



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

한반도 서해안 안개예측을 위한
3차원 변분자료동화 및 분석넷징
효과 분석

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

朴亨植

2020年 2月

석사학위논문

한반도 서해안 안개예측을 위한
3차원 변분자료동화 및 분석넷징
효과 분석

제주대학교 대학원

지구해양과학과

박 형 식

2020년 2월

한반도 서해안 안개예측을 위한 3차원 변분자료동화 및 분석넷징 효과 분석

지도교수 송 상 근

박 형 식

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2019年 12月

박형식의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	_____	문재홍
위 원	_____	김태훈
위 원	_____	송상근



제주대학교 대학원



Effects of data assimilation by 3DVAR with analysis nudging for fog prediction in the west coast of the Korean peninsula

Hyeong-Sik Park
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2020. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 자료 및 방법	6
2.1. 자료 및 방법	6
2.2. 모델 구성	11
2.2.1. 기상모델 및 입력자료	11
2.2.2. 자료동화 방법	15
제 3 장 결과 및 고찰	19
3.1. 서해지역 일기유형 및 안개빈도 특성	19
3.2. 자료동화 개선 효과 분석	23
3.2.1 봄철 안개사례(2016년 4월)	23
3.2.2 여름철 안개사례(2018년 6월)	30
제 4 장 요약 및 결론	43
참 고 문 헌	47
Abstract	68

List of Figures

- Fig. 1.** The pattern of fog occurrence at Incheon international airport between September 2000 and August 2002 5
- Fig. 2.** Geographical locations of the study area, which is the western part of the Korean Peninsula, including the Yellow Sea. 7
- Fig. 3.** WRF modeling system flow chart. 12
- Fig. 4.** Model domains for (a) 27km, (b) 9km, and (c) 3km. 13
- Fig. 5.** WRFDA in the WRF modeling system. 14
- Fig. 6.** Frequency (%) of 6 weather types in several major cities (Seoul, Incheon, Daejeon, Daegu, Gwangju, Busan, and Ulsan) and a remote area (Jeju) in Korea during the study period (2007-2016). The number in parenthesis represents the total occurrence day of weather types. 21
- Fig. 7.** Temporal variations of the occurrence day of 6 weather types in Incheon during 2007-2016: (a) yearly variations, (b) monthly variations, and (c) seasonal variations. 22
- Fig. 8.** Temporal variations of the meteorological variables for 3DVAR+NUD, BASE, and observations (OBS) in ASOS site on April 2016 of the heavy fog event observed. Air temperature = TEMP, wind speed = WS, relative humidity = RH, visibility = VIS, dew point temperature = Td, and T-Td. 25
- Fig. 9.** Spatial distributions of meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD and BASE with the observations (OBS) on 12:00 LST, 8 April 2016 of the heavy fog event observed in the western part of South Korea. 29
- Fig. 10.** Temporal variations of the meteorological variables for 3DVAR+NUD, BASE, and observations (OBS) in observations sites on June 2018 of

the heavy fog event observed.	33
Fig. 11. Spatial distributions of meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD and BASE with the OBS on 10:00 LST, 26 June 2018 of the heavy fog event observed in the western part of South Korea.	41
Fig. 12. Spatial distributions of meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD and BASE with the OBS on 02:00 LST, 30 June 2018 of the heavy fog event observed in the western part of South Korea.	42

List of Tables

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF model.	14
Table 2. Statistical evaluation of the meteorological variables between the observed and model-predicted values (for the 3DVAR+NUD and BASE) at four monitoring sites in the western part of the Korean Peninsula during April 2016 of the heavy fog event observed.	27
Table 3. Statistical evaluation of the meteorological variables between the observed and model-predicted values (for the 3DVAR+NUD and BASE) at eight monitoring sites in the western part of the Korean Peninsula during June 2018 of the heavy fog event observed.	38

1. 서론

안개(fog)는 지면이나 해면에 인접한 층에서 수증기가 응결하여 대기 중에 떠 있어서 수평시정이 1km미만이 되는 현상을 말한다(Byers, 1959; Roach, 1994). 안개 발생시 악시정으로 인해 교통사고의 원인이 되며, 항공 및 해상교통의 방해를 주어 경제적인 피해를 주게 된다(이승호와 허인혜, 2003; Fu et al., 2006). 또한 농작물에 냉해나 상해를 입히고, 일사량을 감소시켜 농작물의 성장에 악영향을 주기도 한다(허인혜, 1998). 여러 선행연구에서 보다 정확한 안개예측은 해상 사고 예방이나 경제적인 손실을 줄이는데 아주 중요하다는 사실을 밝힌 바 있다(기상연구소, 1986; 김문옥, 1998; Cho et al., 2000; 원덕진 등, 2000).

서해지역은 서해와 인접하여 복사무보보다도, 서해 중부 해상에서 발생하는 해무의 이류로 인한 안개 발생이 많은데(Fig. 1), 이는 서해 앞바다에 위치한 많은 섬들과, 조석, 전선의 영향을 받기 때문이다(기상연구소, 2001). 또한 해무는 지속시간이 길기 때문에 항공기의 안전운항에 위협요소가 된다(기상연구소, 2001; 송운영, 2013). 안개의 발생은 지리적 특성을 크게 반영하는데, 편서풍대에 위치한 한반도 서해안지역은 해안선이 복잡하고 섬이 많은 지리적 특성으로 인해 안개의 발생이 많다(류찬수 등, 2004; 이화운 등, 1998). 한반도 남서 해안 지역의 많은 도서 지형은 내륙의 중규모 순환장에 많은 영향을 미친다. 해안 도서지형의 복잡성은 기계적 난류의 형태를 용이하게 만들며, 해륙풍의 풍속 및 풍향에 영향을 준다. 또한 복잡한 해안지형이 내륙에 미치는 영향은 복잡지형의 존재에 따른 기계적인 효과보다는 열적인 효과(현열, 잠열, 야간 복사냉각 등)가 더 크다(류찬수 등, 2004). 서해지역은 이와 같은 많은 영향을 기상현상을 이해하기에 어려움이 많다.

한반도 서해안과 같은 연안에서 발생하는 안개에 대한 메카니즘의 이해와 예측을 위한 연구들이 수행되어왔다. 기상연구소(1986)는 관측 자료 분석을 통해 기상요소들과 해무의 상관성을 구하고 통계모형을 개발한 바 있다. 변희룡 등(1997)은 동해상에서 발생하는 해무의 특성을 고찰하였고, 통계모델의 적용 가능

성을 제시하였다. 김문옥(1998)과 Cho et al.(2000)는 서해안지역은 조석간만의 차가 커서 해수면온도가 낮기 때문에 해수면온도와 노점온도와의 차가 커져서 안개 발생이 더욱 많다고 하였다. 일반적으로 대기경계층(PBL, Planetary Boundary Layer)은 사람들이 활동하는 하층대기로써 온도, 습도, 바람, 해수면 온도 등 모든 기상요소가 시공간적으로 급속하게 변하게 된다(Moon et al., 2011). 안개는 PBL에서 일어나는 현상이므로 다양한 기상요소의 영향을 받는다(Gultepe et al., 2007). 또한 연안에서 발생하는 안개는 국지적인 영향을 많이 받고, 경계층 내에서 발생하는 현상으로 미규모와 중규모의 영향으로 시공간적으로 큰 변동성을 가지고 있다(Croft et al., 1997). 이러한 요인에 의하여 서해안 지역의 기상현상은 복잡한 형태로 나타나고 안개는 미세물리과정 및 PBL에서의 중규모 대기운동의 영향을 받기 때문에 이 지역에서의 안개현상을 예측하기는 매우 어려운 상황이다(Chun et al., 1999; Croft et al., 1997).

기상현상을 정확히 모의하기 위해서는 수치모델의 개선된 초기 자료 및 관측 자료가 필요하다. 그러나 다수의 수치연구에서 수치모델의 초기 자료는 중규모 시스템에 충분히 영향력을 주지 못하는 경우가 많았으며 고해상도의 다양한 관측 자료를 이용하여 초기 조건을 개선하는 자료동화라는 방법들에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Stauffer and Seaman, 1990, 1991; 위태권, 1999; Choi et al., 2002; Lee and Lee, 2003; Lee, 2006; Yu et al., 2007; Choi et al., 2009; Choi et al., 2011; Choi et al., 2013). 자료동화 방법은 그 종류가 다양하고 각 시스템과 사용되는 관측 자료에 따라 결과의 차이가 있으며, 중규모 모델에 많이 적용되고 있는 3DVAR (Three Dimensional Variational data Assimilation), FDDA (Four Dimensional Data Assimilation)를 이용한 선행연구들이 있다.

3DVAR를 이용하여 기상모델의 모의를 개선시키기 위한 연구로 임은하 등(2003)은 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)에 3차원 변분법을 적용하여 레이더 자료를 동화시킨 사례 연구에서, 3차원 변분법의 적용이 강수량 모의에 있어 보다 향상된 영향을 주었다고 하였다. Ha et al.(2011)은 2006년 7월 11일에서 12일 사이에 중부 지역의 집중호우 사례연구에서, 3DVAR 시스템을 이용하여 레이더와 AWS자료를 동화한 초기 자료를 사용하였고 기준 실험에 비해 대류 시스템의 발달을 잘 모의하였으며, 하층 풍속이 보다 증가하였

음을 보여주었다. 황윤정 등(2011)은 남해와 서해상의 고층관측 자료를 WRF-3DVAR를 이용하여 자료동화한 초기장을 사용하여 수치모의를 수행하였고 강수분포의 유사함과 12시간 누적 강수량에 대한 검증에서 긍정적인 효과를 확인하였다. 또한 최원 등(2012)은 WRF-3DVAR를 이용하여 KLAPS(Korea Local Analysis and Prediction System)자료에 레이더 자료를 동화하고 수치모의를 수행하였고 호우 시스템의 발달과정과 누적 강수량에 대해서 향상된 모의를 하였다.

FDDA를 이용하여 기상모델을 개선 시키기 위한 연구로 Choi et al.(2002)은 AWS(Automatic Weather System)자료를 이용하여 공간 분석 넷징과 지상 분석 넷징을 적용한 경우, 단 시간의 예측력을 향상시켰고, 특히 기온과 풍향에 영향을 크게 주었다고 하였다. Yu et al.(2007)은 여름철 대류 현상에 대하여 3DVAR, 관측 넷징, 분석 넷징을 적용한 실험들을 비교 분석하였고 세가지 방법들이 악천후의 발달, 움직임의 특징을 잘 예측하였다. 특히 관측 넷징은 격자의 크기에 상관없이 모든 격자에 자료동화가 잘 수행되며 관측과 모델 방정식 간의 밀접한 상호작용을 가지는 이점이 있다고 하였다. Choi et al.(2009)은 복잡한 지형을 대상으로 관측 넷징을 적용한 자료동화 연구에서 넷징 계수 및 영향 반경 크기 변화에 따라 모의 결과에 미치는 영향을 연구한 결과, 종관 강제력이 큰 사례에서는 영향 반경이 큰 경우와 넷징 계수가 작은 경우에 가장 향상된 결과를 보였다. 반면, 이들은 종관 강제력이 약한 사례에서는 영향 반경이 작은 경우와 넷징 계수가 큰 경우에 가장 향상된 결과를 보였다. Deng et al.(2009)는 CAPTEX(Cross-Appalachian Tracer Experiment)-83 사례를 대상으로 총 4개의 실험(규준실험, 관측 넷징 실험, 공간 분석 넷징 실험, 관측 넷징과 공간 분석 넷징을 함께 적용한 실험)을 수행하여 검증한 결과, 모든 도메인에서 관측 넷징과 공간 분석 넷징을 함께 적용한 실험이 가장 관측과 유사한 결과를 보였다. Kim et al.(2010)은 PBL내 바람에 대한 3가지 계수값의 분석넷징을 적용하였고 개선된 바람장으로 인해 기상 모델 성능이 향상되었음을 확인하였다. Yang(2012)은 강원 지역의 호우 사례를 대상으로 넷징 실험을 한 결과, 하층의 영향을 많이 받는 중관구조의 호우 사례에서는 지상 분석 넷징이, 국지적인 호우 사례에서는 관측 넷징의 효과가 큰 것으로 보였다.

현재 국내에서 사용되는 안개 예측 모델은 국지모델(LDAPS, Local Data Assimilation and Prediction System) 시정예측 모델, 지역특화 안개 가이던스, 구름물리변수 기반의 안개 가이던스 등이 있다(기상청, 2015). 국지모델의 예측 자료는 다른 안개 예측모델에 비하여 실황과 큰 차이를 보였고, 일정규모의 권역에 안개가 발생할 사전 신호로서의 의미를 부여할 수 있었다. 지역특화 안개가이던스의 경우 안개 구역을 다소 과대 모의하는 경향을 보이거나, 상대적으로 안개 탐지율은 높은 편이다. 하지만 현재 안개 탐지율이 높은 사례가 30~40% 정도로서 안개 예측 정확도는 다른 기상요소에 비해 정확도가 매우 낮은 실정이다(기상청, 2015).

본 연구에서는 서해안 지역에서 봄, 여름철에 악시정의 안개가 지속적으로 발생한 두 사례를 대상으로, 3차원 변분 자료동화와 분석넷징을 WRF 기상 모델에 적용하여, 서해와 복잡한 지형의 영향으로 안개 발생이 잦은 서해안 지역에서의 기상요소에 대한 수치 모의 결과를 개선하고자 한다.

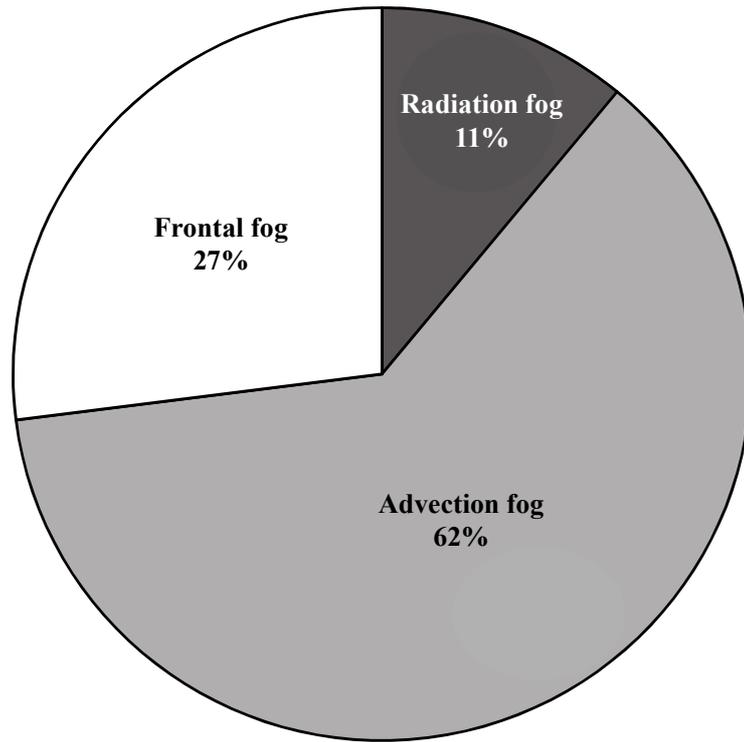


Fig. 1. The pattern of fog occurrence at Incheon international airport between September 2000 and August 2002(Meteorological Research Institute, 2002).

2. 재료 및 방법

2.1 자료 및 방법

본 연구에서는 서해안 지역과 다른 한반도 주요 대도시의 일기유형 빈도의 특성을 분석하기 위하여, 기상청 종관기상관측시스템(ASOS, Automated Synoptic Observing System)에서 기상현상표에 근거한 10년간(2007~2016년)의 시간별 자료를 이용하였다. 서해안 주변의 인천을 비롯한 한반도 주요 대도시 서울, 부산, 대전, 대구, 광주, 울산, 그리고 제주도를 선정하여 일기유형의 빈도를 분석하였다. 일기유형은 맑음(Clear), 흐림(Cloudy), 강수(Precipitation), 연무(Haze), 안개(Fog), 박무(Mist), 황사먼지(Dust), 천둥 및 번개(Thunder and lightning)으로 분류된다(Lee et al., 2013). 이 중에서 맑음과 흐림은 오직 그 날의 전운량으로 결정되는 일반적 유형이므로 본 연구의 일기유형 빈도 분석에서는 제외하였으며, 최종 6개의 특징적인 일기유형(강수, 연무, 안개, 박무, 황사먼지, 천둥 및 번개) 자료를(일별 자료)를 분석에 사용하였다. 하루 중 75%이상의 자료가 있는 날의 유효자료를 선정하여 분석함으로써 자료의 신뢰성을 높였다. 또한 안개가 자주 발생하는 한반도 서해안 지역에서 안개가 발생하였을 때 기상요소(기온, 풍속, 습도, 시정 등)를 분석하기 위하여 내륙의 종관기상관측소인 인천지점(37.47°N, 126.62°E), 서울지점(37.57°N, 126.97°E), 강화지점(37.71°N, 126.45°E)과 방재기상관측소(AWS, Automatic Weather System)인 운평지점(37.08°N, 126.78°E)의 시간별 관측자료를 이용하였다. 서해에서의 기상요소를 분석하기 위하여 해양기상부이인 덕적도지점(37.24°N, 126.02°E), 인천지점(37.09°N, 125.43°E), 등포기상관측소인 가대암(36.77°N, 125.98°E), 서수도(37.33°N, 126.39°E)의 시간별 관측 자료를 이용하였다(Fig. 2).



