한국해안 · 해양공학회논문집
제 24 권 제 3 호, pp. 217~227, 2012년 6월

2007년 3월 31일 서해안에 발생한 이상파랑에 대한 원인 분석
Analysis of Abnormal Wave at the West Coast on 31 March 2007

엄현민* · 승영호** · 우승범** · 유승협***
Hyun-Min Eom*, Young Ho Seung**, Seung-Buhm Woo** and Sung Hyup You***

요 지 : 2007년 3월 31일에 영광을 비롯한 한반도 서해안에 발생한 이상파랑의 발생 원인을 관측자료와 수치모델을 이용하여 분석하였다. 사용된 자료는 조위 관측소에서 관측된 조위 자료와 AWS의 해면기압 자료로서 모두 1분 간격의 시계열 자료이다. 이러한 시계열 자료를 시간과 주기에 대한 에너지 성분으로 변환시켜줄 수 있는 웨이블렛 변환을 이용하여 이상파랑과 같이 단기적으로 불규칙하게 발생하는 변화를 분석하였다. 분석 결과를 이용하여 이상파랑의 도달시간과 진행방향을 도출하였고, 생성원인을 분석하기 위해 AWS 자료를 통해 기압 점프의 크기와 주기 및 진행방향에 대해 조사하였다. 3시간 간격의 분석일기도에 제시된 기압 분포를 이용하여 서해상에서 기압 점프의 이동 패턴을 유추하였다. 분석된 결과의 타당성을 검증하기 위해 2차원 수치모형을 이용하여 이상파랑에 대한 모의를 수행하였다. 기압 점프의 진행에 따라 발생된 해수면의 변동은 공진작용에 의해 수위가 증가하는 것으로 나타났다. 산정된 수위는 관측값과 비교할 때 과소 산정되는 것으로 나타났으나, 웨이블릿 변환을 통해 분석한 도달순서와 유사하게 수위 관측지역에 도달하는 것으로 산정되었다.

핵심용어 : 이상파랑, 조위, 해면기압, 웨이블렛, 수치실험

Abstract : On 31 March 2007, the abnormal wave occurred along western coast of Korean including Yeonggwang. In this paper, this event is studied using available field measurement data for the event analysis and numerical model for reproducing the unknown waves. We found several 1-min interval tidal elevation and mean sea level pressure (MSLP) data along the western coast of Korea and analyzed it using wavelet technique. We computed the arrival time and the propagation direction of abnormal wave using wavelet results and performed the numerical simulation using 2 dimensional shallow water wave model. The sea level under the forcing of air pressure jump was obviously amplified by the Proudman resonant effect. The computed sea levels compared with observations are underestimated, but the order of arrival time at the tidal station showed good agreement.

Keywords : abnormal waves, tidal elevation, mean sea level pressure, wavelet technique, numerical simulation

1. 서 론

이상파랑이 2007년 3월 31일 00시 40분부터 서해안 일대에 발생하여 수 시간 동안 지속되었으며 이로 인해 재산 및 인명 피해가 발생하였다. Fig. 1에 피해가 발생한 지역을 표시하였다. 1시 10분에는 전라북도 부안군 위도면 진리와 벌금 일원의 주택과 차량 및 선박이 침수되었으며 1시 30분에는 변산면 대항, 합구 및 송포 일원에 정박해 있던 선박들이 침수되었다. 1시 50분에는 전라남도 영광군 영광원전 방류시설 인근과 법성면 법성포항, 홍농, 백수 및 염산 등지에서 1명이 사망하고 상가와 선박이 침수되었다. 그리고 2시경에는 전라북도 군산시 옥도면 선유도에서는 주택과 선박이 침수되었으며 고창군 상하면 장호리 용두마을에서는 6명의 사상자가 발생하였다. 이러한 이상파랑은 2005년 2월과 2008년 5월에도 제주 옹포리와 충청남도 보령 인근에 각각 발생한 바 있다.

이렇게 뚜렷한 원인을 알 수 없었던 이상파랑은 아시아, 유럽, 남아메리카 등 전 세계적으로 발생하고 있으며 이에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 가까운 일본의 나가사키만에서는 12월에서 4월 사이, 즉 동계와 춘계에 'Abiki'라고 불리우는 이상파랑이 발생한다. Hibiya and Kajiura(1982)는 1979년 3월 31일에 나가사키만에서 발생하는 'Abiki'에 대한 물리적인 원인을 대상해역에 대해서 잘 검증된 수치모형을 수립하고 여러 가지 요인들의 작용을 수치실험을 통해

* 국립기상연구소 지구환경시스템연구과(Global Environment System Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea.)
** 인하대학교 해양과학과(Corresponding author : Seung-Buhm Woo, Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea. sbwoo@inha.ac.kr)
*** 기상청 관측기반국 해양기상과(Marine Meteorology Division, Observation Infrastructure Bureau, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea.)

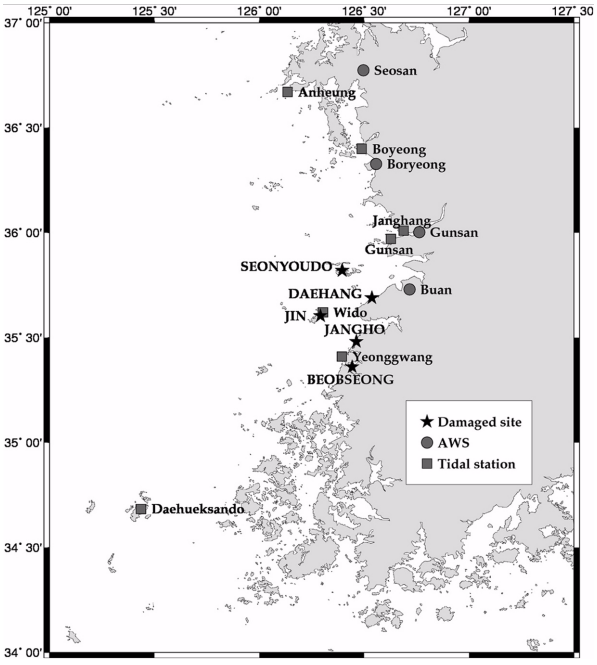


Fig. 1. Location map of damaged areas by abnormal wave on 31 March 2007, tidal stations and automatic weather stations around west coast.

복합적으로 분석하였다. 대기에서 2~6 hPa의 크기를 갖는 강한 기압 교란(pressure disturbance)이 나가사키만을 향하여 31 m/s의 전파속도를 갖고 이동하게 되면, 해양에서는 이로 인해 발생한 수위 변동이 Proudman 공진(Proudman, 1929)을 일으키며 만으로 내습하고, 이렇게 내습한 수위 변동의 주기가 만의 고유진동주기(35분)와 유사하게 되면 만내 공진을 일으켜 수위가 크게 증폭하게 된다.

유럽의 지중해에 위치한 스페인 Balearic 군도의 Ciutadella에서는 'Rissaga'라고 불리는 이상파랑이 발생한다. Fontsere (1934)는 Catalan 해안에서 발생한 이상파랑에 대해 과학적으로 분석한 논문을 처음으로 발표하였는데, 이 현상이 항상 6~9월 사이에 발생하고 기압계의 진동을 동반하고 있어 대기활동에 원인이 있을 것으로 생각하였다. Tintoré et al. (1988)은 대기파(atmospheric wave)와 해양장파의 전파, 만내에서의 공진을 이상파랑의 발생원인으로 제안하였으며, 늦봄부터 여름까지 지중해 서측의 기상상태가 기상 교란이 발생하기 좋은 여건인 것을 밝혔다. Monserrat et al.(2006)은 2006년 6월에 Ciutadella 항에서 발생한 이상파랑에 대해 분석하면서 22~30 m/s의 전파속도와 북동진하는 이동 방향을 갖는 기상교란을 이상파랑의 발생조건으로 제시하였다.

