

대기정책 수립을 위한 대기질 모델링

문난경

2023.11.14



발표 내용

- 대기질 모델링의 역할
- 대기질 모델링 시스템
- 정책지원을 위한 대기질 모델링 연구사례
- 요약



대기질 모델링

- 오염원과 주변 대기질에 미치는 영향을 추정
- 대기질 모델링을 통하여 대기질 문제의 원인을 찾아내고, 대기질 개선을 위한 효과적인 전략 및 정책 수립을 지원
- 대기질 문제에 대한 원인규명을 과학적으로 해석 등 다양한 역할

미세먼지 관리 종합계획(2020-2024)

미세먼지 농도 개선 목표 및 기본방향 제시

미세먼지 농도 및 배출량 현황·전망 제시

미세먼지 및 미세먼지 생성물질의 배출 저감목표와 분야별·단계별 대책

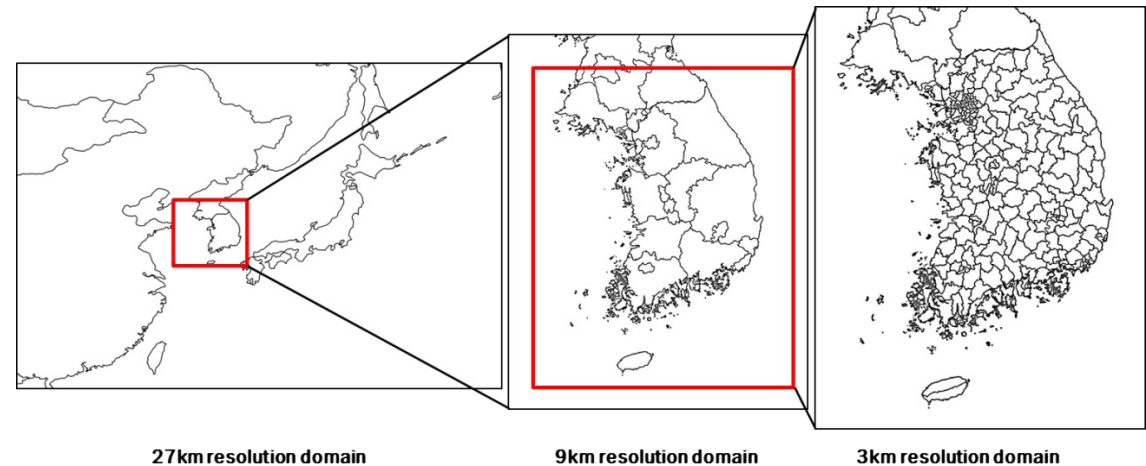
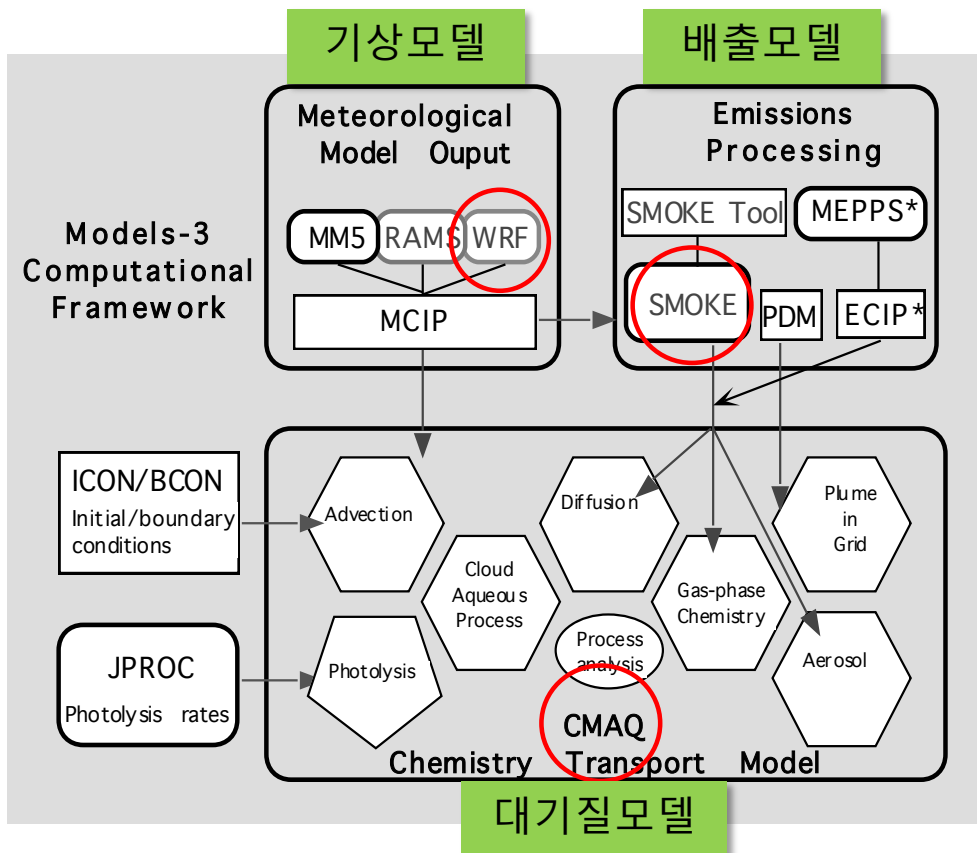
미세먼지의 국민건강 영향에 관한 조사·연구

미세먼지 취약계층 보호에 관한 사항

관리체계 및 사후관리 정비, 소요자원 확보 방안

- 제 2차 미세먼지 관리 종합계획(2025-2029) 준비 중

대기질 모델링 시스템



대기질 모델링의 신뢰도 우선 확보

- 대기정책 지원을 위하여 일정 수준 이상의 신뢰도 확보 필요
- 신뢰도 있는 기상, 배출량 입력자료를 활용해야 신뢰도 높은 결과를 생성할 수 있음
- 과학-정책 분야의 역할 분담 필요, 협력체계 구축 필요

- 기상 및 대기질 모사 결과 평가에 활용되는 통계분석 변수(US EPA, 2018)

약어	통계	정의
MB	Mean bias	$\frac{1}{N} \sum (M_i - O_i)$
ME	Mean error	$\frac{1}{N} \sum M_i - O_i $
RMSE	Root mean squared error	$\sqrt{\frac{\sum (M_i - O_i)^2}{N}}$
FB	Fractional bias	$100\% \times \frac{2}{N} \sum \frac{(M_i - O_i)}{(M_i + O_i)}$
FE	Fractional error	$100\% \times \frac{2}{N} \sum \frac{ M_i - O_i }{(M_i + O_i)}$
NMB	Normalized mean bias	$100\% \times \frac{\sum (M_i - O_i)}{\sum O_i}$
NME	Normalized mean error	$100\% \times \frac{\sum M_i - O_i }{\sum O_i}$
r	Correlation coefficient	$\left(\frac{\sum_1^N ((M_i - \bar{M}) \times (O_i - \bar{O}))}{\sum_1^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_1^N (O_i - \bar{O})^2} \right)$
r ²	Coefficient of determination	$\left(\frac{\sum_1^N ((M_i - \bar{M}) \times (O_i - \bar{O}))}{\sum_1^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_1^N (O_i - \bar{O})^2} \right)^2$

기상 모델링의 신뢰도 권고치

(Emery et al., 2001)

Wind Speed.	RMSE:	≤ 2 m/s
	Bias:	$\leq \pm 0.5$ m/s (new)
	IOA:	≥ 0.6
Wind Direction	Gross Error:	≤ 30 deg (from 20)
	Bias:	$\leq \pm 10$ deg (new)
Temperature	Gross Error:	≤ 2 K
	Bias:	$\leq \pm 0.5$ K
	IOA:	≥ 0.8 (from 0.7)
Humidity	Gross Error:	≤ 2 g/kg
	Bias:	$\leq \pm 1$ g/kg
	IOA:	≥ 0.6 (from 0.7)

대기질 모델링의 신뢰도 권고치

(Emery et al., 2017)

Recommended benchmarks for photochemical model performance statistics: ozone, sulfate(SO₄), nitrate(NO₃), ammonium(NH₄), elemental carbon(EC) and organic carbon(OC).

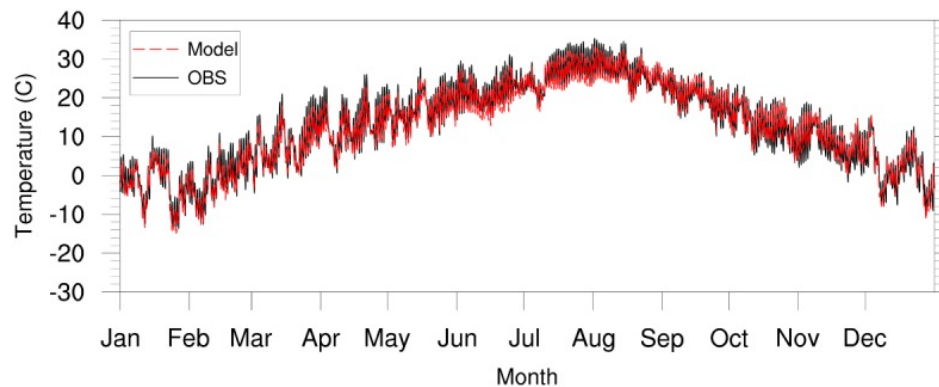
Species	NMB		NME		<i>r</i>	
	Goal	Criteria	Goal	Criteria	Goal	Criteria
1-hr or MDA8 Ozone	<±5%	<±15%	<15%	<25%	>0.75	>0.50
24-hr PM _{2.5} , SO ₄ , NH ₄	<±10%	<±30%	<35%	<50%	>0.70	>0.40
24-hr NO ₃	<±15%	<±65%	<65%	<115%	None	None
24-hr OC	<±15%	<±50%	<45%	<65%	None	None
24-hr EC	<±20%	<±40%	<50%	<75%	None	None

기상과 대기질 모델링의 신뢰도 평가

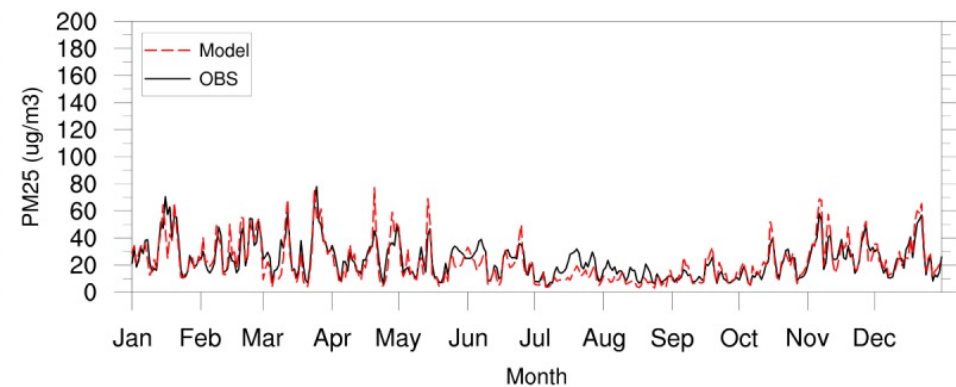
- ◆ 기상 모델링 결과 Emery and Tai(2001)*가 제안한 모델링 결과 평가기준을 전반적으로 충족
- ◆ 대기질 모델링 결과와 PM_{2.5} 농도 측정 자료의 일변동성이 유사, 통계적으로 유의함 확인 (Emery et al.(2017)** 평가기준)

모델	요소	Bias	IOA	RMSE	R
WRF	기온	-0.69 ($\leq \pm 5^\circ\text{C}$)*	0.99 (≥ 0.8)*	2.48	0.98
	풍속	0.85 ($\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$)*	0.77 (≥ 0.6)*	1.80 ($\leq 2\text{m/s}$)*	0.66
CMAQ	PM _{2.5}	-1.11	0.83	13.15	0.7 (> 0.4)**

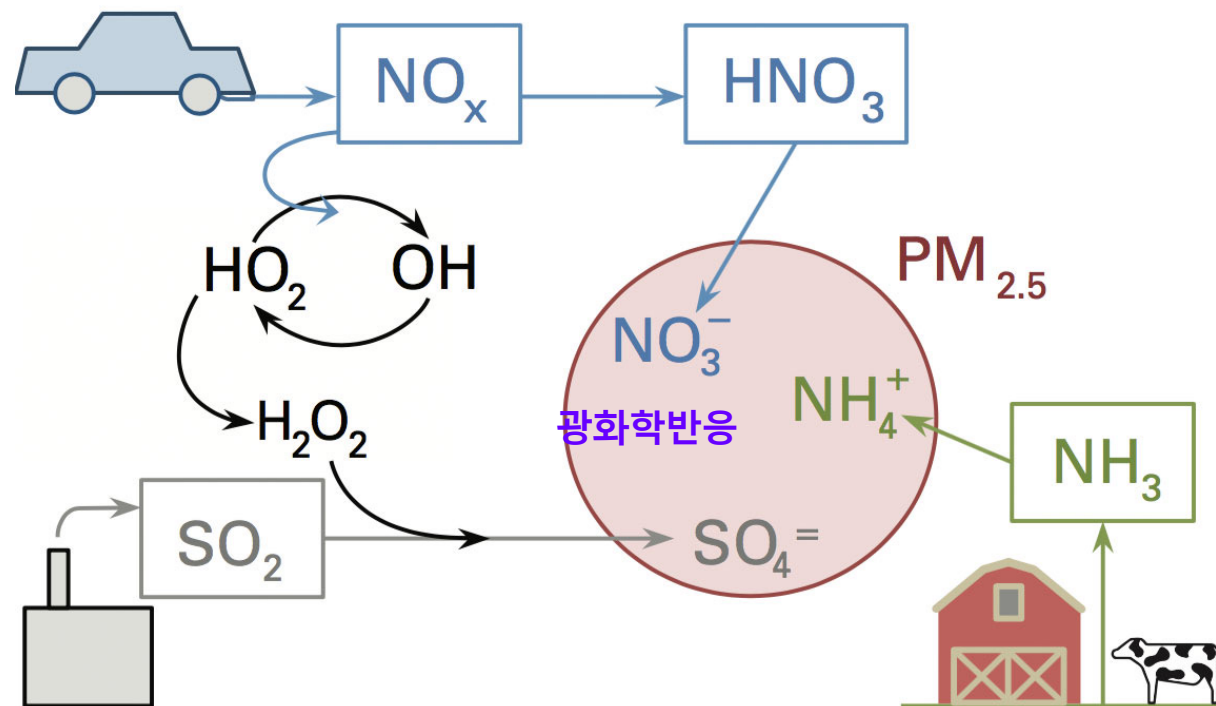
[기상 모델링 성능 평가(기온)-전국평균]



[대기질 모델링 성능 평가(PM_{2.5})-전국평균]



