

원격모니터링을 이용한 연속파랑관측에 관한 연구

신범식
가톨릭관동대학교 미래융합학과

A Study on Continuous long-term Wave Observation using Remote Monitoring System

Bumshick-Shin

Department of Future Convergence Technology, Catholic Kwandong University

요약 본 연구에서는 연안 환경에 대한 대표적인 지상 원격 관측 기기인 Ocean Radar를 이용하여 장기파랑관측을 수행하였다. 지상에 설치한 기기로부터 이루어지는 원격 관측은 소수의 현장 기기 개수로는 관측할 수 없는 넓은 범위의 해역을 동시에 관측할 수 있고 또한 높은 빈도의 지속적인 관측이 가능한 장점이 있다. 장기관측을 위한 Ocean Radar는 과거 지진해일에 의한 피해가 발생하고, 원자력 발전소가 위치한 한국 동해안의 삼척지역에 대해 장기관측을 수행하였으며, 원격관측의 적용성을 검토하기 위해 수압식 파고계를 설치하여 각각의 조사자료를 비교하였다.

원격파랑관측은 연구대상해역 전면에 독일 Helzel사에서 개발된 Array type의 HF-RADAR인 WERA (Wave Radar)를 2개소에 설치하여 자료를 취득하였으며, 장기간 연속된 관측된 자료의 취득률을 분석해본 결과, Ocean Radar가 설치된 두 Site의 중심에서 약 24km이며, 약 27km의 범위 내에서는 Wave 자료가 90% 이상 취득되었으며, 시계열로 분석한 결과, 결측된 시간이 전체 계측기간의 1% 미만이다.

직접관측방식인 수압식 파고계와 관측자료를 비교한 결과, RMS 편차는 20cm 이내이며, 상관계수가 0.84 ~ 0.87로 높은 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 따라서, 급회적용한 Ocean Radar는 기존의 파랑 계측 장비를 대체하여 장기간 면적 파랑 관측이 가능할 것으로 생각된다.

Abstract In this study, continuous long-term observation is implemented with an ocean radar. Ocean radar conducts remote observation (combined) with ground-based radars, which enable a series of simultaneous observations of an extensive range of the coast with high frequency. An ocean radar for continuous long-term observation is operated at Samcheok on the east coast of Korea. Samcheok experienced tsunami damage in recent years and is the location of a nuclear power plant. In order to examine the reliability of the ocean radar, a pressure-type wave gauge, ultrasonic wave gauge, and ocean buoy are installed for the purpose of data comparison and verification. The ocean radar used in this study is an array-type HF-RADAR named WERA (Wave Radar). The analysis of the data obtained from continuous long-term observations showed that the radar observations were in agreement with more than 90% of the wave data collected within a 25 km range from the center of two sites. Less than 1% of the entire observation data was unmeasured by the time series analysis. As a result of comparing the radar data with the direct observations made by the wave gauge, it was inferred that the RMS deviation is less than 20cm and the correlation coefficient was in the range of 0.84 ~ 0.87. Moreover, supported by such observations, a comprehensive monitoring system is being developed to provide the public with real-time reports on waves and currents via the internet.

Keywords : HF-Radar, Ocean Radar, Wave Observation, Coastal Disaster Prevention, long Period Wave

*Corresponding Author : Bumshick-Shin(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-10-9036-9616 email: sbs114@cku.ac.kr

