

새로운 기상청 파랑예측 시스템의 구성과 성능 평가 Upgraded Numerical Wind Wave Prediction Systems at KMA and their Validation

박상욱¹, 박종숙², 서장원³, 최치영⁴
Sangwook Park¹, Jong Suk Park², Jang-Won Seo³, and Chee Young Choi⁴

1. 서 론

기상청에서는 1999년 슈퍼컴 1호기 도입 이후, 해상의 파랑예측을 위한 3세대 파랑 수치모델을 운영하고 있다(박상욱, 2000). WAM(WAMDI, 1988) 모델을 채택한 1/4° 해상도의 지역 파랑예측 시스템(ReWAM)과 1.25° 해상도의 전국 파랑예측 시스템(GoWAM)이다. 2005년 슈퍼컴 2호기의 성능 보장에 따라 현업에서 운영되는 모델의 대체 및 해상도 개선을 위한 작업이 진행되어 왔다. 이와 더불어 지역 시스템보다 상세한 파랑예측을 위한 국지연안 파랑예측 시스템 운영을 새로이 도입하였다(한국해양연구원, 2005). WAM 모델과 함께 세계 각국의 현업 운영 기관에서 많이 사용되기 시작한 WAVEWATCH-III(Tolman, 2002) 모델을 WAM 모델의 대체 모델로 선택하였다. WAVEWATCH-III 모델은 병렬화 코드 및 다양한 사용자 인터페이스를 제공하는 잇점을 지니고 있다.

본 연구에서는 2008년 3월 이후 새롭게 운영되고 있는 파랑예측 시스템에 대한 새로운 구성과 이전 시스템과의 성능 비교를 소개하고자 하였다. 새로운 지역 파랑예측 시스템(ReWW3)은 이전 시스템과 동일한 도메인에 대하여 1/12° 해상도로 구성되었으며, 국지연안 파랑예측 시스템(CoWW3)은 ReWW3 도메인 내에 등지 격자계 형태로 서해중(남)부, 남해동(서)부, 동해중(남)부 해역으로 나누어 3° x 2° 크기의 6개 도메인으로

구성되었으며 1/120° 해상도를 갖는다. 새로운 전국 파랑예측 시스템(GoWW3)은 해상도를 1/2°로 증가시키고 해상풍 입력 시간격을 기존의 12시간에서 6시간으로 단축하여 2009년도부터 운영할 계획이다.

2. 파랑 수치예보 시스템

2.1 시스템 운영 전산 환경 및 최적화

기상청 슈퍼컴 2호기 Cray-X1E는 1호기 NEC-SX5를 대체하여 2005년부터 가동되었다. 1호기는 16개의 벡터 프로세서(1개당 8기가 플롭스)를 사용하는 벡터 컴퓨터였던 것에 비하여 2호기는 1개의 노드 모듈에 18기가 플롭스 속도를 내는 4개의 멀티 스트리밍 벡터 프로세서로 구성된 병렬형 벡터 컴퓨터이다. 현재 128개의 노드 모듈이 구성되어 있으므로 최적화된 코드에 대하여 이론적으로는 15테라 플롭스의 연산 속도를 낼 수 있다. 한 노드 내에서는 32기가 바이트의 공유 메모리를 사용하며 여러 노드를 동시에 사용하기 위해서는 MPI 등을 이용한 분산 프로그래밍이 이루어져야 한다. 적정 시간 내의 수치예보 결과 산출을 위해서는 모델 수행 플랫폼에 적합한 코드의 최적화 및 병렬화가 이루어져야 한다. 슈퍼컴 2호기에서 WAVEWATCH-III 병렬 코드의 최적화는 MPI 통신 루틴에서 point-to-point 통신을 collective 통신이 되도록 전환한 것과 do-loop 연산의 벡터화와 벡터길이를 최대한 확

1 발표자: 국립기상연구소 지구환경시스템연구팀 기상연구사

2 국립기상연구소 지구환경시스템연구팀 연구원

3 국립기상연구소 지구환경시스템연구팀 기상연구관

4 국립기상연구소장

대한 부분이다. 모델 코드의 최적화 후에 프로세서 사용 수에 따른 수행 속도를 상대적 크기로 나타내보면, 프로세서 No. (msp) 대 수행시간의 비는 1msp: 16msp: 32msp: 64msp: 128msp = 1: 0.271: 0.138: 0.0658: 0.0381 로 나타난다.

