

## 병렬 유한요소 모형에 의한 황해의 조석산정 Tidal Computations for the Yellow Sea by Parallel Finite Element Advanced Circulation Model

최병호<sup>1</sup> · 변상신<sup>2</sup> · 김경옥<sup>3</sup>

Byung Ho Choi<sup>1</sup>, Sang Sin Byun<sup>2</sup>, and Kyeong Ok Kim<sup>3</sup>

### 1. 서 론

황해의 경기만 해역은 수많은 섬들이 산재하여 서해의 다도해를 이루고 있고, 임해공업단지 조성등에 의한 연안 매립 및 간척 사업으로 인해 해안선의 변화가 심화되고 있어 이 해역의 해양환경에 대한 체계적인 연구가 절실히 요구되고 있다. 또한, 대륙붕해역의 주요한 특성 중에서 조석현상이 가장 뚜렷한 해양외력으로 작용하는 황해는 황해남부 연안의 목포항에서의 조차는 3m, 서한만의 압록강 입구에서는 6m, 경기만의 인천항 부근에서는 최대 8m의 대조차를 보인다. 또한 중국과의 인적, 물적교류의 활로인 주요 항구와 군사전략상 중요한 시설들이 분포하고 있어 황해의 해양공학적, 환경공학적, 경제적 및 전략적인 관심이 점차 고조되고 있다.

본 연구에서는 이러한 황해의 복잡한 해안선을 잘 해상시킬 수 있는 고해상도의 유한요소 모형을 이용하여 경기만을 상세격자체계로 구성하고 MPI Library를 이용한 Beowulf Clustering 체계를 이용하여 신속한 계산을 수행하여 조석 현상을 파악하고자 한다.

### 2. 모형의 개요

Parallel. ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters(PADCIRC)는 North Carolina 대학의 Luettich 와 Westerink 가 개발한 모형으로, 수심 적분된 2차원 모형(2DDI)와 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있는데, 본 모형에서는 2차원 모형(2DDI)을 이용하여 결과를 산정하였다. ADCIRC 에 대해서는 많은 발표문헌과 Website 의 Manual 에 상세히 소개되어 있으므로 재술치 않기로 하는데, 근년에 미공병단과 해군연구소에서 활발히 활용하고 있다.

본 연구는 김(2000)이 수립한 조격자체계의 황해 FEM 모형에 경기만해역의 상세 유한요소체계를 결합시킨 국지 고해상도 황해 조석모형으로 유한차분 격자체계에서의 격자간 동적 연결기법을 취하는 접근과 더불어서 향후 이용될 계획이다. 국지적으로 상세한 유한요소체계와 황해의 전반적인 넓은 유한요소 체계와의 결합은 Femeditor(김,2000)를 이용하여 요소의 최적화시킨 재배열이 이루어지며, 모형입력을 전처리시킨다.

#### 2.1 지배방정식

ADCIRC 의 2DDI 버전의 구면격자체계 지배 방정식은 다음과 같다.

<sup>1</sup> 성균관대학교 토목환경 공학과 교수 (Ocean Environmental Engineering Laboratory, Chunchun-Dong 300, Jangan-Ku, Suwon, 440-746, Korea)

<sup>2</sup> 성균관대학교·한국해양연구원 학연 석사과정 (Ocean Environmental Engineering Laboratory, Chunchun-Dong 300, Jangan-Ku, Suwon, 440-746, Korea)

<sup>3</sup> 성균관대학교·한국해양연구원 학연 석사수료 (Ocean Environmental Engineering Laboratory, Chunchun-Dong 300, Jangan-Ku, Suwon, 440-746, Korea)

연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \quad (1)$$

운동방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{x\lambda}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx\lambda}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = -\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{y\phi}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by\phi}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (3)$$

여기서,

$(\eta + \gamma)$ : 기조력, 지구조석, 자기인력, 하중조석  
 $\zeta(x, y, t \text{ or } \lambda, \phi, t)$ : 지오이드에 따른 자유수면 변위

$\lambda, \phi$ : 경도, 위도

$\lambda_0, \phi_0$ : CPP 지도투영법의 기준 경도, 위도

$\rho_0$ : 기준유체 밀도

$\tau_0(x, y \text{ or } \lambda, \phi)$ : 원시연속방정식과 GWCE에 의한 운동방정식에 사용되는 가중치

$\tau_{bx}, \tau_{by}, \tau_{sx}, \tau_{sy}$ : 바닥과 자유수면의 응력

$B_x, B_y$ : 2DDI 경압가속항

$D_x, D_y$ : 2DDI 운동량확산항

$f = 2\Omega \sin \phi$ : Coriolis 인자

$H(x, y, t \text{ or } \lambda, \phi, t) \equiv h + \zeta$ : 지오이드에 따른 수심

$p_s$ : 자유수면의 대기압

$Q_x, Q_y \equiv UH, VH$ : 단위폭당 Flux의 체적

$R$ : 지구반지름

$S \equiv \cos \phi_0 / \cos \phi$ : CPP 변환에 이용되는 Scale 인자

$U, V(x, y, t \text{ or } \lambda, \phi, t)$ : 2DDI 수평유속

을 의미한다. 수위는 2차원의 경우 일반화된 파랑 연속방정식(Generalized Wave Continuity Equation)형태로 수심평균된 연속방정식에서 구하면 유속은 운동량 방정식으로부터 산정된다. GWC는 lumped mass matrix 형태의 완전 양해적으로 해를 구했는데 ITPACKV2D Package의 Solver를 이용해 RAM 사용용량을 줄이는 방법도 있다.

