

# 역학 기반 황사계절예측시스템 개발과 현업 운영

임윤규, 강미선, 이우정, 조정훈\*, 장필훈

2022. 7. 1. | 제3차 기후예측워크숍

1. 황사와 봄철 황사 전망
2. 역학 기반
3. 황사계절 예측시스템
4. 예측 결과와 검증  
향후 계획



# 황사

아시아 대륙의 몽골과 중국의 사막 지역, 황하 중류의 건조지대, 황토고원, 내몽골고원에서 한랭전선의 후면에서 부는 **강한 바람**과 지형에 의해 만들어진 **난류**로 인하여 다량의 **흙먼지**가 공중으로 **떠올라** 바람을 타고 이동하면서 **지표에 천천히 떨어지는 현상**

# 기상청의 봄철 황사 전망

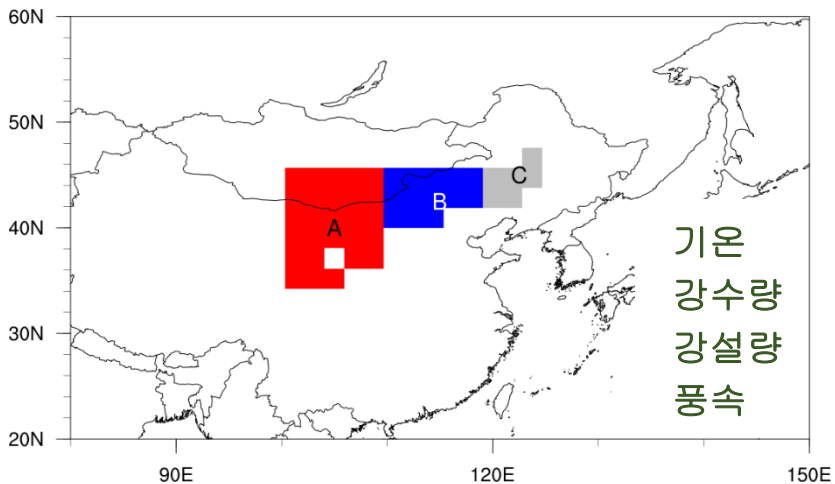
- 2월에 당해년도 봄철(3-5월) 황사일수를 평년 대비 3분위로 전망
- 발원지 기상요소와 기후 지수를 활용한 통계모델 개발
- 2017년, 유전알고리즘, 딥러닝 등 기계학습 방법도 활용
- 통계모델의 한계를 극복하고 예측 성능을 향상시키기 위해  
2016년부터 역학 기반 황사계절예측시스템을 개발
- 2017년 시험 운영 후 현업 기후예측시스템에 적용
- 2018년부터 2021년까지 역학 기반 황사계절예측시스템을  
기반으로 황사 전망을 산출

# 황사 관측 일수

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	봄	합계
2002	1	0	6.3	4.7	0	0	0	0	0	0	2	0	11	14
2003	0	0	0.9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9	1.9
2004	0	1.5	3.8	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	5.2	6.8
2005	0	0	0.8	4.8	0	0	0	0	0	0	1.9	0	5.6	7.5
2006	0	0	3.8	5.9	0.7	0	0	0	0	0	0	0	10.4	10.4
2007	0	0.3	3.1	2.1	2.8	0	0	0	0	0	0.1	1.5	8	9.8
2008	0	0.8	2.4	0.5	1.8	0	0	0	0	0	0	1.7	4.6	7.2
2009	0	1	2.2	0.2	0	0	0	0	0.5	1.1	0	2.9	2.5	7.9
2010	0.6	0	4.6	0.8	0.9	0	0	0	0	0	2.5	2.9	6.3	12.4
2011	0	0	2.4	0.2	5.7	0	0	0	0	0	0	0	8.2	8.2
2012	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	1.4	0	0.3	1.7
2013	0.4	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.7	2.1
2014	1.6	0.2	1.7	0	3.5	0	0	0	0	0	0.4	0.3	5.2	7.7
2015	0.2	2.6	5.5	0.5	0	0	0	0	0	0.2	0	0	6	9
2016	0	0	0.6	3.3	1.5	0	0	0	0	0	0.2	0	5.4	5.5
2017	0.5	0	0	0.6	4	0	0	0	0	0	1.1	0	4.6	6.2
2018	0	0	0	2.1	0.4	0	0	0	0	0	2.3	0	2.5	4.8
2019	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0.8	1.6	0	0.5	2.9
2020	0	0.8	0	0.7	0.3	0.1	0	0	0	0.5	0.3	0	1	2.7
<b>2021</b>	<b>1.1</b>	<b>0</b>	<b>3.7</b>	<b>1.8</b>	<b>4.3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9.8</b>	<b>10.9</b>
평년 1991~2020	0.3	0.3	2	2.3	1.2	0	0	0	0	0.1	0.4	0.4	5.5	7
최근10년 2012~2021	0.4	0.4	1.3	0.9	1.4	0	0	0	0	0.2	0.7	0	3.7	5.3
최근5년 2017~2021	0.3	0.2	0.7	1.1	1.8	0	0	0	0	0.3	1.1	0	3.7	5.5

# 통계모형을 활용한 봄철 황사 전망

독립변수: 황사발원지 기상 요소(4)와 기후 지수(10)



## • 황사발원지

황사 주요 발원지인 고비사막, 내몽골 고원, 만주 지역을 A, B, C 로 구분  
(지면 피복 상태에 따라 격자 단위로 선택)

## • 통계모형

다중회귀, 로지스틱 회귀, 의사결정나무, 유전알고리즘, 딥러닝

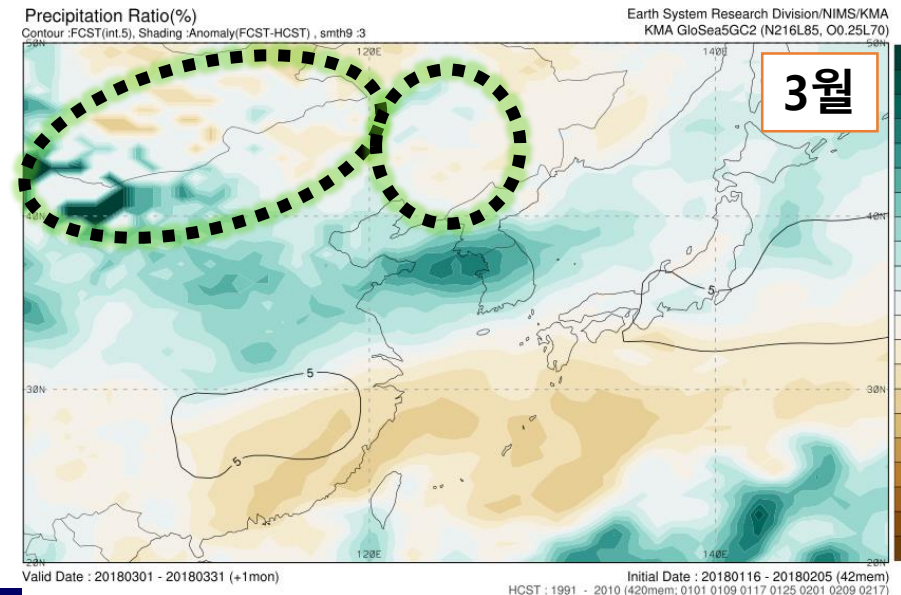
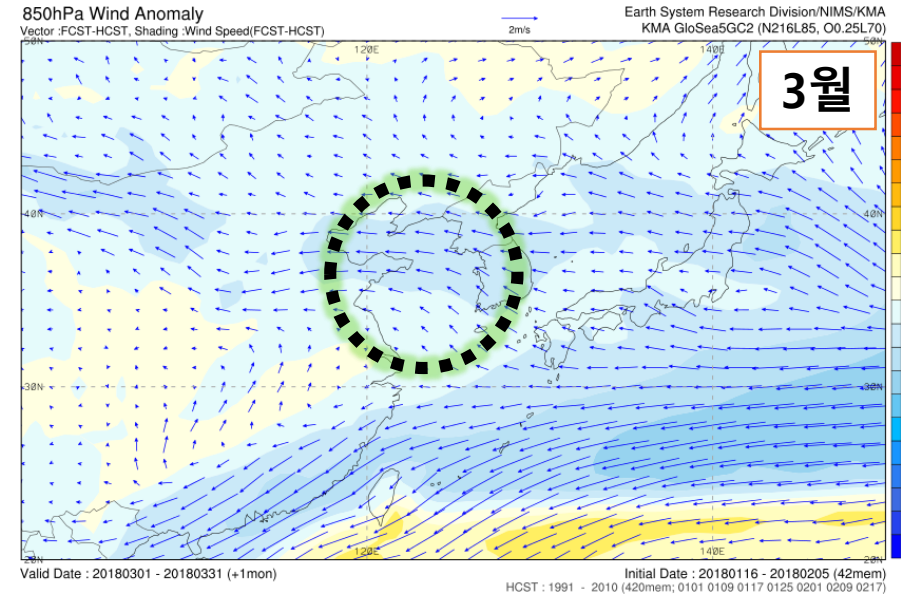
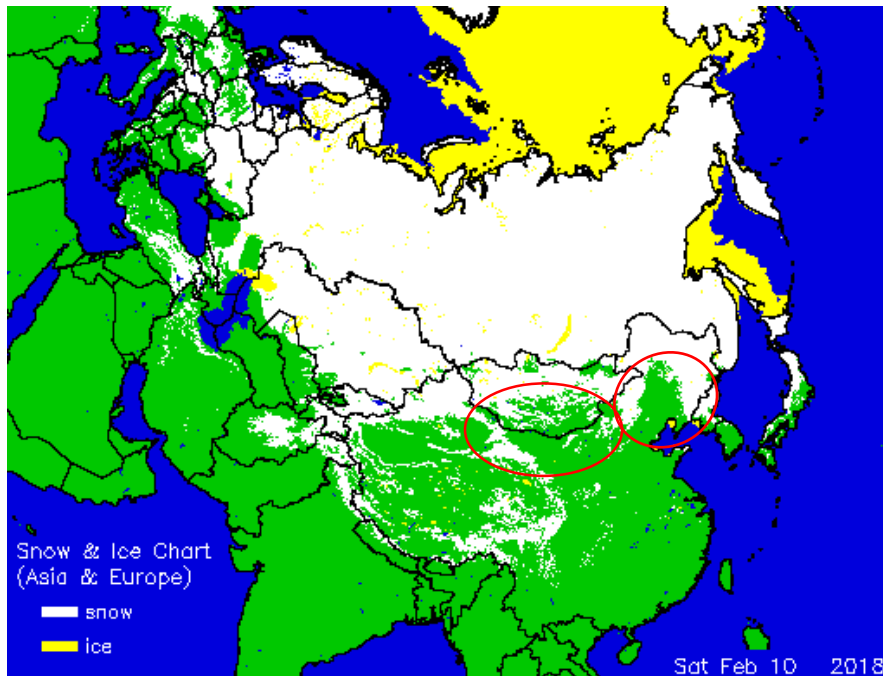
Below Normal Above  
3.4 < 황사일수 < 7.3

