

論 文

조석예보시스템의 구축 및 응용

정 연 철* · 채 양 범*

The Formulation of the Tidal Prediction System and It's Application

Yun-Chul Jung · Yang-Bum Chae**

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서론

2. 조석예보시스템의 구성

2.1 조석수치모델

2.2 조화분해

2.3 조석예측모델

3. 조석예보시스템의 응용에

3.1 조석수치모델의 계산결과

3.2 조석예측모델의 계산결과

4. 결론

참고문헌

부 록

Abstract

Through the combination of existing tidal prediction model and numerical tidal model, the efficient tidal prediction system was formulated and applied to the neighboring area of Pusan port. Because all tidal constituents for tidal prediction(69 tidal constituents are normally used) couldn't be considered due to the physical limits on computing process, some errors between the observed and predicted values were inevitably occurred. But it was confirmed that the computed values with maximum 10% of relative errors can be obtained if four major tidal constituents(M_2 , S_2 , K_1 , O_1) are used.

Thus, if other constituents than four major tidal constituents are additionally used, more accurate values will be obtained. Furthermore, if the database for harmonic constants in coastal waters is made in advance, using the numerical tidal model, prompt tidal prediction can be achieved at any time when it is required.

* 한국해양대학교 해사대학 교수

1. 서 론

해양에서 발생하는 중요한 자연현상중 하나인 조석(tides)은 우리 생활과 밀접한 관련을 가지고 있다. 즉, 조석에 관한 정보는 항해자들에게 있어서는 안전한 항해를 위해 그리고 어부들에게 있어서는 효과적인 어획을 위해 각각 필요하다. 나아가 이는 각종 해양연구에 있어서도 없어서는 안될 중요한 기초자료가 되며, 응용이 가능한 분야로는, 유출유 의 확산예측, 표류물체의 위치추정, 해난구조, 그리고 오염물질 확산예측 등 그 용도가 광범위하다.

조석현상은 태양, 달 및 지구의 상대적 운동에 의해 결정되며, 언뜻 주기적으로 반복되는 현상처럼 보이지만 실제로는 그렇지 않다. 즉, 소위 분조 (tidal constituents)라고 불리는 많은 수의 주기적인 운동성분으로 구성된 복합적인 운동이다. 그러므로 조석예보는 먼저 장기간의 해면관측으로부터 얻어진 조석자료를 조화분해하여 각 분조의 조화상수를 구한 다음 이를 다시 결합함으로써 가능하다. 이와 같이 조석예보는 주로 장기간의 관측 자료가 주어진 특정 지점에 대해서 행해지는 것이 보통이지만, 우리가 필요로 하는 것은 특정 지점이 아닌 특정 구역에 대한 조석예보인 경우가 더 많다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 조석수치모델과 조석예측모델을 서로 결합함으로써 원하는 곳이면 어느 곳이든지 신속한 조석예보가 가능한 조석예보시스템을 구축하고자 한다. 이는 재래적인 조석예보방법에 조석수치모델의 계산결과를 이용함으로써 가능하다. 다시 말해, 조석수치모델의 공간적 예보기능과 조석예측모델의 시간적 예보기능을 결합함으로써 가능하다. 물론 이러한 시스템은 컴퓨터의 비약적인 발전에 힘입어 가능하게 되었다. 이하 본 조석예보시스템의 구성과 부산 연안해역에서의 응용예를 소개한다.

2. 조석예보시스템의 구성

조석수치모델은 외해경계조건이 주어진 특정 해역에 대해서 조위 및 조류를 계산할 때 사용된다. 이 경우 외해경계조건은 시간에 따른 특정 분조의

해면변위로서 주어지기 때문에, 모델의 계산결과와는 실제의 조석과는 차이가 있는 특정 분조의 주기적 변동을 나타내게 된다. 그러나 여러 분조에 대한 조석수치모델의 계산결과를 조석예측모델을 통해 결합할 경우 특정 해역에 대한 실시간 조석예보가 가능하게 된다. 그러나 이 경우 모든 분조 (일반적으로 조석예보시 69개의 분조를 고려함)에 대한 조석수치계산은 계산시간이 오래 걸리고 필요로 하는 모든 외해경계조건을 구하기가 쉽지 않은 등 현실적인 몇가지 제약이 뒤따른다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 영향이 가장 크다고 알려진 주요 4대분조만을 고려함으로써 해결하고자 한다. 그러나 이 경우 어느 정도의 오차는 불가피할 것이다. Fig. 1은 본 연구에서 구축된 조석예보시스템의 구성을 보여주는 블록다이어그램이다.

