

## 해운대 이안류 발생 시 수영만의 물리환경 - 2009년 8월

이재철\* · 김대현  
부경대학교 해양과학공동연구소

### Physical Environments of Suyong Bay during the Rip Current Events at Haeundae - August 2009

J. C. LEE\* AND D. H. KIM

*Korea Inter-university Institute of Ocean Science, Pukyong National University*

수영만에 설치된 모니터링 부이에서 관측된 해류, 바람, 파고자료와 부산항의 조석자료를 이용하여 강한 이안류가 발생했던 2009년 8월 13~15일의 물리환경을 분석하였다. 수영만의 조류는 단주기 해류성분과 비슷한 크기를 가지며 대조-소조에 따른 변화를 보인다. 이안류가 발생했을 때 북동풍이 강하게 불고 조류와 해류가 해운대 해안 쪽 방향으로 중첩되었다는 공통점이 있고, 8월 14일 오후에 이안류가 없었을 때는 파고와 조석은 유사한 조건이었지만 조류와 해류가 거의 반대방향이었다. 강한 바람은 큰 파랑을 동반하여 이안류 발생의 기본조건을 조성하지만 만 내의 해류에 미치는 국지적인 영향은 비교적 작다. 수영만에 인접한 세 해수욕장 중에서 해운대에서만 강한 이안류가 나타나는 데에는 해운대 중앙부의 특이하게 얕은 수중언덕이 외해에서 들어오는 파랑, 해류, 조류를 감쇠시키는 효과가 중요할 것으로 생각된다.

A data set of current, wind and wave height measured at the monitoring buoy and sea level at Busan harbor were analyzed to explain the physical conditions during the strong rip current events at Haeundae Beach of Suyong Bay during 13~15 August 2009. Tidal current, with spring-neap variations, has similar average speed to the short-term non-tidal currents. The common features at the time of rip currents are the strong northeasterly wind and superposition of tidal and non-tidal currents both flowing toward the coast. However on 14 August when the rip current did not occur, tide and wave height were similar to the rip-current cases but the tidal and non-tidal current were to nearly opposite directions. While strong winds produce large waves thus the basic condition for rip current but its influence on the local circulation in the bay is relatively small. Of the three adjacent beaches, only at Haeundae the rip currents are reported. This difference may be due to the unique bottom topography featured by underwater hill in the central region off Haeundae which can decay the incoming waves, tides and currents to intensify the rip current.

**Keywords:** Rip current, Haeundae, Monitoring buoy, Tidal current, Non-tidal current

### 서 론

해운대 해수욕장은 부산의 대표적인 관광지의 하나로서 부산 남동부에 있는 수영만의 북동쪽에 위치하고 있다(Fig. 1). 수영만의 서쪽에는 광안리 해수욕장이, 그림의 영역에는 포함되지 않았지만 해운대의 동쪽으로 송정 해수욕장이 인접해 있다. 해운대 해수욕장은 해안침식에 의한 해변 모래유실이 오래 전부터 지속되어 매년 여름철에 인위적인 모래투입이 이루어 지고 있으며 근래에는 해수욕객의 안전을 위협하는 강한 이안류의 발생이 많은 관심을 끌고 있다.

이안류의 발생에 관한 연구로는 Bowen(1969), Bowen and Inman(1969), Tam(1973), Noda(1974), Leblond and Tang(1974),

Darlymple(1975), Darlymple and Lozano(1978) 등에 의한 직선형 태 혹은 규칙적인 주기함수의 형태를 갖는 해안선과 해저지형을 가정한 이론적 모델들과 Chen *et al.*(1999), Lippmann *et al.*(1999), Hass *et al.*(2003), Yu and Slinn(2003), Kennedy and Zhang(2008) 등의 수치모델들을 예로 들 수 있다. 이안류는 기본적으로 파랑에 의해서 발생하는 것이기 때문에 파랑의 성질과 크기에 의해 좌우되지만, 조석에 따라 달라질 수도 있다(Open University, 1999). 그러나 대부분이 파랑에 의해서 발생하는 이안류에 대한 연구로서 조석과 조류, 혹은 불규칙한 해저지형의 영향에 관한 연구는 매우 드물다.

