

평택화력발전소 취수구 주변 해역에서 세립질퇴적물의 운반양상

류상옥^{1,*} · 장진호² · 최현용³

¹전남대학교 지구환경과학부, ²목포대학교 해양자원학과
³군산대학교 해양학과

Sedimentary Processes of Fine-grained Sediment around Intake of Pyongtaek Power Plant, West Coast of Korea

SANG-OCK RYU^{1,*}, JIN-HO CHANG² AND HYUN-YONG CHOI³

¹Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

²Department of Marine Resources, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

³Department of Ocean Information Science, Saemangeum Environmental Research Center,
Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

평택화력발전소 취수구 주변 해역에서 세립질퇴적물의 운반양상을 규명하기 위하여 표층퇴적물과 부유퇴적물에 대한 모니터링을 실시하였다. 표층퇴적물은 동계에는 상대적으로 개방된 북측해역에서 조립하고 남측해역에서 세립한 반면, 하계에는 조석의 영향에 따라 서측해역에서 조립하고 동측해역에서 세립한 퇴적상의 변화를 보인다. 부유 퇴적물의 농도는 동계에 높고 하계에 낮았으며, 표층수보다는 중·저층수에서 높은 농도를 보였다. 또한 조석에 따라서는, 조류의 비대칭성에 따라 육지 방향으로 이동되는 양이 바다 방향으로 이동되는 양에 비해 뚜렷하게 많았으며, 낙조에서 창조로 바뀌는 수심이 낮은 창조 초반에 급격히 증가하는 양상을 보였다. 장·단기간에 걸쳐 관측된 부유퇴적물의 순이동률은 $3.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \sim 5.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 범위로 육지쪽 취수구 방향으로 이동되었다. 이와 같은 현상은 취수구 주변에서 육지쪽으로 발생하는 인위적인 흐름과 주변의 인공구조물에 의해 조류의 순환양상이 변화되었기 때문으로 해석된다.

Distribution of surface and suspended sediments was studied to understand sedimentary processes of fine-grained sediment near the cooling water intake of Pyongtaek power plant on the west coast of Korea. The grain-size of surface sediment during the winter was coarser in the opened northern area than sheltered southern area. During the summer, finer sediment was found in the east (landward) than west due under dominantly the influence of tidal current. The concentration of suspended sediments was higher in the winter than summer and in the mid- to deep waters than surface waters. Asymmetry of tidal current induced net landward transport of suspended sediments. Landward transport of suspended sediments was most significant at the beginning of flood time when water level is low. Net suspended sediment fluxes ranged from $3.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ to $5.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. This large landward transport of suspended sediments is attributable to combination of enhanced flow induced by intake of cooling water and artificial structures near the water intake.

Key words: Surface sediment, Suspended sediment, Sedimentation rate, Net sediment flux, Pyongtaek power plant

서 론

한반도의 서해 연안역에 광범위하게 발달된 조간대는 마지막 빙하기(LGM, Last Glacial Maximum) 이후 약 5,000~6,000년 전 해수면이 현재의 위치에 도달하는 동안 형성되고 성장되어 왔다(Lee and Yoon, 1997; Chough *et al.*, 2000). 이렇듯 장기간에 걸쳐 발달된 조간대는 조석과 파랑, 계절에 따른 기상요인 등에 의

한 자연적인 퇴적작용과 함께 간척과 항만 및 발전소 건설 등과 같은 대소 규모의 인공적인 구조물 건설 등에 의해 예기치 못한 퇴적과 침식이 발생된다(Lee *et al.*, 1999; 추 등, 2000; 류 등, 2000; Ryu, 2002). 이러한 퇴적학적 변화는 연안역의 생태계 변화는 물론 간척지를 침식시키거나 원래 목적을 가지고 건설된 인공적인 구조물이 제 역할과 기능을 수행할 수 없도록 하는 요인이 되고 있다(해양수산부, 1999).

연구지역인 평택화력발전소 취수구 주변 해역은 북서 방향으로 열려있는 아산만 입구에 해당하는 곳으로, 만 밖으로는 남양방조

*Corresponding author: soryu@chonnam.ac.kr

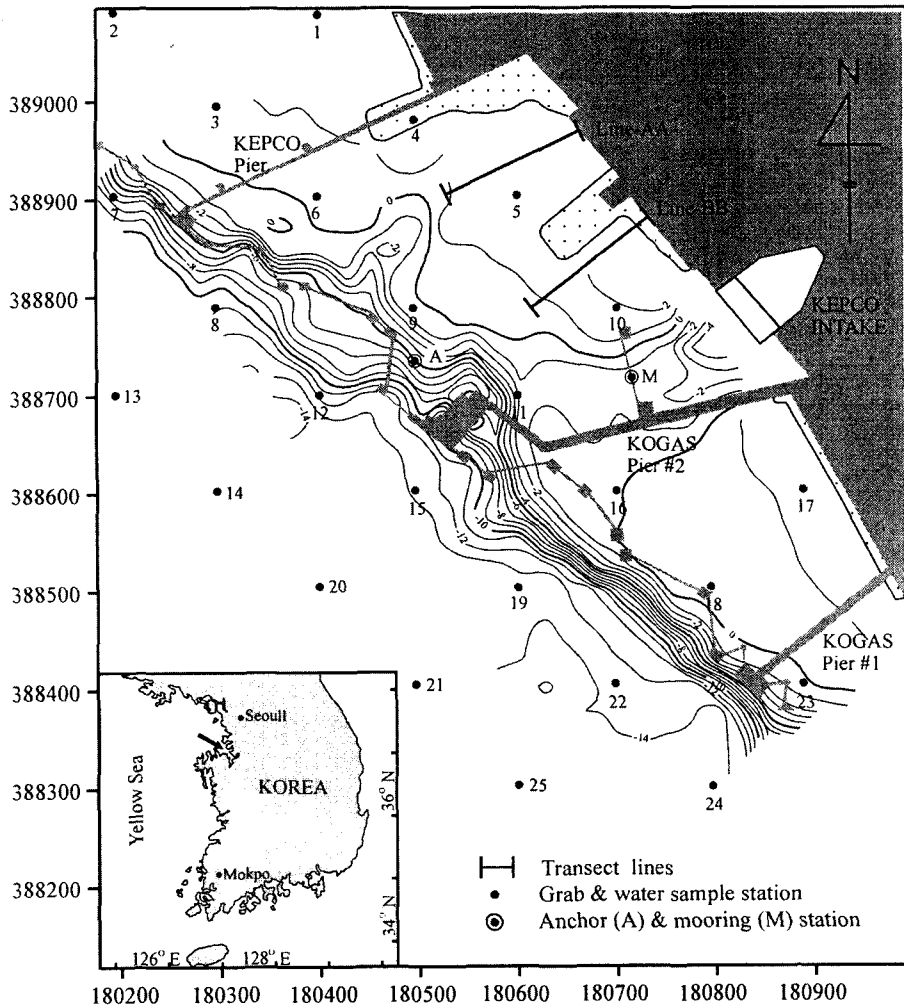


Fig. 1. Map showing the sampling sites and bathymetry of the study area. Depth in metres.

제가 건설되어 있으며 안으로는 서해대교와 삼교호가 건설되어 있는 인위적인 지형변화가 심한 지역이다(Fig. 1). 특히, 취수구 주변 해역은 선박의 접안을 위한 물량장과 교각으로 건설된 부두, 그리고 해안침식을 방지하기 위한 석축과 콘크리트 보호벽 등의 인공적인 구조물들이 곳곳에 건설되어 있으며(Fig. 1), 매몰 방지를 위한 준설이 주기적으로 수행되고 있다. 또한 발전기의 냉각을 위해 238,800 m³/h의 해수가 취수구를 통해 발전소로 유입되기 때문에 자연상태에서 발생되지 않는 인위적인 에너지가 취수구 주변에 발생되고 있다. 이러한 구조물과 보호벽, 주기적인 준설, 그리고 취수구에서 발생하는 인위적인 에너지는 조류와 파랑에너지의 변화를 유발하여 퇴적물의 이동 및 집적에 직·간접적으로 영향을 미칠 것으로 예측된다.

