

한국연안 일평균 조위편차의 시공간적 변동 특성

김호균** · 김영택**

*, ** 국립해양조사원 해양과학조사연구실

Characteristics of Spatio-temporal Variability of Daily averaged Tidal Residuals in Korean Coasts

Ho-Kyun Kim** · Young-Taeg Kim**

*, ** Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 351 Haeyang-ro Yeongdo-gu Busan 606-806, Korea

요 약 : 본 연구에서는 우리나라 연안의 2003~2009년 해수면자료로 조위편차를 산출하고, 일평균조위편차의 시공간적 변동을 EOF 분석, 해면기압과 바람이 조위편차 변동에 얼마나 영향을 미치는지를 상관성 분석을 통해 알아보았다. 일평균조위편차는 전체 변동량의 68%(제1모드)가 동시승강하였고, 전체 변동량의 21%(제2모드)는 서해안이 상승할 때 남해안과 동해안이 하강하는 교차승강을 하였다. 해역별로 조위편차에 영향을 주는 주요 요인을 보면, 서해안은 남-북 방향의 바람 성분이었고, 남해안은 동해안으로 갈수록 해면기압의 영향이 우세하였다.

핵심용어 : 조석, 조위편차, EOF분석, 상호상관함수, 바람

Abstract : EOF analysis of tidal residual derived from 2003~2009 tide data was used to identify the spatio-temporal variability. The effect of sea surface air pressures and winds on the tidal residual was also investigated by the correlation analysis. The first mode accounting for 68% of the total variance represented concurrent sea level rise or fall, and the second mode accounting for 21% of the total variance explained alternative sea level rise and fall between West Sea coast and both South Sea and East Sea coasts. While northerly and southerly winds dominated the tidal residual in the eastern coast of Yellow Sea, the effect of sea surface air pressures on the tidal residual increased along the coastal regions from South Sea to East Sea.

Key Words : Tide, Tidal residual, EOF, Cross-correlation function, Wind

1. 서 론

해양관광, 해양레저, 해상교통, 해상 구조물 설치 등 인간의 연안활동이 증가함에 따라 안전에 위협이 되는 조위편차 예측이 중요해지고 있다. 해수면 관측치를 조석조화분해하여 평균해면과 조위를 해수면 관측치에서 제거한 것을 조위편차라고 하며, 조위편차 중에서 큰 양(+)의 값을 가지는 것을 해일고라 부른다(Pugh, 1987). 조위는 조석조화분해를 통해 구한 조화상수를 이용하여 분조의 합성으로 예측이 가능한 반면, 조위편차는 바람, 기압, 해수밀도 변화 등에 의해 만들어 지기 때문에 불규칙한 변동을 하므로 예측이 쉽지 않다.

선박이 항구에 접안하거나 바다 갈라짐 체험 및 낚시 등

레저 활동을 할 때 예기치 못하게 발생할 수 있으므로 조위편차는 연안에서 인간 활동에 위협이 될 뿐 아니라 해상구조물 및 항만 설계 등에 중요한 기초자료가 된다.

폭풍해일에 의한 조위편차로 발생한 피해사례를 살펴보면 태풍 루사(2002.8.30.)때 사망/실종 246명, 재산피해가 5조 1천억원이었고, 태풍 매미(2003.9.20.)는 사망/실종 131명과 재산피해 4조2천억원을 일으켰다(NTC, 2003). 또한, 이상과랑에 의해 2007년 3월 31일 전남 영광 및 고창에서 사망 4명, 부상 3명, 2008년 5월 4일 충남 보령 죽도 방파제에서 사망 9명, 부상 14명의 인명피해가 발생했다(KHOA, 2010).

우리나라 연안의 조위편차와 해일고에 관한 연구를 보면, Cho and Kang(2012)은 비모수적 방법인 Kernel 함수로 연안 조위편차의 확률밀도함수를 추정·제한하고 조위편차자료의 분포와 다양한 극값 추정에도 높은 수준의 정도를 보였

† Corresponding Author : hokyun1001@korea.kr, 051-400-4361

다. 해일고와 관련하여 서남해안에서 예측 고조위가 증가하는 경향(Kang et al., 2008)과 20개 조위관측소의 자료 분석을 통해 국내연안 해일강도 특성(Kang et al., 2011)이 보고 되었다. Kwon et al.(2008)은 속초와 목호항에서 연간 최대해일고의 장기간 변동성을 고찰한바 있다. 그러나 앞의 연구들은 조위편차 발생의 주요 요인인 해면기압이나 바람 등의 분석이 미약하고, 통계적 분석으로 극치값의 예측에 국한되어 있거나, 조위잔차에 일시적으로 영향을 준 태풍이나 폭풍에 의한 해일고 산정에 한정되어 있다.

불규칙하게 변동하는 조위편차를 예측하기 위해 먼저 변동 특성과 변동에 기여하는 요인별 상관성 연구가 선행되어야 한다. 따라서 한국연안의 조위편차의 변동 특성, 시공간적인 변동을 알아보고, 조위편차의 변동에 영향을 주는 기상요인인 해면기압과 바람의 변동과의 상관성을 파악하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에 사용된 자료는 2009년 기준으로 국립해양조사원이 운영하고 있는 조위관측소 중에서 설치시기와 자료의 결측 정도를 고려한 11개 조위관측소(Fig. 1)를 선정하여 2003년부터 2009년까지 7년 동안 관측한 매 10분 해수면 자료이다. 또한, 조위편차의 변동 요인과의 상호상관성 분석을 위하여 기상청에서 수집한 같은 기간의 매 시간 풍향·풍속 및 매 3시간 기압자료를 수집하여 분석에 사용했다.

조위편차는 각 조위관측소에 대하여 관측된 해수면 자료로부터 매년 조석조화분해하여 예측조위를 생성하고 해수면 자료로부터 예측조위를 제거하여 산출한다. 조위편차와 바람, 조위편차와 해면기압의 상호상관성과 시공간적 변동을 알아보기 위해 모든 자료는 일평균값으로 변환하여 분석한다. 왜냐하면 바람이나 해면기압의 일시적인 변동에 대한 조위편차의 반응보다는 지속적인 변동에 대한 조위편차의 반응을 파악하기 위해서이다. 10분 간격의 조위편차 자료에 대하여 하루 144개 자료중에서 90% 이상인 130개 자료가 취득된 경우에 조위편차의 일평균을 계산하며, 그렇지 않으면 결측으로 처리한다. 해면기압의 잔차성분을 구하기 위하여 하루 8개 자료를 평균하여 일평균자료를 만들고 연변동과 반년변동 주기에 대하여 조화분해하여 연변동과 반년변동치를 산출한 후, 이를 해면기압으로부터 제거한다. 바람은 동방성분(U)과 북방성분(V)으로 분리 후, 해면기압과 마찬가지로 각각 연변동과 반년변동을 제거하여 산출한다.

