

실시간 관측정보에 따른 이안류 경보 지수함수 연구

Study of Rip Current Warning Index Function Varied according to Real-time Observations

최 준 우* / 임 채 호** / 윤 성 범***
Choi, Junwoo / Lim, Chae Ho / Yoon, Sung Bum

Abstract

A rip-current warning index function, which is estimated from the likelihood of rip current quantified based on numerical simulations under various sea environments and is varied according to real-time buoy-observations, was studied to help protect against rip current accidents at Haeundae beach. For the quantification, the definition of likelihood of rip current, which proposed by Choi et al. (2011, 2012b), was employed and estimated based on Boussinesq modelling. The distribution of likelihood of rip current was evaluated by using various simulations according to scenarios established based on physical quantities(i.e., wave parameters) of buoy-observations. To index the likelihood of rip current, empirical functions were derived based on the distribution and adjusted to observational environments. In this study, the observations from June to September in 2011 at Haeundae beach were applied to the rip-current index functions, and its applications into the real events found based on CCTV images were presented and investigated. In addition, limitations and improvements of the rip-current index function were discussed.

Keywords : likelihood of rip current, warning index function, real-time observation, numerical simulation, Haeundae beach

요 지

해운대 해수욕장 이안류 안전사고의 예방을 목적으로, 다양한 해상조건에 따른 시뮬레이션을 기반으로 정량화된 이안류 발생가능성으로부터 추정된, 따라서 실시간 관측자료에 따라 경보할 수 있도록 하는 이안류 경보지수 함수를 연구하였다. 이안류 발생정도를 정량화하기 위해 Choi et al. (2011, 2012b)의 Boussinesq 모델링과 이안류 발생 가능계수의 정의를 사용하였고, 이안류관련 파랑특성과 같은 관측물리량에 대하여 발생가능 시나리오를 수립하여 광범위하고 정도높은 시뮬레이션을 수행하므로 그에 따른 이안류 발생가능 정도의 분포를 추정하였다. 이 추정된 분포에 부합하는 적절한 경험함수를 도출하고, 그 함수를 현실적으로 관측가능 해상조건에 따라 지수화 하였다. 본 연구에서 2011년 6월부터 9월까지 운영된 해운대 파랑부이 관측자료를 제시한 이안류 위험지수 함수에 적용하고, 몇 차례 CCTV를 통해 확인된 이안류 발생시점에 대하여 적용한 결과를 제시하고 고찰한다. 더불어 문제점과 향후 개선방향에 대하여 논의한다.

핵심용어 : 이안류 발생가능 정도, 경보지수 함수, 실시간 관측, 수치모의, 해운대

* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: jwchoi@kict.re.kr)

Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 국립해양조사원 해양관측과 사무관 (e-mail: limch92@korea.kr)

Senior Technical Officer, Oceanographic Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Jung-gu, Incheon 400-800, Korea

*** 교신저자, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (e-mail: sbyoon@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-5144)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil & Env. Engrg., Hanyang University, Ansan-si, Gyeonggi-do 426-791, Korea

1. 서 론

최근 매년 여름 해수욕장에서 발생하는 물놀이 사고의 원인이 되는 이안류라는 현상에 대하여 사람들이 관심을 갖기 시작하였다. 특히, 우리나라 대표 해수욕장인 부산 해운대 해수욕장에서 2009년부터 꾸준히 이안류 관련 안전사고가 발생하여, 이와 관련된 보도가 나오고 있다. 이에 여러 정부기관에서 대책을 제시하고 있으나, 아직까지 뚜렷한 해결책이 제시되고 있는 것처럼 보이지 않는다. 이러한 이안류 사고는 우리나라보다는 해수욕객 인구 및 해변의 규모가 큰 미국 및 호주 등에서 큰 사회문제로 인식되어 있다. Gensini and Ashley (2009)에 따르면 미국의 이안류관련 사고로 인한 사망자는 매년 수십 명에 달하며, 특히 아열대 및 열대기후의 플로리다 주에서는 1994년부터 2007년 사이에 사망사고가 230명에 이른다고 추정하고 있다. 이러한 인명사고는 어느 정도 이상의 파랑이 존재하는 상태에서 레저를 즐기는 서퍼들이 많기 때문이기도 하다. 그러나 아직 미국 해양기상청 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서도 완전한 방어 대책을 강구하고 있지 못하다(Dalrymple et al., 2011). 가까운 미래에 기후변화 때문에 우리나라도 아열대로 변화할 것이고, 삶의 질적 향상으로 레저를 즐기는 해수욕객 수가 계속 증가할 것이므로 이안류 사고에 대한 과학적인 연구와 이를 바탕으로 하는 대책의 개발이 필요하다.

Lushine (1991)은 미국 플로리다 남동 해변에서 발생하는 이안류를 예측하기 위하여 풍향, 풍속, 파고 및 조위와 이안류 사고의 상관관계를 이용하는 LURCS (LUshine Rip Current Scale)라는 이안류 위험점수 산정법을 개발하였다. 이 산정법은 각각의 영향인자를 독립적으로 점수화하고 선형적으로 합산하여 이안류의 위험성을 평가할 수 있도록 한다. Lascody (1998)는 파랑의 주기가 이안류 발생의 주요한 영향인자라는 것에 착안하여 LURCS를 개선하여 ECFL (East Central FLorida) LURCS로 명명하고 플로리다 동중 해변에서 발생하는 이안류 예측에 적용하였다. Engle (2003)은 이 산정법을 다른 플로리다 해안에 적용하여 연구하였다. 그 결과로 조위에 대한 영향을 강조하고 바람에 대한 영향을 제외하므로 산정법을 개선하였다. Schrader (2004)는 Engle (2003)이 개선한 버전의 산정법을 이용하여 추가적 분석을 수행하므로 지역적 특성에 따른 차이도 중요하다고 하였다. 예를 들어, 그 지역의 조차(difference between ebb and flow tides)에 따라 산정법의 적용성에 차이가 발생함을 밝히고 있다. Nelko and Dalrymple (2008)도 메릴랜드 Ocean City의 구조기

록을 이용하여 ECFL LURCS 산정법을 분석하므로 대상 지역의 해상기후 특성 및 지형특성에 따라 보정되어야 할 필요성을 제기하고 있다. 특히, 동일한 지역이라 하더라도 태풍 및 풍랑에 의해 해안 수심지형이 변화할 수 있으므로 시간에 따른 변수도 존재한다고 기술하고 있다. 우리나라에서도 해운대에 적합한 파랑과 이안류의 상관관계를 찾고자하는 시도가 있었다(Lee et al., 2011).

Yoon et al. (2012)과 Choi et al. (2012a)은 해운대 이안류를 Boussinesq modelling하여 제시한 Choi et al. (2011)의 연구를 기초로 해운대에서 관찰되는 이안류의 발생 메커니즘을 연구하였고, 여러 가지 이안류 발생 메커니즘들(Dalrymple et al., 2011) 가운데, 너울성 장파로 부터 형성되는 파랑의 별집구조 현상에 의한 이안류 메커니즘이 해운대에서 관찰되는 이안류의 주요 발생 메커니즘으로 소개하고 있다. 그리고 동시에 불규칙파의 주파수 및 방향 스펙트럼 광협도에 따른 이안류 발생정도를 정량화하여 그 분포를 제시하였다. 또한, Choi et al. (2012b)은 역시 Boussinesq 모형을 이용한 불규칙파 수치해석을 기초로 파고, 주기, 파향 및 조위 특성에 따른 해운대 이안류의 발생정도를 정량화하여 그 분포를 제시하였다. 본 연구에서는 이렇게 해상조건에 따라 정량화된 이안류 발생정도의 분포를 이안류 예측에 활용할 수 있는 방법을 제시한다.

국립해양조사원은 실시간 관측을 바탕으로 이안류 발생을 예측하기 위하여, 파랑부이 및 유속부이, 그리고 CCTV를 해운대에 설치하고, 이로부터 취득되는 파랑정보, 연안흐름정보, 이미지정보 및 조석정보를 종합하여 모니터링 및 분석할 수 있도록 서버를 구성하였다. 뿐만 아니라, 최종적으로 분석된 이안류 위험상황을 해수욕장 안전요원에 문자 서비스하는 계획을 수립하였다. 즉, 이안류 예측을 위해 관측, 모니터링, 분석, 알람 서비스를 종합하는 시스템 구축을 추진하였다. 이러한 시스템이 구동되기 위해서는 관측자료를 분석하여 이안류를 예측할 수 있는 분석 알고리즘이 필수적이었고, 본 연구는 이 알고리즘을 개발하기 위해 수행되었다. 실시간 관측자료를 이용하는 이안류 예측 알고리즘은 다음과 같은 절차를 통하여 개발되었다. 첫째, 이안류관련 파랑특성등과 같은 관측물리량을 변수로 하여 해상상태 시나리오를 수립하고, 광범위한 시뮬레이션을 수행하였다. 둘째, 그 결과를 기반으로 이안류 발생 가능 정도(Choi et al., 2012b)를 각각의 시나리오에 따라 산정하여 그 분포를 추정하였다. 셋째, 이 추정된 분포를 이용하여 각 해상조건에 대하여 경험합수를 도출하고, 그 합수를 실제 이안류 발생시점의 관측 자료들과 비교분석하므로 현실적으로 지수화 하였다. 본 논문에서

는 이안류 경보 지수함수(index function)의 도출과정을 제시하였다. 그리고 2011년 6월부터 9월까지 해운대에서 관측된 국립해양조사원의 관측 자료를 지수함수에 적용하므로 그 결과로 산출되는 지수 및 단계를 제시하므로 본 시스템의 활용 가능성을 확인하였다. 몇 차례 CCTV를 통해 확인된 이안류 발생시점에 대하여 적용한 결과를 제시하며, 더불어 문제점과 향후 개선방향에 대하여 논의하였다.

