

포획된 부유물질의 입도분포를 고려한 탁도계 검교정 Turbidity Meter Calibrations Based on Grain Size Distribution of Trapped Suspended Material

조홍연* · 김백운*

Hong Yeon Cho* and Baeck Oon Kim*

요 旨 : 가덕도 인근 연안해역에서 채취된 해저 퇴적물과 연직방향으로 배열된 표사포획장치로부터 획득된 부유물질을 이용하여 탁도계 검교정을 수행하였다. 포획된 부유물질은 모래 함량이 약 6%인 해저 퇴적물에 비하여 주로 실트 및 점토로 조성되었으며, 해저면으로부터의 높이가 증가함에 따라 세립화하는 경향을 보였다. 해저 퇴적물에 대한 탁도계 검교정 선형 회귀식의 기울기는 최소값으로 나타났으며, 수심별로 포획된 부유물질에 의한 선형 회귀식의 기울기는 포획 고도가 증가함(즉, 입도가 감소함)에 따라서 점진적으로 증가하였다. 이러한 결과는 해저 퇴적물에 대한 탁도계 검교정 결과로부터 부유물질 농도를 환산할 경우 과대추정의 오차가 발생되며, 본 연구해역의 경우에는 그 오차가 최대 25%까지 증가할 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 해저 퇴적물보다는 수층에서 포획된 부유물질의 입도분포를 고려하여 보정된 검교정식을 적용하는 것이 부유물질 농도의 측정오차를 최소화하는 방법으로 사료된다.

핵심용어 : 탁도계 검교정, 표사포획장치, 부유물질, 입도분포, 선형 회귀식

Abstract □ Turbidity meter calibrations were conducted using bottom sediment and suspended material collected with a vertical array of sediment traps at the coastal water off Gaduk Island. Compared to the bottom sediment comprising sand fraction of approximately 6%, trapped suspended material was composed entirely of silt and clay fractions and showed a tendency to get finer as elevation from the sea-bed increases. Slope parameter of linear regression due to bottom sediment was of minimum value and values of those due to suspended material increased gradually as the height of sediment trap increases (i.e., sediment size decreases). This result shows that turbidity meter calibration using bottom sediment can cause an overestimation error in the calculation of suspended sediment concentration and that the error can reach up to 25% in case of this study. Therefore, it is suggested that the use of a corrected calibration curve based on grain size distribution of suspended material instead of bottom sediment may reduce the measurement error of suspended sediment concentration.

Keywords : turbidity meter calibration, sediment trap, suspended material, grain size distribution, calibration curve

1. 서 론

하천, 호소, 하구 및 해역에서 부유물질의 거동 특성을 규명하기 위해서는 부유물질 농도에 대한 장기간 연속적인 관측이 필요하다. 특히, 조석의 영향이 있는 하구 및

해역에서 부유물질 농도의 변동특성을 규명하려면 일반적인 조위관측 자료와 마찬가지로 적어도 1시간 간격의 관측이 요구된다. 그런데 전통적으로 사용되어 온 부유물질 농도관측방법(채수 → 필터링 → 부유물질 질량측정 → 농도 산정)은 비효율적이기 때문에 OBS(Optical Back-

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: Baeck Oon Kim, Coastal & Harbor Engineering Lab., KORDI, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea. bokim@kordi.re.kr)

scatter Sensor)와 같은 탁도계를 이용한 연속관측이 보편화되고 있다. 이 방법은 탁도계 출력값을 실질적인 부유물질 농도 단위(g/L)에 근거하는 측정값으로 환산하는 탁도계의 검교정이 필요하며, 이 성과를 통하여 연속적인 부유물질 농도자료가 산출된다.

지난 수 십년 동안에 걸쳐 퇴적물, 사용 장비 등 다양한 특성이 탁도계 검교정과 부유물질 농도 측정에 미치는 영향을 밝히기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다 (Green & Boon, 1993; Ludwig & Hanes, 1990; Black & Rosenberg, 1994; Ridderinkhof *et al.*, 2000). 이러한 연구의 성과로서, 탁도계 검교정은 퇴적물의 입도 및 형태, 응집도, 오염도 등의 다양한 인자들의 영향이 매우 크다는 점이 부각되었다(Table 1 참조; Bunt *et al.*, 1999). 따라서 탁도계 검교정은 대상 지역의 탁도계 설치 높이에서 채집된 부유물질을 이용하여 수행되어야할 만큼 현장조건을 최대한 반영할 수 있도록 하여야 한다. 그러나 이와 같은 실험은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 보다 간편한 방법이 모색될 필요가 있다.

