Atmosphere, **17**(2), 207-216 June 2007
NOTE

이동격자태풍모델을 이용한 2006년 태풍의 진로 및 강도 예측성능 평가

김주혜[1,*] · 추교명[1] · 김백조[1] · 원성희[2] · 권혁조[2]
[1]기상청 기상연구소 태풍연구팀
[2]공주대학교 태풍연구센터
(2007년 3월 7일 접수; 2007년 5월 29일 승인)

Performance of MTM in 2006 Typhoon Forecast

Ju-Hye Kim[1,*], Gyo-Myung Choo[1], Baek-Jo Kim[1], Seong-Hee Won[2] and H. Joe Kwon[2]
[1]*Meteorological Research Institute*
[2]*Typhoon Research Center, Kongju National University*
(Manuscript received 7 March 2007; in final form 29 May 2007)

Abstract

The Moving-nest Typhoon Model (MTM) was installed on the Korea Meteorological Administration (KMA)'s CRAY X1E in 2006 and started its test operation in August 2006 to provide track and intensity forecasts of tropical cyclones. In this study, feasibility of the MTM forecast is compared with the Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS) of the KMA and the operational typhoon forecast models in the Japan Meteorological Agency (JMA), from the sixth tropical cyclone to the twentieth in 2006. Forecast skills in terms of the storm position error of the two KMA models were comparable, but MTM showed a slightly better ability. While both GDAPS and MTM produced larger errors than JMA models in track forecast, the predicted intensity was much improved by MTM, making it comparable to the JMA's typhoon forecast model. It is believed that the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) bogus initialization method in MTM improves the ability to forecast typhoon intensity.

Key words: typhoon forecast, MTM, GFDL bogus, MM5

1. 서 론

태풍에 의한 인명 및 재산상의 피해를 줄이고자 태풍에 관한 많은 연구가 지속되어왔으며, 컴퓨터 성능의 향상과 수치예보 기술의 발전은 태풍의 예측에 있어서 특히 태풍의 진로예보에 있어서 현저한 성과를 이룩하였다. 한국 기상청 (KMA: Korea Meteorological Administration)은 슈퍼컴퓨터 2호기인 CRAY X1E을 도입하여 2005년 12월부터 T426 기반의 전지구예보시스템 (GDAPS: Global Data Assimilation and Prediction System), 기존의 모델보다 영역이 확장된 지역모델 (RDAPS: Regional Data Assimilation and Prediction System), T213 기반의 앙상블예보시스템 (EPS: Ensemble Prediction System) 등을 현업모델로 운영하고 있으며 이러한 모델은 태풍예보에 있어 중요한 역할을 수행하고 있다. 이 모델들은 KMA의 슈퍼컴퓨터 1호기 NEC SX5에서 운영되었던 모델을 업그레이드한 것으로 수평해상도 및 연직 분해능이 높아짐에 따라 보다 우수한 태풍 예측성능을 보이는 것으로 나타났다 (심미정 등, 2007). 또한 2004년 9월부터 BATS (Barotropic Adaptive-grid Typhoon Simulation) 모델을 대체하여 이중푸리에급수 순압태풍모델 (DBAR: Double fourier series Barotropic Typhoon Model) (기상청, 2002)이 태풍의 진로 예측을 위해 운영되고 있다.

*Corresponding Author: Ju-Hye Kim, Typhoon Research Team, Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea.
Phone : +82-2-836-0687 , Fax : +82-2-836-0688
E-mail: juhye@metri.re.kr

ⓒ Korean Meteorological Society, 2007

KMA에서 운영하고 있는 태풍 예측용 모델들은 보다 발전된 수치예보 기술을 갖고 있는 ECMWF (Medium range Weather Forecasting), NCEP (National Centers for Environmental Prediction), JMA (Japan Meteorological Agency) 등의 전지구 모델 또는 태풍 전용모델과 비교할 때 아직 예측 정확도의 향상이 필요하다. 한편 태풍 전용모델인 DBAR는 순압모델로서 태풍의 강도 예보를 제공하지 않으며, 저위도에서의 태풍예측과 48시간 이내의 태풍예측에 있어서는 상대적으로 우수한 예측 성능을 갖고 있지만 태풍이 저위도에서 벗어나 북상하거나 예보시간이 길어지면 예측 오차가 커지는 단점을 갖고 있다.

이동격자태풍모델 (Moving-nest Typhoon Model, 이하 MTM)은 공주대학교 태풍연구센터에서 개발한 태풍 전용 역학모델로서 중규모 모델인 PSU/NCAR (Penn state University/National Center for Atmospheric Research) MM5 (5^{th} generation Mesoscale Model) (Grell *et al*., 1994)를 기반으로 GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 방식의 보거싱 과정 (Kurihara *et al*., 1995; Kwon *et al*., 2002)이 적용되었고, MM5의 이동격자 시스템을 이용하여 안쪽의 고해상도 둥지격자가 태풍의 진로에 따라 이동하는 자동이동둥지격자 기능을 보유하고 있다. 기상연구소 태풍연구팀에서는 MTM을 기상청 슈퍼컴퓨터 2 호기에 장착하여 태풍이 존재하는 경우에 대하여 입력 자료의 수집에서부터 모델의 수행 및 태풍예측 자료의 예보현업시스템에 제공까지의 전 과정을 자동 수행하도록 설치 하였으며, 2006년 8월부터 시험운영을 시작하였다. 이 연구는 2006년 제 6호부터 20호 태풍에 대한 MTM의 진로 및 강도 예측 성능을 평가하고 예측 특성 및 문제점을 제시하여 향후 태풍역학모델의 개발에 도움이 되는 선행 연구로서의 역할을 하고자 한다.

2. MTM 예보

2.1 초기 및 경계자료

MTM의 초기장 및 경계장으로 사용된 자료는 기상청 슈퍼컴퓨터에서 운영되는 현업 전지구 모델인 GDAPS의 분석 및 예측장이며, 자료의 해상도는 0.28125° x 0.28125°로 30 km 정도의 환산 해상도를 갖는다. 해수면 온도 (SST) 자료는 NCEP에서 제공하는 1° x 1° 일 평균 자료를 사용하였으며, JTWC (Joint Typhoon Warning Center)에서 제공하는 태풍전문 자료 중 중심 위경도 및 최대 풍속 자료를 이용하여 MTM의 모델 적분 영역을 결정하고 모조 태풍을 구성한다.

