

## 한강종합개발 이후 한강하구 및 경기만의 퇴적환경\*

장현도 · 오재경  
인하대학교 해양학과

### Depositional Sedimentary Environments in the Han River Estuary and Around the Kyunggi Bay Posterior to the Han River's Developments

HYUN-DO CHANG AND JAE-KYUNG OH  
*Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

한강종합개발 이후 한강하구 및 경기만에서의 퇴적환경을 파악하기 위하여 수리물리적 및 퇴적학적 관점의 조사를 실시하였다.

수리적 특성과 퇴적학적 특성을 종합해 볼 때, 본 연구지역은 크게 ① 행주대교 상류역의 하천, ② 한강과 경기만을 연결하는 하구, ③ 경기만 일대의 연안-만 퇴적환경으로 구분할 수 있다. 그러나 한강종합개발 이후 한강 전역에서 통수단면적이 증가되고 유속이 감소되는 등 전반적인 수리물리적 특성이 변화됨으로써 한강하류 및 하구역(강화대교)에서의 부유물질 농도가 각각 37 mg/l, 500-1750 mg/l에서 개발 이후 17 mg/l, 208-1142 mg/l로 큰 폭으로 감소된 것으로 나타났다. 또한 하류 수중보 부근에서는 siltation이 유발되고 있으며, 하천환경과 하구환경의 경계가 점이 적이지 못하고 급격한 변화를 보이는 등 퇴적환경에도 상당한 변화가 초래된 것으로 나타났다. 이는 주로 종합개발에 수반되는 한강의 수위저하를 방지하기 위하여 잠실대교와 신곡에 수중보를 설치함으로써 비롯된 것으로 사료된다. 하구는 하천과 해양을 연결하는 전이지역이므로, 한강과 하구에서의 이러한 변화는 앞으로 인접한 퇴적환경에도 많은 영향을 미칠 것으로 사료되며, 경기만으로 파급되는 영향을 파악하기 위하여는 무엇보다도 임진강과 예성강 하구를 포함한 한강 하구역에 대한 상세한 연구가 요구된다.

For the purpose of examining the depositional sedimentary environments in the Han River estuary and around the Kyunggi Bay posterior to the Han River's Developments, a hydrological and sedimentological survey was carried out.

According to the hydrological and sedimentological conditions, the studied area can be divided into 3 depositional sedimentary environments; Fluvial, Estuarine and Coastal-Bay. Posterior to the Han River's Developments, however, the alterations of hydrodynamic condition in the Han River have caused a substantial change of the sedimentary environments in the lower Han River and its estuary. That is, the contents of total suspended sediment anterior to the Developments decreased from 37 mg/l (in the lower Han River) and 500-1750 mg/l (at the Kanghwa Bridge) to 17 mg/l and 208-1142 mg/l posterior to the Developments. These changes seem to have caused the siltation near the Sin-gok Underwater Dam. Thus the characters of the boundary condition between the fluvial and the estuarine environments have rapidly changed. It is considered that these changes result mainly from the construction of the two underwater dams for the maintenance of the water level of the Han River.

As the estuary is a transition zone between land and sea, these changes in the Han River estuary might affect the sedimentary environments around the Kyunggi Bay. In order to verify the effects of these changes, it is necessary that a detailed survey be carried out around the Han River estuary including the Imjin and Yesong River estuaries.

\*본 연구는 1988년도 문교부 자유공모과제 학술연구조성비 및 한국과학재단의 연구비 지원하에 이루어졌음.

## 서 론

하구는 육지로부터 공급되는 담수와 바다로부터 유입되는 해수가 혼합되는 반 폐쇄지역으로(Pritchard, 1967), 하천으로부터 공급되는 퇴적물 중 세립질 성분을 바다로 배출시키는 「여과장치」로서 작용한다(Schubel, 1984; Schubel and Carter, 1984). 또한 하구는 육지와 해양을 연결하는 전이 지역(transition zone)이므로 하천과 하구내에서의 퇴적작용은 곧 인접한 연안해역에도 많은 영향을 준다(Krone, 1975).

한강은 집수면적 및 배수량에 있어서 남한 제 1의 하천으로 오래전부터 담수자원으로서 중요한 위치를 차지하여 왔으나, 1960년대 이후 산업의 고도화와 폭발적인 수도권 인구의 증가와 함께 수질이 악화되고 주변 경관이 훼손되는 등 하천으로서의 제 기능을 상실하기에 이르렀다. 이에 서울시에서는 한강의 본래 기능을 회복시키고, 그 효용을 극대화시키기 위하여(한국종합기술개발공사, 1983a; 이, 1984) 한강종합개발공사를 실시하게 되었다.

그러나 개발공사에 따른 한강의 수리물리적 특성의 변화는 결과적으로 한강하구는 물론 인접한 경기만에까지 영향을 미치게 되어 이 지역의 수리역학적 특성과 퇴적환경에 상당한 변화가 초래될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구의 목적은 한강종합개발 이후 한강하구 및 경기만에서의 퇴적환경을 규명하고, 개발에 따른 수리적 및 퇴적학적 영향을 파악함에 있다.

한강하구 및 인근 경기만에 대한 자료는 군사적 이유 등으로 현장조사가 극히 제한되기 때문에 비교적 적은 편이며, 특히 행주대교 하류에서 강화대교에 이르는 한강하구 지역과 북위 37°30' 이북의 경기만해역에 대한 연구조사는 거의 전무한 실정으로 이 지역의 퇴적환경에 관한 오(1982; 1985; 1989)와 장(1989)의 연구가 있을 뿐이다. 이밖에 한강종합개발 전후 한강에서의 수리현상 및 환경 등에 대한 자료로 한국종합기술개발공사(1983b; 1983c)와 남(1984), 장(1984), 대한조선공사(1986; 1987), 권과 이(1987), 김(1987), 최(1987) 등이 있다.

## 연구방법 및 재료

연구 조사지역은 북위 37°00'-38°00', 동경 126°00'-127°00'내에 포함된 한강상류 왕숙천에서 하류의 신곡수중보에 이르는 한강과 강화도 동·서안의 하구역 및 용유도, 무의도에 이르는 경기만 일대이다(Fig. 1).

현장조사는 한강의 유량조건에 따라 평수기(1988년 5월)와 풍수기(동년 8월) 등 2차례에 걸쳐 한강 중·하류 2개 정점, 하구역 2개 정점, 연안-만 1개 정점 등 총 5개 정점에서 최소 1조석 주기 동안 조류의 유속과 유향, 수온, 염분 및 부유퇴적물 함량 등을 연속 관측하였다.

