韓國海岸 · 海洋工學會誌
第 9 卷 第 4 號, pp. 201~207, 1997年 12月

海濱變形模型을 이용한 港內埋沒豫測
Prediction of Harbor Siltations Using a Numerical Model for Sea Bottom Configuration

김규한* · 백승화** · 편종근***
Kyu Han Kim*, Seung Wha Baek** and Chong Kun Pyun***

要 旨 : 우리나라 동해안 대부분의 중소어항에서는 항내 및 항입구부의 매몰현상이 심각하여 항내수심을 유지하기 위해 거의 매년 준설을 실시하고 있으며, 항내매몰로 인해 수심이 낮아져 배가 전복되는 등 극심한 피해를 입고있어 적지 않은 사회문제로 까지 확대되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 매몰현상이 비교적 심각한 동해안의 K항을 선정하여 항내매몰에 관한, 현지관측 및 수치모형실험을 실시하였고, 실시결과 현지상황과 잘 일치되는 흐름상황 및 매몰현상이 발생하였음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 해빈류, 항내매몰, 수치모형, 현장관측

Abstract □ Most of small harbours are suffering serious harbour siltation problems in the eastern coast of Korea. Also, many of them necessitate maintenance dredging every year. In order to solve these problems, we have to predict the amount of previous harbour siltation. In the present study, numerical prediction of the harbour siltation has been accomplished using numerical model of 3D beach deformation around a structure. And, also the validity of the model has been confirmed by the field investigation.

Keywords : wave induced currents, harbor siltation, numerical model, field observation

1. 서 론

우리나라 동해안에 위치한 대부분의 중소항만 및 어항들은 사빈해안에 건설된 소규모 어항이 주를 이루고 있으며, 항 입구부가 쇄파대 내에 위치하고 있으므로 지형변화가 극심하여, 항내에 매몰현상이 발생되고 있다. 이러한 현상들로 인하여 항내수심을 유지하기 위해 거의 매년 준설을 실시 할 뿐 아니라, 항내매몰로 인해 수심이 낮아져 배가 전복되어 인명피해가 발생하는등 극심한 피해를 입고 있어 항내 및 항로매몰이 적지않은 사회적 문제로까지 대두되고 있는 실정이다. 이와같은 문제를 해결하기 위해서는 우선, 사전예측 및 항내매몰현상의 정확한 재현을 통해 그 원인을 파악할 필요가 있다.

항내매몰의 예측 및 재현을 위한 연구방법으로는 수치모형실험과 수리모형실험, 그리고 현장조사의 방법이 고려될 수 있으며, 3가지 방법을 동시에 이용하는 것이 가장 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 우선, 항내매몰이 극심한 동해안의 K항을 대상으로 수치모형실험을 통한 항내매몰예측법을 이용하여, 현지 항만 주위의 흐름상황 및 항내매몰현황을 파악하였다. 아울러, 현지의 흐름상황에 대해 현지관측을 실시하여 수치모형의 타당성을 검증하였다.

2. 주변해역의 자연조건 및 지형변화

*관동대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kwandong University, Kangwondo, 215-800, Korea)
**인천시립전문대 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Inchon City Junior College, Inchon 402-750, Korea)
***명지대학교 토목환경공학과 (Department of Civil & Environmental Engineering, Myongji University, Kyunggido, 449-728, Korea)

