

큰 조차에 따라 변화하는 지형의 대천 해수욕장 이안류 발생 특성 수치모의 연구 A Numerical Study of Rip Current Generation Modulated with Tidal Elevations at the Daecheon Beach

최준우*
 Junwoo Choi*

요 지 : 서해안에서 대규모 조차에 의해 변화하는 연안 수심의 영향으로 서로 다른 원인으로 생성되는 이안류 발달 특성을 수치모의 결과를 이용하여 검토하였다. 대천 해수욕장 앞바다의 수심자료를 이용하여 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 하는 FUNWAVE 모형으로 수치모의를 수행하였다. 대천 해수욕장 앞바다는 간조에서는 수면 위로 드러나는 바위 섬이 되고, 조위가 상승하면 수중의 암초가 되는 간출암들이 존재하는 등의 복잡한 지형이 관찰된다. 이를 포함한 조차에 의해 변화하는 수심지형의 영향으로 변형되는 파의 횡방향 비균등성에 의해 발생하는 이안류가 잘 재현되었다. 그 결과를 기반으로 조위에 따라 발생 가능한 이안류의 특성을 기술하였다.

핵심용어 : 이안류, 대천 해수욕장, 조위, 간출암, 수치모의, FUNWAVE

Abstract : In order to investigate the generations of rip currents modulated with the tidal elevations at a mega-tidal beach at the West Sea coast, numerical simulations of rip currents over the topography of the Daecheon beach were performed by using a Boussinesq-type wave and current model, FUNWAVE. The mega-tidal coast includes rocky outcrops (i.e., reefs) lying over or under the water surface according to the tidal elevations in the offshore and nearshore bathymetry. The offshore topographically-controlled rip currents were well reproduced due to the alongshore non-uniformities transformed by the tide-modulated topography. This study addressed the generation types of rip currents to occur at the mega-tidal coast with the tide-modulated outcrops and reefs.

Keywords : rip current, daecheon beach, tidal elevation, outcrops (reefs), numerical simulation, FUNWAVE

1. 서 론

이안류는 모든 수면파가 들어오는 자연 연안에서 발생이 가능하며 해수욕장에 나타나는 이안류는 심각한 수준의 재난으로 인식되고 있다. 우리나라에 비해 해수욕객 인구 및 해변의 규모가 큰 미국 및 호주에서는 이안류에 의한 피해가 매우 심각한 수준으로, 이안류 사고로 매년 수십 명의 사망자가 발생하고 있다(Gensini and Ashley, 2010; NOAA, 2022). 우리나라에서도 해운대 해수욕장에서 2009년에 발생한 이안류에 의한 대규모 인명사고 보도 이후 매년 수십에서 수백 명이 이안류 사고로부터 구조 조치되고 있다.

일반적으로 이안류는 연안 수심지형, 비선형파의 상호작용 및 평균자유수면의 불안정성(instability) 등에 기인하여 파랑 에너지가 연안방향으로 강한 비균등성이 형성될 때 발생하는 것으로 이해되고 있다(Bowen, 1969; Darlymple, 1975, 1978; Tang and Dalrymple, 1989). 즉, 연안방향을 따라 부분적으

로 파랑 에너지가 낮아지면, 파랑유도 잉여운동량 플럭스(wave-induced excess momentum flux)의 기울기가 발생하고, 그 낮아진 영역을 통하여 외해방향으로 강한 흐름이 발생하게 된다는 것이다(Choi et al., 2012). 최근에는 위상을 포함한 쇄파 스케일의 파력에 따른 연안흐름 연구가 진행되었고(Clark et al., 2012; Feddersen, 2014; Johnson and Pattiaratchi, 2006; Peregrine, 1998, 1999), 다양한 원인에 의해 끊어진 파봉선을 갖는 파의 쇄파에 따른 변동이 이안류를 발생시키는 근본적인 메커니즘(Peregrine, 1998)으로 인식되기 시작했다(Johnson and Pattiaratchi, 2006; Clark et al., 2012; Choi et al., 2015; Choi, 2015).

이안류를 그 원인에 따라 분류한 Darlymple et al.(2011)과 Castelle et al.(2016)은 이안류를 지형에 의한 이안류와 입사파 특성에 의한 이안류로 크게 나누고 있다. 지형에 의한 이안류는 다시 쇄파대 밖의 외해에 존재하는 수중 암초 및 계곡의 영향으로 발생하는 이안류(Long and Özkan-Haller,

*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원(Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0772, jwchoi@kict.re.kr)

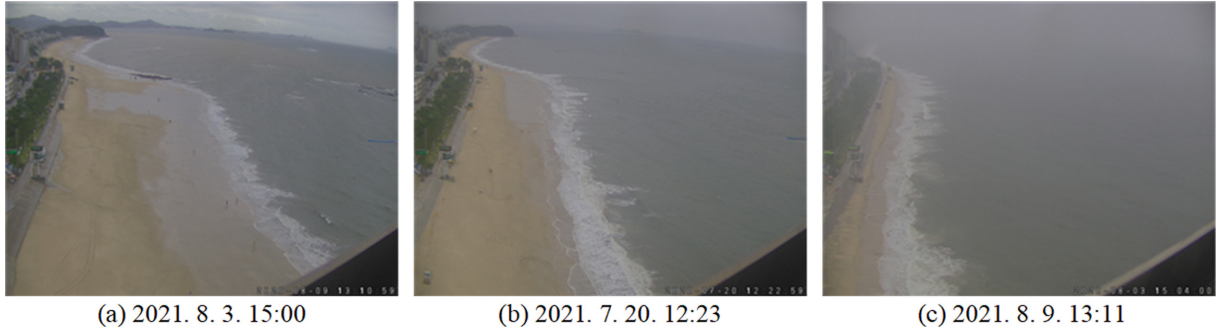


Fig. 1. Snapshots of the surfzone modulated by tidal elevations (a) DL+1.5m, (b) DL+4.0m, and (c) DL+6.0m recorded by video-monitoring of the Daecheon coast (KHOA, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2021).

2005, 2016), 해안선 근처 사주(sandbar) 형상에 의해 발생하는 이안류, 그리고 만곡 해안 측면에 위치한 자연 또는 인공적 돌출지형(곶, headland)의 영향으로 발생하는 이안류로 나눌 수 있다. 입사파 특성에 의한 이안류로는 다방향 불규칙파의 위상 간섭 및 상호작용으로 발생하는 돌발 이안류, 강한 연안류의 요동현상으로 발생하는 이안류, 외중력파에 의해 발생하는 이안류로 나눌 수 있다. 그러나 실제 해안에서는 상기 기술된 원인들의 단일 영향뿐만 아니라 복합적인 영향으로 이안류가 발생하기도 한다. 예를 들어, 수치모의 및 관측 자료분석 등 다양한 기법을 이용한 연구(Yoon et al., 2012; Choi et al., 2012; Choi et al., 2013; Shin et al., 2014)를 통해 해운대 해수욕장의 대규모 이안류는 외해의 수중 암초의 영향으로 두 방향의 파가 위상 간섭 및 상호작용하여 연안방향으로 비균등성이 형성되어 발생함을 주장한다. 나아가, 한 해수욕장에서도 여러 원인에 의해 이안류가 발생하며 복합적인 발생 조건들이 동시에 작용하기도 한다.

상기 대부분의 이안류 연구는 조차의 영향을 고려하고 있지 않으며, 조차가 큰 해변에서 발생하는 이안류에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다. Masselink and Short(1993)는 조차가 큰 해변에서 생성되는 이안류는 조차의 영향으로 시간적으로 변화되는 지형에 큰 영향을 받는다고 하였고, 그 후 많은 연구(e.g., Bruneau et al., 2009; Aagaard et al., 1997; Choi, 2022)에서 이안류는 낮은 조위에서 그 유속 강도가 커진다고 기술하고 있다. 이것은 대부분의 해안 단면이 조위가 낮아질 때 완만해 지고 쇄파대 폭이 넓어지기 때문이다. 더욱이 조차가 큰 해변에서의 이안류를 다루고 있는 대부분의 연구(예를 들어, Scott et al., 2014; Castelle et al., 2007; Austin et al., 2010)는 조위에 따라 달라지는 연속된 만달모양 샌드바에 의해 생성되는 이안류를 그 대상으로 하고 있다. 그리고 Choi and Kim(2016)의 대천 해수욕장의 이안류 수치모의는 평균해면을 기준으로 수행하여 이안류 발생을 연구하였고 조차에 따른 이안류의 변화에 대한 연구는 부재하다.