조류의 유속과 유향은 DCM-II 또는 DRCM-II로 매시간 표·중·저층별로 측정하였으며, 수온과 염분도는 T-S Bridge 또는 STD를 사용하여 측정하였다. 부유퇴적물의 정량분석을 위해 각 정점에서 표·중·저층별로 Niskin Bottle을 이용하여 1liter씩 200 여개의 시료를 채취하였다. 저층퇴적물의 분석을 위해 1988년 8월 왕숙천에서 신곡수중보에 이르는 한강에서, 동년 4월과 10월에 경기만 일대에서 Birge-Ekman Dredge와 Van Veen Grab을 이용하여 총 115점의 저층퇴적물을 채취하여 실험하였다.

부유퇴적물의 농도는 McCave(1979)의 방법을 이용했으며, 이 때 여과지는 공극경이 1.2 μm이고, 직경이 47 mm인 Whatman Glass Microfiber Filter (GF/C)를 사용하였으며, 무게는 Mettler H-51을 이용하여 측정하였다.

저층퇴적물은 실험실로 운반, 1000 ml 비이커에 담아 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 10% HCl을 차례로 넣어 유기물과 탄산염을 제거한 후 습식체질(Wet seiving)을 하여 4φ 이하와 그 이상으로 각각 분리하였다. 4φ 이하의 조립질 시료는 Mechanical Analysis(Folk, 1968)로, 4φ 이상의 세립질 시료는 Stokes' Law에 입각한 Pippet Analysis(Folk, 1968)로 각각 분석하였다. 분석된 입도자료는 Folk and Ward(1957)의 Graphic Method에 의해 평균입도와 분급도, 왜도, 첨도, 중위도 및 최빈수 등을 구하였다.

## 결과 및 토의

### 1. 수리적 특성 조석 및 조류

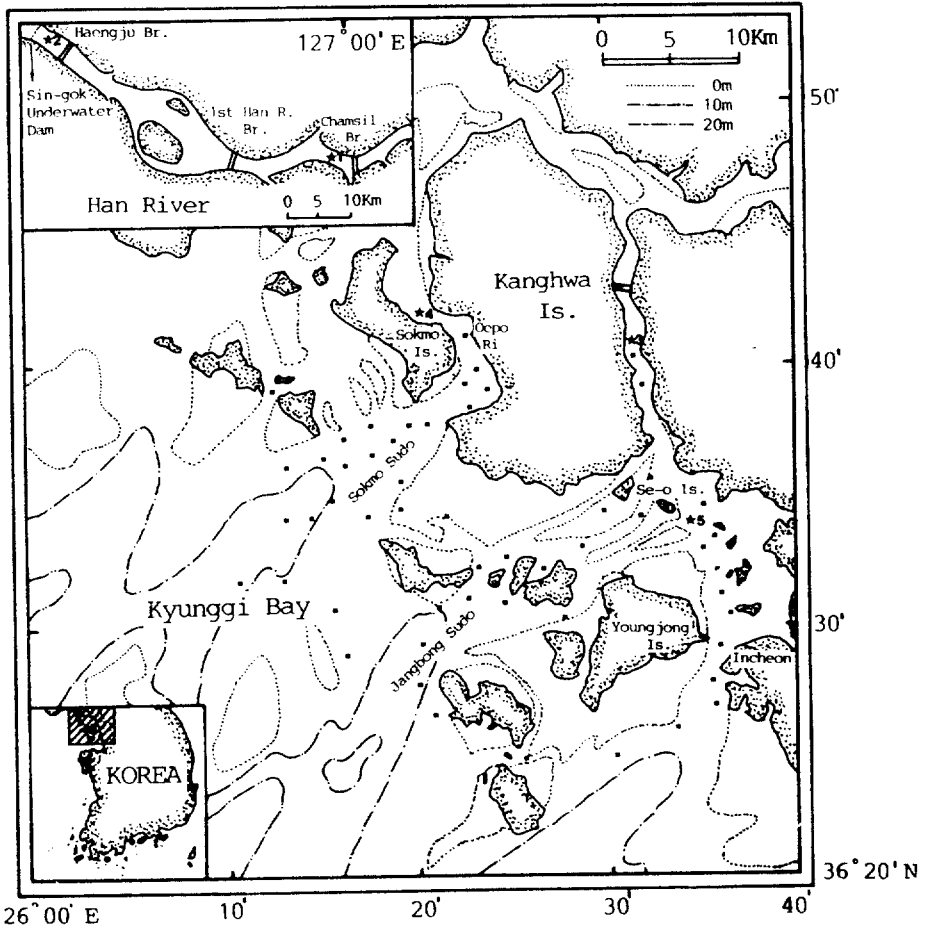


Fig. 1. Map showing the studied area and the mooring stations (St. 1,2,3,4,5). Dots are bottom sediments sampling stations.

경기만내에서의 조석현상은 반일주조형(Semi-diurnal)이 우세하고 일조부등이 적다(봉, 1978). 그러나 조석파가 하구에 진입하게 되면 수심저하로 인한 마찰력 증대와 하천류로 인해 점차 변형되어 창조시간이 짧아지고 낙조시간이 길어지는 조석 비대칭 현상과 함께 조차는 상류로 갈수록 점차 적어지는 하구형 조석의 양상을 보인다(Table 1).

한강에서의 조석현상은 잠실대교와 신곡에 설치된 수중보로 인하여 신곡수중보에서의 조위가 2.7 m 이상일 때만 창조류가 수중보(보 높이 240 cm + 월류고 30 cm = 270 cm)를 월류하여 잠실-신곡 구간에서 조석현상을 일으킨다(대한조선공사, 1986 : 19 87). 따라서 한강에서의 조석현상은 대조기와 중조기에만 나타나며, 소조기에 있어서는 신곡수중보의

높이가 기준수준면상 704 cm(인천항 평균수면 464 cm + 보 높이 240 cm)로, 인천항에서의 만조위가 이보다 낮으면 조석현상은 나타나지 않는다. 또한 평수기에 잠실수중보 상·하간의 수위차이는 약 2.5 m로 조석파가 더 이상 상류로 진행하지 못하도록 차단하기 때문에 잠실대교 상류에서는 조석현상이 전혀 없다.