수영만 일대에는 광안리, 해운대, 송정의 3개 해수욕장이 서로 가까이 위치해 있는데 해운대에서만 강한 이안류가 발생하는 것으로 알려져 있을 뿐 다른 해수욕장에서는 보고되지 않고 있다. 세 해수욕장이 서로 가까이 있으므로 외해에서 접근하는 파랑의 크기는 거의 같을 것으로 예상되기 때문에 해운대에서만 이안류가 강

\*Corresponding author: jaechul@pknu.ac.kr

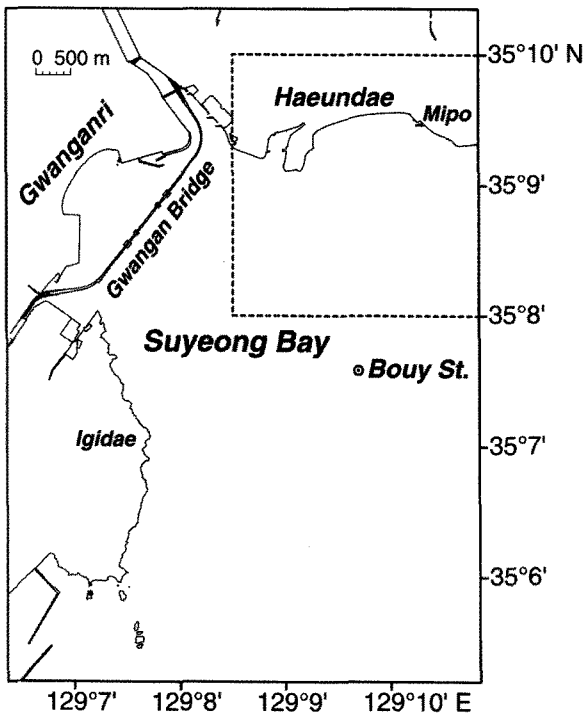


Fig. 1. A map of Suyeong Bay showing the position of the Buoy Station. The area enclosed by dashed line is enlarged in Fig. 6 with bottom topography.

해지는 원인에는 파랑 이외의 요인들이 중요하게 작용할 것으로 보인다. 2009년 8월 13일과 15일 두 차례에 걸쳐서 매우 강한 이안류가 보고되었는데, 본 논문에서는 당시에 수영만에 설치된 모니터링 부이에서 관측된 바람과 유속자료를 이용하여 해운대의 강한 이안류 발생에 영향을 줄 수 있는 물리적 조건들을 분석하였다.

### 자료 및 방법

수영만의 수온, 해류, 기상을 모니터링 하기 위해서 2009년 7월 말에 해운대 남방 3.6 km(35°7.5N, 129°9.6E), 수심 26 m 지점에 부이를 설치하여 10분 간격으로 자료를 수신하기 시작하였다(Fig. 1). 부이에는 초음파식 풍속계를 포함한 기상관측 센서들과 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 및 파고계를 장착하였다.

ADCP에 의한 층별 유속은 2 m 간격으로 관측되었다. 수심이 얇고 유속의 연직변화가 크지 않으므로 최상층 관측자료인 6 m 수심의 자료만을 이용하였다. 조석과의 비교를 위하여 부산항의 관측자료를 사용하였는데 1분 간격의 원래 자료를 10분 간격으로 추출해서 다른 모니터링 자료와 동일한 시계열 자료로 만들었다. 실시간 모니터링 자료는 8월 2일부터 수신되었으며 9월 10일부터 일시적인 통신장애로 중단되었으므로 모든 시계열 자료를 이 기간에 맞추어서 분석하였다. 유속 모니터링 자료와 부산항 조석자료는 MATLAB 프로그램 T\_TIDE(Pawlowicz et al., 2002)에 의한 조화 분석을 실시하였으며, 조석과 조류성분을 제거하고 남은 비조석·비조류 성분에 대하여 40시간 low-pass filter를 적용하여 장주기 성분을 산출하였다. 풍속과 파고 자료는 10분 간격 자료를 그대로 사용하였는데, 파고의 경우에는 강한 이안류의 발생 시기가 관심의

대상이기 때문에 최대파고를 주로 이용하였다. 8월 13일과 15일의 이안류 발생 시점은 해운대 해수욕장의 수상구조대에 확인하였다.

