

온산 항만 시스템에서 조류와 수질 변화 시뮬레이션

김소연* · 박석순**

국립환경연구원 수질연구부 수질화학과*, 이화여자대학교 환경공학과**

Simulation of Tidal Flow and Water Quality in Onsan Harbor System

Kim, So-Yeon* · Park, Seok-Soon**

Water Pollution Chemistry Division, Water Quality Research Department
National Institute of Environmental Research*

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University**

Abstract

Tidal flow and water quality were simulated in this paper to assess environmental impact caused by pier construction projects in Onsan harbor system. The Surfacewater Modeling System (SMS) was applied to the Onsan harbor system, where coastal reclamation and dredging were planned to build the piers. A finite element mesh was constructed and refined to cover the complicated geometry of the Onsan harbor and the proposed reclamation area. The time variable change of tidal height at harbor inlet was given as an input condition to tidal simulation. The water quality simulation was based on the discharge rate of suspended solids at the reclamation area. The simulation results have shown reasonable agreements with real situations in both tidal flow and water quality. According to the proposed plan, tidal flow and water quality were predicted during and after the pier construction. The tidal simulation study showed that there would be no discernible change of tidal current in the harbor except for the dredged area. The water quality simulation, however, predicted that suspended solids would increase significantly near the reclaimed and dredged areas during construction.

Keywords: Pier Construction, Coastal Reclamation, Tidal Flow, Water Quality, Simulation

I. 서론

항만에서 부두건설과 같은 개발사업이 이루어지면 매립이나 준설과 같은 토목공사가 수반된

다. 이러한 항만 토목공사는 해안선과 해저지형을 변화시켜 항내 조석조류와 수질 변화를 유발하게 된다. 특히 해안지형이 복잡한 항만이나 하구에서는 변화정도가 크게 나타나며 방파제나 선

박 접안 시설과 같은 항내 구조물을 축조할 경우에도 조석조류 변화가 야기된다. 조석조류 현상의 변화는 해양 수질과 생물상에 영향을 줄 뿐만 아니라 인접한 육지에 이르기까지 커다란 피해를 유발할 수가 있다¹⁷⁾. 창조시 해수를 육지로 범람하게 하거나 퇴적이나 침식조건을 변화시킬 수도 있으며 오염물질이 외해로 확산되는 과정을 방해하고 해양생물의 서식조건을 악화시켜 부근 해역의 어업에 피해를 유발할 수도 있다. 또한 해안공사 과정에서 유출되는 토사나 항만 이용시에 배출되는 폐수 등이 항내수질과 생태계를 변화시킬 수 있다. 따라서 조석조류와 수질변화를 사전에 예측하고 이를 최소화하는 방안이 강구되어야 한다¹⁾.

조석조류와 수질변화를 예측하는 방법으로 축소모형 실험과 컴퓨터 시뮬레이션이 일반적으로 사용된다. 축소모형 실험은 현장을 재현하는데 많은 경비와 시간이 소모되며 예측에 한계가 있다³⁾. 반면에 컴퓨터 시뮬레이션은 대상해역의 지형과 조류 그리고 수질특성에 적합하게 모델을 개발할 경우 예측력이 높기 때문에 현재 널리 이용되고 있다⁹⁾.

지금까지 여러 가지 형태의 컴퓨터 시뮬레이션 모델이 개발되어 왔으며 이러한 모델은 대부분 유한차분법(Finite Difference Method) 또는 유한요소법(Finite Element Method) 그리고 유한구획법(Finite Segment Method)에 기초하고 있다. 유한차분법은 대상 수체를 동일한 크기로 분할하여 수체이동을 비교적 정밀하게 예측할 수 있으나 많은 계산시간을 요하는 단점이 있다^{11),13),14)}. 해안선이나 해저 지형이 복잡한 항만에서는 계산 격자를 매우 세밀하게 분할해야 하기 때문에 오랜 계산시간이 소모되며 그에 따른 수치오차(Numerical Error)도 매우 크게 나타나게 된다. 유한요소법은 수체 지형의 특성에 따라 불규칙하게 분할하기 때문에 유한차분법에 비하여 계산요소의 수와 계산시간을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다^{18),19)}. 유

한구획법은 유한요소법과 같이 수체를 지형에 따라 불규칙하게 분할하여 계산시간을 줄일 수 있는 장점이 있으나 수체흐름의 방향과 속도를 정확하게 예측하지 못하는 단점이 있다^{7),8),16)}.

