

3차원 수치모형을 이용한 방조제 끝막이 구간의 수리특성분석

An Analysis of Hydraulic Characteristics in Sea Dike Closure Gap Using a Three Dimensional Numerical Model

강민구*(서울대) · 박승우(서울대) · 임상준(서울대)

Kang, Min Goo · Park, Seung Woo · Im, Sang Jun

Abstract

This study reviews qualitatively the flow characteristics around the tidal gap during seadike closures using a three-dimensional model for shallow water equations. The Princeton Ocean Model(POM) was adapted and applied to the Sihwa Seadike which was closed in 1994. The simulated flow patterns around the gap showed that tidal velocities increase with the cross-sectional area during ebb tide. The accelerated flow extended to wider zones passing the gap, and shock waves were generated. Vertical tidal velocity profiles were affected as the bottom scours developed beyond normal conditions.

I. 서 론

방조제 끝막이 공사는 방조제 축조의 성패를 좌우하는 중요한 공정이며, 공사가 진행됨에 따라 개방구간이 축소되어 통수단면적의 감소로 내·외수위차와 조류속이 증가하게 된다. 이렇게 증가된 조류속은 끝막이 구간의 바닥과 제방의 기초를 세굴하여 제방자체를 위태롭게도 한다. 따라서, 이러한 끝막이 구간에 필요한 축조재료의 크기나 침식의 정도를 예측하기 위해서는 공정에 따라 발생하는 조류속의 예측이 필요하다(강 등, 1993).

방조제 끝막이 구간과 부근 해역에서는 개방구간에서 발생하는 강한 유속에 의한 급변류 흐름과 점변류 흐름이 동시에 존재하며, 끝막이 구간에 바닥보호공의 설치로 인해 그 전단부나 후단부에서 와류가 발생하여 3차원 흐름의 특성을 나타낼 수 있다. 이러한 급변류의 흐름을 모의하기 위한 수치모형은 적절한 유효점성항을 사용하는 2차원 해석이 주로 이용되어 왔으며, 개방구간에서 발생하는 급변류 흐름해석의 정확성을 향상시키기 위해서는 난류모형을 이용하여 난류 와점성계수를 산정하는 3차원 해석이 필요하다(최 등, 1993).

POM(Princeton Ocean Model) 모형은 1987년에 Blumberg와 Mellor에 의해 연안 해역의 해수 순환을 모의하기 위하여 개발되었다. POM 모형은 단순화하지 않은 자유수면 원시 방정식을 기본방정식으로 하며, 수심평균 유속과 조위를 계산할 수 있는 2차원 해석과, Mellor와 Yamada에 의해 개발된 turbulence closure 기법을 이용하는 3차원 해석이 가능하다.

POM 모형은 Blumberg 등(1992)에 의해 개수로상의 연직유속분포 해석, Hukuda 등 (1994)에 의해 Ariake만 등에 적용된 바 있으며, 국내의 경우 덕량만(홍철훈, 1998), 진해만(홍철훈, 1998), 천수만(박경 등, 1998, 이종찬 등, 1998), 경기만(임효혁, 1999) 등의 연안해역의 해수 유동 모의에 적용된 바 있다.

본 연구에서는 3차원 해수유동 모의 모형인 POM 모형을 기초로한 3차원 수치모형을 시화 방조제의 끝막이 구간을 포함하는 해역의 조류속 예측에 적용하여 개방구간 흐름의 정성적인 특징을 검토해보고, 개방구간의 단면 변화에 따른 수리특성의 변화를 비교하였다.

II. 모형의 개요

1. 기본 방정식

POM 모형은 식 (1)~식 (7)의 연속방정식, 운동량 방정식, 정수압 방정식, 열보존 방정식, 염보존 방정식, 상태방정식을 기본방정식으로 하며, 정수압 근사와 Boussinesq 가정을 바탕으로 한다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial u}{\partial z}) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial v}{\partial z}) + F_y \quad (3)$$

$$\rho g = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S) \quad (7)$$

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속, f 는 코리올리 계수, g 는 중력가속도, T 는 온도, S 는 염분, K_M 은 연직 와점성계수, K_H 는 연직 와확산계수, F_x, F_y 는 각각 x, y 방향의 수평 와점성항, F_s, F_T 는 각각 염분과 수온의 수평 와확산항을 나타낸다.

2. 경계조건

(1) 해수면과 바닥 경계조건

해수면($\sigma=0$)과 바닥 경계면($\sigma=-1$)에서 연직방향의 유속은 없는 것으로 하였으며, 수평방향의 유속에 대하여 식 (8), 식 (9)와 같은 바닥마찰력을 적용한다(Hukuda 등, 1994).

