

해운대 해수욕장의 이안류 발생 수치모의 Numerical Simulation of Rip Current Generation on Haeundae Beach

김인철¹, 이주용², 이정렬³
In Chul Kim¹, Joo Yong Lee² and Jung Lyul Lee³

1. 서 론

2009년 8월 13일과 8월 15일, 두 차례에 걸쳐 부산 해운대 해수욕장에서 이안류가 발생하여 물놀이를 하던 해수욕객 수십 명이 갑자기 먼 바다 방향으로 떠내려가는 위험천만한 상황이 발생하였다(그림 1). 해수욕객들을 모두 구조했지만 최근 이안류 발생이 너무 잦아져 이에 대한 원인과 약과 대책마련이 시급한 실정이다.



그림 1. 부산 해운대 해수욕장 이안류 발생
(연합뉴스, 2009.8.15)

언론을 통하여 제시되는 이안류의 발생 메커니즘과 원인에 대한 보도자료를 보면 간혹 undertow 현상과 혼돈하거나 하천류에 기반한 잘못된 분석을 제시하는 등 그릇된 기사를 종종 접하게 되어 본 논문에서 이를 바로잡고자 한다. Undertow는 쇄파가 발생하는 해역에서 파가 쇄파되면서 수면을 따라 해안으로 밀리는 흐름이 발생하는 데 이 흐름이 해안에 막히면서 평균수면

아래로 해저면을 타고 다시 바다를 향하여 생기는 흐름으로 이안류처럼 특정해역에 좁게 발생하지 않으므로 위협적이지 않은 흐름이다.

또한 몇몇 언론에서는 하천류와 같이 낮은 수심에서 큰 흐름이 발생하므로 마치 이안류가 낮은 지형에서 외해로 큰 흐름이 발생하는 것이라고 보도되었지만 간혹 파향에 따라 낮은 수심을 통하여 이안류가 발생할 수가 있으나 이는 일반적인 이안류 발생의 메커니즘이 아니다. 본 논문에서 이에 대한 좀 더 정확한 이해를 구하기 위하여 수치 모의 결과를 제시한다.

본 논문에서는 사건 발생시점 해운대 해수욕장 해상을 촬영한 영상 자료로부터 파랑 조건을 유추하여 사용자 편의를 위하여 GUI로 개발된 DISEM 모형(Depth-Integrated Shallow-water Equation Model)을 해운대 실지형에 적용하여 해운대 해수욕장의 이안류 발생 수치모의를 실시하였다. 본 모형은 해빈류 및 조류, 취송류 등의 결합 모형이다. 이 GUI 기반 사용자 편의 모형과 파랑 관측 시스템을 연계하여 예기치 않은 이안류로 인하여 발생할 해수욕객에 노출된 사고 위험을 미연에 방지할 필요가 있다.

2. 이안류

2.1 이안류의 개요

연안역에는 그 기인력이 서로 다른 다양한 흐름(coastal currents)이 존재한다. 이러한 흐름으로는 조석현상에 의한 조류, 계절적으로 변화하며

1 발표자: 동서대학교 건축토목공학부 교수
2 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정
3 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Email: jillee@skku.edu)

공간적으로도 그 스케일이 비교적 큰 해류, 바람의 영향에 의한 취송류, 그리고 파랑의 직접적 영향으로 발달되는 해빈류 등을 들 수 있다. 이 중단기간에 지역적으로 연안역에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파랑의 변형으로부터 비롯되는 해빈류(wave-induced current; 海濱流)라 할 수 있다. 해빈류는 연안에서 쇄파가 발생하면서 생기는 해수면 상승의 차이로 인하여 발생하는 흐름이다. 해빈류가 해안선에 거의 평행으로 흐를 때 연안류(longshore current)라 칭하며, 이러한 연안류가 어느 한 지역으로 중첩되어 그림 2와 같이 외해로 급속하게 좁은 물길을 타고 빠져 나가는 흐름을 이안류(rip current)라 칭한다. 따라서 이안류에 휩쓸렸을 때 썰 물길을 거슬러서 헤엄치려 하지 말고 해안과 평행하게 우선 수영을 하여 이안류로부터 급히 빠져나온 후 해안으로 수영하는 것이 현명한 방법이다. 이안류 바로 옆으로는 다시 해안을 향하는 흐름이 약하게나마 존재하므로 해안으로 수영해오기 비교적 수월하다.

