

서해 연안에서 조석특성의 경년변화 Inter-annual Variation of Tides on the Western Coasts of Korea

정태성*
Tae Sung Jung*

요지 : 서해 연안해역에서 국립해양조사원이 관측한 기왕의 조위자료를 분석하여 조석 조화상수를 산출하고, 조화상수와 비조화상수의 변화추세와 원인을 고찰하였다. 전반적으로 반일주조의 진폭은 거의 변화하지 않았으나 위상은 빨라졌으며, 일주조의 진폭과 위상은 거의 변화하지 않았다. 그러나 내만에 위치한 목포에서는 하구언과 방조제 건설로 인해서 반일주조의 진폭은 크게 증가하고, 위상은 크게 빨라졌다. 전반적으로 일주조의 진폭과 위상은 변화하지 않았으나, 목포에서만 위상이 뚜렷하게 빨라졌다. 대조기 조석간만의 차는 목포를 제외하고는 크게 변화하지 않았으며, 목포에서는 조석폭 험상으로 조차가 증가하고, 간사지의 폭이 넓어졌다. 약최고고조위는 전반적으로 과거에 비해서 상승하여 서해 연안에서 범람으로 인한 위험성이 증가하고 있었다. 약최고고조위와 약최저저조위의 변화는 평균해수면 상승과 밀접한 관계를 가지고 있었다.

핵심용어 : 서해안 조석, 조화상수, 조차, 설계조위

Abstract : Harmonic analysis of tide data observed on the western coasts has been conducted. The changing trends of harmonic constants were reviewed. Overall, amplitudes of semidiurnal tide are not changed and present phases are faster than in the past. In Mokpo located in a semi-enclosed bay, the amplitudes have been greatly increased and the phases have become earlier due to construction of sea-dike and seawalls. Harmonic constants of diurnal tide have not been changed except Mokpo. In Mokpo the phases of diurnal tide have been earlier. Tidal ranges in spring tide and neap tide have not been significantly changed except Mokpo. In Mokpo tidal ranges have been increased and tidal flats widened. Approximate higher high water has been overall rising. Therefore, Korean western coasts can be easily inundated than before.

Keywords : tide on the western coast, tidal harmonic constant, tidal range, design tide

1. 서 론

서해연안에서 해수면은 큰 조석간만의 차로 인해서 변화가 매우 크며, 그 변화는 주로 천문조와 기상조의 복합적인 작용에 의해서 발생한다. 특히 수심이 얕고, 넓은 간사지를 가지고 있는 서해안에서 평균해수면은 간척 등의 해안개발(Fig. 1)로 인해서 변화하였으며(Jung, 2014), 기후변화 등으로 인해서 지속적으로 상승하여 왔다(Kang et al., 2005a; KHOA, 2011). 또한 해안개발로 인해서 가장 큰 조석분조인 M_2 분조의 진폭은 전반적으로 감소하고, 위상은 전반적으로 빨라지고 있다(Jung and Jeong, 2013). 서해안에서 해안개발로 인한 조석특성의 변화를 이해하기 위하여 다수의 조석 수치모델링이 시도된 바 있으며(Kang et al., 2013; Jo et al., 1998; Min et al., 2011), 해안개발로 인한 조간대의 감소와 해안선의 단순화가 그 원인이라는 것을 모델결과로부터 입증되었다. 이 외에도 해안개발로 인해서 서해남부해역에서는 조석의 비선형성과 비대칭성이 심화되었다(Jung and Jeong,

2013; Jung, 2011; Kang, 1996). 이러한 평균해수면과 조석특성의 변화는 해안구조물의 설계조위(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014)를 결정하는 데 널리 사용되는 약최고고조위에도 영향을 주게 되며, 이로 인한 해수면의 상승은 서해안 저지대에서 사리기간 동안에 침수를 보다 빈번하게 발생시키고 있다(Kang et al., 2005b). 또한 조석의 비선형 및 비대칭 특성의 변화는 창조시와 낙조시 해수유동의 차이를 발생하게 하여 하천과 외해로부터 연안해역으로 유입되는 오염물질과 퇴적물의 이동에 영향으로 미치게 되므로 궁극적으로는 연안생태계를 변화시킨다(Moore et al., 2009). Jung and Jeong(2013)은 서해안에서 관측된 국립해양조사원의 조위자료를 분석하고, 조석의 비대칭성과 비선형성이 해안개발로 인해서 심화되었다고 보고하였다. 지구 전체적으로 과거에 비해서 최근에 대기온도가 빠르게 상승하고, 이로 인해서 해수의 온도도 빠르게 상승하고 있으며, 빙하가 녹아서 바다로 유입됨에 따라 전지구 바다의 해수면이 지속적으로 상승하고 있으며(Church and White, 2011). 우리나라 인근해역에서도 과

*한남대학교 건설시스템공학과(Department of Civil & Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Korea, Tel:+82-42-629-7931, Fax:+82-42-629-8366, jungs@hnu.kr)

거에 비해서 빠르게 해수면이 상승하고 있다(Yoon and Kim, 2012; Kang et al., 2005a; Jung, 2014). 평균해수면과 조석 특성의 변화로 인해서 조간대 면적이 변화하고, 해안 저지대의 범람위험성이 증가하고 있다(KMI, 2012).

위에서 언급한 다양한 요인들에 의해서 서해연안에서 평균 해수면과 조석특성이 변화하고, 궁극적으로 해수면이 상승하여 해안재해가 증가할 것이다. 따라서 이러한 자연재해로부터 해안시설을 안전하게 보호하기 위해서는 해수면 상승의 경향성과 그 원인에 대한 정확한 분석이 필요하며, 이 결과는 해안시설물의 설계에 반영되어야 할 것이다. 본 연구에서는 서해안 검조소에서 관측된 조위자료를 분석하여 주요 4개 분조의 조화상수를 산출하고, 그 변화를 분석하였다. 또한 조석 비조화상수의 변화를 조사하여 조간대와 범람가능성의 변화 및 설계조위의 변화에 대해서 검토하였다.

2. 조석 조화상수의 경년변화

서해안에서 조석 조화상수의 경년변화를 조사하기 위해서 국립해양조사원(KHOA)의 홈페이지로부터 2014년까지 매시간 관측한 조위자료를 수집하여 1년 단위로 정리하고, 이를 조화분석하여 조화상수를 산출하였다. 기존 연구(Jung and Jeong, 2013)에서 2012년도까지 자료를 분석하여 발표한 M₂ 분조에 대해서는 보다 정확한 분석을 위해서 2013년과 2014년의 자료를 포함하여 분석하였으며, 기존자료에서는 방조제 준공 직전과 직후의 단기간 변화추세에 대해서 고찰하였으나 본 연구에서는 방조제 착공전과 준공후에 대해서 비교하였다. 추가로 서해안에서 주요 조석분조인 S₂ 분조, K₁ 분조, O₁ 분조의 경년변화에 대해서도 검토하였다. 또한 주요 분조의 조화분석결과와 평균해수면 분석결과(Jung, 2014)를 이용하여, 설계조위를 결정하는 데 널리 쓰이는 약최고고조위(Approximate Higher High Water)의 경년변화를 고찰하였다. 항만 및 어항설계기준(MOF, 2014)에서는 해안구조물의 설계조위는 해안구조물이 가장 위험하게 되는 조위라고 규정하고, 천문조(조석)와 폭풍해일, 지진해일 등에 의한 이상조위의 실측값 또는 추산값을 기초하여 다음과 같은 방법으로 결정하도록 정하고 있다. 폭풍해일 대책을 위한 설계조위는 아래와 같은 방법 중에 하나를 사용하도록 되어 있다.

(1) 기왕의 고극조위 또는 이것에 설계자의 판단에 의하여 약간의 조위를 더한 조위

(2) 기왕 이상조위의 발생확률곡선을 산정하고, 외삽법으로 구한 어떤 재현년도의 조위

(3) 해일수치모형실험 등에 의해 해일고를 추산하는 경우는 약최고고조위에 해일고를 더한 조위

(4) 이상고조위의 발생확률과 각 조위에 대한 배후지의 피해액 및 해일대책 시설의 건설비를 감안하여 결정

위에서 제시한 4개의 방법 중에서 확률분포를 사용하는 방법은 장기간의 안정적인 조위자료의 확보가 필요하고, 이는

조위자료가 미비한 국내에서는 현실적으로 어려우므로 설계조위로 약최고고조위에 해일고를 더하는 방법(3)을 설계에서 널리 사용하고 있다. Kang et al.(2014)은 설계조위 산정에 약최고고조위를 이용하는 경우에 서해안에서는 연평균해수면을 사용해도 문제가 없으나 동해안과 남해안에서는 평균해수면을 계절변화를 고려하여 하절기 평균해수면을 이용하여 산정한 약최고고조위를 사용할 것을 제안한 바 있다.

