

인천항의 조석조화상수 분석에 의한 조위예측 Tide Level Prediction by Analysis of Tidal Harmonic Constants at Incheon Harbor

안경수¹ · 조길문² · 박종현³ · 김강지³

Kyung Soo Ahn¹, Kil Moon Cho², Jong Hyun Park³, and Kang Chi Kim³

1. 서 론

조석을 조화분해하면 주기성분을 갖는 분조들을 분석해 낼 수 있으며 조석의 조화분석이라고도 한다. 이 분조는 진폭(amplitude)과 위상(phase lag) 두 성분으로 이루어져 있다. 조화상수(Harmonic constants)란 각 분조의 조차가 1/2인 진폭(amplitude)과 위상(phase lag)을 말한다. 또한 진폭과 위상은 주위 조건에 대하여 여러 가지 크고 작은 변화를 보인다.

인천항의 조석의 조화분석에 관한 연구를 살펴보면, 우선 Shigeo(1950)는 1943~1944년의 2년간의 검조자료를 T.I.방법(Tidal Institute method, Doodson(1928, 수정)을 이용하여 60개분조의 조화상수를 산정하였고, 이석우(1972)는 인천항의 조위 및 조류현상을 단기간관측자료 및 Shigeo의 분석결과를 이용하여 발표한 바 있으며, 한상복(1980)은 인천항의 조차의 변동을 분석하고, 조차와 조석조화상수와의 관계를 밝힌 바 있다. 최병호(1980)는 인천항의 년별 조화분석 및 연속조화분석을 통해 설계해면자료를 추정하였고 주요 분조들의 변화도를 분석한 바 있다.

조위예측자료는 국립해양조사원에서 관측된 것으로 1960~1972년에는 구선거(37°-27' -54" N, 126°-37' -12" E)의 고정 검조소에서 실시되었다. 이후 인천항의 항만공사(1973.7~1974.12)로 일시 중지되었다가 1975~1998년까지는 월미도(37°-28' -08" N, 126°-35' -51" E)에서 관측되었고, 1999년 이후로는 연안부두(37°-26' -57" N, 126°-35' -39" E)로 이전되어 현재에 이르고 있다. 본 연구에서는 인천항의 38년(1960~1972년,

1975~1998년, 1999년)간의 조위자료 중 1960~1972년 간의 분석자료년별 및 분석기간별(1년씩 누적) 주요분조의 변화와 4대 주요분조(O₁, K₁, M₂, S₂)의 변동특성을 이용하여 조위예측 정확도에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 연구방법

영국해양연구소에서 개발한 조석분해 프로그램인 TIRA(Tidal Institute Recurssive Analysiss(Murray, M.T. 1964)를 사용하여 조석조화상수의 특성을 분석하였고, 조위예측에는 분석된 조석조화상수를 Input Data로 하는 조위예측 프로그램인 MARIE를 사용하였다. 이때 분조는 평균해면(Z₀)과, 계절적 영향을 반영하기 위해 장주기 분조(S_a, S_{sa}, M_m, M_{af}, M_f)등을 포함한 63개의 분조들을 사용하였다.

3. 인천항의 조화상수의 분석

3.1 년별 조화상수의 변화

연도별 인천항의 조석조화상수의 변동특성을 알아보기 위해서 본 연구에서는 조화상수의 변동에 영향을 미치는 수많은 요인과 63개의 분조 중, 우리나라의 평균해면(Mean Sea Level)을 구성하는 약최저조면(A.L.L.W : Approximate Lowest Low Water level)과 4대 주요분조(O₁, K₁, M₂, S₂)중 4대 주요분조에 대해서만 분석하였다. 이 주요분조들을 간단히 설명하면 다음과 같다.

¹ 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 (Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental system Eng., University of Incheon)

² (주)세일종합기술공사 (Seil Engineering CO., LTD)

³ 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정 (Ms. Student, Dept. of Civil & Environment system Eng., University of Incheon)

- 주태음반일주조(M_2) : 달이 상대적으로 지구를 일주함으로써 발생하는 분조로 주기는 12시간 25분이다.
- 주태양반일주조(S_2) : 태양이 상대적으로 지구를 일주함으로써 발생하는 분조로서 주기는 12시간이다.
- 일일합성주조(K_1) : 달과 태양이 그 질량의 중심에 집중하여 적도면상을 회전할 때의 분조로 주기는 23시간 56분이다.
- 주태음일주조(O_1) : 달이 1일에 일주할 때 생기는 분조로서 주기는 25시간 49분이다.

