

연계 파랑류 수치모형 시스템의 개발 및 이안제가 설치된 해안에서의 적용

장 창 환* / 김 효 섭** / 임 남 재***

A Development of Coupled Wave-Induced Current Modeling System and Its application to the Idealized Shoreline with Detached Breakwater

Jang Changhwan* / Kim, Hyoseob** / Ihm, Namjae***

요지 : 파랑 수치모형인 SWAN 수치모형, 파랑에 의해 발생하는 기인력 수치모형인 WIF 수치모형, 그리고 흐름장 수치모형은 EFDC 수치모형을 연동하여 최종적으로 파랑류 계산이 가능한 WIC 수치모형을 개발하였다. 개발된 WIC 수치모형을 검증하기 위하여 Goda(2000)가 적용한 수중 원형천퇴의 파랑변형 계산하여 파고, 파랑의 굴절과 회절을 비교하였으며, 파고비 결과는 약 1~5 %의 차이를 보였다. 파랑에 의한 기인력 수치모형은 기존의 Longuet-Higgins and Stewart(1960)가 제안한 잉여응력에 의해 발생하는 기인력에 Dally and Osiecki(1994)가 제안한 roller로 인한 응력에 의해 발생하는 기인력을 추가하였고, Kim(2004)이 제안한 완화기법을 도입하여 lateral mixing 처리를 수행하지 않아도 자연현상과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 개발되었다. 개발된 파랑에 의한 기인력 수치모형은 계산시 Δt 에 제약을 받지 않는다는 장점을 가지고 있으며, 흐름장 수치모형의 source항이 되어 파랑류의 양상을 계산할 수 있도록 하였다. 연계된 파랑류 수치모형을 검증하기 위해서 Nishimura et al.(1985)의 수리모형실험과 Kim(2004)의 수심적분된 파랑류 수치모형과 비교하였다. 이안제 배후에서 연안류의 유속분포와 이안류의 유속분포 결과가 기존의 수리모형실험과 수치모형실험의 결과와 상당히 일치함이 관측되었다.

핵심용어 : 연계 파랑류 수치모형 시스템, 파랑 수치모형, 파랑에 의한 기인력 수치모형, 흐름장 수치모형, 잉여 응력, roller로 인한 응력, 완화 기법

Abstract : Coupled wave induced current modeling system(WIC) was developed from combining with the nearshore spectral wave model, SWAN, the wave induced force model, WIF, and the flow model, EFDC. The reasonable results were obtained from WIC modeling system. The ratio of the wave height calculated with respect to refraction and diffraction effects over submerged spherical shoal was occurred approximately 1~5 % errors compared to Goda(2000)'s result. The radiation stress suggested by Longuet-Higgins and Stewart(1960), the stresses due to rollers in breaking waves proposed by Dally and Osiecki(1994), and Kim(2004)'s new spreading approach instead of the previous lateral mixing approach were added to calculate wave induced force. The results of the WIC modeling system show good agreement with Nishimura et al.(1985)'s laboratory measurements and better than Kim(2004)'s 2 dimensional depth averaged numerical computations for a plane beach with detached breakwater. The present flow field computed agrees reasonably well with the measured flow field. The relative merit of WIF model in WIC modeling system is unconditional stable for time increment.

keywords : coupled wave induced current modeling system, radiation stress, stresses due to rollers in breaking waves, spreading approach

+ Corresponding author : hkim@kookmin.ac.kr
* 정회원 · 특허청 건설기술심사관 심사관/공학박사 · Email : cjang@kipo.go.kr
** 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · Email : hkim@kookmin.ac.kr
*** 정회원 · 효성에바라엔지니어링(주) 대표이사 · Email : innovation3@hyosung.com

1. 서 론

우리나라 동해안의 대부분은 연중 비교적 큰 파랑이 입사하며, 서해안과 남해안과 같이 대규모 하천이 없고, 조석간만의 차도 약 0.3 m로 매우 적다. 해안의 퇴적물은 거의 모래로 구성되어 있으며, 지역적인 차이가 있겠지만 해저면 경사가 크고, 해안선은 단조롭다. 동해안에는 크고 작은 지정항만(무역항과 연안항) 및 어항이 많은데 입지적, 지형적 특성은 대체로 유사하다. 소수를 제외하고 북동쪽과 동쪽의 큰 파랑을 막기 위해 방파제가 설치되어 있어 항입구가 남쪽 또는 남동쪽으로 열려있는 형태가 전형적이다. 또한, 인접 해빈을 따라 이동하는 퇴적물의 항내 유입을 차단하는 남측 방사제로 구성된 평면배치 형태를 주로 볼 수 있다(과학기술처 1992).

또한 우리나라 동해안은 흐름장이 조류 보다는 파랑류가 우세하다. 주로 북동쪽이나 동쪽에서 입사되는 파랑은 심해에서 천해역으로 이동하면서 파랑에너지를 방출하는데 이 파랑에너지가 해안선에 평행한 흐름을 발생시킨다. 이 흐름을 연안류라 하며, 해안선의 형태와 해저면의 형상 등에 의해 파랑에너지의 경사에 공간적인 차이가 생기는데, 이런 조건하에서 외해로 되돌아가는 흐름을 이안류라 한다.

이처럼 외해로부터 발생되어 밀려오는 물리적인 자연의 힘들이 가장 크게 존재하는 해안에서는 대기, 육지, 그리고 해수의 물리적 상호작용이 매우 복잡하고 완전히 이해하기 어렵게 서로 얽혀있기 때문에 해안의 물리적 시스템을 최대한 이해하기 위해서 해양환경을 크게 파랑, 해수유동, 그리고 퇴적물이동으로 나누어 세분화하고, 현장관측, 수치모형실험, 그리고 수치모형실험을 통해서 이 복잡한 자연현상들을 이해하고 분석하여 공학적으로 해명한다. 이 중에서 수치모형실험은 약 30년 전부터 발전해오면서 최근 컴퓨터의 급속적인 진보와 함께 실제 자연현상의 수많은 변수들을 처리하고 계산하면서 정밀도를 향상시켜왔다. 또한, 복잡한 물리적 힘들이 작용하는 해안을 개발하기

위해서 기술적 그리고 경제적으로 합당한 설계 및 시공이 뒷받침 되어야하므로 선진국에서는 각 나라의 해안환경에 적합한 많은 수치모형들을 개발하고 개발한 수치모형을 수정 및 개선하고 있으며, 우수한 수치모형들을 연계하여 새로운 수치모형시스템을 구축하고 있다. 국내에서도 여러 수치모형들이 개발되고 또는 국외의 우수한 수치모형을 사용하여 그 결과를 연계하여 사용하는 사례를 찾아볼 수 있다(Table 1 참조).

파랑 수치모형으로는 WAM(WAVE Model) 수치모형이 가장 많이 연계된 것으로 집계되었지만, 최근 5년의 수집 자료에서는 SWAN 수치모형이 연계된 사례가 가장 많다. 흐름장 수치모형은 각 기관들이 자체적으로 개발하여 파랑 수치모형과 연계하였으므로, 그 종류가 다양했으며, 최근 5년간 퇴적물이동 수치모형을 연계한 사례는 Warner et al.(2008)과 Tang et al.(2009)의 연구에서 찾아볼 수 있다. 대부분의 연계 수치모형시스템들은 그 대상해역이 해양학적 관점인 광역(oceanic scale)인데 반해, Cobb and Blain(2001), Cialone et al.(2002), Castelle et al.(2006), Lin et al.(2006), 그리고 Tang et al.(2009)의 연구에서만 해안역에서의 소규모 대상해역을 선정하여 해수의 물리적 거동을 예측하는 수치모형시스템을 적용하였다. 특히, Castelle et al.(2006)의 연구는 SWAN 수치모형의 결과를 이용하여 파랑에 의한 기인력을 계산한 후, 흐름장 수치모형인 MORPODYN 수치모형에 연계하여 파랑류의 거동을 예측한 사례이다.

