creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

이학석사학위논문

단기 앙상블 예보에서 모형의 불확실성 표현: 태풍 루사

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

2014년 8월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

김 세 나

단기 앙상블 예보에서 모형의 불확실성 표현: 태풍 루사

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

지도교수 임 규 호

이 논문을 이학석사학위논문으로 제출함
2014년 4월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

김 세 나

김세나의 이학석사학위논문을 인준함
2014년 6월

위 원 장_____(인)

부위원장_____(인)

위 원_____(인)

초록

결정론에 근거한 수치예보모형의 한계를 극복할 수 있는 가장 객관적인 방법은 확률론을 도입해 예보의 불확실성을 표현하는 것이다. 수치예보 시스템의 불확실성은 모형의 격자 크기로는 모의 할 수 없는 규모의 물리현상을 모수화하는 과정에서 발생하며 절단오차나 여러 가지 규모의 물리과정을 모의하면서 일어나는 에너지 손실로 인해서도 발생한다. 본 연구에서는 모형의 불확실성을 표현하기 위해 확률론적인 예보로서 앙상블 예보를 수행한다. Multi-physics scheme(PHYS)과 Stochastic kinetic energy backscatter scheme(SKEBS)을 태풍 루사에 적용시켜 앙상블예보의 성능을 검증하였다. 경로를 모의한 결과 앙상블 평균 예보가 규준실험보다 향상되었으며 5일 예보 시점에서 PHYS의 결과가 28%, SKEBS의 결과가 7% 향상되었다. 두 앙상블의 예보 평균 에러는 두 스킴 모두 예보 84시간부터 급격히 증가한 반면, 스프레드는 완만하게 증가한 경향이 있었다. SKEBS의 결과는 예보 96시간 까지 모형이 앙상블 평균 오차의 불확실성을 잘 표현하였고 이후 시간에 대해서는 과소 모의한 경향이 있었다. PHYS의 결과는 전반적인 예보시간에서 모형이 앙상블 평균 오차를 과대모의 하였고 예보 120시간에는 불확실성을 잘 표현하였다. SKEBS 보다 PHYS 로 모의한 앙상블 예보의 평균이 북상속도에 대한 모의를 개선 시켰다. SKEBS 앙상블 평균 예보는 물리모수

화의 선택에 민감하게 작용하는 것을 확인할 수 있었다. SKEBS forcing parameter인 Backscatter rate의 값을 변화시켜 섭동의 크기를 증가시켜 모의 한 결과 앙상블 스프레드를 향상시키고, 앙상블 평균 오차를 감소 시켰으며 북상속도에 대한 모의도 향상시켰다.

주요어 : 앙상블 예보, 모형 불확실성, 열대저기압 예보, 확률적 운동에너지 재주입

학 번 : 2012-23076

목 차

1. 서론 ..... - 1 -

2. 자료 및 방법 ..... - 6 -

2.1. 자료 및 모형 설정 ..... - 6 -

2.1.1. 모델 초기 자료 입력 (ERA-Interim) ..... - 6 -

2.1.2. Best track 자료 ..... - 6 -

2.2. WRF 모델 및 모델 설정 ..... - 7 -

2.3. 실험 사례 선정 ..... - 10 -

2.4. 앙상블 멤버 구성 방법 ..... - 10 -

2.5. Model Error Scheme ..... - 11 -

2.5.1. Multi-Physics Scheme (PHYS) ..... - 11 -

2.5.2. Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (SKEBS) . - 14 -

2.6. Experiment Method ..... - 19 -

3. 결과 ..... - 21 -

3.1. Forecast ensemble mean error vs ensemble spread ..... - 23 -

3.1.1. Typhoon Track ..... - 25 -

3.1.2. Typhoon Intensity ..... - 26 -

3.1.3. Typhoon Size ..... - 29 -

3.1.4. Spatial distribution ..... - 31 -

3.2. Sensitivity tests on model uncertainty in SKEBS ..... - 35 -

3.2.1. Physics Parameterization ..... - 35 -

3.2.2. Ensemble Size ..... - 41 -

3.2.3. SKEBS forcing parameter tuning ..... - 43 -

4. 요약 ..... - 53 -

5. References ..... - 55 -

그림 목차

Figure 1 Model Domain Configuration. Black – Best track, Green – Control run, Red – Era−Interim reanalysis data. .....− 9 −

Figure 2 Tracks of Typhoon Rusa corresponding Black – RSMC Best track. <Upper> Green –CTRL, Blue – PHYS mean, and Red – SKEBS mean forecast, with open circle for 00 hourly positions, closed circle for 12 hourly positions. <Lower Left> Thin red – SKEBS members with Red – ensemble mean. <Lower Right> Thin multiple colors – PHYS members with Blue – ensemble mean..... − 22 −

Figure 3 Track error of <Upper> Green – CTRL, <Lower Left> Red – SKEBS ensemble mean, and Thin Red – error of each of SKEBS ensemble member. <Lower Right> Blue – PHYS ensemble mean, Thin multiple colors – error of each PHYS ensemble member corresponding Red dashed – ensemble spread of SKEBS and Blue dashed – PHYS. ..... − 24 −

Figure 4 Intensity of ensemble members. Green – CTRL, Red –

SKEBS ensemble mean, Blue – PHYS ensemble mean, Thin red – intensity of each SKEBS ensemble members, and Thin multiple colors – intensity of each PHYS ensemble members. <Upper Right> ensemble spread of intensity on SKEBS and PHYS. ..... – 28 –

Figure 5 Typhoon size of ensemble members. <Left> Green – CTRL, Red – SKEBS ensemble mean, thin red – size of each SKEBS ensemble member. <Right> Blue – PHYS ensemble mean, Thin multiple colors – size of each PHYS ensemble member. ..... – 30 –

Figure 6 Spatial distribution of 96-hour 850hPa temperature (K). <Upper> RMSE of CTRL, <Middle> RMSE for Left – SKEBS, Right – PHYS. <Bottom> Ensemble spread Left – SKEBS and Right – PHYS ..... – 33 –

Figure 7 Same as Figure 6 except for wind speed (m/s). – 34 –

Figure 8 Typhoon track sensitivity to parameterizations. <Left> Cumulus parameterizations, <Right> Microphysics

parameterizations. Dot for 24 hourly positions. Black track corresponds to RSMC best track..... – 38 –

Figure 9 Typhoon model result using CTRL physics set except Kain Fritsch cumulus parameterization. <Upper Left> Black – Best track, Red – SKEBS ensemble mean, Blue – PHYS ensemble mean, Green – CTRL, <Upper Right> Same as <Upper Left> except inclusion of SKEBS ensemble members, <Bottom> Same as <Upper Right> except for minimum sea level pressure. ..... – 39 –

Figure 10 <Upper> Surface wind speed (m/s) (filled), mean sea level pressure (contour) for Tiedtke and Kain Fritsch cumulus parameterizations. <Middle> Relative vorticity ($10^{-5}s^{-1}$) (filled) and surface wind streamline. <Bottom> West–East Cross Section along the typhoon center. Relative humidity (%), virtual temperature (‘C), and surface wind speed attached below ..... – 40 –

Figure 11 SKEBS sensitivity test results for ensemble size. Green – CTRL, Red – 10 members, Blue – 30 members.

<Upper Left> Track error (km). <Upper Right> Track error spread (km). <Lower Left> Minimum sea level pressure spread (hPa). <Lower Right> Minimum sea level pressure (hPa). ..... – 42 –

Figure 12 Ensemble track sensitivity result. <Upper Left> Default, <Upper Right> Set1, <Lower Left> Set 2, <Lower Right> Set 3. See the text for parameter setting details. ....– 45 –

Figure 13 SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio. Green – Default, Red – Set1, Blue – Set 2, Purple – Set 3, Black – Best track. <Upper Left> Track error (km). <Upper Right> Track error spread (km). <Lower Left> Minimum sea level pressure spread (hPa). <Lower Right> Minimum sea level pressure (hPa)..... – 46 –

Figure 14 SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio.96–hour 850hPa temperature (K). <Upper> RMSE of CTRL, <Middle> RMSE for Default, Set1, Set2, Set3, <Bottom> Spread for Default, Set1, Set2, Set3. Markers

around Korean Peninsula represent the center of Typhoon. ..... – 49 –

Figure 15 Same as Figure 14 except for surface wind speed (m/s) ..... – 50 –

Figure 16 SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio. Green – Default, Red – Set1, Blue – Set 2, Purple – Set 3, Black – Best track. <Upper Left> Track error (km). <Upper Right> Track error spread (km). <Lower Left> Minimum sea level pressure spread (hPa). <Lower Right> Minimum sea level pressure (hPa)..... – 52 –

1. 서론

단기 중규모 수치 예보 모형(short-range, meso-scale numerical weather prediction model)의 정확도를 향상시키는 연구는 지속적으로 진행되고 있다. 하지만 대기를 구성하는 방정식 계는 비선형 역학 체계(nonlinear dynamic system) 이기 때문에 초기조건(initial condition) 혹은 예측 모형(prediction model) 에서 오는 작은 불확실성이 예보오차를 이끌고 예보 시간이 지남에 따라 예보오차는 더 커지게 된다 (Lorenz 1963). 결정론에 근거한 수치예보모형의 한계를 극복할 수 있는 가장 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 샘플로부터 구한 spread를 통해 대기의 불확실성 정도를 나타낸다.

수치예보 시스템이 불확실성을 갖는 이유는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 초기조건 오차(initial condition error)이다. 초기조건 오차는 관측기기가 부정확할 경우 발생하는 오차, 혹은 관측이 부족한 지역에서의 오차 등 대기의 실제상태를 모르기 때문에 발생한다. 이를 수치 적분함에 따라 모의된 대기 흐름은 실제 대기상태와 점점 더 멀어진다. 결국 일정

시점이 지난 후의 대기 상태는 기후적 분포에서 임의로 뽑아낸 대기 상태와 통계적으로 다르지 않기 때문에 수치적분의 의미를 잃게 된다. 두 번째로는, 수치모형의 측면 및 지표면의 경계조건(boundary condition)에서 오는 오차이다. 특히 지역모형에서는 적분시간이 길어질수록 측면경계조건에 의한 영향이 커지게 된다. 세 번째로는 대기의 물리과정(physical process)과 역학과정(dynamical process)을 표현하는 단계에서 발생하는 모형오차(model error)로, 모형이 실제 대기 운동을 묘사하는 데에서 오는 오차이다. 모형의 격자 크기로는 모의 혹은 분해할 수 없는 규모의 물리 현상은 모수화(parameterization)를 하는데, 격자(each grid box)의 평균값 혹은 대표 값을 이용하여 표현하는 방법이다. 이렇게 적운 대류나 대기경계층과 같은 중규모 및 소규모 (혹은, 격자보다 작은 규모)를 모수화하는 과정에서 수치모형의 불확실성이 크게 발생한다. 또한, 격자 분해능과 상관없이 수치 적분을 하는 과정에서 절단오차(truncation error) 등으로 인해 적운 모수화의 여러 규모의 물리과정 등을 제대로 표현하지 못함으로써 발생하는 에너지 손실에 의해서도 오차가 발생한다. 대기를 지배하는 방정식 계는 비선형 상태이기 때문에 실제 대기의 불확실성은 대기 흐름에 의거하고, 이는 실제 대기의 흐름을 모의하기 위한 수치 모형의 오차에 크게 영향을 받기 때문에 결국 실제 대기를 예측하는 데 있어서의 불완전성, 즉 예보 오차를 만들게 된다. 이렇게 수치예보를 하는 과정에서 나타나는 필연적인 오차를 표현하는 것 다시

말해, 미래상태의 확률 분포로 불확실성을 표현하는 것이 앙상블예보의 목적이다. 앙상블 예보는 실제 대기현상이 존재할 수 있는 범위를 정해놓고 그 범위에서 앙상블 멤버들을 독립적으로 뽑아내어 그 중에 최소 하나의 멤버는 실제 대기 현상을 따라 가는 것을 기대하는 예보오차를 표현하는 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 위에서 설명한 예보 오차 중 모형오차를 중점적으로 표현을 하고자 한다. 실제 대기현상이 존재할 수 있는 범위를 정해 놓는다는 것은 모형을 만들 때 들어간 가정의 종류, 방법 등을 종합해 놓는다는 말과 같다. 대기모형을 만드는 과정에서 들어간 가정들을 조합해서 앙상블 멤버를 만들어 모형오차를 표현하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하고자 한다. 첫 번째는 다양한 물리 모수화 체계를 사용하여 앙상블을 구성하는 것이다. 기존의 연구들 중에는, 각 물리 모수화 스킴들의 불확실성을 감안하기 위해 다양한 physics package들로 앙상블을 구성하는 multi-physics 및 multi-parameter ensemble (Stainforth et al. 2005), 그리고 여러 다른 수치모형을 사용하여 불확실성을 표현하는 multiple model 앙상블 (Hagedorn et al. 2005; Houtekamer et al. 1996; Krishnamurti et al. 2000) 방법 등이 있었다. 본 연구에서는 물리모수화의 불완전성을 감안하기 위하여 multi-physics 앙상블을 사용하고자 한다. 두 번째는 확률론적인 방법에 근거하여 격자규모에서 표현하지 못한 아격자규모를 표현하는 것인데 Palmer (2001)

가 결정론적 모형(deterministic model)의 불확실성을 나타내기 위해서 확률론적 모형(stochastic dynamic model (Epstein 1969))을 제안했다. 이는 multi-parameter, multi-physics, 그리고 multi-model 앙상블과는 다르게 물리모수화를 비롯한 수치모형에서 피할 수 없는 불확실성을 확률적으로 감안해서 앙상블을 구성하는 방법이다. Shutts (2005)는 수치모형 적분시 손실된 만큼의 에너지를 Cellular Automation Stochastic Backscatter Scheme (CASBS)를 이용하여 주입시키는 방법을 고안하였다. 여기서 처음 소개된 Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (SKEBS) 개념은 ECMWF 중장기 앙상블 예보에 적용됨으로써 수치예보의 정확도 및 확률예보를 향상시키는데 기여하였다 (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 다른 나라 기상청에서 현업 앙상블 예보에 많이 사용되어지고 있는 방법이다.

