

국외 출장 결과보고서

결	담당자	과장	팀장	사업단장
	8월 4일	8월 4일	8월 7일	8월 7일
재	송지애	(대결) 이윤석	이근일	이우진

1. 출장개요

출장목적	WAF/NWP 및 Mesoscale Processes 학회 참석		
출장일정	2023. 7. 16.~2023. 7. 22. (5박 7일)		
성명		소속	직급(직위)
이우진		사업단	사업단장
방문기관 (또는 회의장소)	미국 위스콘신주 메디슨 (모노나 테라스 커뮤니티 및 컨벤션 센터)		
출발지	한국 인천	도착지	미국 메디슨

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 미국기상학회가 매년 주관하는 수치예보 분야 학술회의이며, 모델의 최신 개발 현황과 응용, 모델 성능 개선 동향, 최신 물리과정, 지역모델과 응용, 체계적인 모델 검증과 평가 환류 등을 다루고 있음
- 또한 자료동화, 스톱규모 고해상도 예측, 범용 모델, 앙상블 응용과 장기 예측성, 모델의 고성능 컴퓨팅, 인공지능 접목 활용 등의 주제도 다루고 있어, 사업단이 추구하는 초단기, 중기, 연장 중기까지 이음새 없는 모델 개발에 필요한 최신 기술 개발과 예측성 동향 파악과 사업단 개발 방향 점검

나. 주요 업무 수행 사항

- 미국 수치예보 분야 최신 기술 동향 파악
 - (물리과정)
 - EMC(Environmental Modeling Center)의 격자 적응 연구는 주로 지면, 복사, 중력과 항력(uGWD) 분야에 집중하고, 경계층과 깊은 적운 분야는 도전적임

Atmos Physics Parameterizations in UFS Applications: Current Status

	GFSv17 (13km) & GEFSv13 (25km)	RRFSv1 (3-km) (single physics ensemble)	HAFSv1 (6/2 km)	AQMv7 (12km) aka Inline-CMAQ
Deep Convection	sa-SAS	GF ?	sa-SAS	sa-SAS
Shallow Convection	sa-SAS	MYNN-EDMF	sa-SAS	sa-SAS
Microphysics	Thompson MP	Thompson MP (aerosol aware)	A: GFDL MP B: Thompson MP	GFDL MP
Radiation	RRTMG	RRTMG	RRTMG	RRTMG
Surface Layer	GFS	MYNN	GFS	GFS
PBL	sa-TKE-EDMF	MYNN-EDMF	sa-TKE-EDMF	sa-TKE-EDMF
Land	NOAH-MP	RUC	NOAH LSM	NOAH LSM
oro and non-oro GWD	uGWP v1	N/A	uGWP v0	uGWPv0
SS-GWD & TOFD	Yes	Yes	Yes	No
Aerosol-radiation	MERRA2 Clim & GOCART	MERRA2 Clim	MERRA2 Clim	OPAC Clim

Components that can be unified:

- Land: NOAH LSM and RUC ==> NOAH-MP
- Radiation: RRTMG ==> RRTMGp
- GWD: uGWDv0 ==> uGWDv1

Components that will likely remain diversified

- Microphysics: Thompson MP, GFDL MP, NSSL MP, MG3 or PUMAS ...
- Deep/Shallow Convection: sa-SAS, Grell-Freitas, Tiedtke, C3, CLUBB, SHOC, UNICON ...
- PBL: TKE-EDMF, MYNN-EDMF, Hybrid-EDMF, SHOC ...
- Aerosols (radiation): MERRA2 climatology for GFS
GOCART for GEFS (TBD)
RRFS-SD or CMAQ for RRFS.v2 ?
?? for SFS

- 에어로졸과 구름 강수과정을 연결하는 연구도 활발하게 진행중임
- 구름양은 예단 방안을 개발중이며, 진단 방안도 고려중인 사업단과는 다른 방향이기 때문에 검토 필요
- CCpp(Common Community Physics Package) 물리패키지를 이용하여, 연구자간 협력을 도모하고 코드를 효율적으로 관리하고 체계적인 알고리즘 개발을 유도하고 있음

- (자료동화)

- 상업용 GNSSRO 자료를 미기상청에서 구입하여 활용
- 민간에서는 핸드폰 기압도 동화에 활용 실험
- 초단기 모델의 3dVar 자료동화에서 기후 공분산에 앙상블을 이용하여 시간 변화 영향을 반영하는 알고리즘 개선 추진(Dr. Yokota)

Formulation of Simplified ETLM

B: background error covariance (BEC)
R: observation error covariance
H: linearized observation operator
d: innovation vector
 δx_t : analysis increment at time t

