

## 화옹 (남양만) 방조제에 따른 아산만의 조석변화

박 문 진\*

충남대학교 지구환경과학부

### Tidal Characteristics Change in the Asan Bay due to the Hwaong (Namyang Bay) Tidal Barrier

MOON-JIN PARK\*

School of Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

화옹(남양만) 방조제 건설에 따른 아산만내 조석의 평균적 변화를 알아보기 위하여 평택 및 안흥의 1993년~2006년 조석자료중 분석가능한 자료를 조화분석을 통하여 각 분조의 진폭 및 지각을 구하여 분석한 결과, 아산만 외해에 위치한 안흥의 반일주조의 진폭은 감소 경향을 보이나, 아산만내 평택의 반일주조의 진폭은 증가하는 현상을 보였으며, 특히 화옹방조제 완공 전후 2002년~2003년 평택 반일주조의 급격한 증가현상을 보였다. 이는 아산만내의 조석변화가 외해와 무관하게 존재함을 의미하며, 화옹방조제 건설과 관련이 있음을 시사한다. 아산만의 조석변화는 조석 진행방향을 체절한 금강하구언의 경우 또는 'choking effect'를 없앤 영산강 하구언의 반일주조 진폭증가와 달리 만내 방조제 건설로 조석진폭 증가현상이 발생할 수 있음을 시사한다. 완공전에 비하여 완공 후 조석변형 척도  $M_4/M_2$  비율은 증가하고,  $M_2$ ,  $M_4$ 분조의 지각차는 감소하였다. 따라서, 아산만 조석은 화옹방조제 건설이후 조차의 증가와 창조시간 감소로 인한 창조류 강화로 더 많은 퇴적물의 만내 유입을 유도할 수 있다고 생각된다.

In order to identify the change of tidal characteristics on average in the Asan Bay due to the construction of the Hwaong (Namyang Bay) tidal barrier (HTB), the tide data at Pyongtack (PT) and Anheung (AH) for the periods from 1993 to 2006 were analyzed using the harmonic analysis method, and major and shallow water tidal constituents were compared. The semidiurnal tidal amplitudes at PT increased while those at AH decreased after the tidal barrier construction. In particular, the amplitudes at PT increased abruptly during the period of 2002~2003 when HTB was completed. On the other hand, the amplitudes of the diurnal tides at PT and AH showed minimal change. This suggests that the tidal characteristics change in the Asan Bay may be related to the construction of HTB. The cause of this change is different from either blocking the tidal wave propagation by the Keum River tidal barrier or removing 'choking effect' by the Yeongsan River tidal barrier. The  $M_4/M_2$  ratio increased and their phase difference decreased after the completion of HTB. Accordingly, these changes may result in increase of tidal range, decrease of the flood duration and increase of the flood current velocity, inducing more sediments into the Asan Bay.

**Keywords:** Tidal Barrier, Harmonic Analysis, Tidal Constituents, Asan Bay, Tidal Distortion

### 서 론

아산만(Fig. 1)은 1970년대에 아산방조제(1970.12~1973.12), 삽교방조제(1976.12~1979.11), 남양방조제(1971.4~1973.12), 1980년대에 대호방조제(1981.1~1985.12), 석문방조제(1987.7~1995.12) 건설에 연이어, 1990년대에 화옹(남양만) 방조제(1991.9~2002.3)등이 건설되어 많은 해안지형의 변화가 있어왔다. 아산만은 대조시 조차가 8 m 이상, 조류가 1 m/s 등 조류

가 우세한 대조차 해역(Park, 2000)으로 조석의 해수유동에 미치는 영향이 주도적이다. 따라서, 장기간에 걸친 다양한 해안선 변화는 필연적으로 조석의 변화를 유발할 수 있으며, 이는 해수 유동변화를 수반하게 된다.

이러한 조석의 변화 및 해수유동 변화는 해양생태계, 오염물질 부유물질 및 퇴적물이동에 영향을 줄 수 있다. 그러나, 아산만내 해안선 변화에 따른, 관측자료에 의한 조석변화에 관한 연구는 아직 보고되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 장기간의 조석자료 분석을 통해 화옹(남양만) 방조제 건설에 따른 아산만 조석체계의 평균적 변화를 알아보고자 한다.

