한국항해항만학회지 제32권 제3호, pp. 245~250, 2008 (ISSN-1598-5725)
Journal of Navigation and Port Research

부산항 실시간 해양예보시스템 구축을 위한 기초연구

† 정연철 · 이호진*

† 한국해양대학교 항해시스템공학부 교수
* 한국해양대학교 해양환경 · 생명과학부 교수

Preliminary Study for Establishing the Realtime Ocean Prediction System in Busan Harbor

† *Yun-Chul Jung · Ho-Jin Lee**

† *Division of Navigation Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*
* *Division of Marine Environment and Bioscience, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

요 약 : 근래 컴퓨터 수치모델이 급속하게 발전함으로써 다양한 분야에서 수치예보기술이 응용되고 있다. 실시간 해양예보시스템도 그 중의 하나로 관측시스템, 정보제공시스템 및 모델링시스템을 결합하여 실시간 해양정보를 제공함으로써 해상교통의 안전과 연안환경의 보호에 기여하고 있다. 본 연구에서는 부산항 실시간 해양예보시스템의 구축을 위한 기초연구로서 모델링시스템을 개발하였으며 그 결과를 제시하고 있다. 현재 기존의 관측자료가 부족하여 M2조석의 모델링만으로 시스템의 테스트를 행하였으나 앞으로 실시간 관측자료가 충분히 구비되면 전면적인 시스템의 테스트가 필요하다. 아울러 추후 관측시스템과 정보제공시스템이 계속 구축될 예정이며 이들 시스템이 모두 구비되고 나면 인터넷을 통한 실시간 정보제공이 이루어질 수 있을 것이다.

핵심용어 : 수치모델, 실시간 해양예보, 모델링시스템, POM모델

Abstract : *Recently the numerical prediction technique is applied to many fields, because numerical models are developed so much for last decades. The real-time ocean prediction system is one of them. and is capable of providing the real-time marine information for users to promote the safety of maritime traffic and preservation of marine resources. The system is composed of observing system, data distribution system and modelling system. In this study authors develop the modelling system and show the results as preliminary study for establishing the real-time ocean prediction system in Busan port. The system test is performed only for M2 tidal modelling due to the lack of observation data, thus a full-scale test is required in future if enough data are provided. Also observing system and data distribution system will be constructed continuously in future, then service for real-time data for users will be initiated.*

Key words : *Numerical model, Realtime ocean prediction, Modelling system, POM model*

1. 서 론

근래 컴퓨터 수치모델의 급속한 발전에 따라 다양한 분야에서 수치예보기술이 응용되고 있고 실시간 해양예보도 이 중의 하나이다. 실시간 해양예보시스템은 실시간 해양관측정보와 컴퓨터 수치모델을 이용한 해양예측정보를 결합, 가공하여 인터넷을 통해 사용자들에게 제공함으로써 해상교통의 안전 및 연안환경의 보호에 기여하는 것을 목표로 하고 있다 (NOAA, 2007). 주요 항만의 주변수역에 대한 실시간 해양예보시스템의 구축 및 운용은 선진국(미국 및 유럽의 일부 국가)의 경우 이미 보편화되어 있고, 선박의 출입이 잦은 항만수역에서 해양교통사고의 예방에 크게 기여하고 있다. 따라서 우리나라에서도 이 시스템의 도입이 시급한 실정이다.

실시간 해양예보시스템은 크게 관측시스템, 정보제공시스템 및 모델링시스템으로 구성되어 있다. 관측시스템은 실시간으로 해양 및 기상 정보를 수집하는 기능을 담당한다. 정보제공시스템은 관측 및 예측된 정보를 사용자들에게 인터넷을 통해 제공하는 기능을 담당한다. 모델링시스템은 관측된 정보를 기초로 해양모델링 기술을 이용하여 수치예보를 수행한다.

본 연구는 부산항 실시간 해양예보시스템의 구축을 위한 기초연구로서 세계적으로 널리 알려진 3차원 해양모델인 Princeton Ocean Model(이하 POM모델이라 함)을 이용하여 부산항 모델링시스템을 구축하는 것을 목적으로 한다. 지금까지 부산항 및 주변 해역에 대한 2차원 해양모델링 연구는 수차례 수행되었으나(오 외, 2006; 이 외, 2006, 정 외, 1998), 3차원 해양모델링 연구는 한번도 수행된 적이 없으며, 따라서 본 연구를 계기로 관련 연구가 활발하게 이루어질 것으로 기대된다.

† 교신저자 : 정연철(종신회원), ycjung@hhu.ac.kr 051)410-4286
* hjlee@hhu.ac.kr 051)410-4751

2. 부산항 모델링시스템의 구축

2.1 POM모델의 개요

부산항 모델링시스템의 구축에 사용된 POM모델은 Princeton University의 Jeorge Mellor 교수에 의해 1970년대 말 처음 개발되어 여러 차례 수정, 보완되었으며 강 하구, 연안해역은 물론이고 대양에도 적용이 가능한 범용모델이다. 모델은 3차원이며 지배방정식의 수치해법으로 해양모델에 가장 널리 이용되고 있는 유한차분법(finite difference method)을 채택하고 있다. 유한차분 격자체계는 Arakawa-C 방식으로, 그리고 격자의 모양은 수평방향으로 지형표현 능력이 우수한 Orthogonal Curvilinear Grid를 그리고 수직방향으로는 복잡한 수심에 대한 적용성이 뛰어난 Sigma Grid를 각각 채택하고 있다. 모델은 또한 난류모델(turbulence model)을 내장하고 있어서 수직혼합과정의 계산이 사실적으로 이루어지고 있다(Blumberg and Mellor, 1987). 기타 모델에 대한 자세한 정보는 관련 웹페이지에서 참조할 수 있다(POM, 2007). 질량보존, 운동량보존, 그리고 온도 및 염분 보존을 기술하는 POM 기본방정식의 Cartesian Version은 관련 문헌에서 쉽게 확인할 수 있다. 이 방정식을 수평방향 Orthogonal Curvilinear Grid 및 수직방향 Sigma Grid 상에서 다시 정리하면 다음과 같다(Blumberg and Herring, 1987).

