Boussinesq 방정식 모형을 이용한 해운대 이안류 수치모의 Boussinesq Modeling of a Rip Current at Haeundae Beach

최준우* · 박원경** · 윤성범***

Junwoo Choi*, Won Kyung Park** and Sung Bum Yoon***

요 지 : 파랑 잉여응력의 영향이 자동적으로 고려되므로 파랑으로부터 발생하는 흐름을 수치모의할 수 있는 수평 점성 및 난류항이 포함된 Boussinesq 방정식 모형인 FUNWAVE를 이용하여, 다방향 불규칙파 조건으로 해운대 해안에서 발생하는 이안류를 수치모의하였다. 수치모의는 다방향 불규칙파의 전파양상과 지형에 의한 비선형 파랑변형을 잘 보여주고 있으며, 이러한 파랑변형과 해운대 지형특성이 반영되어 시간에 따라 발달하는 파랑유도 연안흐름 양상을 잘 보여준다. 수치모의 결과로 부터 이안류는 연안방향으로 상대적으로 수심이 깊은 곳에서 그리고 파고가 낮은 곳에서 이안류가 돌발적으로 발생 혹은 증폭될 수 있음을 확인하였다.

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

Abstract : The rip current occurred at Haeundae beach was numerically investigated under directional random wave environment. The numerical simulation was performed using a fully nonlinear Boussinesq equation model, FUNWAVE which is capable of simulating nearshore circulation since it includes the effect of wave-induced momentum flux and horizontal turbulent mixing. The results of numerical simulation show the time-dependent evolution of the wave-induced nearshore circulation system (including rip current) that are caused by nonlinear transformation of directional irregular waves due to unique topography of Haeundae. From the results, it was found that rip current is well generated and developed where relatively lower wave height and relatively deeper water depth along the longshore direction, and sudden and strong events of rip current were observed.

Keywords : Rip current, numerical simulation, nonlinear Boussinesq equation, FUNWAVE, Haeundae beach

1. 서 론

최근 매년 여름 부산 해운대에서 해수욕객의 안전을 위협하는 강한 이안류가 연달아 발생하여 많은 관심을 끌고 있다. 2007년과 2008년 각 1회, 2009년 2회 그리고 2010년 4회의 해운대 해수욕장 이안류 사고가 보고되었고, 2008년부터 매년 수십 명씩 구조 조치되고 있다. 일반적으로 이안류는 연안에서 지형, 비선형파의 상호작용 및 평균자유투수의 불안정성(instability)등에 기인하여 파랑 에너지가 연안방향(longshore direction)으로 강한 비균등(nonuniform)성이 형성될 때 발생하는 것으로 알려져 있다(Darlymple, 1975, 1978; Tang and Dalrymple, 1988). 즉, 연안방향을 따라 파랑에너지(또는 파고)가 급격히 낮아지는 쪽으로 파랑 잉여운동량 플럭스(wave-induced excess momentum flux)의 기울기가 발생하므로 그 부분의 평균수면 상승과 더불어 이안류 수로(rip channel)를

통하여 외해쪽으로 강한 흐름이 발생하게 된다.

이러한 이안류는 Shepard (1936)로부터 관찰되고, 연구되기 시작하였으며, 연구 초기에는 이론적 모형들을 이용하여 기본적인 발생 메커니즘을 밝히려는 내용들을 다루었다(예로, Bowen, 1969; Bowen and Inman, 1969; Noda, 1974; Darlymple and Lozano, 1978). 최근 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)로 나뉘어 진행되고 있다. 최근 국내에서도 결합모형을 이용하여 해운대 해수욕장에서 발생한 이안류를 수치모의한 연구가 발표되었다(김 등, 2011). 파랑-흐름 결합모형은 흐름에 의한 굴절과 회절 현상을 고려할 수 있는 파랑모형과 선형파 이론으로 산정되는 잉여응력항을 포함하는 흐름모형 간에 정

*한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 (River, Coastal & Harbor Research Division, Korea Inst. of Construction Tech., Goyang 411-712, Korea. jwchoi@kict.re.kr)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 (Dept. of Civil & Environ. 1271 Sa-3-dong Sangnok-gu, Ansan, 426-791, Korea.)

