

# 동적 결합형 POM-WAM 모형의 해향저류 모의 적용 Application of Dynamically Coupled POM-WAM to Undertow Simulation

천제호\* · 안경모\*\* · 서경덕\*\*\* · 윤종태\*\*\*\*

Je Ho Chun\*, Kyung Mo Ahn\*\*, Kyung Duck Suh\*\*\* and Jong Tae Yoon\*\*\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 천 등(2009)의 동적결합형 POM-WAM 모형을 천해역 해빈류 현상 중 하나인 해향저류(undertow) 문제에 적용하였다. 수치모형의 해향저류 계산 결과를 향상시키기 위해 surface roller에 대한 방정식을 풀고, 이를 해향저류 계산에 포함시켰다. 수치모형을 Okayasu and Katayama(1992) 및 Cox and Kobayashi(1997)의 수리모형 실험에 적용하고, 계산 결과를 수리모형 실험 결과 및 Tajima and Madsen(2006)의 수치계산 결과와 함께 비교하였다. 그 결과, 본 수치모형의 계산결과와 실험결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이를 통해, 본 수치모형이 쇄파대를 포함한 천해역에 적용 가능함을 확인하였다.

**핵심용어 :** 동적 결합형 POM-WAM, 해향저류, 천해역

**Abstract :** In the present study, the dynamically coupled POM-WAM of Chun et al.(2009) was applied to the numerical simulation of undertow, one of the nearshore currents. To improve the accuracy of the numerical model results in surf zone, the transport equation of the surface roller was solved, and its effects were incorporated into the present numerical model. The numerical model has been applied to two hydraulic experiments of Okayasu and Katayama(1992) and Cox and Kobayashi(1997). The numerical results were compared with the hydraulic experimental results to give a good concurrence. It is concluded that the present numerical model can be applied to the shallow water region including surf zone.

**Keywords :** Dynamically coupled POM-WAM, undertow, shallow water region

## 1. 서 론

동적 결합형 파랑-흐름 모형은 서로 다른 파랑과 흐름 모형을 동적으로 결합하여 파랑과 흐름 현상을 계산하는 수치 모형으로, 파랑과 흐름간의 상호작용을 동시에 고려할 수 있다는 장점이 있는데, 최근에는 동적결합형 파랑-흐름 모형이 태풍 해일 및 태풍 파랑 계산에 많이 이용되고 있는 추세에 있다. 동적결합형 파랑-흐름 모형을 이용한 태풍 해일 및 태풍 파랑 계산 연구 사례들을 간략하게 정리하여 다음의 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 보면, 대부분의 동적 결합형 파랑-흐름 모형에서 파랑 모형으로 심해역 파랑 모형인 WAM 또는 Wavewatch II 등이 이용되고 있다. 이들 파랑 모형에는 수심 감소에 따른 천해역 효과인 쇄파에 의한 에너지 감쇠항이 포함되어 있지 않아 천해역에 적용하기엔 어려움이 있다. 이 때문에 이들 수치모형은 파랑과 흐름을 동시에 고려하고 있지만, 해빈류 계산

적용에 일정한 한계가 있다.

한편, 천 등(2009)의 연구에서는 POM과 WAM으로 동적 결합형 파랑-흐름 모형을 개발하였다. 천 등(2009)의 수치모형에서 POM과 WAM은 각각 천해역에 적용가능하기 때문에 본 수치모형은 천해역에서도 적용가능하다는 특징이 있다. 이 수치모형의 각 계산모듈의 천해역 적용가능 여부를 다음과 같이 간단히 소개할 수 있다. WAM의 원형은 심해역을 대상으로 개발되었기 때문에 천 등(2007, 2008)은 원천 함수, 파랑 에너지 이송 계산 부분 등을 개선하여 천해역에서도 적용 가능하도록 기존의 수치모형을 확장하였다. 개선된 수치모형은 수리모형 실험 결과 또는 실측 결과 등과 함께 비교·검증되었다. 그리고 POM은 일각에서 심해역에만 적용된다고 알려져 있는데, 이는 잘못된 것으로, POM 모형 자체는 천해역 및 심해역 모두 적용이 가능하다. POM 모형의 천해역 적용 사례로 장(2000) 및 윤 등(2006)의 연구사례를 들 수 있는데, 장(2000)의 연구에서는 POM을 이용하여 낙동강 하구역에서의 해수 거동을 성공적

\*한동대학교 건설환경연구소(Corresponding author: Jeho Chun, Institute of Construction and Environmental Research, Handong Global University, Pohang, Kyeongbuk 791-708, Korea, eulia01@hotmail.com)

\*\*한동대학교 공간환경시스템공학부(School of Spatial and Environment System Engineering, Handong Global University)

\*\*\*서울대학교 건설환경공학부 및 건설환경융합연구소 (Department of Civil and Environmental Engineering & Integrated Research Institute of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University)

\*\*\*\*경성대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Kyungsu University)

**Table 1.** Previous studies of numerical typhoon surge-wave model

Previous study	Numerical model		Characteristics
	Wave model	Current model	
Zhang and Li (1997)	A third -generation wave model	3D current model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamically coupled computation of surge and waves</li> <li>• Numerical simulations of the typhoon surge and wave for T8309 Ellen and T8516 Tess</li> </ul>
Moon (2000)	WAVEWATCH II	POM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamically coupled computation of surge and waves</li> <li>• Numerical simulations of the typhoon surge and wave for T9712 Winnie</li> </ul>
Cieslikiewicz and Herman (2002)	WAM	POM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamically coupled computation of surge and waves</li> <li>• Numerical simulations of the storm surge and wave in Baltic sea</li> </ul>
Choi et al. (2004)	WAM	depth-averaged hydrodynamic model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamically coupled computation of tide, surge and waves</li> <li>• Numerical simulations of the typhoon surge and wave for T0314 Maemi</li> </ul>
Osuna and Monbaliu (2004)	WAM	depth-averaged hydrodynamic model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamically coupled computation of tide, surge and waves</li> <li>• Estimation of the wave heights and surge heights around Belgian coasts</li> </ul>

으로 재현하였다. 그리고 윤 등(2006)은 좌표계 관련항을 일부 수정하긴 하였지만, 천해역에서의 저층수 거동을 성공적으로 계산하였다.

천 등(2009)에서는 태풍 ‘매미’에 대해서 적용한 후, 천해역에서의 파랑 및 조위 관측 자료와 비교하여, 천해역에의 적용 가능성을 확인한 바 있다. 하지만, 동일한 태풍에 대해서 계산한 Choi et al.(2004)의 연구에서는 심해역 수치모형 조건을 적용했음에도 불구하고, 계산 결과는 천해역에서의 관측 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 위 실험만으로는 본 수치모형이 쇄파대를 포함한 천해역에서도 잘 적용된다는 일반적인 결론을 내리기가 어렵다. 이에 본 연구에서는 천 등(2009)의 수치모형의 천해 적용성을 보다 명확히 확인하기 위해 천해에서의 3차원 해빈류 현상인 해양저류 문제에 본 모형을 적용하였다.