따라서, 본 연구에서는 취수구 주변 해역에 대하여 퇴적상의 변화가 예측되는 겨울과 여름을 대상으로 표층퇴적상의 변화를 제시하고, 취수구에 인접한 조간대를 대상으로 퇴적물을 규명하여 취수구 주변의 퇴적/침식양상을 간접적으로 규명하고자 한다. 또한 부유퇴적물의 공간분포와 장·단기간에 걸친 관측을 통하여 부유퇴적물의 거동 및 이동률을 규명하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

표층퇴적물 채취 및 분석

동계 및 하계 동안 취수구 주변 표층퇴적물의 공간분포를 조사하기 위하여 조간대 및 조간대의 25개 정점에서 2001년 2월과 8월에 반복하여 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 시료채취는 체니기(Lafond-type grab sampler)를 이용하였으며, 정점의 위치는 DGPS(Ashtech Co., model G12)를 사용하여 측정하였다.

퇴적물의 입도분석은 Ingram(1971)의 표준입도분석 방법에 의거하였으며, 측정된 자료는 그래픽 방법에 의해 평균입도, 분급도, 왜도 등의 통계적 입도상수를 구하였다(Folk and Ward, 1957).

수준측량

조간대의 지형 단면을 조사하기 위하여 취수구 주변 조간대를 대표할 수 있는 2개의 측선(측선 AA, BB)을 해안선에서 바다 방향으로 설정하고(Fig. 1) 그 측선을 따라 수준측량을 실시하였다. 수준측량은 레벨(Topcon AT-G3)을 사용하여 지형적 특징을 달리 하는 지점의 고도를 측정하는 방법으로 이루어졌다. 각 측정점의 고도는 측선의 출발 기준점으로부터 상대적인 고도를 의미한다. 연

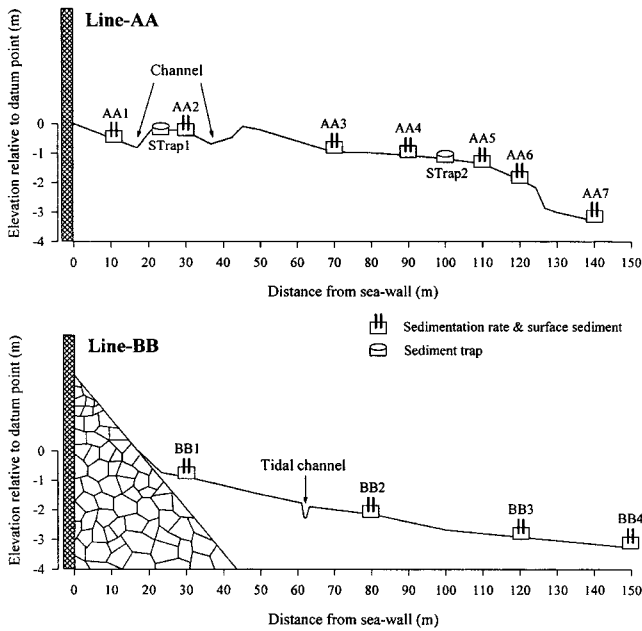


Fig. 2. Stations for sedimentation rate monitoring and elevation feature of lines (Line AA, BB) transecting the tidal flat of the study area. See Fig. 1 for location.

구에 사용된 측량기기는 7 km의 수평거리에 약 6 mm의 고도 오차를 갖는다.

조간대 모니터링

취수구 주변 조간대 퇴적물의 침식 및 퇴적양상을 조사하기 위하여 수준측량이 실시된 2개의 측선 상에 11개의 SRP(sedimentation rate plate)와 2개의 퇴적물 트랩(sediment trap)을 설치하고 퇴적물과 표층퇴적물의 입도 변화에 대한 모니터링을 실시하였다(Fig. 2). 퇴적물의 측정은 해저면 아래의 일정 깊이에서 30×30 cm의 아크릴 판을 기준점으로 설치하고, 주위 환경과 동화될 수 있도록 약 1개월 정도 기다린 다음, 해저면에서 기준면까지의 깊이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 또한, 해수중에서 부유상태로 집적되는 퇴적물의 특성을 조사하기 위하여 측선 AA 상의 해안선으로부터 30 m 지점(TR1)과 100 m 지점(TR2)에 직경 260 mm의 원통형 퇴적물 트랩을 해저면으로부터 약 10 cm 높이에 설치하여 2001년 2월 10일부터 2001년 5월 8일(1차), 그리고 2001년 5월 8일부터 2001년 8월 21일(2차)까지 총 192일 동안 2차에 걸쳐 부유퇴적물을 포획하였다.

조류 및 부유퇴적물의 장·단기 관측

동계 및 하계 동안 취수구 주변 부유퇴적물의 표층 공간분포를 조사하기 위하여 2001년 2월과 8월에 각각 25개 정점(Fig. 1)에서 반복하여 표층 해수시료를 채수하였다. 일반적으로 부유퇴적물의 농도는 소조(neap tide)보다는 대조(spring tide)시, 조류의 유속이 느릴 때보다는 빠를 때(일반적으로 간조 후 약 2시간 이후) 크게 증가하는 경향을 보이기 때문에, 본 조사에서는 대조기 때 간조 후 2시간 이후에 시작하여 30분 이내에 전체 해수시료를 채수하였다. 채수된 해수시료는 미리 건조시켜 무게를 측정할 여과지에

진공펌프를 사용하여 여과시킨 후 건조된 무게를 측정함으로써 부유퇴적물의 농도를 결정하였다. 이 때 여과지는 공극경이 0.45 μm 이고 직경이 4.7 cm인 Whatman Glass Microfiber Filter(GF/C)를 사용하였다.

취수구 주변으로 유출입되는 부유퇴적물의 거동과 이동을 규명하기 위하여 취수구에서 직선거리로 약 120 m 떨어진 취수로의 중앙 부분에 위치한 관측점 M(Fig. 1)에서 2000년 11월과 2001년 8월에 각각 15일 동안 해저면으로부터 2 m 높이에 RCM-9 도플러유속계(Norway)를 사용하여 10분 간격으로 조류의 유향 및 유속, 그리고 탁도(turbidity)를 관측하였다. 또한, 관측된 탁도 값(NTU, Nephelometer Turbidity Units)을 부유퇴적물의 농도 값(mg l⁻¹)과 비교하고 변환하기 위하여 장기관측 기간에 속하는 2001년 8월에 관측점 A(Fig. 1)에서 정선관측을 실시하였다. 관측은 1조석 주기 동안 30분 간격으로 상·중·하층에 대해 수직관측을 실시하였다. 조류의 유향과 유속은 장기관측시 사용한 RCM-9 도플러유속계를 사용하였으며, 부유퇴적물의 농도는 반돔(van Dorn) 채수기를 사용하여 해수시료를 채수하여 구하였다.

부유퇴적물의 이동률 계산

관측점 M과 A에서 얻어진 유속과 유향, 수심, 그리고 부유퇴적물의 농도값을 이용하여 부유퇴적물의 이동률을 구하였으며, 그 식은 다음과 같다(e.g., Gao et al., 1990).

$$f_s = (1/T) \int_T CV dt = (1/25) \left[\sum_{i=2}^{25} C_i V_i + (1/2)(C_1 V_1 + C_{26} V_{26}) \right] \quad (1)$$

여기서, f_s 는 각 층에서 부유퇴적물의 순이동률(net sediment flux; kg m⁻²S⁻¹), C는 부유퇴적물의 농도(kg m⁻³), V는 유속(m s⁻¹), T는 관측시간(12.5시간 동안 관측을 실시하였지만, 30분 간격을 가지는 25회의 대표 시간치에 대해 관측을 실시하였으므로 25로 설정), 그리고 각각의 아래첨자는 시계열 자료를 나타낸다.