Received November 21, 2017

Revised December 11, 2017

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

1. 서론

오래 전부터 고파랑에 의한 피해는 연안재해의 중요한 한 요소로서 취급되어져 왔다. 최근에는 이러한 고파랑의 피해가 장주기의 특성을 지닌 너울성 고파랑 현상으로 나타는 경우가 빈번하고 이상기후의 영향으로 인한 이벤트성 파랑으로서의 출현빈도도 증가되고 있다. 동일한 진폭의 단주기파랑에 비해 연안부근에서의 파에너지가 매우 크게 나타기 때문에 내습시 재산 및 인명피해의 규모도 커지게 되는 특성을 지니고 있다[1]. 특히 우리나라 동해안의 경우에는 너울성 고파랑의 내습빈도가 매년 계속적으로 증가하고 있는 상황이므로 너울성 고파랑 내습에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 장주기파랑에 의한 연안에서의 육상 피해 및 수난사고 예방에 기여하고자 동해안 지역으로 내습하는 파랑특성을 분석하였다. 기존의 단일 지점에서의 관측이 아닌 면적인 개념에서의 관측자료의 취득을 위하여 강원도 삼척시 임원항(Site A) 및 경상북도 울진군 후정해수욕장(Site B)부근에 Ocean Radar를 각각 설치하여 장기간의 연속파랑관측을 실시하였으며, 대상해역으로 내습하는 파랑특성을 분석하였다.

2. 연구내용

2.1 Ocean Radar

연안에 설치하는 해수면 레이더는 육지 기반의 기법으로, 거친 해수면에서 발생하는 산란(scattering)을 이용하여 해양 역학에 의해 발생하는 도플러 시프트(Doppler shift)라고 할 수 있는 에코를 구한다. 산란은 전파와, 그와 같은 방향으로 진행하며 전파 파장의 절반인 중력과 사이에서 우세하게 나타나는 브래그 상호작용(Bragg interaction)임이 실증되었다[2]. 여기에서 브래그 상호작용에서는 에코 스펙트럼에서 두 개의 강력한 일차 순서 라인이 제공된다. 하나는 관측국에서 나와 방사상으로 이동하는 공명 중력파에 기인하고, 또 하나는 관측국으로 이동하는 공명 중력파에 기인한다. 정수면(still water)에서 이러한 라인들에 발생하는 도플러 시프트는 심해 중력과 분산과 관련성이 있다.

$$c = \sqrt{g/k} \quad (1)$$

여기에서 k 는 중력파의 파수이고, g 는 중력 가속도를 말한다. 관측국에서 방사상 방향에 위치한 성분과 관련하여 해수(해류)의 움직임이 매우 큰 경우, 추가적으로 도플러 시프트가 발생하여 앞서 언급한 내용이 명백해지며, 두 개의 일차 순서 라인에 대해 관측된 도플러 시프트 주파수는 다음과 같다.

$$f_D = \pm \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} - \frac{v_r}{\lambda} \quad (2)$$

여기에서 λ 는 해수면 중력파의 파장이고 v_r 은 표층해류의 방사상 성분이다. 일차 순서 스펙트럼 라인은 일반적으로 대역 내의 소음보다 30db 더 높으며, 이중 산란 프로세스에서 발생하는 이차 순서 에코 에너지보다는 일반적으로 10db 더 높다[3]. 그러므로 정점을 식별하고 주파수를 계산할 때에는 적절한 유연적응성(robustness)과 신뢰성을 지닌 자동제어 기법에 따른다. 상황을 모니터링 때에는 각 관측국을 약 5분 동안 정상 가동하여 에너지 스펙트럼이 계산되는 시계열을 생성한다.