본 연구에서는 최근 가장 적용성이 높은 파랑 수치모형인 SWAN과 흐름장 수치모형인 EFDC를 연계하기 위하여 파랑에 의한 기인력 수치모형(Wave Induced Force, WIF)을 개발하여 최종적으로 연계 파랑류 수치모형 시스템(WIC)을 개발하고자 한다.

본 연구에서 파랑 수치모형은 바람에 의해 발생된 표면중력파를 파랑작용의 평형방정식(wave action balance equation with sources and sinks)을 기초로 한 제3세대 SWAN (Simulating

Table 1.1 Coupled numerical modelling system

Developers	Wave model	Flow model	Sediment transport model	Study area
Mastenbroek et al.(1992)	WAM	WAQUA LAM	excluded	North Sea
Cobb and Blain(2001)	SWAN	ADCIRC	excluded	Idealized inlet
Welsh et al. (2001)	WAM	CH3D-SED	included	Adriatic Sea
Baoshu et al. (2002)	YWE-WAM	Tide-Surge model	excluded	Huanghe Delta, China
Cialone et al. (2002)	STWAVE	ADCIRC M2D	included	Grays harbor, U.S.A.
Zhang et al. (2002)	WAM	SEAOM	excluded	South China Sea, China
Kawai et al. (2004)	WAM	Storm-surge model	excluded	Suo-nada bay, Japan
Castelle et al. (2006)	SWAN	MORPHODYN	excluded	Aquitainian Coast, France
Macklin et al. (2006)	WAM SWAN	POLCOMS OCCAM POM	excluded	Tay Estuary, Scotland
Lin et al. (2006)	WABED	M2D	excluded	Idealized inlet
Warner et al. (2008)	SWAN	ROMS	included	Massachusetts Bay, U.S.A.
Brown and Wolf(2009)	WAM	PALCOMS	excluded	Liverpool bay, U.K.
Tang et al. (2009)	SWAN	SHORECIRC	included	Idealized dam-break and dune
Qi et al. (2009)	SWAN	FVCOM	excluded	Gulf of Maine, U.S.A.
This study (2012)	SWAN	EFDC	included(but excluded this paper)	Idealized shoreline installed breakwater

WAVES Nearshore, ver. 40.72) 수치모형을 사용하였다. 풍속과 풍향을 고려할 수 있을 뿐만 아니라, 해저면의 마찰, 수심에 대한 쇄파현상, 파의 처오름, 그리고 해안구조물 인근에서의 회절과 해안선 파향선이 수직하게 입사되는 굴절 등을 고려하여 외해에서부터 해안선까지 대상해역의 파고와

파향을 음해적으로 1차원 또는 2차원으로 계산할 수 있다. 계산된 파고는 입력된 수심자료와 함께 부프로그램(subroutine)인 SURFDIFF를 개발하여 쇄파대와 회절계수를 얻을 수 있도록 하였다.

SWAN 수치모형은 파랑 기후의 정확한 예측을 위해서 상당히 많은 자연현상에 대한 변수들을 입

력할 수 있도록 개발된 우수한 파랑 수치모형이지만, 파랑류는 계산 할 수 없다는 단점을 가지고 있다(SWAN user manual, 2008). 그러므로 파랑 수치모형을 이용하여 대상해역에 예측된 파고와 파향 결과물들을 흐름장 수치모형에 입력자료로 사용하여 파랑류를 계산할 수 있도록 연계 과정이 필요한데, 본 연구에서는 WIF 수치모형을 개발하여 파랑에너지에 의한 잉여응력(radiation stresses)과 쇄파대내에서 roller에 의한 응력을 고려하여 파랑에 의한 기인력을 계산함으로써 대상해역의 파랑류의 양상을 예측할 수 있도록 하였다. 다시 말하면, WIF 수치모형을 이용하여 계산된 파랑에 의한 기인력은 흐름장 수치모형의 source항으로서 파랑류가 발생되도록 구축하였다.

선정된 흐름장 수치모형으로는 미국 Virginia Institute of Marine Science(VIMS)와 School of Marine Science of The College of William and Mary에 의해서 개발된 EFDC(The Environmental Fluid Dynamics Code) 수치모형을 선정하였다. EFDC 수치모형은 크게 유동, 퇴적물이동, 수질의 세 요소로 구성되어 있는데, 특히 유동 부분은 수온과 염분이 함께 고려된 3차원 천수방정식을 기본으로 하며, 본 연구에서는 유동(hydrodynamics) 부분만 사용하였다. EFDC 수치모형의 기본이 되는 물리적 구조는 POM 수치모형(Blumberg and Meller, 1987), 미국 육군 공병단의 CH3D-WES 수치모형 및 TRIM 수치모형(Caulli and Cheng, 1992)과 유사하다.

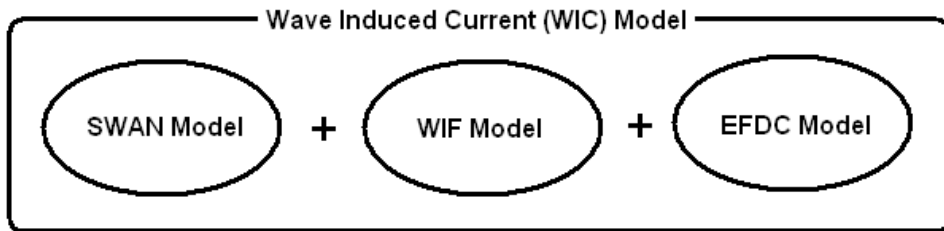


Fig. 1 Coupled wave induced current model

2. 지배방정식

2.1 SWAN 수치모형

심해에서 천이역을 거쳐 천해로 입사하는 파랑은 쇄파대 내에서 비선형 작용이 강하게 나타나지만 SWAN 수치모형에서의 파랑현상은 2차원 스펙트럼에 의해 표현된다. 비선형이 강한 조건에서 스펙트럼을 사용할 수 있는 이유는 스펙트럼 조건에 파랑자료의 통계적 분석이 충분히 표현 될 수는 없지만, 스펙트럼 분포를 이용하면 파랑관측 기록으로부터 파랑예측이 가능하기 때문이다. 해안에서 파랑에 의한 해수면변동의 모든 정보는 파랑의 진행방향 θ 과 각주파수 σ 에 대하여 파랑에너지가 분포하는 에너지 밀도 $E(\sigma, \theta)$ 또는 파

랑 변동 스펙트럼이 포함된다. 일반적인 파랑 수치모형들은 시공간에서의 작용 밀도 $N(\sigma, \theta)$ 의 발달을 계산한다. SWAN 수치모형에서도 사용하는 방법은 파랑에너지 스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 인데, 수치모형 내에서는 파랑 작용 스펙트럼(wave action spectrum) $N(\sigma, \theta)$ 으로 변형되어 사용된다. 흐름이 존재할 경우는 파랑 작용 스펙트럼은 보존되지만 파랑에너지 스펙트럼은 보존되지 않기 때문이다(Whitham, 1974). 파랑 작용 스펙트럼은 파랑에너지 스펙트럼을 각속도로 나누기 때문에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1)$$

여기서 각주파수 σ 는 절대 각주파수 ω 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (2)$$

여기서 \vec{k} 와 \vec{u} 는 각각 파수와 유속의 벡터이다.

