

투수성 호안제체를 통한 해수교환을 고려한 해수유동 모의 Coastal Water Circulation Modeling with Water Exchange through Permeable Dike

정태성*
Tae Sung Jung*

요지 : 서해안과 같이 큰 조차를 가진 연안해역에서 항만건설과 매립사업이 널리 진행되고 있으며, 대부분의 사업은 방조제 건설을 필요로 한다. 대부분의 방조제는 내부와 외부사이에 해수가 교환되지 않으나, 사석만을 사용해서 축조된 방파제와 가호안의 투수성 제방에서는 해수가 교환된다. 내부의 수면은 외부 조위의 변화에 따라 시간에 따라 변화하나 그 조차는 해수교환시 제방에서의 큰 마찰로 인하여 외부보다는 작다. 지금까지의 연구에서는 제방을 통한 해수교환을 무시하는 것이 조석모델링에서 일반적이다. 이는 내부의 해수면 변화를 계산할 수 없을 뿐 아니라 물막이 공사과 같이 일부 개방구간이 존재하는 경우에 개방구간만을 통한 해수교환량만을 고려하고, 제체를 통한 해수교환량을 무시하여 내부의 조위와 실제 해수교환량을 부정확하게 계산한다. 본 연구에서는 지하수이론을 이용하여 해수유동모의시 투수성 제체를 통한 해수교환량을 정확히 고려할 수 있도록 하였다.

핵심용어 : 방조제, 투수성호안, 평택항, 조석모형, 해수교환

Abstract : In coastal zones with high tidal ranges like Korean western coast, port construction and reclamation projects have been increased. Most of the projects include sea-dyke construction. In the sea-dykes constructed to protect sea water intrusion, sea water was exchanged through the permeable dykes. The water level inside the area enclosed by the dykes changes with time due to tidal action of outer sea, but the tidal range is smaller than that of outside because of strong friction. In numerical modeling of coastal circulation the water exchange through the dykes has been neglected, which has produced inaccurate estimation neglecting the water exchange. In this study a method, which can consider water exchange through sea-dyke, was suggested and the modeling accuracy was improved. A groundwater theory was utilized to explain the phenomena.

Keywords: sea-dyke, permeable dyke, Pyungtaek harbor, tide model, water exchange

1. 서 론

우리나라 연안해역에서는 항만 개발과 간척 등의 사업이 널리 진행되고 있으며, 이와 관련하여 호안이 곳곳에서 건설되고 있다. 이러한 호안의 일부는 제체를 통해 해수가 교환되는 투수성 호안이며, 폐쇄된 경우에도 투수성으로 인하여 제체 내부와 외부의 해수가 교환함으로써 호안 내부영역에서도 조석현상이 발생된다. 그러나 지금까지의 연구는 이러한 현상을 고려하지 않고 조위 및 조류 변화를 계산하여 왔다. 따라서 대부분의 모델링 결과는 제체를

불투수성으로 가정함으로써 인하여 내부영역의 해수 저장능력을 무시하고 육지로 간주하거나 일부 개방된 경우에 제체를 통한 해수교환을 무시하여 개방된 단면을 통한 해수 유출입량을 과다하게 산정하고 있는 실정이다.

투수성 제체를 통과하는 흐름에 대한 연구로 주로 non-Darcy 흐름으로 가정하여 이론식을 유도하고 적용성을 수리실험 자료와 검증하는 방법으로 연구되어 왔으나 현장 관측자료와 비교한 연구는 거의 없다. 최근에 대림산업주식회사(2003)에서는 수두경사와 평균유속의 관계를 비선형으로 가정하여 수리특성을 해석하는 방법(Stephenson, 1979;

*한남대학교 토목환경공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea, jungts@hannam.ac.kr)

