

단기 앙상블 예보에서 모형의 불확실성 표현: 태풍 루사

김세나 · 임규호*

서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2014년 7월 11일, 수정일: 2014년 12월 10일, 게재확정일: 2015년 1월 9일)

Representation of Model Uncertainty in the Short-Range Ensemble Prediction for Typhoon Rusa (2002)

Sena Kim and Gyu-Ho Lim*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 11 July 2014; revised 10 December 2014; accepted 9 January 2015)

Abstract The most objective way to overcome the limitation of numerical weather prediction model is to represent the uncertainty of prediction by introducing probabilistic forecast. The uncertainty of the numerical weather prediction system developed due to the parameterization of unresolved scale motions and the energy losses from the sub-scale physical processes. In this study, we focused on the growth of model errors. We performed ensemble forecast to represent model uncertainty. By employing the multi-physics scheme (PHYS) and the stochastic kinetic energy backscatter scheme (SKEBS) in simulating typhoon Rusa (2002), we assessed the performance level of the two schemes. The both schemes produced better results than the control run did in the ensemble mean forecast of the track. The results using PHYS improved by 28% and those based on SKEBS did by 7%. Both of the ensemble mean errors of the both schemes increased rapidly at the forecast time 84 hrs. The both ensemble spreads increased gradually during integration. The results based on SKEBS represented model errors very well during the forecast time of 96 hrs. After the period, it produced an under-dispersive pattern. The simulation based on PHYS overestimated the ensemble mean error during integration and represented the real situation well at the forecast time of 120 hrs. The displacement speed of the typhoon based on PHYS was closest to the best track, especially after landfall. In the sensitivity tests of the model uncertainty of SKEBS, ensemble mean forecast was sensitive to the physics parameterization. By adjusting the forcing parameter of SKEBS, the default experiment improved in the ensemble spread, ensemble mean errors, and moving speed.

Key words: Ensemble prediction, model uncertainty, tropical cyclone forecast, stochastic kinetic energy backscatter

1. 서 론

단기 중규모 수치 예보 모형(short-range, meso-scale

numerical weather prediction model)의 정확도 향상을 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 대기 운동을 묘사하기 위한 방정식계는 비선형 역학 체계(nonlinear dynamic system)이기 때문에 초기 조건(initial condition) 혹은 예측 모형(prediction model)의 작은 불확실성이 예보 오차를 초래할 수 있다. 모델 적분 시간에 따라 예보 오차는 일반적으로 성장한다(Lorenz, 1963). 결정론에 근거한 수치 예보 모형의 한계를 극복할 수

*Corresponding Author: Gyu-Ho Lim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea.
Phone : +82-2-880-6725, Fax : +82-2-887-4890
E-mail : gyuholim@snu.ac.kr

있는 객관적인 방법은 확률론을 도입하여 불확실성을 표현하는 것이다. 그 대표적인 예가 앙상블 예보이다. 실제 대기현상이 존재할 수 있는 확률 분포를 표현하기 위해서 앙상블 멤버들을 구성하고, 그 앙상블 멤버의 스프레드의 정도로 예보의 불확실성을 표현할 수 있다.

수치예보 시스템이 불확실성을 갖는 이유는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 대기 상태를 표현하는 초기 조건 오차(initial condition error)이다. 초기 조건 오차는 관측기기 고유의 오차, 해양과 같은 관측 부족 지역 등 실제 대기를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 발생한다. 초기 조건 오차가 있는 가운데 수치 적분을 하게 되면 모의된 대기 상태는 실제 대기상태로부터 적분과정에서 점점 멀어진다. 수치 적분이 일정 시간 진행된 후의 특정 시점의 대기 상태는 결국 기후 분포에서 임의의 추출한 대기 상태와 다를 바 없다. 다시 말해, 수치 적분의 의미를 잃게 된다. 두 번째로는, 수치모형의 측면 및 지표면의 경계 조건(boundary condition)에서 발생하는 오차이다. 특히 지역 모형에서는 적분 시간이 길어질수록 측면 경계 조건에 의한 영향이 크다. 세 번째로는 대기의 물리 과정(physical process)과 역학 과정(dynamical process)의 표면에서 발생하는 모형 오차(model error)로, 모형이 실제 대기 운동을 묘사하기 위한 모형식에서 나타나는 오차이다. 모형에서 설정된 격자 크기 또는 모형에서 주어진 변수들로는 모의할 수 없는 물리 현상은 모수화(parameterization)를 통해 표현한다. 예를 들어, 적은 대류나 대기경계층과 같은 현상을 모수화하는 과정에서 수치모형의 불확실성이 증가한다. 정리하면, 수치 예보 시스템에서 초기 조건의 오차 및 모형 오차로 인해 예보 오차가 발생하고, 이러한 예보 오차의 불확실성을 앙상블 예보를 통해 표현할 수 있다.

본 연구에서는 위에서 설명한 예보 오차의 원인 중 모형 오차를 주로 다룬다. 대기 모형을 만드는 과정에서 감안한 가정들을 조합해서 앙상블 멤버를 구성한다. 그러한 앙상블 멤버들을 조합하는 과정과 같이 정리할 수 있다.

첫 번째는 다양한 물리 모수화 조합을 사용하여 앙상블을 구성하는 것이다. 기존의 연구들 중에는, 각 물리 모수화 방법들의 오차 가능성을 감안하기 위해 다양한 물리 과정 조합들로 앙상블을 구성하는 multi-physics 및 multi-parameter ensemble (Stainforth et al., 2005), 그리고 여러 수치모형을 사용하여 불확실성을 표현하는 multiple model 앙상블(Houtekamer et al., 1996; Krishnamurti et al., 2000; Hagedorn et al., 2005)이 이용되었다.

두 번째는 확률론적인 방법에 근거하여 모형의 격자 규모로 표현하지 못하는 아격자 규모(sub-grid scale)

의 현상을 매개 변수화하는 것이다. Palmer (2001)가 결정론적 모형(deterministic model)의 불확실성을 감안하고자 확률론적 모형[stochastic dynamic model (Epstein 1969)]을 제안했다. 이는 multi-physics, multi-parameter 그리고 multi-model 앙상블과는 다르게, 물리 모수화를 비롯한 수치 모형에서 피할 수 없는 불확실성을 확률적으로 감안하여 앙상블을 구성하는 방법이다. Shutts (2005)는 수치모형 적분 중 손실된 에너지를 Cellular Automation Stochastic Backscatter Scheme (CASBS)이란 방안을 이용하여 역으로 재주입 시키는 방법을 고안하였다. 여기서 처음 소개한 Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (SKEBS) 개념은 ECMWF 증장기 앙상블 예보에 적용하여 수치예보의 정확도 및 확률 예보를 향상시켰다(Berner et al., 2009). 또한, 물리적 경향성(tendency)의 불확실성을 표현하기 위한 stochastic physics parameterization tendency (Buizza et al., 1999) 방법은 현재에도 ECMWF, UK Met Office 등을 비롯한 해외 기상청에서 현업 앙상블 예보에 사용하는 방법이다.

서로 다른 모형 오차방법을 비교한 이전 연구들도 있었는데, Doblas-Reyes et al. (2009)은 multi-model, multi-parameter, 그리고 stochastic perturbation을 섭동을 주지 않은 단일 모형 시스템(unperturbed single-model systems)과 비교하여 보다 더 향상된 결과를 보였다. 하지만 이 실험은 각기 다른 모형에서 모형 오차 방안을 수행하였기 때문에 어느 모형 오차 방안이 효과적이라고 결론지을 수는 없었다. Berner et al. (2011)은 multi-physics scheme 과 stochastic kinetic energy backscatter scheme (SKEBS)의 두 가지 모형 오차 표현 기법 (model error representation scheme)을 비교 실험하여 단기 앙상블 예보에 적용하였다. 해당 연구에서는 모형 오차를 고려하지 않고 경계 조건만 달리 한 기준 앙상블 예보보다, 두 모형 오차 표현 방안이 상당히 향상된 결과를 보였다. 그리고 전반적으로 지표 근처를 제외하고는 SKEBS가 multi-physics 방안보다 우수하였다. Hacker et al. (2011)에서는 단기 앙상블 예보를 위해 여러 모형 오차를 고려, 비교해서 하층 예보가 얼마나 좋아지는지를 중점적으로 분석하였다.

본 실험에서는 이러한 선행 연구들을 바탕으로, 모형의 오차를 고려할 경우 동아시아 지역 태풍 예보에 있어 단기 앙상블 예보가 얼마나 향상될 수 있는지 확인해 보고자 한다. 특히 Berner et al. (2011)의 논의 진행 방식을 따르기로 한다. 해당 논문에서는 미국 전역의 단기 예보 결과에 대한 논의가 이뤄졌다면, 본 연구에서는 동아시아 지역 태풍 모의에 대한 실험을 수행하고자 한다. WRF 지역모형을 기반으로 multi-physics 방안과 SKEBS, 두 가지 모형 오차 표현 방법을 적용하여 앙상블 예보를 수행한다. 한반도에 상

특한 태풍 루사(Rusa)의 사례에 적용하여 수치예보 모형 오차를 고려한 경우 태풍 경로 및 기상 변수 예보에 어떤 영향을 미치는지 비교 분석한다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료 및 모형 설정

태풍 모의를 위해서 모형의 초기 조건 자료로 ERA-Interim 재분석자료를 사용하였다. ERA-Interim 재분석 자료는 6시간 간격으로 제공되며 수평 공간 해상도는 약 0.7×0.7 degree이고, 연직층은 1000 hPa부터 1 hPa까지 37개 층으로 이루어져 있다. 본 연구의 모형에 사용된 지표 변수는 10 m 수평 바람, 2 m 이슬점 온도, 2 m 온도, land-sea mask, 평균해면기압, 표층수온, 적설밀도, 토양온도, 토양수분, 지상기압이다. 연직 기압면에 해당하는 변수는 지위고도(geopotential), 기온, 바람, 상대습도이다(Dee et al., 2011).

WRF 모형의 태풍 예보 결과와 실제의 태풍 진로 및 강도를 비교하기 위하여 Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) Tokyo 태풍 센터에서 제공하는 RSMC Best Track 자료를 사용하였다(<http://www.jma.go.jp/jma/eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>). 이 자료는 태풍이 소멸한 후 추가로 수집된 위성자료와 AWS, SHIP 자료 등을 활용하여 분석 자료를 구성하는 과정을 거친다. 그 후 일관성 검사(consistency check)를 수행한다. RSMC best track 자료는 북서태평양에서 발생하는 모든 태풍에 대한 정보를 가지고 있어서 태풍의 모의를 검증하는 데 유용한 자료로 사용될 수 있다. 자료는 6시간, 혹은 3시간 간격으로 태풍의 위치, 중심기압, 최대풍속, 강풍 반경 등의 정보를 제공한다.