이렇게 서로 다른 모델 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 스킴을 수행하였기

때문에 이는 같은 조건 에서의 모형오차 스킴 간의 비교는 어렵다. Berner et al. (2011)은 multi-physics scheme 과 Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (SKEBS)을 같은 앙상블예보 시스템에서 비교 실험하여 단기 앙상블 예보에서 얼마나 효과적인지를 분석했다. 이 실험에서 역시 두 모형 오차 스킴은 모델 오차를 고려하지 않고 경계조건만 달리한 컨트롤 앙상블 시스템보다 상당히 향상된 결과를 보였으며 전반적으로 지표 근처를 제외하고는 SKEBS가 multi-physics scheme보다 나은 결과를 보였다. Hacker et al. (2011)에서는 단기 앙상블 예보를 위해 여러 모형오차를 고려, 비교해서 하층 예보가 얼마나 좋아지는지를 중점적으로 분석하였다.

본 실험에서는 이러한 선행 연구들을 바탕으로, 모형의 오차를 고려할 경우 동아시아 지역 태풍예보에 있어 단기 앙상블 예보가 얼마나 효과적인지를 확인해 보고자 한다. WRF 지역모형을 기반으로 multi-physics scheme 과 SKEBS, 두 가지 서로 다른 모형오차 방법을 적용시켜 앙상블 예보를 수행하고, 한반도에 상륙했던 태풍 루사(Rusa)의 사례에 적용하여 수치예보 모형오차를 고려했을 경우 태풍경로 예보에 어떤 영향을 미치는지를 중점적으로 분석하고자 모델의 불확실성을 표현하는 두 스킴을 비교한다. 모형 오차가 큰 태풍모의에서 이 두 수치예보 모형오차 스킴이 단기 앙상블예보에 얼마나 효과적인지 검증해 보고, 나아가 동아시아 지역에서 발생하는 태풍의 수치예보의 정확도 향상에 기여하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료 및 모형 설정

2.1.1. 모델 초기 자료 입력 (ERA-Interim)

태풍을 모의하기 위하여 모델의 초기 입력자료로 ERA-Interim reanalysis자료를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 ERA-Interim 자료는 6시간 간격으로 제공되고 있으며(Dee et al. 2011) 수평 공간 해상도는 0.7 × 0.7 degree 이고, 연직 대기 층은 1000 hPa 부터 1 hPa까지 37개로 이루어져 있다. GRIB 자료의 지표면에 상응하는 변수는 하층 수평바람장, 이슬점온도, 온도, land-sea mask, 평균해면기압, 표층수온, 지표온도, 적설밀도, 토양온도, 지상기압이고, 기압에 해당하는 변수는 지오퍼텐셜, 기온, 수평바람속도, 상대습도이다.

2.1.2. Best track 자료

본 연구에서는 모델의 태풍 모의 결과와 실제의 태풍 진로 및 강도를 비교하기 위하여 Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) Tokyo 태풍 센터에서 제공하는 RSMC Best Track 자료를 사용하였다. 이 자료는 태풍이 소멸한 후 추가로 수집된 위성자료와 AWS, SHIP 자료

등을 활용하여 분석자료를 만드는 과정을 거친다. 그 후 일관성 검사(consistency check) 과정을 거쳐, 최종적인 분석 자료인 best track을 생산하게 된다. RSMC best track 자료는 북서태평양에서 발생하는 모든 태풍에 대한 정보를 가지고 있어서 동아시아에 유입되는 태풍의 모의를 검증하는데 유용한 자료로 사용될 수 있으며 6시간, 혹은 3시간 간격으로 태풍의 위치, 강도, 중심기압, 최대풍속 등의 정보를 제공하고 있다.

2.2. WRF 모델 및 모델 설정

본 연구에서 사용한 모델은 Weather Research and Forecasting (WRF) version 3.5 이다. WRF 모델은 중규모 시스템에 해당하는 현상에 대한 현업 예보 및 연구 수행에 주로 쓰이는 모형이다. WRF는 완전 압축성 비정역학(fully compressible nonhydrostatic) 모형으로, 연직 좌표계로 지형을 따라가는 건조 정역학 기압(terrain-following dry hydrostatic-pressure)을 이용하고, 수평 좌표계로는 Arakawa C-grid 격자 체계를 이용한다. 시간 적분은 2차, 3차, Runge-kutta 시간 적분 스킴을 사용하며 수평 및 수직 차분화는 2차에서 6차까지의 이류(advection)옵션을 제공한다. 꼭대기 경계조건(Top boundary condition)은 중력파를 흡수하며 일정한 기압으로 설정되고 지구 자전의 표현은 코리올리항을 모두 포함하게 하고 있다.

WRF모형은 real-data에 해당하는 측면 경계조건으로 지정측면 경계조건(specified lateral boundary conditions)을 사용하는데 지정 측면 경계 조건(lateral boundary conditions)은 지정지역(specified zone)과 완화지역(relaxation zone)으로 구성된다. 지정지역은 외부의 예보장이나 분석장의 시간적 내삽에 의해 결정되며 본 실험에서는 모형 도메인 바깥쪽에서 초기입력자료로 사용한 ERA-Interim자료를 끌어오게 된다. 완화지역은 모형에서 설정한 도메인 영역과 지정지역 사이의 영역으로 큰 규모의 예보장에 WRF 모형이 넛징(nudging) 되는 지역을 의미한다. 즉 이 두 지역을 설정하여 ERA-Interim자료와 WRF모형의 결과가 서로 시간적, 공간적으로 상관성을 갖도록 하여 측면 경계 조건을 지정해주게 된다.

본 연구에서는 WRF 모형의 수평해상도를 20 km 로 설정함과 동시에 지역적으로 200 × 200 격자 영역으로 나누어 모형 실험을 수행하였다. 또한 태풍을 모의하기 위하여 연직으로 42개의 층으로 격자를 나누었으며, 모델의 최상 층은 10 hPa로 지정하였다. 태풍의 시간에 따른 발달을 보기 위하여 60초의 시간 간격으로 120시간 적분하였고 3시간 간격 출력자료를 얻었다. 태풍 케이스 별 도메인의 중심위치는 Best Track의 위·경도 값을 전체 평균하여 설정하였다. Model error 를 최대한으로 보기 위해 best track과 ERA-interim자료를 비교하여 initial condition error 가 가장 작은 시점을 선택했다. Rusa 모델 수행을 위한 도메인 영역 설정은 Figure 1 과 같다.

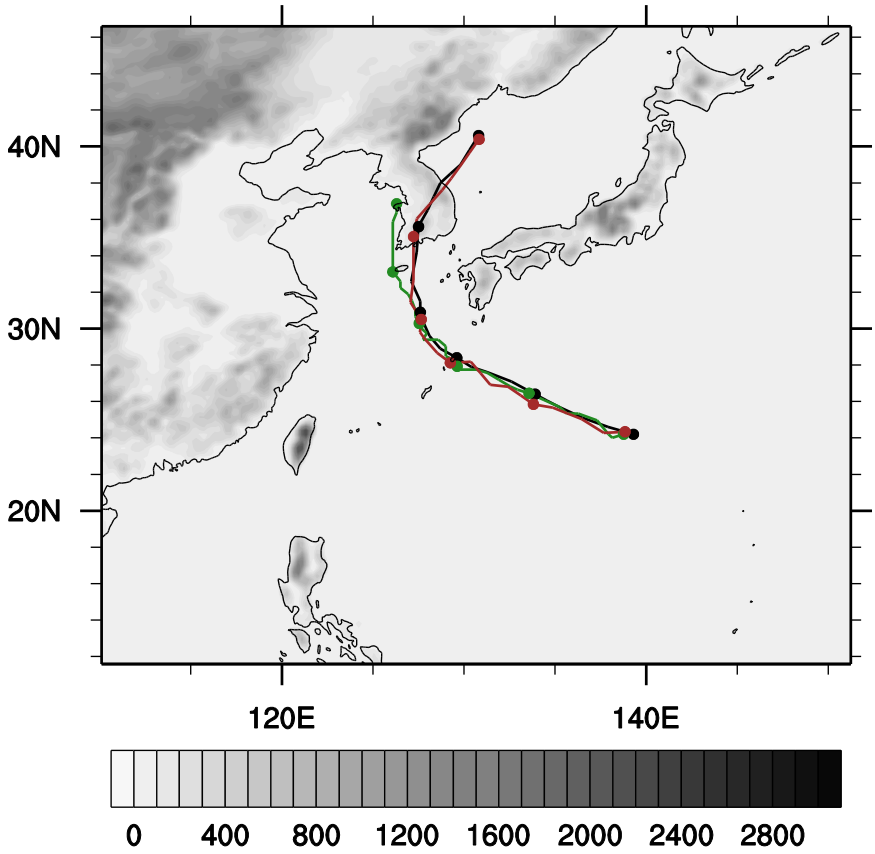

Figure 1 Model Domain Configuration. Black – Best track, Green – Control run, Red – Era–Interim reanalysis data.

2.3. 실험 사례 선정

본 연구에서는 2002년에 발생한 15호 태풍 '루사(Rusa)'를 2002년 8월 27일 12 UTC부터 9월 1일 12 UTC까지 120시간 모의 수행하였다.

2.4. 앙상블 멤버 구성 방법

Multi-physics 앙상블멤버는 서로 다른 물리모수화 스킴을 사용하여 10개의 앙상블 세트로 구성하고, 규준 실험(control run)은 multi-physics 패키지의 1번 세트를 기반하여 구성하였다. SKEBS 역시 규준실험과 같은 물리스킴(physics schemes)을 사용해 10개의 앙상블멤버를 만들었다. 또한 물리모수화 민감도 실험을 위해 Kain Fritsch 적운모수화를 사용하여 SKEBS 앙상블 멤버를 구성했고, 앙상블 사이즈에 대한 민감도 실험을 위해 앙상블 멤버의 수를 기존의 10개에서 30개로 늘려서 모의하였다. Default 값으로 유선함수(streamfunction) parameter를 1.0e-5, 그리고 기온 parameter에 1.0e-6 섭동([perturbation)을 줌으로써 10개의 앙상블 멤버를 생성시켜서 구성하였다. Stochastic forcing 의 민감도 실험을 하기 위해 세 가지로 섭동을 다르게 주어 분석하였다. 첫 번째 실험에서는 유선함수를 2.0e-5, 기온을 1.0e-6 의 값으로, 두 번째 실험에서는 유선함수를 1.0e-5, 기온을 2.0e-6의 값으로, 그리고 세 번째 실험에서는 유선함수를 2.0e-

5, 기온을 2.0e-6의 값으로 변형시킨 섭동을 주어 앙상블멤버를 구성하여 default 실험과 비교 분석하였다. 마지막으로 decorrelation time 에 대한 민감도 실험을 하기 위해 default 값인 30분에서, 3시간으로 변경하여 전 스텝과의 상관성을 더 크게 하여 모의 후 비교 분석하였다.

2.5. Model Error Scheme

2.5.1. Multi-Physics Scheme (PHYS)

대기의 물리과정을 표현하기 위해서 모수화 방법을 사용하여 격자보다 작은 규모의 현상을 모형의 격자에 맞추어서 수치적분을 하게 된다. 이 과정에서 지표면(land surface), 표층(surface layer), 행성경계층(planetary boundary layer), 미시물리(microphysics), 적운대류(cumulus convection), 장파복사(longwave radiation), 그리고 단파복사(shortwave radiation)를 모수화하게 된다. 미시물리과정(microphysical process)은 구름입자와 얼음결정이 형성되고 성장하는 강수 과정을 나타내며 잠열의 방출과 흡수에 따른 기온 분포에도 영향을 주게 된다. 주어진 격자크기에서 분해할 수 있는 강수량(resolvable or grid-scale precipitation)을 직접 모의하며 강한 강수에 따른 지표면 바람 분포에 영향을 미치게 되고 또한, 구름입자의 성격에 따라 단파 복사와 장파복사의 정도가 달라질 수 있다. 지표면, 표층, 행성 경계층

에 관한 물리과정은 평균 대기 프로파일과 지표 속(flux)을 입력자료 쓰게 되어 지표면 근처의 기상 변수의 경향성을 계산할 수 있기 때문에 지표면 근처의 기상 변수 분포가 모수화 스킴의 선택에 따라 달라질 수 있다. 적운대류(cumulus convection)는 적운을 연직방향의 격자점에 표현하기 위한 물리과정 모수화이다. 적운 모수화를 통해 연직방향의 기상변수를 재분배 시키기 때문에 상승기류는 하층의 공기를 상층으로 전달하고 하강기류는 상층의 공기를 하층으로 전달 하게 된다. 또한 적운 모수화는 구름을 어느 시점에 발달시킬지 그리고 그 정도를 결정한다. 단파 복사는 태양 복사와 관련된 물리과정을 표현하기 위한 모수화 방법으로서 태양 복사의 흡수, 반사 그리고 산란 과정을 표현한다. 장파 복사는 대기층 및 지표의 복사과정을 표현하기 위한 모수화로서 대기층의 화학 성분에 따른 적외선 방출을 결정하고 지표종류에 따른 방출율(emissivity)을 계산하며 구름에서의 복사과정도 이에 포함된다. Multi-physics 앙상블은 이러한 여러 물리 스킴들을 다르게 조합하여 물리 스킴 세트를 구성하는 모수화 방법의 불확실성을 설명하는 방법이다. 본 연구에서는 서로 다른 10개의 물리 패키지를 사용했으며 다음과 같이 Table 1에 포함시켰고 자세한 사항은 Skamarock et al. (2008)를 참조했다.

