

태풍 볼라벤 (1215)의 서해안 폭풍해일 분석 Storm Surges in West Coast of Korea by Typhoon Bolaven (1215)

서승남*** · 김상익***
Seung Nam Seo*** and Sang Ik Kim***

요 지 : 태풍 볼라벤의 폭풍해일을 분석하기 위해 단순한 해석적 모형들을 사용하여 서해안 발생한 폭풍해일의 주요 원인을 조사하였다. 여기서 사용된 단순한 해석적 모형은 볼라벤의 실제 현상을 정확하게 재현할 수는 없으나, 폭풍해일에 내재된 주요 물리현상의 설명에는 충분하였다. 수심이 상대적으로 깊은 섬에 발생한 폭풍해일은 태풍에 동반된 바람보다는 저기압에 의한 해면상승이 주도적으로 작용하였다. 천해인 연안지역에서는 저조시에 1 m 이상의 해일고가 관측되었고 이는 주로 바람에 의해 발생된 것이다.

핵심용어 : 태풍 볼라벤, 폭풍해일, 한국 서해안, 해석해

Abstract : To analyze the surface elevation data of Typhoon Bolaven, simple analytical models are employed to investigate major causes of the storm surges in the west coast of Korea. Although the simple models cannot reproduce the storm surges by Typhoon Bolaven accurately, they are able to provide sufficient evidence of physical processes involved in the storm surges. Surges in islands located at deeper water were mainly driven by typhoon low pressure rather than associated winds. In contrast, bigger storm surge heights more than 1m were recorded in shallow coastal areas during low tide, which were dominantly produced by typhoon winds.

Keywords : Typhoon Bolaven, Storm surge, Korea west coast, Analytical solutions.

1. 서 론

태풍 볼라벤 (BOLAVEN, 태풍번호: 1215)은 2012년에 북서태평양에서 발생한 15번째 태풍으로 중심기압이 910 hPa 까지 도달했던 슈퍼태풍이며, 한반도에 영향을 준 세번째 태풍이다. 태풍 볼라벤은 앞서 발생하여 근접한 위치에서 함께 이동한 제14호 태풍 덴빈과 서로 영향을 주고받는 후지와라 효과로 인해서, 중국으로 서진하는 초기 예상진로가 바뀌어 한반도로 북서진하게 되었다. 이 태풍으로 인해 우리나라에서 19명이 숨지는 인명사고와 동반된 강풍으로 인해 상당한 농작물 피해가 발생하였다. 특히 전라남도 완도군에서 최대 순간풍속이 51.8 m/s를 기록해 강풍으로는 2007년의 태풍 나리 이후 가장 강한 태풍이었고, 전라남도 신안군 흑산도에서는 해면기압이 961.9 hPa로 지상에서 관측된 최저 해면기압으로는 7위로 기록되었다. 또한 북위 28.4도에서 중심기압이 935 hPa, 북위 30.5도에서도 중심기압이 945 hPa를 유지하는 등 상당한 고위도 지역에서도 ‘매우강’한 세력을 유지했으며 황해도에 상륙한 후 온대저기압으로 약화되어 러시아 극동지

방으로 진출하였다.

태풍 볼라벤은 Fig. 1에 보인 바와 같이 서해상을 2012년 8월 28일 통과하면서 연안에 상당히 높은 폭풍해일을 발생시켰다. 동반된 강풍으로 인해 우리나라 조위관측소 가운데 13 개소에서 100 cm 이상의 해일고가 관측되었고, 최대 해일고는 고흥에서 167.6 cm이고 인천에서도 151.5 cm를 기록하였다. 이는 Chu (1987)가 조사한 1980대 이전에 발생한 폭풍해일의 최대 해일고 109 cm를 상회한다.

최근 지구 온난화에 의한 해수면 온도의 상승은 태풍의 강도를 증가시키고 동반된 풍속도 같이 강해져 해일고가 증가하는 경향이 있다. 한편, 지난 반세기 이상 한반도에 상륙한 태풍을 분석한 Choi et al.(2012)은 1980년 초반 이후의 태풍은 그 이전에 비해 태풍 상륙빈도가 급증하였으며, 북태평양 고기압이 남서쪽에 위치한 이전에는 한반도 서해안 중북부에 상륙한 반면, 이후에는 북태평양 고기압이 좀 더 북동쪽에 위치하여 서해 남부와 남해안에 상륙한다는 점을 밝혔다. 이 두 기간의 태풍진로 차이에 따른 시사점은 이전 태풍들은 한반도 상륙전 중국대륙을 경유하여 강도가 약화된 반

* 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부 (Corresponding author: Seung Nam Seo, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 426-744, Republic of Korea, Tel.: +82-31-400-6331, Fax: +82-31-400-5823, snseo@kiost.ac).

** 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 (Ocean Science & Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Republic of Korea, snseo@kiost.ac).

*** 한국해양과학기술원 연안재해·재난연구센터 (Coastal Disaster Research Center, KIOST, Ansan 426-744, Republic of Korea, sikim@kiost.ac).

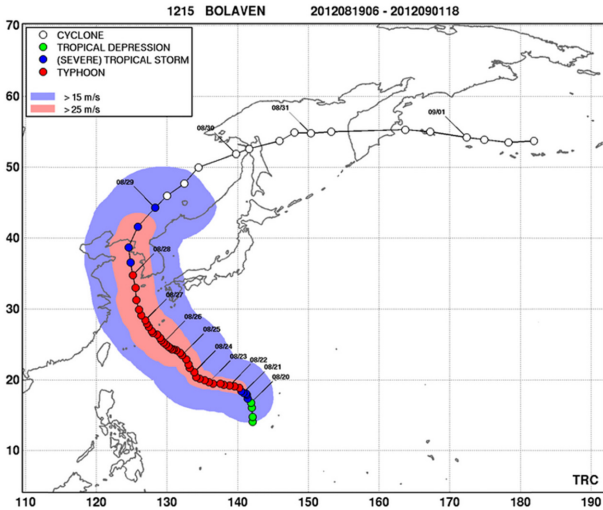


Fig. 1. Typhoon Bolaven track 2012.8.19~2012.9.1) from Tropical Research Center web site.

