

# 연속된 쇄파 파봉선 끝단의 비정상 이안류 LSPIV 계측연구

## A LSPIV Measurement of the Unsteady Rip Current at Successive Ends of Breaking Wave Crests

최준우\*  
Junwoo Choi\*

**요지** : 벌집구조 파에서 나타나는 연속된 쇄파 파봉선 끝단사이로 발달하는 이안류를 수리실험을 통해 재현하고 시간에 따라 발달하는 과정을 정사보정 영상을 통해 관찰하였다. 서로 다른 두 협각의 파랑 중첩에 의해 생성되는 벌집구조 파를 재현하는 대신에 조파장치를 횡방향 두 그룹으로 나누어 역 위상으로 구동시켜 규칙파를 조파하므로 유사 벌집구조 파형을 생성하여 실험을 수행하였다. 수리 실험에서 재현된 이안류의 유속을 계측하기 위해 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하였다. 관측을 통해 노드영역을 따라 생성되는 이안류를 확인하였고, 시간에 따라 흐름이 전단 파동(shear fluctuation)을 포함하여 발달하는 비정상 이안류의 유속 분포를 제시하였다. 또한, LSPIV 기법으로 계측된 유속의 시계열을 통하여 파주기 및 상대적으로 긴 주기의 요동에 따른 유속 성분을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 수리실험, 쇄파 파봉선 끝단, 벌집구조 파형, 비정상 이안류, LSPIV

**Abstract** : The experiment of unsteady rip current generated at the successive ends of breaking wave crests of honeycomb pattern waves was conducted in a laboratory wave basin, and its time-varying evolution was observed by using ortho-rectified images. The present experiment utilized the generation of a quasi nodal line of the honeycomb-pattern waves formed by out-of-phase motion of two piston-type wavemakers arranged in the transverse direction, instead of the original honeycomb pattern waves which are generated when two wave trains propagate with slightly different wave directions. The velocities of rip current were measured by using the LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) technique. As a result, the unsteady rip current was generated between successive ends of wave crests, and evolved with its shear fluctuations in this experiment. Also, the time series of LSPIV velocity of the unsteady rip current showed its short component due to waves and its long component due to wave-induced currents.

**Keywords** : Laboratory experiment, breaking wave crests, honeycomb patterned waves, unsteady rip current, LSPIV

### 1. 서 론

이안류는 연안 수심지형, 비선형파의 상호작용 및 평균 자유수면의 불안정성(instability) 등에 기인하여 파랑 에너지가 연안방향으로 강한 비균등성이 형성될 때 발생하는 것으로 이해되고 있다(Darlymple, 1975, 1978; Tang and Dalrymple, 1989). 즉, 연안방향을 따라 부분적으로 파랑에너지가 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 척도(scale)의 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).

단시간에 발생하여 소멸한다고 알려진 돌발성 이안류(transient rip current)는 Peregrine(1998)의 메커니즘을 바탕으로 연구된 Johnson and Pattiaratchi(2006)의 다방향 입사파 조건에서 정의되었다. 이러한 다방향 입사파에 의해 발생하는 이안류 가운데 가장 전형적인 경우가 벌집구조 파형이 형성될 때 생성되는 이안류이다. 즉, 파향이 조금 다른 두 규칙파의 비선형 상호 간섭에 의해 해안에 벌집구조 파형이 형

\*한국건설기술연구원 해안항만연구실 연구위원(Corresponding author: Research Fellow, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0772, jwchoi@kict.re.kr)

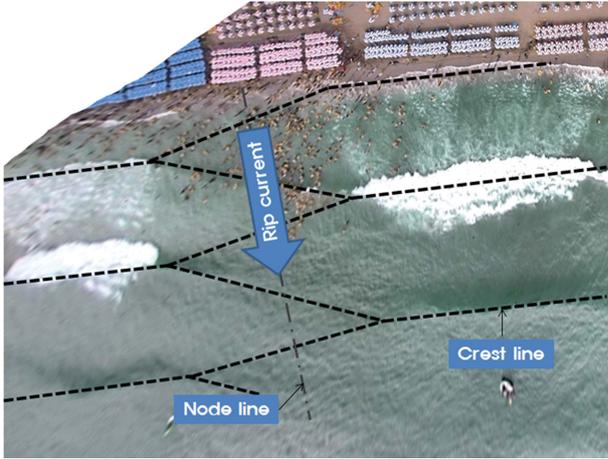


Fig. 1. Schematic sketch of honeycomb-pattern wave crests on an ortho-rectified image of the Haeundae coast at 15:32 of the 10th of August, 2012 (Shin et al., 2014).

성될 때, 해안선 직각방향으로 발달되는 노드선 영역을 따라 이안류가 발달한다(Dalrymple, 1975). 참고로, 수치모의 및 관측 자료분석 등 다양한 기법을 이용한 연구(Yoon et al., 2012; Choi et al., 2012, 2013; Shin et al., 2014)에서 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 해운대 해수욕장의 대규모 이안류가 벌집구조 파형에 의해 발생된다고 주장되기도 했다. 기존의 접근 방법과 함께 이안류 발생 및 거동특성을 면밀히 파악하고, 수치모의 연구를 검증하기 위한 수리실험이 필요하다.

초기 이안류의 수리실험 연구로, Bowen and Inman(1969)은 실험실에서 edge wave에 의해 발생하는 포말대 이안류를 관측하였다. Wind and Vreugdenhil(1986)은 구조물에 의한 이안류 수리실험을 수행하였으며, Haller et al.(1997), Haas and Svendsen(2002), Kennedy and Thomas(2004)는 해안선에 평행한 샌드바의 끊어진 채널에 의해 발생하는 이안류를 관측하였다. Castle et al.(2010)은 변형된 이동상 지형위에서의 이안류를 실험하였다. 최근까지 입사파에 의한 연안방향 불균등성이 원인이 되어 상대적으로 더 위험한 돌발성 이안류에 대한 실험 연구는 없었다. 그러나 Choi and Rho(2020)는 조파 실험실에서 유사 벌집구조 파형을 생성하는 방법을 제안하고, 쇄파 파봉선 끝단에서 생성되는 와류에 의해 발달하는 이안류를 관측하였다. 제한된 수조에서 다방향 파랑의 조파는 측면 재반사 문제를 발생시키기 때문에 조파장치를 횡방향으로 둘로 나누고, 두 조파관을 역 위상으로 구동시켜 일방향 규칙파를 조파하므로 연속된 파봉선 끝단을 형성시켜 돌발성 이안류를 재현하였다.

