수치모의를 통한 해운대 이안류의 주요 메커니즘 연구: 파랑의 벌집구조

Numerical Study on a Dominant Mechanism of Rip Current at Haeundae Beach: Honeycomb Pattern of Waves

최준우* · 박원경** · 배재석*** · 윤성범****

Choi, Junwoo · Park, Won Kyung · Bae, Jae Seok · Yoon, Sung Bum

Abstract

Two regular progressive wave trains, the directions of which are slightly different from each other, develop a honeycomb pattern of wave crests due to their nonlinear interaction. In the honeycomb pattern of wave crest, the nodal line area, which has very low wave energy, is formed. When the honeycomb pattern is developed near the beach area, rip current evolves through the nodal line area formed in the cross shore direction. In this study, to confirm that the formation of honeycomb pattern of waves near the beach area is a dominant mechanism of rip current occurred at Haeundae beach, we performed a numerical simulation of nearshore circulation at Haeundae beach under an unidirectional and monochromatic wave condition by using a nonlinear Boussinesq equation model. As a result, wave refraction due to topographical characteristics (i.e., submerged shoal) of Haeundae gave rise to several wave trains propagating with slightly different directions toward the beach, and consequently rip currents well developed through the nodal line area of honeycomb patterns of wave crest. In addition, we found that a narrow-banded spectral wave condition (i.e., a swell spectrum) increases more likelihood of rip current than a broad-banded spectral wave condition based on the simulations employing various wave spectra with an equivalent wave height and period.

Keywords: *rip current, numerical simulation, nonlinear boussinesq equation, honeycomb pattern, haeundae beach*

요 지

파랑이 약간 다르게 진행하는 두 규칙파는 비선형적 상호작용에 기인하여 파봉선이 벌집구조와 유사한 모습을 갖는 현상이 발생하고, 벌집구조 모양의 파봉선 사이에 일정하게 파랑에너지가 매우 낮게 유지되는 노드선 영역이 생성된다. 이러한 파봉선 벌집구조 모양이 해변에 형성되면, 해안선 직각방향으로 생성되는 노드선 영역을 통하여 이안류가 발달하게 된다. 본 연구에서는 해변가에 형성되는 벌집구조 파봉선 현상이 해운대에서 발생하는 이안류의 주요한 메커니즘임을 확인하기 위하여, Boussinesq 파랑모형을 이용하여 일방향 규칙파에 의한 해운대 연안흐름의 수치해석을 수행하고 이를 분석하였다. 그 결과, 해운대 앞바다의 해저천퇴에 따른 파랑굴절로 파랑이 서로 약간 다른 파랑들이 해안에 전파되고, 이에 따라 벌집구조가 형성되어 노드영역을 따라 이안류가 매우 잘 발달함을 확인할 수 있었다. 또한, 일정한 파고와 주기를 갖는 다양한 폭의 스펙트럼에 따른 불규칙파 수치모의를 수행하므로, 폭이 넓은 스펙트럼 파랑조건보다 규칙파에 가까운 폭이 좁은 스펙트럼의 파랑조건에서 이안류가 더 잘 발달하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 이안류, 수치모의, 비선형 Boussinesq 방정식, 벌집구조, 해운대

1. 서 론

해운대 해수욕장에서 2009년에 발생한 이안류 사고가 사람들의 관심을 끌기 시작하면서 매년 이안류에 의한 피해상황이 보고되고 있다. 기후 변화로 우리나라도 아열대 기후로 변화하고 있으며, 삶의 질적 향상으로 레저를 즐기는 해수욕객 수가 계속 증가 추세에 있으므로 시급한 대책이 필요해

보인다. 이안류는 연안에서 지형, 비선형파의 상호작용 및 평균자유수면의 불안정성(instability)등에 기인하여 파랑 에너지가 연안방향(longshore direction)으로 강한 비균등(nonuniformities)성이 형성될 때 발생하는 것으로 알려져 있다(Darlymple, 1975, 1978; Tang and Dalrymple, 1989). 즉, 연안방향을 따라 파랑에너지(또는 파고)가 상대적으로 낮아지면 잉여운동량 플럭스(wave-induced excess momentum

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천해양연구실 수석연구원 (E-mail : jwchoi@kict.re.kr)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : ocean21c@hanmail.net)

***한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : bjjae194@hanyang.ac.kr)

****정회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 교수 (E-mail : sbyoon@hanyang.ac.kr)

flux)의 기울기가 발생하고 그 부분의 평균수면 상승과 더불어 외해방향으로 강한 흐름이 발생하게 되는데, 이를 이안류라고 한다.

이안류는 Shepard(1936)에 의해서 처음 관찰되고, 연구되기 시작하였으며 이후 이론, 관측, 실험, 수치모의 등 다양한 방향으로 연구되어 왔다. 1960년대에는 각 종 이론들을 이용하여 이안류가 발생하는 메커니즘에 대한 연구가 주를 이루었으며, 그 이후 70년대에는 다양한 수치모형이 제시되기 시작하였으며, 최근에도 활발하게 연구가 진행 중이다(e.g., Bowen, 1969; Bowen and Inman, 1969; Noda, 1974; Dalrymple and Lozano, 1978). 수치모의를 이용한 이안류 관련 연구는 잉여응력(radiation stress) 개념을 이용하는 파랑과 흐름의 결합모형을 이용하는 방법(Haas *et al.*, 2003; Yu and Slinn, 2003; Choi and Yoon, 2011)과 Boussinesq 방정식 모형을 이용하는 방법(Chen *et al.*, 1999; Johnson and Pattiaratchi, 2006)으로 나뉘어 진행되고 있다. 최근 국내에서도 해운대 해수욕장에서 발생한 이안류를 수치모의한 연구가 발표되었다(김 등, 2011; 최 등, 2011).

