

새만금 방조제 건설로 인한 조류변화

서승원*

1. 서론

근자에 서해안에서 추진되고 있는 연안개발 사업중 그 규모나 공사기간, 공사비등이 여타의 사업에 비하여 크게 차이지는 새만금 방조제 축조 사업이 현재 활발히 진행중에 있다. 그러나 이처럼 대규모로 시행되는 사업의 성격에 반하여, 기 시행되었던 관련 환경영향 예측은 다소 미흡하고, 관련된 연구 또한 크게 부족한 실정이다.

본 연구에서는 새만금 방조제 축조 전후의 주변해역의 조류 변화를 해석하고 이로 인한 확산환경의 변화를 수치모형에 의하여 예측하고자 실시되었는데, 대상해역과 같이 도서가 산재해 있고 경계가 복잡하며 수심의 변화가 있는 해역의 특성을 보다 잘 나타내기 위하여 유한요소모형을 해석의 도구로 택하였다. 불규칙한 천해역의 지형적 영향을 묘사하기 위하여 비선형의 모형이 이용되었는데, 장기적인 확산의 해석과 연계할 목적으로 실시된 비선형의 주기적 조화모형에 의한 결과와 짧은 시간의 변화 및 천해역의 비선형 특성을 보다 잘 묘사할 수 있는 시간진행의 모형 결과를 비교 해석되었다.

2. 조류에측모형

조류운동을 묘사하는 지배방정식으로 수심평균화된 형태의 Navier-Stokes 방정식을 택하였다. 기본식에는 다음과 같은 가정이 고려되었다. 즉, 해수의 밀도는 일정하고, 정수압분포가 성립하며, 수평방향의 운동량분산(와점성)이 무시되고 해면에서는 압력이 일정하다. 이러한 가정하에 3차원의 방정식에서 유도된 수심평균의 기본방정식은 다음과 같다. 즉, 2차원의 수심평균화된 연속식과 운동식은 아래와 같은데 비선형 항들을 우변으로 놓고, 선형의 마찰항을 운동식의 양변에 고려하면 식 (1) ~ (3)의 비선형 천수방정식을 얻게된다. (Baptista et al., 1989)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = - \frac{\partial (un)}{\partial x} - \frac{\partial (vn)}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fv + \lambda u = \left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] u - (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + \lambda v = \left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] v - (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (3)$$

여기서 η 는 평균해면으로 부터의 수면변위(L), h 는 평균해면에서 해저까지의 수심(L), u, v 는 x, y 방향의 유속성분(L/T), g 는 중력가속도(L/T²), f 는 Coriolis 인자(T⁻¹), c_f 는 해저마찰계수 그리고 λ 는 선형화된 마찰계수(T⁻¹)이다.

2.1 비선형 주기적 조화모형

위의 식 (1) ~ (3) 으로 주어지는 조류운동에 관한 기본방정식은 경계에서의 조위 혹은 외적 강제함수가 주기적이라고 가정하면 다음식 (4)와 같이 조위와 유속도 주기적이라고 볼 수 있고, 따라서 이를 원래의 기본식에 대입하면, 식 (5) ~ (7)로 단순화되어 표현된다.

$$q(x_j, t) = Re(Q(x_j) e^{i\omega t}) \quad (4)$$

$$i\omega \hat{\eta} + \frac{\partial (\hat{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial (\hat{v}h)}{\partial y} = P_{\hat{\eta}} \quad (5)$$

* 군산대학교 해양공학과(Dept. of Ocean Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Chonbuk, 573-360, Korea)

$$i\omega \hat{u} + \frac{\partial (g\hat{\eta})}{\partial x} - f\hat{v} + \lambda\hat{u} = \hat{P}_u^{nl} \quad (6)$$

$$i\omega \hat{v} + \frac{\partial (g\hat{\eta})}{\partial y} + f\hat{u} + \lambda\hat{v} = \hat{P}_v^{nl} \quad (7)$$

여기서 $\hat{\eta}$ 는 조위의 복소진폭(complex amplitude)을 나타내고, \hat{u} , \hat{v} 는 조류속의 복소진폭을 의미하며, $i=\sqrt{-1}$ 이고, ω 는 조석 분조의 각속도를 의미한다. 따라서 조화함수 형태의 천수방정식은 다음과 같이 더이상 시간 의존성이 있지 않은 단순한 식으로 표현된다.