Li *et al.*, 1988)들을 적용하여 평택 내항의 투수성 가호안을 통해 흐르는 평균유속과 제체 내외부의 수두경사의 관계를 검토하고, Li *et al.*의 식은 공급률을 0.28로 가정하였을 때 해수교환량을 비교적 잘 재현하나, Stephenson의 식은 크게 추정함을 밝힌 바 있다. 그러나 이러한 연구는 여러 크기의 사석이 혼합되어 있어 정확한 추정이 어려운 제체 사석의 평균입경으로 0.255 m로 임의로 가정하였으며, 적용한 식들의 상수결정과 제안된 식의 효용성을 검증하기 위해 단지 약 4시간의 제한된 조위자료와 비교하여 만조와 간조, 대조기와 소조기의 조차가 다른 특성에 대해 종합적으로 고려하지 못하였다. 조위가 2.5 m에서 4.0 m 까지 1.5 m가 변하는 구간에 대해서만 검토하여 실제 가호안으로 둘러싸인 내항의 조위가 5 m 이상 변화하는 조위변화 전반에 대해 검토하지 않았다. 현장 적용을 위해서는 대조기와 같이 조차가 크게 변하는 전 기간에 적용성이 있음을 확인할 필요가 있다. 또한 호안 제체의 폭은 하부에서는 넓고 상부에서는 좁은 모습을 보여, 이를 대표적인 호안 폭을 가지고 모델링하는 데는 한계가 있다. 따라서 이를 정확히 고려하기 위해서는 단면 폭, 내·외부 조위 등을 모두 고려할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 투수성 호안제체를 통한 해수교환량을 산정하는 방법을 수립하기 위하여 평택 내항에서 2003년 7월 22일부터 8월 22일까지 관측한 1개월간의 조위자료(평택지방해양수산청, 2003)를 수집하여, 내부와 외부의 조위와 해수교환량 사이의 관계를 회귀분석법을 사용하여 분석하였다. 분석한 결과로부터 비피압 대수층에 대한 지하수 이론의 적용이 가능함을 확인하고, 해수교환량 계산식을 수립하였으며, 이를 반영하여 호안 내부영역의 조위변화를 계산할 수 있는 2차원 해수유동모델을 수립하였다. 수립한 모형의 현장적용성을 입증하기 위하여 대조기와 소조기를 포함하는 15일간에 대해 모의하고, 현장 조위관측결과와 검증하여 제안된 방법의 효용성을 입증하였다.

2. 투수성 호안제체를 통한 해수교환량 산정식

투수성을 가진 가호안을 포함하고 있는 연안해역에서 호안 제체를 통한 해수교환에 의해 가호안으로 둘러싸여 폐쇄된 해역의 내부에서도 조위변화가 발생한다. Fig. 1과 같이 항만이 개발되고 있는 평택당진항의 내항은 투수성 가호안으로 막혀있다. Fig. 2에 표시된 평택당진항의 내항 남서측에 위치한 내부정점 T-5와 내항 외부정점인 T-4에서 2003년 7월 22일부터 8월 21일까지 대립산업이 수입식 조

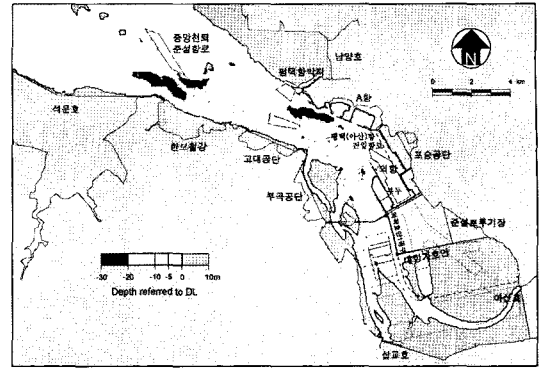


Fig. 1. Development plan for Pyungtaek-Dangjin harbor(인천항만건설사무소, 2002).

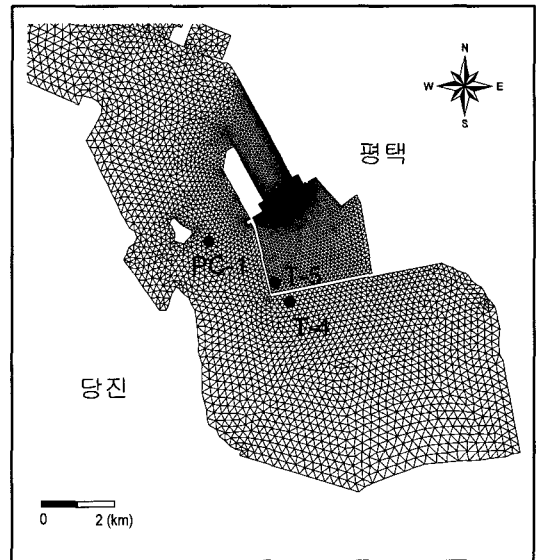


Fig. 2. Location map for tide and currents observation.

