韓國海岸·海洋工學會誌
第5卷 第4號, pp. 406~413, 1993年 12月

沿岸 水動力學 模擬를 위한 時間進行 및 調和 有限要素模型 特性

Characteristics of Time Stepping and Harmonic Finite Element Models for Coastal Hydrodynamic Simulation

서 승 원*
Seung Won Suh*

要 旨 : 수심적분의 2차원 연안수동역학 모형중 시간진행의 방법과 조화해석 방법에 의하여 전개한 유한요소모형을 비교검토하여 각 모형의 특성을 파악하고 오차를 해석하기 위하여 본 연구를 수행하였는데 이에 이용된 모형은 ADCIRC, STEPM, FUNDY 그리고 TEA이다. 비교방법으로 해석적 해를 구할 수 있는 4분환원의 형상에서 영역내 특정점에 대한 수치해의 변화추이와 전영역에 관하여 해석해와의 L_2 정규오차의 비교를 통해 각 특성을 살펴보았다. 그 결과 전반적으로 조화모형이 시간진행모형에 비하여 매우 우수하고 거의 해석적 해와 일치되는 결과를 보이는 반면, 시간진행모형인 STEPM은 조화모형에 비하여 약 7배, ADCIRC는 STEPM에 비하여 5배 가량 정도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이렇게 오차에 지대한 영향을 미치는 것은 초기조건으로 설정한 cold start의 영향 때문에 발생되는 phase lag와 비선형항의 영향인 것으로 추론되었다.

Abstract □ Among 2-dimensional coastal hydrodynamic finite element models time stepping ADCIRC and STEPM, and harmonic FUNDY and TEA models were compared in order to find out their characteristics and analyze error. General feasibility and capability of models were studied by comparing model results with an analytical solution on some reference points and L_2 norm error in quarter annular domain where analytical solution can be obtained. According to these tests harmonic models FUNDY and TEA were nearly coinciding with analytical solutions and gave better results than time stepping models. STEPM was at least 5 times better than ADCIRC in L_2 norm error test, and it was 7 times worse than harmonic models. It was expected and concluded that these errors might come from phase lag due to cold start condition and nonlinear effect in basic equations of time stepping models.

1. 서 론

연안수동역학 해석에 폭넓게 이용되는 수치모형은 현재까지 유한차분모형과 유한요소모형으로 대별할 수 있다. 각각의 방법에 대해서는 장단점이 있으나 불규칙한 지형과 수심의 변화를 고려한 이산화의 유연성으로 유한요소방법이 보다 현실성을 지니고 이용되고 있다.

대부분의 수치모형은 비정상상태의 기본식을 시간에 대해 수치적분하는 시간진행(time stepping or time marching)의 모형들이나 연안의 수동역학이 주기적임에 착안한 조화함수를 이용한 주기적인 모형이 연구되고 있다(Kawahara, 1978; Lynch와 Werner 1987, 1991; Westerink 등, 1984). 역시 이들 방법 또한 개별적인 장단점이 있다.

본 논문에서는 현재 국내외에서 연구와 실제적용이 활발히 추진되는 수심적분의 2차원 연안수동역학 모형중 시간진행의 방법과 조화해석 방법에 의하여 전개한 유한요소모형을 비교검토하여 각 모형의 특성을 파악하고자 한다. 이 연구는 계속되는 실제적용 연구와 3차원 해수유동 연구의 초기단계로서 각 모형간의 특성비교 및 오차해석에 비중을 두었다.

시간진행 모형은 storm surge 혹은 tsunami 등과 같이 단시간내에 급변적으로 변화는 수동역학적 특성을 표현하기 알맞는데, Westerink 등이 연구한 ADCIRC(ADvanced CIRCulation) 모형(Westerink 등,

*群山大學校 海洋工學科 (Department of Ocean Engineering, Kunsan National University, 573-360, Korea)

1992; Leuttich 등, 1991) 그리고 Kawahara(1982)가 제안하여 계속적인 연구를 거듭하고 국내에서는 서(1989a, b)가 보완 발전시킨 STEPM(STEP Model modified) 모형의 두 가지를 선정하였다. 조화모형은 조석과 같이 장기적으로 그 변화가 심하지 않은 즉, 주기적으로 거의 일정하게 변화되는 경우에 보다 적합하다고 할 수 있으며, Westerink 등(1984; 1988)이 제안한 TEA(Tidal Embayment Analysis) 모형 그리고 Lynch(1990) 가 연구한 FUNDY 모형의 두 가지를 선정하였다. 따라서 전부 4개의 모형을 비교 대상으로 선정하였다.

