

防波堤 築造 影響解析에서의 有限要素模型 A Finite Element Model for Impact Assessment of Dike Construction

徐 承 原*
Seung Won Suh*

要 旨 : 도서가 산재해 있고 수심의 변화가 불규칙한 해역을 공간적으로 이산화하기 위하여 전처리 과정에서 가변 격자를 자동으로 발생하여 새만금 해역에 적용함으로써 방조제 축조의 영향을 해석하였다. 비선형의 주기적 유한요소모형(TEANL)이 해석의 도구로 이용되었는데 실측유속과 비교적 잘 일치되는 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 모형 적용결과 건설중인 새만금 방조제의 신시도와 가력도 그리고 대항리, 변산반도를 잇는 방조제 전면 해역은 폭이 넓은 일종의 구형 폐쇄만으로 변화되어 이 일대 해역의 순환 및 확산 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측되었다.

Abstract □ Studied was impact assessment of sea dike construction in Saemankeum. To represent complexity of the geometry and topography of the region a flexible finite grid system are adopted. Combined fine and coarse meshes based on automatic mesh generator were applied in pre-processing. A nonlinear periodic finite element model, TEANL, was implied in this analysis, which gave good results compared to the observed data. It was predicted that the front region of dike connecting Shinsi-Karyeok-Daehang-Pyunsan will behave as a closed rectangular bay with wide width, which may affect significantly to the circulation and dispersion mechanism in the region.

1. 緒 論

수치모형을 이용하여 해양에서의 조석현상을 해석하기 위한 연구는 지난 10여년간 매우 심도있게 진행되고 있다. 수치모형화 방법도 연구가 진행됨에 따라 경제적이고 유용하며 또한 세련된 방법으로 진전되어 발표되고 있는 것으로 인식된다.

유한요소방법은 상세한 해석이 요구되는 해역과 해저경사가 급변하거나 혹은 좁은 수로 등과 같이 조류변화가 첨예한 영역에서는 세격자를 이용한 이산화가 가능하므로, 균일격자를 사용하는 기존의 유한차분법에서 광역모델과 협역모델과 나누어 해석하는 비효율성이 배제되는 장점을 갖는다.

유한요소법에서 시간진행법이 광범위하게 이용되고 있으나 조류운동이 주기적임에 착안한 연구로 조화 해석방법에 근거한 조류 해석이 있는데(Kawahara 1978, Westerink *et al.*, 1988, Lynch 1992), 조화유한요소방법의 장점은 시간진행방법에 비하여 지배방

정식에 포함된 시간미분항이 자연스럽게 소멸되어 계산의 효율이 증대되고, 더우기 조화기법을 응용하므로 실제에 부합되는 결과를 제공할 수 있는 장점을 갖고 있다. 필자가 수행하였던 연구(서, 1993)에 의하면 연안 수동역학에 이용되는 유한요소모형의 비교 결과에서 조화모형이 시간진행모형에 비하여 정확도가 뛰어나고 시간진행모형에서 초기조건으로 설정하는 cold start의 영향이 phase lag로 표현되는 불만족스러운 결과가 나타나지 않는 장점이 있었다. 그렇지만 비교되었던 조화모형은 선형 모형이어서 대상으로 하는 지형 및 수심이 불규칙한 새만금 해역에는 적절치 않아서 이와 같은 특성을 충분히 고려하기 위해 비선형의 조화유한요소 모형을 이용하였다.

본 연구는 방조제가 완공된 이후 조성되는 호수에서 발생하는 오염원의 확산해석 연구와 체류시간 규명을 위한 일련의 연구중 초기단계로 세격자의 사용이 절대적으로 요구되는 새만금해역의 수동역학 특성을

*群山大學校 海洋工學科

ent of Oc .ngineering, Kunsan National University, 573-360, Korea)

과약하기 위하여 실시되었다. 새만금 해역에 관하여 연구된 기 발표 연구들은 유한차분법을 근간으로 해석되었고, 전 해역을 동일한 격자체제로 분할하고 있으며, 불규칙한 경계의 처리에는 어려운 점이 있었다. 최와 이(1993) 및 강 등(1993)은 격자간격 700 m로 분할된 격자 체제상에서 유한차분법에 의해 해석한 바 있고, 최(1988)가 금강하구의 비선형 조석을 해석하기 위해 금강하구의 한정된 해역에서 격자간격 300 m를 갖는 세간격 유한차분모델을 이용한 바 있다. 더우기 새만금 해역에 관한 환경영향평가(농업진흥공사, 1989)에서는 이들보다 훨씬 큰 격자간격 2000 m로써 상대적으로 정도가 떨어지고, 특히 관심있게 관찰해야 할 해역이 간과되는 경향이 있었다. 방조제 체절이후 조성되는 호수의 배수 갑문의 폭이 240~300 m인 점을 감안하고, 대상해역내에 도서가 산재해 있으며 불규칙한 지형으로 되어 있고 좁은 수로가 발달한 점을 고려하면 이러한 부근에는 최소 격자간격은 200 m 정도로 이산화 되어야 할 것이다.

