

## 곰소만 조간대 바지락 양식장 저질의 퇴적학적 및 수리역학적 특성

조태진 · 이상배\* · 김석윤\*  
부경대학교 탐사공학과, \*부경대학교 해양학과

### Sedimentological and Hydromechanical Characteristics of Bed Deposits for the Cultivation of *Manila clam, Ruditapes philippinarum* in Gomso Tidal Flat

Tae-Chin CHO, Sang-Bae LEE\* and Suck-Yun KIM\*

Department of Exploration Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

\*Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

To investigate the effects of hydromechanical and textural characteristics of sediment deposits on the cultivation of *Manila clam, Ruditapes philippinarum* surface and sub-surface core sediments were collected seasonally in Gomso tidal flat. Grain size distribution were analyzed to investigate the annual variation of sediment texture. In winter unimodal distribution of grain size with the peak at  $5\phi$  is dominant. However, during the summer sediment texture become a little bit coarser and grain size distribution shows the peaks at  $4\sim5\phi$ . Optimum sediment texture for the cultivation of manila clam, *R. philippinarum* was found to be sandy silt in which mean grain size was between 4 and  $5\phi$  with the sand content less than 50% and clay content of 5~10%. Mechanical and hydrological characteristics of sediment deposits were also studied in the laboratory and the results were applied to the numerical simulation for the behavior of surface sediment subjected to the cyclic loading from sea-water level change. Results of numerical simulation illustrate that the permeability of sediment had to be maintained in the range of  $10^{-11}\sim10^{-12} \text{ m}^2$  to ensure the proper sedimentological environment for the cultivation of manila clam, *R. philippinarum*. The deposits of virtually impermeable mud layer, with the threshold thickness of 4 cm, would be very hazardous to clam habitat.

**Key words:** Tidal Flat, *Manila clam*, Hydromechanical characteristics, Sediment texture, Numerical simulation, Sea-water level change, Clam cultivation

## 서 론

국내에서 바지락 양식은 경기도 연안의 간석지에서 1912년에 시작되었다고 보고되어 있으며 (유, 2000), 본격적인 양식은 1980년부터 시작되어 1990년에 최고 생산량을 기록하였다 (농림수산부, 1991). 그러나 최근에는 매립에 의한 서식장 감소, 양식장의 밀식에 따른 자가 오염 및 양식장 환경변화 등에 의한 바지락 폐사에 따라 생산량 감소가 야기되어 지속적인 바지락 양식장 유지 관리의 중요성이 대두되고 있다. Park et al. (1999)은 바지락의 대량 폐사 원인을 조사하기 위하여 고수온에 의한 생리적 스트레스와 퇴적물의 조성, 그리고 기생생물인 *Perkinsus sp.*를 연구하였고, Cigarria and Fernandez (2000)는 저질과 바지락 생존율간의 연관성에 관하여 연구하였다. 또한 Mann (1973)은 바지락 양식에 있어 최적 저질환경을 유추하기 위해 다양한 크기의 치폐와 퇴적물 입도 조성의 상관성에 대하여 연구하였다. Kurashige (1943), Lee et al. (1969)은 한반도 바지락 서식지의 입도 조성 분석을 수행하여 바지락 밀집 지역의 특징적인 퇴적물 조성을 연구하였다. 그러나 바지락 양식장의 퇴적학적 특성과 연계하여 저질 거동에 대한 수리역학적 특성을 고찰한 연구는 아직까지 보고되어 있지 않다. 본 연구의 대상 지역은 서해안 곰소만 조간대에 위치하고 있다 (Fig. 1). 조간대는 일반적으로 조차가 크고, 파랑에너지가 낮고, 퇴적물 공급이 우세한 지역에 잘 발달하며 (Davies, 1964; Hayes, 1975), 대부분이 나질 (mud)과 사질 (sand)인 미고결 퇴적물로 덮여있다 (Gary et al., 1972; Robert and Julia, 1987). 기

존의 곰소만 조간대에서 퇴적학적 연구는 Chang et al. (1993)과 Lee et al. (1994)이 상부 조간대에 태풍과 폭풍에 의해 특징적으로 나타나는 독립적인 shelly sand ridge (Chenier)의 이동과 퇴적학적 특성에 관하여 연구하였고, Chang (1995)이 주상 시료의 분석을 통하여 조간대의 퇴적 충서를 연구하였다. 또한 Chang and Choi (1998)는 지형, 퇴적물의 입도, 집적률 등의 계절적 변화를 조사하여 조간대 퇴적층의 형성 및 보존 과정을 규명하였다. 본 연구에서는 곰소만 내에 분포하는 표층 퇴적물 및 주상퇴적물의 특징적인 퇴적상과 계절적 변동사항을 조사하였으며, 퇴적물의 수리·역학적 특성과 해수면의 주기적 변동 자료에 따른 퇴적물의 심도별 역학적 응력 및 과잉간극수압, 그리고 지반의 안정성 분석을 통하여 바지락 양식장 저질의 퇴적학적 및 수리역학적 특성을 고찰하였다.

## 재료 및 방법

### 퇴적물의 입도분석

곰소만 조간대 지역에서 2000년 2월부터 8월까지 2개월 간격으로 총 13개 정점에서 표층 및 주상 시료를 채취하였다 (Fig. 1). 퇴적물의 입도분석은 Galehouse (1971)의 분석방법에 따라 체분석 및 피펫법을 병행하여 실시하였다. 퇴적물은 모래, 실트 및 점토 함량비를 기준으로 분류하는 Folk (1954)의 삼각 다이어그램을 이용하여 구분하였고, 퇴적물의 조직 표준치는 Folk and Ward (1957)가 제시한 도표 계산법에 따라 실시하였다.

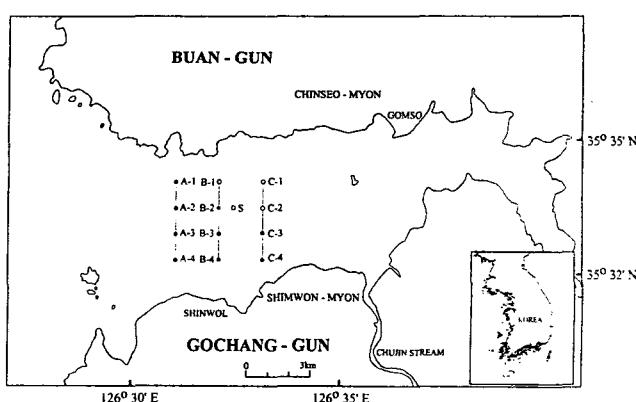


Fig. 1. Location of sampling stations in Gomso tidal flat.

●: Non-cultivation site.  
○: Cultivation site.

