

〈論 文〉

灣內의 潮流數值解析

— 駕莫灣을 中心으로 —

Numerical Simulation on Tidal Currents in a Bay — Application to Gamag Bay —

李寬洙*

李英錫**

李三魯***

Lee, Kwan Soo· Lee, Young Suk· Lee, Sam No

Abstract □ This paper describes the characteristics of tidal currents in the Gamag Bay by using the two-dimensional nonlinear hydrodynamic equation. The basic equations are derived by Navier-Stokes momentum equation and continuity equation and its characteristics critically are reviewed, and they are analysed by the implicit finite difference method. The numerical model is constructed two-dimensional (depth-averaged) simple layer model.

This paper investigates the stability of solution and convergence of solution in application of the method to Gamag Bay, and the reproducibility of the simulation is also discussed in comparison with the results of field survey.

The following items are clarified through the numerical investigation; i) the reproducibility of tidal range and currents are quite acceptable, comparing with the results of model tests and field data, and ii) tidal cycle for convergent solution is four tidal cycle, also, iii) bottom friction is successfully represented as $c = (1/n) \cdot h^{1/6}$.

요 지: 본 연구는 2차원비선형 동수역학방정식을 이용하여 가막만의 조류의 특성을 해석하였다. 사용된 기초방정식은 Navier-Stokes의 운동 및 연속방정식이 이용되었고, 방정식을 구성하는 각항의 특성에 관해 상세하게 살펴본 후, 그것을 음적분법을 사용하여 수치해석하였다. 수치모델은 2차원 단층모델로 구성하였으며, 수립된 수치모델을 가막만에 적용하여, 해의 안정성과 수렴성을 검토하였으며, 모델의 결과와 현지의 관측치를 비교하여 수치모델의 재현성을 검토하였다. 본 수치실험결과 다음의 것들이 증명되었다.

i). 실측치와 비교해서 조류의 유량, 유속에 대해서 재현성은 양호하게 나타났으며, ii). 안정해를 얻기위한 조석 주기는 4주기이었다. 또한, iii). 조도계수는 $C = (1/n) \cdot h^{1/6}$ 으로 충분히 나타낼 수 있었다.

1. 서 론

유체의 운동은 일반적으로 매우 복잡하며 그것을 0해석적으로 정확히 해결한다는 것은 곤란하다. 그것은 경계조건이나 초기조건이 복잡하고, 유체의 운동을 기술하는 방정식이 비선형이기 때문이다. 이를 위해서는 흐름을

규제하는 인자중에서 지배적인 것을 취해 근사화등을 시행 선형화함으로써 해를 구하고있다. 통상 이러한 경우에는 모형실험을 통해 실제의 현상을 축소하여 재현하는 수법이 있다. 그러나 모형실험에는 상사의 문제, 장소, 시간등의 제약을 받아 본 연구에서와같이 비교적 넓은 영역을 대상으로 하는 조류실험에는 더욱 어려움이