천해역 또는 소규모 영역에 대하여 수치모형을 적용할 경우, Cartesian 좌표계에서 스펙트럼 작용 평형방정식으로 표현된다. 아래의 식에서 좌변 1항은 시간에 따른 작용밀도의 시간 변화량, 제2항과 제3항은 각각 x 방향과 y 방향에서의 전파, 제4항은 각속도에 대한 해저면과 흐름의 변화에 따른 상대주파수의 천이, 그리고 제5항은 해저면과 흐름에 따라 변화하는 파랑의 굴절을 나타낸다. 파랑의 전파속도는 선형과 이론으로부터 도출된다(Whitham, 1974; Dingemans, 1997).

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} \\ + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \end{aligned} \quad (3)$$

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_x}{k^2} + u_x \quad (4)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_y}{k^2} + u_y \quad (5)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla d \right) \quad (6)$$

$$- c_y \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -k \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right) \quad (7)$$

여기서 c_x , c_y 는 각각 x , y 방향의 전파속도(군속도)를, c_σ 와 c_θ 는 σ 와 θ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. s , m 은 각각 파향선과 파향선에 수직한 좌표이고, d 는 수심이다.

파랑 작용 평형방정식인 Equation (3)의 우항인 S_{tot} 는 파랑의 생성, 비선형적 파랑간의 상호작용, 그리고 소산의 물리적 과정을 표현하는 원천항이다. SWAN 수치모형내에서 파랑의 발달 과정, 소산, 그리고 비선형 파랑간의 상호작용의 일반적인 물리적 개념들이 적용되었고, 다음과 같이 천해에서는 여섯 개의 과정들이 원천항 S_{tot} 에 기여한다(Fig. 2 참조).

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} \quad (8)$$

$$+ S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$

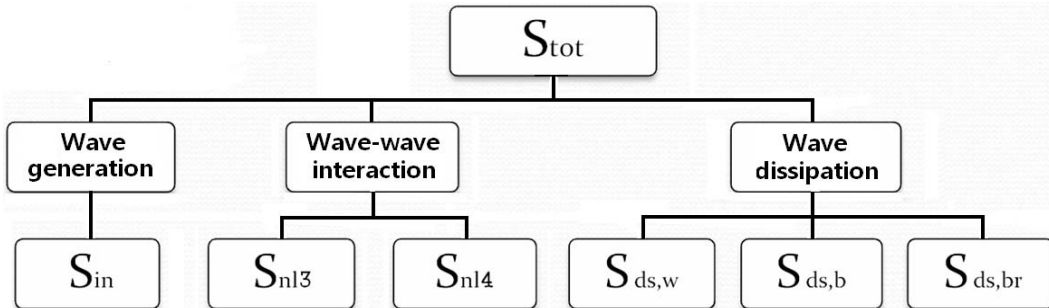


Fig. 2 Six processes contribute to S_{tot}

여기서 S_{in} 는 바람에 의한 파랑의 성장, S_{nl3}, S_{nl4} 은 각각 3파와 4파로 파랑들의 상호작용에 의한 파랑에너지의 비선형 전파, $S_{ds,w}$ 는 백파에 의한 파랑의 감쇠, $S_{ds,b}$ 는 해저면 마찰, 그리고 $S_{ds,br}$ 는 수심에 의한 쇄파이다.

2.2 WIF 수치모형

Longuet-Higgins and Stewart(1960)는 파향선을 따라 생성되는 잉여응력의 S_{xx} 성분은 수직 단면을 지나는 수평 운동량의 총 합력에 대하여 시간 평균한 값을 수면변화에 의한 압력으로 뺀 값으로 표현하였다. 잉여응력은 주로 파랑이 진행되는 방향인 x 축에 대해서 먼저 만들어지고, 추후 임의의 변형된 파랑 방향에 대해서 생성된다. 일반적으로 x 방향에 대한 잉여응력 성분 S_{xx} , y 방향에 대한 잉여응력 성분 S_{yy} , 그리고 전단응력 성분인 S_{xy} 와 S_{yx} 는 각각 아래의 식들로 표현된다.

$$S_{xx} = \left\{ \int_{-d}^{\eta} (p + \rho u^2) dz \right\} - \int_{-d}^0 p_0 dz \quad (9)$$

$$S_{yy} = \left\{ \int_{-d}^{\eta} (p + \rho v^2) dz \right\} - \int_{-d}^0 p_0 dz \quad (10)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \int_{-d}^{\eta} \rho uv dz \quad (11)$$

여기서 η 는 정수면으로부터 측정된 순간적인 수면의 상승을 나타내며, p 는 정수압력, 그리고 p_0 는 수면변화에 의한 수압이다. u 와 v 는 각각 x 와 y 축에 대한 파랑의 속도 성분이며, ρ 는 해수의 밀도($1025 kg/m^3$)이다.

해석적인 방법에 의해 잉여응력을 계산하기 위해서 각 성분들은 육지-외해방향을 x 축, 해안선

을 따르는 방향을 y 축으로 표현하였으며, 입자의 궤도 속도(u, v), 수위변동(η), 그리고 분산방정식 ($\sigma^2 = gk \tanh kd$)에 대하여 소규모 진폭을 갖는 선형파 이론을 추가하여 잉여응력의 각 성분을 표현할 수 있다. 입사하는 파랑이 해안선에 수직인 경우($\theta = 0^\circ$)는 S_{xx} 와 S_{yy} 성분만 존재 ($S_{xy} = S_{yx} = 0$)하며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_{xx}(\theta = 0^\circ) = E \left(2n - \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

$$S_{yy}(\theta = 0^\circ) = E \left(n - \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

여기서 E 는 단위 수면적 당 파랑에너지로 파고의 제곱 승에 비례하고, n 은 군속도 c_g 를 전파속도 c 로 나눈 값이다.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (14)$$

$$n = \frac{c_g}{c} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (15)$$

여기서 a 는 진폭으로 파고 H 의 1/2이고, g 는 중력가속도, k 는 파수로 $2\pi/L$ 이며, L 은 파장이 다.

만약, 파랑이 해안선에 θ 방향을 이루면서 입사하는 경우($\theta \neq 0^\circ$), 잉여응력의 각 성분들은 아래의 식들과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{xx} = S_{xx}(\theta = 0^\circ) \cos^2 \theta \quad (16)$$

$$+ S_{yy}(\theta = 0^\circ) \sin^2 \theta$$

$$S_{yy} = S_{xx}(\theta = 0^\circ) \sin^2 \theta \quad (17)$$

$$+ S_{yy}(\theta = 0^\circ) \cos^2 \theta$$

$$S_{xy} = S_{yx} = S_{xx(\theta=0^\circ)} \sin\theta \cos\theta \quad (18)$$

$$- S_{yy(\theta=0^\circ)} \cos\theta \sin\theta$$

여기서 θ 는 $-x$ 축(negative x axis)을 기준으로 반시계 방향이다. 또한 잉여응력 성분들은 수학적으로 아래의 식들로 단순화가 되며, 본 연구를 위한 프로그램에서는 아래의 식들이 적용되었다.

$$S_{xx} = E \left[n(\cos^2\theta + 1) - \frac{1}{2} \right] \quad (19)$$

$$S_{yy} = E \left[n(\sin^2\theta + 1) - \frac{1}{2} \right] \quad (20)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{En \sin 2\theta}{2} = En \sin\theta \cos\theta \quad (21)$$

