지역특성을 고려한 강우 앙상블 멤버 생성 기법 제안

Rainfall Ensemble Member-Generation Method Accounting for Regional Characteristics

강민석* · 나우영** · 유철상***

Kang, Minseok*, Na, Wooyoung**, and Yoo, Chulsang***

Abstract

This paper proposes a method for generating rainfall ensemble members by considering regional characteristics. The movement directions of storms (characteristic direction) and spatial distribution of rainfall intensity (rainfall-intensity weight) are considered as the regional characteristics. As a case study, grids for the ensemble simulation are set in Seoul, Korea, where the rain-gauge density is quite high. The characteristic direction and rainfall-intensity weight of each grid are determined based on observations of major storm events that occurred in Seoul during the last 10 years. The rainfall ensemble members are generated by considering the characteristic directions quantified using the beta distribution. A total of 100 rainfall ensemble members are generated by repeating the simulation of the storm movement. The result from the simple average of these ensemble members is considered as the ensemble mean. The rainfall ensemble members and ensemble mean are evaluated based on the rainfall-intensity weights. The rainfall ensemble members generated using various types of rainfall fields are found to be very similar to the spatial distribution of the rainfall-intensity weights. The ensemble mean is also found to exhibit average characteristics of the rainfall ensemble members. The same results are also derived from the simulation of the storm event that occurred in 2018.

Key words : Regional Characteristics, Rainfall Ensemble, Characteristic Direction, Rainfall Intensity Weight, Beta Distribution

요 지

본 연구에서는 지역적인 특성을 고려하여 강우 앙상블 멤버를 생성하는 기법을 제안하였다. 지역특성으로는 강우의 이동방향과 강우강도의 공간적 분포를 고려하였다. 본 연구에서는 적용 사례로 지상우량계의 분포밀도가 조밀한 서울특별시에 대해 모의 격자망을 구축하고, 앙상블 기법을 적용하였다. 격자별 특성방향과 강우강도 가중치는 최근 10년 동안 발생한 주요 호우사상의 관측자료를 토대로 결정하였다. 앙상블 멤버는 특성방향의 통계치로부터 유도된 베타분포를 기반으로 생성하였다. 강우의 이동모의를 100회 수행하면 총 100개의 앙상블 멤버가 생성되고, 이 앙상블 멤버들을 단순평균한 결과가 앙상블 평균이 된다. 생성된 앙상블 멤버와 강우 앙상블 평균에 대한 평가는 강우강도 가중치를 기준으로 수행되었다. 여러 형태의 가상의 강우장을 입력하여 생성한 앙상블 멤버는 강우강도 가중치의 공간적 분포와 상당히 유사함을 확인하였다. 또한, 강우 앙상블 평균은 강우 앙상블 멤버들의 평균적인 특성을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 2018년에 발생한 실제 호우사상을 입력한 경우에서도 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 지역특성, 강우 앙상블, 특성방향, 강우강도 가중치, 베타분포

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: minseok0517@hanmail.net)

Member, Ph.D. Candidate. School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: uoo92@hanmail.net)

Member, Ph.D. Candidate. School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

***교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3321, Fax: +82-2-3290-3912, E-mail: envchul@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

1. 서 론

짧은 시간 동안 큰 강우를 동반하는 집중호우에 의해 유발되는 돌발홍수는 도시 및 산지 유역에 막대한 인명, 재산 피해를 야기한다(Kim et al., 2007; Lee et al., 2011). 돌발홍수는 도달시간이 매우 짧아 강우 발생 직후로부터 1~2시간 이내에 유발되는 특성이 있어 지상관측 강우자료 혹은 레이더 관측강우자료를 이용하는 데 큰 한계가 있다(NWS, 1998; Choi and Nam, 2005). 이를 극복하기 위해 수치예보모형 및 강우예측모형으로부터 생성된 예측강우자료를 돌발홍수 예경보에 이용한다(KMA, 2006; Georgakakos et al., 2013; Smith et al., 2016). 예측강우자료 생성에는 자료의 형태가 유사하고, 활용성이 가장 높은 레이더 관측강우가 입력자료로 이용된다. 이 과정에서 예측강우는 레이더 관측이 가지는 오차를 그대로 포함하게 된다. 더욱이 예측 품질은 예측 선행시간이 길어질수록 급격히 감소한다(Hwang et al., 2013). 이에 따라 예측강우자료의 품질 향상을 위해 예측 알고리즘을 개선한다든지 앙상블 기법을 적용하는 등의 노력이 지속적으로 이루어지고 있다(Tracton and Kalnay, 1993; Buizza, 1997; Radhakrishna et al., 2012).

현재까지 초단기 예측강우자료를 생성하는 다양한 강우예측모형들이 개발되었다. 기상청에서는 Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS)과 McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation (MAPLE)과 같은 강우예측모형을 구축하여 초단기 예보에 활용하고 있다. KLAPS는 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 국지 규모 기상자료 처리 및 분석시스템인 Local Analysis and Prediction System (LAPS)을 중규모 예측모형과 결합하여 국내의 실정에 맞게 재구성한 강우예측 시스템으로써, 3시간 간격의 예측자료를 제공한다(KMA, 2008; NIMS, 2009). MAPLE은 변분에코추적 기법(variational echo tracking technique)을 이용하여 강수 에코의 이동벡터를 산출하고 Semi-Lagrangian 방법을 통해 수 시간 이내 강수 에코의 위치를 예측한다(Germann and Zawadzki, 2002). 이외에도 영국 기상청으로부터 도입한 Unified Model (UM), 일본 기상청의 현업 모형인 Very Short-Range Forecast of precipitation (VSRF) 모형, 미국 기상청과 공동 개발한 System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN) 모형 등을 운영한 바 있다(NIMR, 2008; Han, 2014; Kim et al., 2015). 국외에서도 Auto Now Caster (ANC)와 Thunderstorm Environment Strike Probability Algorithm (THESPA), Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting (TITAN) 등 강우예측모형이 개발되어 운영되고 있다(Dixon and Wiener, 1993; Mueller et al., 2003; Dance et al., 2010).

예측강우는 불확실성, 편의를 가질 수밖에 없기 때문에 아직까지도 적정 수준의 예측 품질을 확보하지 못하고 있다(Seo, 2010; Kang et al., 2017). 예측강우는 레이더 관측강우

로부터 생성되기 때문에 관측 과정에서 발생하는 관측오차, 지상관측치와의 편의 등 레이더 강우가 가지는 한계에 의한 오차를 그대로 가지게 된다. 또한, 대기는 비선형 및 혼돈(chaotic) 시스템이므로 강우장의 발달과 이동벡터를 모의하는 과정에서도 많은 불확실성을 내포하게 된다(Lorenz, 1969; Seed, 2003). 특히 대류 불안정으로 발생하는 국지적인 집중호우에 대한 예측성능은 낮은 것으로 알려져 있다(Saito et al., 2011). 더욱이 예측강우의 불확실성은 예측 선행시간, 강우사상의 크기 및 유역의 특성에 따라 다르게 나타나며 일반적인 경향 또한 명확하지 않다(Collier, 2009).