위를 사용하여 1개월간 관측한 조위자료(평택지방해양수산청, 2003)를 도시(Fig. 3)하여 살펴보면, 가호안으로 둘러싸여 폐쇄된 내부(T-5)에서도 가호안을 통한 해수교환으로 인하여 외부보다는 작지만 조위변화가 발생한다. 대조차가 T-4에서는 807.2 cm, T-5에서는 544.6 cm이며, 평균조차는 T-4에서는 589 cm, T-5에서는 407.2 cm, 소조차는 T-4에서 370.8 cm, T-5에서 269.8 cm로 내항 내부에서 조위변화는 외부에서 조위변화의 약 70%이다. 그러나 지금까지 수치모형을 사용하여 해수순환을 모의하는 경우에 일반적으로 투수성 가호안을 통한 해수교환을 무시하고, 가호안으로 둘러싸인 내부영역을 육지로 가정하여 계산하여 왔으며, 이는 가호안 내부의 해수 저장능력을 무시하는 결과를

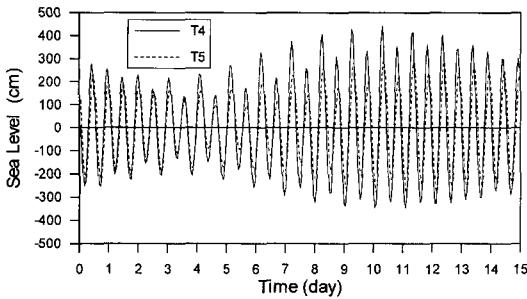


Fig. 3. Inside and outside sea level changes of Pyungtaek inner port.

가져온다. 또한 가호안 끝막이 공사 또는 호안 일부구간 철거와 같이 가호안의 일부구간만이 개방된 경우에 대부분 평가에서 호안제체를 통한 해수교환은 무시하고, 개방된 구간을 통해서만 해수교환이 발생하는 것으로 간주하여 왔다. 이렇게 투수성 호안제체를 통한 해수 유출입을 무시하고 해수유동을 모의하면, 호안내부에서 조위변화를 정확히 산정할 수 없을 뿐만 아니라 호안 개구부를 통한 해수교환량 계산과정에서 투수성 호안을 통한 해수교환량을 무시함으로써 인하여 개구부에서 통수량과 유속이 실제보다 크게 산정되는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 투수성 제체를 통한 해수교환을 고려하여 정확한 해수유동 계산이 가능한 수치모형을 수립하였다. 비피압 대수층에서 지하수 흐름에 대한 이론을 도입하여 제체를 통한 유출입량을 계산하는 방법을 제안하고, 제안한 방법을 사용하여 가호안 내부에서 조위 및 해수유동을 모의하였으며, 내부의 조위변화 계산결과를 현장관측조위와 검증하여 본 방법의 타당성을 검증하였다.

2.1 비피압 대수층의 지하수 흐름

비피압 대수층에서 지하수 흐름은 Fig. 4와 같이 Dupuit의 포물선형으로 수위변화가 발생하며, 수위가 높은 측에서 낮은 측으로 유출이 발생한다. 제체의 좌측으로부터 거리 x 떨어진 지점에서 제체 단위길이당 유량 q 는 다음과 같으며, 이를 Dupuit 포물선(Wang and Anderson, 1982)이라고 한다.

$$q = \frac{k}{2x}(h_0^2 - h_1^2) \tag{1}$$

여기서, k 는 투수계수이다.

제체로 둘러싸인 내부항만의 수표면적을 A , 수위의 시간 변화량을 $\frac{\Delta h_0}{\Delta t}$ 라고 하면, 제체와 내부영역간의 유출입량은

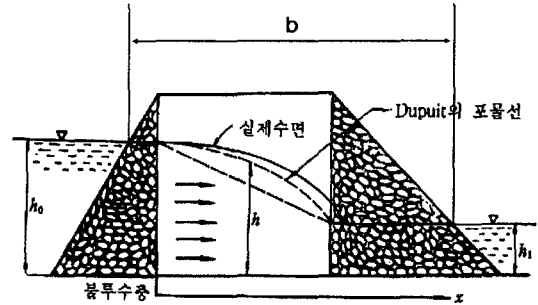


Fig. 4. Groundwater flow through permeable sea-dyke.

