

## 기상청 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템 구축 및 성능 검증

김세현<sup>1)</sup> · 김현미<sup>1)\*</sup> · 계준경<sup>1)</sup> · 이승우<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과, 대기예측성 및 자료동화 연구실, <sup>2)</sup>기상청 수치모델개발과

(접수일: 2014년 11월 14일, 수정일: 2014년 12월 30, 게재확정일: 2015년 1월 22일)

### Development and Evaluation of the High Resolution Limited Area Ensemble Prediction System in the Korea Meteorological Administration

SeHyun Kim<sup>1)</sup>, Hyun Mee Kim<sup>1)\*</sup>, Jun Kyung Kay<sup>1)</sup>, and Seung-Woo Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Atmospheric Predictability and Data Assimilation Laboratory,  
Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea*

<sup>2)</sup>*Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea*

(Manuscript received 14 November 2014; revised 30 December 2014; accepted 22 January 2015)

**Abstract** Predicting the location and intensity of precipitation still remains a main issue in numerical weather prediction (NWP). Resolution is a very important component of precipitation forecasts in NWP. Compared with a lower resolution model, a higher resolution model can predict small scale (i.e., storm scale) precipitation and depict convection structures more precisely. In addition, an ensemble technique can be used to improve the precipitation forecast because it can estimate uncertainties associated with forecasts. Therefore, NWP using both a higher resolution model and ensemble technique is expected to represent inherent uncertainties of convective scale motion better and lead to improved forecasts. In this study, the limited area ensemble prediction system for the convective-scale (i.e., high resolution) operational Unified Model (UM) in Korea Meteorological Administration (KMA) was developed and evaluated for the ensemble forecasts during August 2012. The model domain covers the limited area over the Korean Peninsula. The high resolution limited area ensemble prediction system developed showed good skill in predicting precipitation, wind, and temperature at the surface as well as meteorological variables at 500 and 850 hPa. To investigate which combination of horizontal resolution and ensemble member is most skillful, the system was run with three different horizontal resolutions (1.5, 2, and 3 km) and ensemble members (8, 12, and 16), and the forecasts from the experiments were evaluated. To assess the quantitative precipitation forecast (QPF) skill of the system, the precipitation forecasts for two heavy rainfall cases during the study period were analyzed using the Fractions Skill Score (FSS) and Probability Matching (PM) method. The PM method was effective in representing the intensity of precipitation and the FSS was effective in verifying the precipitation forecast for the high resolution limited area ensemble prediction system in KMA.

**Key words:** The high resolution limited area ensemble prediction system of the Korea Meteorological Administration, ensemble forecast, precipitation forecast, Fractions Skill Score, Probability Matching

\*Corresponding Author: Hyun Mee Kim, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea.  
Phone : +82-2-2123-5683, Fax : +82-2-365-5163  
E-mail : khm@yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

수치 예보 모델의 해상도는 컴퓨터 계산 능력이 향상되면서 점차 증가하고 있다. “Convection allowing” 또는 “storm permitting” 이라고 불리는 고해상도 모델의 경우 적은 모수화를 사용하지 않고도 대류를 명시적으로 표현할 수 있어, 저해상도의 모델보다 좀 더 상세하게 강수 현상과 연관된 대류를 묘사할 수 있다 (Kain et al., 2008; Weisman et al., 2008; Schwartz et al., 2009). 이러한 고해상도 모델의 도입에도 불구하고 아직까지 강수의 강도와 위치 등을 정확하게 예보하기에는 많은 어려움이 있다. Saito et al. (2011)에서는 부정확한 강수 예보의 원인은 대류 불안정으로 발생하는 국지적인 집중 호우에 대한 예측성이 낮은 것 때문이라고 분석하였다. 예측의 불확실성에 대한 해결 방안 중 하나로 앙상블 기법이 있다 (Gebhardt et al., 2011; Migliorini et al., 2011; Done et al., 2012; Baker et al., 2014; Kühnlein et al., 2014). 앙상블 기법은 수치 예보 초기 조건의 불확실성을 나타내기 위해 서로 다른 초기 조건들을 이용하여 수치모델 적분을 수행하는 것으로, 다양한 현상의 가능성을 파악하여 단일 예보를 수행할 때보다 예측성을 향상시킬 수 있는 통계적 예보 방법이다. 여러 현업 기관에서 10 km 이상의 모델 해상도에 대해서는 이미 앙상블 기법을 현업 예보에 적용하여 사용하고 있다 (Marsigli et al., 2005; Bowler et al., 2008; Kay et al., 2013; Kay and Kim, 2014). 수 km의 해상도에 대해 앙상블 기법을 적용한 연구로는 Kong et al. (2007)이 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 이용하여 3 km 해상도의 앙상블 시스템을 구축하고 구축한 앙상블 예측 시스템이 동일한 해상도의 단일 예보보다 예측 성능이 더 좋은 것을 보였고, Hanley et al. (2011)은 대류 규모(convective-scale)의 앙상블 시스템을 구축하여 독일의 산악 지형에서 발생한 고립된 뇌우에 대하여 예측성을 살펴본 결과 지형의 영향으로 인해 발생하는 대류는 초기 조건의 불확실성에 매우 민감함을 보인 바 있다.

하지만 우리나라 지역의 강수 현상의 예측에 고해상도 국지 모델에 대한 앙상블 예측 시스템을 이용한 연구는 아직까지 보고된 바 없다. 현재 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서는 영국 기상청(United Kingdom Meteorological Office, UKMO)으로부터 도입한 통합 모델(Unified Model, UM)을 현업 운영하고 있다. KMA UM을 이용하여 전구, 동아시아, 한반도 지역을 모델 영역으로 하는 단일 예보를 수행하고 있으며, 앙상블 예보는 전구에 대해서만 수행하고 있다. 따라서 한반도 영역에 영향을 미치는 강수 현상을 보다 잘 예측하기 위해서는 한반

도 영역에 대한 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템이 필요하다.

고해상도 모델은 작은 규모의 대기 현상, 특히 강수 현상을 잘 모의하는 것을 목표로 하기 때문에 강수 예보에 대한 검증이 고해상도 모델의 성능을 판단하는 중요한 요소가 된다. 강수 예보를 다른 변수의 예보와 같이 어느 한 지점에 대하여 검증할 때에는 고해상도 예보 값의 예측 성능(e.g., skill score)이 저해상도 예보 값의 예측 성능보다 더 낮을 수 있다 (Roberts, 2008). Mass et al. (2002)과 Done et al. (2004)은 고해상도 모델이 좀 더 현실적으로 대기 현상을 모의할 수 있으나 어느 한 지점에서의 예측 성능은 좋지 않을 수 있고, 대신 일정한 넓이의 지역에서는 평균적인 강수 값을 개선시킬 수 있음을 보였다. 즉 한 지점에서 강수를 검증하는 전통적인 검증 방법으로는 고해상도 모델의 장점을 표현하기에 제약이 따르기 때문에, 고해상도 모델 결과의 검증 방법에 대해서 많은 연구가 진행되어왔다 (Ebert and McBride, 2000; Davis et al., 2006; Ebert, 2008; Roberts and Lean, 2008). 고해상도 모델의 강수 예보를 검증하는 방법 중 하나로는 한 지점의 주변 지역에서 강수 현상이 발생하는 확률을 고려하여 검증하는 방법인 Fractions Skill Score (FSS, Roberts and Lean, 2008)가 있다. FSS는 넓이의 개념인 이웃 규모(neighborhood scale)를 적용시켜 예보를 수평 규모에 따라 검증하는 방법으로 강수 예보 결과의 검증에 매우 유용하다. FSS를 이용하여 Mittermaier et al. (2013)은 강수 사례에 대하여 12 km와 4 km 해상도의 예보를 비교하여 4 km 예보가 더 좋음을 보였으며, Zacharov and Rezacova (2009)는 앙상블 스프레드와 강수 예측 성능간의 관계를 설명하였다. Duc et al. (2013)은 10 km와 2 km 강수 예보에 대해 FSS를 이용하여 2 km는 강한 강수를, 10 km는 상대적으로 약한 강수를 잘 예보함을 보였다.

본 연구에서는 한반도 영역에 기상청 현업을 위한 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템을 구축한 과정과 FSS를 포함한 여러 검증 방법으로 예측을 검증한 결과를 제시하고자 한다. 강수 예측에 가장 적합한 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템을 구축하기 위해서는 모델 해상도와 앙상블 멤버 수가 강수를 예측하는데 적합해야 한다. 따라서 세 가지 모델 해상도(1.5 km, 2 km, 3 km)와 세 가지 앙상블 멤버 수(8개, 12개, 16개)의 조합에 대해 각각 시스템을 구축하고, 구축된 시스템들을 이용하여 강수 사례를 예측함으로써 각 시스템의 강수 예측 성능을 살펴보았다. 2장에는 구축한 시스템에 대한 구성 및 검증 방법에 대하여 설명하였고, 3장에서는 검증 결과를 보였다. 마지막으로 요약 및 결론은 4장에 제시하였다.

## 2. 시스템 구축과 검증 방법

### 2.1 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템

본 연구에서 구축된 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템은 세 가지 해상도(1.5 km, 2 km, 3 km)와 세 가지 앙상블 멤버 수(8개, 12개, 16개)의 조합인 총 9가지 경우에 대해 각기 따로 구축되었다. 각 해상도 및 앙상블 개수는 기상청 현업 시스템에 적용할 수 있는 조합으로 구성 된 것이며, 이는 다른 현업 기관들에서 현재 사용하고 있는 국지 앙상블 예측 시스템의 해상도 및 앙상블 개수와 크게 다르지 않은 시스템 구성이다. 영국 기상청에서는 2.2 km 해상도, 12개의 앙상블 멤버를 사용하고 있으며(Mylne, 2013), 유럽의 Consortium for Small-scale MOdeling (COSMO) 모델 기반의 앙상블 예측 시스템도 2.8 km의 10개 앙상블 멤버를 사용하고 있다(Marsigli et al., 2013). 또한 영국 기상청에서 국지 앙상블 예측 시스템의 구성을 위하여 해상도 및 앙상블 개수에 대해 FSS를 계산한 자료를 보면, 2.2 km 해상도의 경우 일정 앙상블 멤버 수를 넘어서게 되면 FSS가 더 이상 증가하지 않는다(Roberts et al., 2011). 이러한 현상은 같은 예보 모델을 사용하는 기상청 시스템에서도 발생할 수 있는 현상으로 생각되어, FSS의 변화가 크게 나타나지 않는 범위 내에서 적절한 앙상블 개수들을 설정하여 실험을 수행하였다.

