

기상청 현업 모형(UM)과 1차원 난류모형(PAFOG)의 접합시스템 개발 및 검증

김원흥 · 염성수*
연세대학교 대기과학과

(접수일: 2014년 11월 7일, 수정일: 2014년 12월 31일, 게재확정일: 2015년 1월 23일)

Development and Validation of the Coupled System of Unified Model (UM) and Parameterized FOG (PAFOG)

Wonheung Kim and Seong Soo Yum*

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 7 November 2014; revised 31 December 2014; accepted 23 January 2015)

Abstract As an attempt to improve fog predictability at Incheon International Airport (IIA) we couple the 3D weather forecasting model currently operational in Korea Meteorological Administration (regional Unified Model, UM_RE) with a 1D turbulence model (PAFOG). The coupling is done by extracting the meteorological data from the 3D model and properly inserting them in the PAFOG model as initial conditions and external forcing. The initial conditions include surface temperature, 2 m temperature and dew point temperature, geostrophic wind at 850 hPa and vertical profiles of temperature and dew point temperature. Moisture and temperature advections are included as external forcing and updated every hr. To validate the performance of the coupled system, simulation results of the coupled system are compared to those of the 3D model alone for the 22 sea fog cases observed over the Yellow Sea. Three statistical indices, i.e., Root Mean Square Error (RMSE), linear correlation coefficient (R) and Critical Success Index (CSI), are examined, and they all indicate that the coupled system performs better than the 3D model alone. These are certainly promising results but more improvement is required before the coupled system can actually be used as an operational fog forecasting model. For the RMSE, R, and CSI values for the coupled system are still not good enough for operational fog forecast.

Key words: Fog prediction, PAFOG, UM_RE, UM_RE+PAFOG coupled system

1. 서 론

지면에 접한 구름으로 정의되는 안개는 지면 부근에 떠있는 수적 또는 얼음 입자에 의해 1 km 미만의 시정을 발생시킨다. 안개는 지표 부근에서 일어나는 현상으로 지표면뿐만 아니라 중관규모의 영향을 복합적으로 받기 때문에 생성 체계를 명확히 규명하기 어

렵다. 따라서 안개를 복사무, 이류무 등 종류에 따라 분류한 후, 분류된 안개들의 생성 체제 규명을 위한 연구가 이루어지고 있다(Gultepe et al., 2007).

삼면이 바다인 우리나라의 경우 안개의 생성 체제에서 바다의 영향을 무시할 수 없다. 특히 서해 해역의 경우 수심이 얇고 해안선이 복잡하여 기상 상태의 변화가 심하며, 여름철 해무 발생이 잦다(Cho et al., 2000). 이러한 해무는 바람에 의해 해안 지역까지 이동하여 위험 시정을 발생시켜 선박 충돌 사고뿐만 아니라 육상 교통 마비를 야기시키기도 한다(Fu et al., 2006).

*Corresponding Author: Seong Soo Yum, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea.
Phone : +82-2-2123-7613, Fax : +82-2-365-5163
E-mail : ssyum@yonsei.ac.kr

안개를 예측하는 것은 안전한 항공기 운항뿐만 아닌 모든 교통의 안전과 아주 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 안개 예측은 수치모의 방법 및 통계적 방법을 이용하여 다양한 연구가 시도되고 있다. 예를 들어 Holtslag et al. (2010)은 1970년대 미 공군에서 개발된 FSI (Fog Stability Index)를 이용하여 네덜란드에서의 안개 정확도 개선을 시도 하였다. Ballard et al. (1991)은 UKMO (United Kingdom Meteorological Office)의 수치모형을 이용하여 스코틀랜드 북부 지역 안개 예측을 처음으로 시도하였다. 그 이 후로도 Koracin et al. (2005), van der Velde et al. (2010) 등이 3차원 지역 모형을 이용해 다양하게 안개 연구를 시도되고 있다. 그러나 3차원 지역 모형은 넓은 격자 간격으로 인해 안개를 모사하는 데 한계가 있으며, 난류 및 식생 과정에서의 오차로 인해 예보의 정확도가 높지 않다. 이러한 수치 모형의 정확도 개선을 위해 Kim and Yum (2012; 2013)은 1차원 난류 모형(PAFOG; Parameterized FOG)과 3차원 지역 모형(WRF; Weather Research and Forecasting model)의 접합을 시도하였고, 이를 해무 사례에 적용하여 접합의 정확도 개선 여부를 검증하였다.

