

태풍 전용 수치모델 개발과 활용 현황



차 은 정
기상청국가태풍센터
기상연구관
cha@kma.go.kr



원 성 희
기상청 국가태풍센터
기상연구사
shwon@kma.gov.kr



김 동 호
기상청국가기상위성
센터기술서기관
dhkim@kma.go.kr



권 혁 조
공주대 대기과학과
태풍연구센터교수
hjkwon@kongju.ac.kr



김 선 희
공주대 대기과학과
태풍연구센터연구원
sunhkim@kma.gov.kr

1. 서론

우리나라에서 발생하는 자연재해 중 태풍은 가장 큰 비중을 차지한다. 태풍으로 인한 재해로부터 인명·재산 피해를 경감하기 위해서는 정확한 태풍예보가 반드시 필요하다.

태풍의 진로와 강도를 예측하기 위해서 다양한 수치모델이 이용된다. 수치모델은 태풍분석과 예보를 위한 중요한 가이던스이다. 태풍예보를 위한 모델은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 태풍예보만을 위한 태풍전용모델과 모든 예보를 위한 전구모델이다. 미국 기상청은 태풍전용모

델인 Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF)를 주로 활용하고, 일본 기상청과 유럽중기예보센터는 전구모델을 이용하여 태풍예보를 한다. 우리나라 기상청은 전구모델과 태풍전용모델을 태풍예보에 활용한다. 국내·외 태풍전용모델 개발과 활용 현황에 대하여 알아보았다.

2. 국외 기술 개발 현황

태풍의 진로 및 강도를 예측하기 위한 모델은 보통 성능의 컴퓨터에서도 수초 만에 결과를 얻을 수 있는 간단한

모델부터 슈퍼컴퓨터에서조차 수 시간의 계산시간이 걸리는 복잡한 모델까지 다양하다. 태풍 예측을 위한 모델은 크게 역학모델, 통계모델, 그리고 통계-역학 모델이 있으며, 또한 요즘은 앙상블기법을 도입하여 예측성을 높이고자 하는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 태풍 예측을 위해 범용모델인 전구모델이 기본적으로 사용되고 있으나, 진로뿐만 아니라 강도와 강수량 등의 정확한 예측을 위한 태풍 (또는 허리케인) 전용의 제한지역 모델 또한 계속 진화하고 있으며 예보현장에서 운영되고 있다.

대부분의 전구모델은 초기장에 약하게 분석된 열대저기압을 관측값에 가깝게 모의하기 위한 고유한 기법을 적용하고 있다. 이러한 기법을 보거싱 기법이라고 하는데 수치모델에 인공 태풍을 만들어 넣는 것이다. 예를 들어, 미국의 전구예보시스템 (Global Forecast System, GFS)은 6시간 전의 예측장으로부터 추출한 태풍을 미국의 국가허리케인센터 (National Hurricane Center, NHC)에서 공식적으로 발표한 허리케인의 위치로 옮긴 후 자료동화 과정을 수행하여 초기장을 개선한다. 반면, 유럽중기예보센터(European Center for Medium-range Weather Forecasting, ECMWF) 모델은 초기장에 인위적인 보거싱 기법을 적용하지 않음에도 불구하고 고품질의 관측자료를 기본으로 정교한 자료동화를 수행하여 높은 예보 정확도를 보유하고 있다.

