

대기질 진단평가시스템 운영

○ 진단평가시스템 모델별 정확도를 평가하고 주요 오염물질의 부산지역 상세 모델링 결과를 분석하여 정책 방향을 제안

1. 조사개요

- 조사기간 : 2023년 1월 ~ 12월
- 조사대상 : 진단평가시스템 구·군별 모델링 결과
- 조사항목 : 초미세먼지(PM-2.5), 미세먼지(PM-10), 오존(O₃)

2. 조사방법

- 진단평가시스템 : 대기오염물질 배출량과 기상자료를 입력하여 대기오염 물질의 농도를 격자별로 계산하는 모델링시스템(CMAQ, CAMx)
 (기상자료) 지구규모 기상장 예측결과(GFS, UM, FNL)를 WRF 기상모델에 입력하여 생성
 (배출량자료) 국내·외의 기본적인 배출량 목록을 SMOKE 모델링에 입력하여 생성

표 1. 진단평가시스템 입, 출력 자료 및 모델 개요

	구분	개요
기상	UM(Unified Model)	기상청에서 생성되는 지역규모 수치예보자료→WRF 입력
	GFS(Global Forecast System)	NOAA의 환경예측센터에서 생산되는 전지구규모 기상예보자료→WRF 입력
	FNL(FiNaL analysis)	NOAA의 환경예측센터에서 생산되는 전지구규모 기상 재분석자료→WRF 입력
배출량	MEIC(Multi resolution Emission Inventory for China)	중국 Tsinghua university에서 개발된 중국내 배출원별 대기오염물질 배출량, 2010년 기준자료→SMOKE 입력
	REAS(Regional Emission inventory in ASia)	일본 국립환경연구소에서 개발된 아시아지역 대기오염물질 배출량, 2008년 기준자료→SMOKE 입력
	CAPSS(Clean Air Policy Support System)	환경부 국가미세먼지정보센터에서 생성되는 국내 대기오염물질 배출량, 2017년 기준자료 →SMOKE 입력
수치 모델	WRF(Weather Research and Forecast)	미국 국립대기연구소에서 개발된 기상장 예측 수치모델, ver. 3.4.1(2012)
	SMOKE(Spares Matrix Operator Kernel Emissions)	미국 EPA의 환경모델링센터에서 개발된 수치모델 입력용 대기오염물질 배출량 포맷 생성 프로그램, ver. 2.7(2010)
	CMAQ(Community Multiscale Air Quality model)	미국 EPA에서 개발된 3차원 광화학 수치모델. 입력자료를 기반으로 원하는 지역의 격자별 대기오염물질 농도 계산, ver. 4.7.1(2010)
	CAMx(Comprehensive Air quality Model with eXtnsions)	미국 environ사에서 개발된 3차원 광화학 수치모델. 원하는 지역의 격자별 대기오염물질 농도와 배출원, 지역별 기여율 계산, ver. 6.0(2013)

- 사용목적에 따라 실시간 모델링, 재분석 모델링, 에피소드 모델링으로 구분
 - (실시간 모델링) 예측기상장을 입력하여 3일 후까지 대기오염물질의 예측농도를 생성하여 대기질 예측업무에 활용
 - (재분석 모델링) 확정된 기상자료를 입력, 과거 사례를 재현하여 고농도 원인 분석 등에 활용
 - (에피소드 모델링) 배출량 제어를 통한 특정사례에 대한 정책 효과를 검증

