

국내 연안의 해일강도 특성 Characteristics of Nearshore Surge-Intensity

강주환* · 김양선* · 조홍연** · 심재설***

Ju Whan Kang*, Yang Seon Kim*, Hong Yeon Cho** and Jae-Seol Shim***

요 지 : 20개 검조소 자료 분석을 통해 국내연안에서 해일강도특성을 파악하고자 하였다. 조위편차 자료에 대한 통계분석 결과 해역별로 해일발생 특성이 구분되는 경향을 보였으며 서해안의 조위편차가 남해안 및 동해안에 비해 월등히 큰 것으로 나타났다. 30 cm 이상에 해당하는 해일고에 대해서 해일강도를 분석하였는데 태풍에 의한 해일을 분리한 결과 서해안의 경우 해일 발생이 주로 계절풍에 기인하여 동절기에 크게 나타나고 있는 반면 남해안과 동해안의 경우에는 계절풍의 영향은 미미하고 하절기 태풍에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타나고 있다. EOF 분석을 통해 유추된 결과 역시 1차 고유벡터의 경우 서해안 지점에서 두드러진 값을 나타내는 등 일맥상통한 결과를 보이고 있다.

핵심용어 : 해일강도, 조위편차, 계절풍, 태풍, EOF분석

Abstract : Characteristics of nearshore surge intensity were investigated by analyzing the tide data at 20 tidal stations. Statistical analysis of the surge data show that surge heights at the western coast are far greater than those at southern and eastern coasts, implying that each coast has its own classified characteristics. Surge height data greater than 30 cm were chosen and their intensities were calculated, and then, typhoon-induced surges were separated. The results show that while surge intensity at the western coast is conspicuous in winter due to the monsoon, it is conspicuous in summer due to the typhoon at other coasts. EOF analysis show that the 1st eigenvector at the western coast is prominent, which is considered to be consistent with above mentioned results.

Keywords : surge intensity, surge height, monsoon, typhoon, EOF

1. 서 론

기본수준면 및 평균해수면 등과 같은 각종 조위면은 장기간에 걸쳐 지속적인 변화를 보이는데, 그 원인은 조석(천문조) 자체의 변화에 기인하기도 하지만 인위적인 건설에 따른 지형변화가 크지 않은 한 비조석 성분(기상조)의 변화로 인한 것이 대부분이다. 비조석 성분의 변화(Pugh, 2004)는 지구온난화에 따른 전지구적 해수면 상승 및 기온과 수온, 대기압, 바람 등과 같은 기후변화에 의해 유발된다. 충분한 정도로 예측이 가능한 천문조와 달리 기상조는 관측조위와 예측조위의 차이인 조위편차로 산정되는데, 주로 기상효과에 의해 야기되는 조위성분으로 지역적 및 시간적 변동성이 매우 커 예측이 쉽지 않다. 기상조를 포함한 이러한 조위예측은 방재분야 뿐 아니라 해양에너지 분야 및 해안침식 분야 등에 필수적인 사항이다. 따라서 조위면에 대한 정량적 평가를 위해서는 비조석성분인 기상조에 대한 숙고가 필요하며 특히 이를 발생시

킨 기상상태에 대한 고려가 필수적이라고 할 수 있다.

기상조 또는 조위편차와 관련된 국내외 연구는 방재측면에 초점이 맞춰진 경우가 대부분으로 태풍해일 및 지진해일을 외력으로 하여 연안에서의 해일고를 계산(김 등, 2007; 강 등, 2009; 천 등, 2009)하는 일과성 연구 및 통계적 특성 연구(조 등, 2006)가 주종을 이루고 있다. 기상상태의 다양성만큼이나 해일양상도 다양하기에 해일양상의 특성분석에 대한 필요성이 제기되지만 이에 관한 국내 연구는 매우 희소하여 강 등(2008)이 우리나라 서남해안에서 해일고가 증가하는 경향이 있음을 밝힌 연구와 유와 이(2009)가 한반도 인근의 폭풍해일 특성에 대하여 수행한 연구 정도에 불과한 실정이다. 반면 국외에서는 태풍과 비태풍을 아우르는 해일 전반에 대한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다. Zhang et al.(2000)의 연구가 대표적인데 이들 연구에서 해일의 정량적 평가 및 시공간적 변화에 대한 연구, 특히 태풍과 계절풍에 의한 영향성에 대한 정량화를 시도한 것은 특기할 만하다. 이후 해일과 조석과의 상호작용에

*목포대학교 토목공학과 (Corresponding author : Ju Whan Kang, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam 534-729, Korea, jwkang@mokpo.ac.kr)

**한국해양연구원 해양환경보전연구부 (Korea Ocean R&D Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea)

***한국해양연구원 기후변화연안개해연구부 (Korea Ocean R&D Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea)

대한 연구(Kim et al., 2008; Fiore, 2009; Haigh, 2010) 뿐 아니라 해일의 전파 및 계절적 특성, 더 나아가 장주기 변화추세 분석을 통한 장래 해일고 변화 예측 등과 같은 연구(Olbert, 2010)가 진행되고 있다.

이와 같은 배경하에 본 연구에서는 기상상황을 감안하여 야기된 조위편차(해일고)의 특성 분석을 통해 기상조 발생의 이해를 도모할 뿐 아니라 국내 연안의 공간적 및 시간적 조위편차 분포에 대한 정량적 해석을 실시하고자 한다.