국립해양조사원의 검조소에서 관측하는 서해 모든 지점의 장기 검조자료를 분석하였으나 단기간의 자료는 경년변화의 정확한 분석이 어려워 비교적 장기간 자료가 안정적으로 확보되어 있는 7개 지점(인천, 안흥, 보령, 군산외항, 위도, 목포, 대흑산도; Fig. 1)에서 주요 분조들의 경년변화를 분석하였다. 인천은 자료의 일관성을 유지하기 위하여 모든 관측자료 중에서 연안부두에서 최근에 관측한 자료만을 분석에 포함하였다. 6개월 이상의 연속적인 조위자료가 존재하는 년도에 대해서만 조화분석으로 수행하고, 그 결과를 연구 자료로 활용하였다. 조석 분조의 진폭과 위상의 경년변화를 살펴보면 아래와 같다. 위상은 우리나라의 표준시인 동경 135°를 기준으로 하였다.

서해안에 가장 큰 조석분조인 M₂ 분조의 진폭변화(Fig. 2)를 살펴보면, 북쪽에 위치한 인천과 안흥에서는 큰 변화를 보이지 않았으나 보령, 군산, 위도에서는 새만금방조제 준공이 임박한 시점인 2000년대 초반에 변동성이 크게 나타났으며, 인접한 군산에서는 진폭이 뚜렷하게 감소하였다. 내만에 위치한 목포에서는 다른 지점과는 다르게 영산강하구언, 영암방조제, 금호방조제 건설로 인하여 진폭이 크게 증가하였으며, 외해에 위치한 대흑산도에서는 거의 변화하지 않았다. 한편 위

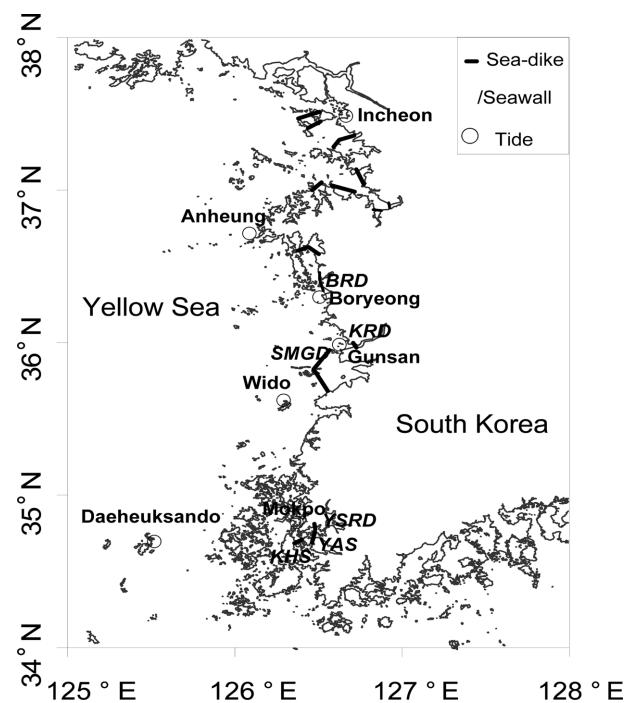


Fig. 1. Sea-dikes, seawalls and tidal stations in the western coast of South Korea.

상(Fig. 3)은 간척 등의 대규모 해안개발(Yun, 1999; Sunwoo, 1996)로 인해서 해안선이 단순화됨에 따라 전반적으로 빨라지는 모습을 보였으며, 진폭과 마찬가지로 인천과 안흥에서는 변화가 거의 없었다. 새만금방조제 준공으로 보령과 대흑산도, 군산에서는 위상이 빨라졌다. 내만에 위치한 목포에서는 방조제 건설에 따라서 위상이 크게 빨라졌다. 조화상수에 대한 그림을 자세히 살펴보면, 거의 변화를 보이지 않다가 다수의 지점에서 인근의 대규모 해안개발 전후로 진폭과 위상이 뚜렷하게 변화하고 있다. 따라서 해안개발로 인한 영향을 보다 자세히 살펴보기 위하여, 영산강하구연(YSRD) 준공(1981년 2월), 금강하구둑(KRD) 준공(1988년 2월), 영암방조제(YAS) 준공(1991년 4월), 금호방조제(KHS) 준공(1993년 3월), 새만금방조제(SMGD) 3공구 준공(1994년 7월), 보령방조제(BRD) 준공(1997년 11월), 새만금방조제 준공(2006년 4

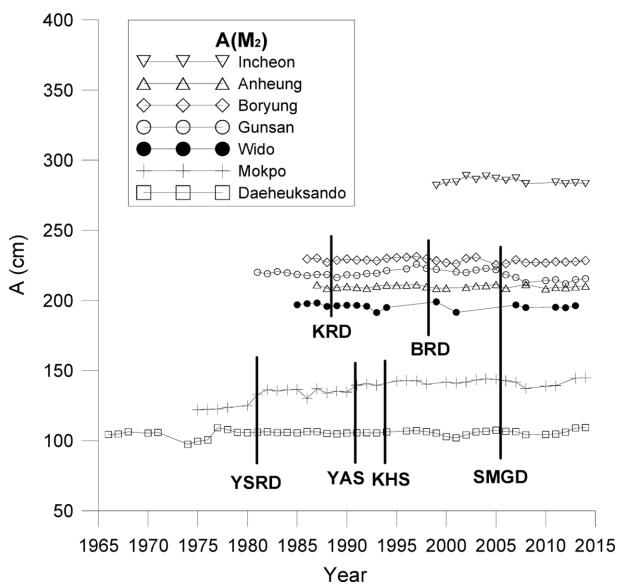


Fig. 2. Time variations of M_2 amplitude.

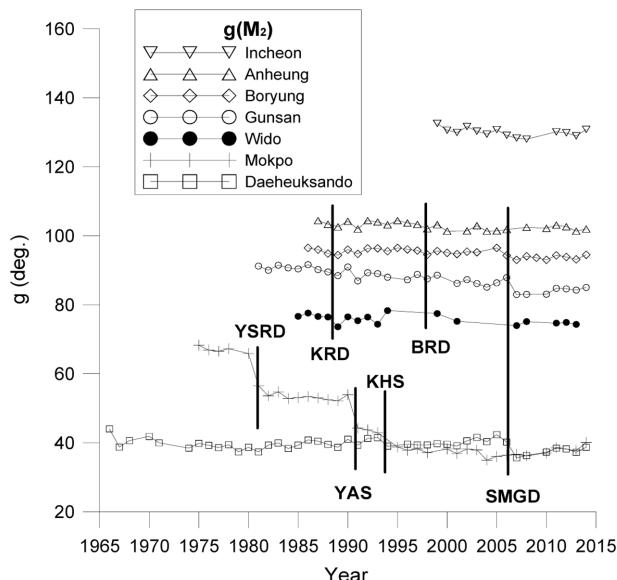


Fig. 3. Time variations of M_2 phase.

