

시공간 통합형 수치예보시스템 개발 현황

박래설, 최석진, 배수야, 구명서, 이은희, 수치모델실

차세대수치예보모델개발사업단
(Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems: KIAPS)

다양한 기상현상을 초단기(~6시간)부터 연장중기(~30일)까지 분석·예측하는 수치예보시스템 개발

태풍 호우 대설 등 위험기상
조기경보체계

이상 고온·저온 등 이음새 없는 확률 예측
블로킹 등 연장중기 예측성 반영



연장 중기예보(~30일)

12km 목표
양상블(30km, 최대 200멤버 수용)

- 양상블 확률예측체계
- 경계장 고도화
- 극지 및 중간대기

단·중기예보(~10일)

5 km 내외, 137층 이상
양상블(15km, 최대 200멤버 수용)

- 고해상도
- 고도화
- 초기장

초단기예보(~36시간)

1~5 km 목표

- 가변격자 모델
- 격자적응
- 인공지능

• 가용 전산자원에따라 해상도와 양상블표본크기 변동 가능성



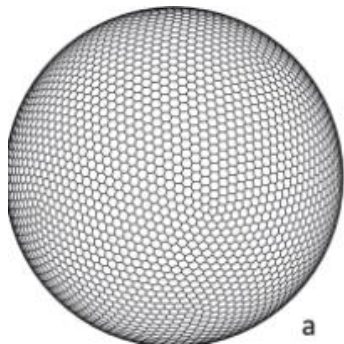
- 단기 예측기술 개발

주요 개발 목표	주요 개발 기술
고해상도 모델	<ul style="list-style-type: none"> [역학코어] 안정화된 연직 격자체계, 적응시간간격 기법 [물리과정] 3차원 복사과정 및 상세 구름물리
가변격자 모델	<ul style="list-style-type: none"> [역학코어] 가변격자 역학코어, 가변격자 지형자료 생성도구 [물리과정] 격자적응 물리과정

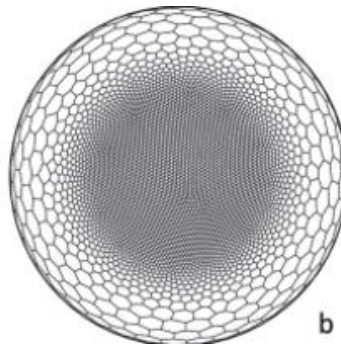
- 연장중기 예측기술 개발

주요 개발 목표	주요 개발 기술
결합모델링 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 해양/해빙/하천유수/파랑 offline 모델 대기-해양-해빙-하천유수-파랑 결합모델링 시스템 Hindcast 시스템 및 결합자료동화 시스템
원격상관성	<ul style="list-style-type: none"> 중간대기/극지 예측성, MJO 예측성 등의 고도화 원격상관성 진단 및 개선
물리과정 일관성/연계성	<ul style="list-style-type: none"> 통합형 적운대류 물리과정 에어로졸-구름물리 연계과정 구름-구름물 일관성: 구름진단방안 개발
기타	<ul style="list-style-type: none"> 양상블 시스템, 확률예측 시스템 등

균일격자
(uniform-resolution grid)



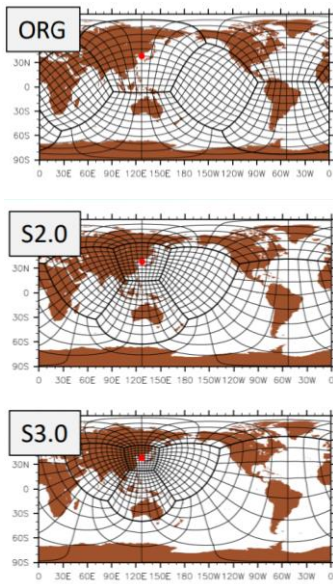
가변격자
(variable-resolution grid)



- 가변격자모델(variable-resolution model): 다양한 해상도의 격자상에서 구현되는 수치모델
- 적은 자원으로 특정 지역의 상세모델링이 가능하도록 한 방안
- 고해상도 모델의 필요성과 제한적인 계산자원으로부터 가변격자 모델의 필요성 제기
- 선행된 국제공동 연구로부터 가변격자모델은 “High quality regional and good quality global” 예측결과를 제공할 수 있음을 확인 (Fox-Rabinovitz et al., 2006)

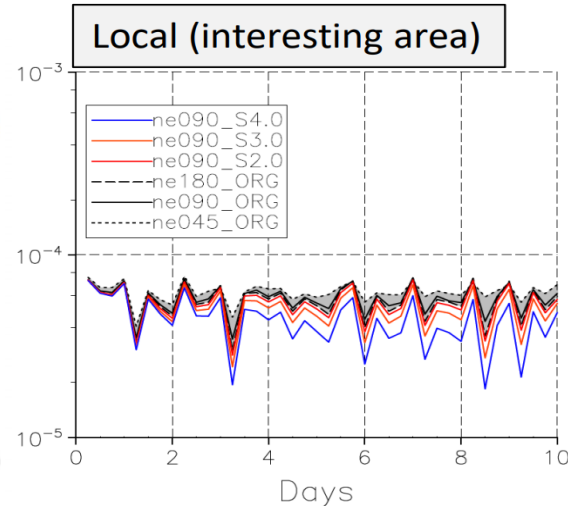
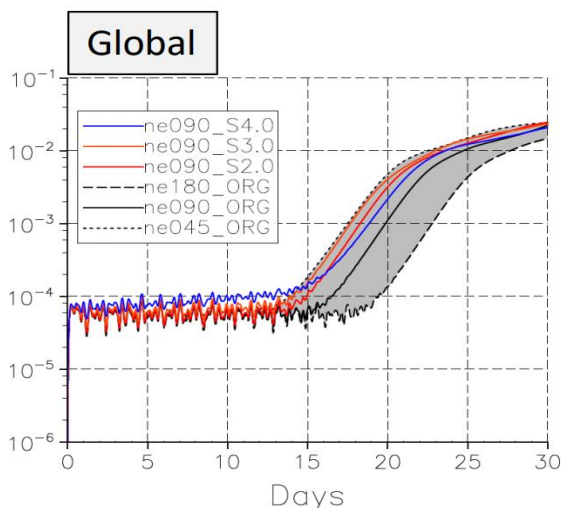
- KIM에 적용하기 매우 용이하며, 기대했던 결과 확인
- 단기 예측에서 특히, 특정 지역에서의 예측성은 매우 우수함
- 그러나, 전지구규모의 중기 및 연장중기 예측성은 균일격자 모델에 비해 낮음 (약 14일 이후)
- 중심지역의 지구 반대편 저해상도 영역의 성능 저하로 인한 중장기 예측성 저하

민감도 실험 구성

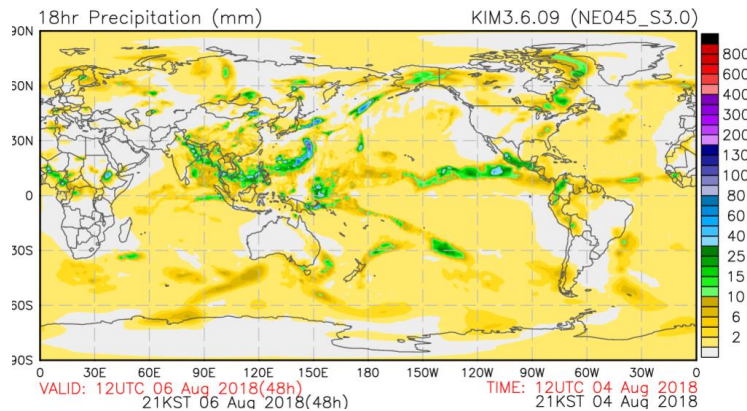
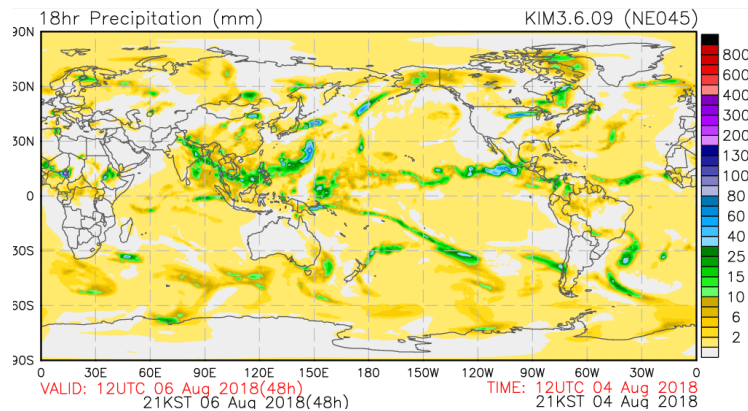
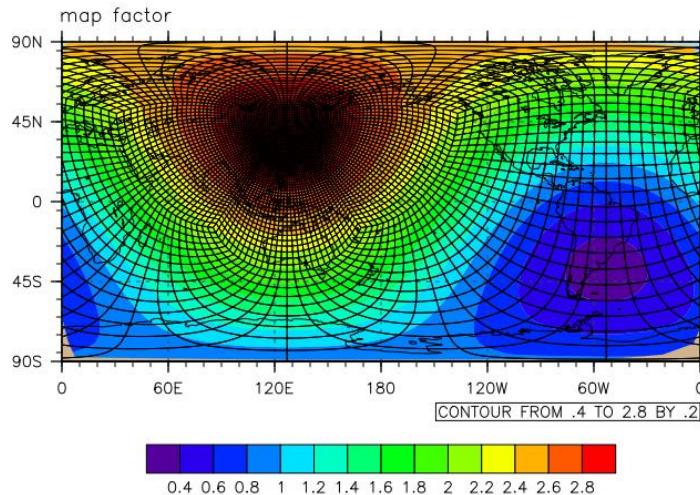
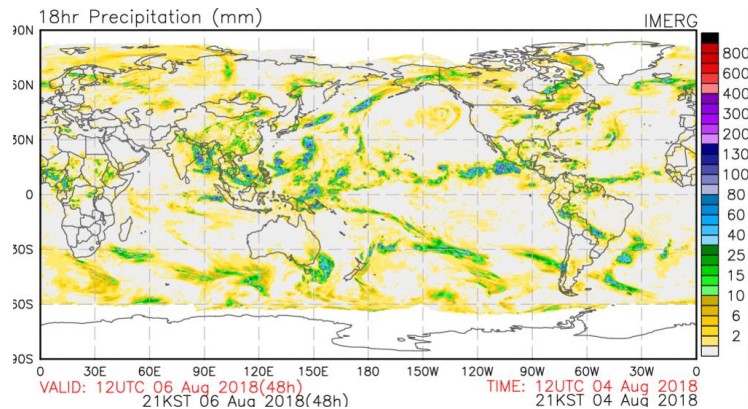