미세먼지 생성



http://www.selingroup.org/news2015/post_id-1

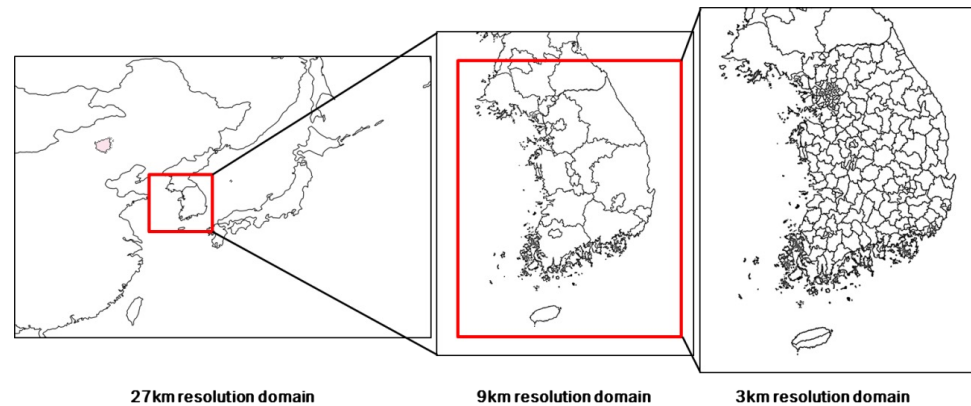
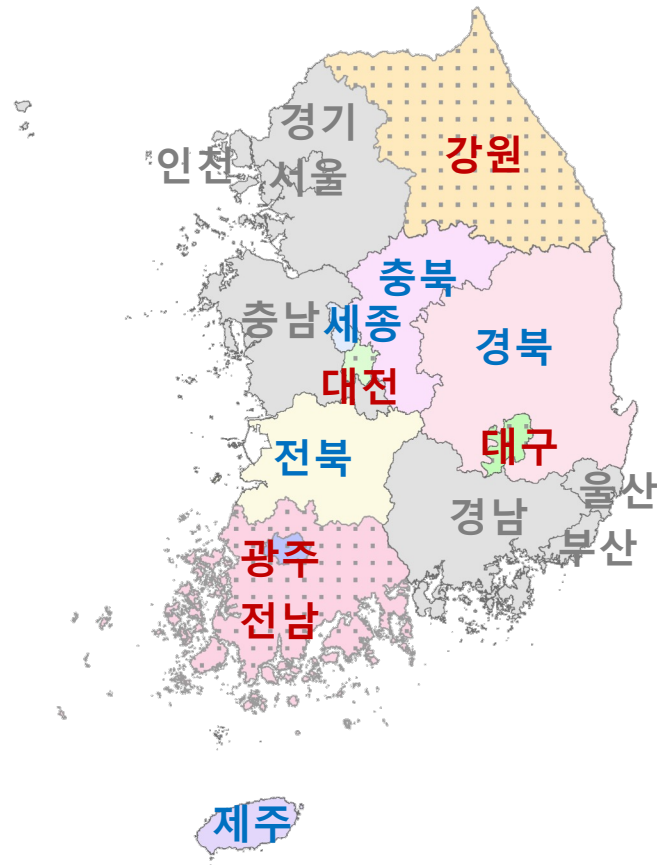
정책 지원을 위한 대기질 모델링 연구사례

- ✓ 지자체별 미세먼지 영향 분석
- ✓ 오염원별 미세먼지 기여도(발전소/선박)
- ✓ 전라북도 대책마련 시나리오 적용 사례

정책 지원을 위한 대기질 모델링 연구사례

- ✓ **지자체별 미세먼지 영향 분석**
- ✓ 오염원별 미세먼지 기여도(발전소/선박)
- ✓ 전라북도 대책마련 시나리오 적용 사례

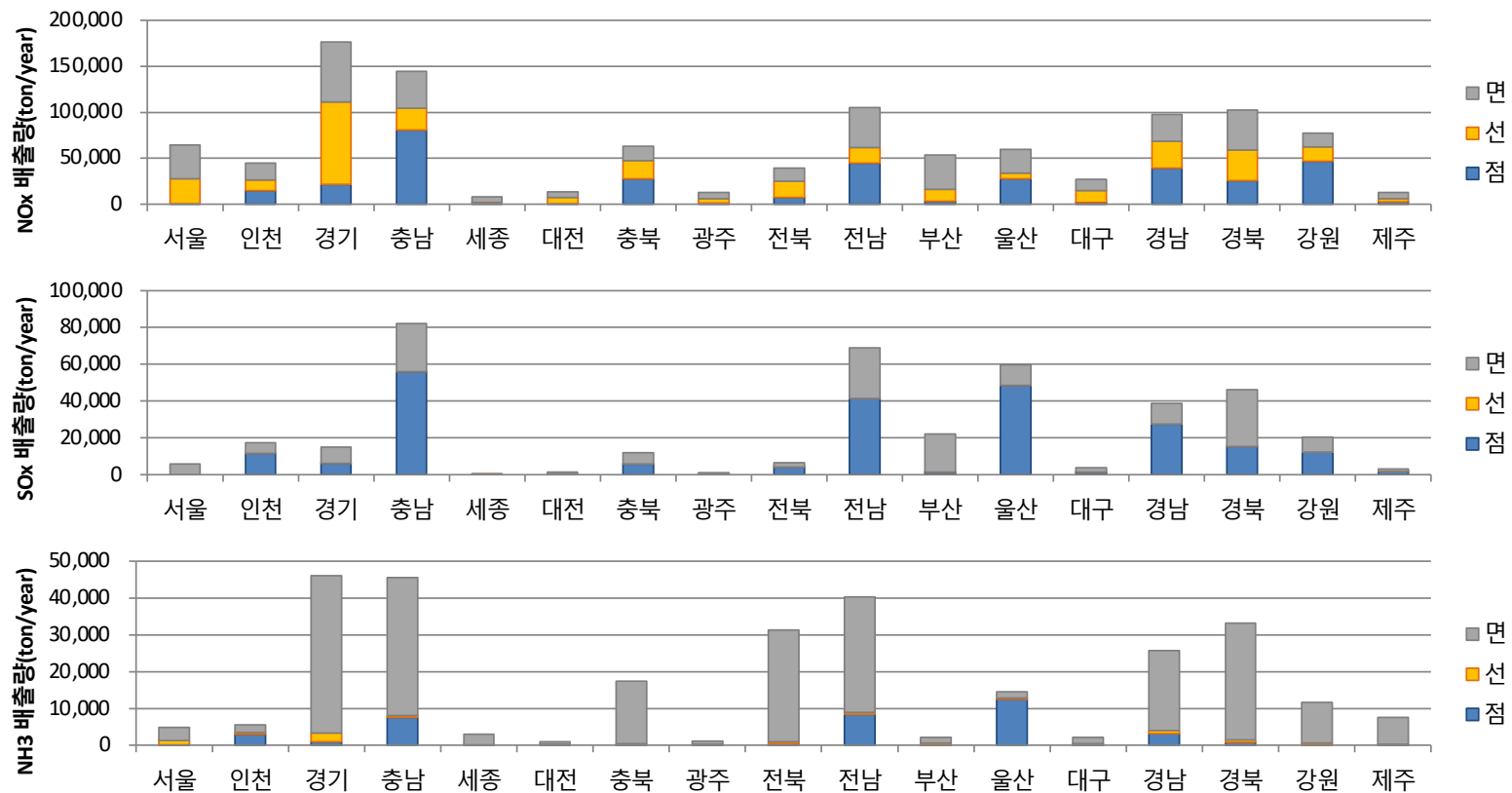
지자체별 미세먼지 기여도 및 전환율 산정



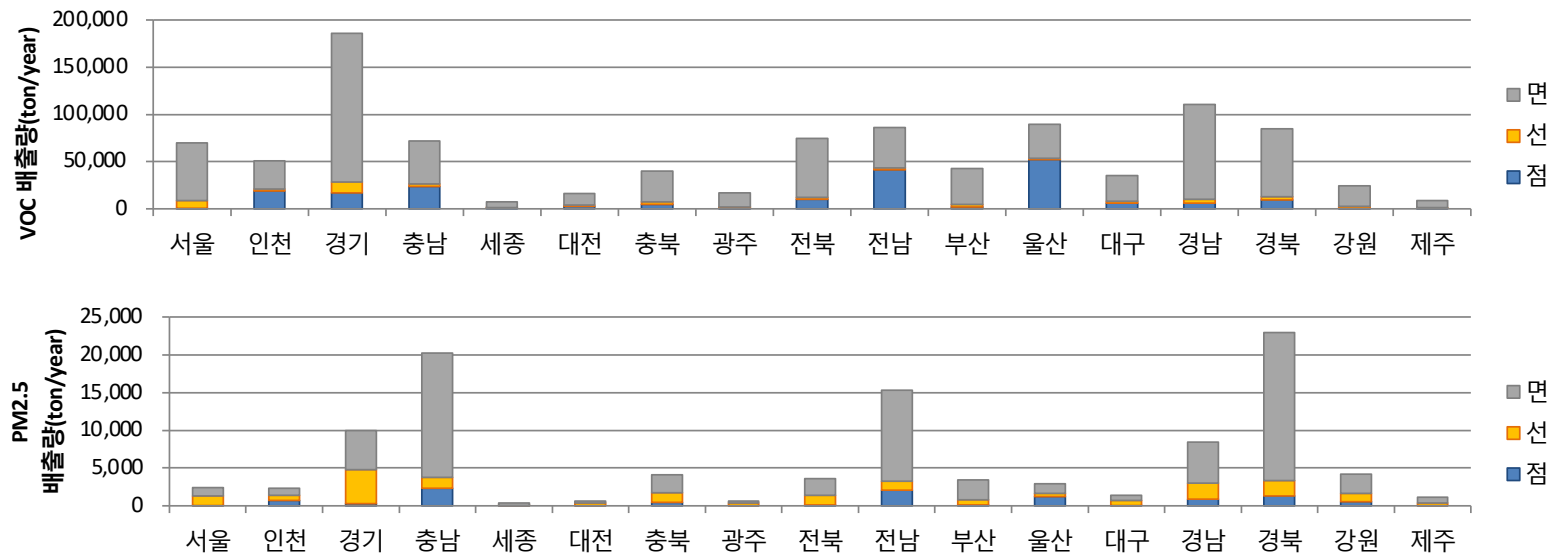
지자체	서울	인천	경기	충남	부산	울산	경남
	강원	대구	대전	전남	광주		
	경북	전북	충북	세종	제주		
오염원	점	선	면				
물질	NOx	SOx	NH ₃	VOC	PM _{2.5}		

(자료: 지자체별 오염원별 물질별 미세먼지 기여도 및 전환율 산정, 문난경 외, 2018)

