한국해안해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 29(1), pp. 36~45, Feb. 2017
https://doi.org/10.9765/KSCOE.2017.29.1.36

# 2016년 4월 대한해협 폭풍파랑 후측모의 실험
# Wave Hindcasting on the Storm Waves at the Korean Straits of April, 2016

천후섭* · 안경모**
Hwusub Chun* and Kyungmo Ahn**

**요 지** : 본 연구에서는 파랑 후측모의 실험을 통해 2016년 4월 대한해협에서 발생한 폭풍 파랑을 재현하고, 당시 폭풍 파랑의 특성을 조사하였다. 파랑 후측모의 실험에 앞서 파랑관측자료를 분석하고, 이를 바탕으로 계산 영역을 설정하였다. 본 연구의 분석에 따르면, 대한해협 지역은 NE 계열의 파랑이 지배적으로 나타나며 이는 동해 지역의 파랑 특성과 일치하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 Ahn et al.(2016)과 동일한 계산 조건을 적용하여 파랑 계산을 수행하였다. 본 연구의 계산 결과, 최대 유의파고 및 해당되는 유의파 주기는 각각 5.06 m, 9.2 s로, 이의 오차는 4 cm, 0.8 s 정도 되며 관측결과와 잘 일치하고 있었다. 이 후, 파랑계산 결과 얻은 유의파고 및 첨두주기를 JONSWAP 관계식과 비교하였는데, 이에 따르면 2016년 4월의 폭풍 파랑은 너울성 파랑보다는 풍파 성향이 더욱 강한 것으로 분석되었다.

**핵심용어** : 대한 해협, 폭풍 파랑, 너울성 파랑, 풍파, 파랑 후측모의 실험, JONSWAP 관계식

**Abstract :** In the present study, the storm waves at the Korean Straits of April, 2016 have been reproduced by the wave hindcasting, and then their characteristics were investigated. Before the wave hindcasting, the wave measurements at the Korean Straits were analyzed. The analysis showed that the waves at the Korean Straits were dominated by the Northeastern waves, same as those in the East Sea. Accordingly, the wave hindcasting was been carried out with the same condition in Ahn et al. (2016). In the numerical results, the maximum significant wave height at the Korean Straits was 5.06 m, and the corresponding significant wave period was 9.2 s. The computed significant wave heights and wave periods were overestimated by 4 cm and 0.8 s, respectively. After the wave hindcasting, the computed significant wave heights and peak periods were compared with the JONSWAP relationship. This comparison showed that the storm waves at the Korean Straits were close to wind waves, not swell.

**Keywords :** korean straits, storm waves, swell, wind wave, wave hindcasting, JONSWAP relationship

## 1. 서 론

최근 사회 전반에 걸쳐 환경·안전에 관심이 증대됨에 따라 해안지역에 대한 너울성 파랑에 대한 대책 마련 또한 활발하게 진행되고 있다. 동해 심해역에서 발생된 폭풍에 의해서 발생하는 너울성 파랑은 동해안을 중심으로 가을부터 이듬해 봄까지 빈번하게 발생하는 특성이 있다. 너울성 파랑에 의한 인명 및 재산 피해는 강원도 및 경상북도 해안에서 주로 발생하지만, 부산 인근에서도 나타나기도 한다 (National Emergency Management Agency, 2014). 이처럼 너울성 파랑에 의한 피해가 지역적으로 편중되는 특성이 있는데, 그 이유는 너울성 파랑의 원인이 되는 폭풍이 북서풍~북동풍으로 대체로 작용하기 때문이다. 하지만, 2016년 4월에는 남서풍의 폭풍에 의해 부산 인근 해역에서 화물선이 침몰되는 사고가 발생하였다. 당시의 바람장 방향은 일반적으로 알려진 것과 달라 본 연구에서는 이를 수치모의 실험으로 재현하고 이의 특성을 조사하였다.

수치모의 실험을 위해서는 계산 영역의 설정이 중요한데, 특히 풍파 수치모의 실험은 경계 조건의 유무 및 경계역으로부터 대상 지역의 거리 등의 설정이 매우 중요하다. 그 이유는 대상 지역에 따라 수천 km 의 Fetch를 따라 발달되는 파랑이 계산 영역에 따라 제한되기 때문에, 동일한 풍속을 적용하더라도 유의파고 또는 파랑 주기가 과소산정될 가능성이 있기 때문이다. 특히 해안공학 분야의 주요 관심 대상인 너울성 파랑은 심해역에서 발생된 장주기파랑이 전달되는데, 너울성 파랑의 주기는 Fetch-limited 파랑의 주기보다 더욱 크기 때문에, 이에 정확한 수치모의 실험을 위해서 계산 영역 설정이 중요하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 수치모의 실험에 앞서 대한해협의 파랑관측자료를 분석하고, 이를 바탕으로 계산 영역을 설정하였다. 이 후 파랑 계산을 수행한 후, 계산 결

* 삼성전자(주)(Memory Manufacturing Operation Center, Samsung Electronics Co. Ltd.,)
**한동대학교 공간환경시스템공학부(Corresponding author: Kyungmo Ahn, School of Spatial Environment System Engineering, Handong Global University, Handong-ro, 558, Pohang, Kyeongbuk, 37554, Korea, Tel: +82-54-260-1421, kmahn@handong.edu)

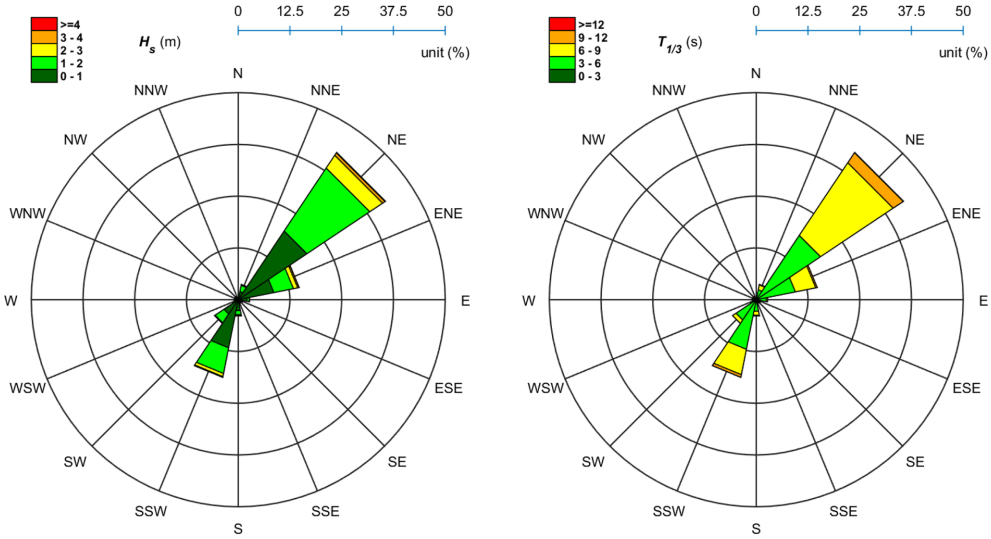
과를 대한해협, 동해, 일본 Niigata 및 Hamada 지역 등에서의 관측결과와 비교·검증하였다. 이후, 파랑 계산 결과 얻은 유의파고 및 첨두주기를 JONSWAP 관계식과 비교하여 이의 특성을 조사하였다.