총 아홉 가지 시스템에 공통적으로 초기 조건과 경계 조건은 모두 N400 해상도(중위도에서 약 33 km 해상도)의 전구 앙상블 멤버로부터 재구성(reconfiguration) 과정을 통하여 제공 받는데, 재구성 과정이란 목표 해상도로 변수 및 영역을 바꿔주는 과정이다(Met. Office, 1998). Marsigli et al. (2014)에서는 COSMO 모델을 이용하여 32 km에서 2.8 km 해상도로 직접 재구성하는 것과 32 km에서 7 km를 거쳐 2.8 km 해상도로 재구성하는 방법을 비교하고, 500 hPa 지위고도 장과 강수 예보에 있어서 큰 차이를 보이지 않았음을 보인다. 따라서 이 연구에서는 전구 앙상블로부터 국지 앙상블로 초기 조건과 경계 조건을 직접 재구성하는 방법을 이용하였다. 전구 앙상블 멤버는 기상청 전구 앙상블 예측 시스템으로부터 생산되며, Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF)에 의해 초기 섭동을 생성한다(Kay et al., 2013; Kay and Kim, 2014). 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템의 구축 순서는 다음과 같다(Fig. 1).

1) 기상청 Four-dimensional variational data assimilation (KMA 4DVAR) 로부터 생성된 N512 해상도(중위도에서 약 25 km 해상도)의 전구 분석장을 N400 해상도로 재구성하여 전구 앙상블의 기준 멤버를 생성한다.

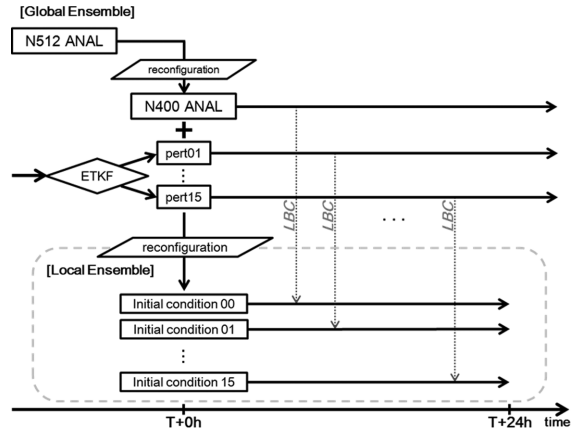


Fig. 1. Schematic of the limited area ensemble prediction system in KMA.

2) ETKF를 이용하여 전구 앙상블의 초기 섭동장 (pert01~pert15)을 생성하고, 15개 초기 섭동장들을 1)에서 생성된 기준 멤버에 더해 15개의 섭동 멤버들을 생성한다. 이때 1개의 기준 멤버와 15개의 섭동 멤버들을 포함하여 총 16개의 전구 초기 앙상블 멤버들을 구성한다.

3) 생성된 전구 앙상블 초기 멤버들을 24시간 적분하여 국지 앙상블 예보에 필요한 경계장을 생성한다.

4) 전구 앙상블의 총 16개 초기 멤버들을 재구성 과정을 거쳐 국지 앙상블의 초기 앙상블 멤버들(initial condition 00~initial condition 15)을 생성한다.

5) 생성된 고해상도 국지 앙상블 초기 멤버들을 이용하여 24시간 예보를 수행하며, 이때 국지 앙상블 멤버들의 경계장은 각각에 대응되는 전구 앙상블 멤버들로부터 제공 받는다.

위와 같이 구축한 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템에서 사용하는 모델은 KMA UM Vn8.2이다. 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템은 세 가지 모델 해상도에 대해 모두 연직으로 71개의 eta-height hybrid층을 가지며, 수평적으로는 한반도를 포함한 지역을 모델 영역으로 한다(Fig. 2). 1.5 km 해상도(격자 수: 900 × 1080)와 3 km 해상도(격자 수: 450 × 540)의 영역은 정확하게 일치하지만, 2 km 해상도(격자 수: 678 × 810)의 경우 모델 영역의 시작점(모델 영역의 좌측 하단)이 다른 해상도에 비해 경도 방향으로 약 6 km, 위도 방향으로 약 1 km도 왼쪽에서 시작하는 차이가 존재한다. 하지만 검증 영역의 경우는 모든 해상도 실험에 대해 같은 영역으로 통일하였다. 모델은 비정수계(non-hydrostatic)로 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계와 회전된 적도의 위도-경도(rotated equatorial latitude-longitude) 격자 투영법을 사용하였다. 연직적

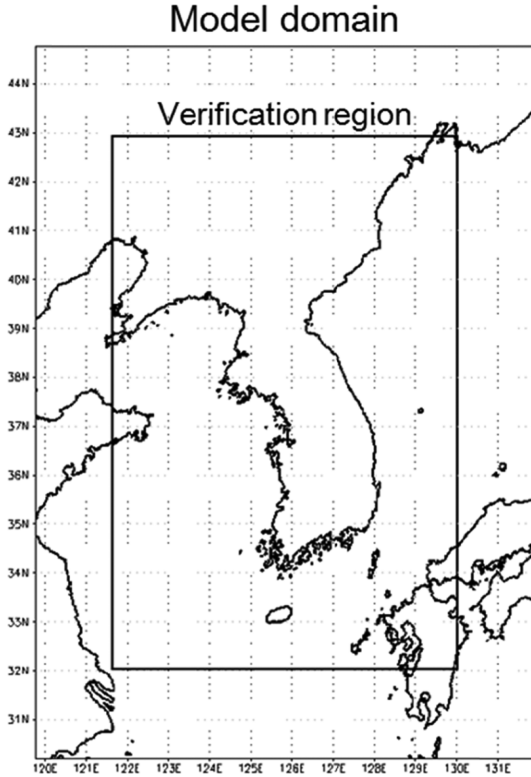


Fig. 2. Model domain and verification region of the limited area ensemble prediction system in KMA.

으로는 Charney-Philips 체계를 terrain-following hybrid-height 좌표계를 따라 사용하였다(Davies et al., 2005). 모델에 사용되는 물리 모수화 과정들로는 미세물리과정은 large-scale precipitation (Wilson and Ballard, 1999), 경계층 물리과정은 boundary-layer mixing (Lock et al., 2000), 지표 및 복사 과정은 각각 Essery et al. (2001)과 Edward and Slingo (1996)을 사용하였다. 적은 모수화는 모든 해상도에서 적용하지 않았는데 그 이유는 고해상도 모델의 경우 미세물리과정으로 강수 현상을 모사할 수 있기 때문이다. UKMO에서는 2.2 km 해상도에서 적은 모수화를 적용하고 있지 않으므로 1.5 km와 2 km 해상도에서는 적은 모수화를 적용하지 않았다. 3 km 해상도의 경우는 gray zone (Shin and Hong, 2013)의 관점에서 적은 모수화의 필요성이 명확하지 않지만 1.5 km와 2 km 실험과의 일관성을 위해서 마찬가지로 적용하지 않았다.

## 2.2 검증 방법

### 2.2.1 Root Mean Square Error (RMSE)와 스프레드(spread)

앙상블 예측 시스템 검증에 있어서 가장 기본적인

검증 요소는 앙상블 평균과 앙상블 스프레드이다. 예보된 앙상블 멤버들을 평균한 값에 대해 살펴 봄으로써 비선형 모델인 수치 예보 모델을 통해 예측된 미래의 대기가 갖는 확률적인 분포의 평균값에 대해 추정할 수 있다. 앙상블 스프레드의 경우 예보된 앙상블 멤버들의 평균에 대한 편차를 의미하며, 다음의 (2.1)식으로 구할 수 있다.

$$SPREAD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{f} - f(i))^2}, \quad (2.1)$$

여기서  $N$ 은 앙상블 멤버의 개수이며,  $\bar{f}$ 는  $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i)$ 로 멤버 별 예보 값의 평균을 의미한다.  $f(i)$ 는  $i$  번째 앙상블 멤버의 예보 값을 의미한다.

앙상블 예보의 가장 큰 특징은 예보의 불확실성을 정량화할 수 있다는 것이다. 통계적으로 완벽한 신뢰성을 갖는 앙상블 예보의 경우, 대기의 실제 확률 분포와 앙상블 멤버들로부터 추출된 확률 분포는 같아야 한다. 즉, 앙상블 사이즈 (i.e., 앙상블 멤버 수)가 무한하다고 가정할 때, 앙상블 멤버들의 스프레드와 앙상블 평균과 실제 대기의 차이인 root mean square error (RMSE)는 같아야 한다. RMSE는 다음과 같이 계산된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\bar{f}_i - o_i)^2}, \quad (2.2)$$

여기서  $M$ 은 모델의 격자 수이며  $o$ 는 검증 값을 의미한다.

예보의 정확성은 앙상블 평균과 앙상블 스프레드를 통해 어느 정도 추정할 수 있다. 일반적으로 앙상블 스프레드가 작으면 앙상블 평균이 실제 대기에 더 가깝다고 생각할 수 있고, 앙상블 스프레드가 크면 상대적으로 불확실성이 커 앙상블 평균의 오차가 크다고 추측할 수 있다. 하지만 Barker (1991)에서 언급하였듯이, 때로 위와 같은 완벽한 상관성을 갖는 것은 불가능하기도 하다. 즉, 앙상블 스프레드가 커도 앙상블 평균의 오차(i.e., 앙상블 RMSE)가 작을 수 있다. 따라서 앙상블 RMSE와 스프레드가 서로 크기가 비슷하여 앙상블 스프레드가 앙상블 예보 오차를 적절히 표현하고, 앙상블 RMSE가 작으면 예보의 성능이 좋다고 평가할 수 있다.