월) 전후로 구분하여 변화량을 조사하였다. 지점별로 영향이 있을 것으로 생각되는 방조제 준공 전후를 다르게 구분하여 정리하였다. Table 1은 M_2 분조의 진폭(A)과 위상(지각, g)에 대해서 분석한 결과이다. 구분한 기간 동안의 평균값을 표에 수록하였다. 인천은 자료가 분석된 1999년 이후로 인근에서 진행된 대규모 해안개발이 없었고, 조화상수가 거의 변동성을 보이지 않았으므로 정량적 분석에서 제외하였다. 안흥에서 새만금방조제 공사이전과 이후를 비교해 보면, 진폭은 0.1 cm가 증가하였고, 위상은 1.3° (약 3분) 빨라졌다. 이는 조화상수의 자연적인 시간변동성을 고려할 때, 거의 변화가 없었다고 볼 수 있다. 보령에서는 보령방조제와 새만금방조제 건설로 인해서 진폭은 1.2 cm가 감소하였고, 위상은 1.9° (약 4분) 빨라졌다. 군산외항에서는 진폭이 군산하구연 건설로 0.9 cm가 감소하였고, 새만금방조제 건설로 3.9 cm가 감소하였으며, 위상은 금강하구연 건설로 1.8° (약 4분)가 빨라졌고, 새만금방조제 건설의 영향으로 5° (약 10분)가 빨라졌다. 금강하구연 보다는 새만금방조제가 군산해역의 조석특성을 크게 변화시켰음을 확인할 수 있었다. 새만금방조제 인근에 위치한 위도에서는 금강하구연 건설로 진폭이 2.3 cm가 감소하고, 위상이 1.6° (약 3분) 빨라졌으며, 새만금방조제 건설기간에 조화상수가 큰 변동성을 보였으나 새만금방조제 건설로 인해서 진폭은 0.2 cm가 증가하고, 지각은 0.7° 빨라져서 조석특성이 거의 변화하지 않았다. 위도에서는 새만금방조제 건설보다 금강하구연 건설로 인한 조화상수 변화가 나타나 군산외항과 상반되는 조석변화를 보였다. 금강하구연과 가까운 군산외항에서는 오히려 새만금방조제의 영향이 크게 나타나고, 새만금방조제와 가까운 위도에서는 금강하구연의 영향이 크게 나타난 점은 매우 특이한 현상으로 그 원인에 대해서는 추가적인 연구를 통해서 자세히 고찰해 볼 필요가 있다. 다른 지역과 달리 폐쇄성 내만에 위치한 목포항 인근에서는 3개의 방조제가 건설되었으며, 이로 인하여 조석 특성이 크게 변화하였다. 진폭은 영산강하구연 건설로 10 cm, 영암방조제 건설로 5.5 cm, 금호방조제 건설로 1.3 cm가 각각 증가하였으며, 위상은 영산강하구연 건설로 13.8° (약 29분), 영암방조제 건설로 9.4° (약 19분), 금호방조제 건설로 6.3° (약 10분)가 각각 빨라졌다. 3회의 방조제 건설로 진폭은 18.8 cm가 감소하고, 위상은 약 1시간 빨라졌다. 외해에 위치한 대흑산도에서는 새만금방조제 건설로 인해서 진폭은 0.6 cm가 증가하였고, 지각은 2.3° (약 5분) 빨라졌다. 새만금방조제 건설은 서해중남부에서 전반적으로 M_2 분조의 진폭을 감소시키고, 위상을 빠르게 하였다. 새만금방조제 건설로 인해서 대흑산도에서 해수면의 변화가 발생하였다는 것은 평균해수면의 경년변화 분석결과(Jung, 2014)에서도 확인할 수 있으며, 방조제 건설 등으로 해안선이 단순화 되면, 일반적으로 진폭은 감소하고, 위상은 빨라진다(Jo et al., 1998; Koo, 1998). 서해안에서 진폭과 위상 변동이 자연적인 요인에 의한 것인지를 살펴보기 위해서 자료를 평균한 기간 동안의 표준편차를 조사하

Table 1. Harmonic constants of M_2 tide in the western coasts

Station	Const.	Before YSRD	YSRD to KRD	KRD to YAS	YAS to KHS	KHS to BRD	BRD to SMGD	After SMGD
Anheung	A(cm)			209.6		(210.2)		209.7
	g($^{\circ}$)			103.6		(102.5)		102.3
Boryeong	A(cm)			228.8		(230.6)	(227.8)	227.6
	g($^{\circ}$)			95.6		(95.7)	(95.4)	93.7
Gunsan	A(cm)		219.1		218.2		(222.2)	214.3
	g($^{\circ}$)		90.8		89.0		(87.0)	84.0
Wido	A(cm)		197.6		195.3		(190.3)	195.5
	g($^{\circ}$)		76.9		75.3		(80.6)	74.6
Mokpo	A(cm)	123.1		135.1		140.6		141.9
	g($^{\circ}$)	67.0		53.2		43.8		37.5
Daeheuk-sando	A(cm)				105.7			106.3
	g($^{\circ}$)				39.7			37.4

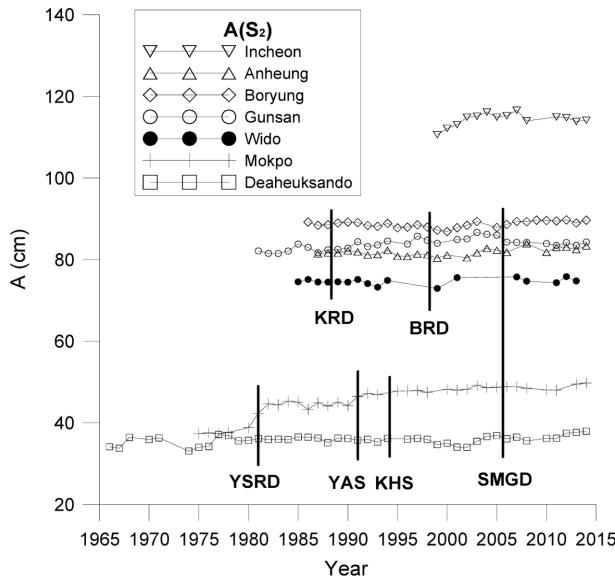
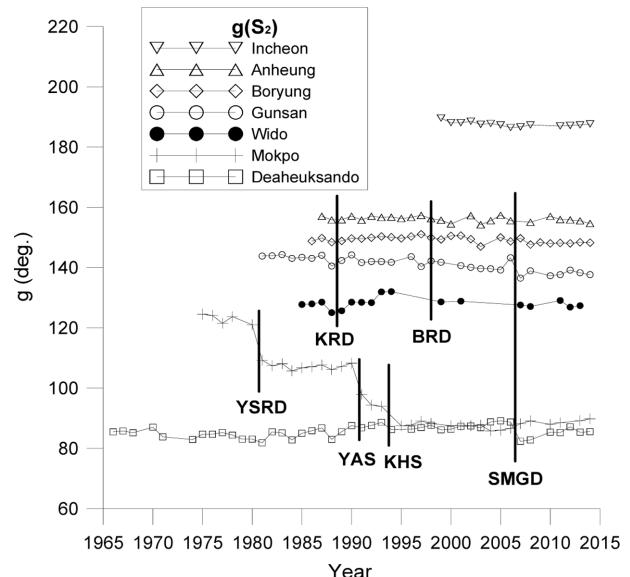
Table 2. Harmonic constants of S_2 tide in the western coasts

Station	Const.	Before YSRD	YSRD to KRD	KRD to YAS	YAS to KHS	KHS to BRD	BRD to SMGD	After SMGD
Anheung	A(cm)			81.6		(81.3)		82.9
	g($^{\circ}$)			156.5		(156.1)		155.7
Boryeong	A(cm)			88.7		(88.1)	(88.1)	89.5
	g($^{\circ}$)			149.4		(150.2)	(149.5)	148.3
Gunsan	A(cm)		82.3		83.2		(85.2)	84.0
	g($^{\circ}$)		143.7		142.1		(140.8)	137.9
Wido	A(cm)		74.8		74.3		(72.6)	75.1
	g($^{\circ}$)		128.1		128.6		(134.6)	127.6
Mokpo	A(cm)	37.8		44.6		47.2		48.5
	g($^{\circ}$)	123.0		107.1		94.3		87.9
Daeheuk-sando	A(cm)				35.7			36.8
	g($^{\circ}$)				85.7			84.8

였다. 진폭의 표준편차를 살펴보면, 안흥과 보령에서는 각각 0.82~0.94 cm와 0.55~0.87 cm로 1 cm미만 이었다. 군산에서는 0.93 cm에서 1.45 cm로, 목포에서는 1.06 cm에서 2.03 cm로 새만금방조제 준공이후에 변동성이 커지고 있었다. 대흑산도에서도 새만금방조제 건설 전에는 1.22 cm, 건설 후에는 1.98 cm로 변동성이 커지고 있었다. 위상의 표준편차는 안흥에서는 0.56~0.90 $^{\circ}$, 보령에서는 0.52~0.78 $^{\circ}$, 군산에서는 0.84~1.21 $^{\circ}$, 목포에서는 0.74~1.19 $^{\circ}$, 대흑산도에서는 1.06~1.10 $^{\circ}$ 이다. 이를 종합하면, 군산외항, 위도, 목포에서는 인위적인 해안개발로 진폭이 뚜렷하게 변화하였으나 다른 지점에서는 변화량이 표준편차 보다 작았다. 그러나 위상은 모든 지점에서 해안개발로 인해서 해안선이 단순화됨에 따라서 빨라졌다. 새만금방조제 개발로 인근 해역에서 진폭이 감소하고, 위상이 빨라졌다는 것은 수치모델링을 이용한 연구결과(Kang et al., 2013; Min et al., 2011)에서도 확인할 수 있다.

