

동해에서 돌연고파의 기준 제안 A Proposal for Criterion of Sudden High Waves in the East Sea

김인철* · 오지희* · 서경덕*
 In-Chul Kim*, Jihee Oh* and Kyung-Duck Suh*

요지 : 동해에서 주로 겨울철에 발생하며 파고가 크고 주기가 긴 너울성 고파의 주요 특성 중 하나는 잔잔한 상태에서 갑자기 파가 커지는 돌발성이다. 본 연구에서는 이러한 돌발성을 나타내기 위하여 돌연고파라는 용어를 도입하였다. 돌연고파의 기준을 제안하기 위하여 강릉과 왕돌초에서 2005년부터 8년간 관측된 파랑자료와 같은 기간 동안 강원도와 경상북도 연안에서 발생했던 해상 사고 기록을 비교하였다. 그 결과 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 상위 20% 값인 $88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이상일 때 대부분의 사고 기록과 일치하는 것으로 나타나 이를 돌연고파의 기준으로 제안하였다. 사용된 변수는 한 파장당 파랑 에너지의 단위시간당 증가율을 나타내며, 고파의 파고 및 주기뿐만 아니라 돌발성도 포함한다.

핵심용어 : 너울성 고파, 돌발성, 돌연고파, 동해, 해상 사고

Abstract : One of the major characteristics of the swell-like high waves, which occur in the East Sea mostly in winter with large height and long period, is its suddenness associated with the rapid development of high waves from a calm state of sea. To represent such suddenness, in this study, the term sudden high waves is introduced. To propose the criterion of sudden high waves, comparisons were made between the wave measurement data at Gangneung and Wangdolcho for eight years from 2005 and the record of marine accidents and property damage on the coast of Gangwon-do Province and Gyeongsangbuk-do Province during the same period. It was found that most of the accidents occurred when $\Delta(H^2L)/\Delta t$ was approximately greater than the top 20% or $88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$, which is therefore proposed as the criterion of sudden high waves. The used variable represents the rate of increase of the wave energy in one wavelength, including not only height and period but also suddenness of high waves.

Keywords : swell-like high waves, suddenness, sudden high waves, East Sea, marine accident

1. 서 론

최근 십여 년 동안 우리나라 동해안에서 갑작스러운 큰 파로 인한 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이는 주로 10월에서 이듬해 2월 사이의 겨울철에 반복적으로 발생하는데, 중국 내륙 및 우리나라 부근에서 강하게 발달한 온대성 저기압이 동해안 부근으로 접근해 올 때 발생한 폭풍파가 내습하게 됨에 따라 발생하는 것으로 알려져 있다(정 등, 2007, 2008). 그런데 이 고파가 발생할 때의 날씨 좋은 경우가 대부분이라 고파에 대한 대비가 부족하여 많은 인명피해와 재산피해를 야기하고 있다(오 등, 2010). 2005년 이후 동해안에서 고파의 발생으로 인한 해상 및 해안에서의 사상자는 집계된 것만 45명에 달하며, 재산 피해는 연평균 백억 원을 상회한다(정과 오, 2009). 이러한 고파를 일본에서는 ‘Yorimawarunami’라는 용어로 부르는데(Nagai et al., 2009; Lee et al., 2010), Nagai et al.(2009)은 이를 ‘sudden peculiar long period swell’이라고 표현하였다.

이 고파는 너울에 비해서 파랑 주파수 스펙트럼의 폭이 넓으며, 유의파고가 5 m 이상인 경우가 빈번하다. 또한 9초 이상의 긴 첨두주기를 갖는데, 이는 통상의 풍파 수준을 상회하는 수치이다. 이러한 이유로 인하여 이 고파는 너울 또는 풍파로 정의하기 다소 힘든 점이 있다(오 등, 2010). 오 등(2010)은 이러한 점을 고려하여 유의주기가 길고($T_s \geq 9 \text{ s}$) 유의파고가 큰($H_s \geq 3 \text{ m}$) 파랑을 너울성 고파라고 지칭하였다. 그러나 기존의 너울성 고파라는 명칭은 현상의 돌발성(suddenness)을 적절히 나타내지 못하는 용어라 생각하여, 본 연구에서는 돌연고파(sudden high wave)로 현상을 지칭하였다.

한편 너울성 고파에 대한 기존의 기준은 임의성이 다소 짙어, 더 많은 연구를 통하여 명확히 정의될 필요성이 있다(오 등, 2010). 또한, 이 기준을 돌연고파에 적용할 경우, 해수면이 잔잔한 상태에서 고파가 발생할 때까지 걸리는 시간을 고려하기 어려운 문제점이 있다.

