

가덕도 연안해역의 부유물질 농도 관측 Observation of SS Concentration on Coastal Waters off the Gaduk Island

조홍연¹ · 김백운¹ · 조범준¹
Hong-Yeon Cho¹, Baeck-Oon Kim¹, and Bum-Jun Cho¹

1. 서 론

연안에서의 부유물질 농도는 파랑, 조류 등 수리역학적 현상과 기상 조건 및 저질의 상태에 따라 그 변동양상이 결정된다(Moody et al., 1987; Ridderinkhof et al., 2000). 현재까지 개발된 장비로는 시·공간적으로 변동하는 부유물질 농도의 특성을 충분히 관측하고 이해하는 데는 한계가 있다. 그러나, 비교적 단순한 장비에 의존하는 연구일지라도 우리나라 주변 연안에서 부유물질 농도 변동에 대한 정량적인 연구는 매우 부족한 실정으로 기초적인 자료의 축적이 거의 전무한 상태이다.

본 연구의 관측지점은 부산항 건설사무소의 위탁으로 한국해양연구원에서 장기적인 파랑관측이 수행되고 있는 장소로서 파랑관측자료의 이용이 가능한 해역에 위치한다. 따라서 파랑, 조류, 부유물질 농도에 관한 종합적인 시계열 자료는 부유물질 농도 연직분포 모델의 입력 및 검증 자료로서 매우 중요할 뿐만 아니라 부산 신항만 개발과 관련된 공사로 인한 부유물질 발생량 평가에 있어서 자연발생적 요인에 의한 배경농도를 추정하는데 필수적인 기초자료가 될 것이다.

2. 현장관측

가덕도 동방파제 전방 해역에서 조류 및 파랑 변동에 의한 부유물질의 거동 특성을 밝히기 위하여 2001년 10월 16일부터 11월 8일까지 23일간 탁도계(turbidity meter)가 부착된 노르웨이 Aanderaa사의 유속계 RCM9을 해저면으로부터 약 2.3 m 높이에 계류

하여, 매 10분마다 유속, 유향, 수온, 염도 및 부유물질 농도(탁도)를 측정하였다(Fig. 1). 고품질의 자료를 획득하기 위하여 현장관측 이전에 측정센서의 검교정을 수행하였다. 또한 생물부착에 따른 센서 오작

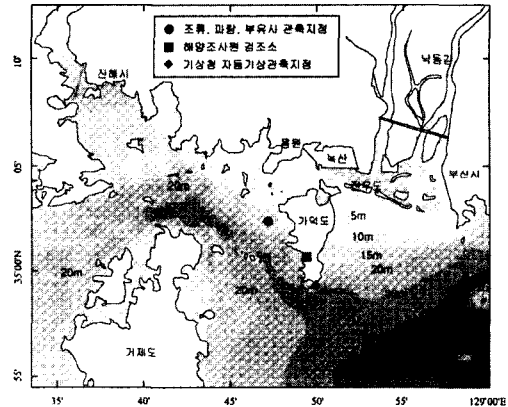


Fig. 1. 부유물질 농도관측 위치도.

동을 저감시키기 위하여 계류관측 중인 2001년 10월 25일에 다이버를 투입하여 측정장비 센서를 청소하였다. 이 결과 측정자료의 품질은 양호한 것으로 평가되었다.

한편, 부유물질 연직분포 특성을 규명하기 위한 간접적인 방법의 일환으로써 부유물질의 침전량을 측정하고자 하였다(Baker et al., 1988; Lund-Hansen et al., 1997). 이를 위하여 PVC로 직경 50 mm (내경), 길이 250 mm (aspect ratio 5)인 실린더 형태의 부유물포획장치(sediment trap)를 제작하였다(Fig. 2). 포획장치는 2002년 10월 16일부터 25일(1차, 9일간)까지 그

¹ 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

리고 10월 25일부터 11월 8일(2차, 14일간)까지 두 차례에 걸쳐 계류되었다. 1차 계류시 해저면으로부터 1m, 4m, 9m 지점에 3개의 포획장치가 설치되었고, 2차 계류시에는 2m 지점에 추가하여 총 4개의 포획장치가 설치되었다. 그런데 1차 관측시 9m 지점의 자료는 포획장치 회수과정에서 침전물질이 유실되었기 때문에 분석에서 제외되었다.