## 2.2 모형의 격자체계

김(2000)이 수립한 황해의 조격자체계는 절점 38090 개, 요소 72733 개로 구성되어 있으며, 경기만을 상세화시킨 본 모형에 사용된 격자는 총 절점 66399 개, 요소 126210 개로 구성되어 있다. 모형에 사용된 황해의 격자체계중 경기만의 절점 및 요소의 수는 각각 약 3만 개 및 7만 개로써 전체 격자수의 50%를 차지하며, 최소절점간 거리는 10초의 해상도를 갖도록 구성되었으며, 큰 조차를 보이는 인천항과 아산만 부근의 해안선 및 섬의 분포를 세밀하게 처리하였다.

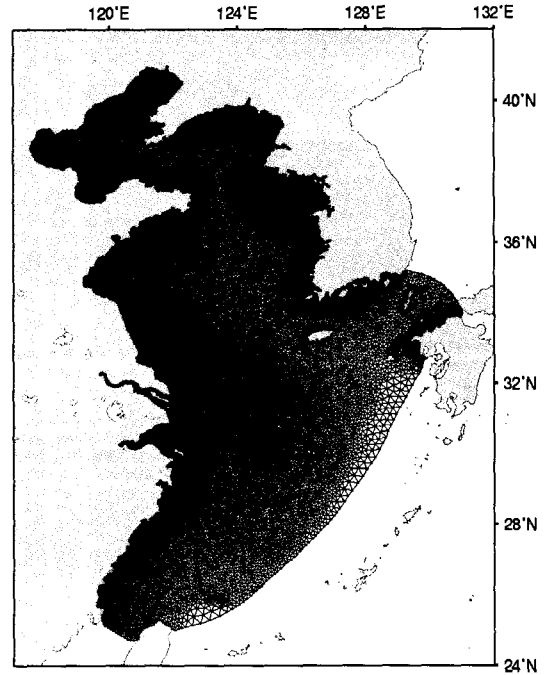


Figure 1. Grid System for Yellow Sea.

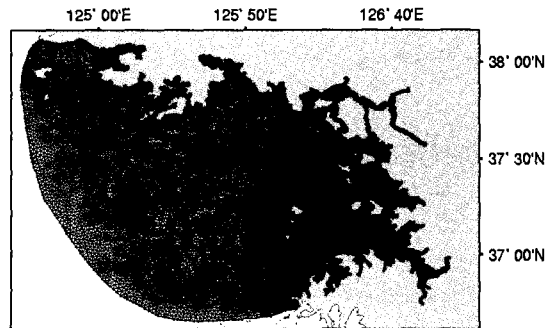


Figure 2. Grid system for Kyunggi Bay.

### 2.3 성균관대의 Beowulf 체계

성균관대학 해안·해양역학실험실에서 설치한 Beowulf 체계는 ATX mainboard P6VXA 133MHZ 에 Intel Pentium-III 1GHZ, Samsung SRAM 768M, Hard Disk 는 Western Digital 60GB, Network Card 는 3com EtherLink 10/100 PCI 3095 XP 를 설치한 8 세트의 PC 를 fast-ethernet 으로 clustering 시켜 구성하였다.

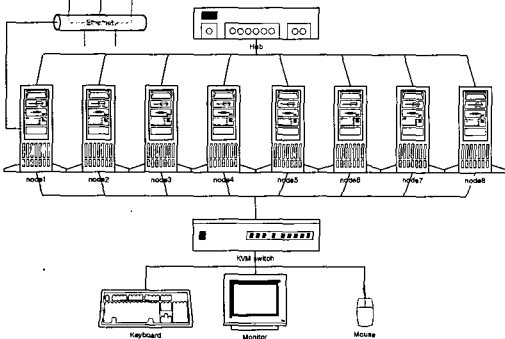


Figure 3. Beowulf System in Sungkwunkwan University.

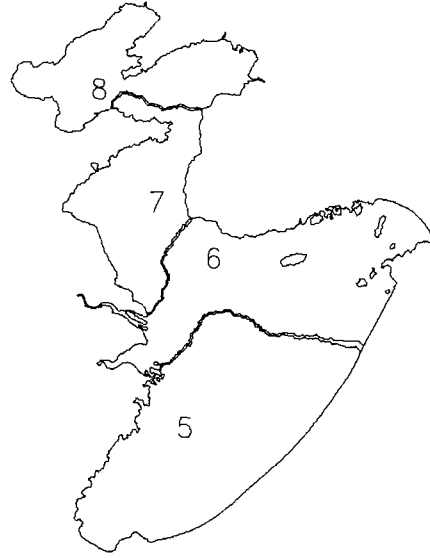
## 3. 모형 결과

### 3.1 모형의 산정

8개의 CPU로 구성된 Beowulf 시스템을 이용하여 병렬산정시 모형의 계산시간은  $S_2$  분조기준 계산 시간간격을 15초로 하고, 20주기를 산정할 경우 2시간이 소요되었다. 또한 모형산정결과 전반적인 조석도의 형태는 기존의 연구결과와 잘 일치하였으며, 인천항의 분조별 진폭은  $M_2$  분조 300cm,  $S_2$  분조 136cm,  $K_1$  분조 33cm,  $O_1$  분조 33.7cm로 관측치와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다.



a) Zones Separated by Cpu Number 1~4.



b) Zones Separated by Cpu Number 5~8.