본 연구에서는 Choi and Rho(2020)가 수행한 수리실험에서 사용한 기법을 사용하여, 시간에 따라 변화하는 이안류의 발달과정을 관찰하였다. 재현된 이안류의 유속을 측정하기 위해 정사 보정된 이미지를 사용하는 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하였다. 반복 수리실험을 수행하여 동일한 조건에서 관측된 결과를 서로 비교하고, 비정

상 이안류의 평균 유속분포의 재현성에 대하여 검토하였다. 또한, LSPIV 기법으로 측정된 유속의 시계열을 추출하여 검토하였다. 이 과정을 통해 이안류특성 연구뿐만 아니라, LSPIV 기법으로 관측할 수 있는 비정상 운동의 시간 척도(time scale)도 확인하였다.

## 2. 실험 조건 및 분석방법

### 2.1 수심 조건

연안방향으로 불균등한 입사파에 의해 생성되는 돌발성 이안류를 재현하고, 관측하기 위한 수리실험은 Fig. 2와 같이 전체 길이 40 m, 폭 30 m, 높이 1.2 m의 조파수조에서 수행하였다. 수심지형은 아래의 평형단면 경험식을 사용하여 구성하였다(Dean, 1991).

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $x$ 는 해안선부터 외해 쪽으로의 수평거리, 그리고  $A$ 는 평형단면 형상계수이다. 평형단면 지형의 수심을 위해 적용되는 형상계수는 표사의 침강속도에 의해 결정되며, 이는 표사의 평균입경( $D_{50}$ )에 따라 추정할 수 있다(Rouse, 1937).

본 실험 규모에 적합한 지형의 형상계수를 결정하기 위해 표사입경의 침강속도에 대한 Froude 상수를 적용하였다(Kriebel et al., 1986). 임의의 원형 해안에 대하여 1/10의 축척으로 가정하고, 원형표사  $D_{50} = 0.40$  mm의 침강속도에 대하여 Froude 상수를 만족하는 모형의 표사 평균입경  $D_{50} = 0.19$  mm를 가정하였다. 가정된 모형의 표사입경 침강속도(= 2 cm/s)에 해당하는 형상계수( $A = 0.097$ )를 적용하였다. 평형단면 경험식의 적용 박인 포말대의 지형 경사는 1:5.6로 구성하였다. 이 경사는 본 연구와 유사한 평형단면 형상계수를 사용한 Choi et al.(2018)의 이동상 실험결과로부터 평형상태 포말대의 단면 경사를 추출한 것이다. 또한 실험조건에서 파랑에 대한 변형을 무시할 수 있는 수심을 60 cm로 가정하여 Fig. 2과 같이 구성하였고, 해안선 방향으로 수심변화를 최소화하여 모형을 제작하였다. 측면 조파장치 단절에 의한 회절 오차를 방지하기 위해 조파장치 폭에 대한 길이방향 수로벽을 설치하였다.

### 2.2 수리실험 방법

본 수리실험은 벌집구조 파형의 노드영역처럼 연속된 쇄파선 끝단사이로 발달하는 이안류를 재현하고 관찰하는데 그 목적이 있다. 실제 벌집구조 파형은 상대적으로 협각으로 진행되는 두 파향의 파랑이 겹쳐 상호 위상 간섭으로 형성되기 때문에 다방향 조파에 의한 실험이 수행되어야 한다. 그러나 다방향 파랑을 조파할 때 제한적인 측면경계의 반사파 영향 때문에 공간적으로 구별된 벌집구조 파형을 생성하기 어렵다. 본 실험연구에서는 실제 벌집구조 파형을 생성시키지 않고,

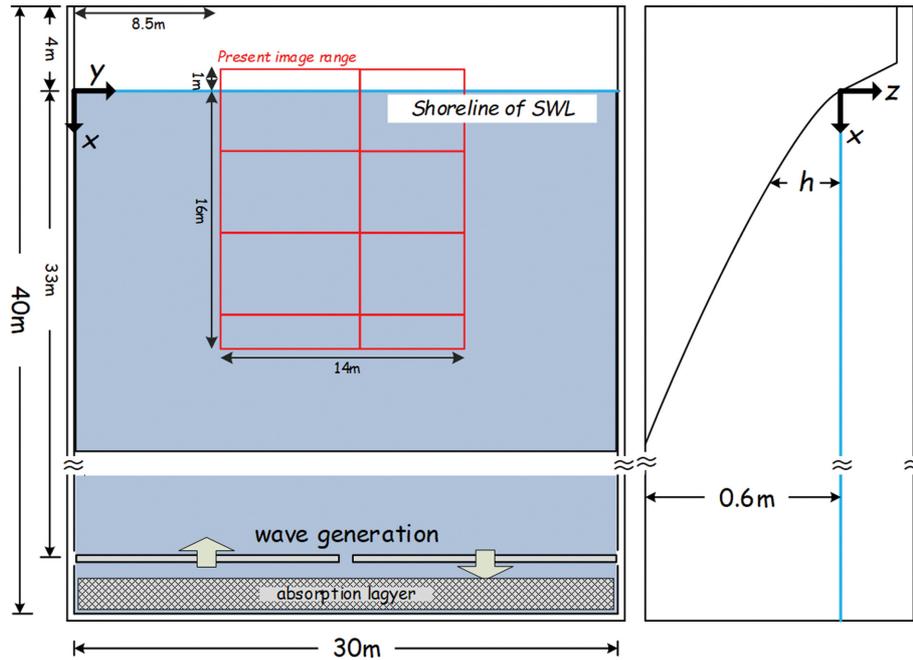


Fig. 2. Sketch of wave basin, wavemaker and experimental bathymetry.

Choi and Rho(2020)에서 제안하고 Fig. 2에 도시한 것과 같이 유사 벌집구조 파형을 생성하여 실험하였다. 피스톤식 조파장치를 50 cm 간격을 두고 두 그룹으로 나누어 구동할 수 있도록 설정하고, 두 조파기를 서로 역 위상으로 규칙파를 조파하여 벌집구조 파형과 같은 연속된 파봉선 끝단을 형성시켰다. 유사 벌집구조 파형 조파기법의 경우, 실제 벌집구조 파형의 노드영역과 다르게 파봉선의 불연속 영역에 의한 회절 현상이 발생하고 이에 따른 파고 변형이 나타나는 차이가 있다. 그럼에도 불구하고 약 20% 상승된 입사파고의 실제 벌집구조와 실험영역에 대하여 거의 동일한 결과를 재현하였다(Choi and Rho, 2020). 참고로, 실제 벌집구조 파는 두 파향의 차이에 따라 횡방향 파고 분포가 변화하고, 유사 벌집구조 파의 경우 회절의 원인이 되는 위치로부터의 거리에 따라 횡방향 파고 분포가 변화하므로, 두 현상에 의한 이안류 발생 유사성은 쇄파대 근처에서의 횡방향 파고분포에 의해 결정된다. 본 이안류 수리실험에서 사용한 유사 벌집구조 파형의 입사 파고와 주기는  $H = 15 \text{ cm}$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ 를 사용하였다.