해양저류는 해빈류 현상의 하나로, 쇄파대에서 해저면을 따라 외해방향으로 흐르는 흐름을 말한다. 해빈침식 등에 대한 관심이 증가함에 따라, 최근 이 현상에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 해빈류 현상 중에는 해양저류 외에도 이안류(rip current)나 연안류(longshore current)등도 있지만, 본 연구에서는 해양저류 문제만을 다룬다. 이안류나 연안류 문제를 수치해석적으로 재현하기 위해서는 외해 경계 조건 뿐만 아니라 측면 경계 조건 또는 해안선 경계 조건 등을 처리할 필요가 있다. 반면에 해양 저류 문제는 외해 경계 조건만 처리하면 되기 때문에 경계 조건 처리가 용이하다는 장점이 있다. 이 외에 해양저류는 3차원 현상이기 때문에 본 연구에서 사용되는 3차원의 수치모형의 특징을 뚜렷하게 볼 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 수치모형을 Cox and Kobayashi(1997)과 Okayasu and Katayama(1992)의 수리모형 실험에 적용한 후, 본 연구의 계산 결과들을 상기 수리모형 실험 결과와 Tajima and Madsen(2006)의 계산결과와 비교·검증하여 본 수치모형의 천해 적용성을 판단하였다.

## 2. 해양저류(Undertow)

### 2.1 Okayasu et al.(1988)의 연구

Okayasu et al.(1988)는 단일경사 해안(plane beach)에 대해서 일련의 수리모형 실험을 실시하고, 유속의 수직 분포 모형을 제시하였다.

Okayasu et al.(1988)에서는  $\rho v_i \partial U / \partial z = -\overline{\rho u'w'}$ 로부터 유속 분포를 계산하였는데, 실험을 통해서, 난류 점성 계수  $\nu_i$ 와 Reynolds stress,  $-\overline{\rho u'w'}$ 에 대한 식을 수심, 바닥경사, 파속 등에 대한 식으로 다음과 같이 나타내었다.

$$v_i = 0.30 \tan \beta z' \tag{1}$$

$$-\overline{\rho u'w'} = 0.046 \tan \beta \rho \frac{c^2}{d_i} z'^2 - 0.08 \tan \beta \rho c^2 \tag{2}$$

여기서,  $z'$ : 바닥으로부터의 거리,  $z' = d_i - z$ ,  $d_i$ : 파곡수위 (trough level)로부터 바닥까지의 거리,  $\tan \beta$ : 바닥 경사

식 (1), (2)를  $\rho v_i \partial U / \partial z = -\overline{\rho u'w'}$ 에 대입한 후,  $U$ 에 대해서 다음과 같이 정리하였다.

$$U = -0.027 c \log \frac{z'}{d_i} + 0.15 c \frac{z'}{d_i} - 0.10 c + U_c \tag{3}$$

여기서,  $c$ : 파속,  $U_c$ : 수심적분 유속

식 (3)에서  $U_c$ 는 수심적분 유속을 말하는데,  $U_c = \int_0^d U dz$ 와 같이 정의된다. 수심 적분 유속은 질량보존식을 이용하여,  $gH^2/8cd_i$ 와 같이 나타낼 수 있다(Svendsen, 2006).

### 2.2 Cox and Kobayashi(1997)의 연구

Cox and Kobayashi(1997)는 수리모형 실험을 실시하고, 유속의 수직 분포에 대한 파라메타 모형을 제안하였다. Cox and Kobayashi(1997)의 연구는 해양저류 수치모의 실험의 검

중 자료로 자주 인용된다.

Cox and Kobayashi(1997)의 연구는 다음의 수직 분포 모형을 제시하였다.

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{z'}{z_0}\right) \quad z_0 \leq z' \leq \delta \quad (4)$$

$$U = U_b + \alpha z'^2 \quad \delta < z' \leq d_t \quad (5)$$

여기서,  $U_b$ : 파랑 경계층이 없을 경우, 가상의 해향저류속 (hypothetical undertow velocity in the absence of the boundary layer),  $\delta$ : 파랑경계층(wave boundary layer)의 두께,  $z_0$ : 바닥 조도고,  $\kappa$ : von Karman 상수,  $u_*$ : 바닥 마찰 속도

위의 식에서 바닥 조도고는 일정한 값으로 계속 유지되나, 바닥 마찰 속도나 경계층의 두께 및 파라메타  $\alpha$ 는 파랑과 흐름의 값으로 결정된다.

### 2.3 Xia et al.(2004)의 연구

Xia et al.(2004)은 선형파 이론을 이용하여 좌표계에서의 3차원 잉여응력을 유도하였다. 제시된 잉여 응력 모형의 정확성을 검증하기 위해서, 단면 2차원에 대해 유속장을 계산한 후, 계산 결과로 평균 수면 상승(wave set-up)과 단면 2차원의 유속장을 제시하였다. Xia et al.(2004)의 잉여응력 모델은 천 등(2009)의 수치모형 뿐만 아니라, Liu and Xie(2009)의 폭풍 해일 계산에도 사용되었다.

Xia et al.(2004)에 따르면, 제시된 계산 결과 중 평균 수면 상승 계산 결과는  $\partial S_{xx}/\partial x + \rho g D \partial \eta / \partial x = -\tau_b$ 로부터 얻은 것과 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

하지만, Xia et al.(2004)의 유속 분포 결과는 Bijker et al. (1974)의 수리모형 실험 결과와 잘 일치한다고 하였지만, Xia et al.(2004)의 계산 결과에서 보면 바닥 및 수면 부근의 유속은 각각 육지 및 수면을 향하는 것으로 나타나고 있다. 이는 일반적으로 알려져 있는 해향저류 패턴과는 정반대되는 특성을 보이고 있다.

### 2.4 Tajima and Madsen(2006)의 연구

Tajima and Madsen(2006)는 유속 분포를로부터 계산하였다. Tajima and Madsen(2006)의 연구에서 난류 점성 계수의 모형을 식 (6), (7)에 나타내었다.

$$v_t = \kappa u_* z' \quad \delta \leq z' \leq z_m \quad (6)$$

$$v_t = \kappa u_* z' \sqrt{d_t/z'} \quad z_m \leq z' \leq d_t \quad (7)$$

여기서,  $u_*$ : 수면에서의 마찰속도,  $z_m$ : 파라메타  $z_m = d_t u_{*cb}^2 / u_*^2$

식 (6), (7)을  $v_t \partial U / \partial z = \tau_b + (\tau_s - \tau_b) z / d_t$ 에 대입하여 다음의 유속 분포 식을 얻었다.

$$U = \begin{cases} A_1 \log \frac{z'}{z_0} & z_0 \leq z' \leq \delta \\ U_\delta + A_2 \log \frac{z'}{\delta} + A_3 \frac{z' - \delta}{d_t} & \delta \leq z' \leq z_m \\ U_{z_m} + A_4 (\sqrt{z'} - \sqrt{z_m}) & z_m \leq z' \leq d_t \\ U_s & d_t \leq z' \leq h + \eta \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $u_{*m}$ : 파랑-흐름이 복합적으로 고려된 바닥 마찰 속도,  $A_1, A_2, A_3, A_4$ : 파라메타,  $A_1 = \tau_b / \rho \kappa u_{*m}$ ,  $A_2 = \tau_b / \rho \kappa u_{*cb}$ ,  $A_3 = (\tau_{cs} - \tau_b) / \rho \kappa u_{*cb}$ ,  $A_4 = ((\tau_{cs} - \tau_b) / \sqrt{d_t} + \tau \sqrt{d_t / z z_m}) 2 / \rho \kappa u_{*s}$ ,  $U_s$ : 표면 유속

식 (8)에서 수면 전단응력은 파고, 평균 수면, 수심, 표면 유속 등을 이용하여 계산한다. 이에 대한 자세한 내용은 Tajima and Madsen(2006)에 나와 있어, 본 논문에서는 이에 대한 설명을 생략한다.

