

인천만의 조석조화해석 및 장기해수면 변동연구

A Study on the Tidal Harmonic Analysis, and long-term Sea Level Oscillations at Incheon Bay

이용창¹⁾
Lee, Yong chang

Abstract

This study investigate the characteristics of tidal constituents, and long-term mean sea level oscillations at Incheon bay. For this, the conditions of three tide stations around Incheon bay have examined, and carried out harmonic analysis on water level data for periods of about 40 years(1960~2007). Four major tidal constituents(M_2 , S_2 , K_1 , O_1) of each tide station showed tendency that change over the 18.61year lunar node cycle, and the type of tide at three stations is mainly semi-diurnal tides. And also, the past monthly tidal modulations are especially sensitive to the cumulative year of water level data in accuracy of tidal prediction. In case that regard the detached data at three tide stations as a single time series data of 40 years, the results of analysis on a single time series, long-term mean sea level oscillations and modulations of tidal datum at tide stations appears with a range of about 10cm, respectively. In addition, the predicted tides at the Incheon harbor by global and regional tide models of OSU(Oregon State University) based on various satellite altimetric(Topex Poseidon, Topex Tandem, ERS, GFO) data are compared with the observed tides by KHOA(the Korea Hydrographic and Oceanographic Administration). The results show that the high resolution regional model is a quite good agreement at coastal shallow water region.

Keywords : Incheon bay, tidal constituents, harmonic analysis, M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , msl, tidal datum

초 록

인천만 조석분조의 특성 및 장기해수면 변동 상황을 고찰하기 위해 인천항 항만건설 전·후, 독립적으로 설치·운영된 세 곳의 조위관측소 상황을 파악하고 총 40년간(1960~2007)의 조위관측자료에 대한 조화분석을 수행하였다. 연구결과, 조석의 주요 4분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)는 관측소 별로 18.61년의 달 교점 cycle에 따른 변동을 보였고, 세 관측소의 조석유형은 모두 반일주조의 경향을 나타내었다. 또한, 조위예측 시, 조위예측의 정확도는 조위관측자료의 누적 년 수 보다는 과거의 월별 조위특성과 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 특히, 세 관측소의 조위자료를 40년간 단일 시계열 자료로 가정하고 분석한 결과, 평균해수면 및 기본수준면의 장기간 해수면 변동은 각 조위관측소 별로 평균 10cm 내·외의 변동을 나타내었다. 아울러, 여러 종류의 위성고도계 자료(Topex Poseidon, Topex Tandem, ERS, GFO)를 근간으로 한 OSU(Oregon State University)의 지역 및 광역 조석모델에 의한 인천항 조위관측소의 조석분석 결과, 지역적 특성을 수렴한 고 해상 모델일수록 복잡한 해협이나 연안지역에 적합한 것으로 사료되었다.

핵심어 : 인천만, 조석분조, 조화분석, 주요 4분조, 평균해수면, 기본수준면

1. 서 론

조석이란, 주로 천문조석 즉, 달과 태양 등과 같은 천체의 위치와 지구자전에 의한 인력의 변화에 따른 해수면의 승강현상으로 항해, 어업, 연안토지등록과 관련된

해안선관리, 해양스포츠 등 해양의 모든 활동에 영향을 주는 중요한 현상이다. 이외의 원인으로는 기상의 규칙적인 변화에 따른 해면승강, 급격한 기압변화나 태풍 등에 의한 Surge 또는 해저화산이나 해저지진 등에 의해 해양의 장파가 전달되어오는 쓰나미 등도 포함된다. 해

1) 인천대학교 도시과학대학 도시환경공학부 교수(E-mail : yclee@incheon.ac.kr)

양과 인접한 각 국에서는 연안 및 해양 조석 관측을 실시하고 통계처리 및 해역시뮬레이션을 통해 조석 예보, 수심의 기준면 결정, 평균해면 변동조사 및 조석자료 제공에 활용하고 있다. 특히, 조석은 위도에 따라 주기나 높이가 달라지며 외해에서 천체력에 의해서 생겨난 천문 조석 성분이 해안으로 전파되어 오면서 해안선이나 해저지형의 변화, 마찰, 기타 천해조 등에 의해서도 영향을 받는다. 따라서, 연안환경의 변화를 가져오는 해안 건설구조물의 공사계획 및 운영, 해양공사의 작업시간, 백중사리나 부진동, 쓰나미 등에 의한 자연재해유발 대비 등에 영향을 주게 된다. 연안 해역에서 단기간에 실시되는 조석조사는 주로 해양공사의 측량, 설계 및 시공을 위한 자료로 활용되며 해안 및 항만조사 시 반드시 포함된다. 우리나라 국립해양조사원(KHOA)에서는 2010년 9월 현재, 서해·남해·동해안의 여러 곳에 42개의 조위관측소를 설치·운영하고 있다.