Figure 4. Domain decomposition by Metis (Grid Partition Method) for the modeled region.

### 3.2 분조별 조석도

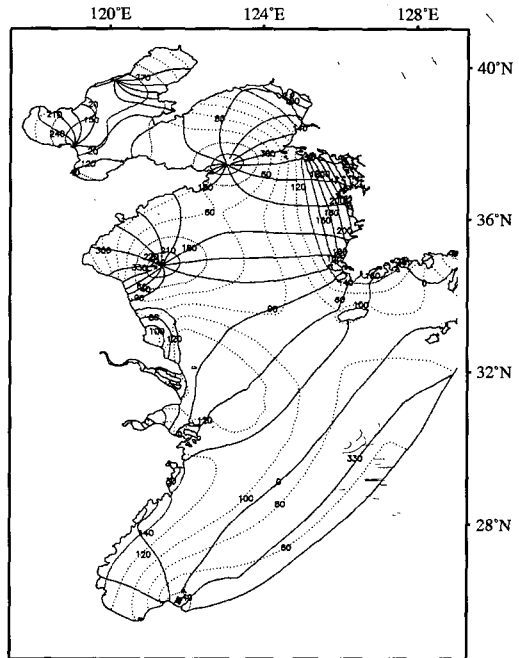


Figure 5. Computed Tidal Chart for the  $M_2$  Tide.

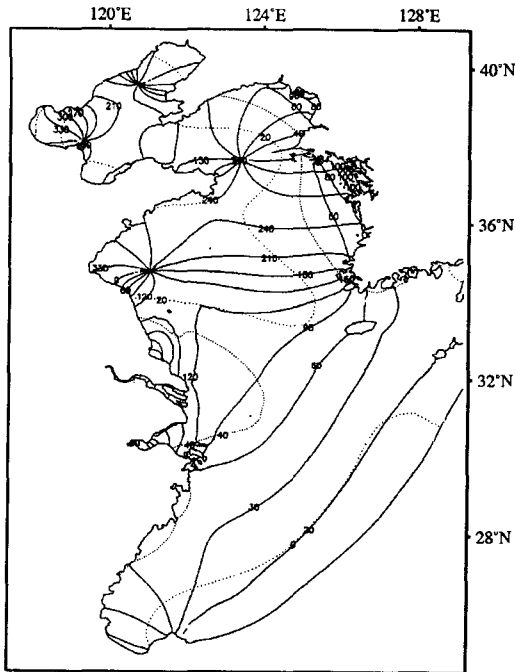


Figure 6. Computed Tidal Chart for the  $S_2$  Tide.

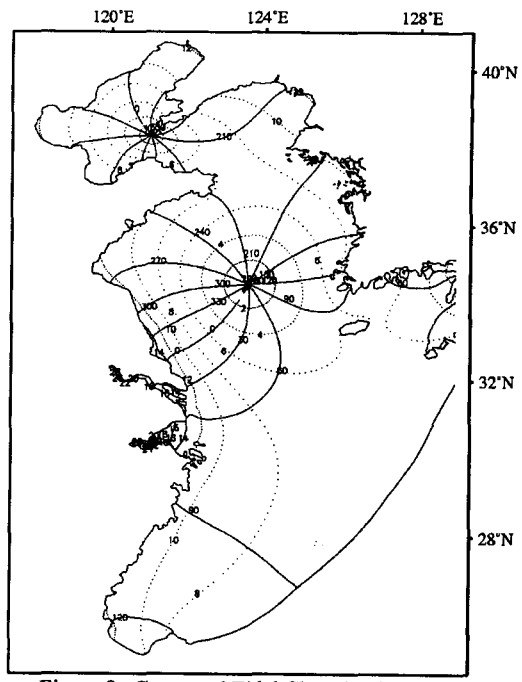


Figure 8. Computed Tidal Chart for the  $O_1$  Tide.

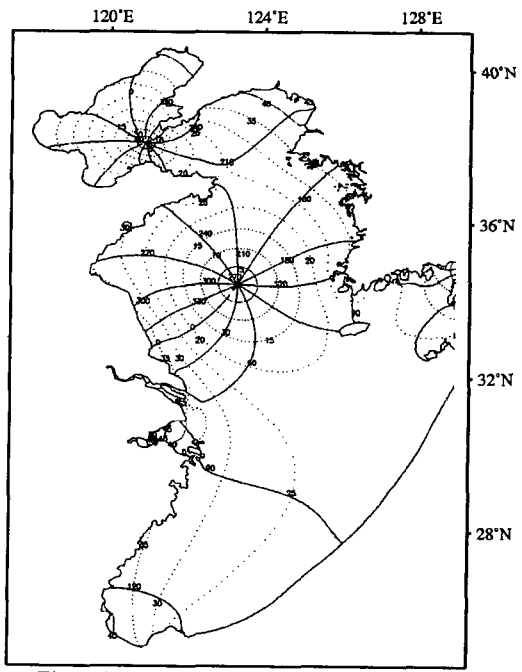


Figure 7. Computed Tidal Chart for the  $K_1$  Tide.