- 하한값 =  $M - 0.43 \times \text{STD}$ ,
- 상한값 =  $M + 0.43 \times \text{STD}$
- M: 1981-2010년 평균, STD: 표준편차

AO	Arctic Oscillation	북극진동
GML	Global Mean Land Ocean Temperature Index	전지구 평균 육지해양기온지수
MEI	Multivariate ENSO Index	다변량 엘니뇨 / 남방 진동지수
NOI	Northern Oscillation Index	북방 진동지수
ONI	Oceanic Nino Index	해양 엘니뇨지수
PDO	Pacific Decadal Oscillation Index	태평양 십년 진동지수
PNA	Pacific/North American Pattern	태평양 / 북미 패턴
SOI	Southern Oscillation Index	남방 진동지수
WPO	Western Pacific Oscillation	서태평양 진동
NAO	North Atlantic Oscillation	북대서양 진동

# 통계모형을 활용한 봄철 황사 전망

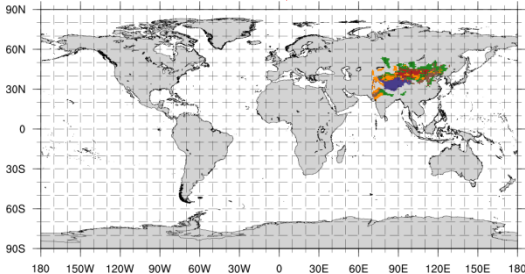
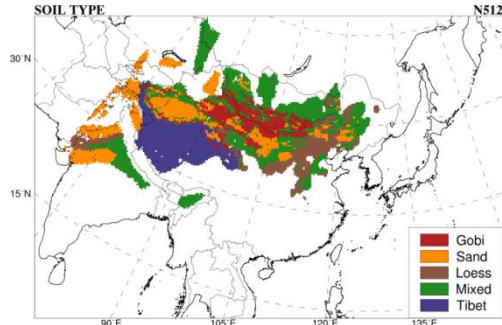
- 역학적 계절 진단을 보조 자료로 함께 활용
- 통계모델 결과와 함께 역학적 계절 진단 후 최종 봄철 황사 전망 발표



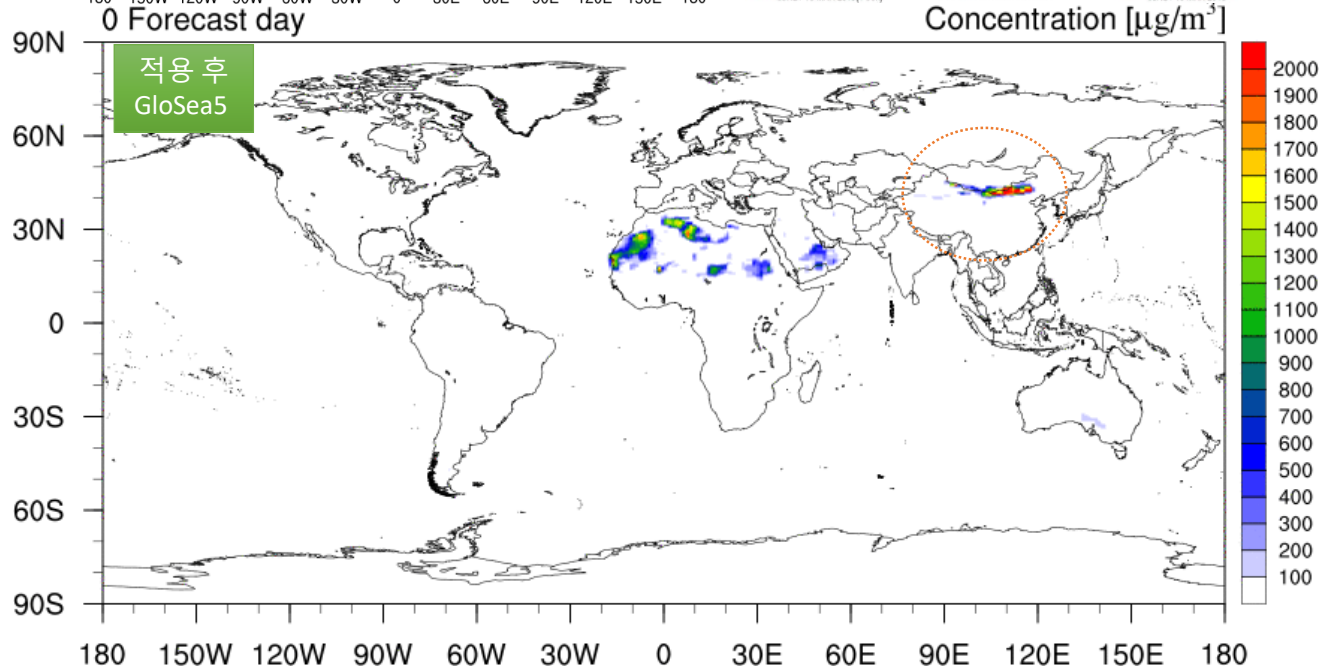
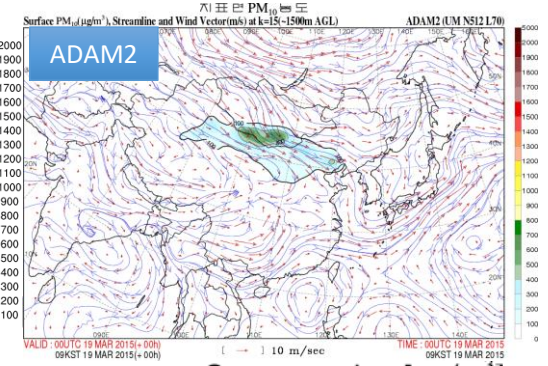
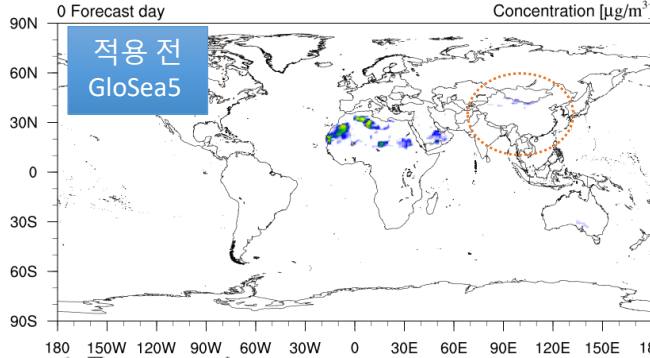
## ▶ GloSea5에 ADAM3 황사발원 알고리즘 이식

- 황사 발원에 필요한 입력자료(토양형태, 식생 감쇄지수) 적용
- 기상모델에 적용된 황사발원알고리즘의 병렬화
- 황사가 모델 내 물리 과정에 영향을 주지 않도록 처방

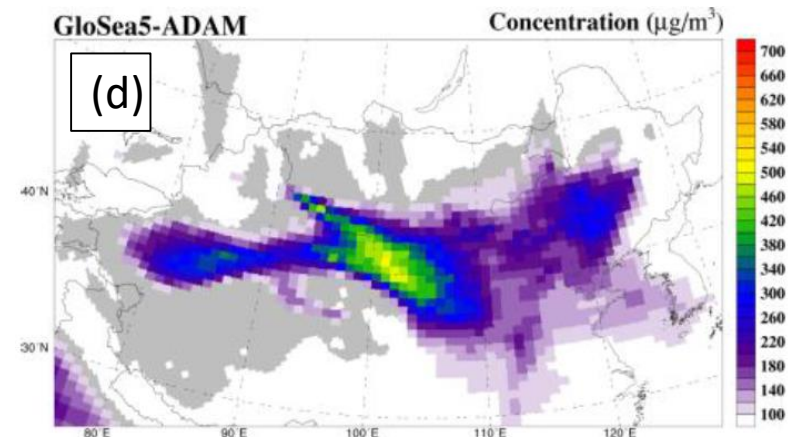
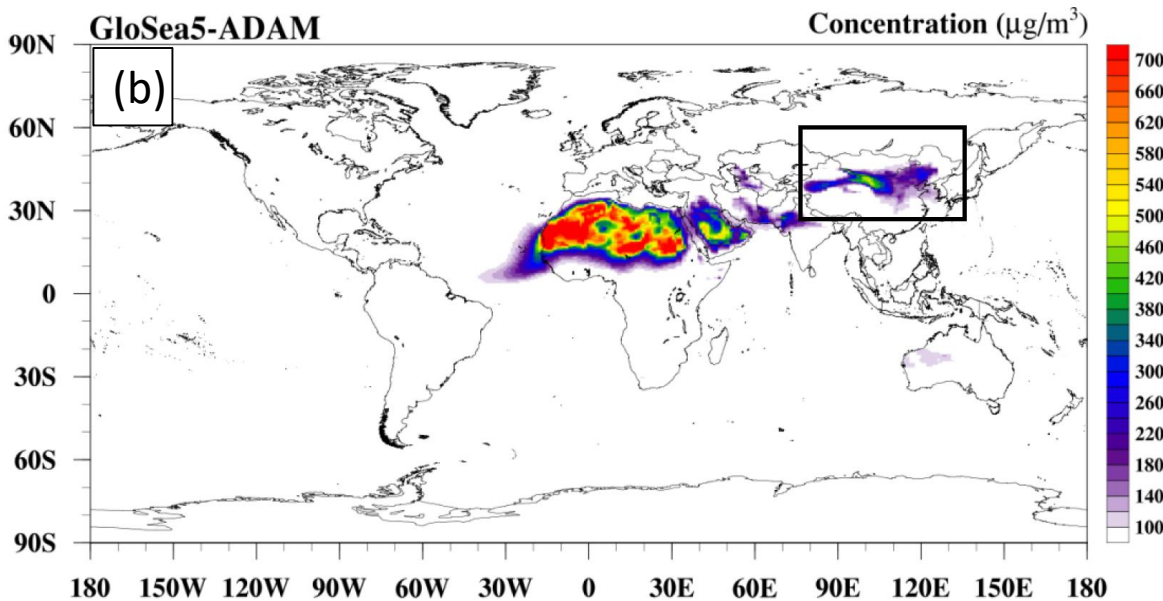
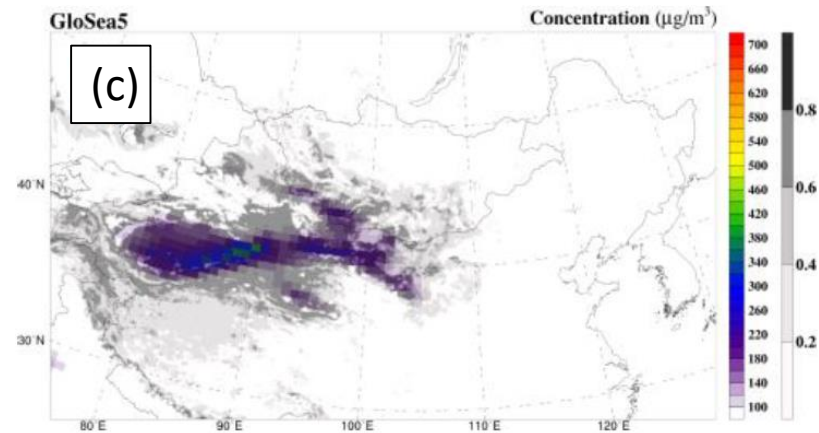
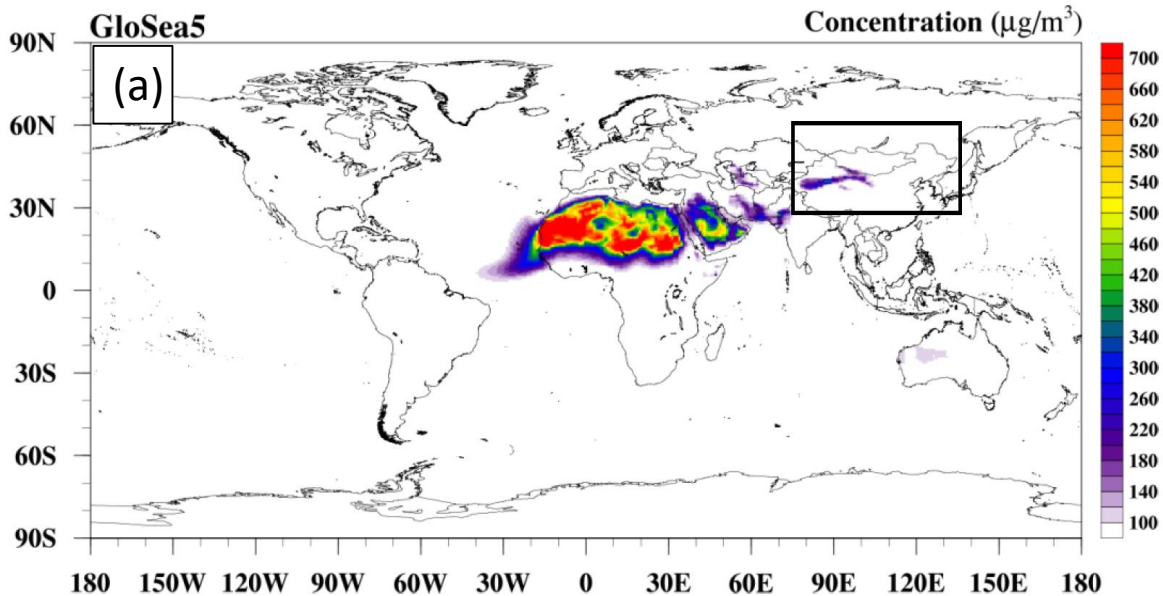
토양형태에 따른  
발원량 감쇄지수 적용