이탈리아와 크로아티아 사이의 Adriatic 해에서도 이상파랑이 발생한다. Orlić (1980)은 1978년 6월에 Vela Luka 만에 내습하여 항내의 선박을 파손시키고 침수 피해를 일으킨 이상파랑의 원인을 북동진하는 기압 교란에 의해 발생한 해수면 변동이 항내로 내습하면서 공진 작용으로 진폭이 커져 나타난 것으로 분석하였다. Vilibić et al.(2004)은 2003년 6월에 Stari Grad와 Mali Ston만에 최대 진폭 1.3 m를 갖는 이상파랑이 발생하여 해안도시가 침수되는 피해를 분석하기 위해 수치모형을 수립하였다. Šepić et al.(2009)은 이 시기의 기압과 바람 등의 기상자료를 스펙트럼 방법으로 분석하고, 대기모델을 이용하여 기압 교란 현상을 모의하였다. Belusić and Mahović(2009)는 과거에 발생했던 사상에 대해 위성사진과 기상, 해양 관측자료를 이용하여 분석하였다.

Dragani(2007)는 남아메리카 남동부에 위치한 아르헨티나의 부에노스아이레스에서 1985년 10월 13일에 발생하였던 이상파랑에 대한 분석을 수행하였다. 2차원 수치모델을 이용하여 한냉전선 통과와 대기 중력파에 의한 해수면 변동 연구를 수행하였다. 그 결과로 한냉전선은 조석보다 긴 주기의 변동을 유발하며 대기 중력파가 해양장파를 발생시키는 중요한 요인임을 밝혀내고 진행방향과 속도 등의 이상파랑 발생조건 등을 제시하였다.

국외에서 이루어진 이상파랑의 발생원인에 대한 연구결과들의 경우 이상파랑은 기상 교란으로 인해 대기로부터 해양에 에너지가 유입되고 이렇게 생성된 해양장파가 기상교란과의 외부 공진, 항이나 만내에서의 부진동, 파랑간의 상호작용 등의 여러 가지 요인들로 진폭이 증가하여 연안에 피해를 유발하는 것으로 정리할 수 있다.

국내의 이상파랑에 대한 연구는 2007년 3월 31일 서해안에 이상파랑에 의해 피해가 발생한 이후부터 진행되었다. 최 등(2008)은 2007년 3월에 전라남도 영광을 포함한 서해안 일대에서 나타난 이상파랑에 대한 연구를 수행하였다. 기상청에서 운영하고 있는 자동 기상 관측시스템(Automatic Weather Station, AWS)에서 관측된 기압자료와 국립해양조사원의 조위 관측소에서 관측된 조위 정보를 high-pass filter를 통해 분석하였으며, 일기도를 통해 국지적인 대기압 교란의 형성 가능성을 제시해 보았다. 1차원 수치모형을 통해 해양장파의 형성과정 실험을 수행하여 대기압 점프와 해양장파간의 공명효과로 진폭이 증가함을 보였으나 지형으로 인한 파랑의 공간적인 변형을 고려하지 못했다. 최 등(2009)은 2008년 5월 보령에서 발생한 이상파랑을 분석하였는데 조위 관측소의 조위자료와 파고 부이에서 관측된 파랑 자료를 필터를 이용하여 분석하였으나 뚜렷한 원인을 찾지 못했다. 해안과 내륙지역에 위치한 AWS와 레이더 관측자료를 통해 기압의 이동을 유추하였고 이상파랑 생성에 대한 여러 가지 요인들에 대해 언급하였다.

국내의 기존 연구에서는 관측자료의 경우 조위 관측소 및 AWS에서 관측된 시계열 자료를 이용하여 분석함으로 인해 기압 점프의 진행방향과 이동속도에 대한 규명이 이루어지지 않았으며, 1차원 모형을 통한 수치실험을 하여 지형에 의해 변하는 파랑을 고려하지 못했다. 본 연구에서는 시계열 관측자료에 대해 웨이블렛을 이용하여 정량적으로 분석하고 파랑변형을 고려할 수 있는 2차원 수치모형을 통해 이상파랑의 발생원인을 분석하고자 한다. 웨이블릿 분석을 통해 조위 관측소의 조위자료와 AWS의 해면기압자료로 부터 이상파랑의 도

달 시간과 전파 방향을 도출하였다. 그리고 일기도의 기압자료를 이용하여 기압대와 기압점프의 이동방향과 진행속도에 대한 분석을 수행하였다. 또한 이렇게 분석된 결과의 타당성을 수치모형실험을 통해 검증하였다.

2. 자료분석

이상파랑의 발생원인을 분석하기 위해 서해안에 위치한 조위 관측소와 AWS의 자료를 수집하였는데 관측소의 지점을 Fig. 1에 나타냈다. 서해안의 7개 조위 관측소(안흥, 보령, 장항, 군산, 위도, 영광, 대흑산도)에서 2007년 3월의 1개월 동안 관측된 1 분간격의 조위자료를 수집하였으며, Fig. 2에 6개 조위 관측소의 원자료로 부터 조석을 제거한 수위성분을 제시하였다. 조석이 제거된 비조석성분을 검토한 결과 이상파랑이 발생했던 시기에 7개 조위 관측소에서 모두 수위의 이상 변동이 나타났다. 이들 중에서도 영광과 위도에서는 수위 변화가 1 m 이상으로 높았으며 보령과 장항의 경우 다른 조위 관측소 보다 수위 변동 주기가 길게 나타났다.

이상파랑의 전파 방향을 판단하기 위해서는 각 관측지점에서 이상 수위 변동이 나타난 시각을 산정한 후에 상호 비교하여야 한다. 그러나 단순하게 수위의 변화를 이용하여 분석을 할 경우 연구자의 판단에 따라 수위 변동의 크기나 발생시기에 대한 차이가 있을 수 있다. 따라서 이로 인해 도달시간이 부정확하게 되고 이상고조 전파방향에 대한 해석의 신뢰성이 결여될 수 있다. 이상고조 발생시각에 대한 정량적인 분석을 위해 본 연구에서는 에너지를 기준으로 하여 일정 에너지 이상의 크기가 나타나는 시각을 도달 시간으로 제시하였다. 이를 위해 웨이블릿 기법을 사용하여 시계열 자료를 시간과 주기에 따른 에너지 변화로 나타냈다.

기존에 시계열 자료 분석시 주로 이용된 푸리에 변환(Fourier Transform)은 sine 과 cosine 함수, 지수함수를 이용하여 일정기간 동안의 자료에서 주파수별로 성분을 분해하므로 여러 개의 규칙적인 변화로 구성되어 있는 자료를 분석하는 데는 효과적으로 이용할 수 있다. 그러나 일시적인 성분이 포함되어 있을 때는 제대로 분해할 수 없는 단점을 갖고 있다. 하지만 웨이블릿 분석은 시계열 자료를 기저함수를 이용하여 시간과 주기에 대한 에너지로 변환시켜 시간에 따른 주기의 변화 특성을 파악할 수 있는 분석 기법이기 때문에 불규칙적이고 일시적인 이상고조와 같은 현상에 대한 분석에 적합하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 Morlet 웨이블렛을 기저함수로 적용하였다.

관측된 수위 자료에서 조석 성분을 제외한 잔차 성분에 대하여 웨이블렛 분석을 수행하고, 시간과 주기에 대한 웨이블렛 파워 스펙트럼을 Fig. 3에 나타냈다. 모든 지점에서 31일 01시 전후에 발생한 높은 파워 스펙트럼은 10 분에서 60 분 사이의 주기를 갖으며 09시 정도까지 지속되는 것을 알 수 있다. 보령과 장항 조위 관측소에서는 1~2시 사이에 32~60 분정도의 주기를 갖는 높은 파워 스펙트럼이 나타나 다른 지역보다 장주기 성분의 이상파랑이 내습한 것으로 분석되었다. 위도와 영광 조위 관측소에서 01시에서 02시 사이에 16 분 주기를 갖는 구역에 2,000 cm^2 이상의 파워 스펙트럼이 나