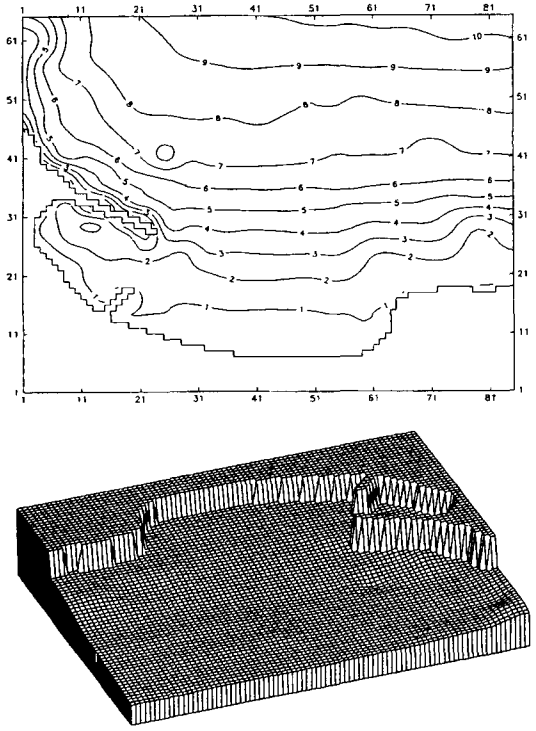

Fig. 1. Bathymetry in the vicinity of the K harbor.

2.1 자연조건

K항은 강원도 동해안에 위치한 비교적 소규모 어항으로 주변해안은 사빈으로 이루어져 있으며, Fig. 1은 이 해역의 해저지형도를 나타내고 있다. 해저경사는 1/40~1/60의 대체로 완만한 경사를 이루고 있으며, 항 주변부의 수심은 3~5 m 정도이고, 저질입경 d_{50}=0.45 mm 정도의 비교적 가는 모래로 이루어져 있으며, 본 항의 조위는 대조차가 18 cm이고 소조차는 9 cm정도이다. 조류 및 해류는 계절에 따라 다소 차이는 있으나 약 0.1~0.3 m/s정도로 판단되며, 주파향은 NE방향으로 유의파의 연간 평균파고는 2.61 m, 주기는 8.1 sec이다. 항을 유지해주는 북방파제의 위치는 파랑의 영향은 다소 막을 수 있도록 설치되어 있으며, 해안을 따라 발달하는 해빈류의 영향을 제어하기에는 어려운 상황이다. 항의 남측에는 유입하천이 있으나 규모가 작고 토사의 유입이 거의 없으므로 항 주변과 항내매몰에는 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

2.2 지형변화

K항은 1974년에 개발된 이후, 꾸준한 확장공사를 실시하여 왔으며 현재에는 어항으로서의 중요한 역할을 하고 있다.

그러나, 최근 심각한 항내매몰로 인하여 1993년 6월부터 93년 11월까지 준설을 실시한 바 있고, 준설량은 대략 56,000 m^3이고 준설면적은 10,625 m^2으로 조사된 바 있으며, 준설이후 현재까지도 극심한 매몰현상이 지속적으로 발생하고 있다.

3. 항내퇴사에 관한 수치모형실험 및 현지관측

3.1 계산조건

본 연구의 대상해역인 K항에 대하여 항내퇴사 수치모형실험을 실시하였다. 수치계산을 수행하기 위한 입사파 제원으로서, 파향은 대상해역의 주파향인 NE방향으로 취하였고, 파고 및 주기는 파랑관측 통계치에 따른 유의파의 년간 평균치인 $H_{1/3}$=2.61 m, $T_{1/3}$=8.1 sec을 사용하였다. 대상해역에 대한 계산격자는 격자간격을 Δx=Δy=10 m로 하여 85×65개의 격자수로 구성하였다. 계산에 사용한 반사율은 해안선에 대해서는 파를 거의 흡수하므로 0.1로 하였으며, 구조물에 대해서는 0.5로 하였다. 또한, 평균조위는 0.23 m로 하였으며, 차분계산의 시간간격은 안정조건을 고려하여 Δt= 0.1 sec로 하였다.

해빈류 계산시 레이놀즈 응력항과 저면마찰항의 무차원정수 N과 저면마찰계수 C_f의 값은 각각 0.016, 0.02로 하였고, 경계조건은 파랑, 해빈류 모형을 동일하게 하였으며, 계산영역에 대해 측방경계는 투과경계, 해안은 개경계, 심해는 입사경계로 하였다.