예측강우의 품질을 개선하기 위한 하나의 방안으로써 앙상블 예측기법이 활용된다. 앙상블 예측이란, 한 시점에 대해 예측된 두 개 이상의 자료들을 결합하여 더 뛰어난 예측 품질을 가지는 예측치를 추정해내는 기법이다(Sivillo et al., 1997; KMA, 2012). 앙상블 예측기법은 결정론적인 값을 제시하는 수치기상예측의 불확실성을 어느 정도 줄일 수 있다(Migliorini et al., 2011; Baker et al., 2014). 또한, 발생 확률은 낮지만 규모가 큰 극치 강우에 대한 강우 발생 시나리오를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 더 나아가 긴 선행시간에 대한 예측성의 향상뿐만 아니라 예측의 불확실성에 대한 정보도 함께 제공할 수 있다(Molteni et al., 1996; Hewitt, 2004). 결국, 앙상블 예측은 수치기상예측이 제공하는 결정론적인 예측치에만 의존하는 것이 아니라 여러 예측치를 확률론적으로 결합하여 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출하는 데에 그 목적이 있다고 할 수 있다. 이와 같은 장점을 가지기에 현재 국외의 여러 현업 기관들에서는 앙상블 예측기법을 기상예보에 적극적으로 활용하고 있다(Richardson, 2000; Bowler et al., 2008; Kay et al., 2013).

공교롭게도 기존의 강우 앙상블 예측기법 중 지역특성을 고려한 사례는 찾아보기 어렵다. 대부분의 연구는 참값으로 가정되는 관측치에 확률론적 섭동을 추가하거나 여러 모형으로부터 생성된 예측강우에 앙상블 기법을 적용하는 등 주로 예측자료의 이용에만 집중하였다(Leith, 1974; Tribbia and Baumhefner, 1988; Duan et al., 2007; Kang et al., 2017). 강우예측모형의 예측강우 생성에 있어서도 호우사상의 기상학적 특성만을 고려하는 경우가 많았다(Dixon and Wiener, 1993; Germann and Zawadzki, 2002; K-Water, 2005; NIMS, 2009). 그러나 어떤 지역의 지형적, 기후적 특성은 호우의 이동 방향, 속도, 공간적 분포 등과 같은 강우의 변동에 큰 영향을 미친다. 그리고 이러한 지역적 특성은 호우사상의 이동 특성에 일종의 경향성을 부여한다. 따라서 대상 지역에서 발생한 호우사상은 유사한 이동 특성 및 공간적 분포를 보이게 된다. 해당 지역에서 발생할 미래의 호우사상 또한 과거에 발생한 호우사상의 특성을 따를 가능성이 매우 높다. 따라서 지역특성을 고려한 강우 앙상블 예측은 강우 예측 품질을 향상시킬 수 있는 하나의 방안으로 이용될 수 있다.

본 연구에서는 지역적인 특성을 고려하여 강우 앙상블

멤버를 생성하는 기법을 제안하고 생성된 강우 앙상블 멤버에 대한 평가를 수행하고자 한다. 지역특성으로는 격자별 강우의 이동방향과 강우강도를 고려한다. 대상 지역에 대해 모의 격자망을 구축하고 격자별로 특성방향, 강우강도 가중치를 결정한다. 결정된 격자별 가중치의 통계학적 특성치를 이용하여 베타분포를 유도하고, 이로부터 생성된 난수를 기반으로 입력강우장의 이동 모의를 수행한다. 강우 이동 모의는 입력강우장을 일정한 방향으로 이동시키며 이전 열의 강우강도를 다음 열로 분할하여 전이하는 일련의 과정을 의미한다. 입력강우장의 이동 모의가 끝난 결과로 나타나는 강우장은 강우 앙상블 멤버에 해당한다. 최종적으로 생성된 강우 앙상블 멤버와 강우 앙상블 평균은 강우강도 가중치를 기준으로 비교 및 평가된다. 본 연구에서는 우리나라에서 지상관측소의 밀도가 가장 높으며, 공간적으로 고르게 분포되어있는 서울특별시를 대상 지역으로 설정하여 강우 앙상블 멤버를 생성하고 평가하였다.

2. 연구 방법론

2.1 지역특성 가중치의 결정

지역특성 가중치를 결정하는 경우, 모의 격자망을 구축하여 이용하는 것이 효과적이다. 즉, 대상 지역을 격자로 세분화한 후 격자마다 가중치를 결정하는 것이다. 이 격자는 후에 지역특성을 고려한 강우장의 이동 모의에도 동일하게 적용된다. 따라서 격자의 크기는 강우장의 이동 모의에 적절한 수준으로 결정되어야 한다. 격자의 크기가 과도하게 크면 호우사상의 공간적 분포를 충분히 고려할 수 없게 되고, 반대로 격자의 크기가 너무 작으면 계산 효율이 떨어질 수 있다. 궁극적으로, 격자의 크기는 연구의 목적과 입력되는 자료의 특성 등을 고려하여 결정되어야 한다.

본 연구에서의 지역특성 가중치란, 격자별로 결정된 호우의 특성방향과 강우강도 가중치를 말한다. 특성방향이란 대상 지역을 통과한 호우사상의 방향성을 대표하는 값이다. 즉, 과거에 발생한 호우사상들이 주로 이동한 방향에 해당한다. 따라서 특성방향은 과거 호우사상의 이동특성을 분석하여 격자별로 결정된다. 강우강도 가중치 또한 특성방향과 유사한 방법으로 결정된다. 과거에 발생한 호우사상의 공간적 강우분포를 분석하여 격자별로 가중치가 결정된다. 즉, 어떤 격자에 강우강도 가중치가 크면 해당 격자에 강우가 집중되는 경향이 크다는 것을 의미한다. 추가로, 지역특성 가중치인 특성방향과 강우강도 가중치가 서로 큰 상관성이 있다는 점도 기억할 필요가 있다. 특성방향이 적절히 추정되었다면 공간적으로 균질한 단위 강우를 입력으로 한 모의결과는 강우강도 가중치와 큰 상관성을 가져야 한다. 이러한 상관성은 본 연구의 결과를 검증하는 과정에서 심도 있게 검토될 것이다.

앞서 언급한 것처럼, 특성방향은 대상 지역의 과거 주요 호우사상에 대한 레이더 강우자료나 지상관측 강우자료를

분석하여 결정할 수 있다. 본 연구에서는 과거 주요 호우사상의 10분 간격 지상관측 강우자료를 이용하였다. 즉, 호우사상이 대상 지역에 진입하였다가 빠져나갈 때까지 매 10분 간격으로 호우의 형태와 중심 위치를 파악한 뒤, 이를 토대로 매 시점 호우의 이동 방향 및 속도를 결정한다. 과거 주요 호우사상에 대해 이러한 분석을 반복한 후 그 결과에 역거리가중법을 적용하여 각 격자에서의 평균적인 특성방향을 결정하였다. 강우 이동 모의시에는 특성방향을 0과 1 사이의 수치로 정량화한다. 여기서 0은 북쪽을 1은 남쪽을 의미한다.