이들 모형들은 천수방정식(shallow water equation)인 연속방정식과 운동량방정식을 기본방정식으로 택하고 있으나 ADCIRC는 기본방정식으로 천수방정식의 연속방정식을 변형한 형태인 일반화된 파동연속방정식(generalized wave continuity equation)과 운동량방정식을 택하고 있다.

시간진행 모형인 ADCIRC는 양, 음해법으로 시간적분을 수행할 수 있다. STEPM은 집중질량행렬의 방법을 이용한 양해법을 적용하고 개방경계의 처리에 관심을 기울인 모형이다. 시간진행모형은 비선형의 방정식을 토대로 하고 있다. TEA와 FUNDY는 선형화된 방정식을 이용하는 조화모형이나 TEA의 비선형 모형인 TEANL이 연구되고(Baptista 등, 1989) 있다.

본 연구에서는 2차원 모형의 정량적인 평가를 위해 2차원 운동을 잘 묘사할 수 있는 영역의 하나인 4분환원형상(quarter annular shape)에 대해 Lynch & Gray(1978)가 유도한 해석적해와 각 모형의 수치결과와 비교하였다. 해석방법으로 영역내 특정점에 대한 해석해와 수치해의 변화추이와 전영역에 관한 L_2 정규오차의 비교를 통해 각 특성을 살펴보았다.

2. 유한요소 수동역학모형

2.1 기본방정식

수심적분된 2차원 천수방정식의 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial HU}{\partial x}+\frac{\partial HV}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}-fV$$

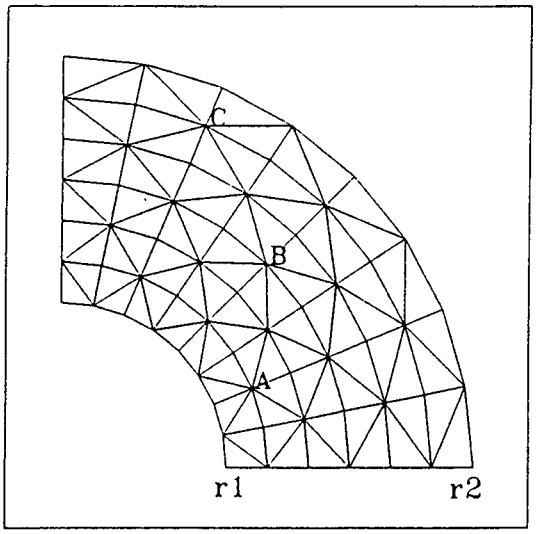

Fig. 1. Idealized quarter annular shape for model tests. r1, r2 are inner and outer circle radii respectively, in which r2 was treated as open boundary. The domain was discretized into 96 linear triangles with 63 nodes. Three points A,B and C are reference points in comparing numerical results with analytical solution. r1 is 60,960 m (2×105 ft) and r2 is 152,400 m (5×105 ft) with constant depth 9.144 m (30 ft). Tidal forcing was considered as harmonic function, $\zeta(m)=1.0\ \sin(2\pi/T_{M_2}t)$ along r2 regardless of θ.

$$+g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H}+\tau_* U=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}-fV$$

$$+g\frac{\partial \zeta}{\partial y}-\frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H}+\tau_* U=0 \tag{2}$$

여기서,

$\zeta(x, y, z)$는 평균해면으로부터 조위의 변위, $H(x, y, t)=h(x, y)+\zeta(x, y, t)$는 총수심으로 여기서 h 는 평균해면으로부터의 수심, $U(x, y, t)$, $V(x, y, t)$는 x, y방향으로의 수심평균된 유속, f는 Coriolis 계수, g는 중력가속도, ρ_o는 해수의 밀도, τ_{sx}, τ_{sy}는 x, y방향의 수표면마찰, 그리고 τ_*는 해저마찰을 표현한다.

