

# 흐름의 영향을 고려한 정상상태 스펙트럼 파랑모델의 적용 및 분석

이학승\* · 이종우\*\* · 양상용\*\*\*

\*한국해양대학교 대학원, \*\*한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수, \*\*\*한국해양대학교 토목환경시스템공학부 겸임교수

## Application and Analysis of the Steady State Spectral Wave Model Take into Account the Effect of Current

Hak-Seung Lee\* · Joong-Woo Lee\*\* · Sang-Yong Yang\*\*\*

\*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\* , \*\*\*Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 복잡한 수심을 가진 연안해역에서 조석, 바람과 파랑에 의해 발생된 흐름의 영향까지를 고려한 파랑모델의 도입은 대부분의 해안공학 설계나 방재 문제에 매우 중요한 요소이다. 근해역에서 수심변화에 의한 굴절 및 천수효과, 흐름에 의해 유발되는 굴절효과, 파형경사에 따른 쇄파, 회절, 바람에 의한 파의 성장, 파랑 상호간의 간섭, 파랑과 흐름의 상호 간섭 및 에너지 재분포 등을 다룰 수 있다는 점에서 정상상태 스펙트럼 모델의 현장 적용은 지금까지 여러 모델이 다루지 못한 부분을 해소하게 될 것이다. 본 연구에서는 부산 신항만 건설이 이루어지고 있는 가덕인접의 넓은 수역에 대해 파랑의 변환과정을 보다 합리적으로 해석하기 위해 스펙트럼 모델을 적용하고 기존의 모델 결과와 비교 분석하는 것을 골자로 하고 있다. 이러한 시도가 가까운 장래에 항만설계 및 방재시스템 분야에서 보다 안전하고 널리 스펙트럼 모델을 적용하게 하는 계기가 되도록 의도하였다.

**핵심용어** : 연안수역, 조석, 항만설계, 방재, 스펙트럼 파랑모델, 에너지 분포, 천수효과, 파형경사, 정상상태, 잉여에너지

**Abstract** : Introduction of wave model, take into account the effect of tide, wind and wave induced currents at the coastal waters of complex bathymetry, is a very important factor for most coastal engineering design and disaster protection problems. As the steady state spectral wave model could simulate depth induced wave shoaling and refraction, current induced refraction effect, steepness induced wave breaking, diffraction, wind wave growth, wave-wave interaction, and wave-current interaction that redistribute energy, this would support and compensate the gap in the real field of design where other wave models could not deal and cause wrong estimation. In this study, for better understanding and analysis of wave transformation process, we applied the spectral wave model to the large coastal waters near Gadeuk Island where the Busan new port construction project is going on. We also compared the simulation results with the calculatea from the existing model. From such a trial of this study, we hope that broader and safer use of the spectral model in the area of port design and disaster prevention system come through in near future.

**Key words** : Coastal waters, Tide, Port design, Disaster prevention, Spectral wave model, Energy distribution, Shoaling effect, Wave steepness, Steady state, Radiation stress

## 1. 서 론

항만의 기본적인 조건은 육상과 해상의 수송수단이 안전하고 지체없이 신속하게 터미널에 접속하여 하역을 하고 돌아갈 수 있도록 하는 여건을 확보하는 것이며, 특히 수역부분은 선박의 출입과 정박이 원활하도록 제반 수역시설과 정온한 항내 수면을 유지시켜야 한다. 한편, 항만 및 연안역 개발의 기본 파라메타인 파랑은 지형과 수심이 복잡한 연안해역에서 조석, 바람에 의한 파랑의 성장 및 감쇄, 흐름의 간섭, 에너지의 재분포의 가정을 거쳐 다양하게 변하므로, 이를 정량적으로 산정하기 위한 노력은 파랑의 관측과 함께 과거 수십 년간 꾸준

히 진행되었다. 최근에는 이러한 파랑과 연안흐름을 연계시키는 시도도 이루어지고 있다(Jonsson, 1990). 또한, 한국 근해의 해안역은 동계 계절풍과 태풍에 기인하는 풍파의 영향을 받음에도 불구하고 해안역에서 풍파의 성장이 고려된 파랑 변형 모델의 개발과 적용이 지연되고 있어서 차폐된 수역이지만 넓은 풍역을 가진 해역에서의 파랑해석에 문제점을 안고 있다. 부산의 가덕도 부근에 위치하게 될 부산 신항의 경우도 내측에 위치하고 있으나 상당한 구간이 여전히 외력에 노출되어 있다. 본 연구는 이상과 같은 점에서 부산 신항만의 북컨테이너와 남컨테이너부두가 완공되었을 경우를 가정하여 인근 해역에서 심해 설계파에 대해서 바람, 흐름의 영향을 고려하여

\* 대표저자 : 이학승(중신회원), seaprince1@hanmir.com 051)410-4981

\*\* 중신회원, jwlee@mail.hhu.ac.kr 051)410-4461

\*\*\* 중신회원, syyang2004@yahoo.co.kr 051)703-2382

파고 분포와 정온도의 변화에 대해 정상상태 스펙트럼 파랑모델을 이용하여 실험하고 분석하였다.

