

위상을 포함한 다방향 불규칙파 조건에서의 이안류 수치모의 Numerical Simulations of Rip Currents Under Phase-Resolved Directional Random Wave Conditions

최준우*
 Junwoo Choi*

요지 : Choi et al.(2015)은 최근 Boussinesq 방정식 모형인 FUNWAVE를 이용하여, 다방향 불규칙파 조건으로 SandyDuck 현장실험 조건의 연안흐름을 수치모의하여, 연안류 유속분포 뿐만 아니라 전단파동 등의 계산결과가 관측결과와 잘 일치함을 보였다. 이 연구모형을 기반으로 SandyDuck 지형과 더불어 다방향 위상의 상호작용에 의해 발생하는 연안방향의 파에너지 비균등성이 이안류 발달에 미치는 영향을 고찰하기 위해 수치모의를 수행하였다. 이 결과 지형에 의해 발생하는 이안류가 지배적인 규칙파 조건과 달리 다방향 불규칙파 위상의 상호작용에 따른 돌발적 이안류의 발생이 추가되어 매우 복잡한 쇄파대의 연안 순환흐름을 재현함을 알 수 있었다.

핵심용어 : SandyDuck 실험, 이안류, 다방향 불규칙파, 비선형 Boussinesq 방정식, FUNWAVE

Abstract : Recently, Choi et al.(2015) showed that a numerical simulation of the SandyDuck experiment under a directional random wave environment agreed well with the experimental data including the wave height distribution of the random waves, the well-developed longshore current and its energetic fluctuation. Based on the Boussinesq modeling, this study investigates the effect of the alongshore variations, which are induced by not only the field topography but also the phase interaction of multidirectional random waves in the surf zone wave field, on the rip currents. As a result, transient rip currents as well as topographical rip currents cause the complicated surfzone circulation and mixing process due to their interactions in a multi-directional random wave condition while the topographical rip currents are dominant in a monochromatic wave condition.

Keywords : SandyDuck experiment, rip current, directional random waves, Boussinesq modeling, FUNWAVE

1. 서 론

쇄파대를 포함하는 연안에서 파랑의 변형과 에너지 소멸은 평균수면의 setup과 setdown, infragravity 파동, 비선형파 및 쇄파 질량유동, undertow, 이안류 등 연안유동의 동역학적 현상들의 외력이 된다. 이러한 현상들은 풍파 스케일에 대해서는 평균 유동이지만 infragravity 파동 스케일에 대해서는 비정상 유동이며, 이러한 장주기 유동성분들은 순간적으로 급격하게 변화하는 쇄파의 난류유동과 상호작용하여 연안지역의 지형변화를 발생시킨다(Choi et al., 2012a). 대부분의 파랑유도 연안현상의 경우, 파랑 잉여에너지 개념으로 연구되어 왔으며 잉여에너지를 산정하는 파랑모형과 이를 기반으로 하는 흐름모형을 결합하여 연구되어 왔다(Bowen, 1969a, 1969b; Longuet-Higgins, 1970; Longuet-Higgins and Stewart, 1962, 1964; Thornton, 1970). 이 보다 최근에 파 위상을 포함하여 계산하고 와도를 근사적으로 해석하는 Boussinesq 모형을 이용하여 연안유동을 연구하고 있기도 하다 (Sørensen et al., 1998;

Chen et al., 1999; Johnson and Pattiaratchi, 2006). 비록 아직까지 계산비용의 한계로 현장에 대한 적용이 제한적이지만 3차원 모형을 이용한 연안유동 수치모의도 가능해 지고 있다 (Choi and Yoon, 2009). 그러나 아직 다방향 불규칙파에 의한 연안흐름 유동에 대한 연구는 많아 보이지 않는다(Battjes, 1972; Goda, 2006; Thornton and Guza, 1986; Van Dongeren et al., 2003). 연안방향으로 변동이 있는 지형에 대한 연구는 더욱 드물다(Choi and Yoon, 2011; Choi et al., 2012a). 더욱이 이러한 연구들은 모두 잉여에너지 개념을 이용하고 있으므로 파 위상 단위의 유동변화를 포함할 수 없다.

위상을 포함한 쇄파 스케일의 파력이 연안흐름과 와류 발달에 주는 영향에 대한 연구가 진행되고 있으며(Clark et al., 2012; Feddersen, 2014; Johnson and Pattiaratchi, 2006; Peregrine, 1998, 1999), 끊어진 파봉선을 갖는 파(relatively short-crested wave)의 쇄파가 와류를 발생시키는 중요한 메커니즘(Peregrine, 1998)으로 인식되고 있다(Johnson and Pattiaratchi, 2006; Clark et al., 2012; Feddersen, 2014).

*한국건설기술연구원 해안연구실험실(Coastal Research Laboratory, Korea Inst. of Civil Eng. & Building Tech., Goyang, 411-712, Korea.
 Tel:+82-31-910-0772, Fax: +82-31-910-0251, jwchoi@kict.re.kr)

짧은 파봉선을 갖는 파(단파정과 또는 short-crested wave)의 진행이 다방향 불규칙과 조건에 따른 위상간의 상호작용과 밀접한 관계가 있기 때문에 다방향 불규칙파에 의한 연안유동 연구는 가치가 있다고 판단된다. 국내에서는 Choi et al.(2011)이 해운대 이안류를 수치모의하기 위해 Boussinesq 모형을 사용한 바 있다.

