

경기만 조석 조건에서의 파랑변이

유동훈*, 김지웅**

1. 서론

경기만 해역에 발생하는 주요 해양 물리인자로는 조석과 파도이다. 경기만 일대는 서해안 일대에서도 조차가 가장 크고 이로 인한 조석간만의 변화가 크다. 특히 영종도 일대는 조간대가 가장 잘 발달한 지역으로서 만조시에는 대부분의 조성지역이 침수되나 저조시에는 대부분의 지역이 해수로부터 노출되므로 조석의 영향을 크게 받는 지역이다. 인천항의 조석을 참조하면 대조차와 소조차는 각각 798 cm, 347 cm 이고 평균조차는 572 cm 이다.

불규칙파를 스펙트럼파로 파악하여 파수벡터보존식과 에너지보존식만으로 구성된 수치모형으로 천해역에서의 천수, 굴절, 회절, 마찰 및 쇄파등에 의하여 불규칙파가 변이하는 현상과 조석과 연속방정식, 운동량 보존식, 파수벡터보존식, 및 에너지 보존식을 연계한 수치해석으로 산정한 불규칙파의 현상을 비교 검토하였다. 지배방정식은 조석과 연속방정식, 운동량 보존식, 파수벡터보존식, 에너지보존식인데 파수벡터보존식에 회절효과를 고려하는 항을 포함하였다. 스펙트럼현상을 재현하기 위하여는 선형누적법을 사용하였으며, 스펙트럼파에 대한 대표 마찰계수를 간단히 산정하는 약산식을 사용하여 마찰손실효과를 고려하였다. 또한 천해역에서의 쇄파를 고려하기 위하여 Kitaigorodskii의 평형조건식을 수정하여 적용하였다.

조석과 운동에 대한 수치해석을 파랑 수치해석과 연계하여 해양구조물의 안정성에 대한 신뢰도를 높이고, 환경관리 기법을 확립하는 조석과 파랑체계의 표준 전산모형을 수립하고자 한다. 특히 조위와 파랑을 연계 운영시에 나타나는 수치해석 결과와 조석과 파랑을 연계 운영할 때 나타나는 결과에 대한 비교 검토 작업을 하였다.

2. 지배방정식

본 수치모형에 이용된 조석파운동의 기본 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} U d + \frac{\partial}{\partial y} V d = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fV = \frac{\tau_{xs} - \tau_{xb}}{\rho d} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fU = \frac{\tau_{ys} - \tau_{yb}}{\rho d} \quad (3)$$

여기서 각 기호는 다음과 같다.

x, y : 정수해면의 수평면상의 직교좌표
 t : 시간

* 亞洲大學校 土木工學科 부교수 ** 석사과정
(Department of Civil Eng., Ajou University, Suwon 442-749, Korea)

- ζ : 해수위
- d : 총수심
- f : 지구 전향력 계수
- U, V : x, y 각 방향의 수평유속성분
- τ_{xb}, τ_{yb} : 해저마찰응력의 x, y 성분
- τ_{xs}, τ_{ys} : 표면응력의 x, y 성분
- ρ : 해수밀도

식 (2)와 (3)에서 해풍이 없다고 가정할 시 표면응력은 존재치 않는다고 가정할 수 있기 때문에 $\tau_{xs} = \tau_{ys} = 0$ 으로 간주하며, 해저마찰응력은 다음과 같이 표기된다.

$$\tau_{xb} = \rho C_f |U| U \quad (4)$$

$$\tau_{yb} = \rho C_f |U| V \quad (5)$$

$$|U| = \sqrt{U^2 + V^2}$$

따라서, 해저마찰응력 산정식 (4)와 (5)를 식 (2)와 (3)에 대입하면 운동량 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fV + \frac{C_f}{d} |U| U = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fU + \frac{C_f}{d} |U| V = 0 \quad (7)$$

굴절-회절 및 조석 조류의 영향을 받는 스펙트럼과의 파수보존식은 x 와 y 방향을 분리하여 다음과 같다(유동훈, 1993).

$$\frac{\partial P}{\partial t} + (PM+U) \frac{\partial P}{\partial x} + (QM+V) \frac{\partial P}{\partial y} + S \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{M}{4E} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (PM+U) \frac{\partial Q}{\partial x} + (QM+V) \frac{\partial Q}{\partial y} + S \frac{\partial d}{\partial y} = \frac{M}{4E} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