2. 해상조건에 따른 이안류 발생정도 분포 선정

이 절에서는 Choi et al. (2012a, b)에서 기술하고 있는 이안류 예측 알고리즘을 구현하기 위하여 수립된 가상 시나리오와 그를 반영하여 수행된 시뮬레이션, 그리고 이를 기반으로 정량화된 이안류 발생가능 정도 및 그 분포에 대하여 간단히 소개한다.

부산 해운대 해안의 해상조건 시나리오를 구성하기 위해서는 해운대 해안에서 발생 가능한 파랑 등의 모든 해상조건을 충분히 반영하는 것이 원칙일 것이다. 그러나 현실적으로 실시간 이안류 예경보를 위해 사용될 수 있는 관측기기가 제공할 수 있는 해상정보의 종류와 특성을 고려하는 것이 우선되어야 한다. 본 연구에서 채용한 해운대 부이는 기본적으로 정밀 위치확인 시스템(GPS)이 자유수면의 변형을 인식하는 방식을 채택하고 있다. 이 관측 시스템은 수면변화에 따라 변동하는 3축의 변위를 이용하여 대표 파고, 주기, 파향 등을 계산한다. 2Hz로 샘플링 되는 3축 변위에 해당하는 원 데이터는 자체 저장장치에 저장되고, 대표 파고, 주기, 파향 등의 파랑정보는 매 5분마다 1,024개에 해당하는 이동 데이터 프레임을 사용하여 계산되며, 이 계산 값들은 국립해양조사원의 서버로 전송된다(Yoon et al., 2012). 참고로, 데이터 프레임, 즉 관측 시스템에서 파랑 정보를 산정하기 위해 사용하는 데이터의 개수는 그 정보의 신뢰도에 영향을 주는 동시에, 돌발적 물리현상을 규명하기 위한 시간 스케일과의 상관관계도 고려되어야 한다. 또한, 본 연구에서 사용한 부이 시스템의 특성상 한 관측점에서의 3가지 변수를 사용하여 파향을 산정하므로 Longuet-Higgins (1963)의 방향 스펙트럼 분석기법을 채택하였고, 따라서 방향 스펙트럼에 대한 신뢰도는 장담하기 어렵다는 문제가 있는 것도 사실이다. 최종적으로, 시나리오는 해운대 해안에 설치된 부이에서 5분마다 계산되는 유의파고, 유의주기, 주 파향, 그리고 부산 조위를 그 대상으로 하여 구성하였음을 밝힌다. 스펙트럼 특성에 관련된 시나리오의 확대는 관측시스템

의 개선과 더불어 향후 연구로 진행될 수 있을 것이다.

파고는 0.6m에서부터 1.6m의 범위를, 주기는 5초에서부터 10초의 범위를, 조위는 DL기준으로 -0.2m에서부터 1.3m의 범위를, 파향은 S파향을 기준으로 -15도에서 15도의 범위를 시나리오의 범위로 잡고, 네 가지 해안조건을 조합하여 시나리오를 구성하였다. 파고와 주기의 하한 범위는 2011년 이안류 관측치로부터 추정된 최저조건으로, 상한범위는 해수욕 불가능 해상조건으로부터 설정되었다. 파향은 한반도 남단의 여름철 풍랑의 주된 전파방향이 S 파향이므로 이를 중심으로 설정하였고, 조위는 약 최고만조위와 약최저간조위를 기준으로 한계범위를 설정하였다.

Fig. 1에 수치모의를 위해 구성된 수심지형과 계산결과 가운데 대표적 흐름 벡터도를 제시하였다. 수심지형(Fig. 1(a))은 위경도 좌표로부터 임의의 좌표원점을 정하여 변환하였으며 수치모의의 편이상 X축을 북에서 서쪽으로 4도 기울어진 방향으로 설정하였다. 사각형(□)과 원기호(○)는 관측부이의 위치를 나타내며, 사각형(□)은 파랑관측 부이, 원기호(○)는 흐름유속관측 부이의 위치를 나타낸다. 이 수심지형을 이용하여 앞에서 기술한 시나리오의 다양한 해상 파랑조건을 입력조건으로 하여 Boussinesq modelling을 기반으로한 시뮬레이션을 수행하고 각 시나리오별로 Fig. 1(b)와 같은 흐름결과가 계산되어 시간에 따라 저장되도록 하였다. 이 결과로부터 이안류 발생 정도를 정량화 하였다. Choi et al. (2012a)은 이 정량화 기법을 다음과 같이 기술하고 있다. 수치모의 결과로부터 2주기 시간평균 연안직각방향(cross shore direction) 유속 성분을 추출하고, 대상영역에 대하여 이 유속값의 심해방향 최대값을 그 지역의 이안류 유속으로 정의하여 시계열로 나타낸다. 다음으로, 전체 수치모의 시간에 대하여 이 시계열이 임의의 위험유속을 초과한 시간의 비율 위험 이안류 발생 가능 정도로 정의하여 정량화하였다. Boussinesq modelling을 기반으로 한 해운대 이안류의 시뮬레이션과 이안류 발생정도 정량화 기법에 관해서는 Choi et al. (2011, 2012a, 2012b)에 충분히 기술되어 있음을 밝힌다.

앞에서 언급했던 정량화된 이안류 발생정도를 나타내는 분포의 일부를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2(a)는 입사유의파 주기와 파고에 대한 이안류의 발생정도의 분포를, Fig. 2(b)에 조위의 변화에 따른 이안류 발생정도를 산정하여 도시한 결과이다. Choi et al. (2012b)에 기술되어 있는 것처럼 대체로 입사파의 파고가 크고 주기가 길면, 파랑 에너지 및 에너지 플럭스가 증가되고, 따라서 쇄파대내에서 그 변화량의 정도도 증가되므로 이안류의 강도를 상

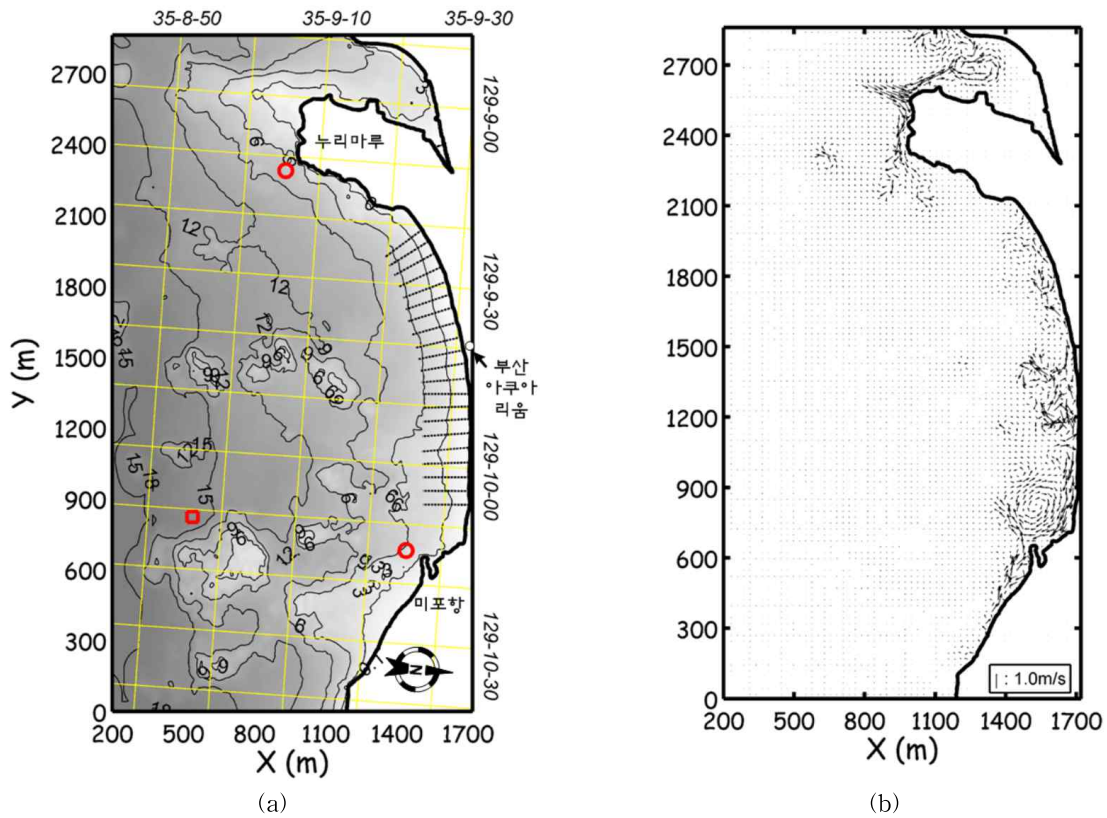


Fig. 1. (a) Topography of Haeundae Beach for Numerical Simulation and (b) a Vector-plot Snapshot of the Results for Nearshore Current (Choi et al., 2012a). The Symbols \square and \circ Indicate Locations of the Current and Wave Buoy, Respectively, the Contour Unit is m, and the Grid Indicates the Latitudinal and Longitudinal Lines.