경기만내 조수로에서의 조류는 조석과 같은 반일 주조형으로 1일 2회의 창·낙조류가 왕복성을 가지고 나타나며, 그 유향은 대체로 수로방향과 평행하다. 전류시는 인천외항 및 주변수로에서 간조 후 15-40분, 만조 후 50분에 나타나나, 세어도 부근에서는 지형적 영향으로 간·만조 후 1시 05분내지 1시 45분으로 상당히 늦게 나타난다. 최강유시는

Table 1. Tidal time difference and tidal range in the Han River estuary\*

Location	Flood difference	Ebb difference	Spring tide ratio	Tidal range(cm)			Duration	
				Spring	Neap	Mean	Flood	Ebb
Incheon	0 : 00	0 : 00	1.00	798	347	572.5	6 : 10	6 : 15
Se-o Is.	0 : 15	0 : 36	1.05	838	364	606.5	6 : 05	6 : 10
Oepo Ri	0 : 40	1 : 30	0.98	780	340	561.0	5 : 50	6 : 35
Kanghwa	1 : 30	2 : 10	0.71	564	246	406.0	5 : 45	6 : 40
Sin-gok	3 : 30	7 : 00	0.10	80	.	.	2 : 30	10 : 05
Chamsil	4 : 24	9 : 06	0.05	49	.	.	1 : 29	10 : 56

\*Data from Hydrographical Office (1980-1988) and KSEC (1986 : 1987).

간조 후 2시 30분 내지 4시 15분 사이에 나타나며, 소조에서 대조에 이를 수록 빨라지는 경향이 있다. 최강유속은 대체로 낙조류가 창조류에 비해 우세하다(봉, 1978).

한강의 유속은 일반적으로 상류댐의 방류량과 경기만에서 진입한 조석의 상대적 강도에 따라 영향을 받아 평수기에는 조석 및 기타의 복합적 요인에 의해 변화하며 풍수기에는 주로 방류량에 따라 좌우된다.

본 조사기간 중 한강에서의 평균유속은 평수기인 5월의 표층 및 저층에서 각각 0.06, 0.03 m/sec이고 풍수기인 8월에는 0.45, 0.27 m/sec로, 풍수기 동안의 유속이 평수기의 10배 가량 높게 나타났다. 시간에 따른 유속 변화가 불규칙하며(Fig. 2), 신곡수중보에 의한 하천류의 정체로 정점 1보다 정점 2에서 다소 낮다.

한강으로부터 유입되는 하천류와 경기만으로부터 진입한 조류의 영향을 모두 받는 염하수로(정점 3)에서는 창조류 및 낙조류의 최강유속이 5월에 1.23, 1.57 m/sec, 8월에 1.39, >1.39 m/sec로 5월과 8월 공히 낙조류가 창조류보다 우세하며, 담수의 유입이 증가한 8월에 비하여 평수기인 5월이 다소 높다. 석모수로(정점 4)에서는 5월 창조류와 낙조류의 최강유속은 각각 1.55, 1.66 m/sec이고, 8월에는 0.98, 1.60 m/sec이다.

정점 5에서 5월의 창조류와 낙조류의 최강유속은 각각 0.98, 1.37 m/sec이나 유량이 증가한 8월에는 0.66, 1.07 m/sec로 감소하였다.

#### 수온 및 염분

조사기간 중 한강(정점 1, 2)에서의 수온변화는 5월에 15.69-18.06°C, 8월에 20.20-24.95°C로 나타났으며, 하구역(정점 3, 4)에서는 5월에 11.49-13.44°C,

8월에 23.57-24.92°C로, 조석에 따라 변화하며 수심에 따른 변화는 뚜렷하지 않다. 하구를 벗어난 정점 5에서는 정점 3, 4와 유사한 양상을 보이나 상대적으로 해수의 영향을 많이 받아 다소 낮다.

염분도는 경기만에서 인천항이나 외해의 경우와 비슷한 양상을 보이고 조차에 관계없이 조석에 따른 하천수의 유출량에 관계되며, 만조와 간조시에 각각 최고 및 최소 염분도 값을 나타낸다. 본 연구지역에서 염분은 해수가 한강으로부터 유입되는 하천수와 혼합되어 희석되므로 염분변화의 가장 큰 요인은 한강수의 유출이며, 조석에 따라 대체로 주기적인 변화를 보인다. 염분의 최대 및 최소치는 관측점의 위치나 수심에 관계없이 대체로 전류시를 전후하여 나타난다(Fig. 2).

한강의 정점 1에서는 염수의 영향을 거의 받지 않는 것으로 보이며, 하류의 정점 2에서는 평수기인 5월에 표층은 0.2‰ 내외이나 저층에서는 조석에 따라 0.21-0.55‰의 변화를 보여 염수의 침입이 있음을 시사한다. 풍수기인 8월에는 유량의 증가에 따라 염수침입 지점이 하류로 이동되어 염수의 영향을 받지 않는다.

하구역에서는 5월에 21.07-27.70‰(정점 3), 25.60-28.54‰(정점 4) 범위이나 한강의 유량이 증가한 8월에는 3.53-15.00‰(정점 3), 9.62-18.65‰(정점 4)로 나타나 풍수기 동안 하천수의 영향을 매우 크게 받는 것으로 사료된다. 대체로 염분의 변화폭이 크고 수심에 따른 염분의 변화가 뚜렷하게 나타나 수괴의 수직 혼합작용이 활발함을 시사한다.

세어도 부근의 정점 5에서는 5월에 26.73-29.87‰로 만(Bay)에 가까운 염분특성을 보이나, 풍수기인 8월에는 13.94-28.92‰로 하구환경의 특성을 나타

