

2008년 2월 동해안에서 발생한 너울의 예측 분석

김태림* · 이강호
군산대학교 해양과학대학

Hindcasting Analysis of Swells Occurred in the East Coast in February 2008

TAERIM KIM* AND KANGHO LEE

College of Ocean Science & Technology, Kunsan University, Kunsan, Korea

2008년 2월 24일 동해안에 출현한 너울은 3명의 인명 사고를 발생시켰으며 또한 일본의 서쪽 해안에서도 피해가 나타났다. 최근에 그 강도가 점점 강해지는 동해의 너울에 의한 사고를 줄이기 위해서는 향후 그 발생 시간과 위치에 대한 보다 정확한 예보가 필요하다. 본 연구에서는 동해에서의 파랑 예보의 정확성을 검증하기 위하여 SWAN 파랑 모델을 이용하여 2008년 2월 발생한 동해의 너울을 예측하고 검증하였다. 모델 결과는 파랑 관측 자료뿐만 아니라 한국기상연구소가 ReWW3를 사용하여 생산한 자료와도 비교 하였으며, 특히 동해안의 두개의 파랑 관측소에서 획득한 주파수 스펙트럼과의 비교·분석도 수행하였다. 그 결과 파고 분포와 발생 시간은 유사하게 나타났지만 주파수 스펙트럼의 형태에 있어서는 차이가 나타났다. 너울에 대한 보다 정확한 예보를 위해서는 보다 많은 현장 관측 자료와의 비교·분석이 필요하며 특히 동해에서의 너울 특성 연구를 위해서는 파랑 스펙트럼 관측 자료가 필요하다.

Swells occurred on the coast of the East Sea on February 24, 2008 caused a loss of three lives and also damaged several west coasts of Japan. The recent increase of swell intensity with number of accidents demands more accurate forecasting of swells in terms of time and location. The swells occurred in February 2008 are hindcasted using SWAN model to examine the accuracy of the model for future forecasting. The model results are compared with ReWW3 data as well as measurement wave data and specially, wave spectrum is analysed by comparing with observed spectrum at two wave stations located in the east coast of Korea. The SWAN model shows similar results with observation data in terms of significant wave heights and swell arrival time but the shapes of wave spectrum are different between model and in-situ measurement data. For further improvement of swell forecasting, more comparison and analysis with observed wave spectrum is necessary and wave directional spectrum data are required to study on the characteristics of swells in the East Sea.

Keywords: Swell, SWAN, Wave spectrum, Forecasting, Significant wave height

서 론

2008년 2월 24일 오후 3~5시경 동해안 강릉시 안목항 부근에서 최대 파고 7 m 이상의 파랑이 내습하여 18명의 인명피해(실종 1, 사망 2, 중상 8, 경상 7)를 발생 시켰다. 이때 발생한 파랑은 너울성 파도로서 안목항 방파제를 월파 하였으며 방파제 부근을 산책하던 관광객들은 물론 이들을 구조하러 출동한 구조대의 차량 및 시설물에도 피해를 입혔다. 또한 거의 비슷한 시기에 일본의 토야마현 및 나가타 현 등지에서도 인명 피해와 함께 해안 주택 및 각종 해안 보전 시설이 피해를 입었다(정 등, 2008). 동해안에서의 너울에 의한 이와 같은 피해는 최근 그 발생 빈도가 높아져서 2005년 10월 및 2006년 10월에도 각각 고파랑에 의한 피해가

발생하였으며 모두 주기가 큰 너울에 의한 것으로 연구 되어지고 있다(정 등, 2007; 정 등, 2008; 정 등, 2008). 이러한 너울은 저기압 중심이 우리나라를 통과한 후 동해안으로부터 상당히 먼 해역에서 발생하여 한국 동해안으로 전파되어 오는 것으로 추정되며 악기상이 아닌 상태에서 큰 너울이 내습하는 경우가 많아 예상치 않은 피해가 발생하고 있다. 이와 같은 갑작스러운 너울에 의한 피해를 줄이기 위해서는 너울의 발생과 전파에 대한 예보가 정확하게 이루어져야 하며 아울러 이에 대한 실용화가 시급하다. 미국 서해안의 경우 중요 해안에 대하여 여러 곳에서 부이를 이용한 실시간 파랑 스펙트럼 관측은 물론 너울에 대하여 따로 예보를 하고 있으며 관측값과 예보값의 지속적인 비교 검증을 통하여 그 정확도를 높이고 있다(CDIP, 2009). 한국도 동해안에서 파랑 스펙트럼 관측이 가능한 장비의 확충이 필요하며 동해안에서의 너울 예보가 정확하게 이루어질 수 있도록 수치모델의 개선이 필요하다.