Fig. 2. Geographical locations of the study area, which is the western part of the Korean Peninsula, including the Yellow Sea.

종관기상관측시스템에서는 기온, 풍속, 습도, 시정, 노점온도, 일기현상 데이터를 이용하였으며, 방재기상관측시스템에서는 상대습도, 시정, 노점온도, 일기현상 데이터의 결측으로 기온, 풍속 데이터를 이용하였다. 해양기상부이 및 등표기상 관측소에서도 기상요소의 결측으로 기온, 풍속, 상대습도 데이터를 이용하였다. 3차원 변분자료동화 및 분석넷징의 효과를 확인하기 위하여 안개 발생시 기상요소를 분석하였는데 안개 사례 선정은 종관기상관측소의 기상현상표에 근거한 자료를 이용하였다. 안개 사례는 서해안 지역에서 안개가 가장 많이 발생하는 봄, 여름철의 사례를 선정하였고, 이 사례는 2016년 4월 8일부터 4월 10일, 2018년 6월 23일부터 6월 30일까지이다. 사례기간동안 안개는 길게 지속되며 시정이 낮은 짙은 안개가 발생하였다. 선정한 사례의 안개는 인천 지역에서 새벽, 오전에 안개가 지속되었으며 짧게는 2시간, 길게는 9시간 안개가 지속되었고, 시정이 40m까지 관측되었다.

자료동화에 의한 기상모델 개선 효과를 확인하기 위하여 기상모델에 의해 모
 의된 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 시정, 노점온도)를 관측값과 비교 분석하였
 다. 각 관측지점에 가장 가까운 모델 격자 값을 이용하였고 기상 모델 결과의 변
 수 중 지상 2m에서의 온도(K)인 T2, 지상 10m에서의 u성분값인 U10, 지상 10m
 에서의 v성분 값인 V10, 지상 2m에서의 혼합비(kg/kg)인 Q2, 기압(Pa)을 나타내
 는 PSFC를 사용하였다.

$$e_s = 6.1078 \exp \frac{19.8t}{273+t} \approx 6.1 \exp 0.073t \quad (1)$$

$$w = \frac{0.622e}{p-e} \quad (2)$$

$$e = \text{상대습도} \times \frac{e_s}{100} \quad (3)$$

$$t_d = 273 \frac{\ln e - \ln 6.11}{19.8 - (\ln e - \ln 6.11)} \approx 13.7 \ln \frac{e}{6.1} \quad (4)$$

기상 모델 결과에서 안개 예측에 중요한 기상요소인 상대습도, 노점온도, 시정
 의 값을 구하기 위하여 식(1)~(4)를 이용하였다. 먼저, 포화수증기압(e_s)은 식 (1)
 을 이용하였는데 $t(^{\circ}\text{C})$ 에 $T2(\text{K})$ 를 단위 변환 후 대입하여 구하였다. 식 (2)에서
 혼합비인 $w(\text{kg}/\text{kg})$ 에 $Q2$ 를 대입하고 기압(hPa)인 p 에 PSFC (Pa)를 단위 변환
 후에 대입하여 수증기압(e)를 구하였다. 상대습도(%)를 구하기 위하여 수증기압
 (e)과 포화수증기압(e_s)을 이용한 식 (3)를 사용하였다. 노점온도는 식 (4)를 이용
 하여 식 (2)에서 구한 수증기압(e)를 대입 후 구하였다.

시정을 계산하기 위해 Bang et al. (2008)이 소개한 RUC (Rapid Update
 Cycle)방법(식 (5))을 사용하였으며 악기상일 경우에는 FSL (Forecast Systems
 Laboratory)방법(식 (6))을 사용하였다. RUC방법은 상대습도(%)에 기초한 식이며,

FSL방법은 NOAA(National Oceanic & Atmospheric Administration) / FSL(Forecast Systems Laboratory)에 의해 개발되었으며 위험한 기상이 발생했을 때 사용하게 되는 식으로 상대습도(%)와 기온(°C)과 노점온도(°C) 차이에 기초한 식이다(Doran et al., 1999). 상대습도와 기온, 노점온도를 대입하여 구하였으며 km로 단위 변환을 해주었다.

$$VIS(km) = 60 \exp \left[-2.5 \times \frac{(RH - 15)}{80} \right] \quad (5)$$

$$VIS(mile) = 6000 \times \frac{T - Td}{RH^{1.75}} \quad (6)$$

기상모델의 검증을 위해 이용된 통계비교 방법은 평균 MBIAS(Mean Bias), RMSE(Root Mean Square Error), IOA(Index of Agreement)를 사용하였으며 모델링 정확도 분석에 이용되는 주요 통계인자들의 자세한 내용은 다음과 같다. IOA는 모델결과와 측정값의 일치도를 보기위한 항목으로 0~1사이의 값은 가지고 1일때 완벽한 일치로 나타낸다.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_1^N (Model - Obs)^2}{\sum_1^N (|Model - AVG(Obs)| + |Obs - AVG(Obs)|)^2} \quad (7)$$

MBIAS는 모델값과 측정값의 차이를 전 기간에 대하여 평균하여 구하는 값으로 (+)값이면 측정값에 비해 모델값이 과대평가, (-)값이면 과소평가 된 것으로 파악 할 수 있다.

$$MBIAS = \frac{1}{N} \sum_1^N (Model - Obs) \quad (8)$$

RMSE는 모델값과 측정값의 평균 제곱근으로 구하며 오차를 보기 위한 항목이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (Model - Obs)^2} \quad (9)$$

이러한 통계적 분석(IOA, RMSE, MBIAS)은 모델 수치모의 결과가 연구 지역(한반도의 서해안 지역)의 안개 현상 예측 및 관련 기상 조건의 이해에 합리적인 것을 나타낸다.

2.2 모델구성

2.2.1 기상모델 및 입력자료

본 연구에서 이용된 기상모델은 WRF(Advanced Research Weather Research and Forecasting) version 3.6 이다. WRF 모델은 1970년대 초반 미국 국립기상연구소 NCAR와 국립환경예측센터 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 공동으로 개발한 모델로 NOAA산하 단체 NCEP과 AFWA(Air Force Weather Agency)에서 기상예측모델로 주로 사용하고 있다. WRF 모델에서 사용하는 격자 체계는 Arakawa-C이며, Eulerian 질량좌표계를 연직격자로 사용한다(Skamarock et al., 2008). 수치계는 3차 Runge Kutta split-explicit 시간적분을 사용하여 6차 중심차분법을 이류항에 대해서 도입하였고, 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라양을 보존하였다.

Fig. 3는 WRF 모델링의 전체적인 흐름을 보여준다. WRF의 기본적인 구성은 전처리 과정인 WPS(WRF Preprocessing System)와 모델 수행단계 과정이다. WPS는 WRF 모델의 전처리 입력자료로, 3단계의 프로그램으로 구성되어있다. 먼저 지형 및 토지피복도 등의 지형경계자료 생성을 위한 GEOGRID는 예측하고자 하는 대상 영역을 설정하는 단계이다. UNGRIB는 초기 추정 입력값으로 부터 등기압면의 기상자료를 생성한다. WPS 마지막 단계인 METGRID는 GEOGRID에 의해 설정된 모델 격자에 UNGRIB에 의해 정리된 기상장을 METGRID.TBL 등기압면의 수평 격자점 자료로 내삽하는 과정이다. 그 후 전처리 과정의 WPS에서 생성된 자료를 이용하여 진단적 계산과 연직적인 내삽과정을 통하여 자료의 재구성 등의 작업을 수행하는 REAL 단계를 거치게 된다. REAL 작업으로부터 WRF의 초기값과 경계조건의 입력 자료가 생성되면 WRF에서 생성된 자료를 수치 적분하여 사례일 내의 기상상태를 모의한다(WRF-ARW V3: User's Guide, 2015; 윤민지, 2010; 손고은, 2014; 한승범, 2016).

WRF Modeling System Flow Chart

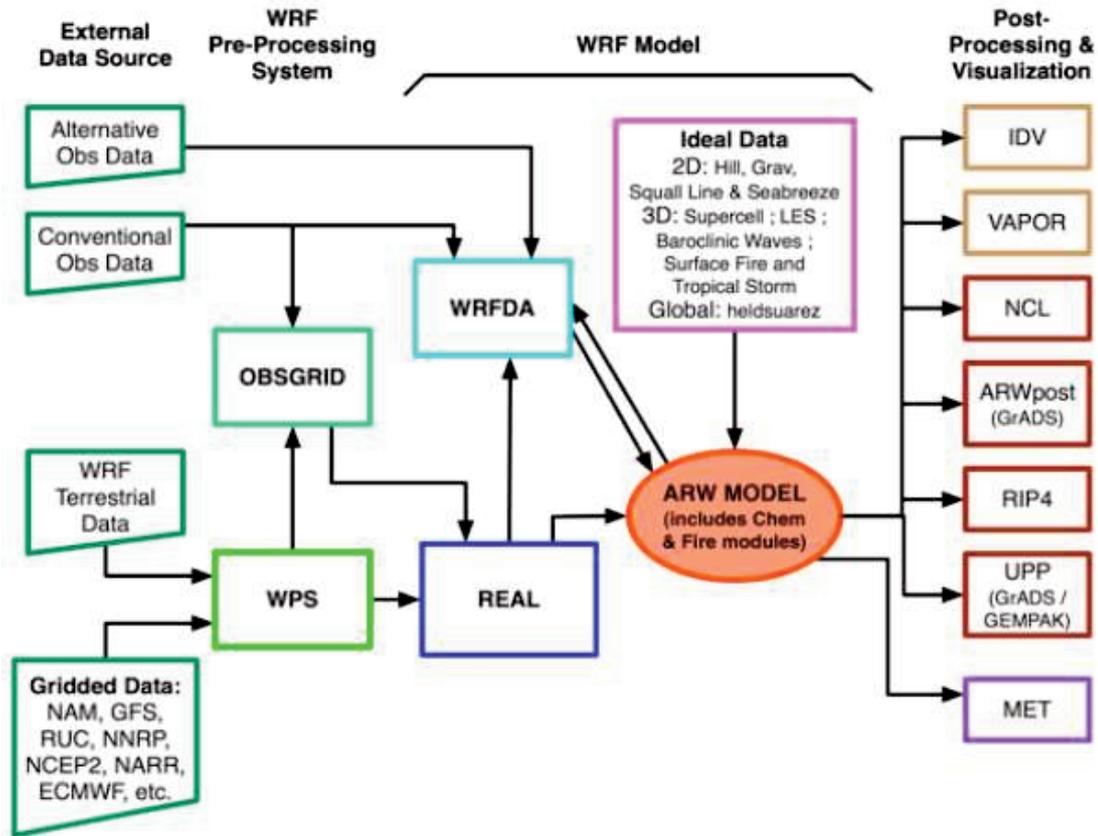


Fig. 3. WRF modeling system flow chart (ARW, 2015).

WRF 모델의 초기/경계 자료에 사용된 입력자료는 시·공간 해상도와 수집 용이성을 고려하여 NCEP에서 제공하는 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research)의 FNL 재분석 자료(6시간 간격, 1.0°×1.0°의 해상도)를 이용하였다. 지형자료는 고해상도의 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 3초 자료를 이용하였으며, 토지 피복 자료는 24 카테고리로 분류되는 United States Geological Survey (USGS) 3초 자료를 이용하였다.

본 연구의 모델링은 27 km, 9 km, 3 km, 수평해상도를 갖는 3개의 도메인으로 구성하였으며(Fig 4), 연직해상도는 30층으로 설정하였다. 최종 분석도메인에 해당하는 D3는 안개가 자주 발생하는 한반도의 서해안 지역으로 설정하였다. 편

서풍대에 위치한 서해안지역은 해안선이 복잡하고 섬이 많은 지리적 특성으로 인해 발생하는 기상현상을 이해하기에 어려움이 많다. 사용된 물리과정과 도메인 상세정보는 Table 1에 제시하였다. 모델 기간은 2016년 봄철 안개사례, 2018년 여름철 안개사례 각각 spin-up 기간 3일을 포함하여 2016년 4월 4일부터 4월 12일, 2018년 6월 20일부터 2018년 7월 1일까지로 정하였다.

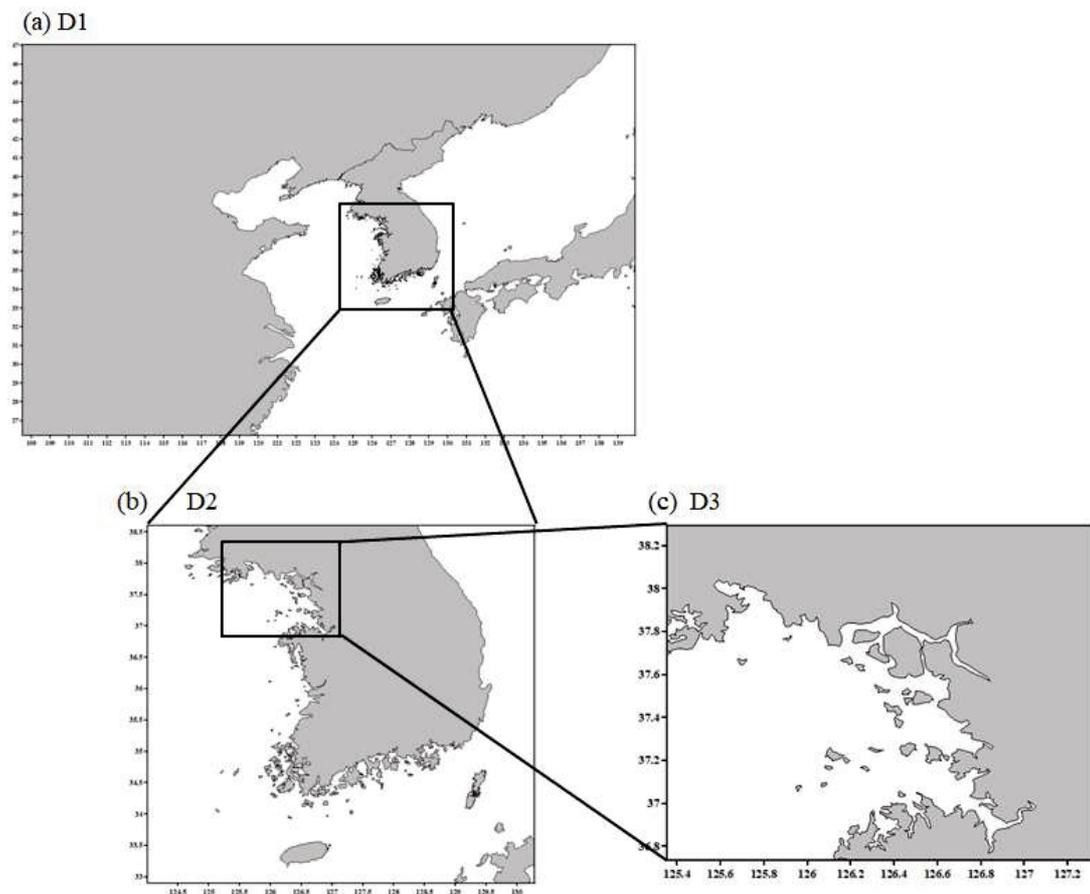


Fig. 4. Model domains for (a) 27km, (b) 9km, and (c) 3km.

모델링 수행시 사용된 물리과정은 YSU 경계층 모수화 방안(Hong and Pan, 1996), 아격자 규모의 적운에 의한 강수를 계산하기 위한 Kain-Fritsch의 적운 대류 모수화 방안(Kain and Fritsch, 1993), RRTM 단파/장파 복사 모수화 방안(Iacono et al., 2008)과 27~3km 격자규모에 대한 해상도에 따른 구름 모수화와

메조스케일에 적합한 Single Moment 3-class scheme(Hong et al., 2004)을 사용하였다. 지표 모수화 방안은 5-layer thermal diffusion scheme을 사용하였다 (Table 1).

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF model.

Domains	D1	D2	D3
Cells in x-direction	91	61	58
Cells in y-direction	82	70	58
Vertical layers		30	
Horizontal resolution	27	9	3
Map projection	Lambert Conformal		
Microphysics	WSM 3-Class Simple Ice		
Cumulus	Kain-Fritsch scheme for D1, D2		
Radiation (long/short wave)	RRTM / Dudhia (Iacono)		
Planetary Boundary layer	YSU scheme		
Surface layer	Monin-Obukhov		
Land Surface	5-layer thermal diffusion		

2.2.2 자료동화 방법

일반적으로 초기장과 지표 및 측면 경계조건이 주어졌을 때 수치 모델은 대기의 움직임을 예보한다. 따라서 수치 모델은 초기장과 경계값의 문제이고 더 정확한 초기 조건이 모델의 예보를 향상 시키게 된다. 현재 수치모델 현업기관들은 모델 예보장과 관측 자료의 통계적 결합으로 초기장을 생성한다(Desroziers and Ivanov, 2001). 이러한 접근 방법을 자료동화라고 하며, 대기(해양)의 흐름 상태를 가능한 정확하게 얻기 위해서 모든 가용한 정보들을 이용하는 것이다(Talagrand, 1997). 관측자료가 균일하게 분포하지 않고 정확성이 낮은 관측자료들이 있기 때문에, 관측자료만을 이용해서 모델의 초기장을 생성할 수 없다. 그래서 모델 예보장과 관측자료를 이용하여 초기장을 생성하고 있다. 통계적 방법으로 관측자료와 모델 배경장을 결합하고 관측과 배경장의 오차 정보를 이용해 최적의 값을 생성한다(Talagrand, 1997).

