

조류와 충격파가 혼재한 해역의 3차원적 수리특성 분석

Identifying Three-Dimensional Hydraulic Characteristics of the Sea Region Under Combined Tidal Current and Shock Waves

강민구*

Kang, Min Goo

Abstract

In this study, the flow characteristics of the sea region, where tidal current and shock waves are combined, are identified using a three-dimensional numerical model (Princeton Ocean Model, POM). The model is adopted and applied for simulating the flows of the sea region near the open sections during the seadike closure work of Sihwa Seadike which was closed in 1994. The simulation results show that the shock waves with high velocities propagate through the sections toward the inside and outside of the seadike during the periods of the spring and ebb tides, respectively. It is found that the phenomena of flow separation occur near the shock waves; as the shock waves extend to wider zones after passing the sections, their effects on the tidal current become weak. In addition, the longitudinal velocity profiles of the flows are revealed to be affected by the shock waves. For all the simulations, at the ebb tide, the drawdown of the water levels occurs in front of the open section, respectively, especially, hydraulic jump occurs when simulating the case of maximum difference in water level between the inside and outside of the seadike. As a result, it is thought that the flow characteristics of the sea region dominated by shock waves need to be identified employing three-dimensional analysis approach, which is expected to provide the information for ocean engineering works and facility management.

Keywords : Three-dimensional numerical modelling, Hydraulic characteristics, Tidal current and shock waves, Princeton Ocean Model, Seadike closure work

요 지

본 연구에서는 조류와 충격파가 혼재한 해역의 흐름 특성을 3차원 수치모형(Princeton Ocean Model, POM)을 사용하여 파악하였다. 1994년에 완공된 시화방조제의 끝막이 공사 동안 개방구간과 그 주변 해역의 흐름을 모의하기 위하여 POM 모형을 선정하였다. 모의결과는 큰 내·외수위차와 적은 통수단면적으로 인해 발생한 충격파가 창조시와 낙조시에 각각 방조제 내측과 외해로 전파되는 것으로 나타났다. 또한, 충격파 주변에서 흐름분리가 발생하며, 충격파가 개방구간을 통과한 후 더 넓은 지역으로 퍼짐에 따라 충격파의 조류에 대한 영향은 약화되는 것으로 나타났다. 흐름의 종방향 유속분포는 충격파의 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 또한, 낙조시 개방구간 전방에서 수위강하가 발생했으며, 내외수위차가 가장 큰 모의조건에서는 도수현상이 발생하였다. 따라서 충격파가 지배적인 해역의 흐름 특성을 파악하기 위해서는 3차원적 수리해석이 필요하며, 해석결과는 대상해역에서 수행되는 해상공사 및 시설물 관리에 필요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 3차원 수치모델링, 수리학적 특성, 조류와 충격파, Princeton Ocean Model, 방조제 끝막이 공사

1. 서 론

대형 수리구조물이나 해역에서 흐름의 거동은 물리적 모형이나 수치모형을 사용하여 분석해오고 있다. 물리적 모형은 축척이나 제작상의 오류로부터 발생하는 문제를 극복하면 설계에 유용한 해석결과를 제공한다. 수치모형은 최근 컴퓨터 기술의 발전에 따라 빈번하게 적용되고 있으며, 대상 영역에 대한 다양한 수리학적 정보를 경제적으로 제공한다는 장점이 있다. 따라서 두 방법은 상호보완적인 사용이 필요하다.

방조제 끝막이 공사는 방조제 축조의 성패를 좌우하는 중요한 공정이며, 공사가 진행됨에 따라 개방구간이 축소되고 통수단면적이 감소하여 내·외수위차와 유속이 증가하게 된다. 증가된 유속으로 인해 끝막이 구간의 바닥과 제방의 기초가 세굴되며, 제방자체의 안전을 위협하기도 한다. 따라서 성공적인 끝막이 공사를 위해서는 공정에 따라 발생하는 유속의 예측이 필요하며, 이를 위해서는 대상 해역의 수리특성을 재현할 수 있는 모형이 필요하다.

방조제 끝막이 구간과 부근 해역에서는 개방구간에서 발생

*정회원 · 미래자원연구원 선임연구원 (E-mail : kmg901@hanmail.net)

하는 충격파로 인한 급변류 흐름과 조류에 의한 점변류 흐름이 동시에 존재하며, 끝막이 구간에 바다보호공의 설치로 인해 그 전단부나 후단부에서 와류가 발생하여 3차원 흐름 특성을 나타낸다. 이와 같은 흐름 영역의 동수역학적 해석에는 적절한 유효점성항을 사용하는 2차원 해석이 주로 이용되어 왔으나, 개방구간에서 발생하는 급변류 흐름해석의 정확성을 향상시키기 위해서는 난류모형을 이용하는 3차원적 해석이 필요하다(최홍식과 이길성, 1993). 정태성과 이길성(1994)은 온배수가 확산되는 해역의 흐름을 모의하기 위하여 3차원 모형을 적용한 바가 있으며, 난류모형을 사용한 3차원 해석의 효율성을 제시하였다. 일반적으로 해수유동 해석은 광역해역을 대상으로 하여 계산격자망을 상기계 구성하므로 관심지역에 대한 상세한 수리해석이 어렵다. 백중철 등(2005)은 해안방조제가 조류 및 잔류흐름에 미치는 영향에 대하여 3차원 모형을 사용하여 분석한 바가 있으나 광역해역의 해수유동을 200 m 크기의 격자를 사용하여 모의함에 따라 개방구간에 대한 상세한 분석은 실시하지 못하였다. 따라서 방조제 끝막이 구간과 같이 상이한 특성을 갖는 흐름이 존재하는 영역의 국부적인 수리특성을 분석하기 위해서는 조밀한 계산 격자망을 사용하는 상세모형이 필요하다.