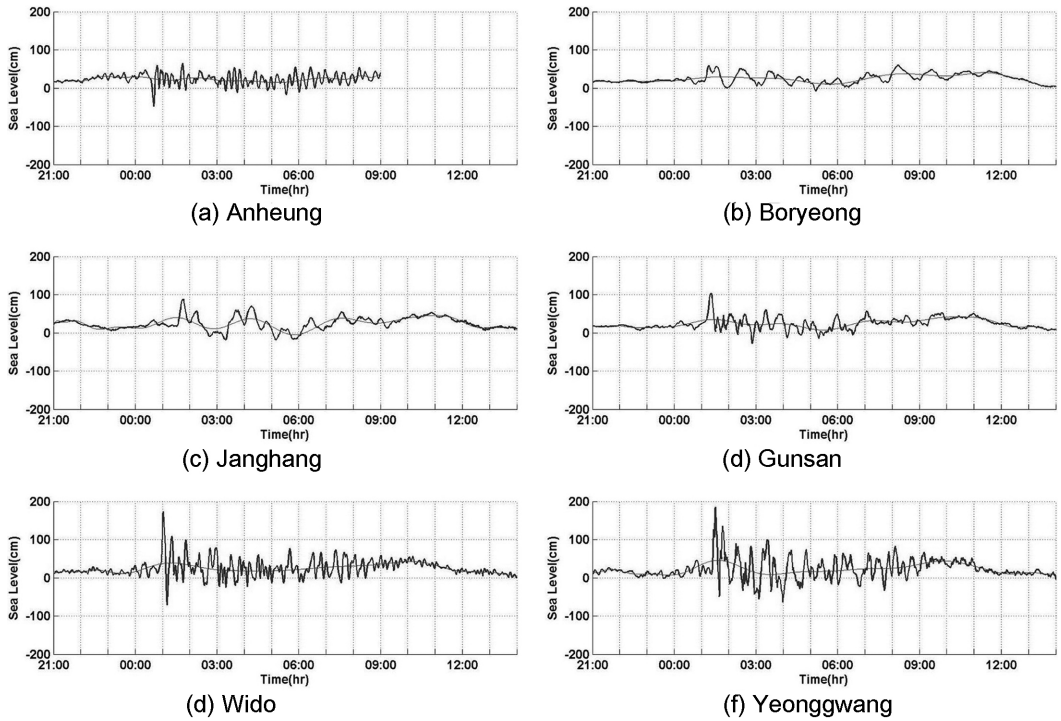


Fig. 2. Sea level oscillations for the period 2100 KST 30~1800 KST 31 March at 6 tidal stations ((a) Anheung, (b) Boryeong, (c) Janghang, (d) Gunsan, (e) Wido, (f) Yeonggwang).

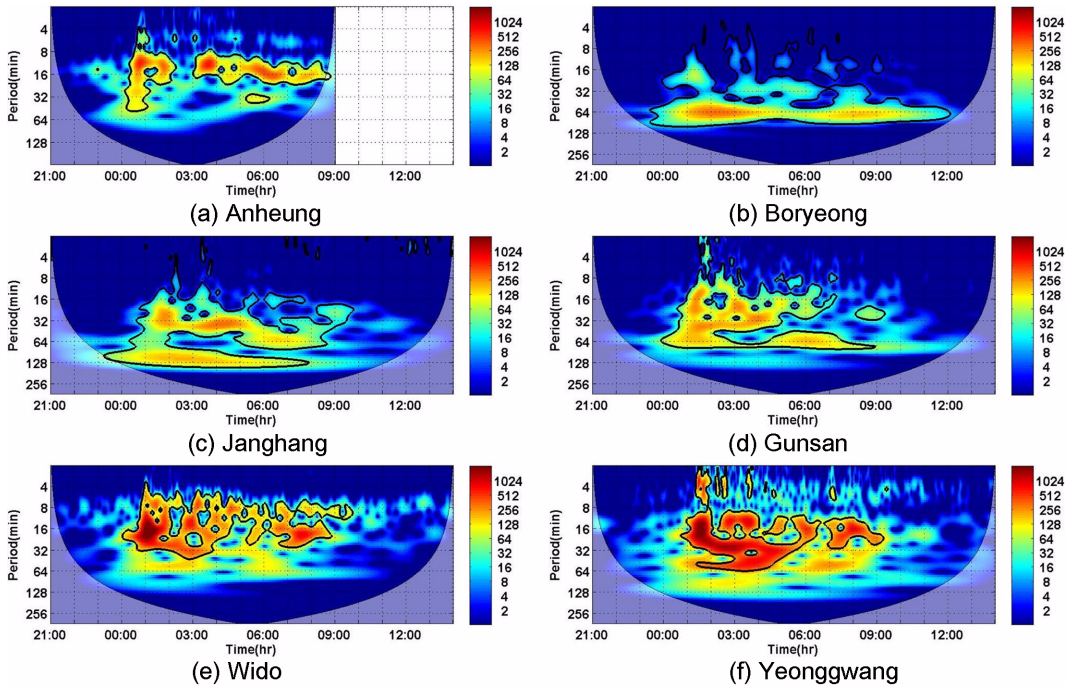


Fig. 3. The wavelet spectrum of sea level oscillations at 6 tidal stations ((a) Anheung, (b) Boryeong, (c) Janghang, (d) Gunsan, (e) Wido, (f) Yeonggwang). The thick contour encloses regions with 95% confidence level. Hatched regions on either end indicate the "cone of influence," where edge effects become important.

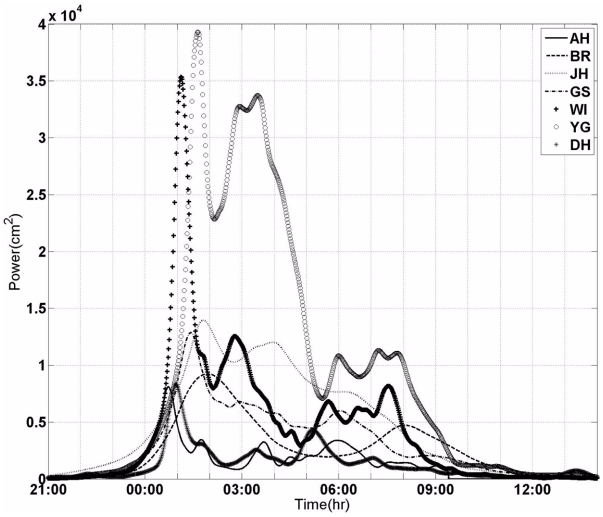


Fig. 4. Time variation of power spectrum at tidal stations.

Table 1. Results of the Wavelet analysis for sea level at 6 tidal stations

Tidal station	Wavelet spectrum according to time		Wavelet spectrum according to period	
	Maximum (cm^2)	Occuring time (hour:min.)	Maximum (cm^2)	Period (min.)
Anheung	8,099	00:43	644	12
Boryeong	9,229	01:56	334	66
Janghang	13,952	01:48	343	35
Gunsan	12,854	01:25	288	30
Wido	35,364	01:07	3,008	18
Yeonggwang	39,308	01:38	2,455	16
Daeheuksando	8,330	00:57	815	17

타났다.

도달시간을 결정하기 위해 웨이블렛 분석 결과에서 95% 유의구간에 들어가는 파워 스펙트럼의 최고값이 가장 먼저 나타난 때를 도달 시간으로 정하였다. Fig. 4에 시간에 따른 합산한 에너지의 변화를 제시하였다. 안흥(00:42), 흑산도(00:57), 위도(01:07), 군산(01:25), 영광(01:38), 장항(01:48) 및 보령(01:56)순으로 이상파랑이 도달한 것으로 나타났다. Table 1에 조위 관측소별로 도달 시각과 합산한 총 파워 스펙트럼, 그리고 최대값과 그에 대한 주기를 제시하였다. 위도에서 1시 7분에 총 파워 스펙트럼이 35,364 cm^2이며 이 시간의 최대값과 그에 대한 주기는 각각 3,008 cm^2과 18분으로 나타났다. 영광의 경우 1시 38분에 총 파워 스펙트럼이 39,308 cm^2으로 위도보다 크며, 16분의 주기를 갖는 장주기파의 파워 스펙트럼이 2,455 cm^2으로 위도보다는 작게 나타났다.

이 분석 결과를 토대로 이상파랑의 전파 방향을 분석하였으며 Fig. 5에 분석 결과를 제시하였다. 천수파의 이동속도는 수심을 통해 산정할 수 있으며 이를 각 지점간의 이동시간과 연관시키면 이동거리를 계산할 수 있다(오, 2009). 도달 시간차로 이동거리를 산정하고, 이 거리를 반지름으로 삼는 원과 이 원의 접선 중에서 이전 발생지점과 만나는 선을 해안으로 내습하는 이상파랑의 파봉선으로 생각할 수 있다. 이를 통해 분석한 결과 이상파랑은 북서측에서 진행해 온 것으로 나타났다.

