

## 해양투기장에서 준설토의 투기에 따른 거동 평가

이중우\* · 오동훈\*\* · 이승철\*\* · 김형철\*\*\* · 김강민\*\*\*\*

\*한국해양대학교 건설환경공학부 교수

\*\* 한국해양대학교 토목환경공학과 대학원

\*\*\*월드건설(주)

\*\*\*\*(주)세일종합기술공사 기술연구소

## Evaluation of the Behavior of Dredged Materials in Ocean Dumping Area

Joong-Woo Lee\* · Dong-Hoon Oh\*\* · Hyung-Chul Kim\*\* · Seung-Chul Lee\*\* · Kang-Min Kim\*\*\*\*

\*Division of Civil and Environment System Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*World construction Co., Ltd., Seoul 150-890, Korea

\*\*\*\*Seileng Engineering Co., Ltd. Shingil-dong Yeongdeungop-gu, Seoul 150-051, Korea

**요 약 :** 새로운 항만을 개발하는 과정에서 가장 중요시 되는 것은 항로 및 접근수로에서 선박의 안전한 통항을 위한 최저 수심이다. 국제적으로 선박의 대형화 추세에 맞추어 기존에 건설되고 있는 항만들도 설계변경을 통한 최저수심을 증가하게 되었다. 설계시 고려한 준설토이상의 토사가 빈번해졌고 이 또한 처리할 내륙측 부지가 부족하게 되어 결국 외해 투기지역에 배출하게 된다. 본 연구에서는 부산신항만 항로중심에 따른 준설토의 해양투기와 관련하여 대상해역에서의 투기가 이루어지는 시점 전후로 현장관측을 통하여 유동 및 수질을 분석하고 해양투기지역에서 배출된 준설토가 대상해역에서 어떻게 거동하는지를 수치실험에서 검증자료로 활용하였다. 확산에 관한 실험은 고품질물에 대해서 수행하였으며, 대상해역의 특성상 초기희석 및 침강이 빠른 순간에 진행되어 인접해역에서 유의할 만한 해양환경에 영향은 미치지 않는 것으로 파악되었다.

**핵심용어 :** 준설토, 투기지역, 배출, 현장관측, 유동, 확산, 침강

**ABSTRACT:** When we consider to develop a new harbor, the most important factor, we think, is the lowest water depth of waterway and approaching channel for safe navigation of vessel. The existing harbors have been being dredged to meet the international trend of jumbo sized vessels by adopting the new design criteria. As the dredged materials over the expected at the design level were common and there are still lack of land based reclamation area, we have no choice to discharge the dredged materials in open sea area. In this study, we analysed the behavior of discharged materials at the dumping area of offshore open sea, which were collected from the dredging work at the waterway in Busan New Port. We measured the tidal currents and analyzed the waters of dumping site after the dumping work. These were used to evaluate the numerical models. Suspended Solids(SS) were introduced to the diffusion model. Because of the characteristic of the dumping site, the speed of initial diffusion and settle down of the discharged materials was so fast. Therefore, we believe that the dumped materials do not cause a significant impact to the marine environment.

**KEY WORDS :** Dredged material, Dumping area, Discharge, Field measurement, Tidal current, Diffusion, Settlement

### 1. 서 론

불과 10년 전만 해도 5000 TEU급 선박은 대형선에 속했지만, 기술의 개발과 유가의 폭등으로 인해 선박이 점차 대형화 되고

있는 추세이다. 2004년 8월 8000 TEU급 선박의 부산항 입항을 시작으로 하여 현재 10000 TEU급 선박들이 부산신항에 입항할 예정에 있다. 부산 신항만은 설계수심을 15m에서 18m로 변경하였다. 이에 따라 준설토량이 증가하게 되어 외해 투기지역에 배출하게 되었다.

해양은 조그마한 환경 변화에도 주변 생태계에 큰 영향을 미치게 되므로 준설토의 외해투기로 인한 영향평가는 실로 중요한

\* jwlee@hanara.hhu.ac.kr

051)410-4461

\*\* crisisoh@korea.com, kmnaritime99@hanmail.net

051)410-4981

\*\*\* kbwc2@worldro.co.kr

051)410-4981

\*\*\*\* kikami@seileng.com

02)840-5182

항목이라 할 수 있다. 이 변화로 인해서 공사시 발생하는 오염원의 확산형태를 추정하여 인근해역에 미치는 영향을 검토하여 준설토 투기시의 평가 지표로 삼고자 한다.