최근 국내에서는 국부적인 수리해석에 Fluent와 Flow-3D와 같은 3차원 수치모형을 적용해 오고 있다. 김영한 등(2003)은 Fluent를 사용하여 댐 접근부, 여수로, 방류구에서의 3차원 흐름을 해석한 바가 있다. 김남일 등(2005)은 시화호 조력발전소의 배수갑문 형상과 배치에 따른 방류능력을 해석하기 위하여 Flow-3D를 적용한 바가 있다. 김대근 등(2004)은 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름을 Flow-3D를 사용하여 동수역학적으로 해석하였으며, 2차원 모의결과와 비교한 바가 있다. 또한, 김대근과 김용근(2007)은 사다리꼴단면을 가진 광정 횡류월류어에서의 흐름 특성을 Flow-3D를 사용하여 분석한 바가 있다. 그러나 이와 같은 모형들은 상용화된 모형이므로 다른 모형들과 자유롭게 결합하여 사용하기가 용이하지 않다. 본 연구에서 채택한 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(홍철훈, 2003). POM 모형은 Blumberg 등(1992)에 의해 개수로상의 연직유속분포 해석, Hukuda *et al.* (1994), Chau and Jiang(2001)에 의해서 만의 해수유동 모의에 적용된 바 있으며, 국내의 경우 덕량만(Hong, 1998), 천수만(Park and Oh, 1998; Lee *et al.*, 1998), 경기만(Park *et al.*, 2002) 등과 같은 연안해역의 해수유동 모의에 적용된 바가 있다.

본 연구에서는 방조제의 끝막이 구간을 포함하는 해역의 수리해석을 위하여 3차원 해수유동 모의 모형인 POM 모형을 기반으로 하여 3차원 수치모델링을 실시하였다. 개방구간의 세밀한 모의를 위하여 광역모형의 모의결과를 경계조건을 사용하는 상세모형을 구축하였다. 또한, 모의결과를 바탕으로 개방구간 흐름 특성을 정량적으로 검토하였으며, 개방구간의 물리적 특성과 조위변화를 고려하여 조류 및 충격파

가 존재한 해역의 수리특성을 다방면으로 분석하였다.

2. 모형의 개요

2.1 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(Hong, 1999).

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

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

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

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

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

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

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

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 은 연직 와확산계수, F_x, F_y 는 각각 x, y 방향의 수평 와점성항, F_S, F_T 는 각각 염분과 수온의 수평 와확산항을 나타낸다. 해수의 밀도 변화는 식 (7)과 같은 상태방정식을 사용하며, 본 모형에서는 식 (5)와 식(6)에 의해 산정된 수온 및 염분농도와 압력으로 해수 밀도를 산정하는 Knudsen 식을 사용하였다(Hong, 1999).

POM 모형은 수직적으로 정해진 비율에 따라 수층을 분할하기 위하여 식 (8)과 같이 (x, y, z, t) 의 좌표체계를 (x^*, y^*, σ, t^*) 의 좌표체계로 변환한다(Mellor, 2003).

$$x^* = x, y^* = y, \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, t^* = t \quad (8)$$

여기서, η 는 조위, H 는 평균해수면하의 수심을 나타내며, $z = \eta$ 인 해수면에서 $\sigma = 0.000$, $z = -H$ 인 바닥에서는 $\sigma = 1.000$ 이다. 본 연구에서는 수층을 9개로 나눴으며, σ 는 -1.000, -0.875, -0.750, -0.625, -0.500, -0.375, -0.250, -0.125, 0.000이다.

2.2 경계조건

2.2.1 해수면과 바닥 경계조건

해수면($\sigma=0$)과 바닥 경계면($\sigma=-1$)에서 연직방향의 유속은 없는 것으로 가정하였으며, 수평방향의 유속에 대하여 식 (9)와 식 (10)과 같은 바닥마찰력을 적용한다(Hukuda *et al.*, 1994).

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)_{\sigma=0} = (0, 0) \quad (9)$$

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)_{\sigma=-1} = C_D \sqrt{(u^2 + v^2)} (u, v) \quad (10)$$

여기서, K_M 은 연직 와점성계수, D 는 수심을 나타내며, C_D

는 바다마찰계수로서 식 (11)을 사용하여 산정하였다(Mellor, 2003).

$$C_D = \max \left[\frac{1}{\kappa} \ln(H+z_b)/z_0 \right]^2, 0.0025 \quad (11)$$

여기서, κ 는 von Karman 상수(0.4), H 는 평균해수면하의 수심, z_b 는 바닥층 두께, z_0 는 조도매개변수(0.001 m)이다. C_D 는 식 (11)과 같이 0.0025를 상회하지 못하도록 하였으며, 2차원 모의와 3차원 모의에 동일한 값을 적용하였다.

2.2.2 개방경계

개방경계조건으로는 외해와의 경계면에서 계산시간별로 조위값을 각 격자점마다 지정해 주며, 대상 영역내의 파에너지가 경계를 통하여 교란이나 제약을 받지 않고 외해로 전파될 수 있도록 식 (12)와 같은 Orlandi 방사조건식을 적용한다(서승원 등, 1989).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

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

2.3 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 수면 경사항은 반음해법으로 처리하고, 이류항과 수평 확산항은 중앙차분법을 적용한다. POM 모형에서 시간에 대한 차분은 leap frog 기법을 적용하여 2차 정도의 정확도를 갖도록 하고 있다(Mellor, 2003).

3. 모형의 적용

3.1 대상 해역

본 연구에서는 방조제 끝막이 공사의 개방구간이 존재하는 해역에서 조류와 충격파가 혼재한 흐름 모의에 대한 3차원 모형의 적용성을 평가하기 위하여 1994년 1월 24일 끝막이 공사가 완료된 시화방조제의 끝막이 구간을 선정하였다.