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)_{\sigma=0} = (0, 0) \quad (8)$$

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)_{\sigma=-1} = C_D \sqrt{(u^2 + v^2)}(u, v) \quad (9)$$

여기서, K_M 은 연직 와점성계수, D 는 수심, C_D 는 바닥마찰계수를 나타낸다.

(2) 개방경계

개방경계조건으로는 외해와의 경계면에서 계산시간 단계별 조위값을 각 격자점마다 지정해 주며, 대상영역내의 파에너지가 경계를 통하여 교란이나 제약을 받지 않고 외해로 전파될 수 있도록 식 (10)과 같은 Orlandi 방사조건식을 적용한다(서 등, 1989).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

여기서, ϕ 는 경계면에 수직한 변수, c 는 파의 전파속도, n 은 경계면에 수직한 좌표면을 나타낸다.

3. 수치기법

POM 모형의 계산격자는 격자의 중앙에서 조위를 계산하고 격자의 x, y 축 변에서 유속을 계산하는 엇갈린 격자체계(staggered grid)에 속하는 Arakawa C 격자를 사용한다. 모형의 기본 방정식은 유한체적법을 사용하여 차분화하며, 연직 확산항은 음해법으로 처리하며, 운동량 방정식의 수면경사항은 반음해법으로 처리하고, 이류항과 수평 확산항은 중앙차분법을 적용한다. 시간에 대한 차분은 leap frog 기법을 적용하여 2차 정도의 정확도를 갖도록 한다.

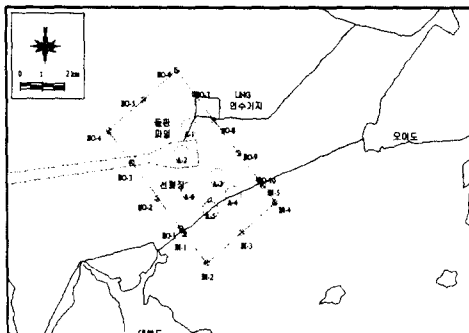
III. 모형의 적용

1. 적용대상

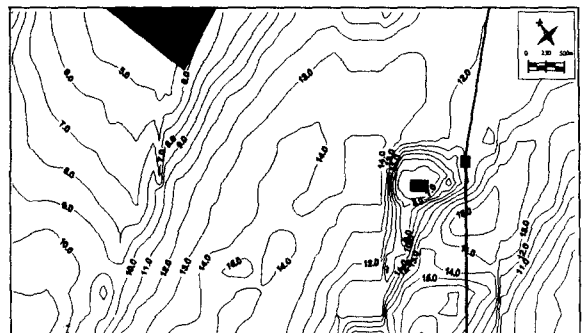
본 연구에서는 끝막이 공사 단계별 개방구간의 흐름 특성을 모의하기 위하여 1994년 1월 24일 끝막이 공사가 완료된 시화방조제의 끝막이 구간을 선정하였다.

<그림 1>은 모형을 적용하기 위한 대상영역과 주요 경계점을 나타낸 것으로, 대상영역의 크기는 $7,850 \times 3,825 \text{ m}^2$ 이며, 시화방조제 내부에 경계점 BI-1~BI-5, 시화방조제 외부에 경계점 BO-1~BO-10을 선정하였으며, 농어촌 진흥공사의 경기·아산만 모형(1998)의 수치모델링 결과로부터 경계점의 시간별 조위자료를 적용하고, 인접점간에는 보간법을 적용하여 산정하도록 하였다.

<그림 2>는 모형의 입력자료로 사용된 대상영역의 수심을 나타낸 것으로, 대상영역의 수심은 평균해수면 기준으로 5~18m의 범위를 나타낸다.



<그림 1> 대상영역과 경계점



<그림 2> 대상영역의 수심자료

2. 수치실험안

본 연구에서 고려한 수치실험안은 <표 1>과 같이 대조기인 1993년 12월 16일, 12월31일과 대조대기기간인 12월 27일을 선정하고, 각각의 경우에 대하여 개방구간의 단면을 바다다짐공이 시공된 계획단면(EL. -6m), 공사전 수심을 적용한 단면, 공사진행에 따른 실측수심을 적용한 단면을 적용하여 총 9가지 시나리오로 구성하였다. 개방구간별 평균해수면 기준의 통수단면적은 Case I-02의 경우 $5,449 \text{ m}^2$ 으로 가장 크며, Case II, Case III의 경우에는 통수단면적이 실측수심 단면, 공사전 수심 단면, 계획단면 순으로 크다.

