

## 바람자료를 이용한 파랑 모의에 관한 연구

- 미계측 해만을 중심으로 -

이호진, 전계원\*, 오현식

---

---

연안에서 각종 개발사업과 항만 운영 등을 안전하게 수행하고 관리하기 위해서는 해당지역의 파랑을 산정하는 것이 중요하다. 파랑을 정확히 산정하기 위해서는 장기간의 관측 자료가 필요하다. 특히 평상파랑의 경우 최소 10년 이상의 파랑관측 자료가 필요하나 우리나라의 경우 이와 같은 자료가 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기상대에서 관측한 바람자료가 비교적 장기간에 걸쳐 축적되어 있음에 착안하여 수치파랑모형을 이용하여 평상파랑을 모의하였다. 모의결과를 관측된 파랑과 비교한 결과, 지형의 방향과 풍향이 일치하는 경우에는 관측파랑을 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다.

**주제어:** 연안, 평상파랑, 바람자료, 수치파랑모형

---

---

### 1. 서론

파랑은 연안에서의 인간 활동을 위협하는 자연현상이다. 항만의 개발과 운영뿐만 아니라 각종 산업 활동과 연안의 효과적 개발 및 이용, 연안재해방지를 위해서는 파랑을 잘 파악하고 예측할 수 있어야 한다. 파랑은 심해로부터 천해까지 전파하면서 수심변화, 인공구조물의 영향, 흐름의 영향, 파랑 사이의 비선형 상호작용 등 복합적인 영향을 받아 변형하기 때문에 파랑을 정확히 예측하는 것 매우 어려운 일이다. 파랑을 정확하게 예측하기 위해서는 장기간에 걸친 파랑관측이 필요하지만, 경제적인 문제와 주변여건의 어려움으로 이에 대한 투자는 매우 부족한 실정이다. 특히, 신규항만 개발 등과 같이 새로운 지역을 개발하는 경우에는 관측 자료가 전무하기 때문에 설계에 많은 어려움을 겪고 있다.

파랑을 예측하기 위한 연구는 제2차 세계대전 중 연합군의 상륙작전을 지원하기 위해 수행된 Sverdrup과 Munk (1947)의 연구에 의해 시작되었다. 이들은 이 연구를 통하여 관측 자료를 통일적으로 정리하여 파랑예보공식을 제시하였다. 이 방법은 후에 Wilson(1965)이 많은 자료를 보완하여 SMB 법으로 명명하였다. 하지만, 이와 같이 관측 자료에만 의존하는 방법은 지역적 특성을 고려할 수 없어,

---

\* 교신저자

많은 문제점을 발생시켰다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 수치모형을 이용한 연구가 진행되었다.

수치모형은 파랑의 발생, 소산 및 비선형 상호작용의 고려여부와 평가방법에 따라 일반적으로 제1세대, 제2세대, 제3세대 모형으로 분류할 수 있으며, 현재는 제3세대 모형을 사용한 연구가 활발히 진행 중이다. 대표적인 제3세대 파랑모형은 WAM 모형(The WAMDI Group, 1988), WAVEWATCH 모형(Tolman, 1991), TOMAVAC(Benoit 등, 1996) 모형이 있다. 이 모형들은 쇄파, 비선형 상호작용 등을 고려할 수 없고 수치적 안정 조건인 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건에 영향을 받아 많은 제약조건을 가지고 있다. 여기서, CFL 조건은 수치적분을 수행할 때 계산을 안정적으로 수행하기 위해서는 적분의 시간간격이 일정시간 크기보다는 작아야 한다는 조건이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서, 수치적으로 안정적이며, 쇄파 및 비선형상호작용을 고려할 수 있는 SWAN 모형(Booij 등, 1999)이 개발되었다. Ou 등(2002)은 태풍시 발생하는 바람장을 계산하고, SWAN 모형에 적용시켜 폭풍파를 모의하여 부이관측자료와 비교하였다. 국내의 연구는 1970년대 항만개발에서 설계파를 산정하기 위한 안수한(1976)의 연구에서 시작되었지만, 국외의 연구에 비해 매우 부족한 실정이다. 특히, 대부분의 연구가 설계파 산정에 집중되어 있어, 실제 시공 및 운영에 필요한 평상파랑 추정에 대한 연구의 거의 전무한 실정이다. 여기서, 평상파랑은 특별한 태풍 등이 이상현상이 발생하지 않은 일반적인 경우에 발생하는 파랑이다(안경모 등, 2004).

본 연구에서는 파랑관측자료 부족으로 인해 미계측 해역에서 평상파를 결정하지 못하여 시공 및 운영에 많은 어려움을 겪고 있고, 바람관측 자료는 기상대에 장기간에 걸쳐 많이 축적되어 있음에 착안하여 바람관측 자료를 이용하여 평상파랑을 모의하였다. 모의를 위해 기존의 모형들과는 달리 파랑 스펙트럼에 대한 가정이 없고, 계산시간이 짧게 소요되는 파랑모형인 SWAN 모형을 이용하였다. 모의결과를 파랑관측 자료와 비교·검토하여, 파랑 미계측 해역에서 바람자료만을 이용한 파랑 모의의 가능성에 대해 살펴보았다.