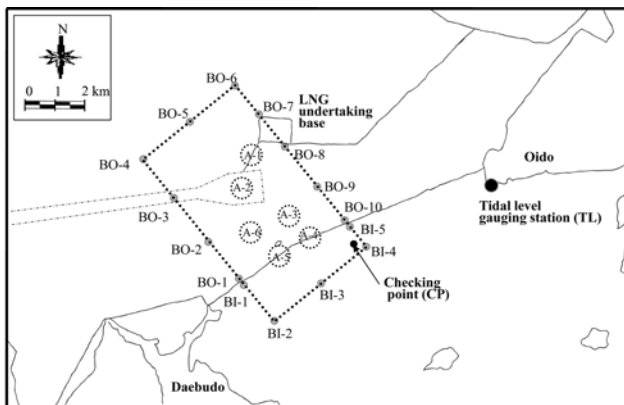


그림 1. 연구 대상 해역, 계산영역 및 경계점, 관심지역, 참고점(CP), 조위관측소(TL)의 위치

그림 1은 연구 대상 해역과 모형의 계산영역을 나타낸 것이다. 연구 대상 해역에는 오이도와 대부도를 이은 시화방조제, LNG 인수기지, 선박의 운항을 위한 선회장 등의 시설들이 위치하고 있다. 모형의 계산영역은 시화방조제의 개방구간에서 발생하는 충격파와 해역에서 발생하는 조류를 고려하기 위하여 시화방조제 내부에 경계점 BI-1~BI-5, 시화방조제 외부에 경계점 BO-1~BO-10을 있는 경계로 하였다. 계산 영역의 크기는 7,850 m×3,825 m이며, 수심은 평균해수면 기준으로 5 m~18 m의 범위를 나타낸다.

3.2 적용 방법

계산영역의 경계조건은 광역모형인 한국농촌공사의 경기·이산만 모형(농림부와 농어촌진흥공사, 1998)으로부터 그림 1에 나타낸 것과 같이 15개의 경계점에 대하여 시간별 조위 자료를 제공받아 사용하였다. 광역모형에서는 네델란드 Delft 연구소에서 개발한 동수역학 수치모델인 TRISULA-3D를 사용하며, 이 모형은 넓은 해역의 해수유동을 모의하기 위하여 구축되었기 때문에 격자가 성기게 구성되어 있다. 따라서 대상 해역에 대한 국부적인 수리특성을 분석하기 위해서는 조밀한 격자를 사용한 상세모형으로 대상 해역을 모의할 필요가 있다. 계산영역에는 본 연구의 관심해역인 방조제 개방구간과 이에 인접한 해역이 포함되도록 하였으며, TRISULA-3D 모형의 모의결과를 분석한 후, 흐름에 대한 경계조건 영향을 고려하여 계산영역을 설정하였다.

계산영역을 모의하기 위해서 구성된 모형의 계산격자망은 직사각형이나 정사각형 형태의 격자를 사용하였으며, 계산영역을 상세히 모의하기 위하여 격자의 가로 및 세로 길이를 각각 20~50 m로 하여 계산격자망을 조밀하게 구성하였다. 광역모형인 TRISULA-3D의 계산 격자망의 격자의 크기는 외해측 개방경계부근에서는 3,000 m×1,000 m, 주요 조석수로에서는 횡단방향으로 350~450m, 주조류방향으로 800~900 m를 사용하였다. 따라서 광역모형에서 사용한 격자망으로는 계산영역의 흐름을 상세히 모의할 수 없기 때문에 상세모형의 격자망은 광역모형 보다 작게 구성하였다. 특히, 관심 대상인 방조제 개방구간 및 LNG 인수기지 부근 해역에서는 격자의 크기를 20 m×20 m로 하여 격자망을 조밀하게 구성하였다. 이곳들을 벗어나는 해역에서는 격자의 크기를 점차적으로 증가시켜 최대 50 m×50 m가 되도록 하는 가변격자체계를 채택하였으며, 격자망을 성기게 구성하였다. 계산 격자의 개수는 272 개×142 개로 총 38,624개이다.

모형은 표 1과 같이 1993년 12월 16일(Case-I), 12월 27일(Case-II), 12월 31일(Case-III)의 조석에 대하여 각각 적용하였다. 내수위와 외조위의 차가 Case-I에서는 약 1.75 m, Case-II에서는 약 2.94 m, Case-III에서는 약 3.57 m를

표 1. 모의조건들의 특징

모의 조건	기간	개방구간 면적 (m ²)	최대 내·외수위차 (m)
Case-I	1993. 12. 16	5,124	1.75
Case-II	1993. 12. 27	1,228	2.94
Case-III	1993. 12. 31	4,315	3.57

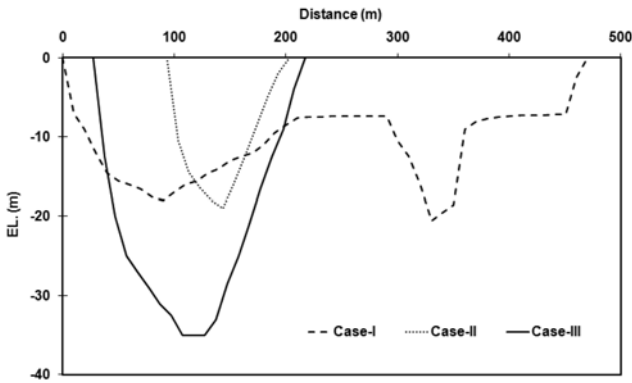


그림 2. 모의조건(Case-I, Case-II, Case-III)별 개방구간의 단면 형상 비교

나타냈다. 개방구간의 면적은 그림 2와 같이 Case-I이 5,124 m²로 가장 크며, 이 시기에 두 개의 개방구간이 존재했기 때문이다. 방조제 끝막이 공사가 진행됨에 따라 개방구간의 단면적이 감소해야 하나, 빠른 유속에 의하여 바닥과 제방이 세굴되어 Case-II가 Case-III보다 통수단면적이 더 크게 나타나고 있다(농어촌진흥공사 시화사업단, 1994).