$$h_1h_2\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(h_2uD)+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(h_1vD)+h_1h_2\frac{\partial \omega}{\partial \sigma}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial(h_1h_2uD)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(h_2u^2D)+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(h_1uvD)+h_1h_2\frac{\partial \omega u}{\partial \sigma}+$$
$$Dv(-v\frac{\partial h_2}{\partial \xi_1}+u\frac{\partial h_1}{\partial \xi_2}-h_1h_2f)=-gh_2D\frac{\partial \eta}{\partial \xi_1}-\frac{gh_2D^2}{\rho_0}$$
$$\int_\sigma^0(\frac{\partial \rho}{\partial \xi_1}-\frac{\sigma}{D}\frac{\partial D}{\partial \xi_1}\frac{\partial \rho}{\partial \sigma})d\sigma-\frac{h_2}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial \xi_1}+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(2A_m\frac{h_2}{h_1}$$
$$D\frac{\partial u}{\partial \xi_1})+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(A_m\frac{h_1}{h_2}D\frac{\partial u}{\partial \xi_2})+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(A_mD\frac{\partial v}{\partial \xi_1})+$$
$$\frac{h_1h_2}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_m\frac{\partial u}{\partial \sigma}) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial(h_1h_2vD)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(h_2uvD)+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(h_1v^2D)+h_1h_2\frac{\partial \omega v}{\partial \sigma}+$$
$$+Du(-u\frac{\partial h_1}{\partial \xi_2}+v\frac{\partial h_2}{\partial \xi_1}-h_1h_2f)=-gh_1D\frac{\partial \eta}{\partial \xi_1}-\frac{gh_1D^2}{\rho_0}$$
$$\int_\sigma^0(\frac{\partial \rho}{\partial \xi_2}-\frac{\sigma}{D}\frac{\partial D}{\partial \xi_2}\frac{\partial \rho}{\partial \sigma})d\sigma-\frac{h_1}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial \xi_2}+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(2A_m\frac{h_1}{h_2}$$
$$D\frac{\partial v}{\partial \xi_2})+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(A_m\frac{h_2}{h_1}D\frac{\partial v}{\partial \xi_1})+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(A_mD\frac{\partial u}{\partial \xi_2})+$$
$$\frac{h_1h_2}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_m\frac{\partial v}{\partial \sigma}) \qquad (3)$$

$$h_1h_2\frac{\partial(\Theta D)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(h_2u\Theta D)+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(h_1v\Theta D)+h_1h_2\frac{\partial(\omega\Theta)}{\partial \sigma}$$
$$=\frac{\partial}{\partial \xi_1}(\frac{h_2}{h_1}A_hD\frac{\partial \Theta}{\partial \xi_1})+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(\frac{h_1}{h_2}A_hD\frac{\partial \Theta}{\partial \xi_2})+\frac{h_1h_2}{D}$$
$$\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_h\frac{\partial \omega}{\partial \sigma})+h_1h_2\frac{\partial R}{\partial \sigma} \qquad (4)$$

$$h_1h_2\frac{\partial(sD)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \xi_1}(h_2usD)+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(h_1vsD)+h_1h_2\frac{\partial(\omega s)}{\partial \sigma}$$
$$=\frac{\partial}{\partial \xi_1}(\frac{h_2}{h_1}A_hD\frac{\partial s}{\partial \xi_1})+\frac{\partial}{\partial \xi_2}(\frac{h_1}{h_2}A_hD\frac{\partial s}{\partial \xi_2})+\frac{h_1h_2}{D}$$
$$\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_h\frac{\partial s}{\partial \sigma}) \qquad (5)$$

상기 방정식에는 정수압가정(hydrostatic approximation)이 도입되었으며 각 부호의 정의는 다음과 같다. t는 시간, 그리고 η는 해면변위이고; H_o와 $D(D=H_o+\eta)$는 각각 평균수심과 순간수심; ξ_1과 ξ_2는 각각 수평방향 Orthogonal Curvilinear 좌표; u와 v는 각각 ξ_1과 ξ_2방향의 유속; h_1과 h_2는 각각 Cartesian 좌표로부터 Curvilinear 좌표로의 변환을 주는 Transformation Metric Coefficient이다.

σ는 $\sigma=(z-\eta)/(H_o+\eta)$로 정의되는 수직좌표이며, 여기서 z는 Cartesian 수직좌표이다. 따라서 σ=0은 수면을, 그리고 σ=-1은 해저바닥을 각각 의미한다. ω는 σ면에 수직방향 유속이고 Cartesian 수직유속 w와는 다음의 관계가 있다.

$$\omega=w-\frac{1}{h_1h_2}\left[h_2u(\sigma\frac{\partial D}{\partial \xi_1}+\frac{\partial \eta}{\partial \xi_1})-h_1v(\sigma\frac{\partial D}{\partial \xi_2}+\frac{\partial \eta}{\partial \xi_2})\right]$$
$$-(\sigma\frac{\partial D}{\partial t}+\frac{\partial \eta}{\partial t}) \qquad (6)$$

$f=2\Omega\sin\Phi$는 Coriolis Parameter이고, 여기서 Ω=7.29×10^{-5}/s로서 지구자전 각속도이고 Φ는 위도이다. g는 중력가속도, P_a는 대기압, Θ는 포텐셜온도, s는 염분, ρ는 유체의 밀도, ρ_o는 배경밀도, R는 태양복사열, K_m과 K_h는 수직와동점성계수로서 전자는 운동량, 후자는 염분 및 온도에 대한 계수이다. A_m은 수평와동점성계수인데, 소위 다음과 같은 Smagorinsky 공식에 의해 계산된다.

$$A_m=C_1h_1h_2\left[(\frac{\partial u}{\partial x})^2+\frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y})^2+(\frac{\partial v}{\partial y})^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (7)$$

여기서 C_1은 상수로서 0.1의 값을 가진다. A_h는 온도 및 염분 혼합을 위한 수평와동점성계수이며, $A_h=C_2A_m$이다. C_2는 보통 1.0의 값을 가진다.

2.2 부산항 모델링시스템의 구축

부산항 모델링 구역은 지역특성을 고려하여 광역(large

area) 및 협역(small area)의 두 구역으로 나누어 설정하였다.

Fig. 1은 부산항 모델링 구역을 도시한 것이다. 광역 모델링 구역은 개방경계의 위치를 고려하고 동시에 추후 부산 신항의 모델링시스템을 구축할 것에 대비하여 설정되었다. 협역 모델링 구역은 부산항 주변의 복잡한 지형을 좀 더 자세하게 표현하면서도 부산 북항과 남항은 물론이고 주변항인 감천항, 다대포항 및 수영만을 모두 포함하도록 설정되었다.

Fig. 1에서 T0, T1, T2, T3, T4, T5, C는 각각 수위 및 유속 관측이 수행된 지점을 표시한 것으로(부산직할시, 1990) 이곳에서 관측된 자료는 조화분해를 거쳐 개방경계의 경계조건과 모델링 결과의 검증에 사용되었다.

