

數値模形을 利用한 새만금 防潮堤 築造後의 潮汐 運動 豫測

박 창 규 · 이 남 호

Numerical Evaluation of Tidal Characteristic Changes after Saemangeum Sea-dike Closing

Park, chang-kyu · Lee, Nam-Ho

ABSTRACT

During the performance of large scale tidal land reclamation project along the coast line, the construction of large scale structures such as sea-dikes, closing estuaries will induce big changes of near-shore hydraulic behavior. In this paper, its is aimed to verify the change of tide and currents after the construction of sea-dike of the Saemangeum project along the coast line. Numerical scale model "TRISULA" which development by Delft Hydraulics in the Netherlands was used. "TRISULA" is adopting the finite difference numerical scheme, and mostly using for hydro-dynamic solution along the sea and estuaries. Model boundary is covering 100×170 Km and constructed with 133×337 grids. Outer side boundary is divided 48 sections, and input 37 tidal components are gained from another big scale numerical "Yellow Sea" model. Model calibrations & verifications were performed with field tide & current datas which were measured along sea-dike alignment during Aug. 1997 ~ Apr. 1999. And then, numerical simulation with the tide condition dated 17 Apr. 1999 was performed with & without sea-dike construction condition for the comparison. Evaluated boundary is 20 km out-side from sea-dike alignment. Four cross lanes were set up, each of lane contains 3 points, for the comparison of sea-dike construction effects.

Results showing the tidal amplitude is reducing approximately 20 cm after the construction of sea-dike during spring tide condition, amplitude 6.9m.

Currents after construction of sea-dikes along the alignment, the northern part shows 50%(inner), 90%(outer) and the southern part shows 10%(inner) 50%(outer) of the currents before construction.

키워드 : 수치모형, TRISULA, 방조제, 조석, 조위, 조류속

I. 서 론

하천이나 하구 및 해양에서 토목구조물을 설계하거나 시공할 때에는 물 흐름에 대한 수리적 특성 변화를 고려하여야 한다. 새만금지구는 서해안 고군산군도 인근 해역을 막는 연장 34 km의 방조제가 설치되는 대규모 간척사업지구로 공사중 출입되는 조석량은 하루에 17억 m^3 에 이르며 이러한 대규모의 방조제 건설은 일차적으로 인접 해역의 조위 및 조류속의 변화를 초래하게 된다. 이와 같은 방조제 건설로 인한 조석 변화를 정량적으로 분석함으로써 방조제 건설 후 발생할 수 있는 여러 가지 피해에 대한 사전 조치를 수립할 수 있을 것이다. 방조제 건설에 따른 조석변화의 추정에는 조석계산을 통하여 규명할 수 있는데, 이를 위하여 추정 결과의 검증과 함께 방조제 건설 전후에 대한 조석 계산을 실시하여야 한다. 새만금지구의 방조제 건설에 따른 조위 및 조류속의 변화는 방조제 건설전과 건설후의 조석 계산 결과를 비교함으로써 평가할 수 있다. 간척사업과 관련된 조석 유동의 해석에는 수리모형시험과 수치모형방법이 주로 이용되어 왔다. 수리모형시험은 모형을 제작하고 실험결과를 취득하는데 많은 시간과 비용이 소요되는 단점이 있으나, 수치적으로 계산이 불가능한 경우의 흐름현상을 해석하는데 유용한 도구로 많이 사용되어 왔다. 이에 비하여 수치모형해석은 수리모형에 비하여 유연성이 뛰어나며, 경제적으로 유리한 장점을 가지고 있다. 간척사업이나 대규모 해안 개발과 관련하여 수리모형을 설치하고 이용할 경우 유한한 영역을 선정하고 그 경계조건을 처리하는데 있어서 모의발생 결과의 왜곡을 최소화할 수 있는 영역의 크기 및 물리적인 의미를 갖는 조건이 필요하며, 동시에 사용 가능한 시설용량과 경제성을 함께 고려하여야 한다. 하지만 적절한 대상 해역을 선정하는 문제, 그리고 해양과 대상 영역과의 경계를 이루는 개방경계 조건 처리는 현재 까지도 매우 까다로운 문제로 대두되고 있으며, 그것이 수치모형의 결과 및 해의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

본 연구의 목적은 네델란드 델프트 수리시험소에서

개발된 2차원 해수 유동 수치 모형인 "TRISULA"를 이용하여 새만금 방조제 전면 및 인접 해역에서의 방조제 설치 전후의 조류속, 조위 등 가장 기본적인 수리적 특성의 변화를 사전 예측하는데 있다.

II. 연구 사

수학적 관점에서 조석의 근원에 대한 검토는 Newton에 의하여 이루어졌으며 Bernoulli와 Laplace에 의하여 조석 관측 분석에 대한 실용적인 이론의 기초가 마련되었다. Thomas는 Laplace의 이론을 바탕으로 조화분석법 (Harmonic method)를 개발하였으며, 이는 임의 지점의 조석을 주기적인 성분을 갖는 여러 형태의 조석 분조로 분류한 후 이를 합하여 계산하는 방법이었다. 이 조화 분석법은 Darwin에 의하여 계승 발전되었으며 이는 아직까지 우리 나라 조석 분석 방법의 하나로 이용되고 있다. 근래에 이르러 수학적 방법의 발전과 컴퓨터의 등장으로 조석분석은 2차원적 수치해석을 이용한 조석 분석이 연안 해역의 개발에 사용되고 있다.

조석 유동 모형에 사용되는 지배 방정식에 대한 수치 해석기법은 크게 나누어 유한차분법과 유한요소법으로 구분된다. 조석 유동에 대한 유한차분법의 연구는 Dronker(1955)에 의한 장주기파의 해석이 시초로 알려져 있으며 Hansen(1956)은 최초로 비선형항과 Coriolis 힘, 바람등의 영향을 고려한 모형을 북해의 조류 해석에 사용한 것으로 알려져 있다. 그리고 Falconer(1980)은 항만의 조석 순환 특성을 Alternate Directon Implicit (ADI) 방법으로, Carton(1983)은 정상류와 항만내의 장주기조인 Mf 분조를 Laplace 방정식으로 해석하는데 난류모형을 도입하여 해석한 바 있다. 우리 나라에서도 해안에서의 수리 해석에 유한차분법이 주류를 이루고 있으며 최(1983, 1986, 1990)는 황해와 동지나해의 조석현상, 김(1986)등은 목포 연안의 복잡한 지형에서의 조류 해석에 유한차분법을 이용한 바 있다. 또한 이와 강(1989)은 가장 널리 쓰이는 ADI 방법, Heap 방법, Hansen 방법, Richtmyer 방법을 유한 차분법을 이용하여 천수방정식의 해석

에 이용한 바 ADI 방식이 가장 좋은 결과를 나타냈다고 보고하고 있다. 강 등(1993)은 Weare(1976)이 지적한 바와 같이 Courant 수가 큰 경우 불규칙한 해역이나 해저 협곡이 발달한 해역에서 정확한 결과를 기대하기 어려운데 이를 극복하기 위하여 완전 음해법으로 차분하고 Conjugate Gradient Square 방식으로 해를 구하는 알고리즘을 개발하였다.

조석운동에 대한 유한요소법은 Taylor(1975) 등이 천수 방정식으로 유한요소법을 해석하여 유한차분법과 거의 동일한 해를 얻었으며 Brebbia(1976)는 천수 방정식의 시간항 적분에 음해법과 양해법을 이용하여 해석한 바 있다. 나(1994)는 삼각형과 4각형 요소를 혼합하여 빈도-시간영역 비선형 유한요소 모형을 개발하고 이를 해석해가 존재하는 직사각형 폐쇄수위에 적용하여 조위와 조류속의 수치해석과의 차이가 거의 없음을 확인하였다.

III. TRISULA 모형

1. 이론적 배경

동수역학 수치 모형인 "TRISULA" 는 조석과 기상학적인 원인에 의하여 발생된 부정류 흐름 및 유동현상을 계산한다. 그 주요 목적은 얇은 바다, 연안지역, 하구지역 및 강과 호수에서의 불규칙한 온도와 염도 분포에 기인하는 밀도차이의 영향 또는 조석 및 바람에 의하여 발생된 흐름을 2차원 및 3차원적으로 수치 해석을 하는데 있다. 모형은 수평방향 스케일이 수직 방향의 스케일보다 훨씬 큰 흐름을 그 해석 대상으로 한다.