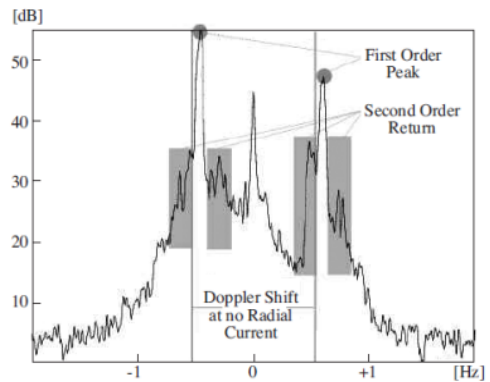


Fig. 1. Typical Spectrum from a WERA system

각 레이더 관측국에서 맵핑하고자 하는 대규모 지역에 대한 각 에코 픽셀의 방사상 거리와 방위각을 확인할 수 있는 경우에는 표층해류의 방사상 성분들을 조합하여 각 위치에서 벡터를 찾을 수 있다. 각 관측국에서는 약 60°의 방사각 범위와 반경 150km 범위 내에서의 방사상 파랑정보를 기록할 수 있으며, 음영 부분은 관측국에서 측정한 방사상 성분 데이터가 중복되어 표층해류 벡터를 계산할 수 있는 구역이다. 일차 순서 정점 주위의 측파대 내에서 발생하는 이차 순서 에너지를 사용하여 파도 파라미터를 산정할 수 있으며, 이차 순서 에너지가 소음보

다 10db 높은 매우 “깨끗한” 스펙트럼인 경우 역산 해석 (inversion analysis)을 실시하여 다방향과 스펙트럼을 찾는 것이 가능하다[4]. 일반적으로 완전한 다방향과 스펙트럼을 해석할 때에는 표층해류 벡터를 추출할 수 있는 범위의 약 절반까지 픽셀을 출력하는 방식으로 실시하고 유의미한 파고에 대해서는 보다 유연적응성이 높은 해석이 가능하다. 이러한 해석 결과를 표층해류에 대해 유사하게 맵핑된 지역에서 출력되는 개별 픽셀에 정기적으로 사용하며[5]~[8]. 이 알고리즘은 도플러 스펙트럼의 이차 순서 대역과 일차 순서 대역 내의 에너지 비율에 의존성이 있다.

2.2 대상해역 선정

본 연구의 대상해역은 주요 발전시설의 건설과 향후 개발계획이 진행되고 있으며, 관광산업개발로 인한 여행객이 증가하고 있는 동해안의 강원도 삼척시 전면해역으로 선정(Fig. 1)하였으며, 관측장비의 설치 지역은 관측되는 자료의 신뢰성, 장비의 가동성 및 고정도 관측자료의 취득을 위하여 충분한 검토를 통하여 최종부지를 선정하였다. HF-RADAR 정보취득 방식에 따라 해안의 형상이 곡의 형상을 취하고 있는 지역을 선정하였고 HF-RADAR 설치를 위한 총 5곳의 후보지역에 대해서 SDR-IQ scanner를 사용한 전파환경조사를 수행하여 설

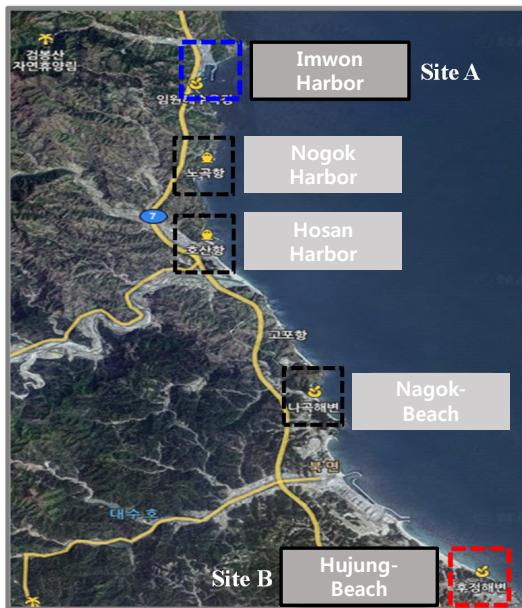


Fig. 2. Installation Candidate Sites

치장소를 조사하였으며, 조사 대역인 24MHz 대역에 전파방해가 없는 것을 확인하였고 주변의 기반시설, 접근의 용이성, 향후 개발 유무 등을 고려하여 선정하였다.