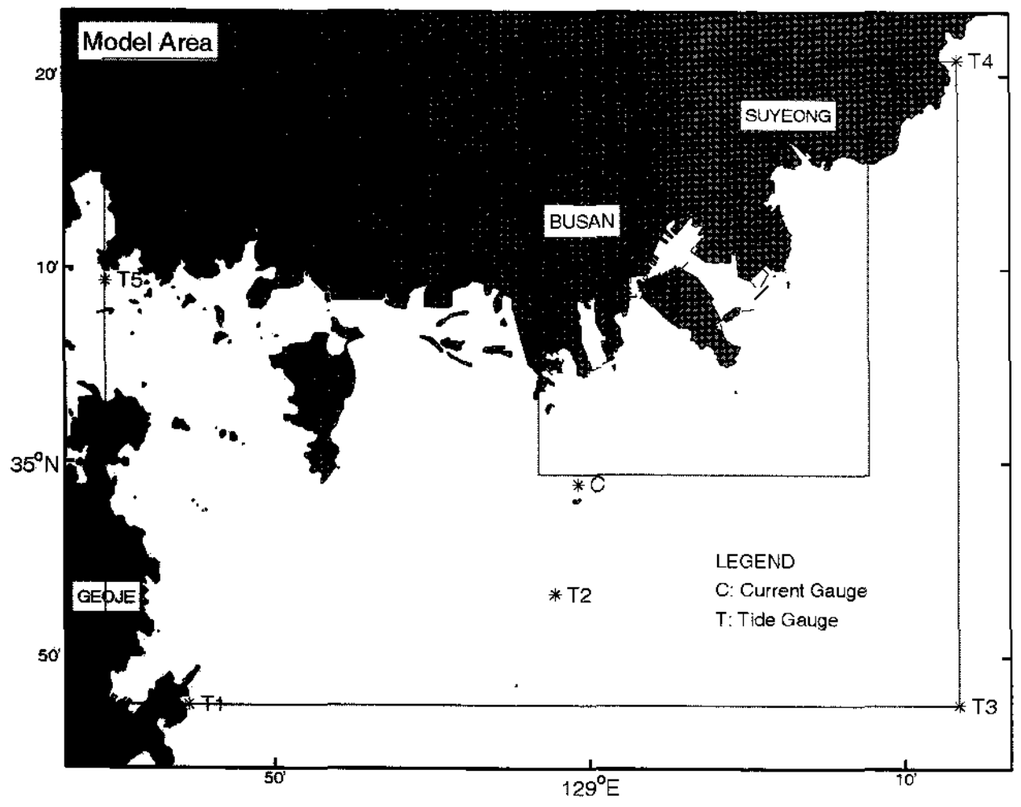

Fig. 1 Modelling area for busan harbor

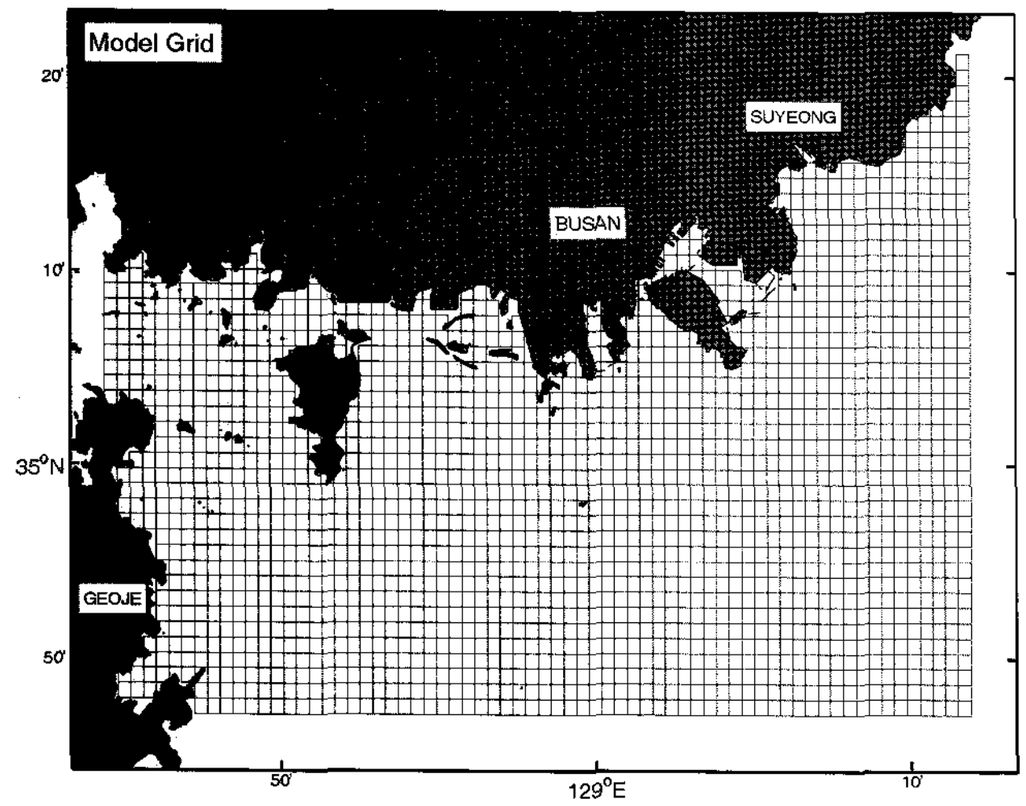

Fig. 2 Grids for large area model

Fig. 2는 광역모델의 계산격자를 보여주고 있다. 수평격자는 균일격자로서 크기가 각각 dx=735m, dy=882m이고, 총 개수는 72×47=3,384개이다. 수직격자는 시그마 격자로서 11개의 Levels로 만들어졌다. POM 모델은 불균일 격자의 적용도 가능하지만 본 연구에서는 실익이 없으므로 균일격자를 채택하였다.

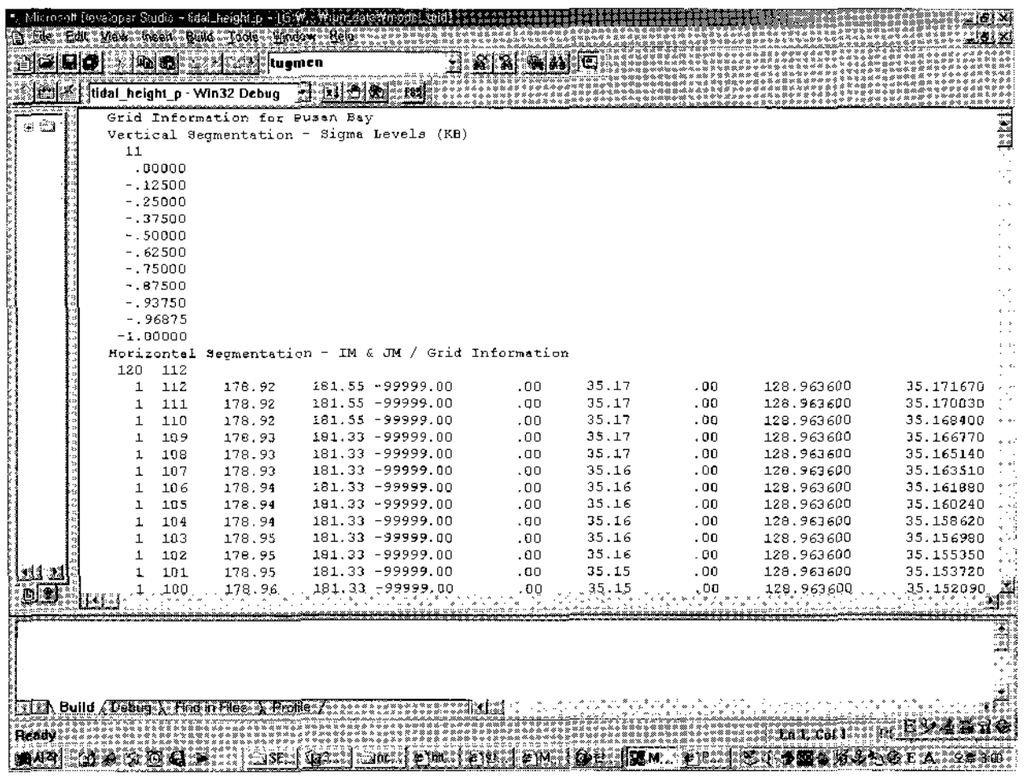

Fig. 3 Input data for small area model

Table 1 Input data for models

	광역모델	협역모델
격자	수평 : 735×882m, 3,384개 수직 : 11 levels	수평 : 179×181m, 13,440개 수직 : 11 levels
시간간격	외부모드 6초 내부모드 60초	외부모드 2초 내부모드 20초
계산시간	10 lunar days	5 lunar days
개방경계의 조건	M2 tide	M2 tide (광역모델의 계산 결과)
	수온 15도, 염분 35psu	수온 15도, 염분 35psu
강 유입	낙동강, 동천, 수영강	동천, 수영강
표층경계	고려되지 않음	고려되지 않음

