

우리나라 연안의 너울성 파도 분석과 원인규명 방법 The analysis and cause tracking method for the swell-generated waves in Korea

장복진¹, 여운광², 이종국³, 박광순⁴

Bok Jin Jang¹, Woon Kwang Yeo², Jong Kook Lee³, Kwang soon Park⁴

1. 서 론

우리가 일반적으로 해안에서 볼 수 있는 파랑의 주기는 수초~20초 정도의 주기를 가지고 있다(안 등, 2002). 이 중 바람에 의한 풍파는 4~8초 정도이고, 너울이 약 8~20초의 주기를 가지고 있다(김, 1998). 너울은 이처럼 풍파보다 긴 주기와 파장을 가지고 있어 천해역에서 침식이나 퇴적 등 지형변화에 풍파나 조석보다 큰 원인이 되며(Jing and Ridd, 1996) 항만의 하역 활동과 선박운행 등을 방해하거나 연안지역에서 인명사고의 원인이 되기도 한다(장, 2007). 국내에서도 이 같은 너울에 의한 피해사례는 매해 적지 않게 발생하고 있다.

너울의 특성을 분석하고 그 원인을 규명하는 연구는 장기간에 걸친 파랑과 바람 등의 관측과 주변외해의 기상자료와의 거시적인 검토가 필요하기 때문에 활발한 연구가 이루어지기 힘들었다. 그 동안의 너울에 관한 연구를 정리하면, Barber와 Ursell(1948)은 폭풍으로부터 발생한 풍파가 긴 거리를 이동하면서 너울로 전파되며, 이 너울의 이동거리를 너울의 주파수와 시간 에너지 밀도함수로 결정하였다. 이후 Muck 등(1963), Snodgrass 등(1966)과 Cartwright 등(1977)은 이 방법을 이용하여 너울의 이동과 원인에 대한 후속 연구를 이어갔다. Snodgrass 등(1966)은 뉴질랜드 서쪽 바다의 폭풍에 의해 발생한 15~20초의 주기를 가진 너울이 뉴질랜드에서 알래스카까지 적도지역의 맞바람이나 강한 유속에도 아랑곳하지 않고 전파됨

을 알아냈다. 또한 너울 관측자료에서 너울의 주기와 발생시각을 이용하여 이동거리를 구한 그래프를 제시하였다. Marshall과 Kathryn(1984)은 북동 태평양에 8개의 해상부이로부터 관측된 자료를 통하여 너울의 전파(이동거리)를 선형파이론으로 계산하고 기상학적 폭풍우의 위치와 비교적 일치하고 있음을 확인한 바 있다.

최근에는 점점 더 발전하고 있는 현장관측기술과 전 지구적인 기상자료를 인터넷을 통해 손쉽게 획득할 수 있게 됨에 따라 과거에 비해 많은 연구여건이 개선되었다. 본 연구에서는 너울에 대한 보다 구체적인 정확한 분석과 원인규명을 위해 국내의 너울 피해의 한 사례를 중심으로 너울을 체계적으로 분석하고 그 원인을 규명하는 방법을 제시하였다. 분석 사례는 2008년 2월 23일부터 26일까지 동해안과 남해안에 발생한 너울이며, 이 너울성 파도는 24일 강릉시 안목항 방파제에서 인명사고를 일으켰던 너울이기도 하다.

2. 이론적 배경

2.1 너울의 개요

파랑은 해수면에서 바람에 의해 발생되며 바람에 직접 영향을 받는 풍파와 이 풍파가 전해져 바람이 불지 않는 장소에 도달하는 너울로 구분할 수 있다(안 등, 2002). 너울은 이처럼 바람에 의한 파랑이 또 다른 해역으로 전파되거나 혹은 풍랑이 발생한 해역에서 바람이 급격히 약화된 후에 여전히 남아있는

1 발표자: (주)데이타피씨에스 부설연구소 차장, 공학박사
2 명지대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사
3 주)데이타피씨에스 부설연구소 소장, 공학박사
4 한국해양연구소 연안방재연구사업단, 단장