본 연구에서 이용하는 자료동화 방법은 3차원 변분자료동화인 3DVAR (three-dimensional variational analysis)을 적용하며 FDDA (Four-Dimensional Data Assimilation)방법의 분석넛징(Analysis nudging)이다. 3차원 변분자료동화는 NCAR/UCAR(Natioanl Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research)에서 개발한 자료동화 시스템인 WRFDA를 이용하였다. WRFDA는 다양한 관측자료를 처리할 수 있으며, 국지 자료로 레이더, GPS PW 등도 동화가 가능하다. WRF 모델링에서 WRFDA 시스템의 흐름은 Fig. 5와 같다. WRF의 REAL 작업으로부터 생성된 WRF의 초기값과 경계조건을 OBSPROC (관측과 오차자료)와 Background Error (배경오차 공분산)을 이용하여 자료동화하게 된다. OBSPROC은 LITTLE_R 포맷의 관측자료를 읽으며 정한 시간과 영역 밖의 관측은 제거를 한다. 정역학 가정을 이용하여 기압과 고도를 추출하고 관측의 연직 일관성을 확인한다. 그리고 관측 오차를 할당하며

WRFDA에서 사용할 수 있는 관측 자료 형태로 출력을 한다. 배경오차는 배경장이 가지는 오차(모델이 가지는 오차)를 의미하며, 대부분의 현업기관에서 NMC 방법으로 배경오차 공분산을 생성한다(Parrish and Derber, 1992).

OBSPROC생성을 위해 이용한 자료로 2016년 4월 봄철 사례에서는 LITTLE_R 포맷의 NCEP ADP Global Upper Air Observational Weather Data (ds351.0), Surface Observational Weather Data(ds461.0)을 이용하였으며, 2018년 6월 여름철 사례에서는 PREPBUFR 포맷의 ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations 자료를 LITTLE_R 포맷으로 변환 후 이용하였다. 즉, 지표 관측값인 SYNOP, 해양 선박에서 관측한 SHIP, Kalpana-1, METEOSAT-6, GMS, GOES 등 인공위성 관측자료인 SATOB, 그리고 상층에는 SOUND, PROFILER, METAR의 자료를 이용하였다.

배경오차 공분산을 생성하기 위하여 NMC방법(24시간과 12시간의 모델 예측차이 생성)을 사용하거나 모델 내 Default 평균장을 사용하였다. 컴퓨터 자원을 줄이기 위해 모델 변수를 그대로 이용하지 않고 control variable을 이용하는데 u , v , T , pseudo relative humidity (RH_s), surface pressure (P_s)이 포함된다.

3차원 변분자료동화기법에 추가적으로 오차를 줄이는데 효율적인 FDDA방법을 사용하였다(Stauffer and Seaman, 1990, 1994). FDDA는 모델 초기화 또는 모델의 사용을 위해 전통적인 객관분석 방법과 동적 완화 방법 사이에서 논리적으로 확장된 방법이다. FDDA 방법에는 관측치를 직접 내삽하는 관측 넷징(Observation nudging)과 종관장을 따르는 관측치를 이용하여 경계 조건을 변화시키고 격자 형태로 내삽하는 분석 넷징(Analysis nudging)이 있다(Shafran et al., 2000). 본 연구에서는 위의 2가지 FDDA 방법 중 분석넷징을 적용하여 3DVAR 방법과 Combination(조합)하였으며 안개 예측 수치모의를 수행하였다. 사용한 분석 넷징은 기존 배경장의 격자점과 관측 간의 차이를 구하여 새로운 초기장의 격자점으로 내삽하는 방법으로, 대기 경계층 밑 원하는 층 이상으로 효과를 주는 공간 분석 넷징(3D Analysis Nudging)과 모델 최하층 이하의 약 10m에 효과를 주는 지상 분석 넷징(Surface Analysis Nudging)으로 구분할 수 있다. 분석 넷징 식은 각 격자점에서 계산된 관측의 분석 값과 모델에서 모의된 값의 차이에 비례한다(국립기상연구소, 2014). 분석 넷징의 경우, 넷징 효과가 미치는

강도가 넷징을 적용하고자 하는 도메인 영역에 따라 다르게 나타난다. 본 연구의 도메인은 3영역이지만 D1에만 넷징을 적용하였고 도메인끼리 서로 상호작용(양방향 등지화 기법)하면서 D1에 적용된 넷징 효과가 D2, D3에 간접적으로 영향을 미치게 된다. 전 기간동안 PBL 내에서의 u, v, t, q 성분을 넷징하였으며 각 성분의 넷징 계수는 기본값인 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 으로 각각 설정하였다(유정우 등, 2017).

본 연구에서는 3차원 변분자료동화 및 분석넷징을 적용한 자료동화 수치모의(이하 3DVAR+NUD)와 자료동화 기법을 적용하지 않은 기본 수치모의(이하 BASE)를 수행하였고 2가지의 모의 결과를 비교분석 하였다.

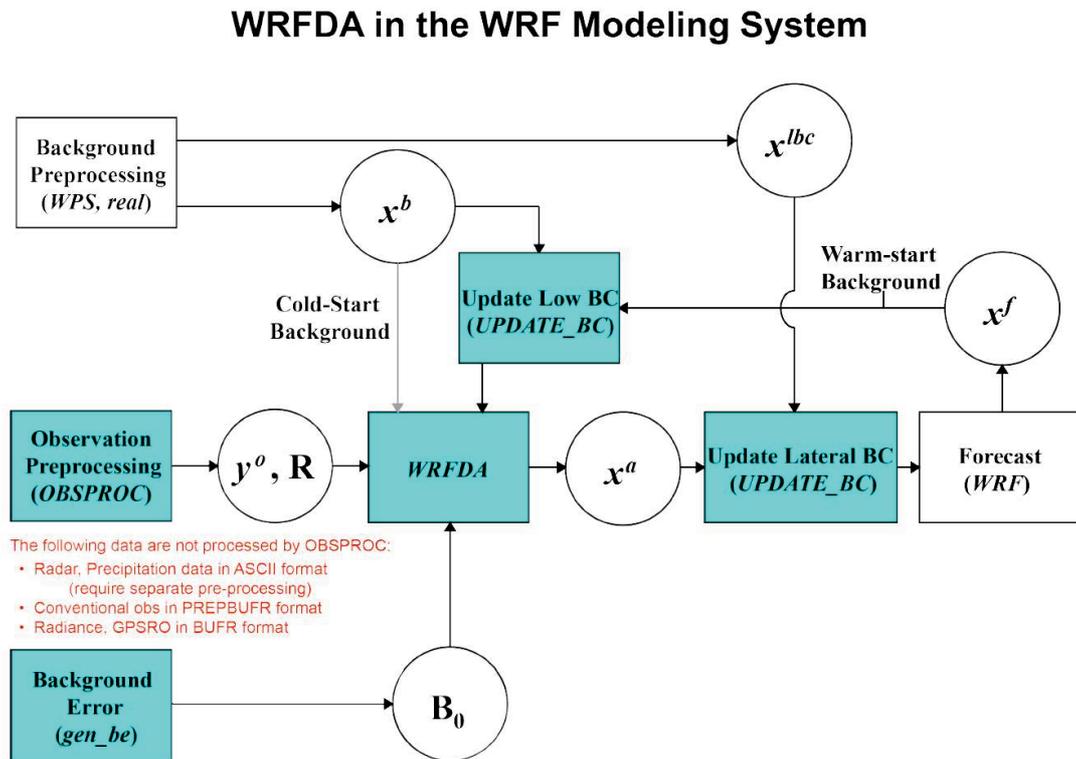


Fig. 5. WRFDA in the WRF modeling system (ARW, 2015).

3. 결과 및 고찰

3.1 서해지역 일기유형 및 안개빈도 특성

서해안에서 발생하는 안개의 형태는 복사무보다도, 서해 중부 해상에서 발생하는 해무의 영향으로 인해 이류무가 많이 발생한다(기상연구소, 2002). 이는 서해안의 지리적 특성과 더하여 조석 및 전선의 영향을 받기 때문이다. 또한 서해안 지역에서는 해양, 기상 환경의 변화가 심하고 해기차로 인하여 안개 발생이 많다(Son, 2010). 10년간(2007~2016년) 서해지역의 인천과 한반도 주요 대도시(서울, 대전, 대구, 광주, 부산, 울산, 제주)에서 관측된 6개의 일기유형(강수, 연무, 안개, 박무, 황사먼지, 천둥 및 번개)의 총 빈도를 보면, 이러한 서해안 지역의 특징을 뚜렷하게 확인 할 수 있다(Fig. 6). 예를 들어, 인천은 다른 지역보다 박무(43%), 안개(8%)의 빈도가 가장 높았으며, 강수는 27%, 연무는 16%, 천둥 및 번개는 4%, 황사는 2%의 빈도를 나타냈다. 인천을 제외한 다른 주요 대도시에서는 강수가 30~47%, 연무가 14~26%(제주 제외)로 서해안 지역과 비교해 높은 빈도를 보였다. 또한 인천을 제외한 지역에서 안개의 빈도가 5%미만으로 낮은 빈도를 보이며 특히 서해안 지역의 안개 빈도가 높음을 보였다(박형식 등, 2018) 이는 선형연구에서 나와 있듯이 해양과 대기의 상호작용에 크게 영향받는 안개가 서해 중부 해역에서 낮은 수온과 하계의 높은 기온 사이의 해기차가 커지면서 다른 지역보다 안개 발생 빈도가 높은 것으로 보인다(기상연구소, 2000; Son, 2010). 또한 중국 대륙으로부터 강하고 따뜻한 이류에 의해 안정층이 형성되면 4월에 황해의 서쪽 위에서 해무가 갑자기 많이 발생되어 그 영향을 준다(Zhang et al, 2009).

연구대상지역인 인천에서의 10년간(2007~2016년) 일기유형의 빈도를 보면, 대체적으로 증가와 감소를 반복하는 특징을 보였고, 2013년 이후 박무의 빈도가 크게 증가한 이후 꾸준히 지속되었다. 특히 안개의 빈도는 연평균 약 50일의 안개

발생을 보이며 다른지역에 비해 2배 이상 높은 빈도를 나타냈다. 인천에서 월 및 계절 빈도의 특징으로는 여름철인 7~8월에 강수 뿐만 아니라 천둥 및 번개의 빈도가, 6~7월에 박무의 빈도가 가장 높게 나타난 반면, 연무의 빈도는 7~8월에 강수로 인한 세정효과(wash-out)로 크게 감소하였다(Ahn et al., 2014). 안개는 주로 바다가 인접해있는 서해지역이 부산, 제주와 함께 상대적으로 높게 나왔으며 주로 봄철인 4~5월과 여름철인 6~7월에 빈도가 높았다. 8월부터는 빈도가 줄어들면서 가을철에는 빈도가 가장 낮았다(Fig. 7).

따라서 본 연구에서는 서해안 지역에서 안개의 빈도가 많은 봄철, 여름철의 안개사례를 선정하여 고해상도 수치모의를 수행하였으며, 자료동화 개선효과에 대한 분석은 3.2절에 자세히 나타낸다.

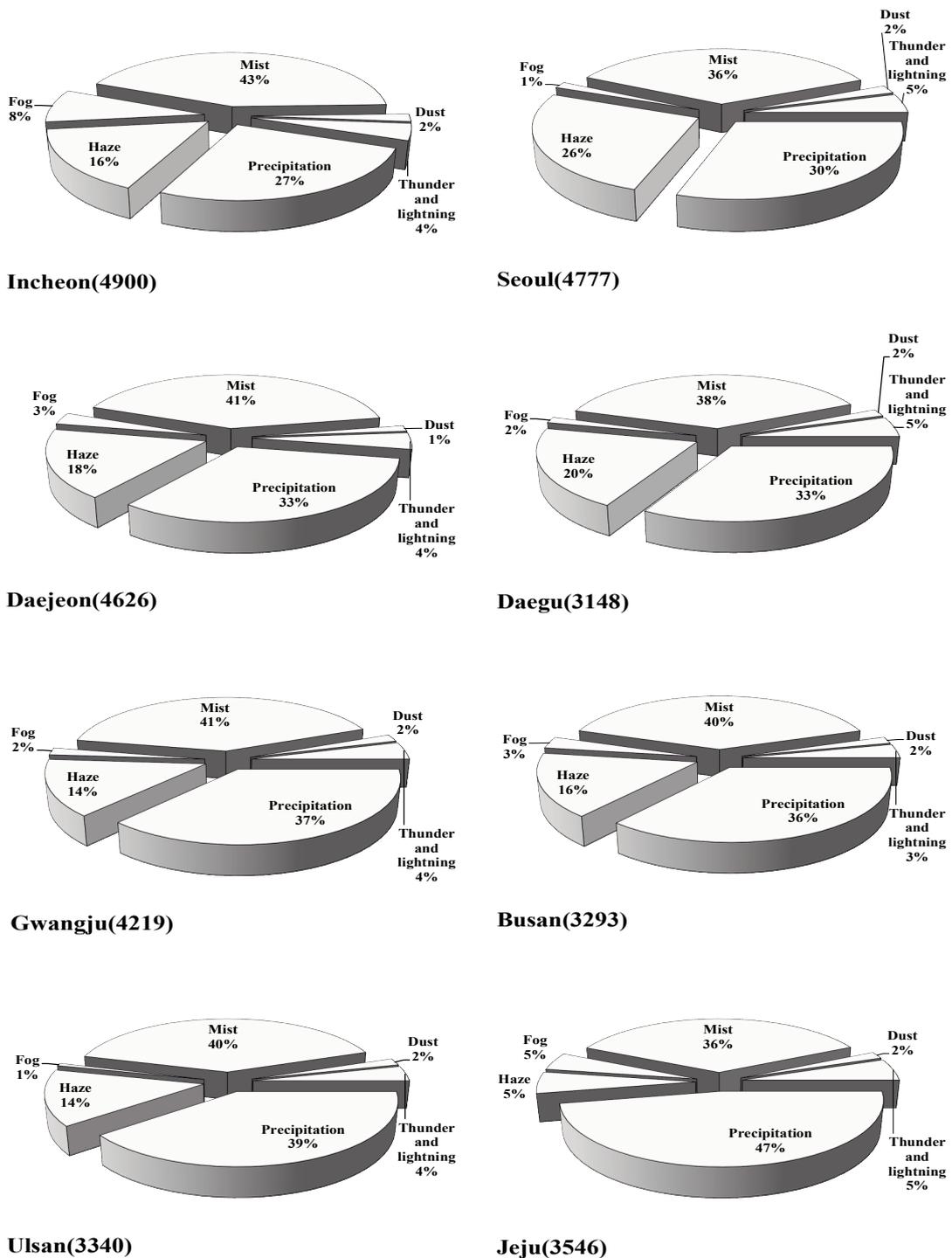


Fig. 6. Frequency (%) of 6 weather types in several major cities (Seoul, Incheon, Daejeon, Daegu, Gwangju, Busan, and Ulsan) and a remote area (Jeju) in Korea during the 2007-2016. The number in parenthesis represents the total occurrence day of weather types (Park et al., 2018).

