

# 관측과 모델을 통해 본 충남 미세먼지 현황

국립환경과학원 \_ 이 재 범 연구관



# 관측과 모델을 통해 본 충남 미세먼지 현황

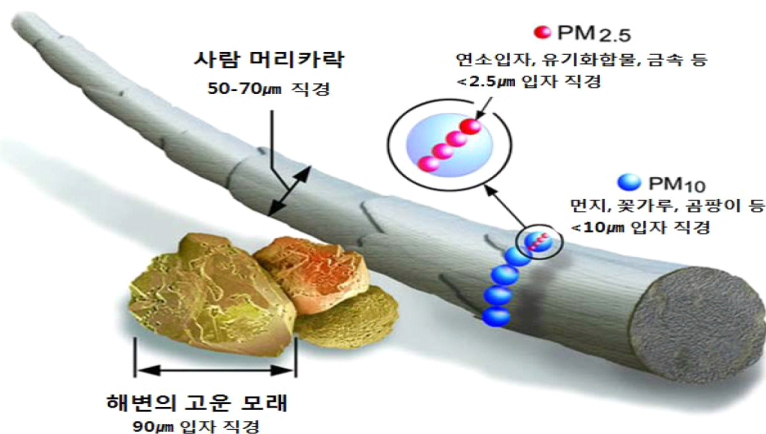
국립환경과학원  
대기질통합예보센터

이재범, 최기철, 임용재



## 0 미세먼지의 위해성

- 세계보건기구(WHO) 산하 국제 암 연구소가 지정(2013년) 한 **1군 발암물질**
  - 입자크기가 매우 작아 폐, 혈관, 뇌까지 침투하여 **각종 질병(천식, 폐질환 등) 유발**과 **조기사망률**을 증가시키는 물질
  - 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 10 $\mu$ m 이하(머리카락 1/5~7), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 2.5  $\mu$ m 이하(머리카락 1/20~30)



## 0

## 미세먼지의 경제학적 평가 (출처: OECD 보고서)

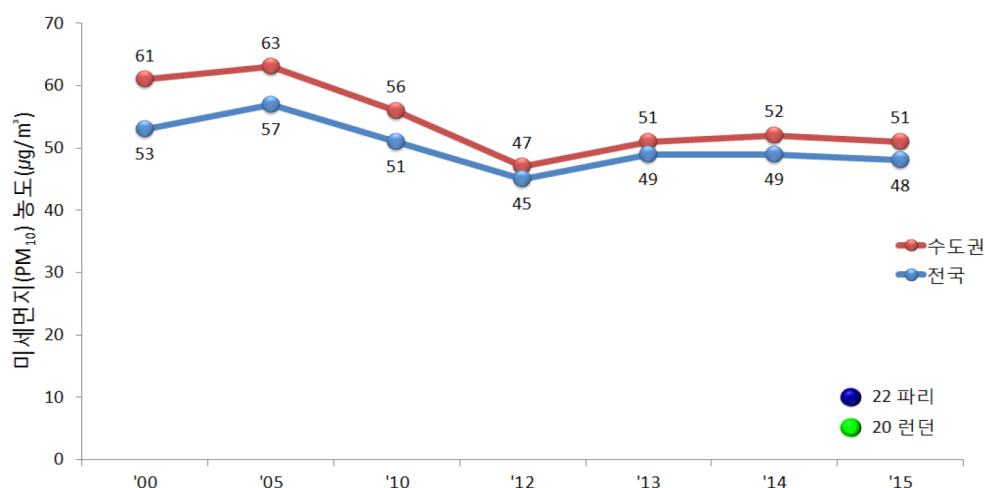
- 전세계 조기사망자 수: 2010년에 약 3 백만명 -> 2060년에 6~9 백만명
  - ※ 한국: 인구 100만 명당 359명('10) → 1,109명 ('60) 수준으로 3.1배 증가
  - 중국: 662명 → 2,052명, 인도: 508명 → 2,039명
- 2060년에 노동 생산력 감소, 추가적 건강관리비용, 작물 수량 감소로 인해 대기오염에 의한 손실은 전 지구 GDP의 1%(2.6조 달러) 수준
  - 한국: GDP 손실은 2060년에 0.63%로서 OECD 회원국 중 최대 (미국: 0.11%, 일본: 0.42%)
- (해석 시 주의점) 경제학적 전망, 대기오염의 생물물리학적 영향의 정량화·비용평가의 불확실성에 고려한 해석 필요

3

## 0

## 연도별 미세먼지 변화

- 2000년 이후 다양한 대기개선 노력으로 **미세먼지 농도는 지속적으로 감소** **[2013년부터 정체]** 하였으나, 여전히 **선진국의 주요 도시보다 높은 수준**



4



## 0 국가 대기질 예보제 운영 현황

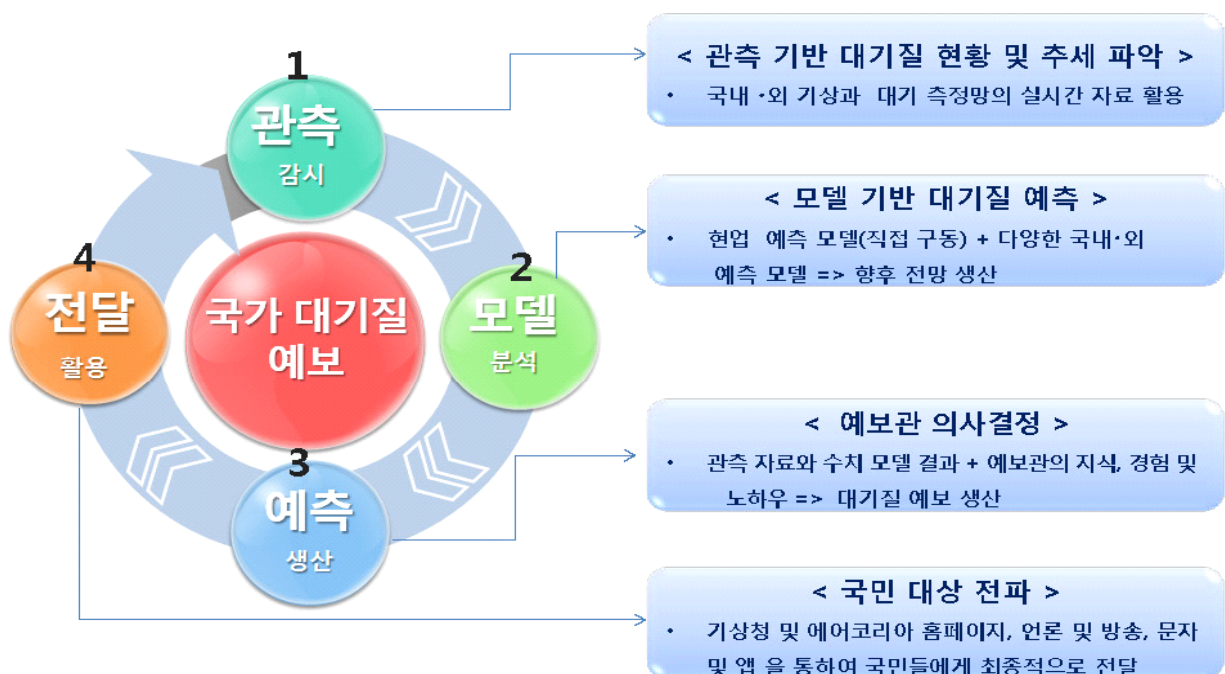
# 국가 대기질 예보

- ✓ 대상 물질 - 시작('13) : 미세먼지(PM<sub>10</sub>)  
-> 현재 : **미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), 오존**
- ✓ 대상 지역 - 시작('13) : 1개 권역(수도권)  
-> 현재 : **19개 권역(광역시도 이상 권역)**
- ✓ 예보 주기 - 시작('13) : 1일 1회(17시)  
-> 현재 : **1일 4회(5시, 11시, 17시, 23시)**
- ✓ 예보 기간 2일(오늘과 내일) 예보 : **19개 권역 대상 4개 등급별 예보**  
- 3일(모레) 예보 : 전국 대상 개괄예보 -> **'17년 11월 등급예보 전환**

Category	Materials	Low	Moderate	High	Very high
Concentration	PM <sub>10</sub>	0~30	31~80	81~150	151~
	PM <sub>2.5</sub>	0~15	1~50	51~100	101~
	O <sub>3</sub>	0~30	31~90	91~150	151~