이상파랑을 발생시킨 원인이 무엇인지를 밝히기 위해서 기

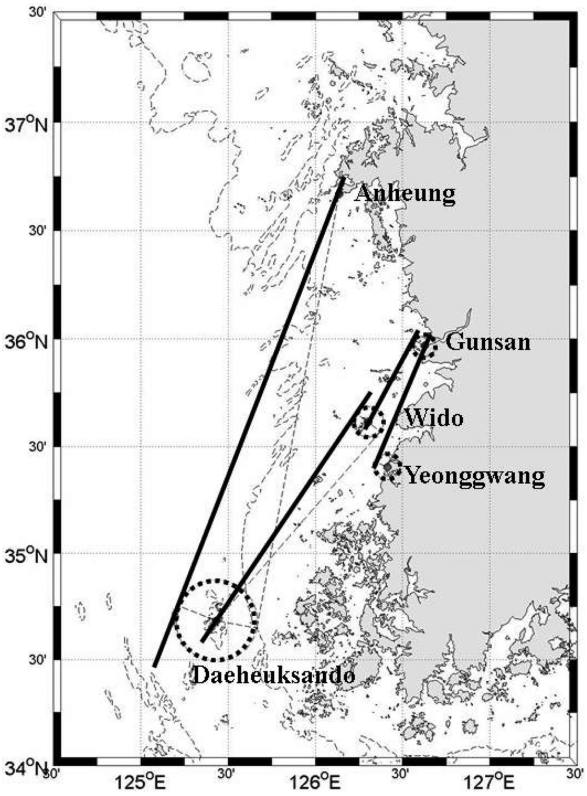


Fig. 5. Calculation method of the propagation direction of abnormal wave by using arrival time and wave celerity.

상청에서 운영하고 있는 AWS를 통해 수집된 1 분간격 해면기압 자료에 대한 분석을 수행하였다. 서해안에 위치한 서산과 보령, 군산, 부안, 흑산도 관측소의 자료를 수집하여, 장주기 성분을 제거하였다(Fig. 6). 흑산도에서는 급격한 기압변화가 나타나지 않았지만 서산에서는 30일 23시부터 31일 6시까지 최대 4 hPa의 기압변화가 계속적으로 나타났다. 또한 보령과 군산, 부안에서는 31일 0시부터 1시 사이에 4 hPa의 큰 기압 변화가 나타났고 이후에 변화폭이 감소하나 5시부터 8시까지 다시 최대 6 hPa에 이르는 기압변화가 나타났다.

기압 점프의 발생시각과 강도에 대해 정량적으로 판단하기 위해서 해면기압 관측 자료에 대해 장주기 변화를 제거한 후 웨이블렛 분석을 수행하고 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 30일 23시부터 31일 6시까지 지속적으로 기압 변화가 나타났던 서산에서는 31일 0시 전후에 60분 내외의 주기를 갖는 성분이 나타났고 이후에 6시까지 30분 내외로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 1시부터 16 분대의 주기를 갖는 성분도 나타나 6시까지 지속된 것으로 분석되었다. 보령과 군산, 부안에서는 31일 0시부터 2시, 5시부터 8시까지 2회의 유의한 구간이 나타났으며 0시부터 2시까지는 60 분 주기의 성분이, 5시부터 8시까지는 주기가 16 분부터 60 분을 갖는 성분이 나타났다.

AWS를 통해 한반도 전역에서 관측된 해면기압 자료의 분포도를 Fig. 8에 제시하였다. 2007년 3월 31일 01시 전후의 기압 분포를 보면 서측 지역에 기압점프가 북서측에서 남동측으로 향하는 것으로 나타나 한반도 내륙지역에서 진행하는 기압점프를 확인할 수 있다. 1007.4 hPa에서 1012.7 hPa으로 변동하여 5.3 hPa의 크기를 보인다. 그러나 2007년 이상파랑 발생 당시의 AWS 관측자료가 내륙지역에만 존재하기 때문에 외해에서의 기압 점프 이동은 일기도 자료를 이용하여 유추하였다.

Fig. 9에 서산과 여수 사이에서 시간에 따른 해면기압의 변화를 제시하였다. 그림에서 x 축은 서산으로부터 여수까지의 거리를 km 단위로 하였으며, y 축은 기압으로 hPa 단위로 나타냈다. 3월 31일 자정부터 35분, 51분, 67분, 84분 및 107분 후의 해면기압을 선정하여 변화를 제시하였다. 35분에 서산에서 17 km 떨어진 지점에 위치한 1013.3 hPa의 고기압은 51분에 43 km, 67분에 52 km, 84분에 104 km 및 107분에 139 km 지점으로 이동을 하였다. 이것을 토대로 기압의 이동속도를 계산한 결과 평균적으로 28 m/s로 나타났다.

기상청에서 제공하는 3시간 간격의 분석일기도를 Fig. 10에 제시하였다. 30일 21시에 산동반도 북측 발해만에 위치한 기압골이 한반도 남동해안까지 이동하는 데 9시간 정도가 소요되었으며, 기압대의 이동의 평균 속도는 약 28 m/s이다. 기

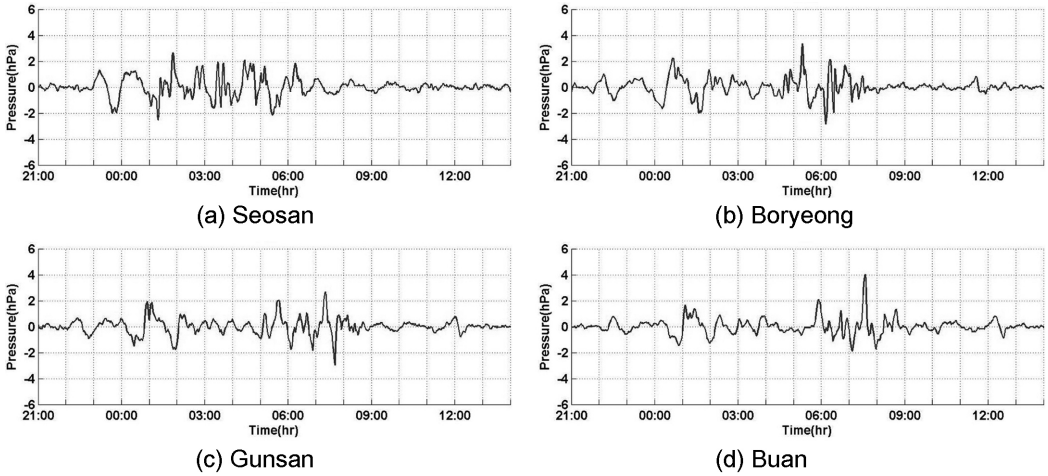


Fig. 6. Time variation of the detrended mean sea level pressure measured at 4 AWS ((a) Seosan, (b) Boryeong, (c) Gunsan, (d) Buan).

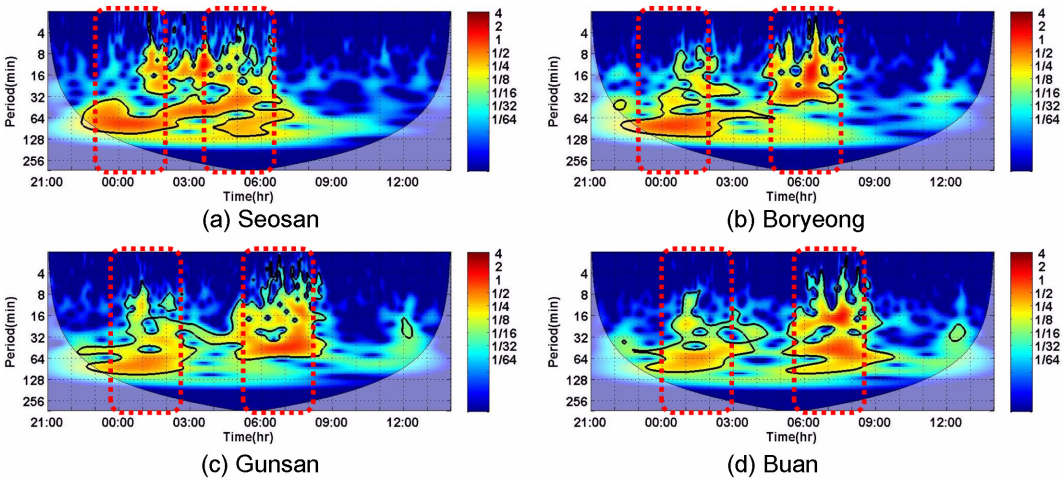


Fig. 7. The wavelet spectrum of detrended mean sea level pressure at 4 AWS ((a) Seosan, (b) Boryeong, (c) Gunsan, (d) Buan).