2.2 MTM 구조

MTM은 중규모 모델인 MM5의 이동격자 체계를 기반으로 하고 있다. 모델의 수행 순서는 MM5의 순서를 따르되 pressure level의 초기 데이터에 보거싱을 해주는 과정이 추가 되어 있다 (Fig. 1). 보거싱 과정은 GDAPS의 초기시간 바람 분석장에 GFDL의 태풍 초기화 알고리즘을 적용해 태풍의 vortex를 생성하는 BOGUS WIND 과정과, 개선된 바람장과 균형을 이루도록 다른 역학 변수들을 nudging하는 24시간 FDDA (Four dimensional Data Assimilation) 과정으로 구성되어 있다. 이렇게 개선된 초기장을 이용하여 72시간 예보를 수행한다. 이때 MM5의 이동둥지격자 기능을 이용하여 태풍의 이동에 맞추어 둥지격자가 이동하며 적분을 수행한다. 이동둥지격자 체계를 이용하면 태풍의 내부를 자세히 모사할 수 있으며 boguscane으로 인한 문제도 해결할 수 있다는 장점이 있다 (Kwon *et al*., 2002).

MTM은 태풍전문을 통해 확인한 태풍의 위치로부터 위도 5° 북쪽을 모델영역의 중심으로 하여 Lambert-Conformal 지도 투영법을 사용한 세 개의 모델영역을 설정하도록 개발되었다. 그러나 본 MTM의 슈퍼컴 2호기 구축에서는 모델 적분시간 절약을 위하여 두 개의 영역만을 설치하였다. 전체격자 (D01)의 동서방향과 남북방향의 격자 개수는 모두 91 개로 구성되어 있으며 격자 간격은 81 km이다. D01의 중심은 태풍전문으로부터 초기의 태풍의 위치를 읽어 그것보다 위도 5° 높은 곳으로 잡는다. 그 안에 위치한 D02는 72시간 예보과정 중 태풍의 움직이는 위치에 따라 함께 이동하는 이동둥지격자이며 동서방향과 남북방향 모두 103 개의 격자와 27 km의 격자 간격을 갖는다. 두 격자체계는 일방 상호 둥지격자 체계 (1-way nesting)로 구성하였다. D03은 격자 간격 9 km의 고해상도 격자이지만 이동격자와 관련된 MM5의 코드가 병렬화 되어 있지 않은 이유로 모델 적분시간의 절약을 위하여 구현하지 않았다. 물리과정 중 명시적 수분과정은 Mixed-phased 방안 (Reisner *et al*., 1998)을, 적운 모수화 방법은 Kuo 방안 (Kuo, 1974)을, 행성 경계층 방안으로는 Blackadar 방안 (Blackadar, 1979)을 사용하였다.

MTM은 하루에 두 번 (0000 UTC, 1200 UTC) 태풍의 존재를 확인하여 TS(Tropical Storm; 중심 최대

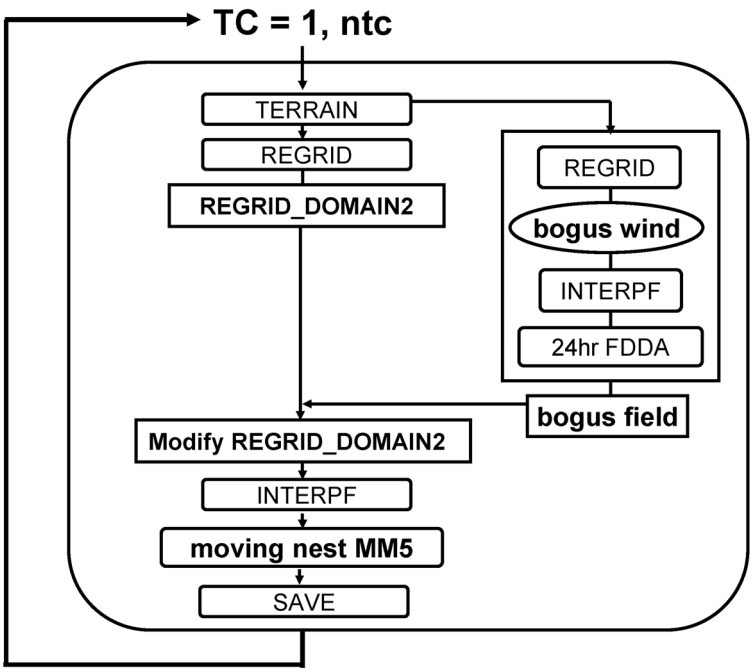

Fig. 1. Flow chart of MTM.

풍속이 17 m/s 이상 24 m/s 미만)급 이상의 태풍이 있을 때에 적분을 수행하여 예보 결과를 태풍예측 및 분석시스템 (TAPS: Typhoon Analysis and Prediction System) 서버에 제공한다.

3. 태풍 예측성능 분석 및 논의

MTM이 시험운영을 시작한 2006년 8월 1일부터 11월까지, 제 6호 태풍 PRAPIROON(0606)부터 제 20호 태풍 CHEBI(0620)까지 15개의 태풍이 발생하였으며, 이 중에서 제 11호 태풍 SONAMU(0611)를 제외한 14개 태풍에 대하여 MTM의 진로 및 강도예보 성능을 GDAPS, JMA 전구모델 (이하 JGSM) 및 태풍모델 (이하 JTYM)의 예보결과와 비교하여 평가하였다. 2006년 MTM 시험운영 기간 중 KMA 지역예보시스템 (이하 RDAPS)의 모델영역 안으로 태풍이 진입하여 RDAPS에 의한 태풍예보가 수행된 경우는 매우 적었다. 그러므로 이 모델을 제외한 GDAPS, JGSM, 및 JTYM과의 비교 검증에 비중을 두었다. 각 모델 별 태풍의 예측특성의 차이점을 이해하고자 모델의 기본적 사항을 분류하여 Table 1에 정리하였다. 한 개 모델 자료의 부재 또는 태풍추적 실패의 경우가 있으면 동일 시