본 연구에서는 최근 Choi et al.(2015)이 수행한 다방향 불규칙과 조건의 SandyDuck 현장실험 연안흐름 수치모의 연구 결과를 기반으로, SandyDuck 지형 영향과 더불어 다방향 불규칙과 위상의 상호작용이 이안류 발달에 미치는 영향을 고찰하였다. Choi et al.(2015)의 연안류 유속 분포뿐만 아니라 전단파동 등이 관측결과와 잘 일치하였으므로, 동일한 모형과 그 모의조건에서 입사 파향만을 해안선에 직각방향으로 하여 이안류 수치모의를 수행하여 그 거동특성을 연구하는 것은 가치가 있다고 판단된다. 과거에 지형적 rip channel에 기인하여 발생하는 이안류에 대한 연구는 현장관측, 수리실험 및 수치모의 등을 통하여 많이 수행되어왔으나(예를 들어, MacMahan et al., 2005; Haas and Svendsen, 2002; Chen et al., 1999), 다방향 입사조건에 기인한 돌발 이안류(transient rip current)에 대한 연구는 많지 않다(Johnson and Pattiaratchi, 2006). 현장관측의 경우에 돌발 이안류가 일정한 위치 또는 시간에 발생하는 것이 아니기 때문에 정량적인 계측이 어렵고, 수리실험의 경우에 규모와 경계조건의 한계로 다방향 조파가 용이하지 않기 때문에 판단된다. Choi et al.(2012b)와 Yoon et al.(2012)은 해운대 해수욕장에서 관찰되는 이안류를 벌집구조 파형으로부터 발생하는 돌발 이안류로 분류하고 Boussinesq 모형을 통해 수치모의를 수행한 바 있으나, 해운대의 복잡한 지형에 의한 영향을 포함하므로 돌발 이안류와 지형 이안류를 구별해서 제시하는 데 어려움이 있었다. 본 연구는 명확하게 지형적 rip channel이 존재하는 SandyDuck 지형에서 발생하는 이안류를 수치모의하여 돌발 이안류와 지형 이안류를 동시에 재현하므로 지형적 이안류에 대한 입사파 영향의 정도를 확인해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수치모형

본 연구에 사용된 수치모형인 FUNWAVE는 Wei et al.(1995)에 소개된 비선형 Boussinesq 방정식을 그 지배방정식으로 사용하며, 유체흐름과 파랑을 동시에 계산할 수 있도록 개선되었다. 모형의 비선형 Boussinesq 방정식은 기본적으로 3차원 Euler 방정식으로부터 비회전 가정과 완화된 정수압분포의 천해 가정을 이용하여 수심 적분하므로 유도되었다. 따라서 자유수면 변위와 순간 유속을 미지수로 위상을 포함한 비선형 파랑해석을 목적으로 사용되어 왔다. 그러나 Chen et al.(2003)은 비회전성 가정으로 유도된 이 지배방정식의 운동방정식에 부분적 회전을 고려할 수 있도록 추가 항을 첨가하여 개선된 모형을 개발하였다. 이 항은 연직방향 2

차 비선형 효과를 포함한 와도(vorticity)를 나타낸다. 지배방정식의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\eta_t + \nabla \cdot \left[(h + \eta) \left\{ \begin{aligned} &\mathbf{u}_\alpha + \left[\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \\ &+ \left[z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right] \nabla[\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)] \end{aligned} \right\} \right] = 0 \quad (1)$$

여기서 η 는 자유수면변위, h 는 정수수심, \mathbf{u}_α 는 $z = z_\alpha = -0.53h$ 에서의 수평유속벡터, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, 그리고 아래첨자는 시간미분을 의미한다. 그리고 지배방정식의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_{\alpha t} + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + g \nabla \eta + \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \mathbf{V}_3 - \mathbf{R}_b - \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_f = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= \frac{z_\alpha^2}{2} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t}) + z_\alpha \nabla[\nabla \cdot (h\mathbf{u}_{\alpha t})] \\ &\quad - \nabla \left[\frac{\eta^2}{2} \nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t} + \eta \nabla \cdot (h\mathbf{u}_{\alpha t}) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

그리고

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_2 &= \nabla \left\{ (z_\alpha - \eta)(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla)[\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)] + \frac{1}{2}(z_\alpha^2 - \eta^2)(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla)(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \nabla \{ [\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha) + \eta \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha]^2 \} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도, \mathbf{V}_1 과 \mathbf{V}_2 는 Boussinesq 분산항, \mathbf{V}_3 는 연직방향 2차 비선형 효과를 포함한 와도(vorticity)를 나타낸다. 그리고 \mathbf{R}_b , \mathbf{R}_s , \mathbf{R}_f 는 각각 쇄파효과, 수평 난류효과, 바닥 마찰효과를 나타내는 항이며, FUNWAVE는 이 항들을 산정하기 위하여 추가적인 모형들을 포함하고 있다(Chen et al., 1999; Chen et al., 2000; Kennedy et al., 2000). 또한, 내부조파 모형을 이용한 불규칙파의 조파를 위해 스펙트럼의 각 성분부에 무작위(random) 위상을 주고 선형 중첩한 자유수면 시계열을 계산하여 조파하게 된다(Wei et al., 1999; Johnson and Pattiaratchi, 2006; Choi et al., 2009). 이모형은 그 결과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 소개되어 있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

3. 모형 set-up

SandyDuck 현장실험은 1997년 North Carolina의 미공병단 FRF 시설이 있는 해변에서 수행되었으며, 3시간 단위로 일정한 지점에서 수위, 유속, 지형변동이 계측된 자료들을 제공하였다(Noyes et al., 2004). Choi et al.(2015)의 수치모의는 1997년 10월 2일 오전 4시부터 7시까지의 계측자료를 기반으로 수행되었으며, Fig. 1에 제시한 지형격자도 1997년 10

월 2일에 측량된 자료(S. Elgar, SandyDuck Nearshore Array, <http://science.whoi.edu/users/elgar/SandyDuck/sandyduck.html>)를 이용하여 구성한 것이다. 도시되어 있는 것처럼 연안방향으로 샌드바가 잘 발달되어 있고 완만한 해변경사를 특징으로 하는 지형이며, 중앙에 실험용 교랑교각에 의한 세굴 영향이 남아 있다. 수치모의를 위해 양쪽 측면경계는 반복경계를 그림과 같은 방식으로 채택하였다. 참고로 $y = -100$ m부터 $y = 1100$ m까지가 측량자료가 반영된 결과이다. 수치모의의 격자는 $\Delta x = 1.5$ m, $\Delta y = 2$ m, 와 $\Delta t = 0.05$ s 를 사용하였다. Fig. 1에 나타난 원 기호들이 수위와 유속이 계측된 위치이며 수심 8 m이고 $x = 900$ m, 700 m $y = 1000$ m인 위치에서 입사파 스펙트럼이 계측되었다.