본 연구는 미국 공병단(United States Army Corps of Engineers)에서 유한요소법으로 개발한 RMA-2와 RMA-4 모델과 입력자료 작성 및 모델 결과 표현을 위해 개발한 SMS(Surface Water Modeling System)을 이용하여 온산항에서 시행될 부두건설에 따른 조석조류 및 수질변화를 시뮬레이션하였다. 항내 매립과 준설이 이루어질 때 나타나는 조위·조속변화와 공사시 유출되는 토사가 조석조류현상에 따라 이동 확산되는 범위와 농도분포를 예측하였다.

II. 연구 대상

본 연구 대상인 온산항은 울산시 울주군 온산읍에 위치하고 있으며 외항강의 하구로 이루어져 있다. 과거 온산항은 외해로 열려있어 파고가 비교적 높았으나, 1978년과 1979년에 각각 완공된 남방파제와 북방파제로 인하여 항내 수체가 정체성을 나타내고 있다(그림 1). 온산항의 항내 해수면적은 약 45 Km²이고 수심은 평균해면(MSL: Mean Sea Level)을 기준으로 4.5 - 18.0 m로 변화하며 평균 8.5 m이다. 외항강 입구에는 하천으로부터 유입되는 토사가 퇴적되어 수심이 비교적 얕으나, 부두의 공사에 따른 항로 준설에 의해 수심이 12 m 이상을 유지하는 곳이 많다. 현재 항내 해수면의 일부가 매립되어 공장부지로 사용되고 있으며 공단으로의 물량 수송을 위해 일반 하역부두와 돌핀식 부두가 항내에 설치되어 있다. 설치된 대부분의 부두 및 접안시설은 사업별 전용부두이다.

온산항의 조석 현상은 온산항과 유사하며 대조차는 49.6 cm, 평균조차 34.5 cm, 소조차 19.6 cm로 동해안의 전형적인 조석 특성을 나타내고 있

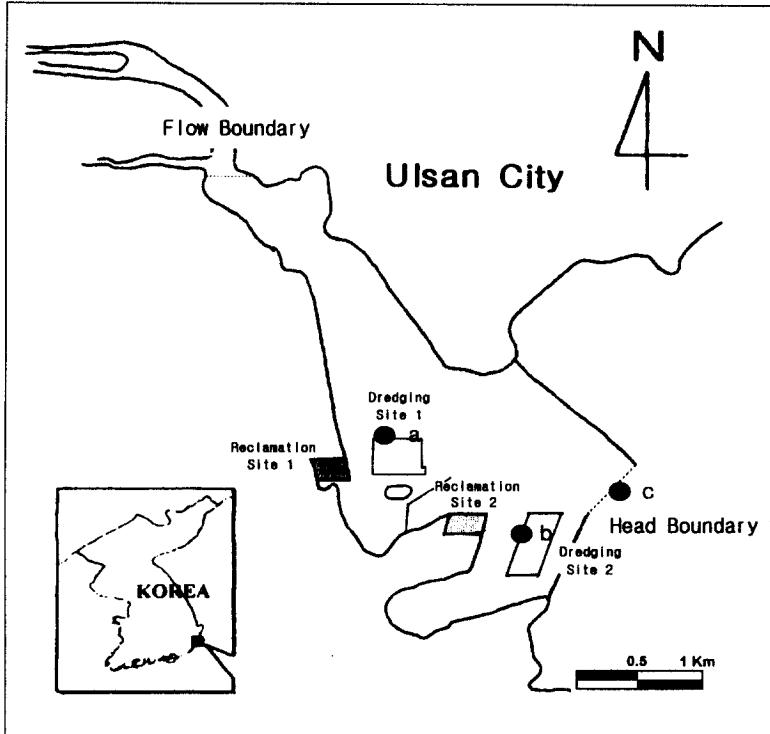


그림 1. 온산항의 모델 경계 및 공사지역

다. 매일 2회의 간조와 만조가 나타나며 일조부등이 비교적 심한 편이다.

III. 모델 원리

본 연구에 사용된 SMS 모델은 미공병단에서 하구나 항만에서 매립이나 항로 준설이 이루어질 때 야기되는 조석조류변화와 수질변화를 예측하기 위하여 개발한 모델로, 조석조류 시뮬레이션을 위한 RMA-2와 수질변화 예측을 위한 RMA-4로 구성되어 있다(그림 2). RMA-4의 수질 시뮬레이션을 위한 수체이동 자료는 RMA-2 결과를 이용할 수 있도록 프로그램되어 있다^{18),19)}. RMA-2는 물질수지(Mass Balance)원리에 바탕을 둔 연속방정식(Continuity Equation)과 운동량 수지(Momentum Balance)원리에 기초한 운동방정식(Equation of Motion)을 유한요소법으로 동시에

풀이한 2차원 모델이다. 연속방정식에서 2차원계에 시간에 따른 수위 변화는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 x는 x축상 거리 [L], u는 x축 방향의 수심 수평 유속 [L/T], y는 y축상 거리 [L], v는 y축 방향의 수심 수평 유속 [L/T], h는 수심 [L], 그리고 t는 시간 [T]이다.