강우강도 가중치의 결정에도 매 10분마다 관측된 지상관측 강우량을 이용하였다. 역시 역거리가중법을 이용하여 각 격자별로 10분 강우량을 산정할 수 있다. 호우사상별로 모든 격자의 평균 강우량을 구한 후 다음 식을 적용하여 격자별 강우강도 가중치를 결정할 수 있다.

$$W_R = (R - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad (1)$$

여기서 W_R 은 격자의 강우강도 가중치를 의미한다. R 은 격자의 평균 강우량이다. $R_{\max}$ 과 $R_{\min}$ 은 각각 모든 격자의 평균 강우량 중 최댓값과 최솟값이다. 이 과정을 고려한 모든 호우사상에 대해 반복한 후 평균하면 각 격자별 강우강도 가중치가 결정된다. 강우강도 가중치도 특성방향과 마찬가지로 0과 1 사이의 수치로 정량화된다.

2.2 베타(beta) 분포

베타분포는 대상 자료가 상한계 및 하한계를 가지는 특수한 경우에 적합한 확률분포이다(Pearson, 1934). 기존 연구들에서도 상·하한계가 명확한 자연현상을 설명하는 데 베타분포가 효과적으로 적용된 바 있다(Hafley and Schreuder, 1977; Maltamo et al., 1995). 수문학 분야에서도 베타분포의 활용성은 크다. 호우사상의 시간분포 유도에 이용되거나(Jun and Yoo, 2012, 2013), 토양이나 대수층의 특성 및 강설 면적을 정량화하고(Beran and Sutcliffe, 1972; Cooke et al., 1995; Brubaker and Menoes, 2001; Ricciardi et al., 2005), 단위유량도 모형의 해석에 이용된 바 있다(Bhunya et al., 2004; Bhunya et al., 2007).

베타분포의 확률밀도함수는 아래와 같다.

$$f(x) = \begin{cases} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}/B(\alpha, \beta), & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 α 와 β 는 베타분포의 형상을 결정하는 매개변수이고 $B(\alpha, \beta)$ 는 베타 함수이다. $\alpha, \beta > 0$ 일 때, 베타 함수 $B(\alpha, \beta)$ 는 Eq. (3)으로 정리된다.

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}dx \quad (3)$$

만일 $\alpha = \beta = 1$ 이면, 위 베타분포는 균등분포(uniform distribution)와 동일하다. 베타분포를 따르는 확률변수 x 의 평균과 분산은 아래와 같이 매개변수 α 와 β 로 나타낼 수 있다.

$$E[x] = \mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (4)$$

$$Var[x] = \sigma^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \quad (5)$$

또한, 베타분포의 평균과 분산 산정식을 조합하면 다음과 같이 매개변수 α 와 β 의 추정식을 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{\sigma^2}(\mu^2 - \mu^3 - \sigma^2\mu) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\alpha - \mu\alpha}{\mu} \quad (7)$$

위 베타분포는 0과 1 사이의 확률변수 x 에 대하여 유도되었으나 확률변수의 상·하 한계에 따라 범위를 확장하거나 축소할 수 있다. 즉, 베타분포를 따르고 범위가 $c < x < d$ 인 확률변수 x 의 평균과 분산은 Eqs. (8) - (9)식과 같이 변형된다.

$$\mu_{cd} = c + \frac{\alpha}{\alpha + \beta}(d - c) \quad (8)$$

$$\sigma_{cd}^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}(d - c)^2 \quad (9)$$

2.3 강우 이동 모의

본 연구에서는 베타분포를 기반으로 강우의 이동을 모의하고 강우 양상별 멤버를 생성하였다. 강우 이동 모의에는 특성방향을 이용하였다. 각 격자별 특성방향은 베타분포를 통해 정량화되는데, 그 평균으로는 격자별로 관측된 이동 방향의 대푯값을 적용하였고, 분산은 격자별로 산정된 평균 이동방향에 대한 변동성을 얼마나 반영할지에 근거하여 결정하였다. 이는 격자별 평균 호우방향은 공간적으로 일관된 특성을 보이는데 반해, 분산은 상대적으로 일관성이 부족했기 때문이다. 충분히 많은 호우사상의 분석을 통해 어느 정도 일관된 특성이 확인된다면 격자별로 추정된 분산을 사용하는 것도 가능할 것이다. 이렇게 격자별로 결정된 베타분포를 이용하여 특성방향의 난수를 발생시킨다. 난수의 발생에는 Monte Carlo Simulation을 이용하였다. 난수발생된 특성방향은 1회의 모의 과정 동안 동일하게 유지된다. 모의가 끝나면 특성방향을 다시 난수발생시키고 다시 모의를 진행하게 된다. 본 연구에서는 이 과정을 100회 반복하였다.

본 연구에서의 강우 이동 모의과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 여기서는 이 과정에 대한 이해를 돕기 위해 강우가 서쪽에서 동쪽으로 이동한다고 가정하였다. 따라서 왼쪽 열의 모의 결과는 오른쪽 열에서의 모의 과정의 입력자료로 사용된다. 그리고 매시간 단위마다 입력강우가 한 격자씩 움직이는데 본 연구에서는 이 과정을 “step”이라고 부른다. 입력강우장이 매 step마다 왼쪽 열에서 오른쪽 열로 한 단계씩 이동하며, 입력강우장이 대상 영역을 모두 빠져나가면 1회 모의가 종료된다. Fig. 1은 격자별 강우강도가 전이되는 경로를 나타낸 것이다. $n-1$ 열의 격자별 강우강도는 n 열로 전이되는데, 이때 beta θ 에 따라 분할된다. beta θ 란, 무작위성이 부여된 격자별 특성방향을 의미한다. 즉, $n-1$ 열 $(i, j-1)$ 격자의 강우강도는 해당 격자의 beta에 따라 $(i-1, j)$, (i, j) , $(i+1, j)$ 격자로 분할되어 전이된다. 반대로 n 열 (i, j) 격자의 최종 강우강도는 (i, j) 격자로 강우강도를 전이할 수 있는 $n-1$ 열의 격자들($(i-1, j-1)$, $(i, j-1)$, $(i+1, j-1)$)에서 분리 할당되는 강우강도를 합산하여 결정된다. Table 1은 (i, j) 격자로 결합되는 강우강도의 여러 경우를 정리한 것이다. 이전 열 격자의 beta θ 가 0° 보다 큰지 혹은 작은지에 따라 다음 열로 할당되는 격자가 달라지게 되며, 이때 전이되는 강우강도의 크기는 beta θ 에 대한 $\cos\theta$ 값과 $\sin\theta$ 값에 따라 결정된다.