식(5)의 우변의 비선형항은 연속방정식에 포함된 비선형의 유한진폭을 나타내고, 식(6)과 (7)에 있는 우변의 비선형항은 운동방정식내의 비선형마찰, 선형마찰, 비선형 이송가속등을 포함한 것을 의미한다. 이러한 비선형성은 반복계산에 의해 우변의 값이 새로이 수정되므로써 해를 구하게 된다.

요소내에서 각종 미지의 변수는 다음식 처럼 표현될 수 있다.

$$a(x,y) = \Phi(x,y) a^{(n)} \quad (8)$$

$\Phi(x,y)$ 로 C^0 연속성을 만족하는 선형보간함수를 취하였다. $a^{(n)}$ 은 변수들의 절점값을 나타낸다. Galerkin의 가중잔차 방법을 적용하고 전영역에 관하여 조합하면 다음의 유한요소식을 얻게 된다.

$$i\omega M_\eta \hat{\eta} - D \hat{U} = \hat{P}_\eta^{lin} + \hat{P}_\eta^{nl} \quad (9)$$

$$i\omega M_U \hat{U} + M_F \hat{U} + M_C \hat{U} + gD^T \hat{\eta} = \hat{P}_{A-fric}^{nl} - \hat{P}_{conv}^{nl} \quad (10)$$

여기서 η 는 조위벡터, U 는 조류속 벡터, D 는 1계 미분항으로 이루어진 행렬을, M_η 는 연속방정식에서의 계수행렬을, M_U 는 운동방정식에서의 질량행렬을, M_F 는 선형화된 마찰행렬을, M_C 는 Coriolis 행렬을, P_η^{lin} 는 유출입이 고려된 경계의 벡터, P_η^{nl} 는 연속방정식의 유한진폭항등의 비선형이 고려된 벡터, P_{A-fric}^{nl} 는 운동방정식내에서 선형화된 마찰과 비선형 마찰과의 차이를 나타내는 벡터를 P_{conv}^{nl} 는 이송가속 영향을 나타내는 벡터를 의미한다.

이처럼 비선형항이 기본방정식의 우변으로 정리되었고, 이러한 조화벡터항은 반복계산에 의해 구해지는데 먼저 계산된 값이 새것으로 치환된다.

2.2 비선형 시간적분모형

시간적분모형은 기본식 (1)~(3) 에 식(8)의 근사해를 직접 대입하고 Galerkin의 가중잔차방법을 적용하여 전영역에 대해 조합하면 다음의 식 (11),(12)를 얻게 된다. 여기에 시간미분항이 있으므로 이에 대한 적분으로 2단계 양해법을 적용하면 최종식은 식(13),(14)와 같이 되는데 계산의 효율을 증진시키기 위하여 집중질량행렬(lumped mass matrix, $L_{\alpha\beta}$)을 이용한다. 이때의 시간간격은 CFL 안정조건에 지배를 받는다.

$$M_{\alpha\beta} \dot{Z}_\beta + (F_{\alpha\beta\gamma} + G_{\alpha\beta\gamma})(h_\beta + Z_\beta)V_\gamma = 0 \quad (11)$$

$$M_{\alpha\beta} \dot{V}_\beta + C_{\alpha\beta\gamma}V_\beta V_\gamma + P_{\alpha\beta}Z_\beta + B_{\alpha\beta}V_\beta + E_{\alpha\beta}V_\beta = T_\alpha \quad (12)$$

$$L_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1/2} = M_{\alpha\beta} U_\beta^n - \frac{\Delta t}{2} X_\beta^n \quad (13)$$

$$L_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1} = M_{\alpha\beta} U_\beta^n - \Delta t X_\beta^{n+1/2} \quad (14)$$