$A \frac{\Delta h_0}{\Delta t}$ 이며, 이를 제체의 총길이 L 로 나누면 제체 단위길이당 유량 q 가 된다. 이 관계를 사용하여 식 (1)을 재정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta h_0}{\Delta t} = K(h_0^2 - h_1^2) \tag{2}$$

여기서, $K = \frac{Lk}{2Ab}$, b = 제체의 폭이다.

식 (2)에서 제체의 폭은 수위에 따라 변화하며, 호안에 사용된 사석크기가 일정하지 않으므로 내부와 외부의 수위에 따라서 투수계수가 변화하므로 투수계수를 일정한 값으로 정의할 수 없다. 따라서 이러한 변화요소들을 모두 포함하는 K 값을 조위 관측자료로부터 구했으며, 식 (2)로부터 수위의 시간변화율을 구하고, $A \frac{\Delta h_0}{\Delta t} = qL$ 이라는 관계로부터 제체 단위길이당 유량 q 를 산정하였다.

2.2 투수성 가호안을 통한 해수교환량 계산식의 수립

식 (2)의 적용가능성을 검토하기 위하여 평택항의 내항안과 밖에서 관측한 조위변화 관측치(Fig. 3)에 대해 제체로 둘러싸인 내부항만의 조위변화율과 호안 내부와 외부에서 관측한 수심을 제공한 값의 차이를 함께 도시하면, Fig. 5와 같이 높은 상관성을 보여 투수계수를 내외부 수위차에 따라 변하는 것으로 가정할 경우에 비피압 대수층 지하수 이론이 적용 가능함을 확인할 수 있었으며, 회귀분석하여 얻은 수위변화율과 수심제곱의 차이 간의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta h_0}{\Delta t} = \frac{(h_0^2 - h_1^2)^{0.56}}{4.4} \tag{3}$$

조위변화율에 내항의 수표면적을 곱하면 제체를 통해 교환되는 해수의 총유출입량이 되며, 이를 제체의 길이로 나누면, 투수성 제체를 통한 단위폭당 유출입량을 구할 수 있

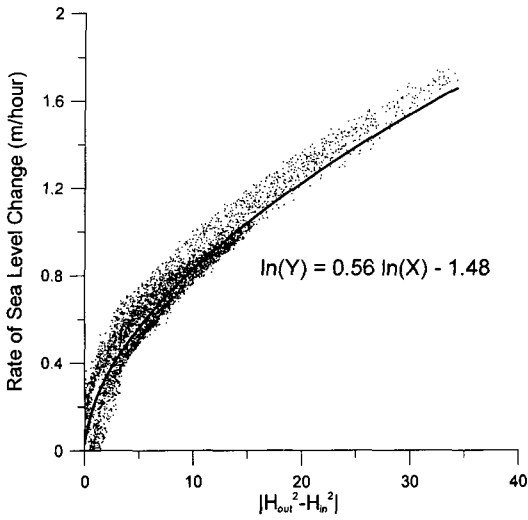


Fig. 5. Rate of sea level change vs difference of sea level between inner port and outer port.

다. 이와 같이 단위폭당 유출입량을 계산하여, 제체에 위치한 격자에서 유량을 부여하는 방법으로 내외부 해수교환을 고려하는 2차원 해수유동모형을 수립하고, 그 적용성을 검토하였다.

3. 제체를 통한 해수교환을 고려한 해수유동 모의

투수성 가호안을 포함하고 있는 평택당진항 인근해역에 대해 식 (3)을 활용하여 호안제체를 통한 해수교환량 Q 를 계산하고, 2차원 해수유동모형을 모의하였다. 제체를 통한 해수교환을 포함하는 해수유동모형의 기본방정식인 수심적분된 2차원 천수방정식은 다음과 같다(Ziegler and Lick, 1986).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} = Q \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(U^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial y} + fV \\ = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial(U/H)}{\partial x} \right] \\ + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial(U/H)}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{wx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2/H)}{\partial y} - fU$$