GloSea5 Dust module on



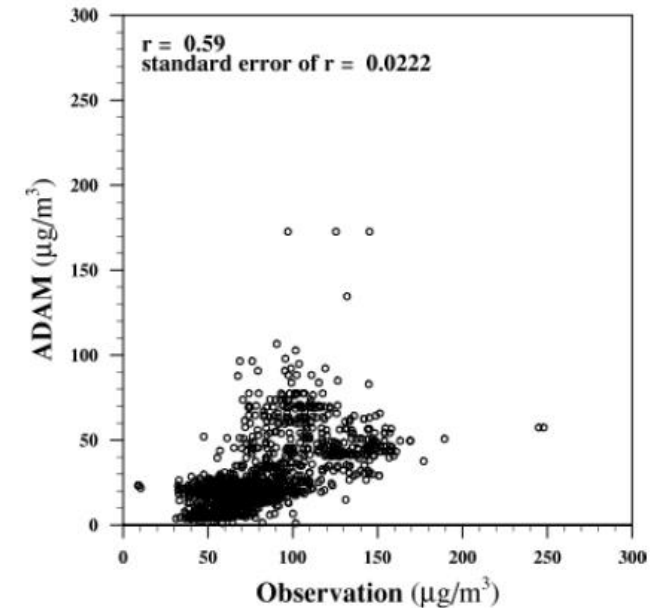
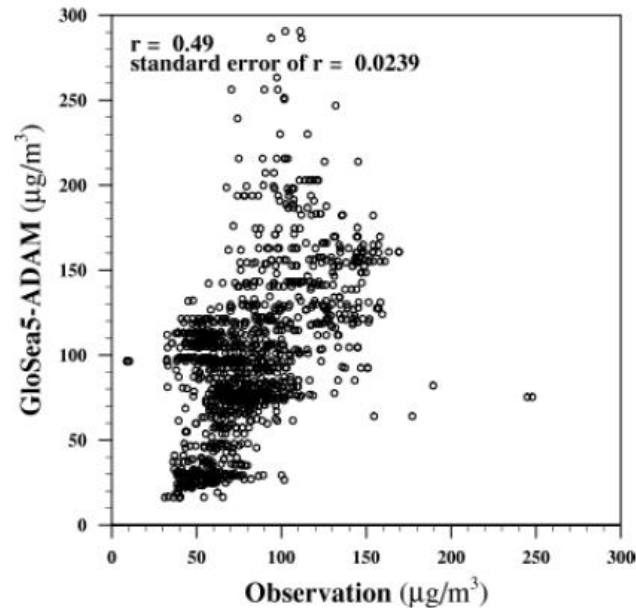
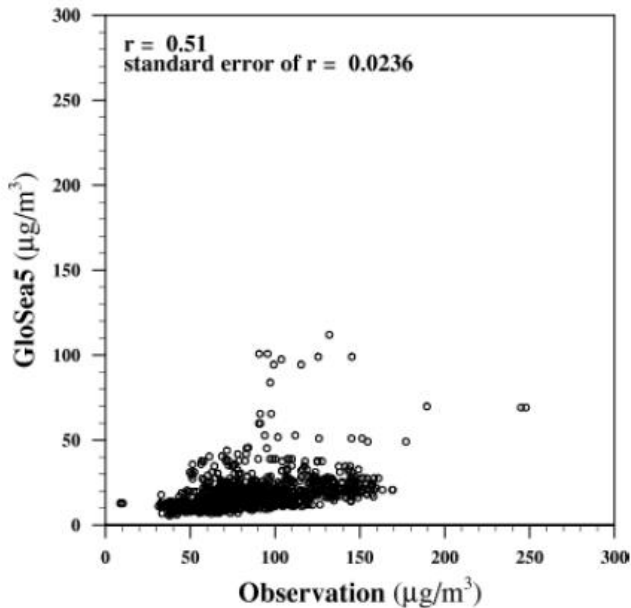
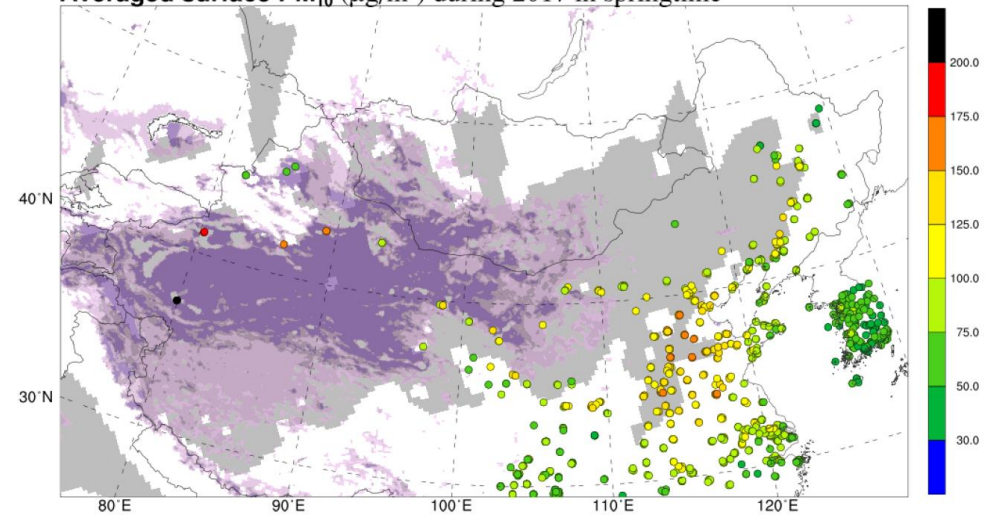
## 역학 기반 황사계절예측시스템



# 역학 기반 황사계절예측시스템

- 2017년 봄철 중국과 국내 대기질 감시망 관측 PM10 농도와 비교
- GloSea5가 관측 대비 PM10 농도를 낮게 모의하는 반면, ADAM 발원알고리즘을 적용 후 관측과 유사한 형태로 모의

Averaged surface PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) during 2017 in springtime



## 1 황사계절예측 범주 설정 자료 및 방법

## 관측(목측)

## 봄철 황사 발생 비율 분석

## ※ 황사 관측자료: 목측

- 기간: 1991~2016년
- 지점: 춘천, 서울, 인천, 수원, 서산, 청주, 포항, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수
- 춘천, 강릉은 관측지점 변경에 따라 북춘천(2016년~), 북강릉(2008년~) 자료를 함께 사용

## ※ 기후기간 예측자료(hindcast)

- 기간: 1991~2016년
- 자료: 2월 1일, 9일, 17일의 3~5월 자료
- 앙상블 멤버: 001, 021, 041
- 지표면 6시간 자료(apc)
- 변수: 황사(dust) 농도

## 모델(GloSea5)

## 황사 농도 자료 추출(6시간 간격)

총 234개 멤버(3 초기시간 × 3 앙상블 멤버 × 26 기후기간)

## 남한 영역 평균 황사 농도 계산(6시간 간격)

남한 영역: 위도(32~38°N), 경도(125~130°E)

## 일 평균 황사 농도 계산 및 빈도분석(10 µg/m³ 간격)

## 누적 빈도율 기반 황사 발생일 기준 설정

총 21528개(3 초기시간 × 3 앙상블 멤버 × 92(3~5월 일수) × 26 기후기간)