## II. SWAN 모형

SWAN(Simulating WAve Nearshore)모형은 바람자료, 지형자료, 흐름자료를 이용하여 연안의 파랑을 모의할 수 있는 제3세대 수치파랑모형이다. 이 모형은 공간상으로 파랑의 전파, 수심변화에 흐름에 의한 굴절, 천수현상 등을 고려할 수 있다(Holthuijsen, *et. al.*, 2000).

SWAN 모형의 기본 식은 다음과 같다.

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t} N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial x} c_x N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial y} c_y N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N(\sigma, \theta) = -\frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

여기서,  $N(\sigma, \Theta)$ 는 파의 에너지 스펙트럼을 상대각주파수로 나눈 값으로 작용(action)이라 한다.  $c_x, c_y, c_\sigma, c_\Theta$ 는 지형( $x, y$ )과 스펙트럼 공간( $\sigma, \Theta$ )에서의 파의 전파속도를 나타낸다.

식(1) 좌변의 제1항은 작용의 시간변화량, 제2항과 제3항은 공간에서의 작용의 전과, 제4항은 수심과 흐름 변화에 의한 주파수 천이, 제5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다. 식(1)은 작용의 시간적 공간적 변화가 우변의 원천함수와 같다는 것으로 작용평형방정식(action balance equation)이라 부른다(김경호 등, 2007).

식(1)의 우변을 다양한 물리적인 과정을 나타내는 원천함수로서 다음과 같은 여러 가지 항을 포함한다.

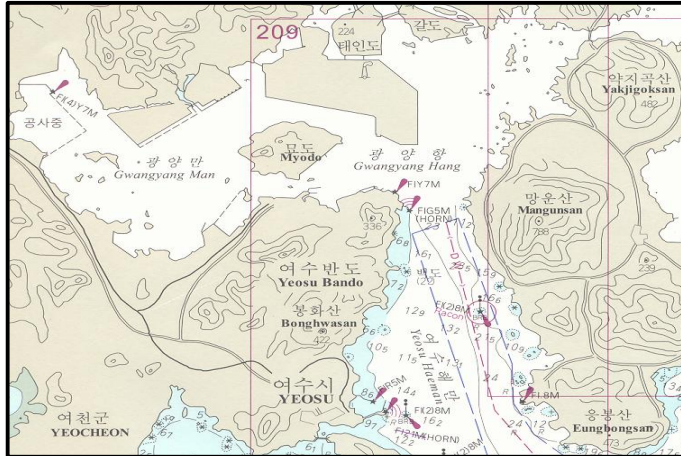
$$S(\sigma, \Theta) = S_{in}(\sigma, \Theta) + S_{ds}(\sigma, \Theta) + S_{nl}(\sigma, \Theta) \quad (2)$$

여기서,  $S_{in}$ 은 바람에 의한 파랑에너지의 발생,  $S_{ds}$ 는 백파(white capping), 바닥마찰, 수심변화에 따른 쇄파에 의한 에너지 소산,  $S_{nl}$ 은 파랑의 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달을 나타낸다(윤종태, 1999).

식(1)은 5개의 독립변수를 갖는 1계 편미분방정식이다. 일반적으로 파랑의 주기가 짧기 때문에 시간에 관련된 항은 무시하여 정상상태(steady state)로 해석할 수 있다(Ris, 1997).