최근 잦은 태풍 등에 의한 너울 및 풍파로 서해안에서도 여름철 해수욕 기간에 이안류가 자주 관찰되고 있다(KHOA, 2021). Fig. 1은 조위가 (a) DL+1.5m, (b) DL+4.0m, 그리

고 (c) DL+6.0m에 해당하는 각각의 시간대의 대천 해수욕장의 영상자료이다. 영상자료의 연안방향으로 균등하지 않은 쇄파분포를 통해 이안류 발생을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 대천 해수욕장 앞바다의 수심지형 자료를 이용하여 상대적으로 간조(DL+1.5m), 평균해면(DL+4.0m), 만조(DL+6.0m)일 때의 수심에 대하여 각각 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 하는 FUNWAVE 모형으로 수치모의를 수행하였다. 그 결과를 기반으로 각 조위에 따라 변화되는 이안류의 특성을 고찰하였다.

2. 수치모형 및 입력조건

2.1 수치 모형

본 연구에 사용된 수치모형인 FUNWAVE는 Wei et al. (1995)에 소개된 비선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용하며, Chen et al.(2003)이 운동방정식에 부분적 회전을 고려할 수 있도록 추가 항(연직방향 2차 비선형 효과를 포함한 와도)을 첨가하여 유체흐름과 파랑을 동시에 계산할 수 있도록 개선하였다. FUNWAVE는 수치모의를 위한 바닥마찰, 쇄파, 내부조파 및 흡수층에 대한 부가적 모형들을 포함하고 있다(Chen et al., 1999; Chen et al., 2000; Kennedy et al., 2000). 이 모형은 그 결과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 소개되어 있어, 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다. 본 연구에서는 다방향 불규칙파에 따른 연안흐름을 연구한 Choi et al.(2015)에서 사용된 FUNWAVE 버전을 사용하였고, 동일한 경험 파라미터들을 사용하였다. 예를 들어, 바닥마찰 항의 계수는 전체 영역에 대해 일정한 값 $f_w = 0.0012$ 를 사용하였고, 쇄파모형을 위한 파라미터는 $\delta_b = 5.0$, $\eta^{(U)} = 0.35\sqrt{gh}$, $\eta^{(F)} = 0.01\sqrt{gh}$, 그리고 $T^* = 0.5\sqrt{h/g}$ 와 같은 계수 값들을 선택하여 사용하였다. 또한, 해안선 경계조건을 위해 $\delta = 0.02$ 와 $\lambda = 20$ 을 사용하였다.

2.2 수치 격자 및 모형 셋업

수치모의에 사용된 대천 해수욕장의 연안지형을 Fig. 2에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 조위에 따른 이안류의 변

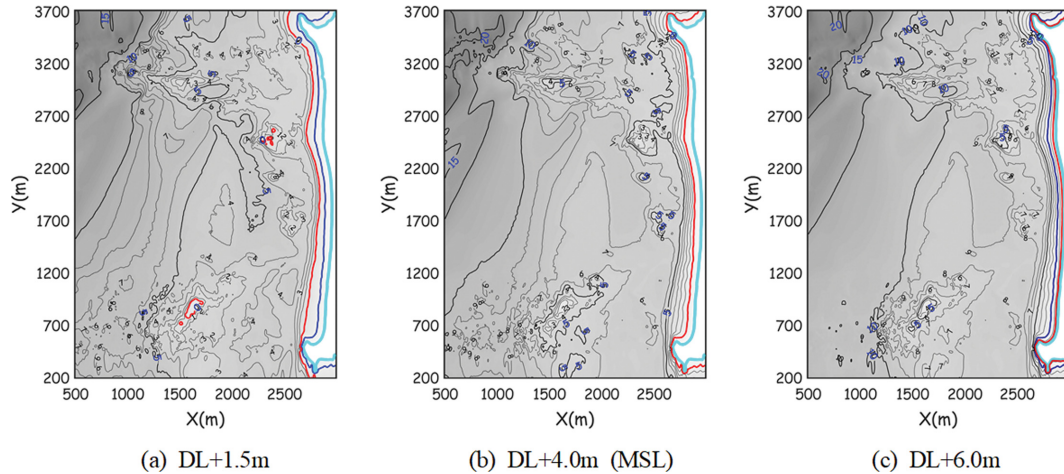


Fig. 2. The bathymetries modulated by the tidal elevations, DL+1.5m (low tide), DL+4.0m (mean sea level, MSL), and DL+6.0m (high tide) of the Daecheon coast. The red line indicates the shoreline of the still water at each tidal level, the blue line indicates the shoreline of the approximated MSL, and the skyblue line indicates the outer boundary of the sand beach.

화를 검토하기 위해, 수치모의에 사용하는 수심지형을 상대적으로 조위가 낮은 DL+1.5m, 평균해면에 가까운 DL+4.0m, 상대적으로 조위가 높은 DL+6.0m를 기준으로 나타내어 각각 제시하였다. 대천 해수욕장은 북측과 남측에 각각 자연 곳에 의해 측면경계가 형성되어 약 3 km의 해안선으로 구성되어 있다. 대천 해수욕장 앞바다 수심지형의 특징으로 간출암과 수중 암초들이 존재한다는 것이다. 특히, 간출암들은 조위가 낮은 경우는 수면 위로 육지가 드러나는 바위섬이 되고 조위가 높은 경우는 수중 암초가 되어 입사파랑 변형에 주요한 영향을 준다. 예를 들어, 상대적으로 간조를 상징한 DL+1.5m를 기준으로 도시한 Fig. 2(a)에서 약 $x = 2400$ m, $y = 2500$ m의 위치와 약 $x = 1600$ m, $y = 800$ m의 위치에 수심이 0인 등수심선(빨간색)으로 표시되는 섬들이 존재함을 알 수 있다. 반면에 평균해면을 상징한 DL+4.0m를 기준으로 도시한 Fig. 2(b)이나 만조를 상징한 DL+6.0m를 기준으로 도시한 Fig.

2(c)의 수심지형에서 이 섬들은 수중 암초들이 된다. 또한, $x = 2400$ m, $y = 2500$ m에 위치한 간출암의 영향으로 보이는 해안선의 전진($y = 2500$ m)으로 대천 해수욕장은 두 개의 만곡해안으로 나누어져 있다. 반면에 일반적으로 이안류 발생과 상호작용하며 변형되는 횡방향으로 굴곡이 있는 형태의 사주 혹은 연속된 반달형 사주 등은 Fig. 2에 제시된 등수심선에서는 확인이 어렵다.

등수심선만으로 확인되지 않는 연안 수심 특성을 살펴보기 위해 Fig. 3에 DL+0.0m를 기준으로 한 대천 해수욕장의 해안단면을 제시하였다. 이 그림에서 간출암이 있는 위치의 해안단면과 앞서 언급한 북측 해안단면과 남측 해안단면을 제시하고 그 평균도 나타내었다. 이 해안단면들을 통해 간출암의 존재를 확인할 수 있었으며, 간출암 외에도 DL+0.0m의 수면에 가까이 위치한 암초들이 존재하는 것이 확인된다. 예를 들어, 약 $x = 1500$ m, $y = 3000$ m의 위치에 수중 암초가

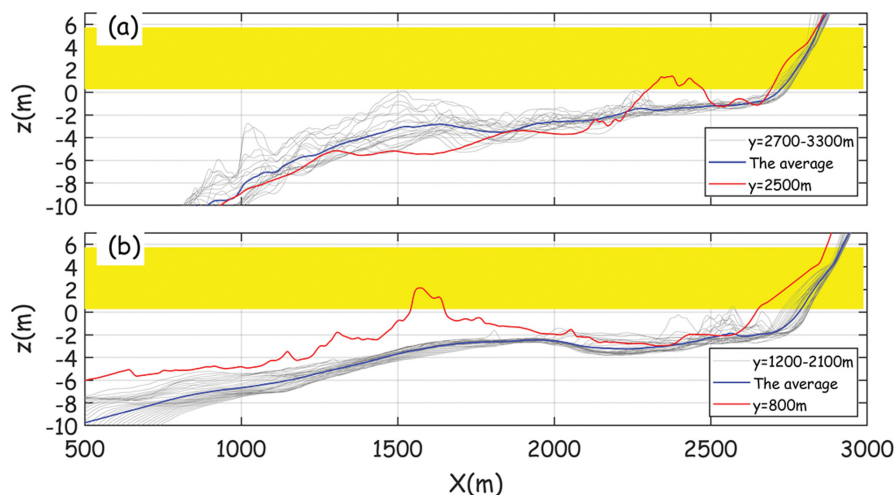


Fig. 3. The cross-shore beach profiles (DL+0m) in the range of (a) $y = 2700 \sim 3300$ m and (b) $y = 1200 \sim 2100$ m of the Daecheon coast shown in Fig. 2. The yellow thick line indicates the approximate range of tidal elevations.