잉여응력의 각 성분을 이용하여 수체의 단위 질량에 작용하는 기인력 F_x 와 F_y 를 계산할 수 있으며, 아래의 식과 같다.

$$F_x = \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (22)$$

$$F_y = \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (23)$$

파랑은 무수히 많은 자연 인자로 인하여 변형되면서 육지로 입사한다. 쇄파로 인한 roller는 쇄파대에서 파의 처오름과 함께 파의 진행 속도보다 수면의 물입자의 속도가 빨라지면서 파봉이 말리는 현상을 말한다. 이로 인하여, 정수면상의 유체는 밀려오는 파랑에너지로 인하여 유속이 육지 방향으로 가속이 발생하고, 수면하의 유체는 외해 방향으로 역행한다. Dally and Osiecki(1994)가 제안한 쇄파에서의 rollers에 의한 응력은 Castelle et al.(2006)과 Li and Qin(2003) 등에 의해서 적용되어 검증된 사례가 있으며, 각 성분

들은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$R_{xx} = 2E_r \cos^2\theta \quad (24)$$

$$R_{yy} = 2E_r \sin^2\theta \quad (25)$$

$$R_{xy} = R_{yx} = E_r \sin 2\theta \quad (26)$$

여기서 E_r 은 단위 면적당 roller 에너지이며, 다음과 같다.

$$E_r = 4\beta_r \frac{C}{gT} \hat{P}E \quad (27)$$

여기서 T 는 파주기이며, roller 계수 $\beta_r \approx 0.9$, 무차원 파고 대 수심 비율 \hat{P} 는 아래와 같이 표현된다.

$$\hat{P} = \left\{ \frac{H}{\gamma(d+\eta)} \right\}^4 \quad (28)$$

여기서 파형기울기와 관계된 계수 $\gamma = 0.5 + \sqrt{H_o/L_o}$ 로 H_o 와 L_o 는 각각 심해에서의 파고와 파장이다.

파랑이 부서지면서 발생하는 roller에 의해서 수체의 단위 질량에 작용하는 기인력 P_x 와 P_y 는 다음과 같다.

$$P_x = \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \quad (29)$$

$$P_y = \frac{\partial R_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \quad (30)$$

계산된 잉여응력에 의한 기인력 F_x 와 F_y 그리고 roller에 의한 응력으로 발생된 기인력 P_x 와 P_y 는 기존의 lateral mixing 기법 대신에

Kim(2004)의 완화기법(spreading approach)을 도입하였다. 완화처리하여 계산된 기인력은 Fig. 3과 같으며, 이 결과는 흐름장 수치모형인 EFDC 수치모형의 운동량의 생성-소멸(source-sink)항 Q_x 와 Q_y 에 더해진다. 하지만 EFDC 수치모형의 운동방정식에 밀도(ρ)가 나누어져 있기 때문에 파랑에너지(E) 계산시 밀도(ρ)를 제외하여야 한다. 최종적으로 총 파랑에 의한 기인력은 아래와 같다.

$$Q_x = F_x + P_x \tag{31}$$

$$Q_y = F_y + P_y \tag{32}$$

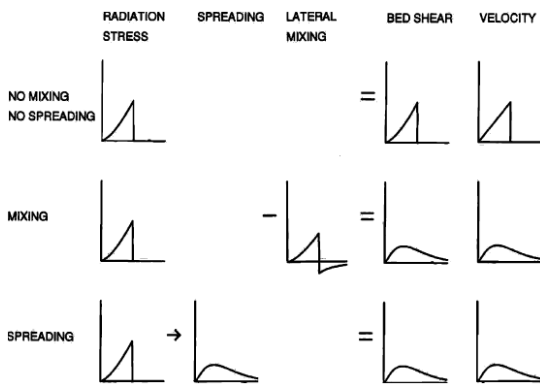


Fig. 3 The effect of the spreading operator and the lateral mixing term (Kim, 2004)

파랑에 의한 기인력 수치모형인 WIF 수치모형은 파랑 수치모형인 SWAN 수치모형과 흐름장 수치모형인 EFDC 수치모형을 연계하기 파랑류 예측을 모의하기 위하여 개발되었다. WIF 수치모형은 lateral mixing에 제약을 받지 않으며, SWAN 수치모형과 EFDC 수치모형이 연계된 파랑류 수치모형(WIC)의 계산시간을 단축시키는 장점을 가지고 있다.

2.2 EFDC 수치모형

파랑 수치모형을 수행하여 취득된 파고와 파향 결과물들은 흐름장 수치모형과 연동하기 위해서는 운동방정식에서 source 항인 파랑에 의한 기인력을 추가하여야 한다. 파랑류의 양상을 재현하기 위하여 연동시킬 흐름장 수치모형으로 EFDC 수치모형을 사용하였다.

EFDC 수치모형은 수평방향으로 직교 격자체계(regular grid)와 격자의 내부가 직각의 형태를 갖추고 있는 직교-곡선 격자체계(orthogonal curvilinear)의 사용이 가능하고, 수직방향으로 stretched 또는 σ 좌표계를 사용하여 정수압, 자유수면, 연직평균 난류운동방정식이 계산 가능한 3차원 수치모형이다. 좌표계는 x 축이 동쪽, y 축은 북쪽을 나타내고, 격자 구성은 엇갈림 격자(staggered grid)에 속하는 Arakawa C grid가 적용되었다.

난류 운동에너지, 난류 길이, 염도와 온도 등을 구하기 위해서 동역학적으로 결합된 질량수송방정식들을 계산한다. 와동점성계수로서 Smogorinsky 확산 이론을 적용하였으며, Mellor and Yamada (1982)의 수정된 난류마감 기법을 사용하고 있다 (Galperin et al., 1988). 특히, 질량보존법칙을 이용하여 천해역에서의 3차원 조건대(wetting and drying / tidal flat) 처리가 가능하게 만들어 졌다.

기본방정식의 수치해는 유한차분법과 질량 및 부피 보존을 위한 유한체적법을 사용한다. 수심, 압력, 해지면 경사의 차분화시 second order의 정확도를 갖는 중앙차분법을 사용한다. 운동방정식에는 Coriolis와 curvature항은 second order의 정확도를 갖는 에너지보존 기법을 사용한다. EFDC 수치모형은 수치적으로 모드 분리법(external-internal mode splitting)을 사용하고 있다. 외부 모드 계산시 수평 방향으로, 내부 모드 계산시 수직 방향으로 음해법을 적용하여 계산시간을 단축시킬 수 있다. 시간 미분항 역시 second order의 정확도를 갖는 three-time-

level의 leap-frog 기법을 사용하며, 반암해법 (semi-implicit method)을 적용한다. Three-time-level 기법 사용 시 발생하는 time step splitting을 억제하기 위하여 two-time-level의 trapezoidal step을 첨가하는 trapezoidal leap-frog 기법을 사용한다. 그리고 빠르게 전파하는 외부 중력파를 계산하는 외부 모드와 수직적 구조를 계산하는 내부 모드를 분리하여 계산의 효율성을 높였다. 또한, 난류강도, 난류길이, 염도, 온도, 그리고 부유사 등을 위한 질량수송방정식 또한 양해법을 이용한 이송과 수평 확산 그리고 음해법을 이용한 수직 확산을 계산하는 분편화 기법을 사용한다. 여러 이송 기법이 EFDC 수치모형 내에 포함되어 있으므로 선택적으로 사용할 수 있다.

