

광안해역에서의 파랑변형예측

박정철* · 김재중* · 김인철**
*동아대학교 토목해양공학부, **동서대학교 건설공학부

Prediction of Wave Transformation in the Kwangan Beach

J. C. PARK*, J. J. KIM* AND I. C. KIM**

*Division of Civil & Ocean Engineering, Donga University, Pusan 604-714, Korea

**Division of Architecture & Civil Engineering Dongseo University, Pusan 617-716, Korea

KEY WORDS: Wave-current model 파랑-흐름모델, Wave-model 파랑모델, Current field 흐름장, Parabolic model 포물형모델, Kwangan beach 광안해역

ABSTRACT: Water waves propagate over irregular bottom bathymetry are transformed by refraction, diffraction, shoaling, reflection etc. Principal factor of wave transform is bottom bathymetry, but in case of current field, current is another important factor which effect wave transformation. The governing equation of this study is developed as wave-current equation type to investigate the effect of wave-current interaction. It starts from Berkhoff's(1972) mild slope equation and is transformed to time-dependent hyperbolic type equation by using variational principal. Finally the governing equation is shown as a parabolic type equation by splitting method. This wave-current model was applied to the Kwangan beach which is located at Pusan. The numerical simulation results of this model show the characteristics of wave transformation and flow pattern around the Kwangan beach fairly well.

1. 서 론

해안개발이나 연안역개발에 있어서는 해안선변형과 생태계변화 등의 환경파괴라는 문제가 발생하게 되며 이러한 환경문제는 국민의식이 높아짐에 따라서 개발 반대의 여론이 발생하기도 한다. 필요한 해안개발을 효과적으로 수행하기 위해서는 개발 전후의 환경변화를 정확히 예측하여 그를 최소화하는 방향으로의 연구가 요구되고 있다. 해양환경변화에 가장 큰 영향을 미치는 주된 물리적 인자는 파랑이기 때문에 해양환경변화 연구중 한 분야인 파랑변형예측은 매우 중요한 연구과제가 된다.

이러한 파랑은 해양에서 발생하여 연안으로 입사하면서 회절, 굴절 및 반사 등의 변형을 일으키는데 주된 물리적 인자는 수심의 변화이지만 흐름, 바람 등에 의해서도 변형된다. 하지만, 대부분의 파랑모델들은 수심의 변화만을 고려할 수 있는 파랑식(wave equation)을 사용하기 때문에 흐름이 존재하는 해역에서는 현장과 다소 차이가 있다. 특히, 해안구조물 설계시 대상해역이 흐름의 영향이 강한 곳이라면 파랑식을 사용하여 예측하는 것 보다 파랑-흐름식(wave-current equation)을 사용하여 흐름의 효과를 고려한 파랑변형 예측이 타당하다.

파랑식에 관한 연구는 Berkhoff(1972)가 완경사방정식을 발표한 이후에 많은 발전이 있었다. 하지만 Berkhoff의 완경사방정식은 회절과 굴절에 수심의 변화만 고려하는 파랑식이기 때문에 흐름이 존재하는 해역에서는 흐름에 의하여 변형되는 파랑을 예측하지 못한다.

흐름의 효과를 고려한 파랑변형 연구는 파랑선법을 사용한

Arthur(1950)에 의해 처음으로 시도되었다. 이후 파랑-흐름모델에 관한 연구는 굴절만 고려한 연구와 회절과 굴절을 동시에 고려할 수 있는 모델에 관한 연구로 진행되었다. 굴절만을 고려한 연구로는 Mei(1973), Phillips(1977) 등이 있으며, 이들은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 등을 수심적분하여 파랑-흐름식을 유도하였다. 그리고 회절과 굴절을 동시에 고려한 파랑-흐름모델에 관한 연구는 Booij(1981) 등이 있으며, Booij는 타원형 편미분 방정식에 흐름의 영향과 시간항을 포함시켜 쌍곡형 편미분 방정식을 유도하였다. 이러한 회절과 굴절을 동시에 고려한 연구는 Liu(1983), Kriby(1984) 등에 의하여 계속 진행되었다.