면에, 이 후의 태풍은 바다 위를 지나면서 충분한 에너지를 공급받아 강도가 강해진 경향이 뚜렷함을 자료로 입증하였다. 위의 두 가지 요인으로 한반도에 상륙하는 태풍의 강도가 유지되거나 강화될 것으로 보이며 이로 인한 해일고 역시 증가할 것으로 예상된다.

해일은 연안 저지대에 범람과 침수를 야기시켜 많은 인명과 재산의 손실을 야기시킨다. 과거 폭풍해일에 대한 기록으로는 1970년 방글라데시에서 사이클론 Bhola에 의해 최대 50만명 사망자가 발생하였고, 2005년 미국 루이지아나를 덮친 허리케인 Katrina는 사망자 1800여명과 재산손실 1080억불의 막대한 피해를 입혔으며, 2013년 필리핀 중부를 통과한 태풍 Haiyan은 5700명 사망자와 24억불 피해를 남겼다 (Wikipedia, 2013). 그래서 많은 국가에서 해일에 의한 피해를 줄이기 위한 방법의 하나로 수치모형에 의한 해일예보 체계를 운영하고 있다. 많은 수치모형들이 국내외에서 개발되어 사용되고 있으며 한국해양과학기술원에서는 Lee et al.(2008)의 모형을 사용하여 72시간 이전 예보를 평시에는 매 12시간, 태풍시에는 3시간 간격으로 발표하고 있다. 기상청에서는 POM (Mellor, 1998)에 기반을 둔 폭풍해일 모형을 개발하여 예보에 활용하고 있으며 You and Lee(2010)는 국내외 수치모형 개발현황과 기상청 수치예보모형을 소개하였다. Suh et al.(2012)는 SLOSH 모형 (Jelesnianski et al., 1992)과 ADCIRC 모형 (Blain and Rogers, 1998)을 기상예보와 연동하여 준 실시간 예보를 위한 선행연구를 수행하였다.

미국에서는 허리케인에 의한 폭풍해일 예보에 SLOSH 모형을 사용하고 있으며, 허리케인 예보의 부정확성은 SLOSH 계산에 오류를 발생시킨다. 또한 SLOSH 모형의 단점으로는 해일에 동반된 파랑의 영향과 홍수시 흐름에 대한 영향을 충분히 고려하지 않은 모형의 한계를 들 수 있다. 이러한 단점을 감안하여 최근에는 유사한 허리케인에 대한 수많은 SLOSH 계산결과를 이용한 확률론적인 방법으로 구한

Maximum Envelopes of Water (MEOWs)과 Maximum of MEOWs (MOMs)를 사용하여 예보한다 (National Hurricane Center, 2013). 폭풍해일에 대한 수치모형의 예측은 다른 방법보다 훨씬 정확하나, 위에 기술한 단점들이 개선보완되어야 보다 정확한 예보가 가능하다.

본 논문에서는 서해를 통과한 볼라벤의 자료를 분석하고 해안에서 발생한 폭풍해일을 단순한 해석적 모형들을 사용하여 내포된 주요 현상을 해석하고자 한다. 사용된 해석적 모형은 특수한 가정하에서만 성립하기 때문에 실제 현상을 모두 재현할 수는 없으나, 볼라벤 폭풍해일에 내재된 주요 물리현상을 설명할 수 있음을 보이고자 한다. 본 연구에서는 일정한 바람이 지속적으로 해안에 불 때 형성되는 해면상승 효과와 일정한 수심 위를 일정한 속도로 움직이는 이동성 저기압에 의한 해면변화를 대상으로 이들을 실측자료와 비교·분석하였다.

2. 서해안 지역 해일자료

태풍 볼라벤의 자료는 국립 해양조사원 관측소에서 관측한 풍향, 풍속, 기압 그리고 해면의 1분 관측자료 (KOOFS, 2013)로 본 연구에서는 서남해 주요 9개 지역 - 이어도, 모슬포, 추자도, 대흑산도, 영광, 군산, 어청도, 대산 그리고 인천의 자료를 분석하였으며 Fig. 2에 위치를 나타내었다.

제시된 자료는 8월 27일 00시부터 8월 29일 24시까지 3일간의 자료이며, 조위 예측은 해양조사원에서 관측한 해면자료 (2011/07/27 ~ 2012/07/31)를 조화분해하여 산출한 해양조사원 예보자료를 사용하였고 이로부터 해일고를 산출하였

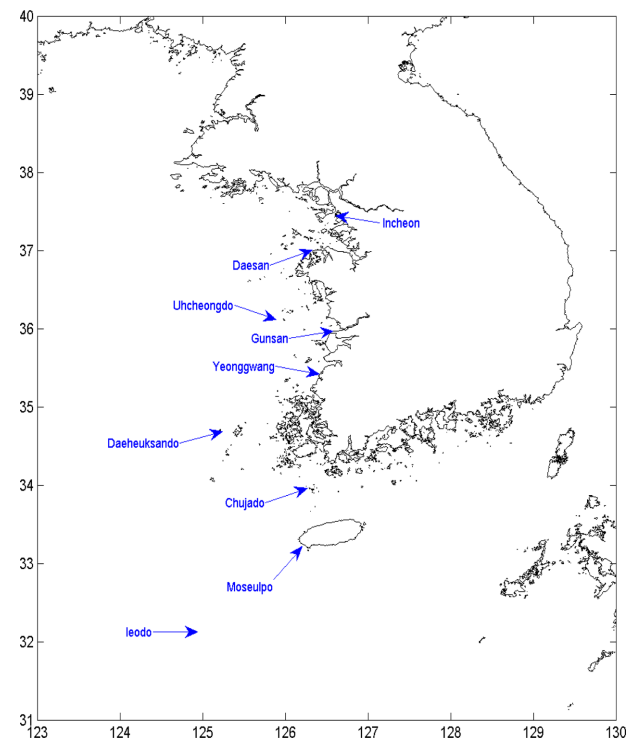


Fig. 2. Location of tide stations for storm surge produced by typhoon Bolaven (2012).

다. 국립 해양조사원에서 생산한 모든 관측자료 (KHOA, 2012)에는 매우 빠른 진동이 불규칙하게 나타나 자료의 대표적인 경향을 나타내기 위해 주위 31개 자료를 이용하여 구한 이동평균값을 사용하였다.

