



A stochastic flood analysis using weather forecasts and a simple catchment dynamics

Kim, Daeha^{a*} · Jang, Sangmin^a

^aClimate Application Department, APEC Climate Center

Paper number: 17-072

Received: 7 September 2017; Revised: 19 September 2017; Accepted: 19 September 2017

Abstract

With growing concerns about ever-increasing anthropogenic greenhouse gas emissions, it is crucial to enhance preparedness for unprecedented extreme weathers that can bring catastrophic consequences. In this study, we proposed a stochastic framework that considers uncertainty in weather forecasts for flood analyses. First, we calibrated a simple rainfall-runoff model against observed hourly hydrographs. Then, using probability density functions of rainfall depths conditioned by 6-hourly weather forecasts, we generated many stochastic rainfall depths for upcoming 48 hours. We disaggregated the stochastic 6-hour rainfalls into an hourly scale, and input them into the runoff model to quantify a probabilistic range of runoff during upcoming 48 hours. Under this framework, we assessed two rainfall events occurred in Bocheong River Basin, South Korea in 2017. It is indicated actual flood events could be greater than expectations from weather forecasts in some cases; however, the probabilistic runoff range could be intuitive information for managing flood risks before events. This study suggests combining deterministic and stochastic methods for forecast-based flood analyses to consider uncertainty in weather forecasts.

Keywords: Weather forecasts, Rainfall-runoff model, Stochastic flood forecasts

기상예보와 단순 강우-유출 모형을 이용한 확률적 홍수해석

김대하^{a*} · 장상민^a

^aAPEC 기후센터, 응용사업본부

요 지

기후변화에 대한 우려와 함께 증가하고 있는 극한호우의 피해를 줄이기 위해서는 호우사상 발생 이전에 홍수위험을 미리 파악하여 피해를 대비할 시간을 늘리는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기상청 동네예보를 기반으로 하는 간단한 확률적 홍수위험 산정방법을 제시하였다. 예보강수를 조건부로 하는 6시간 강수량의 확률밀도함수를 이용해 다수의 임의 강수량을 생성한 후 추계학적 모형으로 1시간 단위로 분해하여 간단한 강우-유출모형에 입력하는 방법을 사용하였다. 보청천 유역의 2017년 주요 강우사상에 제안된 방법을 적용한 결과, 7월 4일 최대홍수량이 나타났던 사상에 대해서는 예보강수를 이용한 모의는 홍수위험을 과소평가하였음을 확인하였고 반면 8월 15일 사상에 대한 동네예보는 강수량을 다소 과대추정 하였지만 홍수위험을 충분히 알릴 수 있는 정보로 평가되었다. 본 연구는 확정론적 모형과 확률론적 강수량을 결합하여 기상예보의 불확실성을 고려한 자료기반 홍수위험도 산정방법을 제시한다.

핵심용어: 기상예보, 강우-유출모형, 추계학적 홍수예측

*Corresponding Author. Tel: +82-51-745-3983
E-mail: d.kim@apcc21.org (D. Kim)

1. 서론

기상관측과 기후변화 시나리오에서 한국의 기상학적 홍수 위험은 점점 증가할 것으로 예상되고 있다(Lee et al., 2011). 도시화로 인한 불투수 면적의 증가는 홍수 위험을 더 키우고 있고, 토양의 침투능과 하천의 배수능이 좋지 않은 농경지역 또한 홍수위험의 사각지대로 보기는 어렵다(Jung et al., 2011; Choi, 2002). IPCC (2014)는 증가하고 있는 대기이산화탄소가 수문순환을 가속화하여 지금까지 경험하지 못한 집중호우가 발생할 가능성을 높일 것으로 예측하고 있다.

이렇게 커지고 있는 기상학적 홍수 위험을 줄이는 비구조적 방법 중 하나는 홍수 피해를 사전에 알리는 예보시스템을 갖추는 것이다. 기상예보를 기반으로 하는 홍수해석은 피해를 사전에 대비할 수 있는 중요한 정보가 된다. 대표적으로 미국 NWS (National Weather Service)에서는 단기 기상예보를 홍수예보의 주요 입력 자료로 사용하고 있다(Clark et al., 2014). 국내에서는 기상예보를 이용한 수문학적 예측이 활발히 검토된 바가 있지만(e.g., Bae et al., 2004, Kim et al., 2005, Kang et al., 2007), 여전히 홍수예측은 관측 강우자료를 기반으로 하는 경우가 많다(e.g., Han et al., 2009). 이 경우, 침투 유출량의 크기와 시간을 강우 발생 이후에만 알 수 있고 강우 발생 이전에 정량적으로 홍수위험도를 평가할 수 없기 때문에 그만큼 대비가 늦어질 가능성이 높다. 특히 강우에 대한 유역의 반응이 빠른 경우, 강우시작부터 침투 유출까지의 시간이 매우 짧아 대비가 거의 불가능해질 수 있다.

홍수피해를 대비할 수 있는 시간을 단 몇 시간이라도 늘리기 위해서는 결국 기상예보를 이용할 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고 홍수해석에 예보강우가 많이 사용되지 않는 이유는 1개의 기상학적 입력을 이용해 1개의 수문학적 출력으로 연결시키는 확정론적 top-down 해석 방식이 주로 사용되기 때문인 것으로 보인다. 이 방식은 복수의 모형이 사용되지 않는 이상 단 1개의 예측결과를 주기 때문에 정확도와 예측력에 상관없이 사용자에게 큰 부담을 준다(Brown et al., 2012). 일기 예보의 기반이 되는 Navier-Stokes 방정식의 비선형성은 기상 예보가 카오스(chaos)적인 예측임을 의미한다(Lorenz, 1963). 따라서 아주 작은 초기조건 차이에도 예측결과에 큰 변화가 나타나는 것은 이미 많이 알려져 있는 사실이고 lead time을 늘릴수록 예측력이 현저히 줄어드는 것은 피할 수 없다(White et al., 2017). 이렇게 실제현상이 예측에서 벗어날 가능성이 상당함에도 1개의 예측만을 제공하는 확정론적 방식을 예보 강수에 적용하는 것은 사용자에게는 큰 위험부담이다. 한국에서 예보강우를 유출모의에 사용한 대표적인 연구로 Kang

and Moon (2010), Kim et al. (2005)를 들 수 있는데, 이들 모두 예보강우를 직접 모형에 입력하는 확정론적 해석을 제안하기 때문에 예측유량이 실제 유출량과 크게 차이나는 경우를 대비하기 어렵게 한다. 특히, Kang and Moon (2010)은 확정론적 유출모의를 위해 기상예보의 편의를 보정하는 것을 제안하는데 이 방법은 예측성능을 높이기는 하지만 예보된 강수량과 실제 강수량 사이에 상당한 차이가 있음을 의미하는 것이기도 하다.