## 2. 기초이론

### 2.1 파랑장

#### 2.1.1 지배방정식

파향선을 따라 정상상태의 스펙트럼 파랑 작용 보존에 대한 지배방정식은 다음과 같다(Jonsson, 1990).

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega_a, \alpha)}{w_r} = \Sigma \frac{S}{w_r} \quad (1)$$

여기서,  $E = (\rho_w g)$ 로 나눈 파랑에너지 밀도,  $\rho_w$  = 물의 밀도,  $S$  = 에너지 근원 및 소산 항,  $\mu$  = 파랑의 에너지 전달 방향,  $\omega$  = 각 주파수,  $g$  = 중력 가속도,  $k$  = 파수,  $h$  = 수심이고, 이때 첨자  $a$ 는 절대치,  $r$ 은 흐름에 대한 상대값을 의미한다. 파랑과 흐름의 상호작용은 기준점을 흐름과 함께 움직이는 이동좌표계로 고려하여 다룬다. 이 경우 파랑의 분산관계는 다음 식으로 나타낸다(Jonsson, 1990).

$$\omega_r^2 = gk \tanh kh \quad (2)$$

절대 각주파수  $\omega_a$ 는 다음과 같다.

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha) \quad (3)$$

여기서,  $U$  = 흐름 속도,  $\delta$  = 상대적 흐름의 방향( $x$ 축),  $\alpha$  = 파봉선과 직교 방향이다.

$C_a$  및  $C_{ga}$ 는 절대 파속도와 파랑의 군속도로 다음과 같다.

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (4)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (5)$$

파랑의 에너지 전달 방향  $\mu$ 는 다음과 같다.

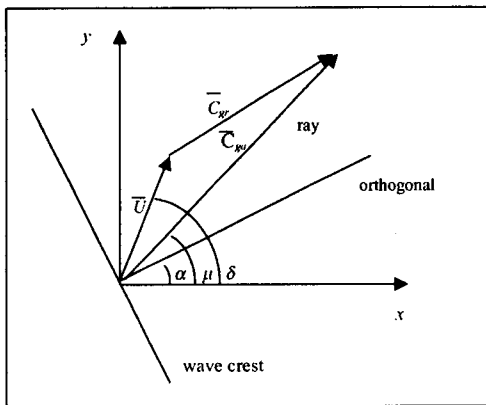


Fig. 1 Definition of wave and current vector

$$\mu = \tan^{-1} \left( \frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right) \quad (6)$$

여기서 첨자  $i$ 는  $x$ 와  $y$ 구성요소에 대한 텐서 표기법이며, 흐름에 대한 상대 파속도와 파랑의 군속도는 다음과 같다.

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad (7)$$

$$C_{gr} = 0.5 C_r \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (8)$$

#### 2.1.2 파랑의 변형

굴절과 천수효과는 파향선이 진행한 뒤를 따라 파랑 운동 보존을 적용하여 스펙트럼 파랑모델에서 도입된다. 파향선은 한 격자 열로부터 단계적으로 추적된다. 이때 2차원 파랑 스펙트럼은 의해 쪽의 처음 격자 열을 초기 입력치로 한다. 해안으로 진행될 때 항 입구에서의 낙조류 흐름과 같은 강한 흐름에 의해서 파랑의 전파가 저지된다. 이러한 파랑의 저지현상은 분산방정식의 해가 없을 경우도 있고, 또는 상대적인 군 파속도가 반대로 흐르는 흐름의 크기보다 작을 경우에 파랑 에너지가 흐름에 대해 전파되지 못하기 때문에 일어난다. 심해에서는 흐름이 없을 경우 심해 파속의  $1/4 (0.25gT_a/2\pi)$ , 이때  $T_a$ 는 절대 파 주기)보다 큰 크기를 갖는 반대 흐름 때문에 저지현상이 발생한다. 파랑의 저지현상이 일어나게 되면 파 에너지는 쇄파를 통해 소산된다. Lai et al.(1989)은 실험 자료를 통해 파랑 에너지의 저지현상이 일어나지 않는 저주파수에 전달되는 비선형 에너지를 통해 선형 저지점을 통과할 수 있다고 하였다. 이 비선형 에너지 전달은 본 연구에서는 제외시킨다. 모델에서는 다음 식을 이용하여 주어진 주파수와 방향 에너지 스펙트럼을 평활화한다.