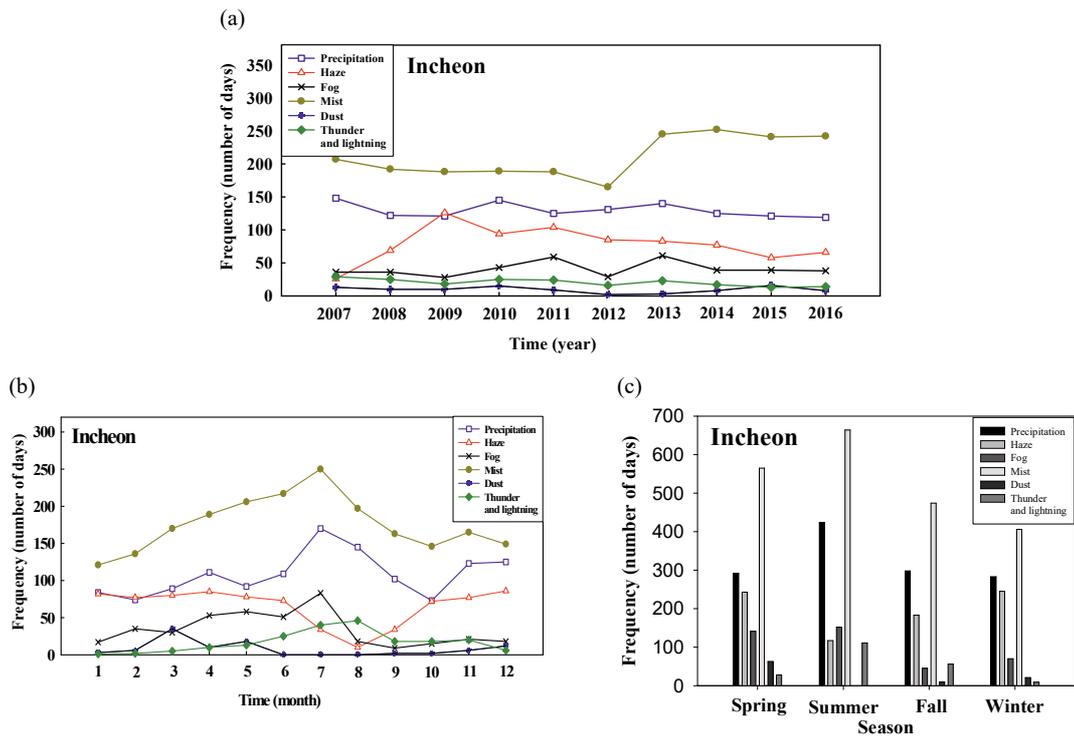


Fig. 7. Temporal variations of the occurrence day of 6 weather types in Incheon during 2007-2016: (a) yearly variations, (b) monthly variations, and (c) seasonal variations (Park et al., 2018).

3.2 자료동화 개선 효과 분석

3.2.1 봄철 안개사례(2016년 4월)

WRF에서 자료동화(3DVAR+NUD)의 효과를 분석하기 위하여 안개발생일을 포함하는 2016년 4월 4일부터 4월 12일까지 서해안지역 기상관측 지점(인천, 서울, 강화, 운평)의 기상인자(기온, 풍속, 상대습도, 시정, 노점온도, T-Td)에 대해 모델 결과(3DVAR+NUD vs. BASE)와 관측값을 비교하였다(Fig. 8). 지역마다 약간의 차이가 있으나 전반적으로 3DVAR+NUD의 모델 결과가 BASE의 결과보다 향상된 모의를 한 것으로 보였다. 특히, 안개가 발생한 4월 8일~10일에서 BASE보다 크게 향상된 결과를 보여준다. 인천지역에서 기온은 9일부터 10일까지 상승하는 관측값을 3DVAR+NUD의 결과가 매우 유사하게 모의하였으며 BASE는 다소 과소모의를 하였다. 안개가 발생하기 시작한 8일에 상대습도, 노점온도가 BASE와 비교하여 크게 향상된 모의를 했다. 안개 발생에 중요한 T-Td는 관측값과 유사한 모습을 보였고 안개 발생의 기준이 되는 시정은 0.1~0.15km의 악시정이 관측된 8일 새벽에 BASE는 3~6km로 과대모의하였으나 3DVAR+NUD는 0~0.65km으로 크게 향상된 모의를 하며 전반적으로 BASE보다 향상되었다.

강화에서는 기온이 9일 주간에 상승될 때 3DVAR+NUD의 결과가 관측 값과 매우 유사한 모습을 나타냈으며 BASE는 관측값과 비교해 과소모의를 하였다. 또한 시정은 8일 새벽에 0.2~0.4km의 악시정이 관측되는데 BASE는 7.8km~17km를 모의하며 안개를 예측하지 못하였고 3DVAR+NUD는 0~0.7km로 크게 향상된 모의를 하였다. 서울에서도 인천, 강화지점과 비슷한 모습을 보이며 자료동화(3DVAR+NUD)를 적용함으로써 기온은 8일~10일에 크게 향상되었으며 시정은 8일에 향상되었다. 노점온도와 T-Td 또한 향상된 모습을 보였지만 안개 발생일의 서울, 강화지역 상대습도는 BASE에 비해 향상되긴 하지만 과대모의를 하며 정확한 모의를 하지 못하였다. 이는 지리적 조건 및 도시의 지표면 상태 등을 모델이 고려하지 못했기 때문으로 사료되며, 특히 해안지역의 많은 도서 지형이 영향을 준 것으로 보인다. 해안 도서지형의 복잡성은 기계적 난류의 형태를 용이하게 만

들며, 해륙풍의 풍속 및 방향에 영향을 미치게 되며 복잡지형의 존재가 열적인 효과를 준다(류찬수 등, 2004). 모델이 서해안의 복잡지형을 적용하지 못하며 오차가 생긴 것으로 보이고, 이는 지형조건의 업데이트로 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2는 연구지역의 관측 지점에서 기상인자별 모델결과(BASE, 3DVAR+NUD)와 관측값 사이의 통계분석(IOA, RMSE, MBE)을 나타낸다. 방재 기상관측소인 운평지점은 상대습도, 시정, 노점온도의 관측자료가 없는 관계로, 기온, 풍속에 이용하였다. 모든 지점에서 풍속을 제외하고 3DVAR+NUD가 BASE에 비해 향상된 결과를 보였는데 3DVAR+NUD의 기온은 IOA가 BASE와 비교하여 0.67~0.83에서 0.79~0.88으로 크게 향상되었으며 RMSE는 2.8°C~3.8°C가 2.3°C~3.3°C로 낮아지며 오차가 줄었다. MBE는 -1.5~-2.5로 음의 값을 보이며 과소모의를 하였고 그 수치는 BASE의 MBE수치인 -2.2~-3.2보다 낮아진 값을 보였다. 풍속은 오히려 결과가 좋지 않게 나왔으나 이는 서해의 많은 섬, 관측지점 주변의 건물과 같은 지리적 영향을 받은 것으로 사료된다.

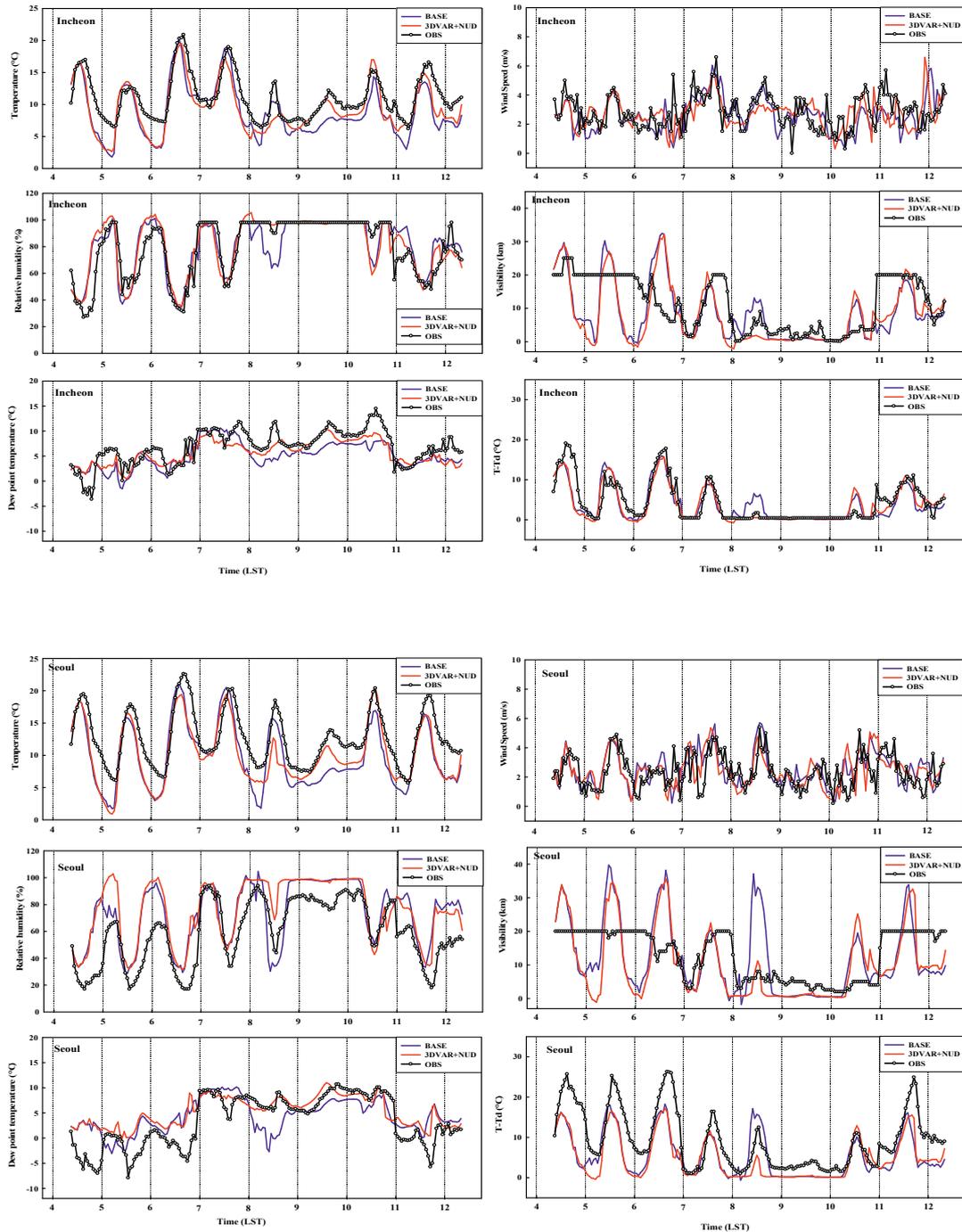


Fig. 8. Temporal variations of the meteorological variables for 3DVAR+NUD, BASE, and observations (OBS) in ASOS site on April 2016 of the heavy fog event observed. Air temperature = TEMP, wind speed = WS, relative humidity = RH, visibility = VIS, dew point temperature = Td, and T-Td.

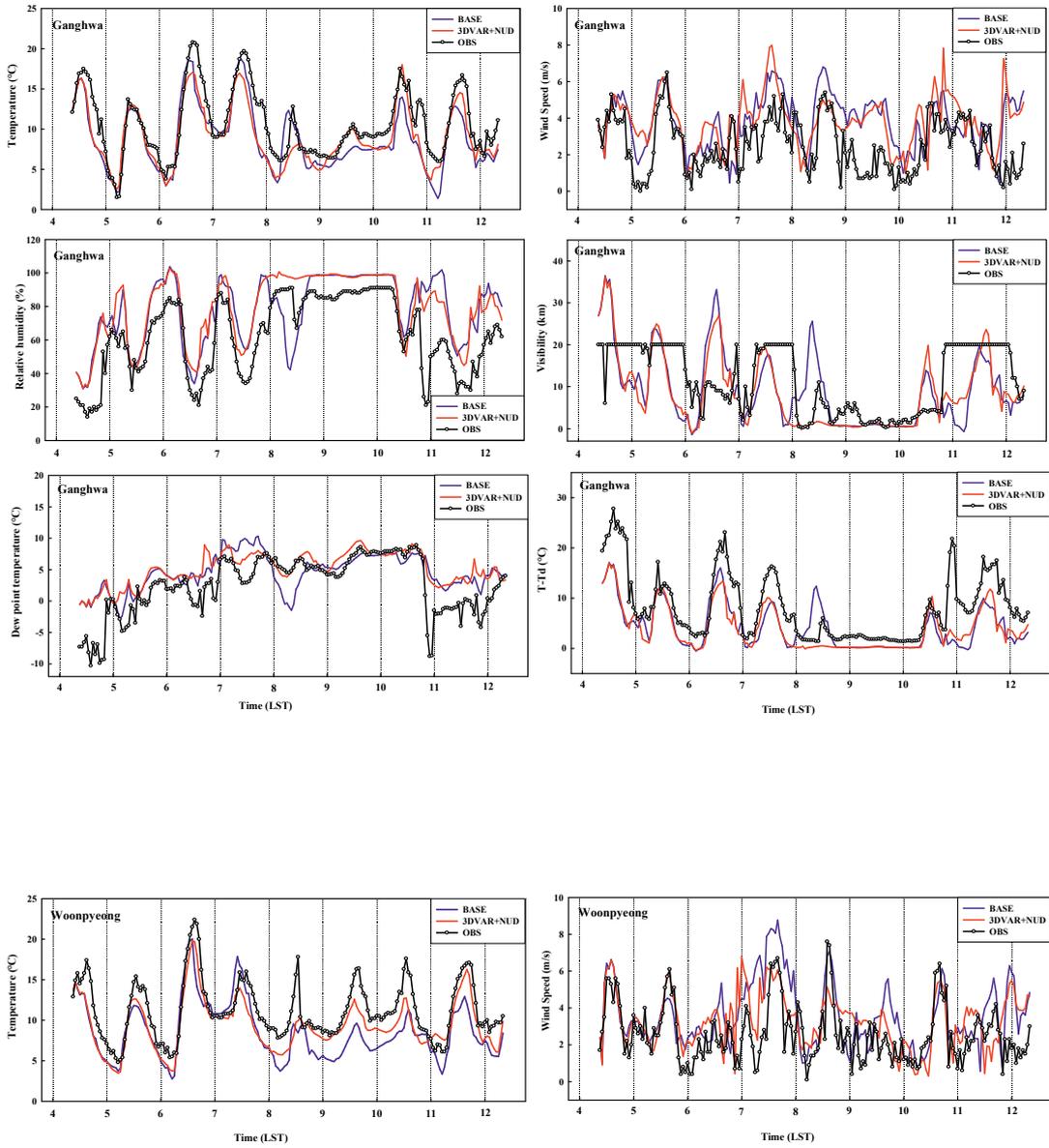


Fig. 8. (Continued)

Table 2. Statistical evaluation of the meteorological variables between the observed and model-predicted values (for the 3DVAR+NUD and BASE) at four monitoring sites in the western part of the Korean Peninsula during April 2016 of the heavy fog event observed.

Site	Variable	BASE			3DVAR+NUD		
		RMSE	IOA	MBE	RMSE	IOA	MBE
Incheon	TEMP	2.855	0.819	-2.314	2.349	0.859	-1.564
	WS	1.220	0.706	-0.169	1.300	0.598	-0.143
	RH	12.203	0.832	-0.300	9.502	0.911	-0.437
	VIS	6.946	0.704	-2.599	6.382	0.774	-2.662
	Td	2.875	0.697	-2.168	2.252	0.786	-1.525
	T-Td	2.291	0.965	-0.146	1.858	0.978	-0.040
Seoul	TEMP	3.808	0.807	-3.094	3.327	0.826	-2.495
	WS	1.142	0.727	0.170	1.263	0.637	0.106
	RH	19.012	0.785	11.635	18.068	0.805	13.861
	VIS	10.000	0.594	-1.455	8.052	0.715	-2.769
	Td	3.500	0.679	-0.511	2.359	0.861	0.620
	T-Td	4.818	0.740	-2.584	4.361	0.779	-3.115
Ganghwa	TEMP	3.047	0.836	-2.254	2.520	0.879	-1.769
	WS	2.152	0.596	1.529	2.186	0.568	1.469
	RH	24.228	0.649	15.351	20.484	0.763	16.820
	VIS	9.273	0.615	-3.482	7.720	0.741	-4.058
	Td	3.704	0.627	1.248	3.276	0.720	1.979
	T-Td	5.746	0.545	-3.501	5.033	0.657	-3.747
Woonpyeong	TEMP	3.821	0.673	-3.250	2.499	0.793	-1.877
	WS	1.879	0.731	1.059	1.600	0.716	0.639

Fig. 9는 연구 사례일동안 자료동화(3DVAR+NUD) 개선효과를 살펴보기 위하여 서해안 지역을 대상으로 주요 기상요소(기온, 상대습도, 시정, 풍속)의 공간 분포를 나타낸다. 공간 분포 분석은 4월 안개 사례 중 안개의 발생이 시작한 시간인 2016년 4월 8일 12시를 대상으로 수행되었다. 기온 공간 분포를 보면, 3DVAR+NUD의 결과는 BASE 결과와 비교해 볼 때 전반적으로 과소모의를 하였으며 특히, 내륙에서의 높은 기온을 3DVAR+NUD에서 다소 낮게 모의하였다. 3DVAR+NUD의 상대습도 결과는 관측값에 비해 내륙에서 과대모의를 하는 모습을 보이지만 크게 과소모의를 하는 BASE에 비해 안개사례일의 적합한 향상된 상대습도 모의를 한 것으로 보인다. BASE는 내륙에서 약 20~30%의 상대습도가 오차가 크게 나타났다. 안개에 중요한 시정의 경우 또한 3DVAR+NUD의 결과가 향상된 모습을 나타내었다. BASE는 내륙에서 시정이 약 20km, 연안에서 약 10km으로 모의하며 관측값과 잘 맞지 않았다. 하지만 3DVAR+NUD의 결과에서는 다소 과소모의를 하였으나 서해뿐만 아니라 연안, 내륙의 시정을 비교적 잘 모의하였다. 3DVAR+NUD의 풍속 결과는 관측값과 아주 유사한 공간 분포를 모의하였다. 안개 발생시 낮은 풍속을 BASE의 결과보다 내륙에서 잘 모의하였으며, 특히 강화 지역 근처에서 BASE는 과대모의를 하는데 3DVAR+NUD의 결과는 관측값과 유사한 낮은 풍속을 모의하였다.