3.3 적용 결과 분석

그림 3은 각 모의조건에서 모의결과를 검토하기 위하여 계산영역에 근접한 조위관측지점에서 측정한 조위자료와 계산영역내에 위치한 참고점의 모의결과를 비교한 것이다. 그림 1에 나타난 오이도 조위관측소(TL)에서는 끝막이 공사기간 중에 방조제 내측의 조위를 측정하였다. 본 연구에서는 모형의 모의결과를 간접적으로 평가하기 위하여 오이도 조위관측소의 관측자료와 이로부터 약 4.5 km 정도 떨어진 참고점(CP)의 모의결과를 비교하였다. 계산영역에서 공간적인 수위변화를 살펴보면, 방조제 개방구간에서 급격한 변화를 나타내며, 이곳을 벗어난 해역에서는 수위변화가 크지 않다. 또한, 광역모형인 TRISULA-3D에 의해 모의된 TL과 CP의 조위변화는 크지 않으며 유사한 경향을 나타내어 간접적으로 모의결과를 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 두 지점이 공간적으로 떨어져 있기 때문에 수치적으로 정확하게 비교하기 어려우나 그림 3에 나타난 것과 같이 두 지점의 조위변화를 도식적으로 비교해 보면 유사한 경향을 나타내고 있다.

그림 4는 Case-II를 모의할 때 사용한 외해조위(BO-1) 및 내수위(BI-4)의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4와 같이 방조

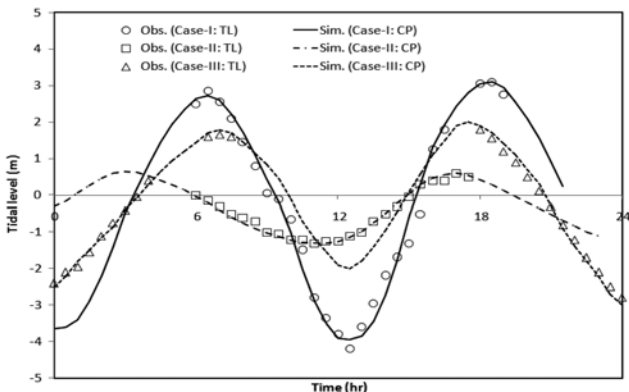


그림 3. 모의조건(Case-I, Case-II, Case-III)에 따른 참고점(CP) 모의결과와 조위관측소(TL)의 관측조위 비교

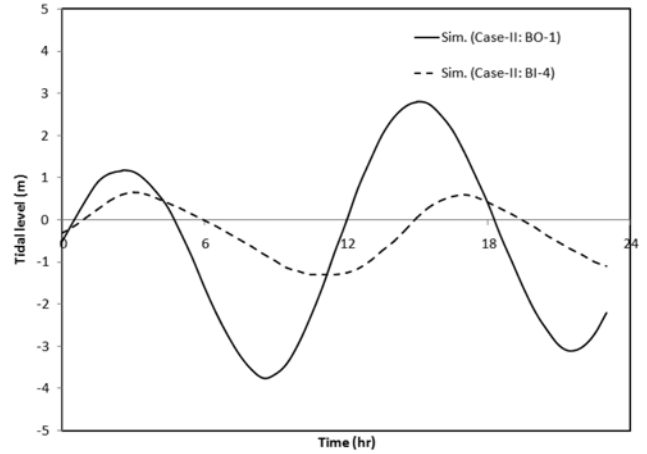
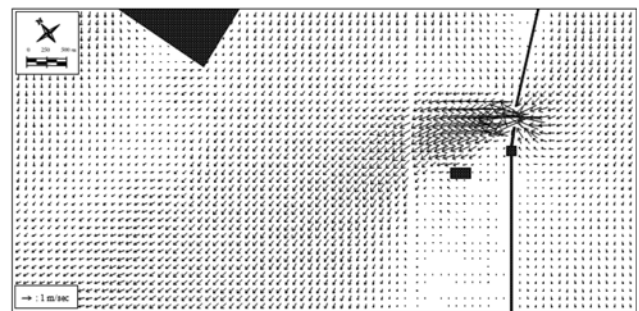


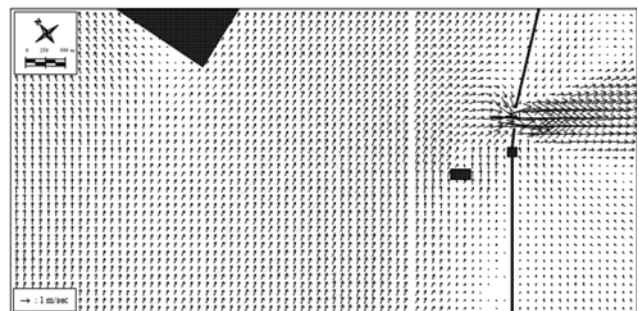
그림 4. Case-II 모의에 사용된 경계점 BI-4의 외조위와 경계점 BO-1의 내수위 변화

제 외측 수위는 대상 해역의 조석의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 방조제 끝막이 구간으로 해수가 유동함에 따라 내수위도 시간에 따라 변하나 개방구간을 통한 통수량이 작기 때문에 외조위 보다 조석의 영향을 덜 받고 있음을 알 수 있다. 모의기간 동안 외조위와 내수위의 차는 낙조시에 최대 2.94 m, 창조시에 최대 2.93 m를 나타냈으며 이로 인하여 모의기간 중에 개방구간에서 최대유속이 5.84 m/sec인 흐름이 발생하였다.

그림 5는 Case-II조건에 3차원 모형을 적용하여 해수유동을 모의한 결과를 창조시와 낙조시로 구분하여 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 (b)는 수층별 모의결과를 평균한 유속벡터를 나타낸다. 그림 5(a)는 낙조시에 최대유속이 발생하는 시간의 유속벡터를 도식적으로 나타낸 것이다. 모의기간 중의 최대유속은 개방구간에서 나타나고 있음을 알 수 있으며, 외조위와 내수위 차에 의해서 폭이 좁은 개방구간을 통해서 방조제 밖으로 빠른 유속으로 방류됨에 따라 충격파가 발생한



(a) 낙조



(b) 창조

그림 5. Case-II 모의시 낙조와 창조시 유속 벡터

부근 해역에서는 와류가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 창조시에 최대유속이 발생하는 시간의 유속벡터를 나타낸 것이며, 외조위와 내수위의 차에 의해서 발생한 충격파가 방조제 안쪽으로 진행하고 있음을 알 수 있다. 또한, 충격파의 빠른 유속으로 인하여 방조제 안쪽에서 와류가 발생하고 있음을 알 수 있다.