최종부지 선정을 위하여 5곳의 설치 후보지역에 대한 세부항목 평가를 실시하여 적합지역 2곳을 선정하였다. 향후 설치가 완료되었을 경우 얻을 수 있는 자료의 취득 범위를 사전에 모의하였으며, 관측장비가 설치되는 최종 부지는 후보 지역 중에 가장 북쪽에 위치한 임원항(Site A)과 가장 남쪽에 위치한 후정리 해변(Site B)이고 선정된 지역은 Ocean Radar를 설치할 경우 관측 범위가 가장 넓은 것으로 나타났다.

2.3 Ocean Radar와 관측범위

본 연구에 사용된 장비인 WERA(WavE RADar)는 2000년 독일 Helzel사에서 개발된 Array Type의 HF-RADAR로 24.525MHz의 주파수 대역을 사용하였다. 연속된 장기간의 관측자료는 각각의 Site 중심에서 약 24km이며, 약 27km의 범위에서는 Wave 자료가 90% 이상 취득 되었다. 각 Site는 4기의 송신기와 8기의 수신기로 구성되어 있는 8 channel 시스템이다. Site A의 중심빔 방위각은 95.8°이며, Site B의 중심빔 방위각은 37.3°로 중심각을 기준으로 ±60°방향에 관측된다. 각 Site는 30분 주기로 관측이 되고 Wave와 Current data가 생성되며(설정에 따라 취득시간간격은 변경할 수 있음), Wave는 최대 약 27km, Current는 최대 약 48km의 관측 범위를 보여주고 있으며, 150KHz의 대역폭을 사용하여 1km 간격의 격자 해상도를 갖는다. HF-RADAR는 Cross

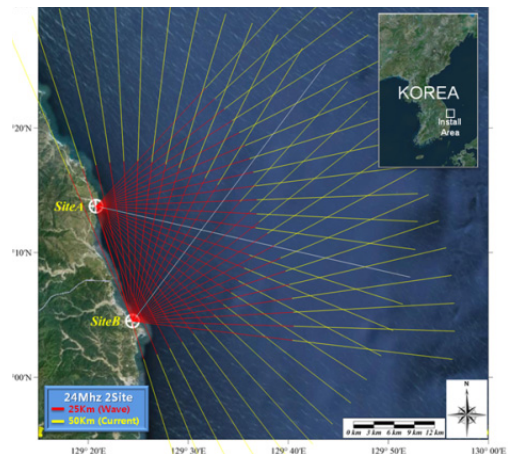


Fig. 3. Installation Sites and Observation Area

Loop 형식(안테나 한개)과 Array 형식(안테나가 여러개 나열되어 있는 형식)이 있는데 Array 형식이 수신 안테나가 넓게 퍼져있기 때문에 반사파의 입사방향을 정확하게 검출할 수 있어서 파랑과 해류(유향 및 유속) 관측 정확도가 높다. 공간분석능력에서 Cross Loop 형식은 관측영역 전체의 평균적인 파랑만을 관측 할 수 있으나 Array 형식은 관측영역에서 세분화된 관측데이터를 취득할 수 있다. HF-RADAR 시스템으로 관측한 Wave 및 Current 등의 자료는 실시간으로 확인이 가능하며 관측된 자료는 원하는 시간(UTC기준)과 자료(Current, Wave, Wind)를 선택하면, HF-Radar 시스템으로 관측한 전 기간 중 원하는 시간에 대하여 확인이 가능하며, 선택된 시간과 자료가 겹쳐진 경우에는 최근 관측된 자료가 나타난다.

3. 연속파랑관측 결과

3.1 자료의 검증

본 연구에서는 2012년 12월부터 2013년 1월까지 HF Radar로 관측한 유의파고 자료와 동기간 삼척시 호산항 전면해역에 Nortek사의 AWAC(Acoustic Wave and Current profiler)을 계류하여 측정한 유의파고를 이용하여 월별로 분석하였다.