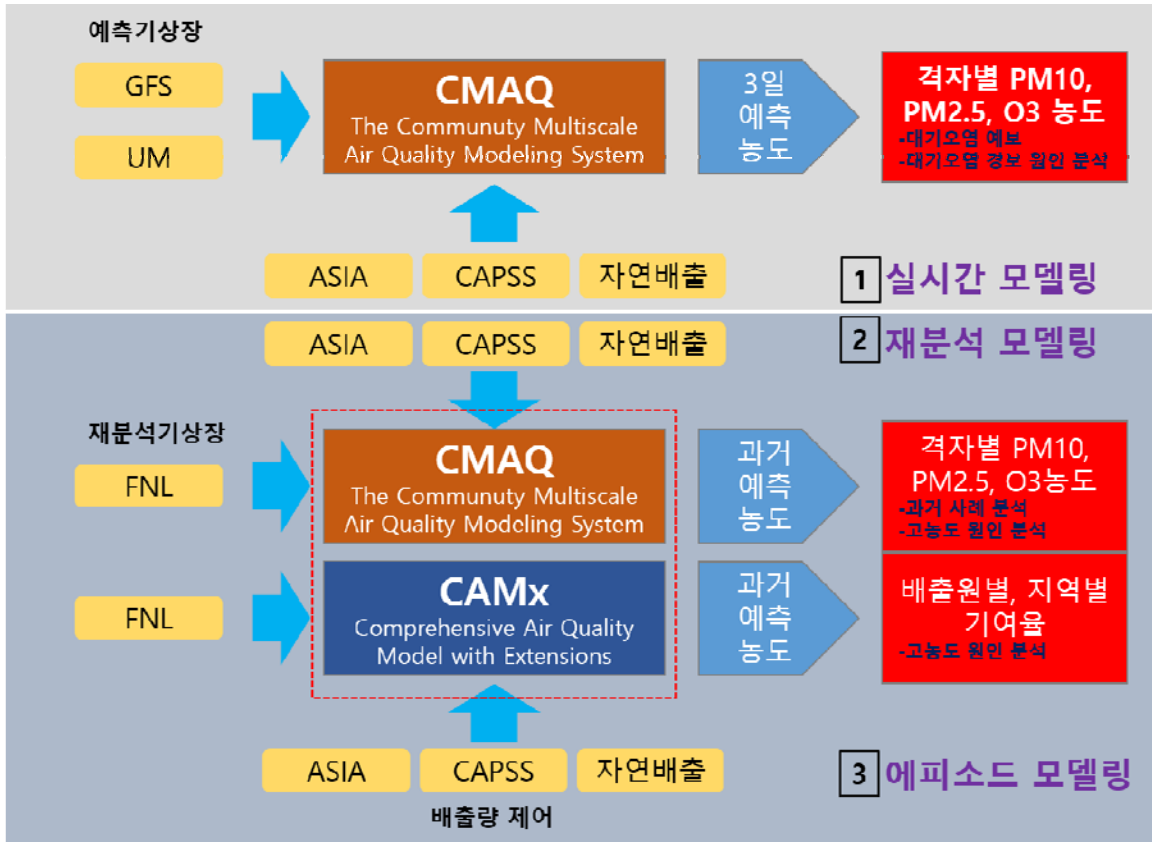


그림 1. 진단평가시스템 기능별 구조

- 분석 대상지역
 - 부산지역을 포함하는 1km×1km 격자체계(domain4)를 구성하기 위하여 동아시아부터 4개의 동지격자 체계를 구축하였으며(각 27, 9, 3, 1km 격자) 최종적으로 부산지역을 포함하는 995개 격자의 결과를 분석(붉은색 사각형).
 - 모델의 정확도는 도시대기 측정소 28개(붉은색 원)에서의 항목별 일평균값과 모델결과를 비교하고 정확도 평가를 위한 변수값을 계산하여 평가
- 모델의 정확도 평가 변수
 - 각 모델들의 정확도는 도시대기측정소 28개소의 항목별 일평균 값과 분석대상 모델링 격자 중 같은 지점의 항목별 일평균값을 비교하여 관측값에 대한 편향성(NMB), 오차율(NME), 관측값과 모델값의 상관관계수(r)로 평가

$$NMB(\text{normalized mean bias}) = \frac{\sum(p_i - o_i)}{\sum o_i} \times 100$$

$$NME(\text{normalized mean error}) = \frac{\sum |p_i - o_i|}{\sum o_i} \times 100$$

$$r(\text{correlation coefficient}) = \frac{\sum(\alpha_i - \bar{\alpha}) \times (\alpha_i - \bar{\alpha})}{\sqrt{\sum(\alpha_i - \bar{\alpha})^2 \times \sum(\alpha_i - \bar{\alpha})^2}}$$