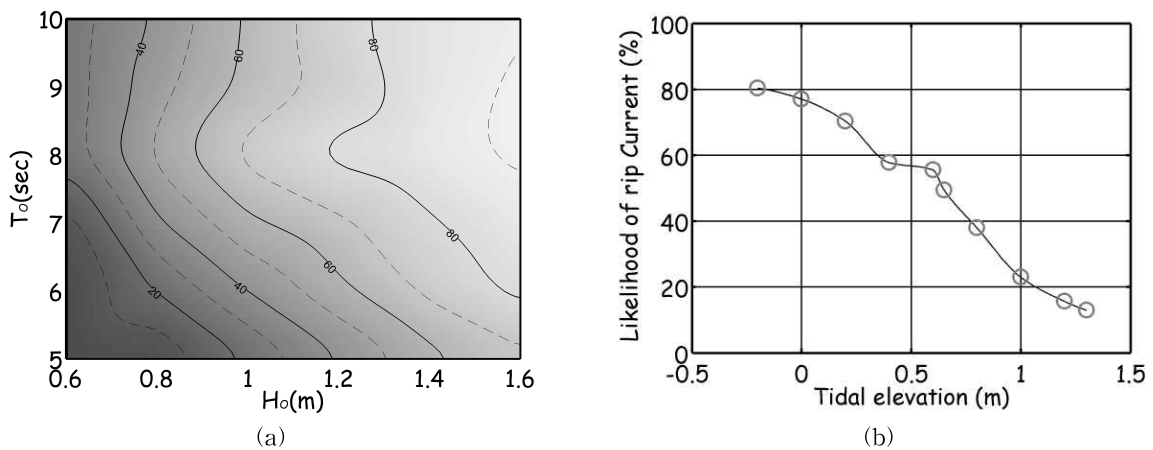


Fig. 2. Distribution of Rip Current Likelihood Varied according to (a) Significant Wave Height and Period of Random Incident Waves with S for the Main Wave Direction (unit: percent), and (b) Tidal Elevation with an Incident Wave Condition, $H=0.7$ m, $T=8.0$ s, and S for the Main Wave Direction (Choi et al., 2012b)

증시킨다. 그리고 일반적인 경우, 조위가 낮아질수록 쇄파대의 폭이 증가하여, 해안선 횡방향으로 비균등한 에너지 분포가 조성되기 쉽기 때문에 조위가 낮을수록 이안류의

발생정도는 상승한다. 해운대 연안흐름을 수치모의하여 산정된 이안류의 발생정도의 분포는 기초적인 이안류 메커니즘에 부합하면서 해운대에서 발생하는 이안류에 특화

되어 정량화 되어있다. 따라서 이 분포도를 지수화하므로 이안류 예측의 한 기법으로 활용될 수 있도록 이 분포를 합수화하고 지수화시켰고 다음 절에 그 절차를 기술하였다.

3. 이안류 발생정도 함수 추정 및 지수화

가장 이상적인 실시간 예측기법은 실시간 관측에 따른 조건으로부터 실시간 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 예보에 이용하는 것이다. 그러나 컴퓨팅 기술의 놀라운 발달을 전제하더라도, 실시간 기법이 추구하는 신속성이라는 목표와 시뮬레이션의 역학적 정확성이라는 목표사이에서 충돌이 발생하게 된다. 차선책으로 해상상태의 모든 가능성을 포괄하는 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 데이터베이스화 하여 관측치에 부합하는 시나리오에 따른 계산된 결과를 이용하는 것이다. 그러나 시나리오의 규모는 해상상태를 나타내는 파라미터들의 조합의 수에 의존하게 되고, 파라미터들의 범위와 그 계수에 따라 경우의 수는 기하급수적으로 증가하게 된다는 문제점이 있다. 그럼에도 향후에는 이러한 실시간 시뮬레이션 기법이나 시나리오별 시뮬레이션의 데이터베이스화 기법으로 진보해야 할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 해상조건을 나타내는 파고, 주기, 파향, 조위와 같은 파라미터를 변수로 하는 데이터 피팅(data fitting)을 통하여 함수를 찾고, 그 함수를 지수화하여 이용하였다. 이 방법은 지수를 산정하기 위한 계산과정을 간소화할 수 있고, 실제 관측결과에 따른 지수를 예정보를 위하여 적절하게 최적화시키기에 유리하다고 판단하였다.

시뮬레이션을 통해 추출해낸 파랑조건에 따른 이안류 발생정도, 즉, Fig. 2(a)를 도시하기 위해 사용된 데이터를 이용하여 적절한 함수를 추정하였고, 그 함수를 데이터들과 함께 Fig. 3에 비교, 제시하였다. 앞에서 언급한 것처럼, 이안류 발생정도는 최대 이안류 유속의 시계열이 임계(위협)유속을 초과하는 비율로 산정되었다(Choi et al., 2012b). 그러므로 파고와 주기가 작아질수록 이안류 유속은 임계 유속보다 작아지므로 그 발생정도는 줄어들어 파고와 주기 값이 0에 가까워질수록 0에 수렴하게 된다. 또한, 파고와 주기가 상승할수록 이안류 유속은 커져 한계유속을 초과하는 이안류유속이 지속되므로 발생정도는 1에 수렴하게 된다. 따라서 파고 및 주기에 따른 지수함수를 위해, 최소값은 0에, 최대값은 1에 점차 수렴하도록 hyperbolic tangent 함수를 변형하여 활용하였다. 입사파의 유의파고에 따른 이안류 발생정도를 적절하게 따르는 계수들을 찾아 Eq. (1)에 나타내었고, Fig. 3(a)에 이 함수와 데이터를 도시하였다.

$$f_H(H) = a_H [1 + \tanh\{b_H(H - c_H)\}]^{d_H} \quad (1)$$

여기서, H 는 파고를 나타내고, $f_H(H)$ 는 파고에 따른 이안류의 발생정도를 백분율 단위로 나타내는 함수로, a_H , b_H , c_H , d_H 의 네 개의 계수를 변화시키며 가장 적절한 함수를 찾았다. 그 함수의 계수 값은 각각 $a_H=0.24$, $b_H=2.2$, $c_H=0.55$, $d_H=2.0$ 이다. 그림에는 여러 주기에 따라 변화하는 데이터를 도시하였으나, 함수는 가장 발생정도가 높은 10초 주기의 경우의 것만을 도시하였다. 다른 주기의 경우에도 발생정도는 낮지만 유사한 분포의 함수가 찾아질 수

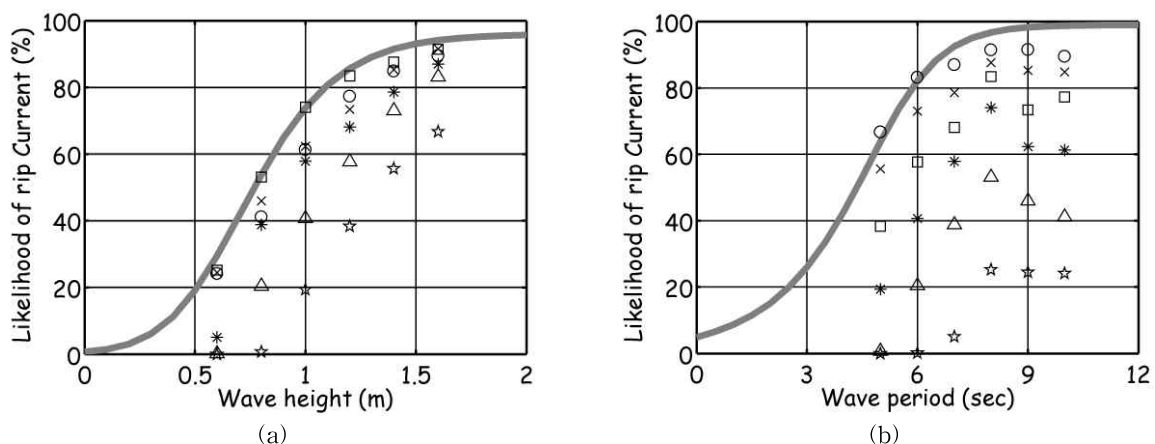


Fig. 3. Mathematical Functions Having the Best Fit to a Series of Data Quantified for Likelihood of Rip Current Evaluated Based on the Simulations. (a) Rip-current Likelihood Function (—) of Incident Wave Height Fitted to Data of Period $T=10$ sec (\square) and other Data of Period $T=9$ sec (\circ), $T=8$ sec (\times), $T=7$ sec ($*$), $T=6$ sec (\triangle), and $T=5$ sec (\star). (b) Rip-current Likelihood Function (—) of Incident Wave Height Fitted to Data of Wave Height $H=1.6$ m (\circ) and other Data of Wave Height $H=1.4$ m (\times), $H=1.2$ m (\square), $H=1.0$ m ($*$), $H=0.8$ m (\triangle), and $H=0.6$ m (\star).