또한 스펙트럼과의 에너지보존식은 에너지손실율을 포함하여 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial (PM+U)E}{\partial x} + \frac{\partial (QM+V)E}{\partial y} + C_E E = 0 \quad (10)$$

여기서 C_E 는 손실계수이며, P 와 Q 는 각각 파수벡타의 x 와 y 성분이며, E 는 파에너지밀도, d 는 수심, U 와 V 는 각각 유속의 x 와 y 성분, M 은 단위군속도(unit number group velocity), 즉 군속도에 파수를 나눈 것으로서

$$M = \frac{1}{2} (1+G) \frac{\sigma}{K} \frac{1}{K} = \frac{C_g}{K} \quad (11)$$

$$G = \frac{2Kd}{\sinh(2Kd)} \quad (12)$$

이다. 따라서 PM 과 QM 은 각각 군속도의 x 와 y 성분 R_x 와 R_y 가 된다. 또한 S 는 수심의 변

화에 따른 파수벡터의 증가율로서 $S = G\sigma/2d$ 이다.

3. 모형의 적용

식 (1), (2), (3)으로 대표되는 조류해석의 지배방정식은 ADE(Angled Derivative Explicit) 유한 차분법의 수치해석 기법을 이용하여 해를 구하였고, 식 (8), (9), (10)의 파수보존식 및 스펙트럼파의 에너지보존식은 일정 간격의 격자에 upstream method에 의한 유한차분법으로 풀어 해를 구하였다(Yoo and O'Connor, 1986). 각 스펙트럼대에 대하여서는 독립적으로 풀어 최종 결과는 누적 적분하여 구한다. 본 모형의 1차 검증을 위하여 Delft 수리시험소의 수조실험자료에 적용한 바 있으며, 서해안이나 유럽의 리버풀만 또는 발틱해 등 여러 현장에 적용한 바 있다. 본 연구대상지는 경기만 개발지구로 한강과 임진강의 지류인 영하하구에 위치하는 인천항을 비롯하여 내·외항과 최근에 남항과 북항의 개발이 완료되었다. 김포 해안 간척공사, 인천항 북측의 율도 발전소와 일도 발전소 건설, 송도 연안도시 개발 및 LNG 잔교부두 등의 건설이 추진되고 있으며, 영종도 신공항 건설과 함께 해저터널의 건설이 추진되고 있다.

경기만 개발지구의 수심은 그림 1에 도시된 바와 같이 극히 일부분만 제외하고는 30 m 정도의 천해역이므로 이 해역에서의 천해파 추정 수치모형을 적용하므로써 천해역에 위치한 해안구조물의 안전 확보를 위한 설계과고를 결정할 수 있다. 경기만 개발지구는 조석 조건의 영향이 매우 강하게 작용하는 해역이라 조석의 영향이 여러 해양인자 특히 파의 변이에 미치는 정도를 정확히 파악하여야 할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

표 1에는 본 모형의 적용 대상해역인 경기만 개발지구의 격자망 구성 및 입사파 조건이 제시되어 있다. 제시된 바와 같이 대상해역의 격자망은 진대상지역에 대하여 크기 1,800m의 정방향 격자로 횡방향 71개, 종방향 80개로 구성하였으며, 입사파는 파향 NW, 파고 8.35 m, 주기 11.81초의 조건을 적용하였다. 또한 적용수심은 평균해수면(datum level + 4.71 m)을 취하였다.

표 1. 대상해역의 격자망 구성 및 입사파 조건

격자망 구성		입사파 조건	
격자크기 [m]	1,800 m × 1,800 m	파향	NW
총격자수 [개]	71 × 80 = 5,680	파고 [m]	8.35
유효격자수 [개]	3,487	주기 [sec]	11.81

그림 1 은 본 수치모형의 적용 대상해역인 경기만 해역 해저 지형도를 나타내었다. 총 10개의 참고지점을 선정하였으며 Lunar hour 0 시 기준으로 Depth(단위 : cm)를 contour 및 색깔별로 구분하여 표현하였다.