이안류의 발생과 변화과정을 Large Scale Particle Image Velocimeter(LSPIV) 기법을 이용하여 분석하였다. 흐름유속에 따른 입자 이동을 관측할 목적으로 실험수조 바닥으로부터 약 8 m 높이의 실험실 천장에 총 8대의 카메라를 설치하였다. 각 카메라는 정사보정 오차를 줄이기 위해 관심영역을 수직으로 촬영하도록 설정하였다. 각 카메라는 x 방향으로 약 6 m, y 방향으로 약 8m의 영역을 촬영하도록 설정하여 관심영역 전체를 포괄할 수 있도록 하였고, 분석된 영상범위는 Fig. 2에 제시하였다. 추적 입자는 구멍이 있는 폴리프로필렌 공을 사용하였다. 폴리프로필렌의 비중은 0.9로 정수상태에서 수면에 접하여 떠있고, 지름은 4 cm로 8 m 거리의 카메라에

의해 충분히 식별이 가능했고(약  $10 \times 10 \text{ pixels}$  크기), 조파 파장의 1/100 이하의 직경에 해당한다. 수면위에서 이동하는 구멍이 없는 추적 입자와 비교하여 상당 부분 수면에 잠겨 이동하기 때문에 급격한 수면변화 구간에서 발생할 수 있는 슬라이딩 현상이 최소화될 수 있고, 물입자 이동에 따른 유속 측정에 더 적합하다고 판단하였다. 조파 전, 해안선 근처에 약 2000개의 입자를 미리 흩뿌리고, 조파 후 해안선 위에서 약 2000개의 입자를 서서히 방출하였다. 촬영 카메라의 기종은 삼성테크윈사의 피쉬아이타입 카메라(SND-K2083R)이며, 촬영영상의 프레임 구성은  $1920 \times 1080 \text{ pixels}$ , 프레임 속도는 60 fps이다. 이안류 발생이 예측되는 주변의 흐름패턴 관측을 위해 상기 기술한 유사 벌집구조 파형 조파를 5분간 지속하였고, 첫 파의 해안선 도달을  $t = 0 \text{ s}$ 로 하여 3분 동안의 영상을 녹화하였다. 참고로, Choi and Rho(2020)에서는 이안류 초기 발달시간을 위한 30초의 시간( $t = 30 \text{ s}$ ) 이후부터 분석하였으나, 본 연구에서는  $t = 0 \text{ s}$ 부터 시간에 따라 변화하는 흐름분포를 분석하고 제시하였다.

LSPIV 기법을 통한 유속계측을 위해 계측 위치 격자는  $32 \times 32 \text{ cm}$ 를 사용하였고, 시간격자는 0.1 s를 사용하여 분석하였다. 프레임 속도는 60 fps이지만 일부 카메라 자체의 한계로 판단되는 중복 프레임이 확인되어, 이를 피하기 위해 프레임 6개 간격의 시간격자를 사용하였다. 이미지 분석은 Matlab(image processing toolbox)을 사용하였다. 녹화된 영상으로부터 추출한 이미지는 카메라 렌즈에 의한 왜곡을 피하기 위해 정사보정하고(Heckbert, 1989), 보정된 추출 이미지에서 이동하는 입자를 추적하여 유속분포를 LSPIV 기법으로 산정하였다(Fujita et al., 1998; Kantoush et al., 2011). 이 기법의 일반적인 한계로 유속측정은 추적 입자가 존재하

고 구별되는 영역에 대해서만 가능하다. 계측 위치에서 추적 입자가 일정 기간 동안 존재하지 않거나 구별되지 않는 등의 경우에 계측 누락이 있을 수 있다. 이 경우, 누락 부분에 대해 시간적으로는 계측된 자료들의 평균값을 이용하여 평균유속을 산정하였고, 공간적으로는 보간 기법을 사용하여 보완하였다. 평균 유속 산정과 관련해서는 연구결과 부분에 추가로 설명한다. 쇄파대 거품이 많은 경우에는 추적 입자와의 구별이 어렵고 3차원적 거동이 지배적인 경우 오차가 클 수 있음을 밝힌다. 참고로, 한 격자에서 계측자료가 시계열의 50% 이상 존재하는 경우에 대해 유속을 계산하였다. 또한, 이안방향 유속이 0.05 m/s 이상인 영역에서 계측이 누락된 부분에 대하여 공간격자 보간을 수행한 경우는 전체격자에 대해 약 5% 정도이며, 대부분 쇄파대 거품이 많은 영역이다.

Kennedy and Thomas(2004)에서 지적하고 있는 것처럼, 추적입자의 이동속도로부터 계측된 유속은 Lagrangian 유속으로 고정위치의 Eulerian 유속에 Stokes 이동속도 및 쇄파에 의한 물입자 이동속도가 더해진 유속이므로 이에 대한 이해가 필요하다. 그러나 실제 사람이 이안류에 떠밀려 나가는 사고의 유속은 Lagrangian 유속이므로 본 실험의 계측유속이

오히려 더 유의미한 유속일 수 있다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 이안류에 의한 입자 이동

Fig. 2에 도시한 바와 같이 횡방향 두 그룹으로 나눈 조파기를 서로 역 위상으로 구동시켜 규칙파  $H=15\text{ cm}$ ,  $T=2.4\text{ s}$ 를 180 s 동안 조파하였고, 연속된 파봉선 끝단이 해안선에 입사함에 따라 발달하는 비정상 이안류를 재현하였다. 조파 이전에 임의로 분포시킨 추적 입자와 조파 후에 해안선 위에서 방출한 추적 입자의 이동을 천장에 설치된 카메라로 촬영한 영상을 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3은 조파된 첫 번째 파봉의 해안선 도달을 기준으로 0~55T 동안에 57마다의 영상을 통해 이안류의 발달과정에서 이동하는 추적 입자의 이동을 보여주고 있다. 그림으로부터 많은 입자들이 끊어진 파봉선 사이를 통해 쇄파대 밖으로 빠져나와 깊은 수심의 외해로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 횡방향의 위상 차이를 통해 뚜렷한 이안류 흐름이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