본 연구에서는 기상청에서 현업 모형으로 사용하고 있는 통합 모형(UM; Unified Model)과 1차원 난류 모형(PAFOG)의 접합을 시도하였으며, 우선적으로 인천 국제공항의 안개예보 개선에 활용하기 위하여 2012년 6월부터 2013년 7월까지 서해안에 가까운 황해상에서 나타난 총 22개 안개 사례를 사용하여 검증하였다.

2 모형 및 접합 시스템

2.1 모형

기상청은 수치 모형 정확도 개선을 위해 Met Office 에서 개발되어 사용되고 있는 UM 모형을 도입하여 2010년 5월부터 현업 수치모형으로 사용하고 있다. 본 모형은 비정수 지배 방정식을 채택하고 있으며, 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를, 연직으로는 Charney-Phillips 격자 체계를 사용하고 있다. 기상청은 12 km의 수평해상도와 지면부터 80 km까지 70의 층을 가진 지역 현업 모형(UM_RE)과 1.5 km 수평해상도와 지면부터 40 km까지 70의 층을 갖는 국지 현업 모형(UM_LO)으로 예보를 생산하고 있다. 이러한 UM 현업 모형은 기존의 GDAPS와 비교했을 때, 북반구 500 hPa 고도장과 여름철에서의 일 5 mm 강수 정확도가 크게 향상시켰다(Kim et al., 2009; Lee et al., 2009). 그러나 이러한 전반적인 예보의 정확도 향상에도 불구하고, 모수화 오차와 큰 연직 격자 간격으로 인해 여전히 안개를 정확히 예측하는 데에는 한계를 가지고 있다.

PAFOG 모형은 독일에서 개발됐으며, 4개의 모듈로

구성되어 있다. 그 중 역학 모듈은 수평 바람장, 온위, 비습에 대한 예단 방정식의 사용한다(Bott and Trautmann, 2002). 난류 모듈은 2.5 level Mellor-Yamada 모수화 방안을 사용하여 난류 및 운정 고도에서의 건조공기와 구름을 혼합 과정이 계산한다(Mellor and Yamada, 1974). 복사 모듈은 Δ -two stream 가정으로 태양 단파 복사(0.28-6 μm)는 4개의 분리된 구간으로, 장파 복사는 적외선 영역(3.5-100 μm)과 대기의 창 영역(8.75-12.25 μm)으로 분리된 구간으로 계산한다(Zdunkowski et al., 1982). 미세물리 모듈은 log-normal 분포를 사용하여 계산된 구름 수함량과 구름의 수농도를 예단한다(Nickerson et al., 1985; Chaumerliac et al., 1987). PAFOG 모형은 1차원 모형으로서 한 개의 수평 격자 점과 지표에서 2500 m까지의 400개의 연직 격자점을 가지고 있으며, 지표부터 1500 m까지는 5 m의 연직 해상도와 1500 m부터 2500 m까지는 10 m 연직 해상도를 가지고 있다.

2.2 UM_RE + PAFOG 접합 시스템

본 연구에서는 우선적으로 기상청에서 현업으로 사용하는 UM_RE 모형과 PAFOG 모형의 접합을 시도 하였다. 접합은 UM_RE 현업 모형의 결과 값으로부터 PAFOG 모형의 구동에 필요한 기상 요소를 추출하는 과정으로부터 시작된다. PAFOG 모형 구동에 필요한 요소는 초기장의 기상 요소와 외부 강제력으로 사용되는 기상 요소로 구분할 수 있다. 첫째, PAFOG 모형의 초기장에 필요한 기상요소는 지면 온도, 2 m에서의 기온과 노점 온도, 지면 기압, 850 hPa에서의 지균풍, 온도와 노점 온도의 연직 분포 등이다. 여기서 850 hPa에서의 지균풍을 제외한 모든 변수는 현업 UM 모형의 결과 값에 포함되어 있으므로 PAFOG의 초기장 형식에 맞추어 가공한다. 그러나 850 hPa에서의 지균풍은 현업 UM 모형의 결과 값에 포함되어 있지 않으므로 아래의 식(1)로 계산하여 PAFOG 모형의 초기장으로 사용된다.