2.2 해석적 해

윗식 (1)-(3)의 기본방정식에 대하여 제한된 특수한 경우의 해석적 해는 Lynch와 Gray (1978) 가 비선

형성을 무시한 선형의 방정식을 부분 환형의 영역과 직사각형의 영역에서 적용시켜 구했으며, 선형마찰의 영향과 해저의 수심변화도 고려하였다. 본 논문에서 비교의 대상으로 택한 경우는 Fig. 1과 같이 해저수심이 일정하고 환형인 경우로써 극 좌표계에서의 그 해는 다음과 같다.

$$\zeta(r, t)=Re\{[AJ_o(\beta r)+BY_o(\beta r)]e^{i\omega t}\} \quad (4)$$

$$V_r(r, t)=Re\left\{[-AJ_1(\beta r)-BY_1(\beta r)]\frac{iw}{\beta h}e^{i\omega t}\right\} \quad (5)$$

여기서, r은 원점으로부터의 거리, $\beta^2=(\omega^2-i\omega\tau)/gh$ 이고, τ는 τ_*의 선형화된 형태이며, $i=\sqrt{-1}$ $\omega=2\pi/T$이며, 계수 A, B는 식 (6), (7)과 같다.

$$A=\zeta_o Y_1(\beta r_1)/[J_o(\beta r_1)Y_1(\beta r_1)-J_1(\beta r_1)Y_o(\beta r_1)] \quad (6)$$

$$B=-\zeta_o J_1(\beta r_1)/[J_o(\beta r_1)Y_1(\beta r_1)-J_1(\beta r_1)Y_o(\beta r_1)] \quad (7)$$

여기서, ζ_o는 $r=r_2$인 환원의 외부원주인 개방경계에서의 조위이며, r_1은 환원의 내부원주 반경으로 고정경계이다.

2.3 시간진행모형

2.3.1 ADCIRC

시간진행모형인 ADCIRC는 일반화된 파동연속방정식을 기본방정식으로 이용하는데, 이는 Lynch와 Gray(1979)가 이용한 이래 Lynch와 Werner(1991), Westerink 등(1992)이 수정을 거쳐 이용하고 있다. 기본방정식의 연속방정식인 식 (1)을 시간에 대하여 미분하고, 운동량방정식을 공간에 대하여 각각 x, y 방향으로 미분한 후 원래의 연속방정식에 임의의 계수인 τ_o를 곱한 후 결합하면 다음과 같이 변형된 연속방정식인 generalized wave-continuity equation (GWCE)을 얻는다(Westerink *et al.*, 1992).

$$\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}+\tau_o\frac{\partial\zeta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{U\frac{\partial\zeta}{\partial t}-Uh\frac{\partial h}{\partial x}-Vh\frac{\partial U}{\partial y}+fVh-hg\frac{\partial\zeta}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}}{\rho_o}-(\tau_*-\tau_o)Uh\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{V\frac{\partial\zeta}{\partial t}-Uh\frac{\partial V}{\partial x}-Vh\frac{\partial V}{\partial y}-fUh-hg\frac{\partial\zeta}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}}{\rho_o}-(\tau_*-\tau_o)Vh\right\}=0 \quad (8)$$

ADCIRC는 이와 같이 파동연속방정식인 GWCE 식 (8)과 운동량방정식인 (2), (3)을 기본식으로 이용하고 있다. 유한요소의 방법으로 공간적인 이산과 보간에는 Galerkin의 가중방법이 이용되고, 시간의 이산화에는 음해법과 양해법이 공용된다. GWCE의 대부분의 선형항은 음해법에 의해 처리되고, 비선형항과 Coriolis, 조석, 강제함수 등은 양해법으로 처리되며, 운동량방정식은 음해법으로 Crank-Nicholson 방법에 의하여 적분된다.

2.3.2 STEPM

이 모형의 기본식은 천수방정식의 원형인 식 (1)-(3)을 이용한다. 시간적분의 방법으로는 Kawahara(1982)가 제안하였던 양해법의 하나인 2단계 Lax-Wendroff 방법을 적용하고, 집중질량의 개념을 도입하여 행렬의 계산이 필요치 않고 Galerkin의 가중잔차 방법을 이용한 모형이다. 서(1989a, b)는 Kawahara의 방법에 외해 개방경계의 처리를 고려한 모형을 발표하였다. 그러나 본 논문의 목적이 시간진행모형과 조화모형들의 상호 비교에 있으므로 개방경계에는 방사조건을 포함시키지 않았다.

2.4 조화모형

조화모형은 Lynch와 Werner(1987), Lynch 등(1992), Westerink 등(1984)과 같이 기본방정식에서 미지치인 조위와 유속이 식 (9)와 같이 주기적으로 변화된다고 가정하여 기본방정식에 포함된 시간미분항을 제거함으로써 시간진행모형들이 시간적분에 대부분의 노력을 쏟는 비경제성을 방지하기 위한 모형이다.

$$q(x_i, t)=Re[Q(x_i)e^{i\omega t}] \quad (9)$$

여기서 Q는 미지치 q의 복소수 진폭을 나타내며, ω는 frequency를 의미한다. i=1, 2로 직각좌표계의 방향을 나타내고, $j=\sqrt{-1}$이다.