조위편차의 시·공간적인 변동을 알아보기 위하여 EOF(Empirical Orthogonal Function, 경험직교함수)분석을 수행하였다. EOF 분석을 위하여 결측자료는 SPLINE 보간 방법을 이용하여 조위편차 추정치로 대체한다.

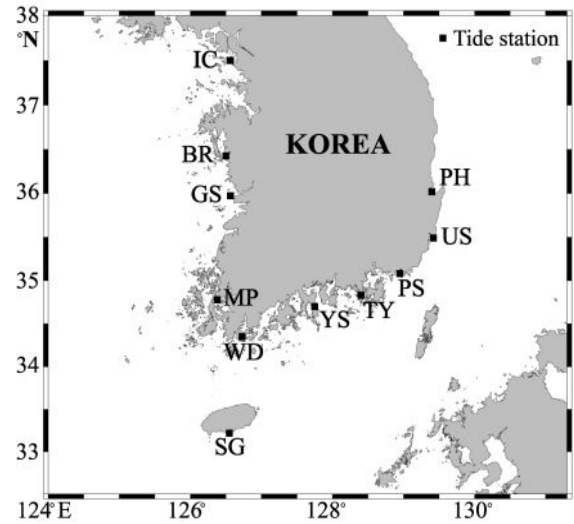


Fig. 1. Location of tide stations.

3. 결과 및 고찰

3.1 조석과 조위편차

해수면 변동은 아래 식과 같이 평균해면, 주기적이고 예측 가능한 조석과 불규칙적으로 변동하는 조위편차의 합으로 구성된다.

$$\zeta(t) = MSL + T(t) + R(t)$$

$$T(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) A_i \cos(w_i t - \phi_i)$$

여기서 $\zeta(t)$, MSL , $T(t)$ 와 $R(t)$ 는 각각 해수면 변동, 평균해면, 조석과 잔차 즉, 조위편차이고 MSL 은 시간에 관계없이 일정하다고 가정한다. $f(t)$ 는 달의 공전주기인 18.61년 동안 달의 적위에 따라 변하는 노달팩터(nodal factor), 아래첨자 i 는 i 번째 분조, n 은 분조의 개수, w 는 각속도, t 는 시간, ϕ 는 위상이다.

조위편차를 구하기 위하여 연구에 사용된 11개 지점 조위관측소의 해수면 자료를 자료수집 기간인 2003년에서 2009년까지 국립해양조사원에서 사용하는 TIRA 프로그램을 이용하여 조석조화분해하고 매년 62개 분조에 대한 조석조화상수를 얻었으며, 조석 주요 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 대하여 7년 평균한 조석조화상수를 Table 1에 보였다. 조석의 크기를 나타내는 분조의 진폭은 황해중부에서, 황해남부, 남해서부, 남해동부를 거쳐 동해안으로 갈수록 작아지며, 조석과의 진행을 알 수 있는 위상은 진폭과 반대로 동해안, 남해동부, 남해서부, 황해남부, 황해중부로 갈수록 커진다.

한국연안 일평균 조위편차의 시공간적 변동 특성

Table 1. Tidal harmonic constants for 4 major constituents. *H* and *g* represent an amplitude in cm and a phase in degree(°)

St.	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
	<i>H</i>	<i>g</i>	<i>H</i>	<i>g</i>	<i>H</i>	<i>g</i>	<i>H</i>	<i>g</i>
IC	286.6	130.2	115.1	187.3	39.2	302.5	28.6	264.4
BR	227.0	95.6	89.0	149.7	35.2	285.1	26.4	248.7
GS	221.7	85.8	86.2	139.1	34.9	280.0	26.3	243.8
MP	143.6	35.5	48.9	85.9	30.6	250.5	23.4	217.6
SG	74.5	282.8	32.9	315.6	24.1	210.3	17.6	179.6
WD	103.4	295.4	44.0	328.2	26.8	204.7	19.3	172.2
YS	95.3	257.3	43.6	292.5	18.9	181.6	12.7	148.3
TY	76.7	252.3	35.2	287.3	14.7	179.8	9.7	137.7
PS	37.9	240.8	17.7	276.9	4.4	147.2	1.6	107.0
US	15.7	210.8	7.3	251.8	3.1	48.6	2.9	346.7
PH	3.1	117.4	0.7	167.2	3.9	6.9	4.1	322.4

Table 2. Statistics of daily averaged tidal residuals

St.	mean (cm)	RMS Amp. (cm)	Max. (cm)	Min. (cm)	UR* (%)
IC	-0.005	9.8	50.1	-47.7	0.08
BR	-0.026	9.2	42.8	-47.4	0.74
GS	-0.008	8.4	37.3	-42.6	0.04
MP	0.007	7.5	34.7	-25.7	0.31
SG	-0.001	6.3	36.1	-21.3	0.00
WD	-0.030	7.2	33.7	-26.4	0.08
YS	0.008	6.5	32.2	-31.2	0.23
TY	0.000	6.1	23.7	-23.2	0.00
PS	0.000	6.4	29.9	-25.4	0.00
US	0.000	6.4	25.5	-24.0	0.00
PH	0.000	6.4	33.2	-20.8	0.00

UR* : Unmeasured Rate

2003년부터 2009년 까지 각 조위관측소별 일평균 조위편차를 산출하고 결측자료에 대하여 SPLINE 보간방법을 사용하여 보간한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. RMS(Root Mean Square) 진폭에 의한 조위편차의 변동 크기와 최대치와 최소치의 변동폭은 Table 2에 보였다. 일평균 조위편차는 불규칙하게 변동하며 분조들의 진폭 크기와 마찬가지로 서해안에서 남해안, 동해안으로 갈수록 변동이 작아진다(Table 1). 결측률은 0.00~0.74%로 보령에서 최대 19일 결측이 발생했다.

조석 주요 4대 분조 진폭의 합은 평균해면으로부터 변동하는 조석의 최대 크기를 의미하는데, 우리나라에서는 평균해면으로부터 이 값만큼 아래에 위치한 이 면을 약최저저조

면이라 하고 조석 관측기준이자 해도에 표기하는 수심의 기준으로 사용하고 있다. 특히, 약최저저조면은 항해하는 선박의 안전을 위하여 조석에 의해 해면이 낮아질 수 있는 수심을 고려한 것이다. 그러나 만약에 큰 음의 조위편차가 발생하면 해수면은 약최저저조면보다 아래로 내려갈 수 있으며 이때, 수심이 얇은 곳에서 좌초의 위험이 있어 선박의 안전을 위협할 수 있다. Table 1, Table 2와 Fig. 2로부터 조석이 큰 지점에서 조위편차도 크다는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 Kang et al.(2011)과 Cho and Kang(2012)의 결과와 일치한다.