4. 수리특성 분석

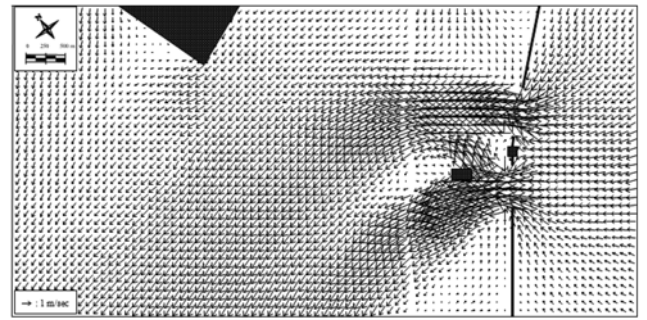
4.1 2차원 및 3차원 모의결과의 비교

3차원 모의 결과를 분석하기 위하여 2차원 모의 결과와 비교하였다. 2차원 모의결과와 3차원 모의결과는 동일한 POM 모형을 사용하여 얻은 것이며, 이때 바닥마찰계수는 2차원 및 3차원 모의에서 동일한 값을 사용하였다. 모의결과를 비교하기 위하여 계산영역에서 그림 1에 나타낸 것과 같이 A1~A6의 6개 지역을 선정하였으며, 표 2와 같이 각 모의기간별로 2차원 모의결과와 3차원 모의결과를 비교하였다. 각 지역의 최대유속을 2차원 모의와 3차원 모의로 구분하여 비교해 보면, 3차원 모의결과가 대체적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이는 2차원 모의에는 수심평균 유속을 사용하기 때문이며, 3차원 모의에서는 각 수층별로 유속을 모의하여 이를 평균한 것을 사용하기 때문이다. 이와 같은 차이는 빠른 유속을 나타내는 충격파가 발생하는 방조제 끝막이 구간과 같은 해역의 수리해석에는 난류 및 와류의 영향을 적절히 재현할 수 있는 3차원 모형이 필요하다라는 것을 나타낸다.

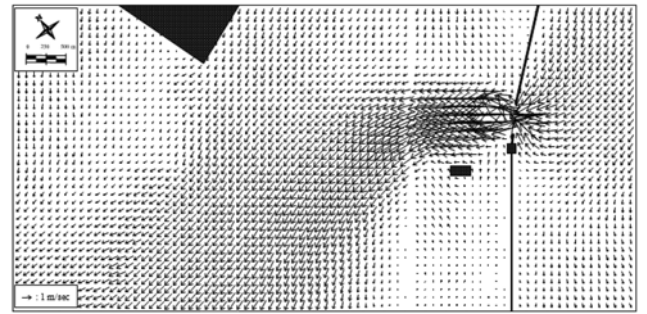
각 모의기간별로 방조제 끝막이 구간이 위치한 A-4 지역의 최대유속을 비교해 보면, 가장 큰 유속을 나타낸 경우는 Case-III로서 2차원 모의시 7.69 m/sec, 3차원 모의시 7.77 m/sec를 각각 나타냈다. Case-III이 다른 모의조건들 보다 내·외수위차가 컸기 때문에 개방구간을 통해서 많은 해수가 유통하기 위해서 빠른 유속이 발생한 것으로 판단된다. 개방구간으로부터 공간적으로 가장 멀리 떨어져 있는 A-1 지역의 최대유속을 비교해 보면, 가장 큰 유속을 보인 경우는 Case-I로서 유속이 2차원 모의시 1.55 m/sec, 3차원 모의시 1.76 m/sec를 나타냈다. 이 지역의 최대유속을 다른

표 2. 2차원 모의 및 3차원 모의시 모의조건별 최대 유속 비교

관심 지역	모의방법	최대유속 (m/sec)		
		Case-I	Case-II	Case-III
A-1	2차원	1.55	0.70	1.15
	3차원	1.76	0.72	1.32
A-2	2차원	1.91	0.88	1.62
	3차원	2.25	1.95	2.01
A-3	2차원	3.17	1.75	3.03
	3차원	3.44	2.16	3.36
A-4	2차원	5.00	5.89	7.69
	3차원	5.08	5.84	7.77
A-5	2차원	4.90	.	.
	3차원	4.93	.	.
A-6	2차원	3.77	0.99	1.52
	3차원	4.11	1.01	1.62



(a) Case- I



(b) Case-III

그림 6. Case-I과 Case-II 모의시 낙조의 유속벡터

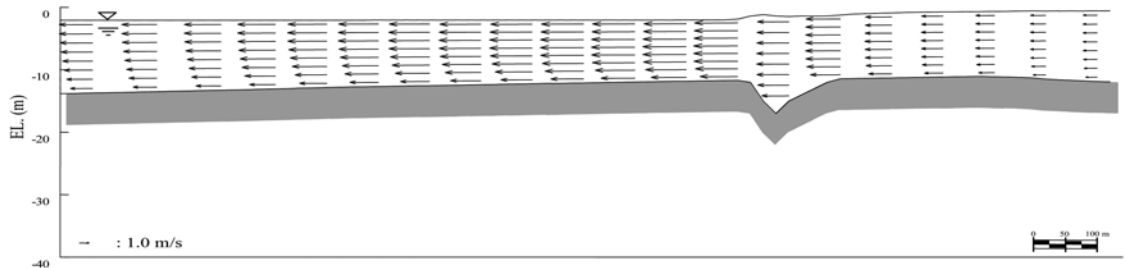
지역의 모의조건별 최대유속들과 비교해보면, 다른 지역들 보다 상대적으로 작은 값을 나타내고 있다. 이는 최대유속을 나타내는 개방구간의 흐름으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 충격파로 부터의 영향이 다른 지역들 보다 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.