## 2. 대한해협 파랑관측자료 분석

본 연구에서는 수치모의 실험에 앞서 계산 영역 설정을 위해 파랑관측자료 분석을 통해 대한해협의 파후(wave climate) 특성을 먼저 조사하였다. 이에 2012년 9월부터 2016년 10월까지 약 3년 정도 관측된 파랑자료를 분석하였다. 본 파랑관측자료는 국립해양조사원에서 수행한 파랑자료로, 부산항에서 동남쪽으로 20 km 떨어진 곳에 위치해 있다. 본 자료의 관측 지점 위치는 Fig. 4에 표시되어 있다. 본 연구에서는 파향별 유의파고 및 첨두주기의 분포를 분석하였는데, 그 결과를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에 따르면, 대한해협의 경우, NE계열의 파랑이 출현빈도가 월등히 높은 것으로 나타나고 있는데, 여기에 NNE 및 ENE 계열의 파랑까지 고려하면, NNE~ENE 계열의 파랑이 전체 파랑관측자료의 약 60.4%를 차지하고 있는 것으로 집계된다. 이러한 파향 분포 특성은 한반도 동해 지역에서 흔히 관측되고 있다. 특히, 본 파랑관측자료의 계절별 파향 평균값은 93.8°, 141.0°, 55.9°, 49.6° 으로 나타나는데, 이 중 하계시 파랑관측자료의 41.7%가 NE계열의 파랑에 해당된다. 이로 볼 때, 대한해협 지역은 남쪽으로 열려 있지만, 이 지역의 전반적인 파랑 특성은 동해와 유사한 것으로 파악된다. 특히 대한해협의 지형이 북서쪽으로 닫혀 있어 북서풍의 영향을 받지 않는 것을 고려한다면, 본 해역에서의 파랑 특성은 Chun et al. (2014)에서 보여진 동해 심해역에서의 그것과 유사하다고 볼 수 있다.

이 후, 대상 해역 폭풍파랑의 통계적 특성을 파악하기 위해 파랑관측자료에 대해 극치 분석을 실시하였다. 먼저 폭풍파랑의 재현 주기를 산정하기 위해 POT (Peak-Over Threshold)기법을 적용하였는데, 이에 의해 추출된 극한 파랑을 GPD(Generalized Pareto Distribution)에 적용하였다. POT 기법 및 GPD 함수는 극치 파랑 분석 기법으로 많이 활용되는 방법으로 Ahn et al. (2016), Chun et al. (2014), Chun and Ahn (2017) 등이 각각 동해 파랑관측자료 및 파랑 후측모의 실험 결과 등에 활용한 바 있다. GPD 함수의 확률밀도분포 함수 및 누적확률분포 함수를 각각 식 (1)과 식




(a) significant wave heights (b) significant wave periods

**Fig. 1.** Wave rose of significant wave heights and periods of the measurements at the Korean Straits.

**Table 1.** Average values of significant wave heights and periods for the wave directions

| Direction | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $H_s$(m) | 0.44 | 1.02 | 1.19 | 1.06 | 0.75 | 0.63 | 0.72 | 0.77 |
| $T_{1/3}$(s) | 4.03 | 5.52 | 6.40 | 5.71 | 4.96 | 4.96 | 5.07 | 5.03 |
| Occurences (%) | 0.4 | 3.7 | 42.0 | 14.7 | 2.7 | 1.1 | 0.8 | 0.9 |
| Direction | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW |
| $H_s$(m) | 0.95 | 0.96 | 0.92 | 0.70 | 0.96 | 0.89 | 0.79 | 0.60 |
| $T_{1/3}$(s) | 5.42 | 5.68 | 4.86 | 4.32 | 4.53 | 4.38 | 4.30 | 4.20 |
| Occurences (%) | 3.9 | 18.8 | 6.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.4 |

(2) 에 나타내었다.

$$f_X(H_s) = \frac{1}{\alpha}\left(1-\kappa\frac{(H_s-\xi)}{\alpha}\right)^{1/\kappa-1} \quad (1)$$

$$F_X(H_s) = 1-\left(1-\kappa\frac{(H_s-\xi)}{\alpha}\right)^{-1/\kappa} \quad (2)$$

여기서, $\alpha$, $\kappa$, $\xi$는 GPD 함수의 모수로서, 본 연구에서는 Singh and Guo (1995)의 최대 엔트로피법 (maximum entropy method)을 이용하여 모수를 산정하였다. 본 연구에서는 유의파고 2 m 를 넘는 파랑을 추출한 후, 이들을 식 (1), (2)에 적용하여 산정하였는데, 이 결과 식 (1), (2)의 모수로 각각 $\alpha = -0.2021$, $\kappa = 0.6922$, $\xi = 1.9822$ 를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이들 모수들의 적합성은 $\chi^2$ 및 K-S (Kolmogorov-Smirnov) test 등을 통해 검증하였다. 적합성 test 결과, 유의수준 0.05에 대한 $\chi^2$-test의 한계치는 219.9로 식 (1)에 위의 모수를 넣어 얻은 오차합은 0.42로, $\chi^2$-test에 대해서 이들 모수는 적합한 것으로 판단된다. 이 외에 식 (2)를 적용한 결과 오차 최대치는 0.0836으로, 유의수준 0.05에 대한 K-S test의 한계치는 0.0984로 K-S test 결과에 대해서도 적합하다. 식 (2)로부터 얻은 재현빈도별 유의파고를 Fig. 2에 나타내었다.

