

아산만 수로와 항내에서 해저경계층을 포함한 수층별 부유사의 이동 특성

박성진^{1,†} · 김경만² · 김태인³¹(주)지오시스템리서치 책임²(주)지오시스템리서치 해양조사부 책임³(주)지오시스템리서치 부회장

Vertical Profiles of Suspended Sediment Transport Integrating Bottom Boundary Layer in the Channel and Port of Asan Bay, Korea

Sung Jin Park^{1,†}, Kyungman Kim², and Tae In Kim³¹Principal Engineer, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea²Principal Engineer, Department of Oceanographic Survey, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea³Vice President, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea

요 약

골재채취 또는 준설 등 인위적인 행위로 인하여 발생하는 부유사량을 평가하기 위한 기초연구로서 아산만의 수로와 항내를 대상으로 인위적인 행위가 없는 자연상태에서 해저경계층을 포함한 전 수층의 부유사 이동특성을 조사하였다. 아산만의 입구부(PC1), 유속이 강한 수로(PC2), 유속이 약한 항내(PC3)의 세 정점에서 2019년 여름의 15일간 0.4 mab(meter above bed)부터 표층까지의 유속과 부유사 농도를 연속 관측하였다. 전층에서 창조류가 우세한 PC1과 PC2에서 부유사 순이동량은 창조 방향으로 각각 27.9와 20.0 ton/m/15day이며, 정규화된 수심(해면 1, 저면 0)의 0.15 이하 수층에서 급격히 증가하는 양상을 보인다. PC3의 부유사 순이동량은 정규화된 수심의 0.4를 기준으로 상층부는 낙조 방향, 하층부는 창조 방향으로 향하며, 이는 항내에 유지되는 밀도 성층으로 이층순환이 형성되기 때문이다. 전 수층에서 부유사 순이동량은 창조 방향으로 0.7 ton/m/15day로서 수로의 약 3%에 불과하다. 본 연구를 통하여 골재채취 또는 준설시 해저면 교란으로 발생하는 해저경계층 부근의 부유사 이동 특성 분석이 가능함을 확인하였다. 또한 골재채취 유·무에 따른 현장조사 분석을 수행하여 골재채취시 발생하는 부유사의 영향 범위를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract – As a preliminary study to evaluate suspended sediment (SS) amount induced by manmade activities such as sand mining or dredging, the vertical profiles of SS transport integrating bottom boundary layer (BBL) are investigated in the channel and port of Asan Bay. Current velocity and SS concentration were continuously measured from 0.4 meter above bed (mab) to surface layer at three stations, i.e. bay entrance (PC1), channel (PC2) with stronger flow, and Inner Port (PC3) with weaker flow for 15 days in summer 2019 when dredging was absent. At PC1 and PC2 flood-dominant in the whole water column, the net SS flux is estimated at 27.9 and 20.0 ton/m/15day, respectively in flood direction, and is abruptly increased in BBL below normalized depth of 0.15 (surface 1 and bed 0). It is estimated to ebb direction above normalized depth of 0.4 but to flood direction below the depth at PC3, which is due to two-layer circulation induced by density stratification in the port. The net SS flux in the whole water column is 0.7 ton/m/15day in flood direction and merely about 3% in the channel. It is ascertained from the study to be possible to analyze the SS transport characteristics in BBL due to bed disturbances during sand mining or dredging. It is thus believed to be able to evaluate quantitatively the extent of SS impact through field campaign both with- and without sand mining.

Keywords: Suspended sediment(부유사), Bottom boundary layer(해저경계층), Residual current(잔차류), Suspended sediment flux(부유사 순이동량), Asan bay(아산만)

[†]Corresponding author: sjpark@geosr.com

1. 서 론

골재채취 또는 준설시 해저면의 저층 퇴적물은 인위적인 교란에 의해 부상되어 해수 흐름을 따라 확산되고, 선박에 적재되는 골재(조립 및 세립 퇴적물) 중 일부는 월류수에 의해 표층 또는 해수 중으로 유출되어 조립 퇴적물은 인근 해역에 침강하고 세립 퇴적물은 원거리까지 확산된다. 남해 EEZ 해역의 경우 골재채취로 발생한 부유사가 표층에서 최대 39.5 km까지 이동한 것이 관측된 바 있다(Seo *et al.*[2018]).

EEZ 해역과 연안역에서 골재채취 행위로 인한 부유사 발생량을 산정하기 위해서는 채취가 이루어지지 않는 평상시 전 수층에서 부유사 이동량을 파악한 후, 골재채취시 동일한 조사를 통하여 부가되는 부유사 이동량을 산출하여야 한다. 그러나 다층의 부유사를 관측하기 위하여 사용되는 일반적인 음향도플러 유속계는 해저면부터 장비 센서까지의 높이 및 음파를 송신하고 수신하기까지 필요한 대기시간을 거리로 환산한 blank distance(RD Instruments [2011])로 인하여 해저경계층 부근에서 유속과 부유사를 관측할 수 없다(Oh *et al.*[2002]; Shin *et al.*[2014]; Figueroa *et al.*[2020]). 따라서 해저경계층에서 많은 퇴적물이 이동됨에도 불구하고 부유사 이동량 산정시 이를 반영할 수 없다(Oh *et al.*[2002]; Incheon Port Construction Office[2012]; Gunsan Regional Office of Oceans and Fisheries[2019]). 이에 대한 해결책으로 해저경계층 부근에 벡터 유속계 또는 탁도계 등을 추가로 계류할 수 있으나(Lee[2010]) 특정 층의 자료만 얻게 되는 한계가 있다. 또 다른 방법으로 수중에 downlooking 방식의 관측 플랫폼(Gartner[2004]; Ha and Park[2012])을 설치할 수 있으나 조차가 큰 해역에서는 고조시 상층부의 자료가 결측되는 문제가 있다. 선박 통항과 어업행위가 많은 우리나라에서 downlooking 방식은 안전사고의 위험에 노출되어 장기간 계류가 어렵다.

따라서 본 연구는 해저경계층을 포함한 전 수층에서 부유사의 이동량을 산정하기 위한 기초연구로서 0.5~2 MHz 주파수대의 음향도플러 유속계, 탁도계, 탁도계 등을 uplooking 방식으로 계류함으로써 해저경계층의 미관측 부분을 최소화하여 부유사의 이동 특성을 파악하였다.

2. 연구 해역

2.1 지형 및 수심

아산만은 지리적으로 평택시의 노미각과 당진시의 한진각을 연결하는 선 내측 해역으로 정의하며, 수면적은 약 100 km²이다. 만 입구부의 폭은 약 2 km이고, 수로의 수심은 DL(-)33~(-)13 m로서 노미각 부근에서 수심이 깊으며, 만 내측에 조간대가 형성되어 있다(Fig. 1). 만 내에 평택·당진항이 위치하며 서부두를 중심으로 두 개의 수로 형태를 보인다. 수로의 주 흐름은 행담도와 서부두 사이를 통과하여 아산호까지 연결되며, 내항 수역으로 연결되는 동부두와 서부두 사이의 흐름은 내항 가호안의 체절로 인하여 약한 흐름을 보인다(Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries[2020]). 아산만으로 유입된 해수는 당진시~서부두 단면으로 84%, 서부두~동부두 단면으로 16%가 통과한다(Bang *et al.*[2013]).

2.2 방조제의 담수 방류량

아산만은 1970년 12월 아산방조제 건설을 시작으로 남양, 삼교, 석문방조제 순으로 개발이 이루어졌으며, 이 방조제를 통하여 아산만으로 배출되는 담수 방류량은 각각 891, 151, 940, 241×10⁶ m³/year로 삼교와 아산방조제의 방류량이 상대적으로 크다. 특히 7~8월에 삼교와 아산방조제로부터 배출되는 방류량은 연간 방류량의 54%와 48%에 이른다(Bang *et al.*[2013]).

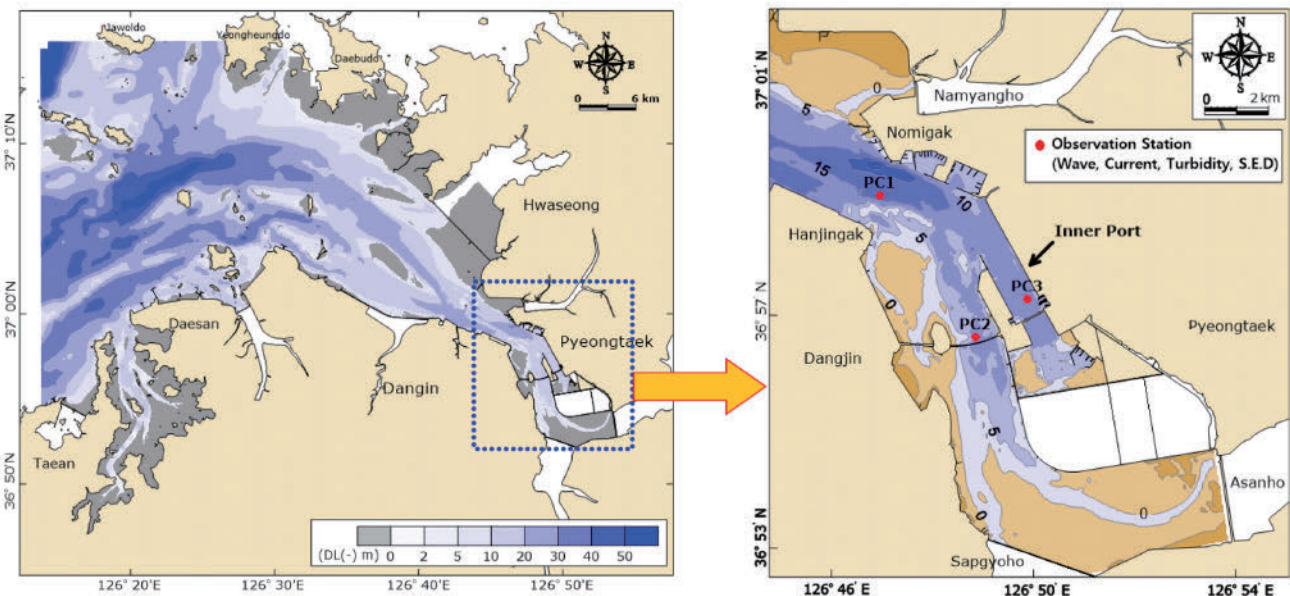


Fig. 1. Bathymetry of Asan Bay and offshore (left panel), and three measurement stations (right panel).