2. 연구 목적 및 방법

우리나라 서해안은 조석 현상이 우세한 해역으로 연안 수심측량·준설, 간척 및 매립 등과 관련하여 조석과 조류에 관한 많은 연구가 이루어져왔으며 최근, 서해연안의 대규모 개발로 인하여 조석특성의 변화가 예상된다. 해역의 조석특성은 해수면의 주기적 변동을 정량적으로 기술하는 조석분조의 조화상수(harmonic constants)로서 표현된다. 본 연구에서는 1960년~2007년간 인천만 조석의 주요 4분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)의 특성을 고찰하기 위해 우선, 국립해양조사원에서 고시한 인천의 조석분조상수, 인천항 주변에 위치한 “월미도 조위관측소”, “구 인천항 조위관측소” 및 “연안부두 조위관측소”에 대한 그동안의 관측상황을 파악하였다. 각 관측소의 조위관측자료를 매 1년 기준의 Robust fit weighting 조화분석(Leffler, 2008)을 통하여 62개의 분조를 산정한 후, 주요 4분조의 특성을 고찰하였다. 또한, 장기해수면의 변동 즉, 평균해수면의 변동 및 “평균해수면 - 주요 4분조의 반조차(진폭) 합” 으로부터 기본수준면의 변동을 고찰하였다. 아울러 미국 OSU(Oregon State University) ESR(Earth & Space Research) 연구실에서 개발한 OTIS(OSU Tidal Inversion Software)로부터 위성 radar 고도계(TOPEX/POSEIDON, TOPEX Tandem, ERS, GFO) 자료 및 기타 자료(검조계, 선상 ADCP ; Acoustic Doppler Current Profilers 등)를 동화·모델링(최병호, 1980 ; 이중

찬, 2001 ; Jicai, 2008)하여 개발한 광역 및 2가지 지역 조석모델을 활용하여 조석분조상수를 산출하고 비교·검토하였다.

3. 조석의 조화분석

실제의 조석은 기본적으로 기조력에 의한 강제진동이며, 기조력과 같은 주기를 가진 변동으로 분해할 수 있다. 조석을 구성하는 개개의 주기변동을 분조, 각 분조차의 $\frac{1}{2}$ 을 반조차라 하며 그 종류는 매우 많다. 어떤 관측점에서의 조석을 보면 각 분조의 주기는 완전히 일치하지만 진폭 및 위상은 각 분조마다 다르다. 장기간의 평균적 진폭과 위상차(지각 ; phase)를 조석상수, 관측자료에서 조석상수를 구하는 것을 조석의 조화분석이라고 한다. 조석상수는 지형변화 등이 없는 한 별로 변화하지 않으며 조석의 예보에 활용된다.(Steaey, 2006) 조석 패턴은 지역에 따라 다양하며 어떤 지역에서는 하루에 하나의 밀물과 썰물을 가지는 일주조(diurnal tide), 하루에 두 개의 대략 같은 밀물과 썰물을 가지는 반일주조(semidiurnal tide), 그 외 혼합조(mixed tides) 패턴이 있다.

Doodson(1944)의 급수로 399개의 분조가 정의되고 있는데 이중 100개는 장주기, 160개는 일주조, 115개는 반일주조 및 14개는 1/3 일주조 특성이 있다. 표 1은 George Darwin(1872)이 명명한 우리나라에서 활용되는 조차가 큰 주요 4분조와 주기를 요약한 것이다. 또한 주요 4분조의 진폭을 식 (1)에 적용하면 특정 조위관측소의 조석 유형을 판단할 수 있는데 조석유형상수(R)의 분포에 따라 $R \leq 0.25$ 반일주조, $0.25 < R \leq 1.5$ (혼합주조) 및 $1.50 < R$ 일주조)로 분류한다.(USACE, 2001) 조석과 조류의 예측을 위한 조화모델에서는 천문조에 의한 조석운동을 여러 단순 조화 항(분조)을 합성한 것이라고 생각하여 나타낼 수 있다. 조석의 조화분석법에는 Darwin 방법, LTI(Liverpool Tidal Institute)방법, 최소제곱법, Robust fitting방법 등이 대표적이다. (Schureman, 1976 ; Forman, 1996 ; Cartwright, 2000 ; Boon, 2004)

표 1. 우리나라의 주요 4분조와 주기

기호	명칭	조화상수기호·주기		
		반조차	지각	주기
M_2	달의 반일주조	H_m	K_m	12h 25m
S_2	태양의 반일주조	H_s	K_s	12h 00m
K_1	달과 태양의 합성일주조	H'	K'	23h 56m
O_1	달의 일주조	H_0	K_0	25h 49m

$$R = \frac{K' + K_o}{K_m + K_s} \quad (1)$$

표 2. 최소제곱 fitting(Matlab code)

```

X = ones(n,1);
for j = 1 : m
    X = [X cos(w(j)*t)' sin(w(j)*t)'];
end
A = (X' * X) \ (X' * Y);
    
```

조석조화모델의 적합성은 전적으로 외력에 대한 해양의 반응에 종속되며 조석모델의 기본방정식을 구성하면 식 (2)와 같다.

$$h(t) = h_0 + \sum_{j=1}^m f_j H_j \cos(\omega_j t + u_j - \kappa_j) \quad (2)$$

여기서, t =임의 시점(in serial hours), $h(t)$ =에서 예측된 조위, h_0 =평균조위, f_j = j 번째 분조의 lunar node factor, H_j =18.6년 lunar node cycle에 대한 j 번째 분조의 평균반조차, ω_j = j 번째 분조의 주파수, u_j = j 번째 분조에 대한 nodal phase, κ_j =시간 원점에 대한 j 번째 분조의 위상, m =분조 수이다. 주태양분조들에 대해서는 $f_j=1$ 및 $u_j=0$ 이 된다.