검토되는 FUNDY나 TEA 모두 유한요소화 방법으로 Galerkin의 가중잔차방법을 이용하고 있다.

2.4.1 FUNDY

기본방정식의 항들중 비선형 항을 무시하고, 해저마찰도 선형적인 경우로 가정하여 식 (9)의 관계를 대입한 복소수를 이용한 연속식방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$j\omega\zeta+\frac{\partial hU}{\partial x}+\frac{\partial hV}{\partial y}=0 \tag{10}$$

$$j\omega U-fV+\frac{\tau_*}{h}U+g\frac{\partial\zeta}{\partial x}=0 \tag{11}$$

$$j\omega V+fU+\frac{\tau_*}{h}V+g\frac{\partial\zeta}{\partial y}=0 \tag{12}$$

2.4.2 TEA

이 모형 역시 앞의 FUNDY 와 같이 연속방정식의 비선형 진폭이 포함된 항을 $h/H=h/(h+\zeta)\approx 1$의 관계가 있다고 보고 선형으로 전개하였으나, 조위의 변동인 ζ를 전 해역에 걸쳐 일정하게 변위되는 ζ_0와 국부변위인 ζ_1의 합으로 즉, $\zeta(x, y, t)=\zeta_0(t)+\zeta_1(x, y, t)$의 관계로 취급한 점이 특이하고 할 수 있다.

이 관계를 적용한 기본방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$j\omega\zeta_1+j\omega\zeta_0+\frac{\partial hU}{\partial x}+\frac{\partial hV}{\partial y}=0 \tag{13}$$

$$j\omega U-fV+\frac{\tau_*}{h}U+g\frac{\partial\zeta_1}{\partial x}=0 \tag{14}$$

$$j\omega V+fU+\frac{\tau_*}{h}V+g\frac{\partial\zeta_1}{\partial y}=0 \tag{15}$$

상기 4개 모형들의 유한요소식의 구성 및 상세한 식의 전개는 본 논문에서는 지면상 생략한다. 관련 문헌을 참조하면 그 과정을 이해하기 용이하다.

3. 모형실험

2차원 모형의 정량적 평가 및 검증은 단순화된 형상의 영역에 대하여 해석적 해와 비교하는 것이 통상적으로 이용되는 방법이다. 단순화 형상인 1차원 직사각형의 영역에서 선형의 마찰이 포함되는 경우 해석적으로 해를 알 수 있는 경우로 Ippen(1966)의 결과와 비교 검토한 Connor와 Wang(1973), 서(1989a, b), 등의 연구가 있으나 이 경우는 완전한 2차원의 운동을 묘사하지 못한 단점이 있었다.

그러나 본 연구에서는 전술한 4개의 수치모형을 비교 평가하기 위하여 Lynch와 Gray(1978)가 해석적 해를 구한 2차원 형상을 갖는 Fig. 1과 같은 4분환원의 영역에 대하여 적용하였다. 이와 같은 형상의 영역에 대한 비교 평가는 시간진행모형의 평가에 이용되기도 하고(Lynch와 Gray, 1979; Westerink 등, 1992), 조화모형의 평가에도(Lynch와 Werner, 1987) 광범위하게 이용되었다.

모형의 실험은 먼저 Fig. 1에 보이는 3개의 관측점에서 계산된 조위와 유속을 해석적 방법에 의하여 구한 값과 비교하고, 4분환원의 중심으로부터 $\theta=\pi/4$의 방사선상에 있는 절점에서의 최대조위의 비교 그리고 전영역의 계산된 값과 정확해와의 L_2 정규오차를 측정하여 비교함으로써 각 모형의 특성을 파악하였다.

대상영역은 모두 96개의 선형 삼각형 요소와 63개의 절점으로 분할되었다. 4분환원의 내원의 반지름 r_1은 6,0960m(2×10^5 ft) 그리고 외원의 반지름 r_2는 152,400m(5×10^5 ft)이다. 수심은 전영역에 일정한 9.144m(30 ft)로 하였다.

외해 개방경계인 r_2에서 강제함수로 부여되는 조석은 $\zeta(m)=1.0\ \sin(2\pi/T_{M_2}t)$와 같이 M_2조로써 진폭 1m인 조화함수로 주었다.