다시 말하면 기상예보에는 큰 불확실성이 있고 이 불확실성을 고려하지 않는 1개의 확정론적 예측은 사용자에게는 큰 위험부담이다. 이를 보완하는 방법 중 하나는 추계학적 모의를 통해 수문곡선의 범위와 침투 유량의 확률밀도함수를 제시하는 것이다. 예보에 대한 조건부 확률밀도함수에서 다수의 강우량을 임의적으로 샘플링해서 수문모형에 입력해 수문곡선의 범위를 정량화하는 간단한 Monte-Carlo 모의가 한 예가 될 수 있다. 다만 이 방법은 유출모의에 요구되는 계산 부담이 클 경우에는 적용되기 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 지금까지 제안된 강우-유출과정의 가장 간단한 형태라 할 수 있는 Kirchner (2009)가 제시한 유역 모형을 예보강수에 적용해 자료기반 추계학적 홍수예보방법을 제안하였다. 먼저 Kirchner (2009) 모형의 적용성을 관측 유출량을 이용해 확인하였고 기상예보와 시간분해기법을 이용해 발생된 다수의 추계학적 모의강우를 수문모형에 입력하여 유출수문곡선의 범위를 제공하는 방법을 제안하였다. 아울러 2017년 주요호우 사상에 대한 예측 홍수수문곡선을 확률적으로 평가하였다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 대상유역 및 자료

본 연구의 대상유역은 한반도 중남부에 위치한 보청천 유역이다(Fig. 1). 보청천 유역은 한반도 지역에서 나타나는 전형적인 기후특성인 몬순 기후를 따르며 이에 따라 여름철(6~9월) 유출의 변동성이 상대적으로 계절성이 큰 높은 유출특성을 보인다. 보청천 하류에 위치한 산계교 지점의 시유량 자료는 금강홍수통제소로부터 제공되고 있고 가용한 자료기간은 2007~2015년이다. 산계교 지점의 유역면적은 483.80 km²로 중규모(meso-scale) 유역에 해당하며 2011년 이후 발생한 최고홍수량은 2011년 7월 10일 22시에 발생한 13.3 mm/hr이다. 유역 내에 위치한 보은 기상관측소에 기록된 해당 사상에 대한 총강수량은 7월 10~11일 이틀 동안 170 mm이다. 보은

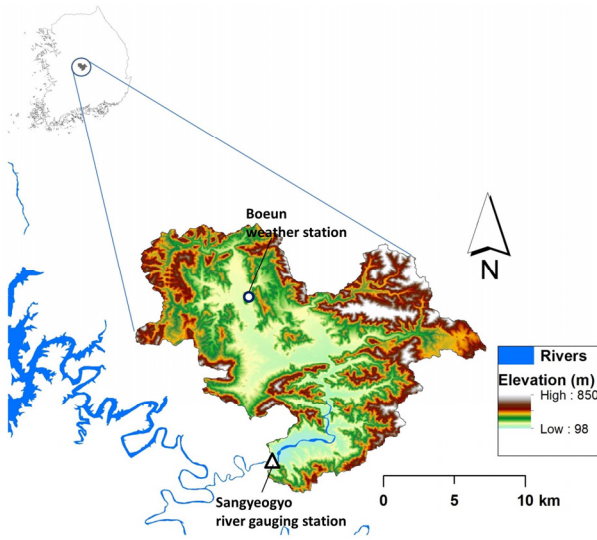


Fig. 1. Study area (Bocheong river basin in South Korea)

지점의 2007~2015년 기간의 연평균강수량은 1,248 mm 이고 이중 837 mm (67%)가 여름철(6~9월)에 내렸다. 2007~2015년 동안의 연평균 기온은 11.3°C 이다.

강우-유출모의를 위해 2007년부터 2015년까지 6~9월 우기동안 보은지점의 시강수량 및 기온 자료와 산계교 관측지점의 유출 자료를 수집하였다. 아울러 6시간 단위 기상청 동네예보의 예측력 평가 및 확률밀도함수를 구하기 위해 2015~2016년 기상청 종관관측소 91 지점에 대한 동네예보 자료와 강수량 자료를 추가적으로 수집하였다.

2.2 강우-유출 모형

본 연구에 사용된 강우-유출 모형은 Kirchner (2009)가 제안한 유출 민감도함수를 이용하는 간단한 Catchment Dynamics 모형이다(이하 Kirchner 모형). Kirchner 모형은 유출량이 유역 저류량과 가역적인 비선형 관계를 가지고 있다고 가정한다. Kirchner (2009)는 유역 저류량을 유출량으로 변환시키는 하는 경험적 유출민감도 함수의 사용을 제안하였고 이 유출민감도 함수를 간단한 멱함수로 가정할 경우(Dingman, 2015; Melson et al., 2014), Eq. (1)과 같은 간단한 1차 모형으로 강우-유출모의가 가능하다.

$$Q_{t+1} = \alpha \times Q_t^\beta \times (P_t - ET_t - Q_t) \times \Delta t + Q_t \quad (1)$$

여기서, Q_t , P_t , ET_t 는 각각 유출량(mm/hr), 강우량(mm/hr), 증발산량(mm/hr), α 와 β 는 민감도 함수의 매개변수(unitless), Δt 는 시간 간격(hr) 이다.