S_2 분조에 대해서 진폭과 위상의 변화(Table 2)를 살펴보면, 진폭(Fig. 4)과 위상(Fig. 5)이 M_2 분조와 유사한 양상으로

변화하였다. 진폭변화를 살펴보면, 북쪽에 위치한 인천에서는 인천신공항 건설을 위한 영종도 간척지가 준공된 2000년 직후에 약간 상승하였으며, 안흥에서는 새만금방조제 준공 이후에 1.3 cm가 증가하였다. 보령에서는 보령방조제와 새만금방조제 건설기간에 변동성이 크게 나타났으며, 보령방조제와 새만금방조제 준공으로 인해서 전체적으로 0.8 cm가 상승하는 모습을 보여 해안개발로 인한 영향이 거의 나타나지 않았다. 군산외항에서는 금강하구둑 건설로 인해서 진폭이 0.9 cm가 증가하였고, 새만금방조제의 건설로 0.8 cm가 증가하여 해안개발의 영향을 크게 받지 않았으며, 위도에서도 해안개발로 인해서 거의 변화하지 않았다. 그러나 내만에 위치한 목포의 진폭은 영산강하구둑 건설로 6.8 cm, 영암방조제 건설로 2.6 cm, 금호방조제 건설로 1.3 cm가 각각 증가하였다. 한편 외해에 위치한 대흑산도에서는 새만금방조제 건설 전후로 1.1 cm가 증가하였다. 전반적으로 목포를 제외하고는 진폭이 거의 변화하지 않았다. 위상을 살펴보면, 해안개발 이전에 비해서 안흥에서 0.8 $^{\circ}$, 보령에서는 0.9 $^{\circ}$ 가 빨라져 중부해역에서

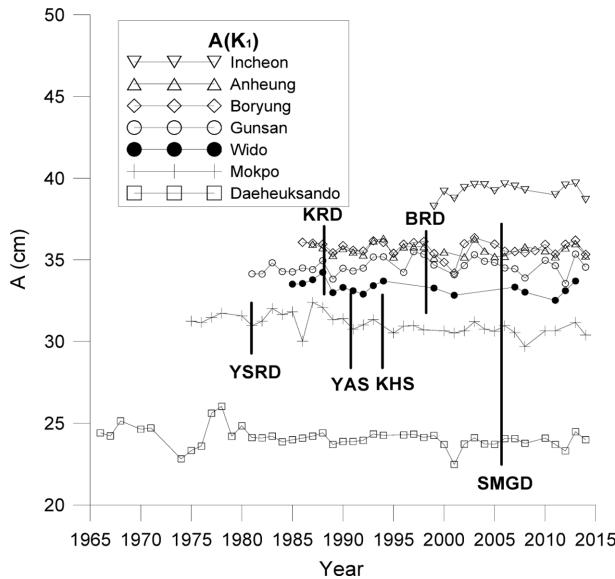
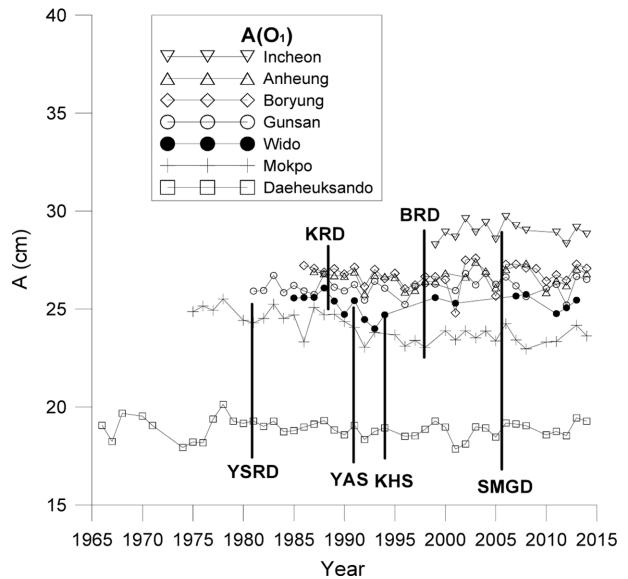
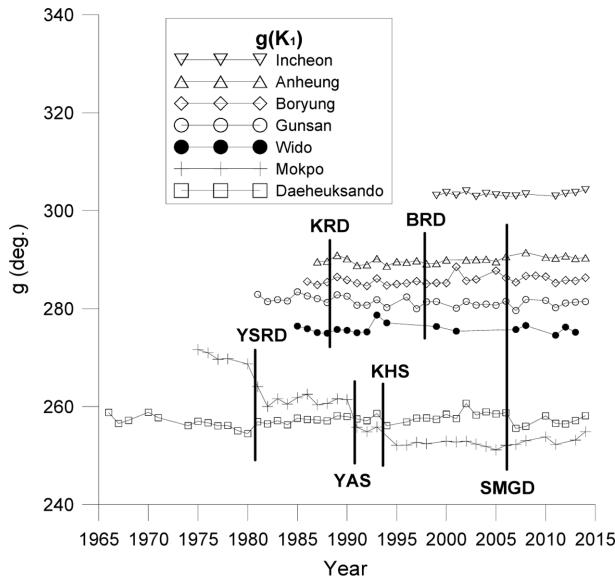
Fig. 4. Time variations of S_2 amplitude.Fig. 5. Time variations of S_2 phase.Table 3. Harmonic constants of K_1 tide in the western coasts

Station	Const.	Before YSRD	YSRD to KRD	KRD to YAS	YAS to KHS	KHS to BRD	BRD to SMGD	After SMGD
Anheung	A(cm)			35.7			(35.5)	35.6
	g(°)			289.8			(289.7)	290.6
Boryeong	A(cm)			35.8		(35.9)	(35.5)	35.7
	g(°)			285.5		(285.2)	(286.6)	286.0
Gunsan	A(cm)	34.4			34.5		(34.8)	34.5
	g(°)	282.2			281.6		(281.0)	281.0
Wido	A(cm)	33.6			33.1		(32.5)	33.1
	g(°)	275.8			276.1		(280.4)	275.6
Mokpo	A(cm)	31.4		31.6		31.0	30.7	
	g(°)	270.1		261.2		254.9	252.6	
Daeheuksando	A(cm)				24.1			23.9
	g(°)				257.3			256.8

는 거의 변화가 없었다. 군산외항에서는 금강하구연 건설로 1.6° , 새만금방조제 건설로 4.2° 가 빨라져 금강하구연 건설보다 새만금방조제 건설로 크게 변화하였다. 금강하구연과 새만금방조제의 건설로 인한 M_2 분조의 위상변화 14분과 거의 비슷하게 S_2 분조의 조시도 12분(5.8°) 빨라졌다. 위도에서는 인접하여 개발된 새만금방조제의 건설기간의 급격한 변동을 제외하고는 거의 변화하지 않았다. 지역적으로 가장 큰 M_2 분조의 변화를 보였던 목포에서는 영산강하구연 건설로 15.9° , 영암방조제 건설로 12.8° , 금호방조제 건설로 6.4° 가 변화하여, 3번의 개발로 위상이 35.1° 빨라졌다. 외해에 위치한 대흑산도에서는 0.9° 가 빨라져 개발로 인한 영향은 거의 없었다. 서해안에서 S_2 분조의 진폭과 위상은 군산과 목포를 제외하고는 거의 변화하지 않았다. 내만에 위치한 목포에서 S_2 분조는 해안개발 이전에 비해서 진폭이 크게 증가하고, 위상이 크게 빨라졌다.