5

## 0 국가 대기질 예보 절차



6

## 목 차

1. 올해 1~3월 간 고농도 초미세먼지 발생 원인

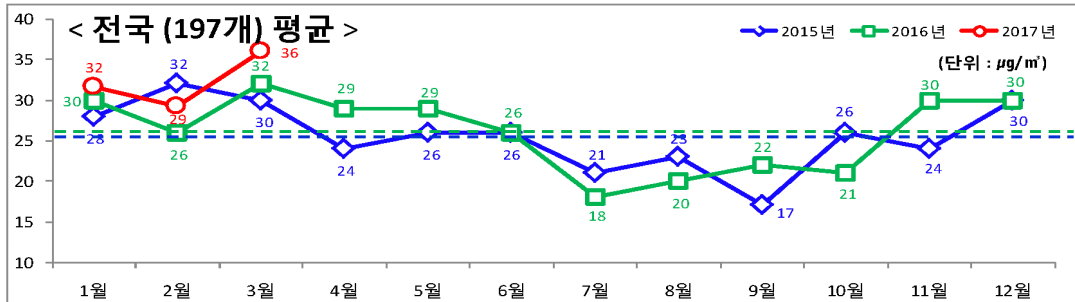
2. 모델을 통해 본 지역 간 초미세먼지 기여도 분석

3. 항공 집중관측을 통해 본 충남의 미세먼지 배출 특성

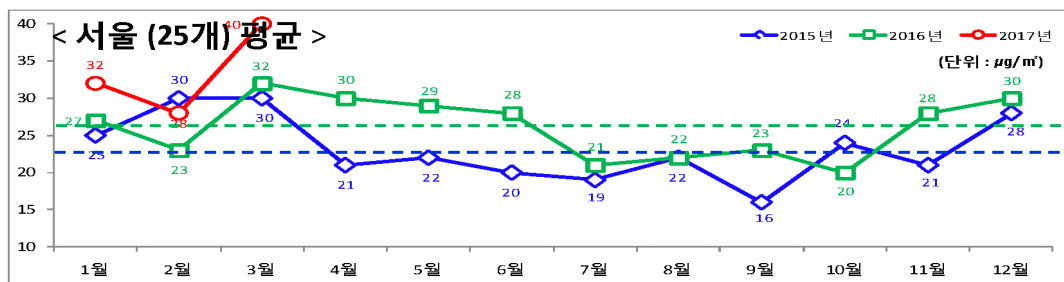
1. 올해 1~3월 간 고농도 미세먼지 발생 원인

# 1 최근 3년간 전국 및 서울의 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 월변화

전국 및 서울지역은 3년간 월 평균농도 중 **올해 3월이 가장 높은 농도**



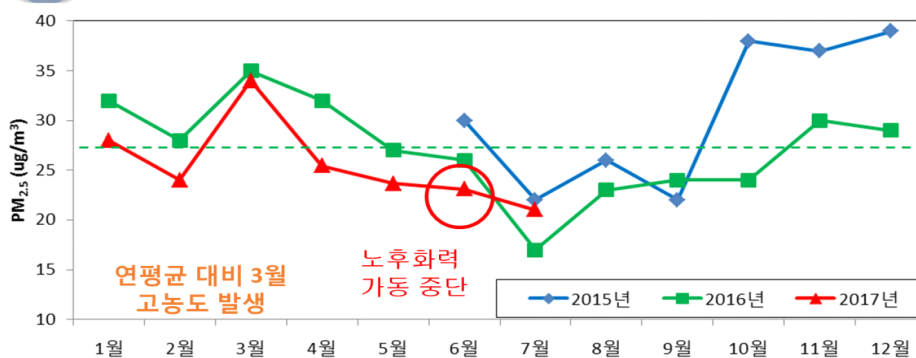
2016년 평균  
2015년 평균



2016년 평균  
2015년 평균

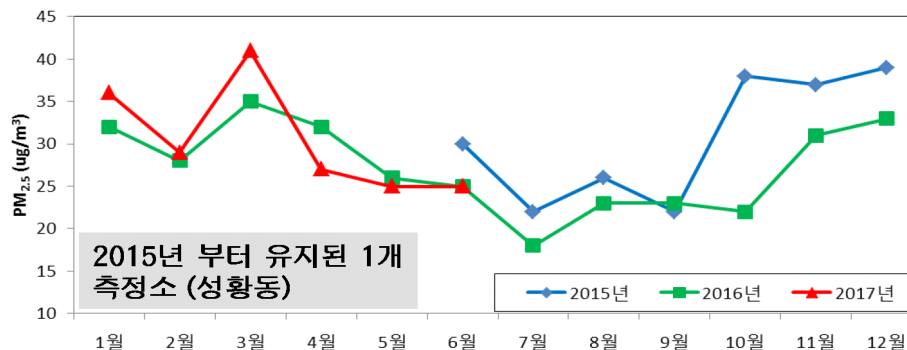
9

# 1 최근 3년간 충남 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 월변화



2016년 평균  
27µg/m³

\*PM<sub>2.5</sub> 측정소  
1개(2015년),  
1~5개(2016년),  
7개(2017년)



**올해 충남도 3월이  
가장 높은 농도**  
**34 µg/m³ (전 측정소 평균)**  
**41 µg/m³ (단일측정소)**

2015년 부터 유지된 1개  
측정소 (성황동)

10

(농도) 올해 1~3월의 전국 평균 PM<sub>2.5</sub> (32 $\mu$ g/m<sup>3</sup>)는

**최근 3년 중 가장 높은 수준**(서울: 6 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 증가)

(나쁨일 수) 국민들이 체감하는 대기질인 나쁨일 수도

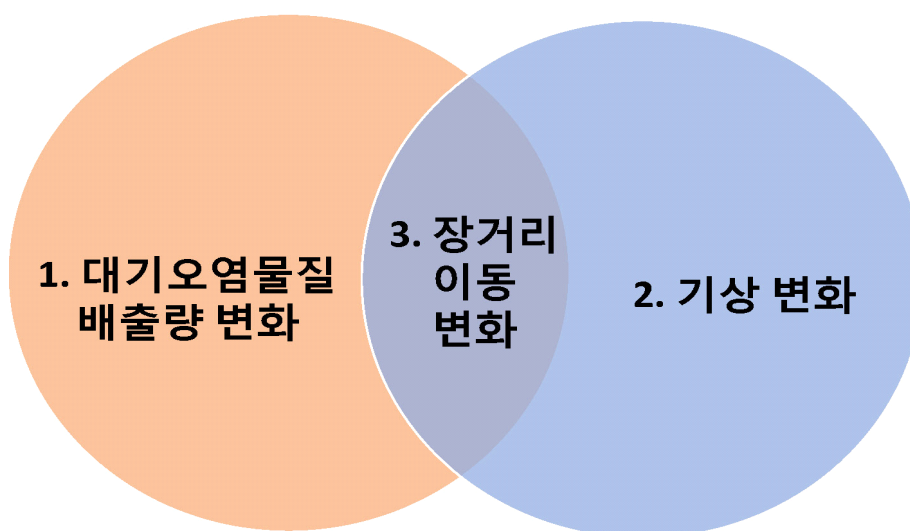
서울지역에서 14회 발생 (**15년 대비 3배, 16년 대비 7배 증가**)

< 최근 3년간 1~3월 동안의 전국 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 현황 >

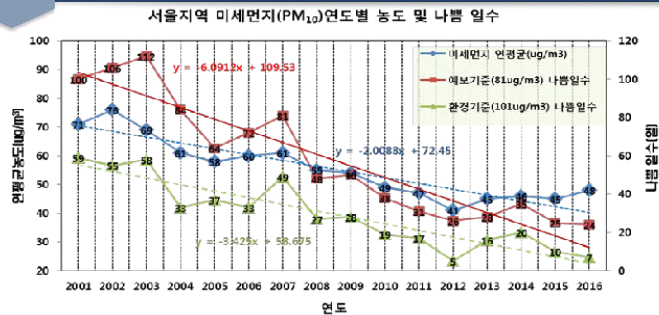
구 분	'15년	'16년	'17년
평균농도 ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	30 (28)	30 (28)	32 (34)
나쁨일 수 (일)	8 (5)	4 (2)	8 (14)
주의보 (회)	55 (3)	48 (0)	86 (3)