Kirchner 모형은 β 값으로 유역의 유출특성을 구분한다. β 가 0인 경우, 유출이 유역 저류량에 비례하게 되고 선형저수지(linear reservoir) 이론을 따르게 된다. β 가 1에 가까워질수록 유역 유출반응은 저류량에 점점 민감하게 반응한다. β 가 1보다 작은 경우에는 유출량이 0되더라도 유역에 잔류 저류량이 존재하지만 β 가 1이 되면 유출이 0인 경우 잔류 저류량은 0이 된다. β 가 1보다 크면 시스템은 유역은 도달 불가능한 저류 한계점을 가지게 되고 이 한계 저류량에 대한 유출량은 수학적으로 무한대이다. 모형에 대한 자세한 사항은 Kirchner (2009), Teuling et al. (2010), Melson et al. (2014)을 참조할 수 있다.

Eq. (1)을 이용해 강우-유출과정을 모의하기 위해서는 실제증발산량이 추가적으로 요구된다. 본 연구에서는 실제증발산량 추정을 위해 Oudin et al. (2005)의 평균기온 기반 잠재증발산량 공식을 이용하였고 실제증발산량은 잠재증발산량에 비례한다고 가정하였다. 이를 고려하여 모형을 다시 구성하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{t+1} = \alpha \times Q_t^\beta \times (P_t - k_E \times PET_t - Q_t) \times \Delta t + Q_t \quad (2)$$

여기서, PET는 Oudin et al. (2005) 방법으로 기온자료로 추정된 잠재증발산량이고 k_E 는 실제증발산량과 잠재증발산량의 비율을 의미한다.

결과적으로 강우-유출모의를 위해 필요한 매개변수는 α , β , 와 k_E 총 3개이다. 매개변수 추정을 위해 전통적인 목적함수인 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE; Nash, 1970)와 간단한 Monte-Carlo 모의가 이용되었다. 20,000회 Monte-Carlo 모의를 통해 NSE를 최대로 하는 (α , β , k_E) 조합을 각 연도별로 찾아내고 각 조합들을 다른 연도에 적용해 매개변수를 검증하였다. 20,000회 모의 횟수는 10,000회부터 5,000회씩 증가시켜가며 최대 NSE의 변화가 크게 나타나지 않는 회수로 개략적으로 결정되었다.

2.3 동네예보 기반 모의 강우 발생 및 시간분해

일기예보에 사용되는 Navier-Stokes 방정식은 비선형항을 포함하고 있어 작은 초기조건의 차이가 시간이 지남에 예측에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lorenz, 1963). 따라서 일기예보는 제한적인 lead time (통상 1~10일) 안에서만 실용성이 있다(White et al., 2017). 본 연구에서는 홍수예보에 적용할 수 있는 예보강수의 lead time을 48시간으로 가정하였고 48시간 동안의 홍수수문곡선 예측에 초점을 맞추었다.

기상청 동네예보(<http://www.kma.go.kr/weather/forecast/timeseries.jsp>)는 6시간 강수량을 5 km 해상도 8개 구간으로 제공 한다(0.1 mm 이하, 0.1~1 mm, 1~5 mm, 5~10 mm, 10~20 mm, 20~40 mm, 40~70 mm, 70 mm 이상). 추계학적 강우모의를 위해 먼저 각 구간에 대한 경험적 관측강우 확률밀도 함수를 91개 기상청 종관관측 지점 2015~2016년 자료를 이용해 구하였다. 6시간 단위 동네예보는 2015년부터 제공되기 시작하여 자료기간이 2년으로 매우 짧아 91개 지점의 자료를 모두 통합한 확률밀도함수를 이용하였다. 이 경험적 확률밀도함수를 이용하면 임의 확률을 발생시켜 48시간동안의 6시간 강수량 모의가 가능해진다. 예를 들면 앞으로 6시간 동안의 강수량이 10~20 mm로 예보되었을 경우, 이 예보를 조건으로 하는 실강우량 확률밀도함수에서 임의적인 6시간 강수량 1개를 비모수적으로 발생시킬 수 있다. 이를 48시간 예보에 적용하면 6시간 단위 모의강수 8개가 발생된다. 유출모의를 위해 먼저 이 동네예보 기반 48시간 모의강수를 1,000회 발생시켰다. 발생된 모의강수는 6시간 단위이므로 시강수에 최적화되어 있는 강우-유출모형에 직접 사용될 경우 큰 오차요인으로 작용하게 된다. 따라서 6시간 단위 모의강수를 Kim et al. (2016)의 Multiplicative Random Cascade (MRC) 모형을 이용해 1시간 단위로 분해하였다. Kim et al. (2016)은 Müller and Harberlandt (2015)의 Microcanonical MRC 모형을 6시간 강수에 사용될 수 있도록 변형시킨 후 보은지점을 포함한 기상청 ASOS 59개 지점의 매개변수를 모두 추정하였다. 이 변형된 MRC 모형은 1시간 자료에서 얻어진 관측 강우강도의 통계특성을 비교적 잘 재현하는 것으로 확인되었다(Kim et al., 2016). MRC 강우분해에 대한 상세한 내용은 Kim et al. (2016)와 Müller and Harberlandt (2015)에서 확인할 수 있다. MRC 모형을 이용해 1,000개의 모의 강수 각각에 대한 추계학적 시간분해를 50회 수행하면, 결과적으로 총 50,000 (1000 × 50)개의 48시간 1시간단위 우량주상도가 생성되게 된다.