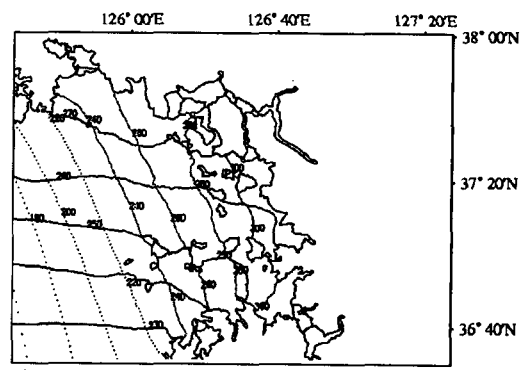


Figure 9. Computed Tidal Chart for  $M_2$  Tide in Kyunggi Bay.

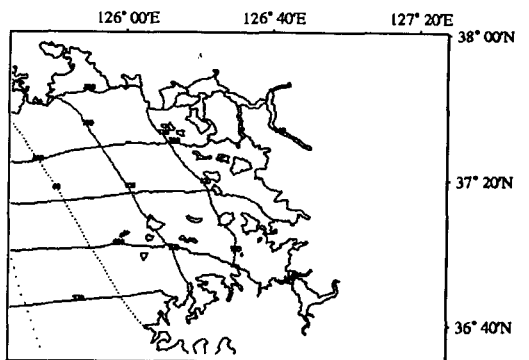


Figure 10. Computed Tidal Chart for the  $S_2$  Tide in Kyunggi Bay.

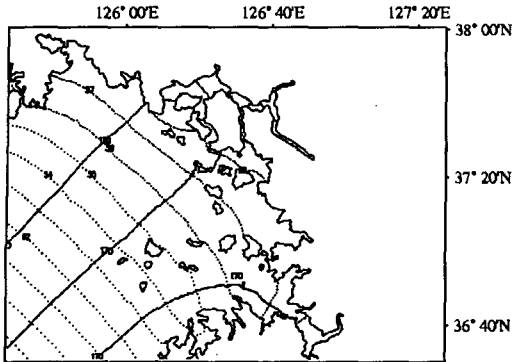


Figure 11. Computed Tidal Chart for  $K_1$  Tide in Kyunggi Bay.

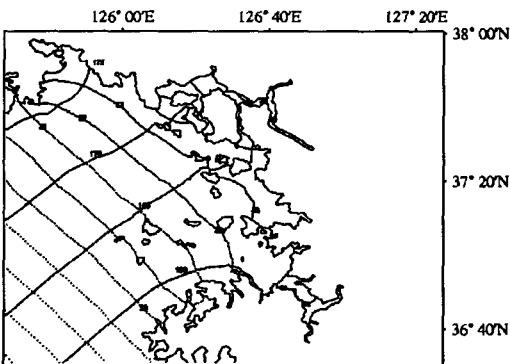


Figure 12. Computed Tidal Chart for  $O_1$  Tide in Kyunggi Bay.

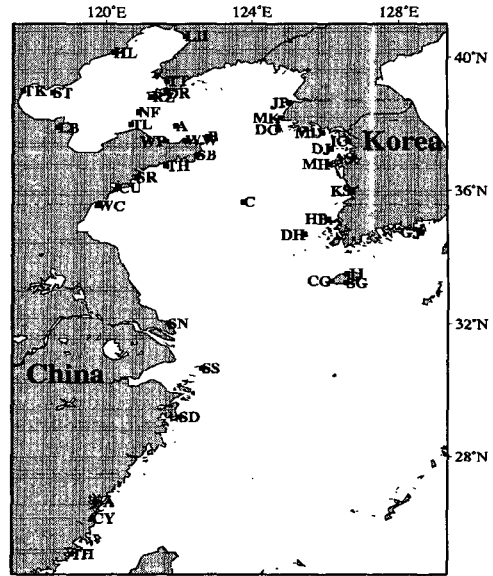
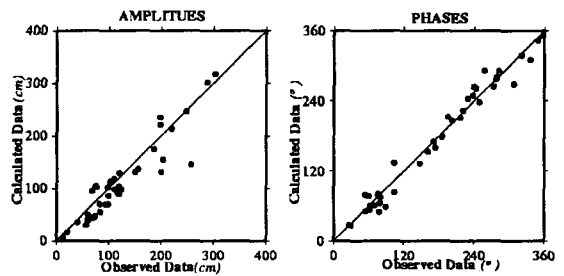
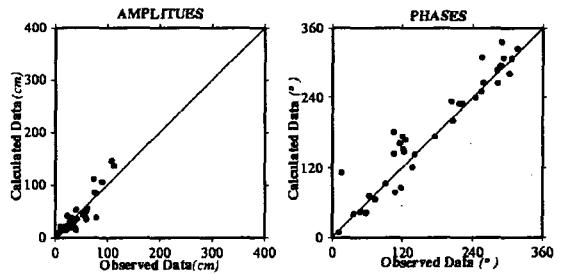


