

## 부유토사 발생량 산정을 위한 현장관측 Field Measurements for the Evaluation of Suspended Sediment Generation Unit

박진순<sup>1</sup> · 진재율<sup>1</sup> · 오영민<sup>1</sup>

Jin Soon Park<sup>1</sup>, Jae-Youll Jin<sup>1</sup>, and Young Min Oh<sup>1</sup>

### 1. 서 론

항만건설, 항로유지 준설 등과 같은 항만공사에 포함되는 다양한 공종은 물리, 지질, 해양생물 등 주변 연안환경의 변화를 초래한다. 이러한 변화 가운데 부유 퇴적물의 증가는 식물의 광합성을 방해하고 주변 생태계에 영향을 끼치는 주요 원인으로서는 어업활동과 양식업에 피해를 유발할 수 있다. 이러한 피해를 최소화하기 위하여 선진 각국에서는 항만공사에 환경규제를 가하고 있는데 우리 나라도 현재 이 문제로 인해 당사자간의 첨예한 대립과 반목이 끊이지 않고 있는 실정이다.

미국의 경우, 1969년 "국가환경관리법(National Environmental Policy Act)" 이 통과된 이후 해양환경 및 해양생물자원 관련 기관은 항만공사를 특정시기에만 수행하도록 요구하고 있으나 악영향 유무에 대한 신뢰성 있는 자료가 없는 무분별한 시공시기제한 요구로 인해 항로 유지 관리 및 항만건설에 많은 어려움이 있는 실정이다. 일본도 1970년대 이후 연안환경보전이 중요시됨에 따라 항만개발 계획단계 혹은 매립신청단계에서 환경보전을 검토하기 시작하였으며 1973~1977년과 1981년의 현장관측자료와 문헌조사를 토대로 준설·매립 공사가 주변의 수질 및 생물상에 미치는 영향을 다루는 "준설·매립에 의한 탁도 등의 영향의 사전예측 매뉴얼"(Nakai, 1978; 운수성 제4항만건설국 해역정비과, 1982)을 운수성 내부 지침서로 발간하였다. 그러나 이는 국가에서 채택한 지침서는 아니며 현재까지도 관련 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

우리 나라의 경우, 미국과 같이 시공시기를 제한하

는 강제규정은 없으며 일반적으로 항만공사에 따른 어업피해를 보상으로 해결하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 보상에도 불구하고 환경부는 공사기간 중 단위공정별로 부유물질의 농도를 측정된 결과, 부유물질의 농도가 급격히 증가하거나 사전 환경영향평가서에 제시한 농도 이상으로 부유물질이 증가하는 경우에 추가 오탐방지막 설치 및 작업시간을 단축하여야 한다고 요구하고 있는 실정이며 세계적인 추세도 연안환경보호를 지향하고 있기 때문에 항만공사에 따른 오탐의 발생은 최대한으로 줄여야하는 실정이다.

연안개발사업은 사전에 환경영향평가를 수행하도록 법제화되어 있으나 어업피해보상을 위하여 별도의 평가를 수행하는 것이 현실이며, 그 피해범위 산정에는 부유퇴적물의 확산정도를 예측한 수치모형실험결과가 주도적인 역할을 담당한다. 따라서, 신뢰성 있는 피해범위 예측을 위해서는 각 공종에 따른 부유퇴적물 발생량을 정확하게 평가하여 수치모형의 입력자료로 활용하여야 한다. 그러나 우리 나라는 이에 대한 연구가 거의 전무하기 때문에 일본이나 유럽에서 사용하고 있는 공종별 발생량을 사용하고 있는 실정인데 그 나라의 연안환경은 우리와는 판이하게 다르고 지침서에서 제시하는 발생량도 일관성이 없다. 예를 들어 1982년 일본의 지침서가 발표된 이후 준설선이 대형화되었고 준설이나 매립과 같은 항만공사의 기술수준이 향상되어 발생량이 과거에 비하여 현저히 줄어들었기 때문에 일본의 지침서를 그대로 우리의 현장에 적용한다는 것은 상당히 무리가 따른다. 따라서, 본 연구에서는 우리의 실정에 맞는 공종별 오탐발생량을 현장관측을 통하여 산정하는 것을 목표로 하여 현재 신항만 개발을 위한 준설공사가 진행중인 아산

<sup>1</sup> 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

항에서 첨단장비를 동원하여 오탁발생량을 계측하였으며 그 결과의 일부를 소개하고자 한다(해양수산부, 2001).

일본과 미국 등에서의 연구는 대부분 주위 유속의 영향을 무시할 수 있으며 일정한 배경농도를 가정할 수 있는 지역에서 수행되었다. 그러나, 아산항은 우리나라에서 조차와 조류가 가장 큰 지역 중의 하나이기 때문에 이러한 해역에서는 배경농도 자체가 潮時에 따라 큰 변화를 보이므로 준설에 의한 부유토사 발생량을 정확하게 평가하기가 매우 어렵다. 또한, 배경농도 이외에도 조류가 상대적으로 강한 지역에서는 다른 준설조건은 같지만 조류가 작은 지역에 비해 발생량이 클 수 있다. 즉, cutter로 강도가 약해진 해저퇴적물은 강한 전단흐름과 난류에너지에 의해 상층으로 운반되어 plume과 함께 이루어지기 때문이다.