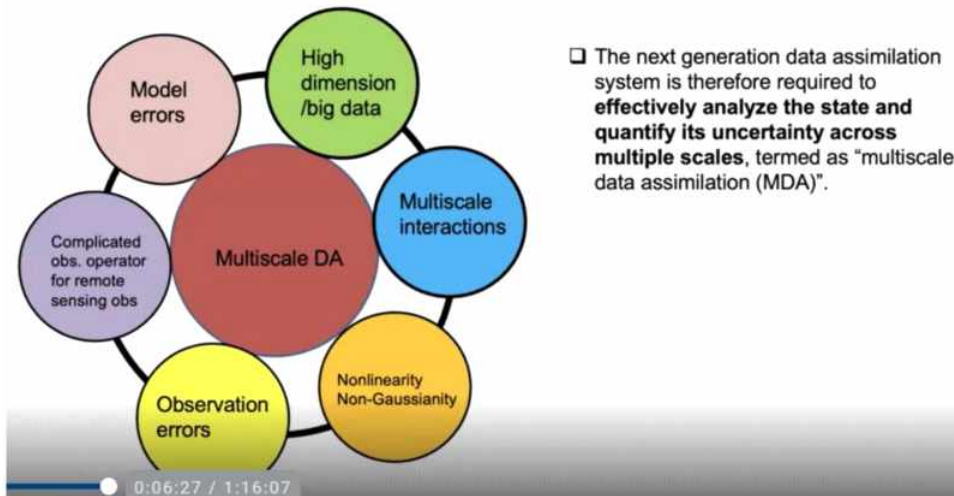
Cost function of 3DVar: $J(\delta x_0) = \frac{1}{2}(\delta x_0)^T B^{-1}(\delta x_0) + \frac{1}{2}(H\delta x_0 - d)^T R^{-1}(H\delta x_0 - d)$

If ETLM is introduced: $J(\delta x_0) = \frac{1}{2}(\delta x_0)^T B^{-1}(\delta x_0) + \frac{1}{2}(HM\delta x_0 - d)^T R^{-1}(HM\delta x_0 - d)$
 $= \frac{1}{2}(\delta x_t)^T (MBM^T)^{-1}(\delta x_t) + \frac{1}{2}(H\delta x_t - d)^T R^{-1}(H\delta x_t - d) \quad (\delta x_t = M\delta x_0)$

Here, $M = (X_t X_0^T)(X_0 X_0^T)^{-1}$ Localization + Simplification $(C^{1/2} \circ X_t X_0^T)(I \circ X_0 X_0^T)^{-1}$
 ensemble perturbations at time t identity matrix (to be able to compute inverse matrix)
 $= \frac{1}{\sqrt{N-1}} [\delta x_{t,1}^f \dots \delta x_{t,N}^f] \quad (N: \text{ensemble size})$ (minimum $X_0 X_0^T$ is set to [horizontal mean] x 0.01 not to make **M** too large)
normalized localization matrix (realized by recursive filter)

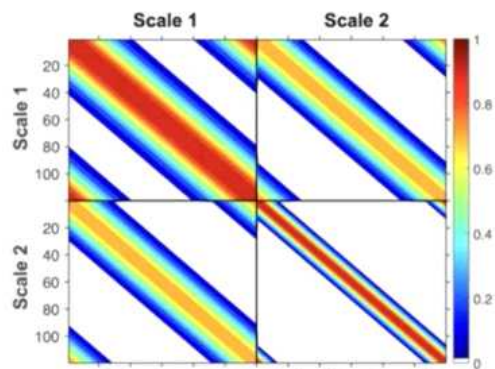
- Cross-variable covariance is included in $C^{1/2} \circ X_t X_0^T$ (excluded from $I \circ X_0 X_0^T$)
 ➤ Control variables (independent in 3DVar) is correlated with each other.
- Ensemble perturbations are input only at reference time ($t = 0$) and analysis time ($t = t$)
 ➤ I/O amount is the same as 4DEnVar.

