

BSPE9853G-10081-1

# 점착성 퇴적물 이동 수치모의 실험

Simulation study of cohesive sediment transport

2012. 1

한국해양연구원



# 제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “점착성 퇴적물 이동 수치모의 실험” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2012년 1월 30일

총괄연구책임자 : 권 재 일

참 여 연 구 원 : 전 기 천    정 진 용    최 정 운  
                                      최 진 용

# 요 약 문

## I. 제목

점착성 퇴적물 이동 수치모의 실험

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 우리나라 주요 연안역에서의 점착성 퇴적물 이동에 대한 연구를 위한 기초 연구로서 점착성 퇴적물이 풍부한 남해나 서해에 수치모형을 수립하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.
- 연안역 개발에 따른 국지적인 항로매몰 현상은 선박의 안전운항을 위협하고, 지속적인 준설작업으로 인한 막대한 경비를 부담해야 하며, 또한 경우에 따라 과도한 침식/퇴적으로 해안선지형 변화를 유발하기도 한다.
- 우리나라 서·남해안은 점착성 퇴적물이 많이 분포하고 있으며, 크고 작은 항구와 부대 항만시설이 많아 부유사 이동의 변화가 큰 악기상, 집중호우 및 태풍 내습시 변동 특성을 이해하는 것이 중요하다.
- 점착성 퇴적물은 사질성 퇴적물과는 달리 강한 점착성으로 인해 여러 가지 독성 오염물질과 쉽게 결합하고 이동·퇴적되어 수질오염을 비롯한 부영양화, 빈산소 또는 무산소 환경을 유발할 수 있다.
- 점착성 퇴적물은 침강속도가 매우 느려 상대적으로 해수에 떠있는 시간이 길어 해저바닥에 부착하여 생활하는 수중식물의 광합성을 방해하여 이들의 생존을 위협하고 이를 기반으로 구성된 생태계를 파괴할 수 도 있다.
- 우리나라의 연안역은 간척사업과 같은 대규모 개발로 인해 인근 연안역의 해수 유동변화를 초래하고, 이는 점착성 퇴적물의 이동양상의 변화를 유발하여 해저지형과 해안선의 변화는 물론 해양생태계에도 지속적으로 영향을 미치고 있다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

- MOHID 수치모델을 이용한 우리나라 서해안에 점착성 퇴적물 이동 수치모델의 수립
- 점착성 퇴적물 수치모델에 핵심 변수 (erosion/deposition rates, settling velocity, mud layer 등)의 최적 모수화를 적용하고, 악기상, 집중호우 및 태풍과 같은 급격한 변화에 따른 변동 특성을 파악
- 또한, 향후 핵심 변수의 현장관측기기의 중·장기 모니터링을 위한 최신 기술 동향의 분석 및 연구방법 개선책을 수립

### IV. 연구개발 결과

- 서해안 곰소만에 MOHID를 이용한 점착성 퇴적물 이동 수치모델을 수립하고, 핵심변수의 최적화 연구를 수행하였다.
- 국토해양부 연구개발 과제로 수행중인 “운용해양(해양예보) 시스템 연구”와 연동한 실시간 부유사 이동예측모델 수립에 적용할 수 있는 기반을 마련하였다.

### V. 연구개발결과의 활용계획

- 현재 수행중인 “운용해양(해양예보)시스템 연구”와 연계하여 필요한 자료수집의 효율화 및 중·장기 계획
- 국토해양부에서 수행중인 4대강 살리기 사업과 연계한 해저지형 및 해안선 변동 관련 연구로의 발전
- 기후변화에 따른 지구온난화로 해수면상승으로 인한 연안역의 해수유동 및 부유사 이동 변동 특성연구의 사전연구로 활용 가능함
- 정지궤도 위성 및 원격탐사 자료의 활용
- 부유사 입자 크기에 따른 정지궤도 해색위성의 부유사 농도 상관관계 연구 및 부유사 알고리즘 개발
- 집중 호우시 하천 discharge에 따른 fresh water plume 거동 연구
- 우리나라 연안역의 임계퇴적 전단응력 분포 특성 파악연구

# SUMMARY and KEYWORDS

## I . Title of the Study

Simulation study of cohesive sediment transports

## II . Objectives and Significance

The objectives of this study is to set-up a cohesive sediment transport model on the western coast of Korea Peninsula where the cohesive sediments are abundant.

The significance of cohesive sediment transport study are 1) the accumulation of fine cohesive sediments can hinder navigation in channels and harbors and bring in contaminants (e.g., heavy metals, insecticides, petroleum by-products, and radio-nuclides). Cohesive sediment can remain in suspension for a long time, and it may damp light penetration and reduce the thickness of the euphotic zone. Consequently, it may limit primary productivity and may prohibit submerged aquatic vegetation (SAV) growth.

## III. Contents and Scope

The content and the scope of study are as follows:

- Establishment of a cohesive sediment transport model on the western coast of Korea Peninsula using MOHID
- Explore the major key parameters in cohesive sediment transport such as erosion/deposition rate, settling velocity, mud layer) and found the characteristics of sediment behavior during sever weather condition such as typhoon period.
- Establishments of state-of-the-art measurements in cohesive sediment properties for mid- and long-term observation plan and research methods.

#### **IV. Results**

- A cohesive sediment transport model for Gomso Bay is established and the sensitivity of major key parameters are examined.
- A basic foundation is established to link with "Korea Operational Oceanographic System" funded by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

#### **V. Applications and Recommendation**

- An established cohesive sediment transport model for Gomso Bay can be used daily prediction in cooperation with KOOS (Korea Operational Oceanographic System).
- Further research topics related with this study are 1) the application of GOCI data and its calibration, 2) the effect of particle size distribution on the GOCI data and development of suspended sediment algorithm for GOCI, 3) fresh water plume behavior study by heavy river discharge, and 5) the spatial and temporal variation of critical shear stress for erosion in Korean coastal waters.

#### **VI. Keywords**

- cohesive sediment transport, erosion rate, deposition rate, settling velocity, Gomso bay, MOHID

# CONTENTS

|  |      |
|--|------|
| Summary and Keywords .....   | iii  |
| Contents .....   | v    |
| List of Figures .....  | vii  |
| List of Tables .....   | viii |
| <br>   |      |
| Chapter 1. Introduction .....  | 1    |
| Section 1. Objective and the necessity of study .....  | 1    |
| <br>   |      |
| Chapter 2. Review of research progress and development .....                                     | 3    |
| Section 1. Domestic progress and development .....   | 3    |
| Section 2. International progress and development .....  | 3    |
| <br>   |      |
| Chapter 3. Contents and results of study .....   | 5    |
| Section 1. Establishment of a cohesive sediment transport model .....                            | 5    |
| Section 2. Results .....   | 13   |
| <br>   |      |
| Chapter 4. Attainment degree of research goal and contribution degree<br>for related field ..... | 21   |
| Section 1. Attainment degree of research and development .....                                   | 21   |
| Section 2. Contribution degree for related field .....   | 22   |
| <br>   |      |
| Chapter 5. Application and utilization plan of study results .....                               | 23   |
| Section 1. Further research topics .....   | 23   |
| <br>   |      |
| Chapter 6. References .....  | 26   |



# 목 차

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 요약문 .....                        | i    |
| Summary and Keywords .....       | iii  |
| Contents .....                   | v    |
| 목차 .....                         | vi   |
| List of Figures .....            | vii  |
| List of Tables .....             | viii |
| <br>                             |      |
| 제 1 장 연구개발 과제 개요 .....           | 1    |
| 제 1 절 연구개발 목적 및 필요성 .....        | 1    |
| <br>                             |      |
| 제 2 장 국내의 기술개발 현황 .....          | 3    |
| 제 1 절 국내 기술개발 현황 .....           | 3    |
| 제 2 절 국외 기술개발 현황 .....           | 3    |
| <br>                             |      |
| 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....      | 5    |
| 제 1 절 짐착성 퇴적물 이동모델 수립            |      |
| 1. 수치모델 .....                    | 5    |
| 제 2 절 연구결과 .....                 | 13   |
| <br>                             |      |
| 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도 ..... | 21   |
| 제 1 절 연구개발 목표 달성도 .....          | 21   |
| 제 2 절 대외 기여도 .....               | 21   |
| <br>                             |      |
| 제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 .....        | 23   |
| 제 1 절 향후 연구과제 도출 .....           | 23   |
| <br>                             |      |
| 제 6 장 참고문헌 .....                 | 26   |