2.3 조석

국립해양조사원이 운영하는 평택 조위관측소 기준조석의 대조차는 약 8.0 m, 소조차는 약 3.5 m로서 인천만과 유사한 조석환경을 보인다. 2019년 8~10월에 평택 조위관측소와 삼교방조제 전면에서 관측한 조위자료를 검토한 결과, 만 내측으로 갈수록 고조위는 상승하는 경향을 보이고, 저조위는 큰 변화를 보이지 않는다(Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries[2020]). 또한 아산만의 조석은 과거에도 창조 지속시간이 낙조 지속시간보다 짧았으나, 남양방조제 건설 이후 창조 지속시간이 더 감소하여 창조류 우세가 가중된 상태이다(Park[2008]).

2.4 해저퇴적물

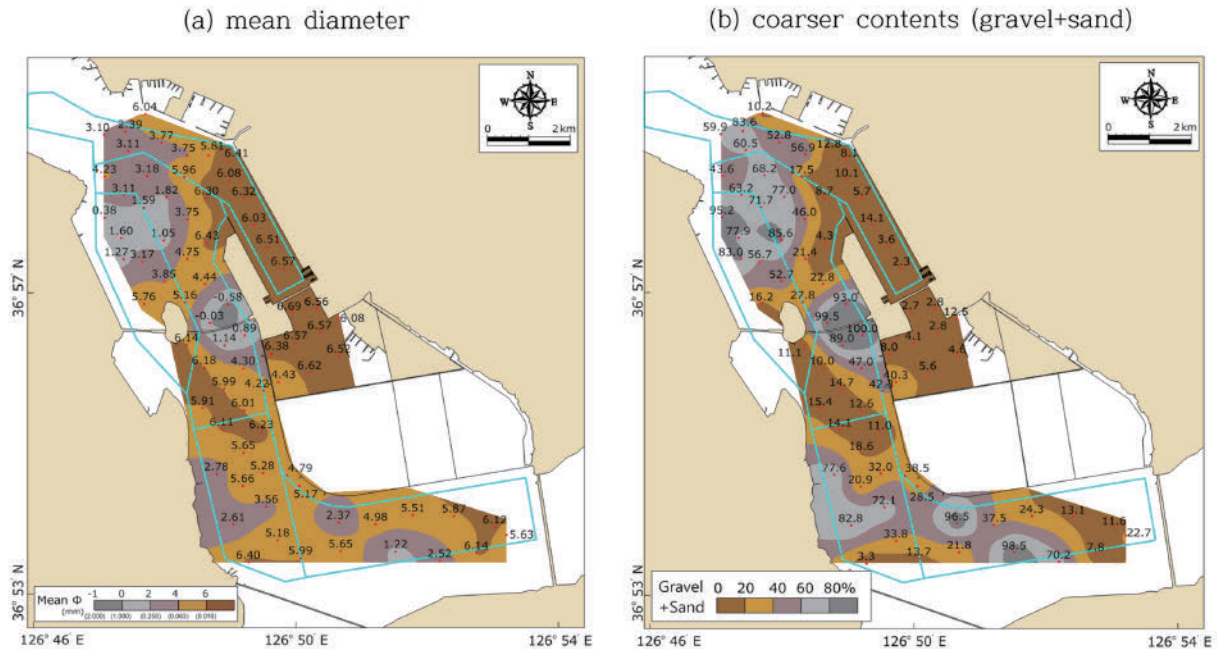
아산만 입구부의 해저퇴적물 평균입경은 3φ (φ = -log₂d, d는 퇴적물 입경(mm))정도이고 자갈과 모래 함량이 60% 이상 분포하고

있으며, 내항으로 들어갈수록 유속이 작아짐에 따라 평균입경은 6φ 보다 세립하고 펄 함량이 95% 정도이다(Fig. 2). 행담도와 서부두 사이에는 강한 유속의 영향으로 평균입경은 1.1φ 보다 조립하며, 자갈과 모래 함량이 89% 이상으로 분포한다. 내항 2공구 외곽 호안~삼교호~아산호에는 조간대가 넓게 분포하고 있으나, 삼교호와 아산호로부터 담수 배출시 강한 유속으로 인하여 주수로의 평균입경은 1~3φ로 조립하다(Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries[2020]).

3. 관측 및 분석 방법

3.1 관측 방법

해저경계층을 포함한 전 수층에 대한 부유퇴적물의 이동 특성을 파악하기 위하여 아산만 입구부인 정점 PC1, 행담도와 서부두 사



※ Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries[2020]

Fig. 2. Distribution of bottom sediment texture.

Table 1. Instrument settings for data collection from July 26 to Aug. 9, 2019 (15days)

Station	Instrument	Depth (DL(-),m)	Sensor height (mab)	Sampling rate (Hz)	Sampling interval (sec)	Samples per burst	Blanking distance (m)	Bin size (m)
PC1	ADCP(600kHz)	18.3	0.5	0.50	600	300	1.35	0.5
	Aquadopp Profiler(2MHz)		0.2	5.06	600	1,518	0.15	0.1
	AWAC(400kHz)		0.5	1.49	3,600	2,048	-	n/a
	TM-256S OBS		2.1	1.00	600	60	-	n/a
PC2	ADCP(600kHz)	10.5	0.5	0.50	600	300	1.35	0.5
	Aquadopp Profiler(2MHz)		0.2	5.06	600	1,518	0.15	0.1
	WTG-256S		0.3	2.00	3,600	2,048	-	n/a
	TM-256S OBS		2.1	1.00	600	60	-	n/a
PC3	AWAC(600kHz)	11.1	0.6	0.50	600	300	0.75	0.5
	Aquadopp Profiler(2MHz)		0.2	5.06	600	1,518	0.15	0.1
	WTG-256S		0.3	2.00	3,600	2,048	-	n/a
	TM-256S OBS		2.1	1.00	600	60	-	n/a

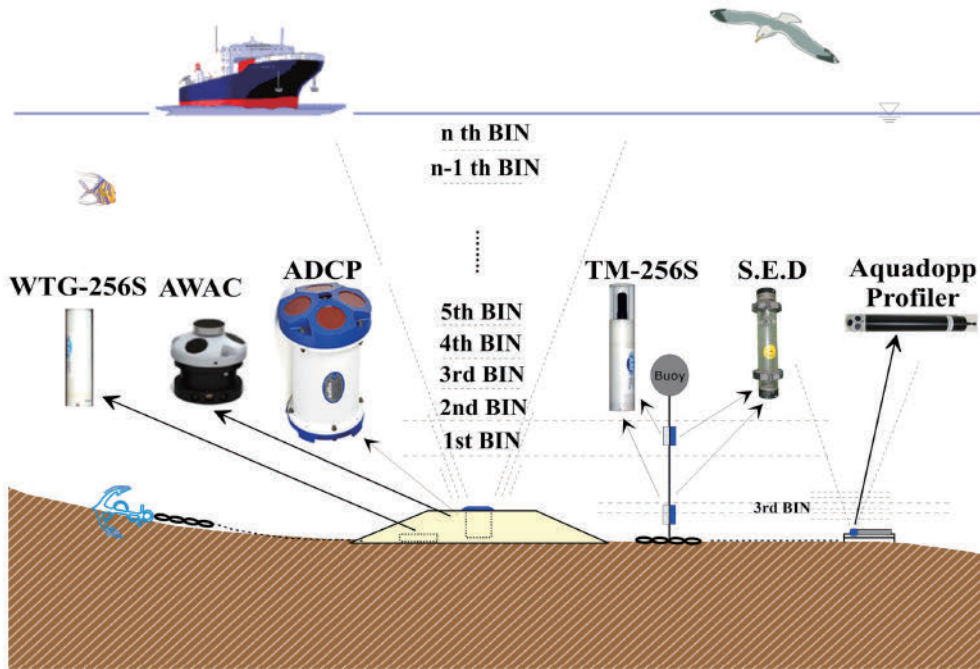


Fig. 3. Schematic diagram of in-situ measurements.

이 강한 유속이 발생하는 수로인 정점 PC2, 유속이 상대적으로 약한 내항 입구부인 정점 PC3에서 Table 1과 같이 2019년 7월 26일부터 8월 9일까지 15일간 유속, 파랑, 부유사 모니터링을 수행하였다(정점 위치는 Fig. 1 참조). 많은 선박의 이동 및 어로행위로부터 안전한 조사를 수행하기 위하여 Fig. 3과 같이 관측 장비를 해저면에 안착시켜 uplooking 방식으로 조사를 수행하였다. 유속과 부유사를 관측하기 위해서 모든 정점에는 Aquadopp Profiler 및 ADCP 또는 AWAC 2기가 각각 설치되었다. Aquadopp Profiler의 자료는 0.4 mab부터 0.1 m 간격으로 생산되도록 설정하였고, ADCP 또는 AWAC은 2.1 mab부터 0.5 m 간격으로 자료가 생산되도록 설정하였다.