운동방정식은 x와 y 방향으로 다음 두 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - \\ \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) - \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

여기서, g는 중력 가속도 [L/T²], a₀는 수위 [L], ρ는 수체 밀도 [M/L³], ε_{xx}는 x축 방향으로의 normal turbulent 교환계수 [M/(TL)], ε_{xy}는 x축 방향으로의 tangential turbulent 교환계수 [M/(TL)], ε_{yx}는 y축 방향으로의 tangential turbulent 교환계수 [M/(TL)], ε_{yy}는 y축 방향으로의 normal turbulent 교환계수 [M/(TL)], 그리고 C는 Manning 계수로 계산될 수 있는 Chezy 조도계수이다 [L^{2/3}/T].

RMA-2는 위의 식들을 Galerkin Weighted Residuals을 이용한 유한요소법으로 계산하고 경계조건을 정상상태(Steady-State) 또는 동적인 상태(Dynamic State)의 수위나 수량 변화로 주어질 수 있도록 프로그램되어 항만이나 하구의 조석조류 변화 뿐만 아니라 하천이나 수심이 얇은 호수에서도 수체이동 방향과 크기를 시뮬레이션할 수

있다¹⁰⁾.

RMA-4는 RMA-2의 조석조류 변화 시뮬레이션 결과에 기초하여 오염 부하량과 위치, 그리고 중력에 의한 침강 등을 고려하여 시간에 따른 항내 수질 분포를 예측할 수 있다. RMA-4의 해를 구하는 기본식은 2차원적 운반 및 확산식 (Advection-Dispersion equation)으로 다음과 같다.

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \sigma + kc \right) = 0 \dots\dots (4)$$

여기서 c는 오염물질의 농도 [M/L³], D_x와 D_y는 각각 x축, y축 방향으로의 확산계수 [L²/T], σ는 오염물질의 발생또는 소멸원 [M/(TL²)], 그리고 k는 오염물질의 사멸계수[1/T]이다.

