

## 섬진강하구에서 부유물질의 분포와 거동 - 풍수기와 평수기의 비교 -

김석윤<sup>†</sup> · 이병관<sup>\*</sup>

부경대학교 해양학과

<sup>\*</sup>(주)오션이엔지

## The Distribution and Behaviors of Suspended Matters in Seomjin River Estuary - Compared with Rainy and Wet Season -

Seok-Yun Kim<sup>†</sup> · Byoung Kwan Lee<sup>\*</sup>

Department of Oceanography, Pukyong National University

<sup>\*</sup>Oceaneng Co., LTD.

(Received 4 August 2009, Revised 15 October 2009, Accepted 17 October 2009)

### Abstract

During period of the rainy season of spring tide Aug. 2005, the suspended sediment transport rate from Seomjin River increased ten times as high as neap tide of low river discharge. During ebb tide of high terrestrial input, the grain size of suspended particles of both surface and bottom layer of the water column, showed a uni-modal distribution with a dominant peak at coarse fraction, which suggests a characteristic development of floc-sized particles of low mean effective density. On the contrary, the particles supplied toward upstream of Seomjin river from Gwangyang Bay during flood tide showed a bi-modal distribution with a secondary peak at finer fraction, possibly due to the resuspension and the deflocculation associated with the increased shear velocity at near bottom. Break-up of large flocs is also suggested by the increased mean effective density. However, settling velocity was lower during flood tide because of smaller grain size. Thus, net deposition of suspended sediment is expected at within Gwangyang Bay instead of upstream of Seomjin River, even though suspended sediment transport rate at near bottom water was three times higher than that at surface water during flood tide.

**keywords** : Flocculation, Gwangyang bay, Seomjin river, Suspended particles

### 1. 서론

섬진강은 국내의 다른 하천(한강, 낙동강, 금강)과 비교해서 인위적인 환경 변화가 작으며 자연적인 상태를 유지한 채, 섬진강의 담수와 광양만의 해수가 자유롭게 교환되고 있다. 해저퇴적물의 조성변화는 수중에 부유물질의 공급량 변화를 가져올 수도 있으며, 생물의 생산에도 직접 또는 간접적으로 영향을 받는다. 그러나, 최근까지 부유물질을 이용한 수괴의 시·공간적인 분포와 운반에 따른 물질 거동을 파악하기란 쉽지 않았으며, 다양한 기원물질이 혼합되어 나타나는 연안 환경에서 부유물질의 순환 과정을 효과적으로 이해하기란 매우 어려운 과제였으므로 부유물질의 정성적인 연구보다는 정량적인 연구가 상대적으로 많이 이루어져왔다(Chang and Oh, 1991; Choi, 1993; Choi et al., 1995; Kang and Lee, 1996; Kim and Ha, 2001; Lee et al., 1990; Lee et al., 1999; Oh et al., 2002; Park and Oh, 1991). Kim and Lee(2004a)는 2003년 3월 대조기에 한 조

석주기 동안이지만, 매 시간 동시에 섬진강과 인접한 광양만의 세 입구를 통한 부유물질의 이동을 파악하여 만 내부보다 만 외부로의 유출량이 더 우세함으로 보였고, 특히, 섬진강 하구에서는 강 상류로의 미약한 순 이동을 보였으며, 이는 섬진강 담수유출량과 일시적인 영향에 의한 것으로 파악이 되며, 하계에 담수유출량이 많아질 경우에는 달라질 것으로 예상된다.

최근 국외에서는 현장 부유물질을 효과적으로 신속하게 측정할 수 있는 광학 장비들이 이용되어 왔으며, 그 중에 광 전도측정기(Beam transmissometer)는 강 하구에서(Campbell and Spinrad, 1987; Wells and Kim, 1991) 뿐 아니라, 연안역과 대륙붕(Moody et al., 1987; Pak and Zaneveld, 1977) 및 심해(Gardner et al., 1985; McCave, 1983)에서 널리 사용되었다. 또한, 현장에서 부유물질의 농도와 입도를 동시에 측정할 수 있는 현장입도분석기(LISST-100, Laser In-Situ Scattering Transmissometry)가 개발되어 부유물질의 농도와 입도에 대한 관계를 연구하는데 도움이 되고 있으며(Agrawal and Pottsmith, 1994, 2000), 현장 부유물질의 시·공간적 변화와 부유물질의 거동 및 기원 연구에 유용하게 이용되고 있다. 국내에서 부유물질의 현장 크기에 관한 연

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

leebk@oeng.co.kr

구는 Kim and Lee(2004b)가 2001년 2월에 현장입도분석기를 적용하여 섬진강 하구에서 부유물질의 조성이 섬진강 상류지역보다 복잡하고 다양한 것으로 연구되었고, 주사전자현미경으로 부유물질의 조성구와 형태를 비교하였다. 하지만 이러한 부유물질의 조성구와 형태 변화가 하계의 풍수기에는 어떻게 변화되고, 섬진강으로부터 많은 담수가 유출되는 경우에 부유물질의 분포와 거동이 어떻게 다른지에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 특히, 이러한 부유물질의 정성적인 변화원인에 관한 연구는 많이 부족한 것으로 여겨진다.

본 연구는 평상시와 달리 풍수기인 2005년 8월의 섬진강 담수 유입 시 섬진강하구에서 부유물질의 정량 및 정성분석을 통해 부유물질의 재 부유와 퇴적작용을 연구하였다. 연구 내용으로 섬진강하구에서 현장 부유물질농도와 입도를 측정하여 저층 부유물질의 현장 크기와 평균유효밀도 변화에 따른 부유물질의 분포와 거동을 파악하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구 지역

섬진강 유역의 하천 기원 퇴적층은 신생대 제4기의 사질을 주로 하는 조립질 퇴적물로 구성되어 있으며, 섬진강 퇴적물의 입자모양은 구형과 판상의 형태를 가지고, 입자의 크기가 다소 변화가 심하며, 사질퇴적물의 원마도는 불량한 편이다(You et al., 2000). 섬진강 상류에 섬진강댐, 동북댐, 보성강댐 및 주암댐이 있으며, 연평균 강우량이 1,759.5 mm로서 유역의 수자원 부족량은  $69.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 이고, 이중 손실량은  $31.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 으로 46%이며 유출량은  $37.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 로 53%를 차지한다(MOCT, 2004).