자료 분석은 전처리 후 해저경계층(0.4 mab)부터 2.0 mab까지는 Aquadopp Profiler의 자료를 활용하고, 2.1 mab부터 표층까지는 ADCP 또는 AWAC의 자료를 활용하였다. 한편 echo intensity 정보를 부유사로 변환하기 위하여 탁도계(TM-256S OBS)와 부유사 포집기를 2.1 mab에 설치하여 탁도를 측정하고 부유사를 포집하였다. 또한 파랑에 의한 부유사의 특성을 파악하기 위하여 정점 PC1에 AWAC을, 정점 PC2와 PC3에는 수압식 파고계(WTG-256S)를 설치하였다.

3.2 분석 방법

3.2.1 탁도

탁도계로 관측된 탁도 값을 부유사 농도로 환산하기 위해 부유사 포집기로 채취한 현장 부유사를 이용하여 탁도계 보정을 수행하였다. 먼저 암처리한 1L 비이커에 증류수를 채운 후 탁도센서의 배경농도를 측정하였다. 다음에 측정하고자 하는 FTU(Formazin

Turbidity Unit, 탁도계 단위) 만큼 퇴적물시료를 첨가하여 잘 혼합한 상태에서 주사기로 시료를 분취하여 부유사 농도를 확인하였다. 그리고 탁도계의 탁도값과 부유사 농도의 관계식을 산출하여 탁도계의 탁도 값을 부유사 농도로 환산하였다(Figueroa *et al.*[2020]).

3.2.2 음향강도

음향도플러 유속계에서 방사되는 음파신호는 부유사나 해수면에서 산란 또는 반사되어 일부가 수신기로 되돌아오는데, 이러한 반사음향이 생기는 원인은 수중에 존재하는 부유사나 플랑크톤 등이 음파에 대한 반사체 역할을 하기 때문이다. 수중에 부유사의 농도가 높으면 수신기에 도달하는 반사음향의 강도가 강해지므로 이 반사음향의 강도로부터 부유사 농도를 측정할 수 있다.

ADCP, AWAC, Aquadopp Profiler에서 방사되는 음파신호는 물속에서 진행하는 동안 넓게 퍼지면서 강도가 약해지고 수체와 부유사에 의해서 감쇄하는데 이를 투과감쇄(transmission loss, TL)라 한다. 감쇄계수(attenuation, α)가 전 수층에서 동일하다고 가정하면, 음파의 투과감쇄(TL)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(RD Instruments[2000]).

$$TL = 20\log_{10}R + 2\alpha R \tag{1}$$

여기서, $20\log_{10}R$ 은 음파가 넓게 퍼지면서 발생하는 손실, $2\alpha R$ 은 수체와 퇴적물에 의한 음파의 감쇄를 의미하며 단위는 모두 dB이다. R은 트랜스듀서로부터 관측이 이루어지는 층까지의 거리이다. 반사 음파강도는 개수(count) 단위로 나타내며, 이를 반사 신호강도라 한다(Deines[1999]; Simpson[2001]). 반사 신호강도를 개수에서 dB 단위로 변환하기 위해서는 음파강도 단위(echo intensity scale,

Kc)와 투과 감쇄(TL)를 고려하는 후처리 과정이 수행되어야 한다. 전 수층에서 감쇄계수와 음파강도 단위가 일정하다고 가정하면, 관측기기의 후방산란 자료는 다음과 같이 표현된다(RD Instruments [2000]).

$$EI = I \cdot K_c + TL \quad (2)$$

여기서, EI는 dB 단위의 음파강도를 나타내며, I는 개수 단위(count)의 음파강도를 나타낸다. 음파강도 단위(Kc)는 0.35~0.55dB/count의 범위를 나타낸다(RD Instruments[2000]; Nortek[2001]). 부유사 농도 변환은 Gartner[2002]의 대수적 농도와 음파강도 사이의 선형적 관계를 이용하였다.

$$10 \log_{10}(c) = A \cdot EI + B \quad (3)$$

Gartner[2002]에 의해 제안된 방법은 현장 시료와 OBS(optical backscattering sensor)를 통한 보정이 필요하다. 후방 산란신호는 부유사 농도의 상용대수로 나타내지만, OBS의 신호는 선형으로 표현된다. 따라서 간단한 회귀분석을 통해 상수를 파악할 수 있다. 또한 기준농도가 필요 없고 실험실 분석이 가능하기 때문에 농도 변환이 간편하다. 실험실에서 OBS의 탁도 보정을 실시한 후, 그 결과로 환산된 농도의 상용대수와 관측기기의 음파강도간의 선형 회귀관계를 통해 음파 강도를 부유사 농도로 환산하였다.

3.2.3 저면 전단응력

해저면을 교란시키는 흐름과 파랑에 의한 저면 전단응력(τ_{cw})은 $\tau_{cw} = \tau_c + \tau_w$ 와 같이 표현할 수 있으며, 파랑에 의한 저면 전단응력(τ_w)은 아래와 같이 표현된다.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_0 f_w u_{orb}^2 \quad (4)$$

여기서, f_w 는 파랑에 의한 해저면 마찰계수(Swart[1974])로서 $A_s/k_s > 1.57$ 경우에는 $f_w = 0.00251 \exp [5.21(A_s/k_s)^{-0.19}]$, $A_s/k_s \leq 1.57$ 경우에는 $f_w = 0.3$ 을 적용한다. u_{orb} 는 파랑 경계층에서 파랑에 의한 수립자의 최대 유속(m/s)으로 $u_{orb} = \frac{1}{4} \sqrt{\pi} \frac{H_w}{\sinh(kh)}$ 이며, A_s 는 파랑 경계층에서 파랑에 의한 수립자의 최대 이동거리(m)로서 $A_s = \frac{H_w}{\sinh(kh)}$ 이다. ρ_0 는 해수의 밀도(g/m^3), H_w 는 파고(m), h 는 총 수심(m), k 는 파수($2\pi/L_w$, m^{-1}), L_w 는 파장(m)을 의미한다.

흐름에 의한 저면 전단응력(τ_c)은 아래와 같은 일반식을 적용하였다(Guard and Nielsen[2008]).

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (5)$$

여기서, u 는 유속, u_* 는 전단속도($u_* = (\tau_c/\rho_0)^{0.5}$), k 는 von Karman 상수($k=0.4$), z 는 저면으로부터 높이, z_0 는 조도높이, τ_c 는 저면전단응력을 의미한다. 식 (5)를 독립변수 u , 종속변수 $\ln(z)$ 으로 변형한 후, 0.4, 0.7, 1.0 mab의 유속 자료를 회귀분석하여 얻은 기울기 k/u_* 로부터 u_* 를 산출하였다.

3.2.4 부유사 순이동량 산정

각 정점에서 10분 간격으로 관측된 층별 유속 및 부유사 농도를 이용하여 전체 수층의 부유사 순이동량을 산정하였다. 자료분석시 2.1 mab 이상은 ADCP 또는 AWAC의 0.5 m 간격의 관측 자료를 사용하였다. 0.5~2.0 mab 구간은 Aquadop Profiler의 관측 자료를 0.5 m 간격으로 평균하였으며, 0.5 mab 이하의 자료는 최하부 관측 층인 0.4 mab 자료를 적용하였다. 전 층의 부유사 농도 수직분포를 검토한 결과, 부유사 농도가 급격하게 변화하는 해저 경계층의 높이는 2.5~3.0 m이며, 0.4 mab 이하부터 해저면까지 외삽할 경우 부유사 농도가 과대평가될 것으로 판단된다. 각 정점에서 부유사 순이동량은 다음과 같이 산출하였다.

$$T_{ss} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n H_j \cdot V_j \cdot SSC_j \right) \quad (6)$$

여기서, T_{ss} 는 부유사 순이동량, n 은 10분 간격 자료의 총 개수, h 는 각 측정점의 수직층 수, H_j 는 수층간 거리(0.5 m), V_j 는 j번째 수층의 주축방향 유속(“+” 창조 방향, “-”낙조 방향), SSC_j 는 j번째 수층의 부유사 농도를 의미한다.

