

## 동해안 너울성 고파의 발생역 추정법 개발 Development of Method to Predict Source Region of Swell-Like High Waves in the East Sea

안석진\* · 이창훈\*\* · 김신웅\* · 정원무\*\*\*

Suk Jin Ahn\*, Changhoon Lee\*\*, Shin Woong Kim\* and Weon-Mu Jeong\*\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 동해안에 고파가 내습한 시점을 대상으로 관측 파랑자료와 미국 국립해양대기청(NOAA)에서 추산한 기상 예측자료를 통합 분석하였으며, 기상예측자료를 이용한 동해안 파랑예측시스템을 구축하였다. 또한, 파랑 예측결과를 관측자료와 비교하여 적용성을 확인하였다. 동해안 연안에는 2회 파고가 증가하고 2차 파고 증가 시 연안 기상조건은 양호한 경우도 있어 피해가 우려된다. 2008년 2월에 관측된 파랑 관측자료를 이용하여 고파의 전파방향을 추정하였으며, 기상자료와 비교를 통해 2번째 증가시기 파랑의 발생역이 동해 연안에서 멀리 떨어진 러시아와 일본 사이 해역을 확인하였다.

**핵심용어 :** 동해안 너울성 고파, 파랑 관측자료, 기상 예측자료, 고파랑의 발생역

**Abstract :** In this study, characteristics of swell-like high waves in the East Sea were analyzed using observed wave data and predicted meteorological data from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). And, the wave prediction system using the data from the NOAA has been established. Furthermore, the applicability of the system has been verified by comparing the predicted results with the corresponding observed data. For some case, there were two times of wave height increase and the second increase occurred in a calm weather condition on the coast which might cause casualties. The direction of wave energy propagation was estimated from observed wave data in February, 2008. Through comparison between the direction of wave energy propagation and the meteorological data, it turns out that the second increase of waves is originated from the seas between Russia and Japan which is far from the East Sea.

**Keywords :** swell-like high waves, observed wave data, predicted meteorological data, occurrence region of high waves

### 1. 서 론

최근 우리나라 동해안에는 가을~겨울철에 너울성 고파가 내습하여 많은 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 2005년 이후 동해안 너울성 고파의 내습으로 인한 연평균 재산피해규모는 백억 원을 상회하며, 해상 및 해안에서 사망·실종된 사람은 70여명에 달한다(Jeong et al., 2007; Jeong et al., 2008; Lee et al., 2014). 동해안의 고파는 연안의 기상악화로 발생하기도 하지만, 동해 먼 바다에서 생성된 파랑이 연안까지 전파하여 영향을 미치기도 한다. 이처럼 동해의 너울성 고파는 넓은 영역의 복잡한 기상요인에 기인하기 때문에 예측이 어렵고 또한 인명 및 재산피해가 크다.

동해안 너울성 고파에 관해서는 오래 전부터 인식되어 왔

으며(Goda and An, 1973), 최근 너울성 고파로 인한 피해가 급증함에 따라 관련 연구가 활발히 수행되고 있다. Oh et al.(2010)은 2005~2008년에 우리나라 연안에 피해를 준 너울성 고파는 중국 내륙에서 발생하여 동해로 진출한 저기압에 기인하며, 저기압 중심 인근에서 발생한 강한 해상풍이 너울을 생성하고 연안까지 전파한 것으로 추정하였다. 또한, 속초 지점의 에너지 스펙트럼 증가시점을 이용하여 너울성 고파의 진행거리를 추정하는 기법을 제안하였다. Ahn et al.(2013)은 스펙트럼 밀도의 증가시각을 Shapiro(1970)의 Smoothing 기법을 적용하여 객관적으로 결정하고, 4개 지점(속초, 묵호, 후포, 진하)의 에너지 스펙트럼 밀도 증가시각을 이용하여 진행거리 뿐만 아니라 진행방향을 추정하는 기법을 제안하였다. 추정결과, 동해상의 국지적인 기상현상의 영향으로 진행거리는

\*(주)지오시스템리서치 부설연구소(Research Institute, GeoSystem Research Corporation)

\*\*세종대학교 토목환경공학부(Corresponding author: Changhoon Lee, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea, Tel: +82-2-3408-3294, Fax: +82-2-3408-4332, cleee@sejong.ac.kr)

\*\*\*한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Coastal and Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

지점별로 다양하게 추정되지만, 진행방향은 일정하게 나타났다. 우리나라 동해안은 한반도, 중국 및 러시아 대륙, 일본 열도 사이에 위치하는 큰 호수 형태의 특징이 있다. 이로 인해 태평양 및 동중국해를 통해 전파하는 파랑은 동해안에 영향을 미치지 못하며, 동해안의 고파는 대부분 동해상의 기상조건에 의해 발생한다. 따라서, 동해상의 시·공간적인 기상자료를 관측 파랑자료와 연계하여 분석하면 동해안 너울성 고파의 발생 및 전파 특성을 파악할 수 있다. 한편 미국 국립해양대기청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서는 WRF (Weather Research and Forecasting) 수치모형을 이용하여 전 지구를 대상으로 기상예측시스템(CFSv2: Climate Forecast System version 2)을 구축하여 운영하고 있으며, 예측결과를 웹을 통해 제공하고 있다.

본 연구에서 2008년 너울성 고파가 발생한 시점을 대상으로 너울성 고파의 발생역을 추정하는 기법을 개발하였다. 먼저 2008년 고파가 발생한 4개 관측지점(속초, 묵호, 후포, 진하)의 파랑자료를 분석하여 두 번째 고파랑이 발생한 경우의 고파랑 발생역을 추정한 결과 고파랑 발생 약 20시간 전에 관측지점으로부터 북동쪽으로 약 900 km 떨어진 동해 해역에 강한 북동풍이 발생하였음을 확인하였다. 또한 본 발생역 추정법의 정확성을 검증하기 위해 2008년 시점을 대상으로 NOAA의 기상예측자료를 이용한 파랑모형을 구축하고 실시간 모의하여 관측자료와 비교하였다. 실험 결과, 지형이 비교적 복잡한 동해안 남측해역을 제외하면 유의파고와 첨두주기의 크기 및 증가·감소경향을 정확히 예측하였다. 제2장에 관측파랑 및 예측기상자료 개요를 제시하였다. 제3장에 기상·파랑 통합분석 결과를 제시하였다. 제4장에 동해안 파랑예측 실험결과를 제시하였으며, 제5장에 연구내용을 정리하고, 향후 연구과제를 제시하였다.