2.2 시스템 구성 및 전후처리

새로운 지역 파랑예측 시스템(ReWW3: Regional WAVEWATCH-III)은 동북아시아 해역(115°-150°E, 20°-50°N)에 대한 3시간 간격의 60시간 파랑예측 정보를 1일 2회(00, 12UTC) 생산하며, 국지연안 파랑예측 시스템(CoWW3: Coastal WAVEWATCH-III)에서 사용될 30분 간격의 경계면 예측 스펙트럼 자료를 만든다. 국지연안 파랑예측 시스템은 해상 예보구역에 따라 6개 도메인으로 구성되며 지역 파랑예측 시스템에서 만들어진 경계면 자료를 사용하여 24시간 파랑예측 정보를 . 국지연안 파랑예측 시스템 각 도메인은 동서 3°, 남북 2°의 영역으로 구성되었으며, 각 지역에 따라 CoWW3-RGW1 (서해중부), CoWW3-RGW2 (서해남부), CoWW3-RGS1 (남해서부), CoWW3-RGS2 (남해동부), CoWW3-RGE1 (동해중부), CoWW3-RGE2 (동해남부)로 독립적으로 운영된다. 각 도메인은 기상청 운영 부이 위치(덕적도(22101), 칠발도(22102), 거문도(22103), 거제도(22104),

동해(22105))를 포함하여 각 부이 위치에서의 스펙트럼 예상도를 산출한다.

새로운 파랑예측 시스템은 해일예측 시스템으로부터 산출되는 해류 및 수심변화의 요인이 되는 해수면 고도 변화 예측 정보의 연계와 대기모델의 해상풍을 고해상도로 다운스테인하여 활용하는 과정을 포함하여 구성되었다. 모델 구성에 필요한 기초 해양환경 자료는 한국해양연구원에서 만들어진 우리나라 주변 해역과 동중국해, 북태평양 등의 수심격자 자료와 국립해양조사원의 수치지도에서 추출한 수심자료로 구축된 데이터베이스를 사용하여 수심격자망이 이용되었다. 국지격자망의 임의의 격자점에서 육지인지 바다인지를 정의한 논리 수심자료는 수치지도 해안선 자료로부터 산출되었다(한국해양연구원, 2005).

해상풍 자료는 기상청 중규모 대기역학모델인 RDAPS 자료를 사용하며, RDAPS의 등거리 좌표계(30km 해상도) 자료는 ReWW3의 구면 좌표계로 변환되어 사용된다. 모델의 주프로그램에서 적용되는 파라미터 및 옵션은 Table 1.에 정리하였다. 모델 초기장의 연속성을 위하여 12시간 모델 적분 후에 생성되는 restart 파일을 다음 시간대의 초기 스펙트럼 자료로 사용한다. 후처리 과정에서 생산된 자료중에서, 해상풍, 유의파고, 파향, 파주기, 파장(wave length) 자료가 저장된다.

Table 1. Specifications and parameter settings of KMA regional and coastal wave prediction system.