### III. 대상해역 및 자료

#### 1. 대상해역

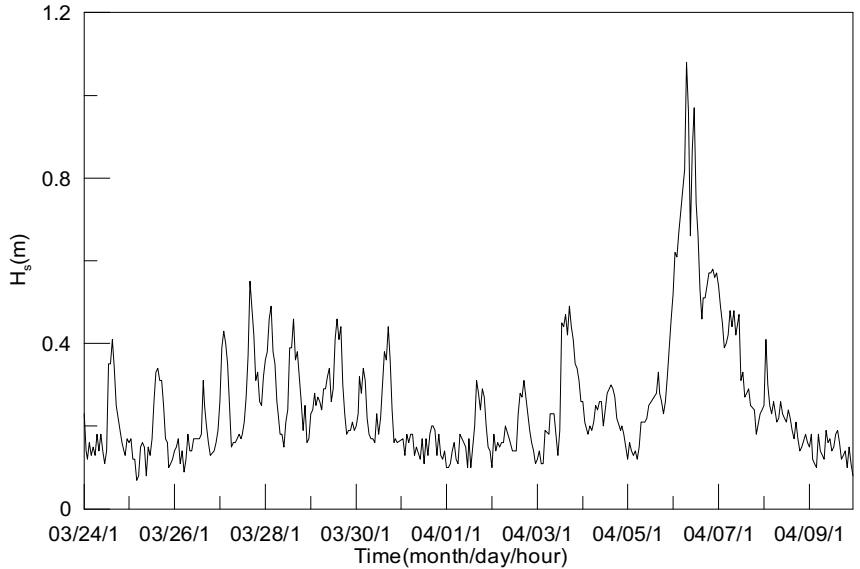


<그림 1> 연구대상해역

<그림 1>은 연구대상해역을 도시한 것이다. 본 지역은 남쪽의 여수반도 및 남동부의 남해도로 둘러싸인 반 폐쇄적인 지형이며 광양만 내에는 크고 작은 섬들이 산재해 있다. 광양만은 동서간의 길이가 27 km, 남북의 폭이 15 km로 동서로 길게 뻗은 모양을 하고 있고 여수해만을 통해 남해와 연결되어 있다. 섬진강, 수어천, 동천 및 서천으로부터 만으로 하천수가 유입되고, 섬진강으로부터는 연간 약 28억 8천만 톤의 담수가 유입되고 있다. 반폐쇄적인 지형과 하천수의 유입으로 인해 광양만 내만은 삼각주, 조산대, 수로 등이 잘 발달되어 있다. 여수해만은 서쪽의 여수반도와 동쪽의 남해도에 의해 형성된 해협으로 북쪽으로 광양만과 남쪽으로 남해와 연결되며 여수반도와 돌산도 사이의 좁은 수로를 따라 가막만과 연결된다(이호진, 2004).

## 2. 파랑관측자료

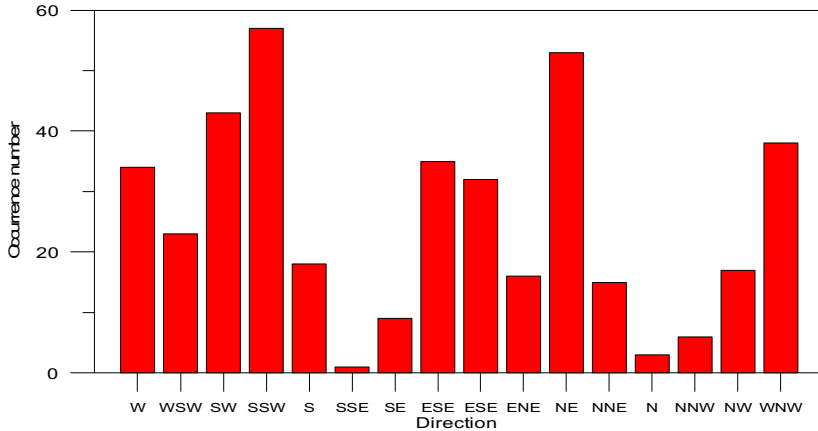
파랑모형을 통한 평상파랑의 모의결과를 비교하기 위해, 연구대상해역의 개발사업에서 취득된 파랑 관측 자료와 비교하였다. 본 연구에 사용된 관측 자료는 광양항 컨테이너부두 설계를 위해 한국해양 연구원에서 2002년 3월24일부터 2002년 4월9일까지 측정된 자료이다(한국해양연구원, 2002). 관측된 파랑자료를 스펙트럼법을 이용해 분석하였다. <그림 2>는 관측된 파랑 자료로부터 분석한 유의파고를 제시한 것이다. 유의파는 관측된 파랑 자료를 파고가 큰 쪽으로부터 전체 파수의 1/3개까지 취하여 파고를 평균한 것으로, 파랑특성을 분석하기 위해 가장 많이 사용되는 값이다.



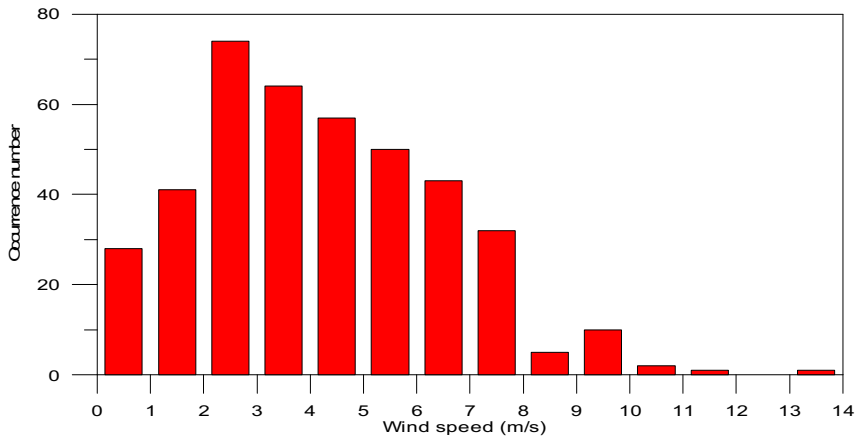
<그림 2> 유의파고의 시계열 분석자료

### 3. 바람관측자료

본 연구에서는 파랑을 모의하기 위해서 연구대상해역 내의 여수기상대에서 관측된 바람자료를 이용하였다. 여수기상대는 북위  $33^{\circ}44'$ , 동경  $127^{\circ}45'$ 에 위치하고 있으며, 기후관측, 지진보조관측, 해양기상관측을 주 업무로 하고 있다. 바람자료는 파랑관측기간과 동일기간에 관측된 자료를 사용하였다. <그림 3>은 바람자료를 풍향에 따라 분류해 놓은 것이다. 여기서 풍향은 바람이 불어오는 방향을 기준으로 한다. 관측기간 동안 남남서(SSW)방향의 바람이 57회(13.97%)로 가장 많이 발생하였고, 그 다음으로 북동(NE)방향의 바람이 53회(12.99%) 발생하였다. <그림 4>는 바람자료를 풍속에 따라 분류해 놓은 것이다. 풍속 2.0~3.0 m/s 사이의 바람이 74회(18.14%)로 가장 많이 발생하였다. 관측기간 동안 풍속은 2.0~6.0 m/s의 범위에 집중하여 발생하였고, 10 m/s 넘는 바람은 4회(1%) 정도 밖에 발생하지 않았다.