$$u_g = -\frac{g\partial z}{f\partial y}, \quad v_g = \frac{g\partial z}{f\partial x}. \quad (1)$$

식(1)의 u_g , v_g 는 850 hPa에서의 지균풍 성분들이며, g 는 중력가속도, f 는 코리올리 상수, z 는 850hPa에서의 지위 고도를 의미한다.

두 번째로, PAFOG 모형 구동에 필요한 외부 강제력은 수평이류이다. 1차원 난류 모형인 PAFOG는 수평 이류를 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있으며, 이를 보완하기 위해 3차원 지역 모형인 UM 현업 모형의 결과 값을 이용하여 수평 이류를 계산한 후 PAFOG에 삽입한다. 이러한 수평 이류는 식(2)를 사용하여 온도와 노점 온도에 대하여 계산된 이류 값을

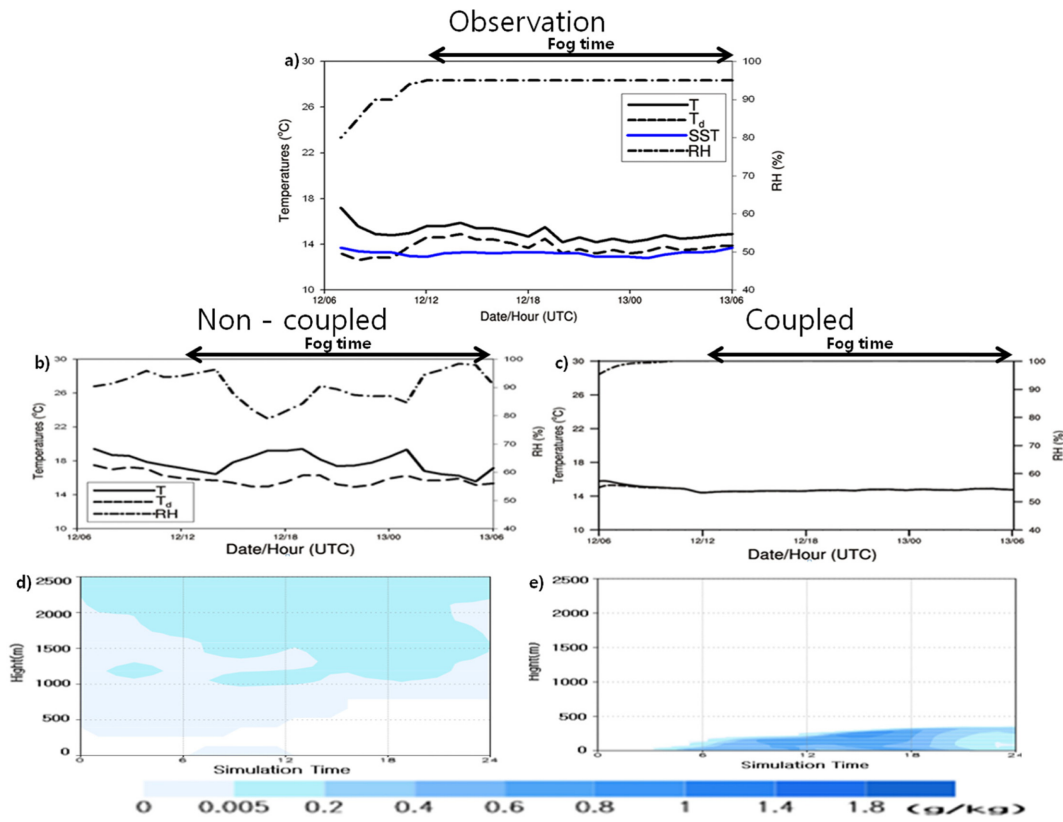


Fig. 1. Time variation of observed T ($^{\circ}\text{C}$), T_d ($^{\circ}\text{C}$) and RH (%) at the buoy site (near Dug-jeok Island) (a), corresponding simulated values from UM_RE (b) and UM_RE+PAFOG (c), and time-height plot of simulated r_w (g kg^{-1}) from the UM_RE (d) and UM_RE+PAFOG (e). The estimated time range of fog existence at the buoy site is indicated by the black arrow.

사용한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \cdot \nabla A = -\left(u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y}\right). \quad (2)$$

이 식(2)에서 u, v 는 각 고도에서의 바람 성분을 의미하며, 위 식은 A 라는 임의의 변수에 관한 수평이류를 구하는 식이다. 즉 본 연구에서는 A 변수를 온도와 습도로 변환하여 수평이류를 계산하는데 이때 온도와 습도의 경도는 중앙차분법으로 계산된다. 이렇게 계산된 각 시간별 평균 수평이류는 매 시간마다 PAFOG 모형에 삽입된다. 이 과정은 현업 UM 모형의 연직 격자 간격보다 PAFOG 모형의 연직 격자 간격이 조밀하기 때문에 PAFOG 모형의 각 연직 격자에 UM 모형의 수평 이류 값을 내삽하기 위한 것이다.

