

이동경계를 고려한 광양만의 조석·조류 모의 Numerical Simulation of Tides of Gwangyang Bay Using Moving Boundary Treatment

민인기¹ · 오병철² · 전인식¹

In Ki Min¹, Byung Cheol Oh² and In Sik Chun¹

1. 서 론

한반도 서남해안은 크고 작은 만과 해변, 삼각주, 하구, 조간대 등 다양한 연안해역이 잘 발달되어 있다. 평균조차는 서해안 남부에서 약 3m로 북쪽으로 갈수록 증가하여 군산 부근에 6m, 인천 부근에서 약 8m에 달하며, 남해안의 평균조차는 부산 1.2m, 진해 2.1m, 충무 2.6m, 삼천포 3.0m, 여수 3.3m, 완도 3.5m, 목포 3.7m로 조석 간만의 차가 크게 나타나서 연안해역에 폭넓은 조간대가 형성되어 있다. 조간대는 해수의 주기적인 상승과 하강에 의해 노출과 침수가 반복되면서 활발한 침식 및 퇴적작용이 일어나며, 외해와 직접 연결된 개방형 해안보다는 반폐쇄적인 지형적 특징을 갖는 만내에 분포하는 경우가 많다.

최근 연안해역에서 해수유동, 퇴적물 이동, 부영양화 현상 등 다양한 현상에 대한 수치모형 연구가 많이 수행되고 있으며(Clarke and Elliott, 1998; Guan *et al.*, 1998), 이런 모든 현상들은 주로 조석에 의한 해수유동에 의하여 지배되는 것이 일반적이므로 해수유동특성을 정확히 모의하는 것이 중요하다. 해수유동 수치모형 연구에서는 통상적으로 연속방정식과 운동방정식 등으로 구성된 동수역학 모형을 적용하여 물질의 이동 모의에 필요한 해수면 변동 및 유속장을 구한다.

중중 좁은 조간대를 포함한 작은 만에서는 고정경계를 사용하곤 한다. 그러나 고정경계를 이

용한 해수유동모형은 완만한 경사를 가진 조간대 해역에서 낙조시 공기 중에 넓게 노출되는 물리현상을 재현할 수 없다. 따라서 조차가 크고 넓은 조간대가 분포하는 해역의 해수유동 모의시 반드시 이동경계처리 기법을 도입하여야 한다(Leendertse and Gritton, 1971; Flather and Heaps, 1975; Lin and Falconer, 1997).

이동경계처리에 관한 국내의 연구는 마로해와 울돌목의 해수유동(정과 김, 1992), 3차원 반음해법으로 경기만의 조류 및 조위 모의(이 등, 2000), FEMOS를 이용한 아산만 조류 모의(정 등, 2002) 그리고 군장지역과 전북해역에 ADCIRC 모형을 적용(서 등, 2002)하는 등 수치모형 연구가 광범위하게 진행되었다.

간단하고 복잡한 경계를 가진 지역에서 2차원과 3차원 모형에 광범위하게 사용되고 있는 wet-dry 법은 노출과 침수의 판단이 복잡하고 많은 계산을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 그러나 슬롯법은 물에서 들어나 있는 노출 지역도 계산영역에 포함하므로 마치 고정경계처럼 계산하는 이동경계처리 방법이다. 이 방법은 이동경계를 고정경계로 바꾸는데 있어서 각 시간단계 및 각 격자점에서 판단이 필요없다는 장점이 있다. 王 등(1999)은 넓은 조간대를 포함한 중국 渤海만에서 오염물의 이동모의에 슬롯법을 사용하였으며, 孙 등(2001)은 중국 套儿江 하구의 SST (Suspended Sediment Transport)에 적용하였다.

본 연구에서는 이동경계처리와 조간대를 반영할

1 건국대학교 토목공학과 (Corresponding Author : In Ki Min, Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul 143-701, Korea, inkimin@orgio.net)

2 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

수 있는 슬롯 모형을 광양만 해역에 적용하여 이의 특성을 살펴보았다.

