

論 文
3-1

## 광안해역에서의 파랑변형예측

박정철\* · 김재중\*\* · 이정만\*

Prediction Wave Transformation in the Kwangan Beach

*J. C. Park J. J. Kim J. M. Lee*

**Key Words** : 파랑-흐름모델(Wave-current Model), 파랑모델(Wave-Model), 흐름장(Current Field), 포물형모델(Parabolic Model), 광안해역(Kwangan Beach)

### 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 develope as wave-current equation type to investigate the effect of wave-current interaction.

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

육지자원의 부족으로 해양개발에 대한 요구는 날로 가속화되고 있지만, 개발로 인한 환경변화는 날로 심각해지고 있다. 이러한 해양환경변화를 예

측하기 위해서는 해양환경변화의 가장 큰 요소인 파랑변형을 예측해야 하는데 파랑변형에 미치는 주된 물리적 인자는 수심의 변화이지만 흐름, 바람 등에 의하여서도 파랑이 변형된다. 하지만, 대부분의 파랑예측모델들은 수심의 변화만을 고려할 수 있는 파랑식(wave equation)을 이용하여 파랑변형

\* 정회원, 동아대학교 토목해양공학부 강사  
\*\* 정회원, 동아대학교 토목해양공학부 교수

을 예측하였기 때문에 흐름이 존재하는 해역에서는 현장과 다소 차이가 있을 수 있다. 특히, 해안구조물 설계시 흐름의 영향이 강한 해역이라면 파랑식을 사용하는 것 보다 파랑-흐름식(wave-current equation)을 사용하여 파랑변형을 예측하는 것이 타당하다.

본 연구의 지배방정식은 Berkhoff(1972)의 완경사 방정식을 Booij(1981)의 변분이론(variational principle)과 분리방법(splitting method)를 이용하여 파랑-흐름작용식을 유도하였는데 지배방정식의 형태는 포물형 파랑-흐름식 수심의 변화는 물론 흐름의 영향도 고려한 파랑변형계산이 가능하다. 그리고 본 모델을 이용하여 대상해역을 선정하여 파랑식을 사용한 경우와 파랑-흐름식을 사용한 경우의 파랑 변형을 비교 분석하였다.

## 2. 지배방정식

Berkhoff의 완경사방정식은 수심의 변화만을 고려하여 회절과 굴절을 고려할 수 있는 파랑식으로 식 (1)과 같다.

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

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

식 (1)은 선형파이론에 기초하여 유도되었기 때문에 파랑의 비선형성을 고려하지 못하며 수치계산 방법 또한 FEM을 사용하여 계산시간이 많이 걸리고 경계처리 등에 어려움이 있다. 그래서 본 연구에서는 진행파에 대한 속도포텐셜을 Multiple-scale 확장법을 사용하여 파랑의 유한진폭을 고려하고, x 방향(파의 진행방향)의 파수성분의 근사도는 Minimax 근사를 이용하여 입사각 및 파랑진행방향의 허용범위를 확장한 광각포물형 방정식을 사용하여 지배방정식을 구성하였으며 식(2)와 같이 흐름

의 효과를 고려한 파랑변형계산이 가능한 파랑-흐름식이다.

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

여기서,  $p = CC_g$

$\omega$  : absolute frequency

$\sigma$  : intrinsic frequency

$\bar{k}$  : reference wave number

$U, V$  :  $x, y$  방향의 유속

$$\beta_1 = \frac{k_x}{k^2} + \frac{(k(p - U^2))_x}{2k^2(p - U^2)}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1$$

$$\Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1$$

$$\Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k}$$

여기서,  $a_0, a_1, b_1$ 는 Minimax 이론에 의한 계수이고, 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 Padé의 근사라고도 한다. 그리고  $a_0 = 0.994733, a_1 = -0.890065, b_1 = -0.451641$ 인 경우에 최대 입사각을 70°까지 허용할 수 있다.

식 (2)에서 파랑의 비선형성을 고려하지 않고  $U=0$ 로 흐름이 없는 경우라면 식 (3)과 같이 되며 이 식은 Radder(1979)의 식과 같다.

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

여기서,  $A$ 는 복소진폭으로 표시되는 진폭이고  $\bar{k}$  진행방향과 직각을 이루는  $y$  방향에 대한 평균 파수이다.  $k$ 는 파수  $\omega$ 는 각주파수,  $C$ 는 파속  $C_g$ 는 파의 군속도를 의미한다.