그림 1에 명기된 총 10개의 참고지점 중 특히 영종도 근해의 참고지점은 Ref. 5, Ref. 6 및 Ref. 7로, 이 세 지점의 조석 및 파랑 수치모형의 연계시에 나타나는 조위변화를 나타내면 다음 그림 2와 같다. 그림 2에 도시된 바와 같이 Lunar hour 0 시 기준으로 12시간 동안의 영종도 근해의 세 참고지점은 저조위시 -2.35 m, 고조위시 2.65 m 이며, 조석차는 5 m를 보이고 있다.

그림 2에 제시된 영종도 근해의 조위변화를 기초로 조석파를 0 m, 2.65 m, -2.35 m 로 수치모형을 구현하였을 경우와 조석 및 파랑수치모형을 연계 운영시에 나타나는 Lunar hour 12시, 2시 및 7시20분 파고양상을 비교하면 다음 그림 4, 5, 6, 7, 8 및 9와 같다.

그림 3 은 Lunar hour 12 시 기준의 조류양상이며, 북서쪽으로 유출되는 간조기로서 경기만 근해에서는 유속이 상당히 빨리 진행중에 있다. 그림 3과 같은 조류양상 조건에 천해파의 변이분포를 도시한 것이 그림 4 이다.

파에너지의 세기를 비교 검토하여 보면, 심해에서 영종도 근해로 접근함에 따라서 그림 5에 나타난 Stream Line에서도 알 수 있듯이 그림 4에 비하여 파에너지가 영종도 근해에까지 영향을 미치고 있다. 반면, 그림 4에는 파에너지가 그림 5에 비하여 영종도 근해에까지 미치지 못하고 있다.