\*Corresponding author: mpark@cnu.ac.kr

조석자료 및 분석방법

아산만 내해 및 외해의 조석 및 조류자료는 여러 지점에 존재하나 아산만의 해안선 변화에 따른 조석체계의 변화를 알아보고자 하는 본연구의 목적에 부합하는 장기간의 연속적 자료는 소수의 지점에만 존재하며, 조류의 경우는 장기간의 연속자료의 부재로 인하여 제외되었다. 아산만내 평택(36°58'N, 126°49'E) (Fig. 1)에서 국립해양조사원의 장기간 조석자료는 1993년~1995년, 2000년~2006년에 존재한다. 또한, 아산만내의 조석변화를 외해와 비교하기 위하여, 황해에서 아산만으로 진입하는 조석파의 진행경로에 위치한 안흥(36°40'N, 126°8'E)의 1993년~2006년(2001년, 2003년은 자료부족으로 제외)과 보령(36°24'N, 126°29'E)의 1993년~1995년과 2006년(2004년, 2005년은 자료부족으로 제외) 조석자료를 이용하였다. 평택, 안흥과 보령의 매시 조석자료는 조화분석방법(Foreman, 2004)을 이용하여 매년 각 분조의 진폭(amplitude) 및 지각(phase lag)을 구하였다. 화옹방조제 건설이 조석에 미치는 영향을 구체적으로 알아보기 위하여 본 연구에서는 평택, 안흥과 보령에서 관측된 1993년~1995년 조석자료와 화옹방조제 건설 후인 2004년~2006년까지의 조석자료의 조화분석 결과로부터  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  등 주요분조와 천해분조(shallow water tide)인  $M_4$ 를 분석하였다. 아산만은 대체로 수심 20 m 이하의 천해로서 외해의 조석이 천해로 진입할 경우 운동 및 연속방정식의 비선형항(nonlinear term)에 의한 비선형적효과(nonlinear effect)로 천해분조 및 복합

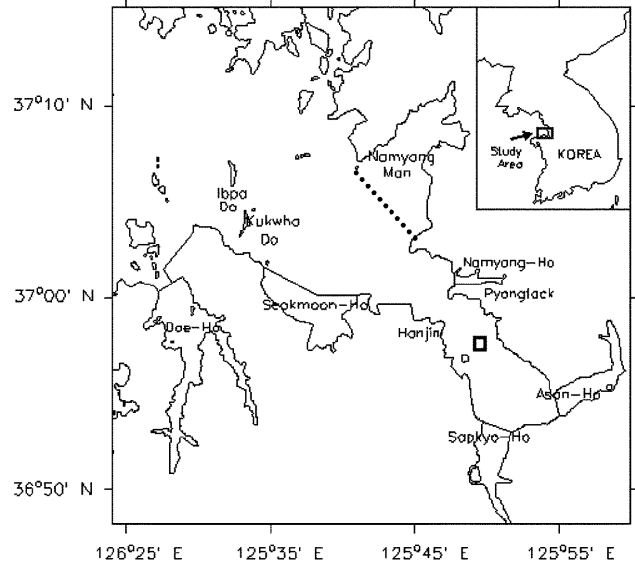


Fig. 1. The Asan Bay showing the Hwaong tidal barrier (HTB) marked by the dashed line and the Pyongtack tidal station (PT) marked by the square.

조(compound tide)를 발생시키며 이는 조석의 변형을 유발하게된다. 반일주조가 우세인 해역에서  $M_2$ 와 최대 천해분조인  $M_4$ 의 비율,  $M_4/M_2$ 는 연구해역 조석의 변형(tidal distortion) 정도를 측정