#### 퇴적물의 물리적 성질

퇴적물의 역학적 특성을 분석하기 위하여 공극율과 투수계수를 측정하였다. 공극율은 8~10 g 정도의 시료를 취하여 수동 방식의 Multivolume pycnometer 1305를 이용하여 측정하였다. 투수계수는 45~55 g 정도의 시료를 채취하여 투수계수 측정기 (ELE: Tri-Flex2 Permeability test system)를 이용하여 측정하였다 (Fig. 2). 채취된 시료는 sample device로 성형된 후, 포화되고, 압력차이에 의한 시간당 물의 투수량을 가지고 측정하였다. 물의 투수량은 부착된 burette을 사용하여 측정하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$\text{Permeability } (K) = \frac{aL}{2At} \ln \left[ \frac{P_B + h(t_1)}{P_B + h(t_2)} \right] \quad (1)$$

$$h(t_1) = \frac{V_U(t_1) - V_L(t_1)}{a} \quad (2)$$

$$h(t_2) = \frac{V_U(t_2) - V_L(t_2)}{a} \quad (3)$$

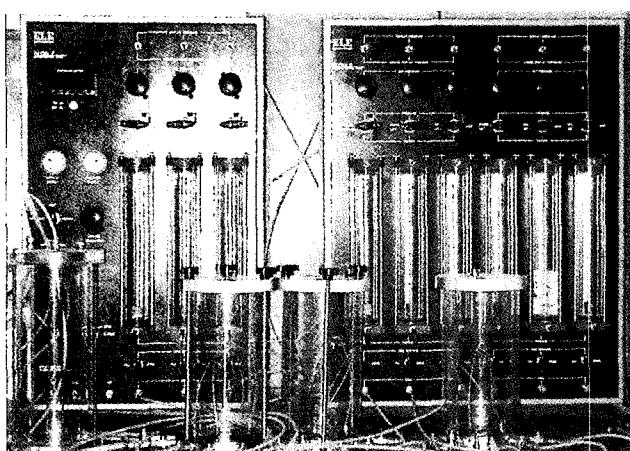


Fig. 2. Permeability test system (ELE, Tri-Flex2).

여기서,  $a$ =burette의 단면적

$A$ =시료의 면적

$L$ =시료의 길이

$t_1$ =측정 시작 시간

$t_2$ =측정 종료 시간

$P_B$ =bias pressure

$h$ =burette에서의 물의 높이

$V_U$ =upper burette의 부피

$V_L$ =lower burette의 부피

#### 저질거동에 대한 수치해석

해저 미고결 퇴적층은 시간의존성 고결작용에 의해 과암밀 상태가 현저하게 나타나기도 하다 (Noorany and Gizienski, 1970), Nakase and Kamei (1983)에 의해 조사된 오사카만의 퇴적층은 정규 암밀 상태를 유지하고 있어서 지역에 따른 퇴적층의 암밀 상태가 상이하게 나타나고 있다. 해수에 의해 완전 포화된 미고결 퇴적층의 암밀 변화는 투수계수에 따른 간극수 확산에 크게 영향을 받는다 (Terzaghi, 1925). 특히 세립질 퇴적물의 경우, 매우 낮은 투수성에 의해 퇴적물의 역학적 특성과 수리학적 특성이 상호 연관되어 매우 복잡한 거동양상을 보여준다. Terzaghi (1925)에 의해 제안된 미고결 물질의 유효응력 (effective stress)에 대한 법칙은 Biot (1941)에 의해 consolidation theory로 발달하였다. Biot에 의해 개발된 포화공극물질의 역학적, 수리학적 상호특성에 대한 관계식은 매우 간단한 일차원 경계조건에서만 이론적 분석 해를 구할 수 있어 실제 복잡한 경계조건에서는 수치해석적 분석이 주로 시도되고 있다. Ghaboussi and Wilson (1973)이 변형된 Biot의 관계식을 이용하여 유한요소법 (Finite Element Method)에 의거한 수치해석 모델을 개발하였으며, 이때 사용된 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + \alpha\delta_{ij}P \quad (4)$$

$$\zeta = -\alpha\delta_{ij}\varepsilon_{ij} + \frac{1}{M}P \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_{ij}$ =stress tensor

$\varepsilon_{ij}$ =strain tensor

$P$ =fluid pressure

$\mu, \lambda$ =Lame's constants

$\zeta$ =volumetric fluid strain

$\alpha$ =Biot's coupling constant

$M$ =Biot's coupling constant

$\delta_{ij}$ =Kronecker's delta

이때,  $\zeta$ 의 시간적 변화는 투수율과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{K}{\eta} \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \quad (6)$$

여기서,  $K$ =투수계수 (permeability)

$\eta$ =유체의 점성도 (viscosity)

$i$ =공간상의 좌표축

개발된 수치해석 모델을 이용하여 곰소만에 분포하는 퇴적물의 수리-역학적 거동특성을 분석하였다. 수치해석에 사용되는 기초 물성 자료는 곰소만에서 채취한 시료를 이용하여 실험적으로 도출된 물리적, 수리적 특성계수들과 일반적으로 사용되는 자료들을 고려하여 결정하였다 (Table 1). 모델분석대상은 기반암이 분포되어 있는 심도 1m까지로 한정하였으며, 유한요소법에 의거한 분석을 위해 퇴적층 두께 2cm를 한 개의 요소로 선정하여 총 50개의 요소로 구성된 mesh를 형성하였다 (Fig. 3). 퇴적층 하중 조건은 평면변형률 상태를 가정하였으며, 해수압 변화를 유발하는 해수면 변동주기는 군산지역의 조석표를 기준으로 설정하였다. 2000년 6월 2일 이후 1주일 동안의 조석 주기를 고찰한 결과 평균 창조기간은 292분, 평균 낙조 기간은 448분으로 산정되었다. 곰소만 양식장 지역에서의 평균 최대 수심을 4m로 가정하여 최대 해수압을 산정하였으며, 양식장의 고도를 고려하여 대표적인 해수압 하중 변화 양상을 Fig. 4에 도시한 바와 같이 설정하였다. 분석대상 지역은 최초 73분 동안 대기중에 노출되며, 조석에 의한 해수면 상승으로 219분 동안 창조류의 영향을 받는다. 해수면이 최고점에 도달한 이후에는 낙조류가 발생되며, 낙조 현상은 창조류 경우에

Table 1. Mechanical and hydraulic properties used for modeling the sediment behavior in Gomso tidal flat

	Clay	Sand
E	10 (MPa)	50 (MPa)
$\nu$	0.35	0.30
$\nu_u$	0.45	0.35
K	$0.94325 \times 10^{-15} \text{ m}^2$	$1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
B	0.72	0.60
$\alpha$	0.95785	0.46296
M	26.912 (MPa)	74.772 (MPa)

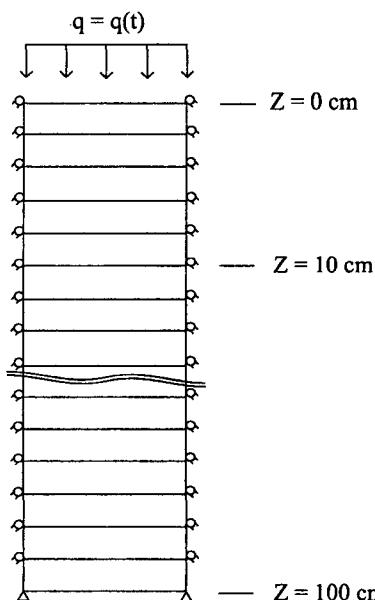


Fig. 3. Finite element mesh for the simulation of sediment behavior subjected to the sea-water level variation.