Table 1에 나타난 것처럼 관측 스펙트럼의 첨두주기는 $T_p = 6.67$ s, 유의파고는 $H_s = 1.43$ m, 그리고 첨두파향은

$\theta_p = 22.0^\circ$ 이다. 파향은 직각 입사방향을 기준으로 시계반대방향인 양의 방향이다. 본 연구에서는 이안류에 의한 연안흐름 거동을 파악하기 위해 해안방향 직각으로 입사하고, 기존 연구와 같이 Table 1과 같이 파고와 주기를 갖는 JONSWAP 주파수 스펙트럼 분포와 Mitsuyasu et al.(1975)의 파향 스펙트럼 분포를 사용하여 수치모의를 수행하였다. Johnson and Pattiaratchi (2006)는 FUNWAVE의 불규칙파와 재현에 대하여 입력 스펙트럼과 출력 스펙트럼을 비교하여 검증한 바 있다. 다른 수치모의를 위한 파라미터는 모두 Choi et al.(2015)과 동일한 값을 이용하였다. 예를 들어, 바닥마찰 항의 계수는 전체 영역에 대해 일정한 값 $f_w = 0.0012$ 를 사용하였고, 쇄파모형을 위한 파라미터는 $\delta_b = 5.0$, $\eta_l^{(l)} = 0.35\sqrt{gh}$, $\eta_l^{(r)} = 0.01\sqrt{gh}$, 그리고 $T^* = 0.5\sqrt{h/g}$ 와 같이 계수 값들을 선택하여 사용하였다. 또한, 해안선 경계조건을 위해 $\delta = 0.02$ 와 $\lambda = 20$ 을 사용하였다.

4. 수치모의

4.1 Choi et al.(2015)의 SandyDuck 실험 수치모의

본 연구의 다방향 불규칙파에 따른 이안류 거동 수치모의 결과의 타당성을 간접적으로 검증하고 다방향 불규칙파에 따른 연안흐름 특성을 검토하기 위해 Choi et al.(2015)의 결과를 제시한다.

Fig. 2는 파고 및 흐름의 3시간자료를 분석한 분포를 나타

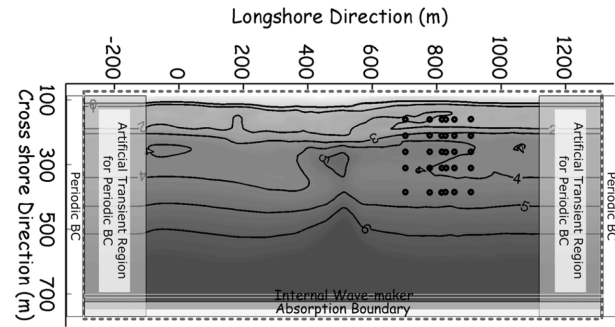


Fig. 1. SandyDuck bathymetries for 04:00-07:00 EST, 2 October 1997, with observation locations (closed circles), computational domains, and boundary conditions for simulations of waves and wave-induced currents (Choi et al., 2015).

Table 1. Incident wave conditions for the simulations using FUNWAVE

SandyDuck experiment (2 October 1997)		Rip current tests at Duck	
random wave case		random wave case	
wave height (H_s)	1.43 m	wave height (H_s)	1.43 m
wave period (T_p)	6.67 s	wave period (T_p)	6.67 s
wave direction (θ_p)	22.0°	wave direction (θ_p)	0.0°
spectrum	observation spectrum	frequency spreading(γ)	3.3
		directional spreading(σ_θ)	18°
monochromatic wave case		monochromatic wave case	
wave height (H)	1.01 m	wave height (H)	1.01 m
wave period (T)	6.67 s	wave period (T)	6.67 s
wave direction (θ)	22.0°	wave direction (θ)	0.0°

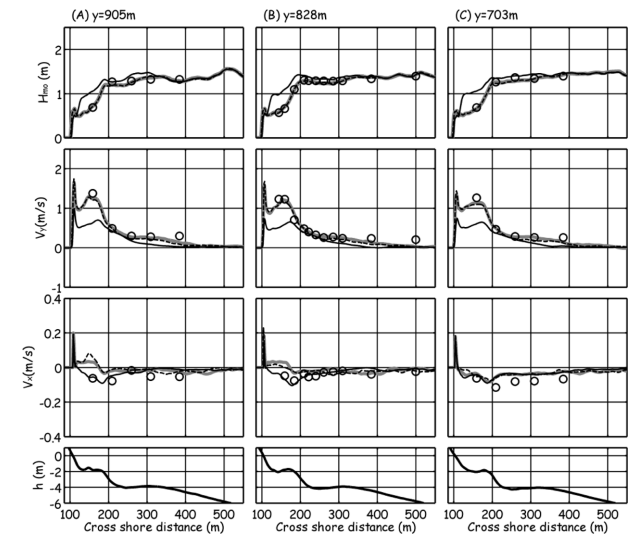


Fig. 2. The cross-shore profile of 3-h-averaged results for (a) $y = 905$ m, (b) $y = 828$ m, and (c) $y = 703$ m. The top panels show the wave heights in the simulation with the default breaking parameters (solid black line), the present simulation with a constant friction factor (thick gray line), and the present simulation with a varying friction factor (dashed black line). The upper middle panels show the longshore current velocity, and the lower middle panels show the cross-shore current velocity for the present simulation. The bottom panels show the profile of the topography. The circles indicate the observations in the SandyDuck experiment (Choi et al., 2015).