적용된 조건은 시간진행모형을 이용한 경우 초기조건은 조위와 유속이 모두 0인 cold start의 조건이고, 시간 적분간격은 CFL의 조건에 알맞는 873.25초이다. Coriolis 영향은 고려하지 않았다. 바닥의 마찰을 고려하는 선형마찰계수는 0.0의 값을 적용하였다. 이유는 바닥마찰을 고려하는 경우 에너지 감소로 마찰이 없는 경우보다도 그 비교의 감도가 둔화되기 때문이다.

특정점 A, B, C에서 각 모형의 시간에 따른 변화추이를 살펴보기 위하여 조위와 유속에 대한 시간변화를 Fig. 2(a)-(c) 에 도시하였는데 여기에는 해석적 해, ADCIRC, STEPM, FUNDY 그리고 TEA의 결과가 포함되었다. 시간진행모형의 결과는 초기조건의 영향이 잔존하는 4주기까지를 제한 값으로 준정상상태(quasi-steady state)에 도달된 이후 2주기간의 변화를 도시하였다. 해석적인 해와 비교할 때 시간진행 결과는 대체로 만족스럽고, 조화모형결과는 해석해와 잘 일치하는 만족스러운 결과를 나타내고 있다. 예견된 바와 같이 내측의 고정경계에 가까울 수록 조위는 증폭되고 유속은 둔화되며(관측점 A), 개방경계에 가까울 수록(관측점 C) 이와 반대되는 양상을 보인다.

시간진행모형에서 조위가 다소 상향으로 전이되어 있음을 알 수 있고 STEPM 이 ADCIRC에 비하여 그 양상이 다소 더하다. 조화 모형인 FUNDY, TEA는 모형정립시 내재되어 있는 조화성격이 아주 잘 반영

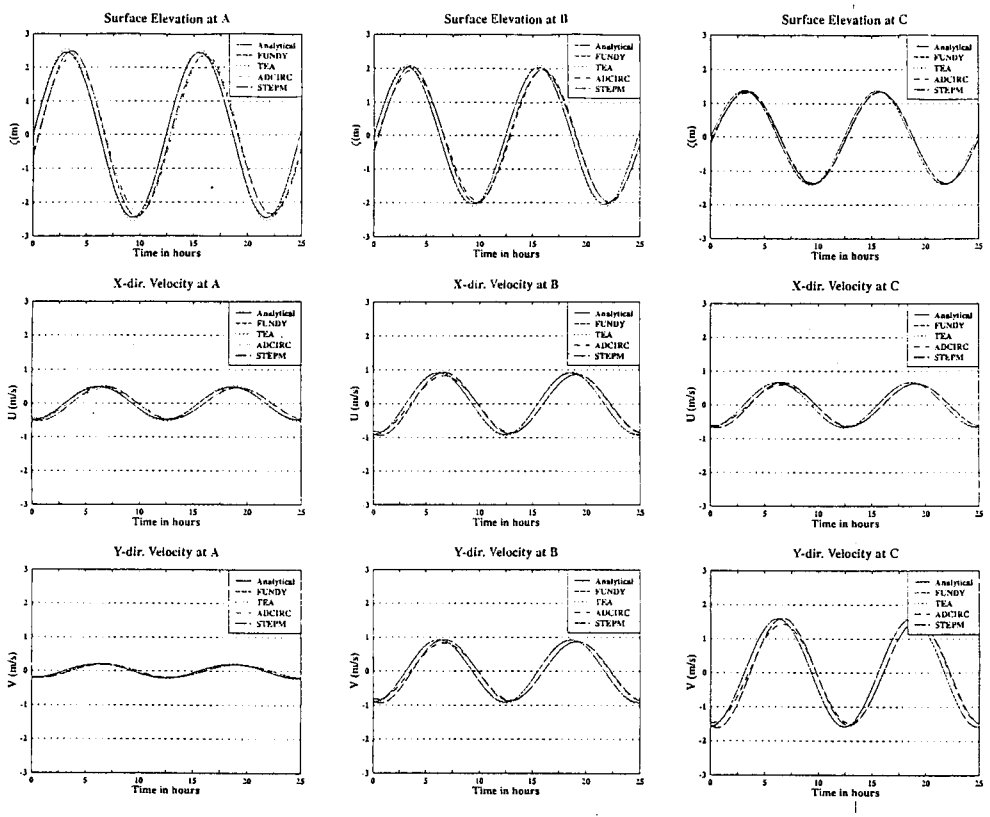

Fig. 2. Time history plots of surface elevation variation and x and y directional velocities for three reference points (a) A, (b) B and (c) C as shown in Figure 1.