Fig. 1. Rainfall Intensity Transposition Path During the Simulation of Storm Movement

3. 대상 지역 및 자료

본 연구에서는 서울특별시를 대상으로 하여 강우 양상별 멤버 생성 기법을 적용하였다. 서울특별시는 우리나라의 수도로써, 중부지역에 위치하며 서해안에 인접한 대도시이다. 서울특별시의 면적은 약 600 km²이며, 중심부에는 한강 본류가 동쪽에서 서쪽으로 흐르고 있고, 북쪽에는 북한산이,

Table 1. Transposed Rainfall Intensity for the Grid (i, j) at Fig. 1

Grid	beta θ	Transposed rainfall intensity $R_{(i,j)}$ for grid (i, j)
$(i-1, j-1)$	$\theta > 0^\circ$	0
	$\theta = 0^\circ$	0
	$\theta < 0^\circ$	$R_{(i-1, j-1)} \times (\sin\theta)^2$
$(i, j-1)$	$\theta > 0^\circ$	$R_{(i-1, j)} \times (\cos\theta)^2$
	$\theta = 0^\circ$	
	$\theta < 0^\circ$	
$(i+1, j-1)$	$\theta > 0^\circ$	$R_{(i-1, j+1)} \times (\sin\theta)^2$
	$\theta = 0^\circ$	0
	$\theta < 0^\circ$	0

남쪽에는 관악산이 위치해 있다. 북한산은 남북방향으로 뻗어있고, 관악산은 동서방향으로 뻗어 있으며, 그 사이로 한강이 흐르고 있다. 이러한 지형적인 특성은 서울특별시 중심부에 지형적인 수렴대(convergence area)를 만들게 된다. 특히 서쪽에서 유입되는 대류성 호우사상은 수렴대가 형성되는 서울특별시의 중심부에서 강우강도가 커지는 특성을 보일 가능성이 크다. 이러한 서울특별시의 지형적 특성은 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

현재 서울특별시 내에서 운영되고 있는 방재기상관측장비(AWS)는 총 32개이며, 종관기상관측장비(ASOS)는 1개이다. 이들 장비(즉, 지상관측소)는 서울 전역에 비교적 균질하게 분포되어 있다(Fig. 2). AWS와 ASOS에서는 1분 강우관측자료를 제공하고 있으나, 본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해 분단위 강우자료를 10분단위 강우자료로 변환하여 이용하였다.

량이 어느 정도 큰 호우사상을 말한다. 2009년부터 2018년까지 총 37개의 주요 호우사상을 선별하였으며, 발생 일자와 총 강우량은 Table 2에 정리하였다. 호우사상 중 가장 규모가 큰 것은 2011년 7월 26일부터 28일에 발생한 집중호우였다. 3일간 총 587.0 mm의 비가 내렸으며, 이는 서울특별시에서 발생한 3일 연속 강수량 중 1907년 기상 관측 이래 역대 최대 규모였다(KMA, 2011). 특히 관악관측소에서 27일 8시에 관측된 강우강도는 110.5 mm/hr로 관측 시작 이래 최대치를 기록했다. 또한, 서초구에 위치한 우면산 일대에 산사태가 발생하고, 강남역과 대치동 사거리 등이 침수되는 등 인명, 재산 피해가 발생하였다. 2010년 9월 21일에도 태풍 말라카스의 영향으로 중부지방에 큰 비가 내려 광화문 일대가 침수되었다(KMA, 2010). 한편 2010년 6월 12일과 2018년 6월 26일에 발생한 호우사상과 같이 최대강우강도가 약 20 mm/hr 정도에 불과한 호우사상도 있다. 본 연구에서 고려한 호우사상은 규모에 관계없이 대부분 서울의 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 2. Geometric Characteristics and the Spatial Distribution of Raingauges in Seoul, Korea

본 연구에서는 최근 10년 동안 서울특별시에서 발생한 주요 호우사상 자료를 이용하였다. 주요 호우사상은 총 강우

4. 적용 및 평가

4.1 지역특성 가중치 결정

본 연구에서는 지역특성 가중치를 결정하기에 앞서 먼저 서울과 주변 지역을 포괄하는 $50 \times 50 \text{ km}^2$ 크기의 정사각형 모의 격자망을 구축하였다. 단위격자의 크기는 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 이며, 총 50×50 개의 격자로 구성되었다(Fig. 3). 이 격자망은 강우의 이동을 적절하게 모의할 정도의 공간해상도를 갖춘 것으로 판단하였다. 모의 과정에서도 문제가 없었다.

Fig. 3의 격자망에는 지역특성 가중치의 유도를 위해 사용한 지상관측소의 위치가 중첩되어 표시되어 있다. 이 그림에서 확인할 수 있듯이 서울 지역에는 지상관측소가 밀도있게 고루 분포되어있으나, 서울의 외곽 지역에는 지상관측소가 다소 성근 공간밀도를 보인다. 따라서 서울 외곽 지역에서 유도된 지역특성 가중치는 서울 내부에서 보다 정도가 떨어질 가능성이 큰 것이 사실이다. 그러나 본 연구에서는 최종적

Table 2. Characteristics of the Major Storm Events Occurred at Seoul from 2009 to 2018

No.	Year	Month	Day	Total Amount (mm)	No.	Year	Month	Day	Total Amount (mm)
1	2009	7	2	96.5	20	2012	8	20-21	196.5
2	2009	7	9	190.0	21	2012	9	17	85.5
3	2009	7	12	114.5	22	2013	7	8	68.0
4	2009	7	14	140.5	23	2013	7	12-13	239.0
5	2009	8	11-12	194.0	24	2013	7	22-23	141.0
6	2010	6	12	71.0	25	2014	7	23-25	162.5
7	2010	7	16-17	146.5	26	2015	7	25	80.0
8	2010	8	7	83.5	27	2016	7	1	108.5
9	2010	8	27	92.5	28	2016	7	5	100.5
10	2010	8	29	99.0	29	2017	7	2-3	159.5
11	2010	9	9-11	235.5	30	2017	7	10	144.5
12	2010	9	21	259.5	31	2017	7	23	133.5
13	2011	6	29	177.0	32	2017	8	15	93.5
14	2011	7	3	115.0	33	2017	8	20	124.5
15	2011	7	26-28	587.5	34	2018	5	16-17	128.0
16	2012	7	5-6	174.5	35	2018	6	26	71.5
17	2012	7	13	76.5	36	2018	7	1-2	143.0
18	2012	7	19	72.5	37	2018	8	28-29	138.5
19	2012	8	15	136.5					

으로 유도되는 지역특성 가중치의 정도는 같다고 가정하고 연구를 진행하였다. 지상관측소가 위치하지 않는 격자에서의 지역특성 가중치는 역거리가중법을 통해 유도되었다.

