

論文

봄철 서해안 해무의 수치예보

김영철*, 한경근**

Numerical forecasting of sea fog at West sea in spring

Young-Chul Kim*, Kyoung-Keun Han**

ABSTRACT

The purpose of this case study is to determine the possibility of Numerical Forecasting of sea fog at West Sea in spring time. For practical method of analyzing the data collected from 24th to 26th March 2003, Numerical Weather Prediction model MM5(Mesoscale Model Version 5) and synoptic field study using synoptic chart, upper level chart, and sea surface temperature were employed.

The results of synoptic field analysis summarized that sea fog at West sea in spring is intensified by the inflow of the warm flow from west or southwest, low sea surface temperature to increase the temperature difference between air and sea surface, and inversion layer to disturb the disperse.

It appears that the possibility of sea fog forecasting by MM5, in view of the result that the MM5 output is similar to the synoptic fields analysis.

Key Words : West sea fog(서해안 해무), NWP(수치예보), MM5, inversion layer(역전층), sea surface temperature(해수면 온도)

1. 서론

안개는 아주 작은, 무수히 많은 물방울들이 대기 중에 떠있는 현상으로, 수평시정이 1km 미만일 때를 말한다.

기상 관측에서는 수평시정이 1km 이상이면 박무(mist)로 구분하고 있지만 일반적으로는 차폐 거리에 따른 세밀한 구분을 하지 않고 모두 안개로 부르고 있다.

구름과 안개의 차이는 그 밑 부분이 지면과 접하고 있는가, 또는 떨어져 있는가에 따라 결정된다. 밑 부분이 지면과 접하여 있으면 안개, 떨어져 있으면 구름으로 분류한다. 안개 속에서 대기는 습하고 차갑게 느껴지며 상대습도는 거의

100%에 가깝다[1].

안개는 발생하는 원인에 따라 공기의 냉각으로 발생하는 안개와 수증기의 증발로 발생하는 안개로 나누어질 수 있다. 공기의 냉각으로 발생하는 안개는 지표면의 야간 복사 냉각으로 발생하는 복사무(radiation fog), 한랭한 해수면 위를 온난 습윤한 공기가 이류하여 발생하는 이류무(advection fog), 그리고 습윤하고 안정한 공기가 경사진 지형을 따라 상승하면서 건조 단열적으로 냉각되어 형성되는 활승무(upslope fog)가 있다. 수증기의 증발로 발생하는 안개에는 한랭한 공기가 상대적으로 온난한 해수면 위를 이류할 때 수면으로부터의 수증기의 증발로 발생하는 증기무(steam fog), 전선이 통과할 때 따뜻한 빗방울이 차가운 공기 중에서 증발하여 발생하는 전선무(frontal fog)가 있다.

발생하는 원인이 무엇이든 간에 안개가 발생함에 따라서 일상생활에 여러 가지 영향을 주는데, 그 중에서도 아주 복잡한 현대 교통 체계에 미치는 영향은 매우 심각한 것으로 나타나고 있다.

2006년 11월 8일 접수 ~ 2006년 12월 21일 심사완료

* 정희원 한서대학교 항공운항학과
연락처, E-Mail : yckim@hanseo.ac.kr
충남 태안군 남면 신온리 태안비행장

** 정희원 한서대학교 항공운항학과

대도시나 고속도로의 자동차 운행에 미치는 어려움은 물론이고 항공기의 지연 발착의 대부분이 안개 때문이며, 심지어는 항공기 사고의 주요 원인의 하나로 분석되고 있다. FAA 산하, NASDAC(National Aviation Safety Data Analysis Center)의 분석에 의하면 1991~2001년 사이에 총 22,655건의 항공기 사고 중 기상 현상이 원인이 되어 발생한 사고는 4,771건으로서 전체 사고의 22.1%에 달했다. 기상 관련사고 4,771건을 현상별로 분석하면 바람이 44.4%이고, 시정·운고 관련사고가 22.9%를 차지하여 두번째로 높은 빈도를 차지하고 있다[2].