## 2. 준설선 주변 탁도 관측

### 2.1 관측장비 및 관측방법

건설중인 아산항의 준설지역 및 준설토 투기장을 그림 1에 제시하였다. 준설은 (주)한라의 12,000 마력급 cutter suction 준설선 한라 2 호가 수행하고 있다. 한라 2 호의自重은 1,665 톤이며, 全長, 全幅 및 吃水는 각각 78.15m, 13.0m, 3.06m이며, cutter wheel의 직경은 4.5m, 細砂基準 준설용량은 2,700m<sup>3</sup>/hr×6,500m, cutter의 swing 폭은 약 90m이다.

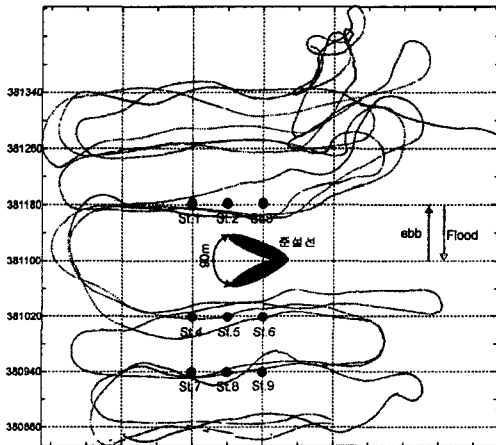


그림 1. 아산항의 준설지역 및 준설토 투기장.

관측은 3 차원 유속의 연직분포를 측정할 수 있는 미국 Sontek 社의 500kHz ADP(Acoustic Doppler Profiler)

1 대와 미국 YSI 社의 수질측정기 YSI6600 3 대, GPS, 자동채수기, 음향측심기 등을 이용하여 수행하였다. 또한 준설토사 입도분포 파악을 위하여 준설선에서 해저퇴적물을 채취하였다.

준설선을 중심으로 동서방향으로 300m, 남북방향으로 480m의 영역(그림 2)을 설정한 후, ADP와 음향측심기 및 YSI6600을 장착한 조사선박이 동서방향으로 설정한 6개 라인을 따라 유속 및 탁도 연직분포, 수심을 관측하였다. ADP와 YSI6600은 수면하 1m로 고정하였으며, ADP는 수면하 2m부터 1m 간격으로 유속 유향 반사음향강도를 측정한다. ADP와 YSI6600의 관측시간 간격은 각각 2초와 4초이다. 또한 정점 S1-S9를 소형선박을 이용하여 이동하면서 YSI6600을 이용하여 탁도의 연직분포를 관측하였으며, 준설선에서는 RCM9를 계류하여 유속과 수온, 염분을 관측함과 아울러 YSI6600을 이용한 탁도 연직분포 관측과 함께 NTU(Nephelometric Turbidity Unit) 단위의 탁도를 부유퇴적물 농도(ppm)로 환산하기 위하여 YSI6600과 같은 층에서 채수하였다.

탁도관측에 이용되는 ADP와 YSI6600은 각각 음향신호와 광후산란을 이용하여 부유퇴적물 농도를 간접적으로 측정하는 것이므로 이를 부유퇴적물 농도로 환산정이 필요하다. 이와 같이 탁도를 농도로 환산하는 과정의 신뢰성을 확보하기 위하여 먼저 채수와 실험을 통해 구한 부유퇴적물 농도와 채수와 동시에 관측한 YSI6600 탁도(NTU)와의 상관관계를 구하였으며, 정점 S1~S9에서의 YSI6600 관측치와 ADP의 음향반사강도와의 상관관계를 구하여 최종적으로 ADP 신호를 부유퇴적물 농도로 환산하였다.

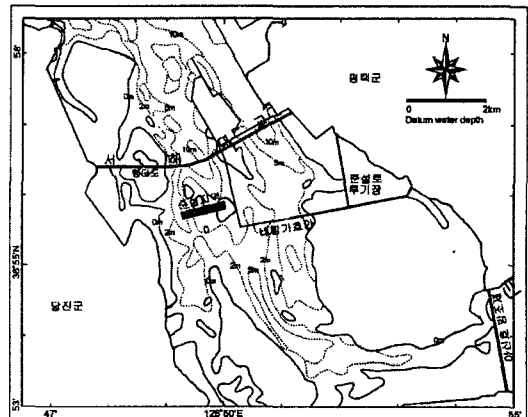


그림 2. 조사선의 궤적 및 조사정점.

## 2.2 실험절차 및 자료분석

### 가. OBS 현장검보정

YSI6600은 광후산란 센서(Optical Backscattering Sensor: OBS)를 이용하여 수중탁도를 NTU로 관측한다. 그러나 OBS는 적외선광을 수중에 투사한 후 수중 입자에 의한 반사광의 세기로 탁도를 측정한다. 따라서 같은 농도일지라도 구성입자의 표면적이 큰 경우에는 반사광의 세기가 높기 때문에 부유퇴적물의 입도 구성에 따라 탁도가 크게 다를 수 있으며, 일반적으로 부유입자가 응집체를 형성하는 미세퇴적물일 경우의 탁도가 사질일 경우보다 높다.