$$\begin{aligned} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial(V/H)}{\partial x} \right] \\ + A_h \frac{\partial}{\partial y} \left[H \frac{\partial(V/H)}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{wy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, ζ 는 평균수심 h 로부터 수위변화, 단위폭당유량 $U = \int_{-h}^{\zeta} u \, dz$, $V = \int_{-h}^{\zeta} v \, dz$, u 와 v 는 각각 x 와 y 방향의 유속, z 는 수심방향 거리, H 는 총수심($=h+\zeta$), Q 는 제체를 통한 해수교환량, f 는 Coriolis 상수, A_h 는 수평 와점성계수, g 는 중력가속도, τ_{wx} 와 τ_{wy} 는 각각 x , y 방향 바람마찰응력이고, ρ = 해수의 밀도, $\tau_{bx} = C_f U \sqrt{U^2 + V^2}$, $\tau_{by} = \frac{C_f V \sqrt{U^2 + V^2}}{H^2}$, 바닥마찰계수 $C_f = \frac{\rho g n^2}{H^{1/3}}$, n = Manning의 조도계수이다.

수치적분법으로는 Galerkin의 유한요소법(Chung, 1978)을 사용하며, 노출과 침수에 따라 계산격자망을 배제 또는 포함하는 방법(Kawahara and Umetsu, 1986)으로 조간대를 고려하였다. 이 모형은 조간대를 포함하는 해역에서 그 적용성이 입증된 바 있다(정태성·김칭식, 1992).

모의를 위해 아산만 해역에 대해 구성한 유한요소망은 Fig. 6과 같다. 평택당진항 부분을 확대한 그림은 Fig. 2와 같다. 가호안 제체로 둘러싸인 내항 내부에서도 해수의 교환에 의한 해수유동 및 조위변화를 계산할 수 있도록 격자망을 구성하였다. 검증한 날짜의 조석이 가능한 정확히 재현되도록 진폭과 위상에 대해 보정하여 2003년 8월 14일부터 15일간의 개경계 조위를 예측하여 모형의 경계조

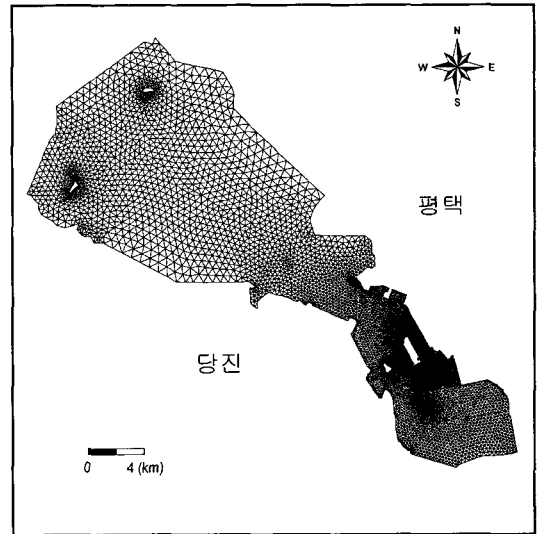


Fig. 6. Finite element grid system for Asan bay modeling.

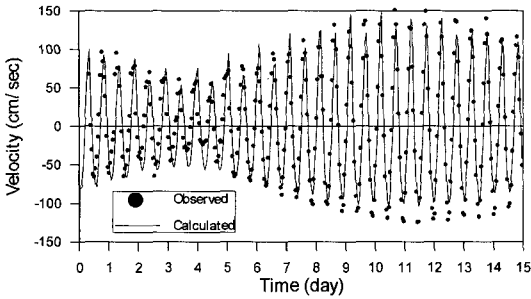


Fig. 7. Comparison of calculated and observed currents at PC-1.

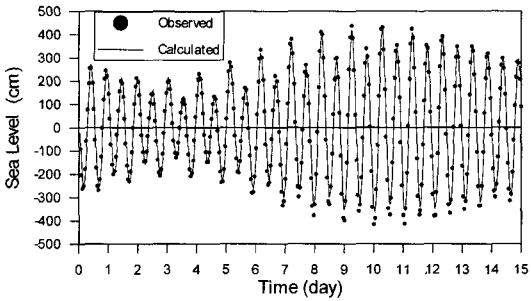


Fig. 8. Comparison of calculated and observed tide at Pyungtaek harbor.