AWAC은 AST(Acoustic Surface Tracking)의 특성을 가지고 있으며, 정밀도는 <math> < 1\%/1\text{cm}</math>이다. 비교자료들은 각 측정기기의 오차를 최소화하기 위해 주성분 분석(Principal Component Analysis)을 이용하여 회귀분석(Regression analysis) 하였다. AWAC의 계류위치는 동해 연안의 수심이 동쪽으로 갈수록 급격히 깊어지기 때문에 현실적으로 해안에서 5km를 벗어나기 힘들며, 이로 인해 본 연구해역에서 높은 GDOP (Geometric Dilution Of Precision) 영역에 위치하게 된다. 따라서 HF Radar로 관측된 유의파고를 추출할 때 GDOP값이 작은 영역을 선택하였다. HF Radar와 파고계로 관측된 자료에 대한 주성분 분석결과를 보면, 2012년 12월은 회귀선의 기울기가 약 1.4로 AWAC의 유의파고가 HF Radar로 관측된 유의파고보다 약 40% 크게 나타났으며, 절편은 거의 0에 가까우며, RMS 편차는 약 19cm로 작은 값을 보였고 상관계수는 0.84로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 2013년 1월의 회귀선은 기울기가 약 1.33으로 AWAC의 유의파고가 HF Radar로 관측

된 유의파고보다 약 33% 크게 나타났으며, 절편은 거의 0에 가까우며, RMS 편차는 약 18cm로 작은 값을 보였고 상관계수는 0.87로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

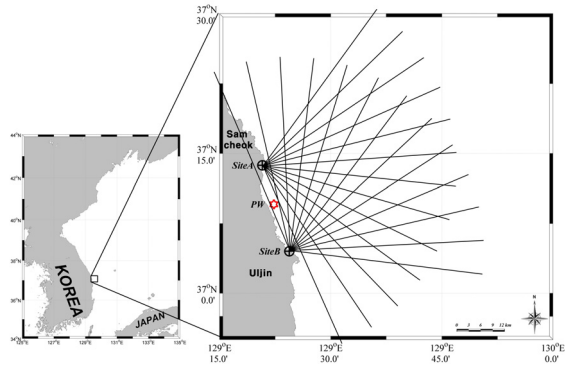


Fig. 4. Installation Point of AWAC

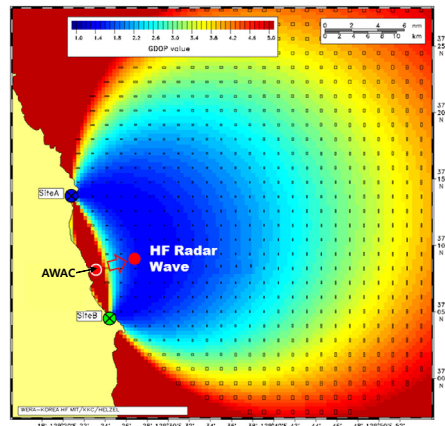


Fig. 5. Wave Data Extraction Point of HF-RADAR

3.2 연속파랑관측 및 면적파랑관측

2012년 3월 부터 2013년 5월까지 취득된 자료를 분석하였다. HF-RADAR의 고정밀도 관측영역(2site의 중심에서 약 24km이며, 약 27km의 범위)내에서 유의파고는 1m ~ 6m의 범위를 나타내었으며 유의파주기는 10 ~ 15sec가 나타났다. 이는 AWAC의 관측값과 비교하였을 때 비교적 동일한 경향이였으며, 면적인 측면에서는 Data 추출영역 및 임원항과 후정해변 인근에서 파고가 급변하는 하는 것을 확인하였다.

