The Result of Flash Flood Index during Preceding Time based on Rescue Request Time on Cells Corresponding to Rescue Request Places (1: Flash Flood Watch, 2: Flash Flood Warning)

No.	Cell	preceding time						RRT
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	
1	65399	1		1		1	1	2
2	61222			1	1	1		2
3	63154							1
4	57716						1	2
5	59952							
6	38852			1				1
7	50725							
8	43991							
9	50725							
10	45909			1	2	1		
11	59036					1	1	
12	51043							
13	51043							
14	68008			2	2	2	2	2
15	55158					1	2	2
16	65089				1	2	2	2
17	60281							
18	55834					1	2	2
19	64440	2	2	2	2	2	1	
20	66386			1	1	1	1	
21	67991			1	1	1	1	
22	67029	1	1	1				
23	71227				1	1	1	
24	60972		1	1	1	2	2	1
25	68296	2	2	2	2	1		
26	51614					2	2	2
27	45911	1	2	2	2	2	2	1
28	55158					1	1	1
29	57081					1	1	
30	57081					1		
31	60659							
32	63798							
33	59335							
34	42042							
35	52301			1	1			
36	60306					2	2	2
37	51043					1	2	1
38	60656				1	2	2	1

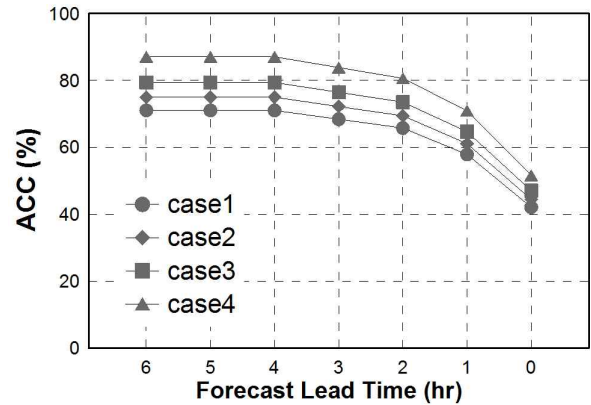


Fig. 6. Accuracy of Flash Flood Hitting according to Preceding Time

동일한 정확도를 갖는다고 가정할 때 잠재적인 돌발홍수 피해 지역을 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 토양수분량, 실제증발산량에 대해 현장관측자료 및 위성자료를 이용하여 모의된 격자수문성분에 대한 공간적인 정확도 검증이 필요하다. 또한 모의된 격자단위 지표유출량과 산지계곡 및 소하천의 실제 유출량의 상관성 분석에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

6. 결론

본 연구에서는 산지지역 소하천 또는 계곡에서 발생하는 급류로 인한 돌발홍수를 예측하기 위해 TOPLATS 지표해석모형을 이용하여 격자 수문기상성분을 생산하고 이를 Yoon et al. (2015)이 제안한 통계적 돌발홍수지수 산정방법을 이용하여 돌발홍수지수를 생산하고 검증을 수행하였다. 이를 위해 TOPLATS 지표해석모형을 수도권지역에 구축하여 1h과 1km의 시공간 해상도를 갖는 고해상도 수문성분을 모의하고 격자 수문성분이 돌발홍수 피해가 발생하는 지표상황을 얼마나 잘 모의하는지와 격자돌발홍수지수에 대한 정확도를 분석하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

수도권지역에 대한 돌발홍수 피해사례 38건에 대해서 TOPLATS 지표해석모형의 격자 수문성분을 분석한 결과, 구조요청시점 기준 선행 6시간동안 10mm 이하의 강우가 발생한 사례 11건을 제외한 27건(71%)에 대해서 강우량, 지표유출량, 토양수분량, 지하수면깊이가 적절하게 모의되는 것을 확인하였다. TOPLATS 모형은 다른 분포형 모형과는 달리 소유역 단위로 지하수면깊이를 재분포시켜서 각 격자단위 지하수면깊이와 토양수분량을 갱신하며 이러한 특성으로 인해 격자단위의 시계열 수문성분도 적절하게 거동하는 것으로 판

단된다.