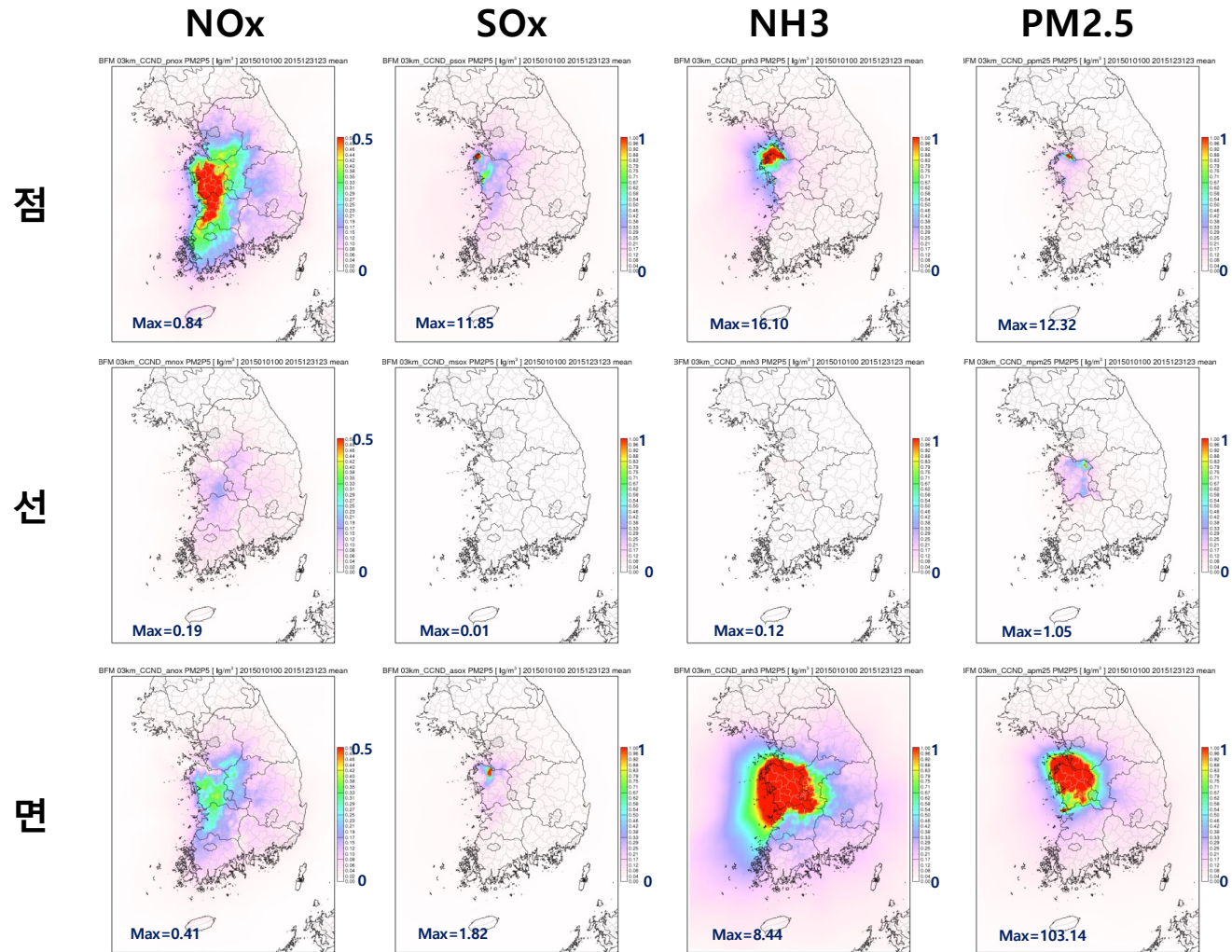
물질별, 오염원별 배출량



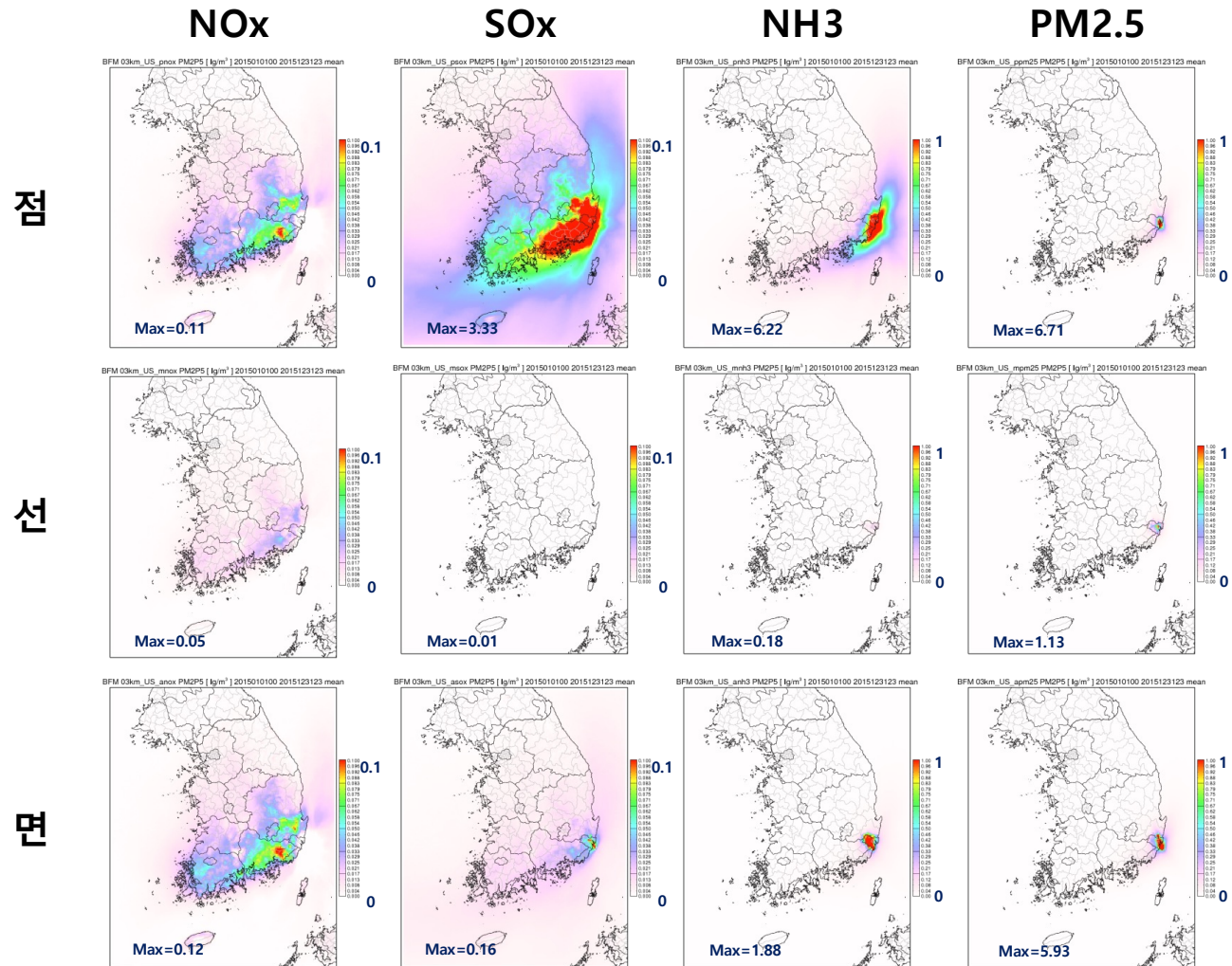
물질별, 오염원별 배출량



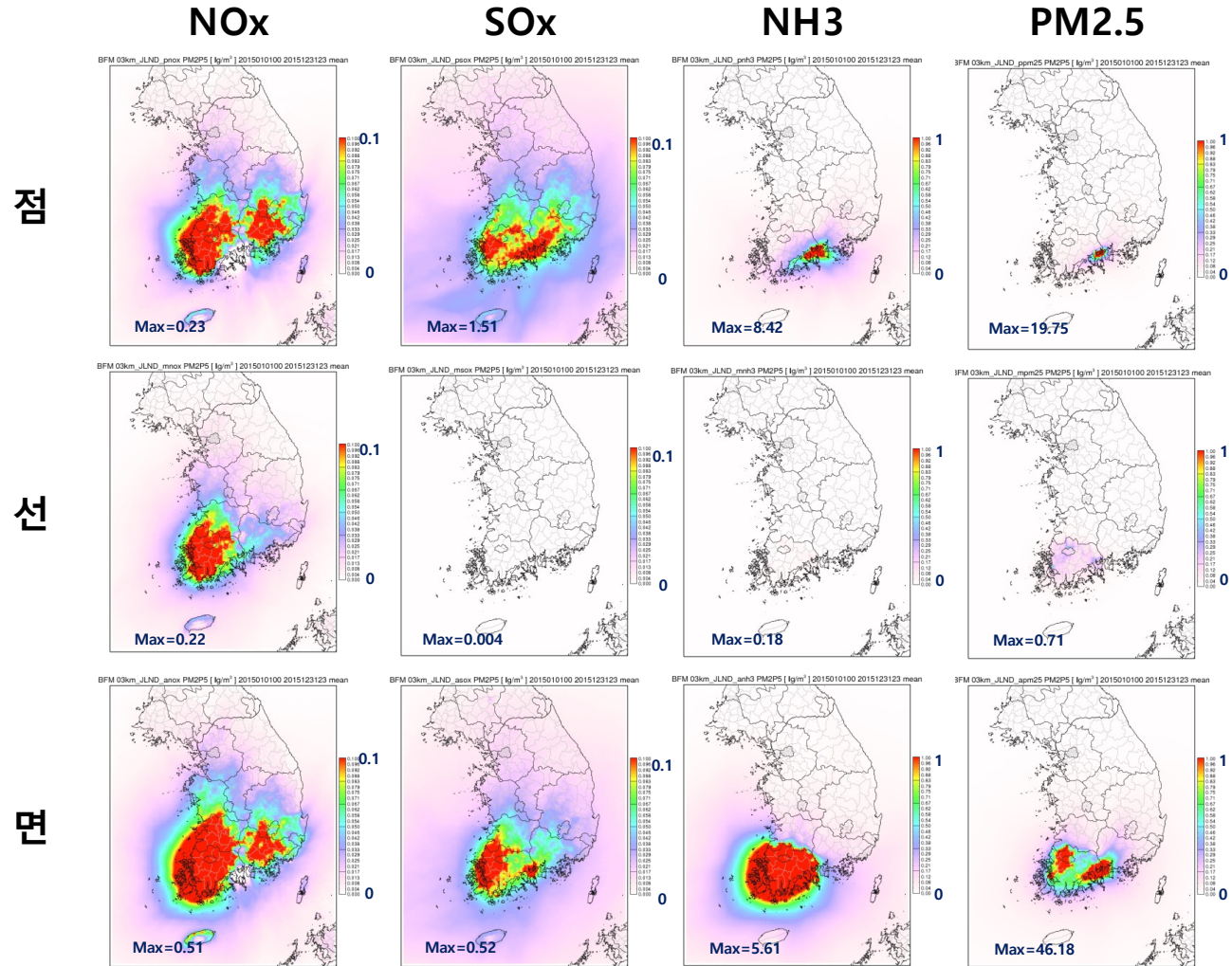
충남 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여농도 분포



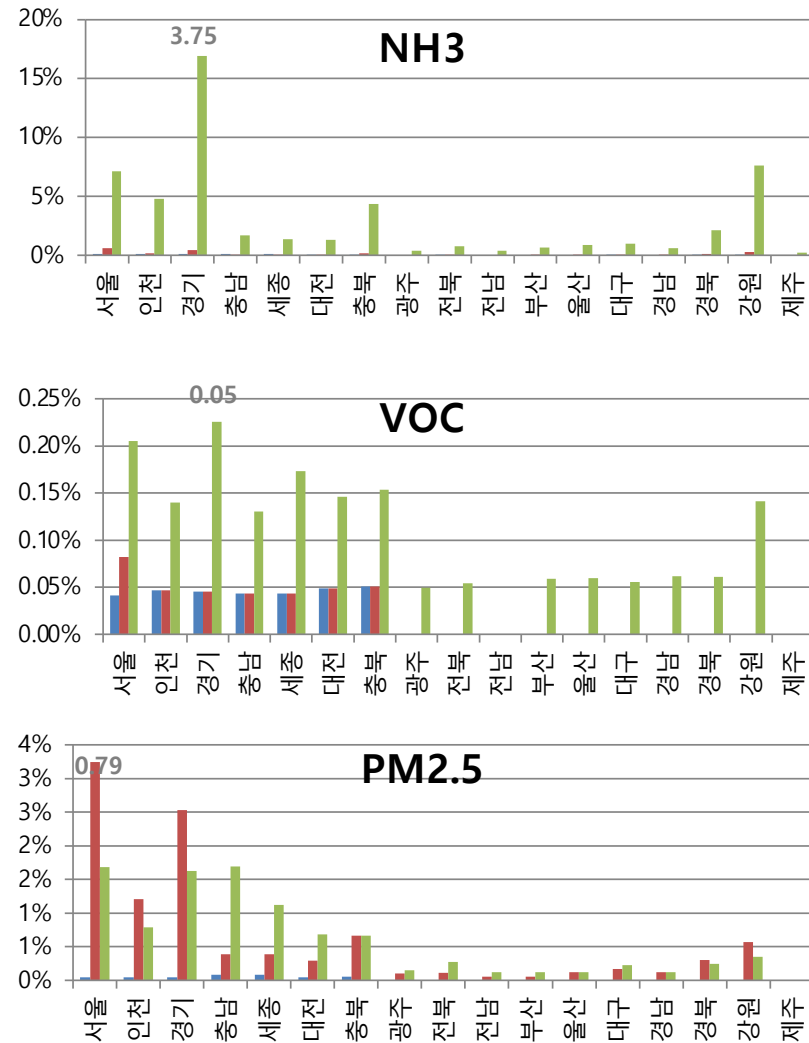
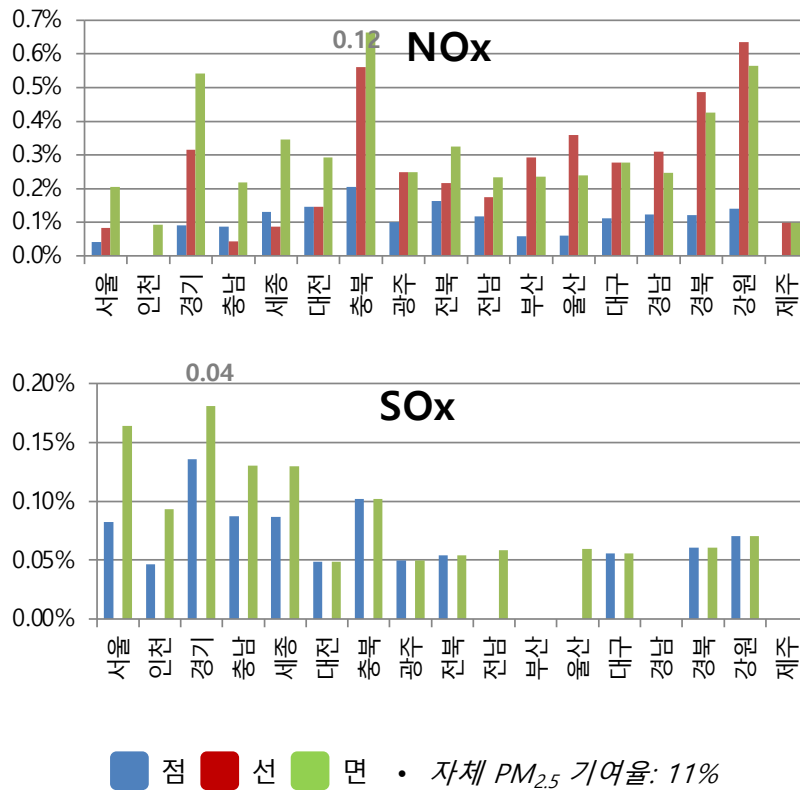
울산 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여농도 분포



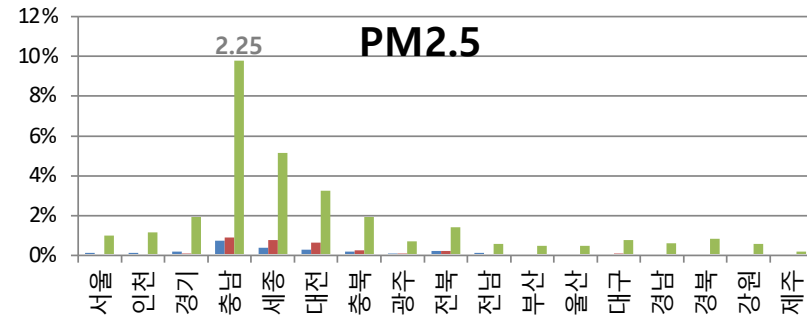
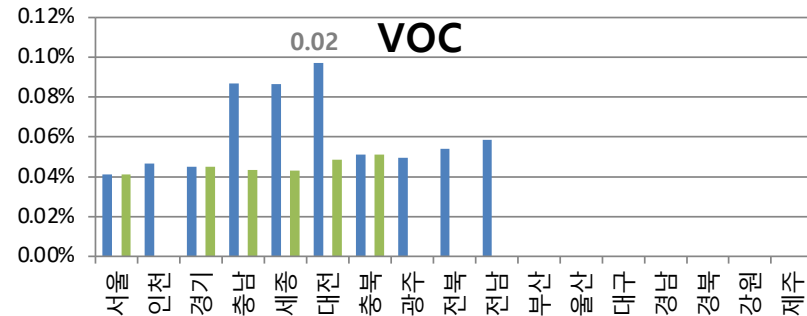
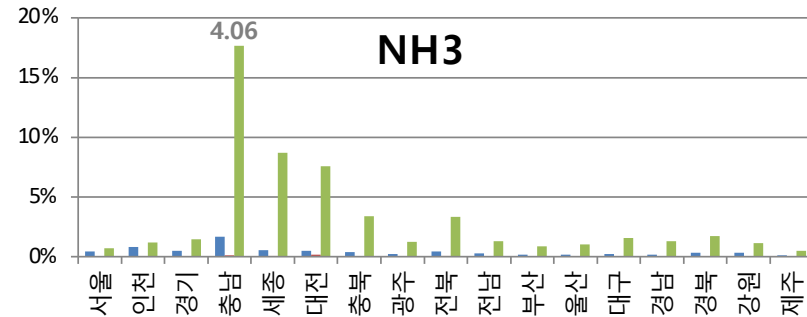
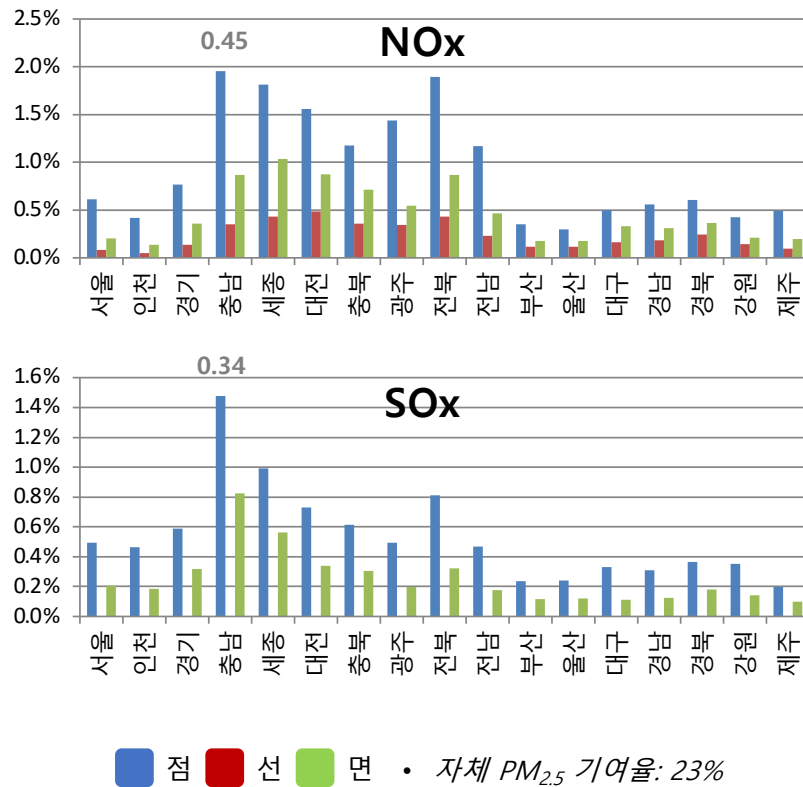
전남 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여농도 분포