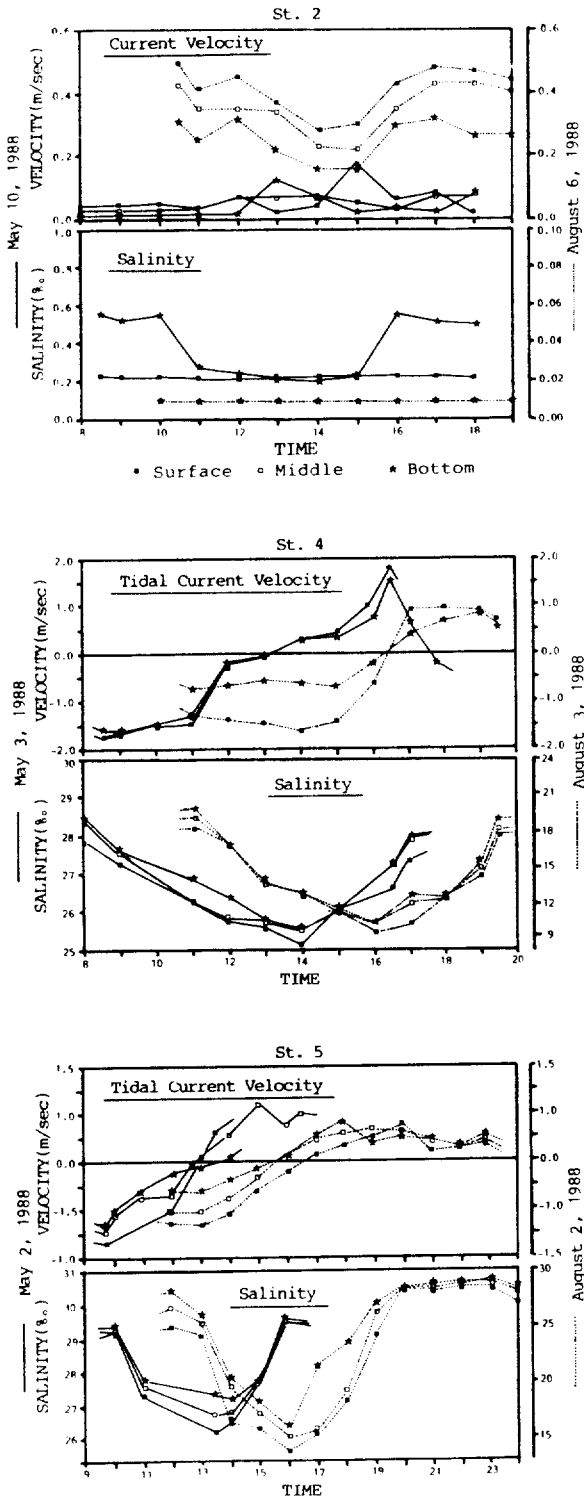


Fig. 2. Time variations of current velocity, and salinity in St. 2, 4, 5.

낸다. 따라서 풍수기 동안에는 적어도 세어도 부근까지 한강수의 직접적인 영향을 받는 것으로 사료된다.

2. 부유퇴적물의 농도변화

시간적 변화

부유퇴적물의 농도는 주로 조류의 유속과 관계되므로(McCave, 1970) 조석주기에 따라 대체로 규칙적인 변화를 보인다. 따라서 부유물질의 농도는 유속이 증가함에 따라 증가하며, 본 연구해역에서 창조류에 비해 낙조류가 우세하므로 낙조시 동안 더 높게 나타난다(Table 2).

한강의 정점 1과 2에서 5월 중 부유물질 농도는 표층에서 11.2-31.2 mg/l, 저층에서 13.6-46.4 mg/l의 범위로 시간에 따른 농도변화가 불규칙하다. 홍수로 인해 방류량이 크게 증가한 8월에는 표층 71.6-11.4 mg/l, 저층 5.8-29.2 mg/l로 평균기인 5월에 비해 절반가량 감소하였다. 이처럼 유속이 10배가까이 증가했음에도 부유물질 농도는 오히려 감소한 것은 매우 특이한 현상으로, 이는 부유물질의 주 기원인 하상의 세립질 퇴적물이 홍수로 인한 상류댐의 방류량 증가로 신곡수중보를 넘어 경기만으로 배출되었기 때문인 것으로 사료된다.

정점 3과 4에서는 5월 중 표층에서 150.8-1074.0 mg/l, 저층에서 208.0-1397.6 mg/l이며, 풍수기인 8월에는 표층 88.8-1170.8 mg/l, 저층 257.6-2921.2 mg/l로 나타났다. 대체로 평균기보다는 풍수기 동안의 농도가 높고, 그 변화폭도 크게 나타난다. 표층과 저층 공히 낙조류가 진행되면서 농도가 서서히 증가하고 창조시에는 낙조시보다 낮은 농도를 보임으로써 해저로부터의 재부유작용보다는 상류의 혼탁한 수괴로부터 운반되어 오는 부유퇴적물이 더 중요함을 시사한다. 최대농도는 표층에서 낙조중기와 창조중기에, 중층과 저층에서는 낙조말기에서 창조초기에 나타난다.

정점 5에서는 5월의 표층에서 63.2-266.8 mg/l, 저층에서 139.2-344.8 mg/l로 나타났으며, 8월에는 표층에서 9.2-465.2 mg/l, 저층에서 20.4-631.6 mg/l로 5월에 비해 농도의 변화폭이 크고 낙조시에 훨씬 높다. 이는 유속비(낙조류/창조류)가 큰 데다가 유량증가에 따라 부유물질의 대부분이 상류로부터 공급되기 때문인 것으로 사료된다.

Table 2. Mean suspended sediment concentration in the Han River estuary and around the Kyunggi Bay during low and high river discharge period.

		(units : mg/l)				
Layer	Discharge	Seongsu (St. 1)	Sin-gok (St. 2)	Kanghwa (St. 3)	Oepo Ri (St. 4)	Se-o Is. (St. 5)
Surface	Low	15.8	25.6	566.2	460.0	140.0
	High	8.5	6.1	371.8	537.3	258.0
Bottom	Low	17.9	37.4	631.8	>749.0	258.0
	High	12.4	15.4	916.5	1536.7	309.1
Average	Low	16.85	31.50	599.00	>604.50	199.00
	High	10.45	10.75	644.15	1037.00	224.15

<Low discharge : May 1-10, 1988 ; High discharge : August 1-6, 1988>

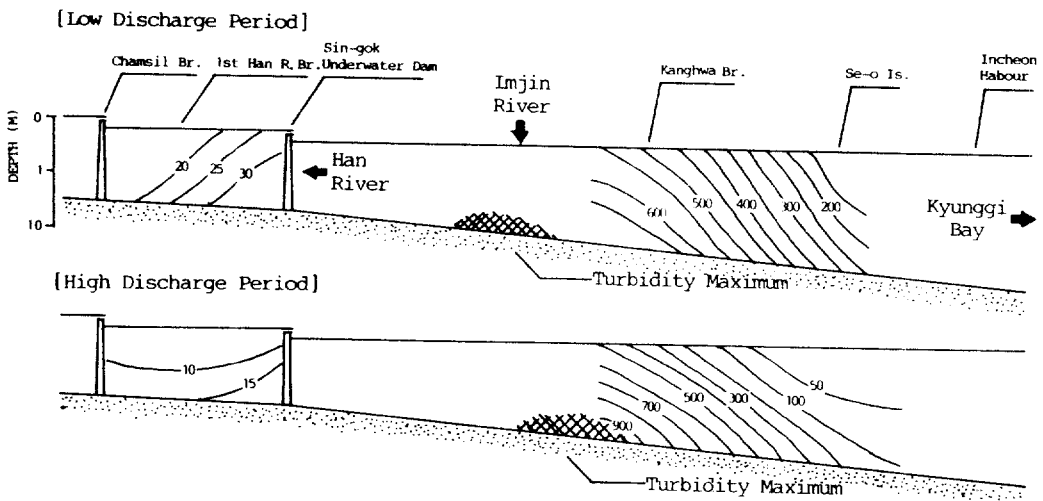


Fig. 3. Spatial distribution of the total suspended sediment (mg/l) in the Han River estuary.