자료는 Fig. 3~5에 도시되었고, 여기서 관측소의 모든 자료는 위의 이동 평균한 값을 사용하여 그래프로 나타내었다. 해면기압은 파란색으로, 풍속은 녹색 점선으로, 조위 예보치는 검은색으로 그리고 해일 높이는 빨강색으로 각각 표시하였다. 또한 그림의 상부에 도시된 바람벡터로부터 풍향을 알 수 있다. 그림에 도시된 풍향은 북풍은 ↓, 남풍 ↑, 동풍 ← 그리고 서풍 → 으로 각각 나타내었다.

바람자료와 기압자료로부터 태풍중심의 이동궤적을 추적하면 이어도와 대흑산도는 태풍중심이 지나기 전에는 동풍이 불고 지난 후에는 서풍이 불었기 때문에, 이는 태풍중심이 관측소를 남에서 북으로 통과한 것임을 나타낸다. Fig. 1의 태풍

중심 궤적으로부터 오른쪽에 위치한 모슬포, 추자도, 영광, 군산 그리고 인천은 궤적으로부터 떨어진 거리에 따라, 태풍이 지나기 전 비교적 강한 바람 (약 10 m/s 이상)은 동남동풍에서 동남풍이 불고 지난 후에는 서남서풍에서 남서풍이 불어 태풍중심은 이들 지역 왼편에서 남에서 북으로 지나간 것을 알 수 있다. 바람자료에 따라 어청도의 태풍궤적을 추정하면 태풍중심은 어청도를 서에서 동으로 지나갔으며, 대신의 경우에는 북북서에서 남남동으로 통과한 것으로 나타나 Fig. 1의 궤적과는 차이가 있다.

남해상에 있는 이어도, 모슬포 그리고 추자도는 섬에 또는 암초 위에 위치한다. 관측소의 자료는 Fig. 3에 나타내었고 관측소 주변의 해저는 비교적 수심이 깊다. 태풍 중심은 이어도 관측소를 28일 00시에 지나 추자도에 06시도 도달한 것으로 보이며, 이어도에서는 태풍 중심이 통과할 때 저조이었으나 추자도에서는 저조에서 고조 사이에 통과하였다. 해일은 태풍중심이 통과하기 전에 발생하였다. 해면은 서서히 상

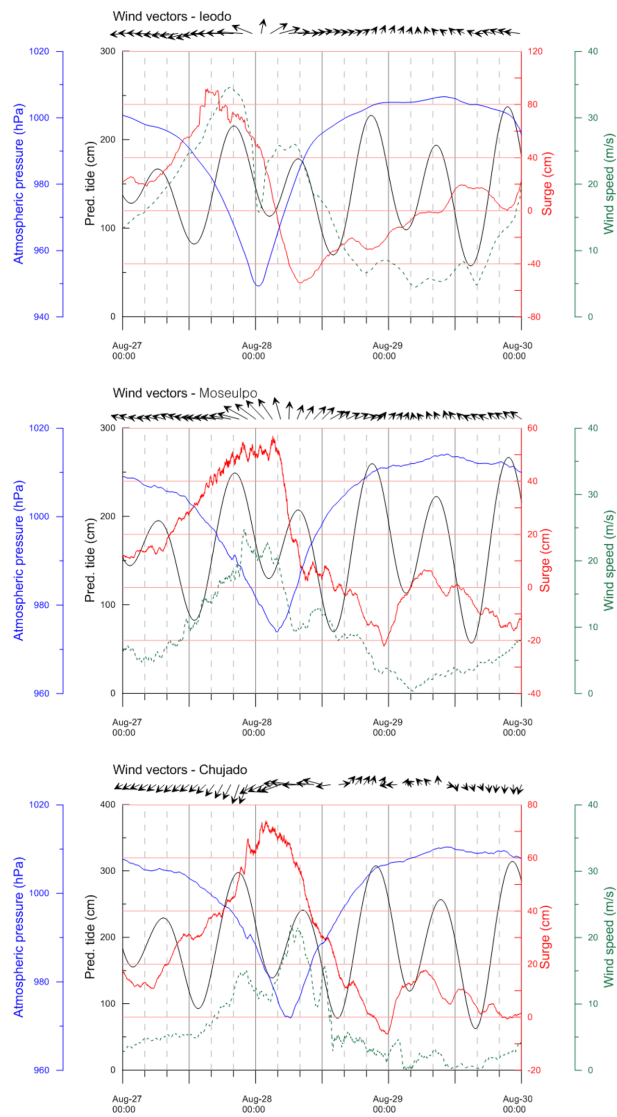


Fig. 3. Predicted tide level, storm surge, wind speed and direction and atmospheric pressure at locations in Korea west coast during the passage of typhoon Bolaven (2012) - Ieodo, Moseulpo and Chujado.

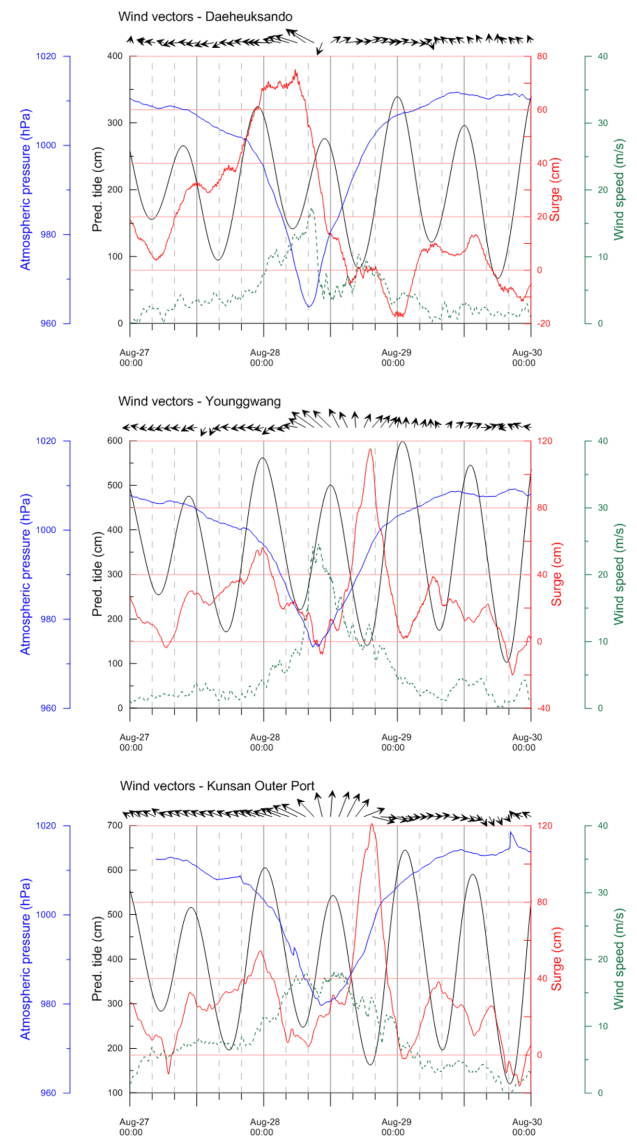


Fig. 4. As for Fig. 3, but for Daeheuksando, Youngkwang and Kunsan outer port.