풍파를 말한다. 너울은 풍파와 비교하여 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 너울의 주기는 풍파보다 긴 8~20초가 보통이며 파고는 낮다. 이 때문에 풍파의 파고의 파형경사가 0.03 이상인 것에 비해 너울의 파형경사는 0.005~0.02 정도이다(Goda, 2000). 둘째, 너울은 파봉이 둥글고 매끈하며 파의 봉우리가 길게 이어져 있으며 진행방향의 흐트러짐이 적다(Goda, 2000). 셋째, 주파수 스펙트럼을 보면 첨두가 예리하게 뾰족하다(Goda, 2000). 그리고 높은 파가 몇 개 연이어 오고 그 후에 작은 파가 계속되는 파고의 비트(Beat)현상이 나타난다(Goda, 2000). 또한, 파랑은 여러 주파수의 성분파를 포함하고 있으며 각 성분파는 주기에 비례하는 군속도로 전파된다. 이 때문에 주기가 긴 성분파는 전체보다 앞으로 나아가고 주기가 짧은 파는 전체보다 쳐져서 전파되며 풍역을 벗어나면서부터 너울로서 상당한 장거리를 이동할 수 있다.

2.2 너울과 풍파의 구분

파랑이 풍파인지 너울인지 구분하기 위해서는 파랑관측 자료로부터 유의파고 및 주기 자료와 바람 자료를 비교하여 확인할 수 있다. 바람이 잔잔하거나 줄어들고 있는 상황에서 파고와 주기가 높아지는 현상이 발생하였다면 이는 대부분 너울로 인한 현상이라고 할 수 있으며, 보다 명확하게 너울을 구분하기 위해서는 유의파의 주기에 대한 도수분포 또는 확률밀도 함수를 구하면 풍파와 너울의 구분을 확실히 할 수 있다.

Fig. 1은 2008년 2월 23일부터 27일까지 부산 광안타워지점에서 관측된 유의파고, 유의파주기 및 바람자료이다. 이 기간에는 유의파고가 최대 2.2m 정도로서 파고는 크게 높진 않았지만 유의파의 주기가 최대 14초여서 비교적 큰 너울을 포함하는 너울성 파도가 발생함을 알 수 있다. Fig. 1을 살펴보면 대략 2월 24일부터 26일까지 유의파고와 주기가 평소보다 높아지고 있음을 알 수 있다. 그러나 당시 바람은 대부분 5m/s 이하이며 가장 강했던 24일에도 10m/s 이하여서 바람과는 큰 상관없는 너울이 발생했음을 짐작할 수 있다. Fig. 2는 이 기간의 유의파 주기에 대한 확률밀도 함수를 구한 것이다. 이 주기의 분포를 살펴보면 약 4초에서 8초사이의 풍파와 8초에서 14초 사이의 너울이 발생했음을 확연히 구분 수 있다.

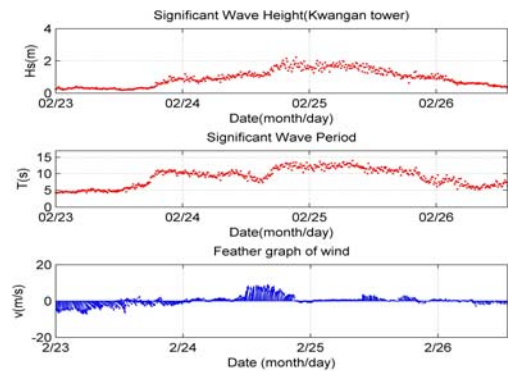


Fig. 1. Significant wave height, period and wind data of Kwangan (2008/2/23~2008/2/27)