- 국지화 방안에서, 밴드간 상관성, 변수간 규모의 차이, 상황에 따른 연직 규모의 조절(깊은 적운 등) 등으로 유연하게 처방(오크라호마 대학의 Wang 교수)



- ❑ In the operational 4DEnVar, horizontal localization functions are scale-invariant at each level
- ❑ A simultaneous multiscale DA using scale dependent localization (SDL) in 4DEnVar for NCEP FV3-based GFS is implemented
 - ensemble perturbation scale decomposition;
 - scale dependent and cross scale covariance localization

$$J(\mathbf{x}'_1, \hat{\mathbf{a}}) = \frac{1}{2} \beta_1(\mathbf{x}'_1)^T \mathbf{B}_1^{-1}(\mathbf{x}'_1) + \frac{1}{2} \beta_2(\hat{\mathbf{a}})^T \mathbf{A}^{-1}(\hat{\mathbf{a}}) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L (\mathbf{y}_j^{o'} - \mathbf{H}_j \mathbf{x}'_j)^T \mathbf{R}_j^{-1}(\mathbf{y}_j^{o'} - \mathbf{H}_j \mathbf{x}'_j),$$



- (지면모델과 자료동화)

- AIRS를 이용한 지면 온도 분석

- 광학두께와 눈의 자료동화도 추진 중
- 해양 온도와 해빙의 초기장 분석을 위해 약결합 자료동화 개발 중
- 하층 대기 관측 증분을 이용하여 토양 수분의 보정을 통해 예측 개선(Dr.Ming Hu, EMC)

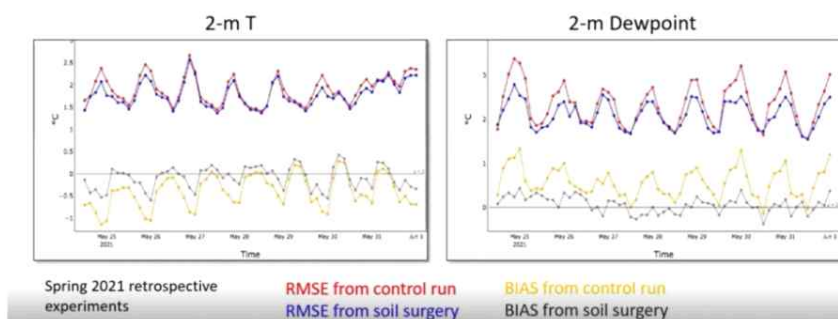
Efforts to improve Surface DA and forecast

- Better surface boundary condition from:
 - Using of high-resolution 30" BNU soil, and 30" VIIRS vegetation information;
 - Snow updating from 4-km IMS data once per day at 01Z product cycle;
 - Real-time VIIRS GVF, updating once per day at 04Z spin-up cycle;
 - SST updating from NSST analysis once per day at 01Z product cycle.
- Continuous surface cycling and surface fields initialization:
 - Continuous soil/snow/vegetation state cycling in partial cycling structure (04/16Z spin-up cycle)
 - Keep GFS ice concentration in surface cycling (introduced twice per day in 04/16Z spin-up cycle)
 - Use FVCOM for surface lake T and ice over of the Great Lakes (twice per day in 04/16Z spin up cycle)
 - Soil surgery to initialize the soil fields from RAP/HRRR soil (beginning of retro or real-time run)
- Improving surface fields in GSI data assimilation:
 - Moderately Coupled Land Data Assimilation – MCLDA - (soil nudging/soil adjustment)
 - Using model forecast fields 2m T/Q as background for GSI surface T/Q observation analysis
 - Using Terrain-elevation matching surface temperature observations
- The latest version of RUC LSM is implemented in CCpp: available for use as a land surface and sea ice component in the UFS.

Soil "surgery" to initialize the soil fields from RAP/HRRR soil



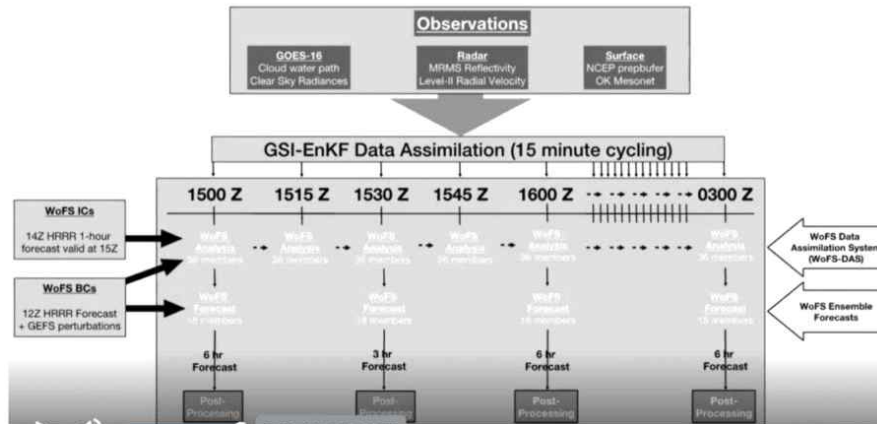
Surface RMSE and BIAS time series against METAR observations for RRFs 3-h forecast