IV. 모델 적용

본 연구는 온산항내에서 대형 선박 정박과 부두 축조를 위하여 준설과 매립공사가 이루어질 경우를 가정하여 실시하였다. 연구대상 해역을

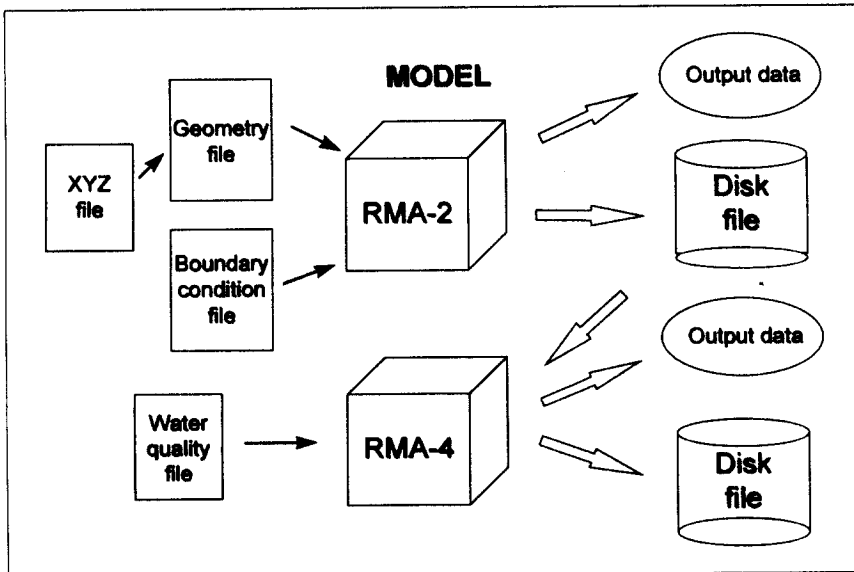


그림 2. SMS 모델 개요

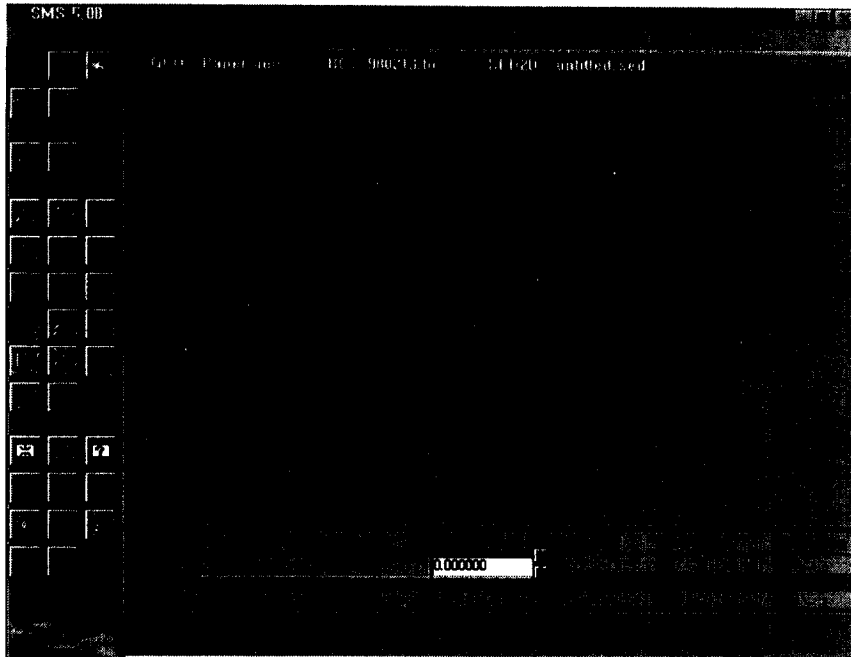


그림 3. SMS에서 대상해역 격자 구성 화면

유한 요소법 원리에 적합하게 382개의 node와 114개의 element로 구성하였다(그림 3). 지형과 조위 변화 자료는 해양수산부에서 발행한 해도와 조위 자료를 이용하였으며, 수심은 기준면으로부터의 높이로 환산하여 입력하였다²⁾. 경계조건은 담수가 유입되는 외항강 부근에 담수 유입량과 해수가 유입되는 외항 방파제 부근의 수위변화로 설정하였다. 외항강에서 유입되는 유황은 저수기시로 가정하였다⁴⁾. 해수가 유입되는 외항 방파제 부근의 수위변화는 온산항에 가장 인접한 이진리에서 관측된 조위도와 조위분석결과를 이용하였다. 해저면의 거칠기를 나타내는 Manning 계수는 본 해역에 적절한 0.016으로 하였으며 Turbulent exchange 계수는 해수에 일반적으로 사용되는 $9000N \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ 으로 하였다⁵⁾.

항내 준설 및 매립공사가 동시에 이루어진 후에 나타나는 조류조석변화와 수질변화를 시뮬레이션하기 위하여 그림 1에 제시한 $364,000\text{m}^3$ (site

1), $186,276\text{m}^3$ (site 2)의 준설과 준설토 처분을 위해 $33,223\text{m}^2$ (site 1), $21,052\text{m}^2$ (site 2)의 해역에 매립이 이루어지는 것으로 가정하여 지형입력자료를 작성하였다. 공사규모와 공사시 유출 토사량은 <표 1>에 제시하였고 부하량 산정과정은 보고서⁶⁾에 제시되어 있다.

V. 결과 및 고찰

모델을 이용하여 항내 준설과 매립공사가 이루어졌을 때 나타날 수 있는 조석조류변화와 수질변화를 예측하였다. 일반적으로 항내 조류현황은 벡터의 크기와 방향으로 표현되나, 본 해역은 유속이 느리고 정온도가 높은 해역이기 때문에 방향과 크기를 함께 표현할 경우 매립전후의 변화를 구분하기가 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 이를 분리하여 <그림 4>에 각각 조류의 방향과 크기를 제시하였다. 창조시 대부분의 해역에서

표 1. Site 별 공사규모와 토사 유출량

공사형태	지점	공사용량(m ³)	공사일수(일/개월)	원단위(ton/m ³)	유출 토사량(kg/hr)
준설	site 1	364,000	200/10	0.025	5,687.5
	site 2	186,276	240/12	0.025	2,425.5
매립	site 1	364,000	200/10	0.00831	1,890.5
	site 2	102,762	240/12	0.00831	444.8