4. 결과 및 고찰

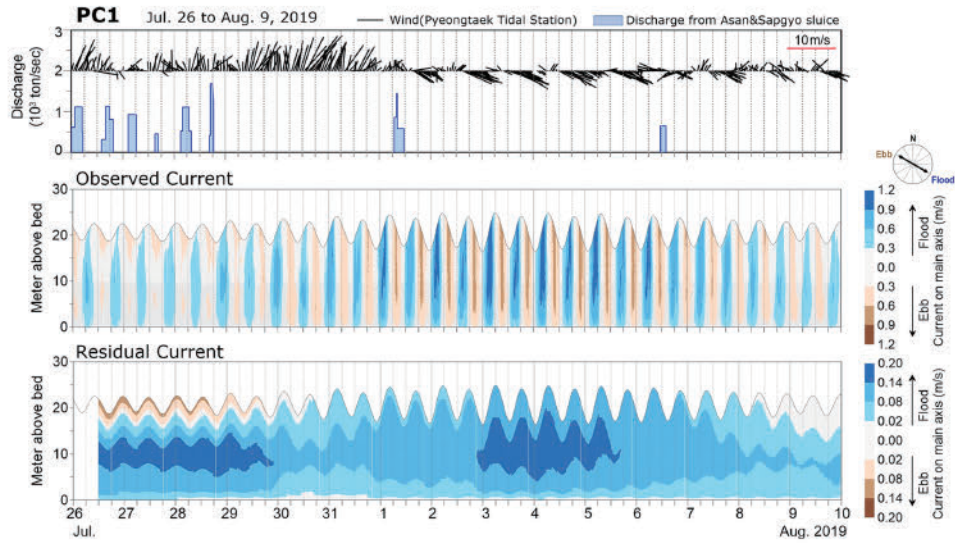
4.1 유속 및 잔차류

각 정점의 유속과 잔차류 시계열을 Fig. 4에 제시하였다. 잔차류 분석은 절단주기 36시간의 low-pass filter 방법을 적용하였다. 아산만 입구에 위치한 PC1에서 유속은 창조시 동~남동방향, 낙조시 서~북서방향의 왕복성 흐름을 보이며, 최강유속은 표층(총 수심의 20%)에서 창조시 1.3 m/s, 낙조시 0.8 m/s이다. 0.4 mab에서 최강 유속은 창조시 0.8 m/s, 낙조시 0.6 m/s로 낙조시보다 창조시에 강한 유속을 보인다. 잔차류는 전 수층에서 창조방향이 우세하며, 최대 0.18 m/s이다. 특히 삼교와 아산방조제에서 집중방류가 이루어진 7월 24~28일에 표층에서 강한 낙조방향의 잔차류가 발생하였으며, 최대 0.12 m/s이다. 이러한 현상은 Cho *et al.*[2008]이 제시한 바와 같이 아산만 해역이 담수의 직접적으로 영향을 받기 때문으로 사료되며, 관측 당시 바람의 영향은 상대적으로 크지 않은 것으로 판단된다.

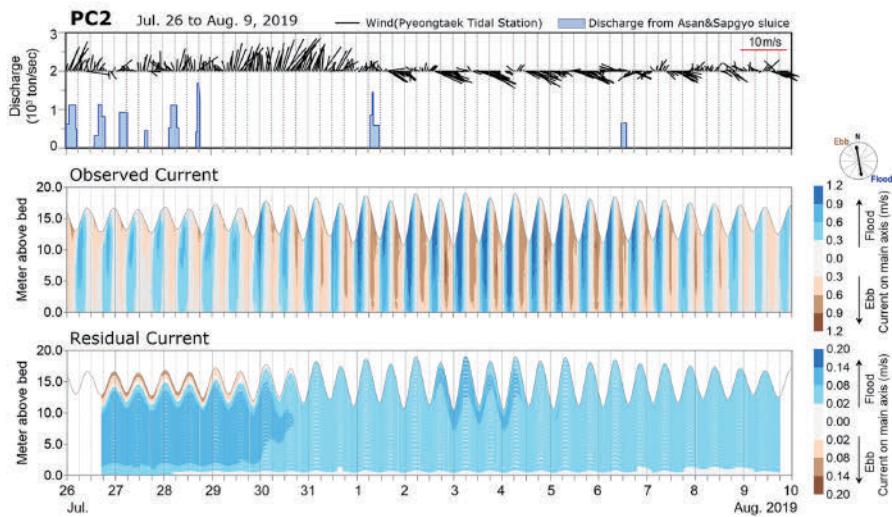
행담도와 서부두 사이의 협수로에 위치한 PC2 지점의 유속은 창조시 남남동방향, 낙조시 북북서방향의 왕복성 흐름을 보이며, 최강유속은 표층에서 창조시 PC1과 유사한 1.3 m/s, 낙조시 1.0 m/s이다. 0.4 mab에서 최강유속은 창조시 1.0 m/s, 낙조시 0.7 m/s로서 창조시는 PC1보다 0.2 m/s 강한 유속을 보인다. 잔차류의 경향성은 PC1과 유사하나 최대 잔차류속은 창조방향이 0.17 m/s, 낙조방향이 0.15 m/s로서 낙조방향의 잔차류속이 PC1보다 다소 강하다. 이는 PC2 정점이 PC1 정점보다 삼교와 아산방조제에 가깝기 때문에 담수의 영향이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

내항에 위치한 PC3에서 유속은 창조시 남동~남남동방향, 낙조시 북서~북북서방향의 왕복성 흐름을 보이며 최강유속은 표층에서

(a) PC1



(b) PC2



(c) PC3

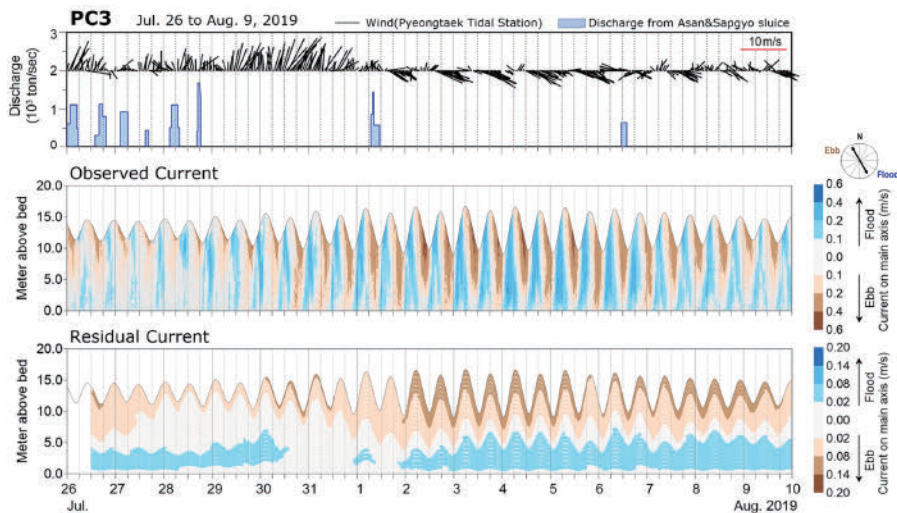


Fig. 4. Time series of wind, freshwater discharge from Asan & Sapgyo dykes, current speed and residual current projected on the main axis.

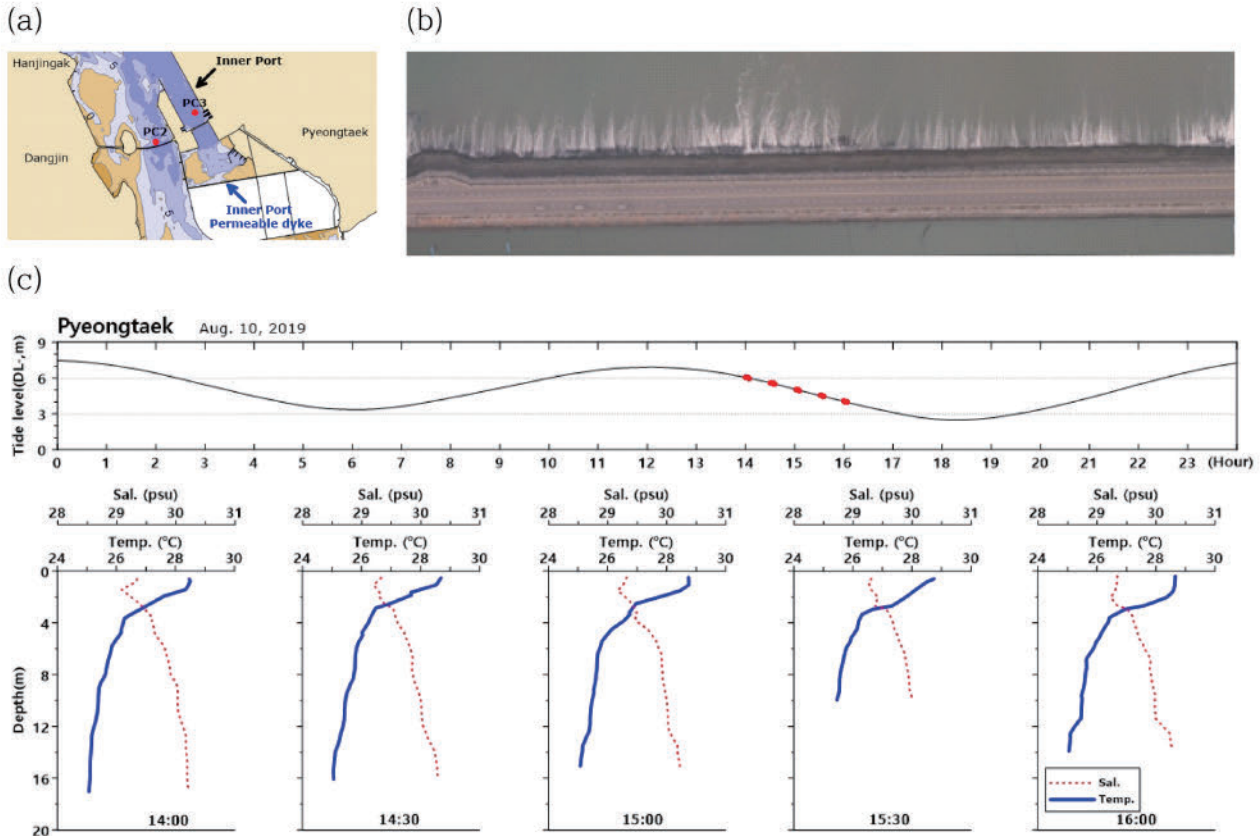


Fig. 5. Location of permeable dyke (a), out-flow from the dyke pictured by UAV (b), and T-S profiles at PC3 (c).