– (초단기모델과 자료동화)

- 시간 지연 앙상블도 활용
- MPAS의 가변격자 체계에 대한 자료동화도 JEDI 프레임에서 개발 중
- 3dEnVar로 빠른 분석 추진

WoFS data assimilation within nested 3-km, 1-km and 500-m grid spacing

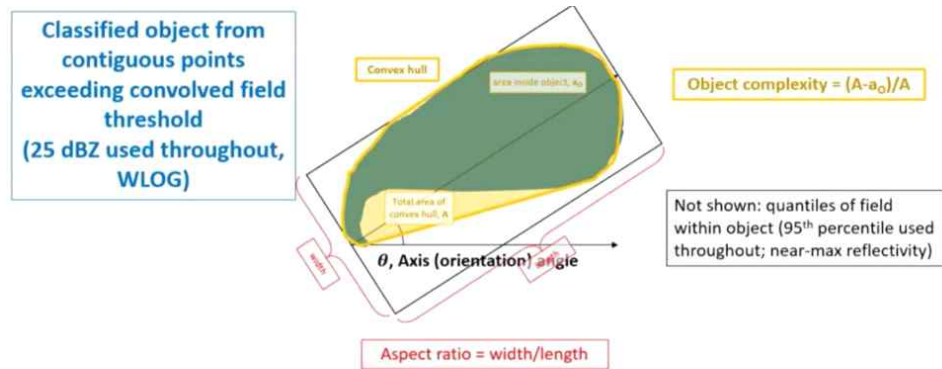


- (양상불 예측)

- 산악도 섭동을 주어 일종의 물리 섭동으로 활용 중

- (검증)

- MODE라는 패턴 검증 도구를 이용하여, 운동의 규모별로 예측성 진단/실시간으로 패턴 일치성 검증



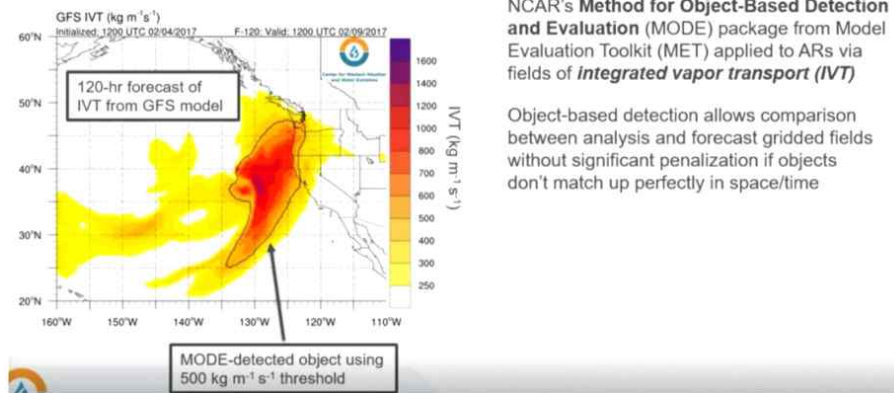
Step 3 – calculate attribute comparisons for object pairs			
Index	Attribute name	Description	Range
0	centroid distance	distance between object centroids	[0, ∞) (km)
1	boundary distance	Closest that object boundaries come to each other	[0, ∞) (km)
2	convex hull distance	same as boundary distance, except using convex hull boundary	[0, ∞) (km)
3	angle difference	Difference in orientation angle of objects	[0°, 360°]
4	aspect ratio difference	Difference between object aspect ratios	[0, 0.1, 0]
5	area ratio	ratio of object areas*	[0, 0.1, 0]
6	encumbrance ratio	Fraction of smaller object encompassed by larger object	[0, 0.1, 0]
7	convexity ratio	ratio of object convexities	[0, 0.1, 0]
8	complexity ratio	ratio of object complexities	[0, 0.1, 0]
9	intensity percentile ratio (pXX ratio)	ratio of pXX value of object* (95 th percentile used for composite reflectivity)	[0, 0.1, 0]

*MODE forces this ratio to be in [0, 1], and will insert the ratio to enforce this range, but computations herein did not use this formulation.