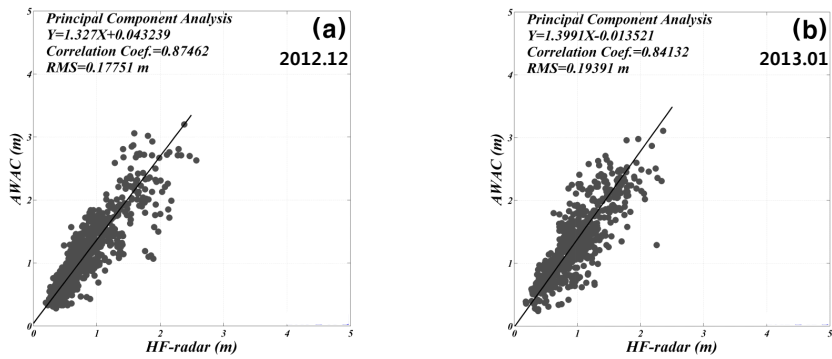


Fig. 6. Correlation Between AWAC and HF-Radar Data

Table 1. Results of Long-Period Wave Data Analysis

Observation Time (2012)	Significant Wave Height(m)	Significant Wave Period(sec)	Observation Time (2013)	Significant Wave Height(m)	Significant Wave Period(sec)
2012. 3. 12 ~ 13	2 ~ 5	10 ~ 13	2013. 1. 15 ~ 16	1 ~ 3	10 ~ 14
2012. 4. 03 ~ 04	2 ~ 6	12 ~ 15	2013. 1. 17 ~ 18	1 ~ 2	10 ~ 11
2012. 4. 19 ~ 20	2 ~ 4	10 ~ 15	2013. 1. 27 ~ 28	1 ~ 2	10 ~ 13
2012. 7. 14 ~ 15	1 ~ 3	11 ~ 13	2013. 2. 08 ~ 09	1 ~ 2	10 ~ 14
2012. 10. 11 ~ 13	1 ~ 2	10 ~ 12	2013. 3. 02 ~ 03	1 ~ 2	10 ~ 14
2012. 11. 01 ~ 03	1 ~ 3	10 ~ 12	2013. 3. 13 ~ 14	1 ~ 2	10 ~ 11
2012. 12. 06 ~ 07	1 ~ 3	10 ~ 11	2013. 4. 07 ~ 08	1 ~ 4	10 ~ 13
2012. 12. 11 ~ 12	1 ~ 2	10 ~ 12	2013. 5. 01 ~ 02	1 ~ 2	10 ~ 11

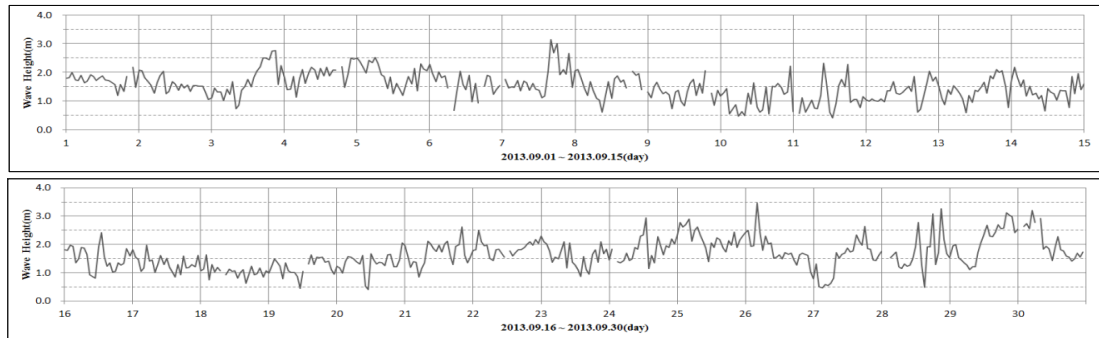


Fig. 7. Results of Long-Period Wave (Time Series)