내고 있다. 회색선과 점선으로 나타낸 결과는 수정된 쇄파모형 계수값 ($\delta_b = 5.0$, $\eta_i^{(l)} = 0.35\sqrt{gh}$, $\eta_i^{(r)} = 0.01\sqrt{gh}$, 그리고 $T^* = 0.5\sqrt{h/g}$)을 사용한 결과이다. 회색선은 일정한 바닥마찰계수를 사용한 결과이고, 점선은 쇄파대 안팎의 마찰계수를 변화시켜 계산한 결과이다. 그 결과가 마찰계수의 영향과 관계없이 현장관측 파고 값과 잘 일치하며, 기존 연구에서 제시한 기본 값으로 수치모의한 결과인 실선에 비해 더 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 불규칙파의 쇄파특징인 상대적으로 약한 부분쇄파 (spilling breaker와 white-capping)에 의한 파에너지가 감소하고, 이어 수심의 급격한 감소에 따른 강한 쇄파 (plunging breaker)로 인해 파에너지가 소멸하는 단계를 거치는 것을 알 수 있다(Choi et al., 2012). 잘 일치하는 파고분포는 파랑 유도류인 연안흐름의 재현을 위한 필수 조건이다. Fig. 2의 두 번째 패널은 연안방향 유속분포를 나타내고 있으며 수치모의 결과가 관측유속과 잘 일치하는 것으로 보인다. 쇄파모형 계수들을 위해 기본 값을 사용하고 쇄파대 안팎에 다른 바닥마찰 계수 값을 사용한 경우에 비해 관측 값에 더 잘 일치함을 보였다. 연안류의 분포는 바닥마찰력과 파랑유도 잉여력의 균형으로 결정되지만, 바닥마찰 계수에 의한 영향보다 쇄파에 의한 에너지 소모의 영향이 더 지배적임(Goda, 2006)을 확인하고 있다. 반면에 Fig. 2의 세 번째 패널에 나타난 해안선 직각방향 유속분포는 관측 치와 잘 일치하지 않는 것으로 보인다. Choi et al.(2012)에서 언급한 것처럼 이안방향 유속분포는 3차원적 거동을 하고 있고, 한 위치에서 그 대푯값을 이용하여 비교하는 것이 매우 어렵다.

Fig. 3은 Choi et al.(2015)의 결과로부터 $t = 400T_p$ 에서의 수면변위, 3시간 분석 파고, 2주기 평균 유속 및 와도의 평면분포를 도시한 것이다. Fig. 3(a)의 수면변위 분포는 전형적인 다방향 불규칙파 스펙트럼을 갖는 풍파의 특징인 파봉선들이 짧게 끊어져 있는 형태(단파정과 또는 short-crested waves)의 특성을 보여준다. Fig. 3(b)는 3시간 자료를 이용한 유의파고 분포이며, 이 분포로부터 연안방향 비균등성이 있음을 알 수 있다. 이러한 연안방향 비균등성은 지형적인 요

인과 다방향 불규칙파에 기인한 군파효과로부터 발생하는 것으로 보인다. Fig. 3(c)과 3(d)에는 $t = 400T_p$ 에서의 2주기 평균 연안흐름 유속벡터 분포와 와도분포를 나타내었다. 하나의 벡터는 주변의 300개 격자점들의 평균값을 표현하고 있다. 이로부터 연안류가 잘 발달하는 것과 전단파동의 강한 fluctuation이 있음을 알 수 있다. 일반적으로 알려져 있는 쇄파대 안팎의 서로 다른 연안류 유속에 기인한 전단파동 fluctuation이 발생하기 전에 다방향 불규칙파의 연안방향 불균등성에 의한 와류들이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이는 기본적으로 Peregrine(1998, 1999)의 끊어진 파봉선을 갖는 파(ends of wave crests)의 쇄파에 따른 변동이 와류를 발생시키는 메커니즘으로부터 설명될 수 있다. 따라서 연안흐름의 와류들은 다방향 파랑에 의한 중첩으로 끊겨 있는 파봉선들(ends of wave crests) 사이를 통해 발달하며, 연안류의 전단진동의 fluctuation 그리고 연안방향 군파효과에 의한 연안방향 불균등성에 의해 발달한다고 판단된다(Johnson and Pattiaratchi, 2006; Long and Özkan-Haller, 2009; Choi and Yoon, 2011; Choi et al., 2012). 연안방향 불균등 외력은 지형적 요인과 결합되어 이안류와 연안류의 fluctuation을 발생시키고 상호작용하여 복잡한 연안유동이 나타난다. 연안방향 불균등성에 의한 와류 발생 메커니즘은 이안류 발달을 의미하며, 따라서 파봉선과 파봉선사이의 단절영역(gaps of wave crests)을 통해 발달하는 이안류가 연안흐름 가운데 지배적인 경우에 대해 다음 절에 제시한다.

단파정과(short-crested wave)에 의한 와류생성 메커니즘을 설명하기 위해 연안방향에 대한 변화가 없는 경우인 일방향 규칙파에 대한 수치모의를 추가 수행하였다. 그 결과 가운데 Fig. 4에 수면변위, 3시간 분석 파고, 2주기 평균 유속 및 와도의 평면분포를 나타내었다. 이 결과로부터 불규칙파의 연안류보다 유속이 강하고 쇄파대의 안팎이 뚜렷하게 구별되는 연안류의 진동이 불규칙파의 진동에 비해 매우 약함을 기술하였다. 연안방향으로 일정하게 발달한 긴 파봉선(장파정과 또

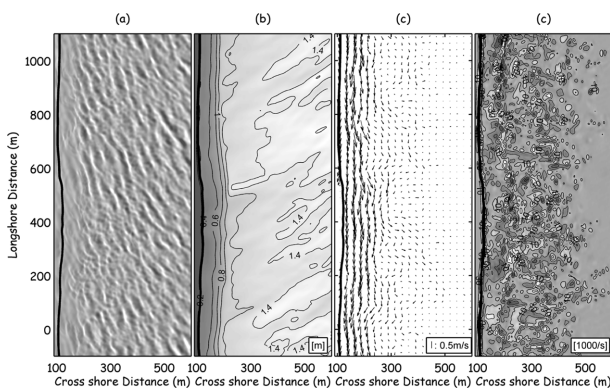


Fig. 3. Horizontal distributions of (a) instantaneous surface displacement at $t = 400T_p$, (b) 3-h-averaged wave height, (c) two peak wave-period-averaged current velocity, and (d) its vorticity at $t = 400T_p$ in the SandyDuck simulation.

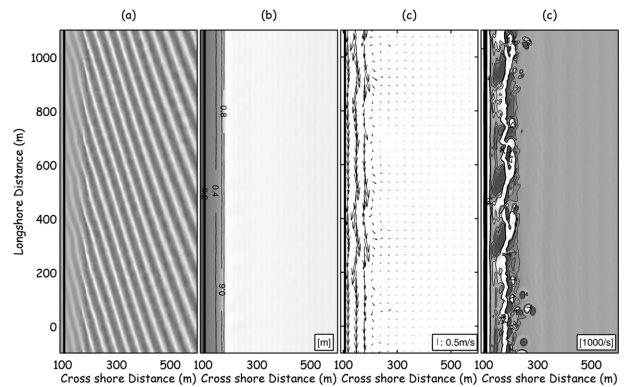


Fig. 4. Horizontal distributions of (a) instantaneous surface displacement at $t = 400T_p$, (b) 3-h-averaged wave height, (c) two peak wave-period-averaged current velocity, and (d) its vorticity at $t = 400T_p$ in the monochromatic unidirectional wave with 1.01-m height, 6.67-s period, and 22.0° direction.