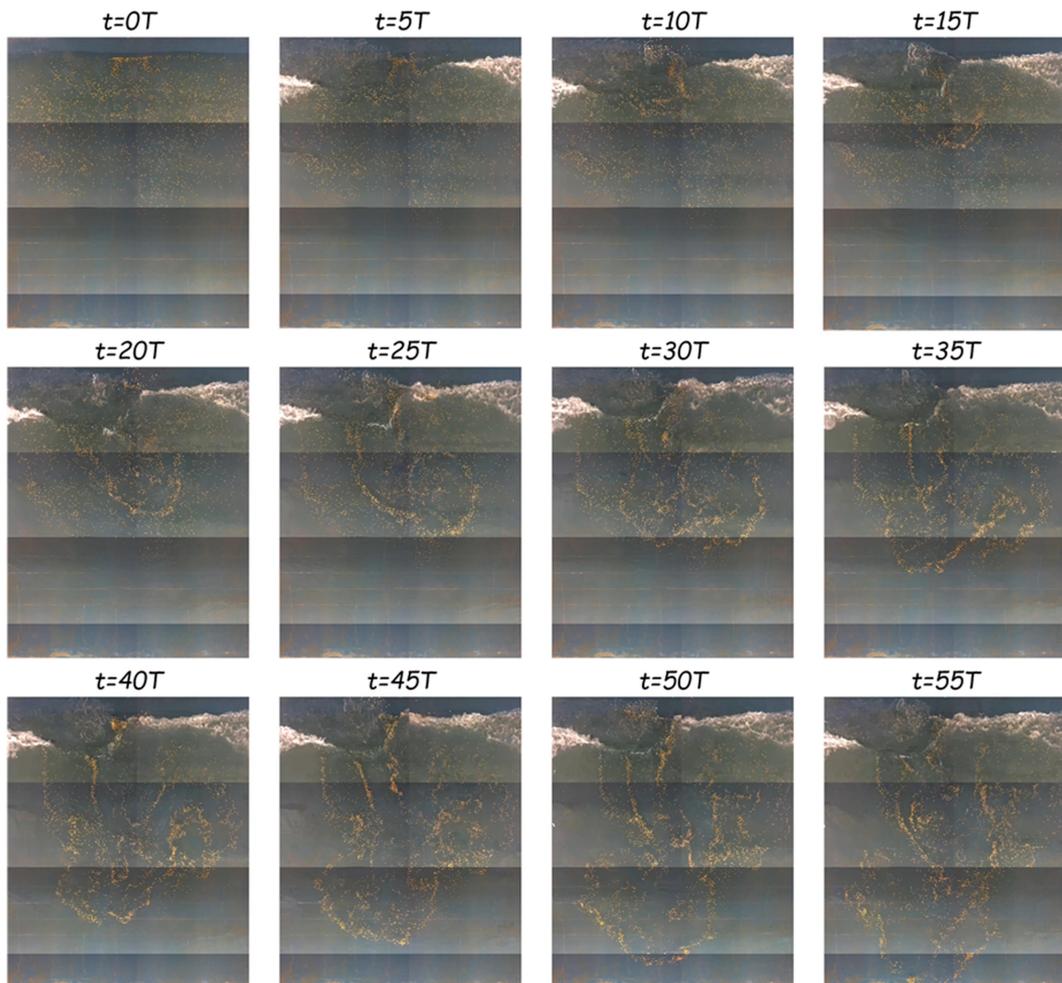


Fig. 3. Snapshots of time-varying particle motions due to the rip current with the incident intersecting wave trains of  $H=15\text{ cm}$  and  $T=2.4\text{ s}$  during  $t=0\sim 55T$ .

### 3.2 시간에 따라 발달하는 이안류의 유속분포

앞 절에 제시된 정사보정 영상자료를 기반으로 LSPIV 기법을 이용하여 시간에 따라 변화하며 발달하는 이안류의 12 s 즉, 5T 평균 유속분포를 제시하였다. Fig. 4는 5T, 10T, 15T, 20T 시간의 5T 평균 유속분포이며, 이안류가 생성 및 발달되는 과정이 제시되었다. 두 번째 패널의  $t=10T$ 일 때, 벌집구조 파형의 노드영역에 해당하는 부분, 연속된 쇄파 파봉선 사이 부분을 향해 feeder current가 생성, 발달되어 흐름이 집중됨이 나타났다. 세 번째 패널의  $t=15T$ 일 때, 이안류가 뚜렷하게 생성되어, 네 번째 패널의  $t=20T$ 일 때, 이안류가 발

달하며 이전의 대칭적 흐름양상이 비대칭으로의 변화가 나타났다.

Fig. 5에 25T, 30T, 35T, 40T의 시간에 12 s 평균 유속분포를 제시하였고, 이 시간동안 이안류가 외해까지 발달하여 횡방향 요동이 생성됨이 나타났다. 첫 번째 및 두 번째 패널의  $t=25\sim30T$ 일 때, 상당히 비대칭 흐름을 보이며 외류의 발달과 더불어 흐름이 기울어지는 양상을 보인다. 그러나 세 번째 및 네 번째 패널의  $t=35\sim40T$ 일 때, 다시 대칭적인 흐름양상을 회복하며 기존과 다른 방향으로 흐름이 기울어짐이 나타났다. 즉, 발달하는 이안류의 흐름 유속 분포가 횡방향으로 기울기

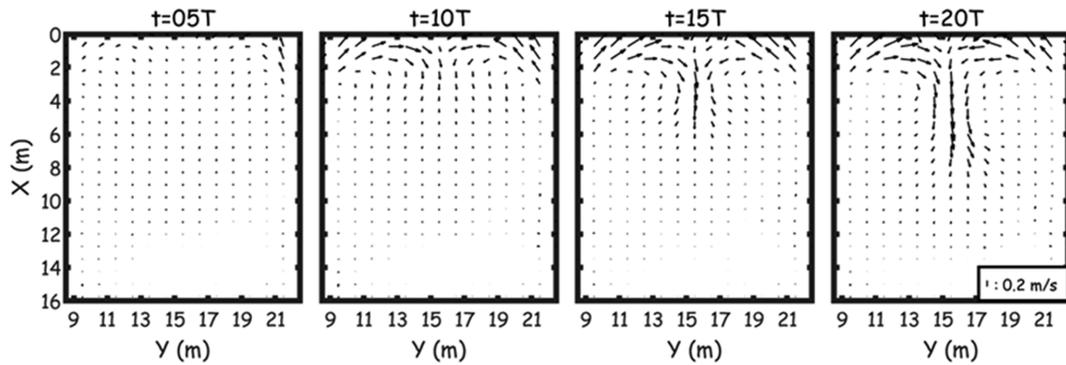


Fig. 4. 12-sec averaged velocity vectors of the unsteady rip current evolved by the incident intersecting wave trains of  $H=15$  cm and  $T=2.4$  s during  $t=0\sim20T$ .