12:00 LST, 8 April 2016

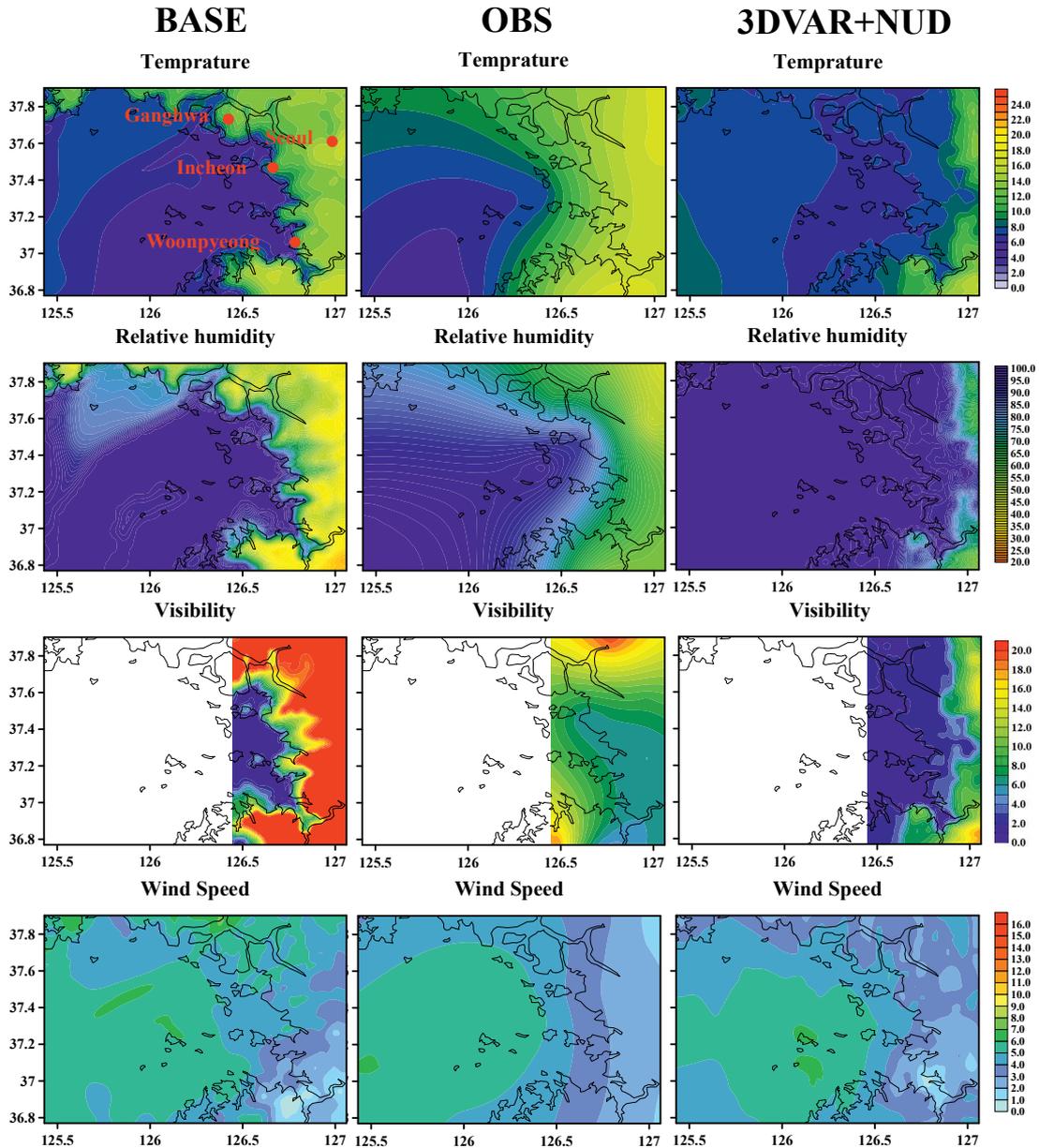


Fig. 9. Spatial distributions of meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD and BASE with the observations (OBS) on 12:00 LST, 8 April 2016 of the heavy fog event observed in the western part of South Korea.

3.2.2 여름철 안개사례(2018년 6월)

Fig. 10는 여름철인 6월 안개사례동안(2018년 6월 23일~6월 30일) 서해안 지역 8개 관측 지점의 3DVAR+NUD와 BASE를 통해 모의된 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 시정, 노점온도, 기온과 노점온도의 차)의 시계열을 나타내며, 이를 관측값과 비교하였다. 서해안 지역 안개 특성상 해양기상의 영향을 많이 받기 때문에 6월 안개 사례에서는 기존 내륙의 4개 지점(인천, 서울, 강화, 운평)에 해양기상 부이 지점(덕적도부이, 인천부이) 및 등표기상관측소(가대암, 서수도)를 추가하여 자료동화 개선 효과를 분석하였다. 인천지역의 기온은 대체적으로 야간에 과소모의를 하였으며 안개가 발생한 27일, 28일에 과대모의를 하였다. BASE는 22일 새벽에 13.9℃를 나타내며 18.2℃인 관측값에 비해 크게 과소모의를 하였고, 28일 야간에는 21.9℃로 모의하였으나 19.6℃인 관측값과 비교해 과대모의를 하였다. 그에 비해 3DVAR+NUD는 22일 새벽에 17.0℃, 28일 야간에 19.3℃를 나타내며 많이 개선된 모습을 보였다. 풍속은 BASE, 3DVAR+NUD 결과 모두 전체적인 풍속패턴을 잘 모의하였으나 BASE의 경우 안개가 극심했던 27일의 풍속을 5.6m/s로 0.7m/s의 관측값과 비교해 크게 과소모의를 하였고 3DVAR+NUD의 경우는 2.0m/s로 많이 향상된 모의를 하였다. 이러한 풍속의 결과는 해안 도서 지형의 복잡성이 난류의 형태를 용이하게 만들고, 이 때문에 해륙풍의 풍속 및 풍향에 영향을 준 것으로 사료된다(류찬수, 2004). 풍속의 모델결과가 과대모의하는 것은 이러한 도서지형의 복잡성을 고려하지 못 하는 것도 영향을 받을 것으로 보인다. 상대습도는 21일 정오에 74%가 관측되었고 BASE가 40.8%로 과소모의를 하였으나 3DVAR+NUD는 62.4%를 나타내었다. 또한 시정은 26일 오전에 시정이 0.55km로 악시정의 안개가 관측되었는데 BASE는 5.67km로 과대모의를 하였으며 3DVAR+NUD는 1.15km를 모의하며 상대습도, 시정이 많이 개선된 모습을 보였다. 노점온도는 23일 모델 결과와 오차가 크게 나타났으나 21~22일, 27~28일 BASE의 결과보다 3DVAR+NUD의 결과가 관측값에 유사한 모습을 보이며 안개예측에 필요한 노점온도를 향상되게 모의하였다. T-Td값은 모델결과가 22~23일에 많이 오차가 나지만 극심한 안개 발생일인 26~29일에 낮은 T-Td값을 잘 모의하였으며 3DVAR+NUD의 효과로 인해 BASE보다 향상된 모의를 하였다.

서울에서도 3DVAR+NUD를 통해 개선된 모습을 보인 인천과 비슷한 모습을 나타내었다. 기온은 연구기간동안 야간에 전반적으로 과소모의를 하였으나 3DVAR+NUD가 BASE에 비해 개선된 모습을 보였다. 풍속은 과대모의 하는 부분이 있었으나 27일 야간에 1.3m/s의 약한 풍속이 관측되었고 3.0m/s를 나타내는 BASE에 비해 3DVAR+NUD는 1.15m/s를 나타내며 향상된 모의를 하였다. 상대습도와 시정은 비교적 과대모의를 하였으나 BASE의 결과보다는 3DVAR+NUD의 결과가 향상된 것을 확인 할 수 있다. 하지만 인천과 다르게 상대습도, 시정, T-Td 등이 개선된 효과가 적었는데 이는 서울의 많고 높은 건물들과 교통량 등 도시의 여러 가지 영향을 받았을 것으로 판단된다.

강화에서는 비교적 인천, 서울보다 BASE, 3DVAR+NUD 모의 결과가 좋게 나타났다. 기온은 BASE의 결과가 22일 오전에 14.8℃, 25일 오전에 17.6℃을 보이며 과소모의를 하는 모습을 보였고 3DVAR+NUD의 결과는 각각 16.4℃, 18.4℃를 나타내며 16.6℃, 18.8℃의 관측값에 가까운 모습을 보였다. 풍속은 BASE가 3DVAR+NUD와 비교해 더 크게 과대모의를 하였고, 특히 안개가 발생한 26일~29일에 크게는 관측값보다 약 6m/s 과대모의를 하였다. 3DVAR+NUD는 26일~29일에 약 2m/s 과대모의하며 자료동화(3DVAR+NUD) 효과를 보였다. BASE의 상대습도, 시정, 노점온도, T-Td는 인천, 서울의 경우와 같이 21일 오전에 오차가 크게 나타났고 3DVAR+NUD는 관측값에 유사한 값을 나타내면서 모델의 모의가 많이 향상되었다. 방재 관측 지점인 운평에서도 인천, 서울, 강화와 비슷한 기온, 풍속 결과가 나왔다.

덕적도 부이 지점에서 기온의 모델결과는 전체적으로 과대모의하면서 관측값의 패턴을 전혀 따라가지 못하는 모습을 보였다. 이는 모델 WPS 중 GEOGRID 단계에서 사용되는 지형자료가 서해안의 복잡한 지형을 묘사하지 못하여 덕적도 부이 지점 주변에 있는 섬의 영향을 고려하지 못한 영향도 있을 것으로 사료된다. 덕적도 부이 지점의 풍속은 과대모의 하지만 3DVAR+NUD의 결과는 26일 오후에 8.0m/s의 관측값에 가까운 9.0m/s를 나타내며 16.0m/s인 BASE에 비해 많이 향상되었으며 전체적으로도 향상된 모습을 보였다. 또한 상대습도는 과소모의를 했으나 전체적으로 3DVAR+NUD의 결과가 좋았으며 특히 21일~22일에 약 7~8% 개선되었다. 덕적도 부이 지점과 같이 주변 복잡한 지형이 있는 가대암,

서수도 등표기상관측소 또한, 덕적도와 마찬가지로 기온의 시계열 그림이 관측값과 다른 모습을 보였다. 하지만 두 등표 지점에서도 3DVAR+NUD의 풍속, 상대습도는 관측값에 많이 유사한 패턴을 보였고 BASE에 비해 향상되었다. 비교적 서해안의 복잡한 지형에서 떨어져 있는 인천부이 지점의 기온은 덕적도, 가대암, 서수도 지점과 달리 비교적 관측값과 유사하게 모의를 하는 모습을 보인다. 이는 인천 부이 관측 지점이 많은 섬의 영향을 받지 않기 때문에 모델에 구성된 지형 조건과 유사하기 때문으로 사료된다. 또한 인천 부이에서는 풍속이 BASE결과가 과대모의를 하는 경향을 보이지만 3DVAR+NUD의 결과는 전체적으로 향상되며 관측값과 유사한 경향을 보였다. 상대습도 또한 BASE에 비해 많이 개선되며 3DVAR+NUD의 효과를 보였다.

전반적으로 모든 지점에서 안개가 발생할 때 풍속을 과대모의 하는 모습과 다르게 3DVAR+NUD는 낮은 풍속을 잘 모의하였다. 안개 형성, 시정 예측에 중요한 상대습도, 노점온도도 3DVAR+NUD가 향상된 모의를 하였다. 기온과 노점온도의 차이가 적을수록, 상대습도가 높을수록 안개 발생이 많다. 또한 대기가 안정하며 풍속이 약할수록 안개형성에 좋은 조건이 된다. 이 점에서 안개발생일의 낮은 풍속과 T-Td의 향상된 모의를 하는 등 3차원 변분자료동화 및 분석넷징은 안개예측에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

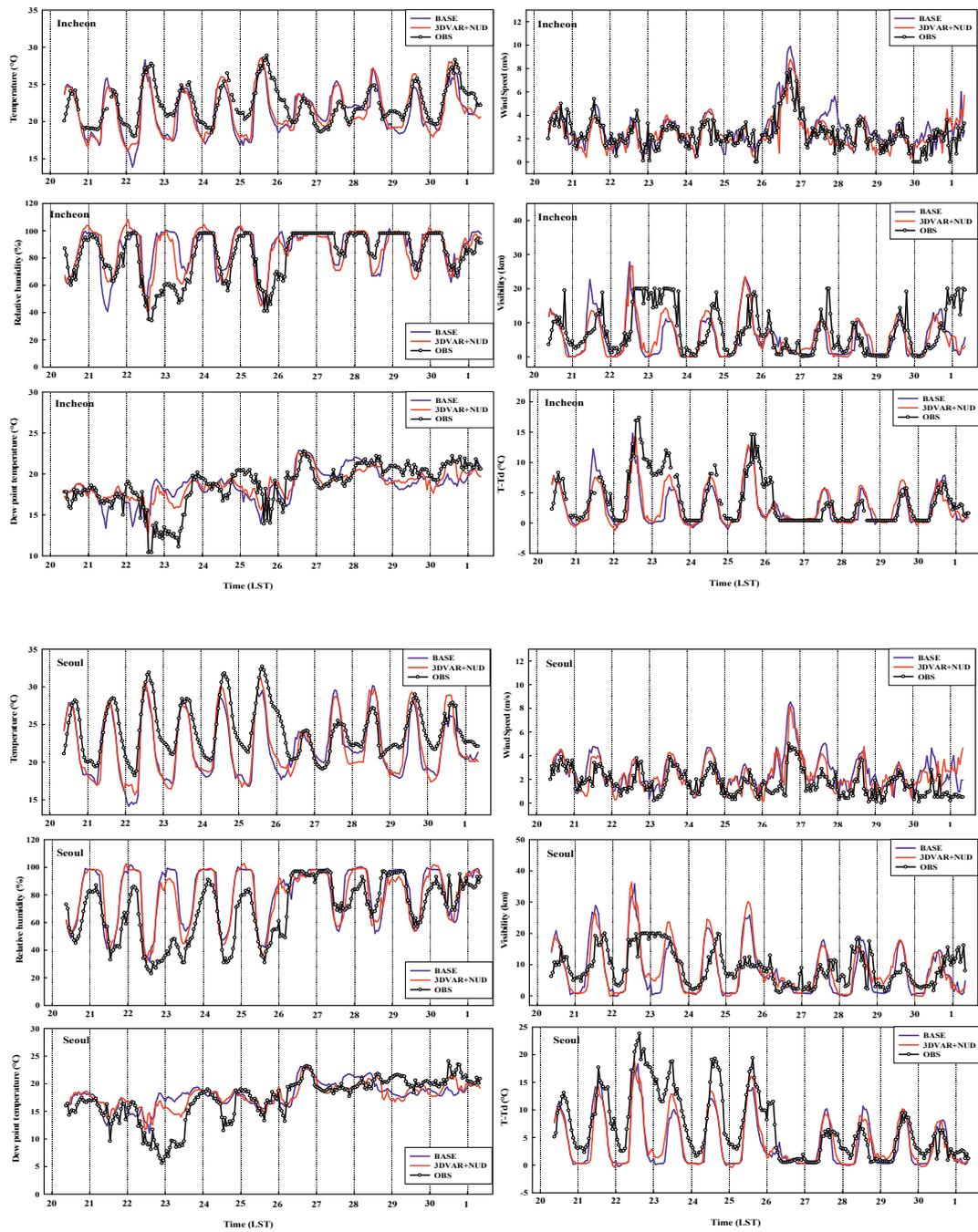


Fig. 10. Temporal variations of the meteorological variables for 3DVAR+NUD, BASE, and observations (OBS) in observations sites on June 2018 of the heavy fog event observed.