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 (Morrison double-moment)

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

2.5.2. Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (SKEBS)

Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme (SKEBS)은 수치 모형에서 아격자규모에 해당하는 현상에 의해 유발되는 모형의 불확실성을 확률론적으로 표현하는 방법이다. 수치모형에서는 격자규모와 상관없이 수치적 분상에서 절단오차(truncation error) 가 발생하고 또한 diffusion에 의해서도 작은 규모의 에너지에 손실이 발생할 수 밖에 없는데, 확률론에 근거한 섭동을 모델 예단 변수에 넣어주므로써 이렇게 손실된 에너지를 보완해주려는 것이다. 우선, 수치모형의 위경도 격자에 기반한 랜덤 섭동(random perturbation)을 푸리에 모드 형태로 만든 다음, first-order autoregressive (AR1) 함수를 이용하여 시공간적으로 상관된 패턴을 갖게 해준다. 이때 섭동을 넣어주고자 하는 파수 및 상관규모 등을 조절해 줄 수 있다. 이렇게 만들어진 섭동을 유선함수(streamfunction)와 온도(temperature)에 더해 줌으로써 두 번째 적분 스텝 (t=2) 부터 바로 전 적분 시간과의 차이 형태로 (즉, $\Delta t = t_{N+1} - t_N$) 운동에너지와 위치에너지에 주입하는 것이다. 이렇게 보완된 소규모 에너지가 결국 모델 적분 과정에서 대규모 에너지에 거꾸로 영향을 미쳐 (즉, backscattered) 전체적인 대기의 흐름을 바꾸게 된다는 것이 기본적인 아이디어이다. (Shutts 2005)

아래에는 Berner et al. (2011) 에 따라 SKEBS의 이론적인 전개 과정

을 정리하였다. Stochastic kinetic energy source를 계산하기 위해 균질(homogeneous)하며 무작위성(random)의 성질을 가지는 실제적인 유선함수섭동(effective streamfunction perturbation) (Ψ')을 식(1)과 같이 정의하였다.

$$\Psi'(x,y,t) = rD(x,y,t)\,\psi'(x,y,t) \tag{1}$$

여기서 x와 y는 각각 WRF 모델의 격자를 구성하는 동-서 및 남-북 방향이며 t는 시간, $D(x,y,t)$는 지역적 에너지 소산률(dissipation rate), $\psi'(x,y,t)$는 2차원 유선함수 섭동 혹은 강제력 (forcing), r은 backscatter ratio를 의미한다. WRF모형에서는 $r*D$값을 상수로 단순화시켰고 그 참조값을 WRF version3.5 에서는 $1.0E\text{-}05\,m^2s^{-3}$ (streamfunction), $1.0E\text{-}06\,m^2s^{-3}$ (temperature) 로 설정하였다.

식 (1)에서의 $\psi'(x,y,t)$ 섭동은 우선 푸리에 공간에서의 유선함수 패턴을 만든 다음 AR1 과정을 각 파수마다 적용함으로써 시공간상의 상관성을 만들어준다. 아래의 식 (2), (3), (4)는 각각 2차원 푸리에 공간에서의 유선함수와, 동-서 방향 바람, 남-북 방향 바람을 나타낸다.

$$\psi'(x,y,t) = \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} \psi'_{k,l}(t) e^{2\pi i(kx/X+ly/Y)} \tag{2}$$

$$u'(x,y,t) = -\frac{\partial \psi'}{\partial y} = -\frac{2\pi i}{Y} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} l\psi'_{k,l}(t) e^{2\pi i(kx/X+ly/Y)} \tag{3}$$

$$v'(x,y,t) = \frac{\partial \psi'}{\partial x} = \frac{2\pi i}{X} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} k\psi'_{k,l}(t) e^{2\pi i(kx/X+ly/Y)} \tag{4}$$

여기서, k와 l은 각각 물리적 공간에서의 x와 y방향의 파수이며 t는 시간을 의미한다. 푸리에 모드인 $e^{2\pi i(kx/X+ly/Y)}$는 WRF의 사각 도메인 ($0 < x < X,\ 0 < y < Y$)에서 서로 수직(orthogonal)인 기저함수들로 구성되어있다. 여기서 만약 spectral 도메인 ($0 < k < \frac{K}{2},\ 0 < l < \frac{L}{2}$) 에서 white noise가 아닌 적어도 하나의 유선함수의 섭동이 존재한다면, 이 유선함수 섭동은 물리적인 공간상에서 상관 관계를 갖는 패턴으로 만들어지게 된다. 또한, 유선함수의 강제력에 시간적인 상관성을 부여하기 위해 AR1 함수를 이용한다. 이 시간 상관성을 Spectral Markov 과정으로 전개하면 식 (5)와 같다.

$$\psi'_{k,l}(t+\Delta t) = (1-\alpha)\psi'_{k,l}(t) + g_{k,l}\sqrt{\alpha}\,\varepsilon_{k,l}(t) \tag{5}$$

여기서 $\varepsilon_{k,l}(t)$는 평균을 0으로 갖으며 공분산(covariance, $< \varepsilon_{k,l}(t)\varepsilon^*_{m,n}(t) >$)이 $\sigma^2\delta_{k,m}\delta_{l,n}\delta_{s,t}$ 인 Gaussian white noise이고 $(1-\alpha)$ 는 linear autoregressive parameter, $g_{k,l}$은 파수의 함수로 표현되는 noise amplitude로 다음과 같이 power law로 정의된다.

$$g_{k,l} = b\rho_{k,l}^{\beta} \tag{6}$$

식 (6)에서 $\rho_{k,l}$는 radial wavenumber 이다 ($\rho_{k,l} = \sqrt{k^2/X^2 + l^2/Y^2}$). 그리고 b는 amplitude로써 아래와 같이 정의 된다.

$$b = \left[\frac{B_{\psi}\alpha}{2\pi^2\sigma^2\Gamma_{\psi}\Delta t}\right]^{1/2}, \text{where } \Gamma_{\psi} = \sum_{k=-K/2}^{K/2}\sum_{l=-L/2}^{L/2}\rho_{k,l}^{2\beta+2} \tag{7}$$

한편, 식 (5)의 Markov 과정에 의한 AR1의 자기상관(autocorrelation)은 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$< \psi'_{k,l}(t)\psi'^{*}_{k,l}(t) > = \frac{g_{k,l}^2\sigma^2\alpha}{1-(1-\alpha)^2} = \frac{g_{k,l}^2\sigma^2\alpha}{\alpha(2-\alpha)} = \frac{g_{k,l}^2\sigma^2}{(2-\alpha)} \tag{8}$$

여기서 linear autoregressive parameter 는 아래와 같이 (모의하는 스케일에 따라 임의로 정해주는) decorrelation time scale (τ) 및 모델의 적분시간간격 (Δt)을 이용하여 다음과 같이 정의되었다.

$$\alpha = \frac{\Delta t}{\tau} \tag{9}$$

식 (7)과 앞으로 전개될 식 (10)에 따르면 운동에너지가 주입되면서 noise 개념으로 유선함수의 강제력을 모형 시스템에 작용시키게 된다. 여기서 각 적분 시간 간격 Δt에서의 b의 값에 해당하는 도메인 평균의 단위 질량당 운동에너지는 식 (10)와

같이 표현된다 (유도과정에서 식 (8)과 (9)가 사용된다).

$$\Delta E'_{kin} = \frac{2\pi^2}{\Delta t} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} \rho_{k,l}^2 < \left|\psi_{k,l}(t+\Delta t)\right|^2 - \left|\psi_{k,l}(t)\right|^2 >$$

$$= \frac{2\pi^2}{\Delta t} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} \rho_{k,l}^2 < \left|\Delta\psi_{k,l}(t)\right|^2 >$$

$$= 2\pi^2 \Delta t \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} (\frac{2}{\alpha} - 1)\rho_{k,l}^2 < \left|\psi_{k,l}(t)\right|^2 >$$

$$= \frac{2\pi^2\sigma^2\Delta t}{(2-\alpha)} \frac{(2-\alpha)}{\alpha} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} \rho_{k,l}^2 g_{k,l}^2$$

$$= 2\pi^2\sigma^2\tau \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} \rho_{k,l}^2 g_{k,l}^2$$

$$= 2\pi^2\sigma^2\tau \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} \rho_{k,l}^2 b^2$$

$$= B_\psi \tag{10}$$

식 (10)이 나타내는 것은 각 적분시간에서 대기 상태 흐름에 주입되는 에너지이다. 주입된 에너지는 푸리에 공간에서의 유선함수로 표현되는 시간 t와 t+Δt 에서의

운동에너지 차이로 주어진다. 앙상블 평균의 개념에서 이 섭동들은 도메인에서 평균된 에너지로서 주입된다고 볼 수 있다. 앞서 일련의 과정을 요약하면 식 (6)에 의해 정의된 noise amplitude를 기반으로 시공간상에서 상관된 유선함수 섭동이 운동에너지 형태로 수치모형에 주입되는 것이다. 여기서 운동에너지 스펙트럼은 모델 내에서 noise amplitude와 radial wavenumber의 제곱형태로 표현되며, 식 (6)을 통해 power-law로써 표현이 가능하다.

$$E'_{kin} \propto \rho_{k,l}^{2} b^{2} \propto \rho_{k,l}^{2\beta+2} \tag{11}$$

2.6. Experiment Method

태풍 분석에 있어서 가장 중요한 변수는 태풍의 위치, 강도 그리고 사이즈이다. 또한 앙상블 예보에서 가장 중요한 변수는 실제 상태(best track)와의 Root Mean Square Error(RMSE)와 앙상블멤버와의 spread이며 실험결과를 검증하기 위해서 Error-spread consistency 방법을 사용했다. RMSE는 앙상블멤버의 평균과 Best track의 차이를 root mean square 하여 구했다. 앙상블 spread는 각 앙상블 멤버와 앙상블 평균의 표준편차로 구했다. 그리고 규준실험에 대해서는 control run (CTRL) 값에서 best track을 차감하여 root mean square 하여 구했다. Error-spread consistency는 앙상블 멤버와 실제가 같은 확률 분포에서 나왔다고 가정하고 앙상블 사이즈가 충분

히 클 때 만족한다. 때문에 앙상블 예보 성능을 검증하는 하나의 방법으로 Error-spread consistency를 확인해 볼 수 있다. 그러므로 RMSE와 ensemble spread에 대한 기대 값은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E\left(\sqrt{(\bar{f}-obs)^2}\right) = \sqrt{\left(1+\frac{1}{N}\right)\sigma^2} \tag{12}$$

$$\mathrm{E}\left(\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(f_i-\bar{f}\right)^2}\right) = \sqrt{\left(1-\frac{1}{N}\right)\sigma^2} \tag{13}$$

즉 앙상블 멤버수가 큰 경우 RMSE와 Spread는 거의 유사한 값을 갖게 되며 이러한 Error~Spread consistency 상태 일 때 좋은 앙상블 예보라고 할 수 있다. N은 앙상블 사이즈, $\bar{f}$ 를 앙상블 평균 예보, f_i는 i 멤버에 대한 3시간 간격 앙상블 예보, obs는 3시간 간격 RSMC best track, 그리고 σ^2는 분산의 확률분포를 의미한다.

3. 결과

태풍 루사는 이전 43년 동안 한반도를 상륙한 태풍 중 가장 강력한 태풍이었다. 2002년 8월 22일에 비키니 제도 근처에서 생긴 열대 저기압이 8월 23일에 괌 북동쪽 1800 km에서 태풍으로 발달하였다. 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 이상의 강한 태풍으로 세력을 유지한 채 일본 오키나와 북쪽에 이르러 전향하는 듯 했으나 약한 편서풍으로 인하여 한반도로 상륙하였다.

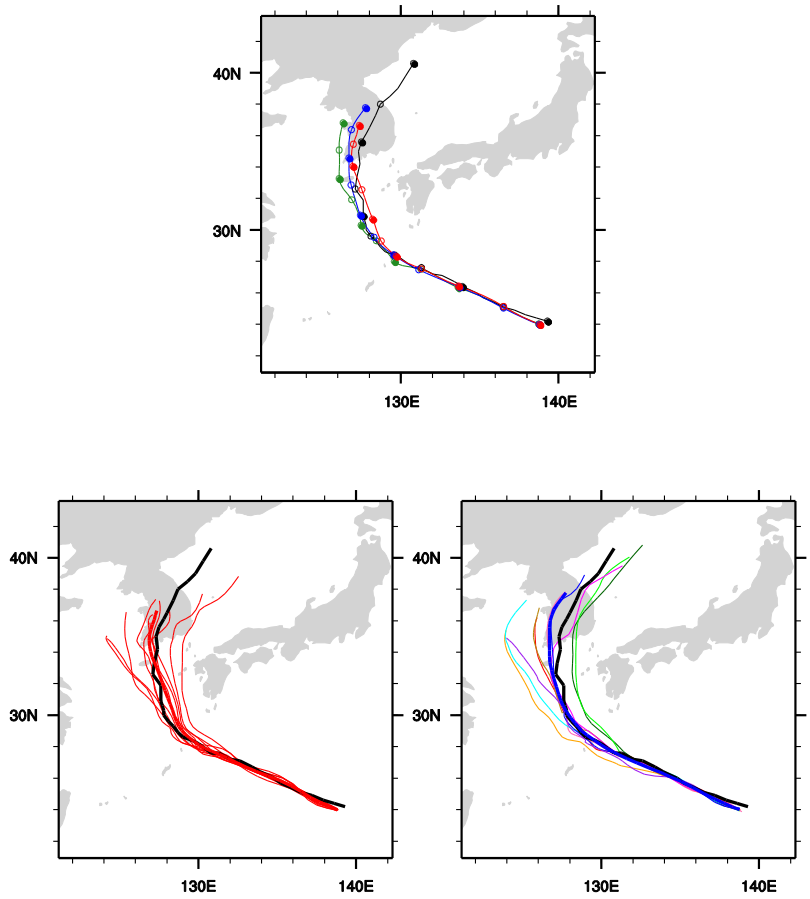

Figure 2 Tracks of Typhoon Rusa corresponding Black – RSMC Best track. <Upper> Green –CTRL, Blue – PHYS mean, and Red – SKEBS mean forecast, with open circle for 00 hourly positions, closed circle for 12 hourly positions. <Lower Left> Thin red – SKEBS members with Red – ensemble mean. <Lower Right> Thin multiple colors – PHYS members with Blue – ensemble mean.

