

무안만의 조석비대칭적 특성 분석

Analysis of Tidal Asymmetric Characteristics in the Muan Bay

강주환* · 김양선**
Ju Whan Kang* and Yang Seon Kim**

요지 : 조석이 크게 작용하는 서해안 지역에서 천해조 성장에 기인하여 조위곡선에 비대칭 현상이 발생하는 경우를 볼 수 있다. 특히 목포해역의 낙조우세는 국내에서 가장 두드러지기에 국내 연구자들에 의해 낙조우세 현상과 관련된 다양한 연구가 수행된 바 있다. 목포해역 낙조우세의 근원은 무안만의 드넓은 조간대에 기인한다고 알려져 있는데 이러한 조석비대칭의 정량적 해석을 위해 진폭비 및 상대지각, 조위 및 조류속 곡선의 왜도 등을 고찰하였다. 또한 무안만에서 보름 동안 조위를 관측함으로써 목포항과의 진폭 및 조시차를 파악할 수 있었으며 무안만의 낙조시간이 목포항보다 40분 정도 짧음을 확인하였다. 이와 함께 목포북항과 목포구 조류예보자료 역시 분석하여 결과 도출에 활용하였다. 한편, 대소조 주기별 조석비대칭의 정량적 변화를 PCA 및 SWA 지표를 통해 검토함으로써 소류사와 부유사 거동의 정성적 해석의 토대를 제공하였다. 이와 함께 목포해역 낙조우세의 장기적 변화를 고찰함으로써 조석비대칭과 관련된 이 해역의 과거-현재-미래를 아우르는 조석특성 규명의 기초를 마련하였다.

핵심용어 : 조석비대칭, 낙조우세, 조간대, 왜도, 무안만

Abstract : Tidal asymmetry would occur owing to shallow water tides at the Western Coast of macro tidal area. Especially, as ebb dominance of Mokpo coastal zone is known as the most prominent in Korea, it had been studied by domestic researchers. The cause of ebb dominance in Mokpo area is considered due to extensive inter-tidal zone in Muan Bay, and this has been studied based on amplification ratio, relative phase and skewness of tide/tidal flow curves in order to analyze qualitative tidal asymmetry. Furthermore, it was possible to figure out tidal characteristics with the difference of tidal amplitude and phase with Mokpo Harbor by observing the tide for 15 days in Muan Bay, which showed 40 minutes shorter ebbing time than at Mokpo Harbor. In addition, tidal flow prediction data in Mokpo North Harbor and Mokpo-Gu were analyzed. Meanwhile, the basis regarding qualitative interpretation of bed sediment and suspended sediment was provided by examining the qualitative changes in tidal asymmetry for spring-neap tidal cycle through the PCA/SWA indices. In addition, by examining long-term changes of ebb dominance in Mokpo Port, tidal characteristics of the past, present and future in this area, which is related to tidal asymmetry, is also provided.

Keywords : tidal asymmetry, ebb dominance, inter-tidal zone, skewness, Muan Bay

1. 서론

일반적인 연안 해역에서 창조지속시간과 낙조지속시간은 거의 동일한 수준을 보여 조위곡선은 대칭적인 형태를 띠게 된다. 그러나 M4 분조나 MS4 분조와 같은 천해조가 발달된 해역에서는 그 모체가 되는 M2 분조나 S2 분조와의 상대적인 위상차에 따라 조위곡선이 비대칭적인 형상을 띠기도 한다. 창조지속시간이 길 경우 낙조시 최대조류속이 크게 되는 낙조우세가 형성되는 반면 낙조지속시간이 길 경우에는 반대로 창조우세가 형성된다. 소류사의 움직임은 유속의 6승에까지 비례하며(Ackers and White, 1973), 조류발전과 관련하여 출

력은 유속의 3승에 비례(Neill et al., 2014) 하므로 이러한 최대조류속 차이에 따라 창조우세 또는 낙조우세 해역에서 소류사 이동량이나 조류발전량에는 큰 차이가 발생할 수 있다.

감조하천의 경우 상류로 갈수록 창조우세화하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있으며 국내에서는 금강을 비롯한 군산 해역이 대표적이다(Kang and Moon, 2001). Kang and Jun (2003)에 따르면 창조우세인 군산해역과 반대로 영산강하구 및 목포해역의 경우 낙조우세를 보이고 있는데, 그 근원은 황해에서의 순환특성과 함께 목포해역 인근의 드넓은 조간대에 기인하는 것으로 추정하고 있다. 특히 인접한 무안만의 낙조우세는 국내에서 가장 심한 수준이며, 목포해역 낙조우세의

*목포대학교 토목공학과 교수(Corresponding author: Ju Whan Kang, Professor, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National University 1666, Yeongsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan-gun, Jeonnam 58554, Korea, Tel: +82-61-450-2473, jwkang@mokpo.ac.kr)

** (주)연안관리기술연구소 기획본부장(Director of Planning Headquarters, Headquarter of Planning, Institute of Coastal Management & Technology)

근원으로 평가되고 있다. 본 연구에서는 무안만과 목포해역의 낙조우세 현상을 정량적으로 평가하는 동시에 양 해역간의 상관성을 분석하였으며, 대규모 건설사업에 따라 목포항 인근에서 낙조우세가 더욱 심화되는 상황에 대한 원인분석을 제시하였다.

2. 조석비대칭 평가 및 국내 현황

2.1 조석비대칭의 정량적 평가 방법

외해역으로부터 전파되어 오는 천문조로부터 바닥마찰과 같은 친해역의 비선형효과에 의해 파생되는 친해조가 중첩될 경우 조석비대칭 현상이 발생된다. 즉, M2 및 S2와 같은 천문조 성분과 M4 및 MS4와 같은 친해조 성분의 상대적 위상에 따라 창조우세 또는 낙조우세의 조석비대칭 현상으로 나타나게 된다. 대부분의 해역에서 M2 분조와 M4 분조 만의 해석을 통해 이러한 조석비대칭 현상에 대한 해석이 가능하기에(Boon and Byrne, 1981; Aubrey and Speer, 1985) 국내의 대부분의 조석비대칭 연구는 M2 분조와 M4 분조의 진폭비 $\alpha (= A_{M4}/A_{M2})$ 및 상대지각 $\psi (= 2\phi_{M2} - \phi_{M4})$ 해석을 통해 이루어지고 있다. 즉, 상대지각이 180도를 경계로 90도에 가까울수록 창조우세, 270도에 가까울수록 낙조우세 등으로 구분되며 진폭비의 크기에 따라 조석비대칭의 심화 정도가 결정된다.