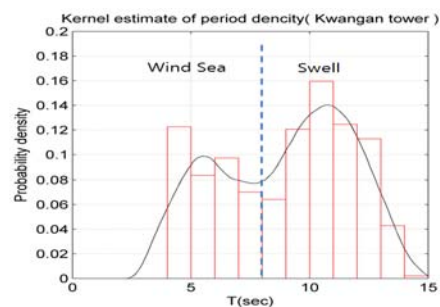


Fig. 2. Kernel estimate of the period density observed at Kwangan (2008/2/23~2008/2/27)

2.3 너울의 이동거리와 도달시간 계산

너울이 이동해온 거리는 주기와 시간을 관측한 현장자료를 통하여 비교적 쉽게 구할 수 있다. 먼저 너울은 연안에 도달할 때까지 대부분 심해에서 발생하여 이동하므로 주파수(f)의 너울 진행속도($v(f)$)는 $\frac{g}{4\pi f}$ 이다. 여기서 g 는 중력가속도이다. 너울이 처음 발생한 시간을 t_0 라 할 때, 너울이 이동하여 어느 지점에 도달한 시간(t_a)는 식(1)로 구할 수 있다.

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

여기서 D 는 너울이 이동한 거리이다. 식(1)은 다시 주파수 f 에 대하여 미분하면 식(2)을 얻을 수 있으며, 이 식으로부터 너울이 관측된 시간과 주기를 알면 손쉽게 너울이 이동한 거리를 구할 수 있다 (Marshall and Kathryn(1984)).

$$\frac{dt_a}{df} = \frac{4\pi D}{g} \approx \frac{t_2 - t_1}{f_2 - f_1}$$

$$D \approx \frac{g}{4\pi} \frac{t_2 - t_1}{\Delta f} \approx \frac{g}{4\pi} \left[\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right] (t_2 - t_1) \quad (2)$$

여기서, T_1, T_2 와 t_1, t_2 는 각각 주파수 f_1, f_2 의 너울 주기와 발생시간이다.

관측된 너울의 도달시간은 앞서 계산한 너울의 이동거리를 너울의 평균속도로 나누어 추정할 수 있다 (식(4)). 너울의 평균속도(v_m)는 심해파의 이동속도를 구하는 식(1)으로부터 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$v_m = \frac{g}{4\pi f_m} = \frac{g}{4\pi} \times T_m^2 \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{D}{v_m} \quad (4)$$

여기서, f_m 는 관측된 너울의 평균 주파수, T_m 은 평균 주기이며 Δt 는 너울의 도달시간이다.

3. 너울의 분석 및 원인규명방법

3.1 너울의 분석

Fig. 3은 Fig. 1의 주기자료만을 가져온 것이다. 2월 24일 부근에 주기가 급격히 상승하다가 그 후 점점 작은 파가 이어 도달하는 것을 알 수 있다. 그런데 24일 밤에는 다시 급격히 주기가 상승하고 다시 25일까지 작은 파들이 연이어 오고 있음을 보여주고 있다. 따라서 2월 23일부터 25일까지 하나가 아닌 두 개의 너울군이 발생되었음을 말해주고 있다.

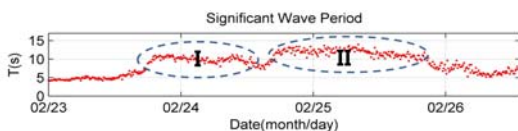


Fig. 3. Significant wave period data of Kwangan (2008/2/23 ~ 2006/2/27)

Table 1은 관측자료로부터 너울 I, II군에 대해 각각 너울의 이동거리와 도달시간을 2장의 식에 따라 계산한 것이다. 즉, 앞서 발생한 너울 I은 약 498km를 23시간 동안 이동하여 도달한 것이며 너울 II는 약 668km를 31시간 동안 이동하여 도달한 너울임을 관측자료와 앞서 설명한 식으로 짐작할 수 있다.

3.2 너울의 원인 추정

우리나라 주변의 외해에 대한 풍파에 관한 자료를 얻을 수 있다면 앞서 계산한 너울의 이동거리와 도달시간을 이용하여 관측된 너울의 원인을 추적할 수

있다.