존재함을 알 수 있다. 제시된 해안단면에서 완만한 사주가 존재하는 것으로 보이나 Fig. 2의 등수심선에서는 그 사주들의 형방향 변화가 커 보이지 않으며, 그 영향들은 수치모의 결과를 통해 자세히 기술한다.

수치모의를 위해 임의로 좌표 원점을 정했으며, x 축을 시계방향으로 25도 회전하여 격자를 구성하였고, 격자크기는 $\Delta x = 1.8$ m 그리고 $\Delta y = 3.0$ m로 하고, 3.0 km \times 3.9 km의 영역을 격자로 구축하였다. 이 영역에서 $x = 150$ 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. 일반적으로 주기적 경계조건은 연안흐름 상류의 입력 조건에 대한 부정확성과 내부조파의 불연속성에 대한 오차를 줄이기 위해 사용된다. 이 조건을 사용하므로 측면에서 발생하는 파랑회절에 따른 오류를 제어하고 계산영역을 줄일 수 있다. 수치모의는 조위에 따라 변화하는 이안류의 특성을 재현하기 위해서 이안류 발생이 유리한 조건인 파고 $H_s = 1.4$ m, 그리고 주기 $T_p = 11.0$ s의 S65°W 파향 입사(즉, 해안선 직각 입사)를 이용했으며, 규칙파를 위해서는 $H = 0.9$ m, $T = 11.0$ s, S65°W 파향을 사용하였다. 참고로, 파향은 주어진 수심격자의 직각 입사방향으로 해안선에 직각 방향입사에서 이안류가 잘 발달되는 이유에서 선택되었다. 불규칙파 조건의 경우, 상기 파고와 주기를 갖는 JONSWAP 주파수 스펙트럼 분포와 Mitsuyasu et al.(1975)의 파향 스펙트럼 분포를 사용하여 수치모의를 수행하였다. 각각의 스펙트럼 광협도를 위한 파라미터는 $\gamma = 6.0$ 과 $\theta_o = 10^\circ$ 를 사용하여 이안류 발생에 유리한 상대적으로 매우 협대역의 스펙트럼을 사용하였음을 밝힌다. 참고로, 이안류 예측을 위해 FUNWAVE 영역 밖의 파랑예측에 이용되는 파랑모형(예, SWAN 모형)이 일반적으로 채택하고 있는 JONSWAP 스펙트럼을 사용했음을 밝힌다. 불규

칙파 스펙트럼 격자는 에너지 밀도에 대해 가변격자를 사용하였으며, 주파수 영역은 0.07~0.22 Hz 구간에 대해 25개로 나누고, 방향 영역에 대해 -24~24° 구간에 대해 41개로 나누어 구성하였다. $\Delta t = 0.05$ s의 격자를 이용하여 총 1시간을 수행하였다. 수치모의를 위한 다른 파라미터는 모두 Choi et al.(2015)과 동일한 값을 이용하였다. 상기 선택된 파라미터들은 사전 수치모의를 통해 이안류 발생이 적절히 모의되고 이안류 발생 원인을 설명하기 적합한 조건으로 선택되었다. 특히, 불규칙파 수치모의를 위해 선택된 주파수 및 파향 스펙트럼 광협도는 일반적인 풍파 조건보다는 그 폭이 좁다. 상대적으로 규모가 큰 이안류 발달에 유리한 폭이 좁은 주파수 스펙트럼과 파향 스펙트럼이 선택되었음을 밝힌다.

3. 수치모의 결과

3.1 너울(규칙파) 수치모의

너울의 입사를 상징한 일방향 규칙파 조건($H = 0.9$ m, $T = 11.0$ s)에 대하여 조위에 따라 변화되는 지형을 입력 조건으로 수치모의한 결과를 Figs. 4~6에 제시하였다. Fig. 4에는 상대적으로 간조인 경우를 가정한 조위가 DL+1.5m인 수심 지형에 대한 수치모의 결과를, Fig. 5에는 평균해면인 경우를 가정한 조위가 DL+4.0m인 수심지형에 대한 수치모의 결과를, 그리고 Fig. 6에는 상대적으로 만조인 경우를 가정한 조위가 DL+6.0m인 수심지형에 대한 수치모의 결과를 각각 나타내었다. 각 그림의 (a)에 자유수면 변위를 나타내었고, (b)에 파고분포, 그리고 (c)에 2주기 평균유속 벡터 분포와 유속 강도를 나타내었다. 제시된 분포는 각각 $t = 140T$ 에 해당하며, 참고로, 파고분포는 자유수면 변위 100주기(T) 시계열 결과에 대한 제곱평균제곱근파고(H_{rms})를 제시한 것이다.

Fig. 4에 제시한 간조인 경우를 가정한 조위가 DL+1.5m인

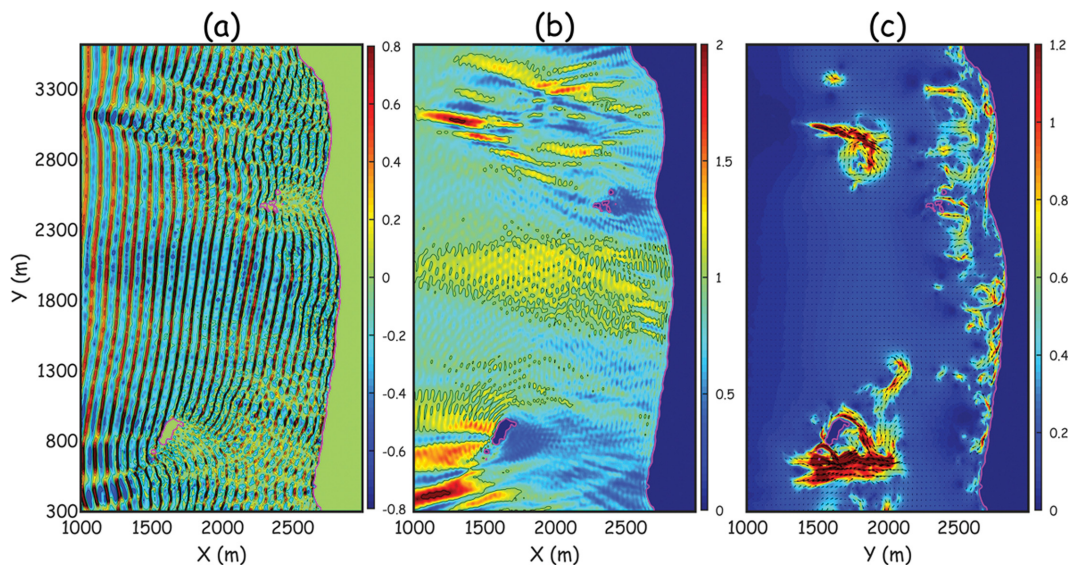


Fig. 4. Numerical simulations of rip currents under the swell incidence ($H = 0.9$ m, $T = 11$ s) at the Daecheon beach with DL+1.5m presenting the distributions of (a) surface displacements (m), (b) wave heights (m) and (c) flow velocities (m/s) at $t = 140T$.