한편, 조석비대칭현상은 바닥마찰과 조간대상 저류공간 등

두 가지 지형학적 조건에 따라 구분된다고 알려져 있다(Boon and Byrne, 1981; Friedrichs and Aubrey, 1988). 바닥마찰과 관련된 매개변수는 M2 분조 진폭과 수심의 비가 사용되는데, 바닥마찰효과가 크면 창조우세화 되는 경향이 있는 반면, 작으면 낙조우세화 되는 경향이 있다고 알려져 있다. 또한 조간대가 발달되어 조간대상 저류공간의 크기가 수로상 저류공간의 크기에 비해 큰 경우에는 고조시 평균수심이 저조시 평균수심보다 오히려 높아 고조의 전파속도가 느려져 낙조우세를 유발하므로 조간대가 발달된 하구는 낙조우세 경향이 있게 된다.

이러한 조석비대칭 현상을 정량적으로 산정하는 다른 하나의 방법으로 조석이나 조류속 시계열에 대한 왜도(skewness)를 사용하는 방법이 제시된 바 있다(Nidzieko, 2010). 조위의 경우 시간에 대한 변화율에 대한 왜도를 TDA(tidal duration asymmetry) 지표로 채택하고 있으며, 조류속의 왜도를 PCA (peak current asymmetry), 조류속의 시간별 변화율을 SWA (slack water asymmetry)에 대한 지표로 각각 채택하고 있다 (Guo et al., 2018).

2.2 국내 창낙조우세 현황

우리나라 서해안은 조석이 크게 작용하는 해역으로서 인천의 경우 조차가 8 m 이상으로 세계적으로도 손꼽을 만한 해역이다. 서해안을 따라 남쪽에 위치할수록 조차는 감소하며 남해안의 동쪽 끝단인 부산의 경우 1 m 정도의 조차를 보이

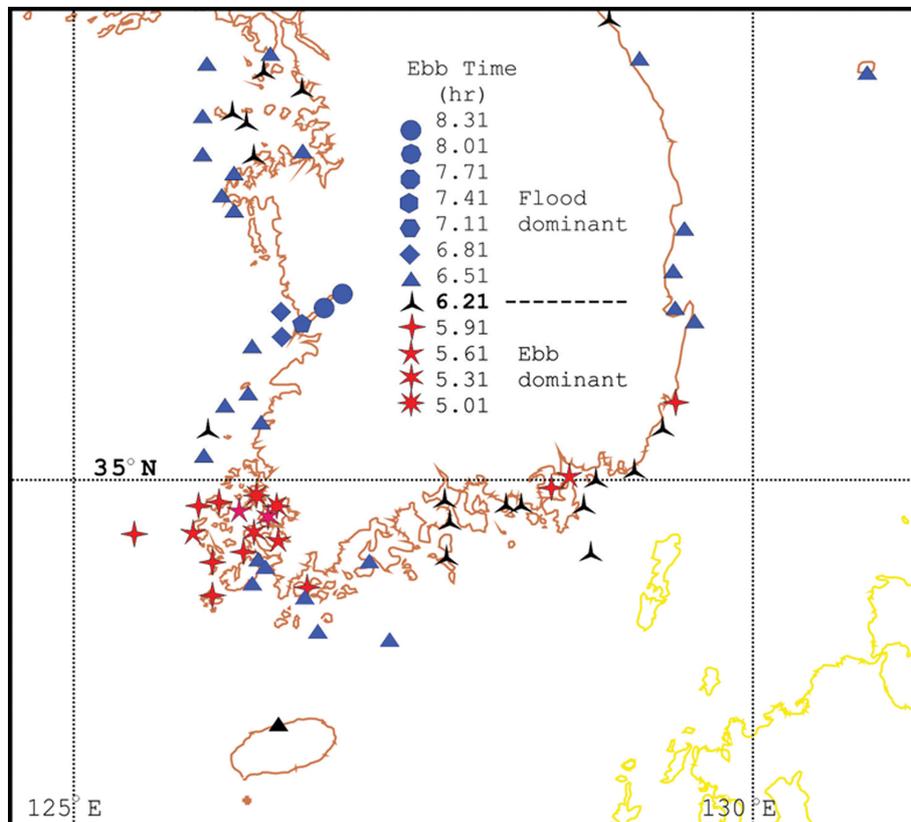


Fig. 1. Ebbing time in the coastal zone of Korea(Kang, 2000).

Table 1. Estimated TDA values in the Western Coast

Station	TDA
Incheon	0.13
Anheung	0.12
Gunsan	0.29
Yeonggwang	0.19
Mokpo	-0.50

고 있다. 이러한 천문조와는 달리 천해조의 경우 하구역에서의 발달이 두드러져 금강 및 영산강의 하구역에서는 M2 분조 진폭에 대한 M4 분조 진폭의 비를 의미하는 진폭비가 0.2에 달하여 매우 심한 조석비대칭 현상을 보이고 있다(Kang, 2000). Fig. 1에 보인 바와 같이 대부분의 국내 해역에서 창조우세적 조석특성을 보이고 있으며 금강하구역의 창조우세가 두드러짐을 볼 수 있다. 반면, 목포해역에서는 그림에서 확인할 수 있듯이 여타 지역과 달리 낙조지속시간이 창조지속시간에 비해 짧게 형성되는 낙조우세적 조석비대칭 현상이 두드러짐을 보이고 있다. 이러한 조석비대칭 현상의 정량화를 위하여 Nidziko(2010)가 제시한 조위곡선의 변화율(dn/dt)에 대한 왜도를 식(1)과 같이 산정하여 그 결과를 Table 1에 제시하였다. 여기서 사용된 조위 자료는 국립해양조사원에서 제공하는 해당 조위관측소의 2018년 1년치 1시간 간격 자료이다. 제시된 바와 같이 목포를 제외한 모든 지역에서 양의 왜도인 창조우세 경향을 보이고 있는 반면 목포에서는 음의 왜도이면서 심한 낙조우세임을 확인할 수 있다.

$$\gamma(\chi) = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\chi_i - \bar{\chi})^3}{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\chi_i - \bar{\chi})^2 \right]^{3/2}} \quad (1)$$

목포해역의 낙조우세 현상과 관련된 국내연구는 Kang et al.(1998)로부터 시작되었는데, 목포 인근해역에서의 M2 분조와 M4 분조의 진폭비와 상대지각 분석을 통해 낙조우세 해역의 범위를 고찰한 바 있다. 조간대가 발달된 무안만 낙조우세가 가장 극심한 결과를 토대로 목포해역 낙조우세의 근원이 무안만을 나타내기도 하였다. 또한 Kang and Jun (2003)은 목포해역인 영산강하구와 군산해역인 금강하구가 각각 한반도에서 가장 두드러지는 낙조우세 및 창조우세 해역임을 보였으며, Table 1에 제시된 결과 역시 해당 결과와 일맥상통하고 있다. 이와 같이 목포항의 경우 낙조지속시간이 5.25시간에 불과해 창조지속시간에 비해 2시간 가까이 짧게 형성되고 있으며 무안만 해역에서는 낙조지속시간이 4.76시간에 불과한 극심한 낙조우세를 보이는 등(Kang, 2000) 목포해역 전반은 국내는 물론이고 세계적으로도 흔치 않은 낙조우세 해역이다. 이 외에도 이 해역의 낙조우세적 조석특성과 관련한 국내 연구로 Suh(2011), Jung(2011) 및 Jung and Jeong(2013) 등이 있다.