$$E_j(\omega_a, \theta) = 0.55E_j(\omega_a, \theta) + 0.225(E_{j+1}(\omega_a, \theta) + E_{j-1}(\omega_a, \theta)) \quad (9)$$

여기서,  $E$ 는 주파수와 방향의 에너지 밀도이고 아래 첨자  $j$ 는 격자 행의 번호이다. 에너지 근원 및 소산 항에서 쇄파의 기준은 수심에 대한 파고 비율의 함수로 적용한다.

$$\frac{H_{m0_{max}}}{h} = 0.64 \quad (10)$$

이때  $H_{m0}$ 는 쇄파시 에너지에 기초한 최대파고이다.

Smith et al.(1997)과 Battjes et al. (1982)은 낙조류상의 불규칙 쇄파를 실험실에서 측정하였고 간단하고 정밀한 Miche (1951) 판정식과 같은 쇄파 관계식을 찾았다.

$$H_{m0_{max}} = 0.1L \tanh kh \quad (11)$$

식(11)을  $H_{m0_{max}}$ 에서 최대 한계로 적용한다.

#### 2.1.3 바람 및 잉여용력

파랑은 바람장으로부터 파랑장으로 운동량의 이송을 통하

여 성장한다. 모델에서 파랑장에서의 에너지 플럭스  $F_{in}$ 은 Resio(1988)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$F_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g} \quad (12)$$

이때,  $\lambda$  = 파랑장으로 대기가 직접 물에 전달하는 운동량의 총량을 나타내는 분할 계수(=0.75),  $\rho_a$  = 공기의 밀도,  $\rho_w$  = 물의 밀도,  $C_m$  = 평균 파속,  $u_*$  = 마찰 속도(= 풍속  $\times \sqrt{\text{항력계수}} = U \times \sqrt{C_D}$ ,  $C_D = 0.0012 + 0.000025U$ )이다. 스펙트럼에 대한 에너지 증가는 파랑이 격자 셀을 직교하여 진행하는 동안의 시간에 에너지 플럭스를 곱하여 계산한다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\beta C_g \cos \theta_m} \quad (13)$$

여기서,  $\Delta t$  = 상용 이동 시간,  $\Delta x$  = 격자 간격,  $\beta$  = 풍파에 대해 0.9와 동일한 계수,  $C_g$  = 스펙트럼의 평균 군속도,  $\alpha_m$  = 격자에 대한 평균 파향이다. 기본조건으로, 해안을 향해 (+x방향) 부는 바람만 포함하며 외해로 부는 바람에 의한 감쇄 및 외해로 이동하는 파랑의 성장은 무시한다. 에너지는 바람으로부터 파랑으로 공급되며 비선형 파랑의 상호작용에 통해 재분배된다. 에너지는 저주파수와 고주파수 스펙트럼의 최고점으로부터 이동하며, 스펙트럼 최대주파수는 취송거리와 함께 증가한다. 다음은  $f_p$ 의 변화율에 대한 방정식이다.

$$(f_p)_{i+1} = \left[ (f_p)_i^{7/3} - \frac{9}{5} \zeta \left( \frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7} \quad (14)$$

여기서,  $\zeta$ 는 무차원 상수이다(Resio & Perrie 1989). 바람 입력으로 파랑장에 유입되는 에너지와 고주파수에서의 비선형 플럭스 때문에 생성되는 파랑장에 잔여 에너지 사이의 동적 평형이 일어난다(Resio 1987, 1988).

잉여응력 텐서는 선형파 이론에 기초하여 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$S_{xx} = \rho_w g \iint E(f, a) \left[ 0.5 \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kh} \right) (\cos^2 a + 1) - 0.5 \right] df da \quad (15)$$

$$S_{yy} = \rho_w g \iint E(f, a) \left[ 0.5 \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kh} \right) \sin^2 a - 0.5 \right] df da \quad (16)$$

$$S_{xy} = \rho_w g \iint E(f, a) \left[ 0.5 \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kh} \right) (\sin^2 a + 1) - 0.5 \right] df da \quad (17)$$

잉여 응력의 기울기는 다음과 같이 계산한다.