2.4 예보기반 유출 모의 및 평가

생성된 50,000개 강우주상도를 매개변수 검증이 완료된 Kirchner 모형에 입력하여 유출모의를 수행하였다. 모의 유출 시계열이 가지는 첨두유출량의 누가확률밀도함수와 50,000개 모의 유출곡선이 가지는 95%의 신뢰구간 경계를 이용해 예보기반 모의유출의 범위를 확인하였다. 2017년 보은 지점 강우사상 2개에 대한 유출 모의를 수행하였으며 관측강우를 이용한 유출모의를 사후적으로 수행하여 예보기반 모의유출의 성능을 비교 평가하였다. 증발산량은 단기간의 유출량에 민감한 영향을 주지 않는 것으로 확인되어 예보 및 관측기반 모의 모두에 관측기온을 이용한 추정치가 이용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우-유출모형 매개변수 추정결과

Kirchner 모형이 보인 관측유량 재현성은 NSE를 기준으로 -1.29에서 0.81사이에서 변화하였다(Table 1). 모형 성능의 변동성이 비교적 커 보이기 는 하지만 여름철 강수량이 많을수록(홍수가능성이 높을수록) 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 2008년과 2009년 보은지점 여름철 강수량은 700 mm를 약간 넘는 수준이었고 2013년 이후 여름철 강수량은 700 mm보다 작았다. 여름철 강수량 1,000 mm가 넘는 홍수가능성이 높았던 해는 2007년, 2011년, 2012년 3개년으로 NSE가 모두 0.65 이상이다. 이 해에 적합 된 매개변수는 다른 해에 적합 된 매개변수에 비해 성능이 좋고 시간적인 변동성도 비교적 작은 것을 확인할 수 있다. Table 1에 나타낸 Kirchner 모형의 성능은 시험유역이 아닌 자연유역에 적용되었던 선행 연구와 유사하거나 높은 수준이다(e.g., Adamovic et al., 2015).

2007, 2011, 2015년 관측유량을 모두 이용해 같은 방법으로 매개변수를 다시 추정한 결과 $\alpha=0.041$, $\beta=0.72$, $k_E=0.33$ 를

Table 1. The NSE matrix of Kirchner model. The years in rows and columns indicate calibration and validation years, respectively

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2007	0.67	-0.41	0.45	0.71	0.74	0.78	0.78	0.60	-2.78
2008	0.55	0.61	0.40	0.67	0.75	0.62	0.48	0.49	-2.61
2009	0.45	-1.61	0.55	-0.47	-0.26	0.39	0.50	0.53	-1.47
2010	0.60	0.28	0.39	0.76	0.76	0.73	0.65	0.52	-6.01
2011	0.65	0.09	0.42	0.75	0.78	0.78	0.76	0.58	-3.04
2012	0.66	-0.60	0.39	0.64	0.77	0.81	0.72	0.58	-6.40
2013	0.66	-0.74	0.44	0.66	0.73	0.78	0.74	0.59	-4.56
2014	0.02	-7.28	0.40	0.51	-0.18	-0.32	-0.82	0.47	-14.02
2015	0.34	-3.93	0.48	0.44	-0.18	-0.13	0.130	0.55	-1.29

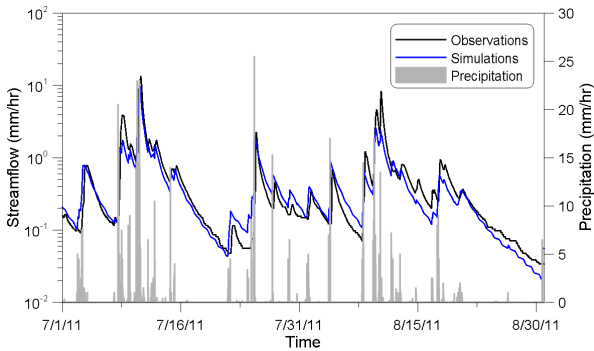


Fig. 2. Comparison between simulated and observed hydrographs

언었고 이 값들은 2011년, 2012년 관측유량만을 이용한 매개변수들과 큰 차이가 없었다. 비교적 작게 추정된 k_E 값은 고유출량에는 증발산량이 미치는 영향이 상당히 작았음을 의미한다. 이 k_E 값은 고유출량 예측에 초점을 맞춘 결과이기 때문에 장기간의 물수지를 최적화하기 위한 k_E 값과는 차이가 있을 수 있다.

Fig. 2는 $\alpha=0.041$, $\beta=0.72$, $k_E=0.33$ 값을 적용해 모의된 2011년 7~8월 유출수문곡선을 관측수문곡선과 비교한 것이다. 침투유출 사상을 모형이 비교적 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다. 수문곡선의 감수부는 유역의 강우에 대한 반응 특성을 집약적으로 보여주는데 침투유출 사상에 대해서는 감수부가 관측된 감수특성을 잘 재현하고 있는 것으로 보인다. 다만, 이후 사상에 대해서는 좀 더 큰 오차를 보이는데 이는 유역 저류량이 줄어들수록 유출반응에 미치는 요소가 다양해지기 때문으로 판단된다. 따라서 장기 유출을 고정된 매개변수로 모의하기 보다는 유역 저류량에 따른 매개변수의 변화가 필요

할 것으로 보인다.

요약하면, Kirchner 모형은 유역 저류량이 많을수록(유출이 많을수록) 좋은 성능을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 이 특징은 Kirchner 모형이 사용되었던 대부분의 선행 연구와 일관되는 결과이다(e.g., Melson et al., 2014; Adamovic et al., 2015). Kirchner 모형은 간단한 구조이지만 보정된 유역의 유출모의에 충분한 적용성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 다만, 이 모형을 장기유출해석에 적용하기 위해서는 매개변수가 시간에 따라 상당히 변화할 가능성이 있기 때문에 매개변수 추정을 위한 다른 방법론을 적용해야 할 것으로 보인다. 특히 우기와 건기에 대해 유역 반응에 미치는 물리적 요소가 다르기 때문에 이를 고려한 매개변수를 추정법이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 동네예보 예측력 평가

Fig. 3은 동네예보의 강수예보구간에 실강우량이 실제로 들어간 비율을 hit ratio로 정의한 후 이 hit ratio의 lead time에 따른 변화를 확인한 결과이다. lead time이 증가함에 따라 예측성은 빠르게 감소함을 확인할 수 있다. 특히 70 mm 이상 큰 강우량에 대한 예측은 약 0.3에서 0으로 급감함을 알 수 있다. 앞서 설명한 대로 일기예보에는 비선형성이 강하게 내재되어 있고 이 비선형성으로 인해 작은 초기값의 차이가 먼 미래의 예측결과에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 예측오차를 관측값을 이용해 지속적으로 제거하지 않으면 예보의 효용성은 크게 떨어지게 된다. Fig. 3은 이러한 일기예보의 특성을 반영한다.