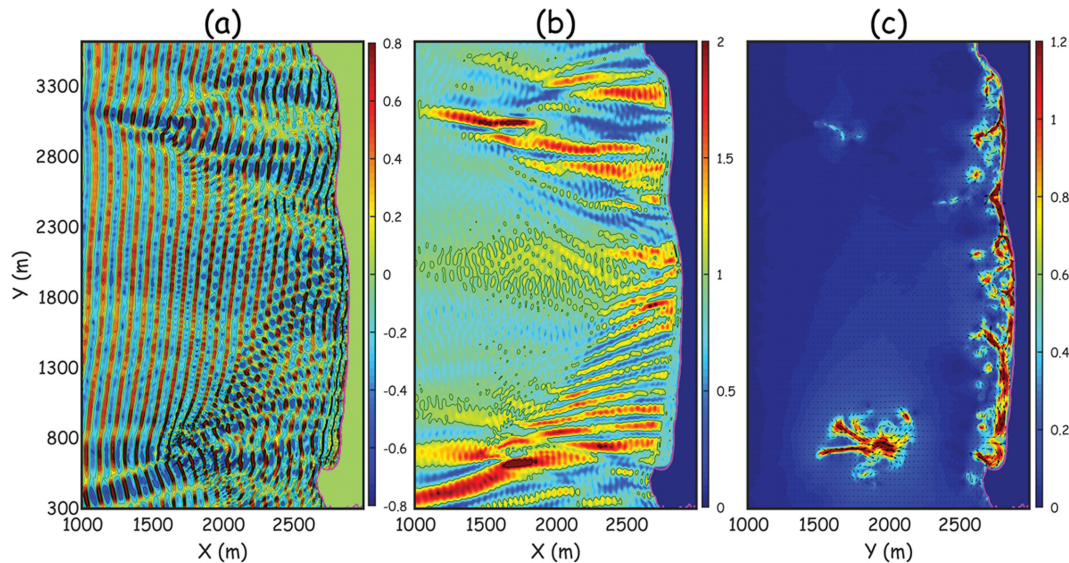


Fig. 5. Numerical simulations of rip currents under the swell incidence ($H = 0.9$ m, $T = 11$ s) at the Daecheon beach with DL+4.0m presenting the distributions of (a) surface displacements (m), (b) wave heights (m) and (c) flow velocities (m/s) at $t = 1407$.

수심지형에서의 자유수면 변위, 파고, 유속벡터 분포를 통해 앞서 언급한 간출암들($x = 2400$ m, $y = 2500$ m; $x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 영향을 확인할 수 있다. 먼저, 조위 DL+1.5m에서 섬이 되는 간출암들은 입사파의 상당부분을 막아 방파제 역할을 하며 그 후면에 회절되는 파랑은 있지만 파고가 낮아짐을 볼 수 있다. 특히 간출암 가운데 상대적으로 먼바다에 있는 남측 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 그 주변의 낮은 수심에 의해 복잡한 회절, 굴절, 천수화 및 쇄파의 파랑변형이 확인되며, 이로 인하여 강한 쇄파 유도류가 발생함도 알 수 있다. 또한, 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)와 그 주변 낮은 수심지형에 의해서도 복잡한 파랑변형과 쇄파로 쇄파 유도류가 발생함을 알 수 있다. 바위섬이 된 간출암들에 의한 파랑 차폐효과와 암초들에 의한 복잡한 파랑변형으로 해안선을 따라 균등하지 않은 파랑 에너지와 쇄파가 형성되기 때문에 이안류를 포함한 복잡한 연안흐름이 발생하게 된다. 그러나 외해에서 쇄파된 후에 에너지 감쇠로 낮아진 파고의 파랑이 입사되었기 때문에 연안흐름 유속강도는 상대적으로 크지 않았다. 참고로, 자세한 연안흐름 특징은 상대적으로 조위가 높은 경우의 수치모의 결과들과 비교하여 다음에 추가로 기술하였다.

Fig. 5에 제시한 평균해면을 가정한 조위가 DL+4.0m인 수심지형에서의 자유수면 변위, 파고, 유속벡터 분포를 통하여, 상대적으로 먼바다의 남측 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 영향으로 복잡한 파랑변형과 연안흐름이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 조위가 DL+1.5m인 수심지형에서는 바위섬이었던 간출암들이 DL+4.0m인 수심지형에서는 수중 암초가 되었다. 따라서 Fig. 4에서 보이던 파랑의 차폐효과는 없어졌고, 수중 암초들의 낮은 수심 효과로 복잡한 굴절, 천수화 및 쇄파의 파랑변형이 확인된다. 수중 암초가 된 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)에 의해 해안을

향한 강한 쇄파 유도류가 발생함도 알 수 있다. 특히, 수면 변위 분포를 나타낸 그림에서 상기 수중 암초가 된 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 북측 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 낮은 수심지형을 통과하며 변형되는 파봉선들을 관찰할 수 있다. 이 수중 암초들에 의해 파고가 상승하는 동시에 파속의 감소로 긴 파봉선으로 전파해 오던 위상이 어긋나며 끊어진 짧은 파봉선의 형태로 변형되어 해변으로 입사하는 것을 알 수 있다. 동시에, 암초들과 주변의 낮은 수심지형에 의해 굴절된 파봉선들이 해안선에 직각으로 입사하는 긴 파봉선들과 서로 만나 교차, 상호간섭하여 Yoon et al.(2012)의 벌집 구조 형태의 비선형 파형이 형성된다. 기술된 파고 상승, 위상의 어긋남 및 상호간섭 등의 파랑변형에 의해 연안방향의 비균등성이 형성되고 이 불균등한 파랑 에너지는 불균등한 쇄파로 이어지게 된다. 이러한 횡방향으로 불균등한 파랑 특성의 결과는 제시된 파고 분포에 잘 나타나 있다. 유속분포를 통해 어긋나고 간섭된 짧은 파봉선들 사이로 노드영역의 낮은 파고분포가 형성되고 이를 따라 여러 위치에서 이안류가 발달하는 복잡한 연안흐름을 확인할 수 있다.

Fig. 6에 제시한 만조를 상정한 조위가 DL+6.0m인 수심지형에서의 자유수면 변위, 파고, 유속벡터 분포를 통하여, 평균해면(DL+4.0m)의 결과와 유사하게 수면 아래의 암초가 된 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 영향으로 복잡한 파랑변형과 연안흐름의 생성을 확인할 수 있다. 평균해면(DL+4.0m)인 경우의 결과에 비해 추가적인 수면 상승에도 불구하고 수중 암초들의 낮은 수심지형의 효과로 복잡한 굴절, 천수화, 위상의 상호간섭 등의 파랑변형이 확인된다. 그러나 남측 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)에 의해 쇄파되어 생성되던 쇄파 유도류는 발생하지 않고 쇄파로 저감되었던 파랑은 높은 파고를 유지하며 해안으로 전파되어 해안선 근처에서 쇄파됨을 알 수 있다. 또한, 평균해면(DL+4.0m)

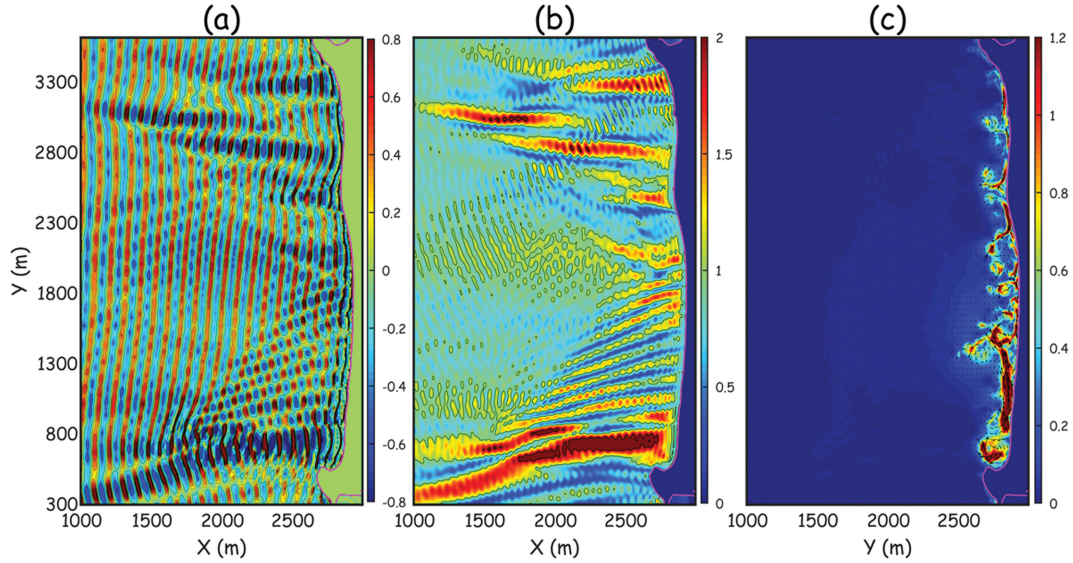


Fig. 6. Numerical simulations of rip currents under the swell incidence ($H = 0.9$ m, $T = 11$ s) at the Daecheon beach with DL+6.0m presenting the distributions of (a) surface displacements (m), (b) wave heights (m) and (c) flow velocities (m/s) at $t = 140T$.