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (18)$$

$$\tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (19)$$

## 2.2 흐름장

### 2.2.1 지배방정식

2차원 순환모델은 수심적분, 천해방정식을 이용한다. 직교 좌표계에서 지배방정식인 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

여기서,  $U, V$ 는  $x, y$ 방향의 평균된 수심에서의 유속이고,  $\zeta$ 는 자유수면이다. 그리고 운동량 방정식은 비보전적인 형태로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU \\ &= -\frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,  $P_s$ 는 수면에서의 대기압이고,  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ 는  $x, y$  방향에 대한 수면에서의 응력이고,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ 는  $x, y$  방향에 대한 저면응력이며,  $\rho_0$ 는 물의 밀도이다.  $\eta$ 는 Reid(1990)가 제안한 뉴턴 조석 항을,  $\gamma$ 는 Ray(1998)의 대양조석의 상호 인력 수정 항을 나타낸다. 이들 방정식의 유한요소 Galerkin 가중잔차법에서 발생하는 수치적 문제를 해결하기 위해, 연속방정식은 일반화된 파랑 연속방정식(GWCE)에 의해 변환되었다. GWCE는 연속방정식의 시간미분과, 공간과 시간 미분 결과의 재정리, 공간적으로 변화하는 수치 가중 파라메타  $\tau_0$ 와 연쇄법칙의 적용을 포함하는 연속방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (23)$$

여기서,

$$A_x \equiv \frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_0 UH = \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \tau_0 Q_x \quad (24)$$

$$A_y \equiv \frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_0 UH = \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \tau_0 Q_y \quad (25)$$

위의  $Q_x, Q_y$ 는 단위 폭 당의 유량이며,  $A_x, A_y$ 는 요소의 면적을 나타내며 시간 미분항에서 연쇄법칙을 사용하고,  $\partial U/\partial t, \partial V/\partial t$  대신에 운동량 방정식을 사용하면 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} A_x &= U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$A_y = V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left( -U \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + Y) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \quad (27)$$

여기서,  $D_x, D_y$ 는  $x, y$ 방향에 대한 운동량 소산을 나타내며,  $B_x, B_y$ 는  $x, y$ 방향에 대한 연직 적분된 바로클리닉 경도력을 나타낸다. GWCE의 최종형태는 식 (23)에서  $A_x$ 와  $A_y$  대신에 위의 식들을 사용하여 얻을 수 있다. 순환모델은 비 보전 운동량방정식인 식 (21), (22)와 함께 GWCE를 유한요소 Galerkin 가중잔차법에 의하여 모델을 구성하였다.

### 2.2.2 저면응력

2차원 순환모델에서 저면응력은 보통 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{bx} \equiv U\tau, \quad \text{와} \quad \tau_{by} \equiv V\tau. \quad (28)$$

$\tau$ 의 사용에 따라 그 결과 값은 1차, 2차식 또는 수심 평균 속도의 합성함수 형태로 나타나며, 본 연구에서는 식 (29)와 같이 2차 마찰을 적용하였으며, 거의 모든 해안에서 적용하고 있는 값으로  $C_f$ 를 0.0025로 사용한다.

$$\tau_* \equiv \frac{C_f(U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \quad (29)$$

## 3. 모델의 구성

### 3.1 흐름장

순환모델은 유한요소법으로 구성하였다. 요소 간격은 10m에서 500m로 가변 요소를 사용하였다. Fig. 2는 순환모델의 계산 영역을 나타내는 것으로, 모델의 영역은 동서로는 낙동강 하구에서 통영 입구까지이며, 남북으로는 가덕도 남단에서 진해만 입구까지이다. 대상영역의 면적은 1044.3km<sup>2</sup>이다.

### 3.2 파랑장

스펙트럼 파랑모델의 대상 영역은 Fig. 2에서와 같이 순환모델 내의 특정 부분을 선택하였다. 순환 모델의 결과 값인, 각 요소의 절점 값을 이용하여 유한차분법으로 직교 격자를 구성하였다. 최대수심은 가덕도 서측해역에서 37.2m이다. 대상 영역은 10.7×10.4km로서, 격자 셀은 정사각형이며, 격자 간격은 20m이다 ( $\Delta x = \Delta y$ ). 좌표축은 진북방향으로 선택하였다. Fig. 3는 격자의 개략도를 나타내며, Fig. 4의 A~N은 수치실험 결과를 비교 분석하기 위해 선정된 지점을 나타낸다.

## 4. 수치 실험 및 분석

본 연구에서는 스펙트럼 파랑모델을 이용하여 파랑에 작용하는 바람, 흐름의 상호작용에 대하여 고찰하고, 그 결과를 비교 분석하기 위해 파랑, 바람, 흐름, 파랑-바람, 파랑-흐름, 파

랑-바람-흐름의 조건에 대해 수치 실험을 수행하였다.