# List of Figures

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1 Finite volume element of MOHID model .....  | 7  |
| Fig. 2 Numerical model domain. Level 1(L1) in left panel and Level 2 (L2, blue box) and Level 3 (L3, red box) are in right panel .....                   | 8  |
| Fig. 3 Sediment model simulation domain (L3) with bathymetry. ....   | 8  |
| Fig. 4 Tidal calibration at Wido and YoungKwang. ....  | 9  |
| Fig. 5 Gomso Bay with measurement locations (from Lee, 2010) .....   | 10 |
| Fig. 6 Current comparison at GS2. Observation (upper panel, from Lee 2010) and model (lower panel) .....   | 10 |
| Fig. 7 Time series of suspended sediment concentration at GS2 (from Lee, 2010) ..  | 13 |
| Fig. 8 Suspended sediment concentration simulation result from reference run. ....   | 14 |
| Fig. 9 Suspended sediment concentration simulation result from case 1. ....  | 15 |
| Fig. 10 Suspended sediment concentration simulation result from case 2. ....   | 15 |
| Fig. 11 Suspended sediment concentration simulation result from case 3. ....   | 16 |
| Fig. 12 Suspended sediment concentration simulation result from case 4. ....   | 17 |
| Fig. 13 Suspended sediment concentration simulation result from case 5. ....   | 17 |
| Fig. 14 Suspended sediment concentration simulation result from case 6. ....   | 18 |
| Fig. 15 Suspended sediment concentration simulation result from case 7. ....   | 19 |
| Fig. 16 Simulation result from case 7. Current (u-component) in upper panel and suspended sediment concentration (lower panel). ....                     | 19 |
| Fig. 17. Model calculated suspended sediment concentration contours of surface (upper panel) and bottom (lower panel) at Gomso bay based on case 7. .... | 20 |
| Fig. 18 The interface of fresh water plume with high turbidity and sea water (August 10, 2011 near Youngkwang) .....                                     | 24 |

# List of Tables

|   |    |
|---|----|
| Table 1 Numerical model domain information (coverage, horizontal cell number,<br>horizontal resolution) ..... | 9  |
| Table 2 Major sediment transport parameters in simulation study. ....   | 14 |

# 제 1 장 연구 개발 과제의 개요

## 제 1 절 연구개발 목적 및 필요성

### 1. 연구개발 목적

- 점착성 퇴적물 이동 수치모델의 수립 (서해안)
- 퇴적모델의 주요 인자(침강속도, 퇴적율)의 최적 모수화 산출
- 집중호우, 태풍과 같은 이벤트 전후의 점착성 퇴적물의 이동 및 변동 특성 파악

### 2. 연구개발 필요성

#### 가. 기술적 측면

- 연안역에서의 점착성 퇴적물의 이동은 수질오염, 양식장, 항만, 항로 유지와 해저지형 및 해안선 변화와 직결되어 해양환경에서 주시되고 있는 분야이다. 하지만, 점착성 퇴적물의 이동은 복잡한 물리-화학적 특성과 아울러 주요 프로세스를 차지하는 핵심 변수의 관측이 매우 어려우면서도 시·공간적으로 크게 변해 연구에 많은 어려움이 있다.
- 점착성 퇴적물 이동의 수치모델은 수 십 년간의 연구를 통해 지속적인 발전을 이루고 있으나, 주요 핵심 변수들 (erosion/deposition rates, settling velocity, mud layer 등)에 대한 실측자료의 확보와 지속적인 모니터링의 어려움으로 인해 우리나라에서는 단발적인 연구에 그치고 있다.
- 우리나라의 연안역은 간척사업과 같은 대규모 개발로 인해 인근 연안역의 해수 유동변화를 초래하고, 이는 점착성 퇴적물의 이동양상의 변화를 유발하여 해저 지형과 해안선의 변화는 물론 해양생태계에도 지속적으로 영향을 미치고 있다.

#### 나. 경제, 산업적 측면

- 연안역 개발에 따른 국지적인 항로매몰 현상은 선박의 안전운항을 위협하고, 지속적인 준설작업으로 인한 막대한 경비를 부담해야 하며, 또한 경우에 따라 과도한 침식/퇴적으로 해안선지형 변화를 유발하기도 한다.
- 우리나라 서·남해안은 점착성 퇴적물이 많이 분포하고 있으며, 크고 작은 항구와 부대 항만시설이 많아 부유사 이동의 변화가 큰 악기상, 집중호우 및 태풍 내습시

변동 특성을 이해하는 것이 중요하다.

- 점착성 퇴적물은 사질성 퇴적물과는 달리 강한 점착성으로 인해 여러 가지 독성 오염물질과 쉽게 결합하고 이동·퇴적되어 수질오염을 비롯한 부영양화, 빈산소 또는 무산소 환경을 유발할 수 있다.
- 점착성 퇴적물은 침강속도가 매우 느려 상대적으로 해수에 떠있는 시간이 많으며 이는, 해저바닥에 부착하여 생활하는 수중식물의 광합성을 방해하여 이들의 생존을 위협하고 이를 기반으로 구성된 생태계를 파괴할 수 도 있다.

다. 사회, 문화적 측면

- 고도 경제성장과 함께 질 높은 생활을 위한 여가활동의 범위가 점점 더 바다로 넓어지고 있어, 깨끗하고 안전한 연안관리가 필요하다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 기술개발 현황

- 각 해역에 따른 해수유동 모델은 대학, 연구기관, 용역사에 이르기까지 많은 곳에서 개발 및 적용하고 있으나, 부유사 이동 및 해저지형의 예측을 위한 수치모델의 기본 입력요소(침강속도, 침식율, 퇴적임계전단응력 등 실측자료)의 부족으로 인해 검·보정에 문제점이 있다.
- 한강 하구역, 새만금 해역 등 서해안에서 주로 연구가 수행된 바 있으며, 기본적인 부유사 농도 관측과 실험실에서 시행할 수 있는 몇몇 주요 핵심변수에 대한 일부 연구결과가 있다.
- 하지만, 실제 가장 중요한 현장에서의 주요 핵심변수에 대한 관측은 거의 찾기 힘들며, 특히 하계 집중호우, 태풍 및 악기상시의 특정지역에서의 연구는 단발성 연구에 국한되어 있다.

### 제 2 절 국외 기술개발 현황

- 유럽(영국과 네덜란드 중심)과 일본, 그리고 미국에서는 인구가 밀집한 하구역을 중심으로 점착성 퇴적물에 대한 지속적인 연구를 시행하여 방대한 실측자료 및 다양한 관측기기의 개발 및 활용연구가 활성화 되어 있으며, 이른 근거로 한 수치모델의 개발과 예측결과를 생산하고 있다.
- 연안역 개발에 앞선 환경영향평가 및 가상의 시나리오(해수면 상승 등)에 대비한 선도 연구가 최근 확산되고 있다.
- POM 모델이 일반에게 공개된 이래 3차원 연안 순환 및 확산 모델이 활성화되어 미국에서는 EFDC 모델이 EPA에서 연안환경 문제 적용을 위해 많이 지원되어 많은 발전을 이루고 있고 ECOM-SED 모델등 실용화 모델이 공개되고 있다. 유럽연합이 장기간에 걸쳐 개발한 COHERENS 모델이 미세퇴적물 이동뿐만 아니라 향후 연안 환경 더 나아가 생태 모델로 발전시킬 수 있는 기반을 마련되었다.

- 미국, 유럽, 일본 등은 사질 토사 이동 현상 연구와 예측 기술 개발을 위해 대규모 현장 실험을 여러 차례 실시하고 이를 바탕으로 이동 예측 모델의 개발, 적용 테스트 등 상당한 수준의 연구를 수행해왔다. 미국은 미육군 공병대 연안 연구소에서는 과거에 실험실 실험 등 많은 기초 연구를 수행하여 실험식 등으로 설계에 활용 정보를 많이 생산해 냈다. 그러나 근래에 와서는 기반 연구가 크게 줄어 기초 연구가 활발하지 못한 편이다.
- 유럽에서는 여러 연안 항만 관련 연구소들(Delft Hydraulics, DHI 등)은 여러 환경 요소 산출 모델과 퇴적물 이동 모델을 연결하여 해외 용역 및 소프트웨어 판매 등 산업화하고 있다. 유럽은 여러 연구소들이 공동으로 COSINUS 프로젝트를 장기간 수행하여 많은 현장 조사, 실험실 실험을 수행했고 최근에는 그 자료를 이용하여 3차원 미세 퇴적물 이동 모델의 적용 테스트를 수행하고 있다. 미세 점착성 퇴적물의 이동 추산 모델의 개발에 그동안 EU에서 COSINUS 사업 등에서 다년간 지원한 이래 사업이 완료된 이후에 투자를 계속하지 않아 연구가 활성화 되지 못하고 있다. 일본은 해안이 주로 사질 토사로 되어 있어 점착성 미세 퇴적물 연구의 수요가 적지만 동남아 지역 등 후진국에 항만 개발 지원을 위해 연구를 진행하고 있다.

# 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

## 제 1 절 점착성 퇴적물 이동모델 수립

### 1. 연구지역

본 연구에 있어 서해안에 위치한 곰소만이 연구지역으로 설정되었는데 가장 큰 이유는 최근 이 지역의 부유사 이동에 대한 관측결과를 제시한 논문 (Lee, 2010)을 최대한 활용하여 점착성 퇴적물 이동모델을 수립하기 위해서이다.