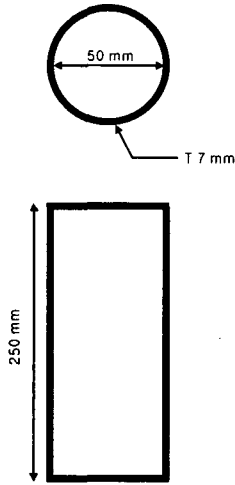


Fig. 2. 부유물질포획장치 단면도.

3. 관측결과 및 분석

3.1 탁도계 검교정

탁도계의 측정값으로부터 부유물질 농도의 실질적인 g/l 단위로 환산하기 위해서는 탁도계 검교정이 요구된다 (Green and Boon, 1993). 이를 위하여 부유물질 혼합기를 제작하였으며 (Fig. 3), 관측지점에서 채취한 퇴적물을 사용하여 탁도계 검교정을 수행하였다. 부유물질 농도 값은 Fig. 4에 도시된 부유물질 농도와 탁도계 출력값 사이의 선형 회귀식을 이용하여 탁도계의 관측값으로부터 변환된 것이다.

탁도 센서 검교정 결과는 선형 회귀식의 R^2 값이 0.99로서 매우 만족할 만한 성과이다. 이러한 검교정의 성과와는 달리 탁도계의 관측값에는 비현실적인 값(예를 들면, 탁도센서의 최대 한계값)들이 나타났으며, 그 상당수가 10월 25일 탁도센서 청소 이전의 관측기간에 발생하였다. 이와 같은 관측값의 오류는 센서의 오작동에 의한 것으로 판단되었으며, 통계적인 방법으로 단지 일부의 오류 값이 제거되었을 뿐이다.

그럼에도 불구하고 적어도 센서청소 이후 기간의 탁도 시계열 자료의 품질은 비교적 양호하였다.

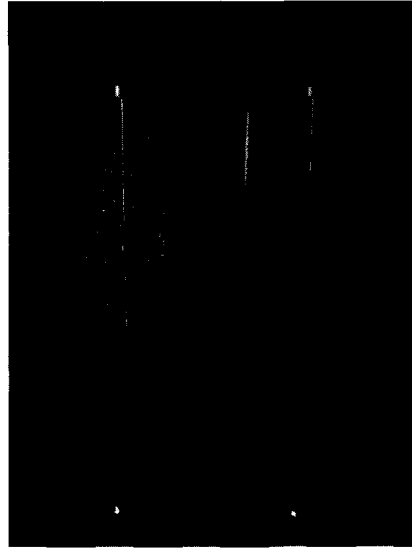


Fig. 3. 부유물질혼합기의 사진.

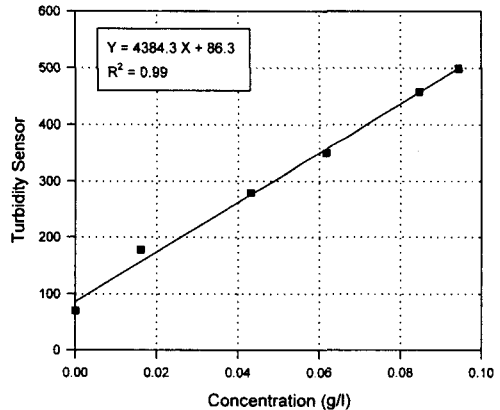


Fig. 4. 탁도계 검교정 결과.

3.2 유속 및 파랑의 시간적 변동

Fig. 5에 관측기간동안 수심과 해저면으로부터 2.3 m 높이에서 측정된 유속, 유향의 시간적인 변동을 도시하였다. 관측지점에서의 평균수심은 약 13 m 이고, 평균조차는 약 1.7 m이며, 반일주조가 뚜렷한 조석환경임을 지시한다. 현장관측이 대조시에 시작되어 연이은 소조-대조를 포함하는 기간동안 수행되었음을 보인다.

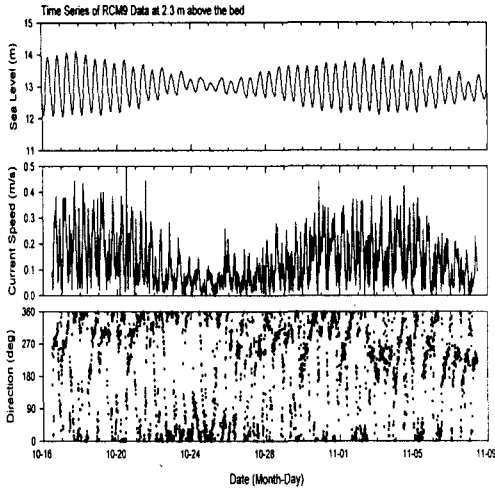


Fig. 5. 수심, 유속, 유향 시계열 자료.