Global L2 error norm

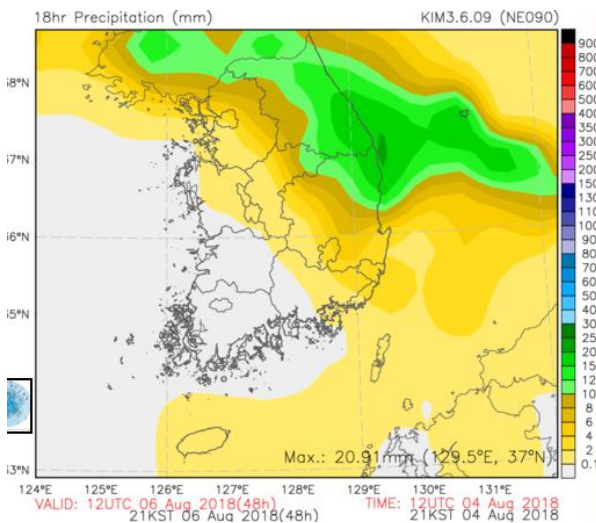
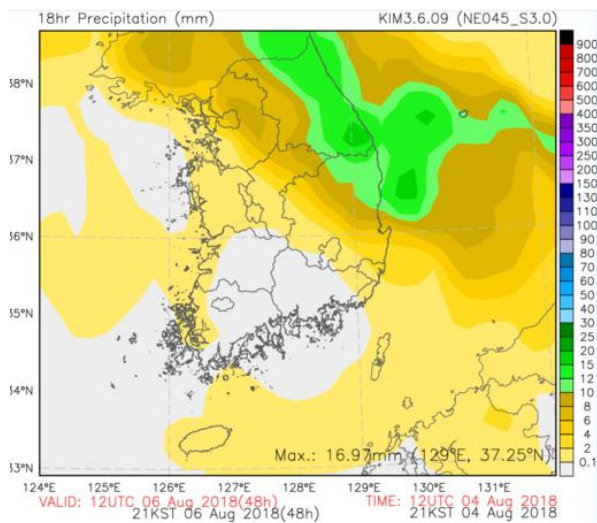
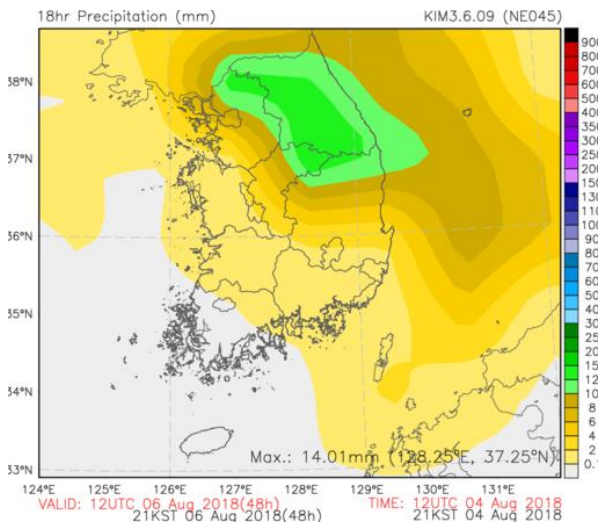
- 지면기압의 시간에 따른 예측 정확성 비교 결과,
- 전구규모: 14일 예측 이후부터 균일격자 대비 성능 저하 확인, 지역규모: 10일 예측까지, 균일격자 대비 성능 우수 확인



- NE45(100 km) 해상도 기반의 S3.0 격자로 시험구동

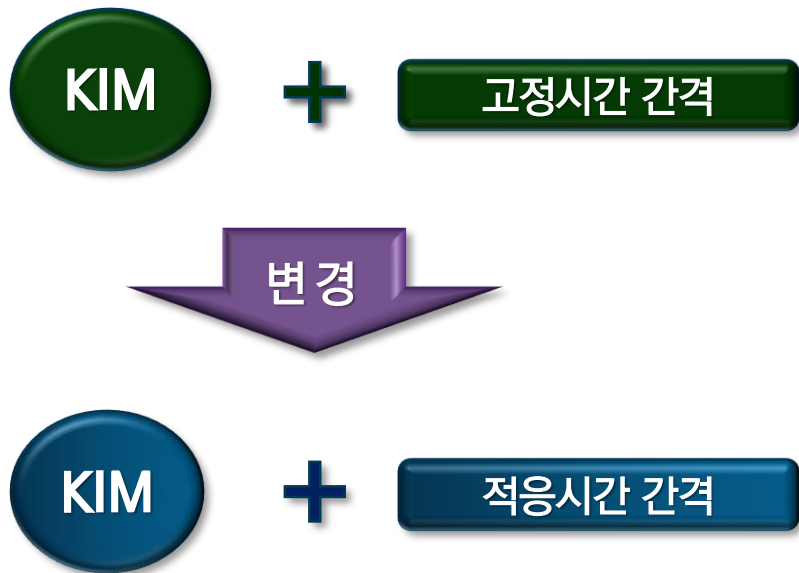


- NE45(100 km) 해상도 기반의 S3.0 격자로 시험구동
- 지역적 고해상도 모의 성능 확인



- ⇒ 가변격자모델의 적분시간간격은 가장 고해상도에 맞춰 설정(NE135~33km)
- ⇒ 따라서, 공간해상도에서는 이점이 있으나 시간해상도 관점에서는 계산효율성이 낮음

- KIM의 시간 이산화 기법 : 시간분할 3차 룽계-쿠타 이산화 기법

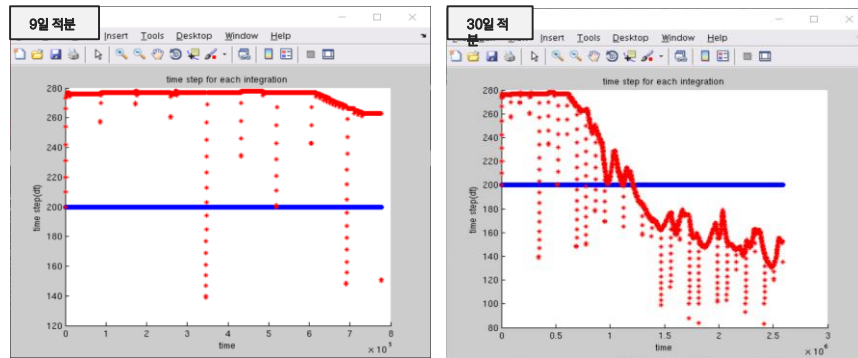


- 현재 KIM에 적용
- 해상도 ne360np3에서의 고정시간 간격 : 25(초)
- 수치해의 안정성을 위해서 비교적 작은 고정시간 간격 적용

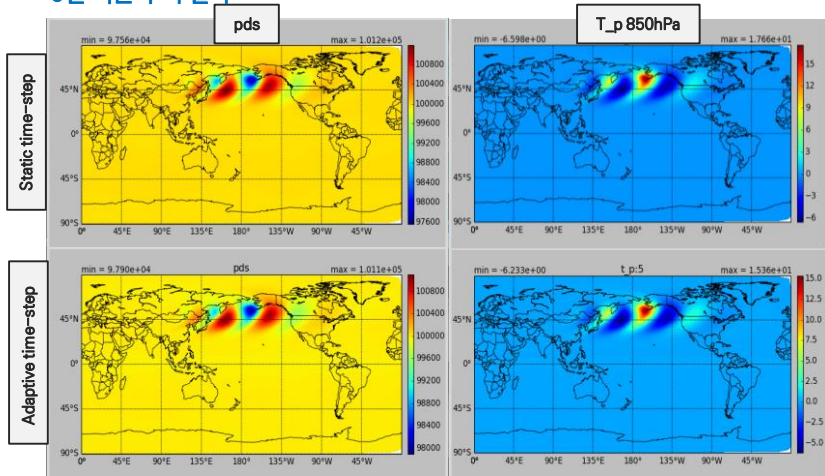
- CFL 조건을 고려하여 매적분시 최대 가용 시간 간격 제시
- 25(초)보다 큰 시간 간격 제시 : 총 실행 시간 단축
- 25(초)보다 작은 시간 간격 제시 : 안정적 수치해 생성