### 결 과

#### 시계열 자료의 비교검토

해운대에 이안류가 발생한 8월 13일과 15일에 바람, 해류, 조석, 파고의 상태를 파악하기 위해서 Fig. 2와 Fig. 3에 각각의 시계열 자료를 나타내었고 Fig. 4에는 이안류가 없었던 8월 14일의 자료를 비교하였다. 8월 13일의 자료를 보면(Fig. 2), 오후 1시 40분경에 이안류가 발생했는데, 바람은 최대 3.6 m/sec의 강한 북동풍이 10시간 이상 지속되다가 다소 약해진 상태였고 유속은 20~33 cm/sec의 북서향류로서 해운대 해수욕장을 향하는 성분이 있었으며 부산항의 조석은 만조가 약 1시간 지난 시점이었다. 최대파고는 약 2.3 m 정도로서 전반적으로 높은 파고였지만 오전 8시경의 약 3 m, 오후 1시의 2.7 m 등으로 파고와 이안류 발생 가능성이 비례하는 것으로 보이지는 않으므로 다른 요인들의 영향도 고려할 필요가 있다.

8월 15일에는(Fig. 3) 이안류가 오후 3시 20분경에 발생했는데 모든 조건들이 13일의 경우와 유사하였다. 바람은 북동풍이 비교적 강했고 해류도 20~30 cm/sec의 북서향류가 점차 강해지고 있었으며 조석은 만조에 최대파고 또한 2 m 이상을 기록한 직후였다.

이안류가 없었던 8월 14일(Fig. 4) 오후 1시부터 4시 사이의 조석은 만조였으며 최대파고는 2 m 이상이였다. 그러나 바람은 최대 3.7 m/sec의 남서풍이 강하게 불었고 해류도 20~30 cm/sec의 남서향류였다는 것이 다른 점들이다. 그러므로 조석과 파랑 조건은 이

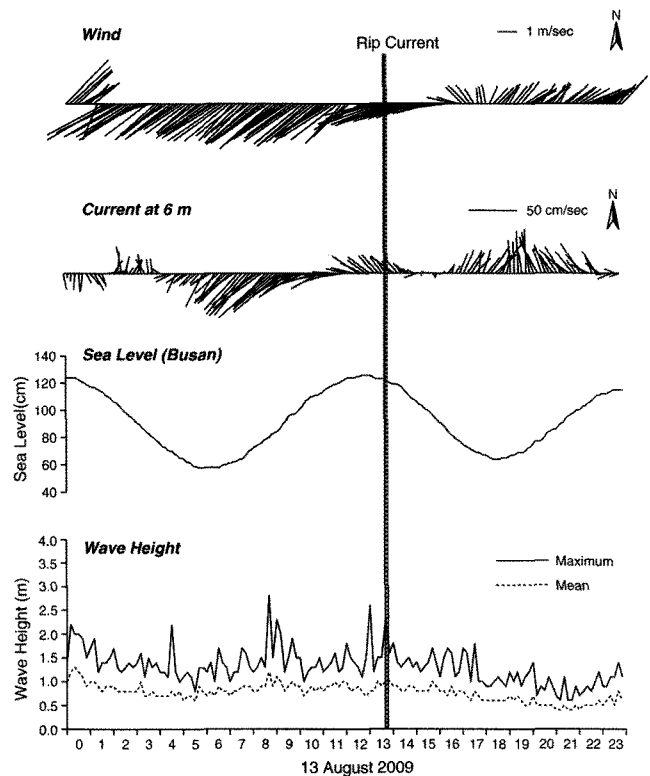


Fig. 2. Time series of wind velocity, near-surface current velocity, sea level at Busan harbor and wave heights on 13 August 2009. Vertical bar denotes the time of strong rip current event.