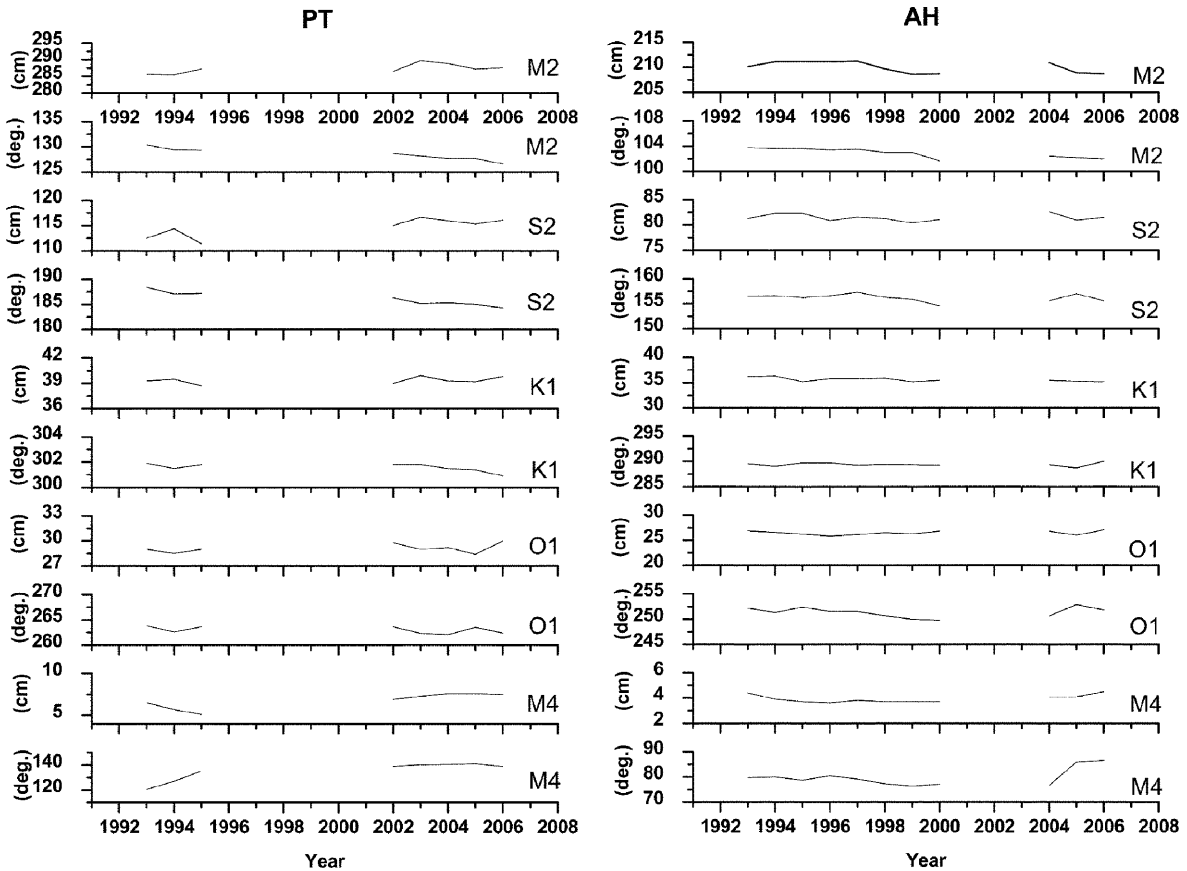


Fig. 2. Amplitudes and phase lags of major tidal constituents and a shallow water constituent at Pyongtack (PT) and Anheung (AH) from 1993 to 2006.

하는 주요도구로 사용되어왔으며(예, Aubrey and Speer, 1985; Speer and Aubrey, 1985; Zarillo and Park, 1987),  $M_2$ ,  $M_4$ 의 지각관계는 창조 또는 낙조우세 및 지속시간 판별에 이용되어왔다.

### 아산만 조석의 변화

평택과 안흥의 1993년~2006년 자료중 관측자료가 존재하는 조석자료의 조화분석결과로부터 얻은  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  등 주요분조와 천해분조  $M_4$ 의 진폭 및 지각의 연도별 변화는 Fig. 2와 같으며, 화옹방조제 완공 전후 두 지점의 조석의 평균은 Table 1과 같다. 우선 조석의 진행경로에 위치한 안흥에서  $M_2$ 의 진폭 및 지각은 1993년~1995년에 비하여 2004년~2006년 감소하는 추세를 보이며(Fig. 2, Table 1),  $S_2$ 의 경우도 평균적으로 변화가 거의 없다고 생각된다. 또한,  $K_1$ 의 진폭은 감소추세를 보이나, 지각 및  $O_1$ 의 진폭 및 지각은 변화가 미미하게 나타났다. 천해분조  $M_4$ 의 진폭의 변화는 미미하나, 지각은 1993년~1995년에 비하여 2004년~2006년 증가한 것으로 나타났다. 안흥조석의  $M_2$  진폭의 감소현상과 일주조의 미약한 변화를 확인하기 위하여 안흥과 가장 근접한 거리에 위치한 보령의 1993년~1995년 평균과 2006년 조석을 비교한 결과는 Table 2와 같다. 보령조석의  $M_2$  분조의 진폭과 지각은 모두 감소하나,  $S_2$  분조의 진폭은 변화가 거의 없으며, 일주조의 변화는 미약한 것으로 나타났는데 이는 안흥의 조석변화와 매우 유사하다. 즉, 아산만 외해의 조석은 화옹방조제 완공전후  $M_2$ 의 감소 및  $S_2$  및 일주조의 미미한 변화를 보인 것으로 나타났다.