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 지형 조건으로 인해 수증기의 수송이 유리하고, 낮은 구름 지나 평야 지대인 서쪽 지방은 야간 복사 냉각이 잘 발생하여 복사무가 많이 형성되는데 특히 봄, 가을에 잦은 안개가 끼고 있다. 그러나 복사무는 해가 뜨면 잘 소산하기 때문에 안개의 지속시간 때문에 생기는 어려움은 비교적 적다. 이에 반해 보통 3월에서 8월까지 발생하는 해무는 -우리나라의 해무는 온난 습윤한 남서 기류의 영향으로 발생하는 이류무가 대부분- 그 지속시간이 길어서 겪게 되는 어려움이 많다. 1986-1995년간 통계자료에 의하면 경기만을 중심으로 한 서해 중부 해상에서 연간 60일, 목포 서쪽을 중심으로 한 서해 남부 해상에서 45일 등으로 해무 다발 지역인 것으로 나타났다[3].

따라서 여러 날 지속되는 해무가 서해안 인근 비행장에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 그러므로 항공 기상대에서는 해무의 발생과 소산 예측에 많은 연구가 필요한 실정이다.

또한 서해에서 일어나는 해상 재난 중 해무에 의한 재해가 큰 비중을 차지하고 있어[4] 서해상 해무의 특성을 규명하고 예측하는 것은 해상 교통과 안전, 해양 생태계 변동 등과 관련하여 그 중요성이 커지고 있다.

우리나라 근해에서 발생하는 해무에 관한 연구는 남해안 [5], 동해안 [6], 서해 중부 연안 [7], 그리고 한국 근해 [8]에 대한 연구가 있다. 그러나 서해안 지역을 포함한 서해상의 해무 연구는 박원선과 신기윤[9]의 연구가 있을 뿐 그 중요성에 비해 연구가 많지 않다. 또한 대부분의 연구는 통계적인 분석이나 종관적 특성 연구이며 수치예보에 관한 연구는 거의 시도되지 않았다.

본 연구는 봄철 서해상에서 발생하는 해무의 수치예보 가능성을 판단하기 위하여 가장 전형적인 봄철 해무 사례라고 할 수 있는 2003년 3월 24~26일 사례를 바탕으로, 종관 일기도, 위성 영

상 자료, 해수면 온도 자료를 사용하여 종관 특성을 알아보고 기상 수치예보 모델인 MM5를 사용하여 해무 발생과 소멸 예측을 위한 수치예보를 시도하였다.

II. 종관 분석

1. 개요

본 사례는 우리나라 북쪽으로 기압골이 통과하고 나서 3월 24일 오후부터 서해상에 해무가 발생하기 시작하여 3월 26일까지 지속되었고, 해안에 인접한 중서부 내륙 지방까지 안개와 낮은 층운이 유입되어 시정장애와 저고도 실링(Ceiling) 현상이 나타난, 가장 전형적인 봄철 서해안 해무 사례이다.

2. 종관 분석

<Fig. 1>의 왼쪽 패널은 24일~26일 0900LST 지상 일기도를, 중간 패널은 같은 시각 850hPa 상층 일기도를, 오른쪽 패널은 같은 시각 위성 가시 영상을 보인 것이다.

지상 일기도를 보면, 24일부터 우리나라 서해상으로 기압능이, 동한만으로 저기압 중심이 위치하여 우리나라 북동쪽으로 기압골이 확장하는 전형적인 해무 발생의 기압배치가 나타나고 있다.

