

가로림만 조력발전소 가동에 따른 조석체계 변화 예측

강 석구¹⁾, 이 광수²⁾, 박 진순³⁾, 염 기대⁴⁾

Prediction of Tidal Regime According To Garolim Tidal Power Plant operation

Sok Kuh Kang, Kwangsoo Lee, Jin Soon Park, Ki-Dai Yum

Key words : Tidal power plant(조력발전소), Garolim Bay(가로림만), Tidal regime(조석체계), Numerical Modeling(수치모델링), Ebb TPP operation(낙조조력발전), 조간대변화(Change of tidal flat)

Abstract : Tidal regime change with general hydrolic condition change is examined, according to Garolim Tidal Power Plant (TPP) operation. Numerical model has been developed for the Yellow and East China Seas region, in order to consider the tidal regime change by the TPP operation. The changes of tidal elevation and tidal current inside the Garolim bay are also investigated in details, along with examining the change of the tidal flat area with operation. The field measurement for the tide and current have been carried out for the validation of the numerical model and for understanding the state of current system in the present state.

Nomenclature

(U,V) : current component, m/s
g : gravity acceleration, m/s²

subscrip

TPP : tidal power plant
 η : surface elevation of water
(1+k-h') : modification factor by earth tide

1. 서론

충청남도 태안에 위치한 가로림만은 지난 1970년대 이래로 그 지형적인 특성과 조석특성으로 인해, 한국에서 유력한 조력발전 후보지로 각광 받아 왔다. 한국해양연구원에서는 지난 1970년 이래로 가로림만 조력발전을 위한 각종 타당성 조사를 통해 조력발전 가동시의 제반 수리특성 변화와 조력발전을 시스템 기술을 개발하여 왔다. 금번 연구에서는 실제 조력발전 가동시 보다 정교한 수리특성 변화를 예측하기 위한 현장 조사, 각종 모델링 연구를 수행하였으며, 본 연구에서는 조력발전소 가동전후의 수리특성과 조석특성체계 변화에 대한 연구결과를 제시한다.

2. 수치모델 수립 및 검증

2.1 수치모형 수립

현상태의 조석체계 특성 파악하고, 가로림만 조력발전소 건설계획에 따라 발전소 가동전후의 퇴적특성 변화 및 구조물 설계를 위한 기본 자료를 제공할 목적으로 해수유동 수치실험을 실시하였다. 이들 결과는 환경영향평가를 위한 기본자료로 활용되었다.

해수유동 수치모델링 분야의 경우 본 연구를 위해 일차적으로 가로림만을 포함한 경기만 일대는 물론 황·동중국해를 포괄하는 모델링 시스템을 구축하였다. 특히 격자망 시스템은 가변격자체계를 개선한 확장가변격자 시스템(Fetched variable grid system)을 적용, 경기만내 가로림만 인근에서의 정밀격자망을 구성하는 데 활용하였다.

가로림만 인근의 조석·조류를 재현하고 발전

-
- 1) 책임 저자의 소속
E-mail : skkang@kordi.re.kr
Tel : (031)400-6313 Fax : (031)408-5823
 - 2) 저자2의 소속
E-mail : kslee@kordi.re.kr
Tel : (031)400-6300 Fax : (031)408-5823
 - 3) 저자3의 소속
E-mail : Jpark@kordi.re.kr
Tel : (031)400-7805 Fax : (031)408-5823

소 가동시의 특성을 예측하기 위하여 사용된 지배방정식은 아래와 같이 2차원 수심 평균된 비선형 천해 장파방정식이며, 비선형항 및 수평 난류확산항을 추가하였다. 지배 방정식은 위도에 따른 전향력(Coriolis force)과 위·경도 함수인 기조력(Tide generating force)을 고려하기 위하여 지구구면좌표계(Spherical polar coordinate system)상에 기술하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \chi} \left(\frac{U^2}{h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{UV}{h} \right) = \\ - \frac{gh}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \chi} (\eta - (1+k-h')\zeta_n) \\ + \frac{UV \tan \phi}{Rh} + 2\omega \sin \phi V - K_b \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^2} + F_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \chi} \left(\frac{UV}{h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{V^2}{h} \right) = \\ - \frac{gh}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} (\eta - (1+k-h')\zeta_n) \\ + \frac{V^2 \tan \phi}{Rh} - 2\omega \sin \phi U - K_b \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^2} + F_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$R \cos \phi \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial \chi} + \frac{\partial (V \cos \phi)}{\partial \phi} = 0 \quad (3)$$

위 식에서 χ , ϕ , h , η 는 경도, 위도 방향 좌표, 수심, 해수위 변화를 각각 나타내며, U , V , R 는 경도, 위도 방향 질량속, 지구반경을 각각 나타낸다. 해저면 마찰계수 $K_b = g/C^2$ 로서 g , C 는 중력가속도, Chezy 계수를 나타낸다. $(1+k-h')$ 는 Earth tide에 의한 Modification factor이다. 기조력 함수와 수평 난류확산항(F)은 Kang et al.⁽¹⁾에 제시된 바와 같다.

상기 비선형 방정식은 ADI(Alternating Direction Implicit) 기법을 이용한 2차원 모델링 시스템으로서 비선형항 처리는 특별한 Side feeding technique을 사용한다. 그 적용결과는 다수의 연구(Kang et al.⁽¹⁾) 및 다수의 연구용역 사업에 성공적으로 적용되어 왔다.