<그림 3> 풍향에 따른 바람의 분류



<그림 4> 풍속에 따른 바람자료의 분류

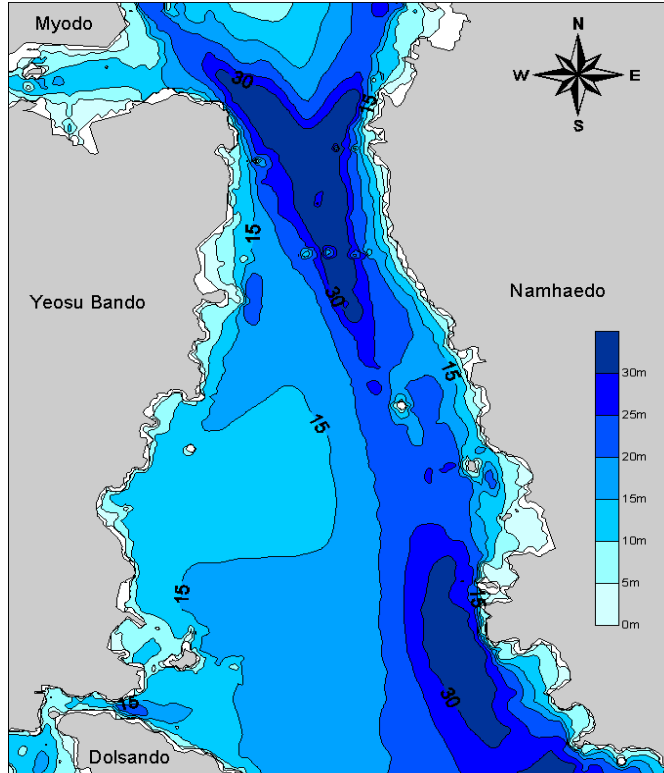
#### IV. 모의결과 및 고찰

##### 1. 파랑모의

파랑을 모의하기 위해서 <그림 1>에 제시된 연구대상해역 중 여수해만에서 광양항 입구에 이르는 남북으로 180 km 동서로 14.2 km의 구간을 선정하였다. <그림 5>는 모의가 수행된 대상지역의 등수심선을 제시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 여수해만 입구와 광양항 입구의 수심은 30m 정도의 깊이를 나타내고 있고, 그 밖의 지역은 15~20 m의 수심 분포를 나타내고 있다. 특히 해안에 인접한 지역은 5 m 이내의 매우 얇은 수심을 보이고 있다. 모의를 위해 100 m 간격으로 대상지역을 세

분화하여 격자를 구성하였으며, 구성된 격자에서 육지부에 해당하는 부분을 계산에서 제외하였다.

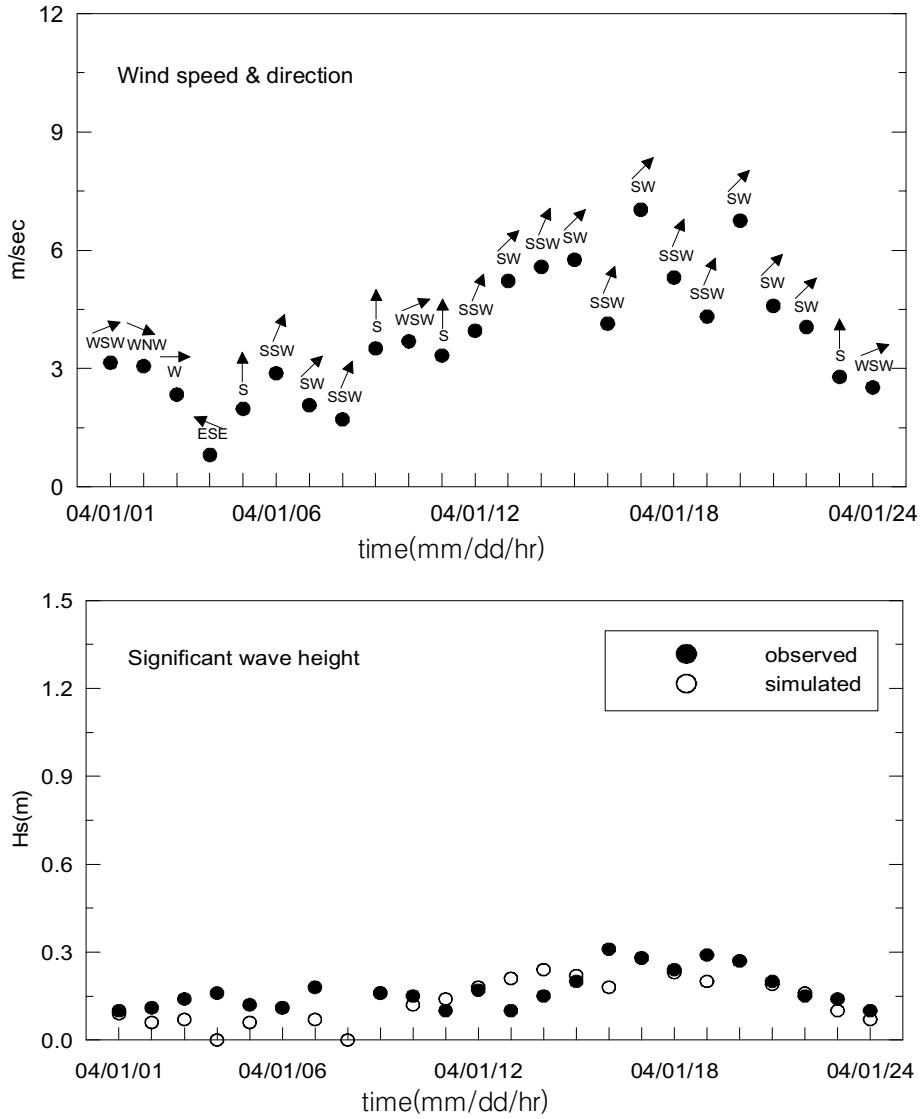
모의를 수행하기 위해 육지경계는 파랑을 발생시키지 않고, 유입되는 모든 파랑에너지를 흡수하는 것으로 처리하였고, 바다경계는 파랑에너지가 계산영역 안으로 유입할 수 있도록 가정하였다.



