

# 항해용 X-band 레이다를 이용한 해운대해수욕장 이안류 자동탐지 및 특성 분석 Automatic Detection and Analysis of Rip Currents at Haeundae Beach using X-band Marine Radar

오찬영\* · 안경모\*\* · 천세현\*\*\*

Chanyeong Oh\*, Kyungmo Ahn\*\* and Se-Hyeon Cheon\*\*\*

**요지** : 본 연구진에서 개발한 항해용 X-band 레이다를 이용한 파랑 및 이안류 관측 시스템을 해운대 해수욕장에 설치하여 이안류를 관측하였다. 기존 이안류 현장관측 방법으로는 측정하기 어려운 이안류의 형태와 크기 및 유속을 X-band 레이다 영상분석을 통해 관측하였다. 본 연구에서는 시간평균한 X-band 레이다 영상으로부터 이안류 발생위치와 크기 및 형태를 자동탐지하는 알고리즘을 개발하였다. X-band 레이다 영상을 3차원 푸리에 변환하고, 도플러 유속이 포함된 분산방정식 조건으로 이안류 유속을 계산하였다. X-band 레이다 영상분석을 통한 이안류 발생위치와 유속 계산 기법은 표류부이 실험으로 검증하였다. 해운대 해수욕장 이안류 조사 결과 한번 발생한 이안류는 1~2일 동안 지속되며, 발생위치가 크게 바뀌지 않는 것이 관찰되었다.

**핵심용어** : 이안류, X-band 레이다, 원격탐사, 해운대 해수욕장, 영상처리

**Abstract** : The observation system has been developed to investigate the rip currents at Haeundae beach using X-band marine radar. X-band radar system can observe shape, size, and velocity of rip currents, which is difficult to obtain through field observation by conventional device. Algorithms which automatically detect locations, shapes, and magnitudes of rip currents were developed using time averaged X-band radar sea clutter images. X-band sea clutter images are transformed through 3D FFT into 2D wave number spectrum and frequency spectrum. Rip current velocities were estimated using differences in wave-number spectra and wave frequency spectra due to Doppler shift. The algorithm was verified by drift experiments. At Haeundae beach, the radar system exactly located the rip currents and found to be sustained for 1-2 days at fixed locations.

**Keywords** : rip current, X-band RADAR, remote sensing, Haeundae beach, image processing

## 1. 서 론

해운대 해수욕장은 우리나라에서 사람들이 가장 많이 찾는 해수욕장 중 하나로 지역 사회에 미치는 경제적 사회적 파급 효과가 매우 크다. 그러나 매년 여름 해운대 해수욕장에서 발생하는 이안류는 해수욕장의 관광적 기능을 심각하게 위협하는 요소로 이안류의 위험성을 저감하기 위해 해운대 해수욕장의 이안류 발생원인을 규명하고 기상조건에 따라 이안류 발생을 예측하는 연구가 진행된 바 있다(kim et al., 2011; Yoon et al., 2012; Choi, 2014). Yoon et al.(2012)은 CCTV 영상 분석과 수치모의를 통해 별집구조의 파랑이 해운대 해수욕장에서 발생하는 이안류의 주요 원인이라고 밝힌 바 있다. 그러나 더 정확한 이안류 발생 예측과 정량적인 수치모의를 위해서는 더 상세하고 많은 이안류 현장관측 자료가 필요하다.

이안류는 대체로 발생위치와 발생시간이 일정하지 않을 뿐 아니라 이안류의 공간적 분포가 매우 좁은 지역에 걸쳐 있어 기존의 1점 관측기기로는 관측이 매우 어렵다. 기존에 수행된 이안류 관측의 경우 관측 성공률이 낮을 뿐 아니라 이안류의 크기 및 형태, 발생위치 그리고 유속 등 지역에서 발생하는 이안류의 특성을 연구하기에는 많은 제약이 있었다. 이러한 1점 관측 기법의 한계를 극복하기 위해 CCTV 등과 같은 영상 장비가 활용되어 왔다. 하지만 CCTV와 같은 영상 장비는 야간에 관측이 어려우며, 파고가 높거나 쇄파대의 폭이 넓어지면 이안류를 관측하기 어려운 단점이 있다. 이에 야간에도 파랑의 관측이 용이하고 높은 파고와 넓은 쇄파대 영역도 관측 가능한 X-band 레이다를 이용해 파고 및 이안류를 관측하려는 시도가 다양하게 이루어져 오고 있다(Dankert and Rosenthal, 2004; Haller et al., 2013; Hessner et al.,

\*한동대학교 건설환경연구소(Institute of Construction & Environmental Research Handong Global University)

\*\*한동대학교 공간환경시스템공학부(Corresponding author: Kyungmo Ahn, School of Spatial Environment System Engineering, Handong Global University, Handong-ro, 558, Pohang, Kyeongbuk 37554, Korea, Tel: +82-54-260-1421, [kmahn@handong.edu](mailto:kmahn@handong.edu))

\*\*\*Department of Ocean, Earth and Atmospheric Sciences, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, USA



Fig. 1. X-band radar system (Haeundae beach).