본 연구에서는 Berkhoff(1972)의 완경사방정식을 Booij(1981)의 변분이론(variational principle)과 분리방법(splitting method)를 이용하여 파랑-흐름식을 유도하였다. 지배방정식의 형태는 포물형 파랑-흐름식이고 경계조건이 간단하며 계산시간이 짧고 흐름의 영향을 고려한 파랑변형계산이 가능하다.

그리고 본 연구에서는 포물형 파랑-흐름식을 부산 광안리해역에 적용하여 파랑변형을 예측하고 수심의 변화만을 고려하는 파랑식을 사용한 경우의 예측결과와 비교하였다.

2. 지배방정식

Berkhoff는 수심의 변화에 의한 회절과 굴절을 고려할 수 있는 식 (1)과 같은 이를 완경사방정식을 제시하였다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\phi}) + \omega^2 \frac{C_g}{C} \hat{\phi} = 0 \quad (1)$$

여기서, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} i + \frac{\partial}{\partial x_2} j$ 는 미분연산자, $\hat{\phi}$ 는 정상상태의 표면포텐셜, ω 는 절대각속도, C 는 파속, C_g 는 군속도이다.

식 (1)은 선형파이론에 기초하여 유도되었기 때문에 파랑의 비선형성을 고려하지 못하며 수치계산방법 또한 FEM을 사용하여 계산시간이 많이 걸리고 경계처리 등에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 진행파에 대한 속도포텐셜을 Multiple-scale 확장법을 사용하여 파랑의 유한진폭을 고려하고, x 방향 (파의 진행방향)의 파수성분의 근사도에 Minimax 근사를 이용하여 입사각 및 파랑진행방향의 허용범위를 확장한 광각포물형방정식을 사용하여 지배방정식을 구성하였으며 식 (2)와 같이 흐름의 효과를 고려한 파랑변형계산이 가능한 파랑-흐름식이다.

$$\begin{aligned} & (C_g + U)A_x - 2\Delta_1 VA_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U)A \\ & + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left(\frac{C_g + U}{\sigma} \right)_x - \Delta_1 \sigma \left(\frac{V}{\sigma} \right)_y \right\} A + i\Delta \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{y,y} \right] \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{y,x} + \left[UV \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{x,y} \right\} + \frac{i\sigma k^2}{2} D|A|^2 A \\ & + \frac{\omega}{2} A + \frac{-b_1}{k} \left\{ \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{y,xx} + 2i \left(\sigma V \left(\frac{a}{\sigma} \right) \right)_{y,x} \right\} \\ & + b_1 \beta_1 \left\{ 2i\omega U \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x + 2i\sigma V \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y - 2UV \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{xy} \right. \\ & \quad \left. + \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{y,y} \right] - \frac{i}{k} b_1 \{ (\omega V)_y + 3(\omega U)_x \} \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x \right. \\ & \quad \left. - \Delta_2 \left\{ \omega U \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x + \frac{1}{2} \omega U_x \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} + ik\omega U(a_0 - 1) \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, A 는 복소진폭, $p = CC_g$, ω 는 절대각속도, σ 는 상대각속도, \bar{k} 는 진행방향과 직각을 이루는 y 방향의 평균 파수이며, U, V 는 x, y 방향의 유속을 의미한다. 그리고

$$\beta_1 = \frac{k_x}{k^2} + \frac{(k(p - U^2))_x}{2k^2(p - U^2)}, \quad \Delta_1 = a_1 - b_1, \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1,$$

$\Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k}$ 이고 a_0, a_1, b_1 는 Minimax 이론에 의한 계수이며 만약, $a_0 = 1, a_1 = -0.5, b_1 = 0$ 인 경우는 Radder(1979)의 근사식과 동일하게 되고, $a_0 = 1, a_1 = -0.75, b_1 = -0.25$ 인 경우는 Booij(1981)의 근사식이 되며 이를 Pade'의 근사라고 한다. 그리고 $a_0 = 0.994733, a_1 = -0.890065, b_1 = -0.451641$ 인 경우는 파의 주 진행방향에 대한 입사각의 허용범위가 70° 까지 가능하다.