서해 및 남해 연안의 해안선이 매우 불규칙하여 조석정보가 없는 곳에서의 수백 m, 혹은 수 km 내외의 보다 정밀한 조석정보를 파악하기 위해서는 특별한 격자망 시스템이 필요하다. 이러한 목적을 위하여 본 연구에서는 광역해역을 대상으로 가변격자망 개념을 도입하여 외해 경계의 규정만으로 연안의 상세 정보를 획득하는 방법을 시도하였다. 본 연구에서 채택한 격자 시스템은 유연한 확장가변격자망 시스템(Fetched variable grid system)으로서 가변격자시스템보다 한 단계 발전된 격자망 시스템으로서 이는 지형특성을 이용한 격자 간격의 효율화를 통해 모델계산상의 효율을 극대화하기 위해서이다.

특히 가변격자망 시스템의 채택은 격자간격이 일정한 경우 Truncation 오차가 공간에 따라 차이가 난다는 점을 제외하고는 운동량이나 질량의 보존에 전혀 오차가 없다는 장점이 있다.

본 연구에 사용된 서해-동중국해 전체영역에 대한 가변 격자망은 Fig.1과 같다. 위도(x방향) 및 경도방향(y방향) 격자 간격은 수백 m에서 수 km 분포한다. 일정 위도 구간당 경도방향 격자 간격을 달리하는 구간은 모두 5개 구간으로 분류된다. 위도 방향 서로 다른 격자간격을 지닌 격자간격은 남쪽에서부터 3.75분, 2.25분, 1.5분, 1.25분, 0.647분, 0.588분, 0.412분, 0.294분

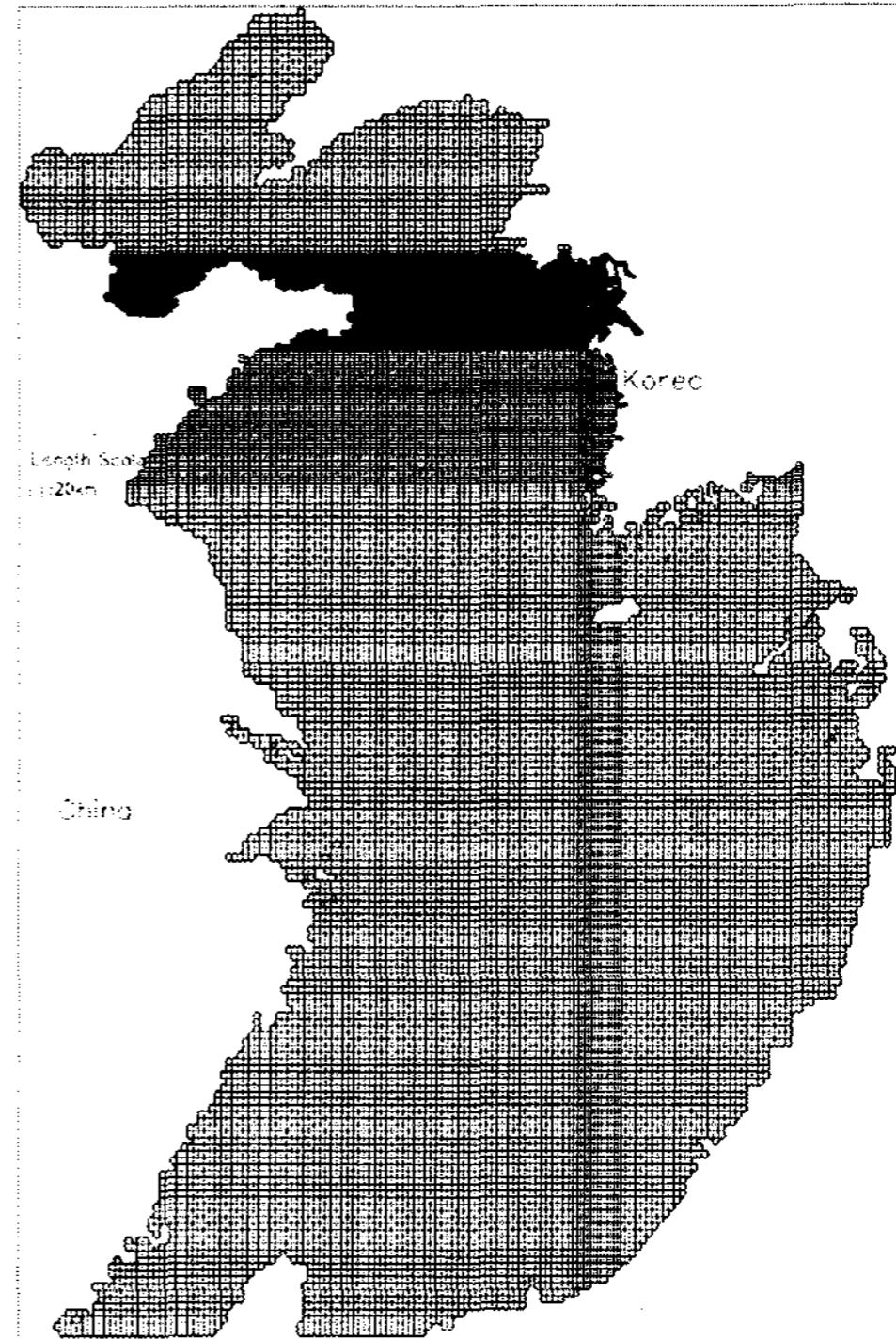


Fig.1 Extended fetched grid system for Yellow and East China Sea model.