Table 1. Specification of X-band radar system

RPM	$\Delta t$	$\Delta r$	$\Delta \theta$	Maximum range	Time length/observation
42	1.43 sec	1.5 m	0.3°	968 m	183 or 366 sec

2014).

본 연구진은 2017년 11월부터 2018년 12월까지 해운대해수욕장 이안류 특성을 조사하기 위해 해운대 해수욕장 주변 해역의 레이더 영상을 수집하였다. 수집한 레이더 영상을 효율적으로 분석하기 위하여 이안류 발생위치를 자동적으로 찾는 영상처리 기법을 제시하였다. 또한 이안류 유속을 정량적으로 측정하기 위하여 X-band 레이더 영상으로부터 Young et al.(1985)의 방법으로 유속을 추정하였다. 해운대 레이더 영상자료 중 2018년 3월 자료를 대상으로 이안류 자동탐지 알고리즘을 적용하여 이안류 발생특성과 알고리즘의 정확도를 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 X-band 레이더

X-band 레이더는 선박에서 항해용으로 흔히 사용되는 레이더로 9.5 GHz의 X-band 대역 전파를 사용하여 물체를 탐지한다. X-band 레이더 영상에는 1 km 내지 2 km 범위의 해수면에서 반사된 레이더 신호가 나타나며, 해수면 레이더 영상을 분석하여 유의파고, 첨두주기 그리고 유속 등 다양한 정보를 얻을 수 있다(Alpers and Hasselmann, 1982; Nieto et al., 2004). 한편, X-band 레이더 영상을 시간에 대하여 평균하면 레이더 영상에서 파랑 성분은 상쇄되고 이안류가 나타난다. 이안류의 영향을 받는 해상에서는 잔물결이 이는 등 해수면이 불안정하여 주변부보다 지속적으로 브래그 공명이 더 잘 일어나는 조건이 되며, 이에 따라 주변부보다 큰 값을 나타내게 된다. 이를 이용하여 X-band 레이더 시간평균 영상에서 이안류가 발생한 위치와 이안류의 형태를 파악할 수 있다(Takewaka and Yamakawa, 2011; Haller et al., 2013).

해운대해수욕장 중앙에 위치한 해운대 여름경찰서 옥상에 이안류 관측용 X-band 레이더 시스템을 설치하여 2017년 11월부터 2018년 12월까지 총 32,690개의 X-band 레이더 영상을 수집하였다(Fig. 1). X-band 레이더 영상 수집 간격은 매 10분 간격이며, 하나의 관측 영상은 약 3분 길이로 수집

하였다. 2018년 8월 14일 이후부터는 1회 관측 시 저장되는 이미지 장수를 두배로 늘려 약 6분 길이로 레이더 영상을 수집하였다. 해운대 해수욕장에 설치된 이안류 관측 X-band 레이더 시스템의 시간 분해능과 공간 분해능을 <Table 1>에 나타내었다.

### 2.2 파랑 스펙트럼

X-band 레이더 영상은 1회전 마다 반경 968 m 이내의 공간을 스캔하여 한 장의 이미지를 얻는다. X-band 레이더 영상은 여러 장의 레이더 이미지로 구성된다. 본 연구에서 사용한 X-band 레이더의 회전속도는 42 rpm으로 레이더 이미지 사이의 시간 간격은 1.43초이다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 해수면을 스캔한 3차원 레이더 영상을 3차원 푸리에 변환을 통해 3차원 스펙트럼을 얻는다. 3차원 스펙트럼을 적분하여 파수 스펙트럼, 주파수 스펙트럼 등을 얻을 수 있다. Fig. 2에 우측 그림을 보면 공간(x축, y축)과 시간(t축)에 대해 3차원 푸리에 변환을 수행하여 x방향 파수  $k_x$ , y 방향 파수  $k_y$  그리고 각주파수  $\omega$ 에 해당하는 파워스펙트럼을 얻는다. 3차원 파워스펙트럼을 통해 각각의 주파수 성분( $k_x$ ,  $k_y$ ,  $\omega$ )에 해당하는 에너지를 알 수 있으며 이를 다음 절에서 제시하는 유속/수심추정식의 입력으로 하여 유속과 수심을 계산한다.

### 2.3 유속/수심 추정

X-band 레이더 영상을 3차원 푸리에 변환하여 해수면에 대한 3차원 스펙트럼을 얻고, 파랑 스펙트럼에 대응하는 각주파수와 파수에 대해 유속과 수심을 추정한다.

흐름장에서 분산방정식은 식(1)과 같다.

$$\omega = k \cdot U + \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (1)$$

여기서,  $k$ 는 파수이고,  $\omega$ 는 각주파수,  $h$ 는 수심,  $g$ 는 중력가속도 그리고  $U$ 는 유속벡터이다.