대표적인 태풍전용모델은 미국 프린스턴대학의 지구물리유체역학연구소의 허리케인 모델 (GHM)과 HWRP가 있다. GHM은 미국기상청의 공식 허리케인 모델로서 1995년부터 예보에 활용되고 있으며 허리케인 예보관들에게 지난 10년간 진로 예측에 있어서 가장 신뢰성 있는 가이드스를 제공하였으나, 2006년에 개발을 중단하였다. GHM은 3개의 영역으로 구성되어 있는데, 가장 바깥 영역의 수평거리는 $75^{\circ} \times 75^{\circ}$ 로 수평해상도는 약 30 km이며, 중간 영역의 수평거리는 $11^{\circ} \times 11^{\circ}$ 로 수평해상도는 약 15 km이다. 가장 안쪽의 영역은 수평적으로 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 로 수평해상도는 약 7.5 km이고, 모든 영역은 42개의 연직층

수를 가진다 (표 1). 특히 GHM은 열대저기압과 해양과의 상호작용 효과를 고려하기 위해 고해상도의 프린스턴대학의 해양모델 (POM)과 접합되어 있다. GHM은 NHC로부터 제공된 중심기압, 중심부근 최대풍속, 30 knots 반경, 50 knots 반경 등을 이용하여 비대칭 태풍성분을 작성하는 방법으로 초기장을 개선하였다. 그림 1. 1은 2008년 허리케인 FAY가 대서양에서 활동하고 있었던 8월 20일 03시에 미국기상청 (National Weather Service, NWS)의 홈페이지에서 제공한 GHM 결과물 중 6시간 강수량과 평균해면기압장이다.

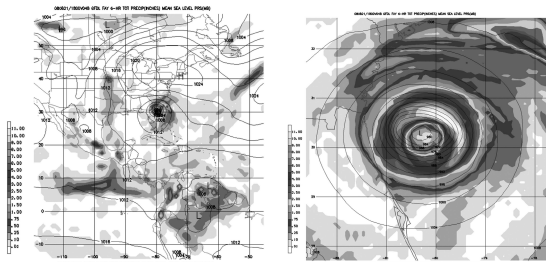
GHM를 대체한 차세대 모델인 HWRP는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Environmental Modeling Center (EMC)에서 개발되어 2007년부터 현업모델로 운영되고 있다. HWRP는 2개의 영역을 가지고 있는데, 가장 바깥 영역의 수평 해상도는 27 km이고 안쪽 영역의 수평 해상도는 9 km이며 42개의 시그마 연직층수를 가지고 있다 (표 2). HWRP 모델은 NHC 예보자들에 의해 발표된 TC 강도와 구조를 초기장에 표현하기 위해 6시간 예측장의 첫 번째 추정오란 (first guess vortex)에 3차원변분동화 격자통계 처리를 수행한다. HWRP는 프린스턴대학의 해양모델과 (POM) 과의 접합을 통해 허리케인 강도 예측에 중요한 요소인 허리케인 환경에서의 대기와 해양의 상호작용을 고려하고 있다. 현재 버전의 HWRP는 GHM과 비슷한 구조와 역학과정을 지녔으나, HWRP의 차후 버전에서는 특히 허리케인 중심부근에 더욱 정교한 역학과정과 자료동화기법을 적용하여 한층 진보된 허리케인 예측모델로 점차 진보할 것으로 여겨진다. HWRP 모델은 초기 허리케인 구조를 더 잘 표현하기 위해 지상과 항공기에서 관측된 도플러 레이더 관측자료를 이용할 계획이며, 이렇게 함으로써 허리케인의 진로와 강도뿐만 아니라 강수량 예측이 더욱 향상될 것으로 기대된다. 그림 1. 2는 2008년 허리케인 FAY 사례의 8월 20일 03시에 생산된 HWRP 결과물 중 6시간 강수량과 평균해면기압장이다.

