한국해안 · 해양공학회논문집
제 23 권 제 5 호, pp. 393~400, 2011년 10월

염하수로 인근에서 조석 변형과 장주기 조류성분의 변동 특성
Periodic characteristics of long period tidal current by variation of the tide deformation around the Yeomha Waterway

송용식* · 우승범**
Yong Sik, Song* and Seung-Buhm Woo**

요 지 : 경기만과 같이 지형이 복잡하고 조차가 큰 해역에서는 활발한 물질순환이 나타난다. 이러한 물질순환에 영향을 주는 장주기 흐름은 다양한 외력에 의하여 형성되며 시공간적으로 독특한 특성이 나타난다. 본 연구에서는 경기만에 위치하는 인천항부터 잠실수중보 사이에서 동기간에 관측된 조위와 유속자료를 분석하여 장주기 조류성분의 주기적인 변화 특성과 발생 기작을 파악하였다. 염하수로와 한강하구에서는 배조나 복합조와 같은 비선형분조의 증가로 인하여 조석파의 변형이 발생하고 이에 따른 평균해면 상승이 나타난다. 경기만으로부터 한강으로 전파하는 조석파는 수로폭과 수심이 크게 감소하는 염하수로로 진입하면서 급격히 변형되어 저조위와 평균해면이 상승하며, 상류로 갈수록 조석변형이 커진다. 이러한 조석변형은 조차가 큰 대조기에 증가하고 조차가 작은 소조기에 감소하며 주기적인 변동을 나타내는데, 이는 장주기 조석성분인 M_{sf} 분조로 해석될 수 있다. 조석변형의 공간적 차이에 의해 발생하는 해면 경사는 대조-소조의 주기와 동일한 주기를 보이며 대조기에 증가한다. 해면 경사의 장주기 변동에 반응하여 조류의 장주기 변화가 나타난다. 이러한 장주기 조류성분은 상류에서 크게 증가하여 한강하류인 전류리 인근에서는 주요 분조인 S_2 분조보다 크게 나타난다.

핵심용어 : 장주기 조류성분, 경기만, 염하수로, 한강, 조석변형

Abstract : The mass transport is very complicated at the area which has the macro tide and complex geometry such as Gyeonggi bay. Especially, the long period current has a strong influence on the estuarine ecosystem and the long-term distribution of substances. The long period current is caused by several external forcing, whose unique characteristic varies spatially and temporally. The variation characteristics of long period current is analysed and its generation mechanism is studied. The tidal nonlinear constituents such as overtide and compound tide are generated due to nonlinear interaction and it causes mean sea level setup. The tidal wave propagating up into estuary is transformed rapidly by decrease of cross-sectional area and depth. Therefore the mean sea level is getting rise toward upriver. The high and low tide level is similar between down-river(Incheon) and up-river(Ganghwa) during neap tide when the tidal deformation is decreased. The tidal phase difference between two tidal stations causes a periodic fluctuation of sea level difference. The low water level of Ganghwa station during spring tide does not descend under EL(-)2.5 m, but the low water level of Incheon fall down under EL(-)4.0 m. The variation of tidal range and its sea level are increased during spring tide. It is found that the long period current M_{sf} is quite similar to that of sea level difference between the two tidal stations. It means that the sea surface inclination caused by the spatial difference of tidal deformation is important forcing for the generation of long period current.

Keywords : long period tidal current, Gyeonggi Bay, Yeomha Waterway, Han River, tidal wave deformation

1. 서 론

경기만은 반폐쇄성 하구역으로서 평균대조차가 7.9 m이고 평균소조차가 3.5 m인 대조차 특성이 나타난다. 큰 조차와 완만한 지형경사로 인하여 넓은 조간대가 발달해 있으며, 그 결과 복잡한 하구순환 특성을 보인다(Park et al.,2002). 대부분의 담수는 한강으로부터 유입되며 연간 총유입량의 70% 이상이 우기(6월부터 9월)에 집중된다. 연평균(2006년) 담수유입량은 320 m^3/s 이며, 다량의 오염물질이 한강을 거쳐 경기만으로 유입된다. 한강은 지형이 복잡한 강화도 북측 수로와 강화도 동측의 염하수로를 통하여 경기만과 연결되어있다 (Fig. 1). 따라서 한강으로부터 배출되는 오염물질의 거동특성과 한강-경기만의 물리적 연계를 이해하기 위해서는 강화도 주변 수로에서의 하구순환을 파악할 필요가 있다.

*(주)지오시스템리서치 (GeoSystemResearch Corp. #306, Hanlim Human Tower 1-40, Geumjeong-dong, Gunpsi, Gyeonggi-do, Korea)
**인하대학교 해양과학과 (Corresponding author: SeungBuhm Woo, Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, 253 Younghyun-dong, Nam-gu, Incheon, Korea, sbwoo@inha.ac.kr)