3.1. Forecast ensemble mean error vs ensemble spread

본 연구에서는 앞서 소개한 WRF 모형을 기반으로 multi-physics 앙상블 스킴과 SKEBS 앙상블 스킴을 태풍 루사 사례에 적용하여 실제 태풍과 모의된 태풍의 위치, 강도 그리고 사이즈 에 대한 RMSE 를 분석하여 규준실험(CTRL)과 비교하였고, 앙상블 멤버들의 Spread 를 분석하여 Error-spread consistency를 확인 하였다. 또한 두 스킴을 평가하기 위해 주어진 도메인에 대한 Era-Interim 재분석자료와 모형에서 모의된 온도와 바람에 대한 공간분포를 같은 방법으로 분석하였다.

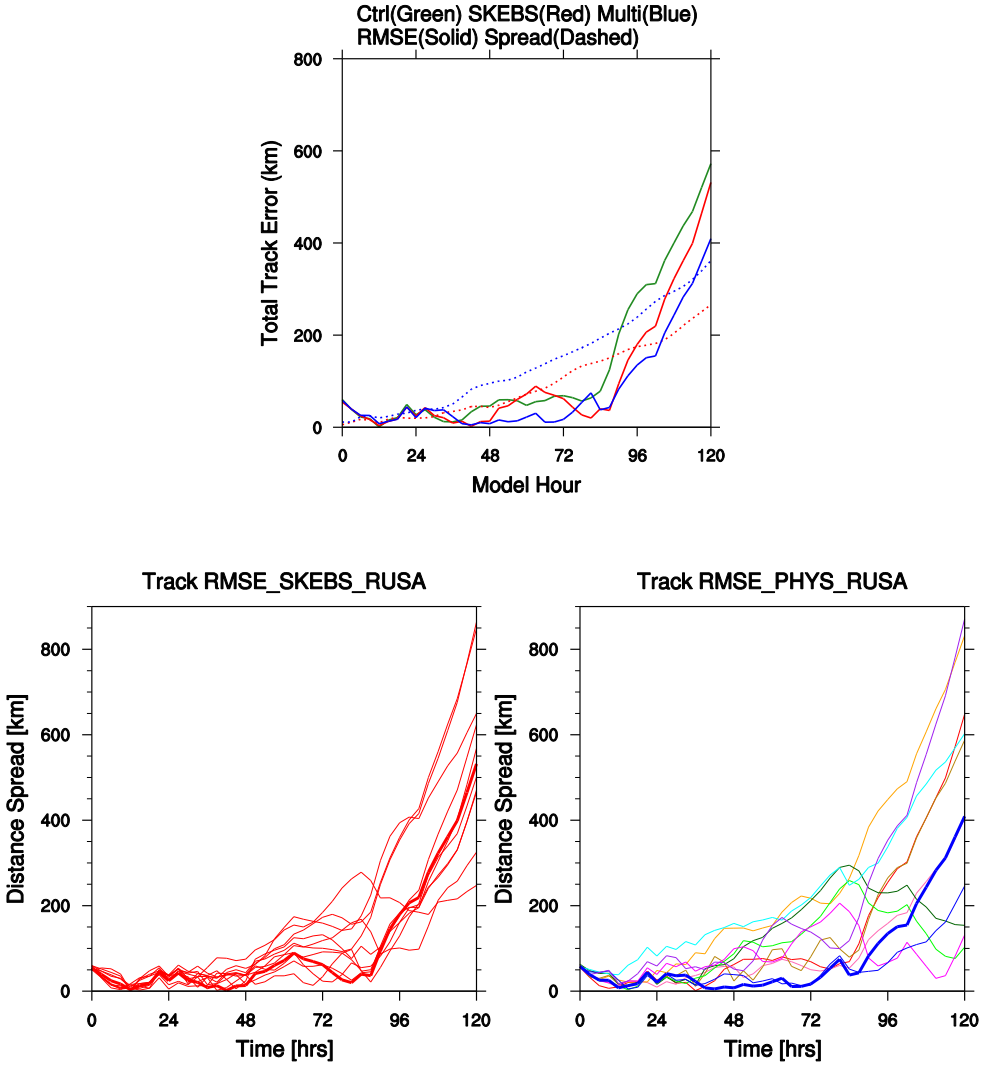

Figure 3 Track error of <Upper> Green – CTRL, <Lower Left> Red – SKEBS ensemble mean, and Thin Red – error of each of SKEBS ensemble member. <Lower Right> Blue – PHYS ensemble mean, Thin multiple colors – error of each PHYS ensemble member corresponding Red dashed – ensemble spread of SKEBS and Blue dashed – PHYS.

3.1.1. Typhoon Track

i) Ensemble mean forecast

본 연구에서는 모형오차만 보기 위해서 초기조건오차는 없다고 가정한다. 48시간 까지 에러의 차이가 크게 증가하지 않는 것으로 보아(Figure 3) 초기조건에 의한 오차가 최소한으로 나타났다. SKEBS 앙상블 멤버들은 전반적으로 북위 30도 근처에 이른 후부터 느리게 북상하였고 각 멤버들의 경로가 best track을 중심으로 고르게 분포 된 반면, PHYS 앙상블 멤버들은 outlier 들이 보이긴 하지만 전체적으로 북상속도에 대한 모의를 향상 시켰다. CTRL 트랙은 서해상으로 지나 간 반면 두 스킴의 앙상블민의 결과 모두 best track과 같이 한반도에 상륙하였다. CTRL은 84시간부터, 두 앙상블 스킴은 90시간부터 에러가 100 km 이상으로 크게 증가한 것으로 보아 앙상블 평균 예보가 CTRL보다 개선되었으며 SKEBS의 결과보다 PHYS의 결과가 좀더 향상되었다. SKEBS는 CTRL과 같은 물리모수화 세트를 사용했고 이에 따라 그 주변에 앙상블 멤버들이 분포한 것으로 보아 이는 물리모수화에 의한 systematic bias로 생각된다. 하지만 PHYS는 서로 다른 물리모수화의 선택으로 인해 평균 예보 오차가 개선 되는 것처럼 보인다.

ii) Error-spread consistency

SKEBS 실험에서는 예보 60시간 까지 모델의 불확실성을 잘 표현하여 Error - spread consistency의 경향을 보였고(즉, 앙상블 예보 평균 오차와 spread가 양적으로 비슷하였고), 96시간 이후로는 모델의 불확실성을 과소 모의한 경향이 있다(under-dispersive). PHYS 실험에서는 앙상블 스프레드가 과다하게 퍼져있으며(over-dispersive) 예보 120시간에서 모델의 불확실성을 잘 표현하였다. 본 실험에서 best track의 관측오차는 없다고 가정한다.

3.1.2. Typhoon Intensity

i) Ensemble mean forecast

Era-interim 자료는 태풍 중심의 대기현상을 표현할 정도의 해상도가 아니기 때문에 초기조건에 의한 강도오차가 크게 나타났다. 초기시점에 초기조건에러가 없다고 가정할 수 없기 때문에 모델에러만 보는데 한계가 있다. SKEBS ensemble mean 값은 CTRL과 크게 다르지 못하고, PHYS 앙상블 평균이 SKEBS 앙상블 평균보다 상대적으로 개선되어 보인다(Figure 4).

ii) Ensemble Spread

PHYS의 경우 Spread가 컸고 best track을 따라가는 멤버가 존재한다. SKEBS에서는 시간이 갈수록 spread가 증가하는 반면 PHYS는 늘었다가 다시 줄어드는데 이는 PHYS에서 모의하는 태풍들이 약 72시간에 최성기에 도달하여 크게 발달하는 멤버들이 있고 그 강도가 다시 크게 약화되기 때문으로 보인다(Figure 4).

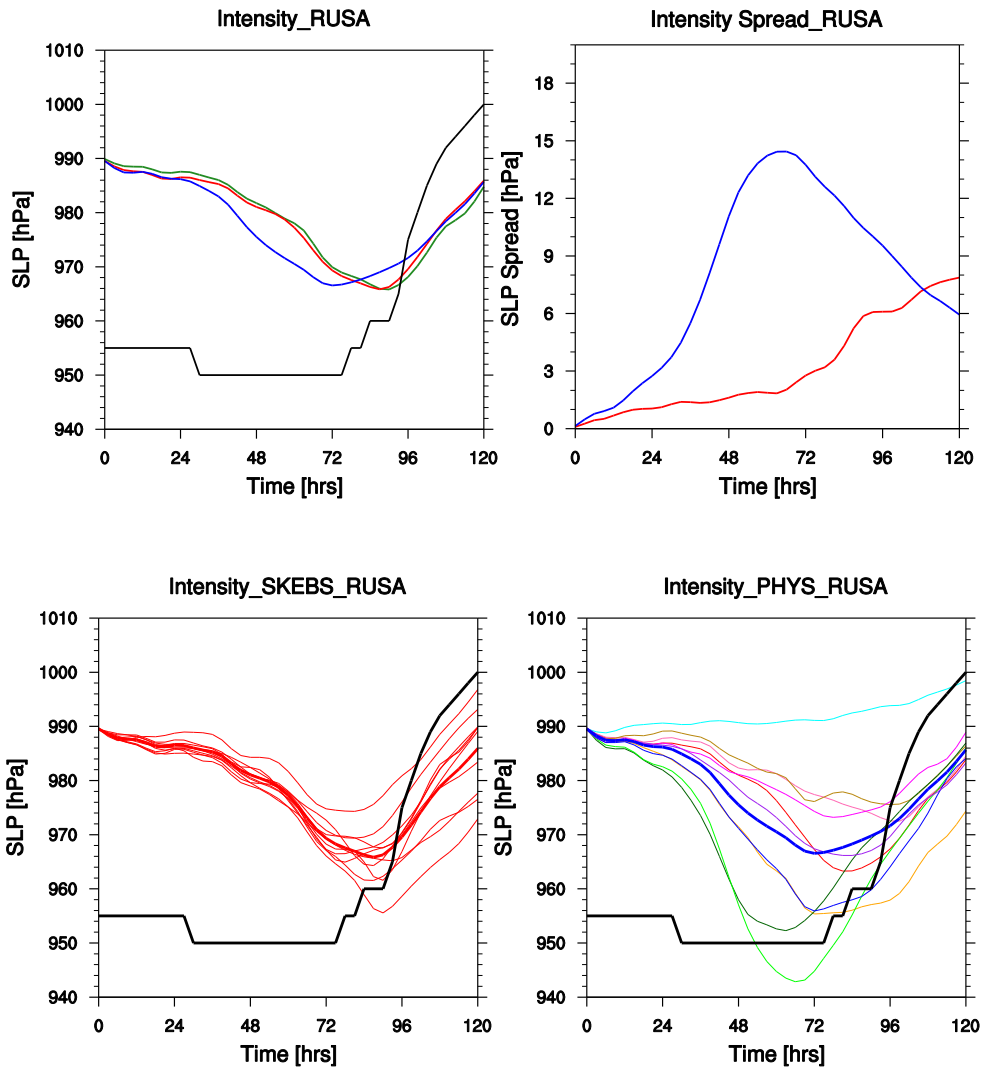

Figure 4 Intensity of ensemble members. Green – CTRL, Red – SKEBS ensemble mean, Blue – PHYS ensemble mean, Thin red – intensity of each SKEBS ensemble members, and Thin multiple colors – intensity of each PHYS ensemble members. <Upper Right> ensemble spread of intensity on SKEBS and PHYS.

3.1.3. Typhoon Size

Era-interim 재분석 자료와 비교하여 실험을 수행하였다. 태풍 주변의 강한 바람이 지표면의 마찰에 의해 크게 감소하므로 지표면에 의한 영향을 최대한 배제하기 위해 850 hPa 고도면의 풍속 25m/s 이상인 곳의 넓이를 계산하였다. SKEBS 앙상블 평균의 경우 CTRL 실험보다 태풍 사이즈가 작게 모의되었다. 지표면 마찰의 효과를 어느 정도 배제한 850 hPa 고도면 이라도 육상의 마찰이 존재하기 때문에 서해상으로 빠진 CTRL 보다 상륙 태풍으로 모의한 SKEBS 와 PHYS 의 사이즈 감소가 상대적으로 더 큰 것으로 보인다. PHYS 앙상블 평균은 서로 다른 물리모수화를 선택하면서 태풍 사이즈가 best track과 비슷하게 모의되다가 72시간 이후로는 더 크게 모의되었다(Figure 5).

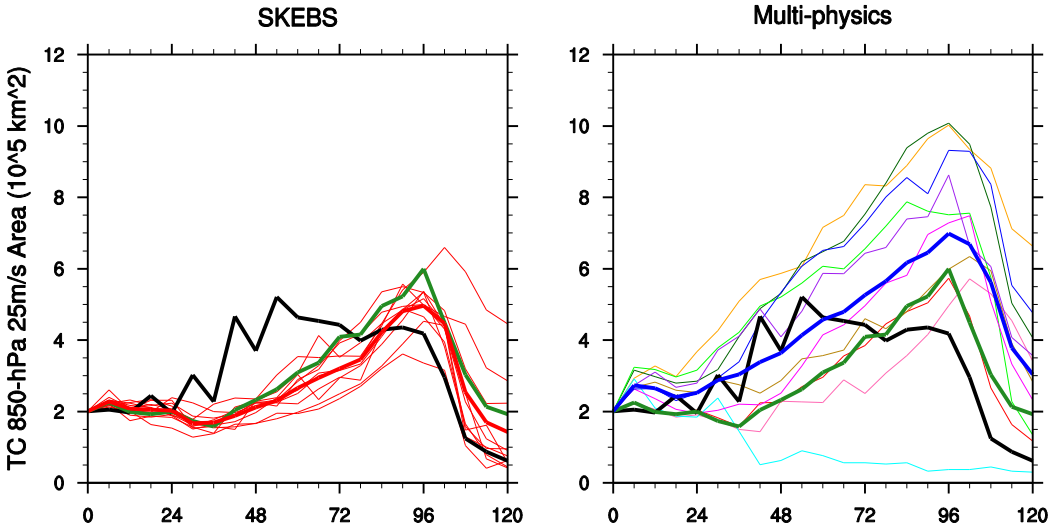

Figure 5 Typhoon size of ensemble members. <Left> Green – CTRL, Red – SKEBS ensemble mean, thin red – size of each SKEBS ensemble member. <Right> Blue – PHYS ensemble mean, Thin multiple colors – size of each PHYS ensemble member.