승하여 최고 해면부근에서는 이동평균을 사용했음에도 불구하고 자료에는 빠른 진동을 보인다. 이 빠른 진동은 섬 이외의 지역에서는 관찰되지 않았으며, 파랑의 효과 (wave setup)

에 의한 것으로 추정된다.

서해 남부에 위치한 대흑산도, 영광 그리고 군산에서 관측한 결과는 Fig. 4에 도시하였다. 대흑산도에서 태풍중심은 저조에서 고조 사이에, 군산에서는 고조에 통과하였다. 대흑산도의 경우 최대 해일고는 태풍중심 통과 전에 발생하였으나, 해안지방에서는 중심 통과 후에 나타났다. 영광과 군산에서 최대 해일고는 저조시에 나타났으며 최대 해일고가 속한 해면이 상승하는 봉우리의 폭은 섬의 경우와 달리 좁은 것이 특징이다.

서해 중부에 위치한 어청도, 대신 그리고 인천에 대한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 태풍중심은 이 구역을 고조시에 통과하였고, 섬인 어청도에서는 태풍중심 통과와 그 전후 세 개의 해면이 상승한 봉우리가 나타났으며 통과 후의 봉우리에서 약하지만 빠른 진동을 볼 수 있다. 그리고 해안지역에서는 저조시에 최대 해일고가 발생하였다.

태풍 중심이 통과할 때 주변 기압과의 차이로 인한 해면상승과 최대 해일고가 발생한 때의 자료를 Table 1에 정리하였다. 뒤에 보이겠지만, 정지한 저기압의 중심기압이 표준기압보다 1 hPa 내려가면 해면은 약 1 cm 상승하는 것을 역기압 법칙이라 하며 (Doodson, 1924) 이로부터 계산한 해면상승을 나타내었다. 역기압 해면상승보다 작은 해면 관측은 이어도, 영광과 군산에서 나타났으며, 영광의 경우를 제외하면 해일고와 정지 저기압에 의한 해면상승의 비가 0.5~2 범위에 속해 태풍중심이 통과시에는 역기압 법칙에 의한 해면상승이 주도적으로 작용한 것으로 분석된다. 영광과 군산의 경우 태풍중심 제적으로부터 떨어져 있어 태풍중심이 관측소를 지날 때 풍향이 완만하게 변화였고 통과 전에는 이안풍 성분이 포함된 남동풍이 수시간에 걸쳐 불었다. 또한 고조시에 태풍중심이 통과하여 해면상승이 크지 않게 된 것으로 추정된다.

뒤에 기술한 Proudman 증폭식은 일정 수심 위를 일정한 속도로 움직이는 이동성 기압장에 대한 식으로, 블라벤은 평균속도 40 km/h로 서해를 통과하고 이동경로 상의 수심은 일정하지 않았지만, 태풍 블라벤의 경우에도 증폭식을 사용하

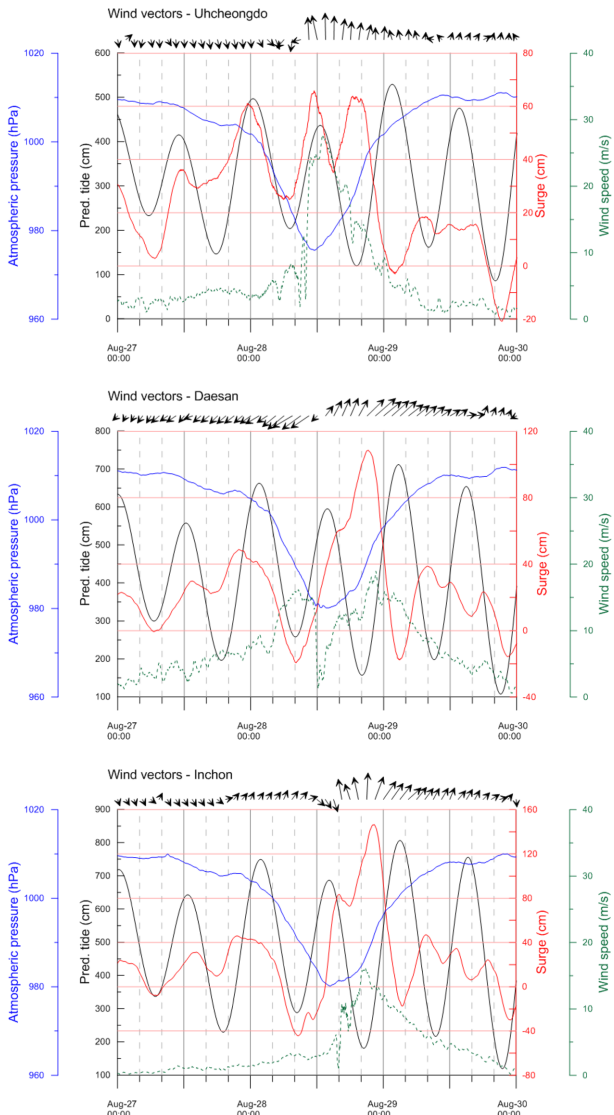


Fig. 5. As for Fig. 3, but for Uhcheongdo, Daesan and Incheon.