진행 파향이 약간 다른 두 규칙파는 비선형적 상호작용에 기인하여 그 파봉선이 벌집구조와 유사한 육각형 모습을 보이는 독특한 파랑 현상이 나타난다. 이러한 현상은 소위 연파(stem waves)라 불리는 파랑형태에서 관찰된다. 즉, 주로 완만하게 비스듬한 경사로 직립 구조물에 반사되는 파랑환경에서 구조물의 직각방향으로는 중복파가 구조물의 평행한 방향으로서는 진행파가 형성되며 파랑의 비선형적 간섭으로 파봉선이 벌집구조 형상을 보이는 현상이 관찰된다. Fig. 1에 나타난 것처럼 파랑이 벌집구조의 형상으로 발달하게 되면 일정하게 파랑에너지가 매우 낮게 유지되는 노드선 영역이 발달하게 된다. 이러한 벌집구조의 파랑 현상이 해안역에서 발생하는 경우, 즉, 파향이 서로 약간 다른 두 규칙파가 해안을 향해 진행하게 되는 경우에, 파고가 매우 낮은 노드 부분이 해안선 근처에서 심해방향으로 형성되고, 이 노드 부분을 통하여 이안류가 발달하게 된다(윤 등, 2012; Dalrymple, 1975; Dalrymple *et al.*, 2011). 윤 등(2012)은 이러한 구조의 파랑현상과 이안류의 발달을 Fig. 1과 같이 개념도로 재구성하여 나타내었다.

본 연구에서는 이러한 메커니즘으로 생성되는 이안류가 해운대에서 발생하여 해수욕객들을 위협하는 이안류의 가장 중요한 메커니즘으로 판단하고, 비선형 Boussinesq 파랑모형인 FUNWAVE를 이용하여 규칙파를 입사파로 하여 해운대 앞

바다 연안흐름의 수치모의를 수행하였다. 파랑과 흐름을 동시에 해석하는 FUNWAVE 모형은 잉여응력을 별도로 산정하지 않고 지배방정식의 비선형항을 통해 자동적으로 고려되므로 잉여응력의 문제점을 피할 수 있으며, 파의 위상을 포함하는 primitive valuable을 풀기 때문에 벌집구조 형상을 보이는 파랑현상을 재현함에 따라 발생하는 유동을 수치모의할 수 있다. 이러한 수치모형을 통하여 해운대 앞바다 지형을 통하여 어떻게 벌집구조 형태의 파랑현상이 발달할 수 있는지, 그리고 지형적 이안류 수로로부터 발생하는 이안류 발생 메커니즘과의 차이를 확인할 수 있을 것으로 판단한다. 해운대 지형을 직접 이용하여 수치모의를 수행하기 전에, 연안의 직각방향으로 해운대의 한 단면지형을 추출하여 연안방향으로는 일정한 임의의 지형수심을 구성하여 본 모형을 통하여 벌집구조의 형성과 그에 따른 연안류 발생을 확인하는 수치모의를 수행하여 결과를 제시한다. 추가로, 일정한 주기와 방향에 에너지가 집중된 형상의 너울성 파랑의 스펙트럼(swell spectrum)을 구성하여 주파수 및 방향 스펙트럼의 넓고 좁음에 따라 수치모의를 수행하여 이안류 발생 정도를 분석한다.

2. 수치모형

본 연구에서는 기존 이안류를 연구하기 위해 사용되었던 수치모의 기법 가운데 가장 발달된 모형 중 하나라고 판단되고, 파의 위상 분해 능력을 갖추고 있어 벌집구조의 노드 라인 영역을 따라 발달하는 이안류를 해석할 수 있는 것으로 알려진 Boussinesq 방정식 모형인 FUNWAVE(Wei *et al.*, 1995, Chen *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2003; Johnson and Pattiaratchi, 2006)를 이용하여 해운대의 연안흐름을 수치모의하였다. 본 연구에서 사용한 모형의 지배방정식인 Wei *et al.*(1995)의 완전 비선형 Boussinesq 방정식은 기본적으로 3차원 Euler 방정식으로부터 비회전 가정과 완화된 정수압분포의 천해 가정으로부터 수심 적분하여 유도된다. 이 모형은 위상을 포함하는 자유수면 변위와 순간 유속을 미지수로 파랑을 해석하는 목적으로 사용되어 왔다. 그러나 Chen *et al.*(2003)은 비회전성 가정으로 유도된 이 지배방정식의 운동방정식에 부분적 회전을 고려할 수 있도록 추가항을 첨가하여 흐름을 해석할 수 있도록 개선된 모형을 개발하였다. 지배방정식의 연속방정식은 다음과 같다.

Fig. 1 Conceptual Sketches of rip current along nodal line area caused by honeycomb pattern of wave crest (윤 등, 2012)

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

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

$$\mathbf{u}_\alpha + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + g \nabla \eta + V_1 + V_2 + V_3 - \mathbf{R}_b - \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_f = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$V_1 = \frac{z_\alpha^2}{2} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) + z_\alpha \nabla[\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)] - \nabla \left[\frac{z_\alpha^2}{2} \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha + \eta \nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha) \right] \quad (3)$$

그리고

$$V_2 = \nabla \cdot \left\{ (z_\alpha - \eta)(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) [\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)] + \frac{1}{2}(z_\alpha^2 - \eta^2)(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla)(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \right\} + \frac{1}{2} \nabla \cdot \left\{ [\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha) + \eta \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha]^2 \right\} \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도, V_1 와 V_2 는 Boussinesq 분산항, 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, 바닥마찰효과를 나타내는 항이며, FUNWAVE는 이 항들을 산정하기 위하여 추가적인 모형들을 포함하고 있다. 또한, 내부조파 모형을 이용한 불규칙파의 조파를 위해 스펙트럼의 각 성분에 무작위(random) 위상을 주고 선형 중첩한 자유수면 시계열을 계산하여 조파하게 된다. 이 모형은 그 결과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 소개되어 있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