2.2 WRF 모델 및 모델 설정

본 연구에서 사용한 수치 모형은 Weather Research and Forecasting (WRF) version 3.5 (Skamarock; Klemp, 2008)이다. WRF 모형의 수평해상도를 20 km로 설정함과 동시에 지역적으로 200×200 격자수로 모형 실험을 수행하였다. 또한 태풍을 효과적으로 모의하기 위하여 연직으로 42개의 층으로 구성하였으며, 모형의 최상층은 10 hPa이다.

적분을 60초의 시간 간격으로 2002년 8월 27일 1200 UTC부터 2002년 9월 1일 1200 UTC까지 120시간 동안 수행하였다. 태풍 모의의 시작 시간은 다음 기준에 고려하여 결정하였다. 본 연구의 목적은 예보 오차에서 모형 오차를 중점적으로 다루는 것으로, 예보 오차에서 초기 조건 오차를 최대한 배제하기 위해 best track 상의 태풍 중심 위치와 ERA-interim에서 표현된 태풍의 평균해면기압 최소 지점을 비교하여 그 둘 사

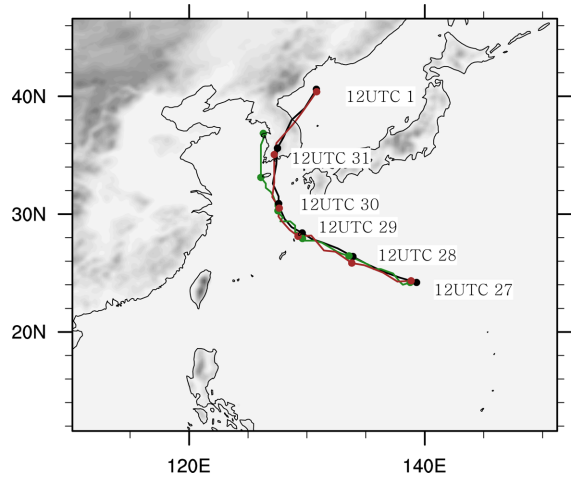


Fig. 1. WRF model domain configuration and tracks of Typhoon Rusa from RSMC best track (black), Era-interim (brown) and control run (green) from 1200 UTC 27th Oct. 2002 to 1200 UTC 1st Sep. 2002. Dots denote the positions of tropical cyclone every 24 hrs.

이의 거리가 가장 짧은 시점을 선택하였다. 루사 모델 수행을 위한 도메인 영역 설정은 Fig. 1과 같다. 도메인의 중심위치는 모형 적분시간 120시간 동안의 태풍 루사 best track상의 위·경도 값을 전체 평균하여 설정하였다.

2.3 Multi-physics Scheme 앙상블 멤버 구성 방법

Multi-physics 앙상블 방안(이하 PHYS)은 적은 모수화, 미시물리 모수화와 같은 모수화 과정마다 모수화 방법의 선택을 서로 다르게 조합한다. 이를 통해, 모수화 선택에 따른 모형 오차의 불확실성을 앙상블을 통해 표현할 수 있다. 본 연구에서 사용한 PHYS 조합은 Table 1에 제시하였다. 각 물리 모수화 기법의 자세한 설명은 Skamarock; Klemp (2008)에 있다. 조합의 선택 기준은 다음과 같다. PHYS 앙상블 멤버들은 서로 최대한 독립적이어야 하며, 모수화 방법이 최대한 골고루 선택되어야 한다. 또한 선택한 조합 중 루사 모의에 실패, 다시 말해 모의 중 태풍이 소멸되어 버리는 조합을 배제하였다. 규준 실험(이하 CTRL)은 Table 1의 첫 번째 멤버로 선택한다.

2.4 Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme 앙상블 멤버 구성 방법

Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (이하 SKEBS)은 수치 모형이 표현하지 못하는 아격자규모 운동이 유발하는 모형의 불확실성을 확률론적으로 표현하는 방법이다. 수치 모형에서는 작은 규모의 운동

Table 1. Configuration of the multiphysics Ensemble. Betts-Miller (BM), Community Atmosphere Model (CAM), Kain-Fritsch (KF), Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), Rapid Radiative Transfer Model (RRTM), Rapid Update Cycle (RUC), WRF Single-Moment 6-class (WSM6), and Yonsei University (YSU). Morrison double-moment (WDM6).

Member	Land surface	Microphysics	PBL	Surface layer	Cumulus	Longwave	Shortwave
1	Noah-MP	WSM6	YSU	YSU	Tiedtke	RRTMG	RRTMG
2	Noah-MP	Morrison	MYNN3	MYNN	Tiedtke	Dudhia	Goddard
3	Noah-MP	Ferrier	ACM2	ACM2	BM	RRTMG	Dudhia
4	Noah-MP	WSM6	MYNN3	MYNN	BM	Goddard	RRTMG
5	Noah-MP	Thompson	YSU	YSU	KF	CAM	CAM
6	Noah-MP	Ferrier	ACM2	ACM2	KF	Goddard	Dudhia
7	Noah-MP	WDM6	MYNN3	MYNN	Tiedtke	Dudhia	Goddard
8	Noah-MP	Morrison	MYNN3	MYNN	New SAS	CAM	CAM
9	Noah-MP	Thompson	ACM2	ACM2	New SAS	CAM	CAM
10	Noah-MP	WDM6r	YSU	YSU	BM	RRTMG	Goddard

을 표현할 때 실제 대기에 대비하여 에너지 손실이 나타난다(Skamarock, 2004). 이를 보완하기 위해 SKEBS는 모형 변수에 각 적분 시간마다 손실되었다고 가정하는 에너지만큼을 역으로 주입한다. 하지만 어느 지역, 어느 시점에 에너지를 주입해야 할지 알 수 없다. 따라서 수치모형의 격자에 기반한 무작위 섭동(random perturbation)을 푸리에 모드 형태로 만들어 시공간적으로 상관된 형태를 가지게 한다. 단, 시공간적으로 상관되는 양상은 각 앙상블 멤버 사이에서는 독립적이어야 한다. 이를 바람장과 온도 변수에 더해 준다. 이렇게 소규모의 형태로 주입된 에너지가 모델 적분 과정에서 대규모의 대기 운동을 변화하여(backscattered) 전체적인 대기의 흐름을 바꾸게 된다는 것이 SKEBS의 기본원리이다(Shutts, 2005).

2.5 앙상블 예보 결과 검증 방법

앙상블 예보의 목적 중 하나는 실제 대기 상태가 존재할 수 있는 확률 분포를 앙상블 멤버들로 표현하는 것이며, 앙상블 멤버 중 하나 혹은 일정 멤버의 조합은 실제 대기 상태(true)를 대표할 수 있다고 기대한다. 앙상블 예보의 결과가 위와 같은 목적을 달성하였는지 확인하는 방법은, 앙상블 예보 평균의 오차(RMSE, root mean squared error)와 스프레드(spread)를 비교하는 것이다. RMSE는 앙상블 멤버들의 평균과 실제 사이의 차이를 제공한 값이다. 스프레드는 각 앙상블 멤버들의 표준편차이다. RMSE와 스프레드에 대한 기대 값은 다음과 같이 계산될 수 있다. \bar{f} 는 앙상블 평균 예보, obs 는 실제 값, N 은 앙상블 멤버 수, f_i 는 i 번째 멤버의 예보, σ^2 는 실제 값이 존재할 수 있는 확률 분포의 분산을 의미한다.

$$E(\sqrt{(\bar{f} - obs)^2}) = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{N}\right)\sigma^2}, \quad (1)$$

$$E\left(\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}\right) = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{N}\right)\sigma^2}. \quad (2)$$

즉 앙상블 멤버 수 N 이 무한대로 커지는 경우, RMSE와 스프레드는 같아진다. 다시 말해, 앙상블 멤버들이 실제 값이 존재할 수 있는 확률 분포를 잘 표현한 경우, RMSE와 스프레드는 비슷한 값을 갖는다. 그리고 RMSE가 스프레드보다 큰 경우, 실제 값이 존재할 수 있는 확률 분포를 앙상블 멤버들이 과소 모의한 것이며(under-dispersive), 반대의 경우는 앙상블 멤버들이 과대 모의한 것이다(over-dispersive).

3. 모의된 앙상블 평균 오차 및 앙상블 스프레드 분석

2002년에 발생한 15호 태풍 ‘루사(Rusa)’를 2002년 8월 27일 1200 UTC부터 9월 1일 1200 UTC까지 5일 동안 모의하였다. 2002년 8월 22일에 비키니 제도 근처에서 발생한 열대 저기압이 8월 23일에 괌 북동쪽 1800 km에서 태풍으로 발달하여 루사로 명명되었다. 루사는 다음 날인 24일에 강도 중, 크기 중의 태풍으로 성장했고, 26일에 이르러서는 대형 태풍으로 성장하였다. 그 후 계속 북서진 하여 중심기압을 950 hPa, 최대 풍속 45 m s⁻¹ 이상의 강한 태풍으로 세력을 유지하면서 한반도에 상륙하였다.

3.1 태풍 경로

Figure 2는 앙상블 모형 수행 결과의 태풍 중심 위치와 best track 에 근거한 위치를 나타낸 것이다(본 연구에서는 best track에 오차는 없다고 가정한다.). PHYS, SKEBS 앙상블 평균 경로 모두 북위 28도 부근까지 best track과 거의 유사한 경로를 모의하였다.