섬진강에서 광양만으로 공급된 담수는 광양만의 다양한 수괴와 혼합된 뒤, 광양만의 유출구인 여수해만 입구를 통해 남해안으로 유출된다(Kim and Kang, 1991; Kim et al., 1996; Lee et al., 1996; Park et al., 1984). 유로연장 225 km에 유역면적 4,896  $\text{km}^2$ 을 갖고 있는 섬진강은 연간 약  $5.8 \sim 8.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 의 담수와 함께, 연간  $0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 부유물질을 광양만으로 공급하는 것으로 알려져 있다(Park et al., 1984).

광양만의 조석은 반일주조의 조류가 탁월하나, 만 북부의 섬진강을 통해서 유입되는 담수가 있어서 밀도 성층과 함께 하구순환도 형성된다. 유속은 만의 내부로 들어갈수록 점차 증가하며, 조류는 여수해만에서는 창조류와 낙조류의 유속이 50~60 cm/s(평균 대조기)를 나타내며, 묘도 주변으로 갈수록 창조류에 70 cm/s, 낙조류에 80 cm/s를 보인다(Lee et al., 1996). 광양만의 면적은 30년 전에 230  $\text{km}^2$ 이었지만, 광양만 내에는 광양제철소와 광양컨테이너부두, 울촌산업단지, 여천산업단지 등 크고 작은 공단이 조성되어 현재에는 약 30%의 면적이 감소한 것으로 조사되었다(Choi et al., 2002; Chu, 2002; Lee et al., 1996). 광양만의 수심은 수로 지역을 제외하고는 대부분 5 m이하로 얕고, 남동쪽의 여수해만쪽 입구로부터 북동쪽의 노량해협으로 이어지는 수심 30 m 이상의 노랑수로와 묘도 북쪽으로 이어지는 묘도 북수로 및 남쪽으로 이어지는 묘도 남수로가 있다.

### 2.2. 연구 방법

2005년 7월 31일 01:00부터 8월 4일 09:00 사이에는 섬진강댐에서 담수유출량의 변화가 있었으며, 약  $28.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유출량을 보였고, 섬진강 유역의 강수량이 8월 2일 22:00 시부터 최대 39.5 mm를 기록하였다. 섬진강댐으로부터 8월 3일 10:00부터 방류가 시작되어, 2005년 8월 3일 16:00 시에는 약  $1,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 최대의 댐 방류량이 측정되었다(Table 1).

2005년 8월 3일 09시부터 8월 4일 09시 사이의 25시간 동안에 섬진강하구(St. K1)에서 부유퇴적물의 유출·입에 관한 정보를 얻기 위하여 유속계인 RCM-9(Aanderaa Co.)과 CTD로 3개 수층의 유속, 수온과 염분을 측정하고, 동시에 채수펌프(Jacob Co., Model Mini200)를 이용하여 해수를 각각 채수하여 실험실에서 부유퇴적물 농도를 분석하였다(Fig. 1). 섬진강하구에서 25시간 동안 유속, 수온과 염분은 30분 간격으로, 부유퇴적물 농도는 1시간 간격으로 분석하였다. 유속은 각 수층(3개, 표층은 수면 아래 0.5 m, 저층은 바닥 위 0.5 m)에서 3분간 측정된 자료를 평균하여 계산하였고, 1 L씩 채수한 시료는 실험실에서 여과하여 여과지의 여과 전과 후의 무게 차이로 부유물질농도( $\text{mg/L}$ )를 계산하였다.

조석주기 동안의 부유퇴적물 순간이동률(Suspended sediment Flux:  $\text{g/m}^2/\text{s}$ )은 각 정점에서 수층별로 관측된 유속, 유향, 수심 그리고 부유퇴적물 농도를 이용하여 다음의 식 (1)으로 계산하였다(Gao et al., 1990).

$$f_s = (1/T) \int_T CV \sin \alpha dt$$

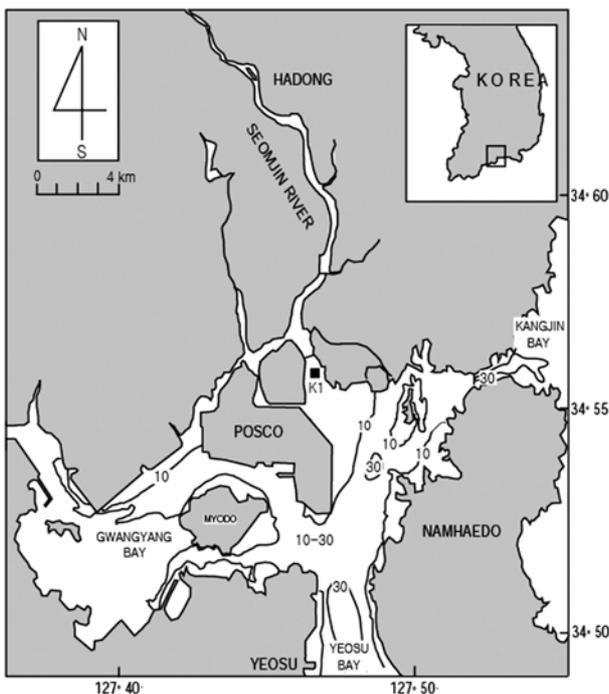
$$= (1/25) \left[ \sum_{i=2}^{25} C_i V_i \sin \alpha_i + (1/2) (C_1 V_1 \sin \alpha_1 + C_{25} V_{25} \sin \alpha_{25}) \right] \quad (1)$$

여기서,  $f_s$ 는 각 층에서의 net sediment flux( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ), C는 부유퇴적물 농도( $\text{kg/m}^3$ ), V는 유속( $\text{m/s}$ ), T는 관측시간(time span: 25 시간동안 1시간 간격으로 관측을 실시하여 대표 시간치는 25), 그리고 각각의 아래첨자는 시계열자료를 나타낸다.

