

# 대기질 진단평가시스템 운영

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

## 1. 조사개요

- 조사기간 : 2024년 1월 ~ 12월
- 조사대상 : 진단평가시스템 구·군별 모델링 결과
- 조사항목 : 초미세먼지(PM-2.5), 미세먼지(PM-10), 오존(O<sub>3</sub>)

## 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	REAS	일본 국립환경연구소에서 개발된 아시아지역 대기오염물질 배출량, 2015년 기준자료 → SMOKE 입력
	CAPSS	환경부 국가미세먼지정보센터에서 생성되는 국내 대기오염물질 배출량, 2020년 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 eXtensions)	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

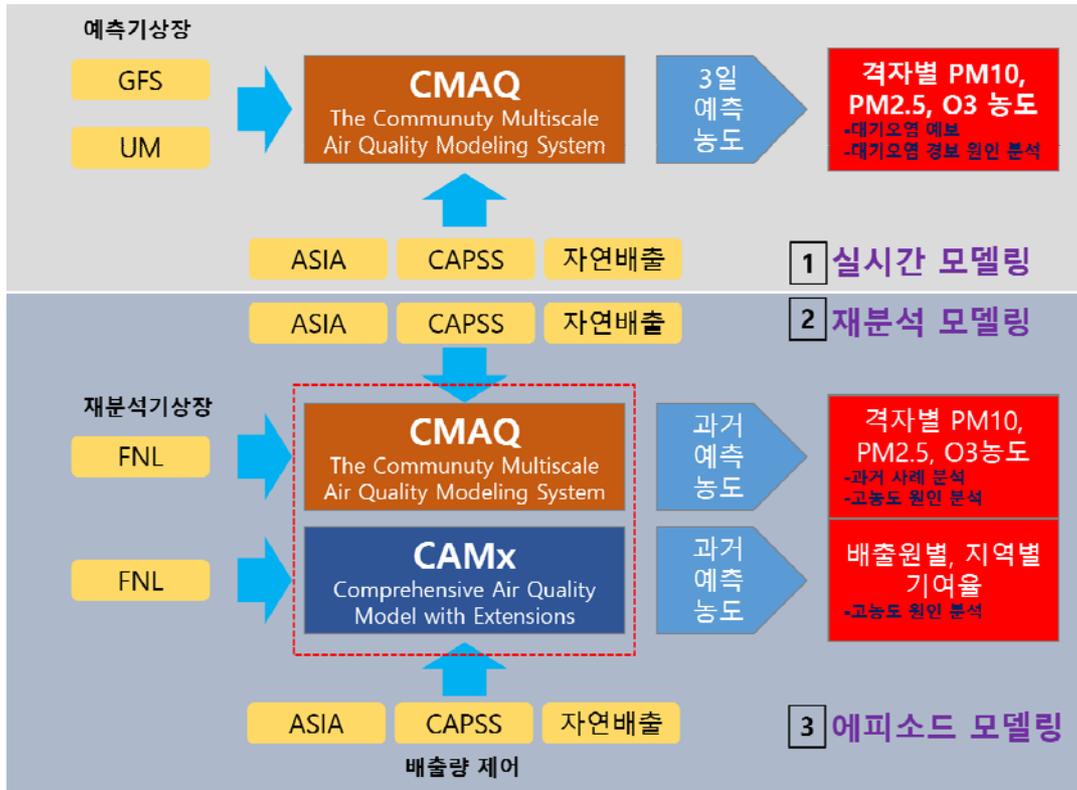


그림 1. 진단평가시스템 기능별 구조

○ 분석 대상지역

- 부산지역을 포함하는 1km×1km 격자체계(domain4)를 구성하기 위하여 동아시아부터 4개의 등지격자 체계를 구축하였으며(각 27, 9, 3, 1km 격자) 최종적으로 부산지역을 포함하는 859개 격자의 결과를 분석
- 모델의 정확도는 도시대기측정소 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 상관계수(r)로 평가

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

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

$$r(\text{correlation coefficient}) = \frac{\sum(o_i - \bar{o}) \times (a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum(o_i - \bar{o})^2 \times \sum(a_i - \bar{a})^2}}$$