3. 모형실험 및 결과분석

새만금 방조제 축조 영향을 해석하기 위하여 대상해역으로는 Fig1과 같이 남북으로는 $35^{\circ}20'N \sim 36^{\circ}10'N$ 까지의 안마도에서 어청도 사이를, 동서로는 금강하구둑 으로부터 안마도와 어청도를 잇는 선 까지인 $126^{\circ}E \sim 126^{\circ}45'E$ 를 포함한다. 방조제 건설전의 이산화 결과는 총 절점과 요소수가 3715 및 7038개이고, 최소 격자 간격은 210m로, 최대는 4120m 이다. 요소의 모양은 가급적 정삼각형에 가깝게 이산화하여 요소 형상행렬을 구성할때와 집중질량행렬을 구성할때의 오차를 최소화 하도록 노력하였다. 수치실험의 첫단계로 대상해역의 지형과 수심을 고려한 적절한 이산화가 필요한데, 이산화에 따라 해석이 달라지므로 무엇보다도 세심한 주의가 요하는 작업이라 할 수 있다. 요소의 자동생성을 위해 편집기능이 뛰어난 ACE/gredit를 사용하였다. 이는 Turner 와 Baptista(1992)가 Workstation 에서 X-window 를 이용하여 작업할 수 있는 유한요소 편집기를 발표한 것을 이용한 것이고, Mexico 만에서 Westerink(1992)등이 이를 응용한 결과가 보고되었다.

먼저 불규칙한 해저 지형으로 되어있는 대상해역의 수심이 해도 302로 부터 입력되었다. 개방경계에서는 조석 산정을 위한 강제함수로 조석의 분조가 입력되었는데 고려된 분조는 M_2, S_2 이다. 각 분조의 진폭과 동경 $135^{\circ}E$ 를 기준으로한 위상지체는 과거의 연구성과인 최(1980)의 결과로 부터 추출하였고, 이후 각종 목적으로 측정된 조석의 조화분해 자료로 부터 발췌하여 이용하였다. 해저마찰계수는 Chezy계수를 $70m^{1/2}/sec$ 로 보아 C_f 는 0.002, Coriolis 인자는 대상해역의 평균위도를 북위 36도로 보아 8.55×10^{-5} 의 값을 적용하였다.

방조제 축조후에 대한 수치실험은 앞서 기술한 이산화 자료와 입력자료를 이용하여 실시하였는데, 새만금 방조제가 건설되기 전의 상태와 대항리-가력도-신시도-야미도를 잇는 본 방조제가 건설되는 상황으로 설정하여 실험하였다.

방조제가 완공된 이후의 이산화에는 내측의 요소가 소거되었으며, 총절점과 요소수는 3311과 6243개로 이루어졌다. 수심변화가 고려되지 않았고, 개방경계도 이전의 상태와 동일하게 설정되었다.

동일 격자체계 상에서 두가지 모형을 이용한 계산상의 비교는 시간진행모형으로 해석할때 안정조건에 알맞는 15.52778초로 cold start로 부터 최소 4주기 이상을 모의해야 하므로 11520회에 상당한 반복 계산시간이 필요한 반면, 주기적 조화모형은 시간적분이 필요치 않아 약 3M Flops의 능력을 지닌 PC486 컴퓨터에서 비교 결과는 양해법을 이용한 모형에서 약 10시간 정도의 CPU가 소요되었으나 주기적 조화모형에서는 1시간 내외가 소요되었다. 주기적모형이 경제적으로 장기간의 조석을 모의 할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 이들 모형은 유한차분모형에 비하여 세격자와 광격자를 혼용하여 이용하므로써 효율적인 것으로 인식된다. 비선형의 주기적 조화모형이나 시간진행모형 모두 불규칙한 천해역인 새만금 해역의 조류해석에 만족스럽게 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