세격자와 조격자를 혼용하는 유한요소 모형의 특성을 충분히 활용하기 위해서는 격자체계 구성이 매우 중요하나 수 작업에 의해서 완성하는 것은 매우 비효율적이고 수심의 변화를 고려해서 이산화작업을 하는 것은 상당히 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 전처리 과정에서 자동 격자체계구성방법을 이용하여 이산화를 실시하였고, 후처리에서는 모델의 결과를 가시화하는 방법을 이용하여 새만금 해역에서 방조제 축조 전후의 특성을 살펴보았다.

그러나 새만금방조제 축조 전후의 해수유동 상황을 모의 및 비교하기 위해 현재 해안선 부근의 조건대 처리는 실시하지 않았다. 이유는 방조제 축조후에는 조건대가 사라지므로 방조제 외측의 특성비교에는 영향을 크게 미치지 않기 때문이다. 여기서 중점을 둔 사항은 뒤따르는 연구에서 논의하게 될 장기적인 확산해석을 위해서 역시 장기적인 수동역학 해석이 필요하게 되므로 격변적 변화를 무시한 조화함수에 의한 반복적인 해석방법을 택하였다.

2. 모형구성

2.1 비선형 천수방정식

기본식에는 다음과 같은 가정이 고려되었다. 즉, 해수의 밀도는 일정하고, 정수압분포가 성립하며, 수

평방향의 운동량분산(와점성)이 무시되고 해면에서는 압력이 일정하다. 이와 같은 가정하에 3차원의 방정식에서 유도된 수심평균의 기본방정식은 다음과 같다. 즉, 2차원의 수심평균화된 연속식과 운동식은 아래와 같은데 비선형 항들은 우변으로 놓고, 선형의 마찰항을 운동식의 양변에 고려하면 식 (1)~(3)의 비선형 천수방정식을 얻게된다(Baptista *et al.*, 1989).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} &= -\frac{\partial(u\eta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\eta)}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + g\frac{\partial \eta}{\partial x} - fv + \lambda u &= \left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] u \\ -\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) & \\ \frac{\partial v}{\partial t} + g\frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + \lambda v &= \left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] v \\ -\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) & \end{aligned}$$

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

개방경계로는 해수면 변위가 정의되는 식 (4)의 Γ_n 와 유출입이 정의되는 식 (5)의 Γ_Q 로 나눌 수 있다.

$$\eta(x,y,t) = \eta^*(x,y,t) \text{ on } \Gamma_n \tag{4}$$

$$Q_n(x,y,t) = Q_n^*(x,y,t) \text{ on } \Gamma_Q \tag{5}$$

조위가 정의되는 경계는 통상 개방경계이고 유출입이 정의되는 경계는 하천을 통해 유입되는 경계가 되는데 법선 방향의 유출입은 다음과 같다.

$$Q_n = \alpha_{nx}\{u(h+\eta)\} + \alpha_{ny}\{v(h+\eta)\} \tag{6}$$

여기서 α_{nx}, α_{ny} 는 방향여현을 의미한다.

위의 식 (1)~(3)으로 주어지는 조류운동에 관한 기본방정식은 경계에서의 조위 혹은 외적 강제함수가 주기적이라고 가정하면 다음식 (7)~(9)와 같이 조위와 유속도 주기적이라고 볼 수 있고, 따라서 이를 원래의 기본식에 대입하면, 식 (10)~(12)로 단순화 되어 된다.

$$\eta(x,y,t) = \text{Re}\{\hat{\eta}(x,y)e^{i\omega t}\} \quad (7)$$

$$u(x,y,t) = \text{Re}\{\hat{u}(x,y)e^{i\omega t}\} \quad (8)$$

$$v(x,y,t) = \text{Re}\{\hat{v}(x,y)e^{i\omega t}\} \quad (9)$$

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 더 이상 시간 의존항이 포함되지 않은 단순한 식으로 표현된다.

$$i\omega\hat{\eta} + \frac{\partial(\hat{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\hat{v}h)}{\partial y} = \hat{P}_\eta^{nl} \quad (10)$$

$$i\omega\hat{u} + \frac{\partial(g\hat{\eta})}{\partial x} - f\hat{v} + \lambda\hat{u} = \hat{P}_u^{nl} \quad (11)$$

$$i\omega\hat{v} + \frac{\partial(g\hat{\eta})}{\partial y} + f\hat{u} + \lambda\hat{v} = \hat{P}_v^{nl} \quad (12)$$

여기서 식 (10)의 우변의 \hat{P}_η^{nl} 은 연속방정식에 포함된 비선형의 유한진폭을 나타내고, 식 (11)과 (12)에 있는 우변의 \hat{P}_u^{nl} , \hat{P}_v^{nl} 운동방정식내에 비선형마찰, 선형마찰, 비선형 이송가속 등을 포함한 것을 의미한다. 이러한 비선형은 반복계산에 의해 우변의 값이 새로이 수정되므로써 해를 구하게 된다.