Fig. 3. Grids Made for the Storm Movement Simulation at Seoul

구축된 모의 격자망을 기반으로 특성방향을 결정하였다. 2009년부터 2018년까지 발생한 주요 호우사상 자료를 이용하여, 일련의 분석과정을 거쳐 50×50 개 격자에 대해 특성방향을 결정하였다. 최종적으로 결정된 특성방향은 Fig. 4(a)와 같다. 특성방향이 전체적으로 서쪽에서 동쪽을 가리키며, 중앙에 집중되는 형태를 보인다. 이는 서울특별시의 지형학적, 기후학적 특성이 특성방향에 반영되었기 때문으로 해석할 수 있다. 과거에 서울특별시에서 발생한 주요 호우사상들은 대부분 서쪽에서 동쪽으로 이동하였다. 또한, 서울특별시의 북쪽과 남쪽에는 각각 북한산과 관악산이 위치하여 호우가 서쪽에서 동쪽으로 이동하면 서울의 중앙부로 호우사상이 집중되는 듯한 경향을 보이게 된다.

과거에 발생한 호우사상의 10분 강우량 자료를 이용하여 강우강도 가중치를 결정하였다. Fig. 4(b)는 강우강도 가중치의 결정 결과를 나타낸 것이다. 검정색에 가까울수록 가중치가 1과 유사하며, 하얀색에 가까울수록 0에 가깝다. 모의 격자망의 중앙에 위치한 격자들의 강우강도 가중치가 다른 격자들에 비해 상대적으로 크게 결정되었다. 이는 호우사상이 주로 서울특별시의 중앙을 지나가는 경로로 이동하는 경향을 보였기 때문이다. 결과적으로 격자망의 상단과 하단부 격자의 가중치는 상대적으로 작게 결정된 반면 중앙에 위치한 격자의 가중치는 크게 결정되었다. 최종적으로 결정된 강우강도 가중치는 특성방향을 결정하는 데 이용된다.

Fig. 4. Derivation of the Characteristic Direction and Rainfall Intensity Weights

4.2 가상의 강우장에 대한 강우 양상블 멤버 생성 및 평가

강우 양상블 멤버는 모의 격자망에 입력강우장이 이동 모의됨으로써 생성된다. 본 연구에서는 다양한 형태의 입력 강우장을 고려하였다(Fig. 5). 본 연구에서 검토한 입력강우장은 전체에 동일한 강우강도를 부여한 강우장, 세로 막대형, 가로 막대형, 원형 강우장이다. 격자내에 강우가 있는 경우 그 강우강도는 50 mm/hr으로 동일하게 설정하였다. 4가지 입력강우장은 격자망의 왼쪽에서 입력되어 오른쪽 방향으로 이동 모의된다.

특성방향의 영향도 함께 살펴보기 위해 특성방향의 무작위성을 두 가지 방법으로 다르게 부여하였다(Fig. 6). 이 그림에서 Case 1은 베타분포의 분산을 격자별 특성방향의 최대값과 최소값의 차이로 설정하여 모의 발생시킨 특성방향이고, Case 2는 분산을 격자별 특성방향의 90%를 포함하는 구간으로 설정하여 모의 발생시킨 특성방향이다. 이 두 경우 모두 전체적인 방향은 Fig. 4(a)의 특성방향과 일치하나 그 변동성은 크게 다른 것을 확인할 수 있다.

Figs. 7(a)와 (b)는 각각 Case 1과 Case 2의 원형 입력강우장에 대한 이동 모의 과정을 보여주고 있다. 즉, Figs. 6(a)와 (b)에 Fig. 5(d)를 이동모의시킨 결과이다. 입력강우장의 크기

도 모의 격자망과 동일하게 50×50 이기 때문에 step 50에 모든 입력강우가 격자망 내로 유입된다. Step 25는 유입되는 입력강우장의 모습을 보여준다. Step 50에서는 입력강우장이 완전히 유입되어 모의 격자망의 중앙에 위치하고 있다. Step 75는 입력된 강우장이 출력되는 모습이다. Case 1과 2에서 모두 입력된 강우장이 특성방향의 경향에 따라 중앙부로 집중되는 형태를 보였다. 이때 Case 2(Fig. 7(b))보다 Case 1(Fig. 7(a))에서 강우가 특정 경로에 집중되는 현상이 더욱 두드러지게 나타났다. 이는 난수의 발생 범위가 특성방향의 무작위성에 영향을 미치기 때문이다. 즉, 무작위성이 커질수록 이전 열의 강우가 다음 열로 전이될 때 더 극단적으로 분할될 가능성이 크기 때문에 마치 특정한 경로에 강우가 집중되는 것처럼 보인다. 집중된 강우장은 밀집된 형태가 그대로 유지되는 형태로 출력되었다. 이러한 강우이동 경향은 100개의 강우 양상블 멤버에서 공통적으로 나타났다.

주어진 입력강우장에 대해 이동모의를 100회 수행하여 총 100개의 강우 양상블 멤버를 생성하였다. Fig. 8(a)는 Case 1에 대해 생성한 강우 양상블 멤버 중 10, 40, 90번째 멤버들의 step 50에서의 모의 상태를 나타낸 것이다. Fig. 8(b)는 Case 2의 25, 60, 75번째 멤버이다. Step 50은 입력강우장이 완전히 격자망 내로 유입된 상태를 나타낸다. 강우

Fig. 5. Various Types of Arbitrary Input Rain Fields

Fig. 6. Examples of the Characteristic Direction with Two Different Variations

Fig. 7. Results of the Storm Movement Simulation for Two Cases

이동 모의는 베타분포를 이용하여 모의 발생시킨 무작위적인 특성방향을 기반으로 수행되므로 모의된 강우 양상블 멤버는 모두 다른 강우강도를 가지게 된다. 그 차이는 물론 모의에 이용한 특성방향 차이에 의해 결정된다. 난수발생 범위를 격자별 특성방향 가중치의 최대값과 최소값의 차이에 해당하는 구간으로 설정한 Case 1이 90%를 포함하는 구간으로 설정한 Case 2에 비해 강우강도의 무작위성이 더 크게 나타나는 것은 당연하다. 다만, 이때 난수발생의 범위는 적용 대상 지역 및 과거 호우사상의 특성에 따라

다양하게 적용할 수 있다.

이동모의된 100개의 강우 양상블 멤버의 격자별 강우강도를 평균하면 강우 양상블 평균이 유도된다. Figs. 9(a)와 (b)는 각각 Case 1과 Case 2의 전체, 세로 막대형, 가로 막대형, 원형 입력강우장에 대한 step 50에서의 강우 양상블 평균을 나타낸 것이다. 베타분포의 분산에 따른 강우 양상블 평균의 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 강우 양상블 평균은 강우 양상블 멤버 100개의 평균적인 강우강도 분포이므로 강우 양상블 멤버에 비해 평활화된 강우장의 형태가 유도되

Fig. 8. Comparison of the Rainfall Ensemble Members Between Two Cases

Fig. 9. Results of the Rainfall Ensemble Mean for Two Cases

었다. 또한, 입력강우장의 형태에 관계없이 공통적으로 강우강도가 모의 격자망의 중앙부에 집중되는 경향이 나타난다. 이는 입력 초반부에 중앙부로 집중되다가 유지되면서 출력되는 특성방향 가중치의 강우 이동 모의 특성에 따른 결과로 해석된다.