요소	내용							
	파수 증분 비		최소 진동수(Hz)		파수		파향수	
스펙트럴 분해능	1.1		0.04118		25		36 ($\Delta\theta = 10^\circ$)	
시간 적분 간격 (s)	전역 시간격		공간이류 시간격		스펙트럼 시간격		원천항 시간격	
	ReWW3	CoWW3	ReWW3	CoWW3	ReWW3	CoWW3	ReWW3	CoWW3
	300	60	150	30	300	60	150	30
바람입력 원천항	Tolman and Chalikov							
성분과간 비선형	Discrete Interaction Approximation							
쇄파소산 원천항	Tolman and Chalikov							
해저 마찰	JONSWAP 모수화							
수평 이류	ULTIMATE-QUICKEST with Averaging							
모델 격자	격자규모		공간분해능		시작 경도		시작 위도	
	ReWW3	CoWW3	ReWW3	CoWW3	ReWW3	CoWW3	ReWW3	CoWW3
	421 by 361	361 by 241	1/12°	1/120°	115°E	124.0°E 124.0°E 125.0°E 127.5°E 127.5°E 128.5°E	20°N	36.5°N 34.75°N 33.0°N 33.5°N 37.0°N 35.25°N
경계면 스펙트럼 출력	서해중부	서해남부	남해서부	남해동부	동해중부	동해남부		
	124-127E 36.5-38.5N	124-127E 34.75-36.75N	125-128E 33.0-35.0N	127.5-130.5 33.5-35.5N	128.5-131.5 37.0-39.0N	128.5-131.5 35.25-37.25		

3. 파랑 수치예보 검증

3.1 사례 검증

2007년 9월 16일 오후 6시 15분 경 남해안 고흥반도 부근에 상륙한 11호 태풍 나리(Nari)의 사례에 대하여 종관자료 및 부이자료를 이용하여 당시의 모델 예측 결과를 비교하였다. Fig. 1은 2007년 9월 한달 기간의 거문도, 거제도 부이에서 관측된 유의파고(검은 실선)와 ReWAM(파란 삼각형) 및 ReWW3(빨간 원형) CoWW3(녹색 원형)의 24시간 예측자료 시계열이다. 두 모델의 한 달 평균 24시간 예측 편차(BIAS)와 평방 제곱근 오차(RMSE)는 각 차트의 상단에 제시되었다. 거문도 부이는 태풍 나리의 경로에 위치하여 기록적으로 높은 파고가 관측되었다. 상륙 이전인 오후 4시에 최대파고 13.7m 유의파고 9.8m를 기록하였으며, 경로의 오른쪽에 위치한 거제도 부이에서는 상륙 3시간 후인 오후 9시에 최대파고 7.8m 유의파고 4.8m를 기록하였다. 거문도 부이에서 기록된 풍속은 25~27m/s로 파고의 피크가 기록된 시각에 나타났으며, 거제도 부이에서 기록된 풍속은 22~24m/s로 파고의 피크가 나타나기 2~3 시간 전에 기록되었다. 남해서부 영역 모델 거문도

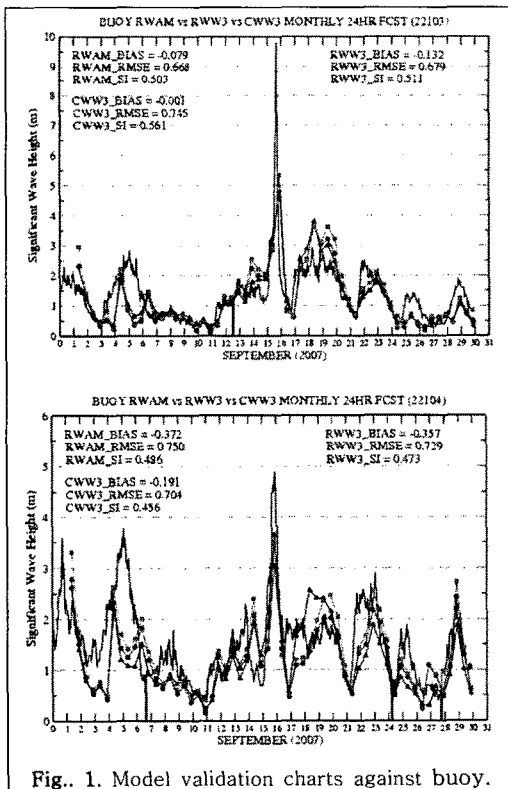


Fig. 1. Model validation charts against buoy.