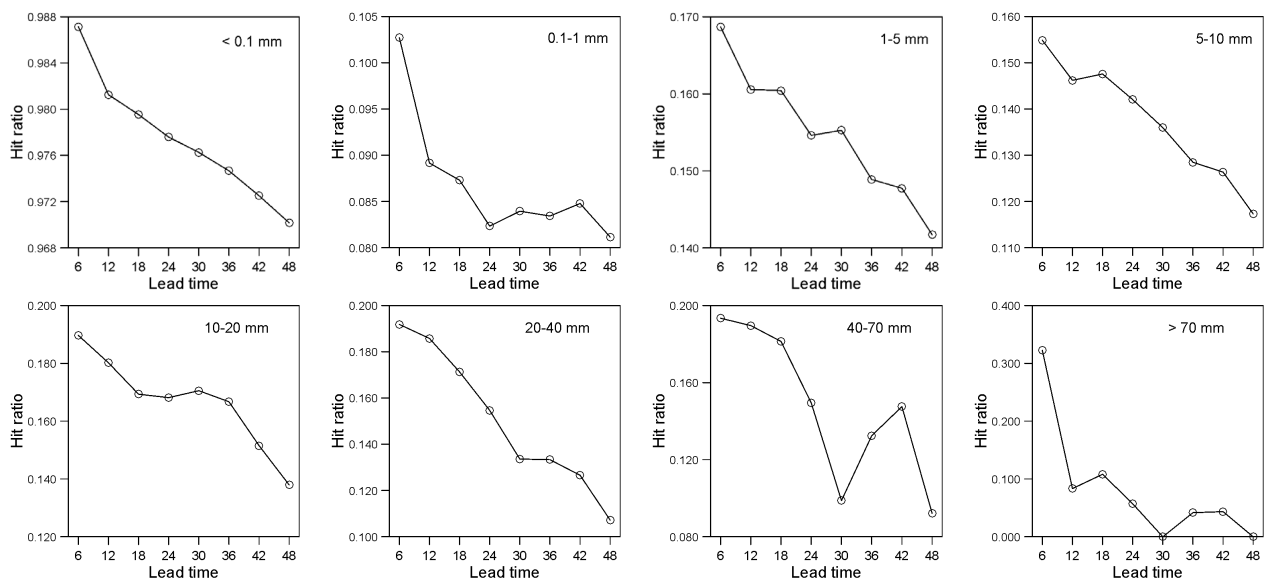


Fig. 3. Prediction skill of KMA rainfall forecasts vs. lead time

기상청 동네예보의 무강수예보는 비교적 높은 예측력을 보이는 것으로 판단된다. 보은지점 1973~2014년 강수량자료에서 얻어진 우기동안의 6시간 무강수 확률은 대략 82%이다. 따라서 기상학적 지식이 없는 사람이 단순히 앞으로 여섯 시간 동안 비가 오지 않을 것이라고 예측하기만 해도 82%의 예측력을 가지게 된다. 동네예보는 48시간 이후에 비가 오지 않는 경우를 97%의 정확도로 예측하였고, 6시간 이후에 대해서는 98%가 넘는 예측력을 보였다.

하지만 Fig. 3은 무강수 예측력을 제외하면 거의 모든 구간, lead time에 대해 관측강수량이 예보구간에 들어갈 확률은 20% 이하임을 의미하기도 한다. Fig. 4는 각 lead time 6시간 동네예보 강수예보구간 관측강수의 확률밀도함수를 나타낸 것이다. 예보강수량이 클수록 무강수확률은 작아지고 실강수량도 커졌음을 확인할 수 있다. 정성적으로는 동네예보가 어느 정도 예측력을 가지고 있음을 나타내는 결과이다. 그러나 70 mm 이상의 강수량이 예보된 경우에도 비가 전혀 내리지 않을 확률이 대략 10% 정도는 되는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 예보강수량을 유출모형에 직접 입력하게 되면 홍수량은 당연히 과대추정 된다. 예측력을 어떻게 평가하느냐에 따라 다르기는 하겠지만, 동네예보는 강수유무예보와 같은 정성적인 강수량예보에 대해서는 비교적 좋은 예측력을 가지고 있는 것으로 보인다. 하지만 Fig. 4는 예보강수량과 실강수량의 차이가 상당히 클 수 있어 그대로 예보강수량을 홍수나 침수모형의 입력값으로 사용기에는 무리가 있음을 의미하기도 한다.

3.3 2017년 주요강우사상에 대한 확률적 홍수모의

동네예보 강수량을 홍수모의에 직접 사용하기에는 무리가 있기 때문에 실강수량 확률밀도함수와 MRC모형을 이용해 생성된 추계학적 강우사상을 이용해 확률적으로 예보를 하는 것이 확정론적 모의보다 좀 더 실용적일 수 있다. 2017년 7월 3일과 8월 15일에 산계교 지점 수위 상승이 꽤 컸던 것으로 확인하였고 각 사상에 대한 50,000개의 추계학적 우량주상도를 Kirchner 모형에 입력하여 유출을 모의하였다.