이상과 같이 모의된 강우 앙상블 멤버의 평가를 위해 본 연구에서는 강우 앙상블 멤버를 강우강도 가중치와 비교

하였다. 특성방향에 의해 호우사상이 이동하는 주된 경로에 강우가 집중되는 것은 당연하므로 강우강도 가중치를 비교의 기준으로 설정하였다. 즉, 전체 격자에 강우강도가 존재하는 입력강우장의 step 50에서의 강우 앙상블 멤버와 강우강도 가중치의 형태를 비교하였다. 이때 평가의 척도로는 두 격자형 강우장의 형태간 유사성을 정량화한 상관계수를 이용하였다. 또한, 강우강도 가중치가 0부터 1 사이의 값이므

로 강우 양상블 멤버의 격자별 강우강도를 0부터 1사이의 값으로 정규화한 후 비교하였다. Fig. 10은 강우 양상블 멤버 100개의 강우강도 가중치와의 상관계수 산정 결과를 히스토그램으로 나타낸 것이다. Case 1의 경우에는 0.56에서 0.64 사이의 값으로 상관계수가 산정되었고, Case 2인 경우의 상관계수 산정 범위는 0.67~0.75였다. 이는 강우 양상블 멤버의 베타분포 기반 이동 모의가 적절히 이루어졌음을 의미한다. Case 2보다는 Case 1의 상관계수가 다소 크게 결정된 점은 Case 1의 강우 양상블 멤버가 강우 이동의 변동성이 더 크기 때문인 것으로 해석된다.

강우 양상블 평균에 대해서도 강우강도 가중치와 비교하였다. 이때에도 강우 양상블 멤버에 대한 평가 방법과 동일하게 상관계수를 산정하였다. 상관계수 산정 결과, 강우 양상블 평균과 강우강도 가중치의 공간 분포가 매우 유사하게 나타났다. Case 1의 상관계수는 0.7820, Case 2의 상관계수는 0.7909로, 두 경우 모두 높게 산정되었다. 앞서 강우 양상블 멤버에 대해 산정한 상관계수보다 강우 양상블 평균의 상관계수가 더 크다. 이는 강우 양상블 멤버는 변동성이 크기 때문에 전체적으로 강우강도 가중치와의 형태적 유사성이 떨어지지만, 강우 양상블 멤버의 변동성을 모두 고려하게 되는 강우 양상블 평균이 강우강도 가중치와 더 유사한 특성을 보이는 것으로 판단된다.

강우강도 가중치에 대해 평가한 결과, 강우 양상블 멤버 보다는 강우 양상블 평균이 강우강도 가중치와 더 유사한 형태임을 확인하였다. 강우 양상블 멤버는 베타분포로부터 발생된 특성방향을 기반으로 모의한 결과이다. 따라서 100개의 강우 양상블 멤버는 각 모의시 무작위성을 포함하는 특성방향과 유사한 형태를 가질 가능성이 크다. 그러나 강우 양상블의 평균은 개개 강우 양상블의 변동성이 제거된 것이므로 특성방향의 평균적인 거동을 보다 잘 반영한다고 판단

할 수 있다. 또한, 앞서 언급한 것과 같이, 유도된 강우강도 가중치는 특성방향을 반영한 것이므로 강우 이동 모의결과인 양상블 멤버는 강우강도 가중치와 유사한 공간분포특성을 보이는 것이 당연하다.

4.3 관측 강우장에 대한 양상블 멤버 생성 및 평가

본 연구에서는 2018년 8월 28일에 발생한 실제 호우사상을 대상으로 양상블 멤버를 모의하고 평가하였다. 즉, 양상블 멤버 생성에 필요한 입력강우장을 실제 호우의 레이더 관측 강우장으로 설정하였다. 이 호우사상은 이동속도가 비교적 빠른 국지성 집중호우에 해당하며, 서울기상대에서 관측된 일강우량은 96.5 mm이다. 또한, 이 호우사상은 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 특성을 보인다. 호우 기간 중 17시 50분에 관측된 레이더 관측장은 Fig. 11과 같은데, 강한 강우가 서울 특별시로 유입되는 형태를 보이기 때문에 강우의 이동 모의에 적합한 경우로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 17시 50분에 관악산 기상레이더에서 관측된 1.5 km CAPPI 자료로부터 레이더 강우강도를 산출하여 양상블 멤버 생성 모의에 이용하였다. 이때 레이더 강우강도 산출에는 Marshall and Palmer (1948)가 제시한 $Z=200R^{1.6}$ 관계식을 이용하였다. 입력강우장은 이동 모의가 가능하도록 1 km² 크기의 격자 50 × 50개로 공간해상도를 조정하였다.

관측 강우장에 대해 100회 이동모의하여 총 100개의 강우 양상블 멤버를 생성하였다. 그림 Fig. 12(a)는 Case 1에 대해 생성한 강우 양상블 멤버 중 10, 40, 90번째 멤버들의 step 50에서의 모의 상태를 나타낸 것이며, Fig. 12(b)는 Case 2의 25, 60, 75번째 멤버이다. Case 1과 Case 2의 양상블 멤버는 전체적인 강우강도의 공간적 분포 경향은 유사한 것으로 나타났다. 즉, Case 1과 Case 2 모두 입력된 강우장이

Fig. 10. Histograms of Correlation Coefficients for Two Cases

Fig. 11. Input Rain Field of the Storm Movement Simulation for the Storm Event Occurred in 2018

Fig. 12. Comparison of the Rainfall Ensemble Members Between Two Cases of the 2018 Storm Event

특성방향의 전체적인 경향에 따라 중앙부로 집중되는 형태를 보였다. 그러나 Case 1의 경우, Case 2에 비해 특정 경로에 강우 이동이 집중되는 현상이 더 뚜렷하게 나타났으며, 100개 멤버들의 모의 결과가 더 상이한 형태임을 확인하였다. 이러한 차이는 난수발생 범위를 어떻게 설정하느냐에 영향을 받는다. 격자별 특성방향 가중치의 최대값과 최소값의

차이에 해당하는 구간으로 설정한 Case 1이 90%를 포함하는 구간으로 설정한 Case 2에 비해 강우강도의 무작위성이 더 크게 나타나는 것은 당연하다.