## 2. 파랑관측자료 및 기상예측모형

너울성 고파의 전파특성을 파악하기 위해 한국해양과학기술

술원(KIOST)에서 관측한 2008년 2월 속초, 묵호, 후포, 진하 지점의 유의파고, 첨두주기, 주파수별 스펙트럼 밀도자료를 분석하였다. 파랑 관측은 수압식 파고계(모델명 : WTG-256M)를 사용하였다. 관측지점 개요를 Table 1에 제시하였으며, 관측 정점도와 지점별 유의파고 및 첨두주기 시계열을 Fig. 1과 Fig. 2에 도시하였다. 관측지점의 수심은 DL- 15~18.5 m이며, 지점별로 유의파고의 최대치는 3~5 m, 첨두주기의 최대치는 14~16초이다. 유의파고의 경우, 후포와 진하지점에서는 2회 증가경향이 뚜렷이 나타나지 않지만, 첨두주기의 경우 모

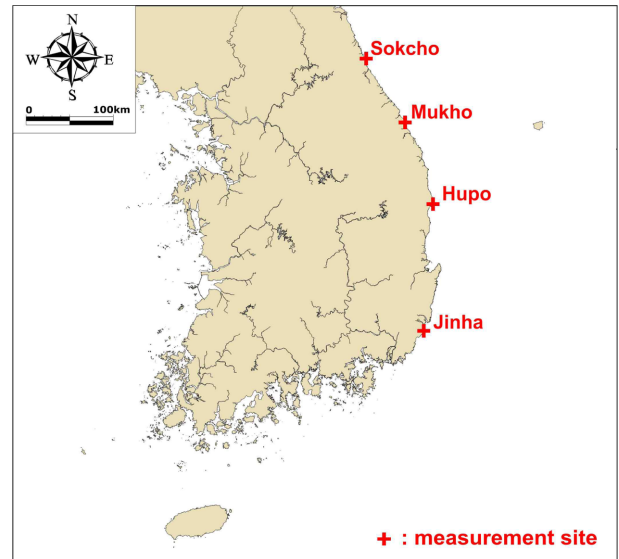


Fig. 1. Location map of wave measurement sites.

Table 1. Information of measurement sites.

Station	Latitude	Longitude	Water depth (DL. - m)
Sokcho	38.208°N	128.617°E	18.5
Mukho	37.548°N	129.125°E	15.0
Hupo	36.700°N	129.484°E	15.0
Jinha	35.378°N	129.361°E	18.0

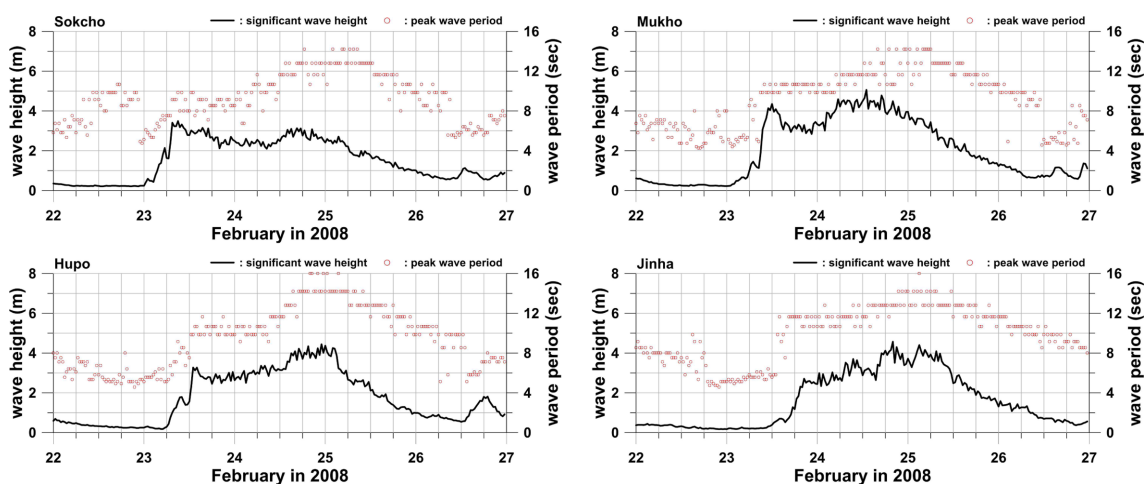


Fig. 2. Time series of significant wave height and peak period at measurement sites.

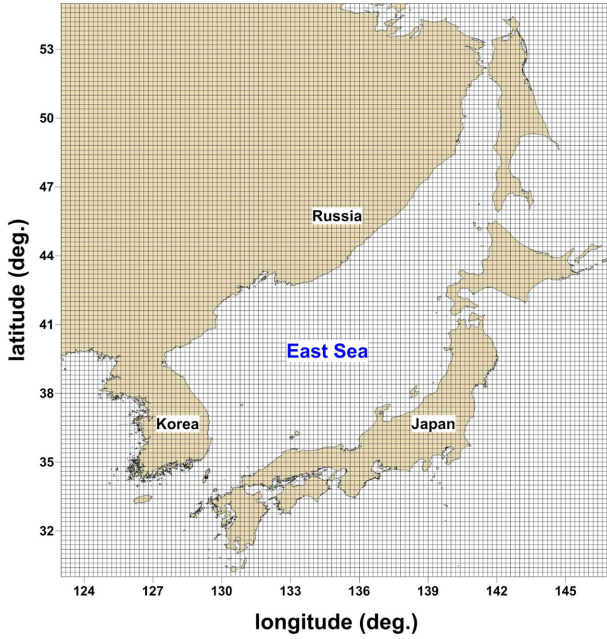


Fig. 3. Computational grid of WRF model around the East Sea.

든 정점에서 2회 증가하였다. 첫 번째 증가시기의 침투주기는 10초 내외였으며, 두 번째 증가시기에는 14초 내외이다.

동해안 파랑과 기상자료와의 상관성 분석을 위해 미국 국립해양대기청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 추산한 해상풍자료를 이용하였다. NOAA에서는 WRF (Weather Research and Forecasting) 수치모형을 이용하여 전 지구를 대상으로 기상예측시스템(CFSv2: Climate Forecast System version 2)을 구축·운영하고 있으며, 예측결과를 웹을 통해 제공하고 있다. CFSv2는 전지구를 1/5°간격으로 분할하고, 관측자료와 자료동화를 통해 산출한 초기조건을 이용하여 하루에 4회 1시간간격 192시간 미래의 기상을 예측한다. 기상예측 모형의 동해안 인근 격자망을 Fig. 3에 도시하였다.

### 3. 고파랑 발생역 추정

#### 3.1 기상-파랑 상관성 분석

우리나라 연안 또는 외측에서 생성된 저기압이 동해상에 진출하면 강한 해상풍이 작용하여 파고 및 주기가 증가한다. 너울성 고파로 인한 피해가 발생한 2008년 2월에 WRF 수치모형을 이용하여 예측된 저기압의 위치와 해상풍 벡터도를 속초, 후포, 진하지점의 관측 유의파고 시계열과 함께 Fig. 4에 도시하였다. 당시 동해안 연안에서 저기압이 발달하기 시작하였으며, 저기압의 발달로 해상풍이 강해지는 해역부터 유의파고가 증가한다(Fig. 4(a)). 이후 저기압이 동진하면서 연안의 해상풍은 작아지고 파고 역시 감소하지만 러시아와 일본 사이 해역에는 NE계열의 강한 해상풍이 작용한다(Fig. 4(b)). 이후 동해상에 해상풍이 약해진 후 연안에 두 번째로

파고가 증가한다. 특히, 유의파고 최대치가 나타나는 시점에는 동해 전체의 해상풍속이 10 m/s 이하였다(Fig. 4(c)). 따라서 두 번째 증가시기의 파랑은 저기압이 동진하면서 발생한 러시아 연안의 강한 해상풍에 기인하는 것으로 판단된다. 동해안 연안의 해상풍은 외해에 비해 풍속과 풍역이 상대적으로 작았다. 이로 인해 첫 번째 파고 증가시기의 침투주기가 두 번째 증가시기에 비해 작다(Fig. 2 참조).