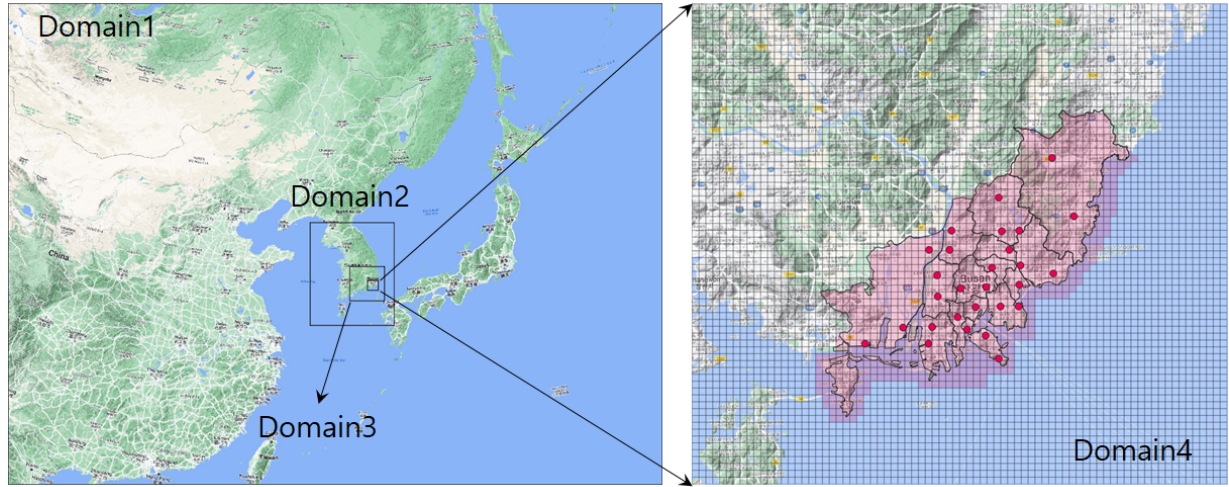


그림 2. 진단평가시스템 도메인 구조 및 분석 대상지역

3. 조사결과

○ 모델별 정확도 평가

- 모델의 정확도는 전반적으로 분석자료로 활용 가능한 수준이나 재분석 모델링 일부 항목은 편향성과 오차율이 다소 높음.
- 농도등급 예측에 활용하는 실시간 모델링 중 GFS 기상자료는 예측 성능이 양호하였으나 UM 기상자료의 오존은 오차율이 높음.
- 주기적인 입력 배출량과 모델버전의 최신화를 추진하여 모델결과의 정확도 개선을 추진할 필요가 있음.

표 2. 모델별 적합성 변수 계산 결과

		미세먼지			초미세먼지			오존				
		NMB(%)	NME(%)	r	NMB(%)	NME(%)	r	NMB(%)	NME(%)	r		
재분석 모델링	CMAQ	-3.79	36.53	0.57	3.17	37.11	0.7	-12.18	25.97	0.64		
	CAMx	-2.21	40.46	0.52	33.6	52.14	0.69	-23.9	31.59	0.59		
실시간 모델링	G	당일	-18.41	36.66	0.56	-5.2	35.07	0.69	3.51	23.67	0.66	
		F	내일	-21.47	37.04	0.56	-8.46	35.63	0.68	4.89	24.38	0.63
		S	모레	-23.08	38.98	0.53	-10.27	37.52	0.65	6.4	24.84	0.62
	U	당일	-17.48	35.72	0.57	-2.11	37.49	0.67	9.83	29.32	0.55	
		M	내일	-18.49	37.14	0.56	-3.02	38.61	0.63	11.05	29.9	0.54
		모레	-18.1	37.53	0.53	-3.01	40.06	0.62	11.38	30.58	0.55	
참고치*	good	<±10	<35	>0.7	<±10	<35	>0.7	<±5	<15	>0.75		
	moderate	<±30	<50	>0.4	<±30	<50	>0.4	<±15	<25	>0.5		

* Emery et al., 2017, Journal of the air and waste management association, 67(5), Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance.

○ 대기오염예보제 운영결과(실시간 모델링)

- 실시간 모델링은 3일간의 예측결과를 포함하고 있으며 이를 대기오염 예보권역별로 구분하고 농도등급(‘ 좋음’-‘매우나쁨’)별 적중률을 계산하였음.
- 실시간 모델링의 예보 적중률은 GFS 기상자료가 UM보다 우수하였으며 오존 최대 93.97%, 미세먼지 최대 74.76%, 초미세먼지 최대 72.55% 수준임.
- 실시간 모델링 결과를 바탕으로 매일 수행되는 진단평가회의는 적중률이 높은 GFS 모델결과를 기준으로 오존 0.73%, 미세먼지 6.28%, 초미세먼지 4.49%의 정확도 개선효과가 있음.