섬진강하구 정점에서 2005년 7월 31일부터 8월 4일 사이에 해저면 0.5 m 상부에 부유물질 농도와 입도 변화를 모니터링하기 위하여 음향도플러유속계(Acoustic Doppler Velocimeter)와 현장입도분석기(LISST-100)를 이용하여 연속적으로 관측하였다. 연속관측은 저층 바닥 위 0.5 m에 기기를 계류한 다음, 20분 간격으로 ADV를 이용하여 세 방향의 유속성분(동서, 남북, 상하), ADV와 연결한 CTD를 이용하여 수온과 염분을 측정하였다. LISST-100에서는 1분 동안 0.2 Hz로 자료를 저장하고, 샘플링 간격은 5분으로 32개 입도구간별 체적농도(VC, volume concentration,  $\mu\text{L/L}$ )와 부유물질의 광 감쇠계수( $c(670)$ , beam attenuation coefficient,  $\text{m}^{-1}$ )를 연속적으로 측정하였다. 해수 채취는 ADV와 동일한 해역에서 수중 펌프를 이용하여 저층 해수 1 L를 각각 채수하였다.

**Table 1.** Two hours of river discharge (m<sup>3</sup>/s) and rainfall (mm) measured at Dam of Seomjin river in MOCT (Ministry of construction & transportation) of Seomjin river area during July 31 ~ Aug. 4, 2005

Date	Time	River discharge	Rain fall	Date	Time	River discharge	Rain fall
		(m <sup>3</sup> /s)	(mm)			(m <sup>3</sup> /s)	(mm)
7/31/2005	1:00	28.0	8.5	8/2/2005	7:00	28.0	8.5
	3:00	28.0	10.5		9:00	28.0	8.5
	5:00	28.0	10.5		11:00	28.0	8.5
	7:00	28.0	10.5		13:00	28.0	9.5
	9:00	28.0	10.5		15:00	28.0	9.5
	11:00	28.0	10.5		17:00	27.0	9.5
	13:00	28.0	10.5		19:00	28.0	13.0
	15:00	28.0	12.0		21:00	28.0	39.5
	17:00	28.0	29.0		23:00	28.0	39.5
	19:00	28.0	32.5		1:00	28.0	0.0
	21:00	28.0	32.5		3:00	9.0	1.0
	23:00	28.0	32.5		5:00	6.0	17.5
8/1/2005	1:00	28.0	0.0	8/3/2005	7:00	4.0	17.5
	3:00	28.0	0.0		9:00	3.0	17.5
	5:00	28.0	0.0		11:00	622.0	17.5
	7:00	28.0	12.0		13:00	847.0	17.5
	9:00	28.0	13.5		15:00	1029.0	17.5
	11:00	28.0	14.0		17:00	1010.0	17.5
	13:00	28.0	14.0		19:00	930.0	17.5
	15:00	28.0	14.0		21:00	827.0	17.5
	17:00	28.0	14.0		23:00	767.0	17.5
	19:00	28.0	14.0		1:00	674.0	0.0
	21:00	28.0	14.0		3:00	620.0	0.0
	23:00	28.0	14.0		5:00	561.0	0.0
8/2/2005	1:00	28.0	0.0	8/4/2005	7:00	402.0	0.5
	3:00	28.0	0.5		9:00	102.0	0.5
	5:00	28.0	7.0				



**Fig. 1.** Map showing study area and observation sites (contours in meter).

부유물질의 입도구간별 체적농도 자료를 이용하여 부유물질의 평균입도(mean particle size,  $\mu m$ )를 계산하였다 (Agrawal and Pottsmith, 1994, 2000). 부유물질의 평균유효 밀도(Mean effective density,  $\rho F - \rho_w$ ,  $\rho F$ : floc의 밀도,  $\rho_w$ : 해수의 밀도)는 체적부피(VC,  $\mu L/L$ )와 부유물질농도(SPM,  $mg/L$ )로 계산하였다(Mikkelsen and Pejrup, 2000). 부유물질의 질량( $M_f$ )은 부유물질 내 입자의 질량( $M_p$ )과 해수의 질량( $M_w$ )으로 주어지고( $M_f = M_p + M_w$ ), 부유물질의 부피( $V_f$ )는 입자의 부피( $V_p$ )와 해수의 부피( $V_w$ )로서 주어지며( $V_f = V_p + V_w$ ), 부유물질의 밀도( $\rho F$ )는 아래의 식 (2)로 변환된다.

$$\rho F = \frac{M_f}{V_f} = \frac{M_p + M_w}{V_p + V_w} = \frac{M_p}{V_p + V_w} + \frac{M_w}{V_p + V_w} \quad (2)$$

$$\frac{M_f}{V_f} - \frac{M_w}{V_p + V_w} = \frac{M_p}{V_p + V_w}$$

해수의 부피가 입자의 부피보다 매우 크다고 가정한다면 ( $V_w \gg V_p$ ),  $V_p + V_w (=VC)$ 는  $V_w$ 가 되고, 식 (2)는 아래로 식 (3)으로 바꿀 수 있다.

$$\frac{M_f}{V_f} - \frac{M_w}{V_w} \approx \frac{M_p}{VC} \Rightarrow (\rho F - \rho_w)$$

$$\approx \frac{SPM}{VC} \Leftrightarrow \Delta\rho \approx \frac{SPM}{VC} \quad (3)$$

이는 부유입자물질의 많은 부분이 결합물 상태로 존재할 때에 바꿀 수 있으며, 실제적으로 한 개의 입자 상태로 있다면, 부유물 입자의 질량/부피(SPM/VC)는 한 개의 입자 밀도에 가까울 것이다. 그러나 해양환경에서 세립질 퇴적물은 주로 결합 상태로 존재하기 때문에, 부유물질의 밀도(해수 밀도 차)는 VC(LISST-100에 의한 체적농도)와 SPM(해수 여과에 의한 질량농도)로 계산하였다. 부유물질의 침강속도( $W_s$ , cm/s)는 LISST-100에서 측정된 평균입도와 부유물질의 밀도( $\Delta\rho$ )를 이용하여, 스톡스 법칙(stokes's law)으로 계산하였다. 부유퇴적물 농도 분석은 채수한 해수 1 L 씩 정확하게 메스실린더로 나눈 다음, 미리 실험실에서 전자저울로 측정된 공경 0.45  $\mu$ m millipore filter paper HA type 여과지 위에 진공여과 방식으로 각각 여과하였다. 해수 여과 시 여과지에 남은 염분을 제거하기 위해 증류수로 3회 이상 반복 세척하고, 여과지는 냉장 밀봉하여 실험실로 옮겨서 3일 동안 자연 건조하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 섬진강하구 부유물질 이동과 분포

