

하구연 수문작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 I. 평균해수면과 조석

권효근 · 이상호
군산대학교 해양학과

Physical Environment Changes in the Keum River Estuary by the Dyke Gate Operation I. Mean Sea Level and Tide

HYOKEUN KWON AND SANGHO LEE
Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

금강 하구역의 해수면 변화에 미치는 하구연 수문 작동의 영향을 알아보기 위하여 군산 내항과 외항의 조석자료를 분석하여 비조석 해수면, 평균해수면 및 주요분조의 조화상수를 구하였다. 비조석 및 평균해수면은 하구연 수문 작동이후 내항과 외항에서 낮아졌고, 특히 내항에서 급격한 비조석 해수면의 하강을 보였다. 이러한 비조석 해수면의 감소로 내항과 외항사이의 평균해수면 구배가 변화되었으며, 이는 주로 하구연으로부터 담수유출량이 감소하여 발생한 것으로 해석되었다. M_2 와 S_2 분조의 진폭은 내항에서 수문작동 후 급격히 증가하였고, 위상은 다소 감소하였다. O_1 과 K_1 분조의 위상과 진폭은 변화가 미약하였다. 이러한 반일주조 진폭의 큰 변화는 입사파와 하구연에서 반사된 파의 중첩에 의한 것으로 해석된다.

Analyzing the tide data taken at Kunsan Inner and Outer ports, non-tidal and mean sea level and harmonic constants of major constituents are investigated to examine the effects of the dyke gate operation on the sea level change in Keum River estuary. Non-tidal and annual mean sea levels decrease at Kunsan Inner and Outer ports after the dyke gate operation, especially showing an abrupt drop of non-tidal sea level at Kunsan Inner port. This non-tidal sea level drop results in the mean sea level gradient change between the inner and outer port, which can be mainly explained in terms of the decrease of river discharge from the dyke. Amplitudes of the M_2 and S_2 tides at the Inner port increase after the dyke gate operation, showing an abrupt jump, and phases of both tides slightly decrease. Amplitude and phase of the K_1 and O_1 tides show slight changes after the dyke gate operation. This significant change of semidiurnal tide amplitude is believed as a result of superposition of incident tidal wave and reflected tidal wave from the dyke.

서 론

금강은 한반도 서해 중부에 위치하며, 충청 남·북도와 전라 북도의 경계를 이루는 하천으로 총 연장이 400 km, 접수 면적이 약 10,000 km²이며, 년간 5.0~6.4×10⁹ m³의 담수를 서해로 유출한다(Shubel *et al.*, 1984). 대조차가 약 7.5 m인 금강하구는 폭이 약 2 km, 수심은 평균해면 하 4~10 m이고(국립해양조사원, 1996), 1990년과 1992년부터 시작된 북·남측도류제 공사로 인하여 남수로와 북수로로 나뉘게 되었다(Fig. 1). 남수로와 북수로 사이에는 유부도를 포함하는 대죽 사주가 발달되어 있으며, 북수로 북측에는 동서방향의 간사지가 육지에서부터 개야도까지 발달되어 해수의 흐름을 제한하고 있다.

군산내항 검조소의 상류 4 km지점에 건설된 금강하구연은 1983년 착공되어 1988년 완공되었으나 하구폭의 절반에 해당하는

수문은 개방해 두었었다. 1994년 8월 31일 02시에 배수갑문을 달았으며, 이후로 갑문작동이 정상 가동되어 담수를 저수하는 금강호가 형성되었고 금강호의 수위에 따라 매일 소량의 담수를 방류하며 장마시기에는 홍수조절을 위해 다량의 담수를 방류한다. 하구연이 건설되기 전에는 금강하구에서 약 63 km 상류인 규암까지 조석진동이 영향을 미쳤으며(최와 안, 1985), 금강상류로 염분이 확산되었으나 하구연 수문을 정상 가동한 이후 담수와 외해수가 서로 차단되는 인위적 담수방류 환경에 놓이게 되었다. 이러한 인위적으로 가해진 급격한 하구환경의 변화는 하구역의 조석과 조류 및 평균해면과 하구순환형태의 변화를 유발할 것으로 기대되어 하구역의 물리적 환경을 조사하게 되었으며, 본 연구와 더불어 하구역의 물성구조 및 하구유형에 대한 연구(이 등, 1999)가 함께 진행되었다.

금강하구연 건설 전·후의 해수면 변화와 조석체계에 대한 연구들을 보면 박(1995)은 1960~1993년까지의 조위자료를 분석하였

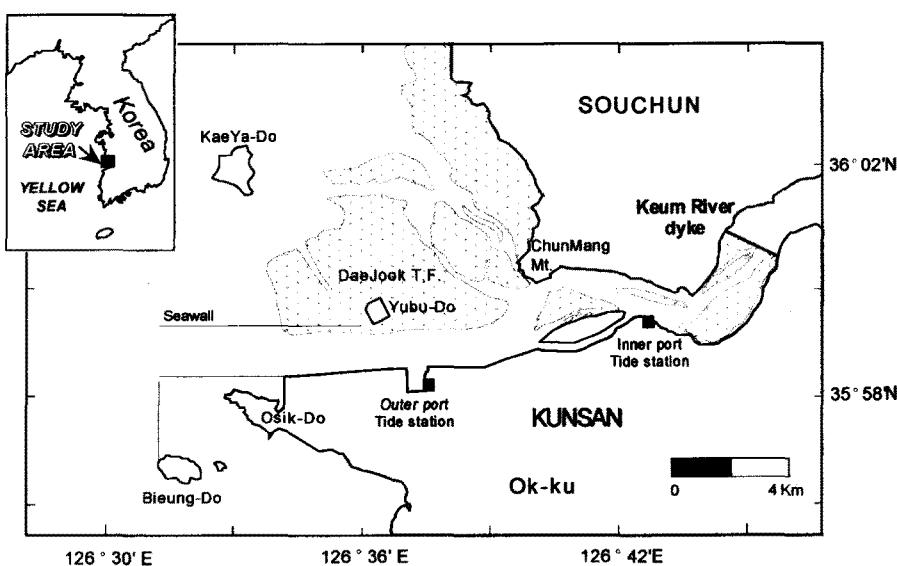


Fig. 1. Location map of tide stations (closed squares) in Keum River estuary. Dotted areas denote the dry bank. Thick line denotes the Keum River dyke, and thin straight lines are the seawalls.