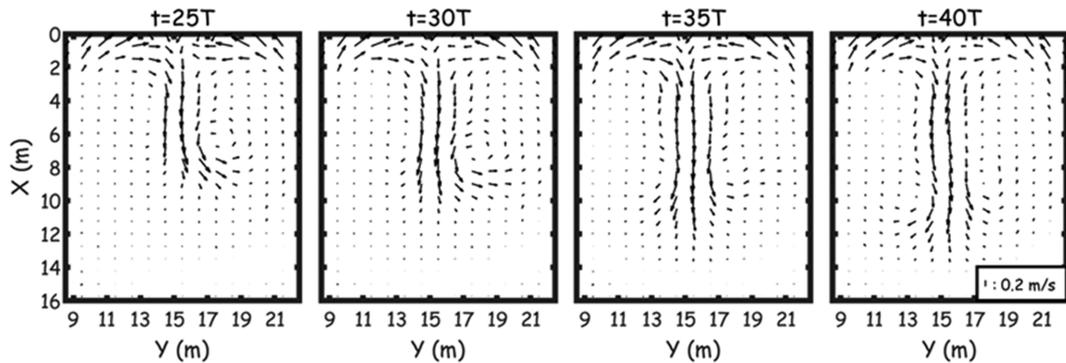


Fig. 5. 12-sec averaged velocity vectors of the unsteady rip current evolved by the incident intersecting wave trains of  $H=15$  cm and  $T=2.4$  s during  $t=20\sim40T$ .

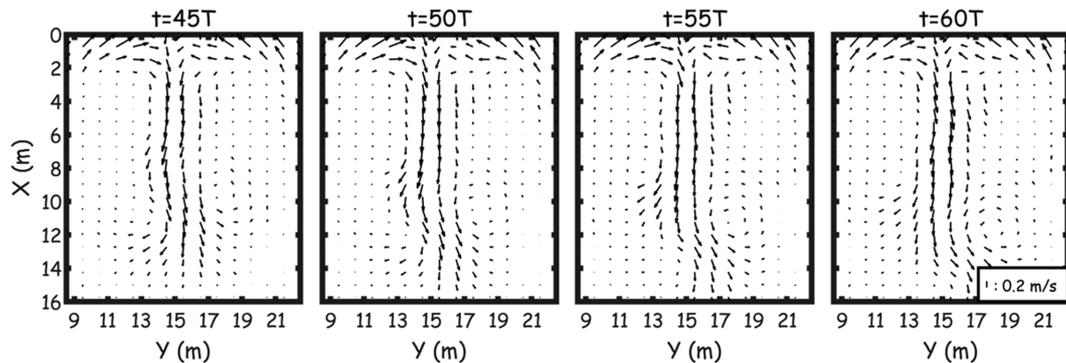


Fig. 6. 12-sec averaged velocity vectors of the unsteady rip current evolved by the incident intersecting wave trains of  $H=15$  cm and  $T=2.4$  s during  $t=40\sim60T$ .

가 급해지며 경계층이 형성되어 전단요동(shear fluctuation)의 특성이 나타났고, 일반적인 제트 흐름과 유사한 특성을 갖는 것으로 보인다.

Fig. 6에 45T, 50T, 55T, 60T의 시간에 해당하는 12 s 평균 유속분포를 제시하여, 이안류가 외해에서 횡방향 요동을 포함하며, 이안류 머리(head) 영역이 발달함을 보여주고 있다. Fig. 6의  $t=45\sim 60T$ 에서 앞서 기술한 전단요동의 전파과정을 확인할 수 있다. 측면으로 기울어진 회전 흐름 즉, 와류 부분이 x 방향으로 진행하는 것을 볼 수 있다. 이러한 와류의 이동은 Fig. 7에서 더 잘 확인된다. Fig. 7은 Figs. 4-6의 유속분포를 이용하여 와도를 계산하여 제시한 것으로 시간에 따라 이안류에 의한 쌍와류의 생성과 이동 및 이탈의 과정을 확인할 수 있다. 즉,  $t=5\sim 20T$ 에서 쌍와류가 생성되고,  $t=25\sim 40T$ 에서 쌍와류가 이동하고,  $t=45\sim 60T$ 에서 쌍와류가 흐름으로부터 이탈하는 과정을 볼 수 있다. 그리고 이러한 쌍와류의 생성부터 이탈 및 소멸하는 과정이 이안류가 지속되는 동안에 계속되는 것으로 보인다. 참고로, 정상 상태의 원천을

갖는 일반적인 제트 흐름과는 다르게 이안류에 의한 흐름은 파봉선 끝단의 쇄파로부터 생성되기 때문에 생성시점부터 횡 방향으로 주기성을 갖는다. 그러나 이안류 흐름 원천은 파랑과 같은 주기를 갖고, 이보다는 상대적으로 긴 전단진동 및 와류생성 주기가 나타나는 것으로 보인다.

### 3.3 반복실험으로 계측된 이안류 유속분포 비교

이번 절에서는 상기 제시한 실험 조건, 즉 횡방향 두 그룹으로 나눈 조파기를 역 위상으로 규칙파  $H=15\text{ cm}$ ,  $T=2.4\text{ s}$ 를 조파하는 실험 조건으로 180 s 동안의 이안류 실험을 세 번 반복하여 그 반복실험의 결과를 제시하여 상호 비교하였다. Fig. 8의 패널 (a)-(c)는 동일 조건 실험을 LSPIV 기법을 이용하여 180 s 즉, 75T 평균 유속분포를 각각 산출한 결과이고, 패널 (d)는 세 반복실험 결과를 평균하여 얻은 180 s 평균 유속 분포이다. 세 반복실험에 의한 180 s 평균 유속 분포의 평균 상대 표준분산도는 약 6%로 상호 유사한 것으로 나타났다며 반복 재현성에 문제가 없어 보인다. 참고로, 상대 표