POM 모델의 구동에 필요한 입력자료는 크게 격자생성 프로그램인 grid.f를 통해 만들어지는 데이터 파일과 각종 경계조건을 설정해주는 파일로 나누어진다. grid.f를 구동하기 위해서는 몇가지 준비작업이 필요한데 즉, 계산격자의 생성을 위한 지리좌표의 설정, 초기조건(염분, 수온, 바람 등)의 설정, 격자 Masking 자료 및 수심자료의 준비 등이 그것이다. 참고로 Fig. 3은 grid.f를 통해 생성된 부산항 협역모델의 입력자료를 보여주고 있다. Table 1은 모델의 입력조건을 정리한 것이다.

3차원 해양모델의 경계조건에는 개방경계조건, 표층경계조건, River경계조건 등이 있다. 개방경계에서는 수위 또는 유속, 염분 및 수온 등이 주어지며 조석모델의 경우 일반적으로 유속대신에 수위가 주어진다. 따라서 이들 자료를 위해 현장관측 자료가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 아직 관측시스템이 구축되지 않았기 때문에 기존의 관측자료를 이용하였다.

3. 부산항 모델링시스템의 계산 결과

구축된 부산항 모델링 시스템을 검증하기 위해 M2조석에 의한 모델링 및 관측자료와의 비교, 검토를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.1 광역모델의 계산 결과

Fig. 4는 수심평균 유속이며 Lunar Time 6 hours일 때의 계산 결과를 보여준다. 창조류가 잘 재현되고 있음을 알 수 있다.

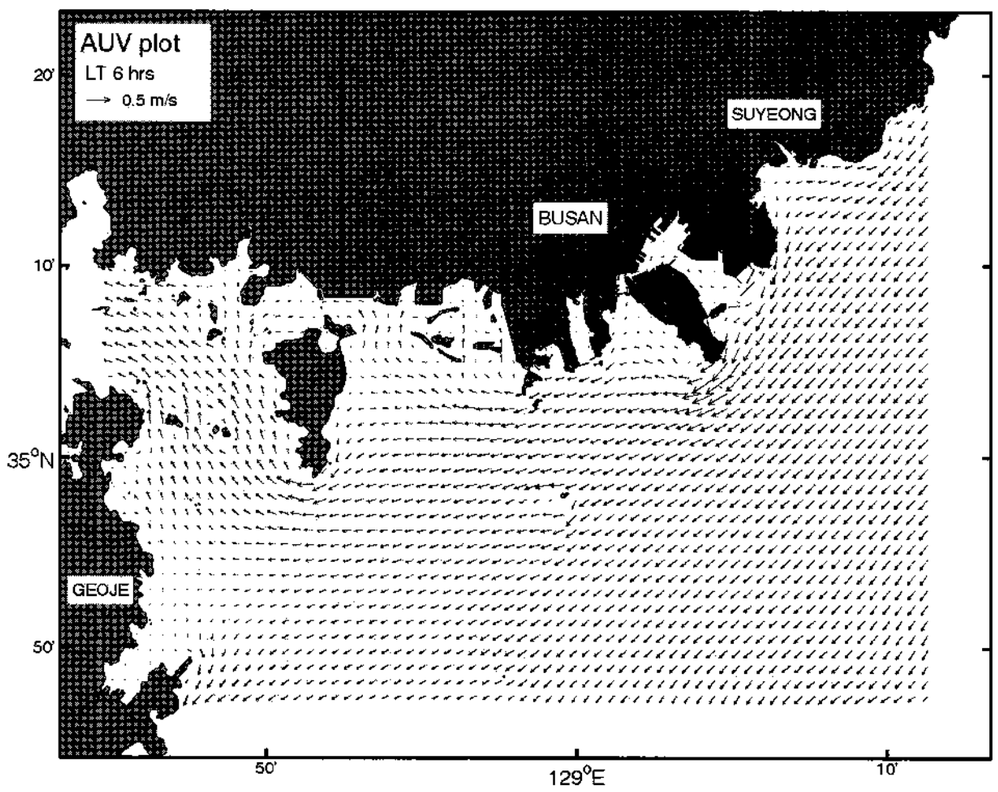

Fig. 4 Depth averaged velocity at lunar time 6 hours

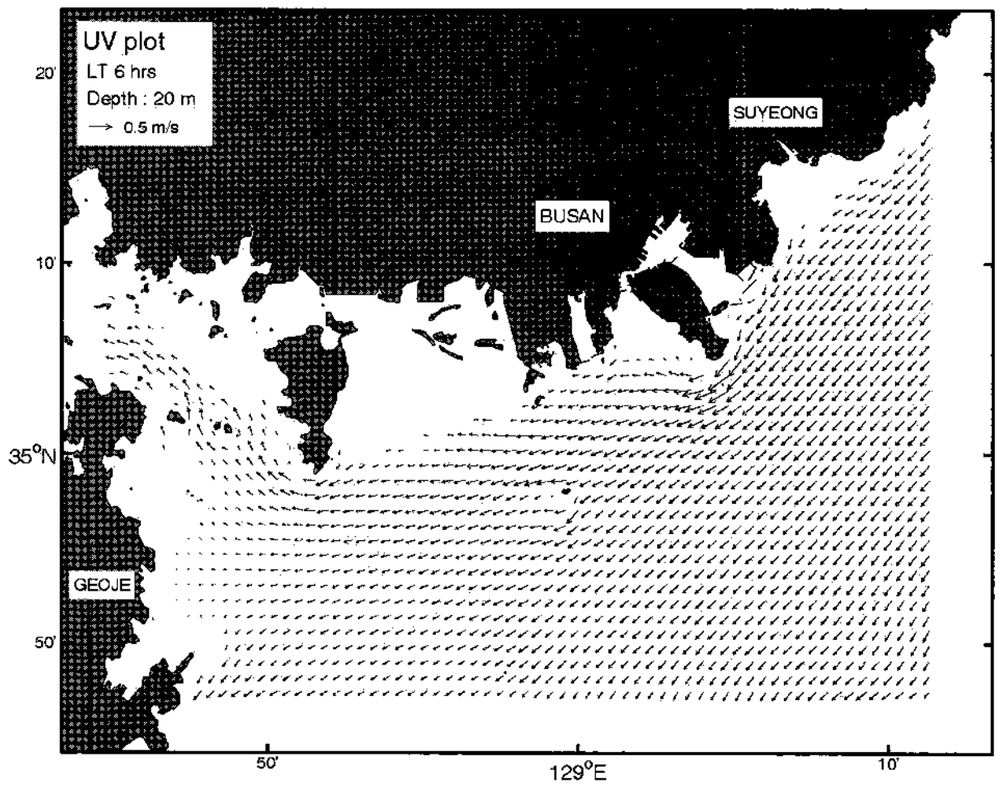

Fig. 5 Velocity of 20m depth at lunar time 6 hours

Fig. 5는 Lunar Time 6 hours일 때 수심 20m에서의 유속 계산 결과를 보여주고 있다. 역시 창조류가 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. 참고로 유속벡터가 나타나지 않는 지역은 수심 20m 이하의 지역이다.