2.2 가중잔차식 구성

위의 식 (10)~(12)에 대하여 Galerkin의 가중잔차 방법을 적용하는 데, 연속방정식과 운동 방정식의 오차는 각각 $\delta\hat{\eta}$, $\delta\hat{u}$, $\delta\hat{v}$ 인 조위와 유속의 변동치를 가중함수로하여 전영역에 대해 적분하면 다음과 같이 된다. 먼저 연속방정식은 식 (13)과 같이 되고, 공간 미분항들에 대한 부분적분을 한 후 Gauss 정리와 식 (6)의 관계인 경계조건을 대입하고 비선형항들을 우변으로 정리하면 식 (14)의 가중잔차식이 구성된다. 운동방정식도 마찬가지로 가중함수를 도입하여 전영역에 대해 적분하는 데, 양변에 수심을 곱한 후 정리하면 식 (15) 및 (16)과 같이 되며 모든 비선형항들은 모두 우변으로 한데 묶어 정리하면 반복 계산에 의해 연속적으로 새로운 값으로 치환될 수 있도록 하였다.

$$\iint_{\Omega} \left\{ i\omega\hat{\eta} + \frac{\partial(\hat{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\hat{v}h)}{\partial y} \right\} \delta\hat{\eta} d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma_Q} (-\hat{Q}_n + \hat{Q}'_n) \delta\hat{\eta} d\Gamma = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left\{ i\omega\hat{\eta}\delta\hat{\eta} - \hat{u}h \frac{\partial\delta\hat{\eta}}{\partial x} - \hat{v}h \frac{\partial\delta\hat{\eta}}{\partial y} \right\} d\Omega \\ & = - \int_{\Gamma_Q} \hat{Q}'_n \delta\hat{\eta} d\Gamma + \iint_{\Omega} \left[\hat{u}\hat{\eta} \frac{\partial\delta\hat{\eta}}{\partial x} + \hat{v}\hat{\eta} \frac{\partial\delta\hat{\eta}}{\partial y} \right] d\Omega \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left(i\omega h \hat{u} + g h \frac{\partial\hat{\eta}}{\partial x} - f h \hat{v} + \lambda \hat{u} \right) \delta\hat{u} d\Omega \\ & = \iint_{\Omega} \left(\lambda \hat{u} - c_f \frac{h}{h + \hat{\eta}} \sqrt{(\hat{u}^2 + \hat{v}^2)} \hat{u} - h \hat{u} \frac{\partial\hat{u}}{\partial x} \right. \\ & \quad \left. + \hat{v} \frac{\partial\hat{u}}{\partial y} \right) \delta\hat{u} d\Omega \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left(i\omega h \hat{v} + g h \frac{\partial\hat{\eta}}{\partial y} + f h \hat{u} + \lambda \hat{v} \right) \delta\hat{v} d\Omega \\ & = \iint_{\Omega} \left(\lambda \hat{v} - c_f \frac{h}{h + \hat{\eta}} \sqrt{(\hat{u}^2 + \hat{v}^2)} \hat{v} - h \hat{v} \frac{\partial\hat{v}}{\partial x} \right. \\ & \quad \left. + \hat{v} \frac{\partial\hat{v}}{\partial y} \right) \delta\hat{v} d\Omega \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 유한요소식의 구성

구성된 가중잔차식내의 변수들은 요소내에서 함수 값이 연속이 되어야 하는 최소한 C^0 연속성을 만족하는 함수로 근사화될 수 있다. 연구에 따라서는 조위에 C^0 연속성을, 유속에는 C^1 연속성을 만족하는 함수가 혼용되기도 하나, 이렇게 혼용할 특이한 이유는 없다. 요소내에서 각종 변수는 다음식 처럼 표현될 수 있다.

$$a(x,y) = \phi(x,y) a^{(n)} \quad (17)$$

여기서 좌변은 미지의 변수들을 대표하고, $\phi(x,y)$ 는 C^0 연속성을 만족하는 선형보간함수를 의미하며, $a^{(n)}$ 은 변수들의 절점값을 나타낸다. 식 (17)로 주어지는 근사화된 변수들을 위에서 유도한 가중잔차식들 (14)~(16)에 대입하고, 가중함수인 $\delta\hat{\eta}$, $\delta\hat{u}$, $\delta\hat{v}$ 의 임의성을 고려하여 전영역을 관하여 조합하면 아래의 유한요소식을 얻게 된다.

$$i\omega \mathbf{M}_\eta \hat{\eta} - \mathbf{D} \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{P}}_\eta^{lin} + \hat{\mathbf{P}}_\eta^{nl} \quad (18)$$

$$i\omega \mathbf{M}_U \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{M}_F \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{M}_C \hat{\mathbf{U}} + g \mathbf{D}^T \hat{\eta} = \hat{\mathbf{P}}_{\Delta-fric}^{nl} - \hat{\mathbf{P}}_{conv}^{nl} \quad (19)$$

윗식의 행렬들은 기본방정식으로 부터 유도된 것으로 전영역에 관해 조합된 것이며 각각은 다음과 같다.

η 는 조위벡터, U 는 조류속 벡터, D 는 1계 미분항으로 이루어진 행렬을, M_η 는 연속방정식에서의 계수 행렬을, M_U 는 운동방정식에서의 질량행렬을, M_F 는 선형화된 마찰행렬을, M_C 는 Coriolis행렬을, P_η^{lin} 는 유출입이 고려된 경계의 벡터, P_η^{nl} 는 연속방정식의 유한진폭항 등의 비선형이 고려된 벡터, $P_{\Delta-fric}^{nl}$ 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. 비선형 모형인 TEANL의 풀이과정은 먼저 비선형을 무시한 상태에서 선형의 모델로 간주하여 해를 구하는 데 이렇게 되면 전회의 연구(서, 1993)에서 비교 연구하였던 선형의 모델인 TEA로 귀착된다. 다음단계는 선형모델로 부터 구해지는 해를 이용해서 시간적으로 연관된 비선형벡터인 $P_\eta^{nl}(t)$, $P_{\Delta-fric}^{nl}(t)$, $P_{conv}^{nl}(t)$ 를 구한다. 이들 시간의존 비선형항들은 근사적으로 여러개의 조화급수로 표현가능하므로 최소자승 조화분해법에 의해 일련의 분조들로 표현할 수 있다. 따라서 최종적인 해는 이들 분조들에 대해 수렴이 될때까지 반복적으로 계산을 하여 구한다(Westerink *et al.*, 1988).