2. 수치모형

2.1 기본방정식

슬롯폭(width of slot)은 다음 식과 같이 정의되고(何와 王, 1986), 슬롯은 해저면 밑에 가늘고 긴 홈의 폭을 나타내며 해저면 위의 슬롯폭은 1이고 해저면 밑은 단위폭의 비율로서 표시된다.

$$f(z) = \begin{cases} \varepsilon + (1 - \varepsilon)e^{-\alpha(z-z_b)} & \text{if } z \leq z_b \\ 1.0 & \text{if } z > z_b \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $f(z)$ 는 슬롯폭, z 는 수직 좌표축, z_b 는 해저면(seabed)의 높이, ε 은 슬롯계수, α 는 수심변화에 따라서 슬롯 변화율을 초래하는 파라미터, z_0 는 가상의 슬롯바닥의 높이, z_s 는 수면의 높이이다(Fig. 1).

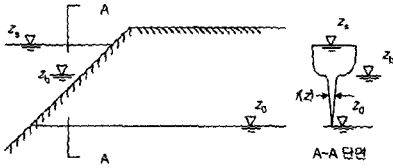


Fig. 1. The principle sketch of the slot method.

슬롯의 정의에 따라서 준수심(h_x , quasi-water depth)은 다음과 같이 유도된다.

$$h_x = \frac{A_x}{\Delta Y} = \frac{\int_{z_0}^{z_s} f(z) \Delta Y dz}{\Delta Y} \quad (2)$$

$$= \begin{cases} \varepsilon(z_s - z_0) + \frac{1 - \varepsilon}{\alpha} e^{-\alpha(z_s - z_0)} (e^{\alpha(z_s - z_0)} - 1) & \text{if } z_s \leq z_b \\ (z_s - z_b) + \varepsilon(z_b - z_0) + \frac{1 - \varepsilon}{\alpha} (1 - e^{-\alpha(z_b - z_0)}) & \text{if } z_s > z_b \end{cases}$$

여기서, A_x 는 x-축에 수직인 단면의 면적이고 ΔY 는 y-축 방향 격자길이다. 그러므로, h_y 도 위의 방법으로 유도된다.

Fig. 2에서 보는바와 같이 단위 체적당 미소 시간동안 유량의 변화율이 같다면 슬롯이 적용된 연속방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

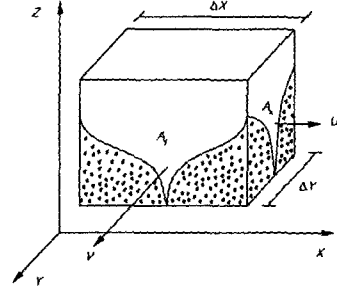


Fig. 2. The sketch of the control-body.

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) \Delta X + \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) \Delta Y + \frac{\partial}{\partial t} (\Delta X A_x + \Delta Y A_y - \int_{z_0}^{z_s} f(z)^2 \Delta X \Delta Y dz) = 0 \quad (3)$$

$$U = u \frac{A_x}{\Delta Y}, \quad V = v \frac{A_y}{\Delta X}, \quad h_x = \frac{A_x}{\Delta Y}, \quad h_y = \frac{A_y}{\Delta X}$$

$$\Delta X = \Delta Y, \quad h_x = h_y, \quad F(z) = 2f(z) - f(z)^2$$

위의 조건을 만족시키면 식(3)은 식(4)와 같이 단순화된 연속방정식으로 유도된다.

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{F(z)} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{F(z)} \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4)$$

또한 슬롯과 결합된 운동방정식은 다음 식(5)와 식(6)으로 나타낸다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{h_x} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{V}{h_x} \frac{\partial U}{\partial Y} + h_x g \frac{\partial Z}{\partial X} - fV + g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 h_x^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{h_x} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{V}{h_x} \frac{\partial V}{\partial Y} + h_x g \frac{\partial Z}{\partial Y} + fU + g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 h_x^2} = 0 \quad (6)$$

여기서, C 는 Chezy 계수, f 는 Coriolis force parameter이다.