평택조석의 경우 1993년~1995년에 비하여 2004년~2006년  $M_2$ ,

$S_2$  분조의 진폭은 증가하고 지각은 감소하는 경향을 보이나, 일주조인  $K_1$ ,  $O_1$ 의 진폭 및 지각변화는 미약하다. 특히, 화옹방조제(1991.9~2002.3) 완공전 2002년에 비하여 완공후 2003년  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  분조 진폭의 급격한 증가를 보였으며, 천해분조  $M_4$ 의 진폭도 증가하는 경향을 보였다. 안흥조석의  $M_2$ 의 경우 진폭이 2004년 증가하였다가 감소하는 경향을 보였으나, 이러한 경향은 평택의  $M_2$ 의 2003년 증가하였다가 이후 1993년~1995년에 비하여 증가를 유지하는 경향과 일치하지 않으며,  $S_2$ 의 경우 안흥에서 진폭의 변화가 뚜렷하지 않으나 평택에서는 증가하는 경향이 뚜렷하다고 생각된다. 이와 같이 아산만 내부의 조석변화가 외해와 다른 현상을 보인것은 연구기간중 아산만의 조석이 외해의 영향이 아닌 아산만 내부, 즉 화옹방조제 건설의 영향을 받았음을 시사한다.

화옹방조제 완공 후 완공전에 비하여 아산만내에서 반일주조의 지각감소와 진폭증가, 일주조의 미미한 변화는 금강하구연 완공전후(권과 이, 1999), 목포 영산강 하구연등의 방조제 건설전후(Kang, 1998; Byun, 2004) 나타난 현상과 유사하나 그 발생여건은 같지 않다. 즉, 금강하구연은 조석의 진행경로에 위치하며, 영산강하구연의 경우 하구연내부의 거대 내만으로 연결되는 좁은 수로의 차단으로 'choking effect'를 제거해 진폭의 증가가 발생한 반면, 아산만 조석의 변화는 남양만 조간대 해역 저수량(intertidal volume storage) 제거와 창조시 조간대 해역의 조석과 진행 지연과 이에 따른 에너지 손실이 방조제건설로 사라져, 고조시각의 지연감소와 진폭 증가가 나타난 결과로 해석될 수 있다.

황해의 조석과는 우리나라 서해안으로 북상하여 아산만으로 진입하므로 그 변화의 영향이 아산만내로 그대로 전달된다고 가정

**Table 1.** Comparison of tidal characteristics at Pyongtack (PT) and Anheung (AH) before and after the completion of the Hwaong tidal barrier in the Asan Bay

	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$		$M_4$	
	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)
PT										
A	287.9	127.3	115.8	184.9	39.4	301.3	29.2	262.7	7.6	140.1
B	286.1	129.7	112.8	187.6	39.2	301.7	28.8	263.3	5.8	127.6
A-B	1.8	-2.4	3.0	-2.7	0.3	-0.5	0.4	-0.7	1.8	12.5
AH										
A	209.5	102.2	81.7	156.1	35.3	289.3	26.6	251.8	4.2	83.0
B	210.8	103.7	82.0	156.4	35.9	289.4	26.6	252.0	4.0	79.5
A-B	-1.3	-1.5	-0.3	-0.4	-0.6	-0.1	0.1	-0.2	0.2	3.5
PT-AH										
A	78.4	25.1	34.1	28.8	4.1	11.9	2.6	10.9	3.3	57.1
B	75.3	26.0	30.8	31.1	3.3	12.3	2.3	11.4	1.8	48.1
A-B	3.0	-0.9	3.3	-2.3	0.8	-0.4	0.3	-0.5	1.6	9.0

Note; A and B represent the period from 2004 to 2006 and the period from 1993 to 1995, respectively.

**Table 2.** Comparison of tidal characteristics at Boryong (BR) before and after the completion of the Hwaong tidal barrier in the Asan Bay

	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$		$M_4$	
	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)	amp (cm)	phase (o)
BR										
A	226.0	94.4	88.2	148.6	35.6	285.8	27.3	247.4	14.8	102.4
B	229.7	95.9	88.3	149.9	35.9	285.2	26.7	248.1	12.4	110.0
A-B	-3.7	-1.5	-0.1	-1.3	-0.3	0.6	0.6	-0.7	2.4	-7.6

Note; A and B represent 2006 and the periods from 1993 to 1995, respectively.