이와 같은 조화조류모형은 기존의 유한차분, 유한요소법에 근거한 시간진행모형에 비하여 시간의존성이 배제되므로써 장기간의 조류를 용이하게 재현할 수 있는 장점이 있고, 또한 천체운행에 의하여 나타나는 조석을 관심있는 여러개 분조의 조합으로써 용이하게 설명할 수 있다. 아울러 천해조의 영향도 쉽게 포함시킬 수 있어 각각의 중첩된 복합영향을 자연스럽게 모의할 수 있다는 장점이 있다.

3. 수치실험

3.1 전처리(Pre-processing)

수치실험의 첫단계로 대상해역의 지형과 수심을 고려한 적절한 이산화가 필요한 데, 이산화에 따라 해석이 달라지므로 무엇보다도 세심한 주의가 요하는 작업이라 할 수 있다. 과거에는 수작업에 의해 이산

화를 실시했으나 절점과 요소의 수가 많아지고 지형이 복잡해지면 질수록 그에 비례해서 노력과 오차는 커지게 된다.

따라서 자동으로 요소를 분할하고 편집기능을 겸한 프로그램들이 개발되고 보급되고 있는데, Henry와 Walters(1993)는 TRIGRID라 명명된 PC용 프로그램을 발표하였고, Turner와 Baptista(1992)는 Workstation에서 X-window를 이용하여 작업할 수 있는 유한요소 편집기인 ACE/gredit를 발표하였고, Mexico 만에서 응용한 결과가 보고되었다(Westerink *et al.*, 1992).

이들 요소발생장치는 모두 Delaunay 삼각형화 기법을 이용하고 있고, 근본적으로 C^0 의 연속성을 만족시키는 선형의 삼각형 요소로 분할하는 것을 기본 골격으로 하고 있으며, 전 해석대상해역에 관해 일정한 Courant수를 유지하도록 즉, 요소 혹은 절점의 밀집도가 수심에 반비례 되도록 유한요소망을 조절할 수 있다. TRIGRID는 요소발생의 초기단계에서 수심의 변화와 불규칙한 지형의 변화를 digitizer로 용이하게 묘사할 수 있으나, 요소의 분할과 절점의 이동 등의 편집기능은 다소 떨어진다.

본 연구에서는 요소의 자동생성을 위해 MIT Par-

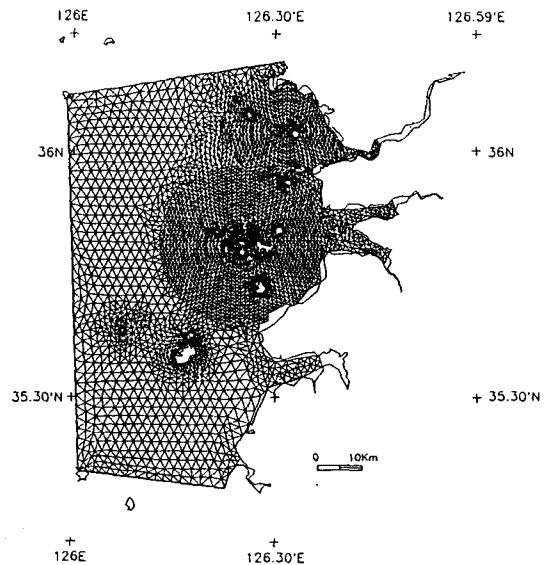


Fig. 1. Map showing the study area before construction of dike. The area is discretized into 3715 nodes and 7038 linear triangular elements by ACE/gredit (Turner and Baptista, 1992).

Table 1. Open boundary tidal forcings. Phases are referenced to 135°E

Stations		Lower left	Lower right	Upper right	Upper left	Remarks
Constituents						
M ₂	Amplitude(m)	1.752	1.901	2.100	1.901	Liner interpolations along O/B nodes
	Phase lag(rad)	1.380	1.437	1.789	1.720	
S ₂	Amplitude(m)	0.632	0.695	0.762	0.660	
	Phase lag(rad)	2.228	2.284	2.573	2.513	

son's Lab의 DEC Workstation에 탑재된 편집기능이 뛰어난 ACE/gredit를 사용하였다. 그림 1에 대상으로 취한 새만금해역과 이산화가 도시되고 있다. 연구에서 택한 모델영역은 남북으로는 35°20'N~36°10'N까지의 안마도에서 어청도 사이를, 동서로는 금강하구둑으로부터 안마도와 어청도를 잇는 선까지인 126°E~126°45'E를 포함한다. 방조제 건설전의 이산화 결과는 총절점과 요소수가 3715 및 7038개이고, 최소 격자 간격은 210 m로, 최대는 4120 m이다. 요소의 모양은 가급적 정삼각형에 가깝게 이산화하여 요소 형상행렬을 구성할 때와 집중질량행렬을 구성할 때의 오차를 최소화 하도록 노력하였다.

