수치모의를 통한 해운대 이안류에 대한 해상요소의 영향 연구: 파주기, 파고, 파향, 조위

Numerical Study on Sea State Parameters Affecting Rip Current at Haeundae Beach : Wave Period, Height, Direction and Tidal Elevation

최 준 우* / 신 충 훈** / 윤 성 범***

Choi, Junwoo / Shin, Choong Hun / Yoon, Sung Bum

Abstract

The likelihood of rip current at Haeundae beach according to wave parameters, such as wave height, period, direction, and tidal elevation, was estimated by using numerical simulations with a Boussinesq model, FUNWAVE. To examine the estimation, the rip current occurred on 12th June, 2011 at Haeundae beach was simulated based on observations. For the estimation, the following procedure was carried out. First, extensive numerical simulations of nearshore circulations are performed under various random sea conditions according to the wave parameters. Second, from the numerical results, cross shore components of two-wave-period averaged velocities over the nearshore area were computed, and their seawardly maximum was defined as rip current velocity of the area. Third, using time series of the rip current velocity, we computed the ratio of the simulation time and the time period in which the rip current velocity exceed a threshold velocity for rip-current accidents, and thus the ratio was quantified as the likelihood of rip current at Haeundae beach for the input wave parameters. From the resultant estimations, it was found that the rip current likelihood increases as wave height and period increase, and tidal elevation decreases.

Keywords : likelihood of rip current, boussinesq model, numerical simulation, wave parameters, haeundae beach

요 지

Boussinesq 모형인 FUNWAVE를 사용한 수치모의 결과를 바탕으로, 파고, 주기, 파향 및 조위와 같은 파랑특성 변수에 따라 해운대 이안류의 발생가능 정도를 추정하였다. 2011년 6월 12일에 발생한 이안류를 수치모의하여 이안류 발생 가능정도를 확인함으로써 정량화 기법을 제시한다. 이 이안류 발생정도의 정량화 기법은 다음의 절차를 따른다. 첫째로, 광범위하게 파고, 주기, 파향, 조위를 변화시키며 불규칙파를 해운대 수심지형에 적용하여 해운대 연안흐름을 수치모의 하였다. 둘째로, 이 수치모의 결과로부터 연안의 직각방향(cross shore direction)의 2주기 시간평균된 유속성분을 추출하고, 연안영역에 대하여 이 유속값의 심해방향 최대값을 그 영역의 ‘이안류 유속’으로 정의하였다. 셋째로, 전체 수치모의 시간에 대한 ‘이안류 유속’ 시계열이 임의의 위험유속을 초과한 시간의 비를 위험 이안류 발생 가능 정도로 정의하여 정량화하였다. 추정된 이안류 발생정도에 따른 분석으로부터, 파고가 클수록, 주기가 길수록, 조위가 낮을수록 이안류가 더 잘 발생하는

* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: jwchoi@kict.re.kr)

Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: lavici@hanyang.ac.kr)

Ph.D. Student, Department of Civil & Env. Engrg, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*** 교신저자, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (e-mail: sbyoon@hanyang.ac.kr; Tel: 031-400-5144)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil & Env. Engrg., Hanyang University, Ansan-si, Gyeonggi-do 426-791, Korea

것으로 나타났으며, 파향은 남동쪽보다 남서쪽 파향에서 조금 더 이안류가 잘 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 이안류 발생가능 정도, Boussinesq 모형, 수치모의, 파랑특성 변수, 해운대

.....

1. 서 론

우리나라의 대표적인 해수욕장인 해운대에는 매년 여름에 수백만명의 피서객이 해수욕을 즐기고 있으며, 각종 국내외 주요행사가 개최되는 관광지로 자리잡고 있다. 그런데 2009년에 발생한 이안류 사고로 사람들의 관심을 끌기 시작한 이후 매년 이안류에 의한 피해상황이 보고되고 있다. 기후 변화로 우리나라도 아열대 기후로 변화하고 있으며, 삶의 질적 향상으로 레저를 즐기는 해수욕객 수가 계속 증가 추세에 있으므로 이안류 사고에 대한 근본적인 대책이 필요해 보인다.

이안류는 Shepard (1936)에 의해서 처음 관찰되고, 연구되기 시작하였으며 이후 이론, 관측, 실험, 수치모의 등 다양한 방법으로 연구되어 왔다. 1960년대에는 각 종 이론들을 이용하여 이안류가 발생하는 메커니즘에 대한 연구가 주를 이루었으며, 그 이후 1970년대에는 다양한 수치모형이 제시되기 시작하였다(Bowen, 1969; Bowen and Inman, 1969; Noda, 1974; Dalrymple and Lozano, 1978). 이안류는 연안에서 지형, 비선형파의 상호작용 및 평균자유투의 불안정성(instability) 등에 기인하여 파랑 에너지가 연안방향(longshore direction)으로 강한 비균등(nonuniform)성이 형성될 때 발생하는 것으로 알려져 있다(Dalrymple, 1975, 1978; Tang and Dalrymple, 1989). 즉, 연안방향을 따라 부분적으로 파랑에너지가 낮아지면, 잉여운동량 플럭스(wave-induced excess momentum flux)의 기울기가 발생하고, 그 낮아진 영역을 통하여 외해 방향으로 강한 흐름이 발생하게 되는데, 이를 이안류라고 한다. 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. 최근에도 국내·외에서 활발하게 연구가 진행 중이다(Kim et al., 2011; Choi et al., 2011).