을 때 금강하구언 공사에 의한 조석체계의 변화를 찾을 수 없으며 평균해수면이 소폭 증가한다고 하였다. 금강 하구언 건설에 따른 조석체계의 변화에 대해서 최와 오(1987)는 1차원 수리역학 모델을 이용하여 군산 내항에서 M_2 분조는 7 cm, S_2 분조는 6 cm 증가하며 평균대조차가 약 15 cm 증가될 것임을 예측하였다. 또한 군산항 건설사무소(1986)가 하구언 축조 후 금강하구역을 대상으로 수치 실험한 예측결과를 보면 대조기의 평균해수면은 내항에서 -4.0 cm, 외항에서 -2.7 cm, 그리고 평균진폭(반조차)은 각각 +2.9 cm, -6.5 cm의 변화량을 갖는다고 하였다. 최근 하구언 건설 후인 1997년 8월 백중사리를 전후하여 서해안에서 해수범람으로 인해 가옥, 농경지 및 공공시설 등에 침수 피해가 있었고 금강 하구역에서도 이상고조가 60 cm에 달하는 것으로 보고되었으며 이 시기의 예보조위가 지난 30년간의 고극조위에 달하여 군산지역의 조위가 높아졌음을 보고한 바 있다(윤 등, 1998). 안과 오(1995)는 만 내부에서 진폭의 증가요인이 반폭의 협소화와 수심이 낮아졌기 때문이라고 제시하여 금강하구언의 조석체계에 대하여 재검토의 필요성을 갖게 하였다. 수문을 닫은 이후의 관측조석자료를 분석한 권과 이(1997)에 따르면 1991년부터 1995년까지 5년간 장기적인 평균해수면 변화는 점차 감소하는 경향을 나타내지만, 하구언 수문을 닫은 1994년과 1995년의 평균해수면의 하강율은 하구언 수문을 닫기 이전의 하강율보다 크고, 또한 반일주조의 진폭이 증가한다고 하였다. 서(1998)는 수문을 닫기 전 6개월과 닫은 후 6개월씩 총 12개월에 걸쳐 군산내항의 조위자료를 조화분해하여 반일주조의 진폭증가를 보고한 바 있다.

본 연구의 목표는 하구언 건설 후 금강하구의 평균해수면과 조석체계에 대한 예측결과들이 서로 상이한 점에 착안하여 하구언 수문을 막기 전과 후의 실측 조위자료를 분석하여 수문작동으로

인한 평균해수면의 단기적 변동과 비조석 해면의 변동 및 조석체계의 변동을 구체적으로 살펴보고 해수면 변화의 원인에 대해 검토해 보고자 한다.

자료 및 방법

금강 하구역의 평균해수면과 조석체계의 변화를 연구하기 위해 군산 내항 검조소와 군산 외항 검조소의 조석자료를 분석하였다 (Table 1). 조위자료는 일정한 조고의 기준면에 대하여 보정되어야 신뢰성을 갖는다. 본 연구에서 이용된 1991년에서 1997년까지 자료는 국립해양조사원에서 군산 내·외항의 일정한 각 조고기준면에 대하여 보정한 후 제공된 자료이며, 본 연구에서는 조고의 기준면 변동 혹은 이에 대한 조고보정 자료는 제공받지 못하여 검토할 수는 없었다. 따라서 비조석 해면과 평균해면은 각 검조소에서의 시간에 따른 변화와 두 검조소간의 공간적 해면차이의 상대적 변화만을 주로 조사하였다. 조석의 조화분석은 Easton(1977)의 "TIDCON"을 이용하여 조화상수를 구하였다. 수문을 닫기 전과 후 2년간의 자료를 각각 1개월과 6개월씩으로 자료를 나누어 분석하여 내·외항에서 주요 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)의 진폭과 위상을 각각 비교하였다. 장기분석은 1991년부터 1995년까지 1년단위의 자료를 분석하였다. 평균해수면은 검조자료에서 조석성분을 제거한 후 1개월, 6개월 혹은 연평균을 구하였으며, 조석성분을 제거하기 위하여 Low-pass filter '24G113' (Thompson, 1983)를 사용하였다. 평균해수면과 기상효과의 상관관계를 구하기 위해 군산기상대에서 1991년부터 1997년까지 관측된 해면기압, 기온, 강수, 풍속자료의 연 평균값을 이용하였다. 하구언 수문을 닫은 후 실제 담수 방류량은 하구언 수문을 작동한 농어촌진흥공사 금강사

Table 1. Analyzed data sets before and after the gate closing of Keum River dyke

Data	Duration	Source
Inner and Outer ports tide date	Before gate closing 1993. 3.~1994. 8. After gate closing 1994. 9.~1995. 3.	Long term variation 1991.1.~1997. 12.
River discharge	1994. 9.~1997. 9.	Rural Development Corporation
Meteorological data	1991~1997	Korea Meteorol. Adm.

업단에서 계산한 1994년 9월부터 1997년 9월까지의 월평균 방출량과 초당 방류량을 이용하였다.

비교적 해면의 변화

비조식 해수면의 변화 1991년부터 1997년까지 군산 내항의 7년간 연평균 해수면변화를 살펴보면(Fig. 2) 1991년부터 1995년까지 연평균 해수면은 점차 하강하는 경향을 보이나, 1996년부터 서서히 증가하고 있다. 7년간 연평균해수면 변화속에 특징적 현상은 1994년과 1995년 사이의 평균해수면 하강율(-8.8 cm/yr)은 1991년부터 1993년까지의 평균해수면의 하강율(-2.0 cm/yr)보다 크다는 점이며, 1994년은 금강하구언 수문이 작동하기 시작한 해이다. 본 연구에서는 수문작동의 영향으로 해수면이 어떠한 변화를 보였는지 알아보고자 한다. 군산항 건설사무소(1986)가 금강하구 및 인근 해역을 포함하는 광역수치모델을 사용하여 초기 추정한 하구언 건설로 인한 중조기의 평균 해수면 변화는 내·외항에서 -5.0 cm 과 -1.1 cm 이었다. 금강하구언 수문을 작동한 시기의 군산내항에서 실측자료를 분석하여 구한 1994년과 1995년 사이의 연평균 해면변화는 기존의 연구와 정성적으로는 일치하나 정량적으로 약 2배 정도 크다.