3.1.4. Spatial distribution

앙상블예보의 목표 중 하나는 실제 값이 존재 가능한 확률 분포를 앙상블 멤버를 통해 표현하는 것이다. 즉 앙상블 예보의 성능을 확인하기 위해 RMSE와 Spread의 분포 및 크기를 해당 도메인에 해당하는 기온과 바람의 공간분포를 분석했다.

예보 96시간의 850 hPa 온도의 공간분포를 살펴보면(Figure 6) 태풍 주변에서 RMSE가 크고 전반적으로 CTRL및 SKEBS와 PHYS 두 앙상블 스킴의 결과 모두 북위 30-40N 부근에 큰 RMSE를 보인다. 전체 도메인에 대한 오차의 평균 값은 CTRL의 결과는 0.97, SKEBS의 결과는 0.83, 그리고 PHYS의 결과는 0.72 값을 나타내는 것으로 보아 SEKBS와 PHYS를 통해 전체적인 오차가 감소한 것으로 보인다. Spread를 보면 SKEBS는 spread의 전체평균이 0.6으로 나타나 RMSE와 비교했을 때 과소 모의되었고 PHYS는 1.05로 과대 모의한 경향이 있다. 하지만 태풍 주변의 분포만 살펴보았을 때 SKEBS 는 앙상블 멤버들이 Error-spread consistency 경향을 보이고, PHYS는 상대적으로 과소 모의된(under-dispersive) 경향이 보인다.

예보 96시간의 10m 바람풍속의 공간분포를 살펴보면(Figure 7), CTRL

에서 오차는 태풍 주변에서 상당히 크며 오차의 전체평균 값이 1.93이다. 하지만 SKEBS와 PHYS 실험에서는 전체적인 오차가 상당히 감소하였고 두 경우 모두 오차의 전체평균 값이 1.57 이다. Spread값을 확인해 보면 전체 격자에 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. 하지만 태풍 주변의 SKEBS의 결과는 Error-spread consistency 경향을 보이고, 반면 PHYS의 결과는 과대모의(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.

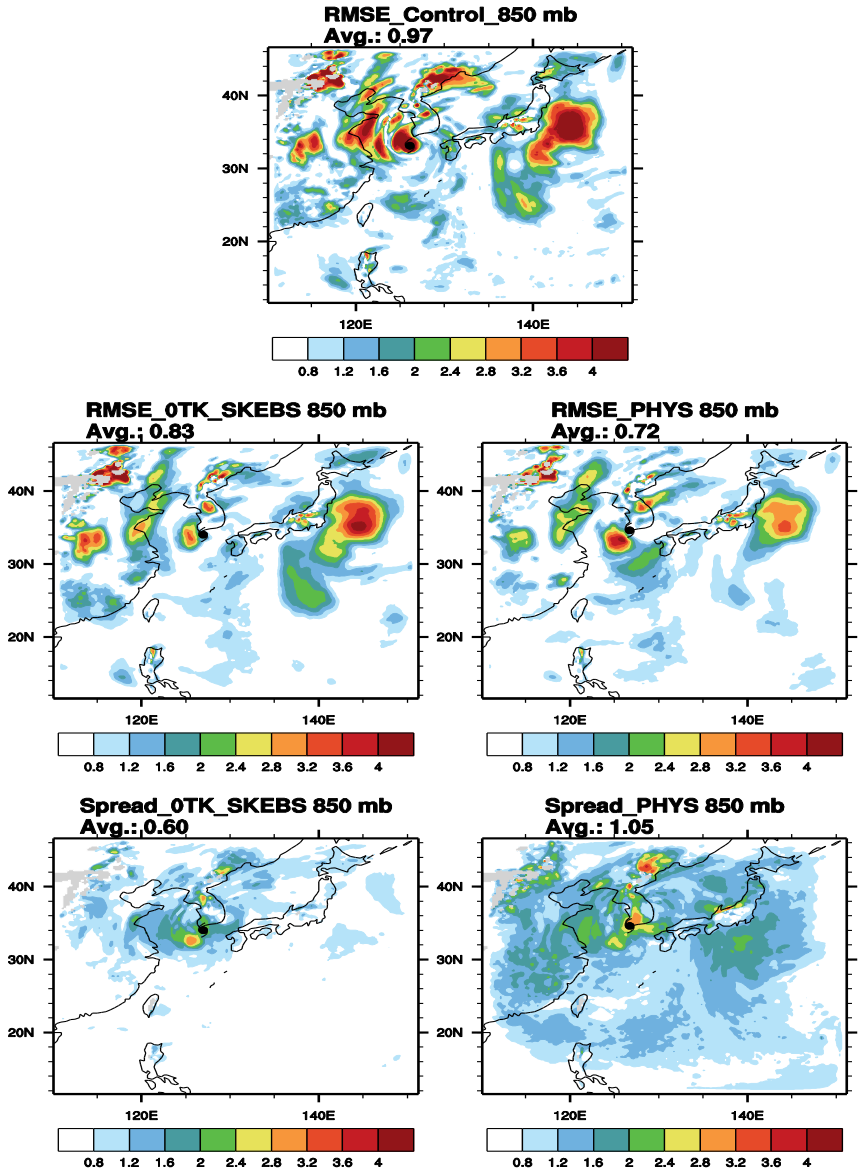

Figure 6 Spatial distribution of 96-hour 850hPa temperature (K). <Upper> RMSE of CTRL, <Middle> RMSE for Left –SKEBS, Right – PHYS. <Bottom> Ensemble spread Left – SKEBS and Right – PHYS

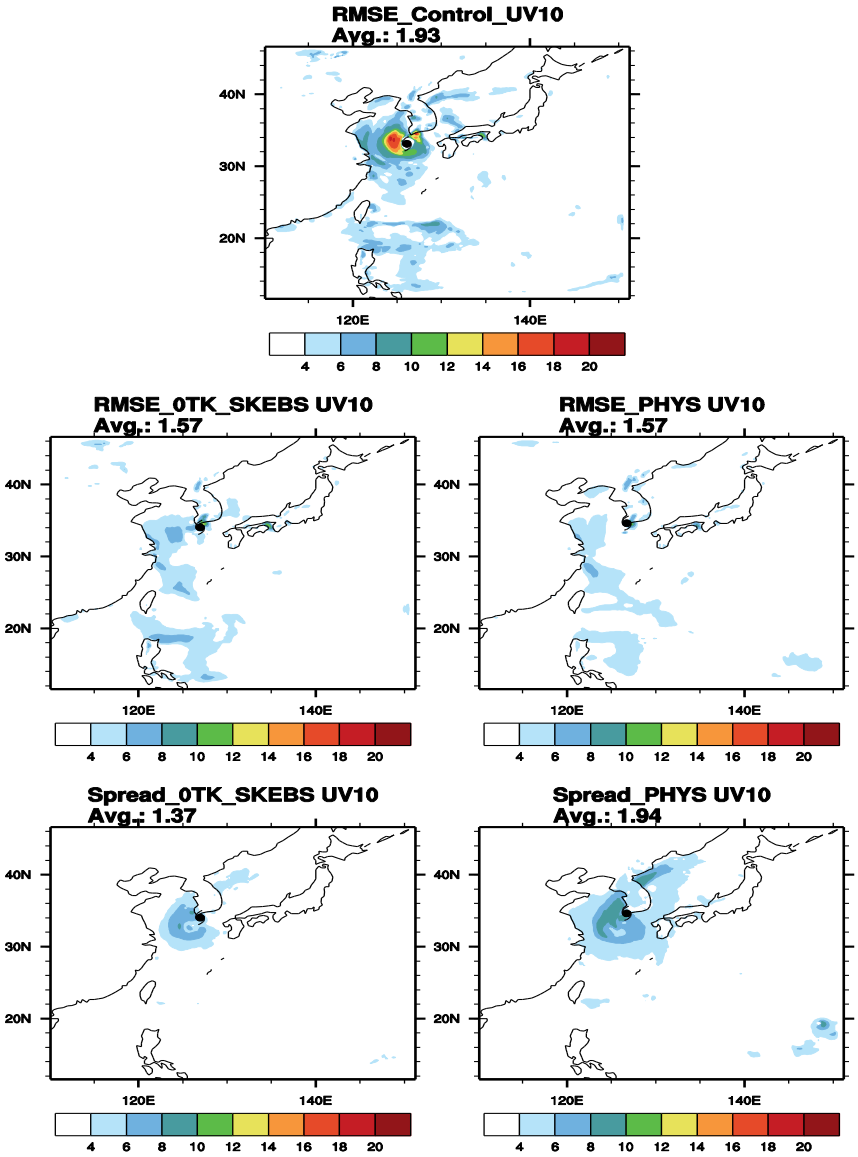

Figure 7 Same as Figure 6 except for wind speed (m/s)

3.2. Sensitivity tests on model uncertainty in SKEBS

SKEBS 앙상블 스킴을 이용하여 민감도 실험을 하였다. 물리모수화에 따라 SKEBS 평균 예보가 크게 달라질 수 있기 때문에 물리모수화 민감도실험을 하였고, Ensemble size를 늘려 분석한 실험, 그리고 마지막으로 SKEBS parameter의 Stochastic forcing perturbation magnitude를 달리하거나 decorrelation time을 다르게 설정하여 SKEBS 앙상블 스킴에 대한 민감도 실험을 진행하였다.

3.2.1. Physics Parameterization

적운모수화의 선택에 따른 앙상블 예보의 변화를 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(Figure 8). 적운모수화에 대한 민감도 실험을 하기 위해 적운모수화를 Tiedtke에서 Kain-Fritch로 바꾸고 그 외의 다른 물리모수화는 동일하게 설정하였다. Tiedtke 적운모수화를 사용한 SKEBS 앙상블 멤버들은 태풍의 북상속도를 상당히 느리게 표현한 반면(Figure 2), Kain Fritsch 적운모수화를 사용한 SKEBS 앙상블 멤버들은 실제트랙보다 다소 동쪽으로 치우치긴 했지만 최종 북상지점

은 실제 트랙과 유사한 결과를 보였다(Figure 9). 이러한 북상 속도 모의의 차이가 적운 모수화의 특성에 따른 고유의 차이로 모의 된다면 이는 systematic error로 보이기 때문에 앙상블 예보를 통해 표현하려는 random error 와는 구분하여야 한다.

두 모수화의 차이를 좀더 자세히 살펴보기 위해 Sea level pressure(contour) 와 Surface wind(filled)(Figure 10)를 분석해보았다. Kain Fritsch 적운모수화가 Tiedtke 적운모수화 보다 Min sea level pressure가 더 낮게 모의 되었고 풍속 또한 태풍 중심에서 더 크게 모의 되었다. 이를 통해서 Kain Fritsch 적운모수화로 모의한 태풍이 더 강하다고 짐작할 수 있다. Streamline과 950 hPa Relative vorticity(filled) 분석을 보면(Figure 10) Kain Fritsch 적운모수화로 모의된 그림은 streamline이 태풍 중심으로 불어 들어가는 바람장의 형태가 매끈하고 좁은데 반해 Tiedtke 적운모수화로 모의한 streamline은 상대적으로 바람장의 형태가 다소 꺾어지고 넓은 형태로 분포한다. 또한 북태평양 고기압의 흐름이 Kain Fritsch 적운모수화에서 Tiedtke 모수화보다 작게 모의 되어 Tietke로 모의한 태풍보다 상대적으로 동해안으로 치우친 앙상블 멤버가 많이 보인다. Relative vorticity는 Kain-Fritch 적운모수화로 모의 한 태풍에서는 작고 원의 형태가 더 뚜렷하지만, Tiedtke에서는 그 모습이 상대적으로 흐트러져 보인다. 이로 인해 Kain Fitsch 적운모수화로 더 빠른 태풍이 모의 되면서 태풍이동

에 영향을 준 것으로 보인다. Cross section 그림을 보면(Figure 10) virtual potential temperature (contour) 와 relative humidity (filled)의 연직 분포, 그리고 surface wind 의 세기를 나타낸다. Kain Fritch에서 상대적으로 높은 기온이 모의되었고 태풍 중심 주변의 연직 분포가 동서방향으로 대칭적인 상대습도 형태가 나타나며 태풍의 눈 에서는 낮은 상태습도가 나타난다. 이로 인해 태풍의 눈 주변으로는 기온과 상대습도가 높아 deep convection 의 경향이 보이고 태풍의 구조가 명확하다. 반면에 Tiedtke에서는 상대적으로 기온이 낮고 상대습도는 태풍 중심의 연직 분포가 동서방향으로 비대칭적인 형태가 나타나며 태풍의 눈도 명확히 표현되지 않았다. 또한 Kain Fritch 에서는 태풍 중심으로 최대 풍속이 38 m/s 로 Tiedtke의 25 m/s 보다 강하게 모의 되었고 중심과의 바람 경도 역시 컸다. 이렇게 Kain Fritch가 모의한 태풍의 구조가 상대적으로 잘 조직되어 있으며 이런 차이가 태풍 이동에 영향을 주었을 것이라고 생각한다.

해면기압은 해수면 위로의 연직 평균 기온에 반비례 하기 때문에 중심기압이 낮다는 것은 그만큼 기온이 높고 수증기가 많다는 것을 의미한다. 즉 태풍이 모의되면서 잠열 방출에 의해 기온이 올라가고 그로 인해 앞서 보인 것처럼 여러 변수에 대한 차이를 야기시켰다. 이러한 잠열방출의 정도는 모델에서 선택한 물리과정에 의해 크게 달라질 수 있으며 이는 선택한 물리과정에 따르는 systematic bias라고 생각할 수 있다.