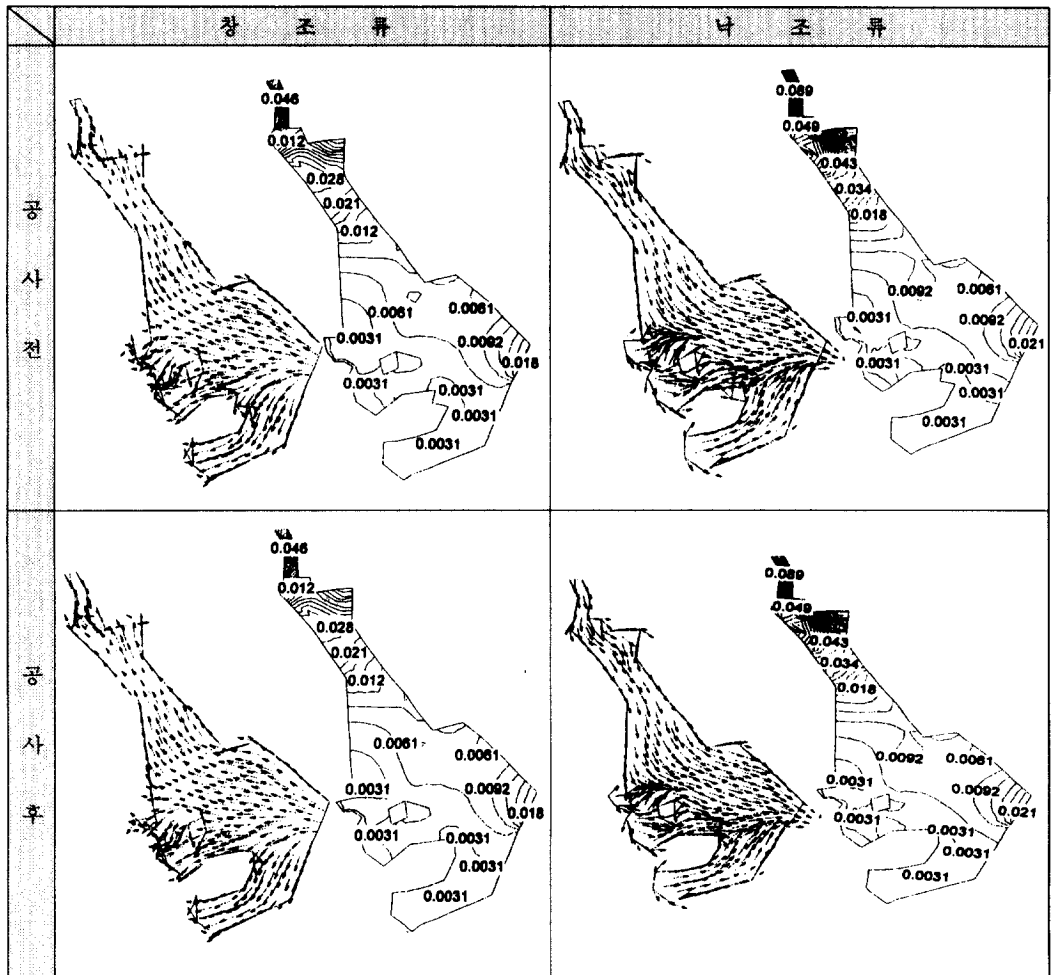


그림 4. 공사 전·후의 조류 방향 및 조류속의 세기 (단위 : m/s)

0.01 m/sec 이하의 조속을 나타내나, 외항강 부근과 외해로 빠져나가는 방파제 근해에서는 최고 0.04-0.02 m/sec의 조속을 보이고 있다. 낙조시 역시 대부분 해역에서 0.01 m/sec 이하의 조속을 나

타내나, 외항강 부근과 방파제 부근에서만 최고 0.089-0.02 m/sec의 빠른 조속을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 공사로 인한 조류의 방향의 변화는 거의 나타나지 않는 것으로 예측되었고, 항