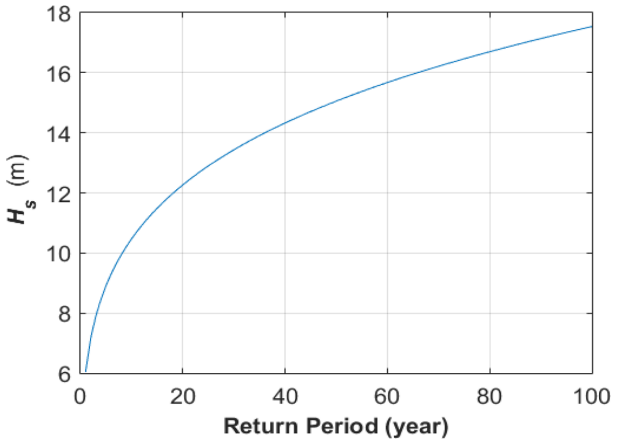
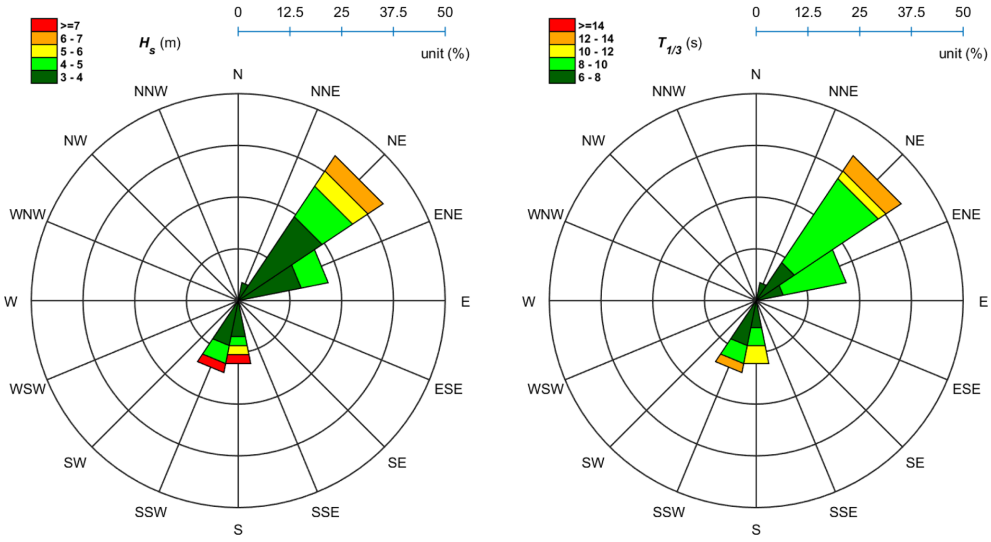



**Fig. 2.** Significant wave heights along with the return periods after the extreme wave analysis for the measurements at Korean Straits.

Fig. 2에 따르면, 1년 및 50년 재현주기 유의파고는 6.0 m, 15.1 m 에 달하는 것으로 파악되고 있다. 최근에 한반도에 큰 피해를 입힌 바 있는 T1618 CHABA 당시의 유의파고는 12.97 m 로 관측되었는데, 이의 재현 주기는 약 25 년으로 파악되고 있다. 이는 파랑 관측 기간이 짧은 반면에 상대적으로 높은 재현 주기를 가진 고파랑이 관측되어 나타난 결과로 보여진다. 보다 많은 자료 보강을 통해 이에 대해 새롭게 재현 주기를 분석할 필요가 있다. 이 후 본 연구에서는 한달이상의 재현 주기를 가지는 파랑을 추출하여, 대상 해역에서의 폭풍 파랑의 파향별 분석 특성을 조사하고 이를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서 한달의 재현 주기를 가지는 유의파고는 3.08 m 와 같다. 이에 의하면, 대한 해협의 폭풍 파랑은 NE, SSW 계열을 중심으로 분포하고 있는데, 이의 양상은 Fig. 1의 것과 유사한 편이다. 특히, NE 계열을 중심으로 폭풍파랑의 출현이 높은데, 이는 Fig. 1에서 보여진 바와 같이 대한 해협의 파랑 분포 특성이 동해의 영향을 강하게 받아 나타나는 결과로 보여진다. 그러나, 동해와 다르게 S, SSW 계열에서 7 m 이상의 유의파고가 나타나고 있는데, 이는 태풍의 영향이 크게 작용하여 나타난 결과이다. Fig. 3의 폭풍파랑을 좀 더 자세히 살펴보면, 대한 해협에서 1달 이상의 재현주기를 가지는 파랑이 46 건 나타났는데, 이 중 태풍에 의한 것은 11건 되며, 춘계 폭풍 파랑은 9건 집계 되었다. 이 중 춘계시




(a) significant wave heights (b) significant wave periods

**Fig. 3.** Wave rose of significant wave heights and periods of storm waves measured at the Korean Straits.

의 폭풍파랑은 동해와 달리, 남서풍에 의해 발생되는 특성이 있다. 이는 2016년 4월의 폭풍파랑처럼, 춘계시 남서풍의 작용으로 대한해협에서 폭풍 파랑이 발생하는 경우가 드물지 않음을 의미한다.

## 3. 파랑 후측 모의 실험

### 3.1 파랑 계산 조건

앞서 파랑관측자료 분석에서 보여진 바와 같이 대한해협 지역의 파후는 동해안에서 관측되고 있는 것과 매우 유사하다. 이에 본 연구에서는 Ahn et al.(2016)과 동일하게 수치모의 실험을 수행하였다. 이의 수치모의 실험에서 공간 및 시간 격자 간격의 크기는 각각 5 분, 20분 등을 각각 사용하였다. 이에 의한 최대 Courant 수는 약 20 정도 되지만, 본 파랑 모형이 음해법을 차용하여 계산하기 때문에 안정적인 파랑 계산이 가능하다.

Ahn et al. (2016)의 계산 영역 및 수심도를 Fig. 4에 제시하였다. 본 연구의 대상 지역이 대한해협 지역이긴 하나, 앞서 파랑관측자료 분석에서도 보여진 바와 같이 대한해협의 파랑은 동해의 영향을 주로 받기 때문에 효과적인 파랑 계산이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 본 연구의 대상 해역이 경계역과 비교적 가까운 편이어서 파고 또는 파주기를 과소산정할 가능성이 있다. 이에 다음 단원에서는 Chun and Ahn (2017)의 연구 결과 얻은 유의파고 및 유의파 주기들을 관측

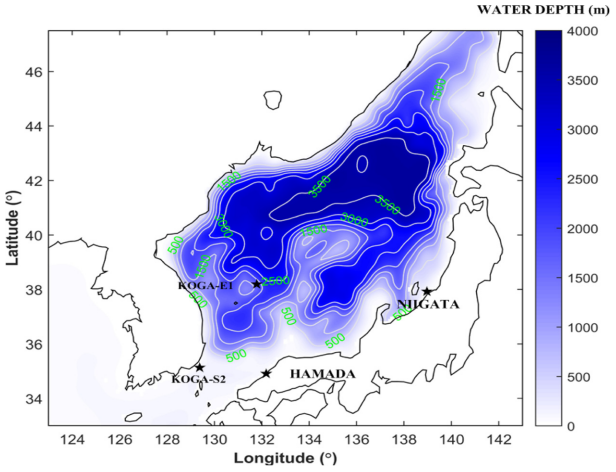



**Fig. 4.** Bathymetry of the present numerical study and the locations of the wave measurements for the validation of the present numerical model.

