

- 2021년도 연구조사사업 최종보고서 -

과학적인 대기질 진단체계 구축

2022. 1.



인천광역시보건환경연구원

<https://www.incheon.go.kr/ecopia/index>

대 기 평 가 과

인천지역 대기질 예측모델 결과 분석

여인환*, 이선우, 우정석, 이진숙, 최종규, 허점건, 곽완순, 권문주
인천광역시보건환경연구원 대기평가과

Analysis of the Air Quality Prediction Model in Incheon

In-Hwan Yeo*, Seon-Woo Lee, Jeong-Seok Woo, Jong-Kyu Choi, Jin-Sook Lee,
Jeom-Geon Heo, Wan-Soon Kwack, Mun-Ju Kwon

Division of Air Quality Assessment,
Incheon Research Institute of Public Health and Environment

ABSTRACT

This study conducted a 1km resolution Community Multiscale Air Quality Model(CMAQ) and Comprehensive Air Quality Model with eXtensions(CAMx) air quality modeling based on United Model(UM), National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System (NCEP/GFS) and National Centers for Environmental Prediction/Final Analysis(NCEP/FNL) weather numerical forecasts in Incheon, and analyzed the results through statistical analysis to lay the foundation for scientific analysis of the regional air quality.

As a result of the analysis, the annual Index of Agreement(IOA) of pollutants was shown in the order of O₃ (0.79) > PM-2.5 (0.64) > PM-10 (0.59). As a result of the analysis by period, IOA was high when GFS were used in most periods, except August to October. By region, the coincidence index of the southeastern, western, and Yeongjong-yeongheung regions was high, and IOA of the ganghwa regions was the lowest. IOA was also high when using GFS in Incheon and all regions.

In the case of high concentration cases due to internal congestion after external inflow, IOA was high when GFS were used, and in the case of the low concentration cases in summer such as rainy season and local rainfall, IOA was high when UM were used. When yellow dust flowed in, the PM-10 IOA value fell significantly, and when yellow dust at the yellow dust level flowed in, the PM-2.5 IOA value also fell. Contamination contribution rates by region were shown in the order of overseas, Seoul, Gyeonggi, Incheon, and other countries in both PM-2.5 and PM-10.

Key words : UM, NCEP/GFS, NCEP/FNL, CMAQ, CAMx, Incheon

I. 서 론

미세먼지(particulate matter, PM)는 호흡기계 질환의 유발, 정밀기기의 불량률 증가, 교통시스템 교란 등 사회 전반에 걸쳐 악영향을 끼치는 주요 대기오염물질로 세계보건기구(WHO) 국제암연구소가 지정한 1급 발암물질에 속하는 물질이다. 미세먼지는 크기에 따라 PM-10, PM-2.5 으로 구분하며 PM-10은 직경이 10 μm 이하인 미세먼지, PM-2.5는 직경이 2.5 μm 이하인 미세먼지를 통칭한다. 미세먼지의 대표적인 자연발생 사례로는 황사가 있으며, 인위적 원인으로서는 화석연료, 자동차, 소각로 등과 같은 오염원에서 직접 배출되는 1차 에어로졸(Primary aerosol)과 대기 중의 질소산화물, 황산화물, 암모니아, VOC의 화학반응에 의해 생성된 2차 에어로졸(secondary aerosol)이 있다.

산업활동 증가 및 대기질에 대한 국민적 관심의 증대에 따라 2013년 초미세먼지가 대기환경기준에 추가되었으며, 2014년도에는 정부에서 예보제를 정식으로 시행하는 등 시민건강에 악영향을 끼치는 오염물질로 대두되었다. 2019년 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 시행 이후로 우리나라는 미세먼지 저감을 위한 다양한 정책을 지속적으로 실시함과 동시에 시민들에게 미세먼지에 대한 예보를 지속적으로 실시하고 있다. 현재 대기미세먼지 예보의 대표적인 사례로 국립환경과학원에서 에어코리아를 통해 다양한 모델링 기법을 활용해 3 km 해상도 수준의 예보결과를 공개하고 있으며, 예측이미지 및 광역시·도에 대한 미세먼지, 오존의 오염등급 예측 결과를 좋음, 보통, 나쁨, 매우나쁨 총 4개등급으로 구분해 5시, 11시, 17시 및 23시에 걸쳐 총 4회 시행하고 있다.

그러나 우리나라와 같이 인구밀집도가 높은 나라에서는 3 km 해상도의 예보를 통한 미세먼지 예측 시 한 개 격자인 내에서도 행정구역의 변동, 미세먼지가 건강 취약계층에 미치는 영향이 크게 달라질 수 있어 고해상도의 자료가 필수적이다¹⁾. 미세먼지는 도로, 사업장, 자연발생 등 다양한 경로를 통해 생성되고 있으며 지형, 풍향, 습도, 온도 등 기후의 영향을 크게 받기 때문에 미세먼지, 오존 등의 고해상도 대기질 예보 시에는 입력 자료들과 더불어 수치해석 방법 등에서 오차가 발생할 수 있으며, 매우 다양한 인자들이 대기질 모델의 결과에 영향을 주는 불확도 유발 인자로 작용하게 된다^{2),3)}.

본 연구에서는 지역 대기질의 과학적 진단을 위해 인천광역시를 대상으로 United Model(UM), National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System(NCEP/GFS) 두가지 기상예보자료를 기초로 1 km 수준의 고해상도 대기질 예측 모델링을 수행하였으며, 실측 값과 모델 예측 값의 비교를 위해 통계분석을 수행했다. 초기 기상장 차이에 의한 모델결과 분석을 수행하였으며 권역별 예측값이 높은 모델을 선정하고 주요 사례를 일기도, 역궤적을 통해 분석하고자 했다. 또한 National Centers for Environmental Prediction/Final Analysis(NCEP/FNL) 기상자료를 이용해 기여도분석을 수행해 지역별 기여율을 산정했다.