EFDC 수치모형의 지배방정식은 연속방정식과 수평·수직방향 운동방정식, 열·염 보존방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식들로 구성되어 있다. 열·염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. 유체 정역학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하면 기본방정식을 나타낼 수 있다. 지배방정식은 수평면 상에서의 직교-곡선 좌표와 연직방향에서의 σ 좌표로 변환된다.

$$(x^*, y^*, z^*, t^*) \rightarrow (x, y, \sigma, t) \quad (33)$$

즉, 유수표면이 $z = \eta(x, y, t)$ 에 위치하고, 저면은 $z = -D(x, y)$ 에 위치한다고 정의하면 σ 좌표계로 변환된 기본방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial m\eta}{\partial t} + \frac{\partial m_y Du}{\partial x} + \frac{\partial m_x Dv}{\partial y} + \frac{\partial mw}{\partial z} = 0 \quad (34)$$

여기서 u, v 는 각각 직교하는 곡선좌표계 x, y 에서의 수평 유속이고, m_x, m_y 는 각각 곡선좌표계 임

의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근($m^2 = m_x m_y$)이다. w 는 변환된 무차원 연직좌표계 z 에서의 수직 유속성분, D 는 총 수심(= $d + \eta$), d 는 기준면 하의 수심, 그리고 η 는 기준면 상의 수심이다.

- 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial mDu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Duu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Dvu) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(mwu) - \left(mf + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) Dv \\ & = -m_y D \frac{\partial}{\partial x} (g\eta + p) - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(mD^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial mDv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Duv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Dvv) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(mwv) - \left(mf + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) Hv \\ & = -m_x D \frac{\partial}{\partial y} (g\eta + p) - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(mD^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (36)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gD(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gDb \quad (37)$$

여기서 p 는 압력, f 는 Coriolis parameter, A_v 는 수직 와동점성계수, Q_u, Q_v 는 각각 x, y 에서의 운동량의 생성-소멸항, ρ 는 밀도, ρ_0 는 초기 (기준)밀도, 그리고 b 는 부력이다.

운동량의 생성-소멸항인 수평 와동점성 및 수

평 와동확산항은 모델격자보다 작은 규모(subgrid scale)의 유동현상을 묘사하며, 습지에 의한 저항, 단주기 표면중력파에 의한 파랑, Reynolds' stress, 고파랑 규모의 제트에 의하여 형성되는 운동량 생성 등도 고려할 수 있다. 수평 와동점성항 및 수평 와동확산항은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_m \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (38)$$

$$Q_v = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_m \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (39)$$

여기서 A_m 는 수평 와동점성계수이다. 수평 와동점성계수의 산정은 격자 크기와 유속 변형에 의해 결정되는 Smagorinsky(1963) 식을 이용한다.

$$A_m = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (40)$$

여기서 상수 C 는 0.10~0.20의 값이 사용되며, 계산 격자가 충분히 작은 경우 무시될 수 있다 (Oey et al., 1985a, b). Smagorinsky 식은 격자의 크기가 작아질수록, 그리고 유속 경사가 작을수록 수평 와동점성계수가 감소한다.

3. 수치모형의 적용 및 결과

SWAN 수치모형을 적용하기 위해서는 우선적으로 검증이 필요하다. 잘 알려진 수치모형이라든 기존의 연구나 적용 사례와 비교·검토하면서 수

치모형의 입력 변수들을 조절하여 정확성을 판단한 후 사용하여야 한다.

본 연구에서는 굴절과 회절(CASE 1), 그리고 회절과 쇄파(CASE 2)의 영향을 고려하여 파랑 수치모형을 수행하였다. SWAN 수치모형의 입력 자료 내에 변수들을 아래의 Table 2와 같이 고려하였다. 해지면 마찰계수는 0.067로 default 값을 사용하였고, 쇄파 계수는 CASE별로 각각 0.78과 0.73을 고려하였다. CASE 1의 계산결과는 Goda(2000)의 결과와 비교하기 위해서 선정되었고, CASE 2는 다음 장의 파랑류 수치모형을 위하여 Nishimura et al.(1985)의 수리모형실험과 Kim(2004)의 수리모형실험과 비교하기 위해서 선정되었다.

Table 2 Initial conditions of each case for SWAN model

	CASE 1	CASE 2
Wave Height	1.0 m	0.02 m
Wave Period	5.1 s	1.2 s
Wave Direction	180°	270°
Seabed slope	Uniform	1/50
Breaking Index	0.78	0.73
Grids	40 × 24 (M×N) $\Delta x = \Delta y = 10m$	80 × 53 (M×N) $\Delta x = \Delta y = 0.1m$

CASE 1은 굴절의 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 5에서와 같이, 15.0 m의 일정한 수심에 해저면에서 10.0 m 높이와 40.0 m 직경을 가진 수중 원형천퇴(spherical shoal)를 만들어 Goda (2000)의 결과와 비교하였다. CASE1의 파랑변형 결과들 중에서 파랑 vector 분포는 Fig. 6에서 제시하였고, 입사된 파랑이 굴절현상과 파의 초요름 현상으로 인하여 수중 원형천퇴로 모이면서 파고가 약 25% 증가되는 것이 관측되었다. 엄밀히 말해서, 수중 원형천퇴를 지나는 파랑은 굴절과 회

절의 효과가 모두 작용하며(Goda 2000), 천퇴 배후에 파랑의 회절로 인하여 불꽃이 피는 형상인 화선(caustic)이 관측되었다. Fig. 7은 SWAN 수치모형으로 계산된 파고비 분포도와 Goda(2000)의 파고비 분포도를 비교한 결과로 수중 원형천퇴로 인하여 수심이 낮아지는 y/L 이 1.0인 구간부터 파고비가 증가되기 시작하면서 y/L 이 4.5인 구간에서 파고비가 최대 25 % 증가되는 것이 관측되었고, Goda(2000)의 결과와 최대값이 약 1.0 %의 차이를 보였다. 하지만 수중 원형천퇴를 지나 간 후, 파고비는 약 5.0 %의 차이가 관측되었고, Goda(2000)의 결과에 비해서 화선이 퍼지는 현상이 관측되었다. 여기서 Goda(2000)가 제안한 파고비는 변형된 파고를 입사파고로 나눈 값으로 회절계수와 같은 값이다.

CASE 2는 Nishimura et al.(1985)의 수리모형 실험을 재현하기 위해서 파랑 수치모형을 수행하였으며, 수심이 0.06 m에 해안선에 평행한 길이 2.7 m의 이안제를 설치하여 파랑 수치모형실험을 수행하였다. 불행히도 Nishimura et al.(1985) 논문에서는 파랑 변형에 대한 결과를 제시하지 않았다. CASE 2의 파랑 변형은 Fig. 8에서 보이는 것처럼, 이안제의 배후에서 입사파가 차단되어 파고가 감소되고, 이안제의 양측 $-y$ 축으로 30지점에서 15지점까지 쇄파로 인하여 파고가 최대 10% 증가된 것이 관측되었다. SWAN 수치모형의 결과를 이용하여 쇄파대를 계산할 수 있는 SURFDIFF 수치모형을 이용하여 쇄파대 및 회절계수를 계산하도록 하였고, 각각 Fig. 9과 Fig. 10에서 제시하였다.

특히, CASE 2의 파랑 수치모형의 결과는 다음 장의 파랑에 의한 기인력 수치모형(WIF 수치모형)의 입력자료로 사용될 것이며, WIF 수치모형은 흐름장 수치모형인 EFDC 수치모형과 연계될 것이다. 연계된 SWAN 수치모형, WIF 수치모형, 그리고 EFDC 수치모형은 최종적으로 파랑류의 양상을 예측할 수 있는 파랑류 수치모형(WIC 수치모형)이 된다.