관측 강우장에 대한 양상블 멤버 생성 및 평가 결과, 강우 양상블 멤버 생성시 지역특성이 반영되며, 모의 결과는 베타 분포의 난수발생 범위 즉, 표준편차에 민감한 영향을 받는다

는 점을 확인하였다. 먼저, 전체적인 강우 이동 모의의 경향성은 지역특성 가중치인 특성방향과 유사하였다. 즉, Fig. 12에서와 같이 step 50에서 호우가 중앙부로 집중되는 현상이 공통적으로 나타났다. 또한, 베타분포의 난수발생 범위를 어떻게 설정하느냐에 따라 앙상블 멤버간의 차이가 달라진다는 점을 확인하였다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 Case 1보다 Case 2의 앙상블 멤버는 서로 차이가 적다. 이는 Case 2의 베타분포 기반 난수발생의 범위가 더 작기 때문이다. 난수발생의 범위는 적용 대상 지역 및 과거 호우사상의 특성에 따라 다양하게 적용할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안하는 기법의 사용자가 임의로 설정하면 된다. 추후 연구를 통해 호우 특성 및 여러 상황에 적합한 베타분포의 표준편차 범위를 제시할 수도 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지역적인 특성을 고려하여 강우 앙상블 멤버를 생성하는 기법을 제안하였다. 또한, 생성된 강우 앙상블 멤버에 대한 평가를 수행하였다. 지역특성으로는 격자별 강우의 이동방향과 강우강도를 고려하였다. 대상 지역에 대해 모의 격자망을 구축하고 격자별로 특성방향과 강우강도 가중치를 결정하였다. 결정된 격자별 가중치의 통계학적 특성치를 이용하여 베타분포를 유도하고, 이로부터 생성된 난수를 기반으로 입력강우장의 이동 모의를 수행하였다. 입력강우장의 형태는 격자망 전체에 강우강도가 존재하는 경우, 세로 막대형, 가로 막대형, 원형을 고려하였다. 입력강우장에 대해 총 100회 모의를 수행하여 강우 이동 모의 결과에 해당하는 앙상블 멤버를 100개 생성하였다. 최종적으로 생성된 강우 앙상블 멤버와 강우 앙상블 평균은 강우강도 가중치를 기준으로 비교 및 평가하였다. 추가적으로 2018년 8월에 서울지역에서 발생한 실제 호우사상에 대해서도 앙상블 멤버를 생성하고 평가하였다.

생성된 강우 앙상블 멤버는 강우강도 가중치의 특성을 나타내는 것으로 확인되었다. 원형 입력강우장에 대한 모의 결과, step 50까지는 강우가 중앙부로 집중되는 형태로 이동하다가 step 50 이후로는 집중된 형태의 강우가 유지되면서 출력되었다. 이러한 경향은 입력강우장의 형태에 관계없이 공통적으로 나타났다. 난수발생의 범위에 따라 강우 이동 모의 결과가 크게 다르게 나타나는 것으로 확인되었다. 난수발생 범위를 특성방향 가중치의 최대값과 최소값 차이로 설정한 Case 1이 이보다 좀 더 작은, 90% 자료를 포함하는 구간으로 설정한 Case 2에 비해 앙상블 멤버의 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 당연히 앙상블 멤버의 무작위성도 Case 1이 더 크게 나타났으며, 이는 생성된 강우 앙상블 멤버와 강우강도 가중치와의 상관관계수 비교에서도 확인되었다.

강우 앙상블 평균은 개개 강우 앙상블 멤버들보다 강우강도 가중치와 더 유사한 특성을 보이는 것으로 나타났다.

즉, 개개 강우 앙상블 멤버는 상대적으로 독립적인 강우의 이동 경로를 보이지만, 이들의 평균은 이동 경로의 평활화를 가져와 결국 강우강도 가중치의 특성에 더욱 근접하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 앙상블 예측의 목적에 잘 부합하는 결과로 이해된다. 즉, 개개 앙상블 멤버는 실현 가능한 경우들을 개별적으로 반영하지만, 그들의 평균은 결국 주어진 추세를 반영하는 형태로 수렴되는 것이다.

본 연구에서 제시한 지역특성을 고려한 강우 앙상블 생성 기법은 추후 확장 적용이 가능하다. 먼저, 실제 호우사상에 대한 레이더 관측자료 혹은 예측자료에 본 기법을 실시간으로 적용하여 도시홍수예경보에 이용될 수 있다. 물론 이 경우에는 예측자료의 품질 향상 및 선행시간 확보 등이 고려되어야 할 것이다. 기술적인 측면에서 앙상블 멤버의 다양화 정도는 베타분포의 난수발생 범위를 어떻게 결정하느냐의 문제이다. 이를 위해서는 대상 지역에 대한 보다 심도있는 자료분석 및 비교평가가 필요하다. 보다 다양한 형태의 호우에 대한 모의도 필요하다. 본 연구에서는 적용 사례로 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 호우를 다루고 있으나, 태풍 등의 경우에는 남북 또는 남서에서 북동의 사선 방향으로 이동하므로 이에 대한 적용성 검토도 필요하다. 물론 이러한 확장을 위해서는 보다 많은 실제 호우사상에 대한 분석이 선행되어야 한다는 것은 자명하다. 향후 이러한 문제들에 대한 지속적인 연구를 통해 강우예측의 변동성 및 불확실성을 고려한 실시간 앙상블 강우예측이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (79615)

References

- Baker, L.H., Rudd, A.C., Migliorini, S., and Bannister, R.N. (2014). Representation of model error in a convective-scale ensemble prediction system. *Nonlin. Processes Geophys.*, Vol. 21, pp. 19-39.
- Beran, M.A., and Sutcliffe, J.V. (1972). An index of flood-producing rainfall based on rainfall and soil moisture deficit. *J. Hydrol.*, Vol. 17, pp. 229-236.
- Bhunya, P.K., Berndtsson, R., Ojha, C.S.P., and Mishra, S.K. (2007). Suitability of Gamma, Chi-square, Weibull, and beta distributions as synthetic unit hydrographs. *J. Hydrol.*, Vol. 334, pp. 28-38.
- Bhunya, P.K., Mishra, S.K., Ojha, C.S.P., and Berndtsson, R. (2004). Parameter estimation of beta distribution for unit hydrograph derivation. *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 325-332.

