Journal of Wetlands Research, Vol. 15, No. 3, pp. 423-430 (2013)

실용적 해안선 후퇴 반영 알고리즘

김효섭 · 이정수 · 진재율* · 장창환**+

국민대학교 건설시스템공학과

* 한국해양과학기술원 연안재해재난연구센터

** 특허청 건설기술심사과

A Practical Algorithm to Simulate Erosion of On-Shore Zone

Kim Hyoseob · Lee Jungsu · Jin Jae-Youll* · Jang Changhwan**+

Department of Civil Engineering, kookmin university

** Coast Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science Technology*

*** Construction Technology Examination Division, Korean Intellectual Property Office*

요 약

일반적 형태의 해안영역에서의 퇴적물이동, 퇴적 및 지형변화를 예측하는 수치모형에서 전빈의 침식으로 인한 해안선 후퇴가 가능한 알고리즘을 제시한다. 평균해수면 기준의 해안선 인근 영역에서는 저면 경사가 저면 퇴적물의 종류, 조석과 조류, 파랑, 연안류 등 외력의 영향을 받는다. 그러나, 해안선에서의 저면경사는 어느 정도 안정된 범위내의 값을 가지는 것으로 보고된 바 있으며, 연중 변화 또한 거의 일정 범위 내에 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 경사의 변동 한계값을 이용하여, 해중 침식이 지속되어 해안선에서의 저면 경사가 계속 증가하는 경우, 이러한 한계 경사를 넘게 되면, 이를 조정하기 위한 방법으로서 저면경사가 한계값 내로 돌아오도록 해안선 인근에서의 저면 형상을 조정하도록 하였다. 이렇게 함으로써 침식이 지속되는 경우 해안선이 지속적으로 후방으로 후퇴하는 현상을 수치모형에서 재현할 수 있게 된다. 개발한 알고리즘을 우물함수형의 침식 상황, 즉 한 점에서 일정 플럭스로 준설을 지속할때 주변 지형이 우물함수 분포 형상으로 침식되어 가는 과정을 잘 재현하였다. 발달하는 해안선의 형태가 거의 원형의 동심원으로 나타나므로 알고리즘의 유용함을 확인하였다. 또 개발한 알고리즘을 침식지역이 일정속도로 하강하는 가상상황에 적용하여 보았으며, 동심원적 지형 변화를 잘 재현하였다. 본 알고리즘을 기존의 수치모형 CST3D 시스템에 채택하여, 등경사 평판형 해안에 이안제가 놓여 있을 경우에 대한 지형변화 수리모형실험의 조건과 동일한 조건을 대상으로 모형실험을 수행한 결과, 해안선의 변화를 정성적으로 만족스럽게 재현하였다.

핵심용어 : 해안선 후퇴, 지형변화, 수치모형, CST3D

Abstract

An algorithm to allow shoreline movement during numerical experiment on sediment transport, deposition or resuspension for general coastal morphology is proposed here. The bed slope near shoreline, i.e. mean sea level, is influenced by bed material, tidal current, waves, and wave-induced current, but has been reported to remain within a stable range. Its annual variation is not large, either. The algorithm is adjusting the bathymetry, if the largest bed slope within shoreline band exceeds a given bed slope due to continuous erosion at zones below the shoreline. This algorithm automatically describes retreat of shoreline caused by erosion, when used within a numerical system. The algorithm was tested to a situation which includes a continuous dredging at a point, and showed satisfactory development of concentric circle contours. Next, the algorithm was tested to another situation which includes sinking of eroded part of bed plate, and produced satisfactory results, too. Finally, the algorithm was tested to a movable-bed laboratory experimental conditions. The shoreline movement behind detached breakwater was reasonably reproduced with this algorithm.

Keywords *: shoreline movement, CST3D, numerical model, erosion*

1. 서 론

하천, 하구 또는 해안에서 흐름방향으로 퇴적물이 소류사 또는 부유사 형태로 이동하는 경우, 이로 인하여 지형변화가 발생한다. 해안에서는 흐름방향 이외에도 단주기 파랑의 진행방향으로도 파랑주기에 대하여 평균

* To whom correspondence should be addressed.
cjang@kipo.go.kr

한 값인 잔여 유체질량이동이 발생하며, 이로 인한 퇴적물 이동도 발생한다. 이러한 파랑진행방향 퇴적물 이동은 해안선 직각방향 퇴적물 이동 (cross-shore sediment transport, on-offshore sediment transport)으로도 부른다. 파랑진행방향 퇴적물 이동은 파랑의 비선형성, 쇄파대의 저층류 (undertow), 흐름장의 난류와 관련이 깊으며, 해안 단면이 평형상태인 경우에는 파랑진행방향의 퇴적물 이동이 거의 없는 상태로 볼 수 있다.