있을 것으로 보이며, 따라서 다음에 제시한 주기에 따른 함수와 결합하므로 발생정도가 낮은 분포의 함수가 사용되도록 하였다. Fig. 3(b)에 입사파의 유의주기에 따른 이안류 발생정도를 나타내는 데이터와 그에 적절하게 따르는 함수 Eq. (2)를 찾아 도시하였다.

$$f_T(T) = a_T[1 + \tanh\{b_T(T - c_T)\}]^{d_T} \quad (2)$$

여기서, T 는 주기를 나타내고, $f_T(T)$ 는 주기에 따른 이안류의 발생정도를 백분율 단위로 나타내는 함수로, 그 계수의 값은 각각 $a_T=0.90$, $b_T=0.57$, $c_T=5.3$, $d_T=0.6$ 이다. 이 함수도 가장 발생정도가 높은 1.6m 파고의 경우의 것만을 도출하였고, 파고에 대한 함수의 곱으로 결합하므로 낮은 파고를 위한 함수가 결정되도록 하였다.

Fig. 4(a)에는 시뮬레이션을 통해 추출해낸 조위에 따른 이안류 발생정도, 즉 Fig. 2(b)를 도시하기 위해 사용된 데이터에 적절히 부합하는 함수 Eq.(3)과 그 데이터를 도시하였다. 조위의 경우는 최하조위에서 최대의 발생정도를 보이며 평균하면 근처에서는 선형적 변화를 보이므로 최하조위에서 1에 수렴하고 조위가 상승할수록 0에 수렴하도록 hyperbolic tangent 함수를 변형하여 채용하였다.

$$f_E(E) = a_E[1 - \tanh\{b_E E\}]^{c_E} \quad (3)$$

여기서, E 는 조위를 나타내고, $f_E(E)$ 는 조위에 따른 이안류의 발생정도를 백분율 단위로 나타내는 함수로, 그 계수의 값은 각각 $a_E=0.82$, $b_E=2.16$, $c_E=0.3$ 이다. Fig. 4(b)는 다양한 파랑조건으로 수행된 시뮬레이션에서의 시간평균 연안류 유속크기와 그 파랑조건에서의 이안류 발생정도의 관계를 나타내고 있다. 연안류 유속은 Fig. 1(a)에 표시된 유속 관측기기가 설치된 위치, 즉, 미포항 앞쪽과 누리

마루 앞쪽에서 계산된 결과를 추출한 값을 이용했다. Fig. 1(b)에 나타낸 것처럼 이안류가 발생할 수 있는 파랑조건에서는 유속관측기가 설치된 위치에서 연안류(쇄파유도류)도 잘 발달하는 것을 알 수 있었으며, 이는 Fig. 4(b)에 나타낸 데이터 값들을 통해서도 알 수 있다. 이것은 예상되는 것처럼 파랑이 해안선에 경사 입사되는 경우에 파랑에너지 및 에너지 플럭스와 비례하여 연안류 강도가 증가하기 때문이다. 따라서 연안류가 측정되는 경우 이안류의 발생정도가 상승하는 상관관계를 예측에 이용할 수 있다는 판단을 했다. 연안흐름의 강도는 파고와 주기의 변화에 비례하므로 파고와 주기의 경우와 마찬가지로 hyperbolic tangent 함수를 최소값이 0에, 최대값이 1에 점차 수렴하도록 변형하여 활용하였다. 이 상관관계를 나타내는 데이터에 적절히 부합하는 수함 함수 Eq. (4)은 다음과 같다.

$$f_V(V) = a_V[1 + \tanh\{b_V(V - c_V)\}]^{d_V} \quad (4)$$

여기서, V 는 연안류 유속을 나타내고, $f_V(V)$ 는 유속에 따른 이안류의 발생정도를 백분율 단위로 나타내는 함수로, 그 계수의 값은 각각 $a_V=0.13$, $b_V=4.73$, $c_V=0.08$, $d_V=0.3$ 이다. 이 함수는 Fig. 4(b)에 점선으로 표시되어있으며, 굵은 회색 실선이 더 부합되는 함수이지만, 발생정도가 높은 쪽의 경향을 선택하여 실선을 선택하였다. 참고로, 본 연구에서 언급하고 있는 쇄파유도류의 특성을 갖는 연안류는 쇄파대의 위치에 따라 그 흐름폭이 결정되기 때문에 고정된 위치에서 이 연안류를 측정하기 위해서는 가능한 해안선에 가까운 곳에서 계측되어야 한다. 그러나 관측기 위치에 따른 기술 및 행정적 문제 때문에, 지속적으로 연안류를 측정하기에는 육지로부터 상당히 떨어진 위치

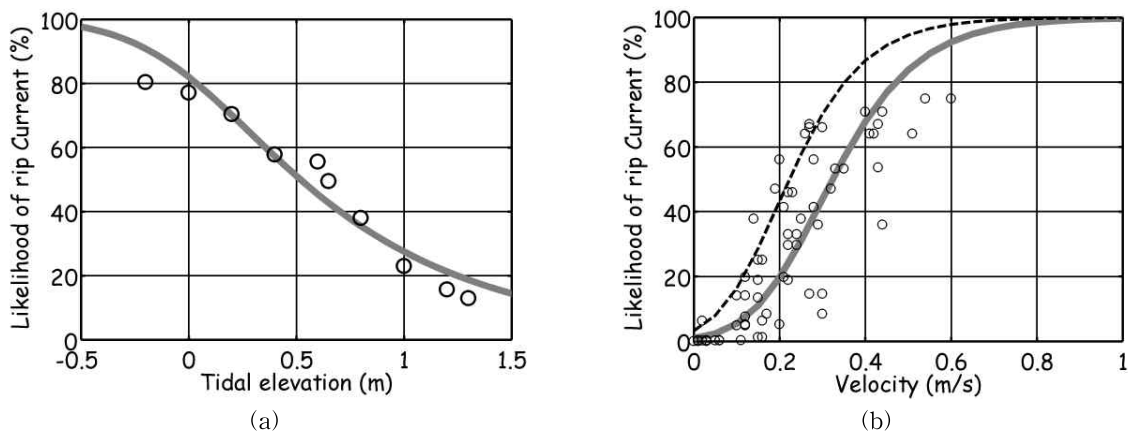


Fig. 4. Mathematical Functions Having the Best Fit to a Series Of Data Quantified for Likelihood of Rip Current Evaluated Based on the Simulations. (a) Rip-current Likelihood Function (—) of Tidal Elevation Fitted to Data (○). (b) Rip-current Likelihood Function (— or ---) of Longshore Current Velocity Fitted to Data (○).

에 관측기기가 설치되어 있음을 밝힌다.

이안류라는 물리적 현상에 대하여 파고, 주기, 파향, 조위 등이 상호 독립적으로 작용할 수는 없다. 따라서 독립적으로 함수를 추정하여 사용하는 것에는 한계가 있으며, 앞으로 개선되어야 할 것이다. 그러나 일부 해양요소의 관측치가 송수신 과정에서 소실되는 비상상태에서 나머지 관측 자료만으로 라도 이안류 경보를 가동할 필요가 있을 때는 독립적 지수함수의 조합이 장점을 갖는다고 판단된다. 다음과 같이 각각의 함수를 결합하여 파랑, 주기, 조위 및 연안류 유속에 따른 이안류 발생지수를 산정할 수 있도록 하였다.

$$S(H, T, E, V) = C_S f_H f_T (1 + f_E) + \alpha C_V f_V \quad (5)$$

여기서, S 는 이안류 발생지수 함수이며, 앞에서 언급한 것처럼 C_S 와 C_V 는 지수화를 위한 계수로, 이안류 발생지점의 관측자료들을 이용하여 지수를 현실적으로 조절할 수 있도록 하는 계수이다. 이러한 이유로 지수함수는 더 이상 백분율로 나타낼 수 없다. 그리고 α 는 스위치로 파랑조건에 따라 연안류관측 위치가 쇄파대이면 $\alpha=1$, 쇄파대 밖이면 $\alpha=0$ 으로 하고, 쇄파대의 판단은 일정이상의 파고 및 조위조건에 따라 결정하도록 하였다. 연안류 유속은 측정하는 두 위치(미포 앞, 누리마루 앞) 가운데 큰 값을 나타내는 유속강도를 사용하였다. 추가로, 이 지수는

이안류의 발생정도를 나타내는 지수이면서 동시에 해수욕 활동의 안전지수 역할을 할 수 있어야 한다고 판단하였다. 이런 판단의 근거는 실제적용 사례를 통해 다음 절에 설명한다. 따라서 태풍 및 풍랑에 의한 높고 긴 파랑이 해안으로 내습하는 경우에 이안류 지수를 임의로 상승시키도록 가중치를 주었고, 최대값은 120으로 고정하여 실제에 적용하였음을 밝힌다. 기술한 내용을 포함하여 Eq. (5)를 도시하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 지수화된 점수들을 파고와 주기에 따른 분포로 도시하였고 각 폐널들은 조위가 서로 다른 경우이다. 굵은 회색선은 지수점수가 30, 55, 80점을 강조한 것으로 지수에 따른 위험단계를 이 지수점수를 기준으로 관심, 주의, 경계, 위험으로 나누어 알림 서비스를 실시할 수 있을 것으로 생각했다. 위험단계를 구분하기 위해 설정된 각 지수 값들은 다음 절에 소개되는 실제 발생한 이안류 사례들을 이용하여 적절하게 선택된 것이며, 더 많은 사례들의 자료가 축적되면 통계적 근거를 통하여 보다 현실적으로 조절될 수 있다고 판단된다.