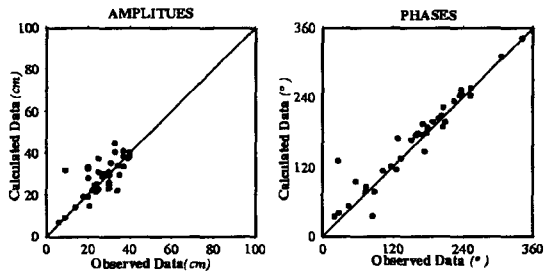
Figure 13. Tidal Observation Point in the Yellow sea.



a)  $M_2$  Tide



b)  $S_2$  Tide



c)  $K_1$  Tide

### 3.3 조위 관측치와 계산치의 비교 결과

관측치와 계산치의 비교결과 황해전체의 진폭은 10cm 이내, 위상 10% 이내로 잘 일치하였으며, 경기만의 주요 5개지점의 관측치와 비교결과 진폭은 잘 일치하는 반면 위상이 다소 크게 산정되었는데 그 원인은 개방경계에서의 입력값의 부정확성 및 2차원 모형의 근본적인 문제인 해저마찰계수를 수심평균 유속과 관련짓는 데서 기인하는 것으로 1차 판단된다. 평균자승오차(RMS)를 이용한 주요분조의 비교결과는 Fig 4에 제시하였으며, 이용된 RMS식은 식 (4)와 같다.

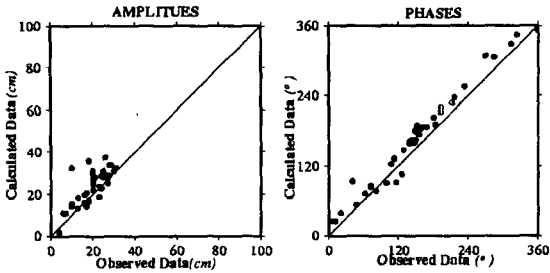
$$\sqrt{\frac{\sum (H_o - H_c)^2 / N_s}{\sum (G_o - G_c)^2 / N_s}} \quad (4)$$

$H_o, G_o$  : 계산치의 진폭과 위상

$H_c, G_c$  : 관측치의 진폭(H)과 위상(G)

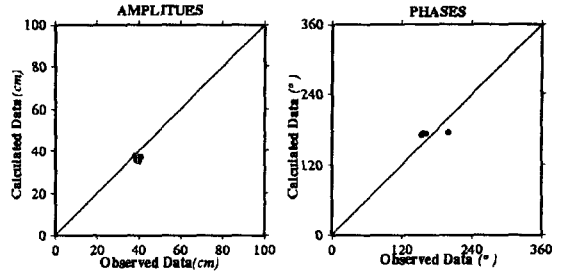
Table 1. Error Table by RMS(Root Mean Square).

비 고	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
Amplitude(cm)	14.3	21.0	3.5	4.7
Phase( $^{\circ}$ )	29.4	29.5	17.7	36.3



d) O<sub>1</sub> Tide

Figure 14. Comparison between Observation data and Calculation data in the Yellow Sea.



c) K<sub>1</sub> Tide

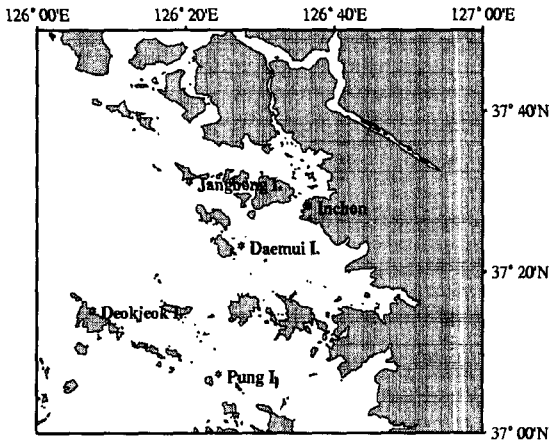
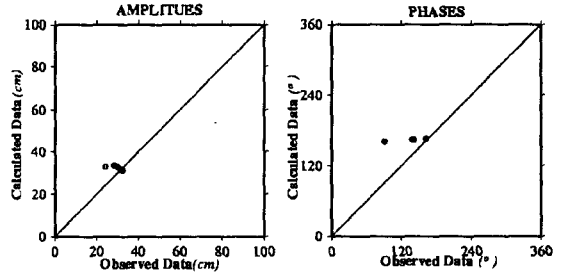


Figure 15. Tidal Observation Point in Kyunggi Bay.

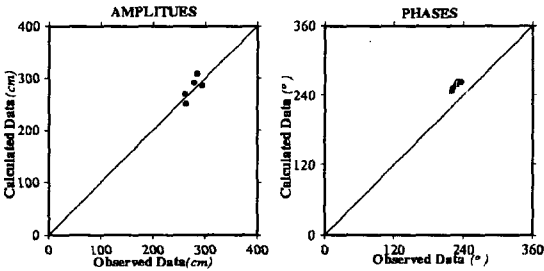


d) O<sub>1</sub> Tide

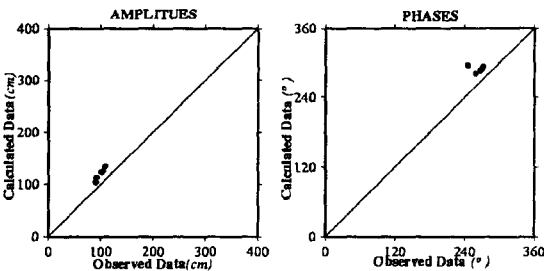
Figure 16. Comparison between Observation data and Calculation data in Kyunggi Bay.