결 과

표층퇴적물의 공간분포

평택화력발전소 취수구 주변 표층퇴적물은 역에서 점토에 이르기까지 다양한 입도의 퇴적물로 구성되어 있다. 표층퇴적물을 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시한 결과 동계에는 약역니질사((g)MS), 약역질니((g)M), 사질실트(sZ), 실트(Z), 니(M)의 5개 퇴적상으로 구분되는데 반해, 하계에는 약역질니, 사질실트, 실트의 3개 퇴적상으로 구분되어 상대적으로 단순화되는 경향을 보였다(Fig. 3).

동계에는 취수구를 기준으로 북측에 사질실트 퇴적물이, 남측에는 니 퇴적물이 각각 우세하게 분포하여 상대적으로 북측에서 조립하고 남측에서 세립한 경향을 보인다(Fig. 3A). 그러나 하계에는 남북으로 양분되는 분포가 파괴되고 동서로 양분되는 퇴적상의 변화가 이루어진다(Fig. 3B). 즉, 서측의 바다 쪽에는 사질실트 또는 약역질니 퇴적물이 우세하게 분포하지만 동측의 육지 쪽에는 실트 퇴적물이 분포하여 상대적으로 서측에서 조립하고 동측에서 세립한 경향을 보인다. 한편, 하계 동안 동·서측의 평균

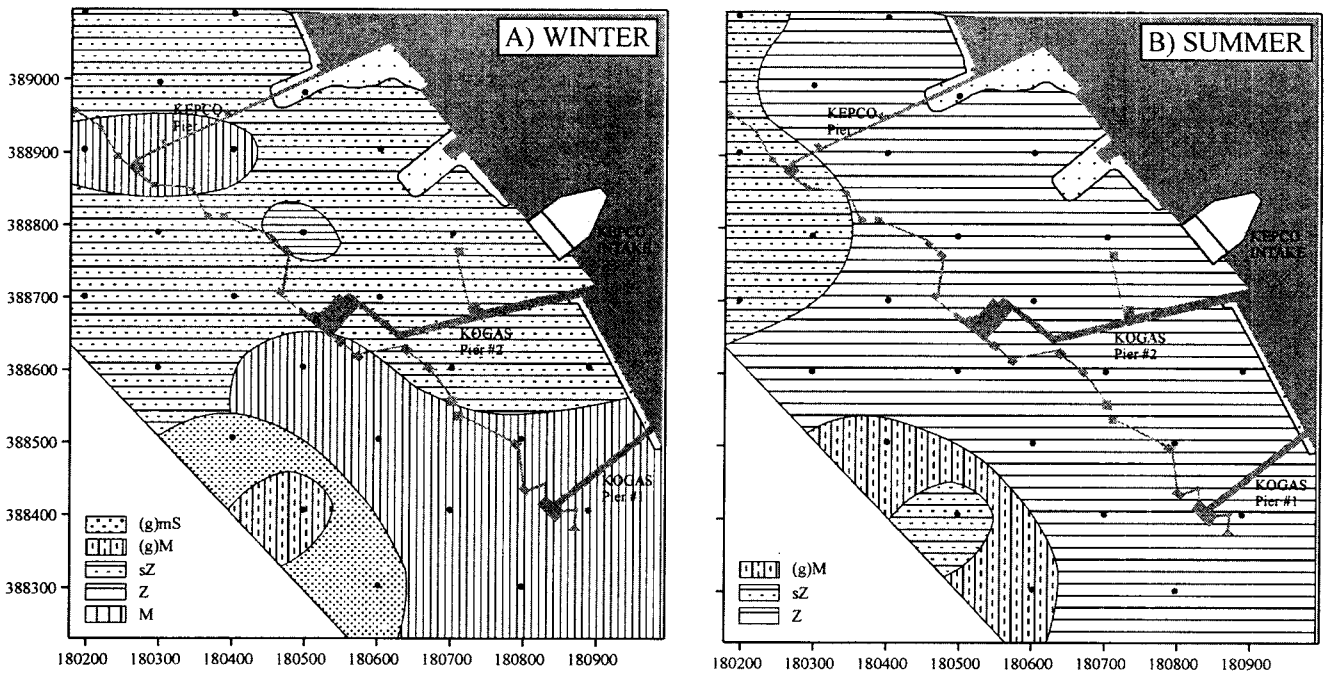


Fig. 3. Spatial distributional pattern of surface sediment in the winter (A) and summer (B) in the study area.

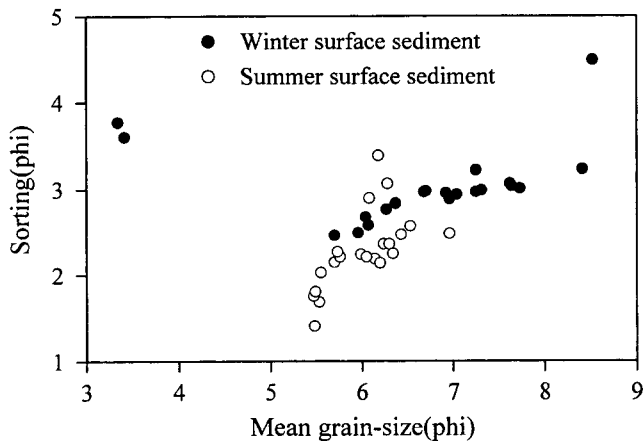


Fig. 4. Plots of sorting value versus mean grain-size of surface sediment sampled in the winter and summer.

입도 편차는 동계 동안 남·북측의 편차에 비해 크지 않고, 분급도 전반적으로 양호해지는 경향을 보인다. 이와 같은 양상은 Fig. 4의 평균입도와 분급도를 합수로 하는 산포도에서 잘 관찰된다. 겨울에는 평균입도가 3~9 ϕ 범위로 조립에서 세립까지 산포되어 나타나고 분급은 3 ϕ 내외로 전반적으로 불량한 경향을 보인 반면, 여름에는 평균입도가 5~7 ϕ 범위로 균질하며 분급은 2 ϕ 내외로 겨울에 비해 상대적으로 양호해진다.

조간대 지형

취수구 주변 조간대는 해안선에서 간조선 방향으로 약 150 m의 폭을 갖는다(Fig. 2). 조간대와 육지가 만나는 경계면에는 5 m 높이 이상의 콘크리트 방호벽과 석축이 수직 또는 약 45° 경사로

쌓여 있으며, 만조시 해수면은 약 5 m 높이에 이르게 된다. 취수구로부터 상대적으로 멀리 떨어진 측선 AA의 조간대 상부는 조류로(tidal channel)와 역질퇴적층(gravel deposit)의 발달에 의해 요철형태를 보이는 반면, 조간대 중부는 완경사를 가지고 간조선 방향으로 연장되어 있으며, 위쪽으로 볼록한(up-ward convex) 형태를 이루고 있다. 조간대 하부는 중부와 접하는 면이 약 1 m의 고저차를 보이며 수직에 가까운 급사면을 이루며 발달되어 있다(Fig. 2). 취수구에 인접한 측선 BB의 조간대는 뚜렷한 기복의 변화 없이 만조선에서 간조선 방향으로 완경사를 가지고 연장되며, 조간대 내에는 사행조류(meandering tidal channel)가 발달되어 있다(Fig. 2).