결과와 함께 비교하고 그 결과를 제시하였다.

본 연구에서도 파랑 후측모의 실험을 위한 바람장 자료로 NCEP Final Operational Global Tropospheric Analysis 바람장 자료를 사용하였다. Ahn et al. (2016) 외에 Lee(2013)가 본 바람장을 이용하여 한반도 동해안에 대해 성공적으로 파랑 후측모의 실험을 수행한 바 있다. 본 자료는 NOAA에서 구축한 기상자료로, 1°간격으로 구성되어 있으며, 6시간 간격으로 제공되고 있는데, 폭풍 및 태풍 바람장이 모두 포함되어 있다. 이로 인해 본 연구의 수치모의 실험 결과에는 폭풍 및 태풍 파랑이 모두 포함되어져 있다. 하지만, 6시간 간격으로 바람장 자료가 제공되기 때문에 진행속도가 빠른 일부 태풍의 경우 태풍파랑을 과소 산정하는 경향이 있다.

### 3.2 Chun and Ahn (2017) 수치모형 정확도

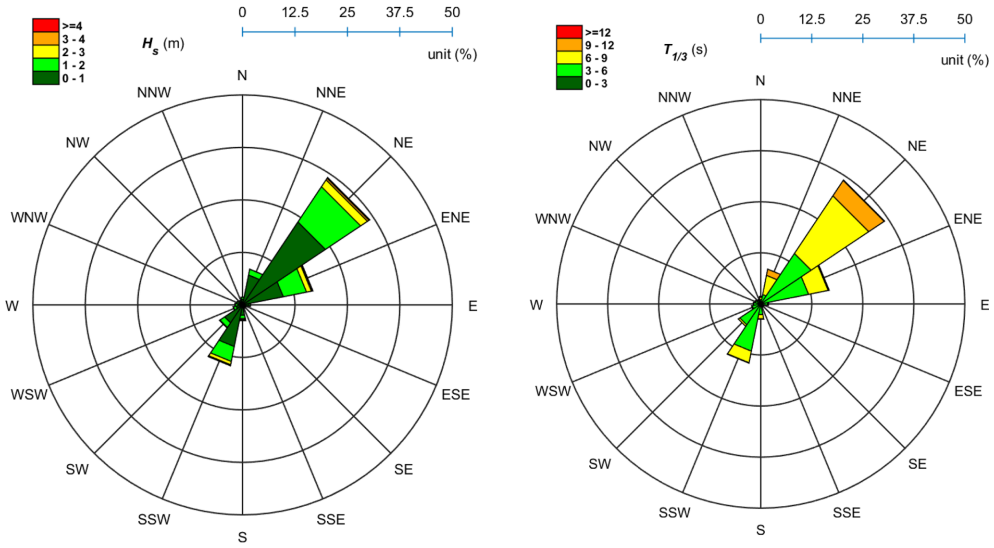
본 연구에서는 파랑후측모의 실험에 앞서 Chun and Ahn (2017)의 계산결과의 정확도를 먼저 분석하였다. Chun and Ahn (2017)의 결과 얻은 대한해협 및 동해 심해역에서의 파랑 계산결과의 정확도는 Table 2에 제시하였다. Table 2에서 bias, RMSE, SI, $r$ 등은 평균 편향, 평균 제곱근 오차, 분산지수, Pearson 상관계수 등을 각각 나타내는 것으로, 이의 정의는 Chun et al. (2014) 에 제시되어 있다. 이 중 Table 2의 bias는 관측치에서 계산치를 뺀 값으로 음수는 과대산정을 의미한다.

Table 2에 따르면 대한해협 지역에서의 계산 정확도는 동해 지점에 비해서 비교적 낮은 편인데, 이 중 유의파 주기의 정확도가 낮다. 이는 대한해협 지점이 남측 경계조건과 상대적으로 가까이 위치해 있어, 북서 태평양 및 동중국해에서의 파랑이 정확히 전달되지 못한 결과로 인해 유의파 주기의 정확도가 상대적으로 낮은 것으로 보인다. 하지만, Pilar et al. (2008)의 계산 결과에서도 평균주기의 Pearson 상관계수 크기는 0.70~0.88에 분포하고 있어, 이의 정확도가 다른 파랑 계산 결과에 비교해 볼 때, 낮지 않다고 볼 수 있다. 그리고 연구대상 영역이 수치모의 실험의 경계역과 상대적으로 가까움에도 불구하고 유의파 주기는 오히려 0.08 s 정도 과대 산정되는 경향이 있어, Ahn et al. (2016)의 계산영역을 사용하더라도 대한해협에서 비교적 정확한 파랑 계산 결과를 얻을 수 있다.

한편 파향에 따른 수치모형의 정확도를 보기 위해 파랑 계산결과의 파향별 유의파고 및 유의파 주기의 분포를 분석하여 그 결과를 Fig. 5와 Table 3에 각각 나타내었다. Fig. 5의

**Table 2.** Accuracy of Chun and Ahn's (2016) numerical results.

| Location | Physical Quantity | bias | RMSE | SI | $r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Korean Straits | $H_s$(m) | 0.12 m | 0.29 m | 0.26 | 0.91 |
| | $T_{1/3}$(s) | -0.08 s | 1.28 s | 0.22 | 0.74 |
| East Sea | $H_s$(m) | -0.09 m | 0.36 m | 0.25 | 0.95 |
| | $T_{1/3}$(s) | -0.09 s | 0.75 s | 0.12 | 0.88 |




(a) significant wave heights (b) significant wave periods

**Fig. 5.** Wave rose of significant wave heights and periods of the computed waves at the Korean Straits.

**Table 3.** Average values of significant wave heights and periods for the wave directions.

| Direction | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $H_s$(m) | 0.75 | 0.57 | 0.93 | 1.03 | 0.75 | 0.76 | 0.78 | 0.91 |
| $T_{1/3}$(s) | 5.94 | 7.16 | 6.66 | 5.48 | 4.71 | 4.81 | 4.97 | 5.14 |
| Occurences (%) | 1.8 | 8.5 | 35.8 | 16.8 | 1.9 | 0.9 | 0.7 | 1.0 |
| Direction | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW |
| $H_s$(m) | 1.04 | 0.88 | 0.68 | 0.86 | 0.96 | 0.91 | 0.83 | 0.79 |
| $T_{1/3}$(s) | 5.44 | 4.98 | 4.38 | 4.30 | 4.08 | 4.03 | 4.33 | 5.08 |
| Occurences (%) | 3.7 | 14.5 | 6.5 | 2.3 | 1.8 | 1.5 | 1.1 | 1.2 |

방향 분포 특성을 보면, Fig. 1의 것과 상대적으로 많이 유사한 편인데, Fig. 1에 비해 NNE계열 파랑의 출현율이 상대적으로 높은 것으로 파악되고 있다.