II. 연구내용 및 방법

2.1. 연구대상

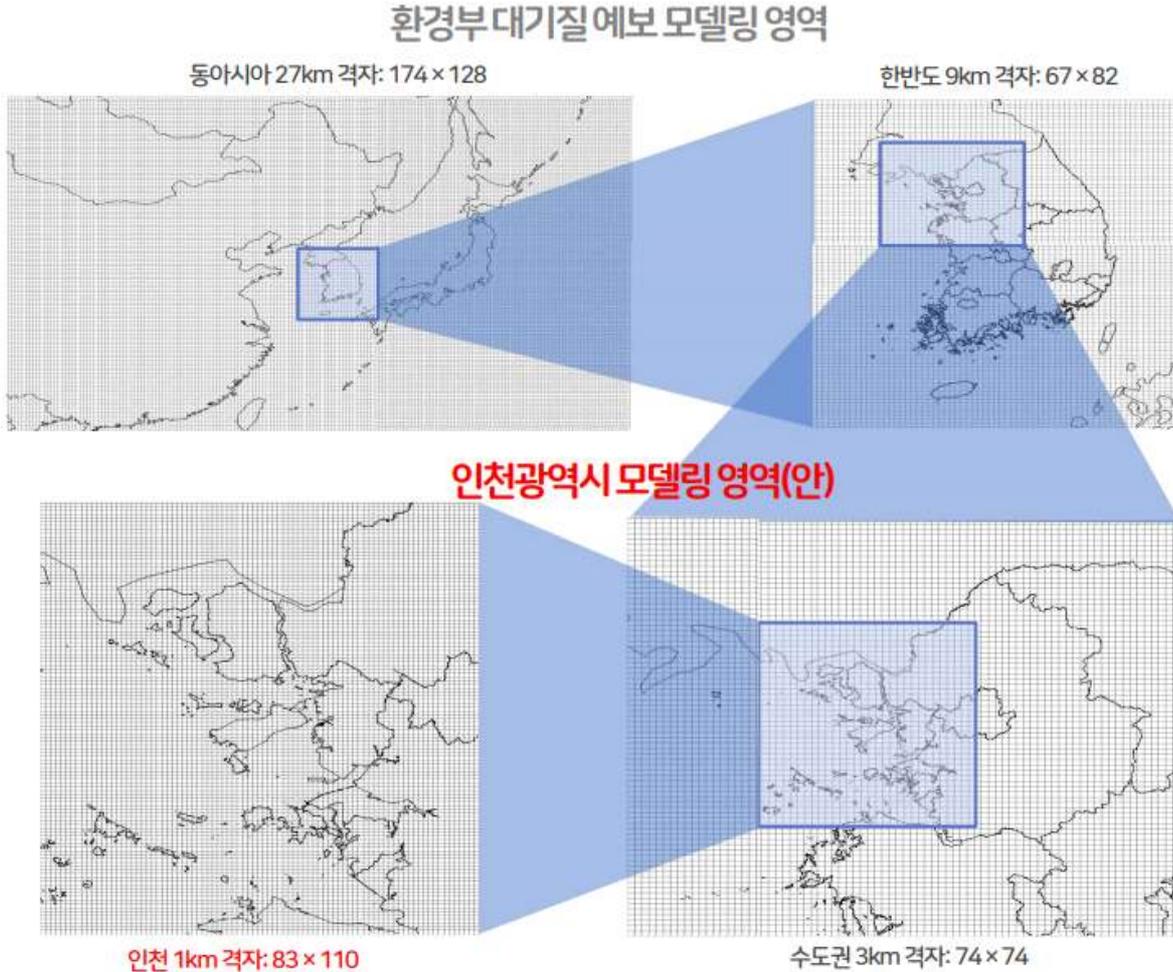


Fig. 1. Model Domain.

본 연구의 모델링 영역은 총 4가지 도메인을 바탕으로 구성하였다(Fig. 1). 첫 번째 도메인은 측정소 2개 지점을 선정하였다. 첫 번째 도메인(D1)은 중점 북위 38.0도, 동경 126.0도를 중심으로 174×128 개의 1개 격자의 수평해상도가 27 km 해상도 수준으로 동아시아 영역을 구성하였으며, 다음으로 연차적인 등지격자(nesting)로 67×82개의 9 km 격자간격의 한반도 영역(D2)을, 그리고 수도권을 중심으로 74×74개의 3 km 격자간격의 수도권 영역(D3)으로 설정하고 마지막으로 83×110 개의 1km 해상도의 인천 영역(D4)을 설정하였다.

2.2. 모델링 설계

2.2.1. 수치예보자료

기상 모델링에 입력하기 위한 전구 기상예보자료로 기상청 수치예보자료(UM)와 NCEP/GFS를 사용하였으며, 기여도분석을 위한 과거기간 재분석 예보모델 자료로 NCEP/FNL를 사용하였다.

UM모델은 통합모델로 영국기상청에서 수치모델 시스템으로 사용되어 왔으며 현재 우리나라 기상 예보모델로 사용되고 있는 수치예보 자료이다. NCEP/GFS 및 NCEP/FNL 자료는 일반적으로 널리 사용되는 수치예보자료로써 NCEP에서 제공하며 두 자료는 동일한 모델링 시스템 및 자료동화 기법을 통해 생산된다. 다만, FNL자료의 경우 재분석 자료로 수치예보 이후 관측 값을 포함시켜 GFS 대비 약 10 % 더 많은 관측 자료를 통해 보정된 자료이기 때문에 GFS자료 생산 이후 수 일후에 생산되는 자료로 예보보다는 실측이후 기존자료를 활용한 대기질 모의분석에 주로 사용된다.

2.2.2. 기상모델

수치예보 자료를 바탕으로 한 중규모 기상모델로는 WRF(Weather Research and Forecasting Model)을 활용했다. WRF는 대기 연구와 예측을 위해 설계된 중규모 수치기상 예측 시스템으로 미국 국립대기연구센터, 미국 국립환경예측센터, 예보시스템연구소, 공군기상국, 해군연구소, 호클라호마 대학, 연방항공청 등 여러 기관의 협력으로 개발되었다. Fig 2는 WRF 기상모델링 전과정을 모식화한 것으로 UM, GFS, FNL 전구 기상예보자료를 바탕으로 국토지리정보원 지형자료(100m 해상도) 및 환경부 중분류 토지피복자료(100m 해상도)를 통해 WRF 지형자료를 작성하고 WRF 기상모델링을 통해 온도, 습도, 기압, 풍속 등의 상세 기상예측을 수행했다.

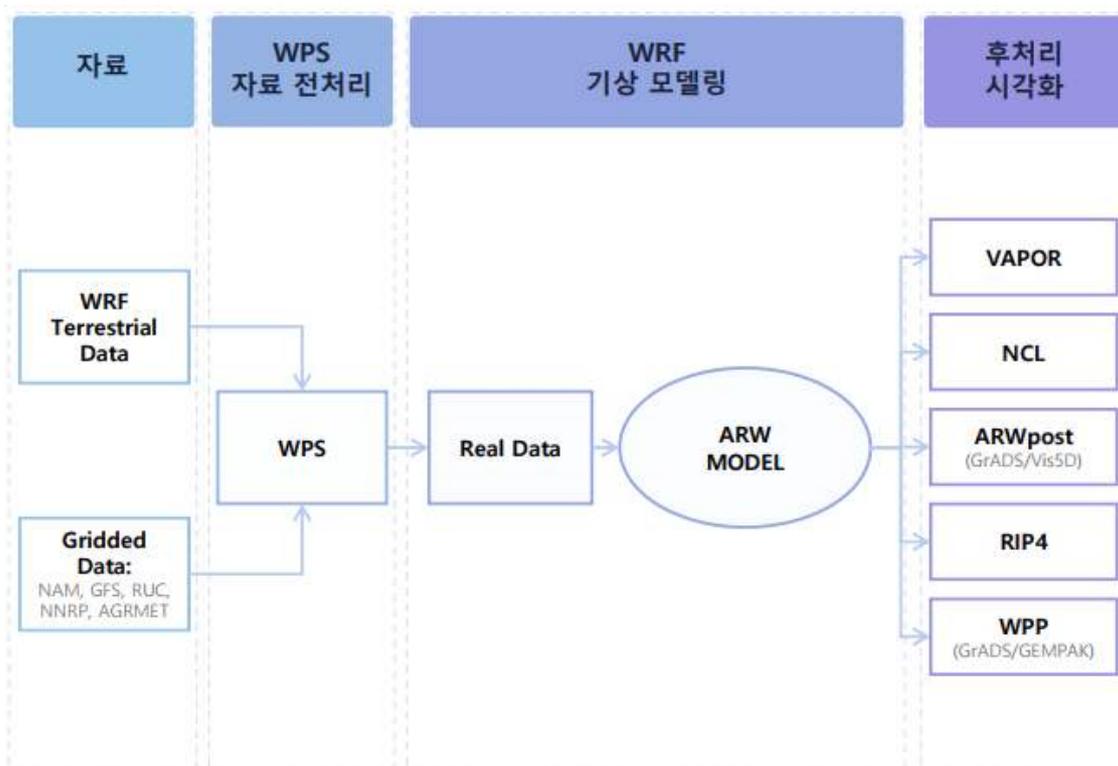


Fig. 2. Schematic diagram of the procedure in WRF modeling system.