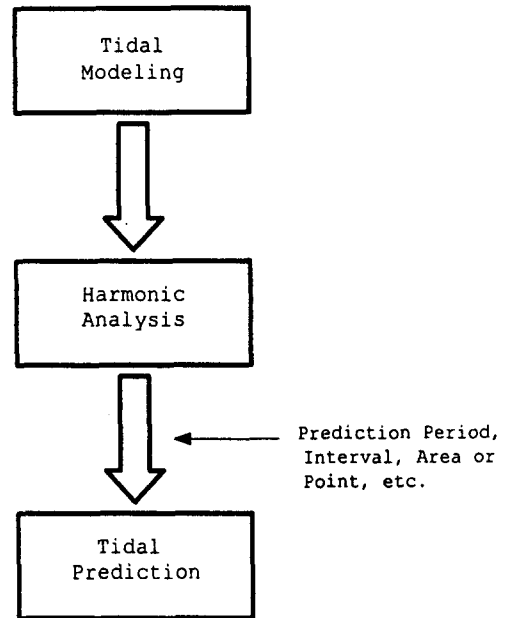


Fig. 1 Block diagram of tidal prediction system

2.1 조석수치모델

본 연구에 사용된 조석수치모델은 2차원 수심적분 모델로써 수심이 비교적 얇은 연안해역의 유동

장을 계산하는데 주로 사용된다. 모델에서 사용하고 있는 기본방정식은 3차원 연속방정식과 운동량 방정식을 수직면($-h \leq z \leq \zeta$)에 대해 평균하고, 외력으로 지구자전에 의한 영향, 바다의 마찰력 및 중력을 포함시키고, 표층에서 바람에 의한 응력을 무시함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(\zeta + h)V] = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad \dots (3)$$

여기서, U, V 는 각각 수심 평균한 x, y 방향 유속, ζ 는 수면변위, h 는 평균수면하 수심, g 는 중력가속도, f 는 코리올리스 계수(coriolis parameter), 그리고 C 는 Chezy 마찰계수이다.

본 모델에서는 상기 방정식의 컴퓨터 수치계산을 위해서 Leendertse(1967)에 의해 조류계산에 응용되어, 현재 널리 이용되고 있는 ADI법(alternating direction implicit method)을 채택하였다. 수치해법은 여러 문헌[1,2]에 이미 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 생략한다. 그리고 각 분조의 조위변동으로 주어지는 외해경계조건은 다음과 같다.

$$\zeta(t) = A \cos(\omega t - \phi) \quad \dots (4)$$

여기서, $\zeta(t)$ 는 분조의 조위변동, A 는 분조의 진폭, ω 는 분조의 각속도, 그리고 ϕ 는 분조의 위상이다.

2.2 조화분해

조석수치모델의 계산결과를 조화분해하므로써 모델영역 내부에서의 조위 및 조류의 조화상수를

계산할 수 있다. 모델에 의해 계산된 조석의 조화분해 과정은 다음과 같다. 시간에 따른 조위 및 조류성분의 변화는 식 (5)와 같은 정현곡선으로 가정한다.

$$y(t) = a \cos(\omega t - \phi) \quad \dots (5)$$

여기서, 각속도 ω 는 주어진 것으로 취급하고, 진폭 a 와 위상 ϕ 를 최소자승법(least-squares approximation)을 사용하여 결정한다. 최소자승법은 모델로부터 계산된 값과 식 (5)의 함수값과의 차를 최소화하는 a 와 ϕ 를 구하는 방법이다.

$$E = \sum_{i=1}^n [y(t) - a \cos(\omega t - \phi)]^2 \quad \dots (6)$$

식 (6)에서 E 를 최소화하는 a 와 ϕ 를 구하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n \cos(\omega t - \phi) [y(t) - a \cos(\omega t - \phi)] = 0 \quad \dots (7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \phi} = 2 \sum_{i=1}^n a \sin(\omega t - \phi) [y(t) - a \cos(\omega t - \phi)] = 0 \quad \dots (8)$$

상기 식은 a 와 ϕ 에 대한 선형연립방정식이 아니므로 다음과 같이 변형하므로써 계산이 가능하다. 즉, 이론식을 다음과 같이 변형한다.

$$\begin{aligned} y(t) &= a \cos(\omega t - \phi) \\ &= a \cos \omega t \cos \phi + a \sin \omega t \sin \phi \\ &= \alpha \cos \omega t + \beta \sin \omega t \quad \dots (9) \end{aligned}$$

여기서, α 는 $a \cos \phi$ 이고, β 는 $a \sin \phi$ 이다. α 와 β 는 시간에 무관한 상수이므로 α 와 β 를 최소자승법을 사용하여 계산하고 나면, a 와 ϕ 는 각각 다음 식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \\ \phi &= \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad \dots (10) \end{aligned}$$

최소자승법에 의해 α 와 β 를 결정하는 최종 식들은 다음과 같다.