**공간적 변화**

평수기에 해당하는 5월의 부유물질의 평균농도는 한강상류의 정점 1에서 표층은 15.8 mg/l, 저층은 17.9 mg/l이며 신곡수중보 앞의 정점 2에서는 표층 25.6 mg/l, 저층 37.4 mg/l로 나타나 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보인다(Fig. 3).

한강수와 경기만으로부터 진입한 해수가 혼합되는 하구역에서 5월의 평균 농도는 표층(저층)에서 각각 566.2(631.8 mg/l), 460.0(>749.0)mg/l이나, 유량이 증가한 8월에는 371.8(916.5)mg/l, 537.3(1536.7) mg/l로 증가하였다. 따라서 홍수기 동안 상당량의 부유성 퇴적물이 경기만으로 배출되는 것으로 사료된다. 전체적인 경향으로 보아 강화대교 상류역에서 최대혼탁수(Turbidity maximum : Nichols and Biggs, 1985)가 형성되는 것으로 사료되며, 유량증가에

따라 그 위치는 다소 외해쪽으로 이동되는 것으로 보인다.

만(Bay)의 환경특성을 보이는 세어도 부근에서는 5월 중 표층과 저층에서 각각 140.0, 258.0 mg/l이며, 유량이 증가한 8월에는 139.2, 309.1 mg/l로 하류를 지나면서 크게 감소한다. 따라서 경기만 일대에서 퇴적작용이 활발히 이루어지고 있으며, 퇴적물 공급에 있어서 하구가 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다.

**3. 저층 퇴적물**

**입도특성 및 입도분포**

퇴적물의 입도특성은 그 퇴적물의 평균입도와 분포, 웨도 및 침도로서 설명할 수 있다(Folk and Ward, 1957). 이에 따라 분석한 결과 연구지역에

Table 3. Characteristics of textural parameters with environments in the Han River and around the Kyunggi Bay.

Environments	Mean( $\phi$ )	Sorting	Skewness	Kurtosis
Fluvial Upper	1.032	1.277	0.157	1.372
Middle	1.373	1.647	0.305	2.576
Lower	3.018	1.696	0.402	1.899
Tidal flats	5.453	2.145	0.249	1.313
Tidal channels	2.661	2.015	0.471	2.155
Sand bars	3.054	1.286	0.319	1.959

분포하는 퇴적물의 입도특성은 환경별로 뚜렷한 차이를 보인다(Table 3).

평균입도(Mean)는 하천환경의 상류에서 하류로 가면서 1.03, 1.37, 3.02 $\phi$ 로 점차 세립화되는 양상이 나타난다. 경기만 조간대에서는 2.46-7.02 $\phi$ 로써 대체로 세사(Fine sand)와 니질(Mud)로 구성되어 있으며, 해안선에서 바다쪽으로 갈수록 평균입도는 증가하고 분급도는 양호해지는 경향을 보인다. 수로환경에서는 강한 조류의 영향으로 -1.42-6.00  $\phi$ 의 사력질(Pebble and gravel)과 사질(Sand)로 구성되어 있으며, 사퇴환경 퇴적물은 2.24-3.92 $\phi$ 의 중사(Medium sand)로 구성되어 있다.

분급도(Sorting)는 퇴적환경에 따른 차이가 뚜렷하지 않고 대체로 Poorly sorted(1.28-2.15)하나, 하천 및 사퇴환경에서 비교적 양호하고 조간대 환경에서 상대적으로 불량한 값을 보인다. 본 연구지역에서 분급도의 분포양상은 대체로 퇴적상 및 평균입도의 분포와 유사하며, 사퇴환경에서 최상의 분급작용이 이루어지고 있는 것으로 사료된다.

왜도(Skewness)는 대부분의 퇴적물이 Positive(Fine skewed)값을 보여 퇴적물의 혼합은 주로 세립질과 이루어지고 있음을 시사하며, 첨도(Kurtosis)는 1.31-2.58의 범위로 Leptokurtic하며, 평균입도가 증가함에 따라 또는 분급도가 양호해짐에 따라 증가하는 경향이 나타난다.

**퇴적상의 공간적 분포**

한강의 하저퇴적물은 인근 경기만 일대의 퇴적물과는 달리 조석의 영향을 거의 받지 않고 주로 하천의 유속에 좌우되기 때문에 전반적으로 사력질 또는 사질로 구성되어 있으며, 퇴적물의 입도특성에 따라 사력질퇴적상(Pebble and gravel facies), 사질퇴적상(Sand facies), 니질퇴적상(Mud facies)으

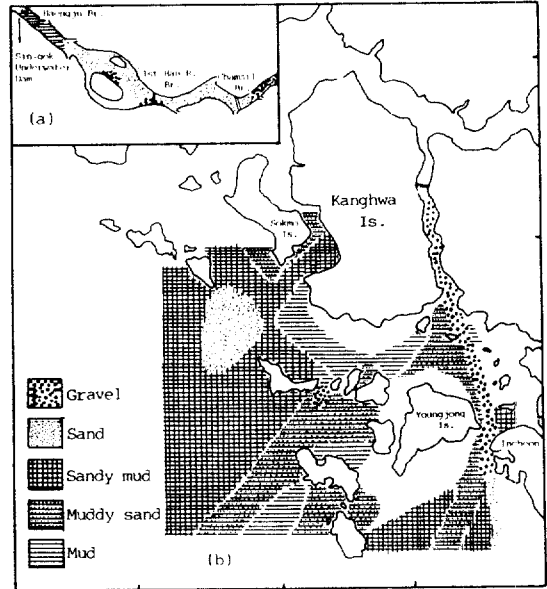


Fig. 4. Distribution of the bottom sediments. (a) The Han River. (b) The estuary and the Kyunggi Bay.

로 구분된다(Fig. 4). 이들 퇴적상은 상류에서 하류로 갈수록 경사구배와 에너지의 감소로 점차 세립화되는 양상이 나타나는데, 특히 신곡수중보 부근에서는 하천류의 정체로 에너지가 크게 감소하여 니질퇴적상이 발달되어 있다.

경기만 일대에서 퇴적상의 공간적 분포는 각 환경에서의 에너지 조건에 따라 사력질(Pebble and gravel)에서 니토질(Silt)에 이르기까지 다양하게 분포하며, 그 입도특성에 따라 사력질퇴적상, 사질퇴적상, 사니혼합퇴적상(Sand and mud mixed facies), 니질퇴적상 등 4가지 퇴적상으로 구분된다.