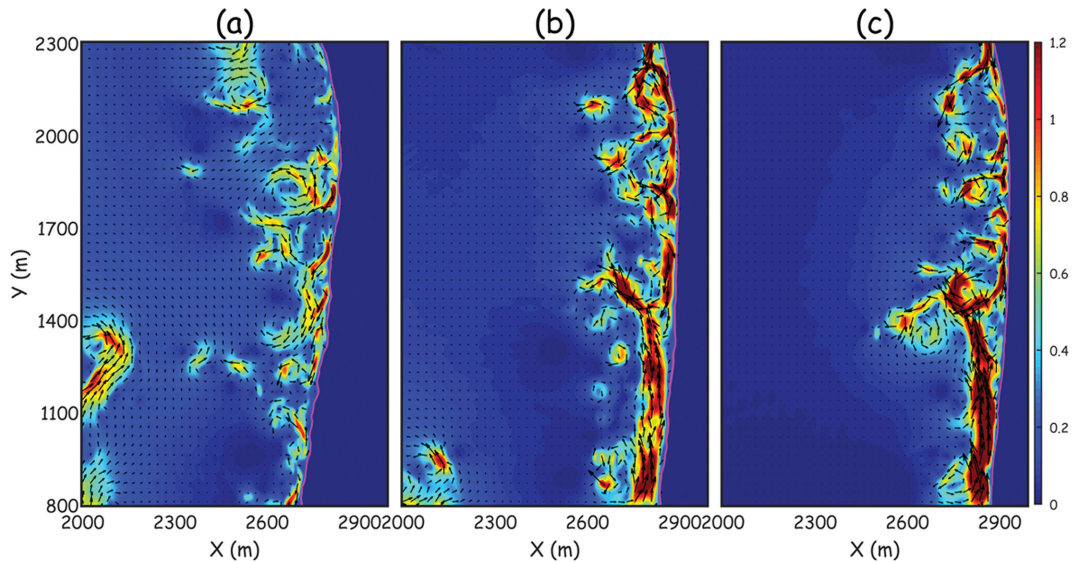


Fig. 7. Numerical simulations of rip currents in the swell incidence ($H = 0.9$ m, $T = 11$ s) presenting the distributions of flow velocities (m/s) of the Daecheon beach with (a) DL+1.5m, (b) DL+4.0m, and (c) DL+6.0m at $t = 140T$.

인 경우의 결과와 마찬가지로, 수면변위 분포를 나타낸 그림에서 상기 수중 암초가 된 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 낮은 수심지형을 통과하며 천수화로 파고가 상승하는 동시에 파속의 감소로 위상이 어긋나며 끊어진 짧은 파봉선의 형태가 되었다. 그리고 굴절된 파봉선들이 다른 긴 파봉선들과 서로 교차, 상호간섭하여 연안방향의 비균등성이 형성되었다. 이 불균등한 파랑 에너지는 불균등한 쇄파로 이어지고, 동시에 짧은 파봉선들 사이 노드영역의 낮은 파고분포에 의해 여러 이안류가 발달하는 복잡한 연안흐름이 확인되었다. 반면에, 평균해면(DL+4.0m)의 결과(Fig. 5)와는 다르게 북측 만곡해안에서의 이안류를 포함한 연안흐름의 유속강도가 낮아졌음을 알 수 있다. 이는 조

위의 상승으로 Fig. 3에 제시한 것과 같이 상대적으로 급해진 해안 단면에 의해 쇄파대가 좁아진 영향이 있다고 판단된다. 그러나 남측 만곡해안에서의 이안류는 평균해면의 결과인 Fig. 5에서의 흐름분포와 비교할 만큼의 이안류가 나타나며 이것은 앞서 언급한 것과 같이 남측 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)에 의해 천수화된 높은 파랑이 간출암 위에서 쇄파되지 않고 해안으로 전파되어 강한 횡방향 불균등성을 만들었기 때문이다.

Fig. 7에 간조를 상정한 DL+1.5m, 평균해면을 상정한 DL+4.0m 그리고 만조를 상정한 DL+6.0m 기준의 수심지형을 이용한 수치모의 결과 중에 대천해변 남측 만곡해면에서 형성된 연안흐름을 확대, 비교하여 제시하였다. 그림에 제시

한 해안 영역은 남측 먼바다에 위치한 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)에 의해 변형되는 입사파의 영향을 받는 영역이다. 간조를 상정한 DL+1.5m의 수심에서는 간출암이 바위섬으로 방파제의 역할을 하여 파랑을 차폐하고, 주변 낮은 수심지형에서 많은 파랑 에너지가 쇄파로 감소되어 해안에 상대적으로 낮은 파고의 파랑이 입사하게 된다. 이 때문에 비록 파랑이 외해로부터 간출암의 영향 없이 입사하는 부분과의 비균등성에 의해 이안류 순환셀과 같은 연안흐름이 발달하지만 상대적으로 그 유속강도가 크지 않다. 평균해면을 상정한 DL+4.0m의 수심에서는 간출암이 수중 암초로 다양한 파랑변형의 원인이 되었다. 특히, 천수화에 따른 파고 상승, 파속차이에 의한 위상 어긋남 및 굴절에 따른 위상 상호간섭 등의 파랑변형에 의해 연안방향의 복잡한 비균등성이 형성된다. 이 때문에 여러 위치에서 크고 작은 이안류 등의 복잡한 연안 흐름이 발생하며, 유속강도가 상대적으로 크게 나타난다. 만조를 상정한 DL+6.0m의 수심에서는 DL+4.0m의 수심지형과 마찬가지로 간출암이 수중 암초로 천수화에 따른 파고 상승, 파속차이에 의한 위상 어긋남 및 굴절에 따른 위상 상호간섭 등의 파랑변형의 원인이 되지만, 간출암 위로 쇄파가 발생하지 않고, 천수화되어 높아진 파고의 파랑이 해안근처까지 입사한다. 이 때문에 상대적으로 급해진 쇄파대의 해안단면 경사에도 불구하고 이안류가 발달하며 복잡한 연안 흐름이 발생하였다. 그리고 DL+4.0m의 수심지형에서 보였던 정도로 이안류의 유속강도가 나타남을 알 수 있다.

첨언하자면, 서론에서 밝힌바와 같이 일반적으로 외해에 특별히 낮은 수심지형이 없는 열린 해안에서 간조보다는 만조의 해안단면 경사가 급하기 때문에 쇄파대가 줄어 이안류의 발달정도가 줄어드는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구의 대천 해변에는 그 앞바다에 간출암 및 암초들의 변화가 심한 낮은 수심지형이 존재하기 때문에 그 영향으로 입사하는 파

랑의 변형에 따른 요인이 쇄파대의 해안단면 경사에 따른 요인보다 지배적으로 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 물론, 북측 만곡 해안에서는 만조시 급해진 쇄파대 단면 경사의 영향으로 연안흐름의 발달이 줄어드는 경향을 보이기도 하였다.

3.2 너울성 풍파(불규칙파) 수치모의

좁은 스펙트럼을 사용하여 너울에 가까운 풍파를 상정한 다방향 불규칙파 조건($H_s = 1.4$ m, $T_p = 11.0$ s)에 대하여 조위에 따라 변화되는 지형을 입력 조건으로 수치모의한 결과를 Figs. 8~10에 제시하였다. Fig. 8에는 간조를 상정한 DL+1.5m 수심지형에 대한 수치모의 결과를, Fig. 9에는 평균해면을 상정한 DL+4.0m 수심지형에 대한 수치모의 결과를, 그리고 Fig. 10에는 만조를 상정한 DL+6.0m 수심지형에 대한 수치모의 결과를 각각 나타내었다. 각 그림의 패널(a)에 자유수면 변위를 나타내었고, (b)에 파고분포, 그리고 (c)에 2주기 평균 유속 벡터 와 유속강도 분포를 나타내었다. 제시된 분포는 각각 $t = 200T_p$ 에 해당하며, 참고로, 파고분포는 자유수면 변위 150주기(T_p) 시계열 결과에 대한 유의파고(H_{mo})를 제시한 것이다.