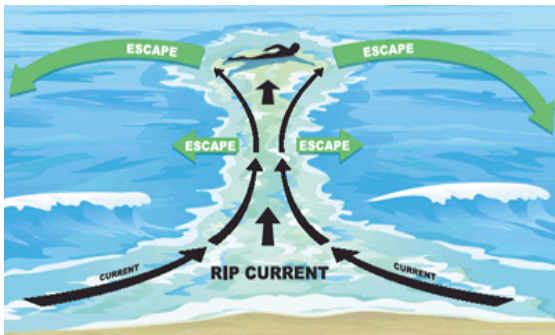


그림 2. 이안류 벡터 모식도 및 탈출법(출처: National Weather Service, NOAA)

특히 해빈류는 자체에 존재하는 파운동 특성과 합성되어 부유된 모래를 이동시키는 데 크게 관여하므로 해안 침·퇴적 및 해안선 변화의 주요 요인으로 작용한다. 문제는 해빈류의 변화가 변화무쌍하여 명확한 발생 메카니즘의 분석을 위해서는 정확한 조석·조류 환경의 재현 하에서 입사 파랑의 입력에 따른 해빈류 수치 결과의 지속적인 비교·분석이 요구된다. 특히 해운대에서도 같이 이안류에 의하여 튜브가 외해로 떠내려가는 것을 예측하기 위해서는 튜브의 거동 및 파랑과 튜브간의 상호 작용에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 관련 연구 결과가 부족한 관계로 실제 현상

과 유사하게 거동하도록 여러 관련 변수가 추정되었다.

2.2 이안류의 발생 메카니즘

그림 1에서 파도가 부서지지 않는 곳은 비교적 수심이 깊은 지역으로 그 곳에서 이안류가 주로 발생하고 있음을 보여준다. 튜브는 파고가 부서지면 쇄파의 힘으로 외해로 나가는 일이 거의 발생하지 않고 보통 해안으로 밀리나 이안류는 일반적으로 파가 부서지지 않는 곳에서 주로 발생한다.

그림 3은 가운데 깊은 골이 형성된 단순 지형에서 이안류가 발생하는 수치모형 결과의 벡터를 보여준 것이다. 골을 따라 이안류가 발생하는 이유는 양 옆의 수심이 낮은 곳에서는 수심이 낮은 관계로 파가 먼저 부서지면서 가운데 수심이 깊은 곳보다 평균수위가 상승한다. 그러면 평균 수위가 높은 양 옆의 해수가 평균 수위가 낮은 가운데로 몰리면서 그 몰린 흐름이 평균 수위가 낮은 깊은 골을 따라 그림과 같이 외해로 빠져나가게 된다. 따라서 이안류가 낮은 수심에서 발생한다는 것은 잘못된 설명이다.

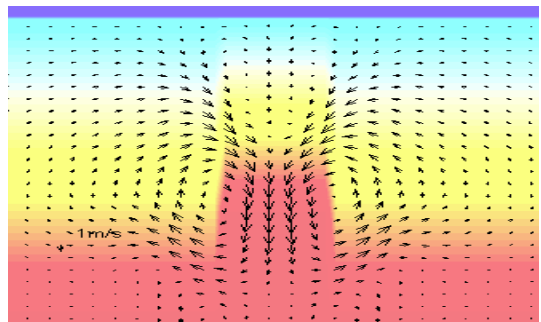


그림 3. 이안류 벡터 모식도 (red: 깊은 수심; blue: 낮은 수심)

3. 모형 설명

잉여응력을 이용한 해빈류 모형은 운동량 방정식에 잉여응력을 추가함으로써 파고의 차이 및 쇄파 현상에 따른 해빈류의 발생을 모의하는 것이다. 따라서 연속 방정식은 다음과 같이 천수 방정식과 동일한 형태를 갖는다(김, 1990; Lee, 1993).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