수치실험결과는 새만금 방조제 건설로 인하여 일대해역은 조석체계 뿐만아니라 조류의 변화가 지대할 것으로 예견되었으며, 정성적인 판단을 할 수 있는 조류벡터의 비교에 따르면 대항리-가력도-신시도를 잇는 방조제 전면해역은 일종의 폐쇄만으로 변하게 됨을 알 수 있었다. 정량적인 평가로는 방조제 전면의 해수유동 변화를 나타내는 조류타원도가 이용되었다. 모의 결과는 무녀도와 비안도 사이 100 cm/sec 내외의 강한 조류속이 크게 둔화되어 대조시의 최강유속이 15 cm/sec 내외로, 비안도와 변산해수욕장 사이도 역시 상당히 둔화되어 최강유속이 10 cm/sec 정도로 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 조류속의 변화는 $\tau_b = \rho K u |u|$ 로 정의되는 해저마찰응력에 직접적으로 작용하여 소류사의 운동을 포함한 이 일대의 퇴적 환경에도 심각한 영향을 미칠 것으로 예견되었다.

参考文献

- 최병호, 1980, A Tidal Model of The Yellow Sea and The Eastern China Sea, KORDI Report 80-02.
- Baptista, A.M., Westerink, J.J. and Turner, P.J., 1989, Tides in the English Channel and Southern North Sea. A frequency domain analysis using model TEA-NL, *Adv. Water Resources*, **12** : 166~183.
- Turner, P.J. and Baptista, A.M., 1992, ACE/gredit user's manual, Oregon Graduate Institute of Science and Technology.
- Westerink, J.J., et al., 1992, Tide and hurricane storm surge computations for the Western North Atlantic and Gulf of Mexico, *Estuarine and Coastal Modeling, Proceeding of 2nd Conference*, 538~550.

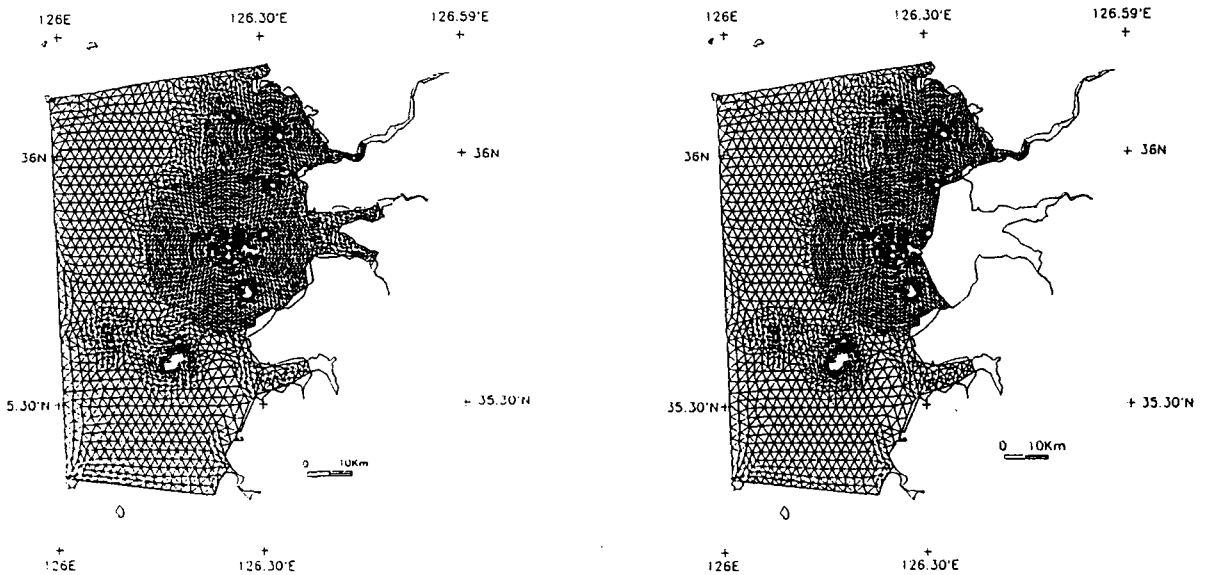


Fig. 1 Finite element meshes for SaeManKeum Dike. (a) before construction, (b) after construction.