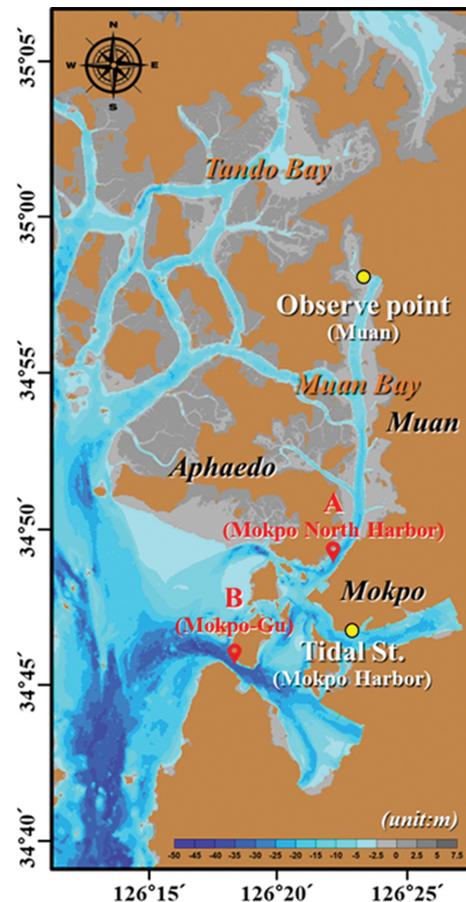
한편 조간대가 발달된 해역은 천해조 생성(Jung, 2011)에

따라 낙조우세 경향이 있음은 전술한 바와 같다. 이와 관련하여 Kang and Moon(2001)은 조간대가 조석과의 전파와 천해조 발생에 미치는 영향성에 대하여 수치실험을 통해 연구한 결과 무안만의 낙조우세는 조간대의 발달에 기인함을 재확인한 바 있다. 따라서 낙조우세를 수치모형을 통해 재현하기 위해서는 조간대 모의가 필수적임(Kang et al., 2004)과 동시에 낙조우세를 재현하기 위해서는 천해조 개방경계 설정이 필요하다(Jung and Choi, 2010)고 알려져 있다. 또한 이렇게 천해조가 발달된 하구에서 조석비대칭 현상은 퇴적물 이동에 직접적인 영향을 미치게 되는데 Kang et al.(2002a)과 Kang et al.(2002b)은 각각 소류사 및 부유사 이동에서 이러한 영향성에 대한 연구를 수행한 바 있다. 그 결과 천해조가 발달된 이러한 해역에서 퇴적물 이동과 관련된 수치모의시 M2 분조와 같은 천문조 경계조건에 부가하여 M4 분조의 천해조까지 포함시킬 것을 제안한 바 있다.

3. 목포해역의 낙조우세

3.1 무안만의 조간대

목포시 북단에 위치한 무안만은 Fig. 2에 보인 바와 같이 무안반도와 신안군 압해도에 둘러싸여 있으며 최대 폭 약 8 km, 길이 약 21 km로 남북방향으로 형성되어 있다. 만 입

**Fig. 2.** Topography of Muan Bay showing inter-tidal zone.

구는 서측과 남측에 위치하고 있는데 서측의 경우 압해도와 무안반도 사이에 좁고 길게 형성되어 탄도만과 연결되어 있고 남측의 경우 목포구와 연결되어 있다(Ryu et al., 2009). 수심은 서측 만입구에서 약 16m, 남측 만입구에서 약 27 m이며 만내로 갈수록 10 m 이하까지 얕아지는 경향을 보이고 있다. 조간대는 그림에 나타낸 바와 같이 무안만 전체 면적 73 km²의 60% 이상인 47 km²를 차지하여 광범위하게 발달되어 있다.

서론에서 언급하였듯이 창조 또는 낙조우세의 조석왜곡양상은 하구의 지형학적 특성과 관련된 두 가지 요소에 의해 결정된다고 알려져 있다(Boon and Byrne, 1981; Friedrichs and Aubrey, 1988). 즉, 조류흐름의 마찰효과 및 조간대상의 저류효과가 그것인데 각각에 대한 지표로 평균해수면 상황에서 수심에 대한 M2 분조 진폭의 비(alh)와 수로의 저류량에 대한 조간대상의 저류량의 비(V_s/V_C)가 사용되고 있다. alh 가 0.3보다 클 경우 마찰효과가 고조시에 비해 저조시에 더 커짐과 함께 상류로 전파되는 조석파의 파속이 \sqrt{gh} 임을 감안하면 수심이 깊은 고조시 파속이 수심이 얕은 저조시 파속보다 빠르게 진행한다. 이에 따라 Fig. 3(a)에 도시된 바와 같이 창조지속시간이 짧게 형성되는 창조우세 경향을 보이게 된다. 반면 수심이 깊어 alh 가 0.3보다 작은 경우에는 마찰효과보다 조간대상의 저류효과에 따라 조석왜곡양상이 결정된다. 조간대가 발달되어 V_s/V_C 가 클 경우 Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 고조시 평균수심이 저조시 평균수심에 비해 오히려 작

아지는 현상에 따라 고조시 파속이 저조시 파속보다 느려져 낙조우세 경향이 나타나게 된다. 조간대가 발달되어 있더라도 조간대가 평균해면보다 아래에 위치할 경우 저조에 가까운 시각에도 조간대 노출이 적어 창조우세가 형성되기도 한다. 무안만의 경우 M2 분조의 진폭과 수심이 각각 1.6 m 정도와 10 m 정도이며 조간대 면적이 전체 수면적의 60% 이상이고 조위조건이 평균해수면 정도인 상황에서도 조간대가 넓게 드러나 있음을 감안할 때 이러한 지표상으로도 낙조우세로 구분될 수 있다.