돌연고파의 가장 중요한 특성 중 하나는 돌발성이다. 국지적 강풍을 동반하지 않고 갑작스럽게 발생하는 돌연고파의 특

*서울대학교 건설환경공학부(Corresponding author: Kyung-Duck Suh, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea, Tel:+82-2-880-8760, Fax:+82-2-873-2684, kdsuh@snu.ac.kr)

성이 많은 인명피해와 재산피해를 야기하고 있다. 이런 돌발성과 큰 파랑을 잘 나타내기 위해서는 변수 안에 두 가지 정보가 포함되어야 한다. 첫 번째는 얼마나 짧은 시간 안에 돌연고파가 발생하는 지에 대한 것이고, 두 번째는 돌연고파의 크기(파고 및 주기)가 얼마인 지에 대한 것이다. 본 연구의 목적은 위의 두 정보가 포함된 변수를 도출하여 돌연고파에 대한 기준을 제시하는 것이다. 이후 본 논문에서 사용되는 기호 중 파고(H), 주기(T), 파장(L)은 모두 유의파에 대한 값이다. 다음 장에서는 연구에 사용된 자료에 대하여 설명한다. 3장에서는 돌연고파 관련 이론을 기술하고, 4장에서는 자료 분석을 통하여 돌연고파의 기준을 제안한다. 마지막으로 5장에서 본 연구의 요약 및 주요 결론을 기술한다.

2. 자 료

본 연구에서는 한국해양과학기술원에서 제공하는 2005년 2월부터 2013년 2월까지의 강릉 및 왕돌초 지역의 겨울철 파랑 관측자료와 2005년부터 2013년까지의 강원도 및 경상북도 연안의 너울성 고파 발생 및 피해 자료를 비교, 분석하여 동해안에서 돌연고파로 인해 사고가 발생하였을 때의 파랑 특성을 고찰하였다. 파랑 관측 자료는 Fig. 1에 보이는 강릉과 왕돌초 인근에 위치한 지점에서 측정한 것이다. 관측기기가 위치한 지점의 수심은 각각 15 m와 15.3 m이고, 파랑 자료는 매 30분마다 취득되었다.

3. 이 론

3.1 돌연고파의 특성

Fig. 2 및 3는 각각 2005년 10월 21 ~ 25일, 2006년 10월 22 ~ 26일에 강릉에서 관측된 유의파고와 유의주기의 시계열을 나타낸 것이다. 두 시기 모두 돌연고파가 발생하여 많은 인명피해와 재산피해를 야기한 대표 사례이다. 두 경우를

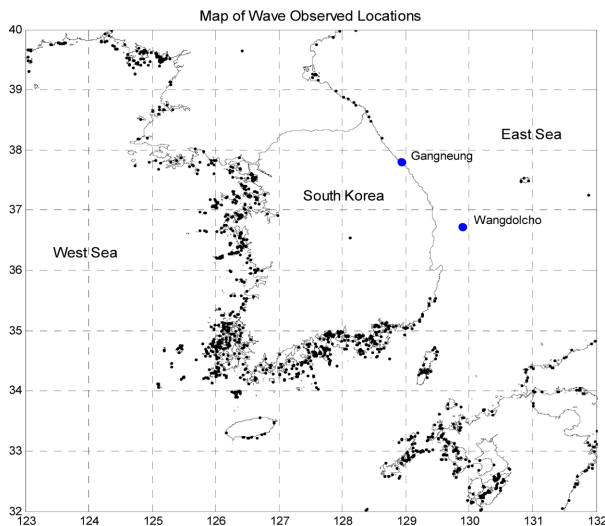


Fig. 1. Location of wave observation.

보면, 돌연고파가 발생하기 전에는 유의파고가 1 m 미만, 유의주기 6초 미만으로 잔잔한 상태였다가 갑작스럽게 유의파고와 유의주기가 상승함을 알 수 있다. 즉, 돌연고파는 통상의 너울에 비하여 유의파고가 크고, 통상의 풍파에 비하여 유의주기가 길며, 국지적 강풍을 동반하지 않고 갑작스럽게 발생하는 특성을 갖는다(오 등, 2010).

3.2 고파 이벤트의 결정

돌연고파의 기준을 제시하기 위해서는 우선 고파 이벤트에

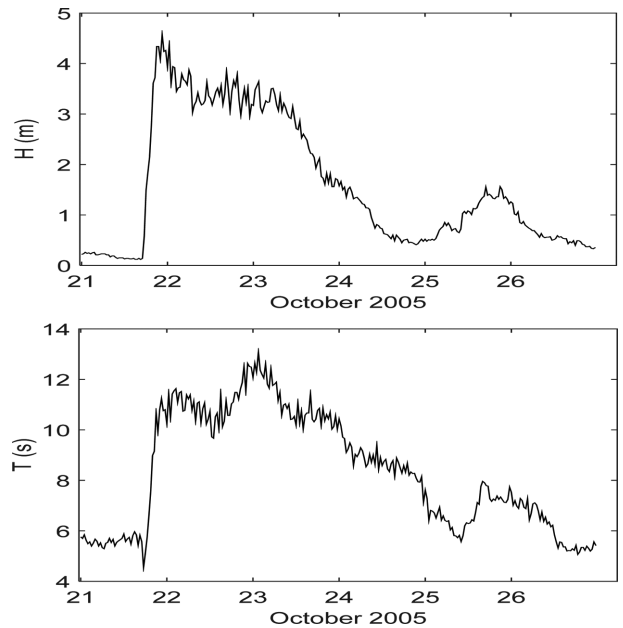


Fig. 2. Significant wave height and period during October 21-26, 2005 at Gangneung wave station.