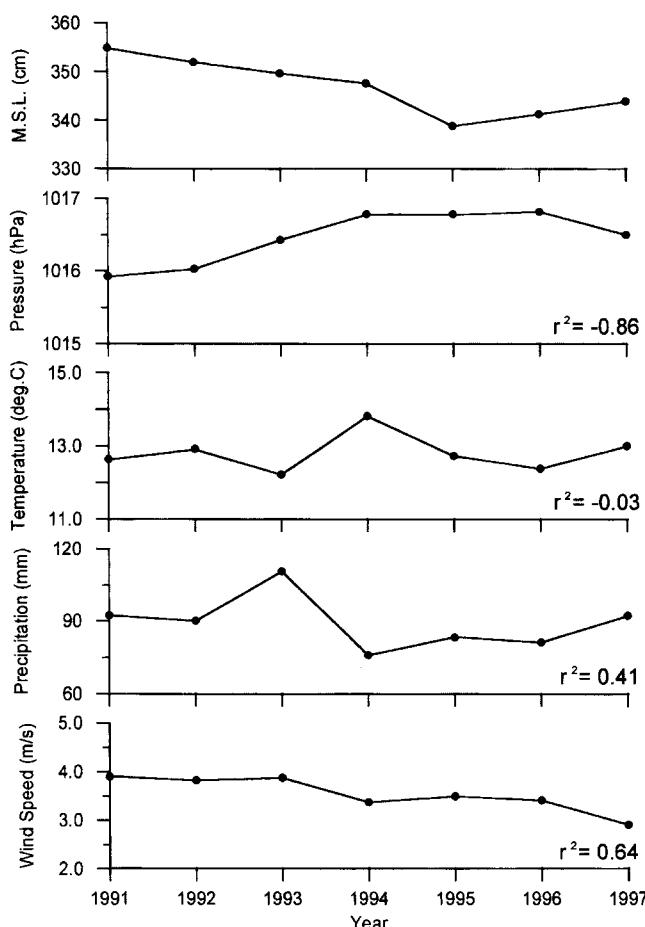


Fig. 2. Annual mean sea level at Kunsan Inner port and annual mean of meteorological variables observed at Kunsan Meteorological Station. r^2 indicates the correlation coefficient between mean sea level and meteorological variables.

하구언 수문작동이 조석외적인 해면에 어떠한 시간적 변화를 야기하는지 알아보기 위하여 조위자료에서 조석효과를 제거한 해수면변동을 검토하였다(Fig. 3). 군산내항과 외항에서 비조식 해수면변화는 온대지방의 전형적인 계절변화를 보이며 계절변화의 진폭은 약 50 cm 정도이고, 내항에서의 해면진동 형태가 8월 31일을 기준으로 달라졌으며 수문을 닫기 전보다 닫은 후에 수일 주기의 요동이 현저히 감소한 특징을 보인다. 가장 주목해야 할 현상은 금강하구언 수문을 작동한 1994년 8월 31일에 외항과 내항에서 비조식 해수면의 변화가 동시에 일어났으며, 외항보다는 내항에서 비조식 해수면의 급격한 하강이 뚜렷이 나타났다는 점이다. 이러한 현상은 조고기준면의 인위적 혹은 자연적 변화에 의한 것으로 보기는 어려우며, 하구언수문을 닫음으로 인해 금강상류와 하구역이 순간적으로 완전히 체결되어 하구환경이 급격히 변화된 효과를 반영한다.

금강 하구언의 수문작동 효과가 연단위의 해수면변화에 영향을 주는지 알아보기 위하여 하구언 수문을 막은 1994년에 8월 31일을 기준으로 전·후 1년 단위로 나누어 닫기 전과 닫은 후로 구분하고 연간 평균해수면을 구하였다(Fig. 3). 내항의 평균해수면은 닫기 전과 후에 각각 348.6 cm, 339.0 cm로 수문을 닫은 후에는 닫기 전보다 9.6 cm 하강하였고, 외항의 경우 평균해수면은 각각 364.6 cm, 363.2 cm로 외항 역시 수문을 닫기 전보다 1.4 cm 하강하였다. 본 연구에서 사용된 검조기록은 조고기준면에 대해 보정된 자료이므로 Fig. 2의 군산내항 연평균해수면의 변화에서 나타난 1994년과 1995년 사이의 변화가 주로 하구언 수문작동의 영향임을 알 수 있다.

수문작동의 직접적 효과는 비교적 짧은 기간동안에도 나타나야 함으로 이를 보기 위하여 막기 전·후 6개월간의 평균해수면을 각각 비교해 보았다(Table 2). 수문을 닫은 후의 평균해수면은 외항보다 내항에서 크게 나타나는데 6개월 동안의 변동은 수문을 닫기 이전에 비해 수문을 닫은 후에 내항에서 18.6 cm 낮아졌고 외항

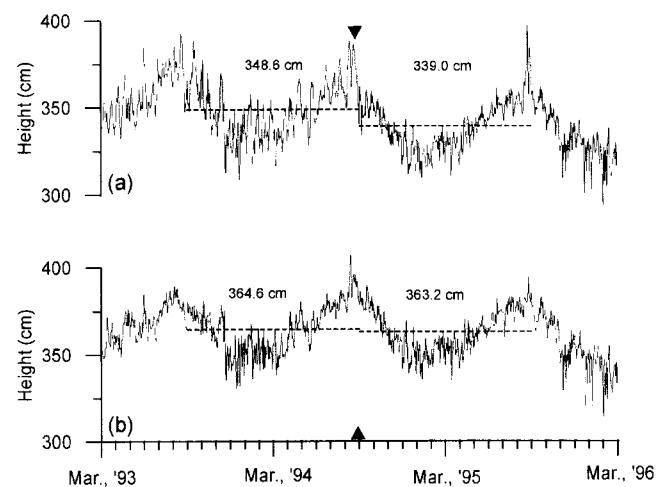


Fig. 3. Time series of low-pass filtered non-tidal sea level at (a) Kunsan Inner and (b) Outer ports from Mar., 1993 to Mar., 1996. Triangles indicate the closing date (Aug. 31, 1994) of the Keum River estuary dyke gate and the dashed lines on either side of the closing date are the mean sea levels during a period of one year before and after the closing date.