### 2.2.2 Fractions Skill Score (FSS)

본 연구에서 사용한 강수 검증 방법은 FSS이다. FSS는 전통적인 강수 예보 검증 방법에서 사용하는 한 지점에서의 검증이 아닌, 해당 지점을 중심으로 이웃한 지점들까지 포함하는 지역에 대해 강수 예보를 검증하는 방법이다. FSS를 계산하는 방법은 다음과

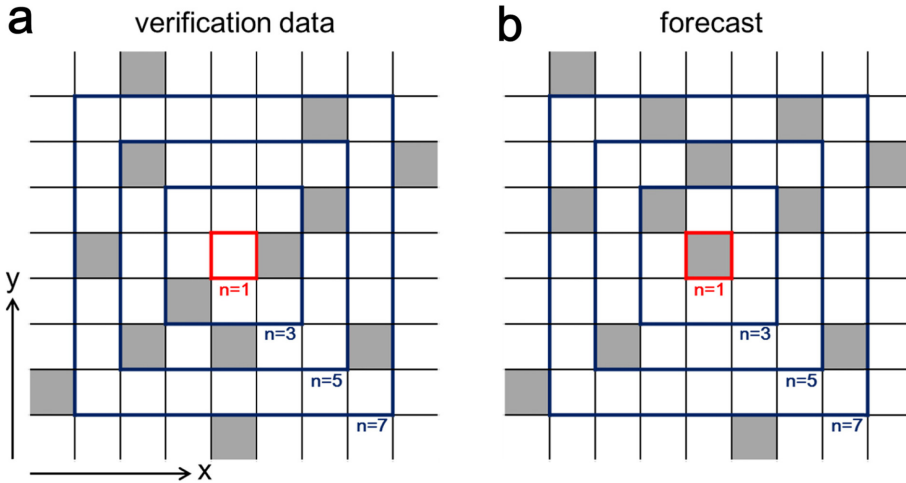


Fig. 3. Schematic example of FSS verification: (a) verification data and (b) forecast binary fields on the same grids, “n” denotes the neighborhood size, and the shaded grid has a value of 1.

같이 세 단계로 구성되며, 수식은 Roberts and Lean (2008)를 참고하였다.

1) 검증하고 싶은 강수 임계값에 대해서 관측장 및 모델 예보장의 각 격자점이 0 또는 1의 값을 갖는 이진 필드(binary field)로 변환해 준다. 이때 격자점의 강수량이 검증하고자 하는 임계값을 넘는 격자점은 1의 값을, 그렇지 않은 격자점은 0의 값을 부여한다.

2) 변환된 모델 예보장 및 관측장에 대하여 각 격자점에서 이웃한 지역에 대한 확률 값을 계산해 준다. 예를 들어 Fig. 3a의 검증 자료에서 빨간색 격자점 위치에서 이웃 값 n에 따른 확률은 n이 3일때는 2/9, 5일때는 6/25, 7일때는 9/49이다. 이때 모델 예보장은 n이 3일때는 2/9, 5일때는 5/25, 7일때는 9/49의 확률을 가지며(Fig. 3b), 이와 같은 경우에는 모델 예보가 n이 3일 때와 7일 때 예보에 성공한 것으로 판단한다. 확률 값은 다음과 같은 수식을 통해 각 격자점에 대하여 n 값에 따라 계산할 수 있다.

$$O(n)(i,j) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_O \left[ i+k-1 - \frac{(n-1)}{2}, j+l-1 - \frac{(n-1)}{2} \right], \quad (2.3)$$

$$M(n)(i,j) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_M \left[ i+k-1 - \frac{(n-1)}{2}, j+l-1 - \frac{(n-1)}{2} \right], \quad (2.4)$$

여기서  $I_O \left[ i+k-1 - \frac{(n-1)}{2}, j+l-1 - \frac{(n-1)}{2} \right]$ 와

$I_M \left[ i+k-1 - \frac{(n-1)}{2}, j+l-1 - \frac{(n-1)}{2} \right]$ 은 각각 검증자료와 모델 예보 값에 대하여 격자점  $i, j$ 에 대한 상대적인 위치에서의 이진 필드 값을 의미한다.  $O(n)(i, j)$ 와  $M(n)(i, j)$ 은 각각 검증 자료와 모델 예보 값의  $(i, j)$  격자점에서 n에 대한 확률 값을 의미한다. n의 크기는 검증 영역의 가로와 세로 격자 수 중 더 큰 쪽을 N이라고 했을 때,  $2N-1$ 까지 계산하여 모든 검증 영역에 대하여 계산할 수 있으며, 홀수 값만을 갖는다. 하지만 본 연구에서는 계산 시간 등을 고려하여 n이 131일 때까지만 FSS를 계산하였다.

3) 각 격자점에서 n 값에 따라 확률을 계산한 것에 대하여 다음의 수식들을 이용하여 Mean Square Error (MSE)를 계산하고, 이의 skill score를 이용하여 FSS를 계산한다.

$$MSE_{(n)} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [O_{(n)ij} - M_{(n)ij}]^2, \quad (2.5)$$

$$FSS_{(n)} = \frac{MSE_{(n)} - MSE_{(n)ref}}{MSE_{(n)perfect} - MSE_{(n)ref}} = 1 - \frac{MSE_{(n)}}{MSE_{(n)ref}}, \quad (2.6)$$

여기서  $MSE_{(n)perfect}$ 는 0이므로  $FSS_{(n)}$ 는 식(2.6)의 맨 오른쪽 항과 같이 계산할 수 있다.  $MSE_{(n)ref}$ 는 검증 자료와 모델 예보 값에 대하여 가질 수 있는 가장 큰 값을 의미하며, 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$MSE_{(n)ref} = \frac{1}{N_x N_y} \left[ \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} O_{(n)ij}^2 + \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} M_{(n)ij}^2 \right], \quad (2.7)$$

이와 같이 계산된 FSS는 강수에 대한 모델의 기본 성능뿐만 아니라 강수 현상의 규모에 따른 예보 성능의 평가가 가능하다.

### 2.2.3 Probability Matching (PM)

앙상블 평균장의 경우 앙상블 멤버들로 표현된 대기의 평균적인 특성을 나타내는 데 많이 사용된다. 강수 예보에 있어서 앙상블 평균장은 앙상블 멤버들이 표현한 강수의 영역은 비교적 잘 표현하지만, 평균을 함으로써 앙상블 멤버들의 강수 강도가 완화되어 앙상블 멤버들이 보이는 강수 강도의 특성은 잘 나타나지 못하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 산술 평균이 아닌 Ebert (2001)에서 제시한 Probability Matching (PM) 기법을 사용하여 강수 예보의 평균장을 나타내었다.

PM의 기본적인 원리는 다음과 같다. 강수 예보에 있어 강수 영역과 강수 강도라는 두 가지 데이터 집단이 있다고 한다면, 강수의 공간적인 분포는 앙상블의 평균장이 잘 나타내었다고 가정하고, 강수의 강도는 앙상블 멤버들 각각이 예보한 값이 참값에 가깝다고 가정하는 것이다. 따라서 앙상블 평균장과 앙상블 멤버들이 예보한 모든 강수량을 두 개의 다른 집단으로 설정하고 두 집단에 대해서 강수의 강도를 내림차순으로 정리한다. 그 다음 강수의 영역은 앙상블의 평균장으로 설정하고, 앙상블 평균이 강수 강도의 최대값을 나타내는 지점에 모든 앙상블 멤버들의 집단에서의 강수 강도 최대값을 넣어준다. 이러한 방식으로 그 다음으로 큰 강수 강도를 나타내는 앙상블 평균장의 지점에 모든 앙상블 멤버들의 집단에서 그 다음으로 큰 강수 강도 값을 넣어주는 것을 반복하여 새로운 강수 예보장을 생성한다. 이러한 방법으로 하면 앙상블 평균장을 구할 때 발생하는 앙상블 멤버들의 강수 강도 완화를 방지하고 각 앙상블 멤버들에서 나타나는 강수 강도의 특성이 유지되도록 앙상블 평균장을 나타내는 것이 가능하다.

## 3. 결 과

### 3.1 사례기간의 기상 특성

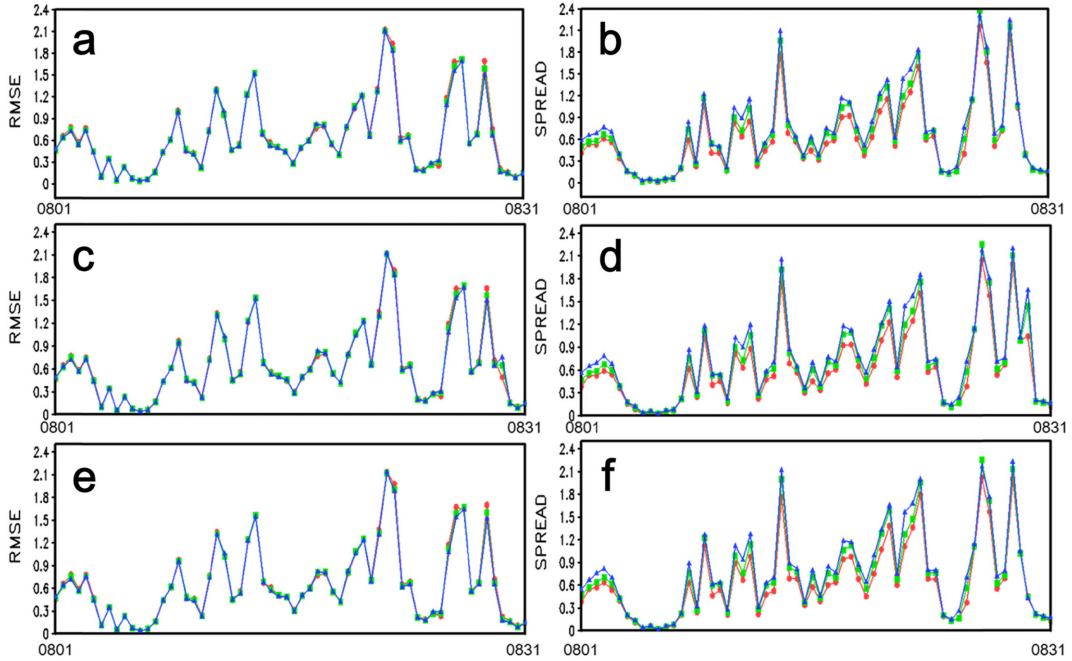
구축한 고해상도 국지 앙상블 예측시스템을 2012년 8월 한달 동안의 기간에 대해 실행하여 여름철에 대한 시스템의 예보 성능을 통계적으로 살펴보았다. 2012년 8월의 전국 평균 기온은 26.4°C, 최고기온의 평균은 30.7°C, 최저기온의 평균은 23.1°C로 평년보다 각각 1.3°C, 0.9°C, 1.6°C가 높았다. 평균 강수량은 408.5 mm로 평년의 149%를 기록하였으며, 강수 일수는 16.4일로 평년보다 3.2일 많았다. 상순은 북태평양고기압의 영향을 주로 받아 무더운 날이 많았고, 폭염과 열

대야 현상이 지속되었다. 중순에는 북태평양고기압 가장자리에서 대기 불안정으로 인해 전국에 비가 오는 날이 많았으며, 평년 대비 185%의 강수량을 기록하였다. 하순에도 마찬가지로 북태평양고기압 가장자리에서 대기 불안정으로 인해 중부지방에 많은 비가 내렸으며, 특히 28일 제 15호 태풍 볼라벤(BOLAVEN), 30일 제 14호 태풍 덴빈(TENBIN)이 우리나라에 상륙하여 전국에 강한 바람과 함께 많은 비가 내렸다(Korea Meteorological Administration, 2012). 2012년 8월에 발생한 강수 사례에 대한 강수 예보의 성능을 살펴보기 위하여 두 강수 사례(2012년 8월 2일 사례와 8월 13일 사례)를 선택하여 개별 강수 예보의 성능을 살펴보았다.