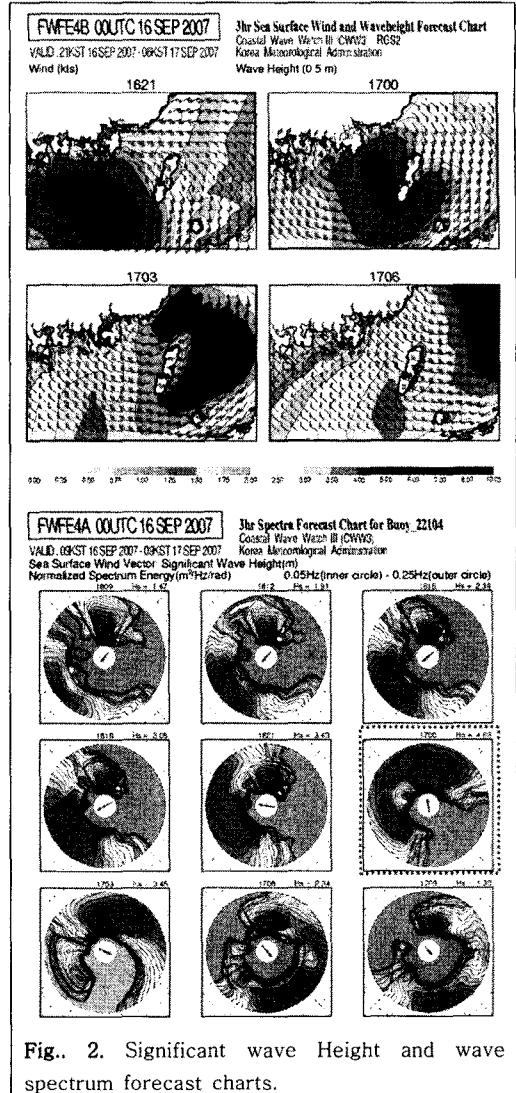


Fig. 2. Significant wave Height and wave spectrum forecast charts.

지점에서 나타난 12시간 예측 유의파고 피크는 오후 6시 5.96m (관측은 5.4m) 였고, 남해동부 영역 거제도 지점에서 나타난 12시간 예측 유의파고 피크는 자정에 4.99m (관측은 3.9m) 였다. 해당 시각의 대기모델 12 시간 예측 해상풍은 15m/s ~17m/s 범위로 관측보다 낮게 모의되어 거문도 지역에서 관측된 9m를 상회하는 유의파고는 모의되지 못하였다.

태풍 나리에 의하여 기록된 9월 16일 전후의 유의파고 피크에 대하여 세 모델의 모의 결과는 모두 관측에 미치지 못하였으나, CoWW3 모델이 다른 두 모델에 비하여 약간 높게 예측한 결과를 보인다. 거문도 부이 지점 스펙트럼 에너지 예상도를 살펴보면 16일 18KST의 피크를 중심으로 태풍의 이동 경로에 따른 파향과 파 에너지가 높게

분포한 진동수의 변화 경향을 알 수 있다. 피크가 나타났을 때에는 짧은 주기를 갖는 풍파 성분과 긴 주기를 갖는 너울 성분이 모두 강하게 존재하며 태풍이 접근하기 이전에는 남에서 북으로 진행되는 장주기 파인 너울 성분이 우세하고 태풍이 지나간 후에는 풍계에 따른 서북에서 남동으로 진행되는 단주기 파인 풍파 성분이 우세하다. 파크가 나타난 17일 00KST에서는 장단주기 모두 남에서 북으로 진행되는 성분이 강하게 나타난다. 거제도에서는 태풍이 상륙한 후 약 6시간 후에 가장 높은 유의파고 분포를 보인다 (Fig. 2.).

