

파랑 스펙트럼 재현 기법 개발의 필요성

Water
for future
학술/기술 기사
03



안성호

Sandia National Laboratories
Water Power Technologies
Postdoctoral Appointee
sahn@sandia.gov

1. 머릿말

해수면 변위의 시계열 기록을 주기 및 방향별 파랑의 에너지 분포로 나타내는 2차원 (주기-방향) 파랑 스펙트럼은 해양의 극한 환경 분석, 해양 및 연안 구조물 설계, 항해를 포함한 해양 과학 및 공학 연구에 핵심 자료로 활용된다. 또한 파랑 스펙트럼은 파랑 자원 특성화 및 평가, 에너지 계획 및 개발을 포함한 광범위한 파력 발전 연구에 기초 자료로 사용된다 (U.S. Army Corps of Engineers, 2008). 실해역의 2차원 파랑 스펙트럼 자료는 해상 부이의 관측으로부터 얻을 수 있다. 하지만 해상 부이의 관측은 설치 지점에 제한되어 있고 관측 기간은 기후 변화에 따른 장기간 변동 추세나 극한 해양 환경 등을 분석하기에 불충분하여 연구의 자료로 활용하는데 제약이 크다 (Ahn & Neary, 2020; Goda, 2010). 이에 광범위한 해역에 장기간 2차원 파랑 스펙트럼을 확보하기 위해 Wave Watch III 나 Simulating WAVes Nearshore (SWAN)과 같은 제3세대 파랑 추산 모델을 개발하고 관측 자료에 정확도를 검증하여 장기간 파랑 스펙트럼 추산 자료를 생산한다 (Det Norske Veritas AS, 2014). 그럼에도 불구하고, 고해상도 파랑 추산 모델에서 계산된 장기간 2차원 파랑 스펙트럼은 자료의 용량이 매우 크기 때문에 제한된 지

점을 대상으로만 저장되고 있다 (IEC, 2015). 예를 들면, 한 지점에서의 40 년의 시간 단위 2차원 파랑 스펙트럼은 5 GB로, 0.5° (약 50 km) 공간격자의 전지구 파랑 모델에서 계산된 모든 격자의 2차원 파랑 스펙트럼은 1,300 TB의 저장 공간을 필요로 한다. 이런 이유로 대부분의 파랑 추산 모델은 2차원 파랑 스펙트럼에서 계산된 유의파고, 첨두 주기, 첨두 방향 등의 파랑 매개 변수만을 모든 계산 격자에 대하여 출력하고 저장하고 있다.

대부분의 해역에서 장기간 2차원 파랑 스펙트럼 자료가 없기 때문에, 스펙트럼 자료가 연구에 필요할 경우에는 위와 같은 파랑 매개변수의 함수로 정의된 Pierson Moskowitz (PM)나 Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)와 같은 매개변수 스펙트럼 모델을 이용하여 스펙트럼을 재현해야 한다 (Hasselmann et al., 1973; Pierson & Moskowitz, 1964). 일정 기간 이상의 관측 스펙트럼

자료가 존재하는 해역에 대해서는 위와 같은 매개변수 스펙트럼 모델을 이용하여 재현된 스펙트럼을 관측 스펙트럼에 보정하여 사용한다. 하지만 관측 스펙트럼 자료가 없는 해역에 대해서는 PM과 JONSWAP의 모수들을 임의로 가정하기 때문에, 시공간적으로 큰 변화를 보이는 파랑 스펙트럼 재현에 불확실성이 증가하게 된다 (Dean & Dalrymple, 1991).

해양 기후 변화, 해양 재난, 해양 재생 에너지, 탄소 중립 등 해양 및 연안의 파랑에 대한 연구의 수요가 증가함에 따라, 기존 매개변수 스펙트럼 모델의 불확실성을 줄이고 정확한 파랑 스펙트럼 재현 기법 개발의 필요성이 점차 증가하고 있다. 본문에서는 지금까지 널리 사용되어 온 기존의 매개변수 스펙트럼 모델의 한계를 극복하기 위해 새롭게 개발한 파랑 스펙트럼 재현 모델을 소개하고자 한다.