0.176분, 0.118분, 0.15분, 0.059분, 0.118분, 0.176분, 0.235분, 0.529분, 0.882분, 1.25분, 1.8분, 3.154분 등으로 구성된다. 경도방향 격자간격은 가장 격자수가 많은 경기만 시화호 영역 구간에서 5.0분, 1.67분, 0.83333분, 0.5분, 0.25분, 0.166분, 0.083분, 0.1666분, 0.25분, 0.333분, 0.5분으로 구성된다.

경기만 영역에 대한 격자망은 Fig.2에 제시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가로림만을 포함한 인근 해역은 정밀격자망으로 구성되어 있으며, 한강유량을 고려하기 위하여 한강상류부를 일부 포함하였다.

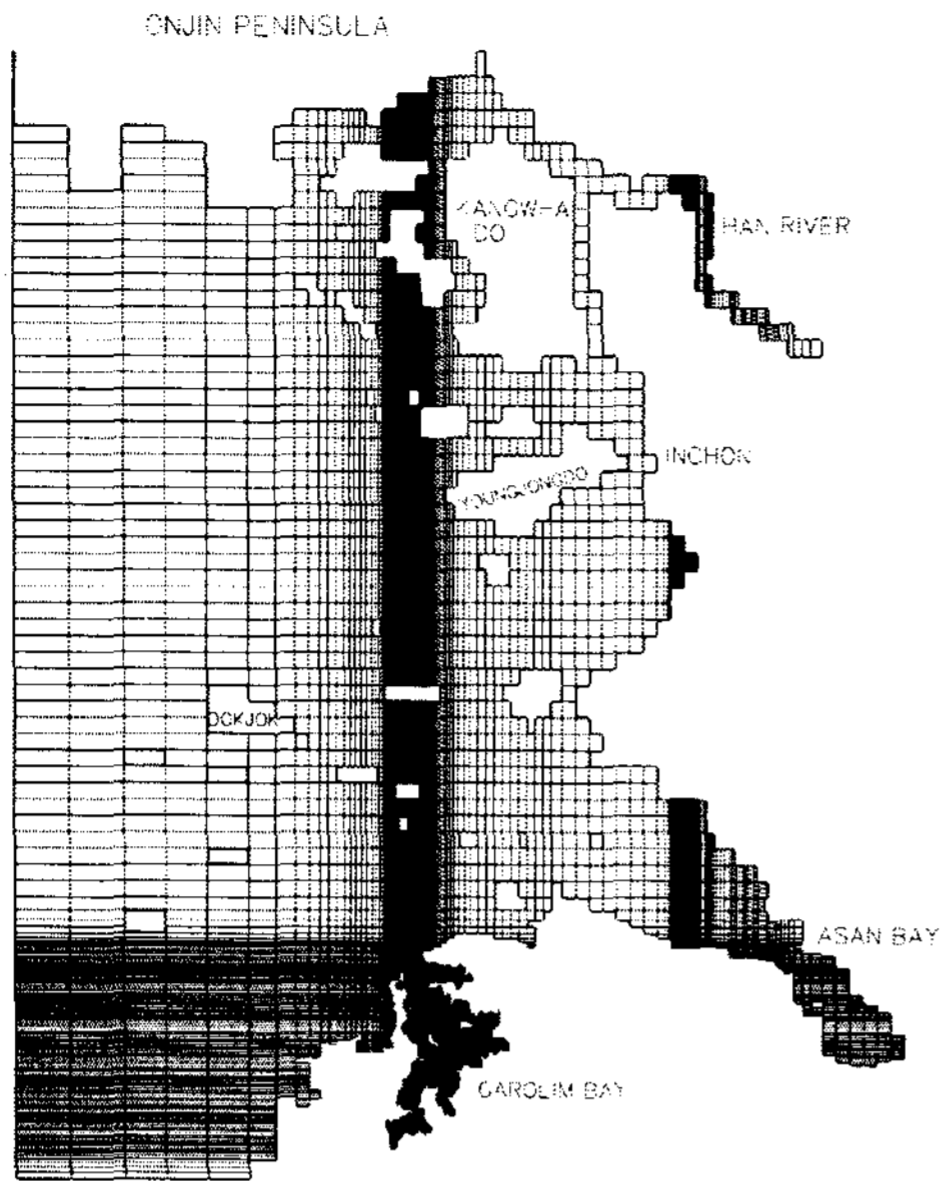


Fig. 2 Grid system of the Kyunggi Bay.

가로림만입구 협수로 부분의 폭은 약 2km로서 100m 동서방향 간격격자로 구성할 경우 약 20개의 격자로 구성된다. 가로림만 조력발전소 건설시 협수로 2km의 폭에 방조제 및 수문, 수차가 놓이게 되며 이들의 위치도는 Fig. 3에 제시하였다. 수차와 수문 윗에 관해서는 2km 폭 수로의 중앙부분이 조간대로서 여러가지 이유에서 수문과 수차가 서로 분리되는 게 유리하다.

2.1 수치모형 검증

모델검증을 위하여 서해-동중국해 개방경계에서 5개의 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)만을 고려하였는데, 관측치에는 60개 이상의 분조가 기여한다는 점을 감안하면 적은 숫자이나 추가적으로 5-10개의 분조를 고려할 수 있으나, 5개 분조를 이용한 검증결과 대체로 만족스러운 것으로 판단되었다.