<표 1> 수치실험안

시나리오	일자	모의 상황		조위
		개방구간단면	통수단면적 (m ²)	
Case I -01	1993. 12. 16	계획단면 적용	2,760	대조
Case I -02		공사전 수심자료 적용	5,449	
Case I -03		실측 수심측정 결과 적용	5,124	
Case II -01	1993. 12. 27	계획단면 적용	600	대조대기기간
Case II -02		공사전 수심자료 적용	1,171	
Case II -03		실측 수심측정 결과 적용	1,228	
Case III -01	1993. 12. 31	계획단면 적용	1,080	대조
Case III -02		공사전 수심자료 적용	2,112	
Case III -03		실측 수심측정 결과 적용	4,315	

3. 모의결과

(1) 시나리오별 최강 낙조 유속

모의결과를 비교하기 위하여 대상영역을 <그림 1>과 같이 6개의 해역으로 구분하였으며, 각 시나리오별 모의결과는 <표 2>와 같다. 각 시나리오별 방조제 개방구간 해역의 최강유속을 비교해 보면, 1호 방조제 개방구간 해역(A-5)에서 가장 큰 유속을 보인 경우는 Case I -1로서 유속이 5.12 m/s이었다. 2호 방조제 개방구간 해역(A-4)의 최강유속을 비교해 보면, 가장 큰 유속을 보인 경우는 Case III -3으로서 유속이 7.77 m/s이었으며, Case III의 A-4 해역에서 유속이 다른 시나리오의 유속 보다 크게 나타나는 이유는 조위가 대조기로 내외수위차가 크고, 통수단면적이 작기 때문이다.

<표 2> 시나리오별 개방구간 부근 해역(A-4)의 최강 유속

시나리오	Case I	Case I	Case I	Case II	Case II	Case II	Case III	Case III	Case III	
	-1	-2	-3	-1	-2	-3	-1	-2	-3	
최강 유속 (m/s)	A-1	1.26	1.71	1.76	0.58	0.68	0.72	0.85	0.90	1.32
	A-2	1.55	2.26	2.25	0.65	0.89	1.95	1.02	1.30	2.01
	A-3	2.09	3.46	3.44	0.80	1.68	2.16	1.30	2.69	3.36
	A-4	5.36	5.11	5.08	6.11	6.16	5.84	7.30	7.30	7.77
	A-5	5.12	5.03	4.93
	A-6	1.95	4.17	4.11	0.64	1.05	1.01	1.04	1.63	1.23

방조제 외해의 최강유속을 비교해 보면, LNG 인수기지 선회장 해역(A-2)에서 가장 큰 유속을 보인 경우는 Case I-2로 유속이 2.26 m/s이었으며, 이는 개방구간의 통수단면적이 Case III 보다 커서 개방구간의 최강유속은 Case III 보다 작으나 개방구간을 통한 조석량이 크고, 1호방조제가 체절이 되지 않은 상태였으므로 이를 통한 조석의 유출입이 있기 때문이다. LNG 인수기지 파일군 설치 해역(A-1)의 최강유속을 비교해 보면, 가장 큰 유속을 보인 경우는 Case I-3으로서 유속이 1.76 m/s이었으며, 이러한 현상은 A-2 해역에서와 같이 다른 경우 보다 Case I의 통수단면적이 크기 때문이다.

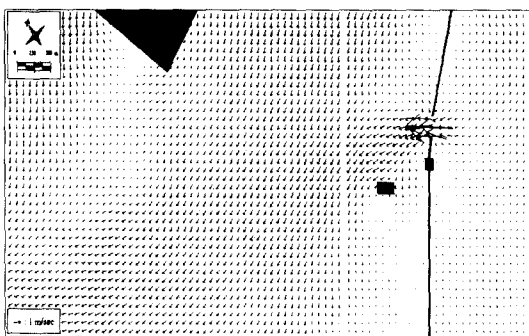
<그림 3>~<그림 5>는 Case II의 낙조시 최강 조류속 벡터를 나타낸 것이며, 각 시나리오 모두 개방구간 전방에서 와류가 발생하고 있다. <그림 6>~<그림 8>은 Case II의 등유속 분포를 나타낸 것으로, 개방구간의 통수단면적이 가장 큰 Case II-3이 개방구간에서 최강유속이 다른 경우 보다 작으나 개방구간을 통해 출입하는 조석량이 다른 경우 보다 많으므로 A-1과 A-2 해역으로 큰 유속이 넓게 분포하는 결과를 나타냈다.