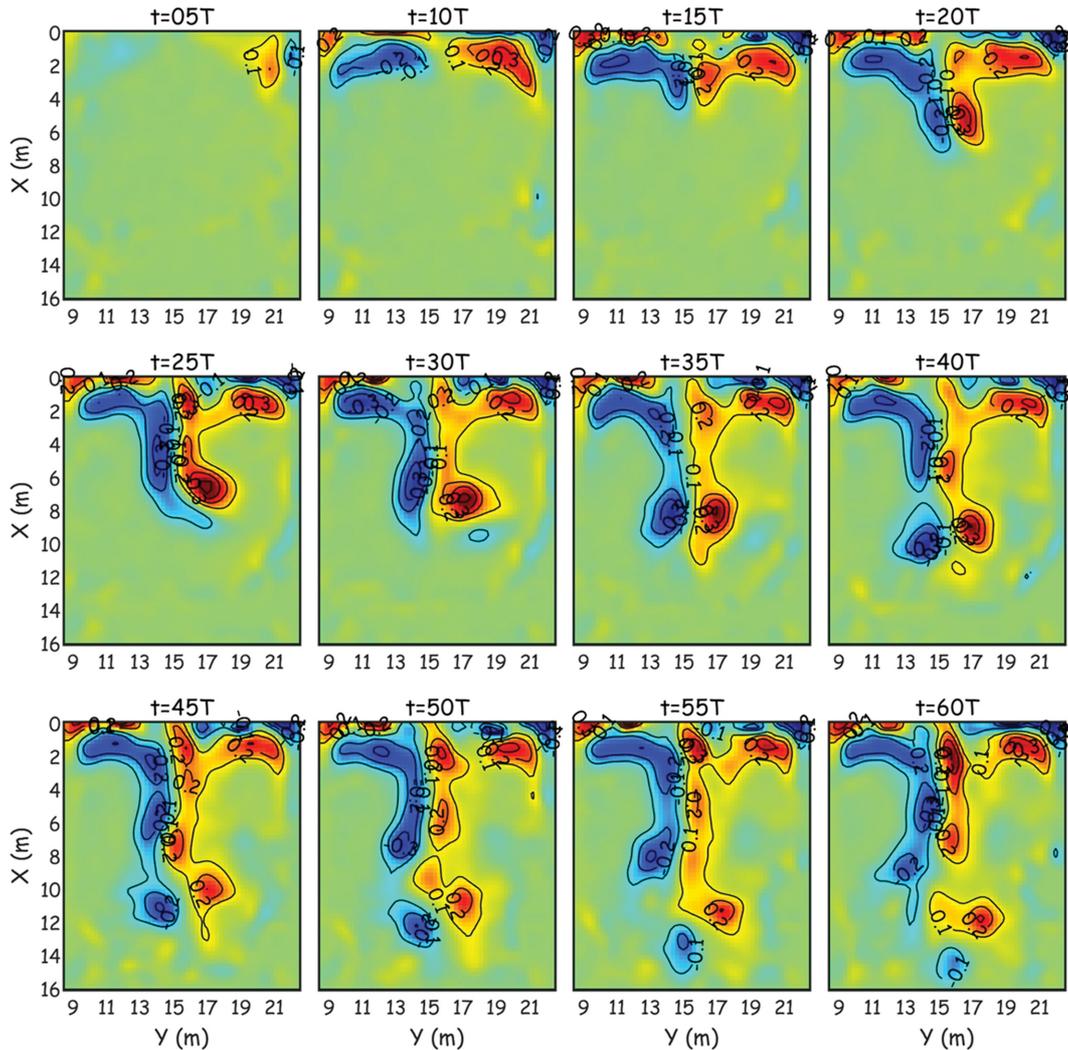


Fig. 7. Time variation of vorticity distribution of 12-sec averaged velocity of rip current evolved by the incident intersecting wave trains of  $H=15\text{ cm}$  and  $T=2.4\text{ s}$  during  $t=0\sim 60T$ .

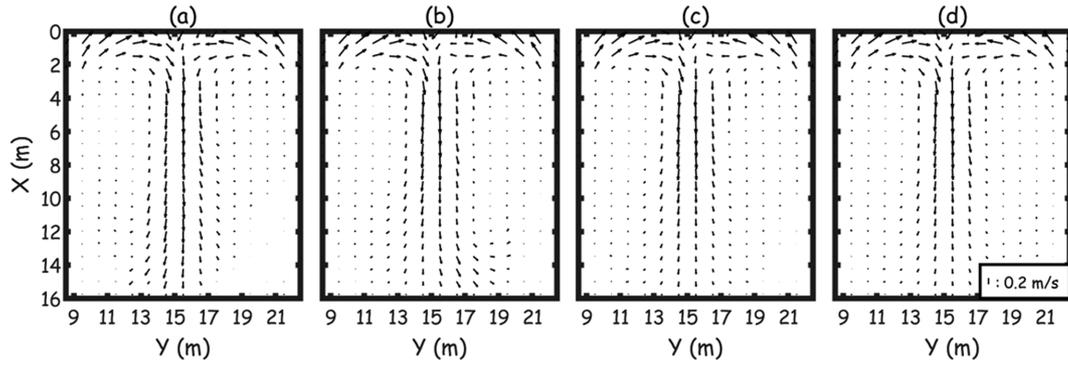


Fig. 8. 180-sec averaged velocity vectors of (a) run 1, (b) run 2, (c) run 3, and (d) average of three runs of the rip current experiment with the incident intersecting wave trains of  $H = 15$  cm and  $T = 2.4$  s.

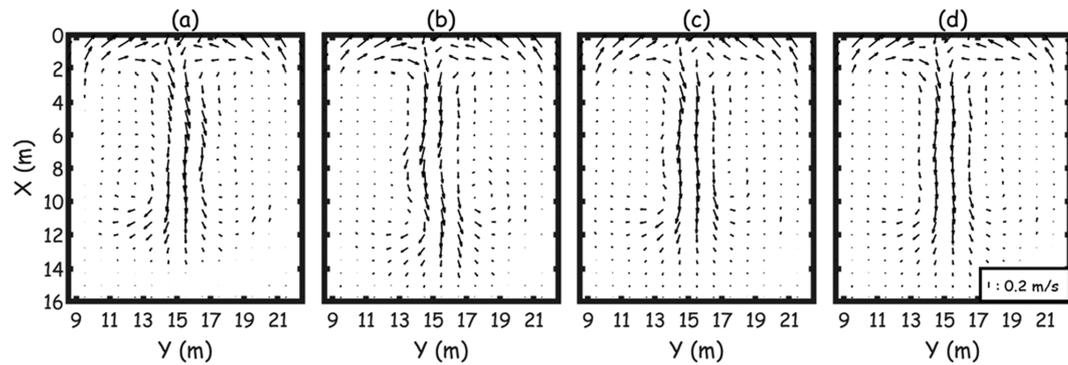


Fig. 9. 12-sec averaged velocity vectors of (a) run 1, (b) run 2, (c) run 3, and (d) average of three runs of the unsteady rip current experiment with the incident intersecting wave trains of  $H = 15$  cm and  $T = 2.4$  s at  $t = 45T$ .

준분산도를 계산하기 위해  $x$  방향 유속 즉, 이안방향 유속을 사용하였고, 최소 유속 0.05 m/s 이상을 대상으로 이용하였다.

Fig. 9의 패널 (a)-(c)는 동일 조건 실험을 LSPIV 기법을 이용하여 12 s 즉,  $5T$  평균 유속분포를 산출한 것으로  $t = 45T$ 에 해당하는 결과이다. 패널 (d)는 세 반복실험을 평균하여 얻은 유속분포이다. 세 반복실험에 의한 12초 평균유속 분포의 평균 상대 표준분산도는 약 11%로 상호 유사한 것으로 나타났다. 180 s 평균유속 분포 보다는 표준분산도가 높

게 나타났지만, 시간에 따른 유속분포를 반복을 통해 재현함에도 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 또한, 패널(d)에서 알 수 있듯이 앞서 언급한 횡방향 요동 및 와류의 발달과정 특성이 평균 유속분포에서도 상쇄되지 않고 유지됨을 볼 수 있다.