### 3.4 조류 관측치와 계산치의 비교 결과

주요 4 개분조에 대하여 황해의 심부 특정 4 개 정점에서 관측된 조류와 모형결과를 비교하였다. 관측점의 위치는 Table 2 와 같다.



a) M<sub>2</sub> Tide



b) S<sub>2</sub> Tide

Table 2. Observation Point for Tidal Currents.

비교지점	관측점 위치
A	124° 05.0' E, 36° 56.9' N
B	124° 34.9' E, 36° 00.1' N
C	124° 44.3' E, 35° 13.8' N
D	124° 41.5' E, 34° 18.1' N

Table 3. Comparison between Observation data and Calculation data for  $M_2$  Tidal Currents.

관측점	$M_2$ 분조							
	U Component				V Component			
	Amp(cm)		Phs(°)		Amp(cm)		Phs(°)	
	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.
A	18.60	19.34	125.14	140.42	32.80	27.63	267.14	260.69
B	15.20	18.19	131.14	134.46	26.10	30.31	183.14	172.63
C	5.00	11.20	127.14	142.45	40.00	46.09	139.14	136.17
D	13.4	14.99	232.14	239.53	43.80	49.03	119.14	114.67
RMS	3.55		11.54		4.41		6.72	

Table 4. Comparison between Observation data and Calculation data for  $S_2$  Tidal Currents.

관측점	$S_2$ 분조							
	U Component				V Component			
	Amp(cm)		Phs(°)		Amp(cm)		Phs(°)	
	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.
A	7.90	8.76	184.00	189.26	12.20	6.17	312.0	318.36
B	7.60	7.91	190.00	181.2	12.20	9.74	224.0	196.26
C	2.70	5.28	201.00	190.21	19.60	15.86	182.0	166.78
D	7.10	5.89	275.00	254.85	18.40	16.34	165.0	147.63
RMS	1.49		12.52		1.81		18.32	

Table 5. Comparison between Observation data and Calculation data for  $K_1$  Tidal Currents.

관측점	$K_1$ 분조							
	U Component				V Component			
	Amp(cm)		Phs(°)		Amp(cm)		Phs(°)	
	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.
A	2.40	2.34	30.63	27.67	5.90	6.41	158.63	130.76
B	1.50	2.37	105.63	31.31	8.80	8.39	142.63	125.58
C	2.40	1.89	12.63	25.54	10.40	10.08	137.63	123.09
D	2.40	2.77	12.63	29.28	10.40	9.61	137.63	129.49
RMS	0.53		38.62		0.66		18.3	

Table 6. Comparison between Observation data and Calculation data for  $O_1$  Tidal Currents.

관측점	$Q$ 분조							
	U Component				V Component			
	Amp(cm)		Phs( $^{\circ}$ )		Amp(cm)		Phs( $^{\circ}$ )	
	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.
A	1.40	1.78	358.51	342.69	3.90	3.82	133.51	129.2
B	0.90	1.74	64.51	3.8	5.90	6.41	108.51	114.16
C	2.40	1.45	309.51	338.87	7.30	8.64	106.51	109.71
D	2.70	3.52	297.51	295.06	8.40	9.16	102.51	116.07
RMS	0.77		34.65		0.86		7.82	

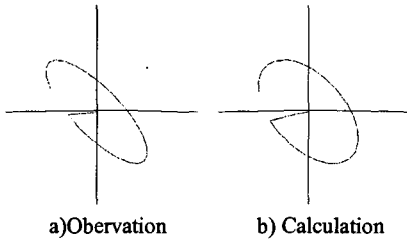


Figure 17.  $M_2$  Tidal Ellipses on the Point A.

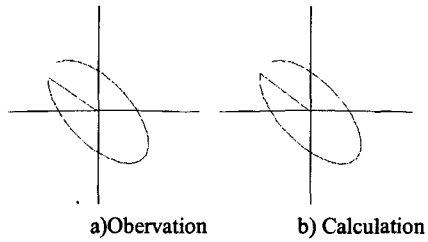


Figure 18.  $S_2$  Tidal Ellipses on the Point A.

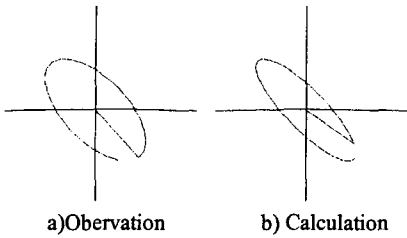


Figure 19.  $K_1$  Tidal Ellipses on the Point A.