#### 3.2 너울성 고파랑의 진행방향 추정

주파수가 서로 다른 파랑 에너지 성분은 전파속도가 서로 다른 점에 근거하여 파랑 관측 자료로부터 각 성분파의 발생 시각 및 발생위치를 해석적 방법으로 추정하는 것이 가능하다(Earle et al., 1984). 시각  $t_0$ 에 발생한 너울이 진행거리  $D$ 만큼 떨어진 지점에 시간  $t_a$ 에 도달한 경우의 관계식은 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$t_a = t_0 + \frac{D}{g/4\pi f} \quad (1)$$

한편, 식 (1)을 차분한 후  $D$ 에 관하여 정리하면, 다음과 같은 식 (2)를 얻게 된다.

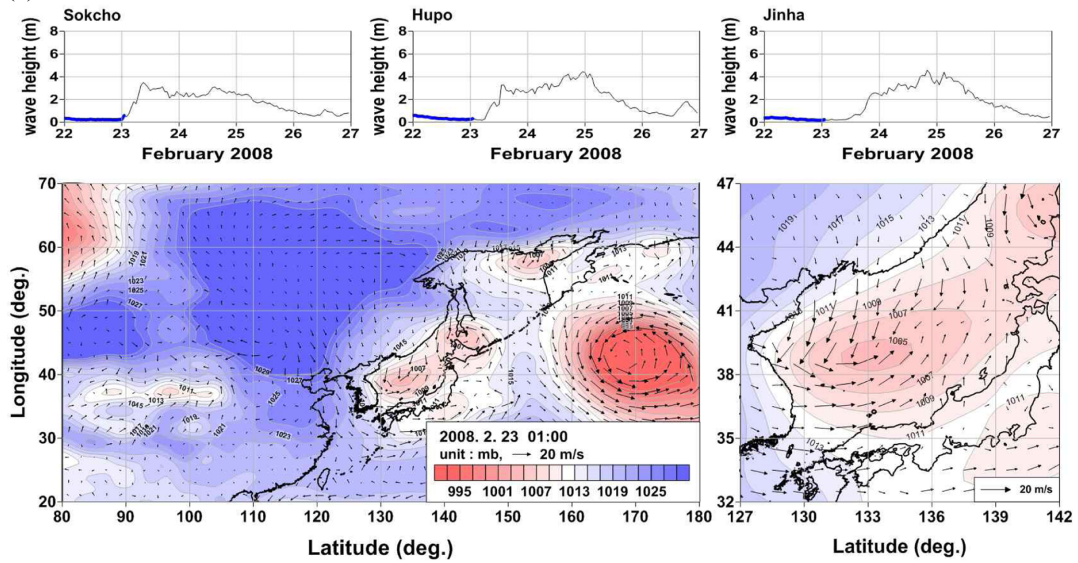
$$D = \frac{g}{4\pi} \left( \frac{t_2 - t_1}{f_2 - f_1} \right) \quad (2)$$

여기서,  $t_1$ 과  $t_2$ 는 주파수  $f_1$ 과  $f_2$ 에 해당하는 성분파의 도달시간을 의미한다. 따라서 주파수가 서로 다른 파랑 에너지 성분의 도달시간이 차이가 날 경우 너울의 진행거리  $D$ 를 계산할 수 있다.

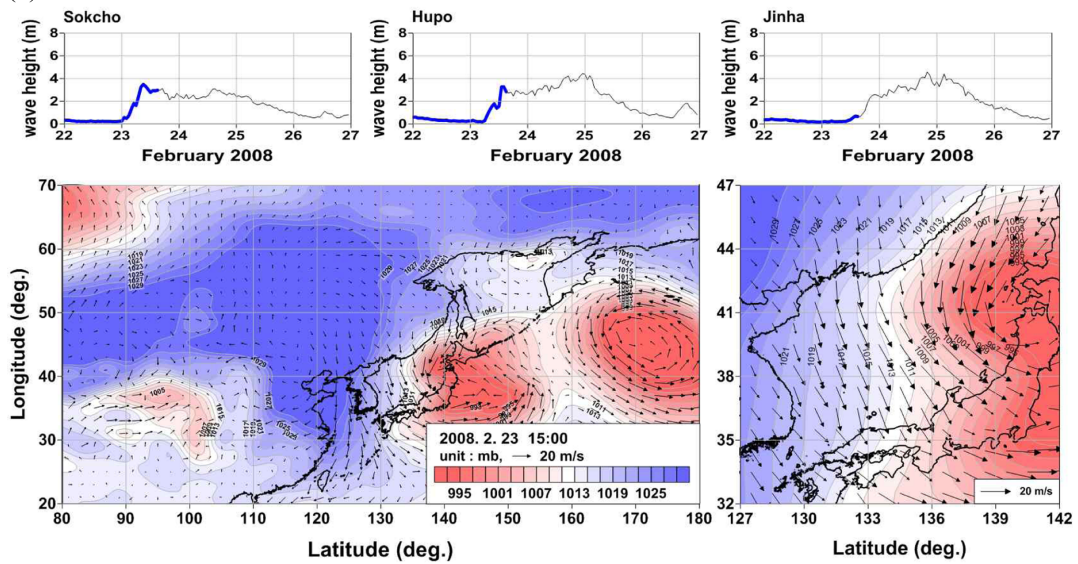
Oh et al.(2010)은 2008년 너울성 고파 내습 시점을 대상으로 속초에서 관측된 주파수 0.070, 0.078, 0.086 Hz에 해당하는 파랑에너지 스펙트럼 밀도의 상승시각을 2개씩 조합하여 너울의 진행거리  $D$ 를 878 및 1,053 km로 추정하였으며, 외해 해상풍향을 고려하여 당시 너울의 진행방향을 북동계열로 가정하고 너울의 발생역을 추정하였다. 그러나 에너지 스펙트럼 밀도가 동시에 증가하는 경우에는 진행거리를 산정할 수 없으며, 여러 지점에서 파랑이 생성되는 경우에는 진행거리 산정결과에 오차가 나타날 수 있다. 또한, 주파수별 에너지 스펙트럼 밀도의 상승시각을 객관적인 관점에서 정확하게 산정하는 것이 중요하지만, 기존 연구에서는 경험적인 방법을 이용하여 상승시각을 추정하였다. Ahn et al.(2013)은 스펙트럼 밀도의 증가시각을 객관적으로 결정하기 위해 Shapiro(1970)가 제안한 Smoothing 기법을 적용하고, 스펙트럼 밀도의 기울기가 음에서 양으로 변하는 시각을 증가시각으로 결정하였다. 또한, 동해안 연안의 4개 지점(속초, 묵호, 후포, 진하)에서 주파수별 스펙트럼 밀도의 상승시각을 추정하고 지점별 너울의 진행거리를 산정하였으며, 두 지점의 특정 주파수에 해당하는 스펙트럼 밀도 상승시각을 이용하여 너울의 진행방향을 추정하는 기법을 제안하였다. 너울의 진행 방향은 독립적으로 관측