3.2 무안만 조석특성

무안만의 조석관련 정보는 매우 희소하여 Ryu et al.(2009)에 제시되어 있는 1982년 자료인 평균조차 301.0 cm(대조차 395.4 cm, 소조차 206.8 cm)이고 약최고고조위는 D.L.503.2 cm 정도 뿐인데 30여년 전 자료이며 천해조에 대한 정보도 결여되어 있다. 따라서 국내에서 가장 심한 낙조우세해역으로 알려져 있는 무안만의 낙조우세 실상을 확인하기 위하여 조위관측을 실시하였다. 관측지점은 Fig. 2에 나타난 지점에서 WLR-7을 2019년 10월 16일 08시부터 보름간 계류하는 방식으로 실시하였다. M2 분조와 M4 분조의 조화상수를 목포 조위관측소의 기준조석과 함께 Table 2에 제시하였는데 양 지점 모두 천해조인 M4 분조의 진폭이 20 cm를 초과하는 결과를 보이고 있다. 진폭비(e)와 상대지각(ψ)도 함께 제시하였으며 이들로부터 낙조지속시간(t_c)은 다음 식(2)와 같이 계산

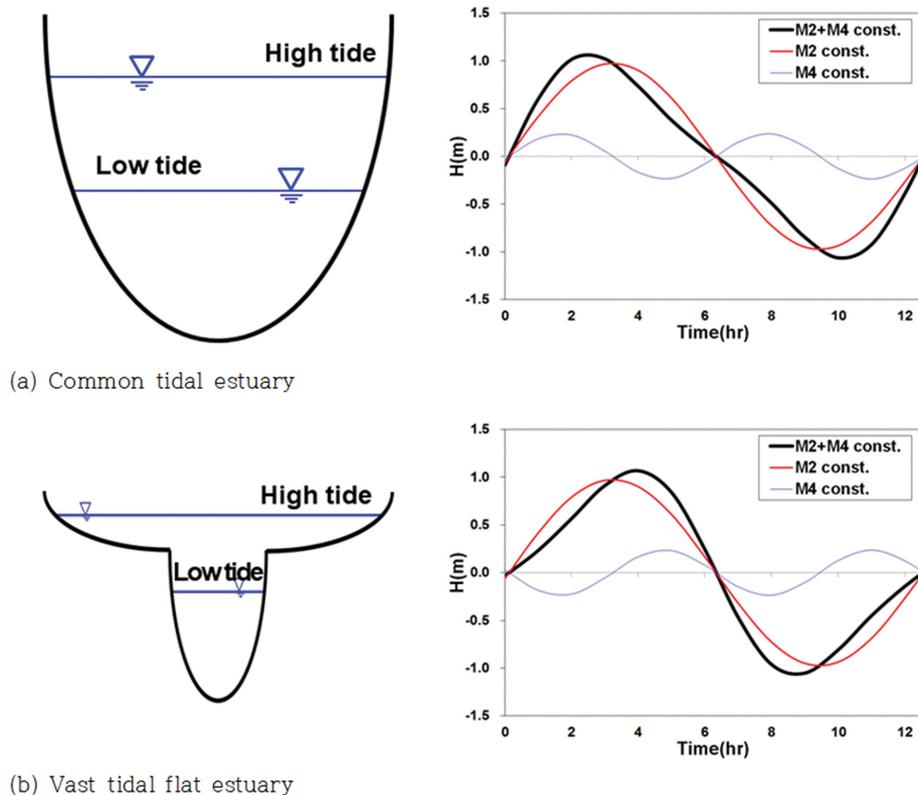


Fig. 3. Propagation of tidal wave and tidal asymmetry.

Table 2. Amplitude ratio and relative phase at Muan Bay and Mokpo Harbor

St.	M2		M4		Ampl. ratio ϵ	Rel. phase Ψ ($^{\circ}$)	Ebbing time (hr)
	A (cm)	ϕ ($^{\circ}$)	A (cm)	ϕ ($^{\circ}$)			
Muan Bay	160.9	52.4	23.6	207.1	0.147	257.7	5.08
Mokpo Harbor	134.5	45.7	21.8	232.0	0.162	219.4	5.40

된다(Kang, 2000).

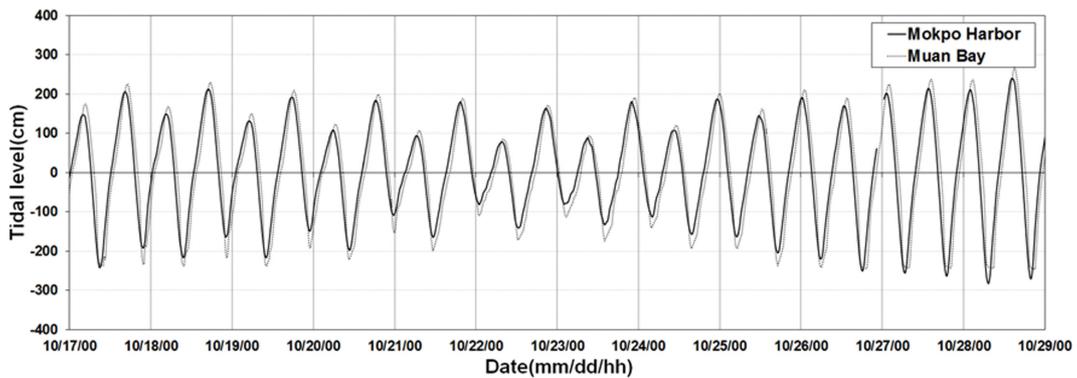
$$t_e = (\pi + 4\epsilon \sin \Psi) / \omega_2 \quad (2)$$

여기서 ω_2 는 M2 분조의 지각이다. 특히 상대지각이 무안만의 경우 270도에 근접하는 결과를 보이고 있으며 계산된 낙조지속시간에 따르면 목포항보다 30분 이상 더 짧은 극심한 낙조우세임을 보이고 있다. Toublanc et al.(2015)에 의하면 세계적으로 천해조가 10 cm를 초과하는 해역은 그리 많지 않으며 황해(Yellow Sea)가 그 중 하나임을 적시한 바 있는데 목포연안 및 무안만은 황해연안에서도 천해조가 가장 발달되어 세계적으로도 흔치 않은 낙조우세 해역임을 보이고 있다.

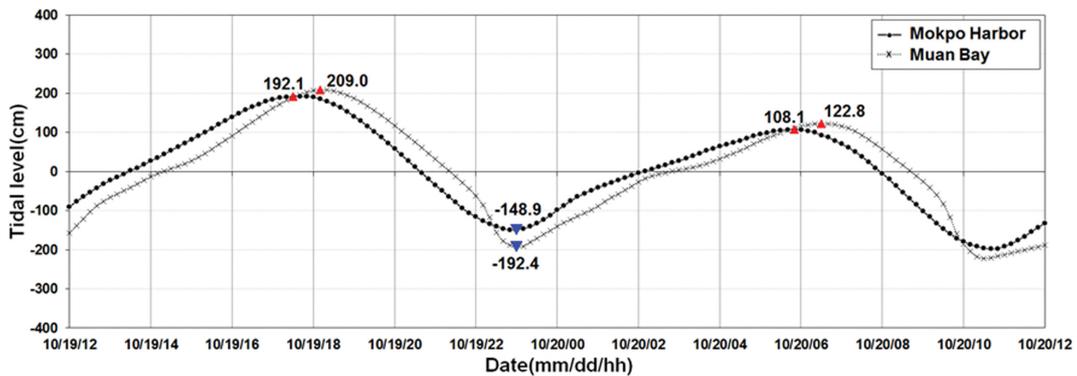
조화분석과 함께 무안만의 조위양상을 목포 조위관측소와 비교함으로써 조시차 및 조석왜곡을 정량적으로 산출할 수 있었다. 즉, 관측 시기 동안 기본수준면이 아닌 평균해수면을 기준으로 하여 목포항 조위관측소의 예측조위를 함께 Fig. 4에 대소조가 포함된 전체 관측기간 및 고저조의 비교를 용이하게 볼 수 있도록 24시간 동안을 함께 제시하였다. 양 지점의