하천이나 해안에서 수면의 변동이 있는 흐름장이 있을 때 수면 하에서 퇴적이 지속적으로 발생하게 되면, 수면이 가장 높이 상승하는 곳까지 저면 높이가 상승할 수 있다. 실제 하천 또는 해안에서는 수면이 상승할 수 있는 극한 상태의 최고수위까지 퇴적이 진행되면 평균수면과 비교하여 더 높은 높이까지 저면이 높아지므로, 이를 재현하기 위한 수치모형에서는 특별한 알고리즘이 필요하지 않다. 특히 퇴적물이 퇴적되는 동안에는 저면의 경사가 하안선 또는 해안선 인근에서는 저면의 경사가 완만해지는 방향으로 지형이 변화하여 최종적으로는 거의 수평경사가 된다. 반면, 퇴적이 아닌 침식이 지속적으로 진행되는 저면의 경우는 국소적으로 하안선 또는 해안선 부근에서 경사가 커질 수 있다. 수면과 떨어진 수중에서는 수중 안식각이라는 한계경사가 존재하며, 수면 부근에서는 수중 안식각보다 작은 한계 경사가 존재하는 것으로 알려져 있다. 이는 해안의 경우 수면 인근에서 파랑의 작용이 활발하고 또한 난류강도가 높아 저면의 퇴적물을 교란시키기 때문일 것으로 인식된다. 해안 단면을 따라가면서 경사가 가장 큰 부분은 암반이 존재하지 않을 경우 보통 평균 수면 근방이다. 이러한 현상을 모의하기 위하여 지금까지 하천이나 해안에서의 지형변화를 예측하는 수치모형이 많이 제시되어 왔으나, 수면보다 높은 저면고를 갖는 전·후빈의 침식을 재현하는 기능은 1-Line 모형 (Ozasa and Brampton, 1979), N-Line 모형 (Perlin and Dean, 1985)과 같은 준선형해안선의 이동예측모형에서만 반영되어 왔으며, 일반적인 형태의 평면 2차원 영역에서의 임의형태의 해안을 대상으로 하는 지형변화 수치모형에서는 반영이 되지 못하였다. 기성패키지로는 1-Line 모형 GENESIS (Hanson, 1988)를 들수 있다. 1-Line 모형의 확장모형인 N-Line 모형은 윤곽선 변경을 계산하고, 2차원 이류 확산 방정식을 사용하였다 (Shibutani and Kuroiwa, 2008). N-line 모형 중 하나인 기성패키지 CSHORE (Bradley et al., 2012)은 부유사와 소류사를 포함하여 해안의 변화를 예측할 수 있으나 해안선 수직방향의 단면 형태위주의 N-line 유형이라는 한계가 있다. 연직 2차원 모형으로 해안선 및 사구변화 모의가 가능한 XBEACH(Roelvink et al., 2009, 2010) 또한 단면 모형이라는 한계가 있으며, 계산시간이 많이 소요되어 장기 지형변화 예측에 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.

해안선의 전진·후퇴는 연안관리 주체인 국가나 지방자치 단체의 주요 관심사 중의 하나다. 해안침식관리 선진국은 최근 해안침식대책 수립시 경제, 환경, 사회적인 측면을 모두 고려하여 종합적인 편익을 면밀하게 검토하는 추세이다(국토해양부, 2010). 우리나라는 1980년대 중반 서해안에 처음으로 퇴적물이동 수치모형실험이 해안 개발사업에 적용되었고, 동해안 사질퇴적물 영역모형실험은 80년대 말부터 시작되었으나 주로 어항·항만 매몰 평가가 목적이었다. 그러나 현재의 국제적인 영역모형 기술수준이 전술한 바와 같으므로 당시에 해안선 변화에 관심이 있더라도 영역모형은 예측수단이 될수 없었다. DGPS를 이용한 해안선 변화 조사 및 분석 (Lee et al., 2007) 에서는 강원도 강릉시 연안지역을 선정하여 측량을 실시하였고, 수치지형도와 수치해도를 상호 비교하여 해안침식과 퇴적이 발생한 것을 확인하였다. 또한 상주해수욕장의 해안선 변형에 대한 수치모형 연구 (Lee et al., 1995), 인공섬건설에 따른 해안선변형모델에 관한 연구 (Oh et al., 1992)와 같이 해안선변형을 예측하기위한 연구가 진행되어 왔으나 일방적 형태의 해안선을 대상으로 수치모형시스템에서 모의한 예는 드문 형편이다. 본 연구에서는 일반적인 평면 2차원 형태의 영역을 대상으로 해안선이 침식으로 인하여 후퇴하는 과정을 재현할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다. 즉 흐름방향의 퇴적물 이동이나, 파랑진행방향 퇴적물 이동으로 인하여 해저면에서 침식이 발생할 때 평균해수면보다 높은 저면으로 구성된 전·후빈의 침식을 동반하는 알고리즘을 제시하고, 이를 수치모형시스템에서 채택하여 모의할 때 알고리즘의 활용성을 확인하고자 한다.