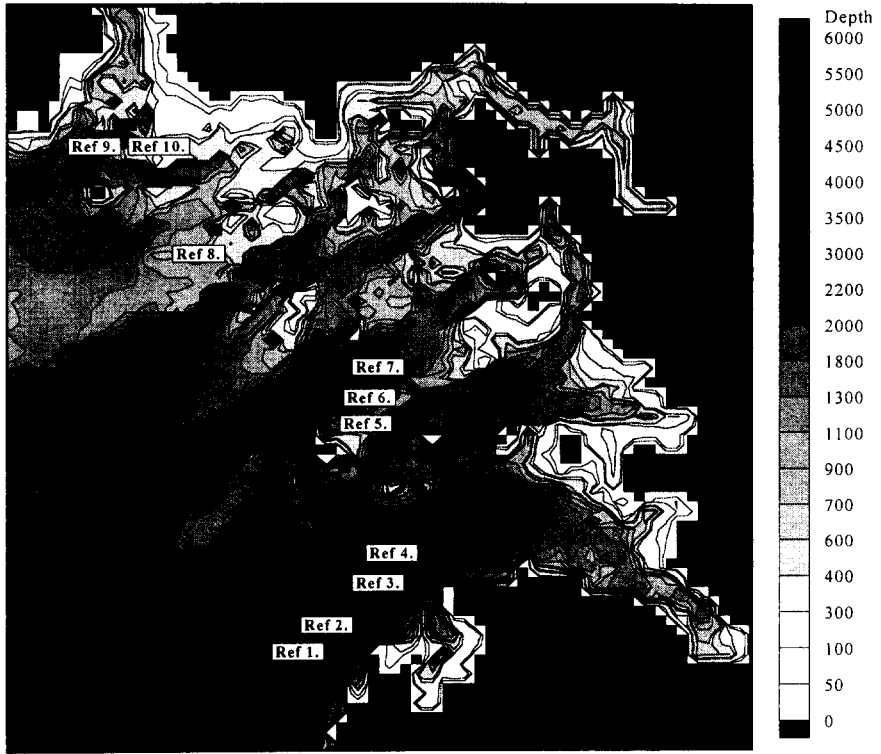


그림 1. 경기만 해역 해저 지형도 및 참고지점

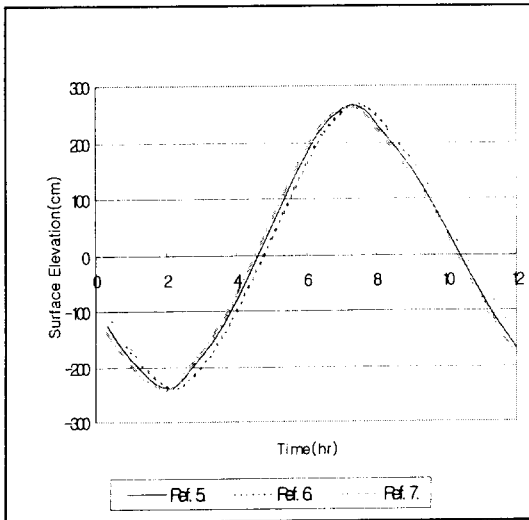


그림 2. 영종도 근해 참고지점에서의 조위변화

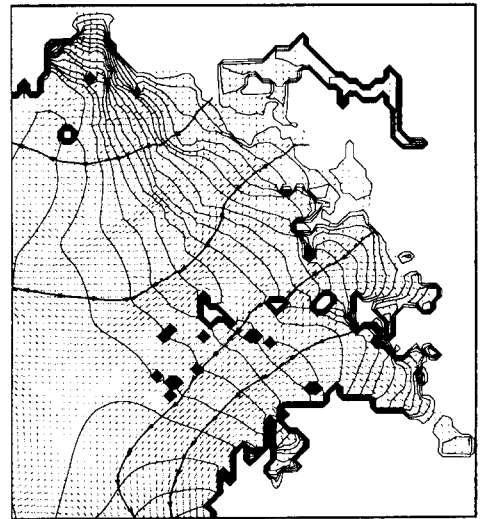


그림 3. 조시 12시의 조류양상도

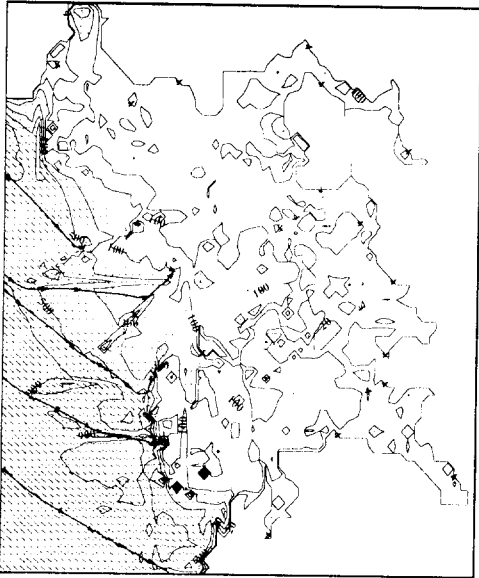


그림 4. 조시 12시 조석 및 파랑 수치모형 연계 운영시 파향벡터도 및 파고분포도

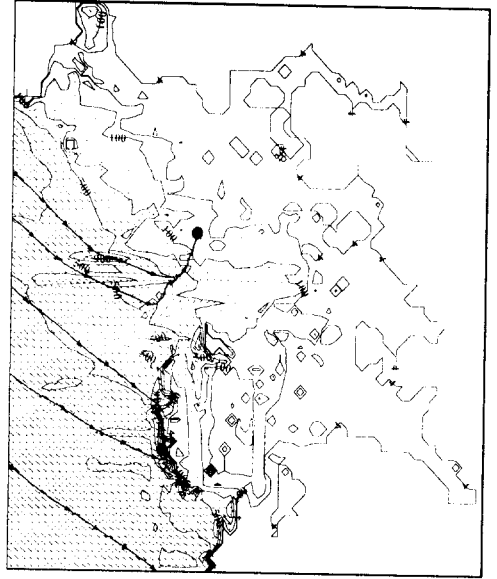


그림 5. 조위(0 m) 및 파랑 수치모형 연계 운영시 파향벡터도 및 파고분포도