우리나라 서·남해안 해역에 위치한 폐쇄형 또는 반폐쇄형 연안의 대부분에서는 주로 실트 및 점토 성분으로 구성된 퇴적물이 우세하며, 특히 매립 및 준설작업과 항만건설이 활발하게 수행되고 있는 지역은 연약지반으로 구성되어 있는 경우가 일반적이다. 이들 해역에서의 부유물질 거동에 대한 관측·분석은 필수적이며, 이를 위해 탁도계를 사용한다면 실트 및 점토성분 변화에 따른 탁도계 검교정 작업이 선행되어야만 한다. 대부분의 경우, 해저 퇴적물 입도분포에 의한 하나의 보정곡선을 사용하여 OBS 값을 SS 농도(mg/L) 값으로 환산하는 방법이 적용되어 왔다. 그러나 연직방향으로 부유물질 농도 뿐만 아니라 입도 분포(실트 및 점토의 구성성분)에도 차이가 있

고, 입도 분포 차이에 의한 보정곡선은 다르기 때문에 수층 높이별로 각기 다른 검교정 성과를 사용하여 부유물질 농도를 산정하는 과정이 요구된다. 실질적으로는 수심에 따른 부유물질의 입도 분포에 대한 정보가 부족한 까닭에, 각각의 탁도계 검교정에 의한 보정곡선을 유도하여 부유물질 농도를 산정하는 과정이 수행되지 못하였다.

본 연구에서는 연직방향에서의 부유물질의 입도분포를 산정하기 위한 방법의 일환으로 표사포획장치(sediment trap)를 사용하여 자연상태에서의 부유물질을 포획하고, 입도분석을 실시하였으며, 포획지점에 대한 보정곡선을 각각 산정하였다. 수심(입도분포 변화)에 따른 보정곡선의 변화를 정량적으로 파악함으로써 OBS 보정곡선 산정을 위한 효과적인 방법이 제시되었다.

2. 시료채취

가덕도 동방과제 전방 해역(Fig. 1 참조)에서 조류 및 파랑 변동에 의한 부유물질의 거동 특성을 밝히기 위하여 2001년 10월 16일부터 11월 8일 까지 23일간 탁도계(Aanderaa Instruments사의 Turbidity Sensor 3612)가 부착된 노르웨이 Aanderaa 사의 유속계 RCM 9을 해저면으로부터 약 2.3 m 높이에 계류하여, 매 10분마다 유속, 유향, 수온, 염도 및 부유물질 농도를 측정하였다. 다이버를 이용하여 해저 퇴적물을 채취하였으며, 부유물질의 연직분포 특성을 규명하기 위한 간접적인 방법의 일환으로써 표사포획장치를 여러 수심별로 동시에 계류하여 부유물질을 포획하였다(Baker *et al.*, 1988; Lund-Hansen *et*

Table 1. Estimated ranges of OBS output due to various factors (Bunt *et al.*, 1999)

Influential factors	Range estimates	Remark
Grain size changes	over × 100	
Shape	× 2	for platy particles
Surface roughness	× 10	for platy particles
Particle flocculation	× 2	dependent upon floc size
Plankton	× 4	compared to minerogenic grains
Air bubbles	× 2	

*The factors vary in importance depending upon the environment setting.

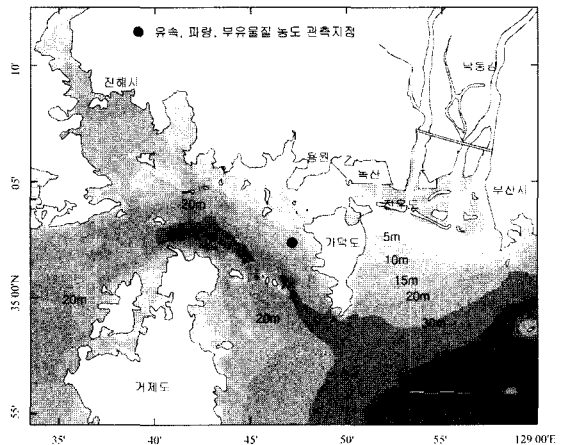


Fig. 1. Map showing locations of bottom sediment sample and sediment trap deployment.