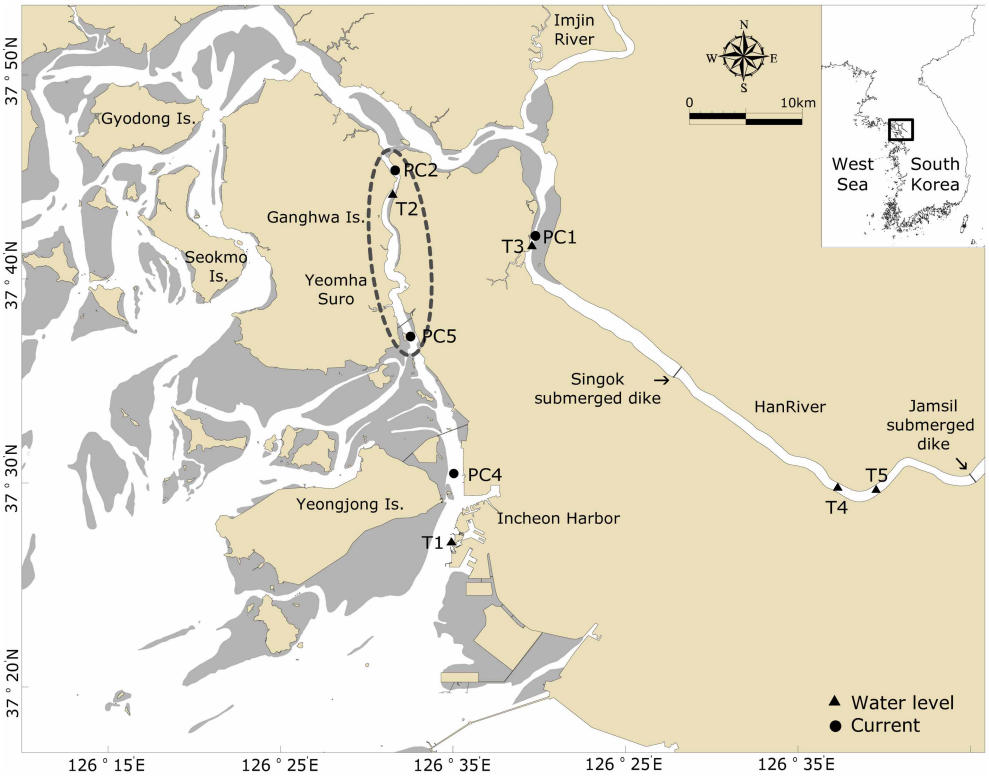


Fig. 1. Locations of observation.

일반적으로 하구의 순환과 물질수송은 다양한 외력들의 상호작용으로 인하여 시공간적으로 복잡한 특성이 나타난다. 특히 염하수로나 한강하구와 같이 조차가 크고 지형이 복잡한 해역에서는 배조(over tide)와 복합조(compound tide)의 발달, 조석변형으로 인한 평균해수면 상승, 천문조 약화 등의 현상과 함께 장주기 조류성분인 M_{sf} 분조가 강화되는 특성이 나타난다.

장주기 조류성분은 하구 물질 순환에 중요한 의미를 갖는다. 하구에서 부유사와 같이 조석주기에 따라 변화하는 특정 물질의 농도가 시간적인 변동성을 갖는 경우, 물질의 농도와의 위상차는 물질의 순수송을 결정하는 중요한 요소로 작용한다 (Stacey, 2001). 그러므로 장주기 조류성분은 공간적 변화에 못지 않게 하구의 물질수송을 이해하는데 매우 중요하다.

복잡한 지형과 조석현상이 나타나는 경기만의 경우 장주기 조류성분은 더욱 중요해진다. 하구의 복잡한 지형과 마찰은 조석 형태를 변화시키며 (Dyer, 1997), 복합조(compound tide)와 배조(over tide)를 형성한다 (Speer et al., 1991). 염하수로와 한강하구에서는 시공간적으로 변화가 큰 조석 특성으로 인하여 독특한 장주기 조류성분이 나타난다. 그러나 한강하구에서 장주기 조류성분에 대한 연구가 수행된 사례가 없다.

Stacey et.al., (2001)은 San Fransisco Bay 북부 지역에서 장주기 흐름성분이 조석주기에 영향을 받는다고 제시 하였으며, Park et al., (2002)은 수치모델을 사용하여 한강 담수 유입조건에 따른 계절별, 수로별 잔차류 특성을 제시하였다. Kim et. al., (2009)은 경기만에 위치하는 석모수도와 장봉수도의 입구에서 장기 조류관측 자료를 사용하여 잔차류의 계절변화를 분석하고 잔차류의 적정 계산법을 제시하였다. 우기인 하계에 석모수도를 통한 담수유입이 증가하여 석모수도에서 26.7 cm/s의 연최대 잔차류가 나타났다. 동계에 장봉수도에서는 최대 27.7 cm/s의 잔차류가 나타났다. 해양수산부와 국립해양조사원(2002)은 한강, 임진강 그리고 염하수도 인근에서 2001년 9월부터 2002년 10월까지 장기 조석관측을 통하여 조석파의 전파특성을 분석하였다. 염하수도 북측 입구에서는 장주기 조석 성분인 M_{sf} 분조의 진폭이 32.3 cm로 나타나 주요 분조인 K_1 분조보다 크고, 한강의 신곡수중보 직하류와 임진강의 파주 인근에서는 각각 52.6 cm와 25.4 cm로 S_2 분조와 M_2 분조의 진폭보다 크게 나타나 15일 주기의 장주기 진동이 있음을 보고하였으며, 이는 상류에서의 비선형성 증가가 원인이라고 제시하였다. 그러나 장주기 조류성분에 대한 조사 및 연구는 수행하지 않았다. 위와 같이 한강하구와 염하수로 인근에서 잔차류나 조석의 변동에 대해서는 연구된 사례가 있으나 장주기 조류성분의 변동에 대해서는 연구된 사례가 없다.

본 연구에서는 한강하구와 염하수로에서 동기간에 관측된 조위와 유속자료를 사용하여 장주기 조류성분의 발생 원인과 주기적 변동성을 분석하였다. 이를 위하여 2005년 11월과 12월에 한강하구와 염하수로 그리고 인천항 인근의 총 4개 정점에서 관측된 조류자료와 인천항, 강화도, 전류리, 한강대교, 잠수교에서 관측된 조위자료를 분석하였다. 그리고 팔당댐 방류량과 임진강, 주요 한강지류의 유량을 사용하여 담수 유입량을 파악하였다.

2. 연구자료

2.1 조석

2005년 1년 동안 T1(인천항 검조소, 국립해양조사원), T2(강화도 검조소, 국립해양조사원), T3(전류리 수위관측소, 한강홍수통제소), T4(한강대교 수위관측소, 한강홍수통제소) 그리고 T5(잠수교 수위관측소, 한강홍수통제소) (Fig. 1)에서 관측된 조위자료를 수집분석하였다(Fig. 2). 기준면은 모두 인천 평균해수면으로 동일하다.