***한양대학교 건설환경공학과 (Corresponding Author: Sung Bum Yoon, Dept. of Civil & Environ. 1271 Sa-3-dong Sangnok-gu, Ansan, 426-791, Korea. sbyoon@hanyang.ac.kr)

보를 교환하며 상호작용이 고려되어 교대로 해를 구하게 된다. 이러한 결합모형은 다방향 불규칙과의 경우, 선형과 이론으로부터 산정되는 잉여응력에 문제점이 있으며(Choi et al., 2009), 기본적으로 시간평균으로 유도된 흐름모형의 특성상, 흐름의 돌발적인 발생이나 변화를 해석하는데 한계가 있다. 이와 다르게, 파랑과 흐름을 동시에 해석하는 Boussinesq 방정식 모형은 잉여응력을 별도로 산정하지 않고 지배방정식의 비선형항을 통해 자동적으로 고려되므로 잉여응력의 문제점을 피할 수 있으나, 계산시간의 부담이 큰 단점이 있다. 그러나 파의 위상을 포함하는 primitive variable을 풀기 때문에 돌발적인 이안류 발생의 해석에 유리하다(윤 등, 2010). 수치모형을 이용한 연구 이외에, Hammack et al.(1991), Haller et al. (2000)와 Dronen et al. (2002) 등과 같은 수리실험을 통한 연구도 찾아 볼 수 있으며, MacMahan et al.(2004a,b) 등과 같은 현장관측을 통한 연구도 수행되어 있다.

대부분의 기존연구는 이안류의 발생환경을 기본조건으로 하여 발달하는 이안류의 수평 및 수심방향의 흐름특성을 그 연구대상으로 삼고 있다. 따라서 발생 메커니즘을 통한 환경조건의 학문적 이해는 존재하지만, 안전사고로 이어질 수 있는 실제의 돌발적이고 불규칙한, 강한 이안류의 발생시점 및 장소를 예측하는 것은 매우 어렵다. 특히, 해운대와 같이 등글게 들어간 만(pocket beach)의 경우, 만내로 진입하는 파랑은 해안 양쪽으로 비스듬하게 굴절되어 입사하는 파랑에 의해 서로 마주보는 방향으로 2종류의 연안류를 발생시키고, 이 2가지 연안류가 만나게 되는데, 이때 위에서 언급한 기존 이안류의 발생 메커니즘과 결합되게 되면 외해 쪽으로 더 강한 이안류를 발달시키게 된다.

본 연구에서는 기존 이안류를 연구하기 위해 사용되었던 수치모의 기법가운데 가장 발달된 모형가운데 하나라고 판단되고, 파의 위상 분해 능력을 갖추고 있어 돌발적 이안류를 해석할 수 있을 것으로 기대되는 Boussinesq 방정식 모형인 FUNWAVE(Wei et al., 1995; Kirby et al., 1998; Chen et al., 1999; Chen et al., 2000; Kennedy et al., 2000; Chen et al., 2003; Johnson and Pattiaratchi, 2006)를 이용하여 해운대의 연안흐름을 수치모의하였다. 파랑유도 연안흐름가운데 해안의 직각방향으로 발달하여 안전사고의 원인이 될 수 있는 돌발적 이안류에 관심을 집중하여 그 결과를 분석하였다. 해운대 연안흐름에 관련된 관측자료는 현재 관측이 진행 중이므로 아직 사용할 수 없고 수리모형실험 결과도 매우 정성적인 것만 공개되어 있으므로, 현장 적용을 위해 parameterization을 통한 정량적인 검증은 불가능한 상태이다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 수치모의 결과를 통하여 해운대에서 돌발적으로 발생하는 이안류의 특성을 이해하고, 앞으로의 관측이나 수리모형실험에 큰 보탬이 될 것으로 판단된다.

2. 수치모형

본 연구에 사용된 수치모형인 FUNWAVE는 유체흐름과 파

랑을 동시에 계산할 수 있는 Wei et al.(1995)에 소개된 비선형 Boussinesq 방정식을 그 지배방정식으로 사용한다. 이 비선형 Boussinesq 방정식은 기본적으로 3차원 Euler 방정식으로부터 비회전 가정과 완화된 정수압분포의 천해 가정을 이용하고 수심 적분하여 유도되며, 자유수면 변위와 순간 유속을 미지수로 위상을 포함함 비선형 파랑해석을 목적으로 사용되어 왔다. 그러나 Chen et al.(2003)은 비회전성 가정으로 유도된 이 지배방정식의 운동방정식에 부분적 회전을 고려할 수 있도록 추가항을 첨가하여 개선된 모형을 개발하였다. 지배방정식의 연속방정식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서,