조간대 퇴적물의 분포 및 변화

조간대 측선 AA와 BB의 모니터링 정점에서 동계(2001년 2월)와 하계(2001년 8월)에 채취하여 분석한 표층퇴적물의 평균입도 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 표층퇴적물의 평균입도는 5.5~7.1 ϕ 범위로 실트 퇴적물이 우세한 분포를 보이는 가운데, 측선 AA에서는 만조선에서 간조선 방향으로 가면서 세립해지는 반면, 측선 BB에서는 조립해지는 상반된 경향을 보였다.

계절적으로는 측선 AA의 조간대 상부 및 하부는 동계에 조립하고 하계에 세립한 반면, 측선 AA의 조간대 중부 및 측선 BB에서는 하계에 조립하고 동계에 세립한 상반된 경향을 보였다(Fig. 5). 또한 파랑의 영향을 강하게 받는 측선 AA의 만조선과 간조선 주변을 제외하고는 동계와 하계의 평균입도 변화폭은 1 ϕ 이내로 크지 않았다.

조간대 퇴적물의 집적 및 침식양상

측선 AA와 BB에서 모니터링한 결과 조사기간 동안(2001년 2월부터 2001년 8월까지) 퇴적률은 측선 AA에서 -9.1 mm로 침식

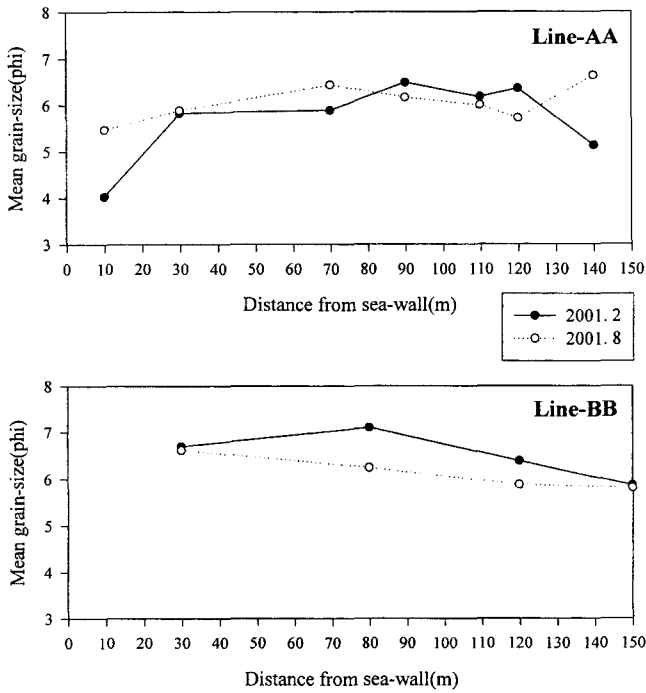


Fig. 5. Mean grain-size variation of lines (Line AA, BB) transecting the tidal flat of the study area. For location of measuring sites, see Fig. 1.

되는 반면, 측선 BB에서는 8.5 mm로 퇴적되는 경향을 보였다(Table 1). 측선 AA에서는 대부분의 지역이 뚜렷하게 침식되었으며, 해안선으로부터 120 m 거리에 위치하는 정점 AA6에서 -109.7 mm로 최대 침식율을 나타냈다. 그러나 다른 정점들과는 달리 지형적 저지에 해당하는 간조선 주변 정점 AA7에서는 288.2 mm로 높은 퇴적물을 나타냈다. 또한 정점 AA7를 제외한 모든 정점에서는 관측 기간 동안 지속적으로 침식된 반면, 간조선 주변 정점 AA7에서는 지속적으로 퇴적되는 상반된 경향을 보였다. 측선 BB에서는 조간대 중부를 경계로 육지쪽에서는 조사기간 동안 지속적으로 침식된 반면, 바다쪽에서는 지속적으로 퇴적되는 상반된 경향을 보였다(Table 1).

한편, 2001년 2월 10일부터 5월 8일까지 87일 동안(1차) 퇴적

물 트랩에 집적된 퇴적물의 무게는 TR1에서 1,008 g, TR2에서 924 g으로 만조선 부근에 설치한 TR1에서 다소 높았으며, 2001년 5월 8일에서 8월 21일까지 105일 동안(2차) 집적된 퇴적물의 무게는 TR1에서 789 g, TR2에서 1,003 g으로 간조선 부근에 설치한 TR2에 집적된 퇴적물의 양이 많았다. 2차에 걸쳐 집적된 퇴적물의 무게는 총 192일 동안에 TR1에서는 1,797 g(연간 3,416 g), TR2에서는 1,927 g(연간 3,663 g)으로 간조선 주변에 설치한 TR2에서 상대적으로 약간 많았다.

또한 퇴적물 트랩에 집적된 퇴적물의 입도분석 결과, 조립 또는 세립 꼬리의 수직적 증감과 최빈값(mode)의 변화에 의한 입도점이(size grading) 현상을 잘 보여준다. TR1에서는 1차에 -5~4φ와 4~5φ 구간(평균입도 -1.0φ, 분급도 4.0φ)에서, 2차에는 -4~3φ와 4~5φ 구간(평균입도 -0.5φ, 분급도 3.7φ)에서 모드를 보이는 북모드(bi-mode) 입도특성을 보였다(Fig. 6). TR2에서는 1차에 0~1φ와 4~5φ 구간(평균입도 6.4φ, 분급도 3.1φ)에서, 2차에는 5~6φ 구간(평균입도 6.4φ, 분급도 2.3φ)에서 각각 모드를 보여 북모드에서 단모드로 변화되었다(Fig. 6). 여기서, 조립 구간의 퇴적물은 인근의 조류로(Fig. 2참조)에 존재하는 조립질퇴적물이 해안선을 따라 건설된 수직의 방호벽(seawall)에 기인한 만조선 주변의 쇄굴현상(scouring effect)(Lee *et al.*, 1999; Chu *et al.*, 2001; Ryu, 2002)과 강한 파랑에너지에 의해 도약(saltation)이나 단속적 부유(intermittent suspension)를 통해 운반된 밑짐(bedload) 퇴적물로 생각된 반면, 세립 계급 구간의 퇴적물은 완전한 부유상태에서 집적되는 뜬짐(suspended load) 퇴적물로 해석된다.

조류의 비대칭성

취수구 주변의 중층에서 정선관측된 조류의 유속은 2.8~34.4 cm s⁻¹ 범위였지만 창조시와 낙조시의 최강유속은 서로 다른 비대칭성을 나타냈다(Fig. 7). 창조시의 최강유속은 저조(low water) 후 약 2시간 이후에 34.2 cm s⁻¹로 최대값을 나타내고 낙조시 최강유속은 낙조 후반부에 22.5 cm s⁻¹로 최대값을 보여, 창조시 최강유속이 낙조시 최강유속보다 강한 창조우세현상을 보였다.

조류의 유향은 101.9~315.5°범위에서 변화하였는데, 대단히 복잡한 양상을 보였다(Fig. 7). 최초관측 시간인 5시 30분에는 수심 12.7 m, 창조류로 조류의 방향은 128.3°로 육지쪽 취수구 방향을

Table 1. Sedimentation rates along lines on the tidal flat of the study area for the period of time (Feb. '01-Aug. '01).

Site	Accumulation rate(mm)		ΔD (mm)	Average (mm)	Assumed annual sedimentation rate (mm/yr)
	(01.2-5)	(01.5-8)			
Line-AA				-9.2	-17.5
AA1	-2.2	-43.8	-46.0		
AA2	-14.4	-47.4	-61.8		
AA3	-13.7	-14.8	-28.5		
AA4	-12.4	-50.5	-62.9		
AA5	-12.1	-31.4	-43.5		
AA6	-54.4	-55.3	-109.7		
AA7	134.5	153.7	288.2		
Line-BB				8.5	16.2
BB1	-26.1	-30.6	-56.7		
BB2	-15.0	8.6	-6.4		
BB3	21.5	34.2	55.7		
BB4	6.5	35.0	41.5		

ΔD=cumulative accumulation or erosion between the initial and the last measurements.