3.2 입력조건

먼저 불규칙한 해저 지형으로 되어있는 대상해역의 수심이 해도 302로부터 입력되었는데, 이때의 수심은 약 최저저조면을 기준으로 작성되어 있으므로 평균 해면으로 환산하기 위하여 대상해역의 평균 Z₀의 값인 3.2 m를 전체해역에 더하였다.

경계조건으로는 금강, 만경강, 동진강 등 하천의 유입을 포함한 폐경계에서 유출입이 없다고 하였고, 이를 제외한 상하 및 좌변의 개방경계에서는 조석 산정을 위한 강제함수로 조석의 분조가 입력되었는데 고려된 분조는 M₂, S₂이다. 각 분조의 진폭과 동경 135°E를 기준으로 한 위상지체는 과거의 연구성과인 최(1980)의 결과로부터 추출하였고, 이후 각종 목적으로 측정된 조석의 조화분해 자료로부터 발췌하였는데 정리하면 표 1과 같다. 이들 4개 모서리 이외의 개방경계상의 절점에서는 조화상수로 부터 선형보간을 취한 값을 입력하였다.

해저마찰계수는 Chezy계수를 70 m^{1/2}/sec로 보아 C_r는 0.002, Coriolis 인자는 대상해역의 평균위도를 북위 36도로 보아 8.55×10⁻⁵ 적용하였다.

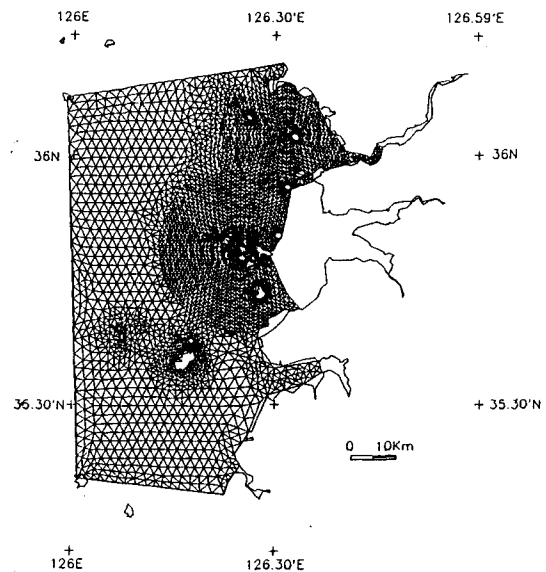


Fig. 2. Finite element meshes after Saemangeum dike construction.

3.3 방조제 축조영향 고려

수치모형실험은 앞서 기술한 이산화 자료와 입력 자료를 이용하여 실시하였는데, 새만금 방조제가 건설되기 전의 상태와 대항리-가력도-신지도-야미도를 잇는 본 방조제가 건설되는 상황으로 설정하여 실험하였다.

방조제가 완공된 이후의 이산화는 그림 2와 같이 방조제 내측의 요소를 소거시켰으며, 총절점과 요소 수는 3311과 6243개로 이루어졌다. 수심변화가 고려되지 않았고, 개방경계도 이전의 상태와 동일하게 설정하였다.

3.4 모형의 검증

복잡한 수치모형의 검증은 실측치와의 비교로써 가능하지만 단순하시킨 경우는 해석해와 비교 가능하

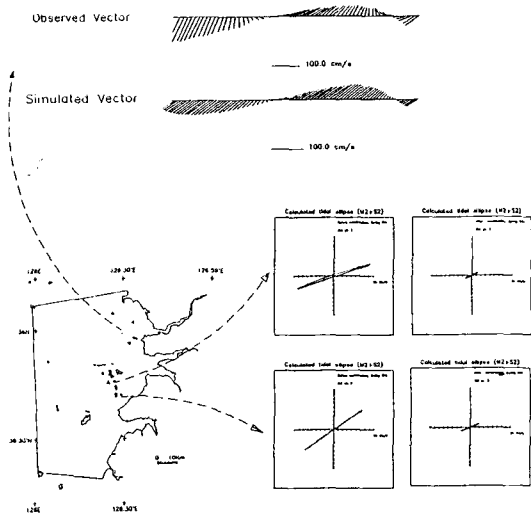


Fig. 3. Comparison of observed and computed velocity vectors(stick diagram). Dike construction effect on velocities at selected points(tidal ellipses).

다. 본 연구에서 이용한 모형을 단순화시킨 선형의 경우는 전희의 연구(서, 1993)에서 검토한 바와 같이 시간진행모형에 비하여 안정되고 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서는 실측한 유속과의 비교를 통해 모형의 검증은 피하였다.

대상해역에서 여러가지 목적으로 유속이 실측되었는데, 이용한 자료는 1992년 8월 1일에 Aanderra RCM-7 유속계를 이용하여 개야도 부근($36^{\circ}00.78'N$, $126^{\circ}29.18'E$)에서 수표면하 5 m에서 10분 간격으로 측정된 관측자료이다. 그림 3에 실측한 자료의 유속 벡터도가 도시되어 있고, 본 모형의 실험결과와 비교되어 있다. 창조류는 유향유속이 잘 일치하고 있고, 낙조류는 실측유향이 약 20° 정도 편향되어 있지만 전반적으로 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

또한 제한된 관측점에서 뿐만 아니라 전 영역에 관한 비교는 수로국 간행 조류도와 비교하므로써 전반적인 성향을 파악할 수 있는데, 그림 4에 최강 창조류와 낙조류에 관한 유속벡터가 도시되고 있다.