2. 조위편차 자료

조위편차 특성 분석을 위해 국내 연안에 가동중인 국립해양조사원(www.khoa.go.kr) 홈페이지에서 제공하는 33개 검조소 중 관측기간이 20년 이상인 20개 검조소의 1시간 간격 조위관측자료를 수집하였다. 이들 검조소에 대한 자료기간 정보를 Table 1에 제시하였다. 관측된 조위자료는 천문조와 기상조가 포함된 자료이기 때문에 조위편차 자료를 취득하기 위해서는 천문조를 분리해야 한다. 이를 위해 모든 검조소에서 1시간 간격 조위자료를 1년 단위의 조화분석을 통해 해당연도의 조화상수를 추출한 후 이를 통해 해당연도의 천문조를 사후추정함으로써 조위편차를 산정하였다. 20개 검조소 자료 공히 1991년부터 2010년까지 20년 기간을 대상으로 하였는데, 관측오류나 기기오차 등에 따른 이상자료 및 결측자료는 해당기간자료를 해석대상에서 제외한 후 분석을 수행하였다. 조화분석과 조위예측을 위해 사용된 프로그램은 각각 TIRA(Murray, 1964)와 MARIE로서 최근 관련연구에 널리 이용되고 있는 모델이다. 이렇게 산정된 조위편차 자료의 평균, 표준편차, 왜곡도계수 및 조위편차가 30 cm를 초과하는 확률 등 통계적 특성값을 해역별로 구분하여 Table 2에 제시하였다.

조위편차 자료에 대한 통계분석 결과 서해안의 경우 평균 값은 양(+)의 값을 보이며 음(-)의 왜곡도를 보이는 반면 여타해역에서는 반대 양상을 보임을 알 수 있다. 즉, 왜곡도 계수로부터 서해안의 경우 왼쪽으로 치우치는 분포형태(음의 왜곡도)를 보이고 있으며, 남·동해안의 경우에는 오른쪽으로 치우치는 분포형태(양의 왜곡도)를 보이고 있음을 알 수 있

Table 1. Record periods of the tidal stations

| West Coast | | South Coast | | East Coast | |
|--------------|-------|-------------|-------|------------|-------|
| Incheon | 1960~ | Seogwipo | 1985~ | Ulsan | 1963~ |
| Anheung | 1987~ | Jeju | 1964~ | Pohang | 1972~ |
| Boryeong | 1986~ | Chujado | 1986~ | Ulleungdo | 1966~ |
| Gunsan | 1981~ | Wando | 1983~ | Mukho | 1966~ |
| Mokpo | 1956~ | Geomundo | 1982~ | Sokcho | 1963~ |
| Daeheuksando | 1966~ | Yeosu | 1966~ | | |
| | | Tongyeong | 1977~ | | |
| | | Gadeokdo | 1977~ | | |
| | | Busan | 1957~ | | |

Table 2. Statistics of surge data excedence

| | | Mean | Standard Dev. | Skewness | Probability (%) |
|-------------|--------------|--------|---------------|----------|-----------------|
| West Coast | Incheon | 0.006 | 14.907 | -0.488 | 2.1075 |
| | Anheung | 0.006 | 12.692 | -0.588 | 1.0828 |
| | Boryeong | 0.004 | 12.433 | -0.506 | 1.0296 |
| | Gunsan | 0.014 | 11.991 | -0.379 | 0.9067 |
| | Mokpo | 0.004 | 11.443 | -0.153 | 0.8045 |
| | Daeheuksando | 0.002 | 9.276 | -0.333 | 0.3561 |
| South Coast | Seogwipo | 0.000 | 7.191 | 0.475 | 0.2055 |
| | Jeju | 0.002 | 7.441 | 0.178 | 0.1332 |
| | Chujado | 0.001 | 8.337 | 0.121 | 0.2528 |
| | Wando | 0.000 | 8.818 | 0.279 | 0.3773 |
| | Geomundo | -0.001 | 7.574 | 0.302 | 0.1663 |
| | Yeosu | -0.001 | 7.956 | 0.328 | 0.1685 |
| | Tongyeong | -0.002 | 7.026 | 0.326 | 0.0886 |
| | Gadeokdo | -0.001 | 7.170 | 0.181 | 0.1006 |
| | Busan | -0.002 | 6.653 | 0.390 | 0.0761 |
| | | Ulsan | -0.002 | 6.488 | 0.376 |
| East Coast | Pohang | -0.002 | 6.667 | 0.461 | 0.0859 |
| | Ulleungdo | 0.001 | 7.368 | 0.110 | 0.0321 |
| | Mukho | -0.002 | 6.648 | 0.245 | 0.0375 |
| | Sokcho | -0.001 | 6.694 | 0.282 | 0.0636 |
| | Mean | 0.000 | 8.740 | 0.090 | 0.4100 |

다. 또한 대부분 서해안 검조소에서 조위편차의 표준편차가 10 cm 이상인 반면 여타 해역은 6~9 cm 정도를 보이고 있다. 이에 따라 30 cm 이상의 조위편차가 발생할 확률 역시 대부분의 서해안 해역에서는 1% 정도(인천은 2%)를 보이고 있는 반면 남해안은 0.1%를 상회하는 정도이고 동해안은 0.1%를 밑돌고 있다. 이와 같이 우리나라 연안에서 관측되는 조위편차는 해역별로 그 특성이 뚜렷하게 구분되는 양상을 보이고 있다. 한편 본 연구에서는 일정크기 이상의 양(+)의 조위편차만을 분석대상으로 선정하였는데, 조위편차가 가장 크게 나타나는 인천에서의 표준편차의 두 배 정도인 30 cm를 기준으로 설정하여 이를 초과하는 양의 조위편차 자료만을 분석대상으로 선정하였다. 폭풍해일시 발생한 조위편차를 일반적으로 (폭풍)해일고라 칭하므로 본고에서도 선정된 자료를 일괄적으로 해일고로 지칭한다. 이렇게 구축된 자료로부터 연평균 월해일강도(해일고 × 지속시간)(Zhang et al., 2000)를 산출하여 분석에 활용하였으며 해일강도의 구체적인 산출방법은 다음 장에 소개한다.