사력질퇴적상은 염하수로와 같은 강한 조류의 영향을 받는 곳에 우세하게 나타나며, 섬과 섬 사이에서도 해자현상(Moat)에 의해 소규모로 분포한다. 사질퇴적상은 수로와 수로 사이에 간조시에 노출되는 사퇴(Intertidal sand body)에 발달되어 있는데, 이러한 사퇴는 깔대기형(Funnel-shaped)의 대조차하구(Macrotidal estuary)에서 형성되는 전형적인 특징이라 할 수 있다(Hayes, 1975; Klein, 1982). 이 밖에 송도 앞 조간대의 바다쪽에서도 길게 발달되어 있다.

사니혼합퇴적상은 주로 조간대와 수로의 전이적 환경에서 발달하며, 경기만 전역에 광범위하게 분

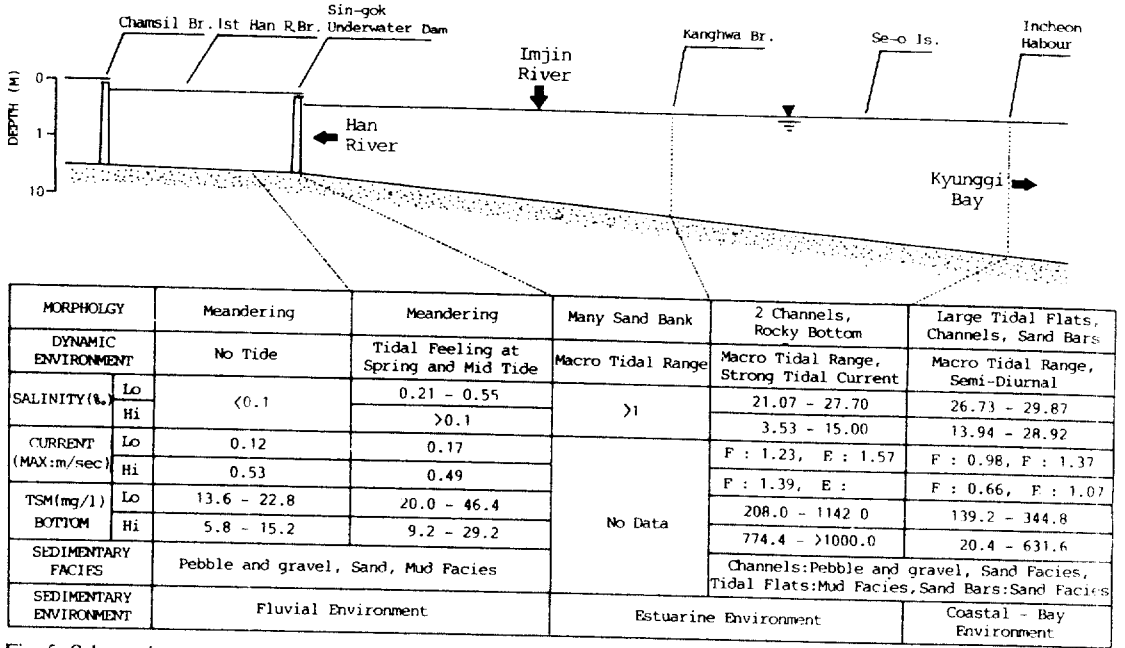


Fig. 5. Schematic representation of different types and the oceanographic parameters along the Han River estuary and the Kyunggi Bay.

포하는데, 비교적 에너지가 강한 외해와 수로부근에는 사질이 우세하고 조간대의 해안쪽으로 갈수록 니질이 우세하다. 니질퇴적상은 에너지가 약한 조간대의 해안선쪽 부근에 발달한다.

4. 퇴적환경의 분류

퇴적환경을 규명하고 분류하기 위하여는 우선 Facies model을 수립하는 것이 중요하다. Facies model이란 어떤 지칭된 퇴적환경의 전반적인 요약이라 할 수 있다(Walker, 1980). 본 연구지역의 수리물리적 및 퇴적학적 특성을 중심으로 분석한 결과 크게 하천환경(Fluvial environment)과 하구환경(Estuarine environment) 및 연안-만 환경(Coastal-Bay environment)으로 분류할 수 있다(Fig. 5).

하천환경(Fluvial environment)

행주대교를 경계로 한강 상류역에서는 염분도 0.1‰ 이하의 전형적인 하천환경 특성을 보이고 있다. 퇴적상은 상류에서 하류로 갈수록 사력질상-사질상-사니혼합질상-니질상으로 점차 세립화되며, 대체로 상류댐의 방류량에 따라 좌우되어 풍수기에는 조립질이, 평수기에는 세립질이 우세하게 나타난다. 하천환경과 하구환경의 경계부인 행주대교와 신곡수

중보 사이에서는 비홍수기 동안 수중보에 의한 하천류의 정체로 상당량의 부유성 퇴적물이 하구로 배출되지 못하고 퇴적되어 니질상이 발달한다. 조석현상은 잠실대교 하류에서 대·중조기에만 나타나며, 평수기 동안 염수침입의 상한은 행주대교 부근이다.

하구환경(Estuarine environment)

하구환경은 한강에서 유출되는 담수와 경기만으로부터 유입되는 해수가 서로 혼합되는 곳으로, 대략 신곡수중보 하류에서 염하수로 및 석모수로를 지나 인천항에 이르는 지역이다. 염분도는 조류와 담수의 유입에 따라 1-28‰로 큰 폭의 변화를 보이며, 하천수의 영향으로 조석 비대칭이 심하고, 특히 풍수기 동안 담수의 영향이 두드러진다. 하천수와 조류의 복합적인 영향으로 매우 복잡한 퇴적양상을 보이나 신곡수중보 하류와 강화도 북부역에 대한 자료가 없어 정확한 퇴적환경을 파악하기에는 많은 어려움이 있다. 한강하구는 조석차에 의한 분류(Davies, 1973)로는 평균조차 406 cm(강화대교)로 대조차하구(Macrotidal estuary)에 속하고, 수괴의 혼합 정도에 따른 분류(Prichard, 1955)로는 지역에 따라 Partially mixed(Type B) estuary 또는 Well mixed



Table 4. Changes of hydraulic characters posterior to the Developments during low river discharge period (Q=200 m<sup>3</sup>/sec)\*.

Hydraulic characters	Before the	After the Developments	
	Developments	No Dams	Two Dams
Mean width(m)	619	845	883
Total surface Area(m <sup>2</sup> )	21,077,882	28,747,347	30,047,900
Mean depth(m)	2.835	2.137	3.215
Mean velocity (m/sec)	0.109	0.111	0.070

\*Data from Chang (1984) and Choi (1987).