가. 기본 가정

모형은 상대적으로 얇은 수심에서 적용되므로 천수 방정식의 가정을 도입한다. 즉 수직 방향의 운동량 방정식은 정수력학적 압력 변화로 단순화시키고 수직 방향의 가속도는 중력 가속도에 비하여 무시할 정도로 작다고 가정한다. 유체는 비압축성이라 정하고 Boussinesq의 가정을 사용하여 밀도 변화의 영향은 단지 수평 방향의 압력 경사항 내에서만 고려한다.

나. 지배방정식

모형의 지배방정식은 운동량방정식과 연속방정식으로 구성되어 있다. 수직 방향의 좌표계로는 σ 좌표계가 이용된다. σ 값의 분포는 바닥에서 $\sigma = -1$ 이며 수면에서 $\sigma = 0$ 이다. 이와 같이 σ 좌표계는 수직 단면에서 경계면에 따라 0 과 -1 사이의 값으로 구분되는 시스템이다.

1) 수평 방향의 운동량 방정식 :

ξ 및 η 방향의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ & + \frac{\omega}{(d+\xi)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ & - \frac{vv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv \\ & + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ & = - \frac{1}{\rho \sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{\partial P}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} \\ & + \frac{\omega}{(d+\xi)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ & - \frac{uu}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ & = - \frac{1}{\rho \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial P}{\partial \eta} + \frac{\partial P}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \\ & + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \dots (2) \end{aligned}$$

Boussinesq 가정에 의해 입력항을 제외하면 밀도는 일정하게 된다.

2) 연속방정식 :

수직방향의 속도 ω 는 연속방정식으로부터 계산된다. 수면에서 바닥까지 접근하면 연속방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

3) 정수력학적 압력 분포 가정

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \dots \dots \dots (4)$$

천해 방정식 가정 아래서 수직 방향의 운동량 방정식은 정수력학적 압력분포방정식으로 단순화된다. 부력 및 갑작스러운 바닥 지형의 변화에 의한 수직 방향의 가속도는 고려하지 않는다. 적분을 하면 정수력학적 압력은 다음과 같다.

$$P = P_{atm} + gH \int_0^\sigma \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \dots (5)$$

4) 확산 방정식 (염분, 온도 및 에너지의 확산)

물질의 이동은 다음의 확산 방정식에 의하여 계산된다.

$$\frac{\partial [(d+\zeta)C]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \right) \frac{\partial C}{\partial \sigma} = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(-\frac{\partial}{\partial \xi} [D_h \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial C}{\partial \eta}] + \frac{\partial}{\partial \eta} [D_h \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial C}{\partial \xi}] \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} [D_v \frac{\partial C}{\partial \sigma}] + (d+\zeta)S \dots \dots (6)$$

5) 상태 방정식

물의 밀도(ρ)는 염도(s) 와 온도(t)의 함수이다.

$$\rho = \frac{1000P_0}{\lambda + \alpha_0 P_0} \dots \dots \dots (7)$$

여기서 $\lambda = 1779.5 + 11.25t - 0.0745t^2 - (3.80 + 0.01t)s$

$$\alpha_0 = 0.6980$$

$$P_0 = 5890 + 38t - 0.375t^2 + 3s$$

공식 (1) ~ (7)에서 사용된 계수의 특성은 아래와 같다.

- C = 바닥 마찰에 대한 Chezy 계수
- Dh, Dv = 수평, 수직 방향의 와류 확산 계수
- d = 평균 해수면을 기준한 수심
- f = Coriolis 파라메타
- G = 곡선 직교 좌표를 직각 좌표로 변환시 보정 계수
- g = 중력가속도
- H = 총 수위 (H = d + ξ)
- h = 바닥부터 기준면까지의 거리
- k = 흐름방향에 대한 확산계수
- P = 정수압
- S = 생성과 소멸(source and sink)에 대한 항
- u = x 방향에 대한 수심평균 유속
- v = y 방향에 대한 수심평균 유속
- ξ, η = 수평 곡선 직교 좌표의 양 방향
- ζ = 기준면에서 수면까지의 수위
- τ_x^s, τ_y^s = x-와 y-방향에 대한 바람 응력항
- σ = 수직 좌표 계수 (수면 $\sigma = 0$, 해저 $\sigma = -1$)
- ρ = 물의 밀도
- ω = 조석의 주기

2. 경계조건

가. 수직면과 바닥의 경계조건

σ 좌표계에서 자유수면과 바닥은 s-평면이다. 연속 방정식에 대한 수직 단면상의 경계조건은 다음과 같다.

$$\omega(-1) = 0, \omega(0) = 0 \dots \dots \dots (8)$$

해저에서 운동량 방정식에 대한 바닥 경계 조건은 다음과 같다.

$$\frac{V_v}{H} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{bx}}{\rho} \dots \dots \dots (9)$$

$$\frac{V_v}{H} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{by}}{\rho} \dots \dots \dots (10)$$

여기서 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 ξ 와 η 방향의 바닥 마찰력이다. 수직방향 평균흐름에 대한 바닥 마찰력은 다음과 같다.

$$\tau_b = \rho \frac{g}{C_{2D}^2} |\bar{U}|^2 \dots \dots (11)$$

여기서 U는 수직 방향의 평균흐름에 대한 속도이고 C_{2D} 는 Chezy 계수이다.

나. 폐쇄 경계에서의 전단 응력

모든 측면 경계에 대하여는 전단 마찰력을 0으로 하는 free slip 조건을 적용하며 모든 폐쇄 경계에 대하여는 partial slip 조건을 적용한다. 대규모 스케일 모형에서는 측면경계에 대한 전단 마찰력의 영향은 무시될 수 있다. 따라서 이 경우 모든 측면 경계에 free slip 조건이 적용된다. 소규모 스케일 모형에서는 측면의 영향은 무시될 수 없다. 측면에 대한 수직방향 마찰력은 다음의 공식에 의하여 계산된다.

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \rho U_*^2 \dots \dots (12)$$

전단속도 U_* 는 조도길이 Z_{ov} 와 경계까지의 거리 x 에 의하여 로그 형태로 결정된다.

$$u(x) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{x}{Z_{ov}}\right) \dots \dots (13)$$

다. 측면 경계조건

개방된 측면 경계에서는 수위, 유속, 유량의 조건들이 적용된다.

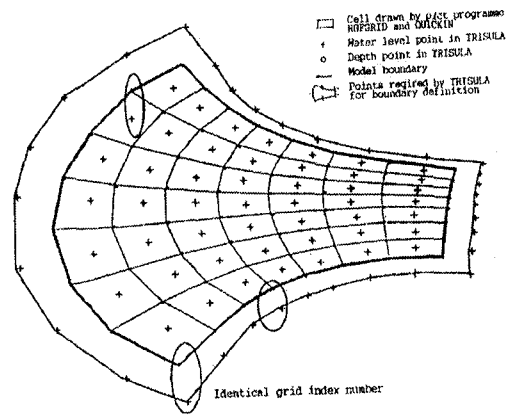
- o 수위 : $S = F_s(t)$
- o 유속 (x- 방향) : $U = F_u(t)$
- o 유량 : $Q = F_q(t)$

3. 수치 해석 기법 및 처리순서

가. Staggered grid system

수치모형 격자망을 구성할 때 수위와 유속 계산 지점의 위치가 교차되어 설정되는 것을 staggered grid 라 부른다. 수위 계산 지점은 하나의 격자 중심에서 정의되는 반면 유속 성분은 이 격자의 가장자리에서 정의되므로 수위와 유속 성분이 계산되는 지점은 서로

엇갈리게 된다. 본 모형에서 격자는 직사각형 형태가 아니라 직교되는 곡선 좌표로 구성된다(그림 1). 수직 방향에서도 유속계산 지점은 압력계산 지점과 엇갈리게 된다. Staggered grid 는 경계 조건이 비교적 단순하게 적용될 수 있고 Non-staggered grid 에 비하여 더 많은 변수를 이용하고 수면의 공간적인 진동을 방지한다는 장점이 있다.