곰소만은 전라북도 고창군과 부안군을 경계로 서해에서 육지 쪽으로 길게 만입한 폭 7~9 km, 길이 약 20 km의 큰 만이다. 만의 남북 연안에는 비교적 높은 산들이 위치하고, 동쪽 연안에는 평탄한 산야 및 평야가 분포하며 만의 남측 중앙부로는 소규모 하천인 주진천이 유입된다. 곰소만의 만입구는 평균수심 6~8 m의 조하대로서 비교적 평탄한 지형을 보이고 있으며, 주조류로는 만 입구에서 곰소항까지 북쪽 해안을 따라 길게 발달하여 최대 수심이 약 18.5 m, 최대 폭은 약 900 m에 이른다. 곰소만의 조석은 일조부등이 거의 없는 1일 2회조로서 평균조차는 433.8 cm(대조차: 589.8 cm, 소조차: 277.8 cm)이고, 최대조차는 717.4 cm에 달한다 (국립지리원, 1981). 조류의 유속은 만 내의 주조류로에서 창조류가 115 cm/sec, 낙조류가 150 cm/sec로서 낙조류가 우세한 편이다(국립지리원, 1981). 또한, 곰소만 주변지역의 연 강수량은 약 1100 ~ 1300 mm로 대부분은 6월에서 8월 사이에 집중적으로 내린다. 바람의 경우 겨울철에는 20 m/s 에 달하는 강한 북서-북풍이 불고 여름철에는 일반적으로 약한 남-남서풍이 분다. 따라서 이에 영향을 받는 파고는 여름철에 1.5 m보다 낮지만 겨울철에는 보통 2 m를 넘고 태풍이 올 때 파고는 비정상적으로 높아지기도 한다.

곰소만은 대조차의 mixed energy 환경으로 외해의 파랑이 상대적으로 자유롭게 만안으로 들어올 수 있으므로 만안의 퇴적작용은 조석과 파랑의 영향을 함께 받게 된다 (Yang et al., 2007). 최근 곰소만은 조간대 면적의 약 10%가 매립에 의해 감소하였고, 해안선의 약 90%가 인공 해안선으로 바뀌었으며, 만의 북쪽에는 대규모의 새만금 방조제가 건설되는 등 만 내·외에 심각한 지형변화가 이루어지고 있다 (류상욱과 장진호, 2006). 2006년 곰소만의 표층퇴적물 분포 특성에 관한 연구 (장진호 등, 2007)에서는 1991년 내만역에서는 저조선에서 고조선 방향으로 실트질 모래-모래질



실트-실트로 육지쪽으로 점차 세립해지는 분포를 그리고 외만역에서는 실트-모래질 실트-실트질 모래-모래로 육지방향으로 조립해지는 복모드 분포를 보였으나, 2006년에는 만 입구에서 만 상부 쪽으로 모래 또는 실트질 모래-모래질 실트-실트로 육지방향으로 세립해드는 단모드 분포를 보여 퇴적상의 변화가 뚜렷하게 변화하였다고 보고하고 있다.

## 2. MOHID 모델

본 연구에서 사용된 모델은 포르투갈의 리스본 대학에서 개발한 MOHID (MOdelo HIDrodinamico) 모델이다. 원래 계획은 ROMS나 EFDC와 같은 수치모델로 연구를 수행하고 자 하였으나, 최근 MOHID 모델의 활용성이 점차 인정받고 있으며, 다른 연구사업에서 수행중인 연구결과를 향후 활용하기 위해서 MOHID 모델을 이용하게 되었다.

MOHID 모델은 연안과 하구역에 적용할 수 있는 다기능 3차원 수치해석 모델로 기본적으로 조석 및 해일과 같은 연안 · 하구역에서의 물리적 작용을 계산하며, 유체특성(수온, 염분 등), Eulerian 물질이동, Lagrangian 물질이동, turbulence, 퇴적물의 이동, 침식과 퇴적, 기상 및 파랑조건 고려, 수질 및 생태, 유류확산 등을 계산할 수 있는 60개 이상의 모듈로 구성되어 있으며, 동적결합(nesting) 기법을 적용하여 보다 정밀하게 관심지역의 해황을 재현할 수 있는 모델이다.

MOHID 모델은 수평적으로 직교 (cartesian) 또는 직교곡선 (orthogonal curvilinear) 격자체계를 사용하며, 수직적으로는 시그마와 직교좌표계를 개별 또는 혼합 사용할 수 있는 GVC (general vertical coordinate) 시스템의 적용이 가능하며, 공간적으로는 유한체적법 (finite volume method)을 사용하고, 시간적으로는 반음해 ADI (semi-implicit Alternate Direction Implicit) 알고리즘을 사용하여 계산상의 안정성 제약을 최소화 한다. 또한, 이동경계 처리가 가능하여 조간대가 넓게 분포한 우리나라의 지형에 필수적인 조간대 처리가 가능한 모델이다.

MOHID 모델은 공간적으로 격자검사체적 (cell control volume)을 이용하여 방정식을 차분하는 유한체적법을 사용한다. 검사체적  $\Omega$ 와 생성항  $Q$ 를 가지는 스칼라항  $U$ 에 대한 일반 보존법칙 (general conservation law)은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\partial_t \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_S \vec{F} d\vec{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 검사면  $S$ 를 통한 스칼라항의 플럭스(flux)이다. 식(1)로부터 다음과 같이  $\Omega_j$ 와  $U_j$ 를 얻을 수 있다.

$$\partial_t(U_j \Omega_j) + \sum_{\text{faces}} \vec{F} \cdot \vec{S} = Q_j \Omega_j \quad (2)$$

이 방법은 격자구조(cell geometry)와는 독립적으로 방정식을 계산하므로, 물리적 변수들과 격자구조를 분리하여 계산할 수 있게 해준다. 이러한 공간 좌표계의 독립성은 어떤 형태의 격자구조도 적용할 수 있도록 허용하므로, 모델은 수평적으로 직교나 직교곡선격자체계, 그리고 수직적으로 GVC 격자체계를

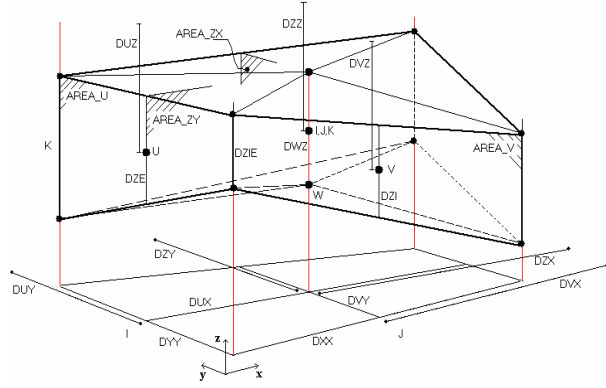


Fig. 1 Finite volume element of MOHID model

채택하여 계산의 효율성을 증대할 수 있다. Fig. 1은 모델에 적용된 유한차분요소를 나타낸 것이다.

MOHID 모델은 삼차원 비압축성 유체에 대한 방정식을 계산하며, 정수압은 부시네스크 (Boussinesq)와 레이놀드 (Reynolds) 근사를 가정한다. 직교좌표계에서 모델의  $x$ ,  $y$  방향의 운동방정식, 연속방정식, 정수압 방정식은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\partial_t u = -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p + \partial_x((\nu_H + \nu) \partial_x u) + \partial_y((\nu_H + \nu) \partial_y u) + \partial_z((\nu_t + \nu) \partial_z u) \quad (3)$$

$$\partial_t v = -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) - fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p + \partial_x((\nu_H + \nu) \partial_x v) + \partial_y((\nu_H + \nu) \partial_y v) + \partial_z((\nu_t + \nu) \partial_z v) \quad (4)$$

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (5)$$

$$\partial_z p + g\rho = 0 \quad (6)$$

### 3. 모델 수립

본 연구의 격자의 영역은 Fig. 2과 같이 구성한다. 수치 실험 영역은 총 3단계로 2차 nesting 으로 구성하였다. L1은 우리나라 서해안을 1/60° 격자 간격, L2는 1/360° 간격으로, L3는 1/1800° 간격으로 구성하였다(Fig. 2 and 3). 각 격자에 대한 내용은 Table 1에 상세히 기술하였다.