$$E = \sum_{i=1}^n [y(t) - (\alpha \cos \omega t + \beta \sin \omega t)]^2 \dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^n [y(t) - (\alpha \cos \omega t + \beta \sin \omega t)] \sin \omega t = 0 \dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^n [y(t) - (\alpha \cos \omega t + \beta \sin \omega t)] \cos \omega t = 0 \dots\dots (13)$$

$$\alpha \sum_{i=1}^n \cos^2 \omega t + \beta \sum_{i=1}^n \sin \omega t \cos \omega t = \sum_{i=1}^n y(t) \cos \omega t \dots\dots (14)$$

$$\alpha \sum_{i=1}^n \sin \omega t \cos \omega t + \beta \sum_{i=1}^n \sin^2 \omega t = \sum_{i=1}^n y(t) \sin \omega t \dots\dots (15)$$

2.3 조석예측모델

실시간 조위 및 조류는 각 격자점에 있어서 조석수치모델에 의해 계산된 조석계산 자료를 토대로 앞에서 설명한 조화분해에 의해 산정된 주요 분조의 조화상수로부터 다음 식에 의해 계산된다 [34].

$$U(t) = \sum_{i=1}^N f_i(t) A_{ui} \cos 2\pi[\omega_i(t) - \phi_{ui} + V_i(t) + u_i(t)] \dots\dots (16)$$

$$V(t) = \sum_{i=1}^N f_i(t) A_{vi} \cos 2\pi[\omega_i(t) - \phi_{vi} + V_i(t) + u_i(t)] \dots\dots (17)$$

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N f_i(t) A_{\zeta i} \cos 2\pi[\omega_i(t) - \phi_{\zeta i} + V_i(t) + u_i(t)] \dots\dots (18)$$

여기서, $U(t)$, $V(t)$ 및 $\zeta(t)$ 는 각각 실시간(t)의 x , y 방향 유속 및 조위변동을 그리고 ω_i , A_i 및 ϕ_i 는 분조 i 의 각속도, 진폭 및 국지적 지각을 각각 나타낸다. 천문변수 $f_i(t)$ 와 $u_i(t)$ 는 진폭 및 위상에 대한 실시간의 노드변동보정치(nodal factor)이며, $V_i(t)$ 는 실시간의 평형조 지각(phase of the equilibrium tide)이다.

각 분조의 천문변수인 f_i , u_i 및 V_i 는 달과 태양의 궤도요소와 관련하여 계산되는데, 본 모델에서는 Doodson(1921)이 제시한 1900년 1월 1일 00시를 기준으로 하여 경과된 시간의 함수로써 계산

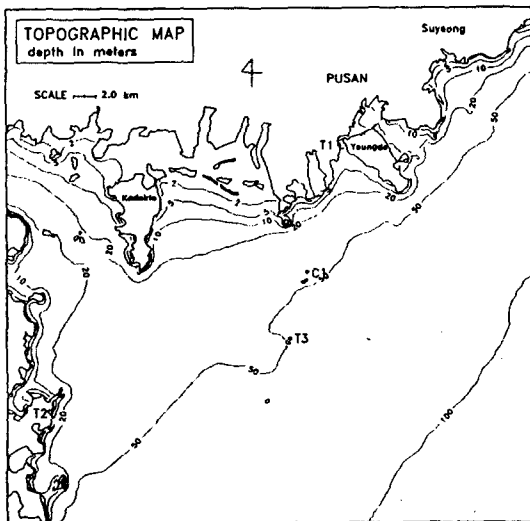


Fig. 2 Map of the study area

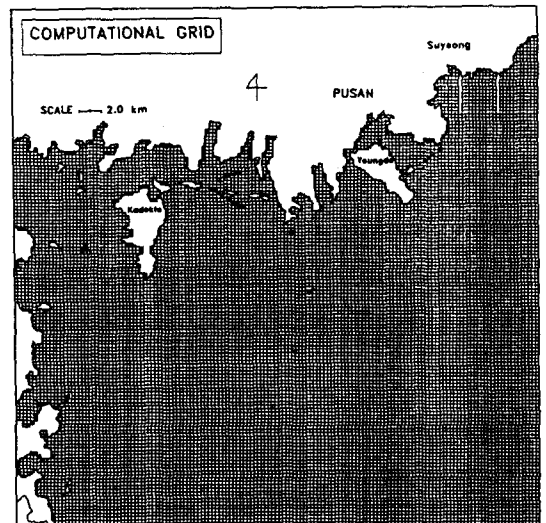


Fig. 3 Computational grid map

하는 방법을 채택하였다[5].

3. 조석예보시스템의 응용에

본 연구에서 구축된 조석예보시스템의 적용성을 검토하기 위하여 부산항 인근해역에 적용하여 보았다.