3. 계절풍 및 태풍에 의한 해일고 분리

3.1 해역별 해일 특성

기상상태에 크게 영향을 받는 해일고는 하절기에는 태풍시,

동절기에는 계절풍시에 극대화된다. 태풍은 주로 7-9월에 발생하는 반면 북서계절풍은 주로 겨울철에 우리나라에 영향을 주고 있다. 이에 따라 국내 연안에서 이들에 의한 영향성은 지역별로 적지 않은 차이를 보이고 있다. 즉, 30 cm 이상의 해일고만을 고려할 경우 Fig. 1에 보인 바와 같이 인천을 위시한 서해안의 경우 해일강도가 하절기에 비해 동절기에 크게 나타나고 있음을 볼 수 있는 반면 남해안의 경우는 정반대의 경향을 보이고 있으며 동해안의 경우에는 동절기 해일고가 거의 나타나지 않고 있으며 하절기 해일고 역시 남해안에 비해 작게 나타나고 있다. 즉, 서해안의 경우 30 cm 이상의 해일 발생이 주로 계절풍에 기인하여 동절기에 크게 나타나고 있는 반면 남해안과 동해안의 경우에는 계절풍의 영향은 미미하고 하절기 태풍에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타나고 있다.

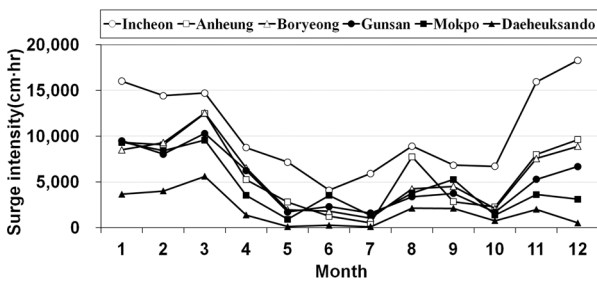
3.2 태풍과 계절풍에 의한 해일고 구분

이와 같이 해일발생양상이 해역별로 구분이 되는 동시에 계절에 따라 서로 다른 특성을 보임에 따라 전체 해일고에서 계절풍에 의한 영향과 태풍에 의한 영향을 구분할 필요성이 제기된다. 이를 위해 먼저 1991년부터 2010년까지 20년간 한

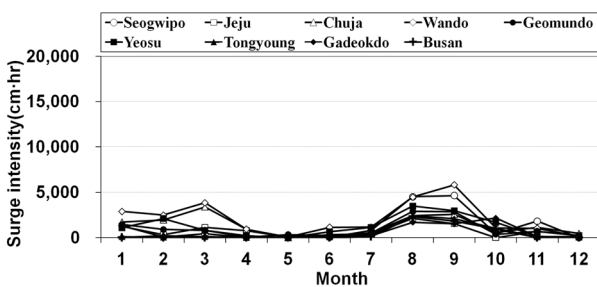
반도에 영향을 미친 태풍자료를 수집하여 영향기간과 함께 Table 3에 정리하였다. 총 60개(연평균 3개) 태풍이 한반도에 영향을 미쳤으며 영향기간은 8월이 40%로 가장 높은 빈도를 보이고 있으며 90% 이상이 7-9월에 발생하였음을 볼 수 있다. 이 태풍 중 높은 해일고를 초래한 순으로 14개를 선택하여 각

Table 3. Influence period of typhoon

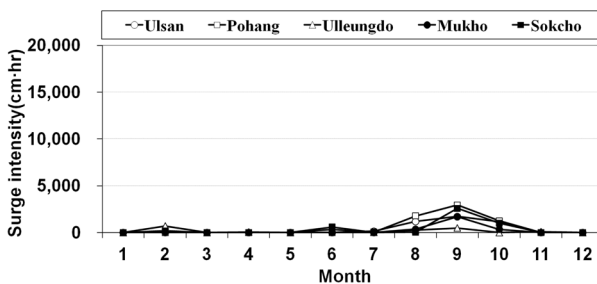
| Year | Typhoon | Period |
|--------------|-----------------|-------------|
| 1991 | CAITLIN(9109) | 07/28~29 |
| | GLADYS(9112) | 08/22~24 |
| | NONAME(9113) | 08/28~29 |
| | KINNA(9117) | 09/13~14 |
| | MIREILLE(9119) | 09/27 |
| 1992 | JANIS(9210) | 08/08 |
| | KENT(9211) | 08/18~19 |
| | TED(9219) | 09/24 |
| 1993 | OFELIA(9305) | 07/27 |
| | PERCY(9306) | 07/29~30 |
| | ROBYN(9307) | 08/09~10 |
| | YANCY(9313) | 09/03~04 |
| 1994 | WALT(9407) | 07/26~28 |
| | BRENDAN(9411) | 07/31~08/01 |
| | DOUG(9413) | 08/10~11 |
| | ELLIE(9414) | 08/14~15 |
| | SETH(9429) | 10/11~12 |
| 1995 | FAYE(9503) | 07/22~24 |
| | JANIS(9507) | 08/26~27 |
| | RYAN(9514) | 09/23~24 |
| 1996 | EVE(9606) | 07/18~19 |
| | KIRK(9612) | 08/13~14 |
| 1997 | PETER(9708) | 06/27~28 |
| | ROSIE(9709) | 07/27~28 |
| | TINA(9711) | 08/08~09 |
| | WINNIE(9713) | 08/19~20 |
| 1998 | OLIWA(9719) | 09/16 |
| | YANNI(9809) | 09/30~10/01 |
| | ZEB(9810) | 10/17 |
| 1999 | NEIL(9905) | 07/26~27 |
| | OLGA(9907) | 08/02~03 |
| | PAUL(9908) | 08/07~08 |
| | ANN(9917) | 09/19 |
| 2000 | BART(9918) | 09/23~24 |
| | KAI-TAK(0004) | 07/10 |
| | BOLAVEN(0006) | 07/30~31 |
| | BILIS(0010) | 08/26 |
| | PRAPIROON(0012) | 08/31 |
| SAOMAI(0014) | 09/15~16 | |