* 전남대학교 토목공학과 교수
** 광주대학교 토목공학과 조교수
*** 여수수산대학 해양토목공학과 부교수

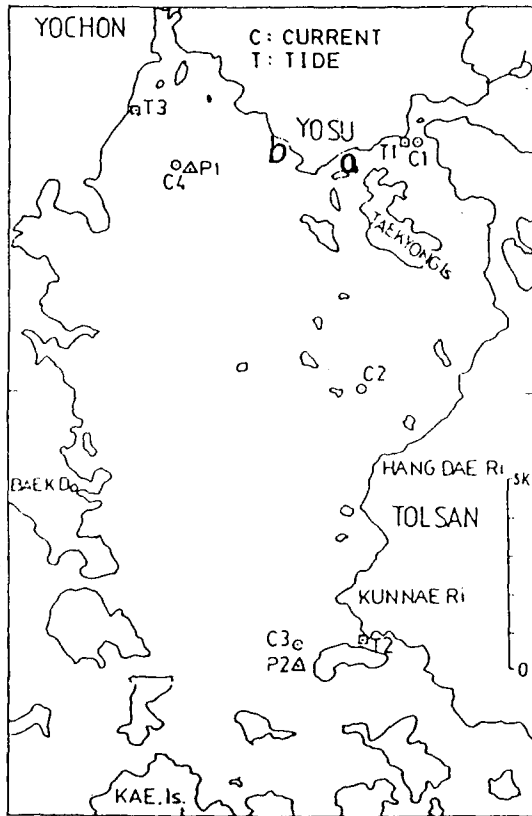


그림 1. 만내의 유속 및 조위관측지점

많다. 한편 수치모델에 의한 계산은 최근 고성능 Computer의 발달에 의해서 비약적으로 발전했으며, 기 확립되어 있는 방정식에 대해 수치화 하여 해를 얻는 일이기 때문에 수치계산에 따른 해의 오차, 안정성에 대한 문제가 수반되지만, 축적의 어려움이나 외력으로서 주어진 경계에서의 조석의 설정, Coriolis힘의 도입 및 조도계수 등의 변경이 용이하여, 본 해석에서는 수치모델을 선택하였다. 한편 해수유동에 관한 연구는 평면 2차원적인 모델과 3차원적인 모델로 대별할 수 있다. 3차원모델은 온도 또는 염분변화로 인한 밀도차에 의하여 흐름이 발생하는 흐름장의 해석에 적합한 모델이다. 그러나 조석에 의한 조류와 같이 압력경사에 의해서 발생하는 흐름장의 해석에는 본 연구에 적용된 평면2차원모델이 일반적으로 많이 쓰여지고 있다. 따라서 평면 2차원모델에 대해서 기술하면 Dronker(18)에 의해 장주기파에 대한 수치계산이 소개된 후 고성능 전자계산기의 발달로 주로 기상학 분야로부터 Platzman(2)에 의하여 조류, 조위의 계산이 행하여져 수치계산의 유용성이 실증되었다. 그 후 Miyasaki(5), 宇野木(8), 등에 의해서 오늘날 일반적으로 적

용하고 있는 장주기파 기초식의 차분화에 의한 계산 수법이 확립되었다. 1970년대에 Peaceman, Rachford(22) 등에 의해서 고안된 A D I법을 Leendertsen(19)이 2차원 단층모델로 조류장과 확산해석에 적용, 해석하여, 최근까지 많이 이용되고 있다. 국내의 조류에 관한 수치해석 연구로는 이석우(20) 등이 광양만의 조석현상을 SOGREAH 모델로 해석 하였으며, 최병호(6)의 아산만, 경기만에서의 조석 수치모형등이 있고 이길성, 강주환(21)은 천수방정식의 유한차분특성을 고찰했다. 따라서 본 연구에서는 경계조건의 설정이 용이한 평면2차원수치모델을 이용하여 그림 1에서와 같이 돌산도와 고돌산반도로 둘러싸인 면적 147Km², 평균수심이 7m의 천해만인(9) 가막만을 중심으로 유한차분법을 사용하여 수치모형실험을 실시하고, 그 적용성을 현지관측자료와 비교, 검토함으로써 만내의 조류의 특성을 규명코자 하였다.

2. 이론적 배경

2-1 기초방정식

연안 해역에서 평균해면상의 한점을 원점으로 하여 직교직선좌표계를 그림 2 와 같이 정하여 평균해면상에 x, y축으로, 연직상방향으로 z축을 잡고 유체는 점성, 비압

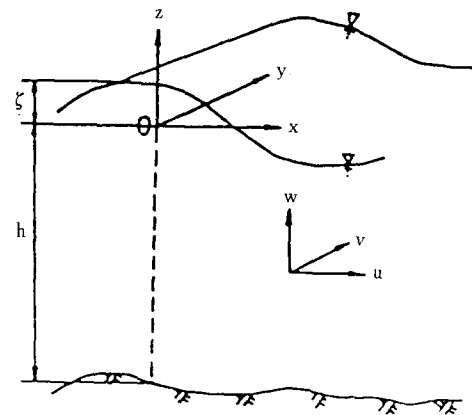


그림 2. 좌표계의 정의

축성이고, 압력은 정수압 분포라하고, 연직유동장의 시간적, 장소적변화량($\frac{\partial w}{\partial t}, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}$)은 무시하면, 장주기파의 운동 및 연속방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fv - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

여기서;