표 3. 대기오염예보 적중률 평가(%)

	실시간모델링 자체 적중률						진단평가 회의결과
	GFS			UM			
	당일	내일	모레	당일	내일	모레	내일
오존	92.54	92.94	93.79	89.94	87.62	88.85	93.67
미세먼지	73.18	74.76	73.1	73.81	67.13	73.16	81.04
초미세먼지	71.44	72.55	69.6	69.51	69.29	66.21	77.04

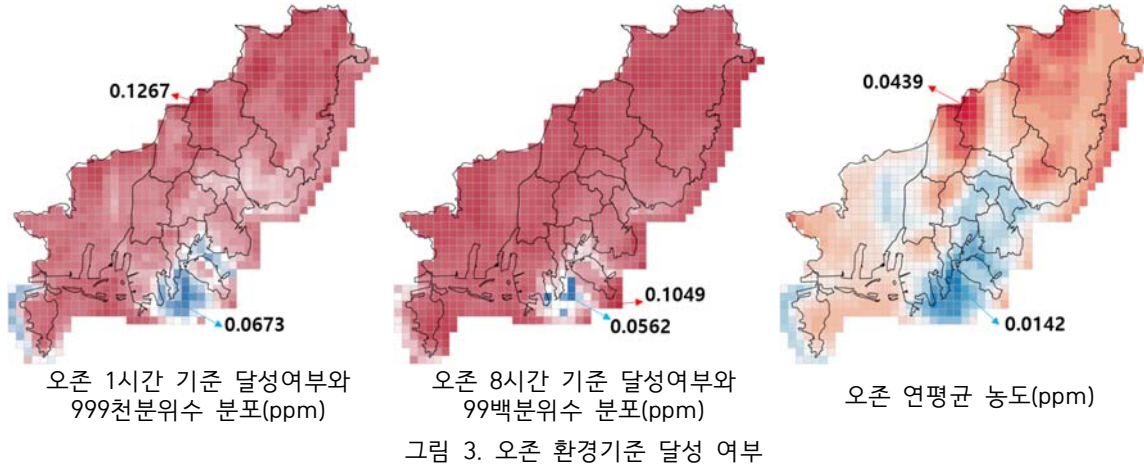
- 내일예보에 대한 농도등급별 적중률은 오존이 ‘보통’, (초)미세먼지는 ‘좋음’ 등급에서 높았고 이는 실측자료의 빈도가 높았기 때문임.
- 진단평가회의는 전 항목에서 ‘나쁨’ 이상의 등급에서 적중률을 크게 증가시켰으며, 이는 모델에서 반영되지 않는 실시간 농도추세나 황사와 같은 장거리 이동 패턴 등을 고려하여 예측등급을 결정하기 때문임.

표 4. 내일예보의 농도등급별 적중률 평가(%)

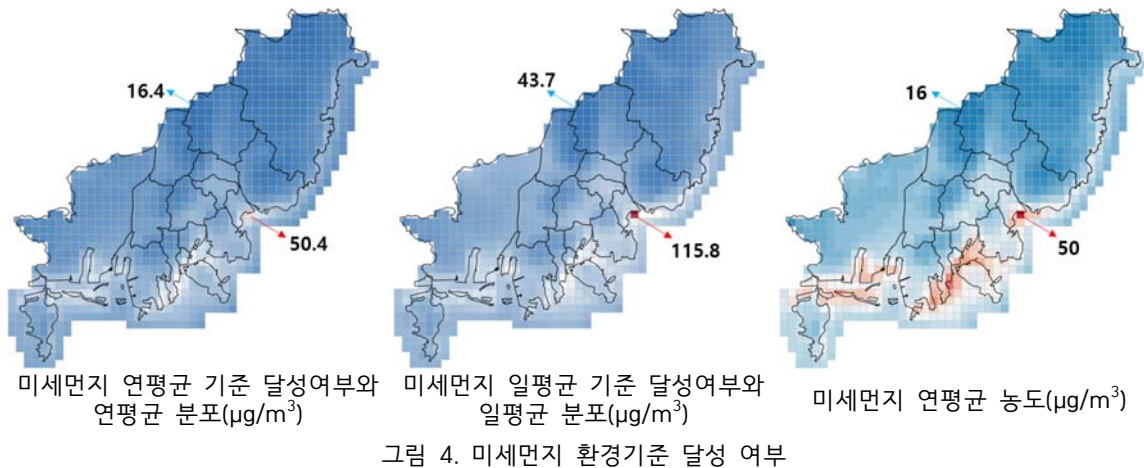
	오존			미세먼지			초미세먼지		
	GFS	UM	진단평가	GFS	UM	진단평가	GFS	UM	진단평가
매우나쁨	-	-	-	0	0	100	-	-	-
나쁨	38.64	43.33	63.64	0	0	33.33	45.31	54.69	63.24
보통	97.85	92.61	96.32	44.24	45.03	67.8	54.64	58.14	67.78
좋음	0	0	0	93.49	80.02	89.83	86.64	77.87	84.44
전체	92.94	87.62	93.67	74.76	67.13	81.04	72.55	69.29	77.04