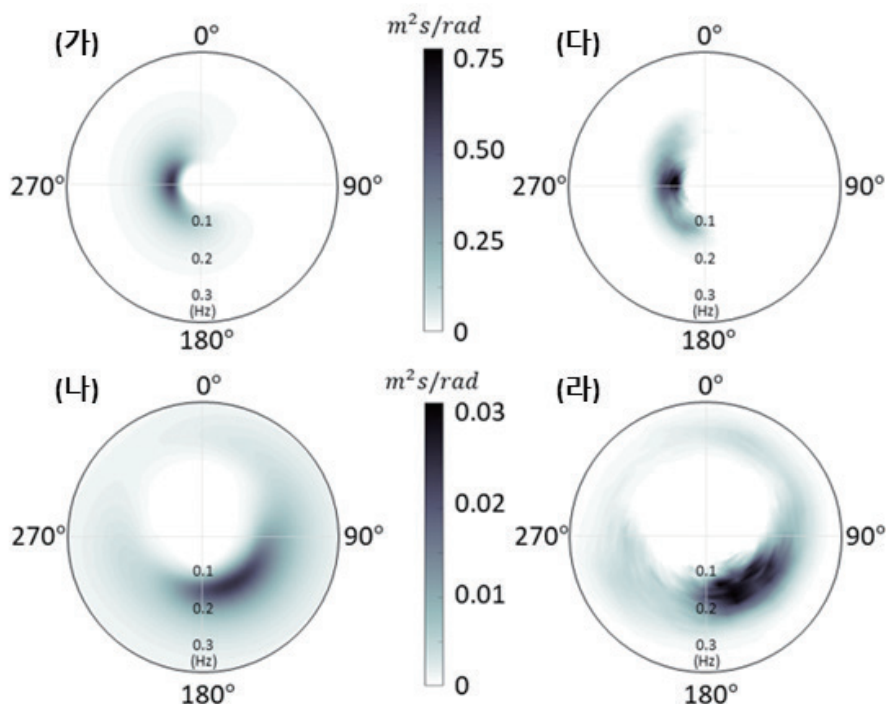


그림 1. (가) NDBC 46089 12년 평균 관측 스펙트럼, (나) NDBC 42012 12년 평균 관측 스펙트럼, (다) NDBC 46089 12년 평균 재현 스펙트럼, (라) NDBC 42012 12년 평균 재현 스펙트럼.

2. 2차원 파랑 스펙트럼 재현 모델 개발

기존의 매개변수 스펙트럼 모델은 유의파고로 표현되는 파랑의 에너지를 첨두 주기를 중심으로 주기대에 연속적으로 분포시키는 반면, 새롭게 개발한 모델에서는 첨두 주기-방향과 평균 주기-방향에 파랑의 에너지를 1:1로 분포시킨다. 위와 같은 시계열 파랑 매개변수를 이용하여 특정 기간 동안의 시간 단위 파랑의 에너지를 각각의 첨두 주기-방향과 평균 주기-방향의 파랑 성분으로 양분하여 누적 분포시켜 시간 평균된 2차원 파랑 스펙트럼을 재현하였다. 그림 1에서는 미국 서해(NDCB 46089)와 멕시코만의(NDBC 42012) 해상 부이의 관측 스펙트럼과 새로운 모델로 재현한 스펙트럼을 비교하였다. 전체적으로 새로운 모델은 서로 다른 해역의 관측 스펙트럼의 에너지 분포를 성공적으로 재현하고 있다. 새로운 모델은 미국 서해의 파랑 기후를 지배하고 있는 북태평양 너울성 파랑(0.08-0.10Hz)의 좁은 주기-방향의 에너지 분포를 재현하고 있으며, 멕시코만의 파랑 기후를 지배하고 있는 풍파(0.14-0.2Hz)의 넓은 주기-방향의 에너지 분포를 재현하고 있다.