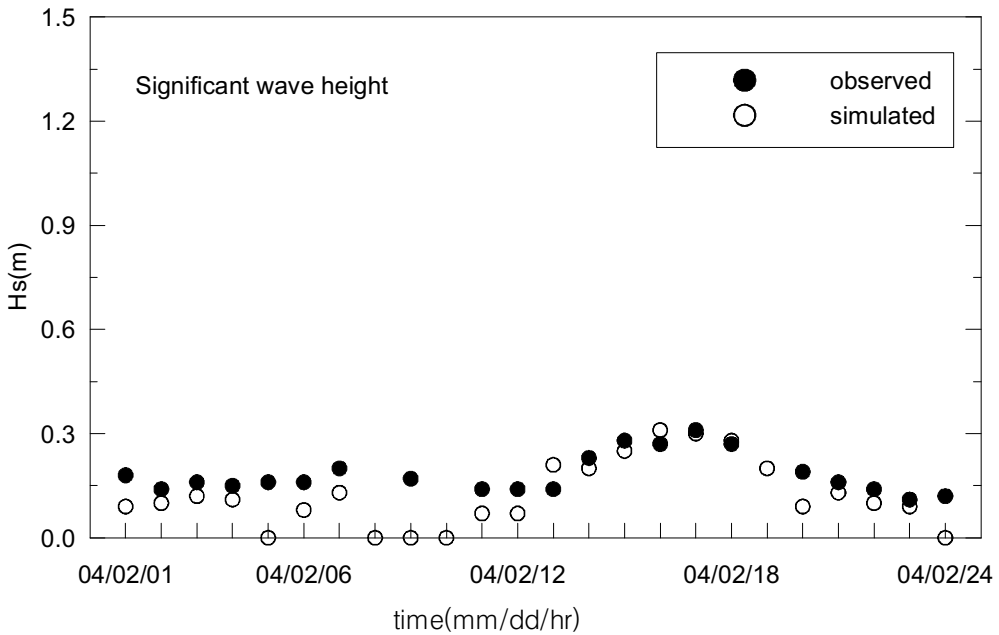
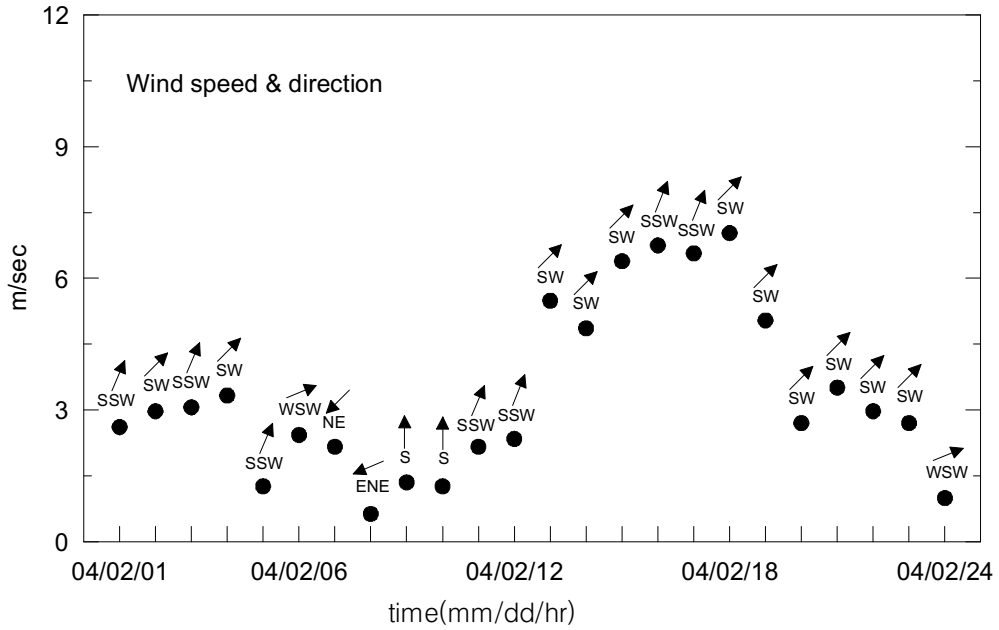
<그림 5> 수심도

## 2. 결과분석

바람자료를 이용하여 파랑을 모의한 결과 중 대표적인 사례를 <그림 6>~<그림 9>에 도시하였다. 그림에서 위쪽에 도시된 것은 모의기간 동안 여수기상대에서 관측된 풍향 및 풍속을 도시한 것이다. 아래쪽에 제시한 그림은 모의한 파고와 관측된 파고를 제시한 것이다. 그림에서 '●' 관측된 유의 파고, '○' 바람자료를 이용하여 모의한 유의파고를 나타낸다. 모의결과를 분석한 결과 바람과 지형의 상관성에 따라 특성을 갖는 것으로 나타났다.