저조시점은 거의 동일한 반면 목포항의 고조시점이 무안만에 비해 약 40분 빠른 것으로 나타나고 있는데 Table 2에 제시된 M2 분조의 지각 차이인 6.7에 해당하는 14분의 두 배와 유사하게 산정된다. 이에 따라 무안만에서 낙조지속시간 역시 목포항보다 약 40분 짧은 한층 심한 낙조우세해역임을 한번 더 확인할 수 있다. 조석 진폭의 두 배인 조차 역시 Table 2에 제시된 M2 분조와 유사하게 무안만에서 60 cm 정도 크게 나타나고 있으며, 무안만에서 저조시 해수면이 조하대에 해당하는 수로상에 위치할 경우 해수면적이 협소해짐에 따라 해수면이 매우 급격하게 감소하고 있음은 특기할 만 하다. 이들 차이 외 전반적인 조석파형은 대체적으로 유사하게 나타나고 있다.

이렇듯 무안만은 국내에서 가장 심한 낙조우세해역임을 확인할 수 있는데 이와 아울러 창조시에 비해 낙조시 최대 조류속이 얼마나 크게 형성되고 있는지 확인하기 위해서는 조류속 분석이 필요하다. 본 연구에서는 국립해양조사원(KHOA)에서 제공하는 조류예보지점 중 Fig. 2에 나타난 무안만의 남



(a) Spring tide ~ neap tide



(b) High tide ~ low tide

Fig. 4. Time series of observed tide at Muan Bay and Mokpo Harbor.

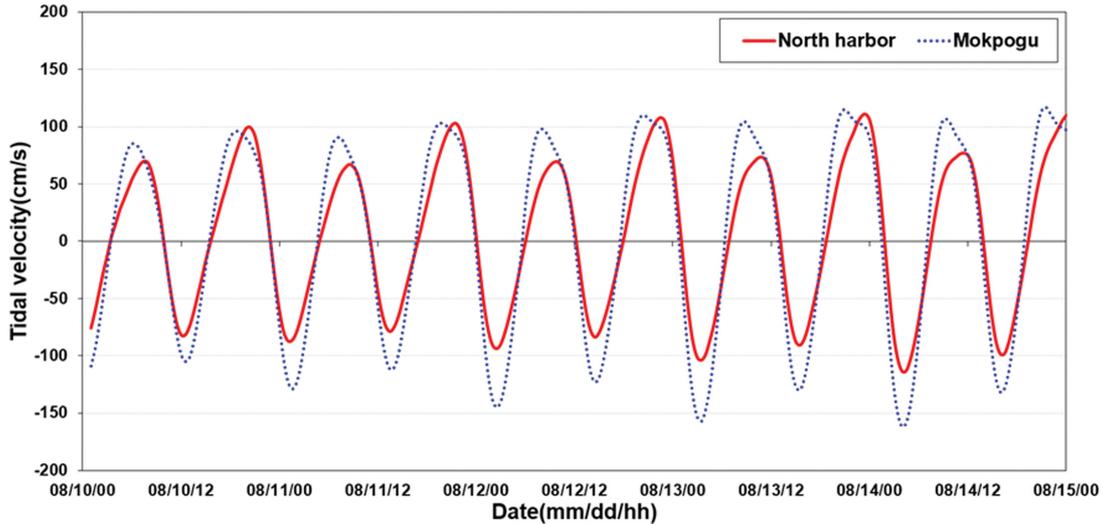


Fig. 5. Time series of predicted tidal current (KHOA data).

Table 3. Skewness and tidal speed at Mokpo North Harbor and Mokpo-gu

Index		Mokpo N. Harbor	Mokpo-gu	
Skewness	PCA	-0.33	-0.27	
	SWA	-0.67	0.31	
Spring tidal speed (cm/s)	Flood (F)	Max	132	143
		Mean	62	73
	Ebb (E)	Max	183	196
		Mean	70	89
Neap tidal speed (cm/s)	Flood (F)	Max	127	143
		Mean	62	73
	Ebb (E)	Max	179	187
		Mean	78	84
Ratio (E/F)	Spring tide	Max	1.39	1.37
		Mean	1.14	1.21
	Neap tide	Max	1.41	1.31
		Mean	1.26	1.15

측 입구인 목포북항(A)과 목포구(B) 등 두 지점에서 2019년의 일년치 조류예보자료를 수집하여 분석에 활용하였다. 두 지점에서 2019년 하절기인 8월 중순의 5일 동안 조류속 예측치에 대한 시계열 자료를 창조시(+)와 낙조시(-)를 부호로 구분하여 Fig. 5에 예시하였고 최대값과 평균값에 대한 결과를 Table 3에 제시하였다. 낙조시 최대조류속과 평균조류속이 창조시보다 각각 1.3~1.4배 및 1.1~1.2배 가량 크게 형성되고 있어 목포구 내부의 목포해역과 무안만 해역의 심한 낙조우세적 특성을 시사하고 있다.

4. 낙조우세의 변화상

4.1 왜도 분석

2장에 제시한 바와 같이 조석왜곡에 따른 창낙조우세 현상은 주로 천문조와 천해조 사이의 진폭비 및 상대지각으로 정

량화시킬 수 있으며, 함께 제시된 국내 선행연구 역시 이러한 지표를 사용하여 목포해역의 낙조우세를 기술한 바 있다. 이러한 방법과 달리 본 연구에서는 Guo et al.(2018)이 L.A. 인근 Newport Bay에 적용한 바 있는 방법인 조위자료의 왜도를 사용한 지표로써 목포해역의 낙조우세를 정량화하였다. 낙조우세현상에 따라 퇴적물 이동에 있어 창조 및 낙조시 비대칭이 유발되는데, 소류사의 경우 창낙조 최강유속에 대한 비대칭인 PCA(peak current asymmetry), 부유사는 SWA(slack water asymmetry)와 관련이 있다(Dronkers, 1986). 그러나 현실적으로 장기간의 조류속 자료는 드물기 때문에 PCA 및 SWA는 쉽게 계산되지 않고 대신 조석왜곡현상에 대한 정량화를 위해 조위의 시간변화율인 TDA(tidal duration asymmetry)를 사용하기도 한다. 국내 서해안 5개 지점에서 조석왜곡의 실상을 정량적으로 밝히기 위해 TDA를 산정하여 Table 1에 이미 제시한 바 있으며 목포해역의 낙조우세가 두보적임을 서술한 바 있다.