2. 해안선 후퇴를 고려한 모의 알고리즘의 제시

일반적인 직선 해안 단면은(Fig. 1)과 같다. 수치모형실험을 위하여 격자마다 수심이 정의되며, 수중에서 침식이 발생하는 경우 단면이 변화할 것이다. $\overline{A_0B_0}$ 였던 단면이 $\overline{A_1B_1}$으로 변화하여 경사가 일정경사를 넘어가면 i와 $i+1$ 격자의 수심을 $\overline{A_2B_2}$로 조정한다. 이 때 해저질의 질량을 보존할 수 있게 조정한다. 이와 같은 조정으로 A_0와 같은 전빈의 저면고가 계속하여 침식될 수 있게 된다. 실제 해안은 일반적인 형태를 가질 것이므로, 이러한 1차원 개념으로는 부족하며 2차원적으로 일반형태의 영역을 갖는 지형으로 확장한다. 지형이 (Fig. 2)와 같은 예를 보면 가운데 호수가 있고 둥근 형태의 해안선이 존재한다. 해안선을 가로지르는 경계 좌우의 격자를 모두 표시하여 해안선 밴드(shoreline band)로 가정할 경우, 이 해안선 밴드 내의 매 격자에 대하여(Fig. 3)과 같이 8방향의 경사 중 최대값을 찾아 기준

경사와 비교하여 기준값 이상의 값이면 해안선 밴드내의 수심을 평활화한다. 해안선 밴드 내의 저면 경사가 기준 경사가 넘는지 검토하는 단계 외에도 해저면 내의 어떠한 곳이든 수중안식각보다 큰 경사가 발생하는 경우에는(Fig. 4)와 같이 수심의 평활화 단계를 수행할 수 있다.

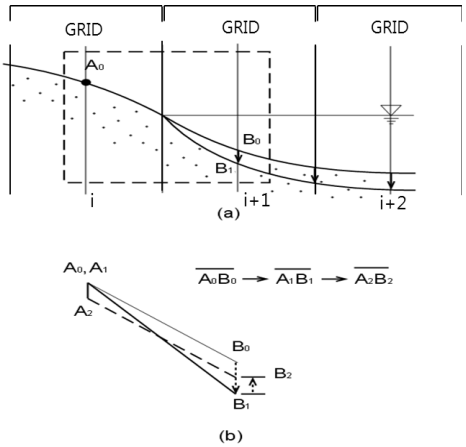

Fig. 1. Concept for adjustment of excessive bed slope caused by erosion (one-dimensional bed profile)

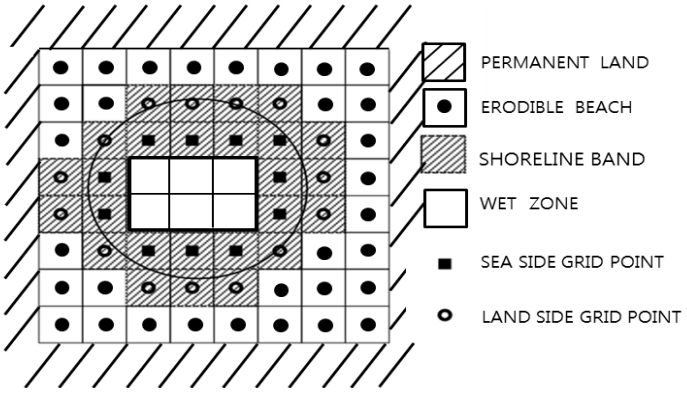

Fig. 2. Distinguishment of zones for computation of bed slope (general two-dimentional plan bathymetry)

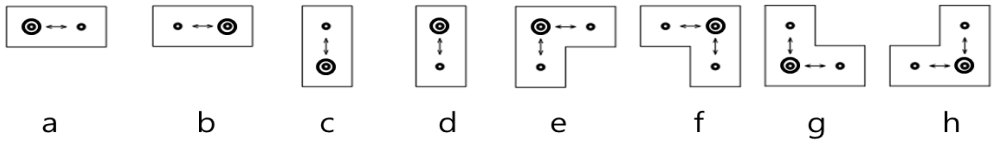

Fig. 3. Eight directions for bed slope calculation. (⊙ : grid point of interest in shoreline band)