<그림 1> Grid for numerical computation

나. 모형 경계의 정의

수치 모형의 범위는 격자상의 계산 경계에 의하여 결정된다. 격자상의 계산 경계는 모형 안에서 육지 경계를 나타내는 하나 또는 그 이상의 다각형들로 구성된다. 이들 다각형들은 격자 위에서 사용자가 정의한 수위 계산 지점들을 연결하여 구성된다. 특별히 지정되지 않는 경우 기본적인 계산 경계는 (1,1) (1, Mmax), (Nmax, Mmax) 및 (Nmax, 1)의 연결선상에 있는 격자들의 수위계산 지점들로 구성된다. 이들 경계상의 격자점들 중 개방 경계는 별도로 정의되어야 하며 별도로 정의되지 않는 부분은 육지경계로 간주한다.

다. 격자번호의 정의

격자 발생 프로그램인 RGF-GRID는 수심 계산 지점들을 연결한 선들의 번호로 격자점의 번호를 지정한다. 수치모형 "TRISULA"는 경계조건이 모형경계의 밖에서 정의되도록 요구하므로 격자발생 프로그램에 의하여 격자크기보다 양쪽 방향으로 하나씩 더 중

가한 격자 크기를 갖는다.

라. 수직 방향 격자

수직 방향의 격자는 Phillips가 대기 모형에 사용하여 소개한 σ 좌표계를 이용하여 구성되었다. 이 좌표계에 의하면 수직 방향의 격자는 바닥과 표면의 두 σ 면을 경계로 한 사이에서 구성된다. 이는 전체 계산 영역에 걸쳐서 수심의 변화에 관계없이 층수의 구분이 일정함을 의미한다. 따라서 지형의 변화에 따라 유연한 표현이 가능하게 된다. 또한 수심이 낮은 지역 및 표면 부근과 같이 중요한 부근에서는 보다 높은 정밀도를 얻을 수 있다.

마. 2D 천수 방정식의 계산방법

인접한 수직층의 수평방향 속도는 수직방향의 이류(advection)향과 수직방향의 점성향들과 결합된다. σ 좌표계는 수심이 얇은 지역에서는 매우 얇은 층들을 발생시킨다. 수직방향의 점성향에 의한 불안정성을 방지하기 위하여 수직방향 교환향의 계산에 대하여는 완전 음해법(implicit)이 사용된다. 각 층들의 속도는 Gauss elimination에 의하여 수위의 형태로 표현된다. 그 다음 각 층들의 속도는 수심 평균 연속 방정식에 대입된다. 수위에 대한 방정식은 Alternating Direction Implicit (ADI) 기법으로 계산된다. 수위는 격자선상의 x 및 y 방향에서 교대로 음해법으로 계산된다.

바. 이류향

ADI 기법에 의한 이류향의 적분에 있어서 두가지 가정이 사용된다. 수위 계산시 처음의 음해법 반시간 스텝 뒤에는 이류향에 대하여 양해법(explicit) 2차 central approximation이 사용된다. 다음의 양해법 반시간 스텝에는 이류향에 대하여 음해법에 의한 교차 upwind approximation이 사용된다.

IV. 모형의 검정 및 보정

1. 수문현황

가. 조 위

새만금 지구는 금강, 만경강 및 동진강의 하구 주변의 해역으로서 조석의 형태는 하천형으로부터 외해형으로 변질되는 복잡한 양상을 띄고 있다. 본 지구에 인접한 군산 외항에서 반일주조인 M_2 분조와 S_2 분조의 반조차는 각각 2.20m와 0.82m로서 그 비는 1:0.37이며 양 분조의 지각의 차 (S_2-M_2)는 44.1degree로서 대조, 즉 M_2 분조와 S_2 분조의 위상의 일치되는 시기는 삭망후 약 2일 (Phase age = 43시간 24분)에, 그리고 소조는 상하현 후 약 2일에 나타난다. 본 지구의 증양부인 야미도의 대조차는 5.89m, 평균조차가 4.24m, 그리고 소조차는 2.60m 로 군산 외항보다는 각각 약 0.15m가 적으며 대체적으로 지구 전역에 걸쳐 5.90m 내외의 조차를 나타내며 조차의 비는 1:0.72:0.44로 군산 외해와 거의 비슷하다. 일반적으로 조차는 외해로 나갈수록 감소되어 고군산군도의 서쪽 끝인 말도에서 5.50m이며 서쪽으로 감에 따라 점차적으로 감소되고 있다. 그러나 고군산 군도내의 선유도, 무녀도 및 신시도로 돌려 막힌 내측에서는 지형적인 영향으로 5.30m를 나타내고 있다. 만경강, 동진강의 하구부인 계화도에서는 5.88m이나 강을 올라감에 따라 조차는 감소되어 심포에서는 5.70m를 나타낸다. 또한 금강하구부인 외항부근에서 조차는 최대 6.03m를 나타내고 있으나 강을 소상함에 따라 점차로 감소되어 내항부근에서는 0.3m 적은 5.74m를 나타낸다.

서해 남부에서 일주조인 K_1 분조의 조석파는 남해 서측으로부터 북진하여 등조시 약 18시에 본 해역에 도달하며 회귀조의 조차는 약 1.2m이다. 본 지구에 인접된 군산외항에 있어 K_1 분조와 O_1 분조의 반조차는 0.34m 및 0.26m 로 약 4:3의 비를 가지며 지각 (Phase Lag)은 각각 272도 및 244도로서 양분조의 지각의 차 K_1-O_1 (degree)는 28도 (Diurnal age = 25h 36m)로서 일조부등은 달의 적위가 최대인 시각으로부터 약 1일 후에 크게 나타난다. 그리고 회귀조의 조차는 본 지구내에서는 1.25m 내외이나 외해로 나갈수록 점차 감소되어 고군산군도의 서쪽 끝인 말도에서 1.14m, 하왕등도에서 1.11m이다. 조석의 형태수 F ($F = \text{일주조}/\text{반일주조}$)를 보면 본지구내에서는 전반적으로 0.21이나 외해로 나갈수록 커져 대장도 0.22,

왕등도 0.23. 남측의 안마도에서는 0.25로 새만금지구 부근 일대가 0.25이내로서 반일주조 조석의 형태를 갖는다. 즉 일주조는 반일주조의 약 1/5를 접하여 통례적으로 1일 2회 간만의 차이가 일어나며 일조 부등은 적으나 조차가 크므로 약간 큰 조위의 부등을 볼 수가 있다. 본 지구의 인근인 군산 외항의 천해 분조인 M₄ 분조 및 MS₄ 분조의 반조차는 0.13m 및 0.10m로 M₂ 분조의 0.06배 및 0.04배를 나타낸다. 특히 M₄ 분조의 지각은 82.7도로서 2M₂ - M₄ <180도 이므로 만조를 빠르게 하고 간조를 늦추게 하는 현상을 일으킨다. 그러나 외해로 나갈수록 그 영향은 적어져 본 지구의 야미도에 있어서 M₄분조 및 MS₄ 분조의 반조차는 0.10m 및 0.06m로 M₂ 분조의 0.05 배 및 0.03 배이다. 서측의 대장도에서는 더욱 감소되어 M₂ 분조의 0.03 배 및 0.01배로 그 영향은 아주 작다.

나. 조류속

조류의 경우도 조석과 마찬가지로 조화분해가 가능하다. 즉 각 측정점의 관측 자료를 1일 조류조화 분석법

에 의하여 일주조류(M₁), 반일주조류(M₂) 및 1/4주조류(M₄)와 항류(M₀)로 분해할 수 있다. 취득값의 유향에 의하여 북방분속과 동방분속으로 분리하고 이를 전개하여 V 및 k를 구할 수 있다.

$$V_t = V_0 + V_1 \cos(15^\circ t - K_1) + V_2 \cos(30^\circ t - K_2) + V_4 \cos(60^\circ t - K_4) \dots \dots \dots (14)$$

- 여기서 V_t : 임의시의 유속 (cm/s)
- V₀ : 항류 (cm/s)
- V₁, V₂, V₄ : 일, 반일 및 1/4일주조의 유속 (cm/s)
- K₁, K₂, K₄ : 일, 반일 및 1/4일주조의 지각 (°)
- t : 태음시수

상기의 식에서 구한 각 분조의 최대 유속(V)과 유향(Dir.) 및 달의 자오선(135° E) 경과시부터 최대 조류시까지의 지각(K)과 항류 (V₀)를 산출한 결과는 <표 1>과 같다.