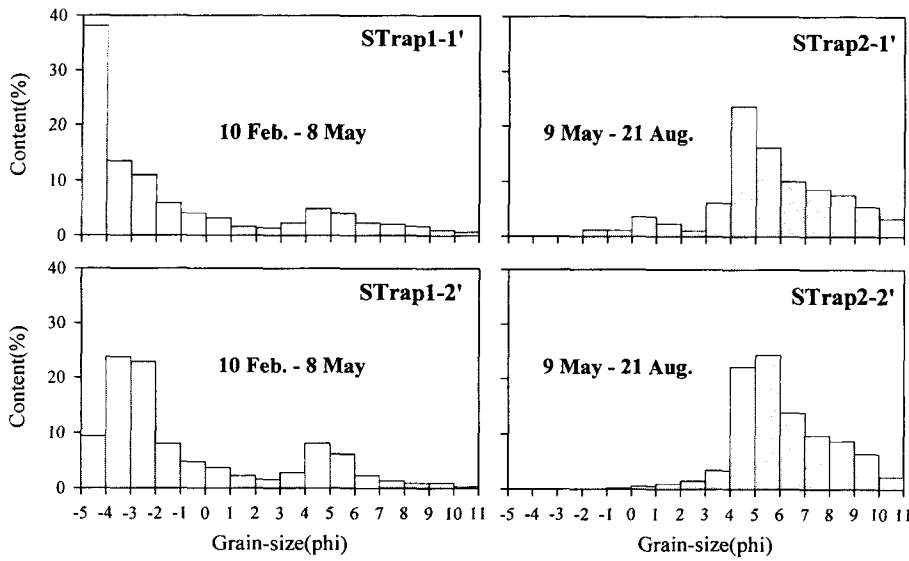


Fig. 6. Grain-size mode variation of sediment settled in sediment traps.

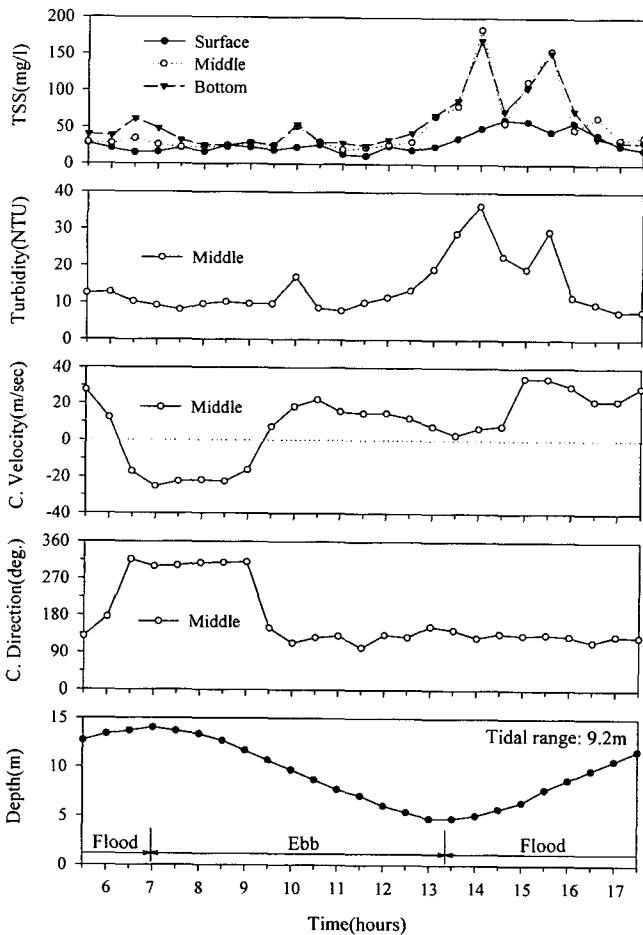


Fig. 7. Time series (13 h) of tide, currents, turbidity and suspended sediment concentration from anchor station A at summer. See Fig. 1 for location.

가리켰다. 그러나 6시 30분과 7시에는 각각 수심 13.7 m와 14.0 m로 수위가 올라가고 있음에도 불구하고 조류의 방향은 낙조류의 주 방향인 300°내외로 바다쪽을 향했다. 반면, 7시 30분부터 13시

30분까지는 낙조류로 수심은 13.7 m에서 4.8 m로 점점 낮아지고 있음에도 불구하고, 그러나 조류의 방향은 7시 30분부터 9시까지는 낙조류의 주 방향인 300°내외를 가리켰으나 9시 이후부터 13시 30분까지는 창조류의 주 방향인 120°내외(취수구 방향)를 가리켜 조석위상과 조류의 이동방향은 일치되지 않는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 일반적인 조류 특성과 일치하지 않는 것으로 취수구 주변에서 부유퇴적물의 이동양상을 추적할 때 대단히 중요하게 고려되어야 한다.

부유퇴적물의 공간분포

동계와 하계 동안 대조기의 창조시 관측된 취수구 주변 부유퇴적물의 표층 농도는 12.0~104.4 mg l⁻¹ 범위로 시·공간적으로 다양한 농도 분포를 보였으며, 하계(평균 27.1 mg l⁻¹)보다는 동계(평균 56.5 mg l⁻¹)에 높은 농도를 보였다(Fig. 8). 동계에는 취수구 주변 및 PT13에서 최대 80 mg l⁻¹ 이상으로 높은 농도를 보인 반면, 하계에는 30 mg l⁻¹ 내외로 낮고 균질한 농도분포를 보였다. 동계 동안 부유퇴적물의 농도가 증가하는 현상은 동계에 파랑에너지가 강화되면 표면마찰력이 해저에 직접 전달되면서 해저마찰력은 크게 증가되고(Kang and Choi, 1984) 해저퇴적물이 활발하게 재부유되어 상부수괴로 쉽게 확산되기 때문이다(Park and Choi, 1989).

부유퇴적물의 거동

2001년 8월 대조기에 1조석 주기 동안 정선관측된 부유퇴적물의 농도는 평균 44.7 mg l⁻¹(11.4~184.2 mg l⁻¹ 범위)로 하계임에도 불구하고 비교적 높은 값을 보였다(Fig. 7). 수층별로는 표층수에서 평균 28.8 mg l⁻¹, 중층수에서 50.4 mg l⁻¹, 저층수에서 54.9 mg l⁻¹로 표층수에 비해 중층수와 저층수에서 높은 농도를 보이며, 표층에서 저층으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 해수의 이동방향에 따라서는, 표층수의 경우 육지방향으로 평균 36.5 mg l⁻¹, 바다방향으로 19.5 mg l⁻¹, 중층수에서는 육지방향으로 58.0 mg l⁻¹, 바다방향으로 26.3 mg l⁻¹, 저층수에서는 육지방향으로 60.4 mg l⁻¹, 바다방향으로 37.2 mg l⁻¹로 모든 수층에서 육지방향으로 이동되는 양이 바다방향으로 이동되는 양에 비해 뚜렷하게 증가하는 경