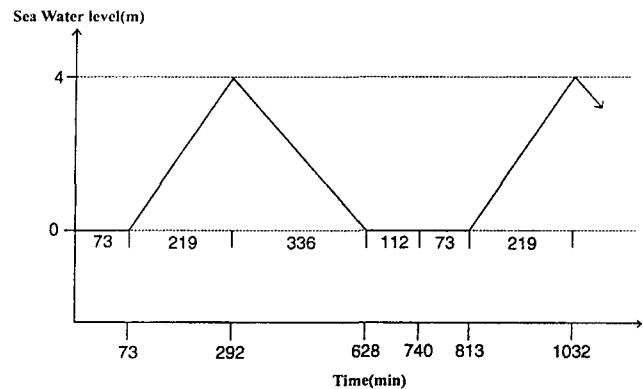


Fig. 4. Representative variation of sea water level in Gomso tidal flat.

비해 완만하게 진행된다. 창조 및 낙조 현상에 의한 해수압은 선형으로 변화하는 것으로 가정하였다. 해수면 강하에 의해 간석지 표층은 112+73분 동안 대기중에 재노출되며, 이후 동일한 주기의 해수면 변동양상이 반복된다. 이상에서 기술된 해수면 변동에 의한 해수압 하중 변화에 의거하여 바지락 서식 심도에서의 퇴적물 거동양상을 수치 해석적으로 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 표층 퇴적상의 계절별 변화

곰소만 조간대 중심구역의 표층 퇴적상의 계절별 변화양상을 Fig. 5에 도시하였다. 연구 지역의 약 50% 이상을 차지하는 silty sand 퇴적상이 만의 입구까지 광범위하게 분포하고 있다. Sandy silt 퇴적상은 양식장을 포함하는 지역에 분포하고 있으며, 세립질 퇴적물의 함량이 타 정점들과 달리 높은 편이다. 만의 입구 쪽 정점들에서는 모래 함량이 50% 이상으로 조립한 편이며 sand 퇴적상을 나타낸다. 겨울에서 여름까지의 표층 퇴적상의 계절적 변화는 뚜렷하지 않으나, 정점 A-4 (Fig. 1)를 중심으로 만의 입구 쪽에서 쌓기 모양의 sand 퇴적상 침입이 있어, 조립질 퇴적물의 유입을 보여준다. Chang (1995)은 만입구 상부조간대에 평균 95% 이상의 모래질로 구성된 특징적인 사주형태의 퇴적체인 셰니어 (chenier)가 발달한다고 보고하였다. 본 연구에서도 정점 A-4에서 모래 함량이 90% 이상으로 아주 높게 측정되었다.

양식장이 형성된 지역에서의 대표적 정점 S를 선정하여 계절변화에 따른 입도분포 양상 (Fig. 6)을 고찰하였다. 겨울에는 5φ의 조립 실트가 주를 이루는 단모드형을 나타내고, 여름에는 5φ 입도의 조립 실트질 퇴적물에 4φ의 미세사질 퇴적물이 첨가된 경향을 보여준다. 이와 같은 단기간의 퇴적 양상 변화는 폭풍 또는 태풍과 같은 고에너지 환경의 영향을 고려하여 설명될 수 있다. 2000년 7월에 한반도에 영향을 준 태풍 카이탁과 불라벤의 영향으로 5φ의 조립 실트질 퇴적물은 제거되어지고, 상대적으로 조립인 4φ의 미세사질 퇴적물의 유입이 뚜렷하게 증가하였다. 퇴적물의 계절적 입도 변화양상이 가장 심하게 나타난 정점 B-3에서 채취된 코어 시료에서는 심도 25~40cm 구간에 다수의 난질층이