Table 2. Mean sea levels in cm and their differences calculated for every six months and one month data before and after the gate closing of the Keum River dyke at Kunsan Inner and Outer ports

Station	six months			one month		
	Before	After	Diff.	Before	After	Diff.
Kunsan Inner port	352.3	333.7	-18.6	370.1	349.9	-20.2
Kunsan Outer port	369.4	359.9	-9.5	388.1	380.1	-8.0
Difference	-17.1	-26.2	-9.1	-18.0	-30.2	-12.2

를 비교해 보면 6개월간의 자료에서는 수문을 막기 전에 -17.1 cm에서 막은 후에 -26.2 cm가 되어 내항과 외항사이의 평균해수면 차이가 9.1 cm정도 변화되었다. 이러한 결과는 내항과 외항사이의 평균해수면의 절대적 차이는 알 수 없으나 두 지점간의 상대적 평균해수면 구배가 변화되었음을 의미한다. 1개월 자료에서는 내항과 외항간의 평균해수면 차이가 12.2 cm 변화되었다.

조석의 변화

금강하구언 수문을 닫은 시기의 4일동안 조위변화를 살펴보았다 (Fig. 4). 금강하구언 수문을 닫은 직후인 1994년 8월 31일 2시 이후의 내항과 외항에서 관측된 저조위가 한 조석주기 전후의 저조위에 비해 충분히 낮아지지 못하였으며 상대적으로 상승한 것을 볼 수 있고, 이로인해 수위곡선이 매끄럽지 않다. 이러한 조위기록은 하구언 수문의 닫음이 조위의 변동을 야기시켰음을 보여주는 직접적 자료이다.

하구언 수문닫음으로 인한 조석체계의 변동을 분석하기 위하여 조화상수의 변화를 살펴보았다. 우선 조석의 연별변화를 파악하기 위하여 1991년부터 1995년까지 5년간의 조석자료를 1년 단위로 조화분해하여 주요 4대 분조의 조화상수를 살펴보았다 (Fig. 5). 진폭은 외항보다 내항에서 큰 폭으로 증가하였고 반일주조 성분이 일주조 성분보다 큰 폭으로 증가하였다. 위상의 경우 내항에서 반일주조 성분이 일주조 성분보다 크게 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 금강하구역에서 5년동안 전반적으로 조석의 진폭은 점차 증가

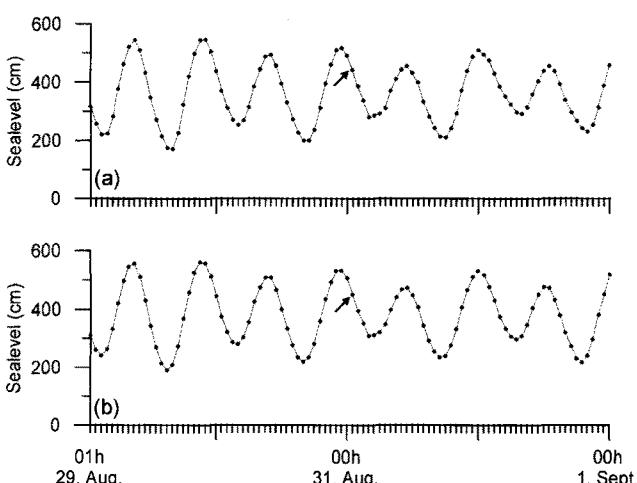


Fig. 4. Time series of observed sea level at (a) Kunsan Inner and (b) Outer port tide stations. Arrows indicate the closing time of Keum River dyke gate.

해왔으며 위상이 감소되고 있음을 알 수 있다.

이러한 장기간에 걸친 군산 하구역의 조석진폭과 위상변화에서 순간적으로 하구언을 체결한 하구언 수문닫음의 직접적 효과를 구별해보고자 하였다. 1993년 1월부터 1995년 12월까지 2년간에 걸쳐 1개월 단위로 조석자료를 나누어 조화 분해하였으며, 주요 4대 분조의 진폭과 위상변화를 살펴보았다 (Fig. 6). 1개월 단위 분석으로 인한 월별 진폭변동이 있으나 M_2 와 S_2 분조의 진폭은 내항에서 수문 작동 전·후에 걸쳐 확연히 증가하였으며 진폭의 변화가 수문 작동시기에 급격히 증가하였음을 알 수 있다. 외항은 변화가 비교적 작으나 수문작동시기에 큰 진폭변화의 경향은 나타난다. 이러한 반일주조 진폭의 급격한 변화는 앞서 분석한 금강 하구역의 장기적 진폭증가 경향속에 금강하구언 수문작동으로 인한 단기적인 진폭변화가 포함되어 있음을 의미한다. 그러나 O_1 와 K_1 분조의 경우 수문작동 전·후에 걸쳐 O_1 분조는 내·외항에서 소폭 증가하고 K_1 분조는 다소 감소하는 경향을 보이나 월별 진동폭의 범위내에 있어 수문작동의 효과로 구분되기는 어렵다.

다음으로 1개월 단위의 조화분석에서 발생하는 조화상수의 불안정성을 피하기 위하여 하구언 수문을 닫은 8월 31일을 기준으로 전·후 6개월 단위의 조석자료를 분석하였다 (Table 3). M_2 와 S_2 분조의 진폭은 내항에서 수문을 닫은 후에 15.8 cm와 11.6 cm 증가되었고, 외항에서는 약 4 cm 정도 증가하였다. O_1 와 K_1 분조는 내·외항에서 하구언 수문을 닫은 후에 소폭 감소되었다. 이로 인해 반일주조인 M_2 분조의 경우, 내·외항의 공간적인 진폭차는 닫기 전 -8.3 cm이었으나, 닫은 후에는 +3.6 cm가 되어 +11.9 cm 증가하였고 S_2 분조는 +6.9 cm 증가하였다. 일주조인 O_1 와 K_1 분조의 경우 내·외항의 공간적인 진폭 차의 변화는 +0.5 cm, +0.8 cm로 소폭 증가되었다.

M_2 와 S_2 분조의 위상은 내·외항에서 하구언 수문을 닫기 전보다 닫은 후에 확연히 감소하였으나, O_1 와 K_1 분조는 내·외항에서 하구언 수문을 닫은 후에도 별차이가 없다. 내·외항의 공간적인 위상 차는 M_2 분조의 경우 닫기 전에는 9.5° 이었으나 닫은 후에는 6.8° 로 위상 차의 변화는 -2.7° 이고, S_2 분조는 위상 차의 변화가 -4.2° 이다. O_1 분조의 경우 위상 차의 변화는 $+0.6^\circ$ 이고, K_1 분조는 -2.0° 이다.