목포해역에서 조류속에 대한 PCA를 산정하기 위하여 국립해양조사원에서 제공하는 전술한 두 지점인 목포북항과 목포구에서 2019년의 일년치 조류예보자료를 수집하여 분석에 활용하였다. 식(1)로 산정되는 1시간 간격 1년치 조류속 자료에 대한 왜도를 산정한 결과를 Table 3에 함께 제시하였는데 목포북항과 목포구 모두 PCA 수치가 음의 값인 낙조우세를 보이고 있다.

이와 같이 조류속(u)의 왜도를 나타내는 PCA 지표를 통해 소류사 거동에 대한 정성적인 정보를 얻을 수 있는 반면 약한 조류속 상황에서 조류속의 시간변화율(du/dt)에 대한 왜도를 의미하는 SWA 지표를 통해 부유사 거동에 대한 정성적인 정보 역시 얻을 수 있다. SWA 지표에 대한 2019년 1년 동안의 평균치 역시 Table 3에 수록하였는데, 목포북항의 경우 부유사마저 낙조우세인 음(-)의 값을 보이는 반면 목포구에서는 양(+)의 값인 창조우세를 각각 보이는 것은 특기할

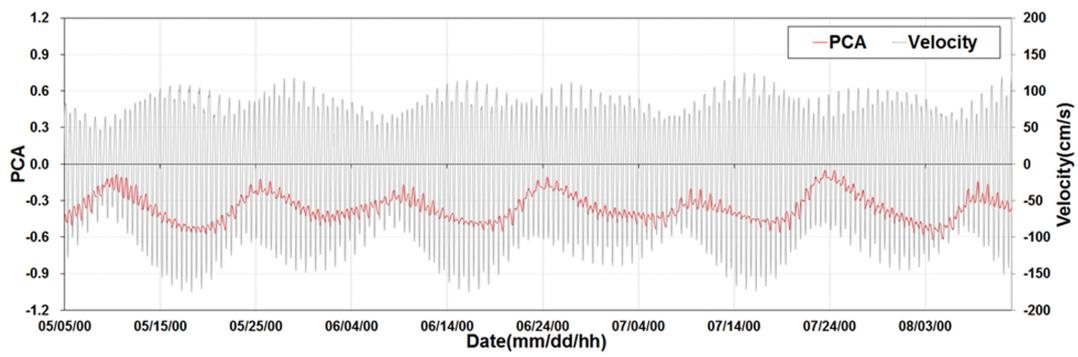
만 하다. 즉, 무안만의 낙조우세적 조류특성에 따라 소류사 이동의 주류가 외해 방향인 반면 부유사는 목포북항에서는 외해방향이지만 목포구에서는 내해방향임을 시사하고 있다. 정설로 되어 있는 목포해역의 낙조우세적 특성과 달리 이러한 상반된 결과가 도출된 자료는 국립해양조사원의 조류예측치에 근거하고 있다. 따라서 실제 현상도 이에 부합하는지 여부를 확인하기 위해서는 해당 해역에서 조류 관측이나 부유사 관측을 시행해야 한다. 따라서 향후 해당 해역에서 이러한 관측을 비롯한 다각적인 측면의 분석이 추가적으로 이루어져 소류사 뿐 아니라 부유사 거동에 대한 거시적인 특성 규명에 대한 필요성이 제기된다.

4.2 대소조 변화

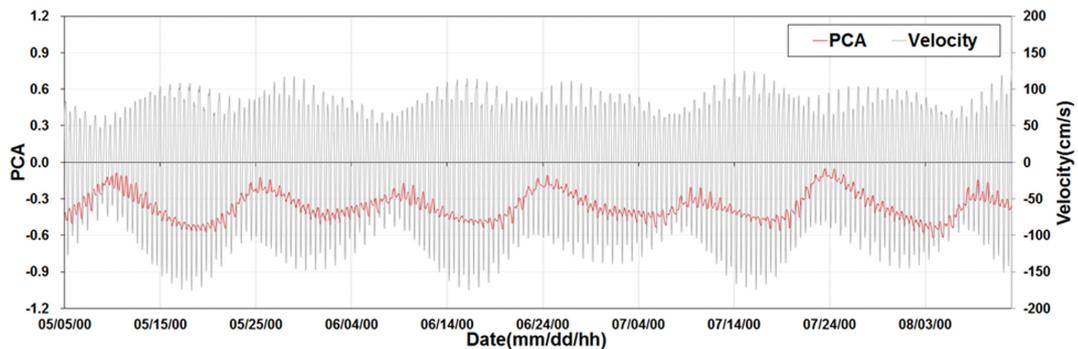
1년치 자료로부터 산정된 PCA와 SWA 지표에 대한 대소조 주기별 변화를 살펴보기 위해 먼저 1시간 간격으로 12시간 전부터 12시간 후까지 25개 자료에 대한 하절기(5~8월) 동안의 PCA 지표를 매시간 산정하여 Fig. 6에 제시하였다. 그림에 보인 바와 같이 대소조에 따라 주기적 변화를 보이고 있는데 PCA 지표의 경우 대조일수록 낙조우세를 의미하는 음(-)의 절대값이 크게 산정되고 있어 대조기에 조석왜곡이 심해진다는 연구(Wang et al., 1999)와 일치하는 결과를 보이고 있다. 즉, Fig. 6에 함께 제시한 창낙조 조류속 크기를 소/대조기에 따라 비교해보면 목포북항과 목포구에서 소조기의 창조와 낙조 조류속의 차이는 크지 않은 반면 대조기일수록

그 차이가 커져 낙조우세가 심화됨을 확인할 수 있다. 이와 같이 조간대가 발달된 무안만 입구에 위치한 목포북항 및 목포구에서 소조기에 비해 대조기시 증가하는 PCA 지표값 경향은 낙조우세 심화를 시사하고 있는데, 이는 대조기일수록 조간대 규모가 커지므로 조간대 규모가 커질수록 낙조우세가 심화된다는 명제와 일맥상통하는 결과이다.