(a) 2008. 2. 23 01:00



(b) 2008. 2. 23 15:00



(c) 2008. 2. 24 20:00

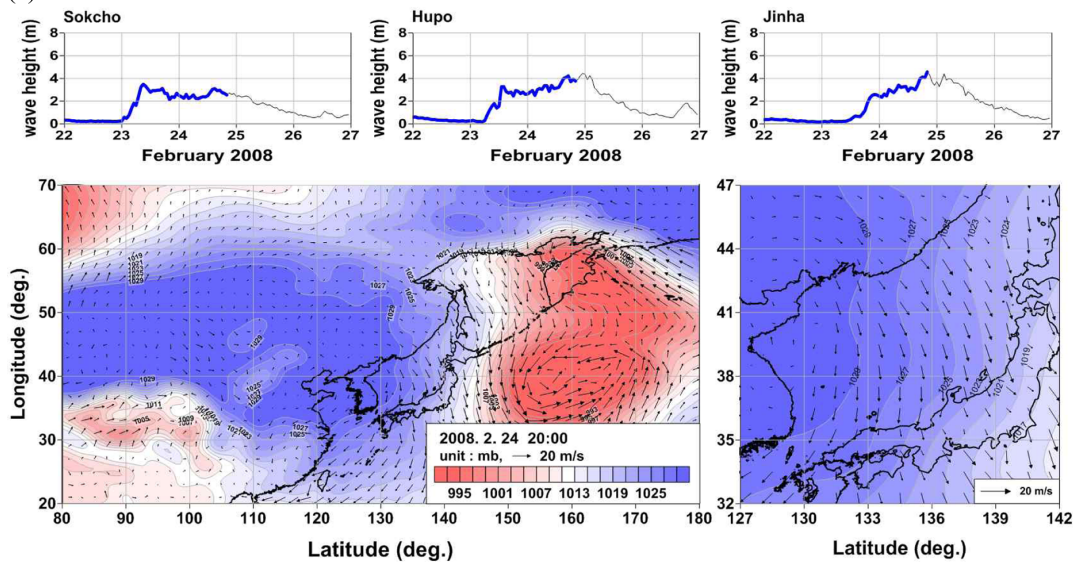


Fig. 4. Time series of significant wave heights at 4 sites and Snapshot of wind vectors and contours of low pressure around the East Sea.



된 지점별 관측자료를 이용하였음에도 불구하고 모든 경우에 유사한 진행방향을 보였으며, 해석에 신뢰성이 있는 것으로 판단하였다. 그러나 너울의 진행거리는 지점에 따라 불규칙하게 나타났으며, 이는 너울성 고파가 동해안의 기상조건에 따라 다양한 지점에서 생성되었기 때문인 것으로 판단된다.

Ahn et al.(2013)이 제안한 너울의 진행방향은 두 지점간 너울의 상대적인 진행거리( $D_r$ )를 이용하여 산정할 수 있다. 너울의 상대적인 진행거리( $D_r$ )는 Earle et al.(1984)이 제안한 너울의 진행거리(너울의 발생역 부터 관측지점 까지의 거리,  $D$ )와는 구별되며, 하나의 너울이 특정지점에 도착한 후 다른 지점에 도달할 때 까지 이동한 거리를 뜻한다. 임의의 두 지점에서 특정 주파수에 해당하는 스펙트럼 밀도의 상승 시각을  $t_1$ ,  $t_2$ 라 할 때 지점간 너울의 상대적인 진행거리( $D_r$ )의 관계식은 식 (3)과 같이 주어진다. 지점간 너울의 상대적인 진행거리( $D_r$ )와 지점간 직선거리( $D_p$ )를 이용하면 식 (4)를 통해 너울의 진행방향각( $\theta_r$ )을 구할 수 있다. 너울의 진행방향 추정

모식도를 Fig. 9에 도시하였다.

$$D_r = \frac{g}{4\pi f} \times (t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$\theta_r = \cos^{-1}\left(\frac{D_r}{D_p}\right) \quad (4)$$

본 연구에서는 2008년 너울성 고파 내습시점을 대상으로 속초, 묵호, 후포, 진하지점의 모든 주파수별 에너지스펙트럼 밀도를 분석하였으며, Ahn et al.(2013)이 제안한 너울의 진행방향 추정방법을 적용하였다. Table 2에 지점별-점두주기별 에너지스펙트럼 밀도의 증가시각을 제시하였으며, Fig. 5 ~ 8에 주파수별 스펙트럼 밀도 시계열을 증가시각(수직선)과 함께 도시하였다. 주기가 15초 이상이거나 9초 이하일 때는 스펙트럼 밀도의 증가가 1회 나타났으며, 10초 전후에서는 2회 증가하였다. 단주기 성분의 에너지스펙트럼 밀도가 먼저 증가하고, 시간차를 두고 장주기 성분의 에너지스펙트럼 밀도가 증가하였다. 2008년 2월은 저기압의 중심이 울릉도 북동측 해역에서 발달하여 동진하였다. 해상풍속은 저기압 중심 인근에서 강하게 나타났으며, 동해안 연안의 해상풍이 강해진 후 풍역대가 점차 외해로 이동하였다(Fig. 4 참조). 연안의 해상풍속이 증가한 후 시간차를 두고 외해의 해상풍이 증가하였으므로 첫 번째 증가시각의 파랑은 연안의 해상풍에 기인하며, 두 번째 증가 시기는 외해의 해상풍에 의해 생성된 파가 연안으로 전파하여 관측된 것으로 추정된다.

또한, 두 번째 파고 증가시기에 출현빈도가 가장 높은 14.22초를 대상으로 주파수 스펙트럼 밀도의 상승시각을 이용하여 에너지의 전파방향을 추정하였다. 4개 지점의 상승시각을 이용하여 2지점씩 조합하면 총 6개 경우에 대해 너울의 진행방향을 추정할 수 있다. Table 3에 너울의 진행방향 산정

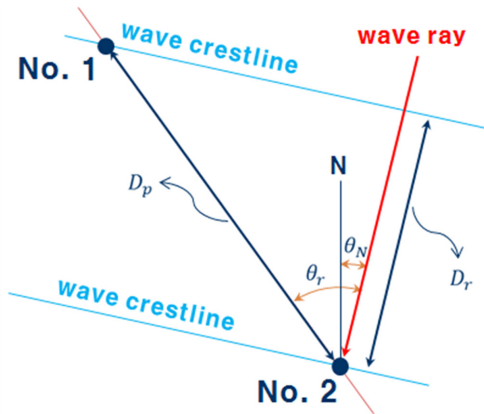


Fig. 9. Conceptual picture to estimate wave direction.