Fig. 5는 7월 2일 23시에 발표된 동네예보를 이용해 생성된 50,000개의 추계학적 우량주상도에 대한 유출수문곡선의 95% 신뢰구간과 실강수량으로 모의한 결과를 비교한 것이다. 실강수량으로 모의된 수문곡선이 95% 신뢰구간 내에 있지 않음을 쉽게 확인할 수 있다. 50,000개의 추계학적 우량주상도는 99% 확률로 첨두유량이 2.4 mm/hr보다 작을 것으로 예측했는데 실제로는 이를 훌쩍 넘었던 것으로 보인다. 7월 2일 23시에 발표된 예보는 7월 3일 00시 이후 1~5 mm 혹은 5~10 mm 정도의 6시간 강수량이 48시간 동안 지속될 것으로 예상하였고, 7월 4일 12시 이후 6시간동안 10~20 mm 정도의 강우량이 최대가 될 것으로 내다보았다. 하지만 실제로는 7월 3일 00시부터 12까지 60 mm가 넘는 강수가 내렸다. 당연히 유역 저류량은 급격히 증가하였을 것이고 7월 4일 00시 이후에 내린 추가적인 강수는 7월 3일의 강수량과 비슷하기는 했지만 높아진 유역 저류량으로 인해 훨씬 큰 유량을 발생시켰을 것이다. 사상 초기에 발생한 큰 강우를 적절히 예측하지 못한 경우이다. 95% 신뢰구간의 위쪽경계가 시간이 갈수록 높아지는 이유는 동네예보는 더 많은 강수가 7월 4일 00시 이후

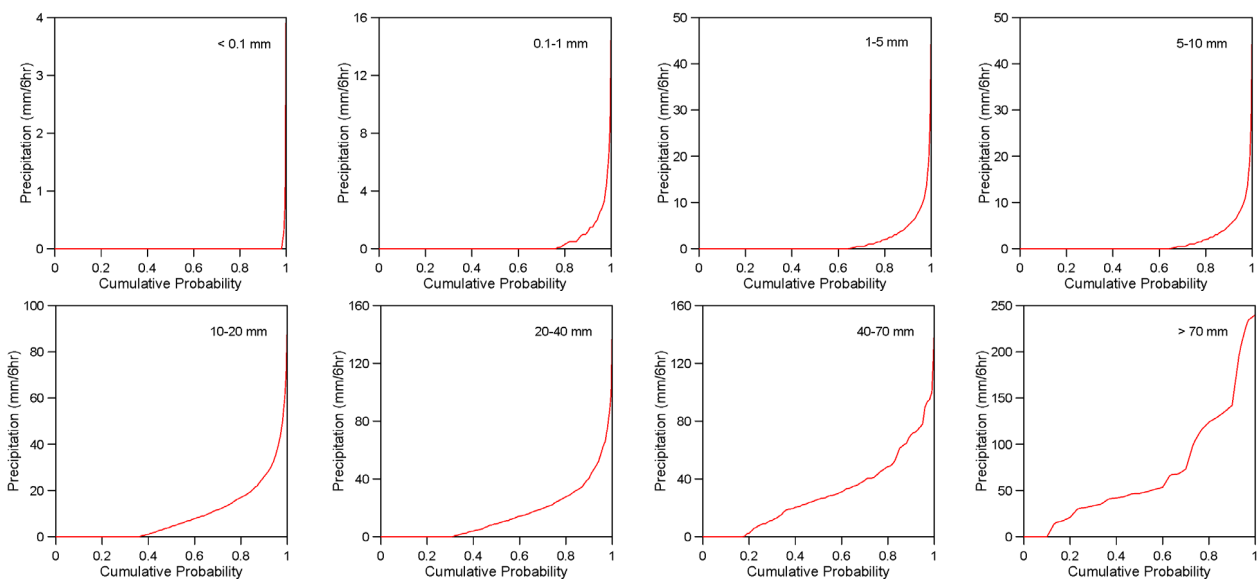


Fig. 4. Empirical cumulative probability functions of observed precipitation for each forecast interval

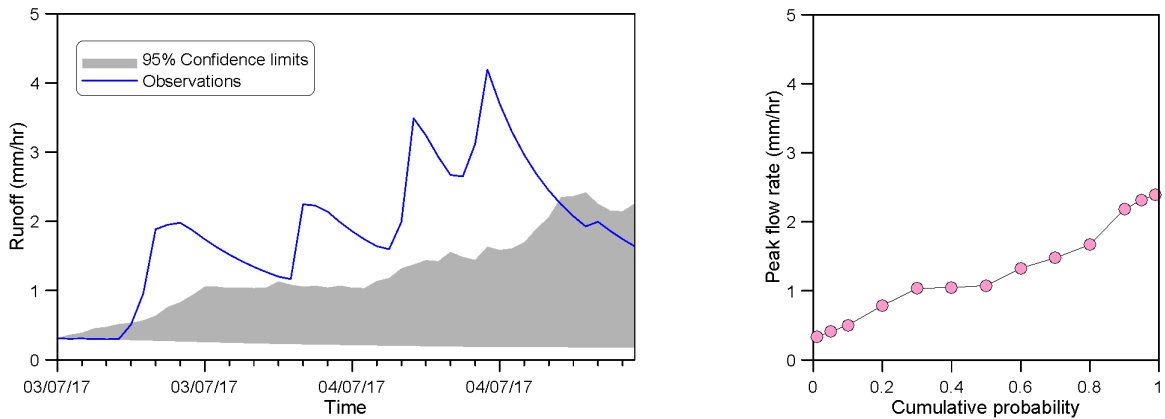


Fig. 5. Comparison between observation- and forecasted-based runoff simulations and non-exceedance probability of peak flow (Jul/3-4, 2017)

에 올 것이라고 예측했기 때문이다. 강우가 예보되었다 하더라도 비가 오지 않을 수 있기 때문에 95% 신뢰구간 아래쪽 경계는 무강수 감수곡선을 따른다. 7월 3~4일 사상은 총강우 155 mm 정도로 침수를 일으킬 정도는 아니었던 것으로 보이거나 기상예보만을 기반으로 하는 홍수예보의 한계를 나타내는 사례로 판단된다. 만약 위험기준이 2 mm/hr 라면 동네예보 상으로 이를 넘어설 확률은 20%가 되지 않았지만 실제로는 이를 동안 4회 이상 넘어선 경우이다.