가장 큰 일주조인 K_1 분조에 대해서 진폭과 위상의 변화

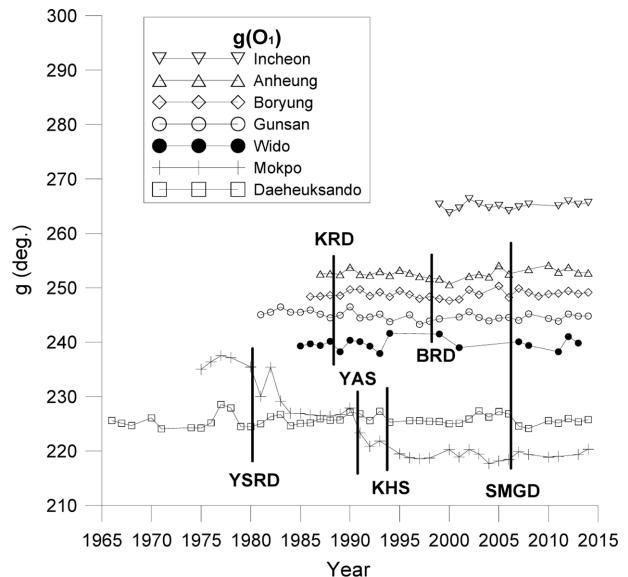
(Table 3)를 살펴보면, 반일주조는 달리 진폭(Fig. 6)과 위상(Fig. 7)이 크게 변화하지 않았다. 진폭은 안흥과 보령에서 0.1 cm 가 감소하고, 군산에서 0.1 cm 가 증가하였으며, 위도에서는 0.5 cm , 목포에서 0.7 cm , 대흑산도에서는 0.2 cm 가 감소하였다. 지각은 안흥에서 0.8° , 보령에서 0.5° 가 느려졌다. 군산에서는 1.2° 가 빨라지고, 위도에서는 거의 변화하지 않았고, 대흑산도에서는 0.5° 가 빨라졌다. 그러나 내만에 위치하고, 인접지역에서 개발사업이 진행되어 그 영향을 크게 받은 목포에서는 진폭이 크게 변화하지 않았으나, 반일주조와 유사하게 위상이 $70\text{분}(17.5^\circ)$ 이 빨라졌다. 목포에서 위상이 변화한 것을 제외하고는 일주조의 조화상수는 과거에 비해서 거의 변화하지 않았다. O_1 분조의 경우도 K_1 분조와 비슷한 양상으로 변화하였다(Fig. 8 & 9). 반일주조와 달리 목포를 제외하고는 해안개발로 인한 일주조의 변화가 뚜렷하게 보이지 않는 이유는 반일주조는 우리나라 서해안에서 지구자전효과에 의해서 진폭이 크게 변화하나, 일주조는 그 변화가 크지

Fig. 6. Time variations of K_1 amplitude.Fig. 8. Time variations of O_1 amplitude.Fig. 7. Time variations of K_1 phase.

않기 때문이다. 이와 같은 현상은 새만금방조제 건설로 인한 조석변화를 모의한 Kang et al.(2013)의 연구결과에서도 확인할 수 있다.

3. 조석 비조화상수의 경년변화

앞에서 분석한 조석 조화상수를 토대로 조석 비조화상수 (Pugh, 1987; Lee, 1986)의 변화에 대해서 조사하였다. 설계 기준조위를 추산하는 데 널리 사용되는 약최고고조위(평균해면에서 주요 4개 분조 진폭의 합만큼 올라간 높이), 대조기와 소조기의 조간대의 면적과 밀접한 관계가 있는 평균대조차(M_2 분조와 S_2 분조의 조차의 합)와 평균소조차(M_2 분조와 S_2 분조의 조차의 차이), 일주조와 반일주조의 진폭의 비로 조석운동에서 반일주기가 우세한지 전일주기가 우세한지

Fig. 9. Time variations of O_1 phase.

를 판단하고 일조부등 정도를 파악할 수 있는 조석형태수 (Tide Form Number), 해도에서 바다 깊이의 기준이 되는 기준면 즉 약최저저조위의 변화에 대해서 조사하였다. 분석하기에 앞서서 우리나라 연안해역에서 조위관측하고, 조화분석하여 얻은 조석 조화상수를 수집해서 최대조차와 조석형태수를 계산하였다. 4개 분조의 파고를 합하여 구한 최대조차의 공간분포(Fig. 10)를 살펴보면, 조차는 인천부근에서는 약 10 m에 달하나, 서해남부, 남해, 동해로 갈수록 작아져 동해에서는 수십 cm로 감소한다. 조석형태수(Fig. 11)는 서해안과 남해안에서는 전반적으로 반일주조형($TFN < 0.25$)이나, 특이하게 서해남부해안에서는 반일주조가 우세한 혼합형($0.25 < TFN < 1.5$) 조석특성을 나타내었으며, 동해남부해안에서는 일주조가 우세한 조석형태($TFN > 1.5$)를, 동해중부해안에서는 반일주조가 우세한 혼합형 조석형태를 보였다. Fig. 10과

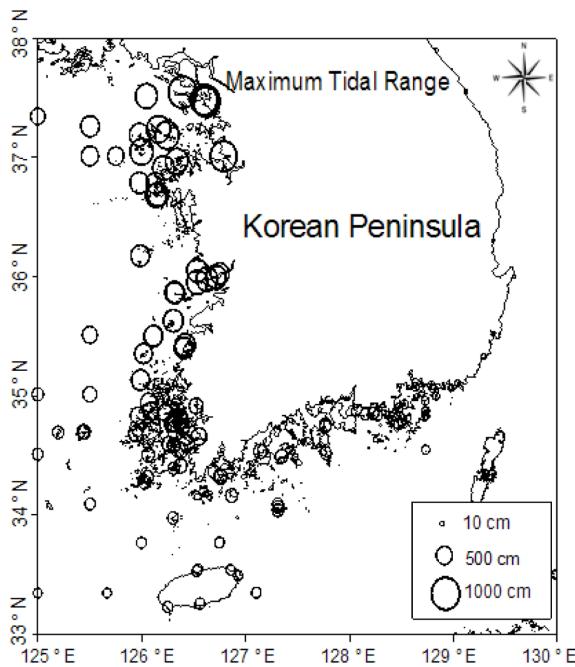


Fig. 10. Spatial distribution of maximum tidal range.

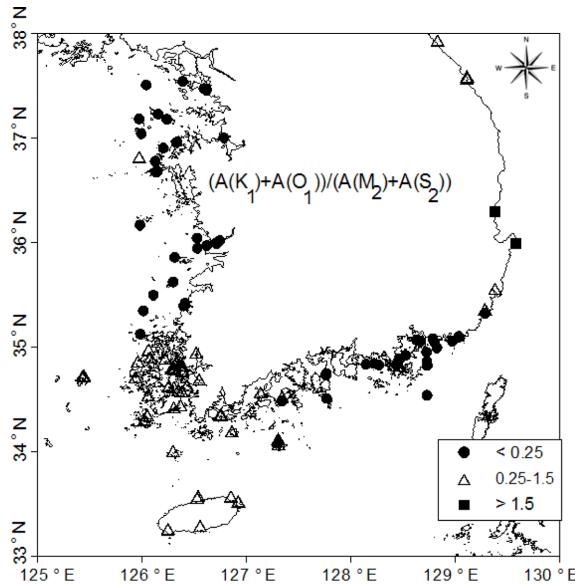


Fig. 11. Spatial distribution of tide form factor modified after Jung and Jeong (2013).

11은 국내에서 발간된 각종 보고서(해양조사보고서, 환경영향 평가서, 설계도서, 풍수해종합계획 등)에 수록된 조석 조화상수 자료를 수집하여 분석한 결과이다.