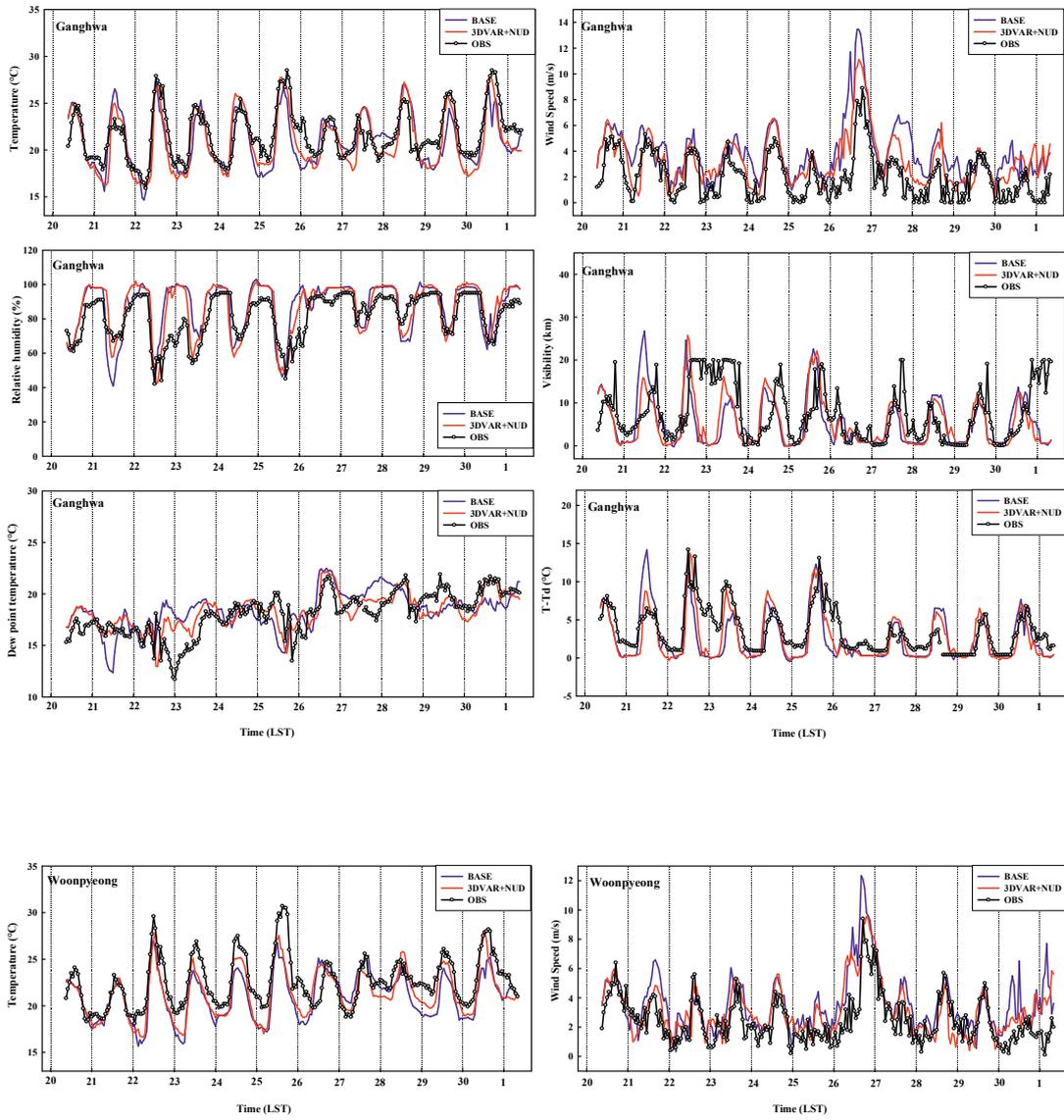


Fig. 10. (Continued)

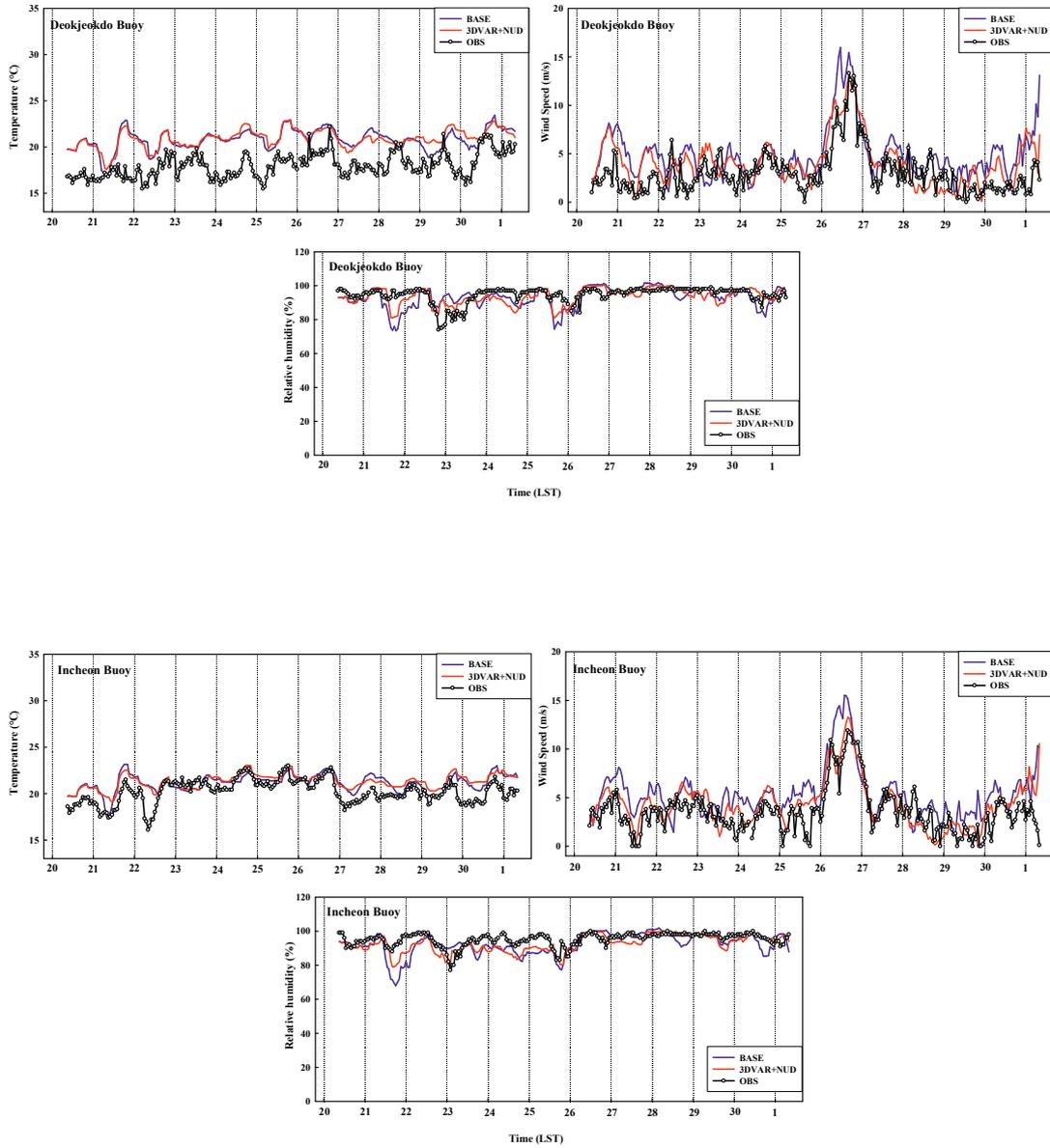


Fig. 10. (Continued)

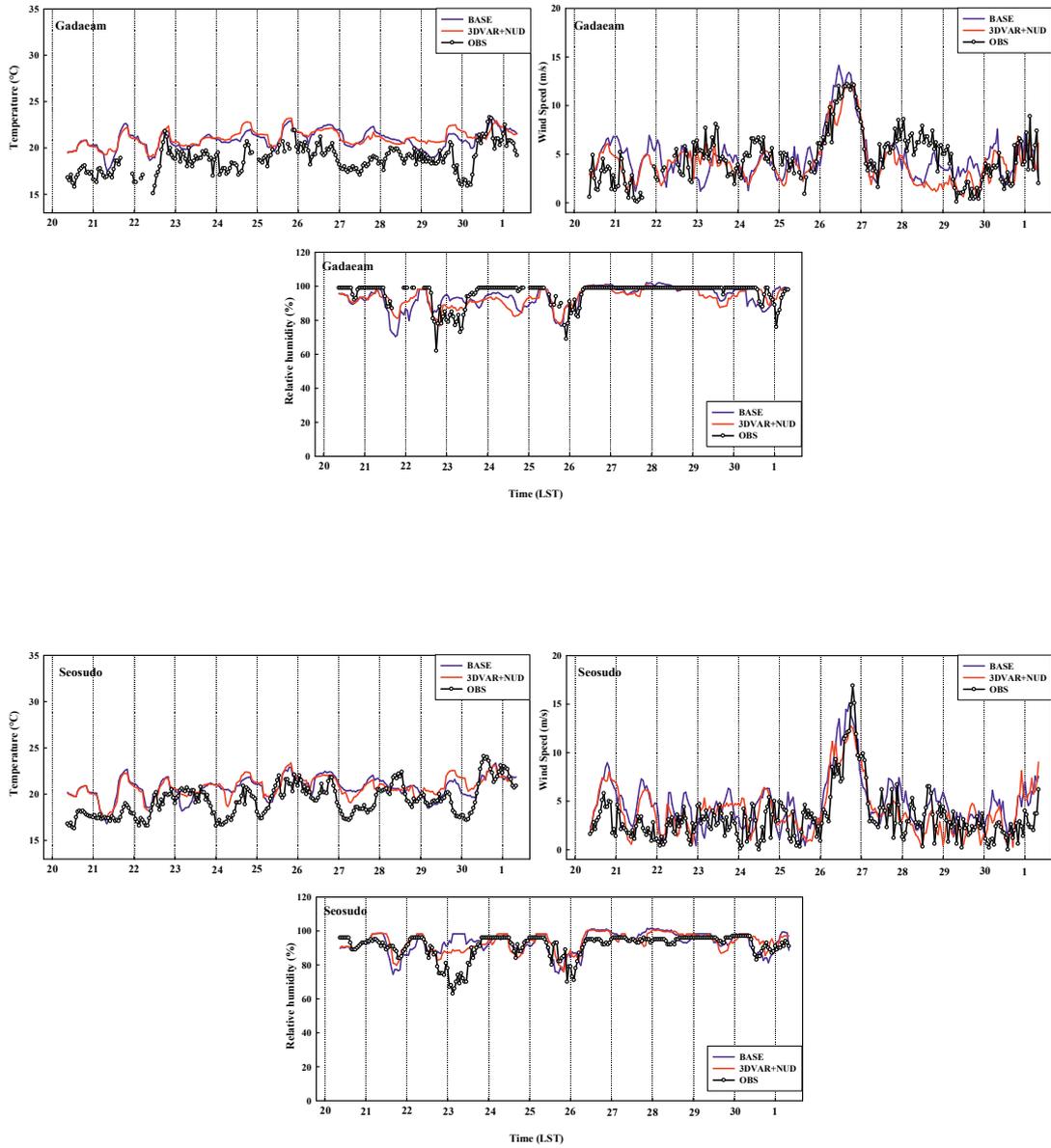


Fig. 10. (Continued)

모델의 모의가 연구지역의 안개 현상 예측 및 관련 기상 조건의 이해에 합리적임을 보이고 3차원 변분자료동화 및 분석넷징의 효과를 통계적으로 살펴보기 위하여 6월 안개사례의 각 관측지점에서 기상인자별 BASE와 3DVAR+NUD 모델 결과값의 통계검증(IOA, RMSE, MBE)을 하였다(Table 3). 방재기상관측소인 운평은 상대습도, 시정, 노점온도의 결측으로 기온, 풍속만 분석하였으며 해양기상부이인 덕적도부이, 인천부이, 등표기상관측소인, 가대암, 서수도는 시정, 노점온도의 결측으로 기온, 풍속, 상대습도를 분석하였다. 시계열 그림에서 보였듯이 전체적으로 3DVAR+NUD의 결과가 통계검증에서도 향상된 수치를 보였고, 이는 4월 안개사례의 결과와 유사하다. 인천에서 기온의 IOA는 0.79에서 0.84로 향상되었고 모든 기상인자(풍속, 상대습도, 시정, 노점온도, T-Td)가 0.02~0.12만큼 향상되었다. 인천 외에도 내륙에 있는 지점(서울, 강화, 운평)에서는 IOA, RMSE, MBE가 모두 향상되었다. 4개의 내륙 지점에서 3DVAR+NUD에 의해 모의된 기온, 풍속, 상대습도, 시정, 노점온도, T-Td의 IOA는 각각 0.81, 0.71, 0.79, 0.61, 0.76, 0.79이상으로 나타났다. 또한 RMSE는 각각 3.2℃, 2.8m/s, 18%, 7.3km, 2.8℃, 4.8℃ 미만으로 계산되었다(기온, 시정, 노점온도, T-Td는 부이와 등표 지점 제외). 이것은 BASE에 비해 IOA는 0.03~0.14만큼 크게 향상되었으며, RMSE는 기온이 0.2~0.46℃, 상대습도가 1.6~2.8%가 감소하여 향상된 모습을 보였다. 하지만 해양의 지점인 해양 기상 부이 지점과 등표기상관측소의 4지점에서는 풍속, 상대습도는 3DVAR+NUD의 IOA가 0.03~0.16까지 향상되었으나 기온의 모델결과(BASE, 3DVAR+NUD)는 상대적으로 낮게(0.41~0.66) 모의되었다. 위 결과는 시계열 그래프에서도 확연하게 드러났으며, 이는 서해의 많은 섬과 복잡한 지리적인 특징의 영향으로 추정된다.

Table 3. Statistical evaluation of the meteorological variables between the observed and model-predicted values (for the 3DVAR+NUD and BASE) at eight monitoring sites in the western part of the Korean Peninsula during June 2018 of the heavy fog event observed.

Site	Variable	BASE			3DVAR+NUD		
		RMSE	IOA	MBE	RMSE	IOA	MBE
Incheon	TEMP	2.400	0.794	-1.013	2.167	0.839	-0.789
	WS	1.178	0.820	0.336	1.049	0.837	0.071
	RH	16.123	0.728	4.743	13.273	0.820	4.048
	VIS	7.672	0.559	-2.012	7.032	0.619	-1.781
	Td	2.338	0.669	0.082	1.813	0.793	0.106
	T-Td	3.348	0.789	-1.101	3.028	0.827	-0.973
Seoul	TEMP	3.540	0.767	-2.185	3.235	0.813	-1.993
	WS	1.422	0.699	0.903	1.320	0.708	0.698
	RH	20.954	0.753	11.767	18.879	0.791	10.293
	VIS	7.804	0.625	-1.219	7.310	0.653	-0.516
	Td	3.284	0.670	0.793	2.822	0.755	0.686
	T-Td	5.298	0.754	-2.978	4.831	0.791	-2.679
Ganghwa	TEMP	2.017	0.853	-0.659	1.778	0.900	-0.762
	WS	2.438	0.683	1.871	1.760	0.791	1.258
	RH	12.704	0.785	5.232	10.826	0.846	5.143
	VIS	8.002	0.516	-2.069	7.292	0.606	-2.142
	Td	2.119	0.672	0.025	1.678	0.794	-0.095
	T-Td	2.761	0.787	-0.684	2.248	0.861	-0.666
Woonpyeong	TEMP	2.380	0.790	-1.572	1.917	0.866	-1.216
	WS	1.774	0.760	1.093	1.402	0.822	0.694
Deokjeokdo Buoy	TEMP	3.158	0.427	2.964	3.219	0.419	3.070
	WS	2.837	0.712	1.958	2.136	0.798	1.150
	RH	6.703	0.473	-0.774	5.108	0.635	-0.173
Incheon Buoy	TEMP	1.406	0.663	1.113	1.443	0.656	1.270
	WS	2.675	0.735	1.827	1.751	0.860	0.829
	RH	6.519	0.558	-2.085	4.800	0.706	-1.804
Gadaeam	TEMP	2.401	0.543	3.588	2.595	0.501	3.776
	WS	2.304	0.780	0.419	2.133	0.807	-0.143
	RH	6.829	0.629	5.478	6.273	0.700	5.264
Seosudo	TEMP	2.092	0.602	1.379	2.084	0.605	1.458
	WS	2.500	0.779	1.367	2.176	0.813	0.774
	RH	7.921	0.565	2.027	6.153	0.707	2.293

Fig. 11은 자료동화(3DVAR+NUD) 개선 효과를 살펴보기 위하여 6월 안개 사례 중 길게 지속된 안개가 발생하기 시작한 6월 26일 10시의 서해안 지역을 대상으로 주요 기상요소(기온, 상대습도, 시정, 풍속)의 공간 분포를 나타낸다. 기온 공간분포는 3DVAR+NUD의 향상된 모의가 뚜렷하게 보이지는 않지만 서울에서 향상된 모습을 보인다. 상대습도의 공간분포에서 3DVAR+NUD 효과를 볼 수 있는데 운평의 연안지역에서 관측된 높은 상대습도를 잘 모의하고 있다. 3DVAR+NUD 모의결과가 내륙의 높은 상대습도를 모의를 하지 못하였지만 BASE의 경우보다 향상되었음을 나타내었다. 시정은 방재기상관측소, 해양기상부이, 등표기상관측소에서 관측을 하지 않기 때문에 서해안지역의 종관기상관측소의 시정 자료만 이용하였다. 그로인해 시정의 공간분포는 일정부분 생략되었다. 3DVAR+NUD 모의결과의 시정은 인천, 운평 연안에서 BASE보다 향상된 모의를 하였다. 대부분의 안개가 해안의 안개가 내륙까지 영향을 주는 이류무형태의 안개가 발생하는 서해안지역(기상연구소, 2002)이기 때문에 연안 시정 예측 능력이 향상된 것은 서해안의 안개예측에 도움을 줄 것으로 보인다. 하지만 시정은 전체 공간 분포를 봤을 때 모델 모의 결과가 관측값보다 과대 모의를 하는 것을 보였다. 이 점은 관측값의 공간분포를 나타낼 때 사용된 관측지점의 수가 충분하지 않았다는 점을 고려해봐야 한다. 악시정이 관측된 시간인 만큼 풍속은 낮게 관측이 되었는데 3DVAR+NUD의 결과가 낮은 풍속을 모의하였다. BASE의 결과는 서해의 풍속을 크게 과대모의를 하고 있으며 연안 지역에서도 관측값에 비해 높았지만 3DVAR+NUD의 결과는 서해의 낮은 풍속 공간 분포를 관측값과 유사하게 모의하였다. 낮은 풍속 또한 안개 형성 조건에 필요한데 이처럼 서해의 낮은 풍속을 유사하게 모의한 것은 서해안 지역의 안개 예측에 도움을 줄 것이다.