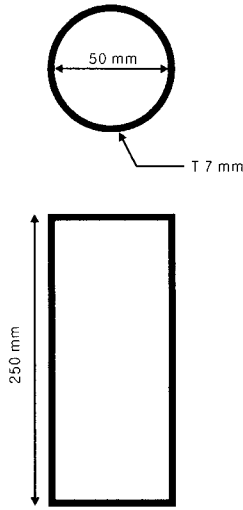


Fig. 2. Sketch of sediment trap specifications.

al., 1997). 표사포획장치는 PVC 재질의 원통형으로 제작되었으며, Fig. 2에 제시된 바와 같이 내경과 길이는 각각 50 mm와 250 mm(Aspect Ratio = 5)이다. 관측시기는 2002년 10월 16일부터 25일(1차관측), 10월 25일부터 11월 8일(2차관측)까지이며, 포획장치는 1차관측시 해저면으로부터 1 m, 4 m, 9 m 높이의 3개 수심, 2차관측시에는 1 m, 2 m, 4 m, 9 m 높이의 4개 수심에 설치하였다. 따라서, 1차 관측 결과는 9일 동안의 부유물질 침전량이며, 2차 관측 결과는 14일 동안의 부유물질 침전량에 해당한다. 참고로, 1차관측시 9 m 지점에 설치한 표사포획장치는 회수과정에서 포획된 부유물질이 유실되어 분석에서는 제외하였다.

3. 해저 퇴적물 및 부유물질 입도 분포

해저 퇴적물과 포획된 부유물질의 입도 특성을 파악하기 위하여 Micromeritics사의 Sedigraph 5100 장비를 이용한 입도분석을 수행하였다(Table 2). 2차 관측시기에 포획된 부유물질은 각각의 건조중량과 입도 분포를 해저면으로부터의 높이에 대비하여 도시하였다(Fig. 3).

입도분석 결과에 따르면, 조사 대상 해역에서의 해저 퇴적물과 포획된 부유물질은 주로 실트 및 점토 성분으로 구성되어 있으며, 포획 높이가 해저면으로부터 높아질수록 실트성분은 74%(2차 관측 1 m 지점) 정도에서 40%(2차 관측 9 m 지점) 정도로 감소하고, 점토성분은 25%(2차 관측 1 m 지점) 정도에서 60%(2차 관측 9 m 지점)

Table 2. Results of grain size analysis for bottom sediment and trapped suspended material

	Percent (%)		
	Sand	Silt	Clay
Bottom	5.8	45.5	48.7
1차 관측 (1 m)	0.7	68.1	31.2
1차 관측 (4 m)	1.1	56.7	42.2
1차 관측 (9 m)	-	-	-
2차 관측 (1 m)	1.0	74.0	25.0
2차 관측 (2 m)	0.5	70.5	29.0
2차 관측 (4 m)	0.9	56.1	43.0
2차 관측 (9 m)	0.4	39.9	59.7

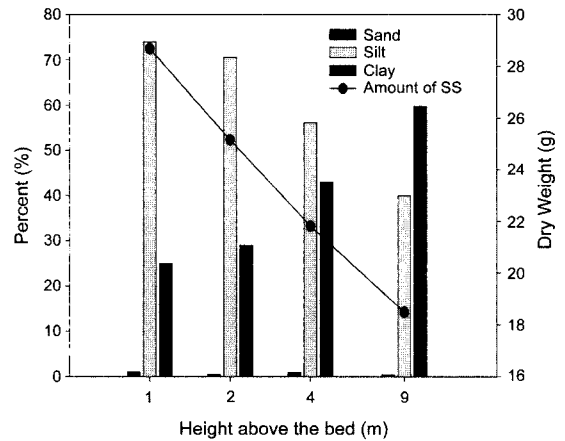


Fig. 3. Grain size distribution and dry weight of trapped suspended material.

정도까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 해저면으로부터 부유되는 미세한 점토입자가 실트입자에 비하여 침강속도가 작기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 포획된 부유물질의 입도분포에서 모래성분 비율이 거의 나타나지 않는 것은 측정기간 동안에 해저 퇴적물에 포함된 모래성분의 부유고도가 표사포획장치에 미치지 못한 것으로 판단된다.