25일에는 동중국해상에 위치한 고기압이 더욱 세력을 확장하고 있으며, 서해상에 지속적으로 내지 남서 기류의 유입되면서 해무의 강도는 서해안 전역에 영향을 주었다. 26일 들어 이동성 고기압이 점차 동진하여 한반도를 빠져나가면서 서해상의 해무는 점차 소멸되었다. 850hPa 상층 일기도를 보면, 24일부터 우리나라 서해상으로 기압골과 Thermal Trough가 형성되었다가 점차 기압골의 축이 동진하면서 동해상으로 이동했고, 우리나라는 고기압의 전면에 놓이게 되었다가 26일에 고기압의 영향권에서 벗어남을 알 수 있다.

위성 가시 영상을 보면, 발해만 부근과 서해 5도 및 먼 바다에서 해무가 형성되어 점차 유입되어 25일에는 서해 도서 지방은 완전 차폐 현상을, 인접한 중서부 내륙 지방은 1mile 이하의 시정과 낮은 층운이 형성되었다가 26일에 점차 약화되고 있음을 알 수 있다.

<Fig. 2>는 25일 0900LST 오산 단열선도를 보인 것으로, 지상에서 상층까지 서풍 계열의 바람이 불고 있으며, 지상에서부터 약 3,000ft까지 습윤층이 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