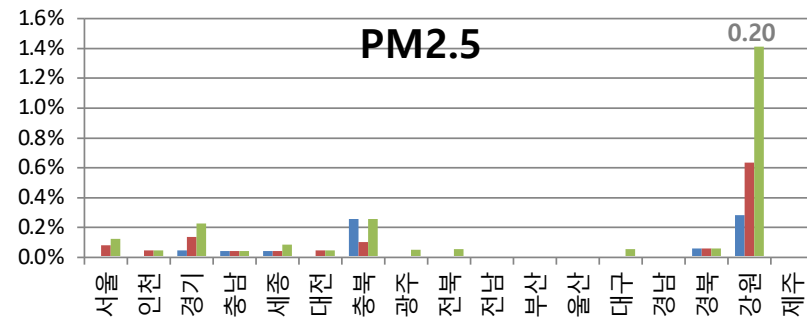
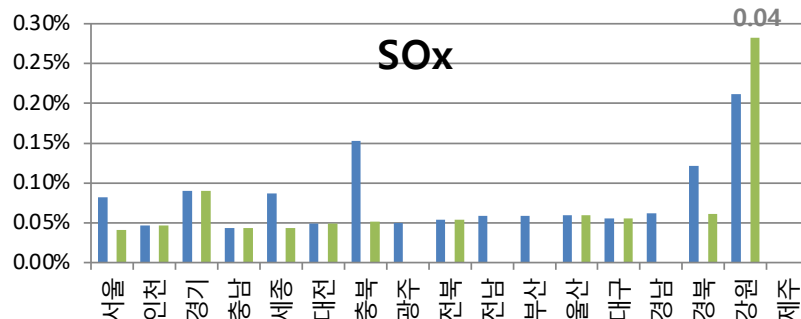
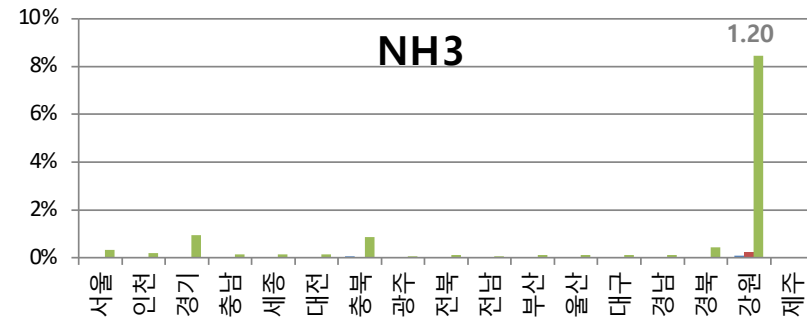
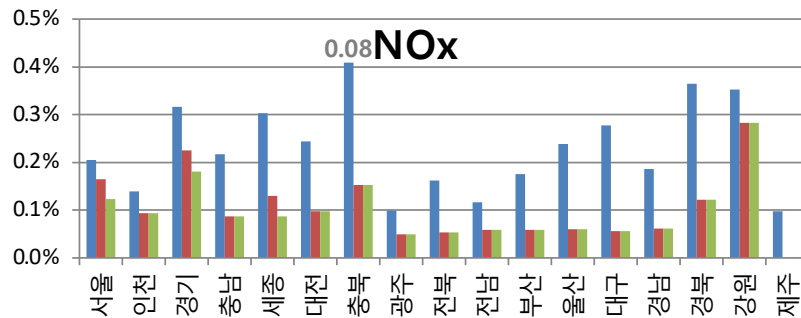
경기 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여율



충남 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여율

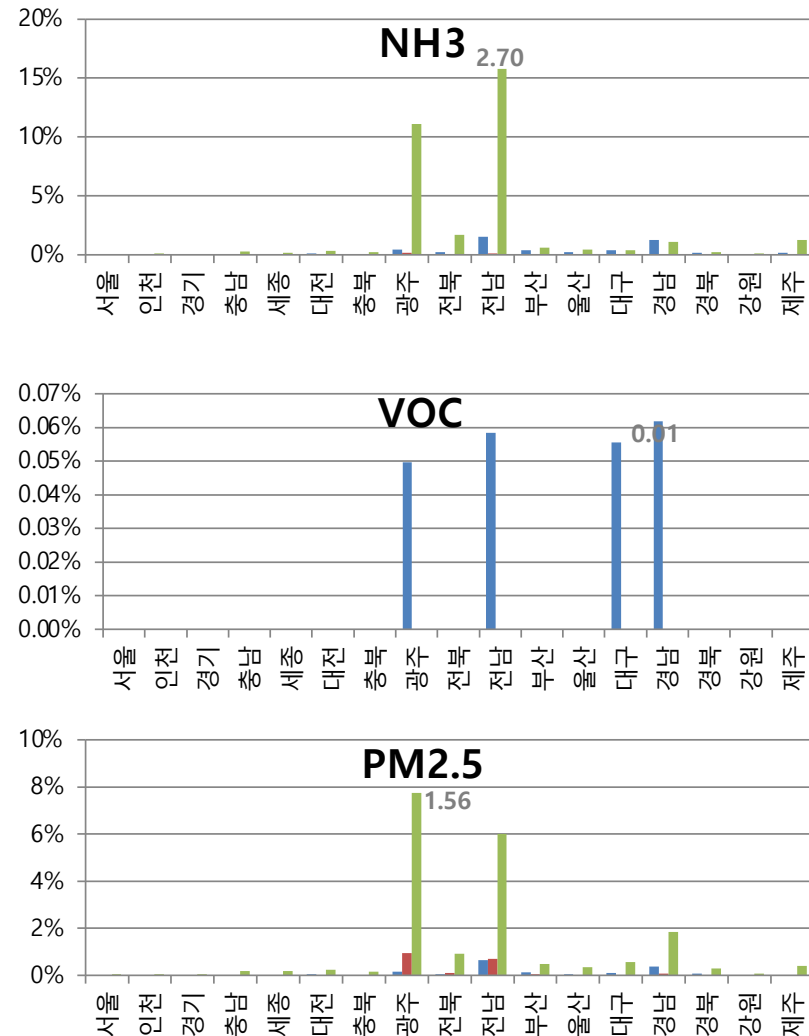
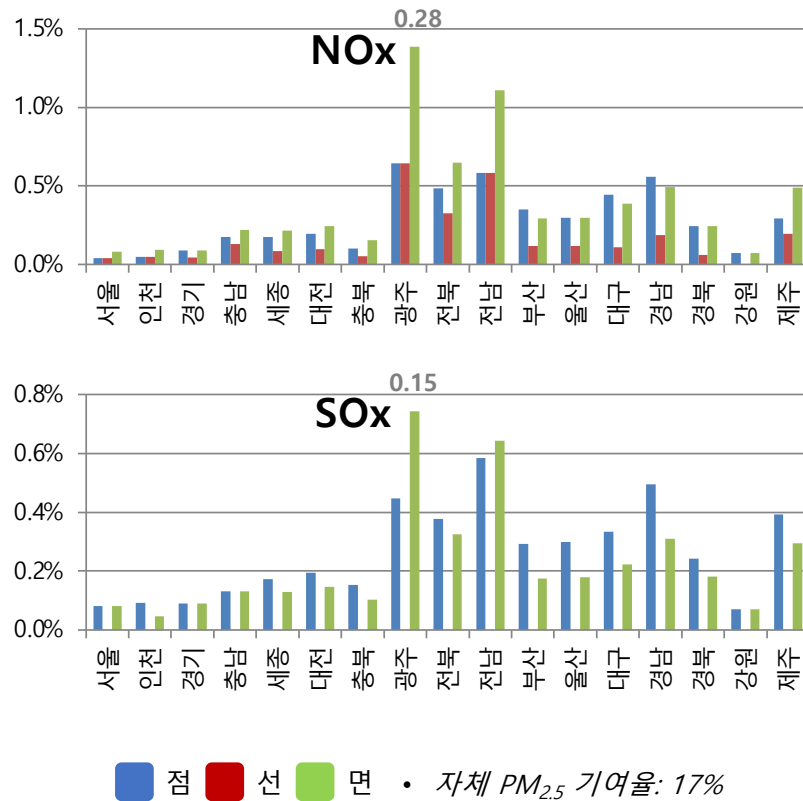


강원 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여율



■ 전 ■ 선 ■ 면 • 자체 PM_{2.5} 기여율: 6%

전남 오염원별·물질별 배출량의 PM_{2.5} 기여율



지자체별 미세먼지 영향 분석 프로그램 운영

[지역환경정보시스템 \(kei.re.kr\)](http://kei.re.kr)
eiaresearch.kei.re.kr/analysis/dust

배출량과 미세먼지 농도 저감/증가 산정 프로그램

✓지자체 선택

충남

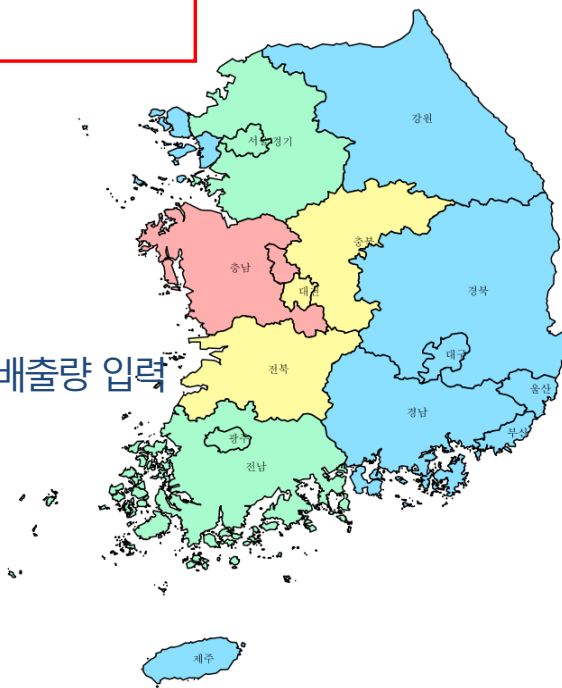
	SOx	NOx	NH3	VOC	PM2.5
전	5000	5000			
선	1000	1000			
면	7000	7000			

✓배출원별·물질별 배출량 입력

적용

범위

~ 0.0340	
0.0340 ~ 0.0680	
0.0680 ~ 0.1020	
0.1020 ~	



- 지자체 단위의 개발 계획 수립 시 사전평가 자료로 유용하게 활용될 수 있음
- 사전평가 단계 이후 상세한 정책 시나리오에 맞는 모델링 수행 및 기여도 분석이 반드시 수반 필요
- 정기적 업데이트 중

활용 예시(1)

➤ 충남 개발계획 시나리오

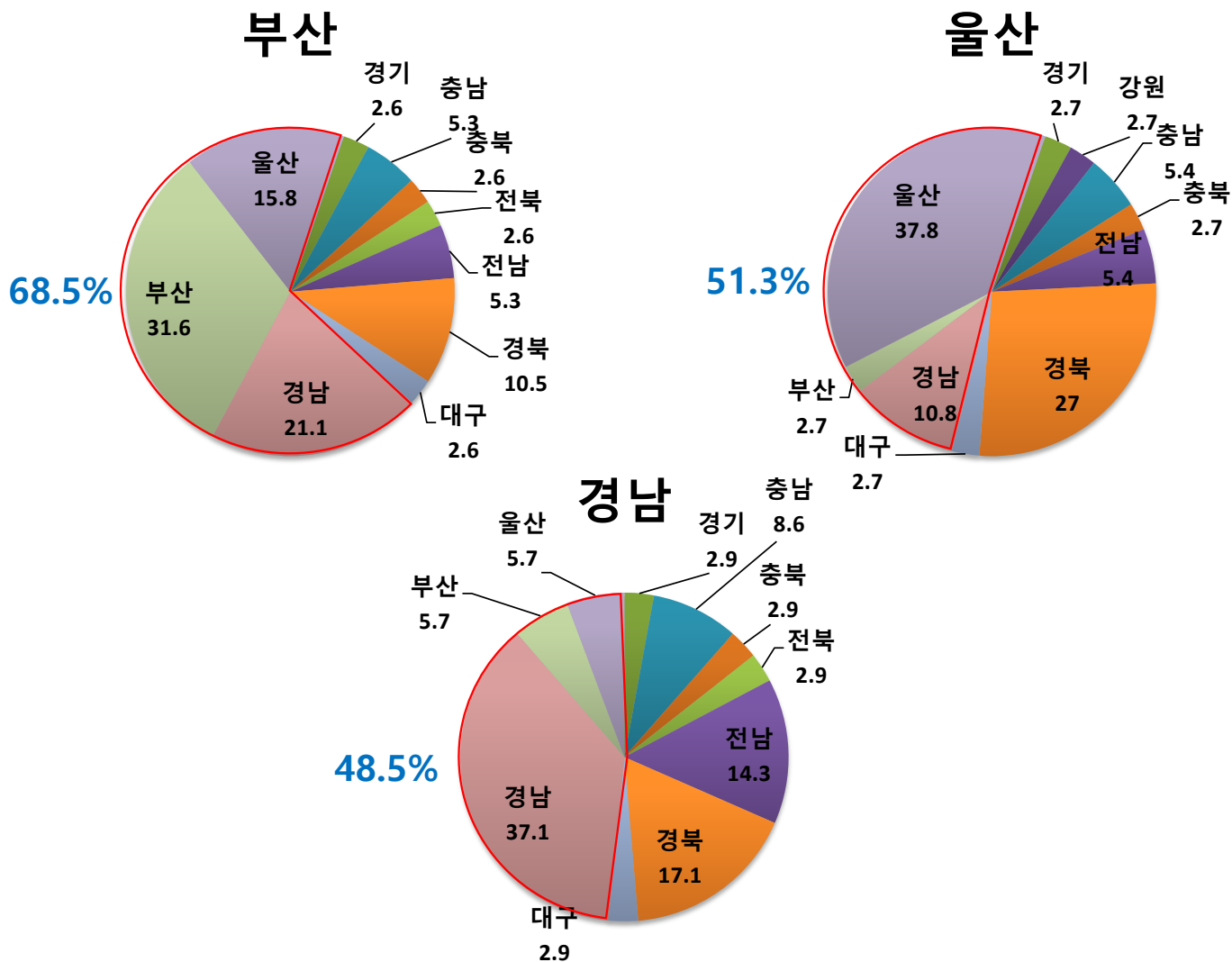
(단위: ton/year)

	NOx	SOx
화력 발전소 1 (점오염원)	20,000	11,000
산업단지 1 (면오염원)	5,000	5,000

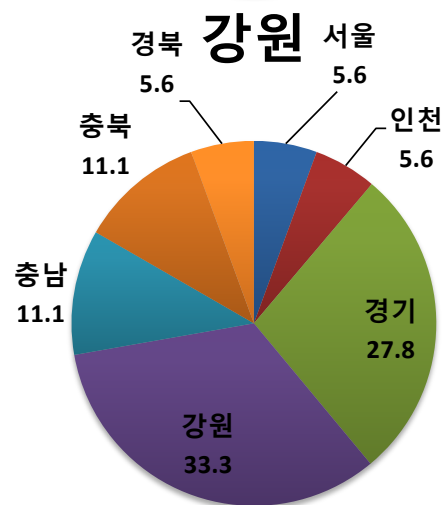
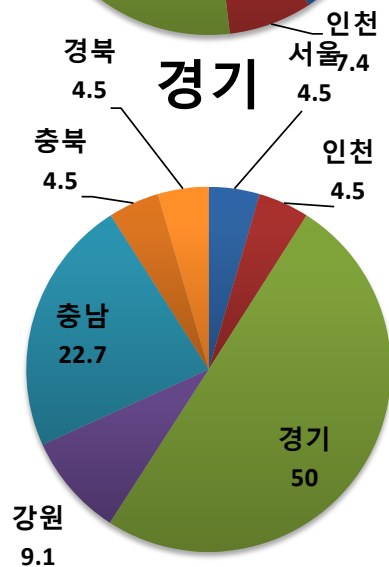
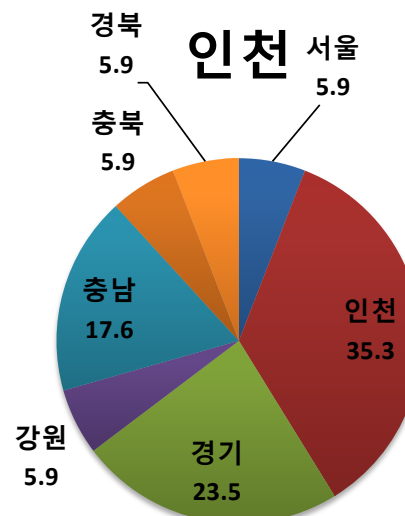
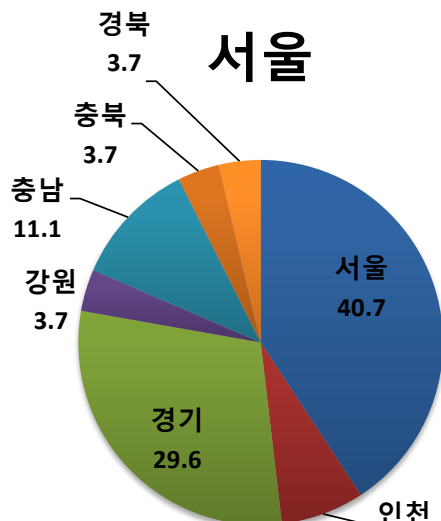
[지역환경정보시스템 \(kei.re.kr\)](http://kei.re.kr)
eiaresearch.kei.re.kr/analysis/dust