해운대 이안류에 대한 Boussinesq 모델링을 제시한 Choi et al. (2011)과 너울성 장파로부터 발생하는 벌집구조 파랑현상으로부터 발달하는 이안류 메커니즘이 해운

대 이안류의 주요 발생 메커니즘으로 소개하고 있는 Yoon et al. (2012) 및 Choi et al. (2012)의 연구를 기초로 본 논문의 연구가 수행되었다. 즉, 앞선 논문의 연장선에서 해운대 이안류의 Boussinesq 모델링을 이용하고, 광범위하게 파고, 주기, 파향, 조위를 변화시켜 전형적인 스웰스펙트럼을 구성하여, 그에 따른 불규칙파를 해운대 수심지형에 입사하여 해운대 연안흐름을 수치모의 하였다. 그 결과를 바탕으로 파고, 주기, 파향 및 조위와 같은 파랑특성 변수에 따라 이안류의 발생가능 정도를 추정하고 분석하였다. 이러한 이안류 발생정도를 추정하기 위하여 2011년 6월 12일에 발생한 이안류를 수치모의하고 이를 이용하여 정량화 기법을 제시하고 그 기법을 검증하였다. 이 이안류 발생정도 분포는 향후에 이안류 예측기법의 일환으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 수치모형

본 연구에서는 기존 이안류를 연구하기 위해 사용되었던 수치모의 기법 중 가장 발달된 모형중 하나라고 판단되는 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. 이 파랑모형은 파의 위상을 포함하여 규칙파 및 불규칙파를 해석하고, 이러한 환경에서 다양한 이안류의 발생원인에 따라 돌발적인 이안류를 해석할 수 있는 것으로 알려진 비선형 Boussinesq 방정식 모형이다. 특히, Chen et al. (1999)은 본 모형을 이용하여 Haller et al. (1997)에서 수행하여 제시한 샌드바가 있는 지형에서 발생하는 이안류의 수리실험을 수치모의 하므로, 그 계산결과가 관측치와 잘 일치함을 보였다. 본 모형의 비선형 Boussinesq 방정식은 기본적으로 3차원 Euler 방정식으로부터 비회전 가정과 완화된 정수압분포의 천해 가정을 이용하고 수심 적분하여 유도되며, 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 추가항을 첨가하여 흐름까지도 해석할 수 있는 개선된 모형을 개발하였다. 지배방정

식의 연속방정식은 다음과 같다.

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

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 밑첨자 t 는 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,

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

그리고

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

여기서, g 중력가속도, $\mathbf{V}_1$ 와 $\mathbf{V}_2$ 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, 수평난류효과, 바닥마찰효과를 나타내는 항이며, FUNWAVE는 이 항들을 산정하기 위하여 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

본 연구를 위해 수행된 해운대 연안흐름 시뮬레이션을 위하여 사용한 해운대 연안지형을 Fig. 1에 나타내었다. 수치모의를 위해서 그림에 나타난 위경도 좌표로부터 임의의 좌표원점을 정하여 변환하였다. 주기적 측면 경계조건을 이용하기 위하여 X축을 북에서 서쪽으로 4도 기울어진 방향으로 설정하여 지형의 좌표를 회전하여 재구성

하였다. 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, X방향 격자수는 1,551개, Y방향 격자수는 1,678개를 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. 주기적 경계조건은 파랑 및 흐름의 연속성을 보장하는 물리량의 상호교환을 가능하게 하므로 일반적으로 입사파랑의 부재로 발생하는 파랑의 반사 혹은 회절에 따른 오류를 방지할 수 있다. Fig. 1에 해안선을 따라 나타낸 점선들은 수치계산 결과 분석을 위해 임의로 설정한 측정선들로, 2m마다 2주기 평균 연안방향 및 직각방향 유속을 저장하도록 하였다. 연안방향 및 직각방향을 구별하기 위하여 이 측정선들은 가능한 연안지형의 등수심선 및 해안선에 대하여 직각방향(cross

Fig. 1. Topography of Haeundae Beach for Numerical Simulation, the Location of Wave Buoy (○) Operated by Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA), and Numerical Gauges (□, ×, △). The Contour Unit is m and the Grid Indicates the Latitudinal and Longitudinal Lines

shore direction)으로 일직선이 되도록 설정하였다. 그리고 사각형(□), 곱표(×), 삼각형(△)으로 표시된 위치는 매 시간격자($\Delta t=0.1$ sec)마다 유체유속을 기록하도록 하였다. 참고로, 원기호로 표시된 위치는 국립해양조사원에서 파랑계측을 위해 설치한 부이의 위치를 나타낸다.