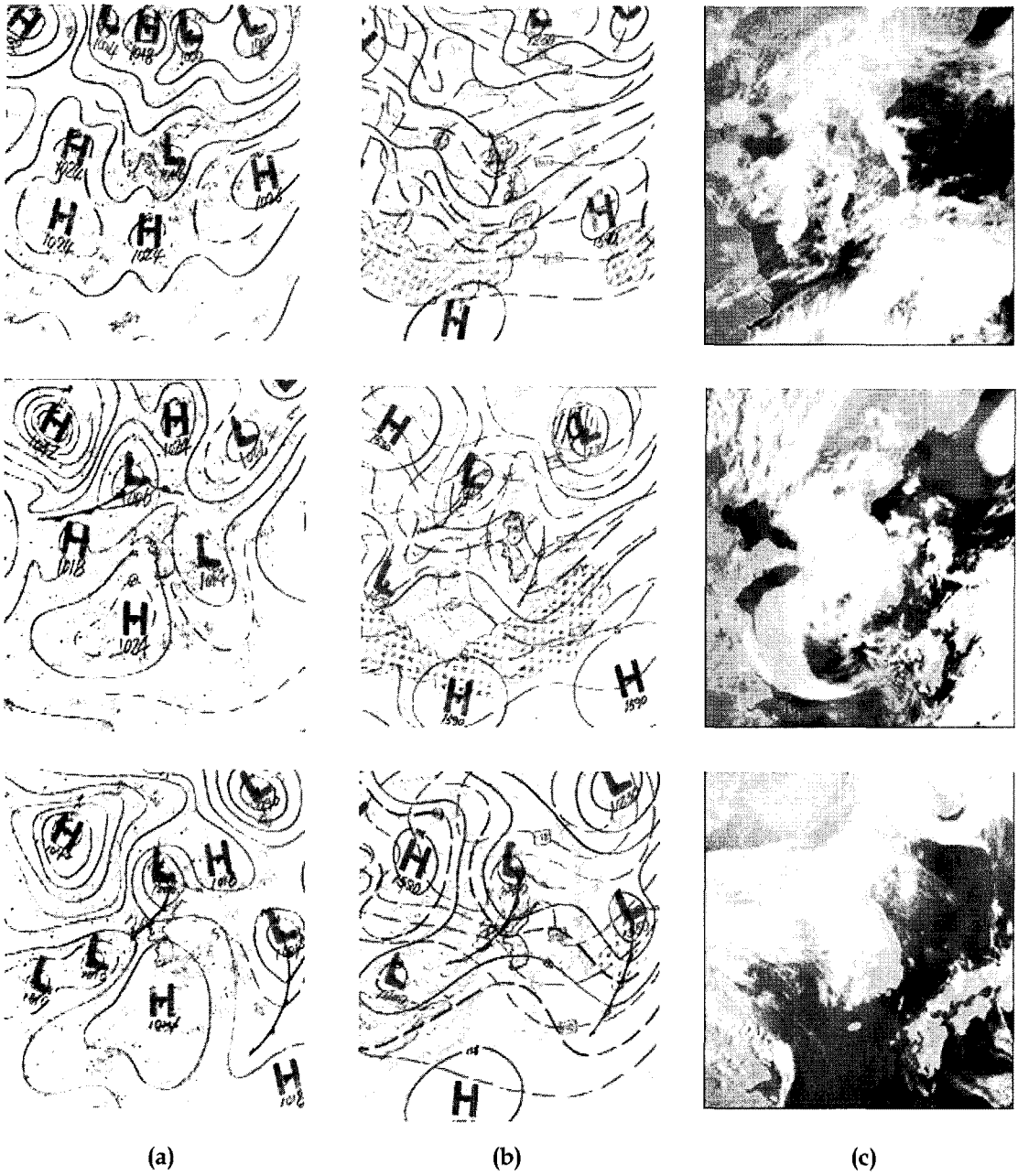


Fig. 1 '03년 3월 24~26일 종관장 분석. 왼쪽 패널은 지상 일기도(a), 중간 패널은 상층 일기도(b), 오른쪽 패널은 가시 영상(c)을 각각 나타내며, 위에서부터 24일 0900LST, 25일 0900LST, 26일 0900LST를 자료임.

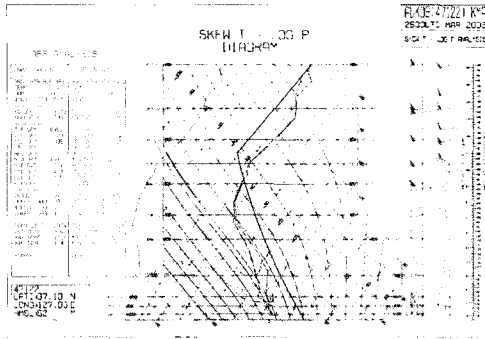
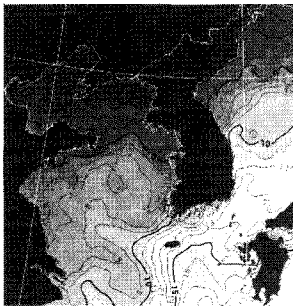
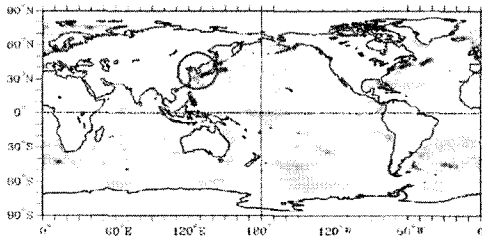


Fig. 2 '03년 3월 25일 0900LST 오산 단열선도.

<Fig. 3>는 25일 우리나라 근해 해수온도(a)와 해수면온도편차(b)를 각각 나타내 것이다. 해무 기간 동안 서해상의 해수면온도 분포는 큰 변화 없이 태안반도 부근에 5°C선이 지나고 있고, 서해는 4~7°C의 분포를 보이고 있으며, 이러한 해수면 온도 분포는 평년보다 0.5~1°C 정도 낮은 것이다. 이는 평년보다 낮은 해수면 위를 온난한 서풍 기류 계열이 통과할 때 더 큰 온도차가 발생하여 온난 이류성 해무 발생에 용이한 조건으로 작용하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 '03년 3월 25일 일평균 해수면 온도(a)와 편차도(b).

종합하면 이 해무 사례는 동중국해에 중심을 둔 이동성 고기압의 영향권에서, 온난한 서풍 기류가 평년에 비해 낮은 해수면 온도를 유지한 서해상으로 이루어지면서 해무가 발생한, 가장 전형적인 봄철 해무 특성을 보인 것으로 분석되었다.