3.2 조위편차의 변동 과정

일평균 조위편차의 변동 특성을 알아보기 위해 조위편차의 크기에 따른 변동 과정을 Table 3~13에 백분율로 나타내었다. 조위편차의 크기는 일반화를 위해 각 자료의 표준편차($\pm\sigma$)를 이용하여 $\pm 3\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm\sigma$ 를 기준으로 8개 구간을 ① $r \leq -3\sigma$, ② $-3\sigma < r \leq -2\sigma$, ③ $-2\sigma < r \leq -\sigma$, ④ $-\sigma < r \leq 0$, ⑤ $0 < r \leq \sigma$, ⑥ $\sigma < r \leq 2\sigma$, ⑦ $2\sigma < r \leq 3\sigma$, ⑧ $r \leq 3\sigma$ 와 같이 정했다. 여기서 r 은 조위편차를 의미한다. 어느 구간의 I 번째 날 조위편차(가로 ①~⑧)가 I+1 번째 날 어떤 구간의 값(세로 ①~⑧)으로 전환되는 가를 백분율로 나타내었으며 이를 일평균 조위편차의 전환행렬(TRANS MATRIX)이라 명명한다.

연구 대상 11개 전 지점에서 일평균 조위편차는 약 60%가 표준편차($\pm\sigma$) 내에서 전환되며, 조위편차의 절대값이 2σ 이상에서 같은 부호로 절대값 2σ 이상으로의 전환은 최대 1.22%를 넘지 않는다. -2σ 이하(①,②)에서 2σ 이상(⑦,⑧) 또는 2σ 이상(⑦,⑧)에서 -2σ 이하(①,②)로 전환되는 경우는 서해안에서 최대 0.12%인 반면에 남해안과 동해안은 거의 없다. 특히, 조위편차의 극단적인 변동을 나타내는 ①에서 ⑧로 전환은 인천에서 0.08%로 2회, ⑧에서 ①로 변동은 보령에서 0.04%로 1회 발생했다. Fig. 2에 보인바와 같이 조

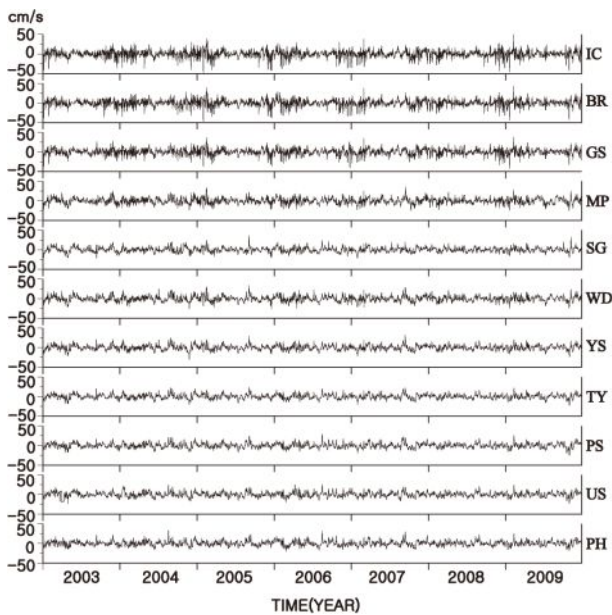


Fig. 2. Time series of daily tidal residuals(2003~2009).

위편차가 전 지점에서 불규칙한 변동을 하지만 $|\pm 2\sigma|$ 이상에서 $|\pm 2\sigma|$ 이상으로 거의 전환되지 않는다. 인천, 보령과 군산에서 -2σ 이하(①,②)가 나머지 지역에 비해 상대적으로 높고, 2σ 이상(⑦,⑧)은 황해 3 개 지점보다 높다. 인천, 보령과 군산의 일평균 조위편차는 양의 구간(⑤~⑧)에서 전 구간(①~⑧)으로 전환이 음의 구간(①~④)에서 전구간(①~⑧)으로 전환보다 우세하다. 이것은 위 3 지점에서 양의 조위편차 지속성이 음의 지속성보다 강하다는 것을 의미하며, 음의 조위편차가 크게 발생할 수 있는 가능성을 나타낸다. 나머지 지점은 세 지점과 현상은 반대이다.

Table 3. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at IC

IC($\sigma=\pm 9.8$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.12	0.16	0.20	0.35	0.35	0.16	0.04	0.00
②	0.00	0.08	0.39	0.43	0.70	0.39	0.04	0.04
③	0.27	0.39	1.33	2.78	2.62	0.78	0.23	0.08
④	0.31	0.82	3.48	18.43	10.52	2.35	0.31	0.08
⑤	0.47	0.43	2.43	11.74	19.13	3.91	0.67	0.04
⑥	0.08	0.16	0.63	2.39	4.62	2.62	0.39	0.00
⑦	0.00	0.04	0.04	0.20	0.82	0.63	0.12	0.00
⑧	0.08	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00

Table 4. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at BR

BR($\sigma=\pm 9.2$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.16	0.08	0.16	0.39	0.31	0.20	0.00	0.04
②	0.08	0.04	0.39	0.67	0.67	0.31	0.00	0.00
③	0.31	0.70	1.49	2.31	2.11	0.98	0.23	0.04
④	0.27	0.74	3.44	18.70	10.80	2.39	0.27	0.04
⑤	0.35	0.43	2.23	11.85	18.51	4.15	0.59	0.04
⑥	0.12	0.12	0.43	2.35	5.01	3.05	0.39	0.04
⑦	0.04	0.00	0.04	0.39	0.70	0.35	0.23	0.04
⑧	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.08	0.08	0.00

Table 5. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at GS

GS($\sigma=\pm 8.4$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.12	0.08	0.16	0.27	0.23	0.12	0.00	0.00
②	0.00	0.12	0.27	0.74	0.63	0.20	0.04	0.04
③	0.23	0.43	1.76	3.29	2.46	0.82	0.12	0.00
④	0.31	0.59	4.69	17.96	10.41	2.03	0.35	0.12
⑤	0.16	0.59	1.96	11.89	18.23	4.15	0.63	0.04
⑥	0.12	0.16	0.23	2.11	5.05	3.48	0.47	0.04
⑦	0.04	0.04	0.08	0.16	0.59	0.82	0.16	0.00
⑧	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.12	0.00