<표 1> Harmonic analysis of measured tidal velocity

측점	일자	위도,경도	월령	측	M2			M1			M4		
					Dir	v1	k1	Dir	v1	k1	Dir	v1	k1
Gap 1	1997. 8.15	35-45.06 126-30.51	11.8~12.8 S18-16 ~ N17-22	Maj. Min. Rat.	47. 137.	71.1 .9 .01L	1.0 4.0	12. 102.	12.1 .0 .00L	1.7 7.7		6.0 .9 .15R	1.4 2.9
Gap 2	1997. 8.17	35-48.5 126-29.20	13.8~14.8 S15-19 ~ N12-12	Maj. Min. Rat.	63. 153	91.5 2.6 .03L	1.2 4.2	241. 331.	10.0 3.5 .35R	1.3 7.3		10.4 .0 .00R	.9 2.4
Gap 3	1997. 8.23	35-53-54 126-29.20	19.8~20.8 S09-36 ~ N12-12	Maj. Min. Rat.	226. 316.	65.8 9.1 .14L	5.5 8.5	91. 181.	5.6 .6 .11R	1.2 7.2		19.9 8.5 .43L	1.2 2.7
R1	1998. 9.22	35-55.20N 126-27.33	1.4~2.4 S2-25~ N6-11	Maj. Min. Rat.	307 37.0	15.3 0.0 0.0	3.4 6.4 R	283 13.0	0.5 0.0 0.09	7.6 13.6 R	117 207	23 0.5 0.20	2.1 3.6 L
R2	1998. 9.22	35-53.36 126-25.48	11.4~12.4 S2-25~ S6-11	Maj. Min. Rat.	128 218	14.8 0.5 0.03	0.9 3.9 L	111 201	0.7 0.2 0.30	9.4 15.4 R	300 30.0	1.4 0.2 0.14	2.3 3.8 L
R3	1998. 9.22	35-46-00 126-24.00	2.4~3.4 S6-11~ S9-41	Maj. Min. Rat.	130 220	17.2 3.7 0.21	0.6 3.6 L	308 38.0	6.0 0.4 0.06	6.2 12.2 R	310 40.0	4.3 1.4 0.33	2.0 3.5 L
R4	1998. 10.3	35-46.00 126-24.00	12.4~13.4 S10-49~ S6-34	Maj. Min. Rat.	60 150	58.1 12.3	1.6 4.6 L	224 314	2.9 0.8 0.28	9.9 15.9 R	227 317	7.2 1.8 0.25	2.1 3.6 R

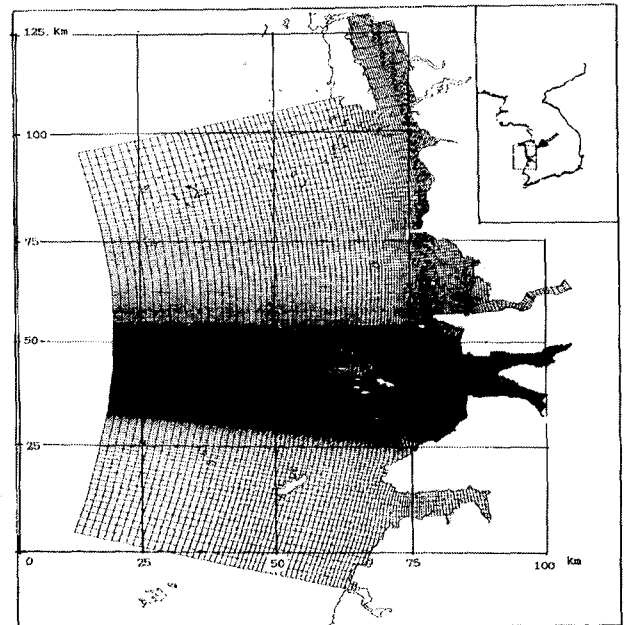
2. 광역모형과 지역모형

모형경계조건을 입력하는 방식은 경계해역의 관측자료로부터 직접 수집, 분석된 조석자료를 입력하거나 별도의 "광역모형"으로부터 계산결과를 이용하는 방법이 있다. 앞의 방식은 많은 관측자료가 필요하므로 이번에 계산된 세부 "새만금 모형"은 서해 해역의 수치 해석을 위하여 기 구축된 광역 "황해 모형"의 계산 결과로부터 경계 조건을 이용하였다. "황해 모형"은 중국의 홍콩, 대만, 일본열도와 대한해협을 연결하는 선을 외측 경계로 하고 있으며 산동반도까지의 황해 전구역을 포함하고 있다. "황해모형"에서의 격자 구성은 spherical coordinate grid 방식으로서 경,위도 양방향으로 1/12도 간격 (약 9km 격자간격)으로 분할하였고 지구의 곡면 형태가 미리 고려되었다. 반면 지역모형(새만금 모형)은 곡선 직교 좌표 (curve-linear grid)를 사용하였다. 이 방식은 경계면의 갑작스런 변화를 피할 수 있으며 방조제와 주요 수로 등을 정확하게 표현할 수 있다.

3. 개방 경계 및 격자의 배치

지역모형(새만금모형)의 개방 경계는 해의 왜곡을 최소화시키고 방조제 건설후 반사파의 영향이 미치지 않으며, 전구역 수리모형 개방 경계 설정에 대한 타당성 검토를 할 수 있도록 범위를 설정하였다. 이에 따라 본 수치모형의 경계는 새만금 전구역 수리모형의 경계구역 보다 서쪽 선단으로부터 약 65Km, 북쪽 경계로부터 70Km, 남쪽 경계로부터 각각 약 50Km 확장된 범위로 설정하였다. 최종적으로 결정된 모형의

경계는 서쪽 동경 125° 40', 북쪽은 안면도까지 포함하는 북위 36° 30', 남쪽은 북위 35° 10' 로 결정하여 전체적인 모형 크기는 동서 100Km 남북 170Km의 영역으로 하였다.<그림 2>



<그림 2> Boundary and grids (123*337)

모형 격자는 곡선형 직교 좌표 형태로 하고 각 격자요소들에 대한 고유 번호를 좌표로 표시하였다. 단위 격자 크기는 위치에 따라 다르나 종방향(남북)은 약 300m에서 750m, 횡방향(동서)은 약500m에서 1,000m로 동서방향이 약간 길게 배치하였으며, 동서방향 123개 격자, 남북방향 337개의 격자망을 근거로 각 격자별 지형 및 하상 조건에 대하여 모의발생을 실시하였으며 시간 및 격자망등 여러 입력 변수 계산

<표 2> Computation interval of input variables

Variables	Input Data	Description
DX(m), DY(m)	300 - 1,000	Distance Increment
DT(sec)	150.0	Computation Time Increment
CL1(min)	1440.0	Computation Start Time
CL2(min)	2880.0	Computation End Time
PRT(sec)	1800.0	Print Time Increment

간격은 <표2>와 같이 정의하였다.