Table 1. Atmospheric pressure, sea surface rise by inverse barometric law, surge height and time for various observatories when the lowest atmospheric pressure passes and the maximum surge height occurs. These are obtained from moving averaged data

Observatory	At the lowest atmospheric pressure passing				At the maximum surge height			
	pressure (hPa)	Sea surface rise (cm)	Surge height (cm)	Time (dd hh:mm)	pressure (hPa)	Sea surface rise (cm)	Surge height (cm)	Time (dd hh:mm)
Ieodo	949.3	63.7	47.2	28 00:30	983.6	29.4	91.9	27 15:20
Moseulpo	973.9	39.1	51.4	28 03:51	975.2	37.8	57.1	28 03:50
Chujado	971.8	41.2	63.7	28 06:15	982.3	30.7	74.1	28 01:50
Daeheuksando	963.7	49.3	54.2	28 08:06	972.7	40.3	75.1	28 05:39
Youngkwang	973.8	39.2	6.5	28 08:47	996.2	16.8	115.4	28 19:10
Kunsan	979.7	33.3	20.4	28 10:25	997.0	16.0	121.2	28 19:24
Uhcheongdo	975.5	37.5	65.3	28 11:30	975.6	37.4	65.9	28 11:26
Daesan	980.1	32.9	40.8	28 13:48	991.5	21.5	108.6	28 21:12
Inchon	980.1	32.9	43.9	28 14:24	991.8	21.2	146.6	28 22:22

여 해면상승을 개략적으로 설명할 수 있다. 그리고 기압차에 의한 해면상승이 주도적인 경우에도 바람에 의한 해면변화의 부차적인 효과가 존재하며 이를 고려하면 실제 관측치에 더 근접하게 된다.

최대 해일고가 발생한 시점에서 역기압 법칙에 의한 해면 변화는 작아 0.1~0.7의 범위에 속한다. 그러나, 섬 지역에서는 이 비율이 비교적 높아 0.3이상이나 해안에서는 대략 0.15 정도로 작다. 이로부터 섬은 주변 수심이 깊고 해안가에서 해저경사가 급하기 때문에, 바람에 의한 해면상승이 해안지역보다 작은 것으로 분석된다. 앞에서 언급한 바와 같이 섬에서 최대 해일고는 태풍중심이 통과하기 전이나 통과시에 발생하였고 해안에서는 태풍중심이 통과한 후에 발생하였다. 해안에 위치한 관측소에서는 수심이 낮은 저조시에 최대 해일고가 발생하였으나 연안 범람은 보고되지 않았다.

특히 해안에서는 1m 이상의 아주 높은 해일고가 발생하였으나 이로 인해 연안범람 또는 연안 구조물에는 피해가 발생하지 않았다. 연안구조물의 설계를 위해 극치해면을 추정할 때 Jeong et al.(2008)과 같이 최극 관측조위를 사용하는 경우에는 블라벤의 해면자료는 작기 때문에 제외되게 된다. 한편 Suh et al.(2009)과 같이 우리나라에 영향을 준 태풍으로부터 폭풍 해일고 자료를 산출하여 극치해석을 하는 경우, 구조물 설계와 무관한 블라벤 자료가 포함되어 극치해석에 영향을 주게 된다.

이 절에서 분석한 해면자료에 내포된 물리적 특성을 이해하기 위해 주요 현상만을 고려한 단순화된 미분방정식의 해와 그 의미를 조명하고자 한다. 우선 일정한 수심 위를 일정한 속도로 이동하는 기압장에 의한 해면변화에 대한 식을 유도하여 이동성 기압장에 의한 해면변화를 살펴본 후, 지속적으로 일정한 바람이 상당한 거리에 불어 상승한 해면이 거의 정상 상태를 이룰 때 지배방정식과 그 해를 다음 절에서 구하고 실측자료와 연관하여 해석하고자 한다.

3. 이동성 기압장에 의한 해면변위 해석해

주변 기압과의 기압차 강도 P_a 의 이동성 기압장에 의해 생성된 해면변위를 기술하기 위해 선형 천해방정식으로부터 유도된 기존 해석해를 본 논문의 목적에 따라 재구성하고자 한다. 수심을 h , 해면변위를 η 그리고 연관된 평균유속을 u 로 표기하고 외력의 방향을 x 축으로 정한 1차원 문제를 대상으로 한다. 천해조건으로부터 수중 위치 z 에서의 압력은 $P = \rho g(\eta - z) + P_a$ 로 표현되고, 비선형항과 크기가 상대적으로 작은 응력항을 무시한 수심 평균한 평면 1차원 천해방정식은 Eq. (1)로 주어진다 (Dean & Dalrymple, 1984).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (1.a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_{zx}|_{z=\eta} - \tau_{zx}|_{z=-h}}{\rho(h+\eta)} \quad (1.b)$$

Eq. (1)에서 u 는 수심 평균한 유속이고, Eq. (1.b)은 응력항을 포함하여 연안에서 수심변화에 따른 해면변위를 검토하기 위한 것이다. Eq. (1)로부터 수심이 일정한 해역을 일정한 속도로 움직이는 기압장에 의해 생성될 때 나타나는 장파의 증폭인 Proudman resonance (Proudman, 1953)를 유도한 후, 지속적으로 부는 바람에 의한 연안에서의 해면변화 즉 폭풍해일의 해면상승을 간단한 식으로 나타내고자 한다.

3.1 Proudman 증폭

수심이 깊은 지역에서는 Eq. (1.b)의 해저와 해면의 전단 응력 항들이 상대적으로 작아 무시할 수 있으며 또한 수심이 일정한 해역에서 외력 P_a 가 일정한 속도 U 로 움직이는 경우를 상정한다. 이 때에는 이동좌표계 $\xi = x - Ut$ 를 사용하는 것이 편리하고, 고정좌표계의 미분을 이동좌표계의 미분으로 바꾸기 위해 Chain rule을 적용하면 Eq. (2)를 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = -U \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (2)$$

한정된 크기를 갖는 이동성 저기압에 의해 생성된 해수운동의 범위는 유한하기 때문에 관련 운동방정식의 경계조건은 다음과 같다.

$$\eta = u = P_a = 0, \text{ as } \xi \rightarrow -\infty \quad (3)$$

Eq. (2)를 (1.a)에 대입하고 조건 (3)을 이용하면 유속은 Eq. (4.a)가 된다.