## 기후기간 동안의 연도별 황사일수 분석

황사일수: 각 연도별(9개 멤버) 봄철 황사발생일의 평균값

## 황사 계절예측 범주 설정

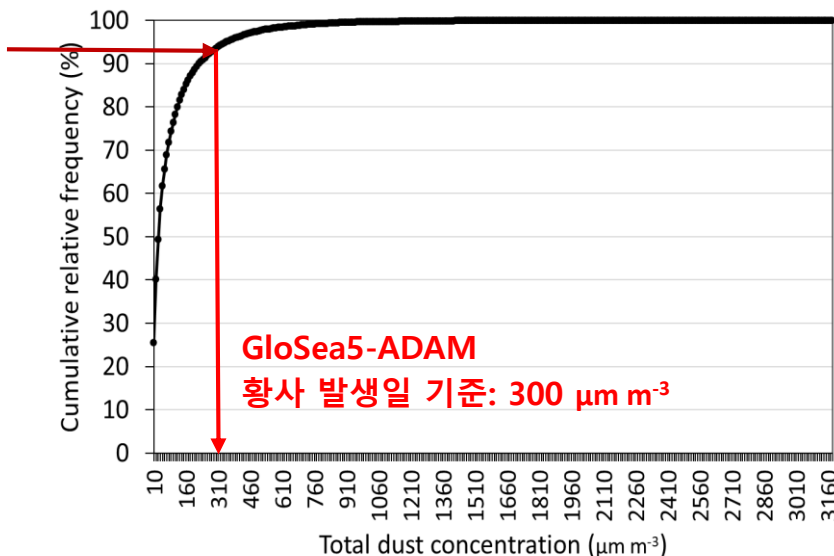
상한값 =  $M + 0.43 \times \text{STD}$ , 하한값 =  $M - 0.43 \times \text{STD}$

M: 황사일수 평균, STD: 황사일수 표준편차

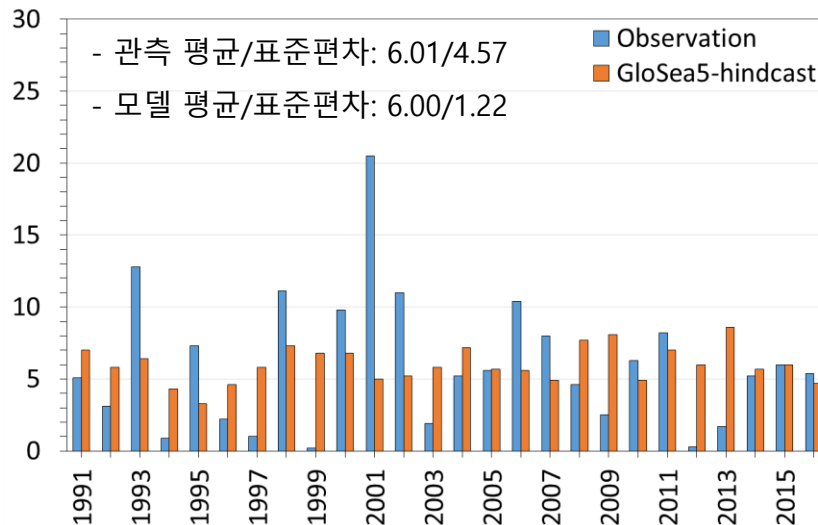
## 2 황사 계절예측 범주 설정

### ▪ GloSea5-ADAM 황사 발생일 기준 설정

26년  
관측 봄철  
황사일  
발생 비율  
(6.5%)



### ▪ 관측 및 모델의 연도별 황사일수



### ▪ GloSea5-ADAM 황사 계절 예측 범주

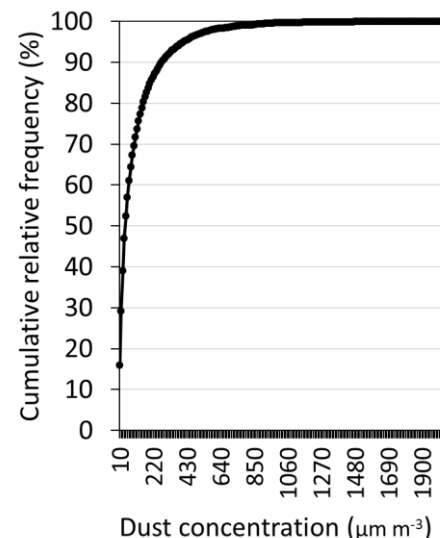
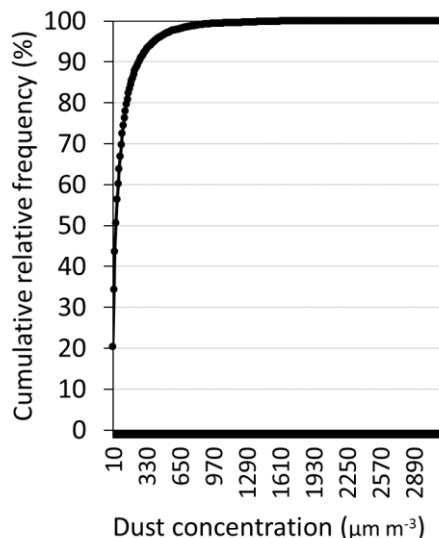
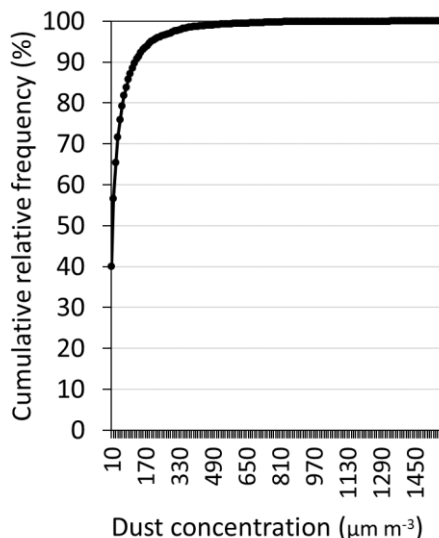
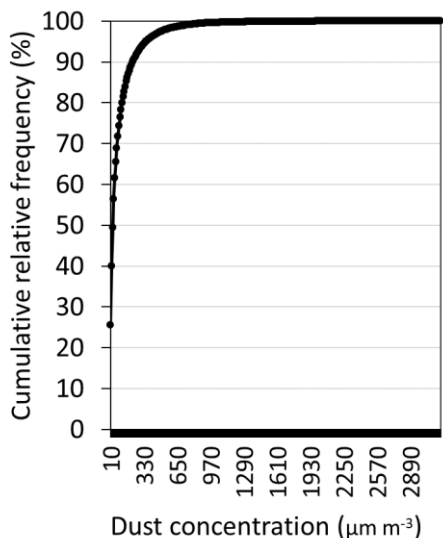
	관측	계절예측시스템
Above	황사일수 > 7.98	황사일수 > 6.53
Normal	4.04 < 황사일수 < 7.98	5.47 < 황사일수 < 6.53
Below	황사일수 < 4.04	황사일수 < 5.47

- 상한값 =  $M + 0.43 \times \text{STD}$   
 - 하한값 =  $M - 0.43 \times \text{STD}$   
 - M: 연도별 황사 일수 평균,  
 STD: 연도별 황사 일수 표준편차

## 역학 기반 황사계절예측시스템

관측	3-5월	3월	4월	5월
황사일수 합계	156.3	60.1	64.6	31.8
황사일수 평균	6.0	2.3	2.5	1.2
황사발생율(%)	6.5	7.5	8.3	3.9

※ 황사발생율=황사일수/(일수×연수) ×100



GloSea5-ADAM	3-5월	3월	4월	5월
기준 농도	300	153	297	457
황사일수 합계	156.0	59.8	65.2	32.0
황사일수 평균	6.0	2.3	2.5	1.2
황사일수 표준편차	1.3	0.9	0.8	0.5

## ※ GloSea5-ADAM을 활용한 계절 전망

### GloSea5-ADAM(기후기간)

#### 황사 계절예측 범주 설정

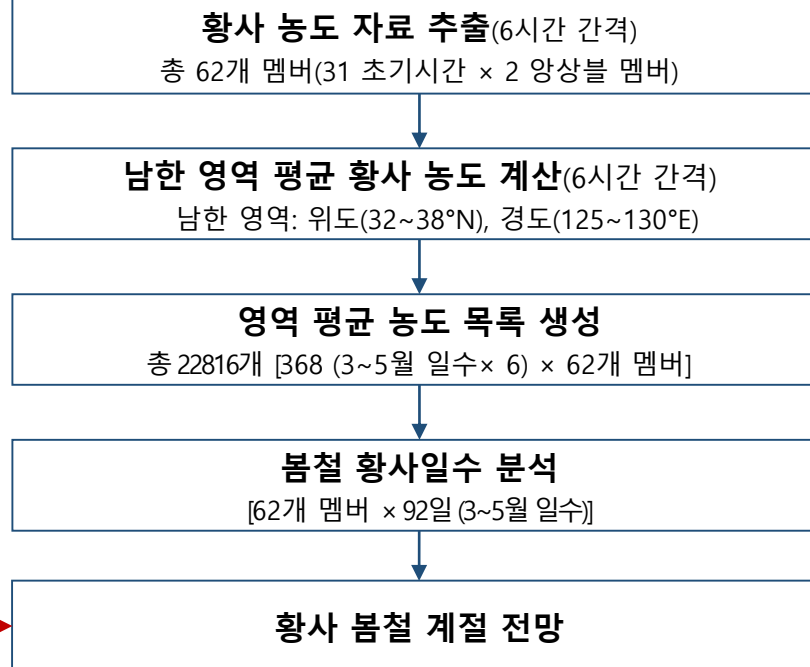
#### ※ GloSea5-ADAM 기후기간 예측자료

- 기간: 1991~2016년
- 자료: 2월 1일, 9일, 17일의 3~5월 자료
- 앙상블 멤버: 001, 021, 041
- 지표면 6시간 자료(apc)
- 변수: 황사(dust) 농도