<표 3> 37 tidal components at outer boundary (Sta.01, Sta.20, Sta.42)

Component	Station 001		Station 020		Station 042	
	Ampl.	Phase lag	Ampl.	Phase lag	Ampl.	Phase lag
A0	-0.004	0	-0.004	0	-0.003	0
Q1	0.066	232.8	0.064	226.0	0.064	223.0
O1	0.272	247.0	0.263	239.7	0.268	235.9
M1	0.014	143.9	0.013	140.3	0.013	118.8
K1	0.271	279.4	0.259	271.1	0.262	266.1
P1	0.090	271.8	0.086	263.4	0.087	258.5
SO1	0.008	136.8	0.007	124.5	0.011	109.9
MNS2	0.023	196.0	0.023	184.8	0.026	167.7
MU2	0.098	240.3	0.095	229.4	0.104	214.0
N2	0.387	76.7	0.383	60.6	0.425	56.2
NU2	0.074	77.2	0.073	61.1	0.081	56.6
2N2	0.055	64.1	0.055	48.0	0.061	43.5
M2	1.896	91.7	1.840	75.7	2.053	70.2
LABDA2	0.036	147.	0.035	131.7	0.039	126.0
L2	0.026	133.7	0.020	129.9	0.025	89.0
S2	0.631	141.4	0.607	124.5	0.671	119.9
K2	0.176	141.1	0.169	124.2	0.186	119.6
T2	0.052	121.2	0.050	104.3	0.056	99.6
MSN2	0.018	344.7	0.014	332.3	0.017	302.6
2SM2	0.018	71.1	0.015	58.6	0.015	36.3
MO3	0.009	86.0	0.010	38.7	0.017	22.0
M3	0.002	307.0	0.002	272.3	0.001	262.9
MK3	0.016	158.3	0.019	122.2	0.026	114.2
SK3	0.006	219.2	0.007	178.5	0.009	168.8
MN4	0.027	20.8	0.027	42.6	0.041	63.1
M4	0.061	46.3	0.062	72.9	0.091	96.1
SN4	0.006	67.9	0.004	1.5	0.007	360.0
MS4	0.040	109.7	0.033	144.7	0.045	175.1
S4	0.006	164.4	0.004	182.3	0.005	203.8
2MN6	0.005	21.1	0.010	330.7	0.003	215.1
M6	0.006	56.8	0.014	355.8	0.003	232.4
MSN6	0.002	330.8	0.003	47.0	0.002	117.4
2MS6	0.003	99.5	0.014	58.6	0.004	191.8
2SM6	0.001	97.8	0.004	109.2	0.003	236.6
M8	0.003	254.0	0.003	187.3	0.003	190.9
2MSN8	0.002	24.2	0.002	242.3	0.003	297.2
3MS8	0.004	336.3	0.005	249.7	0.007	277.5
2(MS)8	0.002	48.5	0.002	304.6	0.002	357.1

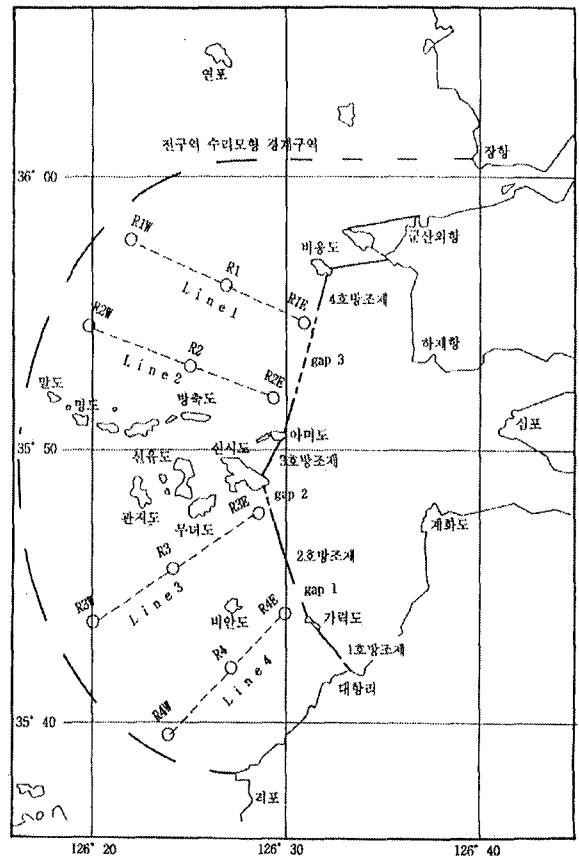
모형은 그 범위가 150 km에 이르며 위치에 따라 조석 분조의 값이 변화하므로 여러 개의 소구역으로 구분하였다. 이에 따라 북쪽은 No. 1 - No. 12, 서쪽은 No. 13 - No. 32, 남쪽은 No. 33 - No. 46까지 모두 46개의 구간으로 구분하여 각 위치마다 37개의 조석 분조가 입력되었으며 그 중간 구간에서의 세부 경계 조건은 보간법으로 설정되었다(표 3). 본 새만금 해역에서의 하천(만경강, 동진강) 유출량은 조석량에 비하여 매우 작으므로 유량 조건은 고려하지 아니하였다.

해역의 마찰계수 산정에는 Manning의 조도계수 n 값을 이용하는데, 우선 전 해역에 걸쳐 거의 일정한 것으로 가정하여 0.018~0.026의 범위에서 추정하였다. 그리고 각 방향에 대한 와류 점성계수와 밀도는 기존의 연구 결과를 참조하여 각각 $1.00\text{m}^2/\text{s}$ 와 $1.030\text{kg}/\text{m}^3$ 의 값을 사용하였다.(농림부, 농어촌진흥공사 1998, 하구둑 설치 연안의 조석특성연구) 중력 가속도는 $9.797\text{m}/\text{s}^2$ 값을 사용하였고, 지구 편향력 (Coriolis force) 계산을 위한 위도는 대상해역의 중간 위도인 북위 $35^\circ 50'$ 을 적용하였다.

4. 모형의 보정

모형의 보정은 1997년 8월 16일에 새만금 해역에서 관측된 조류속 및 조위 자료에 이용하여 수행하였다. '97년 8월 현재 새만금 방조제 시공 진도는 1호, 3호 방조제는 노선을 연결하는 시공이 완료되었으며, 2공구 시점에서 사석제 시공은 No. 11 까지 진척되었고 4공구 개방구간은 No.11부터 No. 85까지이었다. 모

의 발생은 1997년 8월 14일 0:00시로 부터 실시하여 8월 16일 24:00시까지 수행하였으며, 모의 발생 결과와 현장 관측치는 8월 16일 0:00시부터 24시간 동안을 비교하였다.



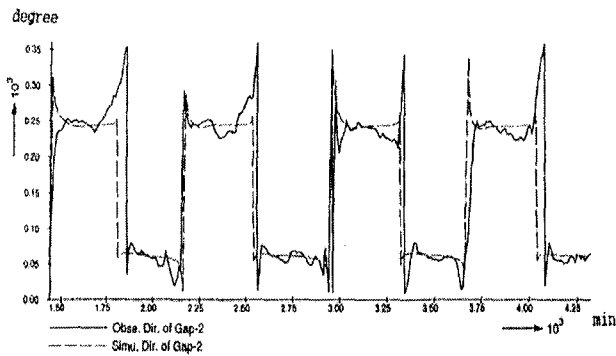
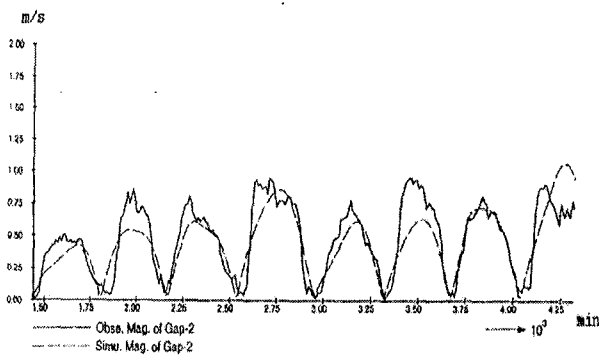
<그림 3> Location of validation points

<표 4> Data used for calibration and validation of the model

구분	위치	좌표	계측기	관측기간	비고
조위	하계항	N: $35^\circ 52'49''$ E: $126^\circ 38'07''$	WLR-7	'98.2.26 -2.28	검정
	선유도	N: $35^\circ 48'18''$ E: $126^\circ 25'05''$	WLR-7	'97.8.14 -8.16 '98.2.26 -2.28	보정 검정
조류속	gap 1	N: $35^\circ 45'39''$ E: $126^\circ 30'36''$	RCM-7	'97.8.14 -8.16	보정
	gap 2	N: $35^\circ 48'30''$ E: $126^\circ 29'12''$	RCM-7	'97.8.14 -8.16	보정
	R3	N: $35^\circ 46'00''$ E: $126^\circ 24'00''$	RCM-7	'99.4.17 -4.18	검정

가. 조류속의 보정

조류속에 대한 수치 모형의 보정은 방조제 노선 부근의 3개 주요 끝물막이 지점에서 '97년 8월 14일 관측된 결과를 이용하였다. 모형에 입력되는 각종 인자 대개 기존의 각종 자료들로부터 결정 가능하지만, 바닥마찰계수는 추정치의 불확실성 등으로 인하여 그 값을 보정해야 할 필요가 있기 때문에 바다 마찰계수를 먼저 보정 인자로 사용한다. Manning의 조도계수 n 의 값은 0.018에서 0.026의 범위에서 조절하였다. 대부분의 평탄해역은 $n=0.018$ 을 사용하였고 일부 섬 지역에서는 0.026까지 부분적으로 조도를 변화하여 입력하였다. 보정 결과 n 의 값은 0.018을 사용할 경우 실측치와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.