는 long-crested waves)의 단일방향 파랑의 경우에 쇄파대 밖으로 빠져나가는 이안류나 와류의 발달이 매우 억제됨을 보였다. 다방향 파랑의 위상 중첩에 따른 상호작용으로 나타나는 파봉선 끝의 틈새(gaps of wave crests) 등의 연안방향 비균등성이 와류의 발달에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

Figs. 5와 6은 Choi et al.(2015)의 결과로 각각 파수-주파수 스펙트럼과 그에 따른 연안류 전단파동 에너지 스펙트럼을 제시하고 있다. 파수-주파수 스펙트럼으로부터 전단파동의 에너지뿐만 아니라 수면파 에너지 영역에서도 관측치와 유사한 분포를 재현하는 등, 관측과 계산결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 연안류 전단파동 스펙트럼의 경우, 기존 연구(Kirby et al., 2003; Noyes, 2002; Özkan-Haller and Kirby, 1999)에서 제시한 결과보다 고주파수 영역을 포함한 전 영역에서 상대적으로 관측 스펙트럼과 잘 일치한다. 따라서 Choi et al.(2015)의 연구에서 사용되어 검증된 연안흐름 Boussinesq modeling을 이용하여 연안방향으로 비균등한 SandyDuck 지형과 다방향 불규칙 입사조건으로 수치모의를 하여 다음 절에 이안류 거동특성을 확인하는 결과를 제시한다.

4.2.2. Modeling of Rip Currents in the SandyDuck experiment condition

파봉선이 끊어진 형태의 파(relatively short-crested wave)가 쇄파될 때 파봉선의 끝(ends of wave crests)에서 생성되는 와류 및 이안류 발생 메커니즘(Peregrine, 1998, 1999)은 지형적 이안류 채널과 상관없이 입사파 조건만으로 발생하는 이안류까지 포괄하여 적용될 수 있다. Johnson and Pattiaratchi(2006)는 연안방향으로 일정한 지형에서 불규칙파에 의한 돌발 이안류를 수치모의하여 이를 확인하였다. 또한, Choi et al.(2012b,

2013a, 2013b) 및 Yoon et al.(2012)의 해운대 해수욕장에서 관찰되는 벌집구조 파형에 의한 이안류 메커니즘도 동일한 방법으로 설명될 수 있다. Choi et al. (2015)은 이러한 메커니즘에 추가하여 연안방향 군파효과에 의한 연안방향 불균등성과 결합하여 복잡한 연안흐름이 발달한다고 밝히고 있다.

앞에서 제시한 바와 같이 FUNWAVE의 유속은 수심의 한 지점에 대하여 산정되는 유속이므로 임의의 위치에서 계측된 유속과 비교하기 위해서는 수심방향 유속분포에 큰 변화가 없는 경우에 용이하다. 수심평균 유속이 계산되는 경우도 계측치와 비교하는 경우에 비슷한 문제가 있다. Choi et al.(2015)에서 기술한 바와 같이, 연안류의 경우에는 상대적으로 좁은 bottom boundary layer 밖 대부분의 영역에서 평균유속 수심분포에 큰 변화가 없으므로 잘 일치했지만, 외해로 향하는 undertow와 파봉과 파곡사이의 해안으로 향하는 Lagrangian flux가 있는 복잡한 수심분포를 갖는 cross-shore 평균유속과는 일치되지 않았다. 그러나 이안류가 지배적인 경우의 cross-shore 방향 유속의 수심방향 분포는 Haas and Svendsen(2002)에 제시되어 있는 바와 같이 undertow가 있는 경우와 달리 수심방향에 대해 상대적으로 큰 변화가 없는 로그분포를 갖는다. Chen et al.(2003)에서 FUNWAVE 결과와 관측 이안류 유속을 비교하여 일치함을 보인바 있다. 따라서 본 수치모의의 이안류 유속은 최소한 정성적으로 의미가 있다고 볼 수 있다.

입사파 조건으로부터 발생하는 연안방향 비균등성이 없는 파고는 $H = 1.01$ m, 주기는 $T = 6.67$ s 그리고 파향은 $\theta = 0.0^\circ$ 인 일방향 규칙파 조건의 수치모의 결과를 먼저 제시

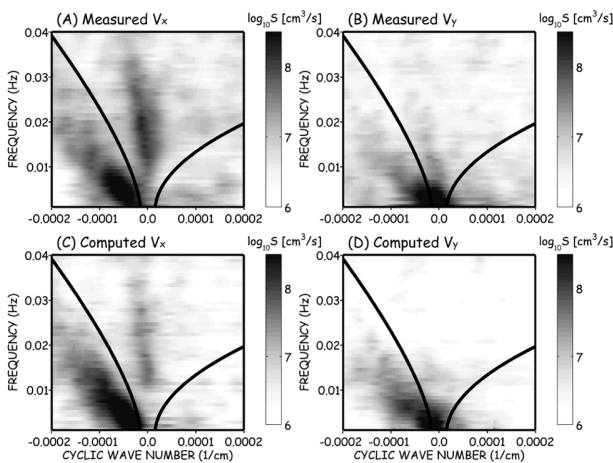


Fig. 5. The wavenumber-frequency spectra obtained using measurements of (A) cross-shore velocity and (B) longshore velocity, and the computations of (C) cross-shore velocity and (D) longshore velocity for the longshore array at $x = 160$ m and $y = 704$ - 906 m. The logarithmic grayscale indicates energy density. The bold lines denote mode-0 edge waves propagating upcoast and downcoast with a small wavenumber offset (0.0015 m^{-1}) (Choi et al., 2015).