○ 환경기준 달성 여부(재분석 모델링)

- 오존의 1시간 환경기준은 0.1ppm(999천분위수), 8시간 평균 환경기준은 0.06ppm(99백분위수)이며 각각의 분위수 값을 기준으로 환경기준 달성여부를 평가.
- 오존의 연평균은 0.0142-0.0439ppm 수준이며 기장군, 금정구와 북구 지역을 중심으로 높았고, 도심지역과 영도구 등 해안 지역을 중심으로 낮음.
- 1시간 평균의 분위수값은 0.0673-0.1267ppm 수준이며 기준 미달성 지역은(0.1ppm 초과, 붉은색 지역) 전체 격자 중 약 92% 지역이며 환경기준을 만족하는 지역은 영도구 인근의 해안지역 일부(파란색 지역)로 나타남.
- 8시간 평균의 분위수값은 0.0562-0.1049ppm 수준이며 약 99% 지역에서 환경기준을 초과(0.06ppm 초과, 붉은색 지역)하였음.



- 미세먼지의 연평균 환경기준은 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 환경기준은 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (99백분위수)이며 각 평균과 분위수 값을 기준으로 환경기준 달성여부를 평가.
- 미세먼지의 연평균은 $16\text{--}50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이며 기장군, 금정구와 북구, 해운대구에서 특히 낮았고 향만과 해안지역을 중심으로 높음.
- 미세먼지는 대부분의 지역에서 환경기준(연평균 50, 일평균 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 파란색 지역)을 만족하고 있음.



- 초미세먼지의 연평균 환경기준은 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 환경기준은 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ (99백분위수)이며 각 평균과 분위수 값을 기준으로 환경기준 달성여부를 평가.
- 초미세먼지 연평균은 $13\text{--}27\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이며 기장군, 금정구와 북구, 해운대구에서 특히 낮았고 향만과 해안지역을 중심으로 높음.
- 연평균 환경기준은($15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 파란색 지역) 전체 격자의 약 45%가 만족하고, 서부산권과 도심 및 향만 지역에서 초과하였음.
- 일평균 환경기준은 전 지점에서 초과하였으며($35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상, 붉은색 지역) $37.4\text{--}71.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높은 수준임.