6개월 단위의 조석자료로 분석한 본 연구결과에 의하면, 진폭증가는 주로 하구언 수문작동으로 인한 급격한 단기적 변화를 나타낸다. 하구언 수문작동 이후, M_2 와 S_2 분조 진폭의 증가된 양의 합은 약 27 cm에 달하며, 이는 대조차를 증가시킨다. 한편 하구언 수문작동을 전후로 연평균해수면은 내항에서 9.6 cm 낮아졌다 (Fig. 3a). 따라서 M_2 와 S_2 분조만을 고려했을 때 대조시 만조위

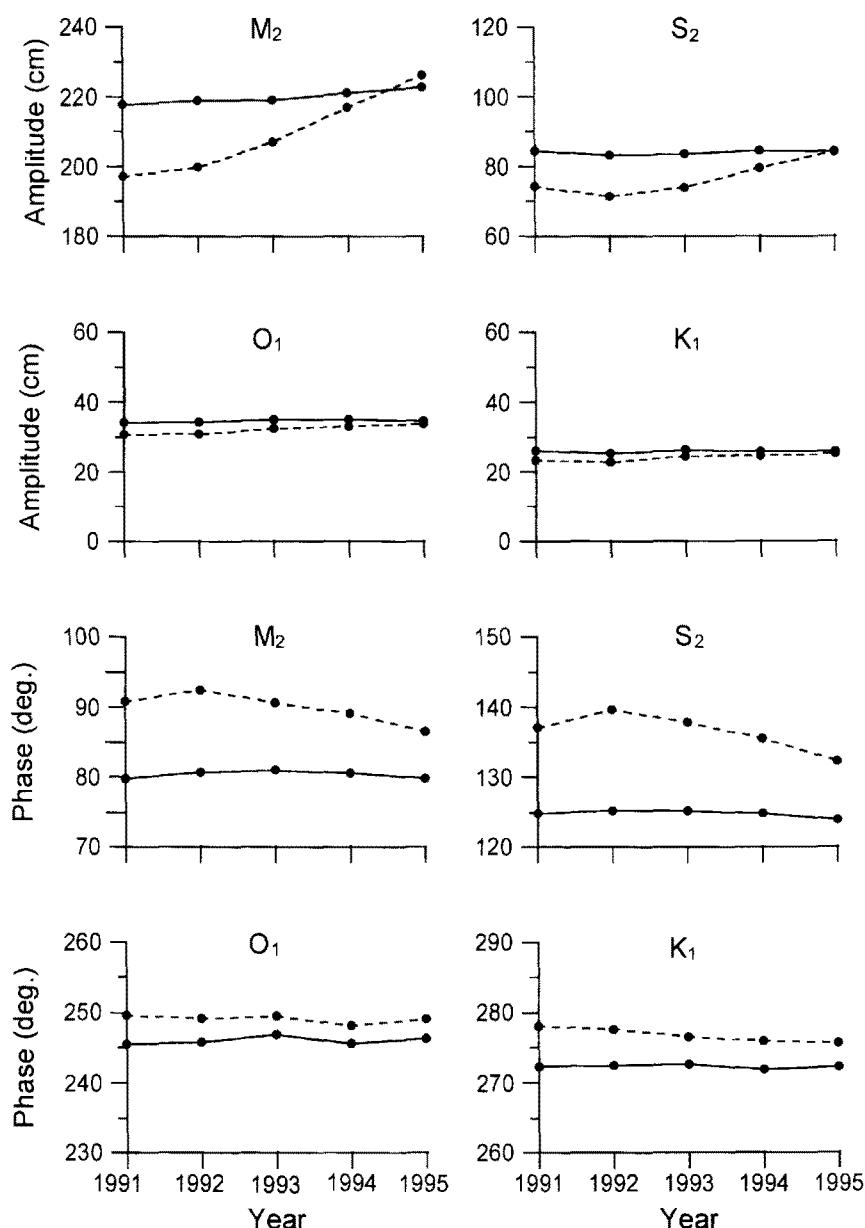


Fig. 5. Annual variations of harmonic constants for major four tidal constituents at Kunsan Inner port (dashed line) and Outer port (solid line) from 1991 to 1995.

는 평균적으로 약 17 cm 이상 상승하게 된다. 이러한 조위의 상승은 1997년 8월의 백중사리파와 같이 폭풍성 해일 등의 기상조석이 충첩되면(윤 등, 1998) 해수면 상승 및 해수범람을 일으키는데 중요한 요소가 될 것으로 사료된다.

토의 및 결론

본 연구에서 금강 하구역의 연평균 해수면은 1991년부터 1995년까지 점차 낮아졌으나 금강하구안 수문작동이 시작된 1994년 8월 31일에 내·외항의 비조석 해수면이 급격히 낮아지는 변화가 뚜렷이 발생하였음을 밝혔다. 이러한 비조석 해수면의 변화는 하구역의 평균해수면 변동에 영향을 주고 있으며, 이로 인해 군산내항과 외항간의 평균해수면 차이가 약 8~9 cm 정도 변화되었고 평균해수면의 기울기가 변화되었다. 하구안 수문작동으로 어떻게 비

조석 해수면이 변화되었는지 알아보기 위하여 해수면 변동요인들을 검토해보기로 한다.

평균해수면 변동에 영향을 미치는 요소는 우선 기상변화를 고려할 수 있으며 해면기압과 기온, 강수량, 풍속 등을 들 수 있다. 1994년과 1995년 사이에 금강하구역의 급격한 해면변화를 야기시킬 수 있는 원인을 알아보기 위해 1991년부터 1997년까지 연평균 해수면과 기상요소의 상관관계를 구하였다(Fig. 2). 해면기압의 경우 상관계수는 -0.86으로 좋은 상호 반작용을 나타내나, 1994년과 1995년의 연평균 해면기압은 1016.8 hPa로 변동이 없다. 일반적으로 해면기압 1 hPa의 증가는 해수면 1 cm의 감소를 유발시키는데 해면기압으로는 1994년과 1995년의 평균해수면이 약 9 cm 감소한 것을 설명하기 힘들다. 해면변동과 풍속과는 상관계수가 0.64로 온도와 강우량에 비해 높은 상관값을 나타내나 1994년과 1995년의 풍속증가량은 0.2 m/s로 평균해수면 변동에 직접적