되고 있다. 특히 FUNDY는 정확해와 거의 일치되는 결과를 보이나 TEA는 미미하게 증폭된 결과를 보인다. 그러나 시간진행모형인 STEPM 이나 ADCIRC는 모두 phase lag가 발생되어 조화모형에 비하여 정확도가 결여됨을 알 수 있다.

위의 조위와 유속에 대한 time history 의 결과에서 잘 파악할 수 없었던 각 모형의 특성을 보다 잘 비교하기 위하여 특정점에 대하여 고조시 조위의 최대치를 검토하였다. Fig. 3에는 이에 관한 것이 도시되고 있는데 이 결과는 4분환원의 중심으로부터 $\theta=\pi/4$되는 방사상의 절점에서의 조위이다. 그림에서 보듯이 조화모형인 FUNDY는 정확해와 거의 일치되는 결과를 보이나 TEA 는 내만 고정경계 지점에서의 증폭된 결과로 변위가 있는 것을 알 수 있다.

역시 시간진행모형은 오차를 수반하며 STEPM은 조위의 진폭이 다소 증가된 결과를 ADCIRC는 감소된 결과를 보이고 있다. 앞서의 검토와 같이 불필요한 phase lag가 기여하기 때문인 것으로 여겨진다.

그러나 앞서의 두 가지 특정점에 관한 결과는 전체 계산영역의 극히 일부분에서의 비교된 값으로서 전반적인 비교는 곤란한 점이 있다. 따라서 전체영역에 대하여 보다 포괄적인 비교 방법이 모색되어야 한다. 이러한 목적을 충족시키기 위하여 계산치와 해석해와의 오차를 가늠할 수 있는 L_2 정규오차를 다음과 같이 정의하여 비교의 수단으로 이용하였다.

$$\|e\|_{L_2}=\left\{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[(U_i^n-U_i^a)^2+(V_i^n-V_i^a)^2+(\zeta_i^n-\zeta_i^a)^2\right]}{\sum_{i=1}^{N}(h_i)^2}\right\}^{1/2} \quad (16)$$

여기서, N은 총절점의 수이고, 위첨자 n은 수치해를 a는 해석해를 의미한다. 윗식으로 표현되는 L_2 정규오차는 초기수심으로 정규화 되었다. 그런데 식에는 기본적으로 물리량이 다른 조위와 유속이 함께 오차의

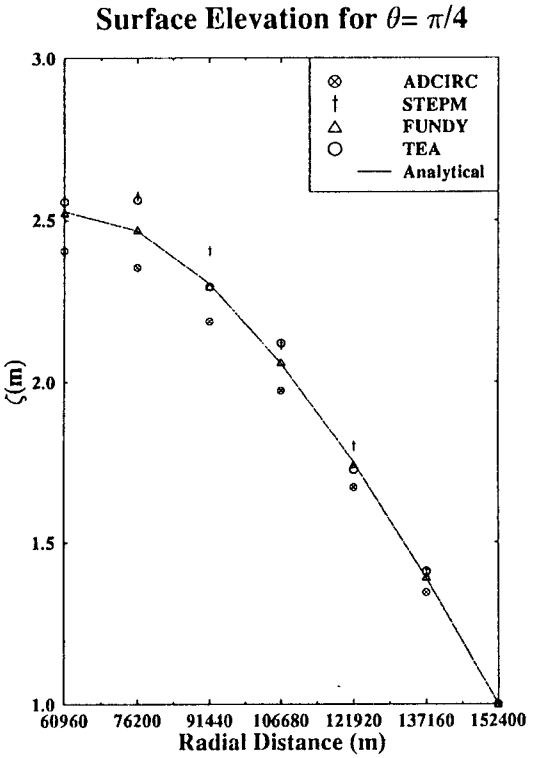

Fig. 3. Tidal elevations on radial nodes along the central line, θ=π/4 at high tide.

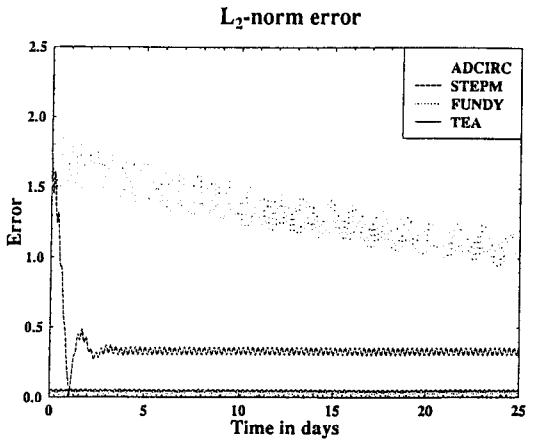

Fig. 4. L_2 norm error for entire domain.