새로운 모델에서는 시간별 파랑의 에너지를 첨

두 주기-방향과 평균 주기-방향의 파랑 성분에 양분하기 때문에 상대적으로 좁은 확산 분포를 보이는 첨두 주기-방향 파랑 성분의 에너지를 관측 값보다 높게 재현하는 오차가 발생한다. 기존 매개변수 모델의 특성화되지 않은 불확실성과 달리 이 오차는 미국 전체 해상 부이의 관측 스펙트럼과 재현 스펙트럼 사이에서 체계적이고 획일적으로 발견되었기 때문에 스펙트럼 재현의 불확실성은 상대적으로 낮아지게 되었다. 첨두와 평균 파랑 성분 사이의 다양한 에너지 분포 비율을 실험한 결과, 1:1 비율이 가장 작은 재현 오차를 보였다. 첨두 파랑 성분에 가중된 비율을 사용하면 첨두 주기-방향에 에너지 치우침 현상이 증가하고 평균 파랑 성분에 가중된 비율을 사용하면 인위적인 에너지 Peak이 생성된다. 또한 평균 주기-방향의 파랑은 물리적으로 첨두 주기-방향의 파랑보다 더 많은 에너지를 포함할 수 없기 때문에 1:1 에너지 분포가 이상적인 비율이 된다.

새로운 모델이 관측 스펙트럼의 에너지 분포를 얼마나 잘 재현하는지 알아보기 위해 파랑 에너지 분석의 국제표준에서 제안한 3개의 스펙트럼 매개변수(파력 에너지, J , 에너지 주기, T_e , 스펙트럼

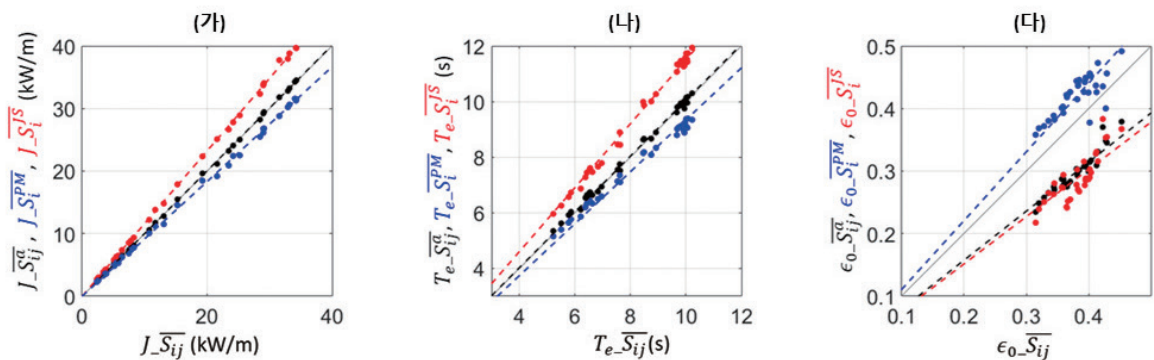


그림 2. 미국 33개 NDBC 해상 부이의 관측 스펙트럼(x축)과 재현 스펙트럼(y축: 검은색 - 새로운 모델, 파란색 - PM, 빨간색 - JONSWAP)에서 계산된 (가) 파력 에너지, J (나) 에너지 주기, T_e ; (다) 스펙트럼 폭, ϵ_0 .

폭, ϵ_0)를 계산하여 그림 2에 비교하였다. 33개의 미국 NDBC 해상 부이를 대상으로 새로운 모델, PM, JONSWAP 모델을 이용하여 시간 평균된 스펙트럼을 재현하고 3개의 스펙트럼 매개변수를 계산하여 관측 스펙트럼으로부터 계산된 매개변수를 비교하였다. JONSWAP 모델의 Peak 향상 계수는 가장 일반적으로 사용되는 3.3으로 가정하였다.