Fig. 6은 Lunar Time 6 hours일 때 수심 1m에서의 염분분포를 보여주고 있다. 낙동강 하구 주변에서 강의 유출에 따른 약간의 염분 하강을 확인할 수 있다. 참고로 염분분포는 총 10 Lunar Days 동안의 계산 결과이며 정상상태가 아니다.

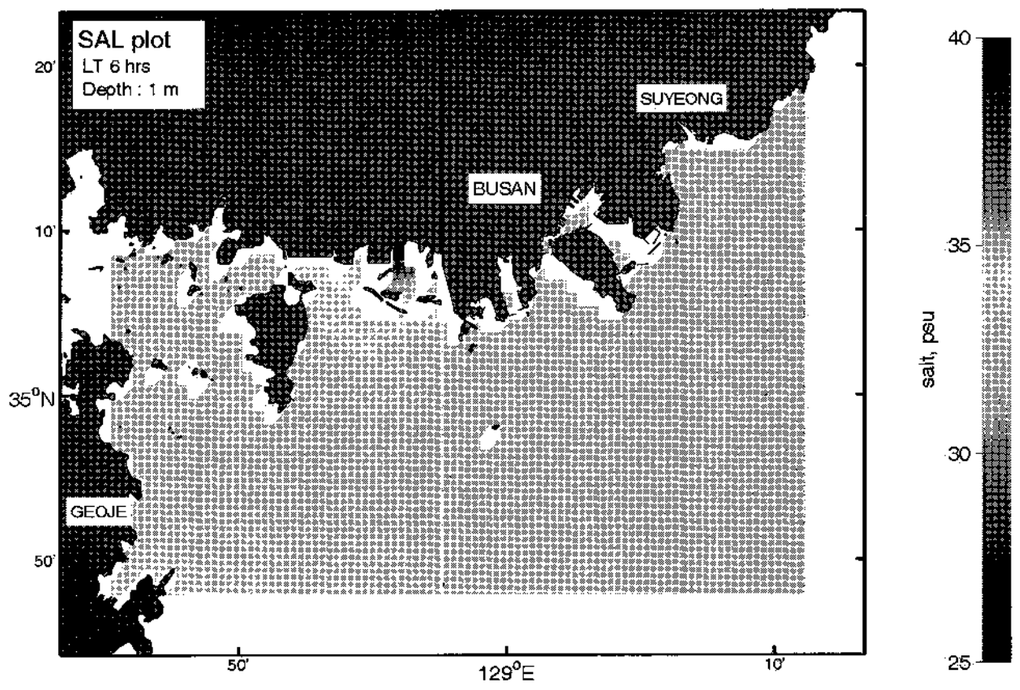

Fig. 6 Salinity of 1m depth at lunar time 6 hours

Fig. 7은 모델링 결과의 검증을 위해 모델영역 내 조석관측점인 T0지점(정확한 위치는 Fig. 1 참조)에서 시간에 따른 계산수위 및 관측수위의 변화를 도시한 것이다. 두개의 수위가 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