2.2 초기치 및 경계조건

복잡한 수리현상을 수치모형화하는 경우 대상이 되는 물리현상 또는 적용된 수치해석기법에 적합하도록 초기조건을 설정해야 한다. 본 수치모형은 여러 가지 경우에 대한 시험계산 과정을 통하여 안정도가 높고 짧은 시간 내에 평형상태에 도달할 수 있을 것으로 기대되는 초기조건으로 계산되는 전영역에 대하여 해수위가 영으로 일정하고 ($Z=0$), 초기유속이 영인 ($U=0, V=0$) 초기조건 (cold start)을 사용하였다.

본 수치모형에서는 경계조건을 필요로 하며, 이들은 각각 육지경계조건과 외해경계조건으로 나눌 수 있다. 육지경계면은 해수면 상승 및 하강 등으로 인해 변하게 된다. 해수위에 대해서는 Dirichlet 경계조건을 사용하였다.

$$Z(t) = \sum H_i \cos(\sigma_i t - g_i) \quad (7)$$

여기서, H_i 와 g_i 는 각각 각 분조의 진폭과 위상이다.

유속장 계산을 위한 육지경계조건은 다음과 같다.

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0 \quad (8)$$

여기서, \vec{V} 는 유속벡터이고, \vec{n} 는 육지경계의 외향단위법선벡터이다.

2.3 차분식의 이산화

수심평균 연속방정식과 운동방정식에 대하여 staggered grid를 사용하여 음해법과 양해법을 동시에 적용하였다(Leendertse and Gritton, 1971).

3. 모형의 적용 및 계산 결과

전술한 바와 같이 수립된 수치모형을 본 연구의 대상해역인 한반도 남해안 중앙부에 위치한 광양만에 적용하였다. 격자 간격 Δx 와 Δy 는 각각 100m으로 대상해역을 300x160개의 정방형 격자로 구성하였으며, 이중 계산되는 해수 격자수는 17218개이고 조간대 격자수는 1981개이다. 수심도는 Fig. 3에, 유한차분 격자체계는 Fig. 4에 각

각 나타내었다.

모형의 입력 자료 및 검증을 위하여 광양만 해역에서 2002년 3월 24일부터 약 16일간 조위와 유속을 관측하였다(한국해양연구원, 2001). Table 1은 조위와 유속 관측 정점의 경위도 좌표이며, Fig. 3의 수심도에 도시하였다. 조위관측 정점 수는 총 6개이고 유속은 2개 정점에서 관측하였다. 모형의 외해경계조건에 필요한 자료는 3개 정점(T1, T2, T3)에서 관측된 자료를 사용하였다. 조위검증은 3개 정점(P1, ADP1, ADP2)에서, 유속은 2개 정점(ADP1, ADP2)에서 모형검증을 위해 관측하였다.

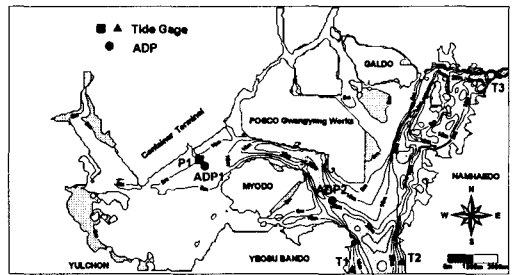


Fig. 3. Bathymetry and location map of the measurement stations.

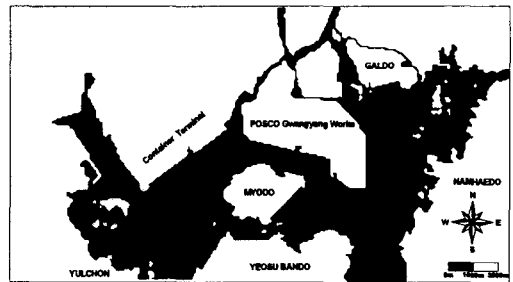


Fig. 4. Finite difference grid system for the modeling domain in Gwangyang Bay.

외해경계조건으로 광양만 입구(T1, T2정점)와 남해대교 교각(T3정점)에서 관측한 조석의 반일 주조(semi-diurnal)인 M2분조와 S2분조의 합성 조위로서 시간에 따라 변하는 진폭과 지각을 지정하여 주었다.