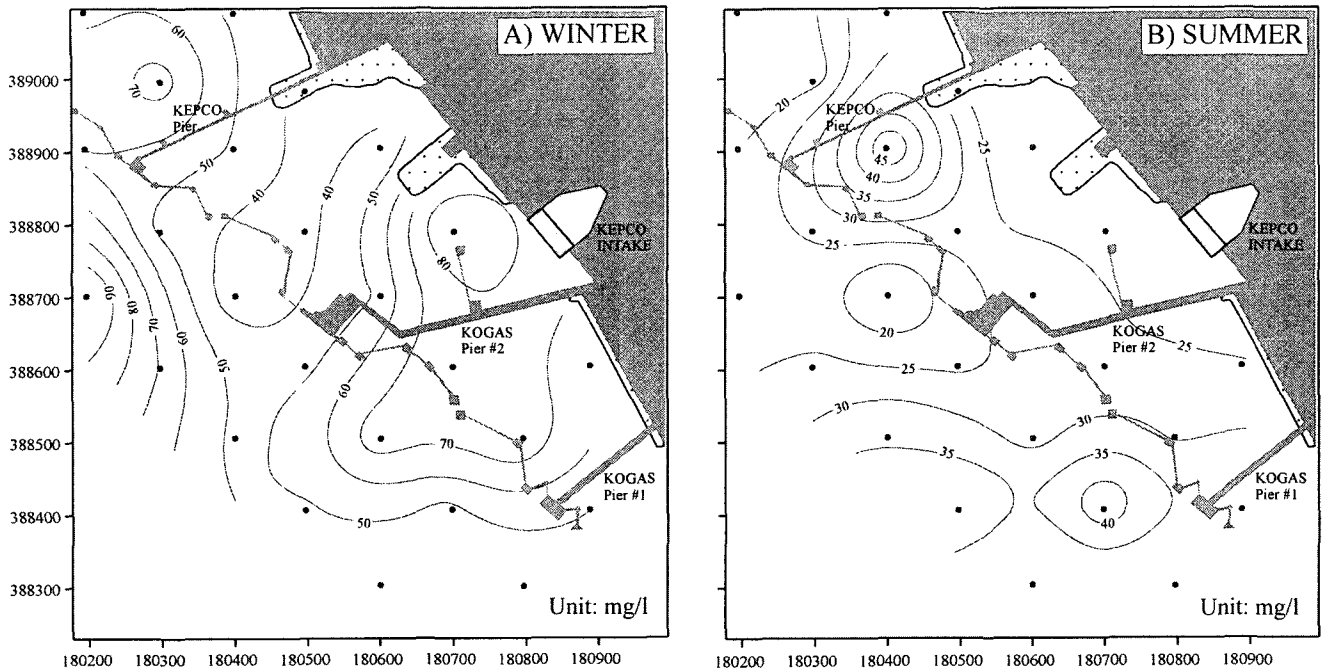


Fig. 8. Spatial distributional pattern of suspended sediment in the winter (A) and summer (B) in the study area.

향을 보였으며, 특히 수심이 낮은 창조류 초반부에 급격히 증가하는 경향을 보였다(Fig. 7).

한편, 1조석 주기 동안 중층수에서 관측된 탁도(turbidity)의 시계열 변화는 부유퇴적물 농도의 시계열 변화와 잘 일치되는 경향을 보였다(Fig. 7). 따라서, 이와 같은 결과에 근거하여 해저면상 2 m에서 2000년 11월과 2001년 8월에 장기관측된 탁도값을 부유퇴적물의 농도로 변환하였으며(cf. Anderson and Pejrup, 2001), 그 식은 아래와 같다.

$$SSC(mg\ l^{-1}) = 2.5130x(100\ NTU\ 이하) \\ = 0.0336x^2 - 1.0379x(100\ NTU\ 이상) \quad (2)$$

여기서 SSC는 부유퇴적물의 농도($mg\ l^{-1}$)이며, x는 탁도(NTU)이다. 부유퇴적물의 농도로 변환된 장기관측 결과에 따르면, 부유퇴적물의 농도는 2000년 11월에는 육지쪽 취수구 방향으로 평균 $36.8\ mg\ l^{-1}$, 바다방향으로 $27.1\ mg\ l^{-1}$, 2001년 8월에는 육지방향으로 평균 $33.0\ mg\ l^{-1}$, 바다방향으로 $25.1\ mg\ l^{-1}$ 로 1조석 주기 동안 정선관측한 결과와 유사한 시계열 변화와 농도를 나타냈다(Fig. 9).

부유퇴적물의 이동률

Fig. 10과 11은 취수구 주변에서 조류의 유속과 유향, 부유물질의 농도의 시계열자료를 이용하여 부유퇴적물의 이동양상을 나타낸 것이다. 각 정점에서 관측된 유속은 내만으로 향하는 흐름을 양(+)의 값, 그리고 외해쪽으로는 흐름은 음(-)의 값으로 표시하였다. 하계 대조기의 1조석 주기 동안 정선관측된 부유퇴적물의 순이동율은 $5.7 \times 10^{-3}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 로 육지쪽 취수구 방향으로 이동

되는 경향을 보였다(Fig. 10). 수층별로는 표층수에서 $3.6 \times 10^{-3}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 중층수에서 $6.9 \times 10^{-3}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 저층수에서 $6.6 \times 10^{-3}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 로 표층수에 비해 중·저층수에서 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으며, 부유퇴적물의 농도 분포와는 달리 중층수에서 최대값을 보였다(Fig. 11). 이동방향은 관측된 모든 수층에서 육지쪽 취수구 방향을 따라 유입되는 경향을 보였다. 또한 장기계류관측 결과에 의하면, 부유퇴적물의 순이동율은 2000년 11월에 $3.4 \times 10^{-3}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 2001년 8월에 $5.6 \times 10^{-3}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 로 2000년 11월에 비해 2001년 8월에 높았으며, 2회의 관측기간 모두 육지쪽 취수구 방향으로 이동되는 경향을 보였다(Fig. 10).

고 찰

조간대 퇴적물의 운반양상

조간대에서 퇴적물의 운반양상은 퇴적물의 종류와 공급원, 해저 및 연안지형, 조류와 파랑 등의 동력학적 특성, 그리고 생물의 종류와 밀도 등에 의해 크게 좌우된다(Anderson and Pejrup, 2001). 그러나 연구지역과 같이 조간대의 발달이 미약하며 강이나 하천과 같은 퇴적물의 공급원이 뚜렷하게 존재하지 않고 평균조차가 약 10 m에 이르는 대조차환경에서는 기본적으로 조류의 영향을 강하게 받는다. 실제로 취수구에 인접한 남측 조간대(측선 BB)는 조류의 영향에 따라 조류로(tidal channel) 및 조류세곡(tidal creek)의 발달이 양호하며(Fig. 2), 간조선에서 만조선으로 가면서 평균입도가 세립해지는 경향을 보인다(Fig. 5). 관측기간 동안 퇴적물은 만조선 부근을 중심으로 다소 침식되지만 간조선 주변을 중심으로 퇴적되어 전체적으로 퇴적되는 양상을 보이며(Table 1), 평균입도는 부유퇴적물의 공급양에 따라 동계에 세립하고 하계에 조