Table 2. Starting time of increase of spectral density (unit : day\*).

		peak period (sec)											
		21.33	18.28	16.00	14.22	12.80	11.64	10.67	9.85	9.14	8.53	8.00	4.92
measurement site	Sokcho	24.21	24.26	24.30	24.33	23.21	23.20	23.20	23.09	23.07	23.05	23.05	23.00
	Mukho	24.33	24.32	24.34	24.36	23.30	23.30	23.29	23.29	23.20	23.20	23.19	23.17
	Hupo	24.46	24.38	24.40	24.44	23.43	23.44	23.44	23.45	23.31	23.31	23.12	23.21
	Jinha	24.48	24.50	24.53	24.54	23.61	23.63	23.65	23.67	23.68	23.66	23.31	23.41

\* : 2008년 2월 1일을 기준으로 한 Julian date.

Table 3. Comparison of predicted wsel-like high wave direction.

Point (No. 1 - No. 2)	$D_p$ (m)	$D_r$ (m)	$\theta_r$ (deg.)	$\theta_N$
Sokcho-Mukho	85,779	33,274	67.18	N35.87°E
Sokcho-Hupo	184,035	111,573	52.68	N28.03°E
Sokcho-Jinha	319,889	204,621	50.23	N38.27°E
Mukho-Hupo	99,333	78,299	37.98	N19.07°E
Mukho-Jinha	240,635	171,347	44.60	N39.41°E
Hupo-Jinha	146,053	93,048	50.43	N54.53°E

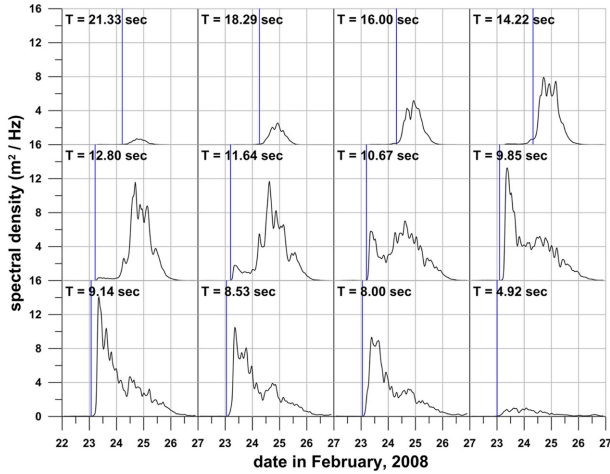


Fig. 5. Time series of spectral density at Sokcho.

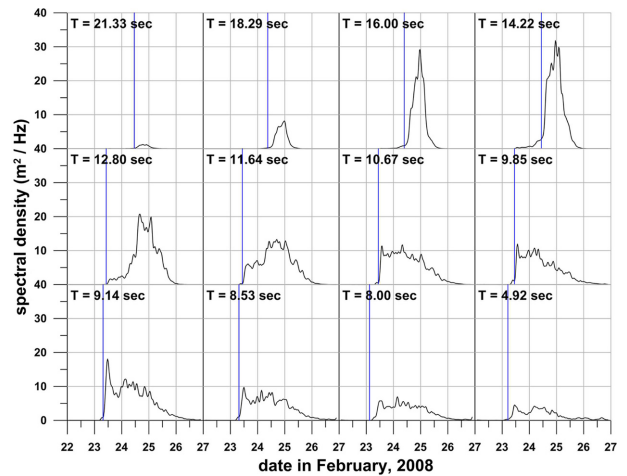


Fig. 7. Time series of spectral density at Hupo.

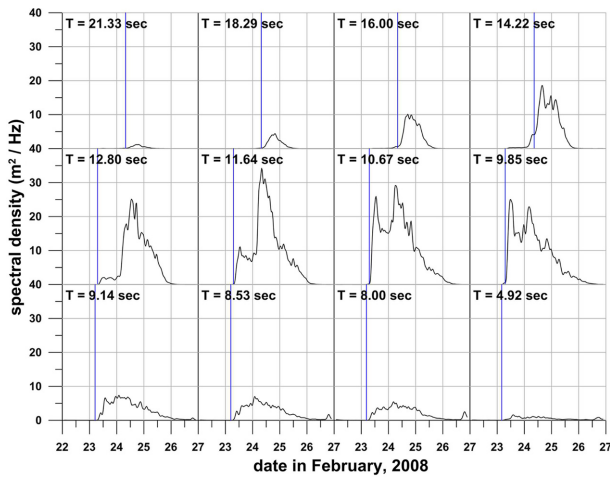


Fig. 6. Time series of spectral density at Mukho.

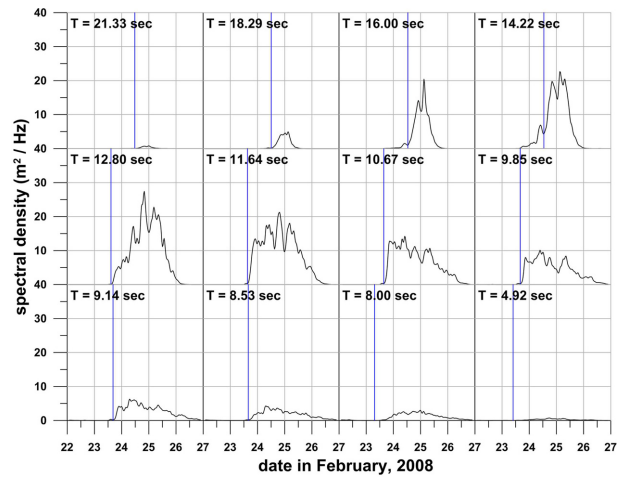


Fig. 8. Time series of spectral density at Jinha.

결과를 제시하였다. 진북 기준 진행방향( $\theta_N$ )은 N19.07°E ~ N57.53°E로 나타났다. 후포 관측지점 자료를 제외한 경우에는 N35.87°E~N39.87°E로 비교적 일정한 진행방향을 보였다. 후포지점은 북동측에 울릉도가 위치하고 있으며, NE계열 파랑이 전파하는 경우 전파속도 및 전파방향이 교란될 수 있을 것으로 판단되어 이후 분석에서 제외하였다.