2.2.3. 배출량 산정모델

배출량 입력모델로는 The Sparse Matrix Operator Kernel Emissions(SMOKE) 모델을 활용했다. SMOKE는 미국의 Environmental Modeling Center(EMC)에서 개발된 것으로 모델링에 필요한 배출량을 고효율로 계산할 수 있도록 Matrix 구조체로 생성하는 배출량 모델링 시스템이다. 다양한 배출량 데이터를 세부격자별, 시간별, 화학종별로 구분해 상세배출량을 산정한다. 배출량 자료로

중국 Tsinghua University에서 산정한 0.25도 격자의 중국 Multi-resolution Emission Inventory for China(MEIC)배출량, 일본 국립환경연구소에서 산정한 0.25도 격자의 아시아 REAS배출량, 국립환경과학원 2015년 Clean Air Policy Support System(CAPSS) 국내배출량을 활용했다.

2.2.4. 화학수송모델

기상예보자료를 바탕으로 한 WRF모델 결과와 배출량 입력자료를 기반으로한 SMOKE모델 결과를 입력자료로 화학수송모델링을 수행했으며 모델로는 Community Multiscale Air Quality Model(CMAQ)을 활용했다. CMAQ은 미국 EPA서 개발한 대기질 모델 중에서 국내에서 자주 이용되는 3차원 광화학 오일러리안 모델로, 대기 중 오염농도, 침적과 같은 물리적 과정과 광화학 반응 등 물리 화학적 반응을 포함하는 모델로 알려져 있다(Fig 3)³⁾⁴⁾.

격자농도 예측모델과 별개로 FNL 기상예보자료를 바탕으로 CAMx 화학수송모델 시 Particulate Source Apportionment Technology(PSAT) 기법을 이용해 기여도 분석을 수행하여 오염물질별, 지역별 기여도를 산정했다. CAMx는 ENVIRON사에서 대기질 모사를 위해 개발한 광화학 격자 모델로 지역단위 대기오염 예측을 위해 개발된 모델로 CMAQ과 더불어 화학수송모델링에 대표적으로 사용되며 동일한 기상장을 바탕으로 대기질 모사 시에 대체로 유사한 모의성능을 보이는 것으로 알려져 있다. PSAT은 tagged species를 이용하는 방법으로 모델격자로 대상 지역을 구분하고, 대상지역 배출량에 배출원별 자료를 입력해 모델결과 산출 시 배출원을 파악하는 기여도 분석에 주로 사용되는 기법이다.

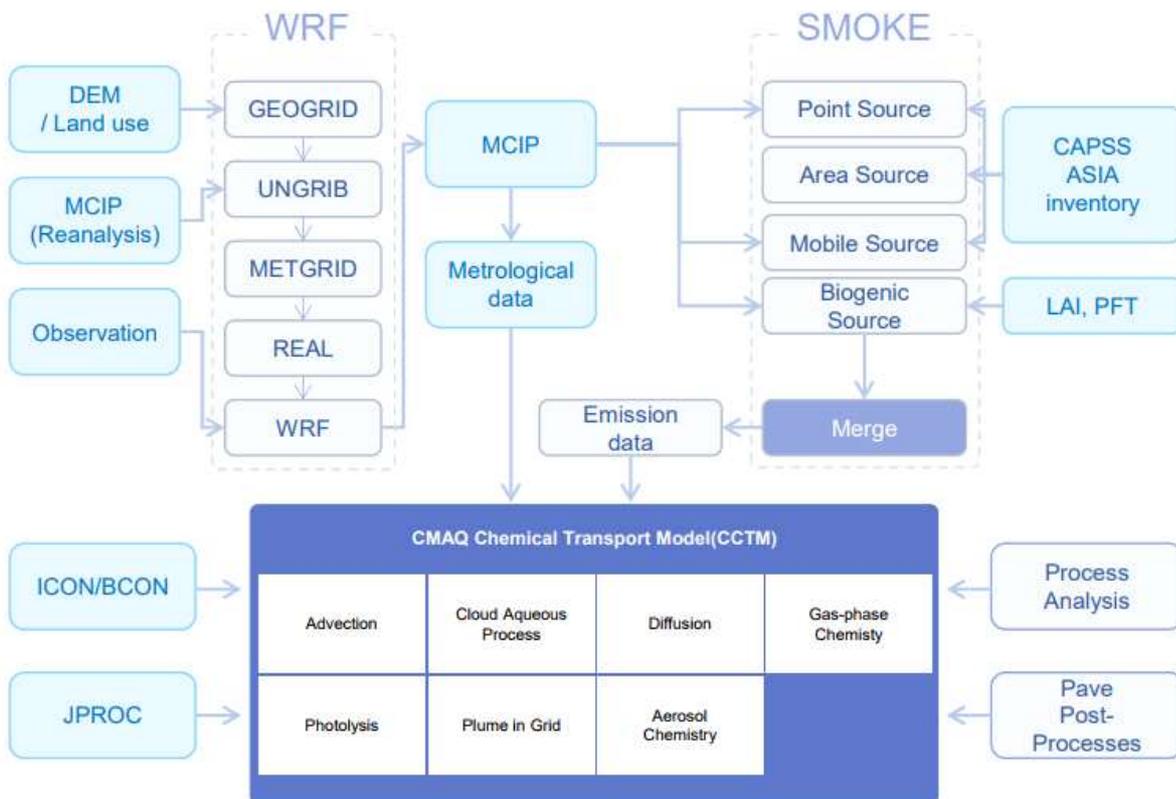


Fig. 3. Schematic diagram of the procedure in CMAQ modeling system.

2.2.5. 모델링 기간

Table 1은 CMAQ 및 CAMx모델 가동을 위한 모델링 일정 및 모델링 과정을 도식화 했으며, GFS-CMAQ, UM-CMAQ, FNL-CAMx 각 3가지 모델을 이용해 2021년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 365일간 일 1회 모델링을 수행했으며, 오후 12시부터 24시까지 기상예보자료 수신, 기상 모델링 및 화학수송모델 작업을 수행해 익일 새벽에 후처리를 통해 매일 결과를 확인했다.

Table. 1. Time set of daily forecasting simulation

구 분	당 일			익 일
GFS-CMAQ UM-CMAQ	<12:00>	<18:30>	<21:00>	<24:00>
	기상자료 수신 · GFS, UM	WRF 가동 · GFS-WRF · UM-WRF	CMAQ 가동 · GFS-CMAQ · UM-CMAQ	후처리 · DB 저장 · 결과 이미지 생성
FNL-CAMx	<14:00>	<15:30>	<17:00>	<24:00>
	기상자료 수신 · FNL	WRF 가동 · FNL-WRF	CAMx 가동 · FNL-CAMx-PSAT	후처리 · DB 저장 · 결과 이미지 생성

2.3. 모델 일치도 지수

관측값과 일별 모델링 결과의 차이를 정량적으로 판단하기 위하여 통계값을 비교하였다. 본 연구에서는 식(1);일치도지수(Index of Agreement:IOA)와 식(2);평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error:RMSE), 식(3);평균편차(Mean Bias:MBIAS)를 사용했으며, 각 식에서 n은 자료의 개수를 말하며 M은 모델값, O는 관측값을 말한다. MBIAS와 RMSE는 관측과 모델 값의 편향과 오차를 나타내는 값으로 0에 가까울수록 이상적인 값이며, IOA는 모델결과와 측정값의 일치도 정도를 나타내는 수치로 0에서 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 일치도가 높은 값이다.