(a) West Coast



(b) South Coast



(c) East Coast

Fig. 1. Monthly variations of surge intensity.

Table 3. Continued

| Year | Typhoon | Period |
|------|----------------|----------|
| 2001 | PABUK(0111) | 08/20~21 |
| | RAMMASUN(0205) | 07/05~06 |
| 2002 | NAKRI(0208) | 07/13~14 |
| | FENGSHEN(0209) | 07/26~27 |
| | RUSA(0215) | 08/30~31 |
| 2003 | SOUDELOR(0306) | 06/18~19 |
| | MAEMI(0314) | 09/12~13 |
| | MINDULLE(0407) | 07/04 |
| 2004 | NAMTHEUN(0410) | 08/01~02 |
| | MEGI(0415) | 08/18~19 |
| | CHABA(0416) | 08/30 |
| 2005 | SONGDA(0418) | 09/07 |
| | NABI(0514) | 09/06 |
| | EWINIAR(0603) | 07/09~10 |
| 2006 | WUKONG(0610) | 08/19~20 |
| | SHANSHAN(0613) | 09/17 |
| 2007 | USAGI(0705) | 08/02~03 |
| | NARI(0711) | 09/16 |
| 2008 | KALMAEGI(0807) | 07/20 |
| 2009 | - | - |
| 2010 | DIANMU(1004) | 08/10~11 |
| | KOMPASU(1007) | 09/01~02 |

태풍의 경로와 함께 주요 7개 검조소에서 발생한 최대 해일고를 Fig. 2에 제시하였다. 90년대에 비해 2000년대 들어 서 해안의 해일고는 다소 감소한 반면 남해안과 동해안의 해일고는 RUSA(0215)와 MAEMI(0314)와 같은 대형 태풍 발생에 따라 증가한 결과를 보이고 있다.

전절에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 30 cm 이상 해일고만 분석대상으로 선정하였으며, 그중 태풍 영향기간 중에 발생한 해일은 전적으로 태풍에 의한 해일로 간주하였다. 즉, Table 3에 제시된 RUSA(0215) 영향기간인 8월 30~31일 전후로 목포 검조소에서 발생한 조위편차 시계열을 Fig. 3에 도시하였는데, 영향기간 중 30 cm 이상인 조위편차를 태풍에 의한 해일로 산정하여 음영으로 나타낸 부분의 면적을 해일강도로 산정하였다.

4. 해일의 시공간적 특성

4.1 해역별 해일발생의 계절 특성

전절에서 제시된 방법으로 산정된 전체 해일강도 중 태풍에 의해 발생한 해일강도를 분리하여 각 검조소에서의 결과 중 일부를 Fig. 4에 제시하였다. 인천과 군산 등 서해안 지역에서는 8월과 9월에 집중되는 태풍에 의한 해일강도에 비해 여타

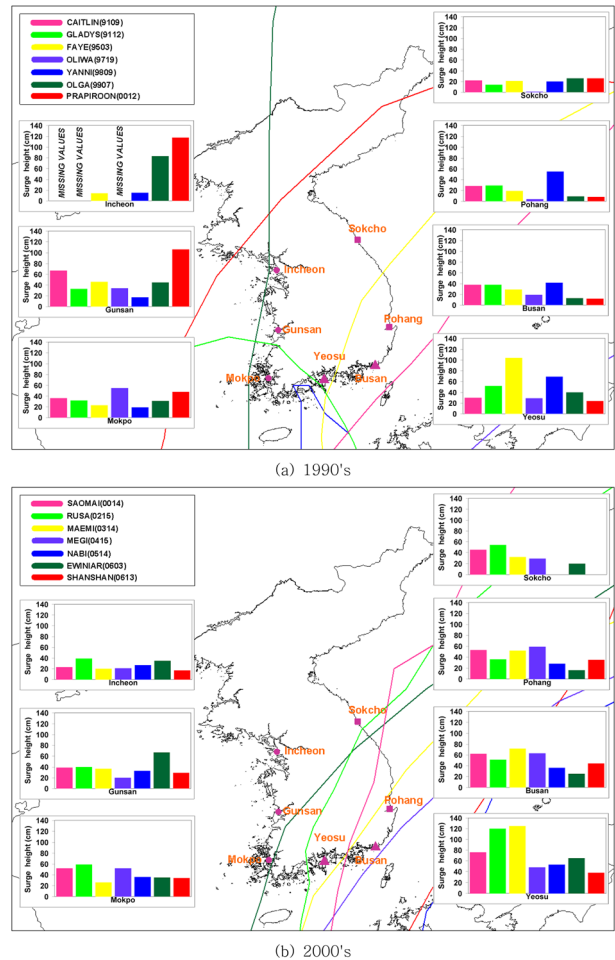


Fig. 2. Typhoon tracks and maximum surge heights.