2.2 유속

유속자료 취득을 위하여 4개 정점(Fig. 1, Table 1)에서 유속계 (RCM9 또는 RCM7, AANDERAA, Norway)를 계류하였다. 부이를 사용하여 유속계를 해표면하 2 m에 고정시켰으며, 10분마다 유속, 유향 자료를 자기기록 하였다(Fig. 3).

Table 1. Outlines of tidal current observation

St.	Period	Depth(D.L(-)m) (Obs./Total)	Inst.
PC1	Nov. 15 to Dec. 18 2005	2/8	RCM9
PC2	Nov. 18 to Dec. 17 2005	2/8	RCM9
PC4	Nov. 16 to Dec. 23 2005	2/8	RCM7
PC5	Dec. 2 to Dec. 23 2005	2/5	RCM9

정점 PC1은 신곡수중보로부터 하류방향으로 약 16 km 떨어져 있으며, 수심은 DL(-)8 m 이고 하폭은 1 km 미만이다. 정점 PC2는 염하수로 북측 입구에 위치하고 정점 PC1으로부터 하류방향으로 24 km 떨어져 있다. PC5는 염하수로 남측 입구에 위치한다. 정점 PC4는 인천북항의 북서측에 위치하며, 정점 PC1으로부터 하류방향으로 54 km 떨어져있다.

관측은 2005년 11월 15일부터 12월 23일까지 수행되었으며,

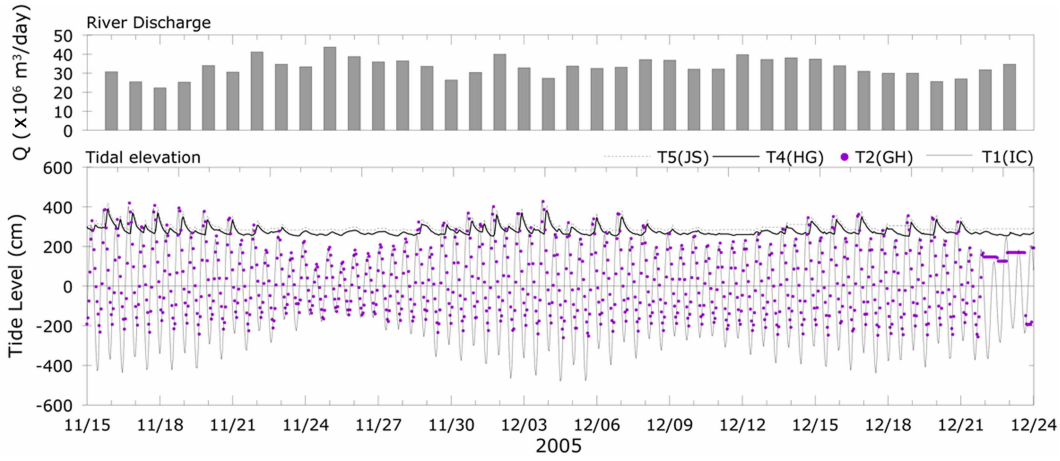


Fig. 2. Time variations of tide level and river discharge (Tide level : from T1(Incheon) to T5(Jamsu BR.), Discharge : Paldang Dam, Imjin River, Wangsuk Cheon, Tan Cheon, Jungrang Cheon, Jungrang Cheon, Anyang Cheon).

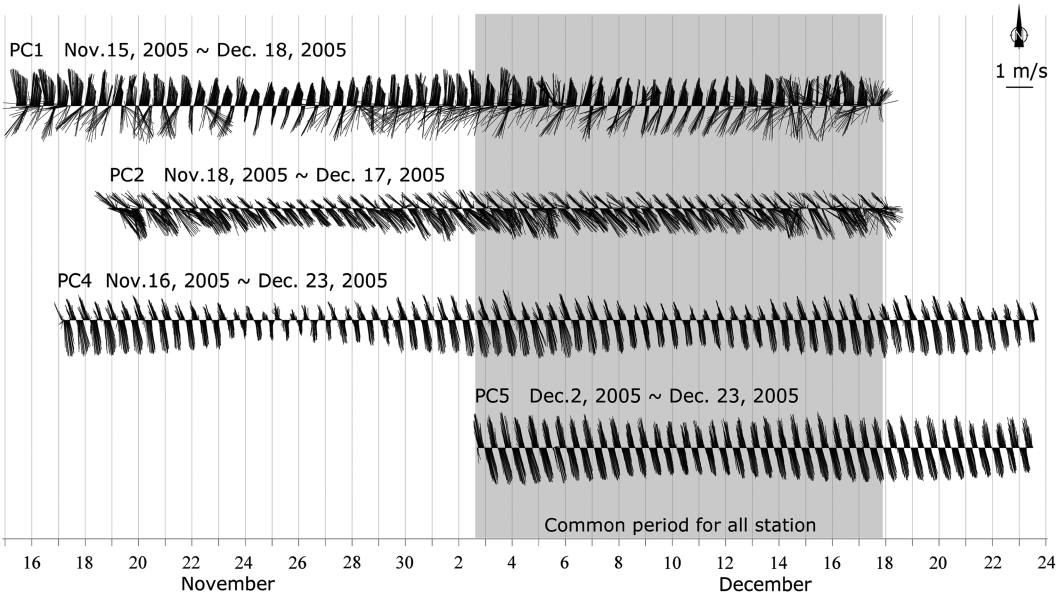


Fig. 3. Time variations of current vectors.

전정점의 자료가 존재하는 기간은 12월 2일 부터 12월 17일 까지이다.

2.3 하천 유입량

한강의 수위관측소들에서 제공되는 유량자료는 수위-유량 관계식에 의하여 계산된 유량으로서 수위 관측을 통하여 산정된다. 한강에서 조석파는 잠실수중보까지 전파되기 때문에 잠수교(T5) 하류의 수위관측소에서 제공되는 유량은 조석의 영향을 받은 자료로서 하천수 유입이 포함된 조량으로 이해되어야 한다. 따라서 조석의 영향을 받지 않은 팔당댐 방류량과 임진강(적성), 한강의 주요 지류인 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천의 유량을 하천유입량 분석에 사용하였다. 분석에는 국토해양부의 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr)의 유량자료를 사용하였다.