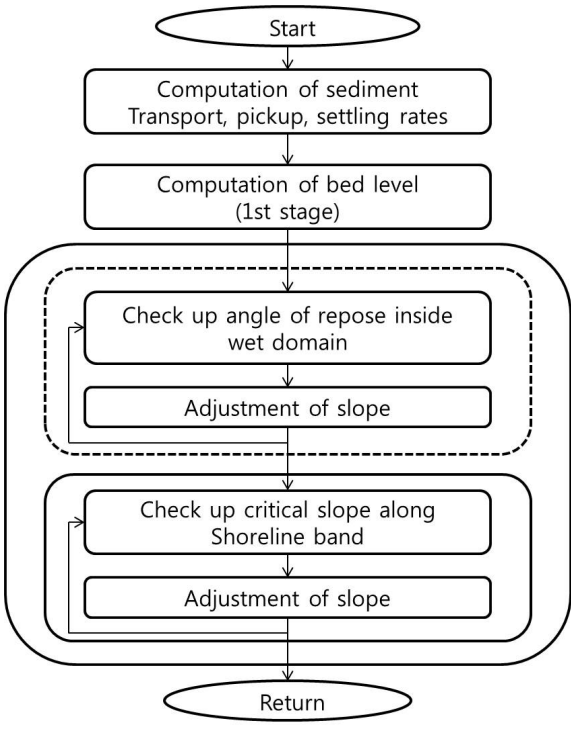

Fig. 4. Flowchart for adjustment of slopes

3. 해안선 후퇴를 고려한 모의 알고리즘의 적용성 검증

3.1 검증 : 우물함수형 지형침식

일반형태 영역에서의 해안선 후퇴 계산 알고리즘을 검토하기 위한 첫 단계로서, 전체 영역이 침식 가능한 육지영역으로 구성된 지형에서 지속적으로 일정 퇴적물 플럭스를 한 격자점에서 준설하는 경우를 대상으로 모형실험을 수행하였다. 임의로 x 축 방향으로 101개, y 축 방향으로 101개의 격자를 생성하였고 격자 간격은 10 m 로 동일하다. 격자의 중앙점에서 $0.1 m^3/s$로 부피 플럭스 준설을 계속한다. 제안하는 해안선 전진 후퇴 알고리즘에 생성된 격자를 적용한 결과 수중격자가 점차 시간이 지날수록 동심원으로 수심이 깊어지는 과정을 잘 재현하였다. 또한 대상 격자점을 중심으로 동일 반경에서의 퇴적물 이동률이 반경에 대하여 일정할 것이므로, 침식이 발생하는 지형의 단면형태는 우물함수 형태가 될 것이며, 모형적용결과 잘 재현되었다(Fig. 6). 이때, 한계경사를 보정하기 위한 지형변형 단계는 퇴적물 이동과 같은 시간적 변화로 보지 않고 순간적으로 보정하는 것으로 가정하였다.