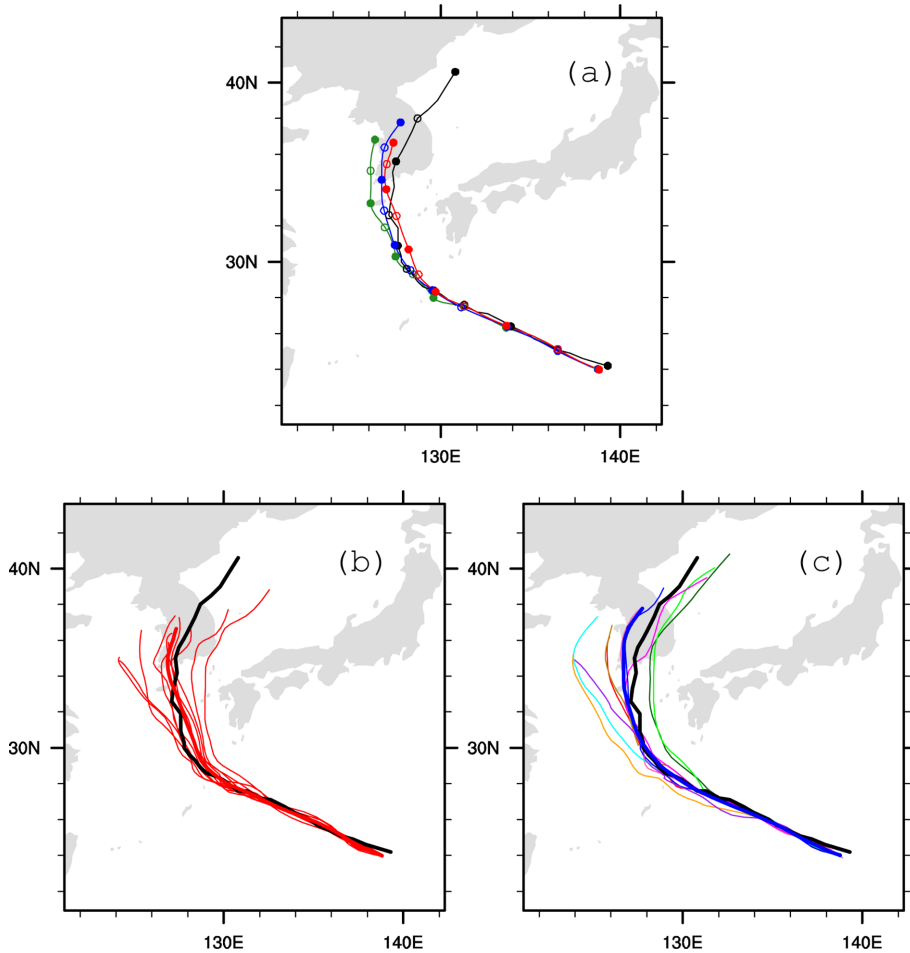


Fig. 2. Results from typhoon Rusa ensemble predictions. (a) Ensemble mean track. RSMC best track (black), Control run (green), PHYS (blue) and SKEBS (red) with open circle for every 0000 UTC, closed circle for every 1200 UTC (b) RSMC best track (black), SKEBS ensemble mean (thick red) and SKEBS 10 members (thin red) (c) RSMC best track (black), PHYS ensemble mean (thick blue) and PHYS 10 members (multiple colors, color configuration for each member will remain same here after).

이는 태풍 모의 시작 시점을 정할 때 태풍 중심 위치의 관점에서 오차가 가장 작은 시점을 선택한 것에 대한 영향으로 해석할 수 있다. 앙상블 평균 관점에서 SKEBS는 북위 32도에 도달한 후 best track보다 느린 북상 속도를 모의하였다. PHYS 앙상블 평균 경로는 SKEBS보다는 빠른 북상 속도를 모의하였지만, 여전히 best track에 비해 느린 북상 속도를 보인다. Figure 2a에서, CTRL 경로는 서해상으로 지나 간 반면 PHYS, SKEBS 앙상블 평균 경로는 한반도에 상륙하였다. Figure 3a에서 정량적으로 살펴본 경우, 84 시간 이후로 태풍 중심 위치 오차가 커지는데, 이는 대부분 태풍 북상속도를 실제보다 느리게 모의하였기 때문이다. CTRL, SKEBS, PHYS 순으로 태풍 중심

위치 모의가 향상되었다고 볼 수 있다.

CTRL, SKEBS 두 실험 사이에는 태풍의 진행 방향의 차이만 있을 뿐 태풍 북상 속도는 거의 차이가 없다. SKEBS서 사용한 물리 모수화 조합은 CTRL과 동일하다. 따라서 태풍 북상 속도 모의의 차이가 발생하는 이유는 CTRL 및 SKEBS에서 사용한 특정 물리 모수화 방법 때문이라 생각한다. 실제보다 모의 결과가 특정 물리 모수화 방법의 선택 등 특정 요인에 의해 어느 한 쪽으로 치우치는 양상을 “체계적 편향 (systematic bias)”이라 한다. PHYS 실험에서는 이러한 체계적 편향이 여러 물리 모수화 방법의 조합으로 인해 개선되는 것처럼 보인다.

그러나 체계적 편향의 개선은 앙상블 예보를 통해

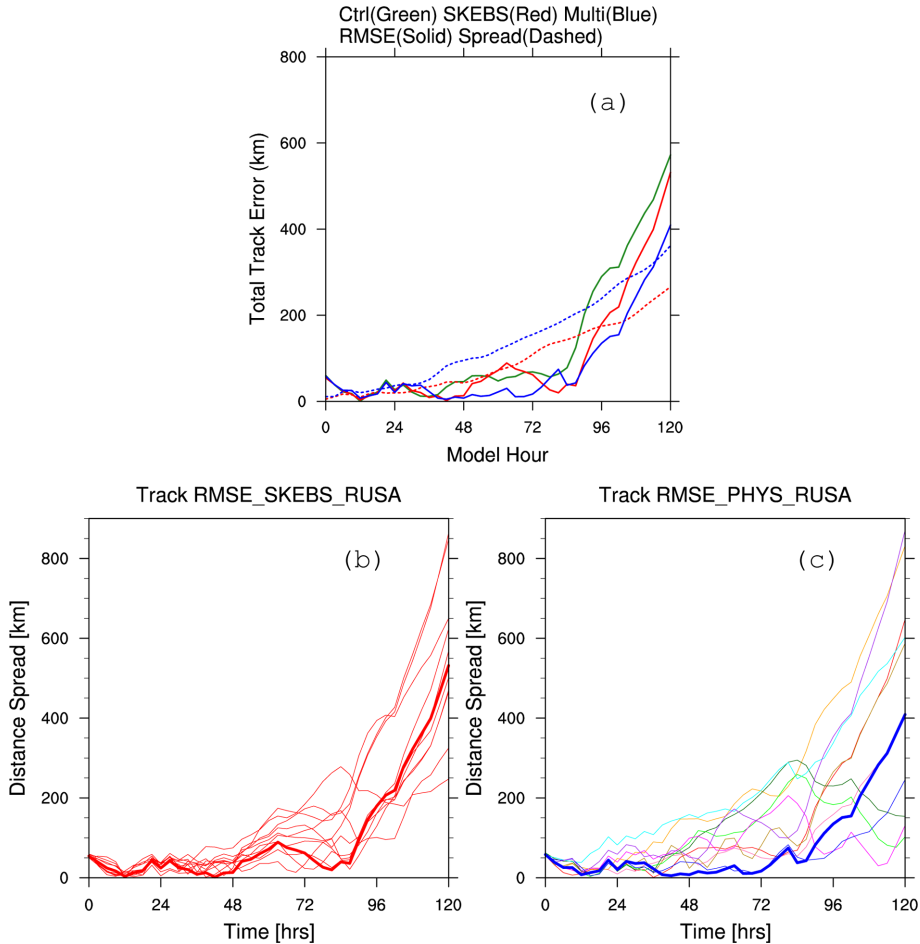


Fig. 3. Track errors (km) for SKEBS and PHYS ensemble prediction. (a) Track error for control run (green), SKEBS ensemble mean (red) and PHYS ensemble mean (blue). SKEBS (dotted red) and PHYS (dotted blue) ensemble spread for reference. (b) Track error for SKEBS ensemble mean (thick red) and SKEBS ensemble members (thin red). (c) Track error for PHYS ensemble mean (thick blue) and PHYS ensemble members (thick multiple colors).

개선되는 것이 아니다. 체계적 편향의 개선은 물리 모수화와 같은 특정 요인의 개선을 통해 이루어내는 것이지 앙상블 예보를 통해 개선 될 수 없다. 앙상블 예보의 목적은 수치 모의 결과가 가질 수 있는 “불확실성”을 앙상블 멤버들을 통해 표현하는 것이다. 그러나 체계적 편향은 한 방향으로 일관되게 치우쳐진 것을 의미하며, 이는 더 이상 “불확실”하지 않음을 의미한다. 따라서 앞으로의 결과 분석에서 모형 오차의 불확실성 표현과 체계적 편향은 서로 별개의 것으로 감안하여야 할 것이다.

3.2 태풍 강도 및 크기

Era-interim 자료는 수평 격자 간격이 약 70 km로 태풍 중심의 조밀한 대기현상을 표현하기엔 부족하다.

그로 인해 Era-interim 자료에서 표현하는 태풍 중심 최저 기압은 실제보다 높아 초기 조건의 오차를 무시할 수 없다. 이를 Fig. 4에서 확인할 수 있는데, best track은 태풍 모의 시작 시점에 955 hPa인 반면, WRF 모형에서는 990 hPa 정도로 그 차이가 매우 크다. 따라서 앞 절에서 태풍 중심 거리 오차를 살펴 볼 때 초기 조건의 오차는 무시했던 반면 강도 관점에서는 그러한 오차를 무시할 수 없다. 따라서 태풍 강도 측면에서 모형의 오차를 적절히 살펴보는 것엔 어려움이 있다.

중심 기압 모의의 SKEBS 앙상블 평균 값은 CTRL과 비슷한데, 이는 태풍 중심 위치 모의와 비슷한 양상이다. 마찬가지로 PHYS의 경우 CTRL, SKEBS와 양상이 다르며 이는 서로 다른 물리 모수화 선택에

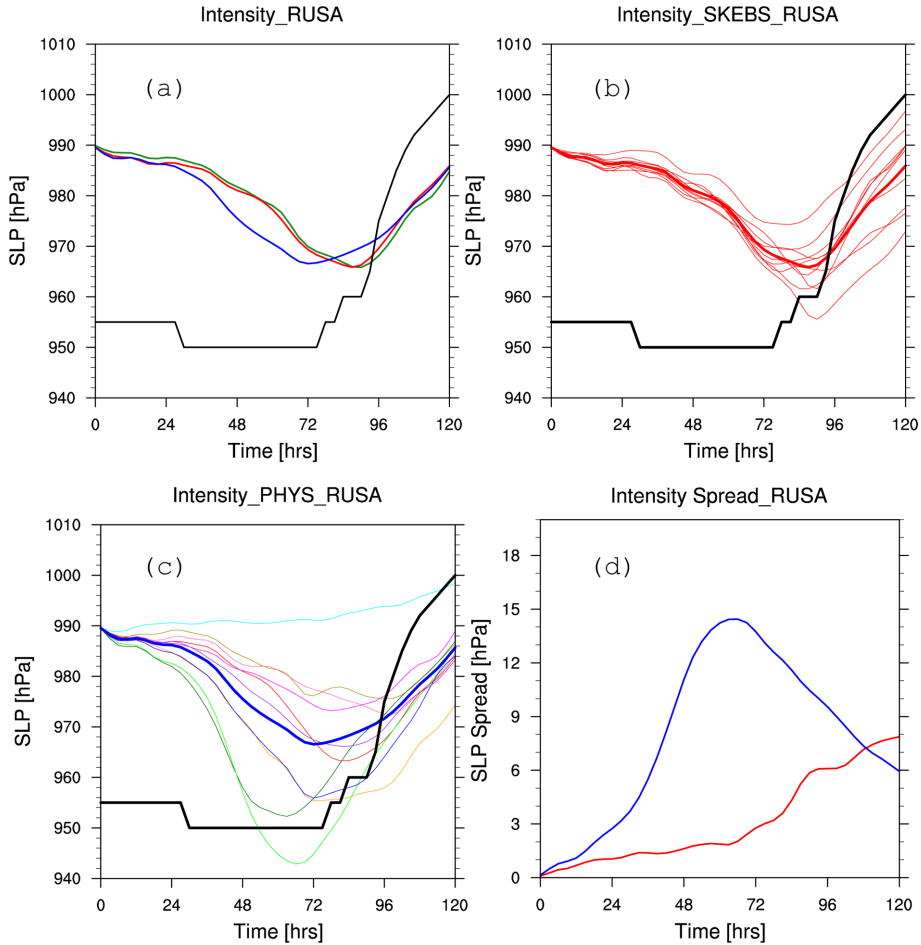


Fig. 4. Minimum sea level pressure (hPa) at the center of typhoon Rusa. (a) RSMC best track (black), control run (green), SKEBS ensemble mean (red) and PHYS ensemble mean (blue). (b) SKEBS ensemble mean (thick red) and SKEBS ensemble members (thin red). (c) PHYS ensemble mean (thick blue) and PHYS ensemble members (thick multiple colors). (d) Ensemble spread of Minimum sea level pressure (hPa) for SKEBS ensemble (red) and PHYS ensemble (blue).