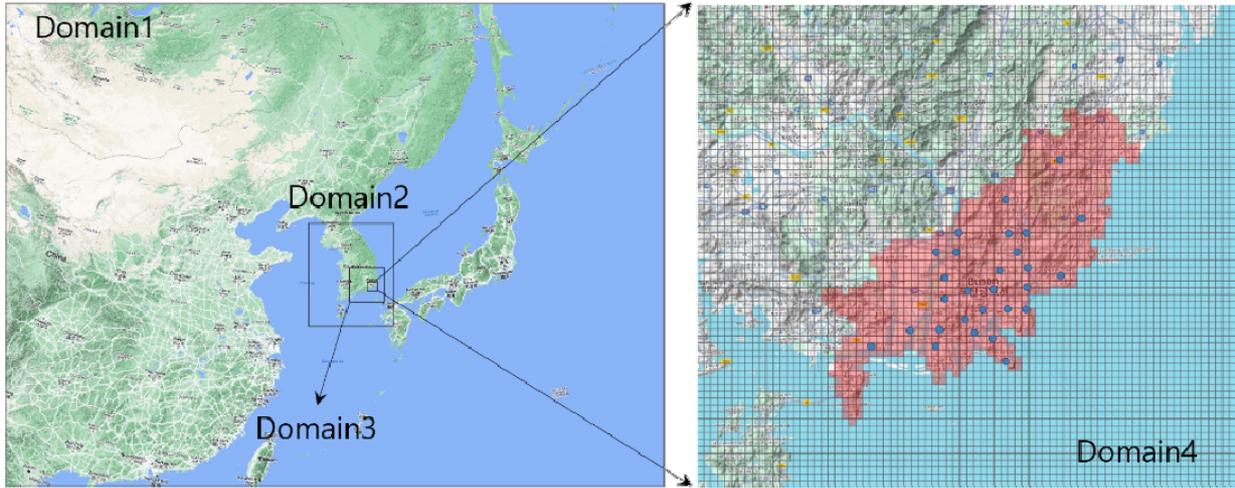


그림 2. 진단평가시스템 도메인 구조 및 분석 대상지역

### 3. 조사결과

#### ○ 모델별 정확도 평가

- 모델의 정확도는 전반적으로 국외 연구결과에서 제안되는 모델 정확도 기준에서 보통 이상 수준임
- 재분석 모델링의 초미세먼지 결과는 나머지 모델과 비교하여 상대적으로 편향성이 낮고, 관측값과의 상관성이 높음
- (초)미세먼지가 오존보다 정확도가 높으며 관측값을 과소모의하고, 오존은 과대모의 하는 경향이 있음
- 기상청 자료를 입력하는 UM은 오존 결과의 오차율(NME)이 크게 나타나고 있어 결과 활용과 모델개선에서 우선적인 검토가 필요함

표 2. 모델별 적합성 변수 계산 결과

		미세먼지			초미세먼지			오존				
		NMB(%)	NME(%)	r	NMB(%)	NME(%)	r	NMB(%)	NME(%)	r		
재분석 모델링	CMAQ	-3.16	33.11	0.64	-5.14	36.36	0.73	-4.15	22.9	0.6		
	CAMx	-22.39	38.31	0.61	3.79	37.91	0.71	1.36	24.58	0.52		
실시간 모델링	G	당일	-18.34	34.59	0.6	-13.79	36.9	0.71	7.52	22.54	0.63	
		F	내일	-20.34	36.45	0.57	-14.88	39.11	0.69	8.67	22.79	0.64
		S	모레	-22.92	36.93	0.59	-17.2	39.33	0.69	9.13	22.87	0.63
	U	당일	-17.79	33.49	0.62	-12.61	35.38	0.74	13.41	27.28	0.57	
		M	내일	-18.9	34.44	0.62	-12.48	36.7	0.72	13.24	26.53	0.59
		모레	-20.09	37.11	0.57	-13.01	39.78	0.67	13.85	27.42	0.57	
참고치*	우수	<±10	<35	>0.7	<±10	<35	>0.7	<±5	<15	>0.75		
	보통	<±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.