본 연구에서는 부산 신항의 항로 준설로 발생하는 준설토의 외해 투기로 인한 영향을 검토하기 위하여, 해수유동 수치모의와 오염확산 수치모의를 수행하였다. 해수유동 수치모의를 위한 계산영역은 거제도 동부와 서부산 일부를 포함하고 외해역으로는 약 30~40km 까지 확장하여 투기될 지점에서의 경계영향을 받지 않도록 70km × 65km로 설정하여 실험을 수행하였으며, 오염확산 수치모의는 월별 부유사 관측자료와 투기될 SS발생량을 바탕으로 하여 해수유동 실험의 조위, 조류자료를 외력장으로 하여 실험을 수행하였다. 또한, 실제 투기후 부유사 관측자료와 수치 모의 자료를 비교함으로써 실제 투기에 따른 오염확산 모델링의 정확도를 평가하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 해수유동

금회 수치모의에서는 2차원 모드(2-D Circulation)에 의해 계산을 수행하였으며 연직적으로 적분된 기본 방정식은 다음과 같다. 모드분리(Simans(1974), Madala and Piacsek(1977))로 알려진 이 기법은 속도와 열역학적 특성의 3차원 계산으로부터 개별적으로 속도수송을 풀어버림으로써 계산시간에 있어서 조금의 손실도 없이 자유 수면승강을 계산한다.

외부모드 방정식의 체적수송은 깊이에 대한 내부모드 방정식을 적분하는 것으로 얻어진다. 그것에 의하여 모든 연직구조는 제거되어 진다.

외부 모드와 내부모드의 지배방정식은 (x, y, z, t)에서 (x\*, y\*, σ, t\*)로 변형된다. 여기서,  $x^* = x, y^* = y, \sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta}, t^* = t$ 이다.  $\sigma = -1$ 에서  $\sigma = 0$  까지 연속방정식을 적분하고 경계조건(w(0)=w(-1)=0)을 사용하여 다음과 같이 수면변위에 대한 방정식을 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial y} - f\bar{V}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - D\bar{F}_x \quad (2)$$

$$= -\overline{wu}(0) + \overline{wu}(-1) - \frac{\partial \bar{D}U'^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{D}U'V'}{\partial y}$$

$$- \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' d\sigma$$

$$+ \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial x} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \sigma' \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma d\sigma'$$

$$\frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} + f\bar{U}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - D\bar{F}_y \quad (3)$$

$$= -\overline{wv}(0) + \overline{wv}(-1) - \frac{\partial \bar{D}U'V'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{D}V'^2}{\partial y}$$

$$- \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' d\sigma$$

$$+ \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial y} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \sigma' \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma d\sigma'$$

여기서,  $D = H + \eta$ 이고, 연직적분된 속도는 다음과 같이 정의된다.

$$(\bar{U}, \bar{V}) \equiv \int_{-1}^0 (U, V) d\sigma \quad (4)$$

바람응력 성분은  $-\overline{wu}(0), -\overline{wv}(0)$ 이고, 저면응력 성분은  $\overline{wu}(-1), \overline{wv}(-1)$ 이다.

$U'^2, U'V', V'^2$ 을 포함하는 식(2), (3)의 항들은 연직적분(평균)속도로부터 출발한 속도의 외적의 연직 평균으로 표현된다. 그리고 그것은 종종 분산항을 나타내기도 한다. 이와 같이

$$(\overline{U'^2}, \overline{U'V'}, \overline{V'^2}) = \int_{-1}^0 (U'^2, U'V', V'^2) d\sigma \quad (5)$$

여기서,  $(U', V') = (U - \bar{U}, V - \bar{V})$ 이다.

$\bar{F}_x, \bar{F}_y$ 의 양은 수평운동량 확산의 연직적분이고 다음과 같이 정의된다.

$$D\bar{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} (2A_M \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} A_M (\frac{\partial \bar{U}D}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial x}) \quad (6)$$

$$D\bar{F}_y = \frac{\partial}{\partial y} (2A_M \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} A_M (\frac{\partial \bar{U}D}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial x}) \quad (7)$$

계산방법은 조석운동을 푸는 단시간 단계를 포함하는 천해파 방정식(1), (2), (3)을 외부모드를 이용하여 방정식을 푸는 것이다. 외부모드 해는 시간에 고정된 식(2), (3)의 오른쪽 항을 얻을 수 있고 큰 시간 스텝 후, 100차수 후에 내부모드 계산이 수행된다.