4. 이안류 위험지수의 관측자료 적용 및 사례 분석

이번 절에서는 앞서 제시한 이안류 지수함수를 실제 해안대 부이의 관측에 적용한 결과를 제시하고 그 가능성과

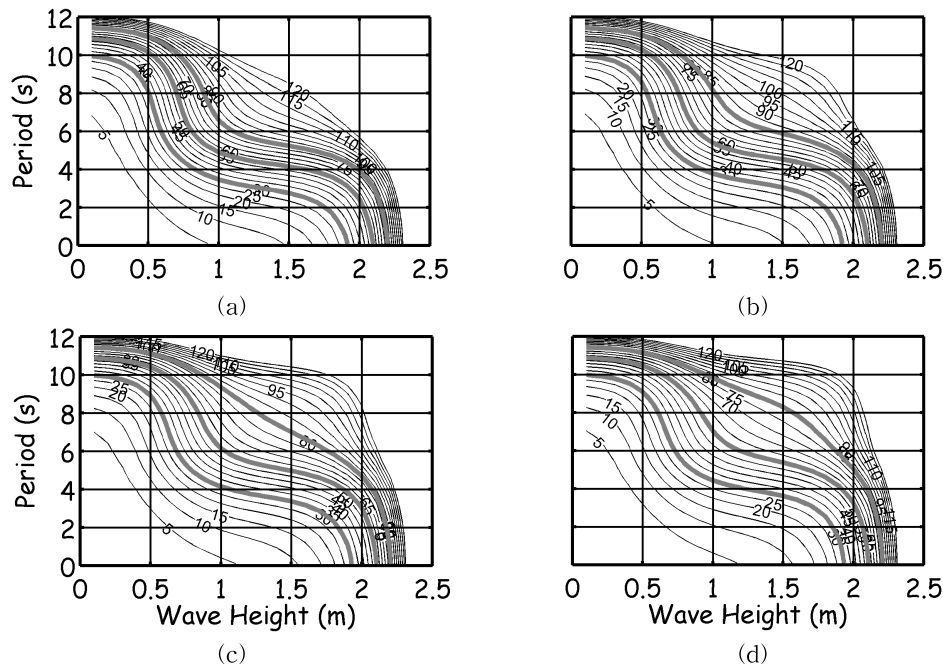


Fig. 5. Distribution of Rip-current Likelihood Index Compounded by using the Rip-current Likelihood Functions of Wave Height, Period, and Tidal Elevation Varying with Tidal Elevation (a) 0.0 m (DL), (b) 0.3 m (DL), (c) 0.6 m (DL) and (d) 0.9 m (DL). The Bold Lines Indicate 30, 55 and 80 Points as a Rip-current Likelihood Index.

문제점을 다루고자 한다. 적용시점으로는 돌발적 이안류가 발생한 것이 CCTV 영상으로도 확인된 2011년 6월 12일, 8월 30일, 9월 29일과 태풍의 영향으로 발달한 너울성 파도에 의해 지속적으로 이안류가 발달한 것으로 추정되는 7월 20일과 8월 8일을 선택하였다.

4.1 6월 12일

Fig. 6은 2011년 6월 12일 11시 22분, 11시 37분, 11시

58분, 12시 33분의 CCTV 이미지로 당시 발생한 이안류의 모습을 보여주고 있다. 각 이미지로부터 이안류의 발생이 뚜렷하게 보이며, 해수욕객들이 있었다면 안전사고가 발생할 수도 있는 정도의 강도로 판단된다. 이 돌발성 이안류들은 지속시간이 1~2분 정도였으며, 11시부터 13시 사이에는 제시한 경우이외에도 작은 이안류의 발생이 몇 차례 더 발생하였다. 이 기간을 포함한 2011년 6월 12일 8시부터 15시까지의 관측된 유의파고, 유의주기, 누리마루 및 미포항 앞 유속강도, 그리고 부산조위를 Fig. 7에 도시하

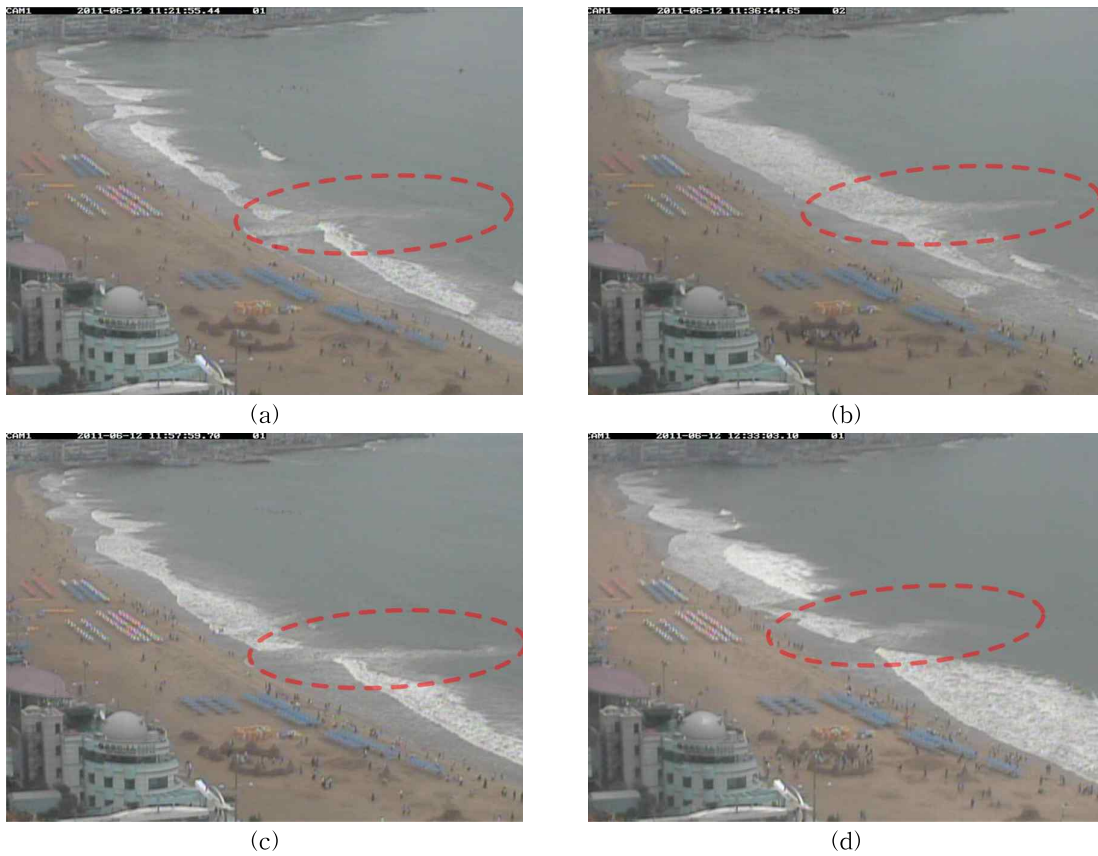


Fig. 6. Snapshots (CCTV images) of Rip Current Events at Haeundae Beach at (a) 11:22, (b) 11:37, (c) 11:58, and (d) 12:33 (KST) of the 12th of June, 2011

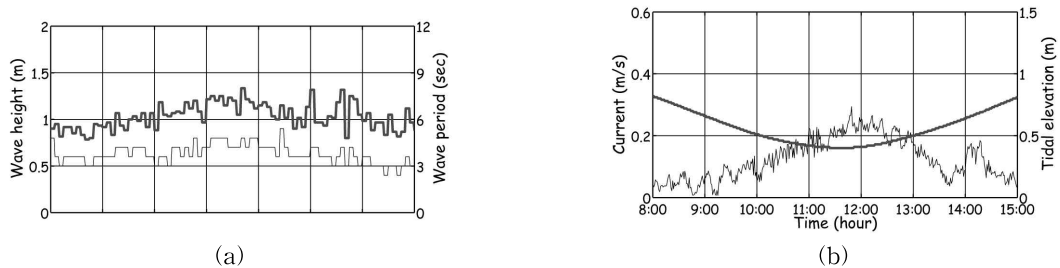


Fig. 7. Time Series of the Observations of Haeundae Buoys from 8:00 to 15:00 of the 12th of June, 2011. (a) Wave Height (—) and Wave Period (—). (b) Current Velocity Magnitudes at Mipho (—) and Tidal Elevation (—).

었다. 이안류가 수차례 발생했던 11시부터 13시 사이의 파고와 주기가 상대적으로 그 이전이나 그 이후 보다 높아 보이며, 조위가 낮은 간조위의 상황이다. 이 기간에 미포항 앞의 연안류 유속강도가 상대적으로 상승되어 있으나, 쇄파대 내에서 측정된 유의미한 값이라고 하기는 명백하지 않다.