돌발홍수주의보는 40~60 범위, 돌발홍수경보는 60이상에서 발령하며 구조요청시간을 기준으로 선행 6시간에 대해 돌발홍수지수를 산정한 결과에서 27건에 대해 주의보나 경보가 발생하는 것으로 나타났다. 선행시간별로 정확도를 분석한 결과에서 해당격자의 강우량 발생 조건에 따라 선행 4~6시간까지 71~87%의 정확도를 유지하고 0시간에서 42~52%로 정확도가 줄어드는 것으로 나타났다. 선행시간이 줄어들수록 정확도가 낮아지는 이유는 구조요청시점과 모의된 돌발홍수지수의 주의/경보가 발생한 시점과의 오차가 상대적으로 제한된 조건에서의 결과이기 때문이다.

분포형 수문모형 또는 지표해석모형의 장점은 넓은 지역에 대해 공간적으로 세밀한 수문성분 모의가 가능하다는데 있다. 물론 이를 위해서는 지표특성을 나타내는 토양과 토지 피복에 대한 정확한 입력자료 구축과 격자 강우량의 정확도가 확보되어야 한다. 이러한 문제들은 GIS 자료의 발달과 레이더와 수치모델의 발달정도에 따라 개선될 가능성이 높다고 판단된다. 향후, 다양한 지표해석모델 적용을 통해 격자 수문성분의 불확실성을 평가하고, 모의수문성분의 정확도 검증 및 산지계곡/소하천 유출량과의 상관성 분석에 대한 연구를 수행하고자 한다. 또한 돌발홍수 피해사례를 추가하여 돌발홍수지수에 대한 검증을 수행하고 레이더 및 수치모델 QPE/QPF 적용에 따른 결과를 분석하여 현업에서 활용이 가능한 산지돌발홍수 예측체계를 구축하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스 개발(WISE) 사업(KMIPA-2012-0001-1)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Bae, D.H., and Kim, J.H. (2007). "Development of Korea flash flood guidance system: (I) theory and system design." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3B, pp. 237-243.

Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). "Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins." *Hydro-*

logical Processes, Vol. 22, pp. 2644-2656.

Beven, K., Quinn, P., Romanowicz, R., Rreer, J., Fisher, J., and Lamb, R. (1994). *TOPMODEL and GRIDDATB, A users guide to the distribution versions (94.03)*, CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, Lancaster, U.K.

Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (1993). *GIS based procedures in support of flash flood guidance*, IHR Report, No. 366, Iowa Institute of Hydraulic Research The University of Iowa, Iowa City, pp. 1-27.

Chang, H., and Kwon, W.T. (2007). "Spatial variations of summer precipitation trends in South Korea, 1973-2005." *Environmental Research Letter*, Vol. 2, pp. 1-9, DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045012.

Famiglietti, J.S., and Wood, E.F. (1994). "Application of multiscale water and energy balance models on a tallgrass prairie." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 11, pp. 3061-3078.

Ji, H.S., Lee, B.J., Nam, K.Y., Lee, C.K., and Jung, H.S. (2014). "Evaluation of hydrological components simulated by water and energy balance." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 1, pp. 25-35.

Jung, I.W., Bae, D.H., and Kim, G. (2011). "Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea." *Int. J. Climatol.*, Vol. 31, pp. 359-370.

Kim, B.S., and Kim, H.S. (2008). "Estimation of the flash flood severity using runoff hydrograph and flash flood index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 407-424.

Lee, B.J., and Choi, Y.J. (2012). "Evaluation of high-resolution hydrologic components based on TOPLATS land surface model." *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 22, No. 3, pp. 357-365.

Lee, S., and Kwon, W.T. (2004). "A variation of summer rainfall in Korea." *Journal of Korean Geographical Society*, Vol. 39, pp. 819-832.

Rodríguez-Iturbe, I., Sanabria, M.G., and Bras, R.L. (1982). "A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 877-886.

Shin, H.S., Kim, H.T., and Park, M.J. (2004). "The study of the fitness on calculation of the flood warning trigger rainfall using GIS and GCUH." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, pp. 407-424.

Sweeney, T.L. (1992). *Modernized areal flash flood guidance*, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO44.

UCAR (2010). *Flash Flood Early Warning System Reference Guide 2010*, ISBN 978-0-615-37421-5.

Yoon, S., Choi, S., Lee, B.J., and Choi, Y.J. (2015). "A study on statistical methods for the development of flash flood index." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Proceeding.