표 1은 구선거('60년~'72년) 4대 주요분조의 조화상수 값을 나타내며, 표 2는 구선거('60년~'72년) 조위관측자료에 대한 13년간의 통계량을 계산한 표이다.

표 1. 주요분조의 년별 조화상수(구선거)

년	O_1		K_1		M_2		S_2	
	H(cm)	g(°)	H(cm)	g(°)	H(cm)	g(°)	H(cm)	g(°)
60	28.99	257.79	38.47	297.28	290.75	122.56	109.78	180.67
61	29.39	258.02	38.68	297.46	291.25	123.40	110.33	181.38
62	28.13	263.32	39.89	304.87	291.77	137.40	110.48	195.69
63	29.53	265.10	40.04	303.49	293.46	138.65	112.22	197.25
64	29.33	264.67	39.89	304.99	293.02	138.34	111.90	196.39
65	29.64	266.05	40.52	304.98	293.48	138.36	113.36	196.08
66	28.83	266.31	39.53	305.73	291.55	137.96	112.56	195.78
67	28.21	265.90	39.62	304.71	290.64	137.28	112.33	194.75
68	29.03	265.54	39.85	304.04	288.12	137.31	113.23	194.87
69	28.77	266.97	38.94	304.56	289.34	137.48	112.66	195.48
70	27.84	264.56	37.77	305.88	283.61	137.37	108.86	195.77
71	28.36	266.55	39.42	304.36	288.65	137.86	112.77	195.14
72	27.69	267.60	37.65	305.72	286.63	137.60	110.92	195.82

표 2. 4대 주요분조의 년별 조화상수의 통계량

분조	진폭(H)					위상(g)				
	MEAN (cm)	SD (cm)	MAX (cm)	MIN (cm)	CV (%)	MEAN (°)	SD (°)	MAX (°)	MIN (°)	CV (%)
O_1	28.75	0.65	29.64	27.69	2.26	264.49	3.13	267.60	257.79	1.18
K_1	39.25	0.89	40.52	37.65	2.26	303.70	2.89	305.88	297.28	0.95
M_2	290.18	2.87	293.48	283.61	0.99	135.51	5.58	138.65	122.56	4.12
S_2	111.65	1.42	113.36	108.87	1.28	193.47	5.56	197.25	180.67	2.88

그림 1.1~그림 4.2는 '60년~'72년간의 조위관측자료에 대한 4대 주요분조의 진폭과 위상의 변화양상을 나타낸 것이다.

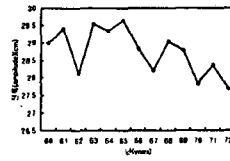


그림 1.1. O_1 분조의 연별 변화(진폭)



그림 1.2. O_1 분조의 연별 변화(위상)

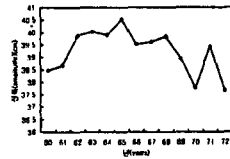


그림 2.1. K_1 분조의 연별 변화(진폭)



그림 2.2. K_1 분조의 연별 변화(위상)

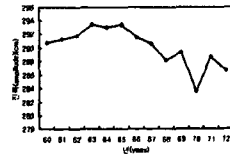


그림 3.1. M_2 분조의 연별 변화(진폭)

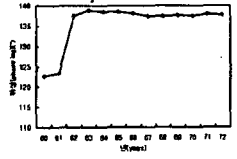


그림 3.2. M_2 분조의 연별 변화(위상)

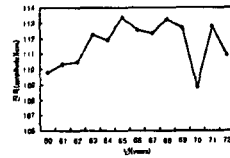


그림 4.1. S_2 분조의 연별 변화(진폭)



그림 4.2. S_2 분조의 연별 변화(위상)

여기서 그림 1.1과 그림 1.2는 O_1 분조의 진폭과 위상에 대한 연별 변화를 나타낸 그림이며, 그림 2.1과 그림 2.2는 K_1 분조의 진폭과 위상에 대한 연별 변화를 나타낸 그림이며, 그림 3.1과 그림 3.2는 M_2 분조의 진폭과 위상에 대한 연별 변화를 나타낸 그림이며, 그림 4.1과 4.2는 S_2 분조의 진폭과 위상에 대한 연별 변화를 나타낸 그림이다.