$$u = \frac{\eta U}{h} \quad (4.a)$$

Figs. 1~3에 도시된 바와 같이 섬에서 발생한 폭풍해일의 해면 진폭은 평균 50 cm, 평균 주기는 2일로 파경사가 아주 작은 선형 장파이다. 이러한 파랑의 유속은 Eq. (4.a)에 나타난 것과 같이 저기압 이동속도에 비해 아주 작다. 해면과 해저면에서의 전단응력 항을 무시한 Eq. (1.b)에 (2)를 대입하고 조건 (3)을 이용하여 해면은 Eq. (4.b)가 된다.

$$\eta = \frac{h P_a \rho}{U^2 - gh} \quad (4.b)$$

여기서 고려한 섬들의 최강 조류유속이 2 kts 정도이고, 블라벤의 평균 이동속도 40 km/h를 고려하면 비선형 항에서 생성되는 조류유속에 의한 기여는 무시할 수 있다. 천해장파의 파속은 $C = \sqrt{gh}$ 로 주어지며, 이동속도가 천해파속에 근접하면 해면의 높이가 무한히 증가하는 Proudman 공진이 발생한다. 이 경우 Eq. (4.a)로부터 유속 역시 커지므로, 식 유도에서 작다고 가정된 비선형항은 더 이상 무시할 만큼 작지 않게 된다. 따라서 Eq. (4.b)는 해면이 한계이상 커지면 성립하지 않으며, 이동속도가 파속에 근접하면 비선형 항과 응력 항

이 포함된 식이 사용되어야 한다.

만일 이동속도가 점차 느려져 정지한 상태에 이르면 Eq. (4.b)의 해면은 Eq. (5)가 된다.

$$\eta = -\frac{P_a}{\rho g} \quad (5)$$

Eq. (5)가 의미하는 바는 기준해면 기압과 차인 기압강도가 1 hPa (= 1000 dyn/cm²) 감소하면 해면은 약 1 cm 상승하는 역기압 법칙 (inverse barometer rule)이다. 결국 정지 상태의 저기압은 해면을 끌어 올리며, 고기압은 해면을 강하시킨다. 더욱이 역기압 법칙은 수심과는 무관함을 알 수 있다.

Eq. (4.b)에서 이동속도가 천해파속보다 늦으면 $U < C$, 해면과 기압장은 위상이 상반되어 저기압은 해면을 끌어 올리거나 고기압은 해면을 강하시킨다. 한편 $U > C$ 의 경우는 해면과 기압장이 위상이 같아 고기압은 해면을 끌어 올리거나 저기압은 해면을 강하시킨다. 이동성 저기압에 의한 해면과 정지 저기압에 의한 해면 (η_s)의 비는 Froude 수, $Fr = U/C$ 로 간단히 표현된다.

$$\frac{\eta}{\eta_s} = \frac{gh}{gh - U^2} = \frac{1}{1 - Fr^2} \quad (6)$$

Fig. 6는 Eq. (6)의 절대값을 나타낸 것으로 이동속도가 매우 빠르면 증폭비는 0으로 접근한다. 기압장의 이동속도는 연안이나 해상에서 큰 차이는 보이지 않는 점을 감안하면 이 경우는 파속이 감소하는 수심이 낮은 천해에 해당된다. 결국 천해인 연안에서는 이동성 기압장에 의한 증폭비는 아주 작게 된다.

앞 절에서도 언급한 바와 같이, 태풍중심 통과시 관측점에서의 실측 해일고와 역기압 법칙에 의한 해면변화의 비가 영광과 군산을 제외하면 0.5~1.5 내의 범위에 있다. 이 경우에는 이동성 기압장에 의한 해면변화가 주도적인 요인임을 반증한다. 그리고 실측 해일고가 극히 낮은 영광의 경우 해안선은 거의 직선이고, 연안의 수심이 아주 낮으며 저조에서 고

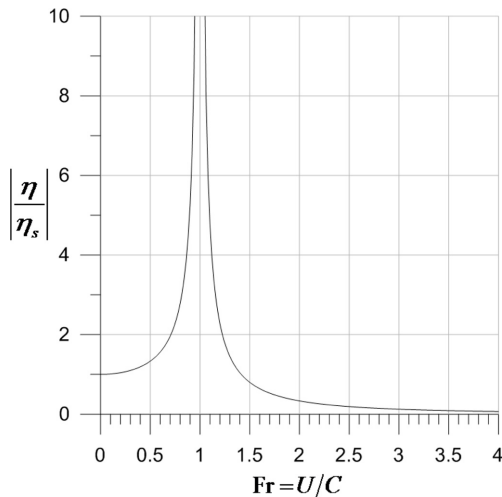


Fig. 6. Amplification of surface elevation by moving atmospheric disturbance with speed U .

조 사이에 태풍중심 통과하여 Froude 수가 2보다 큰 것으로 추정된다. Eq. (6)으로부터 영광의 경우 태풍중심이 통과할 때 해면이 강하하게 되었으며 그 밖의 요인들이 더해져 해일고가 더 낮아진 것으로 분석된다.

3.2 지속적인 바람에 의한 해면상승

연안지역에 바람이 육지쪽으로 불면 표층 부근의 물이 해안으로 이동하여 국지적으로 쌓여, 해면이 높아지게 된다. 바람이 상당 시간 동안 지속되면 바람에 의한 해면 상승과 해면변위에 의한 수압의 기울기가 서로 균형을 이루는 평형상태에 도달하게 된다. 이 때 해면부근의 해수는 바람에 의한 전단력을 받아 육지쪽으로 이동하나, 해저면 부근의 해수는 표층 이동량만큼 외해로 빠져 나가 해면의 변화가 없게 된다. 결국 수심 평균한 유속은 0이 된다. 한편 기압 분포에 따른 기압 경사도 바람이 생성되고 이는 해면에서 전단력을 발생시키므로 기압 경사력은 해면 전단응력에 포함되거나 전단력에 비해 아주 작은 것으로 분석된다. 그러면 Eq. (1.b)은 Dean and Dalrymple (1984)이 보인 바와 같이 Eq. (7)로 간략하게 된다. 그리고 저면 전단력은 저층 유속의 함수이나, 수심 평균유속이 0이므로, 이를 표층 전단응력에 포함시킨 환산비 n 으로 나타낸다.