#### 1. 격자망 구성과 수심도

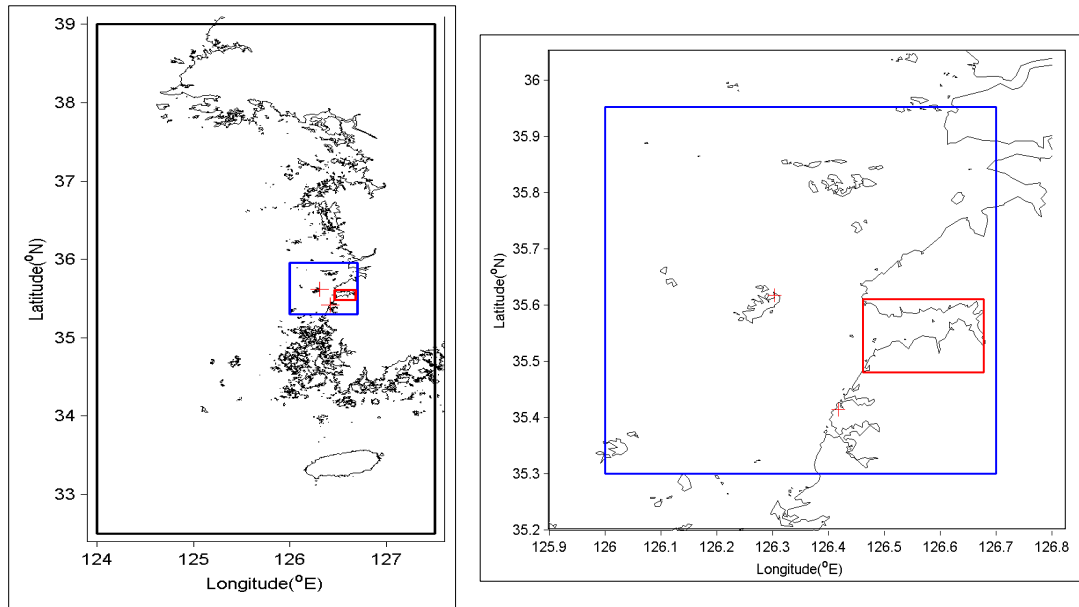


Fig. 2 Numerical model domain. Level 1(L1) in left panel and Level 2 (L2, blue box) and Level 3 (L3, red box) are in right panel

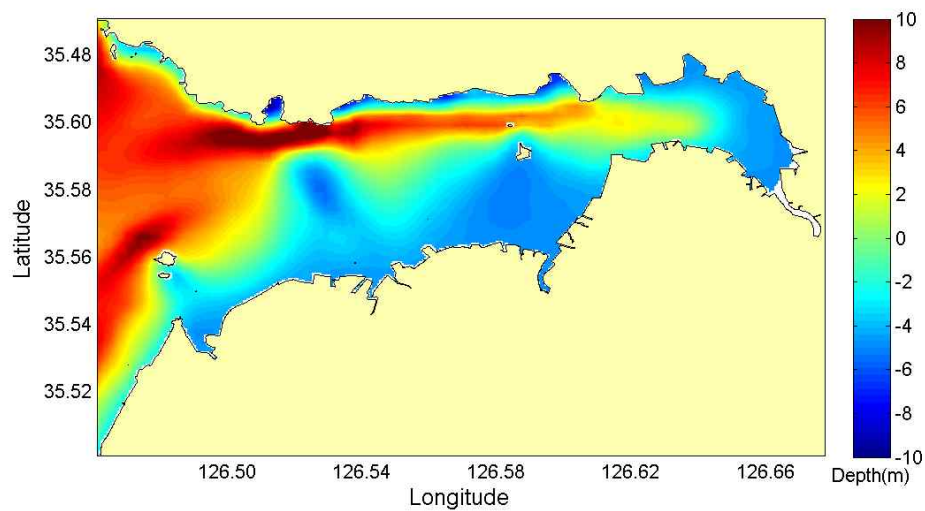


Fig. 3 Sediment model simulation domain (L3) with bathymetry.

Table 1 Numerical model domain information (coverage, horizontal cell number, horizontal resolution)

|        | 영역            |             | 격자수 |     | 격자간격    |
|--------|---------------|-------------|-----|-----|---------|
|        | 경도            | 위도          | 경도  | 위도  |         |
| LEVEL1 | 124.00-127.50 | 32.50-39.00 | 210 | 370 | 1/60°   |
| LEVEL2 | 126.00~126.70 | 35.30~35.95 | 252 | 235 | 1/360°  |
| LEVEL3 | 126.46~126.87 | 35.48~35.61 | 390 | 235 | 1/1800° |

## 2. 조석 검증 (2006년)

위의 연구지역에서의 퇴적물 이동 수치실험에 앞서 조석에 대한 검증을 실시하였다. 조석검증 시기는 이 연구지역에서 부유사관측 자료가 있는 기간인 2006년 8월을 기준으로 하여 실시되었다.

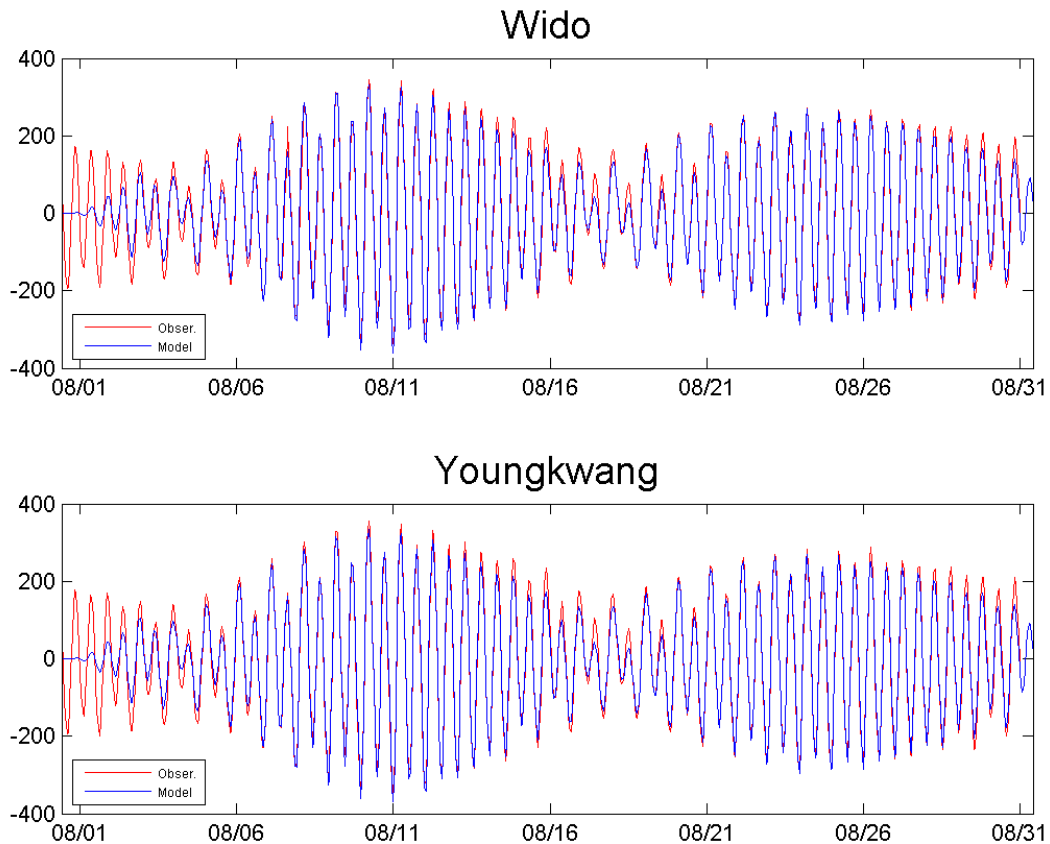


Fig. 4 Tidal calibration at Wido and YoungKwang.

비교 정점은 국립해양조사원 조위관측소 중 실험 지역과 가까운 2개의 정점 (위도, 영광)으로 선정하였다(Fig. 2, 우측 판넬 더하기 기호). 관측치와 비교는 Fig. 4에서 제시하였으며, 전체적으로 조위를 잘 재현해 내고 있음을 알 수 있다. 대조기에서 소조기로 가면서 밀물 때 다소 수치모델이 작게 나오고 있으나, 퇴적물 이동 실험을 수행하는 것에는 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

### 3. 조류 비교

실험 기간 동안의 관측 위치는 Fig. 5와 같으며, GS2에서의 조류 관측 결과와 MOHID 모델의 결과는 Fig. 6에서 비교하였다. GS2 관측정점에 해당하는 모델 정점에서의 유속 값은 관측 결과 보다 작게 계산되었으나, 이는 GS2에서 관측은 바닥에서 약 15cm 떨어진 지점에서 관측한 결과이며, 수치모델의 결과는 약 5-6m 정도의 수층 (모델에서의 최하 바닥 layer)에 해당하는 값이므로 이 정도의 차이는 충분히 있을 수 있을 것으로 생각된다. 관측에서는 GS2에서는 썰물에 밀물보다 더 강하게 나타남을 잘 보여주고 있으나, 수치모델은 거의 유사한 크기를 보이며, 대신 지속 시간이 더 길게 나타나고 있음을 보여준다.

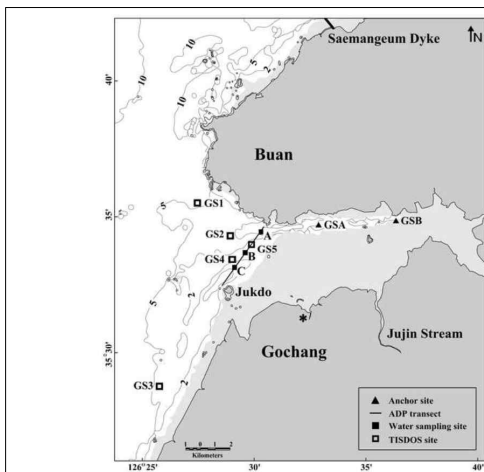


Fig. 5 Gomso Bay with measurement locations (from Lee, 2010)

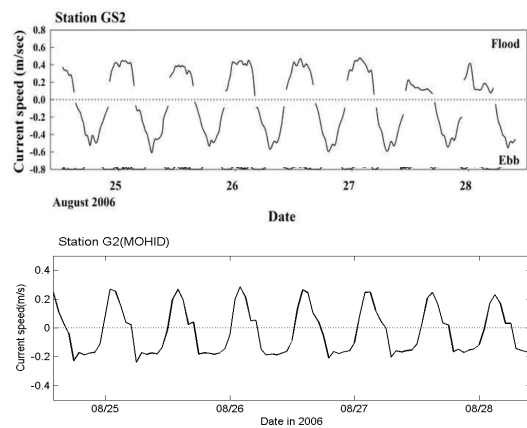


Fig. 6 Current comparison at GS2. Observation (upper panel, from Lee 2010) and model (lower panel)

#### 4. 부유사 모듈 수립

MOHID 모델에서는 해저 경계면에서 입자성 물질에 대한 플럭스를  $F_b$  (mass of sediment per unit bed area per unit time)로 정의하고 다음과 같이 표현된다.

$$F_b = E(\text{erosion flux}) - D(\text{deposition flux})$$

저면 전단응력(bottom shear stress)이 임계치보다 높으면 침식(erosion)이 발생하고 낮으면 퇴적되며, 침식/퇴적 임계치 사이에서는 입자성 물질이 해수중에 부유상태로 되어 퇴적과 침식이 균형을 이루게 된다.