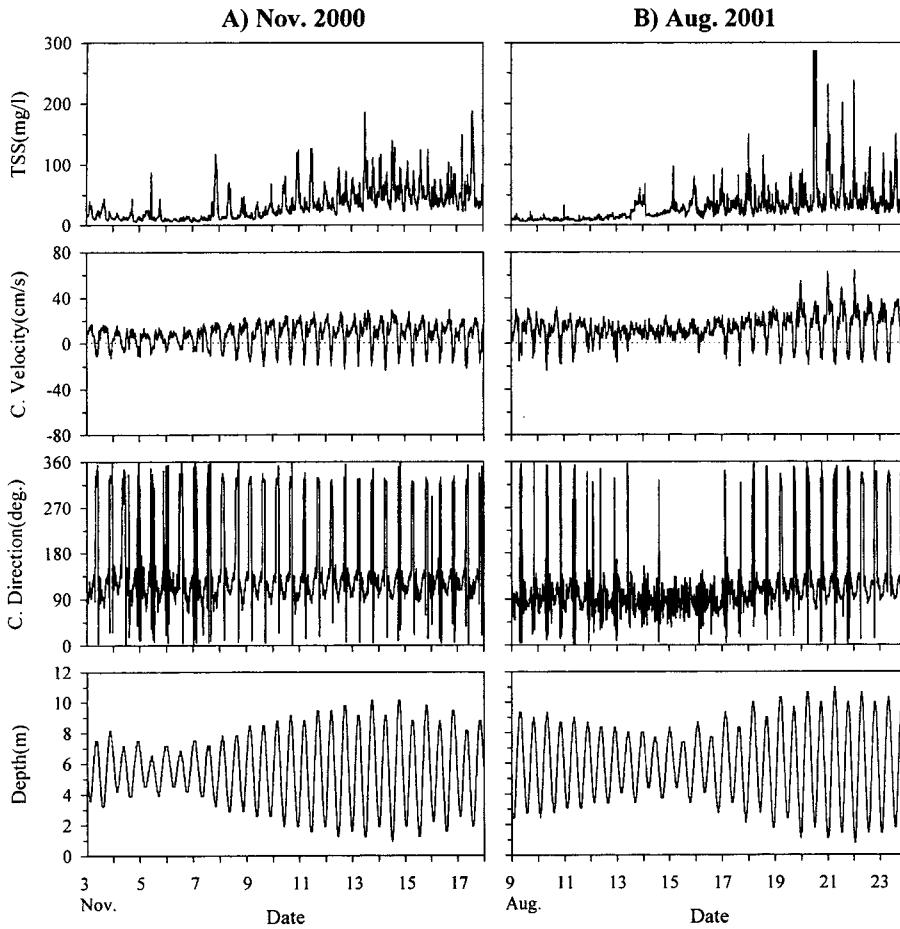


Fig. 9. Time series of tide, currents and suspended sediment concentration from mooring station M in November 2000 and August 2001. See Fig. 1 for location.

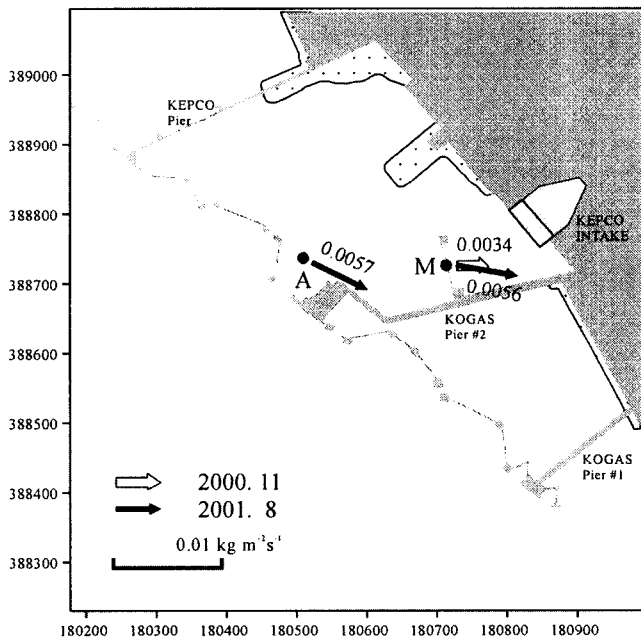


Fig. 10. Vector diagram showing net flux of suspended sediment. Calculation based on time series of tide, currents, turbidity and suspended sediment concentration (see Fig. 7). Note that suspended sediment is somewhat imported into the KEPCO intake.

립한 경향을 보인다(Fig. 5).

그러나 취수구로부터 멀리 떨어진 북측 조간대(측선 AA)는 남측 조간대에 비해 개방된 지형적 특징에 따라 파랑의 영향을 상대적으로 강하게 받을 뿐 아니라 해안선을 따라 건설된 수직의 방호벽에 기인한 만조선 주변의 쇄굴현상(Lee *et al.*, 1999; Chu *et al.*, 2001; Ryu, 2002)에 의해 조류로 및 조류세곡의 발달이 미약하고 역질퇴적층(gravel deposit)의 발달이 양호하며(Fig. 2), 만조선에서 간조선 방향으로 가면서 평균입도가 세립한 경향을 보인다(Fig. 5). 관측기간 동안 퇴적률은 간조선 부근의 지형적 저지(AA7)에서 퇴적되지만 전체적으로 침식되는 양상을 보이며(Table 1), 평균입도는 파랑의 영향에 따라 동계에 조립하고 하계에 세립한 남측 조간대와 상반된 경향을 보인다(Fig. 5). 이와 같은 현상은 북측 조간대의 상부 및 중부에 설치되어 퇴적물 트랩에 집적된 퇴적물의 특성, 즉 매우 굵은 잔자갈의 존재, 조립 또는 세립꼬리의 수직적 증감과 최빈값의 이동에 의한 입도의 점이현상을 통해서도 알 수 있다(Fig. 6).

부유퇴적물의 거동 및 이동률

하계의 대조기에 1조석 주기 동안 정선관측된 부유퇴적물의 농도는 평균 44.7 mg l⁻¹로 표층수에 비해 중·저층수에서 높은 농도를 보였다(Fig. 7). 일반적으로 대조기에는 강한 조석작용을 동반하므로 수괴의 수직적 혼합작용이 원활하게 이루어져 부유퇴적

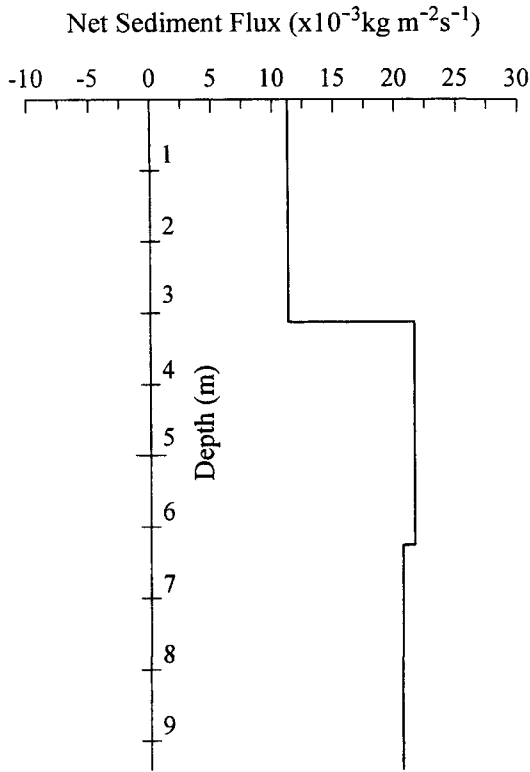


Fig. 11. Vertical transport pattern of suspended sediment for one tidal cycle at anchor station (A) during summer. See Fig. 1 for location.

물의 수층별 농도 차이가 감소되는 경향을 보인다(Officer, 1976). 그러나 본 조사에서는 대조기 입에도 불구하고 중·저층수에서 비교적 농도가 높은 성층현상을 보였다.