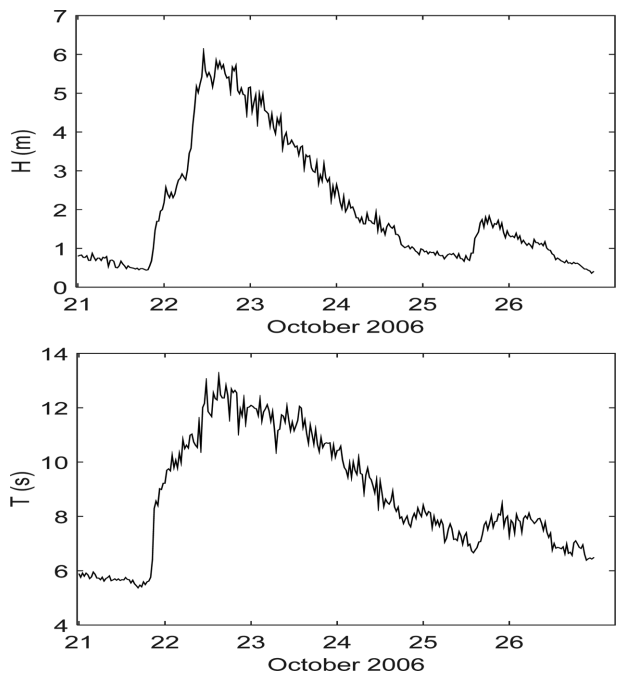


Fig. 3. Significant wave height and period during October 21-26, 2006 at Gangneung wave station.

대한 결정이 선행되어야 한다. Figs. 2 및 3에서 보듯이 파고와 주기는 거의 비례 관계에 있기 때문에 여기서는 파고의 시계열에 기초하여 고파 이벤트를 결정한다. 여기서 고파 이벤트라 함은 해수면이 잔잔한 상태를 유지하다가 파고가 증가하여 거친 상태가 되었다가 다시 잔잔한 상태로 되돌아올 때까지를 일컫는다. Douglas sea scale의 Degree 3인 slight sea는 파고가 0.5~1.25 m 사이를 일컫는데(World of Earth Science, 2003), 본 연구에서는 이 단계를 잔잔한 해면의 기준으로 삼아서 한 시점의 유의파고가 이 기준의 중간 값인 $(0.5+1.25)/2=0.875$ m 이하인 경우를 잔잔한 상태로 정의하였다.

고파 이벤트에 대한 결정은 다음 순서를 따른다. 설명을 위하여 Fig. 4를 참고한다. 이 그림에서 역삼각형으로 표시된 시점이 고파 이벤트의 시작 및 끝 점을 나타낸다. 그림에서 보듯이 한 이벤트 동안에 파고의 변동이 매우 심한 것을 알 수 있다. 해수면이 잔잔한 상태에서 거친 상태가 되었다가 다시 잔잔한 상태로 되돌아오는 기준만을 가지고 고파 이벤트를 결정하면 너무 많은 이벤트가 발생하는 것으로 계산되기 때문에 최소값 비교기간(Comparison period of minimum wave height)이라는 개념을 도입하였다. Fig. 4는 최소값 비교기간을 60 시간으로 설정했을 때의 결과이다. 임의의 한 시점에서 파고가 잔잔한 상태(0.875 m 이하)를 만족시키면서 그 시점으로부터 비교기간만큼의 전과 후 사이에서 최소가 될 경우 그 점을 이벤트의 시작점으로 결정한다. 이러한 방법을 사용하면 변동을 거둬들이 미분하기 힘든 그래프 내에서 극솟값을 찾을 수 있다. 예를 들어 Fig. 4의 12일 21시쯤에 파고가 0.875 m보다 작고 그 점으로부터 60시간 전과 후 사이에서 최소가 되기 때문에 이벤트의 시작점으로 선정되었다. 14일 18시쯤에도 파고가 0.875 m보다 작고 최소값을 보이지만 그 점으로부터 60 시간 전 (즉 12일 6시) 이후에 그보다 작은 파고가 발생하였기 때문에 새로운 이벤트의 시작점으로 선정되지 않았다. 16일 21시쯤과 17일 18시쯤의 점도 같은 이유로 선정되지 않았다. 그 이후 파고가 계속 증가하여 0.875 m 이상으로 유지되다가 24일 9시쯤에 0.875 m 이하로 최소값을 보이지만 그 점으로부터 60시간 후 (즉 26일 21시) 이전에 그보다 작은 파고가 발생하였기 때문에 이벤트의 시작점으로 선정되지 않았다. 25일 12시쯤과 27일 0시쯤의 점

도 같은 이유로 선정되지 않았고, 27일 12시쯤에 가서야 전후 60 시간 이내에 그보다 더 작은 값이 없기 때문에 새로운 이벤트의 시작점으로 선정되었다.