창·낙조시 모두 0.5 m/s이고 0.4 mab에서 창·낙조시 0.2~0.3 m/s이다. 잔차류는 전반적으로 표층에서는 낙조방향(최대 0.12 m/s), 저층에서는 창조방향(최대 0.17 m/s)의 전형적인 이층순환 구조를 보이고 있는데, 이러한 현상은 2009년 이후 유사한 결과를 보이고 있다(Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries[2018]). 담수의 영향 여부를 확인하기 위하여 2019년 8월 10일 14~16시(낙조시)에 30분 간격으로 정점 PC3에서 수온·염분 관측을 수행하였다. 그 결과 표층에서 29 psu 정도의 저염수가, 저층에서 30 psu 정도의 고염수가 존재하여 이층순환 구조가 형성되는 것을 확인하였다(Fig. 5). 이는 내항 2공구를 투수성 호안으로 시공한 이후, 호안 내측으로 우수가 집적되어 형성된 저염수가 낙조시 가호안 외측으로 배출되면서 발생한 현상으로 판단된다. 해수가 유통되는 투수성 호안에 대한 설명은 Bang *et al.*[2013]의 연구결과에 자세히 제시되어 있다.

4.2 부유사 농도

탁도와 부유사 농도의 보정 결과 모든 정점에서 결정계수가 0.99로 상관관계가 높게 나타났으며, 환산된 부유사 농도의 상관계수와 음파강도간의 선형 회귀식의 결정계수는 모든 정점에서 0.60~0.86으로 비교적 양호하게 나타났으며(Fig. 6), 현장에서 직접 채수한 부유사와 추정된 ADCP 부유사 농도의 상관관계도 비교적 양호하게 나타났(Fig. 7). 변환된 부유사 농도를 평택 조위관측소의 조위,

삽교와 아산방조제의 방류량, 각 정점에서의 파고, 유속(0.4 mab) 그리고 저면전단응력과 같이 Fig. 8에 제시하였다.

관측 초기에 다소 많은 담수가 아산만으로 유입되었으나, PC1과 PC2 정점에서 방류로 인한 뚜렷한 부유사의 증가 양상은 보이지 않았다. 또한 가장 외해측에 위치한 PC1에서 유의파고 0.5 m 이하의 출현율이 99.6%로서 관측기간 동안 대체로 잔잔한 파고가 관측되어 파고 역시 부유사 농도를 증가시키는데 큰 역할을 하지 못하였다. 따라서 저면전단응력은 유속의 크기에 비례하며, 소조기보다 대조기시에, 낙조보다 창조시에 전단응력이 크게 발생한다(Fig. 8 참조). 또한 같은 창조시에도 조차가 큰 창조시에 전단응력이 보다 크게 발생한다.

부유사 농도는 전단응력에 직접적으로 반응하는 것으로 나타나는데 아산만 외해측에 위치한 PC1에서 대조기에, 0.4 mab에서 창조시에 높고 낙조시에 낮은 농도를 보이며, 고조시에 낮고 저조시에 높은 농도를 보인다. 이는 아산만이 창조우세 해역으로서 창조시 강한 유속으로(Park[2008]) 인하여 낙조시보다 높은 농도를 보이는 것으로 판단되고, 고조시에 낮은 농도와 저조시에 높은 농도를 보이는 것은 창조시에 조립한 부유퇴적물이 만 내측으로 이동하다가 빠르게 침강하는 반면에 낙조시에는 만 내측의 세립한 퇴적물이 외해측으로 이동하면서 천천히 침강하여 높은 농도를 나타낸 것으로 추정할 수 있다. 중·소조기의 경우 전단응력이 0.2 N/m² 이하로서 저층 퇴적물의 재부유가 미약한 것으로 나타났다(Table

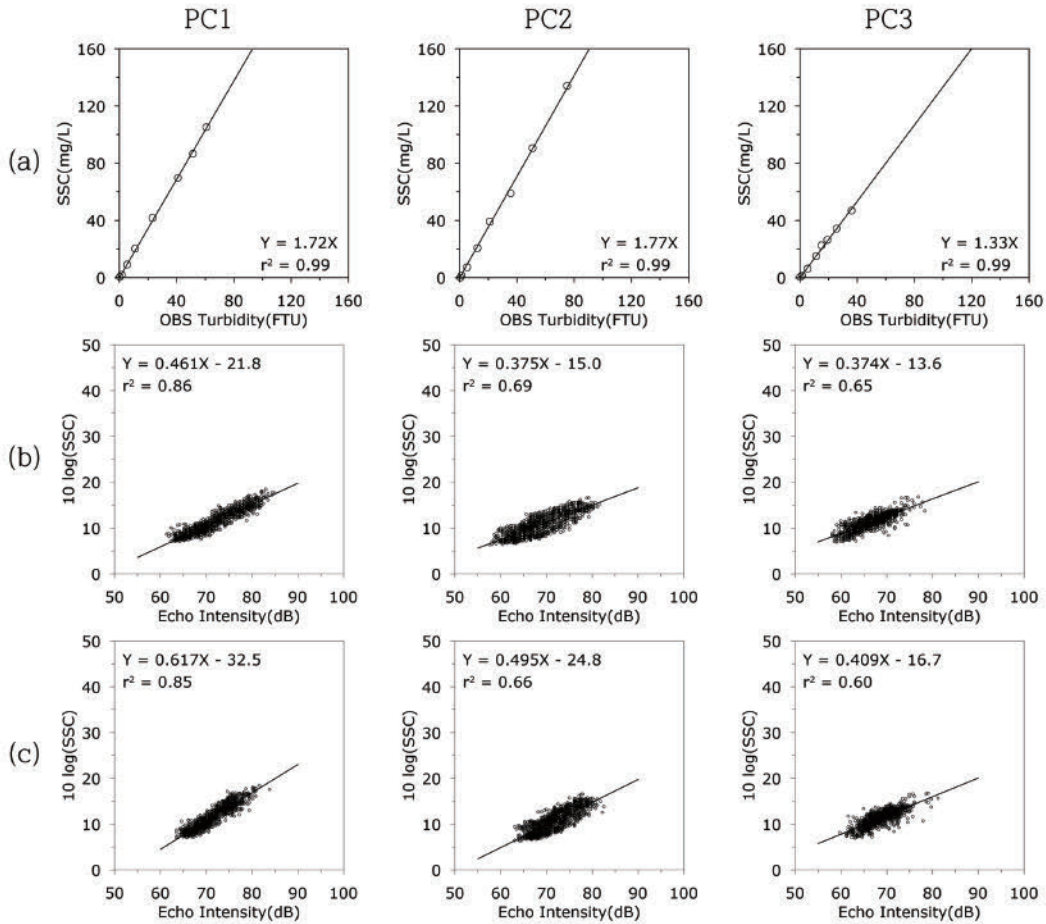


Fig. 6. Conversion of turbidity and echo intensity into suspended sediment concentration (SSC). Calibration of OBS turbidity to SSC obtained from sediment entrainment device (a), correlation between SSC and echo intensity from Aquadopp Profiler (b), and from ADCP at PC1 & PC2 and AWAC at PC3 (c).

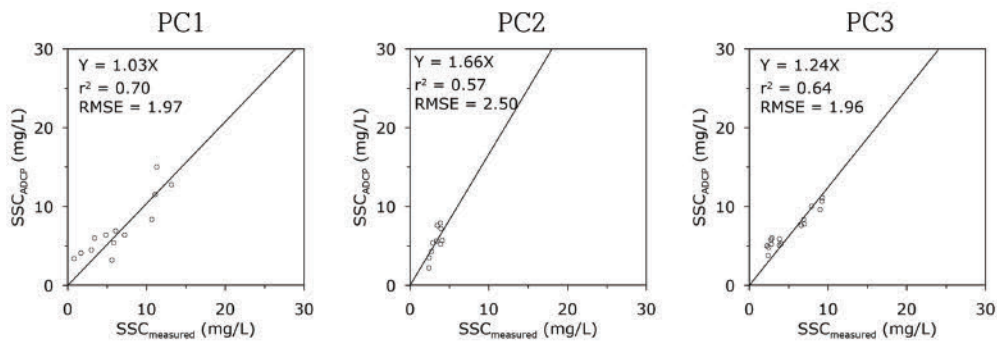


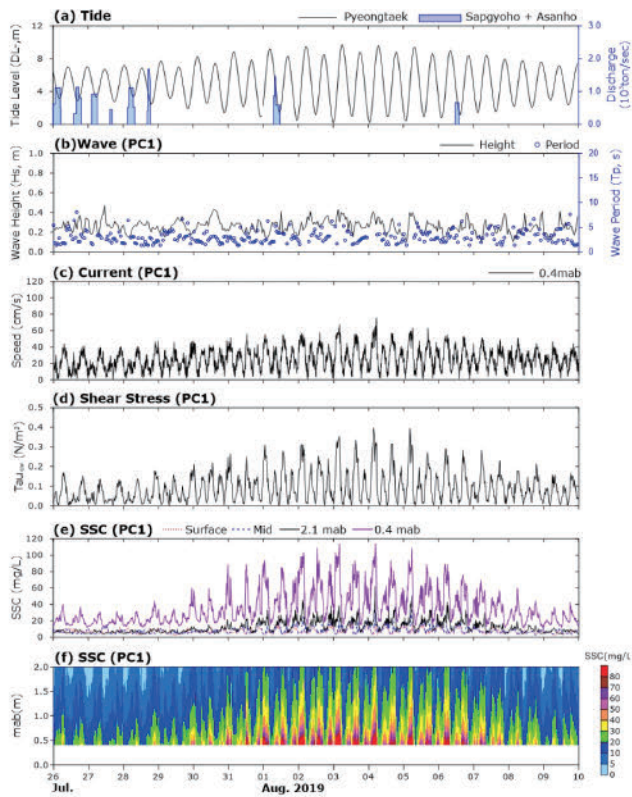
Fig. 7. Comparison of estimated SSC from echo-intensity with those from direct sampling at PC1, PC2 and PC3.