3.2 분석기간별 조화상수의 변화

본 연구에서는 4개의 주요분조(O_1 , K_1 , M_2 , S_2)에 대하여 분석기간별 조석조화상수의 변동특성을 분석하였는데, 다음의 표 5는 분석기간을 60년을 기준으로 72년까지 13년간 자료에 대하여 1년씩 누적시켜 분석기간을 달리한 각각의 기간자료에 대하여 조화상수를 구한 결과를 나타낸 표이다.

표 3. 분석자료기간별 조화상수의 변화(구선거)

년	O ₁		K ₁		M ₂		S ₂	
	H(cm)	g(°)	H(cm)	g(°)	H(cm)	g(°)	H(cm)	g(°)
60	28.99	257.79	38.47	297.28	290.79	122.56	109.78	180.67
60~61	29.39	258.02	38.68	297.46	291.25	123.40	110.33	181.38
60~62	28.88	259.98	39.04	300.16	289.49	128.00	109.89	186.18
60~63	29.04	261.50	39.30	301.10	289.51	130.62	110.13	188.92
60~64	29.10	262.30	39.42	302.00	289.75	132.12	110.30	190.42
60~65	29.22	263.15	39.62	302.61	290.14	133.11	110.71	191.42
60~66	29.13	263.75	39.60	303.15	290.20	133.76	110.96	192.05
60~67	28.97	264.11	39.60	303.39	290.19	134.17	111.14	192.38
60~68	28.97	264.33	39.63	303.48	289.94	134.49	111.36	192.67
60~69	28.94	264.68	39.55	303.61	289.85	134.77	111.47	192.96
60~70	28.82	264.68	39.36	303.84	289.31	134.99	111.25	193.20
60~71	28.77	264.86	39.37	303.88	289.22	135.22	111.37	193.36
60~72	28.68	265.08	39.23	304.03	289.02	135.40	111.33	193.54

표 4. 주요분조의 분석자료기간별 조화상수 평균통계량

분계명 분조	진폭(H)					위상(g)				
	MEAN (cm)	SD (cm)	MAX (cm)	MIN (cm)	CV (%)	MEAN (°)	SD (°)	MAX (°)	MIN (°)	CV (%)
O ₁	28.99	0.19	29.39	28.68	0.66	262.63	2.57	265.08	257.79	0.98
K ₁	39.30	0.37	39.63	38.47	0.94	302.00	2.36	304.03	297.28	0.78
M ₂	289.90	0.63	291.25	289.02	0.22	131.74	4.42	135.40	122.56	3.35
S ₂	110.77	0.61	111.47	109.78	0.55	189.93	4.46	193.54	180.67	2.35

표 4는 표 3과 마찬가지로 분석기간을 60년을 기준으로 72년까지 13년간 자료에 대하여 1년씩 누적시킨 각각의 자료에 대한 주요 4개분조의 조화상수 평균통계량을 나타낸 표이다.

그림 5.1~그림 8.2는 주요 4개분조의 '60년~'72년 조위관측자료에 대하여 60년을 기준으로 1년씩 72년까지 분석기간을 누적시킨 시간에 대한 진폭과 위상에 대한 변동특성을 그림으로 나타낸 것이다.



그림 5.1. O₁ 분조의 분석자료 기간별 변화(진폭)

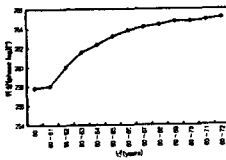


그림 5.2. O₁ 분조의 분석자료 기간별 변화(위상)



그림 6.1. K₁ 분조의 분석자료 기간별 변화(진폭)

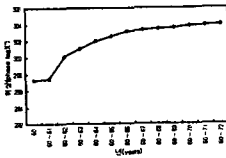


그림 6.2. K₁ 분조의 분석자료 기간별 변화(위상)

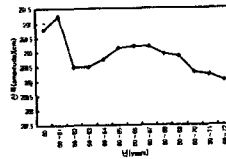


그림 7.1. M₂ 분조의 분석자료 기간별 변화(진폭)

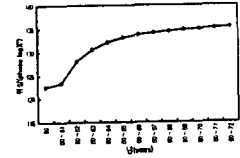


그림 7.2. M₂ 분조의 분석자료 기간별 변화(위상)

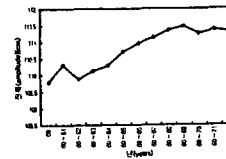


그림 8.1. S₂ 분조의 분석자료 기간별 변화(진폭)

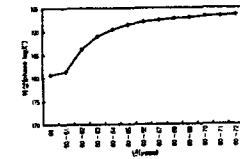


그림 8.2. S₂ 분조의 분석자료 기간별 변화(위상)

4. 조위예측분석

분조의 개수, 분석자료년 그리고 분석자료기간의 변화가 조위예측정확도에 미치는 영향을 분석하기 위해, 본 연구결과 분석한 분석년별, 분석기간별 조화상수값을 이용하여, 1996년에 대해 조위예측을 실시해 보았다. 이 때, 조위예측 프로그램은 영국해양조사원이 개발한 MARIE를 사용하였다.