식(1)로부터 X-band 레이더 영상의 3차원 스펙트럼에서 총 N개의 주파수 쌍 중 j번째 파랑성분 주파수 쌍( $k_{xj}$ ,  $k_{yj}$ ,  $\omega_j$ )에 대해 다음 식을 만족하는 값을 구해 유속을 구할 수 있다.

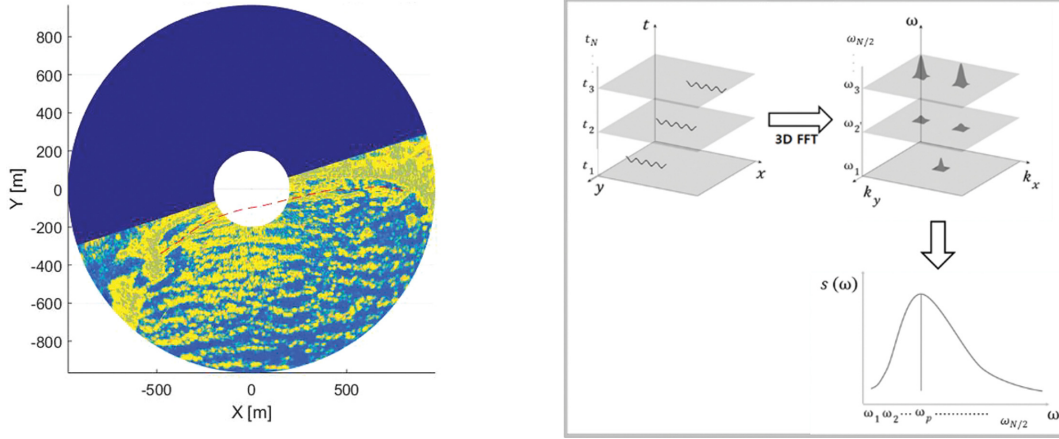


Fig. 2. X-band radar image (left); Procedure of wave spectrum calculation (right).

$$Q(u_x, u_y, h) = \sum_{j=1}^N S_j(\omega_j - u_x k_{xj} - u_y k_{yj} - \sigma_j)^2 = 0 \quad (2)$$

여기서  $\sigma_j = \sqrt{gK_j \tanh(K_j h)}$  이며,  $K_j = \sqrt{k_{xj}^2 + k_{yj}^2}$  이다.  $S_j$ 는 주파수 쌍( $k_{xj}, k_{yj}, \omega_j$ )에 해당하는 스펙트럼 에너지 세기로 레이다 영상의 주된 성분을 나타내기 위한 가중치로 작용한다.

식(2)를 x 방향 유속  $u_x$ 와 y 방향 유속  $u_y$ 에 대해 각각 편미분하고 결과를 연립하여 다음과 같이 유속 계산식을 도출한다.

$$u_x = \left( \sum_{j=1}^N S_j k_{xj}^2 \sum_{j=1}^N S_j (\omega_j - \sigma_j) k_{xj}^2 - \sum_{j=1}^N S_j k_{xj} k_{yj} \sum_{j=1}^N S_j (\omega_j - \sigma_j) k_{yj}^2 \right) / \left( \sum_{j=1}^N S_j k_{xj}^2 \sum_{j=1}^N S_j k_{yj}^2 - \left( \sum_{j=1}^N S_j k_{xj} k_{yj} \right)^2 \right)$$

$$u_y = \left( \sum_{j=1}^N S_j k_{xj} k_{yj} \sum_{j=1}^N S_j (\omega_j - \sigma_j) k_{xj}^2 - \sum_{j=1}^N S_j k_{xj} k_{yj} \sum_{j=1}^N S_j (\omega_j - \sigma_j) k_{yj}^2 \right) / \left( \sum_{j=1}^N S_j k_{xj}^2 \sum_{j=1}^N S_j k_{yj}^2 - \left( \sum_{j=1}^N S_j k_{xj} k_{yj} \right)^2 \right) \quad (3)$$

이안류는 얇은 수심에서 발생하며 식(3)은 천해에서 수심에 민감하게 반응한다. 그러나 쇄파대는 얇은 수심 변화를 겪음에도 불구하고, 기존 수심측량 방식으로 넓은 면적을 짧은 간격으로 측량하는 것이 쉽지 않다. 식(2)에서 수심을 변수로 두고 편미분하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다(Ahn et al., 2015).

$$Q_h(u_x, u_y, h) = (\omega_j - u_x k_{xj} - u_y k_{yj} - \sigma_j) \frac{g K_j^2 (1 - \tanh^2(K_j h))}{\sigma_j} = 0 \quad (4)$$

식(4)를 유속과 함께 풀면 수심을 계산할 수 있다.