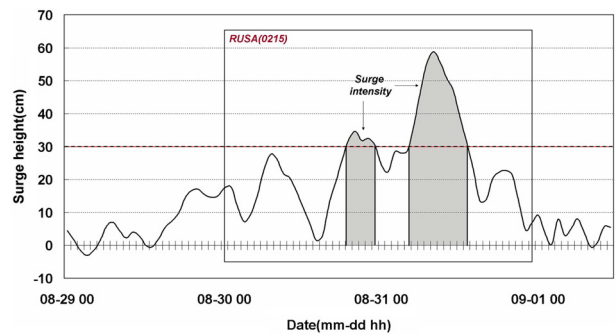


Fig. 3. Schematic diagram illustrating surge intensity.

계절, 특히 동계 계절풍에 의한 해일강도가 훨씬 크게 나타나고 있다. 이에 반해 여수, 통영 등 남해안의 경우 하절기 태풍 영향이 계절풍에 비해 크게 나타나고 있으며, 포항, 속초 등 동해안에서는 남해안과 유사하게 태풍의 영향이 크고 계절풍 영향은 미미한 것으로 나타나고 있다. 따라서 해일강도가 해당시기에 발생하는 상당한 정도의 해빈변형의 척도가 됨을 감안할 때, 서해안의 경우 동절기 계절풍에 의한 해빈변형이 지배적일 수 있는 반면 남해안과 동해안의 경우 태풍에 의한 해빈변형이 지배적일 수 있는 것으로 추정할 수 있다.

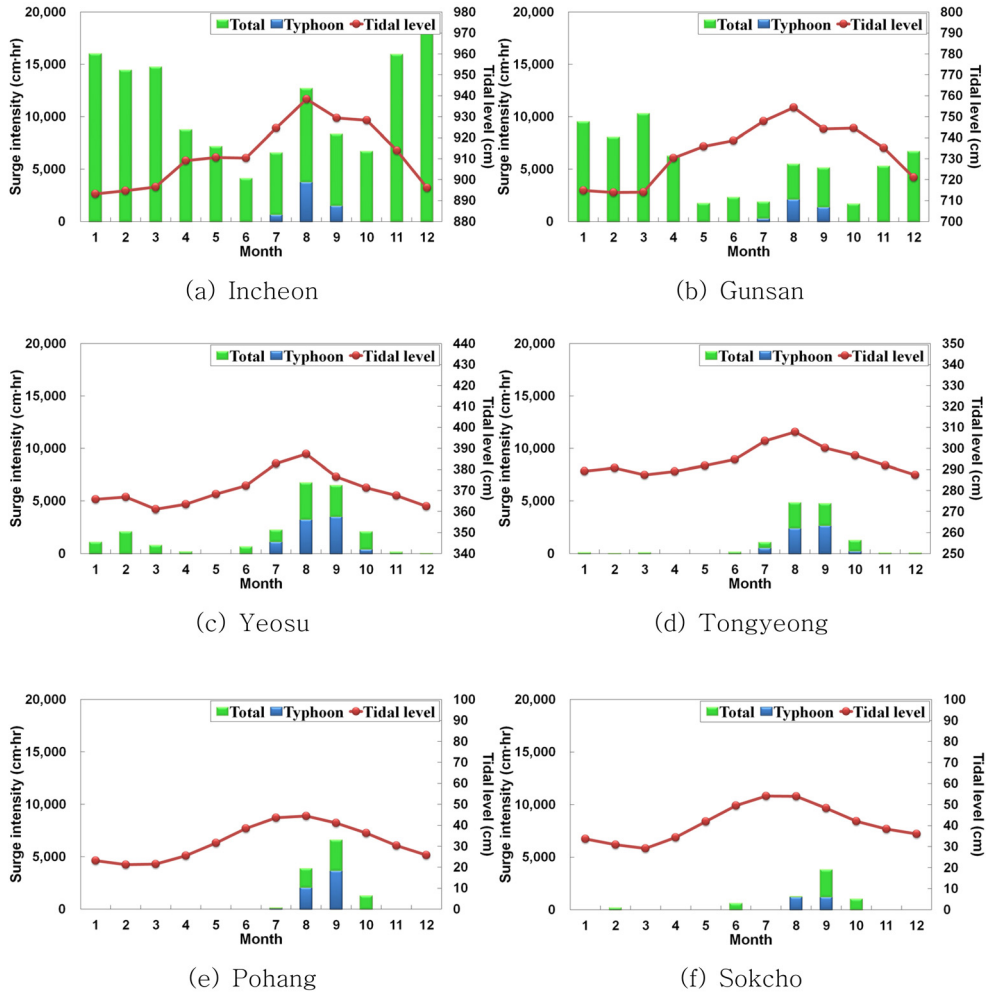


Fig. 4. Separation of surge intensity due to typhoon.