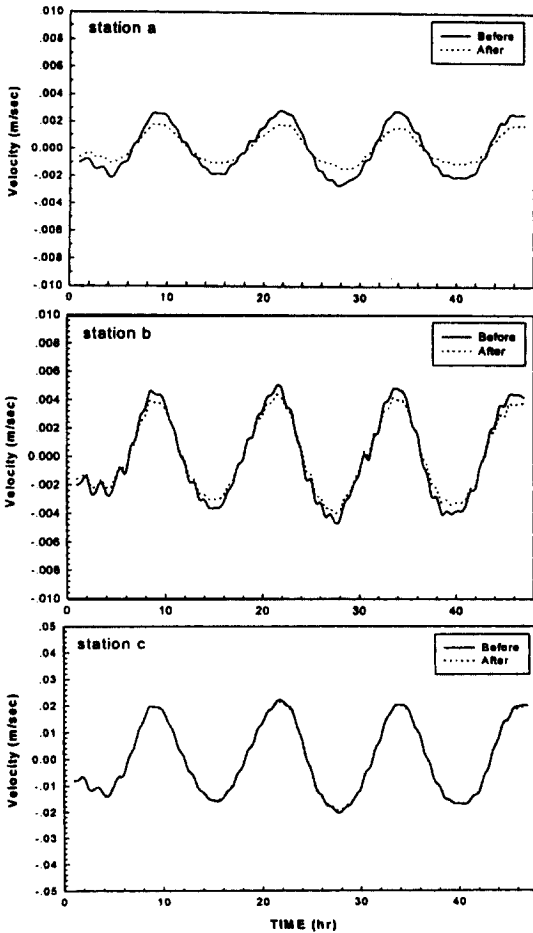


그림 5. 대상해역에서의 사업에 따른 조류속 변화

내 조류속 역시 창·낙조 모두 거의 변화가 없는 것으로 예측되었다. 좀 더 자세한 조류속 변화를 살펴보기 위해서 <그림 1>에 제시된 사업지구 근해의 특정 지점에서 시간에 따른 조류속 변화를 <그림 5>에 제시하였다. 그림에서 보듯이 준설 site 1에서는 약 $-0.05 \sim 0.05$ cm/sec의 조류속변화를 나타내고 있고, 준설 site 2에서는 약 $-0.02 \sim 0.03$ cm/sec의 조류속변화를 나타내고 있으나, 방파제 부근에서는 거의 조류속 변화가 없는 것으로 예측되었다. 따라서, 항내 준설공사 지점에서만 공사로 인해 미미한 조류속 변화를 나타내고

항외에는 거의 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다. 이는 항내 수체부피에 비해 준설량과 매립면적이 좁고 매립이 해안선과 평행하게 이루어지기 때문이라고 사료된다.

<그림 6>은 준설과 매립공사시 토사유출로 인한 주변해역의 수질변화를 보여주는 그림으로 만조시 공사를 시작한 경우의 창, 낙조시와 간조시 공사를 시작한 경우의 창, 낙조시 부유물질 농도변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 만조시 공사를 시작한 경우와 간조시 공사를 시작한 경우 모두 비슷한 농도변화를 보인다. 이는 온산항의 조위차가 크지 않기 때문이라고 판단된다. 공사시작후 4시간 경과시에는 site 1의 준설과 매립공사로 인하여 해안선에서 750 m까지 부유물질 농도가 약 10 mg/l이상 증가되고 site 2의 준설과 매립공사로 인하여 공사지점 반경 약 150 m까지 5 mg/l이상의 농도 증가를 나타낸다. 공사시작후 8시간 경과시에는 해안선으로부터 약 900 m까지 10 mg/l, 반경 300 m까지 5 mg/l이상의 농도 증가를 나타낸다. 서로 인접해 있는 준설과 매립 공사로 인해 유출된 토사의 확산범위는 중첩되어 공사 지점 근해의 높은 부유물질 농도 증가를 나타내나, 다소 거리가 있는 site 1과 site 2의 공사로 인해 유출된 토사의 확산범위는 서로 중첩되지 않는 것으로 나타났다.

본 연구 대상 해역인 온산항은 항내 섬이 위치하고 방파제가 설치되어 매우 복잡한 해안 지형을 형성하고 있으며 외항강으로부터 연속적인 담수 유입이 이루어지고 있는 곳이다. 본 연구에서 사용된 유한요소법은 계산 격자를 불규칙한 형태로 분할하여 지형을 표현할 수 있기 때문에 유한차분법에 비해 계산 시간을 크게 줄일 수 있었다. 특히 논문(5,15)에서 기술하였듯이 유한요소법은 복잡한 지형에서 나타나는 조석조류 현상을 방향과 속도에 이르기까지 매우 정밀하게 시뮬레이션할 수 있다.