- 해상도 : ne045np3(약 100km) in KIMv3.6.09
- 적분 기간 : 9일 & 30일 (1일마다 출력)
- $\Delta t_s = 200(\text{초})$
- 적응시간 간격 알고리즘 세팅
 - $\text{init_dt} (\Delta t_0) = 200(\text{초})$
 - $\text{dt_max} (\Delta t_{\text{max}}) = 3\Delta t_0$ & $\text{dt_min} (\Delta t_{\text{min}}) = 0.5\Delta t_0$
 - $\text{preset_time} (t_{\text{preset}}) = 1(\text{일})$
 - $\text{reference_cfl} (C_{\text{REF}}) = 0.1$
 - $\text{max_step_inc} = 5(\%)$

❖ 9일 & 30일 적분 기간 동안 적응시간 간격 및 적분 횟수



❖ 9일 적분 수치 결과



적분기간	고정시간 간격		적용시간 간격	
	적분횟수	적분횟수	증감율	
9일	3889	2842	약 27% 감소	
30일	12960	13490	약 4% 증가	

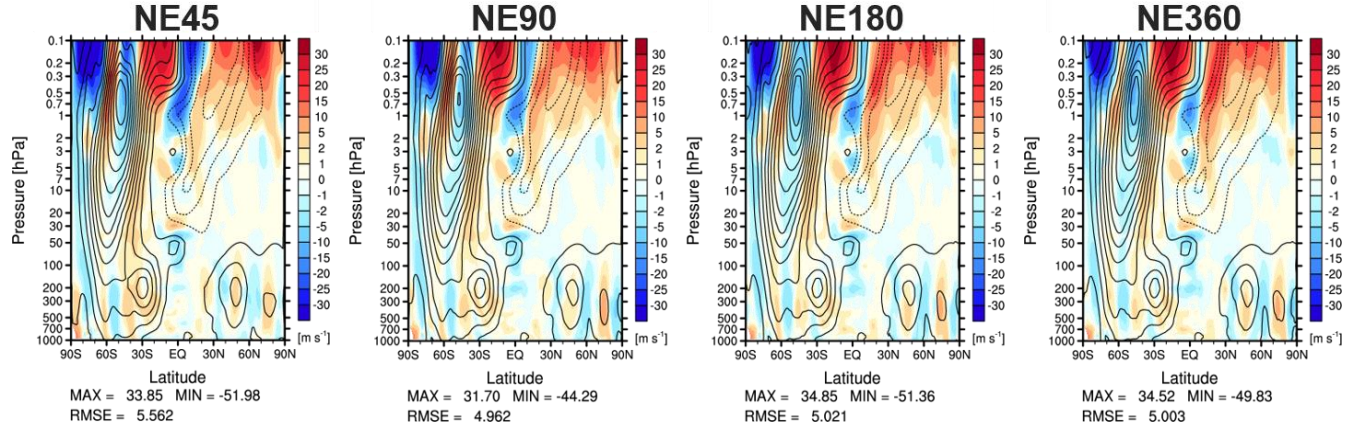
	적용시간 간격	적분횟수	특징
$C_{\text{REF}} < C_{\text{ideal}}$	$\Delta t_a < \Delta t_s$	증가	해의 안정성 보장
$C_{\text{REF}} \geq C_{\text{ideal}}$	$\Delta t_a \geq \Delta t_s$	감소	실행시간 단축 (cf. 9일 적분 실험)

- 가변격자모델에서 계산효율성 극대화
- 연장중기시스템에서 안정성 및 정확성 제고 9

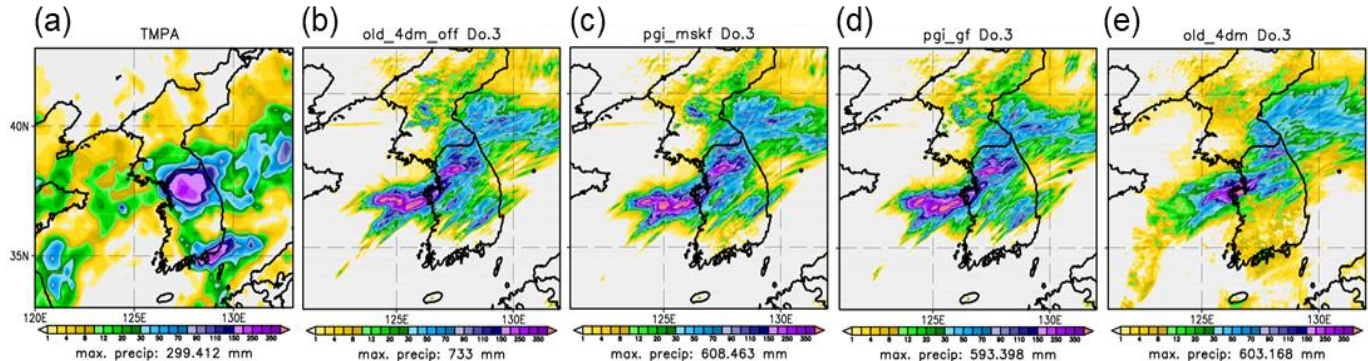
- 모수화: 수평적으로 격자보다 작은 규모의 현상, 격자상에서 모의(계산)할 수 없는 현상
주로 연직 방향의 움직임 (경계층, 아격자산악(비산악)중력파, (깊은/얕은) 적운대류)
- Scale-aware: 규모인지의, 해상도 의존성 고려한, 해상도에 상관없이 적용할 수 있는...
- Gray zone: 해당 영역이 불분명한 중간지대(적운대류 1-10 km, 경계층 0.1-1 km)



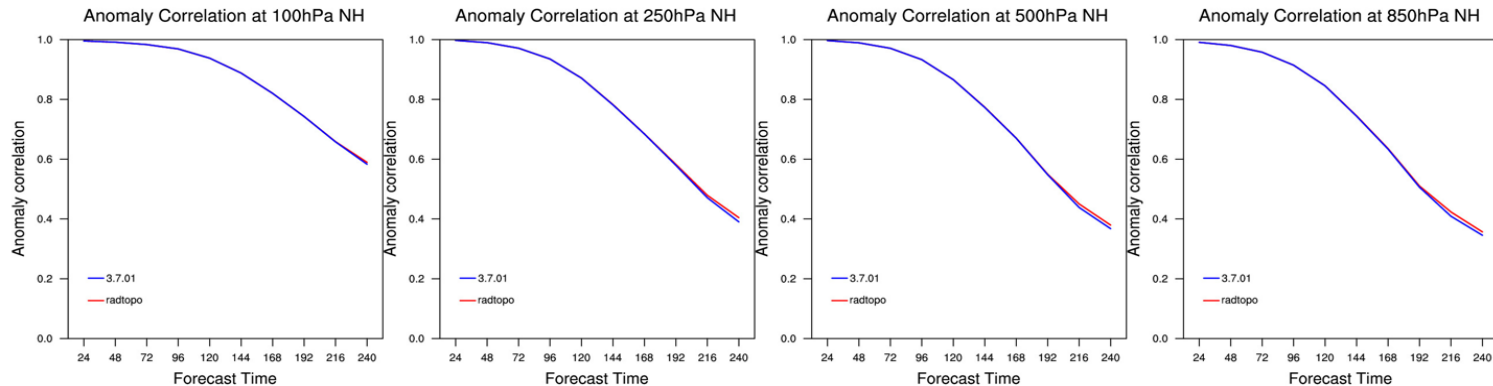
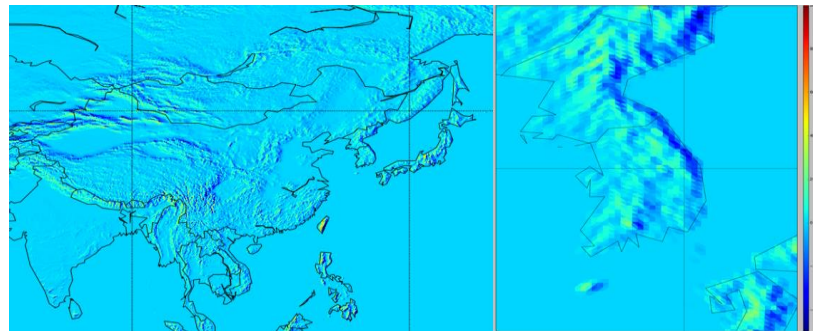
- 성층권 및 하부중간권 예측성의 해상도 민감도
- 해상도 증가에 따라 풍속 증가로 오차 감소
- 해상도 증가로 전선중력파 운동량 속 감소 및 발생지역 증가