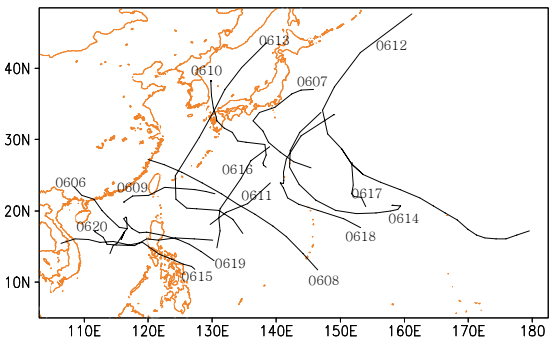

Fig. 2. Observed tracks of tropical cyclones in 2006 (0606 to 0620).

각의 모든 모델 자료를 제외하고 검증을 수행하였다.

Fig. 2는 2006년 제 6호 태풍부터 제 20호 태풍까지의 관측 진로를 보여준다. 이 기간 중 한반도를 통과한 태풍은 없었고 제 10호 태풍 WUKONG과 제 13호 태풍 SHANSHAN이 직접 또는 간접적으로 한반도에 영향을 미쳤다. 8월 7일 0000 UTC부터 8월 10일 0000 UTC에는 제 7호 태풍 MARIA, 8호 태풍 SAOMAI, 9호 태풍 BOPHA, 세 개의 태풍이 동시에 존재하였으며 특히 태풍 SAOMAI와 BOPHA는 서로 근접하여 상호간에 영향을 주고 받으며 발달하였다. 또한 8월 19일 중

Table 1. Comparisons of KMA and JMA models.

		GDAPS	MTM	JGSM	JTYM
Dynamics	Horizontal resolution (Vertical layer)	30 km (40)	27 km (23)	55 km (40)	24 km (25)
	Differential method	Spectral	Finite	Spectral	Spectral
Vortex initialization method		Same as JGSM	Kurihara *et al*. (1995), Kwon *el al*. (2002)	Ueno(1989, 1995)	Same as JGSM
Physics	Cumulus	Kuo (1974)	Kuo (1974)	Arakawa and Schubert (1974)	Same as JGSM
	PBL	Hong and Pan (1996)	Blackadar (1979)	Mellor and Yamada (1974, 1982)	
Forecast time		00/12/UTC	00/12/UTC	00/12/UTC	00/06/12/18/UTC

태평양에서 TD (Tropical Depression)로 발생한 허리케인 IOKE는 지속적으로 서진하여 8월 27일 1200 UTC에 동경 180°를 지나 태풍 감시영역으로 진입하였고 9월 7일 0000 UTC에 소멸하며 긴 일생을 마친다.

3.1 진로 예보 검증

Table 2a에 14개 각각의 태풍에 대한 24, 48, 72시간 진로오차 및 표준편차 값을 정리하였고, Fig. 3a는 12, 24, 36, 48, 60, 그리고 72시간 평균 진로오차를 도시하였다. 비교 및 검증을 위해 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center) best track 자료를 이용하였다. 태풍 진로예보 성능을 평가한 결과 MTM은 진로예측에 있어 평균적으로 GDAPS보다 조금 작은 거리 오차를 보이는 것으로 나타났다. MTM의 24시간 진로오차의 경우 173.7 km로 GDAPS보다 28.9 km 작은 거리오차를 보였고, 48 (72)시간 예보의 경우 326.8 (457.4) km로 GDAPS보다 9.1 (7.5) km 작은 거리 오차를 보였다. 태풍의 진로 예측에 있어 JGSM과 JTYM의 결과는 MTM의 예측보다 뛰어난 성능을 보이고 있다. JTYM의 72시간 진로오차는 267.2 km를 기록하여 MTM의 진로오차 457.4 km에 비하여 190 km 정도 작은 오차를 가짐이 확인되었다. 이런 차이를 보이는 이유는 각 태풍모델이 초기 및 경계장으로 사용하는 전구모델의 예측성능과 밀접한 관련이 있으리라 생각된다. GDAPS의 24, 48, 72시간 진로오차는 202.6, 335.9, 464.9 km로 JGSM이 109.0, 204.6, 308.9 km를 기록한 것에 비해 큰 오차를 갖는 것으로 분석되었다. Kwon *et al*. (2002)에 의하면 태풍의 움직임은 주변장의 흐름에 많은 영향을 받는데, 보거싱 과정을 거치더라도 태풍주변의 작은 영역만이 새롭게 구성되므로, 근본적으로 기존 전구모델의 예측능력 향상 없이는 태풍전용모델의 진로 예측능력 향상을 크게 기대할 수 없다고 했다.

JTYM은 초기에 JGSM과 비슷한 오차를 보이지만, 시간이 흐름에 따라 JGSM보다 거리오차가 줄어들어 72시간 예보에 대해서는 JGSM보다 41.7 km 작은 거리 오차를 보인다. 이것은 JTYM이 JGSM에 비해 고해상도의 태풍예측을 수행하기 때문에 시간이 흐림에 따라 예보 오차가 작아진 것으로 생각된다 (Table 1). 반면 MTM의 거리오차는 초기 예보시간에 GDAPS보다 매우 작은 값을 가지지만 예보시간이 길어짐에 따라 오차 값이 증가하여, 72시간 예보에 대하여는 GDAPS보다 7.5 km 작은 오차를 기록하여 태풍전용모델로서 태풍의 진로 예측에 대한 이득이 크지 않음을 알 수 있다. 초기에 MTM의 진로 오차가 GDAPS에 비해 현격히 작은 값을 갖는 이유는 GFDL 보거싱에 의해 개선된 초기장이 비교적 초기시간인 12시간과, 24시간의 진로 예보에 긍정적 영향을 끼쳤기 때문인 것으로 보인다. 그러나 MTM D02의 해상도와 GDAPS의 해상도가 큰 차이를 보이지 않으므로 예보시간이 증가함에 따라 MTM과 GDAPS의 예보결과에 큰 차이가 있지 않음을 확인할 수 있다.