본 연구에서 시도한 토사확산 현상도 비교적

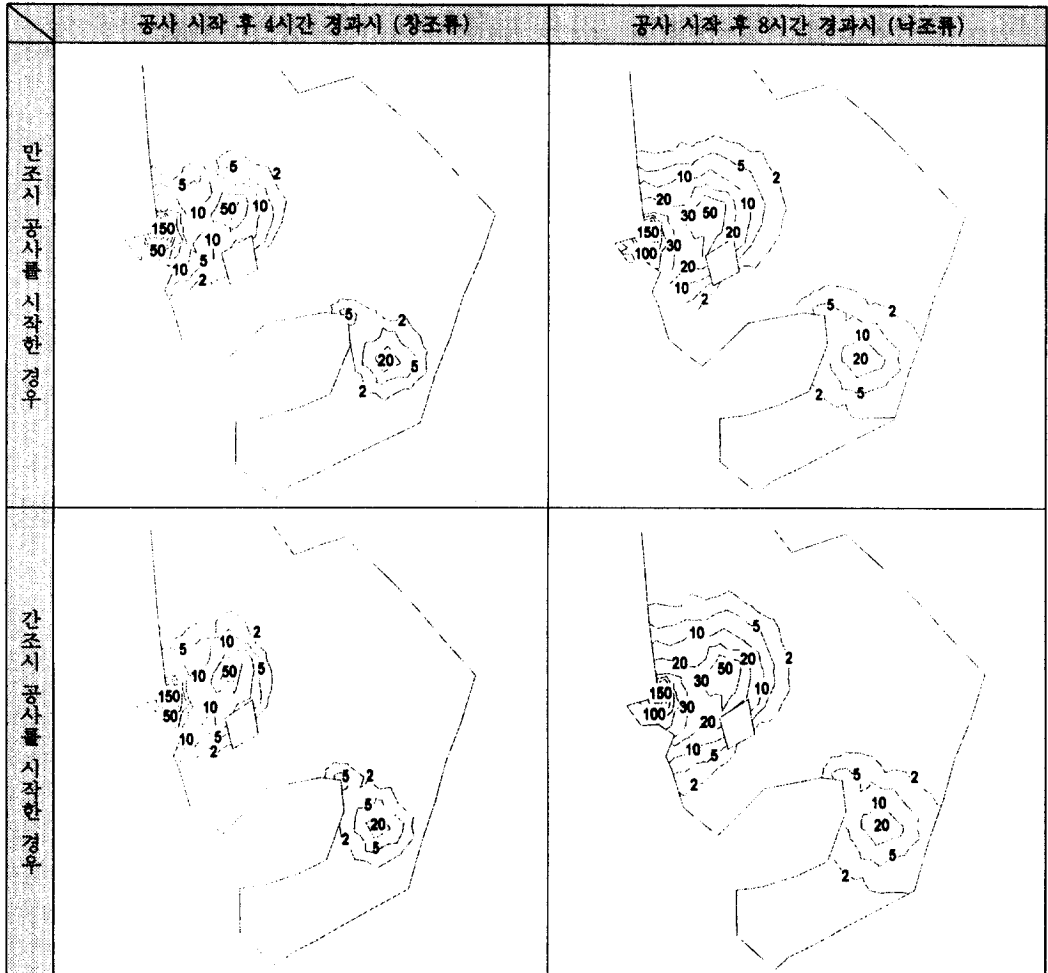


그림 6. 준설·매립 공사시 부유물질 농도 분포 (mg/l)

적절히 시뮬레이션할 수 있었다. 유한구획법은 배출지점 부근에서 나타나는 수질분포를 계산구획내 평균농도로 제시되는 반면 본연구에서 사용한 유한요소법은 비교적 세밀한 등농도 곡선으로 예측할 수 있었다¹²⁾. 또한 SMS는 기존에 사용되어온 모델이 비해 입력자료 구성과 예측결과 표현에 사용되는 시간을 크게 줄일 수 있었다. 조류의 속도와 방향을 정밀하게 예측할 수 있는 것은 유한요소법이 유한구획법에 비해 갖는 큰 장점이나, 수질의 경우 유기물이나 토사 확산과 같이 단일반응 물질만 고려할 수 있기 때문에 해안의 적

조현상이나 영양염류 변화 등을 예측할 수 없다. 본 연구에서 대상으로 한 해안지형이 복잡한 항만에서 매립에 따른 조석조류 변화와 토사확산을 예측하기 위해서는 유한요소법이 가장 적합한 것으로 사료된다.