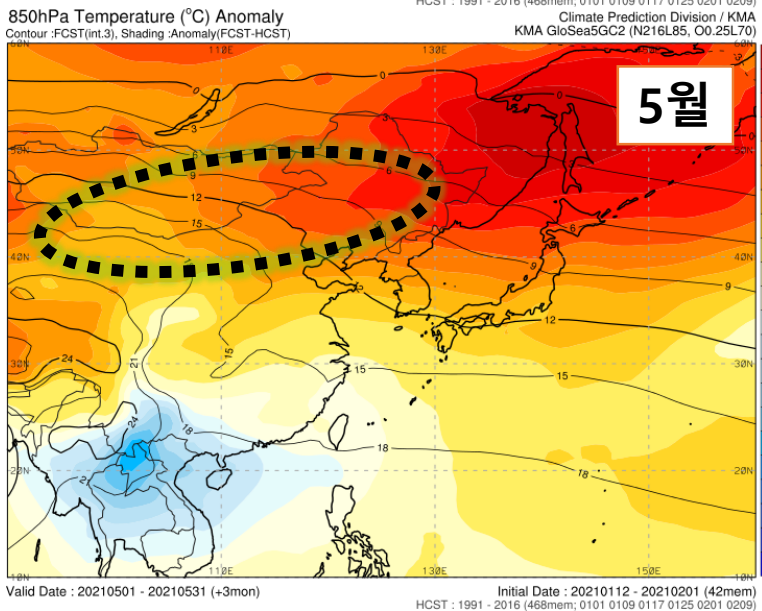
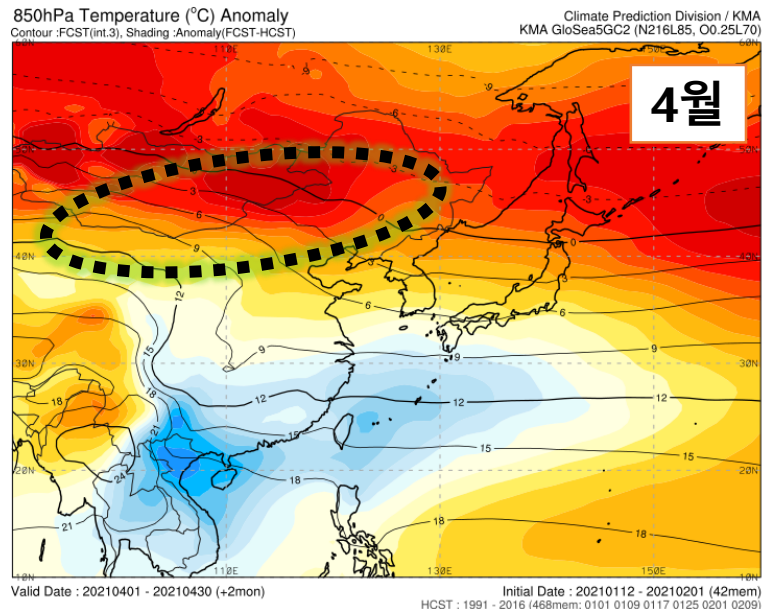
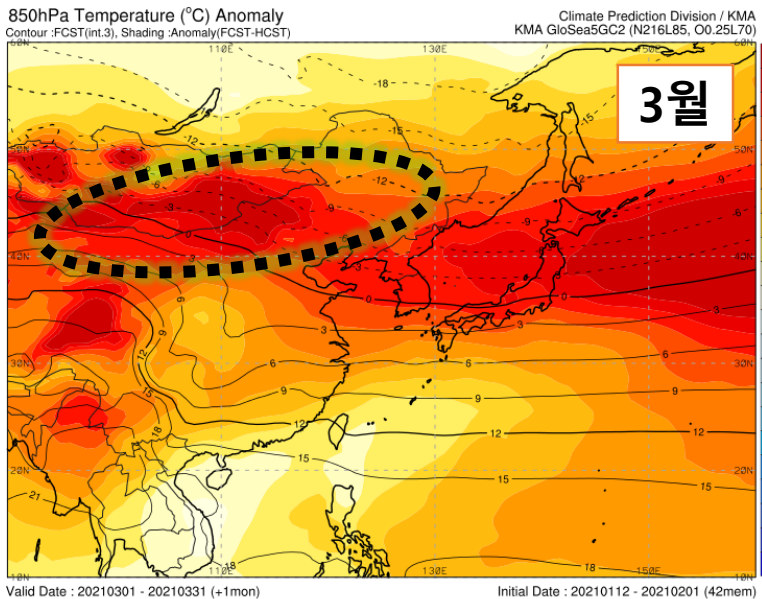
#### ※ GloSea5-ADAM 2021년 예측자료 예시

- 기간: 2021년 1월 1일 ~ 31일
- 앙상블 멤버: 001, 002
- 지표면 6시간 자료(apc)
- 변수: 황사(dust) 농도

### GloSea5-ADAM(예측)



## 예측 및 검증 (2021년)



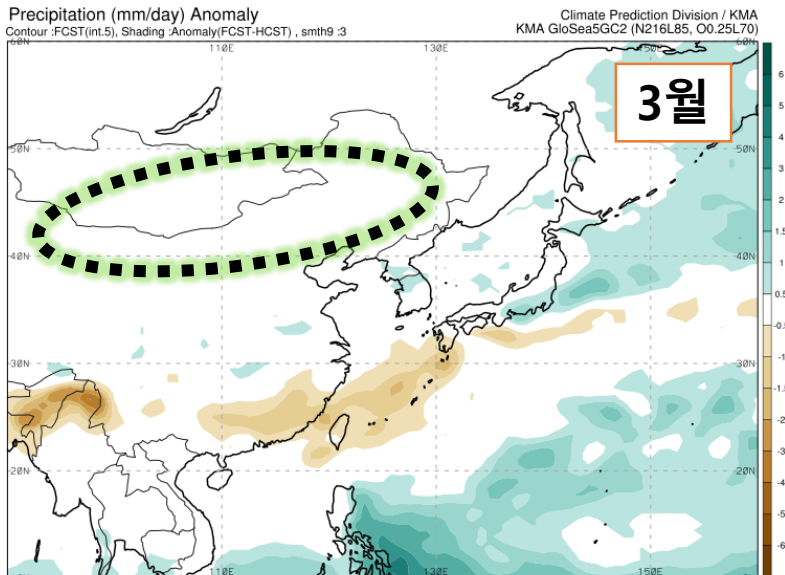
황사발원지 평균기온 편차

3월 (평년보다 높음)

4월 (평년보다 높음)

5월 (평년보다 높음)

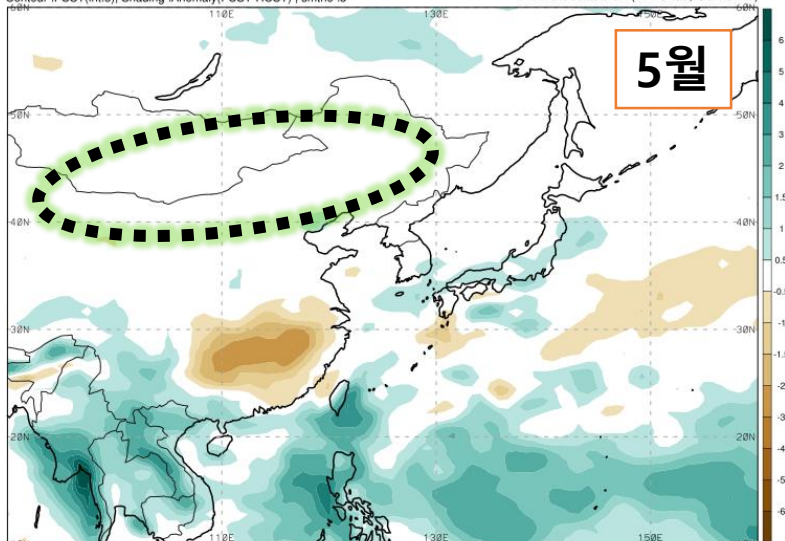
## 예측 및 검증 (2021년)



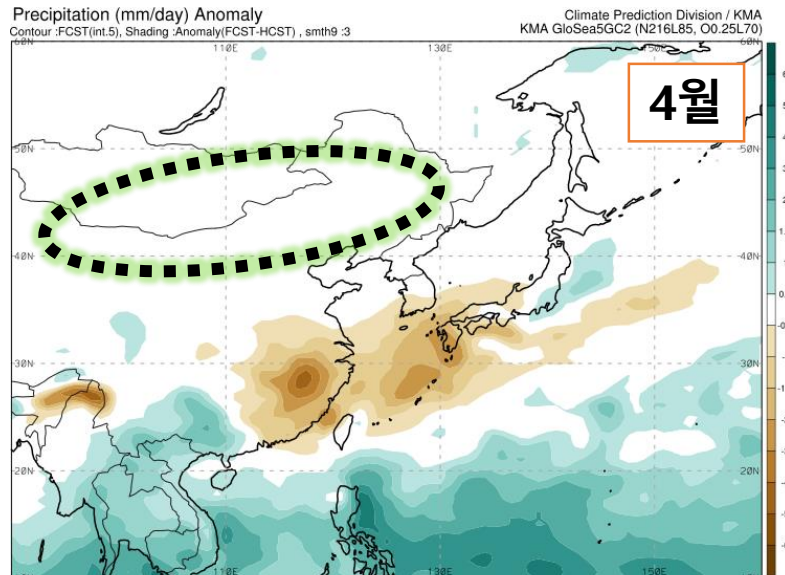
Valid Date : 20210301 - 20210331 (+1mon) Initial Date : 20210112 - 20210201 (42mem)  
HCST : 1991 - 2016 (468mem; 0101 0109 0117 0125 0201 0209)

Precipitation (mm/day) Anomaly  
Contour :FCST(int.5), Shading :Anomaly(FCST-HCST), smth9\_3

Climate Prediction Division / KMA  
KMA GloSea5GC2 (N216L85, O0.25L70)



Valid Date : 20210501 - 20210531 (+3mon) Initial Date : 20210112 - 20210201 (42mem)  
HCST : 1991 - 2016 (468mem; 0101 0109 0117 0125 0201 0209)



Valid Date : 20210401 - 20210430 (+2mon) Initial Date : 20210112 - 20210201 (42mem)  
HCST : 1991 - 2016 (468mem; 0101 0109 0117 0125 0201 0209)

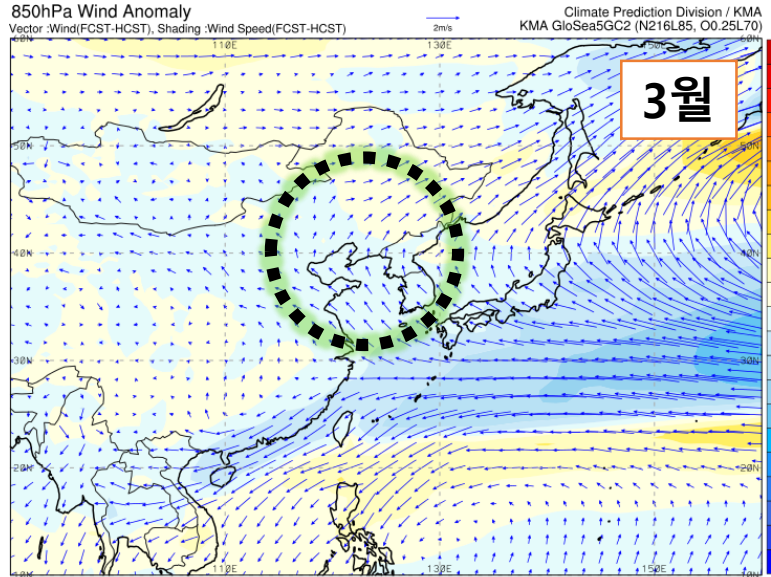
### 황사발원지 강수량 편차

3월 (평년과 유사)