최근 인터넷과 현장기술의 발전은 한반도 주변의 외해에 대한 해상풍 관측자료를 인터넷을 통해 어렵지 않게 확인할 수 있다. 국내에서는 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>) 또는 기상청에서 제공하는 방재기상정보 시스템(<http://metsky.kma.go.kr/>)에서 제공하는 일기도 자료를 통해 알 수 있으며, 보다 직접적으로는 미항공우주국(NASA)에서 제공하는 위성 해상풍 관측자료(<http://www.ssmi.com/qscat/>)등을 이용할 수 있다.

Table 1의 계산결과에 따라 너울 I의 경우, 대략 2월 22일 20시부터 23일 15시 사이에 광안타워에서 약 498km 떨어진 지점에 발생한 풍파가 원인이며, 너울 II의 경우 대략 23일 11시에서 24일 12시까지 약 668km 떨어진 지점의 풍파가 원인일 것이라는 추정을 할 수 있다. 이 기간 동안의 위성 해상풍 관측자료와 기상청 일기도 자료를 살펴보면 계산된 추정치를 가지고 실제 원인 풍파를 합리적으로 추적할 수 있다.

Fig. 4는 위성 해상풍 관측자료 중 일부로서 위에서 예상한 기간 중에 동해안 외해에 15m/s 이상의 강풍이 발생했음을 알 수 있다. 이 해상풍 관측자료는 12시간 단위로 제공되므로 기상청의 3시간마다 발표되는 기상자료를 살펴보면 보다 정확히 외해에 발생하는 강한 풍파를 알 수 있다. Fig. 5는 이 기간 중 동해의 외해 지역에서 강한 저기압이 발생하여 강한 해상풍을 발생시켰음을 알 수 있다.

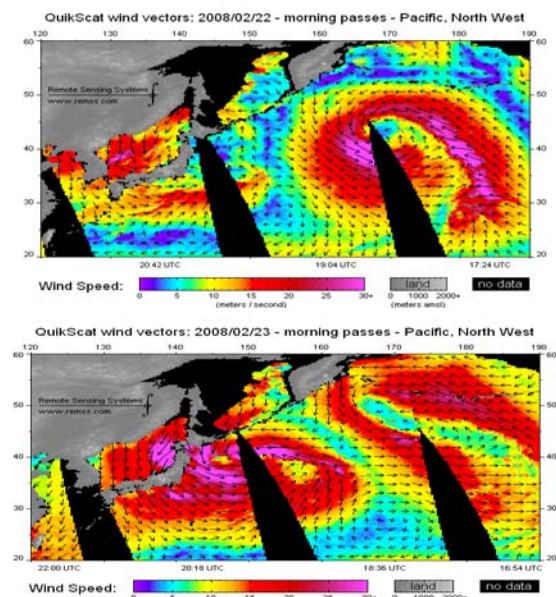


Fig. 4. The microwave scatterometer SeaWinds of QSCAT (2008/2/23 05:42, 2008/2/24 07:00, KST)

Table 1. Calculated swell propagation distances and arrival time from measurement data

Section Number	Period of swell $T_1 \sim T_2$	Time of the generated swell	$t_2 - t_1$ (hour)	Distances of swell (D , km)	Mean-period (T_m , sec)	Mean-Velocity (v_m , m/s)	Arrival time (Δt , hr)
I	8.4~11.2	2008/02/23 19:00:00 ~ 2008/02/24 14:00:00	19	498	9.91	76.59	23
II	9.5~14.0	2008/02/24 18:00:00 ~ 2008/02/25 19:00:00	29	668	11.89	110.26	31