### 3. 수치차분 및 경계조건

본 연구에서 지배방정식을 차분화 하기 위한 좌표계는 Fig. 1과 같다.  $x$ 방향을 파의 진행방향으로 정의하고  $y$  방향을 연안과 평행한 방향으로 정의하였다.  $x$ 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.

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

위와 같은 차분식을 이용하여 지배방정식에 Crank-Nicolson scheme을 적용하면 지배방정식은 다음식과 같이 차분된다.

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

여기서, 계수  $a, b, c, d, e, f$ 는 변수로 되어 있으며, 복소수와 비선형항이다. 왼쪽에 있는 진폭은

이 방정식에서 미지의 값이며, 이때 오른쪽에 있는 진폭은 기지값이 되는데, 계산되어져 있거나 초기 조건으로부터 알 수 있다. 초기조건으로는 외해에서는 파고, 주기, 파향 등 파의 입사조건을 주었으며 측면 경계조건으로는 Closed Boundary를 조건을 사용하였다. 그리고 내해쪽으로의 경계는 외해쪽에서 계산되어져 오기 때문에 경계조건이 필요 없게 된다.

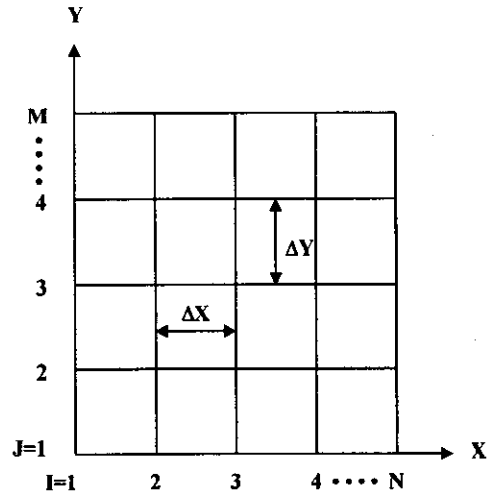


Fig. 1 Definition of coordinate system

### 4. 모델의 적용

본 연구의 대상해역은 광안리 인근해역이다. 광안리해역은 부산광역시 남구에 위치하고 있으며 여름철에는 외지인들의 피서지로 널리 알려져 있으며 민락동 매립지의 놀이시설과 수변공원 건설로 평상시 부산시민의 휴식처로 널리 이용되고 있다. 하지만, 민락동 인근 해역의 매립과 광안대교건설공사로 인하여 해안선의 변화와 주변해역은 많은 환경변화가 있었다.

그래서 본 연구에서는 광안리해역에서의 파랑변형을 흐름을 고려하지 않은 경우와 흐름을 고려한 경우에 대하여 파랑변형을 예측한 후 그 결과를 분석하였다.

파랑변형 예측에 사용된 파랑제원은 부산광역시

건설관리부의 컨테이너 배후도로(광안대로)건설사업의 사후 환경영향조사 보고서(1998)을 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 격자간격은  $\Delta x, \Delta y$ 는 동일하게 20m로 하였고 격자수는  $54 \times 64$ 이다. 그림에서 점선으로 표시된 A와 B는 연안에서 0.6km와 0.44km 떨어진 곳으로 흐름의 영향으로 인한 파랑을 비교하기 위하여 임의로 설정한 단면이다.

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

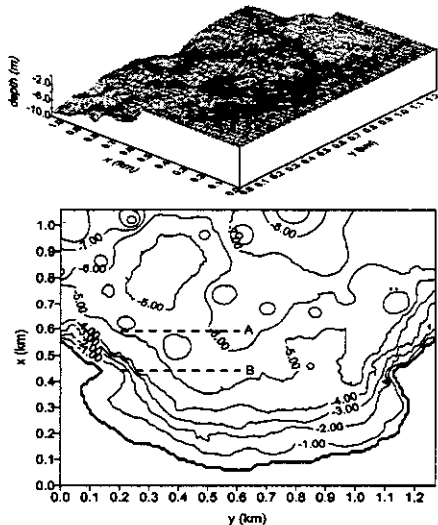


Fig. 2 Bottom topography of Kwangan beach

### 가. 흐름을 고려하지 않은 파랑변형예측

흐름이 없는 경우에 대하여 파랑변형을 예측한 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 각 격자점에서 계산된 수치결과를 입사파고로 나누어 무차원화된 파고와 파향을 나타낸 것이다. 민락동부근해역에서(x축방향 0.2-0.6km, y축방향 0.2-0.6km)에서 파랑변형이 매우 복잡한 형태로 나타나며 타지역에 비하여 파고비가 크게 나타난다. 이러한 원인으로서는 민락동부근해역이 타지역에 비하여 수심의 변화가 심하여 이로 인하여 회절과 굴절이 복합적으로 작용하기 때문이다. 본 모델이 이러한 지리적 특징을 잘 반영하여 파랑변형을 예측한 것이라고 판단된다.