### 3.3 너울의 발생역 추정

파랑에너지 전파속도를 군속도로 가정하고 추정된 전파방향을 이용하면 과거 시간의 파랑에너지 도달위치를 예측할 수 있으며, 예측된 에너지 도달위치를 WRF 모델을 이용하여 예측된 기상자료와 비교하면 파랑에너지 생성시점과 위치를 추정할 수 있다. 파랑에너지가 속초에 도달한 시각은 2008년 2월 24일 7시 49분경 이다. 각 지점에서 관측된 에너지 도달 시각과 방향을 이용하여 2008년 2월 24일 7시의 파랑에너지 도달위치를 예측하였으며, 그 시점을 기준으로 7시간, 13시간, 20시간 이전의 파랑에너지 도달위치를 예측하였다. 예측

결과를 각 시각의 해상풍 벡터도와 함께 Fig. 10에 도시하였다. 7시간 이전의 파랑에너지 도달위치 인근에 20 m/s 이상의 강한 해상풍이 작용하지만, 풍역이 좁고 해상풍향이 NW 계열이므로 연안 관측지점에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 13시간 이전에는 에너지 도달위치 인근에 해상풍속이 약하다. 20시간 이전인 2008년 2월 23일 11시경은 러시아와 일본 사이 해역에 NE계열의 강한 해상풍이 작용한다. 따라서, 침투주기가 14초 내외로 관측된 2번째 파고증가 시기의 파랑에너지는 동해안에서 약 900 km 북동측에 위치한 해역에서 생성되어 약 20시간 후 연안에 도달한 것으로 추정된다.

## 4. 동해안 파랑예측 시스템

### 4.1 구축 개요

NOAA에서는 WRF모델을 이용한 192시간 기상예측시스템을 구축하여 운영하고 있으며, 웹을 통해 제공한다. 한반도,

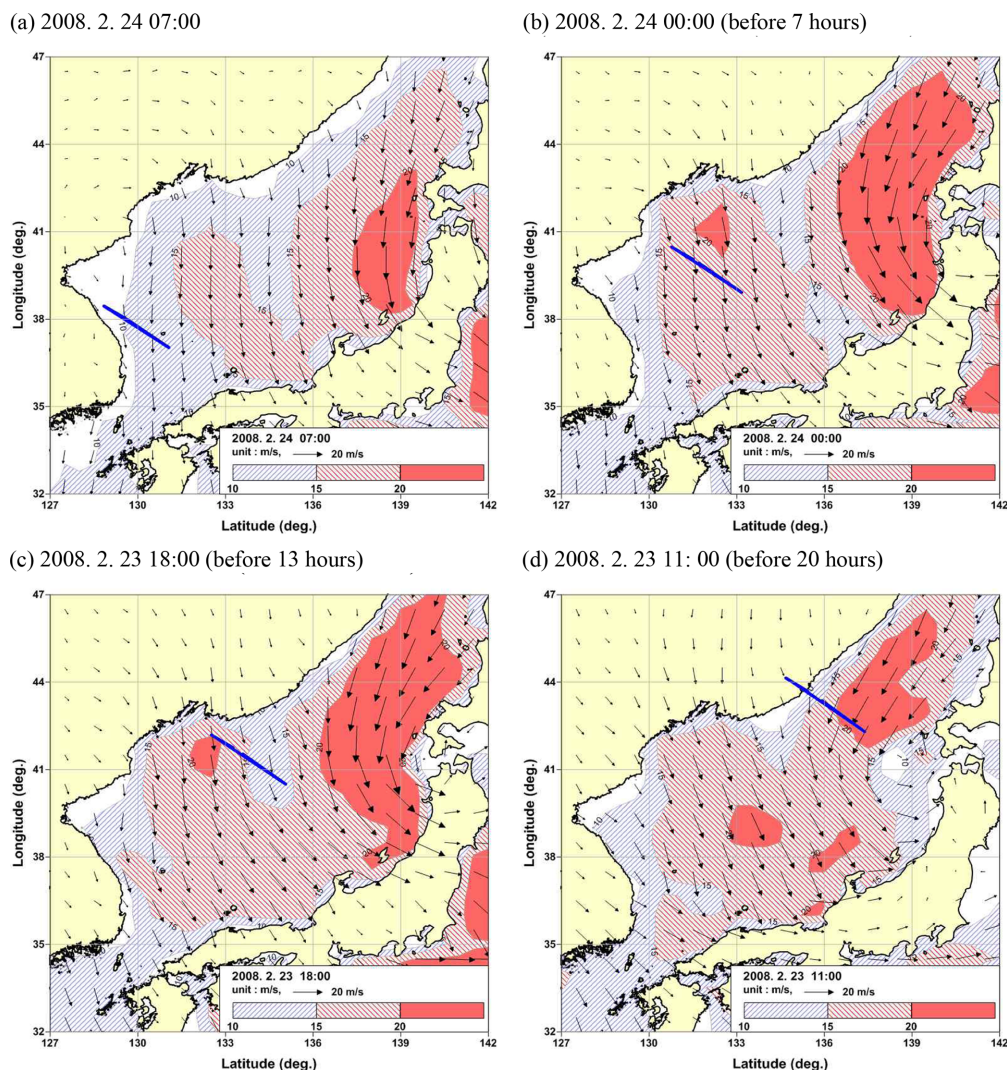


Fig. 10. Variation of wind vectors and contours and predicted high wave source line (blue line) at different time.

중국 및 러시아 대륙, 일본 열도 사이에 위치하는 큰 호수형 태의 동해는 기상예측자료를 이용한 파랑 예측시스템을 통해 실시간 파랑 예측이 가능하다. 본 연구에서는 NOAA의 기상예측자료를 입력조건으로 하는 파랑모델을 구축하고 2008년 2월 너울성고파 내습시점을 대상으로 파랑변형 실험을 수행하였으며, 관측자료와 비교를 통해 예측 정확성을 검토하였다. 파랑예측 수치모델로는 SWAN(Booij et al., 1999)을 사용하였다. SWAN(Simulating WAve Nearshore)은 네덜란드 Delft 공대에서 개발한 3세대 파랑변형 수치모델형으로 파랑에너지의 천수, 굴절, 회절, 파랑-흐름 상호작용, 바람에 의한 에너지 생성, 백파(white capping), 쇄파에 의한 에너지 감쇠, 파랑간의 3차 및 4차 비선형 현상, 바닥의 마찰 등을 모의할 수 있다. SWAN모델은 파랑의 위상을 고려하지 않으므로 반사 및 회절 계산 시에 유의해야 하며, 본 연구에서 대상으로 하는 동해는 회절의 영향이 크지 않으므로 적용성에 문제가 없는 것으로 판단하였다. 지배방정식으로 다음과 같은 파작용 평형방정식(wave action balance equation)을 사용한다 (Mei, 1983; Komen et al., 1994).

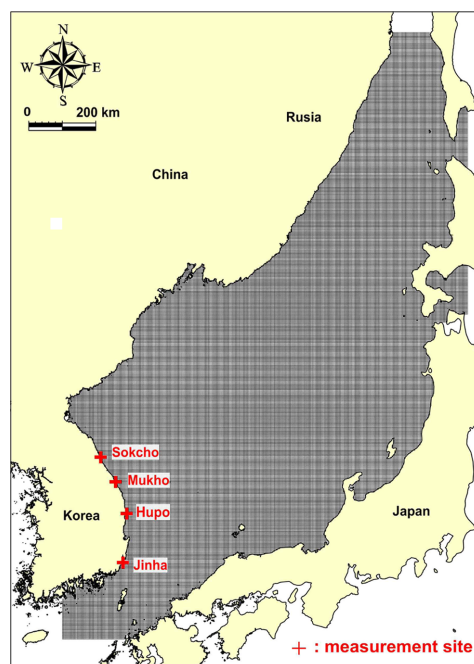


Fig. 11. Meshes for numerical experiment.