따른 것으로 보인다. 앙상블 스프레드 관점에서 PHYS가 SKEBS보다 컸는데 이는 마찬가지로 각기 다른 물리 모수화 조합의 선택에 따른 것으로 볼 수 있다. PHYS 앙상블 멤버 별 그림에서 상대적으로 빠르게 발달하는 멤버들도 있고 오히려 약화되는 멤버도 있어, 이러한 멤버들이 PHYS 실험의 전체적인 스프레드를 증가시켰다. 그러나 PHYS 실험이 SKEBS 실험보다 수치 모의의 불확실성을 더 크게 표현했다고는 결론지을 수 없다. 3.1절에서 기술한 것처럼 태풍 강도 모의에도 물리 모수화 선택에 따른 “체계적 편향”을 감안해야 하기 때문이다.

Best track에는 태풍 강풍 반경에 대한 변수를 제공하지만, 그 형태가 8방위로 나누어 그 중 가장 큰 반경과 가장 작은 반경을 제공하여 WRF 모의 결과

와 비교하기가 어렵다. 따라서 태풍 크기 분석의 경우엔 Era-interim 재분석 자료와 비교하여 실험을 수행하였다.

태풍이 한반도로 북상하였을 경우 지표면 풍속은 육상의 마찰에 의해 크게 감소한다. 비슷한 구조를 가지는 태풍이라도 육상에 근접한 태풍과 해상에 머무는 태풍의 강풍 반경은 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서 지표면에 의한 영향을 최대한 배제하기 위해 850 hPa 기압면의 풍속을 사용하였으며, 여기서는 풍속이 25 m s^{-1} 이상인 곳의 넓이를 태풍의 크기로 정의하였다.

태풍의 강풍이 나타나는 구역, 줄여서 태풍의 크기가 어떤 요인에 의해 결정되는지에 대해선 알려진 점이 많지 않은 것으로 보인다. 최근의 대표적인 연구

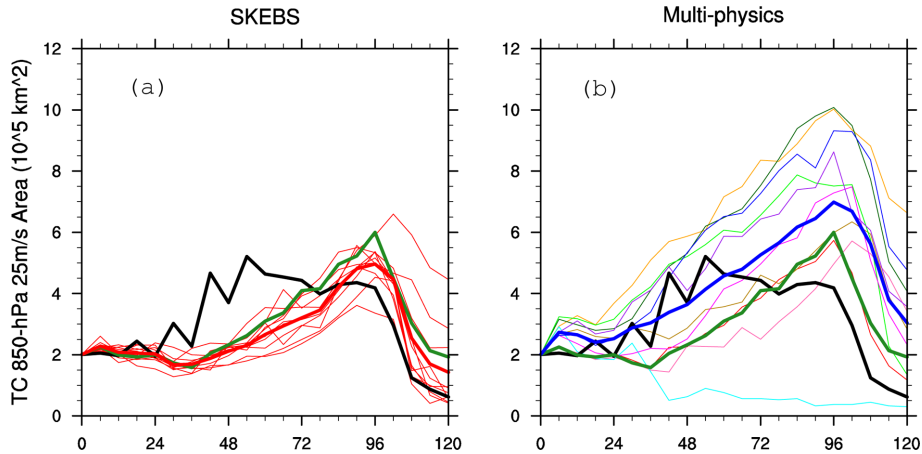


Fig. 5. Area (10^5 km^2) that wind speed exceeded 25 m s^{-1} on 850 hPa around tropical cyclone center. (a) Era-interim (black), control run (green), SKEBS ensemble mean (thick red) and members (thin red). (b) Era-interim (black), control run (green), PHYS ensemble mean (thick blue) and members (multiple colors).

는 Hill and Lackmann (2009)으로 태풍 주변의 상대 습도가 낮을수록 태풍의 크기는 감소한다는 연구 결과가 있다. 해당 논문에서는 주변 상대습도 감소로 인해 태풍 주변의 강수강도가 약해지고 최종적으로 태풍의 크기가 감소한다는 결과를 보여준다. 비록 상대 습도 하나의 요인만을 본 논문이지만, 태풍 중심의 바깥 쪽 강수 강도에 따라 태풍의 크기가 바뀔 수 있다는 점을 시사한다. 따라서 물리 모수화 조합의 선택에 따라서 태풍 주변의 상대습도 모의 및 강수 분포의 모의가 달라질 수 있으며, 이러한 차이가 SKEBS, PHYS 사이의 차이를 발생시킬 수 있을 것이다.

Figure 5에서, SKEBS 앙상블 평균의 경우 CTRL 실험보다 태풍 크기가 작게 모의되었다. 이는 지표면의 마찰 효과를 감안한 850 hPa 기압면이지만, 태풍 상륙으로 인한 태풍의 전체적인 강도 약화에 의한 태풍 크기 감소 효과는 제거할 수 없다. 따라서 서해상으로 빠진 CTRL보다 앙상블 멤버들이 주로 남해상에 상륙한 SKEBS와 PHYS의 크기 감소가 상대적으로 더 큰 것으로 보인다. 태풍 크기 관점에서도 체계적 편향의 가능성을 감안하여야 한다.

Figure 5에서 PHYS의 앙상블 스프레드가 SKEBS보다 큰 것으로 보인다. 그러나 이를 SKEBS에서 모의하는 불확실성의 정도가 PHYS에서 모의하는 불확실성의 정도보다 작다고 단정하기는 어렵다. PHYS 각 멤버 별로 각기 다른 물리 모수화 조합을 사용하였으며, 그에 따라 태풍의 구조 모의가 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 체계적 편향의 효과를 감안하기 위해서는, 지금의 단 하나의 사례만으로는 힘들며 향후 많은 태풍 사례를 추가하여 통계적인 분석을 시도하여야 할 것이다.

3.3 RMSE 및 스프레드 공간 분포

앙상블 예보의 목표 중 하나는 실제 값이 존재 가능한 확률 분포를 앙상블 멤버를 통해 표현하는 것이다. 2.5절의 Error-Spread consistency를 확인하여 그러한 목표가 달성되었는지를 확인할 수 있다.

예보 96시간의 850 hPa 기온장의 RMSE 및 스프레드 공간분포를 살펴보면(Fig. 6) CTRL, PHYS, SKEBS 실험 모두 태풍 주변에서 큰 RMSE 값을 보인다. 전체 도메인에 대한 RMSE 평균 값은 CTRL의 결과는 0.97, SKEBS의 결과는 0.83, 그리고 PHYS의 결과는 0.72 값을 나타내는 것으로 보아 SKEBS와 PHYS 앙상블 방법을 통해 전체적인 오차가 감소한 것으로 보인다. 다만 전체적인 값은 SKEBS가 더 크지만 특히 태풍 중심 남서쪽에서는 PHYS의 RMSE가 더 크게 모의되었다. 스프레드 관점에서 SKEBS는 전체 영역 평균이 0.6으로 나타나 RMSE와 비교했을 때 과소 모의하였고(under-dispersive) PHYS는 1.05로 과대 모의한 경향이 있다. 태풍 주변의 분포만 살펴보았을 때 SKEBS는 앙상블 모의 결과가 과소 모의한(under-dispersive, $\text{RMSE} > \text{스프레드}$) 경향을 보인다. PHYS는 RMSE에 비교하여 상대적으로 과대 모의한(over-dispersive, $\text{RMSE} < \text{스프레드}$) 경향이 보인다. 태풍 순환과 별개로 일본 동쪽 해상에서 RMSE가 높은 구역이 있다. SKEBS에서는 불확실성을 거의 표현하지 못한 반면 PHYS에서는 위치적인 차이가 있지만 어느 정도는 RMSE에 대응되는 스프레드 구역이 나타난다.

모의된 태풍의 중심 부근에서 스프레드가 큰 경향을 보이는데 이는 앙상블 멤버별 태풍 위치 차이 및 강도 차이에 의한 것으로 보인다. 그러한 경향은 SKEBS, PHYS 실험에서 유사하게 나타난다. 그러나