3.2 수치모형실험의 계산법

본 연구에서 사용된 수치모형은 파랑계산영역과 흐름장계산영역 그리고 지형변동계산영역으로 크게 구분되며, 계산과정의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

파랑변형모형의 계산은 수심변화에 의한 천수변형, 굴절, 회절, 반사 및 쇄파 등에 의한 에너지 감쇠에 의한 파랑 변형을 모두 고려할 수 있는 丸山 등(1982)의 시간의존 완경사방정식을 기본식으로 사용하였다. 파랑의 운동은 수면변위 η와 선유량 $\vec{Q}$의 시간에 따른 변화를 계산하는 식으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n}\nabla \cdot (n\vec{Q}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + c^2 \nabla \eta + f_D \vec{Q} = 0 \tag{2}$$

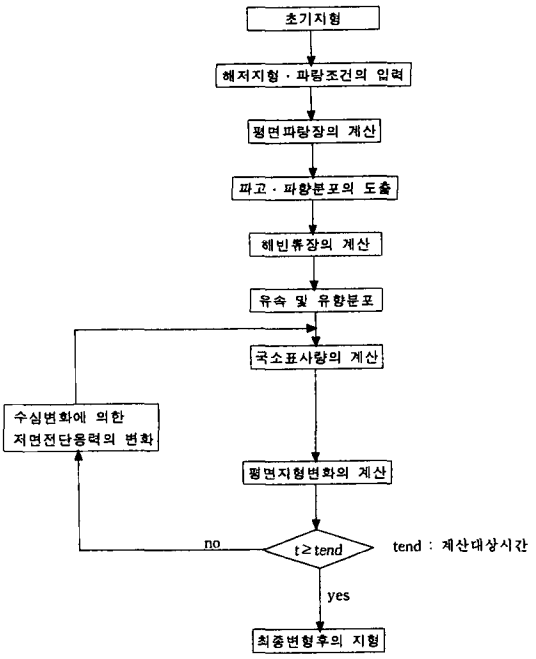

Fig. 2. Flowchart of numerical modeling.

여기서, C: 파속

n: 군속도와 파속의비(Cg/C)

f_D: 쇄파감쇠항

또한 쇄파감쇠항 f_D는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_D = 2.5 \tan\beta \sqrt{\left(\frac{g}{h}\right)\left(\frac{\hat{Q}}{Q_r} - 1\right)} \tag{3}$$

$$\hat{Q} = \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2} \tag{4}$$

$$Q_r = 0.25\sqrt{gh^3} \tag{5}$$

$\hat{Q}_x$, $\hat{Q}_y$: x, y 방향 선유량의 진폭성분

tan β: 쇄파대 부근의 평균해저면 경사

Q_r: 재생파 영역의 한계 선유량진폭

파랑의 영향에 의해 발생되는 흐름인 해빈류장의 계산은 다음과 같은 연속방정식과 운동방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h+\bar{\eta})U + \frac{\partial}{\partial y}(h+\bar{\eta})V = 0 \tag{6}$$

여기서,

h: 수심

$\bar{\eta}$: 평균수위 상승량

U, V: x, y방향의 평균유속

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + g\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon\frac{\partial U}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\frac{\partial U}{\partial y}\right) + \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})}\overline{\tau_x^B} + \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + g\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon\frac{\partial V}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\frac{\partial V}{\partial y}\right) \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})}\overline{\tau_y^B} + \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) = 0 \tag{8}$$

지형변동 계산에 있어서 저질의 연속방정식은 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q'_x}{\partial x} - \frac{\partial q'_y}{\partial y} \tag{9}$$

여기서,

$$q'_x = q_x - \varepsilon_s \mid q_x \mid \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

$$q'_y = q_y - \varepsilon_s \mid q_y \mid \frac{\partial z_b}{\partial y}$$

$q_x = q_{wx} + q_{cx}$: x방향의 파와 흐름에 의한 표사량

$q_y = q_{wy} + q_{cy}$: y방향의 파와 흐름에 의한 표사량

q_{wx} , q_{cx} , q_{wy} , q_{cy}: 파와 흐름에 의한 표사량

ε_s: 무차원계수 (지형안정화계수)