$[Y] = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ \dots \ h_n]'$ 는 n 개의 관측값을 포함하는 벡터행렬이다. n 개 관측값으로 구성된 관측자료 행렬 Y 를 이용하여 m 개 분조에 대한 최소제곱 조화분석을 수행할 수 있도록 MATLAB 코드를 구성하면 표 2와 같다. 이외에도 조화상수에 의해 계산식으로 얻어질 수 있는 비조화상수가 있다. 지각의 기준으로 현재, 국내에서는 한국표준시 자오선기준($g, 135^\circ E$), Greenwich 자오선기준(G), 및 관측지점 경도기준(κ)이 혼용되고 있다. 국립해양조사원은 초창기부터 κ 기준을 사용하고 있으나 해양관련 국내·외 학회차원의 지구적 조석특성의 비교는 G 기준, 우리나라 주변해역의 연구에서는 g 기준 등을 고려할 수 있다.(변도성, 2007) 식 (3)은 지각기준 간의 변환식을 나타낸다. 여기서, a 는 각 분조의 각속도(degree/ hour)로서 주요 4분조의 각속도는 각각 $aM_2 = 29.9841042$, $aS_2 = 30.0000000$, $aK_1 = 15.0410686$ 및 $aO_1 = 13.9430356$ 이며 S = 표준자오선 경도, L = 관측지점 경도, p 는 반일주조인 경우 2, 일주조는 1이다.(US Army, 1995)

$$G = g + aS/15 = \kappa + pL \quad (3)$$

치수목적의 육상측량에서는 평균해수면(MSL ; Mean Sea Level)을 해양측량, 해안공사 및 해도와 같은 이수목적의 경우는 기본수준면(DL ; Datum Level)을 기준면으로 사용하고 있다. 평균해수면은 매시 조위의 평균치를 말하며 매일의 평균해면은 기압, 바람, 강수, 해수의 비중, 해류 등에 따라 변화한다. 원칙적으로 평균해면은 1년 단위로 연평균해면을 채용하며 우리나라는 인천항의 연평균해면으로 정하고 있다. 우리나라 연안의 월평균해면은 겨울철에 낮고 여름철에 높으며 그 차는 대체로 30~60cm이다. 조위 및 수심은 어떤 기준면으로부터 측정된 값으로 그 기준면을 정밀하게 설정해야한다. 우리나라의 기본수준면은 약취저조위로 장소마다 고유값을 가지며 해도, 조석표, 항만공사기준면으로 사용하고 있다. 기본수준면의 결정은 해당 지점의 년평균해면값과 4분조의 반조차 값을 결정한 후, 식 (4)와 같이 해당 지점의 평균해수면에서 주요 4분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 반조차(진폭 ; H_m, H_s, H', H_o)의 합만큼 아래쪽으로 취하여 결정한다. (R. Pawlowicz, 2003)

$$DL = MSL - (H_m + H_s + H' + H_o) \quad (4)$$

기본수준점표(T.B.M ; Tidal Bench Mark)는 육상에 설치한 수준표석의 일종으로 기본수준면으로 부터의 높이를 결정할 때 활용한다. 인천항의 조화분석 및 관련 연구로는 Shigeo 1950)가 “월미도 검조소” 자료(1943~1944년)를 LTI 방법을 이용하여 조화상수(60개 분조)를 산정한 것을 시작으로 이석우(1972), 한상복(1980), 최병호(1980) 및 안경수(2001) 등이 1972년까지의 조위자료를 이용하여 연구를 수행한바 있다. 국립해양조사원 및 한국해양연구원(1996)에서는 우리나라 연안, 주요 항만의 조화상수, 비조화상수 및 년평균해면값을 수로기술연보(현, 해양조사기술연보), ‘한반도 주변 조석 조화상수 자료집’ 및 웹서비스를 통하여 부분적으로 제공하고 있다.

4. 연구내용 및 분석

4.1 인천만 주변 조위관측소 상황

표 3은 수로국 및 국립해양조사원에서 인천항 주변에 설치한 조위관측소의 제원과 관측소별 관측기간을 나타낸 것이며 그림 1은 표 3의 조위관측소를 위성영상에 도시한 것이다.

표 3. 인천항 주변 조위관측소 상황

관측소	위치(WGS84)		측정기기	관측기간	비고
	위도(° ' ")	경도(° ' ")			
인천항 dock	37-28-04.101	126-37-04.559	Ott 형	1960~1972	현재, 제1부두와 제3부두사이 수역
월미도	37-28-18.099	126-35-43.567	Ott 형	1975~1998	월미놀이공원 앞 인접 해상
연안부두(현)	37-27-07.107	126-35-31.568	Ott형 원격	1999~현재	인천시 중구 항동 역무부두방파제



그림 1. 인천만 주변 조위관측소 상황

본 연구에서 활용한 조위자료는 1960년~2010년 6월 기간 동안 중, 월 관측 누락기간이 포함된 년도(1975, 1990, 1991, 1992, 1993, 1997, 2008, 2009), 인천항 항만공사 기간(1973. 7~1974. 8, 갑문완공)중 관측이 중단된 년도(1973, 1974)를 제외한 인천항 DOCK 관측소(13년), 월미도 관측소(18년) 및 연안부두 관측소(9년) 총 40년간의 조위관측자료를 관측소 별 조석의 조화분석에 활용하였다. 또한, 2008년 1월~2010년 6월 기간 중, 연안부두 관측소의 일부분 자료를 조위예측에 활용하였다.

4.2 조위관측소 별 조석의 조화분석

각 조위관측소의 년도 별, 조석조화분석에 활용된 조위관측자료는 각 조위관측소의 특성은 물론 시계열 특성을 동시에 내포하고 있다.