### 3.4 이안류 실험의 순간유속 시계열

LSPIV 기법을 이용하여 관측한 이안류의 순간 유속을 시

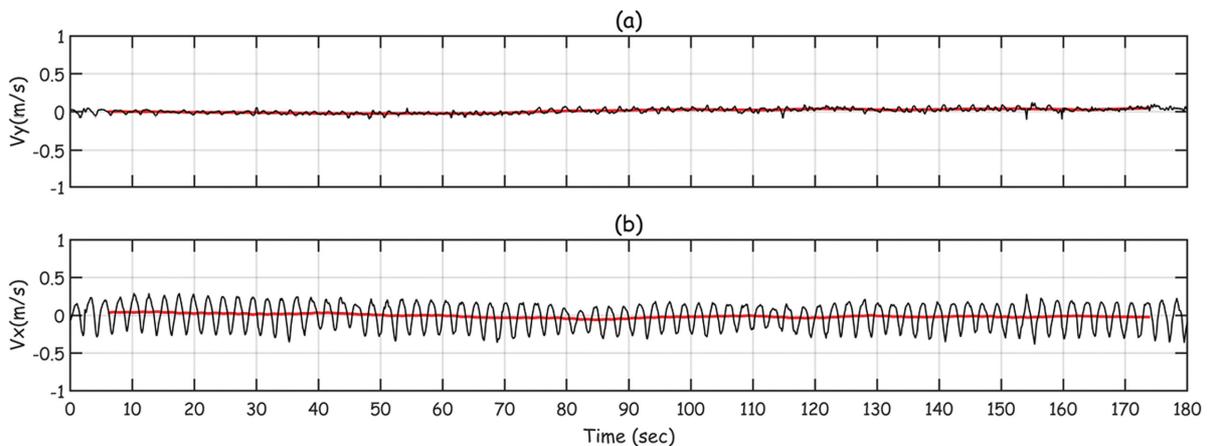
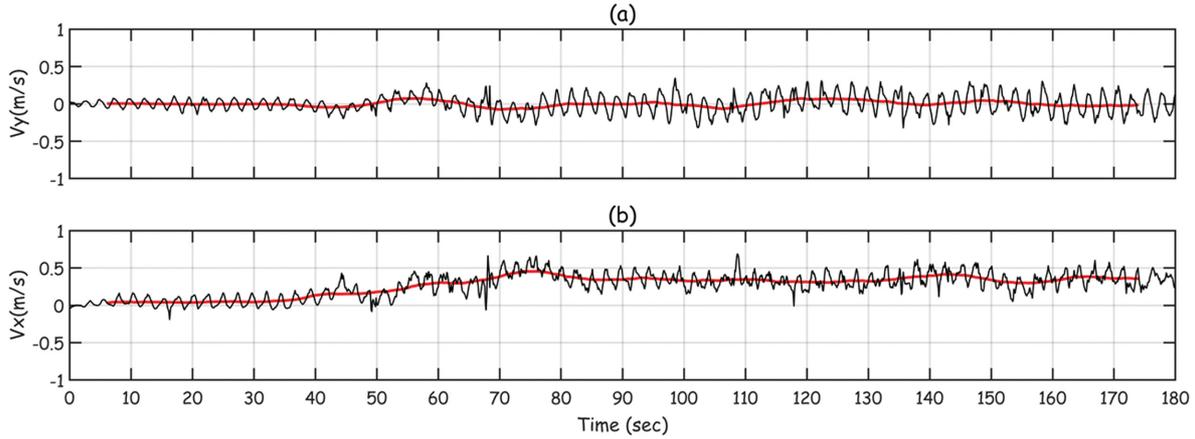


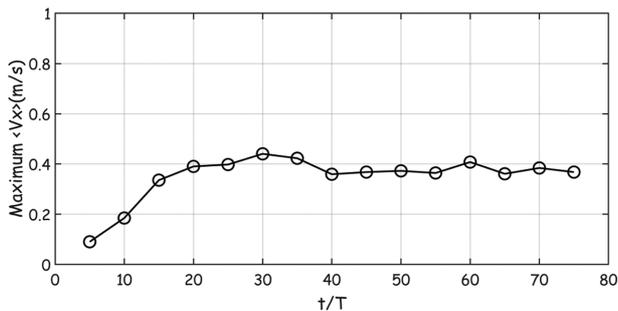
Fig. 10. Time series of (a) longshore and (b) cross shore component of the instantaneous velocity (black) and 12-sec averaged velocity (red) obtained by LSPIV measurement of the unsteady rip current due to the incident intersecting wave trains of  $H = 15$  cm and  $T = 2.4$  s at  $x = 7.0$  m,  $y = 11.75$  m.



**Fig. 11.** Time series of (a) longshore and (b) cross shore component of the instantaneous velocity (black) and 12-sec averaged velocity (red) obtained by LSPIV measurement of the unsteady rip current due to the incident intersecting wave trains of  $H = 15$  cm and  $T = 2.4$  s at  $x = 7.0$  m,  $y = 15.25$  m.

계열로 제시하고, 관측된 유속을 통해 입사파 주기와 횡방향 요동 주기를 비교하였다. Fig. 10에  $x = 7.0$  m,  $y = 11.75$  m에서 관측된 순간 유속과 12 s 평균 유속을 제시하였고, Fig. 11에  $x = 7.0$  m,  $y = 15.25$  m에서 관측된 순간 유속과 12 s 평균 유속을 제시하였다. 참고로, 제시된 순간 유속은 0.1 s 간격으로 관측된 결과로 난류성분은 분해될 수 없다.

Fig. 10에 나타난 유속의 위치는 이안류 주 흐름(rip current neck)의 바깥으로 주로 입사파가 일방향으로 전파되는 영역이다. 따라서 패널 (a)의  $y$  방향 유속 시계열에서 입사파 주기 성분은 매우 약하지만, 패널 (b)의  $x$  방향 유속 시계열에서는 입사파 주기 성분이 뚜렷하게 나타난다. 평균 유속으로부터 이안류 발달에 의한 유속의 증감이나 상대적 장주기 요소도 뚜렷하지 않다. Fig. 11에 나타난 유속의 위치는 파봉선 끝단들 사이의 노드영역에 해당하며 이안류 주 흐름의 안쪽으로 이안류의 영향이 계속되는 위치이다. 따라서 패널 (a)  $y$  방향 및 패널 (b)의  $x$  방향 순간 유속 시계열에서 입사파 주기 성분도 나타나고, 패널 (b)의  $x$  방향 유속 시계열에서는 이안류에 따른 평균 유속의 증가도 확인할 수 있다. 각 성분의 평균 유속을 통해 이안류의 횡방향 진동에 따른 상대적 장주기 요소도 포함되어 있음을 알 수 있다.