		PM _{2.5} 기여농도(μg/m ³)																
		서울	인천	경기	충남	세종	대전	충북	광주	전북	전남	부산	울산	대구	경남	경북	강원	제주
NOx	점	0.0372	0.0224	0.0422	0.1116	0.1042	0.0794	0.0570	0.0720	0.0868	0.0496	0.0148	0.0124	0.0224	0.0224	0.0248	0.0148	0.0124
	면	0.0062	0.0037	0.0100	0.0249	0.0298	0.0224	0.0174	0.0137	0.0199	0.0100	0.0037	0.0037	0.0075	0.0062	0.0075	0.0037	0.0025
SOx	점	0.0237	0.0197	0.0256	0.0669	0.0452	0.0295	0.0237	0.0197	0.0295	0.0157	0.0079	0.0079	0.0118	0.0098	0.0118	0.0098	0.0040
	면	0.0095	0.0076	0.0134	0.0362	0.0248	0.0134	0.0114	0.0076	0.0114	0.0057	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0057	0.0038	0.0019
총 기여농도		0.0766	0.0534	0.0911	0.2395	0.2040	0.1446	0.1095	0.1129	0.1475	0.0810	0.0302	0.0278	0.0454	0.0422	0.0497	0.0321	0.0208

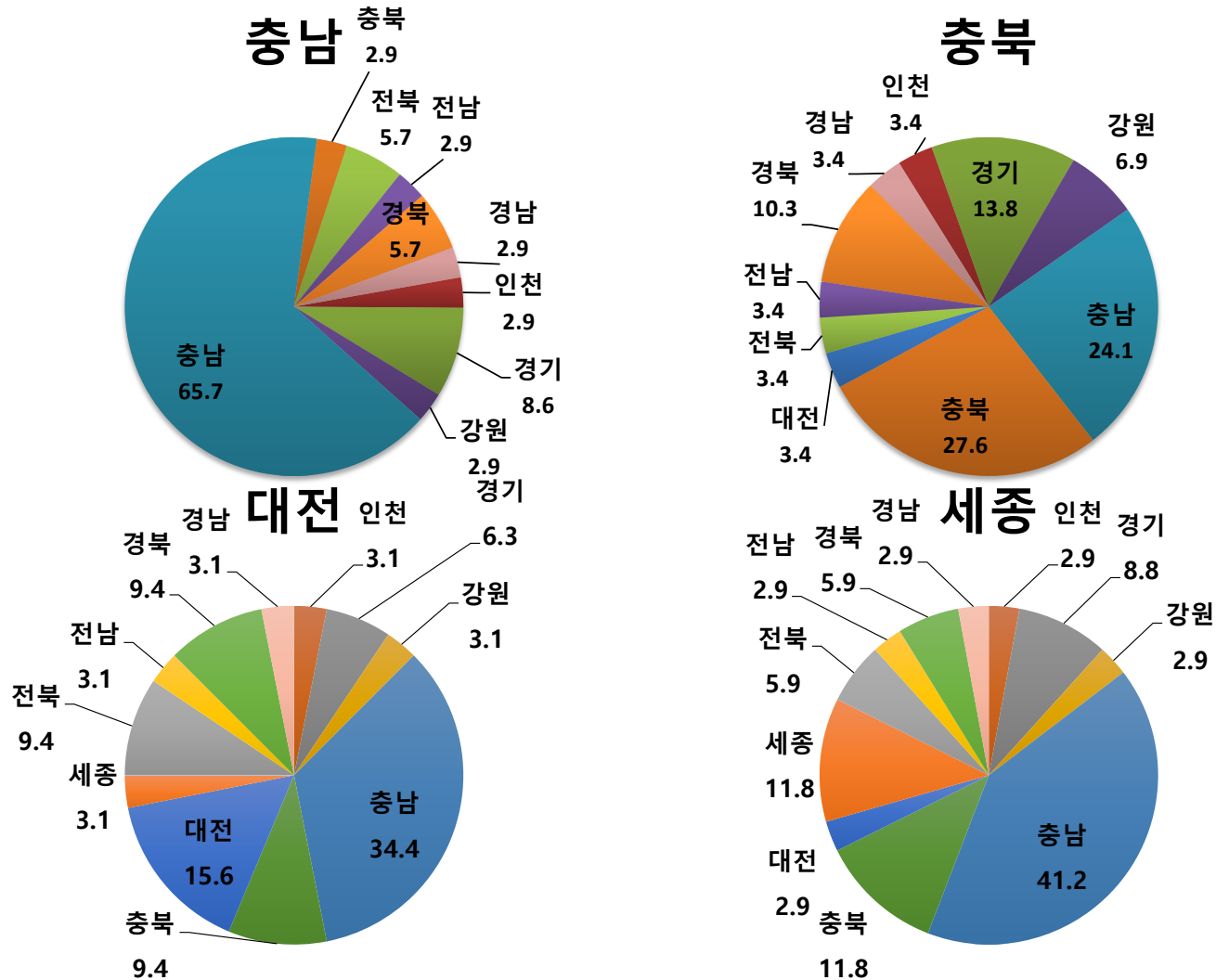
지자체별 PM_{2.5} 생성에 대한 각 지자체의 기여율



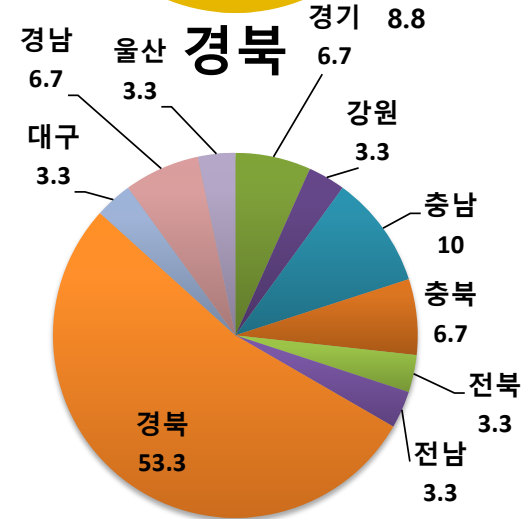
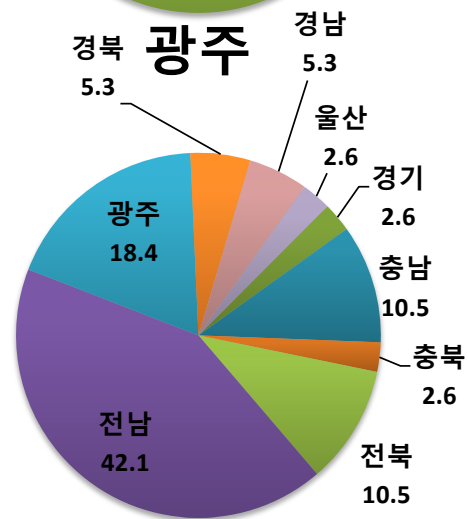
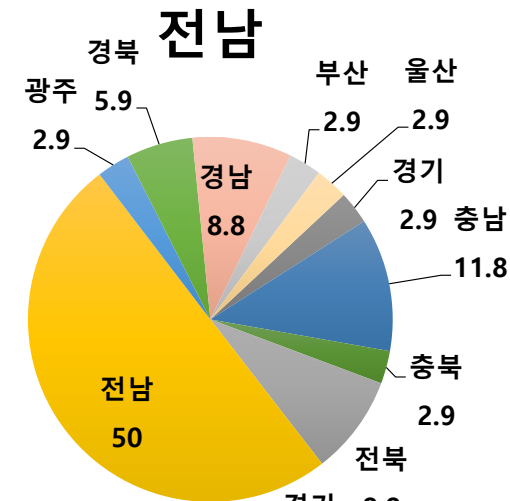
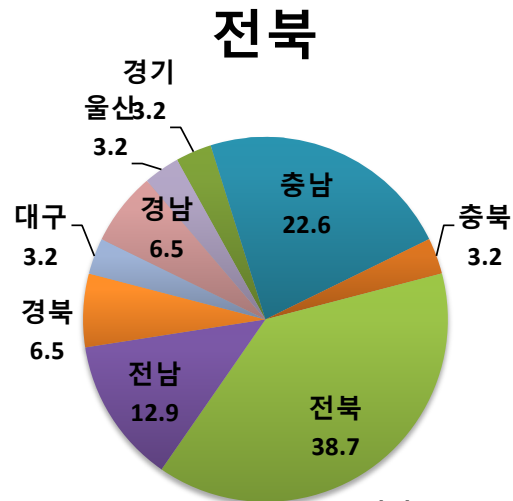
지자체별 PM_{2.5} 생성에 대한 각 지자체의 기여율



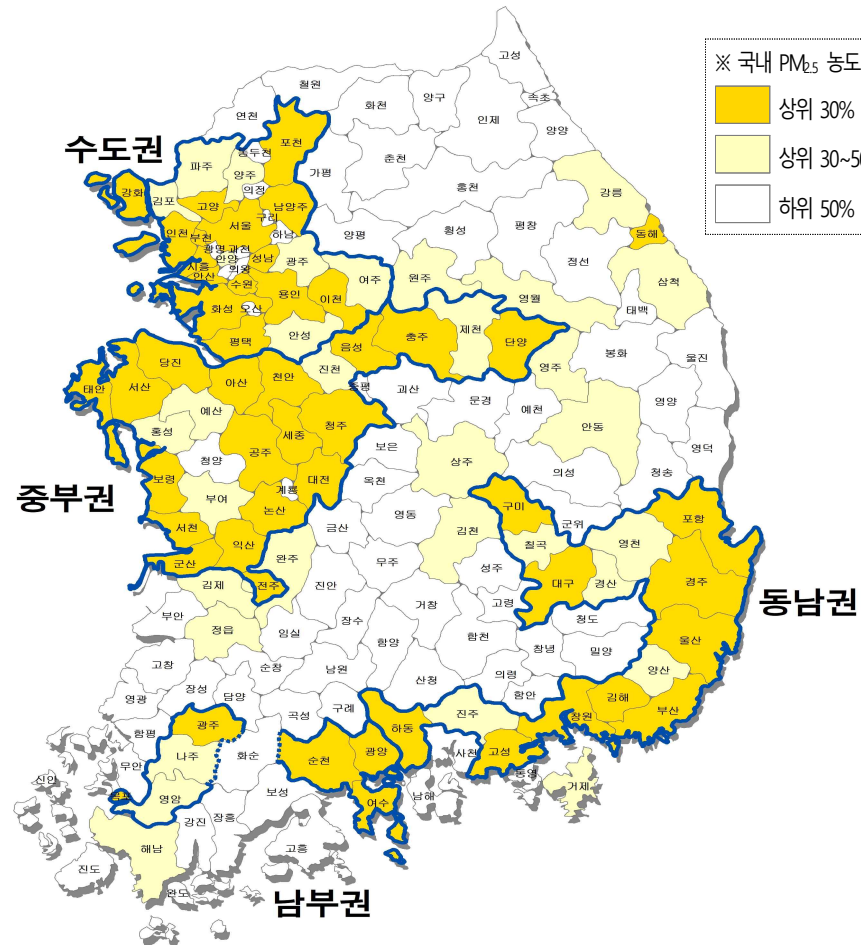
지자체별 PM_{2.5} 생성에 대한 각 지자체의 기여율



지자체별 PM_{2.5} 생성에 대한 각 지자체의 기여율



대기관리권역



【 대기관리권역 설정 대상지역(안) 기본 현황 】

(%는 전국 대비)

	행정구역 (시·군 단위)	농도 기여율 ¹⁾ (모델링 결과)	총량사업장 ('19년 기초조사)	특정경유차 ²⁾ ('19.10월 기준)	인구 ('18년)	국토 ('18년)
권역 전체	77개	82%	1,094개	85%	88%	38%
수도권	30개	21%	407개	44%	49%	9%
중부권	25개	31%	256개	14%	13%	14%
남부권	7개	10%	92개	5%	5%	4%
동남권	15개	20%	339개	22%	21%	11%