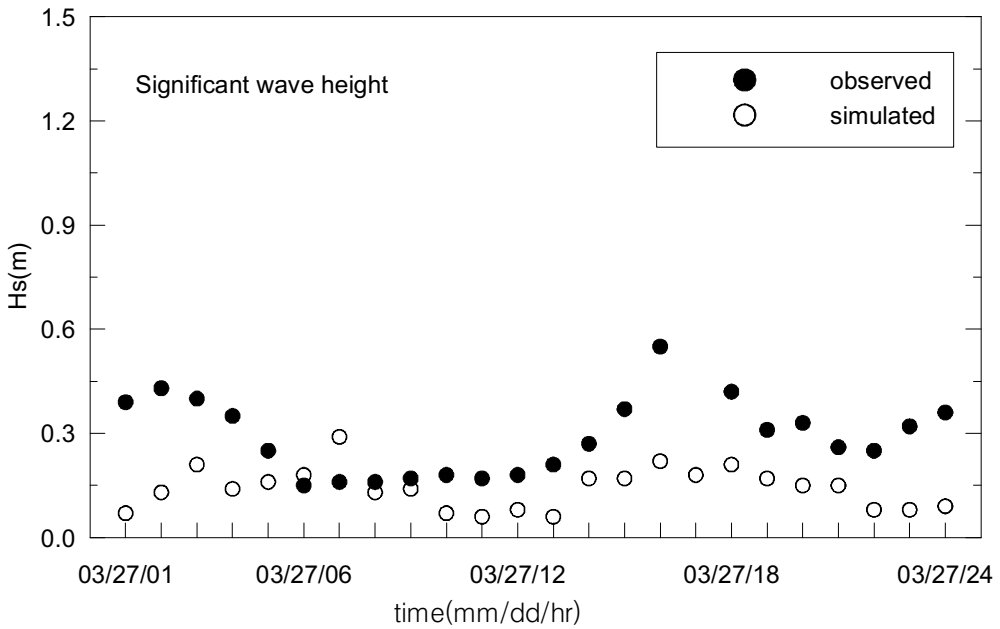
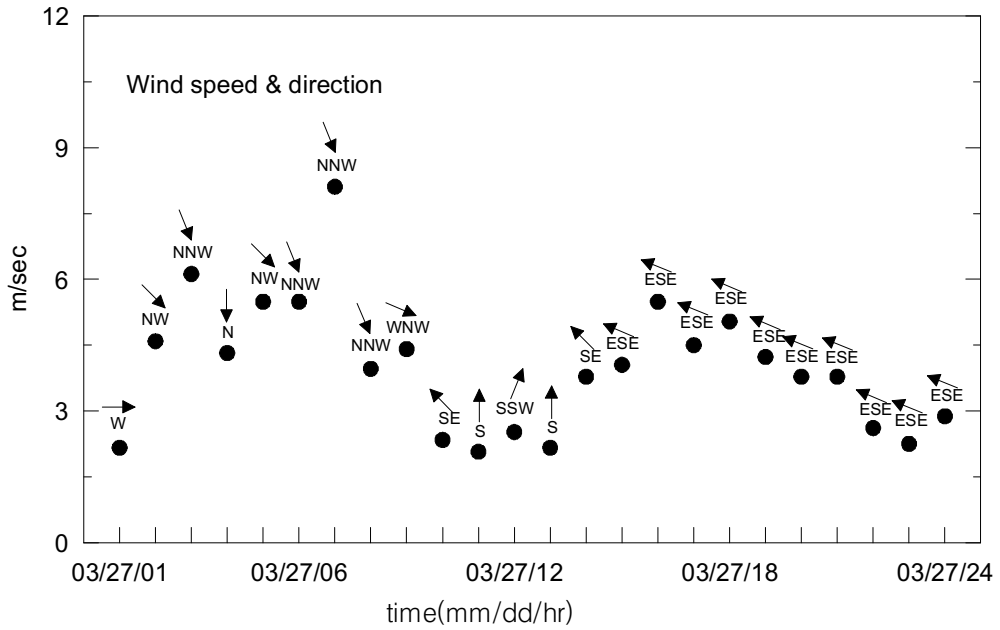


< 그림 6 > 지형방향과 주 풍향이 일치하는 경우 (2004년 4월 1일)