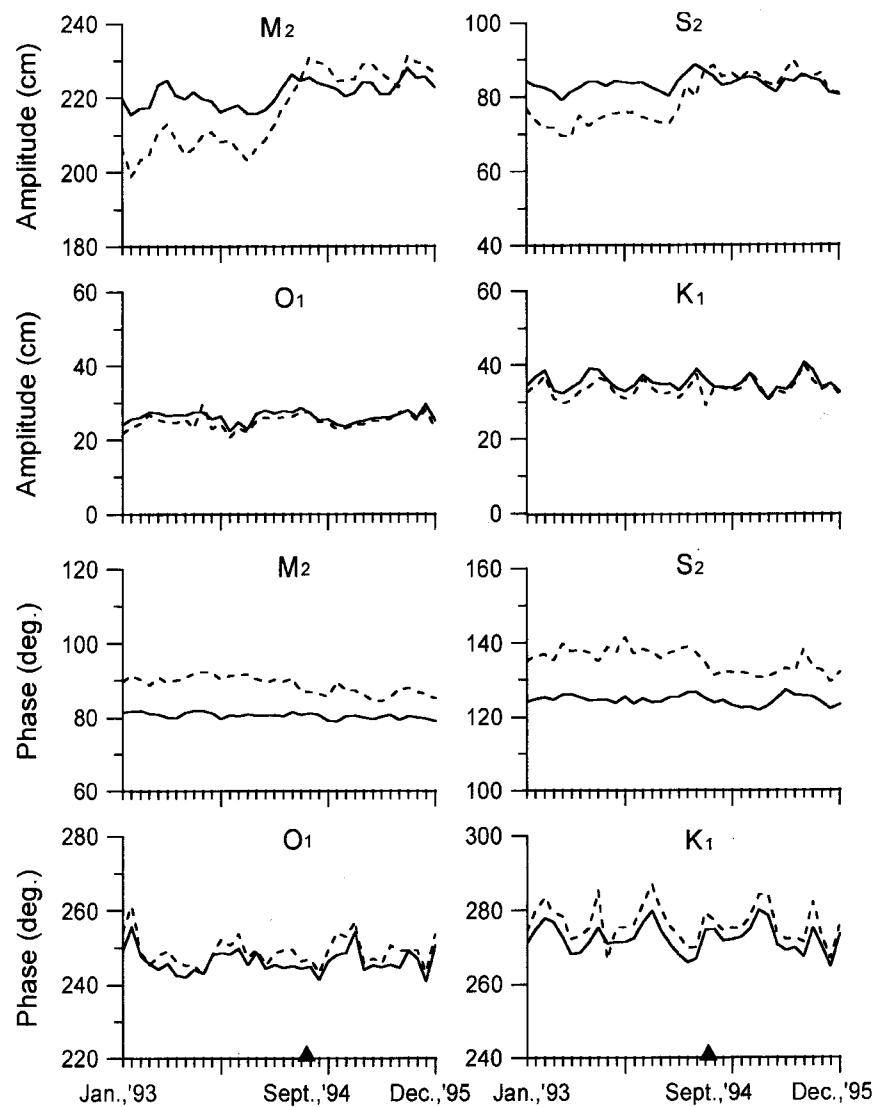


Fig. 6. Monthly variations of harmonic constants for major four tidal constituents at Kunsan Inner port (dashed line) and Outer port (solid line). Harmonic analysis was done using each one month data. Triangles indicate the closing date of the Keum River estuary dyke gate.

Table 3. Harmonic constants and their differences (Δ) between Kunsan Inner (I) and Outer port (O), analyzed from six months data before (B) and after (A) the dyke gate closing

Harmonic Constants	Amplitude (cm)			Phase (deg.)			
	Before(B)	After(A)	$\Delta(A - B)$	Before(B)	After(A)	$\Delta(A - B)$	
M_2	211.6	227.4	15.8	90.6	86.7	-3.9	
	Outer port	219.9	223.8	3.9	81.1	79.9	-1.2
	$\Delta(I - O)$	-8.3	3.6	9.5	6.8	-2.7	
S_2	Inner port	75.3	86.9	11.6	139.7	130.9	-8.8
	Outer port	82.4	87.1	4.7	127.2	122.6	-4.6
	$\Delta(I - O)$	-7.1	0.2	+12.5	+8.3	-4.2	
O_1	Inner port	25.0	24.7	-0.3	247.6	250.6	3.0
	Outer port	26.3	25.5	-0.8	245.1	247.5	2.4
	$\Delta(I - O)$	-1.3	-0.8	+2.5	+3.1	0.6	
K_1	Inner port	33.6	33.6	0	275.8	276.7	0.9
	Outer port	35.6	34.8	-0.8	270.9	273.8	2.9
	$\Delta(I - O)$	-2.0	-1.2	+4.9	+2.9	-2.0	

원인이라 보기 힘들다. 따라서 기상요소들의 변화가 금강하구의 평균해수면 변화에 직접적 영향을 준 것은 아니라고 해석된다. 하구언수문의 작동으로 평균해수면이 변화되는 과정에 대한 하

나의 가설은 다음과 같이 설정될수 있다. 낙조시에반 2~3시간정도 불규칙적으로 하계에 집중하여 개방하는 수문작동으로 평균적 담수흐름을 유지하던 평균해수면 구배가 감소되었을 가능성을 들

수 있다. 하구언 건설전의 금강담수 유출량은 평균적으로 연간 60 억톤 정도인데, 금강하구언으로 인해 저수되어 사용되는 담수량 등을 고려하면 하구언 수문작동 이후 담수의 유량감소가 하구역의 평균해면 구배를 변화시켰을 가능성이 높다.

이러한 가설을 검증하기 위하여 하구언의 수문작동 전·후로 변화된 평균해수면의 공간적 차이를 이용하여 하구로 유입되는 담수량의 변화를 추정해 보았다. 금강 담수의 순압적 평균흐름에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다(Knauss, 1978)

$$\begin{aligned} Ju &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\Delta z}{\Delta x} \\ &= -gi_x \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 J 는 해저마찰계수, u 는 강물의 수직평균속도이며, ρ 는 일정한 밀도, P 는 압력, g 는 중력가속도, Δz 는 평균해수면의 수평적 차이이고 i_x 는 평균해면의 기울기이다. 하구언 수문을 닫은 1994년 8월 31일로부터 전·후 각각 6개월간 군산 내·외항의 공간적 평균해수면 차이의 변화량(Δz)은 -9.1 cm 이고(Table 2), 1년간 평균해면의 공간적 차이의 변화량은 8.2 cm 이므로(Fig. 3) $\Delta z = 8 \text{ cm}$ 로 보자. 내·외항의 거리(Δx)를 약 8.5 km 로 설정하면 수압 경도력의 변화는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -gi_x = 0.00922(\text{cm}/\text{s}^2) \quad (2)$$

여기서, 해저면 마찰계수를 $J=4.5 \times 10^{-3}/\text{s}$ 로 가정하면 (1)에서 담수의 평균속도를 구할 수 있다.

$$u = -\frac{g i_x}{J} \cong -2 \text{ (cm/s)} \quad (3)$$

즉, 수문을 닫기 전에 비해 닫은 후에는 강물의 평균속도가 약 2 cm/s 정도 감소되어야 함을 의미한다. 계산된 속도에 의하여 내 항부근 하구 단면적 7780 m^2 (군산항 건설시무소, 1993)을 통과하는 담수의 평균적 감소량은 $155.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 혹은 연간 약 45억톤에 달한다.