4.2 계산영역의 흐름 특성

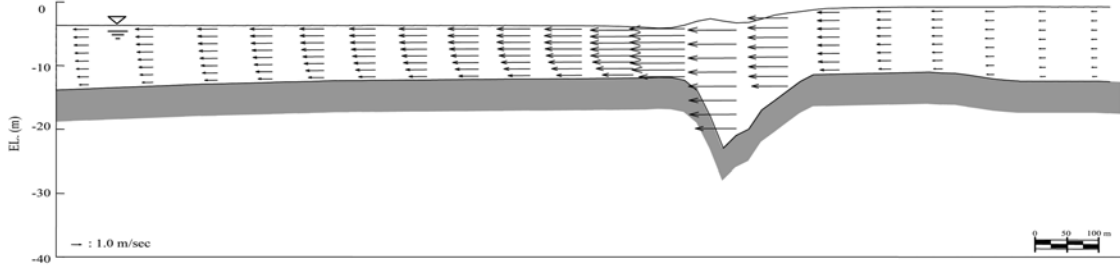
그림 6(a)와 6(b)는 Case-I과 Case-II의 낙조시 유속 벡터를 각각 나타낸 것이다. 이들은 수층별 모의결과를 평균한 유속벡터를 나타낸다. 그림 5(a)의 Case-II의 낙조시 유속 벡터와 함께 세 가지 모의조건들의 낙조시 흐름 상태를 비교해 보면, 공통적으로 내·외수위차 때문에 개방구간에서 발생한 빠른 유속의 충격파로 인하여 인접한 해역에서 흐름분리가 발생하고 있음을 알 수 있다. Case-I의 경우 A-1과 A-2 지역으로 큰 유속이 넓게 분포하는 결과를 나타내는데 이는 Case-I에서는 개방구간이 두 곳이며, 이의 통수단면적이 다른 모의조건들 보다 커서 개방구간의 최대유속은 작으나 개방구간을 통한 조석량이 많기 때문인 것으로 판단된다. Case-III은 개방구간에서 다른 모의조건들 보다 큰 최대유속을 나타냈으며, 개방구간을 통과한 후 감속되어 흐름분리 현상이 방조제 외측에서 Case-I과 Case-II 보다 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.3 개방구간의 수리특성

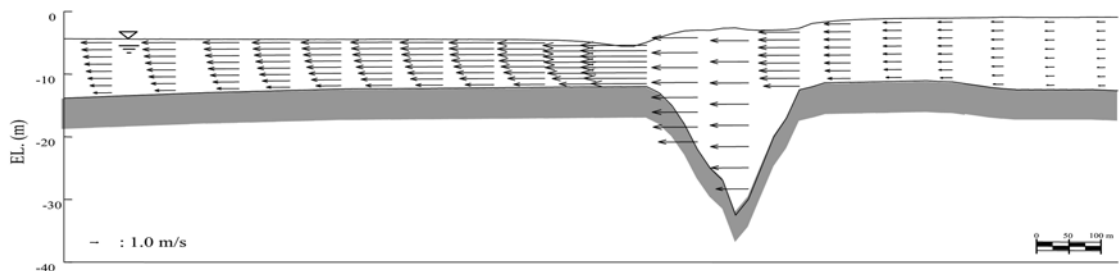
그림 7은 각 모의조건별로 개방구간을 포함한 해역에서 낙조시 수면 변화와 수심별 종방향의 유속분포를 나타낸 것이다. 각 모의조건들의 종방향 유속의 수층별 변화를 살펴보면, 방조제의 내부에서는 수심에 따른 유속의 변화가 크지 않으나 개방구간을 벗어난 방조제 외해에서는 수심별 유속이 바닥으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다. 개방구간에서는 빠른 유속으로 인해 난류가 잘 발달되었으나, 외해에서는 에