한편, 레이다 영상 자료 크기에 따라 유속 측정 오차가 발생한다. 이는 레이다 영상의 스펙트럼 주파수 분해능(frequency resolution)이 레이다 영상 자료 크기에 따라 결정되기 때문이다. 주파수 분해능( $\Delta k_x, \Delta k_y, \Delta \omega$ )은 레이다 영상의 x 방향

길이  $L_x$ , y 방향 길이  $L_y$ , 관측 시간 길이 T에 대하여 식(5)와 같이 계산된다.

$$\Delta k_x = \frac{2\pi}{L_x}, \Delta k_y = \frac{2\pi}{L_y}, \Delta \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

주파수 분해능은 레이다 영상 크기와 반비례 관계이다. 따라서 이안류의 크기가 작고 지속시간이 짧을 수록 레이다를 이용한 유속 측정 오차가 커진다. 이러한 레이다 영상 자료 크기에 따른 오차는 레이다 유속측정과정의 비선형성으로 인해 수식으로부터 정량적으로 파악하기 어렵다. 이에 따라 수치모의 실험으로 측정오차를 확인하였다. JONSWAP 스펙트럼과 Mitsuyasu 방향스펙트럼으로 해수면을 합성하고, 쇄도우 변조와 틸트 변조를 적용하여 레이다 이미지를 합성하였다(Fig. 3). 쇄도우 변조와 틸트 변조는 레이다에 스캔된 해수면 영상에 가장 큰 영향을 주는 이미지 변조 메커니즘으로 쇄도우 변조는 앞 파랑에 의해 뒤 파랑이 가려져 발생하고 틸트 변조는 레이다 전파 입사 방향과 해수면 방향 조건에 따라 결정된다(Nieto et al., 2004). 너울과 같이 긴 파장

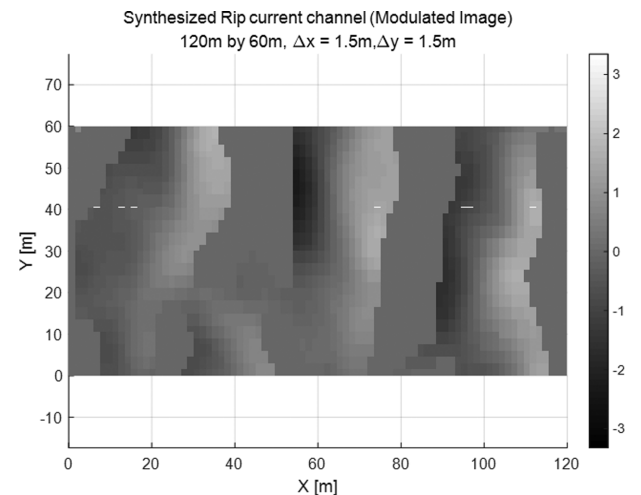


Fig. 3. Synthesized rip radar image.

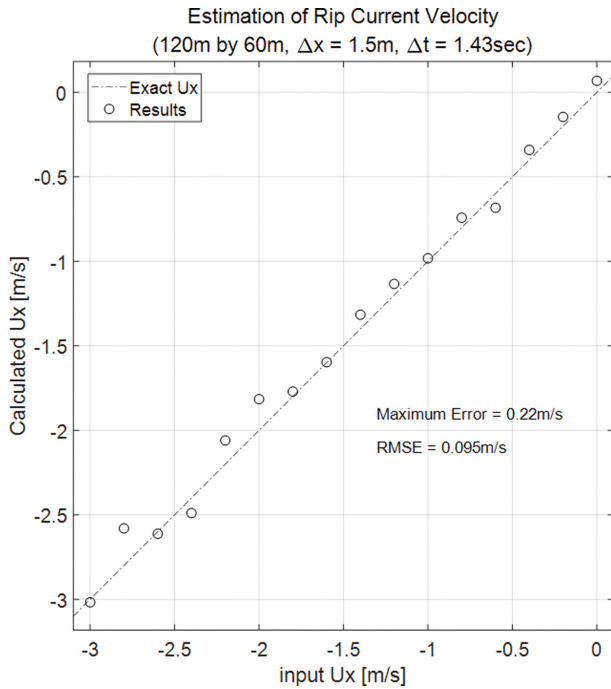


Fig. 4. Results of current estimation from synthesized rip radar image.

을 가진 파랑조건에서도 이안류 크기와 같은 작은 영역을 분석하는 것이 유효할지 확인하기 위해 유의파고 4 m 그리고 첨두주기 8.53초로 수치모의 실험을 수행하였다. 0 m/s부터 0.2 m/s 간격으로 최대 3 m/s의 유속을 수치모의 실험해본 결과 길이 120 m, 너비 60 m 그리고 지속시간 3분일 경우 최대 오차 0.22 m/s, 평균제곱근오차 0.095 m/s의 결과를 얻었다(Fig. 4).