또한 본 모형적용에서 바닥마찰은 Chezy 계수를 사용하였고 조위와 유속은 모두 영인 초기조건을 이용하였고, $C=48.48m^{1/2}/s$, $\alpha=0.88$, $\varepsilon=0.01$ 를 적용하여 20일 동안의 해수유동을 모의하였다.

Table 1. Location of the measurement stations

관측 항목	관측장비(정점명)	설치위치(경위도)	수심 (m)
조석	수압식조위계(T1)	127° 46' 30.984" 34° 50' 16.110"	6.5
	수압식조위계(T2)	127° 48' 40.734" 34° 50' 22.848"	10.0
	수압식조위계(T3)	127° 52' 19.242" 34° 56' 32.718"	8.0
	수압식파고조위계(P1)	127° 40' 40.296" 34° 53' 42.144"	9.0
조석 및 조류	다층유속계(ADP1)	127° 40' 44.946" 34° 53' 33.978"	8.0
	다층유속계(ADP2)	127° 46' 01.374" 34° 52' 25.266"	21.0

Fig. 5는 대조와 소조시 최강 창·낙조와 고조·저조의 해수유동을 나타낸 그림이다. 조간대에서 이동경계처리가 잘 되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 P1, ADP1, ADP2 정점에서 20일간의 계산된 조위와 유속에서 정상상태에 도달했을 것으로 기대되는 5일 이후의 15일간의 계산값을 관측값과 비교한 그림이다. 조위에 비해 상대적으로 유속의 오차가 더 많이 나타나는 경향을 보인다.

Table 2는 Fig. 6에서의 계산치와 관측치의 RMS(Root Mean Square) 오차를 보여준다. 여기서 UV는 U와 V의 합성 유속의 크기이다. ADP1 정점에서의 평균유속오차가 ADP2 정점에서 오차의 약 60% 수준이다.

4. 결 론

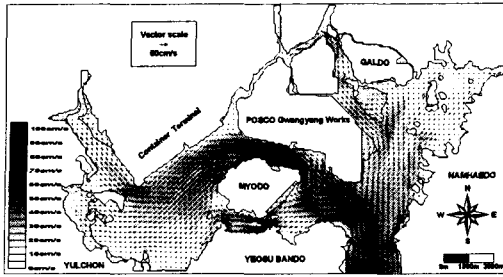
조간대 같은 이동경계를 처리할 수 있는 슬롯법을 도입하여 유한차분법을 사용한 2차원 해수유동 수치모형을 광양만 해역에 적용하였다.

본 모형에서 사용한 이동경계처리 기법은 계산영역내 조간대에서 해수의 주기적인 상승 및 하강을 비교적 잘 재현하였다. 또한 조간대의 노출 및 침수 판단이 불필요하기 때문에 다른 이동경계처리 기법을 적용하였을 때보다 계산시간이 단축될 것으로 기대된다.

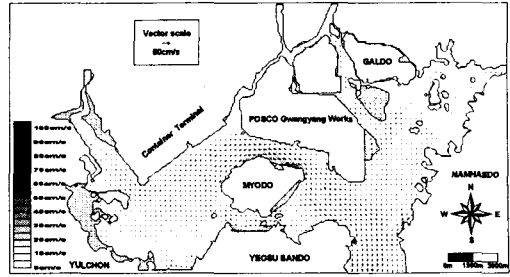
참고문헌

서승원, 김정훈, 유시홍, 2002. 유동모의에서 조간대 처리 효과. 한국해양해양공학발표논문집, 13, 177-183.
이경선, 박경, 오정환, 2000. 조간대 처리 기법