## 3. 수치모형

### 3.1 WAM

WAM의 지배방정식은 파랑 작용 보존식으로 다음과 같이 쓸 수 있다(Monbalieu et al., 2000).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(c_\lambda F)}{\partial \lambda} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial(c_\theta \cos \phi F)}{\partial \phi} + \omega_r \frac{\partial}{\partial \omega_r} \left( c_\omega \frac{F}{\omega_r} \right) + \frac{\partial(c_\sigma F)}{\partial \theta} = S \quad (9)$$

여기서,

$F(\lambda, \phi, \omega_r, \theta)$ : 파랑에너지 스펙트럼

$\lambda$ : 경도,  $\phi$ : 위도

$\omega_r$ : 상대주파수,  $\omega_r = \sqrt{h k \tan h k h}$ ,  $\Omega$ : 절대 주파수,  $\Omega = \sqrt{g k \tan h k h} + \vec{k} \cdot \vec{U}$

$\theta$ : 스펙트럼의 방향

$$c_\lambda = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g \sin \theta + U}{R \cos \phi}, \quad c_\phi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g \cos \theta + V}{R}$$

$$c_\theta = (kR)^{-1} = \left( \sin \theta \frac{\partial \Omega}{\partial \phi} - \cos \theta \frac{\partial \Omega}{\partial \lambda} \right) + c_g \frac{\sin \theta \tan \phi}{R}, \quad c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt}$$

$R$ : 지구의 반경

$c_g$ : 군속도,  $c_g = \frac{\partial \omega_r}{\partial k}$

$S$ : 원천함수,  $S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl4} + S_{nl3} + S_{bf} + S_{br}$

$S_{in}$ : 바람에 의한 에너지 입력

$S_{ds}$ : 백파에 의한 에너지 감쇠

$S_{nl4}$ : 사파 비선형 상호작용

$S_{nl3}$ : 삼파 비선형 상호작용

$S_{bf}$ : 바닥 마찰에 의한 파랑 에너지 감쇠

$S_{br}$ : 쇄파에 의한 파랑 에너지 감쇠

본 연구에서는 식 (9)에 대해 fractional step method 를 이용한 음해법을 적용하였다(천 등, 2006). 이 때문에 높은 Courant수에서도 안정적으로 파랑 계산이 가능하다. 본 연구의 WAM 모델은 앞 부분에서 기술한 바와 같이 천해역에서도 적용가능하다. 식 (9)에서 쇄파 모형으로 Battjes and Janssen (1978)의 쇄파 모형을 사용하였다. 이에 대한 자세한 내용은 천 등(2008)에서 자세히 나와 있어 이에 대한 설명을 생략한다.

### 3.2 POM

POM의 지배방정식은 정수압 근사 가정 조건아래, Navier-Stokes 방정식에 좌표계를 도입한 것으로, POM의 지배방정식은 식 (10)-(16)에 나타내었다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (10)$$

운동방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} \\ & = gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + fVD + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial U}{D \partial \sigma} \right) + F_x + B_x - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} \\ & = gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + fUD + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial V}{D \partial \sigma} \right) + F_y + B_y - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (12)$$

난류모델:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial kD}{\partial t} + \frac{\partial kUD}{\partial x} + \frac{\partial kVD}{\partial y} + \frac{\partial k \omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A_M D \partial k}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A_M D \partial k}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial k}{D \sigma_k} \right) \\ & \quad + \frac{K_M}{D} \left( \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right) + K_H \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} + \varepsilon D \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \varepsilon D}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon UD}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon VD}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon \omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A_M D \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A_M D \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial \varepsilon}{D \sigma_\varepsilon} \right) \\ & \quad + c_{1\varepsilon} \frac{K_M}{D} \left( \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right) + c_{3\varepsilon} K_H \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} + c_{2\varepsilon} \varepsilon \end{aligned} \quad (14)$$

경계 조건:

$$w(0) = w(-1) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{K_M \partial U}{D \partial \sigma} = \tau_{bx}, \quad \frac{K_M \partial V}{D \partial \sigma} = \tau_{by} \quad \text{at } \sigma = -1 \quad (16)$$

여기서,

$\eta$ : 수면변위

$D$ : 바닥에서 수면까지의 거리,  $D = h + \eta$

$h$ : 바닥에서 정수면(still water level)까지의 거리

$x, y$ : 수평방향 좌표계

$z$ : 수직방향 좌표계,  $-h \leq z \leq \eta$

$\sigma$ :  $\sigma$  좌표계,  $\sigma = \frac{z-h}{h+\eta}$

$U, V$ : 수평방향 3차원 유속

$w$ : 가연직속도(pseudo vertical velocity)

$F_x, F_y$ : 수평방향 shear stress

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M D \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_M D \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_M D \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M D \frac{\partial V}{\partial y} \right)$$

$B_x, B_y$ : 수평방향 baroclinic pressure force

$$B_x = \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\rho} \left( \sigma' \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} - \frac{\partial \rho'}{\partial x} \right) d\sigma'$$

$$B_y = \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\rho} \left( \sigma' \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} - \frac{\partial \rho'}{\partial y} \right) d\sigma'$$

$S'_{xx}, S'_{yy}, S'_{xy}$ : 잉여응력(radiation stress)

$$S'_{xx} = En(\cos^2 \theta + 1) - E, \quad S'_{yy} = En(\sin^2 \theta + 1) - E,$$

$$S'_{xy} = Encos\theta \sin \theta$$

$E$ : 파랑 에너지

$\tau_b$ : 바닥 마찰력

$\tilde{\rho}$ : 밀도,  $\rho$ : 평균밀도,  $\rho'$ : 변동밀도(fluctuating density),

$\rho_0$ : 해수의 밀도

$A_M$ : 수평방향 점성 계수

$K_M$ : 수직방향 점성 계수

$k$ : 난류에너지

$\varepsilon$ : 난류에너지 감쇠율

$\sigma_k$ : 상수,  $\sigma_k = 1.0$

$\sigma_\varepsilon$ : Schmidt number,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

$c_{1\varepsilon}$ : 상수,  $c_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $c_{2\varepsilon}$ : 상수  $c_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $c_{3\varepsilon} = -1$

식 (9)에서 바닥마찰 응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{bs} = C_D |U_b| U_b, \quad \tau_{by} = C_D |U_b| V_b \quad (17)$$

여기서,  $C_D$ : 바닥 항력 계수,  $C_D = \kappa / \log(z_r/z_{0,a} + 1)$ ,  $U_b, V_b$ :  $x$  및  $y$ 방향의 바닥 인접 유속 성분,  $|U_b|$ : 바닥에 인접한 곳의 유속,  $|U_b| = \sqrt{U_b^2 + V_b^2}$ ,  $z_r$ : 수직 방향 기준 위치,  $z_{0,a}$ : 겉보기 바닥 조도고(apparent bottom roughness height)

식 (17)에서  $z_{0,a}$ 는 Madsen(1994)의 이론에 의해 파랑과 흐름을 동시에 고려하여 계산하였다. 본 논문에서는 이에 대한 설명을 생략한다.