MOHID 모델에서 침식 알고리즘은 다음과 같은 Partheniades(1965)의 방법이 사용되었다.

$$\frac{dM_E}{dt} = E \left( \frac{\tau}{\tau_E} - 1 \right) \quad \text{for} \quad \tau > \tau_E$$

$$\frac{dM_E}{dt} = 0 \quad \text{for} \quad \tau < \tau_E$$

$\tau$  : bed shear stress

$\tau_E$  : critical shear stress for erosion

$E$  : erosion constant [ $kgm^{-2}s^{-1}$ ]

퇴적 플럭스는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_p = \frac{dm}{dt} = -p W_s C, \quad p = \left( 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right)$$

$p$  : probability of sediment deposition

$C$  : near-bed cohesive sediment concentration

$W_s$  : settling velocity

$\tau_b$  : bottom shear stress

$\tau_{cd}$  : critical shear stress for deposition

퇴적 알고리즘은 다음과 같은 Krone(1962)의 방법을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{dM_D}{dt} &= (CW_s)_B \left(1 - \frac{\tau}{\tau_D}\right) & \text{for } \tau < \tau_D \\ \frac{dM_D}{dt} &= 0 & \text{for } \tau > \tau_D \end{aligned}$$

$\tau_E$  : critical shear stress for deposition

해저면에 퇴적된 퇴적물의 압밀화(consolidation)은 다음과 같이 계산된다.

$$M_{average} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_{consolidation}} M_t \times dt}{dt_{consolidation}}, \quad \frac{dM}{dt} = Mr_c, \text{ for } M_{average} > M_{t_0}$$

$M_{average}$  : average mass availability [kg/m<sup>2</sup>]

$M_t$  : average mass availability in a specific time step [kg/m<sup>2</sup>]

$dt$  : sediment time step [s]

$dt_{consolidation}$  : consolidation time step [s]

$t_0$  : beginning of the consolidation time step

$t_{consolidation}$  : end of the consolidation time step

$r_c$  : consolidation rate [1/s]

## 제 2 절 연구결과

### 1. 부유사 이동 수치모델 결과

MOHID에서 부유사는 cohesive sediment의 침, 퇴적한계 계수 및 침강속도 등을 고려하여 계산한다. 모델에서 적용될 수 있는 실험 영역에서의 주요 계수 값을 최적화하기 위한 민감도 실험을 실시하였다. Fig. 7은 관측 정점 GS2에서의 관측된 부유사 농도의 시계열 그림으로, 바닥에서 15cm 떨어진 한 point에서 관측된 값이다. Fig. 7의 부유사 농도는 부유사 이동 실험을 위한 기본 관측자료로 이 시계열 변화를 재현하기 위해 민감도 실험을 우선적으로 실시하였다.

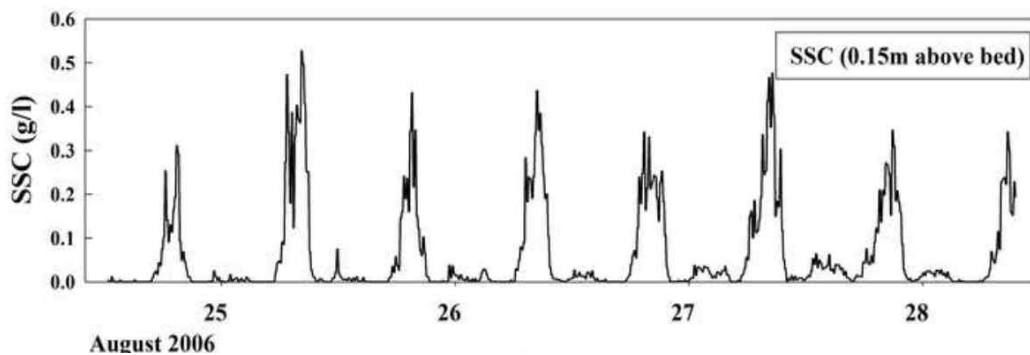


Fig. 7 Time series of suspended sediment concentration at GS2 (from Lee, 2010)

부유사 이동 수치실험에서는 먼저 가장 기본이 되는 case를 정해 (reference run) 재현 실험을 한 후, 관측치와 비교해서 각각의 parameter를 수정하면서 진행하게 된다. 먼저 reference run에서 사용된 주요 퇴적물 파라미터들의 값은 MOHID sediment transport module에서 제시한 기본값으로 설정하였으며, 이의 결과에 따라 각 파라미터 값을 변화시킨 case들에 대해서는 Table 2에 정리하였다.

#### 1) Reference Run

앞서 밝힌 바와 같이 MOHID sediment transport module의 기본값으로 모의한 reference run의 결과는 Fig. 8에 제시하였다. 우선 Fig. 7의 관측치와 비교해보면 최대 농도값이 거의 1/10 정도로 작게 나오며, 부유사 농도가 지속되는 시간 또한 너무 길게 나타내고 있음을 알 수 있다. 먼저 최대 농도값에 이 작게 나오는 것에 대해서는



침식률 (erosion rate)이 너무 작거나, 침강속도가 너무 큰 경우에 이렇게 모의 결과가 나올 가능성이 높다. 따라서 이 두 변수의 적당한 조정이 필요하며, 부유사 농도가 지속되는 시간이 매우 긴 것은 임계침식 전단응력 (critical shear stress for erosion)과 임계퇴적 전단응력 (critical shear stress for deposition)과 관계가 있다.

Table 2 Major sediment transport parameters in simulation study.

| Case          | critical shear stress for erosion (N/m <sup>2</sup> ) | settling velocity (m/s) | erosion rate (kg/m <sup>2</sup> /s) | critical shear stress for deposition (N/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|---|-------------------------|-------------------------------------|--|
| Reference Run | 0.4   | 1e-4                    | 1e-5                                | 0.35   |
| case 1        | 0.15  | 1e-2                    | 1e-5                                | 0.07   |
| case 2        | 0.15  | 1e-2                    | 1e-3                                | 0.07   |
| case 3        | 0.15  | 1e-2                    | 1e-5                                | 0.10   |
| case 4        | 0.15  | 1e-2                    | 1e-4                                | 0.07   |
| case 5        | 0.15  | 5e-2                    | 1e-4                                | 0.07   |
| case 6        | 0.15  | 3e-2                    | 5e-5                                | 0.07   |
| case 7        | 0.15  | 3e-2                    | 5e-5                                | 0.10   |

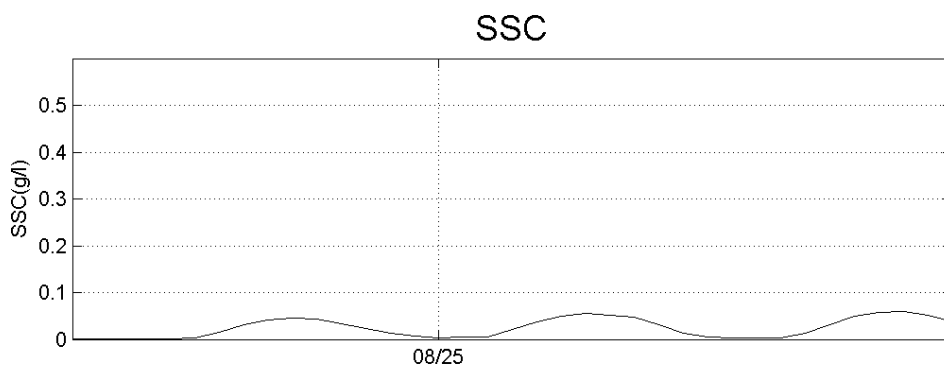


Fig. 8 Suspended sediment concentration simulation result from reference run.

2) Case 1

앞선 reference run의 결과를 바탕으로 case1은 최대 부유사 농도 지속시간을 줄이기

위해 우선 침강속도를 100배로 크게 설정하였으며 , 임계침식 전단응력과 임계퇴적 전단응력은 0.15와 0.07로 reference run 보다 다소 작게하여 실험을 실시하였다. 모의 실험 결과는 Fig. 9에 나타내었으며, reference run의 결과와 비교해 보았을 때 부유사 농도 지속시간은 여전히 길게 지속되고 있으며, 최대 농도는 약 2배 정도 크게 나오고 있으나 유의할 만한 값은 아니다.