각 모델들의 진로오차를 살펴보면, 모델이 각 태풍에 따라 상대적으로 정확한 예측자료를 생산한 경우와 그렇지 못한 경우를 볼 수 있다. 검증에 사용된 자

Table 2. Statistics of (a) track distance errors (km) and (b) intensity errors (hPa) for 2006 typhoons. <N> indicates the number of cases.

(a)

TC ID	24 h FCST					48 h FCST					72 h FCST				
	<N>	M	G	JG	JT	<N>	M	G	JG	JT	<N>	M	G	JG	JT
0606	<4>	186.5	171.5	84.2	128.2	<3>	293.1	386.3	193.9	237.7	<1>	348.5	697.3	239.1	268.7
0607	<4>	152.1	107.7	158.1	234.8	<1>	253.1	62.7	234.3	373.1	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
0608	<3>	221.0	220.3	109.6	130.6	<2>	442.5	406.6	552.4	330.3	<1>	463.0	425.7	699.5	557.9
0609	<2>	143.8	74.8	95.8	189.8	<1>	390.4	425.8	237.7	514.3	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
0610	<12>	182.5	133.2	66.9	106.9	<10>	373.6	292.4	189.4	231.1	<5>	495.4	415.4	247.9	334.5
0612	<19>	137.5	187.8	78.8	81.0	<17>	265.6	253.7	156.0	165.3	<15>	339.9	477.0	340.9	313.6
0613	<16>	180.1	145.7	65.7	73.5	<13>	328.6	190.4	101.7	111.3	<11>	418.2	296.5	134.4	199.0
0614	<14>	166.8	173.6	109.7	76.8	<12>	407.2	327.1	196.2	103.4	<10>	696.5	538.8	295.7	212.6
0615	<9>	172.0	288.7	93.2	92.8	<6>	234.8	500.5	101.1	171.9	<2>	307.9	503.4	91.1	321.4
0616	<5>	329.3	398.6	325.0	331.8	<3>	333.2	676.8	504.2	461.8	<1>	112.9	831.6	534.7	470.1
0617	<4>	233.8	258.5	41.9	98.3	<2>	360.6	478.7	178.0	198.5	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
0618	<11>	186.5	196.4	112.8	91.4	<9>	336.6	253.8	255.1	144.2	<7>	543.5	296.1	478.6	175.4
0619	<11>	159.4	356.9	138.3	122.5	<11>	312.2	577.3	258.5	179.8	<6>	416.6	752.8	405.5	317.8
0620	<8>	116.6	143.7	191.6	134.0	<5>	327.6	237.6	288.7	153.0	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
Ave	<122>	173.7	202.6	109.0	111.5	<95>	326.8	335.9	204.6	178.1	<59>	457.4	464.9	308.9	267.2
SD	<122>	40.9	78.9	57.2	56.5	<95>	52.2	138.1	94.6	80.8	<59>	132.8	146.8	125.7	76.1

(b)

TC ID	24 h FCST					48 h FCST					72 h FCST				
	<N>	M	G	JG	JT	<N>	M	G	JG	JT	<N>	M	G	JG	JT
0606	<4>	11.0	15.6	10.0	12.3	<3>	11.0	10.6	14.3	19.3	<1>	0.6	6.5	2.0	24.0
0607	<4>	9.7	11.8	6.5	5.0	<1>	11.1	8.4	6.0	2.0	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
0608	<3>	43.4	48.2	20.7	17.0	<2>	34.9	28.1	18.5	8.5	<1>	35.0	19.0	33.0	2.0
0609	<2>	2.9	8.0	6.0	14.0	<1>	0.2	12.5	6.0	16.0	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
0610	<12>	8.7	7.1	2.2	7.5	<10>	9.8	13.1	3.2	14.1	<5>	10.4	12.7	2.6	20.0
0612	<19>	24.9	41.9	7.4	26.1	<17>	17.5	36.8	14.6	37.5	<15>	15.6	29.5	23.7	44.8
0613	<16>	24.5	35.9	15.9	18.4	<13>	28.0	36.3	22.9	23.7	<11>	24.3	34.0	22.2	24.7
0614	<14>	18.7	40.2	20.2	17.5	<12>	32.9	36.4	35.4	25.9	<10>	40.8	33.4	43.8	34.7
0615	<9>	20.3	36.0	11.0	9.9	<6>	22.9	39.8	16.7	11.5	<2>	29.2	55.1	39.0	26.0
0616	<5>	20.1	8.4	2.8	9.2	<3>	50.6	11.8	3.3	19.3	<1>	43.9	10.9	4.0	27.0
0617	<4>	9.9	10.9	2.5	3.8	<2>	5.5	13.1	2.5	3.5	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
0618	<11>	11.2	19.2	8.0	4.4	<9>	11.8	21.2	12.9	5.6	<7>	20.3	24.0	13.1	5.7
0619	<11>	23.3	34.9	10.5	16.9	<11>	25.0	28.0	18.0	26.4	<6>	21.7	17.9	33.3	45.3
0620	<8>	26.9	37.7	30.5	29.3	<5>	21.5	28.3	37.0	33.2	<0>	0.0	0.0	0.0	0.0
Ave	<122>	19.4	29.5	11.6	15.5	<95>	21.6	28.6	18.0	22.4	<59>	23.2	27.7	24.7	30.6
SD	<122>	7.6	13.2	7.5	7.8	<95>	9.8	9.9	10.2	10.4	<59>	10.1	9.1	12.3	13.5

료의 양이 비교적 많은 태풍 SHANSHAN(0613)과 CIMARON(0619)의 사례를 비교해 보면 SHANSHAN의 경우에 대해서는 GDAPS의 결과가 MTM보다 진로예측에 있어 정확도가 높았으나 CIMARON의 경우에는 MTM이 GDAPS보다 작은 진로 오차를 보인다. 그러나 MTM 진로 오차의 표준편차를 살펴보면 모든 시간에 대하여 GDAPS의 값보다 작은 값을 가진다. 48시간 예보결과를 살펴보면 MTM은 최대 오차가 442.5 km이며 최소 오차는 234.8 km인데 비해 GDAPS의 최대 오차는 각각 676.8 km이고 최소 오차는 62.7 km이다. 또한 48시간 MTM 진로 오차의 표준편차는 JGSM과 JTYM에 비해서도 작은 값을 보인다. 이것은 MTM의 태풍 진로 예측이 특정 태풍에 대해서만이 아니라 발생하는 모든 태풍에 대하여 비교적 안정적인 예보를 수행하는 것으로 해석된다.