4. 탁도계 검교정

탁도계의 측정값을 부유물질 농도의 실질적인 단위(g/L, mg/L)로 환산하기 위해서는 탁도계 검교정이 요구된다(Green & Boon, 1993). 관측지점에서 채취한 해저 퇴적물과 2차 관측시기 동안 포획된 부유물질을 사용하여 탁도계 검교정을 수행하였다. 이를 위하여 부유물질 혼합장치를 제작하였다(Fig. 4). 부유물질 혼합장치는 물과 소

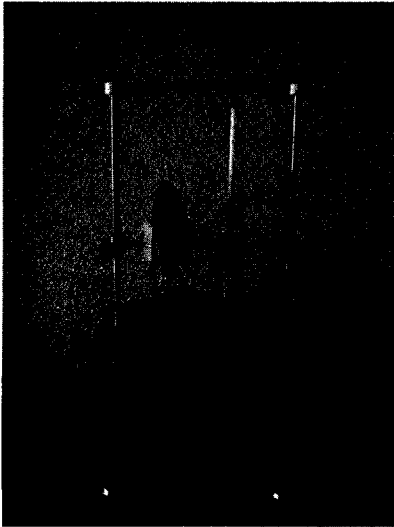


Fig. 4. Photograph of device for suspension of sediment.

량의 퇴적물 시료가 회전날개가 부착된 전기 드릴의 동력으로 약 10 L 용량의 검정색 플라스틱 버킷에서 균일하게 혼합되어 정상상태를 유지할 수 있도록 제작된 것이다. 한편, 탁도 센서가 버킷의 일정 지점(수면에서 약 10 cm 깊이)에 고정되어, 정상상태의 혼합용액 농도에 대한 탁도계 출력값이 측정되었다.

탁도계 검교정 실험은 퇴적물 시료가 없는 수돗물을 넣은 다음, 전기 드릴을 가동한 상태에서 탁도계의 출력값을 측정하는 것으로 시작된다. 이때, 혼합과정에서 발생하는 기포에 의한 영향이 반영되는데, 드릴 동력이 전 실험과정에서 동일하게 적용될 경우에는 이러한 기포의 영향은 균일하다고 가정할 수 있다. 따라서, 최초의 드릴 회전상태를 유지한 상태에서 퇴적물의 시료를 순차적으로 증가시켜 버킷에 투입하였다. 퇴적물 시료를 투입한 다음 혼합이 정상상태에 도달하면 탁도계의 출력값을 5회 이상 읽어 평균을 취하였다. 퇴적물 시료 투입량은 가덕도 현장에서 관측된 탁도계 출력값의 최대치(약 500)까지 5~6회에 걸쳐 도달할 수 있도록 대략적으로 조정된 것이다. 따라서 각각의 혼합용액에 대한 실제 농도(g/L)는 버킷에서 300 mL의 용액을 채취하여 측정하였다.

이와 같은 실험으로 획득된 6~7개의 측정자료(탁도계 출력값 vs 농도)를 이용하여 검교정 회귀식을 산정하였다. Fig. 5는 해저 퇴적물을 이용한 탁도 센서 검교정 결과를 도시한 것으로서, 선형 회귀식의 R² 값이 0.99 정도로 매우 만족할 만한 성과를 보여준다. 마찬가지로 표시표확장치로 획득된 부유물질을 이용한 탁도계 검교정 결과도 R²

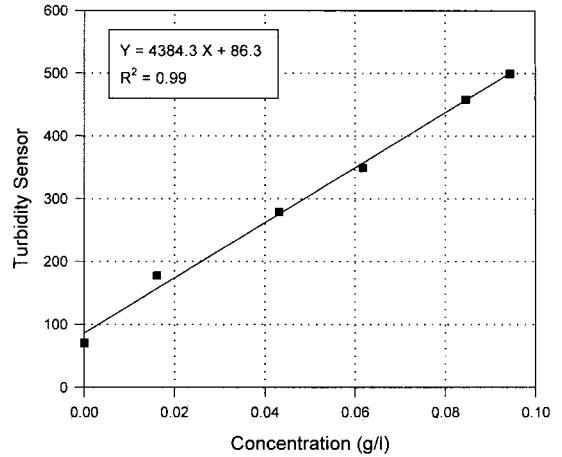


Fig. 5. Result of turbidity meter calibration using bottom sediment.