3.3 돌연고파 강도 변수의 선정

돌연고파를 나타내는 변수로 우선 생각할 수 있는 것은 파고(H)일 것이다. 파고는 파의 크기를 가장 잘 나타내며 파로 인한 피해에 가장 직접적인 영향을 주는 변수이다. 그러나 Figs. 2 및 3에서 보듯이 돌연고파 발생 시에는 짧은 시간 동안에 파고뿐만 아니라 주기(T)도 급격히 증가한다. 그런데 파의 주기가 증가하면 파장(L)도 증가하기 때문에 파고와 주기의 영향을 동시에 나타낼 수 있는 변수로 H^2L 을 생각할 수 있을 것이다. 한 파장당 파랑 에너지를 $\rho g H^2 L / 8$ 로 나타낼 수 있으므로 (여기서 ρ = 해수의 밀도, g = 중력가속도), H^2L 은 파랑 에너지를 나타내는 변수로 간주할 수 있다. 참고로 김과 이(2008)는 2008년 2월 23~24일 동해에 내습하여 큰 피해를 입혔던 파랑 자료를 웨이블릿 방법으로 분석하여 짧은 시간 동안에 파랑 에너지가 급격히 증가하는 것을 보인 바 있다. 또한 수심이 얕은 경우 파장은 주기뿐만 아니라 수심의 영향도 받기 때문에 H^2L 은 파고, 주기, 수심의 영향을 모두 포함한다. 돌연고파의 대표적인 특성 중 하나는 해수면이 잔잔한 상태에서 갑자기 파고 및 주기가 증가하는 돌발성이다. 이 돌발성을 나타내기 위해서는 잔잔한 상태에서 큰 파랑으로 발전하는 데 걸리는 시간 Δt 가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 돌연고파의 강도를 나타내는 변수로 $\Delta H / \Delta t$ 와 $\Delta(H^2L) / \Delta t$ 를 선정하였다. 여기서 ΔH 와 $\Delta(H^2L)$ 은 각각 시간 Δt 동안의 H 와 H^2L 의 증가량이다.

3.4 돌연고파 강도 변수의 계산

3.2절에서 결정한 하나의 고파 이벤트 내에서 H 또는 H^2L 이 최대가 되는 점을 이벤트 내의 최댓값으로 잡는다. 같은 최댓값이 여러 개일 경우에는 먼저 나온 점으로 한다. 이벤트의 시작점과 최댓값 발생 시점 사이에서 파고가 Douglas sea scale의 Degree 3인 slight sea의 상한 값인 1.25 m 이하이면, H 또는 H^2L 의 값이 최댓값의 1/10 이하가 되는 점들 중 최댓값과의 기울기($\Delta H / \Delta t$ 또는 $\Delta(H^2L) / \Delta t$)가 가장 큰 값을 갖는 점을 돌연고파의 시작점으로 채택하였다 (Fig. 5에서 다이아몬드로 표시한 점). 같은 기울기 값을 갖는 점이 여러 개일 경우 먼저 나온 점으로 하였다. Douglas sea scale의 Degree 3인 slight sea의 중간 값인 0.875 m는 고파 이벤트를 결정하기 위한 기준으로 사용되었는데, 돌연고파의 시작점의 기준으로는 다소 보수적이기 때문에 상한 값인 1.25 m를 기준으로 하였다. 또한, 돌연고파 강도 변수의 급격한 증가가 돌연고파의 돌발성에 중요한 요소이기 때문에 최댓값의 1/10 이하가 되는 점들을 돌연고파의 시작점의 후보로 간주하였다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 2008년 2월 22~27일과 2009년 1월 6~12일에 강릉에서 관측된 H^2L 시계열을 나타낸 것

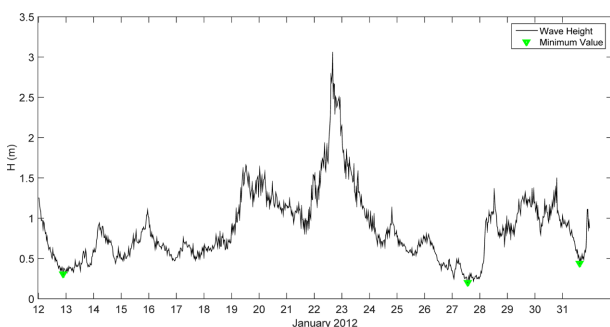


Fig. 4. Illustration of high wave event.