3. 분석결과

3.1 조석

외해로부터 유입된 조석파는 인천항을 지나 수로폭이 급격히 감소되는 염하수로와 한강으로 전파한다. 가장 하류에 위치하는 T1(인천)과 최상류인 T5(잠수교) 간의 거리는 약 97 km 이며, 두 정점간의 거리는 주수로를 통한 거리를 의미한다. 조석파는 잠수교 상류 9.5 km (인천항에서 109 km)에 위치한 잠실수중보 까지 전파한다. 정점 T1(인천)은 반일주조가 우세한 혼합조의 특성이 나타나며, 분석기간 동안의 최대조차는 8.6 m, 최소조차는 2.3 m이다 (Fig. 2). 염하수로 북측에 위치하는 T2(강화)의 수로폭은 약 0.5 km이며 주수로의 수심은 DL(-)6 m 내외이다. 관측기간 동안의 최대조차는 6.7 m, 최소조차는 2.4 m이다 (Fig. 2). T2(강화)의 고조위는 T1(인천)과 유사하거나 약간 높게 나타나며, 저조위는 EL(-)2.5 m 이하로 하강하지 않는다. 한강 신곡수중보의 2.3 km 하류에 위치하는 T3(전류리)은 수로폭이 1 km 미만이며, 고조위는 T1(인천)과 유사하다. 저조위는 소조기 동안에만 EL(±)0 m 이하로 하강한다. T4(잠수)와 T5(한강)는 소조기에는 조석전파로 인한 수위변동이 거의 나타나지 않으며, 대조기에는 1.3 m의 수위 변화가 나타났다. 고조는 T1(인천)보다 약 4.5시간 이후에 나타난다. 수로폭은 T3(전류리)과 유사하다.

3.2 하천 유입량

유속 관측기간과 동기간의 하천유량을 Fig.2에 제시하였다. 관측이 수행된 기간은 강우량이 적은 시기로서 22×10^6~ 49×10^6 m^3/day의 담수가 유입되었으며, 평균 유량은 33×10^6 m^3/day 이다 (Fig. 2). 대소조 또는 창낙조의 발생시기와 방류시기와는 뚜렷한 상관관계가 없었다.

3.3 조류

관측된 유향, 유속자료로부터 주성분 방향의 유속성분을 계산하여 분석에 사용하였다. 주성분 방향은 주성분분석(Principle Component Analysis)을 통해 산정하였다. 정점별 조류벡터 시계열을 Fig. 3에 제시하였으며, Fig. 4에 정점별 유속 통계분석 결과를 창조와 낙조로 구분하여 제시하였다.

정점 PC1은 왕복성 조류 특성을 보이나 창조시 분산성이 크게 나타난다. 최강유속은 창조시 153.7 cm/s로 나타났다. 정점 PC2는 낙조 출현율이 창조보다 높으며, 최강유속도 낙조시 131.4 cm/s로 나타나, 창조시 최강유속인 100.0 cm/s와 큰 차이를 보인다. 정점 PC4와 PC5는 분산성이 작아 왕복성 조류의 특성이 강하다. 최강유속은 각각 139.7, 140.9 cm/s로서 모두 낙조시에 나타나며, 창조보다 낙조의 출현율이 더 높아 낙조 지속시간이 더 길다. 최강 유속은 정점 PC1을 제외한 모든 정점에서 창조시보다 낙조시에 더 크게 나타난다. PC1에서는 창조유속이 낙조유속보다 크게 나타나나 유속차이는 10% 미만이다.

장주기 조류성분의 변화특성을 파악하기 위하여 절단주기 48시간의 low-pass filter를 사용하여 그 이하의 주기를 갖는 조류성분을 제거하였다. 2일 이상의 장주기 성분은 M_f, M_{sf}, MM, SSA로 각각 13.8일, 14.8일, 27.8일, 187.5일의 주기를 갖는다. 따라서 절단주기 48시간의 low-pass filter를 사용하여 2일 미만의 주기를 갖는 단주기 조류성분들을 제거하였다. 분석에 사용된 조류 관측자료는 21일부터 36일까지 비교적 짧은 기간 동안 관측되어 조화분석을 통해서는 장주기 조류성분을 효과적으로 추출하기 어렵기 때문에 low-pass filter를 사용하였다(식 1-2).

$$V = V_s + V_L \tag{1}$$

$$V_L(t,x) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{t} V \tag{2}$$

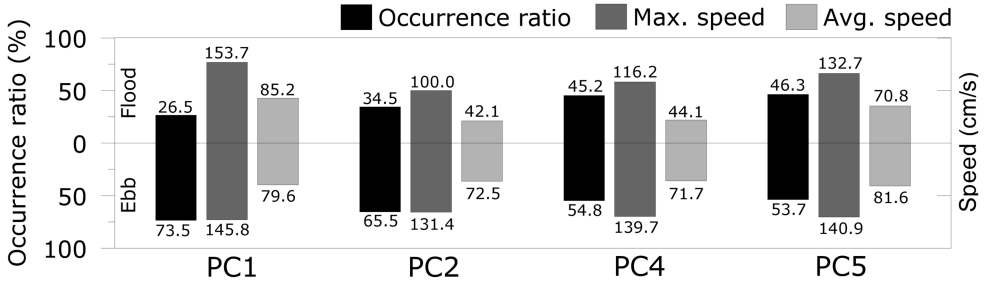


Fig. 4. Statistics of tidal current speed (2. Dec. ~ 17. Dec., 2005)

여기서 V는 관측 총유속, V_L은 단주기 조류성분이 제거된 장주기 조류성분, V_S는 단주기 조류이다. V_L은 절단주기 48시간의 low-pass filter를 사용하여 주성분 방향의 유속에서 단주기 조류성분을 제거하여 산정하였다.