Fig. 7에 도시한 관측된 값들을 본 연구에서 제시한 이안류 지수함수에 적용하여 산출된 지수 값을 Fig. 8에 도시하였다. 기본적으로 파고가 크고, 주기가 길고, 조위가 낮을 수록 지수는 크게 산정되므로 그림에 보인 것처럼, 이안류가 수차례 발생했던 11시부터 13시 사이에 지수가 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 그 값은 대체로 주의 단계인 30이상으로 이안류 발생가능성이 있는 상태로 해수욕객들이나 안전요원들에게 정보를 제공할 수 있을 것이며, 따라서 안전사고 예방에 도움을 줄 수 있을 것이라고 판단된다. 그러나 여기서 두 가지 지체시간이 존재함을 인지해야 할 필요가 있다. 첫째는 실제 파랑현상과 관측치의 시간사이에는 차이가 있다. 즉, 수면변위를 결정하기 위해 필요한 평균수면계산을 위한 시간 및 파랑정보 산정을 위해 사용하는 데이터의 개수에 기인한 시간 지체문제가 있다는 것이다. 둘째, 높은 파고와 긴 주기를 갖는 파랑이 해안에 도달하는 시점과 이에 기인한 이안류가 발생하는 시간에는 어느 정도의 이안류 발달에 필요한 시간이 존재할 것이다. 이안류 예측관점에서 다행히 후자의 지체시간은 전자의 관측 지체시간을 보완해 주는 관계가 되기는 하지만, 후자의 지체는 일정 기간의 예측 값을 얻기 힘들다는 문제가 있다.

4.2 8월 30일

Fig. 9의 CCTV 이미지가 보여주는 2011년 8월 30일에 발생한 이안류는 해양경찰을 통해 그 발생이 보고되었다. Fig. 9(a), (b), (c)는 각각 13시 17분, 15시 1분, 16시 1분의 CCTV 이미지로 당시 발생한 이안류의 모습을 보여주고 있다. 이 이미지들에서는 이안류의 모습이 뚜렷하게 보이지는 않지만, 안전요원들이 이안류가 발생한 위치로 이동하는 모습들을 볼 수 있다. 자세히 보면, 표시된 점선 안에 희미하지만 해수욕객들이 이안류에 의하여 떠밀려 나가는 모습이 보인다. 각각의 이 이안류들은 지속시간이 1~2분 정도로 역시 돌발적인 발생을 보였고 13시부터 17시 사이에 몇 차례의 상대적으로 소규모의 이안류가 더 있었을 것으로 추정된다. 이 기간을 포함한 2011년 8월 30일 11시부터 17시까지의 관측된 유의파고, 유의주기, 누리마루 및 미포항 앞 유속강도, 그리고 부산조위를 Fig. 10에 도시하였다. 13시 20분경에 높은 파고가 있었다는 것이 두드러지며, 대체로 13시부터 17시 사이에 파고가 상대적으로 높았던 부분들이 있고, 조위가 낮은 간조위 전후의 때임을 알 수 있다. 이번 경우의 이안류 발생 기간에 미포항 앞의 연안류 유속강도가 상대적으로 상승되어 있으나, 쇄파대 내에서 측정된 유의미한 값이라고 하기는 명백하지 않다.

Fig. 10에 도시한 관측된 정보들을 이안류 지수함수에 적용하여 산출된 지수 값을 Fig. 11에 도시하였다. 13시부터 17시 사이에 지수가 상대적으로 높아 “주의”단계인 30 이상의 지수를 나타내는 시간들이 존재하며 그 시간들을

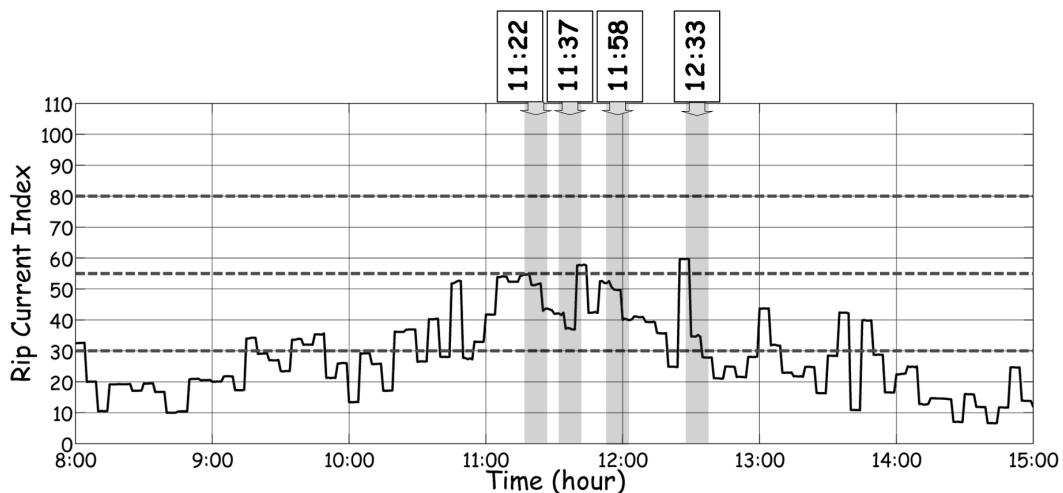


Fig. 8. Time Series of Rip-current Likelihood Index (—) Applied to the Observations of Haeundae Buoys from 8:00 to 15:00 of the 12th of June, 2011. The Broken Lines Indicate 30, 55 and 80 Points as a Rip-current Likelihood Index and the Wide Gray Bands Emphasize the Time of Rip Current Events.

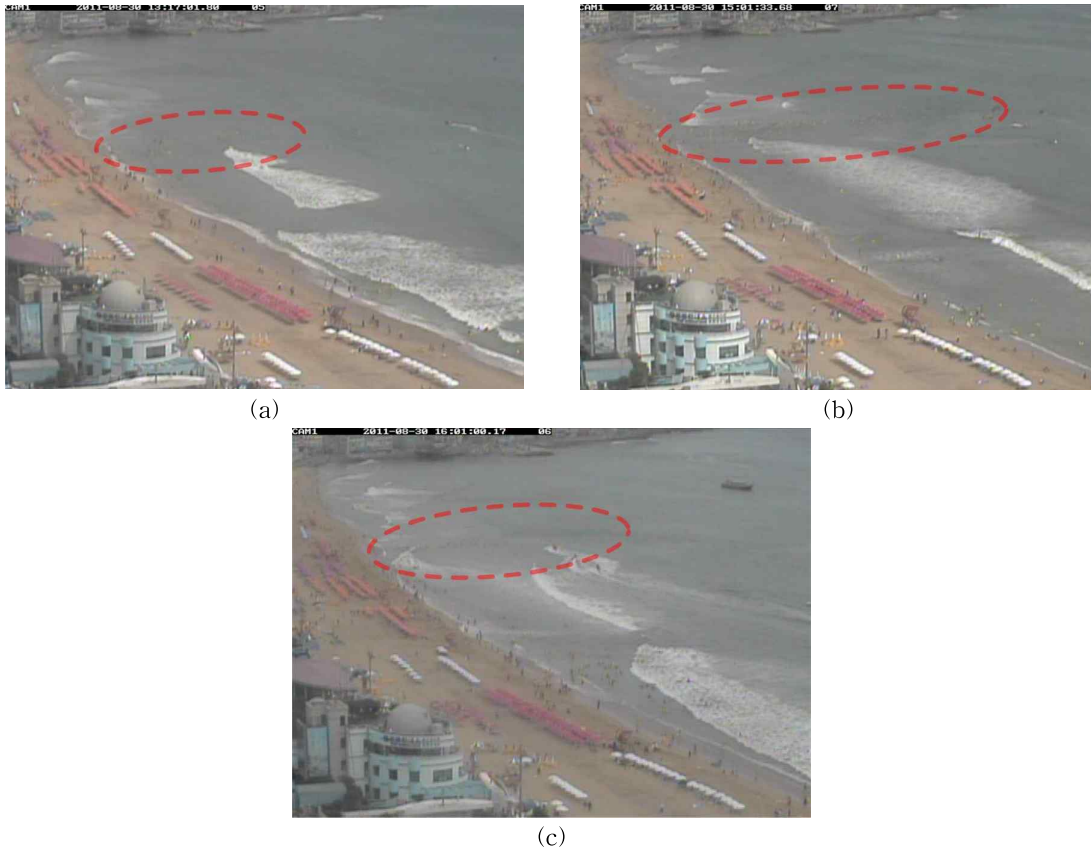


Fig. 9. Snapshots (CCTV images) of Rip Current Events at Haeundae Beach at (a) 13:17, (b) 15:01 and (c) 16:01 of the 30th of August, 2011

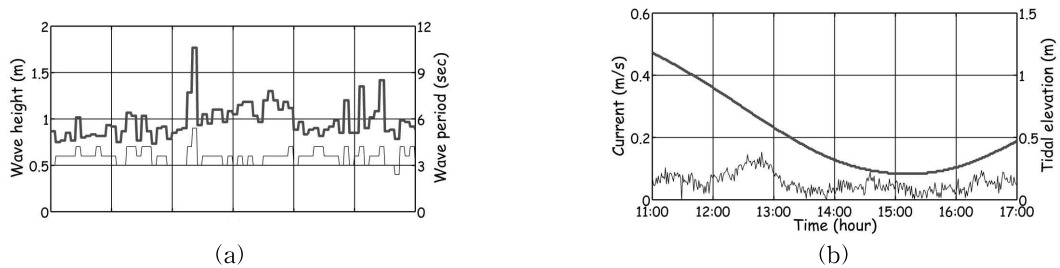


Fig. 10. Time Series of the Observations of Haeundae Buoys from 11:00 to 17:00 of the 30th of August, 2011. (a) Wave Height (—) and Wave Period (—). (b) Current Velocity Magnitudes at Mipho (—) and Tidal Elevation (—).