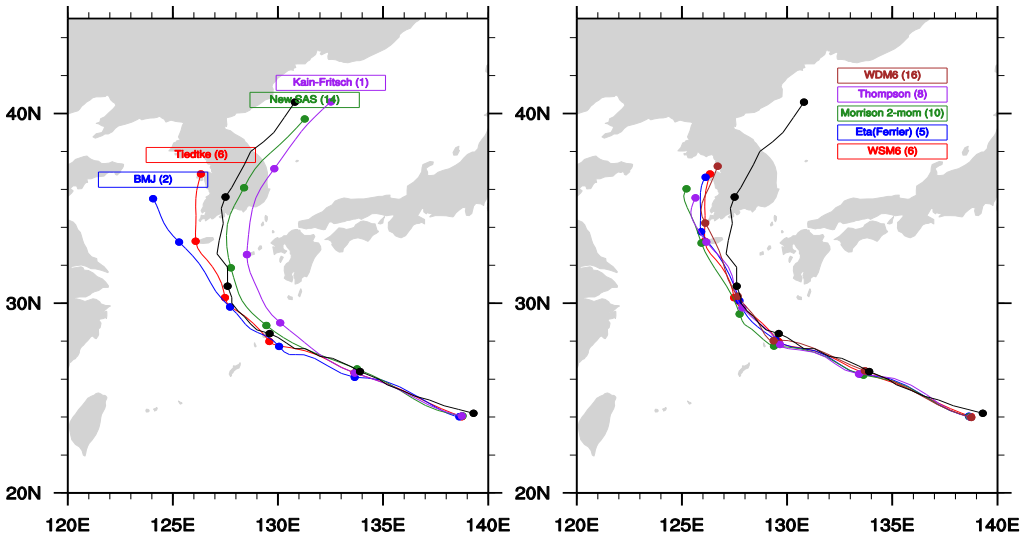

Figure 8 Typhoon track sensitivity to parameterizations. <Left> Cumulus parameterizations, <Right> Microphysics parameterizations. Dot for 24 hourly positions. Black track corresponds to RSMC best track.

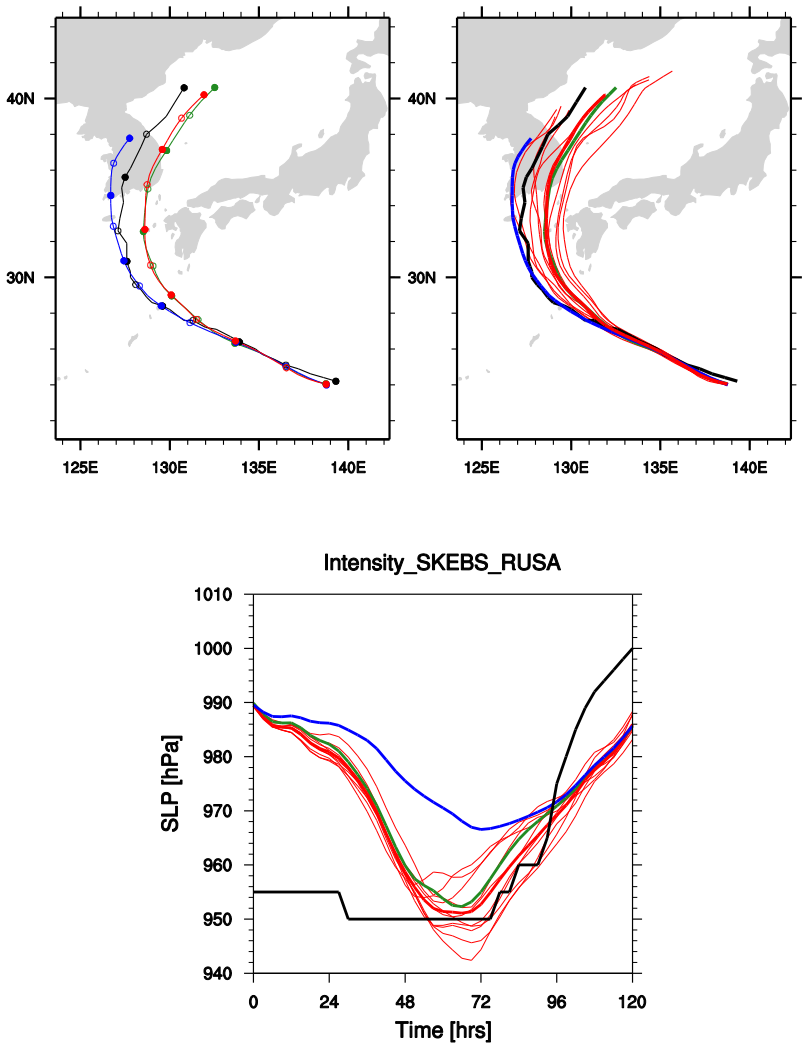

Figure 9 Typhoon model result using CTRL physics set except Kain Fritsch cumulus parameterization. <Upper Left> Black – Best track, Red – SKEBS ensemble mean, Blue – PHYS ensemble mean, Green – CTRL, <Upper Right> Same as <Upper Left> except inclusion of SKEBS ensemble members, <Bottom> Same as <Upper Right> except for minimum sea level pressure.

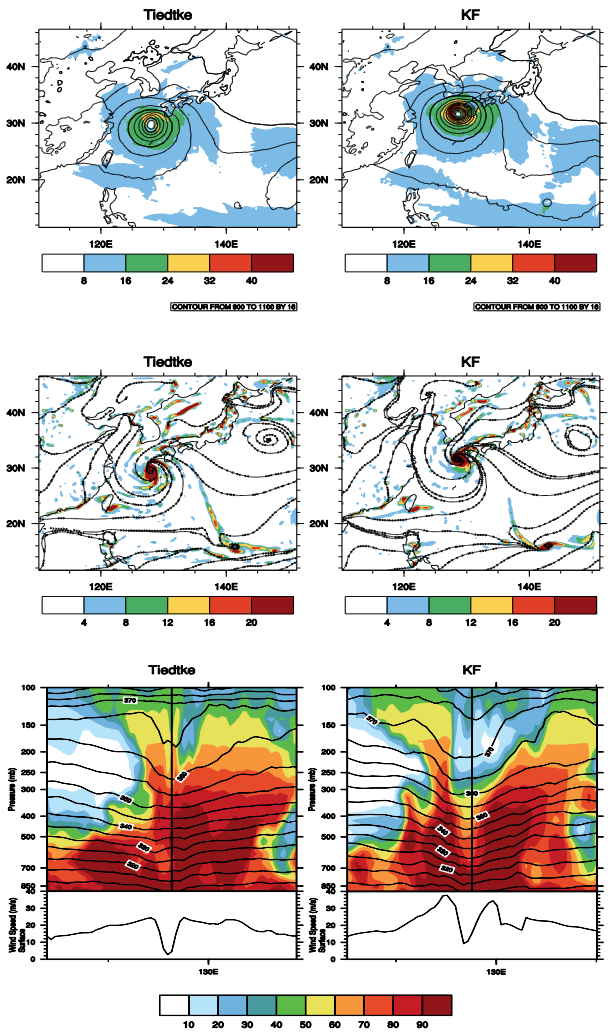

Figure 10 <Upper> Surface wind speed (m/s) (filled), mean sea level pressure (contour) for Tiedtke and Kain Fritsch cumulus parameterizations. <Middle> Relative vorticity ($10^{-5}s^{-1}$) (filled) and surface wind streamline. <Bottom> West-East Cross Section along the typhoon center. Relative humidity (%), virtual temperature (‘C), and surface wind speed attached below

3.2.2. Ensemble Size

앙상블 멤버를 기존 10개에서 30개로 늘려서 모의 하였다. 위치모의의 RMSE는 CTRL로 모의한 결과보다는 개선됐지만 10개로 모의한 결과보다 더 높은 오차를 보였다(Figure 11). 앙상블 스프레드는 60 시간까지는 조금 커지는 듯하지만 그 이후로부터 조금 작게 모의되는 것으로 보인다(Figure 11). 강도면 에서는 태풍 최성기로 모의된 84 시간에서 좀더 강하게 모의되었지만 큰 차이는 보이지 않는다(Figure 11). 스프레드 분석에서는 84 시간까지는 10개 앙상블 멤버보다 더 크게 모의했고 그 이후부터는 작게 모의했다. 즉, 이러한 결과를 보아 모델에러의 불확실성을 표현하는데 있어 10개를 가지고 표현하는 것과 30개를 가지고 표현하는 것의 차이는 미미하다.

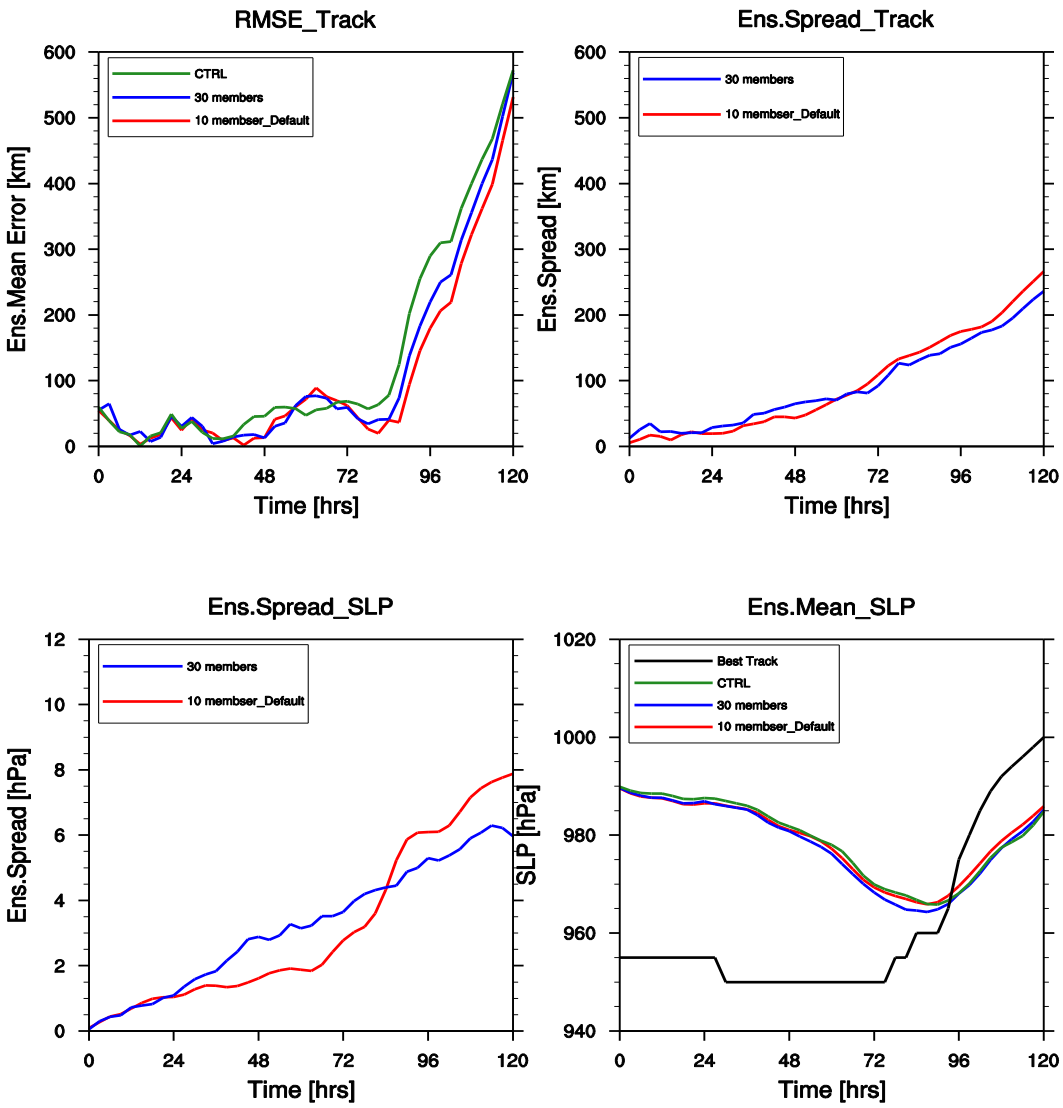

Figure 11 SKEBS sensitivity test results for ensemble size. Green – CTRL, Red – 10 members, Blue – 30 members. <Upper Left> Track error (km). <Upper Right> Track error spread (km). <Lower Left> Minimum sea level pressure spread (hPa). <Lower Right> Minimum sea level pressure (hPa).

3.2.3. SKEBS forcing parameter tuning

SKEBS forcing parameter를 다르게 설정하여 분석하였다. 첫 번째 실험은 WRF SKEBS backscatter ratio를 바꾸어 Stochastic forcing perturbation magnitude 를 다르게 설정하여 실험을 하였다. streamfunction과 temperature에 해당하는 에너지 주입량을 달리하면서 에너지 주입량에 따라 SKEBS 앙상블 예보의 반응을 살펴보았다. 두 번째 실험은 decorrelation time을 다르게 설정하여 이 전 타임스텝과 상관성을 지니는 정도를 다르게 적용시켜 SKEBS 앙상블 예보의 반응을 살펴보았다.

i) Stochastic forcing perturbation magnitude

i.a) Ensemble mean forecast – Track and Intensity

SKEBS 가 계산하는 Stochastic forcing perturbation magnitude를 다르게 설정하여 에너지 주입량에 따라 다르게 반응하는 양상을 확인해보았다. 식(10)의 Stochastic forcing perturbation magnitude 를 결정하는 backscatter ratio인 B_{ψ}를 변형시켜 계산하는 방법인데, 주입되는 에너지량을 달리하여 모의 하면서 식(5)의 주입되는 에너지의 amplitude인 $g_{k,l}$ 가 바뀌면서 다음 타임스텝에서 영향을 주는 것이다. 실험1인 Figure 12의 첫 번째 그림인 Default 에서 temperature 값은 그대로 두고 streamfunction

값을 2배로 하였고, 실험 2인 Figure 12은 streamfunction 값을 그대로 두고 temperature 값을 2배로 하였으며 실험 3인 Figure 12는 streamfunction 과 temperature 값 모두 2배로 크게 하여 태풍경로에 대한 RMSE와 Spread를 구하였다. 세 가지 실험에서 track 앙상블 평균 예보가 CTRL 과 Default 실험보다 향상된 결과를 보였다. 두 변수의 크기를 증가시킨 실험 3에서 오차가 가장 크게 감소하였고, Streamfunction을 증가시킨 실험보다 Temperature을 증가시킨 실험의 RMSE가 더 감소하였다(Figure 13). Spread 를 살펴보면(Figure 13), 세가지 실험 모두 default 실험보다 spread가 증가했으며 실험1과 실험2의 spread 는 비슷하게 모의 되었고 실험3의 spread가 가장 크게 모의 되었다. 이 사례에서는 실험 2가 가장 Error-spread consistency 경향을 보이면서 위치의 불확실성을 잘 표현한 것으로 보인다. 태풍 강도 모의를 보면 모든 실험에서 앙상블 평균값의 변화가 없었던 것으로 보이고 spread는 실험3에서 가장 크고, 실험 2가 실험1보다 스프레드가 크게 모의 되었다. 세 실험 모두 Default에 비해 위치에 대한 평균 예보는 개선시킨 것으로 보이지만 강도에 대한 평균 예보는 개선시키지 못한 것으로 보인다. Default 실험에서는 스프레드가 상당히 작았는데 에너지 주입량을 늘리면서 세 실험모두 Spread가 default 실험보다 크게 모의된 것을 확인할 수 있다.