1) 초미세먼지 생성물질의 배출량, 기상 여건 등을 종합하여 국내 초미세먼지 농도에 미치는 영향 모델링

2) 권역 내 저공해 조치 대상이 되는 2005.12.31. 이전에 제작된 노후 경유자동차

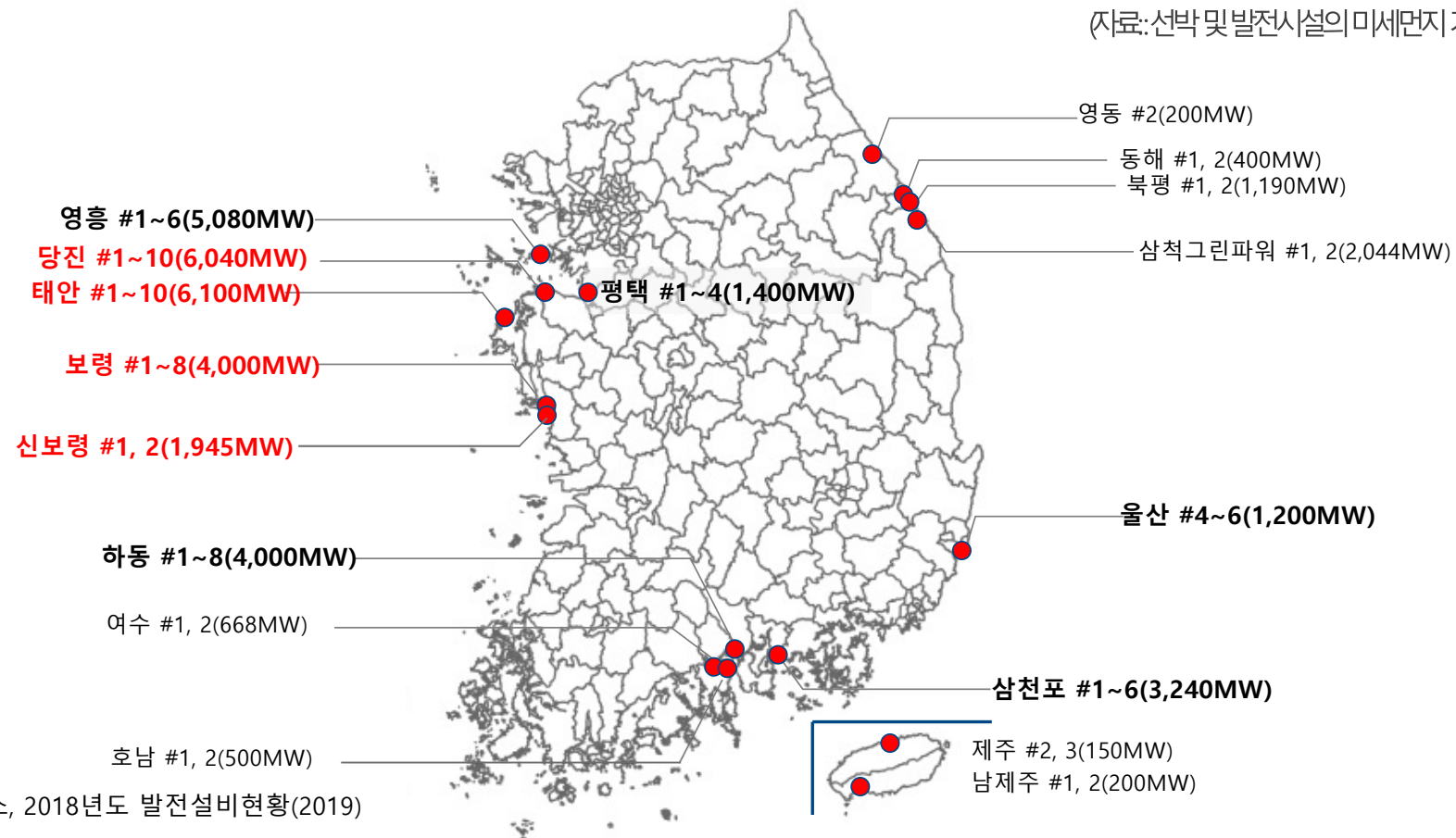
자료:미세먼지관리종합계획(2020~2024)관계부처합동,2019.11

정책 지원을 위한 대기질 모델링 연구사례

- ✓ 지자체별 미세먼지 영향 분석
- ✓ 오염원별 미세먼지 기여도(발전소/선박)
- ✓ 전라북도 대책마련 시나리오 적용 사례

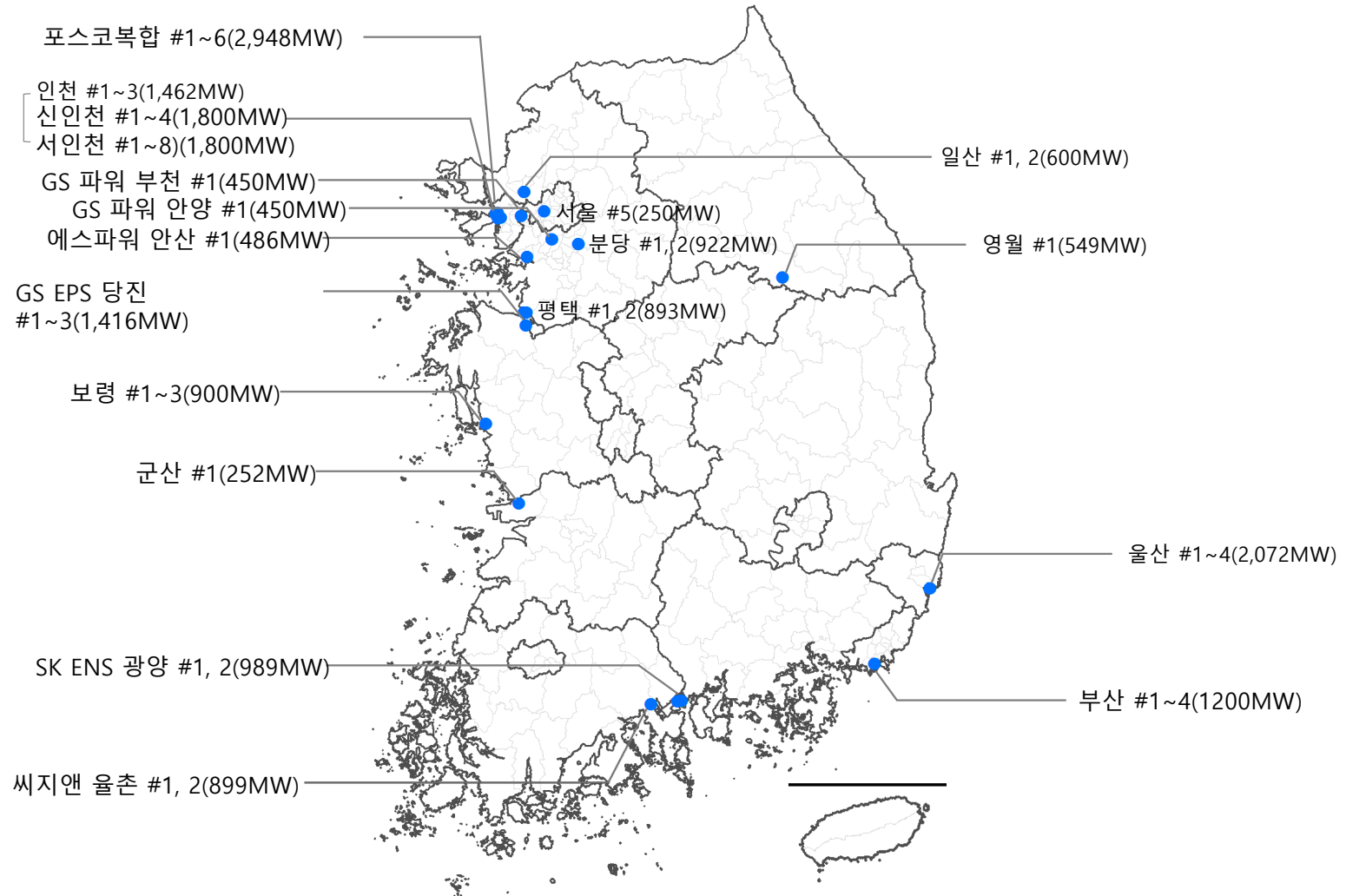
전국 석탄화력발전소 현황

(자료: 선박 및 발전시설의 미세먼지 기여도 분석, 문난경 외 2019)

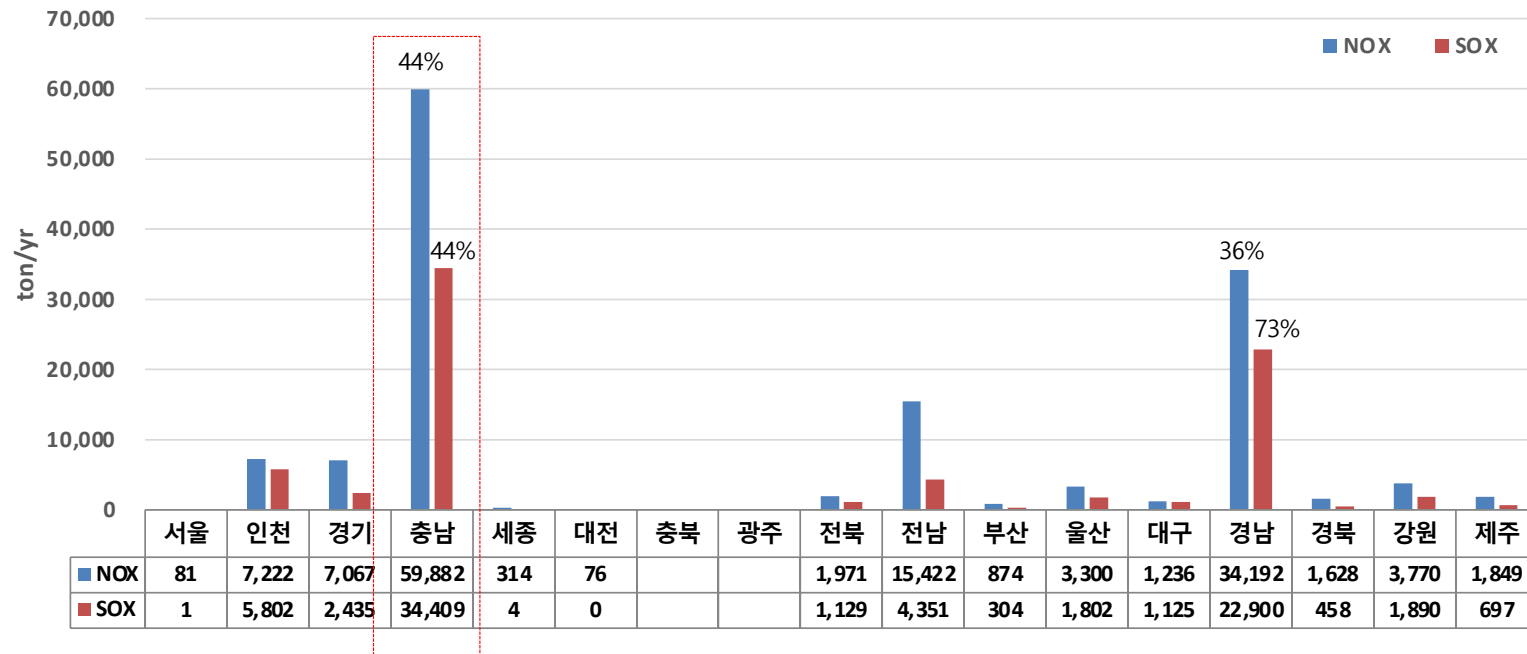


*자료: 전력거래소, 2018년도 발전설비현황(2019)

전국 LNG 화력발전소 현황



지자체별·물질별 발전시설 배출량

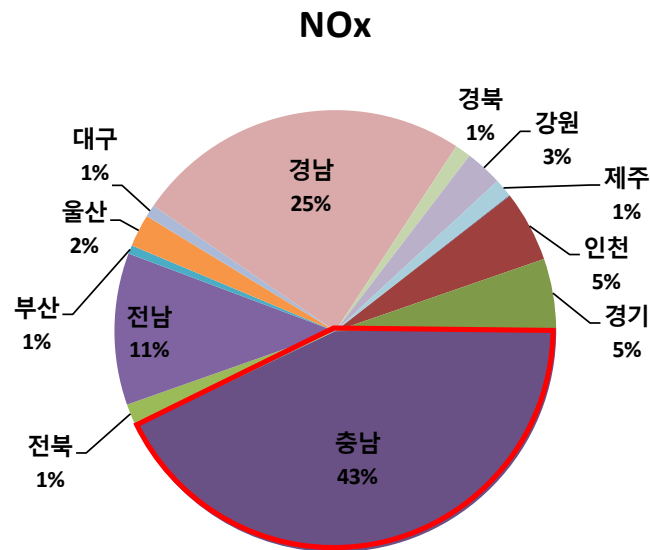


- 그래프 % : 지자체 전체 배출량 대비 발전시설 배출량 비율
- 자료: 국립환경과학원, 대기오염물질 배출량 2015(2018)

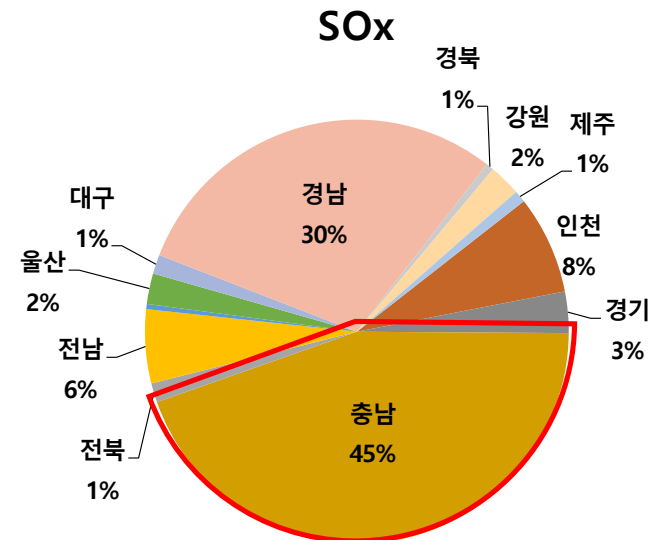
- 충남의 발전시설 배출량이 가장 높게 나타나며, NOx와 SOX 모두 자체 배출량의 44%를 차지함

전국 발전시설의 지자체별 배출량 비율

*자료: 국립환경과학원, 대기오염물질 배출량 2015(2018)

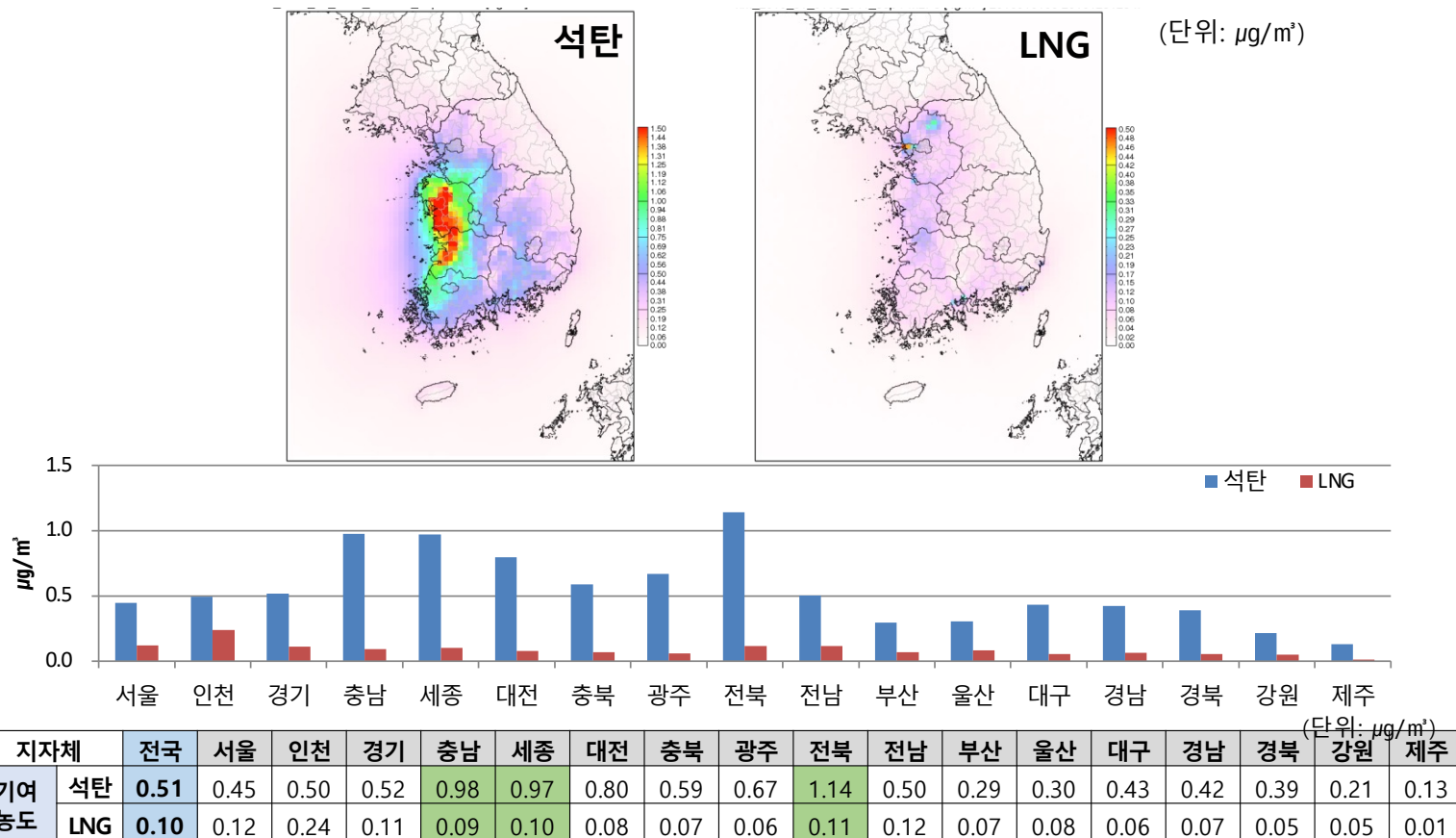


국가 전체배출량의 12%
(138,884 ton/year)