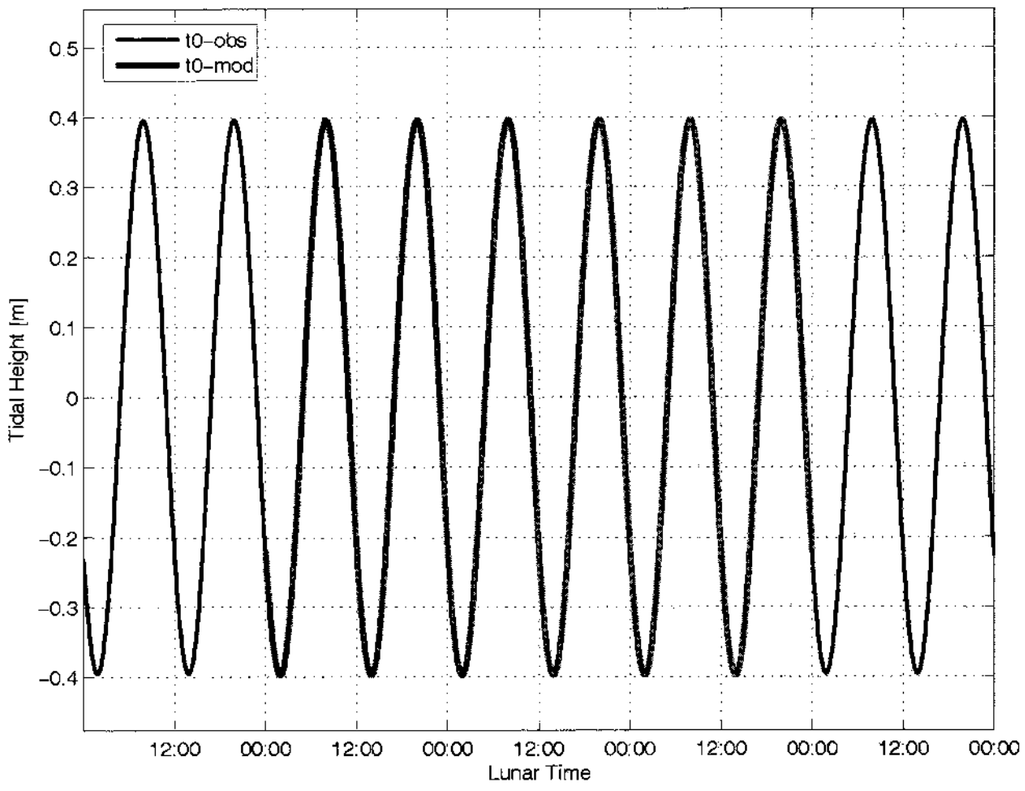

Fig. 7 Observed and modeled sea level at T0 station

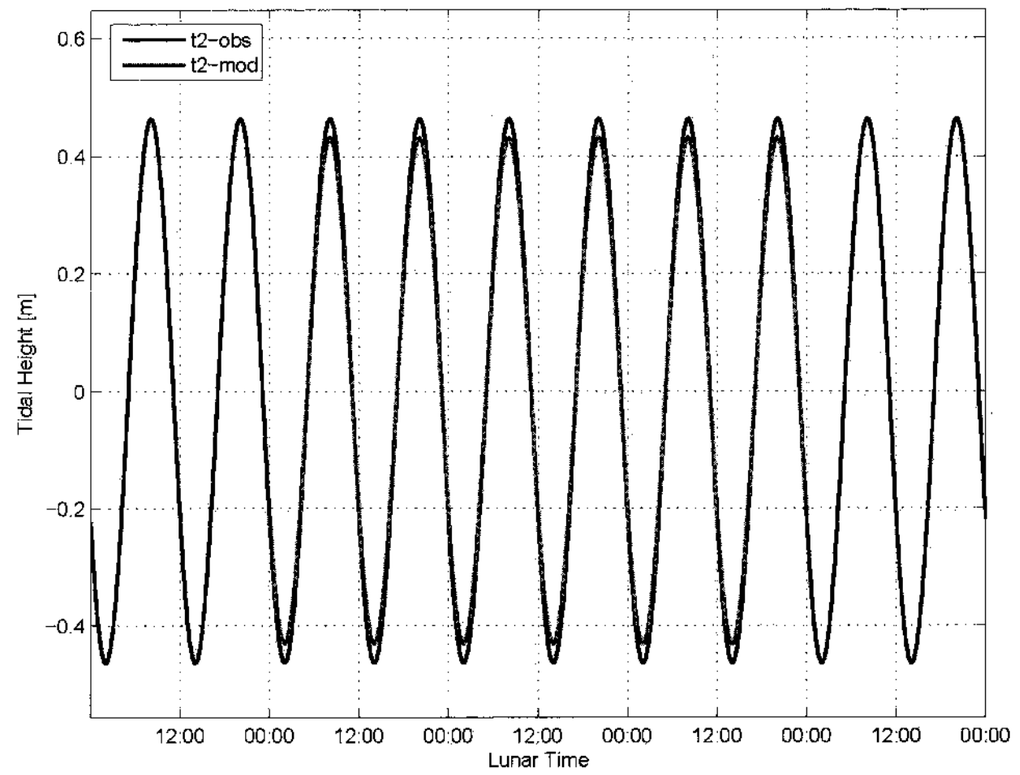

Fig. 8 Observed and modelled level at T2 station

Fig. 8은 모델영역 내 또 다른 조석관측점인 T2지점에서의 시간에 따른 계산수위 및 관측수위의 변화를 도시한 것이다. 두 개의 수위가 위상은 정확하게 일치하고 있으나 진폭에는 약간의 차이(3cm, 6%)를 보이고 있다. 이러한 차이가 발생한 원인은 비교적 단기간의 관측자료를 사용했기 때문으로 추측된다.

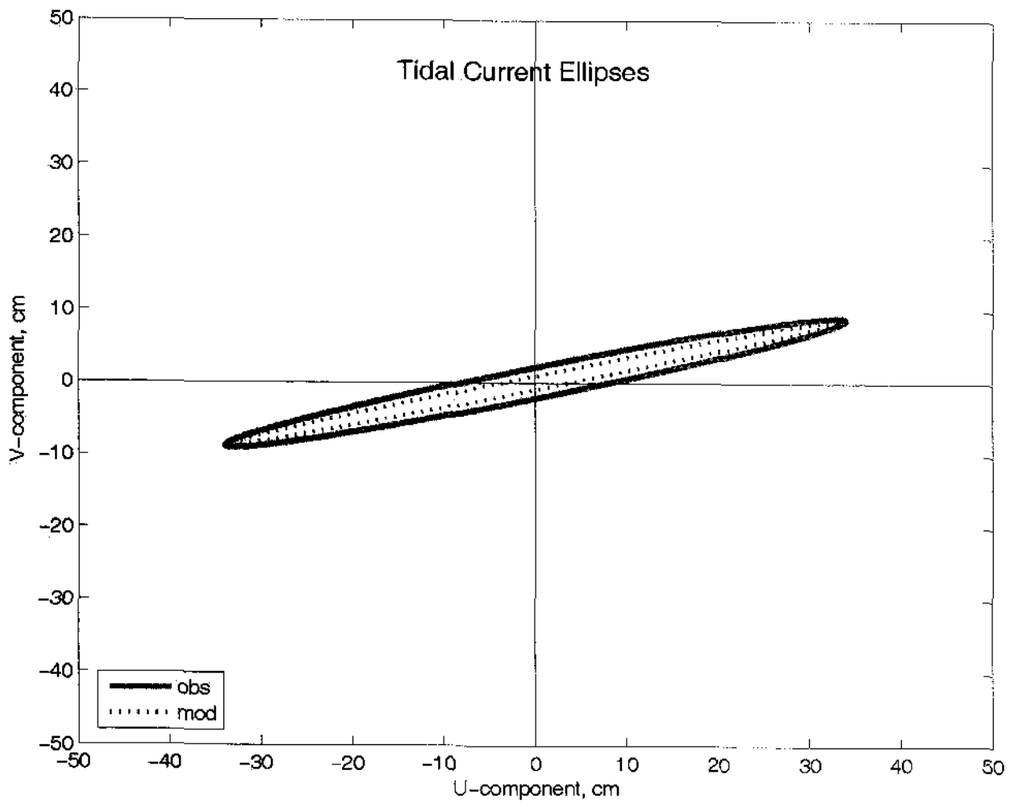

Fig. 9 Tidal current ellipses at C station

Fig. 9는 모델링 결과의 검증을 위해 모델영역 내 유속관측점인 C지점에서의 계산유속과 관측유속을 조류타원도로 비교하여 나타낸 것이다. 두개의 유속이 비교적 정확하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 협역모델의 계산 결과

Fig. 10은 수심평균 유속으로 Lunar Time 6 hours일 때의 계산 결과를 보여주고 있다. 창조류가 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. 그러나 광역모델의 계산 결과와 비교할 때 남쪽 개방경계 부근에서 유속장이 약간 차이가 발생하고 있는데 추후 보완이 필요할 것으로 생각된다.