지형변화의 계산은 국소표사량 평가식을 이용하였고, 식 (10), (11)의 q_c, q_w는 각각 흐름에 의한 표사량과 파향의 파동성분에 의한 표사량이다.

$$q_c = A_c\,(u_*^2 - u_{*c}^2)\cdot u/g \tag{10}$$

$$q_w = A_w \cdot F_d\,(u_* - u_{*c}^2)\cdot u_b/g \tag{11}$$

여기서,

u: 흐름의 평균유속

u_*: 파와 흐름의 공존장 저면마찰속도

$\overline{u_b}$: 파의 궤도유속의진폭

u_{*c}: 저질이동한계 마찰속도

A_c, A_w: 무차원계수

F_d: 표사 방향함수

g: 중력가속도

위의 식에서 이동한계 마찰속도(u_{*c})는 Shield's number $\psi_m = u_*^2/sgd$를 이용하여 한계 Shield's number ψ_c에 관한 식으로 부터 다음 식 (12)와 같이 구한다.

$$u_{*c} = \sqrt{sgd\,\psi_c} \tag{12}$$

여기서, $\psi_c \simeq 0.11$(가는모래), 0.06(굵은모래), s는 저질의 수중비중(=$(\rho_s-\rho)/\rho$), ρ_s, ρ는 모래와 물의 밀도, d는 저질입경이다.

가는모래 및 굵은모래에 해당하는 모래입경의 판정은 진동류 경계층 두께의 척도를 나타내 주는 매개변수, $\delta_L=\sqrt{\nu T/\pi}$($\nu$: 동점성계수)를 이용하여 $\delta/\delta_L < 1/6.5$이면 가는모래, $\delta/\delta_L > 1/4$이면 굵은모래로 판정한다.

이와 같이 쇄파대내에서는 심해파에 비해서 저질이 이동하기 쉽다는 점을 고려하여 해빈에서의 저질의 이동한계 마찰속도를 다음과 같이 평가한다.

$u_{*c} = 0$: 쇄파대내

$u_{*c} = \sqrt{sgd\,\psi_c}\cdot h\,(\kappa_c X_b/\chi_b)$: 쇄파대외

κ_c: 쇄파점을 경계로 한 u_{*c}을 연속시키는 무차원계수

X_b: 쇄파대폭

χ_b: 쇄파점으로 부터 심해 방향으로 취한 거리

식 (11)에서 사용되는 표사 방향함수(F_d)는 파에 의한 표사 방향(해안, 또는 심해 방향)을 나타내 주는 함수로서 다음 식 (13)으로 평가할 수 있다.

$$F_d = \tanh\left(x_d \frac{\Psi_c - \Psi}{\Psi}\right) \qquad (13)$$

$$\Psi = \frac{u_b^2}{sgd}\frac{h}{L_0}$$

여기서, F_d는 표사 방향함수로 표사의 방향이 해안방향일 경우 양으로, 심해 방향일 경우는 음으로 된다. 또한 κ_d는 무차원계수로 표사 방향의 변화점 부근에서의 표사량 변화의 정도를 나타낸다. 아울러 Ψ_c는 표사의 방향 변화점에서의 Ψ의 값이다.

결국, F_d는 표사 방향 판정지표 Ψ_c와 Ψ의 값에 의해 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$\Psi \leq \Psi_c$, $F_d = 1$ (해안측방향)

$\Psi > \Psi_c$, $F_d = -1$ (심해측방향)

지형변형계산의 각식 중에서는 검토를 요하는 계수가 설정되어 있고 수치실험에 의해 모형실험과 현지 지형변화를 재현하기 위해서는 어느 정도의 시행착오가 필요하다. 일반적으로 渡邊 등(1984)은 모형실험의 결과를 재현하기 위해 다음 값들을 기준치로 하고 있다.