III. 수치예보 실험

1. 모델 개요 및 구성

이 연구를 위해 사용된 MM5는 Anthes와 Warner[10]에 의하여 고안된 PSU/NCAR 모델에 기초를 두고 있으며, 우리나라 실정에 맞도록 지속적으로 개선 및 보완되었다.

MM5는 3차원 원시 방정식 모델이며, 종관 규모에서 중간-규모의 대기 현상에 적합하도록 개발되었다. 모델의 수평 격자계는 Lambert-Conformal 도법에 의한 등거리 간격의 격자계를 사용하며, 격자 간격은 20km에서 200km까지 할 수 있다. 연직 좌표계는 23층의 좌표계를 사용하며, 수평 좌표계와 연직 좌표계 모두 차 격자계(staggered grid system)를 사용했다. 연변 경계 조건은 완화법(Relaxation method)을 사용하여 경계 자료로 사용되는 대규모 모델의 결과 값을 완화하여 사용되도록 구축했다.

이 실험을 위해서는 한반도 서해안에 대한 상세한 수치예보 자료가 필요하여 수평 격자 거리가 60km인 성금 격자 모델과 수평 격자 거리가 20km인 상세 격자 모델을 각각 구성했으며, 그 두 모델을 등지 격자 체계로 구성하였다. 성금 격자 모델과 상세 격자 모델 간의 연속성 및 연계성을 고려하여 모두 비정역학 모드로 설정하였다.

<Table. 1>은 이 해무 사례를 위해 구성된 MM5 모델 구성을 보인 것으로, 성금 격자 모델(Domain 1)과 상세 격자 모델(Domain 2)에 대해 모델을 수행했다. 성금 격자 모델의 적운 모수화 과정은 Grell 방안을, 상세 격자 모델은 Kain-Fritsch 방안을 사용했다.

<Table. 2>는 모델 수행을 위한 초기, 경계 조건을 나타낸 것으로, 초기 자료는 기상청 전구 모델인 수평 격자가 1.875°인 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 자료를 사용했으며, 관측 자료는 GTS(Global Telecommunication Systems) 전문 자료를 사용하여, 중규모 대기 현상 모의에 가장 적합하도록 구성했다. 또한 가장 중요한 경계 자료인 해수면 온도 자료는 0.1° 수평 격자를 갖는 5일 평균 KMA SST(Korea Meteorology Administration Sea Surface Temperature)를 사용했다.

Table. 1 MM5 모델 내부 구성

		Domain 1	Domain 2
Version		MM5 Version 3.5	
Resolution		64 x 81 (60km)	85 x 94 (20km)
Vertical layer		23층 (Top 100hPa)	
적분 간격		180 sec	60 sec
예보 기간		60시간	
모델 중심 위치		37.0°N x 125.0°E	
물리 업선	Implicit Physics Scheme	Reisner	
	Cumulus Parameterization	Grell	Kain-Fritsch
	Planetary Boundary Layer	Blackadar	
	Radiation Parameterization	Cloud Radiation	

Table. 2 MM5 모델 실험 구성

Initial condition	GDAPS 자료 (1.875°)	12시간 전 GDAPS
Observation	GIS 자료	12시간 전 지상/상층 6시간 전 지상
Sea Surface Temperature	KMA SST (0.1°)	Pentad mean

2. 시정 계산 과정

MM5에서 시정 계산은 식 (1)과 같이 계산한다.

$$VIS \text{ (mile)} = 6000 \cdot \frac{T - T_d}{RH^{1.75}} \quad (1)$$

(T : 기온, Td : 노점 온도, RH : 상대습도)

이 식은 미국 FSL에서 Doran et al[11]에 의해서 개발되었다. 식에서 알 수 있는 것과 같이, 시정은 노점편차(T-Td)와 상대습도의 비로 계산이 되는데 노점편차와 상대습도 모두 공기 중의 수증기량에 관련된 변수이므로 수증기 외의 시정 악화

요인은 배제하고 있다. 따라서 이 식은 내륙에서 국지적인 지형 등의 영향을 많이 받는 복사무보다는 해무의 예측에 유리하다고 볼 수 있다.