4.1 분조갯수에 따른 조위예측치의 변화

분조의 갯수가 정확도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음의 4가지 데이터 Set을 구성하고, TIRA 프로그램의 역계산 기능을 사용하여 조위예측을 실시하였다.

- 1) 35개 분조(평균해면고(Z₀) + 26개의 Doodson 분조 + 8개의 관련 분조)
- 2) 58개 분조(평균해면고(Z₀) + 55개의 Doodson 분조 + 2개의 관련 분조)
- 3) 58개 분조(평균해면고(Z₀) + 57개의 Doodson 분조)
- 4) 63개 분조(평균해면고(Z₀) + 57개의 Doodson 분조 + 5개의 장주기 분조)

표 6은 set 별 표준계산오차를 구한 결과로써 set 4를 적용했을 때 표준계산오차가 14.685로 가장 작게 나타나 조위예측시 좋은 결과를 얻을 수 있다.

표 5. 자료 Set별 표준계산오차

Data Set	1	2	3	4
표준계산 오차(cm)	24.445	23.092	22.946	14.685

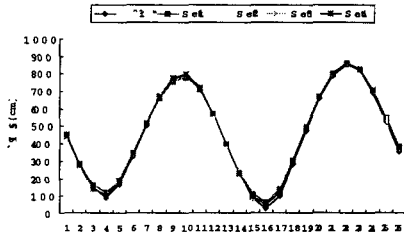


그림 9. Data Set별 조위예측

조위예측치와 조위실측치와의 조위예측의 정확성을 분석하기 위하여 표준계산오차(Standard Error of Estimates)를 구하여 판단하였으며, 그 식은 다음과 같다. 여기서 N : 관측값 수, q_i : 실측값(조위기록), \bar{q}_i : 예측값을 나타낸다.

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q}_i)^2}$$

4.2 년별 조위예측치의 변화

분석기간을 1년으로 하여 얻어진 조화상수를 사용하여 1964년도의 조위예측을 실시하여 얻은 결과 표 6 과 같이 나타났고, 분석자료년별 표준오차의 변화는 그림 10와 같다. 표준오차는 20.732cm의 변동폭을 가지면서 불규칙하게 변화하는 양상을 보였다. '64년도에서 가장 작은 오차를 나타냈는데 이는 자신의 조화상수를 가지고 조위예측을 했기 때문이라 본다. 따라서 63개의 분조 이외에 조석에 영향을 주는 여러 가지 경향을 고려하여 분석한다면 오차는 0에 가까운 결과를 얻을 것이라 사료된다.

표 6. 분석년별 표준계산오차

분석시기 (year)	표준계산 오차 (cm)	분석시기 (year)	표준계산 오차 (cm)
60	19.907	67	22.051
61	20.493	68	27.361
62	22.205	69	17.003
63	25.193	70	27.619
64	14.468	71	35.200
65	25.356	72	30.427
66	19.250		

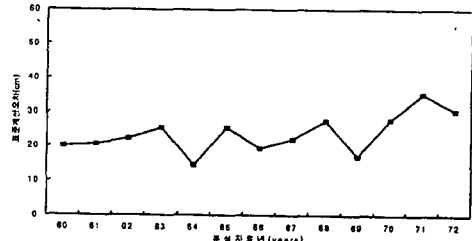


그림 10. 분석년별 표준계산오차 변화양상

4.3 분석기간별 조위예측치의 변화

표 7과 그림 11은 분석기간의 증가에 따른 조화상수값이 조위예측의 정확도에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 1960년을 기준으로 하여 1972년까지 분석기간을 1년씩 증가시켜 가면서 1964년의 조위를 예측한 결과를 나타낸 것으로 변화양상을 살펴보면 분석기간을 누적시킬수록 표준계산오차가 점차 줄어드는 경향을 나타내며, 분석기간이 길어질수록 완만하게 감소하는 추세를 보여주고 있다.