### 3.2 2012년 8월에 대한 RMSE와 스프레드

고해상도 국지 앙상블 예측 시스템의 예측 결과를 검증하는데 사용한 자료는 기상청에서 현업 운영 중인 Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS)의 Three-dimensional variational data assimilation (3DVAR) 분석장이다. LDAPS는 한반도 지역을 모델 영역으로 1.5 km 해상도의 단일 예보를 수행하는 시스템인데, LDAPS 분석장은 사례 기간 동안 이용 가능한 관측 자료를 동화하여 생성된 것으로 실제 대기의 상태를 잘 나타낸다고 가정하였다. Figures 4~7은 2012년 8월 한 달간 구축한 국지 앙상블 예측 시스템의 예측 변수 별 RMSE와 스프레드를 나타내는데, 각 해상도 별로 RMSE와 스프레드가 유사한 것을 확인할 수 있다. 변수 별로 자세히 살펴보면, 1시간 누적 강수량의 경우 그 변동폭과 패턴이 다른 변수들에 비해 크게 나타나는데(Fig. 4), 이는 강수 현상의 유무에 의해 나타나는 현상으로 분석된다. 전반적으로 RMSE는 멤버 수 및 해상도에 따라 그다지 많은 차이를 보이지 않지만(Table 1), 스프레드는 멤버 수가 적을수록 감소하고(Figs. 5, 6) 이는 주로 1.5 m 온도에서 나타났다(Fig. 6). 등압면 변수인 500 hPa 수평 바람과 850 hPa 온도 및 지위고도장의 분포를 살펴보면, 앙상블 멤버가 16개인 경우 대체로 모든 해상도에서 RMSE와 스프레드가 유사하다(Fig. 7, Table 2). 하지만 8월 말에는 500 hPa 수평 바람의 스프레드가 증가하는데(Fig. 7), 이는 2012년 14호 태풍 덴빈(TENBIN)과 15호 태풍 볼라벤(BOLAVEN)의 영향이며, 이러한 특징은 2 km 해상도에서 다른 해상도에 비해 두드러지게 나타났다. 2 km 해상도 실험은 1시간 누적 강수량에 대한 값을 제외하고 나머지 변수에서 모두 다른 해상도들에 비해 더 큰 RMSE와 스프레드를 보였다.

전반적으로 각 해상도와 멤버 수 별로 각 변수에 대해 RMSE와 스프레드가 비슷한 크기를 보이고, 그



**Fig. 4.** RMSE (left column, unit: mm) and spread (right column, unit: mm) of 24 hr forecast on 1 hr accumulated precipitation at surface during Aug. 2012 (top row: 1.5 km resolution, middle row: 2 km resolution, bottom row: 3 km resolution, red solid line: 8 member, green solid line: 12 member, blue solid line: 16 member).

**Table 1.** Mean of RMSE of 1 hr accumulated precipitation at surface, zonal wind at 10 m, and temperature at 1.5 m during the experimental period.

Resolution	Ensemble member	Variable		
		1 hr accumulated precipitation at surface	Zonal wind at 10 m	Temperature at 1.5 m
1.5 km	8	0.659	1.545	0.888
	12	0.650	1.513	0.868
	16	0.644	1.499	0.849
2 km	8	0.662	1.553	0.887
	12	0.657	1.530	0.871
	16	0.654	1.524	0.857
3 km	8	0.670	1.564	0.895
	12	0.660	1.531	0.874
	16	0.653	1.517	0.855

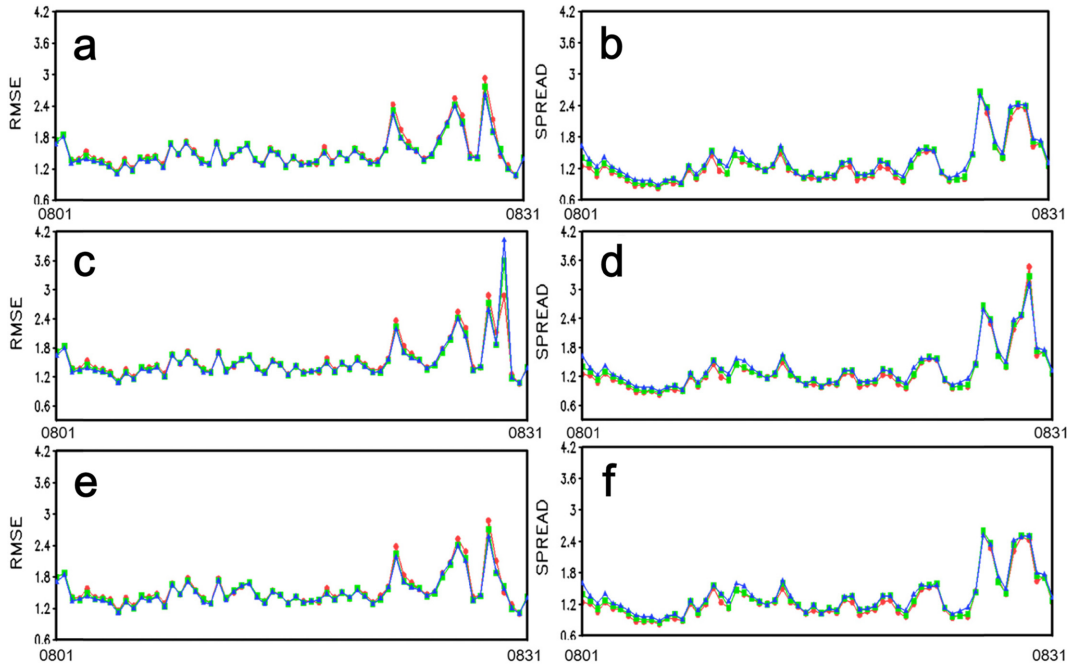
다지 크지 않은 RMSE 값을 나타냄으로써 구축한 고 해상도 국지 앙상블 예측 시스템의 기본적인 성능은 좋은 것으로 판단된다.

### 3.3 강수 사례에 대한 FSS 검증

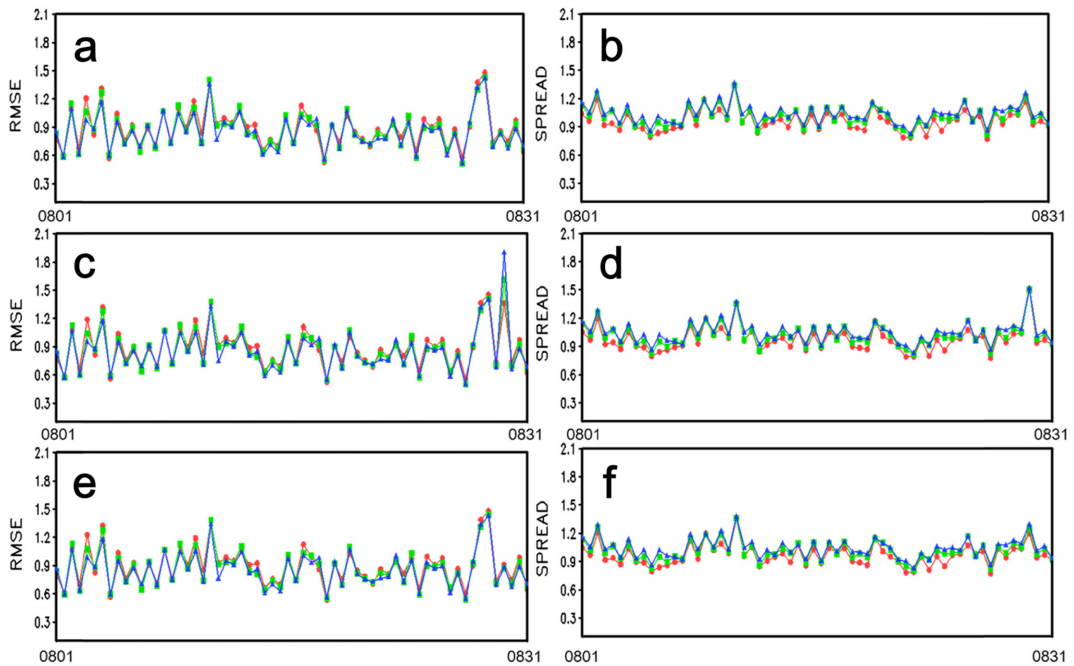
#### 3.3.1 2012년 8월 2일 0000 UTC 사례

구축한 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템을 2012년 8월 2일 0000 UTC의 강수 현상에 대해 해상도

와 앙상블 멤버 별로 FSS 검증을 하였다. FSS 검증을 위해 본 연구에서는 관측 자료 대신 3 km로 내삽된 LDAPS 자료를 검증 자료로 사용하였고, 각각의 해상도의 예보 결과도 3 km 해상도로 내삽하여 검증에 사용하였다. 그 이유는 일반적으로 고해상도의 모델 검증을 할 경우 상대적으로 낮은 해상도의 관측에 대해 검증하기 때문이다. 본 연구에서는 1.5 km LDAPS의 분석장을 관측 대신 사용하였고, 이는 모델의 해

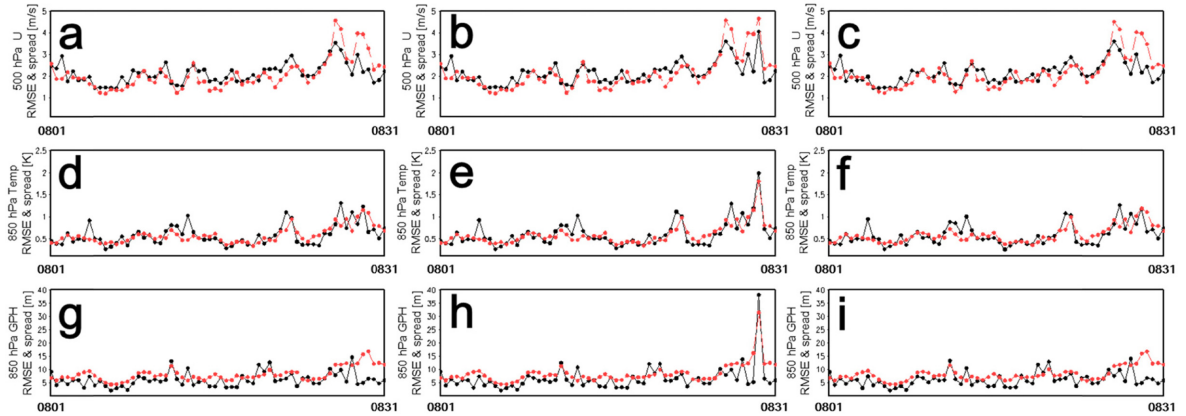


**Fig. 5.** RMSE (left column, unit:  $\text{m s}^{-1}$ ) and spread (right column, unit:  $\text{m s}^{-1}$ ) of 24 hr forecast on zonal wind at 10 m during Aug. 2012 (top row: 1.5 km resolution, middle row: 2 km resolution, bottom row: 3 km resolution, red solid line: 8 member, green solid line: 12 member, blue solid line: 16 member).