주요 분조의 조화상수가 시간에 따라 변화함에 따라 대조차(Spring Tide Range)와 소조차(Neap Tide Range)도 변화하였다. 대조차(Fig. 12)는 지역에 따라서 상승한 곳도 있고 감소한 곳도 있으나, 소조차(Fig. 13)는 목포를 제외하고는 변화가 없거나 약간 감소하였다. 지역별로 해안개발의 영향 (Table 4)을 자세히 살펴보면, 안흥에서는 새만금방조제 건설 이전에 비해서 대조차는 2.9 cm가 증가하고, 소조차는 2.5 cm가 감소하였다. 이는 M_2 분조의 진폭은 거의 변화하지 않았으나 S_2 분조의 진폭이 증가(Table 1&2)하여 발생한 현상이다. 보령에서는 대조차는 거의 변화하지 않았으나 소조차는 보령방조제와 새만금방조제 개발로 3.8 cm가 감소하였다. 이는 과거에 비해서 M_2 분조의 조차는 거의 변화하지 않았으나 S_2 분조의 조차는 약간 증가하였기 때문이다. 군산외항에서는 대조차가 금강하구언 건설로 2.5 cm가 증가하고, 새만금방조제 건설 후에는 6.1 cm가 감소하는 모습을 보였다. 소조차는 해안개발의 영향으로 지속적으로 약간 감소하였다. 금강하구언 개발이전과 새만금방조제 준공이후를 비교해 보면, 대조차는 소조차는 각각 3.6 cm와 6.6 cm가 감소하였다. 이 기간 동안 M_2 분조의 진폭 감소량이 S_2 분조의 진폭 증가량 보다 크기 때문에 이러한 현상이 발생하였다. 인접한 위도에

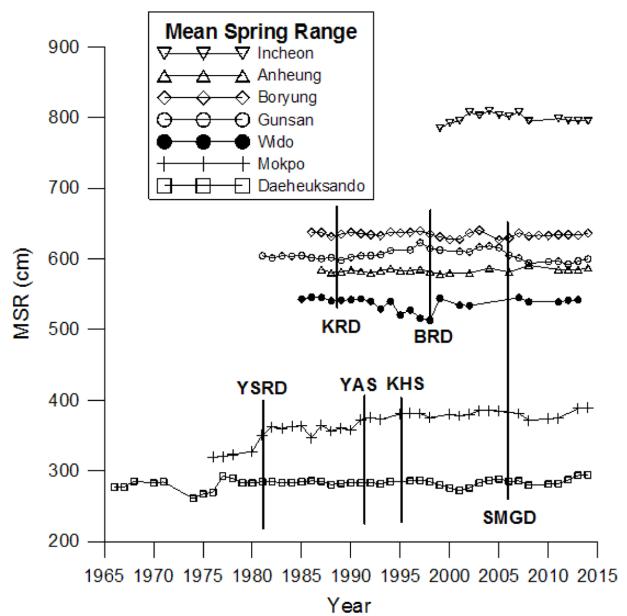


Fig. 12. Time variations of mean spring range.

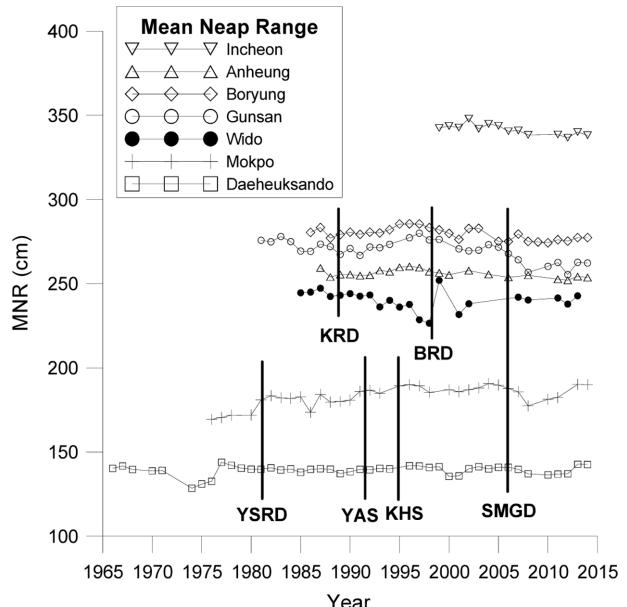
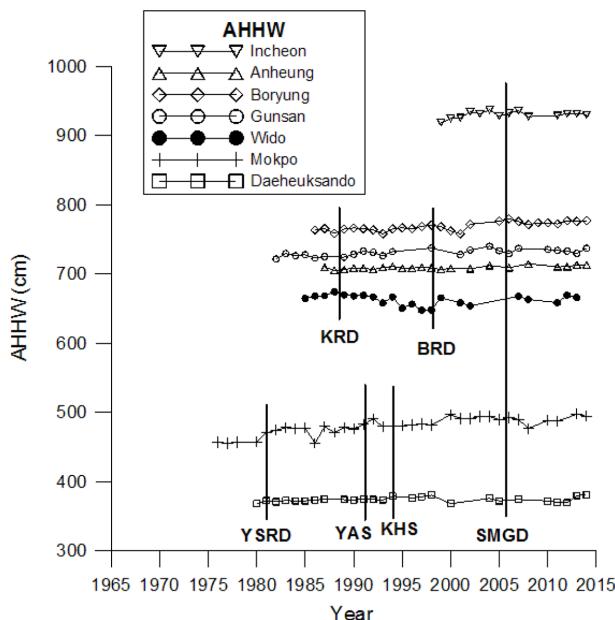
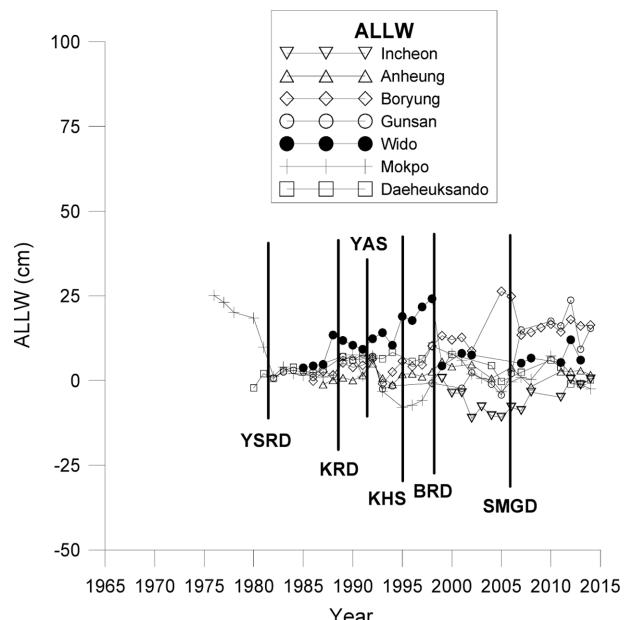


Fig. 13. Time variations of mean neap range.

Table 4. Spring tide range and neap tide range in the western coasts

Station	Const. (cm)	Before YSRD	YSRD to KRD	KRD to YAS	YAS to KHS	KHS to BRD	BRD to SMGD	After SMGD
			(1981.2)	(1988.2)	(1991.4)	(1993.3)	(1997.11)	(2006.4)
Anheung	STR		582.4			(583.0)	585.3	
	NTR		256.0			(257.8)	253.5	
Bo-ryeong	STR		635.1			(637.2)	(631.7)	634.1
	NTR		280.1			(284.9)	(279.4)	276.2
Gunsan	STR	600.1		602.6		(614.8)	596.5	
	NTR	275.8		273.3		(272.8)	269.6	
Wido	STR	544.6		539.1		(525.8)	541.2	
	NTR	245.6		241.9		(235.4)	240.9	
Mokpo	STR	322.5	359.3	375.5		380.8		
	NTR	171.0	180.9	186.7		186.7		
Daeheuksando	STR			282.9			286.2	
	NTR			139.6			138.9	

**Fig. 14.** Time variations of approximate higher high water.**Fig. 15.** Time variations of approximate lower low water.