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \right] \quad (1)$$

$$MBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 모델링 수행결과

Table 2는 2021년 연간 수행한 초기 기상장 변화에 따른 화학수송모델 결과의 통계값이다. 오염물질별 IOA 비교 시 O₃, PM-2.5, PM-10 순으로 O₃가 평균 0.79로 가장 높은 IOA를 보였으며 MBIAS는 0.002에서 0.005 수준으로 실측치보다 모델결과 값이 오존농도를 과대 모의 하는 것으로 나타났다. PM-2.5와 PM-10의 IOA는 각각 0.64, 0.59로 O₃대비 낮게 나타났으며 PM-10이 PM-2.5 대비 소폭 낮게 나타났다. Table 3은 풍속, 온도에 관한 모델링 수행결과 값으로 온도의 경우 IOA가 0.91 수준으로 실측값과 측정값의 차이가 적었으며, 실측값대비 모델링 예측값이 -1.0 ~ -1.3 °C 수준으로 과소 모의 하였다. 풍속의 경우 IOA가 0.76 수준이었고, 실제 측정값 대비 약 1 m/s 가량 예측 값이 과대 모의 하였다.

미세먼지가 O₃ 대비 IOA값이 낮게 나타나는 이유로 미세먼지의 농도변화는 물리적 기상인자인 풍속에 영향을 크게 받는 편으로 수평·수직확산에 의한 내부축적 여부, 월경성 오염에 의한 외부 유입 발생 시 유입속도 및 외부오염물질의 지역내 체류정도 등에 오염농도가 결정될 수 있다⁵⁾. O₃은 대기정체 및 풍속에 의한 영향을 받을 수 있으나, 오존 생성 메커니즘의 경우 기본적으로 여름철 고온 하에서 강한 일사량, 대기 중 VOCs 및 NO₂와 같은 특정 오염물질 등에 영향을 크게 받기 때문에 풍속의 영향이 상대적으로 줄어들게 된다. 기상모델링 결과 온도대비 풍속의 IOA가 낮게 나타났기 때문에 대기확산의 영향을 크게 받는 미세먼지의 IOA값이 낮게 나타난 것으로 사료된다.

기상수치예보 입력자료인 GFS와 UM을 비교하면, 모든 오염물질에서 GFS자료를 활용할 때 예측률이 더 높게 나타났으며, UM자료를 활용할 때 대비 0.02에서 최대 0.05 수준의 IOA 값이 차이를 보였다. 다만 개별권역이나 월별 기상조건에 따라서 일부권역이나 특정상황에서는 UM자료를 활용할 때 더욱 높은 예측률을 보일 것으로 판단된다.

Table. 2. Time set of daily forecasting simulation

Item		IOA	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm)	MBIAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm)	Actual Average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm)	Model Average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm)
PM-2.5	GFS	0.65	17.1	3.4	20.4	23.5
	UM	0.63	16.2	0.9		21.4
PM-10	GFS	0.60	43.8	-5.7	39.1	32.9
	UM	0.57	45.0	-9.3		30.1
O ₃	GFS	0.82	0.014	0.002	0.031	0.034
	UM	0.77	0.016	0.005		0.036

Table. 3. Time set of daily forecasting simulation

Item		IOA	RMSE	MBIAS	Actual Average	Model Average
Wind speed	GFS	0.74	1.9 m/s	1.0 m/s	2.9 m/s	3.8 m/s
	UM	0.71	1.9 m/s	1.0 m/s		3.9 m/s
Temperature	GFS	0.92	2.3 °C	-1.3 °C	13.4 °C	12.0 °C
	UM	0.90	2.6 °C	-1.0 °C		12.1 °C

3.2. 실측치 및 예측치 비교

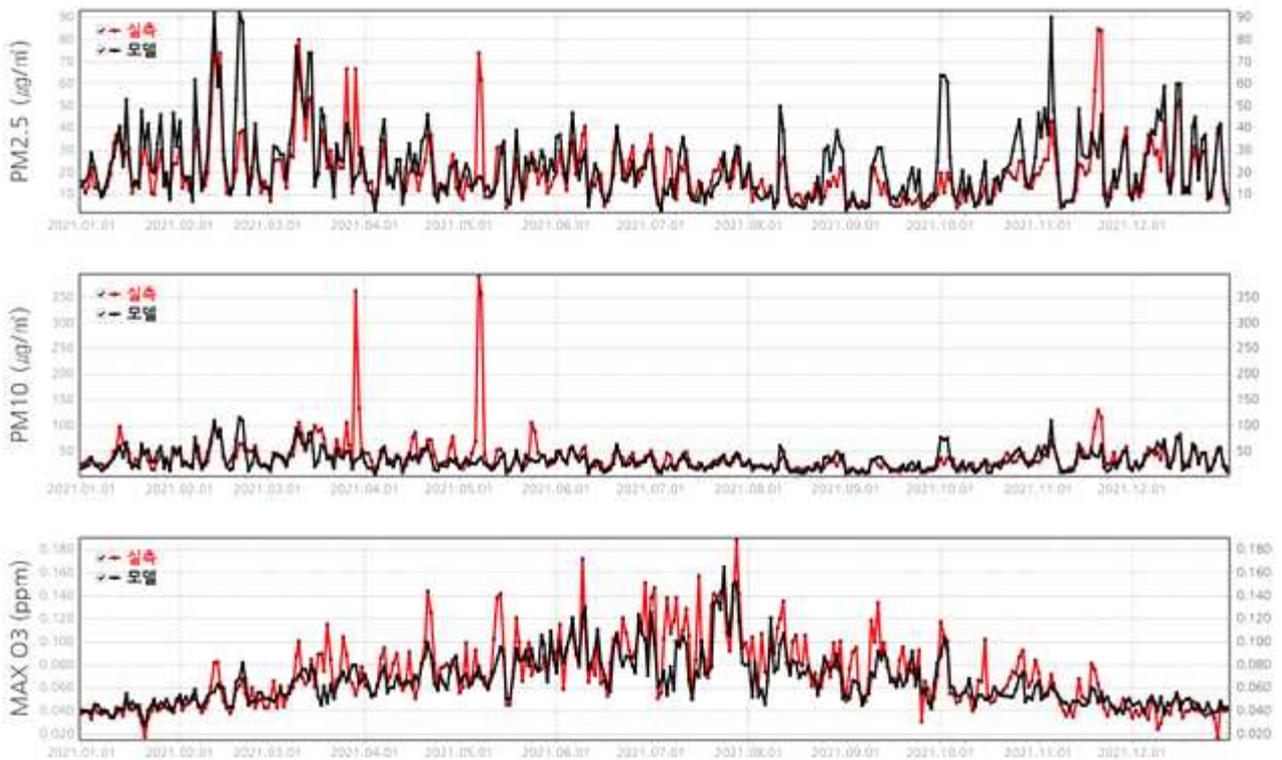


Fig. 4. GFS-CMAQ vs Measured Value in 2021.