(a) Case- I

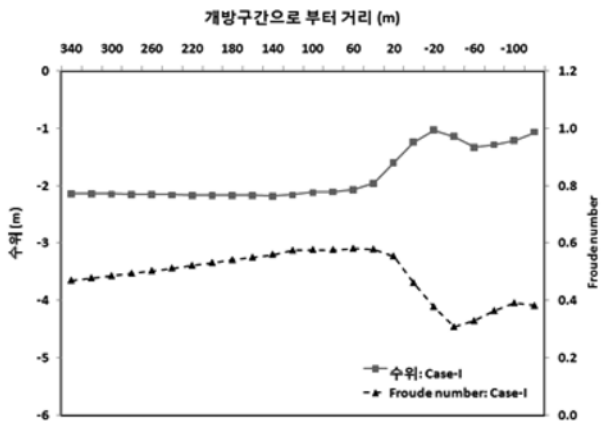


(b) Case-II

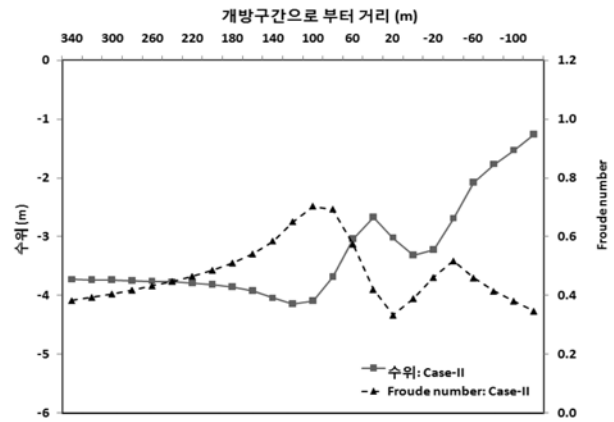


(c) Case-III

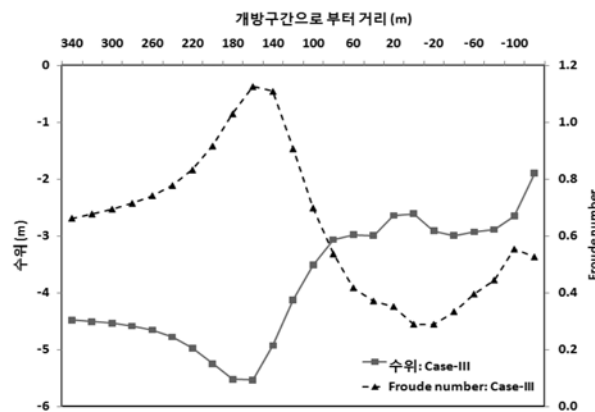
그림 7. 모의조건별 종방향의 수층별 유속분포와 수면 변화 비교



(a) Case- I



(b) Case-II



(c) Case-III

그림 8. 모의조건별 최대유속 발생시 수위 및 Froude 수 비교

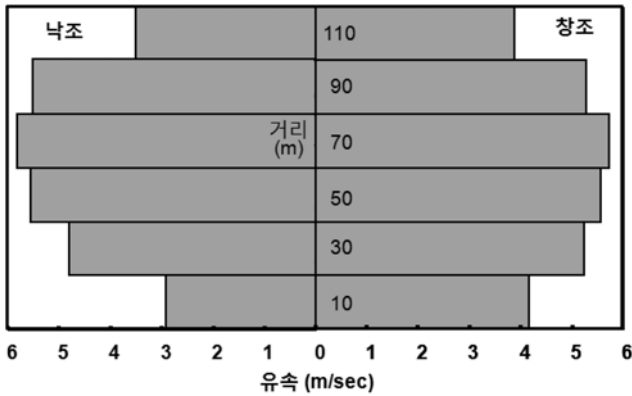


그림 9. Case-II 모의시 개방구간의 공간적 유속분포

너지가 감소하여 유속이 상대적으로 작아져서 유속분포가 포물선 형태에 가까워지는 것으로 사료된다.

그림 8은 각 모의조건별로 최대유속이 발생할 때 개방구간 인접해역에서 수위와 Froude 수의 변화를 나타낸 것이다. 공통적으로 개방구간을 통과하면서 수위강하가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 빠른 유속이 급속소단면을 통과하기 때문에 발생하며, 세굴로 인하여 개방구간의 하상이 급격하게 변함에 따라 개방구간에서 불규칙한 수위 변화를 나타내고 있다. 각 모의조건에 내·외수위차가 비교해보면, Case-III에서 내·외수위차가 가장 크게 나타나고 있으며, 이로 인하여 개방구간에서 가장 큰 유속을 나타내고 있다. 각 모의조건의 Froude 수를 비교해 보면, 최대유속을 나타낸 Case-III에서 Froude 수가 1.0을 상회한 사례로 인하여 도수현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 그림 8(c)와 같이 Case-III의 경우에 큰 내·외수위차로 인하여 개방구간에서 빠른 유속이 발생하였으며, 개방구간 전면에서 큰 수위강하가 나타나며, 이 구간을 통과한 후에 다시 수위가 상승하고 있다.

그림 9는 Case-II 모의시 개방구간의 위치별 유속을 낙조와 창조로 구분하여 나타낸 것이다. 개방구간에서 최대유속은 낙조와 창조시 각각 개방구간의 중앙부분에서 발생하고 있다. 낙조시 개방구간의 위치별 유속을 비교해보면, 개방구간 상측의 유속이 하측의 유속보다 다소 큰 결과를 나타냈으며, 그림 5-(a)와 같이 충격파가 개방구간을 통과한 후에 충격파의 방향이 조류로부터 영향을 받는 것으로 판단된다. 창조시 개방구간의 위치별 유속을 비교해 보면, 개방구간

상·하측의 유속이 비슷한 경향을 나타냈으며, 그림 5-(b)와 같이 충격파가 개방구간을 통과한 후 방조제 내측으로부터 영향을 받지 않고 진행되는 것으로 나타났다.

4.4 수층별 유속분포

그림 10은 Case-II 모의시 개방구간을 포함한 해역에서 수층별로 종방향 유속을 표면유속에 대한 비율을 사용하여 무차원으로 나타낸 것이다. 그림 10에서와 같이 개방구간에서는 $\sigma = -0.81$ 위의 수층에서는 수심에 관계없이 거의 비슷한 유속분포를 나타내고 있으며, 그 이하의 수층에서는 수심에 따른 유속의 변화가 크게 나타났다. 또한, 낙조시 방조제 내측과 외측의 수층별 유속분포를 살펴보면, 방조제 내측의 수층별 유속분포가 방조제 외측의 유속분포보다 크지 않음을 알 수 있다. 이는 낙조시 개방구간으로 해수가 유입되면서 유속이 가속되고 방조제 외측으로 해수가 방류된 후에는 에너지가 손실되어 감속되므로 유속이 감소하기 때문으로 판단된다. 그림 10과 같이 개방구간으로 진입하면서 흐름이 발달하여 난류 특성을 나타내며, 유속분포가 대수형에 가까워진다. 또한, 개방구간에서 외해로 나아갈수록 충격파로부터 영향이 감소하고 에너지가 감소함에 따라 층류 특성을 나타내며 유속분포가 포물선형에 가까워진다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원 해수유동 모의 모형인 POM 모형을 기반으로 한 3차원 수치모델링을 실시하여 방조제 끝막이 구간의 수리특성을 분석하였다. 개방구간의 특성과 조위조건을 고려하여 선정된 3가지 모의조건을 재현하여 대상 영역에서 나타나는 동수역학적 현상을 분석하였다. 선정된 모형은 대상 해역에서 발생하는 해수유동, 난류 흐름, 흐름분리 현상 등을 양호하게 재현하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 광역모형으로부터 제공받은 조위자료를 계산영역의 경계조건으로 사용하여 조밀한 격자망으로 충격파와 조류가 혼재한 방조제 끝막이 구간을 포함하는 해역의 흐름을 3차원 모델링하여 모의한 결과, 개방구간에서 빠른 유속을 갖는 사례가 발생하고, 그에 따라 흐름분리 현상이 발생하며, 개방구간에서 멀리 떨어진 방조제 외해에서는 조류에 지