산출된 담수유출 감소량은 평균적 연간 유출량 60억톤에 비교했을 때는 매우 큰 값이다. 하구언 수문을 작동한 이후의 월별 담수방출량은(Fig. 7) 하계에 집중되어 있으며 연 방출량이 주로 하계방출량에 의해 결정됨을 보여준다. 1994년 9월부터 1년간의 방출량이 약 40억톤으로 평균적 연간유출량에 비해 20억톤정도 감소하였다. 따라서 하구언 수문을 닫은 이후에 군산 내항과 외항사이의 평균해수면 구배변화의 약 50% 정도는 담수 방출량의 감소로 인한 내항쪽의 평균해수면 변화에 기인된 것으로 추정할 수 있다. 1995년 하계에는 다른 해보다 대량으로 담수를 방류하였는데, 1995년 8월과 9월에 내항에서 비조석 해면이 큰 이상치를 보였다(Fig. 3a). 이러한 담수방류와 비조석 해면 변동의 일치는 상기 가설이 타당성있음을 보여주는 예이다.

제시된 가설의 적용에서 제기되는 문제점은 금강하구역의 내항과 외항사이에 북수로가 있어 하구가 하나의 수로로 연결되어 있지 않다는 점이며, 북수로에 의해 금강담수 유출에 작용하는 해수면의 구배가 교란될 수 있다. 또한 평균유속을 산출하는 과정에서 해저 마찰계수를 적절히 산정하지 못하였을 가능성이 있다. 일반적

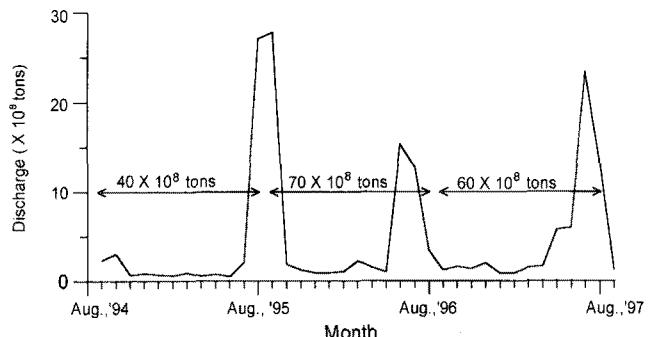


Fig. 7. Monthly and annual fresh water discharge of Keum River dyke from Sept., 1994 to Sept., 1997.

으로 선형 해저마찰계수는 10^{-3}s^{-1} 의 크기를 갖지만(Knauss, 1978) 수심이 얕은 하구역에서는 마찰계수가 증가할수 있다. 이러한 요소들은 해면변화와 유량과의 관계에 중요한 요소들이므로 앞으로 이에 대한 연구가 수행되어야 한다. 한편, 담수유출 감소에 의한 평균해수면 변화에 있어 하구내의 밀도가 일정하다고 한 가정에도 문제가 제기될 수 있다. 즉, 하구에서의 밀도는 상류쪽에서 입구쪽으로 갈수록, 해면에서 해저로 갈수록 밀도가 증가하여 경압적 구조를 가진다. 이러한 밀도의 공간적 차이는 하구 내측의 평균해수면의 구배에 영향을 미치며, 밀도가 작은 상류쪽으로 갈수록 평균해수면이 높아지게 작용한다. 따라서 하구언 수문작동 이후 담수유출이 감소되면 하구의 상류역 밀도가 수문을 작동하기 전에 비해 증가하게 되고 이로 인하여 높아져 있던 평균해수면이 낮아지게 되는 현상도 평균해수면의 구배를 변화시키는 요인이 될 수도 있다.

군산내항에서 분석된 해면의 장·단기적 변동에 영향을 주는 요인으로 인위적인 해안선 및 해저지형변화를 고려할 수 있다. 군산내항에서 연평균해면이 1996년부터 다시 증가하는 경향을 보이는 현상(Fig. 2)과 1992년경부터 1995년까지 반일주조의 진폭증가율과 위상감소율이 뚜렷이 커진 현상(Fig. 5) 등은 해면의 장기적 변화를 나타낸다. 금강하구언 건설은 1983년에 시작하여 10여년 이후에 수문작동을 정상적으로 하였으므로 공사기간중의 금강 수로변경과 수심변화 등이 평균해면과 조위의 변화를 초래할 수 있다. 군산항의 항로유지와 군장국가공단 건설을 위한 연안매립 등으로 금강하구의 남쪽수로 양측에 방조제가 1990년부터 현재까지 계속 건설되어(Fig. 1, seawall 참조) 수로폭이 장기간에 걸쳐 변화되었고, 준설로 인하여 수로 수심이 변화되어 왔다. 이러한 인위적 환경변화는 해면변화에 영향을 주었을 것이나 인위적 변화가 지속적으로 서서히 진행되어왔고 지금도 계속되고 있으므로 장기적 혹은 단기적 해면변화와 조석변화에 얼마만큼의 영향을 주었는지는 구체적으로 구분해내기는 힘들다.

본 연구에서는 금강 하구역의 조석이 장기적인 변화를 보이지만 Fig. 6에서 보는 바와같이 하구언 수문을 닫은 후 짧은 시간내에 반일주조의 진폭이 내항에서 급격히 증가했음을 밝혔다. 금강 하구역에서 완전한 수로를 이루는 구간은 전망산부터이므로(Fig. 1) 조석이 수로를 따라 금강 상류로 전파될 때 금강 입구는 전망산부근으로 보아야하며, 금강하구언은 이곳에서 약 8 km 지점에 해당하고 내항 검조소는 약 4 km 지점에 해당한다. 본 연구에서

밝혀진 반일주조 진폭의 단기간에 걸친 급격한 변화는 감조구간이 금강입구에서 상류쪽으로 약 63 km에 달하던 것이 금강하구언으로 인해 약 10 km 미만으로 짧아진 것이 원인이 될 수 있다.