### 2.3 X-band 레이다 시간평균 영상에서의 이안류 탐지

시간평균한 X-band 레이다 영상에서 이안류가 발생한 곳에서는 주변보다 강한 신호가 관측된다. Fig. 5a는 해운대 해수욕장에서 관측한 X-band 레이다 영상을 시간평균한 것으로 해안선에서 먼바다로 향하는 이안류의 형태가 관찰된다.

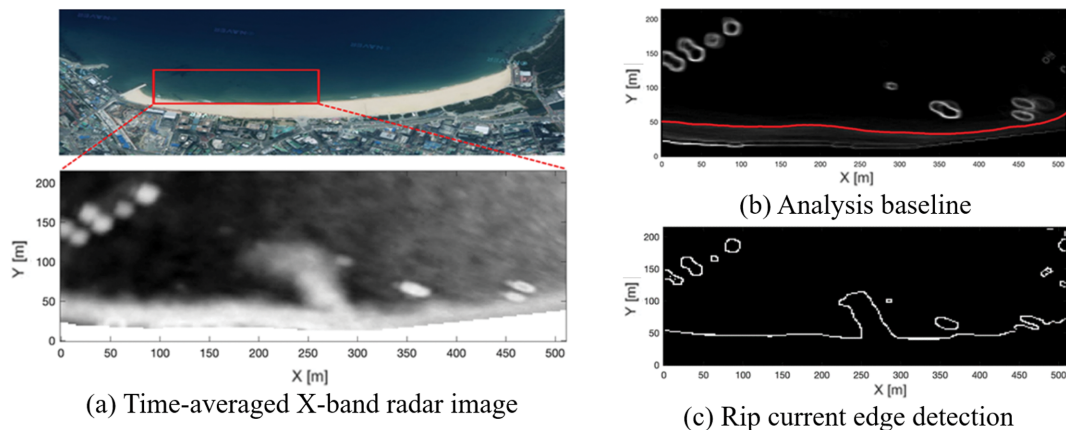


Fig. 5. Image processing for rip current detection.

X-band 레이다 시간평균영상으로부터 이안류를 추출하는 과정은 다음과 같다(Fig. 5). 먼저, X-band 레이다 시간평균 영상을 분석에 용이한 크기로 분할하고 각 이미지의 경계를 추출한다(Canny, 1986; Fig. 5c 참조). 추출한 경계선 이미지 중 이안류가 발생하지 않은 시점의 해안 경계 이미지를 평균하여 이안류 분석 기준선을 산정한다(Fig. 5b).

산정한 이안류 분석 기준선과 경계 추출된 분석 대상 이미지를 비교하여 이안류 발생 여부와 이안류 발생위치를 찾는다. 여기서 이안류 분석 기준선에서 각 이미지 경계선 사이가 떨어진 거리의 평균값과 이 평균값의 차분 값을 산정하여 이를 이안류 발생 기준이 되는 변수로 사용하였다.

## 3. 해운대 이안류 관측 결과

### 3.1 표류부이를 통한 이안류 관측 기법 검증

X-band 레이다 영상분석을 통한 이안류 유속과 발생위치의 정확도를 확인하기 위해 표류부이를 이용한 검증을 수행하였다. 이안류 발생 시 표류부이를 해상에 투척하고 해운대 파라다이스 호텔 옥상 CCTV에 나타난 표류부이 궤적을 추적하여 관측 결과를 비교하였다.

Fig. 6은 2018년 7월 13일 오전 9시 45분 이안류 발생 시 해운대 해수욕장 관측 위치(a), 정사보정된 CCTV영상(b), 해안에서 촬영한 영상(c) 그리고 X-band 레이다 시간평균영상(d)을 나타낸 것이다. 이안류는 해운대 해수욕장 7번 망루와 8번 망루 사이에서 발생하였고, CCTV영상과 X-band 레이다 시간평균영상에서 이안류 관측 위치가 동일하게 나타났다. 표류부이 중 가장 멀리 이동한 표류부이는 해수욕객 안전을 위해 해운대 해수욕장 전면 해상에 설치된 1차안전선까지 약 60 m 이동하였다. CCTV 영상과 X-band 레이다 시간 평균 영상에서도 해안으로부터 약 60 m 길이로 발달한 이안류가 확인된다. 이때 해운대 해수욕장 전면 해상에 위치한 국립해양조사원 해양관측부이에서 관측된 유의파고는 0.73 m 유의파주는 8.59초이다.

X-band 레이다 영상에서 이안류가 포함되도록 가로길이



Fig. 6. Haeundae beach rip current observation (a); Rectified CCTV image of rip current (b); Drifters were caught in rip current (c); Time-averaged X-band radar image (d).