식 (2)에서 파랑의 비선형성을 고려하지 않고 흐름이 없는 경우 즉, $U=0$ 라면 식 (3)과 같이 되며, 이는 Radder(1979)가 유도한 파랑식과 같다.

$$\begin{aligned} & 2ikCC_g A_x + 2k(k - \bar{k})(CC_g)A \\ & + i(kCC_g)_x A + (CC_g A_y)_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 수치차분 및 경계조건

본 연구에서는 지배방정식을 차분화에 있어서 좌표계는 Fig. 1과 같다. x 방향을 파의 진행방향으로 정의하고 y 방향을 연안과 평행한 방향으로 정의한다. 지배방정식의 형태가 포물형 편미분방정식이기 때문에 Crank-Nicolson scheme을 사용하였다. x 방향으로의 차분은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A_{i+1,j} - A_{i,j}}{\Delta x} \quad (4)$$

혼용편미분형태의 차분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A}{\partial x \partial y} = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{A_{i+1,j+1} - A_{i+1,j-1}}{2\Delta y} \right. \\ \left. - \frac{A_{i,j+1} - A_{i,j-1}}{2\Delta y} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

위와 같은 방법으로 식 (2)의 파랑-흐름식을 각 항별로 차분하고 복소진폭 A 에 관하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} & a A_{i+1,j+1} + b A_{i+1,j} + c A_{i+1,j-1} \\ & = d A_{i,j+1} + e A_{i,j} + f A_{i,j-1} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 계수 a, b, c, d, e, f는 변수로 되어 있으며 복소수와 비선형항이다. 식 (6)에서 좌변항은 미지의 값이며, 이때 우변항은 기지값이 되는데, 계산되어져 있거나 초기조건으로부터 알 수 있다. 초기조건으로 외해에서는 파고, 주기, 파향 등 파의 입사조건을 주었으며 측면경계조건으로는 완전반사를 사용하였다. 그리고 내해쪽으로 경계는 외해쪽에서 계산되어져 오기 때문에 경계조건이 필요 없게 된다.

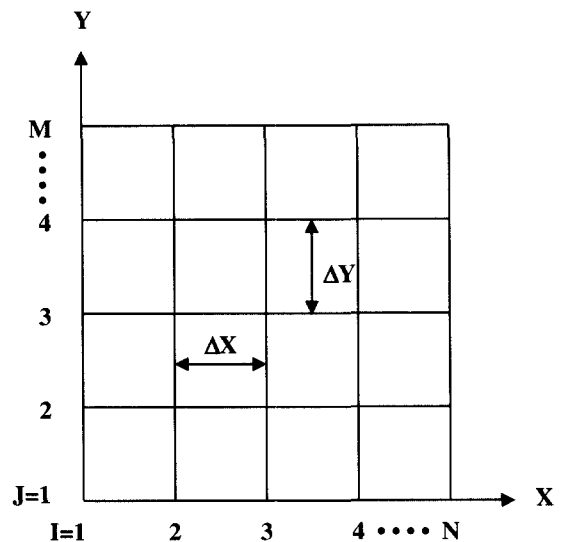


Fig. 1 Definition of coordinate system

4. 모델의 적용

본 연구의 대상해역은 광안리 인근해역이다. 광안리해역은 부산광역시 남구에 위치하고 여름철에는 외지인들의 피서지로 널리 알려져 있으며, 민락동 매립지의 놀이시설과 수변공원 건설로 평상시 부산시민의 휴식처로 널리 이용되고 있다. 최근에 민락동 인근 해역의 매립과 광안대로건설공사 등으로 해안선 변화가 있었다.

본 연구에서는 광안리해역에서의 파랑변형을 흐름을 고려하지 않은 경우, 즉 파랑식을 사용하여 예측한 경우와 흐름을 고려한 파랑-흐름식을 사용한 경우의 파랑변형을 예측한 후 그 결과를 분석하였다.

파랑변형예측에 사용된 파랑제원은 부산광역시 건설관리부의 컨테이너 배후도로(광안대로) 건설사업의 사후 환경영향조사 보고서(1998)를 검토하여 Table 1과 같이 계산영역 외해에서 평상시 입사파를 결정하였다. 계절별 파랑 중 본 연구에서 사용한 입사파는 가을철 파랑자료를 이용하였다.

파랑계산을 위한 수심도는 Fig. 2와 같으며 격자간격 $\Delta x, \Delta y$ 는 동일하게 20m로 하였고 격자수는 54×64이다. 그림에서 파선으로 표시된 A와 B는 연안에서 0.6km와 0.44km 떨어진 곳으로 흐름의 영향으로 인한 파랑을 비교하기 위하여 입으로 설정한 단면이다.