본 연구에서는 2011년 6월 12일 오전 11:21, 11:35, 그리고 11:58에 발생한 것으로 확인된 해운대 이안류를 수치모의하기 위해서 관측된 스펙트럼을 이용하였다. 그리고 이안류 발생가능 정도를 추정하기 위해 수행한 수치모의를 위해서는 광범위하게 파랑특성을 변화시키며 JONSWAP 주파수분포와 Mitsuyasu et al. (1975)의 방향분산함수를 따르는 주파수-방향 스펙트럼을 구성하여 이용하였다. 각 스펙트럼에 대하여 다음 절들에 자세히 기술하기로 한다. 이렇게 구성된 스펙트럼을 동일한 파랑에너지를 갖는 2,400개의 파성분으로 분리하여 무작위(random)위상을 주어 조파하였다. 수치모의를 위한 시간격자는 0.1초로 하였다. 참고로 조파성분의 최단파의 해상도를 최대수심에

대하여 선형분산관계식에 따라 10격자이상을 유지하도록 하였다. 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. 관측자료

2011년 6월 12일 오전 11시부터 13시의 두 시간사이에 수차례의 이안류 발생이 해운대 해수욕장 CCTV에 포착되었다. 그 CCTV 영상자료 가운데 뚜렷한 세 차례의 이안류의 모습을 Fig. 2에 제시하였다. 쇄파에 의해 발생한 난류거품이 외해로 떠밀려 나가면서 동시에 이 흐름 스스로 전단류(shear flow)로 난류를 형성하며 발달하는 뚜렷한 이안류 형상을 확인할 수 있다. Fig. 3에 나타난 이안류 발생당시를 포함하고 있는 파고와 주기의 시계열은 Fig. 1에 원기

Fig. 2. Rip Current Observed at Haeundae Beach. An Snapshot at (a) 11:21, (b) 11:31, (c) 11:58 on the 12th of June, 2011

호로 표시한 위치의 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration)에서 운용하고 있는 파랑부이로부터 관측된 유의파고와 유의주기이다. 이 유의파고와 주기는 5분 단위 자료의 분석을 통해 산정되었음을 밝히며, 파향의 경우는 5분 단위자료 분석을 통하여 유의미한 값이 산정될 수 없으므로 따로 제시하지 않는다. 그림의 시계열 위로 회색음영을 통하여 발생당시 시점을 표시하였다. Fig. 3(a)의 일단위로 나타낸 시계열로부터, 이안류가 관찰되지 않는 시점들의 파고와 주기에 비하여 이안류가 관찰된 시점의 파고와 주기가 상대적으로 높게 나타나 있음을 알 수 있다. 참고로, 이 기간 동안의 이안류 발생 여부를 검토하기 위하여, 해상상태를 확인가능한 낮 시간의 CCTV영상을 이용하였으며 이 영상만을 근거로 판단하였음을 밝힌다. Fig. 3(b)의 분단위로 나타낸 시계열을 살펴보면, 이안류가 발생한 시점이 다른 시점에 비해 유의파고와 주기가 확연히 구별되지는 않음을 알 수 있었다. 우선, CCTV자료로부터 돌발 이안류의 지속시간은 수십초에 불과하므로 5분 자료분석을 통한 파고 및 주기값의 한계를 의심할 수 있다. 또는 유의파고와 주

기이외에 다른 인자들도 매우 중요할 수 있음을 암시하는 것으로 판단할 수 있다. Choi et al. (2012)은 일방향 단주기에 가까운 스웰 스펙트럼을 갖는 너울성 파랑이 해운대 지형에 의하여 별집구조가 형성되고 이러한 특성이 이안류를 잘 발생시키는 것으로 분석하고 있다. 이러한 환경이 해운대 이안류 발생의 중요한 인자로 보고 수치모의로 검증한 바 있다. 그리고 6월 12일의 저조(간조)시간이 대략 오전 11시 30분이었던 점은 유의미해 보인다. 일반적으로 이안류의 발생은 저조, 특히 대조기의 저조에 가장 잘 발생하는 것으로 알려져 있다. 이는 수심지형에 따라 달라질 수 있으나 쇄파의 시작위치가 상대적으로 심해 쪽으로 위치하므로 쇄파대역이 넓어지면서 연안방향으로 파랑에너지의 불규칙성이 증가하기 때문이다(Aagaard et al. 1997; Brander and Short, 2001).

Fig. 4(a)에 이안류 발생 시점들을 포함한 오전 11시부터 12시까지의 관측자료를 이용하여 주파수 스펙트럼을 계산하여, JONSWAP 스펙트럼과 비교하여 나타내었다. Fig. 4(b)에 Rayleigh 분포와 zero-up crossing으로 분석한 파고들의 확률분포를 비교하여 도시하였다. Fig. 4(a)

Fig. 3. Time Series of Significant Wave Height and Period Observed at Haeundae Buoy of KHOA during the Interval Including the Rip Current Event on the 12th of June, 2011

Fig. 4. (a) Frequency Spectrum for the Period (from 11:00 to 12:00) Including this Event. The Observed Spectrum (—) and JONSWAP Spectrum with Spreading Factor $\gamma=5.0$ (---) with Wave Parameters, $H_{sig}=0.75$ m, $T_p=8.5$ sec. (b) Probability Density Function Analyzed using the Zero-up Crossing of the Observed Data (bar) and Rayleigh Distribution (—)