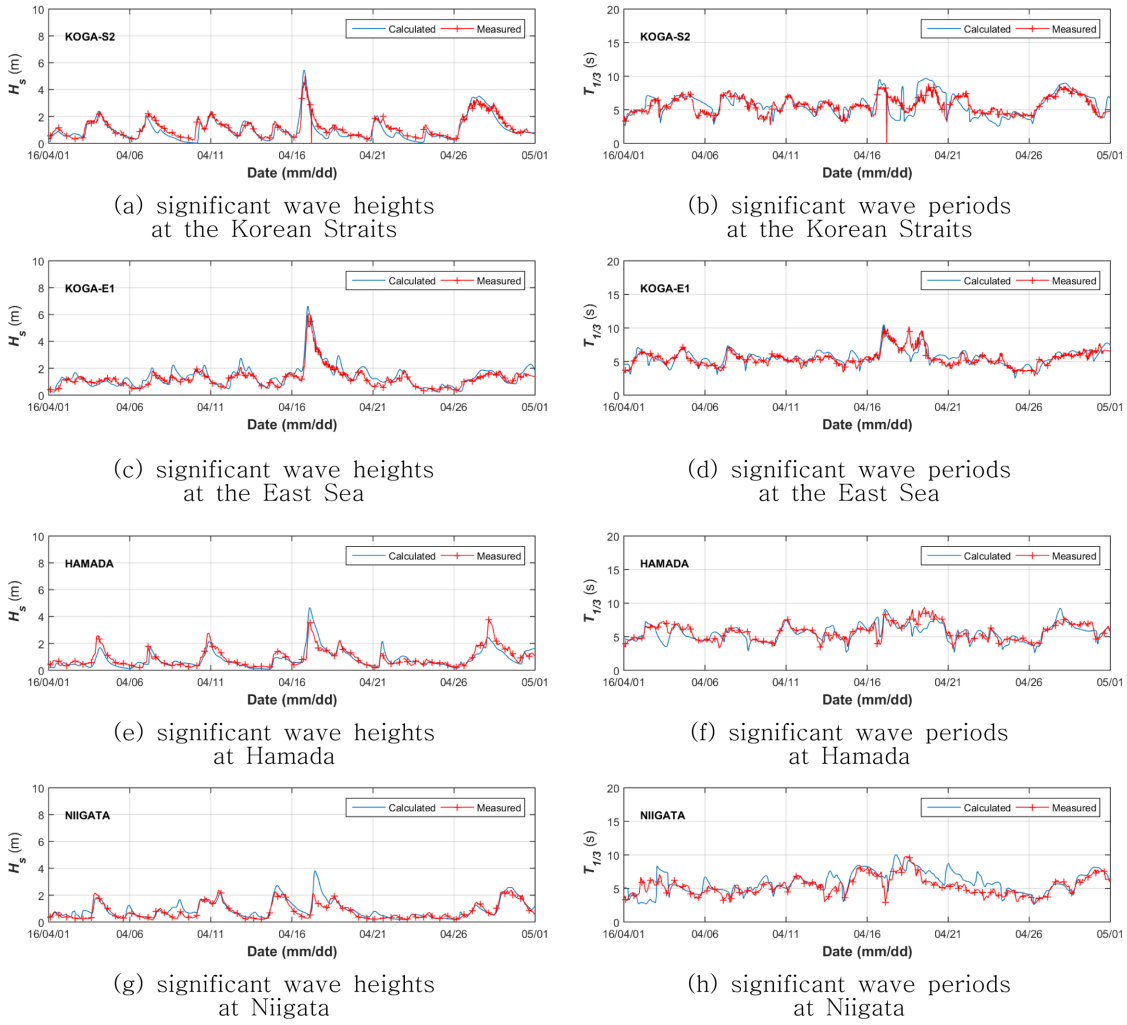
이에 본 연구에서는 통계적으로 일치함을 보기 위해서 파향별 유의파고, 유의파주기의 평균값, 평균파향의 출현율에 대해 Paired *t*-test를 수행하였다. Paired *t*-test를 수행한 결과, 평균파향별 유의파고, 유의파 주기, 평균파향 출현율 등의 *t* 값은 각각 0.12, 0.81, 0.00 으로, 유의 수준 0.05에 대한 *t*-Student 의 분포 *t* 값인 2.89 보다 작아 Chun and Ahn (2017)의 대한해협에 대한 파랑 계산 결과의 파향별 분포 특성은 파랑관측자료와 일치하는 것으로 나타났다. 이로써, 본 연구대상 지역이 경계역과 가까워도, 유의파고, 유의파 주기, 평균파향 등을 비교적 정확하게 계산하고 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 2016년 4월 폭풍 파랑 후측모의 실험

본 연구에서는 2016년 4월에 대해 파랑 후측모의 실험을 수행한 후, 파랑 계산 결과 얻은 유의파고 및 유의파 주기를 파랑관측결과와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6의 파랑관측자료의 위치는 Fig. 4에 표시되어 있는데, 대한해협 및 동해 심해역을 KOGA-S2, KOGA-E1등으로 표시하였다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 대한해협에 대한 파랑 계산 결과를 관측결과와 함께 비교한 것으로, 최대 유의파고가 나타난 2016년 4월 16일 19시 30분에 대한 파랑 계산 결과의 유의파고 및 유의파 주기는 각각 5.06 m, 9.2 s로 나타났다. 이 때 당시의 관측된 유의파고 및 유의파 주기는 각각 5.02 m, 8.4 s 로 본 연구의 파랑 모형의 유의파고 및 유의파 주기의 오차는 각각 4 cm 및 0.8 s 정도에 지나지 않는 것으로 파악되고 있다. 한편, 본 연구 파랑 모형의 정확도를 정량적으로 파악하기 위해, 대한 해협 지점을 포함한 동해 지역의 4 개 지점에 대한 bias, RMSE, SI, *r* 등을 Table 4에 정리하여 나타내었다.