*Corresponding author: trkim@kunsan.ac.kr

김과 이(2008)는 2008년 2월 동해안에서 발생한 너울 관측 자료를 웨이블릿 방법을 사용하여 분석하였으며 너울 파랑 내습시 30분간 1 m 이상씩 파고가 증가하는 것으로 보고하였다. 또한 김과 이(2008)는 2005년 및 2006년 10월의 동해안 너울 피해 당시 파랑을 SWAN 모델을 이용하여 재현한 후 관측 결과와 비교 검토 하였다. 그러나 유의 파고에 대한 관측 자료만을 비교 하였으며 수치모델에서 나오는 파랑 스펙트럼 결과를 비교하지는 못하였다. 본 논문에서는 2008년 2월 말에 발생한 동해안 너울에 대하여 수치모델 SWAN을 이용하여 재현한 후 한국 해양연구원이 강릉과 왕돌초에서 관측한 파랑 자료를 이용하여 그 스펙트럼의 변화를 비교 분석하였다.

2. 파랑 모델

동해안에서의 너울의 예보를 위하여 사용한 수치 모델은 SWAN (Simulating Waves Nearshore, Booij *et al.*, 1999)이다. 이 모델은 심해파랑 모델인 WAM(WAMDI Group, 1988)이나 WAVEWATCH III(Tolman, 1999)의 파랑 역학의 물리적인 원천항을 사용하면서 천수 효과, 굴절 효과 그리고 바닥으로부터의 마찰로 인한 에너지 감쇄 효과를 포함함으로써 천해에서의 파랑 예보를 위하여 개발된 모델이다. 일반적으로 실시간 예보를 위해서는 효율적인 수행시간 등을 고려할 때 WAM이나 WAVEWATCH III와 같은 심해파랑 모델을 수행한 후 접합 모형(nested model) 형태로 천해에 대하여 SWAN과 같은 천해 모델을 수행하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 동해라는 비교적 작은 규모의 폐쇄적인 해안을 감안하고 과거 관측 자료와의 비교 분석을 목적으로 하였으므로 SWAN 모델만을 단독으로 수행하였다. 이 모델은 각 격자에서 파랑 에너지 밀도를 계산하며 이 에너지 밀도로 부터 아래와 같이 유의파고(H_s)가 계산되어 진다(The SWAN team, 2008).

$$H_s = 4 \sqrt{\int \int E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 격자 시스템은 김과 이(2008)가 사용한 격자 시스템보다 조밀한 가로 세로 각각 5 km인 직교 등방 격자 체계(265×356)이고 파향은 동일한 10° 간격으로 모든 방향에 대하여 36개의 성분으로 나누어져 계산되며 주파수는 0.0464 Hz에서 1.0 Hz까지 32개의 성분으로 나누어진다. 현재 2008년 2월 당시의 파랑 관측 자료 중 일부는 주파수 스펙트럼으로서 이와의 비교를 위해서 모델에서 출력된 파향 스펙트럼을 모든 방향에 대하여 적분한 주파수 스펙트럼만을 비교하였다. 또한 현장에서 30분 간격으로 유의 파고와 주파수 스펙트럼이 관측되는 것을 고려하여 모델에서 계산된 결과도 30분 간격으로 출력되도록 하였다. 본 모델에서 입력 자료로 사용된 해상풍은 기상청 현업 예보용 모델인 RDAPS/KMA(Regional Data Assimilation and Prediction System/Korea Meteorological Administration)로부터 우리나라 주변 해역에 대하여 3시간 간격으로 산출된 자료를 활용하였으며(기상청, 2006) SWAN 파랑 모델의 입력 자료로 사용하기 위하여 파랑 모델의 격자와 동일하게 선형 보간 하였다.