의 짧은 회색선은 관측된 주파수 스펙트럼을 나타내고 검은 점선은 관측된 유의파고와 침두주기를 이용하여 구성된 JONSWAP 스펙트럼으로 침두중폭계수 γ 는 5.0을 사용하여 도시하였다. 비록, FFT를 이용한 주파수 스펙트럼의 분포는 관측자료의 개수에 따라 조금씩 변동이 있을 수는 있지만, 충분히 한 주기에 에너지가 집중된 형태의 너울성 스펙트럼으로 판단할 수 있다. 참고로 Goda (2010)는 침두중폭계수 γ 가 3.0 이상인 스펙트럼을 너울성 스펙트럼(swell spectrum)으로 분류하고 있다. 더욱이, 심해로부터 해안으로 전파되며 다양한 요인에 의하여 파랑의 에너지 손실의 증가로 상대적으로 짧은 파들이 더 쉽게 소멸되므로 연안에 영향을 주는 파랑은 장파성분이 더 지배적일 것으로 추론한다면 연안에서의 스펙트럼은 침두 주파수에 에너지가 더 집중된 형태의 스펙트럼이 될 것으로 추측할 수 있다. Fig. 4(b)는 관측자료로부터 zero-up crossing으로 분석한 파고의 평균파고(H)로 무차원화 시킨 확률밀도분포와 Rayleigh 분포를 도시하였고, 그 결과 일반적인 정도에서 일치하는 것으로 판단되며, 에너지 소멸에 의한 변형이 일어나기 이전의 심해파의 특성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5에 나타낸 주파수-방향 스펙트럼은 Fig. 4에 나타낸 관측 주파수 스펙트럼과 Mitsuyasu et al. (1975)의 방향분산함수를 이용하여 구성하였다. 한 관측점에서의 자료를 이용하여 구성할 수 있는 Longuet-Higgins et al. (1963)의 방향 스펙트럼 산정기법의 경우, 침두방향은 어느 정도 유의미할 수 있지만, 전체적인 분포의 형상은 신뢰할 수 없을 정도로 완만하게 산정되는 것으로 알려져

Fig. 5. Frequency-directional Spectrum for Numerical Simulation of the Rip Current Event on the 12th of June, 2011 Established by Utilizing Observed Frequency Spectrum and Estimated Directional Spectrum (Mitsuyashi spectral distribution) using Observed Wave Direction S6W and Directional Spreading $\sigma_\theta=10$

있다. 따라서 Longuet-Higgins et al. (1963)의 방향 스펙트럼 분석을 통하여 얻어진 남쪽으로부터 서쪽으로 6도 기울어진 곳으로부터 입사해서 들어오는 파의 방향, 즉 침두방향 S6W에 대하여 다음과 같은 Mitsuyasu et al. (1975)의 $\cos^2$ 분포를 이용하여 주파수-방향 스펙트럼을 구성하여 수치모의 하였다.

$$D(\theta) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

여기서, $\Gamma(s)$ 는 Gamma function이고 s 는 방향폭 계수(directional width parameter)로 다음과 같은 방향 집중 계수(circular root-mean-square spreading) σ_θ 로 나타내어 방향 스펙트럼의 분산정도를 나타낼 수 있다(Kuik et al., 1988).

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{s+1} \right)^{1/2} \quad (6)$$

수치모의를 위하여 방향분산함수의 방향 집중도(σ_θ)를 10 degree로 정하여 구성하였고, 지형이 -4 degree 회전되어 있어 Fig. 5와 같이 스펙트럼상의 첨두파향은 -10 degree로 구성되어 있다.

5. 수치모의

앞 절에서 제시한 해운대의 2011년 6월 12일 관측자료를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의로부터 얻어진 자유수면변위와 유의파고의 평면분포를 Fig. 6에 제시하였다. 패널(a)에 나타난 자유수면변위 분포는 목포파를 발생시킨 후로부터 약 200주기가 경과된 후의 결과로 밝은 부분이 파봉, 어두운 부분이 파곡 부분을 표시하고 있다. 패널(b)에 나타난 유의파고분포는 200주기 경과 후 30주기 동안의 파랑변위를 이용하여 계산한 결과이다. 유의파고는 zeroth-moment wave height를 계산하여 사용하였다.

$$H_{m0} = 4.0 \sqrt{\overline{\eta^2}} \quad (7)$$

여기서, η 는 계산된 자유수면변위, $\overline{(\quad)}$ 는 30주기 시간평균이다. 이렇게 나타난 Fig. 6(a)의 자유수면변위 평면분포는 협대역 불규칙파가 해운대 앞바다의 해저 산맥과 천퇴 등의 영향으로 광범위하게 굴절 등 변형되는 것을 잘 보여주고 있다.

파고분포를 나타낸 Fig. 6(b)로 부터 방향 불규칙파의 특성과 지형에 따른 굴절로부터 파에너지의 집중과 발산이 발생하고, 해안선을 따라 파랑 에너지가 연안방향(longshore direction)으로 강한 비균등(nonuniform)성이 형성됨을 알 수 있다. 더불어, 쇄파대 위치(Fig. 6(a)의 점선)가 해안선을 따라 불규칙하게 형성된 것을 알 수 있다. 이 쇄파영역은 200주기 시뮬레이션 시간에 대하여 0.5% 이상 쇄파가 발생하는 영역을 쇄파영역으로 간주하여 도시한 것이다. 이러한 연안방향 비균등성이 이안류 발달의 원인으로 판단된다. 특히, 남서쪽으로 기울어진 파향과 계산영역 중앙에 발달해 있는 해저 산맥지형의 영향으로 높

은 파고분포영역이 남서쪽으로 기울어져 심해에서 해안으로 나란히 발달해 있음을 확인할 수 있다. 이 분포는 해안선 근처에서 몇 갈래로 나뉘며 해안을 따라 에너지의 비균등성을 증가시키고, 결국, 높은 파고분포사이의 낮은 파고를 보이는 영역을 통하여 이안류가 잘 발달하게 되는데, 이는 Figs. 7 and 9에 유속벡터를 통해 도시하였다.