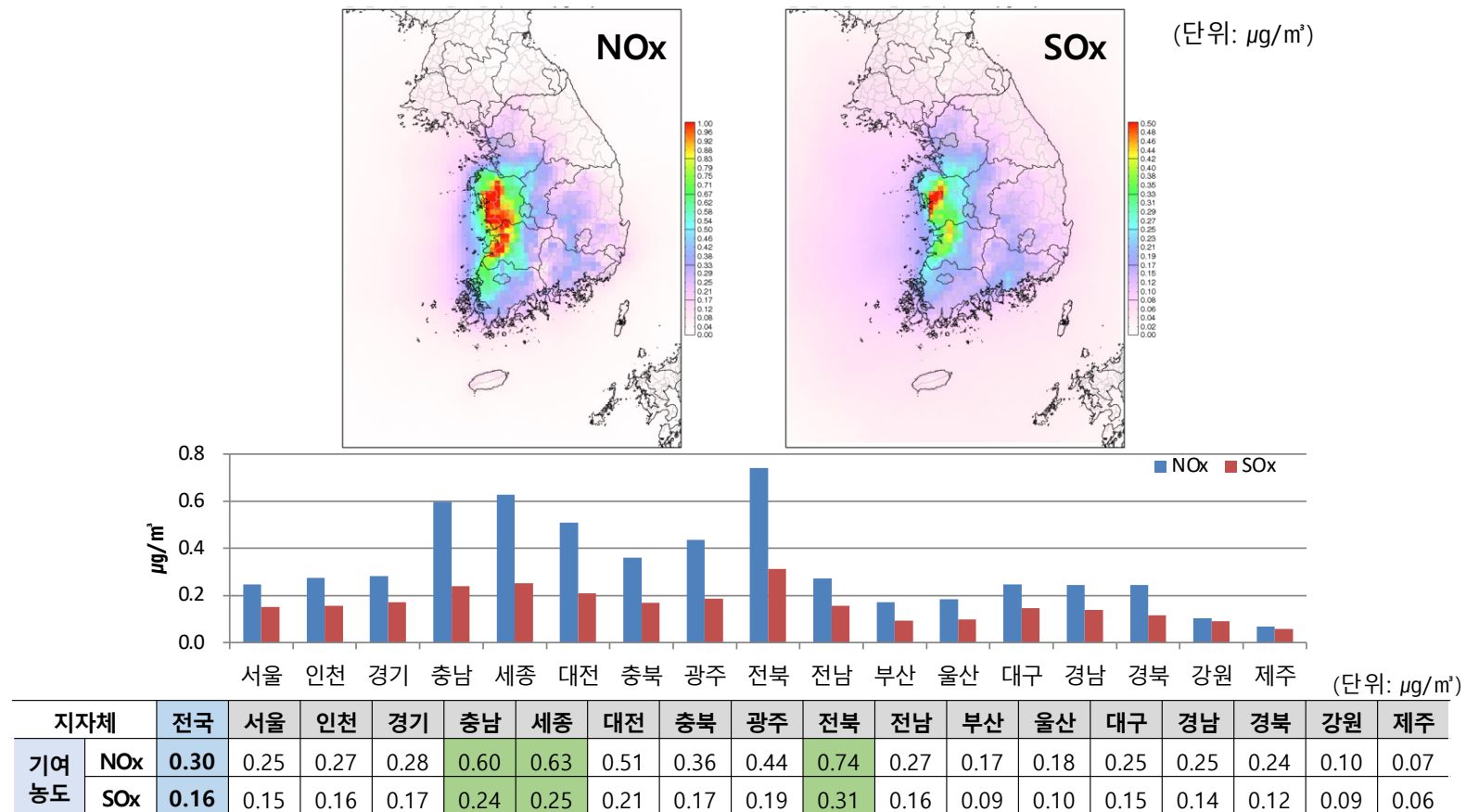


국가 전체배출량의 22%
(77,307 ton/year)

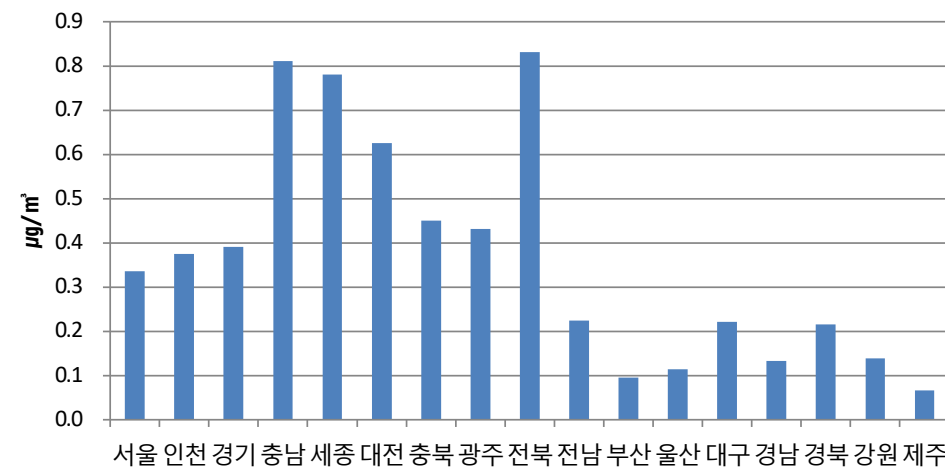
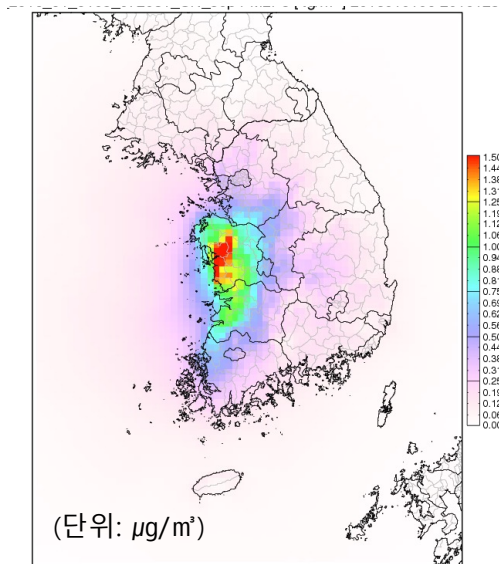
전국 발전시설(석탄, LNG) 배출원의 미세먼지 기여농도



전국 석탄 발전소 배출 주요 물질별 미세먼지 기여농도



충청남도 석탄 발전소 배출 미세먼지 기여농도

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

지자체		전국	서울	인천	경기	충남	세종	대전	충북	광주	전북	전남	부산	울산	대구	경남	경북	강원	제주
기여 농도	관측지점	0.34	0.34	0.37	0.39	0.81	0.78	0.63	0.45	0.43	0.83	0.22	0.10	0.11	0.22	0.13	0.22	0.14	0.07
	지역전체	0.33	0.33	0.29	0.35	1.04	0.80	0.60	0.37	0.46	0.65	0.33	0.09	0.10	0.19	0.15	0.18	0.09	0.07

➤ 전력수급기본계획 등 에너지 믹스 기본계획 수립시 활용

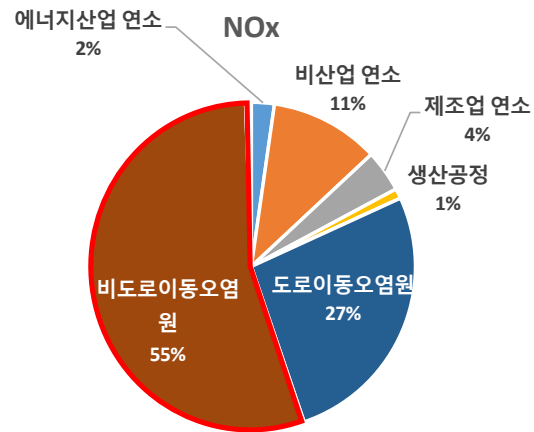
선박 배출원

- ❖ 부산, 인천, 울산과 같은 주요 항만도시의 경우 선박으로 인한 미세먼지 영향이 큰 것으로 분석됨
- ❖ 특히, 다량의 황이 함유된 벙커 C유 등 저급연료를 연소하여 미세먼지를 비롯한 대기오염물질 다량 발생
- ❖ 부산항의 경우는 중국 7개 항만, 두바이, 싱가포르와 함께 '세계 10대 초미세먼지 오염항만'으로 꼽히기도 함

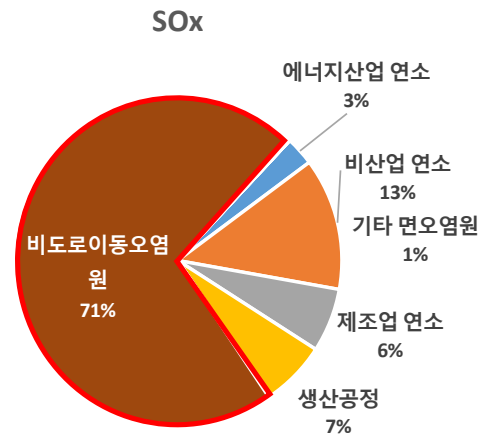
부산지역 배출특성

*자료: 국립환경과학원, 대기오염물질 배출량 2015(2018)

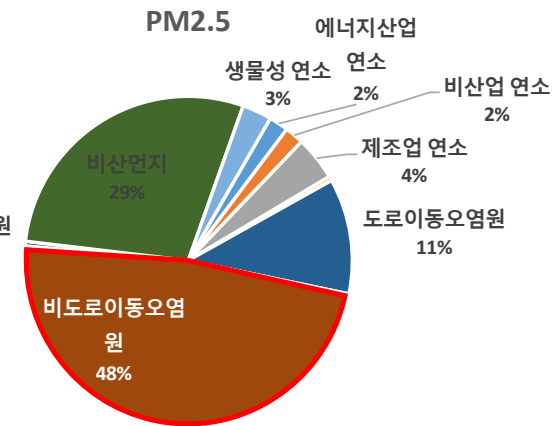
부산



부산 비도로이동오염원 중
선박배출량 75%



부산 비도로이동오염원 중
선박배출량 99%



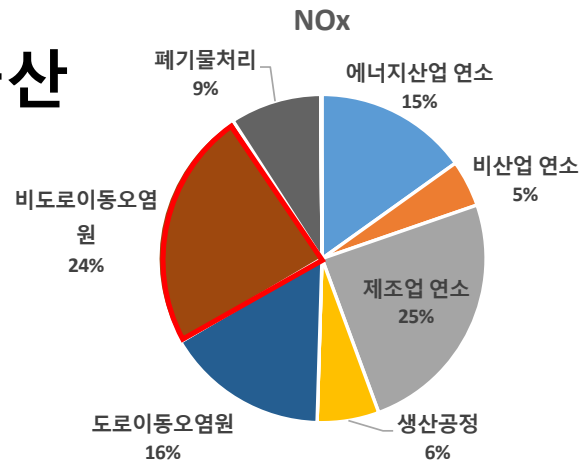
부산 비도로이동오염원 중
선박배출량 79%
(단위: TPY)

오염원 중분류	NOx	SOx	PM _{2.5}
철도	323	8	19
선박	17,997	7,487	928
항공	1,003	79	7
농업기계	104	-	7
건설장비	4,481	1	215
총합계	23,908	7,575	1,176

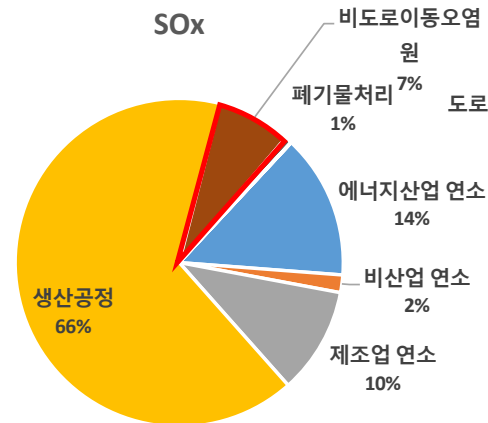
울산지역 배출특성

*자료: 국립환경과학원, 대기오염물질 배출량 2015(2018)

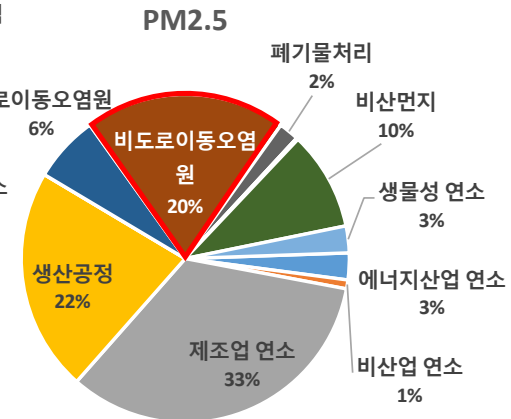
울산



울산 비도로이동오염원 중
선박배출량 71%



울산 비도로이동오염원 중
선박배출량 100%

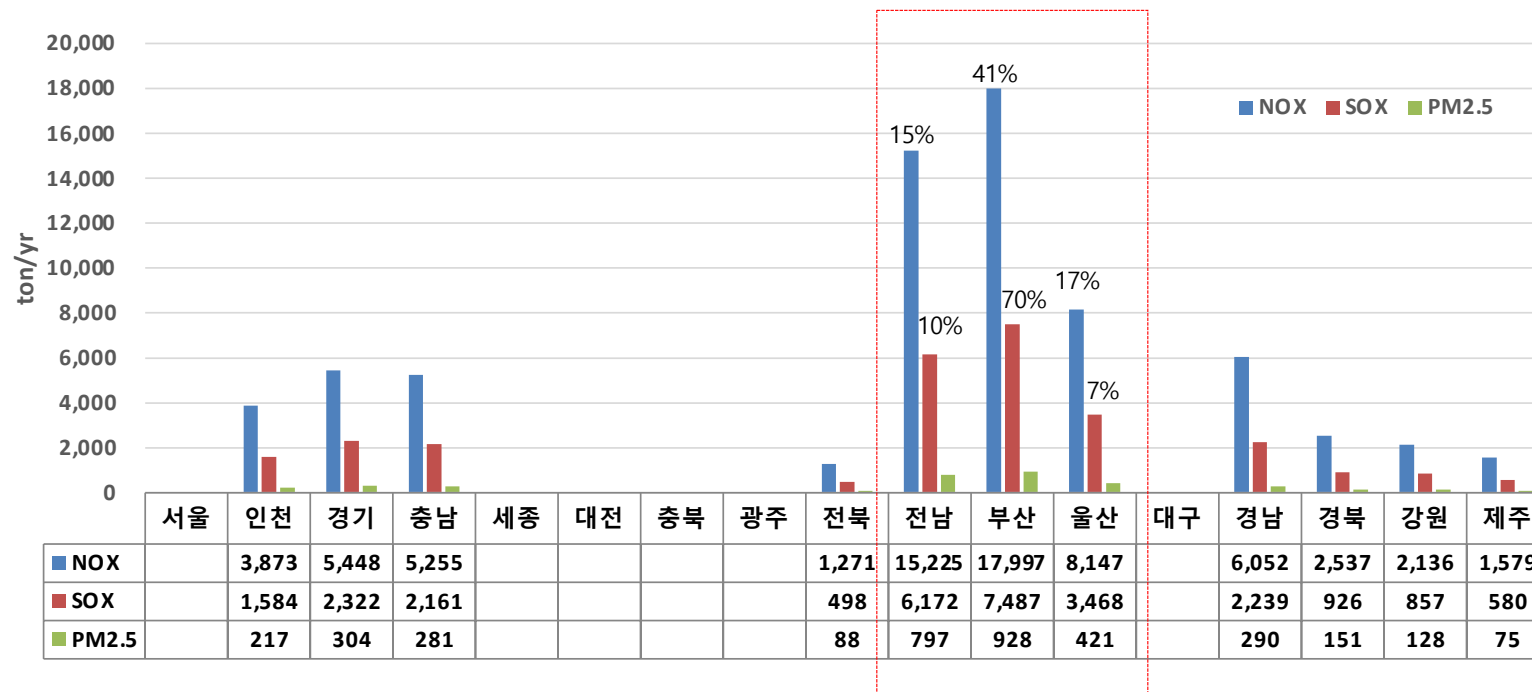


울산 비도로이동오염원 중
선박배출량 71%

(단위: TPY)