파력 에너지 (J)와 에너지 주기 (T_e)를 비교한 결과, 새로운 모델에 의해 재현된 스펙트럼에서 계산된 값이 관측 스펙트럼의 값과 가장 작은 오차를 보이고 있다. PM은 단주기 풍파가 지배하는 해역에서는 비교적 높은 정확도를 보이지만 주기가 긴 장주기 너울성 파랑에 노출된 해상 부이에서는 오차가 증가하는 결과를 보여주고 있으며, JONSWAP은 주기가 굉장히 긴 극한 파랑을 대상으로 정의되었기 때문에 시간 평균된 스펙트럼에서는 전체적으로 에너지를 높게 재현하는 결과를 보여준다 (ISO, 2015). 새로운 모델에 의해 재현된 스펙트럼은 관측 스펙트럼보다 상대적으로 좁은 스펙트럼 폭(ϵ_0)을 보여주고 있지만 33개의 해상 부이에 대하여 그 결과가 높은 상관 계수를 갖고 있기 때문에 스펙트럼 폭 재현의 일관된 편향성을 선형으로 보정할 수 있다.

새로운 모델이 시간 평균된 스펙트럼 재현에 우수한 성능을 보이는 것은 그 형상이 PM과 JONSWAP 스펙트럼의 사이에 있기 때문이다. 새로운 모델의 에너지 분포 비율을 조정하여 첨두 주기에 에너지 분포 비율을 높이면 재현 스펙트럼이 JONSWAP에 가까워지며, 반대로 평균 주기에 에너지 분포 비율을 높이면 PM에 가까워진다. 새

로운 모델은 첨두 주기와 평균 주기에 에너지를 1:1 분배하는 방식으로 JONSWAP의 Peak 향상 요소를 반영하여 너울성 파랑의 특성을 고려하고 PM이 우수성을 보이는 풍파 재현의 특성을 동시에 고려하고 있다.

3. 맺은말

최근 탄소 중립, 기후 변화, 해양 재생 에너지 개발에 대응하기 위해 세계의 다양한 연구 기관에서 고해상도 장기간 파랑 추산 자료를 생산하고 있지만 저장 공간 부족, 높은 유지 관리 비용 등의 이유로 유의파고, 첨두 주기 등의 기본적인 파랑 매개변수만을 출력하고 있다. 한국을 포함한 세계의 많은 해역에서 장기간 2차원 파랑 스펙트럼 자료의 확보는 여전히 어려운 상황이다. 이런 해역에서는 상대적으로 접근이 용이한 파랑 매개변수 기반의 매개변수 스펙트럼 모델이 파랑 스펙트럼 자료를 확보할 수 있는 실용적인 대안책이기 때문에 기존 매개변수 스펙트럼 모델의 정확도를 높이고 새로운 모델을 개발하는 노력이 필요하다. 기존의 PM과 JONSWAP 모델이 해양 및 해안 공학의 발전에 기여한 바는 의심의 여지가 없지만 관련 연구 및 개발에서의 무분별한 사용은 지양해야 한다고 생각한다. 본문에서 소개한 새로운 모델은 기존의 우수한 매개변수 스펙트럼 모델들의 장점을 반영하여 2차원 스펙트럼 재현의 오차를 줄이고자 개발되었다. 장기간 고해상도 파랑 추산 자료의 접근성이 증가함에 따라 이 모델의 적용성도 함께 증가할 것으로 생각된다.

참고문헌

- Ahn, S., & Neary, V. S. (2020). Non-stationary historical trends in wave energy climate for coastal waters of the United States. *Ocean Engineering*, 216(May), 108044. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108044>
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. (Advanced Series on Ocean Engineering, Ed.). World scientific 2.
- Det Norske Veritas AS. (2014). *Recommended Practice—Environmental Conditions and Environmental Loads; DNV-RP-C205*. Oslo, Norway.
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol.33 (3rd ed.). World Scientific Publishing Ltd.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Ergänzungsheft 13*, No. A.
- IEC. (2015). *International Standard, Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 101: Wave energy resource assessment and characterization*, IEC 62600-101: Edition 1.0. Geneva, Switzerland.
- ISO. (2015). *Petroleum and natural gas for offshore structures — Part 1: Metocean design and operating considerations (Vol. 2014)*. Switzerland.
- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S . A . Kitaigorodskii. , *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5181-5190.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2008). *Coastal Engineering Manual*, 1110-2-1100, Part II (Vol. 1100).