○ 예측농도 등급 적중률 평가(실시간 모델링)

- 대기질 진단평가는 예측 모델링의 결과와 국내외 실시간 농도 패턴, 기상예보 등을 종합하여 3일 후까지의 일별 예측농도 등급(' 좋음'- '매우나쁨')을 대기오염 예보권역별로 구분하여 결정함
- 실시간 모델링만의 예보 적중률은 초미세먼지 75.7%, 미세먼지 82.6%, 오존 90.8% 이상의 농도등급 적중률을 보이고 있음
- 실시간 모델링 결과를 바탕으로 매일 수행되는 진단평가회의는 고농도 (초)미세먼지의 정확도 개선 효과 (미세먼지 나쁨 0%→100%, 초미세먼지 나쁨 25%→56.5%)가 있음
- 이는 모델에서 반영되지 않는 실시간 농도추세나 황사와 같은 장거리 이동 패턴 등을 고려하여 예측 등급을 결정하기 때문임
- 따라서, 예측 농도 등급 결정 시 고농도가 예상될 경우, 국내외 실시간 농도 변화 패턴의 반영 비율을 높여서 판단하여야 함

표 3. 대기오염예보 적중률 평가(%)

구분	미세먼지					초미세먼지					오존					
	매우 나쁨	나쁨	보통	좋음	전체	매우 나쁨	나쁨	보통	좋음	전체	매우 나쁨	나쁨	보통	좋음	전체	
진단회의	33.3	100	63.4	93.6	86.7	0	56.5	61.2	92.0	82.0	0	56.8	97.2	0	93.1	
당일	GFS	0	0	34.5	98.2	83.7	0	25.0	37.6	95.9	76.3	0	31.8	99.4	0	92.9
	UM	0	0	33.6	97.5	83.0	0	16.7	43.6	91.9	75.8	0	51.6	95.6	0	91.1
내일	GFS	0	0	32.0	97.6	82.6	0	12.5	37.0	95.7	76.3	0	39.4	98.9	0	93.2
	UM	0	0	34.3	97.4	83.0	0	25.0	39.9	93.4	75.9	0	41.4	97.1	0	91.6
모래	GFS	0	0	30.6	98.5	83.2	0	20.8	37.1	95.1	76.2	0	27.2	98.7	11.1	91.9
	UM	0	0	32.8	97.4	82.8	0	20.8	41.2	92.5	75.7	0	38.3	96.7	0	90.8

○ 물질별 공간분포 분석(재분석 모델링)

- (초)미세먼지와 오존의 전체 1km 격자별 연간 평균 농도를 평가하여 측정소가 없는 지역의 농도 수준을 평가함
- 미세먼지 연평균(도시대기측정소)은 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 지점별 학장동 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 청룡동, 청학동 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준임
- 모델링결과 측정소가 없는 지역이 포함된 전체 격자의 미세먼지 평균 농도는 17.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 도시대기 평균 보다 낮게 평가되었으며 항만이 있는 해안지역을 중심으로 높게 분포함
- 초미세먼지의 연평균(도시대기)은 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 지점별 녹산동 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 영도구, 대연동 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준임
- 모델링결과 측정소가 없는 지역이 포함된 전체 격자의 초미세먼지 평균 농도는 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 도시대기 평균 보다 낮게 평가되었으며 기장군, 금정구, 해운대구가 상대적으로 낮고 도심과 항만이 있는 해안지역을 중심으로 높게 분포함
- 오존 연평균(도시대기측정소)은 0.0334 ppm, 지점별 용수리 0.0413 ppm, 학장동 0.0276 ppm 수준임
- 모델링결과 측정소가 없는 지역이 포함된 전체 격자의 오존 평균 농도는 0.0353 ppm으로 도시대기 평균보다 높았으며 기장군, 금정구, 북구 외곽지역을 중심으로 높았음
- 종합적으로 (초)미세먼지는 배출량이 많은 항만지역 및 구도심을 중심으로 높았으며, 오존은 기장군과 북쪽 외곽지역에서 높음을 알 수 있음