Table 6. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at MP

MP($\sigma=\pm 7.5$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.00	0.04	0.08	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00
②	0.08	0.35	0.43	0.74	0.43	0.16	0.00	0.04
③	0.08	0.82	3.79	4.73	1.96	0.51	0.00	0.00
④	0.04	0.70	6.22	19.64	9.27	1.64	0.20	0.04
⑤	0.00	0.23	1.10	10.68	15.88	4.66	0.55	0.08
⑥	0.00	0.08	0.23	1.80	5.05	4.66	0.63	0.04
⑦	0.00	0.00	0.04	0.08	0.55	0.82	0.39	0.04
⑧	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.16	0.12

Table 7. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at SG

SG($\sigma=\pm 6.3$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.08	0.16	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00
②	0.08	0.35	0.39	0.20	0.23	0.00	0.00	0.00
③	0.12	0.59	6.34	4.54	0.74	0.23	0.04	0.04
④	0.04	0.16	5.05	21.95	8.76	0.78	0.08	0.00
⑤	0.00	0.00	0.82	9.62	19.52	4.42	0.59	0.12
⑥	0.00	0.00	0.00	0.43	4.93	4.66	0.86	0.20
⑦	0.00	0.00	0.00	0.04	0.74	0.90	0.47	0.12
⑧	0.00	0.00	0.00	0.04	0.16	0.08	0.20	0.08

Table 8. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at WD

WD($\sigma=\pm 7.2$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.00	0.00	0.08	0.08	0.04	0.00	0.00	0.04
②	0.08	0.55	0.59	0.35	0.12	0.04	0.00	0.00
③	0.08	0.74	4.66	5.24	1.13	0.20	0.04	0.00
④	0.04	0.39	5.83	20.34	9.23	1.13	0.23	0.12
⑤	0.04	0.04	0.74	10.21	17.72	4.85	0.55	0.08
⑥	0.00	0.00	0.16	1.06	4.93	4.23	0.86	0.16
⑦	0.00	0.00	0.00	0.08	0.86	0.82	0.47	0.12
⑧	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.12	0.20	0.16

Table 9. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at YS

YS($\sigma=\pm 6.5$ cm)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
①	0.04	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
②	0.08	0.59	0.70	0.39	0.08	0.00	0.00	0.00
③	0.08	0.78	5.24	5.05	0.78	0.16	0.04	0.04
④	0.00	0.23	5.32	20.85	9.19	0.86	0.20	0.04
⑤	0.00	0.04	0.82	9.35	19.68	4.73	0.67	0.12
⑥	0.00	0.04	0.08	0.90	4.77	3.79	0.86	0.16
⑦	0.00	0.00	0.00	0.12	0.86	0.94	0.51	0.16
⑧	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.12	0.31	0.00

Table 10. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at TY

		TY($\sigma=\pm 6.1$ cm)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
①	0.04	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
②	0.08	0.51	1.02	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	
③	0.12	0.86	5.75	5.28	0.51	0.04	0.04	0.00	
④	0.00	0.16	5.24	21.21	9.12	0.78	0.12	0.04	
⑤	0.00	0.04	0.51	9.15	18.31	5.13	0.51	0.00	
⑥	0.00	0.00	0.08	0.82	5.24	4.89	1.02	0.08	
⑦	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	1.17	0.51	0.35	
⑧	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.12	0.31	0.00	

Table 11. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at BS

		PS($\sigma=\pm 6.4$ cm)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
①	0.04	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
②	0.08	0.35	0.82	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
③	0.04	0.82	6.26	5.63	0.43	0.12	0.00	0.00	
④	0.00	0.04	5.52	22.89	8.76	0.78	0.04	0.00	
⑤	0.00	0.04	0.59	8.49	17.53	4.77	0.39	0.00	
⑥	0.00	0.00	0.08	0.90	4.66	5.20	1.33	0.12	
⑦	0.00	0.00	0.00	0.04	0.39	1.25	0.63	0.27	
⑧	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.16	0.20	0.12	

Table 12. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at US

		US($\sigma=\pm 6.4$ cm)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
①	0.04	0.08	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	
②	0.08	0.82	0.63	0.20	0.04	0.04	0.00	0.00	
③	0.04	0.67	6.26	5.16	0.67	0.00	0.00	0.00	
④	0.04	0.20	5.36	22.46	8.80	0.86	0.04	0.00	
⑤	0.00	0.04	0.47	9.08	17.72	4.66	0.47	0.08	
⑥	0.00	0.00	0.04	0.78	4.85	5.20	1.10	0.12	
⑦	0.00	0.00	0.00	0.04	0.39	1.33	0.67	0.08	
⑧	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.23	0.08	

Table 13. TRANS MATRIX of daily tidal residuals at PH

		PH($\sigma=\pm 6.4$ cm)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
①	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
②	0.04	0.47	0.94	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	
③	0.00	0.86	6.34	5.28	0.63	0.12	0.00	0.00	
④	0.00	0.23	5.20	20.46	9.59	0.94	0.04	0.00	
⑤	0.00	0.04	0.67	9.59	18.31	4.62	0.51	0.04	
⑥	0.00	0.00	0.04	0.94	4.62	4.81	1.10	0.23	
⑦	0.00	0.00	0.04	0.08	0.51	1.13	0.67	0.16	
⑧	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.12	0.27	0.12	

3.3 조위편차의 시공간적 변동(EOF 분석)

일평균 조위편차의 시공간적인 변동을 알아보기 위하여 EOF(Empirical Orthogonal Function, 경험적직교함수)분석을 수행하여 그 결과를 Fig. 3(a)-(c)에 나타내었다. 제1모드는 전체 변동량의 68.1%를 차지하며, 조위편차가 11개 전 지점에서 동시에 상승(+)하거나 동시에 하강(-)하는 변동을 보이는데 (Fig. 3a), 해면기압과 바람이 우리나라와 주변해역에 대하여 거의 동시에 광범위하게 영향을 주기 때문으로 생각된다.