\* 괄호 수치는 서울지역에 대한 값임

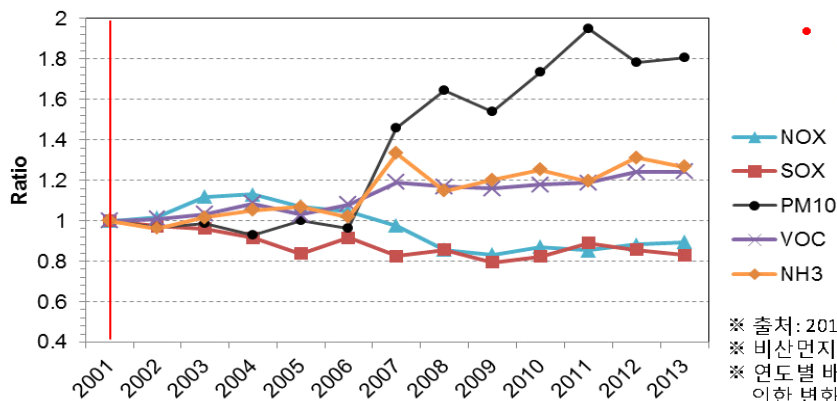
## 대기 중 미세먼지 농도변화에 미치는 주 요인



## 1-1 장기간 국내 대기오염물질 배출량 변화



국내 대기오염물질별 배출량 변화 추이(2001년 기준)



※ 출처: 2013 국가 대기오염물질 배출량  
 ※ 비산먼지, 생물성 연소 및 식생 제외  
 ※ 연도별 배출량은 배출원 추가, 산정방식 개선 등에 의한 변화를 포함하고 있음

13

- (장기추이)  
 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>는 점진적 **감소**,  
 PM<sub>10</sub>, VOC, NH<sub>3</sub>는  
 2006년 이후 **증가**
- (최근추이) 2010년 이후  
 모든 배출량은 큰 변화 없음
- **미세먼지 농도 추이를 국내  
 배출량과의 관계성만으로  
 설명하는 데는 무리가 있음**

## 1-2 기상 인자가 대기질에 미치는 영향

Source: Atmospheric Environment (Jacob & Winner, 2009)

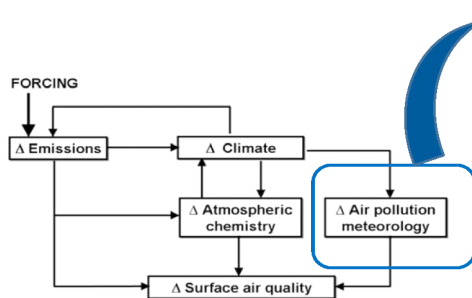


Fig. 2. Effect of climate change on surface air quality placed in the broader context of chemistry-climate interactions. Change is forced by a perturbation to anthropogenic emissions resulting from socio-economic factors external to the chemistry-climate system. This forcing triggers interactive changes ( $\Delta$ ) within the chemistry-climate system resulting in perturbation to surface air quality.

Dependence of surface air quality on meteorological variables.<sup>a</sup>

Variable	Ozone	PM
Temperature	++	-
Regional stagnation	++	++
Wind speed	-	-
Mixing depth	=	+-
Humidity	=	+
Cloud cover	-	-
Precipitation	=	+-

<sup>a</sup> Sensitivities of surface ozone and PM concentrations in polluted regions as obtained from the model perturbation studies reviewed in Section 4. Results are summarized as consistently positive (++), generally positive (+), weak or variable (=), generally negative (-), and consistently negative (--) See text for discussion, including comparison to observed correlations (Section 3).

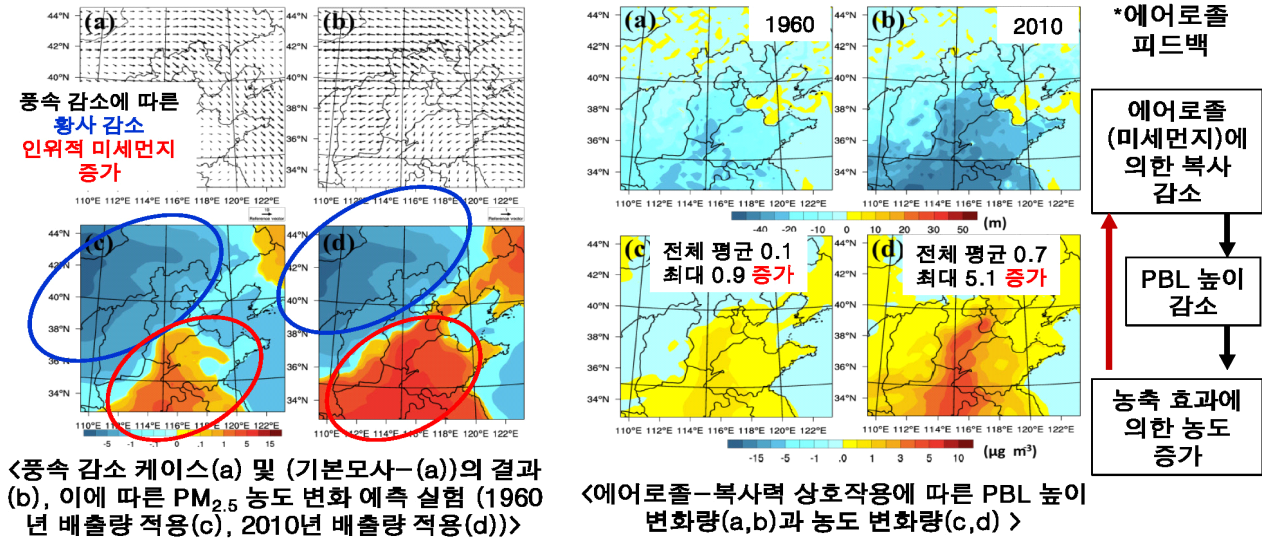
- **미세먼지 농도에 영향을 미치는 주요 기상 인자로는,**
  - ✓ 대기 정체(Regional stagnation) : 양의 상관
  - ✓ 혼합고(Mixing depth): 음의 상관
  - ✓ 강우(Precipitation): 음의 상관
  - ✓ 풍속(Wind Speed): 음의 상관

14



## 1-2 기상 변화(풍속&혼합고)에 따른 미세먼지 영향

Source: ACP (Gao et al., 2016)



- 13년 1월의 중국 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도는 기상(풍속 감소, 에어로졸 피드백에 의한 혼합고 감소) 변화에 의해 증가될 수 있음을 시사함

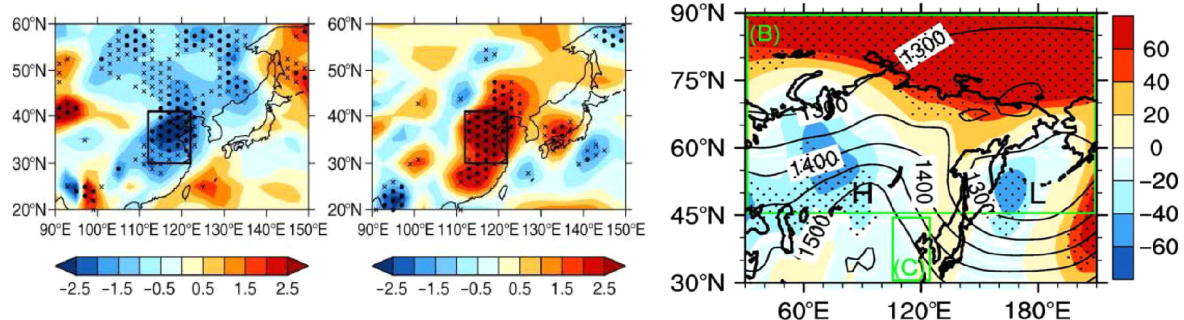
15

## 1-2 기상 변화(풍속&혼합고)에 따른 미세먼지 영향

Source: Science advances (Zou et al., 2017)