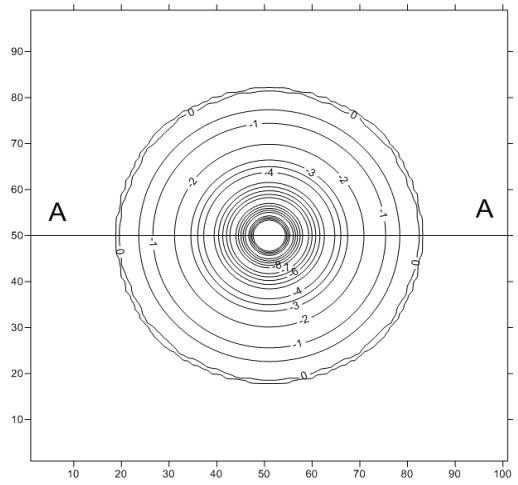

Fig. 5. Depth Contours

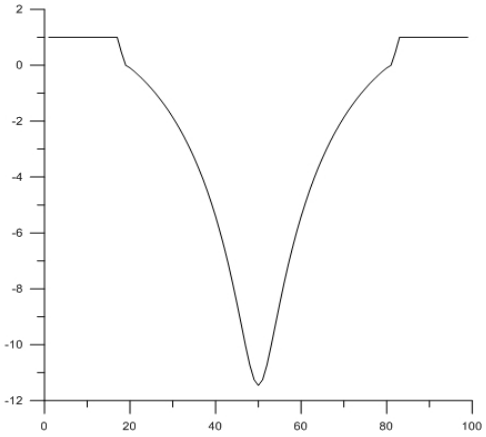

Fig. 6. Depth profile A-A

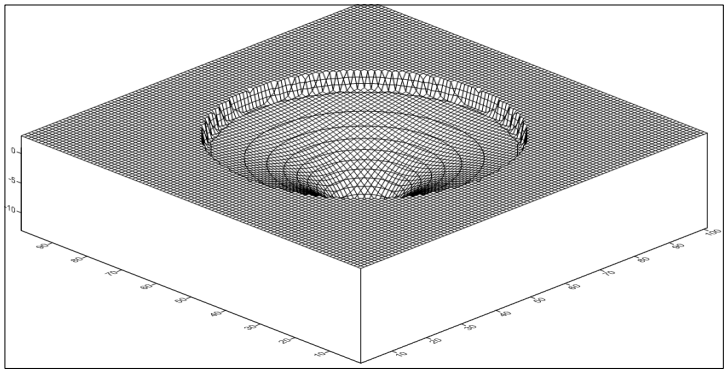

Fig. 7. Bird's eye view

3.2. 검증 : 원뿔형 지형침식

평면으로 형성된 침식가능 전빈 가운데에서 침식이 발생한 면적의 지반이 $0.2cm/s$ 속도로 침하하는 경우에 대하여 수치모형을 적용하였다. 격자의 갯수는 위의 소절과 같이 101×101, 격자의 크기는 10m×10m 이며 시작시점에서는 가운데 격자만 침식이 발생하였다. 지반 침하가 지속되면 침하 면적이 점차 넓어진다. 동심원 등고선이 발달하여 단면의 형태는 V자 형태로서 원뿔의 단면을 나타내며(Fig. 9), 원형의 해안선이 정상적으로 발달함을 보였다.