(2) 수심별 유속분포

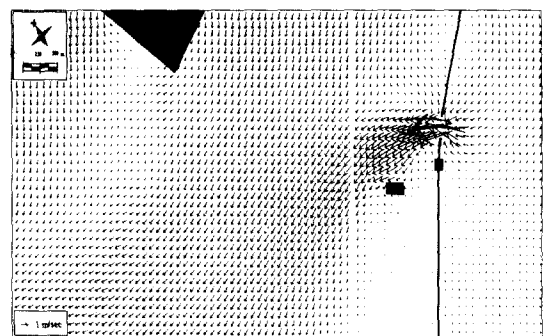
<그림 9>~<그림 11>은 Case II의 개방구간해역에서 낙조시 최강유속을 나타낼 때 수면형태와 수심별 유속을 나타낸 것이다. <그림 9>와 같이 개방구간의 단면이 계획단면인 Case II-1은 최강유속이 단면상에서 발생하며, 개방구간을 통과한 후에 도수현상(hydraulic jump)이 발생하고 있다. <그림 10>, <그림 11>과 같이 Case II-2, Case II-3은 최강유속이 개방구간 앞에서 발생하며, Case II-2의 경우는 개방구간 앞에서 도수현상이 발생하고 있으며, Case II-3의 경우에는 단면의 변화가 심한 세굴단면의 시작부분과 끝나는 부분에서 도수현상이 발생하였다.

각 시나리오의 수평방향 유속의 수심별 분포를 비교해 보면, 개방구간으로 유입되는 방조제의 내부에서는 수심별 유속분포가 수심에 관계없이 일정한 경향을 나타내며, 개방구간을 통과한 방조제의 외부 해역에서는 와류가 발생하지 않고, 수심별 유속이 바닥으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다.

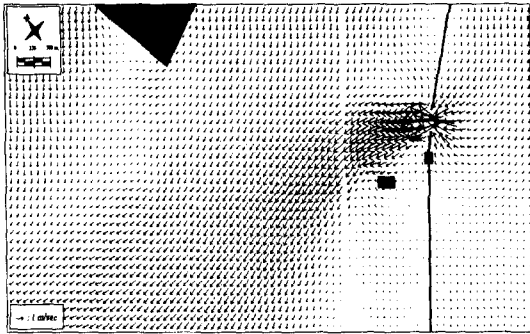
개방구간 유속의 수층별 분포를 비교해 보면, 수층별 유속은 <그림 10>과 같이 $\sigma = -0.813$ 위의 수층에서는 수심에 관계없이 거의 일정한 유속분포를 나타내고 있으며, 그 이하의 수층에서는 수심에 따른 유속의 변화가 심하게 나타났다. 또한, 개방구간의 최강유속은 개방구간의 중앙에서 나타나고 있으며, 개방구간의 시점보다 종점에서 다소 큰 유속을 나타냈다.