2021년 1월부터 12월까지 오염물질별 실측치와 모델 예측치를 비교해보면(Fig 4, 5), UM 및 GFS 기상장 모두 실측치와 유사한 경향성을 나타냈다. 미세먼지의 경우, 예측치와 실측치와 유사한 경향성을 보이지만 월경성 오염물질에 의한 대표적인 고농도 사례인 황사유입의 경우 PM-2.5 및 PM-10에서 실측치가 예측치 대비 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 인천지역의 2021년 황사 관측일은 총 12일로 1월 2일을 제외하면 3월에서 5월까지 각각 4일, 2일, 4일로 월경성 유입이 잦았고, 3월 29일 ~ 30일, 5월 7일 ~ 8일까지 4일에 걸쳐 황사경보가 발령되는 등 외부유입에 의한 고농도 사례를 확인할 수 있다. 특히 황사경보가 발령된 3월말과 5월초를 살펴보면 일반적인 황사의 경우 PM-10이 증가할 때 PM-2.5 농도는 큰 변화가 없는 반면, 2021년 실측치에서는 PM-10의 일평균 농도가 $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준까지 상승해 PM-2.5에도 영향을 끼친 것으로 사료된다.

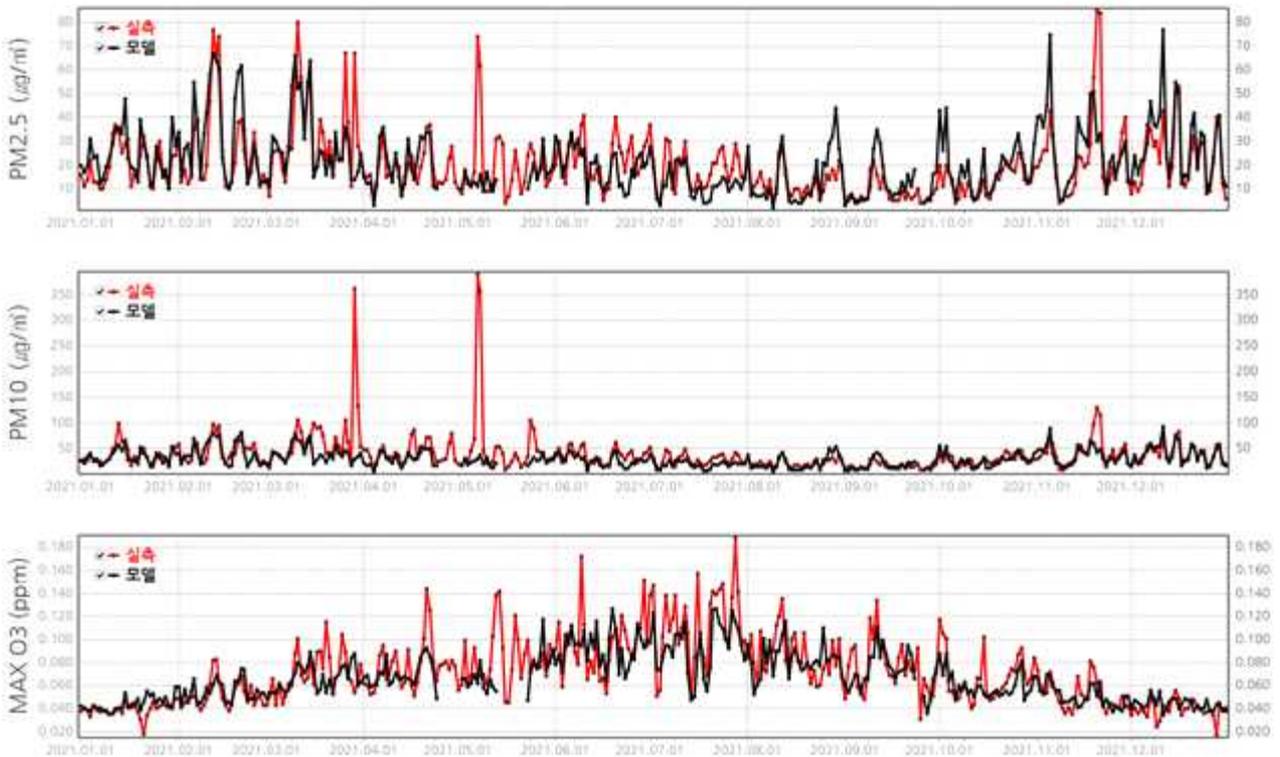


Fig. 5. UM-CMAQ vs Measured Value in 2021.

3.3. 월별 IOA 비교



Fig. 6. Monthly IOA of PM-2.5.



Fig. 7. Monthly IOA of PM-10.



Fig. 8. Monthly IOA of O₃.

Fig 6 ~ 8은 2021년 1월부터 12월까지 기상수치예보 변화에 따른 미세먼지의 IOA 값을 나타낸 것으로 3월과 5월을 제외하면 미세먼지 및 오존이 유사한 예측률을 보였다. 3월, 5월의 경우 황사 유입에 따른 월경성 고농도 사례 발생 시에 배출량 모델인 SMOKE에 황사배출량이 포함되어 있지 않기 때문에 황사유입이 강하고 영향이 클수록 모델링 예측 값이 실측값보다 낮아지게 된다. 따라서 황사가 잦았던 3월부터 5월까지 PM-10의 IOA 값이 더욱 낮아졌으며, 상대적으로 황사의 영향이 적은 PM-2.5의 경우 3, 4월에는 IOA 값에 큰 영향을 받지 않은 것으로 사료된다. 다만 5월의 경우 황사경보가 발령되고 그 지속시간도 길었기 때문에 PM-2.5에도 영향을 끼쳐 5월은 PM-2.5 IOA 값도 낮아진 것을 확인할 수 있다.

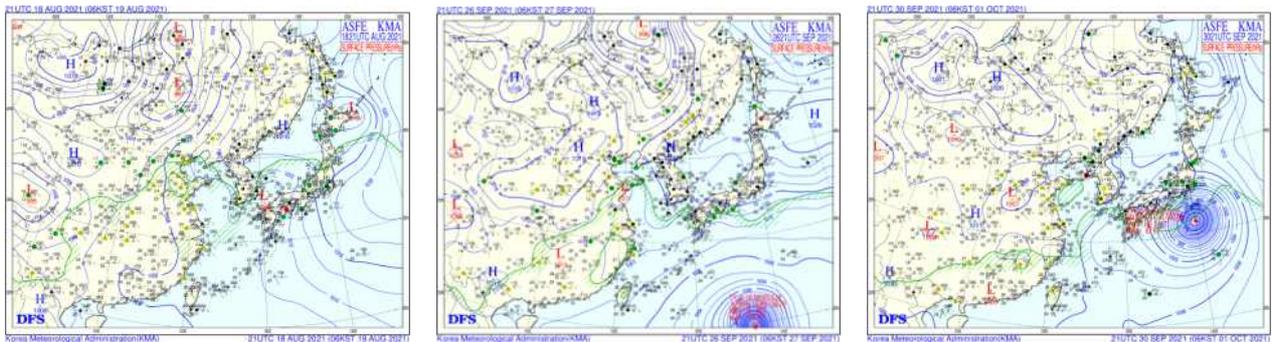


Fig. 9. Weather map of August to September.