3.1 조석수치모델의 계산결과

Fig. 2는 대상해역을 도시한 것으로서 서쪽으로 거제도 일부, 동쪽으로 대변항, 그리고 남쪽으로 장승포항을 포함하는 사각형 해역이다. 그림에서 정점 T는 조위관측지점을, 정점 C는 조류관측지점을 각각 나타낸다. Fig. 3은 조석수치모델의 적용을 위해 만들어진 유한차분 계산격자를 보여주고 있는데, 격자는 가로 150개, 세로 145개, 총 21,750개로 구성되었다. 모델의 적용을 위해 채택된 기본변수들을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

계산의 편의를 위해 주요 4대분조에 대한 조석 모델링만을 수행하였다. 해의 안정성을 고려하여 각 분조마다 총 6 조석주기 동안 반복해서 계산하

였고, 계산이 안정된 마지막 1주기를 택하여 같은 시간간격으로 48등분하여 그 결과를 저장하였다. 저장된 자료를 조화분해하여 각 분조별로 조위와 조류의 남북성분에 대한 조화상수를 구하여 데이터 베이스를 만들었고 또, 이들 조화상수를 이용하여 각 분조별로 등조석도와 조류타원도를 각각 플로팅하여 부록에 제시하였다.

Table 2는 계산결과와 검증용을 위해 조위관측이 수행된 T_1 , T_2 및 T_3 의 세 정점에 대하여 조화상수의 관측치와 계산치를 서로 비교하여 나타

Table 1. Input data for numerical tidal model

Parameters	Input Values
Grid Size	$\Delta x = \Delta y = 312.7 \text{ m}$
M_2	20.7 sec
S_2	20.0 sec
Time Step	K_1 35.9 sec
	O_1 38.7 sec
Water Depth	Chart Datum + MSL
Coriolis Coefficient	$f = 2\omega \sin \varphi$, $\varphi = 35^\circ$
Chezy Coefficient	$C = \frac{1}{n} h^{1/6}$ 단, $n = 0.026$, h 는 수심

Table 2. Comparison between observed and calculated constants

Station	Constituent	Observed		Calculated		Diff.		Rel. Error
		Amp.	Phs.	Amp.	Phs.	Amp.	Phs.	Amp.
T_1	M_2	39.6	234.9	39.2	234.4	0.4	0.5	1.0
	S_2	19.4	271.1	19.1	271.0	0.3	0.1	1.5
	K_1	4.8	136.5	4.4	135.6	0.4	0.9	8.3
	O_1	1.7	107.2	1.8	108.0	0.1	0.8	5.9
T_2	M_2	49.9	242.8	49.0	241.3	0.9	1.5	1.8
	S_2	24.7	277.9	24.7	277.2	0.0	0.7	0.0
	K_1	7.9	159.1	6.9	158.2	1.0	0.9	12.6
	O_1	4.4	132.8	4.0	130.5	0.4	1.7	9.1
T_3	M_2	46.3	241.7	44.8	241.6	1.5	0.1	3.2
	S_2	23.3	277.1	22.6	277.0	0.7	0.1	3.0
	K_1	6.5	160.2	5.7	165.7	0.8	5.5	12.3
	O_1	3.3	137.3	2.8	130.0	0.5	7.3	15.2

unit : amplitude(cm), phase($^\circ$), rel. error(%)

낸 것이다. 그 결과 반일주조의 경우 양자가 거의 일치하였다. 그러나 일주조의 경우 비교적 큰 10% 내외의 상대오차를 나타내었는데, 이는 무조점(ephidemic point)이 가까이 위치하고 있기 때문이며, 이를 감안하면 양호한 계산결과로 판단된다.

3.2 조석예측모델의 계산결과

3.2.1 조위계산

조석예보시스템에 의해 계산된 실시간 조위를 검증하기 위하여 관측치와 예보치를 서로 비교하였다. Fig. 4와 5는 각각 정점 T_1 과 T_3 에 있어서 조위변화의 관측치, 예측치 및 계산치를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 관측치는 조위관측계에 의해 관측된 자료를 69개의 분조(천해분조는 제외)로 조화분해한 후, 얻어진 조화상수를 사용하여 조석예측모델을 통해 다시 합성한 것이며, 예측치는 분석된 69개의 분조중 주요 4대분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)의 조화상수만을 이용하여 조석예측모델을 통해 합성한 것이다. 그리고 계산치는 조석수치모델의 계산결과로부터 얻어진 주요 4대분조의 조화

상수를 조석예측모델을 통해 합성한 것이다. 따라서 관측치와 예측치 사이의 오차는 예측에 사용된 분조의 수에 따른 오차이며, 예측치와 계산치 사이의 오차는 계산과정에서 도입된 오차를 각각 나타낸다.