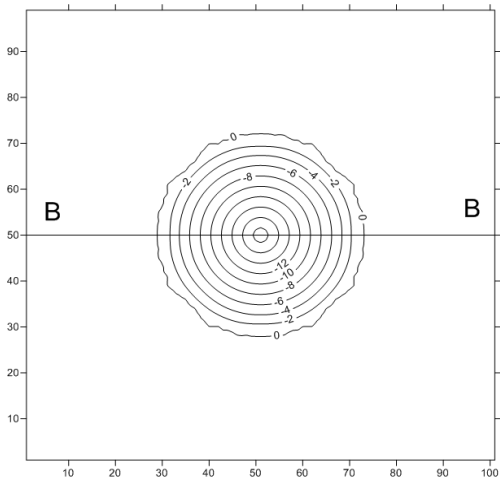

Fig. 8. Depth Contours

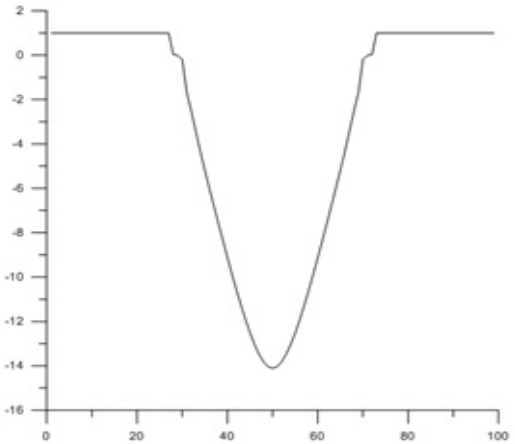

Fig. 9. Depth profile B-B

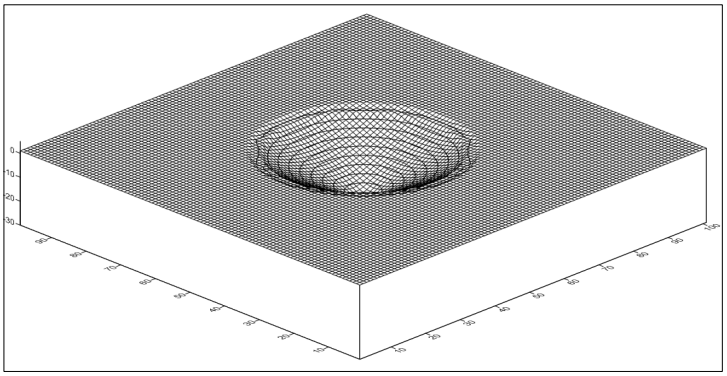

Fig. 10. Bird's eye view

3.3 검증 : 이안제 인근해빈 지형변화 수리모형실험 자료

이안제와 해안선의 거리에 따른 해안선 후퇴양상을 이동상 수리실험을 통하여 모의한 Ming and Chiew.(2000)의 실험결과중 일부를 검증데이터로 활용하였다(Table 1). Ming and Chiew.은 일정경사와 직선 등고선, 즉 평판형의 해안에 이안제가 놓여있는 지형에서의 이동상 해안선변화 수리모형실험을 수행하였다. 보통 평행해빈에 이안제를 건설하게 되면 이안제의 해안 쪽으로는 해안선이 차차 전진하여 새로운 평형상태의 해안선이 형성되며, 경우에 따라서는 톰볼로(tombolo)가 형성되어 이안제와 해안이 연결이 되기도 한다. 본 알고리즘을 σ-좌표계 이용 개수로 흐름장 계산 수치모형실험 (Kim et al., 2012, Kim et al., 2013) 시스템에 장착하여 Ming and Chiew의 수리모형 실험 조건과 동일하게 수치모형 실험을 수행하였다 (Table 2). CST3D 시스템 내의 파랑모듈 SWAN을 이용하여 주어진 외해 파랑조건을 입력하여 구한 파랑장은(Fig. 11)과 같으며, 이안제 배후의 정온역을 잘 재현하고 있다. CST3D 시스템 내의 파랑에 의한 흐름장 기인력 산정결과는(Fig. 12)와 같으며, 이안제 배후에서 기인력의 크기가 줄어드는 경향을 보인다. CST3D 내의 흐름장 모듈을 이용하여 파랑류(wave-induced-current)를 계산한 결과는(Fig. 13)과 같으며 이안제 배후의 와류쌍을 잘 재현하고 있다. CST3D 시스템 내의 퇴적물이동 모듈을 이용하여 지형변화를 계산한 결과 해안선의 이동이 발생하였으며, Ming and Chiew(2000)의 수리모형실험 결과를 정성적으로 잘 재현하고 있다. 즉 이안제 바로 배후에서는 해안선이 전진하였으며, 이안제의 양단의 배후에서는 해안선이 후퇴하였다. 그러나, 정량적으로는 아직 예측의 정밀도가 높지 않은 편이다. 이는 추후 추가적인 실험을 통하여 세부적인 원인을 파악할 필요가 있을 것이다.

Table 1. Laboratory test conditions (Ming and Chiew., 2000)

deep water wave height	0.05m
wave period	0.85sec
length of detached breakwater	1.5m
distance between breakwater and shoreline	0.9m
median sediment size	0.25mm(non-cohesive sediment sand)
bed slope	1/100

Table 2. Present Numerical experiment

dx,dy	0.1m, 0.11m
dt	0.02sec
deep water wave height	0.05m
wave period	0.85sec
length of detached breakwater	1.5m
distance between breakwater and shoreline	0.9m
median sediment size	0.25mm(non-cohesive sediment sand)
bed slope	1/100
software used	CST3D(2013-ver1)