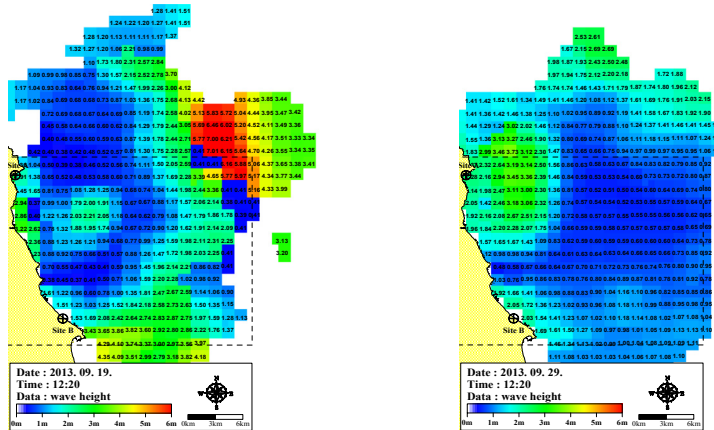


Fig. 8. Wave Height Distribution

4. 결론

본 연구에서는 HF-RADAR를 이용한 연속파랑관측 자료를 분석하였으며, 관측지점 전면해역에서 파랑이 급변하는 현상을 확인할 수 있었다. 이는 대상해역 내습하는 파랑이 해저지형의 형상으로 인하여 발생된 이상현상으로 사료되며, 외해에서 내습하는 고파랑과 수심과의 연관성에 대한 좀 더 면밀한 분석을 위하여 HF-RADAR 및 AWAC을 이용한 동일시간의 장기적인 파랑관측이 수행되어야 한다고 판단된다. 관측된 HF-RADAR 자료는 향후 주기 및 파향 자료와 함께 장주기성 파랑의 발생원인 및 자연피해를 예측하기 위한 파랑의 발생, 전파, 소산 및 성분파간의 비선형에너지 교환 등 파랑의 전파현상과 비선형 상호작용에 의한 에너지 수송을 직접 계산할 수 있는 모델을 구축하고 천해역에서는 바람과 해저면 및 해류조건, 굴절, 회절, 반사등 파랑변형에 대한 현상의 시뮬레이션이 가능한 모델을 이용한 수치모의 자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

from the HF Coastal Ocean Surface Radar, *Canadian Journal of Remote Sensing*, (28), pp. 385-393, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.5589/m02-031>

신 범 식(BumShick Shin)

[정회원]



- 2002년 2월 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2012년 2월 : 첨단해양공간개발연구센터 선임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 미래융합학과 조교수

<관심분야>

해양환경, 해안침식, 해양에너지, 해양구조물

References

- [1] Gyu-Tae Shim, Hyung-Min Bae, Bum-Shick Shin, Kyu-Han Kim, "An Analysis on the Applicability of Ocean Radar for Wave Energy Analysis", *Korean Society of Civil Engineers Annual Conference*, pp. 1895-1898, 2013
- [2] Crombie, D.D., "Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s", *Nature*, 175, pp. 681-682, 1955.
DOI: <https://doi.org/10.1038/175681a0>
- [3] Barrick, D.E., "Remote sensing of sea state by radar, In Remote Sensing of the Troposphere", ed. V. E. Derr, U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC, 1972.
- [4] Wyatt, L.R., G.J. Holden, "HF radar measurement of multimodal directional wave spectra", *Global Atmosphere and Ocean System*, 2, pp. 265-290, 1994.
- [5] Barrick, D.E. "Extraction of wave parameters from measured HF sea echo Doppler spectra", *Radio Science*, 12, pp. 415-424.
DOI: <https://doi.org/10.1029/RS012i003p00415>
- [6] Graber, H.C., M.L.Heron, "Wave height measurements from HF radar", *Oceanogr.*, 10, pp. 90-92, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.1997.32>
- [7] Heron, S.F., M.L. Heron, "A comparison of algorithms for extracting significant wave height from HF radar ocean backscatter spectra", *J Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, pp. 1157-1163, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<1157:ACOAFE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<1157:ACOAFE>2.0.CO;2)
- [8] Heron, M.L., A.Prytz, "Wave height and wind direction