Fig. 12은 인천에서 시정이 40m가 관측되는 악시정이 발생한 시간인 2018년 6월 30일 2시의 3DVAR+NUD와 BASE를 통해 모의된 기온, 상대습도, 시정, 풍속의 공간 분포를 나타내었다. 3DVAR+NUD의 기온 공간 분포 결과는 향상되었으나 서해안에 해양기상 관측망이 부족하고 많은 섬과 지리적인 특징의 영향으로 인해 관측값과 다소 다르게 나타났다. 하지만 상대습도, 시정, 풍속의 공간분포 결과는 6월 26일 10시의 공간 분포 결과에서 그랬듯이 3DVAR+NUD 모의결과가 향상된 공간 분포를 보였으며 관측 공간 분포에도 많이 유사한 모습을 보였

다. 상대습도는 서울지역이 운평지역보다 비교적 낮게 관측되었는데 이를 BASE에서는 모의를 하지 못하였으나 3DVAR+NUD에서는 모의를 하였다. 하지만 이 시간 서해에서의 높은 상대습도를 모의하지 못하였는데 해양기상 관측망이 부족하여 보다 정확한 비교, 분석이 어렵다. 시정은 서해연안지역 중 강화, 인천에서 낮은 시정을 보이고 서울 및 경기도, 운평은 시정이 비교적 높게 관측된다. 정확하게 모의는 하지 못했지만 3DVAR+NUD 모의 결과가 서울 및 내륙의 높은 시정을 모의했으며 강화 인천의 낮은 시정을 BASE보다 향상된 모의를 하였다. 풍속의 공간분포는 악시정이 발생한 시간이라 전체적으로 낮은 풍속이 관측되었다. 서해의 낮은 풍속을 3DVAR+NUD가 BASE에 비해 잘 나타내고 있다.

이처럼 안개가 발생한 시간의 공간분포를 봤을 때 3차원 변분자료동화 및 분석넛징의 효과로 인해 기상요소의 공간분포도 많이 향상됐다. 또한 서해에서의 기상요소도 많이 향상되었는데 서해안 지역은 서해의 해양기상에 영향을 많이 받으므로 기상을 예측하는 데 있어서 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

10:00 LST, 26 June 2018

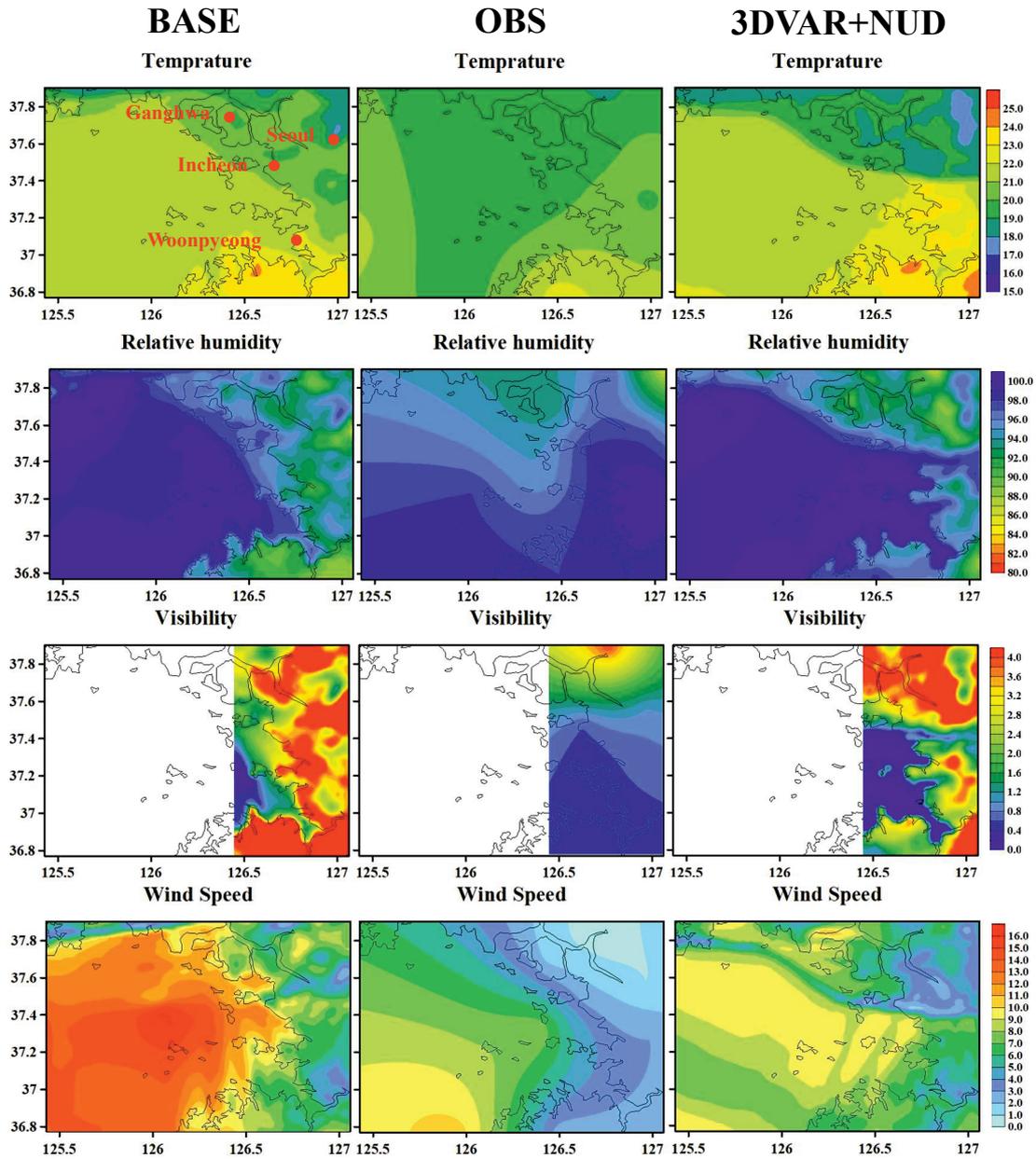


Fig. 11. Spatial distributions of meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD and BASE with the OBS on 10:00 LST, 26 June 2018 of the heavy fog event observed in the western part of South Korea.

02:00 LST, 30 June 2018

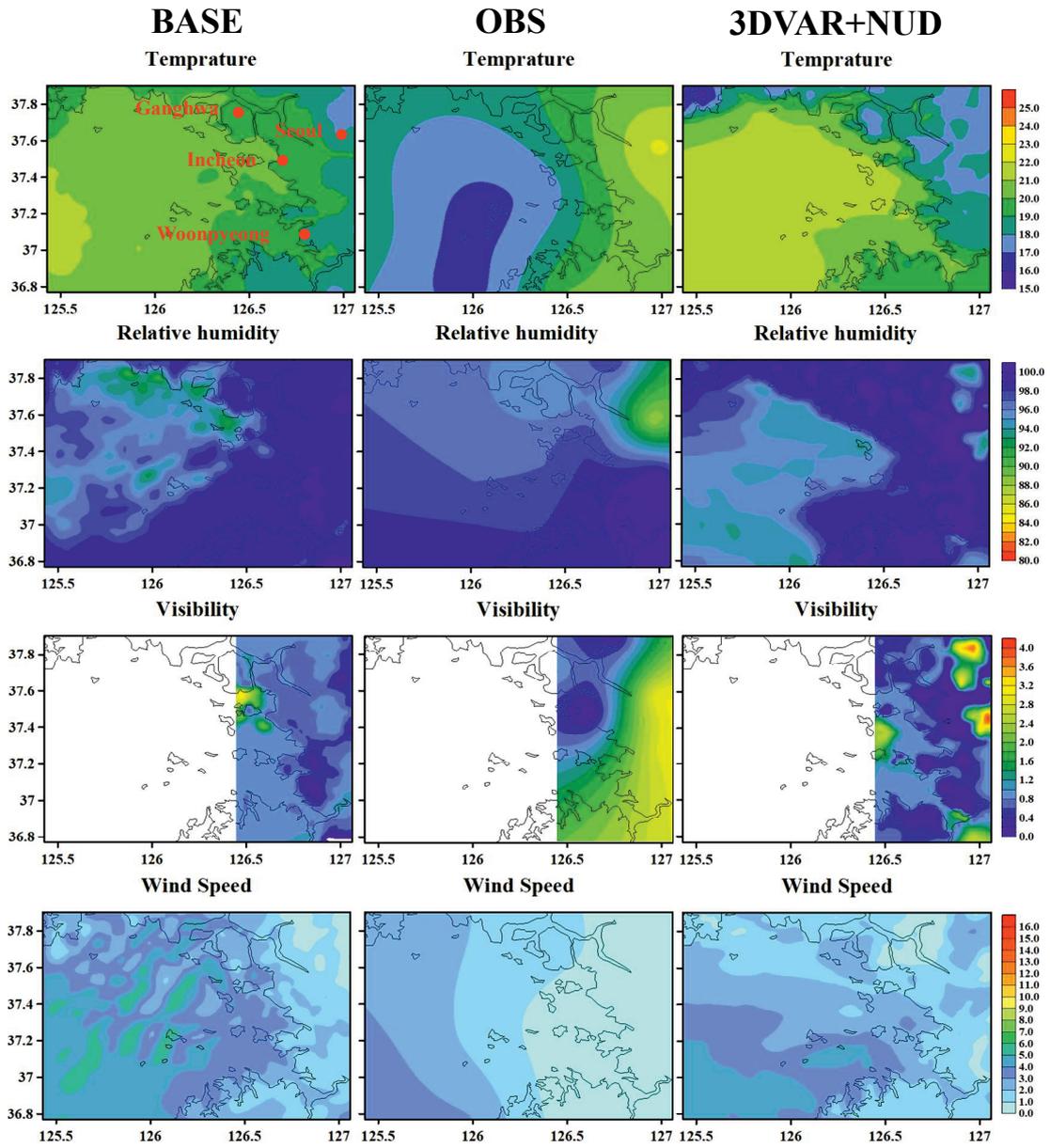


Fig. 12. Spatial distributions of meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD and BASE with the OBS on 02:00 LST, 30 June 2018 of the heavy fog event observed in the western part of South Korea.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 안개가 자주 발생하는 한반도 서해안 지역의 안개예측을 위하여 10년간(2007~2016년)의 일기유형 빈도, 안개발생빈도를 분석하였고 안개가 길게 지속되며 시정이 낮은 짙은 안개가 발생한 사례일을 선정하고 기상모델의 3차원 변분자료동화 및 분석넷징의 효과를 분석하였다.

서해안 지역인 인천의 10년간의 일기유형은 다른 한반도 주요 대도시(서울, 대전, 대구, 광주, 부산, 울산, 제주)와 비교하여 박무(43%), 안개(8%)의 빈도가 가장 높았다. 인천을 제외한 지역은 안개의 빈도가 5%미만으로 특히 서해안 지역의 안개 발생 빈도가 높았다. 해양과 대기의 상호작용에 크게 영향을 받는 안개가 서해의 지리적인 특징으로 해기차가 커지면서 안개의 빈도가 다른 지역에 비해 높은 것으로 보인다. 인천의 안개 발생은 주로 봄철인 4~5월과 여름철인 6~7월에 빈도가 높았다.

3차원 변분자료동화 및 분석넷징의 효과를 분석을 위하여 안개 사례일을 선정하여 기상모델의 결과와 관측값과 비교하였다. 안개 사례일은 인천에서 안개가 가장 많이 발생하는 봄, 여름철의 사례중 안개가 길게 지속되며 시정이 낮게 관측된 날로 선정하였다. 봄철사례는 2016년 4월 8일 02시부터 4월 10일 06시까지이며 여름철 사례는 2018년 6월 23일 22시부터 6월 30일 06시까지이다. 기상모델은 3차원 변분자료동화 및 분석넷징을 적용한 수치모의(3DVAR+NUD)와 자료동화 기법을 적용하지 않은 기본 수치모의(BASE)의 2가지 경우로 설정하였다.

4월 안개사례에서 자료동화 개선효과를 분석하기 위하여 안개발생일을 포함한 2016년 4월 4일부터 4월 12일까지 서해안지역 기상 관측 지점(인천, 서울, 강화, 운평)의 기상인자(기온, 풍속, 상대습도, 시정, 노점온도, T-Td)별 2가지의 모델결과 및 관측값의 시계열 그림을 나타내고 분석하였다. 지역마다 차이는 있으나 전반적으로 3DVAR+NUD의 모델 결과가 BASE의 결과보다 향상된 모의를 하였다. 서해안지역의 인천에서는 안개 형성 조건에 중요한 상대습도, 노점온도가 크게 향상되었고 특히 T-Td는 관측값과 유사한 모습을 나타내었다. 하지만 서울, 강화의 상대습도는 BASE에 비해 향상되긴 하지만 과대모의를 하며 정확한 모의

를 하지 못하였다. 이는 도심지역의 지리적 조건 및 도시의 지표면 상태 등이 모델 내 지형조건과 다르기 때문으로 추정된다. 또한, 각 관측지점에서의 기상인자별 BASE와 3DVAR+NUD 모델값의 통계검증을 하였다. 모든 지점에서 풍속을 제외하고 향상된 결과를 보였다. 3DVAR+NUD의 기온은 IOA가 BASE에 비교하여 0.67~0.83에서 0.79~0.88으로 크게 향상되었으며 RMSE는 2.8°C~3.8°C가 2.3°C~3.3°C로 낮아지며 오차가 줄었다. 이러한 통계적 분석은 모델 모의가 연구지역인 한반도 서해안 지역의 안개 현상 예측 및 관련 기상 조건의 이해에 합리적일 수 있음을 나타낸다. 같은 4월 사례기간 중 안개의 발생이 가장 심했던 2016년 4월 9일 06시, 12시, 18시의 한반도지역(D2)의 기온 공간 분포 그림을 나타내어 분석하였다. BASE가 다소 과소모의를 하였으나 3DVAR+NUD에선 많이 개선된 모습을 보였다. 풍속은 모델 특성상 과대모의를 하는 모습을 보였고 다른 기상요소들도 기온과 유사한 경향을 보였다.