(Type C) estuary의 특성을 보인다.

**연안-만 환경(Coastal-Bay environment)**

한강하구를 벗어나 경기만 일대에는 반일주조형 (Semi-diurnal)의 조석현상이 우세한 연안-만의 환경특성을 보인다. 에너지조건에 따라 사력질상, 사질상, 혼합질상, 니질상 등 다양한 퇴적상이 나타나며, 하구로부터 유입되는 퇴적물의 퇴적작용이 활발하다. 큰 조차와 많은 세립질 퇴적물 유입으로 연안역에는 조간대(Intertidal flat)가 폭넓게 발달되어 있으며, 경기만 전역의 수로와 수로 사이에는 강한 왕복성 조류에 의한 소류사(Bedload)의 퇴적으로(Hayes, 1975 ; Klein, 1982) 북동-남서방향의 대규모 사퇴(Intertidal sand body)가 Tidal tongue 모양으로 발달되어 있다(Fig. 1). 한편, 오(1989)는 이를 조석선상지(Tidal delta)로 분류하였다.

**한강 종합개발에 따른 영향**

**1. 수리물리적 특성의 변화**

한강종합개발공사의 기본계획대로 시공할 경우 하천의 수위저하는 물론 유속, 수표면적 등 전반적인 수리물리적 특성의 변화가 초래되어(Table 4) 하류에서의 염수침입 경계점이 상향되고 지하수면이

저하되는 등의 문제점이 발생하게 된다. 개발에 수반될 이러한 문제점 중 특히 수위저하를 방지하기 위하여 잠실대교와 신곡 등 2곳에 수중보를 건설하게 되었다(남, 1984 ; 장, 1984).

수중보의 건설로 수위는 개발전과 비슷하게 유지되었으나 통수단면적의 감소로 평상시(방류량 : 200 m<sup>3</sup>/sec), 전 구간의 평균유속이 개발이전 0.11 m/sec에서 0.07 m/sec로 64% 가량 감소되었다(최, 1987). 또한 개발 이후 한강하구역에서의 조석현상은 잠실대교 하류에서 인천항의 조위가 7m에 달해야만 나타나게 되었으며, 조석의 영향권도 중량천 합류지점에서 개발 이후에는 잠실수중보까지 상향되었다. 조차의 경우에도 대조기에 신곡수중보 상류부근에서는 개발이전보다 현저히 감소했으나, 10 km 하류에 위치한 전류리에서는 오히려 약 80 cm 가량 상승한 것으로 나타났다(김, 1987). 해수의 역류작용 또한 신곡수중보에 의한 창조류의 차단으로 극히 미약해져 염수침입의 경계점이 개발 이전 가양동부근(한국종합기술개발공사, 1983b)에서 개발 이후에는 행주대교 부근까지로 제한되는 것으로 보인다.

**2. 퇴적작용 및 환경의 변화**

퇴적물의 「침식-운반-퇴적」의 역학관계는 유속과 퇴적물 입자간의 상관관계에 의해 결정되므로(Postma, 1967), 종합개발 이후 전술한 한강에서의 수리물리적 특성변화(특히 유속감소)는 곧 이 일대에서의 퇴적작용 변화를 초래하게 될 것이다.

개발이전 갈수기의 한강에서 채취한 하저퇴적물의 입도특성(오, 1985)과 비교해 볼 때, 수중보가 설치되어 있는 잠실대교와 행주대교 하류에서는 유량과 유속이 크게 증가되었음에도 오히려 세립질로 나타나(Table 5) 수중보 부근에서 상당량의 세립질 퇴적물이 하류로 배출되지 못하고, 퇴적(Siltation)되는 것으로 나타나 보인다. 또한 왜도의 경우에도

Table 5. Mean size of the bottom sediments in the Han River during low and high river discharge period. (unit : φ)

Discharge	Khwang Br.	Chamsil Br.	Dongho Br.	Panpo Br.	Seongsan Br.	Haengju Br.
Low*	1.30	0.81	1.92	3.20	4.95	1.96
High	0.97	1.75	1.18	0.94	1.18	5.26

\*Data from Oh (1985).

개발 이전 상류에서는 coarse-skewed하고 하류에서는 fine-skewed 하였으나, 개발 후에는 전반적으로 fine-skewed한 것으로 개발 이후 유속감소에 따른 세립질 퇴적물의 퇴적작용이 두드러졌음을 시사한다.

이처럼 세립질 퇴적물이 수중보부근에서 퇴적됨으로써 부유퇴적물의 농도 또한 한강하류의 가양동에서 개발전 평수기에 평균 37 mg/l(한국종합기술개발공사, 1983b)에 비해 17 mg/l로 절반이상 감소한 것으로 나타났으며, 이에 따라 경기만으로 공급되는 퇴적물의 양도 감소하여 강화대교 부근에서 개발전 500-1750 mg/l이었던 것이(오, 1985) 개발 후에는 208-1142 mg/l로 감소하였다.

퇴적환경에 있어서도 한강개발 이전 이 일대의 퇴적환경을 분류한 오(1989)의 결과와 다소 변화된 점이 나타난다. 즉 하천퇴적환경의 경우 행주대교 주변에서 부유성 퇴적물이 비대칭형 조류의 왕복운동에 의한 Lag effect의 영향으로 퇴적된다고 하였으나 개발 이후에는 주로 수중보에 의한 유속감소에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 염수침입과 조석현상의 제한으로 하천환경과 하구환경의 경계가 접이적이지 못하고 신곡수중보를 경계로 급변하는 양상이 나타난다.

결국 한강종합개발공사에 따른 한강의 수리물리적 특성변화는 담수역은 물론 하구역에서의 수리물리적 및 퇴적학적 특성의 변화를 초래하였으며, 앞으로 인접한 경기만의 퇴적환경에도 상당한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

### 결론 및 제언

본 연구지역은 수리물리적 및 퇴적학적 특성에 따라 ① 하천환경(Fluvial environment), ② 하구환경(Estuarine environment), ③ 연안-만환경(Coastal-Bay environment)으로 구분할 수 있다.

행주대교 상류의 한강은 전형적인 하천환경의 특성을 보이며, 퇴적상은 상류에서 하류로 가면서 사력질상-사질상-혼합질상-니질퇴적상으로 점차 세립화된다. 한강과 경기만을 연결하는 한강하구역에서는 하천수와 조류의 영향으로 조석 비대칭이 심하고, 1-28%의 염분변화를 보이며, 수괴의 혼합 정도에 따라 Partially mixed 또는 Well mixed estuary로

분류된다. 연안-만의 환경특성을 보이는 경기만내에는 강한 왕복성 조류의 영향으로 조수역과 사퇴조간대 등 다양한 환경이 북동-남서방향으로 발달되어 있으며, 퇴적상은 에너지조건에 따라 사력질상, 사질상, 혼합질상, 니질상이 분포한다.