본 접합 모형은 1차원 모형의 장점인 5 m의 조밀한 연직 격자 간격으로 계산될 뿐만 아니라 2.5 level Mellor-Yamada 모수화 방안을 사용함으로써 안개 및 구름 가장 자리에서의 건조 공기 혼합 효과를 명시적으로 계산한다(Mellor and Yamaha, 1974). 또한 1차

원 모형이 수평 이류를 3차원 모형의 결과를 통해 삽입하므로, 중관규모의 기상 변화를 반영하기 어렵다는 1차원 모형의 단점을 보완할 수 있다. 따라서 기존의 모형보다 정확한 안개 수치 모의 결과를 기대할 수 있다.

3. UM_RE+PAFOG 접합 시스템 검증

본 연구에서는 덕적도 부이 자료 및 인천 기상 자료를 기준으로 선택된 2012년 6월부터 2013년 7월까지 덕적도 부이의 상대습도 자료와 인천공항의 기상 기록을 이용하여 선택한 총 22개의 항해상에 나타난 안개 사례에 대해 UM_RE+PAFOG 접합 시스템을 검증하였다. 총 22개의 안개 사례 중 2013년 6월 12일 안개 사례에 대한 시간에 따른 지표 주변의 온도, 노점 온도, 상대 습도 및 연직 수함량 변화는 Fig. 1과 같다. 관측 값과 두 모형의 시간에 따른 온도와 노점 온도의 변화를 비교해 보면 관측은 대부분의 시간에서 약 14°C 인 것을 확인할 수 있다(Fig. 1a). 이러한

값은 단독 UM_RE 현업 모형의 결과 값과는 약 2°C의 차이가 있지만 접합 모형(UM_RE+PAFOG) 결과 값은 관측과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다(Figs. 1a, b, and c). 이는 UM_RE+PAFOG 모형에서 난류에 의한 냉각이 지면 근처에서 잘 모의되어 단독 UM_RE 모형의 온도 과다 모의를 완화시켰기 때문으로 판단된다. 또한 시간에 따른 연직 수증량 분포의 시간 변화 자료에서도 이러한 이유로 안개가 발생한 시간(2013년 6월 12일 1200 UTC~2013년 6월 13일 0600 UTC)에 지면 근처에서 0.005 g kg⁻¹ 이상의 수증량을 단독 UM_RE 모형보다 UM_RE+PAFOG 모형이 잘 모의하고 있는 것을 확인할 수 있다(Figs. 1d, e).