파랑 모델 수행 결과의 비교를 위하여 Fig. 1에서와 같이 3곳의 현장 관측 값을 사용하였다. 이 중에서 동해 부이는 유의 파고 자

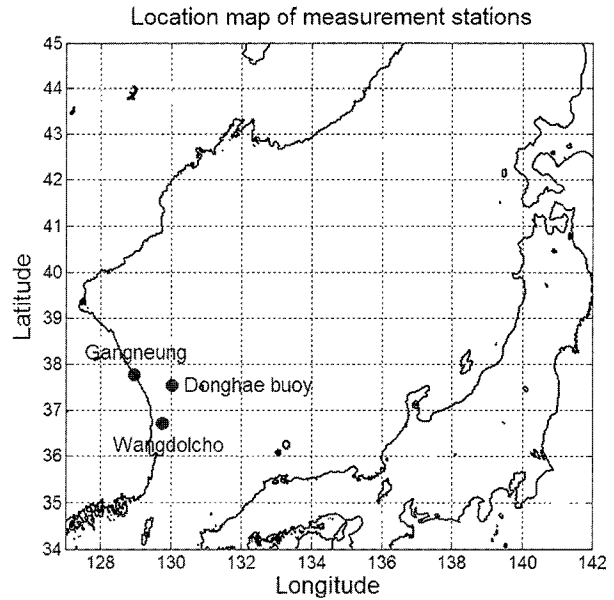


Fig. 1. Location map of wave measurement stations.

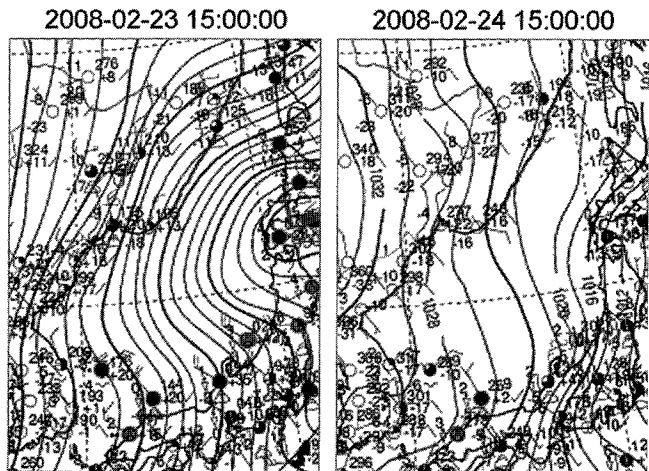


Fig. 2. Weather map for 23 February at 15:00 and 24 February at 15:00 in 2008.

료를 비교 하였고 강릉과 왕돌초의 파랑 자료는 파고 자료와 주파수 스펙트럼 관측 자료도 함께 비교 하였다.

Fig. 2는 동쪽으로 이동하는 저기압 중심이 동해의 동쪽 경계인 일본의 북쪽 열도를 벗어난 후인 2월 23일 15시의 일기도와 우리나라 강릉시 안목항에서 피해를 발생시킨 2월 24일 15시의 일기도를 보여 주고 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 각각의 일기도의 시간에 대한 풍속 분포를 보여 준다. 시간적인 일기도의 변화를 살펴보면 저기압 중심이 동해상을 빠져 나가면서 남북방향으로 등압선이 분포하게 되고 특히 23일 오후부터 24일 오전까지는 쓰가루 해협 동쪽에서 계속 발달하는 저기압으로 인하여 기압 구배가 큰 등압선이 계속적으로 남북방향으로 분포하고 있음을 알 수 있다(Fig. 2). 이로 인하여 강한 바람이 발생되며 Fig. 3에서는 23일 15시에 25 m/s 속력의 강한 북풍 계열의 바람이 동해의 북동 해역에 분포하고 있다. 하루 후인 24일 15시에는 등압선의 구배가 상대적으로 약해

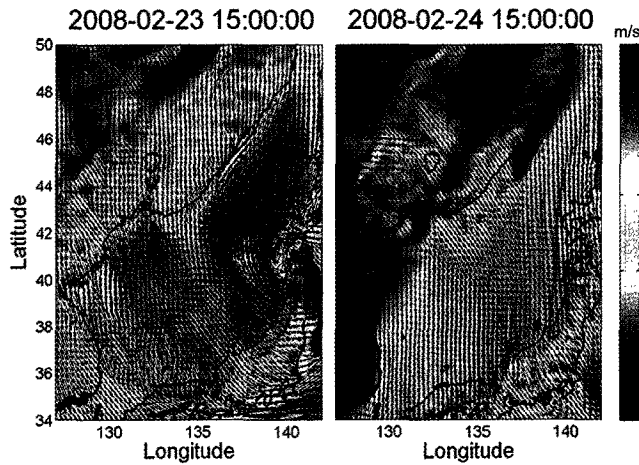


Fig. 3. Wind field for 23 February at 15:00 and 24 February at 15:00 in 2008.