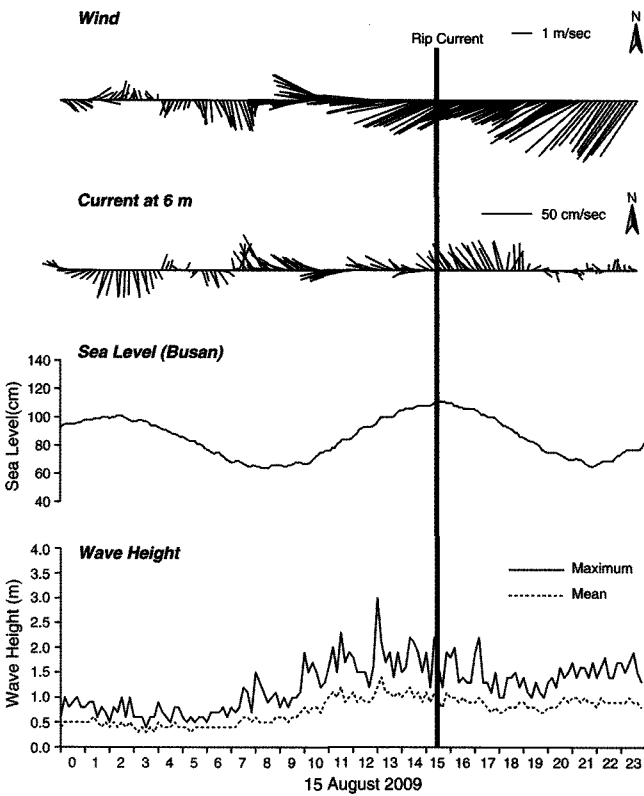


Fig. 3. Time series of wind velocity, near-surface current velocity, sea level at Busan harbor and wave heights on 15 August 2009. Vertical bar denotes the time of strong rip current event.

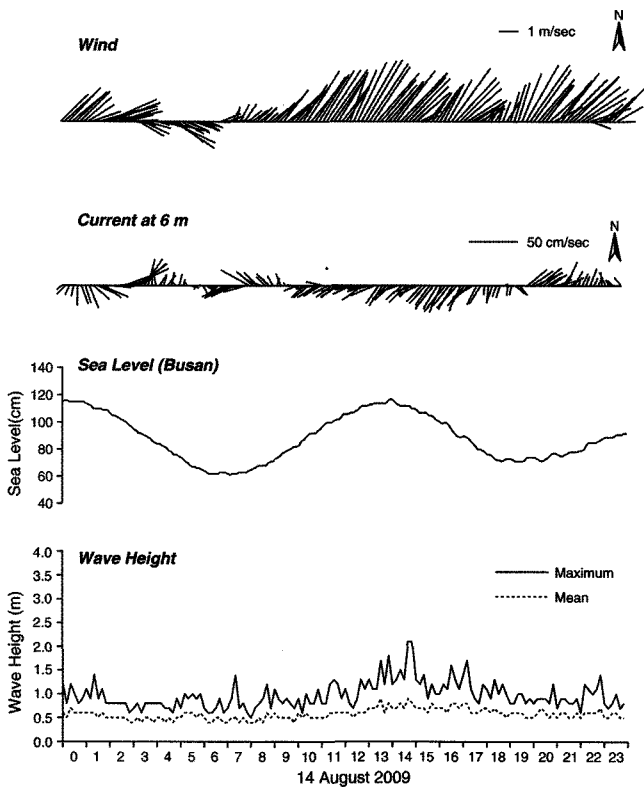


Fig. 4. Time series of wind velocity, near-surface current velocity, sea level at Busan harbor and wave heights on 14 August 2009 when the rip current did not occur.

안류 발생의 경우와 유사하였으나 바람과 해류는 반대 방향으로 작용했다는 것을 알 수 있다.

비록 이안류의 발생이 2회에 그쳤기 때문에 충분한 자료라고 보기는 어려우나 이 세 가지 사례를 비교함으로써 파랑 이외의 해양 조건을 검토해 볼 수 있다. 바람에 있어서 북동풍이 오래 불게 되면 국지적으로는 남서향의 파랑이 발생하지만 풍성해류는 좁은 수영만 내에서 크게 발달하지 않으며 오히려 외해의 에크만 수송이 훨씬 크게 영향을 준다(이와 김, 2007). 그러므로 지속적인 북동풍은 전반적으로 수영만 인쪽을 향하는 에크만 수송을 일으키게 되고 해운대와 광안리를 포함하는 수영만 해안의 해수면을 어느 정도 상승시키는 효과를 유발할 것으로 추측된다. 이것은 또한 만조에 따른 창조류와 증첩되면서 이안류를 강화시키는 요인으로 작용할 수 있다. 반대로 지속적인 남서풍은 외해쪽으로 에크만 수송을 일으킬 것이다.

조석-조류에 있어서 만조시의 창조류는 한국 남동해안에서 전체적으로 남서향으로 흐르면서 수영만 해안 쪽으로 들어올 것으로 예상되는데, 8월 14일 오후의 만조에는 남서향류가 있었으나 이안류가 발생했던 13일과 15일에는 북서향류가 기록된 점이 특이하다. 이는 남서향의 조류에 비해서 북서향의 해류 성분이 더 우세했다는 것을 의미한다. 그러나 수영만의 바깥 쪽에 위치한 관측지점의 유향과는 달리 해운대 해안 부근에서는 수영만의 지형에 의해 조류와 해류 모두 해안을 향해 증첩될 가능성이 높다.