- Bowler, N.E., Arribas, A., Mylne, K.R., Robertson, K.B., and Beare, S.E. (2008). The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Q. J. Royal Meteorol. Soc.*, Vol. 134, pp. 703-722.
- Brubaker, K.L., and Menoes, M. (2001). A technique to estimate snow depletion curves from time-series data using the beta distribution. *Proceedings of the 58th Eastern Snow Conference*, Ottawa, Ontario, Canada, Vol. 58, pp. 343-346.
- Buizza, R. (1997). Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. *Mon. Weather Rev.*, Vol. 125, No. 1, pp. 99-119.
- Choi, H., and Nam, K.W. (2005). Real-time flash flood evaluation by GIS module at mountainous area. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 4, pp. 317-327.
- Collier, C.G. (2009). On the propagation of uncertainty in weather radar estimates of rainfall through hydrological models. *Meteorol. Appl.*, Vol. 16, No. 1, pp. 35-40.
- Cooke, R.A., Mostaghimi, S., and Woeste, F. (1995). Effect of hydraulic conductivity probability distribution function on simulated solute leaching. *Water Environ. Res.*, Vol. 67, No. 2, pp. 159-168.
- Dance, S., Ebert, E., and Scurrah, D. (2010). Thunderstorm strike probability nowcasting. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 27, No. 1, pp. 79-93.
- Dixon, M., and Wiener, G. (1993). TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting: A radar-based methodology. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 10, No. 6, pp. 785-797.
- Duan, Q., Ajami, N.K., Gao, X., and Sorooshian, S. (2007). Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Adv. Water Resour.*, Vol. 30, pp. 1371-1386.
- Georgakakos, K.P., Graham, R., Jubach, R., Carpenter, T., Shamir, E., Spencer, C., et al. (2013). *Global flash flood guidance system, phase I*. Hydrologic Research Center (HRC) Technical Report No. 9, Hydrologic Research Center, San Diego, CA, USA.
- Germann, U., and Zawadzki, I. (2002). Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Mon. Weather Rev.*, Vol. 130, pp. 2859-2873.
- Hafley, W.L., and Schreuder, H.T. (1977). Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands. *Can. J. For. Res.*, Vol. 7, No. 3, pp. 481-487.
- Han, M. (2014). *Correction from MAPLE and KLAPS rainfall forecasting*. Ph.D. dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
- Hewitt, C.D. (2004). Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 85, No. 52, pp. 566-566.
- Hwang, S., Lim, S., Kim, K., and Yoon, J. (2013). Verification of characteristics of radar rainfall observation for a real time application of radar rainfall data. *Magazine of Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 72-79.
- Jun, C., and Yoo, C. (2012). Application of the beta distribution for the temporal quantification of storm events. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, No. 6, pp. 531-544.
- Jun, C., and Yoo, C. (2013). Analysis on the characteristics about representative temporal-distribution of rainfall in the annual maximum independent rainfall events at Seoul using beta distribution. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 46, No. 4, pp. 361-372.
- Kang, N., Joo, H., Lee, M., and Kim, H.S. (2017). Generation of radar rainfall ensemble using probabilistic approach. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 50, No. 3, pp. 155-167.
- Kay, J.K., Kim, H.M., Park, Y.Y., and Son, J. (2013). Effect of doubling the ensemble size on the performance of ensemble prediction in the warm season using MOGREPS implemented at the KMA. *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 30, pp. 1287-1302.
- Kim, B., Hong, J., Kim, H.S., and Yoon, S. (2007). Development of flash flood model using digital terrain analysis model and rainfall RADAR: I. Methodology and model development. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2B, pp. 151-159.
- Kim, S., Kim, H., Kay, J., and Lee, S. (2015). Development and evaluation of the high resolution limited area ensemble prediction system in the Korea Meteorological Administration. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 25, No. 1, pp. 67-83.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2006). *Development of monitoring and prediction technology for severe weather (heavy rainfall) over the Korea peninsula*. Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2008). *Study on the weather radar application (II)*. Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2010). *Annual climatological report*. Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2011).

- Annual climatological report*. Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2012). *Ensemble forecasting, forecasting technique in hand 2012*. Seoul, Korea.
- K-Water. (2005). *Development of basin water management technology*. Daejeon, Korea.
- Lee, G., Park, K., Yu, W., Jung, K., and Jang, C. (2011). A study on flood damage estimation using DEM-based flood inundation model and MD-FDA. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 5, pp. 327-336.
- Leith, C.E. (1974). Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Weather Rev.*, Vol. 102, No. 6, pp. 409-418.
- Lorenz, E.N. (1969). Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 26, No. 4, pp. 636-646.
- Maltamo, M., Puumalainen, J., and Päivinen, R. (1995). Comparison of beta and weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *pinus sylvestris* and *picea abies*. *Scand. J. For. Res.*, Vol. 10, pp. 284-295.
- Marshall, J.S., and Palmer, W.M.K. (1948). The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.
- Migliorini, S., Dixon, M., Bannister, R., and Ballard, S. (2011). Ensemble prediction for nowcasting with a convection permitting model-I: Description of the system and the impact of radar-derived surface precipitation rates. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, Vol. 63, No. 3, pp. 468-496.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T.N., and Petroliagis, T. (1996). The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Q. J. Royal. Meteor. Soc.*, Vol. 122, No. 529, pp. 73-119.
- Mueller, C., Saxen, T., Roberts, R., Wilson, J., Betancourt, T., Dettling, S., et al. (2003). NCAR auto-nowcast system. *Weather and Forecasting*, Vol. 18, pp. 545-561.
- National Institute of Meteorological Research (NIMR). (2008). *Improvement of quantitative precipitation forecast (QPF) skills in a short-range prediction (II-2)*. Seoul, Korea.
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). (2009). *Development of very short-range prediction system for severe weather*. Seoul, Korea.
- National Weather Service (NWS). (1998). *NCRFC flash flood guidance, office of hydrologic development*. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD, USA.
- Pearson, K. (1934). *Tables of the incomplete beta function*. Biometrika Office, London, U.K.
- Radhakrishna, B., Zawadzki, I., and Fabry, F. (2012). Predictability of precipitation from continental radar images. Part V: Growth and decay. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 69, pp. 3336-3349.
- Ricciardi, K.L., Pinder, G.F., and Belitz, K. (2005). Comparison of the log-normal and beta distribution functions to describe the uncertainty in permeability. *J. Hydrol.*, Vol. 313, No. 3-4, pp. 248-256.
- Richardson, D.S. (2000). Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Q. J. Royal Meteor. Soc.*, Vol. 126, pp. 649-667.
- Saito, K., Seko, H., Kawabata, T., Shoji, Y., Kuroda, T., Fujita, T., and Suzuki, O. (2011). Studies at MRI toward cloud resolving ensemble NWP. *Proceedings of the 11th EMS Annual Meeting*, Berlin, Germany.
- Seed, A.W. (2003). A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 42, pp. 381-388.
- Seo, B.C. (2010). *Towards a better representation of radar-rainfall: Filling gaps in understanding uncertainties*. Ph.D. dissertation, The University of Iowa, IA, USA.
- Sivillo, J.K., Ahlquist, J.E., and Toth, Z. (1997). An ensemble forecasting primer. *Weather and Forecasting*, Vol. 12, No. 4, pp. 809-818.
- Smith, P.J., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Del Pozo, J.T., Krzeminski, B., Salamon, P., et al. (2016). On the operational implementation of the European flood awareness system (EFAS). In T.E. Adams, and T.C. Pagano (Eds.), *Flood forecasting: A global perspective* (pp. 313-348). Cambridge, MA, USA: Academic Press.
- Tracton, M.S., and Kalnay, E. (1993). Operational ensemble prediction at the national meteorological center: Practical aspects. *Weather and Forecasting*, Vol. 8, No. 3, pp. 379-398.
- Tribbia, J.J., and Baumhefner, D.P. (1988). Estimates of the predictability of low-frequency variability with a spectral general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 45, pp. 2306-2318.

Received	September 3, 2019
Revised	September 4, 2019
Accepted	October 10, 2019