GFS와 UM 기상자료 변화에 따라 IOA 값에 차이를 나타내며, 8월, 9월, 10월을 제외하면 GFS 수치예보를 이용한 화학수송 모델 결과가 UM 수치예보를 이용할 때 대비 더 높거나 유사한 IOA 값을 보였다. 8월에서 10월의 경우 한반도가 가을장마의 영향으로 정체전선이 남부지방에 머무르며 인천지역에 국지적인 강우가 빈번하게 발생하거나 장마 이후에도 국지적으로 발생하는 강우의 영향으로 인천지역에 잦은 소나기가 내렸다(Fig 9). 특히 해당 기간은 외부유입의 영향이 적고 미세먼지 오염도가 낮아 국지적인 기상현상과 강우의 영향이 높았으며 이러한 경우 국내에서 사용하는 수치예보 모델인 UM을 사용한 화학수송모델을 활용할 때 더욱 정확한 오염물질 농도 예측이 가능해 높은 IOA 값을 보이는 것으로 사료된다.

3.4. 권역별 모델 결과

Table 4는 권역별로 기상예보자료 변화에 따른 IOA 값을 나타냈다. 인천평균권역 및 모든 권역에서 GFS-CMAQ 모델이 UM-CMAQ 모델 대비 높은 IOA 값을 보였다. 권역별로는 동남부 권역과

서부권역, 영종·영흥권역이 상대적으로 IOA 값이 높았으며 강화권역은 IOA 값이 타 권역대비 낮은 특성을 보였다. 주요 원인으로 외부를 통한 오염유입 시에 인천은 백령도, 석모도, 강화도의 순으로 오염도가 높아지며, 강화권역은 타권역 대비 내부정체로 인한 오염도 증가가 적을 수 있어 외부 유입에 의한 오염도의 변화가 크게 나타날 수 있어 예측률이 낮아진 것으로 사료된다.

Table. 4. Time set of daily forecasting simulation

Area	PM-2.5		PM-10		O ₃	
	GFS	UM	GFS	UM	GFS	UM
Dongnambu Area	0.64	0.63	0.60	0.58	0.82	0.76
Gangwha Area	0.61	0.57	0.58	0.53	0.69	0.66
Yeongjong-Yeongheung Area	0.65	0.62	0.59	0.55	0.77	0.73
Seobu Area	0.64	0.63	0.59	0.56	0.80	0.75
Incheon	0.65	0.63	0.60	0.57	0.82	0.77

3.5. 주요 예측 사례

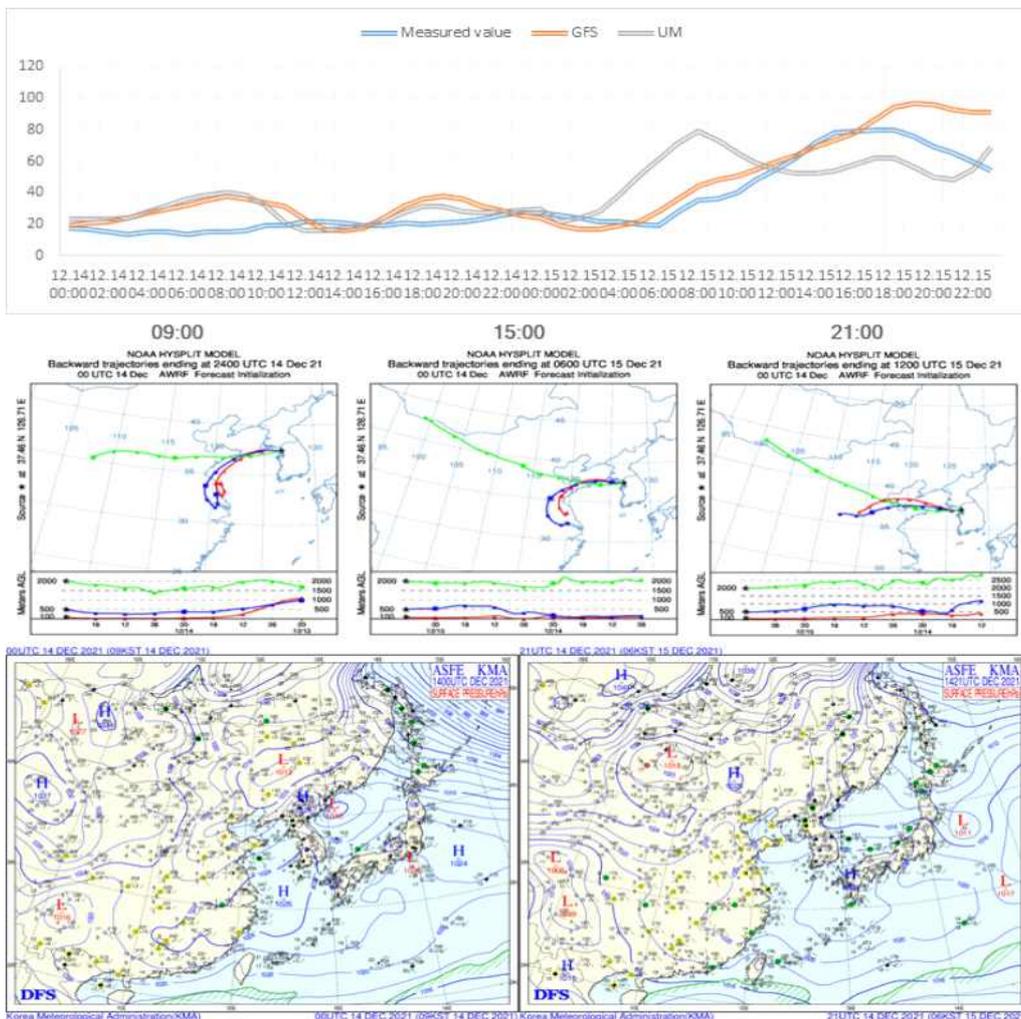


Fig. 10. Modeling result and weather map of December 14th to 15th.

Fig 10은 12월 14일 ~ 15일까지의 대기질 예측값 및 실측치, 12월 15일 역궤적 분석과 일기도를 나타낸 것으로, 15일 15시 및 16시를 기점으로 인천 4개 권역에서 PM-2.5주의보가 발령되었다. 14일은 고기압 중심부가 제주도 남부 해상에 자리잡아 기압 중심부가 바다를 지나는 동안 따뜻한 성질의 고기압으로 변해 따뜻한 남서풍을 통해 외부유입이 시작되었다. 15일은 우리나라 남쪽에 위치한 고기압 흐름을 따라 습한 공기가 유입되어 오전까지 강우가 지속되었으며 이후 중국 동부 해안을 거친 남서풍이 유입되어 서풍을 통한 외부유입이 발생하기 시작했다. 해당 사례는 남서풍 및 서풍을 통한 외부유입 이후 넓은 간격의 기압등고선으로 인한 내부정체가 더해져 주의보가 발령되는 겨울철 대표적인 고농도 사례이며, 해당 사례의 경우 GFS 기상자료를 활용한 화학수송 모델의 IOA값이 0.833, UM 기상자료를 활용하는 경우 0.737로 GFS가 더욱 높은 예측률을 나타냈다.