표 7. 분석년별 표준계산오차

분석시기 (year)	표준계산 오차 (cm)	분석시기 (year)	표준계산 오차 (cm)
60	55.363	60~67	32.076
60~61	52.570	60~68	30.846
60~62	44.934	60~69	29.913
60~63	40.604	60~70	35.335
60~64	37.384	60~71	34.935
60~65	35.212	60~72	37.453
60~66	33.510		

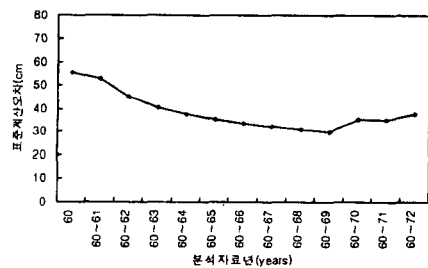


그림 11. 분석기간별 표준계산오차 변화양상

5. 결론

본 연구에서는 인천항의 조위관측자료를 이용하여 조석조화상수의 분석자료의 연변화에 따른 변동특성과, 분석자료의 기간변화에 따른 변동특성을 분석하여 비교검토 하였고, 분석결과를 조위예측에 적용하여 분석자료의 연변화 및 기간변화가 조위예측정확도에 미치

는 영향에 대하여 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

i) 조석조화상수에서 4대 주요분조(M_2 , O_1 , S_2 , K_1)의 년자료에 대한 자기상관관계를 구하여 진폭에 대한 변동특성을 분석한 결과 대체적으로 3년의 시차를 두었을 때 높은 상관성을 나타내었고, 위상의 경우에 년 변화에 따른 장기적 변동이 불규칙한 양상을 나타내어 주기성이나 장기적 변동경향을 파악하기 힘들었다.

ii) 조석조화상수(M_2 , O_1 , S_2 , K_1)의 분석기간(년)누적에 따른 진폭의 장기적 변동양상을 보면, O_1 분조는 선형적인 변화양상을, K_1 분조는 포물선 형태의 변화양상을, M_2 분조는 증가하다가 감소하는 지수식의 형태(凹, 凸)의 변화양상을 나타내었고, S_2 분조는 지수식 형태의 증가양상을, 위상의 변동양상은 변동폭은 작으나 장기변동양상이 지수식의 형태로 완만하게 증가하는 양상(凸)을 보였다.

iii) 조위예측의 정확도에 사용분조의 개수가 어떻게 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 4가지 자료 Set 즉, 35개 분조(평균해면고(Z_0) + 26개의 Doodson 분조 + 8개의 관련분조), 58개 분조(평균해면고(Z_0) + 55개의 Doodson 분조 + 2개의 관련분조), 58개 분조(평균해면고(Z_0) + 57개의 Doodson 분조), 63개 분조(평균해면고(Z_0) + 57개의 Doodson 분조 + 5개의 장주기 분조)를 구성하여 조위예측을 실시하고 표준계산오차를 구하여 비교한 결과, 63개의 분조를 사용한 예측조위의 표준계산오차가 가장 작아 TIRA 프로그램에 의한 조위예측시 장주기 분조(Sa, Ssa, Mm, Maf, Mf)를 포함한 63개의 분조들을 사용한 결과가 가장 우수한 것으로 밝혀졌다.

iv) 4대 주요분조(M_2 , O_1 , S_2 , K_1)에 대하여 연별, 누적기간(년)별로 분석하여 얻어진 조화상수값들을 사용하여 조위예측을 실시하고, 표준계산오차값을 비교·분석한 결과, 누적기간별 분석결과가 연별분석한 결과보다 정확도가 더 높게 나타났다. 따라서, 조위예측시 누적기간별 조위자료를 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

참고문헌

- 최병호(1980), “ 인천항 조위분석에 관한 연구 ”, 한국 해양연구소, pp1~2, pp31~34
관중웅(1950), “ 인천항의 조석에 について ”, 일본해양학회지, 6(2), pp.16~22
이석우(1972), “ 인천항의 조석, 조류 및 조랑에 대하여 ”, 한국해양학회지, 제7권 제2호, pp.86~97
한상복(1980), “ 인천의 조차 변동 ”, The journal of

the oceanological society fo korea, vol. 15, No. 2, pp.123~128

김영복(1994), “ 한국 서해의 조석모형 ”, 성균관대학교 석사학위논문, pp.13~19

Murray, M.T.(1996), “ Pol/PSMSL Tidal Analysis Software Kit(TASK Package) ”, Proudman Oceanographic Laboratory.