3. 모형 set-up

3.1 해운대 규칙파 수치모의 경우

본 연구에서 사용한 해운대 연안지형을 Fig. 2에 나타내었다. 수치모의를 위해서 임의로 좌표원점을 정하였으며, 그림에 위경도 좌표를 표시한 것처럼 X축을 북에서 서쪽으로 4도 기울어진 방향으로 설정하여 지형을 다시 구성하였다. 주기적 측면 경계조건(periodic lateral boundary condition)을 이용하기 위하여 좌표축의 회전이 필요했다. 주기적 측면조건을 사용하므로 측면에서 발생하는 파랑회절에 따른 오류를 제어하여 계산영역을 줄이고, 동시에 흐름의 연속성을 유지할 수 있다. 격자는 $\Delta x = 1.2$ m 그리고 $\Delta y = 1.8$ m로 1551×1678(즉, X방향 격자수×Y방향 격자수)의 격자를 구성하여 사용하였다. 그림에 나타나지 않은 $x = 150$ m를 따라 내부조파 영역을 설치하였고, 내부조파선 뒤쪽에 약 140 m 두께의 흡수층 영역을 설정하였다. 좌우 측면으로 약 200 m의 임의 지형을 만들어 주기적 경계조건을 사용할 수 있도록 하였다. Fig. 2에 해안선을 따라 나타낸 점선들은 수치계산 결과 분석을 위해 임의로 설정한 측정선들로 가능한 연안지형의 등수심선 및 해안선에 대하여 직각방향(cross shore direction)으로 일직선이 되도록 설정하였다. 이 측정선들을 따라 2 m마다

Fig. 2 Topography of Haeundae beach for numerical simulation, the location of wave buoy (○), and numerical gauges (□, ×, △). The contour unit is m and the grid indicates the latitudinal and longitudinal lines.

2주기 평균 연안방향 및 직각방향 유속을 저장하도록 하였고, 사각형(□), 곱표(×), 삼각형(△)으로 표시된 위치는 매 시간 격자 ($\Delta t = 0.1$ 초)마다 유체유속을 기록하도록 하였다. 원기호로 표시된 위치는 국립해양조사원에서 파랑계측을 위해 설치한 부이의 위치를 나타내고 있다. 해운대 규칙파 수치모의를 위해 일방향 단주기를 입사파로 사용하였으며, S 파향의 파고 0.7 m, 주기가 8초인 파랑을 조파하였다.

3.2 이상적 벌집구조 수치모의 경우

앞에서 언급했던 것처럼, 해운대 지형을 직접 이용하여 수치모의를 수행하기 전에, 연안의 직각방향으로 해운대의 한 단면지형을 추출하고 연안방향으로는 일정한 임의의 지형수심을 구성하여 수치모의를 수행하였다. 그 지형의 연안직각방향의 분포는 Fig. 3에 나타내었고, 이 지형은 Fig. 2의 곱표로 나타낸 수치관측점 ×를 통과하는 연안 직각방향 지형이다. 이 수치모의를 위해서는 $\Delta x = 1.2$ m 그리고 $\Delta y = 1.5$ m로 201×301(즉, X방향 격자수 × Y방향 격자수)의 격자를 구성하여 사용하였다. $x = 50$ m를 따라 내부조파 영역을 설치하였고, 내부조파선 뒤쪽에 약 40 m 두께의 흡수층 영역을 설정하였다. 앞에서 언급한 것과 동일한 목적으로 좌우 측면으로 주기적 경계조건을 사용할 수 있도록 하였다. 시간 격자는 $\Delta t = 0.1$ 초를 이용하였다. 본 수치모의시 파봉선의 별

Fig. 3 A topographical profile of Haeundae beach through a numerical gauges (×) located at X=1660 m, Y=1400 m

집구조 형상을 재현하기 위해 두 개의 파향이 약간 다른 규칙파를 입사파로 사용하였으며, 파고와 주기가 0.4 m와 8초며 파향이 +8과 -8도로 입사하도록 조파하였다.

3.3 불규칙파 수치모의 경우

일정한 파고, 주기, 파향에 대하여 불규칙파 에너지의 집중된 정도가 다른 스펙트럼에 대하여 해운대 이안류 발생정도를 분석하기 위하여 주파수 및 방향 스펙트럼의 넓고 좁음에 따라 스펙트럼을 구성하여 해운대 지형에 조파하여 수치모의를 수행하였다. S 파향의 유의파고 1.0 m, 첨두주기가 8초인 다방향 불규칙파를 위하여 JONSWAP 주파수분포와 Mitsuyasu *et al.*(1975), 즉, $\cos^2$ 분포의 방향분산함수를 이용하여 다양한 주파수-방향 스펙트럼을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 아래는 JONSWAP 스펙트럼 $S(f)$ 을 나타내는 식이다.

$$S(f) = 0.0081(2\pi)^{-4} g^2 \gamma^{\exp[-(f-f_p)^2/(2\sigma^2 f_p^2)]} f^{-5} \exp(-1.25 f_p^4 f^{-4}) \quad (5)$$

여기서 f 는 진동수, g 는 중력가속도, f_p 는 첨두 진동수, γ 는 주파수 스펙트럼 첨두증폭계수(peak enhancement parameter)이고, $f \leq f_p$ 는 이면, 0.07을, $f > f_p$ 이면 0.09를 사용하는 계수이다. 그리고 다음과 같이 방향 분산함수를 이용하면 방향-주파수 스펙트럼을 구성할 수 있다.

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (6)$$

여기서 θ 는 방향이고, 방향분산함수 $G(f, \theta)$ 로는 일반적으로 $\cos 2s$ 분포를 이용하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(f, \theta) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

방향분산함수에서 $\Gamma(s)$ 는 Gamma function이고 s 는 방향

폭 계수(directional width parameter)로 다음과 같은 방향 집중계수(circular root-mean-square spreading) σ_θ 으로 나타내어 방향 스펙트럼의 분산정도를 나타낼 수 있다(Kuik *et al.*, 1988).