풍파의 입사를 상정한 다방향 불규칙파 수치모의 결과에서는 외해 경계에서부터 위상 간섭 및 상호작용으로 횡방향으로 끊어진 짧은 파봉선이 입사하고, 따라서 횡방향 파고가 변화하며 입사하는 파랑의 수면변위 분포와 파고 분포를 확인할 수 있다. 여기에 규칙파 수치모의에서 언급한 간출암과 암초들을 포함한 복잡한 외해 지형에 의한 파랑 변형이 더해져 횡방향 비균등성이 형성되어 이안류가 발달하게 된다. 그렇기 때문에 다방향 불규칙파 조건에서 생성되는 이안류의 위치와 발달양상은 너울 조건에서의 이안류 발달 위치와 양상과 같지 않음을 알 수 있다. 또한, 불규칙파 조건에서는 쇄파에 의한 에너지 손실이 완만하게 발생하므로 쇄파 유도류

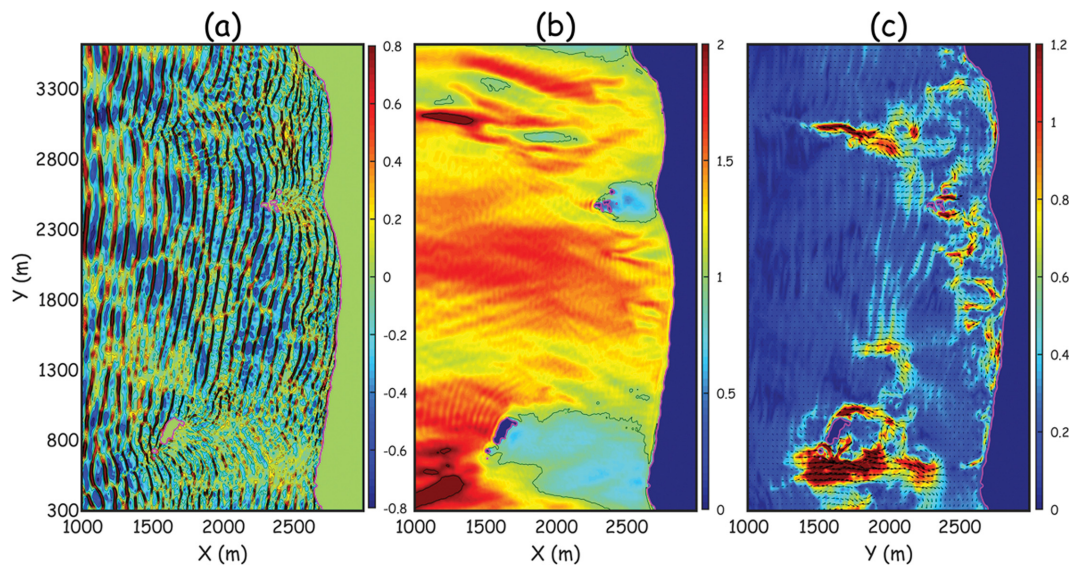


Fig. 8. Numerical simulations of rip currents under the random wind wave incidence ($H_s = 1.4$ m, $T_p = 11$ s) at the Daechon beach with DL+1.5m presenting the distributions of (a) surface displacements (m), (b) wave heights (m) and (c) flow velocities (m/s) at $t = 200T_p$.

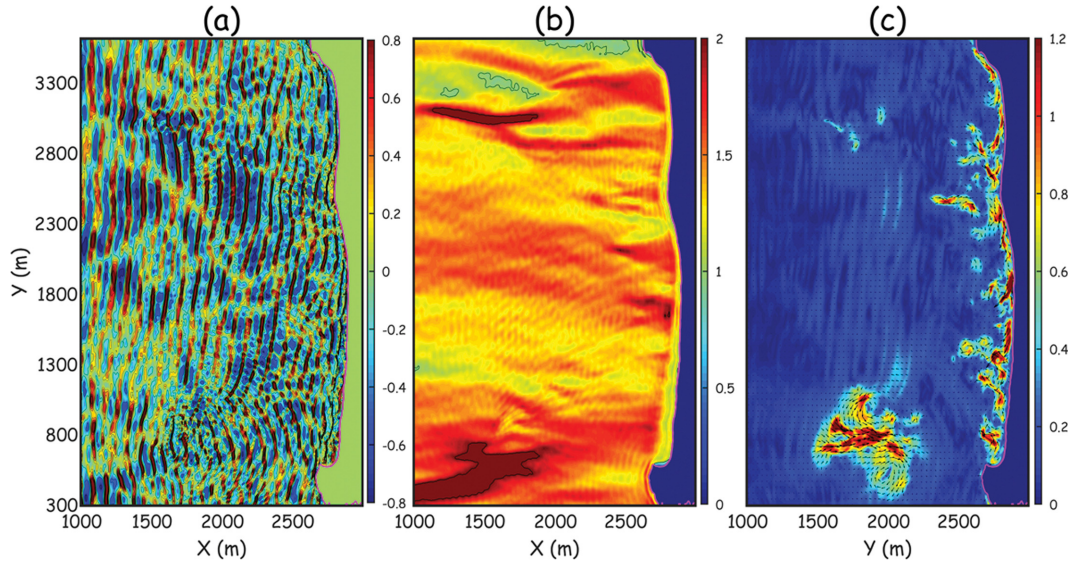


Fig. 9. Numerical simulations of rip currents under the random wind wave incidence ($H_s = 1.4$ m, $T_p = 11$ s) at the Daechon beach with DL+4.0m presenting the distributions of (a) surface displacements (m), (b) wave heights (m) and (c) flow velocities (m/s) at $t = 200T$.

가 등가의 파랑 에너지를 갖는 규칙파에 비해 강하게 발달하지 못하게 된다(Choi et al., 2015). 따라서 상대적으로 낮은 입사파의 규칙파 조건 수치모의 결과와 비교해서 전반적으로 연안방향의 파고 비균등성의 정도가 완만해 졌고, 이안류를 비롯한 연안흐름도 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 8에 간조인 경우를 상정한 조위가 DL+1.5m인 수심지형에서의 불규칙파 수치모의 결과를 제시하였다. 먼저, 자유수면 변위, 파고 분포를 통해 외해 경계로부터 횡방향으로 끊어진 짧은 파봉선들이 입사하고 이 때문에 횡방향으로 일정하지 않은 파고분포가 형성되어 입사하는 것을 확인할 수 있다. 여기에 규칙파 수치모의에서 언급한 간출암들($x = 2400$ m, $y = 2500$ m; $x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 영향으로부터 회절, 굴절, 천수화 및 쇄파의 파랑 변형이 발생한다. 특히, 조위 DL+1.5m에서 바위섬이 되는 간출암들은 방파제 역할을 하며 파랑을 차폐하는 역할을 한다. 남측 먼바다 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 북측 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 주변 낮은 수심지형에서 쇄파가 발생하고 강한 쇄파 유도류가 발생함을 알 수 있다. 다방향 불규칙파의 위상 상호간섭에 의한 횡방향 비균등성과 간출암 및 암초들에 의한 복잡한 파랑변형으로 해안선을 따라 균등하지 않은 파랑 에너지와 쇄파가 형성되기 때문에, 제시된 유속분포에 나타난 것과 같은 이안류를 포함한 복잡한 연안흐름이 발생하게 된다. 그러나 외해 지형특성으로 쇄파되어 감쇠된 에너지의 낮은 파고의 파랑이 해안으로 입사하기 때문에 유속강도는 다른 조위의 경우에 비해 상대적으로 약하게 나타났다.

Fig. 9에는 평균해면을 상정한 조위가 DL+4.0m인 수심지형을 이용한 불규칙파 수치모의 결과를 제시하였다. 앞선 불규칙파 수치모의 결과와 마찬가지로 외해 경계에서 이미 횡방향으로 끊어진 짧은 파봉선들이 형성되어 횡방향으로 일정

하지 않은 파고분포로 입사하는 것을 확인할 수 있다. 수중 암초가 된 남측 먼바다 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 북측 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)의 좁고 낮은 수심지형의 효과로 복잡한 굴절, 천수화 및 쇄파의 파랑변형이 나타난다. 수중 암초가 된 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)에 의해 파랑의 차폐효과는 없어졌지만, 해안을 향한 강한 쇄파 유도류가 발생함도 알 수 있다. 다방향 불규칙파의 특성으로 이미 짧은 파봉선의 형태로 전파되어 오던 입사파가 수중 암초들에 의해 파속차이에 따른 위상 어긋남 및 굴절된 파봉선들의 교차, 상호간섭으로 더욱 복잡하게 불균등한 파랑 에너지가 형성되고 불균등한 쇄파로 이어지게 된다. 이러한 횡방향 불균등한 파랑 분포 특성의 결과로 유속분포에 나타난 것처럼 여러 위치에서 이안류가 발달하는 등의 복잡한 연안흐름이 나타난다.