흐름자료는 동아대학교 해양자원연구소(1992)의 2차원 흐름 모델을 이용하여 최강 낙조류시와 최강 창조류시의 흐름을 계산하여 이를 파랑-흐름모델에서 흐름의 입력자료로 사용하였다.

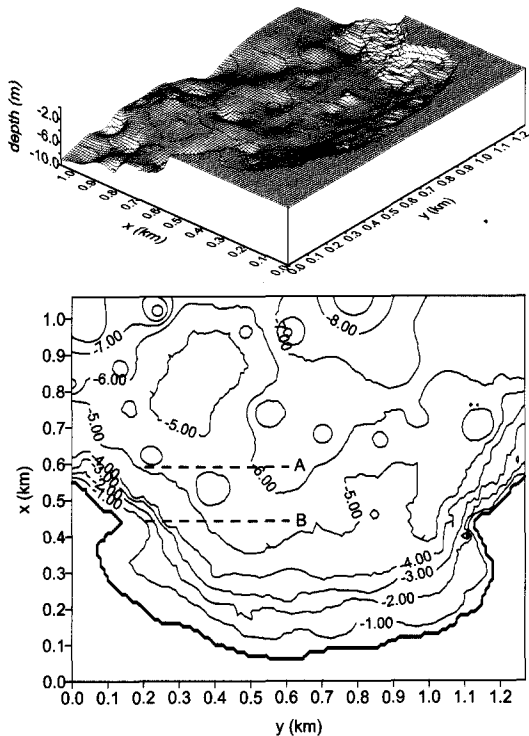


Fig. 2 Bottom topography of Kwangan beach

Table 1 Seasonal wave data

Season	Wave Height	Wave Period	Wave Direction
Spring	0.53m	6.58sec	SE
Summer	0.92m	6.90sec	SE
Autumn	1.02m	7.27sec	SE
Winter	0.58m	6.53sec	SE

4.1 흐름을 고려하지 않은 파랑변형예측

흐름이 없는 경우에 대하여 파랑변형을 예측한 결과는 Fig. 3과 같다. 이는 각 격자점에서 계산된 수치결과를 입사파고로 나누어 무차원화된 파고와 파향을 나타낸 것이다. 민락동 인근 해역에서(x 축 방향0.2-0.6km, y 축 방향 0.2-0.6km) 파랑변형이 매우 복잡한 형태로 나타나며 수치계산결과 계산영역 중 다른지역에 비하여 파랑이 집중되고 파고가 크게 나타난다. 이러한 원인은 Fig.2의 수심도에 관찰하면 알 수 있는데 민락동 인근해역이 다른지역에 비하여 수심의 변화가 심하여 이로 인하여 회절과 굴절이 복합적으로 작용하기 때문이라고 판단된다.

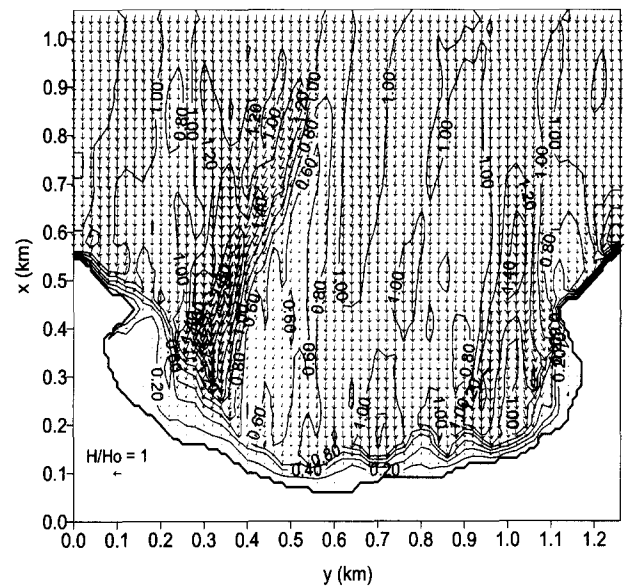


Fig. 3 Distribution of wave height and angles without current

4.2 흐름을 고려한 파랑변형예측

대상해역에서 흐름의 주된 인자는 조류이다. 따라서 대상해역에서 전반적인 흐름의 양상을 파악하기 위하여 기존에 널리 사용되는 2차원 흐름모델을 사용하여 흐름을 계산하였는데 그 결과는 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