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

그리고

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

여기서 g 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, 바닥마찰효과를 나타내는 항이며, FUNWAVE는 이 항들을 산정하기 위하여 모형들을 포함하고 있다(Kirby et al., 1998; Chen et al., 1999; Chen et al., 2000; Kennedy et al., 2000). 또한, 내부조파 모형을 이용한 불규칙과의 조파를 위해 스펙트럼의 각 성분에 무작위(random) 위상을 주고 선형 중첩한 자유수면 시계열을 계산하여 조파하게 된다(Wei et al., 1999; Johnson and Pattiaratchi, 2006; Choi et al., 2009). 이 모형은 그 결과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 소개되어 있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

3. 모형 set-up

수치모의에 사용된 해운대 연안지형을 Fig. 1에 나타내었다. 수치모의를 위해서 임의로 좌표원점을 정하였으며, x축을 북에서 서쪽으로 4도 기울어진 방향으로 설정하여 지형을 다시 구성하였다. 격자는 $\Delta x = 2.0$ m 그리고 $\Delta y = 3.0$ m로 총 948,600개의 격자를 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 임의의 지형을 만들어 주기적 경계조건을 사용할 수 있도록 하였다. 이 주기적 측면 경계조건을 이용하기 위하여 앞에서 언급한 좌표축의 회전이 필요했으며, 이 조건을 사용하므로 측면에서 발생하는 파랑회절에 따른 오류를 제어하고 계산영역을 줄일 수 있었다. Fig. 1에 나타낸 점선(A, B, C, D)들은 수치계산 결과 분석을 위해 임의로 설정한 측정선으로 가능한 연안지형의 등수심선 및 해안선에 대하여 직각방향(cross shore direction)으로 일직선이 되도록 설정하였다. 그 위치로 A선(array A)은 근처 등수심선 및 해안선들이 평행하게 보이는 곳, B선(array B)과 D선(array D)은 연안방향(longshore direction) 좌우에 비하여 지형이 상대적으로 낮은 곳 (rip channel의 가능성이 있는 곳), C선(array C)은 연안방향 좌우에 비하여 지형이 상대적으로 높은 곳에 설정하였다.

본 연구에서는 이안류가 주로 발생하는 것으로 알려진 S 파향

Fig. 1. Topography of Haeundae beach for numerical simulation and numerical gauge array locations A, B, C and D (unit : m).

Fig. 2. Input frequency-directional spectrum with a significant wave height $H = 1.5$ m, a peak frequency $f = 0.1$ Hz, a peak direction $\theta = -4$ deg. (i.e., waves from south to north) using JONSWAP spectrum for frequency distribution and cosine-power spreading function for directional distribution.

에 대하여 수치모의를 실시하였다. S 파향의 유의파고 1.5 m, 첨두주기가 10초인 다방향 불규칙파를 조파하기 위하여 JONSWAP 주파수분포와 cosine-급수 방향분포함수를 이용하여 주파수-방향 스펙트럼을 Fig. 2와 같이 구성하였다. JONSWAP 첨두증폭계수 (peak enhancement parameter)는 3.3을, 방향 집중도 계수는 15를 사용하였다. 참고로 S 파향을 재현하기 위해 스펙트럼의 첨두방향이 -4도로 구성된 것은 앞에서 언급한 것처럼 지형을 회전했기 때문이다. 이렇게 구성된 스펙트럼을 동일한 파랑에너지를 갖는 2,400개의 파성분으로 분리하여 무작위(random)위상을 주어 조파하였다. 이와 동일하게 유의파고 2.5 m, 첨두주기 10초인 스펙트럼을 구성하고 이 불규칙파를 조파하여 수치모의를 추가 실시하여 수리모형 실험과 비교하였다. 수치모의를 위한 시간격자는 0.1초로 하였다. 참고로 조파성분의 최단파는 약 3.85초의 주기를 가지며, 선형 분산관계식에 따르면 수심 18m에서 약 23m의 파장을 갖는다. 연안흐름에 매우 중요한 역할을 하는 바닥마찰항의 계수는 0.003을 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 수리모형실험과의 정성적 비교