졌으며(Fig. 2) 풍속도 동해의 동쪽 해상에서 15 m/s의 북풍 계열이 우세하며 우리나라에서 피해가 발생한 강릉시 안목항 부근의

해역에서는 5-10 m/sec의 풍속이 분포함을 알 수 있다. 시간에 따른 동해상의 파고 분포 변화를 파랑 예보 모델 결과를 통하여 살펴보면 Fig. 4와 같다. 즉 Fig. 3과 같은 바람장이 3시간 간격으로 입력되며 이때 3시간 동안 동일한 바람이 계속 분다고 가정한다. 저기압 중심이 동해에 위치하는 22일 밤부터 동해 전체 해역에서 파고가 증가하기 시작하여 저기압 중심이 쓰가루 해협을 빠져 나가는 23일 15시 이후에는 동해의 북동해역에서 높은 파고를 갖는 파들이 발달하기 시작하여 24일 6시에는 유의 파고가 9 m 이상인 높은 파고가 일본의 북서쪽 쓰가루 해협 근처의 해역에서 나타나고 있으며 이후 점차 파고가 낮아진다. 또한 동해 중앙에서도 동해의 동쪽 해역보다는 작지만 유의 파고 6 m 이상의 높은 파고 해역이 따로 생성되고 있음을 알 수 있다. 23일 03시 부터 24일 15시까지 동해에서의 바람장(기상청, 2008)에 의하면 Fig. 3과 같이 동해 전체 해역에서 북풍 계열의 바람이 지속적으로 불었음을 알 수 있다. 강한 풍속과 충분한 취송 시간 그리고 동해 북부 연안으로부터의 충분한 취송 거리를 고려하여 볼 때 이 시기의 동해 연안의 고파랑은 그 북쪽 연안에서 발생하여 전파 되었을 가능성이 크다.