건으로 활용하였으며, 예측시 주요 4개 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)의 합성조석을 고려하였다. 모형의 정확성을 검증하기 위하여 Fig. 2의 PC-1에서 2003년 8월 14일부터 15일간 관측한 조류자료 및 평택항에서 관측한 조위자료(평택지방 해양수산청, 2003)와 비교하였다. Fig. 7은 PC-1 정점에서 조류크기의 변화를 비교한 그림으로 모의결과가 관측유속과 일치하는 양호한 결과를 보였으며, Fig. 8은 평택항의 조위 관측자료와 비교한 결과로 모의결과와 관측치가 잘 일치하였다.

해수유동 모의시 호안제체를 통한 해수교환은 다음과 같이 고려하였다. 가호안을 통한 해수교환량을 고려하기 위하여 식 (3)에 수표면적을 곱하여 전체유량을 계산한 후에 이를 가호안 내부와 외부 인접격자점에서 주변격자와의 거리비, 격자크기 등을 고려하여 전체유량을 가호안에 위치한 격자점에서 유량으로 분할하였으며, 가호안에 위치한 각 유한요소에서 분할된 유량을 부여하였다. 내항 수위가 외부 수위보다 높은 경우는 내부에 위치한 가호안 격자점에서는 음의 유량을, 외부측 가호안 격자점에서는 양의 유량을 부여하였으며, 내외부 수위가 반대로 되는 경우는 유량의 부호를 반대로 부여하였다. 조시에 따라 변화하는 가호안 외부와 내부의 수위차에 따른 유출입량 변화를 모두 포

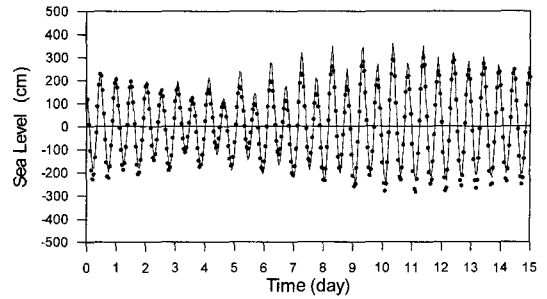


Fig. 9. Comparison of simulated(-) and observed(●) tide at Inner Port.

함할 수 있도록 조차가 큰 대조기와 작은 소조기를 포함하는 15일간에 대해 모의하였으며, 내항 내부점인 T-5에서 관측조위와 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. 폐쇄된 내항 내부영역에서도 가호안 제체를 통해 유출입되는 해수로 인해 발생하는 Fig. 2의 T-5정점에서 대조기와 소조기를 포함하는 15일간의 조위변화가 거의 정확하게 재현되었다. 호안을 통한 해수교환을 무시하는 기존 방법들로 계산하면, 내항 내부에서는 조위변화가 발생하지 않는다.

이상과 같은 과정을 거쳐 모의된 내항을 포함하는 해역에 대한 평균대조기 창조류 분포는 Fig. 10, 낙조류 분포는 Fig. 11과 같다. 평택항 서측에 위치한 수로를 통해 강한 흐름이 발생하며, 그림의 중앙에 위치한 폐쇄된 항인 내항에서는 흐름이 거의 발생하지 않고 가호안을 통한 외해

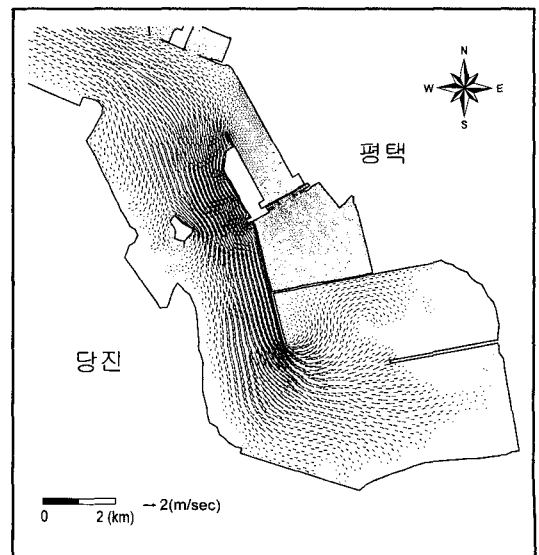


Fig. 10. Simulated flood currents in spring tide.