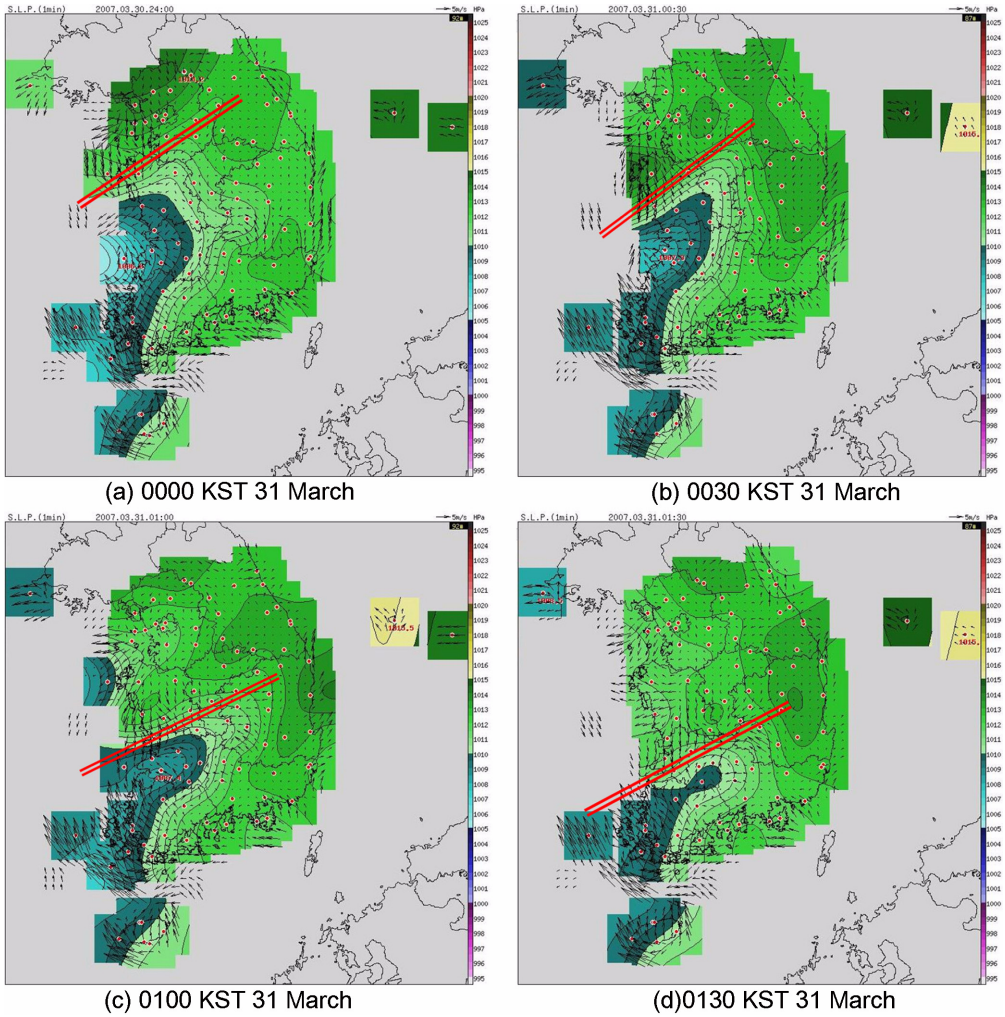


Fig. 8. Mean sea level pressure measured at AWS at (a) 0000 KST 31 March, (b) 0030 KST, (c) 0100 KST, (d) 0130 KST.

압점프가 일기도에 표시되어 있지 않지만 기압대와 기압점프가 유사하게 이동한 것으로 나타났다. 황해 동부 해역의 평균수심을 60 m로 볼 때 천수파의 속도($c = \sqrt{gh}$)는 계산하면 25 m/s가 되며, 이는 기압 점프와 유사한 전파속도이다. 천수파가 기압점프와의 공진작용으로 인해 발달하여 우리나라 서해안에 내습했다고 판단할 수 있다.

3. 수치실험

관측 자료들을 통해 전절에서 분석한 내용을 확인하고 서

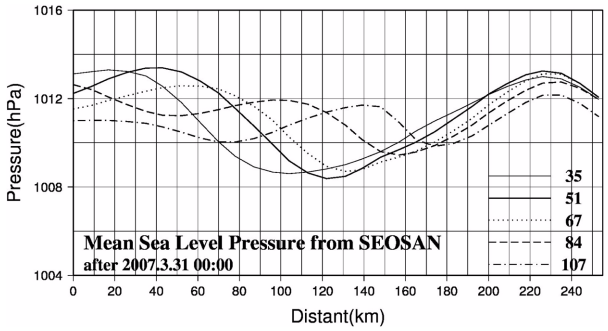


Fig. 9. Variation of the mean sea level pressure between Seosan and Yeosu, measured after 35 min. (thin line), 51 min. (thick line), 67 min. (dotted line), 84 min. (dashed line), 107 min. (dash-dot line) from 0000 KST 31 March.

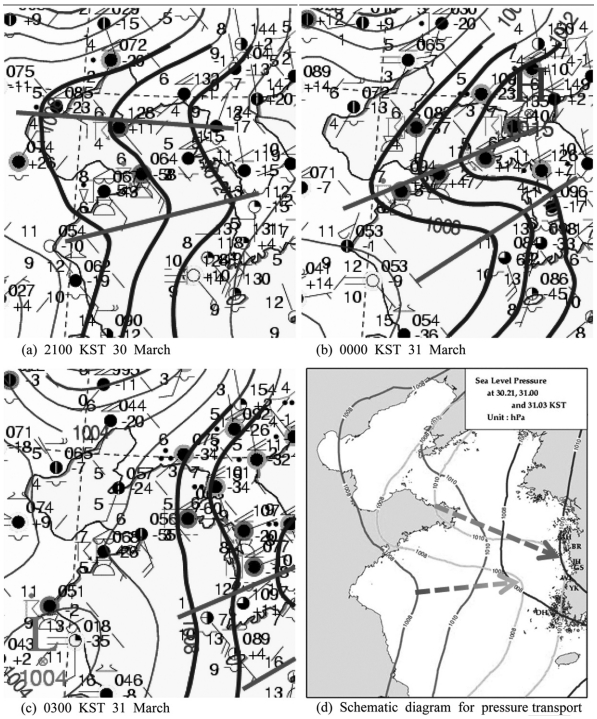


Fig. 10. 3 hourly weather charts for the period 2100 KST 30~0300 KST 31 March and illustration of pressure contours on 2100 KST 30(red line), 0000 KST 31(green line) and 0300 KST 31(blue line).

해안에 발생한 이상파랑을 재현하기 위해 수치모형실험을 수행하였다. Table 2에 계산영역과 수치모형 등에 대한 개요를 제시하였다. 계산영역은 황해와 동중국해 그리고 발해만을 포함하도록 설정하여 전체 영역을 750 m의 격자크기로 구성하였다. 수심은 한국해양연구원에서 제작한 KorBathy30s 자료(서, 2008)를 기본적으로 사용하였으나 발해만 부근의 수심이 포함되어 있지 않아 ETOPO5 자료(NGDC, 1988)를 추가하였다.

기압 점프의 형태는 AWS 기압 관측자료를 참고하였으며 기압의 이동 패턴을 간략하게 표현하였다. 기압 점프의 진폭은 5.3 hPa으로 하였으며 주기는 관측자료의 웨이블렛 분석 결과를 참고하여 60분으로 하였다. 실험은 총 2 가지를 수행하였는데 일기도에 나타난 기압을 입력한 것과 기압점프와 일기도 기압을 동시에 적용한 실험을 수행하였다. 기압 점프의 이동은 AWS에 나타난 기압 분포 변화와 일기도 기압대의 이동을 참고하여 설정하였으며 일기도 기압 자료는 3시간 간격의 일기도에 나타나 있는 기압 분포를 적용하였다. 실험 결과로는 기압과 해수위 분포도를 제시하였으며 수치실험을 통해 계산된 결과들은 조위 관측소에서 관측된 수위자료와 비교하였다.