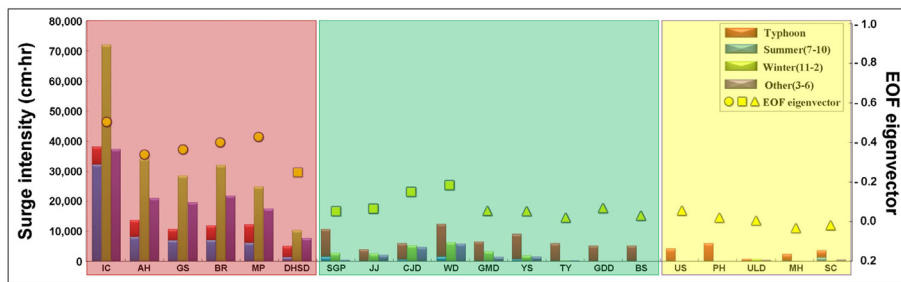


Fig. 5. Cumulative surge intensity and result of EOF analysis.

해빈변형과 달리 범람과 관련된 방재측면에서는 해일고 자체보다 조석과 해일이 중첩된 상태의 조위가 더욱 의미가 있다. 국내 해역별 조석상황을 함께 살펴보기 위해 먼저 각 검조소별로 관측된 월별최고조위를 20년간 평균한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 인천의 경우 8월에 약 940 cm 정도를 보이는 등 서해안의 조차가 동해안에 비해 매우 크게 형성되고 있음은 널리 알려진 사항이다. 이와 더불어 모든 해역에서 하절기 최고조위가 특히 높게 나타나고 있는데, 이는 주로 Sa 분조와 같은 연주조에 기인한 것으로 연교차가 동해안의 경우 20 cm, 서해안의 경우 40 cm에 이르는 것으로 알려져 있다(강 등,

2005). 이렇게 하절기 해수면이 동절기에 비해 높게 유지되고 있는 상태에서 태풍발생이 시기적으로 일치하고 있어 방재측면에서 태풍에 의한 영향요소가 더욱 부각되고 있다. 또한 연중 해일고 발생을 하절기(7~10월), 동절기(11~2월), 기타(3~6월)로 구분함과 동시에 하절기 해일 중 태풍에 의한 해일을 분리하여 Fig. 5에 제시하였다. 인천을 비롯한 서해안의 경우 동절기 해일강도가 가장 크게 나타나고 있으며 남해안과 동해안의 경우 하절기 중에서도 태풍발생시 해일강도가 크게 나타나고 있다. 따라서 조차가 큰 인천, 군산, 목포 등 서해안의 경우 대소조 및 조시에 따라 해수면 높이가 크게 좌우되므로 하절기와 동

Table 4. Issues for coastal erosion and disaster prevention

| Coast | Tidal range | Dominance | Erosion | Disaster prevention |
|----------------------|---------------|-----------|---------|-------------------------------|
| West Coast | more than 3 m | Monsoon | Monsoon | Spring tide & Monsoon/Typhoon |
| Southwest Coast | 1~3 m | Typhoon | Typhoon | Summer spring tide & Typhoon |
| Southeast/East Coast | less than 1 m | Typhoon | Typhoon | Summer & Typhoon |

질을 망라한 연중 대조기에 초점을 맞춰 발생 가능한 태풍과 계절풍 모두를 염두에 둔 방재대책이 요구된다. 완도와 여수 등 남해안의 중서부 해역에서는 조차 및 하절기 해수면 높이의 상대적 크기도 작지 않고 태풍에 의한 해일고가 크게 나타나므로 하절기의 대조기에 발생하는 태풍에 주의를 집중할 필요가 있다. 남해안의 동부해역과 동해안의 경우 조차는 비교적 작은 반면 하절기 태풍에 의한 해일이 지배적인 것으로 나타나고 있어 태풍영향만 고려해도 무방하다. 이러한 내용을 Table 4에 정리하였다.

4.2 해일발생의 연도별 특성

해일강도의 경년변화를 해역별로 구분하여 Fig. 6에 도시하였다. 모든 해역에서 추세나 주기적 변화가 감지되지는 않고 있으며 전절에서와 같이 서해안의 해일강도가 훨씬 크게 나타나고 있다. 서해안의 경우 대부분 검조소에서 1991년, 1998년, 2005년, 2009년 해일강도가 높게 형성되고 있는 반면 남해안의 경우 1998년에 다소 크게 나타나고 있으며 동해안에서는 규모만 다소 작을 뿐 남해안과 유사한 경향을 보이고 있다.

4.3 해일강도의 EOF 분석

두 개의 변량 사이의 상관관계를 파악하기 위해 상관계수 (correlation coefficient) r 를 사용한다. 이러한 개념을 세 개 이상의 다차원 변량에 적용하기 위해, 먼저 m 가지 종류의 변량 (관측소)이 있고 각 변량의 개수(관측연도)를 n 개라 할 때, 전체 변량은 $m \times n$ 행렬이 되고 표준화된 j 번째 변량과 k 번째 변량 간의 상관계수는 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

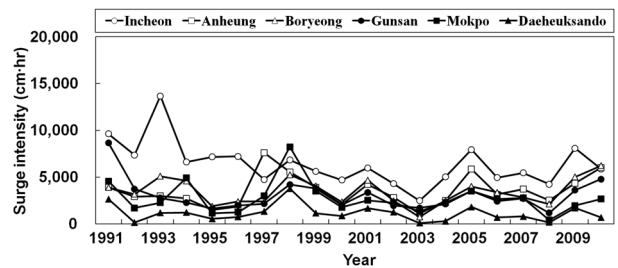
$$r_{j,k} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{j,i} - \bar{x}_j)(x_{k,i} - \bar{x}_k)}{s_j s_k} \tag{1}$$

여기서 s_j 와 s_k 는 표준편차이다. 또한 두 변량간의 공분산계수 (covariance coefficient)는 다음 식 (2)와 같이 비표준화 형태로 식 (1)과 유사하게 나타낼 수 있다.