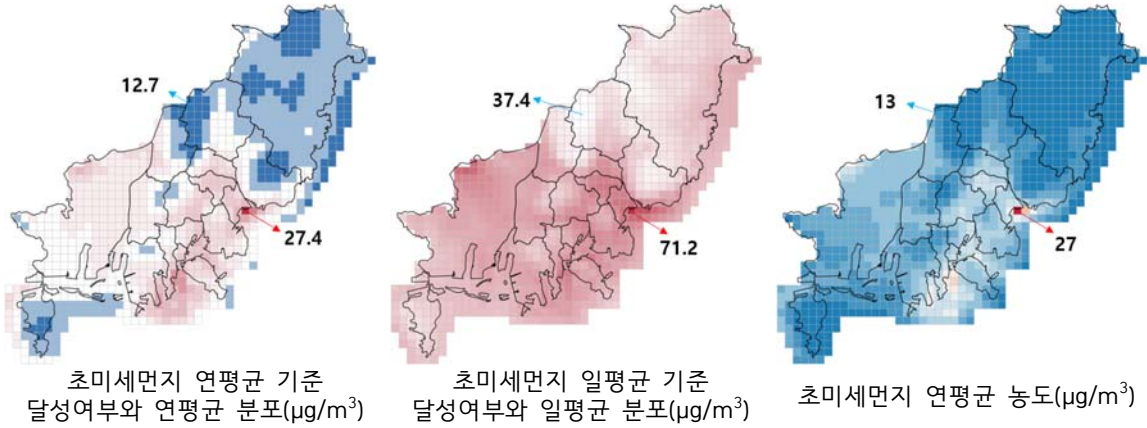


그림 5. 초미세먼지 환경기준 달성 여부

○ 주요 성분의 구성(재분석모델링)

- 부산권 전체 격자의 초미세먼지 평균은 $15.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이상 조대 입자의 평균이 $9.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 차지하여 미세먼지는 $25.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수준임.
- 초미세먼지의 구성성분 중 질산염이 25.5%로 가장 높았고 황산염과 암모늄염을 포함한 2차 생성물질이 65.4%, 직접 배출되는 미세입자가 17.9%를 차지함.

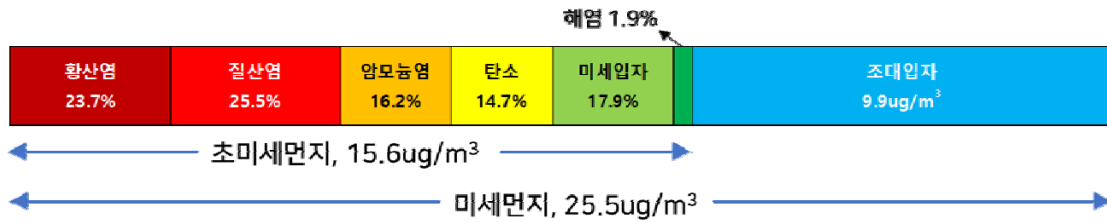


그림 6. 입자상물질의 구성비율 분포

- 초미세먼지 구성성분 중 황산염은 해안지역에서, 질산염은 도심지역에서 높은 비중을 차지하고 있으며, 미세입자는 초미세먼지 농도가 높은 지역인 항만지역에서 높은 비중을 차지하고 있음.
- 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 조대입자는 해안지역에서 농도가 높았으며 기장군과 북구, 금정구 내륙에서 낮았음.

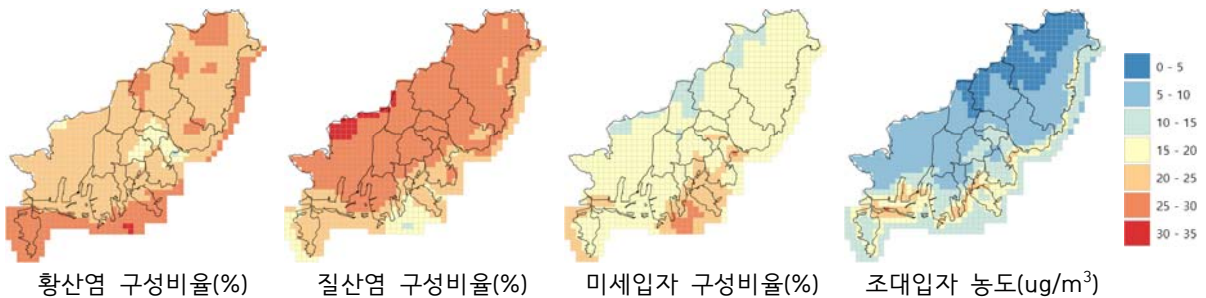


그림 7. 주요 구성 성분의 구성비율 분포

- 부산권 전체 격자의 오존 평균은 0.0323ppm이며 질소산화물 배출량 제어가 효과적인 NOX 제한조건의 오존이 54%를 차지하였고 부산권 전체 격자에서 비슷한 분포를 보였음.