모델검증을 위한 자료로는 본 과업기간 중에 자료가 수집된 조석 4개점(T2)과 조류 2개점(Fig. 4 참조)에서의 결과를 비교하였다. 엄밀한 검증을 위해서는 황해의 성층에 의한 조석의 계절변화 특성(Kang et al. (19))은 현 단계 연구 목적상 그러한 영향은 고려하지 않았다.

초기 warming계산 후 15 혹은 28일간의 계산 결과를 비교하였다. 조석관측점 4개 지점에서의 관측치(실선)와 계산치(점선)의 검증결과중 T1, T2에서의 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 그림에 제시된 바와 같이 위상 및 진폭변화 특성이 매우 만족스러움을 알 수 있다.

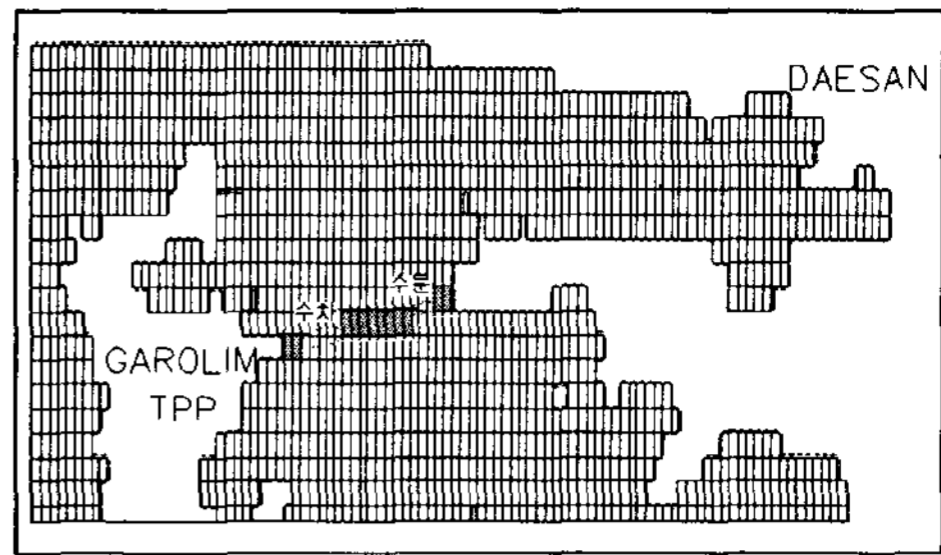


Fig. 3 Turbine and sluice gate location in Garolim TPP.

그러한 영향은 고려하지 않았다.

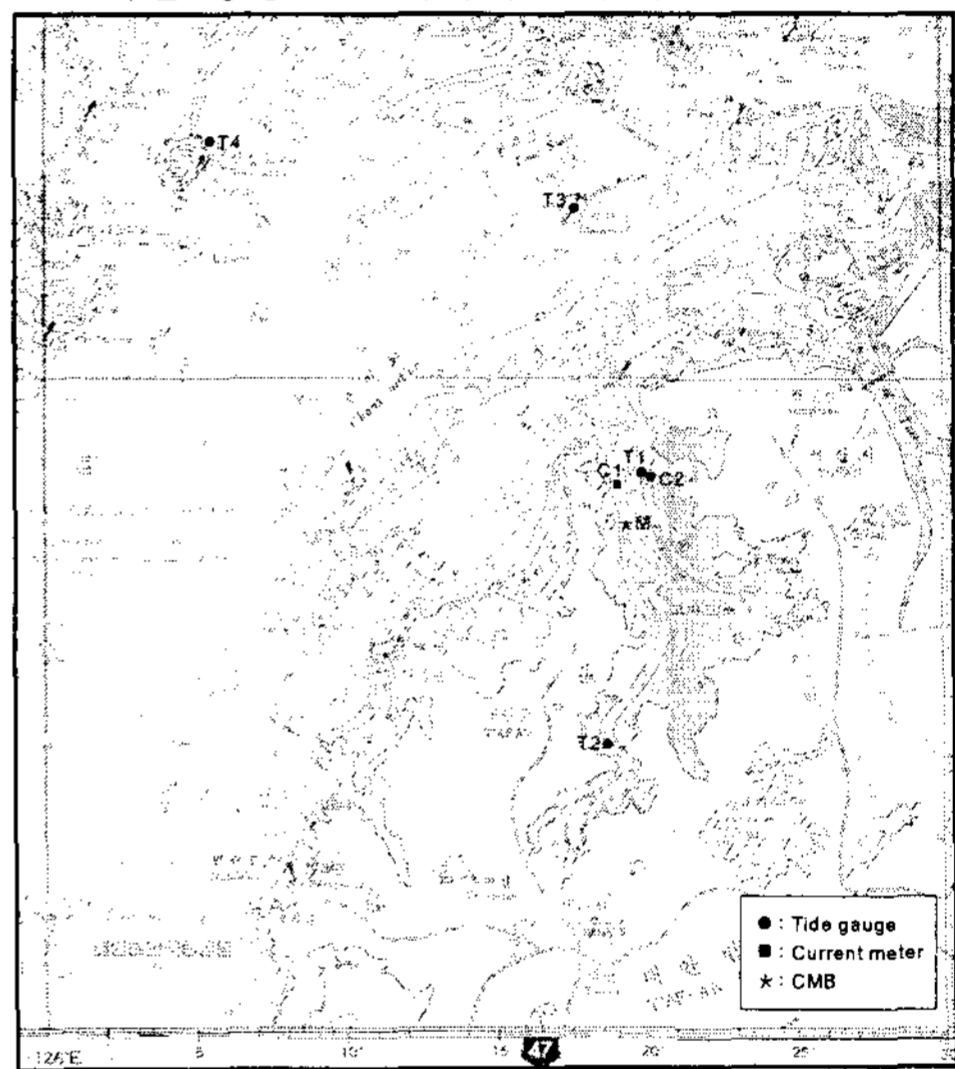


Fig. 4 Station map for tide and tidal current, mooring buoy.