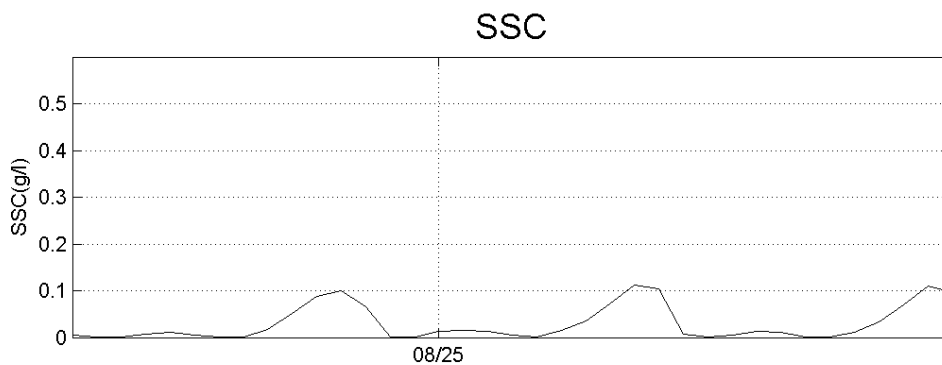


Fig. 9 Suspended sediment concentration simulation result from case 1.

### 3) Case 2

이번 실험에서는 case 1의 세팅에 침식율만 100배로 크게 설정하여 모의한 경우이다. Fig. 10에서의 모의결과는 예상대로 최대 농도값이 관측치를 훨씬 상회하며 부유사 농도 지속시간은 상대적으로 좀 나아진 결과를 보였다. 하지만, 이 파라미터의 세팅에서도 여전히 유의할 만한 결과를 주고 있지는 않다.

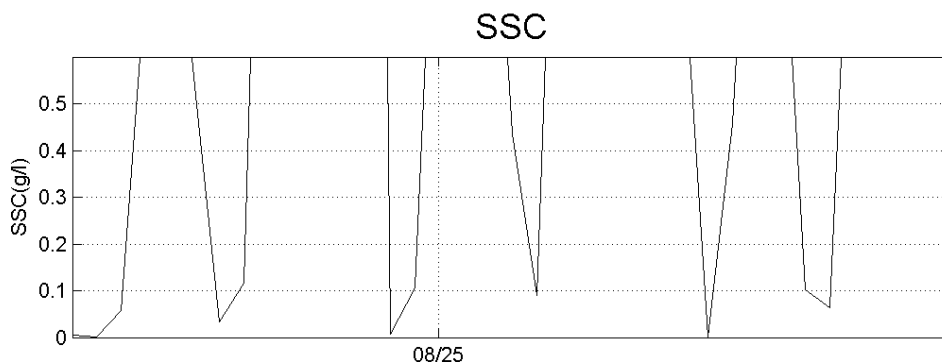


Fig. 10 Suspended sediment concentration simulation result from case 2.

#### 4) Case 3

이번 모의실험은 case 2에서 지나치게 큰 값을 준 침식율은 다시  $1e-3$ 값으로 복원시키고 단지 임계퇴적 전단응력 값을 다소 크게 (0.1) 설정하였다. 즉, case 1과의 차이는 임계퇴적 전단응력 값만 다르다. 따라서, 실험결과는 case 1의 결과와 거의 유사하게 나타났다 (Fig. 11). 하지만, 임계퇴적 전단응력 값이 다소 크게 설정된 case 3에서 아주 작은 차이나 상대적으로 최대 부유사 농도값이 더 작게 나타남을 보였으며, 부유사 농도 지속시간도 아주 미세하지만 더 짧아졌다. 이는 계산된 수층 (water column)의 바로 윗층과 바닥층과의 영향을 같이 고려해야 해석이 가능하며, 상대적으로 위에 위치한 수층의 영향을 많이 받는 것으로 보이는데, 이는 현재 수치모델에서는 단지 3개의 수층만을 고려한 영향으로 보인다.

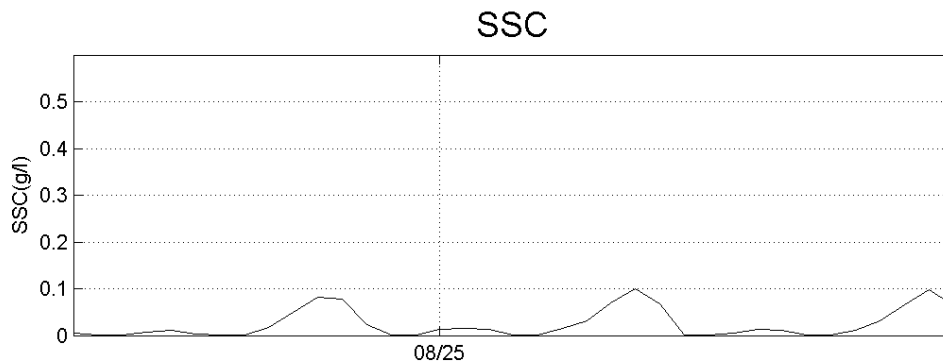


Fig. 11 Suspended sediment concentration simulation result from case 3.

#### 5) Case 4

Case 4에서는 case 1을 기준으로 하여 침식율을 10배만 크게하여 모의한 경우이다. Fig. 12에 나타난 실험결과는 여전히 최대 부유사 농도를 상당히 크게 모의한 결과를 보이고 있으나, 앞선 case2와 달리 현저히 작은 피크와 큰 픽이 교대로 나타나는 형태의 모의가 이뤄지고 있다.

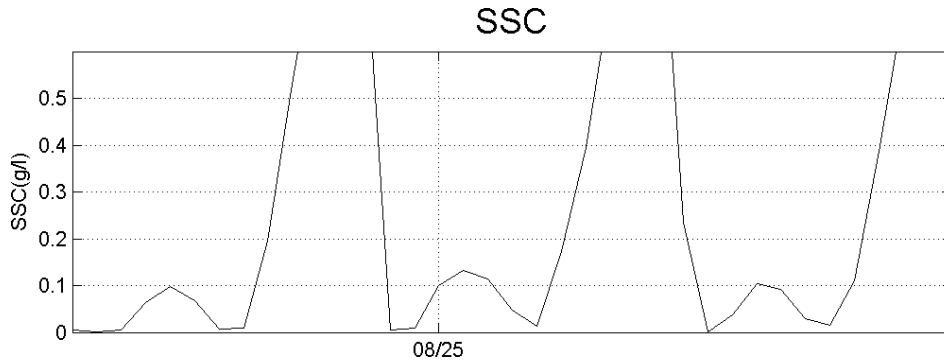


Fig. 12 Suspended sediment concentration simulation result from case 4.

6) Case 5

Case 5에서는 앞선 case 4을 기준으로 하여 침강속도를 5배로 모의한 경우이다. Fig. 13에 나타난 실험결과는 case 4의 결과와 거의 유사하게 나타나고 있다 (Fig. 13). 하지만 미세하게도 부유사 농도의 지속시간은 줄어든 것으로 나타났는데 이는 침강속도가 커짐에 따라 부유사가 수층내에 머무는 시간이 상대적으로 작아짐에 따라 나타난 결과라 할 수 있다.

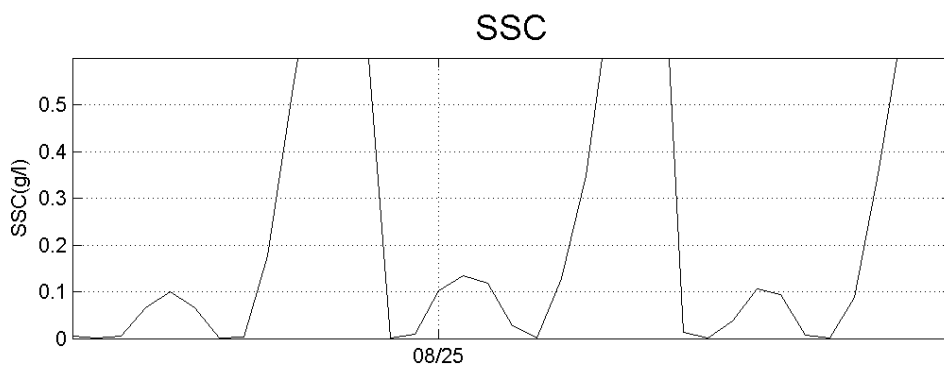


Fig. 13 Suspended sediment concentration simulation result from case 5.

7) Case 6

앞선 실험에서 알 수 있듯이 침식율이  $1e-4$  이상의 값을 가질 경우는 과도한 최대 부유사 농도가 모의되어 이번 실험에서는 반으로 줄인  $5e-4$  값으로 고정하고 침강속도는 다소 크게 주었다 ( $3e-2$ ). Fig. 14의 실험결과는 앞선 결과들과 달리 상대적으로 현실적으로

재현되었음을 알 수 있다. 하지만, 관측치와 비교해보면 최대 부유사 농도는 다소 크게 모의되고 있음을 알 수 있다.