### 3.3 Surface roller

surface roller 는 쇄파시, 해수면에 나타나는 현상으로서,

Duncan(1981)에 의해서 처음 제안되었다. surface roller 는 에너지를 가지고 있는데, surface roller 의 에너지  $E_r$ 는 파속  $c$ , surface roller 의 면적  $A$ , 파랑 주기,  $T$ 등을 이용하여  $E_r = (1/2)\rho c A/T$ 와 같이 정의된다(Svendsen, 1984). surface roller 에너지 이동에 대한 식을 식 (18)에 나타내었다.

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial 2(u+c_x)E_r}{\partial x} + \frac{\partial 2(v+c_y)E_r}{\partial y} = D_{br} - \frac{2g \sin \beta E_r}{c} \quad (18)$$

식 (18)은 Lippmann et al.(1996)의 식을 비정상형태로 나타낸 식이다. 식 (18)에서  $\beta$ 는 파랑과 surface roller stress 사이의 각도를 나타낸다. 본 수치모형의 파랑 모형인 WAM 이 음해법을 사용하므로, 식 (18) 역시 음해법을 적용하여 해석하였다. 식 (18)을 푸는 데 완전음해법(fully implicit method)을 사용하였다.

### 3.4 잉여응력 및 수면 응력

천 등(2009)은 Xia et al.(2004)의 3차원 잉여응력 모형을 사용하여 태풍 해일을 계산하였다. 이 잉여응력은 Xie et al. (2008)과 Liu and Xie(2009)의 폭풍 해일 계산에서도 적용된 바 있다. 하지만, Xia et al.(2004)의 연구 결과에서 보면, 평균 수면 상승은 실험치와 잘 일치하지만 유속 분포는 물리적인 현상과 배치되는 모습을 보이고 있어, Xia et al.(2004)의 3차원 잉여응력을 신뢰하기 힘들다. 이에 본 연구에서는 Xia et al.(2004)의 3차원 잉여응력 대신에 Longuet-Higgins and Stewart(1964)의 2차원 잉여응력을 사용하였다.

본 연구의 흐름 모형이 3차원 해수유동 모형이기 때문에 3차원 잉여응력 모형을 도입해야 하지만, Longuet-Higgins and Stewart(1964)의 잉여응력이 3차원 폭풍 해일 또는 3차원 해빈류 계산에 여전히 많이 응용되고 있다(Xie et al., 2001; Tajima and Madsen, 2006; Sheng et al., 2010).

본 연구의 지배 방정식인 식 (11)과 식 (12)에서 나타나 있는 잉여응력  $S'_{xx}$ 과  $S'_{yy}$ 을 tensor 형태로 식 (19)에 나타내었다.

$$S'_{ij} = \int_{-1}^0 \left( \frac{E g k_i k_j \cosh^2 k D (1 + \sigma)}{\omega_r^2 \cosh^2 k D} - \frac{E g k^2 \sinh^2 k D (1 + \sigma)}{\omega_r^2 \cosh^2 k D} \right) d\sigma \quad (19)$$

여기서,  $S'_{ij}$ : 잉여응력 tensor,  $k_i$ : 파수 벡터,  $k$ : 파수

식 (19)의 잉여응력은 Longuet-Higgins and Stewart(1964)의 잉여응력에서 파랑 포텐셜 에너지 성분이 제외된 것으로, 이는 Kuroiwa et al.(1998)의 3차원 해빈류 모형에서도 잉여응력으로 사용되었다. Longuet-Higgins and Stewart(1964)의 잉여응력에서 파랑 포텐셜 에너지 성분은 평균 수면에서의 파랑의 운동을 고려한 것으로 본 연구의 수치모형에서는 수면 경계 조건에 포함된다. 즉, 체적력(body force)에 있어야만 하는 파랑 포텐셜 에너지 성분이 수면 경계 조건에 포함되어 있다.

태풍해일 계산에서는 바람 응력의 효과가 파랑 쇄파 효과

보다 월등하기 때문에, 파랑 쇄파의 효과가 상대적으로 낮게 나타나지만, 해양 저류에서는 파랑 쇄파의 효과가 매우 크다. 이에 본 연구에서는 파랑 포텐셜 에너지 성분을 체적력이 아닌 수면 경계 조건으로 포함시킴으로써, 쇄파 시 해안선 방향으로 향하는 유속 분포를 잘 재현할 수 있었다. 이와 같은 파랑 포텐셜 에너지 성분 처리는 Stive and Wind(1986)의 수면 경계 조건과도 부합된다.

본 연구의 수치모형에서 사용된 수면 응력 식을 식 (20)과 식 (21)에 나타내었다.

$$\tau_{s,x} = \tau_{w,x} - \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial x} - \left( \frac{\partial 2E_r \sin^2 \theta}{\partial x} - \frac{\partial E_r \sin \theta \cos \theta}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$\tau_{s,y} = \tau_{w,y} - \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial y} - \left( \frac{\partial E_r \sin \theta \cos \theta}{\partial x} - \frac{\partial 2E_r \cos^2 \theta}{\partial y} \right) \quad (21)$$

여기서,  $\tau_{w,x}$ ,  $\tau_{w,y}$ : 바람 응력

식 (20)과 식 (21)은 바람, 파랑, surface roller의 효과가 모두 고려한 것으로, 바람과 surface roller의 효과를 배제할 경우, 식 (20)과 (21)은 Stive and Wind(1986)의 수면 응력과 일치한다. 식 (20)과 식 (21)에서 우변의 두 번째 항은 파랑 포텐셜 에너지의 경사(gradient)를 나타내는 것으로 앞 단락에서 언급하고 있는 Longuet-Higgins and Stewart(1964)의 잉여응력 모형에서의 파랑 포텐셜 에너지 성분을 이와 같이 고려하고 있다. 이 항으로 인해 쇄파 시 해안선 방향으로 향하는 평균수면 인근의 유속을 잘 재현할 수 있다.

그리고, 위의 수면 경계 조건들과 함께 식 (11)과 식 (12)를 수심에 대해서 적분하면 다음과 같은 형태로 최종 정리된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_{-1}^0 U^2 D d\sigma \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_{-1}^0 UVD d\sigma \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + f\bar{V}D + \bar{F}_y + \bar{B}_x - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \tau_{w,x} - \tau_{b,x} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_{-1}^0 UVD d\sigma \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_{-1}^0 V^2 D d\sigma \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - f\bar{U}D + \bar{F}_x + \bar{B}_y - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \tau_{w,y} - \tau_{b,y} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,  $\bar{F}_x$ ,  $\bar{F}_y$ : 수심 적분된 전단응력

$$\bar{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2D \int_{-1}^0 A_M \frac{\partial U}{\partial x} d\sigma \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \int_{-1}^0 A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) d\sigma \right)$$

$$\bar{F}_y = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \int_{-1}^0 A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) d\sigma \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2D \int_{-1}^0 A_M \frac{\partial V}{\partial y} d\sigma \right)$$

$\bar{B}_x, \bar{B}_y$ : 수심 적분된 밀도차에 의한 압력

$$S_{xx} = En(\cos^2 \theta + 1) - E/2, S_{yy} = En(\sin^2 \theta + 1) - E/2$$

식 (22)와 식 (23)은 기존의 수심적분된 해빈류의 운동 방정식과 그 형태가 동일하다.