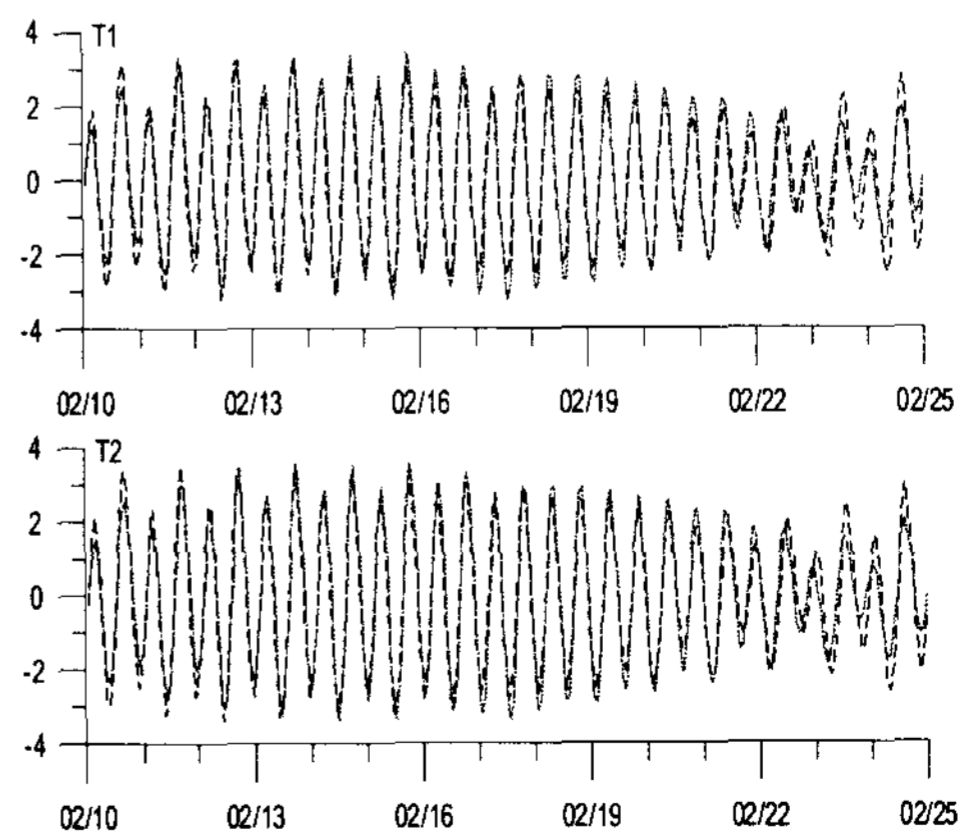


Fig. 5 Validation result at T1 and T2.

3. 모델 적용

3.1 유동특성

조력발전소 가동 창, 낙조시 가로림만 인근의 창조시 계산된 조류벡터도를 Fig.6a와 Fig.6b에 각각 제시하였다. 창조시 수로 좌측의 수차와 우측의 수문을 통해서 조류가 만내로 유입되는 특성이 잘 반영되어 계산되었음을 알 수 있다. 상대적으로 조류통수능력이 큰 수문을 통해서 보다 많은 해수가 유입되는 특성을 알 수 있다.

Fig.6b는 조력발전소의 수차만 가동하여 전력이 생산되는 단계의 조류벡터도를 나타낸다. 조류벡터 계산시각은 현상태 낙조시기 와 같으나, 이는 발전을 위해 수차를 통해 들어왔던 해수에 의해 높아진 수위가 일정 수두차까지 방출되지 않고 유지되기 때문에 현상태와 같은 조시라도 내수위가 전보다 높게 유지되고 있어 조간대가



Fig. 6a Flood current field with TPP operation.

가동전·후의 유속의 정량적인 변화가 Fig.7에 나타난 바와 같이 유속변화가 가로림만 조력발전소 내외부 주수로에서는 전반적으로 약화되는 특성이 나타나나, 조간대 영역에서는 강화되는 특성을 보인다. 가로림만 내부로 연결되는 외측 주수로에서는 0.1~0.2m/s 내외, 최대 0.3m/s 내외의 유속감소가 나타난다.

3.2 수위변화

조력발전소 가동은 가로림만 내외에서 조위 특성의 변화를 가져온다. 28일간의 조력발전소 가동시와 약 1개월간의 조력발전소 가동시 조력발전소 외해측 수위와 만내의 수위, 내측과 외측의 수위차(만내-만외) 및 수문과 수차를 통한 통과유량변화를 Fig. 8에 제시하였다.