Table 4에 따르면, 대한해협 지점의 유의파고 및 유의파 주기는 전반적으로 13 cm 및 0.5 s 정도 과대산정하고 있으며, 각각에 대한 Pearson 상관계수는 0.86, 0.71 등으로 나타나 대한해협 지역에 대해 본 연구의 파랑 계산이 성공적으로 수행된 것으로 보인다. 이 외에 동해 심해역과 일본 Hamada 및 Niigata 에 대한 본 파랑 계산 결과의 정확도도 제시되어 있는데, 이들 지역에 대한 유의파고의 Pearson 상관 계수는 0.85~0.92 등으로 나타나 유의파고가 비교적 정확하게 계산된 것으로 파악되고 있다. 그러나 유의파 주기의 Pearson 상




(a) significant wave heights at the Korean Straits

(b) significant wave periods at the Korean Straits

(c) significant wave heights at the East Sea

(d) significant wave periods at the East Sea

(e) significant wave heights at Hamada

(f) significant wave periods at Hamada

(g) significant wave heights at Niigata

(h) significant wave periods at Niigata

**Fig. 6.** Comparison of computed significant wave heights and periods during April, 2016.

**Table 4.** Accuracy of the present numerical results.

| Location | Physical Quantity | bias | RMSE | SI | $r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Korean Straits | $H_s$(m) | -0.13 | 0.37 | 0.43 | 0.86 |
| | $T_{1/3}$(s) | -0.50 | 1.24 | 0.21 | 0.71 |
| East Sea | $H_s$(m) | -0.15 | 0.37 | 0.28 | 0.92 |
| | $T_{1/3}$(s) | -0.15 | 0.78 | 0.14 | 0.78 |
| Hamada | $H_s$(m) | 0.14 | 0.37 | 0.30 | 0.92 |
| | $T_{1/3}$(s) | -0.10 | 1.22 | 0.21 | 0.68 |
| Niigata | $H_s$(m) | 0.08 | 0.38 | 0.41 | 0.85 |
| | $T_{1/3}$(s) | 0.15 | 0.98 | 0.17 | 0.70 |

관 계수는 0.68~0.78 로 유의파고에 비해 상대적으로 낮은 편이다. 이 중에서도 Hamada 에 대한 유의파 주기의 Pearson 상관계수가 낮은 편인데, 이는 일시적으로 일부 구간에 대해서 유의파 주기를 과대 혹은 과소한 산정한 결과로 보인다 (Fig. 6(f) 참조). 하지만, 유의파 주기의 평균 오차 자체는 대한해협에서의 것보다 0.40 s 더 작은 편이다.

한편, 당시의 폭풍파랑 발달 양상을 Fig. 7에 나타내었다. 이 중, 2016년 4월 16일 18시에 대한 결과가 대한 해협 최대 유의파고 시점과 유사한데, 남서풍 계열의 바람에 의해 한반도 남해안을 중심으로 4~5 m 의 고파랑이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이 후 당시의 고파랑은 남서풍을 따라 동해 전체로 확대되다가, 2016년 4월 17일 12시에는 일본 Tsugaru 해협에서 10 m 정도의 유의파고가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 때 동해 심해역에서는 약 6 m의 유의파고를 고파랑을 가진 유의파고가 나타나고 있는데, 이는 Fig. 6(c)에서도 확인되고 있다. 당시 동해지역에서의 폭풍파랑은 북서풍이 아닌 남서

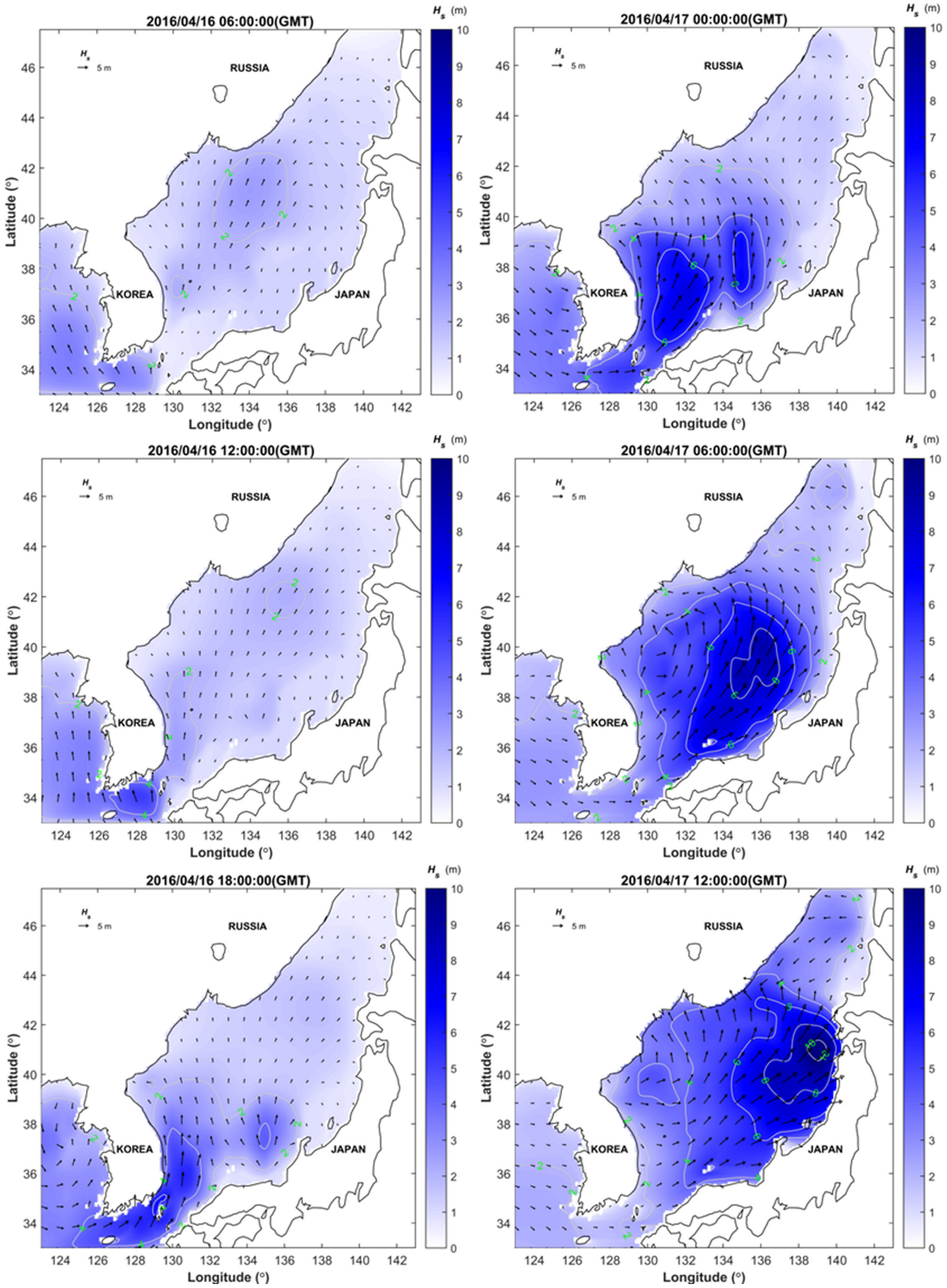



**Fig. 7.** Development of storm waves in the East Sea during April, 16, 2016.

풍에 의한 폭풍 파랑이란 점에서 다른 폭풍파랑에 비해 이례적인 편이다.