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{s+1} \right)^{1/2} \quad (8)$$

주파수 스펙트럼을 위해서는 JONSWAP 첨두증폭계수 γ 를 0.55, 1.1, 3.3, 6.6, 9.9으로 변화시키며 구성하였고, 방향 스펙트럼의 경우는 일방향 (S파향)을 비롯하여, 방향 집중도(σ_θ)를 10, 15, 20, 25, 30도로 변화시키며 조합하여 총 30가지 경우의 스펙트럼 불규칙파를 조파하여 수치모의를 수행하였다. 그 가운데 일부를 Fig. 4에 제시하였다. 참고로 S 파향을 재현하기 위해 스펙트럼의 첨두방향이 -4도로 구성된 것은 앞에서 언급한 것처럼 지형을 회전했기 때문이다. 이렇게 구성된 스펙트럼을 동일한 파랑에너지지를 갖는 2,400개의 파성분으로 분리하여 무작위(random)위상을 주어 조파하였다. 참고로 조파성분의 최단파는 약 3.85초의 주기를 가지며, 선형분산관계식에 따르면 수심 18 m에서 약 23 m의 파장을 갖는다.

연안흐름에 매우 중요한 역할을 하는 바닥마찰항의 계수는 0.0015를 사용하였고, 그 밖의 모형의 물리적 혹은 경험적 상수들은 모형의 초기 설정치를 사용하였다. 그리고 본 수치모의를 위하여 Intel Core i7(950)의 PC를 사용하였다.

4. 수치모의

4.1 벌집구조 노드라인을 따라 발달하는 이안류

본 연구를 위해 사용된 FUNWAVE 모형은 파랑유도 연

Fig. 4 Frequency and directional spectra (JONSWAP and Mitsuyashi spectral distribution) established for numerical simulations using (A) $\gamma=6.6$ and $\sigma_\theta=10$ degree, (B) $\gamma=3.3$ and $\sigma_\theta=15$ degree, (C) $\gamma=1.1$ and $\sigma_\theta=20$ degree

Fig. 5 Plane distributions of (a) bathymetry, (b) free surface, (c) current vector plot, and (d) vorticity when rip current evolves along the nodal line area of honeycomb pattern of wave crest resulted from $t = 120T$ after wave generation begins (incident wave condition: $H_1=0.4$ m, $T_1=8.0$ sec, $\theta_1=-8$ deg, $H_2=0.4$ m, $T_2=8.0$ sec, $\theta_2=8$ deg)

안흐름을 수치모의 하는 데 충분히 검증된 모형이고, 별집구조의 노드라인을 통해 이안류가 발달한다는 내용은 Darlymple *et al.*(1975, 2011) 및 윤 등(2012)에 의해 검증된 내용이다. 해운대 지형의 단면을 이용해 구성한 Fig. 3과 같은 수심에 대하여 해운대에서 관찰되는 정도의 파랑조건을 이상화시켜서 FUNWAVE를 이용하여 수치모의를 수행하고 그 결과를 고찰해 보았다. Fig. 5에 그 결과를 도시하였다. Fig. 5(a)에 구성한 지형을, (b)에 조파 시작 후 120주기의 시간이 흐른 뒤의 자유수면 변위를, (c)에는 이안류를 확인할 수 있는 16초($=2T$) 평균유속의 벡터도를, 그리고 (d)에는 발달한 이안류의 와도를 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 결과는 앞에서 언급했던 것처럼 파향만 약간 다른 두 개의 규칙파, 즉 파고 $H_1=0.4$ m, 주기 $T_1=8.0$ 초, 파향 $\theta_1=-8$ deg인 파와 파고 $H_2=0.4$ m, 주기 $T_2=8.0$ 초, 파향 $\theta_2=8$ deg인 파를 동시에 내부조파하여 수치모의한 것이다. Fig. 5(b)는 자유수면을 나타낸 것으로 X방향으로는 진행파가 Y방향으로는 중복파가 비선형 상호작용하므로 Fig. 1의 개념도에서 언급한 것과 같은 육각형 별집구조의 파봉선 형상이 나타나게 된다. 특히, 중앙에 해안으로부터 외해로 이어지는 뚜렷한 노드라인 영역이 존재함을 알 수 있다. 이 영역은 이론적으로 진폭이 없는 절점선으로 파랑에너지가 상대적으로 낮은 계곡(수로)과 같은 역할을 하여 Fig. 5(c) 및 (d)와 같이 외해쪽으로 이안류가 발생 및 발달하게 된다. 즉, 쇄파대 내에서 파랑 에너지가 연안방향(longshore direction)으로 강한 비균등(nonuniformities)성이 형성되고 잉여운동량 플럭스(wave-induced excess momentum

flux)의 기울기가 발생하므로 그 부분의 평균수면 상승과 더불어 파랑에너지가 상대적으로 낮은 수로(rip channel)를 통하여 외해쪽으로 강한 흐름이 발생하는 이안류의 정의를 만족한다. 일반적으로 파랑에너지가 상대적으로 낮은 수로(rip channel)가 지형적 영향으로 부터 지배적으로 발생하는 메커니즘을 갖고 발생하는 이안류와는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 파랑이 거의 대칭적인 형태를 보이는 것과 다르게 이안류는 흐름방향 좌우로 굽이침(meandering instability)과 그로 인한 와류의 이탈(separation vortex)이 발생함을 알 수 있었다.

4.2 규칙파 환경의 해운대 이안류

앞 절에서 해운대의 지형을 단순화 시켜 이상적인 별집구조 파봉현상의 노드라인 영역에서 발달하는 이안류를 확인하였다. 이러한 이안류의 메커니즘이 해운대 해수욕장에서 발생하는 돌발적 이안류의 중요한 메커니즘으로 예상하고, 규칙파 조건으로 비선형 Boussinesq 파랑모형을 해운대 지형에 적용하여 수치모의를 수행하였다.