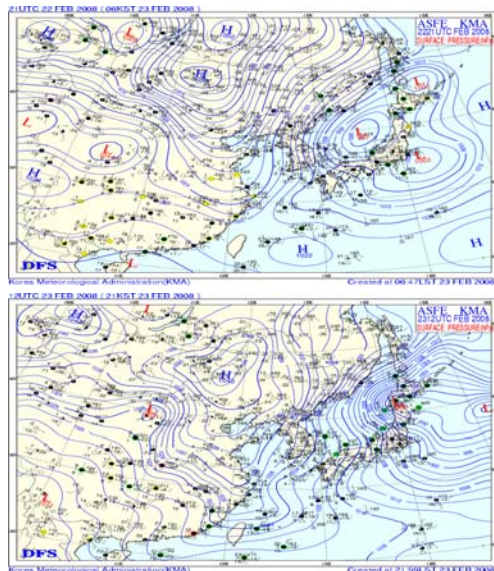


Fig. 5. The weather chart of KMA (2008/2/23 06:00, 2008/2/23 21:00, KST)

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라에서 너울의 특성을 분석하고 그 원인을 추적하는 방법에 대하여 2008년 2월에 발생한 너울의 사례를 들어 제시하였다.

관측된 파고, 주기 및 바람 자료를 이용하여 너울성 파도인지 판단할 수 있으며 이는 유의파 주기의 도수분포를 살펴보면 명확히 구분할 수 있다. 너울로 판단된 자료는 선형파 이론에 의해 너울의 이동거리와 도달시간을 계산할 수 있고 이 결과를 이용하면 너울의 원인이 되는 풍파가 발생한 시간과 거리를 추정할 수 있다. 이렇게 계산 결과로 추정된 원인 풍파는 위성 해상풍 관측자료와 기상청 일기자료 등을 이용하여 보다 명확하게 추적할 수 있다.

위와 같은 방법을 통해 너울을 분석하고 그 원인을 추정하는 연구는 원격 현장 관측장비와 인터넷을 통한 전 지구적인 기상자료의 공유 및 기타 컴퓨터 전산기술로 가능하게 된 것이다. 본 연구는 과거의 국내 발생한 너울에 관한 특성 분석 뿐 아니라 너울을 합리적으로 예측할 수 있는 연구로 확장하여 진행하고 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자

원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Barber, N. F. and Ursell, F. (1948). The generation and propagation of ocean waves and swell. *Phil.Trans. R. Soc.*, A240(824), pp. 527~560.
- Cartwright, D. E., Driver, J. S., Tranter, Joyce E. (1977). Swell waves at Saint Helena related to distant storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 103, no. 438, pp. 655~683.
- Jing, L. and Ridd, P.V. (1996). Wave-current bottom shear stresses and sediment resuspension in Cleveland Bay, Australia. *Coastal Engineering* 29, 169~186.
- Marshall D. Earle and Kathryn A. Bush (1984). High-height long period ocean waves generated by a sever storm in the northeast pacific ocean during February 1983. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 14, pp. 1286~1299.
- W.H. Munk, G.R. Miller, F.E. Snodgrass, and N.F. Barber (1963). Directional Recording of Swell from Distant Storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 255, No. 1062, pp. 505~584.
- Snodgrass, F. E., Groves, G. W., Hasselmann, K. F., Miller, G. R., Munk, W. H., Powers, W. H. (1966). Propagation of ocean swell across the Pacific. *Phil. Trans. R. Soc.*, A259(1103): pp. 431~497.
- Sverdrup H. U and W. H. Munk (1947). *Wind sea and swell; Theory of relations for forecasting*. Publication 601, Hydrographic Office, U.S. Navy, pp. 50.
- Yoshimi Goda (2000). 토목강좌 해안·항만. Shokokushi Publishing Co., Ltd.
- 안희도, 신승호, 정원무, 이광호 (2002). 파를 켜다. 한국해양연구원.
- 김지희 (1998). 현장관측을 통한 한국 동해안의 장주기와 특성 고찰. 명지대학교 석사논문.
- 장복진 (2007). 유비쿼터스 관측시스템을 이용한 너울의 특성규명파 예측에 관한 연구. 명지대학교 박사논문.