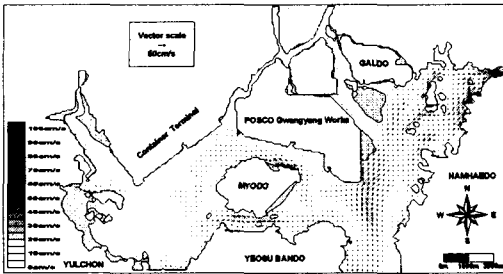
을 포함한 3차원 Semi-Implicit 수역학모형 개발. 한국해양해양공학회지, 12(2), 70-80.
정태성, 김성곤, 강시환, 2002. 3차원 흐름 모델링시스템(FEMOS)을 이용한 아산만 조류 모의. 한국해양해양공학회지, 14(2), 151-160.
정태성, 김창식, 1992. 이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형. 한국해양해양공학회지, 4(3), 146-151.
한국해양연구원, 2002. 광양항 3단계 1차 컨테이너터미널 축조공사 대안설계 해양조사 및 수치모델 용역 해양조사보고서.
Clarke, S. and Elliott, A. J., 1998. Modelling Suspended Sediment Concentrations in the Firth of Forth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, 235-250.
Guan, W. B., Wolanski, E. and Dong, L. X., 1998. Cohesive Sediment Transport in the Jiaojiang River Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46, 861-871.
Flather, R. A. and Heaps, N. S., 1975. Tidal computations for Morecambe Bay. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42, 489-517.
Leendertse, J. J. and Gritton, E. C., 1971. A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas: Vol. II, Computation Procedures. The Rand Corporation.
Lin, B. and Falconer, R. A., 1997. Three-dimensional Layer-integrated Modelling of Estuarine Flows with Flooding and Drying. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44, 737-751.
孙琪, 孙效功, 李瑞杰, 2001. 窄缝法在河口区悬沙输运数值计算中的应用. *海洋与湖沼*, 32(3), 296-301.
王泽良, 王日新, 陶建华, 1999. 渤海湾流场以及污染物分布的数值模拟研究. *海洋与湖沼*, 30(2), 224-230.
何少岑, 王连芬, 1986. 窄缝法在二维边界变动水域计算中的应用. *水利学报*, 12, 11-19.