60 m, 세로길이 120 m로 레이더 영상을 분할하여 유속 및 수심을 계산하였다. 레이더 영상분석을 통해 계산된 유속은 0.53 m/s로 나타났다. 표류부이로 관측한 유속은 4개의 추적 점에서 최소 0.54 m/s 최대 0.77 m/s의 평균유속을 나타내었다. 이때, 레이더 영상으로부터 계산된 수심은 3.04 m이고, 파

장은 39.9 m로 나타났다.  $h/L$ 은 0.076으로 0.05보다 크므로 천이파에 해당한다. 유속 추정식은 미소진폭파 조건으로부터 유도된 것이므로 극천해파에 적용시 오차가 크다. 본 관측 결과에서는 파장이 수심에 비해 짧아 유속과 수심이 상당히 정확하게 측정되었으나, 내습하는 파랑의 특성에 따라 계산 결

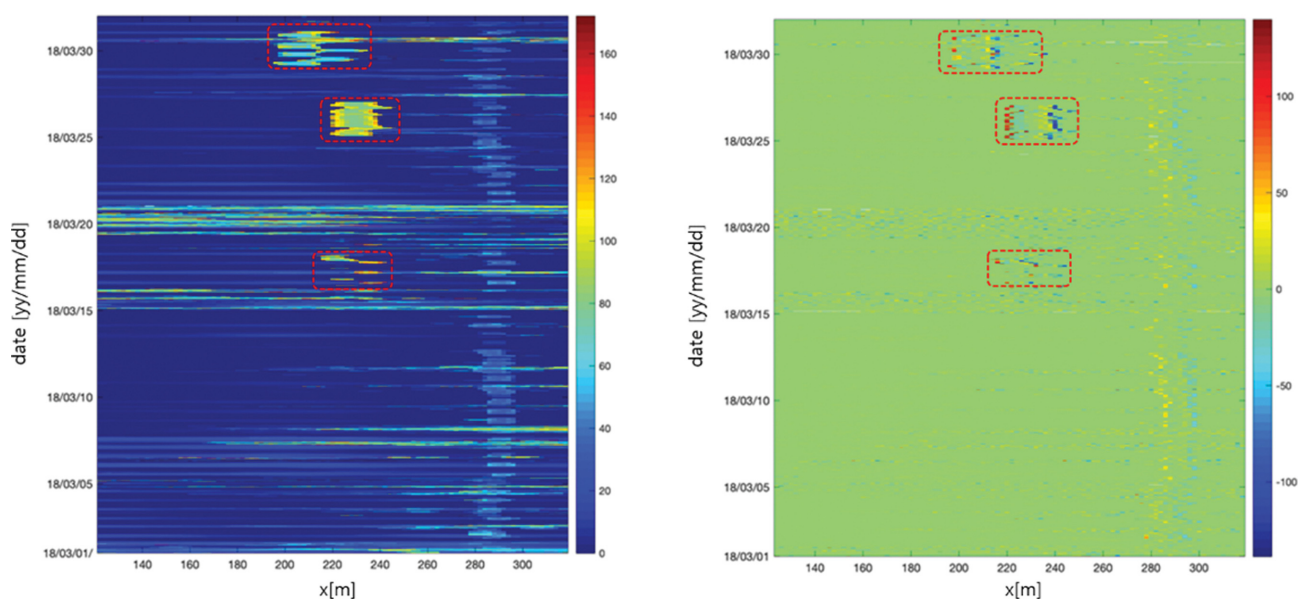


Fig. 7. Mean distance between analysis baseline and rip current edge (left); Difference of mean distance between analysis baseline and rip current edge (right).

과의 오차가 달라질 것으로 판단된다.

한편, Kim et al.(2011)은 관측기기로 정확한 이안류 위치를 파악한 것은 아니나 해경 목측에 의한 이안류 위치 정보에 따르면 본 연구에서 이안류를 실측한 파라다이스 호텔 전면 해상은 이안류가 자주 발생하는 지역이다. 또한 Park(2013)

은 본 연구와 동일한 위치에서 2012년 8월 10일 15시 31분경에 60 m 내지 70 m 크기의 이안류를 관측하였으며, CCTV 영상을 분석하여 이안류 유속 최대값 1.12 m/s 그리고 이안류 유속 평균값 0.7 m/s를 보고하여 본 이안류 관측 결과와 발생위치와 크기가 유사하였다.