서는 대조차와 소조차가 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 새만금방조제 인근해역에서는 새만금방조제 건설로 인해서 약간의 간사지 폭이 감소되었음을 확인할 수 있었다. 한편 폐쇄성이 강한 내만에 위치한 목포에서는 대조차와 소조차가 모두 큰 폭으로 증가하였다. 이는 방조제 건설로 인해서 반일 주조인 M_2 분조와 S_2 분조의 조차가 모두 증가하고, M_2 분조의 진폭증가가 S_2 분조의 진폭 증가보다 크기 때문이다. 영산강 하구언 건설이전에 비해서 새만금방조제가 준공된 2006년 이후에는 대조차가 58.3 cm, 소조차가 15.7 cm가 증가하였다. 이로 인해 간사지의 면적이 증가하였다. Kang et al.(2005b)은 목포해역에서 방조제 건설로 인해서 조석이 확폭되고, 조간대 규모가 증대되었음을 조석 수치모형을 이용하여 연구하였다. 한편 외해에 위치한 대흑산도에서는 대조

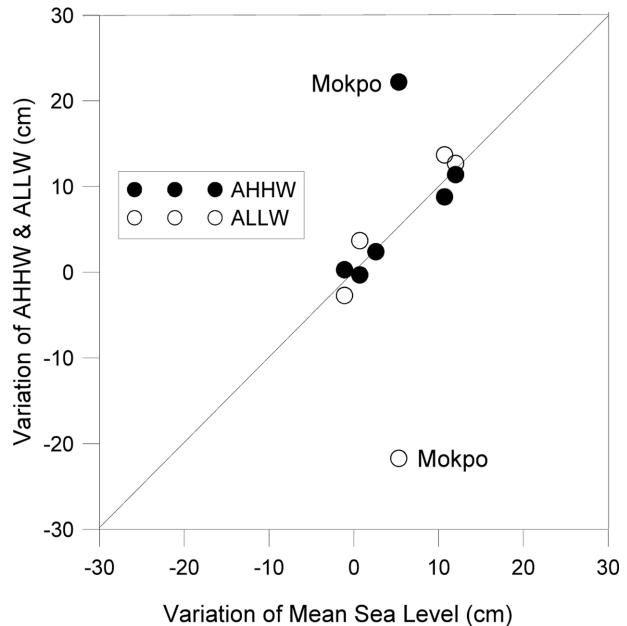
차는 증가하고, 소조차는 약간 감소하였다. 이상을 종합해 보면, 해안개발의 영향을 거의 받지 않은 안흥과 대흑산도에서 대조차가 증가하고, 소조차가 감소하는 패턴을 보였으며, 개방된 연안해역에서는 방조제 건설과 해안 매립 등의 해안개발로 해안선이 단순화되어서 조석파의 위상이 빨라지고, 가장 큰 조석분조인 M_2 분조의 진폭이 감소함으로 인하여 대조기와 소조기의 조차가 감소하였다. 따라서 서해안에서는 해안개발로 인해서 조차가 감소함으로 인해서 조간대 폭이 크지는 않지만 약간 감소하였다. 한편, 내만에 위치한 목포에서는 서해안에서 전체적인 변화보다는 개발로 인한 국지적인 변화에 영향을 받아서 조차가 크게 증가하고, 조간대 폭도 증가하였다.

해안구조물의 설계해면을 산출하는 데 가장 널리 이용되는

Table 5. Approximate higher high water, approximate lower low water and mean sea level in the western coasts

Station	Const. (cm)	Before YSRD	YSRD to KRD	KRD to YAS	YAS to KHS	KHS to BRD	BRD to SMGD	After SMGD
Anheung	AHHW			708.6		(711.1)		713.4
	ALLW			1.6		(4.6)		4.0
	MSL			354.5		(355.9)		357.1
Bo- ryeong	AHHW			763.4		(768.0)	(767.2)	774.8
	ALLW			2.9		(6.2)	(14.9)	15.6
	MSL			383.2		(387.1)	(391.1)	395.2
Gunsan	AHHW	725.8			728.9		(734.9)	734.6
	ALLW	2.4			5.1		(-1.2)	16.1
	MSL	364.1			367.0		(366.8)	375.4
Wido	AHHW	667.1			665.7		(655.4)	666.8
	ALLW	4.1			11.4		(15.9)	7.8
	MSL	335.6			337.8		(335.5)	336.3
Mokpo	AHHW	457.1		474.5		490.8		489.3
	ALLW	21.7		3.0		7.2		0.0
	MSL	239.3		238.8		249.0		244.6
Daeheuk- sando	AHHW				374.6			374.9
	ALLW				4.5			1.8
	MSL				189.4			188.3

약최고고조위(AHHW)와 선박의 안전항해의 기준이 되고, 해도작성의 기준면인 약최저저조위(ALLW)의 변화에 대해서 살펴보았다(Fig. 14 & 15, Table 5). 약최고고조위의 변화를 보면, 거의 변화하지 않은 위도와 대흑산도를 제외하고는 모두 과거에 비해서 상승하였다. 약최저저조위는 관측초기에 비해서 목포와 대흑산도를 제외하고는 모두 상승하였으며, 전반적으로 해안개발 기간에서는 그 변동성이 크게 나타났다. 약최고고조위의 변화를 자세히 살펴보면, 조위관측 초기에 비해서 새만금방조제 준공이후에 안흥에서는 4.8 cm, 보령에서는 11.4 cm, 군산에서는 8.8 cm, 목포에서는 32.2 cm가 상승하여 범람으로 인한 재해발생 위험성이 증가하였다. 특히, 목포에서는 영산강하구연 개발로 인해서 약최고고조위는 17.4 cm가 상승하고, 약최저저조위는 17.7 cm가 하강하여 개발로 인해 조석간만의 차가 약 35 cm 증가하였으며, 영암방조제와 금호방조제 개발로 인해서는 약최고고조위가 14.8 cm가 상승하고, 약최저저조위는 3.0 cm가 하락하였다. 이로 인해서 목포해역에서는 해안가 침수면적이 증가하고, 조간대의 폭이 넓어졌다. 외해에 위치한 대흑산도와 위도에서는 변화가 거의 발생하지 않은 것으로 보아 연안에서 해안개발이 목포의 조석을 변화시킨 것으로 추정된다. 전반적으로 약최저저조위도 약최고고조위와 비슷한 패턴으로 지속적으로 상승하였다. 그러나, 특이하게도 위도에서는 새만금방조제 건설초기에는 급격하게 상승하다가 1998년에 급격하게 하락한 후에 일정한 값을 보였다. 또한 군산과 보령에서는 2000년대에 급격한 변동성을 보였다. 이는 군산은 인근에서 새만금방조

**Fig. 16.** Relationship of mean sea level with AHHW and ALLW.

제가 건설되어 해안선이 급격하게 변화하는 과정에서 발생한 것으로 보이며, 보령에서의 급격한 변화는 Jung(2014)의 평균 해수면의 변화에 대한 연구에서 언급한 바와 같이 인근에 위치한 화력발전소로 인한 해수온도의 상승과 관련 있을 것으로 추정된다. 정확한 분석을 위해서는 조석변화 모델링 또는 해수온도 변화와의 상관성 분석 등의 연구가 필요할 것이다.

약최고고조위 및 약최저저조위의 변화의 원인을 파악하기

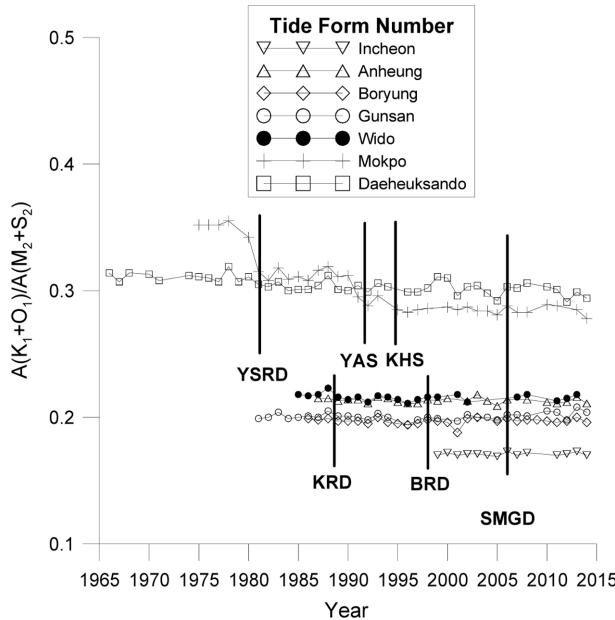


Fig. 17. Time variations of tide form number.

위해서 평균해수면 변화와 관련성을 살펴본 결과, 목포를 제외하고는 평균해수면의 상승률과 크기가 거의 일치하여 약최고고조위와 약최저저조위의 변화가 평균해수면의 변화와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 16). 그러나 목포에서는 해안개발로 주요 분조의 진폭이 증가하는 현상으로 인해서 조차가 증가하였으며, 평균해수면은 거의 변화하지 않았음에도 불구하고 약최고고조위는 상승하고, 약최저저조위는 하락하는 현상이 나타났다. 따라서 장래 설계조위를 결정하기 위해서 널리 사용하고 있는 약최고고조위에 장래 평균해수면 증가량의 추정치를 더해서 설계조위를 구하는 방법은 개방된 지역에서 사용하는 데는 일반적으로 문제가 없으나, 목포와 같이 내만에 위치하여 개발로 인해서 조석의 진폭이 크게 변화하는 지역에서는 조석진폭의 변화를 고려하지 않고 단순히 평균해수면의 변화만을 가지고 장래 약최고고조위를 추정하는 방법은 문제가 있다는 것을 알 수 있었다.