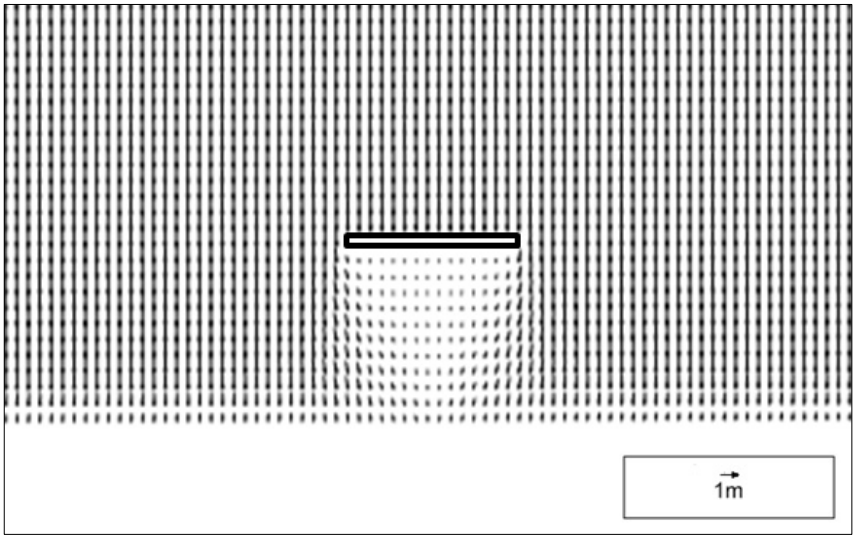

Fig. 11. Computed wave height and direction vectors with CST3D

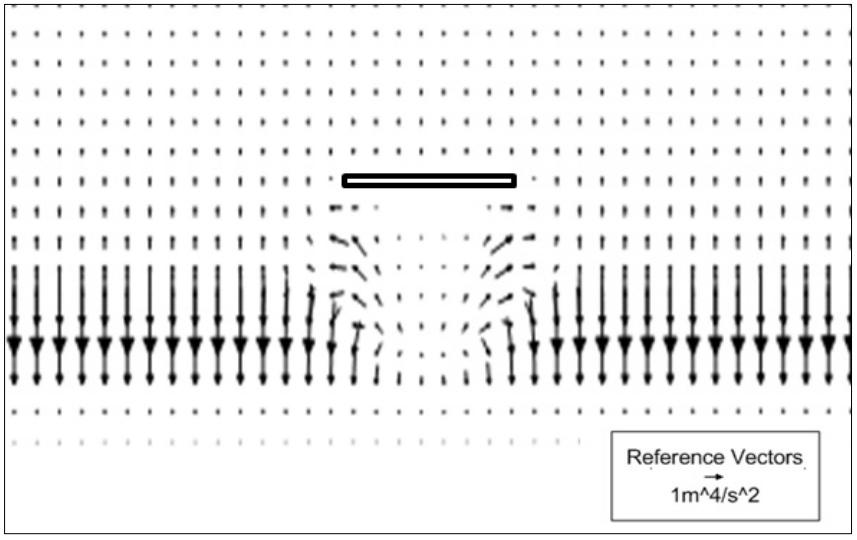

Fig. 12. Computed wave-in duces force vectors with CST3D

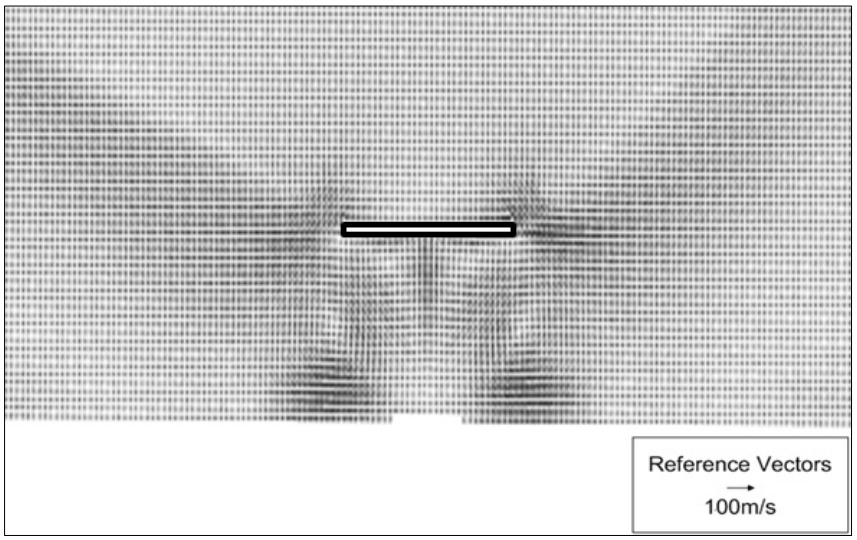

Fig. 13. Computed wave-induced current vectors with CST3D

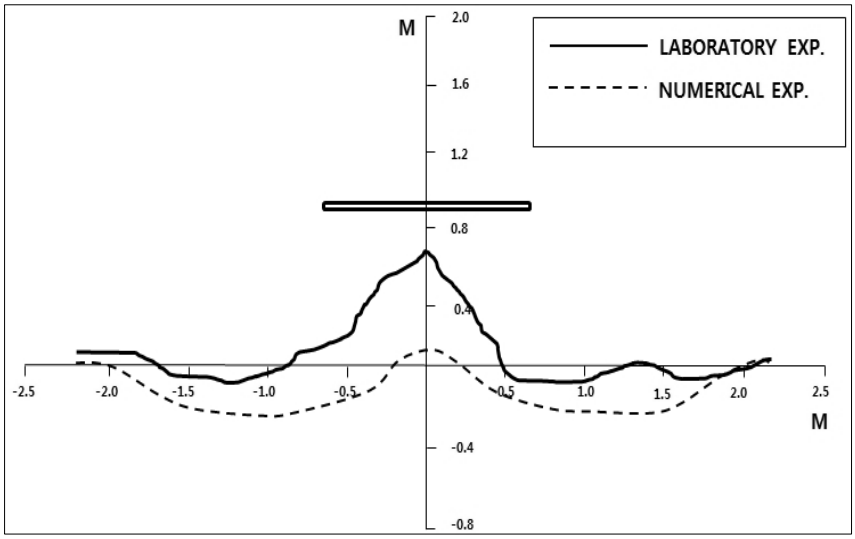

Fig. 14. Comparison of computed and measured shoreline positions

3. 결 론

하천이나 해안에서 평균해수면보다 높은 저면의 전·후빈이 침식이 되는 경우를 규칙격자망을 사용하는 수치모형 내에서 모의할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 수치모형에서 사용하는 격자에서 해안선 바로옆 격자를 찾아내어 해안선 격자대로 구분하고, 저면경사가 일정경사를 넘는 경우에는 지형을 평활화하여 저면 경사가 일정 경사 이내가 되도록 조정하도록 한다. 이러한 알고리즘이 일방적인 2차원 평면 영역에 적절한지 확인하기 위하여 세 경우의 예를 선택하여 적용하여 보았다. 첫째로, 평면으로 된 전빈의 가운데 점에서 일정 속도의 준설을 하는 경우를 적용하여 보았으며, 원형으로 해안선이 확장하는 현상을 잘 재현하였다. 둘째로, 평면으로 된 전빈 가운데에서 침식이 시작되어 침식역이 일정속도로 침하하는 경우에 적용하여 보았으며, 원형으로 해안선이 확장하는 현상을 잘 재현하였다. 셋째로, 일정경사의 평행등고선 해안에 이안제를 둔 경우의 지형변화를 관찰한 수리모형실험의 경우와 동일한 조건을 대상으로 본 알고리즘을 채택한 수치모형 CST3D 시스템을 적용하여 보았으며, 해안선 변화를 정성적으로 잘 재현하였다. 본 알고리즘이 임의형태의 해안선의 변동에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부와 한국해양과학기술진흥원이 지원하는 '인공구조물 설치/제거에 의한 해양환경예측모델링 기술개발' '연안침식대응기술개발' 연구과제, 국민대학교의 교내연구(2013년도)의 연구 결과입니다.

References

Hanson, H (1988). Genesis-A generalized shoreline change numerical model. *J. of coastal research,* 5(1), pp. 1-27.

Johnson, BD, Kobayashi, N. and Gravens, MB (2012). Cross-shore numerical model CSHORE for waves, currents, sediment transport and beach profile evolution.

Kim, HS (2013). CST3D User Manual V1. *Korea Institute of Ocean Science Technology.*

Kim, HS, Lee, JS, Yoo, HJ, LEE, JW (2012). Numerical Model with σ-coordinate and hydrodynamic for open channel flows, *J. of Korean Society of Civil Engineers, Conference,* pp. 2109-2113.