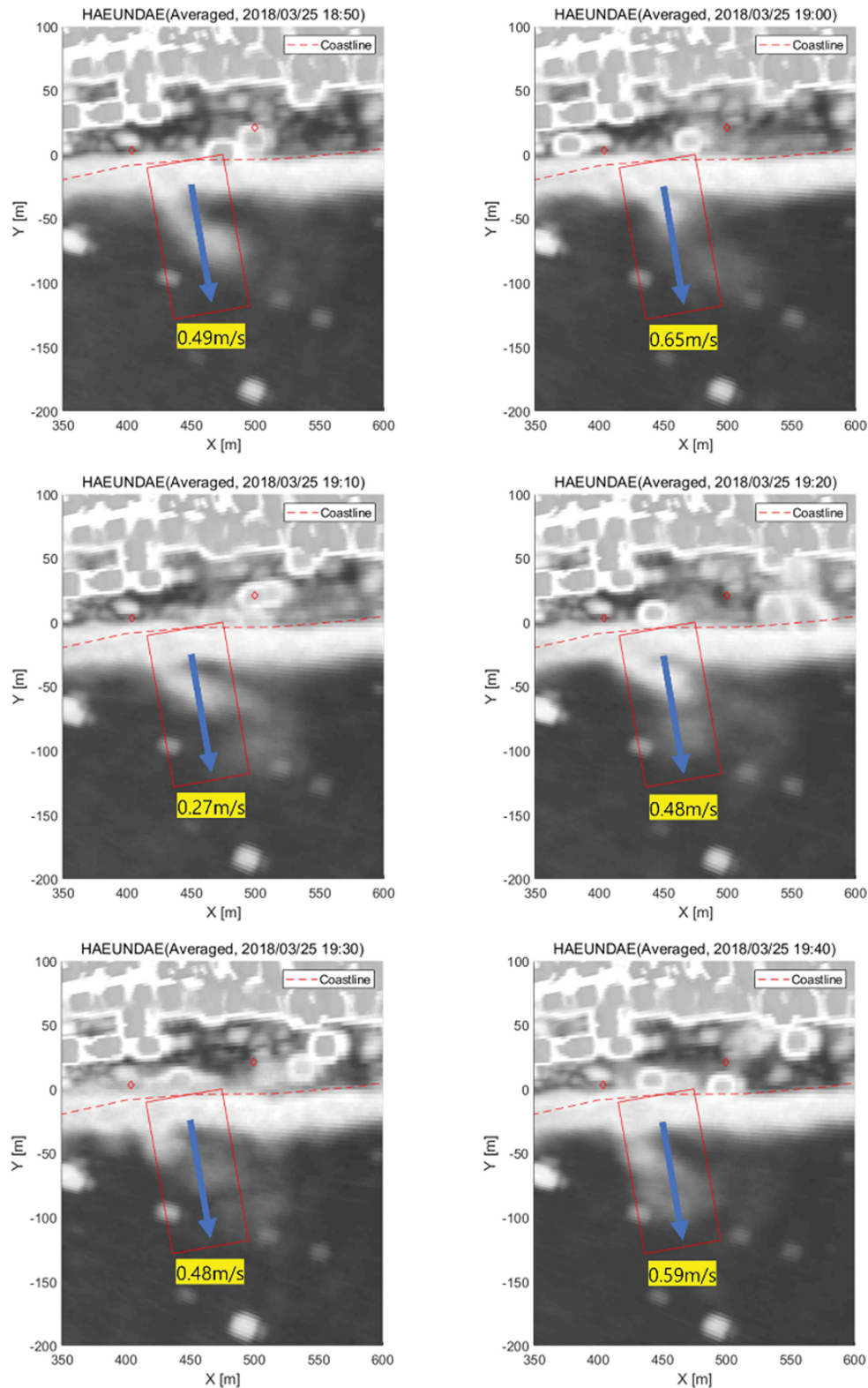


Fig. 8. Time-averaged X-band radar image and current velocity 2018/03/25 18:50~19:40.

### 3.2 해운대 이안류 특성 분석 결과

2018년 3월 해운대 해수욕장에서 X-band 레이더로 관측된 이안류 발생 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 좌측 그래프는 분석기준선에서 이안류 경계까지 거리의 평균을 나타낸 그래프이며, 오른쪽 그래프는 왼쪽 그래프의 차분값이다. 여기서 그래프 가로축은 해안선방향 거리이며 Fig. 5a에 나타난 해안영상의 가로축과 일치한다. 그래프 세로축은 시간을 나타낸다. 빨간색 점선 사각박스는 이안류가 발생한 시점과 위치를 표시한 것이다.

2018년 3월 해운대해수욕장 이안류 관측 결과를 살펴보면, 이안류 발생위치가 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 수 일동안 이안류가 연속적으로 발생하는 것이 확인된다. Fig. 8은 2018년 3월 25일 18시 50분부터 19시 40분까지 10분 간격으로 관측한 X-band 레이더 시간평균 영상을 나타낸 것이다. 빨간색 사각박스는 60 m by 120 m 크기이며, 해당 영역을 분석하여 유속을 계산한 결과를 노란 사각박스에 표시하였다. 50분 동안 동일 위치에서 유사한 방향으로 향하는 이안류가 나타나며, 유속은 0.27 m/s 내지 0.65 m/s로 관측되었다. 한편, 해운대해수욕장 전면 해상에 위치한 국립해양조사원 해양관측부이 관측 결과에 따르면 2018년 3월 25일 19시의 유의파고는 0.57 m 유의파주기는 3.94초로 나타났다.