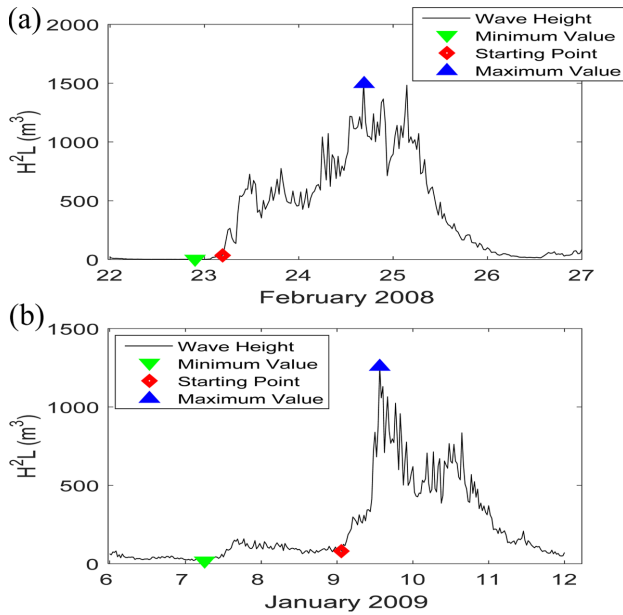


Fig. 5. Illustration of determination of intensity of sudden high waves.

로 두 기간 모두 각각 하나의 고파 이벤트가 결정되었다. 그런데 두 그래프의 돌연고파 시작점들은 상당히 상이한 곳에 위치해 있음을 알 수 있다. 그 이유는 (a) 그래프의 경우, 최댓값과의 기울기가 가장 큰 값을 갖는 점이 24일과 25일 사이에 존재하지만, 이 기간 동안의 점들은 파고가 1.25 m 이하이면서, H^2L 의 값이 최댓값의 1/10 이하여야 한다는 돌연고파 시작점의 기준을 만족하지 못하기 때문에 시작점이 되지 못한다. 반면에 (b) 그래프의 경우에는, 9일과 10일 사이의 한 점이 최댓값과의 기울기가 가장 큰 값을 나타내면서 돌연고파 시작점의 기준을 만족시키기 때문에 시작점으로 결정되었다. 따라서 두 이벤트를 비교해 보면 (b)가 (a)보다 더 큰 돌발성을 갖고 있음을 알 수 있고, (a)가 (b)보다 이벤트 내에서 더 높은 최댓값을 갖고 있음에도 불구하고 $\Delta H^2L/\Delta t$ 값은 $40.7 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 $98.2 \text{ m}^3/\text{hr}$ 인 (b)보다 작은 값을 갖는다. 즉, 단순 고파가 높은 H 또는 H^2L 값을 갖고 있어도 (a)와 같이 돌발성이 크지 않으면 돌연고파 강도 변수는 낮게 계산된다. 따라서 위와 같은 돌연고파 강도 변수 계산 방법을 통하여 단순 고파와 돌연고파를 구분할 수 있다.

4. 결 과

4.1 최솟값 비교기간의 결정

3.2절에서 설명한 고파 이벤트를 결정하기 위해서는 최솟값 비교기간을 결정해야 한다. 적절한 최솟값 비교기간을 결정하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다. 우선 임의로 설정한 최솟값 비교기간을 이용하여 3.2절에서 설명한 방법으로 만들어지는 실제 이벤트 개수(number of actual events)를 계산하였다. 다음으로 이 비교기간으로 만들 수 있는 최

Table 1. Values of number of actual events divided by number of maximum possible events in Gangneung depending on comparison period of minimum wave height.

Comparison period of minimum wave height (hr)	(Number of actual events) / (Number of maximum possible events)
12	0.479
24	0.619
36	0.731
48	0.808
55	0.821
57.5	0.831
60	0.835
62.5	0.819
65	0.807
72	0.806

대 이벤트 개수(number of maximum possible events)를 계산하였다. 예를 들어서 비교기간을 60시간으로 했을 경우 매 120시간마다 하나의 이벤트가 발생한다고 간주하여 최대 이벤트 개수는 전체 관측기간을 120시간으로 나눈 값으로 계산된다. 다음으로 최솟값 비교기간을 변화시켜 가면서 실제 이벤트 개수를 최대 이벤트 개수로 나눈 값이 1에 가장 가까워지는 경우를 찾아서 이를 최솟값 비교기간으로 결정하였다. 강릉 지역의 파랑 관측자료에 대해 최솟값 비교기간을 12시간부터 72시간까지 조정해 본 결과는 Table 1과 같다. 따라서 (실제 이벤트 개수)/(최대 이벤트 개수)가 1에 가장 근접한 비교기간인 60시간을 최솟값 비교기간으로 결정하였다.

4.2 돌연고파의 기준

강릉 지역의 파랑 관측자료에 대해 최솟값 비교간격을 60시간으로 하여 두 변수 H 및 H^2L 에 대하여 이벤트를 생성한 결과, 각각 208개와 206개의 이벤트가 생성되었다. 이와 같이 생성된 이벤트를 강원도 연안의 너울성 고파 발생 및 피해 현황 자료와 비교해 보았다. Table 2는 2005년부터 2012년까지 강원도와 경상북도 연안에서 겨울철(10월부터 이듬해 2월까지)에 발생한 해난 사고 및 피해 현황 자료이다. 한편 Table 3은 Table 2의 자료 중 강원도 연안의 사고 및 피해 발생 시기에 강릉 관측지점에서 발생한 고파 이벤트의 특성들이다.