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\tau_{zx}|_{z=\eta} - \tau_{zx}|_{z=-h}}{\rho(h+\eta)} = \frac{n \tau_{zx}(\eta)}{\rho(h+\eta)}, \quad n = 1 + \frac{\tau_{zx}(-h)}{\tau_{zx}(\eta)} \quad (7)$$

표층 전단력의 환산비 n 의 값은 1.15~1.3으로 주어진다 (U.S. Army, Coastal Engineering Research Center, 1977). 바람이 취송거리 l 의 해역에 일정하게 불고, 수심이 일정하거나 또는 수심 경사가 일정한 단순한 경우에는 Eq. (7)로부터 해석해를 구할 수 있다 (Dean & Dalrymple, 1984). 먼저 수심이 일정하여 h_0 이고 일정 수심이 시작되는 $x=0$ 에서는 해면 상승이 없는 경우, 해는 Eq. (8)이 된다.

$$\frac{\eta(x)}{h_0} = \sqrt{1 + \frac{2Ax}{l}} - 1, \quad A = \frac{n \tau_{zx}(\eta) l}{\rho g h_0^2} \quad (8)$$

여기서 매개변수 A 는 단위폭 당 거리 l 에 가해지는 환산 전단력과 수심 h_0 에 의한 정수압력의 비이다. 이 변수가 커지면 해면도 같이 증가하게 되며, 수심이 낮으면 이 변수는 커진다. 결국 환산 전단력이 일정한 경우 수심이 낮을수록 해면이 상승하게 된다.

수심 경사가 일정하고 $x=l$ 에 해안선이 위치한 경우 $h(x) = h_0(1 - x/l)$ 이를 Eq. (7)에 대입하면 정리하면

$$(h+\eta) \frac{\partial(h+\eta)}{\partial x} + (h+\eta) \frac{\eta_0}{l} = \frac{n \tau_{zx}(\eta)}{\rho g} \quad (9)$$

Eq. (9)에서 미지수 $h+\eta$ 를 새로운 변수로 치환하여 풀고, 위의 경계조건을 사용하면 해 (10)을 얻게 된다.

$$\frac{\eta}{h_0} = -A \ln \left(1 - \frac{x/l - \eta/h_0}{1-A} \right) \quad (10)$$

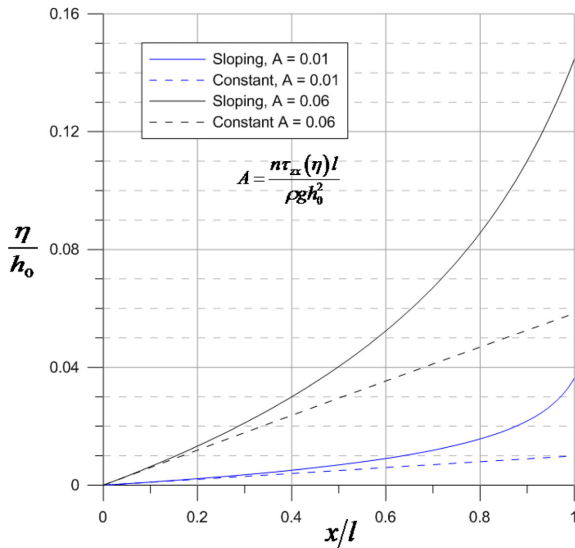


Fig. 7. Water level rise due to constant onshore wind blow.

해 (10)은 Dean & Dalrymple (1984)의 해에 수심 함수를 대입하여 정리한 것으로 해면변위를 구하는 데 보다 편리하다. 매개변수 A 와 변수 x/l 가 주어지면 해면 η/h_0 는 반복 법으로 구할 수 있고 여기서는 Newton-Raphson 방법을 사용하여 해면 상승비를 Fig. 7에 나타내었다.

취송거리가 길어지면 해면도 상승하며, 수심이 일정한 해역 보다는 해저면이 경사진 해안에서 해면의 상승이 두드러진다. A 값이 클수록 해면도 상승하며 이 값은 바람이 강하거나, 수심이 낮거나 또는 수심 경사가 클수록 커진다.

태풍 불라벤에 의한 최대 해일고 발생시 역기압 법칙에 의한 해면변위와 최대 해일고의 비는 섬지역에서는 대략 0.5이고 암초인 이어도에서는 0.3으로 해안지역의 0.15보다는 상당히 높다. 이는 수심이 상대적으로 깊은 섬에서는 기압차에 의한 해면변위가 해일고의 상당 부분을 점하는 것으로 해석할 수 있다. 한편 관측소가 위치한 해안의 수심은 낮고 완만하며 저조시에 최대 해일고가 발생하여 발생지점의 수심이 가장 낮았다. 그래서 약한 바람에서도 해면이 상당히 상승한 것으로 분석되며 이는 Eq. (10)의 해석해의 결과와도 일치한다.

3.3 이동성 기압장에 의한 해면변위 특성

이동성 기압장의 기압분포로부터 형성된 기압 경도력이 바람을 생성함으로써 해면에 전단력으로 힘을 가한다. 즉 기압 분포와 해면 전단력은 밀접한 관계가 있어 주어진 조건에 따른 이들의 크기에 따라 이 가운데 하나만을 운동방정식에서 고려할 수 있다. 예를 들면, 수심이 깊으면 수심 평균한 해면 전단력이 상대적으로 작아 기압 경도력이 주도적인 외력의 인자가 된다. 반면에 평균 전단력이 일정한 경우라도 수심이 점차 감소하는 천해의 경우에는 전단력이 해면변화를 좌우하게 되며 이는 태풍 불라벤에 의한 해일고 자료의 특성과도 일치한다.

앞 절에서 유도한 해석해는 주어진 조건들이 아주 단순한

경우를 대상으로 정해 얻었지만, 이동성 기압장에 의한 해면 변화의 주요 현상을 설명할 수 있다. Table 1에 정리한 바와 같이 수심이 깊고 일정한 경우에는 해면 증폭비는 주로 Proudman 증폭으로 결정된다. 최저 기압 발생시 섬 지역에서 해면은 이어도 경우를 제외하면 역기압 법칙의 해면보다 상승하여 관측지점의 파속이 저기압 이동속도보다 작음을 암시한다. 그리고 일정한 바람이 상당 시간 동안 지속되는 천해의 경우에는 해면을 상승시키는 전단력과 해면을 평탄화하려는 정수압력의 비인 매개변수 A 의 값이 크면 해면의 상승도 커지게 된다. 해저경사가 크거나 혹은 바람이 강하면 이 변수의 값이 커진다.