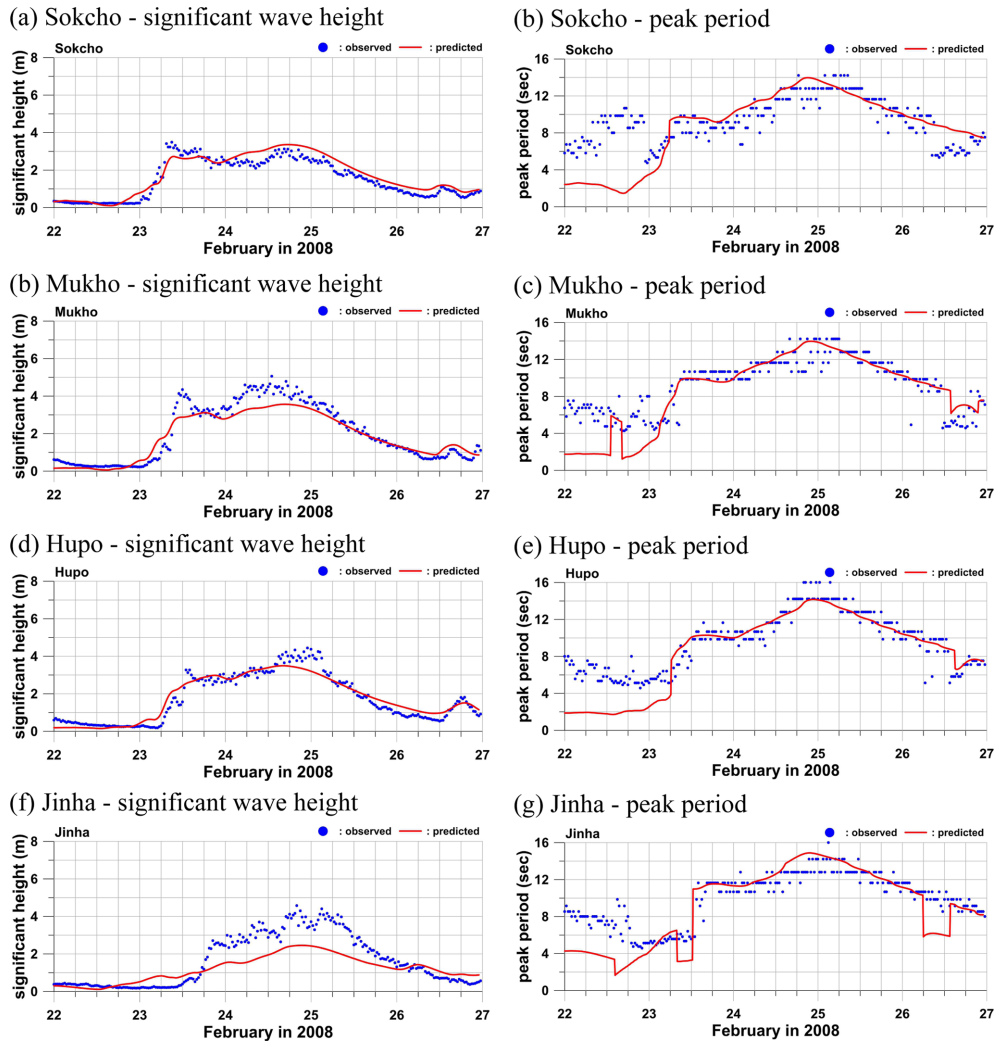


Fig. 12. Time series of measured and predicted significant wave height and peak period.

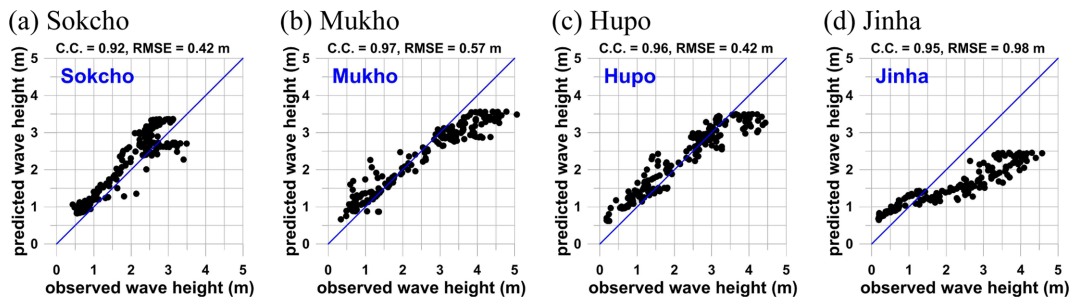


Fig. 13. Scatter plot of measured and predicted significant wave height.

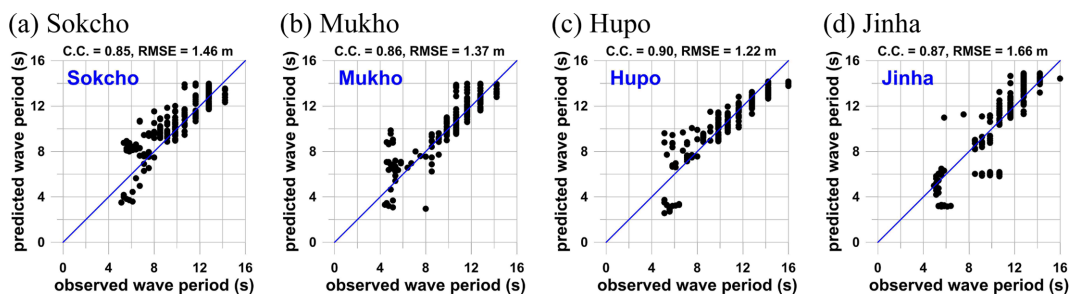


Fig. 14. Scatter plot of measured and predicted peak wave period.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{k}} \cdot [(c_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_g N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (3)$$

위 식에서  $N = S(f, \theta)/\sigma$ 은 파작용밀도이고,  $S(f, \theta)$ 는 방향스펙트럼밀도이고,  $\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$ 는 흐름의 속도  $\vec{U}$ 로 움직이는 좌표에서의 각주파수이고,  $c_g$ 는 파랑의 군속도이고,  $c_\sigma, c_\theta$ 는 각각  $\sigma, \theta$ 공간에서의 위상속도이고,  $S_{tot}$ 는 파작용밀도의 생성, 소멸, 파랑간의 상호작용에 따른 원천항이다.

계산격자는 동해안 전체를 포함하는  $1,200 \text{ km} \times 1,800 \text{ km}$  영역을 대상으로,  $4 \text{ km}$  등간격자로 구성하였으며, 계산 시간 간격은 5분으로 설정하였다. 모형의 검증은 너울성고파 내습 당시 파랑관측이 이루어진 속초, 묵호, 후포, 진하지점의 자료를 이용하였다. 파랑 검증위치 및 계산격자망을 Fig. 11에 도시하였다.