전후하여 이안류가 발생되었음을 알 수 있다. 앞에서 언급하였던 파랑관측과정의 지체시간과 파랑전조와 이안류 발생사이의 지체시간의 문제가 있음에도 지수 및 등급에 따라 적절한 알림 서비스를 제공한다면 안전사고를 예방에 도움을 줄 수 있을 것이라고 판단된다.

4.3 9월 29일

2011년 9월 29일 해운대 해수욕장의 폐장을 하루 앞두

고 이안류가 발생하는 모습이 CCTV 영상에 찍혔고 이를 Fig. 12에 나타내었다. 12시 13분경의 이 이안류 발생은 전후의 다른 이안류의 발생은 없었던 것을 판단되며, 그 지속시간은 3분정도이고 그 유속강도가 큰 것처럼 보였다. 단발적인 이 이안류의 발생시기를 전후한 시기인 2011년 9월 29일 10시부터 16시 사이의 관측된 유의파고, 유의주기, 미포항 앞 유속강도, 그리고 부산조위를 Fig. 13에 도시하였다. 12시 20분경에 높은 파고와 긴 주기의 파랑이

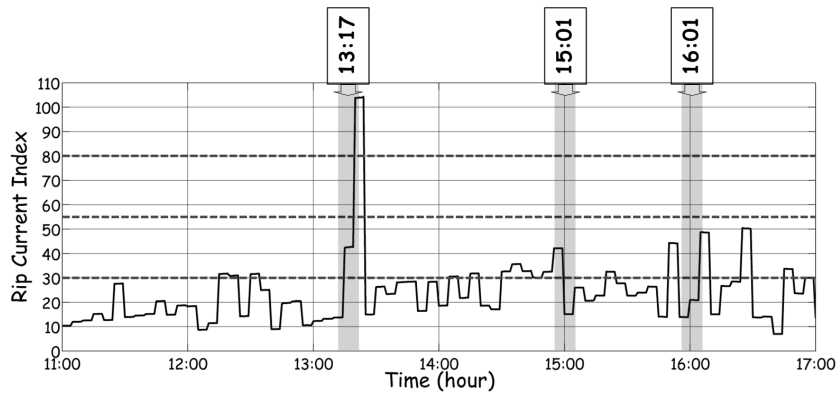


Fig. 11. Time Series of Rip-current Likelihood Index (—) Applied to the Observations from 11:00 to 17:00 of the 30th of August, 2011. The Broken Lines Indicate 30, 55 and 80 Points as a Rip-current Likelihood Index and the Wide Gray Bands Emphasize the Time of Rip Current Events.



Fig. 12. Snapshots (CCTV images) of Rip Current Events at Haeundae Beach at 12:13 of the 29th of September, 2011

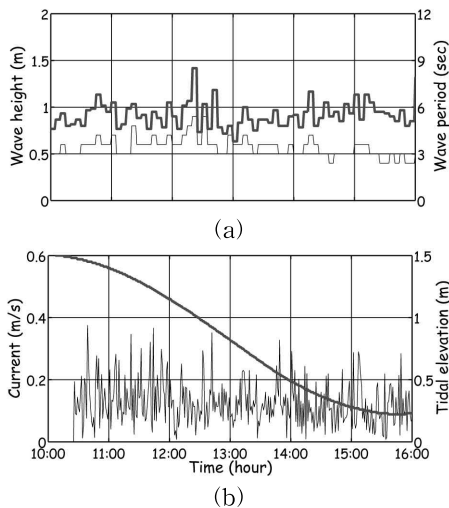


Fig. 13. Time Series of the Observations from 10:00 to 16:00 of the 29th of September, 2011. (a) Wave Height (—) and Wave Period (---). (b) Current Velocity Magnitudes at Mipho (—) and Tidal Elevation (---).

있었다는 것이 두드러지며, 이 이안류 발생시의 조위는 평균조위 근처의 낙조시기였다.

앞에 제시된 경우와 마찬가지로 Fig. 13에 도시한 관측된 값들을 이안류 지수함수에 적용하여 산출된 지수 값을 Fig. 14에 도시하였다. 이안류가 발생한 시점에서부터 약 10분 동안에 상대적으로 높은 지수를 보이고 있으며, 최대 57점의 “경계” 등급을 나타내고 있다. 따라서 높은 지수의 원인이 되는 높고 긴 너울성 파랑을 전조현상으로 볼 때, 관측에 따른 지체시간을 단축하지 않는다면, 지수에 따라 이루어지는 일련의 조치가 실제 이안류 발생시점에 비해 늦은 알림 서비스가 될 수 있음을 암시한다. 그러나 파랑정보의 산정기법에 기인한 이 지체시간을 줄인다는 것은 통계적 관점에서는 신뢰도가 떨어진다는 것을 의미하므로, 파랑정보 산정기법을 포함하여 다양한 측면에서 본 연구에서 제시하고 있는 실시간 예측기법의 개선을 연구할 필요가 있다고 판단된다.

4.4 풍랑주의보 발령 경우

앞의 경우와 달리 기상청에서 발령된 기상특보가 있었던 기간의 이안류 지수를 살펴보기 위하여 2011년 7월 19일부터 22일까지의 태풍 망온의 영향권에 있었던 기간과 8월 6일부터 9일까지의 태풍 무이파의 영향권에 있었던 기간을 선택하였다. Fig. 15에 태풍 망온의 영향권에 있었던 기간에 해운대 부이에서 관측되었던 유의파고, 유의주기 그리고 이안류 지수를 도시하였고, 추가로 7월 20일 12시 40분경의 CCTV 이미지를 제시하였다. 태풍의 영향권에 있으므로 풍랑주의보가 발령된 상태였고, 그림에 나타난 것처럼 해운대에서 관측된 유의파고와 유의주기도 상당히 크고 길다는 것을 알 수 있다. 따라서 그를 반영한 이안류 지수도 전체적으로 높을 뿐 아니라 20일 오전에는

지수가 80이상인 “위험” 단계가 지속적으로 유지되었다. 그러나 이 기간의 이안류 발생은 우천으로 인하여 CCTV로 확인할 수 없었으며, 이안류에 의한 위험이 아닌 1.5m 파고이상의 높은 파랑으로 인하여 이 기간에는 사실상 해수욕이 불가능한 상태였다. 20일 오후의 해안을 보여주고 있는 Fig. 15(c)의 CCTV 이미지에서도 확인할 수 있는 것처럼, 이미 태풍의 직접적인 영향권에 벗어났음에도 파고가 높기 때문에 해수욕이 제한되고 있다. 또한, 이 이미지에서 미포항에 가까운 해변에서 이안류의 발생을 확인할 수 있다.

기존의 연구(Darlymple et al., 2011; Yoon et al., 2012; Choi et al., 2012)로 부터 실제 태풍의 직접적인 영향권에 있을 때, 높고 긴 파랑이 나타나지만 광대역 불규칙과 환경이므로, 태풍이 지나간 간접 영향권에서 비록 상대적으로

로 작고 짧은 파랑이지만 협대역 불규칙과 환경이 되어 더 이안류가 잘 발생하는 것으로 알려져 있다. 이런 관점에서 7월 20일 오전 보다는 오후에 이안류가 발생할 가능성이 높다고 가정하면, 이안류 발생정도를 나타내는 지수가 오후보다 오전에 더 높게 나타내는 것은 이 시스템의 문제로 지적될 수 있다. 이 문제점은 우선은 스펙트럼에 따른 분석을 동반하여 지수산정법을 개선해야할 이유가 된다. 그러나 이안류 예측이라는 관점이 아닌 해수욕객의 안전이라는 관점에서 이런 경우에 높은 이안류 지수와 단계를 제공하여 안전요원들이 해수욕객에게 경고할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 즉, 이안류 지수는 이안류 발생정도를 나타낼 뿐아니라 해수욕 안전지수의 역할도 병행해야하는 것이 현실적으로 타당할 수 있음을 밝힌다.

태풍 무이파의 영향권에 있었던 기간에 해운대 부이에

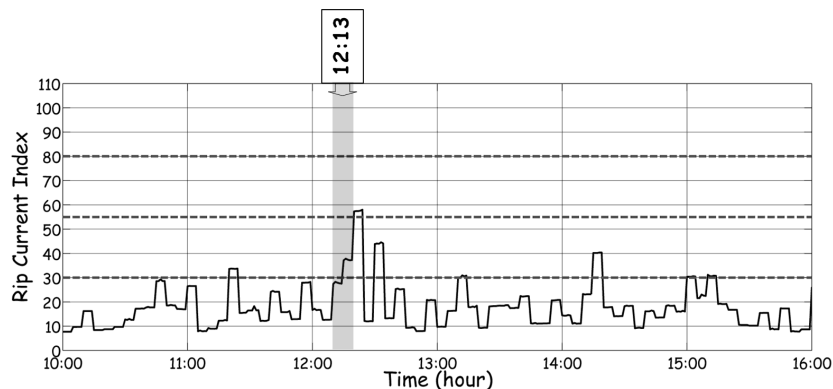


Fig. 14. Time Series of Rip-current Likelihood Index (—) Applied to the Observations from 10:00 to 16:00 of the 29th of September, 2011. The Broken Lines Indicate 30, 55 and 80 Points as a Rip-current Likelihood Index and the Wide Gray Bands Emphasize the Time of Rip Current Events.