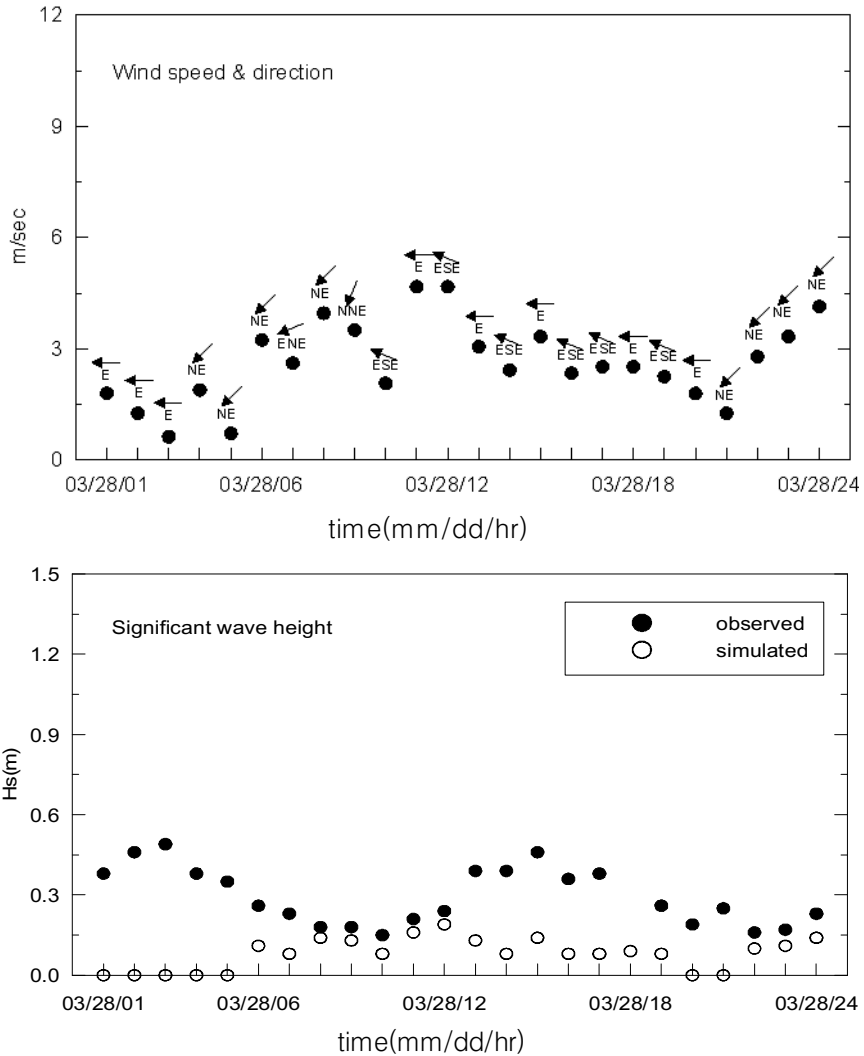


<그림 7> 지형방향과 주 풍향이 일치하는 경우 (2004년 4월 2일)

<그림 6>과 <그림 7>은 풍향과 지형의 방향이 일치하는 경우로 모의된 파고가 관측된 파고를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 이것은 모의 영역이 남북으로 긴 형상을 갖고 있어 파랑이 발달할 수 있는 충분한 취송거리를 확보할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 8> 지형방향과 주 풍향이 일치하지 않는 경우 (2004년 3월 27일)



<그림 9> 지형방향과 주 풍향이 일치하지 않는 경우 (2004년 3월 28일)

<그림 8>과 <그림 9>는 풍향과 지형의 방향이 일치하지 않는 경우로, 관측된 파고에 비해서 모의된 파고가 매우 작게 나타났다. 이것은 모의 영역이 남북으로 긴 형상을 갖고 있음에 비해 풍향은 동서 방향을 나타내고 있어, 바람에 의한 파랑의 발달을 제대로 재현하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 모의된 파고는 주로 풍속의 크기에 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 <그림 6>~<그림 9>에서 보는 바와 같이 풍속이 2m/s보다 작은 경우에는 파고를 모의하지 못하고 있다.

## V. 결론

연안에서의 각종 개발에 따른 시공 및 운영의 안전성을 확보하기 위해서 선행되어야 할 중요한 과제 중에 하나가 평상파랑을 산정하는 것이다. 평상파랑은 장기간의 파랑관측 자료를 분석하여 구할 수 있기 때문에, 우리나라처럼 장기간의 파랑관측 자료가 부족한 실정에서는 평상파랑을 산정하는 데 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 바람관측 자료는 비교적 장기간에 걸쳐서 보유하고 있고, 파랑을 발생시키는 외력이 바람인 점을 감안하여, 수치모형을 통하여 바람에 의한 파랑을 모의하고 이를 통한 평상파랑의 모의 가능성에 대해서 살펴보았다. 모의된 파고를 관측된 파고와 비교한 결과 지형의 방향과 풍향이 일치하는 경우에는 비교적 파고를 잘 재현해 내는 것으로 나타났다. 그러나 풍향이 지형의 방향과 일치하지 않는 경우에는 관측된 파고보다 파고가 작게 모의 되었다. 또한, 풍속이 일정 크기보다 작은 경우에는 파고를 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 바람자료를 이용하여 평상파랑을 산정시 지형의 방향과 주 풍향이 일치하는 경우에는 비교적 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있지만, 지형의 방향과 주풍향이 일치하지 않는 경우에는 실제의 파랑에 비해서 작은 파고를 산출할 것으로 판단된다.