2005년 8월 3일과 4일 사이에 섬진강의 입구(K1)에서 조석주기별로 수층별 유속세기를 비교한 결과(Fig. 2(a)), 섬진강에서 광양만 방향으로 흐르는 낙조류 동안에 표층의 평균유속(최소~최대)은 70.2(12.1~100.4) cm/s이고, 중층은 42.0(5.1~82.6) cm/s, 저층은 21.6(2.4~56.2) cm/s로 표층이 저층보다 매우 빠른 유속을 갖고 저층으로 갈수록 약해진다. 반대로 광양만에서 섬진강 방향으로 흐르는 창조류 동

안에 전 수층에서 비슷한 유속을 보이며, 표층의 평균유속(최소~최대)은 29.3(6.4~92.6)cm/s이고, 중층은 32.3(15.8~72.4) cm/s, 저층은 32.2(19.4~59.5) cm/s로서 중층과 저층보다는 표층에서 유속이 약해지는 것을 보인다. 이는 섬진강 유출수가 주로 표층을 따라서 빠르게 흐르는 반면에, 섬진강 방향으로 흐르는 저층유속이 증가하고, 섬진강 표층수가 중층과 저층의 유속보다 상대적으로 약해지는 경향을 보이기 때문으로 판단된다.

섬진강의 입구(K1)에서 수온과 염분을 연속적으로 관측한 결과, 표층에서는 평균 수온(최소~최대)이 25.0°C(24.0~25.8°C)이고, 저층에서는 24.3°C(23.4~25.1°C)로 표층보다 저수온을 보였다(Fig. 2(b)). 염분은 표층에서 평균 염분(최소~최대)은 3.5 psu(0.1~8.3 psu)로 8.3 psu 미만의 염분 값을 보이는 반면에 저층은 20.8 psu(0.1~31.1 psu)로 표층보다 고염분을 나타냈다(Fig. 2(c)). 섬진강 입구(K1)는 표층의 고수온과 저염분의 섬진강 표층수와 저층의 저수온과 고염분의 광양만 저층수가 혼합되어 나타나며, 이 두 수괴는 조류에 따라서 섬진강의 상부와 하부 지역으로 왕복 이동하고 있다. 부유물질농도는 섬진강에서 광양만으로 공급되는 표층수에서 13.0~28.6 mg/L의 범위를 나타내고, 유속이 빠를수록 부유물질농도도 증가하고, 유속이 약할수록 농도는 감소하여 유속세기와 유사한 경향을 보였다(Fig. 3(a)). 하지만, 중층수(23.4~49.4 mg/L)와 저층수(43.6~88.8 mg/L)에서는 부유물질농도가 유속변화와 유사한 경향을 보이지는 않으며, 표층보다 저층 바닥 근처에서 부유물질농도가 3~4배 정도 증가하였다. 특히, 표층수와 저층수의 이동방향이 반대가 되는 층류 현상이 관찰되며, 이 시기에 표층(17.4 mg/L)보다 중층(35.0 mg/L)과 저층(46.8 mg/L)에서 부유물질농도의 뚜렷한 증가를 보였다.

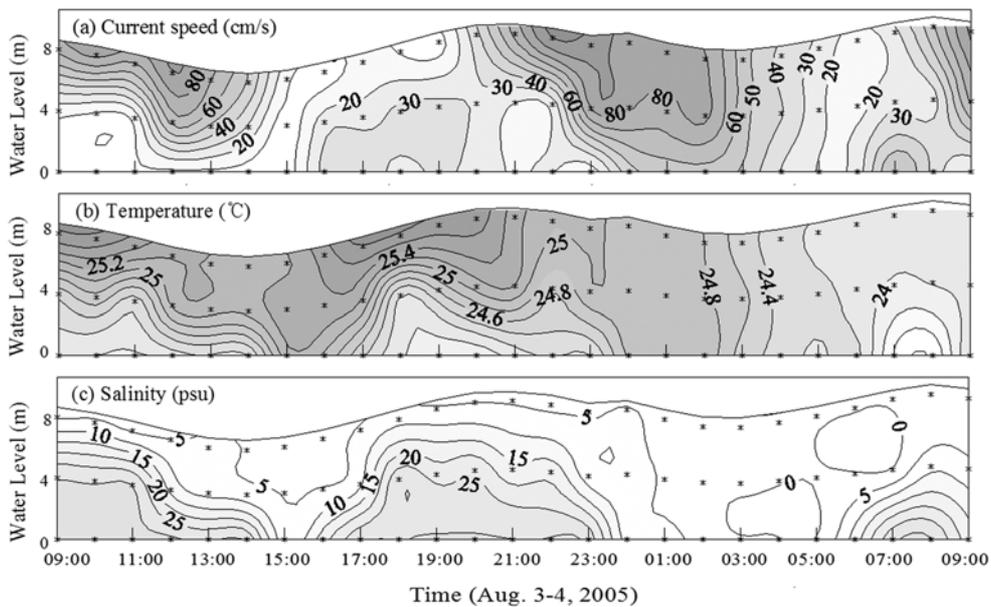
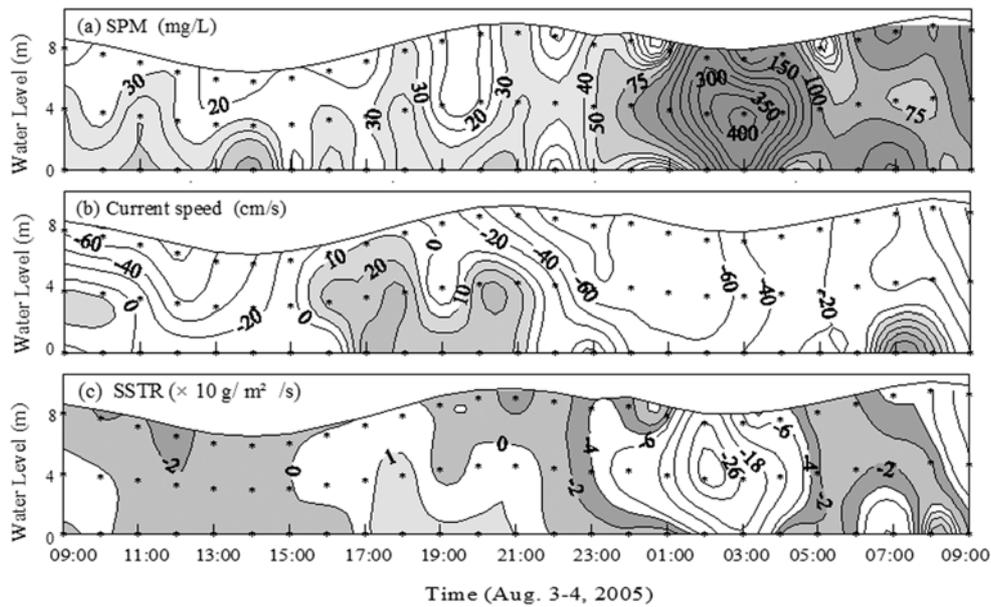


Fig. 2. Time series distribution of current speed (cm/s) (a), temperature (°C) (b) and salinity (psu) (c) at different depths of station K1 during Aug. 3~4, 2005.