하여 평택과 안흥의 분조의 진폭 및 지각차를 계산한 결과(Table 1), 외해의 안흥과 아산만내의 평택항의  $M_2$  분조의 차는 화옹방조제 완공전에 비하여 완공 후 진폭 3.0 cm 증가, 지각 0.9° 감소로 나타났다. 또한,  $S_2$  분조의 차는 완공 후 진폭 3.3 cm 증가, 지각 2.3° 감소로 나타났다. 일주조인  $K_1$ ,  $O_1$  분조는 반일주조에 비하여 상대적으로 미약한 진폭증가와 지각감소를 보였다. 이와 같은 결과는 아산만 외해역, 안흥의 영향이 아산만에 영향을 미친다고 생각할 경우에도 아산만 조석의 변화는 존재하며, 아산만내의 반일주조의 진폭증가 현상이 오히려 증대됨을 의미한다.

남양만 조간대의 제거는 아산만 천해분조에도 영향을 미친 것으로 나타났다. 평택항에서 조석의 비선형적 조석변형(nonlinear tidal distortion) 지수인  $M_4/M_2$  비율은 완공 전 0.020에서 완공 후 0.026으로 약 32% 증가하였고,  $M_2$ ,  $M_4$  분조의 지각차는 완공 전 131.8° 이나 완공 후 114.5°로 나타났다. 이는  $M_2$ ,  $M_4$  분조의 고조시각의 차이가 줄어들어 창조시간이 짧아지고 낙조시간이 길어졌음을 의미한다.  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 지각차가 0° 또는 180°일 경우 창, 낙조시간이 동일한 대칭형조석(symmetric tide)이 되나, 0°보다 크고 180° 미만일 경우 창조시간이 짧고 낙조시간이 길어 창조류가 강한 창조우세형(flood dominant) 조석, 180°보다 크고 360° 미만일 경우 낙조시간이 짧고 창조시간이 길어져 낙조류가 강한 낙조우세형(ebb dominant) 조석이 나타나 비대칭형조석(asymmetric tide)이 된다(Friedrichs and Aubrey, 1988).

창조우세형 조석에서 지각차가 90° 일 경우 비대칭형이 강화되 창조시간이 가장 짧게 되는데, 본 연구결과에 의하면 아산만 조석은 화옹방조제 건설로 지각차가 131.8°에서 114.5°로 감소하여 창조시간이 더 짧아져 비대칭형 정도가 강화되고, 따라서 창조류 우세가 좀더 진행된 상태인 것으로 생각된다. 이를 좀더 구체적으로 알아보면 평택항의  $M_2$ ,  $M_4$ 의 진폭 및 지각으로부터 구한 방조제 완공전(1993년~1995년) 평균적 창, 낙조 시간은 각각 6.1, 6.3 시간이었으나, 완공후(2004년~2006년) 6.0, 6.4 시간으로 나타나, 더욱 짧아진 창조시간으로 창조류 우세가 강화된 것으로 나타났다. 또한,  $M_2$ ,  $M_4$  진폭 및 지각차 변화에 따른 조위변화에 따라 고조위는 상승(+2.7 cm), 저조위는 하강(-1.3 cm)하여 조차가 4 cm 증가하게 되는 것으로 나타났다.

### 결론 및 토의

아산만내 화옹(남양만) 방조제 건설에 따른 조석변화를 알아보기 위하여 평택 및 안흥의 1993년~2006년 조석자료중 분석 가능한 자료가 존재하는 해당년도에 대하여 조화분석을 통해 각 분조의 진폭과 지각을 구하여 시계열자료를 분석한 결과, 아산만 외해에 위치한 안흥의 반일주조의 진폭이 감소 또는 변화가 미미한데 비하여, 외해의 영향을 받는 아산만내 평택의 반일주조의 진폭은 완공전에 비하여 완공후 증가하는 경향을 보였다. 이같은 결과는 아산만내의 반일주조의 진폭증가가 외해의 영향과 무관하게 만내의 요인에 의하여 발생함을 시사하며, 특히, 2002년에 비하여 완공후 2003년 급격히 증가하는 현상을 보인것은 아산만의 조석이 화옹방조제 완공의 영향을 받았음을 시사한다. 화옹방조제 건설후 반일주조 진폭의 증가는 방조제 건설에 따라 남양만 조간대 해역의 조간대저수량(intertidal volume storage) 제거되어, 창조시 조