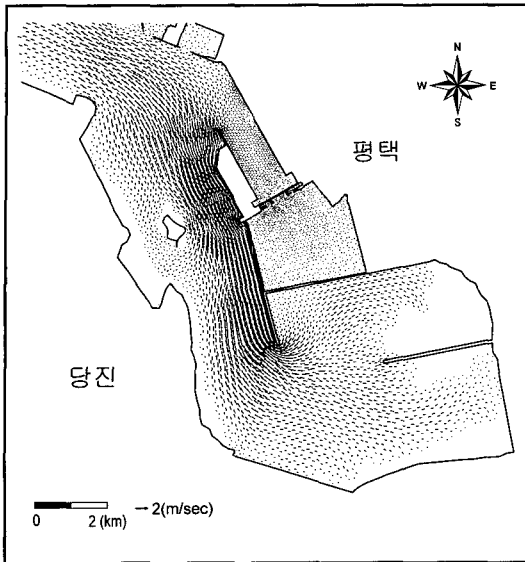


Fig. 11. Simulated ebb currents in spring tide.

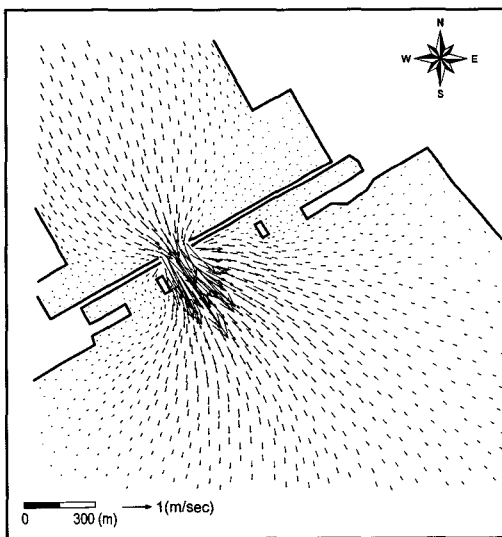
수의 유출입만이 발생한다. Fig. 8에서와 같이 외부 조위 변화의 약 70%에 달하는 조위변화가 내항 내부에서 발생하는 현상이 본 연구에서 제안한 방법을 사용하여 비교적 정확히 모의되었다. 본 연구에서 검토한 내항의 가호안은 대부분은 사석으로 구성되어 있으나, 일부구간에 배수관문이 위치하여 평균해수면 이상인 경우에는 해수를 소통하고

있으며, 남측호안의 일부는 블록으로 구성되어 있다. 그러나 이러한 구간별 호안특성을 상세하지 분류하지 않고 해석하여, 내외부 수위차가 큰 경우에 Fig. 4의 회귀곡선식이 관측치와 차이가 나고, Fig. 9에서와 같이 고조위 부분에 대한 예측결과가 다른 기간에 비해 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 보다 정확한 예측을 위해서는 형상이 다른 일부 호안의 다른 투수성이 내수면의 수위변화에 미치는 영향을 보다 정확히 분석할 필요가 있다.

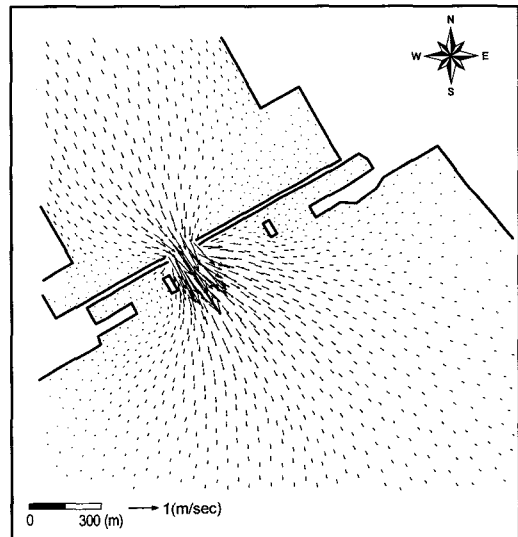
제체의 투수성이 개방구간의 유속에 미치는 영향을 분석하기 위하여 복측호안을 150 m 개방하였을 경우에 대해 수치실험을 실시한 결과인 유속분포도(Fig. 12)를 보면 투수성 제체를 통한 해수교환을 무시한 경우에는 최대 유속이 4.4 m/sec, 투수성 제체를 통한 해수교환을 고려한 경우에는 최대 유속이 3.35 m/sec로 최대 유속이 24% 감소하는 것으로 나타나 투수성 제체를 통한 해수교환을 무시하고 계산하는 경우에는 개방구간의 유속을 과대 추정하며, 이로 인해 해수소통량 및 내부 조위계산에도 오차를 발생시킨다. 따라서 투수성 제체를 통한 해수교환은 정확한 유속계산 및 내부 조위계산을 위해서 반드시 고려하여야 한다.