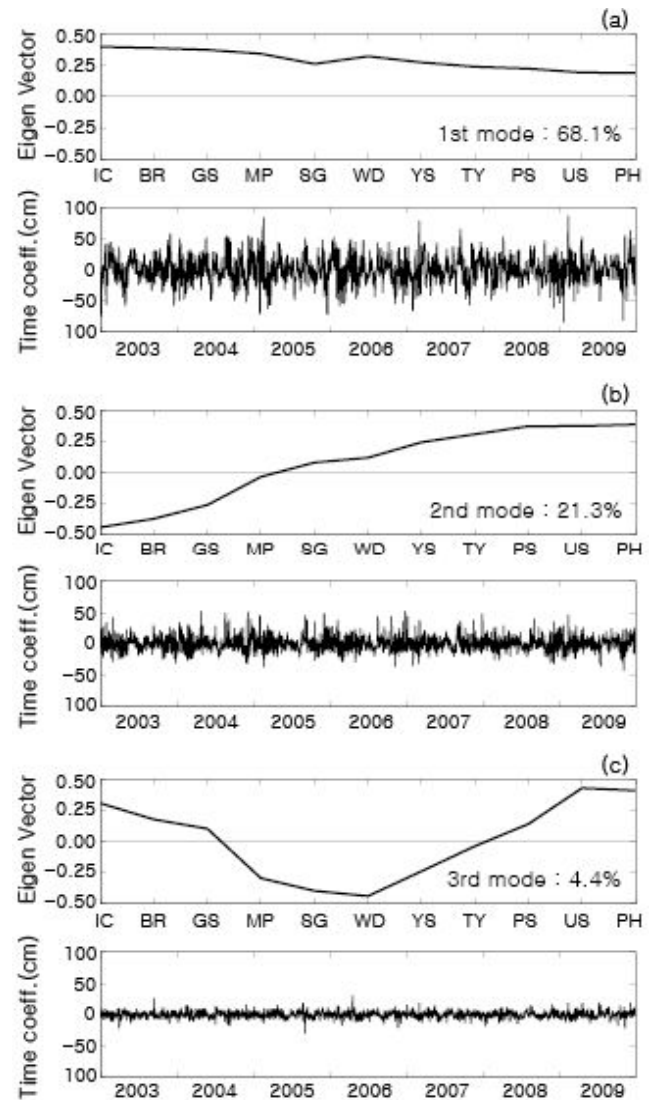


Fig. 3. EOF analysis of daily tidal residual shows (a)1st mode (68.1%) of concurrent sea level rise and fall over the whole stations, (b)2nd mode(21.3%) of alternative rise and fall between Yellow Sea~Southern Sea and East Sea, and (c)3rd mode(4.4%) of alternative rise and fall among Mid-Yellow Sea, Southern Sea, and East Sea.

그러나 해역별로 조위편차의 변동 크기는 다른데 서해안 중부에서 남해안, 동해안으로 갈수록 조위편차의 변동은 작아진다. 이것은 조차가 큰 서해안에서 조위편차가 크고 남해서부, 남해동부, 동해안으로 갈수록 조차가 작아지는데 조위편차도 작아지는 Table 1과 Table 2에 보인 것과 같다.

제2모드는 전체 변동량의 21.3%를 차지하며 조위편차가 서해안에 위치한 인천, 보령, 군산, 목포에서 상승(하강)할 때 남해안과 동해안 나머지 7개 지점에서 하강(상승)하는 교차승강을 보여준다(Fig. 3b). 제2모드의 교차승강은 조위편차 변동 과정이 서해안과 남해안·동해안이 다른 것을 의미한다. 즉, 해면기압과 바람의 변동이 서해안과 남해안·동해안에 각각 다르게 작용하는 성분으로 인한 조위편차 변동이 제2모드에 나타난 것이다. 이러한 변동의 요인으로 바람과 기단의 이동을 고려할 수 있다. 북풍은 해수를 황해연안으로 이동시켜 해수면을 상승시키고 남해안·동해안의 해수를 외해쪽으로 이동시켜 해수면을 낮추는 작용을 하는 것으로 보이며 또한, 서쪽으로부터 동쪽으로 이동하는 기단이 원인인 것으로 추측된다. 제1모드와 제2모드 변동량의 합은 조위편차 전체 변동량의 약 90%를 차지함으로써 조위편차 변동의 대부분을 설명한다.

제3모드는 전체 변동량의 4.4%를 차지하며 서해안 인천, 보령, 군산 3개 지점과 부산과 동해안 2개 지점이 상승(하강)할 때 목포와 남해안에 위치한 5개 지점들이 하강(상승)하는 교차승강을 나타낸다(Fig. 3c). 이런 결과는 바람이나 해면기압의 변동 성분 중에 서해안과 동해안과 달리 남해안에 작용하는 성분이 있을 것으로 추정된다.

3.4 해면기압 변동

일평균 해면기압의 연변동과 반년변동 조화상수를 Table 14에 나타내었다. 해면기압의 연평균은 군산에서 1016.6 hPa

Table 14. Harmonic constants(A: Amplitude, P: Phase) of annual and semi-annual variations using daily mean sea surface pressure(hPa)

St.	AVG. (hPa)	A _a (hPa)	P _a (°)	A _{sa} (hPa)	P _{sa} (°)	Residual(hPa)		
						Max.	Min.	SID.
IC	1015.9	9.37	3	1.01	166	13.8	-23.0	4.5
BR	1016.3	9.50	4	0.94	183	13.8	-21.9	4.4
GS	1016.6	9.51	4	0.90	186	13.8	-21.5	4.4
MP	1016.2	9.34	5	0.89	193	13.3	-20.0	4.3
SG	1015.5	8.34	6	0.90	248	13.7	-17.8	4.2
WD	1016.0	9.09	5	0.87	246	14.0	-19.4	4.2
YS	1016.0	8.41	4	0.93	248	14.8	-19.4	4.3
TY	1015.6	8.14	4	0.94	242	14.9	-19.5	4.4
PS	1015.5	7.86	4	1.01	237	15.1	-20.0	4.6
US	1015.4	7.97	4	1.07	232	15.4	-20.2	4.6
PH	1015.5	7.99	1	1.04	228	15.8	-21.5	4.6

로 최대, 울산에서 최소 1015.4 hPa를 보이며, 연진폭은 군산에서 9.51 hPa로 최대, 부산에서 최소 7.86 hPa이다. 해면기압은 모든 지점에서 매년 1월 초에 최대를 나타낸다.

연변동과 반년변동이 제거된 일평균 해면기압(Fig. 4)의 최대치는 서해안, 남해안, 동해안 순서로 커지며 최소치는 서해안에서 남해안으로 갈수록 커지다가 동해안으로 갈수록 작아진다. 해면기압의 반년진폭은 울산에서 1.07 hPa로 최대, 완도에서 최소 0.87 hPa로 연진폭에 비해 매우 작다.