**Fig. 12.** Time variation of maximum velocity of 12-sec averaged rip current distribution due to the incident intersecting wave trains of  $H = 15$  cm and  $T = 2.4$  s.

### 3.5 시간에 따른 최대 이안류 유속의 변화

앞 절에서 제시한 시간에 따라 변화하며 발달하는 이안류의 12 s 평균 유속분포로부터 각 시점의 최대 이안류 유속을 추출하여 Fig. 12에 제시하였다. 이 그림으로부터 이안류 유속이 이안류의 생성 및 발달과정을 통해 상승하나 약 20T 뒤에는 변동은 있지만 0.36~0.44 m/s 구간 안에서 유지됨을 알 수 있다. 또한, 제시된 시간의 이안류 유속 변화에 따르면 약 15~20T 정도면 실험 전체의 최대 이안류 유속에 근접함을 알 수 있다. 이로부터 실제 해안에 끊어진 파봉선이 연속해서 입사하는 조건이 상기 기간만 유지되더라도 강한 이안류가 생성될 수 있음을 의미한다.

## 4. 요약 및 결론

해운대 해수욕장에서 매년 수십에서 수백 명이 안전사고로 구조 조치되고 있다. 해운대 해수욕장에서 별집구조 파형에 의해 발생한다고 알려진 대규모 이안류를 수리실험을 통해 연구하였다. 서로 다른 두 협각의 파랑 중첩에 의해 생성되는 별집구조 파를 재현하는 대신에 Choi and Rho(2020)에서 제안한 조파장치를 횡방향 두 그룹으로 나누어 역 위상으로 구동시켜 생성되는 유사 별집구조 파형을 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 별집구조 파형과 같이 연속된 파봉선 끝단이 해안선으로 입사하며 쇄파할 때, 생성 및 발달하는 이안류의 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 수리 실험에서 재현된 이안류의 유속을 측정하기 위해 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하였다.

시간에 따른 유속분포로부터 생성 및 발달하는 이안류를 확인할 수 있었고, 이안류 발달에 따라 흐름 유속 분포의 횡방향 기울기가 급해지며 경계층이 형성되어 전단요동(shear fluctuation)의 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 이안류가 발달하면서 전단요동과 더불어 쌍외류의 생성부터 이탈 및 소멸하는 과정이 연속되는 것으로 나타났다. 추가로, 반복 실험

험을 통한 유속 분포의 비교를 통해, 3분 평균 유속의 결과뿐만 아니라 12 s 평균유속 분포의 결과도 반복 재현될 수 있음이 확인되었다. 이 실험 결과는 시간변화에 따른 수치모의 결과를 검증하는 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한, LSPIV 기법으로 계측된 순간 유속의 시계열을 통하여 파주기 및 상대적으로 긴 주기의 요동에 따른 유속 성분도 확인하였다.

본 연구를 통해 비정상 이안류 흐름의 특성 관찰뿐만 아니라 LSPIV 기법으로 관측할 수 있는 비정상 운동의 시간 척도(time scale)의 범위도 확인할 수 있었다. 즉, LSPIV 기법을 통한 관측으로 난류 척도(scale)를 분해하여 관측할 수는 없지만, 파주기 척도 및 파랑에 기인하여 생성되는 운동 성분의 척도를 관측할 수 있음을 확인하였다. 즉, 향후 LSPIV 기법은 다른 수리실험에서도 상기 운동 성분 스케일의 현상을 관측하는 데 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

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

## References

- Bowen, A. and Inman, D. (1969). Rip currents 2. Laboratory and field observations. *J. Geophys. Res.*, 74(C3), 5479-5490.
- Castelle, B., Michallet, B., Marieu, V., Leckler, F., Dubardier, B., Lambert, A., Berni, C., Bonneton, P., Barthelémy, E. and Bouchette, F. (2010). Laboratory experiment on rip current circulations over a moveable bed: Drifter measurements. *J. Geophys. Res.*, 115, C12008.
- 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., 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. the Korean Society of Civil Engineers*, 32(5B), 321-329 (in Korean).
- Choi, J. and Roh, M. (2020). A Laboratory experiment of rip currents between the ends of breaking wave crests. *Coastal Engineering*, In print.
- Choi, J., Roh, M. and Hwang, H.S. (2018). Observing the laboratory interaction of undertow and non-linear wave motion over barred and non-barred beaches to determine beach profile evolution in the surf zone. *Journal of Coastal Research*, 34(6), 1449-1459.
- 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).
- 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, 20.
- 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.
- Dean, R.G. (1991). Equilibrium beach profiles: Principle and applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53-84.
- Feddersen, F. (2014). The generation of surfzone eddies in a strong alongshore current. *J. Phys. Oceanogr.*, 44, 600-617.
- Fujita, I., Muste, M. and Kruger A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414.
- Haas, K.A. and Svendsen, I.A. (2002). Laboratory measurements of the vertical structure of rip currents. *J. Geophys. Res.*, 107(C5), 3047.
- Haller, M., Dalrymple, R. and Svendsen, I.A. (1997). Rip channels and nearshore circulation: Experiments. In *Proc. Coastal Dynamics*, 594-603.
- Heckbert, P.S. (1989). Fundamentals of texture mapping and image warping. Mather's Thesis, University of California, Berkeley.
- Johnson, D. and Pattiaratchi, C. (2006). Boussinesq modelling of transient rip currents. *Coastal Engineering*, 53, 419-439.
- Kantoush, S.A., Schleiss, A.J., Sumi, T. and Murasaki, M. (2011). LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-environment Research*, 5, 263-276.
- Kennedy, A.B. and Thomas, D. (2004). Drifter measurements in a laboratory rip current. *J. Geophys. Res.*, 109, C08005.
- Kriebel, D.L., Dally, W.R. and Dean, R.G. (1986). Undistorted froude model for surf zone sediment transport. *Coastal Eng.*, 20, 1296-1310.
- 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.
- Rouse, H. (1937). Nomogram for the settling velocity of spheres. National Research Council, Washington, DC. 57-64.
- 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.
- Wind, H.G. and Vreugdenhil, B.B. (1986). Rip-current generation near structures. *J. Fluid Mech.*, 171, 459-476.
- 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).

Received 10 November, 2020

Revised 30 November, 2020

Accepted 30 November, 2020