유속자료의 각 성분들을 비교하기 위해서 Fig. 5의 위에서부터

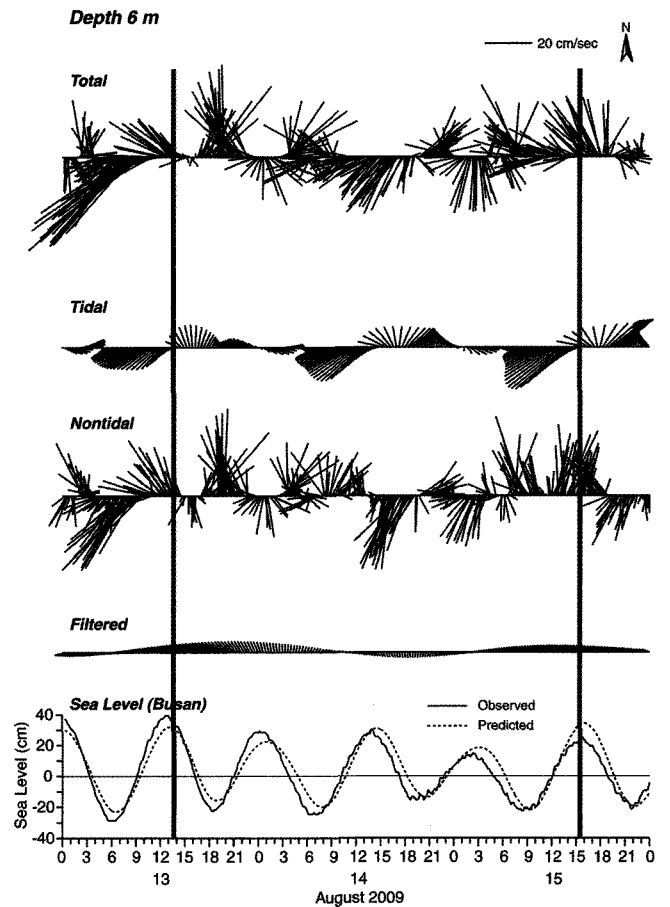


Fig. 5. Current velocity components at 6 m depth and sea level at Busan harbor from 13 to 15 August 2009.

관측유속(Total), 조류성분, 비조류 성분(Non-tidal), 장주기 성분(Filtered)의 백터, 그리고 부산항의 조석관측자료와 조화분석 결과 재현된 조석을 차례로 도시하였다. 소조기에 해당되는 조류는 전반적으로 약한 유속이며 천해조의 영향으로 다소 복잡한 양상을 보인다. 그러나 8월 전체의 자료를 비교하면 유속 크기의 평균과 표준편차는 조류와 비조류 각각  $16.2 \pm 10.3$  cm/sec,  $16.6 \pm 10.2$  cm/sec로서 거의 같다. 그러나 에크만 수송의 영향이 일부 반영되는 장주기 성분은  $7.7 \pm 5.1$  cm/sec로서 매우 약하다.

이안류가 발생한 시기에 조류는 남서향류에서 서향류로 바뀌고 있었고 비조류는 북서향류가 매우 강했으며 장주기 성분 또한 북향류였던 것을 알 수 있다. 한편 8월 14일 비슷한 시기에 조류는 북서향이었지만 남서향으로 강하게 흘렀던 비조류 성분이 지배적이었으며 약한 장주기 성분도 남향이였다. 조류와 조석을 비교하면, 만조와 간조시에는 유속이 약해지고 그 사이에 유속이 최대가 되는 정상파에 가까운 경향을 보이고 있다. 비조류 성분에 있어서 유향변화의 주기는 5~11 시간으로 다소 불규칙하고 바람과의 상관성도 거의 없다. 물론 여기에는 파랑에 의한 부이의 진동도 영향을 주지만 주기가 매우 짧은 고주파 성분에 한정된다. 그러므로 비조류 성분은 한국 남동해안을 따라 흐르는 강한 대마난류의 변동이 해안지형의 영향을 받아 수영만 쪽으로 전파되는 결과로 해석하는 것이 타당할 것이다.