Fig. 4는 최강 낙조류시의 흐름을 나타낸 것으로 흐름의 형태는 외해우측에서 좌측으로 흐르고 있으며 흐름의 세기는 약 0.25m/sec이고 미쳐 빠져 나가지 못한 흐름이 연안을 따라 흐르고 있다. Fig. 5는 최강 창조류시의 흐름을 나타낸 것으로 최강 낙조류시와는 흐름의 형태가 반대이며 외해에서 흐름의 세기는 0.4m/sec이다.

이상과 같은 흐름을 입력자료로 사용하여 파랑변형을 예측한 결과는 Fig. 6, Fig. 7과 같다. Fig. 6은 최강 낙조류시의 흐름의 영향에 의하여 변형된 파랑장을 나타낸 것이고 Fig. 7은 최강 창조류시의 흐름의 영향에 의하여 변형된 파랑장을 나타낸 것이다.

최강 낙조류시와 최강 창조류시의 흐름을 고려한 계산결과가 흐름을 고려하지 않은 경우 계산결과와 비교해 볼 때 전반적인 경향은 유사하지만, Fig. 3, Fig. 6, Fig. 7에서 파고비가 1인 등파고선을 비교하면 모두 다른 형상을 하고 있다. 이것은 흐름을 고려하지 않은 경우와 흐름을 고려한 경우 파랑변형의

차이가 있으며 흐름의 세기와 방향에 의하여서도 파가 변형됨을 알 수 있다. 특히 단면 A와 B에서의 파고를 비교하면 최강 낙조류시에는 파의 진행방향과 반대방향으로 흐름이 일어나기 때문에 전반적으로 파고의 상승효과를 보이고 있으며 최강 창조류시의 경우에는 파의 진행방향과 같은 방향의 흐름으로 인하여 파고가 흐름을 고려하지 않은 경우보다 파고가 작게 나타난다. 이러한 결과를 보다 자세히 관찰하기 위해서 Fig. 8과 Fig. 9에서 각 격자점에서 계산된 파고를 입사파고로 나누어 무차원하여 나타내었다.