수치 모델 적용시 수평 와동 점성 계수로 상수 값을 사용하기도 하나, 아래 식과 같이 격자 크기와 유속장을 수평와동 점성계수에 관련시킨 Smagorinsky type diffusivity가 보다 발전적이다(한국해양연구소, 1993).

$$A_M = c \Delta x \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2} \quad (8)$$

여기서, c : 무차원 상수

$\Delta x, \Delta y$  : x-방향과 y-방향의 격자 크기

본 수치 모델링에서는 수평와동 점성계수로 Smagorinsky type diffusivity에 수심 적분으로 인한 분산 효과(dispersion effect)를 고려하여 사용하였으며, 수평 난류 확산 계수는 수평와동 점성계수와 같은 값을 사용하였다.

격자구성은 엇갈림 격자(staggered grid)에 속하는 Arakawa C-grid를 이용하였으며, 기본방정식은 flux-conservative form으로 표현하여서 방정식을 차분화할 때 질량과 에너지 보존에 유의하였고, 차분화 방법으로는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용함으로써 질량과 부피 보존이 잘 되게 하였다. 수면경사를 반음해법으로, 수평 확산항을 CS(Centered Space) 방법으로 해석하였고, 시간에 대하여는 leapfrog scheme을 사용하였다. 운동방정식 이류항은 CS법으로 해석하였고, 물질 보존 방정식 이류항은 BS(Backward Space)법으로 해석하였다.

시간미분항을 차분화하는데 three-time level scheme인 leapfrog scheme을 이용하면 Coriolis항을 처리하는데 유리하지만 각 time step마다 physical mode와 computational mode를 형성하는 time-step splitting이 생긴다. Time-step splitting

으로 인한 불안정성을 제거하기 위해 Euler-backward scheme(Blumberg, 1977; Wang and Kravitz, 1980)이나 weak time filter(Blumberg and Mellor, 1987)를 적용한다.

본 모델링에서의 수치해는 각 time step(n)마다 아래 식(Asselin, 1972)을 이용하여 평활화(smooth) 되었다.

$$T_s^n = T^n + \frac{\alpha}{2}(T^{n+1} - 2T^n + T_s^{n-1}) \quad (9)$$

여기서, T: unsmoothed numerical solution

Ts: smoothed solution

$\alpha=0.05$

수심 적분된 기본 방정식에서 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 수치 안정 조건은 다음과 같다(Blumberg and Mellor, 1987).

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_i} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (10)$$

여기서,  $C_i = 2\sqrt{gH} + U_{\max}$

$U_{\max}$ : 최대 수심평균 속도

모델링에서 바람 응력의 효과는 고려하지 않았고, 해수 유동장에 대한 초기조건은 해수 유동이 없는 것(cold start)으로 설정하였다.

해수 유동의 폐경계 조건으로 육지 경계면을 가로지르는 유량은 없다고 하였고, 저면 마찰은 Manning의 마찰 계수를 이용한 quadratic stress law를 사용하였다.

$$\vec{\tau} = C_D \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U} \quad (11)$$

여기서,  $C_D = gn^2 \Delta z^{-1/3}$

n: Manning의 마찰 계수

$\Delta z$ : bottom layer thickness

(수심 적분된 경우는 total 수심)

조위의 개방 경계 조건으로 개방경계면에 위치한 관측자료를 이용하여 외해측 개방 경계에서 M2, S2, K1, O1 분조에 의한 조위 변화를 관측 자료에 근거하여 시·공간 함수로 주었다.

조류의 개방 경계 조건은 다음과 같이 처리하였다. 개방 경계에 수직(normal)한 속도 성분은, 모델 영역 외부의 속도 성분을 필요로 하는 이류항(advective term)과 수평 와동항(horizontal eddy viscosity term)을 무시하고 운동 방정식을 풀어 구하였다. 개방 경계에 접한(tangential) 속도 성분은, 흐름이 모델 영역 외부로부터 내부를 향할 때는 내부 값과 같은 값으로 처리하였고, 흐름이 모델 영역 내부로부터 외부로 향할 때는 아래 식에 의해 구하였다.

$$\frac{\partial U_t}{\partial t} + U_n \frac{\partial U_t}{\partial x_n} = 0 \quad (12)$$

여기서,  $U_t$ : 개방 경계에 접한(tangential) 속도 성분

$U_n$ : 개방 경계에 수직(normal)한 속도 성분

$x_n$ : 개방 경계에 수직(normal)한 좌표(coordinate)

## 2.2 준설물 투기 확산

사용된 부유사 퇴적모델은 세립 퇴적물의 부유(suspension), 이류(advection), 침전(settling), 재부유(resuspension) 등을 고려하여 퇴적·침식과 부유사 확산