장주기 조류성분의 변화특성을 파악하기 위하여 Fig. 5에 T1(인천)의 조위 시계열, 정점별 주성분 방향 유속(V_p) 그리고 48시간 이하의 단주기 성분이 제거된 장주기 조류성분(V_L)의 시계열을 제시하였다. 정점 PC1은 +, 나머지 정점들은 -값이 하류방향을 의미한다. 분석결과 정점 PC1에서 +, 나머지 정점들에서 -값으로 모든 정점에서 하류 방향의 흐름이 나타난다. 대조기에 장주기 성분의 유속이 강해지며, 조위의 대조-소조 주기와 동일한 주기적 변화가 나타난다.

이와 같은 장주기 조류성분의 변화를 일으키는 주요 원인을 파악하기 위하여 관측된 장주기 조류성분의 주기성과 이를 형성할 수 있는 외력들의 주기성을 비교하였다. 흐름의 장주기 변화를 발생시킬 수 있는 원인으로는 조석의 비선형성, 바람 그리고 공간적인 밀도차 등이 있다(Yanagi, 1999).

장주기 조류성분이 조석의 월령과 동일한 주기로 변동하는 것은 이를 형성하는 외력도 동일한 주기로 변동함을 의미한다. 조석의 장주기 성분인 M_{sf} 분조는 14.8일 주기로 월령과 동일한 주기로 변화하며 대조기에 증가하고 소조기에 감소한다(Pugh, 1987).

바람은 대기의 조건에 따라 변화하므로 조석의 주기성과는 관계가 없다. 해수의 공간적인 밀도차이에 의한 경압력의 주기는 조석의 월령과 동일하지 않다. 해수 밀도는 하천으로부터의 담수 유입에 따라 변화하며 하천 담수 유입량은 조석의 영향을 받지 않는다. 한강에서 담수유입량은 대부분 팔당댐 방류에 의해서 결정되는데 팔당댐 방류는 하류조위 조건을 고려하면서 운영되지 않는다. 따라서 한강담수 유입과 흐름의 대소조주기 변동은 서로 관계가 없다. Yanagi (1999)는 장주기 성분의 크기가 대조기에 강화되고 소조기에 약화되는 결과를 제시한 바 있으나 이는 곶(headland)의 전면해역에서 나타나는 조석와류(tidal vorticity)의 대소조 변화에 의한 것이다. 즉 조석와류는 일부 구간에서 나타나는 국지적인 현상으로 한강하류나 염하수로의 전구간에서 나타나는 현상이 아니다.

해수면 경사에 의해서 유지되는 순압력의 장주기 변화도 장주기 조류성분을 형성할 수 있다. 염하수로에서 해수면경사는 한강으로부터의 담수유입과 조석파의 변형으로 인한 상류의 해면 상승에 의해 발생한다.

3.4 조석변형의 공간적 특성

비선형 작용은 조석파의 변형과 평균해면 상승을 발생시킨다(Parker, 1991; Pugh, 1987). 한강 상류로 전파하는 조석파는 수로폭과 수심이 크게 감소하는 염하수로로 진입하면서 급격히

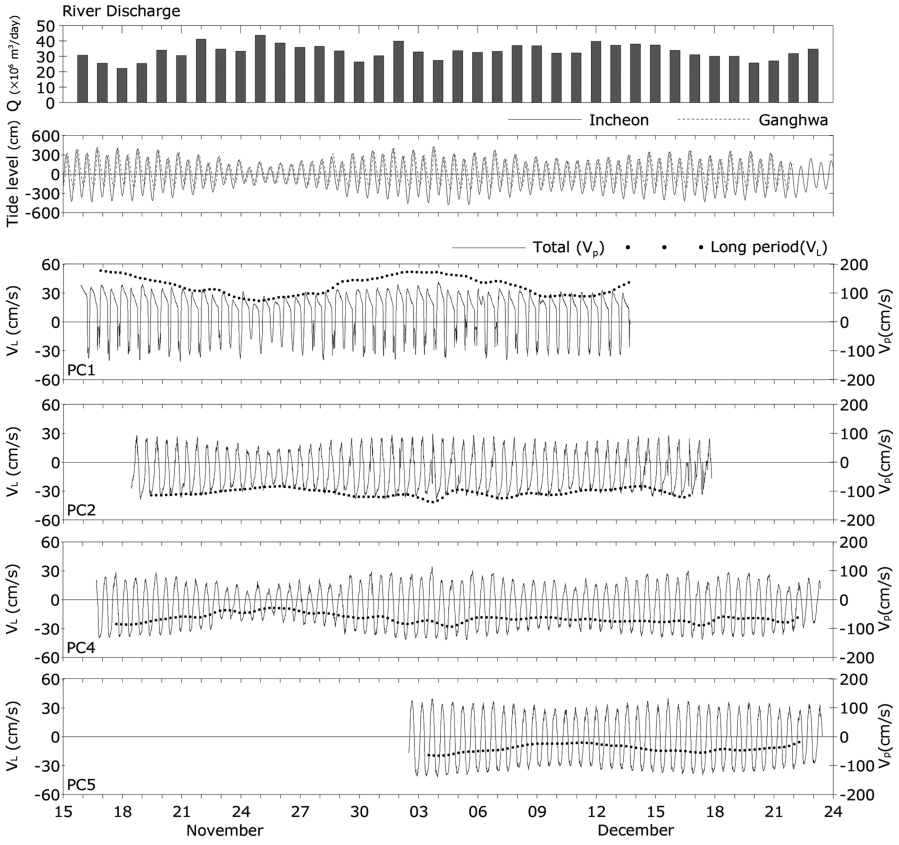


Fig. 5. Time variations of river discharge, sea level and current speed (V_L(•) is speed of low-pass filter applied and V_P(-) is total speed for principle direction).

변형된다(윤, 2006). Fig. 2에서 상류(T5)로 갈수록 저조위 상승과 조석파의 비대칭성이 커져 조석변형 (tidal distortion)이 증가하는 것을 알 수 있다.