EFDC 수치모형을 SWAN 수치모형과 WIF 수

치모형과 연계하여 파랑류 수치모형(WIC 모형)으로 개선하여 CASE 2에 대한 해안에서의 파랑류의 거동을 계산 한 결과는 기존의 Nishimura et al.(1985)의 수리수치모형실험 결과와 Kim(2004)의 수심평균된 2차원 파랑류 수치수치모형실험과 비교하였다.

Fig. 11은 WIF 모형을 수행하여 계산된 잉여응력에 의한 기인력을 보여준다. 이안제 배후는 소파로 인하여 파랑에너지가 소산되어 기인력은 거의 존재하지 않으며, 이안제 양측 선단에서 파랑에너지의 경사 차이로 기인력이 이안제 배후로 회선하는 형태를 관찰할 수 있다. 잉여응력에 의한 기인력은 해안선으로부터 외해방향으로 y 축이 6지점인 선상에서 최대 약 $0.11 N/m^2$ 이 관측되었다. Fig. 12는 roller에 의한 기인력을 제시하였으며, 쇄파대내에서는 roller에 의한 기인력이 육지방향으로 발생되었고, 쇄파대 이전에서는 기인력이 외해방향으로 발생되고 있음을 보여준다. roller에 의한 기인력의 최대값은 약 $0.02 N/m^2$ 로 나타났다. Fig. 13은 두 기인력을 합한 값으로 이안제 배후를 제외한 해안선에서는 최대 $0.13 N/m^2$ 의 기인력이 발생되었다.

Fig. 14는 WIC 모형을 수행한 결과로 Nishimura et al.(1985)의 수리수치모형실험 결과(Fig. 15)와 Kim(2004)의 수치모형실험(Fig. 16)과 비교하기 위하여 3개의 측정구간(profile 1, 2, and 3)을 선정하였다. Fig. 17은 이안제 배후에서 발생하는 이안류의 유속분포를 나타낸 것으로, Nishimura et al.(1985)의 결과가 Kim(2004)의 결과와 본 연구의 결과와 비교하여 최대값이 약 $2.0 cm/s$ 크게 관측되었다. Kim(2004)의 결과와 본 연구의 결과의 최대 유속값은 유사하나 본 연구에서는 roller에 의한 기인력이 고려되어 이안류의 양상이 Nishimura et al.(1985)의 결과와 유사함이 관측되었다.

Fig. 18은 해안선 인근에서의 연안류의 유속분포를 비교한 결과로 Nishimura et al.(1985)의 결과와 두 수치모형의 결과가 전체적으로 유사하나, Kim(2004)의 수치모형결과는 이안류의 유속이 x

측으로 24지점에서 최대값이 10.5 cm/s로 분석된 반면, 본 연구에서는 x 축에서 28지점에서 최대값이 10.14 cm/s로 관측되었고, 본 연구와 Nishimura et al.(1985)의 수리모형실험 결과가 x 축에서 28지점에서 최대값이 동일하게 나타났다.

Fig. 19는 이안제 배후에서 역류하는 연안류의 유속분포를 비교한 결과이다. Kim(2004)과 본 연

구의 수치모형결과는 양상이 유사하나, 본 연구결과가 Nishimura et al.(1985)의 수리모형결과와 유속값이 더욱 일치함을 보였다. 하지만 Nishimura et al.(1985)의 수리모형 결과는 적은 데이터를 목적으로 구했기 때문에 오차의 발생은 무시할 수 없다.

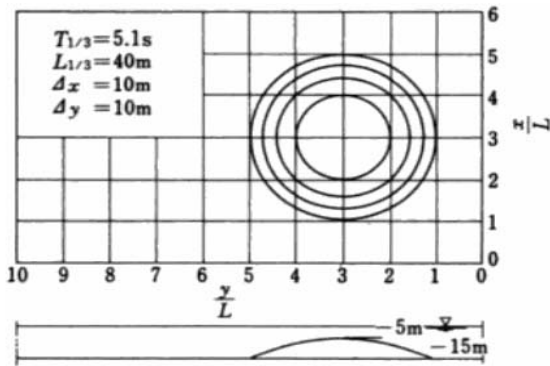


Fig. 5 Shape of spherical shoal (from Goda, 2000)

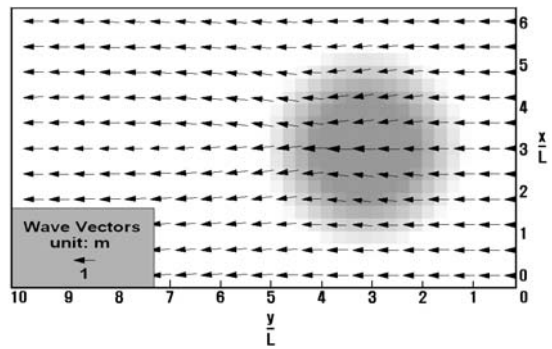


Fig. 6 Wave vectors (CASE 1)

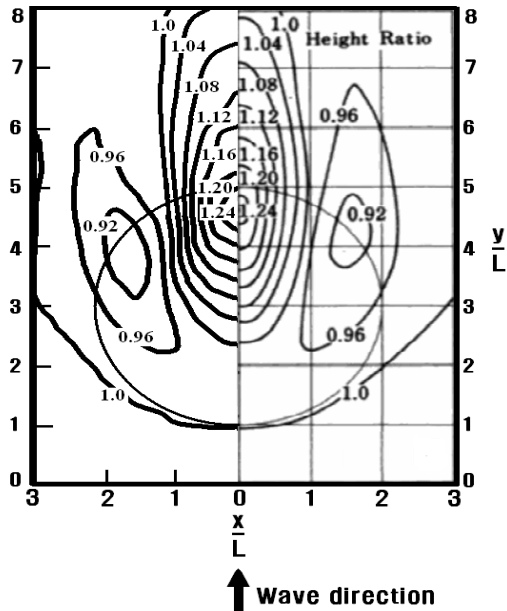


Fig. 7 Comparison of computed(left) and Goda(2000)'s(right) distributions of the ratios of wave heights

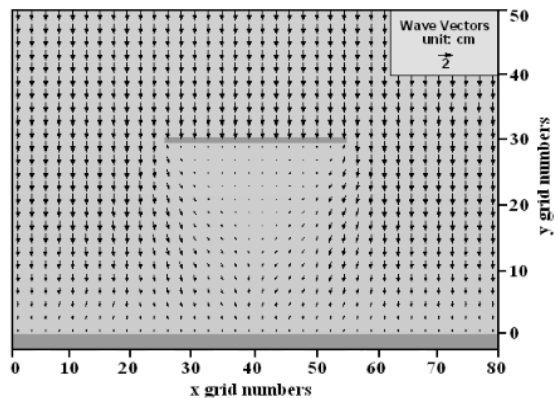


Fig. 8 Calculated wave height distribution around a detached breakwater (CASE 2)

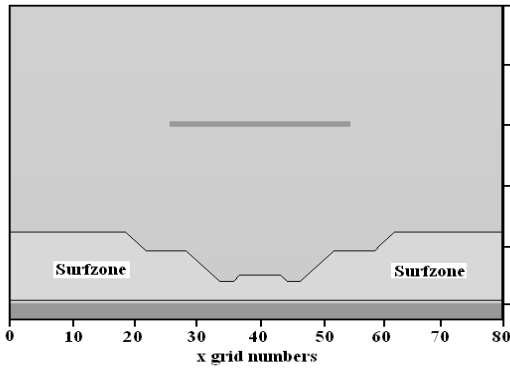


Fig. 9 Surfzone (CASE 2)