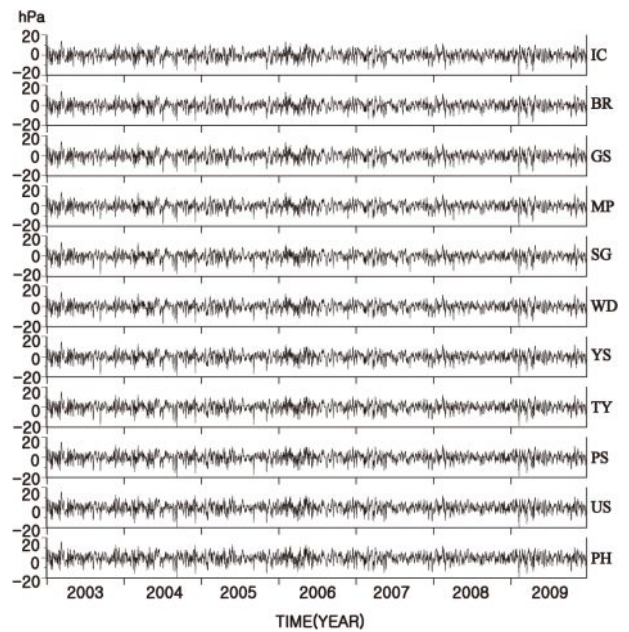


Fig. 4. Time series of daily sea surface air pressure with annual and semi-annual variations removed(2003~2009).

3.5 바람 변동

바람의 일평균 동-서 성분(U)과 남-북 성분(V)에 대한 연변동과 반년변동 조화상수를 Table 15에 나타내었다. 바람의 동-서 성분 연진폭은 목포에서 최소 0.41 m/sec부터 여수에서 최고 1.46 m/sec까지 이다. 동-서 성분의 연위상은 최소 189°에서 최대 313°으로 7월초에서 11월 중순에 최대값이 나타난다. 바람의 남-북 성분의 연진폭은 서귀포에서 최소 0.60 m/sec부터 완도에서 최고 2.20 m/sec까지 이다. 남-북 성분의 연위상은 포항 210°(8월 초순)을 제외하고 337°에서 21°까지 변하는데, 이것은 12월초에서 다음해 1월 하순에 해당한다.

바람의 동-서 성분과 남-북 성분의 연변동과 반년변동이 제거된 바람의 잔차성분을 합성하여 Fig. 5에 나타내었다. 일평균 바람 잔차성분이 가장 큰 곳과 가장 작은 곳은 각각 여수 약 3 m/sec, 보령 1.2 m/sec이며 일평균 최대풍속은 여수에서 2005년 9월 5일에 14.3 m/sec를 나타낸다.

Table 15. Harmonic constants(A: Amplitude, P: Phase) of annual and semi-annual variation using daily mean wind(m/sec)

St.	U			V		
	AVG	A _a	P _a (°)	AVG	A _a	P _a (°)
IC	-0.66	0.51	295	0.41	1.20	1
BR	-0.11	0.44	313	0.09	0.90	343
GS	-0.41	0.57	283	0.53	0.61	21
MP	-0.09	0.41	281	0.97	1.87	4
SG	0.09	0.60	247	0.24	0.60	340
WD	-0.50	0.97	217	0.73	2.20	8
YS	-0.34	1.46	223	0.99	1.80	353
TY	0.09	0.29	258	0.51	1.46	346
PS	-0.43	0.71	220	0.49	1.26	337
US	-0.27	0.71	189	0.54	0.68	343
PH	-0.64	0.87	191	-0.41	0.64	210

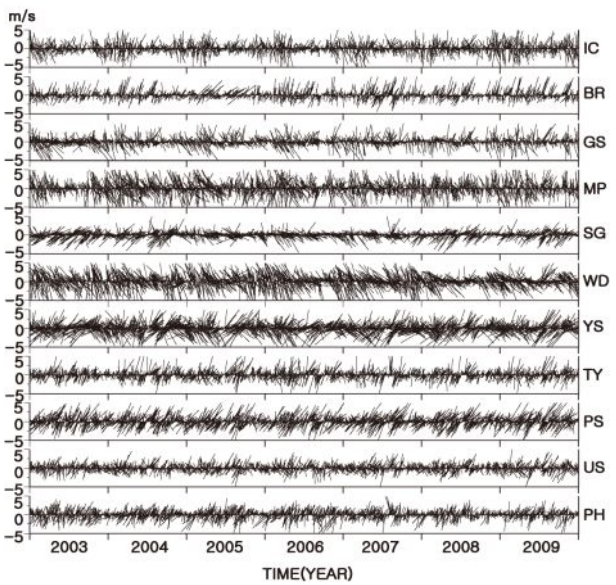


Fig. 5. Time series of daily wind with annual and semi-annual variations removed(2003~2009).

3.6 조위편차-해면기압-바람의 상관성

조위편차와 이에 영향을 미치는 기상요인인 해면기압(P)과 바람(U, V)에 대하여 상관성을 알아보기 위하여 상호상관함수를 11개 지점에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. 해면기압에 의한 해수면의 변동은 해면기압이 높으면 해수면이 낮아지고 해면기압이 낮으면 높아지는 역수은주 현상으로 설명된다(Pugh, 2004). 조위편차와 해면기압 사이의 상관성은 인천과 보령에서 해면기압과 하루 늦게 대응되는 지연시간 1일 때 -0.45 정도로 역상관이 가장 크며, 나머지 9개 지점은 지연시간이 0에서 역상관이 가장 큰데 상관계수는 -0.5 이하이다.