Step 4 – compute object pair interest	
• Key output: object pair total interest (for F-O object pair p)	
$I^p = \frac{\sum_{k=1}^{10} C_k * W_k * I_k^p}{\sum_{k=1}^{10} C_k * W_k}$ (Summing index k represents the 10 attribute comparisons)	
C	Confidence (robustness of attribute comparison value). Disregarded in this investigation, and most values are 1.0 anyway
I	single-attribute interest Maps actual attribute difference to normalized range [0, 0.1, 0]
w	attribute weight – importance of a given attribute
• Problem: optimal values to use for these settings not established, and likely dependent on individual user's application, so what values do we pick? • Short and straightforward solution: tuning • Problem: values would need to be tuned for every variable in the verification, including field and cases	
• Present objective: identify robustness of interest values (and metrics derived from it) to modifications of attribute weight sets (w) and interest maps (I)	

- 수증기장 검증시 연직 평균 수증기 플럭스(IVT; integrated vapor transport)를 대기 강물 지표로 활용하고, MODE로 객관평가

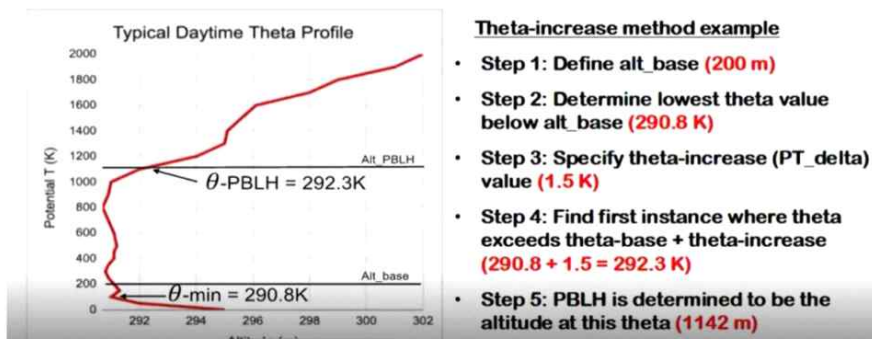
AR OBJECT DETECTION– MET MODE TOOL APPLICATION



- AMDAR를 이용한 경계층 고도장 추정과 경계층 물리 검증 응용 (Jason M. English, CIRES/NOAA GSL, Boulder, CO, USA)

“Theta-Increase” Method

- Take an ascending or descending flight profile
- Convert pressure altitude (hPa) to altitude (m)
- Convert temperature (K) to potential temperature (K)



PBLH Algorithm Development

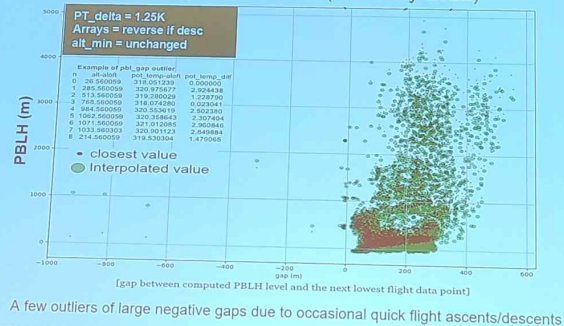
- Data range: 1-31 July 2022, daytime convective hours 00-02, 13-23 UTC
- Four airports: Denver, Dallas, Minneapolis, Boston

Initial Algorithm Settings

Include the following AMDAR aircraft data:

- Ascents/Descents (discard all cruising flights)
- Flights within a 0.7 deg radius (~80km) of the airport [Evaluated 0.3-1.0 deg (30-110 km); 0.3 deg had not enough flights; 1.0 deg was similar to 0.7 deg]
- Flight must contain at least one data point below alt_min (200 m)
- Flight must contain at least 4 data points
- Flight data point below PBLH must be < gap_max (400 + PBLH/20 m)

Scatterplot at Denver (1-31 July 2022)



3. 출장성과 • 시사점 및 향후 업무 활용 계획

가. 출장성과 • 시사점

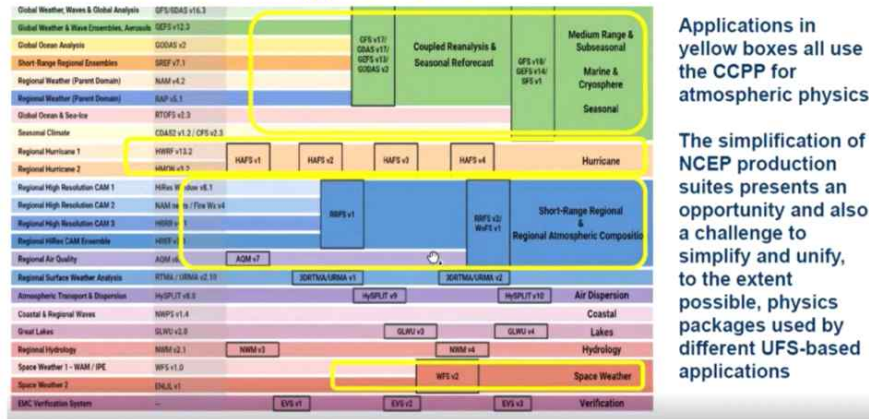
- (모델 통합화의 방향)