간대 해역 조석과 진행 지연 감소와 이에 따른 에너지 손실 감소로, 지각감소와 진폭증가가 나타난 결과로 해석될 수 있다. Park (2006)은 아산만해역을 단순화한 모델시형을 이용한 3차원 수치 모델실험을 통하여 아산만 외만의 일부를 방조제등의 건설로 제거할 경우 아산만내 반일주조의 진폭이 증가하는 현상을 보인바 있으며, 이에 관한 추가적 연구가 현재 진행중이다. 또한, 안흥 및 보령의 반일주조의 진폭 및 지각감소는 연구기간중 진행되어온 새만금방조제등 안흥주변의 해안지형의 변화에 따른 것으로 보이나, 정확한 요인분석을 위하여 향후 추가적 연구가 필요하다.

안흥의 경우 반일주조의 진폭이 감소하는데 반해  $M_4$ 의 진폭은 증가하는 경향을 보이는데, 이는  $M_4$ 가 천해분조로서 반일주조가 천해로 진입할 경우 앞서 언급한 비선형 효과에 의하여 외해보다는 수심이 얇은 연안에 가까운 지형에 의하여 발생하기 때문인 것으로 보인다. 또한, 아산만에서 반일주조와 천해분조인  $M_4$ 의 진폭이 동시에 증가함은 이같은 변화가 준설등으로 인한 수심증가에 의한 것이 아닐 것임을 시사하며, 오히려 아산만내 물리적 환경 변화규모를 생각할 때 화옹방조제 건설로 인한  $M_2$  진폭증가가 만내의 여타 환경 변화보다 중요하게 작용하였을 것으로 생각된다.  $M_4/M_2$  비율의 증가와  $M_2$ ,  $M_4$ 분조의 지각차의 감소로 인하여 아산만 조석은 화옹방조제 건설이후 창조시간이 더 짧아져 비대칭형 정도가 강화되고, 따라서 창조류 우세가 좀더 진행된 상태인 것으로 생각된다. 기존 연구 결과(Park, 2000)에 의하면 아산만은 창조류 우세에 의한 퇴적물의 순수입 현상을 보인바 있으며, 강화된 창조류는 퇴적물의 아산만내로의 순수입을 증가시키는 결과를 낳게되며, 이는 아산만내의 사퇴형성 및 항로유지등에 영향을 줄 것으로 예상된다.

### 사 사

본 연구는 2005년도 충남대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 심사위원의 심사의견에 감사드립니다.

### 참고문헌

권효근, 이상호, 1999. 하구언 수문작동으로 인한 금강하구역의 물리적 환경변화, I. 평균해수면과 조석, 한국해양학회지 바다, 4: 93-100.

Aubrey, D.G. and P.E. Speer, 1985. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part I: Observations, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 21: 185-205.

Byun, D.S., X.H. Wang and P.E. Holloway, 2004. Tidal characteristic adjustment due to dike and seawall construction in the Mokpo coastal zone, Korea, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 59: 185-196.

Foreman, M.G.G., 2004. *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*, Pacific Marine Science Report, 77-10, Institute of Ocean Sciences, Canada, 66pp.

Friedrichs, C.T. and D.G. Aubrey, 1988. Nonlinear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 26: 521-545.

Kang, J.W., 1999. Changes in tidal characteristics as a result of the

- construction of sea-dikes/sea-walls in the Mokpo coastal zone in Korea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **48**: 429–438.
- Park, M.-J., 2000. Modeling of sediment transport and sand bank formation in a macrotidal sea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **35**: 1–10.
- Park, M.-J. 2006. Tidal characteristics in the Asan Bay, Korea, 2006 Joint Assembly, American Geophysical Union, May 23-26, Baltimore, MD, USA.
- Speer, P.E. and D.G. Aubrey, 1985. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part II: Theory, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **21**: 207–224.
- Zarillo, G.A. and M.-J. Park, 1987. Sediment transport prediction in a tidal inlet using a numerical model: application to Stony Brook Harbor, Long Island, New York, USA, *J. Coastal Res.*, **3**: 429–444.
- 
- 2008년 7월 30일 원고접수  
2008년 8월 29일 수정본 채택  
담당편집위원: 이호진