먼저, 정점 T_1 에서의 결과인 Fig. 5를 보면, 관측치와 예측치 사이에 최대 12cm의 오차를 보이고 있는데, 이는 진폭의 약 10% 정도에 해당된다. 이 오차는 4대분조만을 고려하여 예측했기 때문에 파생된 결과로서 예측에 사용되는 분조의 수를 늘리게 되면 자연적으로 감소된다. 그러나 예측치와 계산치 사이에는 거의 오차가 없이 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 계산결과가 매우 양호함을 입증하는 것이다.

정점 T_3 에서의 결과인 Fig. 6을 보면, 관측치와 예측치 사이에 최대 13cm의 오차를 보이고 있는데, 이는 진폭의 약 10% 정도에 해당된다. 그러나 예측치와 계산치 사이에는, 정점 T_1 의 경우와 마찬가지로, 거의 오차가 없이 일치하는 것을 알 수 있다.

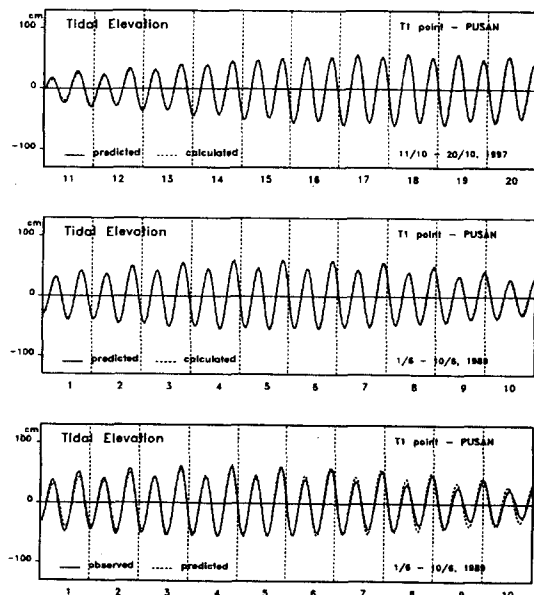


Fig. 4 Changes in tidal elevation at T_1 station

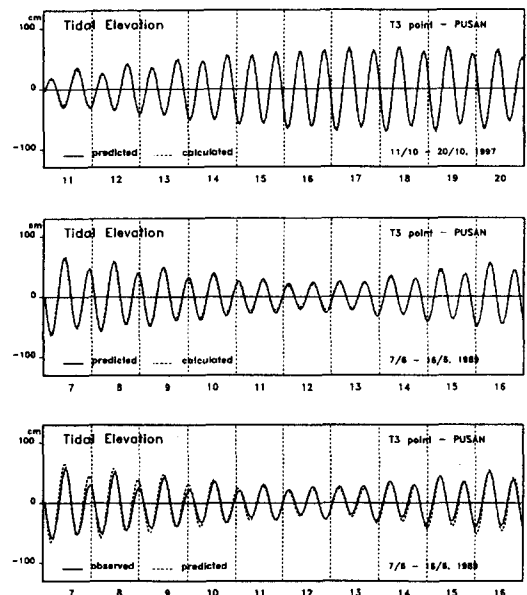


Fig. 5 Changes in tidal elevation at T_3 station.

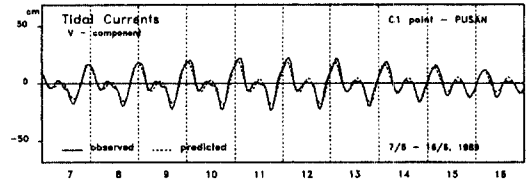
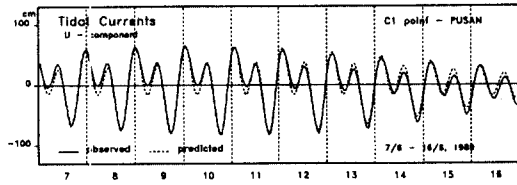
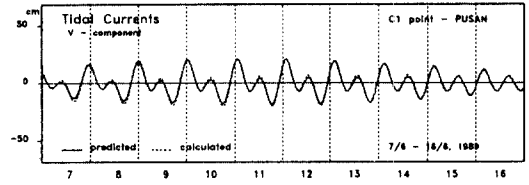
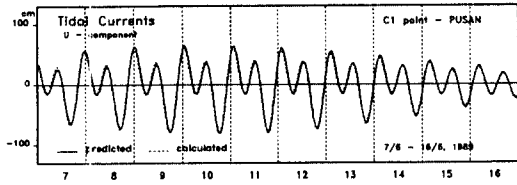
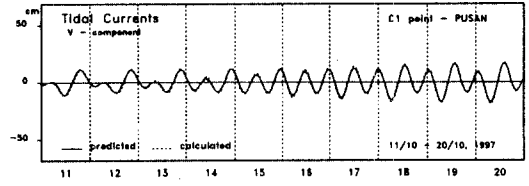
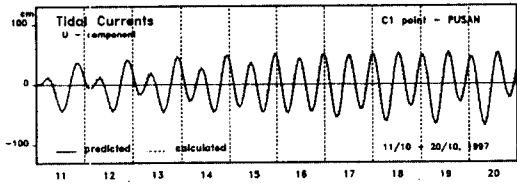