**Fig. 3.** Time variation of SPM (mg/L) (a), axial velocity (cm/s) decomposed along the direction of tidal channel (N-S) (b) and suspended sediment transport rate ( $\times 10 \text{ g/m}^2/\text{s}$ ) calculated by the product of SPM and axial velocity at St. K1 (c) during Aug. 3~4, 2005.

유속(cm/s)과 부유물질농도(mg/L)를 이용하여 순간이동률( $\text{g/m}^2/\text{s}$ )을 계산한 결과(Fig. 3(b), (c)), 낙조류 동안에 표층에서 부유물질의 평균(최소~최대)이동률은  $10.3(0.8\sim 28.8) \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 중층은  $7.8(1.2\sim 17.6) \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 저층은  $7.0(0.8\sim 15.9) \text{ g/m}^2/\text{s}$ 로 계산되었다. 표층에서 11:00~13:00 동안에 섬진강에서 광양만 방향으로 평균 이동률이  $17.8 \text{ g/m}^2/\text{s}$ 이고, 반대로 광양만에서 섬진강 방향으로 16:00~18:00에 평균 이동률이  $2.0 \text{ g/m}^2/\text{s}$ 로 광양만 방향으로 순간이동률이 많은 것으로 계산되었다. 이는 표층에서 광양만 방향으로 유속이 증가하였기 때문이다. 이에 비해서 중층과 저층에서 부유물질의 순간이동률은 낙조 동안보다 창조 동안에 유속이 표층에 비해서 중층과 저층에서 빨라지고, 부유물질농도 또한 높았기 때문에 광양만 방향으로의 순간이동률보다 섬진강 방향으로의 순간이동률이 증가하는 결과를 나타냈다. 낙조류보다 창조류 동안에 표층보다 중층에서 순간이동률이 섬진강 방향으로 5배 이상 증가되었다.

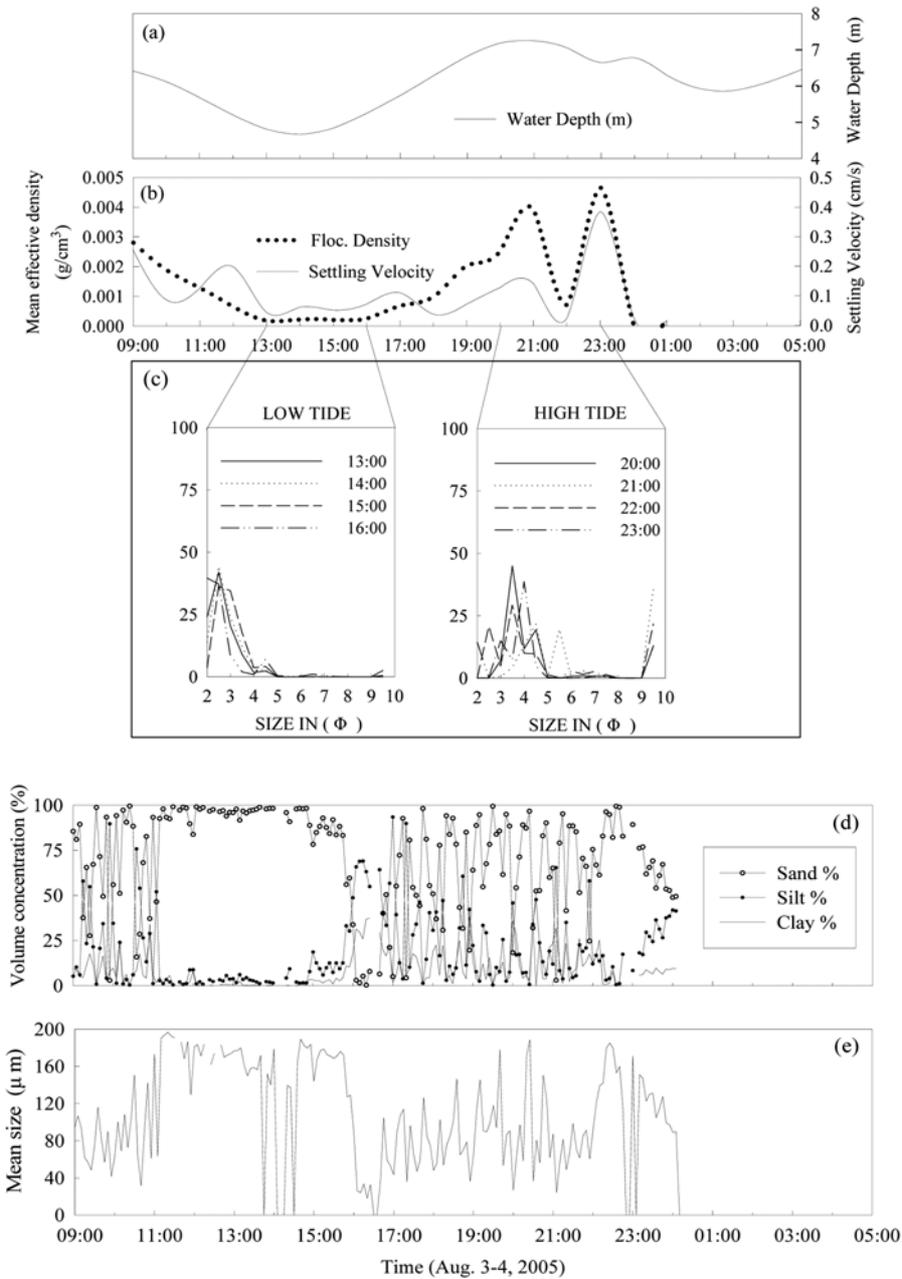
섬진강의 담수유출량이 증가하면서 표층에서 최강 낙조류가  $82.5 \text{ cm/s}$ 에서  $18.9 \text{ cm/s}$  더 빨라져  $101.4 \text{ cm/s}$ 로 빠른 유속을 보였다. 표층과 마찬가지로 저층에서도 최강 낙조류가  $2.4 \text{ cm/s}$ 보다  $15.6 \text{ cm/s}$ 로 더 빨라지면서  $18.0 \text{ cm/s}$ 로 유속이 강했다. 표층과 저층의 최강유속 차이가  $80 \text{ cm/s}$ 가 되면서 표층 유속이 저층 유속보다 훨씬 빠른 유속을 보였다. 낙조류의 증가와 마찬가지로 창조류 또한 증가하였는데, 최강 창조류가 저층(17:00 ( $37.7 \text{ cm/s}$ ), 익일 07:00 ( $59.5 \text{ cm/s}$ ))에서  $21.8 \text{ cm/s}$ 로 증가하여, 담수 유출량의 증가로 저층에서의 유속이 증가되었다. 표층수에서 부유물질의 순간이동률이  $65.5(4.9\sim 264.6) \text{ g/m}^2/\text{s}$ 이고, 중층수는  $96.6(7.8\sim 313.6) \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 저층수는  $43.0(0.9\sim 168.1) \text{ g/m}^2/\text{s}$ 로 표층과 저층보다는 중층을 통해서 이동하는 부유물질이 더 높았다. 섬진강의 담수유출량이 증가한 결과, 저층을 통해서