노점온도(Td)는 현재의 수증기압(e)이 포화수증기압(es)과 같을 때의 기온이고 상대습도(RH)는 포화수증기압에 대한 현재 수증기압의 비이다. 이를 바탕으로 각각의 변수를 기온(T)과 기압(p) 그리고 혼합비(w)의 함수로 정리하면 아래와 같이 된다.

$$T_d = 273 \frac{\ln e - \ln 6.1}{19.8 - (\ln e - \ln 6.1)} \quad (2)$$

$$e = \frac{\rho}{0.622} \quad (3)$$

$$e_s = 6.1 \exp(0.073 T) \quad (4)$$

$$RH = 100 \frac{e}{e_s} \quad (5)$$

위 식을 이용해 다시 정리하여 노점편차와 상대습도를 각각 표현하면,

$$T - T_d = T - 273 \frac{\ln \left(\frac{\rho}{0.622} \right) - \ln 6.1}{19.8 - (\ln \left(\frac{\rho}{0.622} \right) - \ln 6.1)} \quad (6)$$

$$RH = \frac{100 \frac{\rho}{0.622}}{6.1 e^{0.073 T}} \quad (7)$$

두 식 모두 혼합비와 기압, 기온의 함수로 표현되었다.

각 변수의 특성을 살펴보면, 같은 수증기량에 대해 노점편차와 상대습도 중에서 기온에 따라 더욱 민감하게 변화하는 것이 상대습도임을 알 수 있다. 또한 같은 상대습도라고 하더라도 기온이 낮을 때는 시정이 좋지만 기온이 높은 경우에는 시정을 나쁘게 표현하게 된다. 한편 같은 수증기량과 기온의 경우에 기압에 따른 상대습도와 노점편차 그리고 시정의 변화를 살펴보면, 기압이 높을수록 상대습도가 높고, 노점편차는 줄어들어 낮은 시정을 산출하게 된다.

즉, 식 (1)은 습도와 온도, 기압의 함수이며 습도나 기온, 그리고 기압이 높을수록 낮은 시정을 모의하는 경향성을 나타내어 더욱 현실적인 시정 계산이 가능함을 알 수 있다.

3. 수치예보 모델 결과

<Fig. 4>는 성금 격자 모델 결과로 왼쪽 패널(a)이 시정을, 오른쪽 패널(b)이 지상 변수(기온, 상대습도, 바람)를 나타내며, 위에서부터 차례대

로 24일 0900LST, 25일 0900LST, 26일 0900LST 자료이다. <Fig. 4>에서 외쪽 패널의 시정은 연한 회색은 3~7mile 사이 영역, 연한 초록은 1~3mile 사이 영역, 진한 초록은 1mile 이하 영역을 각각 나타내 색깔이 진할수록 시정이 악화됨을 알 수 있다. 그리고 오른쪽 패널에서 빨간 대쉬선이 지상 기온을, 초록색은 바람을 각각 나타내며, 파란색은 상대습도 80% 이상인 영역을 보이며, 색깔이 진할수록 상대습도가 높아짐을 의미한다.

시정을 보면 24일에는 해무가 아직 중국 동해상에 머물고 있으나 25일 들어 한반도 서해안 및 인접 연안 지역을 완전히 뒤덮었으나, 26일 0900LST 들어 점차 해무가 약해지는 것을 볼 수 있다.