Fig. 6 Changes in U-component of tidal currents at C₁ station

Fig. 7 Changes in V-component of tidal currents at C₁ station

3.2.2 조류계산

조석예보시스템에 의해 계산된 실시간 조류를 검증하기 위하여 관측치와 예보치를 서로 비교하

였다. Fig. 6과 7은 각각 정점 C₁에 있어서 U, V 유속성분의 관측치, 예측치 및 계산치를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 관측치, 예측치 및 계산치의 의미는 조위의 경우와 마찬가지로이다.

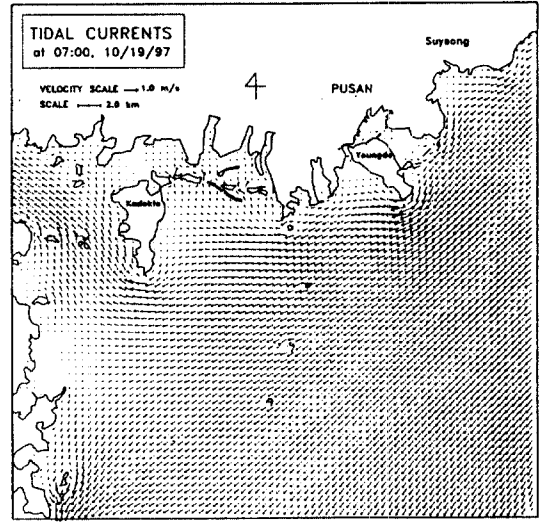
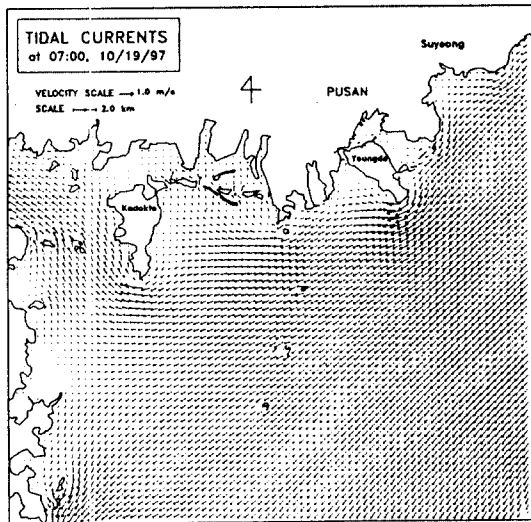


Fig. 8 Tidal currents at 7 AM on 10/19/1997

Fig. 9 Tidal currents at 2 PM on 10/19/1997

먼저, U 유속성분의 변화를 보여주는 Fig. 6의 경우, 관측치와 예측치 사이에 최대 18cm/sec의 오차를 나타내고 있는데, 이는 진폭의 약 13% 정도에 해당된다. 이 오차 역시 예측에 사용되는 분조의 수를 늘리게 되면 자연적으로 감소될 것이다. 예측치와 계산치 사이에는 거의 오차가 없는 것을 알수 있는데, 이는 계산결과가 매우 양호함을 입증하는 것이다. V 유속성분의 변화를 보여주는 Fig. 7의 경우, 관측치와 예측치 사이에 최대 5cm의 오차를 보이고 있는데, 이는 진폭의 약 10% 정도에 해당된다. 그러나 예측치와 계산치 사이에는, U 유속성분의 경우와 마찬가지로, 거의 오차가 없이 일치하는 것을 알수 있다.

Fig. 8과 9는 각각 조석예보시스템의 계산결과인데, 창조류인 1995년 10월 19일 07:00시와 낙조류인 동일 14:00시에 있어서의 유속분포를 각각 벡터도로 나타낸 것이다. 유속은 외해에서 창조류 최대유속이 80cm/sec, 낙조류 최대유속이 65cm/sec로 각각 나타났다.

4. 결 론

기존의 조석수치모델과 조석예측모델을 결합하여 효율적인 조석예보시스템을 구축하였다. 이 시스템은 연안해역에 있어서 우리가 원하는 어떤 지점 및 구역의 실시간 조석이라도 예보가 가능한 장점을 지니고 있다. 따라서 이는 선박의 안전항해뿐 아니라 해양의 여러 분야에 응용될 수 있을 것으로 생각된다. 이 시스템의 단점은 물리적 한계상 조석예보에 필요한 모든 분조를 고려할 수 없기 때문에 예보치와 실제조석 사이에 다소의 오차를 나타낸다는 점이다. 그러나 계산의 편의를 고려하여 주요 4대분조만을 고려했을 경우이라도,