$A_c = 0.5$: 흐름에 의한 표사량의 정도에 관한 계수

$A_w = 0.15$: 파에 의한 표사량의 정도에 관한 계수

$\varepsilon_s = 10.0$: 해저경사 효과의 정도에 관한 계수

$\kappa_c = 2.0$: 쇄파점으로 부터의 심해측 한계마찰속도의 분포를 나타낸 계수

$\kappa_d = 2.0$: 파에 의한 표사 방향의 변화점 근방의 표사량 분포를 나타낸 계수

$\Psi_c = 0.16$: 파에 의한 표사 방향의 변화점에서의 Ψ의 값

3.3 흐름에 관한 수치모형실험 및 현지관측

수치모형실험에 의한 계산결과의 검증을 위하여, 대상해역인 K항에 대해 현지관측을 실시하였다. 현지관

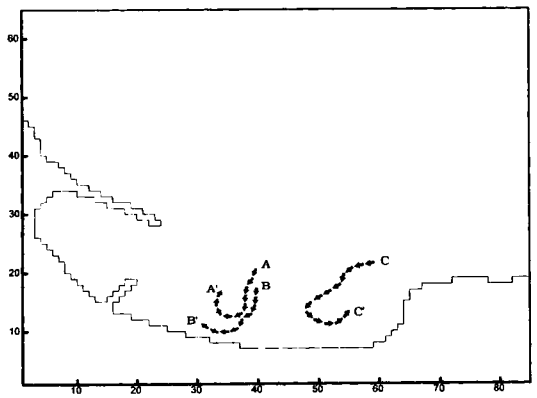

Fig. 3. Current patterns (field observation).

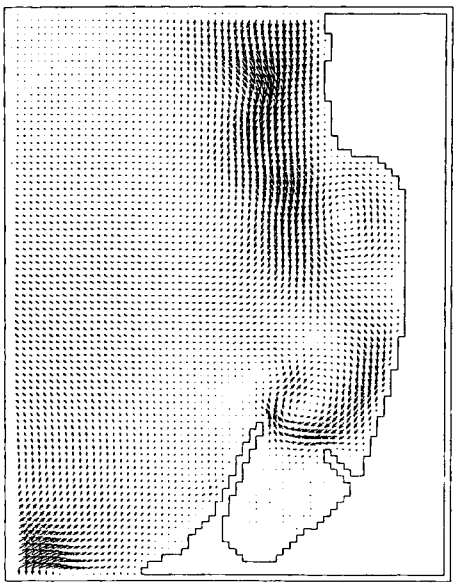

Fig. 4. Calculated currents.

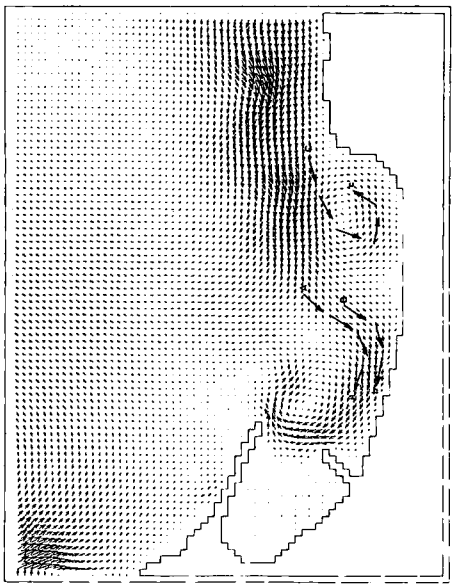

Fig. 5. Comparison between measured and calculated currents.

측은 1997년 5월 29일 10:00부터 17:00까지 실시하였고, 관측지점을 A, B, C의 3지점으로 나누어 관측을 실시하여 각 지점에서의 유황분포를 Fig. 3에서 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 A, B, C지점에 투입한 부자는 해안선을 타고 A', B', C'지점으로 이동하고 있음을 알 수 있고, 특히 C지점에서는 해안선을 타고 이동하다가 원래의 위치로 회전하고 있음이 확인되었다. A, B지점에서는 항구측으로 향하는 연안류의 흐름으로 인하여 남측에서 북쪽 항구측으로 향하게 되어 각각 A', B'지점으로 이동하고 있음이 확인되었다.