[표-1] GFM 개요

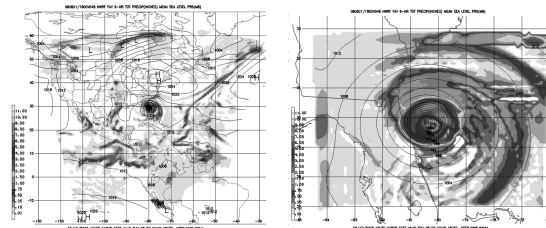
	외부 격자	중간 격자	내부 격자
격자간격	75°x75°	11°x11°	5°x5°
수평해상도	30 km	15 km	7.5 km
연직층수		42 층	

[표-2] HWRF 개요

	외부 격자	내부 격자
격자간격	60°x60°	7°x7°
수평해상도	27 km	9 km
연직층수		42 층

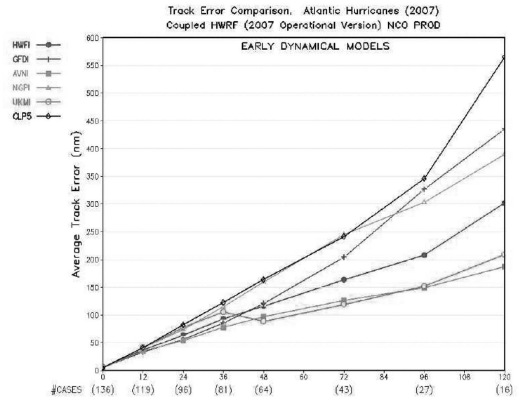


[그림 1.1.] 허리케인 전용모델 (GHM)에서 예측한 6시간 누적 강수량 (좌), 해면기압 2008년 8월 20일 03시 (자료출처, <http://www.nco.ncep.noaa.gov>)

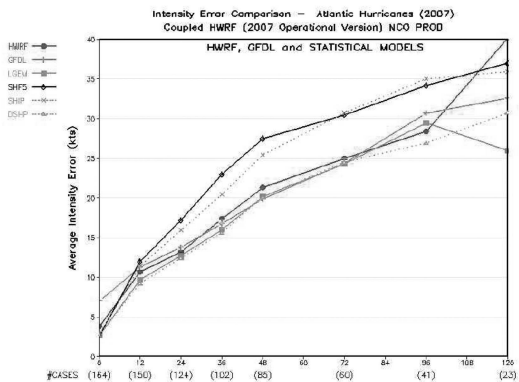


[그림 1.2.] 허리케인 전용모델 (HWRF)에서 예측한 6시간 누적 강수량(좌), 해면기압 2008년 8월 20일 03시 (자료출처, <http://www.nco.ncep.noaa.gov>)

2007년 대서양에서 발생한 허리케인을 대상으로 전용 모델인 GHM, HWRF와 전구모델인 AVN, UKMO에서의 진로예보오차를 비교해 보면 (그림 3), 대체로 전구모델의 진로예보 정확도가 높았다. GHM과 HWRF를 서로 비교해보면, 48시간까지는 비슷한 예보오차를 나타내고 있으나, 48시간 이후는 HWRF의 진로예보 오차가 현저히 작았다. 또한 GHM, HWRF의 강도예보 오차가 다른 통계모델들에서의 강도예보 오차보다 작거나 비슷했다 (그림 4).



[그림 3] 전구모델과 허리케인 전용모델에서 계산한 2007년 대서양 허리케인 진로예보 정확도 비교



[그림 4] 전구모델과 허리케인 전용모델에서 계산한 2007년 대서양 허리케인 강도예보 정확도 비교

3. 국내 기술 개발 현황

우리나라 기상청의 태풍 예보에 사용되고 있는 현업 모델로는 (1) 전구모델인 Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS), (2) 지역모델 Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS), (3) 지역모델 Korea WRF (KWRF)와 (4) 태풍 전용모델인 DBAR (Double fourier series Barotropic Typhoon Model)가 운영되고 있다. 이중 GDAPS 모델은 일본의 세계기상기구 산하 지역 기상센터 (Regional Specialized Meteorological Center, RSMC)의 태풍센터에서 작성, 전 세계 통신망 시스템 (Global Telecommunication