Fig. 7 에서 보면, 남서풍의 영향으로 대한해협에서는 SW계열의 파랑이 지배적인데, 이를 Fig. 8에서도 확인된다. Fig. 8은 폭풍파랑 기간 동안 대한해협에서의 계산 평균 파향과 관측 결과를 비교한 것으로, 폭풍이 작용했던 2016년 4월 16일부터 2016년 4월 19일까지는 SW계열의 파랑이 지배적이다가, 그 이후는 NE 계열의 파랑이 지배적인 것으로 나타나

고 있다. 당시 계산 평균파향의 정확도를 살펴보면, bias, RMSE, SI, $r$ 값은 각각 -14.3°, 44.1°, 0.27, 0.88 등으로 나타난다. 여기 결과에서 보면, bias 대비해서 RMSE가 비교적 큰 편인데, 이는 파향값 자체가 0~360°사이에 분포하는 탓에 방향 차이에 따른 오차가 크게 계산된 결과이다.

### 3.4 2016년 4월 폭풍 파랑 특성

Fig. 6(a)의 계산 결과에 의하면, 2016년 4월 16일 5시 대한해협의 유의파고는 0.41 m 였지만, 15시간 후 약 5.06 m로 나타났다. 이러한 유의파고 증가 현상은 동해안에서 흔히 관측되는 너울성 파랑 현상과 유사하다. 그러나 태풍파랑처럼 파고가 크면 이에 비례하여 주기 또한 증가하는 것이 일반적이기 때문에 주기만으로 너울성 파랑 여부를 판단하는 것은 쉽지 않다. 이에 본 연구에서는 파랑 계산 결과 얻은 유의파고 및 첨두주기를 JONSAWP 관계식과 비교하여 당시 폭풍 파랑의 성향을 분석하였다. 여기서 JONSWAP 관계식은 Hasselmann et al. (1973)이 북해 파랑관측자료를 바탕으로 제안한 식으로, 풍속과 Fetch 길이에 대한 Fetch-limited 파랑의 유의파고 및 첨두주기의 관계를 나타낸다. 이를 바탕으로 Kamphuis (2000)는 유의파고에 대한 첨두주기에 대한 관계식을 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$T_p = 0.78F^{1/6}H_s^{1/3} \tag{3}$$

여기서, $F$, $H_s$, $T_p$는 각각 Fetch 길이, 유의파고, 첨두주기 등을 나타낸다. 식 (3)은 특정 Fetch 길이 및 유의파고에 대한 Fetch-limited 파랑의 첨두주기를 나타내는 것으로, 특정 파랑의 첨두주기가 이보다 크면 너울성 파랑으로 볼 수 있다 (Sorensen, 1993). 이 반대의 경우는 Duration-limited 파랑를 나타내며, 풍파 (Wind wave)로 분류된다. 한편, 대한해협에서의 파랑관측 결과에서는 첨두주기가 제공되지 않아 파랑관측자료를 이용하여 이러한 분석을 실시할 수 없어 본 연구의

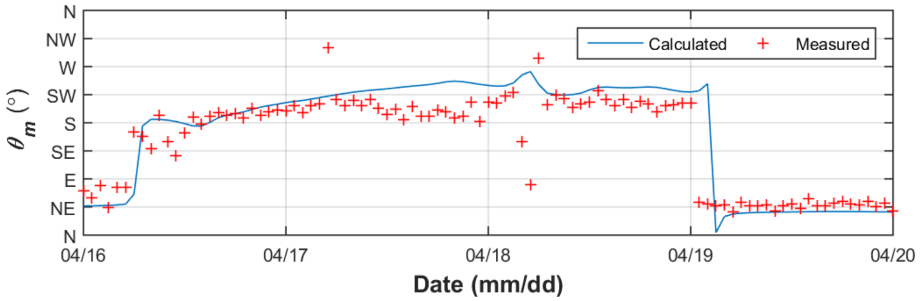



**Fig. 8.** Comparison of measured and calculated mean wave direction at the Korean Straits during April, 16, 2017~April, 20, 2017.

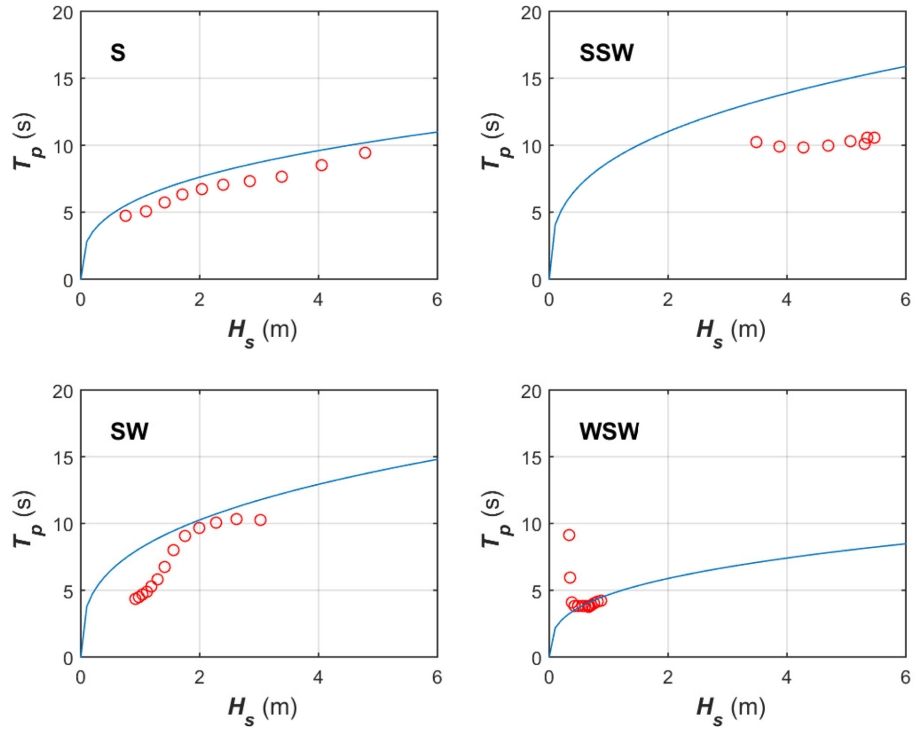



**Fig. 9.** Relationship between the significant wave heights and peak periods. JONSWAP relationship (solid line) and the relationship by the computed waves (circle).

계산 결과를 바탕으로 폭풍파랑의 특성을 조사하였다. 이 방법 외에 너울성 파랑의 정의를 이용하여 당시 폭풍파랑의 성향을 파악할 수도 있지만, Oh et al. (2010) 등에서 지적되고 있는 바와 같이 너울성파랑에 대한 명확한 정의가 있지 않기 때문에 본 연구의 방법이 당시 폭풍파랑의 파랑 특성을 파악하는 데에는 유효한 것으로 판단된다.