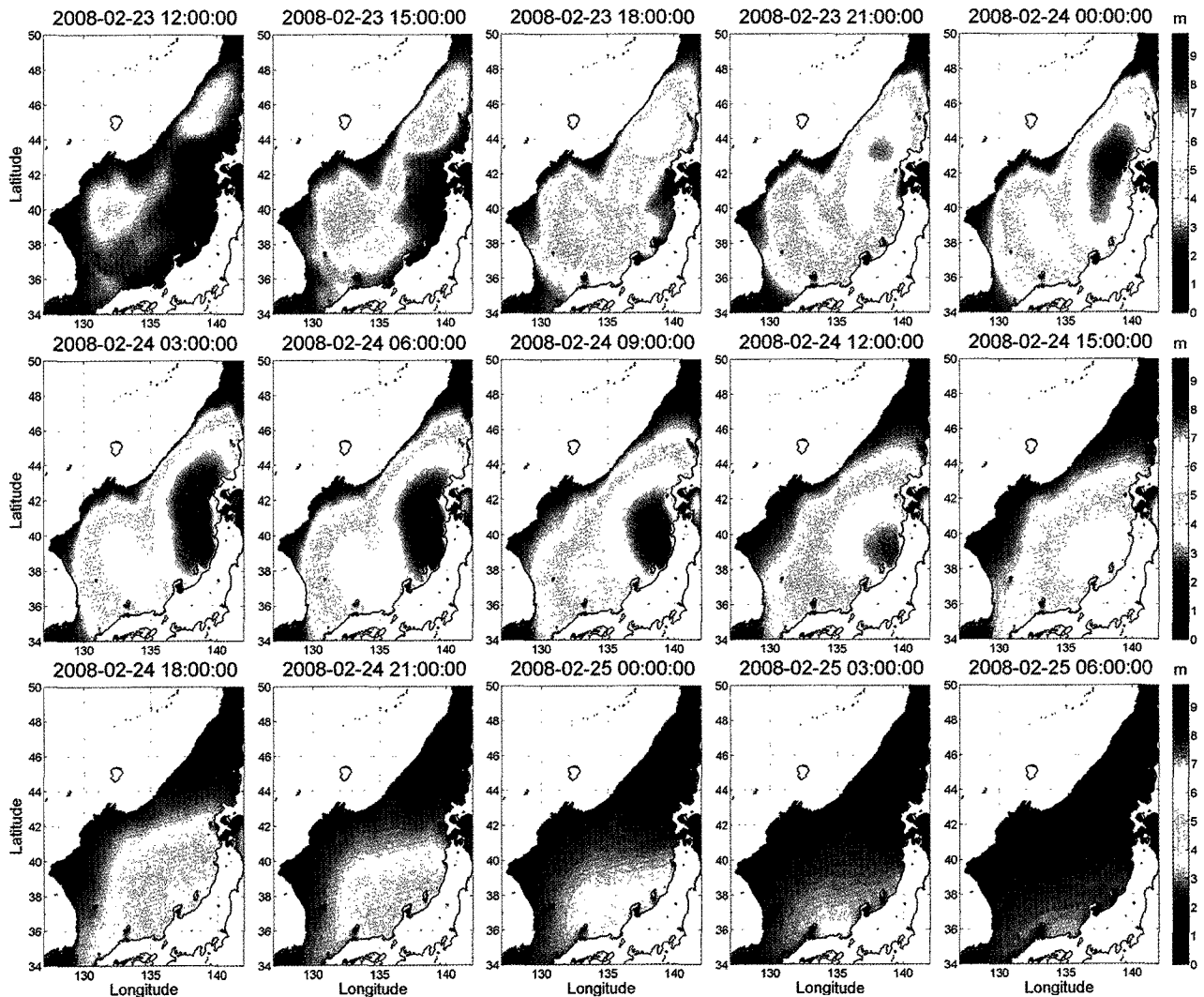


Fig. 4. Hindcast of significant wave height distributions in February 2008.

3. 유의 파고와 스펙트럼 비교

모델 결과의 검증용 위하여 앞서 언급한 3개 지점의 파랑 관측 값과 파랑 수치 모델이 재현한 계산값을 비교하였다(Fig. 5). 또한 기상 연구소에서 수행중인 파랑 예보 모델 결과(기상청, 2008)도 함께 관측 지점의 값에 대하여 비교 하였다. 기상청 국립기상연구소에서는 2007년 이후 WAVEWATCH III 모델을 바탕으로 하는 지역 파랑 예측 시스템(ReWW3, 기상청, 2007)을 구축하여 운용 중에 있으며 그 결과를 DB화하여 배포하고 있다. 시간에 따른 관측 유의 파고의 변화를 살펴보면 동해에 위치한 파랑 관측 값의 경우 모두 23일 오후까지는 1-2 m의 파고 분포를 보이다가 급격히 파고가 높아지기 시작하여 24일 자정을 전후 하여 4.5 m의 높은 파고 상태를 유지 하고 있으며 25일부터 파고가 낮아지기 시작함을 알 수 있다. 모델 예보 값과의 비교를 보면 동해 연안 3곳에서는 모두 파고 값의 차이는 있지만 그 경향이 유사하게 나타났으며 특히 파고가 갑자기 높아지기 시작하는 시간에 대해서 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 모든 관측 장소와 시간에 있어서 본 연구에서 수행한 SWAN 모델의 계산 값이 ReWW3 값에 비