정점 T1, T2, T3, T4에서 동기간(2005년 5월)의 조위 자료를 조화분석하여 분조별 반조차(amplitude)를 Fig. 6에 제시하였다. 하류인 T1(인천)에서 상류인 T3(전류리)으로 갈수록 배조(M_4, M_6)와 복합조(MS_4, MN_4, M_{sf})의 반조차가 증가한다. T3(전류리)의 상류에서는 주요 천문조와 함께 배조와 복합조의 조차도 감소하며, 이와 같은 특성은 '해양수산부와 국립해양조사원(2002)'에서도 제시한 바 있다. 그러나 T3(전류리)의 상류에서 주요 천문조인 M_2 분조와 천해분조인 배조 및 복합조간의 비는 증가한다 (Table 2). 특히 M_{sf} 분조의 경우 정점 T4와 T5에서 각각 253.8배와 164.4배의 급격한 증가를 보인다 (Table 3). 즉 비선형성으로 인한 해면경사의 장주기 변화는 상류로 갈수록 증가한다.

3.5 조석변형의 시간적 변동

비선형성으로 인한 해면 상승은 전 기간 동안 지속적으로 나타나는 변화가 아니며, 한 조석주기 이내의 비대칭적 변화로 이해되어야 한다 (Parker, 1991). 해면 상승은 시간적으로 변화하며, 이로 인한 해면 경사도 시간적으로 변화한다. Fig. 7에 T2(강화)와 T1(인천)의 조위차(T2-T1) 시계열을 제시하였다. 조석변형이 작은 소조기에는 T2(강화)의 저조위와 고조위가 T1(인천항)과 유사하며, 두 지점간의 해수면 차이는 조시차에 의해서 발생하여 정현곡선의 형태를 보인다 (Fig. 7(a)).

그러나 대조기에는 T2(강화)의 저조위가 E.L(-)2.5 m 이하로 하강하지 않아 저조위가 E.L(-)4 m 이하로 하강하는 T1(인천)과 차이를 보인다 (Fig. 7(b)). 따라서 정점 T2에서 조석 변형과 저조위 상승(Fig. 6)으로 인한 평균해면 상승은 조차가 큰 대조기에 증가하는데, 이는 장주기 조석성분인 M_{sf} 분조로 해석될 수 있다.

Table 4에 정점 T1과 T2에서 소조기와 대조기의 평균해면과 해면경사를 제시하였다. 평균해면(η_0)은 소조기와 대조기시 4조석주기 동안의 산술평균해면이고, 해면경사는 두 정점간의 평균해면 기울기로 정의하였다. 두정점간의 거리(Δx)는 34 km이다. 관측기간 동안의 평균해면은 소조기에 T2(강화)에서 EL(+)1.7 cm, T1에서 EL(-)2.9 cm로 나타났다. 대조기에는 T2(강화)에서 EL(+)43.4 cm, T1에서 EL(-)25.8 cm로 나타나 T2가 T1보다 69.2 cm 높게 유지되었다. 해면경사는 소조기에 0.13×10^{-3}, 대조기에 2.04×10^{-3}로 대조기에 15배 큰 경사가 나타났다. 이와 같은 해면경사의 대소조 주기 변동으로 인하여 순압력(barotropic forcing)이 대소조 주기로 변화하며, 장주기 조류성분도 동일한 주기로 변화한다 (Fig. 8).

관측 기간 동안 나타난 2회의 소조기 중 두 번째 소조기인

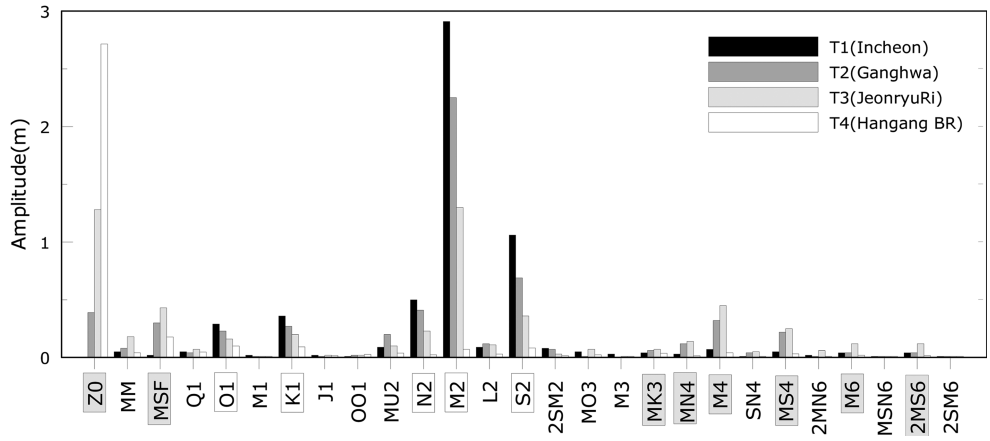


Fig. 6. Amplitude of tidal constituents at each tide station.

Table 2. Amplitude ratio between M_2 and other tidal contituents (Unit : %)

St.	Incheon(T1)	Ganghwa(T2)	JeonryuRi(T3)	Hangang BR.(T4)	Jamsu BR.(T5)
M_{sf}/M_2	0.7	13.3	33.1	253.8	164.4
M_4/M_2	2.4	14.2	34.6	57.1	48.3
MS_4/M_2	1.7	9.8	19.2	45.9	43.2
M_6/M_2	1.4	1.8	9.2	29.2	27.0

Table 3. Mean sea level during observation period (May, 2005) (Unit : m)

St.	Incheon(T1)	Ganghwa(T2)	JeonryuRi(T3)	Hangang BR.(T4)	Jamsu BR.(T5)
Z_0	0.00	0.39	1.28	2.71	2.97

12월 9일부터 12월 11일에는 T1(인천)에서 4.4 m 이상의 비교적 큰 조차가 발생하였으며, 저조위는 EL(-)2.5 m 이하로 하강하였다. 따라서 소조기 임에도 불구하고 이 기간 동안에는 T1과 T2 사이에서 하류방향의 평균해면 경사가 유지된다. 이로 인하여 장주기 조류성분은 첫 번째 소조기(11월 24일부터 11월 26일까지)보다 두 번째 소조기에 더 강하게 나타난다(Fig. 8).