앞에서 이미 언급한 것처럼 본 연구를 위해 사용된 FUNWAVE 모형은 파랑유도 연안흐름을 수치모의하는 데 충분히 검증된 모형이다. 모형을 구동하기 위해 필요한 파라미터들, 특히, 연안류의 강도에 매우 중요한 영향을 주는 바닥마찰계수의 parameterization을 위해서, 그리고 관심영역을 수치모의하기 위해 설정한 경계조건들의 합리성을 검증하기 위해서 신뢰할 만한 정량적 실험자료나 관측자료와의 비교가 필요하다. 그

러나 아직 충분히 검증된 현장 관측자료들이 전무한 실정이고, 정량적인 실험결과도 부족하다. 다만, 해운대해수욕장 연안정비사업 기본설계용역 보고서(부산광역시 해운대구, 2009)에 해운대 연안흐름의 수치모형실험에서 측정한 정성적인 결과가 있어, 본 연구의 수치모의 결과와 비교하여 정성적 타당성을 확인해 보았다.

이 절에서 제시하고 있는 수치모형실험 및 수치모의는 S 파향의 유의파고 2.5 m, 첨두주기 10초인 다방향 불규칙파를 대상으로 수행되었다. 우선 수치모의로부터 얻어진 자유수면변위와 유의파고의 평면분포를 Fig. 3에 제시하였다. 자유수면변위 분포는 목표파를 발생시킨 후로부터 60분이 경과된 후의 결과이며, 유의파고분포는 60분경과 후 300초 동안의 파랑변위를 이용하여 계산한 결과이다. 불규칙파의 유의파고를 계산하기 위하여 첨두주기를 기준으로 수백개 파에 해당하는 시

계열을 이용하는 것이 일반적이지만, 시간변화에 따라 발 달하는 천이상태 흐름의 영향을 받아 변형하는 파고분포를 얻기 위해 300초 시계열의 분산을 이용하여 다음과 같은 zeroth-moment wave height를 계산하여 유의파고로 간주하였다.

$$H_{sig} = 4.0\sqrt{\overline{\eta^2}} \quad (5)$$

여기서 η 는 계산된 자유수면변위, $(\overline{\quad})$ 는 300초 시간평균이다. 이렇게 나타낸 Fig. 3은 비선형성을 포함한 다방향 불규칙파의 전파 및 변형특성을 매우 잘 보여주고 있다. 특히, 자유수면변위 분포를 나타낸 Fig. 3(a)에서 약 $x = 750$ m, $y = 600$ m에 위치한 수중천퇴에 의하여 굴절, 전파되는 파랑변형이 잘 나타나 있다. 그리고 파고분포를 나타낸 Fig. 3(b)로 부터 지형에 의해 발생하는 파랑변형이전인 상대적 심해에서도 주된 파랑진행의 횡방향으로 불규칙한 파고분포를 갖는다는 다방향 불규칙파의 특성을 확인할 수 있다.

S파향, 유의파고 2.5 m, 첨두주기 10초의 불규칙파가 지속적으로 해운대 연안으로 전파될 때, 발생하는 파랑유도 연안흐름의 수치모형실험 및 수치모의 결과를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 수치모의 결과인 Fig. 5(a), (b) 및 (c)는 조파시작

Fig. 3. Plane distributions of (a) free surface displacement and (b) significant wave height (m) resulted from $t = 60$ min after wave generation begins (incident = 2.5 m).

Fig. 4. Vector plot of wave-induced currents resulted from a laboratory experiment where the shading indicates the bathymetry (Busan Metro City - Haeundae District, 2009).

Fig. 5. Vector plots of wave-induced currents obtained at (a) $t = 15$ min, (b) $t = 30$ min, and (c) $t = 45$ min after wave generation begins (incident $H_{sig} = 2.5$ m).

후, 각각 15분, 30분, 45분경과 후 300초 동안의 결과를 평균하여 계산된 유속성분을 도시한 것이다. 지속적으로 파랑이 해안으로 전파 및 변형, 특히 연안에서 쇄파되므로, 파랑 잉여운동량 유량의 변화량은 평균적으로 일정 방향성을 가지게 되고, 이로부터 파랑유도 연안흐름을 발달시키게 됨을 알 수 있다. Fig. 4에 나타난 수리모형실험 결과와 비교해 보면, Fig. 5(a)에 나타난 연안흐름의 양상과 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 약 $x = 750$ m, $y = 600$ m에 위치한 수중천퇴에 의해 발생된 파랑유도류(Choi et al., 2009)가 상대적으로 수치모의 결과에서 더 강한 결과를 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고, 이 비교로부터 본 수치모의의 결과가 정성적으로나마 해운대에서 발생하는 연안흐름을 잘 재현하고 있다고 판단할 수 있다. 참

고로 본 수치모의는 조파 시작 45분 경과 후 Fig. 5(c)와 같은 완전히 발달한 흐름양상에 도달하였다.