여기서, η 는 평균 수위 상승이며, Q_x 와 Q_y 는 수심 적분된 유량의 x 와 y 성분이다. Undertow를 예측하려면 mass flux가 유량 벡터에 추가된다. 운동량 방정식의 유속성분을 흐름성분과 파운동 성분으로 분리하고 수심 적분한 후 파주기에 대하여 평균하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{h + \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{h + \eta} \right) & (2) \\ + \frac{1}{rta} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \right) + (g + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{\tau_{Bx}}{rta} - \frac{\tau_{Sx}}{rta} - f Q_y = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[D_x \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_y \left(\frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{h + \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{h + \eta} \right) & (3) \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{\tau_{By}}{\rho} - \frac{\tau_{sy}}{\rho} + f Q_x = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[D_x \left(\frac{\partial Q_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_y \left(\frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \right] \end{aligned}$$

여기서 S_{xx} , S_{yy} 와 S_{xy} 는 잉여응력으로 파고와 파향의 함수로서 파랑의 영향으로 발생하는 해빈류와 쇄파로 인한 평균 수면의 상승을 산정하기 위하여 해수 순환 모형에 적용된다. τ_{Bx} , τ_{By} 는 저면 전단응력으로 저면 마찰에 의하여 발생하며, f 는 Coriolis 계수, 그리고 D_x , D_y 는 확산 계수이다. 사용된 수치기법은 교호격자를 이용하여 factorization 기법에 의하여 단계별로 수치해석하는 음해법의 유한차분 모형(DISEM)이다.

4. 모의 결과

해운대 해수욕장에서는 그림 4와 같이 파라다이스 호텔 앞, 만남의 광장 앞, 글로리 콘도 앞에서 이안류가 자주 발생하고 있는 것으로 파악돼 해경과 119수상구조대가 이곳을 집중적으로 관찰하고 있다. 2009년에도 총 6번이 발생하였으나 특히 8월 13일과 15일 파라다이스호텔 앞 1번과 2번 망루 사이(폭 300m)에서 강한 이안류가 발생해 튜브를 타고 물놀이를 즐기던 피서객이 13일 63명, 15일 43명 등 모두 106명이 먼바다 쪽으로 50-100m쯤 휩

쓸려 갔다가 구조 되는 위기 상황이 발생하였다.

그림 5와 6은 사건 발생지점 해운대 해수욕장 해상을 촬영한 영상 자료로부터 추정된 60cm의 입사 파고와 약 10초의 주기 조건으로부터 해빈류와 조류 결합 모형인 DISEM을 이용하여 사고 시점의 조위 및 조류 조건에서 얻은 이안류 모의 결과로 파향이 약간 다른 경우의 결과 들이다. 그 결과 해운대 해수욕장의 파라다이스 호텔 전면부에서 강한 이안류가 재현되었다. 이 곳은 8월 두차례 이안류 사건 발생과 거의 일치하는 지점으로 상당히 긴 이안류가 발생하는 모습을 보여준다.



그림 4. 이안류 발생 지점(red line: 우측부터 파라다이스호텔, 만남의 광장, 글로리콘도 순)

이송에 의한 튜브의 위치를 파악하기 위하여 다음 식이 사용된다.

$$\frac{dx}{dt} = ku \quad (4)$$

여기서 튜브의 위치를 나타내는 공간 좌표벡터 \mathbf{x} 의 성분은 (x, y) 이며, 유속 벡터 \mathbf{u} 의 성분은 (u, v) 이고 k 는 튜브와 파랑의 상호작용에 따른 보정 계수로서 관측을 통하여 보정해야되지만 편의 상 본 연구에서는 0.5를 사용하였다. 유속은 조류, 해빈류, 그리고 파랑에 의하여 생성된 표면류 성분으로 이루어지며 튜브는 유속에 의하여 해수 입자처럼 그대로 거동하지 않고 상호 작용에 의하여 다소 지연 거동된다. 파랑에 의한 표면류는 Lee(1993)로부터 유추하였다.