오염원 중분류	NOx	SOx	PM _{2.5}
철도	161	4	9
선박	8,147	3,467	421
항공	28	3	-
농업기계	143	-	11
건설장비	3,089	1	148
총합계	11,568	3,475	589

지자체별·물질별 선박 배출원 배출량



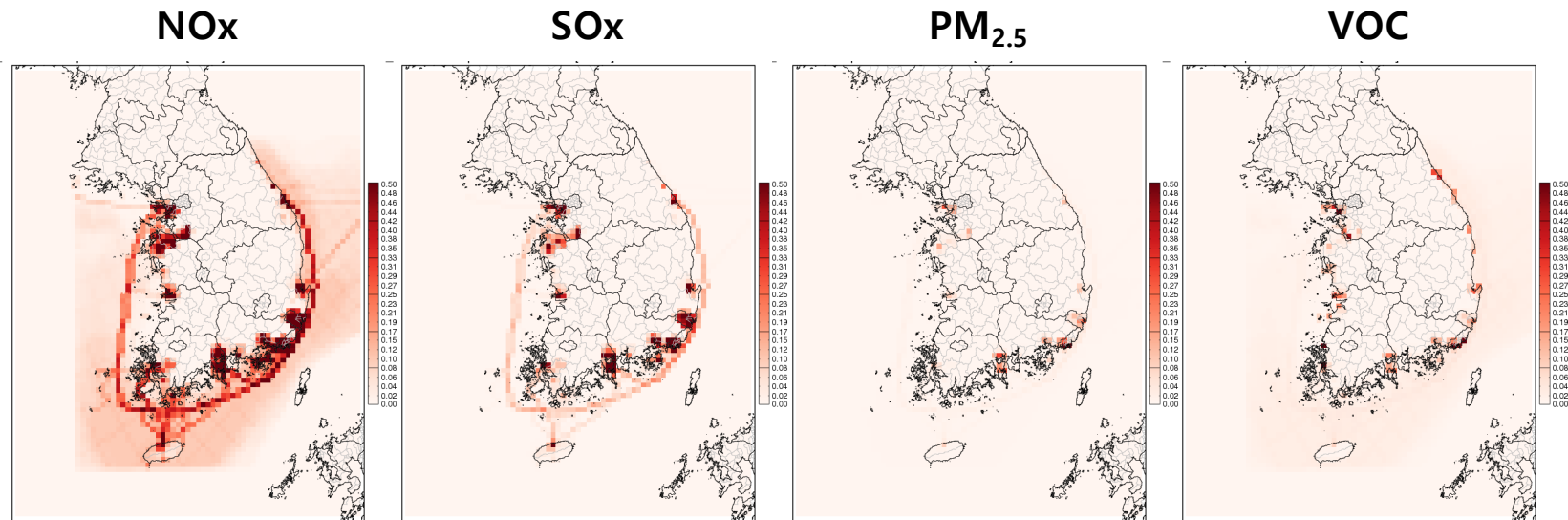
- 그래프 % : 지자체 전체 배출량 대비 선박 배출량 비율
- 자료: 국립환경과학원, 대기오염물질 배출량 2015(2018)

- 부산의 선박 배출량이 가장 높게 나타나며, NOx는 자체 배출량의 41%, SOx는 70% 차지함

선박 배출원 배출량 분포

❖ 전국 선박 배출원 배출 분포

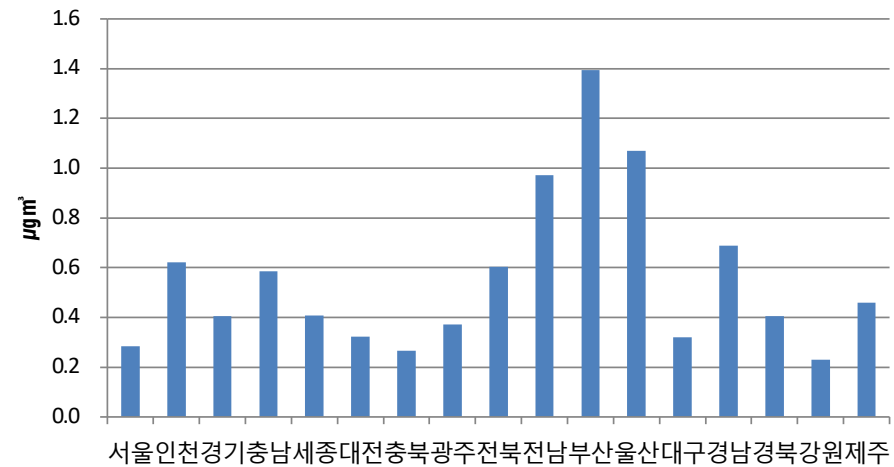
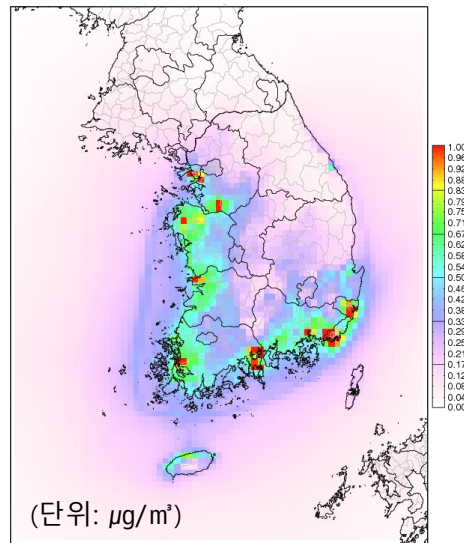
(단위: TPY)



(단위: TPY)

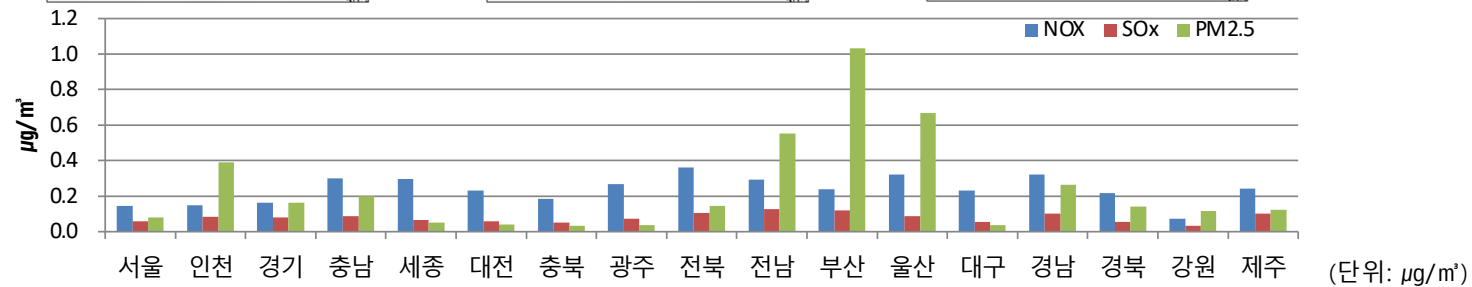
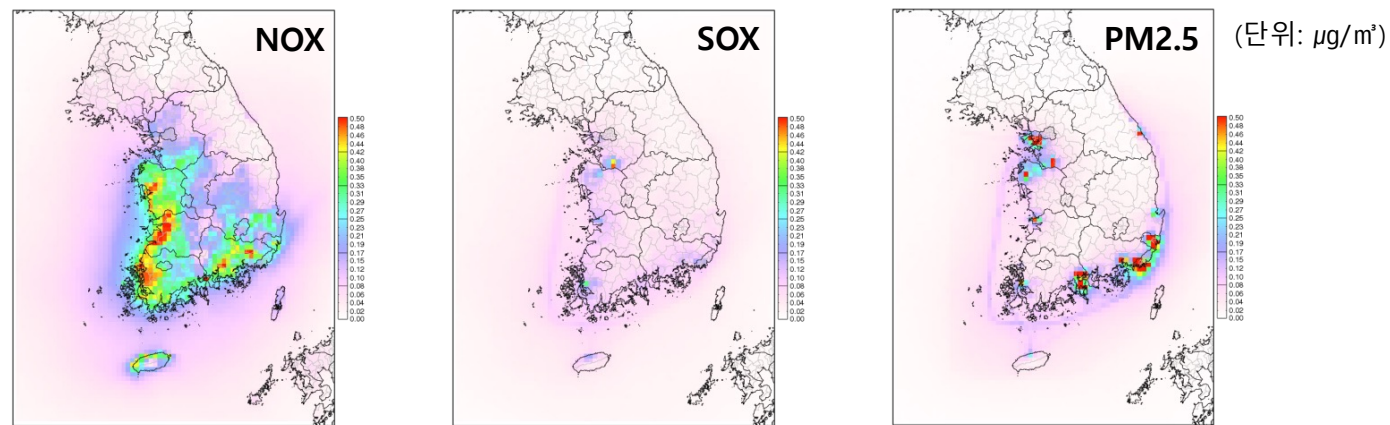
	NOx	SOx	PM _{2.5}	VOC	NH ₃
전국	151,735	38,467	6,539	20,970	14
부산	17,997	7,487	928	854	2
울산	8,147	3,468	421	288	1
여수	6,539	2,682	331	247	1

전국 선박 배출원 미세먼지 기여농도

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

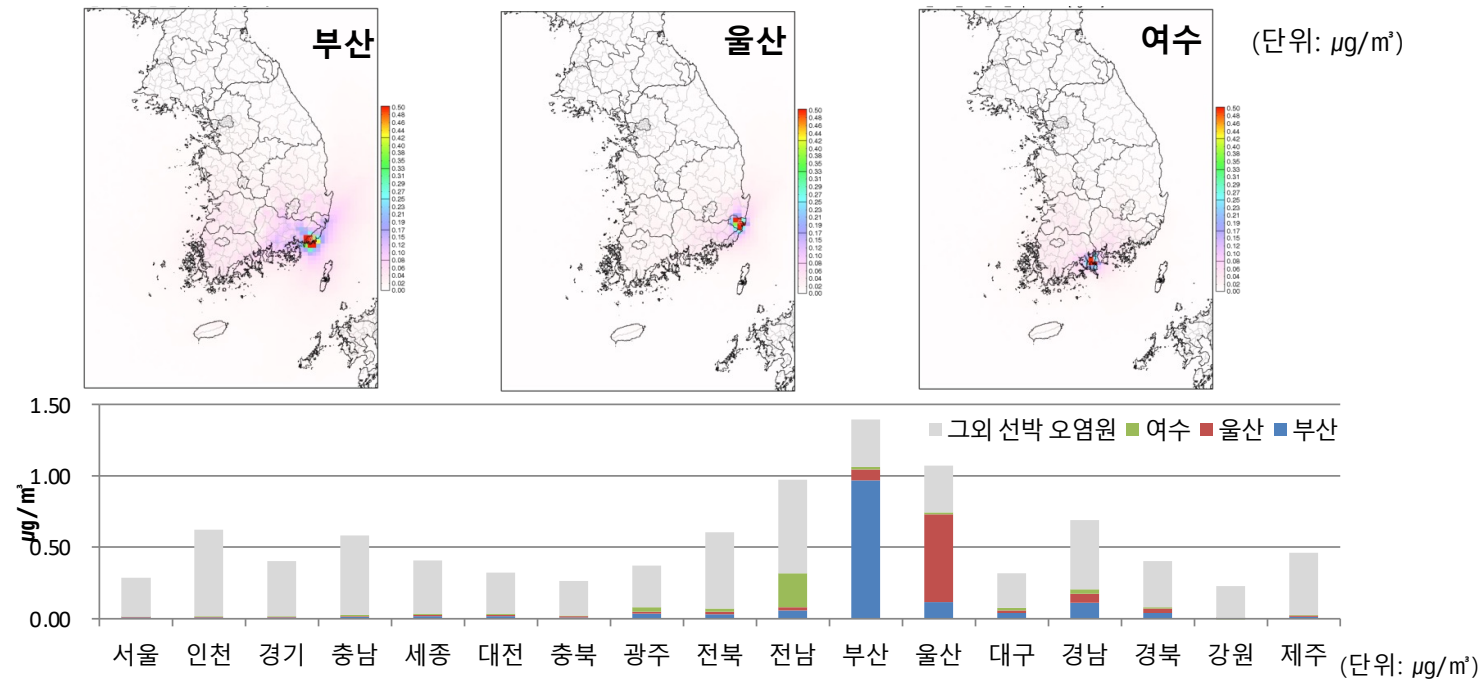
지자체	전국	서울	인천	경기	충남	세종	대전	충북	광주	전북	전남	부산	울산	대구	경남	경북	강원	제주
기여농도	0.57	0.28	0.62	0.41	0.58	0.41	0.32	0.26	0.37	0.60	0.97	1.39	1.07	0.32	0.69	0.41	0.23	0.46

전국 선박 배출 주요 물질별 미세먼지 기여농도



		전국	서울	인천	경기	충남	세종	대전	충북	광주	전북	전남	부산	울산	대구	경남	경북	강원	제주
기여농도	NOx	0.22	0.14	0.15	0.16	0.30	0.29	0.23	0.18	0.27	0.36	0.29	0.24	0.32	0.23	0.32	0.22	0.07	0.24
	SOx	0.08	0.06	0.08	0.08	0.09	0.07	0.06	0.05	0.07	0.10	0.13	0.12	0.09	0.06	0.10	0.05	0.03	0.10
	PM2.5	0.27	0.08	0.39	0.16	0.20	0.05	0.04	0.03	0.04	0.14	0.55	1.03	0.67	0.04	0.26	0.14	0.12	0.12

주요 선박 배출 지역별 미세먼지 기여농도



		서울	인천	경기	충남	세종	대전	충북	광주	전북	전남	부산	울산	대구	경남	경북	강원	제주
기여농도	부산	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.03	0.06	0.97	0.12	0.04	0.11	0.04	-	0.01
	울산	-	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.07	0.61	0.02	0.06	0.03	-	0.01
	여수	-	-	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.24	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	-	0.01

- 정책 수립을 위한 모델링 수행 시 정확도 향상을 위하여
 - 배출량 현실화(상향식-하향식 배출량 상호 보완 및 연구를 통한 현실화 작업) 필요
 - 어떤 배출량을 사용하냐에 따라 정책 효과가 크게 달라질 수 있음
 - 모델 개선(기상-화학 모듈 등)
- 미세먼지를 포함한 대기오염물질에 대한 원인 규명을 위한 과학적인 해석 지속 필요
 - 모델과 관측의 상호비교 및 협업을 위한 연구 체계 필요
- 정책 지원을 위한 기초자료로 활용하기 위한 체계적인 시스템 활용
 - 과학과 정책 분야의 협업 필요
 - 중앙정부와 지자체의 역할 분담
- 맞춤형 정책 지원을 위하여 대상지역별 배출량 저감 시나리오 적용 및 민감도 분석 등 세분화된 시나리오 선정과 상세한 기여도 분석을 통한 실효성 있는 정책 도출 필요





감사합니다