반면, 8월 15일 사상은 7월 3일과 비교하면 비교적 성공적인 경우이다(Fig. 6). 8월 14일 23시에 발표된 예보는 15일 00시부터 06시까지 10~20 mm 이상의 많은 비가 내릴 것으로 예상하였고 이후 16일까지 5~10 mm, 1~5 mm 정도의 강우가 이어지다 그칠 것으로 예상하였다. 실제로는 15일 12~18시 사이에 35 mm의 비가 내렸고 다른 시간대에는 그렇게 많은 강우가 내리지 않았다. 실강수량으로 모의된 유출 수문곡선이 동네예보를 이용한 예측의 95% 신뢰구간에 들어오기는 하였으나 총강수량이 약간 크게 예측된 경우이다. 모의 결과 침투유량

이 2 mm/hr 이하일 확률은 80% 정도였고 실제로도 그 이하에서 유량이 변동하였다. 이 경우에도 95% 신뢰구간의 아래쪽 경계는 강수가 없을 때의 감수곡선이며 위쪽 경계는 초기강수가 많을 것으로 예측한 동네예보 결과가 반영된 것이다.

단 두 개의 사례만으로 동네예보의 사용성을 판단하기는 어렵지만 두 사상에 대한 해석 결과는 결국 동네예보를 확정론적으로 사용하기에는 무리가 있음을 의미한다. 예보와 실강우의 차이가 상당히 크기 때문에 동네예보를 조건부로 하는 확률적 해석이 홍수나 침수대비를 위한 의사결정에 좀 더 실용적일 수 있다는 것이다. 7월 3일 사상처럼 예보가 크게 부정확한 경우, 확률적인 해석마저도 홍수예보에 약점을 드러낼 수 있다.

하지만 이 두 사례가 동네예보의 예측력을 대표하는 것은 아니다. 또한 본 연구에 적용된 방법은 lead time을 최대 48시간으로 가정하는 것이므로 lead time을 줄이고 관측강우를 이용해 유출모의를 지속적으로 업데이트 한다면 예측력은 당연히 올라가게 된다. 본 연구의 주 목적은 강우가 실제로 일어나기

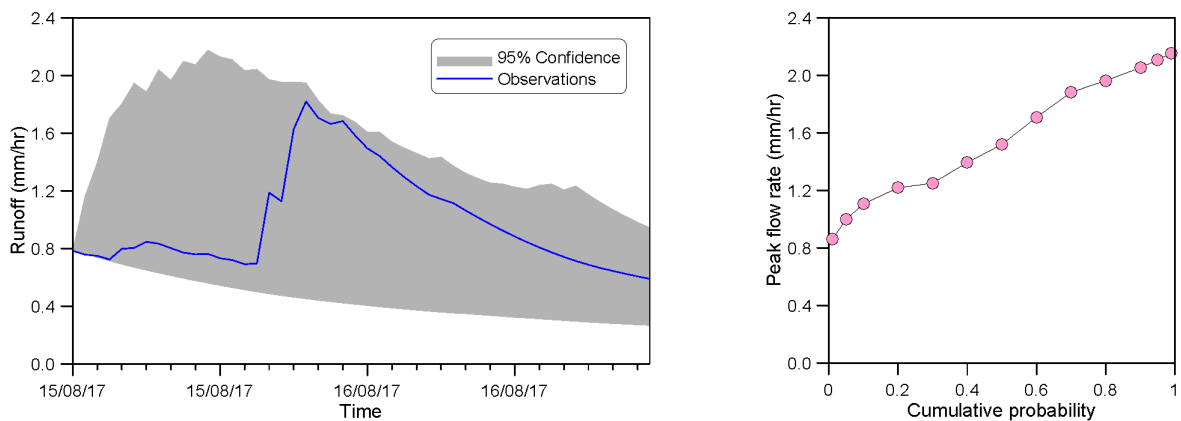


Fig. 6. Comparison between observation- and forecasted-based runoff simulations and non-exceedance probability of peak flow (Aug/15-16, 2017)

전에 기상예보를 기반으로 홍수 위험도를 평가하는데 있다. 제안된 방법은 기상예보를 기반으로 이틀 동안 나타날 유출수 문곡선의 범위를 확률적으로 찾아내는 도구이지 정확히 홍수 유무를 가리는 기준은 아니다. 다시 말하면 홍수 위험의 크기를 강우발생 이전에 정량적으로 확인하는 하나의 도구로 사용될 수는 있으나 의사결정의 절대적 기준으로 사용하기에는 무리가 있다.

4. 결론

전지구적으로 증가하고 있는 기후변화의 위험과 함께 기상예보 기반 홍수 예측의 중요성은 점점 강조되고 있다. 재해를 대비할 수 있는 시간을 늘리는 것은 재해의 영향을 사전에 대비하고 피해를 최소화하는데 결정적인 역할을 한다. 본 연구에서는 기상청 동네예보를 기반으로 하는 6시간 강수량의 조건부 확률밀도함수를 이용해 임의로 생성된 6시간 단위 강수량을 MRC 모형으로 1시간 단위로 분해하여 유출곡선의 범위와 첨두유량의 확률밀도함수를 생성하는 방법을 제안하였다. 강우-유출 모의에는 가장 간단한 유출 모의 기법인 Kirchner 모형이 사용되었고 보청천 유역 유출모의에 충분한 적용성이 있음을 확인하였다.

보청천 유역의 2017년 주요 강우사상에 제안된 방법을 적용한 결과, 2017년 7월 최대홍수량이 나타났던 사상에 대해 동네예보는 홍수위험을 과소평가하는 정보였음을 확인하였다. 반면 8월 15일 사상에 대한 동네예보는 강수량을 다소 과대추정 하였지만 홍수위험을 충분히 알릴 수 있는 정보로 평가되었다.