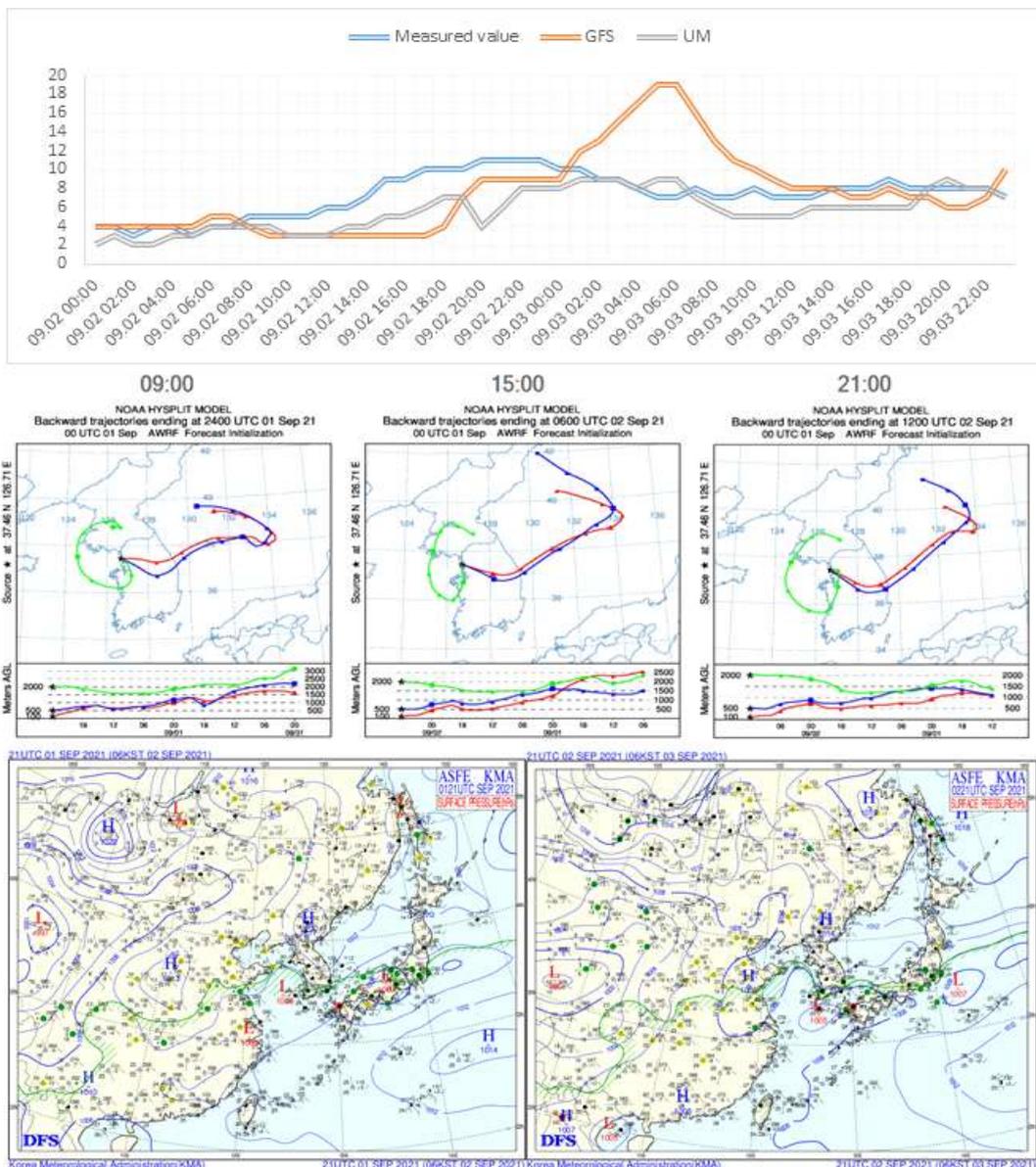


Fig. 11. Modeling result and weather map of September 2th to 3th.

Fig 11은 9월 2일 ~ 3일까지의 대기질 예측값 및 실측치, 9월 2일 역궤적 분석과 일기도를 나타낸 것으로, 장마철 생성되는 정체전선의 영향으로 청정한 대기질이 유지되는 대표적인 사례이다. 9월 2일은 북쪽의 기단과 남쪽의 따뜻한 기단이 만나 형성된 정체전선이 남해에 머무르고 있으며 북한에 자리잡고 있는 고기압 경계를 따라 유입되는 남동풍에 의한 원활한 대기확산으로 대기질이 청정하고 선선한 날씨가 유지되었다. 3일은 정체전선이 제주도 이남에 머무르는 가운데 동해 북쪽에 생성된 고기압 경계를 따라 동풍이 태백산맥을 넘어 인천으로 유입되어 청정한 대기질이 지속되고 더불어 고온건조한 동풍의 영향으로 최고기온이 전일 대비 2도 가량 상승했다. 해당 사례는 늦여름부터 가을철까지 동풍 및 남동풍을 통한 원활한 수평 대기확산과 낮 동안 가열된 지표에 의한 수직확산이 지속되어 청정한 대기질이 유지되고, 지표가열로 인해 국지적인 강우 또는 장마의 영향을 받는 대표적인 저농도 사례이다. 해당 사례의 경우 UM 기상자료를 활용한 화학수송모델의 IOA값이 0.754, GFS 기상자료를 활용하는 경우 0.493로 UM이 더욱 높은 예측률을 나타냈다.

3.6. 지역별 기여율

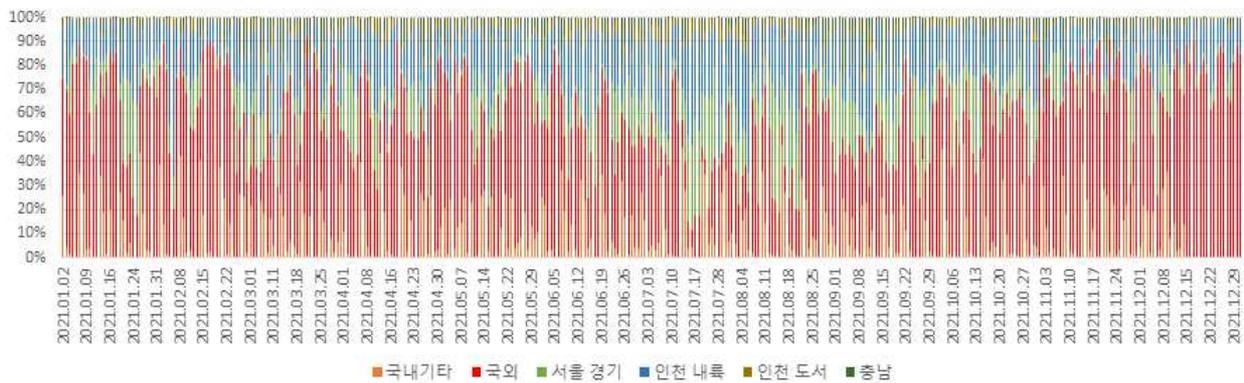


Fig. 12. PM-2.5 daily contribution rate change of 2021.