표 4는 각 관측소별로 산정한 조석분조의 년도 별 반조차(a)와 지각(p) 및 표준편차(std)의 평균값을 정리한 것이다. 관측소별 주요 4분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 진폭 및 지각의 최대·최소 극간편차는 8cm, 2cm, 3cm, 3cm 및 6°, 8°, 2°, 8°로서 비교적 근접한 결과를 나타내었다. 각 편차는 인천항 개발 전·후 주변 및 입지환경의 변화, 기후변화 등의 종합된 결과로 사료된다. 관측소별 조석

조화상수의 표준편차는 진폭 및 지각에서 평균 2cm 및 2° 내외의 분포를 보였다. 특히, 월미도 조위관측소의 경우, 본 연구에서 산출한 18년(1976~1998)기간의 조화상수 진폭과 그림 1의 Shigeo(1950) 조화상수 진폭 성분은 매우 근접한 결과를 보였는데 약간의 편차는 30여년의 경과기간 중 주변 환경 및 기후변화, 해석방법의 차이 등으로 사료된다. 또한, 세 조위관측소 주요 4분조의 진폭을 식 (1)에 대입하고 산정한 조석유형상수 (R)값은 모두 0.17로서 반일주조의 조석유형을 나타내었다. 식 (3)으로부터 표 4의 월미도 관측소 주요 4분조의 표준시 지각을 월미도 관측점의 지각기준으로 변환하면 M_2, S_2, K_1 및 O_1 의 지각은 각각 131.14°, 179.67°, 298.66° 및 266.67°로서 Shigeo(1950)의 해석결과와 매우 근사하였다. 그림 2는 각 조위관측소 및 시계열 특성을 x축에 동시에 설정하고 인천만 조석의 주요 4분조 반조차의 변동 특성을 각각 나타낸 것이다. 관측소의 입지환경차이, 시차에 따른 환경변화 및 산발적으로 누락된 8년간의 자료 관계로 부분적인 편차는 있으나 각 주요 분조 마다 대체로 일정한 변동범위를 보였고 특히, 달의 교점 회귀년주기 즉, (18.61년)로 순환하는 경향을 나타내고 있다. 그림 2에서 1978~1979 및 1997~1998 기간은 1960년을

표 4. 각 조위관측소 별, 조석 4분조 및 표준편차의 평균값 (지각기준 : 135°E 표준시)

관측소 명칭	관측기간 (년)	상수 및 신뢰도	반조차(진폭) 평균값 cm				지각(phase) 평균값, 10진 deg(°)				조석유형 R, 식(1)
			M ₂ -a	S ₂ -a	K ₁ -a	O ₁ -a	M ₂ -p	S ₂ -p	K ₁ -p	O ₁ -p	
인천항 DOCK	13	상수	289.09	112.21	40.68	30.31	136.25	193.43	306.46	261.13	0.17
		std	2.01	0.39	2.30	1.00	0.91	1.34	0.90	1.71	
월미도	18	상수	290.76	112.47	38.20	27.51	138.76	196.43	307.41	265.54	0.17
		std	2.22	0.43	2.52	1.09	0.87	1.33	0.83	1.83	
연안부두	9	상수	282.49	114.01	41.19	31.23	132.43	188.50	307.97	257.89	0.17
		std	1.88	0.39	2.16	0.92	0.71	1.00	0.70	1.25	
평균		상수	288.36	112.73	39.68	29.26	136.52	193.67	307.23	262.38	0.17
		std	2.08	0.41	2.37	1.02	0.85	1.26	0.83	1.66	

원년으로 가정할 때, 약 19년의 주기성을 나타내는 년도이다. 그림 3은 연안부두 조위관측소에서 측정된 7년(2001~2007)간의 조위자료로부터 산정한 62개 분조로부터 2010년 4월, 5월 및 6월의 조위를 예측하고 국립해양조사원의 실측조위와 함께 시계열로 나타낸 것이다. 표 5는 조석의 조화해석에 사용된 조위자료의 기간별, 조석상수를 구하고 2010년 4월~6월에 대한 예측조위와 국립해양조사원의 실측조위와의 편차에 대한 평균제곱근오차(rms)를 월별로 나타낸 것이다. 2008년 및 2009년

자료에는 조위자료가 누락된 “월”이 있어 예측기간이 포함될 수 있도록 3개월분 및 4개월분 조위자료를 선정·활용하였다. 7년간의 누적자료로부터 산정한 62개 분조에 의한 예측 결과는 2001년~2007년 조위자료 중, 예측기간에 가장 근접한 2007년, 1년간의 예측 결과에 비해 월등한 접근성을 보이지 않아 조위예측 시, 누적자료의 년 수에 큰 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 2007~2009년 기간 중, 예측기간의 해당 월인, 매년 4월~6월의 조위자료를 활용하여 조위를 예측한 결과는 7년 및 1