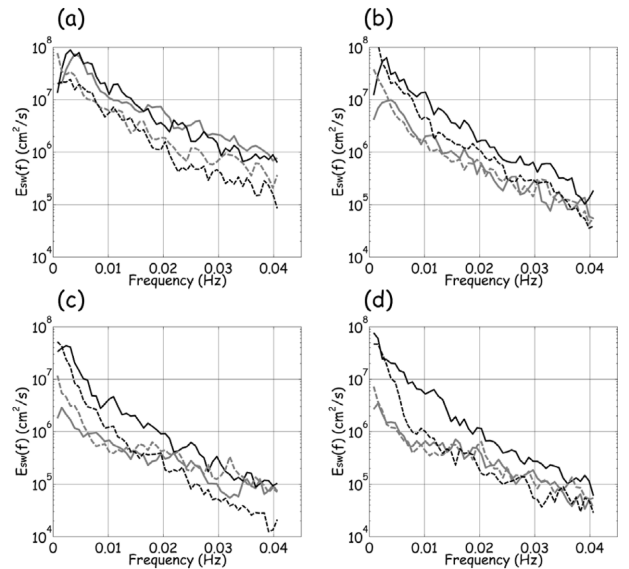


Fig. 6. Shear wave frequency spectra obtained using the observed cross-shore velocities (solid gray) and longshore velocities (dashed gray) and the modeled cross-shore velocities (solid black) and longshore velocities (dashed black) at (a) Array 1 ($x = 160$ m), (b) Array 2 ($x = 210$ m), (c) Array 3 ($x = 260$ m), and (d) Array 4 ($x = 310$ m) with $704 \text{ m} < y < 906 \text{ m}$ in the SandyDuck experiment (Choi et al., 2015).

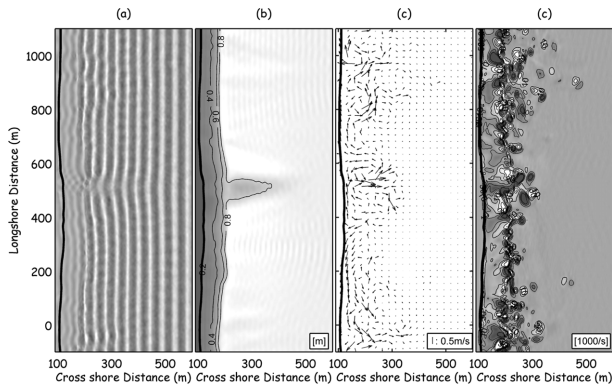


Fig. 7. Horizontal distributions of (a) instantaneous surface displacement at $t = 500T_p$, (b) 3-h-averaged wave height, (c) two peak wave-period-averaged current velocity, and (d) its vorticity at $t = 500T_p$ in the monochromatic unidirectional wave with 1.01-m height, 6.67-s period, and 0.0° direction.

한다. Fig. 7에 수면변위, 3시간 분석 파고, 2주기 평균 유속 및 와도의 평면분포를 나타내었다. 이로 부터 지형에 의한 연안방향 균등성이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 교각 세굴된 수중 channel이 존재하는 약 $x = 500$ m에서 굴절과 그에 따른 교차 파봉선 패턴(interference pattern)이 생성된다. 동일한 위치의 파고분포에서도 지형에 의한 연안방향의 두드러진 불균등성이 나타남을 알 수 있다. 따라서 지형에 기인된 쇄파대 파에너지의 연안방향 불균등성에 의해 이안류가 발생할 수 있으며, 유속과 와도 분포로부터 상대적으로 지형의 변화가 심한 영역에서 이안류가 더 잘 발달하는 것을 알 수 있다. 그러나 다음에 제시되는 다방향 파랑조건의 수치모의에서 나타나는 끊어진 파봉선들 틈새(gaps of wave crests)로 쇄파대 밖으로 나가는 흐름 및 와류의 발생이 일방향 규칙파 조건에서는 상대적으로 억제되어 있는 것도 알 수 있다. 참고로, Haller et al.(2014)에 따르면 $x = 900$ m 영역에서도 지형적 이안류 채널에 의한 이안류가 잘 관찰되는 것으로 언급되고 있다.

Figs. 8과 9에는 Table 1에 제시한 것과 같이 첨두주기는 $T_p = 6.67$ s이고 유의파고는 $H_s = 1.43$ m, 그리고 첨두파향은 $\theta_p = 0.0^\circ$ 인 다방향 불규칙파 조건의 수치모의 결과를 제시한다. Fig. 8는 $\gamma = 3.3$ and $\sigma_\theta = 18^\circ$ 의 스펙트럼 파라미터를 갖는 상대적으로 넓은 분포의 스펙트럼 불규칙파 입사조건의 수치모의 결과를 나타내었고, Fig. 9는 $\gamma = 6.6$ and $\sigma_\theta = 6^\circ$ 의 스펙트럼 파라미터를 갖는 상대적으로 좁은 분포의 스펙트럼 불규칙파 입사조건의 수치모의 결과를 나타내었다. 각각의 그림에 수면변위, 3시간 분석 파고, 2주기 평균 유속 및 와도의 평면분포를 나타내었다. 수면변위로부터 상대적으로 좁고 넓은 스펙트럼에 따라 전파되는 파봉선의 길이에 차이가 있음을 알 수 있으며, 입사파에 따른 연안방향으로의 비균등성이 생성됨을 알 수 있다. 이는 연안방향으로 비균등한 파고 분포로부터도 확인할 수 있다. 입사파에 의한 쇄파대의 연안방향 비균등성은 다방향 불규칙파의 위상 중첩으로 생성되는 단

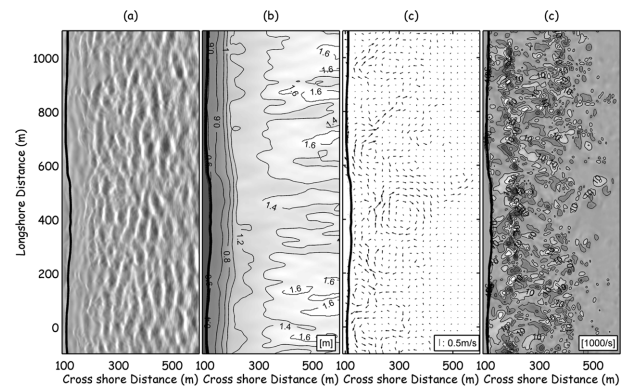


Fig. 8. Horizontal distributions of (a) instantaneous surface displacement at $t = 500T_p$, (b) 3-h-averaged wave height, (c) two peak wave-period-averaged current velocity, and (d) its vorticity at $t = 500T_p$ in the multi-directional random wave of $\gamma = 3.3$ and $\sigma_\theta = 18^\circ$ with 1.43-m significant height, 6.67-s peak period, and 0.0° direction.