- 미국 기상청은 당초 UFS라는 하나의 모델로 모든 시공간, 응용분야를 아우르는 통일적 시스템

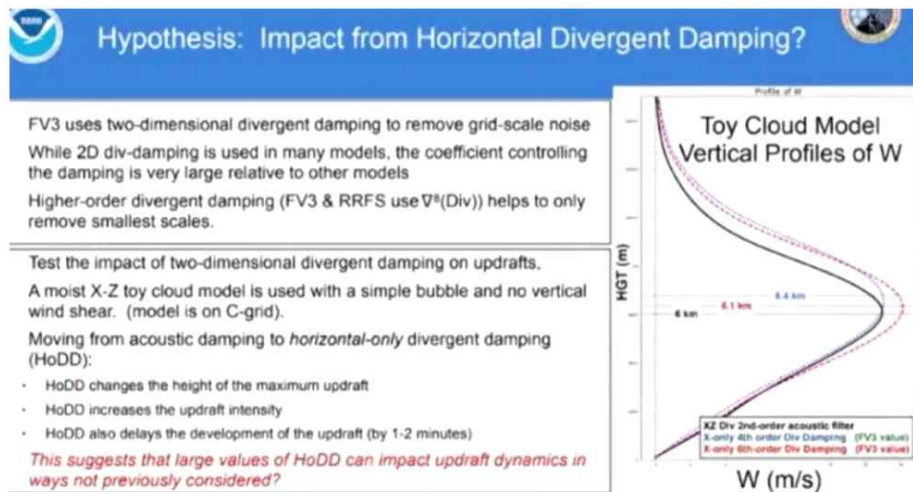
(unified system)을 구축하고자 추진중임

- 그간 많은 모델을 관리해오던 관행을 바꾸면서, 12개의 모델을 8개 이하로 줄여나가기 위해, 이해관계 그룹의 이해를 구하는데 많은 노력과 소통 등 투자를 하고있음(정영선박사)

Transition to UFS Applications



- 최근 접근 방향과 통일적 시스템의 개념을 유연하게 확장하여 복수의 역학코어 (FV3와 MPAS)를 허용하는 쪽으로 옮겨가고 있고 특히 초단기 예측 분야는 MPAS를 도입하는 쪽에 무게를 두고 있음 (MPAS 와 달리 FV3가 중규모 강수시스템 모의에 한계, 수평 확산만으로 제어하기 어려운 문제; 바람과 다른 변수가 한 곳에 몰려있는 격자구조의 문제일 수도 있음; VJ Tallapragada)



- Despite the FV3 designers' best well-intentioned efforts, using the horizontal D-grid for convective-scale prediction, inevitably:
 - D-grid requires a **large** amount of 2D divergent damping (as well as other filters) to **stabilize model solutions** (much more filtering than WRF or MPAS)
 - **More filtering** leads to **larger storms**. Paradoxically, **2D divergence damping creates deeper updrafts which can be initially very intense**.
 - **Result: FV3** convective storms are **often too large & intense** and have **excessive/extreme precipitation rates** (particularly in low-shear environments)
- Full mitigation of these issues likely requires a new dynamical core. What is cost/benefit of building vs. choosing an existing model?
- Further: An FV3 version of NSSL's Warn on Forecast ensemble prediction system was tested in 2022-2023 on a set of cases.
 - Rapid data assimilation (e.g., 15 min cycling) of satellite and radar creates large model imbalances which generates excessive spurious convection within FV3