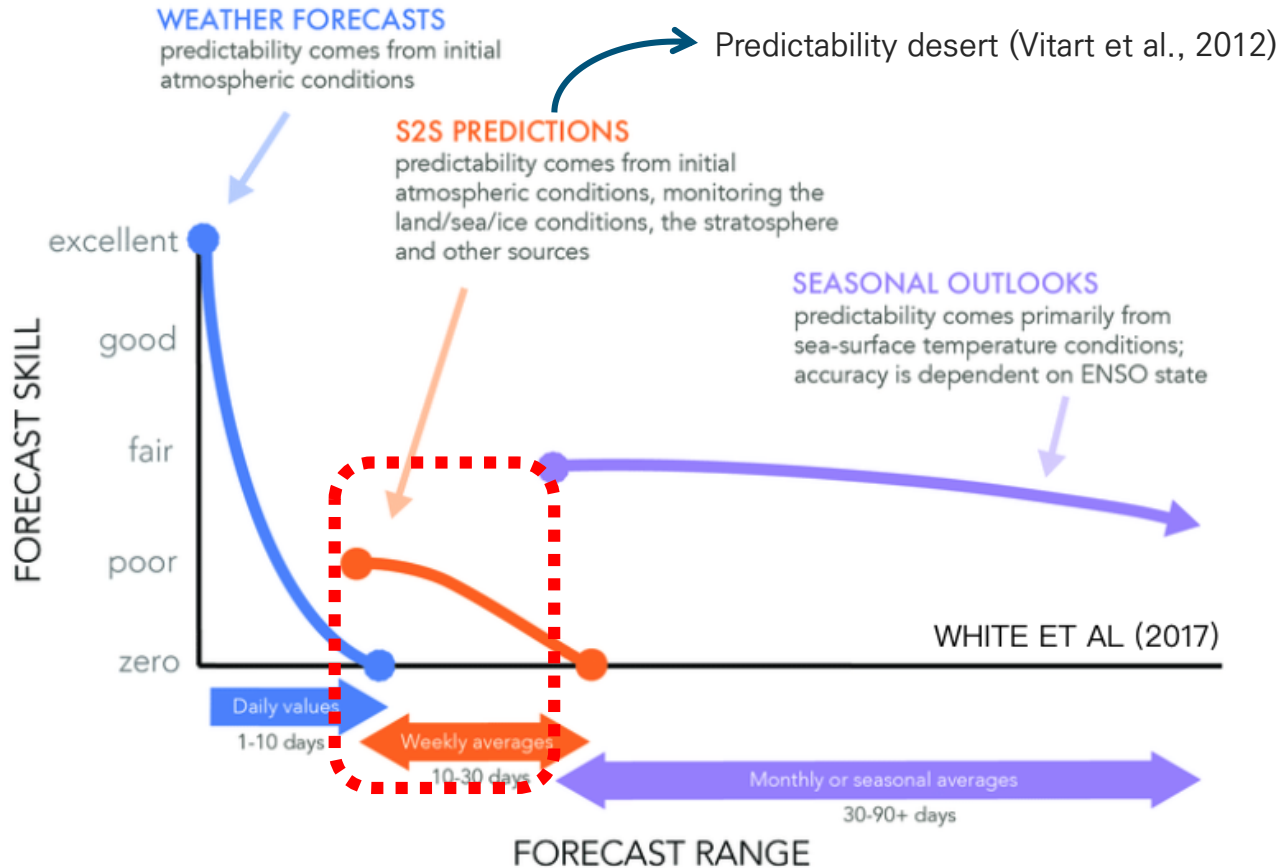


- 격자적응 적운대류 방안 기법 비교 (9km해상도)
- KSAS: 격자적응 방안의 효과로 적운대류 모수화의 효과가 크게 나타남
- MSKF/GF: 적운대류모수화를 사용하지 않은 것과 유사한 결과. 그 레이존에서 적운대류를 거의 사용하지 않음



- 고해상도 지형자료 적용 및 지형에 의한 태양복사의 산란 등을 모의
- 지형효과 고려로 평균 $20\text{--}30\text{ W m}^{-2}$ 의 차이
- 중기실험에서 예측 후반부 지위고도 약간 개선됨을 확인
- 8km, 5km 등의 고해상도에서 영향성이 커질 것으로 기대





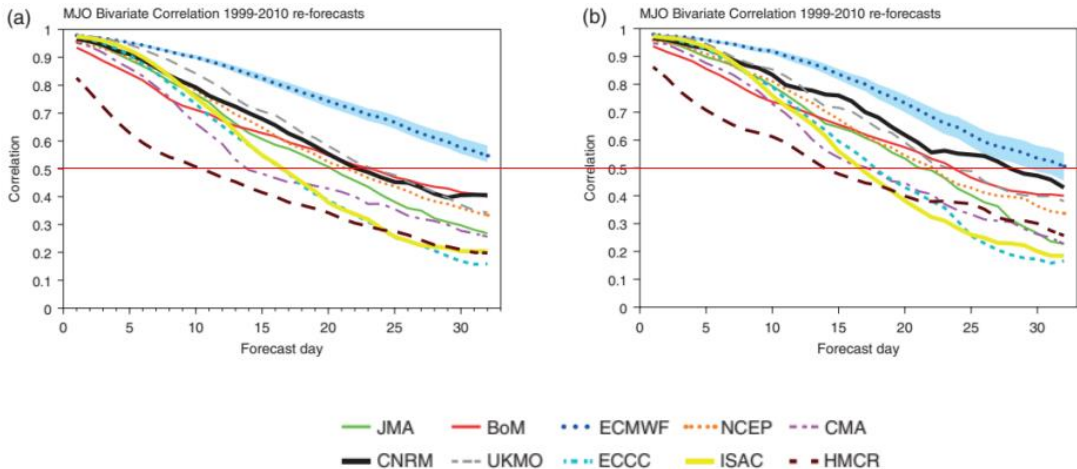


Figure 1. Evolution of the MJO bivariate correlation between the model ensemble means and ERA-Interim as a function of lead time for ten S2S models. The MJO bivariate correlations have been calculated over the period 1999 – 2010 for (a) all the seasons and (b) extended winters (December – March). The shaded area represents the 95% level of confidence computed from a 10 000 bootstrap re-sampling procedure. [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com].

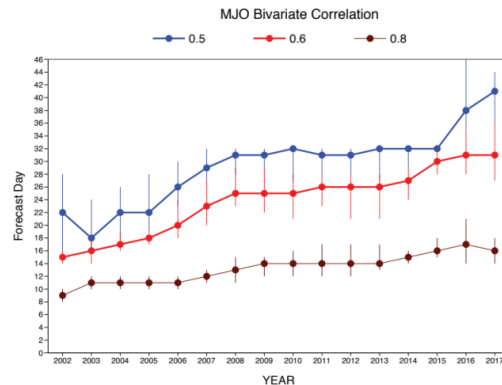


Figure 1: Evolution of the MJO skill scores since 2002. The MJO skill scores have been computed on the ensemble mean of the ECMWF re-forecasts produced during a complete year. The blue, red and brown lines indicate respectively the forecast lead time in days when the MJO bivariate correlation reaches 0.5, 0.6 and 0.8. This figure shows that the MJO forecasts are significantly more skillful now than 15 years ago (0.6 correlation reached at day 30 in 2017 instead of day 15 in 2002).