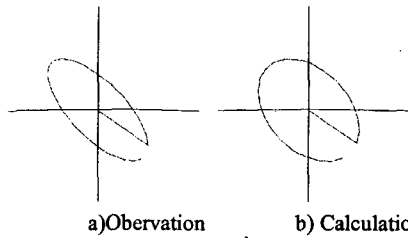
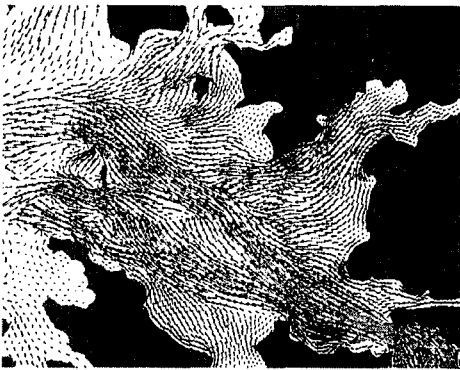
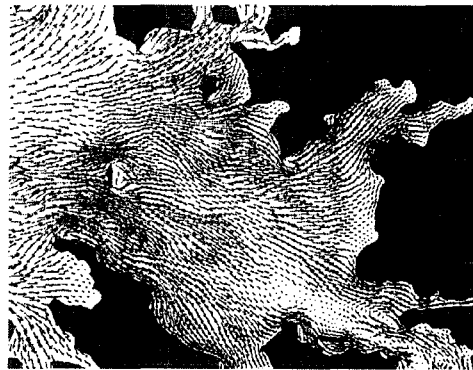


Figure 20.  $O_1$  Tidal Ellipses on the Point A.

### 3.5 경기만의 조류 흐름도

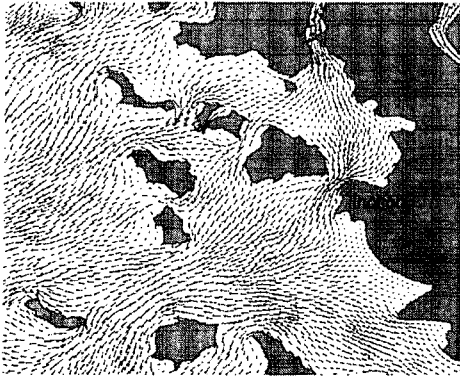


a)  $M_2$  Tidal Currents near Pyungtag at ebb tide

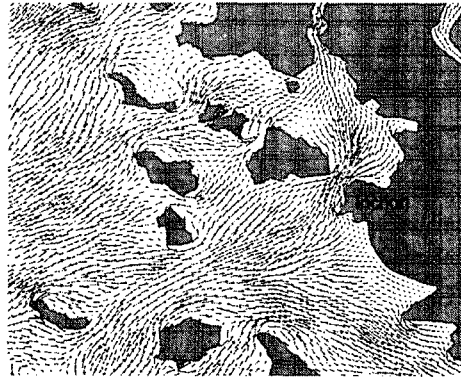


b)  $M_2$  Tidal Currents near Pyungtag at flood tide





c)  $M_2$  Tidal Currents near Incheon Port at ebb tide



d)  $M_2$  Tidal Currents near Incheon Port at flood tide

Figure 21.  $M_2$  Tidal Currents in Kyunggi Bay.

Table 7. Used Parameters When Running ADCIRC(Bold Character : used parameter option).

PARAMETER	Option	Definition
NABOUT	0,1	Controlling whether output to the diagnostic run information(fort.16) or not 1: <b>diagnostic file writing</b>
ICS	1,2	Controlling Spherical or Catesian 1: Catesian Coordinate 2: <b>Spherical Coordinate</b>
NOLIBF	0,1,2	Controlling Bottom Friction law 0: linear bottom friction law 1: quadratic bottom friction law 2: <b>hybrid nonlinear bottom friction law(deep water : constant, shallow water :increase as depth)</b>
NOLIFA	0,1,2	Controlling Minimum Water Depth 0: finite amplitude term does not included, initial water depths are assumed equal to the bathymetric water depth specified in the grid file(fort.14) 1: <b>finite amplitude terms are included, initial water depths are assumed equal to the bathymetric water depth specified in the grid file(fort.14)</b> 2:finite amplitude terms are included and wetting and drying of elements is enabled
NOLICA	0,1	Controlling Advection Term 0: Advection terms are not included 1: <b>Advection terms are included</b>
NOLICAT	0,1	Controlling time derivative portion of the advective terms that occurs in the GWCE form of continuity equation 0: not included 1: <b>included</b>
NCOR	0,1	Controlling Coriolis whether parameter is constant or spatially varing 0: to read in a spatially constant Coriolis parameter 1: <b>to compute a spatially variable Coriolis parameter</b>
NMP	0,1	Controlling whether the bottom friction coefficient is constant or spatially variable 0: to read in a spatially constant bottom friction coefficient 1: to read in a spatially varying bottom friction coefficient at all nodes(fort.21)
NWS	0~11	Controlling whether wind velocity or stress, wave radiation stress and atmospheric pressure are used to force ADCIRC 0: <b>no wind, radiation stress or atmospheric pressure forcings are used</b>

#### 4. 실조석시간 산정

수립된 8개분조의 조석체계(tidal regime)의 관측치 분석결과 시뮬레이션은 양호한 결과를 갖아 채택된 모형의 외해조석 입력이 적절하였음을 입증하였다. 후속 시뮬레이션으로 외해경계에 8개분조에 의한 조위추정을 입력으로하는 실조석시간 산정은 1990년 1월기간(31일)에 대해 수행하였다. Figure 22는 인천항의 산정조위와 관측조위의 비교결과 인데 경계 조석을 8개분조로 규정한 제약을 고려할 때 좋은 일치를 보인다.