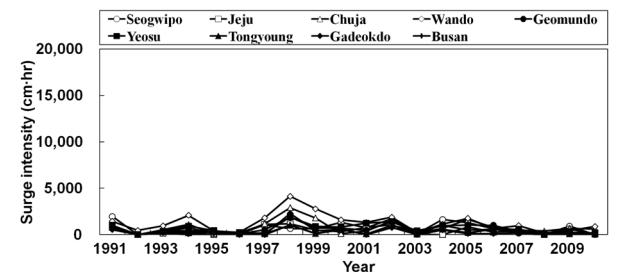
$$s_{j,k} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{j,i} - \bar{x}_j)(x_{k,i} - \bar{x}_k) \tag{2}$$

각 변량에서 평균값을 빼준 형태의 행렬식을 $X=(X_{orig} - \bar{x} \mathbf{1}^T)$ (여기서 $\mathbf{1}$ 은 모든 요소의 값이 1인 column vector)라 하면 공분산행렬은 다음 식 (3)과 같이 된다.

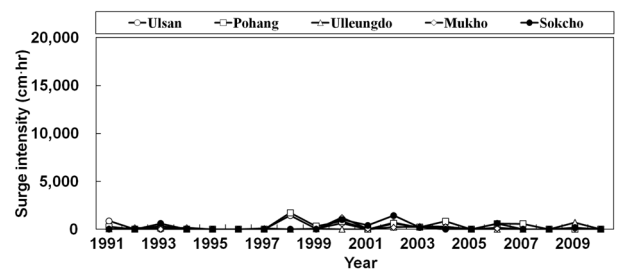
$$S = \frac{1}{n-1} X X^T \tag{3}$$



(a) West Coast



(b) South Coast



(c) East Coast

Fig. 6. Annual variations of surge intensity.

이때 SVD(singular value decomposition)를 통해 X 를 전개하면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X = U \Sigma V^T \tag{4}$$

이로부터

$$S = U \Sigma V^T V \Sigma U^T = U \Sigma^2 U^T \tag{5}$$

여기서 U 는 고유벡터(eigenvector), Σ^2 은 $1/(n-1)$ 이 포함된 고유치(eigenvalue)이다.

이상에서와 같이 공분산행렬의 고유벡터 U 를 EOF(empirical orthogonal function)라 하며, 이는 S 의 고유행렬 분석을 통해 얻을 수 있다. 그러나 m, n 이 커질 경우 고유벡터를 구하기는 매우 어렵지만 식 (5)의 SVD를 통해서 쉽게 얻을 수

Table 5. EOF results

| Station | 1st(47%) | 2nd(25%) | Station | 1st | 2nd |
|--------------|----------|----------|-----------|-------|-------|
| Incheon | -0.51 | 0.75 | Geomundo | -0.06 | -0.14 |
| Anheung | -0.33 | -0.28 | Yeosu | -0.06 | -0.12 |
| Boryeong | -0.37 | 0.05 | Tongyeong | -0.02 | -0.05 |
| Gunsan | -0.40 | 0.03 | Gadeokdo | -0.08 | -0.10 |
| Mokpo | -0.43 | -0.38 | Busan | -0.03 | -0.06 |
| Daeheuksando | -0.24 | -0.13 | Ulsan | -0.05 | -0.08 |
| Seogwipo | -0.06 | -0.08 | Pohang | -0.03 | -0.11 |
| Jeju | -0.07 | -0.09 | Ulleungdo | 0.00 | 0.02 |
| Chujado | -0.15 | -0.19 | Mukho | 0.03 | -0.02 |
| Wando | -0.19 | -0.28 | Sokcho | 0.02 | -0.01 |

있다(Navarra and Simoncini, 2010). 이렇게 얻어진 EOF는 X 행렬의 각 변량을 가장 정확하게 묘사하는 벡터들의 집합이 되는 동시에 X 행렬의 각 벡터는 m 개의 고유벡터의 선형조합으로 표시가 가능하게 된다(Kutzbach, 1967).

2장에서 언급된 20개 검조소에서 20년 동안 연별 해일강도에 대한 EOF 분석을 시행하였다. 그 결과 Table 5에 제시된 바와 같이 고유벡터의 1차와 2차 모드의 전체 변화상에 대한 기여율(괄호안에 표시)은 각각 47%와 25%로써 20년간 변화상의 대부분을 묘사하고 있다. 1차 고유벡터의 경우 인천에서 대흑산도까지 6개 서해안 지점에서의 절대값이 크게 나타나는 반면 추자도와 완도 등 일부 남해안의 서측 지점을 제외한 남해안 모든 지점과 동해안 지점에서의 값은 매우 작게 나타나고 있다. 1차 고유벡터가 계절풍에 의한 해일의 공간적 패턴을 보이고 있음(Zhang et al., 2000)을 감안할 때 계절풍에 따른 해일 영향성은 서해안에서 지배적이고 남해안에서도 추자도와 완도 지점에서 다소간의 영향이 있음을 시사하고 있으며 이러한 내용은 Fig. 5에서도 볼 수 있듯이 4.1절에서 확인된 사항과 일맥상통하고 있다. 즉, 국내연안의 해일발생 특성은 해역별로 뚜렷이 구분되어 서해안에서는 계절풍 영향이 상대적으로 크게 나타나고 있으며 동해안에서는 태풍의 영향이 지배적으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 EOF 분석결과에서도 유사하게 나타나고 있어 해역별로 상관관계가 뚜렷하게 구분되고 있다. 2차 고유벡터는 1차 고유벡터에서 묘사된 공간패턴을 제외한 나머지 값에 대한 공간패턴을 나타내고 있으며, 여기에는 계절풍 일부와 태풍에 의한 해일의 공간적 패턴을 포함하고 있지만 1차 고유벡터만큼 뚜렷한 상관성은 보이고 있지 않다.