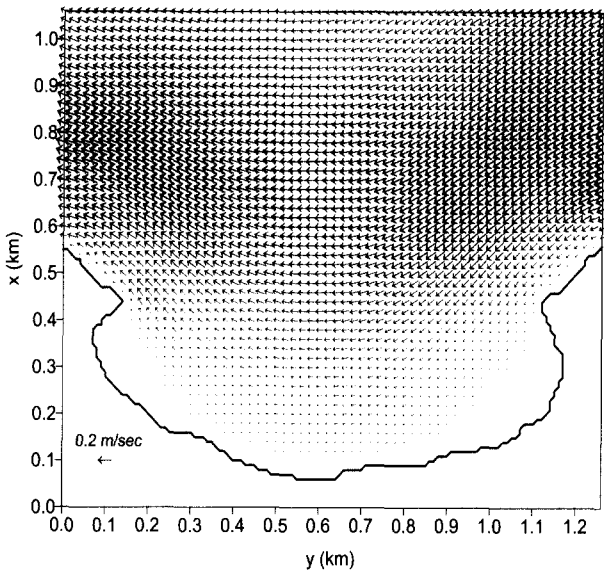


Fig. 4 Tidal velocity distribution at maximum ebb tide

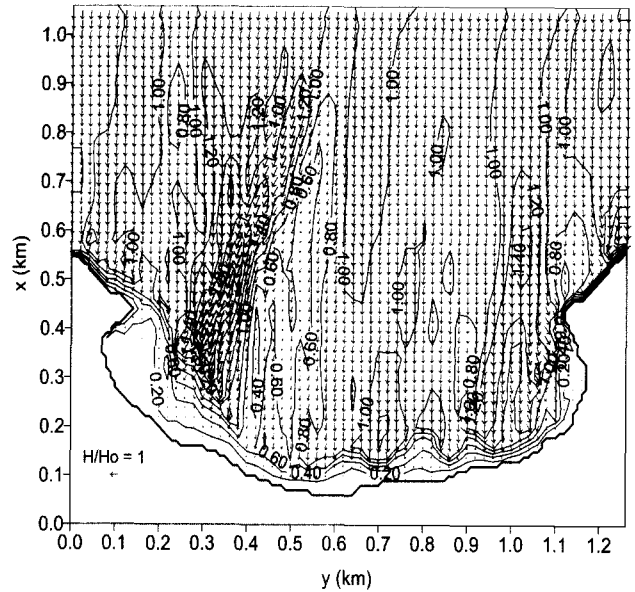


Fig. 6 Distribution of wave height and angles with maximum ebb tide

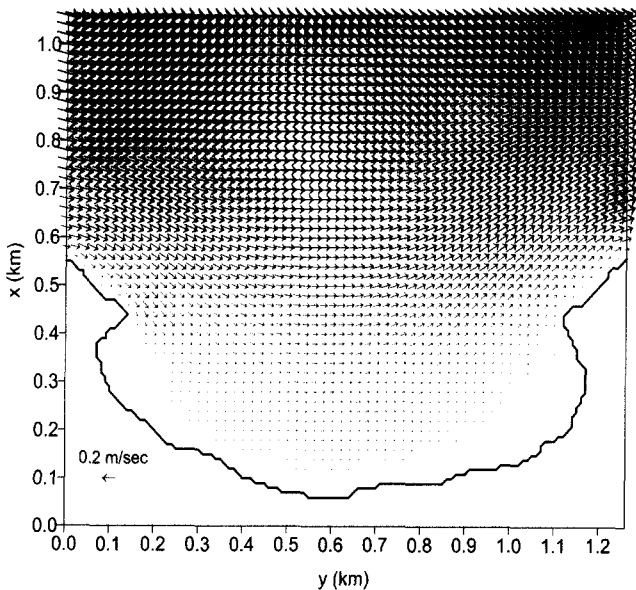


Fig. 5 Tidal velocity distribution at maximum flood tide

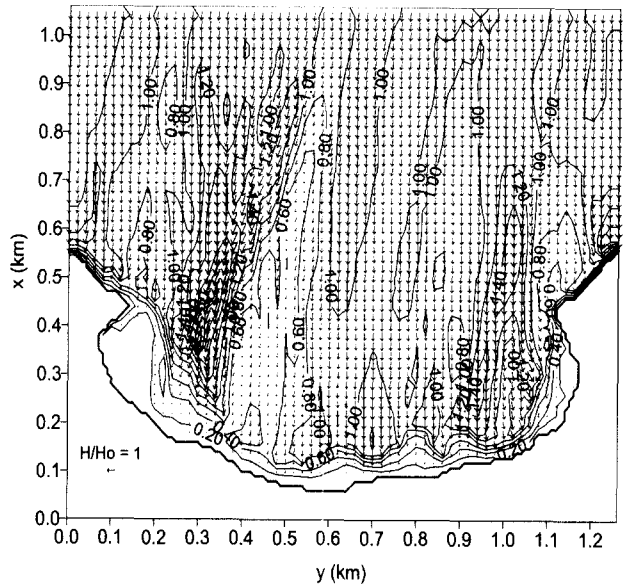


Fig. 7 Distribution of wave height and angles with maximum flood tide

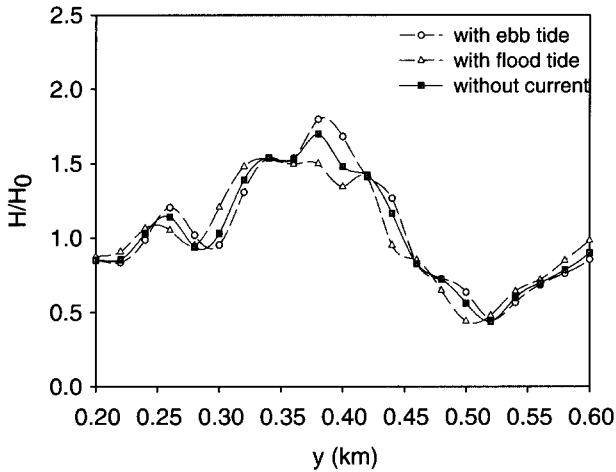


Fig. 8 Wave height comparisons between Wave model results and wave-current model results (Section A)