돌연고파의 강도를 나타내는 두 변수, $\Delta H/\Delta t$ 와 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 를 비교해 보았을 때 대부분의 사건에서 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 의 순위가 $\Delta H/\Delta t$ 의 순위보다 더 높은 순위에 위치해 있음을 알 수 있다. 따라서 파고의 변화율을 나타내는 $\Delta H/\Delta t$ 보다 파랑 에너지의 변화율을 나타내는 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 돌연고파의 강도를 나타내는 데 더 적합한 변수로 볼 수 있다. 또한 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 가장 큰 값을 갖는 2005년 10월 21일과 2006년 10월 23일에 발생한 사건들을 보면, 인명피해뿐만 아니라 넓은 지역에 걸쳐

Table 2. Marine accidents and/or property damage along the coast of Gangwon-do Province and Gyeongsangbuk-do Province (from Geo-system Research, 2015).

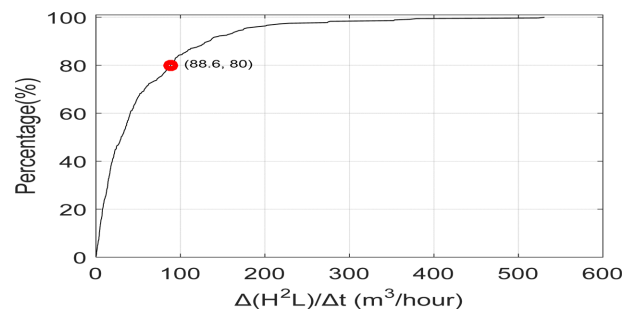
Date	Area	Specific area	Life damage (Death)	Remarks
10.21	Pohang	Ship at 7 km offshore	14(9)	One ship sank, nine crew members disappeared
10.22	Pohang	Imgok-ri breakwater	2(2)	Two children killed
10.22	Donghae	Daejin Port	3(0)	Breakwater damage
2005 10.22	Donghae	Cheongok Port	3(0)	Breakwater damage
10.22	Gangneung	Jumunjin Port breakwater	1(1)	One tourist killed
10.23	Sokcho	Yeongrang-dong	-	Three houses partially destroyed, road damage
10.23	Sokcho	Jangsa Port	-	Two ships sank
10.08	Pohang	Yangpo Port breakwater	13(2)	Eleven tourists injured, two killed
10.09	Ulleung	Jeodong Inner Port breakwater	1(1)	One tourist killed
2006 10.23	East Sea	Entire area	-	110 ships, 270 houses damaged
10.23	Sokcho	Ship at 100 km offshore	7(4)	One ship sank
10.23	Goseong	Bongpo Port breakwater	4(1)	Four tourists swept away, one killed
2007 10.28	Sokcho	Seashore rocks off Yeonggeum-jeong	3(1)	One tourist killed, two injured
2008 2.24	Gangneung	Anmok Port	18(3)	Three tourists killed
2009 1.10	Gangneung	Jumunjin Port breakwater	1(1)	One tourist killed
1.13	Gangneung	Jumunjin Port north breakwater	5(3)	Three out of five tourists killed
1.1	Pohang	Seashore rocks off Youngam-ri	2(0)	All rescued
2012 1.20	Samcheok	Seashore rocks at Namaemul, Wondeok-eup	2(1)	One angler killed, one rescued
11.20	Gangneung	Namhangjin	4(0)	One barge damaged, rescue of human lives

Table 3. Characteristics of $\Delta H/\Delta t$ and $\Delta(H^2L)/\Delta t$ at Gangneung wave station.

Date	$\Delta H/\Delta t$		$\Delta(H^2L)/\Delta t$	
	Value (m/hr)	Rank (Percent)	Value (m ³ /hr)	Rank (Percent)
2005/10/21	0.807	1 (0.48)	523.6	1 (0.49)
2006/10/23	0.367	3 (1.44)	353.2	2 (0.98)
2007/10/29	0.128	32 (15.3)	38.6	73 (35.4)
2008/02/24	0.080	65 (31.2)	40.7	67 (32.5)
2009/01/09	0.052	89 (42.8)	98.2	22 (10.7)
2012/01/22	0.012	197 (94.7)	39.4	70 (34.0)
2012/11/20	0.075	71 (34.1)	59.0	47 (22.9)

상당한 재산피해가 발생했음을 알 수 있다. 따라서 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 의 값이 사건의 규모와 비례하는 것을 알 수 있다.

한편, 강릉 및 왕돌초 지역의 파랑 관측자료에 대하여 최소값 비교간격을 60시간으로 하여 H^2L 에 대한 이벤트를 생성한 결과, 각각 206개와 155개의 이벤트가 생성되었다. 각 지역에서 생성된 이벤트에서 돌연고파의 강도를 나타내는 변수인 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 또한 206개와 155개가 생성되었다. 생성된 총 361개의 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 에 대하여 누적백분율 곡선을 그려본 결과, Fig. 6과 같이 누적백분율이 급격히 증가하다가 대략 상위 20% 범위 안에서 완만하게 증가하는 특성을 보인다. 따라서 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 의 상위 20% 값인 88.6 m³/hr을 임의의 돌연고파의 기준으로 설정하고, $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 88.6 m³/hr 이

**Fig. 6.** Cumulative percentage curve of $\Delta(H^2L)/\Delta t$.

상인 이벤트들과 강원도와 경상북도 연안의 해난 사고 및 피해 현황 자료와 비교해 보았다.