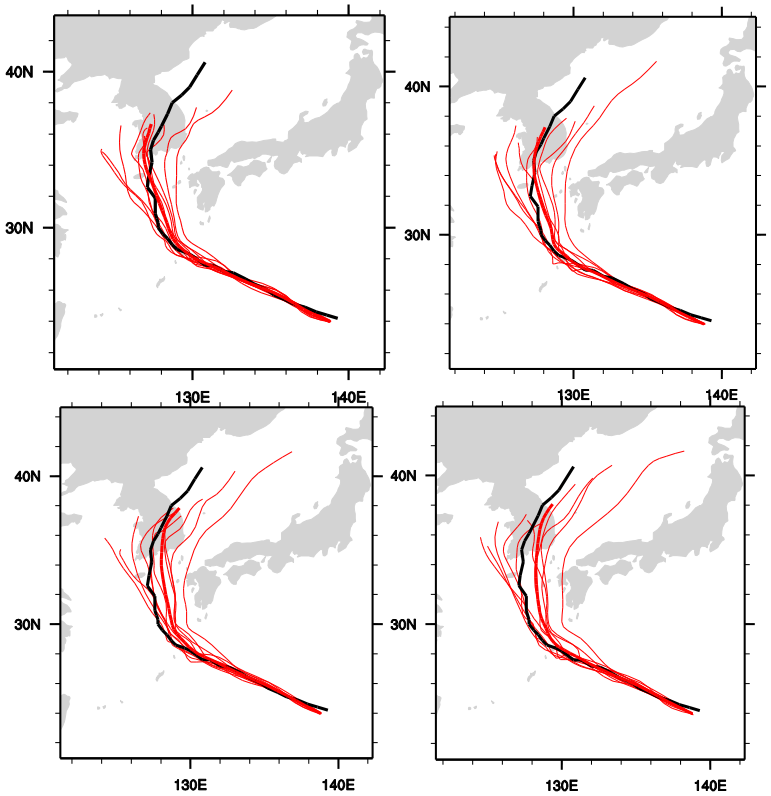

Figure 12 Ensemble track sensitivity result. <Upper Left> Default, <Upper Right> Set1, <Lower Left> Set 2, <Lower Right> Set 3. See the text for parameter setting details.

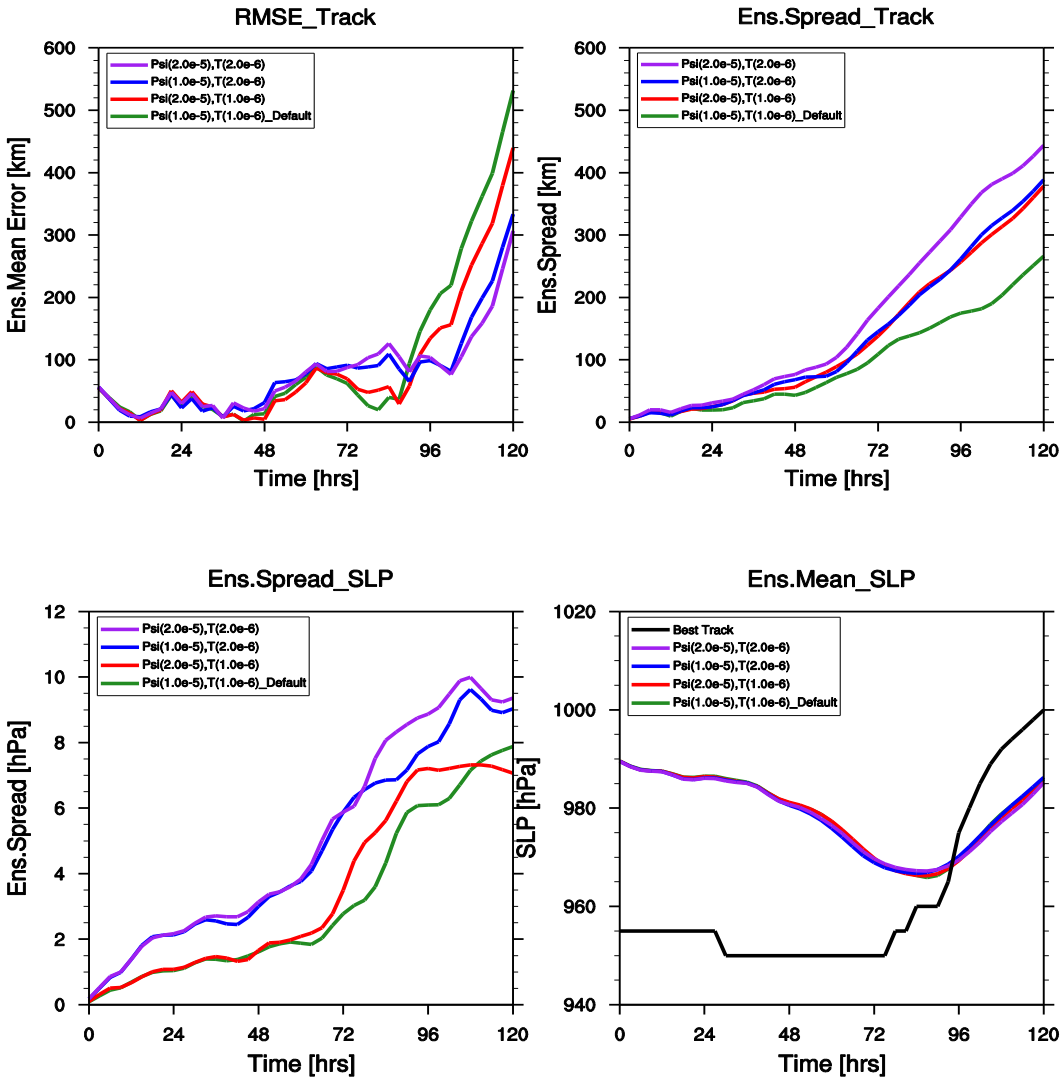

Figure 13 SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio. Green – Default, Red – Set1, Blue – Set 2, Purple – Set 3, Black – Best track. <Upper Left> Track error (km). <Upper Right> Track error spread (km). <Lower Left> Minimum sea level pressure spread (hPa). <Lower Right> Minimum sea level pressure (hPa).

i.b) Spatial distribution

에너지 주입량을 변화시켰을 때 모델에서 다르게 반응하는 양상을 확인하기 위해 해당 도메인에 해당하는 기온(Figure 14)과 바람(Figure 15)의 공간분포의 RMSE와 Spread의 분포 및 크기를 분석했다. Figure 14에서 도메인 전체를 평균한 온도의 RMSE는 CTRL이 0.97, SKEBS default 실험이 0.83, 실험1이 0.82, 실험2가 0.76, 그리고 실험3이 0.78로 세 실험 모두 온도의 앙상블 평균 예보가 향상된 결과를 보였다. 또한 Streamfunction을 증가시킨 실험보다 Temperature을 증가시킨 실험의 온도에 대한 RMSE가 더 감소하였다(Figure 14). 태풍 주변의 오차를 살펴보면 세 실험 모두 CTRL의 결과 보다 오차가 작은 것으로 보인다. 앙상블 Spread 를 확인해 보면 도메인 전체를 평균한 앙상블 spread 값은 default 실험에서 0.6, 실험1에서 0.67, 실험2에서 0.84, 실험3에서 0.89로 에너지 주입량이 많을수록 앙상블 spread 기 큰 값을 보였다. Error-spread consistency 를 살펴보면 실험1에서 under-dispersive (0.82~0.67)의 경향이 보였고 실험2에서는 over-dispersive (0.76~0.84), 실험3에서는 over-dispersive (0.78~0.89) 경향이 보였고 공간분포도 앞서 보인 태풍 경로에 대한 모의 결과와 같이 실험2가 예보의 불확실성을 가장 잘 표현한 것으로 보인다. 태풍주변의 spread 양상을 살펴보면, 실험1과 실험2는 불확실성을 잘 표현한 것으로 보이고 실험3은 상대적으로 과대 모의한 것으로(Over-dispersive) 보인다.

표층 풍속을 살펴보면 (Figure 15) 도메인 전체를 평균한 RMSE값은 CTRL 실험이 1.93, SKEBS default 실험이 1.57, 실험1이 1.55, 실험2가 1.49, 그리고 실험3이 1.53으로 세 실험에서 풍속의 앙상블 평균 예보가 CTRL, Default 실험보다 향상된 결과를 보였으며 Streamfunction을 증가시킨 실험보다 Temperature을 증가시킨 실험의 풍속에 대한 RMSE가 더 감소하였다(Figure 15). 태풍 주변의 오차를 살펴보면 세 실험 모두 CTRL의 결과 보다 오차가 작은 것으로 보인다. 앙상블 Spread 를 확인해 보면 도메인 전체를 평균한 앙상블 spread 값은 default 실험에서 1.37, 실험1에서 1.6, 실험2에서 1.83, 실험3에서 2.01로 에너지 주입량이 많을수록 앙상블 spread 역시 큰 값을 보였다. Error-spread consistency 를 살펴보면 실험1에서 well-spread (1.55~1.60)의 경향이 보였고 실험2에서는 over-dispersive (1.49~1.83), 실험3에서는 over-dispersive (1.53~2.01) 경향이 보였다. 풍속에 대한 공간분포를 확인하면 실험1이 불확실성을 잘 표현한 것으로 보인다. 태풍주변의 spread 양상을 살펴보면, 세 실험 모두 불확실성을 과대 모의한 것으로(over-dispersive) 보인다.

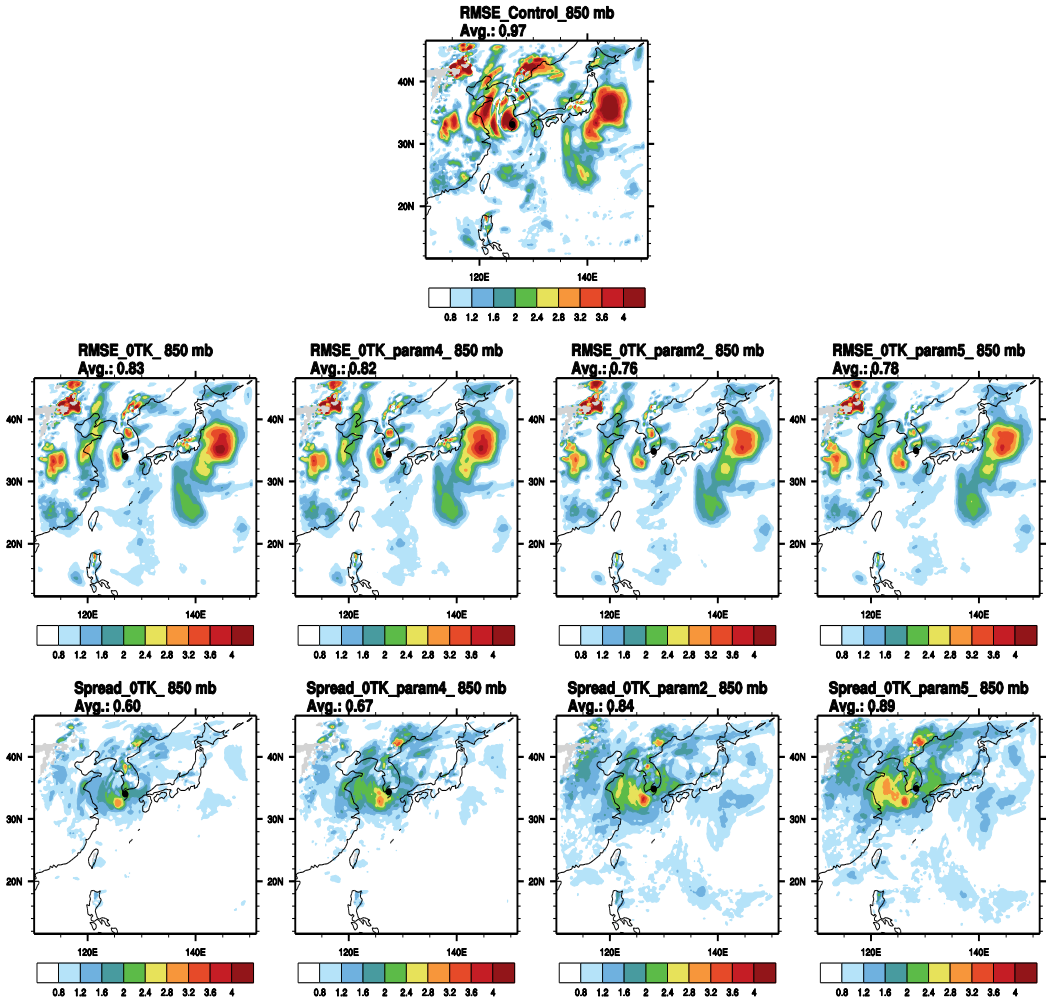

Figure 14 SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio.96-hour 850hPa temperature (K). <Upper> RMSE of CTRL, <Middle> RMSE for Default, Set1, Set2, Set3, <Bottom> Spread for Default, Set1, Set2, Set3. Markers around Korean Peninsula represent the center of Typhoon.