- 북극 해빙 감소로 인해 유라시아 적설 증가  
→ 중국 동부 지역에서 풍속 감소와 연직 안정도 증가

<지난 30년간 1월 대비 2013년 1월의 풍속 및 안정도 편차>

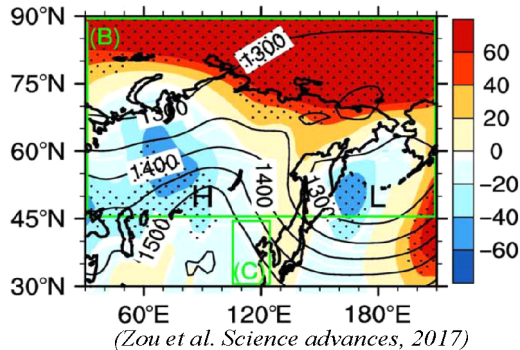


16

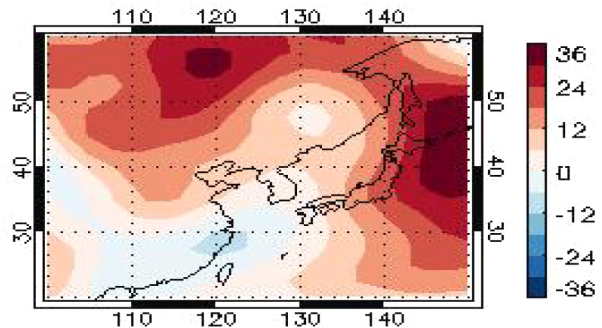


## 1-2 올해 1~3월 동안의 기압변화 분석

2013년 1월 중국  
고농도 사례일 기상 패턴(HGT850)



2017년 1~3월 서울 PM<sub>10</sub>  
고농도 사례일 평균 기상 패턴(HGT1000)



- 2013년 1월 중국의 고농도 사례에 대한 국제 연구 결과와 최근 2017년 1~3월 고농도 사례일과 유사한 기상 패턴을 나타냄
- 최근 3년 중 올해 대기 정체일수 증가 및 강수량도 감소 (강수에 의한 세정효과 감소)

< 서울지역의 3년(1~3월)의 기상조건 변화 >

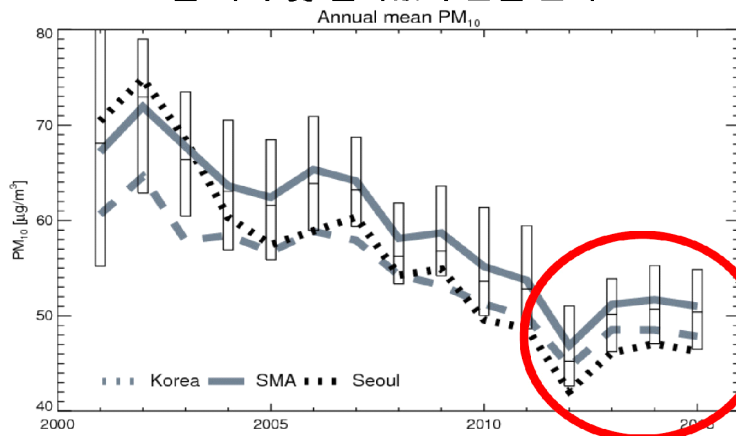
구분	'15년	'16년	'17년
풍속 [2m/s 미만]	13일	16일	29일
강수량	43.6mm	89.1mm	33.9mm

17

## 1-2 국내 미세먼지 연간 농도변화와 풍속과의 관계

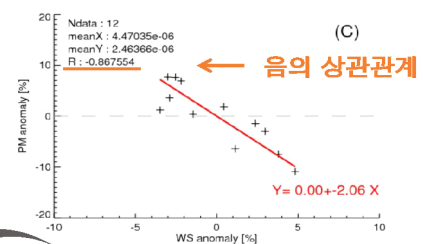
Source: SREP (Kim et al., 2017)

<서울, 수도권, 국내 미세먼지 연평균 농도에 대한  
모델 예측 및 관측값의 연간 변화>

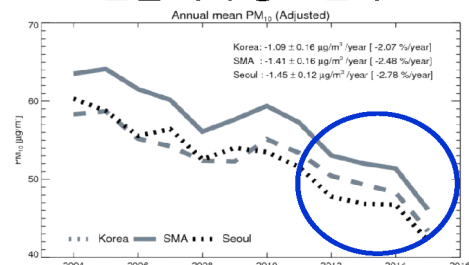


- 풍속 감소가 장기적인 추세인지에 대해서는 불분명하나, 풍속 저하에 의한 정체가 최근 국내 미세먼지 수준에 영향을 준 것으로 분석됨

<풍속 및 미세먼지 농도의  
상관관계 분석>



<기상 변동인자 제거 시  
연간 예측 농도 변화>



### 1-3 장거리 이동 영향 변화

Source: 주중인민공화국대한민국대사관(2017.4)

#### [ 중국의 대기오염 개선노력 ]

1) 중국 북경시는 **고농도 대기오염발생시 응급조치 메뉴얼\*** 을 강력시행

\* 강력한 차량 2부제, 노후차량 운행정지 및 오염물질 배출사업장 조업중단 정책

< 긴급대응메뉴얼 실시 상황 불시 감찰 (환경보호부장, 4.4) >

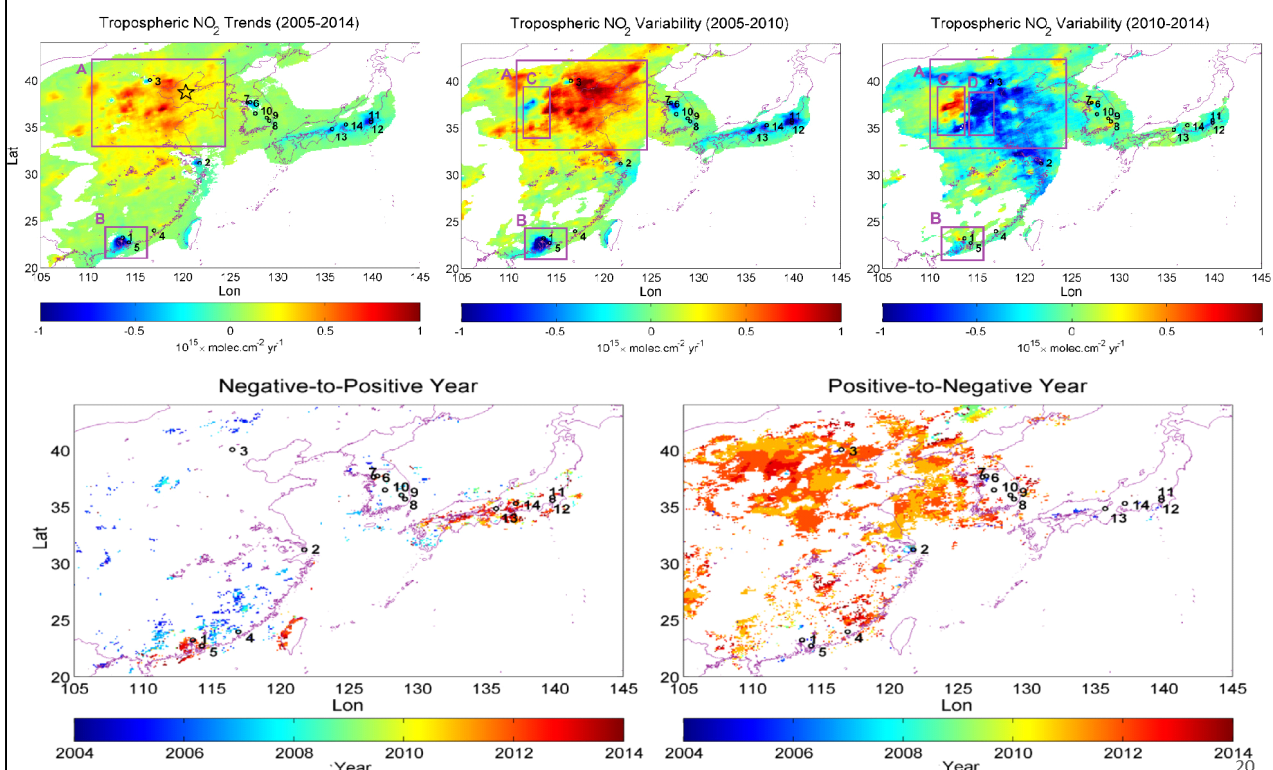
중국석유화학 엔산지사 등 2개 업체에게 오염물질의 실질적인  
배출감축 지시 및 비산먼지 관리 강화토록 조치 요청