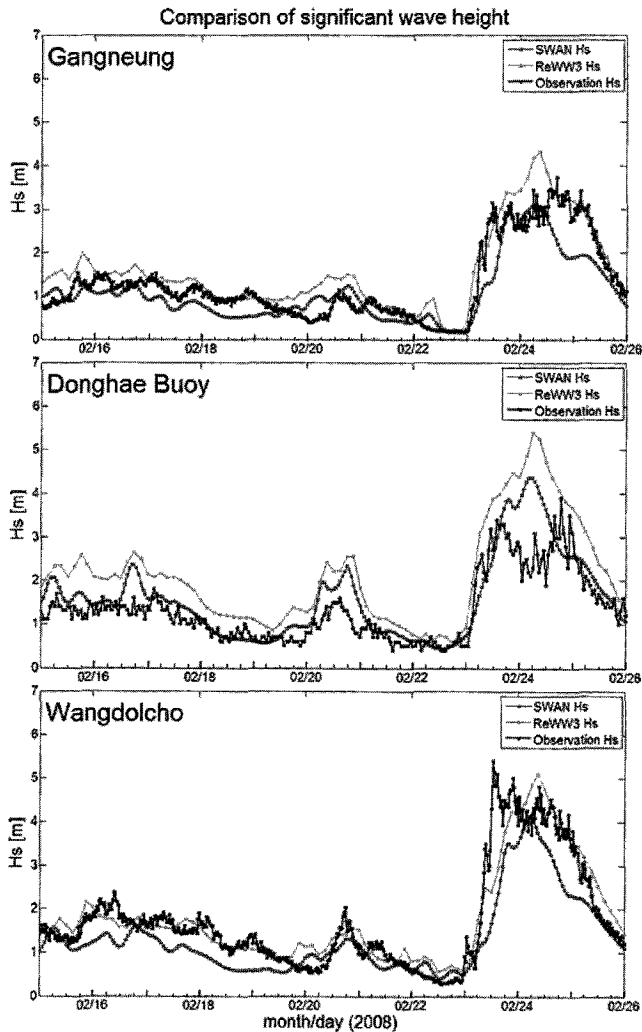


Fig. 5. Comparison of time series of significant wave heights between SWAN model, ReWW3 and observation data in February, 2008.

하여 낮게 나타났다. 동일한 풍속 입력 값과 파랑 발달 관계식을 사용하였음에도 불구하고 이와 같은 차이가 나타나는 것은 바닥 마찰과 같은 수심의 영향이 포함되는 천해 파랑 모델의 특성 때문인 것으로 보인다. 현재의 결과를 바탕으로 두 모델 값의 정확도를 평가하기에는 관측 장소와 시간에 따라서 각각 그 정확도가 차이가 나므로 향후 더 많은 관측 자료를 사용하여야 할 것으로 보인다.

모델결과의 정확한 분석을 위해서는 모델로부터 계산된 파랑 스펙트럼을 현장에서 관측한 파랑 스펙트럼과 비교하여야 된다. 유의 파고 값은 모든 파향과 주파수의 파랑에너지를 적분하여 계산된 결과 값으로 유의 파고 값만의 비교를 통해서만 파향과 주파

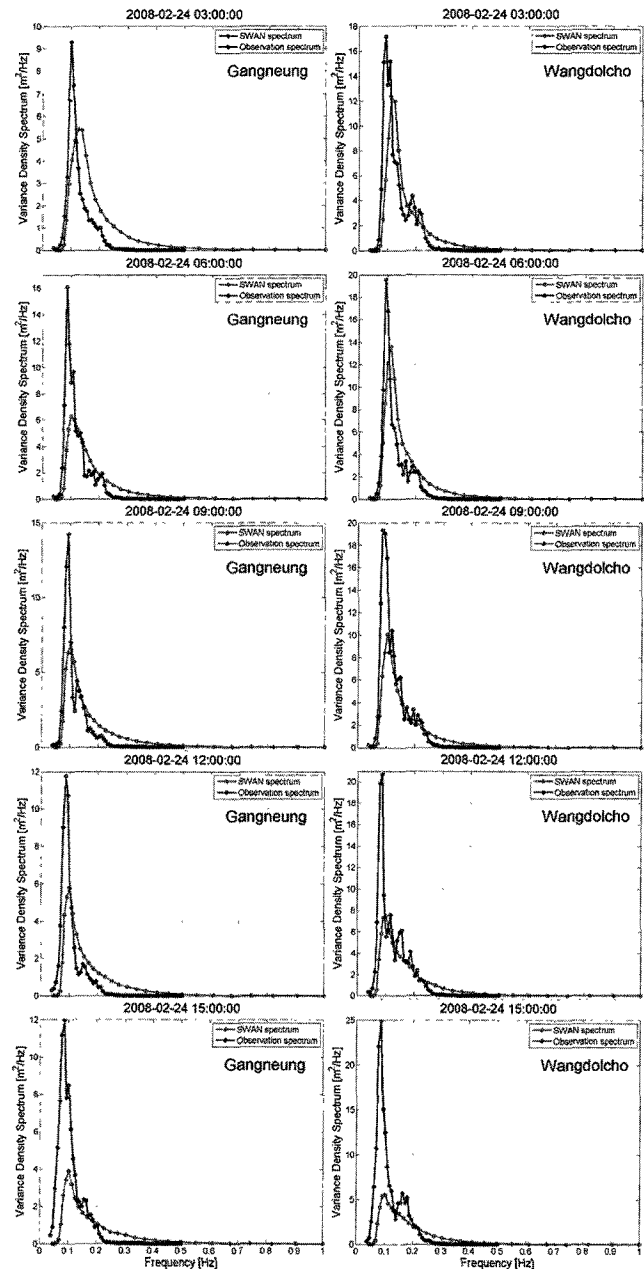


Fig. 6. Comparison of frequency wave spectrum between SWAN model results and observation data in February, 2008.