섬진강 방향으로 이동하는 순간이동률이  $123.2 \text{ g/m}^2/\text{s}$ 로 담수유출량이 증가하기 전보다 10배 증가하였고, 낙조류보다도 3배 정도 증가하였다. 이것은 담수유출량이 증가되어 유속이 빨라지면서 섬진강 방향으로 유입이 많아지면서 부유물질의 공급이 담수유출량이 증가하기 전보다 많아진 것으로 판단된다.

2003년 3월의 대조기에 동일한 지점인 섬진강 입구(K1)에서 낙조 동안 표층을 통한 이동률(표층:  $14.3 \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 중층:  $10.3 \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 저층:  $7.9 \text{ g/m}^2/\text{s}$ )이 가장 우세했으며, 창조 동안에는 저층을 통해서 우세한 이동률(표층:  $6.9 \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 중층:  $9.1 \text{ g/m}^2/\text{s}$ , 저층:  $23.2 \text{ g/m}^2/\text{s}$ )을 보였다(Kim and Lee, 2004a). 하지만 이는 창조 동안 저층에서 나타난 현저하게 높은 농도 값으로 인하여 상류 쪽으로의 미약한 순 이동이 분석된 것이며 장기간의 조사결과와는 다를 것으로 판단된다. 2005년 하계에는 섬진강의 담수유출량의 증가로 낙조 동안에 표층( $65.5 \text{ g/m}^2/\text{s}$ )과 저층( $43.0 \text{ g/m}^2/\text{s}$ )을 통한 이동률보다 중층( $96.6 \text{ g/m}^2/\text{s}$ )을 통한 이동률이 높았다. 특히, 창조 동안에 중층을 통한 이동률이 2003년 3월의 대조기보다 10배 이상 증가하였다.

### 3.2. 부유물질의 재부유와 퇴적작용

섬진강의 입구(K1)에서 부유물질의 입도분포를 이용한 입도분포곡선의 모드(최빈값)형태와 세립질/조립질의 함량을 비교한 결과(Fig. 4), 섬진강 표층수의 유입이 약해지는 저조 부근에서 부유물질의 입도분포곡선은 조립부에 뚜렷한 단 모드 형태를 보였고, 광양만 저층수의 유입이 약해지는 고조 부근에서 부유물질의 입도분포곡선이 조립부와 세립부에 하나씩의 모드를 갖는 복모드를 보였다(Fig. 4). 이러한 모드형태는 섬진강 표층수가 약해지면서 낙조 동안에 주로 공급된 조립한 섬진강 부유물질이 수직적으로 침



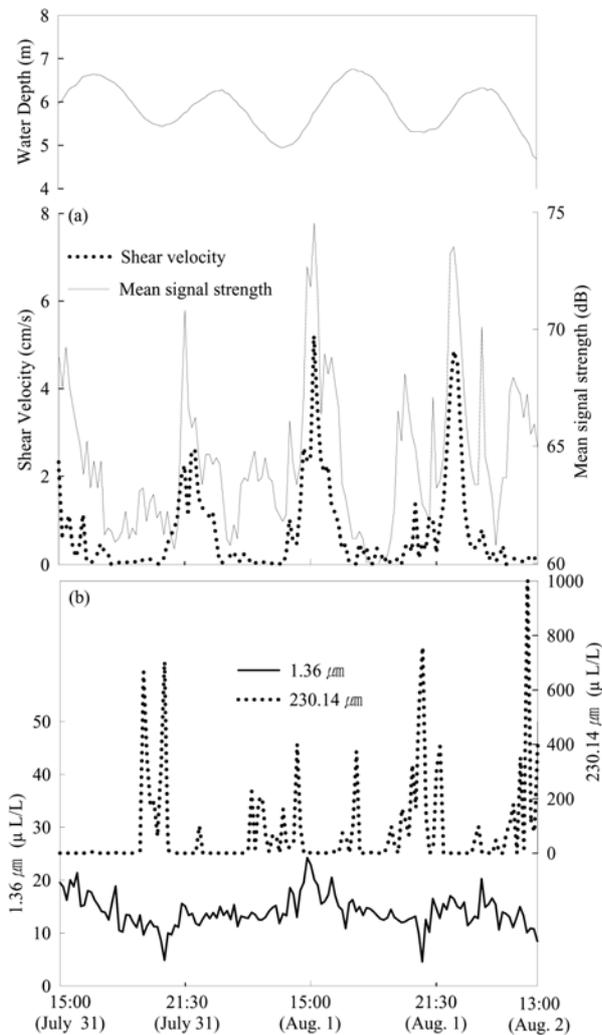
**Fig. 4.** Time variation of water depth (a), mean effective density ( $\text{g/cm}^3$ ) and settling velocity ( $W_s$ ,  $\text{cm/s}$ ) (b), size distribution (c), volume concentration (%) (d) of sand: silt: clay size fraction and mean particle size ( $\mu\text{m}$ ) (e) of suspended material in near bottom water at St. K1 during Aug. 3~4, 2005.