[WMO Bulletin V68, 2019]

[Vitart et al., 2017]

- 현재 ECMWF 예측성에 근사한 성능 확보를 목표로 함
- 최근 ECMWF 개발 동향 파악 필요
- : **물리과정 일관성** 최적화를 통한 모델의 안정성 확보 (ECMWF newsletter No. 164)

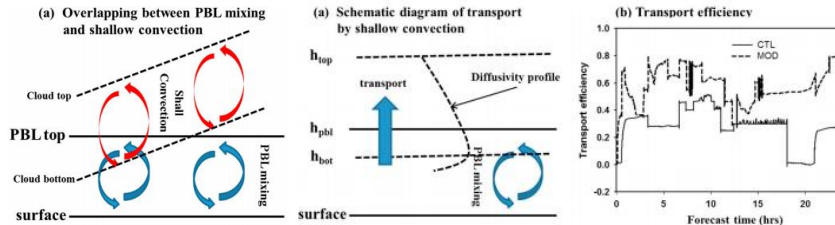
- 물리과정별 독립적인 개발 환경에 기인한 물리과정 일관성 문제 발생

Although parametrizations are often developed as separate entities, it is vital that they interact with each other in a physically consistent way to represent real-world processes effectively. There are therefore many dependencies between schemes. **Individual developments over many years have led to some complications and inconsistencies in the way these schemes work together.** [ECMWF Newsletter, 2020]

The cloud and radiation modules in the KIM are being developed separately by the KIAPS scientists; so, the consistency between the cloud and radiation modules should be carefully checked. From a consistency perspective, **two inconsistent linkages in the KIM physics package are discussed at the KIAPS.** [Bae and Park, 2018]

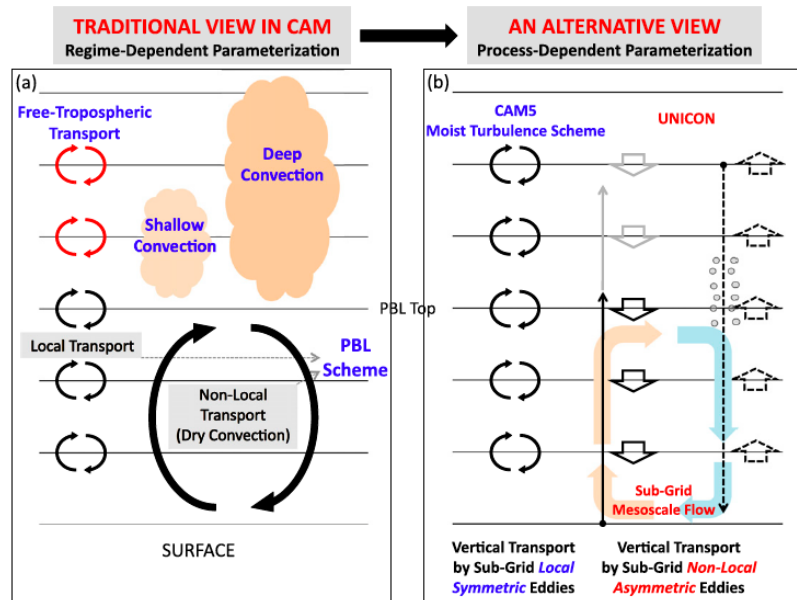
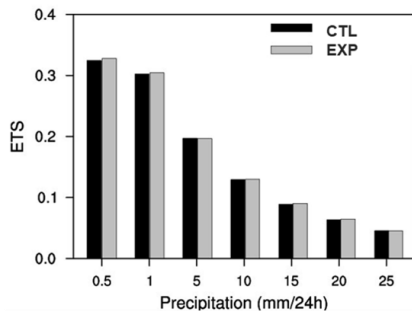
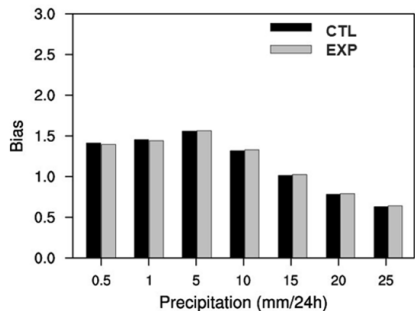
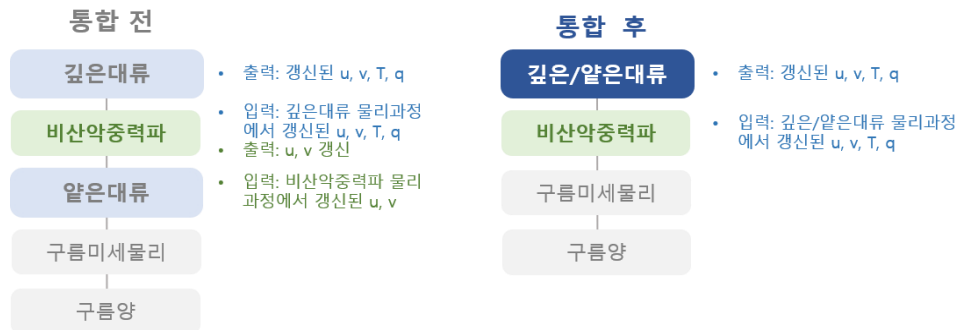
- 물리과정 일관성 문제들

Another problem occurs in cloudy scenarios. Suppose a grid-point in the forementioned domain without clouds in the vertical in which the radiative transfer is called at t_0 . After three simulation minutes, the microphysics scheme produces a cloud at this grid-point. Then, the solar surface fluxes would not be updated after seven minutes, when the radiative schemes are called again. Therefore, there is *a physical inconsistency between microphysics and radiation* during 7 minutes. [Torrecillas A. M.]

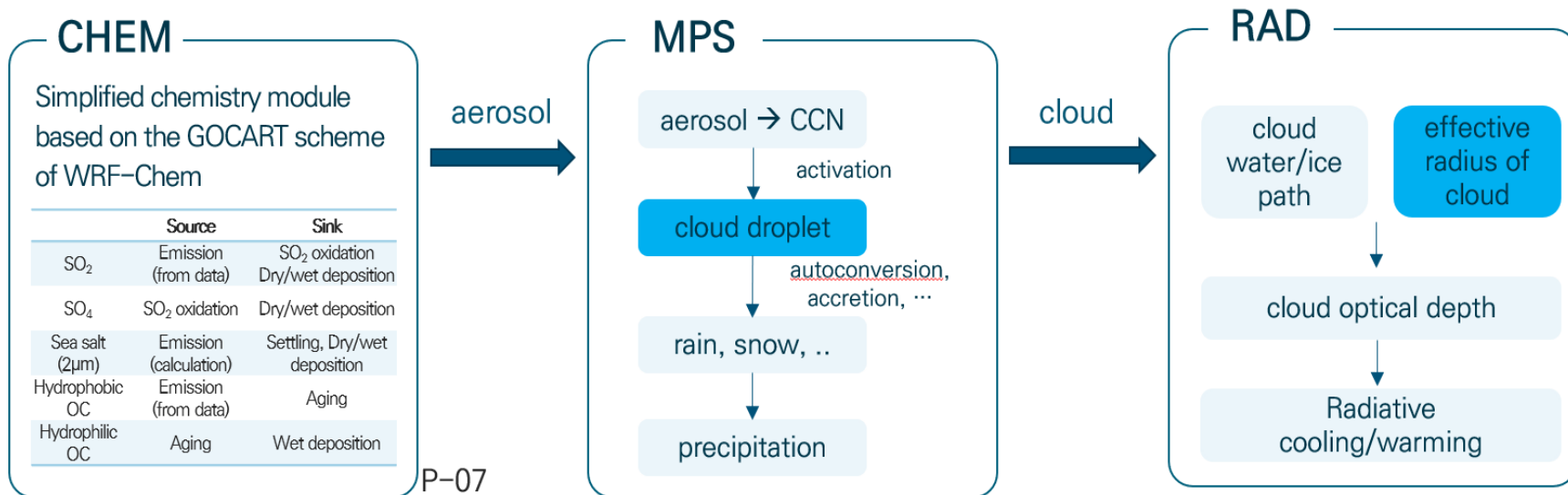


The simulation results show that the direct effect of shallow convection enhances additional vertical mixing inside the shallow convective layer, whereas its indirect effect reduces vertical mixing inside the PBL by changing the PBL height, thus vertical mixing strength. [Park and Kwon, 2018]

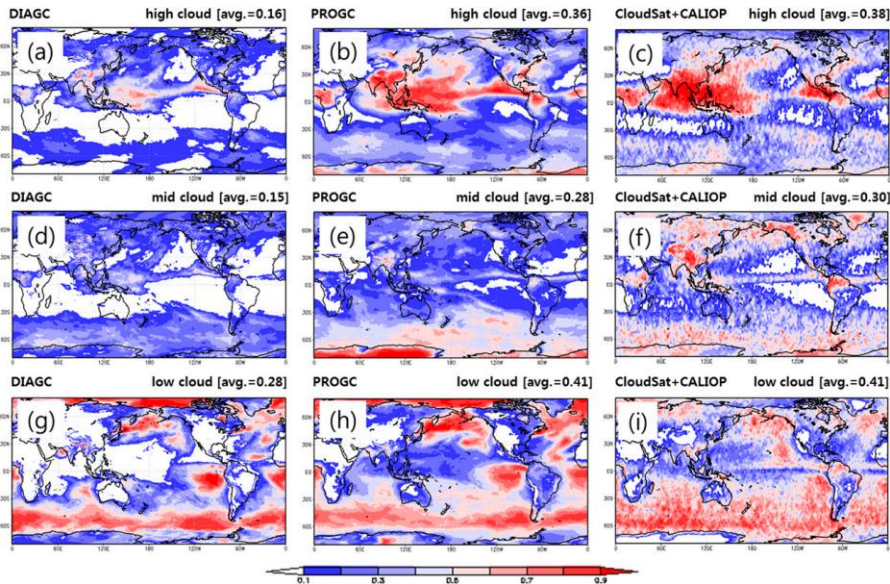
- 통합형 물리과정의 대표적인 예: UNICON
- 안정성, 성능, 계산시간 등을 고려하여 SCV와 CPS의 통합을 시도, 8,5% 계산시간 저감