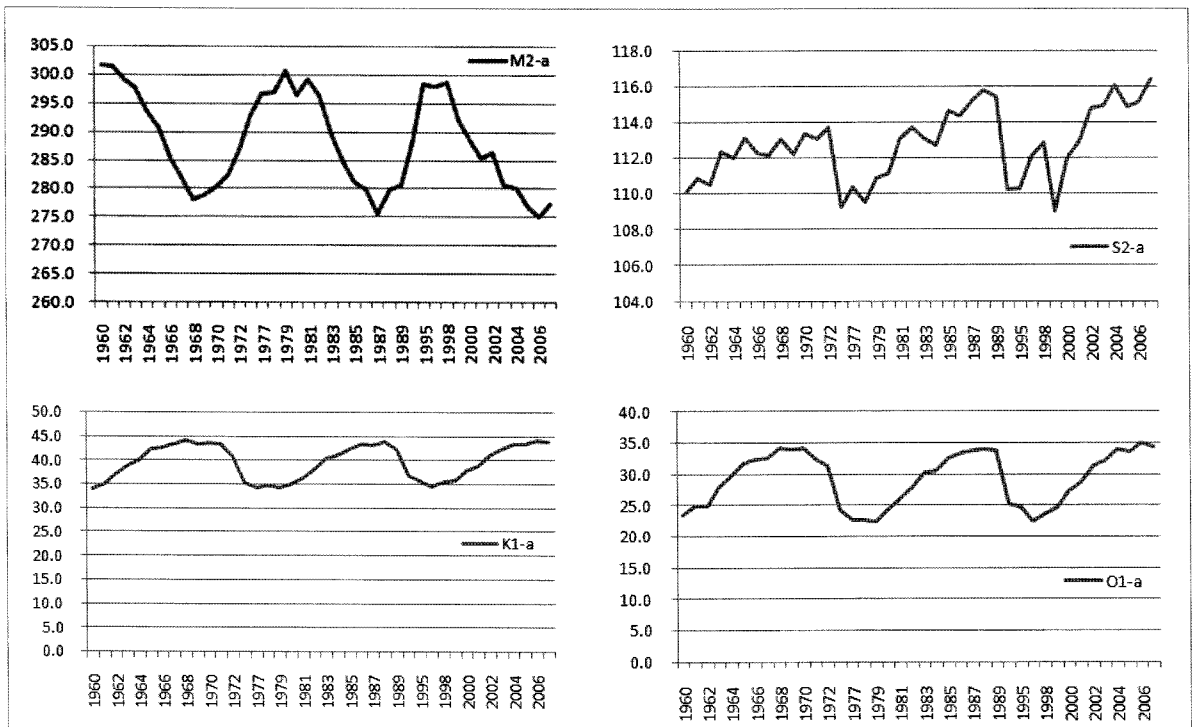


그림 2. 년도 별 인천항 조위관측소의 주요 4분조 반조차(진폭) 변동

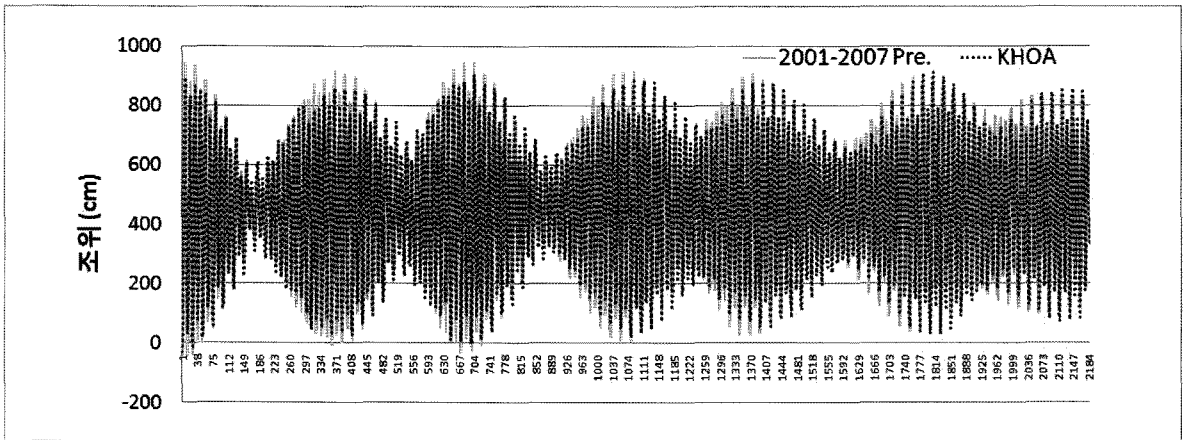


그림 3. 연안부두 관측소의 2010년 4월~6월 중, 조위 예측 시계열 분포

년 기간의 예측결과에 비해 월등한 향상을 나타내었다. 그러나 2007년 및 2008년의 3개월분 자료에 예측 전월, 1개월을 추가한 4개월분 자료에 의한 예측은 3개월의 결과에 비해 편차가 증가하였다. 따라서, 조석해석 및 예측 시, 태음 분조의 진폭 변동과 관련한 보정이 고려되고 이 기간 중, 특별한 외력(태풍, 쓰나미 등)이 작용하

지 않는 경우, 과거 조석의 월별 조위특성은 조위예측과 상관성이 높은 것으로 사료된다. 그림 4는 예측기간 중, 연안부두 조위관측소의 실측조위와 가장 근접성이 양호한 2009.4월~6월 기간의 62개 조석분조에 의한 예측조위와 국립해양조사원의 실측조위 간의 편차를 시계열로 나타낸 것이다.

표 5. 연안부두 조위관측소, 조위편차의 평균제곱근오차(cm, rms)

예측 년 월 조석상수 종류	2010년			
	4월	5월	6월	4~6월
2001~2007 (7년)	37.048	36.956	36.927	36.729
2007 (1년)	40.067	39.224	33.471	38.111
2007.3~2007.6 (4개월)	23.684	25.525	26.116	25.710
2007.4~2007.6 (3개월)	22.70	520.581	24.799	23.427
2008.3~2008.6 (4개월)	24.243	23.931	25.212	25.106
2008.4~2008.6 (3개월)	26.827	20.088	23.165	24.155
2009.4~2009.6 (3개월)	31.204	18.910	18.824	24.320