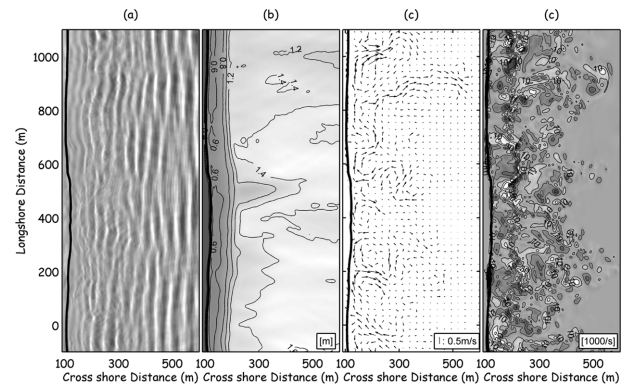


Fig. 9. Horizontal distributions of (a) instantaneous surface displacement at $t = 500T_p$, (b) 3-h-averaged wave height, (c) two peak wave-period-averaged current velocity, and (d) its vorticity at $t = 500T_p$ in the multi-directional random wave of $\gamma = 6.6$ and $\sigma_\theta = 6^\circ$ with 1.43-m significant height, 6.67-s peak period, and 0.0° direction.

파정파(short-crested wave) 분포와 연안방향 군파효과에 의해 나타나며, 지형에 의한 파변형에 기인한 비균등성과 상호 작용하게 된다. 이러한 쇄파대의 연안방향 비균등성에 의해 이안류가 발생하게 되고, 그 수치모의 결과가 흐름 및 와도 분포로부터 나타나 있다. 앞에서 언급한 것처럼 다방향 불규칙파 조건에서 끊어진 파봉선들 사이(gaps of wave crests)를 통해 쇄파대 밖으로 나가는 와류와 흐름이 상대적으로 많아 보이며, 이안류를 포함한 연안흐름이 일방향 규칙파 조건의 연안흐름 보다 복잡하다. 쇄파에 의한 에너지 소멸이 일시적으로 일어나 변화량이 큰 규칙파 조건에서 연안흐름이 부분적으로 강한 것으로 보인다. Johnson and Pattiaratchi(2006)와 Choi et al.(2013a)에서 제시한 것처럼 상대적으로 넓은 스펙트럼의 불규칙파 조건 보다 좁은 스펙트럼에서 강한 이안류가 더 잘 발달하는 것이 확인된다. 본 연구의 조건에서는 다방향 입사파에 따른 쇄파대 연안방향 비균등성이 발생하는 경우에 지형적 요인으로 발생하는 이안류가 지배적으로

볼 수 없으며, 입사와 조건에 기인해서 발생하는 돌발 이안류의 정도가 지형 이안류에 비해 작지 않다는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 토의

Boussinesq 방정식 모형인 FUNWAVE를 이용하여, 다방향 불규칙과 조건으로 SandyDuck 현장실험 조건의 연안흐름을 수치모의하여, 연안류 유속 분포 뿐만 아니라 전단파동 등이 관측결과와 잘 일치함을 보인 Choi et al.(2015)의 연구모형을 기반으로 이안류 거동특성 연구를 수행하였다. 연안방향으로 변화하는 SandyDuck 지형과 더불어 다방향 불규칙과 위상의 상호작용에 의해 발생하는 연안방향의 파에너지 불균등성이 이안류 발달에 미치는 영향을 고찰하였다. 일방향 규칙과 조건에서는 지형에 기인한 이안류가 지배적이지만, 다방향 불규칙과 조건에서는 위상의 상호작용에 기인한 돌발적 이안류의 발생이 추가되고, 쇄파대 연안방향 비균등성에 의한 매우 복잡한 연안 순환흐름이 재현되었다. 이로부터 다방향 입사파에 따른 쇄파대 연안방향 비균등성이 발생하는 경우에 돌발 이안류의 강도가 지형 이안류에 비해 작지 않음을 알 수 있었다. 뚜렷한 지형적 rip channel이 있는 Duck 해변에서도 입사와 조건에 따라 지형적 요인과 결합 및 상호작용하여 돌발 이안류가 발생할 수 있다는 것은 해수욕장 인명피해 저감을 위해서 지형 이안류가 지배적이라고 해도 돌발 이안류에 대한 대비가 필요함을 의미한다. 위상의 효과를 고려하지 못하는 수치모의의 경우, 이러한 파봉선의 끊김 효과를 포함하고 있지 않기 때문에 이안류와 그에 따른 와류의 발달을 충분히 재현하기 어려울 수 있다고 판단된다. 또한, 이러한 복잡한 연안흐름 패턴은 지형변동에 영향을 주어 해안선 변형 및 침퇴적 등으로 연안방향 변동성을 발달시키는 원인이 되므로 지형변동 예측을 위해 고려되어야 하는 요소라고 판단된다.

비록 연구의 결과가 과고, 연안류 유속 및 와류의 정도를 매우 잘 재현하였으나, 기본적으로 Boussinesq 모형이 갖는 한계들로 인해 문제점들을 내포하고 있음을 밝힌다. 더 완전한 수치모의를 위해서는 쇄파모형의 한계, 쇄파시 발생하는 롤러효과 부재, 이안방향의 유속에 대한 수심방향 분포의 3차원 효과 부재 등의 문제해결이 필요함을 밝힌다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 소관 연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

Battjes, J.A. (1972). Setup due to irregular wave, Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, ASCE, 1993-2004.

Bowen, A.J. (1969a). The generation of longshore currents on a plane beach, *Journal of Marine Research*, 27, 206-215.

Bowen, A.J. (1969b). Rip currents, Part 1: Theoretical investigations, *Journal of Geophysical Research*, 74, 5467-5478.

Chen, Q., Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Kennedy, A.B. and Haller, M. (1999). Boussinesq modelling of a rip current system, *Journal of Geophysical Research*, 104, 20617-20637.

Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, A.B. and Chawla, A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup II: two horizontal dimensions, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126(1), 48-56.

Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Shi, F. and Thornton, E.B. (2003). Boussinesq modeling of longshore current, *Journal of Geophysical Research*, 108(C11), 26-1-26-18.