이 절에서 제시하고 있는 수치모의는 S 파향의 파고 0.7 m, 주기 8초인 규칙파를 대상으로 수행되었다. 수치모의로부터 얻어진 자유수면변위와 유의파고의 평면분포를 Fig. 6에 제시하였다. 패널 (a)에 나타난 자유수면변위 분포는 목표파를 발생시킨 후로부터 약 200주기가 경과된 후의 결과로 밝은 부분이 파봉, 어두운 부분이 파곡 부분을 표시하고 있다. 유의파고분포는 200주기 경과 후 30주기 동안의 파랑변위를 이용하여 계산한 결과이다. 유의파고를 계산하기 위하여 zero-up-crossing method를 사용하는 것이 원칙이지만 시계열 전체를 저장하는 것은 한계가 있어 zeroth-moment wave height를 계산하여 유의파고로 간주하였다.

$$H_{sig} = 4.0\sqrt{\eta^2} \quad (9)$$

Fig. 6 (a) Free surface displacement (shading) and (b) wave height (unit: m) resulted from $t=60T$ after wave generation begins (incident wave condition: $H=0.7$ m, $T=8.0$ sec, wave direction from S). The broken lines in (a) indicate the region where relatively intense wave-breaking occurs.

여기서 η 는 계산된 자유수면변위, $(\bar{\cdot})$ 는 30주기 시간평균이다. 이렇게 나타낸 Fig. 6의 자유수면변위 평면분포는 규칙파의 굴절에 따른 변형이 해운대 앞바다의 해저 산맥과 천퇴 등의 영향으로 광범위하게 변형되는 것을 잘 보여주고 있다. 또한, 앞에서 언급했던 육각형의 벌집구조 형태를 보이는 파봉선들의 분포를 찾아 볼 수 있다. 파고분포를 나타낸 Fig. 6(b)를 보면, 지형에 의한 굴절로부터 파에너지의 집중과 발산이 발생하고, 해안선을 따라 파랑 에너지가 연안방향(longshore direction)으로 강한 비균등(nonuniformities)성이 형성되므로, 쇄파대 위치(Fig. 6(a)의 점선)가 해안선을 따라 매우 불규칙하게 형성되는 것을 알 수 있다. 이 쇄파영역은 200주기 시뮬레이션 시간에 대하여 0.5%이상 쇄파가 발생하는 영역을 쇄파영역으로 간주하여 도시한 것이다. 특히, 파고 분포로부터 해안선 근처에서부터 심해방향으로 파고가 매우 낮은 영역들이 형성되어 있음을 알 수 있는데, 이러한 영역은 굴절에 의하여 파향이 변한 상태로 해안으로 전파되므로 벌집구조 파봉선 형태가 형성되고 그에 따라 해안에서 심해 방향으로 파고가 낮은 노드선 영역들이 나타나게 되는 것으로 보인다. 여기에 파랑굴절의 집중과 발산에 따른 연안방향의 에너지분포의 비균등성이 극심해져 이안류가 잘 발달하게 되는 것으로 판단된다. 이러한 이안류의 발달은 Fig. 7과 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

S 파향의 파고 0.7 m, 주기 8초인 규칙파가 지속적으로 해운대 연안으로 전파될 때, 발생하는 파랑유도 연안흐름의 수치모의 결과를 각각 Fig. 7에 나타내었다. 수치모의 결과인 Fig. 7(a), (b) 및 (c)는 조파시작 후, 각각 약 8분, 27분, 46분경과 후 16초 동안의 결과를 평균하여 계산된 유속 성분을 도시한 것이다. 지속적으로 파랑이 해안으로 전파 및 변형되며, 특히 연안에서 쇄파되므로, 파랑 잉여운동량 유량의 변화량은 평균적으로 일정 방향성을 가지게 되고, 이로부터 파랑유도 연안흐름을 발달시키게 됨을 알 수 있다. 특히, 누리마루와 미포항 연안의 연안류로 분류할 수 있는 쇄파유도류는 시간에 따라 발달하는 형상이 뚜렷하다. 반면에 해운대 중앙, 약 $Y=1200\sim1500$ m의 영역에서는 조파 후 수분만에 이안류가 뚜렷하게 발생하는 것이 관찰되며, 시간에 따라 심해 쪽으로 발달하지 못하고 굽이치는 현상을 보이며

Fig. 7 Vector plots of wave-induced currents obtained at (a) $t=60T$, (b) $t=200T$, and (c) $t=340T$ after wave generation begins (incident wave condition: $H=0.7$ m, $T=8.0$ sec, wave direction from S)

Fig. 8 Zoomed figure of Fig. 6. (a) Free surface displacement (shading) and (b) wave height (unit: m) resulted from $t=60T$ after wave generation begins (incident wave condition: $H=0.7$ m, $T=8.0$ sec, S파향). The broken lines in (a) indicate the region where relatively intense wave-breaking occurs.

Fig. 9 Zoomed figure of Fig. 7. Vector plots of wave-induced currents obtained at (a) $t=60T$, (b) $t=200T$, and (c) $t=340T$ after wave generation begins (incident wave condition: $H=0.7$ m, $T=8.0$ sec, wave direction from S)

큰 와류들이 발생되었다가 떨어져나가 사라지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8과 9는 각각 Fig. 6과 7에 나타낸 자유수면 변위, 유의파고 및 연안흐름 벡터도로부터 이안류가 관찰되는 영역을 자세히 확대하여 도시한 그림들이다. Fig. 9에 나타낸 평균유속벡터들로부터 이안류가 확인되는 위치는 거의 고정되어 있는 것을 알 수 있다. 이 위치에 대하여 Fig. 8(a)에 나타낸 자유수면 변위의 분포를 살펴보면, 앞에서 언급한 것처럼 파랑에너지가 상대적으로 낮은 노드라인 영역이 형성되어 있음을 알 수 있으며, Fig. 8(b)에 나타낸 파고분포를 확인해 보면 파고가 상대적으로 낮게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 쇄파영역 분포로부터도 쇄파(각 위치의 좌우에 대하여) 상대적으로 해안선에 가까운 곳에서 일어나는 위치임을 알 수 있다.