이와 같이 강한 바람은 큰 파도를 일으켜서 이안류의 발생에 기본적인 조건을 조성하며 북동풍은 수영만 내부로 향하는 에크만 수송을 야기함으로써 창조류와 같은 효과를 유발할 수 있겠지만 그 영향은 장주기 성분에 포함될 것이며(이와 김, 2007) 이 경우에는 크게 나타나지 않는다. 여기에서는 비조석 단주기 성분의 해류변동이 중요하게 부각되고 있으며 대상시기가 소조기인 점을 감안하고 전 기간의 자료를 고려하면 조류와 단주기 해류성분의 중첩이 이안류 강화현상과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5의 비조류 성분에 상당한 주기성이 나타나므로 보다 구체적인 확인을 위하여 Fig. 6의 하단과 같이 동방분속(왼쪽)과 북방분속(오른쪽)의 스펙트럼을 분석하였다. 그림의 횡축에서 로그 스케일로 도시하면 단주기 성분들을 구분하기 어려우므로 선형 스케일로 나타냈으며 전체 자료를 FFT한 다음에 인접 주파수대의 값들을 평균하는 band-averaging 방법을 사용하였다. 그림의 윗부분에 조류성분을 포함하는 전체 유속을 도시하여 아래 부분의 비조류 성분과 비교하였다. 전체 유속의 스펙트럼에서 높은 값을 보이는 주요 주기에 연직 사선을 표시하였는데 왼쪽으로부터 두 개의 선은 각각 일주조와 반일주조에 해당하는 것으로서 하단의 비조류 성분에서는 band-averaging 때문에 0이 되지는 않지만 매우 낮은 값을 보이므로 조류 성분이 충분히 제거되었다고 판단된다. 그러나 반일주조는 제거되었더라도 비조류에서 12시간 주기 부근에서는 여전히 높은 값을 가지고 있다. 한편, 약 8시간과 6시간 주기에서도 높은 값을 나타내며 이보다 짧은 주기에서 점차 감소하는 스펙트럼은 전체유속과 비조류 성분이 서로 동일하다. 그러므로 Fig. 5의 비조류 성분에 나타나는 불규칙한 변동은 이상의 세 가지 주기성이 중첩된 효과가 큰 영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

**해저지형의 영향**

앞에서는 수영만의 바람, 조석, 해류가 해운대의 이안류에 미칠 수 있는 영향에 대하여 검토하였다. 그러나 수영만 인근의 세 해수

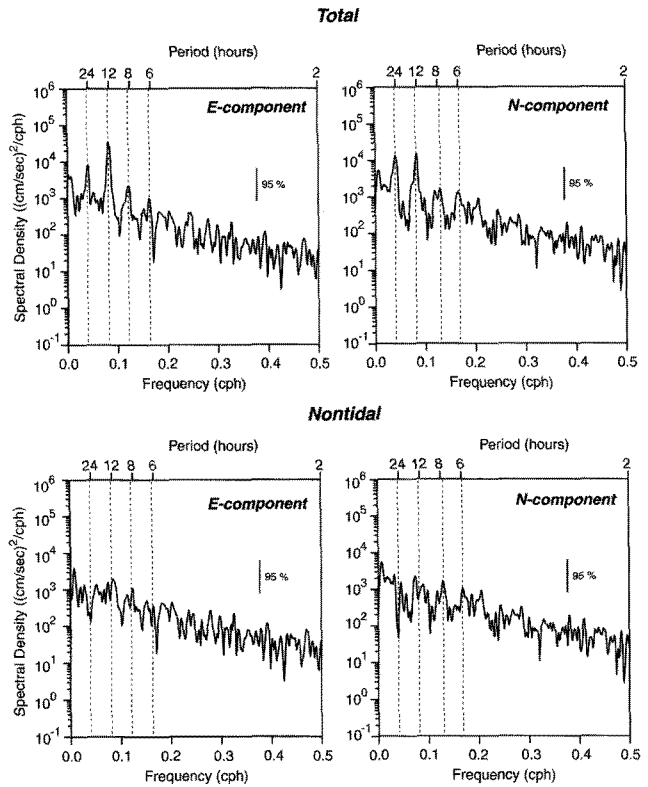


Fig. 6. Autospectra of total velocity (upper parts) and non-tidal velocity (lower parts). East components are on the left side and north components on the right side. Four dashed lines depict the major peaks including the tidal components.