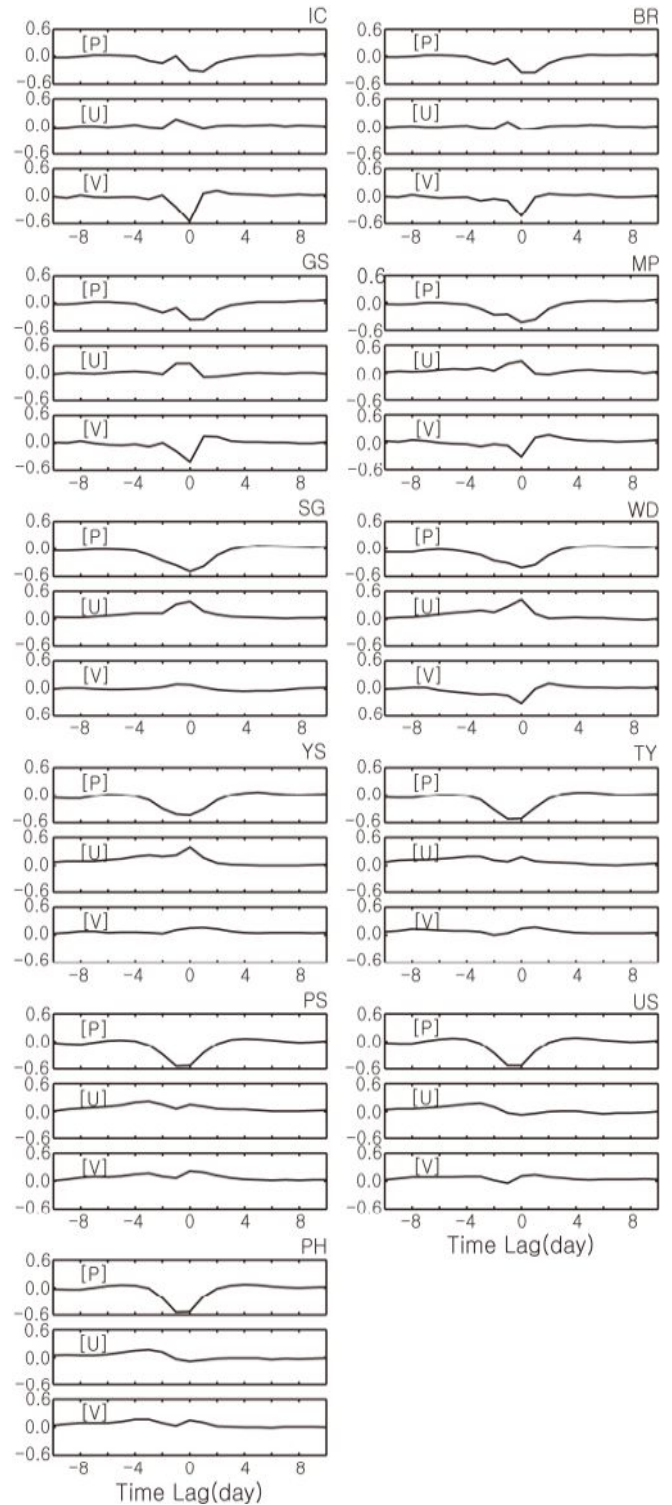


Fig. 6. Cross-correlations between tidal residual and sea surface air pressure (upper), east-west component of wind (middle), and north-south component of wind (lower) with vertical axis of correlation coefficient and horizontal axis of time lag between -10 and 10 days.

지연시간이 0일 때 상관계수는 서해안, 남해안, 동해안 순으로 커지며, 통영, 부산, 울산과 포항에서 상관계수가 -0.5 이상이다(Fig. 6, 각 지점 그림 상).

조위편차와 바람의 동-서 성분(U)의 상관성은 서해안의 인천, 보령과 군산에서 지연시간 -1에서 가장 높지만 상관계수는 0.3 이하이며, 서귀포, 완도와 여수는 지연시간 0에서 상관계수가 0.4 이상이다. 남동해안과 동해안에 위치한 통영, 부산, 울산과 포항에서 지연시간이 3일 때 상관성이 가장 높으며 상관계수는 0.3 이하이다(Fig. 6, 각 지점 그림 중). 동-서 성분의 바람은 전 연안에서 조위편차와 양의 상관을 보이지만 상관성은 매우 낮다. 이것은 서풍이 해수면을 상승시키고 동풍은 하강시키는 것을 의미하며, 동-서 성분의 바람은 남해안, 서해안, 동해안 순서로 영향을 미친다.

조위편차와 바람의 남-북 성분(V) 상관성은 서해안의 인천, 보령, 군산, 목포와 서귀포에서 지연시간 0에서 역상관성이 가장 높으며 상관계수는 -0.4 이하이다. 남해안과 동해안에 위치한 완도, 여수, 통영, 부산, 울산과 포항은 지연시간 0에서 양의 상관을 보이지만 상관계수는 0.2 이하이다(Fig. 6, 각 지점 그림 하). 즉, 북풍은 해수를 남쪽으로 이동시켜 서해안과 서귀포의 해수면을 하강시키지만 남풍은 해수를 북쪽으로 이동시켜 남해안과 동해안의 해수면을 상승시킨다. Hsueh and Romea(1983)은 황해연안을 따라 해면변동이 0.17과 0.36 cpd에서 남-북 성분의 바람에 높은 상관성을 보인다고 했다. 그리고 우리나라의 서쪽해안을 따라 남쪽으로 해수면이 상승하는 것은 한반도 끝부분에 수심이 낮은 대륙붕의 해수보다 상대적으로 바람의 영향을 덜 받는 외해 심층수가 존재하기 때문이다(Hsueh et al., 1986). 따라서, 조위편차와 상관성이 높은 순서는 서해안에서 바람의 남-북 성분, 해면기압, 바람의 동-서 성분이며, 남해안에서 해면기압, 바람의 동-서 성분, 바람의 남-북 성분 순서이고 동해안에서 일평균 조위편차는 해면기압과 상관성이 매우 높고 바람과는 상관성이 상대적으로 낮다는 것을 보여준다.

조위편차에 영향을 주는 연변동과 반년변동이 제거된 해면기압과 바람의 변동을 자세히 알아보기 위하여 연구기간 중 서해안에서 조위편차가 가장 크게 발생했던 2009년 2월 13일을 전후하여 90일 동안 인천, 보령, 군산 3 지점의 해면기압(P), 바람의 남-북 성분(V)과 조위편차(T)의 변동을 Fig. 7에 나타내었으며, 3개 지점에서 각각 거의 동일한 변동을 보인다.

2009년 2월 13일에 인천, 보령, 군산에서 조위편차가 양의 값을 가지며 각각 50 cm, 43 cm, 37 cm이고, 해면기압은 3 지점 모두 -20 hPa이며, 남풍은 각각 4.9 m/sec, 5.0 m/sec, 4.1 m/sec이다. 역수은주 현상을 고려하면 해면기압의 영향을 받는 조위편차는 3 지점에서 모두 20 cm이고, 남풍의 영향으로

추정되는 조위편차는 인천, 보령, 군산에서 각각 30 cm, 23 cm, 17 cm이다. 따라서, 인천과 보령에서 2009년 2월 13일에 발생한 양의 최대 조위편차는 남풍에 의한 영향이 해면기압보다 우세하며, 군산에서 미약하게 해면기압의 영향이 남풍보다 크다. 또한, 2009년 1월 23일 음의 조위편차는 인천, 보령, 군산에서 각각 -46 cm, -44 cm, 43 cm인데 미약한 저기압 상태에서 2 m/sec 이상의 북풍 영향으로 발생한 것으로 추정된다. 결과적으로 서해안에서 조위편차에 영향을 주는 것은 해면기압보다 남-북 성분의 바람이다. 이것은 3.6절의 결과와 일치한다.