3.2 강도 예보 검증

태풍의 강도 예보에 대한 평가 자료로 관측된 해면기압 값과 모델에서 예보한 해면기압 값을 선택하여 비교하였다. Table 2b에 14개 각각의 태풍에 대한 24, 48, 72시간 강도오차 값을 정리하였고, Fig. 3b에 12, 24, 36, 48, 60, 그리고 72시간 평균 강도오차를 도시하였다. MTM의 태풍 강도 예측 결과는 모든 예보 시간에 대하여 GDAPS보다 작은 오차를 가짐을 확인할 수 있었다. MTM의 24시간 태풍 강도예측 결과는 19.4 hPa로 GDAPS의 29.5 hPa보다 약 10 hPa정도 작은 강도오차를 보였으며, 48, 72시간 오차를 살펴보면 21.6, 23.2 hPa로 GDAPS 예측에 비해 각각 7.0, 4.5 hPa 가량 작은 오차를 가진다. 이에 비해 JTYM의 강도 예측 오차는 모든 시간에 대해 JGSM의 것보다 크다. 이것은 MTM이 별도의 보거싱 과정을 거쳐 태풍 강도 예보를 독자적으로 수행함에 비해, JTYM은 JGSM의 결과를 그대로 사용하므로 전구모델의 예측성에 보다 의존하기 때문인 것으로 생각된다. 물론 모델을 이용한 태풍의 강도 예보는 아직도 만족할만한 수준이 아니지만 MTM의 예측 결과는 JTYM보다도 작은 오차를 가지는 것으로, GFDL 보거싱을 이용한 MTM의 강도 예보가 다른 모델의 예보에 비해 비교적 우수함을 의미한다.

MTM을 이용한 태풍 강도 예보의 또 다른 특징은 오차의 값이 예보시간에 따라 큰 차이를 보이지 않는다는 것이다. 일본 모델들의 경우 12시간 예보 오차 (JGSM [6.7 hPa], JTYM [10.3 hPa])에 비해 72시간 예보 오차 (JGSM [24.7 hPa], JTYM [30.6 hPa])가 3배 이상 큰 값을 보인다. 반면 MTM의 경우 예보 시간이 늘어남에 따라 강도 예보 오차의 증가가 있긴 하지만, 12시간 예보 오차 값이 17.4 hPa임에 비하여 72시간 오차 값은 23.2 hPa로 비교적 작은 차이를 보인다 (Fig. 3b). GDAPS의 경우는 모든 모델 적분 시간에 대하여 높은 오차 값을 기록한다.

Fig. 4a는 MTM이 태풍 EWINIAR(0603)의 강도 예측 결과와 JTYM의 결과를 비교한 것이다. 한 사례에 대한 그림이지만 미리 논의 되었던 MTM과 다른 모델들의 강도 예측 특성을 잘 보여주고 있다. 초기 36시간에 대하여서는 MTM과 JTYM 두 모델 모두 태풍의 강도를 실제보다 강하게 모의하였다. 그러나 36시간 이후에 태풍이 약화되는 것은 MTM에 의해 보다 근접하게 모의됨을 확인할 수 있다. Fig. 4b는 GDAPS와 JGSM이 예측한 태풍 EWINIAR의 강도를 비교한 그림이다. JGSM이 태풍의 강도를 950 hPa 정도로 예측한 데 비하여 GDAPS는 980 hPa 정도로 예측하여, GDAPS가 태풍의 강도를 실제보다 약하게 모의함을 확인할 수 있다. 이렇게 약하게 모의된 GDAPS의 결과를

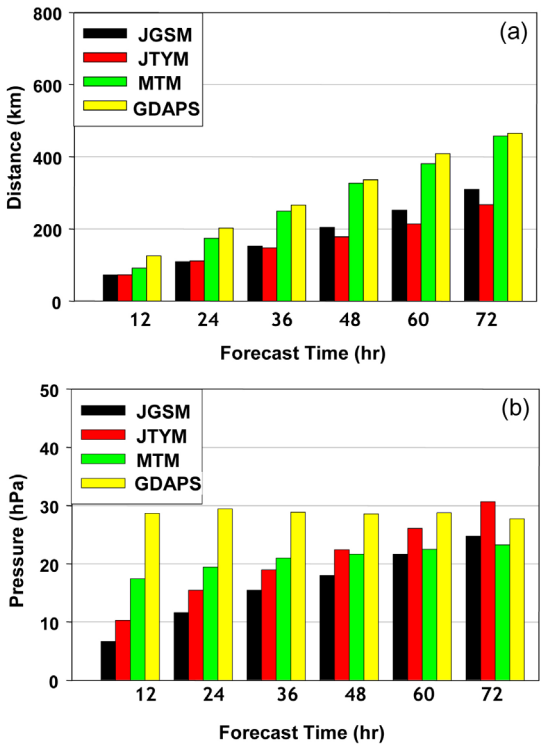

Fig. 3. Averaged (a) track distance errors and (b) intensity errors measured by sea surface pressure.