Table 2. Condition of numerical experiments

Contents		Descriptions
Model		COMCOT
Bottom topography		KorBathy30s, ETOPO5 m
Grid system		Cartesian coordinate, dx = dy = 750 m
Profile of pressure disturbance		Amplitude : 3 hPa Period : 60 min.
Run cases	Case 1	Mean sea level pressure on Weather chart
	Case 2	Case 1 + Pressure disturbance

본 실험에 사용한 수치모형은 COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) 모델(Liu et al., 1998)로서 미국 코넬대학교의 Liu 교수팀에서 지진해일의 생성과 전파 모의를 위해 개발된 것으로 지진해일과 시간과 공간적으로 유사한 특성을 갖는 이상파랑에 대한 모의에 적합할 것으로 생각된다. 이 모형의 지배방정식은 식(1)~(3)와 같으며, 비선형 천수방정식으로 구면좌표계와 직교좌표계 모두를 적용할 수 있도록 구성되어 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{H}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{H}\right)+gH\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\tau_x H=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{PQ}{H}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q^2}{H}\right)+gH\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\tau_y H=0 \tag{3}$$

여기서, 식 (1)에서 ζ은 수위, P와 Q는 x와 y 방향의 이동량을 나타낸다. 천수방정식을 풀기 위해 외삽법의 Leap-frog의 유한차분법을 적용하였다. 바닥 응력인 τ_x 와 τ_y 는 Manning 공식으로 적용하였다(식(4)~(5)).

$$\tau_x=\frac{gn^2}{H^{10/3}}P(P^2+Q^2)^{1/2} \tag{4}$$

$$\tau_y=\frac{gn^2}{H^{10/3}}Q(P^2+Q^2)^{1/2} \tag{5}$$

여기서, n은 Manning의 상대 거칠기 계수이다.

수위와 이동량은 시간과 공간에 대해서 교호격자상에서 풀며, (Δt^2, Δx^2)의 정확도를 갖는다. 정사각형 격자를 사용하

고 둥지형 격자체계를 통해 광역과 상세역에서 나타나는 해일의 전파와 변형을 재현할 수 있다. 그리고 이동경계 처리 기법이 포함되어 있어 조간대와 같은 연안 저지대에 대해서 수위 증감에 따른 계산영역의 변화를 고려할 수 있다. 이 기법에서 해안선은 바다격자와 육지격자가 접해있는 영역으로 정의하며 이 영역에 대해 연직한 이동량은 없도록 한다.

기상청에서 제공하는 3시간 간격의 일기도에 나타나 있는 해면기압을 수치해석 모델에 외력조건으로 적용하였다. 3시간 간격사이의 기압은 일정한 방향과 속도를 가지고 움직이는 것으로 가정하였으며, 30일 21시, 31일 00시 및 31일 03시 의 일기도에 나타난 기압 분포를 분석하였다. 30일 21시에서 31일 00시에 산동반도 남측에서 한반도 서해안으로 이동하는 저기압(1008 hPa)이 존재하는 것으로 보이며, 31일 00시에서 03시 사이에는 산동반도 북측으로부터 남동측으로 이동하는 기압(1010 hPa)이 나타나 있다(Fig. 9). 이 두가지 기압의 이동 패턴의 속도는 약 28 m/s로서 천수파 전파속도(25 m/s)와 유사하여 장주기파 생성에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

서해안에 위치한 6개 지점의 AWS 관측자료를 통해서 기압 점프가 발생하여 통과한 것을 알 수 있었으며 한반도 전역의 자료를 이용하여 내륙지역에서의 이동방향과 크기를 확인하였다. 그러나 서해와 황해 해상에서의 기압 점프 정보는 AWS 자료에는 나타나 있지 않기 때문에 일기도에 제시된 기압 자료를 이용하여 기압 점프의 이동을 유추하였다. 기압 점프는 상층의 기압 분포와 기층의 불안정한 것과 상관이 있으며 저기압 또는 이동하는 전선에 수반하여 발생하므로, 본 연구에서는 황해상에서의 기압 점프 이동은 기압대와 같은 패턴을 갖는다고 가정하였다(Belusić and Mahović, 2009). Fig. 11에 기압 점프의 진행 방향을 제시하였다.

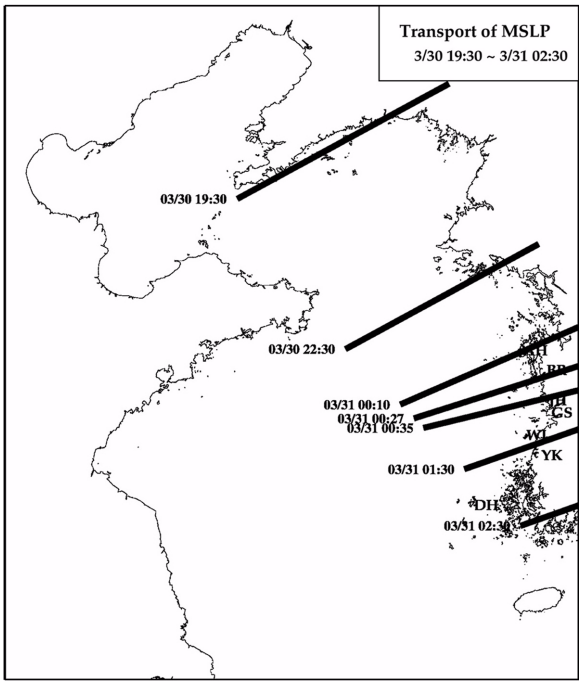


Fig. 11. Moving pattern of pressure disturbance from 1930 KST 30 to 0230 KST 31 March.

4. 결 과

실험 1안은 일기도에 나타난 기압 자료를 입력한 실험이며, Fig. 12에 3시간간격의 수위분포도를 제시하였다. 기압의 분포에 따라서 수위가 변화하였는데 30일 19시 30분과 22시에는 황해의 서측해역에 동측보다 낮은 기압이 위치함으로 인해 높은 수위가 나타났다. 31일 00시에는 산동반도 남측에서 한반도 서해안으로 진행한 기압(1008 hPa)대로 인해 서해안의 수위가 상승하는 것으로 나타났으며 31일 02시 30분에는 산동반도 북측에서 남동진한 기압(1010 hPa)로 인해 서해안에 수위가 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 이때 발생한 수위의 변동은 기압의 변화가 작았던 것처럼 10 cm 이하로 크기가 작았으며 조석보다 더 긴 주기를 갖는 변화로 나타났다.

실험 2안은 기압 점프와 일기도의 기압 자료를 동시에 적용한 경우이며, 기압 점프가 산동반도 북측에서부터 한반도 서해안까지 이동하였다. 실험한 결과 기압의 이동에 따라 이상파랑이 진행하는 것으로 나타났다. Fig. 13에는 산동반도 북측의 발해만에서부터 영광까지의 해역을 연결하는 직선상에서 시간에 따라 변화하는 기압과 수위를 도시하였다. 기압 점

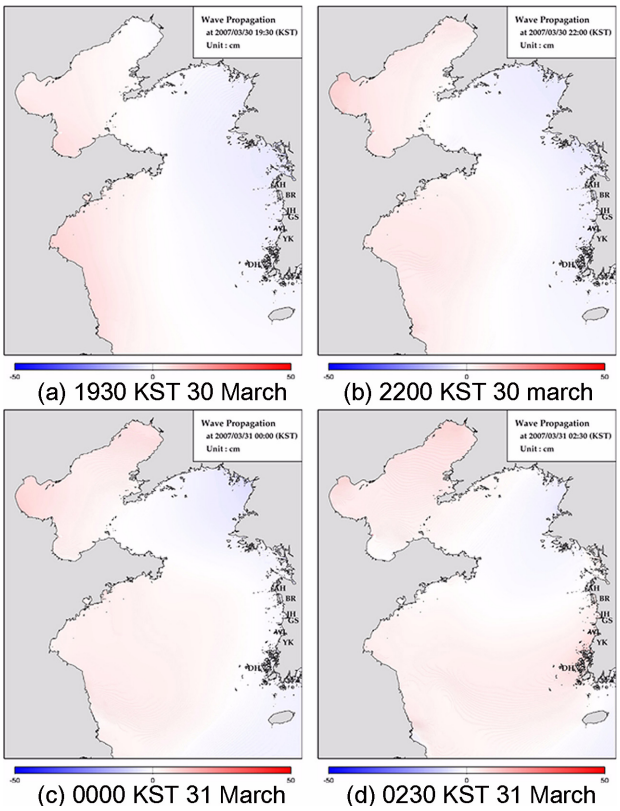


Fig. 12. 3hourly sea levels for Case 1 at (a) 1930 KST 30 March, (b) 2200 KST 30 March, (c) 0000 KST 31 March and (d) 0230 KST 31 March.