일반적인 이안류가 수 분 이내로 돌발적으로 생성되었다 사라지는 것과 달리 유사한 위치에 오래 지속되는 이유는 지형적 요인 때문인 것으로 보인다. 해당 시점의 수심 자료를 확보하지 못하였으나, 해당 위치에 이안류 수로(rip channel)가 존재할 것으로 보인다. 또한 국립해양조사원 해양관측부이에 파향 관측자료가 제공되지 않아 확인이 불가하나, 해당 지형에 이안류를 유발하는 방향의 파랑이 해운대 해안에 입사하여 작은 파고에도 이안류가 발생하는 것으로 추정된다.

## 4. 결 론

X-band 레이더 영상분석을 통해 해운대 해수욕장에서 발생하는 이안류 특성을 조사하였다. X-band 레이더 시간평균 영상에서 이미지 프로세싱을 이용하여 이안류를 탐지하고 또한 X-band 레이더 영상을 푸리에 변환하여 유속을 측정하였다. X-band 레이더 영상분석을 검증한 결과 이안류 발생위치와 형태가 CCTV와 동일하게 나타나는 것을 확인하였다. X-band 레이더 유속관측결과를 표류부이의 움직임을 추적하여 얻은 유속 관측결과와 비교해본 결과 최대 0.24 m/s의 오차를 나타내었다. 2018년 3월을 대상으로 X-band 레이더 영상 분석하여 해운대 해수욕장 이안류 발생을 조사해본 결과 이안류가 1일 내지 2일 동안 지속되며, 발생위치가 대체적으로 일치하는 것을 확인하였다. 동일한 위치에서 유사한 방향으로 이안류가 지속적으로 발생하는 것은 수 분 이내로 생성되었다 사라지는 것으로 알려진 일반적인 이안류 특성과 다르다. 이는 해당위치의 지형적인 요인과 수 일동안 지속되는 기상적 요인이 결합되어 발생하는 현상으로 추정된다.

다만 구조물 설치구역에서 이안류를 효과적으로 추적하지 못하는 한계는 향후 지속적인 알고리즘 개량을 통해 극복해야 할 점이다. 한편 유속/수심 추정식은 미소진폭과 조건을 토대로 한 식으로 이안류가 발생하는 천해에서 오차가 커질 가능성이 있다. 분석 영역 크기와 위치의 작은 차이에도 값이 크게 바뀌고, 수심 계산이 발산하는 등 개선된 유속/수심 추정 기법 개발이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 해양과학조사 및 예보 기술사업의 일환인 “연안이상현상(이상고파, 이안류) 발생원인 규명 및 대응체계 구축”(NO.20140057) 연구비 지원으로 수행되었습니다. 정사보정 된 해운대 해수욕장CCTV 영상 자료 및 표류부이 속도 분석 결과를 제공해주신 건설기술연구원과 (주)지오시스템리서치에 감사의 말씀을 드립니다.

## References

- Ahn, K., Oh, C.Y. and Chun, H. (2015). Algorithm for detection of current and water-depth using X-band marine radar. *Procedia Engineering*, 116, 818-823.
- Alpers, W. and Hasselmann, K. (1982). Spectral signal to clutter and thermal noise properties of ocean wave imaging synthetic aperture radars. *International Journal of Remote Sensing*, 3(4), 423-446.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6, 679-698.
- 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. *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(5B), 321-329 (in Korean).
- Choi, J. (2014). Study of rip current warning index function according to real-time observations at Haeundae beach in 2012. *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(4), 1191-1201 (in Korean).
- Dankert, H. and Rosenthal, W. (2004). Ocean surface determination from X-band radar-image sequences. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C4).
- Haller, M.C., Honegger, D. and Catalan, P.A. (2013). Rip current observations via marine radar. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 140(2), 115-124.
- Hessner, K., Reichert, K., Borge, J.C.N., Stevens, C.L. and Smith, M.J. (2014). High-resolution X-band radar measurements of currents, bathymetry and sea state in highly inhomogeneous coastal areas. *Ocean Dynamics*, 64(7), 989-998.
- Kim, I.C., Lee, J.Y. and Lee, J.L. (2011). Generation mechanism and numerical simulation of rip current at Haeundae beach. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineer*, 23(1), 70-78 (in Korean).

- Nieto Borge, J., Rodríguez, G.R., Hessner, K. and González, P.I. (2004). Inversion of marine radar images for surface wave analysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(8), 1291-1300.
- Park, W.K. (2013). Generation Mechanism and Characteristics of Rip Current at Haeundae Beach. Thesis of doctoral dissertation. Hanyang Univ. (in Korean).
- Takewaka, S. and Yamakawa, T. (2011). Rip current observation with X-band radar. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 43.
- 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. *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(4), 243-251 (in Korean).
- Young, I.R., Rosenthal, W. and Ziemer, F. (1985). A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C1), 1049-1059.
- 
- Received 11 December, 2019  
Revised 24 December, 2019  
Accepted 26 December, 2019