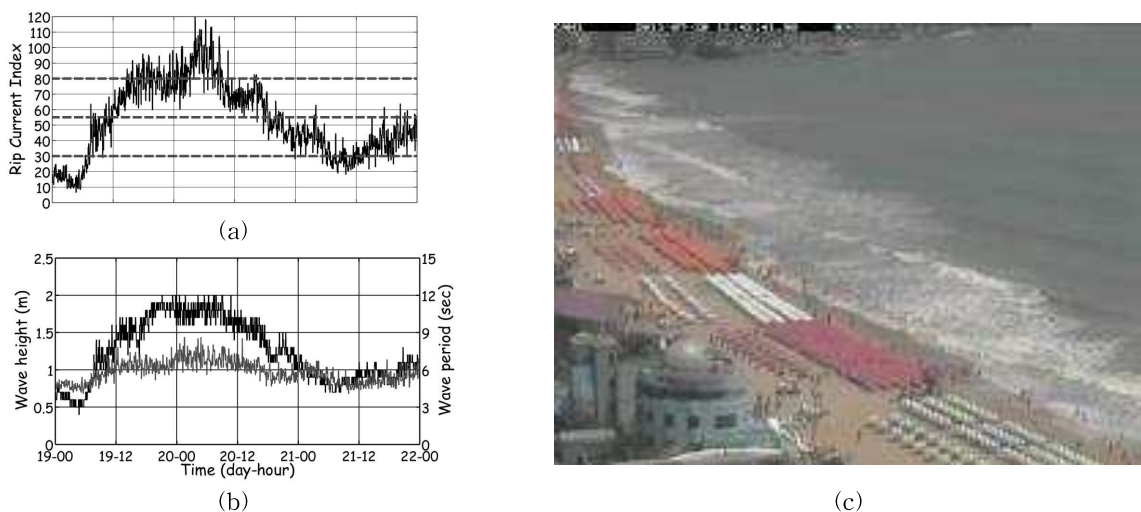


Fig. 15. Rip-current Likelihood Index, Observations and CCTV Snapshots during the Typhoon MANGON from the 19th to the 22nd of July, 2011. (a) Rip-current Likelihood Index, (b) Wave Height (—) and Wave Period (—). (c) Snapshot of CCTV Image at 12:43 of the 20th of July, 2011.

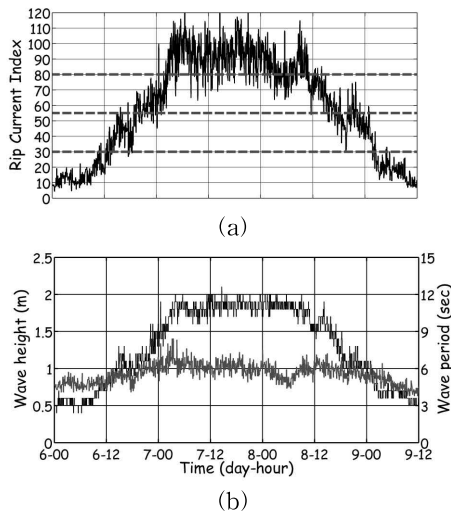


Fig. 16. Rip-current Likelihood Index, Observations and CCTV Snapshots during the Typhoon MUIFA from the 6th to the 12th of August, 2011. (a) Rip-current Likelihood Index, (b) Wave Height (—) and Wave Period (—). (c) Snapshot of CCTV Image at 14:00 of the 8th of August, 2011.

서 관측되었던 유의파고, 유의주기, 이안류 지수, 그리고 8월 8일 14시경의 CCTV 이미지를 Fig. 16에 제시하였다. 8월 5일부터 8일까지 풍랑주의보 혹은 경보가 발령된 상태였고, 그림에 나타난 것처럼 해운대에서 관측된 유의파고와 유의주기도 상당히 크고 길다는 것을 알 수 있다. 이를 반영한 이안류 지수도 7일과 8일에는 지수가 80 이상인 “위험”단계가 거의 지속적으로 유지되었다. 이 기간 역시 이안류에 의한 위험이 아닌 1.5m 파고이상의 높은 파고로 인하여 사실상 해수욕이 불가능한 상태였다. Fig. 16(c)의 CCTV 이미지는 태풍의 직접적인 영향권에서 벗어난 8일 오후의 해안을 보여주고 있으며 해수욕이 불가능해 보인다. 앞에서 언급한 것처럼 태풍의 간접 영향권에서 너울성 파랑이 잘 나타나며 이런 환경에서 이안류가 잘 발생하는 것으로 알려져 있으므로 8일 오후의 해안을 보여주는 이 이미지에서도 이안류의 발생이 있을 것으로 추정된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 불규칙파에 따른 해운대 연안흐름 시뮬레이션 결과를 기반으로 이안류 발생정도를 정량화시키고, 다양한 해상조건 시나리오에 따른 이안류 발생정도 분포를 제시한 기존의 연구를 바탕으로 하고 있다. 관측 정보와 이 시나리오를 연계하므로 실시간으로 전송되는 파랑정보 및 조위정보에 해당하는 이안류 위험지수를 산정하여 위험단계와 함께 제공할 수 있는 기법을 연구하였다. 이

기법에 따라 시스템을 구축하고, 이를 실제 발생한 이안류 상황에 적용하므로 그 활용 가능성을 확인하였다. 그러나 제시하고 있는 이안류 지수 산정기법은 기술적으로 개선의 여지가 많이 있다. 예를 들어, 최근 연구에서 밝혀진 규칙파에 가까운, 즉, 협대역 스펙트럼의 너울성 파랑이 해안에 도달할 때 이안류가 잘 발생한다는 해운대 이안류의 특성을 반영시킬 수 있도록 개선시켜야 하며, 본문에서 지적된 것과 같이 연안류의 관측결과를 유효하게 지수산정에 반영할 수 있도록 관측장비가 개선되어야 하고, 방향 스펙트럼을 정확하게 도출해 낼 수 있는 관측기기의 도입 등이 필요하다. 비록 추가적인 개선이 필요하지만, 본 연구의 이안류 예경보 알고리즘 수립 기법은 다른 이안류가 발생하는 해안에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구의 정량화된 이안류 발생정도의 분포 및 함수들은 해운대 시뮬레이션을 기반으로 수립된 것으로 국지적으로 해운대에만 적용될 수 있는 것임을 밝힌다.

본 연구의 기법보다는 실시간 관측과 실시간 시뮬레이션의 조합이 좀 더 미래 지향적이며, 현재 Scripps Institution of Oceanography for California 등의 기관에서 시범적으로 실시하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션은 항상 두 가지 목표, 즉, 정밀한 자연현상을 구현하기 위한 역학적 정확도와 계산의 신속성간의 충돌문제를 내포하고 있다. 따라서 본 연구의 이안류 발생 예측 지수산정 기법은 하나의 대안으로 지속적인 발전이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국립해양조사원의 연구비 지원 및 한국건설기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었기에 감사드립니다. 또한, 관측 자료를 제공해 주신 국립해양조사원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, J., Park, W.K., and Yoon, S.B. (2011). "Boussinesq Modeling of a Rip Current at Haeundae Beach." *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 4, pp. 276-284.
- Choi, J., Park, W.K., Bae, J.S., and Yoon, S.B. (2012a). "Numerical Study on a Dominant Mechanism of Rip Current at Haeundae Beach: Honeycomb Pattern of Waves." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5B, pp. 321-329.
- Choi, J., Shin, C.H., and Yoon, S.B. (2012b). "Numerical Study on Sea State Parameters Affecting Rip Current at Haeundae Beach : Wave Period, Height, Direction and Tidal Elevation." *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 205-218.
- Dalrymple, R.A., MacMahan, J.H., Reniers, A.J.H.M., and Nelko, V. (2011). "Rip Currents." *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 43, pp. 551-581.
- Engle, J. (2003). *Formulation of a rip current forecasting technique through statistical analysis of rip current-related rescues*. Master's thesis. Univ. Florida.
- Gensini, V.A., and Ashley, W.S. (2009). "An examination of rip current fatalities in the United States." *Natural Hazards*, Vol. 54, No. 1, pp. 159-175.
- Lascody, R. (1998). "East central Florida rip current program." *Natl. Weather Dig.*, Vol. 22, No. 2, pp. 25-30.
- Lee, J.L., Cho, J.H., Suh, J.W., and Lee, J.Y. (2011). "A Study of dangerous rip current generation and related wave factors on Haeundae Beach, Korea." *Proceedings KAOSTS '11, KAOSTS, BEXCO in Busan, Korea*. pp. 1955-1958.
- Longuet-Higgins, M.S., Cartwright, D.E., and Smith, N.D. (1963). "Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy." *Ocean wave spectra, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey*, pp. 111-136.
- Lushine, J. (1991). "A study of rip current drownings and related weather factors." *Natl. Weather Dig.*, Vol. 16, pp. 13-19.
- Nelko, V., and Dalrymple, R.A. (2008). "Rip currents: mechanisms and observations." In Proc. 31st Int. Conf. Coast. Eng., ed. JM Smith, World Sci., Singapore, pp. 888-900.
- Schrader, M. (2004). "Evaluation of the modified ECFL LURCS rip current forecasting scale and conditions of selected rip current events in Florida." *Master's thesis*. Univ. Florida.
- 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." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 4B, pp. 243-251.

논문번호: 12-120	접수: 2012.11.08
수정일자: 2013.01.21/02.07	심사완료: 2013.02.07