변화를 계산한다. 세립퇴적물 이동의 기본 방정식은 다음과 같은 2차원 질량 보존식이다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \quad (13)$$

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( h D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( h D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{h}$$

여기서,  $C$ : 수심평균농도 ( $g/m^3$ )

$u, v$ : 수심평균유속 ( $m/s$ )

$D_x, D_y$ : 분산계수 ( $m^2/s$ )

$h$ : 수심 ( $m$ )

$S_i$ :  $i$  점에서의 소멸항/생성항 ( $g/m^2/s$ )

부유사의 침강 및 재부유는 저면전단응력( $\tau$ ,  $N/m^2$ )의 함수이다.

$$\tau = \rho g h J \quad (14)$$

여기서,  $\rho$ : 해수 밀도( $kg/m^3$ )

$g$ : 중력가속도( $m/s^2$ )

$J$ : 에너지 경사

$$J = \frac{u^2 + v^2}{k^2 h^{4/3}} = \frac{u^2 + v^2}{Ch^2 h^2}$$

여기서,  $u, v$ :  $x, y$  방향의 유속( $m/s$ )

$k$ : Strickler 조도계수( $m^{1/3}/s$ )

$Ch$ : Chezy 조도계수( $m^{1/2}/s$ )

부유사의 퇴적은 평균유속이 저면으로부터의 입자부상에 필요한 허용속도보다 충분히 적고 즉각적인 재부유 없이 저면에 있을 때 일어난다. 퇴적률(Deposition Rate)  $D$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D = \frac{W_s C}{h_*} \left[ \frac{\tau}{\tau_{cd}} - 1 \right], \tau \leq \tau_{cd} \quad (15)$$

여기서,  $W_s$ : 침강속도( $m/s$ )

$h_*$ : 입자가 침강하는 평균깊이

$\tau$ : 저면전단응력( $N/m^2$ )

$\tau_{cd}$ : 퇴적에 대한 한계 저면전단응력( $N/m^2$ )

점착성 표사(저니)의 침식에 대한 저항은 개개입자의 물에 잠긴 중량 뿐 아니라 침식이 시작하기 전에 전단응력을 극복한 입자상호간의 전기화학적 결합에 의해 배제되는 것에 의존한다. 침식률(Erosion Rate)  $E$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$E = - \frac{M}{h} \left[ \frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right], \tau \geq \tau_{ce} \quad (16)$$

여기서,  $M$ : 침식상수

$\tau_{ce}$ : 침식에 대한 한계 저면전단응력( $N/m^2$ )

침식상수는 표사의 형태, 압밀, 염분 등에 의존한다.  $M$ 에 대한 일반적인 표현은 없기 때문에 모델 모의과정에서 보정계수로서 종종 사용된다.  $\tau_{ce}$ 는  $0.5N/m^2$ 로 입력하였다. 확산계수  $k$ 에 대한 방향성분들은 유선방향 좌표로부터  $x-y$  직교좌표로 좌표변환함으로써 구하는데, 유선 방향 즉, 흐름방향( $\xi$ )과 이에 직각인 방향( $\eta$ )으로 표시하면 다음과 같다.

$$k_{11} = \epsilon_{\zeta} \cos^2 \theta + \epsilon_{\eta} \sin^2 \theta \quad (17)$$

$$k_{12} = (\epsilon_{\zeta} - \epsilon_{\eta}) \cos \theta \sin \theta$$

$$k_{22} = \epsilon_{\zeta} \sin^2 \theta + \epsilon_{\eta} \cos^2 \theta$$

여기서,  $\epsilon_{\zeta}$ 와  $\epsilon_{\eta}$ 는 흐름방향과 이에 직각방향의 혼합계수이고,  $\theta$ 는 x축으로부터  $\zeta$ 축까지의 각도(반시계방향 +)이다.  $\epsilon_{\zeta}$ 와  $\epsilon_{\eta}$ 는 평균류 특성으로부터 다음과 같은 Elder식에 의하여 구하여진다(Elder, 1959).

$$\epsilon_{\zeta} = e_L U_* h, \quad \epsilon_{\eta} = e_T U_* h \quad (18)$$

여기서,  $e_L$ ,  $e_T$ : 각각 흐름방향과 직각방향의 무차원계수(Elder 실험에 의하면 각각 5.93, 0.23)

### 3. 해양환경 조사

#### 3.1 파랑

단주기 파랑에 대한 부산 파랑관측자료분석 보고서(해양환경청)의 부산항 조도 외해측에서의 1980년부터 1982년까지 3년간의 파랑관측성공에 의하며, 연간 파고 0.5m 이상의 파랑 출현율은 25.1%(정온율 74.9%)이며, 0.5~0.9m의 파고 출현율은 8.3%, 1.0~1.9m는 6.1%, 2.0~2.9m는 0.7%(연 9회)이며 3.0m 이상의 파고는 나타나지 않았다. 파향은 E파향이 15.9%로서 최대 파향이고 SE파향은 9.2%이다. 주기는 4.0~9.9sec 사이에 걸쳐 분포하는데 주로 6.0~7.9sec의 주기가 9.9%이며 8.0~9.9sec에 3.9%로 분포하고 있다.