수의 주된 성분에 대한 비교가 불가능하다. 현재 우리나라의 경우 파랑모델에서 계산되는 파향 스펙트럼 결과를 비교할 만한 관측 값은 많지 않으며 기상청에서 제공하는 파랑 자료도 유의 파고 값만을 제공하므로 파랑 모델의 수행 분석을 하는데는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서 사용한 강릉과 왕돌초의 파랑 스펙트럼 자료는 한국 해양연구원에서 관측한 자료로서(김과 이, 2008) 24일 3시부터 15시까지 3시간 간격으로 주파수 스펙트럼을 비교하였다(Fig. 6). 관측 스펙트럼의 경우 모두 최대 파랑 에너지가 0.1 Hz 이하에서 나타나고 있으며 이는 관측된 파랑의 주성분이 주기 10 초 이상의 너울임을 알 수 있다. 또한 풍랑과 너울이 동시에 존재하는 복수의 에너지 피크도 나타나는데 2월 24일 09시의 강릉의 경우 11초 주기의 너울과 6-7 초의 풍랑이, 2월 24일 15시의 왕돌초의 경우 11초 주기의 너울과 5-6초의 풍랑이 동일한 해역에 분포함을 알 수 있다. SWAN 모델 계산 결과의 경우 관측 값과 같이 복수의 에너지 피크를 보이지는 않고 있으며 최대 파랑에너지도 관측 값에 비하여 약간 큰 주파수에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 최대 파랑에너지 값이 관측 값에 비하여 절반 이상 낮게 나타나고 있으며 침두 주파수 이상에서는 관측 값에 비하여 더 많은 파랑 에너지가 분포한다. 즉 전반적으로 관측 스펙트럼의 경우 특정 주파수에 에너지가 집중되어 있으며 파향 스펙트럼 자료가 없어서 주파수별 파향 특성이 다른 것은 확인할 수 없으나 주파수별 에너지 전이가 이루어 지지 않은 상태임을 알 수 있다. 모델 스펙트럼에서는 0.1 Hz 근처의 침두 주파수 이하에서는 주파수에 따른 에너지 분포가 급하게 나타나고 그 이상에서는 완만하게 나타난다. 따라서 24일 06시와 09시 스펙트럼의 경우 침두 주파수에너지의 관측값과 모델 계산 값의 차이는 있지만 스펙트럼 자체의 면적은 유사하여 식 (1)과 같이 주파수별 에너지의 합으로 계산되는 유의 파고는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유사하게 나타난다. 24일 15시에는 모델에서 계산한 전체 스펙트럼 면적이 관측 값에 비하여 모두 적게 나타나며 특히 0.1 Hz 이하 주파수대의 에너지가 소멸되었음을 보여 준다. 이는 Fig. 5에서 강릉과 왕돌초의 모델 유의파고가 24일 15시를 전후하여 관측 값에 비하여 낮게 나타나는 것을 반영한다. 따라서 2월 24일 동해안의 고파랑의 경우 모델에서 계산된 유의 파고 값이 관측 값에 비하여 낮게 나타나는 것은 침두 주파수의 에너지가 실제 현장에서의 침두 주파수 에너지 보다 낮게 계산하는데 문제가 있는 것으로 보이며 또한 유사한 유의 파고가 계산되는 경우에도 관측값과 모델 계산값의 주파수별 에너지 분포에는 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 관측 주파수 스펙트럼의 경우 주파수간의 에너지 변화가 크고 뚜렷하게 나타나는 반면 모델 주파수 스펙트럼에서는 주파수 별로 에너지가 완만하게 분포하는 것을 볼 수 있다.