본 연구에 제시된 방법은 확정론적 모형과 확률론적 강수량을 결합한 비교적 간단한 방법이다. 매개변수 3개만으로 시간 단위 유출모의가 가능하고 직접유출과 기저유출의 분리와 같은 사용자의 주관적인 판단의 개입이 거의 없다고 할 수 있다. 단점은 동네예보에 기반 한 확률적인 홍수량 예측기법이 기 때문에 동네예보의 예측력에 상당히 결과가 좌우된다는 점이다. 앞서 평가한대로 동네예보는 강수유무에 대한 예측력은 상당히 뛰어나지만 유출량을 확률론적으로 모의하기에는 아직 무리가 있는 것으로 보인다. 또한 91개 지점의 자료를 통합해 실강수량 확률밀도함수를 구했기 때문에 강수예측력의 공간적 변동성을 고려하지 못하는 단점이 있다. 동네예보의 현재 예측력으로는 lead time을 줄이고 관측자료를 적절히 추가해 예측을 수행하는 것이 실용적인 방법이 될 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에 사용된 확률밀도함수는 지난 단 2년

동안의 기록만을 이용한 결과이므로 자료가 축적될수록 홍수 예측의 정확도가 함께 향상될 가능성이 있다. 아울러 본 연구에서 사용된 Kirchner 모형의 단순한 구조는 미계측 유역으로 홍수예보의 확장하는데 큰 편의성을 제공할 수 있다. 예보의 예측력 확보와 미계측 유역에서의 매개변수 추정이 본 연구를 확장하는 추가적인 연구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ011686 012017)의 지원에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Adamovic, M., Braud, I., Branger, F., and Kirchner, J. W. (2015). "Assessing the simple dynamical systems approach in a Mediterranean context: application to the Ardèche catchment (France)." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 5, pp. 2427-2449.
- Bae, D.-H., Jeong, C.-S., and Kwon, W.-T. (2004). "Effectiveness of high resolution GCM simulation for Korean water resources managements." *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 40, No. 4, pp. 409-418.
- Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., and Li, K. (2012). "Decision scaling: linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 9, W09537, doi: 10.1029/2011WR011212.
- Choi, Y. (2002). "Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in South Korea." *Journal of the Korean Data Analysis Society*, Vol. 4, No. 3, pp. 269-282.
- Clark, R. A., Gourley, J. J., Flamig, Z. L., Hong, Y., and Clark, E. (2014). "CONUS-Wide evaluation of national weather service flash flood guidance products." *Weather and Forecasting*, Vol. 29, No. 2, pp. 377-392.
- Dingman, L. S. (2015). *Physical hydrology*. Chapter 1, Waveland Press, Inc. IL. ISBN 1-4786-1118-9.
- Han, M. S., Kim, C. S., Kim, H. S., and Kim, H. (2009). "A study on the revised methods of missing rainfall data for real-time forecasting system." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 131-139.
- IPCC (2014). *Climate change 2014: synthesis report*. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jung, I. W., Bae, D. H., and Kim, G. (2011). "Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea." *International Journal of*

- Climatology*, Vol. 31, No. 3, pp. 359-370.
- Kang, B., and Moon, S. (2010). "Realtime streamflow prediction using quantitative precipitation model output." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 6, pp. 579-587.
- Kang, B., Rieu, S.-Y., and Ko, I.-H. (2007) "Long-term probabilistic streamflow prediction using weather outlook weighted ensemble streamflow prediction." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2B, pp. 183-191.
- Kim, D., Yoon, S.-K., Kang, M. S., and Lee, K.-D., (2016). "Applicability of a multiplicative random cascade model for disaggregation of forecasted rainfalls." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 58, No. 5, pp. 89-97.
- Kim, J. H., Yoon, W. J., and Bae, D. H. (2005) "Real-time application of streamflow forecast using precipitation forecast." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 1, pp. 11-23.
- Kirchner, J. W. (2009), "Catchments as simple dynamical systems: catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 2, W02429, doi: 10.1029/2008WR006912.
- Lee, M. H., Jung, I. W., and Bae, D. H. (2011). "Korean flood vulnerability assessment on climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 653-666.
- Lorenz, E. N. (1963). "Deterministic nonperiodic flow." *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 42, No. 2, pp. 433-471.
- Melsen, L. A., Teuling, A. J., van Berkum, S. W., Torfs, P. J. J. F., and Uijlenhoet, R. (2014). "Catchments as simple dynamical systems: A case study on methods and data requirements for parameter identification." *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 7, pp. 5577-5596, doi: 10.1002/2013WR014720.
- Müller, H., and Haberlandt, U. (2015). "Temporal rainfall disaggregation with a cascade model: from single-station disaggregation to spatial rainfall." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 11, 04015026.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. (2005). "Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling." *Journal of Hydrology*, Vol. 303, No. 1-4, pp. 290-306.
- Teuling, A. J., Lehner, I., Kirchner, J. W., and Seneviratne, S. I. (2010). "Catchments as simple dynamical systems: experience from a Swiss prealpine catchment." *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 10, W10502, doi: 10.1029/2009WR008777.
- White, C. J., Carlsen, H., Robertson, A. W., Klein, R. J. T., Lazo, J. K., Kumar, A., Vitart, F., Coughlan de Perez, E., Ray, A. J., Murray, V., Bharwani, S., MacLeod, D., James, R., Fleming, L., Morse, A. P., Eggen, B., Graham, R., Kjellström, E., Becker, E., Pegion, K. V., Holbrook, N. J., McEvoy, D., Depledge, M., Perkins-Kirkpatrick, S., Brown, T. J., Street, R., Jones, L., Remenyi, T. A., Hodgson-Johnston, I., Buontempo, C., Lamb, R., Meinke, H., Arheimer, B., and Zebiak, S. E. (2017). "Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions." *Meteorological Applications*, Vol. 24, No. 3, pp. 315-325.