4.2 돌발적 이안류

앞 절의 수치모의는 유의파고 2.5m, 침투주기 10초의 S방향의 파가 지속적으로 해운대 연안으로 전파되는 경우 매우 강한 이안류가 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 해안가에서 3.0 m 이상의 파랑이 관찰되는 상황에서 해수욕이 진행될 수는 없을 것으로 판단되므로, 안전사고를 발생시킬 가능성이 있는 이안류를 재현하기 위해, 해수욕이 가능하리라 판단되는 유의파고 1.5 m, 침투주기 10초의 S방향 파에 대하여 수치모의를 추가적으로 수행하고 그 결과를 분석하였다.

Fig. 6에 목표파를 발생시키고 60분이 경과된 후의 자유수면변위 분포와 60분경과 후 300초 동안의 파랑변위를 이용하여 계산된 유의파고 분포를 도시하였다. 앞 절에서 제시한 수치모의의 결과와 같이, 비선형성을 포함한 다방향 불규칙파의 전파 및 지형 등에 의한 변형특성을 잘 보여주고 있다. 추가로 Fig. 6(a)에 쇄파대를 제시하였다. 이 쇄파영역은 300초 시물레이션 시간에 대하여 0.5%이상 쇄파가 발생하는 영역을 쇄파영역으로 간주하여 도시한 것이다.

Fig. 7에 조파시작 후, 각각 25분, 60분, 95분경과 후 300초 동안의 결과를 평균하여 계산한 유속성분을 도시하여 지속적인 파랑 전파 및 변형의 영향으로 발달되는 파랑유도 연안흐름을 나타내었다. Fig. 5에 나타난 2.5m 유의파고의 경우보다 약하고 느리게 발달되는 것을 알 수 있다. 특히, $y = 700$ m와 1,250 m 정도의 위치에서 해안가로부터 이안류가 발달되는 것이 관찰된다. 이 위치는 앞에서 언급된 수치모의를 위해 설정한 4개의 관찰 array 가운데, 이안류 수로(rip channel)가 존재할 것으로 예측했던 B와 D의 위치이며, 이 위치의 파고분포를 Fig. 6에서 확인해 보면 파고가 상대적으로 낮게 분포되어 있

Fig. 6. Plane distributions of (a) free surface displacement and (b) significant wave height (m) resulted from $t = 60$ min after wave generation begins (incident $H_{sig} = 1.5$ m). The broken lines in (a) indicate the region where relatively intense wave-breaking occurs.

Fig. 7. Vector plots of wave-induced currents resulting at (a) $t = 25$ min, (b) $t = 60$ min, and (c) $t = 95$ min after wave generation begins (incident $H_{sig} = 1.5$ m).

음을 확인할 수 있으며, 쇄파영역 분포로부터도 쇄파가 (각 위치의 좌우에 대하여) 상대적으로 해안선에 가까운 곳에서 일어나는 위치임을 알 수 있다. 참고로 본 수치모의는 조파 시작 95분 경과 후 Fig. 7(c)와 같은 완전히 발달한 흐름양상에 도달하였다. 이제 4개의 관찰 array에서 추출한 수치모의 결과를 자세히 살펴보기로 한다.

Fig. 8에 앞에서 언급한 4개의 관찰 array A, B, C, D 위치에 대하여 수치모의 결과로부터 보간하여 추출한 $t = 75, 80, 85, 90$ 분에서의 자유수면 변위와 유의파고를 지형분포와 함께 도시하였다. 수심의 감소로 변형되는 비선형파의 파형과 불규칙파의 쇄파로 인하여 감소하는 파고분포를 볼 수 있다. 지형분포를 살펴보면 일반적으로 직선헌변에서 발달하는 bar 형성이 뚜렷하게 드러나지는 않는데 이는 수심자료의 정밀도가 떨어지는 것일 수도 있다. 다른 array에서 추출된 파고분포에 비하여 array B에서 관찰되는 5분 간격의 파고분포는 상대적으로 강한 비정상성(unsteadiness)을 보인다. 이는 이안류를 포함하는 연안에 직각방향 흐름의 비정상성에 의한 파랑변형이라고 판단되며, 이는 다음 그림(Fig. 9(b)의 두 번째 패널)에 나타난 흐름분포를 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 9에는 array A, B, C, D 위치에서의 평균수면 ($\bar{\eta}$), 연안직각방향 유속(cross shore velocity, $\bar{V}_{cs}$), 연안방향 유속(longshore velocity, $\bar{V}_{ls}$)을 지형분포와 함께 도시하였다. 그림에 나타난 값은 수치모의 결과로부터 시간 $t = 80, 85, 90, 95$ 분에서 300초 동안의 값을 각 array 위치에 대하여 보간, 추출, 평균하여 얻었다. 먼저, 각 array에 나타난 평균수면은 잘 알려진 setup과 setdown의 분포를 잘 나타내고 있다. 연안직각방향(cross shore direction) 유속의 양의 값은 각 array 위치