2) “대기오염방지 행동계획” 등 강력한 정책 시행으로 **대기오염은 점진적 개선**

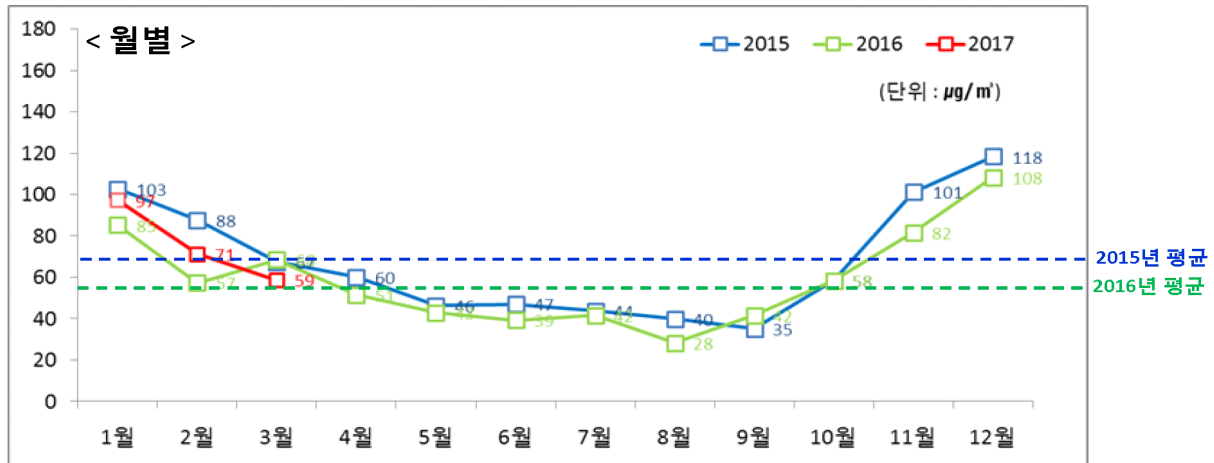
3) 최근 중국 과학자들은 **기후변화인자와 지정학적 위치와의 관련성 등에서  
고농도사례 원인을 찾으려는 노력을 진행 중**

19

### 1-3 중국 및 동아시아 지역의 연직 적분된 NO<sub>2</sub> 농도 변화



### 1-3 중국 9개 지역 평균 15~17년 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 월변화



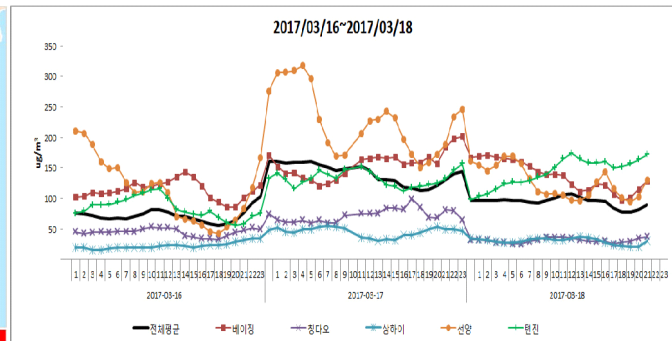
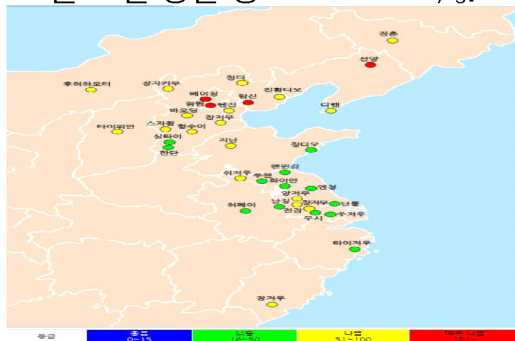
※ 베이징, 톈진, 스자좡, 칭다오, 상하이, 난징, 하얼빈, 장춘, 선양 등 9개 지역

- 중국의 연평균 초미세먼지 농도는 15년 대비 16년 개선되었으며, 올해 3월은 앞의 두 해에 비해 가장 좋은(59) 수준
- 그러나, 올해 3월 고농도 사례(3월 16~21일) 전 중국 베이징은 약 114µg/m³ 로 월평균 농도 대비 약 2배 증가 → **국내 유입으로 고농도 미세먼지 발생**

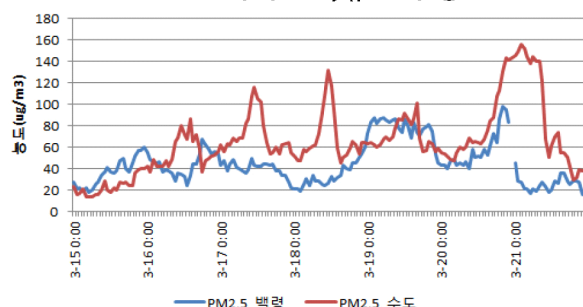
21

### 1-3 3월 17~21일 고농도 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 사례 (장거리이동)

<중국지역 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도>  
3월 16일 평균 농도 : 26 ~ 114 µg/m³



<국내 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도>



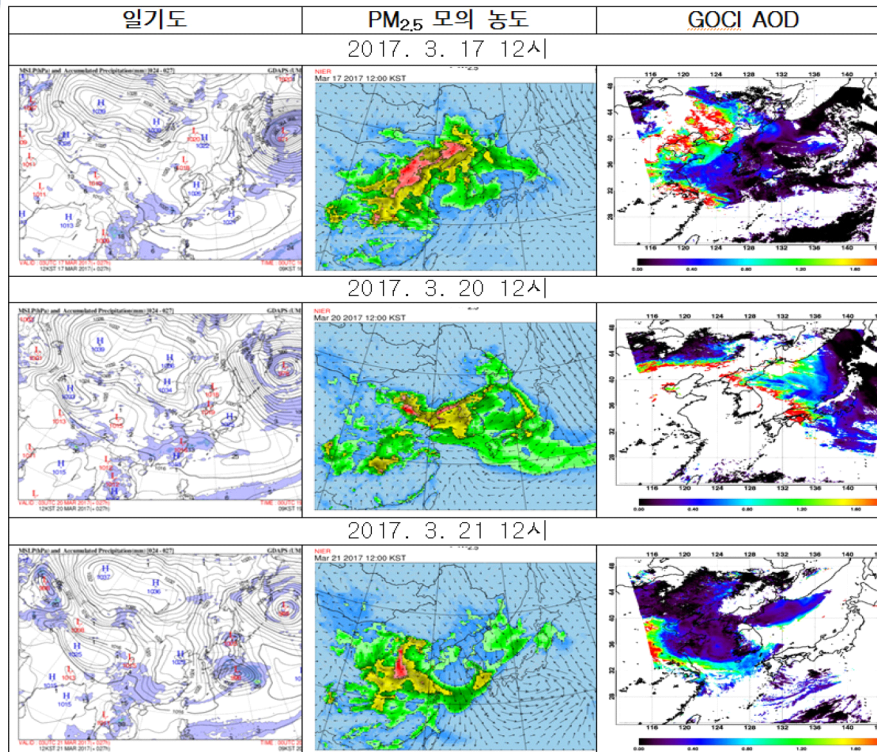
<국외 기여도 산정결과>

- 전국 : 51(18일)~73(21일)%
- 수도권 : 52(20일)~86(21일)%

22



### 1-3 3월 17~21일 고농도 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 사례 (장거리이동)



북쪽지역으로부터  
국외 초미세먼지  
유입 및 대기정체로  
고농도 발생



대륙고기압 확장과  
저기압 후면 강수로  
해소

23

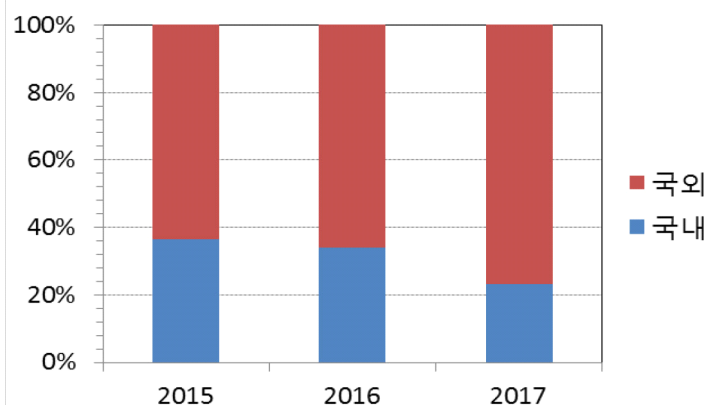
### 1-3 장거리이동영향 변화

< 서울 기준 >

	'15년(1-3월)	'16년(1-3월)	'17년(1-3월)
풍향(서풍 계열) 일수	67	19	75
나쁨일 (PM <sub>2.5</sub> )	5	2	14

나쁨일 평균  
PM<sub>2.5</sub> 국내·외  
기여도\*

\*Brute Force Method  
방법에 기반한 대기  
질 모델 민감도 실험  
도출 결과 (수도권)