5. 결 론

본 연구에서는 한반도에 영향을 미치는 태풍 또는 계절풍에 의한 연안해일특성을 분석하고자 검조소 자료를 분석하였다.

조위편차 자료에 대한 통계분석 결과 서해안의 경우 평균값은 양(+)의 값을 보이며 음(-)의 왜곡도를 보이는 반면 여타해역에서는 반대 양상을 보이고 있다. 또한 30 cm 이상의 해일고가 발생할 확률은 서해안은 1% 이상인 반면 여타 해역은 0.1% 정도에 불과한 것으로 나타났다. 이와 같이 해역별로 특성이 구분되는 해일고는 기상상태에 크게 영향을 받아 태풍이나 폭풍시에 극대화된다. 태풍은 주로 7~9월에 발생하는 반면 북서계절풍은 주로 겨울철에 우리나라에 영향을 주고 있다. 따라서 국내 연안에서 이들에 의한 영향성은 지역별로 적지 않은 차이를 보이게 된다. 서해안의 경우 30 cm 이상의 해일 발생이 주로 계절풍에 기인하여 동절기에 크게 나타나고 있는 반면 남해안과 동해안의 경우에는 계절풍의 영향은 미미하고 하절기 태풍에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타나고 있다.

연중 해일고 발생을 하절기(7~10월), 동절기(11~2월), 기타(3~6월)로 구분함과 동시에 하절기 해일 중 태풍에 의한 해일을 분리한 결과 인천을 비롯한 서해안의 경우 동절기 해일강도가 가장 크게 나타나고 있으며 남해안과 동해안의 경우 하절기 중에서도 태풍발생시 해일강도가 크게 나타나고 있다.

EOF 분석을 통해 유추된 결과 역시 1차 고유벡터의 경우 서해안 지점에서의 절대값이 크게 나타나는 반면 남해안과 동해안에서의 절대값은 매우 작게 나타나고 있다. 이러한 사항은 계절풍에 따른 해일 영향성은 서해안에서 지배적이고 남해안에서도 추자도와 완도 지점에서 다소간의 영향이 있음을 시사하고 있으며 앞에서 나타낸 결론과 일맥상통한 결과이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지식경제 기술혁신사업의 연구비 지원(20103020070080)에 의해 수행되었습니다. 또한 본 연구는 한국해양연구원 주요사업 ‘태풍해일 침수범람 예측 및 재해도 작성기술 개발’ 사업의 지원으로 일부 수행되었습니다.

참고문헌

- 강주환, 박선중, 문승록, 윤종태 (2009). 태풍의 특성변화에 따른 경남해역 해일양상 고찰. 한국해안·해양공학회논문집, 21(1), 1-14.
- 강주환, 박선중, 박민원 (2008). 서남해안의 해수면 상승과 해일고 증가 경향. 한국해안·해양공학회논문집, 20(1), 13-24.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 이성대 (2007). 연안역에서 고파랑과 폭풍해일을 고려한 침수해석. 한국해안·해양공학회논문집, 21(2), 35-41.
- 유승협, 이우정 (2009). 2006-2007년 한반도 인근 폭풍해일 특성. 한국마린엔지니어링학회지, 33(4), 595-602.
- 조홍연, 정신택, 윤종태, 김창일 (2006). 한반도 연안 비조석 성분자료의 통계적 특성. 한국해안·해양공학회지, 18(2), 112-123.
- 천제호, 안경모, 윤종태 (2009). 천해에 적용가능한 태풍 해일-조석-파랑 수치모델 개발 2. 태풍 매미에 의한 해일-조석-파랑 모델의 정확성 검토. 한국해안해양·공학회논문집, 21(1), 79-90.

- Fiore, M.M.E., D'Onofrio, E.E., Pousa, J.L., Schnack, E.J. and Bertola, G.R. (2009). Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina, *Continental Shelf Research*, 29, 1643-1649.
- Haigh, I., Nicholls, R. and Wells, N. (2010). Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900-2006, *Continental Shelf Research*, 30, 1042-1055.
- Kim, S.Y., Yasuda, T. and Mase, H. (2008). Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves, *Applied Ocean Research*, 30, 311-322.
- Kutzbach, J.E. (1967). Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America, *Journal of Applied Meteorology*, 6, 791-802.
- Murray, M.T. (1964). Pol/PSMSL Tidal Analysis Software Kit (TASK Package), Proudman Oceanographic Laboratory.
- Navarra, A. and Simoncini, V. (2010). A guide to empirical orthogonal functions for climate data analysis, Springer, 39-49.
- Olbert, A.I. and Hartnett, M. (2010). Storms and surges in Irish coastal waters, *Ocean Modelling*, 34, 50-62.
- Pugh, D. (2004). *Changing sea levels*, Cambridge University Press, 129-156.
- Zhang, K., Douglas, B.C. and Leatherman, S. (2000). Twentieth-century storm activity along the U.S. east coast, *Journal of Climate*, 13, 1748-1761.
-
- 원고접수일: 2011년 10월 5일
수정본채택: 2011년 10월 25일
게재확정일: 2011년 11월 1일