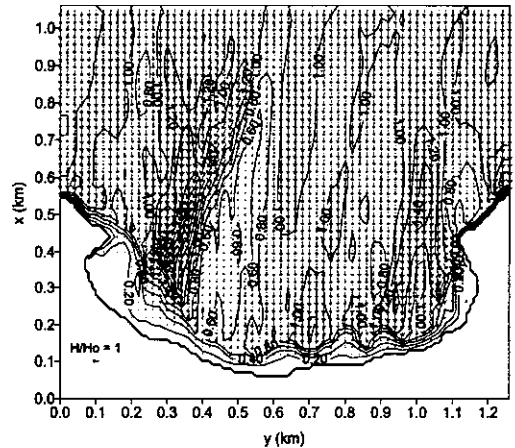


Fig. 3 Distribution of wave height and angles without current

### 나. 흐름을 고려한 파랑변형예측

대상해역에서의 흐름의 주된 인자는 조석에 의한 조류이기 때문에 본 연구에서는 입력자료로 사용될 각 격자점에서의 흐름을 알기 위하여 기존에 널리 사용되는 2차원 흐름모델을 사용하여 흐름을 계산하였는데 그 결과는 Fig. 4, Fig. 5와 같다.(동아대학교 해양자원연구소, 1992)

Fig. 4는 최강 낙조류시의 흐름을 나타낸 것으로 흐름의 형태는 외해우측에서 좌측으로 흐르고 있으

며 흐름의 세기는 약 0.25m/sec이고 미쳐 빠져 나가 지 못한 흐름이 연안을 따라 흐르고 있다. Fig. 5는 최강 창조류시의 흐름을 나타낸 것으로 최강 낙조류 시와는 흐름의 형태가 반대이며 외해에서 흐름의 세기는 0.4m/sec이다.

이상과 같은 흐름을 고려하여 파랑변형을 예측한 결과는 Fig. 6, Fig. 7과 같다. Fig. 6은 최강낙조류 시의 흐름의 영향에 의하여 변형된 파랑장을 나타낸 것이고 Fig. 7은 최강 창조류시의 흐름의 영향에 의하여 변형된 파랑장을 나타낸 것이다. 두 결과 모두 흐름을 고려하지 않은 경우 계산결과 Fig. 3과 비교하면 파랑변형에 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 단면 A와 B에서의 파고를 비교하면 창조류시에는 파의 진행방향과 반대방향으로 흐름이 일어나기 때문에 파고의 상승효과를 보이고 있으며 최강 낙조류 시의 경우에는 파의 진행방향과 같은 방향의 흐름으로 인하여 파고가 흐름을 고려하지 않은 경우보다 작게 나타나고 있다. 이러한 결과를 Fig. 8 과 Fig. 9에 표시하였는데 각격자점에서 파고를 입사파로 무차원화 나타낸 것이다.