강하기 때문으로 판단된다. 그러나, 창조 동안에는 광양만 저층수가 저층 바닥을 통해서 재공급되면서 세립질 부유물질이 혼합되는 것으로 판단된다.

바닥 위 0.5 m 상부의 저층수에서 전단속도(shear velocity)와 유속계에 의한 음향산란강도(mean signal strength)는 창조 동안에 증가하여, 부유물질의 평균유효밀도와 침강속도도 높아졌다(Fig. 4). 이는 섬진강 표층수의 유속이 약해지는 저조부근에는 표층에서 침강하는 조립한 부유물질에 의해서 상대적으로 유효밀도가 감소하지만, 광양만 저층수에 의해서 재공급되는 세립질 부유물에 의한 복모드 형태의 퇴적물은 유효밀도가 높고, 침강속도가 최대를 나타낸다.

창조 동안에 저층 바닥 위에서 전단속도가 증가한 것은 표층수의 빠른 낙조류에 대한 저층수의 재공급에 의한 마찰속도가 증가한 결과, 표층수와 반대 방향의 저층수의 유속이 증가하였기 때문이다. 유속계의 음향산란강도 역시, 섬진강 방향으로 이동하는 저층수에서 음향산란강도가 증가하였고, 세립질 부유물질에 의한 복모드 형태의 퇴적물에서 높은 것으로 판단된다(Fig. 5).

Jago 등(2002)이 북해(North Sea)에서 표층수와 저층수의 부유물질이 혼합되는 상태에서는 다소 느린  $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 의 침강속도를 보이며, 간헐적인 퇴적물의 재 부유물질은 0.2~5.7 mm/s로 2~3 order의 침강속도가 증가하는 것



**Fig. 5.** Time variation of shear velocity (cm/s), mean signal strength (dB) (a) measured by ADV, volume concentration of fine size (1.36 μm) and coarse size (230.14 μm) (b) of suspended material measured by LISST-100 at near-bottom of St. K1 during Jul. 31~Aug. 2, 2005.

을 보였다. 또한, ADV 유속계는 수중에 음파를 발사하여 물과 함께 유동하는 부유입자에 의해서 반사되는 음향의 도플러(Doppler)효과를 이용하여 유속과 유향을 측정하는 장비이기 때문에, 도플러 효과에 의한 반사음향의 주파수 변화는 부유물질농도에 따라 달라지고, 이를 이용하여 수중에 부유물질농도가 높으면 수신기에 도달하는 반사음향의 강도가 강해진다(Oh et al., 2002; Thevenot and Kraus, 1993). 섬진강 입구(K1)에서 섬진강으로 유입(저층수) 또는 유출(표층수)되는 부유물질의 광 감쇠(Beam attenuation)현상은 농도 뿐 아니라, 입도에 따라서도 달라지는 경향을 보이기 때문에, 부유물질의 평균입도가 작고, 농도가 높아지면 광 감쇠계수가 더욱 뚜렷하게 감쇠되었다. ADV 유속계의 음향반사강도와 전단속도도 창조 동안에 증가하며, 특히 음향반사강도가 높아지는 것은 조립한 부유입자물질보다는 바닥에서 재 부유하여 세립한 부유입자물질에서 더 높은

음향반사강도를 나타냈다. 창조 동안에 표층수에 대한 저층수의 유속은 섬진강 표층수가 증가되면서 저층수와 바닥 사이에서 전단속도(shear velocity)가 증가하였기 때문에, 섬진강으로 재공급되는 세립한 퇴적물의 농도가 증가되었다.

#### 4. 결론

본 연구는, 2005년 풍수기(Table 1)에 광양만 북측 입구인 섬진강하구에서 섬진강으로 교환되는 부유물질을 평수기와 비교하였으며, 현장 부유물질의 입도변화 원인으로 재부유와 침강속도 차이에 의한 부유물질 거동을 아래와 같이 요약하였다.

- 1) 2005년 8월 대조기에 섬진강을 통해서 광양만으로 이동하는 부유퇴적물은 섬진강의 담수유출량이 증가하여, 표층(65.5 g/m<sup>2</sup>/s)과 저층(43.0 g/m<sup>2</sup>/s)을 통한 이동보다 증층(96.6 g/m<sup>2</sup>/s)을 통해서 이동하는 부유물질이 높으며, 광양만 북측에서 섬진강으로 이동하는 부유물질은 저층을 통해서 주로 이동하며, 2003년 3월(Kim and Lee, 2004a)의 결과보다 순간이동률은 10배 이상 빨라졌다.
- 2) 현장 부유물질의 입도 변화는 조류가 강한 시기에 작은 입자 크기를 보이는 것은 조류에 의해 입자들이 부서지거나, 해저퇴적물의 재부유작용이 증가되어 작은 입자들의 공급이 증가되기 때문으로 해석할 수 있다. 유속이 약한 고조보다 저조 근처에서 상대적으로 입자의 크기가 크게 나타나는 것은 입자들의 운반이 유속이 약해지면서 집적되어 입자의 크기가 증가된 것이다.
- 3) 섬진강과 인접한 광양만 북측에서 조류에 따른 저층 현장 부유물질의 크기와 평균유효밀도로 계산한 침강속도는 유속의 변화와 유사한 관계를 보이지 않으며, 낙조류에 더 빠른 침강속도를 보였다. 섬진강으로 운반되는 부유물질이 증가할수록 부유물질의 조성변화가 더 심하지만, 침강속도는 섬진강 상류지역보다 복잡하고 다양한 이유로 느려지는 것으로 판단된다.
- 4) 섬진강에서 평수기보다 풍수기에 광양만으로 공급되는 부유물질의 순 이동이 증가하는 것은 담수유출량에 의한 유속이 증가되어 부유물질의 공급이 증가하였기 때문이지만, 궁극적으로는 섬진강과 인접한 광양만 북측 입구의 저층 바닥에서 더 작고 다양한 형태를 갖는 부유물질의 재 부유작용이 증가되면서 섬진강 상류로 빠르게 운반된 결과로 판단된다.