계측에 이용되는데 그 크기의 정도(order of magnitude)가 거의 같다면 공히 이용할 수 있겠다. 조위와 유속은 앞에서 검토한 특정점의 비교에서 보듯이 0에서 ±2.5 정도까지로 그 크기의 정도가 거의 같으므로 식 (16)의 L_2 정규오차가 각 모형들의 오차 계측수단으로 이용될 수 있다. 이러한 L_2 정규오차는 Garcia와 Kahawita(1986) 그리고 서(1989a, b)가 모형의 검증으로 이용한 바 있다.

L_2 정규오차를 계측하기 위해 각 모형을 이용한 계산은 25일 이상으로 하였다. Fig. 4에 그 결과가 도시되었다. 조화모형은 전영역에 걸친 오차의 크기가 미미하고 거의 일정하나, 시간진행모형은 초기조건의 영향을 받아 계산시작 시점에는 상당한 오차가 있었고 그 영향은 시간이 진행함에 따라 감소된다. STEPM은 초기조건의 영향이 계산 시작후 급속히 소멸되어 약 4주기인 2일 이후이면 거의 일정한 준정상상태를 보이나 ADCIRC는 완만히 감소되고 계산 시작후 25일이 경과되어도 수치결과의 상당부분은 초기조건의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 시간진행모형들의 L_2 정규오차는 앞서 검토한 바와 같이 phase lag가 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결과의 고찰 및 토의

연안 수동역학 해석에 응용되는 2차원 유한요소 모형중 시간진행모형과 조화모형에 관한 4개의 모형을 수치실험한 결과, 장기간의 주기적 변화에 응용력이 높은 조화모형은 정확해와 잘 일치하고 있으며, 단기간의 급변적 모의에 보다 유용한 시간진행모형은 이 보다는 정도가 덜하지만 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 계량하여 표현하면 L_2 정규오차 비교에서 각 오차의 크기는 ADCIRC가 1.60 내외, STEPM이 0.32, TEA가 0.05 그리고 FUNDY가 0.04 정도를 나타내었다.

이처럼 시간진행모형의 정도가 조화모형보다 덜한 것은 모형의 기본방정식중 연속방정식에 포함되는 비선형의 유한진폭항 처리 때문인 것으로 판단되고, 또한 시간적분이 필요한 시간진행모형의 초기조건으로 부여된 cold start의 영향이 연속되는 계산에 영향을 미쳐 조위와 유속에 phase lag를 발생시킴으로써 지대한 영향을 미치는 것으로 인식되었다. 특히 ADCIRC가 STEPM에 비하여 더욱 좋지 않은 결과를 보이고 있는 것은 파동연속방정식으로 기본방정식을 변환할 때 적용하는 가중인자 τ_0의 값의 적절한 선택이 이루어지지 않은 것도 이유중의 하나인 것으로 판단되며, 이에 대해서는 계속되는 연구가 있어야 될 것이다.

STEPM은 계산시점부터 최소 4주기간 경과되면 초기조건의 영향이 소멸되고, 조화유한요소 모형인 FUNDY, TEA가 선형의 기본식을 이용하는데 반하여 비선형의 천수방정식을 이용하고 있으므로 실제의 연안 해역에서의 수동역학 해석에는 STEPM이 가장 적합한 것으로 생각된다. 다만 주기적으로 그 변화가 일정한 경우의 수동역학 모의에는 FUNDY 및 TEA가 이용되어져 장기간의 특성을 효율적으로 예측할 수 있을 것이다.

본 연구는 각 모형의 특성파악에 국한하여 해석적으로 해를 구할 수 있는 특정적인 4분환원의 형상에 관하여 수치실험을 실시하였으나 향후에는 비선형성을 표현할 수 있는 형상에서 실제의 관측치와의 비교연구를 통한 점진적인 노력이 필요하다. 그리고 시간진행모형을 이용하는 경우에는 개방경계에서의 방사조건처리와 초기조건의 적절한 처리를 통하여 해의 신뢰성을 높이는 연구도 병행되어야 할 것이다.

5. 결 론

현재 국내외에서 불규칙한 연안의 수동역학해석에 폭넓게 이용되는 2차원의 모형들중 시간진행모형과 조화모형의 4개의 모형을 해석해를 구할 수 있는 4분환원의 형상에서 정량적으로 평가한 결과를 간추리면 다음과 같다.