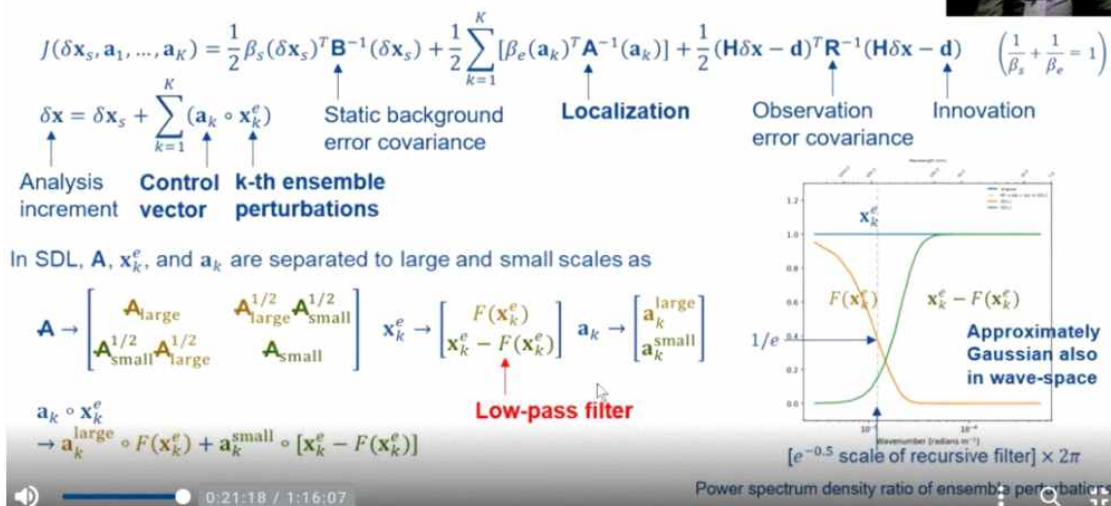
Due to this evidence: **NSSL's WoFS group is now testing NCAR's regional MPAS model for our next generation WoFS system**

○ (앙상블 자료동화)

- EMC는 앙상블 자료동화 국지화 방안으로 밴드의 상관성, 변수 특히 비습의 국지화를 좁히는 처방 실험 중임

Scale-Dependent Localization

(Buehner and Shlyayeva 2015, Tellus; Hua)



- JEDI 표준 자료동화 시스템은 개발중이나 현장에 실용화되기까지 좀 더 많은 시간이 걸릴 것으로 전망
- 토네이도 등 위험기상의 초단기 예측(warn on forecast) 분야에 많은 투자를 하고 있는데, 스톰규모 앙상블(1~3km 내외 격자)에 AI기술을 접목하여 예보관의 빠른 의사결정을 지원하는 시스템을 구축 활용 중임

○ (객관적 패턴 검증)

- 초단기 예측 검증 과정에서 MODE라는 객관적 패턴 검증 기법을 개발하여, 스톰의 모양 뿐만 아니라 대기 물길(atmopsheric river)에 이르기 까지 다양하게 모델 검증에 응용하고 있음

○ (기타 시사점)