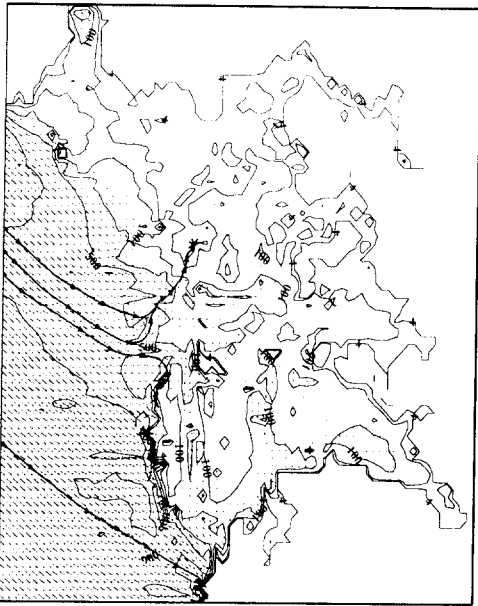


그림 6. 조시 2시 조석 및 파랑 수치모형 연계 운영시 파향벡터도 및 파고분포도

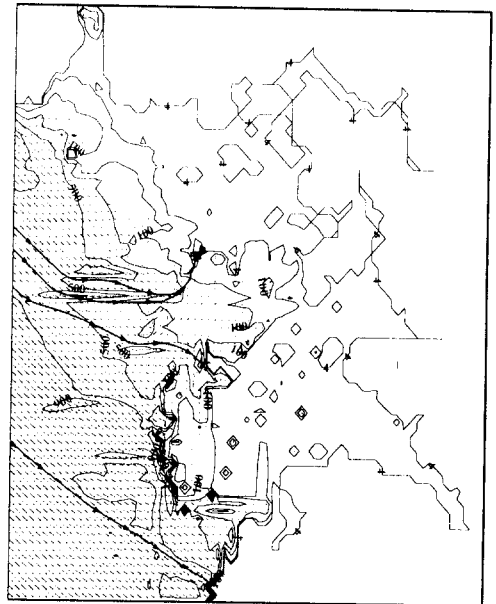


그림 7. 조위(-2.35 m) 및 파랑 수치모형 연계 운영시 파향벡터도 및 파고분포도

파의 양상에 있어서도 그림 4와 그림 5에 도시된 바와 같이 특히 경기만 근해에 파가 들어옴에 따라서 파의 전파 방향에 차이를 보여주고 있다.

그림 6과 7에 있어서는 파에너지의 세기에 큰 차이는 보이지 않고 있지만, 파향에 있어서는 특히 영종도 근해로 접근함에 따라서 다른 양상을 보이고 있는 것을 볼 수 있다.