한편 고조시 정조가 지속되는 시간과 저조시 정조의 지속 시간 간의 차이로 인해 부유사 거동에 차이가 발생되는데, 이러한 불일치는 고조 및 저조 정조시점에서 조류속의 시간변화율(du/dt)에 대한 왜도로부터 SWA 지표로 정량화시킬 수 있다. 즉, 고조정조($du/dt < 0$) 및 저조정조($du/dt > 0$) 지속시간 중 전자가 길 경우 SWA는 양(+)의 왜도를 갖게 되며 외해방향의 부유사 이동 경향을 나타내는 반면 후자가 길 경우 음(-)의 왜도와 함께 내해방향 부유사 이동 경향을 시사한다. SWA 지표를 산정하기 위해 먼저 조석주기 동안 조류속 방향이 전환되는 정조시점을 찾게 되는데, 조류속의 부호가 음(-)인 낙조에서 양(+)인 창조로 바뀌는 순간 및 정반대 순간 각각에 대하여 부호가 바뀌는 전후의 유속차를 구해 이들 자료에 대한 전후 7 조석주기 동안의 왜도를 계산하여 해당 시점의 SWA로 산정하였다. 그 결과를 Fig. 7에 제시하였는데 목포북항의 경우 SWA 지표가 PCA 지표와 유사하게 전반적으로 음의 값, 즉 외해방향의 부유사 이동을 시사하고 있다. 목포구의 경우에는 반대로 양의 값의 패턴을 보여 내해방향의 부유사 이동을 나타내고 있다. 이는 Fig. 5에 제시된 두

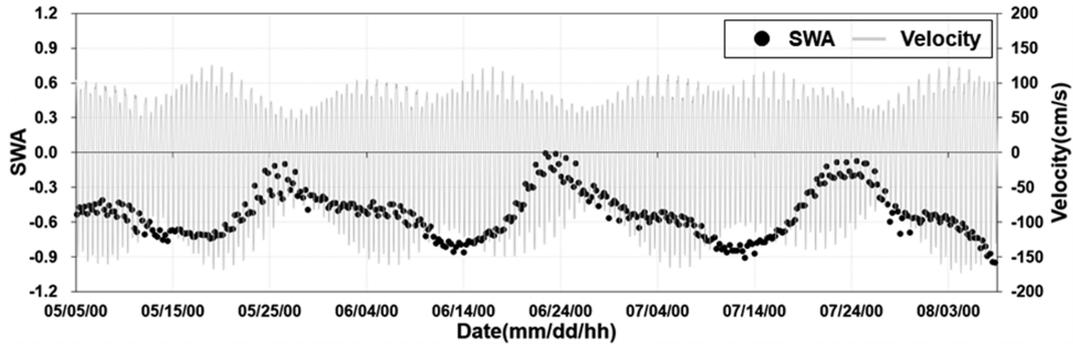


(a) Mokpo North Harbor

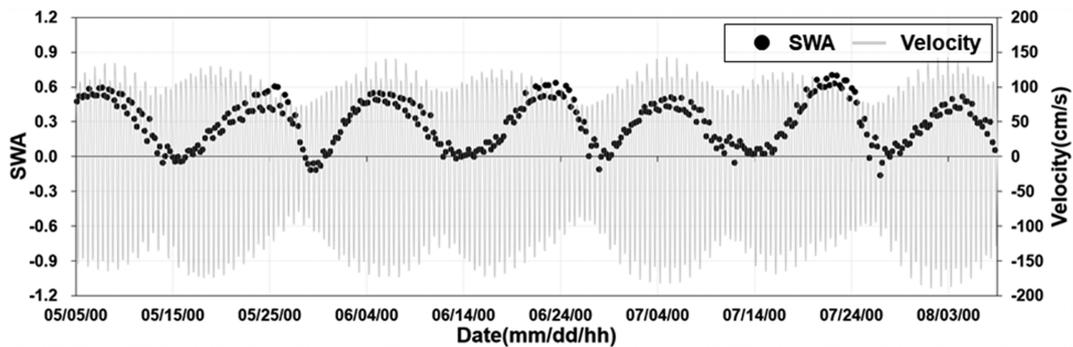


(b) Mokpo-Gu

Fig. 6. Time series of PCA (peak current asymmetry) with tidal velocity.



(a) Mokpo North Harbor



(b) Mokpo-Gu

Fig. 7. Time series of SWA (slack water asymmetry) with tidal velocity.

지점의 조류속 예측치의 창조와 낙조의 전환시점 기울기 특성에 기인하는 것으로 파악된다. 즉, 낙조에서 창조로 전환되는 순간(저조)의 조류속 변화율(양의 기울기)과 창조에서 낙조로 전환되는 순간(고조)의 조류속 변화율(음의 기울기)을 비교해 보면 침두치 형성과 관련하여 목포북항의 경우 후자, 그리고 목포구의 경우 전자가 각각 더 크게 나타나고 있어 SWA 지표값이 상반된 결과를 보이고 있는 것이다. 이러한 SWA 분석결과는 국립해양조사원(KHOA)에서 제공하는 조류속 예측치로부터 산정된 것이므로 자료의 신뢰도가 입증되지 않은 상태에서 이 사실만을 토대로 부유사 이동의 정량적인 패턴을 규정짓기에는 한계가 있다. 자료의 신뢰도가 보장되거나 추후 관측 등을 통해 추가적인 관련 정보가 축적될 경우 부유사 이동에 대한 명확한 특성파악이 가능해질 것이다.

4.3 낙조우세의 장기 변화

Kang et al.(1998)은 M2 분조와 M4 분조의 진폭비와 상대지각의 정보로부터 낙조지속시간을 산정하는 방법으로 영산강하구연과 영암/금호방조제 건설에 따라 목포해역에서 낙조우세가 심화되었음을 밝힌 바 있다. 이 방법과 동일한 방법으로 1998년 이후 기간이 추가된 목포항 조위관측소 자료에 대한 M2 분조와 M4 분조의 조화상수로부터 산정된 낙조 지속시간을 Fig. 8에 제시하였다. 또한 Table 1에 제시된 목포 조위관측소의 TDA 연별 수치를 조사하여 Fig. 8에 함께 도시하였는데, A, B, C 시점으로 각각 나타난 영산강하

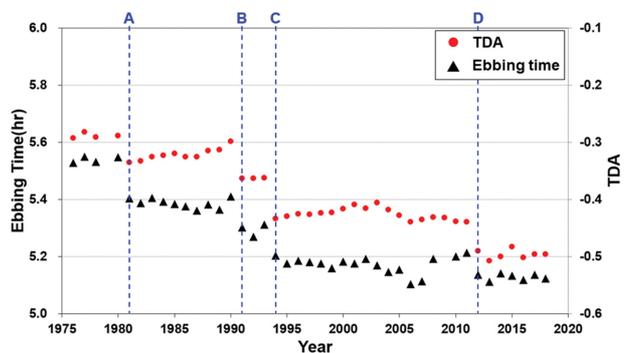


Fig. 8. Annual variation of ebbing time and TDA (tidal duration asymmetry).