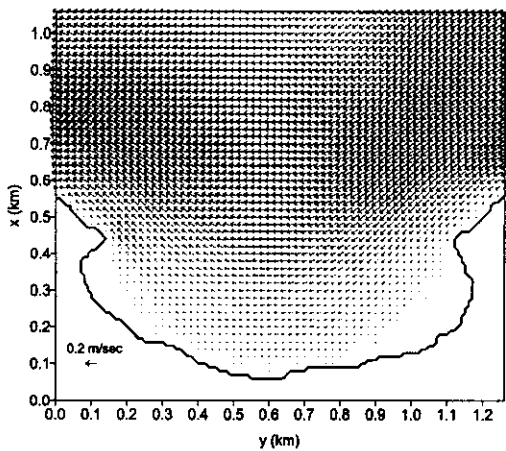


Fig. 4 Tidal velocity distribution at maximum ebb tide

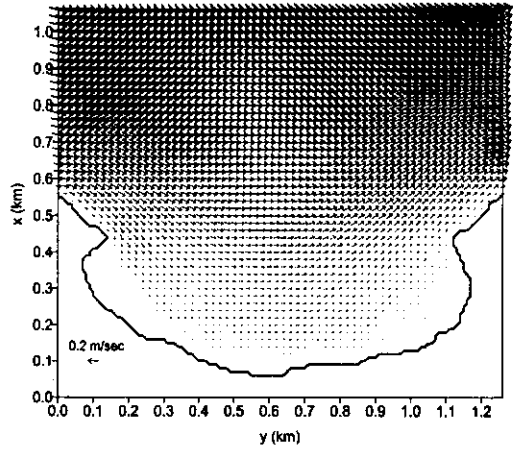


Fig. 5 Tidal velocity distribution at maximum flood tide

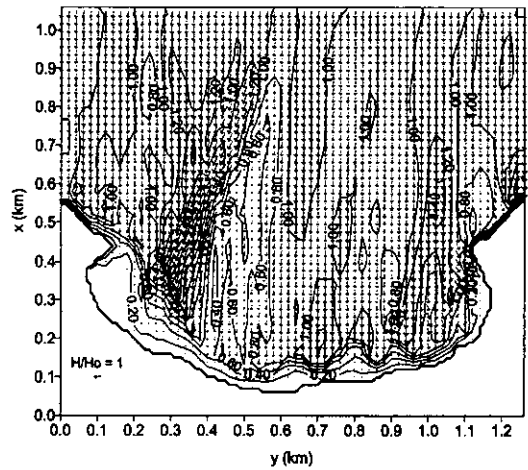


Fig. 6 Distribution of wave height and angles with maximum ebb tide

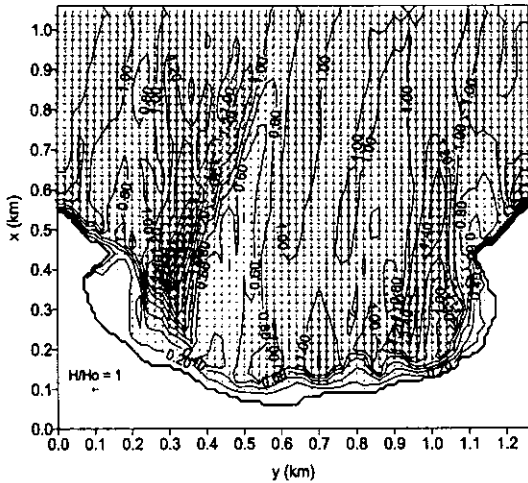


Fig. 7 Distribution of wave height and angles with maximum flood tide

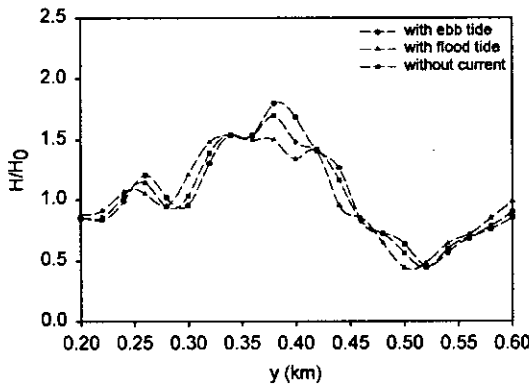


Fig. 8 Wave height comparisons between Wave model results and Wave-current model results (Section A)

## 5. 결론

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

## 6. 참고문헌

1. 김재중, 박정철 (1998), '광각 포물형 환경사 방정식에 관한 연구', 한국항만공학회, 제 12권 제 2호 pp. 281-289.
2. 박정철 (1999), '흐름이 고려된 불규칙 파랑모델에 관한 연구', 동아대학교 박사학위논문.

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

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) 창조류시의 흐름을 고려한 경우가 파랑이 흐름을 고려하지 않은 경우보다 단면 A와 B에서 크게 나타남을 알 수 있다.

3) 본 연구에서는 대상해역을 광안리 인근 해역에서 파랑과 흐름의 상호작용에 의한 파랑변형을 예측하였지만 현장 관측자료의 부족으로 실제와는 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 이에 대한 보완책으로는 추후 체계적인 현장관측을 실시하여 연구한다면 보다 좋은 결과를 기대할 수 있을 것이다.

3. 동아대학교, (1992), '인공섬 건설에 따른 해안선 변형에 관한 연구', 동아대학교 해양자원연구소.
4. 부산광역시 (1998), '컨테이너 수송배후도로(광안대로) 건설 사업 사후 환경영향조사 보고서', 부산광역시 건설안전관리본부.
5. Berkhoff J. C. W. (1976), 'Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves Diffraction and Refraction', Publ, 163, Delft Hydraulic Laboratory.
6. Kriby J. T. (1986b), 'Rational Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves', Coastal Engineering, Vol. 10, pp.355-378.