- 단순화된 화학모듈 개발 및 구름물리과정과 연계
 - 에어로졸 기후자료를 활용한 직접효과(복사효과) 적용, 간접효과 부재
 - 간접효과 고려를 위한 에어로졸 모듈 개발 및 구름물리과정과 연계



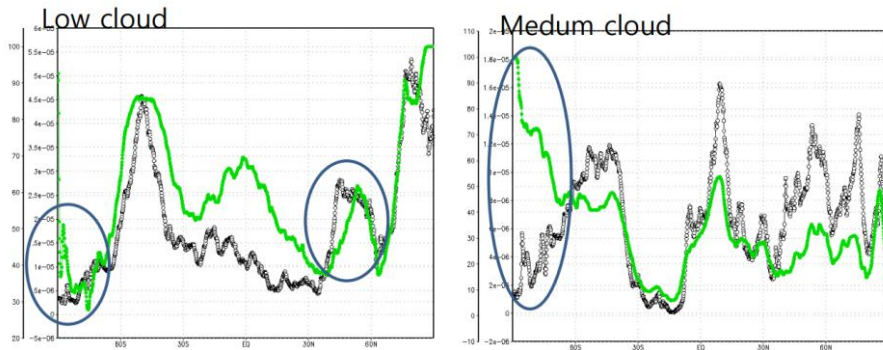
구름양 진단방안->예단방안



[Park et al., 2016]

- 과거 구름물리 방안에서는 구름물량의 모의 성능이 현저히 낮음.
- 아격자 수상에 대한 처리 부재.
- 따라서, 예단방안을 통해 현실적인 구름양 모의 도모.

구름양vs구름물량 일관성 문제

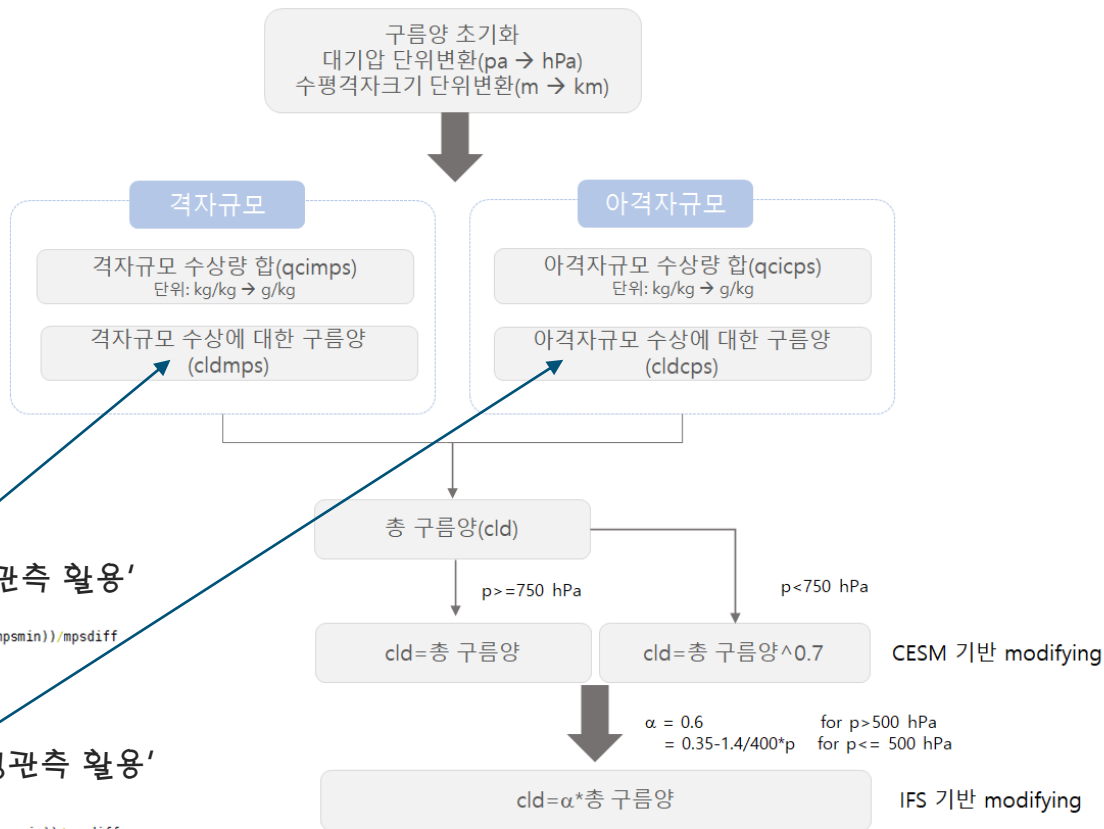


수상양 기반의 구름양 진단방안 개발

: IFS 분석장 및 cloudsat 관측자료 활용

**※ 모델 구름물리 방안의 정교화로
구름물량의 산출 정확성이
비약적으로 개선**

구름양 진단방안 계산 흐름도



<구름양 계산식>

• 격자규모

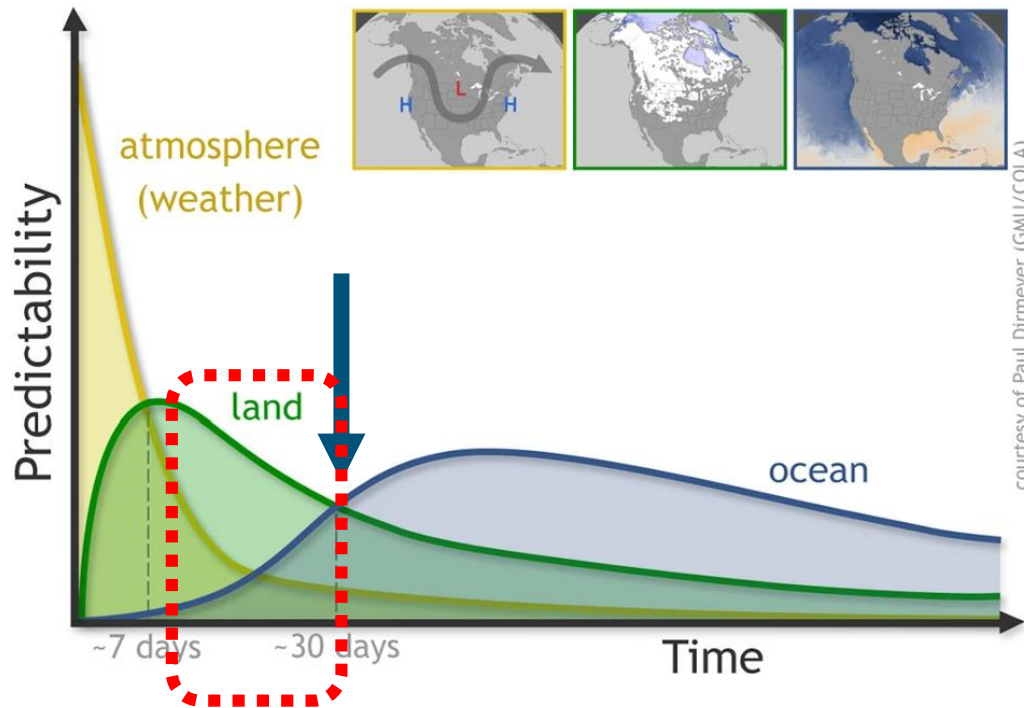
```
! cloud fraction from resolved hydrometeor '항공관측 활용'
```

$$\begin{aligned} \text{mps10}(k) &= 5.57 * \text{qcimps}(k) ** 0.78 \\ \text{mps100}(k) &= 4.37 * \text{qcimps}(k) ** 0.77 \\ \text{cldmps}(k) &= (\text{mps10}(k) * (\text{mpsmax} - \text{dxkm}) + \text{mps100}(k) * (\text{dxkm} - \text{mpsmin})) / \text{mpsdiff} \end{aligned}$$