6월 안개사례에는 서해안 지역 안개 특성상 해양기상의 영향을 많이 받기 때문에 기존 내륙의 4개 지점(인천, 서울, 강화, 운평)에 해양 기상 관측 지점인 해양기상부이(덕적도부이, 인천부이), 등표기상관측소(가대암, 서수도)를 추가하여 자료동화 효과를 분석하였다. 시계열 분석을 하였을 때 내륙의 4개 지점에서 4월 사례와 유사하게 안개 형성에 중요한 기상요소들을 3DVAR+NUD의 결과가 BASE에 비해 향상된 모의를 하였다. 안개 사례일 중 시정이 매우 낮게 관측되는 날에 특히 노점온도, T-Td 등을 관측값과 유사하게 모의하였다. 하지만 해양 기상 관측 지점에서의 결과는 다르게 나타났다. 풍속, 상대습도는 3DVAR+NUD의 결과가 BASE에 비해 향상되었으며 관측값에 많이 유사한 패턴을 보였지만 인천부이를 제외하고 덕적도부이, 가대암, 서수도에서 기온의 모델결과는 전체적으로 과대모의를 하면서 관측값의 시계열그림과 전혀 다른 모습을 보였다. 이는 기상 모델에서 사용되는 지형자료가 서해안의 복잡한 지형을 묘사하지 못하여 주변에 있는 섬의 영향을 고려하지 못한 것으로 판단된다. 비교적 서해안의 복잡한 지형에서 떨어져있어서 섬의 영향을 받지 않는 인천부이의 기온은 덕적도부이, 가대암, 서수도보다 모델 결과가 관측값과 유사하게 모의하였다. 6월 안개사례에서의 통계검증의 결과로는 시계열 그림 분석과 같이 전체적으로 3DVAR+NUD의 결과가 BASE에 비해 향상된 수치를 보였다. 내륙에 있는 지점인 인천, 서울, 강화,

운평에서 3DVAR+NUD에 의해 모의된 기온, 풍속, 상대습도, 시정, 노점온도, T-Td의 IOA는 각각 0.82, 0.71, 0.79, 0.61, 0.76, 0.86이상으로 향상된 IOA를 보였다. 또한 RMSE는 각각 3.2℃, 2.8m/s, 18%, 7.3km, 2.8℃, 4.8℃ 미만으로 계산되었다(기온, 시정, 노점온도, T-Td는 부이와 등표 지점 제외). 이것은 BASE에 비해 IOA는 0.03~0.14만큼 크게 향상되었으며, RMSE는 기온이 0.2~0.46℃, 상대습도가 1.6~2.8%가 감소하여 향상된 모습을 보였다. 하지만 해양 지점인 덕적도부이, 인천부이, 가대암, 서수도에서는 풍속, 상대습도의 3DVAR+NUD 모의 결과가 BASE에 비해 IOA가 0.03~0.16까지 향상되었으나 기온의 3DVAR+NUD, BASE의 모의결과가 상대적으로 낮게(0.41~0.66) 모의되었다. 이는 시계열 그래프에서도 확연하게 드러났으며 서해의 많은 섬과 복잡한 지리적인 특징의 영향으로 추정된다. 6월 안개사례 중 악시정이 관측된 2018년 6월 26일 10시와 6월 30일 2시의 서해안지역(D3)을 대상으로 3DVAR+NUD와 BASE를 통해 모의된 기상요소(기온, 상대습도, 시정, 풍속)별 공간 분포를 나타내었다. 26일 10시의 기온 공간 분포는 3DVAR+NUD의 향상된 모의가 뚜렷하게 보이지는 않았지만 서울에서 향상된 모습을 보였다. 상대습도는 운평의 연안지역에서 관측된 높은 상대습도를 3DVAR+NUD가 BASE에 비해 향상된 모의를 하였다. 시정은 종관기상관측소를 제외한 다른 관측소에서 관측을 하지 않기 때문에 종관기상관측소의 시정 관측값만 사용하였다. 같은 시간 인천, 운평 연안에서 악시정을 3DVAR+NUD가 잘 모의하였다. 짙은 안개가 발생하며 낮은 풍속이 관측되었고 서해의 풍속을 크게 과대모의하고 있는 BASE에 반대로 3DVAR+NUD의 결과는 낮은 풍속을 잘 모의하였다. 시정이 40m가 관측되는 악시정이 발생한 2018년 6월 30일 2시의 공간 분포도 비슷한 모습을 보였다. 기온은 3DVAR+NUD 모의 결과의 공간분포가 BASE에 비해 향상되었으나 관측값과 다소 다르게 나타났다. 하지만 상대습도, 시정, 풍속의 결과는 3DVAR+NUD 모의 결과가 향상된 공간 분포를 보였으며 관측 공간 분포에도 많이 유사한 모습을 보였다. 상대습도는 서울지역이 비교적 낮게 관측되는데 이를 BASE에서는 모의를 하지 못하였으나 3DVAR+NUD에선 모의를 하였다. 또한 3DVAR+NUD의 결과는 강화, 인천의 낮은 시정과 서울 및 경기도, 운평의 높은 시정을 잘 모의하였으며 서해의 낮은 풍속도 잘 나타내고 있다. 이와 같이 전체적으로 3DVAR+NUD가 BASE에 비해 공간 분포에서도 향

상된 모습을 보였고 서해의 해양기상에 영향을 많이 받는 서해안지역에서 서해의 기상요소의 예측능력 향상은 서해안지역의 기상을 예측하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 하지만 서해에 해양기상 관측망이 부족하여 보다 정확한 비교, 분석이 어려운 것으로 보인다.

서해상 지역의 안개 예측을 위해서는 서해상의 수온 및 이류 등의 예측도 필요하기 때문에 향후, 현재 서해안의 복잡한 지형을 정확히 묘사할 필요가 있고 보다 정확하고 해상도가 높은 수온(위성 및 모델링 SST)의 적용으로 안개 예측능력을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 또한 분석넷징뿐만 아니라 관측넷징의 적용이나 사례에 따른 넷징 계수의 변화를 준 다양한 수치모의 연구가 정확한 안개 예측을 위하여 필요하다.

참 고 문 헌

- 기상연구소, 1986: 한국 서해중부연안의 해무특성 조사, MR 86-1, 83pp.
- 기상연구소, 2000: 영종도 주변해역의 해무예측 연구(I).
- 기상연구소, 2001: 영종도 주변해역의 해무예측 연구(II).
- 기상연구소, 2002: 인천국제공항의 안개 예측기법 연구.
- 기상연구소, 2014: WRF-LES-FDDA 구축 및 검증.
- 기상청, 2015: 주요 안개 사례 분석을 통한 안개 분석기술과 예측방법.
- 김문옥, 1998: 한반도 주변 해역의 해무 분포 특성, 전남대학교 석사학위 논문, 63pp.
- 류찬수, 신유미, 이순환, 2004: 해안지형 복잡성이 중규모 순환장에 미치는 영향에 관한 수치실험. 한국기상학회지, 40, 71-86.
- 박형식, 송상근, 한승범, 조성빈, 2018: 최근 10년간 (2007~2016년) 한반도 대도시 일기유형 빈도의 시·공간 특성 및 유형별 대기질 변화 분석. 한국환경과학회지, 27(11), 1129-1140.
- 변희룡, 이동규, 이화운, 1997: 동해 및 그 주변에서 발생하는 해무의 특성과 예측 가능성 조사. 한국기상학회지, 33, 41-62.
- 손고은, 2014: WRF-SWAN 모델을 이용한 상세규모 연안기상 예측, 부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공 석사학위논문, 71pp.
- 송윤영, 2013: 인천 국제공항에서의 안개 발생지수 FSI(Fog Stability Index) 개발, 연세대학교 대기과학과 석사학위논문, 52pp
- 유정우, 박순영, 전원배, 김동혁, 이화운, 이순환, 김현구, 2017: WRF-CMAQ 결합 모델을 이용한 에어로졸 피드백 효과가 한반도 일사량에 미치는 영향 연구. 한국 대기환경학회지 (국문), 33(5), 435-444.
- 윤민지, 2010: 자료동화 및 physics scheme에 따른 기상모델 WRF의 민감도 분석, 안양대학교 환경공학과 석사학위논문, 86pp.
- 이승호 · 허인혜, 2003, 대형 댐 건설이 주변 지역의 안개 특성에 미친 영향 - 주암 댐과 충주댐을 사례로-, 환경영향평가학회지, 12(2), 109-120.

- 이화운, 이동규, 이태영, 김유근, 원경미, 한한우, 1998: 연안 도시 지역의 대기 흐름 시뮬레이션(A Numerical Simulation for Flow Current in Coastal Urban Area). 한국기상학회지, 34, 75-86
- 임은하, 김영화, 이천우, 2003: 지역용 3차원변분자료동화에서 레이더 시선 속도 자료의 동화 효과. 대기, 13(1), 94-97.
- 원덕진, 김상운, 김경익, 민경덕, 2000: 황해상 해무 발생시의 기상 및 해양 요소의 특성 분석. 한국기상학회지, 36, 631-642.
- 위태권, 1999: 중규모 대류계의 구름 분해 모의에 기초한 적운 매개 변수화. 서울대학교 대기과학과 박사학위논문, 308pp.
- 최원, 이재규, 김유진, 2012: 분석자료의 분해능과 3DVAR 적용에 따른 WRF 모의 민감도: 사례 연구. 대기, 22(4), 387-400.
- 한승범, 2016: 제주지역 고농도 대기오염 원인규명에 관한 기상학적 특성: 관측자료 분석과 수치모델링 연구, 제주대학교 지구해양과학과 석사학위논문, 69pp.
- 허인혜, 이승호, 1998: 한국의 안개 분포와 특성. 한국지리환경교육학회지, 71-85.
- 황윤정, 하종철, 김연희, 김기훈, 전은희, 장동언, 2011: KLAPS와 3DVAR를 이용한 ProbeX-2009 남·서해상 고층관측자료의 관측 시스템 실험 연구. 대기, 21(1), 1-16.
- Ahn, S. H., Park, S. Y., Kim, J. Y., Kim, B. J., 2014, Effect of the rainfall during typhoon periods on the variation of concentration of ambient air pollutants (PM10, NO2, CO, SO2) in the Korean peninsula, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 30, 128-138.
- Bang, C. H., Lee, J. W., & Hong, S. Y., 2008, Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model. J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24(E2), 92-101.
- Byers, H. R., 1959, General Meteorology, 3rd Edition, McGraw Hill Book Co., Inc, 540pp.
- Cho, Y.-G., Kim, M.-O., Kim, B.-C., 2000, Sea Fog around the Korean Peninsula. J. Appl. Meteor. Soc., 39, 2473-2479.

- Choi, H.-J., H. W. Lee, K.-H. Sung, and M.-J. Kim., 2009, The effect of atmospheric flow field according to the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on complex area. *J. Environ. Sci.*, 18, 271-281.
- Choi, H.-Y., J.-H. Ha, D.-K. Lee, and Y.-H. Kuo., 2011, Analysis and simulation of mesoscale convective systems accompanying heavy rainfall: The Goyang case. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 47(3), 265-279.
- Choi, J. H., Y. H. Lee, D. E. Chang, and C. H. Cho, 2002: The impact of surface data assimilation on shortrange prediction using AWS data. *Atmosphere*, 12, 377-380.
- Choi, W., J. G. Lee, and Y.-J. Kim., 2013, The impact of data assimilation on WRF simulation using surface data and radar data : Case study. *Atmosphere*, 23, 143-160.
- Chun, Y.-S., K.-O. Boo, J.-Y. Kim, S.-W. Kim, H.-M. Cho, and S. Hong., 1999, Analysis of the radiation fog at the Kimpo International Airport in autumn, *J. of Atmos. Res.*, 16(1), 30-43.
- Croft, P.J., R.L. Pfof, J.M. Medlin, and A.J. Johnson., 1997, Fog forecasting for the southern region: a conceptual model approach, *Wea. Forecasting*, 12, 545-556.
- Deng, A., and Coauthors., 2009, Update on WRF-ARW end-to-end multi-scale FDDA system. Proceedings of the 10th Annual WRF users' workshop, Boulder, CO., USA, NCAR, 1.9.
- Desroziers, G., and Ivanov, S., 2001, Diagnosis and adaptive tuning of observation error parameters in a variational assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(574), 1433-1452.
- Doran, J.A., P.J. Roohr, D.J. Beberwyk, G.R. Brooks, G. A. Gayno, R.T. Williams, J.M. Lewis, and R.J. Lefevre., 1999, The MM5 at the Air Force Weather Agency-New products to support military operations. The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology,

Dallas, Texas, 10-15 January.

- Fu, G., J. T. Guo, S. P. Xie, Y. H. Duane, and M. G. Zhang., 2006, Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. *Atmos. Res.*, 81, 293-303.
- Gultepe, I. R., and Coauthors, 2007: Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure Appl. Geophys.*, 164, 1420-9136.
- Ha, J. H., H.-W. Kim, and D.-K. Lee., 2011, Observation and numerical simulations with radar and surface data assimilation for heavy rainfall over central Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(3), 573-590.
- Hong, Song-You, Hua-Lu Pan., 1996, Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- Hong, Song - You, Jimy Dudhia, and Shu - Hua Chen., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103 - 120.
- Iacono, M., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins., 2008, Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *J. Geophys. Res.*, 10. 1029/2008JD009944.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch., 1993, Convective parameterization for mesoscale models; The kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, *Meteor Monogr*, American Meteorological Society, 24, 165-170.
- Kim, Y., Fu, J. S., & Miller, T. L., 2010, Improving ozone modeling in complex terrain at a fine grid resolution: Part I - examination of analysis nudging and all PBL schemes associated with LSMs in

- meteorological model. *Atmospheric Environment*, 44(4), 523-532.
- Lee, H. D., Lee, G. H., Kim, I. D., Kang, J. S., Oh, K. J., 2013, The influences of concentration distribution and movement of air pollutants by sea breeze and mist around Onsan industrial complex, *Clean Technology*, 19, 95-104.
- Lee, J. Y., 2006, Impact of nudging and resolution on the monthly weather prediction. M. S. thesis, Yonsei University.
- Lee, M. S. and D. K. Lee., 2003, An application of a weakly constrained 4DVAR to satellite data assimilation and heavy rainfall simulation. *Mon. Wea. rev.*, 131(9), 2151-2176.
- Moon, N., S. Kim, and J. Seo., 2011, Sensibility study for PBL Scheme of WRF-CMAQ. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27, 791-804.
- Park, C., Moon, J. Y., Cha, E.-J., Yun, W.-T., Choi, Y., 2008, Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea, *J. Korean Geography. Soc.*, 43(3), 324-336.
- Parrish, D. F., and Derber, J. C., 1992, The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, 120(8), 1747-1763.
- Roach, W.T., 1994: Back to basics: Fog: Part 1 - Definitions and basic physics. *Weather*, 49, 411-415.
- Shafan, P. C., N. L. Seaman, and G. A. Gayno., 2000, Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study. *J. Appl. Meteorol.*, 39, 412-426.
- Son, H. J., 2010, Characteristic analysis of long-term variability of fog occurrence in South Korea, M. Sc. Dissertation, Kongju National University, Kongju.
- Stauffer, D. R., and N. L. Seaman., 1990, Use of four dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: experiments with synoptic scale data. *Mon. Wea. Rev.*, 118,

1250-1277.

- _____, and _____, 1991, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 734-754.
- _____, and _____, 1994, On multi-scale four-dimensional data assimilation. *J. Appl. Meteorol.*, 33, 416-434.
- Skamarock W.C., J. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers., 2008, A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR. Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Talagrand, O., 1997, Assimilation of observations, an introduction (gtspecial issue\data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 75(1B), 191-209.
- WRF-ARW V3: User's Guide, 2015.
- Yang, A.-R., 2012, A sensitivity study of WRF to the choice of observational data used in nudging. M. S. thesis, Gangneung-Wonju National University.
- Yu, W., Y. Liu, and T. Warner, 2007, An evaluation of 3DVAR, nudging-based FDDA, and a hybrid scheme for summer convection forecasts using the WRF-ARW model. *Proceedings of the 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction*, Park City, UT, Amer. Meteor. Soc., P2.8.
- Zhang, S. P., Xie, S. P., Liu, Q. Y., Yang, Y. Q., Wang, X. G., & Ren, Z. P., 2009, Seasonal variations of Yellow Sea fog: Observations and mechanisms. *Journal of Climate*, 22(24), 6758-6772.

Effects of data assimilation by 3DVAR with analysis nudging for fog prediction in the west coast of the Korean peninsula

Hyeong-Sik Park

Department of Earth and Marine Sciences, Graduate School, Jeju National University, Jeju, Korea

Abstract

The effect of data assimilation (DA) on the prediction of the heavy fog event occurred at the west coast of the Korean Peninsula was evaluated using a high resolution numerical modeling approach during the spring of 2016 and summer of 2018. This analysis was performed by two sets of simulation experiments: (1) WRF run with DA (i.e., 3DVAR+NUD), including analysis nudging for meteorological variables (e.g., temperature, u and v wind components) within the planetary boundary layer, and (2) WRF run without DA (i.e., BASE). To reflect more effectively the surface conditions of the study area, the WRF simulation was performed using the 24-category land-use data (3s elevation data) from the United State Geological Survey (USGS) and the high-resolution topographic data (3s elevation data) from the Shuttle Radar

Topography Mission (SRTM). For 3DVAR, OBSRPOC was generated using ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations, and background error covariance was generated by NMC method. Overall, the results simulated by the 3DVAR+NUD for the fog event in the study area provided better agreement with those observed, compared to the BASE run. The results of model simulations (3DVAR+NUD, BASE) were compared with observed values of ASOS (Automated Synoptic Observing System) and AWS (Automatic Weather System) to confirm the effect of data assimilation. From the statistical analysis (e.g., Index Of Agreement (IOA) and Root Mean Square Error (RMSE)), the IOAs of air temperature, wind speed, relative humidity, visibility, dew point temperature, and T-Td for the fog event simulated by the 3DVAR+NUD were in the range of 0.80-0.88, 0.57-0.72, 0.76-0.91, 0.71-0.77, 0.72-0.86, and 0.66-0.98, respectively. 3DVAR+NUD showing significantly higher than those simulated by the BASE run (0.67-0.83, 0.60-0.73, 0.65-0.83, 0.59-0.70, 0.62-0.69, and 0.54-0.96, respectively), except wind speed during the spring of 2016. Wind speed may be affected by urban surface conditions and high buildings. During the summer of 2018, IOAs of meteorological variables simulated by 3DVAR+NUD (0.81-0.90, 0.71-0.84, 0.79-0.85, 0.61-0.65, 0.76-0.79, 0.79-0.86) show higher than those simulated by the BASE run (0.76-0.85, 0.68-0.82, 0.72-0.78, 0.51-0.62, 0.66-0.67, 0.75-0.78) in the inland station. In addition, the RMSEs of these meteorological variables simulated by the 3DVAR+NUD were somewhat lower than those simulated by the BASE run. The comparison between the two simulations indicated that the effect of DA with analysis nudging is crucial to enhance the modeling capability of fog simulation over the Korean Peninsula. In addition, it is estimated to improve the fog prediction ability by accurately describing the terrain and applying high-resolution sea surface temperature in the west coast of the Korean peninsula.