시간간폭 Δt 가 작은 경우 식 (4)는 시간단계 n 에서 입자가 위치한 (x^n, y^n) 로부터 다음 시간단계 $n+1$ 에서의 위치를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_k^{n+1} &= x_k^n + k u_k \Delta t \\ y_k^{n+1} &= y_k^n + k v_k \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 (u_k, v_k) 는 각 각 튜브가 놓인 지점에서의 선형 보간된 유속이다. 이동된 입자는 확산에 의하여 무작위 행보를 하는데 다음과 같이 반영된다.

$$\begin{aligned} x_k^{n+1} &= x_k^n + ku_k \Delta t + \delta x_k \\ y_k^{n+1} &= y_k^n + kv_k \Delta t + \delta y_k \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 δ 는 평균이 0이고 확산계수가 D인 경우 $2D\Delta t$ 의 분산으로 발생하는 무작위 값이다. 추적된 위치가 유동장을 벗어나 육지영역으로 이동한 경우, 그 위치는 mirror image 기법에 따라 다시 유동장 안으로 반사처리되고 개방경계를 벗어나 외해로 방출되는 경우는 고려 대상에서 제외한다.

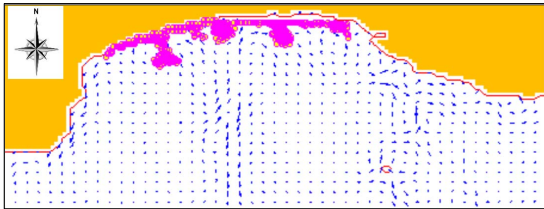


그림 5. 이안류+조류로 인한 튜브 이동 수치모의 (입사파고: 0.6m; 파향: 170°)

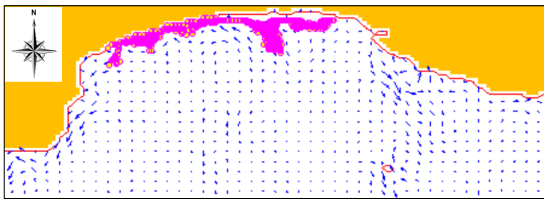


그림 6. 이안류+조류로 인한 튜브 이동 수치모의 (입사파고: 0.6m; 파향: 185°)

5. 결 론

이안류는 일단 1) 파향이 해안선에 직각으로 오는 경우에 대부분 발생하며 2) 해수욕이 가능한 쾌청한 날씨에 강한 이안류가 발생했다면 파고가 높게 오는 장주기의 경우에 발생할 확률이 높다. 만조위에 발생했다는 것은 수심이 깊어져 해운대로의 파랑 에너지 손실이 적었거나 만조위에서의 해저 지형이 이안류 발생 가능성을 높였다고 볼 수도 있으나 아직 속단은 어렵다.

파랑 에너지가 크게 작용하고 있는 상황에서 만조위라면 조석 및 파랑 에너지가 해안을 따라 잔뜩 집중된 상황에서 썰물로 바뀌게 되면 고파랑에 의하여 잔뜩 긴장한 setup 환경이 깨지면서 쇄파가 작게 발생하는 해안을 뚫고 이안류가 갑자기 발생할 가능성이 있다. 따라서 해안류는 본 연구에서와 같이 조류 및 취송류 모형 등과 결합하여 수치모의 될 필요성이 있다.

튜브의 유적자료로부터 모형의 검증과정을 거쳐 신뢰도를 높인 후, 해운대 현지 관리자가 운용하기 쉬운 사용자 편의 모형을 통하여 외해 모니터링 자료로부터 5~10분 이내 튜브들이 어떻게 이동할 지를 예측하는 시스템의 구축이 필요하다. 이 경우 튜브와 파랑의 상호 작용에 대한 고려도 필요하다.

참고문헌

- 김인철. (1990) 연안역 구조물 주위에서의 파랑과 해빈류의 수치모형에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교.
- 연합뉴스 기사 (2009. 8. 13, 15).
- Lee, J. L. (1994) Wave-current interaction and quasi 3D numerical modeling in nearshore zone, PhD. Dissertation, University of Florida.
- National Weather Service (NOAA) (<http://www.ripcurrents.noaa.gov/tips.shtml>)