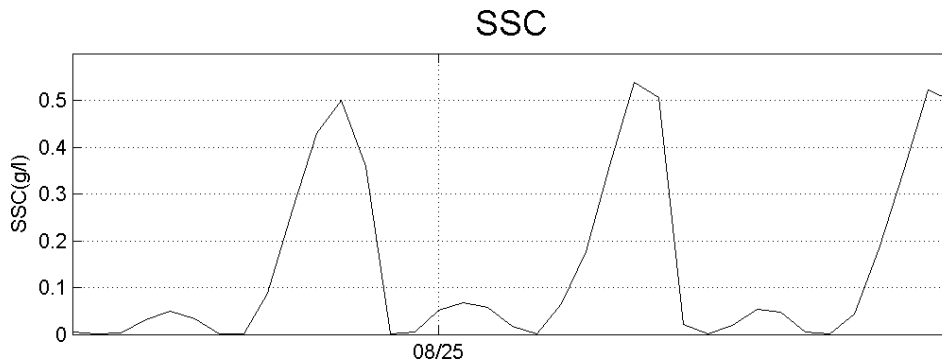


Fig. 14 Suspended sediment concentration simulation result from case 6.

#### 8) Case 7

이번 모의실험은 Case 6에서 다소 크게 재현된 최대 부유사 농도 값을 줄이기 위해 임계퇴적 전단응력 값을 다소 크게 하여 실험하였으며, 그 결과 (Fig. 15, 16)로 최대 부유사 농도는 조금 더 줄어들어 관측치와 유의한 결과를 나타내었다. 따라서, case 7의 점착성 퇴적물 파라미터가 2006년 8월의 곰소만 환경을 가장 잘 재현하는 것으로 생각할 수 있다. 또한, 곰소만 전체 지역에서의 부유사 농도 분포를 살펴보면 비록 특정한 시점에서의 해석이지만, 표층에서는 조간대의 영역을 뚜렷하게 보이면서 전체적으로 매우 낮은 농도값을 잘 보여주고 있으며, 저층에서의 분포는 북쪽에서 동-서방향으로 위치한 채널을 따라서 상대적으로 고농도의 부유사가 나타났다. 특이할 만 점으로는 채널내에서도 패치형태가 4개정도 존재하는 것을 보이고 있다는 점이다. 이것은 보다 상세한 관측자료와 함께 해석되어야 할 것으로 사료된다.

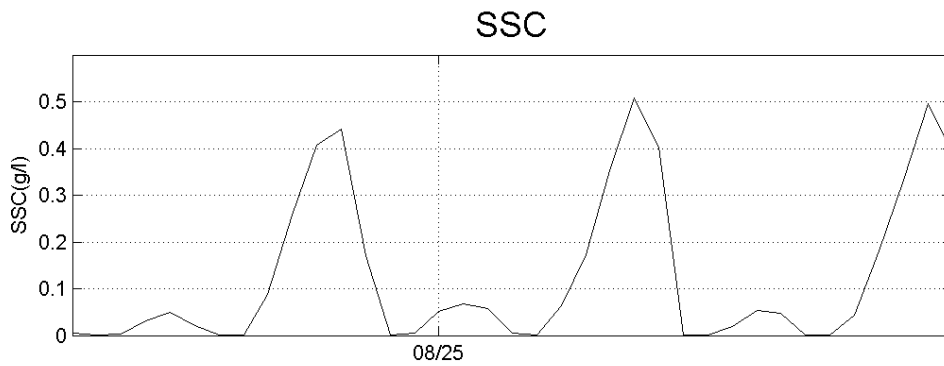


Fig. 15 Suspended sediment concentration simulation result from case 7.

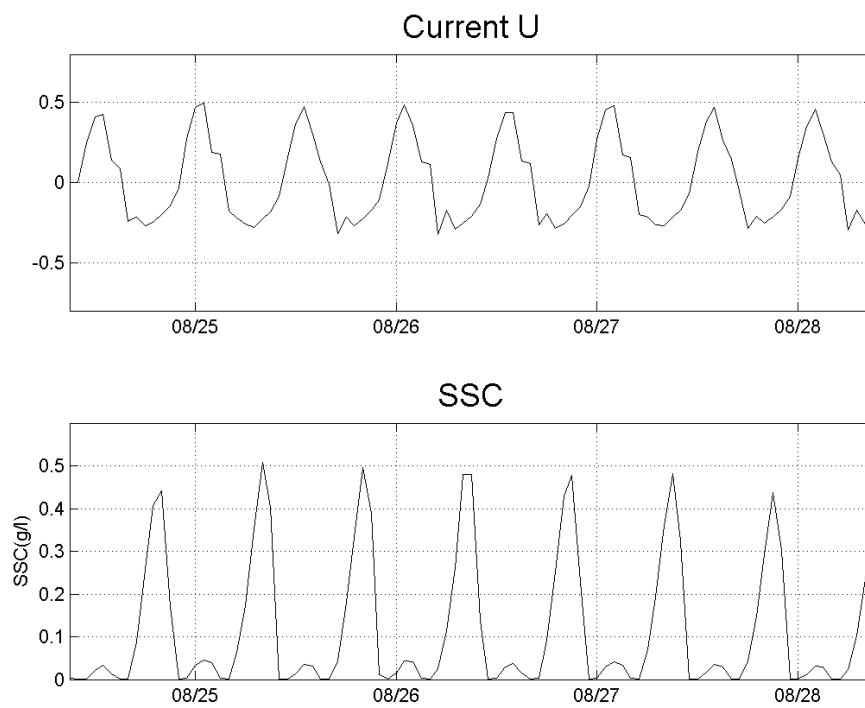


Fig. 16 Simulation result from case 7. Current (u-component) in upper panel and suspended sediment concentration (lower panel).

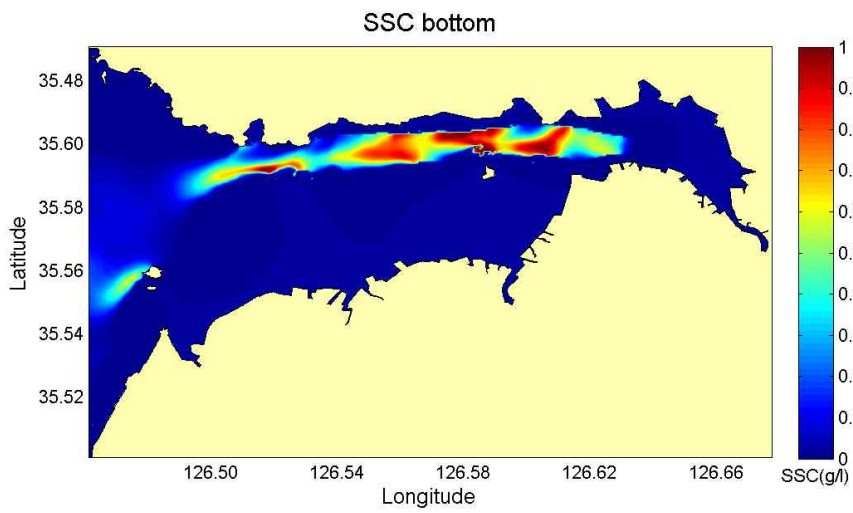
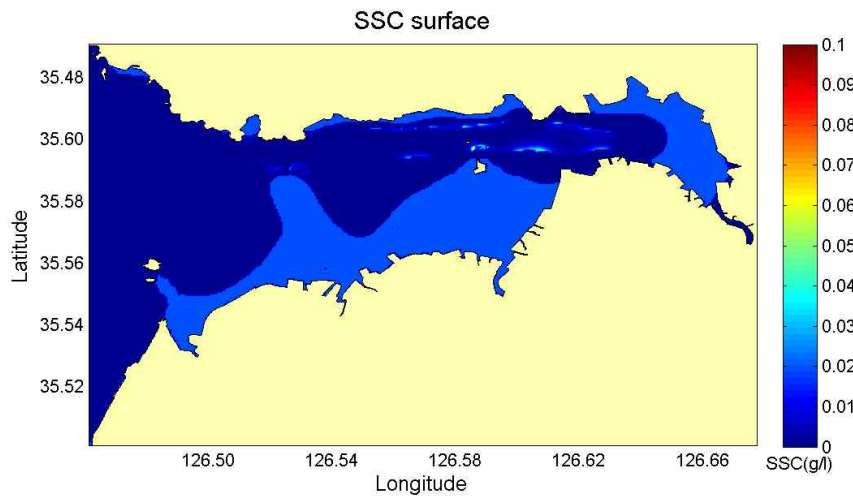


Fig. 17. Model calculated suspended sediment concentration contours of surface (upper panel) and bottom (lower panel) at Gomso bay based on case 7.