5. 스펙트럼 광협도에 따른 이안류 발생 정도 고찰

앞 절들에서 해운대에서 보고되고 있는 이안류의 지배적인 발생 메커니즘의 하나로 벌집구조파랑현상으로 나타나는 낮은 파고의 노드라인 영역이 이안류 채널 역할을 함을 제시하고 증명하였다. 현장 목격자들의 공통된 의견으로, 지배적으로 일정한 주기와 방향을 갖는 너울(swell)성 장파와 이안류의 관계를 언급하는 근거를 본 연구에서 확인하였다고 할 수 있다. 본 절에서는 파랑에너지가 집중된 형상의 너울성

Fig. 10 (A) An snapshot of rip current observed at 11:31 of June 12th 2011 at Haeundae beach and (B) the frequency spectrum for the period (from 11:00 to 12:00) including this event. The observed spectrum (—), JONSWAP spectrum with spreading factor $\gamma=6.6$ (—), $\gamma=3.3$ (- -), and $\gamma=1.1$ (···) with wave parameters, $H_{sig}=0.75$ m, $T_{peak}=8.5$ sec

파랑 스펙트럼(swell spectrum)을 구성하여 주파수 및 방향 스펙트럼의 넓고 좁음에 따라 수치모의를 수행하여 이안류 발생 정도를 분석하였다. 이러한 분석은 실제 파랑 스펙트럼을 관찰하여 너울성 장파 여부를 판단하므로 그에 따라 이안류 발생정도를 예측할 수 있는 기본적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

먼저 실제 관측된 이안류의 경우를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 10은 2011년 6월 12일 오전 11시 31분에 발생한 이안류를 포착한 CCTV영상자료와 이안류 발생 시점의 관측자료를 분석한 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 이안류 발생 시점을 포함하는 약 54분의 시계열 분석으로부터 유의파고와 유의주기는 각각 0.75 m와 7.5초이며, 침두주기는 8.5초였다. Fig. 10(A)에 나타난 CCTV영상자료로부터 쇄파에 의해 발생된 하얗게 보이는 거품이 외해로 떠밀려 나가는 장면을 통해 매우 뚜렷한 이안류 발생 모습을 확인할 수 있다. Fig. 10(B)에 해운대 부이(Fig. 2)에서 관측된 주파수 스펙트럼을 굵은 회색선으로 나타내었고, 나머지 세 종류의 선으로 나타낸 스펙트럼은 관측된 유의파고와 침두주기를 이용하고 JONSWAP 스펙트럼으로, 침두중폭계수를 각각 6.6, 3.3, 1.1로 조정하여 도시하였다. 관측 스펙트럼의 형상은 침두중폭계수가 5.0인 주파수와 매우 유사하며, 침두 주파수에 에너지가 잘 집중된 형태의 스펙트럼으로 보인다. 참고로 Goda(2010)는 침두중폭계수 γ 가 3.0이상인 스펙트럼을 너울성 스펙트럼(swell spectrum)으로 분류하고 있다. 실제로 8.5초의 침두주기에 에너지가 잘 집중되어 있는 이러한 파랑은 육안으로 관측할 때 거의 단주기에 가까운 너울성 파랑으로 보일 것이며, 심해로부터 해안으로 전파되며 다양한 요인에 의하여 파랑의 에너지 손실의 증가로 상대적으로 짧은 파들이 더 쉽게 소멸되므로 연안에 영향을 주는 파랑은 장파성분이 더 지배적으로 보일 것을 추론할 수 있다.

다음으로 불규칙파 수치모의로부터 결과된 이안류의 경우를 살펴보면 다음과 같다. 앞에서 언급했던 것처럼 유의파고 1.0 m, 침두주기 8초에 해당하는 다양한 스펙트럼을 구성하여 수치모의를 수행하였다. 참고로, 앞 절에서 제시하였던 규칙파의 경우와 동일한 파랑에너지의 조건에서 이안류 발생 수치모의를 수행하기 위하여, 스펙트럼을 갖는 불규칙파와의 경우는 유의파고와 제공된 평균파고의 비율을 고려하여 파고를 선정하였음을 밝힌다. Fig. 4에 나타난 스펙트럼을 포함하여 이들을 구성하는 방법과 동일하게, 앞에서 언급했던

것처럼, 주파수 스펙트럼을 위해서는 γ 를 0.55, 1.1, 3.3, 6.6, 9.9로 변화시키며 구성하였고, 방향 스펙트럼의 경우는 일방향 (S파향)을 비롯하여, 방향 집중도(θ_0)를 10, 15, 20, 25, 30도로 변화시키며 조합하여 총 30가지 경우에 대하여 다양한 스펙트럼의 불규칙파를 조파하여 해운대 연안흐름을 수치모의하였다. 이 각각의 수치모의 결과로부터 16초($=2T$) 평균 연안직각방향 유속(cross shore velocity, $\langle V_{cs} \rangle$, 여기서 $\langle \rangle$ 는 16초 시간평균)을 해안선 근처에서 추출하여 그 일부를 Fig. 11(A), (B), (C)의 첫 번째 패널들에 나타내었다. 이 유속 값들은 Fig. 2에 나타난 점선들의 위치로부터 추출하여 저장하였고, 그들 중 기호로 표시한 세 점(사각형, 곱표, 삼각형)에서 추출한 시계열을 나타낸 것이다. 그리고 점선들로 나타낸 모든 수치 측정들로 부터 평균연안직각방향 유속을 추출하여, 모든 측정들에 대한 음의 방향(심해방향)으로의 최대값을 계산하여 시간에 따른 변화를 Fig. 11(A), (B), (C)의 두 번째 패널들에 도시하였다. 이를 계산 영역에대한 이안류 유속의 시계열로 정의하고자 한다. 다시 말하면, 조파 후 매시간 격자의 유속자료를 이용하여 연안영역에 대하여 해안선 직각방향의 16초 평균유속을 계산하였고, 그 유속값들의 최대값을 구하여 그 영역의 이안류 유속으로 정의한 것이다. 그리고 Fig. 11(A)는 Fig. 4(A)에 나타난 스펙트럼($\gamma=6.6$, $\sigma_\theta=10$)을, Fig. 11(B)는 Fig. 4(B)에 나타난 스펙트럼($\gamma=3.3$, $\sigma_\theta=15$)을, Fig. 11(C)는 Fig. 4(C)에 나타난 스펙트럼($\gamma=1.1$, $\sigma_\theta=20$)을 갖는 불규칙파를 이용한 수치모의로부터 얻은 결과이다. 즉, Fig. 11(A), (B), (C)는 상대적으로 폭이 좁은 스펙트럼(패널(A))으로 부터 넓은(패널(C)) 스펙트럼의 순서로 대로 불규칙파를 조파하여 수치모의를 수행한 결과의 시계열을 도시한 그림이다. 각각의 시계열들을 살펴보면, 폭이 좁은 협대역 스펙트럼의 불규칙파를 사용한 결과가 이안류와 관련하여 더 큰 유속성분들을 갖는다는 것을 알 수 있다.