• 아격자규모

```
! cloud fraction from subgrid-scale hydrometeor '위성관측 활용'
```

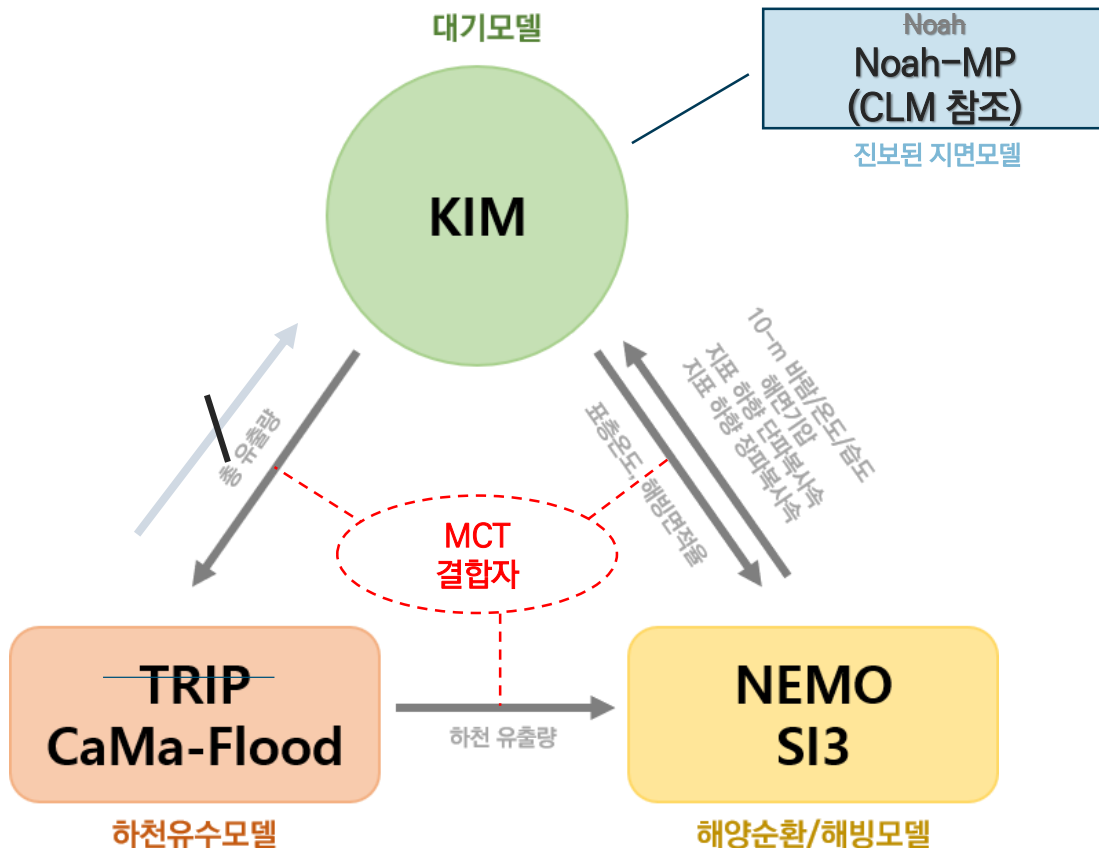
$$\begin{aligned} \text{cps50}(k) &= 5.77 * \text{qcicps}(k) ** 1.07 \\ \text{cps100}(k) &= 4.82 * \text{qcicps}(k) ** 0.94 \\ \text{cldcps}(k) &= (\text{cps50}(k) * (\text{cpsmax} - \text{dxkm}) + \text{cps100}(k) * (\text{dxkm} - \text{cpsmin})) / \text{cpsdiff} \end{aligned}$$



courtesy of Paul Dirmeyer (GMU/COLA)

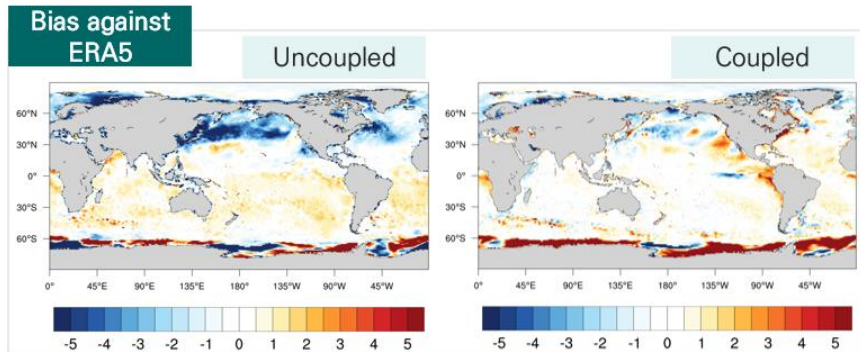
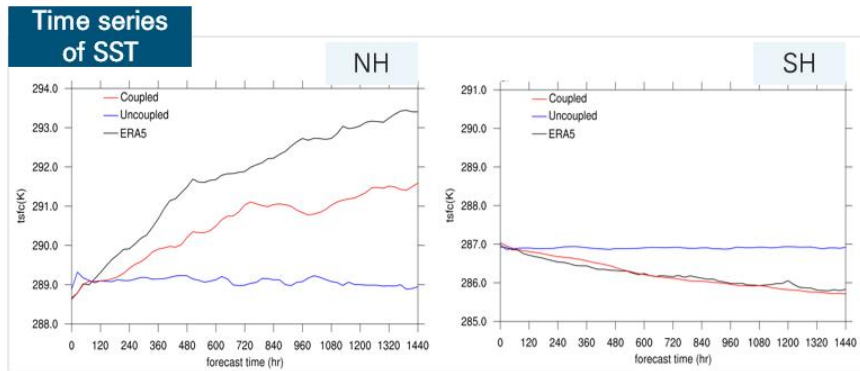
[Mariotti et al., 2018]