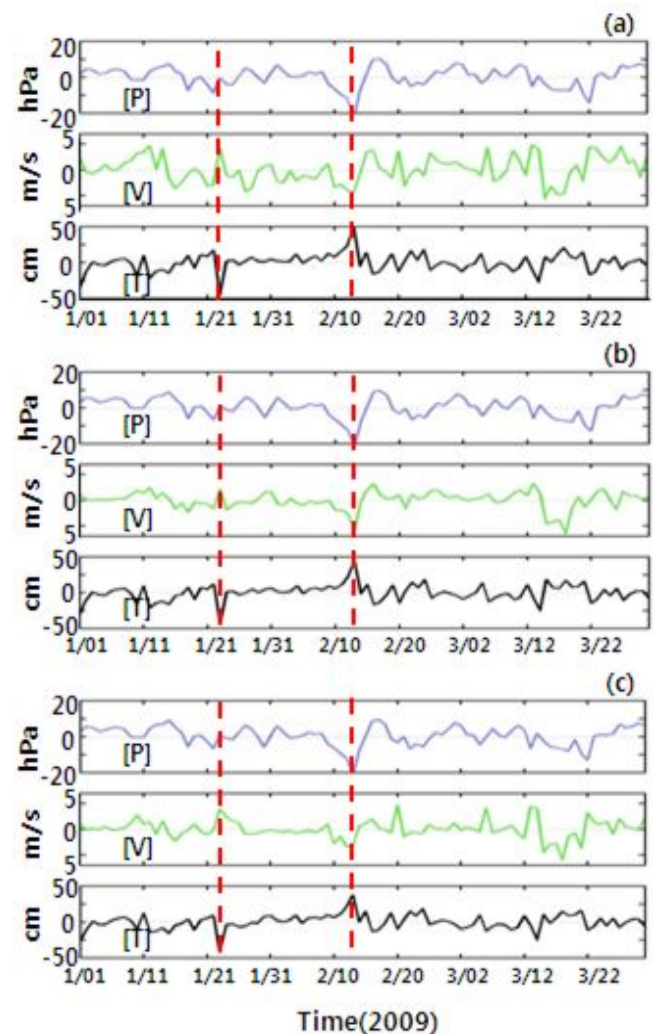


Fig. 7. Time series of sea surface air pressure(upper), north-south component of wind(middle), and tidal residual(lower) before and after the maximum tidal residual occurred(Feb. 13, 2009) at IC(a), BR(b), and GS(c).

4. 결론

2003년에서 2009년까지 한국연안의 일평균 조위편차의 시공간적 변동을 파악하고 변동요인인 해면기압과 바람과의 상관성을 알아 보았다. 일평균 조위편차는 아래와 같이 시공간적으로, 해역별로 뚜렷한 변동 특성을 가진다.

$|\pm\sigma|$ 보다 작은 일평균 조위편차가 다음날에도 $|\pm\sigma|$ 이하로 변동하는 것은 전체 자료의 약 60%이다. 일평균 조위편차가 -2σ 이하에서 2σ 이상 또는 2σ 이상에서 -2σ 로 전환되는 경우는 서해안에서 0.04~0.12%로써 큰 변동이 발생하는 반면에 남해안과 동해안에서 0.04% 이하로 큰 변동이 거의 발생하지 않는다.

일평균 조위편차의 시공간적인 특성은 전체 변동량의 68.1%가 전 지점에서 동시 증강하고, 전체 변동량의 21.3%는 서해안과 남해안·동해안이 교차 증강하며 전체 변동량의 4.4%가 서해안·동해안과 남해안이 교차증강한다.

황해는 남쪽이 트인 반 폐쇄만이고, 남해와 동해는 각각 북쪽과 서쪽에 육지가 있다. 이러한 지형적인 특징이 해역별 조위편차 변동의 주요 요인을 달라지게 한다. 북풍(남풍)은 해수를 남쪽(북쪽)으로 이동시켜 서해안의 조위편차를 하강(상승)시키지만, 남해안에서 동해안으로 갈수록 일평균 조위편차의 변동에 해면기압의 변동이 바람보다 밀접하게 영향을 미친다.

본 연구는 일평균 조위편차의 시공간적인 변동 특성을 파악하였으며 조위편차 예측을 위한 선행 연구이다. 실질적인 조위편차의 예측을 위해 해수면 자료의 관측간격과 분석기간을 달리하여 분석하는 연구가 필요하다.

References

- [1] Cho, H. and J. W. Kang(2012), Probability Density Function of the Tidal Residuals in the Korean Coast, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 24, No. 1, pp. 1-9.
- [2] Hsueh, Y., R. D. Romea and P. W. Dewitt(1986), Wintertime Winds and Coastal Sea-Level Fluctuations in the Northeast China Sea, Part II: Numerical Model, Journal of Physical Oceanography, Vol. 16, No. 2, pp. 241-261.
- [3] Hsueh, Y. and R. D. Romea(1983), Wintertime Winds and Coastal Sea-Level Fluctuations in the Northeast China Sea, Part I: Observation, Journal of Physical Oceanography, Vol. 13, No. 11, pp. 2091-2106.
- [4] Kang, J. W., S. J. Park and M. W. Park(2008), Rising Tendencies of both Tidal Elevation and Surge Level at the Southwestern Coast, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 14-24.
- [5] Kang, J. W., Y. S. Kim, H. Y. Cho and J. Shim(2011), Characteristics of Nearshore Surge-Intensity, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 23, No. 6, pp. 458-465.
- [6] KHOA(2010), Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2010 Technical Reports of Oceanographic Research, p. 483.
- [7] Kwon, S. J., I. Moon and E. Lee(2008), A Study on the Long-Term Variations of Annual Maximum Surge Heights at Sokcho and Mukho Harbors, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 6, pp. 564-574.
- [8] NTC(2003), National Typhoon Center, <http://typ.kma.go.kr/>.
- [9] Pugh, D. T.(1987), Tides, Surges and Mean Sea-Level, A handbook of Engineers and scientists. John Wiley & Sons (Reprinted with corrections June 1996), p. 472.
- [10] Pugh, D. T.(2004), Changing Sea Levels, Effect of Tides, Weather and Climate, Cambridge University Press, p. 280.

원고접수일 : 2013년 10월 01일

원고수정일 : 2013년 12월 12일

게재확정일 : 2013년 12월 26일