파랑 관측자료와 실험결과의 비교에는 RMSE(Root Mean Squared Error)와 상관계수(correlation coefficient,  $r$ )를 적용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Y_{com} - Y_{obs})^2} \quad (4)$$

$$CORR = \frac{\sum (Y_{com} - \overline{Y_{com}})(Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})}{\sqrt{\sum (Y_{com} - \overline{Y_{com}})^2} \sqrt{\sum (Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})^2}} \quad (5)$$

여기서,  $Y_{com}$ 과  $Y_{obs}$ 는 모델치와 관측치이며,  $\overline{Y_{com}}$ 과  $\overline{Y_{obs}}$ 는 각각 모델치와 관측치의 평균이다.

## 4.2 검증 결과

파랑변형 실험을 통해 예측된 유의파고와 침두주기 시계열을 관측자료와 함께 Fig. 12에 도시하였다. 파랑변형 실험 수행시 초기조건을 설정하지 않았으며, 이로 인해 초기 침두주기 계산에 다소 오차를 보이지만, 24시간이 경과한 2008년 2월 23일 이후에는 모델치와 관측치가 잘 일치한다. 유의파고는 관측치의 증가·감소 경향을 모델치가 잘 재현한다. 외해까지 열려있는 지형인 속초의 경우는 유의파고의 최대치도 관측치와 유사하게 예측되었다. 울릉도 및 독도의 영향을 받거나, 굴절 등의 천해 파랑변형이 많이 일어나는 동해안 남측해역의 경우에는 관측치보다 작게 예측되었다. 2008년 2월 23일~27일 유의파고의 관측치와 모델치 상관성 분석결과를 Fig. 13에 도시하였으며, 침두주기 상관성 분석결과를 Fig. 14에 도시하였다. 유의파고는 모든 지점에서 0.92 이상의 상관계수를 보였다. 관측치와 예측치의 차이가 상대적으로 큰 진하의 RMSE는 0.98 m로 높지만, 다른 지점은 0.6 m 이하의 값을 보였다. 침두주기의 상관계수는 0.85 이상이며, RMSE는 1.2~1.7초이다. 침두주기의 상관계수는 유의파고에 비해 상대적으로 작다. 이는 파랑 관측자료 분석시 주기의 계급구간을 크게 설정하여 나타나는 현상으로 판단된다.

본 연구의 파랑예측시스템은 입력조건으로 이용한 기상예측결과의 적정성을 검토하고, 동해 전체의 예측결과를 도출

하기 위한 것이며, 연안에서 침두주기와 유의파고의 증가·감소 경향을 비교적 정확히 예측하므로 향후 동해안 전체의 공간적인 파랑생성 특성을 검토하거나 상세 파랑예측시스템의 경계조건으로 활용성이 높은 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 너울성 고파로 인한 피해가 발생한 2008년 2월을 대상으로 기상예측자료와 파랑 관측자료를 통합하여 고파 발생과 기상 패턴의 경향성을 분석하였다. 2008년 2월은 연안의 유의파고 및 침두주기가 2회 증가하며, 파랑에너지 스펙트럼을 분석하여 2번째 내습한 장주기성 파랑의 전파방향을 예측하였다. 예측한 전파방향과 군속도를 이용하여 과거 파랑에너지의 위치를 추정하였으며, 2번째 증가한 파랑에너지는 러시아와 일본 사이에 발생한 NE계열 해상풍에 기인하는 것을 확인하였다.

또한, 2008년 시점을 대상으로 NOAA의 기상예측자료를 이용한 파랑모형을 구축하고 실시간 모의하여 관측자료와 비교하였다. 검증 결과, 지형이 비교적 복잡한 동해안 남측해역을 제외하면 유의파고와 침두주기의 크기 및 증가감소경향을 정확히 예측하였다. NOAA의 해상풍 예측자료가 동해안의 공간적인 해상풍 특성을 재현하는 것으로 판단되며, 향후 상세 파랑예측시스템의 경계조건으로 활용성이 높은 것으로 판단된다.

최근 수치모델의 발달로 전 지구 또는 국지해역을 대상으로 기상 및 파랑예측시스템이 개발되어 운영되고 있다. 동해안 파랑과 기상자료의 상관성 및 관측파랑의 발생기원을 분석하고, 동해안 전체를 대상으로 파랑예측시스템을 구축한 본 연구가 향후 예측시스템의 정확성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 동해안의 너울성고파 피해 저감방안 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양과학조사 및 예보기술개발사업의 일환인 “연안 이상현상(이상고파, 이안류) 발생원인 규명 및 대응체계 구축(No. 20140057)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Ahn, S.J., Lee, C., Kwon, S.J., Jeong, W.-M., Kim, S.W. (2013). Source area and propagation direction of large-height swell-like waves in the east coast of Korea, 2013 Conference of the Korean Society of Civil Engineers, 2127-2131. (in Korean)
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions : 1. Model description and validation. J. of Geophysical Research, 103(C4), 7649-7666.
- Earle, M.D., Bush, K.A. and Hamilton, G.D. (1984). High-height

- long-period ocean waves generated by a severe storm in the northeast Pacific ocean during February 1983, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1286-1299.
  - Goda, Y., An, E.-S. (1973). On wave characteristics along the east coast of Korea and some remarks on breakwater design, *J. of Korean Society of Civil Engineers*, 21(1), 78-89 (in Korean).
  - Jeong, W.M and Oh, S.-H. (2009). Abnormally high swells occurred on the east coast in recent several years, 2009 Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 2119-2122 (in Korean).
  - Jeong, W.M, Oh, S.-H., and Lee, D.Y. (2007). Abnormally high waves on the east coast, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 19(4), 295-302 (in Korean).
  - Jeong, W.-M, Oh, S.-H., Ryu, K.-H, and Kim, T.-I. (2008). Characteristics of abnormally high waves on the east coast, February 2008, 2008 Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 2480-2483 (in Korean).
  - Komen, G.J., Cavleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., and Janssen, P.A.E.M. (1994). Dynamics and modeling of ocean waves, Cambridge University Press, 533.
  - Lee, C., Ahn, S.J., Lee, B.W., Kim, S.W. and Kwon, S.J. (2014). Prediction of swell-like high waves using observed data on the east coast of Korea, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 149-159 (in Korean).
  - Mei, C.C. (1983). The applied dynamics of ocean surface waves, Wiley, New York.
  - Oh, S.-H., Jeong, W.-M., Lee, D.Y. and Kim, S.I. (2010) Analysis of the reason for occurrence of large-height swell-like waves in the east coast of Korea, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 22(2), 101-111 (in Korean).
  - Shapiro, R. (1970). Smoothing, filtering, and boundary effects, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 8(2), 359-387.
- 
- Received 29 June, 2016  
Revised 16 August, 2016  
Accepted 17 August, 2016