### 4.1 입력 조건

#### 4.1.1 흐름장

수치모형실험의 수심자료는 이 해역에 대한 해양조사원 간행 수치해도(Chart No. 202, 206)를 이용하여 입력하였으며, 부산 신히만이 완공되었을 경우로 가정하여 항내의 수심을 계획 수심인 16m로 수정하였다. 모델에서 사용한 주요 입력자료 중 개방경계에서의 분조는 1990년 해상 신도시 건설 사업 환경영향평가서의 관측치(M2, S2)를 이용하였으며 시간변화에 따라 모의 실험시 입력되도록 하였다. 유동실험 결과의 1조석 주기를 파랑장 해석에 도입하였으며, 해저마찰계수는 일반적으로 심해의 최적치로 알려져 있고 해의 안정성을 주는  $C_f=0.0025$ 를 적용하였다(해양연구소, 1989).

#### 4.1.2 파랑장

수치모형실험의 입력 조건으로, 파향이 S인 파랑은 파고 10.1m 주기 14sec이다. 바람은 풍속은 25m/s이고, 풍향은 SSW이다. 수심 및 대상영역은 순환모델의 일부분을 이용한다. 실험 Case는 다음과 같다. Case 1은 파랑 조건을 최강창조류, 최강낙조류, 고조위, 저조위시에 각각 순환 모델과 연동하여 수행한다. Case 2는 입력으로, 파랑 조건과 바람 조건을 부여한다. Case 3는 실제 자연 조건과 거의 동일하게 Case 2에 대해 최강창조류, 최강낙조류, 고조위, 저조위시에 각각 순환모델과 연동하여 수행한다. Wv는 파랑 조건, Wnd는 바람 조건, 그리고 Crnt는 흐름 조건을 의미한다.

Table 1. Design condition for deep water wave and wind

Wind				
Dirction	Speed (m/sec)			
SSW	25.0			
Wave				
Direction	Height	Period	Return Period	Remark
S	10.1m	14 sec	50 year	MOMAF, Typhoon SARAH(1984)

Table 2. Incident wave and wind conditions

Case	Input con	Input con			Remark
		Wave	Wind	Current	
Case 1	Wv_Wnd	○	○		
Case 2	Wv_Crnt(M.F.T)	○		○	
	Wv_Crnt(M.E.T)	○		○	
	Wv_Crnt(H.W.L)	○		○	
	Wv_Crnt(L.W.T)	○		○	
Case 3	Wv_Wnd_Crnt(M.F.T)	○	○	○	
	Wv_Wnd_Crnt(M.E.T)	○	○	○	
	Wv_Wnd_Crnt(H.W.L)	○	○	○	
	Wv_Wnd_Crnt(L.W.T)	○	○	○	
	Wv(S)	○			
	Wnd(SSW)		○		
	Current			○	