관측자료를 바탕으로 구성된 스펙트럼의 불규칙파가 지속적으로 해운대 연안으로 전파될 때, 발생하는 파랑유도 연안흐름의 수치모의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 수치모의 결과인 Fig. 7(a), (b) and (c)는 조파시작으로 부터 각각 약 8분, 27분, 46분경과 후 2주기 동안의 결과를 평균하여 계산된 유속성분을 도시한 것이다. 2주기 동안의 결과를 평균하여 파랑성분의 유속을 제거하므로 이안류의 유동을 잘 관찰할 수 있다. 앞에서 언급했던 것처럼 수심지형에 의한 파랑변형으로 해안을 따라 비균등성이 발생하고 이러한 지속적인 일정한 패턴의 파고분포에 의하여 파랑 잉여운동량 유량의 변화량이 평균적으로 일정 방향성을 가지게 되므로, 이로부터 이안류가 발달하는 것으로 판단한다. 그러나 본 시뮬레이션 결과가운데 S파향의 경우에서 관찰(Choi et al., 2011; Choi et al., 2012)되던 누리마루와 미포항 연안의 연안류의 발달이 뚜렷하게 발달하지 못하는 점이 특이한 점이다. 파고 및 주기의 파랑 조건에 따른 영향을 포함하여 파향과 관련하여 연안류의 발달에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 6. (a) Free Surface Displacement (shading) and (b) Wave Height (unit: m) Resulted from $t=60 T_p$ after Wave Generation Begins (incident wave condition: $H_{sig}=0.75$ m, $T_p=8.5$ s, wave direction from S6W). The broken lines in (a) Indicate the Region Where Relatively Intense Wave-breaking Occurs

Figs. 8 and 9는 각각 Figs. 6 and 7에 나타낸 자유수면 변위, 유의파고 및 연안흐름 벡터도를 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, 해

안선 근처의 파봉(또는 파곡)선들이 끊어져있는 파랑에너지가 낮은 노드라인 영역이 연안에 직각방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 8(b)에 나타낸 파고분포를 확인해 보면 노드라인 영역의 파고가 상대적으로 낮게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 쇄파영역 분포(Fig. 8(b)의 점선)로부터도 그 영역의 쇄파가(각 위치의 좌우에 대

Fig. 7. Vector Plots of Wave-induced Currents Obtained at (a) $t=60 T_p$, (b) $t=200 T_p$, and (c) $t=340 T_p$ after Wave Generation Begins (incident wave condition: $H_{sig}=0.75$ m, $T_p=8.5$ s, wave direction from S6W)

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 : $H_{sig}=0.75$ m, $T_p=8.5$ s, S6W). The Broken Lines in (a) Indicate the Region Where Relatively Intense Wave-breaking Occurs

하여) 상대적으로 해안선에 가까운 곳에서 일어남을 알 수 있다. 이론적으로 파랑에너지가 영인 벌집구조 형태에서의 파랑 노드라인의 형성은 규칙파 시뮬레이션으로부터 보인바 있으며(Choi et al., 2012), 이러한 현상은 한 주기와 방향에 파랑에너지가 집중되어 있는 불규칙파 조건에서도 유사한 형태로 이안류를 발생시키는 것으로 보인다.

앞에서 언급했던 것처럼 계산의 시간적 공간적 영역의

연안직각방향의 외해로 흐르는 유속값을 이용하여 이안류의 발생정도를 정량화하는 간단한 방법을 제시하고 이를 이용하여, 다음 절에 이안류의 파랑조건에 따른 발생정도를 분석 및 고찰하려 한다. 앞에서 제시한 수치모의 결과로부터 17초($=2T_p$) 평균 연안직각방향 유속(cross shore velocity, $\langle V_{cs} \rangle$, 여기서 $\langle \rangle$ 는 17초 시간평균)을 해안선 근처에서 추출하여 그 일부를 Fig. 10의 첫

Fig. 9. Zoomed figure of Fig. 7. Vector plots of wave-induced currents obtained at (a) $t=60 T_p$, (b) $t=200 T_p$, and (c) $t=340 T_p$ after wave generation begins (incident wave condition: $H_{sig}=0.75\text{m}$, $T_p=8.5\text{s}$, wave direction from S6W)

Fig. 10. Time Series of 17 sec-averaged Cross Shore Velocity (upper panels of each figure) at the Numerical Gauges Shown Fig. 2 ($\square$ (---), $\times$ (—), $\triangle$ (—)) and Time Series of Rip Current Velocity (that is spatially maximum value of cross shore velocity over the nearshore area)

번째에 나타내었다. 이 유속 값들은 Fig. 2에 해안선을 따라 나타낸 점선들을 따라 2m간격으로 계산하여 추출한 결과의 일부로, 기호로 표시한 세 점(사각형, 곱표, 삼각형)에서 추출한 결과를 시계열로 나타낸 것이다. 이 시계열의 유속값은 연안직각방향의 유속이므로 음의 값이 외해방향으로 흐르는 유속이다. 기본적으로 시간에 따라 그 크기가 변화하는 비정상류이며, 측정위치에 따라 그 유속 크기들이 다를 수 있다.