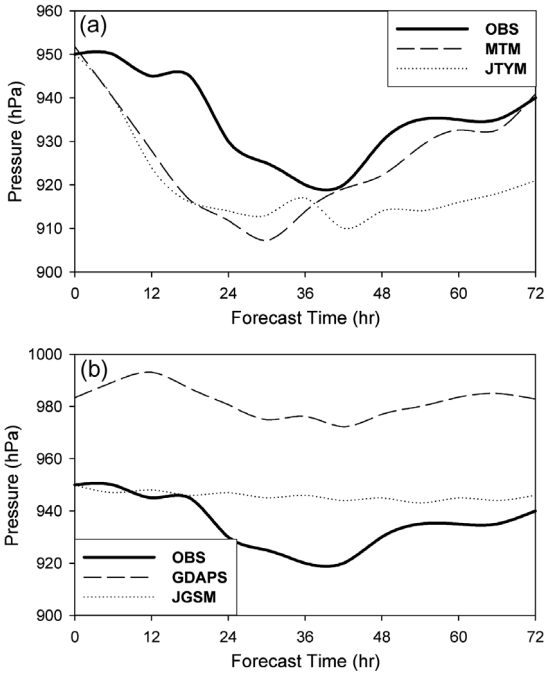

Fig. 4. Predicted typhoon intensities (hPa) at 1200 UTC 3 July 2006 for (a) typhoon models of MTM and JTYM and for (b) global models of GDAPS and JGSM.

MTM의 초기 및 경계장으로 사용했음에도 MTM의 강도 예측 결과가 우수한 것은 보거싱을 통한 초기장의 개선이 태풍의 강도 예측에 많은 기여를 했기 때문인 것으로 해석된다.

4. 사례별 예측특성 분석 및 논의

4.1 태풍의 위치에 따른 예측특성 분석

태풍이 비교적 저위도에 위치해 있을 때와 태풍이 중위도로 이동 했을 때 MTM 의 각 예보 특성을 분석해 보았다 (Table 3). Table 2의 사례들 중 초기 시간 태풍의 위치가 위도 23.5°를 기준으로 해서 아래쪽에 위치할 때를 저위도 지방에 위치할 때, 또한 23.5°보다 위쪽에 있을 때를 중위도 지방으로 진입했을 때로 분리하여 분석해 보았다. MTM의 진로예보 결과를 살펴보면 태풍이 저위도에 위치할 때나 태풍이 중위도 지방으로 이동했을 때 진로예보 오차 값이 비교적 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인된다. MTM의 72시간 예보에 대해서는 중위도에 위치한 태풍의 진로예측에서 정확도가 높지만 검증에 사용된 중위도에 위치한

Table 3. Statistics of (a) track distance errors (km) and (b) intensity errors (hPa) at low latitudes and mid latitudes. <N> indicates the number of cases.

(a)

	Low latitude					Mid latitude				
Fcst	<N>	MTM	GDAPS	JGSM	JTYM	<N>	MTM	GDAPS	JGSM	JTYM
12 h	84	90.0	136.3	70.5	74.0	42	88.5	100.3	77.8	71.8
24 h	81	175.6	221.0	104.9	106.6	41	169.9	166.3	117.2	121.3
36 h	74	252.8	290.0	147.7	137.5	33	243.1	211.9	163.6	169.4
48 h	69	322.6	362.9	193.9	165.5	26	337.9	264.2	233.0	211.6
60 h	58	378.2	419.5	220.3	188.3	19	390.6	374.5	348.9	291.3
72 h	47	471.4	450.4	258.6	220.0	12	402.2	521.8	506.0	452.3

(b)

	Low latitude					Mid latitude				
Fcst	<N>	MTM	GDAPS	JGSM	JTYM	<N>	MTM	GDAPS	JGSM	JTYM
12 h	84	20.4	35.1	6.9	11.5	42	10.2	13.2	4.6	6.1
24 h	81	24.0	38.2	12.2	17.5	41	10.6	11.4	9.1	10.2
36 h	74	25.2	37.6	16.1	20.4	33	11.7	9.4	12.6	13.7
48 h	69	25.7	35.4	17.8	23.6	26	10.9	10.5	16.6	17.0
60 h	58	26.1	34.5	21.4	26.8	19	11.2	10.9	20.2	21.1
72 h	47	26.1	32.2	24.5	31.7	12	11.0	9.5	23.3	24.6

태풍 예보의 자료 수가 적은 점을 고려하면 유의할만한 의미를 부여하기에는 부족한 것으로 판단된다. 그에 비해 GDAPS의 경우 태풍이 북상함에 따라 72시간 예보를 제외한 모든 시간에 대하여 진로 예보 오차가 감소함을 확인할 수 있었다. 이것은 전지구 자료동화 시스템을 운영하는 GDAPS가 중위도 지방의 많은 관측 자료를 이용하여 향상된 예측 값을 제공하므로 태풍의 진로 및 강도 예보에 긍정적 영향을 끼친 것으로 보인다. 이에 비해 일본의 모델들은 중위도 지방에서 오히려 오차 값이 증가하는 경향을 보였는데 이러한 이유는 중위도 지역에서 동시에 존재한 제 8호와 9호 태풍의 진로 예측 오차가 평균에 비해 훨씬 컸기 때문인 것으로 생각된다 (Table 2a).

태풍의 위치에 따른 태풍의 진로예측 오차의 차이는 뚜렷하지 않았지만, 중위도 지방으로 태풍이 북상함에 따라 MTM의 태풍 강도예보 오차는 평균 15 hPa 정도 작아짐을 확인할 수 있다 (Table 3b). 이러한 경향은 GDAPS에서 더욱 두드러졌다. 저위도에서 35 hPa 가량의 오차를 갖던 GDAPS의 예측 오차값은 중위도에서 10 hPa 정도의 값으로 작아진다. 이에 비하여 JGSM은 태풍의 위치에 따른 강도 예보 오차의 차이가 크지 않았으며, JTYM은 태풍이 북상했을 때의 오차가 저위도에 위치할 때의 값보다 5 에서 8 hPa 정도 감소하는 경향을 보였다.

4.2 태풍 강도에 따른 MTM의 예측특성 분석

Table 2에서 분류한 모든 사례 중 태풍이 TS급에 머물러 있던 태풍과 TY (Typhoon; 중심 최대 풍속이 33 m/s 이상)급까지 발달한 태풍으로 분리하여 MTM과 JTYM의 진로 및 강도 예보 오차를 비교해 보았다 (Table 4). STS (Severe Tropical Storm; 중심 최대 풍속이 24 m/s 이상 32 m/s 미만)급의 태풍인 MARIA (0607)와 BOPHA(0609)는 사례에 포함되지 않았다. TS급 태풍 사례는 TY급 태풍의 사례에 비해 작은 수를 갖는다. 특히 72시간 자료가 6 개 밖에 되지 않아 단정적인 결론을 도출하기 어려운 점이 있다.