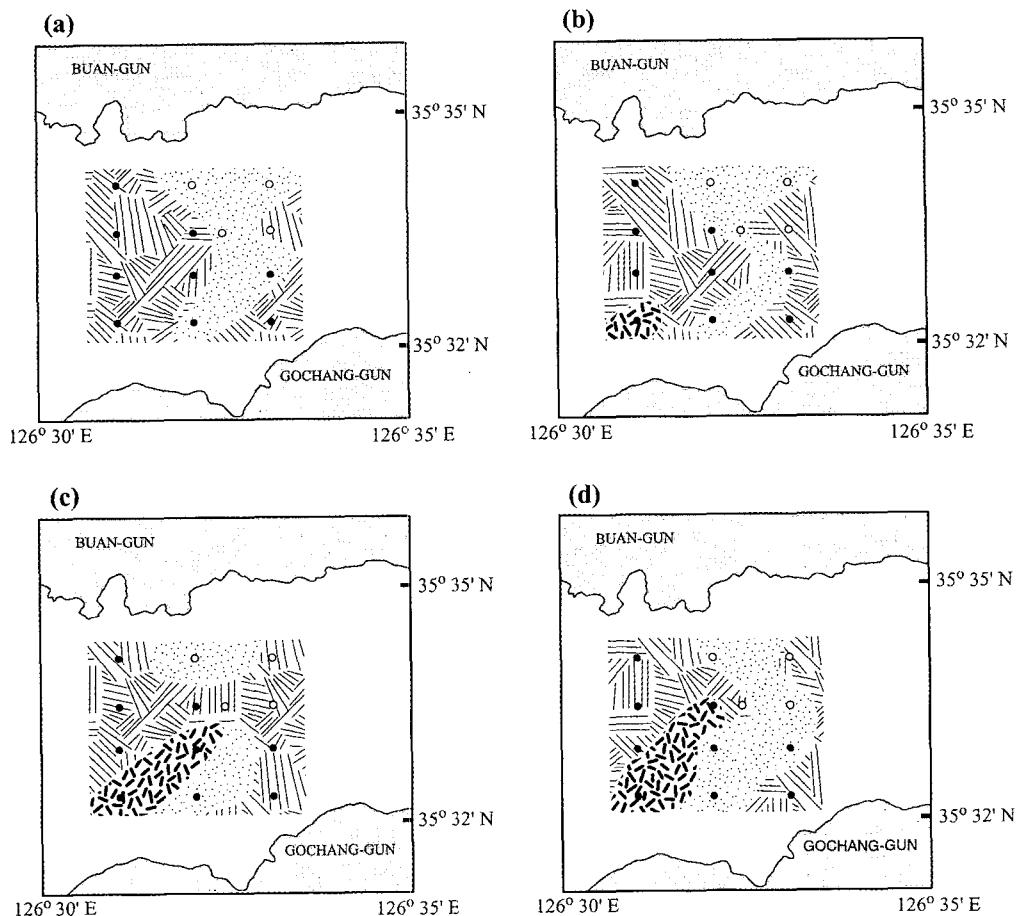


Fig. 5. Surface sediment distribution of the Gomso tidal flat: (a) February, 2000; (b) April, 2000; (c) June, 2000; (d) August, 2000.

■ Sandy silt, ▨ Silty sand, ┌ Sand

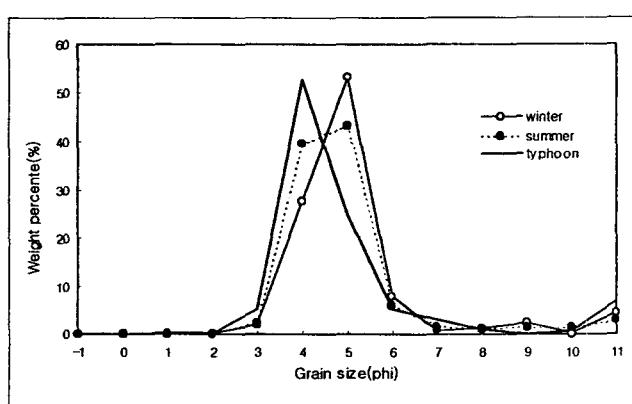


Fig. 6. Seasonal changes of grain size distributions for the surface sediment at station S.

sand 퇴적상에 교호하며 발달되어 있는 층서 양상이 관찰되었다 (Fig. 7). 이러한 조사 결과에 의거할 때 곰소만 조간대의 퇴적상은

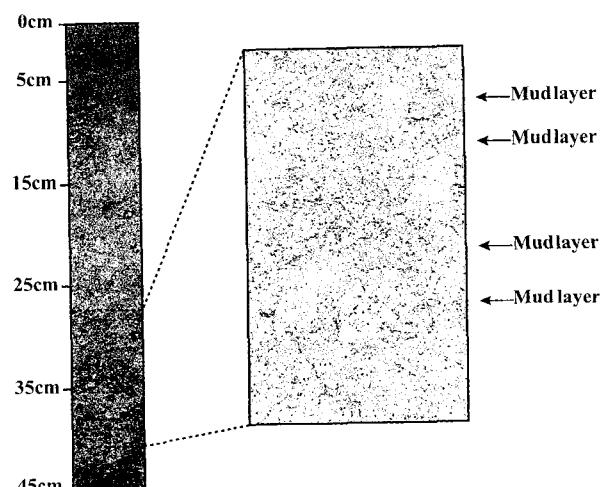


Fig. 7. Photograph of core sediment structure at station B-3 in Gomso Tidal Flat.

계절별로 변화되며, 또한 단기적 고에너지 환경 유입에 의해 매우 변화양상이 급변하는 것으로 사료된다.

#### 바지락 양식장의 퇴적 환경

바지락 양식의 퇴적 환경 요인을 유추하기 위해 곰소만 내에서 바지락 양식을 하고 있지 않는 3개 정점과 양식을 하는 3개의 정점 및 양식장 대표 지역 S에서의 퇴적물 조직 특성 및 물리적 특성에 대하여 조사하였다. 바지락 양식이 이루어지지 않는 정점 A-2, A-4, B-4에서 채취된 코어 시료에서는 전체적으로 사질의 함량이 아주 높고, 미세한 폐각편들이 다수 존재한다 (Fig. 8a). 표층퇴적물의 평균입도는  $1.97\sim4.43\phi$ 의 분포를 보이며, 평균은  $3.24\phi$ 이다 (Table 2). 정점 B-4의 경우 평균입도  $4\phi$  이상으로 세립이고, 분

급도가  $1.50\phi$ 로 불량한 분급을 나타낸다. 또한 모래 함량이 40% 미만으로 70% 이상인 A-2와 A-4와는 다른 경향을 보여준다. 심도별 함수율은  $16.54\sim20.87\%$ 로 크게 변화가 없으며, 공극율은  $34.42\sim41.18\%$ 로 B-4에서 약간 높은 경향을 보인다. 투수계수 또한  $0.0272\sim0.0387\text{ cm/s}$ 로 B-4에서 약간 낮은 값을 나타낸다 (Table 2).

바지락 양식장이 위치한 B-1, C-1, C-2에서 채취한 코어 시료에서도 대체적으로 사질의 함량이 높으며, 심도 20cm에서 폐사한 바지락 폐각들이 존재한다 (Fig. 8b). 표층 퇴적물의 평균 입도는  $2.90\sim4.71\phi$ 의 분포를 보이며, 평균은  $4.04\phi$ 이다. 분급도는  $0.71\sim2.09\phi$ 의 분포를 보이며, 평균은  $1.34\phi$ 로 불량한 분급을 보인다. 왜도 또한 양성왜도를 나타낸다. 퇴적물 조성에서는 모래 함량이