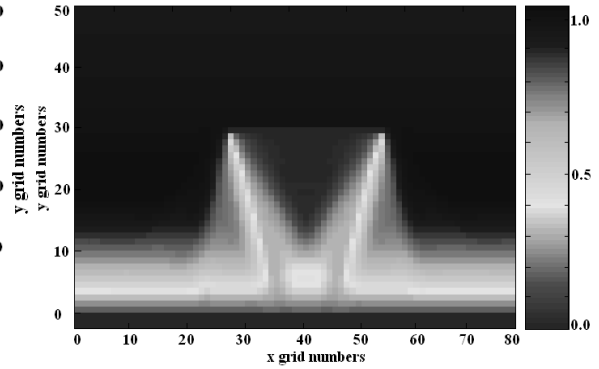


Fig. 10 Calculated diffraction coefficient around a detached breakwater (CASE 2)

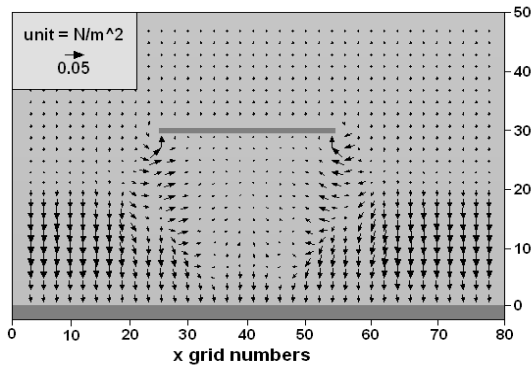


Fig. 11 Calculated wave induced forces by radiation stresses around a detached breakwater (CASE 2)

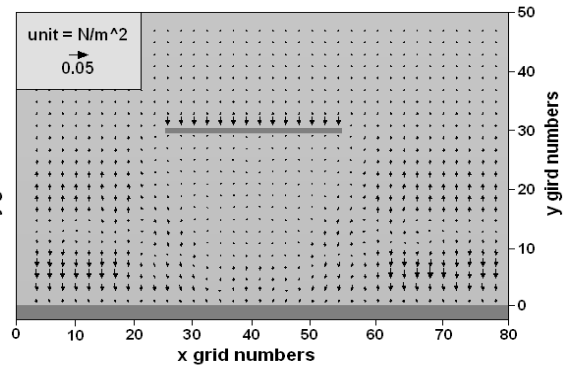


Fig. 12 Calculated wave induced forces by the stresses due to roller in breaking waves around a detached breakwater (CASE 2)

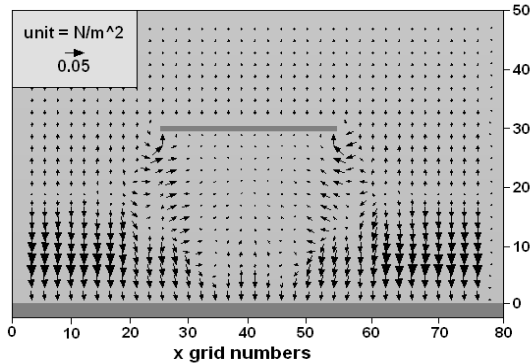


Fig. 13 Calculated wave induced forces by total stresses around a detached breakwater (CASE 2)

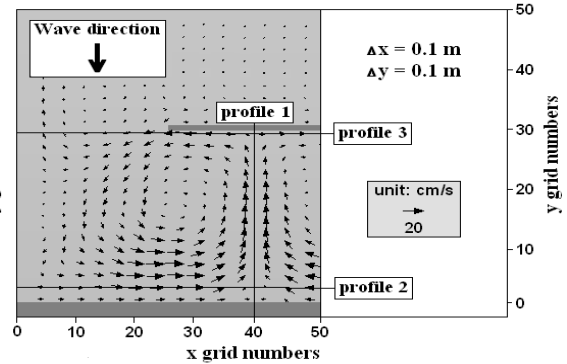


Fig. 14 Calculated wave induced currents around a detached breakwater (CASE 2)

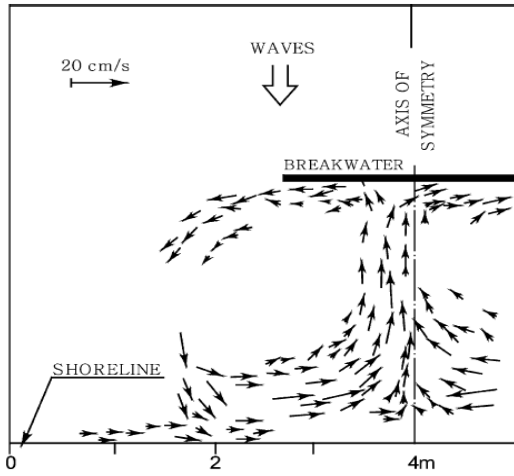


Fig. 15 Measured wave induced current field around a detached breakwater (Nishimura et al., 1985)

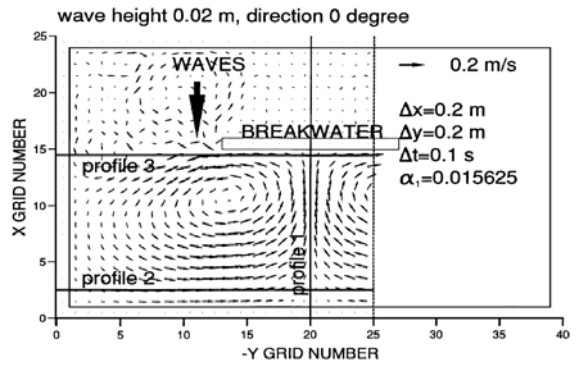


Fig. 16 Calculated wave induced current field around a detached breakwater (Kim, 2004)

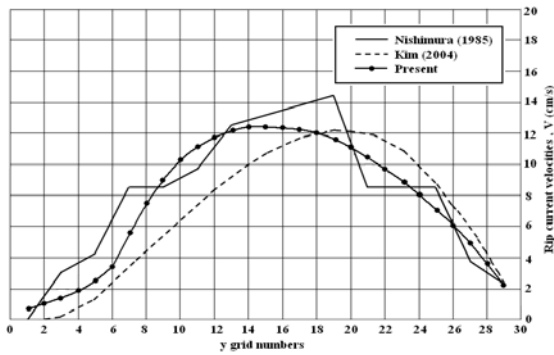


Fig. 17 Comparison of computed and measured rip current velocity distributions for profile 1

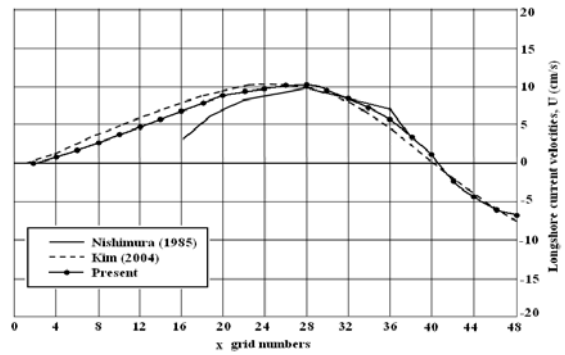


Fig. 18 Comparison of computed and measured longshore current velocity distributions for profile 2