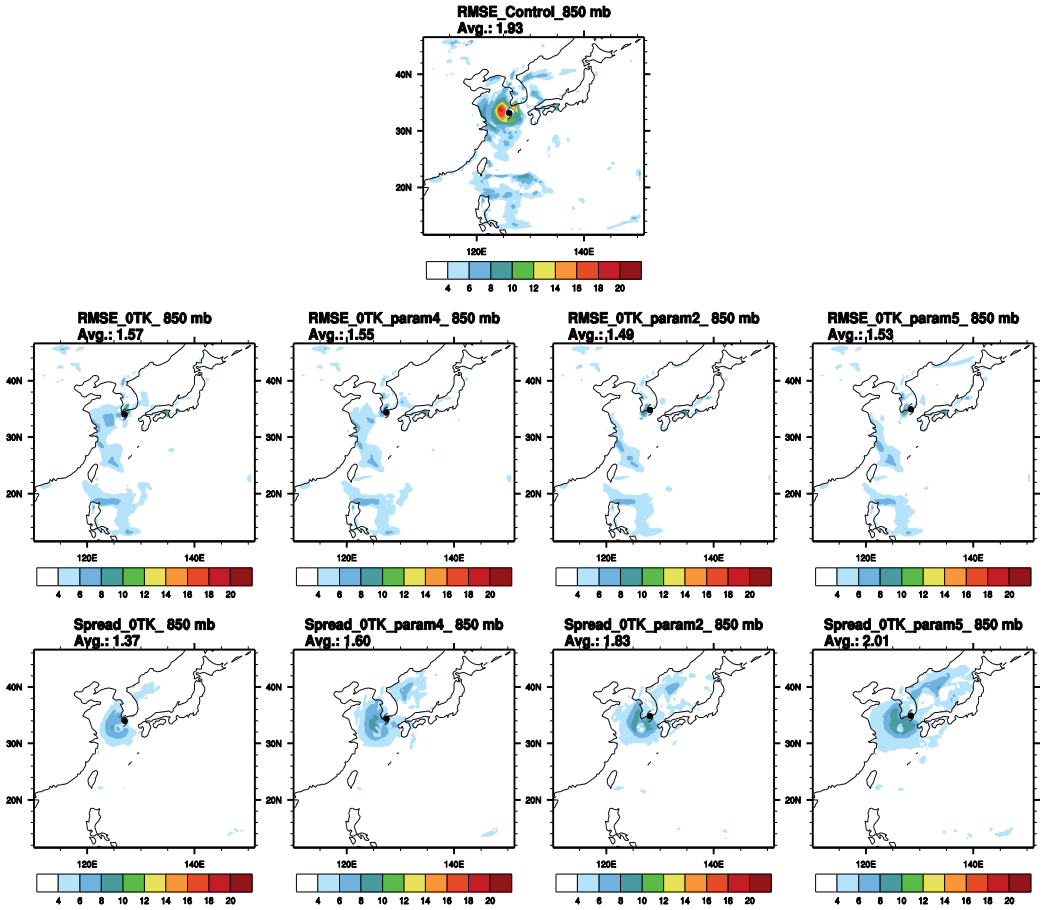

Figure 15 Same as Figure 14 except for surface wind speed (m/s)

ii) Decorrelation time

SKEBS forcing parameter tuning 의 또 다른 방법으로 decorrelation time을 변경하여 실험하였다. 식(9)에서 τ는 decorrelation time을 의미하는데, 다음 타임스텝의 섭동이 이 전 타임스텝의 섭동과 상관성을 가지는 정도를 결정하는 값이다. τ가 커질수록 식(9)의 α가 작아지고 식(5)에서 이전 타임스텝과 상관성의 정도가 커지면서 다음 타임스텝의 에너지 주입량을 결정하게 된다. 본 실험에서는 decorrelation time을 default 값인 30분에서 3시간으로 변경하여 전 타임스텝과의 상관성을 크게 하여 모의했다. Figure 16 에서 decorrelation time을 30분으로 했을 때보다 3시간으로 했을 때 예보 54시간부터 90시간 까지 RMSE가 10 km 정도가 감소한 것으로 보이며 spread 값은 기존과 변화가 없었다. Decorrelation time을 시간스케일이 큰 대기현상에 대해서는 크게, 시간스케일이 작은 대기현상에 대해서는 작게 설정 함으로써 대기 상태 따라 다르게 설정 해야 할 것 같다.

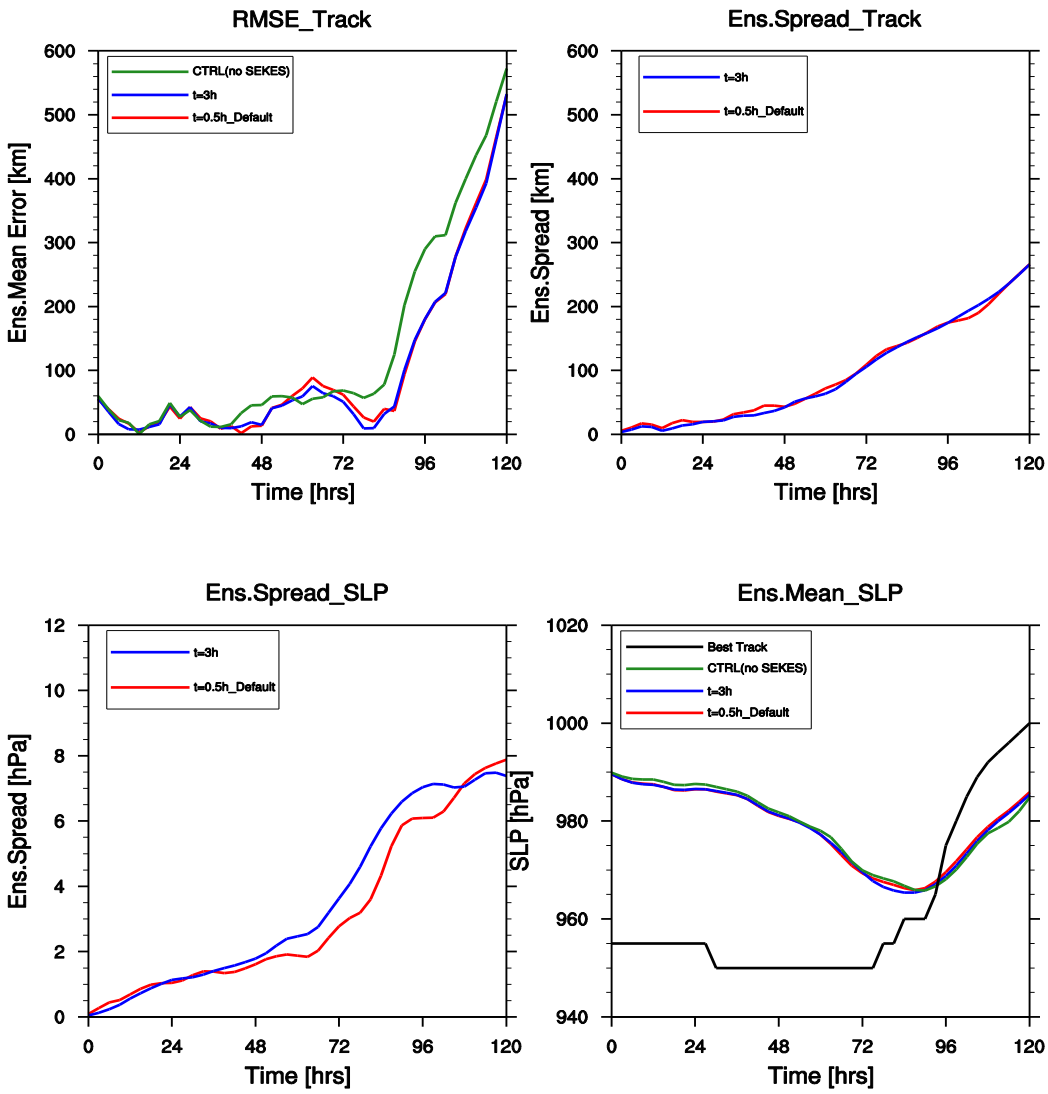

Figure 16 SKEBS sensitivity test results for backscatter ratio. Green – Default, Red – Set1, Blue – Set 2, Purple – Set 3, Black – Best track. <Upper Left> Track error (km). <Upper Right> Track error spread (km). <Lower Left> Minimum sea level pressure spread (hPa). <Lower Right> Minimum sea level pressure (hPa).

4. 요약

모델의 불확실성을 표현하기 위해서 모델에러앙상블 스킴 SKEBS와 PHYS 를 사용하여 태풍 루사(2002) 를 모의하였다. 태풍 경로를 모의한 결과 평균 예보가 규준실험보다 향상 되었고 PHYS의 결과가 SKEBS의 결과보다 좀더 개선 된 결과를 보였다. 두 앙상블 멤버의 스프레드를 확인한 결과 SKEBS를 적용한 앙상블 스프레드는 예보 60시간 까지는 모델의 불확실성을 충분히 표현했지만 그 이후 시간에서는 과소모의 된 경향을 보였다. PHYS를 적용한 앙상블 스프레드는 전반적인 예보 시간 동안 과대모의 된 경향을 보였지만 5일 예보 시점에서 모델의 불확실성을 충분히 표현했다. 태풍 상륙지점을 비교했을 때 CTRL 의 태풍 트랙은 서해상으로 빠진 반면 SKEBS와 PHYS로 모의한 태풍은 상륙하여 실제와 유하사게 모의 했다. SKEBS의 결과는 물리모수화에 의한 systematic bias가 존재하였다. 하지만 PHYS의 결과는 서로 다른 물리모수화의 선택으로 인해 평균 예보 오차가 개선 되는 것처럼 보인다.

예보 96시간의 850 hPa 기온과 표층풍속의 공간분포를 살펴보면 두 경우에서 모두 SKEBS와 PHYS로 모의한 도메인의 전체 평균 오차가 CTRL의 결과와 비교해 감소하였고, SKEBS의 결과 는 상대적으로 태풍주변에서 모델의 불확실성을 잘 표현했다.

SKEBS 앙상블 스킴이 물리모수화에 따라, 특히 적운모수화에 민감하게 반응하는 systematic bias를 보였다. Default 로 사용한 Tiedtke 적운모수화를 Kain Fritsch 적운모수화로 바꿔서 모의 한 결과 북상속도에 대해서 향상되었다. Kain Fritsch 적운모수화로 모의한 태풍의 구조가 더 명확하고 잘 발달 된 형태였으며 풍속 역시 더 강했다. 이로 인해 Kain Fritsch 적운모수화로 모의한 태풍이 Tiedtke 적운모수화로 모의한 태풍보다 더 강하고 빠르게 모의 된 것으로 보인다.

SKEBS forcing parameter tuning을 달리하여 분석하였다. streamfunction과 temperature에 해당하는 에너지 주입량을 달리하여 SKEBS가 다르게 반응하였고 더 많은 에너지가 주입될수록 앙상블 멤버들의 spread가 컸다. Default 실험에서는 북상속도를 모의 하지 못했지만 에너지가 주입 됨으로써 북상속도를 모의한 멤버가 존재하였고 결국 Default 실험보다 모델의 불확실성을 표현하는데 향상된 결과를 보였다. Decorrelation time 을 0.5 h 에서 3 h 로 변형 시켰을 때 예보 54시간부터 90시간 까지 RMSE가 감소했다.

5. 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. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **66,** 603-626.

Berner, J., 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. Weather Rev.*, **139,** 1972-1995.

Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **125,** 2887-2908.

Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137,** 553-597.

Doblas-Reyes, F. J., and Coauthors, 2009: Addressing model uncertainty in seasonal and annual dynamical ensemble forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **135,** 1538-1559.

Epstein, E. S., 1969: STOCHASTIC DYNAMIC PREDICTION. *Tellus*, **21,** 739-&.

Hacker, J. P., and Coauthors, 2011: The U.S. Air Force Weather Agency's mesoscale ensemble: scientific description and performance results. *Tellus Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography*, **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 Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography*, **57,** 219-233.

Houtekamer, P. L., L. Lefaivre, J. Derome, H. Ritchie, and H. L. Mitchell, 1996: A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon. Weather Rev.*, **124,** 1225-1242.

Krishnamurti, T. N., and Coauthors, 2000: Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *Journal of Climate*, **13,** 4196-4216.

Lorenz, E. N., 1963: DETERMINISTIC NONPERIODIC FLOW. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **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. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **127,** 279-304.

Shutts, G., 2005: A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **131,** 3079-3102.

Stainforth, D. A., and Coauthors, 2005: Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*, **433,** 403-406.

Abstract

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

Sena Kim

School of Earth and Environmental Sciences

The Graduate School

Seoul National University

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 numerical weather prediction system is occurred by parameterization of unresolved scale and energy losses from the sub-scale physical processes etc. In this study, we focused on model error, and performed ensemble forecast to represent model uncertainty. By applying multi-physics scheme (PHYS) and stochastic kinetic energy backscatter scheme (SKEBS) to typhoon Rusa (2002), we verified the performance of two schemes. Both ensemble mean forecast of typhoon track were improved compared

to control run. The results using PHYS was improved by 28% and the results using SKEBS was improved by 7%. Both of ensemble mean errors were increased rapidly when forecast time 84 hours, and both of ensemble spread were increased gradually during time integration. The results using SKEBS represented model error well during forecast time 96 hours, and after that it tended to simulate as an under-dispersive way. The model simulation using PHYS overestimated the ensemble mean error during time integration, and represented well at the forecast time 120 hours. The moving speed using PHYS was closest to the best track, especially after landfall. In the sensitivity tests on the model uncertainty of SKEBS, ensemble mean forecast was sensitive to physics parameterization. By changing the value of SKEBS forcing parameter, the results of ensemble spread, ensemble mean errors, and moving speed were improved by default experiment.

Keywords: ensemble forecast, model uncertainty, tropical cyclone forecast, stochastic kinetic energy backscatter

Student number: 2012-23076