#### 3.2 조석

가덕도의 조석형태수는 0.15이며, 반일주조가 우세한 혼합조형으로서 매일 두 고·저조가 나타나는 것으로 조사되었다. 일조부등은 현저하지 않으며, 심한 날이라도 1일 2회의 규칙적인 승강을 하고, 최고고저는 여름철에는 야간에, 겨울철에는 주간에 일어나며, 평균해면은 2~3월이 가장 낮고, 8~9월이 가장 높게 일어난다.

1999년도에 측정·분석된 본 해역의 대조차, 평균조차 및 소조차는 각각 161.0cm, 110.8cm 및 60.6cm서 22년 전 1978년도의 166.0cm, 113.4cm, 60.8cm에 비교할 때 특별히 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

본 해역의 약최고고조위, 대조평균 및 소조평균고조위는 각각 185.6cm, 173.3cm 및 123.1cm며 20년전에 비해 약 2cm 전후로 하강한 것으로 나타났다.

#### 3.4 조류

2005년 12월부터 2006년 11월까지 부산신항 준설토 외해투기시 투기해역에 대한 수질조사와 동시에 관측된 조류 관측 자료에 의하면 최강 유속은 50cm/sec 내외를 보이고 있으며, 조석시기에 따른 유속차는 거의 나타나지 않고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 준설토 투기해역의 투기지점인 ST-5를 중심으로 한 조류 및 부유사 관측위치는 Table 1에 제시하였다.

Table 1 조류 및 부유사 관측지점 위치

Station	N	E
ST. 1	34°50' 32"	128°01' 20"
ST. 2	34°50' 32"	128°02' 00"
ST. 3	34°50' 32"	128°02' 40"
ST. 4	34°50' 00"	128°01' 20"
ST. 5	34°50' 00"	128°02' 00"
ST. 6	34°50' 00"	128°02' 40"
ST. 7	34°49' 28"	128°01' 20"
ST. 8	34°49' 28"	128°02' 00"
ST. 9	34°49' 28"	128°02' 40"

#### 3.3 부유사

05년 12월, 06년 3월과 6월에 가장 큰 부유사 농도분포를 보이며 이 시기를 제외하고는 10mg/L 이하의 값을 보이고 있다. 또한, 저층과 표층의 농도차이는 크게 나타나지 않고 있는 것은 해수의 수직적 순환이 잘 이루어지고 있다는 것을 의미하며, 조류 관측결과와 유사하게 조석시기에 따른 부유사 농도 차이는 나타나지 않고 있다.

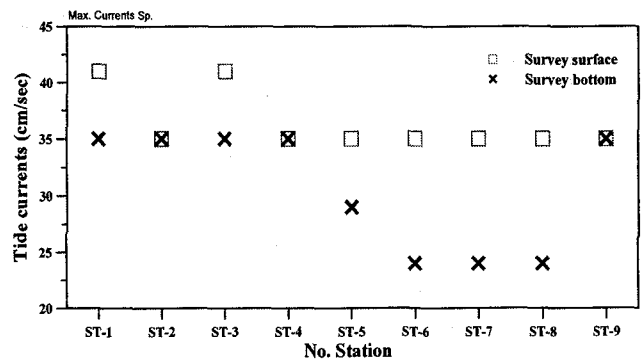


Fig. 1 Results of tide current survey (surface, bottom)