#### 5. 결론

병렬 유한요소모형을 이용한 황해의 조석산정 결과 전반적으로 관측치와의 양호한 일치를 얻었으며, 세격자체계로 구성된 경기만의 계산결과도 만족할 만한 결과를 신속하게 산정 할 수 있었다.

보다 정확한 계산결과를 얻기위해서는 조건대 처리를 위한 이동경계조건의 사용과 정확한 섬처리,

보다 세밀한 해안선처리 등이 필요할 것으로 판단되며, Beowulf Clustering체계를 이용한 계산시간의 단축으로 8개 분조의 경계조건을 이용한 실시간 조석산정으로의 개선은 뚜렷한 평균해류가 발달되어 있지 않은 황해의 기초적인 실시간의 동수역학적 정보 및 해역을 출입하는 선박의 안전항해를 위한 자료를 효율적으로 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 새 접근은 우리나라 서해안에 걸친 광역의 실조석 시간의 상세한 조위, 조류산정을 저가의 Beowulf 체계에서 제공할 수 있음을 입증하고 있으며, 역시 병렬체계를 이용한 분산 가시화 기법에 의해 전진적해상기법(Progressive Resolution Technique) 및 다중 모니터에 의한 고해상 표출방법을 더 큰 체계로 구성시켜야 할 필요성이 대두된다.

무엇보다 본 연구를 통해 광범하게 실험된 성과는 모형영역내의 세부 정밀 해상영역의 유한요소 체계를 신속히 구성하며 기본육봉 유한요소 모형에 결합시키는 위치이식성(relocatability)이 용이하게 수행되었으며 광역의 병렬 분산산정 기법에 의해 실조석 시간 예측이 가능한 체계로서 발전시켰다는 점이다.

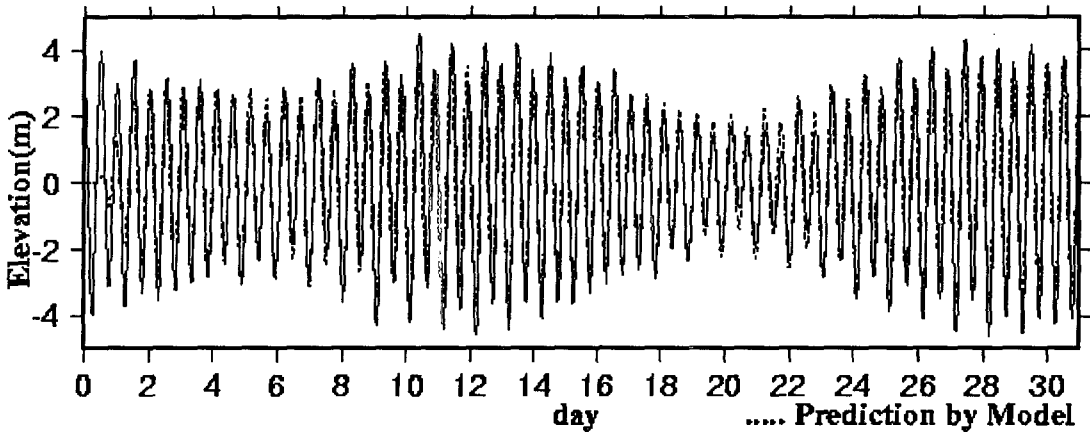


Figure 22. Comparison between Observation and Calculation data in the Incheon Port in January, 1990.

#### 참고문헌

- 김경옥, 2000. 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정, 성균관대학교, 석사학위 논문.
- 서승원, 1999. 비선형 3차원 조화유한요소모형을 이용한 황해의 천해조석 발생, 대한토목학회 논문집, 제19권 제II-3호.
- 최병호, 1990. 세격자체계의 황해 및 동지나해 조석모형의 개발, 한국해양해양학회 논문집, 제2권 제4호, pp. 231~234.
- Choi, B. H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, *Korea Ocean Research and Development Institute Report* 80-02.
- Choi, B. H. and Fang, G., 1993. A review of tidal models for the East China and Yellow Seas, *Journal of the Korea Society of Coastal and Ocean Engineers*, 5(2), pp. 151~171.
- Choi, B. H., Kim, Y. K. and Kim, Y. B., 1997. A nested fine fesh M2 tidal model of the Yellow Sea, *Journal of the Yellow Sea*, vol. 3, Dec., pp.76~86.
- Hendershott, M. C., 1972. The effects of solid-earth deformation on global ocean tides. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, Vol. 29, 389-402.

- Henry, R. F. and Walters, R. A., 1993. A geometrically-based automatic generator for irregular triangular networks, *Communication in Applied Numerical Methods*, 9, pp. 555-566.
- Le Fevre, F., Le Provost, C. and Lyard, F.H., 2000. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea, *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, 8707-8725.
- Naimie, C. E. and Lynch, D. R., 1993. Three-dimensional diagnostic model for baroclinic, wind-driven and tidal circulation in shallow seas, *FUNDY5 user's manual*, Dartmouth College, NH.