태풍의 진로 오차를 살펴보면 48시간 이전에 대하여서는 MTM과 JTYM 모두 TY 급 태풍의 진로를 보다 정확하게 예측하는 경향을 보였다. 그러한 경향은 JTYM에서 더 두드러졌다. 특히 48시간 이후 예보에 대해 JTYM의 예보 오차를 살펴 보면 TY급 태풍의 진로 오차가 TS급의 오차보다 100 km 이상 작았다. 그러나 MTM의 경우 60시간과 72시간의 진로 오차가 TY급 태풍에서 더 큰 것으로 기록되었다. 장기간의 자료가 생산된다면 보다 정확한 예보경향을 설명할 수 있겠지만, JTYM이 TY급의 강한 태풍에 대해 보다 정확한 예측 능력을 가지고 있음에 비해 MTM은 그러한

Table 4. Statistics of track distance errors (TDE) (km) and intensity errors (IE) (hPa) for typhoons at level (a) TS and (b) TY. <N> indicates the number of cases.

(a)

		TDE		IE	
Fcst	<N>	MTM	JTYM	MTM	JTYM
12 h	23	133.8	93.1	10.3	5.3
24 h	21	227.2	158.8	11.6	7.2
36 h	18	315.4	225.9	16.4	10.2
48 h	15	363.8	272.9	17.4	13.7
60 h	11	369.0	305.4	16.9	15.9
72 h	6	431.7	357.1	16.0	21.2

(b)

		TDE		IE	
Fcst	<N>	MTM	JTYM	MTM	JTYM
12 h	95	75.6	64.0	19.5	11.7
24 h	95	163.4	94.3	21.6	17.7
36 h	85	238.5	121.5	22.3	20.8
48 h	78	319.8	153.1	22.8	23.7
60 h	66	383.3	198.4	23.3	26.8
72 h	53	460.3	257.0	23.7	30.5

특성이 두드러지지 않음을 확인할 수 있다.

태풍의 강도 오차를 살펴보면 MTM과 JTYM 모두 TY급의 태풍을 예측할 때 더 큰 오차를 보였다. 이는 강한 태풍일수록 중심기압의 하강 폭이 크므로 모델이 예측을 수행할 때 발생할 수 있는 예측 오차의 폭 또한 커지는 것으로 생각된다. MTM의 강도예보 결과를 보면 TS급과 TY급 태풍 모두에서 예보시간과 관계없이 일정한 오차 값을 보인다. 그러므로 초기시간에는 MTM의 오차가 JTYM보다 컸고 48시간 이후 예보에 대하여는 JTYM의 오차가 더 컸다. 이것은 MTM과 JTYM의 태풍 강도 예보 경향에 대한 전반적인 특성과 일치한다.

4.3 지역모델과의 비교

현재 기상청에서 운영중인 RDAPS는 동아시아 지역의 고정된 영역에서 66시간 예보를 수행하고 있다. 그러므로 저위도에서 발생하는 태풍에 대한 예보를 수행할 수 없다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 태풍의 초기 위치가 위도 17° 이상일 경우에 대해서는 태풍 예측 결과를 제공하므로 RDAPS 예보 결과가 존재하는 경우에 대하여 새롭게 사례를 구성하여 RDAPS와 MTM의 예측결과를 비교해 보았다 (Table 5).

모든 시간에 대하여 MTM의 예측 결과는 RDAPS의 값보다 큰 오차를 기록하고 하고 있다. 두 모델이 모두 MM5를 기반으로 만들어졌음에도 이런 차이를 보이는 이유 중 하나는 KMA의 현업 예보 모델인 RDAPS는 독자적인 자료동화시스템을 수행하여 초기 및 경계 자료의 질을 높여 예보를 수행한다는 점이다. 또한 한반도 및 동아시아 지역에 적합한 Kain-Fritsch (Kain and Fritsch, 1993) 적운 모수화 방안 및 비국지 행성경계층 방안 (Hong and Pan, 1996)을 장착하고 있으며 10 km의 수평 해상도와 33 개의 연직 층수를 가져 고해상도 예측을 수행한다. 이에 비해 MTM은 태풍의 중심기압과 최대 풍속을 이용한 보거싱 이외에 어떠한 동화 과정도 거치지 않아 한반도 근처에 존재하는 관측자료를 통한 이득이 없으며, 저위도 지역에서의 대류과정 모의에 보다 적합한 Kuo (Kuo, 1974) 적운 모수화 방안을 사용하여 태풍의 예보를 수행하였다.

5. 요약 및 논의

공주대학교 태풍연구센터에서 개발한 이동격자 태풍모델 (MTM)은 진보된 태풍 보거싱 기법과 자동 이동격자 기능을 갖는 태풍 예측 전용모델이다. 기상청 태풍예보에 MTM이 활용될 수 있도록 기상청 슈퍼컴퓨터 2호기에 이식하였고, 2006년 8월부터 시험운영을 수행하여 태풍 예측 정보를 실시간으로 태풍예보담당관실에 제공하였다. 시험운영 기간 중에 생산된 태풍 예측자료를 사용하여 MTM의 태풍 진로 및 강도 예측 능력을 평가하였으며 GDAPS, JGSM, 및 JTYM과 비교하여 예보 특성을 분석하였다.