흐름에 대한 수치계산에서는 먼저 비정상완경사방정식에 기초한 파랑계산 결과로 부터 쇄파후의 잉여응력을 구할 수 있고, 계산된 잉여응력으로 부터 해빈류 계산이 수행되며 그 결과는 Fig. 4에 나타낸 해빈류 벡터로 확인할 수 있다. Fig. 4로부터 남측에서 유발되는 해빈류는 연안류의 특성에 의해 해안선을 따라 북측으로 이동한 후, 세갈래로 나뉘어 그 일부는

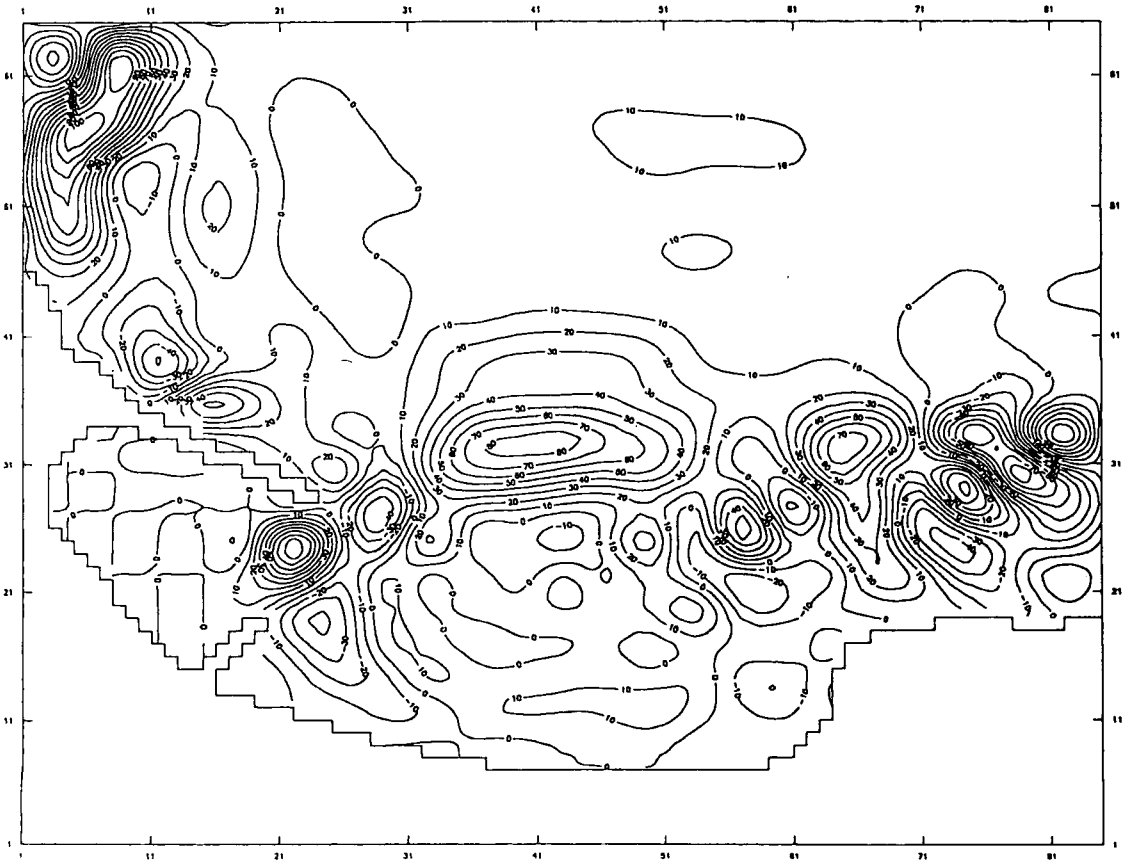

Fig. 6. Contour map of deposition and erosion (after 10 days).