평균 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도 : 28.3ug/m<sup>3</sup> 27.7ug/m<sup>3</sup> 33.5ug/m<sup>3</sup>

24

**올해 1~3월의 미세먼지 고농도 발생은**

중국[단속 강화] 및 국내[단속 강화 및 경기침체] 배출량 감소경향에도 불구하고,

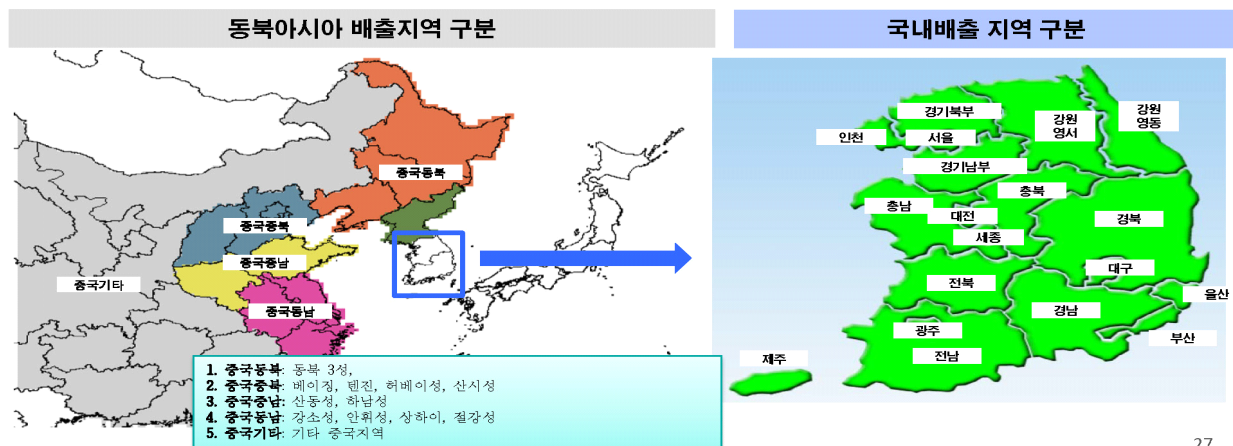
**기상학적 요인변화**(대기정체 증가, 풍속 및 강수량 감소)와

**초미세먼지 장거리 이동**(국외 기여) 영향 증가로 설명될 수 있음

**2. 모델을 통해 본 지역 간 미세먼지 기여도 분석**

## 2 연구 방법 (배출지역 구분은 26개로 국외 7개 및 국내 19개)

- (중국) 중국의 배출강도를 고려, 중국 북부지역, 수도권(京津冀) 주변, 산둥 반도를 포함하는 중부 지역, 상하이를 포함하는 동남부 지역, 그리고 중국기타로 5개 지역  
 ➤ 중국 지역 내 우선저감 지역을 도출하기 위해 배출강도가 높은 중국 동부지역을 위도에 따라 세분화
- (한국) 현재 대기질 예보에 활용되고 있는 광역시도 이상 19개 지역
- (기타) 중국을 제외한 국외지역은 북한과 기타지역으로 2개 지역