Fig. 10의 두 번째 패널에 한 시점에서의 영역내 ‘이안류 유속’이라고 정의된 값의 시계열을 나타내었다. 여기서, ‘이안류 유속’이란 매 시점마다 계산된 연안직각방향 유속들의 계산영역내 음의 최대값으로 정의하였다. 이 값은 계산영역 전체 이안류의 대표 유속이다. 다시 말하면, 조파 후 매 시간격자의 유속자료를 이용하여 연안영역에 대하여 해안선 직각방향의 17초 평균유속을 계산하였고, 그 유속값들의 공간영역 최대값을 한 시점에서의 이안류 유속으로 정의하여 시계열로 나타낸 것이다. 여기서, 이 이안류의 유속이 안전사고를 발생시킬 수 있는 정도인지 판단하기 위하여 임의의 위험 이안류라고 분류될 수 있는 정도의 임계유속을 정할 필요가 있다. 예를 들어, 1.0m/s 이상의 이안류에서는 안전사고가 발생할 수 있다고 하면, 이 크기의 유속보다 큰 이안류 유속이 있을 때, 위험 이안류가 발생할 가능성이 있다고 말할 수 있을 것이다. 이렇게 임계유속을 초과하는 이안류 유속을 보이는 시간을 위험 이안류 발생시간으로 간주하면, 총 이안류 시뮬레이션 시간에 대하여 위험 이안류 발생시간의 비율을 계산할 수 있다. 이 비율을 이안류 발생가능 정도를 나타내는 계수(likelihood of rip current)로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. Fig. 10의 두 번째 패널에 나타낸 이안류 유속 시계열을 예로하여 계산하면, 임계유속을 1.0m/s로 하는 경우에, 8%, 0.75m/s로 하는 경우에, 45%, 0.5m/s로 하는 경우에 93%의 이안류 발생정도를 나타내는 비율이 계산된다. 한 가지 파랑조건을 갖는 시뮬레이션으로부터 산출되는 이 이안류 발생정도 계수는 독립적으로 큰 의미를 부여하기는 어려울지 모르나, 다양한 파랑조건에서 산출되는 이 계수의 크기를 상대적으로 비교하면, 다양한 파랑조건에 따른 이안류 발생정도의 경향성을 파악할 수 있을 것이라고 판단하였다. 그리고 광범위한 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 다음 절에 제시하고 그 결과를 분석하였다. 참고로, 수치모의 결과에 따른 계산영역 내 이안류가 발생하는 위치에 대한 공간정보는 더 이상 활용할 수 없게 된다. 무시된 위치정보의 신뢰도는 장래의 수치모의와 관측자료의 정밀도 향상과 더불어 증가할 수 있을

것으로 판단된다.

6. 파랑 특성 파라미터 및 조위에 따른 이안류 발생 정도 고찰

2011년 6월 12일의 해운대 이안류 시뮬레이션 결과를 통하여 이안류의 발생가능성을 정량화시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 이러한 정량화된 발생정도를 이용하여 다양한 파랑 파라미터들을 발생가능한 범위에서 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 각 시뮬레이션들의 결과로부터 정량화된 이안류 발생정도의 값을 추출할 수 있으므로, 다양한 파랑 파라미터에 따라 이안류 발생정도의 분포를 도출하여 그 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단하였다.

실제 해운대 해역에 대한 특성을 고찰하기 전에 Choi et al. (2012)의 Fig. 5에 제시한 해운대 지형의 한 단면을 추출하여 구성한 지형을 이용하여, 파고 및 주기를 변화시키며 수행한 수치모의결과를 Fig. 11에 도시하였다. 입사파향이 서로 16도 다른 두개의 단주기 파군은 별집구조 파봉선을 형성하고 이로부터 이안류가 발달함을 잘 나타내고 있다. 그리고 파고가 높을수록 주기가 길수록 이안류가 더 잘 발달하는 것을 알 수 있다. 참고로, 그림에서 파랑의 경사 입사시 주기가 줄어들수록 y축 방향 파장이 줄어들므로 y축도 상대적으로 작게 도시되었음을 밝힌다. 잉여운동량 플럭스의 기울기가 이안류의 주된 발생 원천이며, 이 운동량플럭스는 파고가 클수록, 주기가 길수록 증가하게 된다. 그리고 일반적인 완전쇄파에 의한 그 기울기 즉, 작용력도 강해지게 되므로 파고와 주기의 상승에 따른 이안류의 발생가능성과 강도의 상승은 이론적으로도 설명될 수 있다.

해운대 실제해역의 시뮬레이션으로부터 도출된 결과는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 도시된 것처럼, 각 시뮬레이션을 위해 변화시킨 파라미터는 파고, 주기, 파향, 조위이다. 먼저 파고는 0.6m에서부터 1.6m까지 0.2m씩 변화시키며, 주기는 5초부터 10초까지 1초씩 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 이 범위는 사전 시뮬레이션 결과 및 관측자료와 CCTV영상자료를 통하여 이안류가 발생가능한 그리고 해수욕이 불가능한 조건의 경우들을 고려하여 설정한 것으로 파라미터의 변화에 따른 일반적인 이안류 발생정도의 경향을 알아보기에는 충분하다고 생각한다. 그리고 파향의 경우는 일반적으로 해수욕이 가능한 여름철 해운대에 영향을 주는 주된 파향인 S계열의 파향을 중심으로 S15W, S, S15E의 세 파향만을 고려하였으