에서 해안선을 향하는 흐름을 나타내고, 음의 값은 외해를 향하는 흐름을 나타낸다. 연안방향(longshore direction) 유속의 양의 값은 각 array 위치에서 서쪽 방향으로 흐르는 흐름을, 음의 값은 동쪽 방향으로 흐르는 흐름을 나타낸다. Array B와 C에서 관찰되는 유속성분의 시간적 변동이 다른 array의 유속성분에 비해 상대적으로 크며, 특히 파랑전파방향의 순, 역방향 흐름을 나타내는 연안직각방향 유속은 파랑변형에 영향을 주므로 Fig. 8에 나타난 파고의 시간적 변동에 영향을 주는 것으로 판단된다.

Fig. 9에 나타난 음의 값을 갖는 연안직각방향 유속성분이 외해로 향하는 흐름을 나타내므로 이 흐름을 이안류라고 판단할 수 있을 것이다. Array B에서 시간적인 요동이 있기는 하지만 상대적으로 외해 쪽으로 흐르는 이안류가 관찰된다. 그러나 그 강도가 약하고, 5분 평균된 유속값으로 안전사고를 일으킬 만한 돌발적 이안류의 가능성을 판단하기는 어려워 보인다. 따라서 20초 평균 유속값을 이용하여 각 array에서의 유속분포를 다시 도시하여 살펴보았다. Fig. 10은 array A, B, C, D 위치에서의 20초 평균 수면변위 ($\langle \eta \rangle$), 연안직각방향 유속(cross shore velocity, $\langle V_{cs} \rangle$), 연안방향 유속(longshore velocity, $\langle V_{ls} \rangle$)을 지형분포와 함께 도시한 것이다. 앞에서와 같이 수치모의 결과로부터 시간 $t = 80, 85, 90, 95$ 분에 각 array 위치에 대하여 보간, 추출, 평균하여 그 값을 얻었다. 20초 평균 수면변위는 300초 평균 수면변위와 다르게 시간에 따른 심한 변동을 보인다. 그에 비해 연안류를 나타내는 20초 평균 연안방향 유속성분 $\langle V_{ls} \rangle$ 는 array B의 것을 제외하고는 300초 평균 연안방향 유속성분 $\bar{V}_{ls}$ 와 비슷한, 어느 정도 일관된 방향성을 나타내고 있다. 그리고 이안류의 크기를 평가할 수 있는

Fig. 8. Free surface displacement (top panels), significant wave height (middle panels) and bathymetry (bottom panels) along (a) array A, (b) array B, (c) array C, and (d) array D at $t = 80$ min (.....), $t = 85$ min (—), $t = 90$ min (—), $t = 95$ min (---) (incident $H_{sig} = 1.5$ m).

Fig. 9. Cross-shore distribution of 5 min-averaged surface elevation (top panels), cross shore velocity (first middle panels), longshore velocity (second middle panels) and bathymetry (bottom panels) along (a) array A, (b) array B, (c) array C, and (d) array D at $t = 80$ min (·····), $t = 85$ min (—), $t = 90$ min (—), $t = 95$ min (---)(incident $H_{sig} = 1.5$ m).

Fig. 10. Cross-shore distribution of 20 sec-averaged surface elevation (top panels), cross shore velocity (first middle panels), longshore velocity (second middle panels) and bathymetry (bottom panels) along (a) array A, (b) array B, (c) array C, and (d) array D at $t = 80$ min (·····), $t = 85$ min (—), $t = 90$ min (—), $t = 95$ min (---)(incident $H_{sig} = 1.5$ m).