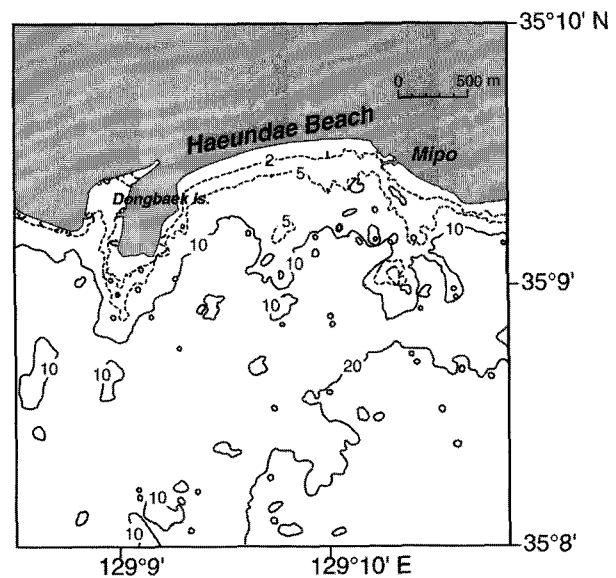


Fig. 7. Bottom topography off Haeundae beach.

욕장은 가까이 있으므로 이들 조건이 유리하게 중첩되면 모두 이안류가 발생할 수 있을 것이지만 실제로는 해운대에서만 강한 이안류가 보고되고 있다. 여기에는 해운대의 해저지형이 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 국립해양조사원에서 발행한 해도로부터 구한 해운대 부근의 해저지형(Fig. 7)을 보면 중앙부에 해안으로부터

터 약 1.2 km 거리까지 최소 수심 3 m 이하의 수중 언덕이 넓게 형성된 점이 매우 특이하다.

외해에서 들어오는 심해파는 이 언덕을 넘으면서 천해파로 먼저 바뀌면서 느려지고 감쇠될 것이다. 최저 수심이 3 m 미만이므로 심해파의 조건을 만족시키지 못하는 파장 6 m 이상인 대부분의 파랑은 감쇠되는 반면에 그 양쪽의 비교적 깊은 골을 지나는 파랑은 더 큰 에너지를 가지고 보다 빠르게 해안에 접근할 것이다. 물론 파랑의 굴절로 인해 수중언덕으로 에너지가 집중되는 효과도 있겠지만 이렇게 강화된 파랑도 얇은 수심으로 인해 부서지면서 감쇠될 것이다. 그 결과 수중언덕의 후면에 속하는 지역은 양쪽 보다 에너지가 적으므로 연안류의 수렴이 가속되어 이안류의 발달이 촉진된다. 그런데 이러한 효과는 파장과 주기가 훨씬 더 큰 조류나 단주기 해류의 경우에도 같이 나타날 수 있다. 그러므로 이안류의 발생에 유리한 해저지형에 조류와 해류가 함께 중첩되면 매우 강한 이안류를 발생시키고 서로 반대 방향으로 중첩되면 이안류는 감소할 것으로 예상된다.

### 요약 및 토의

해운대 해수욕장에는 강한 이안류가 자주 발생하는 것으로 알려져 있는데, 2009년 8월 13일과 15일 오후에 두 차례 강한 이안류가 발생하였다. 본 논문에서는 수영만 모니터링을 위해서 해운대 남방 약 3.6 km에 설치한 부이에서 관측된 해류와 바람 및 파고자료, 그리고 부산항의 조석자료를 이용해서 이안류 발생 시점의 상황을 비교 분석함으로써 이안류 강화에 영향을 줄 수 있는 물리환경에 대해서 연구하였다.

외해에서 접근하는 파랑의 조건은 유사할 것임에도 인접한 광안리와 송정해수욕장에서는 이안류가 보고되지 않는 반면에 해운대에서만 강한 이안류가 나타나는 데에는 해운대의 특이한 해저지형이 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다. 해운대 해역의 중앙부에 위치한 최저수심 3 m 이하의 수중 언덕은 대부분의 파랑, 혹은 조류와 해류가 해안으로 들어올 때 감쇠시키는 역할을 할 수 있으므로 에너지가 감소된 그 후면 쪽으로 연안류가 수렴하면서 이안류가 강해지는 결과를 초래할 수 있을 것으로 추정된다.