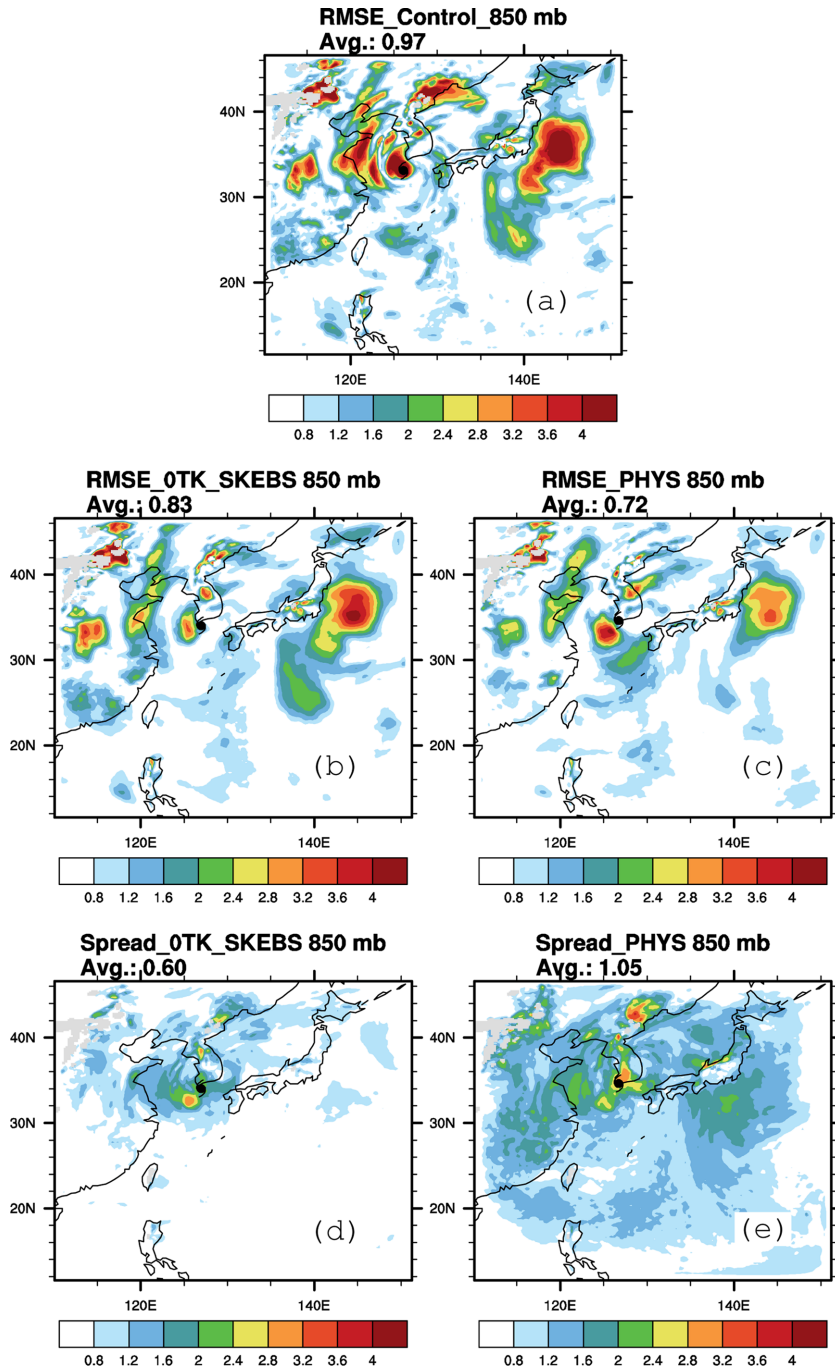


Fig. 6. Spatial distribution of 96-hr 850 hPa temperature RMSE and spread (K). (a) RMSE of control run, (b) SKEBS ensemble mean RMSE, (c) PHYS ensemble mean RMSE, (d) SKEBS spread and (e) PHYS spread.

스프레드는 앙상블 멤버간의 차이를 나타내는 변수라면 RMSE는 앙상블 평균과 실제 값과의 차이를 보여주는 값이다. 이러한 관점을 태풍이라는 현상에 적용

하면, 태풍 중심부근에서 기온의 RMSE가 큰 이유는 아마도 SKEBS, PHYS 앙상블 평균 태풍 경로의 실제보다 느린 북상 속도와 연관되었다. 북상 속도 차

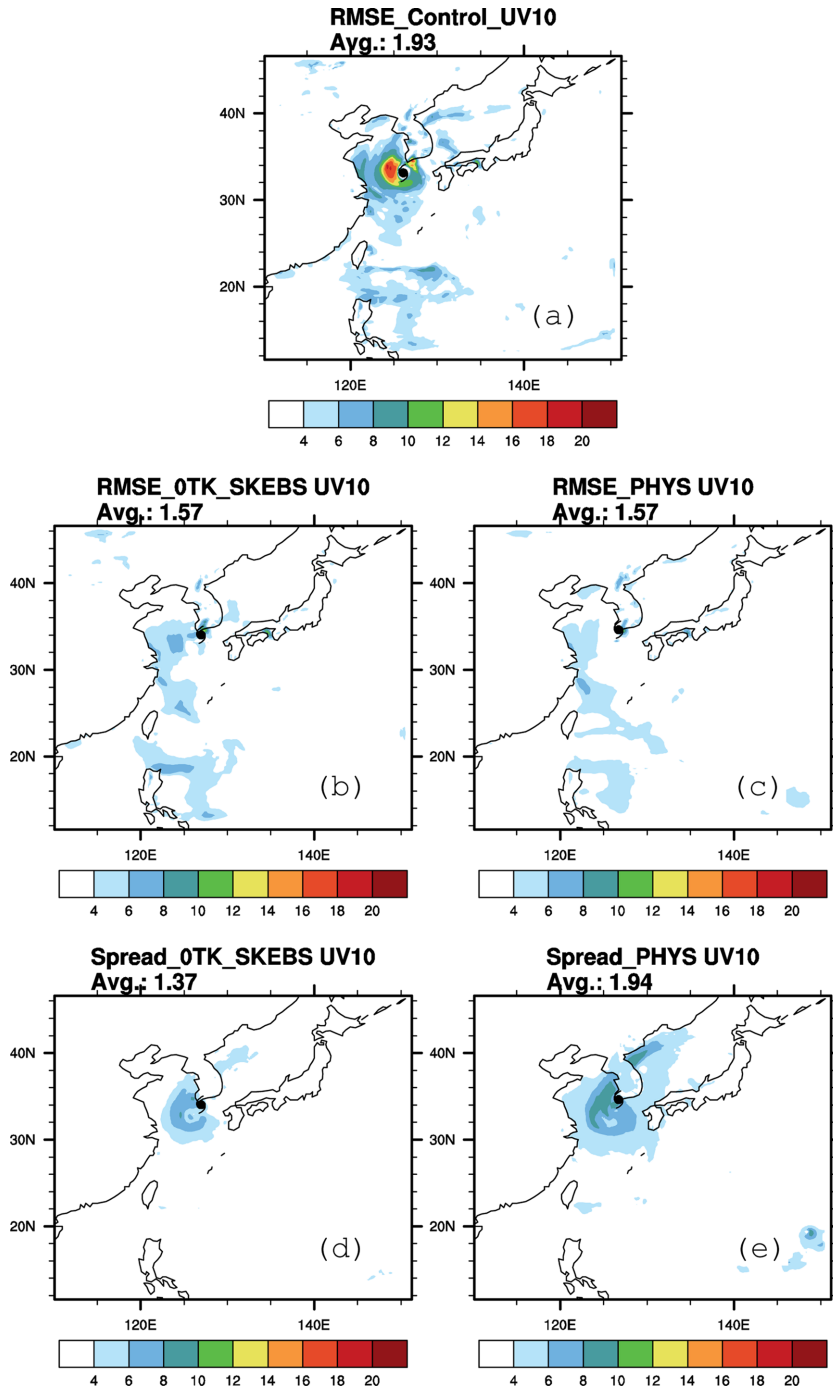


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for 10 meter wind speed ($m s^{-1}$).

이에 따른 태풍 주변 공기 흐름의 차이가 나타나고 곧 주변 기온 모의의 큰 오차가 나타날 수 있으며, 그러한 차이가 RMSE로 나타나는 것이다. 향후 추가 사

례 모의를 통한 통계적 분석을 통해 태풍 주변의 RMSE 및 스프레드의 양적 분포가 본 연구의 루사에만 국한된 양상인지 다른 태풍 모의에서도 유사하게

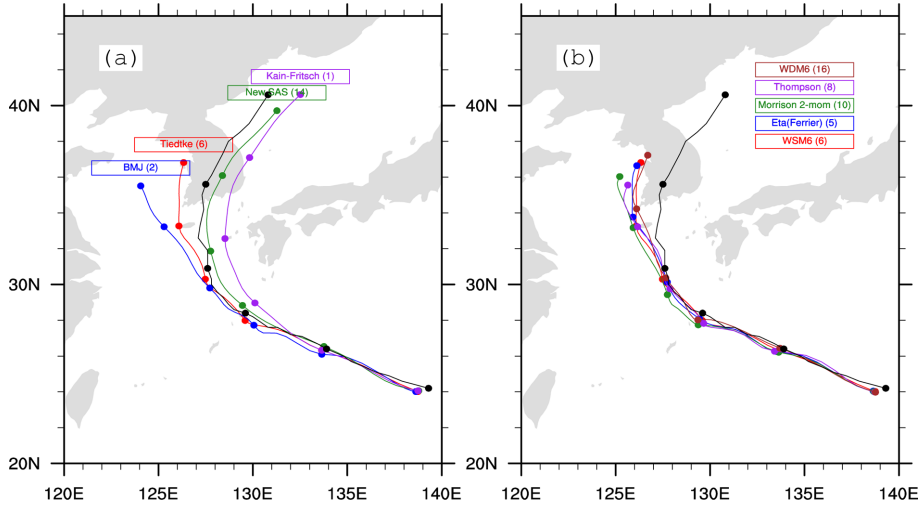


Fig. 8. Typhoon track sensitivity test for (a) cumulus parameterizations and (b) microphysics parameterizations. Dots for 24 hourly positions. Black track corresponds to RSMC best track.

나타나는지 확인할 필요가 있다.

이어서 지상 10 m 풍속장의 공간분포를 살펴보면 (Fig. 7), CTRL에서 오차는 태풍 주변에서 상당히 크며 오차의 전체평균 값이 1.93이다. 하지만 SKEBS와 PHYS 실험에서는 전체적인 오차가 상당히 감소하였고 두 경우 모두 오차의 전체평균 값이 1.57이다. Spread값을 확인해 보면 전체격자에 대한 spread 평균 값은 SKEBS의 경우 1.37로 과소 모의(under-dispersive)된 경향이 있고, 이와 반대로 PHYS의 결과는 1.94로 과대 모의(over-dispersive)된 경향이 있다. 이러한 경향은 앞서 850 hPa 기온장 결과와 유사하다. 태풍 주변의 SKEBS의 결과는 RMSE와 스프레드가 유사한 경향을 보이고, 반면 PHYS의 결과는 RMSE 대비 스프레드가 과대 모의(over-dispersive)한 경향이 보인다. 전체적으로 두 앙상블 스킴을 통하여 기온과 바람의 앙상블 평균 오차는 CTRL에 비해 개선되었고, 특히 SKEBS의 결과가 PHYS의 결과보다 태풍주변의 온도와 바람 모의의 불확실성을 더 잘 표현한 것으로 보인다.

4. SKEBS 방안에서 모형 불확실성 표현에 대한 민감도 실험

SKEBS 방안을 이용하여 민감도 실험을 하였다. 앞서 실험에서 물리 모수화에 따라 SKEBS 평균 예보가 크게 달라지는 것처럼 보였는데 이를 서로 다른 물리 모수화 선택에 따른 민감도 실험으로 확인하려 한다. 또한 앙상블 개수를 늘려 모의해 보고 마지막으로 SKEBS 조절 변수의 에너지 재주입 정도를 달리하거나 상관성 완화 시간(decorrelation time)을 다르게 설

정하여 SKEBS 앙상블 스킴에 대한 민감도 실험을 수행하였다. 이를 통해 SKEBS 방안의 성질을 파악하고 좋은 앙상블 모의 결과를 얻기 위한 요건을 파악한다.