한편, 부유퇴적물의 이동양상은 한 정점에서 관측된 조류와 밀접한 관련성을 가지고 있기 때문에 부유퇴적물 농도의 시계열 변화가 크더라도 일차적으로 조류의 유향과 유속, 그리고 지속시간에 따라 좌우된다(Nichols, 1977). 취수구 주변에서 관측된 조류의 유향과 지속시간은 장단기 관측 결과에 무관하게 육지쪽 취수구 방향(120°내외)으로 약 9시간 정도, 바다 방향(300°내외)으로 약 3시간 30분 정도로 뚜렷한 비대칭성을 보였다(Fig. 7). 이와 같은 현상은 조석현상만으로는 설명되지 않으며, 인위적인 요인이 가미되는 것으로 해석된다. 즉, 낙조류 입에도 불구하고 낙조 초반부 이후에 조류의 방향이 육지쪽을 가리키는 것은 수심이 낮아짐에 따라 취수구에서 물을 흡입하는 속도가 상대적으로 증가할 뿐 아니라 취수구 방향을 따라 건설된 인공구조물의 영향으로 육지쪽의 취수구 방향을 가리키는 것으로 생각된다. 또한 창조류 입에도 불구하고 창조 후반부에 조류의 방향이 낙조시 주 방향인 북서쪽(300°내외)을 가리키는 것은 인공구조물과 관련된 지형적 요인으로 해석된다. 실제로 이와 같은 조류의 비대칭성은 부유퇴적물의 이동에 있어서 육지쪽 취수구 방향으로 편향된 결과 값으로 나타나고 있다. 하계의 1조석 주기 동안 정점 A에서의 정선관측 결과, 부유퇴적물의 순이동율은 $5.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 전 수층에서 육지쪽 취수구 방향으로 이동되었으며, 표층수에 비해 중·저층수

에서 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다(Figs. 10, 11). 또한 정점 M에서의 장기 계류관측 결과 역시 2000년 11월에 $3.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 2001년 8월에 $5.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 육지쪽 취수구 방향으로 이동되는 것으로 나타났다(Fig. 10).

따라서, 취수구 주변은 수심이 낮은 낙조 후반과 창조 초반에 상대적으로 강하게 나타나는 취수구에서 발생하는 육지 방향의 인위적인 흐름, 그리고 취수구 주변에 건설된 인공구조물에 의해 조류의 이동양상이 변화되고, 이에 따라 취수구 방향으로 이동되는 양이 바다방향으로 이동되는 양에 비해 뚜렷하게 많은 것으로 해석된다.

결론

평택화력발전소 취수구 주변 해역에서 세립질퇴적물의 운반양상을 연구한 결과, 주요 내용은 다음과 같다.

1. 표층퇴적물의 공간분포는 동계에는 북측에서 조립하고 남측에서 세립한 경향을 보인 반면, 하계에는 남북방향의 분포가 파괴되고 바다방향의 서측에서 조립하고 육지방향의 동측에서 세립한 퇴적상의 변화가 이루어진다.

2. 부유퇴적물의 표층농도는 동계에는 파랑에너지의 강화에 따른 재부유 작용에 의해 취수구와 아산만 주수로를 중심으로 높은 농도(평균 56.5 mg l^{-1})를 보인 반면, 하계에는 전체적으로 낮은 농도(평균 27.1 mg l^{-1})를 보이며 균질한 양상을 보인다.

3. 조간대퇴적물의 평균입도는 남측 조간대(측선 BB)에서는 간조선에서 만조선 방향으로 갈수록 세립한 경향을 보이며, 부유퇴적물의 공급량에 따라 동계에 세립하고 하계에 조립해지는 경향을 보인다. 그러나 북측 조간대(측선 AA)에서는 해안선을 따라 건설된 수직의 보호벽에 의한 쇄굴현상과 상대적으로 강한 파랑의 영향에 의해 간조선에서 만조선 방향으로 갈수록 조립한 경향을 보이며, 파랑의 강약에 따라 동계에 조립하고 하계에 세립해진다.

4. 관측기간 동안 퇴적물은 남측 조간대에서는 만조선 주변을 중심으로 다소 침식되거나 전체적으로 퇴적되는 경향을 보인 반면, 북측 조간대에서는 간조선 주변의 지형적 저지에서 퇴적되거나 전체적으로 침식되는 경향을 보인다.

5. 취수구 주변에서 1조석 주기 동안 정선관측된 부유퇴적물의 농도는 평균 44.7 mg l^{-1} 를 보였으며, 표층수에 비해 중·저층수에서 보다 높은 농도를 보였다. 해수의 이동방향에 따라서는, 조류의 비대칭성에 따라 육지 방향으로 평균 51.6 mg l^{-1} , 바다방향으로 27.7 mg l^{-1} 로 육지 방향으로 이동되는 양이 뚜렷하게 많았으며, 낙조에서 창조로 바뀌는 수심이 낮은 창조류 초반부에 급격히 증가하는 경향을 보였다.

6. 부유퇴적물의 순이동율은 하계의 1조석 주기 동안 정선관측한 결과에 의하면 $5.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 육지쪽 취수구 방향으로 이동되었다. 또한 장기관측 결과에 의하면 2000년 11월에는 $3.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 2001년 8월에는 $5.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 11월에 비해 8월에 높았으며, 2회의 관측기간 모두 육지쪽 취수구 방향으로 이동되는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 취수구를 향하여 발생하는 인위적인 흐름과 주변에 건설된 인공구조물에 의해 조류의 순환양상이 변화되었기 때문으로 해석된다.

사 사

본 논문은 2000년 군산대학교 해양개발연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 현장조사에 도움을 준 전남대학교 해양학과 김석과 윤영준 군에게 고마움을 전하며, 투고된 논문을 세밀히 심사해주신 이희준 박사님과 김석운 교수님께 심심한 감사드립니다.

참고문헌

- 류상욱, 김주용, 유희수, 2000. 반폐쇄된 무안만에서 부유물질의 계절적 변동 및 운반양상. 한국지구과학회지, **21**: 128-136.
- 추용식, 이희준, 박은순, 이연규, 정갑식, 2000. 만입구에서 부유퇴적물 거동과 플럭스: 한반도 서해 남부 함평만의 여름철 특성. 한국해양학회지 「바다」, **5**: 105-118.
- 해양수산부, 1999. 갯벌생태계 조사 및 지속 가능한 이용방안 연구. BSPM 99035-00-1228-3, 877 pp.
- Anderson, T.J. and M. Pejrup, 2001. Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Marine Geology*, **173**: 69-85.
- Chough, S.K., H.J. Lee and S.H. Yoon, 2000. Marine Geology of Korean Seas. Amsterdam: Elsevier, 313 pp.
- Chu, Y.S., H.J. Lee, K.W. Choi and D.S. Choi, 2001. Accelerated seaward growth of tidal sand bar during giant dyke construction off the Mangyung River mouth, west coast of Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **36**: 72-82.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**: 3-26.
- Folk, R.L., 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hemphills's, Austin, 170 pp.
- Gao, S., Q.-C. Xie and Y.-J. Feng, 1990. Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangnan Bay, Zhejiang, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **31**: 397-409.
- Ingram, R.L., 1971. Sieve analysis. In: Procedures in sedimentary Petrology, edited by Carver, R.E., Wiley-Inter Science, New York, 49-67.
- Kang, S.W. and J.K. Choi, 1984. Surface waves and bottom shear stress in the Yellow Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **19**: 118-124.
- Lee, H.J. and S.H. Yoon, 1997. Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene sea-level rise. *Journal of Sedimentary Research*, **67**: 341-389.
- Lee, H.J., Y.S. Chu and Y.A. Park, 1999. Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-nearshore area, northern west coast of Korea. *Marine Geology*, **157**: 171-184.
- Nichols, M.M., 1977. Response and recovery of an estuary following a river flood. *Journal of sedimentary Petrology*, **47**: 1171-1186.
- Officer, C.B., 1976. Physical oceanography of estuaries and associated coastal water. John Wiley & Sons, New York, 465 pp.
- Park, Y.A. and J.Y. Choi, 1989. Mechanisms and distribution patterns of the fine-grained suspended materials off the southwest coast of Korea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, **24**: 52-64.
- Ryu, S.O., 2002. Seasonal variation of sedimentary processes in a semi-closed bay: Hampyong Bay, South Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **56**: inpress.

2002년 8월 13일 원고접수

2002년 9월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 강효진