Fig. 11. Time history of a wave height (top panels), 20 sec-averaged cross shore velocity (first middle panels) and longshore velocity (bottom panels) at 50 m from the shoreline along array A (· · · ·), array B (—), array C (—), and array D (—) (incident $H_{sig} = 1.5$ m).

연안직각방향 유속($\langle V_{cs} \rangle$) 분포는 시간에 따른 심한 변동이 관찰된다. 연안직각방향 유속($\langle V_{cs} \rangle$) 분포가운데 array B의 경우, $t = 85$ min일 때 해안선에서 80~110 m 떨어진 구간에서 0.5 m/s를 초과하는 돌발적 이안류가 발생하고, 5분 뒤인 $t = 90$ min에는 해안선으로부터 20~60 m 떨어진 수심 1.0~2.0 m 지역으로 이안류 최강 구간이 접근하였으며, 다시 5분 후인 $t = 95$ min에는 이안류가 사라지는 것으로 나타나 이안류의 비정상성이 잘 표현되고 있음을 알 수 있다.

이러한 돌발적 이안류의 발생 주기를 확인하기 위해 다음 그림(Fig. 11)에 해안선으로부터 50 m 떨어진 위치의 유속성분을 시간에 따라 도시하였다. Fig. 11은 array A, B, C, D를 따라 해안선으로부터 50 m 떨어진 위치에서 계산된 수치결과를 이용하여 20초 동안의 수면변위를 이용한 유의파고, 20초 평균 연안직각방향 유속(cross shore velocity, $\langle V_{cs} \rangle$), 연안방향 유속(longshore velocity, $\langle V_{ls} \rangle$)을 시계열로 나타낸 것이다. 여기서 유의파고는 20초 동안의 시계열을 이용하여 다음의 zeroth-moment 파고를 이용하여 산정하였다.

$$H_{m0} = 4.0 \sqrt{\langle \eta^2 \rangle} \quad (6)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 20초 시간평균으로 정의한다. 그리고 앞 절에서 언급했던 유속성분의 음과 양의 값에 따른 방향성은 그대로 유효하다. 즉, 음의 값을 갖는 연안직각방향 유속성분 $\langle V_{cs} \rangle$ 이 외해로 향하는 흐름을 나타내므로 이안류를 나타낸다고 판단할 수 있을 것이다. 그림에 도시된 유의파고 시계열로부터 불규칙파의 시간에 따라 변화하는 파고변화를 알 수 있으며, array A에서 계산된 파고는 다른 array의 경우에 비해 해안선 근처에 가서 강한 쇄파가 발생하기 때문에 대체적으로 크게 나타난다. 연안직각방향 유속성분 $\langle V_{cs} \rangle$ 의 경우, 시간에 따

라 흐름방향이 변화하기도 하는 것을 알 수 있다. 특히, array B에서 추출된 연안직각방향 유속성분 $\langle V_{cs} \rangle$ 의 시계열로부터 순간적으로 0.5m/s가 넘는 이안류 성분이 몇 차례 돌발적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 파고분포 시계열과 비교하면, 상대적으로 낮은 파고가 계산된 array에서 큰 이안류 성분이 관찰됨을 알 수 있다. 연안방향 유속성분 $\langle V_{ls} \rangle$ 의 경우, array B에서 추출된 연안류가 시간에 따라 흐름방향이 변화하는 반면, 나머지 연안류의 방향은 시간에 따른 변동이 관찰되긴 하지만, 전체적으로 일관된 흐름방향이 존재한다.

6. 결론 및 토의

연안의 파랑 및 흐름을 계산하는 데 충분히 검증된 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 하고 파의 잉여에너지가 자동적으로 고려되는 FUNWAVE 모형을 이용하여 해운대 이안류를 포함한 연안흐름을 수치모의하고, 수리모형실험 결과와 정성적으로 잘 일치함을 보였다. 수치모의로부터 이미 알려진 바와 같이 상대적으로 수심이 깊고 쇄파가 적은 지형 즉 연안류 수로(rip channel)를 통하여 이안류가 돌발적으로 발생 혹은 증폭될 수 있음을 확인할 수 있었다.