Table 2. Averaged suspended sediment concentrations for 15 days from July 26 to August 9, 2019

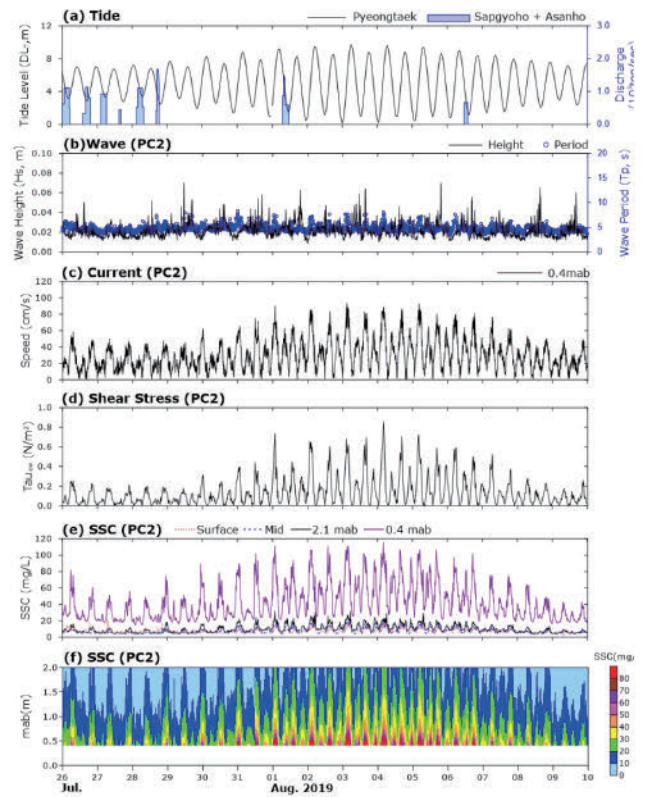
(Unit: mg/L)

Tide	PC1			PC2			PC3		
	Surface layer	Mid. layer	0.4 mab	Surface layer	Mid. layer	0.4 mab	Surface layer	Mid. layer	0.4 mab
Spring Tide	8	10	50	8	10	58	4	7	32
Mean Tide	7	8	35	7	7	39	4	6	28
Neap Tide	6	6	22	7	5	29	4	6	26
Average	7	8	36	7	7	42	4	6	29

[PC1]



[PC2]



[PC3]

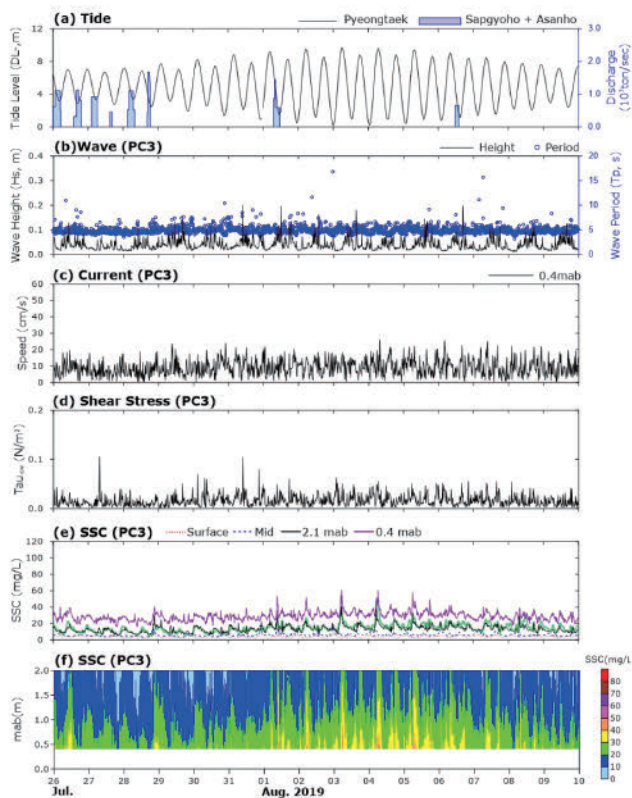


Fig. 8. Time series of tide & freshwater discharge (a), wave height & period (b), current speed at 0.4 mab (c), bed shear stress (d), and suspended sediment concentration (e, f) at PC1 to PC3.

2). 정점 PC2의 부유사 농도(0.4 mab 기준)는 낙조시보다 창조시에 높은 농도를 보이며 최대 부유사 농도가 132 mg/L까지 관측되었다. 그러나 고·저조시에는 PC1 정점과 다르게 유사한 농도를 보이는데 이는 창·낙조시 정점 PC2를 통과하는 부유사의 입경이 유사한 것으로 추측할 수 있다. 유속이 약한 정점 PC3(0.4 mab 기준)에서 부유사 농도는 대체로 대·중·소조기에 따른 큰 변동을 보이지 않으나, 대조기 조차가 큰 창조 이후 고조시에 상대적으로 높은 농도의 침투(최대 61 mg/L)를 보인다. 또한 저면전단응력이 최대 0.11 N/m²로 대체로 약한 것을 고려하면 PC3에서 관측된 부유사 농도는 항내에서 재부유되기보다 창조시 외해측으로부터 유입되는 것으로 추정할 수 있다. 특히, 최근 이 해역에서 20.3 cm/year의 높은 퇴적율(2018년 3월 ~ 2019년 9월)을 보이는 것(Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries[2020])은 외해로부터 유입된 부유사가 항내에 침강한 이후 다시 외해측으로 빠져 나가지 못하기 때문으로 사료된다.

4.3 부유사 이동량

수층별 부유사 이동량을 산정하여 관측기간 동안의 시계열을 Fig. 9에 제시하였고, 평균 잔차류와 부유사 순이동량을 수심에 대한 정규화를 통하여 Fig. 10에 제시하였다. 부유사 이동량은 PC1과 PC2 모두 대조기 창조시에 뚜렷하게 높은 수치를 보이며, PC3에서는 대조기에도 매우 낮게 유지된다.

관측기간 동안 PC1의 전 수층에서 부유사의 순이동량은 창조방향으로 27.9 ton/m/15day이고, 2.0 mab 이하의 부유사 순이동량은

전 수층의 30%를 차지한다(Table 3). 정규화된 수심 0.8~1.0에서 잔차류는 미약하게 창조방향이나 부유사 순이동량은 낙조방향으로 나타난 것은 관측 초기 담수의 집중 방류 영향과 함께, 대조기시 표층에서 부유사 농도가 창조시보다 낙조시에 높게 나타났기 때문이다. 이는 창조시 강한 유속으로 외해측의 조립질 부유사가 고농도를 일으키지만 표층까지 부유되지 못하는 반면, 낙조시 만내측의 세립질 부유사는 표층까지 부유되어 외해측으로 이동되기 때문으로 추정된다. 부유사의 순이동량이 급격히 증가하는 수층은 정규화된 수심의 0.15 이하로서 많은 퇴적물이 창조방향(만 내측)으로 이동한다.

PC2 정점의 전 수층에서 부유사 순이동량은 창조방향으로 20.0 ton/m/15day이고, 2.0 mab 이하의 부유사 순이동량은 전 수층의 48%를 차지한다. 표층의 일부 구간에서 부유사 순이동량이 낙조방향인 것은 관측 초기 담수의 집중 방류시 낙조방향 잔차류의 영향으로 판단되며, PC1과 같이 정규화된 수심의 0.15 이하에서 창조방향의 부유사 순이동량이 급격히 증가한다.

PC3 정점의 전 수층에서 부유사 순이동량은 0.7 ton/m/15day로서 창조방향이며, 2.1 mab 이상에서 부유사 순이동량은 -0.9 ton/m/15day로서 낙조방향이다. 부유사 순이동량은 정규화된 수심 0.4를 기준으로 상층부는 낙조방향, 하층부는 창조방향인데, 정규화된 수심 0.4부터 0.8까지는 부유사 순이동량이 지속적으로 증가하다가 표층에 이르러 감소하는 양상을 보이며, 정규화된 수심 0.4 이하의 하층부에서는 해저면으로 갈수록 지속적으로 증가하는 양상을 보인다. 이러한 양상은 PC1, PC2의 순이동량과 상이한 양상으로서