Fig. 10에는 만조를 상정한 조위가 DL+6.0m인 수심지형을 이용한 불규칙파 수치모의 결과를 제시하였다. 자유수면 변위, 파고, 유속벡터 분포를 통하여, 외해 경계에서 이미 횡방향으로 끊어진 짧은 파봉선들에 의한 일정하지 않은 파고분포 특성과 수면 아래의 암초가 된 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)과 암초($x = 1500$ m, $y = 3000$ m)에 의한 파랑변형으로 복잡한 연안흐름이 생성하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 조위의 상승으로 상대적으로 급해진 해안 단면에 의해 쇄파대가 좁아져서 북측 만곡해안에서의 연안흐름의 강도가 낮아졌다. 만조에도 불구하고 수중 암초들의 좁고 낮은 수심지형 효과로 복잡한 굴절, 천수화 및 위상의 상호간섭 등의 파랑변형이 확인되지만 남측 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)에 의한 쇄파 유도류는 거의 사라졌고, 쇄파로 저감되었던 파랑은 높은 파고를 유지하며 남측 만곡 해안으로 전파되었다. 따라서 북측 만곡해안에서와는 다르게 남측 만곡 해안에서는 상대적으로 높은 유속강도의 이안류가 발달하는 복잡한 연안흐름을 확인할 수 있다.

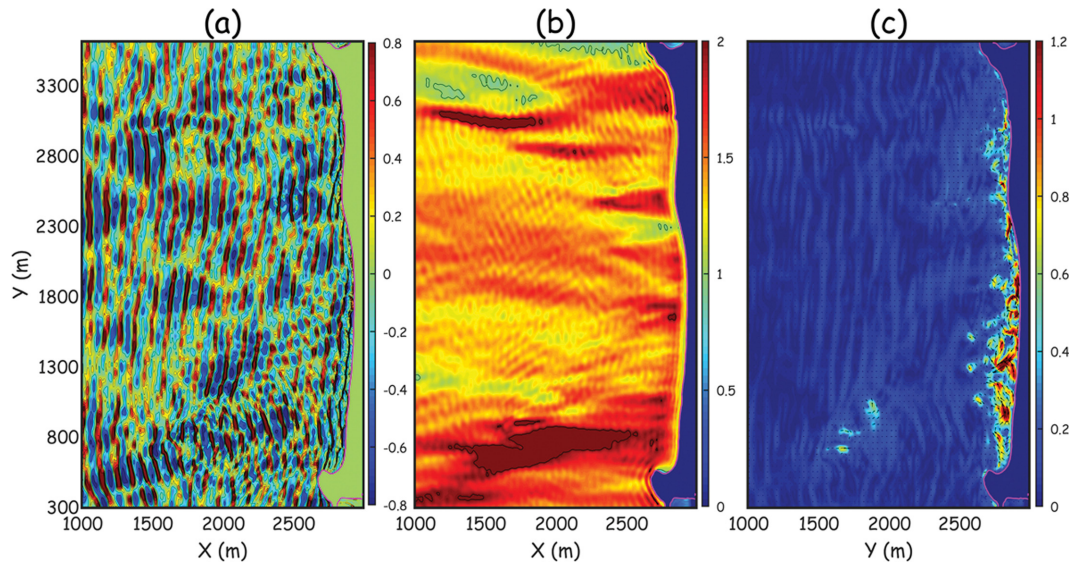


Fig. 10. Numerical simulations of rip currents under the random wind wave incidence ($H_s = 1.4$ m, $T_p = 11$ s) at the Daecheon beach with DL+6.0m presenting the distributions of (a) surface displacements (m), (b) wave heights (m) and (c) flow velocities (m/s) at $t = 200T$.

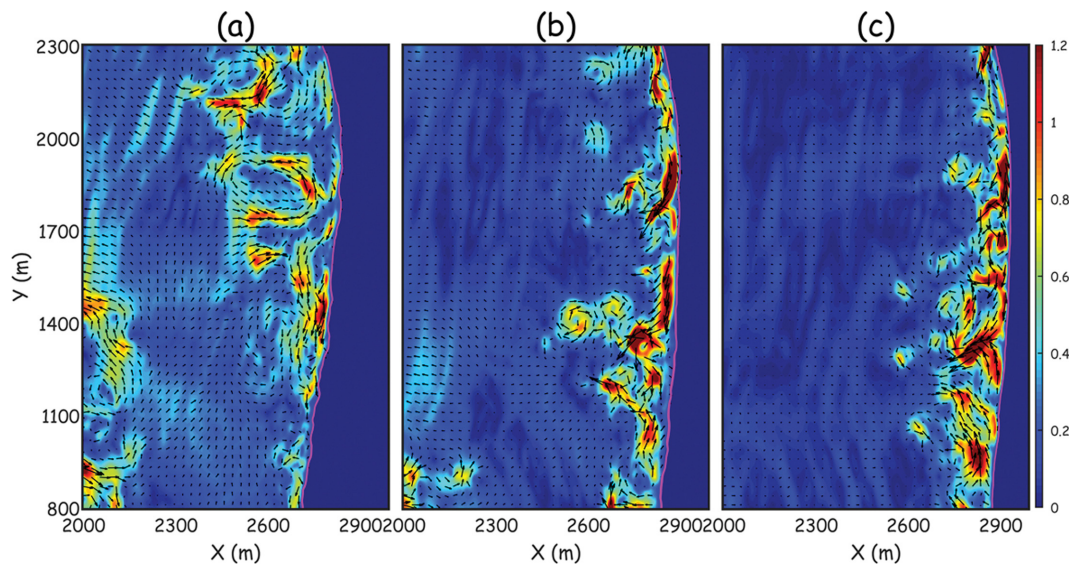


Fig. 11. Numerical simulations of rip currents under the random wind wave incidence ($H_s = 1.4$ m, $T_p = 11$ s) presenting the distributions of flow velocities (m/s) of the Daecheon beach with (a) DL+1.5m, (b) DL+4.0m, and (c) DL+6.0m at $t = 200T$.

Fig. 11에 간조를 상정한 DL+1.5m, 평균해면을 상정한 DL+4.0m 그리고 만조를 상정한 DL+6.0m 기준의 수심지형을 이용한 불규칙과 수치모의 결과 중에 남측 만곡해변의 연안흐름 유속분포들을 확대하여 제시하였다. 규칙과 수치모의 결과에서도 알 수 있었던 것처럼 남측 먼바다 간출암($x = 1600$ m, $y = 800$ m)이 간조(DL+1.5m) 시에는 바위섬으로 방파제 역할을 하여 파랑을 차폐하고, 평균해면(DL+4.0m) 시에는 상대적으로 얕은 수중 암초가 되어 파랑을 쇄파시켜 유도류를 발생시키고, 만조(DL+6.0m) 시에는 깊은 수중 암초로 파랑을 천수화하여 상승된 파고의 파랑을 해안에 도달시키는 역할을 하였다. 이렇게 조위에 따라 변화되는 지형적 특성, 즉 간출암의 역할에 따라 해안에 도달하는 입사파가 변

형되고 그 횡방향 비균등성의 정도가 달라져 연안흐름의 발달도 변화된다. 앞서 언급한 것처럼 일반적으로 간조보다는 만조의 해안단면 경사가 급하기 때문에 쇄파대 폭이 줄어 연안흐름, 즉 이안류가 저감되는 경향이 있음에도 불구하고, 외해 간출암, 암초 등의 영향이 복합적이기는 하지만 국지적으로 더 지배적일 수 있음을 알 수 있다. 규칙과 수치모의 결과와 비교하여 높은 입사파고를 사용했음에도 불구하고 다양한 불규칙과의 완전한 쇄파 특성과 짧은 파봉선 전파 특성에 따라 유속강도는 약하지만 횡방향으로는 복잡한 연안흐름 양상을 보인다. 간조(DL+1.5m) 시에 완전한 단면에도 불구하고 간출암의 차폐효과로 상대적으로 유속강도가 크지 않은 연안흐름이 생성되었고, 평균해면(DL+4.0m)인 경우에는 얕은

수심의 간출암 주변에서의 다양한 파랑변형에 따른 변화가 심한 파고분포에 기인한 유속강도가 큰 이안류가 발생하였다. 만조(DL+6.0m) 시에는 상대적으로 급한 단면경사에도 불구하고 수중 암초가 된 간출암 위로 천수화된 높은 파고의 파랑이 해안에 입사하기 때문에 복잡하고 강한 유속강도의 이안류가 발달하였다. 앞서 언급한 것처럼, 북측 만곡 해안에서는 만조시 쇄파대 단면 경사의 영향으로 연안흐름의 발달이 줄어들어 가는 경향이 있었다.