3.5 후처리(Post-Processing)

계산된 조위와 유속을 일목요연하게 정리하고 또 가시화하기 위한 방편으로 후처리에 관한 연구가 진전되고 있으나(최, 1993), 실제로 현실적인 동적가시화에는 상당한 노력이 요구되고 있어 그 사용에는

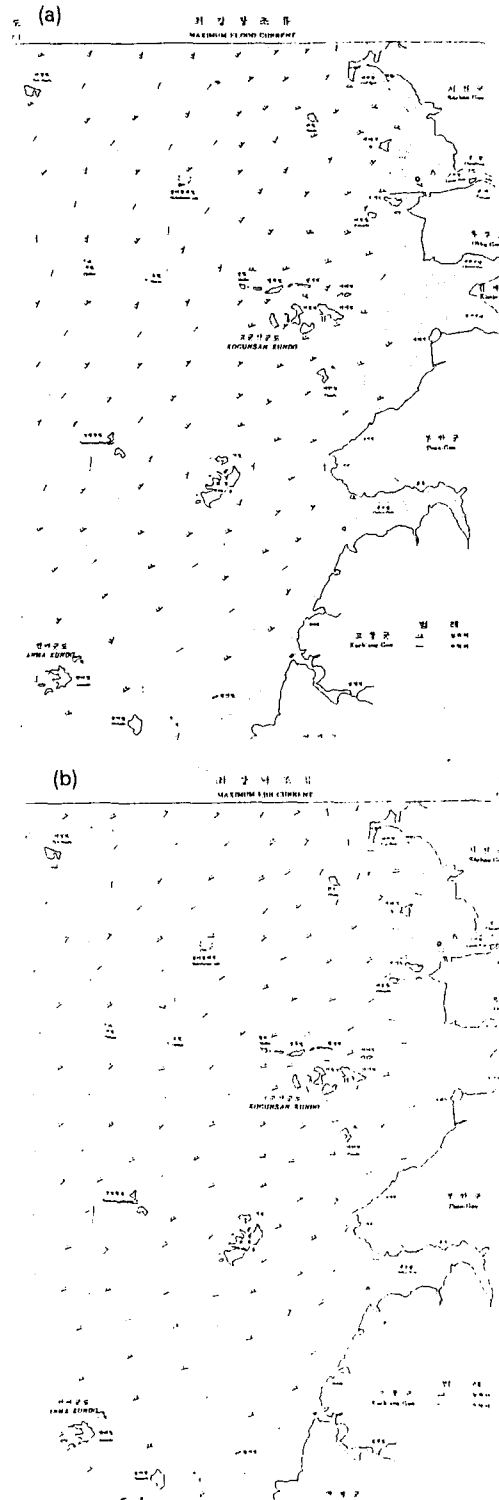


Fig. 4. Observed maximum tidal currents (a) at flood and (b) at eb. (水路局 조류도)

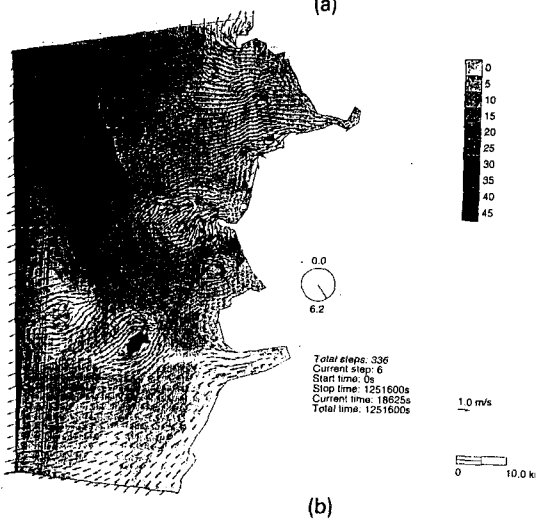
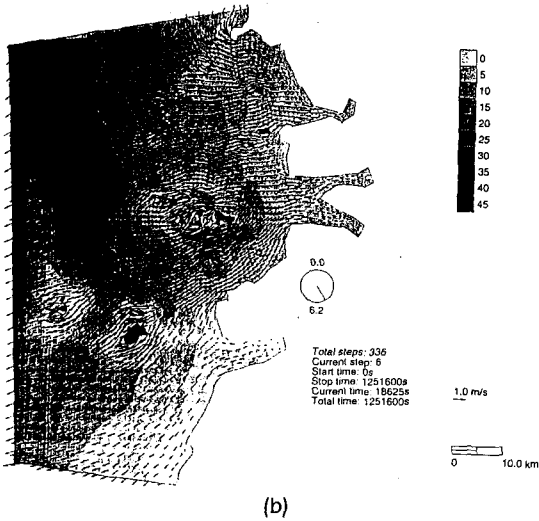
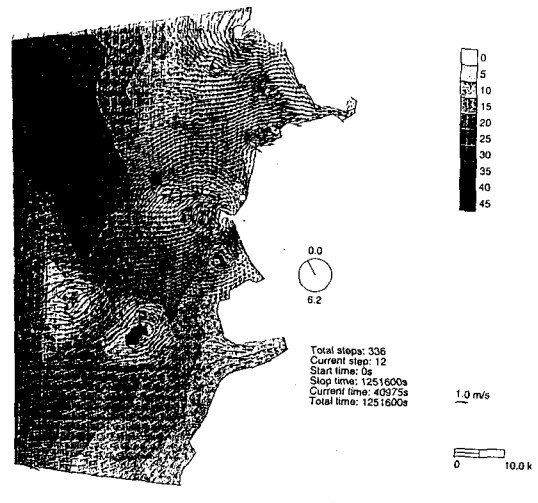
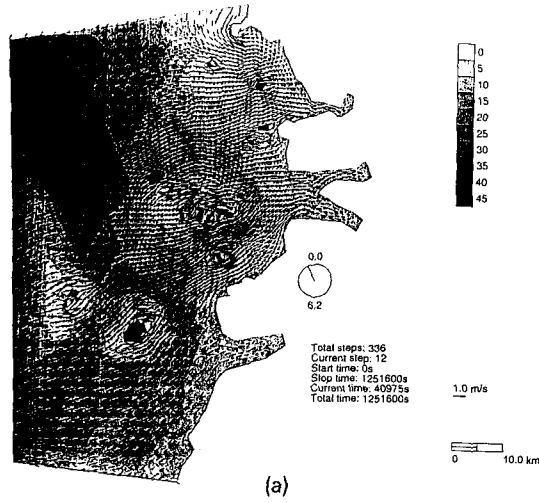