Fig. 11. Plane Distributions of Free Surface and Vector Plot for Rip Current Due to Honeycomb Pattern of Waves with Two Incident Wave Directions $\theta_1=-8$ deg and $\theta_2=8$ deg. The Snapshots are Resulted from $t=10$ min after Wave Generation Begins. (a) $H_1=H_2=0.4$ m and $T_1=T_2=8.0$ sec, (b) $H_1=H_2=0.35$ m and $T_1=T_2=8.0$ sec, (c) $H_1=H_2=0.3$ m and $T_1=T_2=8.0$ sec, (d) $H_1=H_2=0.4$ m and $T_1=T_2=7.0$ sec, (e) $H_1=H_2=0.4$ m and $T_1=T_2=6.0$ sec

며, 조위의 경우 약최저저조위(DL 0 m)의 수심자료를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 추가로 조위에 따른 경향성을 파악하기 위해 파고 1.0 m, 주기 8초, S파향의 조건을 고정시키고 약최저저조위를 기준으로 -0.2 m에서부터 약최고고조위인 1.3 m까지 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 다양한 파고, 주기, 파향, 조위에 대한 불규칙파 조건의 파랑-흐름 시뮬레이션을 수행하기 전에 대표스펙트럼을 정하고 이 분포를 고정하여 사용하였다. 본 시뮬레이션에서 사용한 스펙트럼 분포는 JONSWAP 주파수분포와 cosine-급수 방향분포함수를 이용하여 구성하였다. JONSWAP 첨두증폭계수(peak enhancement parameter)는 3.3을, 방향집중도 계수는 15를 사용하였으며, 이는 스펙트럼 광협도 분포에 따른 이안류 발생정도를 분석한 Choi

et al. (2012)의 연구를 기반으로 설정하였다. 그리고 해운대 이안류 발생가능 정도를 나타내는 계수(likelihood of rip current)를 위하여 위험임계유속을 1.0 m/s, 0.75 m/s, 및 0.5 m/s로 하여 산정한 값의 평균을 사용하여 도시하였다.

Fig. 12(a)는 S파향 조건에 대하여 입사 유의파 주기와 파고에 대한 이안류의 발생정도의 분포를 도시화하여 나타낸 것이다. 마찬가지로, Figs. 12(b) and (c)는 각각 S15W, S15E파향에 대하여 파랑조건에 대한 이안류 발생정도의 분포를 도시하였다. 파향의 변화와 관계없이 입사파의 파고가 크고 주기가 길수록 이안류의 발생정도가 높은 것으로 나타났다. 파랑 에너지 및 에너지 플럭스의 증가는 쇄파대내에서 그 변화량의 정도도 증가시켜 이안류의 강도를 상승시키는 것으로 설명할 수 있을 것이다. 파향별로

Fig. 12. Distribution of Likelihood of Serious Rip Current Varied according to Significant Wave Height and Period of Random Incident Waves (unit: percent). (a) Cases with S for the MAIN WAVE DIRection, (b) Cases with S15W for the Main Wave Direction, and (c) Cases with S15E for the Main Wave Direction

는 상대적으로 S와 SW계열의 파향조건이 SE계열 파향 조건에서 이안류가 잘 발생하는 것으로 보인다. 이는 여름철 해운대 해역에 미치는 태풍의 영향에 따른 풍향이 S 및 SW계열 파랑을 생성시키는 것과 연결하여 생각해 볼 수 있다고 판단된다. S파향 조건에서 8초대의 주기에서 이안류의 발생정도가 9초나 10초의 입사주기보다 높게 나온 것에 대하여 단순한 수치모의상의 문제인지 수심지형과 파장의 상관관계로 인한 굴절정도와 관계가 있는지 추가적인 연구가 필요해 보인다.

Fig. 13에 조위를 변화시키며 시뮬레이션 한 결과를 이용하여 이안류 발생정도를 산정하여 도시하였다. 알려진 바와 같이 조위가 낮을수록 이안류의 발생정도는 상승하는 것으로 나타났다. 해안선 근처(beach face)의 경사가 쇄파대 영역(surfzone)보다 급하면, 조위가 낮아질수록

Fig. 13. Distribution of Likelihood of Serious Rip Current Varied according to Tidal Elevation with an Incident Wave Condition, $H_{sig}=0.7$ m, $T_p=8.0$ s, and S for the Main Wave Direction ($\gamma=5.0$ and $\sigma_\theta=10$ deg)

쇄파대의 폭이 증가하여, 해안선 횡방향으로 비균등한 에너지 분포가 조성되기 쉽기 때문에 설명될 수 있다. 즉, 해운대에서도 조위가 낮아짐에 따라 이안류가 잘 발생하는 일반적인 경향을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 과거 일부 해운대 이안류 사고의 시점이 만조였다는 기록 (Lee and Kim, 2010)이 있으며, 이에 대해서는 추가적인 설명이 필요해 보인다. 과거 이안류 사고시점에서의 파랑 조건, 예를 들어 입사파가 높고 주기가 길어, 만조위에서도 이안류를 발생시킬 수 있을 정도의 환경이었을 가능성이 있다. 그리고 만조시와 간조시 동일하게 이안류가 발생하는 경우라면, 수위가 깊어진 만조시에서 해수욕객들의 사고율이 더 클 가능성을 추측해 볼 수 있다. 그러나 보다 확실한 검증을 위해서는 추가적인 관측 자료들의 축적과 이에 따른 분석이 필요해 보인다.