**Fig. 6.** RMSE (left column, unit: K) and spread (right column, unit: K) of 24 hr forecast on temperature at 1.5 m during Aug. 2012 (top row: 1.5 km resolution, middle row: 2 km resolution, bottom row: 3 km resolution, red solid line: 8 member, green solid line: 12 member, blue solid line: 16 member).





**Fig. 7.** RMSE (black solid line) and spread (red dashed line) of 24 hr forecast for 16 ensemble members with each resolution (top row: zonal wind at 500 hPa, middle row: temperature at 850 hPa, bottom row: geopotential height at 850 hPa, left column: 1.5 km resolution, middle column: 2 km resolution, right column: 3 km resolution).

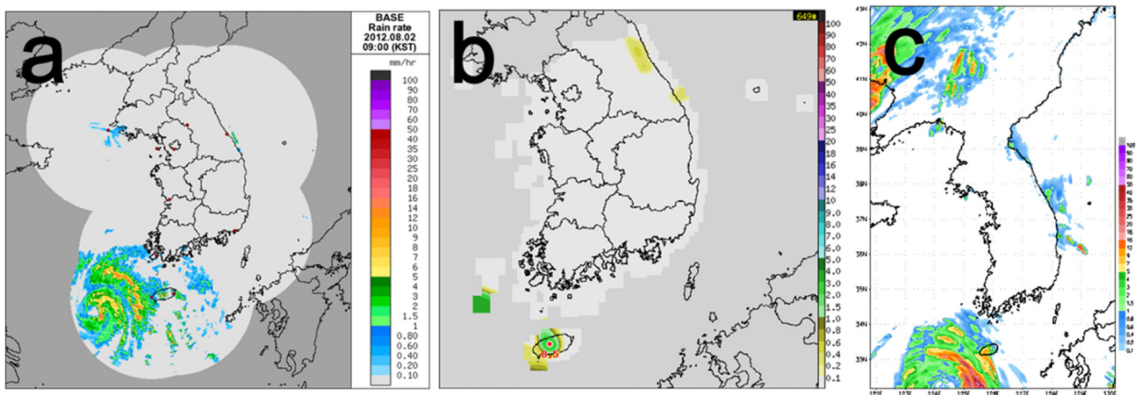
**Table 2.** Mean of RMSE of 500 hPa zonal wind, 850 hPa temperature, and 850 hPa geopotential height for 16 ensemble members during the experimental period.

Variable	Resolution		
	1.5 km	2 km	3 km
500 hPa zonal wind	2.134	2.161	2.137
850 hPa temperature	0.659	0.672	0.658
850 hPa geopotential height	5.358	5.802	5.389

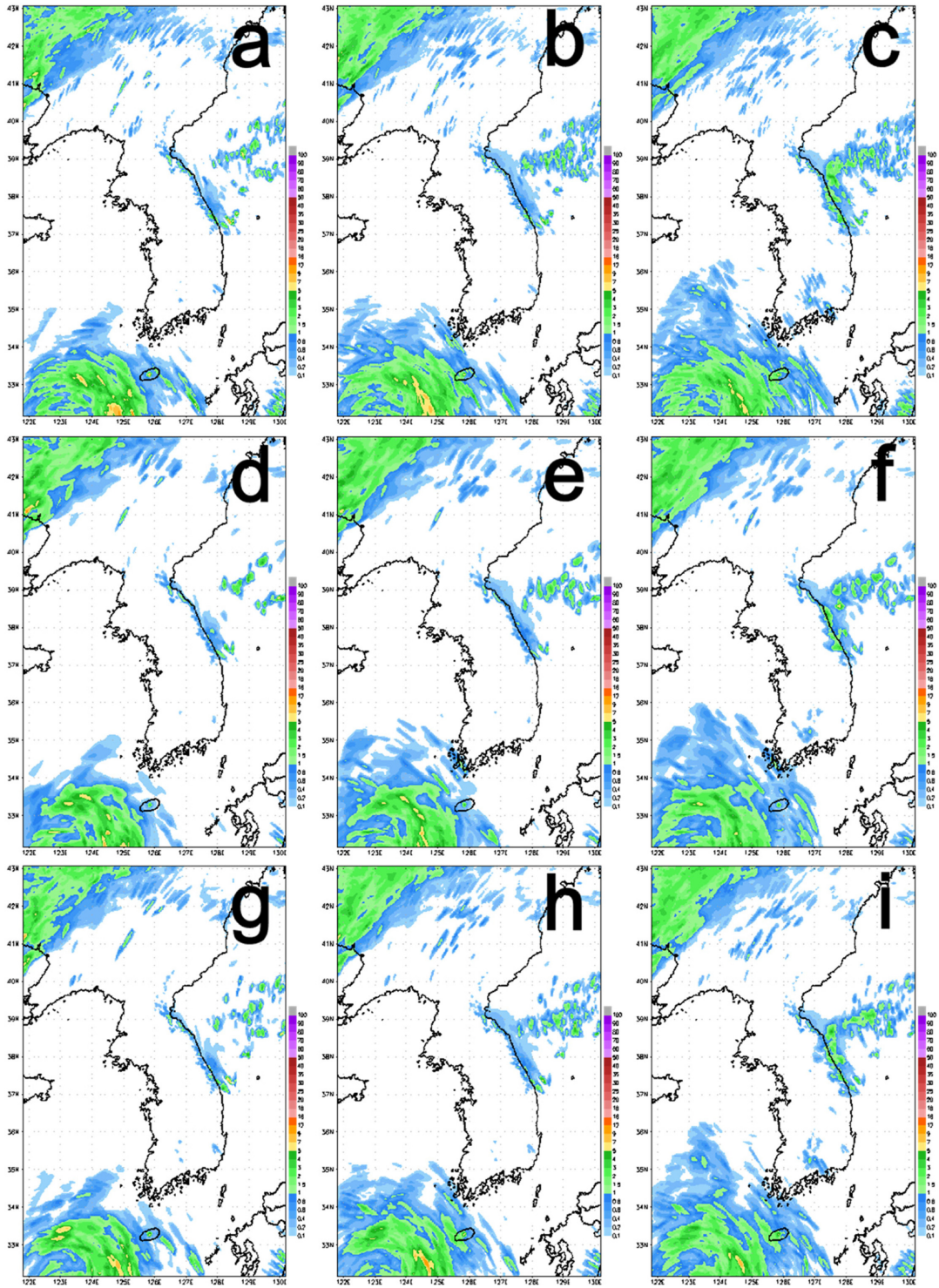
상도와 같거나 높은 해상도이다. 따라서 LDAPS 자체의 해상도를 3 km로 변환하여 관측 자료처럼 사용하고, 이것에 모델의 해상도를 맞춰 검증하였다.

Figures 8a, b에 사례 시점의 레이다 관측 및 AWS

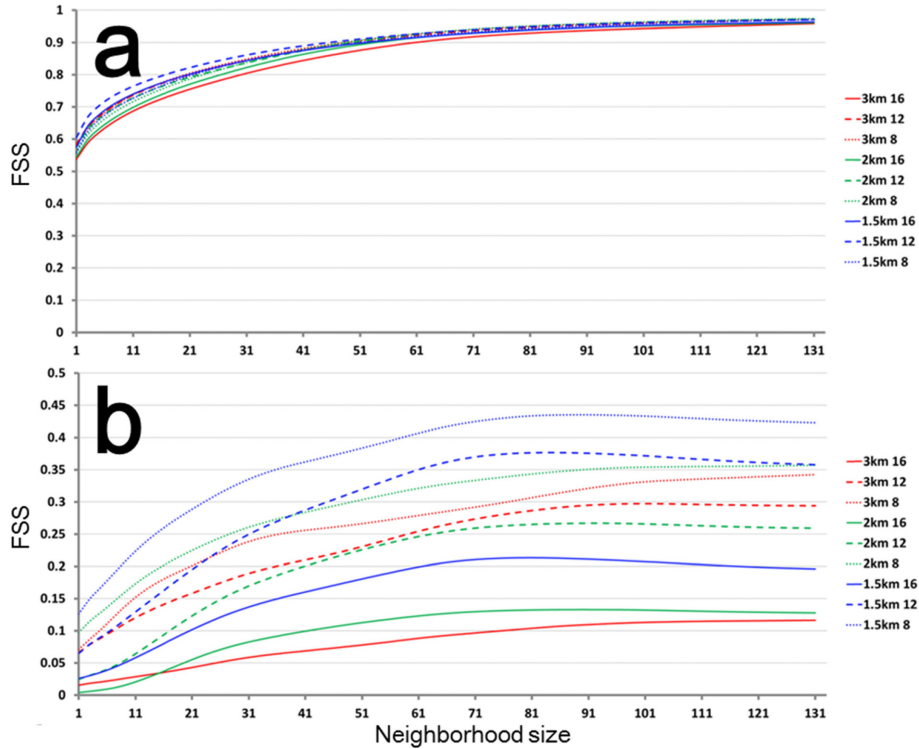
관측을 나타내었다. 레이다 관측 영상의 좌측 하단에 나타난 태풍은 2012년 10호 태풍인 담레이(DAMREY)로 한반도 남서쪽에서 강수가 관측되었다(Fig. 8a). AWS 관측 영상에서도 마찬가지로 주로 제주도 지역에서만 태풍으로 인한 강수가 관측되었으며, 한반도 내륙에는 강수가 발생하지 않았다(Fig. 8b). Figure 8c는 검증 자료로 사용된 사례 시점에서의 기상청 LDAPS의 3DVAR 분석장으로 LDAPS 3DVAR 분석장이 레이다 관측장을 비교적 잘 나타내는 것을 확인할 수 있다. Figure 9는 각각의 해상도 및 앙상블 멤버에 대한 강수 예보 결과이다. 실험 별로 많은 차이는 보이지 않지만, 동일한 해상도에서 앙상블 멤버 수가 많아질수록 더 넓은 영역에 강수가 나타나는 것을 볼 수 있다. 반대로 강수의 강도는 멤버 수가 적을수록



**Fig. 8.** 1 hr accumulated precipitation of (a) radar observation, (b) AWS observation, and (c) LDAPS analysis at 0000 UTC 2 Aug. 2012.