Fig. 5. Computed maximum tidal currents (a) at flood and (b) at ebb tide, before construction. Tidal clock shows the lagged lunar time referenced to 135°E. Gray scaled depth(m) represents bottom topography.

Fig. 6. Computed maximum tidal currents (a) at flood and (b) at ebb tide, after construction.

한계가 있다. 여기서는 전처리과정에서 이용하였던 요소생성 프로그램과 연계하여 가시화할 수 있는 프로그램(ACE/vis, 1992) DEC Station에 탑재된 것을 이용하였는데, 계산된 결과는 실시간으로 유속 혹은 조위가 벡터 및 색상의 변화로 모니터에서 가시화된다. 여기서는 출력된 결과를 Laser printer로 받다 그중 일부를 그림 5 및 6에 최강 창조시와 낙조시만 도시하였다.

방조제 축조 전의 대조시 창조시에 관한 그림 5를

앞서의 조류도(그림 4)와 비교하면 개방경계부근을 제외하고는 대체로 내부영역에서 잘 일치하는 성향을 띠고 있다.

4. 실험결과 분석 및 토의

4.1 모형의 평가

비선형의 조화유한요소 수치모형을 이용한 실험결과는 실측치와 잘 일치하는 것으로 판단된다. 그러나 조류관측이 극히 제한된 지점에서 한정적으로 행하여 지므로써 모형에 이용된 각종 변수의 보정은 불가능

하였다. 그리고 본 수치모형에 민감하게 영향을 끼치는 강제함수로 부여된 개방경계조건 역시 대상해역에서 한정된 지점의 자료로부터 추출되어 입력되므로써 개방경계조건에 관한 신뢰성이 다소 의문시되는 문제점이 있는 것으로 지적된다. 그렇지만 개방경계는 관심을 갖는 새만금 해역과 충분히 떨어져 있어 개방경계조건이 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 판단되었다.

대상해역과 같이 천해역에는 천해조가 크게 영향을 미칠수도 있고, 해저마찰의 영향이 우세하게 지배하는 것으로 믿어지나 여기서는 관측자료의 제한때문에 이에 관한 평가가 실시되지 못한 아쉬움이 있다. 그러나 한정된 관측자료와 비교한 그림 3의 결과나, 조류도와 비교가 되는 그림 5의 계산 결과를 비교하면 본 모형이 불규칙한 천해역에서 만족스럽게 적용될 수 있음을 보여준다.

이러한 연구에서 논의되었지만 동일 격자체계 상에서 시간진행모형 중 양해법을 이용한 STEPM(서, 1993)으로 해석하려면 안정조건에 알맞는 15.52778초로 cold start로부터 최소 4주기 이상을 모의해야 하므로 11520회에 상당한 반복 계산시간이 필요하다. 약 3M Flops의 능력을 가진 PC486 컴퓨터에서 비교결과는 양해법을 이용한 모형에서 약 10시간 정도의 CPU가 소요되었거나 본 모형에서는 1시간 내외가 소요되었다. 따라서 본 연구에 적용한 모형은 기존 시간진행 모형들에 비하여 매우 경제적으로 장기간의 조석을 모의할 수 있는 것으로 판단되고, 유한차분 모형에 비하여 세격자와 광역격자를 혼용하여 이용하므로써 효율성이 입증되었다.

실제해역의 조석운동을 보다 정확히 재현하고 수치모형의 신뢰성을 높이기 위해서는 개방경계조건과 이산화 영역의 적정성 등이 면밀히 검토되어야 하고, 지속적인 현장관측이 병행되는 것이 필수적인 과업의 하나라고 생각된다.