해마다 발생하는 연안재해를 방지하고 피해를 경감시키기 위해서는 현 상태에서 사용할 수 있는 자료를 최대한 이용하여 정확한 파랑을 산출하는 것이 필요하다. 특히, 장기간의 파랑관측자료가 부족한 우리나라에서는 바람자료, 조류자료 및 외해입사파자료를 통합한 새로운 파랑산정체계를 구축하여야 하겠다.

## 참고문헌

- 김경호 · 이호진. 2007. 수공구조물 여유고 산정을 위한 파랑모형의 적용성 검토. 한국해양공학회지. 21(1): 25-30.
- 안경모 · 천제호. 2004. 장기 파랑측정자료를 이용한 평상파 산정 방법론. 한국 해안 · 해양공학회지. 16(3): 178-189.
- 안수환. 1976. 설계파 산정을 위한 조사연구 보고서. 항만청.
- 윤종태. 1999. 동해에서의 파랑추산을 위한 심해파랑 모형에 관한 연구. 한국해양공학회지. 13(2): 116-128.
- 이호진. 2004. 파랑추정에 미치는 조류의 영향. 충북대학교 공학박사학위논문. 38-60.
- 한국해양연구원. 2002. 광양항 3단계 1차 컨테이너터미널 축조공사 대안설계 해양조사보고서.
- Sverdrup, H. U., and Munk, W. H. 1947. Wind, Sea and Swell - Theory of Relation for Forecasting. *U.S. Navy Hydrogr. Office Pub. No. 601.*
- Wilson, B.W. 1965. Numerical Prediction of Ocean Waves in the North Atlantic for December

1959. *Deut. Hydrogr. Zeit.* 18(3): 114-130.
- The WAMDI Group. 1988. The WAM model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *J. Phys. Oceanogr.* 18: 1775-1810.
- Tolman, H.L. 1991. A Third-Generantion Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady and Inhomogeneous Depth and Currents. *J. Phys. Oceanogr.* 21(6): 782-797.
- Benoit, M., Marcos, F., and Becq, C. 1996. Development of a Third - Generation Shallow-Water Wave Model with Unstructured Spatial Meshing. Proc. 25th Int. Conf. *Coastal Eng.* ASCE: 465-478.
- Booij, N., Ris, R.C., and Holthuijsen, L.H. 1999. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions : 1. Model Description and Validation. *J. Geophys. Res.* 104(C4): 7649-7666.
- Ou, S.H., Liao, J.M., Hsu, T.W., and Tzang, S.Y. 2002. Simulation typhoon waves by SWAN wave Model in Coastal Waters of Taiwan. *Ocean Engineering.* 29: 947-971.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, IJ.G., Kieftenburg, A.T.M.M., and Kriezi, E.E. 2000. *SWAN Cycle III version 40.11 User Manual.* Delft Univ. of Technology.
- Ris, R.C. 1997. *Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas. PhD Thesis.* Delft Univ. of Technology.

---

**李昊振**: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 파랑추정에 미치는 조류의 영향, 2004. 2), 현재 충북대학교 토목공학부에서 강사로 재직 중이다. 주요 관심분야는 연안방재, 수공구조물 설계, 유사현상 등이며, 주요 논문으로 “파랑과 해안구조물의 상호작용에 관한 연구(2009)”, “작은 사면체형 소파블록의 안정성 평가(2009)”, “Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model(2010)” 등이 있다 (lhjce@chungbuk.ac.kr).

**全桂元**: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발, 2004. 2), 현재 강원대학교 방재전문대학원 부교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 풍수해 방재, 산지재해 방재, 자연재해관리 등이며, 자연재해란 무엇인가?(공저, 2008) 등의 저서와 주요 논문으로 “산악지역돌발홍수 기준수량 결정에 관한 기초연구(2010)”, “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구(2010)” 등이 있다 (kwjun@kangwon.ac.kr).

**吳賢植**: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 천해역에서의 파와 흐름에 기인한 해저관로 주변의 국부세굴폭의 특성, 2011. 2), 현재 충북대학교 토목공학부에서 강사로 재직 중이다. 주요 관심분야는 해안세굴, 하천구조물, 생태구조물 등이며, 주요 논문으로 “파랑하 해저관로 주변의 세굴폭에 영향을 주는 매개변수 분석(2009)”, “파랑에 의한 해저 매설관로 주변의 국부세굴 특성(2005)” 등이 있다 (octavius@nate.com).

투 고 일: 2011년 1월 11일

수 정 일: 2011년 2월 18일

게재확정일: 2011년 2월 19일

## A Study on Wave Simulation Using Wind Data

– Ungaged Bay –

Ho Jin Lee, Kye Won Jun, Hyun Sik Oh

Wave calculation is very an important thing to select operable wave condition for use in coastal and ocean desing or in marine operation planning. Wave measurement data which is measured over 10 years is needed to calculate wave correctly, but, there is few long-term wave measurement data in Korea. As long-term wind data is much more than wave data, in this study, wind data was used to simulate wave by numerical wave model. As a result, when the geographical direction of study area is similar to the direction of wind, the simulated wave coincide with the measured wave.

**Key words:** coastal, operable wave condition, wind data, numeircal wave model