4.1 적은 모수화에 따른 민감도

적은 모수화과정의 선택에 따른 태풍 모의의 민감

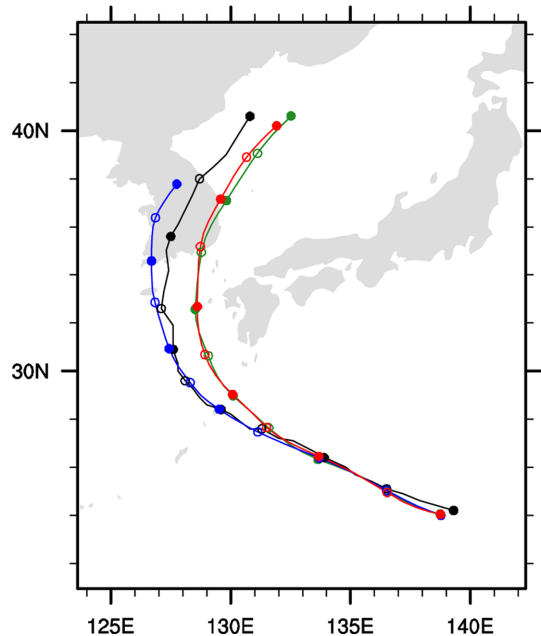


Fig. 9. Same as Fig. 2a except using Kain-Fritsch cumulus parameterization.

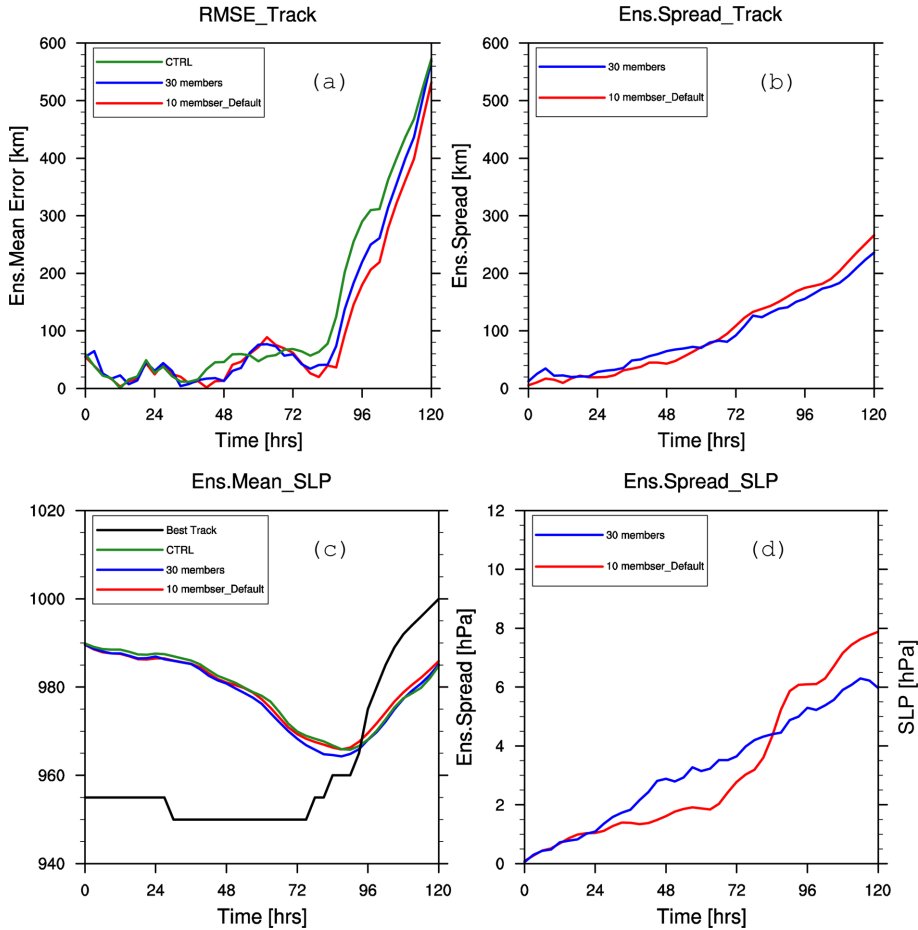


Fig. 10. SKEBS sensitivity test results for ensemble size. (a) Typhoon track RMSE (km) for control run (green), 10 members run (red) and 30 members run (blue) and (b) spread for 10 members run (red) and 30 members run (blue). (c) Typhoon minimum sea level pressure (hPa) for RSMC best track (black), control run (green), 10 members run (red) and 30 members run (blue) and (d) spread for 10 members run (red) and 30 members run (blue).

도를 보기 위한 실험이다. 본 실험에서는 미시물리 (microphysics) 모수화나 지표면(land surface) 모수화 (figure is not shown)에 비해 상대적으로 적운(cumulus) 모수화의 변화에 따라 모의 결과가 크게 달라진 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8). 적운 모수화에 대한 민감도 실험을 하기 위해 적운 모수화를 Tiedtke에서 Kain-Fritsch로 바꾸고 그 외의 다른 물리 모수화는 동일하게 설정하였다. Tiedtke 적운 모수화를 사용한 SKEBS 앙상블 멤버들은 태풍의 북상속도를 상대적으로 느리게 표현한 반면(Fig. 2), Kain-Fritsch 적운 모수화를 사용한 SKEBS 앙상블 멤버들은 실제 경로보다 다소 동쪽으로 치우치긴 했지만 5일 후 최종 북상지점은 실제 경로와 유사한 결과를 보였다(Fig. 9). 이러한 북상 속도 모의의 차이가 적운 모수화의

특성에 따른 고유의 차이에 의한 것으로 생각된다. 즉 이러한 차이에 의해 체계적 편향이 발생했다고 할 수 있으며, 물리 모수화 선택에 따른 체계적 편향 때문에 태풍 경로의 RMSE가 크게 달라질 수 있다. 따라서 앙상블 모의 결과를 해석할 때 모의 결과의 체계적 편향에 따라 RMSE와 스프레드 사이의 양적 비교 논의가 크게 달라질 수 있음을 감안해야 한다.

4.2 앙상블 개수에 따른 민감도

앙상블 멤버를 기존 10개에서 30개로 늘려서 모의 하였다. 태풍 중심 위치 모의의 RMSE는 CTRL로 모의한 결과보다는 개선됐지만 10개로 모의한 결과보다 더 높은 오차를 보였다(Fig. 10a). 이러한 차이는 일반

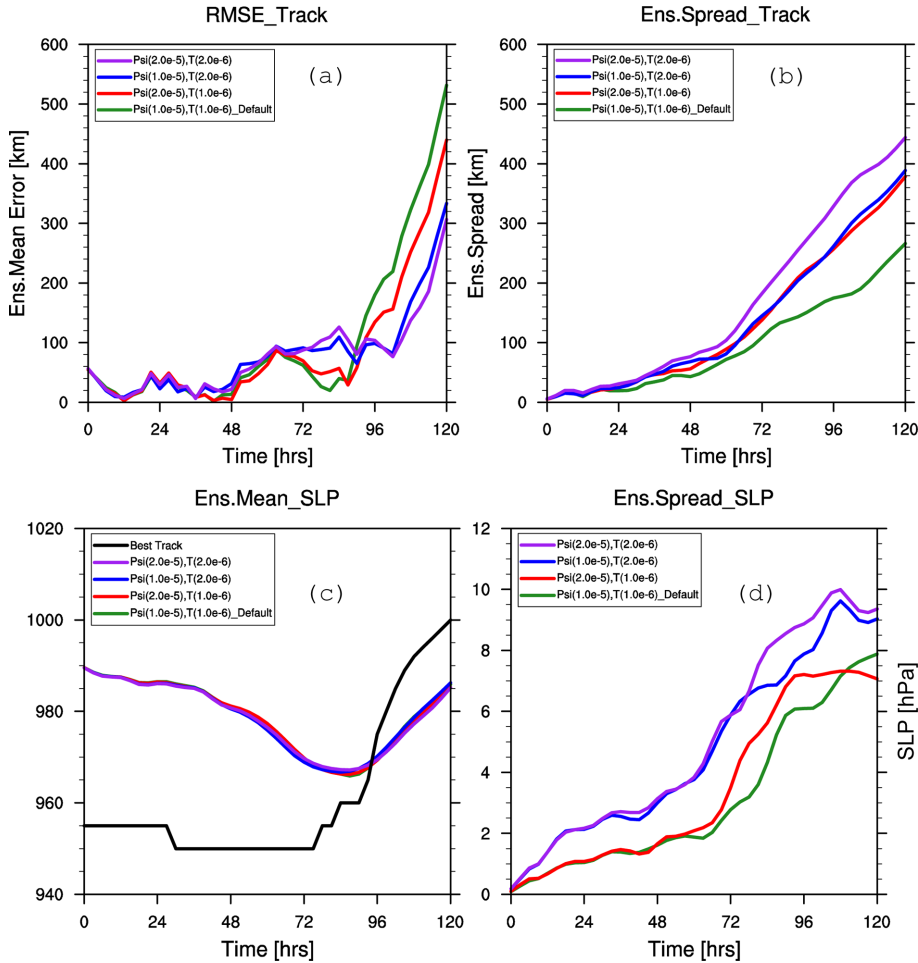


Fig. 11. SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio RSMC best track (black), set default (green), set 1 (red), set 2 (blue) and set 3 (purple). (a) Typhoon track RMSE (km), (b) spread, (c) typhoon minimum sea level pressure (hPa) and (d) spread.

적으로 앙상블 예보에서 기대할 수 있는 결과와 반대되는 결과이다. 일반적인 기대치와 반대로 나온 이유를 하나의 태풍 사례 모의만으로 유의미한 통계적 결론을 내리기엔 무리가 있으며, 향후 추가 태풍 사례의 분석을 통해서만 보완될 수 있을 것이다. 앙상블 스프레드는 60시간까지는 조금 커지는 듯하지만 그 이후로부터 조금 작게 모의되는 것으로 보인다(Fig. 10b). 강도 관점에서는 태풍 최성기로 모의된 84시간에서 좀더 강하게 모의 되었지만 큰 차이는 보이지 않는다(Fig. 10c). 스프레드 분석(Fig. 10d)에서는 84시간까지는 10개 앙상블 멤버보다 더 크게 모의했고 그 이후부터는 작게 모의했다. 그러나 이러한 차이들을 태풍 사례 하나만으로 결론 짓기는 무리가 있으며, 단지 앙상블 멤버 개수에 따른 결과 차이가 있을 수 있음을 암시한다.

4.3 SKEBS 강제 변수에 따른 민감도

SKEBS의 모형 오차 표현 능력을 살펴보기 위해 SKEBS 강제 변수를 달리하여 앙상블 모의를 하였다. 첫 번째 실험은 재주입되는 에너지의 정도를 달리하는 실험이다. WRF 모형에서 기본값으로 주어지는 에너지 재주입량은 기존 연구자들이 많은 사례를 종합하여 만들어진 일반화된 값이다. 그러나 실제 대기 대비 에너지 손실량은 어떤 대기 현상을 모의하느냐에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구의 태풍 사례에서는 에너지 손실 정도가 더 커질 수 있다. 따라서 적절한 에너지 재주입 정도를 찾기 위한 민감도 실험을 다음과 같이 수행하였다. 구성은 다음과 같다. 구성1은 기온장 에너지 재주입량은 기본값, 유선함수장 에너지 재주입량은 2배로 하였다. 반대로 구성2는 기온은 2배, 유선함수는 기본값이며, 마지막으로 구성3은 기온,

유선함수 모두 2배로 하였다.