Table 1은 위의 특정 사례를 포함한 22개의 안개 사

Table 1. Average values of performance statistics for UM_RE and UM_RE+PAFOG for 22 sea fog cases. Here RMSE, R, and CSI, respectively, indicate Root Mean Square Error, linear correlation coefficient and Critical Success Index. The examined meteorological variables are temperature (T), dew point temperature (T_d) and liquid water mixing ratio (r_w).

	UM_RE		UM_RE + PAFOG	
	RMSE	R	RMSE	R
T	2.60 ± 1.06	0.12 ± 0.12	1.78 ± 1.15	0.36 ± 0.25
T_d	2.32 ± 1.42	0.23 ± 0.21	1.94 ± 1.74	0.29 ± 0.26
	CSI		CSI	
r_w	0.23 ± 0.24		0.33 ± 0.34	

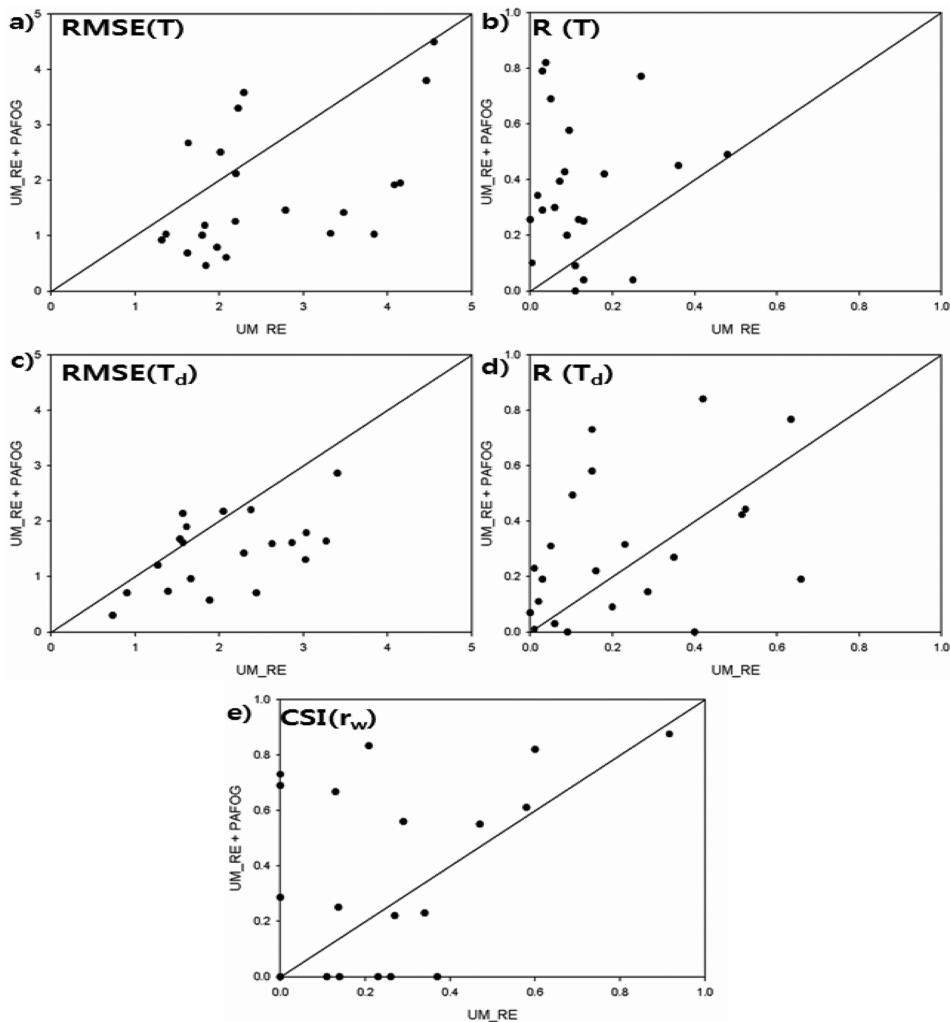


Fig. 2. Scatterplot of model performance indices of UM_RE vs UM_RE+PAFOG: (a) RMSE of T (°C), (b) R of T (°C), (c) RMSE of T_d (°C), (d) R of T_d (°C), and (e) CSI of r_w (g kg⁻¹).