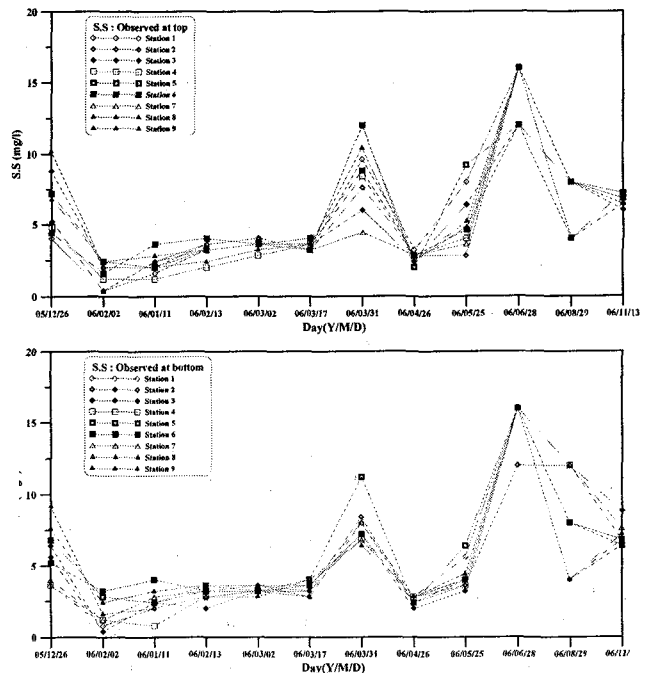


Fig. 2 Results of SS survey (surface, bottom)

## 4. 수치 모의

### 4.1 실험 개요

본 연구에서는 투기 해역의 해황을 재현하기 위하여 거제도 동부와 서부산을 포함하고 외해역으로는 약 30~40km까지 영역을 확장하여 수치실험시 경계의 영향이 없도록 영역을 구축하였다. 또한, 투기 해역 부근을 50m 격자로 구성하여(53km × 37.3km) 해상도를 높였으며, 대,중,소조기가 포함되는 15일 동안에 걸쳐 수치모의를 수행하였다. Table 2에 개략적인 해수유동 실험의 개요를 정리하였다. 계산영역의 격자망도 및 수심도는 Fig. 3에 제시하였다.

준설토 투기로 인한 확산실험은 부산신항 개발사업 환경영향평가지 사용한 투기량(13,916m<sup>3</sup>/day)을 근거로 하여 SS발생량을 산정하였으며, 제 입력자료는 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Summary of model simulation set up

구분	내용	
해수유동	계산영역	거제도 동부, 서부산을 포함한 일대 해역 (70.0km×35.0km)
	격자체계	338 × 267 (90,246개) ΔS=50,100,200,400,800,1600m 가변격자
	조건	15일간(M2+S2+K1+O1), n(마찰계수) : 0.023
부유사 확산	SS발생량	13,916m <sup>3</sup> /day × 39.6kg/m <sup>3</sup> = 45,922.93kg/hr
	부유사	초기·경계부유사 농도 - 5mg/L
	침강속도	1.25mm/sec

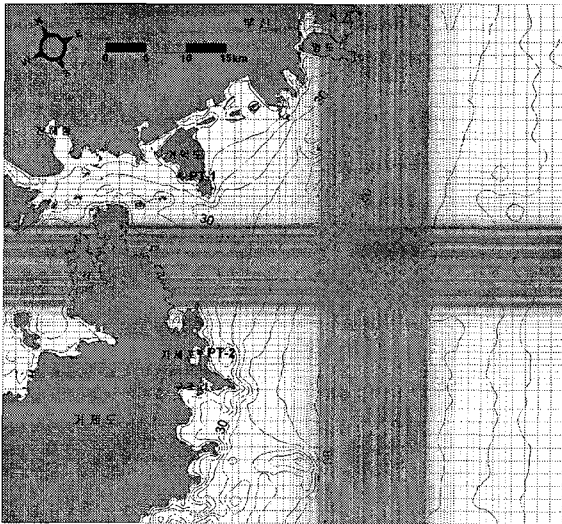


Fig. 3 Grids and bathymetric chart

### 4.2 모형 검증

검증을 위하여 지세포(PT-1), 가덕도(PT-2)에서 조위검증을 실시하였으며, 투기 해역에서의 조류관측 자료를 바탕으로 최강유속 비교 검증을 실시하였다. 조위검증곡선은 Fig. 4에, 최강유속 비교는 Fig. 5에 제시하였다.

보정된 조위값은 96% 이상, 조류속 비교를 통한 검증은 72% 이상 정확도를 보이고 있다. 관측 조류속이 약한 것은 관측시기가 대조와 중조 사이에 위치했기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에 최강 창·낙조시 유속을 나타내었다. 낙조시의 유속이 창조시에 비해 다소 우세한 것으로 나타나고 있다.