Figure 11에서 세 가지 구성에 대한 결과를 나타냈다. 세 가지 구성에서 태풍 중심 경로 앙상블 평균 예보가 CTRL 및 기본값 실험보다 향상된 결과를 보였다(Fig. 11a). 구성3에서 태풍 중심 거리 오차가 가장 크게 감소하며, 구성1보다는 구성2의 거리 오차가 향상되었다. 스프레드 측면(Fig. 11b)에서 세 가지 구성 모두 기본값 실험보다 스프레드가 증가하였고 구성3에서 증가 정도가 가장 큰데 이는 에너지 재주입량이 구성들 중 가장 큰 만큼 당연한 결과라 생각된다. 구성2의 경우에 RMSE와 스프레드가 가장 유사하게 앙상블 모의 목적 달성의 측면에서 가장 적합한 구성이라 생각된다. 그러나 이는 체계적 편향을 감안하지 않은 결과이며, 적절한 체계적 편향 제거(debiasing)가

Table 2. Model domain averaged 850 hPa temperature (K) and 10 m wind speed ($m s^{-1}$) RMSE and Spread results for SKEBS forcing parameter sets. If RMSE is greater than Spread, we can say that ensemble prediction modeled smaller uncertainty than true, vice versa.

850 hPa temperature (K)		Set1	Set2	Set3	Set4
Control		0.97			
RMSE		0.83	0.82	0.76	0.78
Spread		0.60	0.67	0.84	0.89
10 m wind speed ($m s^{-1}$)		Set1	Set2	Set3	Set4
Control		1.93			
RMSE		1.57	1.55	1.49	1.53
Spread		1.37	1.60	1.83	2.01

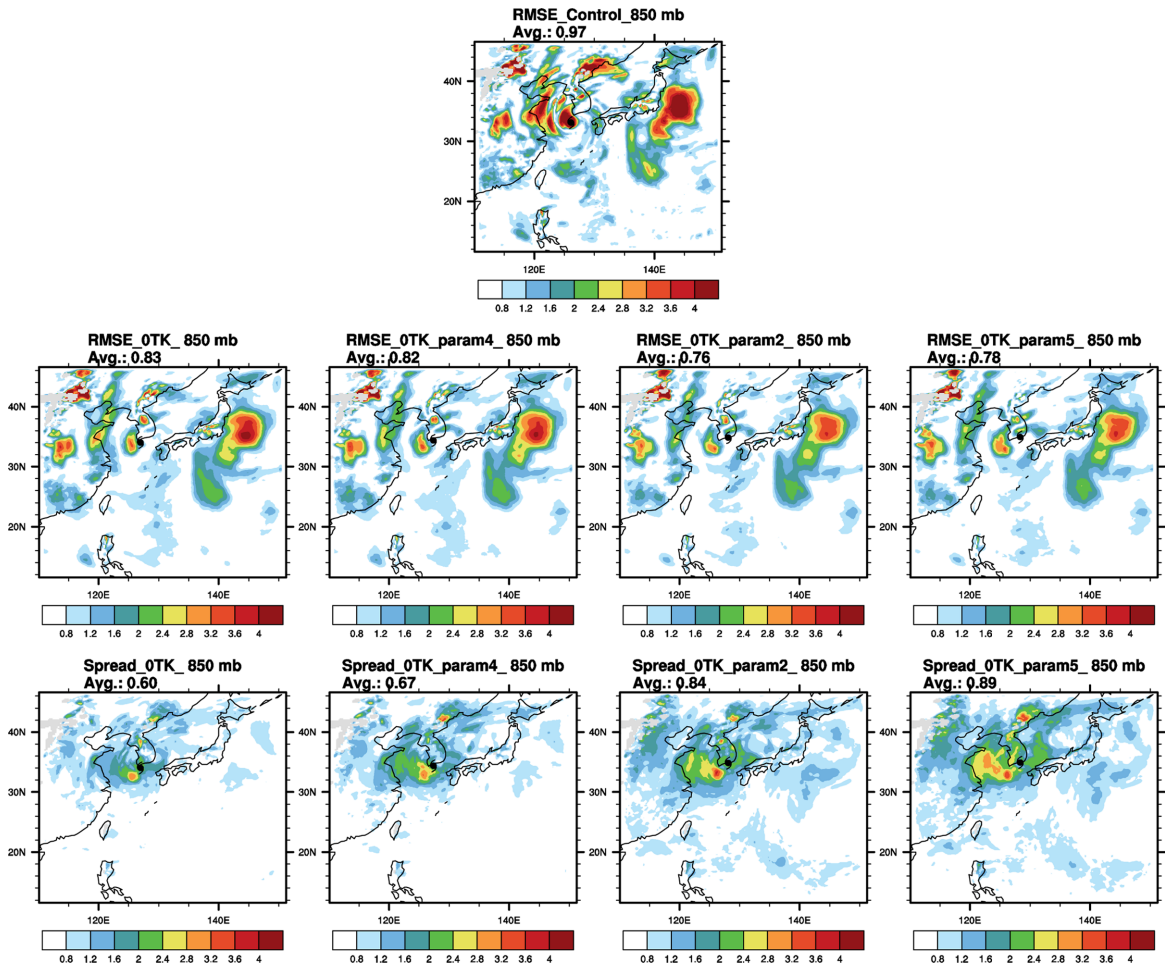


Fig. 12. Spatial distribution of 96-hr 850 hPa temperature (K) of SKEBS sensitivity test for backscatter ratio. <Upper> RMSE of control run, <Middle> RMSE of set default, set 1, set 2, set 3, <Bottom> Spread for set default, set 1, set 2, set 3 Markers around Korean Peninsula represent the center of Typhoon.

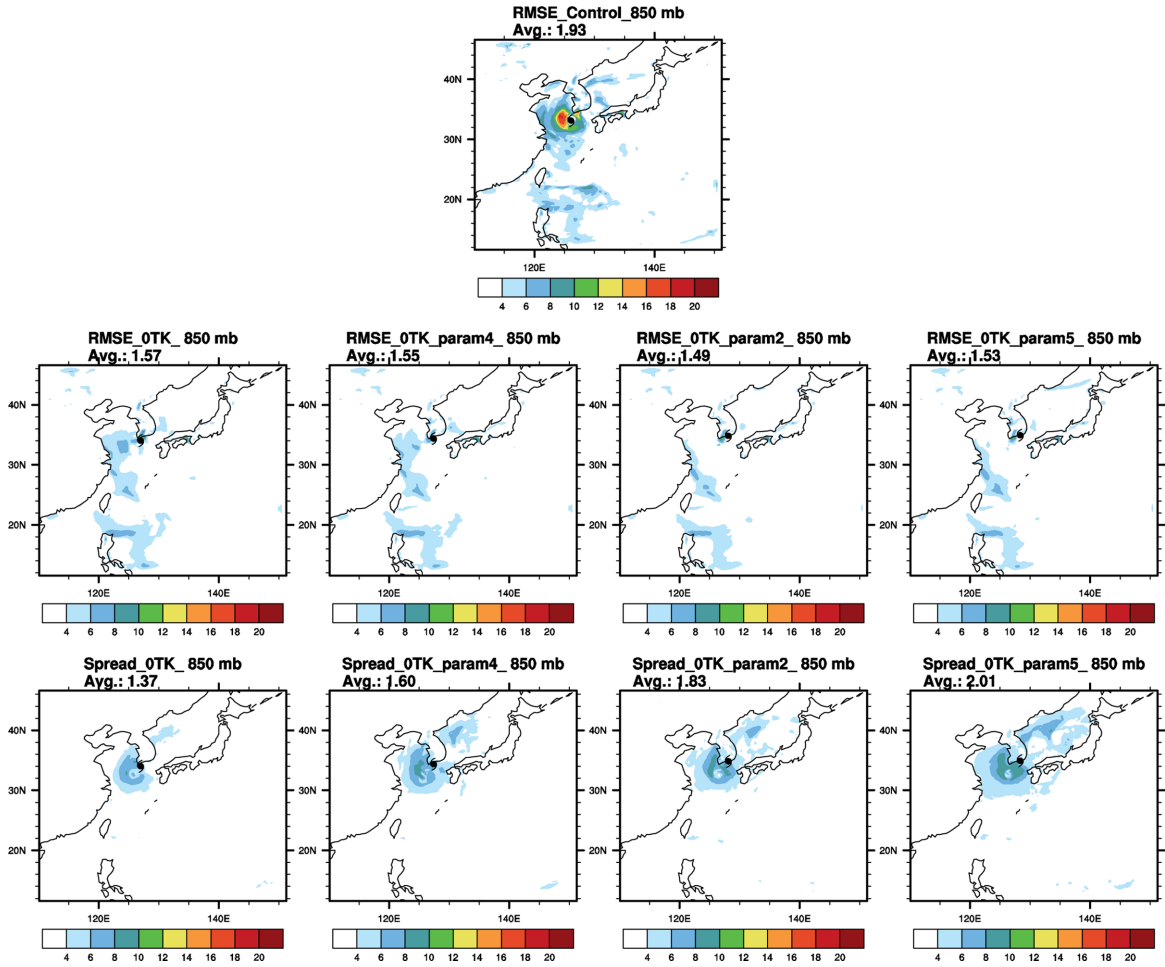


Fig. 13. Same as Fig. 12 except for surface wind speed ($m s^{-1}$).

이루어진다면 다른 결과를 보여줄 수 있다. 태풍 강도 모의에선 모든 구성에서 앙상블 평균값의 차이가 거의 없다. 스프레드는 구성3에서 가장 크고, 구성2가 구성1보다 스프레드가 크게 모의되었다.

태풍 중심 관점에서 벗어나 수평 분포 관점으로 앙상을 살펴보았다. 결과는 Table 2에 정리하였다. Figure 12는 850 hPa 기압면 기온의 결과이다. 도메인 전체 평균으로서 RMSE는 CTRL이 0.97, SKEBS 기본값 실험이 0.83, 구성1이 0.82, 구성2가 0.76, 그리고 구성3이 0.78로 세 실험 모두 기온의 앙상블 평균 예보가 향상된 결과를 보였다. 태풍 주변의 오차를 살펴보면 세 실험 모두 CTRL의 결과보다 오차가 작은 것으로 보인다. 앙상블 스프레드는 기본값 실험에서 0.6, 구성1에서 0.67, 구성2에서 0.84, 구성3에서 0.89로 에너지 주입량이 많을수록 앙상블 스프레드가 큰 값을 보였다. RMSE와 스프레드의 양적 비교 측면에서 구

성2가 예보의 불확실성을 가장 잘 표현한 것으로 보인다. 태풍 주변의 spread 앙상을 살펴보면, 실험1과 실험2는 불확실성을 잘 표현한 것으로 보이고 실험3은 상대적으로 과대 모의한 것으로(Over-dispersive) 보인다.