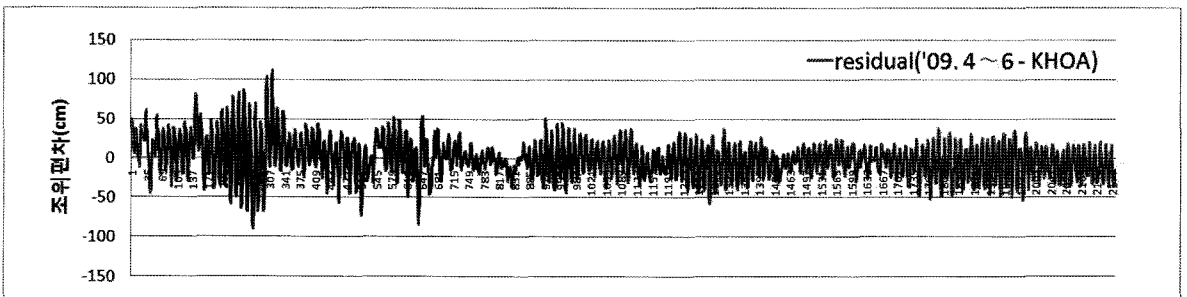


그림 4. 연안부두 관측소의 2010년 4월~6월 중, 조위편차 시계열 분포

4.3 조위관측소별 평균해수면 및 기본수준면

평균해수면은 기압, 바람, 강수, 해수의 비중, 해류 등에 따라 변화하며 조위관측소의 분조 또한, 달 교점의 경도 변화에 따라 18.61년의 주기로 변하는 태음분조의 진폭 변동으로 인해 변화된다. 태음분조의 진폭 보정은 각 조위관측소의 위도정보를 활용하는데 세 관측소의 위도 차가 14" 초~1' 12" 범위에 있어 관측소간 보정량의 편차는 미소하였다. 세 조위관측소는 인천항 주변 반경 1km내·외의 각기 다른 장소에 위치하며 시간적으로 독립 운영되었지만, 각 조위자료를 조합할 경우, 연속 시계열 자료 특성을 갖는다. 본 연구에서는 각 조위관측소의 해수면 변동 특성은 물론, 인천항 개발 전·후 주변 및 입지환경의 변화, 기후변화 등의 변동요인으로 다소 무리는 있을 수 있지만, 세 관측소의 조위자료를 40년간 단일 시계열자료로 가정하고 인천만의 해수면 변동을 검토하였다. 그림 5 및 6은 각각 40년간 조위관측소별, 평균해수면의 변동 및 기본수준면을 결정하기 위한 "주요 4분조 진폭 합"의 변동을 나타낸 것이다. 평균해수면은 각 조위관측소 별로 평균 10cm의 변동을 보였고 1995년도를 제외하면, 전체적으로는 450~465cm 범위 내의 변동경향을 나타내었다. 인천항, 월미도 및 연

안부두 관측소의 MSL 평균값은 각각, 458.34 cm, 454.30cm 및 461.84cm 로서 1943~1944년 조위자료에 의한 MSL(464.0cm; Shigeo, 1950)과는 약간의 편차를 보이고 있는데 현, 연안부두 조위관측소와는 가장 작은 편차를 보였다. 또한, 기본수준면 결정과 관련하여 "4분조의 진폭 합"은 그림 6과 같이 평균해수면과는 반대되는 변동 경향으로 각 조위관측소 별로 10cm 이상의 편차를 보였고 평균값은 471.95 cm, 468.44 cm 및 468.61cm 였다. 특히, 인천항 조위관측소는 평균해수면 및 기본수준면의 변동 폭이 다른 두 관측소에 비해 크게 나타나고 있다. 원인으로는 주변 입지환경의 변동, 단기간의 기후변화 및 선박의 출입이 빈번한 내항에 위치한 점 등의 복합적 원인으로 사료된다. 미국 NOAA의 NOS(National Ocean Service, 2001, 2003)에서는 국가차원의 조석기준면 결정에 필요한 조위관측기간을 18.6년(NTDE; National Tidal Datum Epoch)으로 규정하고 있으며 기후변화, 쓰나미, 태풍 외 주변지형의 변화 등을 고려하여 25년 마다 기준면을 갱신하고 있다. 향후, 평균해수면 및 기본수준면에 대한 면밀한 변동 분석을 통하여 국내에 맞는 기준을 정하고 갱신여부를 검토해야할 것이다.

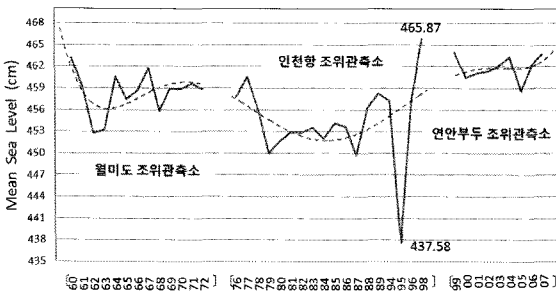


그림 5. 조위관측소 별 평균해수면 변동

4.4 OSU ESR의 광역 및 지역 조석모델에 의한 조석상수

표 6은 OSU의 ESR 연구실에서 다양한 위성 radar 고도계자료, 검조계 및 선상 ADCP 자료를 동화·모델링하여 개발한 조석모델의 제원 및 모델의 적용구역 등을 나타낸다.