VI. 결론

본 연구는 항만 부두건설사업에 따른 조석조류와 수질 변화를 SMS 모델을 이용하여 예측하였다. 매립을 가정하여 지형조건을 구성하였으며

모델계수와 경계조건은 매립전과 동일하게 유지하였다. 시뮬레이션 결과, 준설공사 지점에서만 수심의 변화로 인해 미미한 조류속 변화를 나타내고, 항외에는 거의 영향을 미치지 못할 것으로 예측되었다. 이는 항내 수체 부피에 비해 준설량과 매립면적이 좁고 매립이 해안선과 평행하게 이루어지기 때문이라고 사료된다. 그리고 서로 인접해 있는 준설과 매립공사로 인해 유출되는 토사의 확산범위는 중첩되어 공사지점 근해의 높은 부유물질 농도 증가를 나타내나, 다소 거리가 있는 site 1과 site 2의 공사로 인해 유출되는 토사의 확산범위는 중첩되지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 많은 량의 토사유출로 인하여 항내 수질이 악화될 우려가 있으며 이는 해양생물상에 피해를 유발하고 퇴적하여 항내 수심을 변화시킬 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서, 해역에서 이러한 사업이 시행되기 위해서는 옹탁방지막과 같은 적절한 토사유출 방지 대책이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에 사용된 모델은 유한요소법에 기초하여 개발되어 복잡한 해안지형을 표현하는데 적합하였으며, 컴퓨터 화면에 결과를 제시하여 해안공사에 따른 변화정도를 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있었다. 해역에서 나타나는 조속의 분포와 농도 분포를 2차원 평면에 등농도 곡선으로 표현할 수 있어 공사 전후에 나타나는 조속분포와 공사시 유출되는 토사의 확산 분포를 나타내는데 매우 적합하였다.

사 사

본 연구는 (주)쌍용엔지니어링 연구지원의 일부로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강 현, 박석순, 이무춘 외, 1996, 「환경영향평가」, 동화기술.
2. 해양수산부, 1996, 온산항 해도 No. 119.
3. 군산시, 1993, 군산해상도시건설 계획용역 수리모형실험 보고서.
4. 고려석유화학주식회사, 1997, 「온산항 전용부두 축조 및 배후지 조성공사에 따른 환경영향평가」.
5. 박석순, 박재우, 1996, “해안 매립에 따른 항내 조류변화 예측”, 「환경영향평가학회지」 5(1): 31-45.
6. 쌍용정유 주식회사, 1997, 「신규 4만DWT 부두 2선좌 건설사업 환경영향평가서」.
7. Ambrose, R.B., 1988, WASP4, A Hydrodynamic and water quality model: model theory, user's manual and programmer's guide, US EPA/600/3-87/039.
8. Feigner, K.D. and Harris, H.S., 1970, Documentation report FWQA dynamic estuary model, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.
9. Fischer, H.B, List, E.J, Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., 1979, Mixing in inland and coastal water, Academic Press, New York, NY.
10. Heltzel, S.B. and Granat, M.A., 1988, Lower James River circulation study, Virginia, evaluation of Craney Island enlargement alternatives, Technical Report HL-88-8, Waterway Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.
11. Leedertse, J.J., Alexander, R.C., and Liu, S-K., 1973, A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: Volume 1, principles of computation, R-1417-OWRR, The Rand Corporation, Santa Monica, CA.
12. Najjar, K.F., Park, S.S., and Uchirn, C.G., 1995, “A water quality management model for the lakes bay estuarine embayment 1: receiving water quality model”, J. Environ. Sci. Health,

- A30(5):1025-1038.
13. Oey, L.Y., Mellor, G.L., and Hires, R.I., 1985, "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part I: description of the model and model simulations", J. Phys. Oceanogr, 15:1676-1692.
 14. Oey, L.Y., Mellor, G.L., and Hires, R.I., 1985, "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part II: comparison with observation", J. Phys. Oceanogr, 14:629-645.
 15. Park, J.W. and Park, S.S., 1998, "Hydrodynamic modeling of tidal changes due to land reclamation in an open-ended harbor, Pusan, Korea", J. Environ. Sci. Health, A33(5):877-890.
 16. Park, S.S., Najjar, K.F., and Uchrin, C.G., 1995, "A water quality management model for the lakes bay estuarine embayment 2: hydrodynamic tidal model", J. Environ. Sci. Health, A30(5):1025-1038.
 17. Richards, D.R., 1988, New Haven Harbor numerical model study, Technical Report HL-88-24, Waterway Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.
 18. US Army Corps of Engineers, 1990, Generalized computer program system for open-channel flow and sedimentation TABS system: Volume 1, general overview, Vicksburg, MS.
 19. US Army Corps of Engineers, 1990, Generalized computer program system for open-channel flow and sedimentation TABS system: Volume 2, user's manual, Vicksburg, MS.