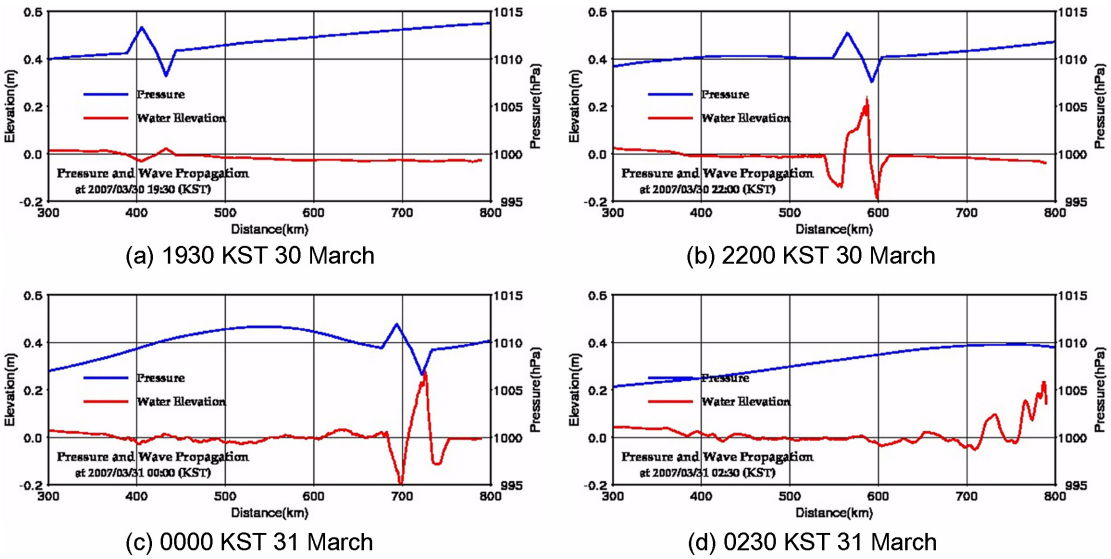


Fig. 13. The snapshots of mean sea level pressure and water elevation for Case 2 at (a) 1930 KST 30 March, (b) 2200 KST 30 March, (c) 0000 KST 31 March and (d) 0230 KST 31 March.

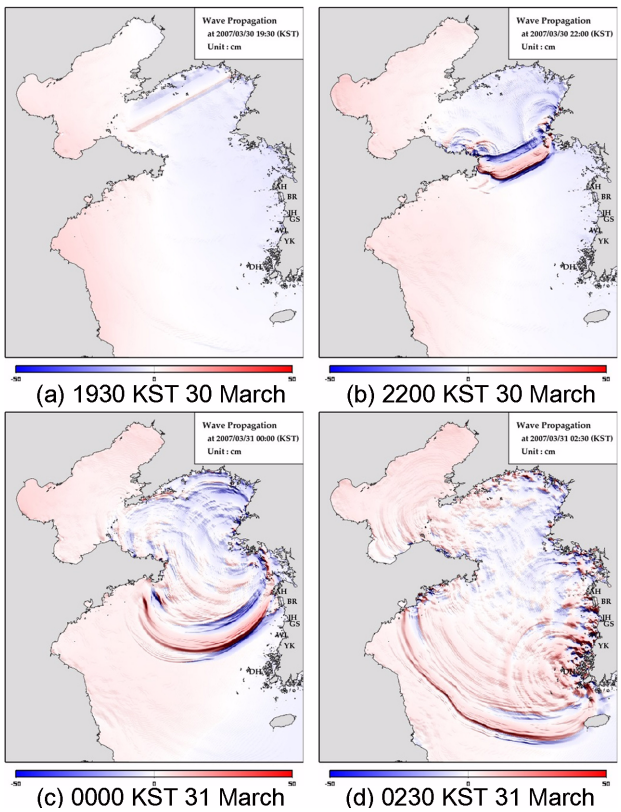


Fig. 14. Spatial distribution of wave propagations for Case 2 at (a) 1930 KST 30 March, (b) 2200 KST 30 March, (c) 0000 KST 31 March and (d) 0230 KST 31 March.

프가 진행하면서 발생된 해수면의 변동이 Proudman 공진에 의해 점차 증가하는 것으로 나타났다. 기압 변동은 직선 형태로 간략화하여 입력하였지만 이로 인해 발생한 수위 변동은 수심에 따른 전파속도의 차이로 인해 변형되는 것을 알 수 있다. Fig. 14에 수위 분포도를 제시하였는데 일기도 기압에 의한 수위 분포와 기압점프에 의한 변동이 동시에 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 15에 각 관측위치에서의 수위 변화에 대해 수치실험 결과와 관측치를 비교하여 제시하였다. 영광 조위 관측소에서 관측된 이상파랑은 1:38분경에 165 cm 정도로 나타났으나 기압점프를 기압대의 진행패턴과 유사하게 적용한 실험 2안은 1:32분경에 85 cm로 산정하였다. 그리고 일기도에 나타난 기압의 변화만을 적용한 실험 1안은 7 cm의 수위 상승이 나타났다. 전반적으로 최대 수위차에 있어서 관측치의 절반 정도의 수위가 산출되었으나 이상파랑의 도달 순서는 관측자료를 토대로 검토한 결과와 유사하게 나타났다(Table 3).

5. 토의 및 결론

2007년 3월 31일에 서해안 인근에 나타난 이상파랑 내습 기간에 관측된 자료를 분석하고 수치실험을 수행하였다. 기상청의 분석일기도에 제시된 기압분포와 AWS에 나타난 기압 점프를 수치모델의 외력조건으로 적용하였으며 기압 점프에 의해 이상파랑이 생성되고 발달하는 것을 확인하였다. 실험 결과 이상파랑의 초기 도달시간이 관측치와 유사하게 나타났으며, 이는 본 실험에서 가정한 기압점프의 이동방향과 속도가 타당하다고 할 수 있다.

그러나 산정된 수위의 크기는 관측치에 비해 작게 산정되었는데 이렇게 산정된 몇가지 원인은 다음과 같다. 첫째, 외해에서 발생한 이상파랑이 연안으로 전파하면서 부진동, 굴절, 회절 및 천수 등 파랑변형과정을 통해 변화가 발생하는데 이 변형 효과를 제대로 반영하지 못했기 때문으로 생각된다. 이것은 연안을 상세하게 모의할 수 있는 수치모델을 통해 개선이 가능할 것으로 보인다. 둘째, 본 실험에서 외력조건으로 사용한 일기도에 나타나 있는 해면기압의 불확실성 및 제한성 때문이다. 일기도 작성시 사용할 수 있는 해상 관측