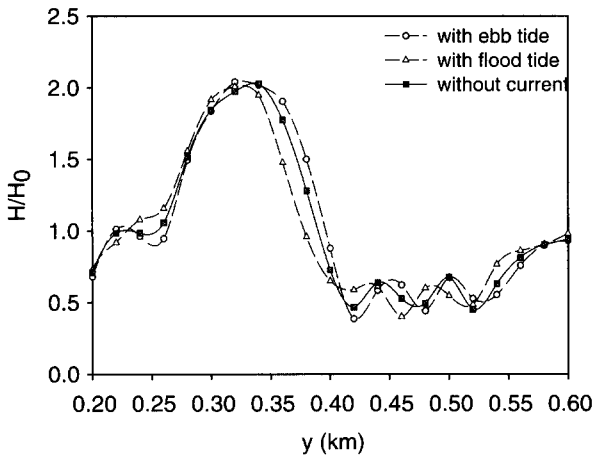


Fig. 9 Wave height comparisons between Wave model results and wave-current model results (Section B)

5. 결 론

본 연구에서는 파랑식과 파랑-흐름식을 사용하여 광안리해역의 평상파랑을 예측하였다. 지배방정식의 형태는 포물형편미분방정식이고 회절과 굴절을 동시에 고려 할 수 있으며, 흐름에 의한 파랑변형도 예측이 가능하다. 본 모델을 광안해역에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평상파랑제원을 사용하여 광안리 해수욕장 부근에서 흐름을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 파랑변형을 예측하였다. 그 결과 흐름을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 파랑변형에 차이가 있음을 알 수 있었다.
- (2) 흐름의 방향이 파의 진행방향과 일치할 경우 전반적으로 파고는 감소하며 파의 진행방향과 흐름의 방향이 반대로 작용

하는 경우 파의 상승효과 나타낸다.

- (3) 광안해역에서 파랑변형의 지배적인 인자는 수심의 변화이지만 흐름에 의하여서도 파랑이 변형되는 것을 알 수 있다.
- (4) 본 연구에서는 흐름의 효과를 고려한 파랑변형계산을 위하여 흐름의 입력값을 2차원 흐름모델의 계산결과를 사용하였는데 현장관측결과를 이용한다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김재중, 박정철(1998). “광각 포물형 완경사 방정식에 관한 연구”, 한국항만공학회, 제12권, 제2호, pp 281~289.

동아대학교(1992). “인공섬 건설에 따른 해안선 변형에 관한 연구”, 동아대학교 해양자원연구소.

박정철(1999). “흐름이 고려된 불규칙 파랑모델에 관한 연구”, 동아대학교 박사학위논문.

부산광역시(1998). “컨테이너 수송배후도로(광안대로) 건설 사업 사후 환경영향조사 보고서”, 부산광역시 건설안전관리본부.

Arthur R. S.(1950). “Refraction of Shallow Water Waves: the Combined Effect of Currents and Underwater Topography”, Trans. AGU, 31, pp 549~552.

Berkhoff J. C. W.(1976). “Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves Diffraction and Refraction”, Publ, 163, Delft Hydraulic Laboratory.

Booij N.(1981). “Gravity Waves on Water with Non-uniform Depth and Current”, Doctoral Dissertation, Technical University of Delft, The Netherlands.

Kirby J. T.(1984). “A Note on Linear Surface Wave-Current Interaction over Slowly Varying Topography”, J. of Geophysical Research, Vol. 89, pp 745~747.

Kirby J. T.(1986b). “Rational Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves”, Coastal Engineering, Vol. 10, pp 355~378.

Liu, P. L. F.(1983). “Wave-current Interactions on a Slowly Varying Topography”, J. of Geophysical Research, Vol. 88, No. C7, pp 4421~4426.

Mei C. C.(1973). “A Note on the Averaged Momentum Balance in Two-dimensional Water Waves”, J. of Marine Research, Vol. 31, pp 97~104.

Phillips O. M.(1977). “The Dynamics of the Upper Ocean”, Cambridge University Press, Cambridge, England.

Radder A. C.(1979). “On the Parabolic Equation Method for Water-Wave Propagation”, J. of Fluid of Mech., Vol. 95 Part 1, pp 159~176.

2000년 9월 19일 원고 접수

2000년 12월 16일 수정본 채택