조석형태수의 변화(Fig. 17)를 살펴보면, 과거에 비해서 전반적으로 값이 약간 감소하는 패턴을 보이고 있다. 이는 서해안에서 조석이 전반적으로 반일주조의 영향이 커지는 형태로 바뀌고 있다는 것을 의미하며, 특히 다른 지역에 비해서 목포에서 큰 폭으로 감소하였다.

4. 결 론

서해 연안의 7개 검조소에서 장기 조위관측자료를 조화분석하고, 주요 4개 분조의 조화상수와 조석 비조화상수의 경년변화를 조사하여 다음과 같은 결론은 얻었다. 가장 큰 조석분조인 M_2 분조의 진폭이 군산과 위도에서는 금강하구언과 새만금방조제 준공 이후에 감소하였으며, 목포에서는 하구언과 방조제 건설로 인해서 크게 증가하였으며, 그 외 지

역에서는 거의 변화하지 않았다. M_2 분조의 위상은 전반적으로 해안개발 특히 새만금방조제 개발 이전에 비해서 빨라졌다. 목포에서의 위상은 다른 지역에 비해서 큰 폭으로 빨라졌으며, 군산에서도 그 변화가 뚜렷하게 나타났다. S_2 분조는 목포에서만 진폭이 증가하였고, 다른 지역에서는 거의 변화하지 않았다. 위상은 목포, 군산 순으로 뚜렷하게 빨라졌으나 다른 지역은 거의 변화하지 않았다. 가장 큰 일주조인 K_1 분조의 진폭은 거의 변화하지 않았으며, 위상은 목포에서만 빨라졌다.

주요 분조의 조화상수가 변화함에 따라서 비조화상수도 변화를 보여 대조기와 소조기의 조차가 목포에서 크게 증가하였고, 안흥과 대흑산도에서는 대조차는 약간 증가하였으나 소조차는 약간 감소하였으며, 군산과 위도에서는 대조차와 소조차가 약간 감소하였다. 해안개발로 인해서 목포에서는 조석확폭이 크게 발생하여 조간대의 폭이 증가하였으나 군산과 위도에서는 간사지의 폭이 오히려 약간 감소하였다. 안흥과 대흑산도 인근에서도 대조차가 증가하여 약간의 간사지 폭이 증가하였을 것이나 그 변화는 작았다.

설계조위를 결정하는 데 널리 사용되는 약최고고조위는 위도와 대흑산도를 제외한 지역에서 상승하였다. 따라서 서해연안이 과거에 비해서 범람의 위험성이 증가하였음을 확인할 수 있었다. 약최저저조위는 서해남부에 위치한 목포와 대흑산도를 제외하고는 증가하였다. 목포에서는 해안개발로 조차가 커지는 조석확폭으로 인해서 크게 하강하였다. 따라서 간조시의 수심이 서해남부해역을 제외한 지역에서는 깊어져서 선박의 운행안정성이 다소 개선되었을 것으로 보이나 서해남부해역에서는 오히려 간조시 수심이 얕아져서 선박운항의 위험성이 증가하고 있었다. 약최고고조위와 약최저저조위의 변화는 전반적으로 평균해수면 변화와 매우 상관성이 높음을 회귀분석을 통해서 확인할 수 있었으나 내만에 위치한 목포에서는 평균해수면 상승과 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 해안구조물 설계를 위한 장래 설계조위를 결정하기 위해서 장래 평균해수면 추정치와 주요 4개 분조 진폭의 합을 합해서 구하는 방법은 개방된 해안에서는 타당성이 있으나 목포와 같이 해안구조물 건설로 인해서 진폭이 크게 변하는 내만에 위치한 지역에서는 적용하는 데 문제점이 있으므로 주의해야 할 것이다. 조석형태수는 전반적으로 감소하여, 반일주조의 특성이 뚜렷해지고 있음을 확인할 수 있었다. 기왕의 조위자료에는 해안개발로 인한 영향이 뚜렷하게 나타나고 있어서 기후변화로 인한 장래 조석변화를 예측하는 데 본 연구결과를 바로 사용하기에는 문제가 있으며, 정확한 예측을 위해서는 기후변화로 인한 영향, 해안개발로 인한 영향, 지각변동 등의 영향을 정확하게 분리하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 약최고고조위와 같은 비조화상수의 경년변화를 정확하게 예측하기 위해서는 18.6년 주기의 장주기 조석변화를 파악할 수 있는 장기 조위자료가 확보가 필수적이다.

References

- Church, J.A. and White, N.J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32, 585-602.
- Jo, J.H., Park, S.H. and Ku, Y.H. (1998). Tidal changes of Kyonggi-Bay after the large reclamation in the Incheon coastal area. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 40(6), 70-78. (in Korean)
- Jung, T.S. (2011). Numerical modeling of tide asymmetry in the southeast coastal zone of Yellow Sea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(6), 429-441. (in Korean)
- Jung, T.S. (2014). Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean peninsula. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 429-441. (in Korean)
- Jung, T.S. and Jeong, J.K. (2013). Spatial distribution and time variation of M_2 tide and M_4 tide in the western coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(4), 255-265. (in Korean)
- Kang, J.W. (1996). Tide/Tidal currents changes by construction of seawall/seawalls near the coastal zone of Mokpo. *Journal of Water, Coastal, and Environmental Engineering*, KSCE, 16(II-6), 611-619. (in Korean)
- Kang, J.W., Joo Y.-M., Cho, H. and Kweon, H.-M. (2014). Spatio-temporal Variability of AHHW in relation with the Design Sea Level. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(2), 72-80.
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Oh, N.S. (2005a). Sea level rise at the southwestern coast. *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(2B), 151-157. (in Korean)
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Park, S.J. (2005b). Effects of tidal flat enlargement induced by tidal amplification. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 17(1), 47-54. (in Korean)
- Kang, S.K., Jung K.T., Kim E.J., So J.K. and Park, J.J. (2013). Tidal regime change due to the large scale of reclamation in the west coast of the Korean peninsula in the Yellow and East China Sea. *J. of Coastal Research*, 65, 254-259.
- Koo, Y.H. (1998). Changes of Tidal Characteristics due to Development of West Coastal Area. Ph.D. thesis, Chungnam University, Korea. (in Korean)
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA) (2011). Detailed Analysis and Prediction (3rd) of Sea Level Change in Korea. (in Korean)
- Korea Maritime Institute (2012). Evaluation and Improvement of Coastal Areas' Climate Change Response Capabilities : with focus on climate change adaptation capability of coastal municipalities. (in Korean)
- Lee, S.W. (1986). *Physical Oceanography*. Moonwoondang press. (in Korean)
- Min, B.I., Kim, K.O., Lee, H.S., Yuk J.-H. and Choi, B.H. (2011). Disturbances in tidal and sedimentation regimes at Sae-mangeum due to a dike. *J. of Coastal Research*, 64, 576-580.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2014). *Design Manual and Compendium for Ports and Fishing Ports*. (in Korean)
- Moore, R., Wolf, J., Souza, A., and Flint, S. (2009). Morphological evolution of the Dee estuary, Eastern Irish Sea, UK: A tidal asymmetry approach. *Geomorphology*, 103(4), 588-596.
- Pugh, D.T. (1987). *Tides, surges, and mean sea level*. John Wiley & Sons Ltd.
- Sunwoo, J.H. (1996). *Land Reclamation in the West Coast of Korea*. Seoul National University, Korea.
- Yoon, J.J. and Kim, S.I. (2012). Analysis of long period sea level variation on tidal station around the Korea peninsula. *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(3), 299-305. (in Korean)
- Yun, O.S. (1999). *History of Reclamation Technology: Evaluation of Reclamation Project*. The Korean Society of Agricultural Engineers, 189-222. (in Korean)

Received 22 February, 2016

Revised 15 April, 2016

Accepted 20 April, 2016