4. 결 론

태풍 불라벤은 2012년 8월 28일 이어도를 지나 서해를 통과하면서 연안 도서에 상당한 높이의 해일을 발생시켰고, 서남해에 위치한 9개의 조위관측소의 해면, 풍향·풍속과 기압 자료를 분석하여 동반된 해일의 특성을 분석하였다. 매 1분의 실제 관측기록에 포함된 high frequency 자료를 제거하여 대표적인 경향을 나타내기 위해 30분 이동평균 자료를 생산하였다. 이를 이용한 시계열 그래프들을 제시하였으며, 조위예보는 국립 해양조사원의 자료를 사용하였다. 여기서는 이동 평균한 자료를 이용하였기에 실제 해일고와는 약간의 차이를 보인다.

모든 관측소에 대한 태풍중심이 통과한 시점의 자료와 최대 해일고 발생시점의 자료를 분석하여, 주변 수심이 깊은 섬에서는 기압차에 의한 해면변화가 발생 해일고에 대략 50% 또는 그 이상으로 나타나 이 효과가 해일 발생에 주도적으로 작용한 것으로 분석된다. 한편, 해안에 위치한 관측소는 주변 수심이 낮고 완만하여 바람에 의한 해면상승이 두드러져 발생 해일고에 80%이상 점유한 것으로 나타났다. 영광 이북 해안의 해일고는 매우 높아 1 m를 상회하였으나, 저조에 발생하여 실제 해면은 높지 않았고 연안범람도 발생하지 않았다.

태풍 불라벤의 자료에 대한 분석을 토대로 발생한 폭풍해일의 주요 원인을 파악하기 위해 단순한 해석적 모형들을 사용하였다. 여기서 사용된 해석적 모형은 특수한 가정하에서만 성립하기 때문에 실제 현상을 정확하게 재현할 수는 없으나, 관측자료와 상호 분석하여 폭풍해일에 내재된 주요 물리 현상을 이해하는 데는 충분함을 입증하였다. 일정 수심 위를 일정한 속도로 움직이는 기압장에 의한 Proudman 공진과 이로부터 유도되는 역기압 법칙에 따른 해면변위는 섬에서 발생한 해일을 적절하게 나타낸다. 일정한 수심 또는 경사의 해안에 육지쪽으로 일정하게 부는 바람이 상당시간 지속되면 바람에 의한 전단력과 해수면의 경사에 의한 정수압력이 서로 균형을 이룰 때까지 해면이 상승한다. 이러한 바람에 의한 해면상승은 수심이 낮은 지역에서 현저하며, 수심 경사가 급할수록 상승이 커진다. 태풍 불라벤의 경우는 해안선에 직각인

바람성분은 비교적 약하였으나, 저조시의 낮은 수심으로 상당히 높은 해면고가 나타났으며 이는 바람에 의한 해면상승이 주도적인 요인임을 자료와 연관하여 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 국가연구개발사업 “운용해양(해양예보)시스템 연구 (2단계)”와 한국해양과학기술원 주요사업 “선형 산란파에 대한 계단형 근사법”과 “재해성 파랑의 특성분석 및 예측기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Blain, C. A. and Rogers, E. (1998). Coastal tidal prediction using the ADCIRC-2DDI hydrodynamic finite element model. Formal Report NRL/FR/7322-98-9682, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS.
- Choi, K.-S., Cha, Y.-M. and Kim, T.-R. (2012). Decadal Change of Frequency in Korea Landfalling Tropical Cyclone Activity, Jour. Korean Earth Science Society, v. 33, no. 1, p. 4958 (in Korean).
- Chu, K. S. (1987). On the storm surges and tsunami occurred in the coast of Korea. Korea Hydrographic Office (in Korean).
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). Water wave Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice-Hall Inc., Eaglewood Cliffs, N.J.
- Doodson, A.T. (1924). Meteorological perturbations of sea level and tides, Geophys. Suppl. R. Astron. Soc., 1, 124~127.
- Jelesnianski, C. P., Chen, J. and Shaffer, W. A. (1992). SLOSH: Sea, lake and overland surges from hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48. Silver Spring, MD: Dept. of Comm. NOAA.
- Jeong, S.T., Kim, J.D., Ko, D.H. and Yoon, G.L. (2008). Parameter Estimation and Analysis of Extreme Highest Tide Level in Marginal Seas around Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 5, pp. 482~490 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2012). The 15th Typhoon Bolaven in 2012. Oceanic Abnormal Phenomena Report 2012, Vol. 2a.
- Korea Ocean Observing and Forecasting System (2013). Korea Hydrographic and Oceanographic Administration website, http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real_map.asp.
- Lee, J. C., Kwon, J.-I., Park, K.-S. and Jun, K.-C. (2008). Calculations of Storm Surges, Typhoon Maemi. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 93~100.
- Mellor, G. L. (1998). Users guide for a three dimensional primitive equation, numerical model. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences. Princeton University, Princeton, N.J.
- National Hurricane Center (2013). Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes (SLOSH). <http://www.nhc.noaa.gov/surge/slosh.php>.
- Proudman, J. (1953). Dynamical Oceanography. Wiley, New York.
- Suh, K.D., Yang, Y.C., Jun, K.C. and Lee, D.Y. (2009). Extreme Sea Level Analysis in Coastal Waters around Korean Peninsula Using Empirical Simulation Technique. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 21, No. 3, pp. 254~265 (in Korean).
- Suh, S.W., Lee, H.Y., Kim, H. and Park, J. (2012). Near Real-time Immediate Forecasting of Storm Surge Based on Typhoon Advisories. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 24, No. 5, pp. 352~365 (in Korean).
- Typhoon Research Center (2013). Previous typhoons - individual search, TRC web page. www.typhoon.or.kr
- U.S. Army, Coastal Engineering Research Center (1977). Shore Protection Manual. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Wikipedia (2013). Storm surge. http://en.wikipedia.org/wiki/Storm_surge.
- You, S. H. and Lee, W.-J. (2010). A Study of Storm Surges Characteristics on the Korean Coast Using Tide/Storm Surges Prediction Model and Tidal Elevation Data of Tidal Stations. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 22, No. 6, pp. 361~373 (in Korean).

원고접수일: 2013년 12월 12일

수정본채택: 2014년 1월 14일

게재확정일: 2014년 2월 27일