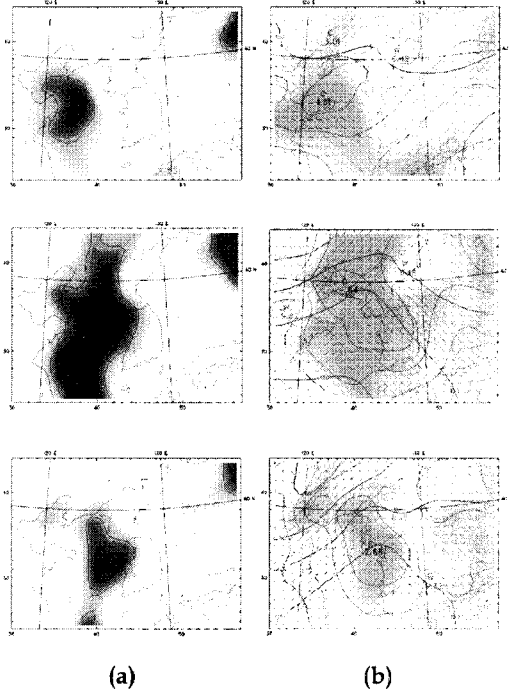


Fig. 4 성금 격자 모델 결과. 왼쪽 패널(a)은 시정, 오른쪽 패널(b)은 지상 기온(빨간색), 바람, 상대습도(파란색)임. 위에서부터 24일 0900LST, 25일 0900LST, 26일 0900LST 수치예보 자료임.

오른쪽 패널에서 지상 기온을 보면, 해무가 가장 강했던 25일에는 한반도 주변 기온이 많이 약해졌음을 볼 수 있고, 바람 또한 강한 서풍 계열을 보이다 26일 0900LST 들어 강한 남풍 내지

남서풍 계열로 바뀌었음을 알 수 있다.

상대습도 분포 또한 시정과 같이 25일 중국 동해를 완전히 뒤덮었으나, 26일 0900LST 들면서 한반도 서해 및 연안 지역으로 매우 약해졌음을 알 수 있다.

<Fig. 5>는 상세 격자 모델 결과를 보인 것으로, 그림 구성은 <Fig. 4>와 같다. 상세 격자 모델에서도 성금 격자 모델과 같이 25일 0900LST에 해무가 가장 강하고, 상대적으로 낮은 기온을 보이며, 26일 0900LST 들어 바람이 남풍 내지 남서풍으로 바뀐다는 것에서는 <Fig. 4>의 양상과 같다.

그러나, 전반적으로 24일 0900LST부터 서해 5도를 포함한 서해안 지역으로 해무의 영향이 나타나고 있으며, 전반적으로 성금 격자 모델 결과보다 더욱 강한 해무를 모사하고 있음을 알 수 있다. 또한 25일 0900LST에 상세 격자 모델이 태안반도 지역으로 강하게 모사하나, 성금 격자 모델은 충청도 지역 모두를 모사하는 등 전반적으로 내륙 지역을 과도 모사하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 25일 0900LST 기온과 상대습도 모사 결과에서도 확인할 수 있다.

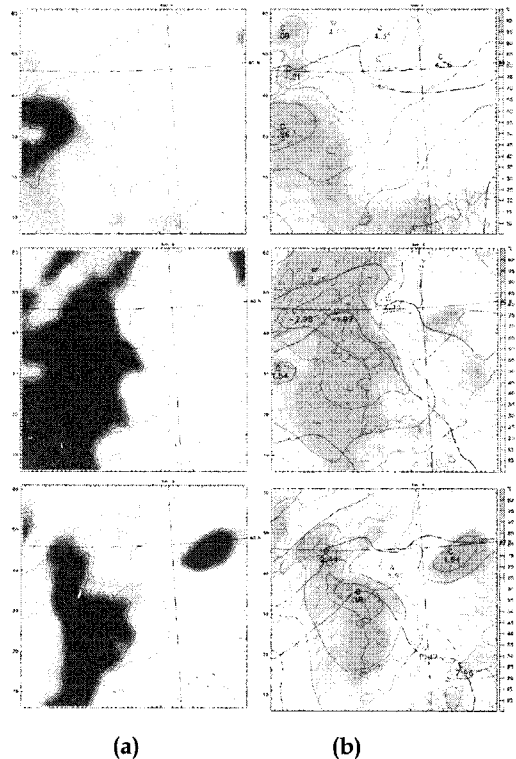


Fig. 5 상세 격자 모델 결과로, 구성은 나머지는 <Fig. 4>와 같음.