4. 요약 및 결론

대천 해수욕장은 조차가 큰 서해안에서 가장 유명한 해수욕장 중에 하나이다. 그 앞바다에는 조위가 낮은 경우에 바위섬이 되고 조위가 높아지면 수중으로 들어가는 간출암과 암초들이 위치하는 등의 복잡한 수심지형이 관측된다. 서해안의 대규모 조차에 의해 변화하는 연안 수심지형에 따라 서로 다른 원인으로 생성되는 이안류 발달 특성을 수치모의 결과를 이용하여 검토하였다. 조위가 낮아 간출암이 바위섬이 되는 경우, 간출암은 방파제 역할을 하여 파랑을 차폐하고, 그 주변 낮은 수심지형 및 암초들 위로 미리 쇄파되어 낮아진 파랑 에너지의 횡방향 비균등성 형성으로 복잡한 연안흐름이 발생하지만 상대적으로 완만한 해안경사에도 불구하고 그 유속강도는 상대적으로 높지 않았다. 평균해면에서 간출암은 상대적으로 얕은 수중 암초가 되고, 이로부터 파랑은 굴절, 천수화 및 쇄파 등의 변형이 일어나 횡방향으로 불균등한 파랑 에너지가 형성되고 불균등한 쇄파로 이어지게 된다. 이러한 횡방향 불균등한 파랑분포 특성의 결과로 상대적으로 강한 유속강도의 이안류가 발달하는 등의 복잡한 연안흐름이 나타났다. 만조가 되어 간출암이 깊은 수중 암초가 될 때, 파랑은 그 위에서 천수화하지만 쇄파되지 않아 상승된 높은 파고의 파랑이 남측 만곡해안에 도달하였다. 따라서 조위 상승으로 상대적으로 급해진 쇄파대 해안 단면에도 불구하고 높은 유속강도의 이안류가 발달하는 복잡한 연안흐름을 확인 할 수 있었다. 반면에, 급해진 해안단면의 영향으로 북측 만곡해안에서의 연안흐름의 강도는 낮아졌다. 결론적으로 간조보다는 만조의 해안단면 경사가 급하기 때문에 쇄파대 폭이 줄어 연안흐름, 즉 이안류가 저감되는 경향이 있음에도 불구하고 대천 해수욕장과 같이 외해에 특수한 수심지형(간출암, 암초 등)이 있는 경우에는 그 영향이 복잡적이기는 하지만 더 지배적으로 작용할 수 있음을 알 수 있었다. 대천 해수욕장 연안에도 평균 해면 아래쪽에 해안선을 따라 변화가 있는 사주가 존재하지만 간출암의 존재와 같은 외해의 복잡한 지형에 기인한 횡방향 비균등성이 연안흐름 발달에 더 영향을 주는 것으로 보인다.

본 수치모의는 연안에서 파랑 및 흐름과 더불어 변화하는 사주 등 지형 변화를 고려하고 있지 않으며, 조류의 영향도

무시하고 있으므로 이들의 영향을 포함한 추가적인 연구가 필요함을 밝힌다. 또한, 이안류 발생정도나 규모는 입사파 파고 변화에 크게 의존하므로, 기상조건에 따라 실제 해변으로 입사하는 파의 특성이 이안류 발생을 결정하는 데 가장 중요한 요소이다. 이런 관점에서 본 연구는 서해에 자주 발생하는 입사파 특성에 대한 고려가 충분하지 않다는 한계가 있다. 향후에 비디오 모니터링 자료를 정보정하여 그 결과를 수치모의와 비교, 검증하는 연구가 필요하다. 그러나 기후변화로 여름철 태풍에 의한 고파의 입사 빈도가 증가하고 있어서 서해안에서 발생하는 이안류에 대해서도 주의가 필요해 보인다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 국립해양조사원의 “실시간 이안류 감시체계 확대 및 서비스” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Aagaard, T., Greenwood, B. and Nielsen, J. (1997). Mean currents and sediment transport in a rip current. *Marine Geology*, 140, 25-45.
- Austin, M., Scott, T., Brown, J., Brown, J., MacMahan, J., Masselink, G., and Russell, P. (2010). Temporal observations of rip current circulation on a macro-tidal beach. *Continental Shelf Research*, 30, 1149-1165.
- Bowen, A.J. (1969). Rip current: Theoretical investigations. *Journal of Geophysical Research*, 74, 5467-5478.
- Bruneau, N., Castelle, B., Bonneton, P., Pedreros, R., Almar, R., Bonneton, N., Bretel, P., Parisot, J.-P., and Sénéchal, N. (2009). Field observations of an evolving rip current on a meso-macrotidal well-developed inner bar and rip morphology. *Continental Shelf Research*, 29, 1650-1662.
- Castelle, B., Bonneton, P., Dupuis, H. and Sénéchal, N. (2007). Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast: A review. *Marine Geology*, 245, 141-159.
- Castelle, B., Scott, T., Brander, R.W. and McCarroll, R.J. (2016). Rip current types, circulation and hazard. *Earth-Science Reviews*, 163, 1-21.
- 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., 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. J. of the Korean Society of Civil Engineers, 32(5B), 321-320 (in Korean).
- Choi, J., Shin, C.H. and Yoon, S.B. (2013). 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.
- Choi, J. (2015). Numerical simulations of rip currents under phase-resolved directional random wave conditions. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 27(4), 238-245 (in Korean).
- Choi, J. and Kim, H.-S. (2016). A boussinesq modelling of a rip current at the daecheon beach in Korea. Journal of Coastal Research, IS75, 1332-1336.
- Choi, J. (2022). A numerical study on rip currents at the Haeundae coast changed after the beach nourishment. Journal of Korea Water Resources Association, 55(9), 669-678 (in Korean).
- Clark, D.B., Elgar, S. and Raubenheimer, B. (2012). Vorticity generation by short-crested wave breaking. Geophysical Research Letters, 39, L24604, doi:10.1029/2012GL054034.
- 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., MacMahan, J.H., Reniers, A.J.H.M. and Nelko, V. (2011). Rip currents. Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 551-581.
- Feddersen, F. (2014). The generation of surfzone eddies in a strong alongshore current. Journal of Physical Oceanography, 44, 600-617.
- Gensini, V.A. and Ashley, W.S. (2009). An examination of rip current fatalities in the United States. Natural Hazards, 54(1), 159-175.
- 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.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2021). Report for Operation of Rip current Warning System in 2021.
- Long, J.W. and Özkan-Haller, H.T. (2005). Offshore controls on nearshore rip currents. J. Geophys. Res., 110(C12). doi:10.1029/2005JC003018.
- Long, J.W. and Özkan-Haller, H.T. (2016). Forcing and variability of nonstationary rip currents. J. Geophys. Res., 121(1), 520-539. doi:10.1002/2015JC010990.
- Masselink, G. and Short, A.D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology. Journal of Coastal Research, 9, 785-800.
- 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. Journal of Physical Oceanography, 5, 750-760.
- National Oceanic and Atmospheric (2022). Weather Related Fatality and Injury Statistics, National Weather Service, Available at: <https://www.weather.gov/hazstat/> (Accessed: September 1, 2022).
- Peregrine, D.H. (1998). Surf zone currents. Theoret. 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, 18, 403-408.
- Scott, T., Masselink, G., Austin, M.J. and Russell, P. (2014). Controls on macrotidal rip current circulation and hazard. Geomorphology, 214, 198-215.
- Shin, C.H., Noh, H.K., Yoon, S.B. and Choi, J. (2014). Understanding of rip current generation mechanism at Haeundae beach of Korea: Honeycomb waves. J. Coastal Res., SI(72), 11-15.
- 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.
- 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, 32(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.

Received 10 November, 2022

Revised 8 December, 2022

Accepted 8 December, 2022