System, GTS)을 통해 제공되는 태풍분석 중에서 몇 가지 자료를 선택한 뒤, 태풍의 평균적 구조에 기초해서 만들어진 경험식을 사용해서 모조태풍을 작성한다. 태풍 전용 모델인 DBAR는 순압모델로서 태풍의 강도 예보를 제공하지 않으며, 저위도에서의 태풍예측과 48시간 이내의 태풍예측에 있어서는 상대적으로 우수한 예측 성능을 갖고 있지만 태풍이 저위도에서 벗어나서 북상하거나 예보시간이 길어지면 예측 오차가 커지는 단점을 갖고 있다. 한편, 공주대학교 태풍연구센터에서 개발한 태풍 전용 역학모델인 MTM (MM5 based moving nest Typhoon Model)이 2006년 8월부터 시험 운영되고 있다. MTM은 태풍 전용 역학모델로서 중규모 모델인 PSU/NCAR (Penn state University/National Center for Atmospheric Research) MM5 (5th 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 동지격자가 태풍의 진로에 따라 이동하는 자동이동동지격자 기능을 보유하고 있다.

기상청은 2004년 11월 슈퍼컴 2호기를 도입하여 각종 수치모델을 운영하고 있다. 슈퍼컴퓨터를 이용하여 신뢰성 있는 예보자료를 얻기 위해서는 2가지 꼭 필요한 요소가 있다. 첫째는 수치모델이 실제와 같은 대기 상태를 수식으로 표현할 수 있어야 하고, 둘째는 모델 계산에 필요한 초기값이 정확해야 한다는 것이다. 기상현상 중에서도 엄청난 에너지를 가진 열대저기압은 관측값이 절대적으로 부족한 해상에서 발생하고 발달하기 때문에 정확한 관측값을 얻는데 한계가 있어 자칫 오보로 인한 재산 및 인명 피해로 이어질 수 있으나, 아직 발생 및 발달 메커니즘이나 중심구조에 대한 정확한 이해가 부족한 현실이다. 그럼에도 불구하고 지난 20년 동안 보거싱 기법 및 자료동화를 이용한 초기장의 개선 (Zou *et al.*, 2000, Pu *et al.*, 2001, Wu *et al.*, 2006)과 더불어 수치모델의 발달은 열

대저기압에 대한 진로와 강도 예측의 정확도를 비약적으로 발전시켰다. 특히, 열대저기압의 진로를 예측하는 수준은 전 세계적으로 상당한 수준에 도달해 있다. 따라서 현재는 고해상도 모델을 이용한 열대저기압 중심부근의 구조에 대한 정확한 이해를 바탕으로 열대저기압의 강도에 대한 예측 정확도를 높이고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

2004년 5월 초기버전이 발표된 WRF 모델 시스템은 중규모 기상현상에 대한 예측성을 향상시키고, 연구기관과 현업예보기관간의 긴밀한 협력을 위한 자료동화시스템을 포함한 중규모 예측 모델시스템이다. WRF 모델은 미국 NCAR MMM, NOAA의 NCEP과 FSL, 미국 국방부의 AFWA와 NRL, Oklahoma 대학의 CAPS등에서 공동개발 했으며 국내외 기상센터와 여러 대학간의 협력을 통해 지속적으로 개선되고 있다. WRF 모델의 모듈화된 각각의 단일 소스 코드는 연구와 현업 목적에 맞게 적용될 수 있으며, 물리과정에 대한 다양한 옵션을 제공한다. 또한 WRF 모델은 수 미터에서 수천 킬로미터까지의 다양한 영역에서 사용가능하다. 따라서 고해상도 예측에 적합하게 개발된 WRF 모델에 최적화된 모조태풍 기법을 접합함으로써 태풍의 진로뿐 아니라 강도 예측이 가능한 한국형 태풍 전용모델을 구축하고자 한다.