### 4. 수치모의 실험

#### 4.1 Okayasu and Katayama(1992)의 수리모형 실험

Okayasu and Katayama(1992)에서는 둔덕(bar)을 가진 해안(barred beach) 조건에 대한 해양 저류 수리모형 실험을 실시하였는데, 이 수리모형 실험에서 입사파고와 입사파 주기로 각각 5.61 cm 및 1.14 초가 사용되었다.

그리고, 이 수리모형 실험에서 매끄러운 바닥이 적용되었다. 이에 본 연구의 수치모의 실험에서 Nikuradse 조도고  $k_N$ 값으로  $k_N = 3.3 v/u_*$ 을 사용하였다. 이 값은 매끄러운 바닥에서 유속 분포식  $U(z) = \frac{u_*}{K} \log\left(10.35 \frac{u_* z}{\nu}\right)$ 로부터 유도하였다.

본 연구의 계산 결과를 Tajima and Madsen(2006)의 계산 결과와 수리모형 실험 결과 등과 함께 다음의 Fig. 1~Fig. 3에 나타내었다. Fig. 1~Fig. 3의 Tajima and Madsen(2006)의 계산결과와 Okayasu and Katayama(1992)의 실험 자료는 Tajima and Madsen(2006)의 논문으로부터 독취하였다.

Fig. 1은 파고 계산 결과들을 서로 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 1의 본 연구 파고 계산 결과를 보면,  $x = 2.5$  m 지점의 둔덕 전면에서 쇄파 작용이 일어나 파가 감소했다가, 수심이 깊어짐에 따라 파고가 다시 증가하다가, 해안선 인근에서 쇄파 작용으로 인해 파고가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 Tajima and Madsen(2006)의 계산 결과 및 실험 결과에서도 마찬가지로 나타나고 있다.

Fig. 2에 평균 수위 계산 결과 및 관측 결과들을 나타내었다. Fig. 2의 관측 결과에서 보면, 둔덕 및 해안선 전면의 쇄파 지점에서는 평균 수위 하강(wave set-down)이 일어나서 수면

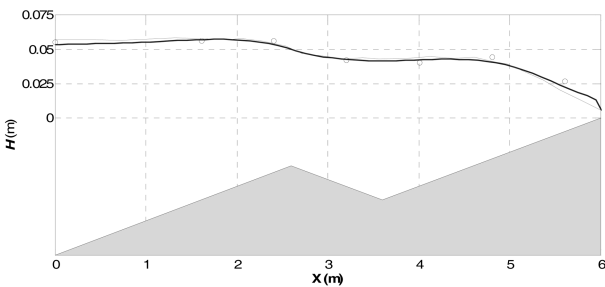


Fig. 1. Comparisons of computed and measured wave heights: present study(thick blue line), Tajima and Madsen(2006)(red line), measured ones(black circle).

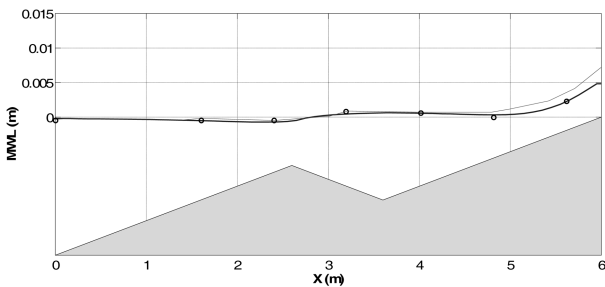


Fig. 2. Comparisons of computed and measured mean water level: present study(thick blue line), Tajima and Madsen(2006)(red line), measured ones(black circle).

이 하강했다가, 이 지점을 지난 후에는 다시 평균 수면이 상승하는 것으로 나타나고 있다. 본 연구의 평균 수면 상승 계산 결과는 관측결과와 대체로 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. Tajima and Madsen(2006)의 계산에서는 둔덕 전면에서는 관측 결과와 잘 일치하다가, 해안선 전면에서는 과대 계산하는 경향이 있다.

본 연구 및 Tajima and Madsen(2006)의 계산 결과와 관측 결과로부터 얻은 유속 분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에는 유속분포 뿐만 아니라, 본 연구의 계산 결과 얻은 파곡 수위도 함께 나타내었다. 본 연구의 수치모형에서 수직방향의 격자는 해저면에서부터 평균 수위까지 정의되어, 파곡수위부터 평균 수위까지의 영역에도 유속계산 결과가 존재한다. 반면에 Tajima and Madsen(2006)의 수치모형은 해저면으로부터 파곡수위까지의 구간에 대해서만 적용가능하기 때문에 파곡수위 위로 계산 결과가 존재하지 않는다. 이러한 수직방향의 계산영역은 Tajima and Madsen(2006)에서 뿐만 아니라, Svendsen(2006)와 Smith et al.(1992)등의 연구에서도 보여진다. 하지만, 실제로는 파곡수위부터 평균 수위까지의 구간 뿐만 아니라, 평균 수위부터 파봉선까지의 구간에도 흐름이 존재하는 데, 이들 구간에서의 유속이  $U_0$ 로 일정하다고 한 후, 파봉선부터 파고선까지의 유량을 파랑 주기에 대해서 평균화하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{\xi} U_0 dz dt = 0$$

위의 식에서  $\xi$ 는 파랑에 의한 수면 변위를 나타내는 것으로 진폭과 위상이 각각  $\alpha, \psi$ 일 때,  $\xi = a \cos \psi$ 와 같이 정의된다. 이 때문에 파곡수위부터 평균 수위까지의 구간에서 흐름이 실질적인 물리적 의미를 가지고 있다고 보기 힘들다. 본 연구의 수치모형은 해저면에서부터 평균 수위까지 계산되고 있지만, 이 구간에서 발생하는 모든 물리적 현상을 고려한 것은 아니기 때문에 해저면에서부터 파곡수위까지의 구간의 결과만 신뢰할만한 것으로 보고, 다른 계산 결과 및 실측 결과 등과 비교하였다. Fig. 3에서 보면,  $x = 5.6$  m 지점에서의 관측 유속을 제외하고 본 연구의 계산 결과는 관측 결과와 대체로 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 이와는 반대로 Tajima and Madsen

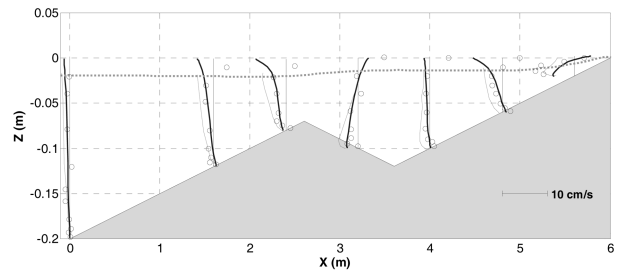


Fig. 3. Comparisons of computed and measured velocity profiles: present study(thick blue line), Tajima and Madsen(2006)(red line), measured ones(black circle), computed wave trough level(green broken line).