- 지면모델의 고도화 필요
- 결합모델링: 경계모델(해양 모델)의 중요성 상대적 증가

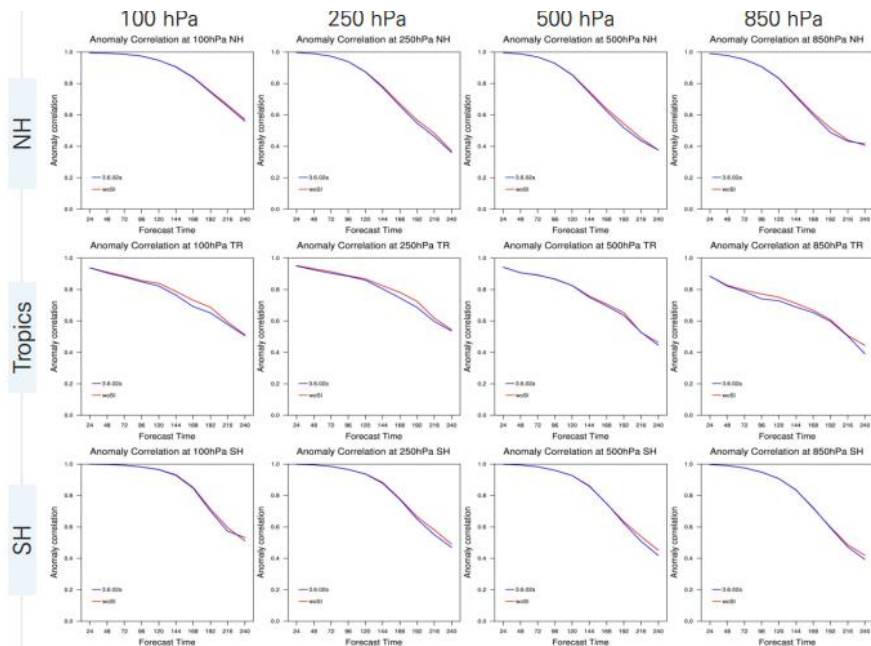


- 결합모델링 시스템 초기버전 완성
- 각 결합구성의 개별 성능 진단
- 결합 연계성, 결합구조 등 최적화
- 파랑모델 등 추가 결합 계획

- SST의 현실적 모의



- 적도지역 대기 예측성 두드러지게 개선
- 남반구 예측 후반 성능 개선

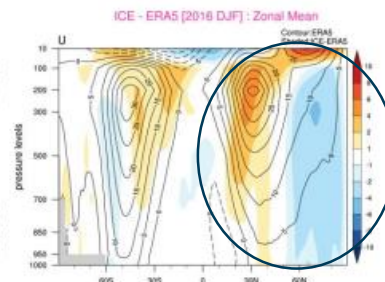
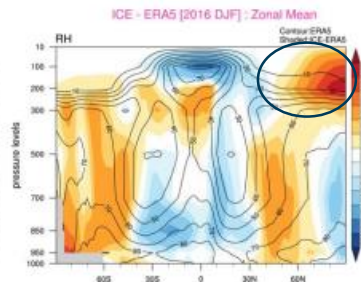
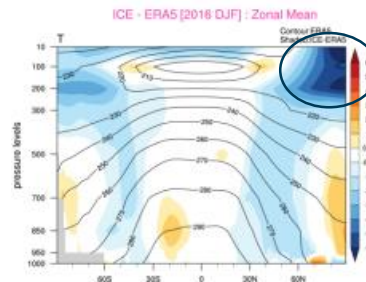
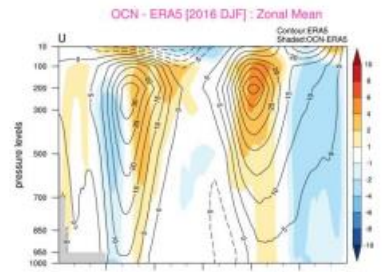
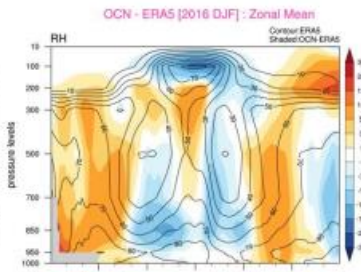
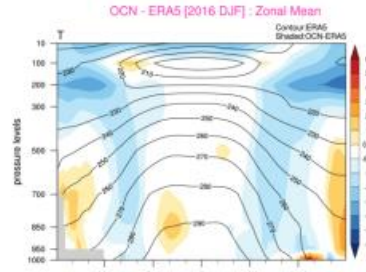
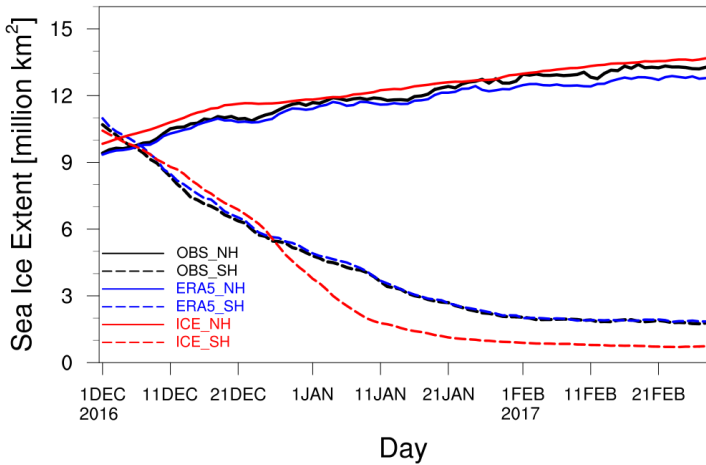


해빙면적 모의 성능 진단

- 남반구에서 약한 과소모의
- 전반적으로 적절히 모의

해빙모델 민감도 (TMP, RH, U)

- 해빙의 변동성이 성층권에 영향 (성능 감소)
- 구름모의 성능 등 추가진단 필요
- 중위도 대류권에 약한 영향성

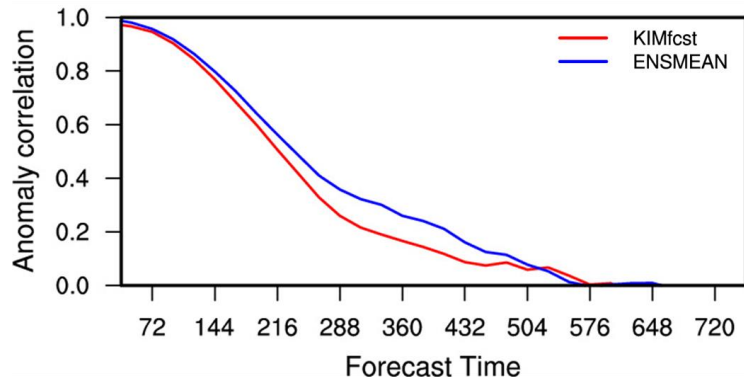


- 저해상도 앙상블 예측시스템 (KIM Low-resolution Operation System, KLOS)
- KLOS 앙상블 생성 방법: deterministic+3 ensemble members (50개의 앙상블 중 무작위 선택) 의 평균

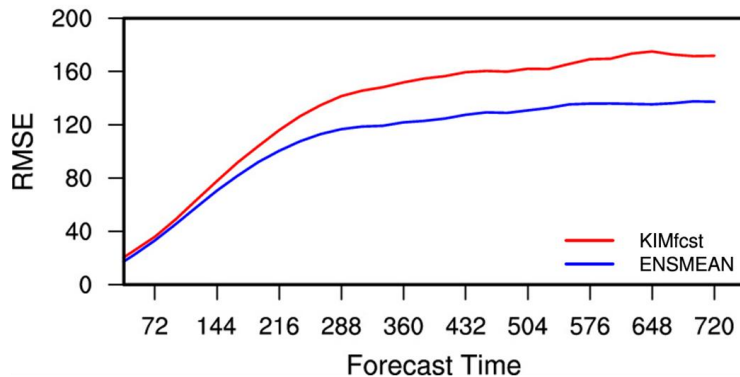
		Explanation	Resolution
KLOS configuration	KIM	Atmospheric model	NE045NP3 (~100km), L91
	KPOP	Observation processing	-
	Hybrid-4D EnVar	3D Variational DA	NE030NP4 (~100km), L91
		Ensemble DA (50 members)	NE045NP3 (~100km), L91
Analysis period		6 hour	
Forecast length		31 day 12 hour	
Initial state	Atmosphere	ERA5 reanalysis	
	Land	GFS analysis	
	Ocean-Sea ice	OSTIA SST and sea ice data	
Prediction period		Jan.-Feb. 2019 (spin-up 20 days), 00 UTC	

◆ 분석장 대비 표준 검증

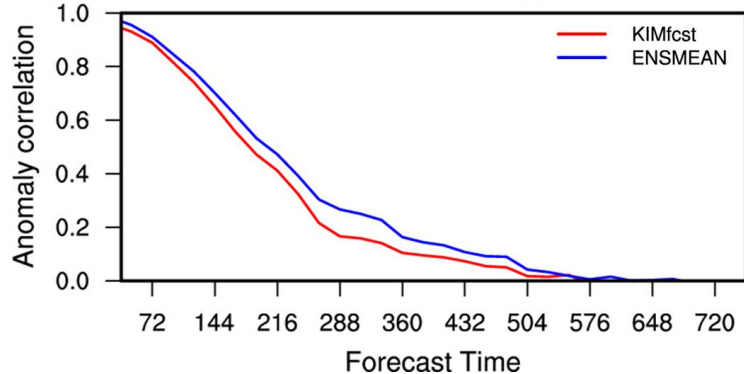
NH HGT 500 ACC verified against analysis



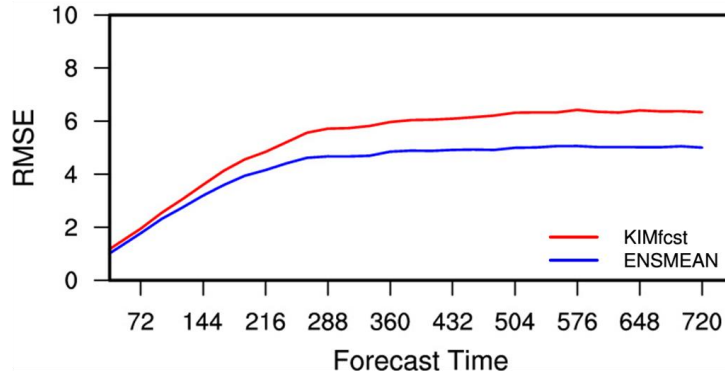
NH HGT 500 RMSE verified against analysis



NH TEMP 500 ACC verified against analysis



NH TEMP 500 RMSE verified against analysis



	20년도 12월	21년도 상반기	21년도 하반기	22년도 상반기	22년도 하반기(계획)
역학과정			역학 이상 실험 추가 INICOND 업데이트 SMH 연직격자	8km 고해상도 역학코어 Schmidt Transform 가변격자 역학코어 정적점성 적용	Adaptive time-step 연직고해상도(137층)
물리과정	물리과정 코드 최적화	Phy21.01 복사과정: - RRTMG v5.0 적용 경계층: - 눈/비 난류수송량 반영 및 구름양 난류수송 제거 적운대류: - 얇은대류/깊은대류 통합과정 개발	Phy21.02 복사과정: - 상세화된 구름수직결합 방안 적용 - 아격자 수상양 산출과정 개선 (구름시간규모 적용)	Phy22.01 복사과정: - 지형 효과를 고려한 복사과정 미세물리: - 세미-라그랑주 방안 도입 단일기둥모델 개발 1D 미세물리과정 개발	Phy22.02 복사과정: - 오존 선형 모델 구름양: - 구름양 진단방안
경계모델			지면/해양 초기장 변경: - GFS→ERA5 지면모델 결합: - NOAH-MP	해양모델 결합: - NEMO 결합 - 열거칠기 길이 수정 및 cool-skin layer 적용 해빙/하천유수 결합: - SI3 결합 - CAMA-FLOOD 결합	파랑모델 결합: - WW3 결합
검증진단		KAT3.6.01: - 검증 및 진단 사례 추가 - 시간기준 및 구조 변경	KAT3.6.02: - skewT 추가 - 코드 정리	KAT3.7: - 고해상도 검증 추가 - 오류 수정 및 가시화 개선	
준실시간	KIM3.5.06	KIM3.6.01~KIM3.6.03	KIM3.6.04~KIM3.6.06	KIM3.7.01~KIM3.7.02	KIM3.7.03