2005년 1년 동안의 정점 T1과 T2 조위 자료를 대상으로 48시간 절단 주기의 Low-pass filter를 사용하여 단주기 조석

Table 4. Mean sea level and sea surface slope between T1 and T2 during neap and spring

Div.	Mean sea level (η_0) (EL, cm)		Sea surface slope($\Delta\eta_0/\Delta x$)
	T2(Gang hwa)	T1(Incheon)	
Neap[1)]	1.7	-2.9	0.13×10^{-3}
Spring[2)]	43.4	-25.8	2.04×10^{-3}

[1)]Neap period : 24.Nov. ~ 26.Nov.2005, 4 tidal cycles
[2)]Spring period : 2.Dec. ~ 4.Dec.2005, 4 tidal cycles

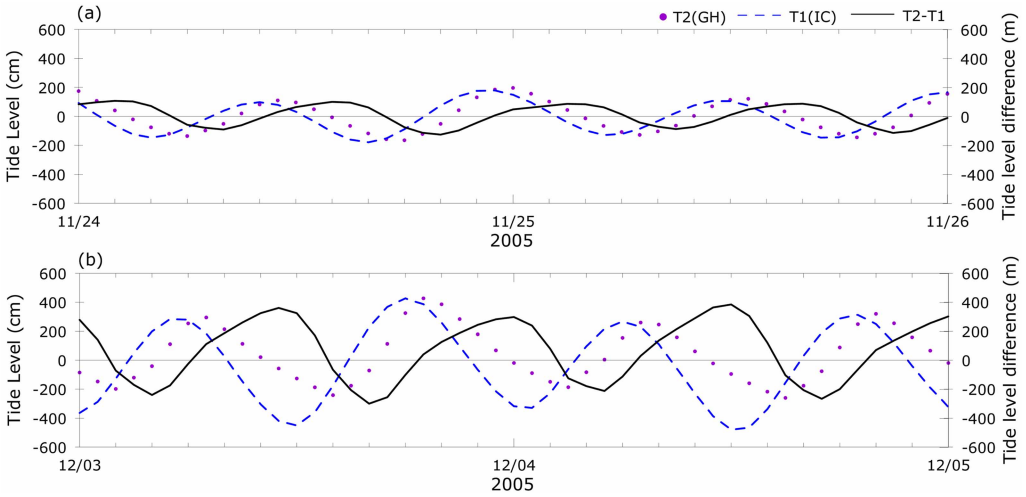


Fig. 7. Time variations of sea level difference between T2(Ganghwa) and T1(Incheon) (a)Neap period, (b)Spring period).

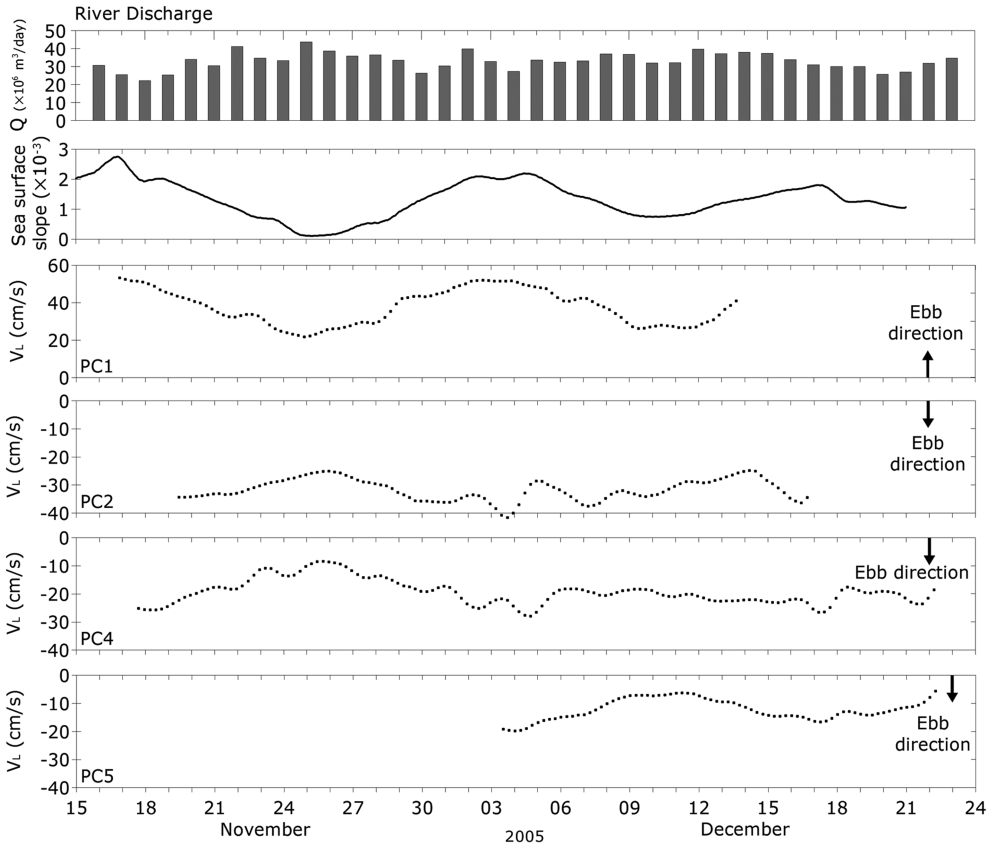


Fig. 8. Time variations of river discharge, sea surface slope and long period current at each station. Sea surface slope means the mean sea level difference between T1 and T2 (V_L is the long period current of low-pass filter applied).