**Fig. 9.** Ensemble mean of 1 hr accumulated precipitation forecasts for each member and resolution at 0000 UTC 2 Aug. 2012 (top row: 1.5 km resolution, middle row: 2 km resolution, bottom row: 3 km resolution, left column: 8 members, middle column: 12 members, and right column: 16 members).

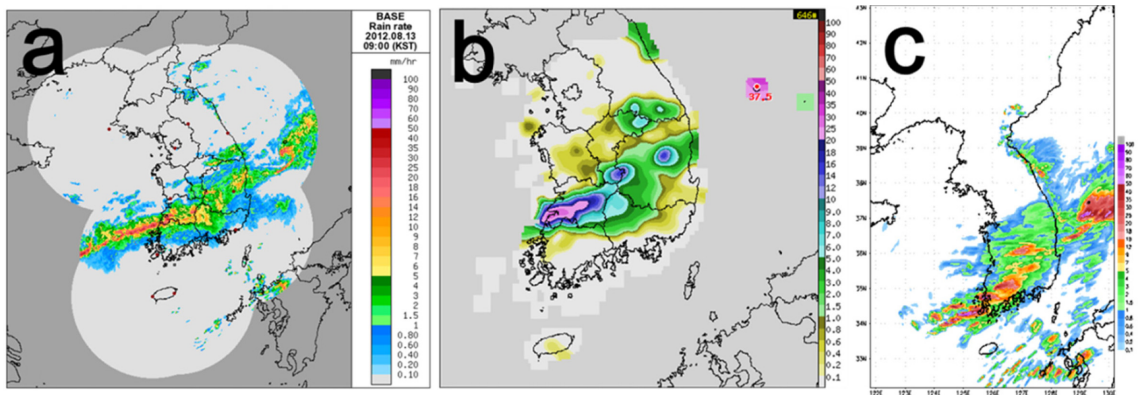


**Fig. 10.** FSS of ensemble mean with respect to neighborhood size for (a) 1 mm and (b) 4 mm threshold for a rainfall event at 0000 UTC 2 Aug. 2012.

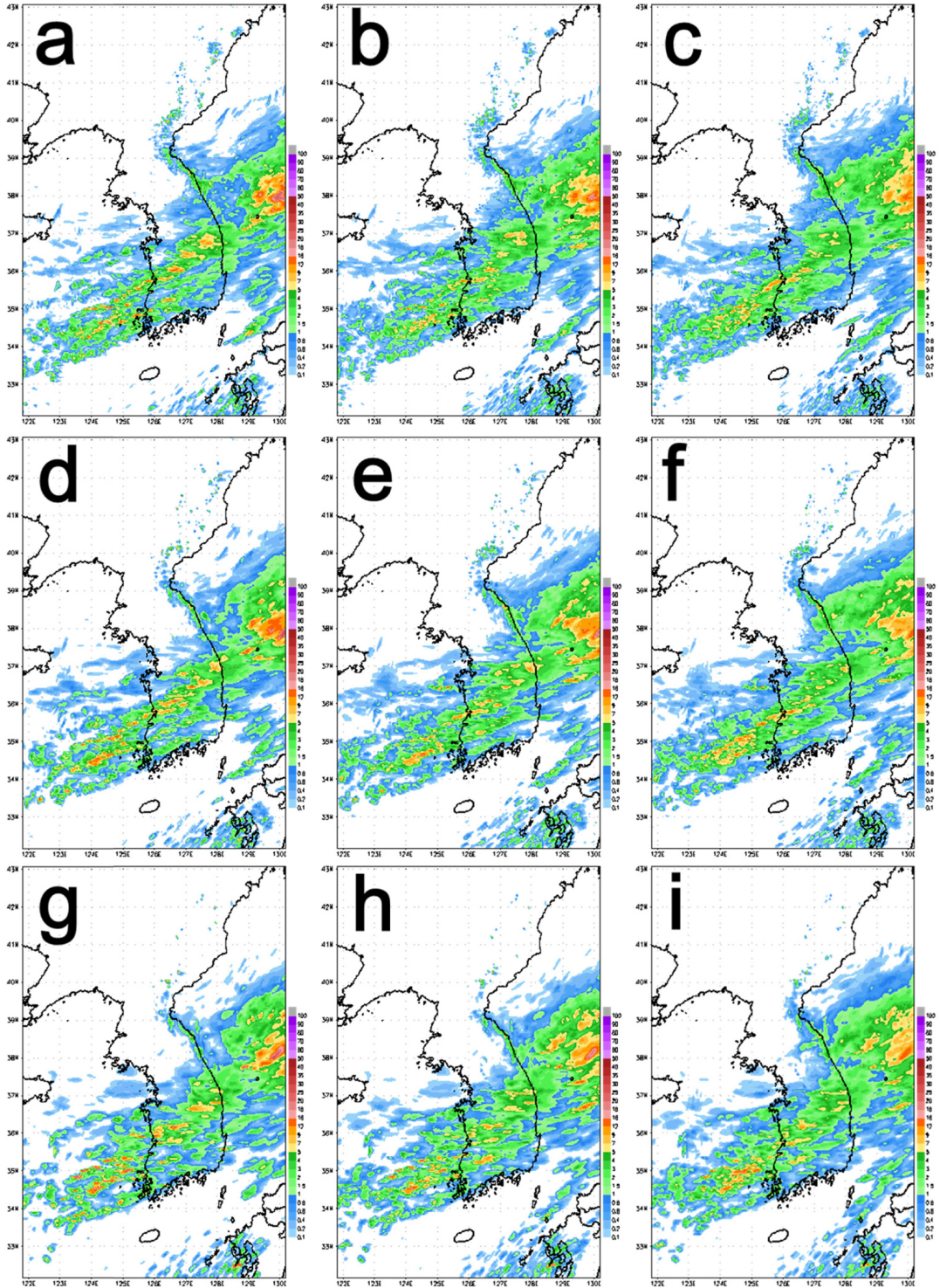
강한 영역이 더 넓게 나타나는 것을 확인 할 수 있다 (e.g., Fig. 9a와 Fig. 9c 비교).

Figure 10은 앙상블 평균장에 대한 FSS 검증 결과이다. Figure 10a는 1.0 mm의 강수 임계값에 대한 FSS 검증이고, Fig. 10b는 4.0 mm의 강수 임계값에 대한 FSS 검증이다. 1.0 mm의 강수 임계값은 강수

영역을 나타내는데 유효하며, 4.0 mm의 강수 임계값은 상대적으로 강한 강수를 나타내는 데 유효하다고 볼 수 있다. 1.0 mm의 강수에 대해서는 모든 해상도 및 앙상블 멤버 수 사이에 FSS의 차이가 크지 않은 반면에, 4.0 mm 강수에 대해서는 실험 별 FSS의 차이가 매우 크다. 일반적으로 0.5 이상의 FSS 값을 갖



**Fig. 11.** 1 hr accumulated precipitation of (a) radar observation, (b) AWS observation, and (c) LDAPS analysis at 0000 UTC 13 Aug. 2012.



**Fig. 12.** Ensemble mean of 1 hr accumulated precipitation forecasts for each member and resolution at 0000 UTC 13 Aug. 2012 (top row: 1.5 km resolution, middle row: 2 km resolution, bottom row: 3 km resolution, left column: 8 members, middle column: 12 members, and right column: 16 members).

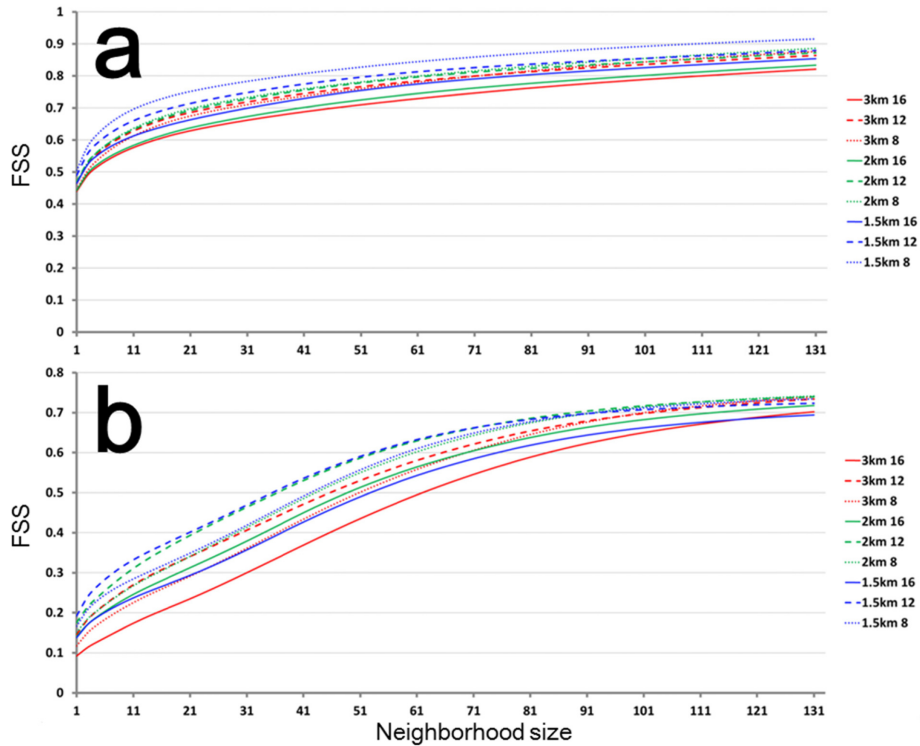


Fig. 13. FSS of ensemble mean with respect to neighborhood size for (a) 1 mm and (b) 4 mm threshold for a rainfall event at 0000 UTC 13 Aug. 2012.

는 이웃 지역의 크기(neighborhood size)부터 예측이 유효하다고 분석한다. 따라서 1.0 mm의 강수에서는 모든 조합의 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템이 잘 예측하는 것으로 볼 수 있다. 한편 4.0 mm 강수에 대해서는 1.5 km 해상도와 8개의 앙상블 멤버의 조합이 가장 높은 FSS 값을 보이나 그 경우도 FSS 값이 0.5보다 작아 모든 조합이 예측을 잘 하지 못한 것으로 볼 수 있다. 즉 2012년 8월 2일 0000 UTC 사례는 강수의 영역은 모든 조합에서 잘 예측하는 편이나, 상대적으로 강한 강수는 잘 예측하지 못했고 조합간 결과의 차이도 큰 사례로 해석할 수 있다.