구연(1981), 영암방조제(1991), 금호방조제(1994) 건설직후 낙조시간 감소와 TDA 변화 양상이 유사하게 형성되고 있어 건설에 따라 낙조우세가 심화되고 있음을 볼 수 있다. 하구연과 방조제 건설에 따라 낙조우세가 심화된 원인에 대해서는 Kang et al.(2005)이 밝힌 바 있는데, 이러한 건설에 따른 낙조우세의 심화 이후에도 D 시점인 2012년을 기점으로 낙조우세가 더욱 심화되는 경향을 보이고 있어 하구연 및 방조제 건설 외에 추가적인 낙조우세 심화기작에 대한 관심과 분석이 요구된다. 이와 같이 목포해역의 낙조우세 심화현상은 관측자료로부터 명백히 드러나고 있는 반면 그 근원이 되는 무안만의 낙조우세의 변화추이는 전혀 밝혀진 바가 없다. 무안만은 천혜의 갯벌 생태계가 조성되어 각종 어패류 및 연체동

물과 같은 수산자원의 보고로서 이 지역의 생태환경 변화는 세심히 관찰될 필요성이 충분하다. 이에 따라 무안만을 포함한 목포해역의 전반적인 낙조우세 실상 및 변화에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

5. 결 론

낙조우세현상이 극명하게 드러나는 목포해역에서 조위 및 조류속 관련 자료를 분석함과 동시에 무안만에서 조위관측을 시행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 조화상수를 이용한 분석 뿐 아니라 조위의 왜도를 조사한 결과 역시 목포해역이 국내에서 유일한 매우 심한 낙조우세 해역임을 나타내고 있으며, 무안만에서 단기간 조위관측을 시행한 결과를 보면 무안만에서 낙조지속시간이 목포항에 비해 40분 정도 더 짧은 한층 심한 낙조우세해역임을 보이고 있다.

2) 국립해양조사원에서 제공하는 목포북항 및 목포구에서의 조류예보자료에 대한 PCA 지표 및 SWA 지표 분석 결과 목포북항의 경우 무안만에서 목포항 쪽으로 소류사 뿐 아니라 부유사까지 이동이 발생하는 낙조우세적 특성에 부합하는 결과를 시사하고 있다. 그러나 목포구에서는 소류사의 경우 낙조우세적 특성을 보이지만 부유사는 창조우세적인 상반된 특성을 보이고 있는 점은 추후 관측자료에 의한 확인이 필요한 사항이다.

3) 상기 지표의 대소조 주기별 변동양상을 보면 대조기에 낙조우세가 심해지는 반면 소조기에는 낙조우세가 완화되어 대조기에 특히 퇴적물 이동이 탁월할 것으로 예상된다.

4) 건설사업에 기인한 조류특성의 변화에 따라 목포항 부근 해역에서 낙조우세가 급격히 또는 점진적으로 지속적인 심화현상을 보이고 있다. 이러한 낙조우세현상의 변화는 퇴적물 이동 뿐 아니라 주변 해역의 생태환경에도 크게 영향을 미치게 된다. 특히 낙조우세 변화가 무안만 일대에 서식하는 각종 동식물의 생태환경에 미치는 영향성은 지속적인 모니터링 및 관리가 요구된다.

References

- Ackers, P. and White, W.R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics, ASCE*, 99(HY11), 2041-2060.
- Aubrey, D.G. and Speer, P.E. (1985). A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part I: observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 185-205.
- Boon, J.D. and Byrne, R.J. (1981). On basin hypsometry and the morphodynamics response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, 40, 27-48.
- Dronkers, J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2/3), 107-131.
- Friedrichs, C. and Aubrey, D.G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27, 521-545.
- Guo, L., Brand, M., Sander, B.F., Foifoula-Geogiou, E. and Stein, E.D. (2018). Tidal asymmetry and residual sediment transport in a short tidal basin under sea level rise. *Advances in Water Resources*, 121, 1-8.
- 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 Eng.*, 23(6), 429-441 (in Korean).
- Jung, T.S. and Choi, J.H. (2010). Numerical modeling of ebb-dominant tidal flow in the Mokpo Coastal Zone. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 22(5), 333-343 (in Korean).
- Jung, T.S. and Jeong, J.K. (2013). Spatial distribution and time variation of M2 tide and M4 tide in the western coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 25(4), 255-265 (in Korean).
- Kang, J.W. (2000). Flood/Ebb Dominance in the southwestern part of Korean coastal zones and rotation of tidal currents in the Yellow Sea. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 20(2B), 269-276 (in Korean).
- Kang, J.W. and Jun, K.S. (2003). Flood and ebb dominance in estuaries in Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56(1), 189-198.
- Kang, J.W. and Moon, S.R. (2001). Tidal propagation characteristics in the estuary which shows significant shallow tides. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 13(1), 56-60 (in Korean).
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Ahn, S.M. (2002b). Suspended sediment transport characteristics in the estuaries with significant shallow water tides and tidal flat. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 14(3), 201-208 (in Korean).
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Park, H.S. (2002a). Bed sediment transport characteristics in the estuaries which show significant shallow water tides. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 22(4B), 531-538 (in Korean).
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Park, S.J. (2004). Necessities of the simulation of tidal flats in hydrodynamic numerical models. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 24(3B), 259-265 (in Korean).
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Park, S.J. (2005). Effects of tidal flat enlargement induced by tidal amplification. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 17(1), 47-54 (in Korean).
- Kang, J.W., Song, J.J. and Oh, N.S. (1998). Analysis of ebb-dominant tidal currents characteristics. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 18(II-2), 259-265 (in Korean).
- Neill, S.P., Hashemi, M.R. and Lewis, M.J. (2014). The role of tidal asymmetry in characterizing the tidal energy resource of Orkney. *Renewable Energy*, 68, 337-350.
- Nidzicko, N.J. (2010). Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides. *Journal of Geophysical Research*, 115.
- Ryu, S.-O., Chang, J.-H., Lee, H.-J., Jo, Y.-J. and Choi, O.-I. (2009). Spatial and temporal variation of surface sediments by

- tidal environment changes: Muan Bay, West Coast of Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 14(1), 10-21 (in Korean).
- Suh, S.W. (2011). Reproduction of shallow tides and tidal asymmetry by using finely resolved grid on the West Coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 23(4), 313-325 (in Korean).
- Toublanc, F., Brenon, I., Coulombier, T. and Le Moine, O. (2015). Fortnightly tidal asymmetry inversions and perspectives on sediment dynamics in a macrotidal estuary (Charente, France). *Continental Shelf Research*, 94, 42-54.
- Wang, Z.B., Jeuken, H. and de Vriend, H.J. (1999). Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries. WL Hydraulics, report No. Z2749.
-
- Received 1 June, 2020
1st Revised 24 June, 2020
2nd Revised 24 June, 2020
Accepted 25 June, 2020