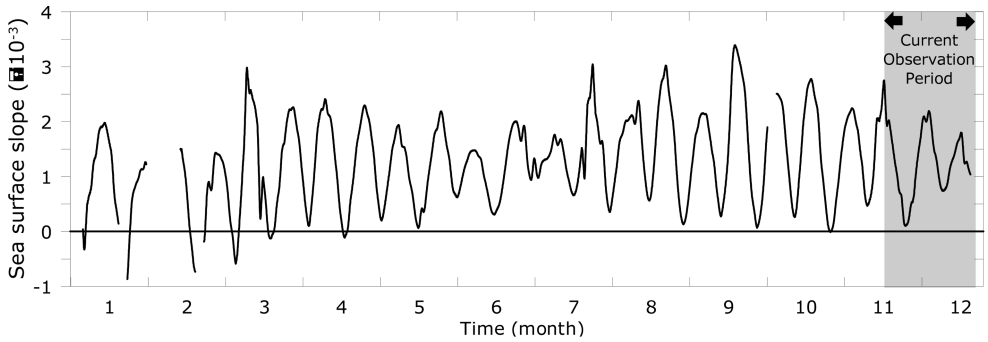


Fig. 9. Time variations of sea surface slope between T2(Ganghwa) and T1(Incheon) (Low-pass filter applied).

성분을 제거한 후 장주기 성분간의 차이를 계산하였으며, 이를 Fig. 9에 제시하였다. 단주기 조석성분이 제거된 성분을 산술평균해면으로, 그 차이를 해면경사로 정의하였다. 해면 경사는 대조기에 최대값을 보이고 점차 감소하여 소조기에는 거의 사라지는 주기적인 변화를 갖는다. 우기인 7월에는 다량으로 유입되는 한강 담수로 인하여 해면 경사가 유지된다.

4. 결 론

동기간에 관측된 조석과 조류자료를 사용하여 한강하류 및 염하수로에서 장주기 조류성분의 주기적 변화 특성을 분석하였다. 장주기 조류성분의 주기적 변화 특성을 파악하기 위하여 절단주기 48시간의 low-pass filter를 사용하여 단주기 조석과 조류 성분을 제거하였다.

염하수로와 한강하구의 비선형성으로 인하여 하류인 T1(인천)에서 상류인 T3(전류리)으로 갈수록 배조와 복합조 그리고 산술평균해면이 증가한다(Table 2, 3). T3(전류리)의 상류에서는 조차가 큰 폭으로 감소하여 배조와 복합조도 감소하나 주요 천문조인 M_2분조와의 비는 증가한다 (Table 2). 즉 비선형성으로 인한 조석 변형과 산술평균해면의 상승은 상류로 갈수록 커지며, 하류방향의 해면경사가 유지된다. 조석변형이 작은 소조기에는 T2(강화)의 저조위와 고조위가 인천항과 유사하며, 두 지점간의 해수면 차이는 조시차에 의해서 발생하여 정현곡선과 같은 변화 특성을 보이고, 낙조시 하류방향의 경사(+)와 창조시 상류방향의 경사(-)가 유사한 크기이다(Fig.7(a)). 그러나 대조기에는 T2(강화)의 저조위가 EL(-)2.5 m 이하로 하강하지 않아 저조위가 EL(-)–4 m 이하로 하강하는 T1(인천)과 큰 차이를 보인다(Fig. 7(b)). 낙조시 두 정점간의 순간적인 해수면 차이는 최대 4 m이나 창조시에는 최대 2 m 내외이다. 따라서 조석 변형과 저조위 상승으로 인한 산술평균해면의 상승은 조차가 큰 대조기에 증가한다. 해면 경사의 대소조 변동은 순압력(barotropic forcing)의 대소조 주기 변화를 의미하며, 장주기 조류성분도 동일한 주기로 변화한다(Fig. 8). 즉 염하수로 및 한강하구에서 조석변형의 공간적 차이로 인해 생성되는 해수면 경사의 장주기 변동이 장주기 조류성분 생성의 주요 원인으로 판단된다. 이러한 해수면 경사의 장주기 변동과 이에 반응하는 장주기 조류성분은 M_{sf}로 표현될 수 있다. 한강 담수유입량이 급증하는 7월에는 소조기에도 해수면 경사가 유지된다(Fig. 9).

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (해수순환 및 생태계변화 예측기술개발사업)

참고문헌

해양수산부, 국립해양조사원 (2002). 한강임진강 유역에 대한 조위영향 연구(II). BSPM12800-1463-2, 452 pp.

윤병일 (2006). 경기만 한강하구 조석/조류 전파특성 및 비선형 천해분도에 대한 수치모델링. 인하대학교 석사학위논문, 93 pp.

Dyer, K.R. (1997). Estuaries, A physical introduction. John Wiley & Sons, Inc., New York, 195 pp.

Kim, C.S., Lim, H.S., Kim, J.A. and Kim, S.J. (2009). Residual flow and its implication to macro-tidal flats in Kyunggi Bay Estuary of Korea. J. Coast. Res., Special issue 56.

Park, K., Oh, J.H., Kim, H.S. and Im, H.H. (2002). Case study: Mass transport mechanism in Kyunggi Bay around han River mouth, Korea. J. hydraulic eng., 128(3): 257-267.

Parker, B.B. (1991). The relative importance of the various nonlinear mechanism in a wide range of tidal interactions (review). In: Tidal hydrodynamics, Parker, John Wiley & Sons, Inc., pp. 237-268.

Stacey, M.T., Burau, J.R. and Monismith, S.G. (2001). Creation of residual flows in a partially stratified estuary. J. Geophys. Res., 106: 17,013-17,037.

Speer, P.E, Aubrey, D.G. and Friedrichs, C.T. (1991). Nonlinear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. In: Tidal hydrodynamics, Parker, John Wiley & Sons, Inc., pp. 321-339.

Yanagi, T (1999). Coastal oceanography. Springer, 172 pp.

원고접수일: 2011년 8월 31일
수정본채택: 2011년 9월 23일(1차)
2011년 9월 29일(2차)
게재확정일: 2011년 9월 29일