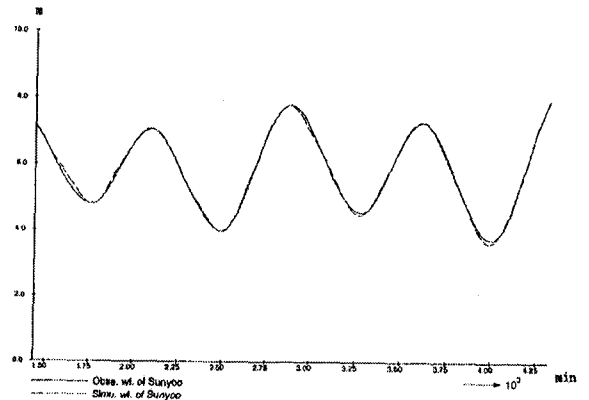
<그림 4> Calibrated tidal velocity ('97.8.14 gap 2)

<그림 4>는 끝물막이 예정구간인 gap 2에서의 모의 발생과 현장 관측치와의 비교를 보여주고 있다. gap 2에서는 창조시 계산 유속이 실제 관측 유속보다 낮게 나타나고 있으며 이와 같이 창조 유속의 경우

계산치보다 실측치가 높은 것은 깊은 수심인 현장 여전에서 현장 수위계의 위치에 따른 층별 유속의 분포 차이인 것으로 판단된다. 유향의 경우는 계산치과 현장 관측치와 잘 일치하며 조류향은 밀물, 썰물이 변화할 때 순간적인 오차를 발생시키나 대체적인 변화 양상은 매우 높은 상관성을 보이고 있다.

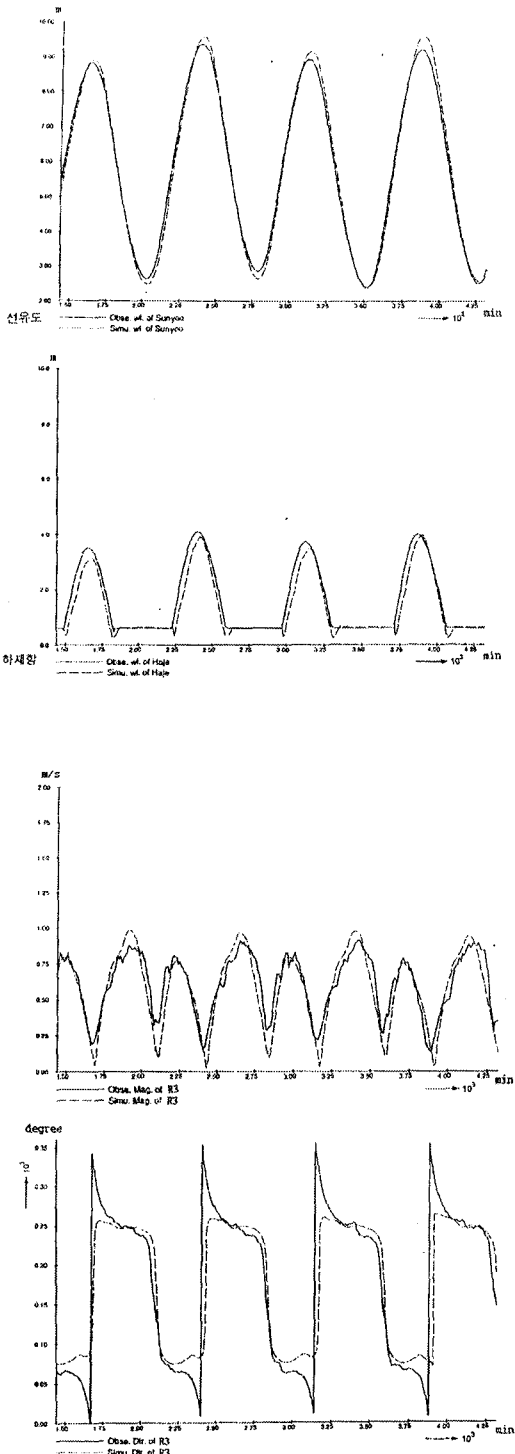
나. 조위의 보정

조위에 대한 모형의 보정 및 검증은 동일 기간 중 자기기록식 유속계를 사용하여 선유도와 내측 근산 비행장 인근 해안에 위치하고 있는 하제항에서 관측된 결과와 <그림 5>에서와 같이 비교하였다. 모형의 보정 결과 방조제 고군산군도 중앙에 위치하고 있는 선유도에서는 '97.8월 14일 조위 결과를 비교하여 볼 때 진폭이나 위상이 거의 일치하나 내측의 관측점인 하제항에서 모의 발생치는 낙조시 조위가 표시되지 못하고 있다. 이러한 원인은 사업지구 내측에 공사로 인하여 퇴적이 유도되고 해안이 얕아 짐으로서 조석과의 전파가 간조시 간석지에서 차단되며 수치모형의 경우 격자망 해상도의 한계로 인하여 하제항 인근의 간석지 및 가느다란 수로를 제대로 표현하지 못하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 선유도에서의 모형 조위의 발생 결과를 보면 수치 모형은 높은 적용성을 보인 것으로 인정된다.



<그림 5> Calibrated tide ('97.8.14 Sunyu island)

5. 모형의 검정



<그림 6> Validated tide ('98.2.27 Sunyu island)

<그림 7> Validated tidal velocity ('99.4.17 R3)

조위는 1998년 2월 26일에 선유도와 하재항에서 관측치, 조류속은 1999년 4월 17일 2공구 Gap 2의 바깥쪽(Line 3, 무녀도 남측)에 위치하고 있는 측정점 R3의 실측 자료를 사용하였다. '98년 2월 당시의 공정은 1공구와 3공구는 사석제가 연결되었고 2공구는 시점부터 No. 11까지는 사석제를 이용한 방조제가, No. 36부터 No. 85까지는 중간 가적장이 설치된 조건이다. 4공구는 No 31부터 No. 85까지 개방된 상태이었다. 검정을 위한 수치 모형 조위의 발생은 대조기인 '98년 2월 24일 00:00부터 실시하여 4회의 조석 주기가 포함되도록 하였으며 모형 발생 결과와 현장 조위 관측치의 비교는 대조기인 2월 26일 00:00부터 시작하여 48시간 동안에 대하여 수행하였다. 조류속에 대한 TRISULA 모형 검정시 조도계수는 $n = 0.018$ 을 사용하였다. 선유도에서의 조위 모의 결과를 <그림 6>과 같이 현장 관측치와 비교하여 보면 주기는 잘 일치하나 간, 만조시 정점에서의 조위가 약간 강하게 계산되고 있음을 보여주고 있으며 하재항의 경우는 간조시 조위가 제대로 기록되지 않고 있다. 이러한 이유는 선유도의 경우 섬 안쪽에 측점이 위치하고 있는 관계로 파의 진입과정에서 에너지의 중첩 효과로 판단된다. 하재항은 인근의 발달된 간석지로 인하여 간조시 모형에서의 수리조건이 dry condition으로 표시되고 있기 때문이며 이는 국부적인 현상으로 추측된다. <그림 7>은 노선 Line 3의 가운데 측정점 R3(무녀도 남측) 조류속의 현장 관측치와 모의 발생치의 비교 결과로서 조류속의 진폭과 주기가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 모형 출력의 결과를 볼 때 본 수치 모형은 주변의 섬이나 간석지로 폐쇄된 경우 약간의 오차를 보이고 있으나 개방된 해역에서의 조류속, 조위의 재현 능력은 신뢰도가 뛰어난 것으로 인정된다.