### 3.3.2 2012년 8월 13일 0000 UTC 사례

2012년 8월 13일 0000 UTC 사례에도 해상도와 앙상블 멤버 별로 FSS 검증을 수행하였다. 사례 시점에 대한 레이더 관측을 보면 한반도 남쪽으로 길게 밴드 형태의 강수대가 발달하였으며(Fig. 11a), 이는 2일 0000 UTC와 기상장이 전혀 다른 사례임을 나타낸다. 같은 시점의 AWS 관측을 보면, 레이더 관측과 마찬가지로 한반도에 강수대가 발생하였고 강한 강수가 발생한 지역 및 셀의 위치도 레이더 관측과 유사한 것을 확인할 수 있다(Fig. 11b). 같은 시점에서 검증

자료로 사용되는 LDAPS 분석장을 Figure 11c에 나타내었다. 관측에 비해서는 강한 강수 강도를 나타내고 강수 영역도 넓게 나타났지만 밴드 형태는 잘 모사하였다. Figure 12의 앙상블 평균장의 강수를 살펴보면, 8월 2일 0000 UTC 사례와 마찬가지로 같은 해상도에서 앙상블 멤버 수가 증가할수록 강수의 강도는 점차 약하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 구축한 시스템의 앙상블 스프레드가 커져 앙상블 멤버 수가 증가할수록 강수 영역이 넓어지고 강수 강도의 평균값이 약하게 나타나기 때문이다. 또한 모든 조합에서 밴드의 형태는 대체로 잘 모의하는 모습을 볼 수 있다. 1.0 mm의 강수 임계값에 대한 FSS를 살펴보면 1.5 km 해상도와 8개 앙상블 멤버의 조합이 가장 좋은 값을 보이며, 다른 조합의 결과들은 서로간의 차이가 크지 않음을 볼 수 있다(Fig. 13a). 반면 4.0 mm 강수 임계값에 대한 FSS를 살펴보면 1.5 km 해상도와 12개 앙상블 멤버의 조합이 21 이웃 지역 크기(neighborhood size)까지는 가장 좋지만 그 이후에는 2 km 해상도와 12개 앙상블 멤버의 조합과 매우 유사한 값을 보인다(Fig. 13b). 예보의 유효성을 나타내는 0.5 이상의 값은 약 37 이웃 지역 크기에서부터 넘기 시작하는데, 이는 약 111 km 크기의 강수 영역 예보에 효과적인

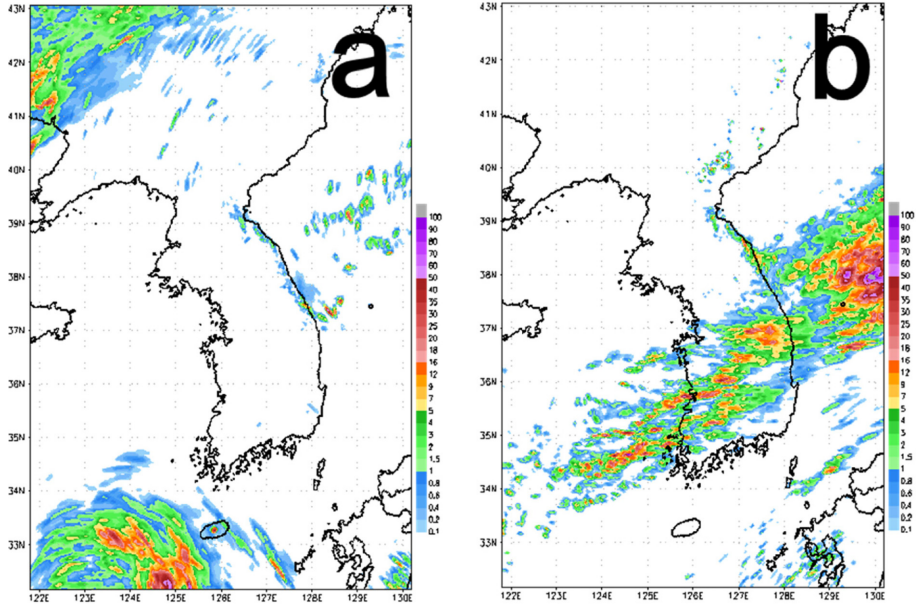


Fig. 14. PM mean of 1 hr accumulated precipitation forecast at (a) 0000 UTC 2 and (b) 0000 UTC 13 Aug. 2012.

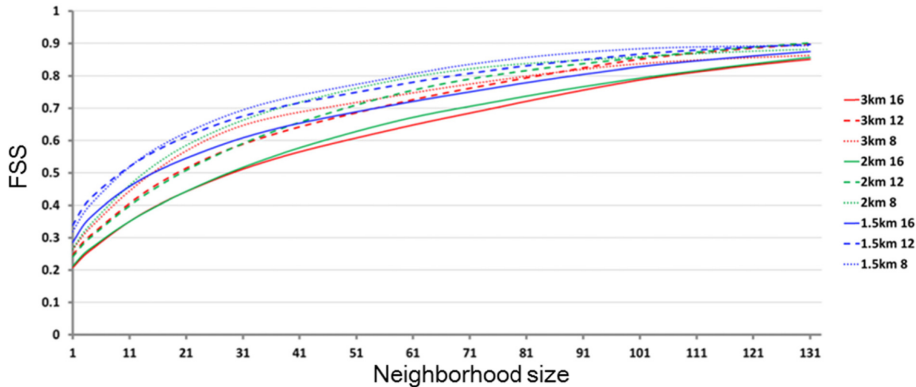


Fig. 15. FSS of PM mean with respect to neighborhood size for 4 mm precipitation threshold for a rainfall event at 0000 UTC 2 Aug. 2012.

것으로 해석된다(Fig. 13b). 따라서 2012년 8월 13일 0000 UTC 사례는 강수의 영역은 모든 조합에서 잘 예측하는 편이고, 강한 강수도 조합간 차이는 약간 있지만 111 km~189 km 이상의 넓은 영역에 대해서는 비교적 잘 예측한 사례로 해석할 수 있다.

3.4 Probability matching 평균

FSS 검증을 수행한 두 가지 사례에 대하여 가장 좋은 결과를 나타냈던 조합에 대하여 각각 PM 기법을 적용해 보았다. 2012년 8월 2일 사례에 대해서는 1.5 km 해상도와 8개의 앙상블 멤버에, 2012년 8월 13일

사례에 대해서는 1.5 km 해상도와 12개의 앙상블 멤버에 PM을 적용하여 나타내었다(Fig. 14). 기존의 일반적인 앙상블 평균장과 비교하였을 때(Fig. 9a와 Fig. 14a 비교, Fig. 12b와 Fig. 14b 비교), PM 기법을 적용한 앙상블 평균장은 확실히 강수 강도가 더 강하게 나타나며 강수 셀이 더 세밀하게 나타난다. 4.0 mm 강수에 대하여 FSS 값이 낮게 나타났던 2일 사례(Fig. 10b)에 대하여 PM 평균으로 FSS를 다시 계산해 본 결과, 기존 앙상블 평균장을 이용하여 검증하였을 때 보다 전반적으로 높은 FSS 값을 보이는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 15).

## 4. 결 론

본 연구에서는 기상청 고해상도 국지 규모 앙상블 예측 시스템을 세 가지 해상도 및 세 가지 앙상블 멤버 수의 조합에 대하여 구축하고 그 성능을 평가해 보았다. 구축한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 2012년 8월 한 달 동안 24시간 예보를 수행하였으며, RMSE와 스프레드를 통하여 기본적인 성능을 검증해 보았다. 검증을 수행한 변수는 1시간 누적 강수량, 10 m 수평 바람, 1.5 m 온도, 500 hPa 수평 바람, 850 hPa 온도, 그리고 850 hPa 지위 고도장이며 기상청에서 현업 운영 중인 LDAPS의 분석장을 관측 대신 사용하여 검증하였다. RMSE와 스프레드에 대한 결과는 모든 해상도 및 앙상블 멤버의 조합에 대해서 비슷한 값과 패턴을 보였으며, 동일한 해상도에서 멤버 수가 적을수록 스프레드가 줄어드는 모습을 보였다. 또한 8월 말 기간에 모든 해상도 및 앙상블 멤버 수 조합에 대해 2012년 14호 태풍 덴빈과 15호 태풍 볼라벤의 영향으로 분석되는 RMSE와 스프레드의 증가가 나타났는데, 이는 2 km 해상도에서 가장 크게 나타났다. 구축한 고해상도 앙상블 예측 시스템의 스프레드가 RMSE와 비슷한 값을 보이며, 비교적 크지 않은 RMSE를 보이는 것으로 보아, 구축한 시스템의 기본적인 성능은 좋은 것으로 평가된다.

또한 고해상도 모델 예보에 있어서 중요한 강수량 검증을 서로 다른 종관 기상 상황에서 발생한 두 가지 강수 사례에 대해 수행해 보았다. 수행한 검증 방법으로는 전통적인 검증 방법인 지점별 검증이 아닌 지점 주변을 포함한 지역에 대해 검증하는 FSS 방법을 사용하였다. 2012년 8월 2일 0000 UTC 사례와 13일 0000 UTC 사례에서 1.0 mm 강수에 대해서는 해상도와 앙상블 멤버의 모든 조합이 큰 차이를 보이지 않았으나, 4.0 mm 강수에 대해서는 해상도 별로 큰 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 두 사례에 대한 FSS 검증 결과에서 1.5 km의 해상도가 가장 좋은 검증 값을 보였으며, 특히 12개와 8개 앙상블 멤버가 16개 멤버보다 좋은 결과를 보였다. 16개의 멤버보다 적은 앙상블 멤버 수를 이용했을 때 검증 값이 더 좋은 이유는 앙상블 평균 값으로 FSS를 검증한 것이 하나의 원인이 될 수 있다. 이 경우 많은 수의 앙상블 멤버를 평균할수록 smoothing 효과가 커져 강수 강도가 약화되는 것으로 분석된다. Clark et al. (2011)에서는 총 17개의 앙상블 멤버에 대하여 앙상블 멤버 수에 따른 확률 정량 강수 예보(probabilistic quantitative precipitation forecasts)의 특성을 살펴보고, 앙상블 멤버 수가 일정 개수(3개~9개) 이상 증가하면 그 이후로는 더 이상 예보 향상이 이루어지지 않음을 보인 바 있으며, Du et al. (1997)는 10개 정도의 앙상블 멤

버 수로 확률 정량 강수 예보 향상의 90% 이상을 나타낼 수 있음을 보인 바 있다. 하지만 이 결과는 확률 정량 강수 예보 결과이기 때문에 사례마다 다를 수 있고, 예측성이 낮은 사례인 경우에는 더 많은 앙상블 멤버 수가 필요할 것이라고 언급하였다. 따라서 위의 12개와 8개 앙상블 멤버가 16개 멤버보다 좋은 결과를 보인 것이 Clark et al. (2011)과 Du et al. (1997)에서 제시된 바와 같이 앙상블 멤버 수가 일정 개수 이상 많아지면 더 이상 강수 정량 예보 결과가 좋아지지 않는 것과 관련이 있는지에 대해서는 더 많은 사례에 대한 추후 검증이 필요할 것이다.