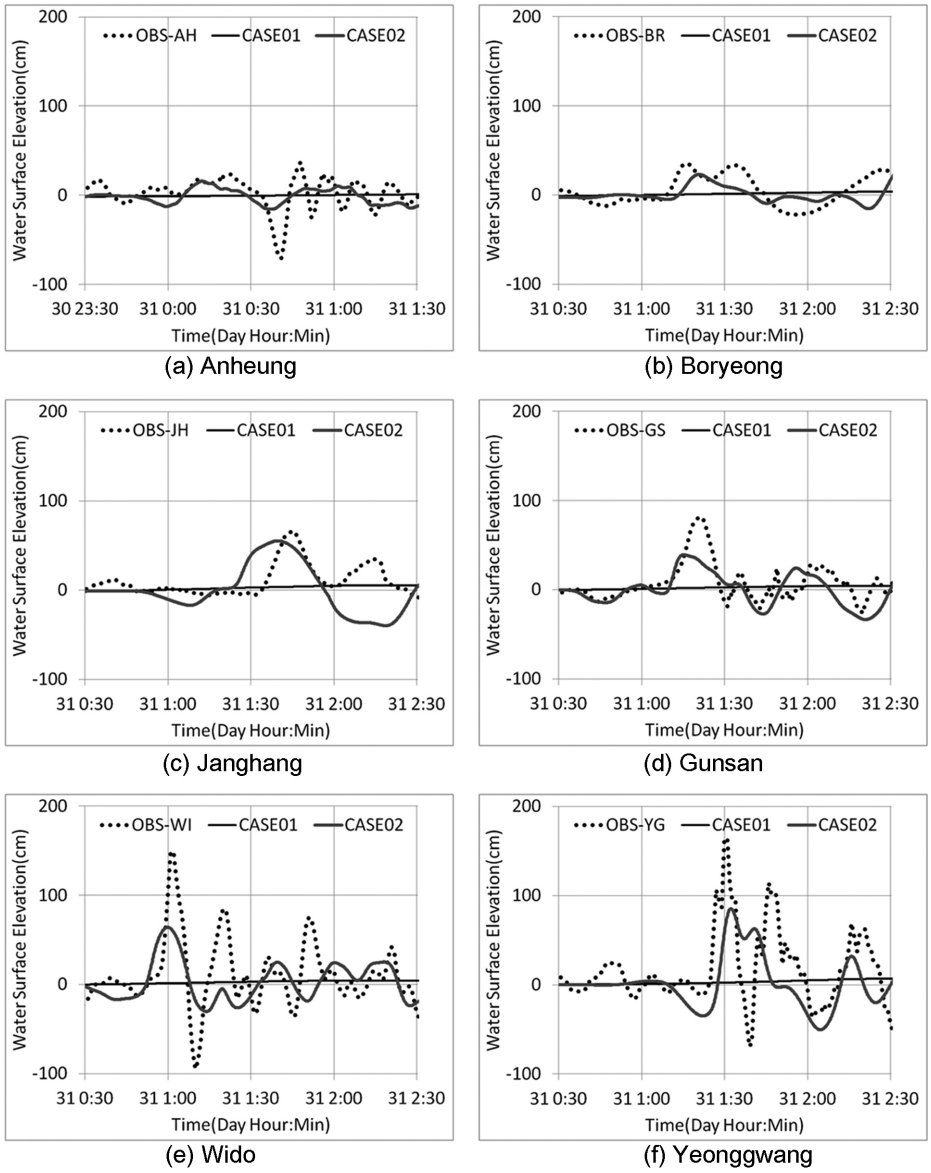


Fig. 15. Comparison of measured (dotted line) and computed (Case 1 (black line) and Case 2 (blue line)) sea level at (a) Anheung, (b) Boryeong, (c) Janghang, (d) Gunsan, (e) Wido, (f) Yeonggwang.

Table 3. Comparison of measured and computed order of arrival time and maximum residual at 6 tidal stations

Tidal station	Order of arrival time		Max. residual (cm)	
	Measured	Computed	Measured	Computed
Anheung	1	1	70.8	15.7
Boryeong	7	5	35.1	23.1
Janghang	6	7	65.9	55.2
Gunsan	4	4	81.3	39.2
Wido	3	3	149.5	64.1
Yeonggwang	5	6	164.5	85.4
Daeheuksando	2	2	51.9	51.8

자료가 부족하기 때문에 일기도에 표시된 해상에서의 기압 정보가 부정확할 것이다. 또한 분석일기도가 3시간 간격으로 작성되어 있어 1분 간격의 AWS 관측자료에는 나타난 기압점프가 표현되지 못하고 있다. 따라서 일기도는 공간적으로나 시간적으로 기압 점프를 표현할 가능성이 낮다.

앞으로 이상파랑의 발생원인을 명확히 밝히기 위해서는 황해 주변의 기상관측자료를 수집하여 이 시기의 기상 상태에 대한 이해를 높일 필요가 있다. 그리고 일기도 자료의 AWS 관측자료와 비교 검토를 수행하여 수치모형실험에 적용한 외력조건에 대한 검증을 수행하여야 할 것이다. 본 실험에서는 기압 점프가 직선으로 전파하도록 나타내었으나 호 형태의 곡선으로 적용하는 것이 더 타당할 것으로 생각된다.

그리고 기압 점프가 나타날 수 있도록 중규모 대기모델(WRF : Weather Research and Forecasting, Wang et al., 2008)를 통해 공간적으로도 시간적으로도 상세하게 기상 상태를 산정하고, FVCOM(Unstructured Grid Finite Volume

Coastal Ocean Model, Chen et al., 2003)과 같은 가변격자 체계 모형을 수립하여 연안에서의 파랑 변형을 구현하는 것을 추후 연구로 계획하고 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-2021)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

서승남 (2008). 한국 주변해역 30초 격자수심-KorBathy30s. 한국해안 · 해양공학회논문집, 20(1), 110-120.

오유리 (2009). Wavelet을 이용한 해수면 이상고조에 관한 연구. 석사학위논문, 인하대학교.

최병주, 박용우, 권경만 (2008). 2007년 3월 서해안에 발생한 해양장파의 형성과 성장과정. Ocean and Polar Research, 30(4), 453-466.

최진용, 이동영 (2009). 보령 이상파 발생과 관련한 소규모 기압점프 이동에 대한 분석. Ocean and Polar Research, 31(4), 379-388.

Belušić, D. and Mahović, N.S. (2009). Detecting and following atmospheric disturbances with a potential to generate meteotsunamis in the Adriatic. Physics and Chemistry of the Earth, 34, 918-27.

Chen, C.S., Liu, H.D. and Beardsley, R.C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20(1), 159-186.

Dragani, W.C. (2007), Numerical experiments on the generation of long ocean waves in coastal waters of the Buenos Aires province, Argentina, Continental Shelf Research, 27, 699-712.

Fontseré, E. (1934). Seiches on the Catalan coast. Notes d'Estudi, 58. Servei Meteorolgic de Catalunya, Barcelona, Spain (in Catalan).

Hibiya, T., Kajiura, K. (1982). Origin of 'Abiki' phenomenon(kind of seiches) in Nagasaki Bay. Journal of Oceanographical Society of Japan, 38, 172-182.

Liu PL. F., Woo, S.B. and Cho, Y.S. (1998): Computer programs for tsunami propagation and inundation. Cornell University, New York.

Monserrat, S., Vilibić, I. and Rabinovich, A.B. (2006). Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 1035-1051.

NGDC (1988). Data Announcement 88-MGG-02, Digital Relief of the Surface of the Earth. NOAA, National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.

Proudman, J. (1929). The Effects on the Sea of Changes in Atmospheric Pressure. Geophys. Suppl. Mon. Notices R. Astr. Soc., 2(4), 197-209.

Orlić, M. (1980). About a possible occurrence of the Proudman resonance in the Adriatic, Thalassia Jugoslavica, 16(1), 79-88.

Šepić, J., Vilibi, I., and Belui, D. (2009). Source of the 2007 Ist meteotsunami (Adriatic Sea). Journal of Geophysical Research, 114, C03016, doi:10.1029/2008JC005092.

Tintor, J., Gomis, D., Alonso, S. and Wang, D.P. (1988). A theoretical study of large sea level oscillations in the Western Mediterranean, Journal of Geophysical Research, 93(C9), 10797-10803.

Vilibić, I., Domijan, N., Orli, M., Leder, N., and Pasari, M. (2004). Resonant coupling of a traveling air-pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters, Journal of Geophysical Research, 109, C10001, doi:10.1029/2004JC002279.

Wang, W., Barker, D., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Michalakes, J. and Rizvi, S. (2008). User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division-National Center for Atmospheric Research (MMM-NCAR).

원고접수일: 2012년 5월 24일
수정본채택: 2012년 6월 15일
게재확정일: 2012년 6월 15일