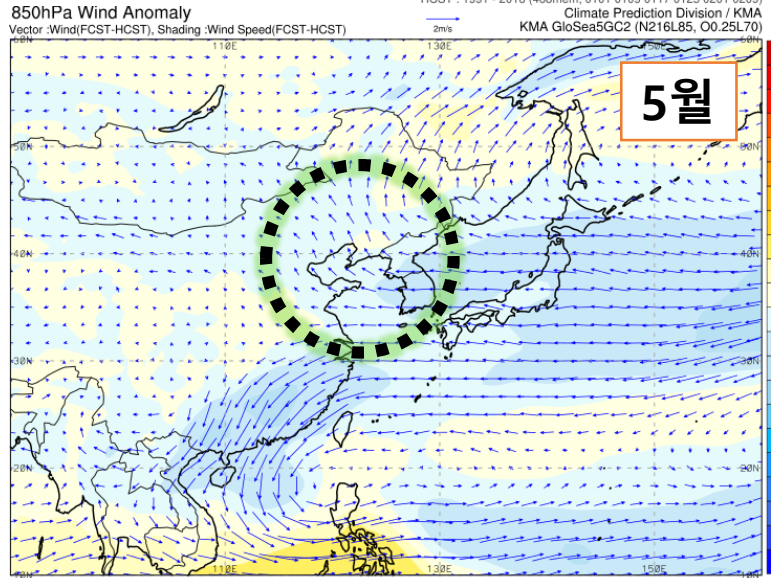
4월 (평년과 유사)

5월 (평년과 유사)

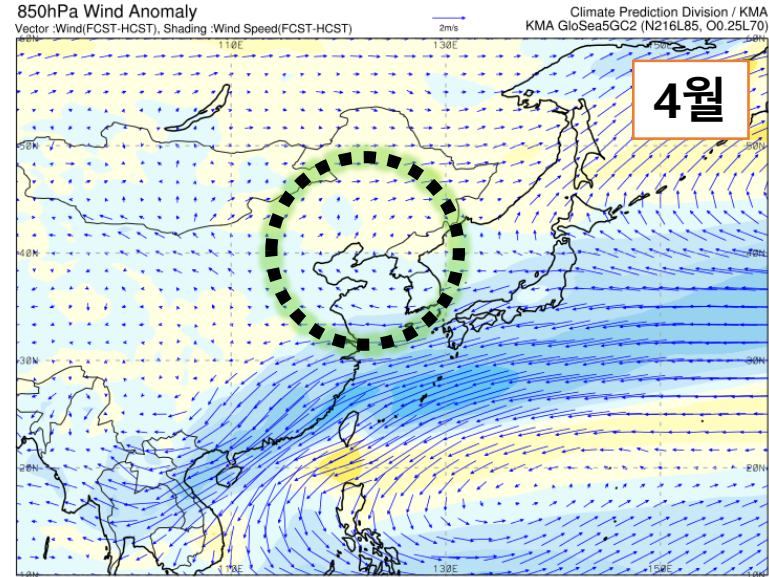
## 예측 및 검증 (2021년)



Valid Date : 20210301 - 20210331 (+1mon) Initial Date : 20210112 - 20210201 (42mem)  
HCST : 1991 - 2016 (468mem; 0101 0109 0117 0125 0201 0209)



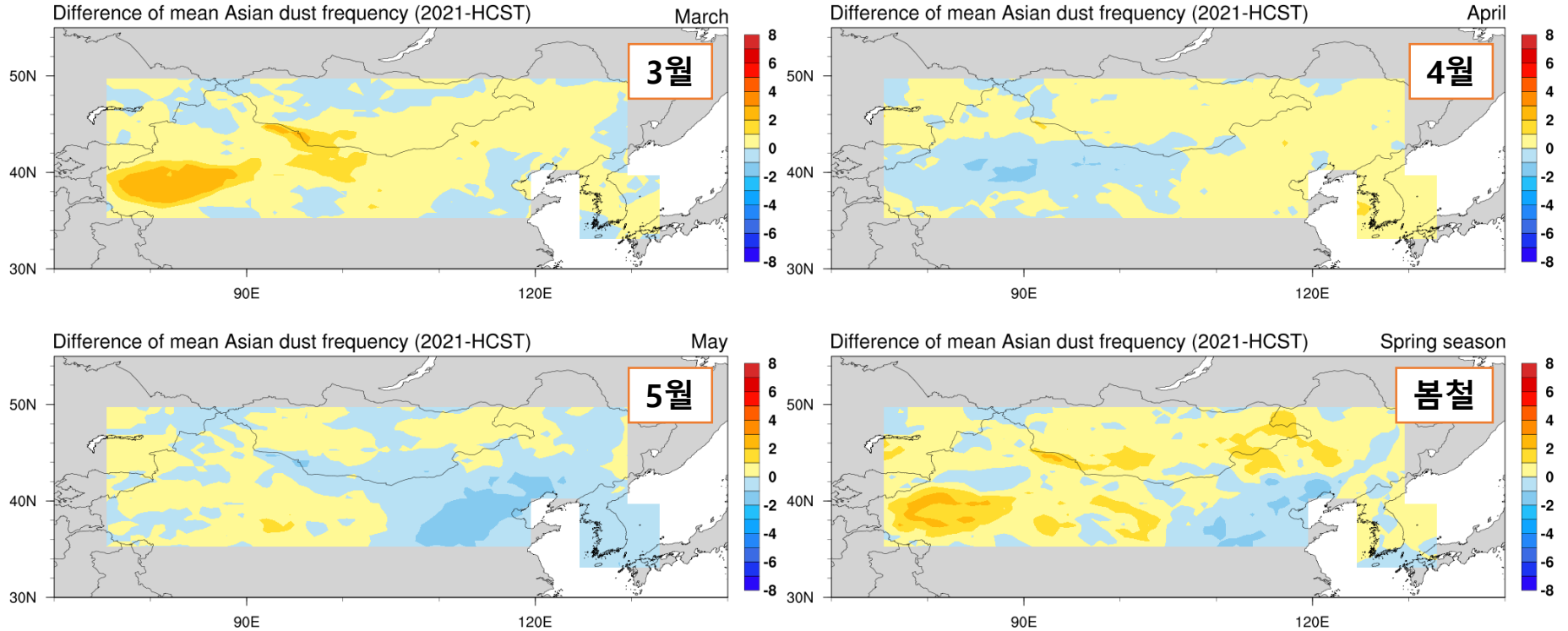
Valid Date : 20210501 - 20210531 (+3mon) Initial Date : 20210112 - 20210201 (42mem)  
HCST : 1991 - 2016 (468mem; 0101 0109 0117 0125 0201 0209)



Valid Date : 20210401 - 20210430 (+2mon) Initial Date : 20210112 - 20210201 (42mem)  
HCST : 1991 - 2016 (468mem; 0101 0109 0117 0125 0201 0209)

황사발원지(발해만 주변)에서  
한반도로 기류 유입가능성  
3(낮음), 4(낮음), 5월(낮음)

## GloSea5-ADAM3 평균 황사 일수 차이 (2021-HCST)



※ 황사 일수 기준  
 - 발원지:  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$   
 - 한반도:  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$

# 예측 및 검증 (2021년)

- 기간: 2021년 1월 1일~1월 31일
- 대상 영역: 남한 영역(2~38°N, 125~130°E)
- 앙상블 멤버: 62개 (001, 002)
- 황사일수 조건: 남한 평균황사농도  $\geq 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- 변수: Total dust concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- 2021년 봄철 황사일수: 5.75일

## 2021년 봄철 황사 전망

Year	Observation	GloSea5-ADAM
2017	Normal	Normal
2018	Below	Below
2019	Below	Above
2020	Below	Below
2021	Above	Normal

## ※ 황사일수 범주 기준

- 관측

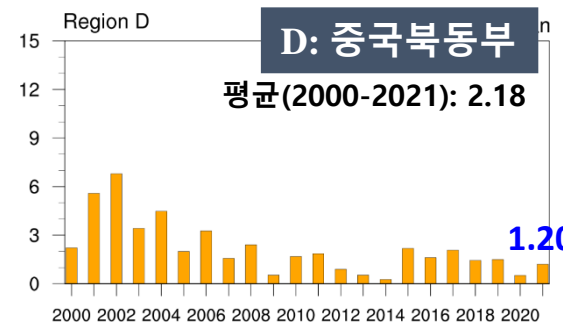
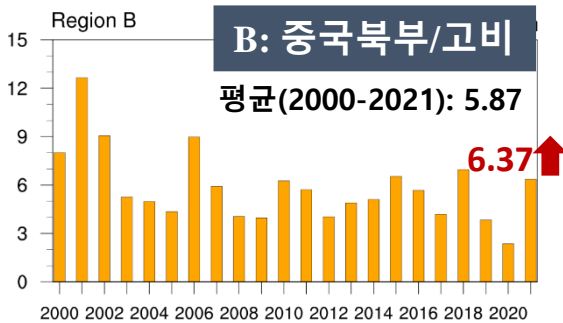
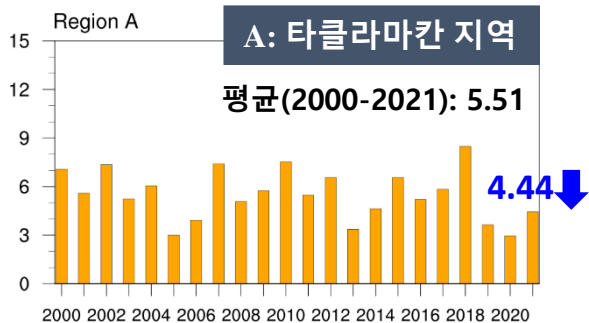
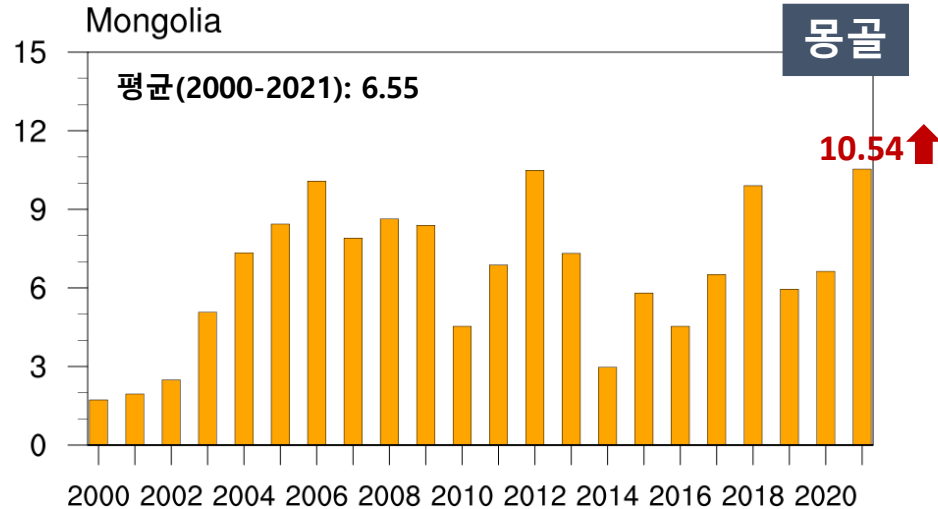
Below   Normal   Above  
4.04 < 황사일수 < 7.98