해결할 수 있는 자료를 줄 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 연구는 봄철 서해상에서 주로 발생하는 해무의 수치예보 가능성을 판단하기 위하여 '03년 3월 24~26일 사례를 바탕으로, 종관 일기도, 위성 영상 자료, 해수면 온도 자료를 사용하여 종관 특성을 알아보고 기상 수치예보 모델인 MM5를 사용하여 해무 발생과 소멸 예측을 위한 수치예보를 시도한 것이다.

서해안 해무 사례에 대한 종관장 분석 결과를 요약하면, 우리나라는 남서해상에 중심을 둔 이동성 고기압의 영향으로 따뜻한 서 내지 남서 계열의 기류가 지속적으로 유입되었다. 또한 우리나라 주변 해수면 온도가 평년보다 0.5~1°C 정도 낮은 분포로 해기차(해양 대기 온도차)가 증가하면서 해수면 부근에서 수증기의 응결이 쉽게 이루어져 해무 발생이 더욱 용이해졌고, 또한 고기압의 영향으로 상층 역전 현상이 나타나 층운 소산을 어렵게 하여 2~3일간 한반도는 해무의 영향을 받았다.

종관장 분석 결과를 바탕으로 성금 격자 모델과 상세 격자 모델을 사용하여 사례를 검증한 결과 대체적으로 종관장의 특징을 잘 나타내고 있었으며, 특히 상세 격자 모델에서 더욱 정교하게 예보하고 있음을 확인 할 수 있었다.

이러한 결과는 해무 발생과 소멸 예측에 있어 수치예보 모델 결과 적용 시 그 예측 가능성이 매우 높음을 의미하는 것으로, 해무 예보에 수치예보 모델을 적용할 수 있는 한 시발점이 될 수 있을 것이다.

따라서 이 연구를 바탕으로 수치예보 모델에 의한 해무의 특성 및 예보에 대한 많은 연구가 이루어지면 해무 예보의 정확성 향상을 기대 할 수 있다. 이러한 연구를 통해 해무에 의한 항공기의 지연 및 발착 등 관련 문제를 객관적으로

참고 문헌

- [1] 공군기상전대, "기상총감", 1994
- [2] FAA, "NASDAC review of NTSB weather/related accident", 2005
- [3] 이우진, "일기도와 날씨해석", 광교이텍스, 2006, p.146.
- [4] 김범영, "남한 해무와 무중해난의 연관성에 관한 연구", 연세대학교 석사학위 논문, 1985, p.40.
- [5] 정성호, "다도해 안개에 관하여", 관상대보, 1968, pp.18~29.
- [6] 변희룡 등, "동해 및 그 주변에서 발생하는 해무의 특성과 예측 가능성 조사", 한국 기상학회지, 33, 1997, pp.41~62.
- [7] 오귀영, "황해 중부 연안 안개의 발생 특성 분석과 예측 가능성 조사" 부산수산대학교 석사학위 논문, 1995, p.58.
- [8] 김문옥, 고정석, "한국 근해의 해무 특성 조사", 광주기상청, 1996, p.52.
- [9] 박원선, 신기윤, "황해상의 해무에 관한 연구", 한국기상학회 추계발표회, 1997.
- [10] Anthes, R. A., and T. T. Warner, "Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies", Mon. Wea. Rev., AMS, 106, 1978, 1045-1078.
- [11] 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, "The MM5 at the Air Force Weather Agency - New products to support military operations", The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 1999.