Table 4. Comparison of sudden high wave events of $\Delta(H^2L)/\Delta t \geq 88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ and marine accidents.

Gangneung		Wangdolcho		Accident	
Period	$\Delta(H^2L)/\Delta t \text{ (m}^3/\text{hr)}$	Period	$\Delta(H^2L)/\Delta t \text{ (m}^3/\text{hr)}$	Date	Area
2005/10/21 17:30 - 2005/10/24 06:30	523.6	2005/10/21 21:00 - 2005/10/24 18:30	128.4	2005/10/21	Pohang
				2005/10/22	Pohang
				2005/10/22	Donghae
				2005/10/22	Donghae
				2005/10/22	Gangneung
				2005/10/23	Sokcho
				2005/10/23	Sokcho
2006/10/11 21:30 - 2006/10/12 15:00	79.1	2006/10/12 01:30 - 2006/10/12 20:00	47.7	2006/10/08	Pohang
				2006/10/09	Ulleng
2006/10/22 21:00 - 2006/10/25 18:00	353.2	2006/10/23 03:00 - 2006/10/25 23:30	274.8	2006/10/23	Entire East Sea
				2006/10/23	Sokcho
				2006/10/23	Goseong
2008/02/23 04:30 - 2008/02/25 20:00	40.7	2008/02/23 06:30 - 2008/02/25 18:00	371.6	2008/02/24	Gnagneung
2009/01/09 01:30 - 2009/01/11 08:30	98.2	2009/01/09 07:30 - 2009/01/11 19:00	146.1	2009/01/10	Gnagneung
				2009/01/13	Gnagneung
2012/01/01 18:00 - 2012/01/03 10:30	112.1	2012/01/01 21:30 - 2012/01/24 12:00	530.8	2012/01/01	Pohang
2012/01/12 21:00 - 2012/01/23 20:30	39.4	2012/01/22 09:30 - 2012/01/24 12:00	108.7	2012/01/20	Samchoek
2012/11/20 05:30 - 2012/11/21 12:30	59.0	2012/11/23 06:30 - 2012/11/24 15:30	84.8	2012/11/20	Gnagneung

Table 5. Precipitation and maximum wind speed during marine accident and/or property damage due to sudden high waves.

	Date	Area	Specific area	Precipitation (mm)	Max wind speed (m/s)
2005	10/21	Pohang	Ship at 7 km offshore	0.4	8.3
	10/22	Pohang	Imgok-ri breakwater	2.0	3.6
	10/22	Donghae	Daejin Port	4.5	10.7
	10/22	Donghae	Cheongok Port	4.5	10.7
	10/22	Gangneung	Jumunjin Port breakwater	1.5	6.9
	10/23	Sokcho	Yeongrang-dong	-	4.8
	10/23	Sokcho	Jangsa Port	-	4.8
2006	10/23	East Sea	Entire area	232	30.5
	10/23	Sokcho	Ship at 100 km offshore	232	30.5
	10/23	Goseong	Bongpo Port breakwater	232	30.5
2008	2/24	Gangneung	Anmok Port	-	5.2
2009	1/10	Gangneung	Jumunjin Port breakwater	-	8.1
2012	1/1	Pohang	Seashore rocks off Youngam-ri	-	4.9

$\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 $88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이상인 이벤트들과 Table 2의 강원도와 경상북도에서 발생한 사고 및 피해를 비교한 결과를 Table 4에 정리하였다. 돌연고파 이벤트에 대하여 시작 시간부터 종료 시간(유의과고가 1.25 m 이하가 되는 시간)까지의 기간을 표시하여, 사고 발생 일자가 돌연고파 기간 내에 해당하는 지를 검토하였다. 이 표에서 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 $88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$

이하인 경우와 사고 발생 일자가 돌연고파 기간 내에 포함되지 않는 경우는 표의 칸을 음영으로 처리하였다. 그 결과 총 18개 사고 기록 중 13개의 사고가 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 가 $88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이상인 돌연고파 기간 중에 발생하였음을 확인하였다. 나머지 5건의 사고는 다른 원인으로 인하여 발생한 것으로 추정된다. 결론적으로 Table 2에 정리한 사고 기록 중 Table 4에

포함되지 않은 것들과 위에서 설명한 돌연고파 기간을 벗어나서 발생한 5건의 사고들은 단순 고파 또는 다른 원인에 의한 사고로 간주할 수 있다.