4.2 방조제 건설에 따른 영향

방조제 건설에 따른 유동변화와 장차 인근해역의 확산메카니즘에 끼치는 영향을 살펴보기 위하여 격자간격 210~230 m의 세격자가 고군산 열도 및 인근 수로를 포함한 대부분의 해역에 적용되었고, 3000~4000 m의 조격자는 개방경계 부근의 비교적 수심이

깊은 해역에 적용되었다. 수치실험 결과, 그림 6에서 보듯이 방조제로 인해 이곳의 수로를 따라 북동 및 남서향 하던 강한 창·낙조류는 사라지고 이 일대는 일종의 구형폐쇄만으로 변함을 알 수 있었다. 이와 같은 폐쇄만 내의 정체된 해수유동은 만내의 끝단에 위치한 가력 및 신시 배수갑문을 통한 오염물 혹은 담수 방류가 외해로 이송 확산되지 못하고 상당히 만내에 체류될 가능성을 나타낸다.

그림 3에는 방조제 전면의 해수유동 변화를 나타내는 조류타원도가 모형의 검증에 이용된 벡터와 함께 도시되어 있는 데 유향과 유속의 변화를 용이하게 평가할 수 있다. 모의 결과는 무너도와 비안도 사이도 역시 상당히 둔화되어 최강유속이 15 cm/sec 내외로, 비안도와 변산해수욕장 사이도 역시 상당히 둔화되어 최강유속이 10 cm/sec 정도로 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 조류속의 변화는 이 일대의 퇴적환경에도 심각한 영향을 미칠 것으로 예견된다. 퇴적메카니즘에 관한 연구도 함께 병행되어야 할 것이다.

5. 결 론

전처리 과정에 이용된 유한요소 자동격자 발생기는 일정 Courant수를 유지할 수 있도록 영역을 유연하게 이산화하는 것이 가능하며, 격자간격 210~4120 m의 가변 격자체계가 새만금 해역에 적용되었는데, 도서가 산재해 있고 불규칙한 연구대상해역을 공간적으로 잘 묘사할 수 있었다.

적용된 비선형의 조화유한요소 모형결과를 실측유속과 비교하여 잘 일치되는 양호한 결과를 얻을 수 있었고, 장기간의 조석변화를 예측할 수 있는 경제적으로도 유용한 도구임을 알았다.

새만금 방조제 축조로 인해 신시도와 가력도 그리고 대항리, 변산반도를 잇는 방조제 전면해역은 일종의 폐쇄만으로 변화되어 정체수역으로 급변하게 된다. 특정 비교점인 그림 3의 A, B점인 신시도와 비안도의 중간점 그리고 비안도와 변산해수욕장의 중간점에서는 최강 창낙조류의 유속이 100 cm/sec내외에서 10~15 cm/sec로 상당한 변화를 보이는 것으로 실험되었다. 이런 해양물리의 변화는 새로이 조성되는 새만금호수의 폐쇄만 끝단에 위치한 가력도와 신시도 배출수문으로부터 오염물 및 담수가 만내에 정체되어

장기적인 확산에도 상당한 영향을 끼칠 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 부분적으로 한국과학재단의 해외 Post-Doc지원 프로그램 및 전라북도의 지원을 받아 수행되었기에 감사의 뜻을 전한다.

参考文献

- 강주환, 박상현, 이길성, 1993. 음해법을 이용한 천수방정식의 수치해석, 대한토목학회 논문집, 13(3): 119-127.
- 농업진흥공사, 1989. 새만금지구 간척종합개발사업 환경영향평가서, 461.
- 서승원, 1993. 연안 수동역학 모의를 위한 시간진행 및 조파유한요소모형 특성, 한국해양·해양공학회지, 5(4): 406-413.
- 최병호, 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, KORDI Report 80-02.
- 최병호, 1988. 금강하구의 비선형 조석, 한국수문학회지, 21(1): 87-93.
- 최병호, 1993. Computer Graphic 동화에 의한 과학 가시화 기법, 대한토목학회지, 41(4): 41-51.
- 최홍식, 이길성, 1993. 방조제 축조시 수리특성 및 조간대의 모의해석, 한국해양·해양공학회지 5(2): 99-106.
- Baptista, A.M. and Turner, P.J., 1992. ACE/vis user's manual, Oregon Graduate Institute of Science and Technology.
- Baptista, A.M., and 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.
- Dronkers, J.J., 1964. Tidal computations in rivers and coastal Waters, North-Holland Co.
- Henry, R.F. and Walters, R.A., 1993. Geometrically based, automatic generator for irregular triangular network, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 9: 555-566.
- Kawahara, M. et al., 1977. Periodic tidal flow analysis by finite element perturbation method, *Computers and Fluids*, 5: 175-189.
- Kawahara, M. and Hasegawa, K., 1978. Periodic Galerkin finite element method of tidal flow, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 12: 853-871.
- Lynch, D.R., Werner, F.E., Greenberg, D.A. and Loder, J.W., 1992. Diagnostic model for baroclinic, wind-driven and tidal circulation in shallow seas, *Continental Shelf Research*, 12: 37-64.
- 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., 1984. TEA: A linear frequency domain finite element model for tidal embayment analysis, MIT.
- Westerink, J.J., et al., 1988. A frequency-time domain finite element model for tidal circulation based on the least-squares harmonic analysis method, *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, 8(7): 813-843.
- 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.