## 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

### 제 1 절 연구개발 목표 달성도

- MOHID 모델을 이용한 곰소만 퇴적물 이동 수치모델 수립
  - 곰소만 퇴적물 수치모델 주요 인자 (침강속도, 침식율 등) 민감도 실험
    - 1) MOHID 부유사 모듈의 기본값에서는 곰소만의 2006년 8월 관측 재현이 어려움
    - 2) 침강속도가 커짐에 따라 최대 부유사의 농도가 상대적으로 작게 나타나며, 부유사 농도의 지속시간도 작아짐
    - 3) 침식율의 경우 최대 부유사 농도의 크기에 가장 큰 영향을 줌
    - 4) 임계퇴적 전단응력과 임계침식 전단응력은 부유사 농도의 지속시간과 최대 부유사 농도에 영향을 줌
- 곰소만 퇴적물 수치모델 주요 인자 (침강속도, 침식율 등) 최적화
  - 일련의 민감도 실험을 통해 2006년 8월의 곰소만의 부유사 이동 수치모델 연구를 위한 최적화 작업을 완료했음. 하지만, 이는 제한된 관측자료를 바탕으로 역산출된 값으로 다른 목적을 위해 사용시에는 주의를 요함.
- 집중호우, 태풍과 같은 이벤트 전후의 점착성 퇴적물의 이동 및 변동 특성 파악
  - 본 연구사업에서는 관측자료의 직접적인 수집이 아닌 간접자료의 활용을 바탕으로 하고 있으며, 곰소만에서의 집중호우나 태풍과 같은 이벤트 전후의 퇴적물 이동에 대한 직접적인 자료를 확보하지 못하여 이벤트에 따른 이동 및 변동 특성 파악에 대한 연구는 수행하지 않았다. 물론, 최적화된 주요 인자를 바탕으로 가상의 이벤트를 구성하여 수치실험을 수행할 수는 있으나 이는 어디까지나 흥미위주의 작업으로 보다 과학적인 연구결과를 얻기는 제한적으로 생각된다.



## 제 2 절 대외 기여도

- MOHID 모델을 이용한 곱소만 퇴적물 이동 수치모델 수립
  - 3차원 해양예측시스템과 연계를 통한 국지 운용해양시스템과의 연계
  - 서해안 항만매몰 예측 시스템 및 활용체계 구축시 수치모델의 기본 자료
  - 순환 및 파랑 외력을 모두 고려한 점착성 퇴적물 이동 수치모델 개발
  - GOCI 자료의 활용 (부유사 검·보정 등)
  
- 곱소만 퇴적물 수치모델 주요 인자 (침강속도, 침식율 등) 최적화
  - 곱소만의 퇴적물 수치모델 주요 인자 (침식율, 침강속도 등)에 대한 시간적 (계절 변화 및 갈수기/홍수기) 변동의 이해에 대한 기본 자료
  - 점착성 퇴적물의 입자 크기에 따른 부유사 이동 특성 연구

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 향후 연구과제 도출

1. 부유사 입자 크기에 따른 정지궤도 해색위성의 부유사 농도 상관관계 연구 및 부유사 알고리즘 개발

부유사 이동 예측시스템에서는 수치모델에서의 입력자료로 물론, 검증자료로 활용될 수 있는 부유사 농도자료의 확보는 무척이나 중요한 사항이다. 하지만 부유사 농도의 관측에 있어 많은 어려운 점 중 하나는 공간적으로 많은 자료를 획득하기가 매우 힘들다는 점이다. 이를 해결하기 위해서 우리나라 최초의 정지궤도 해색위성에서의 자료를 적극 활용하는 것은 공간적인 자료의 획득면에서는 획기적이라 할 수 있다. 하지만, 아쉽게도 해색위성에서의 자료를 부유사 농도로 쓰기 위해서는 단순한 방법으로는 정확한 자료라고 할 수 없는 점이 있다. 이것은 위성자료의 특성에 관한 문제로 광학자료는 대기의 영향은 물론, 수중의 부유사 입자크기에 따라 반사되어 오는 양이 달라진다는 것이다. 따라서, 이를 정확히 보정하기 위해서는 부유사 입자크기의 분포에 대한 광학밴드의 특성 파악이 선결 요건이라 할 수 있다. 최근 여러 연구를 통해서 현장에서 퇴적물의 입자 크기를 직접 관측할 수 있는 장비의 활용이 두드러지고 있다. 이러한 부유사 입자의 크기를 현장에서 직접 관측하고 해색위성의 광학자료와 현장에서의 광학관측 값과의 상호비교를 통한 연구의 수행으로 정지궤도 해색위성에서 부유사 농도의 산출시 신뢰할 수 있는 알고리즘의 개발과 이를 통한 부유사 농도의 mapping 지속적으로 이뤄져 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 집중호우시 하천 discharge에 따른 fresh water plume 거동 연구

우리나라의 주요 하천은 여름철에 집중된 강우에 의해 상당한 양의 민물이 하구역을 통해 바다로 직접 유입되는 현상이 매년 일어난다. 지난 2011년 8월 9일에는 정읍과 고창 등에 호우관련 기록이 경신되면서 많은 피해를 입었다. 일강수량이 정읍 420mm, 고창 235.5mm로, 1시간 최대 강수량은 정읍 64.0mm, 고창 44.5mm로 바꿨다. 이 집중호우로 도내 7개 시군에 산사태가 발생하고 주택가와 공장이 침수

되는 등 피해가 속출했다고 알려지고 있다. 하지만 이러한 호우의 여파가 바다로 이어져 이후 해양의 환경에 미치는 영향에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. Fig. 18은 이 호우가 범성포로 빠져나와 인근 해역으로 흘러들어 만들어낸 fresh water plume을 보여주고 있다. 이러한 현상은 하구언으로 막혀 있는 큰 강에서도 홍수에 의해 방류시에는 언제든지 나타날 수 있으며 이러한 fresh water plume의 가장 큰 특징은 아주 단시간에 해수와 혼합하지 않고 제법 긴 시간동안 폐치형태로 유지한다는 것이다. 사진에서와 같이 탁도가 높은 경우는 주변해역의 양식장으로 흘러든다면 광합성에 필요한 광량을 저해하여 문제를 야기 할 수 도 있다. 또한, 영광 원전과 같이 취수가 필요한 지역에는 높은 탁도로 인해 펌핑시스템에 과부하가 걸리는 등 불의의 사고도 유발할 수 있을 것이다. 따라서, 주기적으로 발생하는 fresh water plume의 거동에 대한 현장관측과 해색위성 자료의 활용 그리고 수치 모델 (부유사 이동 포함)을 이용한 거동에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.



Fig. 18 The interface of fresh water plume with high turbidity and sea water (August 10, 2011 near Youngkwang)

### 3. 우리나라 연안역의 임계퇴적 전단응력 분포 특성 파악연구

점착성 퇴적물 연구에서의 임계퇴적 전단응력은 전 세계의 다양한 연구지역에서의 많은 실험이 행해 졌음에도 불구하고 대략적인 그 값의 범위만 보고되고 있을 뿐, 구체적인 영향을 주는 인자에 대한 연구는 수행된 바가 없다. 우리나라의 연안역은 간척사업과 같은 대규모 개발에 따라 급격한 변화를 보이고 있으며, 부유사 및 해저지형에 대한 모니터링과 예측을 지속적으로 수행하고 있다. 하지만, 임계퇴적 전단응력에 대한 실측값과 변화의 폭을 구체적으로 파악하지 못한 상황에서 수치모델의 튜닝파라미터로 적당히 사용하고 있는 실정이다. 본 연구과제에서도 이러한 범위를 넘어서지 못한채 수치모델을 수행하였다.

임계퇴적 전단응력에 관한 초기 연구는 1960대 확립되었으며, 이후 여러 연구지역에서 관측된 값을 보고하였다. 하지만, 영향을 주는 인자에 대한 폭 넓은 연구가 구체적으로 실시된 바는 없다. 우리나라 연안에서의 임계퇴적 전단응력 변화의 폭을 파악하며, 영향을 주는 인자에 따른 구체적인 영향을 이해를 통하여 해저지형의 변동을 예측하는 수치모델에 보다 신뢰할 수 있는 주요 인자를 직접 활용을 한다면 보다 정확한 예측결과를 산출 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 제 6 장 참 고 문 헌

국립지리원, 1981, 연안해역 기본조사 보고서(석포지구). 56 p.

류상욱, 장진호, 2006, 곰소만 갯벌 퇴적물 어떻게 변할 것인가? 국립목포대학교 갯벌 연구소-국립수산과학원 갯벌연구센터 학술교류협정체결 기념 갯벌학술세미나, 59-73.

장진호, 류상욱, 조영조, 2007, 곰소만 조간대 퇴적물의 장기적 변화. Jour. Korean Earth Science Society. v28(3). 357-366

해양수산부, 2001, 세계 주요국가의 갯벌백서. 259 p.

Hee Jun Lee, 2010, Preliminary Results on Suspended Sediment Transport by Tidal Currents in Gomso Bay, Korea. Ocean Sci. J., 45(3), 187-195.

Krone, R.B. , (1962) - Flume studies of the transport in estuarine shoaling processes. Hydr. Eng. Lab., Univ. of Berkeley, California, USA.

Partheniades, E., (1965) - Erosion and deposition of cohesive soils. J. Hydr. Div., ASCE, 91, No. HY1 : 105-139.

Yang, B.C., Dalrymple, R.W., 2007, Up-estuary variation of sedimentary facies and ichnocoenoses in an open-mouthed, macrotidal, mixed-energy estuary, gomso bay, korea. Journal of Sedimentary Research, 77, 751-771.