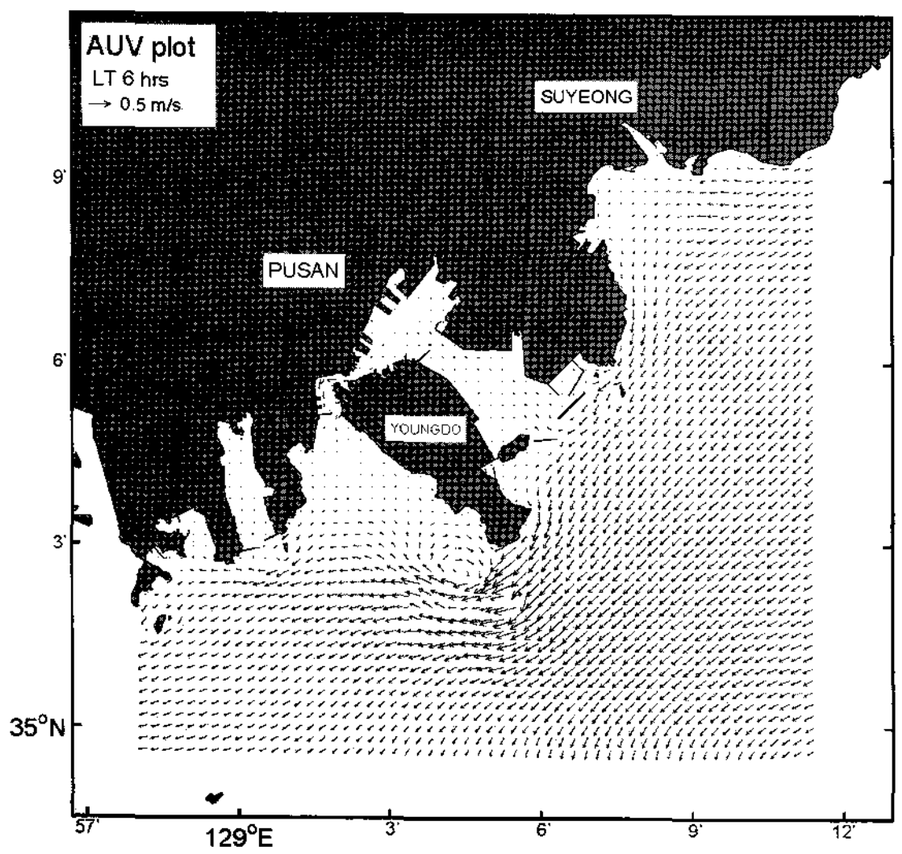

Fig. 10 Depth averaged velocity at lunar time 6 hours

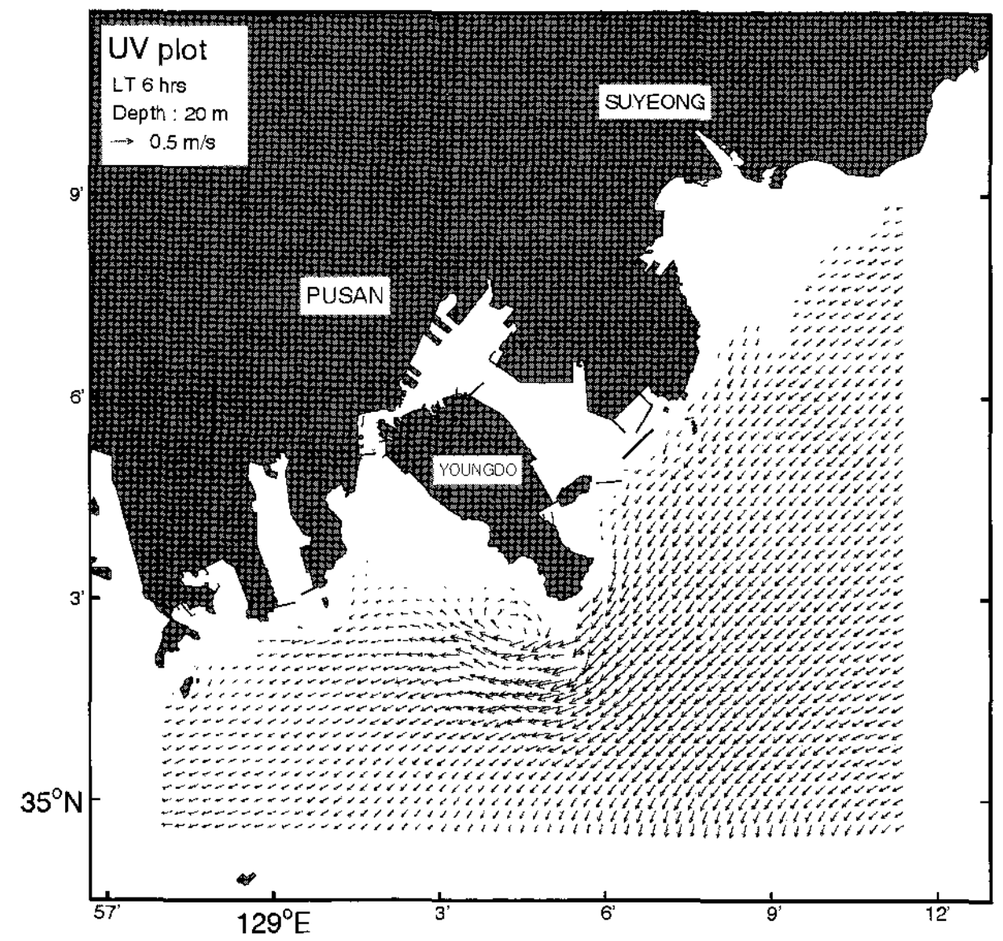

Fig. 11 Velocity of 20m depth at lunar time 6 hours

Fig. 11은 Lunar Time 6 hours일 때 수심 20m에서의 유속 계산 결과를 보여주고 있다. 역시 창조류가 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. 참고로 유속벡터가 나타나지 않는 지역은 수심 20m 이하의 지역이다.

Fig. 12는 Lunar Time 6 hours일 때 수심 1m에서의 염분분포를 보여주고 있다. 수영강 하구 주변에서 강의 유출에 따른 약간의 염분 하강을 인지할 수 있다. 참고로 염분분포는 총 10 Lunar Days 동안의 계산 결과이며 정상상태가 아니다.

Fig. 13은 모델링 결과의 검증을 위해 모델영역 내의 T0 조석관측지점에서 시간에 따른 계산수위와 관측수위의 변화를 도시한 것이다. 광역모델의 경우와 마찬가지로 두개의 수위가 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