지상 10 m 풍속을 살펴보면(Fig. 13) 도메인 전체를 평균한 RMSE값은 CTRL 실험이 1.93, SKEBS 기본값 실험이 1.57, 구성1이 1.55, 구성2가 1.49, 그리고 구성3이 1.53으로 세 실험에서 풍속의 앙상블 평균 예보가 CTRL, 기본값 실험보다 향상된 결과를 보였다. 유선함수 에너지 재주입량을 증가시킨 실험보다 기온을 증가시킨 실험의 풍속에 대한 RMSE가 더 감소하였다(Fig. 13). 태풍 주변의 오차를 살펴보면 세 구성 모두 CTRL의 결과보다 오차가 작은 것으로 보인다. 도메인 전체를 평균한 앙상블 스프레드 값은 기본값 실험에서 1.37, 구성1에서 1.6, 구성2에서 1.83, 구성3에서 2.01로 에너지 재주입량이 클수록 스프레드가 커

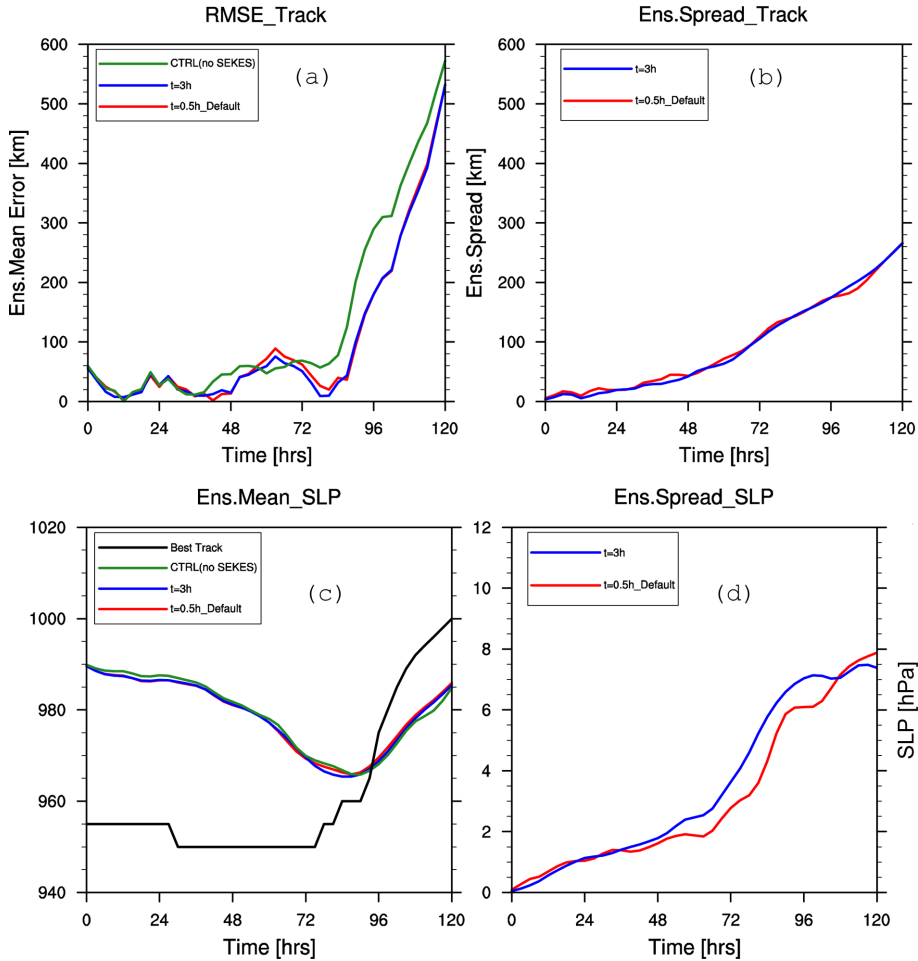


Fig. 14. SKEBS sensitivity test results for decorrelation time for RSMC best track (black), control run (green), t = 0.5 h (red) and t = 3 h (blue). (a) Typhoon track RMSE (km), (b) Spread, (c) typhoon minimum sea level pressure (hPa) and (d) spread.

지는 경향을 보였다.

SKEBS 강제 변수 조절의 또 다른 방법으로 상관성 완화 시간(decorrelation time)을 변경할 수 있다. 이 값은 에너지 재주입 양상이 시간에 따라 변화하는 정도를 조절한다. 상관성 완화 시간이 커질수록 한 시점의 에너지 재주입 양상이 유사하게 유지되는 시간이 길어진다. 수치 모형 모의에 따른 소규모 에너지 손실의 양상은 모의하는 현상에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 한반도 여름철 소나기 같은 경우는 비구름이 수 십분 사이에 발달, 소멸 과정을 거친다. 반대로 본 연구의 태풍과 같이 발달 소멸 양상이 수 시간에 이를 수 있다. 이처럼 모의되는 현상 별로 에너지가 손실되는 양상이 달라지며 이를 감안하기 위해 상관성 완화 시간을 조절할 수 있다. 즉 상관성 완화 시간의 조절에 따라 앙상블 예보 결과의 향상을 기대

하는 것이다.

상관성 완화 시간의 기본값은 30분이며 이를 3시간으로 변경하여 비교 실험을 수행하였다.

Figure 14에서 볼 때 중심해면기압의 앙상블 스프레드를 제외하고 두 실험 사이의 차이는 거의 없는 것으로 보인다. 앞서 상관성 완화 시간의 조절에 따른 앙상블 예보 결과의 차이를 기대하였지만, 그러한 차이는 본 사례에서는 미미한 것으로 보인다.

5. 결 론

모형의 불확실성을 표현하기 위해서 모형 오차 표현 방안의 하나로 SKEBS와 PHYS를 사용하여 태풍 루사(2002)를 모의하였다. 태풍 경로를 모의한 결과 오차를 감안한 앙상블 예보가 표준실험보다 향상될

결과를 보였다. 두 모형 오차 표현 방안의 앙상블 스프레드를 확인한 결과 SKEBS를 적용한 앙상블 스프레드는 예보 60시간 까지는 모델의 불확실성을 충분히 표현하였지만 그 이후 시간에서는 RMSE보다 과소 모의된 경향을 보였다. PHYS를 적용한 앙상블 스프레드는 전반적인 예보 시간 동안 RMSE보다 과대 모의된 경향을 보였지만 5일 예보 시점에서 모델의 불확실성을 충분히 표현했다. 태풍 상륙지점을 비교했을 때 CTRL의 태풍 트랙은 서해상에서 나타난 반면 SKEBS와 PHYS로 모의한 태풍은 한반도에 상륙하여 실제와 유사한 이동 경로를 보였다. SKEBS의 결과는 물리 모수화에 의한 체계적 편향이 존재하였다. PHYS의 결과는 서로 다른 물리 모수화의 선택으로 인해 평균 예보 오차가 개선된 것처럼 보인다. 하지만 이는 앙상블 예보를 통해 획득하고자 하는 사항은 아니다.

SKEBS가 물리 모수화 선택에 따라, 특히 적은 모수화의 선택에 민감하게 반응하는 체계적 편향(systematic bias)을 보였다. 기준 실험에서 사용한 Tiedtke 적은 모수화를 Kain-Fritsch 적은 모수화로 바꿔서 모의한 결과 북상 속도는 실제와 비슷해지는 것으로 나타났다. 이처럼 적은 모수화의 선택에 따라 태풍 모의의 RMSE가 크게 달라질 수 있으며, 이러한 체계적 편향을 감안하여야 RMSE와 스프레드 사이의 적절한 양적 비교가 이뤄질 수 있다.

또한 SKEBS 앙상블 결과는 SKEBS 방안의 방법 조절에 따라 달라질 수 있다. 유선 함수와 기온에 해당하는 에너지 주입량을 달리하여 SKEBS가 다르게 반응하였고 더 많은 에너지가 주입될수록 앙상블 멤버들의 스프레드가 커지며 모델의 불확실성을 표현하는데 향상된 결과를 보였다. 시간성 완화 시간을 0.5 h에서 3 h로 조절하였을 때는 차이가 미미하였다.

태풍 사례를 늘려 체계적 편향에 대한 검증이 절실하다. 앙상블 모의 결과에서 체계적 편향을 제거할 필요가 있다. 체계적 편향이 없는 경우에만 RMSE와 스프레드 사이의 양적 비교를 통해 앙상블 모의 목적 달성 정도를 평가할 수 있을 것이다. 본 연구의 민감도 실험도 더 많은 사례로 검증하여야 할 대상이다. 동아시아 태풍 모의에 대한 SKEBS 에너지 재주입량 및 상관성 완화 시간 최적값을 정하여야 한다. 이러한 추가 연구로 SKEBS 방안, PHYS 방안 또는 SKEBS와 PHYS 결합 적용 방안 중 한반도 태풍예보를 위한 최선책을 결정할 수 있다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 본 연구는 기

상청 기상기술개발사업(CATER 2012-6080)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Berner, J., G. J. Shutts, M. Leutbecher, and T. N. Palmer, 2009: A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 603-626.
- _____, S. Y. Ha, J. P. Hacker, A. Fournier, and C. Snyder, 2011: Model uncertainty in a mesoscale ensemble prediction system: Stochastic versus multiphysics representations. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1972-1995.
- Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887-2908.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Doblas-Reyes, F. J., and Coauthors, 2009: Addressing model uncertainty in seasonal and annual dynamical ensemble forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1538-1559.
- Epstein, E. S., 1969: Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, **21**, 739-759.
- Hacker, J. P., and Coauthors, 2011: The U.S. Air Force Weather Agency's mesoscale ensemble: Scientific description and performance results. *Tellus A.*, **63**, 625-641.
- Hagedorn, R., F. J. Doblas-Reyes, and T. N. Palmer, 2005: The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept. *Tellus A.*, **57**, 219-233.
- Hill, K. A., and G. M. Lackmann, 2009: Influence of environmental humidity on tropical cyclone size. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3294-3315.
- Houtekamer, P. L., L. Lefaiivre, J. Derome, H. Ritchie, and H. L. Mitchell, 1996: A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1225-1242.
- Krishnamurti, T. N., and Coauthors, 2000: Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. Climate*, **13**, 4196-4216.
- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- Palmer, T. N., 2001: A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-

- dynamic parametrization in weather and climate prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 279-304.
- Shutts, G., 2005: A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3079-3102.
- Skamarock, W. C., 2004: Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 3019-3032.
- _____, and J. B. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3465-3485.
- Stainforth, D. A., and Coauthors, 2005: Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*, **433**, 403-406.