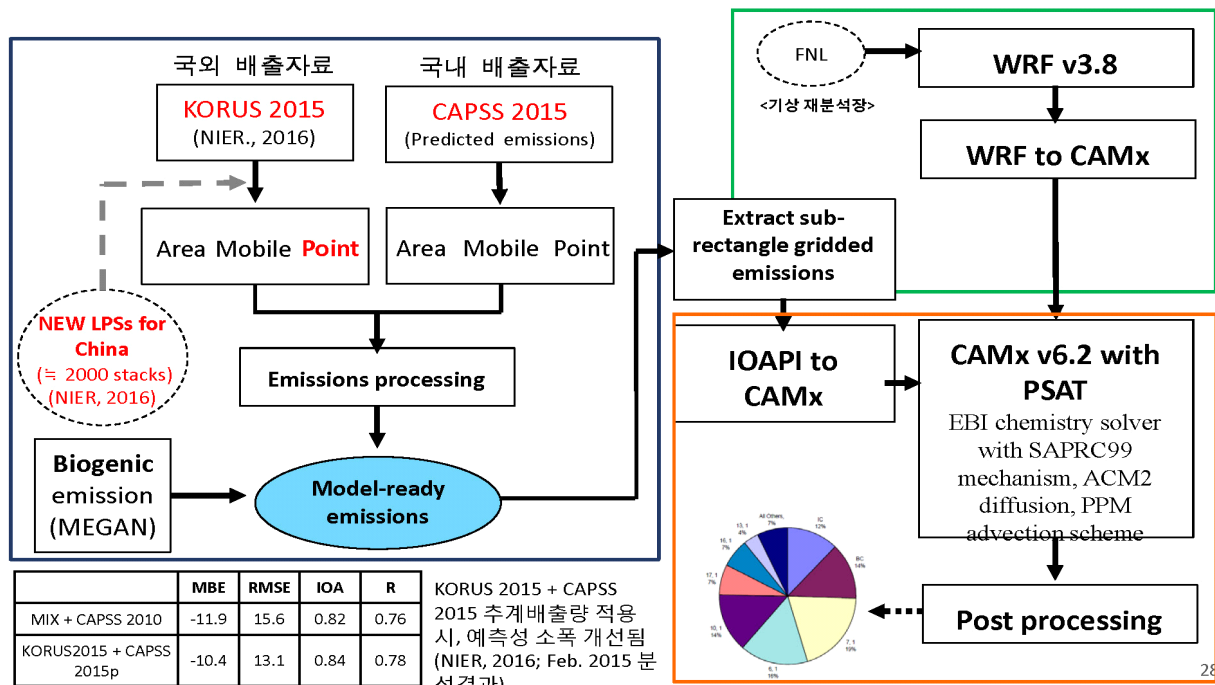


27

## 2 연구 방법 (모델링체계)

➤ 대상 기간: 2015년 3월

\* PSAT: 배출지역별 배출량에 이름표(추적지표)를 할당하여 미세먼지 농도에 미치는 기여도 산출방법



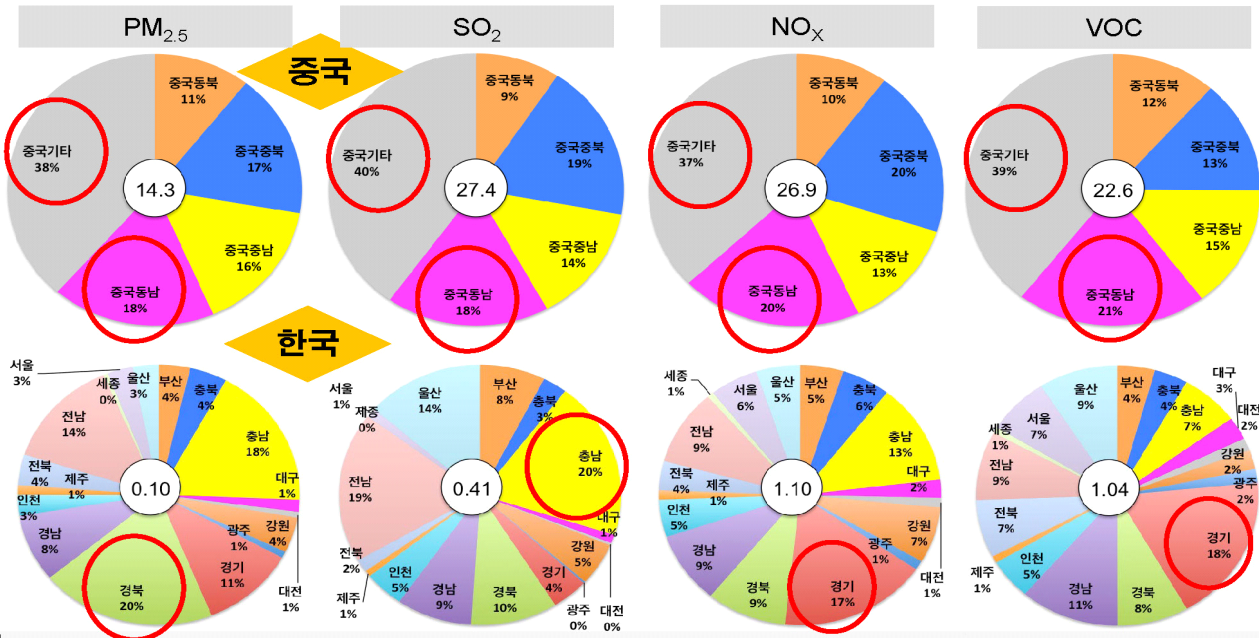
28



## 2

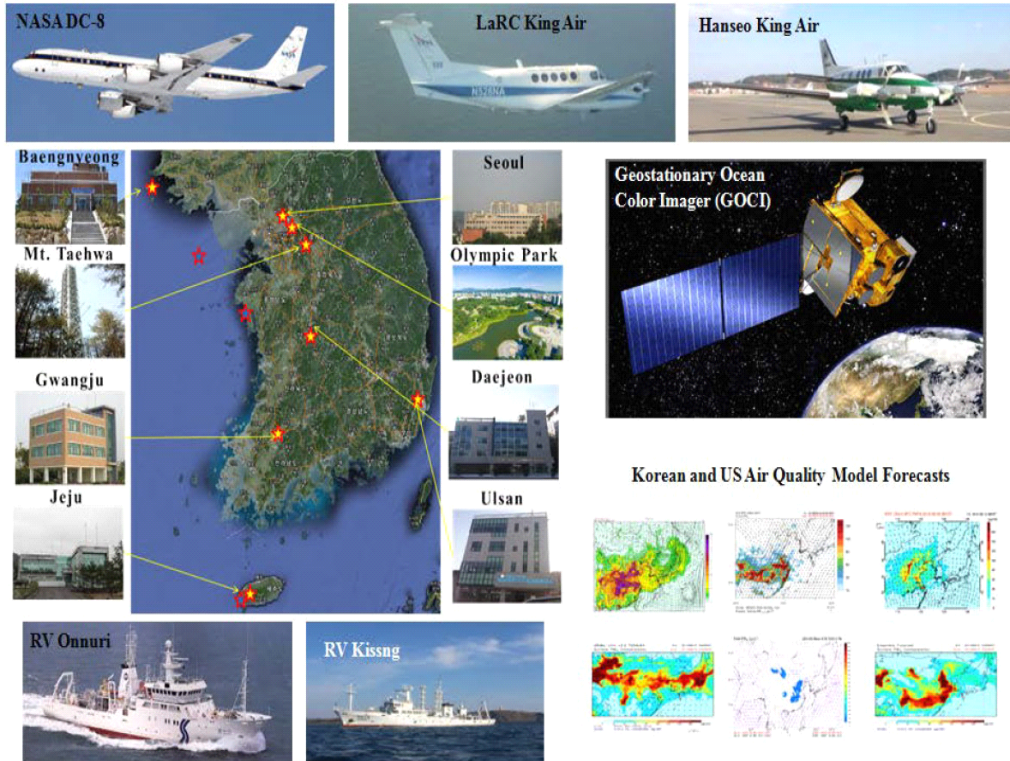
## 연구 결과 (배출지역별 배출량 및 비율)

※ 배출량 단위: Tg/year



- ✓ 중국: 중국기타 및 동남지역이 모든 배출물질에서 높은 비율을 차지함
- ✓ 국내: 직접배출량(PM<sub>2.5</sub>)은 경북, SO<sub>x</sub>는 충남, NO<sub>x</sub> 및 VOC는 경기도가 높은 비율을 차지

## 3. 항공 집중관측(16년 5월)을 통해 본 충남 배출 특성



31

### 3 국내 주요 사업장의 물질별 배출량 분포

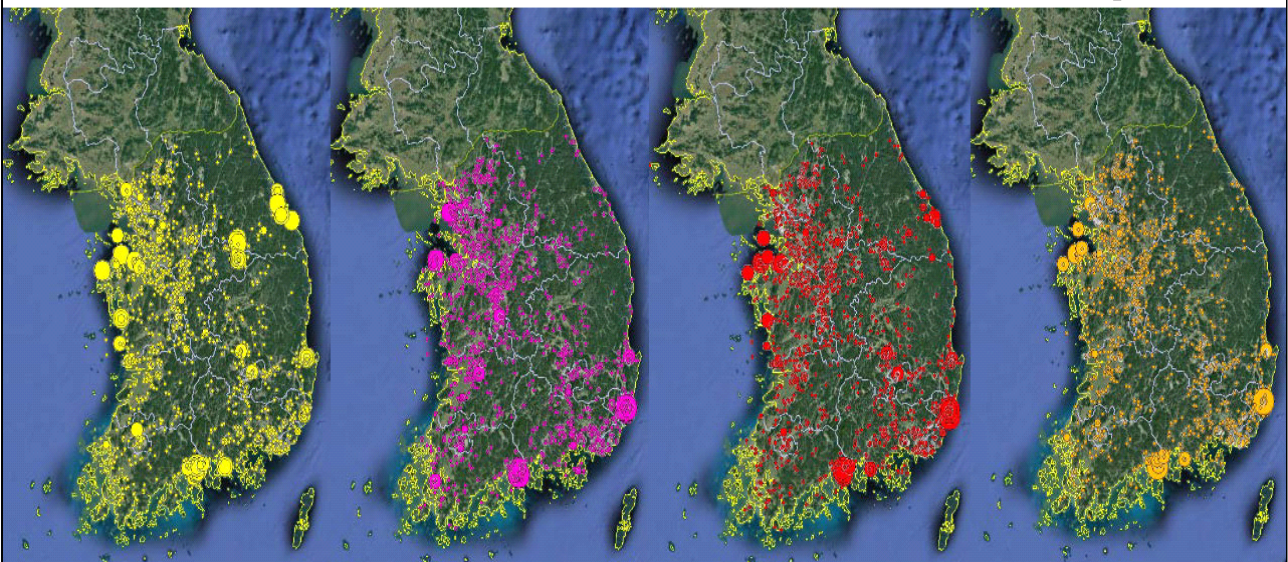
Q: KORUS-AQ 관측을 통해 검증한 최근 국내 배출량의 양적 수준과 배출원은?

NO<sub>x</sub>

VOCs

SO<sub>x</sub>

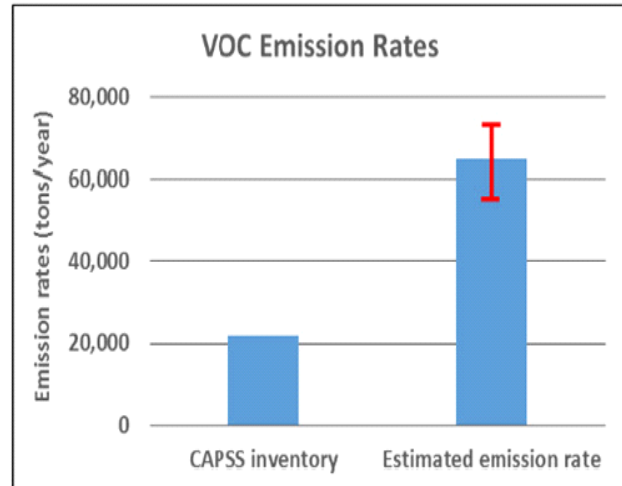
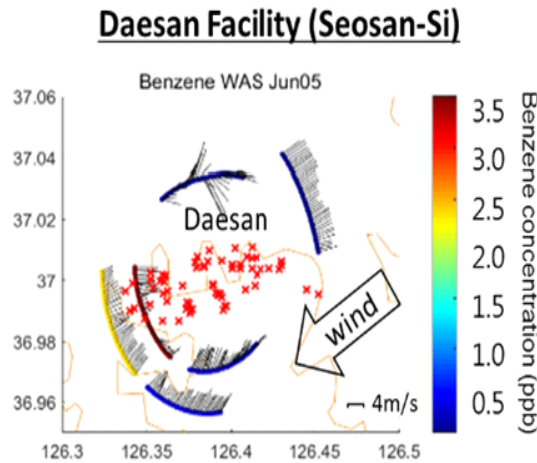
NH<sub>3</sub>