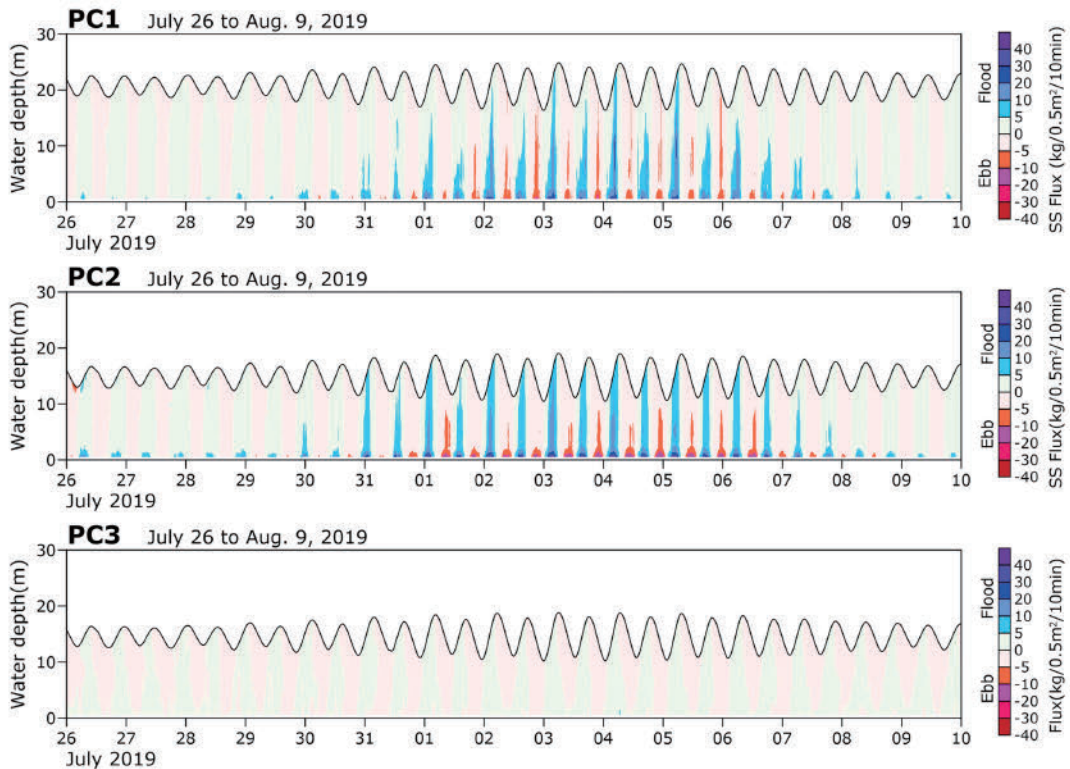


Fig. 9. Time series of suspended sediment flux profiles.

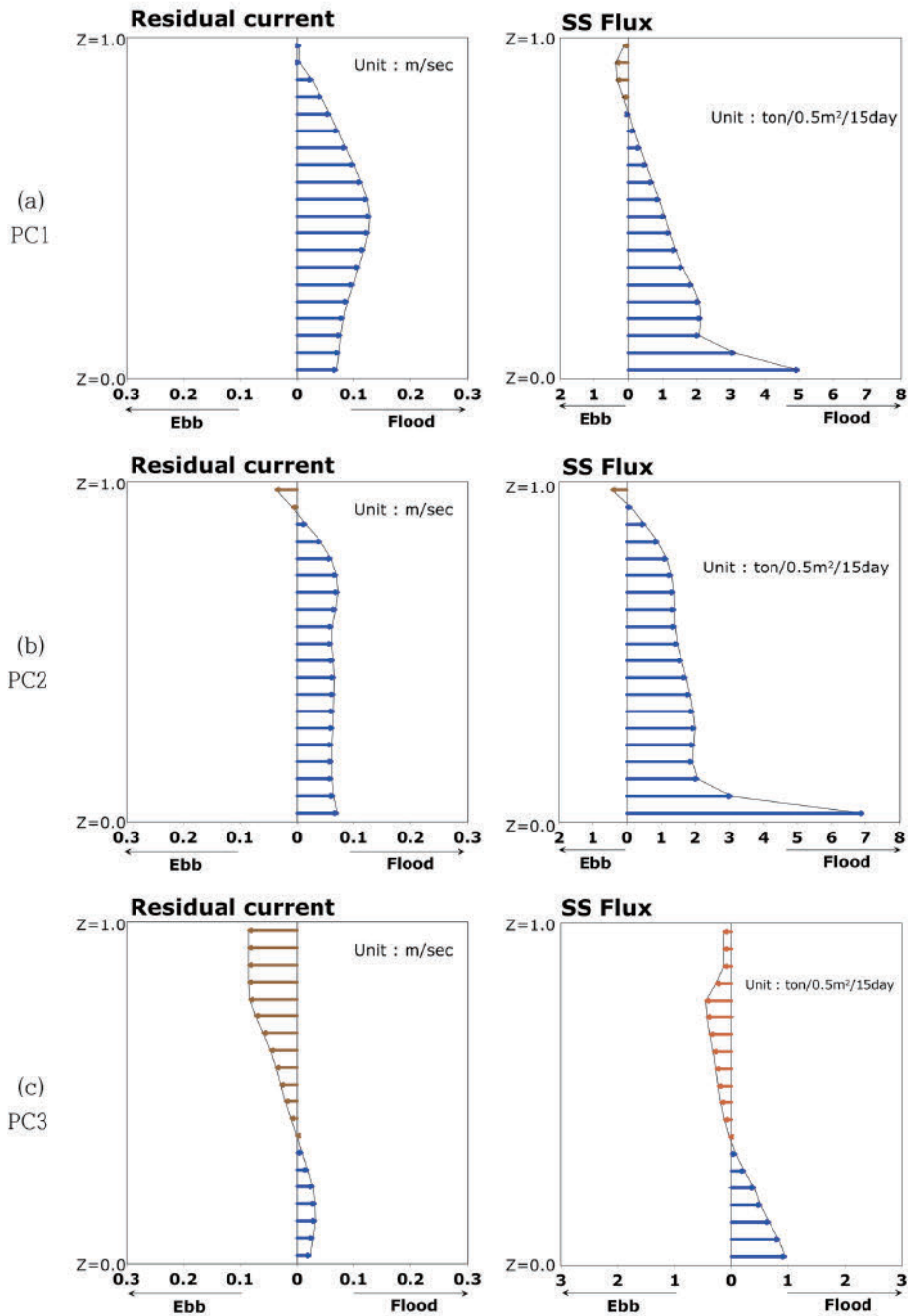


Fig. 10. Normalized mean flow and suspended sediment flux.

Table 3. Net suspended sediment flux over 15 days

(Unit: ton/m/15day)

PC1			PC2			PC3		
Above 2.1mab	Below 2.1mab	Total	Above 2.1mab	Below 2.1mab	Total	Above 2.1mab	Below 2.1mab	Total
19.6	8.3	27.9	10.4	9.6	20.0	-0.9	1.6	0.7

※ “+”flood direction, “-”ebb direction

항 내측의 이층 순환에 기인하는 것으로 판단된다.

태안과 웅진군의 골재채취 예정구역(2019년 현재)은 개방되어 있고 해저퇴적물의 평균입경이 각각 0.66~4.62φ(Korea Aggregates Association - Daejeon-Sejong-Choongnam Branch[2019])와 2.0~6.0φ

(Korea Aggregates Association - Incheon Branch[2019])로 비교적 조립하기 때문에, 이 해역의 부유사 순이동량은 Fig. 10(a, b)와 유사한 양상을 보일 것으로 사료된다. 특히 최근 골재채취선은 과거 표층으로 배출하던 월류수 일부를 선저로 배출하기 때문에 중~저

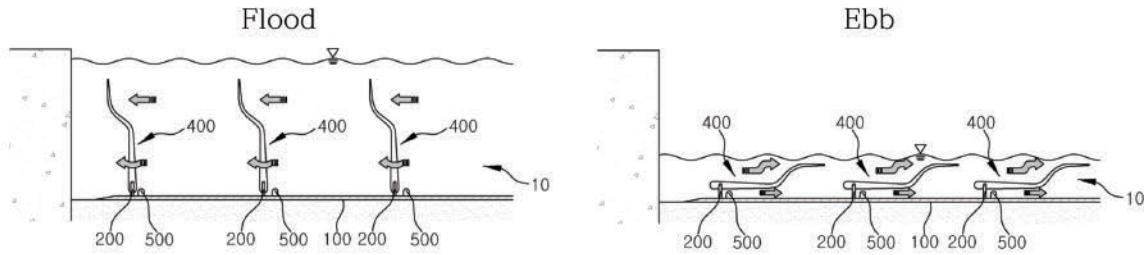


Fig. 11. Illustration of sediment transport reducing apparatus.

층에서 부유사 순이동량이 증가할 수 있을 것이다.

한편, 골재채취 또는 준설로 인한 표층의 부유사 이동을 저감하기 위해서 오타방지막과 같은 도구를 이용하지만, 본 연구 해역과 같이 많은 부유사가 이동하는 해저경계층을 포함한 저층의 부유사 이동에 대한 저감이 필요할 수 있다. Park[2021]은 창·낙조류가 존재하는 해역의 해저지면에 무동력 베이스 플레이트를 일정 간격으로 설치한 후, 해수의 흐름을 이용하여 창조시 해저면으로 유입(만 내측)되는 부유사를 차단하고, 창조시 동안 베이스 플레이트 전면에 퇴적된 부유사를 낙조시에 다시 외해측으로 이동시키는 장치를 고안하였다(Fig. 11). 이를 골재채취 또는 준설시 활용하면 인위적인 행위로 인하여 저층으로 이동하는 부유사를 충분히 저감할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 요약 및 결론

연안역에서 해저경계층을 포함한 전 수층의 부유사 이동 특성을 파악하기 위하여 2019년 여름에 아산만의 입구부(PC1), 유속이 강한 수로(PC2), 유속이 약한 항내(PC3)에서 파고, 유속, 부유사 관측기기를 15일간 계류하였다. 특히 해저경계층 부근을 조사하기 위해서 0.4 mab부터 자료가 생산될 수 있도록 하였다. 관측된 자료는 평택 조위관측소의 조위와 바람 자료, 방조제의 방류량 자료와 함께 부유사의 이동특성 분석에 이용하였다.