Fig. 8에 따르면 당시 폭풍 파랑기간 동안 대한해협은 W~S 계열의 파랑이 우세한 것으로 나타나고 있으며, 당시의 계산 파향은 S, SSW, SW, WSW 등으로 구분되어 진다. 각 방향에 대한 Fetch 길이는 각각 216.7 km, 1,983.1 km, 1,300.6 km, 46 km 등인데, 이를 식 (3) 에 대입한 후, 각 파향에 대한 유의파고에 대한 첨두주기들을 계산 유의파고 및 첨두두기와 함께 Fig. 9에 나타내었다. 이에 따르면 WSW계열의 파랑을 제외하고 대체로 식 (3)에 의한 첨두주기보다 계산 파랑의 첨두주기가 더욱 낮은 것으로 나타나고 있는데, 이는 당시의 폭풍 파랑이 너울성 파랑이 아닌 풍파 성향이 더욱 강함을 의미한다. 동해 지역의 경우, 폭풍 파랑이 발생하더라도 긴 Fetch를 따라 너울성 파랑이 전파되는데, 대한해협에서 남서풍에 의해서 발생된 폭풍 파랑은 풍파 성향을 강하게 띄어, 이에 의한 너울성 파랑 가능성은 낮은 것으로 보여진다.

## 4. 결 론

대한해협 지역은 동해 남부지역에 위치해 있으며, 강원도 및 경상북도 해안 지역과 동일하게 너울성 파랑을 포함한 폭풍파랑의 피해가 발생하는 편이다. 이는 본 연구의 대한해협 파랑관측 자료 분석에 의해서도 뒷받침되는데, 본 연구의 분석에 따르면, 대한해협 지역의 파랑의 경우, NE 계열의 파랑의 출현빈도가 가장 높다. 특히 하계시에도 41.7% 는 NE 계열의 파랑으로 집계되었다. 이는 대한해협이 지형적으로 남해에 대해 열려 있긴 하지만, 이 지역에서의 파랑은 동해의 영향을 매우 강하게 받음을 의미한다. 대한해협에서의 폭풍파랑 역시 NE 계열의 파랑이 주도적인데, 춘계에 발생한 폭풍 파랑 중 일부는 SW 계열의 파랑도 존재하고 있다.

2016년 4월 대한해협에서 발생한 폭풍파랑은 동해역에서 일반적으로 관측되는 북서풍~북동풍 계열의 바람이 아닌 남서풍 계열의 폭풍에 의한 것으로, 당시 부산 인근해역에서 화물선이 침몰되는 등 피해가 발생한 바 있다. 이에 본 연구에서는 파랑 후측모의 실험을 통해 2016년 4월의 폭풍파랑을 재현하고, 이의 특성을 조사하였다. 먼저, 파랑 계산을 수행한 후, 이의 결과를 대한해협, 동해 심해역, 일본 Niigata 및 Hamada 등의 지점에서의 관측결과와의 비교를 통해 검증하였다. 비교 결과 본 연구 계산 결과 얻은 유의파고의 경우, Pearson 상관계수가 0.85~0.96에 이르러 비교적 정확하게 계산한 반면에, 유의파 주기의 Pearson 상관 계수는 0.68~0.78에 이른다. 유의파고에 비해 유의파 주기의 정확도는 낮은 편인데, 이러한 특성은 기타 다른 파랑 후측모의 실험에서도 나타나는 현상으로, 파랑 스펙트럼으로부터 유의파 주기를 추정하는 과정에서 오차가 일부 포함된 것으로 보인다.

한편 본 연구의 계산 결과 최대 유의파고는 5.06 m 이고, 해당 유의파 주기는 9.2 s로 관측치에 비해서 약 4 cm, 0.8 s 정도를 과대산정하고 있다. 그리고 폭풍파랑 기간 동의 평균파향의 Pearson 상관 계수는 0.88로 본 연구의 파랑 후측모의 실험에서 비교적 정확하게 파랑이 재현된 것으로 보인다. 이들 파랑 계산를 JONSWAP 관계식과 비교하여 당시 폭풍파랑의 성향을 조사하였는데, 본 연구의 분석 결과에 따르면 대한해협에서의 폭풍파랑은 너울성 파랑보다는 풍파에 가까운 것으로 파악되고 있다. 이로 볼 때, 대한 해협 지역에서 폭풍에 의해 폭풍 파랑이 내습하기는 하나, 동해처럼 긴 Fetch를 따라 발달된 너울성 파랑이 내습하지는 않는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

해양수산부 해양과학조사 및 예보기술개발사업의 일환인 “연안 이상현상(이상고파, 이안류) 발생원인 규명 및 대 응체계 구축”(No, 20140057)과 경북씨그란트 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

Ahn, K., Hwang, S.-M., and Chun, H. (2016). Characteristics of Storm Waves at Gangneung Port Based on the Wave Hindcasting. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 28(6). 375-382. (in Korean)

Chun H. and Ahn, K. (2017). Storm Waves on the East Coast of Korea: 20 Years of Wave Hindcasting. Journal of Coastal Research. (*published pre-print online, DOI 10.2112/JCOAS-TRES-D-16-00139.1*)

Chun, H., Kang, T.-S., Ahn, K., Jeong, W.M., Kim, T.-R., and Lee D.H. (2014). A Study on the Statistical Characteristics and Numerical Hindcasts of Storm Waves in East Sea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(2), 81-95. (in Korean)

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell., W., and Walden, H. (1973). Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches, A12, 1-95.

Kamphuis, J.W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Lee, H.S. (2013). Abnormal Storm Waves in the East Sea (Japan Sea) in April 2012. Journal of Coastal Research SI. 65, 748-753.

National Emergency Management Agency. (2014). Development

of Countermeasure Techniques Against Large Swells using IT. National Emergency Management Agency. (in Korean)

Oh, S.H., Jeong, W.-M., Lee, D.Y., and Kim, S.I. (2010). Analysis of the Reason for Occcurrences of Large-Height Swell-Like Waves in the East Coast of Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(2), 101-110. (in Korean)

Pilar, P., Guedes Soares, C., and Carretero, J.C. (2008). 44-year Wave Hindcast for the North East Atlantic European Coast. Coastal Engineering, 55(11), 861-871.

Singh, V.P. and Guo, H. (1995). Parameter Estimation of 3-Parameter Generalized Pareto Distribution by the Principle of Maximum Entropy (POME), Hydrological Science Journal, 40(2), 165-181.

Sorensen, R.M. (1993). Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers. John Wiley and Sons. Inc.

Received 12 February, 2017
Revised 23 February, 2017
Accepted 23 February, 2017