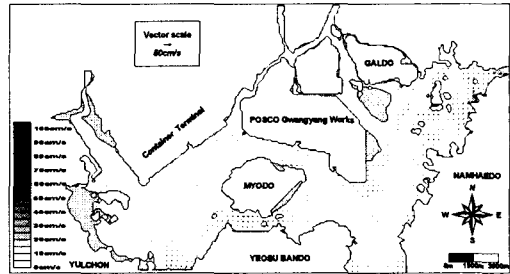
(a) Flood maximum during spring tide



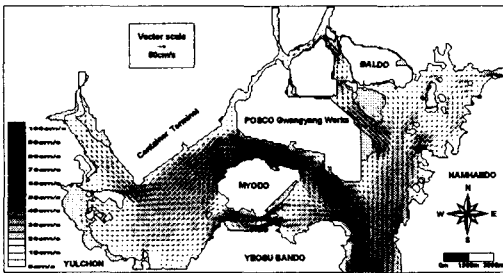
(e) Flood maximum during neap tide



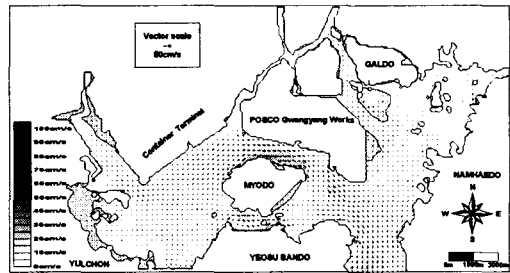
(b) High water during spring tide



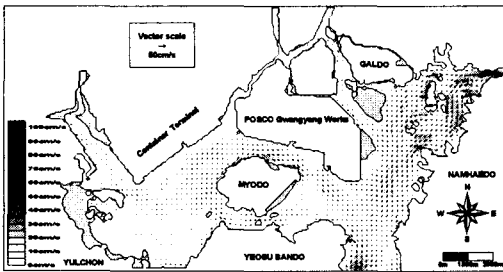
(f) High water during neap tide



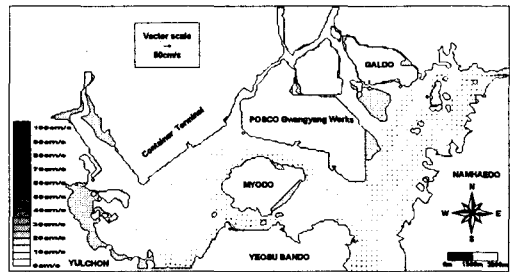
(c) Ebb maximum during spring tide



(g) Ebb maximum during neap tide

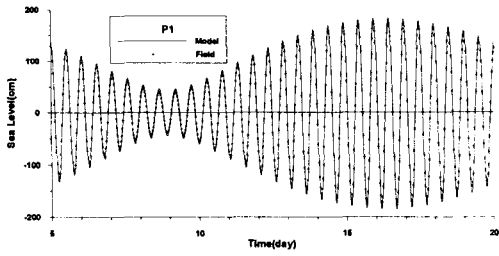


(d) Low water during spring tide

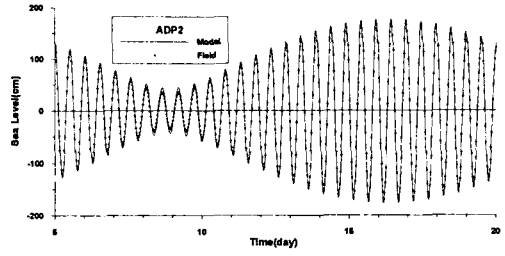


(h) Low water during neap tide

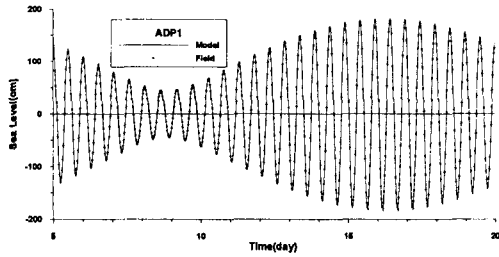
Fig. 5. Tidal current distribution of Gwangyang Bay.



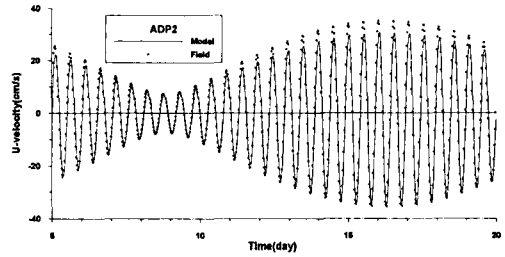
(a) Water level comparison at P1 station



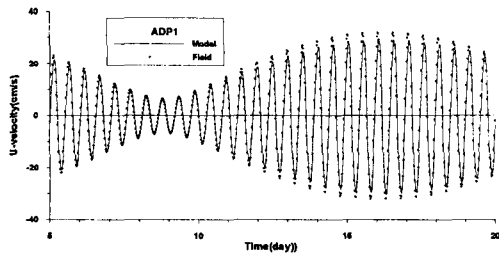
(e) Water level comparison at ADP2 station



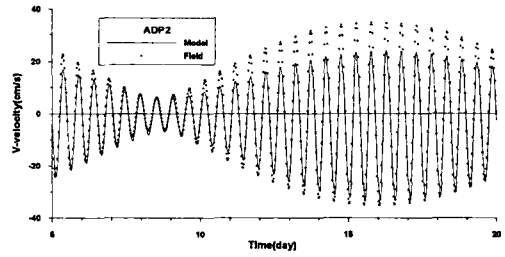
(b) Water level comparison at ADP1 station



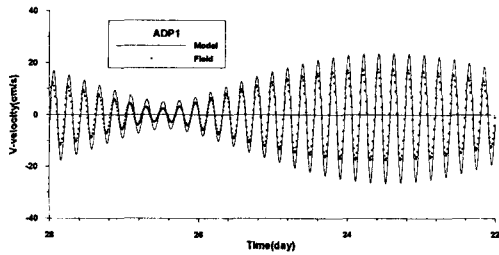
(f) U-velocity comparison at ADP2 station



(c) U-velocity comparison at ADP1 station



(g) V-velocity comparison at ADP2 station



(d) V-velocity comparison at ADP1 station

Fig. 6. Time variations of the computed and observed values.

Table 2. RMS errors of the calculated water level and velocity

RMS Error Unit: Z(cm), U and V(cm/s)

P1	ADP1				ADP2				Meam Velocity Error
	Z	U	V	UV	Z	U	V	UV	
8.47	3.92	3.43	2.43	4.20	6.42	4.99	5.21	7.21	5.71