8월 13일에서 15일 사이에는 주로 오후에 풍속 3.5 m/sec 이상의 바람이 불어 최대파고 2 m 이상의 파랑이 발생하였다. 이안류는 파랑에 의해서 발생하지만 파고가 가장 높았던 시기와 이안류의 발생이 일치하지는 않으므로 다른 요인들도 영향을 주는 것으로 나타났다. 두 차례 이안류가 발생했을 당시에 바람은 북동풍이 불고 있었고 조석은 만조였으며 부이에서 관측된 해류는 북서향류였다. 공통점이 있는데, 이안류가 없었던 14일 오후에는 파고와 조석은 유사한 조건이었지만 바람은 남서풍이, 해류도 남서향류로서 반대방향이었다. 상층유속자료를 분석한 결과, 11시간 이하의 주기를 갖는 단주기 해류성분과 조류는 전체적으로는 유사한 크기지만 이안류 기간에는 소조기라서 조류는 다소 약한 상태였고, 바람의 영향을 일부 반영하는 장주기 해류성분은 훨씬 작았다. 이안류 발생 시점에 부이에서 조류는 서향, 해류는 북서향이었지만 수영만의 지형으로 인해 해운대 부근에서는 해안을 향한 조류와 해류가 파랑에 중첩되면서 앞에서 설명한 해저지형의 영향을 받아 이안류가 강

해졌을 것으로 판단된다. 14일에는 바람이 남서풍이 불었고 조석-조류는 유사한 조건이었지만 단주기 해류가 해운대 해안을 벗어나는 방향으로 조류보다 강하게 흘러서 이안류의 발달을 억제하였을 것으로 보인다. 이 단주기 해류 성분의 원인은 한국 남동해안 가까이 흐르는 대마난류가 해안지형의 영향을 받아 변동하기 때문인 것으로 해석된다. 이 현상에 대해서는 해류분포에 대한 직접적인 관측을 통해서 밝혀져야 할 것이다. 또한 본 연구에 사용된 2009년 8월의 3 가지 경우만으로는 자료가 충분하다고 볼 수 없으므로 향후 더욱 많은 사례들을 수집하여 해양관측 자료와 비교해야 할 것이다.

### 참고문헌

- 이재철, 김정창, 2007. 2006년 봄철 광양만 해류의 구조와 변동. 한국해양학회지, 12: 219-224.
- Bowen, A., 1969. Rip Currents 1. Theoretical Investigations. *J. Geophys. Res.*, 74: 5467-5478.
- Bowen, A. and D. Inman. 1969. Rip Currents 2. Laboratory and Field Observations. *J. Geophys. Res.*, 74: 5479-5490.
- Chen, Q., R. Dalrymple, J. Kirby, A. Kennedy and M. Haller. 1999. Boussinesq modeling of a rip current system. *J. Geophys. Res.*, 104: 20617-20637.
- Dalrymple, R., 1975. A mechanism for rip current generation on an open coast. *J. Geophys. Res.*, 80: 3485-3487.
- Dalrymple, R. and C. Lozano. 1978. Wave-Current Interaction Models for Rip Currents. *J. Geophys. Res.*, 83: 6063-6071.
- Haas, K. A., I. A. Svendsen, M. C. Haller and Q. Zhao, 2003. Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems. *J. Geophys. Res.*, 108: doi:10.1029/2002JC001355.
- Kennedy, A. B. and Y. Zhang, 2008. The stability of wave-driven rip current circulation. *J. Geophys. Res.*, 113: 1-17.
- LeBlond, P., and C. Tang, 1974. On energy coupling between waves and rip currents. *J. Geophys. Res.*, 79: 811-816.
- Lippmann, T., T. Herbers, and E. Thornton, 1999. Gravity and shear wave contributions to nearshore infragravity motions, *J. Phys. Oceanogr.*, 29: 231-239.
- Noda, E.K., 1974. Wave-induced nearshore circulation. *J. Geophys. Res.*, 79: 4097-4106.
- Open University, 1999. Waves, tides and shallow-water processes, Butterworth-Heinemann, pp. 141.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Comput. Geosci.*, 28: 929-937.
- Tam, C.K.W., 1973. Dynamics of rip currents. *J. Geophys. Res.*, 78(12): 1937-1943.
- Yu, J., and D. N. Slinn, 2003. Effects of wave-current interaction on rip currents. *J. Geophys. Res.*, 108: doi:10.1029/2001JC001105.

2010년 5월 13일 원고접수

2010년 7월 15일 수정본 채택

담당편집위원: 이상호