수심변화에 따른 유속 및 유향의 변동 양상은 일조석 주기뿐만 아니라 대조-소조 조석주기(neap-spring tidal cycle)동안 서로 밀접함을 보이고 있다. 특히 창조시 보다 낙조시의 유속이 크게 증가하는 경향이 뚜렷하며, 이는 관측지점이 낙조우세 (ebb flow dominant) 환경을 지시하고 있다. 일조석주기동안 최대 유속은 대조시 50 cm/s 에 달하고 있으며, 소조시에는 20 cm/s 에도 미치지 못하는 것으로 볼 때, 대조-소조간 유속은 두 배 이상으로 큰 차이가 있음을 보인다.

유향은 대체로 북향 및 서향이 우세하나 그 방향성이 탁월하게 나타나지 않는 특징을 보이고 있다. 특히 Fig. 6 에 제시된 바와 같이 남북-동서 유속성분의 상관관계와 10° 간격으로 구분된 방향별 유속 빈도수를 도시한 그림에서 유향분포의 폭이 매우 넓게 나타나고 있다. 한편, 유향을 0-360° 범위 이상으로 확대한 유향 시계열 자료에서 보듯이 유향은 수 차례의 조석 주기동안 단조감소(반시계방향) 또는 단조증가(시계방향)로 변동함을 보이고 있다. 이는 국지적 지형특성에 따른 회전류 또는 와류에 기인하는 것으로 해석되며, 방파제 건설로 인한 지형요소의 변화로 인하여 방파제 건설이전에 이 해역에서 전형적인 북-남 방향의 왕복성 조류 특성과는 다른 것으로 사료된다.

매시 간격의 파고, 주기 및 파향 시계열 자료는 Fig. 7 에 도시하였다. 관측기간동안 파고 및 주기의 변동 범위는 각각 0.1-1.3 m, 3-13 sec 이며, 대부분의 파랑은 남쪽에서 전파되었다. 특히 10 월 17-18 일과 10 월 28 일 두 기간동안 관측된 파랑특성이 주목된다. 10 월 28 일에 파고는 최대 1.3 m 까지 증가하였으며, 주기는

6-8 sec 로서 폭풍에 의한 파랑으로 해석된다. 10 월 17-18 일에는 파고가 0.4-0.7 m 인 반면 주기가 10-13 sec 로 비교적 장파인 특징을 보인다.

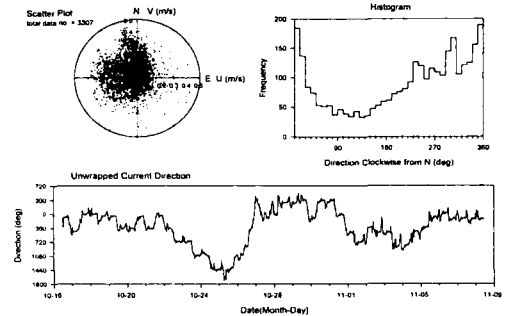


Fig. 6. 유속성분의 산포도, 방향별 유속 빈도분포, 유향 시계열 자료.

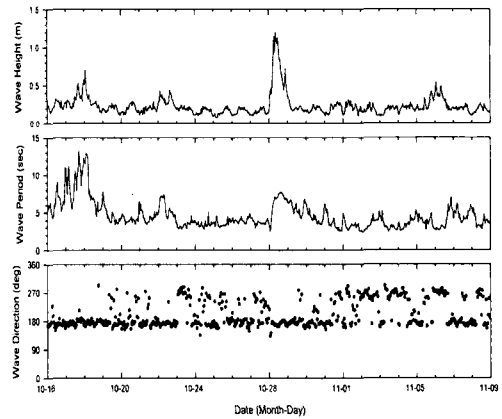


Fig. 7. 파고, 주기, 파향의 시계열 자료.

3.3 수온, 염도 및 SS 농도 변동

관측기간동안 측정된 온도, 염도, 및 탁도의 시계열 자료를 Fig. 8 에 도시하였다. 수온은 17.5-21°C 범위, 염도는 32.0-34.0 ppt 범위에서 변동하였으나, 유속 변동과 달리 수온 및 염도의 시간적인 변동 양상은 조석과 무관한 것으로 나타났다. 수온은 점차 추워지는 대기의 영향으로 인하여 시간에 따라서 전체적으로 단조롭게 감소하는 경향을 보인다.