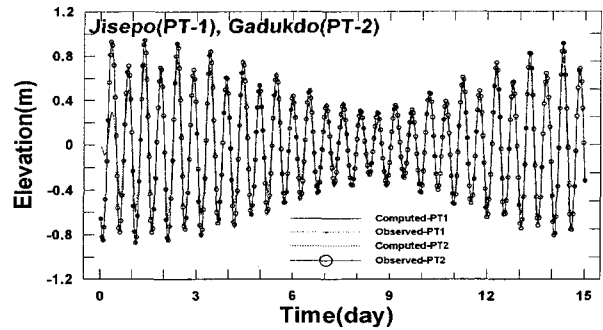


Fig. 4 Calibration of tide elevation (PT-1, 2)

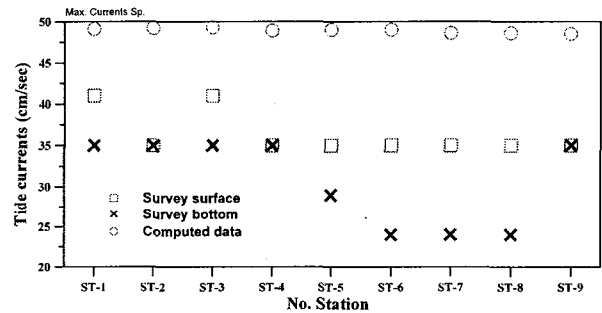


Fig. 5 Comparison of max. velocity on ST-1~9 point.

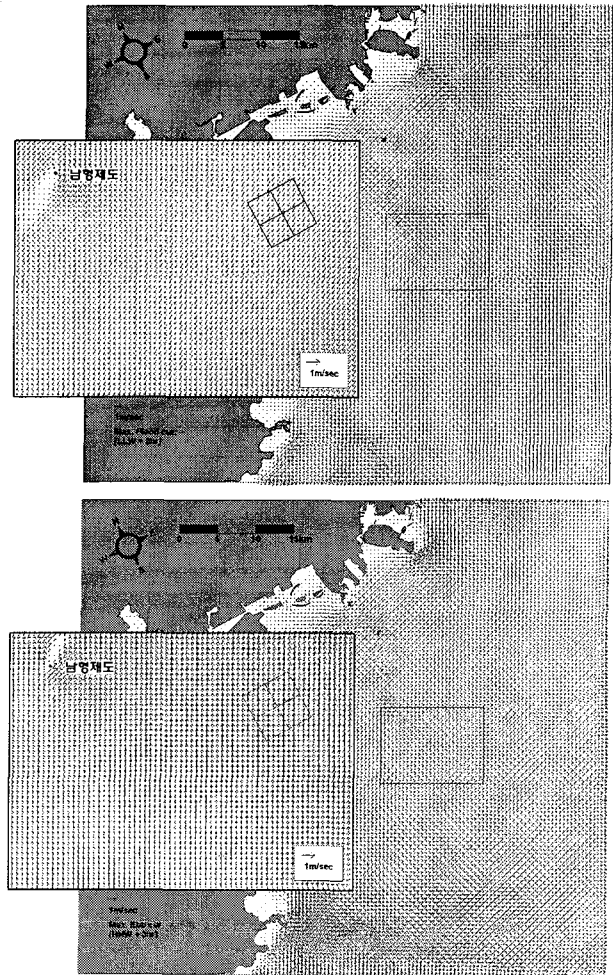


Fig. 6 Maximum flood and ebb currents

### 4.3 SS확산 수치모의

대,중,소조기를 포함하는 15일 동안 수치모의를 수행하였으며, 출력되는 결과에서 최대 확산범위는 계산시간 동안 각 격자에서 최대치를 추출한 것으로서 이는 동일시간대에 발생한 것은 아니며 해당격자에서 나타날 수 있는 최대농도를 의미한다 (Fig. 7). 결과에서 보는 바와 같이, 확산양상은 창·낙조류와 전류시의 방향으로 확산되고 있으며, 5mg/L 등농도곡선을 기준으로 확산면적은 284.02km<sup>2</sup>, 점원에서 최대 확산거리는 동쪽으로는 13.89km, 남쪽으로는 11.89km까지로 창조시의 조류에 의한 영향이 다소 크게 나타나고 있다.

실제 투기해역에 준설토 투기 후 6, 12시간이 지난 시점에서의 부유사 측정치와 수치모의 결과를 비교한 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 그림에서와 같이, 실제 투기시 순간방출되지만 수치실험시 투기시 연속방출되는 점을 고려하면 농도분포의 양상은 어느 정도는 유사하게 나타나고 있지만 농도값은 상이한 결과를 보이고 있다.