표 6. OSU ESR의 광역 및 지역 조석모델

모델 명	해상도	발표년도	적용구역
TPX07.2	1/4° (15')	2009. 7	전세계
hf.YS_2008	1/30° (2')	2008. 8	서해
hf.PO_2009	1/12° (5')	2009. 7	태평양

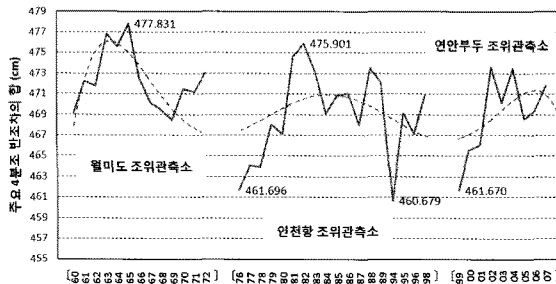


그림 6. 조위관측소 별 주요 4분조 반조차 합의 변동

각 모델은 고도, 속도 및 수심측량자료에 관련한 격자형 조화계수 형식으로 3개의 2진화일로 구성·제공된다. 표 7은 3가지 모델을 OSU ESR의 TMD(Tidal Model Driver)에 적용하고 인천만 조위관측소 3곳의 주요 4분조 조석상수를 산출한 것으로 각각의 기준은 그리니치 자오선이며 각 모델에 따른 조화상수의 편차를 확인할 수 있다. 앞선 40년간 조석조화분석결과에 가장 근접한 경향을 나타낸 모델은 인천만의 지역적 특성을 가장 많이

표 7. OSU ESR 모델별 인천만 조위관측소의 조석조화상수 (지각기준 : Greenwich)

조석 모델	조 위 관측소	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁		4분조
		진폭	지각	진폭	지각	진폭	지각	진폭	지각	진폭 합
서 해	연안부두	308.74	232.53	108.09	289.05	41.80	158.32	29.54	140.28	488.17
	인천항 DOCK	310.79	232.82	108.65	289.57	41.88	158.45	29.58	140.49	490.90
	월미도	310.71	232.94	108.67	289.68	41.87	158.53	29.57	140.56	490.82
태 평 양	연안부두	240.94	263.80	91.54	307.42	38.84	177.91	27.41	149.30	398.73
	인천항 DOCK	241.32	264.03	91.70	307.66	38.86	178.02	27.42	149.40	399.30
	월미도	242.24	264.73	92.07	308.37	38.89	178.38	27.44	149.73	400.64
전 세 계	연안부두	344.95	73.70	189.48	86.82	25.61	279.30	55.65	215.01	615.69
	인천항 DOCK	368.43	74.41	198.07	86.08	27.13	281.42	58.29	215.23	651.92
	월미도	334.28	73.49	185.73	86.70	25.20	278.51	55.02	214.79	600.23

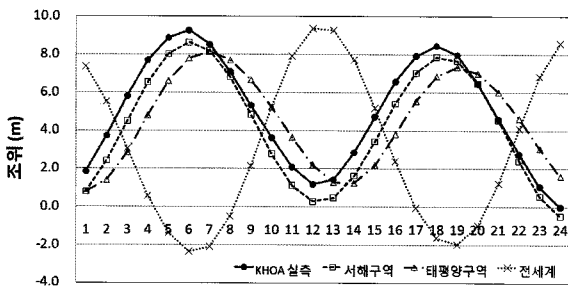


그림 7. OSU ESR 조석모델 별, 연안부두 조위관측소의 조석 예측 시계열 분포

반영하고 있는 서해구역모델이었고 전 세계 모델의 경우는 진폭 및 지각에서 매우 큰 편차를 보였다. 표 7에서 서해구역모델에 의한 월미도 관측소의 그리니치 기준 지각을 식 (3)을 이용하여 표준시 기준 지각으로 변환하고 표 4의 표준시 기준 지각과 비교하였다. 표준시 기준에 의한 주요 4분조의 변환 지각은 각각 133.80°, 199.69°, 293.90° 및 266.05°로서 표 4의 해석결과 (138.76°, 196.43°, 307.41° 및 265.54°)에 근사함을 보였다. 그림 7은 위의 세 가지 모델로부터 각각 산정한 조석상수를 2010년 8월 10일 연안부두 조위관측소의 조위 예측에 적용하고 산정한 예측조위의 시계열 분포를 국립해양조사원의 실측조위와 비교한 것이다. 서해구역모델 및 태평양구역모델의 경우, 진폭 및 지각에서 약간의 편차는 있지만 실측조위자료 대비 대체로 유사한 조위에 예측 경향을 보였다. 그림 7에서 서해모델 및 태평양모델의 지각편차는 표 4 및 표 7의 세 가지 지각기준(g, G, κ) 변환 과정에서 확인한 지각변환편차($\kappa \sim G$; 대략 10° 이내)에 기인된 것으로 사료된다. 전 세계모델에 의한 예

측조위의 결과는 진폭 특히, 지각에서 다른 두 모델과는 큰 편차를 보였다. 따라서, 지역적 특성을 수렴한 고해상도 모델일수록 복잡한 해협이나 연안지역에 적합하고 광역모델은 주로 대양에 적합한 것으로 사료되었다. 또한, 다양한 자료를 동화·모델링한 조석모델의 특성 및 조화분석 프로그램의 해석 알고리즘 차이에 따른 특성 관계로 조석의 조화분석 시, 동일 계열 및 모듈을 사용한 모델과 해석프로그램을 사용해야 할 것이다.