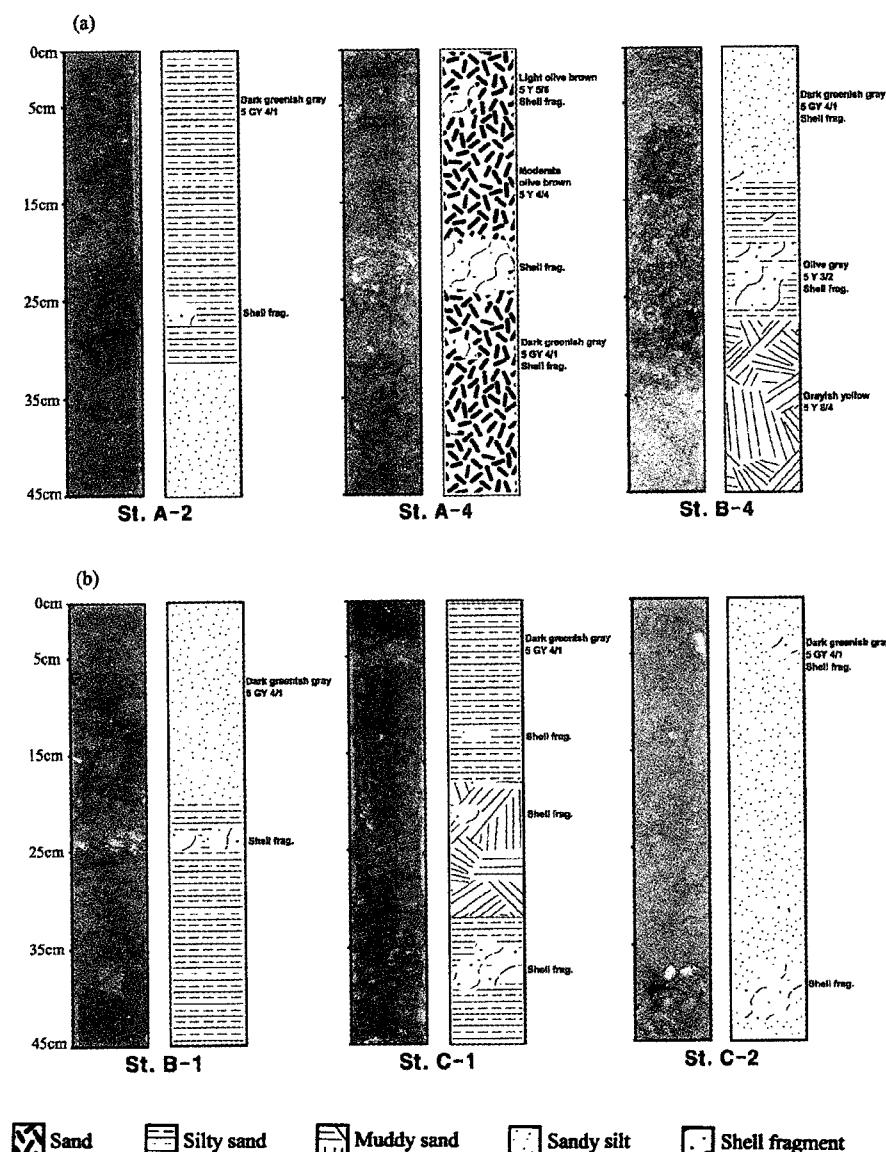


Fig. 8. Photographs and texture description of core sediments in Gomso tidal flat; (a) Non cultivation area, (b) Clam cultivation area.

Table 2. Textural and physical parameters of sediment deposit in Gomso tidal flat

	Mean size ( $\phi$ )	Sorting ( $\phi$ )	Skewness	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Water content (%)	Porosity (%)	Permeability (cm/sec)
Non-cultivation	3.24	1.57	0.07	68.50	27.68	3.82	20.20	36.34	0.030
Cultivation	4.04	1.34	0.37	49.18	43.87	6.95	20.85	36.45	0.022
Cultivation (S-site)	4.44	1.53	0.41	47.74	43.29	8.97	24.18	44.22	0.028

평균 49.1%로 비양식장의 70% 이상인 경우와 크게 대비된다. 퇴적물의 심도별 물리적 특성을 비교하여 보면 함수율은 15.61~25.47%, 공극률은 29.86~43.60% 범위로 나타난다. 투수계수는 0.0148~0.0287 cm/s로 비양식장 경우보다 낮게 나타난다 (Table 2).

곰소만 양식장 중심구역 S의 세부 24개 정점에서의 퇴적물의 조직 특성 및 물리적 특성에 대하여 조사하였다. 평균 입도는 4.15~5.10  $\phi$ 의 분포를 보이며 평균은 4.44  $\phi$ 로 미세사에 포함되고, sandy silt 퇴적상을 나타낸다. 분급은 1.32~1.86  $\phi$ 의 분포 범위를 보여 불량한 분급을 나타내고, 평균은 1.53  $\phi$ 이다. 왜도는 양성 왜도를 나타낸다. 모래 함량은 평균 35.50%의 함량비를 보여 비양식장의 경우보다 낮은 함량비를 보인다. 함수율과 공극율은 각각 24.18%, 44.22%를 나타내고, 투수계수는 0.0278 cm/s를 나타낸다 (Table 2).

서해안과 남해안에 발달된 조간대에는 해수층에 함유되어 있는 유기염류 및 유기물의 함량이 별로 차이가 없으며, 패류 서식지의 환경요인은 주로 퇴적물의 조성에 달려있다고 보고되었다 (Lee et al., 1969). 곰소만에서 양식장과 비양식장, 그리고 S 지점 세부 정점에서 조사된 결과를 종합해 보면 다음과 같다. 곰소만에서 양식장 및 비양식장에 저질을 형성하는 퇴적물의 조직 특성을 비교해 볼 때 평균입도, 왜도, 사질 및 나질 함량에 의해 양식장이 조성되는 퇴적물의 조성특성이 뚜렷하게 대비된다. 바지락 양식장의 경우 평균입도는 4~5  $\phi$  분포를 나타내어, 비양식장의 평균입도 3.24  $\phi$  보다 현저하게 세립인 조직 특성을 보인다. 퇴적물의 조성에 있어서도 모래 함량이 50% 미만, 나질 함량은 5~10% 범위이다. 퇴적상은 sandy silt, 분급도는 1.0~2.0  $\phi$ 의 범위를 나타내고, 왜도는 0.1~0.5의 범위에 포함되어 있다. 결과적으로 바지락 양식에 있어서 퇴적물의 퇴적작용이 방해될 만한 높은 에너지 상태가 지속되지 않는 환경에서 양식장이 형성되는 것으로 사료된다.

#### 저질 거동에 대한 수치해석

곰소만의 해수압 변화에 따른 조간대 퇴적층의 거동 양상을 수치해석적으로 분석하였다. 최대 해수면 높이 4 m일 때 조간대 표층에 재하되는 수압 하중은 39.4 kPa이다. 일차적으로 퇴적물 조성에 따른 과잉간극수압 및 유효응력 발달 정도를 고찰하기 위하여 전체 퇴적층이 동일한 수리·역학적 특성을 지닌 것으로 가정하고 간극수압 형성에 가장 큰 영향을 끼치는 절대 투수계수를  $1.0 \times 10^{-10} \sim 1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 까지 변화시켜 응력 발달 상태를 분석하였다. 표층 심도 11 cm에서 발달되는 퇴적층의 수직응력 및 과잉간극수압은 해수면 높이가 최대가 되는 시점에서 발생하였다. 한편 퇴적층에서의 유효수직응력은 과잉간극수압의 발달정도에 따라

변화되며, 최대 과잉간극수압은 분석 심도에서의 유체유동 (fluid diffusion)에 절대적인 영향을 받는다. Fig. 9에 도시된 바와 같이 투수계수가 증가하면 표층과 심도 11 cm에서의 수압 차이에 의한 유체 확산이 활발해져서 과잉간극수압이 증가하며, 결과적으로 유효수직하중은 감소한다. 한편, 분석대상 심도 11 cm가 표층에 매우 근접되어 있어 최대 과잉간극수압이 최대 해수면 높이 시점 이후에 발생되는 위상 지체 (phase lag) 현상은 나타나지 않으며, 유효수직응력도 조간대 지반이 압축 상태에서 안정되는 양상을 보여준다.