32



☞ **사업장에서의 VOCs 배출량이 실제 관측 대비 과소 산정된 것으로 확인**

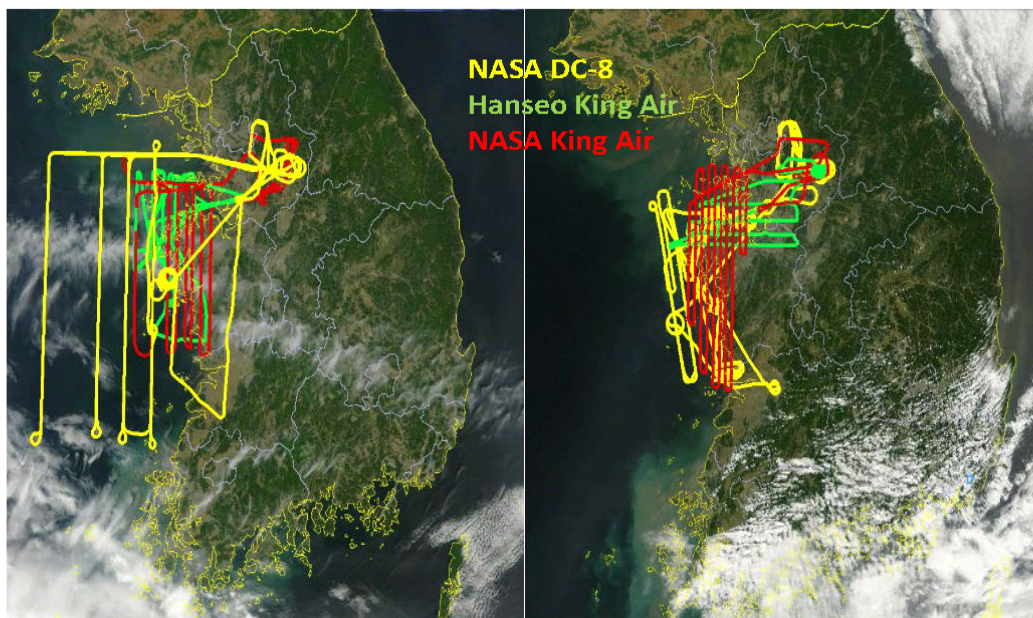


*VOC emissions derived from DC-8 observations using the mass balance approach.*

33

### 3 충남 지역의 점오염원이 주변에 미치는 영향

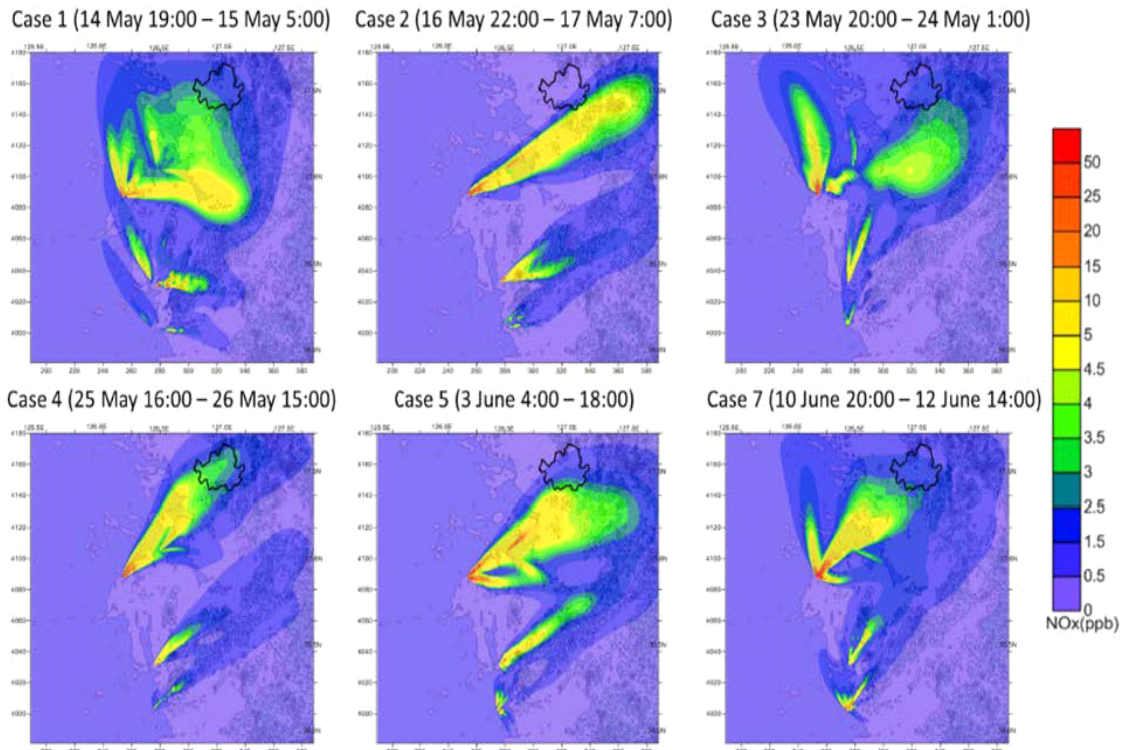
Q: 충남 서해안의 대형 점오염원이 수도권에 미치는 영향은?



*Coordinated airborne sampling of point sources on 22 May and 5 June during KORUS-AQ*

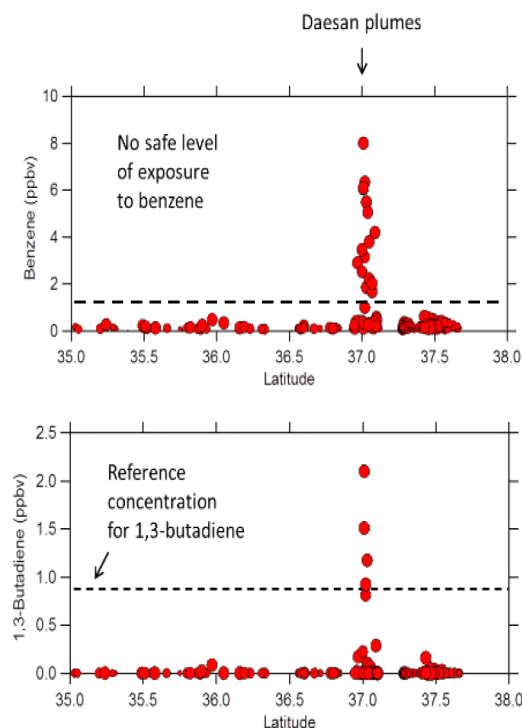
34

☞ 발전소 배출이 서울 남부지역에 영향을 미치는 것으로 확인됨 (CALPUFF 모델 실험)

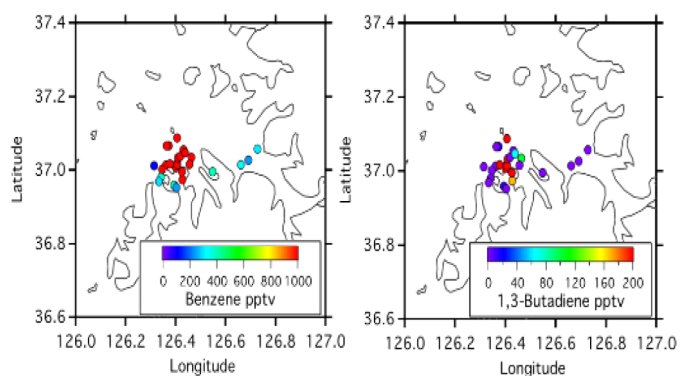


35

☞ 충남 대산 공단 지역에서 기준을 초과하는 독성 물질 (벤젠, 1,3-부타디엔)들이 관측됨



Daesan low-altitude plumes and “background”



**DC-8 observations for overflight of Daesan compared to the larger region.**

36

충남 지역의 배출(점오염원)은 수도권까지 영향을 미칠 수 있으며, 과소 평가된 배출량(대산공단 등)이 확인됨에 따라,

**충청권 및 수도권** 대기개선 측면에서 **중요 배출 권역**으로 관리가 필요하며, 정확한 **배출량 재산정** 노력이 동시에 요구됨

## 전체 결론

1. 올해 1~3월의 고농도 미세먼지는 주로 **기상학적 요인**[대기정체, 혼합고 감소, 강수량 감소]과 **대기오염물질 장거리 이동**에 의한 영향으로 풀이됨
2. 국내 미세먼지 개선을 위해서는 **우선적으로 국가간 협력**이 수반되어야 하며, 더불어 **국내 저감 노력도 병행**되어야 함
3. 전국, 충청권, 수도권의 동시개선을 위한 **효과적인 저감대상 지역**은 국내에서는 **충남**인 것으로 분석됨(배출 기여도 높은 에너지산업연소 및 제조업 연소 우선 저감 필요)
4. 충남 지역의 **누락/과소 평가된 배출량**(대산공단 등)에 대한 재평가 및 관리 필요

**경청해 주셔서 감사합니다.**