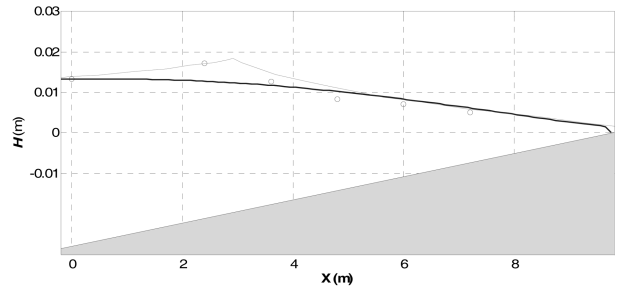
(2006)의 계산 결과는  $x = 5.6\text{ m}$  지점에서는 관측 자료와 잘 일치하고, 나머지 지점에서는 전체적으로 유속을 과대 계산하고 있는 것으로 나타나고 있다. 본 연구의 수치모형은 해저면으로부터 평균 수위까지 계산된다. 본 연구의 수치모형이 Okayasu and Katayama(1992)의 수리모형 실험에서 보여진 해양 저류를 성공적으로 재현했다고 판단된다.

본 수치모의 실험 결과 과정에서 얻은 계산 변수들 중, surface roller, 수면전단응력, 바닥마찰응력, 난류에너지, 난류에너지 감쇄율, 난류 점성 계수들을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보면, 이중 쇄파로 인해  $x = 2.5\text{ m}$  와  $x = 5.5\text{ m}$  인 근에서 surface roller, 수면전단응력, 평균 수위 인근의 난류에너지 및 난류에너지 감쇄율이 상승하는 것을 볼 수 있다.

**4.2 Cox and Kobayashi(1997)의 수리모형 실험**

Cox and Kobayashi(1997) 수리모형 실험은 단일경사 해안에 대한 수리모형 실험을 실시하였다. 본 수리모형 실험의 입사 파고와 입사파 주기는 각각  $0.125\text{ m}$ 와  $2.2\text{ 초}$ 이다. 바닥면 조건은 거친 바닥인데, 바닥 조도고는 평균모래입경 크기인  $d_{50}$ 를 통해 산정할 수 있다. 본 수리모형 실험에서  $d_{50}$ 의 크기는  $0.1\text{ cm}$ 로 바닥 조도고는  $z_0 = 2d_{50}/30 = 0.007\text{ cm}$ 이다.

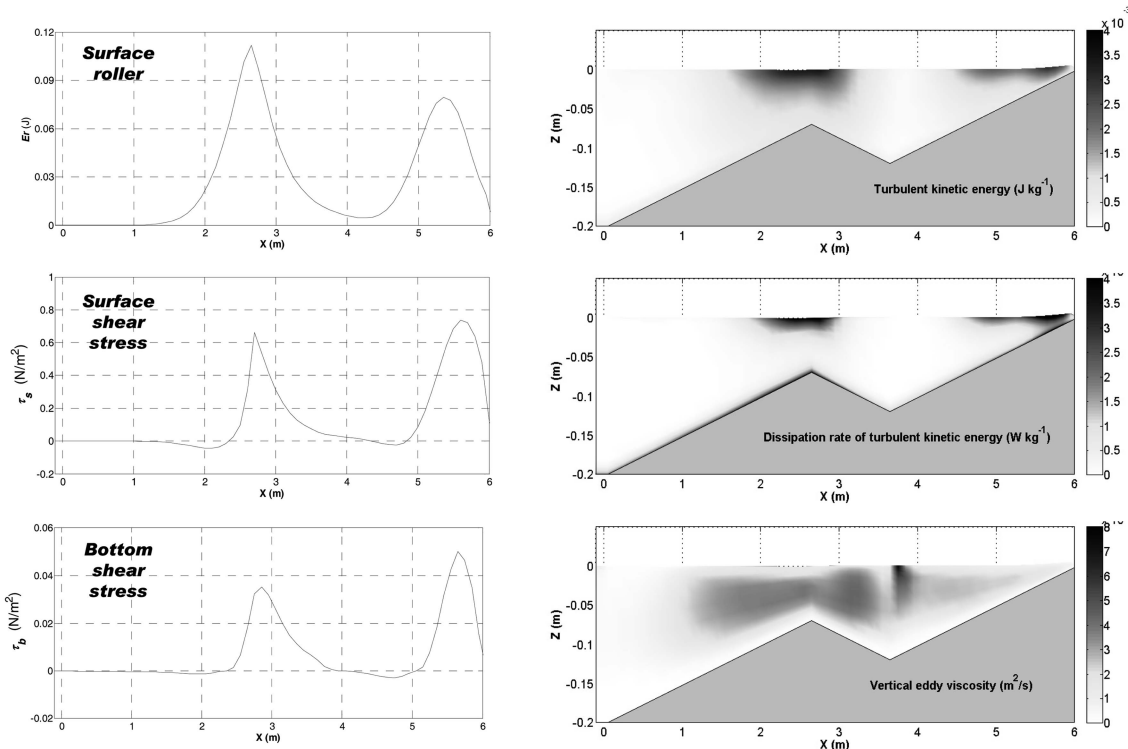
본 연구의 계산 결과를 Tajima and Madsen(2006)의 계산 결과와 수리모형 실험 등과 함께 다음의 Fig. 5~Fig. 7에 나타내었다. Fig. 5~Fig. 7에서 실험 결과는 Cox and Kobayashi(1997)에서 얻었으며, Tajima and Madsen(2006)의 계산 결과는 Tajima and Madsen(2006)의 논문으로부터 독취하였다.



**Fig. 5.** Comparisons of the computed and measured wave heights: present study(thick blue line), Tajima and Madsen(2006) (red line), measured ones(black circle).

파고 계산 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보면, Tajima and Madsen(2006)의 계산 결과는 관측 결과와 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 하지만, 본 연구의 계산 결과는 쇄파 후에는 잘 일치하는 반면에 쇄파 전에는 대체로 과소산정하는 것으로 나타나고 있다. Tajima and Madsen(2006)의 파랑 모형의 지배방정식은 에너지평형 방정식(energy balance equation)이지만, 파랑 계산 과정에서는 비선형 천수관계식을 고려하여 파랑 계산의 정확도를 향상시켰다. 이로써, 본 연구의 수치모형에서는 비선형 천수관계식을 별도로 고려하지 않아, 쇄파 지점 전의 파고가 실제보다 과소산정된 것으로 보여진다. 이는 본 연구의 수치 모형이 가지는 한계점 중의 하나라고 할 수 있다.

Fig. 6에 평균 수위 계산 결과 및 관측된 평균 수위등을 나타내었다. Fig. 6에서 보면, Tajima and Madsen(2006)의 계산



**Fig. 4.** Parameters used in the numerical simulation for Okayasu and Katayama(1992).

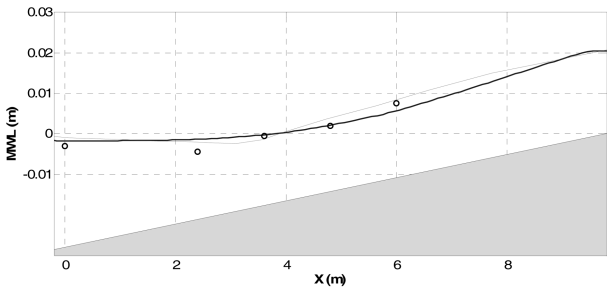


Fig. 6. Comparisons of the computed and measured mean water level: present study(thick blue line), Tajima and Madsen(2006) (red line), measured ones(black circle).