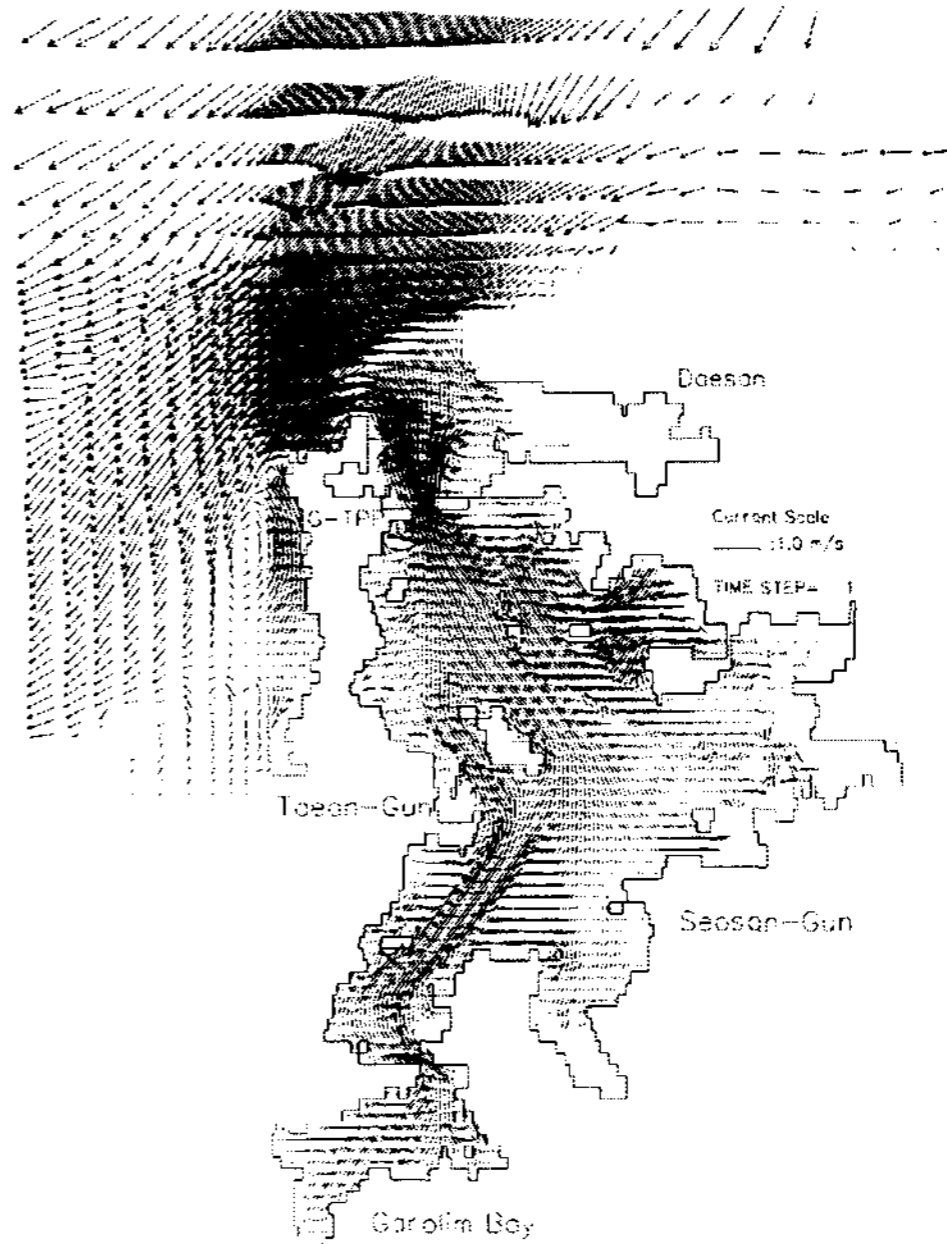


Fig. 6b Flood current field with TPP operation.