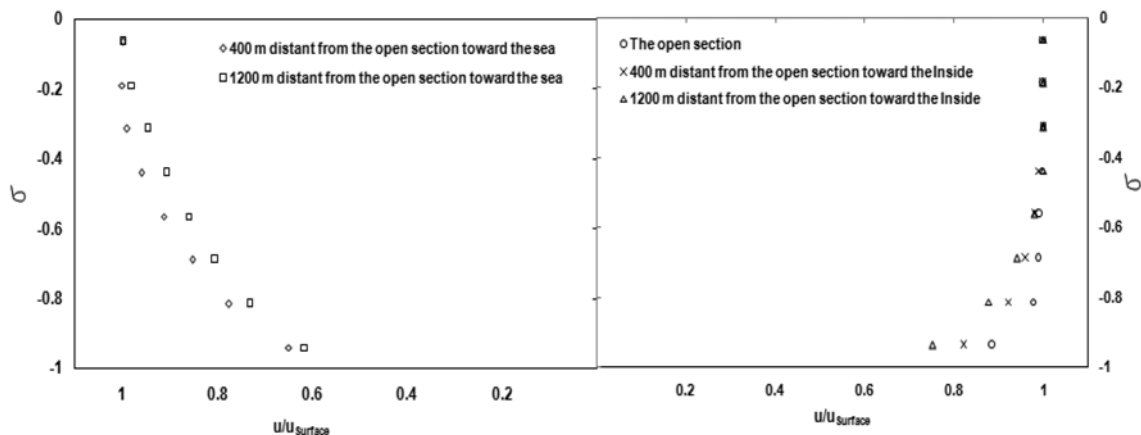


그림 10. 낙조시 방조제 외해와 내측, 개방구간의 수층별 x-방향 유속분포 비교(Case-II)

배되는 흐름이 발생하는 대상 해역의 흐름 특성이 양호하게 제시되었다.

2. 2차원 모의와 3차원 모의결과를 분석하기 위하여 6개 지역을 선정하여 모의기간 중의 최대유속을 비교한 결과, 3차원 모의가 2차원 모의 보다 전반적으로 큰 값을 나타냈으며, 개방구간의 형상과 내·외수차를 고려하여 선정된 3가지 모의조건 모두에서 개방구간 부근에서 가장 큰 유속을 나타냈다.
3. 모의조건에 따라 개방구간을 포함하는 해역의 수면형태를 비교한 결과, 세가지 모의조건에서 개방구간을 통과한 후 수위강하가 발생하였다. 또한, 내·외수차가 가장 큰 모의 조건에서는 개방구간 전방에서 발생한 사류로 인하여 도수현상이 발생하였다.
4. 종방향의 유속을 수층별로 살펴본 결과, 낙조시 방조제 개방구간과 인접 해역에서 난류가 발달하여 수층별 유속 변화가 대수형을 나타냈다. 개방구간에서 외해쪽으로 떨어진 곳에서는 충격파의 영향이 감소하여 층류 특성을 나타내며, 수층별 유속변화가 포물선형을 나타냈다.

방조제 끝막이 구간에서는 강한 유속으로 인해 제방과 바닥에서 세굴이 발생하기 때문에 보다 경제적이고 안전한 공사를 시행하기 위해서는 발생 가능한 조건들을 고려한 수리해석이 선행되어야 한다. 따라서 향후 연구에서는 특성이 다른 흐름들이 혼재하는 영역에 대하여 상세한 수리실험을 실시하여 3차원 모델링 결과를 검토하고 이들을 상호보완할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

김남일, 김대근, 이길성, 김달선(2005) 3차원 수치모의를 이용한 배수갑문의 방류능력 개선효과 분석, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제3호, pp. 189-198.

김대근, 김용근(2007) 3차원 수치모의를 이용한 광정형월류위어의 흐름특성 해석, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 277-286.

김대근, 이재형, 서일원(2004) 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 363-373.

김영한, 오정선, 서일원(2003) 수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 761-776.

농림부, 농어촌진흥공사(1998) **히구독 설치연안의 조석특성연구(최종)**
 농어촌진흥공사 시회사업단(1994) **시화방조제 끝막이 보고서**.

백중철, 윤영호, 신문섭, Din Van Manh(2005) 해안방조제가 조류 및 잔류흐름에 미치는 영향, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제1호, pp. 83-96.

정태성, 이길성(1994) 연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형, **한국해안·해양공학지**, 한국해안·해양공학회, 제6권, 제3호, pp. 245-259.

서승원, 신응배, 윤태훈(1989) 방사효과를 고려한 개방경계조건, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제9권, 제2호, pp. 63-71.

최홍식, 이길성(1993) 방조제 축조시 수리특성 및 조간대의 모의해석, **한국해안·해양공학지**, 한국해안·해양공학회, 제5권, 제2호, pp. 99-106.

홍철훈(2003) 3차원 원시모델을 이용한 태풍통과시 일본 북부 연안역에서 발생한 연안용승 연구, **한국수산학회지**, 한국수산학회, 제36권, 제6호, pp. 723-734.

Blumberg, A.F., Boris, G., and O'Connor, D.J. (1992) Modeling vertical structure of open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 8, pp. 1119-1134.

Chau, K.W. and Jiang, Y.W. (2001) 3D numerical model in orthogonal curvilinear and sigma coordinate system for Pearl River estuary, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 1, pp. 72-82.

Hong, C.H. (1999) A three-dimensional numerical study of effects of typhoons on oceanographic conditions in the Korea Strait, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 34, No. 2, pp. 73-85.

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, No. 3, pp. 53-63.

Hukuda, H., Yoon, J.H., and Yamagata, T. (1994) A tidal simulation of Ariake Bay-A tideland model, *Journal of Oceanography*, Vol. 50, pp. 141-163.

Lee, J.C., Kim, C.S., and Jung, K.T. (1998) Application of a 3D hydrodynamic model to macro-tidal water of Korea in the Yellow Sea, *The Proceedings of the Hydroinformatics'98*, pp. 1391-1398.

Mellor, G.L. (2003) *Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model (June 2003 version)*, Princeton University.

Park, K., Oh, J.H., Kim, H.S., and Im, H.H. (2002) Case study: Mass transport mechanism in kyunggi bay around han river mouth, Korea, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 257-267.

Park, K. and Oh, J.H. (1998) Calibration and verification of a hydrodynamic model in chunsu bay and adjacent coastal water, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 109-119.

(접수일: 2009.1.20/심사일: 2009.2.23/심사완료일: 2009.5.11)