V. 모형의 적용

새만금 방조제 건설 전후의 상태에 대하여 모의 발생을 하고 그 결과를 비교하였다. 모의 발생 일자는 분석을 용이하게 하기 위하여 대조기인 1999년 4월

17일로 하였으며 방조제가 설치되지 않은 상태와 방조제가 완전히 연결된 상태에서 수치계산 결과를 비교하였다. 새만금 방조제 건설후의 조석 계산은 방조제 노선을 고정 경계로 변환하여 방조제 외해측에 대해서만 모형을 수행하고 방조제 건설후의 바닥마찰계수, 지형조건 및 기타 파라메타는 방조제 건설전의 점정에 사용한 결과와 동일한 것으로 가정하였다. 방조제부터 수리모형 경계해역인 말도 외측까지의 반원형 경계인 거리 약 20 km의 해역을 <그림 8>에서와 같이 북쪽으로부터 4공구 외측에 2개구간, 2공구 외측에 1개구간, 1공구 외측에 1개구간 등 모두 4개 구간으로 구분하여 각 위치마다 방조제 인근, 중앙부, 외측 경계 등 3개 측정점으로 종단을 구분하여 모두 12개의 측정점에서 방조제 시공 전후의 조위와 조류속을 비교하였다. 시공전후의 조류속 및 조류향의 변화는 <표 5>에 정리하였다. 각 노선별로 수리현상 변화를 다음과 같이 검토하여 보았다.

1. Line 1에서의 변화

4호 방조제 노선 외측에 있는 본 노선은 방조제 인근의 측정점 R1E에서 유속은 방조제 설치전후 0.95m/s에서 0.50m/s로 약 50% 정도 감소되었고 조류향은 약 60 degree 정도 반시계 방향으로 전이되었다. 그러나 Line 1의 중앙부인 R1 측정점에서의 유속은 0.75 m/s에서 0.65 m/s로 약 15% 정도 감소되었고 조류향은 30 degree 정도 반시계 방향으로 이동되었다. 그리고 가장 외측인 측정점 R1W에서는 조류속의 감소는 5% 이내이며 조류향의 변화는 5 degree 로 매우 적은 양으로 다른 측정점에 비하여 방조제 설치로 인한 영향을 거의 받지 않는다고 볼 수 있다. 방조제 축조로 인한 조위 변화는 그 절대 표고를 비교하지는 않았고 그 진폭만을 상호 비교하였다. 방조제 노선에 인접된 측정점 R1E에서 조차의 평균치는 대조일 때 시공 전 6.999m 이었고 시공 후 6.836m로 시공후 조석 진폭이 시공 전에 비하여 0.159m 감소하는 것으로 나타났다. 가장 서쪽의 측정점 R1W에서는 진폭의 차이가 시공 후 0.059m 감소하여 다른 측정점에 비하여 낮은 값을 보이고 있다. <그림 9>

2. Line 2에서의 변화

본 노선은 4호 방조제 시점부인 야미도 북쪽에서 방축도 북쪽으로 연결되는 노선이다. 해저 지형은 수심이 내측(R2E) -10m정도이며 완만하게 낮아져서 외측(R2W)에서는 -20.0m 정도이다. 가장 동쪽인 측정점 R2E에서의 시공 전 조류속은 방조제 예정선 인근의 다른 측정 3개소에 비하여 가장 낮은 0.85m/s 이며 방조제 체절이후에는 조류속이 0.50m/s로 약 40% 정도 감소되고 있다. 가장 외측인 측정점 R2W(말도 북쪽 3km 해상)에서는 방조제 설치 전 조류속이 0.95m/s 이나 설치 후 0.77m/s 로 약 20%정도 감소되었다. 조류향은 방조제 인근에서는 Line 1에서와 마찬가지로 65 degree 시계 반대 방향으로 회전하나 중앙부분인 측정점 R2에서는 R1의 전이된 값 35degree보다 매우 낮은 5degree 정도 반전하고 외측인 측정점 R2W에서는 R1W에서와 마찬가지로 5degree 반시계 방향의 변화량을 보이고 있다. 조위의 경우 가장 동쪽인 R2E에서의 진폭은 시공 전 6.868m, 시공후 6.815m로 그 진폭이 0.053m 감소되는 것으로 나타났으며 이는 방조제 인근 4개 측정점 중 가장 높은 감소량이다.

3. Line 3에서의 변화

본 노선은 2호 방조제 외측이며 가장 동쪽의 R3E는 2호 방조제 끝물막이 예정구간인 Gap 2와 바로 인접되어 있으며 측정점 R3와 측정점 R3W는 Gap 2에서 많은 조석량이 유출되는 주 수로에 위치하고 있다. 본 Line의 바로 북쪽에는 고군산군도가 위치하고 있기 때문에 조류향의 변화는 이루어지기 힘든 지형 조건이며 측정점 R3E는 고군산군도 섬의 하나인 신시도와 신설되는 2호 방조제에 완전히 폐쇄되므로 방조제 시공 전 가장 강한 유속을 보였던 1.65m/s 의 조류속은 시공 후 거의 정지된 상태인 0.05m/s의 낮은 유속을 보이고 있다. 중간 측정점인 R3에서는 조류속이 일부 증가되어 방조제 설치 전 0.95m/s 의 유속은 설치 후 약 0.40 m/s 로 약 60% 감소된 유속을 보이고 있으며 외측인 측정점 R3W에서는 설치 전 0.8m/s에서 설

치 후 0.57m/s 로 약 30% 감소된 값을 보이고 있다. 이는 Line1과 Line 2에서 5 ~ 20 %에 비하면 많은 감소량이다. Line 3에서는 방조제 설치 전 내측(측점: R3E)의 유속이 외측(측점: R3W)의 유속 0.8m/s 보다 2배 높은 1.5m/s의 지역적 특성을 보이고 있다. 그러나 다른 노선(Line 1, 2, 4)에서의 경우 시공 전 내 외측 조류속 차이는 거의 없고 오히려 외측에서의 유속이 강하게 나타나고 있다. Line 3에서 조위의 변화는 각 측점별로 거의 차이가 없으며 측점 R3E에서의 조석 진폭 변화를 보면 설치 전 6.909 m 이고 설치 후에는 0.277 m 감소된 6.632 m이다.

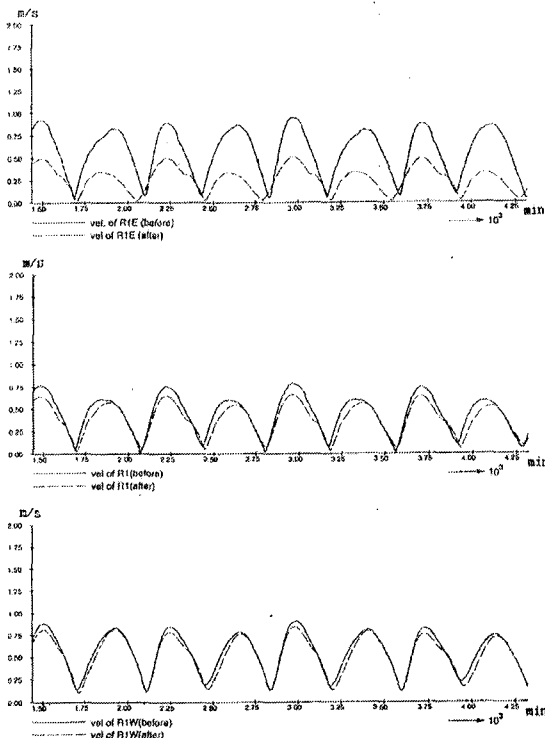
4. Line 4에서의 변화

본 노선은 1호 방조제의 외측에 위치하고 있으며 남서 방향으로 1호 방조제 끝물막이 예정구간인 gap 1의 외측에 있는 수로를 따라 설정되었다. 방조제 시공전 본 노선 3개 측점에서의 조류속은 0.8 ~ 0.9m/s 로 거의 비슷하다. 시공 후 내측의 측점 R4E에서의 유속은 0.88m/s에서 0.13m/s로 감소되며 외측에서는 0.75m/s에서 0.50m/s로 약 30 % 정도 감소되고 있다. 고군산군도 및 비안도가 조석의 흐름 방향을 유도하