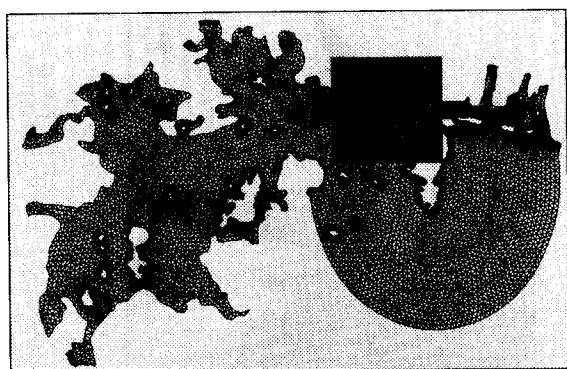


Fig. 2 Study area for Wave model and Current model

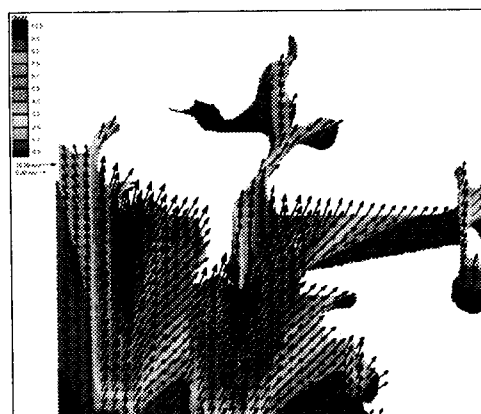


Fig. 6 Wave and wind wave distributions

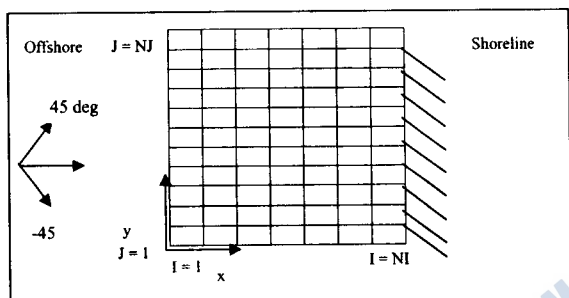


Fig. 3 Schematic diagram of coordinate system

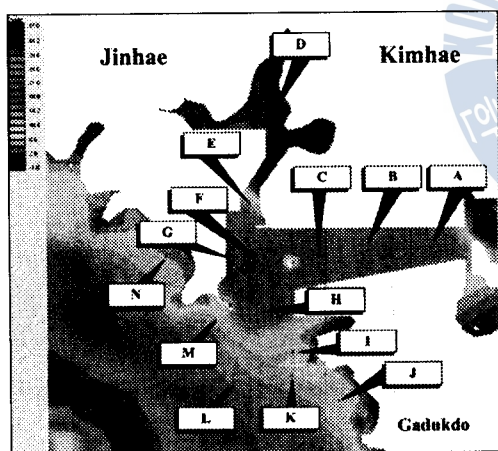


Fig. 4 Study area for wave model and selected station

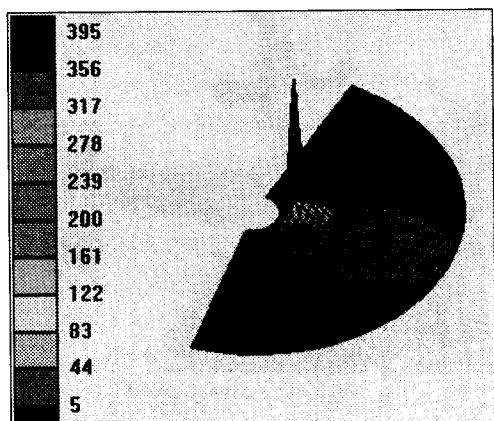


Fig. 5 Frequency and directional wave energy distribution

### 4.2 결과 및 분석

먼저 파랑의 조건만으로 수치 실험한 결과 S방향에서 입사하는 파랑은 0°에서 최대에너지가 나타나며, 0.714Hz에서 최대에너지가 나타난다. Fig. 5는 방향과 주파수에 따른 에너지 분포를 나타내고 있다. 최대파고는 외해에 영향을 가장 많이 받는 K지점에서 6.63m로 나타났으며, 항내에서 최대 파고는 F지점으로 4.53m이다. 바람에 의해 넓은 수역에서 성장한 파랑의 파고는 항내에서 최대 0.42m로 나타났다. 흐름 조건만 입력하여 수치 실험을 수행한 결과, 최강창조류시에 E 지점에서 0.85m/s의 최대 유속이 발생하였으며, 최강낙조류시에 1.02m/s의 유속이 발생하여 최강창조류보다 최강낙조류에 좀 더 큰 유속이 발생하는 것을 알 수 있었다. 항내에는 계획 수심인 16m로 동일화하여 최강창조류시 0.054m/s, 최강낙조류시 0.086m/s로 작은 유속분포를 보였다. 고조시에 수심은 최대 0.79m 상승하였으며, 저조시의 수심은 최대 0.69m 하강하였다.

Case 1은 파랑이 S방향으로 입사하는 경우에 대해 바람(SSW, 25m/s)에 대한 입력 조건을 주어 수치 실험을 행하였다. Fig. 6은 파랑과 바람의 입력조건으로 수치실험 한 결과이다. 계산 결과 바람에 의해 파고가 감소하였으며, 파랑, 파랑-흐름의 조건에 비해 파랑은 바람의 영향으로 많이 굴절되어 항내로 진행되는 것을 알 수 있다. Fig. 8. (a), (b)는 항내, 항외의 각 대상지점에서 Case 1의 결과 값을 나타낸다. Case 1의 경우 K지점(6.23m)과 F지점(4.2m)에서 최대 파고를 나타낸다.

Case 2는 파랑이 S방향으로 입사하는 경우에 대해 최강창조류, 최강낙조류, 고조, 저조시의 흐름에 대한 입력 조건을 주어 수치 실험을 행하였다. Fig. 7. (a)~(d)는 파랑과 흐름을 연동하여 계산한 결과를 나타내고 있다. Fig. 8. (c), (d)는 두 경우에 대하여 항내와 항외의 대상 지점에서 계산된 파고를 나타내었다. 항내에서는 F지점에서 고조시에 파고가 4.53m로 가장 높게 나타났고, 항외 역시 고조시에 외해의 영향을 많이 받는 K지점에서 6.63m로 가장 높게 나타났으며, 항 입구인 H 지점은 5.51m로 나타났다. 각 조건에 대하여 수치 실험한 결과 최대파고는 고조시, 최저파고는 저조시에 나타났다. 고·저조시 파고의 차이는 0.01~0.78m로 나타났다.