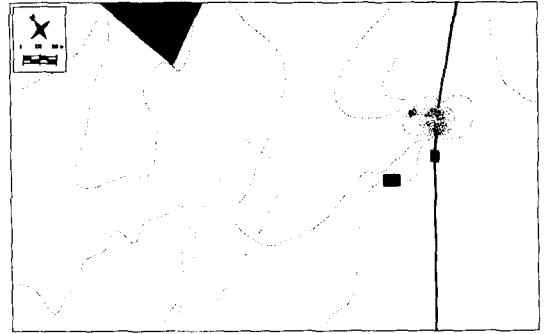
<그림 3> Case II-1 조류속 벡터



<그림 4> Case II-2 조류속 벡터



<그림 5> Case II-3 조류속 벡터



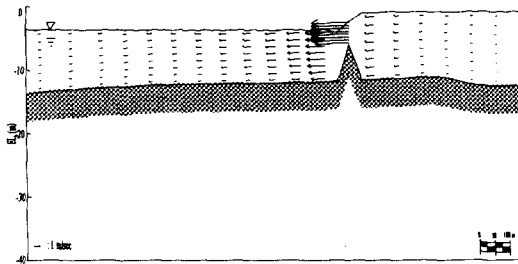
<그림 6> Case II-1 등유속 분포



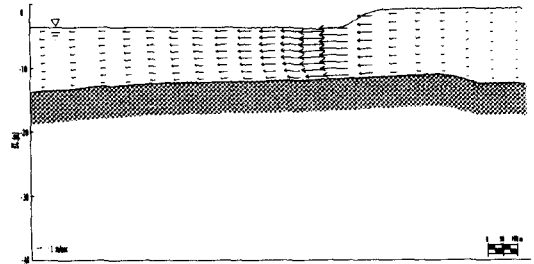
<그림 7> Case II-2 등유속 분포



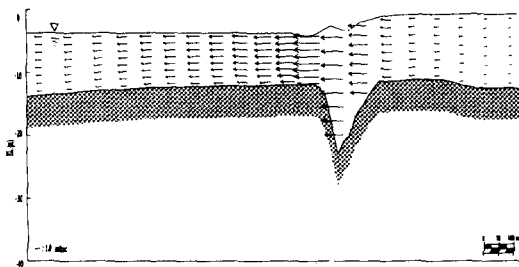
<그림 8> Case II-3 등유속 분포



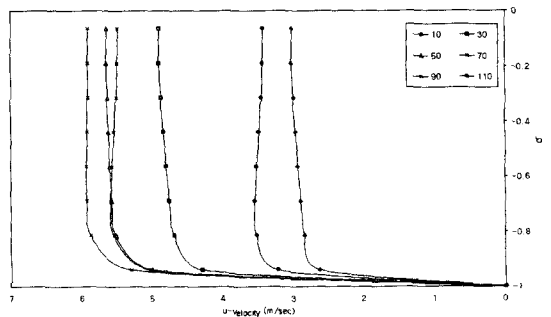
<그림 9> Case II-1 수심별 유속분포



<그림 10> Case II-2 수심별 유속분포



<그림 11> Case II-3 수심별 유속분포



<그림 12> Case II-3 개방구간의 수심별 유속분포

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원 해수유동 모의 모형인 POM 모형을 기초로한 3차원 수치모형을 시화방조제의 끝막이 구간을 포함하는 해역의 조류속 예측에 적용하여 개방구간 흐름의 정성적인 특징을 검토해보고, 개방구간의 단면 변화에 따른 수리특성의 변화를 비교하였다.

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

① 동일한 길이의 개방구간에 대해 바닥다짐공이 시공된 계획단면(EL. -6m), 공사전의 수심을 적용한 단면, 공사진행에 따른 실측수심을 적용한 단면을 적용하여 끝막이 구간의 조류속을 모의한 결과, 낙조시 개방구간의 좌우측에서 와류가 발생하였으며, 통수단면적이 증가함에 따라 방조제 외해에서 큰 유속이 넓게 분포하는 결과를 나타냈다.

② 개방구간의 단면형태에 따른 개방구간의 수면형태를 비교한 결과, 개방구간을 통과한 후 도수현상이 발생하였으며, 수평방향 유속의 수심별 분포를 비교한 결과, 개방구간으로 유입되는 방조제의 내부에서는 수심별 유속분포가 수심에 관계없이 일정한 경향을 나타내며, 개방구간을 통과한 방조제의 외부 해역에서는 와류가 발생하지 않고, 수심별 유속이 바닥으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다.

③ 개방구간 단면상의 유속은 단면의 중앙에서 최강유속을 나타냈으며, 수심별 유속분포는 $\sigma = -0.813$ 이상에서는 수심에 관계없이 일정한 유속분포를 나타냈으며, 그 이하의 수층에서는 수심에 따른 유속의 변화가 심하게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 강예목, 구자용, 권순국, 조병진, 조성정, 황은, 1993, 신고 간척공학, pp. 199-230.
2. 농림부, 농어촌진흥공사, 1998, 하구둑 설치연안의 조석특성연구(최종).
3. 농어촌진흥공사 시화사업단, 1994, 시화방조제 끝막이 보고서.
4. 서승원, 신웅배, 윤태훈, 1989, 방사효과를 고려한 개방경계조건, 대한토목학회논문집, 9권 2호, pp. 63-71.
5. 최홍식, 이길성, 1993, 방조제 축조시 수리특성 및 조간대의 모의해석, 한국해안·해양공학회지, 5권 2호, pp. 99-106.
6. Blumberg A. F., G. Boris, and D. J. O'Connor, 1992, Modeling vertical structure of open-channel flows, Journal of hydraulic engineering, Vol. 118(8), pp. 1119-1134.
7. Hong, C. H., 1998, Simulation of sea water response in Deukrang bay to typhoon using the princeton ocean model, Journal of the Korean society of oceanography, Vol.33(3), pp. 53-63.
8. Hukuda, H., J. H. Yoon, and T. Yamagata, 1994, A tidal simulation of Ariake Bay - A tideland model, Journal of Oceanography, Vol. 50, pp. 141-163.
9. Lee, J.C., C. S. Kim, and K. T. Jung, 1998, Application of a 3D hydrodynamic model to macro-tidal water of Korea in the Yellow Sea, Hydroinformatics'98, pp. 1391-1398.
10. Park Kyeong, and Jeong-Hwan Oh, 1998, Calibration and verification a hydrodynamic model in Chunsu Bay and adjacent coastal water, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 10(3), pp. 109-119.