폭이 좁은 협대역 스펙트럼 즉, 너울성 파랑 스펙트럼처럼 파랑 에너지가 한 주기와 한 파향에 집중되는 경우, 더 이안류가 잘 발생할 수 있다는 사실을 정성적으로 확인하였다. 이로부터 이안류의 발생정도를 정량화시키기 위하여 이안류 발생정도 계수(parameter for likelihood of rip current)의 정의를 도입한다. 이 정의는 다음과 같이 설명될 수 있다. 위험 이안류라고 분류될 수 있는 임의의 유속크기를 정하고, (예를 들어, 1.0 m/s) 이 크기보다 큰 유속의 이안류 유속이

Fig. 11 Time series of 20sec-averaged cross shore velocity (upper panels of each figure) at the numerical gauges shown Fig. 2 ($\square(\cdots)$, $\times$ (—), $\triangle$ (—)) and time series of rip current velocity (that is spatially maximum value of cross shore velocity over the nearshore area). Panel (A) is the result using the spectrum Fig. 4(A), panel (B) is the result using the spectrum Fig. 4(B), and panel (C) is the result using the spectrum Fig. 4(C).

나타나는 시간을 위험 이안류 발생시간으로 간주한다. 그리고 총 이안류 시계열 시간에 대하여 위험 이안류 초과 유속 발생시간의 비율을 계산하여 이를 이안류 발생가능 정도로 정의하였다(참고로, 언급된 이안류 유속에 대한 정의와 이안류 발생정도 산정기법에 대한 자세한 내용은 다른 논문으로 발표될 예정이다). 이 정의로부터 앞에서 언급한 총 30개의 스펙트럼 불규칙파로부터 Fig. 11과 같은 시계열들을 추출하여, 이안류 발생가능 정도, 즉, 총 시계열 시간(시물레이션 시간)에 대한 위험 이안류 초과 유속 시간의 비율을 계산하여 방향 및 주파수 스펙트럼 광협도를 축으로 하는 분포도를 Fig. 12에 도시하였다. 이 그림의 이안류 발생가능 정도를 나타내는 분포를 도시하기위해, 위험 이안류 유속은 1.0 m/s, 0.75 m/sec 그리고 0.5 m/s로 가정하여 계산한 각각의 분포들을 평균하였다. 여기서 방향 스펙트럼 광협도는 앞에서 언급한 방향 집중도(σ_θ)를 사용하고 주파수 스펙트럼의

Fig. 12 Distribution of possibility (percent) of serious rip current varied according to the dimensionless frequency spectrum spreading parameter, and the directional spectrum spreading parameter, σ_θ (degree) of incident random waves.

광협도는 침투계수(γ)를 사용하였고, 일방향의 파랑조건의 경우는 방향 집중도를 $\sigma_\theta=0$ 으로 간주하여 도시하였다. 즉, Fig. 12의 방향 스펙트럼 광협도(directional spreading, σ_θ)를 나타내는 가로축은 작을수록, 주파수 스펙트럼 광협도(frequency spreading, γ)를 나타내는 세로축은 클수록 좁은 협대역 스펙트럼의 불규칙파를 의미한다. 따라서, 동일한 파고와 주기 및 방향을 갖는 파랑조건에 대하여 스펙트럼의 광협도만을 변화시켜서 해운대 이안류 수치모의를 수행한 결과, 스펙트럼의 광협도가 좁은 협대역의 스펙트럼에서 더 이안류가 잘 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히, Fig. 12에 따르면, 주파수 스펙트럼뿐만 아니라 방향 스펙트럼이 좁을수록 그 영향이 커서 이안류를 잘 발생시키는 것을 알 수 있다. 규칙파에 가까운 협대역 스펙트럼을 갖는 불규칙파 조건에서 앞서 언급한 별집구조 형태의 파봉선 현상에서의 노드선 영역이 더 뚜렷하게 발생하므로 이안류가 더 잘 발생한다고 추론될 수 있다.

6. 결론 및 토의

연안의 파랑 및 흐름을 정도 높게 계산하고 파의 잉여에너지가 자동적으로 고려되는 비선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용하는 FUNWAVE 모형을 이용하여, 입사 파향이 다른 규칙파에 의해 해안에서 발생하는 별집구조 형태의 파봉선과 그 노드선 영역을 통하여 발생하는 이안류의 발달을 검증하고, 이 이안류 메커니즘에 의한 해운대 이안류의 발생가능성을 수치모의하여 확인하였다. 해운대 지형에 규칙파 수치모의를 수행하여 해저천퇴 등 수심지형에 따른 파랑굴절 등의 파향 변화로 서로 다른 파향의 파랑이 해안에 도달하고 이에 따라 별집구조 파봉선 현상이 발생됨이 확인되었다. 이 별집구조 파봉선 현상의 파랑에너지가 지속적으로 낮은 노드선 영역이 심해방향으로 유지되고 이를 따라 이안류가 잘 발달함을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 이안류의 메커니즘이 해운대에서 발생하는 이안류의 가장 중요한 요소 중 하나라고 판단할 수 있었다. 이러한 결론은 현장 목격자들의 공통된 의견인 지배적으로 일정한 주기와 방향을 갖는 너울(swell)성 장파와 이안류의 밀접한 관계에

대한 근거가 된다고 판단된다.