조석 현상에 의해 해수면 높이가 감소하여 조간대 표층이 대기 중에 노출되는 시점부터는 퇴적층에 재하되던 해수압 하중이 소멸된다. 퇴적층 고체 입자들에 하부 수직 방향으로 작용하던 표층 해수압이 제거되면 수치해석 분석대상 영역에서의 역학적 수직하중은 존재하지 않게 되나 표층하부에서 형성된 과잉간극수압은 상부 방향으로의 유체확산작용에 소요되는 시간 정도에 따라 서서히 소멸된다. 즉, 표층 노출시점에서는 이전에 형성된 과잉간극수압에 의해 유효수직하중이 인장력 상태로 전환되어 지반의 안정성이 저하될 수 있다 (Fig. 10). 해수압 하중 소멸 시점에서 발달될 수 있는 인장력에 의한 지반 안정성을 고찰하기 위하여 현장 퇴적층의 자체하중을 고려한 현장유효응력을 산정하였다. 코어시료 분석 결과에 의거하여 공극률을 45%로 가정하여 산정된 심도 11 cm에서의 현장유효응력을 Fig. 11에 도시하였다. 유효하중 980 Pa이 고려된 현장유효응력은  $K=10^{-10} \text{ m}^2$  및  $10^{-11} \text{ m}^2$ 일 경우 압축력을 유지하고 있으나, 절대 투수계수가 매우 저감된  $K=10^{-12} \text{ m}^2$  및  $10^{-13} \text{ m}^2$  경우에서는 인장력 상태로 반전된다. 특히,  $K=10^{-12} \text{ m}^2$

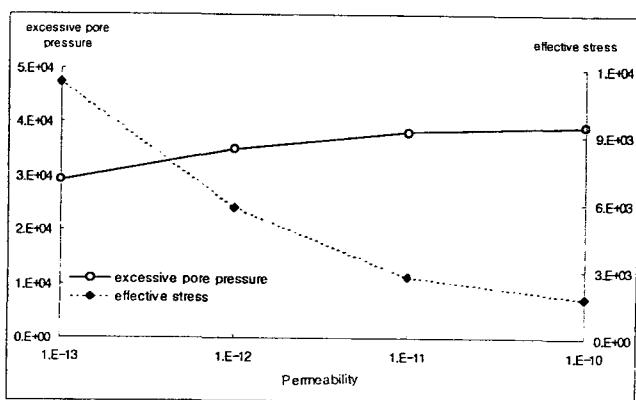


Fig. 9. Variations of excessive pore pressure and effective stress at depth 11cm with respect to sediment permeability.

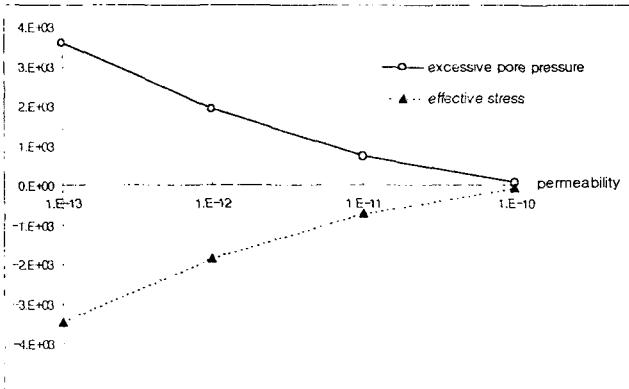


Fig. 10. Excessive pore pressure and effective stress at the instance of surface exposure.

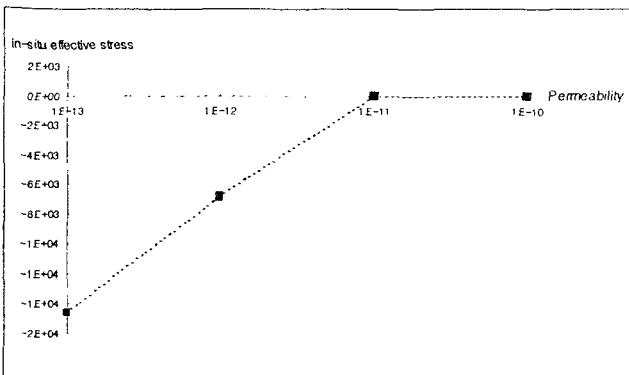


Fig. 11. In-situ effective stress developed at the depth of 11 cm.

경우에는 표층 노출 시간이 경과됨에 따라 과잉간극수압이 감소되어 현장유효응력이 압축력 상태로 전환되나, 투수계수가 극히 낮은  $K=10^{-13} \text{ m}^2$  경우에는 전체 표층 노출 기간에서 인장력이 발생되어 바지락 서식 기반인 퇴적층의 지반 안정성이 유지되지 못하고 있다. 결론적으로 조간대 퇴적층에 니질 성분이 증가되어 투수계수가  $10^{-12} \text{ m}^2$  이하로 감소될 경우 바지락 서식에 대한 저질 환경은 극히 불량한 것으로 사료된다.

곰소만 조간대에는 계절적 퇴적환경 변화에 따라 니질 퇴적물이 유입되어 표층에 퇴적되며, 퇴적두께에 따라 바지락 폐사에 큰 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 니질층 퇴적에 따른 지반 거동 변화를 분석하기 위하여 조간대 표층에 니질층이 2 cm 간격으로 최대 10 cm까지 퇴적된 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치 모의실험에 사용된 퇴적층 특성치들은 Table 1에 수록된 자료들을 이용하였다. 조석 해수면 수위가 최대인 시점에서 퇴적층내부에 형성되는 과잉간극수압의 깊이별 변화 양상을 Table 3에 수록하였다. 표층에 니질층이 퇴적되지 않은 경우 ( $h=0 \text{ cm}$ ) 원활한 유체확산작용에 의하여 과잉간극수압은 심도에 따라 약간 감소 추세를 나타내기도 하지만 거의 동일한 수준으로 형성된다. 니질층이 2 cm 두께로 덮혀 있는 경우 ( $h=2 \text{ cm}$ ) 니질층의 낮은 투수성에 기인하여 과잉간극수압은 전반적으로 감소되나, 표층에 퍼복된 니질층의 두께가 작아서 저질내의 유체유동에

Table 3. Excessive pore pressure distributions at the peak sea water level

Depth (cm)	Excessive pore pressure (Pa)				
	0	2	4	6	10
1	39371	36555	36876	37262	37569
11	39098	33474	29507	27429	26413
21	38855	33239	29309	27271	26285
31	38640	33032	29135	27131	26172
					25719

미치는 영향이 낮아 감소폭은 크지 않다. 한편, 니질 퍼복층 하부에서는 상대적으로 높은 투수성에 의한 저질내의 유체유동에 의하여 과잉간극수압의 발달 정도가 거의 유사하다. 이와 같은 양상은 니질 퍼복층의 두께가 증가할수록 확연하게 나타나며,  $h=10 \text{ cm}$  경우 니질층 하부에서 형성되는 과잉간극수압은  $h=0 \text{ cm}$  경우에 비해 약 2/3 정도로 감소된다.