그림 8. 오존의 구성비율 분포

- 오존 저감은 질소산화물의 제어가 다소 효과적이지만 휘발성유기화합물 제어와 크게 차이가 나지 않을 것으로 예상되어 전구물질의 전반적인 관리가 필요함.
- 질소산화물의 농도는 0.009-0.122ppm 수준이며 항만과 인접한 해안지역, 부산신항 관련 지역에서 농도가 높았음. 질소산화물의 농도분포는 2020년 기준 지역별 배출량 분포와 유사하여 배출원의 영향이 직접적으로 반영됨.
- 휘발성유기화합물 농도는 0.065-0.779ppm이며 도심과 공단이 있는 지역에서 높았음. 휘발성유기화합물의 지역별 배출량 분포와 유사하여 배출원의 영향이 직접적으로 반영됨.

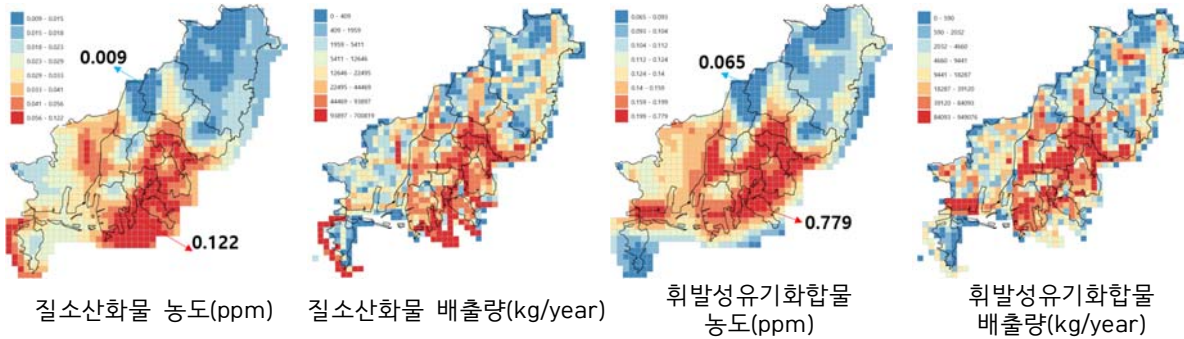


그림 9. 오존 전구물질의 지역별 농도와 배출량 분포

4. 활용방안

- 진단평가시스템 모델의 정확도는 전반적으로 분석자료로 활용 가능한 수준이나 일부 항목에서 편향성과 오차율이 다소 높음.
- 실시간 모델링의 예보 적중률은 오존 최대 92.94%, 미세먼지 최대 74.76%, 초미세먼지 최대 72.55% 수준이나, 기상요인과 실시간 농도추세 등을 반영하는 진단평가회의를 통하여 각각 93.67, 81.04, 73.04%로 개선되었음.
- 부산지역 전체 오존의 연평균은 0.0142-0.0439ppm 수준이며, 1시간 환경기준은 약 92%, 8시간 환경기준은 약 99% 지역에서 초과하고 있음.
- 미세먼지의 연평균은 16-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이며 대부분의 지역에서 환경기준을 만족하고 있음.
- 초미세먼지 연평균은 13-27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이며 약 45% 지역에서 환경기준을 만족하였으나 일평균 환경기준은 전 지점에서 초과하였음.
- 초미세먼지의 구성성분 중 질산염이 25.5%로 가장 높았고, 황산염과 암모늄염을 포함한 2차 생성물질이 65.4%, 직접 배출되는 미세입자가 17.9%를 차지함.
- 부산지역 평균적인 오존은 질소산화물 제한 조건 54%, 휘발성유기화합물 제한 조건 46%로 구성이 되어 전체 전구물질에 대한 전반적인 관리가 필요.

5. 기대효과

- 2024년 기준 모델입력 배출량은 최신화 완료(2024년 1월). 수치모델의 최신화를 위한 시스템 고도화 예산을 지속적으로 요청. 국외배출량, REAS, 2008 → 2015 / 국내배출량, CAPSS 2017 → 2020.
- 2차 오염물질(오존, 초미세먼지)의 기준초과는 부산의 전 지역에서 발생하고 있으므로 효과적인 개선을 위하여 구성비율을 고려한 전구물질 관리가 필요.
- 초미세먼지 평균적인 구성은 2차 생성물질이 약 65.4%로 높았지만 고농도 지역은 1차 배출되는 미세입자의 구성비율이 높음.
- 오존 저감을 위한 배출량 제어전략은 질소산화물과 휘발성유기화합물 간의 우선 순위에 크게 차이가 없으며 배출량이 높은 지역의 특성을 반영한 정책이 필요함.