7. 요약 및 결론

해운대 이안류의 Boussinesq modelling을 통하여 2011년 6월 12일에 발생한 이안류를 수치모의하고 이안류 발생 가능정도를 확인하였고, 그 결과를 이용하여 입사파 파랑조건에 따른 이안류 발생정도를 나타내는 계수의 산정기법을 제시하였다. 광범위한 시뮬레이션을 수행하고 그 발생정도 계수를 산정하여, 파고, 주기, 파향 및 조위와 같은 파랑특성 변수에 따라 해운대 이안류의 발생가능 정도의 특성을 분석하였다. 추정된 이안류 발생정도에 따른 분석으로부터, 파고가 클수록, 주기가 길수록, 조위가 낮을수록 이안류가 더 잘 발생하는 것으로 나타났으며, 파향은 남동쪽보다 남서쪽 파향에서 조금 더 이안류가 잘 발생하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 도출해 낸 입사파 파랑 및 조위 조건에 따른 이안류의 발생정도의 경향은 이미 알려진 특성 그 이상을 제시하고 있지는 못하지만, 이안류 발생정도를 정량화시키고 그 정량적인 분포를 제시하였다. 따라서 차후에 다양한 외부환경에 대한 시나리오를 수립하고 이를 해석하여 그 분포도를 실시간 관측 정보와 연계함으로써 향후에 이안류 예측기법의 일환으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(항만구조물 해체저감 및 설계기술 개발)의 연구비지원에 의해 수행되었기에 감사드리며, 관측 자료를 제공해 주신 국립해양조

사원에 감사드립니다.

참고문헌

- Aagaard, T., Greenwood, B., and Nielsen, J. (1997). "Mean currents and sediment transport in a rip channel." *Mar. Geol.*, Vol. 140, No. 1-2, pp. 25-45.
- Bowen, A. (1969). "Rip currents 1. Theoretical investigations." *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, No. 23, pp. 5467-5478.
- Bowen, A., and Inman, D. (1969). "Rip currents 2. Laboratory and field observations." *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, No. 23, pp. 5479-5490.
- Brander, R.W., and Short, A.D. (2001). "Flow kinematics of low-energy rip current systems." *J. Coast. Res.*, Vol. 17, No. 2, pp. 468-481.
- Chen, Q., Dalrymple, R., Kirby, J., Kennedy, A., and Haller, M. (1999). "Boussinesq modelling of a rip current system." *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, No. C9, pp. 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. Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng.*, Vol. 126, No. 1, pp. 48-56.
- Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Shi, F., and Thornton, E.B. (2003). "Boussinesq modeling of longshore current." *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. C11, pp. 3362-3379.
- 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.
- Choi, J., Park, W.K., and Yoon, S.B. (2011). "Boussinesq Modeling of a Rip Current at Haeundae Beach." *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 4, pp. 276-284.
- Choi, J., Park, W.K., Bae, J.S., and Yoon, S.B. (2012). "Numerical Study on a Dominant Mechanism of Rip Current at Haeundae Beach: Honeycomb Pattern of Waves." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5B, pp. 321-329.
- Dalrymple, R.A. (1975). "A mechanism for rip current

- generation on an open coast.” *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, No. 24, pp. 3485–3487.
- Dalrymple, R.A. (1978). Rip currents and their causes. *16th international Conference of Coastal Engineering*, Hamburg, pp. 1414–1427.
- Dalrymple, R.A., and Lozano, C. (1978). “Wave current interaction models for rip currents.” *J. of Geophys. Res.*, Vol. 83, No. C12, pp. 6063–6071.
- 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.*, Vol. 108, No. C7, p. 3217, doi:10.1029/2002JC001355.
- Haller, M.C., Dalrymple, R.A., and Svendsen, I.A. (1997). Modeling rip currents and nearshore circulation, paper presented at Ocean Wave measurement and Analysis, Am. Soc. of Civ. Eng., Virginia Beach, VA.
- Johnson, D., and Pattiaratchi, C. (2006). “Boussinesq modelling of transient rip currents.” *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 419–439.
- Kim, I.C., Lee, J.Y., and Lee, J.L. (2011). “Generation Mechanism and Numerical Simulation of Rip Current at Haeundae Beach.” *Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 1, pp. 70–78.
- 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.*, Vol. 18, No. 7, pp. 1020–1034.
- Lee, J.C., and Kim, D.H. (2010). “Physical Environments of Suyong Bay during the Rip Current Events at Haeundae–August 2009” *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 15, No. 3, pp. 110–114.
- Longuet-Higgins, M.S., Cartwright, D.E., and Smith, N.D. (1963). *Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy*. Ocean wave spectra, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 111–136.
- 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.*, Vol. 5, No. 4, pp. 750–760.
- Noda, E.K. (1974). “Wave induced nearshore circulation.” *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, pp. 4097–4106.
- Shepard, F.P. (1936). Undertow, rip tide or “rip current,” *Science*, Vol. 21, pp. 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, pp. 205–230.
- Wei, G., Kirby, J., Grilli, S.T., and Subraymanya, R. (1995). “A fully non-linear Boussinesq model for surface waves: I. Highly non-linear, unsteady waves.” *J. Fluid Mech.*, Vol. 294, pp. 71–92.
- 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.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 4B, pp. 243–251.
- Yu, J., and Slinn, D. (2003). “Effects of wave-current interaction on rip currents.” *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. C3, p. 3088, doi:10.1029/2001JC001105.

논문번호: 12-101	접수: 2012.08.28
수정일자: 2012.10.08/10.18	심사완료: 2012.10.18