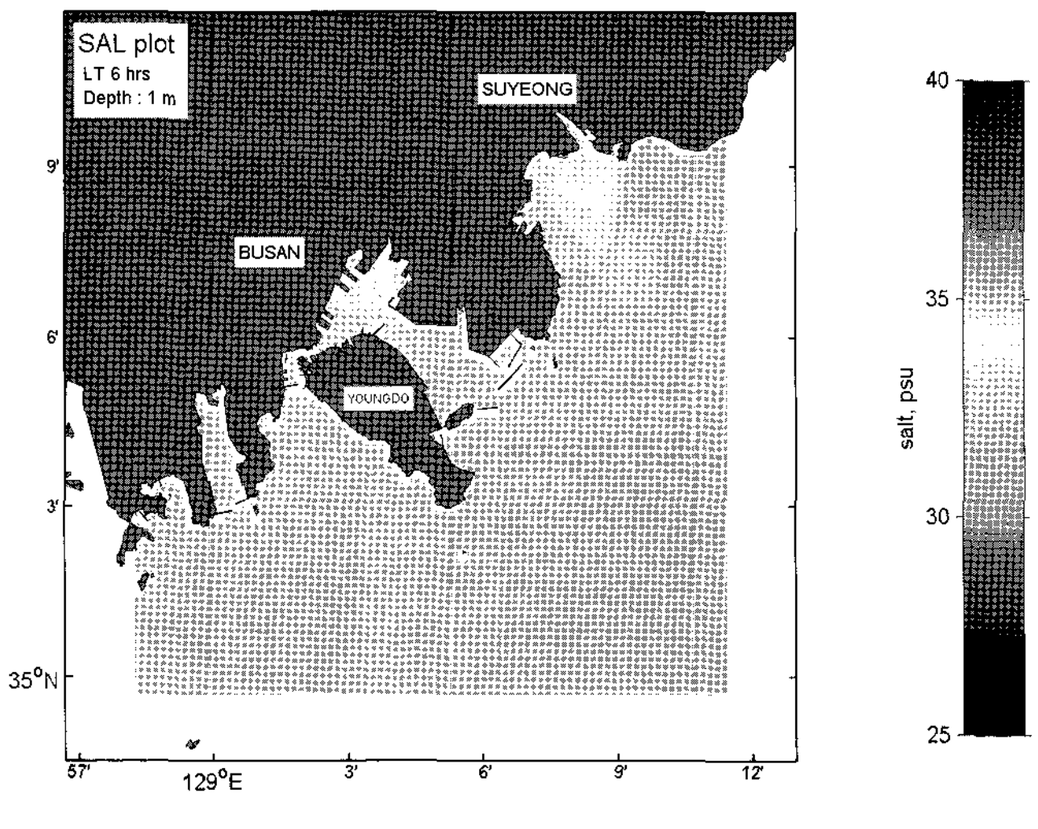

Fig. 12 Salinity of 1m depth at lunar time 6 hours

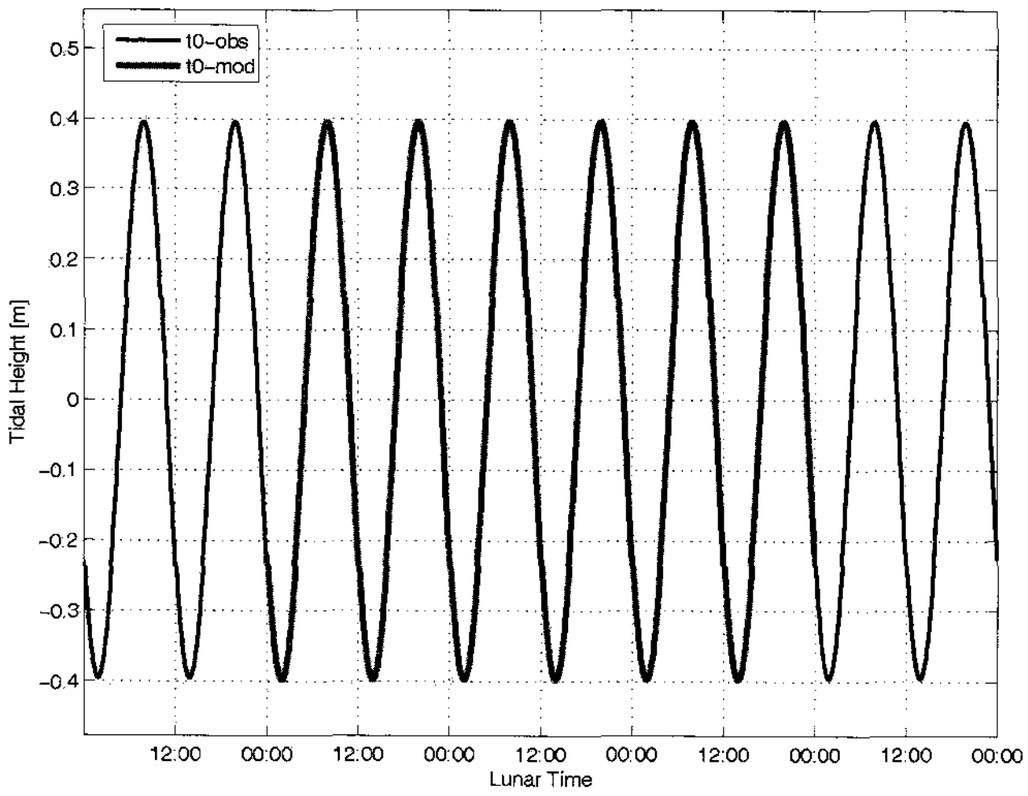

Fig. 13 Observed and modeled sea level at T0 Station

4. 결 론

근래 컴퓨터 수치모델이 급속하게 발전함으로써 다양한 분야에서 수치예보기술이 응용되고 있다. 실시간 해양예보시스템도 그 중의 하나로 관측시스템, 정보제공시스템 및 모델링 시스템을 결합하여 실시간 해양정보를 제공함으로써 해상교통의 안전과 연안환경의 보호에 기여하고 있다. 본 연구에서는 부산항 실시간 해양예보시스템의 구축을 위한 기초연구로서 부산항 모델링시스템을 개발하였으며 그 결과를 제시하고 있다.

기존의 이용 가능한 조석관측 자료가 부족하여 M2조석에 의한 모델링만으로 시스템 테스트가 수행되었다. 그럼에도 불구하고 개발된 모델링시스템의 계산 결과는 관측 결과와 매우 유사하게 나타났으며 그 효용성이 입증되었다. 그러나 이번 연구에서는 M2조석에 의한 테스트만 수행되었지만 앞으로 장기 관측 자료가 확보되면 실조석(real tide)에 의한 광범위한 시스템 테스트가 필요하다. 아울러 현재까지는 재현모드(hindcast mode)로만 운전되었으나 앞으로 예보모드(forecast mode)로도 운전될 수 있도록 시스템을 보완해나가야 할 것이다. 나아가 추후 관측시스템과 정보제공시스템이 계속적으로 구축되어야 하며 이들 시스템이 모두 구비되고 나면 목표로 하는 인터넷을 통한 실시간 정보제공이 이루어지게 될 것이다.

후 기

이 연구는 영남 Sea Grant 시범대학사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] 부산직할시(1990), “해상신도시건설 기본계획 연구용역 수치모형실험 보고서”, 한국과학기술연구원 해양연구소, pp. 17~23.

[2] 오동훈, 이중우, 금동호, 전성환, 김강민(2006), “부산북항 재개발에 따른 유동장 및 해수교환 변화 모의”, 한국항해항만학회지, 30권 10호, pp. 861~867.

[3] 이중우, 오동훈, 이승철, 김형철, 김강민(2006), “해양투기장에서 준설토의 투기에 따른 거동 평가”, 한국항해항만학회 2006 추계학술대회 논문집, 1권, pp. 433~438.

[4] 정연철, 채양범(1998), “조석예보시스템의 구축 및 응용“, 해양안전학회지, 4권 1호, pp. 31~40.

[5] Blumberg, A. F. and Herring, H. J. (1987), "Circulation Modelling Using Orthogonal Curvilinear Coordinates", Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics, edited by Nihoul, J. C. J. and Jamart, B, M., Elsevier Oceanography Series, 45, pp. 55~88.

[6] Blumberg, A. F. and Mellor, G. L.(1987), "A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model", In Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Sciences, Vol.4(Heaps, N. S., Ed.), Washington, D. C., American Geophysical Union, pp. 1~16.

[7] NOAA PORTS homepage(2007), “http://nws.noaa.gov/om/marine/ports.htm”.

[8] POM model homepage(2007), “http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/”.

원고접수일 : 2007년 12월 25일
원고채택일 : 2008년 3월 24일