응용예에서 보듯이 관측치와의 상대오차가 최대 10% 내외로 나타남으로써 실용상 지장이 없음을 확인하였다. 물론 응용분야에 따라서는 주요 4대분조 이외에 추가로 몇개의 분조를 더 고려해줌으로써 좀 더 정확한 예보가 가능할 것이다. 아울러 조석예보가 요구되는 모든 연안해역에 대해 조석수치모델을 사용하여 사전에 조화상수 데이터베이스를 구축해 놓는다면 필요할 때 언제든지 신속한 조석예보가 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] Leendertse J. J., 1967. "Aspects of a Computational Model for Long-period Water-wave Propagation", Report RM-5294-PR, The Rand Corporation, Santa Monica, California, pp. 52~65.
- [2] Lardner R. W., Belen M. S., and Cekirge H. M., 1982. "Finite Difference Model for Tidal Flows in the Arabian Gulf", Comp. & Maths. with Appls. Vol. 8. No. 6 pp. 425~444.
- [3] Foreman, M. G. G., 1977. "Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction", Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Sidney, B. C. 97 pp.
- [4] Foreman, M. G. G., 1978. "Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction", Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Sidney, B. C. 70 pp.
- [5] Doodson, A. T., 1921. "The Harmonic Development of the Tide-generating Potential", Philosophical Transaction Royal Society-London, A, 100: pp. 305~329.