Kraus, NC (1981). One-line model development and simulation for Oarai beach, NERC Report, 15, Japan.

Lee, SH, Shin, DS, Her, SG (1995). A Study of Numerical Shoreline Change Model for SANGJU beach, *J. of Korean Society of Civil Engineers,* 15(1), pp. 229-238.

Lee, HS, Kim, IH (2007). Investigation and Analysis of Shoreline Change using DGPS. *J. of the Korean Association of Geographic Information Studies,* 10(2), pp. 1-10.

Ming, D. and Chiew, YM (2000). Shoreline changes behind detached breakwater. *J. of Waterway, Port, Coastal, and Oecan Engineering,* 126(2), pp. 63-70.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Development of Coastal Erosion control technology. 11-1611000-001508-1.

Oh, SY, Min, BH, Kim, JH, Kim, KC, Kim, JJ (1992). A Study on the Coastal Development Model Due to

Construction of Artificial Island. *J. of Ocean Engineering and Technology,* 6(2), pp. 133-142.

Ozasa, H. and Brampton. AH (1979). Models for predicting the shoreline evolution of beaches backed by seawalls. *Report of the Port and Harbor Research Ins,* 18(1), pp. 78-104.

Perlin, M. and Dean, RG (1983). A Numerical model to simulate sediment transport in the vicinity of coastal structures. U.S Army. CERC. Miscel. Rep. 83-10.

Roelvink, D, Reniers, A, Van Dongeren, A, Van Thiel de Vries, J, Mccall, R, Lescinski, J (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Elsevier, 56(11-12), pp. 1133-1152.

Roelvink, D, Reniers, A, Van Dongeren, A, Van Thiel de Vries, J, Lescinski, J, Mccall, R (2010). XBeach model description and manual.

Shibutani, Y, Kuroiwa, M. and Matsubara, Y (2008). N-Line model for predicting beach evolution due to nourished sands. IEEE. pp. 1-8.

○ 논문접수일 : 2013년 05월 22일
○ 심사의뢰일 : 2013년 05월 27일
○ 심사완료일 : 2013년 08월 20일