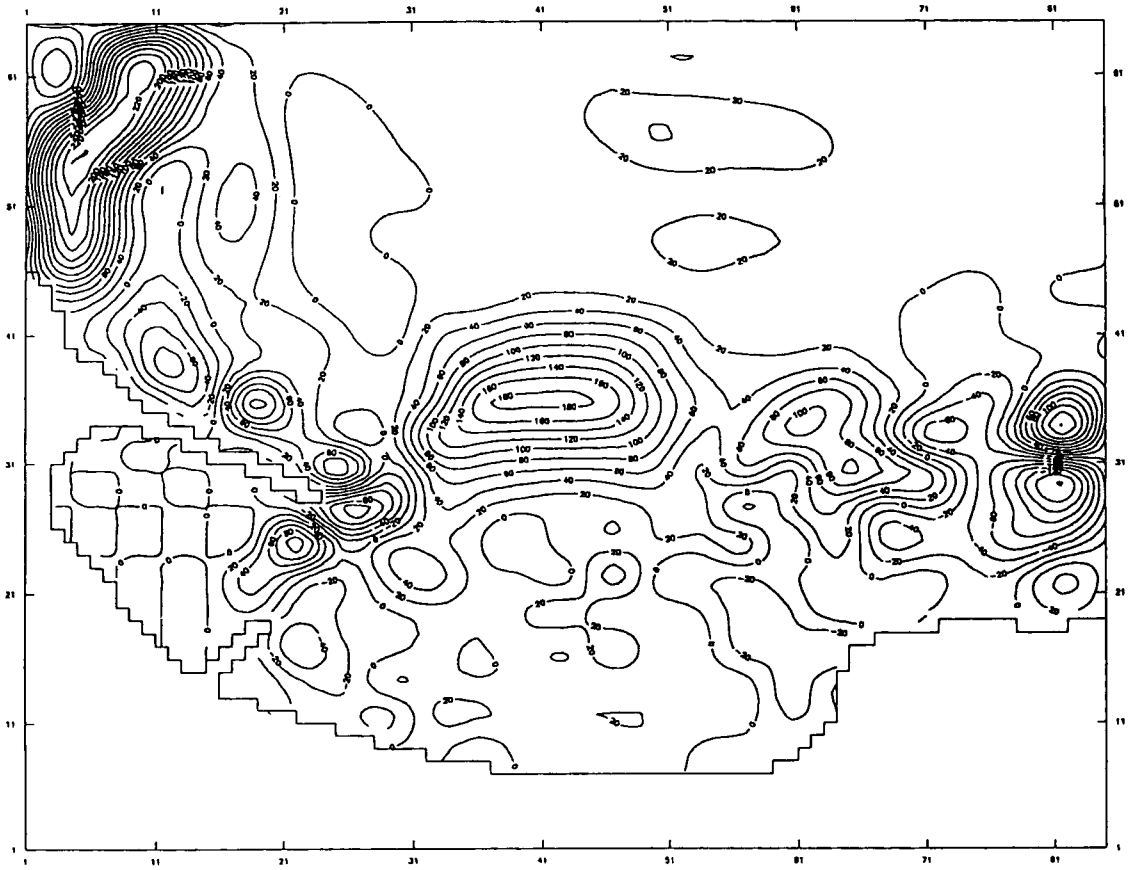

Fig. 7. Contour map of deposition and erosion (after 25 days).