탁도 변동 범위는 0.003-0.07 g/l 이며, 농도 변동 양상은 조석주기에 따른 농도변동과 더불어 간헐적인 대규모의 피크들로 구성된다. 대체로 10 월 16-22 일 그리고 10 월 28 일에 0.05 g/l 이상의 피크가 관측되었다. Fig. 4 의 수심 및 유속변동과 비교해 볼 때, 초기의

부유물질 농도 피크는 대조시 유속이 강한 시기에 발생한 것이며, 후기의 피크는 유속이 비교적 약한 시기에 해당된다. 따라서 부유물질 농도는 조석 변동 이외에도 간헐적으로 작용하는 외력조건에 의하여 변동하였음을 보여준다 (Fig. 8).

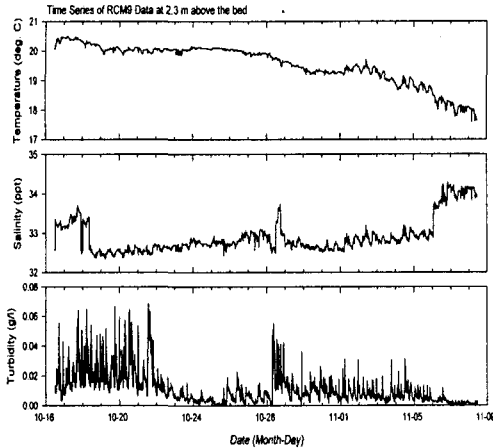


Fig. 8. 수온, 염도, 탁도의 시계열 자료.

선형파 이론에 의하여 파랑자료로부터 해저면에 작용하는 파랑궤도속도 U_b (bottom wave orbital velocity) 를 계산한 결과 (Fig. 9), 대부분의 관측기간 동안 파랑궤도속도는 5 cm/s 미만이었으며, 최대 파랑궤도속도는 약 25 cm/s 이었다. 10 m/s 를 넘는 기간은 10월 17-18일과 10월 28일로 나타났다. 두 기간 사이의 파랑궤도속도로 피크는 파고의 크기 차이가 대략 두 배가 되는 것과는 달리 거의 비슷한 강도를 보이고 있다. 그런데 이러한 피크들은 부유물질 농도의 피크와 비교적 일치하는 경향이 있으므로 부유물질 농도 변동에서 간헐적인 피크들은 파랑에 의한 영향으로 해석된다.

상기의 유속 및 파랑관측 자료로부터 해저 경계층 모델 (benthic boundary layer model)을 적용하여 전단 응력 (bottom shear stress)를 계산하였다 (Grant and Madsen, 1986). 이러한 계산을 통하여 비선형적인 파랑-항류 상호작용 (wave-current interaction)의 부유물질 농도 변동에 대한 영향을 파악할 수 있다. Fig. 9에 도시된 바와 같이 파랑-항류의 상호작용에 의한 전단 응력(u^*_{wc})의 시간적인 변동이 부유물질 농도 변동과 매우 유사하였다.

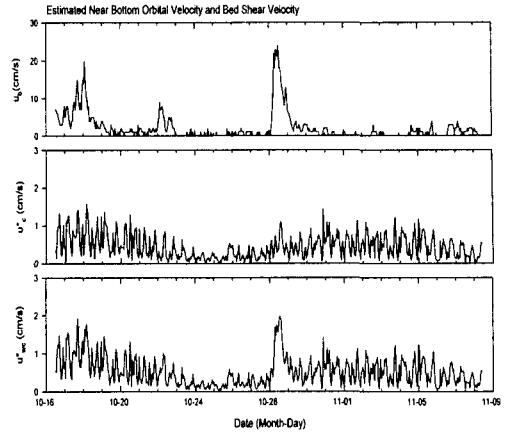


Fig. 9. 해저면 파랑궤도속도, 전단속도에 대한 계산값.

3.4 포획된 부유물 중량의 연직분포

Fig. 10에 도시한 수심별 포획된 부유물질 중량의 연직분포는 log-log 스케일의 그래프에서 저층에 가까울수록 포획 부유물질의 양이 선형으로 증가하는 특징을 나타내고 있다. 이는 정상상태(steady state)에서 Rouse 형태의 연직농도분포 모형과 유사한 것으로 판단된다.