4. 토의 및 결론

2008년 2월 동해 연안에서 발생한 고파랑을 재현하기 위하여 SWAN 파랑 모델을 이용하여 유의 파고와 스펙트럼을 계산하였다. 계산된 유의 파고는 동해안에서 관측된 유의 파고의 시간적 변화와 유사한 경향을 보이고 있으며 특히 너울이 출현한 시기는 관측시간과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 유의 파고 값

에 있어서는 약간의 차이를 나타냈으며 동일한 유의 파고값을 나타내더라도 주파수 스펙트럼은 다른 형태를 보이고 있다. 즉 관측 값과 모델 계산 값이 모두 너울을 나타내는 스펙트럼 특성을 보였으나 모델의 스펙트럼에서는 침두 주파수의 에너지가 관측 스펙트럼에 비하여 절반이상 작게 나타났고 침두 주파수에서 고투파로의 에너지 분포가 보다 완만한 경향을 보였다. 이를 통해서 정확한 파랑 예보를 위해서는 관측된 유의 파고의 비교 뿐만 아니라 주파수 스펙트럼을 통한 검증이 필요함을 알 수 있으며 특히 모델에서 생성되는 파향 스펙트럼의 검증을 위한 현장 관측 자료가 절실하다.

SWAN 모델을 통하여 보다 정확한 너울에 대한 예보를 하기 위해서는 주파수간 에너지 전달에 대한 자세한 분석이 필요하며 보다 많은 관측 자료를 통하여 비교 검증을 하여야 할 것이다. 본 연구에서는 모델의 여러 입력 계수 값을 설정치(default)로 사용하였으며 현재의 자료만으로는 여러 입력 값들을 변경시키면서 모델을 최적화 시키는 데는 어려움이 있다. 보다 많은 현장 관측 자료와 특히 파향 스펙트럼과 같은 양질의 자료가 제공된다면 여러 계수의 변환을 통하여 보다 정확한 예보가 가능할 것이다.

동해에서의 너울의 생성과 전파에 대한 특성을 연구하기 위해서는 동해 중심 해역에서의 파랑 관측이 필요하나 현재 한국 연안과 일본 연안을 제외한 동해 내부에서의 파랑 관측이 부족한 상태이다. 일본에서도 최근 한국과 같은 시기에 너울에 의하여 피해가 발생하고 있어 이에 대한 공동 연구가 필요하리라고 생각하며 일본 연안의 파랑 자료도 함께 분석이 이루어진다면 동해 너울의 특성 연구에 많은 도움이 될 것이다.

최근에 동해안에서 너울에 의한 피해가 자주 발생하는 이유는 연안에서의 인간 활동의 증가와 함께 전 지구적인 기후 변화의 영향 때문인 것으로 사료된다. 이에 대한 피해를 최소화하기 위해서는 강도가 커지는 너울을 고려한 새로운 설계파의 산정과 함께 너울의 전파 해역에 대한 정확한 예보와 너울의 경보 시스템 구축이 필요하다.

후 기

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-2311)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문을 심사하시고 많은 조언을 해주신 심사 위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청, 2006. 해양 기상 변화 탐지 기술 개발(IV). 기상연구소, MR053M16 2002M-004-00.
- 기상청, 2007. 고해상도 폭풍 해일 및 파랑 모니터링 시스템 개발. 기상연구소, 274p.
- 기상청, 2008. Wind waves 2008 DB, 기상연구소, CD.
- 김태림, 이동영, 2008. 동해 너울에 대한 웨이블릿 분석. 한국해양해양공학회지, 20(6): 583-588.
- 김태림, 이강호, 2008. 동해안 이상너울 추산에 관한 고찰. 한국해양공학회지, 22(6): 13-19.
- 정복진, 여운광, 이종국, 박광순, 2008. 우리나라 연안의 너울성 파도 분석과 원인 규명 방법. 2008년도 한국 해양과학기술협

- 의회 공동학술대회, 2448-2450.
- 정원무, 오상호, 이동영, 2007. 동해안에서의 이상 고파. 한국해양안 해양공학회지, **19**(4): 295-302.
- 정원무, 오상호, 류경호, 김태인, 2008. 2008년 2월 동해안 이상 고파의 특성. 2008년도 한국 해양과학기술협회의 공동학술대회, 2480-2483.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, **104**: 7649-7666.
- CDIP, 2009. The coastal data information program. SCRIPPS Institution of Oceanography, <http://cdip.ucsd.edu>.
- Kobayashi, T. and Yasuda, T., 2004. Nearshore wave prediction by coupling a wave model and statistical methods. *Coastal Engineering*, **51**: 297-308.
- Tolman, H.L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.
- The SWAN team, 2008. SWAN Cycle III version 40.72 Technical documentation.
- WAMDI Group, 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, **18**: 1775-1810.

2010년 2월 12일 원고접수

2010년 5월 18일 수정본 채택

담당편집위원: 이상호