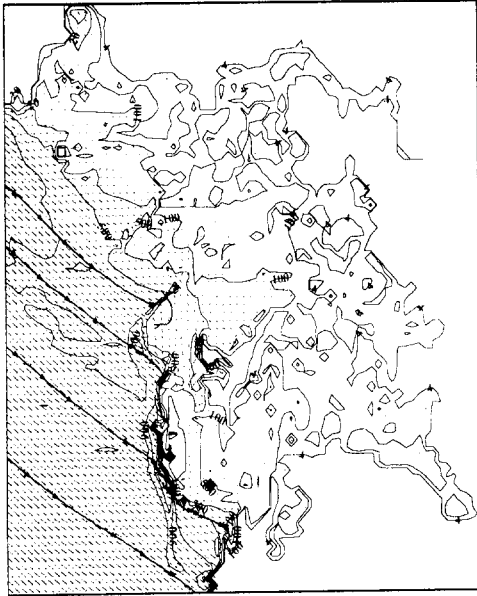


그림 8. 조시 7시 20분조석 및 파랑 수치모형 연계 운영시 파향벡터도 및 파고분포도

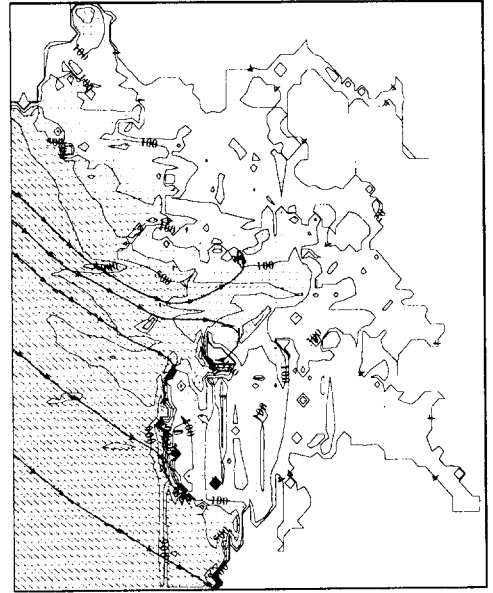


그림 9. 조위(2.65 m) 및 파랑 수치모형 연계 운영시 파향벡터도 및 파고분포도

그림 8과 9에 있어서는 파에너지의 세기와 파의 전파방향에 있어서 매우 큰 차이를 보여주고 있다. 그림 8에 있어서 파의 전파가 간조기의 조류양상으로 말미암아 경기만 근해에 특히 영종도 근해에 영향을 미치는 못하고 있다. 파에너지의 세기에 있어서도 그림 9에 비하여 작은 결과를 나타내어 주고 있다.

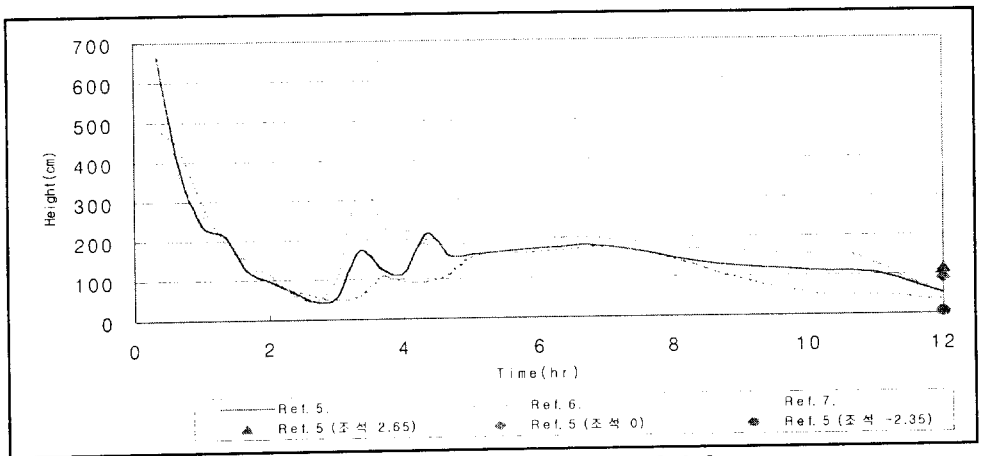


그림 7. 영종도 근해 참고지점의 파의 높이변화도

그림 7은 영종도 근해의 세 참고지점의 Lunar hour 0시에서 12시까지의 파고 변화를 도시한 Graph이다. Lunar hour 12시 조석 및 파랑 수치모형의 파의 높이는 조석파를 0 m로 가정한 파랑 수치모형의 파고보다는 작게 나타나고, 조석파 -2.35 m 보다는 크게 나타나고 있다.

5. 결 론

본 연구에서 개발된 모형은 굴절, 회절, 해저면마찰, 쇄파손실 등 천해역에서의 파변이현상을 고려한 것으로 불규칙파를 스펙트럼파로 재현하여 조석 조건에서의 변이를 해석하였다. 경기만 해역에 조석파 수치모형과 파랑 수치모형을 연계하였을 경우와 조위와 파랑 수치 모형을 하였을 경우에 대해 비교 검토해 보았다.

경기만 지역은 조수간만의 차가 심하고 매우 복잡한 지형이다. 그러므로 조위와 파랑 수치 모형의 연계운영 결과 보다는 조석과 파랑의 연계에 좀 더 나은 결과치를 가져 올 수 있다고 판단된다. 특히 해양구조물의 경우 대부분 근해에 위치하므로 좀 더 경제적인 설계를 할 수 있을 것이다.

결과적으로 수치모형의 계산결과시 조석 조건에 따라 파고 및 파장의 변이가 심대하게 다를 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 유동훈, 1993, 천해에서 불규칙파의 변이, 한국해양해양공학회지, 5(3): 212-220.
농어촌진흥공사, 1995, 한국의 간척.
서해안 간척개발에 관한 연구, 1996, 서울대학교 심재문화재단.
Kitaigorodskii, S.A., Krasitskii, V.P. and Zaslavskii, M.M., 1975, On Phillips' equilibrium range in the spectra of wind generated gravity waves, J. Phys. Oceanogr., 5: 410-420.
Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1988, Diffraction of waves in caustics, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 114, 6: 715-731.