부 록

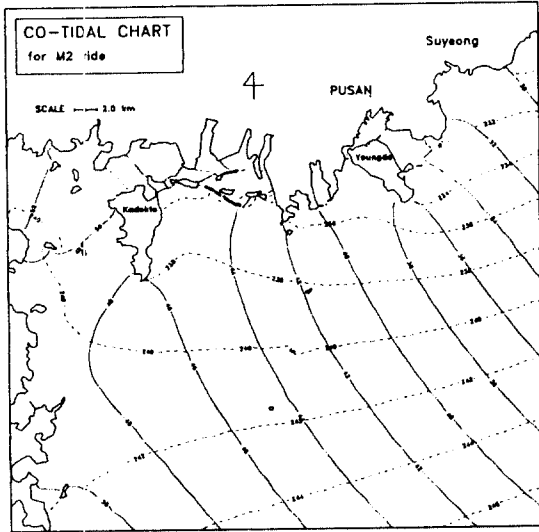


Fig. A1 Co-tidal chart for M_2 tide

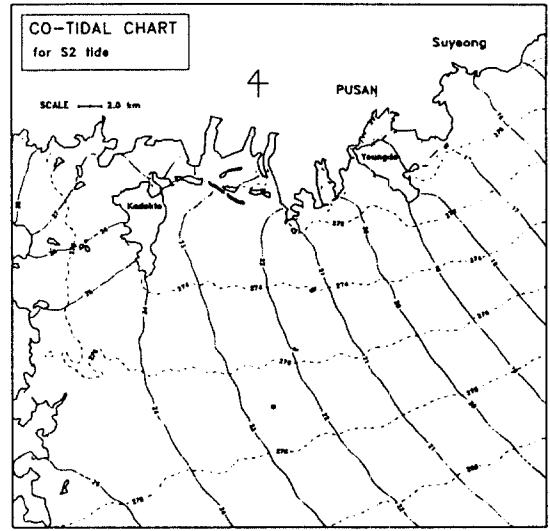


Fig. A2 Co-tidal chart for S_2 tide

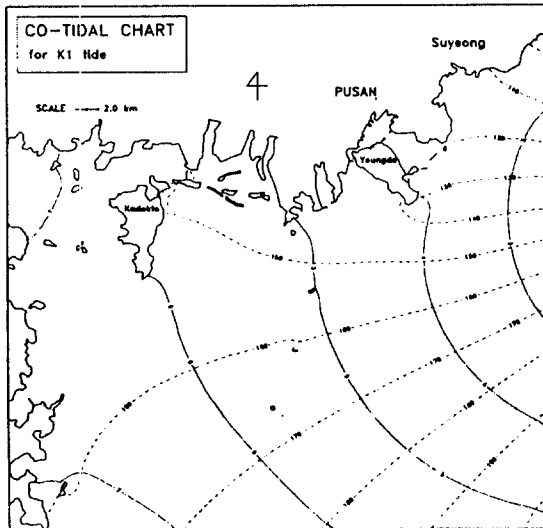


Fig. A3 Co-tidal chart for K_1 tide

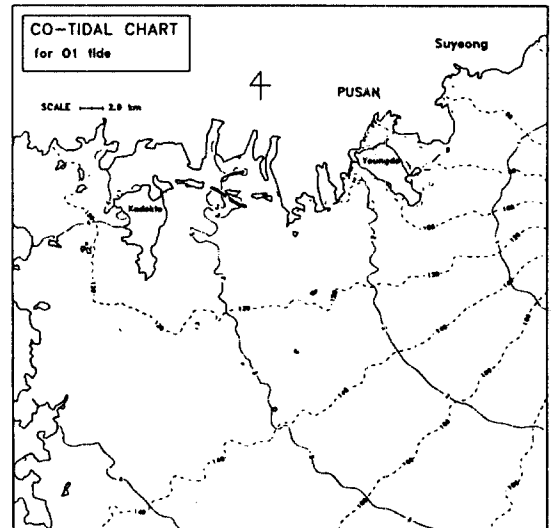


Fig. A4 Co-tidal chart for O_1 tide

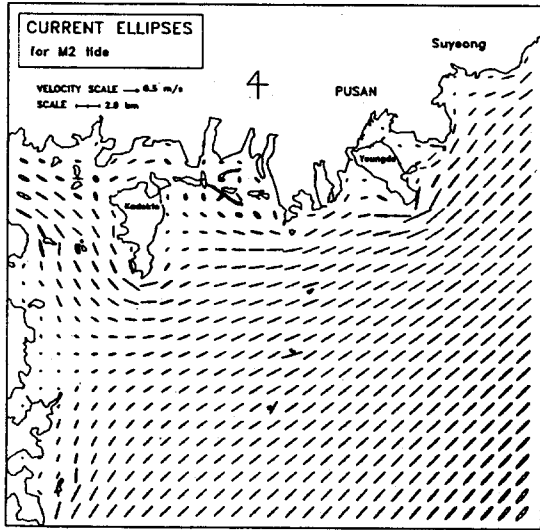


Fig. A5 Tidal current ellipses for M_2 tide

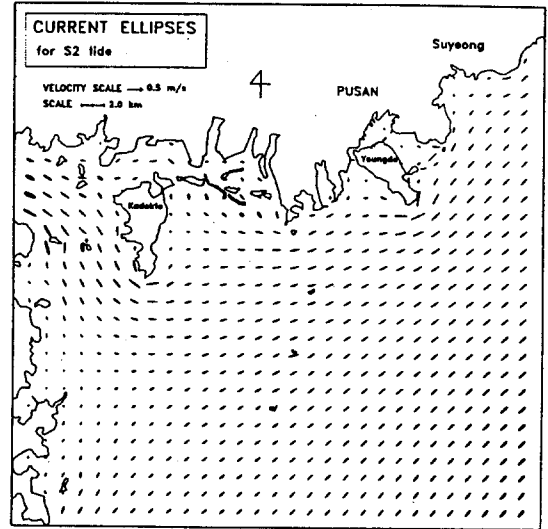


Fig. A6 Tidal current ellipses for S_2 tide

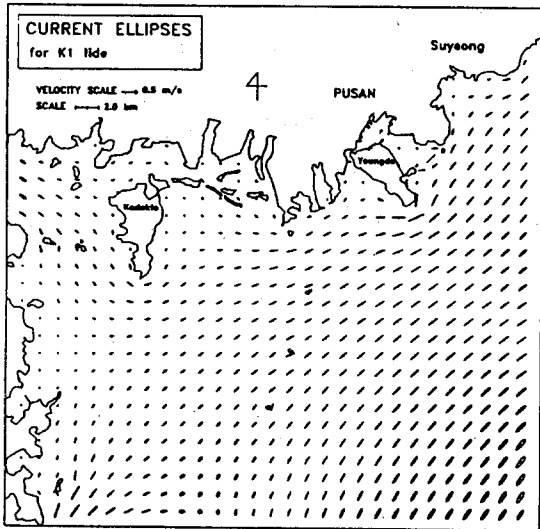


Fig. A7 Tidal current ellipses for K_1 tide

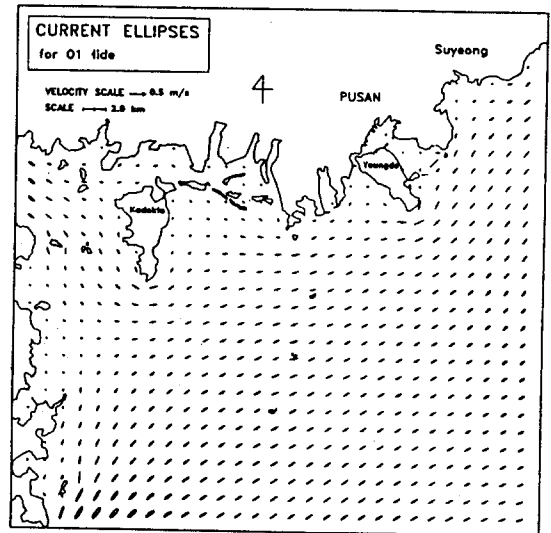


Fig. A8 Tidal current ellipses for O_1 tide