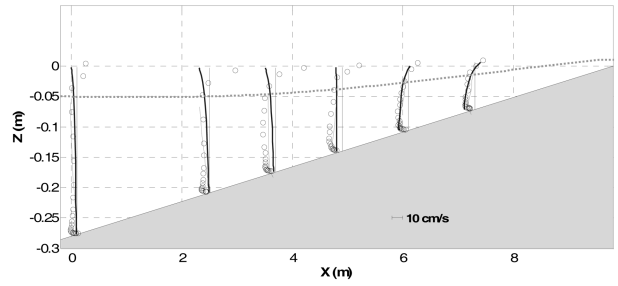


Fig. 7. Comparisons of the computed and measured velocity profiles: present study(thick blue line), Tajima and Madsen(2006)(red line), measured ones(black circle), computed wave trough level (green broken line).

결과와 잘 일치하는 반면에, 본 연구의 계산 결과는 본 연구의 계산 결과는 경향성은 잘 일치하는 뿐, 정확도가 떨어지는 것으로 나타나고 있다. 특히, 본 연구의 계산결과의 평균 수위 하강의 크기가 실측 자료 및 Tajima and Madsen(2006)의 것에 비해 작게 나타나고 있다. 이는 본 연구의 파랑 계산 결과에서 나타나고 있는 쇄파지점 부근의 파고 과소산정으로 인해서, 평균 수위 하강이 과소산정된 것으로 보인다. 평균 수위 하강은 쇄파로 인한 파랑 에너지의 급격한 변화로 인해서 발생하는 현상인데, 본 연구의 파랑 계산 결과에서는 파고가 실제보다 다소 과소산정되어 결과적으로 평균 수위 하강이 저평가된 것으로 보인다.

유속 분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보면, 본 연구의 계산결과가 쇄파지점 인근에서는 실험결과에 비해서 다소 과소산정하고 있지만, 쇄파지점을 지난 후에는 본 연구의 계산결과가 실험결과와 잘 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다.

해양저류에서 유속의 수직 분포는 수면전단응력, 잉여응력의 경사, 평균수위의 경사등에 의해서 결정되는데, 수면전단응력 및 잉여응력의 경사는 파랑 에너지의 경사에 비례하고 있다. 이로써, 해양저류의 유속분포는 파랑 에너지 및 평균 수위의 경사에 의해서 결정된다고 볼 수 있다. 본 연구의 계산 결과에서 보면,  $x = 0 \sim 4$  m 구간은 파고의 과소산정으로 인해서 파고 및 평균 수위 하강의 크기가 크지 않다. 이로 인해 파랑에너지 및 평균 수위의 경사가 과소산정되어 유속의 크기가 과소산정된 것으로 보인다. 이 반면에,  $x = 4 \sim 6$  m 구간에서는 파랑에너지의 경사 및 수면 변위의 경사가 실험결과와 잘 일치하고 있다. 이 때문에, 본 연구의 계산결과가 잘 일치하는 것으로 보여진다.

본 수치모의 실험 결과 과정에서 얻은 계산 변수들 중, Surface roller, 수면전단응력, 바닥마찰응력, 난류에너지, 난류 에너지 감쇄율, 난류 점성 계수들을 Fig. 8에 나타내었다.

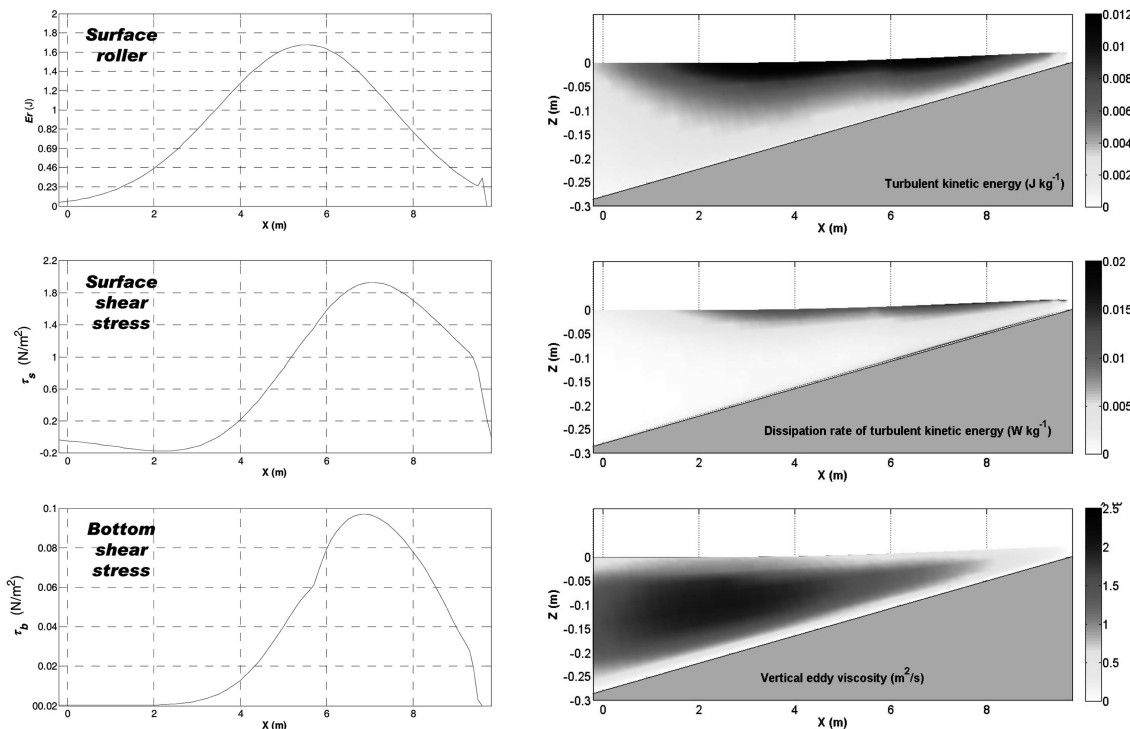


Fig. 8. Parameters used in the numerical simulation for Cox and Kobayashi(1997).



## 5. 결 론

본 연구에서는 천 등(2009)의 동적결합형 파랑-흐름 모형의 쇄파대를 포함한 천해역 적용 여부를 검토하기 위해, 천해역에서 발생하는 대표적인 흐름 현상 중 하나인 해양저류 문제에 본 연구의 수치모형을 적용하였다. 천 등(2009)의 수치모형은 태풍 해일 계산을 위한 것이어서, 파랑의 작용이 주요한 쇄파대에서의 유속 분포를 잘 재현하지 못하는 경향이 있다. 이에 본 연구에서는 해양 저류 재현을 위해서 surface roller 효과를 고려하고 수면전단응력 및 잉여응력을 수정하고, Okayasu and Katayama(1992) 및 Cox and Kobayashi(1997)의 수리 모형실험에 본 연구의 수치모형을 적용한 후 비교·검증하였다.