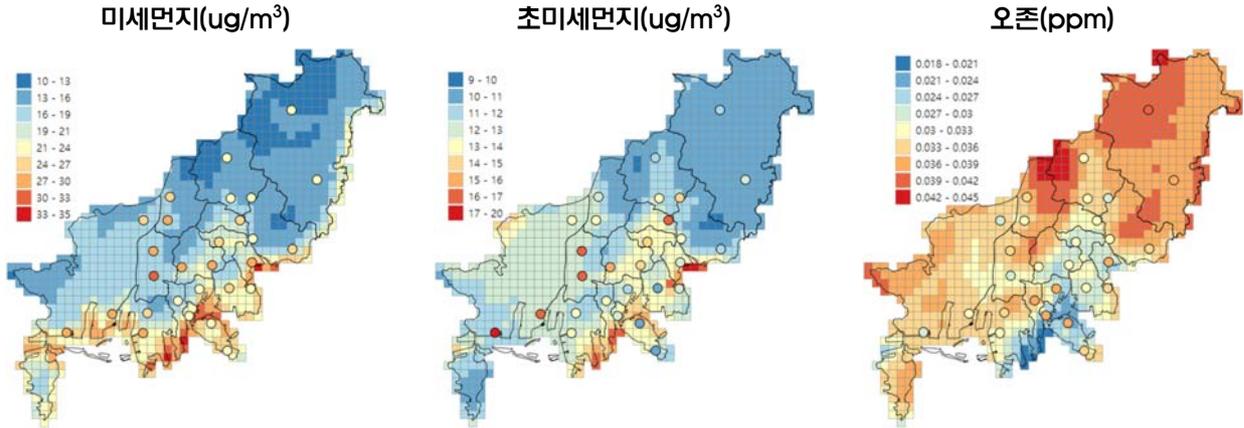


그림 3. 2024년 평균 격자별 모델링결과 및 측정소별 평균 농도 분포

○ 구성성분의 분포(재분석 모델링)

- 초미세먼지 평균은  $11.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 입경  $2.5 \mu\text{m}$  이상 조대 입자의 평균이  $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 차지하여 입자상물질 중 초미세먼지의 비율은 0.67 수준임
- 초미세먼지의 주요 구성성분은 2차 생성물인 질산염(27.1%)과 황산염(20.3%), 직접 배출되는 미세입자(17.8%)가 65.2%를 구성함

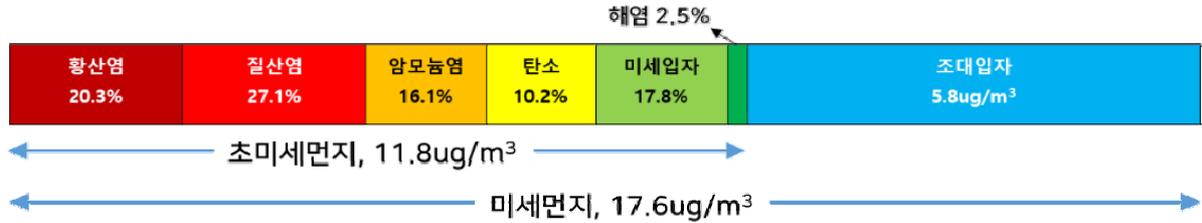


그림 4. 입자상물질의 주요 구성성분의 구성비율 분포

- 오존 평균은 0.0353 ppm이며, 질소산화물이 제한조건이 되는 오존의 비율(57.4%)이 휘발성유기화합물 보다 높게 나타나 질소산화물 관리가 효과적으로 판단됨



그림 5. 오존의 구성비율 분포

4. 활용방안

- 모델링 자료를 통해 부산지역의 측정소 미설치 지역에 대한 대기오염물질 농도 제공
- 재분석 모델링을 통해 고농도 원인 분석 등에 활용

5. 기대효과

- 대기진단을 통해 대기질 예측 자료를 제공하여 고농도 대기오염물질 발생 시 선제적 대응 기대
- 배출원 분석 및 배출량 제어를 통한 특정 사례에 대한 정책 효과를 검정