Fig. 7 Wave and current wave distributions

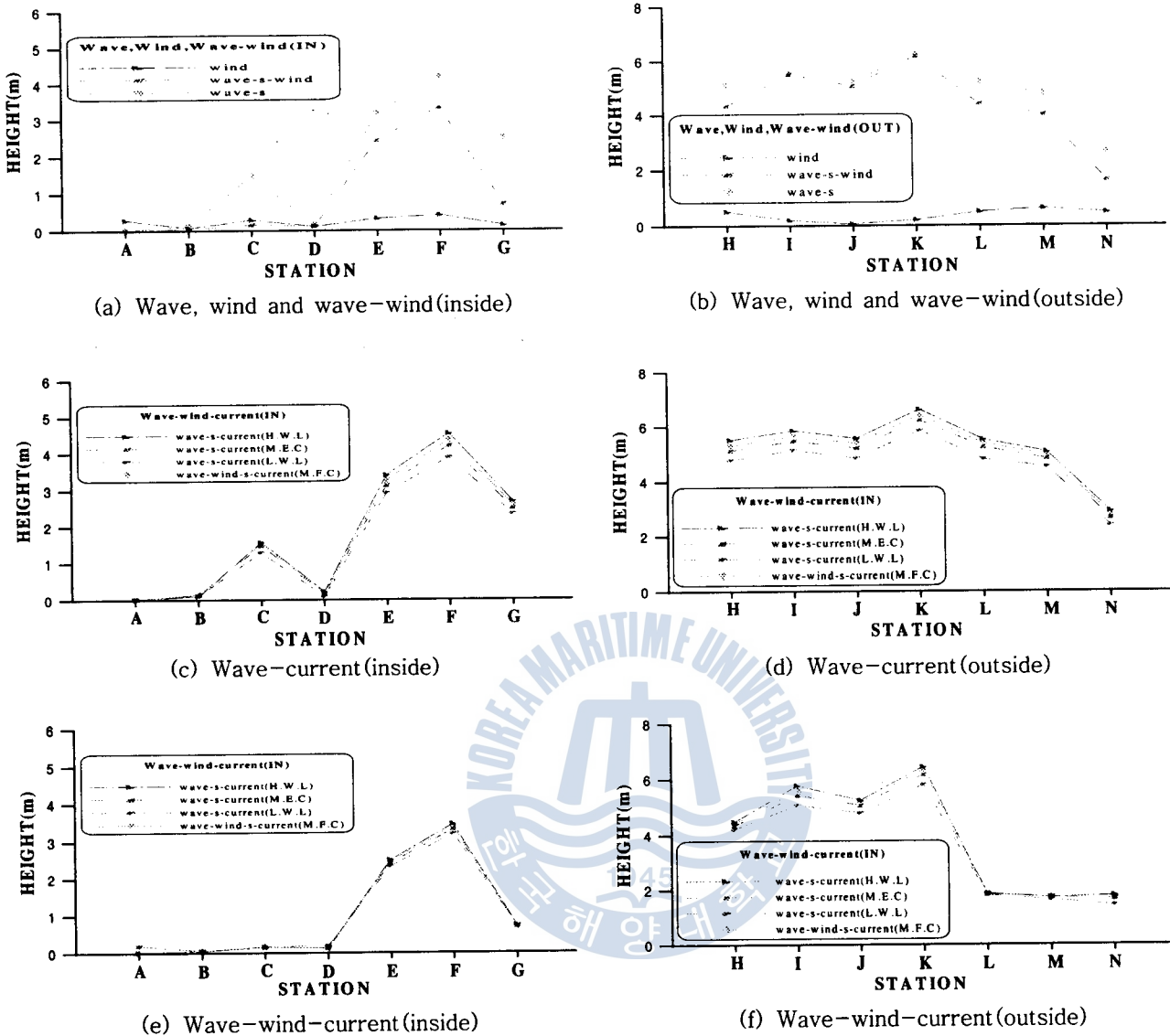


Fig. 8 Wave height distribution of the New port

Case 3은 실제 자연현상과 유사하게 파랑-바람-흐름의 조건을 모두 입력하여 수치실험을 행하였다. 파랑-바람의 조건은 Case 2에서 수치 실험한 결과를 이용하였다. Fig. 7. (e)~(h)는 S방향으로 입사하는 파랑에 대해 흐름의 조건(최강창조류, 최강낙조류, 고조위, 저조위)을 주어 수치 실험한 결과이다. 각 대상 지점에 대한 결과 값은 Fig. 8. (e), (f)에 나타내었다. Case 3도 다른 Case와 마찬가지로 파고가 S방향으로 입사하는 경우에 대하여 K지점에서 6.34m, H지점에서 4.42m로 가장 높게 나타났다.