- GloSea5-ADAM

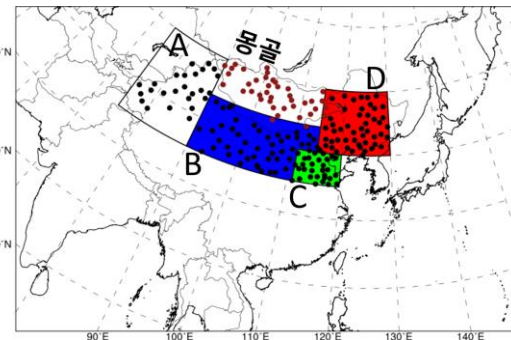
Below   Normal   Above  
5.47 < 황사일수 < 6.53

2021년 봄철 황사 예측 결과: **Normal**

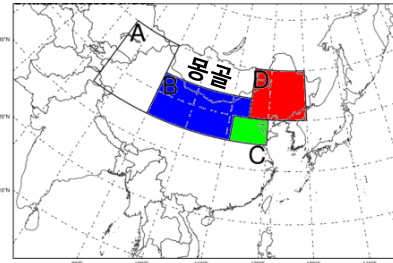
# 예측 및 검증 (2021년)



- 2021년 봄철, 몽골에서는 황사 발생 빈도가 2000년 이후 가장 높게 나타남
- 중국 북부지역의 황사 발생 빈도는 평균 이하를 보였지만, 중국북부/고비(B) 및 황토고원(C)에서는 평균 이상의 황사가 발생하였음



## 2월 말 예측 기준



## ※ GloSea5

### · HCST

- 분석기간: 1991~2016년 3~5월
- 앙상블 멤버: 001, 021, 041
- 초기 시간: 0201, 0209, 0217
- 초기 시간: 0209, 0217, 0225
- 초기 시간: 0309, 0317, 0325
- 초기 시간: 0409, 0417, 0425

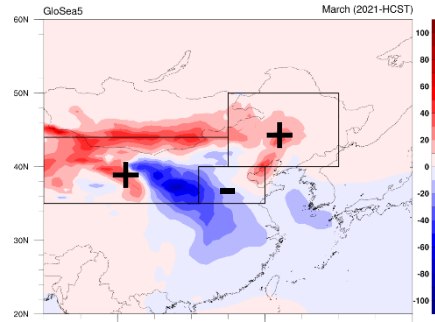
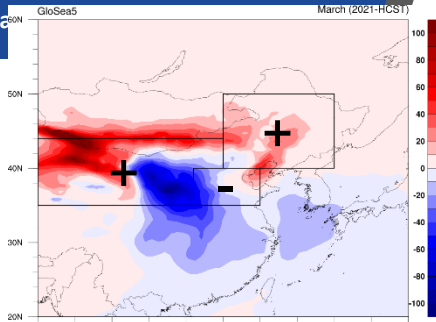
### · FCST

- 분석 기간: 2021년 3~5월
- 앙상블 멤버: 001, 002
- 초기 시간: 20210126~20210215
- 초기 시간: 20210202~20210222
- 초기 시간: 20210309~20210329
- 초기 시간: 20210406~20210426

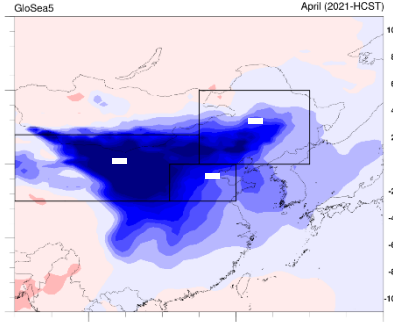
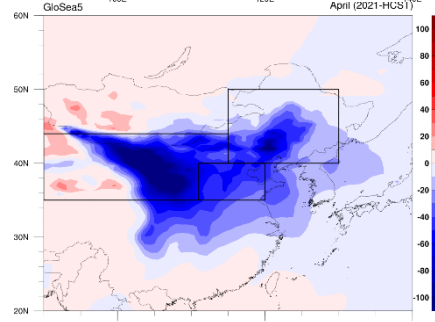
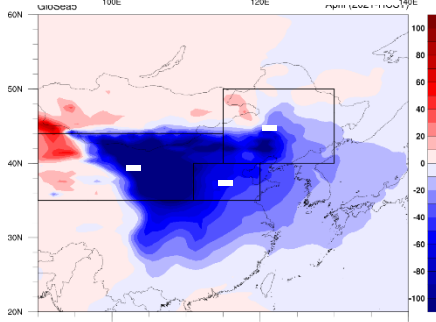
## 3월 예측 기준

## 4월 예측 기준

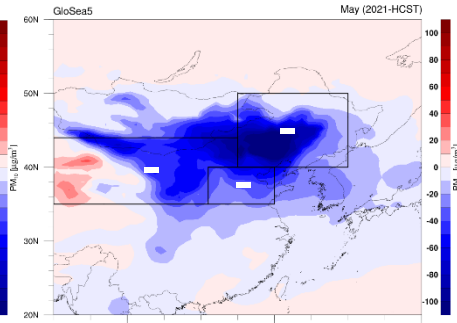
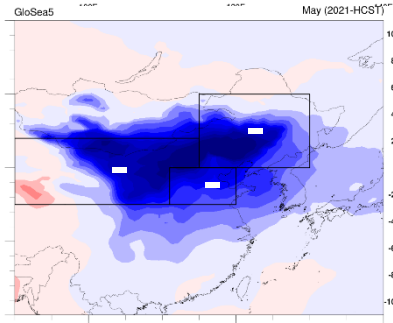
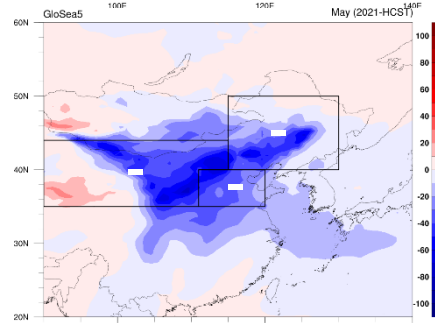
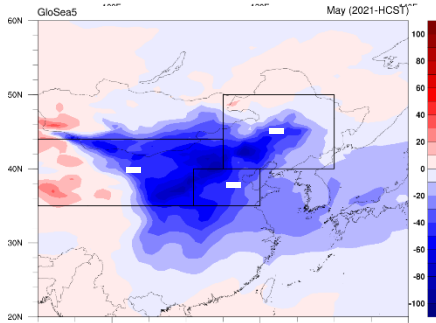
3월



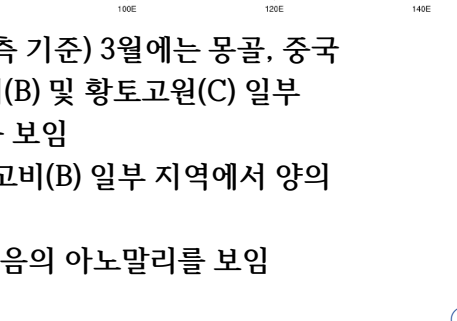
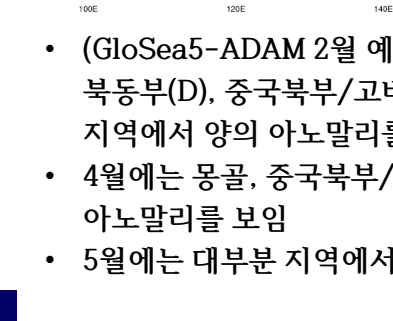
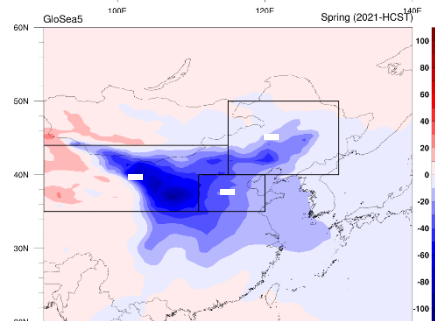
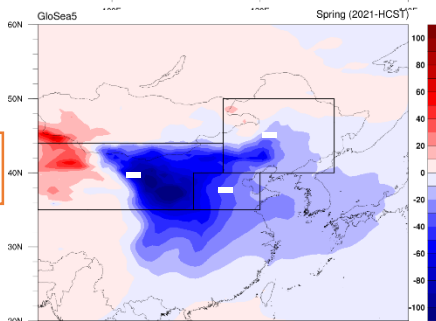
4월



5월



봄철



- (GloSea5-ADAM 2월 예측 기준) 3월에는 몽골, 중국 북동부(D), 중국북부/고비(B) 및 황토고원(C) 일부 지역에서 양의 아노말리를 보임
- 4월에는 몽골, 중국북부/고비(B) 일부 지역에서 양의 아노말리를 보임
- 5월에는 대부분 지역에서 음의 아노말리를 보임