수심별로 포획된 부유물질의 양을 일평균으로 산정하면, 1차 관측시기의 포획 부유물질 중량은 1 m, 4 m 지점에서 각각 2.54 g, 2.08 g, 2차 관측시기의 포획 부유물질 중량은 1 m, 2 m, 4 m, 9 m 지점에서 각각 2.12 g, 1.80 g, 1.56 g, 1.32 g 이다. 2차 시기에 비하여 1차 시기의 부유물질 포획량이 약 15~20% 정도 큰 값을 보이고 있다.

포획된 표사와 저질의 입도분석결과 (Fig. 10), 실트 및 점토 성분이 대부분이다. 2차 관측 시기의 경우, 포획수심이 저면으로부터 높아질수록 실트성분은 74% 정도에서 40% 정도로 감소하며, 점토성분은 25% 정도에서 60% 정도까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 저면으로부터 부유되는 미세한 점토입자는 실트입자에 비하여 침강속도가 작기 때문이다. 또한, 부유물포획장치의 입도분포 분석자료에서 모래성분의 비율이 미미한 것에 의하면, 저질에 포함된 6% 정도의 모래는 측정기간동안에 포획장치에 대부분이 도달하지 않은 것으로 판단된다.

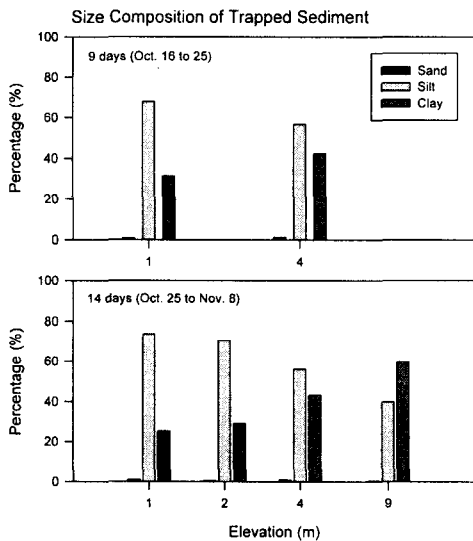
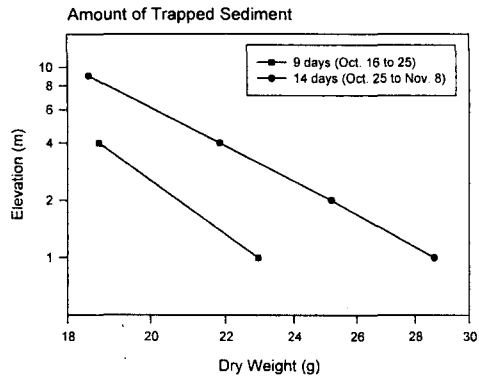


Fig. 10. 포획된 부유물질 분석 결과.

4. 결론 및 연구추진계획

가덕도 동방파제 전방 연안해역에서의 부유물질 농도의 변동은 조석에 의한 유속변동과 더불어 간헐적인 파랑의 영향과 밀접한 상관관계를 보인다. 따라서 해양수리역학 측정변수들을 이용하여 부유물질 농도를 추정하는 경우에는 조류 및 파랑의 비선형적인 상호작용이 고려되어야 한다. 한편, 탁도계에 의한 부유물질 농도의 직접적인 시계열 관측과 포획장치에 의한 간접적인 침전량 관측사이의 상관관계를 파악함으로써 보다 경제적인 포획장치의 이용이 확대될 필요가 있다. 이를 위하여 농도 분포 모형과 침전량 분포와의 상관성에 관한 분석이 요구될 뿐만 아니라, 부유물질 침전량으로부터 부유물질을 역추정하여 관측기간동안의 일평균 부

유물질 수지분석 및 관측기간동안의 파랑 및 조석 자료와의 연관성 분석이 수행될 예정이다.

사 사

본 연구는 부산지방해양수산청 부산항건설사무소 '부산신항 해양수리현상 및 사후환경조사 연구개발 용역 (3차)' 연구용역의 일환으로 수행된 것입니다.

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.
- Grant, W.D. and Madsen, O.S., 1986. The continental-shelf bottom boundary layer, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 18, pp. 265-305.
- Green, M.O. and Boon, J.D., 1993. The measurement of constituent concentrations in nonhomogeneous sediment suspensions using optical backscatter sensors, *Marine Geology*, 110, pp. 73-81.
- 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 Science*, 44, pp. 521-531.
- Moody, J.A., Butman, B. and Bothner, M.H., 1987. Near-bottom suspended matter concentration on the continental shelf during storms: estimated based on in situ observations of light transmission and a particle size dependent transmissometer calibration, *Continental Shelf Research*, 7, pp. 609-628.
- 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.