한강종합개발 이후 하천과 하구역에서 통수단면적과 유속 등 수리물리적 특성 뿐만 아니라 부유물질 농도와 퇴적상 등의 퇴적학적 특성과 전반적인 퇴적환경에도 상당한 변화가 초래된 것으로 나타났다. 이는 주로 종합개발에 따른 한강의 수위저하를 방지하기 위하여 잠실대교와 신곡에 설치한 수중보에 기인된 것으로 사료된다.

이러한 변화는 앞으로 인접한 경기만에도 상당한 영향을 미칠 것으로 사료되며, 한강과 하구역에서의 수리적·퇴적학적 변화가 경기만으로 파급되는 영향을 파악하기 위하여는 무엇보다도 임진강 및 예성강 하구를 포함한 한강하구역에 대한 상세한 연구가 요망된다.

### 참고문헌

- 국립건설시험소, 1984. 한강수위유지시설(잠실수중보) 수리모형 실험보고서, No. 453. 건설부.
- 국립건설시험소, 1985. 한강하류보 수리모형 실험보고서, No. 461. 건설부.
- 권숙표, 이수환, 1987. 서울지역의 한강수질에 관한 조사연구. 서울시. 한강생태계 조사연구보고서, 95-114.
- 김재경, 1987. 한강종합개발사업공사 보고서. 대한토목학회지, 35(2): 36-51.
- 남인호, 1984. 수도권 한강종합개발사업 환경영향평가. 대한토목학회지, 32(3): 26-29.
- 대한조선공사(KSEC), 1986; 1987. 한강수로측량 용역보고서. 한강관리사업소.
- 봉종현, 1978. 인천항 부근 수로의 조류. 한국해양학회지, 13(1): 29-34.
- 수로국, 1980-1988. 조석표.
- 오재경, 1982. 경기만 주변에서 1차적 퇴적구조와 조석의 조사에 의한 퇴적환경적 연구. 한국과학기술재단 보고서.
- 오재경, 1985. 한강종합개발 이전의 한강하구에서 퇴적환경과 광물자원에 관한 연구. 한국과학기술재단 보고서.
- 오재경, 1989. 한강개발 이전 한강하구와 경기만에서의 퇴적환경. 황해연구, 2: 13-20.
- 이현삼, 1984. 한강하류부 종합개발사업의 계획 및 설계. 대한토목학회지, 32(3): 15-21.
- 장인식, 1984. 한강종합개발사업개요. 대한토목학회지, 32(3): 5-10.
- 장현도, 1989. 한강종합개발 이후 한강하구 및 경기만에서의 퇴적환경의 변화. 인학대 이학석사 학위논문, p. 82.
- 최영박, 1987. 하천유황계. 한강생태계 조사연구 보고서.

- 서울시, 63-94.
- 한강홍수통제소, 1986, 1987. 한강홍수예경보 건설부.
- 한국종합기술개발공사, 1983a. 한강종합개발 기본계획 보고서. 서울시.
- 한국종합기술개발공사, 1983b. 한강종합개발 환경영향평가 보고서. 서울시.
- 한국종합기술개발공사, 1983c. 한강종합개발 현장조사 보고서. 서울시.
- Allen, G.P. and Castaing, P., 1973. Suspended sediment transport from the Gironde Estuary (France) onto the adjacent continental shelf. *Mar. Geol.*, **14**: M47-M53.
- Castaing, P. and Allen, G.P., 1981. Mechanisms controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde: A macrotidal estuary in France. *Mar. Geol.*, **40**: 101-118.
- Davies, J.L., 1973. Geographical variation in coastal development. Hafner, p. 204.
- Dyer, K.R., 1973. Estuaries: A physical introduction. John Wiley, p. 140.
- Folk, R.L., 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill's, p. 170.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain-size parameters. *J. Sed. Pet.*, **27**: 3-27.
- Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: An introduction to the symposium. In: L. E. Cronin, ed., "Estuarine research". Academic Press, **2**: 3-22.
- Klein, G.DeV., 1982. Sedimentology of a sub-tidal, tide-dominated sand body in the Yellow Sea, southwest Korea. *Mar. Geol.*, **50**: 221-240.
- Krone, R.B., 1975. Effects of physical alterations. In: M. Wiley, ed., "Estuarine processes". Academic Press, **2**: 1.
- McCave, I.N., 1970. Deposition of fine-grained suspended sediment from tidal currents. *J. Geoph. Res.*, **79**(21): 4151-4158.
- McCave, I.N., 1979. Suspended sediment. In: K.R. Dyer, ed., "Estuarine hydrography and sedimentation". Cambridge Univ. Press, 131-185.
- Nichols, M.M., 1986. Consequences of sediment flux: escape or entrainment? *Rap. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.*, **186**: 343-351.
- Nichols, M.M. and Bigg, R.B., 1985. Estuaries. In: R.A. Davis, Jr., ed., "Coastal sedimentary environments (2nd. ed.)". Springer-Verlag, 77-186.
- Oh, J.K., 1983. Preliminary study on the depositional sedimentary environment around the Gulf of Kyunggi (Korea). *Bull. Inst. Basic Sci., Inha Univ.*, **4**: 121-129.
- Oh, J.K., 1985. Estuarine conditions in the Han River Estuary mouth, Korea. *Bull. Inst. Basic Sci. Inha Univ.*, **6**: 177-182.
- Postma, H., 1967. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: G.H. Lauff, ed., "Estuaries". Am. Assoc. Adv. Sci. 158-179.
- Prichard, D.W., 1955. Estuarine circulation patterns. *Proc. Am. Soc. Civil. Engr.*, **81**, No. 717: 1-11.
- Prichard, D.W., 1967. Observations of circulation in coastal Plain estuaries. In: G.H. Lauff, ed., "Estuaries". Am. Assoc. Adv. Sci. 37-44.
- Schubel, J.R., 1984. The estuary as a filter: An introduction. In: V.S. Kennedy, ed., "The estuary as a filter". Academic press, 1-11.
- Schubel, J.R. and Carter, H.H., 1984. The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: V.S. Kennedy, ed., "The estuary as a filter". Academic Press, 81-105.
- Walker, R.G., 1980. Facies and Facies Model. In: R.G. Walker, ed., "Facies Models". Geos. Canada, Reprint Ser., **1**: 1-7.

Received December 3, 1990

Accepted February 4, 1991