례에 대해 단독 UM_RE 모형과 UM_RE+PAFOG 모형의 모의 결과 값을 덕적도 부이 관측 자료 값과 비교 분석한 것이다. 이 분석에서는 Root Mean Square Error (RMSE), 상관 계수(R), Critical Success Index (CSI)를 사용하였다. 여기서 RMSE는 0에 가까울수록 R와 CSI는 1에 가까울수록 정확한 예보를 의미한다. RMSE와 R은 각 모형의 2 m 고도에서의 온도와 노점 온도를 덕적도 부이에서 관측한 값과 비교함으로써 얻어낸 값이며, CSI는 각 모형 결과에서 2 m 고도에 구름 수합량이 존재하는 시각과 덕적도 부이에서 관측한 상대습도가 안개추정 임계값(95%)을 초과하는 시각을 비교함으로써 얻어낸 값이다. 우선 온도에 대한 평균값을 비교해 보면 관측과의 온도 차이가 접합을 통해 감소한 위 대표 사례에서 예상할 수 있는 바와 같이 접합 후의 RMSE 평균값이 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한 온도 변화의 경향성 일치율을 암시하는 R의 평균값도 접합 모형이 역시 접합 후에 상승하여 접합을 통한 개선이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 노점 온도의 경우에도 단독 모형에 비해 접합모형의 RMSE가 더 작고 R이 더 크므로 접합을 통한 개선이 이루어졌다고는 말할 수 있으나 그 정도는 온도에 비해 적은 편이었다. 마지막으로 지표 근처 고도의 구름 수합량에 대한 CSI 값 또한 단독 UM_RE 모형에 비해 UM_RE+PAFOG 모형이 0.1 정도 상승하여, 접합을 통해 정확도가 개선되었다고 볼 수 있다.

Figure 2는 22개 안개 사례 각각에 대한 UM_RE 모형과 UM_RE+PAFOG 모형의 지수들의 분포를 좀 더 자세히 살펴 본 것이다. 우선 온도에 대한 지수들을 보면, UM_RE+PAFOG의 RMSE가 UM_RE에 비해 비교적 더 0에 가까워 1:1 선의 아래에 분포한 것을 볼 수 있고, R의 경우에는 1:1 선의 위에 대부분 분포하고 있는 것을 잘 보여 준다. 노점온도에 대한 지수들 역시 비슷한 결과를 보이나 R은 그 경향이 비교적 적은 것을 알 수 있다. 여기에 비해 CSI의 경우에는 UM_RE+PAFOG가 UM_RE보다 큰 값을 보이는 사례가 더 많으나 UM_RE+PAFOG의 CSI가 0인 사례도 여럿 있어 변화의 폭이 큰 것을 볼 수 있다. 종합해 볼 때 UM_RE+PAFOG 접합 모형이 UM_RE, 단독 모형에 비해 좀 더 나은 성능을 보인 것은 사실이나 UM_RE+PAFOG 접합 모형에 개선의 여지가 많다는 것을 잘 보인다고 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

기상청에서 사용하는 현업 UM_RE 모형의 안개 수치 모의의 정확도 개선을 위하여 1차원 난류 모형인 PAFOG 모형과의 접합을 시도하였다. 접합 과정은

PAFOG 모형의 구동에 필요한 초기장의 기상변수들(지표 온도, 2 m 고도에서의 온도 및 노점 온도, 850 hPa에서의 지균풍, 온도와 노점온도의 연직 분포)과 외부 강제력(온도 이류, 습도 이류)을 UM 현업 모형에서 추출한 후, PAFOG 모형에 알맞게 가공하여 삽입하는 형식으로 이루어진다. 외부 강제력의 경우 매 시간마다 갱신되어 삽입된다. 이렇게 접합된 모형은 1차원 모형의 장점인 조밀한 연직 격자 간격과 정교한 모수화뿐만 아니라 3차원 모형의 장점인 종관적 기상 변화 반응을 모두 갖게 된다.