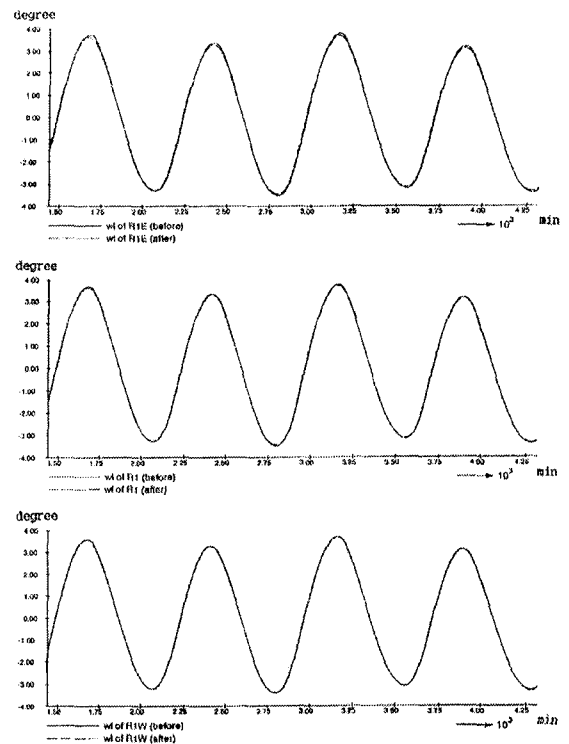
므로 방조제 시공 전후의 조류향은 변화가 없다. 방조제 인근의 측점 R4E에서의 조위는 시공 후 그 진폭이 6.94m에서 0.196 m 감소되었으며 외측으로 나갈 경우 그 진폭의 차이는 0.06cm로 방조제 시공전과 거의 변화가 없음을 보이고 있다. 새만금 방조제가 차단됨으로 해서 외측의 조류향은 직접적으로 영향을 받는다. 시공전의 조류향은 방조제 노선상에서 창조시 50 ~ 90 degree, 낙조시 230 ~ 250 degree를 보이고 있으며 일반적으로 4호 방조제 인근인 Line 1, 2에서는 동서향 성분이 강하고 고군산군도 아래쪽 1,2호 방조제 노선에서는 발달된 수로의 영향으로 북동, 남서향 성분이 강한 특성을 보이고 있다.

<표 5> Model comparison before and after construction

노 선	단계	서 쪽		중 앙		동 쪽		비 고
		창조	낙조	창조	낙조	창조	낙조	
Line 1	시공전	0.90	0.80	0.75	0.65	0.95	0.85	(단위:m/s)
	시공후	0.87	0.77	0.65	0.55	0.50	0.35	
	차이	0.03	0.03	0.10	0.10	0.45	0.50	
Line 2	시공전	0.95	0.75	0.90	0.77	0.85	0.67	
	시공후	0.77	0.72	0.70	0.53	0.50	0.38	
	차이	0.18	0.03	0.20	0.24	0.35	0.29	
Line 3	시공전	0.80	0.66	0.95	0.83	1.67	1.50	
	시공후	0.57	0.50	0.40	0.37	0.05	0.05	
	차이	0.23	0.16	0.55	0.46	1.62	1.45	
Line 4	시공전	0.75	0.63	0.83	0.83	1.07	0.88	
	시공후	0.50	0.48	0.40	0.40	0.13	0.13	
	차이	0.25	0.15	0.43	0.43	0.94	0.75	



<그림 8> Comparison of tidal velocity before and after construction of sea dike ('99. 4. 17 Line 1)



<그림 9> Comparison of tides before and after construction of sea dike ('99. 4. 17 Line 1)

VI. 결 론

새만금 해역에서 방조제 설치에 따라 변화되는 해양 인자 중 조위, 조류속에 대하여 비교 분석하기 위하여 수치모형 실험을 통하여 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상 해역은 새만금 지구이며 본 모형의 외측 경계조건은 동지나해를 포함하는 "황해" 광역모형으로부터 유도된 조석 특성을 사용하였다. 조석발생을 위하여 사용된 조석 인자(Tidal Component)는 37개이며 모형 격자는 곡선형 직교 좌표 형태로 123×337 개의 요소로 구성하였다.
2. 모형의 보정은 1997년 8월 16일 현장에서 관측된 조류속 및 조위 자료를 통하여 수행하였다. 모의 발생 결과 조도 계수 $n=0.018$ 일 경우 가장 관측 값에 근접하는 것으로 나타났다. 1998년 2월 26일 관측된 조위, 1999년 4월 17일 방조제 외측에서 관측된 조류속

자료를 이용하여 검정한 결과 조류속, 조위 모두 만족할 만한 결과를 얻었다.

3. 1999년 4월 17일의 대조기 때의 조석을 이용하여 방조제가 없는 경우, 방조제가 준공된 조건에 대하여 모의발생하고 상호 비교하였다. 대상 지점은 모두 수리모형 경계해역과 방조제 사이에 있는 4개 노선, 12 점이였다.
4. 수치모형 모의발생 결과 조류속은 고군산군도 이북 해역인 경우 방조제 주변 측점에서 설치 전 1.0m/s 의 유속이 약 50% 감소하나 그 외측에서는 10% 이내로 약하게 감소됨을 보이고 있다. 다만 조류향은 방조제 인근에서 60 degree, 외측에서는 5 degree 반시계 방향으로 전이한다.
5. 고군산군도 남쪽 해역인 경우 조류속은 내측에서 거의 95% 감소 하고 외측에서는 약 30% 정도만 감소한다. 다만 유향의 변화는 거의 없다.
6. 공사후 방조제 외측에서의 조위는 매우 미약하지

만 그 진폭이 감소되며 방조제 외측으로 나갈수록 그 변위는 작아져 공사전과 일치한다.

참 고 문 헌

1. 강용덕. 1989. "새만금해역의 조석수치모형", 성균관대학교 대학원
2. 강주환. 1991. "유한차분 모형에 의한 하구의 염도 확산 분석" 서울대학교 대학원, 박사학위논문
3. 강주환, 박상현, 이길성. 1993. "음해법을 이용한 천수 방정식수치해석", 대한토목학회 논문집, 제13호, 제3호, pp119-127
4. 농림부, 농어촌진흥공사. 1990. "새만금지구 수리 시험보고서"
5. 농림부, 농어촌진흥공사. 1997. "새만금지구 수리 실험보고서"
6. 임성만. 1992. "해수유동해석을 위한 사각형 조화유한요소모형개발" 서울대학교 대학원 석사학위논문
7. 김형섭. 1991. "조석 순환에 미치는 수차이송항의 비선형효과"
8. 나정우. 1994. "새만금해역의 조석유동해석을 위한 비선형 유한요소모형의 개발" 서울대학교 대학원, 박사학위 논문
9. 최병호. 1983. "경기만남부해역의 M₂조석영향", 대한토목학회 논문집, 제3권, 제2호, pp.97-107
10. 최병호. 1986. "해양조석의 우리나라 서해 물리해양에의 영향", 한국 수문학회지, 제 19권, 제2호, pp. 104-108
11. 최병호. 1990. "아산만의 조석수치모형", 대한토목학회논문집, 제10권, 제2호, pp. 129-135
12. Carton, J.A.. 1983. "The Variation with Frequency of the Long-Period Tides" Journal of Geo-physical Research, Vol.88, No.C12, pp. 7563-7571
13. Dronkers, J.J. and J.C. Schonfeld. 1955. "Tidal Computations in Shallow Water", Hydraulics Division, ASCE, Vol. 81, Separate No. 714
14. Falconer, R.A.. 1980. "Numerical Modelling of Tidal Circulation", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 106, No. WW1, pp 31-48
15. Hansen, W.. 1956. Theorie zur Errchung des Wassersrandes und der Stromungen in. Randmeeren nebst Anwendungen", Tellus, Vol. 8.
16. Taylor, c and J.M. Davis. 1975. "Tidal Propagation and Dispersion in Estuaries, Finite Elements in Fluids, Vol. 1 (ed. R.H. Gallagher et al.), John Wiley & Sons, Ltd, pp. 95-118. 1975
17. Westering, J. J., J.J.Connor and K.D. Stolzenbach. 1987. "A Primitive Pseudo Wave Equation Formulation for Solving the Harmonic Shallow Water Equations, Adv. Water Resources, pp 188-199
18. Weare, T.J.. 1976. "Instability in Tidal Flow Computational Schemes", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102, No. HY5, pp 569-580