태풍의 진로 예측 성능을 평가한 결과 MTM은 GDAPS보다 진로 예측에 있어 평균적으로 조금 작은 거리 오차를 보였으나, 태풍 전용모델임에도 불구하고 GDAPS에 비해 진로 예측에 있어 큰 이득을 볼 수 없었다. 그것은 MTM이 모델 적분시간 절약을 위해 D02에서 예보를 수행하는데, 그 해상도가 GDAPS T426의 것과 비교할 때 큰 차이를 보이지 않기 때문이라고 생각된다. 또한 GDAPS의 진로 예보 오차는 JGSM에 비해 현격히 큼을 볼 수 있었는데, 이것은 전구모델의 분석 및 예측장을 초기 및 경계자료로 사용하는 태풍 전용모델의 예측성에도 영향을 미쳐 MTM의 진로 예측 오차가 JTYM의 오차보다 큰 결과를 가져왔다고 생각된다.

MTM의 태풍 강도에 대한 예측성을 비교해 본 결과 JGSM, JTYM보다 작은 오차를 보여 태풍 강도의 예측에 있어 상대적으로 우수한 능력을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 그것은 전구모델로부터 제공된 초기장을 GFDL 보거싱을 이용하여 다시 한 번 개선하고 예

Table 5. Statistics of track distance errors (TDE) (km) and intensity errors (IE) (hPa) from MTM and RDAPS. <N> indicates the number of cases.

		TDE		IE	
Fcst	<N>	MTM	RDAPS	MTM	RDAPS
12 h	40	97.3	92.7	13.6	13.6
24 h	38	176.7	134.7	15.4	13.7
36 h	33	260.8	166.6	18.2	15.0
48 h	28	340.4	227.1	18.0	16.3
60 h	22	403.4	292.4	20.2	17.5

보를 수행하기 때문인 것으로 생각되는데, 조사한 대부분의 사례에 대해 MTM의 예측 오차가 GDAPS의 오차에 비해 작음을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 결과는 MTM의 강도 예측이 다른 모델들에 비해 상대적으로 우수한 것임을 의미하며, 실제 관측된 태풍과는 여전히 20 hPa 이상 차이가 나는 것으로, 모델을 이용한 태풍의 강도 예보는 여전히 과제로 남아있다.

MTM은 다른 모델들에 비해 각 사례나, 태풍의 위치, 또는 강도에 따른 오차의 차이가 크지 않아 대부분의 사례에 대하여 비교적 안정적으로 예보를 수행함을 확인할 수 있었다. 또한 MTM과 RDAPS의 결과를 비교 보면 진로 예측에 대하여 RDAPS의 예측성이 보다 우수했는데, 그것은 RDAPS가 가진 자료동화 시스템과 고해상도 격자체계가 태풍의 진로 예측에 긍정적인 영향을 주었기 때문인 것으로 보인다. 그러나 RDAPS는 고정된 영역을 가지고 있어 위도 17° 이상에서 존재하는 태풍에 대해서만 예보를 수행하는 한계점이 있고, 독자적인 보거싱 과정을 거치지 않기 때문에 강도 예측에 대하여 GDAPS의 예측 능력에 크게 의존할 것으로 예상된다.

본 연구에서 MTM의 보거싱 과정이 태풍 강도에 대한 예측성 향상에 기여한 점이 확인되었지만, 실제 현업예보에서 태풍전용모델로 활용되기 위해서는 몇 가지 개선되어야 할 점이 있다. 가장 근본적으로 고려해야 할 점은 고해상도의 격자체계를 이용한 태풍 예측이 빠른 적분시간 내에 수행되어야 한다는 것이다. 현재는 이동격자 체계와 관련된 코드가 병렬화 되어 있지 않아 모델 적분에 많은 시간이 소요되므로 고해상도 모의가 불가능하다. 즉 병렬화된 이동격자 시스템을 구축하는 것이 근본적인 해결 방법이 되겠다. 그러나 각 태풍의 발생시 새로운 적분 영역을 설정하는 기존의 방식은 유지한 채, 적분 영역 자체를 확장시키고 둥지격자를 고정하여 예보를 수행하는 방법도 차선책이 될 수 있을 것이다. 그리고 태풍 전용모델은 큰 피해를 줄 수 있는 태풍에 대하여 보다 빨리 보다 정확하게 예측해야 하므로 JTYM과 같이 6시간 간격으로 예측결과를 제공할 수 있어야 한다. 이 문제 또한 모델의 계산 속도와 밀접하게 연관되어 있는 것이므로 태풍 전용모델을 개발할 때 슈퍼컴퓨터의 계산능력을 최대한 활용하기 위한 노력은 필수적이라 생각된다.

감사의 글

이 연구는 기상연구소의 주요사업인 “진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

기상청, 2002: 선진 수치예보시스템 구축을 위한 기반기술 개발. 분야 1 전지구 예보시스템의 예측성능 개선. 276 pp.

심미정, 손주형, 박상욱, 추교명, 정현숙, 장동언, 2007: 수치예보 시스템의 검증 (2006년). *수치예보담당관 기술노트*, 2007-1, 95 pp.

Arakawa, A., and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.,* **31**, 674-704.

Blackadar, A. K., 1979: High resolution models of the planetary boundary layer. *Advances in Environmental Science and Engineering*, Vol. **1,** J. Pfafflin and E. Ziegler, Eds., Gordon and Breach, 50-85.

Grell, G., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). *NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR*, 117 pp.

Hong, S.-Y. and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev*., **124,** 2322-2339.

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*., No. **46**, *Amer. Meteor. Soc*., 165-170.

Kuo, H. L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1232-1240.

Kurihara, Y., M. A. Bender, R. E. Tuleya and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev*., **123**, 2791-2801.

Kwon, H. J., S.-H. Won, M.-H. Ahn, A.-S. Suh and H.-S. Chung, 2002: GFDL-Type Typhoon Initialization in MM5. *Mon. Wea. Rev.,* **130**, 2966-2974.

Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.,* **31**, 1791-1806, Corrigendum, **34**, 1482.

_____, and ____, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys*., **20**, 851-875.

Reisner, J., R, M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*., **124**, 1071-1107.

Ueno, M., 1989: Operational bogusing and numerical prediction of typhoon in JMA, *JMA/NPD Technical Report*. No. 28, 48pp.

_____, 1995: A study on the impact of asymmetric components around tropical cyclone center on the accuracy of bogus data and the track forecast. *Meteor. Atmos. Phy.,* **56**, 125-134.