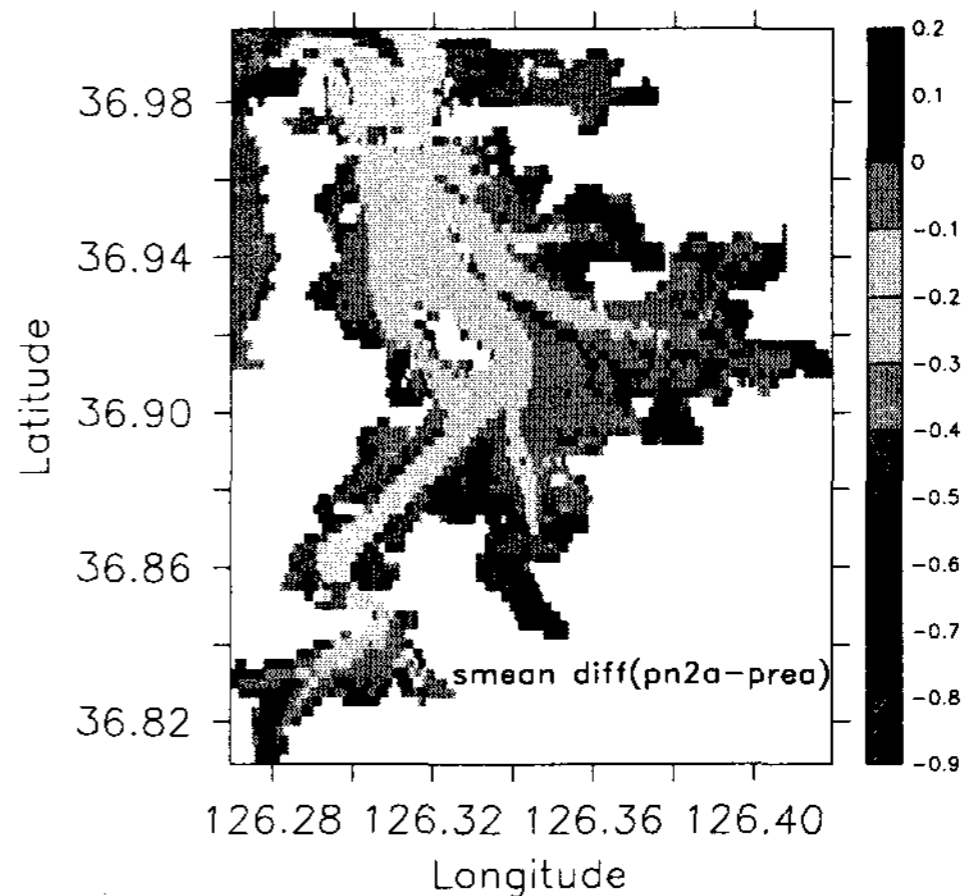


Fig. 7a Monthly mean current change (TPP operation-present state) (m/s).

<제시된 약 1개월간의 계산결과로 볼 때, 소조기에는 만내와 만외의 수위차가 3m 내외이나 대조기에는 수위차 4-5m에 이르며 최대 수위차는 5m에 근접하는 것을 알 수 있다. 조차가 작게 나타나는 소조시(시작후 8-9일경)에는 수두차가 제한되어 조력발전이 이루어지지 않는 시기가 있음을 알 수 있다.

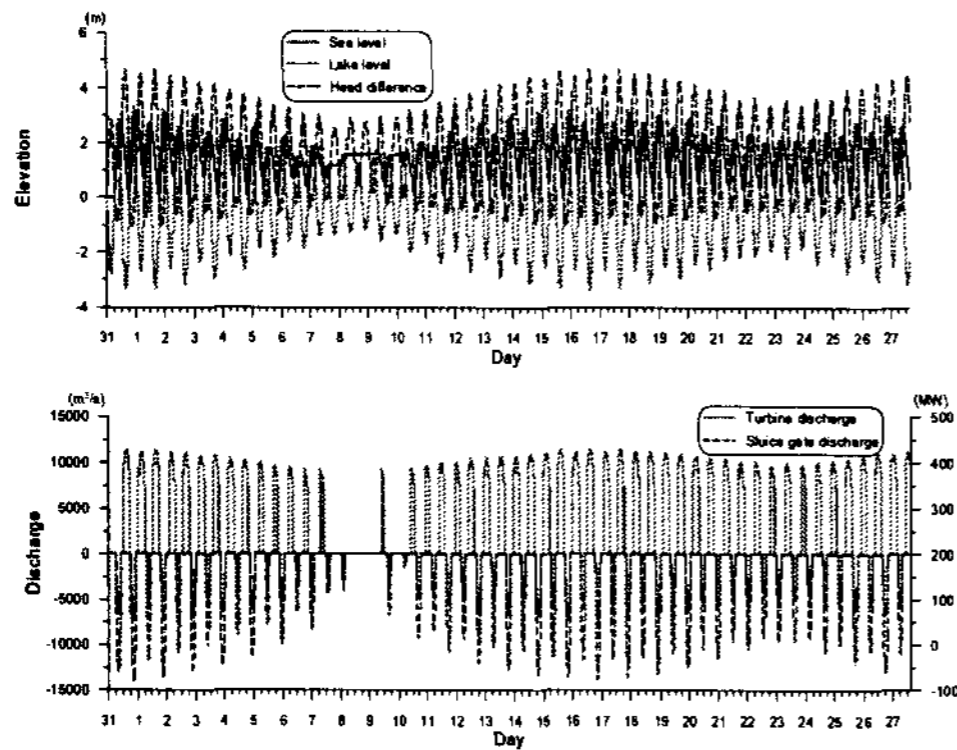


Fig. 8 Sea level, transport change through turbine and sluice with TPP operation over 28 days.

조력 발전시 수차를 통한 방류량은 순간 최대치는 10,000~12,500 CMS(=m³/s)에 이르나, 창조시 수차를 통한 최대 유입량은 5,000~7,500 CMS의 변화를 보인다. 창조시 수문을 통한 순간 최대 유입량은 최대 12,500~15,000 CMS에 달한다.

조력발전소 가동전인 현 상태의 월최고 수위는 <그림 3.2-12(a)>에 제시된 바와 같이, 만입구에서 내측으로 가며 증가하며 전체적인 3.4~3.6 m 정도로서 4개 주요 분조의 합이 약 4.0 m내외 이므로 월최고 조위는 대체로 합리적이다. 조력발전소 가동시 최고 수위는 <그림 3.2-12(a)>에 제시된 바와 같이 3.0~3.2 m로서 조력발전소 가동시 전반적으로 수위가 하강하는 것을 알 수 있다. 발전시 가로림만 외측의 월최고 수위도 약 0.1 m 낮아지는 특성을 보이는데, 이는 조력발전소 건설에 따라 외측 수위가 얼마간 낮아지는 특성을 반영한다.

현상태 M2 분조의 가로림만 인근에서의 계산 결과를 이용하여 산정된 M2 등진폭도는 Fig. 9에 제시하였다. 5cm 내외의 오차를 감안하면, 가로림만내의 진폭변화를 잘 나타내고 있다. 특히 입구역에서 220~240cm인 M2 진폭이 가로림만 내부로 향하면서 240~245, 245~250cm로 증가해 가는 M2 진폭 증대 특성이 모델 결과에 잘 나타나 있다.