- u, v : 해면으로부터 저면까지의 평균유속의 x, y, 방향의 유속성분 (m/sec)
- f : coriolis계수 (=2ω sin φ, ω=지구자전의 각속도 φ, : 위도)
- τ_x, τ_y : 해저 마찰응력성분
- L : 수평와동점성계수
- p : 압력, ρ : 유체의 밀도

윗식 (2.1), (2.2), (2.4) 식을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} - fv + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial (v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (vw)}{\partial z} + fv + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} - L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

한편 (2.3) 식에서 $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$ 되며 따라서 $p = \rho g(\zeta - z) + p_0$ (2.7)

조류계산에 있어서는 수면 (z=ζ) 에 있어서 압력 p₀는 0으로 취하기 때문에 윗식 (2.7)은

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (2.8)$$

따라서 (2.8) 식을 (2.5)와 (2.6) 식에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} - fv + g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial (v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (vw)}{\partial z} + fv + g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} - L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

연속방정식 (2.4) 식 및 x, y 축 방향의 운동방정식 (2.9), (2.10) 등이 조류계산에 있어서의 기본식이 된다. 한편 상기의 식을 2차원화(수평방향에 평균화)를 시행하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \{ (\zeta + h) \} + \frac{\partial v}{\partial y} \{ (\zeta + h) \} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \quad (2.13)$$

여기서, u, v는 $-h \leq z \leq \zeta$ 사이의 평균 유속, C는 Chezy의 계수를 나타낸다.

2-2 수치해석 및 방법

만내의 조류의 거동을 해석 하기 위해서는 여러형태의 수치해석이 필요하지만 Leendertse에 의해서 조류 및 확산방정식의 차분식에 응용되어 오차의 억제와 계산방법의 효율성에서 널리 쓰여지고 있는 ADI법으로 해석한다. 먼저 계산 수법은 한 Time step Δt를 둘로 나누어, 전반

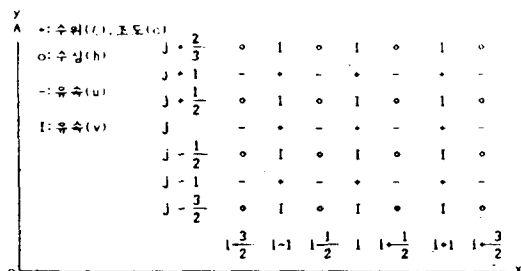


그림 3 유한차분 계산망의 구성

Time step : $k\Delta t \rightarrow (k + \frac{1}{2})\Delta t$ 에 있어서는 (2.11)식과 (2.12)식을 연립하여 u, ζ 를 구하고 얻어진해를 이용하여 (2.13)식에서 v 를 구한다.

후반 Time step : $(k + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (k+1)\Delta t$ 에 있어서는 (2.13)식과 (2.11)식을 연립하여 v, ζ 를 구하고 얻어진해를 이용하여 (2.12)식에서 u 를 구한다.

따라서 2개의 Time step을 계산함으로써 $u^{n+1}, v^{n+1}, \zeta^{n+1}$ 가 구해진다.

그림 3은 유한차분법의 해석을 위한 변수의 위치를 나타내고 있다.

전반 Time step $k\Delta t \rightarrow (k + \frac{1}{2})\Delta t$ 에 있어서 (2.11), (2.12), (2.13)식 각각 $(i + \frac{1}{2}, j), (i, j)$ 및 $(i, j + \frac{1}{2})$ 에 대해서 차분화하여 정리하면 다음과 같다.

$$\zeta^{k+1/2} = -P_i \cdot u^{k+1/2, i+1/2} + Q_i \quad (2.14)$$

$$u^{k+1/2, i+1/2} = -R_{i-1} \cdot \zeta^{k+1/2} + S_{i-1} \quad (2.15)$$

여기서,

$$P_i = \frac{r_{i+1/2}}{1+r_{i+1/2}}, \quad Q_i = \frac{A_{ik} + r_{i-1/2} \cdot S_{i-1}}{1+r_{i-1/2}}$$

$$R_i = \frac{r_{i+1}}{r_{i+1/2} + r_i}, \quad S_i = \frac{B_{i+1/2} + r_i \cdot Q_i}{r_{i+1/2} + r_i}$$

$$r_{i+1/2} = g \cdot (z_{i+1/2} - z_i) \quad (2.16)$$

위의 식을 x 방향으로 u, ζ 를 Implicit로 계산한 후 y 방향으로 Explicit로 풀다.