3.2 월별 누적 통계 검증

검증에 사용된 모델 자료는 부이 관측 자료(덕적도, 칠발도, 거문도, 거제도, 동해)에 대한 ReWAM 과 새로운 지역 파랑모델 ReWW3과 6개 도메인에 따른 국지연안 파랑모델 CoWW3이다. 월별 시계열 자료는 매월 +00, +12, +24, +36, +48시간 모델 예측 유의파고 자료를 이용하여 모델 편차 및 평방 제곱근 오차를 계산한다. 2008년 1월부터는 CoWW3의 +00, +24 예상 시간에 따른 통계 자료도 함께 산출하고 있다.

서해, 남해, 동해에 위치한 각각의 부이마다 각 해역의 특성을 반영하고 있기 때문에 검증 결과에 나타난 경향은 일관되지 않다. 서해중부와 서해남부에 위치한 덕적도와 칠발도에서는 모델 편차와 평방 제곱근 오차 모두 새로운 모델에서 개선된 경향이 보인다. 모델 편차의 경우 2006년과 2007년은 상이한 패턴을 보이는데 2006년에서로 상반된 경향을 (기존모델은 양의 편차, 새로운 모델은 음의편차) 보이는데 2007년에는 전반적으로 양의 편차가 나타나고 있다. 상반된 패턴은 두 모델의 천해 파랑 프로세스의 차이에서 비롯한 것으로 보인다. 남해서부와 남해동부에 위치한 거문도와 거제도에서도 서해의 경우와 유사하게 모델 편차와 평방 제곱근 오차 모두 새로운 모델에서 개선된 경향이 나타났다. 모델 편차 경향이 두 모델 모두 2006년 9월까지의 양의 편차를 그 이후에는 음의 편차를 나타내는데, 이는 두 부이가 2006년 9월에 새로이 교체되어 관측 자료의 성질이 바뀌었음을 의미한다. 즉 이전의 부이가 갖고 있는 관측 데이터 처리 알고리즘에서 유의파고가 낮게 처리된 것으로 보인다. 동해 부이 검증 결과는 이전의 서해와 남해 부이의 결과와 다르게 두 모델의 성능 비교에 있어서 일관

적으로 새로운 모델에서 나아졌다고 보기 어렵다. 새로운 모델에서 양의 편차가 기존 모델보다 크게 나타나고 있으며 이러한 경향이 평방 제곱근 오차에서도 높게 계산 된 결과로 보인다. 고해상도 지역 모델과 국지연안 모델의 성능 비교에서는 서해와 남해에서는 유사하거나 국지연안 모델이 약간 나은 성능을 보이고 있으나 동해에서는 반대의 결과가 나타나고 있다. 국지연안 동해중부 도메인 모델의 과대 모의 경향이 전반적으로 나타나고 있다.

감사의 글

새로운 파랑예측 시스템의 구축 및 현업 운영을 위하여 기초 연안 환경 자료 및 필요 프로그램을 지원 해주신 한국해양연구원의 전기천 박사님, 모델 코드의 병렬화를 지원하여 주신 크레이코리아의 양우선 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 국립기상연구소 지구환경시스템연구팀의 ‘고해상도 폭풍해일 및 파랑 모니터링 시스템 개발’ 연구과제의 일부로 진행되었으며, 슈퍼컴퓨터 전산환경을 제공하여 주신 기상청 정보화기술 운영과 관계자분들께도 감사드립니다.

참고문헌

- 한국해양연구원, 2005: 선진수치예보시스템 구축을 위한 기반기술 개발 (V), 국지연안 파랑예측 시스템 시범구축, 11-1360000-000151-10 기상청, 149pp.
- 박상욱, 2000: 기상청 파랑 수치예보 시스템, 예보국 수치예보과 기술노트 2000-2, 기상청, 88pp.
- Tolman, H. L., Balasubramanian B., Burroughs L. D., Chalikov D. V., Chao Y. Y., Chen H. S., and Gerald V. M., 2002a: Development and implementation of wind generated ocean surface wavemodels at NCEP. *Wea. Forecasting*, 17, 311-333.
- WAMDI group: The WAM Development and Implementation group, 1988: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.