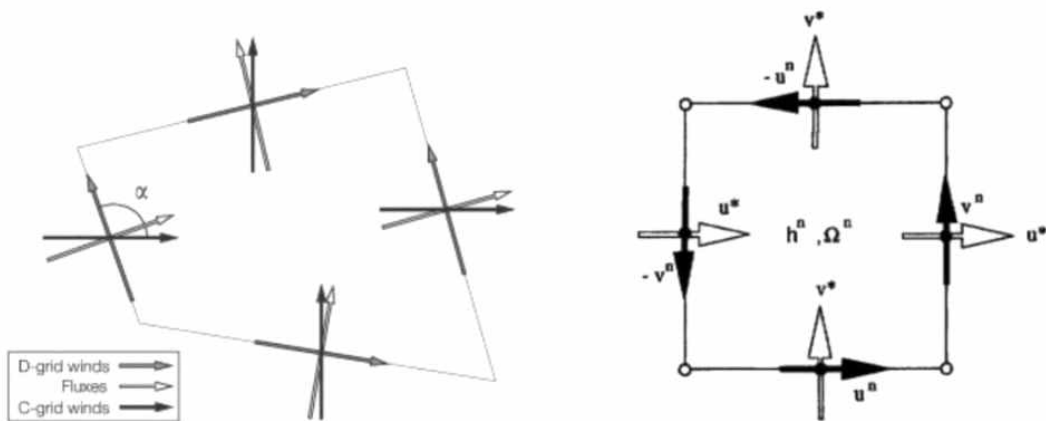
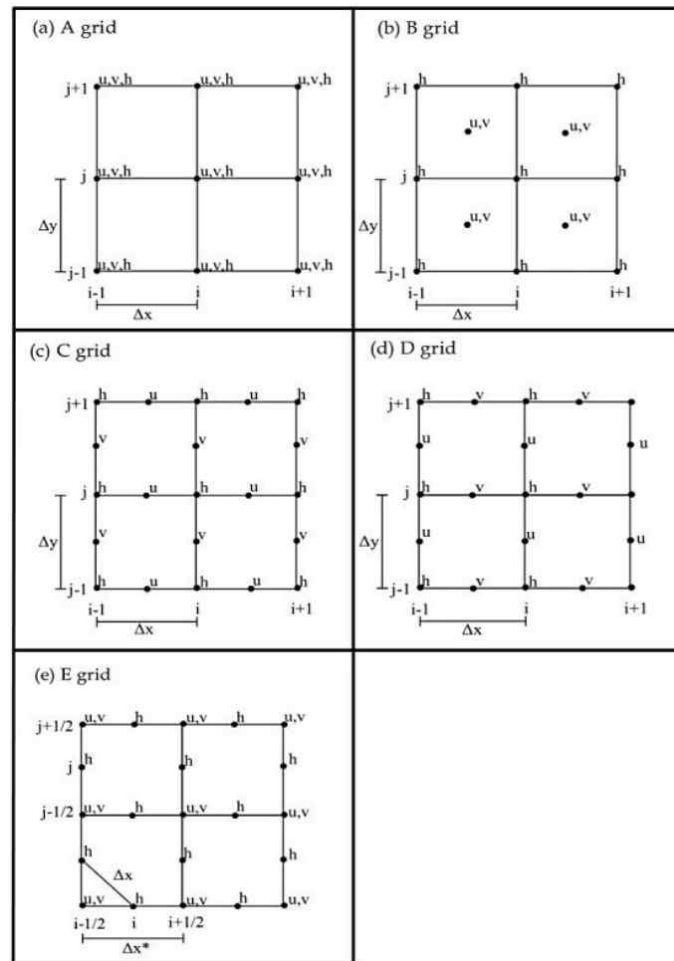
- 예전보다 미국기상학회의 수치예보 분야 대면 발표는 눈에 띄게 줄어들었는데, 자료동화는 JCSDA 워크숍에서 많이 다루고 있고, 모델도 UFS 워크숍을 통해 반영하고 있는 탓도 있는 듯하고, 동 분야의 연구 투자와 인력 양성이 점점 축소되는 것도 이유로 보임
- 집중 관측 실험과 예측 민감도 연구가 활발하고, 중규모 이론적 연구로 이어지며 관측과 이론의 연구가 균형 있게 이루어지고 있음
- 모델 예측의 실용성을 검증하는 실증센터(testbed)를 활발하게 운영하고 있으며, 특히 예보 효용성을 확인하기 위해 대학과 협력하여 계절별, 위험 현상별로 장단기 예보실험 사업을 통해서 모델 개발자, 수치예보 현장 전문가, 예보 전문가 등이 함께 소통하고 이 기회를 통해 인재 양성도 효과적으로 수행하고 있음
- AI를 응용하여 효율적으로 자동 전선 분석 알고리즘 개발 (Justin etal.)
- BM 에서는 인공지능도 모델 개발에 활용하지만, 우선은 MPAS-GSI(JEDI) 기반으로 모델과 자료동화를 구축하고, 후처리과정 에서 로그 회귀식을 응용하여 자료서비스 중임

나. 향후 업무 활용 계획

○ 모델과 자료동화 기술 개발 계획 보완과 최신 기술 접목에 활용

- (모델역학)

- MPAS는 C-grid를 쓰는 반면, 우리는 바람을 포함하여 모든 변수가 A-grid처럼 한 곳에 모여 있는데, 스톰 규모 예측에 FV3처럼 문제는 없는 건지 확인 필요
- ※ FV3 is discretized on D-grid, with C-grid winds which are interpolated from D-grid winds to compute fluxes



- (물리과정)

- 우리가 추진중인 구름양 진단 보강 접근과 미국기상청의 예단 방안 접목 추세를 비교하여 방향성 정립 필요
- 격자적응 중력파항력 uGWD의 접근 방법 참고
- aerosol-aware 접근 방법 참고

- (결합모델)

- 수상별 량에 따른 지면 모델 초기조건의 영향에 대한 검토 필요
- 하층 관측 증분으로 토양 수분과 해수 온도 보정 방법 참고(미국 EMC)

- (모델검증)

- 대륙 서안의 층운 구름이 잦은 지역에서 구름강수 물리과정이 층적운(Sc)에서 적운(Cu)형 구름으로 변하는 것을 잘 모의하는지 확인 필요
- MODE 패턴 검증 도구의 도입 활용 가능성 검토와 IVT 등 패턴 검증 응용 검토
- AMDAR를 이용한 경계층 고도 검증 방법 참고

- (자료전처리)

- 극지 청천 자료동화에 IASI 초분광 적외채널 활용 가능성 검토

- (동화기법)

- MPAS 가변격자에서 앙상블 자료동화 가능성 확인 필요
- 초단기 고해상도 예측에서 3dVar의 활용 참고
- 격자적응 국지화에서 밴드간 상관성과 비습 변수의 좁은 국지화 방법 검토 필요