모형의 검토에 이용된 시간진행모형은 일반화된 파동연속방정식을 이용한 ADCIRC, 2단계 Lax-Wendroff 방법을 이용한 STEPM이며, 조화모형은 FUNDY와 TEA인데 상호의 정량적 평가를 위해 비선형성을 무시하고 선형적인 경우만을 고려하였다. 조화모형이 시간진행모형에 비하여 정도가 우수하고 시간적분이 필요하지 않아 계산의 효율 또한 우수한 것으로 나타났다. 그러나 시간진행모형은 초기조건의 영향과 기본식내에 내재된 비선형항 및 개방경계의 방사조건 미고려 등으로 조화모형에 비하여 정도가 떨어지는 것으로 나타났다. L_2 정규오차를 이용한 계량적 평가에서는 조화모형이 비슷한 정도를 보이고, 시간진행모형인 STEPM은 조화모형에 비하여 약 7배, ADCIRC는 STEPM에 비하여 5배 가량 정도가 떨어지는 것으로 연구되었다. 이와 같이 원하지 않은 phase lag에 기인되어 나타난 오차를 최소화시킴으로써 더욱 만족스러운 결과를 얻을 수 있으므로 향후에는 개방경계의 처리 및 초기조건의 영향을 면밀히 살피는 연구가 수행되어야 할 것이다.

결론적으로 장기간의 주기적 변화를 모의하는 데는 FUNDY, TEA가 모두 만족스럽게 이용될 수 있을 것이나, 급변적인 변화를 모의하고 비선형을 포함한 일반적인 연안의 수동역학 해석에는 STEPM이 ADCIRC에 비하여 보다 만족스러운 결과를 제공할 수 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 92년도 전반기 해외 Post-Doc 지원에 의해 MIT 토목 환경공학과에서 연구하였던 결과의 일부이며, 지원하여 주신 재단에 심심한 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

서승원 등, 1989a. 방사효과를 고려한 개방경계조건, 대한토목학회논문집, **9**(2): 63-71.

서승원, 윤태훈, 1989b. 오차해석에 의한 해양방사경계조건 비교, 한국수문학회지, **22**(3): 315-322.

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.

Connor, J.J. and Wang, J.D., 1973. Mathmatical models of the Massachusetts Bay: Part I. Finite element modeling of two-dimensional hydrodynamic circulation. Rep No. 172, MIT, pp 57.

Garcia, R. and Kahawita, R.A., 1986. Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite difference scheme. *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, **6**: 259-274.

Ippen, A.T., 1966. Tidal dynamics in estuaries, Part I: Estuaries of rectangular section, Ch. 10 of *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. A.T. Ippen, ed., Mcgraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y.

Kawahara, M., 1978. Periodic Galerkin finite element method of tidal flow. *Int. J. for Num. Methods in Engrg.*, **12**: 853-871.

Kawahara, M. *et al.*, 1982. Selective lumping finite element methods for shallow water flow. *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, **2**: 89-112.

Luettich R.A., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W., 1991. ADCIRC: An advanced three dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries, report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Coastal Engrg. Res. Ctr., U.S. Army Engrs. Wtrways. Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Lynch, D.R., 1990. Three-dimensional diagnostic model for baroclinic, wind-driven and tidal circulation in shal-

low seas. Numerical methods lab., Dartmouse College, pp23.

Lynch, D.R. and Gray, W.G., 1978. Analytic solutions for computer flow model testing. *J. of Hyd. Div., ASCE,* **104**(10): 1409-1428.

Lynch, D.R. and Gray, W.G., 1979. A wave equation model for finite element tidal computations. *Computers and Fluids,* **7**: 207-228.

Lynch, D.R. and Werner, F.E., 1987. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part I: Linearized harmonic model. *Int. J. for Num. Methods in Fluids,* **7**: 871-909.

Lynch, D.R. and Werner, F.E., 1991. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II: Non-linear time-stepping model. *Int. J. for Num. Methods in Fluids,* **12**: 507-533.

Lynch, D.R., Werner, F.E., Greenberg, D.A. and Loder, J.W., 1992. Diagnostic model for baroclinic, wind-driven and tidal circultion in shallow seas. *Continental Shelf Research,* **12**: 37-64.

Westerink, J.J. *et al.*, 1984. TEA: A linear frequency domain finite element model for tidal embayment analysis. Energy Laboratory Report 84-012, MIT, pp143.

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 storm surge predictions using finite element model. *J. of Hyd. Engrg., ASCE* **118**(10): 1373-1390.