5. 결 론

인천만 조석분조의 특성 및 장기해수면 변동 상황을 고찰하기 위해 인천항 항만건설 전·후, 시차를 갖고 설치된 세 곳의 조위관측소 상황을 파악하고 2010년 6월까지의 조위관측자료를 활용하여 조화분석을 수행한 결과, 조석분조상수, 평균해수면 및 기본수준면의 변동 상황을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

첫째, 각 조위관측소의 환경차이와 불연속 특성을 갖는 조위자료로 인해 부분적인 편차는 있으나 관측소 별로 조석의 주요 4분조마다 일정한 변동범위를 보였고 특히, 달의 교점 회귀년 주기에 따른 각 분조의 변동경향도 확인할 수 있었다.

둘째, 세 조위관측소의 조석유형상수(R)는 모두 0.17로 동일한 값을 나타내어 반일주조의 조석 유형을 보였다.

셋째, 조위예측 시, 사용되는 조위관측자료의 누적 년수는 예측정확도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료되었고 태음 분조의 진폭 변동과 관련된 보정 및 조화해석 기간 중, 특별한 외력이 없다면, 과거 조석의 월별 조위

특성은 조위예측과 상관성이 높은 것으로 사료된다.

넷째, 입지환경의 변화, 기후변화 등의 변동요인으로 다소 무리는 있지만, 시간적으로 독립 운영된 인천항 주변 반경 1km 내 · 외에 위치한 세 장소의 조위관측소 자료를 조합하여 40년간 단일 시계열 자료로 가정하고 분석한 결과, 평균해수면 및 기본수준면의 장기 해수면 변동은 각 조위 관측소 별로 평균 10cm 내 · 외의 변동경향을 보였다.

다섯째, 위성고도계 자료를 근간으로 한 OSU ESR의 지역 및 광역 조석모델에 의한 인천항 조위관측소들의 조석 분석 결과, 고 해상 지역모델이 복잡한 해협이나 연안지역에 적합한 것으로 사료되었다.

본 연구를 통해 인천만의 주요 4분조의 특성과 평균해수면 및 기본수준면의 장기 변동 특성을 고찰하였다. 특히, 인천만의 평균해수면은 우리나라 육상부, 표고의 기준면으로 학술적은 물론 실무적으로도 의의가 크므로 평균해수면 및 기본수준면에 대한 면밀한 변동 분석을 통하여 국내에 맞는 관리기준을 정하고 유지관리 방안을 적극 검토해야 할 것이다.

참고문헌

국립해양조사원, www.khoa.go.kr
 이종찬, 김창식 (2001), Topex/Poseidon 고도계 자료를 이용한 북동 아시아 해역의 조석 산정, *Journal of the Korean Society of Oceanography* Vol. 6, No. 1, pp. 1~12.
 변도성 (2007), 우리나라 조석지각 기준 표기에 대한 고찰, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol.12, No.3, pp. 234~238.
 Shigeo (1950), 인천항의 조석에 대하여, *일본해양학회지*, 6(2), pp. 16~22.
 이석우 (1972), 인천항의 조석, 조류 및 조랑에 대하여, *한국해양학회지*, 제 7권 제 2호, pp. 86~97.
 한상복 (1980), 인천의 조차변동, *한국해양학회지*, 제 15권, 2호, pp. 123~128.
 최병호 (1980), 인천항 조위 분석에 관한 연구, *한국해양연구소 보고서* 88-02, p. 72.
 최병호 (1997), 세계자체계에 의한 전 지구 해양조석산정, *한국측지학회지*, 제 15권, 제 1호, pp. 51~61.
 안경수, 조길문, 박종현 (2001), 인천항의 조석조화상수 분석에 의한 조위예측, *한국해양 · 해양공학발표논문집*, 제 12권, pp. 214~218.

한국해양연구원 : www.kordi.re.kr
 한국해양연구소 (1996), 한반도 조석 조화 상수집 (1).
 Leffler, Keith, Jay (2008), DA, Enhancing tidal harmonic analysis : Robust (hybrid L1/L2) solutions, *Continental Shelf Research* in press.
 OSU ESR, <http://volkov.oce.orst.edu/tides/>
 Jicai Zhang and Xianqing Lu (2008), On the Simulation M2 Tide in the Bohai, Yellow, and East China Seas with TOPEX/Poseidon Altimeter Data, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol.19, No.1~2, pp. 173~181.
 Steacy Dopp Hicks (2006), Understanding Tides, *NOAA Report*.
 Doodson, A.T. and H.D. Warburg (1944), Admiralty Manual of Tides. Admiralty *Charts and Publications*, London, England.
 The U.S. Army Corps of Engineer's (USACE's) (2001), *Coastal Engineering Manual*, Report Number : EM 1110-2-1100
 Schureman, P. (1976), Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, *United States Government Printing Office, Washington*.
 Foreman, M.G.G. (1996), Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction, *Pacific Marine Science Report* 77-10, p. 58.
 Cartwright, D.E. (2000), Tides : A scientific history. *Cambridge University Press*.
 Boon, J.D. (2004), Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current analysis and Predictions, Storm surges and Sea Level Trends. *Horwood Publishing, Chichester, U.K.*
 US Army Engineer Waterways Experiment Station (1995), *Dredging Research Technical Note, DRP-1-19*.
 R. Pawlowicz, B. Beardsley, and S. Lentz (2003), "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE", *Computers and Geosciences* 28, pp. 929~937.
 NOS (2001), Tidal Datums and Their Applications, *NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1*.
 NOS (2003), Computational Techniques for Tidal Datums Handbook, *NOAA Special Publication NOS CO-OPS 2*.
 George Howard Darwin (1975), "Tides", *Encyclopædia Britannica*, Ninth Edition, IV. HARMONIC ANALYSIS, Part 23." Development of Equilibrium Theory of Tides in Terms of the Elements of the Orbits".