다음의 Time step $(k + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (k+1)\Delta t$ 에 있어서는 $u \rightarrow v, k \rightarrow k + \frac{1}{2}, i \rightarrow j, r \rightarrow r', P \rightarrow p, Q \rightarrow q, R \rightarrow r, S \rightarrow s, A \rightarrow a, B \rightarrow b$, 로 놓고 전반 시간 Step 에서와 같은 방법으로 정리하면 다음과 같다.

$$\zeta^{k+1, j} = -p_j \cdot v^{k+1/2, j+1/2} + q_j \quad (2.17)$$

$$v^{k+1/2, j+1/2} = -r_{j-1} \cdot \zeta^{k+1, j} + s_{j-1} \quad (2.18)$$

여기서,

$$p_j = \frac{r_{j+1/2}}{1+r_{j+1/2}}, \quad q_j = \frac{a_j^{k+1/2} + r_{j-1/2} \cdot s_{j-1}}{1+r_{j-1/2}}$$

$$r_j = \frac{r_{j+1}}{r_{j+1/2} + r_j}, \quad s_j = \frac{b_{j+1/2}^{k+1/2} + r_j \cdot q_j}{r_{j+1/2} + r_j} \quad (2.19)$$

후반의 time Step 은 y 방향으로 v 를 Implicit로 계산한 후 x 방향으로 u 를 Explicit로 해결한다. 그림 4은 조류계산을 위한 흐름도를 나타낸다.

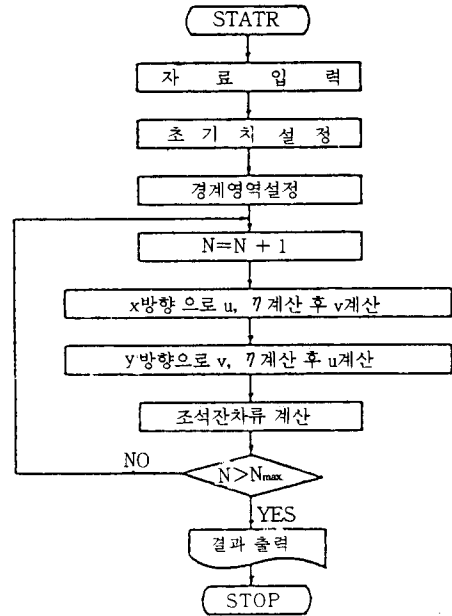


그림 4. 해수유동모델의 흐름도

3. 수치실험 및 고찰

3-1. 입력자료

조류계산의 입력자료로서 수심자료는 국동항(a)을 중심으로 연안방향으로 14km, 외해방향으로 18km의 해역

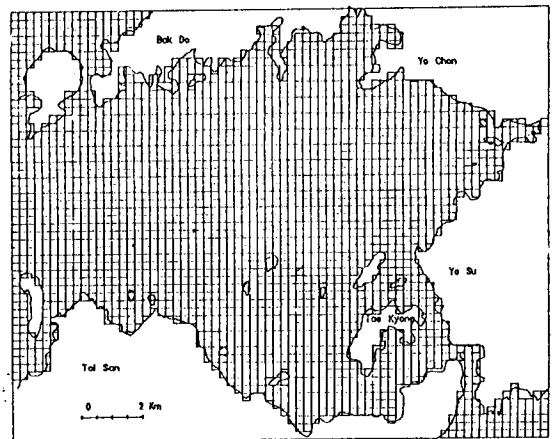


그림 5. 계산영역의 격자망

에 대해서 1/50,000의 수로국발행 해도(No240)를 이용하여 그림 5에서와 같이 격자간격 250m로 계산격자망을 구성하여 격자망속의 평균수심을 취했다. 계산시간간격은 C.F.L조건에 의하여 만내의 최대수심이 36m로서 $\Delta t =$

9sec로 하였으며, 해저마찰계수는 Manning 계수 $n=0.025$ 을 사용하여 각격자점에서의 Chezy계수를 계산하였다. Coriolis계수는 계산영역의 위도가 $34^{\circ}36' \sim 34^{\circ}45'$ 로서 중앙영역인 $34^{\circ}40'$ 의 값을 채택했다. 한편 조류계산