반면에 가로림만 내에서 발달한 조간대에서는 진폭 감소특성이 두드러지게 나타난다. 즉 수심이 낮은 만내부 깊숙한 지점에서의 진폭은 20cm 이하를 보인다. 이는 크게 변형된 조석커브를 조화분석하여 나타낸 상수값으로 정의할 경우 산정된 수치이다.

4. 결론

조력발전소 가동은 가로림만 내외에서 조위 특성의 변화를 가져온다. 이는 가로림만내의 조간대 면적 변화를 유발한다. 특히 낙조시기에 조력발전은 외해와 내부의 조위차가 1.0m인 경우 발전이 중지되기 때문에 이로 인해 저조위의 수위가 상대적으로 높게 유지된다. 조간대 변화에 대한 예측결과 조간대 감소면적은 현상태에 비해 약 27%인 것으로 예측되었다.

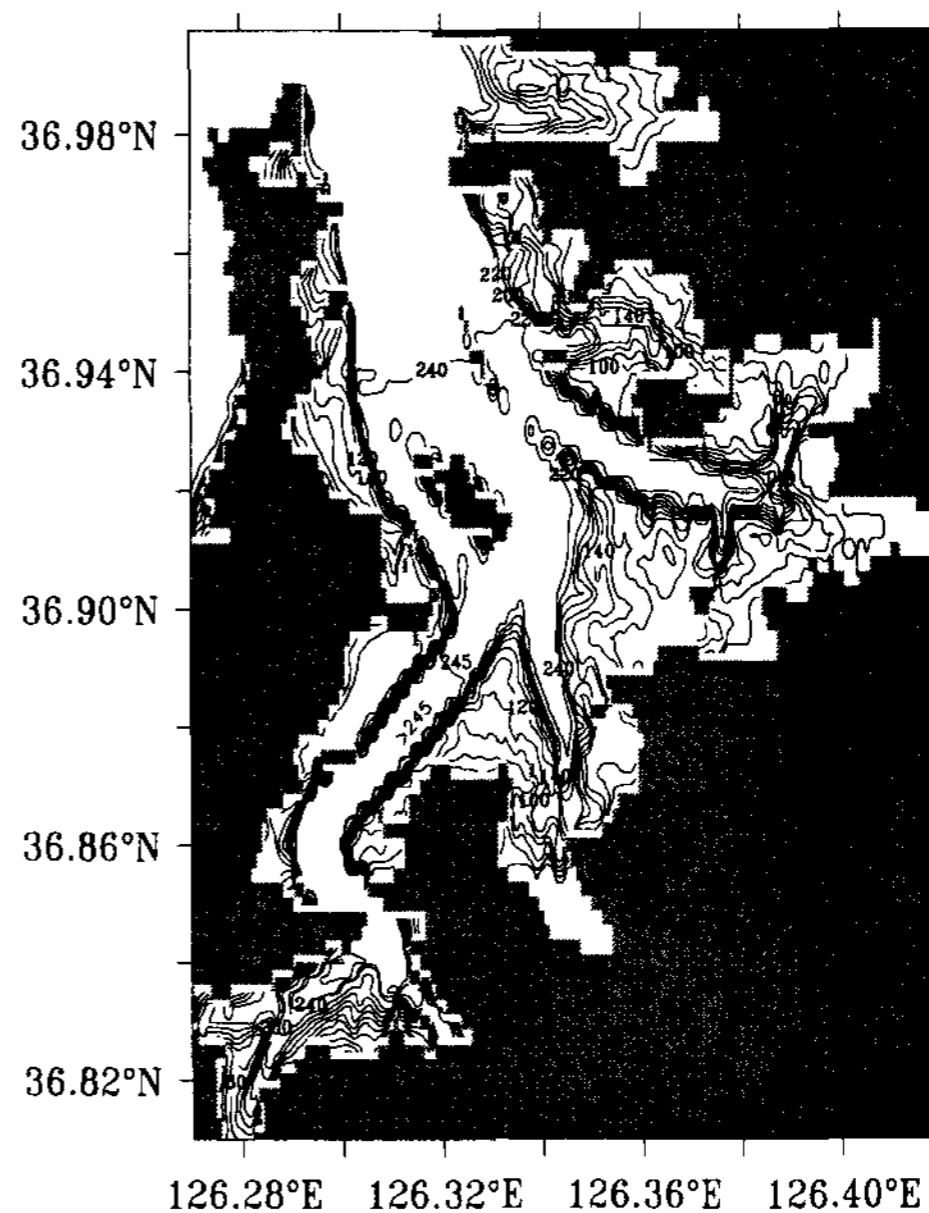


Fig. 9 M2 coamplitude line for the present state(cm).

후 기

본 연구는 조력에너지실용화기술개발 연구사업 (PM43201)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kang, S. K., S.R. Lee, H.J. Lie, "Fine grid tidal modeling of the Yellow and East China Seas", Cont. Shelf Res., Vol. 18, pp. 739-772, 1998.
- [2] Kang, M.G.G. foreman, H.J. Lie, H.J. Lee, J. Cherniawsky, and K.D. Yum, "Two-layer tidal modeling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M2 tide", J. Geophys. Res., Vol. 107, NO. C3, 10.1029/2001JC000838, 2002.