일정한 주기와 방향에 에너지가 집중된 형상의 너울성 파랑 스펙트럼(swell spectrum)을 구성하여 주파수 및 방향 스펙트럼의 넓고 좁음에 따라 수치모의를 수행하여 규칙파에 가까운 좁은 스펙트럼의 파랑조건에서 이안류가 더 잘 발달하는 것을 확인하였다. 특히, 방향 스펙트럼이 좁을수록 그 영향이 커서 이안류를 잘 발생시키는 것을 알 수 있었다. 이로부터, 규칙파에 가까운 협대역 스펙트럼의 불규칙파 조건에서 앞서 언급한 벌집구조 파봉선 현상의 낮은 파랑에너지의 노드영역이 더 뚜렷하게 발생하므로 이안류가 더 잘 발생한다고 추론될 수 있을 것이다. 추가로, 스펙트럼의 광협도에 따른 이안류 발생정도를 나타낸 분석은 실제 파랑 스펙트럼을 관찰하여 너울성 장파 여부를 판단하므로 그에 따라 이안류를 예측할 수 있는 기본적 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 이안류 예측기술의 일환으로 계속 연구될 필요가 있다고 판단된다.

지형적 연안류 수로가 아닌 파랑에너지가 상대적으로 낮은 중북파의 노드영역이 연안류 수로 역할을 하는 이안류의 발생 메커니즘이 매우 중요한 해운대 이안류 원인으로 판단된다. 수심지형에 의한 파랑 에너지의 집중과 분산, 연안방향으로 수심이 상대적으로 깊은 지형적 이안류 수로, 다방향 불규칙파의 특성 등 연안방향으로 파고의 불균등성을 만드는 다양한 이안류 메커니즘들의 중첩은 더 강하고 위험한 돌발적 이안류를 발생시킬 수 있을 것이다. 그러나 이안류를 수치모의할 때, 수치격자의 분해능이 지형적 이안류 수로를 정밀하게 나타내지 못하는 경우에는 본 연구의 파랑특성에 따른 변형으로 나타나는 이안류 메커니즘이 더 지배적으로 나타날 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(항만구조물 재해 저감 및 설계기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 그리고 관측자료를 제공해 주신 국립해양조사원에 감사드립니다.

참고문헌

김인철, 이주용, 이정렬(2010) 해운대 해수욕장의 이안류 발생기구 및 수치모의. **한국해안·해양공학회 논문집**, 한국해안·해양공학회, 23(1), 70-78.

윤성범, 권석재, 배재석, 최준우(2012) 관측자료 분석과 수치모의에 의한 해운대 이안류 발생 특성 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제32권 제4호.

최준우, 박원경, 윤성범(2011) Boussinesq 방정식 모형을 이용한 해운대 이안류 수치모의. **한국해안·해양공학회 논문집**, 한국해안·해양공학회, 제23권 제4호, pp. 276-284.

Bowen, A. (1969) Rip currents 1. Theoretical investigations. *J. Geophys. Res.*, 74(23), 5479-5490.

Bowen, A. and Inman, D. (1969) Rip currents 2. Laboratory and field observations. *J. Geophys. Res.*, 74 (C3), 5479-5490.

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

Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, A., and Chawla, A. (2000) Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. II: 2d. *J. Wtrwy., Port, Coast. and Ocean Eng.*, 126 (1), 48-56.

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

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

Dalrymple, R.A. (1975) A mechanism for rip current generation on an open coast. *J. Geophys. Res.*, 80, 3485-3487.

Dalrymple, R.A. (1978) Rip currents and their causes. 16th international Conference of *Coastal Engineering*, Hamburg, 1414-1427.

Dalrymple, R.A. and Lozano, C. (1978) Wave current interaction models for rip currents. *J. Geophys. Res.*, 83(C12), 6063.

Dalrymple, R.A., MacMahan, J.H., Reniers, A.J.H.M., and Nelko, V. (2011) Rip Currents. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 43, 551-581.

Goda, Y. (2010) *Random seas and Design of Maritime Structures*, 3rd Ed., Advanced Series on Ocean Eng., 33, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Haas, K., Svendsen, I., Haller, M., and Zhao, Q. (2003) Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems. *J. Geophys. Res.*, 108(C7), 3217.

Johnson, D. and Pattiaratchi, C. (2006) Boussinesq modelling of transient rip currents. *Coastal Engineering*, 53, 419-439.

Kuik, A.J., van Vledder, G.Ph., and Holthuisen, L.H. (1988) A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1020-1034.

Mitsuyasu, H., Tasai, 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. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 750-760.

Noda, E.K. (1974) Wave induced nearshore circulation. *J. Geophys. Res.*, 79 (1974), 4097-4106.

Shepard, F.P. (1936) Undertow, rip tide or "rip current", *Science*, 21, 181-182.

Tang, E.-S. and Dalrymple, R.A. (1989) *Nearshore circulation: rip currents and wave groups. Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Plenum Press, New York, 205-230.

Wei, G., Kirby, J., Grilli, S.T., and Subramanya, R. (1995) A fully non-linear Boussinesq model for surface waves: I. Highly non-linear, unsteady waves. *J. Fluid Mech.*, 294, 71-92.

Yu, J. and Slinn, D. (2003) Effects of wave-current interaction on rip currents. *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 3088, doi:10.1029/2001JC001105.

(접수일: 2012.5.31/심사일: 2012.7.4/심사완료일: 2012.8.16)