만 입구부에 위치한 PC1에서 유의파고 0.5 m 이하의 출현율이 99.6%로서 관측기간 동안 파랑에 의한 부유사 이동특성은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 최강유속은 PC1과 PC2 모두 창조시 표층에서 나타났으며, 0.4 mab에서 각각 0.8과 1.0 m/s로 나타났다. PC3의 최강유속은 0.5 m/s로서 창·낙조류가 유사하였다. 잔차류는 PC1과 PC2 모두 전 수층에서 창조방향인 우세하였으나, 삽교와 아산 방조제에서 집중방류가 이루어진 시기의 표층에서 강한 낙조방향의 잔차류가 발생하였다. 특히 PC2에서 낙조방향의 잔차류속은 PC1 정점보다 다소 강하였다. PC3의 잔차류는 표층에서 낙조방향, 저층에서 창조방향으로 전형적인 이층순환 구조를 보이는데 이러한 현상은 내항 2공구를 투수성 호안으로 시공한 이후, 강우 등으로 생성된 저염수가 낙조시 투수성 가호안 외측으로 배출되어 발생하는 현상으로 해석된다.

만 외측에 위치한 PC1에서 소·중조기시 저층 퇴적물의 재부유가 미약하다. 대조기시 부유사는 창조시에 고농도를, 낙조시에 저

농도를 보이고, 고조시에 저농도를, 저조시에 고농도를 보인다. 이는 창조시에 외해측의 조립 부유사가, 낙조시에는 만내측의 세립 부유사가 PC1을 통과하기 때문으로 추정된다. 또한 PC2의 부유사는 고조시와 저조시의 농도가 서로 유사한 것으로 보아 PC2를 통과하는 부유사 입경이 유사한 것으로 추정된다. 이러한 현상은 부유사 관측시 수층별로 어떤 크기의 부유사가 이동되는지 관측이 필요하다라는 것을 시사한다. 유속이 약한 해역에 위치한 PC3은 대·중·소조기에 따른 부유사 농도의 큰 변화를 보이지 않으며, 조차가 큰 창조 이후 고조시에 상대적으로 높은 농도의 침투를 보이는 것은 관측 위치에서 재부유되기보다 외해측으로부터 부유사가 유입되는 것으로 추정된다.

PC1의 전 수층에서 부유사 순이동량은 창조방향으로 27.9 ton/m/15day이며, 2.0 mab 이하 해저경계층의 부유사 순이동량은 전 수층의 30%를 차지한다. 정규화된 수심 0.15 이하에서 부유사 순이동량이 급격하게 증가하는 양상을 보인다. 표층 일부 구역에서 낙조방향의 부유사 순이동량이 발생된 것은 담수의 방류 영향과 대조기 창조시 조립한 입도의 부유사가 표층까지 부유되지 못한 반면, 낙조시 세립한 입도의 부유사는 표층까지 부유하여 이동되기 때문으로 사료된다. PC2의 전 수층에서 부유사 순이동량은 창조방향으로 20.0 ton/m/15day이며, 2.0 mab 이하의 부유사 순이동량은 전 수층의 48%를 차지한다. PC1과 같이 정규화된 수심 0.15 이하에서 부유사 순이동량이 급격히 증가하는 양상을 보인다. PC3의 전 수층에서 부유사 순이동량은 창조방향으로 0.7 ton/m/15day이며, 2.1 mab 이상에서 부유사의 순이동량은 -0.9 ton/m/15day로서 낙조방향이다. 부유사 순이동량은 정규화된 수심의 0.4를 기준으로 상층부는 낙조방향이고, 하층부는 창조방향이다.

골재채취, 준설 등 인위적으로 발생하는 부유사의 발생량을 산정하기 위해서는 인위적인 행위가 없는 시기의 부유사 이동 특성을 파악하여 상호 비교·분석하여야 한다. 본 연구를 통하여 골재채취 또는 준설시 해저면 교란으로 발생할 수 있는 해저경계층 부근의 부유사 이동 특성 파악이 가능함을 확인하였다. 또한 골재채취 진행 유·무에 따른 현장조사 및 분석을 수행하여 골재채취시 발생하는 부유사 영향범위를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서는 음향도플러 관측기기 사용시 불가피한 표층의 사이드 로브 효과 및 관측 플랫폼 설치 한계에 따른 미관측 부분을 최소화하였으나, 많은 퇴적물이 이동하는 해저면부터 0.3 mab (최근에 해저경계층을 0.3 mab부터 측정이 가능하도록 개선하였음)

이하의 수층에서도 유속과 부유사를 관측할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

후 기

연구의 기초자료를 제공해 주신 평택지방해양수산청 관계관 여러분께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발, 20210427)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Bang, K.Y., Park, S.j., Kim, S.O., Cho, C.W., Kim, T.I., Song, Y.S. and Woo, S.B., 2013, Numerical Hydrodynamic Modeling Incorporating the Flow through Permeable Sea-Wall, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Engineers*, 25(2), 63-75.
- [2] Cho, H.Y., Cho, B.J. and Kim, S.J., 2008, Estimation on the Regions of Freshwater Influence using the Seasonal Salinity Data in Asan Bay Coastal Zone, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Engineers*, 20(2), 291-231.
- [3] Deines, K.L., 1999, Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, In: Anderson, S.P., Terry, E.A., White, J.A.R., and Willian, A. J., (Editors), *Proceedings of the IEEE 6th Working Conference on Current Measurement Technology*, 249-253.
- [4] Figueroa, S.M., Lee, G.H., Chang, J.W., Schieder, N.W., Kim, K.M. and Kim, S.Y., 2020, Evaluation of along-channel sediment flux gradients in an anthropocene estuary with an estuarine dam, *Marine Geology*, 429, 106318.
- [5] Figueroa, S.M., Lee, G.H., Shin, H.J., 2020, Effects of an estuarine dam on sediment flux mechanisms in a shallow, macrotidal estuary, *Marine Coastal and Shelf Science*, 238, 106718.
- [6] Gartner, J.W., 2002, Estimation of Suspended Solids Concentrations Based on Acoustic Backscatter Intensity: Theoretical Background, *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*.
- [7] Gartner, J.W., 2004, Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211, 169-187.
- [8] Guard, P.A., Nielsen, P., 2008, Unsteady flow effects on bed shear stress and sheet flow sediment transport, *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, World Scientific, Singapore, 1521-1532.
- [9] Gunsan Regional Office of Oceans and Fisheries, 2019, Investigation of the Hydraulic Study for Geum River Estuary.
- [10] Ha, H.K. and Park, K., 2012, High-resolution comparison of sediment dynamics under different forcing conditions in the bottom boundary layer of a shallow, micro-tidal estuary, *J. Geophys. Res.*, 117, C06020.
- [11] Incheon Port Construction Office, 2012, Investigation of the Marine Hydraulic Study for Incheon Port.
- [12] Korea Aggregates Association (Daejeon·Sejong·ChoongNam Branch), 2019, Sea Area Utilization Impact Assessment for marine sand mining project around Taean-Gun Igokgijuck, 465.
- [13] Korea Aggregates Association (Incheon Branch), 2019, Sea Area Utilization Impact Assessment for marine sand mining project in Ongjin-Gun, 547.
- [14] Lee, H.J., 2010, Preliminary Results on Suspended Sediment Transport by Tidal Currents in Gomsu Bay, *Ocean Sci. J., Korea*, 45(3), 187-195.
- [15] Nortek, 2001, Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments, *Nortek Technical Note No.003*.
- [16] Oh, B.C., Chu, Y.S. and Jung, B.S., 2002, Calculation of Suspended Sediment Flux from ADP, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Engineers*, 14(3), 222-231.
- [17] Park, M.j., 2008, Tidal Characteristics Change in the Asan Bay due to the Hwaong(Namyang Bay) Tidal Barrier, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 13(4), 320-324.
- [18] Park, S.J., 2021, Sedimentation transport reduction apparatus, Registration number : 10-2217837, Korea Intellectual Property Office.
- [19] Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries, 2018, Investigation of the Hydraulic Study for Pyeongtaek-Dangjin Port.
- [20] Pyeongtaek Regional Office of Oceans and Fisheries, 2020, Investigation of the Hydraulic Study for Pyeongtaek-Dangjin Port.
- [21] RD Instruments, 2000, WinRiver User's Guide, RD Instruments. San Diego, USA.
- [22] RD Instruments, 2011, Principles of Operation A Practical Primer, 39.
- [23] Seo, J.Y., Ha, H.K., Im, J.h., Hwang, J.H., Choi, S.M., Won, N.I. and Kim, Y.S., 2018, Impact of seasonal vertical stratification on the dispersion patterns of dredging plumes off the south coast of Korea, *Marine Geology*, 395, 14-21.
- [24] Shin, H.J., Kang, K.R. and Lee, G.H., 2014, Estimation of the Freshwater Advection Speed by Improvement of ADCP Post-Processing Method Near the Surface at the Yeongsan Estuary, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 19(3), 180-190.
- [25] Simpson, M.R., 2001, Discharge measurements using a broadband acoustic Doppler current profiler, *US Geological Survey Open-File Report 01-1*.
- [26] Swart, D.H., 1974, Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, Delft Hydraulics Publ., no.131.

Received 5 October 2021

Revised 5 November 2021

Accepted 16 November 2021