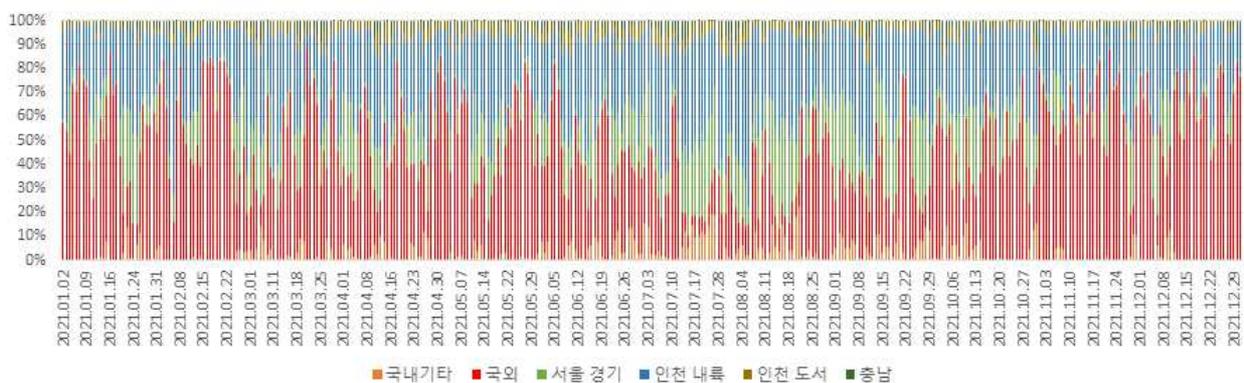


Fig. 13. PM-10 daily contribution rate change of 2021.



Fig. 14. PM-2.5 contribution rate of 2021.

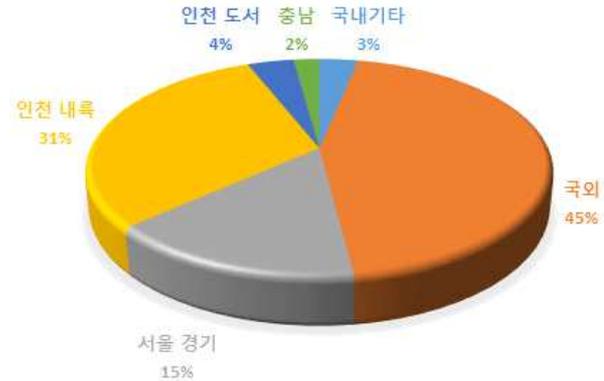


Fig. 15. PM-10 contribution rate of 2021.

1월 ~ 12월 기간의 일별 기여도를 보면, 하반기로 갈수록 인천내륙과 서울 경기 등의 기여도가 낮아지고 국외기여도가 높아지는 패턴이 보여지며 기간에 따른 국외와 인천 주변지역의 기여도 변화폭은 PM-2.5에서 더 크게 나타났다. FNL/CAMx-PSAT 모델의 CMAQ 화학수송모델과 동일하게 황사에 의한 배출량이 제외되어 있기 때문에, 국외유입에 의한 황사배출량이 포함될 경우 PM-10의 국외 기여도가 크게 상승할 수 있을 것으로 예상된다.(Fig 12, 13).

2021년 1월부터 12월까지 기간 지역별 기여도 모델 가동 결과, PM-2.5는 국외 55 %, 인천 내륙 20.4 %, 서울 경기 14.5 % 등의 기여도를 보였으며 PM-10 국외 44.8 %, 인천 내륙 30.7 %, 서울 경기 15.4 %로 국외 기여도는 PM-2.5가 상대적으로 더 높았고 인천 내륙은 PM-10에서 높은 기여도를 나타냈다. 그 외 인천 도서지역이나 충남, 국내 기타 지역들은 2 ~ 4 % 가량의 기여를 하는 것으로 산출되었다(Fig 14, 15).

IV. 결론

본 연구에서는 UM, NCEP/GFS, NCEP/FNL 기상예보자료를 바탕으로한 WRF모델, 배출량 입력자료를 바탕으로 한 SMOKE모델, 두 모델을 기반으로 화학수송모델을 인천지역을 대상으로 1km 대기질 예측 모델링을 2021년 1월부터 12월까지 수행하였다. 모델링 결과를 바탕으로 실측값과의 통계 값 비교, 월별 모델링 예측를 변화양상, 권역별 기상장 변화에 따른 모델결과, 주요 사례 등을 분석하였다. 지역 대기질에 대한 과학적 분석기반 확충과 대기질 진단평가시스템을 통한 대기질 진단 및 분석을 본격화 하기위해 수행한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 오염물질의 연평균 일치도 지수는 O₃(0.79) > PM-2.5(0.64) > PM-10(0.59) 순으로 나타났고, 기상항목의 연평균 일치도 지수는 온도(0.92) > 습도(0.82) > 기압(0.75) > 풍속(0.72) 순으로 나타났다. GFS와 UM 기상장 모두 풍속의 과대 모의 경향으로 실측값보다 풍속을 높게 모의해 고농도에 의한 정체가 발행하는 경우, 예측농도가 낮게 나타날 수 있다. 또한 풍속 과대모의 경향으로 상대적으로 일치도 지수가 높은 온도에 영향을 크게 받는 O₃보다 미세먼지의 일치도 지수가 낮게 나타났다.

- 2) 월별 일치도 지수에서 대부분 기간 동안 GFS 기상장을 활용하는 경우 예측률이 높았으며, 8월에서 10월까지 정체전선에 의한 강우로 미세먼지 농도가 매우 낮게 측정되거나 태풍 및 국지적인 지표가열에 의해 생성된 소나기와 같은 사례 시에는 UM-CMAQ 모델의 예측값이 실측값과 유사하였다. 황사의 경우 모델링 결과산출에 기본이 되는 배출량에 산정되어 있지 않기 때문에, 2021년 3월 및 5월과 같이 고농도 황사가 유입되어 미세먼지 농도에 영향을 줄 경우 일치도 지수가 저하가 두드러졌다. 고기압의 기압경계를 따라 중국 동부해안을 거친 서풍유입, 또는 남서풍 유입과 같은 외부유입 사례 및 중규모 기상현상에 의한 고농도 사례 시에는 GFS-CMAQ 모델의 예측값이 실측값과 유사하게 나타났다.
- 3) 지역별 기여도 모델가동결과, PM-2.5는 국외(55.0 %) > 인천 내륙(20.4 %) > 서울경기(14.5 %) 순으로 나타났고, PM-10은 국외(44.8 %) > 인천 내륙(30.7 %) > 서울경기(15.4 %) 순으로 PM-2.5가 PM-10보다 국외 기여율이 높게 나타났다. 기여도 모델은 황사에 의한 배출량이 제외된 결과로 황사유입 시에 일치도 지수가 크게 하락한 것을 감안할 때 황사에 의한 국외유입 기여도가 포함되는 경우, PM-10 국외 기여율이 크게 상승할 것으로 판단된다.

V. 참고문헌

- [1] 손건태, 하미향, 이순환(2016) CMAQ 예측치를 이용한 서울지역 PM10 농도 예측모형, 한국 데이터분석학회, 18(6), 3001-3009.
- [2] 조유진, 이효정, 장입석, 김철희(2017) CMAQ 모델링을 통한 초기 기상장에 대한 미세먼지 농도 예측 민감도 연구, 한국대기환경학회, 33(6), 554-569.
- [3] 윤권우(2021) 위성자료와 자료동화 CMAQ을 활용한 미세먼지 재분석 자료생성연구, 안양대학교 대학원
- [4] Doreswamy, Harishkumar K. S., Yogesh KM. and Ibrahim G.(2020) Forecasting Air Pollution Particle Matter(PM_{2.5}) Using Machine Learning Regression Models, Procedia Computer Science, 171, 2057-2066.
- [5] 전병일(2021) 부산지역 여름철 해풍 발생 시 미세먼지와 초미세먼지 중의 이온성분 특성, 한국환경과학회, 30(6), 465-474.