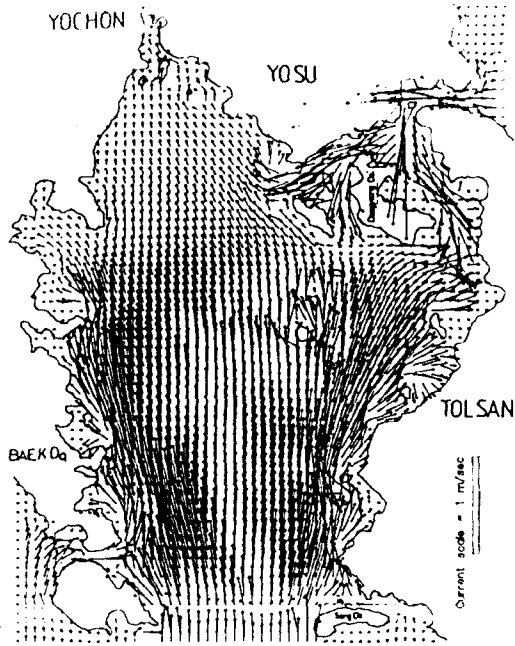


그림 6. 대조창조시 유속벡터

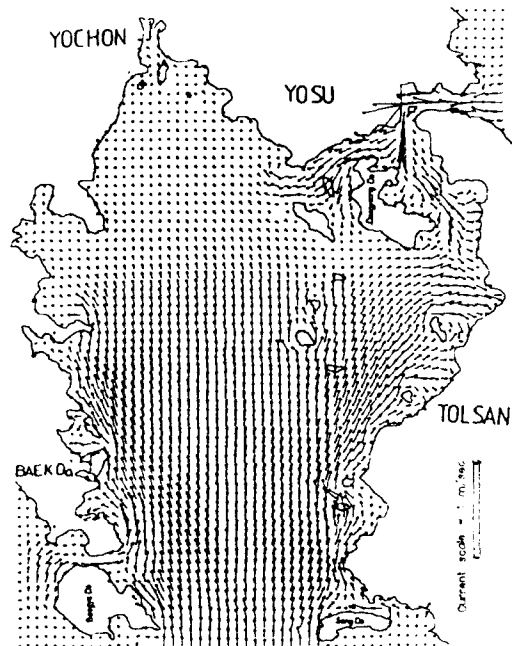


그림 8. 소조창조시 유속벡터

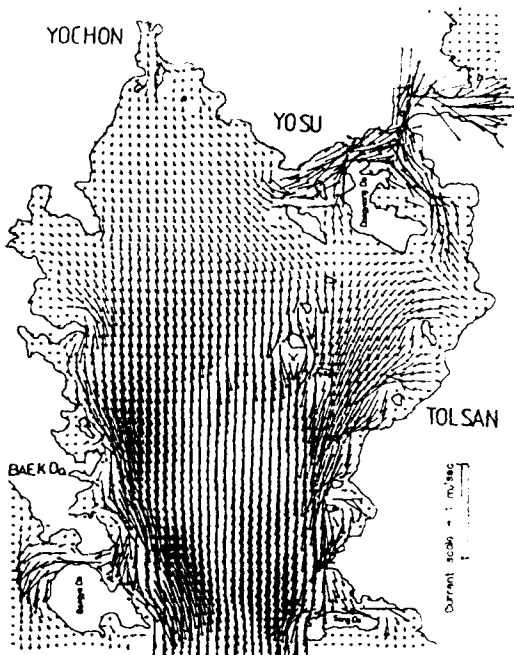


그림 7. 대조낙조시 유속벡터

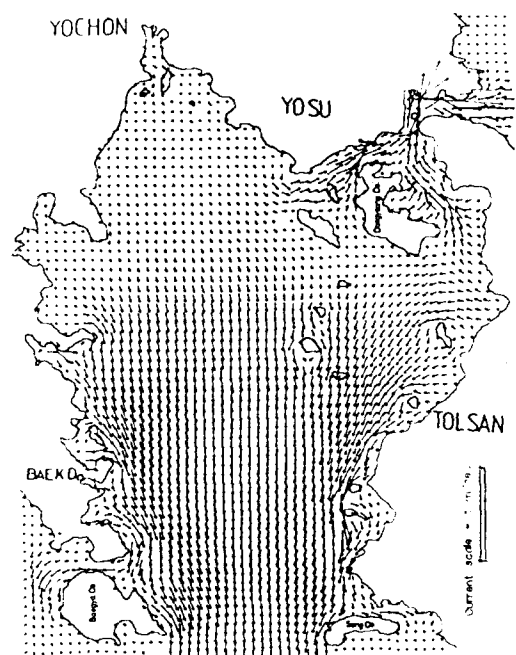


그림 9. 소조낙조시 유속벡터

의 경계조건으로서 돌산연륙교(그림 1의 T1)에서와 남쪽 송도부근(그림 1의 T3)의 개경계에서 대조(1990년 6월23~24일), 소조(1990년 6월2~3일)에 25시간 동안 매 30분 간격으로 연속관측한 조위자료를 여수항 조위관측소의 관측치와 비교, 검토 후 조화분해하여 12시간 30분의 주기로 모의발생 시켰다. 또한, 초기치의 경계조건으로는 조위와 유속을 0으로 하여 계산하였다.

3-2. 결과 및 고찰

대조기와 소조기의 유속계산결과를 창, 낙조류 최강류 시에 그림 6에서 그림 9까지 유속의 분포를 벡터로써 나타내었으며, 각 관측점에서의 대조기의 관측치와 계산치를 그림 10에서 그림 11로 나타 내었다. 한편, 본 수치계산 결과를 1982년에 이규형등(17)이 그림 12의 부표추적실험에서 조사된 해수유동패턴과 비교 하여본 결과 전반적인

흐름의 패턴은 같은 양상을 보였다. 해수 유동패턴의 특성을 보면 돌산교에서 유입된 해수는 비교적 큰 유속으로 대경도를 돌아 굴전과 평사리에서 북상하는 해수와 서로 만나며, 일부는 국동항(a)을 돌아 신월동(b)앞에서