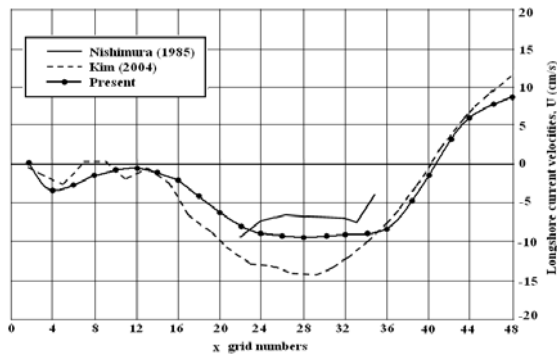


Fig. 19 Comparison of computed and measured longshore current velocity distributions for profile 3

4. 결 론

파랑에 의한 기인력 수치모형은 기존의 Longuet-Higgins and Stewart(1960)가 제안한 잉여응력에 의해 발생하는 기인력에 Dally and Osiecki (1994)가 제안한 roller로 인한 응력에 의해 발생하는 기인력을 추가하였고, Kim(2004)이 제안한 완화기법을 도입하여 lateral mixing 처리를 수행하지 않아도 자연현상과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 개발되었다. 개발된 WIF 수치모형은 계산시간 Δt 에 제약을 받지 않는다는 장점을 가지고 있으며, EFDC 수치모형의 생성-소멸항이 되어 파랑류의 양상을 계산할 수 있도록 하였다. 연계된 파랑류(WIC) 수치모형을 검증하기 위해서 Nishimura et al.(1985)의 수리모형실험과 Kim(2004)의 수심적분된 파랑류 수치모형과 비교 검증되었다.

개발된 WIC 수치모형은 앞으로 연안역의 인공구조물 설치 및 제거 시에 현장관측과 수리모형실험과 함께 사용하여 경제적이고 안전한 해안구조물 및 항만 설계에 도움을 줄 것이다. 또한 사용자 편의기법(Graphic User Interface, GUI)을 도입하여 입력자료 처리는 물론, 계산 결과를 쉽게 재현할 수 있도록 범용성을 지닌 수치모형으로 개선할 필요가 있다. 또한 우리나라는 서해안, 동해안 그리고 남해안의 해양환경이 상이하므로 파랑이 우세한 경우, 조류가 우세한 경우, 그리고 파랑과 조류가 공존하는 경우에 대하여 수치모형을 수행하여 그 결과를 현장관측 자료나 다른 수치모형시스템과 비교함으로써 자연현상과 보다 유사하게 재현할 수 있는 정밀도 높은 수치모형으로 개선되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 재원으로 “(재)한국해양과학기술진흥원”의 지원을 받아 수행된 “인공구조물 설치/제거에 의한 해양환경 예측모델링 기술개발”의 연구결과 중 일부이고, 2012년 국민대학교 교내연구비 지원 사업으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. 과학기술처 (1992). 동해안 항만매몰 및 해안 변형에 관한 연구 (I)
2. 장창환. 2009. 비점작성 퇴적환경변화 예측기술개발. 박사학위논문. 국민대학교.
3. 김현수, 김수전, 김형수 (2011). HEC-HMS 모형에 의한 장기유출량과 EFDC 모형을 이용한 호소 내 수질특성 분석, 한국습지학회, 제13권, 제3호, pp. 707-720.
4. 최승용, 한건연, 황재홍 (2011). 수심평균 혼합거리 난류 모형의 개발 및 와점성계수의 평가, 한국습지학회, 제13권, 제3호, pp. 395-409.
5. Arakawa, A. and Lamb, V.R., (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. Methods in Computational Physics, Vol 17, Academic Press, 174-265.
6. Baoshu, Y., Perrie, W., Yijun, H., Xiang, L., and Minghua, C., (2002). The impact of radiation stress in a coupled wave-tide-surge model, 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting October 21-25, 2002, Banff, Alberta, Canada.
7. Brown, J. M. and Wolf, J., (2009). Coupled wave and surge modelling for the eastern Irish Sea and implications for model wind-stress, Continental Shelf Research, 29 (10). 1329-1342.
8. Castelle, B., Bonneton, P., Senechal, N., Dupuis H., Butel R., and Michel, D., (2006). Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform multiple-barred sandy beach on the Aquitanian Coast, France, Continental Shelf Research 26, 113-131
9. Cialone, M.A., Militello, A., Brown, M.E., and Kraus, N.C., (2002). Coupling of wave

- and circulation numerical models at grays harbor entrance, Washington, U.S.A., Coastal Engineering, 1279-1291.
10. Cobb, M. and Blain, C.A., (2001). A Coupled Hydrodynamic-Wave Model for Simulating Wave and Tidally-Driven 2D Circulation in Inlets, the Seventh International Conference, November 5-7, 2001, St. Petersburg, Florida, Estuarine and Coastal Modeling 2001, 725-744.
 11. Dally, W. R. and Osiecki, D. A., (1994). The role of rollers in surf zone currents. In: 24th Int. Conf. On Coastal Eng., Kobe, 1895-1905.
 12. Goda, Y., (2000). Random seas and design of maritime structures, Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 15.
 13. Kawai, H., Kawaguchi, K. and Hashimoto, N., (2004). Development of storm surge model coupled with wave model and hindcasting of storm waves and surges caused by typhoon 9918, International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, May, 2004, 23-28.
 14. Kim, H., (2004). Practical spreading of driving forces for wave-driven currents, Ocean Engineering. 31, No 3-4. 435-453
 15. Lin, L., Mase, H., Yamada, F. and Demirbilek, Z., (2006). Wave-action balance equation diffraction (WABED) model: Tests of wave diffraction and reflection at inlets, ERDC/CHL CHETN-III-73.
 16. Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W., (1962). Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. J. of Fluid Mech. Vol. 8, 565-583.
 17. Macklin, T., Wolf, J., Wakelin, S., Gommenginger, C., Ferrier, G. and Elliott, A., (2006). The Benefits of Combining Coupled Wave-Current Models with SAR Observations for the Interpretation of Ocean-Surface Currents, Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS missions, ESA ESRIN in Frascati, Italy, January 24-26.
 18. Masternbroek, C., Burgers, G. and Janssen, P.A.E.M., (1992). The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer, J. of Physical Oceanography, Vol. 23, 1856-1866.
 19. Nishimura, H., Maruyama, K. and Sakurai, T., (1985). On the numerical computation of nearshore currents. Coastal Engineering in Japan, Vol. 28. 137-145.
 20. Qi, J., Chen, C., Beardsley, R.C., Perrie, W., Cowles, G.W. and Lai, Z., (2009). An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): Implementation, validations and applications, Ocean Modelling 28, 153-166.
 21. Smogorinsky, J., (1963). General circulation experiments with the primitive equations, Part I: the basic experiment. Mon. Wea. Rev., 91, 99-164.
 22. Tang, H. S., Keen, T. R. and Khanbilvardi, R., (2009). A model- coupling framework for nearshore waves, currents, sediment transport, and seabed morphology, Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 14, 2935-2947.
 23. The SWAN team (2008). SWAN user manual. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, available from <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>(Version 40.72).

24. Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C.K. and Arango, H.G., (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model, *J. of Computers & Geosciences* 34, 1284-1306.
25. Welsh, D.J.S., Bedford, K.W., Guo, Y. and Sadayappan, P., (2001). A Coupled Wave, Current, and Sediment Transport Modeling System, *ASCE, Ocean Wave Measurement and Analysis*, 1336-1345.
26. Zhang, H., Sannasiraj, S.A., Monirul, I. and Choo, H.K., (2002). Coupled Ocean Circulation and Wind-Wave Models With Data Assimilation Using Altimeter Statistics, *The Seventh OMISAR Workshop on Ocean Models*.
- 논문접수일 : 2012년 05월 29일
○ 심사의뢰일 : 2012년 06월 05일
○ 심사완료일 : 2012년 10월 22일