조간대 표층이 대기중에 노출되는 시점에서의 과잉간극수압은 최대 수위 시점의 경우와 상반된 분포양상을 나타낸다. Table 4에 수록된 수치해석 결과에 의거할 때 니질 퍼복층의 두께가 증가할수록 상부 방향으로의 유체 유동이 저해되어 니질 하부층에서의 과잉간극수압은 증가되는 경향이다. 특히 한 점은 니질층 퍼복에 따른 과잉간극수압의 발달양상이 니질층 내부와 하부 퇴적층에서 상반되는 추세를 나타낸다. 니질층 퍼복에 따른 니질층 내부(심도 1 cm) 및 기존 퇴적층(심도 11 cm)에서의 과잉간극수압 변화를 Fig. 12과 13에 각각 도시하였다. 최대 해수면 수위 시점에서 심도 1 cm 지점에 형성되는 과잉간극수압은 니질층이 퍼복되지 않는 경우를 기준으로 퍼복두께 2 cm 경우 일단 상당히 감소되나, 퍼복량이 증가할수록 점점 높게 형성된다. 한편, 표층 노출 시점에서는 퍼복 두께 2 cm 경우에 증가되었던 과잉간극수압이 퍼복량 증가에 따라 낮아지는 추세를 나타낸다. 이와 같은 변화 양상은 니질층 내에서의 유체유동에 근거하여 설명될 수 있다. 니질층 퍼복은 최대 수위시점에서 하부방향으로의 유체유동을 저하시켜 심도 1 cm에서의 과잉간극수압이 낮게 형성된다. 그러나, 니질층 두께가 증가할 경우 심도 1 cm 하부의 퍼복두께도 증가하며, 이는 기존 저질층으로의 유체유동이 더욱 심하게 저하되는 현상을 초래한다. 결과적으로 심도 1 cm 지점까지 확산된 유체가 퍼복두께 증가에 의해 보존되어 과잉간극수압이 증가하게 된다. 한편, 표층노출시점의 경우에는 표층수압 소멸에 기인한 상부로의 유체유동이 퍼복두께 증가에 따라 저하되며, 이는 심도 1 cm 지점으로의 유체공급을 감

Table 4. Excessive pore pressure distributions at the instance of tidal flat exposure

Depth (cm)	Excessive pore pressure (Pa)				
	0	2	4	6	10
1	19	1895	1732	1462	1236
11	197	3948	6792	8199	8787
21	356	4104	6927	8308	8873
31	496	4242	7047	8403	8950
					9134

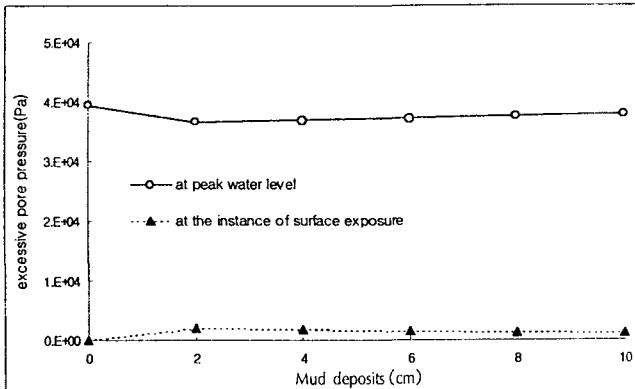


Fig. 12. Excessive pore pressure at the depth of 1 cm (mud layer).

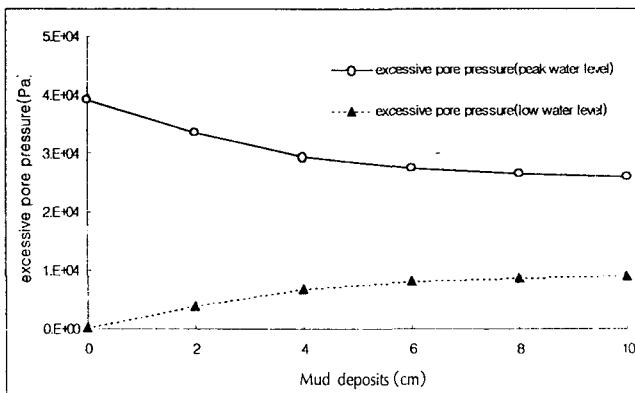


Fig. 13. Excessive pore pressure at the depth of 11 cm (silty sand layer).

소시켜 과잉간극수압이 낮아지는 직접적인 원인으로 작용한다. 기존 저질층 심도 11 cm 지점에서는 니질층 피복에 따른 유체유동 저하에 기인하여 과잉간극수압이 최대 수위 시점에서는 피복층 두께 증가에 따라 감소되며, 표층노출시점에서는 반대로 증가되는 추세를 나타내게 된다 (Fig. 13).

니질층 피복에 따른 과잉간극수압 변화에 의해 표층노출시점에서 저질층에 형성되는 심도별 현장유효응력을 산정하여 Table 5에 수록하였다. Fig. 13에 도시된 바와 같이 간석지 표면에 니질층이 피복될 경우 과잉간극수압은 피복두께에 따라 증가하며, 이 현상이 현장 유효응력 변화에 직접적인 영향을 끼쳐 기존 저질층의 지반 안정성이 저해된다. 니질층이 피복되지 않은 경우 기존 저질층에서 형성되는 현장유효응력은 압축력 상대를 지시하여 해수압 변화에 관계없이 지반 안정성이 확보된다. 그러나 간석지 표면에 니질 퇴적층이 피복될 경우에는 초기 피복량 증가에 의해 현장유효응력이 민감하게 변화된다. 심도 11 cm 이하의 기존 저질층에 형성되는 현장유효응력의 경우 피복량 6 cm 두께까지 급격하게 인장력 상태로 전환되며, 추가적인 피복량 증가에 대해서는 점진적인 변화양상을 나타낸다. 바지락의 서식 심도인 10~15 cm 깊이에서는 니질 피복 두께가 4 cm 이상일 경우 지반 안정성이 심하게 저하되며, 하부 심도 31 cm까지에서도 인장력 상태의 현장유

Table 5. In-situ effective stresses at the instance of tidal flat exposure

Depth (cm)	in-situ effective stress (Pa)					
	Thickness of mud deposit (cm)	0	2	4	6	8
1	889	-848	-2164	-2815	-3088	-3187
11	1705	-30	-1337	-1976	-2238	-2330
21	2533	798	-500	-1128	-1381	-1467

효응력이 형성된다. 현장에서 채취된 코어시료 관찰 결과에 의하면 폐사 바지락 패각은 심도 30 cm 정도까지 하강되어 있어 인장력 상태의 현장인장응력 형성시 저질층의 안정성 상실에 의해 연속적으로 침몰되는 증거를 제시하고 있다.