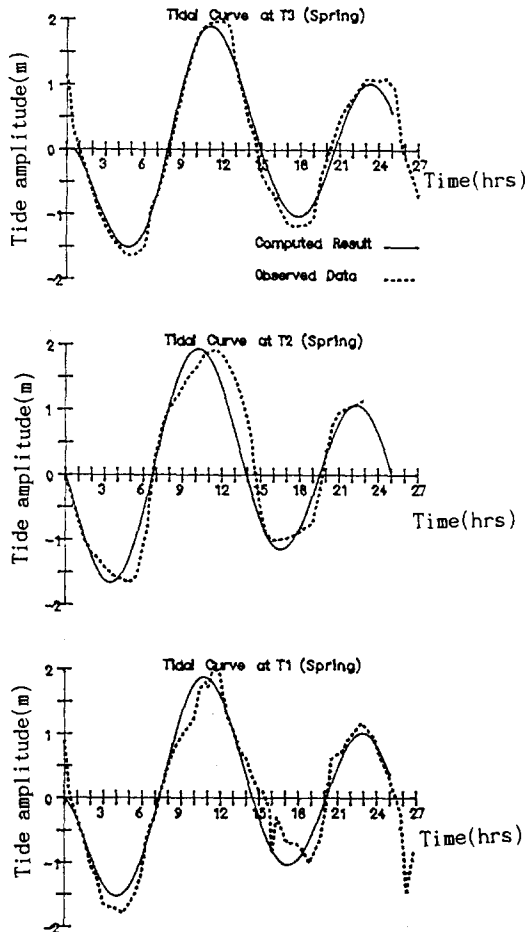


그림 10. 조위 계산치와 관측치

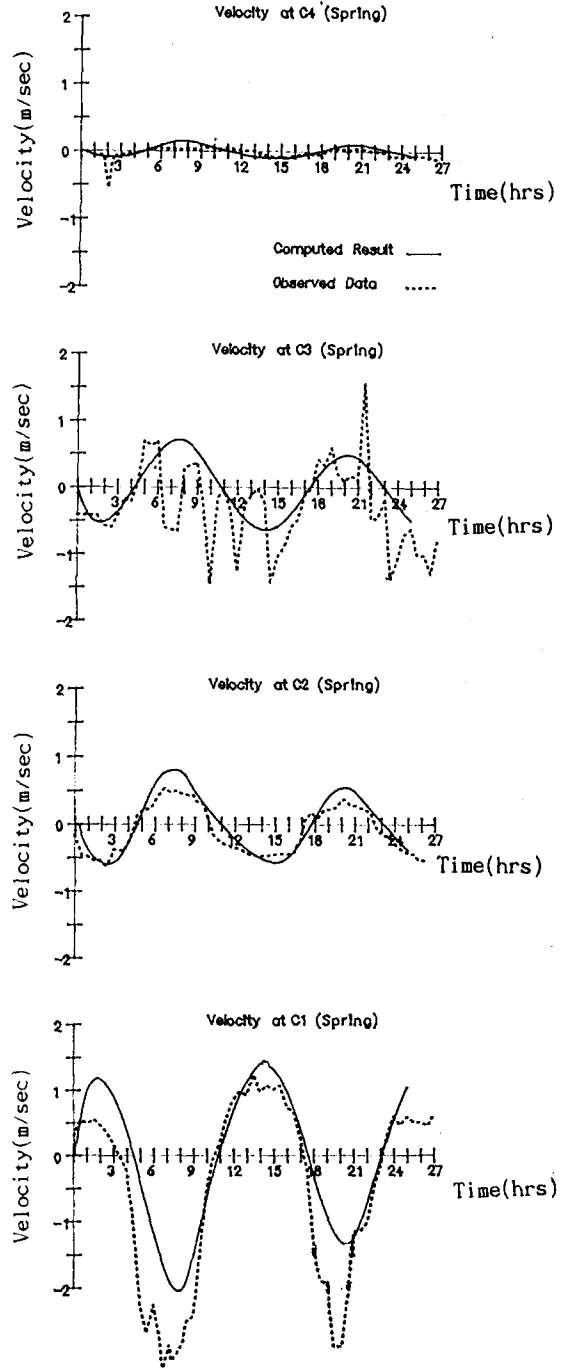


그림 11. 유속 계산치와 관측치

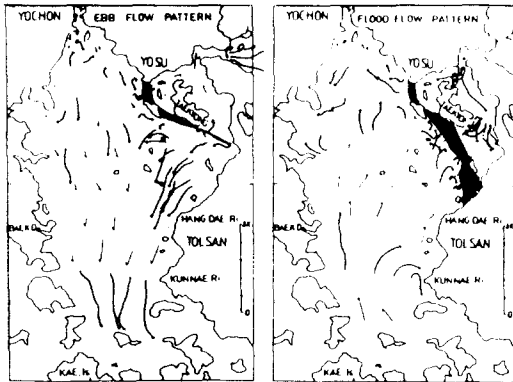


그림 12. 대조기 부표주적실험

복상하는 해수와 접하는 것으로 나타났다. 한편, 현지관 측에 의한 만내의 조석형태는 규칙적인 반일주조형이며, 조류 역시 조석에 의해 반복된 반복류의 경향이 뚜렷이 나타났다. 또한 유속의 크기에 있어서는 돌산대교 부근(C1지점)에서 최대 약 1.7m/sec, 낙조류시 1.9m/sec로서 관측치 1.82m/sec와 2.1m/sec와 비슷한 값을 보였으며, 낙조류가 창조류 보다 크게 나타나 연중 남향의 향류가 탁월한 것으로 나타났다. 여천시 소호리부근(C4지점)에서는 유속이 0.1m/sec 미만으로 타지역에 비해 해수의 교류가 활발하지 못하여 해수정체현상이 나타날 것으로 보인다.

4. 결 론

가막만의 해수유동특성을 해석하기 위하여 동수역학 방정식을 ADI법에 의해 2차원 단층모델로 구성하여 수치계산한 결과와 현장관측결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 그림 6에서 그림9의 수치계산결과의 분석으로부터 만내의 해수유동패턴은 대체로 재현되었다고 판단되며, 계산개시 1조석 후에 안정해를 얻을 수 있었다.
2. 가막만의 조석의 형태는 규칙적인 반일주조형이고, 조류 역시 조석에 의해 반복된 반복류의 경향이 뚜렷하였다. 한편, 여천시앞(T3지점)과 송도부근(T2지점)의 조시차는 30분, 여수항과는 20분의 조시차를 보였다.
3. 해수유동특성을 보면 돌산연륙교에서 유입된 해수는 비교적 빠른 유속으로 대경도를 돌아 일부는 돌산도를 따라 남하하여 굴전과 평사부근에서 송도부근으로 유입된 해수와 서로 만나고, 일부는 국동항(a)을 따라 신월동(b)부근에서 복상하는 해수와 서로 만나고있다. 또한 조류형태는 왕복성조류로서 남북방향 성분이 우세하게 나

타났다.