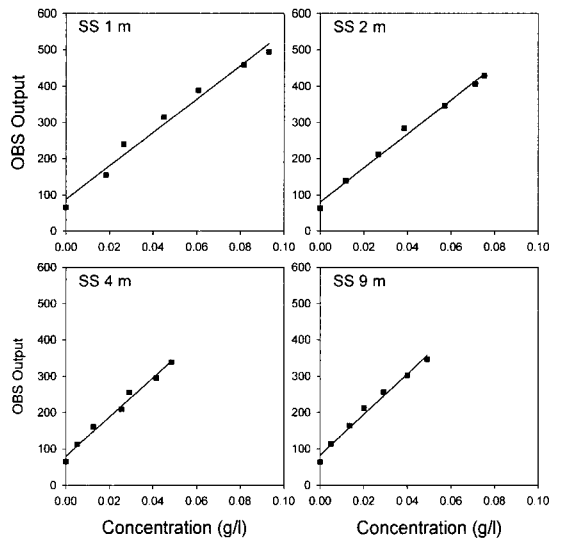


Fig. 6. Result of turbidity meter calibration using suspended material trapped at different elevations.

값이 0.98 이상으로 탁도계 출력값과 부유물질 농도가 높은 상관관계를 보여주고 있다(Fig. 6). 각각의 표시포확지점에 대한 선형회귀식의 절편 및 기울기, 상관계수를 Table 3에 제시하였다.

5. 입도분포에 따른 검교정 회귀식의 변화분석

2차 관측 자료를 이용하여 산정된 회귀식을 실트 및 점토성분의 비율과 관련하여 분석하여 보면, 절편은 전체적인 값의 변화영역과 비교하여 볼 때 무시할 만한 정도의

Table 3. Regression coefficients and R^2 values of calibration curves

포획지점 (시기)	회귀식의 기울기	회귀식의 절편	(R^2)
Bottom	4384.3	86.3	0.9944
1 m	4598.2	88.5	0.9798
2 m	4690.4	0.9915	
4 m	5387.4	79.7	0.9850
9 m	5579.0	83.1	0.9855

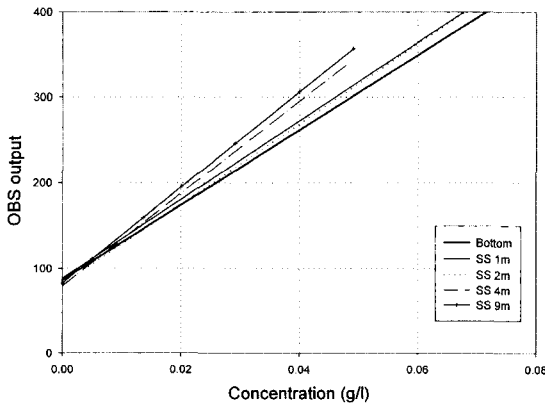


Fig. 7. Variation of regression curves with elevation due to the change in grain size of suspended material.

변화를 보이고 있는 것으로 파악된다. 반면, 회귀식의 기울기는 저층에서 멀어질수록(포획지점의 고도가 증가할수록) 기울기가 증가하는 양상을 명확하게 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 7). 즉, 포획지점의 고도가 증가할수록 실트 성분은 감소하고, 점토성분은 증가하므로 입도분포가 세립화됨에 따라 기울기가 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

따라서, 일반적으로 사용되는 해저 퇴적물을 채취하여 탁도계를 검교정하는 방법은 수월하기는 하지만 해저 퇴적물과 수층의 부유물질 사이에서 입도분포의 차이가 있기 때문에 오차를 수반하게 된다. 해저 퇴적물을 이용하여 탁도계 검교정 회귀식을 추출하여 탁도계 출력값을 부유물질 농도(mg/L)로 환산하는 경우, 부유물질 농도는 전 수층에서 과대추정(overestimation)하는 결과를 도출한다. 예를 들면, OBS 출력값이 300일때, 저층퇴적물 검교정식을 사용하여 산정한 SS 농도는 47 mg/L, 9 m 지점에서 포획된 퇴적물을 이용하여 추출된 검교정식을 사용하여 산정한 SS 농도는 38 mg/L가 된다(Fig. 7 참조). 즉, 본 연구해역에서는 해저 퇴적물에 의한 검교정 결과를 이용하