#### 사 사

이 논문은 2004학년도 부경대학교 동원학술연구재단의 지원을 받아 수행된 결과로서 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

Agrawal, Y. C. and Pottsmith, H. C. (1994). Laser diffraction particle sizing in STRESS. *Continental Shelf Research*, **14**,

- pp. 1101-1121.
- Agrawal, Y. C. and Pottsmith, H. C. (2000). Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Mar. Geol.*, **168**, pp. 89-114.
- Campbell, D. E. and Spinrad, R. W. (1987). The relationship between light attenuation and particle characteristics in a turbid estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **25**, pp. 53-65.
- Chang, H. D. and Oh, J. K. (1991). Depositional sedimentary environments in the Han river estuary and around the Kyunggi bay posterior to the Han river's developments. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, **26**, pp. 13-23.
- Choi, D. L., Hyun, S. M., and Lee, T. H. (2002). Recent Geomorphological changes and late Quaternary depositional sequence of Gwangyang Bay, southern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 『*The Sea*』, **8**(1), pp. 35-43.
- Choi, J. Y. (1993). Seasonal variations of suspended matters in the Keum estuary and its adjacent coastal area. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, **28**, pp. 272-280.
- Choi, J. Y., Choi, H. Y., and Seo, M. S. (1995). Physical and sedimentological changes in the Keum estuary after the gate-close of Keum river weir. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, **30**, pp. 262-270.
- Chu, H. S. (2002). Numerical experiments for the changes of currents by reclamation of land in Kwangyang Bay. *J. of the Environmental Sciences*, **11**, pp. 637-650.
- Gao, S., Xie, Q. C., and Feng, Y. J. (1990). Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay, Zhejiang, China. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **31**, pp. 397-409.
- Gardner, W. D., Biscaye, P. E., Zaneveld, J. R. V., and Richardson, M. J. (1985). Calibration and comparison of the LDGO nephelometer and the OSU transmissometer on the Nova Scotian Rise. *Mar. Geol.*, **66**, pp. 323-344.
- Jago, C. F., Jones, S. E., Latter, R. J., McCandliss, R. R., Hearn, M. R., and Howarth, M. J. (2002). Resuspension of benthic fluff by tidal currents in deep stratified waters, northern North Sea. *J. Sea. Res.*, **48**, pp. 259-269.
- Kang, H. S. and Lee, K. W. (1996). Trace metal concentrations and sedimentation rates of Kwangyang, Masan and Ulsan Bay sediments. *J. Korean Society on Water Quality*, **12**(4), pp. 455-461.
- Kim, D. C. and Kang, H. J. (1991). Suspended sediment budget in Gwangyang Bay through the Yeosu Sound. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, **24**, pp. 31-38.
- Kim, S. J., Kim, D. C., Yi, H. I., and Shin, I. C. (1996). Changes in sedimentary process and distribution of benthic foraminifera in the Eastern Part of Kwangyang Bay, South Sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **1**, pp. 32-45.
- Kim, S. Y. and Ha, J. S. (2001). Sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong river estuary and adjacent coastal area. *J. Korean Fish. Soc.*, **34**(3), pp. 268-278.
- Kim, S. Y. and Lee, B. K. (2004a). A Preliminary Study on the Sediment Flux in Gwangyang Bay: during Spring tide, March 2003. *J. Korean Fish. Soc.*, **37**(6), pp. 511-516.
- Kim, S. Y. and Lee, B. K. (2004b). In-situ Particle Size and Volume Concentration of Suspended Sediment in Seomjin River Estuary, determined by an optical instrument 'LISST-100'. *J. Korean Fish. Soc.*, **37**(4), pp. 323-329.
- Lee, S. H., Kwon, H. K., Choi, H. Y., Yang, J. S., and Choi, J. Y. (1999). Physical environment changes in the Keum river estuary by the dyke gate operation II. Salinity structure and estuary type. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, **4**, pp. 253-265.
- Lee, Y. D., Kim, C. W., Kim, D. Y., Park, B. N., and Lee, K. J. (1990). A study of marine environment in the estuary of Nakdong river: Sedimentation processes and heavy metal distribution. *J. KSWPRC June*, pp. 1-7.
- Lee, Y. G., Hwang, J. Y., Jung, K. K., and Choi, J. M. (1996). Sedimentary environment change in Kwangyang bay and Yosu Sound - Based on sediment characteristics and Clay minerals. *J. Korean Earth Science Society*, **17**, pp. 407-416.
- McCave, I. N. (1983). Particulate size spectra, behavior, and origin of nepheloid layers over the Nova Scotian continental rise. *J. Geophys. Res.*, **88**, pp. 7647-7666.
- Mikkelsen, O. A. and Pejrup, M. (2000). In situ particle (floc) size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume. *Mar. Geol.*, **170**, pp. 443-459.
- Ministry of Construction & Transportation (2004). Flood Control Prediction of Seomjin river Office.
- Moody, J. A., Butman, B., and Bothner, M. H. (1987). Near-bottom suspended matter concentration on the continental shelf during storms: estimates based on in situ observations of light transmission and a particle size dependent transmissometer calibration. *Cont. Shelf Res.*, **7**, pp. 609-628.
- Oh, B. C., Chu, Y. S., and Jung, B. S. (2002). Calculation of suspended sediment flux from ADP. *J. Coastal and ocean engineers, Soc. Kor.*, **14**(3), pp. 222-231.
- Pak, H. and Zaneveld, J. R. V. (1977). Bottom nepheloid layers and bottom mixed layers observed on the continental shelf off Oregon. *J. of Geophys. Res.*, **82**, pp. 3921-3931.
- Park, Y. A., Lee, C. B., and Choi, J. H. (1984). Sedimentary environments of the Gwangyang Bay, southern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, **19**, pp. 82-88.
- Park, C. K. and Oh, J. K. (1991). A study on the clay minerals in the Han river estuary and the Kyonggi bay areas. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, **26**, pp. 313-323.
- Thevenot, M. M. and Kraus, N. C. (1993). Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary. *J. Mar. Environ. Eng.*, **1**, pp. 65-79.
- Wells, J. T. and Kim, S. Y. (1991). The relationship between beam transmission and concentration of suspended particulate material in the Neuse River Estuary, North Carolina. *Estuaries*, **14**, pp. 395-403.
- You, H. S., Cho, S. H., and Koh, Y. K. (2000). Fluvial deposits distributed along the Seomjin river. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **21**, pp. 174-187.