수치모의 결과를 통해 정성적인 이안류의 특성은 확인할 수 있었으나, 수치모의 결과로부터 제시된 파고 크기에 따른 연안흐름 강도간의 상호관계 등 정량적 해석을 위해서는 경험 파라미터(바닥마찰계수 등)들의 튜닝이 필요하며, 따라서 이를 위한 정량적 수리모형 실험과 현장관측 자료가 필요하다. 또한, 이안류의 통로가 되는 이안류 수로(rip channel)를 더 잘 재현할 수 있는 정밀도 높은 지형자료가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 연안방향으로 수심이 상대적으로 깊은 연안류 수로가 존재하는 곳에서 이안류가 발생할 가능성이 큰 것은

사실이지만, 다방향 불규칙파의 특성상 일정수심에서도 횡방향으로 파고의 불균등성이 존재하며, 수중지형에 의한 파랑 변형이 심해파 특성 및 발달되는 연안류의 영향으로 항상 동일한 장소에서 이안류가 발생한다고 단정할 수는 없다. 또한, 수치해석에서 다루고 있는 다방향 불규칙파는 일정한 스펙트럼과 임의의 무작위 함수를 이용하여 구성된 시계열의 파랑 조건을 지속적으로 조파시켜 시뮬레이션하는 것이다. 따라서, 실제현장의 경우는 시간에 따라 스펙트럼 자체가 변동될 수 있으므로 돌발적 이안류에 관한 심층적 연구를 위하여 심해파랑 및 연안흐름 관측정보를 바탕으로 한 광범위한 수치모의가 필수적이다.

끝으로 본 수치모의의 실제시간 1초를 모의하기 위해 약 3분의 계산시간이 소요되었다. 따라서 실시간 예측을 위해 본 모형을 이용하여 수치모의를 수행하는 것은 아직 현실적으로 어려우므로, 본 연구에서와 같은 수치모형을 이용하여 다양한 시나리오에 대한 해석을 수행한 다음, 그 결과를 실시간 관측 정보와 연계하는 예경보 구축 방안이 현실적 대안으로 고려될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부소관 연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김인철, 이주용, 이정렬 (2010). 해운대 해수욕장의 이안류 발생기구 및 수치모의. 한국해양해양공학학회논문집, 23(1), 70-78.
- 부산광역시 해운대구 (2009). 해운대해수욕장 연안정비사업 기본설계용역 보고서 (제6권 수치모형실험, 제7권 수리모형실험).
- 윤성범, 배재석, 박원경, 최준우 (2010). 해운대 이안류 발생 역학과 수치모의 기법 분석. 한국해양해양공학학회 학술발표논문집, 19, 121-124.
- 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., Lim, C.H., Lee, J.I. and Yoon, S.B. (2009). Evolution of waves and currents over a submerged laboratory shoal. Coastal Engineering, 56, 297-312.
- Choi, J. and Yoon, S.B. (2011). Numerical simulation of nearshore circulation on field topography in a random wave environment. Coastal Engineering (in press).
- 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.
- Dronen, N., Karunarathna, H., Fredsoe, J., Sumer, B.M. and Deigaard R. (2002). An experimental study of rip channel flow. Coast. Eng., 45, 223-238.
- Haas, K., Svendsen, I., Haller, M. and Zhao, Q. (2003). Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems. J. Geophys. Res., 108 (C7), 3217.
- Haller, M., Dalrymple, R. and Svendsen, I. (2002). Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip channels. J. Geophys. Res., 107 (C6), doi:10.1029/2001JC000955.
- Hammack, J., Scheffner, N. and Segur, H. (1991). A note on the generation and narrowness of periodic rip currents. J. Geophys. Res., 96 (C3), 4909-4914.
- Johnson, D. and Pattiaratchi, C. (2006). Boussinesq modelling of transient rip currents. Coastal Engineering, 53, 419-439.
- MacMahan, J.H., Reniers, A.J.H.M., Thornton, E.B. and Stanton, T.P. (2004). Infragravity rip current pulsations. J. Geophys. Res., 109, C01033.
- MacMahan, J.H., Reniers, A.J.H.M., Thornton, E.B. and Stanton, T.P. (2004). Surf zone eddies coupled with rip current morphology. J. Geophys. Res., 109, C07004.
- 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, 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, 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.
- Wei, G., Kirby, J. and Sinha, A. (1999). Generation of waves in Boussinesq models using a source function method. Coast. Eng., 36, 271-299.
- Yu, J. and Slinn, D. (2003). Effects of wave-current interaction on rip currents. J. Geophys. Res., 108 (C3), 3088, doi:10.1029/2001JC001105.

원고접수일: 2011년 1월 31일

수정본채택: 2011년 3월 21일

게재확정일: 2011년 7월 23일