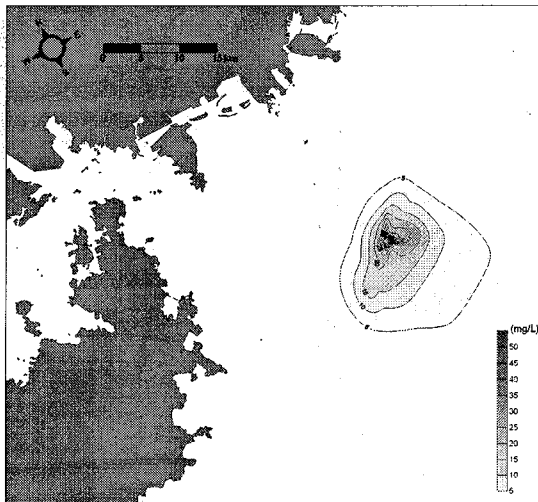


Fig. 7 Maximum diffusion distribution(mg/L)

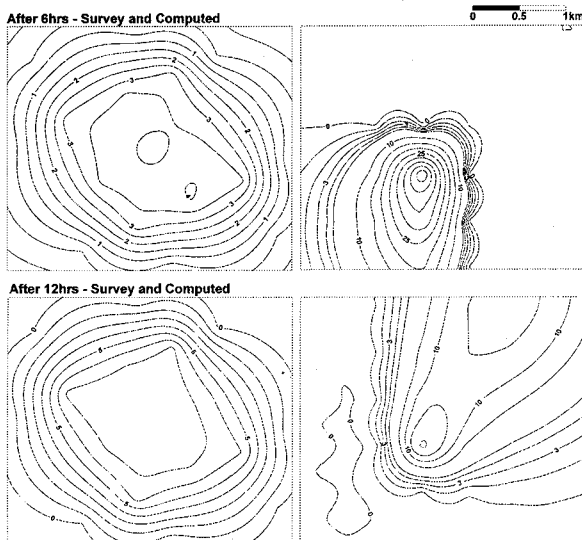


Fig. 8 Comparison of diffusion between survey and simulation

### 5. 결 론

본 연구에서는 4대분조인 M2, S2, K1, O1을 고려한 15일 간의 해수유동 수치모의 결과를 바탕으로 준설토의 외해투기로 인한 외해에서의 부유사 확산양상을 수치모의하였다.

구축된 부유사 확산 모형의 검증은 기존 모형의 안정성에 의지하였으나, 모델러의 실험 운용에 따라 결과는 크게 상이할 수 있다는 점에서 실제 확산시 자료를 통한 검증은 매우 드물고 의미깊은 연구라 생각된다.

본 연구에서 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 투기해역에서의 대조기시 최강 조류속은 30-50cm/sec 이내의 분포를 나타내고 있으며, 낙조류의 영향이 창조류에 비하여 다소 우세하게 나타나고 있으며 부유사 농도의 공간적 분포는 표·저층간의 큰 차이를 나타내지 않아 혼합기작이 비교적 잘 일어나는 것으로 나타났다.
2. 준설토 투기 후 시간에 따른 부유사 농도 관측성과와 수치실험 성과를 비교한 결과, 확산양상은 유사하지만 농도값은 상이한 결과값을 보이고 있다. 즉, 외해역에서의 확산양상은 조류와 같은 외력보다는 수심의 영향이 탁월하게 나타나고 있다.
4. SS 최대확산 결과, 창조시 조류의 영향이 다소 크게 나타나고 있다.

### 참고 문헌

- [1] 김태인 (2002), 금강하구의 해수유동과 퇴적과정, 성균관대학교 박사학위 논문, pp. 114-135.
- [2] 한국환경정책·평가연구원 (2003), 해수유동 및 부유사확산 예측기법 개선에 관한 연구, p. 198.
- [3] 해양수산부 (1997), 부산신항 개발사업 환경영향평가서, pp. 139-172.
- [4] Blumberg, A.F. (1977), Numerical model of estuarine circulation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 103(HY3), pp. 295-310.
- [5] Blumberg, A. F., and G. L. Mellor (1987), "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coastal Model", Vol.4, edited by N. Heaps, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- [6] Elder, J.W., 1959, The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, Jour. of Fluid Mechanics, 5, pp. 544-560.
- [7] Madala, R. V. and S. A. Piacsek (1977), "A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans", J. Comput. Phys., 23, pp. 167-178.
- [8] Simans, T. J. (1974), "Verification of numerical models of Lake Ontario, Part I. Circulation in spring and early summer", J. Phy. Oceanogr., 4, pp. 507-523.
- [9] Wang, D. and D.W. Kravitz (1980), A semi-implicit two-dimensional model of estuarine circulation. Journal of Physical Oceanography, 10(3): pp. 441-454.