## 요약

곰소만 조간대에서 채취한 표층퇴적물에 대하여 입도분석을 수행하여 퇴적물의 조직 특성을 분석하였다. 코어 시료를 이용하여 퇴적물의 수리-역학적 특성을 실험적으로 도출하였으며, 퇴적물의 심도별 역학적 응력 및 과잉간극수압, 그리고 지반의 안정성을 수치해석적으로 분석하여 바지락 양식장 퇴적물의 거동 특성을 규명하였다. 곰소만 조간대내의 표층 퇴적물은 겨울에는 5 φ의 조립 실트가 주를 이루는 단모드형을 나타내고, 여름에는 5 φ의 조립실트질 퇴적물에 4 φ의 미세사질 퇴적물이 첨가된 경향을 보여준다. 바지락 양식장의 퇴적환경은 평균 입도 4~5 φ 범위, 모래 함량 50% 미만, 나질 함량 5~10% 범위를 나타낸다. 퇴적양상은 sandy silt이며, 분급도는 1.0~2.0 φ를 나타내고, 왜도는 0.1~0.5의 범위에 포함되어 퇴적물의 퇴적 작용이 방해가 될 만한 높은 에너지 상태가 지속되지 않는 환경이 바지락 양식에 양호한 것으로 조사되었다. 수치해석적 결과를 토대로 볼 때, 바지락 양식에 양호한 저질환경은 사질과 나질이 혼합되어 절대 투수계수가  $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ m}^2$  범위인 경우로 사료되며, 수치해석 모델링 결과 나질 피복층의 두께가 4 cm를 초과하게 되면 바지락 서식에 대한 저질환경은 크게 저하되고 있는 것으로 고찰된다.

## 감사의 글

이 논문은 해양수산부 수산특정연구개발과제 “폐류 양식장에서 지속적인 생산성유지를 위한 최적 생산기술개발”의 협동연구과제인 “간석지 폐류 (바지락) 양식장의 최적 생산기술 개발”의 연구 결과 일부입니다.

## 참고 문헌

- Biot, M.A. 1941. General theory three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys., 12, 155~165.  
 Chang, J.H., S.S. Chun, S.J. Kwon, D.H. Shin, S.J. Han and Y.A. Park. 1993. Sedimentary characteristics and evolution history of chenier.

- Gomso-Bay tidal flat, western coast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 28(3), 218~228 (in Korean).
- Chang, J.H. 1995. Depositional processes in the Gomso Bay tidal flat, west coast of Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul (in Korean).
- Chang, J.H. and J.Y. Choi. 1998. Seasonal accumulation pattern and preservation potential of tidal-flat sediments; Gomso Bay, West coast of Korea. 「The Sea」 J. Oceanol. Soc. Korea, 3(3), 149~157 (in Korean).
- Cigarria, A. and J.M. Fernandez. 2000. Management of *manila clam* beds; Influence of seed size, type of substratum and protection on initial mortality. Aquaculture, 182, 173~182.
- Davies, J.S. 1964. A morphogenic approach to world shorelines. Z. Geomorph., 8, 127~142.
- Folk, R.L. 1954. The distribution between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclatures. J. Geol., 62, 334~359.
- Folk, R.L. and W.C. Ward. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sed. Petrol., 27(1), 3~26.
- Gahboussi, J. and E.L. Wilson. 1973. Flow of compressible fluid in porous elastic media. Int. J. Num. Method Engng., 5, 419~442.
- Galehouse, J.S. 1971. Sedimentation analysis. In procedures in sedimentary petrology., Ed. By Carver, R. E. Wiley-Interscience.
- Gary, M., R. McAfee and C.L. Wolf. (eds.) 1972. Glossary of geology. Am. Geol. Inst., Washington, D.C., 857p.
- Hayes, M.O. 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries. In: Crolin, L.E. (ed), Estuarine Research, 2, 3~22.
- Kurashige, H. 1943. Seasonal variation in the weight and volume as well as the chemical composition of the soft body of *Tapes philippinarum* with special reference to its spawning. Bull. Kor. Fish. Ex. Sta. 8, 115~140.
- Lee, C.K., N.K. Chang and S.S. Choi. 1969. Studies on environmental factors in marine bivalve culture. Bull. Korean Fish. Soc., 2, 33~40.
- Lee, H.J., S.S. Chun, J.H. Chang and S.J. Han. 1994. Landward Migration of isolated Shelly Sand Ridge (Chenier) on the Macrotidal flat of Gomso Bay, west coast of Korea; Controls of Storms and Typhoon. J. Sed. Petrol., 64, 886~893.
- Mann, R. 1973. The effect of substrate particle size on growth of the manila clam *Tapes japonica*. Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, 28p.
- Nakase, A. and T. Kamei. 1983. In situ void ratio, strength and overburden pressure anomalies in seabed clays, in Seabed Mechanics, B. Deness, ed. Graham & Trotman Ltd., 9~15.
- Noorany, I. and S.F. Gizienski. 1970. Engineering properties of sub-marine soils-A state-of-the-art review. Proc. ASCE, 96(SM5), 1735~1762.
- Park, K.I., K.S. Choi and J.W. Choi. 1999. Epizootiology of *Perkinsus* sp. found in the *Manila clam*, *Ruditapes philippinarum* in Komsoe Bay, Korea. J. Korean Fish. Soc., 32, 303~309 (in Korean).
- Robert, L.B. and AJ. Julia. 1987. Glossary of Geology. Am. Geol. Inst., Virginia, 687p.
- Terzaghi, K. 1925. Principles of soil Mechanics. Eng. News Record.
- 유성규. 2000. 천해양식. 구덕인쇄소. 부산, 262pp.
- 농림수산부. 1991. 농림수산통계연보. 동양문화인쇄. 서울, 291pp.

---

2001년 2월 23일 접수

2001년 4월 30일 수리