1. 소조기에서는 돌산연륙교부근의 협수로를 제외한 대부분의 해역에서 유속이 미약하여 해수교류가 활발하지 못하여 해수정체현상이 나타날 것으로 보인다.

참고문헌

1. 加藤重一, (1984) "수산토목개론", 恒性社厚生園, PP.116~168.
2. G. Platzman, (1958) "The Lattice Structure of the Finite-Difference Primitive and Vorticity Equations", Monthly Weather Review, Vol. 86, No. 8, pp. 285~292.
3. 南基樹, (1982) "江, 河, 内河의 海水流動, 混合, 擴散", 海洋研究所 所報, 第1卷, 第2號, pp.103~118.
4. 中近啓二, (1989) "환경평가의 제문제-유황과 물질확산", 日本土木學會關西支部講習, pp.25~40.
5. Miyasaki, M., T. Ueno and S. Unoki, (1961~1962) "Theoretical Investigations of Typhoon Surges along the Japanese Coast", (I), Oceanogr. Mag., 13(1), (II), Oceanogr. Mag. 13(2).
6. 최병호, (1990) "아산만의 조석수치모형", 대한토목학회 논문집, 제10권, 제2호, pp.129~130.
7. 편종근, et al, (1990) "시간의존 경사방정식을 이용한 항만과 고 분포계산", 해양및항만공학회 제 2권 1호, pp.18~27.
8. 宇野木早苗, 磯崎, (1962) "高潮의 數値實驗에 의한 結果에 대해서", 第9回海岸工学講演會講演集, pp.31~42.
9. 수로국, "조석표", (1989~1990) 대한민국수로국, pp.41.
10. 東海大學 出版部, (1981) "해양물리학Ⅲ", 東海大學 出版會, pp.133~165.
11. 中野猿人, (1980) "조석학", 古今書院, pp.121~173.
12. Masch, F. D., et al, (1969) "A Numerical Model for the Simulation of Tidal Hydrodynamics in Shallow Irregular Estuaries," HYD 12~6901, Hydraulic Engineering Laboratory, The University of Texas at Austin.
13. Eider, J. W., (1959) "The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow", J. Fluid Mech., 5 pp.544~560.
14. Oster, C. A., Sonnichsen, J. C., and Jaske, R. T., (1970) "Numerical Solution to the Convection Diffusion Equation," Water Resources Research, Vol. 6, NO. 6, PP. 1746~1751.
15. Richtmyer, R. C., (1954) "Difference Methods for initial Value Problems, Interscience, New York,
16. 金子安雄, et al, (1975) "ADI법에 의한 조류오염확산의 수치계산", 항만기술연구 소보고, 제14권, 제1호, pp.7~11.
17. 이규형, et al, (1982) "가막만의 해수 교환", 한국해양학회지, 제7권, 제1호, pp.15.
18. Dronker, J. J., (1955) Tidal computation in shallow water, Proc. A. S. C. E., Hy6, Vol. 81, June.
19. Leendertse, J. J., (1971) "A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal sea, vol. 2, Rand Corporation.
20. 이석우, et al, (1988) "광양만의 조석현상", 광양공업단지조성에 관한 토목공학심포지움, 대한토목학회, 포항제철

- (子), pp. 381~405.
21. 李吉成, 강주환, (1989) "淺水方程式의 有限差分特性", 大韓土木學會論文集, 第9卷, 第1號.
22. Peaceman, D.W. and Rachford, H.H., (1955) "The Numer-

ical Solution of Parabolic and Elliptic Differential Equations", J. Soc. Indu. Appl. Math, 3, No. 1, (1955), pp. 28~41.

—1991년 7월 3일 접수—