Choi, J., Lim, C.H., Lee, J.I. and Yoon, S.B. (2009). Evolution of waves and currents over a submerged laboratory shoal, *Coastal Engineering*, 56(3), 297-312.

Choi, J. and Yoon, S.B. (2009). Numerical simulations using momentum source wave-maker applied to RANS equation model, *Coastal Engineering*, 56, 1043-1060.

Choi, J., Park, W.K. and Yoon, S.B. (2011) Boussinesq Modeling of a Rip Current at Haeundae Beach. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(4), 276-284 (in Korean).

Choi, J. and Yoon, S.B. (2011). Numerical simulation of nearshore circulation on a field topography in a random wave environment, *Coastal Engineering*, 58, 395-408.

Choi, J., Lee, J.I. and Yoon, S.B. (2012a). Surface roller modeling for mean longshore current over a barred beach in a random wave environment, *J. Coastal Research*, 28(5), 1100-1120.

Choi, J., Park, W.K., Bae, J.S. and Yoon, S.B. (2012b) Numerical Study on a Dominant Mechanism of Rip Current at Haeundae Beach : Honeycomb pattern of waves. *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(5B), 321-320 (in Korean).

Choi, J., Lim, C.H. and Yoon, S.B. (2013a). Study of Rip Current Warning Index Function varied according to Real-time Observations. *J. of Korea Water Resources Association*, 46(5), 477-490 (in Korean).

Choi, J., Shin, C.H. and Yoon, S.B. (2013b) Numerical Study on Sea State Parameters Affecting Rip Current at Haeundae Beach : Wave Period, Height, Direction and Tidal Elevation. *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(2), 205-218 (in Korean).

Choi, J., Kirby, J.T. and Yoon, S.B. (2015). Boussinesq modeling of longshore currents in the SandyDuck experiment under directional random wave conditions, *Coastal Engineering*, 101, 17-34.

Clark, D. B., Elgar, S. and Raubenheimer, B. (2012). Vorticity generation by short-crested wave breaking, *Geophys. Res. Lett.*, (39), L24604, doi:10.1029/2012GL 054034.

Feddersen, F. (2014). The generation of surfzone eddies in a strong alongshore current, *J. Phys. Oceanogr.*, 44, 600-617.

Goda, Y. (2006). Examination of the influence of several factors on longshore current computation with random waves, *Coastal*

- Engineering, 53, 157-170.
- Haas, K. A. and Svendsen, I.A. (2002). Laboratory measurements of the vertical structure of rip currents, *J. Geophys. Res.*, 107(C5), 3047.
- Haller, M.C., Honegger, D. and Catalan, P.A. (2014). Rip current observations via Marine Radar. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 140(2), 115-124.
- Johnson, D. and Pattiaratchi, C. (2006). Boussinesq modelling of transient rip currents, *Coastal Engineering*, 53, 419-439.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. I: 1D, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126, 39-47.
- Kirby, J.T., Chen, Q., Noyes, T.J., Elgar, S. and Guza, R.T. (2003). Evaluating the low frequency predictions of a Boussinesq wave model: Field cases, *Proc. ISOPE-2003, Honolulu, May 25-30*, 398-404.
- Long, J.W. and Ozkan Haller, H.T. (2009). Low-frequency characteristics of wave group-forced vortices, *J. Geophys. Res.*, 114, C08004, doi:10.1029/2008JC004894.
- Longuet-Higgins, M.S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: Parts 1 and 2, *Journal of Geophysical Research*, 75, 6778-6801.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to 'surf-beats', *Journal of Fluid Mechanics*, 8, 565-583.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1964). Radiation stress in water waves, a physical discussion with application, *Deep Sea Research*, 11, 529-563.
- MacMahan, J.H., Thornton, E.B., Stanton, T.P. and Reniers, A.J.H.M. (2005). RIPEX: Observations of a rip current system, *Marine Geology*, 218, 113-134.
- Mitsuyasu, H., Tsai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T. and Rikiishi, K. (1975). Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *Journal of Physical Oceanography*, 5, 750-760.
- Noyes, T.J., Guza, R.T., Elgar, S. and Herbers, T.H.C. (2004). Field observations of shear waves in the surfzone, *Journal of Geophysical Research*, 109, C01031, doi:10.1029/2002 JC001761.
- Noyes, T.J. (2002). Field observations of shear waves, Ph.D. thesis, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla.
- Özkan-Haller, H.T. and Kirby, J.T. (1999). Nonlinear evolution of shear instabilities of the longshore current: A comparison of observations and computations, *J. Geophys. Res., Oceans*, 104, 25953-25984.
- Peregrine, D.H. (1998). Surf zone currents, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 10, 295-309.
- Peregrine, D.H. (1999). Large-scale vorticity generation by breakers in shallow and deep water, *Eur. J. Mech. B Fluids*, 18, 403-408, doi:10.1016/S0997-7546(99)80037-5.
- Sørensen, O.R., Schaffer, H.A. and Madsen, P.A. (1998). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations, *Coastal Engineering*, 33 (2), 155-176.
- Thornton, E.B. (1970). Variation of longshore current across the surf zone, *Proceedings of the 12th Coastal Engineering Conference*, 291-308.
- Thornton, E.B. and Guza, R.T. (1986). Surf zone longshore currents and random waves: field data and models, *Journal of Physical Oceanography*, 16, 1165-1178.
- Van Dongeren, A.R., Reniers, A.J.H.M., Battjes, J.A. and Svendsen, I.A. (2003). Numerical modeling of infragravity wave response during DELILAH, *Journal of Geophysical Research*, 108, 3288, doi:10.1029/2002JC001332.
- Yoon, S.B., Kwon, S.J., Bae, J.S. and Choi, J. (2012). Investigation of Characteristics of Rip Current at Haeundae Beach based on Observation Analysis and Numerical Experiments. *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(4B), 243-251 (in Korean).
- Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T. and Subramanya, R. (1995). A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves: Part 1: Highly nonlinear unsteady waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 294, 71-92.
- Wei, G., Kirby, J.T. and Sinha, A. (1999). Generation of waves in Boussinesq models using a source function method, *Coastal Engineering*, 36, 271-299.

Received 14 July, 2015

1st Revised 12 August, 2015

2nd Revised 20 August, 2015

Accepted 21 August, 2015