여 탁도계 출력값으로부터 부유물질 농도를 환산할 경우 최대 25% 정도의 상대오차가 발생하는 것으로 파악되었다. 따라서, 해저 퇴적물보다는 전 수층의 부유물질 입도 분포를 대표할 수 있는 검교정식을 사용하는 것이 오차를 최소화하는 방법으로 사료된다. 이러한 방법은 전 수층에서 포획된 부유물질의 입도 분석을 통하여 수행하는 것이 바람직하지만 작업량이 증가하므로, 해저 퇴적물에서 모래성분을 제거한 시료를 이용하여 수행하는 방법이 적절한 대안으로 사료된다.

6. 결론 및 제언

탁도계(OBS)의 검교정 회귀식은 입도분포에 따라 다르며, 점토성분이 증가하거나 실트성분이 감소할수록 회귀식의 기울기는 증가하는 것으로 파악되었으며 절편의 변화는 미미한 양으로 파악되었다. 또한, 전통적으로 해저 퇴적물만을 이용하여 선형회귀식을 추출하여 SS 농도환산에 이용한다면 저층과 표층의 입도차이에 따른 오차가 발생되며, 표층으로 갈수록 그 오차는 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 해역의 SS 농도를 측정하기 위하여 OBS 센서를 사용하는 경우에는 수층의 퇴적물 입도분포도 고려하여 수층별로 다른 검교정 선형회귀식을 사용하여야 보다 정확한 값을 얻을 수 있다.

그러나, 10% 정도의 정확도가 허용되는 과업 또는 목적에 부합되는 경우에는 해저 퇴적물로부터 모래성분을 제거한 퇴적물을 이용하여 추출된 선형회귀식을 이용한다면 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구가 수행된 해역의 해저 퇴적물은 실트 및 점토성분이 우세한 지역이기 때문에 입도 분포의 범위가 큰 해역에서는 보다 다양한 입도성분에 대한 검교정 실험이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 부산신항 해양수리현상 및 사후환경조사 연구개발용역 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원한 부산지방해양수산청 부산항건설사무소에 감사드리며, 현장관측 및 실내실험을 도와준 원광대학교 박사과정 조범준씨에게도 감사드립니다. 원고를 심사해 주신 전북대학교 황규남 교수와 남해전문대학 김차겸 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- Baker, E.T., Milbourn, H.B. and Tennant, D.A., 1988. Field assessment of sediment trap efficiency under varying flow conditions, *Journal of Marine Research*, **46**, pp. 573-592.
- Bale, A.J., 1998. Sediment trap performance in tidal waters: comparison of cylindrical and conical collectors, *Continental Shelf Research*, **18**, pp. 1401-1418.
- Black, K.P. and Rosenberg, M.A., 1994. Suspended sand measurement in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques, *Coastal Engineering*, **24**, pp. 137-150.
- Bunt, J.A.C., Larcombe, P. and Jago, C.F., 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter, *Continental Shelf Research*, **19**, pp. 1199-1220.
- Green, M.O. and Boon, J.D., III, 1993. The measurement of constituent concentrations in nonhomogeneous sediment suspensions using optical backscatter sensors, *Marine Geology*, **110**, pp. 73-81.
- Ludwig, K.A. and Hanes, D.M., 1990. A laboratory evaluation of optical backscatterance suspended solids sensors exposed to sand-mud mixtures, *Marine Geology*, **94**, pp. 173-179.
- Lund-Hansen, L. C., Valeur, J., Pejrup, M. and Jensen, A., 1997. Sediment fluxes, re-suspension and accumulation rates at two wind-exposed coastal sites and in a sheltered Bay, *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, **44**, pp. 521-531.
- Ridderinkhof, H., van der Ham, R. and van der Lee, W., 2000. Temporal variations in concentration and transport of suspended sediments in a channel-flat system in the Ems-Dollard estuary, *Continental Shelf Research*, **20**, pp. 1479-1493.

Received December 24, 2002

Accepted January 17, 2003