본 접합 모형을 2012년 6월부터 2013년 7월까지의 총 22개 안개 사례에 대해 적용하여 검증을 시도하였다. 대표 사례로 선정된 2013년 6월 12일 안개 사례에서 접합을 통해 온도, 노점 온도 및 구름 수합량의 정확도 개선이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 총 22개 안개 사례에 대한 성능 평가 지수(RMSE, R, CSI)의 평균값도 접합을 통한 안개 예측성 개선이 이루어짐을 잘 보여주었다. 그러므로 PAFOG 모형과 UM_RE 모형의 접합은 안개 예보 정확도를 향상시킨다고 결론지을 수 있다.

그러나 접합 모형의 예측성이 단독 모형에 비해 나아진 것은 사실이나 여전히 예측성 지수의 값 자체는 현업으로 사용하기에는 매우 낮은 값이라고 말할 수 있다. 따라서 접합 모형의 성능을 개선하기 위한 많은 노력이 필요한 상황이다. 이를 위해서는 접합 모형의 모의 결과가 좋은 사례와 나쁜 사례 각각에 대한 심도 있는 원인 분석을 통해 개선점을 찾아나가야 한다. 또한 국지 규모 현업 모형인 UM_LO과 PAFOG의 접합 모형은 어떤 성능을 보이는지, UM_RE+PAFOG 접합 모형과 비교해서는 어떤 결과를 보이는지에 대해서도 상세한 비교 분석을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-2012)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ballar, S. P., B. W. Golding, and R. N. B. Smith, 1991: Mesoscale model experimental forecasts of the haar of northeast Scotland. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2107-2123.
- Bott, A., and T. Trautmann, 2002: PAFOG-a new efficient forecast model of radiation fog and low-level stratiform clouds. *Atmos. Res.*, **64**, 191-203.
- Chaumerliac, N., E. Richard, J. P. Pinty, and E. C. Nickerson, 1987: Sulfur scavenging in a mesoscale model

- with quasi-spectral microphysics: two-dimensional results for continental and maritime clouds. *J. Geophys. Res.*, **92**, 3114-3126.
- Cho, Y.-K., M.-O. Kim, and B.-C. Kim, 2000 : Sea fog around the Korean Peninsula, *J. Appl. Meteorol.*, **39**, 2473-2479.
- 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.
- Kim, C. K., and S. S. Yum, 2012: A numerical study of sea fog formation over cold sea surface using a one-dimensional turbulence model coupled with the Weather Research and Forecasting Model. *Bound.-Layer Meteor.*, **143**, 481-505.
- _____, and _____, 2013: A study on the transition mechanism of stratus cloud in fog over warm sea surface using a single column model coupled with WRF. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 245-257.
- Kim, D. J., H. Park, S.-W. Joo, J.-O. Lim, B.-K. Park, H.-D. Yoo, and J.-Y. Joo, 2009: Unified numerical forecasting system of performance evaluation. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS 2009*, 218-219.
- Koracin, D., J. Businger, C. Dorman, and J. Lewis, 2005: Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **117**, 447-478.
- Lee, H. J., S.-W. Joo, D. J. Kim, J. H. Son, and H.-D. Yoo, 2009: Unified numerical forecasting system of characteristic analysis. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS 2009*, 334-335.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- Nickerson, E. C., E. Richard, R. Rosset, and D. R. Smith, 1986: The numerical simulation of clouds, rain, and airflow over the Vosges and Black Forest mountains: a meso-h model with parameterized microphysics. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 398-414.
- Van der Velde, I. R., G. J. Steeneveld, B. G. J. Wichers Schreur, and A. A. M. Holtslag, 2010: Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 4237-4253.
- Zdunkowski, W. G., W.-G. Panhans, R. M. Welch, and G. J. Korb, 1982: A radiation scheme for circulation and climate models. *Beitr. Phys. Atmos.*, **55**, 215-238.