최근 박(1995)은 영산강 하구언으로 인한 하구길이의 변화가 하구역의 조석진폭을 증가시키고, 위상을 늦추는 결과를 초래하는 것을 이론적 모델로 제시하였으며, 상류나 지류로 전달되는 조량은 하구언체결로 차단됨으로 하구역의 조차가 증가하는 것으로 해석하였다. 이러한 모델결과는 하구역에서 입사된 조석파의 에너지가 강의 상류나 지류로 전파되면서 감쇄하는데 하구언으로 인해 상류로 전파하던 조석파가 반사되고, 반사파는 입사파와 중첩되어 조석진폭이 증가된 것으로도 설명될 수 있다. 신과 이(1997)가 일정한 수심을 갖는 하구를 가정하여 수로길이에 따른 M_2 분조의 진폭과 위상의 변화를 1차원 수치모델로 모의한 결과를 보면, 수로길이가 70 km일 때 수로 입구로부터 약 5 km 되는 지점에서 M_2 분조의 진폭이 155.9 cm가 되어 200 cm인 입사파 전폭보다 44 cm 감소하였으나 수로길이를 20 km로 줄였을 때는 동지점에서 200.9 cm로 증가하였다. 위상은 9.6°에서 6.5°로 3.1° 감소되었다. 본 연구에서 분석된 실제 관측치는 내항에서 M_2 분조의 진폭은 15.8 cm 증가하고 위상은 3.9° 감소하였다. 신과 이(1997)의 수치모델 결과와 본 연구에서 밝혀진 결과는 정량적 차이는 있으나 정성적으로는 일치한다. 이러한 기준의 연구결과로 미루어 금강 하구역에서 반일주조의 진폭이 증가하고 위상이 감소하는 것은 하구언 수문작동으로 인해 수로의 길이가 짧아져 발생한 현상으로 해석할수 있다.

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다. (1) 금강 하구언의 수문을 닫은 때에 내항에서 비조석 해수면이 큰 폭으로 감소하였고, 수문을 닫은 후에 연평균해수면은 내항과 외항에서 9.6 cm와 1.4 cm 정도 감소하였다. 이로인해 내항과 외항간의 상대적 평균해수면 기울기가 감소되었다. 평균해수면의 감소는 주로 금강 하구언으로부터의 담수유출 감소에 의해 발생되었던 것으로 해석되며, 담수유출 감소로 인한 하구상류의 밀도증가, 지속적으로 변형되는 하구역의 지형변화도 평균해수면의 변화에 부분적으로 기여했을 가능성 있다. (2) 금강하구의 조석은 수문을 닫은 때에 군산내항에서 M_2 와 S_2 분조의 진폭이 16 cm와 11 cm 정도 단기적으로 급격히 증가하였고, 위상은 감소하였다. 일주조 성분은 진폭과 위상의 변화가 거의 없다. 이로 인해 군산 내·외항간 반일주조 진폭의 공간적 차이가 변화되었으며, 이러한 조화상수의 변화는 하구언수문작동으로 인하여 입사된 조석파가 반사되어 나타나는 중첩효과로 해석된다. (3) 반일주조 진폭의 증가와 연평균 해수면의 하강은 군산내항에서 대조시 만조위를 17 cm 이상 증가시킬 것으로 예측된다.

사 사

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비

지원에 의하여 연구되었다. 조위자료를 제공해준 국립해양조사원에 감사하며, 자료해석에 좋은 비평을 해주신 군산대학교 최현용교수께 감사하고 자료정리에 많은 시간과 노력을 아끼지 않은신은주, 이현정양과 김창희, 손영태군 그리고 군산대 해양학과 학부생들에게 감사한다.

참고문헌

- 국립해양조사원, 1996. 조석표(한국연안). 250 pp.
 국립해양조사원, 1997. 조석표(한국연안). 250 pp.
 군산항 건설사무소, 1986. 금강하구 수리현상조사 수치모형실험 보고서. 193 pp.
 군산항 건설사무소, 1993. 금강하구 수리현상조사 보고서. 170 pp.
 권효근, 이상호, 1997. 금강 하구언 수문 닫음으로 인한 하구의 해수면 변화. 한국해양학회 춘계 학술발표회 요약집, 33 pp.
 이상호, 권효근, 최현용, 양재삼, 최진용, 1999. 하구언 수문작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 II. 염분구조와 하구형태. 한국해양학회지 (접수).
 박기진, 1995. 하구역에서 지형변화에 따른 조석체계의 변화. 석사학위논문, 부산대학교, 부산, 99 pp.
 서승원, 1998. 금강하구역의 수동역학적 변화(2) -수치모형을 중심으로-. 한국연안해양공학회지, 10: 18-26.
 신은주, 이상호, 1997. 1차원적인 만과 하구의 반일주조에 대한 수치실험. 군산대학교 해양개발연구소 논문, 10: 9-24.
 안희수, 오임상, 1995. 유한요소법에 의한 금강하구역의 조석 및 금강 유입의 수치실험. 한국해양학회지, 30: 299-308.
 윤용훈, 오임상, 김충기, 홍윤, 1998. '97 백중사리 기간중의 이상해면에 대하여. 기상연구논문집, 15: 16-25.
 최병호, 안원식, 1985. 금강 감조구간의 조석전파. 한국수문학회지, 18: 67-73.
 최병호, 오형근, 1987. 금강 하구둑에 의한 조석변화의 초기추정. 한국해양학회지, 20: 161-168.
 Easton, A.K., 1977. Selected programs for tidal analysis and prediction. Computing Report No. 9. *The Flinders Institute for Atmospheric and Marine Sciences*, 78 pp.
 Knauss, John A., 1978. Introduction to Physical oceanography. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 338 pp.
 Shubel, J.R., H.T. Shen and M.J. Park, 1984. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea. In: Proc. Korea-U. S. Seminar and Workshop on Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea, edited by Y.A. Park *et al.*, Seoul National University Press, Seoul, pp. 286-308.
 Thompson, R.O.R.Y., 1983. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *J. Phys. Oceanogr.*, 13: 1077-1083.

1998년 8월 10일 원고 접수

1998년 1월 28일 수정본 채택