## 5. 결론

본 연구는 스펙트럼 파랑모델을 이용하여 파랑에 작용하는 바람, 흐름의 상호작용에 대하여 고찰하고 그 결과를 비교 분석하기 위해 파랑, 바람, 흐름, 파랑-흐름, 파랑-바람, 파랑-바

람-흐름의 조건에 대해 각각 수치 실험을 수행하였다. 그 결과, 파랑과 거의 동일한 방향으로 진행되는 바람의 조건을 추가한 경우, 파고는 조금 감소하는 반면에 파향은 바람의 영향을 받아 풍향 쪽으로 굴절되어 파랑이 진행하는 것을 알 수 있었다. 흐름의 조건을 추가한 경우는 파향보다는 파고 변화에 영향을 많이 주는 것을 알 수 있었다. 파랑에 대해 바람과 흐름의 조건을 모두 주어 수치 실험한 결과 파향과 파고 모두 변화를 받으면서 진행되는 것을 알 수 있었다. 각 조건에 대해서 최대 파고는 흐름의 조건만 주어 수치 실험한 경우이며, 흐름 조건 중에서도 고조위에서 최대파고가 나타났다. 본 연구는 파랑의 영향만 고려한 경우와 비교하여 바람과 흐름이 파랑에 미치는 영향에 대한 연구의 한 사례가 될 것으로 사료되며, 향후에는 해안·항만 건설에 있어서 파랑과 바람, 흐름의 상호작용을 고려한 조건을 적용하여 설계에 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 부산직할시 (1990), "해상신도시 건설사업 환경영향평가서"
- [2] 해양연구소 (1989), "연안환경 보전기술 개발연구", BSPG0083-242-4.
- [3] Battjes, J. A., and Janssen, J. P. F. M. (1978). "Energy loss and set-up due to breaking of random waves." *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering.*, ASCE, 569-587.
- [4] Battjes, J. A. (1982). "A case study of wave height variations due to currents in a tidal entrance," *Coastal Engineering*, 6, 47-57.
- [5] Brigham Young University Environmental Modeling Research Laboratory.(2002). "Surface-water modeling system reference manual, version 8.0," Brigham Young University, Provo, UT.
- [6] Jonson, I.G.,(1990). "Wave-current interactions". The sea.9, part A, B. LeMehaute and D. M. Hanes, ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [7] Lai, R. J., Long, S. R., and Huang, N. E. (1989). "Laboratory studies of wavecurrent interaction: Kinematics of the strong interaction." *J. Geophys. Res.*, 97(C11), 16201-16214.
- [8] Luettich, R. and Westerink, J. (2003). "Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 43.XX." University of North Carolina at Chapel Hill institute of marine sciences, Department of civil engineering and geological sciences University of Notre Dame.
- [9] Miche, M. (1951). "Le pouvoir reflechissant des ouvrages maritimes exposes a l' action de la houle." *Annals des Ponts et Chaussess*, 121e Annee, 285-319 (translated by Lincoln and Chevron, University of California, Berkeley, Wave Research Laboratory, Series 3, Issue 363, June 1954).
- [10] Ray, R. D. (1998). "Ocean self-attraction and loading in numerical tidal models", *Marine Geodesy*, 21, 181-192
- [11] Reid, R. O. (1990). Waterlevel changes, *Handbook of coastal and ocean engineering.*, J. Herbich, ed., Gulf Publishing, Houston, TX.
- [12] Resio, D. T. (1987). "Shallow-water waves. I: Theory". *J. Waterway, Port, Coastal, and Oc. Engrg.*, ASCE, 113(3), 264-281.
- [13] Resio, D. T. (1988). "Shallow-water waves. II: Data comparisons", *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean. Eng.*, ASCE, 114(1), 50-65.
- [14] Smith, J. M., Resio, D. T. and Vincent, C. L. (1997). Current-induced breaking at an idealized inlet. *Proc. Coastal Dynamics 97*, ASCE, 993-1002.
- [15] Smith, J. M., Sherlock, A. R. and Resio, D.T.,(2001). "STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model: User's manual for STWAVE, version 3.0, ERDC/CHL-01-1". U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

원고접수일 : 2003년 12월 27일

원고채택일 : 2004년 2월 6일