Okayasu and Katayama(1992)의 수리모형 실험은 해저지형에 둔덕이 있는 둔덕해안(barred beach) 형태의 지형 조건을 갖는다. 본 모형의 파랑 계산 결과 및 wave set-up 계산 결과는 관측치와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 유속 분포 또한 관측치와 대체로 잘 일치하였다. Cox and Kobayashi(1997)의 수리모형 실험은 단일경사 해안(plane beach) 지형 조건을 갖는 수리모형 실험이다. 본 모형의 파랑 및 평균 수위 상승 계산 결과는 관측 결과에 비해 과소 산정되었고, 이는 Tajima and Madsen(2006)의 연구결과와 비교해 볼 때 본 연구의 계산 과정에 비선형천수 효과가 고려되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 하지만 유속 분포는 관측 결과와 매우 잘 일치하였다.

해양저류 현상은 천해역에서만 발생하는 흐름 현상의 한 종류로, 낮은 수심, 쇄파, 평균 해면의 경사도 등의 영향을 받는다. 본 연구의 수치모형을 수리모형 실험에 적용해본 결과, 수리모형 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타나고 있어, 본 수치모형의 쇄파대를 포함한 천해역에의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역특성화연구개발사업(C105E1020001-06E020200210)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

## 참고문헌

- 윤종성, 이동근, 김인철 (2006). 개량형 POM을 이용한 수역에서의 저층수의 거동에 관한 연구. 한국해양·해양공학회지, 18(3), 198-210.
- 장성태 (2000). 낙동강 하구의 해양환경에 관한 연구: 강수의 유출거동과 혼합을 중심으로. 동아대학교 박사학위 논문.
- 천제호, 안경모, 윤종태 (2006). 음해법을 이용한 WAM모형의 태풍파랑 수치모의. 한국해양해양공학회지, 18(4), 294-300.
- 천제호, 안경모, 윤종태 (2007). 천해역으로 확장된 WAM모형에 의한 영일만 수치모의. 한국해양해양공학회지, 19(6), 511-520.
- 천제호, 안경모, 윤종태 (2008). WAM모형의 천해역 확장에 관한 연구. 한국해양·해양공학회지, 20(1), 148-156.
- 천제호, 안경모, 윤종태 (2009). 천해에 적용가능한 태풍 해일-조석-파랑 수치모형 개발 2. 태풍 매미에 의한 해일-조석-파랑 모델의 정확성 검토. 한국해양·해양공학회지, 21(1), 79-90.
- Battjes, J.A. and Janssen, P.A.E.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking random waves. Proc. 16th Int'l Conf. Coastal Eng., 563-587.
- Bijker, E.W., Kalwijk, J.P. and Pieters, T. (1974). Mass transport in gravity waves on a sloping bottom. Proc. 14th Int'l Conf Coastal Eng., 447-465.
- Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S., Jeong, W.M. and Shim, J.S. (2004). Wave-tide-surge coupled simulation for typhoon Maemi. Workshop on Waves and Storm Surges around Korean Peninsula, 121-144.
- Cieslikiewicz, W. and Herman, A. (2002). Wave and current modelling over the Baltic sea and the Gdansk bay. Proc. 28th Int'l Conf. Coastal Eng., Cardiff, UK, 176-187.
- Cox, D.T. and Kobayashi, N. (1997). Kinematic undertow model with logarithmic boundary layer. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 123(6), 354-360.
- Duncan, J.H. (1981). An experiment investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil. Proc. R. Soc. London, A377, 331-348.
- Kuroiwa, M., Noda, H. and Matsubara, Y. (1998). Applicability of a quasi-three dimensional numerical model to nearshore currents. Proc. 26th Int'l Conf. Coastal Eng., Copenhagen, Denmark, 814-828.
- Lippmann, T.C., Brookins, A.H. and Thorton, E.B. (1996). Wave energy transformation on natural profiles. Coastal Engineering, 27, 1-20.
- Liu, H. and Xie, L. (2009). A numerical study on the effect of wave-current-surge interactions on the height and propagation of sea surface waves in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989. Continental Shelf Research, 29(11), 1454-1463.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1964). Radiation stresses in water waves: a physical discussion, with applications. Deep sea research, 11(4), 529-562.
- Madsen, O.S. (1994). Spectral wave-current bottom boundary layer flows. Proc. 24th Int'l Conf. Coastal Eng., Kobe, Japan, 384-398.
- Moon, I.J. (2000). Development of a coupled ocean-wave circulation model its application to numerical experiments for wind waves, storm surges and ocean circulation for the Yellow and East China seas. Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Monbaliu, J., Padilla-Hernandez, R., Hargreaves, J.C., Albiach, J.C.C., Luo, W., Sclavo, M. and Gunther, H. (2000). The spectral wave model, WAM, adapted for applications with high spatial resolution. Coastal Engineering, 41(1), 41-62.
- Okayasu, A., Shibayama, T. and Horikawa, K. (1988). Vertical distribution of undertow in the surf zone. Proc. 21st Int'l Conf. Coastal Eng., 478-491.
- Okayasu, A. and Katayama, H. (1992). Distribution of undertow and long-wave component velocity due to random waves. Proc. 23rd Int'l Conf. Coastal Eng., 883-893.
- Osuna, P. and Monbaliu, J. (2004). Wave-current interaction in the

- southern North sea. *Journal of Marine Systems*, 52, 65-87.
- Sheng, Y.P., Alymov, V. and Paramygin, V.A. (2010). Simulation of storm surge, wave, currents, and inundation in the outer banks and Chesapeake bay during hurricane Isabel in 2003: The importance of waves. *Journal of geophysical research* 115, c04008, doi:10.1029/2009JC005402.
- Stive, M.J.F. and Wind, H.G. (1986). Cross-shore mean flow in the surf zone. *Coastal Engineering*, 10, 325-340.
- Smith, J.M., Svendsen, I.A. and Putrevu, U. (1992). Vertical structure of the nearshore current at Delilah: measured and modeled. *Proc. 23rd Int'l Conf. Coastal Eng.*, 2825-2838.
- Svendsen, I.A. (1984). Wave heights and set-up in a surf zone. *Coastal Engineering*, 8, 303-329.
- Svendsen, I.A. (2006). *Introduction to nearshore hydrodynamics*. World Scientific.
- Tajima, Y. and Madsen, O.S. (2006). Modeling near-shore waves, surface rollers, and undertow velocity profiles. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132(6), 429-438.
- Xia, H., Xia, Z. and Zhu, L. (2004). Vertical variation in radiation stress and wave-induced current. *Coastal Engineering*, 51, 309-321.
- Xie, L., Liu, H. and Peng, M. (2008). The effect of wave-current interaction on the storm surge and inundation in Charleston harbor during Hurricane Hugo 1999. *Ocean modelling*, 20, 252-269.
- Xie, L., Wu, K., Pietrafesa, L. and Zhang, C. (2001). A numerical study of wave-current interaction through surface and bottom stresses: wind-driven circulation in the south Atlantic Bight under uniform winds. *Journal of Geophysical Research*, 106(C8), 16841-16855.
- Zhang, M.Y. and Li, Y.S. (1997). The dynamic coupling of a third-generation wave model and a 3D hydrodynamic model through boundary layers. *Continental Shelf Research*, 17(10), 1141-1170.

---

원고접수일: 2011년 2월 5일

수정본채택: 2011년 4월 6일

게재확정일: 2011년 4월 6일