본 연구에서 분석한 총 고파 이벤트가 361개인데 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 의 상위 20% 값인 $88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 을 돌연고파의 기준으로 잡았기 때문에 이 기준을 만족시키는 이벤트의 갯수는 72개이다. 하지만 Table 4에서 보듯이 돌연고파의 기준을 만족시키면서 해상 사고를 발생시킨 이벤트는 9개에 불과하다. 나머지 63개의 돌연고파 이벤트에는 사고가 발생하지 않았음을 의미한다. 따라서 돌연고파가 발생하더라도 대부분의 경우에는 사고 없이 지나가게 됨을 알 수 있다.

마지막으로, 악천후로 인한 사고와 돌연고파에 의한 사고와의 구분을 위하여 Table 4의 돌연고파에 의한 사고가 발생한 날에 해당 장소에서의 강수량과 평균 풍속을 Table 5에 정리하였다. 24시간 동안의 강수량이 80 mm 이상일 때 발표되는 호우경보와, 해상에서 10분 동안의 평균 풍속이 14 m/s 이상인 상태가 3시간 이상 지속될 때 발표되는 풍랑경보에 해당되는 경우는 2006년 10월 23일의 돌연고파 이벤트뿐이었다. 이 날에는 악천후와 돌연고파가 동시에 발생한 것으로 판단된다. 나머지 사고들은 악천후와 상관 없이 돌연고파만에 의한 사고라고 말할 수 있다. 따라서 Table 5의 사고들은 모두 돌연고파에 의한 사고라고 결론지을 수 있다.

5. 결 론

우리나라 동해안에서 겨울철에 갑자기 발생하는 장주기 파랑 현상에 대해서 기존의 너울성 고파라는 용어는 파고가 크고 주기가 길다는 특징은 나타내지만 현상의 돌발성을 나타내지는 못한다. 또한 너울성 고파에 대한 기존의 기준은 파고와 주기만을 포함하기 때문에 이러한 현상이 얼마나 갑자기 발생하는지를 표현하지 못한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 이 현상을 돌연고파로 정의하고, 돌연고파의 가장 중요한 특징 중 하나인 돌발성을 잘 표현할 수 있는 기준을 제시하였다. 돌연고파의 파고, 주기 (또는 파장) 및 발생 소요 시간 등을 나타낼 수 있는 변수로 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 를 선정하고, 2005년부터 2012년 사이에 강원도와 경상북도의 연안에서 발생한 인명 및 재산 피해 현황과 강릉과 왕돌초에서 관측된 파랑 자료를 비교하여 $\Delta(H^2L)/\Delta t$ 의 상위 20% 값인 $\Delta(H^2L)/\Delta t \geq 88.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 를 돌연고파의 기준으로 제시하였다. 그러나 이 기준은 임시적으로 제시한 기준으로 추후에 더 많은 자료를 이용하여 탄력적으로 조정할 수 있으며, 본 연구에서 조사하지 않은 지역의 피해 현황과 파랑 자료를 이용하면 더 명확하게 사고를 포괄할 수 있는 기준을 제시할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서 제시한 기준을 파랑예보 자료와 함께 사용하면 돌연고파의 예·경보 수단으로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양과학조사 및 예보기술개발사업의 일환인 “연안 이상현상(이상고파, 이안류) 발생원인 규명 및 대응체계 구축(No. 20140057)”의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구원에서 수행되었습니다.

References

- Geosystem Research Corporation (2015). Yearly Report of the Project of Investigation of Large Swell Waves and Rip Currents and Development of the Disaster Response System (in Korean).
- Jeong, W.M. and Oh, S.H. (2009). Abnormally high swells occurred on the East Coast in recent several years. Proceedings of 2009 Joint Conference of Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 2119-2122 (in Korean).
- Jeong, W.M., Oh, S.H. and Lee, D.Y. (2007). Abnormally high waves on the East Coast. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 19(4), 295-302 (in Korean).
- Jeong, W.M., Oh, S.H., Ryu, K.H. and Kim, T.I. (2008). Characteristics of abnormally high waves on the East Coast, February 2008. Proceedings of 2008 Joint Conference of Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 2480-2483 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (2005-2012). Monthly Weather Report.
- Kim, T.R. and Lee, D.Y. (2008). Wavelet analysis of swells in the East Sea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 20(6), 583-588 (in Korean).
- Lee, H.S., Kim, K.O., Yamashita, T., Komaguchi, T. and Mishima, T. (2010). Abnormal storm waves in the winter East/Japan Sea: generation process and hindcasting using an atmosphere-wind wave modelling system. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 773-792.
- Nagai, T., Hiraishi, T., Kawai, H., Kawaguchi, K., Nihei, A. and Ohkama, T. (2009). Characteristics of Yoriawari-nami, peculiar Japan-Sea low frequency swell, observed by NOWPHAS seabed wave gauge network. Proceedings of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 940-945.
- Oh, S.H., Jeong, W.M., Lee, D.Y. and Kim, S.I. (2010). Analysis of the reason for occurrence of large-height swell-like waves in the East Coast of Korea, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(2), 101-111 (in Korean).
- World of Earth Science (2003). Douglas sea scale. <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-3437800174.html>.

Received 19 February, 2016

Revised 13 April, 2016

Accepted 1 May, 2016