현재, 드롭존데(dropwindsonde)를 이용하여 북서태평양과 대서양에서 활동하는 열대저기압을 감시하는 프로그램이 활발하게 진행 중에 있다. 그 중 하나는 National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA)의 Hurricane Research Division (HRD; Aberson and Franklin, 1999)에서 진행하고 있고, 다른 하나는 Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR; Wu *et al.*, 2005) 프로그램이다. 특히, Wu *et al.* (2007)은 3차원 변분자료 동화 (Three-dimensional variational data assimilation, 3DVAR) 기법을 이용한 연구에서 DOTSTAR 관측자료가 WRF 모델의 태풍 진로

및 강도 예측 능력을 향상시킨 사례들을 보였다. DOTSTAR 프로그램은 대만 근처에 접근한 태풍에 대한 관측을 수행하는데, 이 부근의 태풍에 대한 진로는 우리나라에도 매우 민감한 요소이다. 왜냐하면 기후학적으로 대만~오끼나와 부근 지역에서 태풍이 전향하는 사례가 많고, 전향한 태풍 중에서 며칠이내에 우리나라에 영향을 주는 태풍이 많기 때문이다.

이와 같이 신속정확한 태풍예보를 위하여 전세계에서 여러 가지 수치모델이 지속적으로 개발하고 있다. 또한 수치모델의 재료가 되는 항공기를 이용한 특별관측자료로 증가하고 있고, 컴퓨터 발달과 함께 수치모델 성능이 빠른 속도로 개선되고 있어서 앞으로 이 분야는 투자가치가 큰 분야이다.

참고문헌

1. 연구보고서, 2002: 태풍예보기술의 다변화(III), 744pp.
2. Aberson, S. D., 2002: Two years of operational hurricane synoptic surveillance. *Wea. Forecasting*, 17, 1101-1110.
3. Arakawa, A and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701.
4. Braun S. A., and W.-K. Tao, 2000: Sensitivity of high-resolution simulations of hurricane Bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3941-3961.
5. Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model - Combination of the bogus vortex with the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Mon. Wea. Rev.* 136, 865-879.
6. Claude, E. D., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1016-1022.
7. Fovell R. G. and H. Su, 2007: Impact of cloud microphysics on hurricane track forecasts. *Geophys. Res. Lett.*, 134, L24810, doi:10.1029/2007GL031723.
8. Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-3981STR, 117 pp.
9. Ide, K., P. Courtier, M. Ghil, and A. C. Lorenc, 1997:

Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational. *J. Met. Soc. Japan*, 75, 181-189.

10. Kwon, H. J., S. H. Won, 2002: GFDL-Type Typhoon Initialization in MM5. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2966-2974.
11. Kurihara, Y. M., A. Bender, and R. J. Ross, 1992: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2030-2045.
12. 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.
13. Lord S. J., H. E. Willoughby, and J. M. Piotrowicz, 1984: Role of a parameterized ice-phase microphysics in an axisymmetric, nonhydrostatic tropical cyclone model. *J. Atmos. Sci.*, 41, 2836-2848.
14. Pu, Z.-X., and S. A. Braun, 2001: Evaluation of bogus vortex techniques with four-dimensional variational data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2023-2039.
15. Wang Y., 2002: An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part II: Model refinements and sensitivity to cloud microphysics parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 3022-3036.
16. Willoughby H. E., H. Jin, S. J. Lord, and J. M. Piotrowicz, 1984: Hurricane structure and evolution as simulated by an axisymmetric, nonhydrostatic numerical model. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1169-1186.
17. Wu, C.-C., and Coauthors, 2005: Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An Overview. *Bulletin of the American Meteorological Society.*, 86, 787-790.
18. Wu, C.-C., K.-H. Chou, Y. Wang, and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, 63, 2383-2395.
19. Wu, C.-C., K.-H. Chou, and P.-H. Lin, 2007: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Wea. and Forecasting*, 22, 1157-1176.
20. Zou, X., and Q. Xiao, 2000: Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J. Atmos. Sci.*, 57, 836-863.

감사의 글

이 연구는 국가태풍센터 시험연구비 지원으로 수행되었습니다.