4. 결 론

투수성을 가진 가호안을 통한 해수교환을 고려한 해수 유동모델링의 가능성을 검토하였다. 비피압 대수층에 대한



(a) w/o sea-dyke water exchange



(b) with sea-dyke water exchange

Fig. 12. Distribution of calculated maximum velocity.

지하수 이론의 적용성을 검토하기 위하여 제체 내외부의 수위제곱의 차와 유량의 관계식을 평택항에서 관측한 조위자료를 가지고 검토한 결과에 의하면 서로 높은 상관성을 보여, 비피압 대수층 지하수 이론이 투수성 호안제체를 통한 해수교환을 계산하는 데 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 제체를 통한 해수교환량 산정식을 활용하여 제체를 통한 해수교환 모의가 가능한 2차원 해수유동모형을 수립하였으며, 수립된 모형을 활용하여 15일간의 내부 조위변화를 정확하게 모의하여 본 연구에서 제안한 해수교환 산정식이 타당함을 확인할 수 있었다. 또한 150 m 구간을 임의로 개방하고 모의한 결과, 투수성으로 인하여 개방구간에서 최대유속이 투수성을 무시하고 계산하는 기본방법에 의한 결과보다 24% 감소하여, 개방구간의 유속산정시 호안제체의 투수성을 무시하는 기본 방법이 유속을 과대 추정함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 방법은 가호안, 사석방파제 등의 투수성 호안을 포함하고 있는 해역에서 가호안으로 둘러싸인 내부영역의 조위변화를 계산하고 주변 해수유동을 모의하는 데 널리 활용될 수 있을 것이다. 정확한 내부 조위변화 모의결과는 제체의 안정성 분석을 위한 내외부의 수위차 계산 및 호안 일부구간 철거 공사시 또는 최종 물막이 공사시 개방구간의 정확한 유속 계산에 필요한 중요한 자료이다. 앞으로 다양한 형상의 재료와 크기를 사용하는 투수성 제체의 해수교환량 산정식을 수립하기 위한 연구가 필요하며, 투수성 호안제체를 통한 해수교환이 주변 해수유동 및 일부 개방구간에서 유속크기에 미치는 영향에 대해서도 자세히 연구할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구에 사용된 조위 및 조류 관측자료를 제공해 주신 대림산업주식회사에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 대림산업주식회사 (2003). 평택(아산)항 외곽호안 축조공사 구조 및 수리계산서 제5권 끝막이(최종체절) 관련연구. 인천항건설사무소 (2002). 평택(아산)항 수리현상조사 보고서. 정태성, 김창식 (1992). “이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형,” 한국해양·해양공학회지, 4(3), 146-155. 평택지방해양수산청 (2003). 평택(아산)항 외곽호안 축조공사 구조 및 수리계산서 제2권 해양조사. Chung, T.J. (1978). *Finite element analysis in fluid dynamics*. McGraw-Hill, Inc.
- Kawahara, M. and Umetsu, T. (1986). “Finite element method for moving boundary problems in river flow”, *Int. J. for Numer. Meth. in Fluids*, 6, 89-112.
- Li, B., Garga, V.K. and Davies, M.H. (1998). “Relationship for non-Darcy flow in rockfill”, *J. Hyd. Eng., ASCE*, 124(2), 206-212.
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier Science Publishers BV(North-Holland), The Netherlands, 19-24.
- Wang, H.F. and Anderson, M.P. (1982). *Introduction to Groundwater Modeling*. W.H. Freeman and Company.
- Ziegler, C.K. and Lick, W. (1986). A Numerical Model of the Resuspension, Deposition, and Transport of Fine-Grained Sediments in Shallow Water. UCSB-ME-86-3, College of Engineering, University of California at Santa Barbara, U.S.A.

Received October 21, 2006

Accepted November 21, 2006