# 850hPa GloSea5-ADAM

# ERA5

# NCEP R1

wind

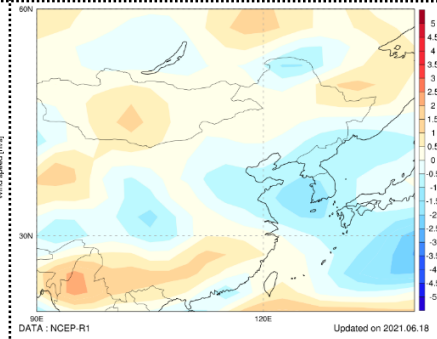
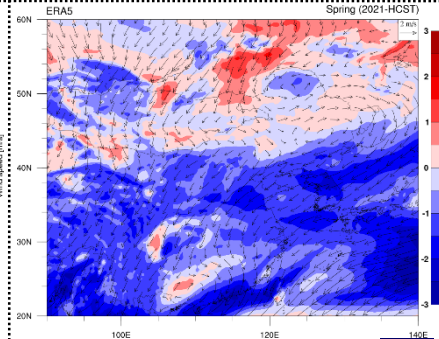
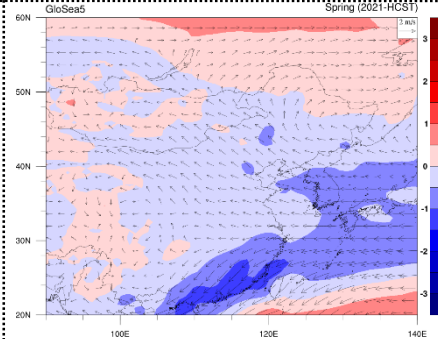
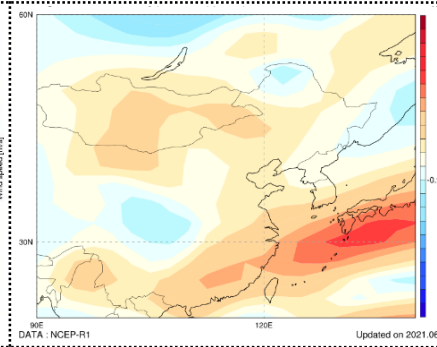
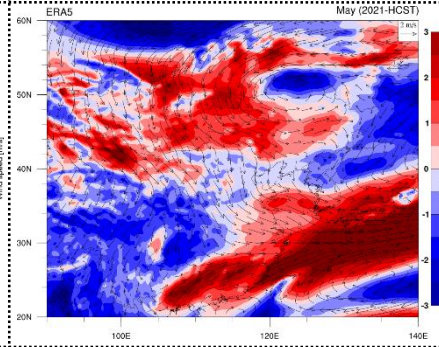
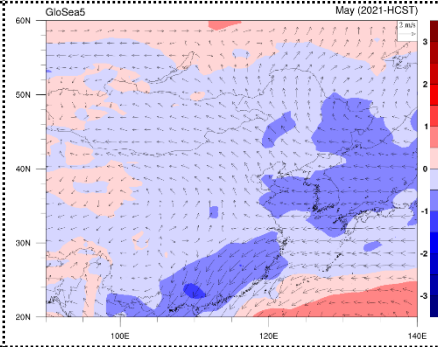
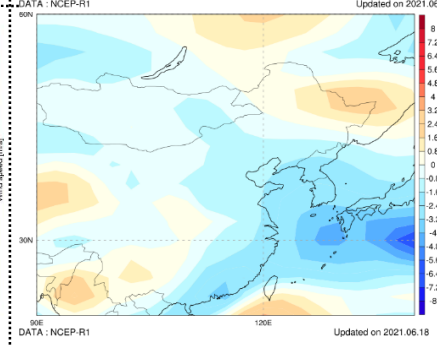
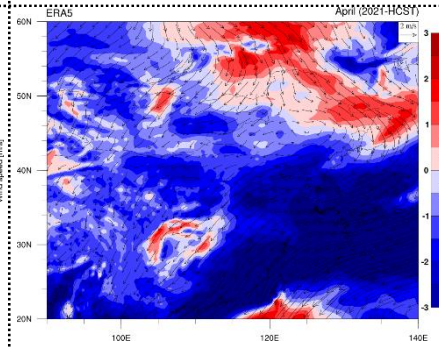
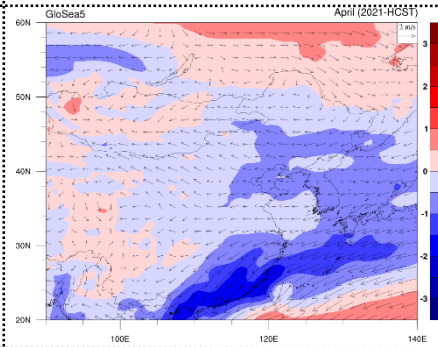
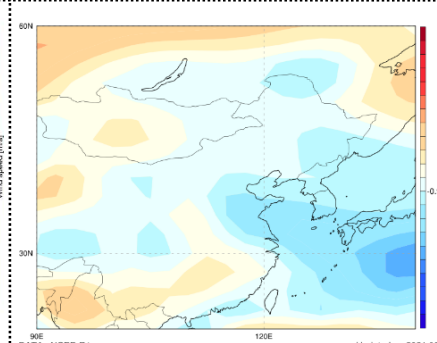
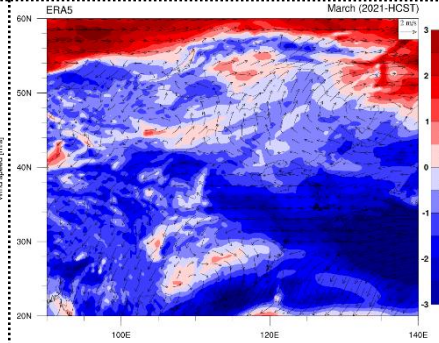
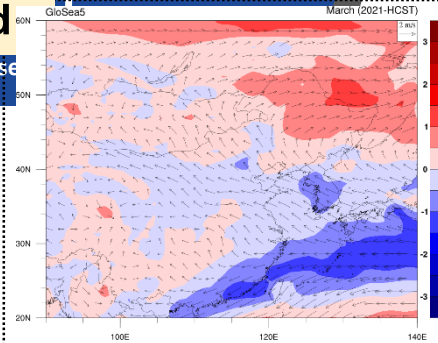
Forecast Rese

March

April

May

Spring



## ※ GloSea5

- HCST
  - 분석기간: 1991~2016년 3~5월
  - 초기 시간: 0201, 0209, 0217
  - 앙상블 멤버: 001, 021, 041
- FCST
  - 분석 기간: 2021년 3~5월
  - 초기 시간: 20210126~20210215
  - 앙상블 멤버: 001, 002

## ※ ERA5

- 기후 기간: 1991~2016년 3-5월
- 분석 기간: 2021년 3-5월
- 해상도: 0.25° × 0.25°

## ※ NCEP R1

- 기후 기간: 1991~2016년 3-5월
- 분석 기간: 2021년 3-5월
- KMA 기후 분석 시스템 이용

- GloSea5-ADAM에서 발원지 영역에서의 양의 아노말리를 모의하지 못함

# 예측 및 검증 (2021년)

## 1) 황사 발원지 황사발생빈도(평균: 2000-2021)

GTS	3월	4월	5월
중국 북부	높음	낮음	높음
몽골	높음	높음	높음

※ 몽골에서는 봄철 황사 발생 빈도가 2000년 이후 가장 높게 나타남

## 2) ERA5 분석장(기후 기간: 1991-2016)

ERA5	3월	4월	5월
기온	+	0+	0
강수	0	0	0
바람(10m)	- (몽골 일부 0+)	- (몽골 일부 +)	+
바람(850hPa)	- (몽골 일부 +)	- (몽골 일부 +)	+

## 3) GloSea5-ADAM 예측장(기후 기간: 1991-2016)

	3월	4월	5월
기온	+	+	0+
강수	0	0	0
바람(10m)	0- (몽골 일부 0+)	0- (몽골 일부 0+)	0-
바람(850hPa)	0- (몽골 일부 0+)	0- (몽골 일부 0+)	0-
황사 농도	+(몽골)/-	-	-

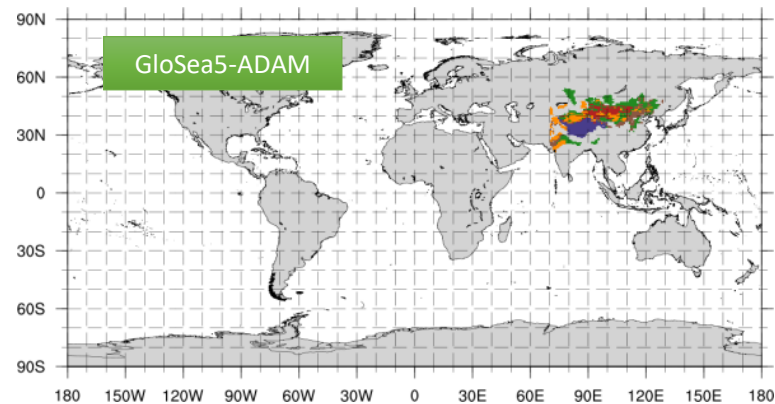
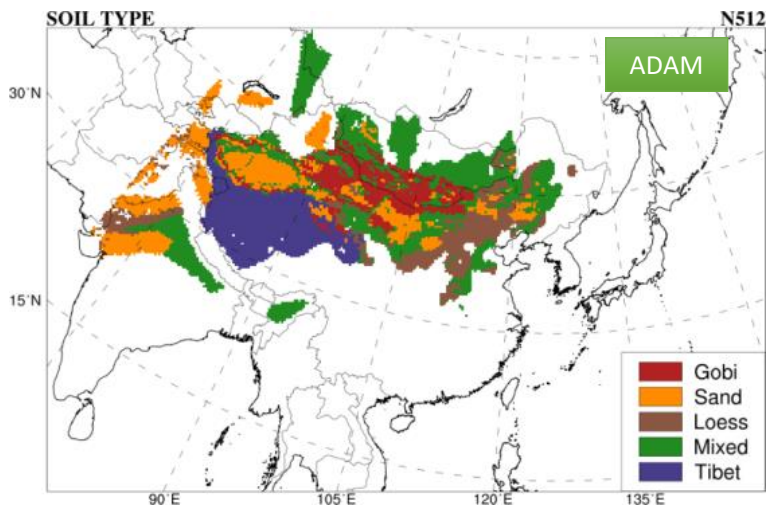
## 봄철 우리나라에 황사가 많았던 이유

- (1) 3월에는 높은 기온과 몽골 일부 지역에서 평년 이상의 지면 바람으로 황사 발생 빈도가 높았고 우리나라에 영향을 미침
- (2) 5월에는 높은 지면 바람으로 황사발생이 많았고 발원지의 북서 기류가 평년보다 강함

## GloSea5-ADAM 봄철 황사 전망 고찰

- (1) 한반도 봄철 황사 농도를 평년대비 낮게 모의함
- (2) 발원지에서 3월 황사 농도는 평년대비 높았으나, 평균적으로 황사 이동경로 형성이 적절히 모의되지 못함.
- (3) 5월에는 발원지 및 한반도에서의 황사 농도를 모의 못하였고(평년대비 적음). 북서 기류를 약하게 모의함.

## GloSea6 도입에 따른 황사계절예측시스템 개선



토양 유형에 따른 발원량 감쇄지수 적용

개선  
방안

### GloSea6-ADAM

	GloSea5-GC2			GloSea6-GC3.2		
대기	GA6.0	UM vn8.6	N216L85	GA7.2	UM vn11.3	N216L85
지면	GL6.0	JULES vn4.7	N214L4	GL8.0	JULES vn5.4	N214L4
해양	GO5.0	NEMO vn3.4	ORCA025L75	GO6.0	NEMO vn3.6	eORCA025L75
해빙	GS16.0	CICE vn4.1	ORCA025L75	GS18.1	CICE vn5.0	eORCA025L75

※ GloSea6의 에어로졸 과정: CLASSIC, UKCA-mode

※ GloSea6의 Mineral dust 과정: GloSea5와 동일

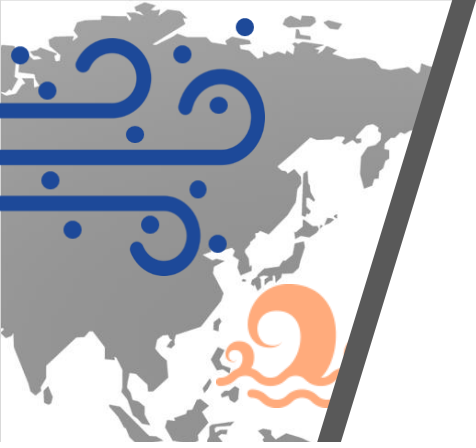
→ Mineral dust 과정과 에어로졸 과정의 연계를 위해

**Dust 입자 크기 구간을 2개에서 6개로 변경 필요**

	입자 크기(지름) 구간 (μm)					
모델	1	2	3	4	5	6
GloSea5	0.2~4.0	4.0~20.0	-	-	-	-
GloSea6	0.063~0.20	0.20~0.63	0.63~2.0	2.0~6.3	6.3~20.0	20.0~63.0

→ 식생에 의한 월별 황사발원저감지수 갱신

(2018년도 현업 ADAM3 개선사항)



**감사합니다.**