Kim and Kim (2014)에서는 경계장 섭동을 고려하지 않은 기상청 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템을 이용하여 본 연구와 같은 실험들을 수행하였고, 약한 강수에 대해서는 1.5 km 해상도 실험이, 강한 강수에 대해서는 3 km 해상도의 실험의 결과가 좋다는 것을 보인 바 있다. 따라서 본 실험의 결과와 Kim and Kim (2014) 결과의 차이는 기상청 고해상도 국지 앙상블 예측 시스템의 결과가 경계장 섭동에 민감하게 반응하는 것에 기인한다고 할 수 있다. 또한 사례 및 검증하는 강수의 임계 값 별로 검증 결과가 매우 다르기 때문에, 한반도에서의 전반적 강수 예보에 대해 어떤 해상도 및 앙상블 멤버의 조합이 가장 좋은지는 더 많은 강수 사례에 대해 검증이 필요할 것으로 보인다.

앞서 말한 일반적인 앙상블 평균장에서 발생하는 강수 강도 완화 현상을 방지하고자 Probability Matching 기법을 이용하여 새로운 앙상블 평균장을 나타내었다. 두 가지 강수 사례에 대하여 가장 높은 FSS를 보였던 조합에 적용한 결과, 일반적인 앙상블 평균장 보다 강수 강도를 좀 더 잘 나타내었다. 따라서 Fractions Skill Score와 Probability Matching 기법이 강수 예보의 검증에 매우 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다.

이 연구의 결과와 관련 후속 연구는 고해상도 모델과 앙상블 기법의 결합에 의한 고해상도 확률 및 통계 예보를 한반도에 발생하는 강수 시스템의 예측에 활용할 수 있는 기반을 마련하는 데 도움이 될 것이다.

## 감사의 글

심사를 맡아주신 두 분 심사위원의 세심한 심사에 감사드립니다. 본 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2013-2030)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

Barker, T. W., 1991: The relationship between spread and forecast error in extended-range forecasts. *J. Climate*, **4**, 733-742.

- Baker, L., A. Rudd, S. Migliorini, and R. Bannister, 2014: Representation of model error in a convective-scale ensemble prediction system. *Nonlin. Proc. Geophys.*, **21**, 19-39, doi:10.5194/npg-21-19-2014.
- Bowler, N. E., A. Arribas, K. R. Mylne, K. B. Robertson, and S. E. Beare, 2008: The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 703-722.
- Clark, A. J., and Coauthors, 2011: Probabilistic precipitation forecast skill as a function of ensemble size and spatial scale in a convection-allowing ensemble. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1410-1418.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modeling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1759-1782.
- Davis, C., B. Brown, and R. Bullock, 2006: Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1772-1784.
- Done, J., C. A. Davis, and M. L. Weisman, 2004: The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmos. Sci. Lett.*, **5**, 110-117, doi:10.1002/asl.72.
- Done, J. M., G. C. Craig, S. L. Gray, and P. A. Clark, 2012: Case-to-case variability of predictability of deep convection in a mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 638-648, doi:10.1002/qj.943
- Du, J., S. L. Mullen, and F. Sanders, 1997: Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2427-2459.
- Duc, L., K. Saito, and H. Seko, 2013: Spatial-temporal fractions verification for high-resolution ensemble forecasts. *Tellus*, **65A**, 18171, doi:10.3402/tellusa.v65i0.18171.
- Ebert, E. E., 2001: Ability of a Poor Man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2461-2480.
- \_\_\_\_\_, 2008: Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. *Meteor. Appl.*, **15**, 51-64.
- \_\_\_\_\_, and J. L. McBride, 2000: Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors. *J. Hydrol.*, **239**, 179-202.
- Edward, J. M., and A. Slingo, 1996: Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 689-719.
- Essery, R., M. Best, and P. Cox, 2001: 'MOSES 2.2 Technical Documentation'. *Technical Report 30*, Hadley Centre. [Available online at <http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/pubs/HCTN/index.html>.]
- Gebhardt, C., S. E. Theis, M. Paulat, and Z. Ben Bouallègue, 2011: Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variations of lateral boundaries. *Atmos. Res.*, **100**, 168-177.
- Hanley, K. E., D. J. Kirshbaum, S. E. Belcher, N. M. Roberts, and G. Leoncini, 2011: Ensemble predictability of an isolated mountain thunderstorm in a high-resolution model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 2124-2137, doi:10.1002/qj.877.
- Kain, J. S., and Coauthors, 2008: Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Wea. Forecasting*, **23**, 931-952.
- Kay, J. K., and H. M. Kim, 2014: Characteristics of initial perturbations in the ensemble prediction system of the Korea Meteorological Administration. *Wea. Forecasting*, **29**, 563-581, doi:10.1175/WAF-D-13-00097.1.
- \_\_\_\_\_, and H. M. Kim, Y.-Y. Park, and J. Son, 2013: Effect of doubling ensemble size on the performance of ensemble prediction in warm season using MOGREPS implemented in KMA. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 1287-1302, doi:10.1007/s00376-012-2083-y.
- Kim, S., and H. M. Kim, 2014: Neighborhood-based verification of high resolution ensemble forecast system in KMA. *94th American Meteorological Society Annual Meeting*, 2-6 Feb, 2014, Atlanta, Georgia. [Available online at <https://ams.confex.com/ams/94Annual/web-program/Paper234899.html>.]
- Kong, F., K. K. Droegmeier, and N. L. Hickmon, 2007: Multi-resolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part II: Storm-scale experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 759-782.
- Korea Meteorological Administration, 2012: Annual Climate Report, 312 pp. [Available online at [http://www.kma.go.kr/repository/sfc/pdf/sfc\\_ann\\_2012.pdf](http://www.kma.go.kr/repository/sfc/pdf/sfc_ann_2012.pdf).]
- Kühnlein, C., C. Keil, G. C. Craig, and C. Gebhardt, 2014: The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 1552-1562, doi:10.1002/qj.2238.
- Lock, A. P., A. R. Brown, M. R. Bush, G. M. Martin, and R. N. B. Smith, 2000: A new boundary layer mixing scheme. Part I: Scheme description and single-col-



- umn model tests. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3187-3199.
- Lorenz, E. N., 1969: The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, **21**, 289-307.
- Marsigli, C., A. Montani, and T. Paccagnella, 2013: Test of a COSMO-based convection-permitting ensemble in the Hymex framework. *COSMO Newsletter No. 13*, 5 pp. [Available online at <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/default.htm>.]
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2014: Provision of boundary conditions for a convection-permitting ensemble: comparison of two different approaches. *Nonlinear Proc. Geoph.*, **21**, 393-403, doi:10.5194/npg-21-393-2014.
- \_\_\_\_\_, F. Boccanera, A. Montani, and T. Paccagnella, 2005: The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlinear Proc. Geoph.*, **12**, 527-536.
- Mass, C. F., D. Ovens, K. Westrick, and B. A. Colle, 2002: Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 407-430.
- Met. Office, 1998: *Unified Model User Guide*, 200 pp. [Available online at [http://www.ukscience.org/\\_Media/UM\\_User\\_Guide.pdf](http://www.ukscience.org/_Media/UM_User_Guide.pdf).]
- Migliorini, S., M. Dixon, R. Bannister, and S. Ballard, 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*, **63A**, 468-496, doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00503.x.
- Mittermaier, M., N. Roberts, and S. A. Thompson, 2012: A long-term assessment of precipitation forecast skill using the fractions skill score. *Meteor. Appl.*, **20**, 176-186, doi:10.1002/met.296.
- Mylne, K., 2013: Scientific framework for the ensemble prediction system for the UKV. *MOSAC Paper 18.6*, Met Office, 12 pp. [Available online at [http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/q/0/MOSAC\\_18.6\\_Mylne.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/q/0/MOSAC_18.6_Mylne.pdf).]
- Roberts, N. M., 2008: Assessing the spatial and temporal variation in skill of precipitation forecasts from an NWP model. *Meteor. Appl.*, **15**, 163-169.
- \_\_\_\_\_, and H. W. Lean, 2008: Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 78-97.
- \_\_\_\_\_, G. Leoncini, and C. Wang, 2011: Storm-permitting Ensemble. Presentation at 9th International SRNWP-Workshop on Non-Hydrostatic Modelling, 16-18 May, 2011, Bad orb, Germany. [Available online at [http://srnwp.met.hu/workshops/BadOrb\\_2011/Presentations/05\\_Predictability/01\\_Roberts/ROBERTSN\\_SRNWP\\_MAY18\\_2011.pdf](http://srnwp.met.hu/workshops/BadOrb_2011/Presentations/05_Predictability/01_Roberts/ROBERTSN_SRNWP_MAY18_2011.pdf).]
- Saito, K., H. Seko, T. Kawabata, Y. Shoji, T. Kuroda, T. Fujita, and O. Suzuki, 2011: Studies at MRI toward cloud resolving ensemble NWP. *Presentation at 11<sup>th</sup> EMS Annual Meeting*, 12-16 Sep, 2011, Berlin, Germany. [Available online at [http://presentations.copernicus.org/EMS2011-527\\_presentation.pdf](http://presentations.copernicus.org/EMS2011-527_presentation.pdf).]
- Schwartz, C. S., and Coauthors, 2009: Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3351-3372.
- Shin, H. H., and S.-Y. Hong, 2013: Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 3248-3261.
- Weisman, M. L., C. Davis, W. Wang, K. W. Manning, and J. B. Klemp, 2008: Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Wea. Forecasting*, **23**, 407-437.
- Wilson, D. R., and S. P. Ballard, 1999: A microphysically based precipitation scheme for the UK Meteorological Office Unified Model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1607-1636.
- Zacharov, P., and D. Rezacova, 2009: Using the fractions skill score to assess the relationship between an ensemble QPF spread and skill. *Atmos. Res.*, **94**, 684-693, doi:10.1016/j.atmosres.2009.03.004.