이안류로 전환되어 심해지역으로 이동하고, 별도의 일부분은 해안으로 향하는 질량수송류로 전환되었다가 남측 방향의 연안류로 바뀌고 다시 이안류로 전환되는 흐름을 나타내고 있으며, 이것은 일종의 순환류 역할을 하고 있다. Fig. 5는 해빈류의 관측치와 계산치를 나타내며, 그림에서 굵은 화살표는 관측결과를 나타낸 것이고, 가는 화살표는 계산결과를 나타낸다. 관측결과는 계산결과와 마찬가지로 동일지점에서 순환류 현상이 발생하고 있어 계산결과의 타당성을 입증해 주고 있다. 주 흐름은 해안선을 따라 항 입구측으로 이동하는 연안류 특성을 나타내고 있으며, 이 흐름은 항 입구측에서 매우 큰 회전운동을 하게 되며 이때 흐름의 에너지는 크게 감소되어 연안류는 표사이동의 역할 능력을 상실하게 되고, 이와같은 현상으로 인해 남측에서부터 연안류가 몰고 온 토사를 항 입구부에서 떨어뜨려 놓아 항 입구 남측에 대량의 토사매몰이 발생하는 것으로 판단된다.

3.4 항내매몰에 관한 수치모형실험

항내매몰에 대한 수치모형실험 결과로서, 퇴적 및 세굴에 대한 등고선도를 Fig. 6과 7에서 나타내었으며, 이것은 계산시작후 각각 10일과 25일의 단기간의 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 10, 25일 모두 항 입구부에서 심각한 매몰현상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 여기에서도 단기간 동안의 시뮬레이션이므로 항내쪽의 매몰현상이 두드러지게 나타내고 있지는 않지만, 시간의 경과에 따라 항 입구부에서 항내측으로 서서히 이동하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 계산결과로 부터 해빈류 계산결과에서 유추하였던 표사이동에 의한 매몰상황이 3차원 해빈변형 수치시뮬레이션에 의해 잘 재현되었음을 알 수 있다.

본 계산은 차후, 장주기파 특성을 고려한 장기간의 지형변동 수치모형실험을 실시한다면 항내 안쪽까지의 매몰현상에 대한 재현문제는 비교적 쉽게 해결되리라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 동해안에 위치한 중소어항을 대상으로 항내매몰에 관한, 현지관측 및 수치시뮬레이션을 실시하였고, 실시결과 현지상황과 잘 일치되는 흐름상황 및 매몰현상이 발생하였음을 알 수 있었다. 현지관측 및 수치모형실험 결과를 비교한 결과 항내매몰은 항 남측으로부터 유입되는 해빈류의 영향으로 항 입구에 쌓인 토사가 장기적으로 항내로 계속 침입하여 발생된 현상으로 판단된다.

이와같은 해빈변형 현상을 제대로 평가하기 위해서는 외력의 특성과 저질조건에 부합하는 예측모형을 선정하고 경계조건이 성립될 수 있는 계산범위를 설정하는 것이 무엇보다 중요하며, 파랑, 해빈류등 각각의 모형에서의 각 단계마다 상세한 현지검증과 적용성 검토를 실시할 필요가 있다. 아울러 정확한 현지관측자료(파랑, 해빈류, 수심등)의 축적 또한 계속적으로 노력해야 될 중요한 사항일 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 명지대학교 교내연구비의 지원을 받은 것임을 밝히며 이에 사의를 표한다.

참고문헌

Maruyama, K. and Takagi, T., 1988. A simulation system of nearshore sediment transport for the coupling of the sea-bottom topography, waves and currents, *IAHR Symp. on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone*, pp. 300-309.

Noda, H., 1966. Model study on the filling-up of a fishing habor by drifting sand, *Proc. 10th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, Vol. 1, pp. 564-594.

Ozaki, A., 1964. On the effect of an offshore breakwater on the maintenance of a habor constructed on a sandy beach, *Proc. 9th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 323-345.

丸山康樹, 成廣明雄, 近藤浩右, 1982. 發電所港灣における港內堆砂の豫測モデル, 第29回海岸工學講演會論文集, pp. 294-298.

渡邊 晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊山 勉, 1984. 構造物設置に伴う 三次元海浜變形の數値豫測モデル, 第31回海岸工學講演會論文集, pp. 292-296.