부유퇴적물 구성에 따른 OBS 출력의 차이는 같은 지역일지라도 해상상태에 따라 발생할 수 있다. 즉 해저 퇴적물이 泥質이나 砂質과 같이 균질하지 않고 泥砂質 혹은 砂泥質인 경우에는 평상시에 비해 惡氣象일 경우에 부유퇴적물 중의 사질입자 함유비가 높아지므로 평상시에 악기상시의 탁도를 같은 변환식을 사용하여 농도로 환산하면 오차가 발생할 수 있다. 이상과 같은 탁도계 현장검보정의 중요성에 따라 준설선에서 YSI6600을 이용한 탁도 연직분포 관측치와 같은 층에서 채수하여 얻은 부유퇴적물 농도와의 상관관계를 그림 3과 같이 구하였다.

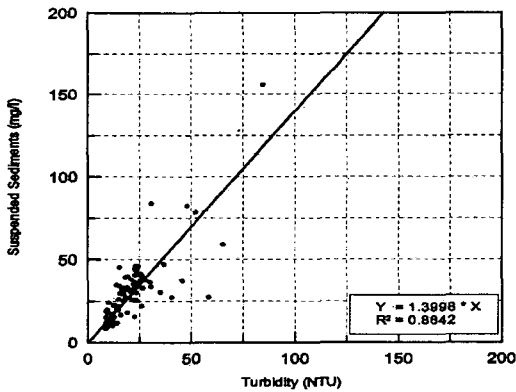


그림 3. 준설선에서의 관측을 통한 탁도와 부유퇴적물 농도의 상관관계.

### 나. ADP 음향반사강도의 탁도 검보정

ADP는 음파를 수중에 투사하여 이동중인 부유입자에 의해 반사되는 음향의 Doppler 효과를 이용하여 하나의 기기로 층별 유속 유향을 측정하는 장비이다. 따라서 ADP가 입자로부터의 수신음향세기를 기록한다면 이 세기는 부유입자농도에 따라 특정한 함수형태로 증가할 것이며, 이 함수를 적절히 구할 수 있다면, ADP 한 대로 유속 유향의 분포와 함께 부유퇴적물 농

도의 연직분포를 구할 수 있다.

ADP가 유속 유향 탁도 연직분포를 측정할 수 있는 매우 효과적인 관측기기이지만 반사음향강도를 탁도 혹은 농도로 환산하기 위해서는 OBS의 경우보다 복잡한 신뢰성 있는 검보정 과정을 거쳐야 한다. 즉, 수중 부유퇴적물이 0에 가깝더라도 동물성 플랑크톤 등에 의해 음향이 반사되며, 全層이 같은 농도일지라도 음원으로부터의 거리 증가에 따라 음향이 감쇠된다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 Tubman and Corson(2000)은 준설 전에 浚渫豫定線을 따른 관측을 통하여 수심에 따른 배경농도 하에서의 음향반사강도와 표준편차를 구한 후, 준설시 측정된 음향반사강도에서 준설전 강도를 뺀 후 표준편차로 나누어 배경음향강도 이상의 값, 즉 준설에 의한 음향강도 증분(acoustic intensity above background: ABAB)을 산출하였다.

이와 같이 준설 전에 측정된 음향강도를 배경음향강도로 간주하는 것은 준설전후의 배경농도가 같다고 가정하기 때문이다. 그러나 조류가 강한 해역의 경우에는 농도가 潮時別로 변하며, 같은 潮時일지라도 潮齡에 따라 변하므로 단순히 준설전의 측정치가 준설시의 배경농도를 대변한다고 볼 수 없다. 본 조사에서는 먼저 모든 관측치에 대하여 음원으로부터의 거리 증가에 따라 감쇠된 각 층에서의 음향강도를 Sontek에서 제공하는 식 (1)을 이용하여 보정한다.

$$DECAY = -20 \log_{10} R_{beam} - 2 \alpha R_{beam} \quad (1)$$

여기서 DECAY는 음향강도감쇠치(dB),  $R_{beam}$ 은 음원으로부터 해당 층까지의 거리이고,  $\alpha$ 는 일방향 음향강도 감쇠율로서 본 조사에서 이용 500kHz ADP의 경우 0.14db/m이다. 다음으로 내삽법을 통하여 YSI6600을 이용하여 탁도 연직분포를 관측하는 시각과 같은 시점의 반사음향강도 연직분포를 그림 1의 9개 정점에서 구하여 YSI6600 탁도와 상관관계를 그림 4와 같이 도출하였다. 이 때 탁도가 1NTU일 때 0인 반사음향강도를 제약조건으로 주었다. 그러나 층별 반사음향강도를 부유퇴적물 농도로 환산하기 위해서는 보다 정밀한 조사가 필요하다. 즉, 수심 1m에서 투사된 음향신호는 음원으로부터의 거리 증가에 따라 감쇠됨과 아울러 수중 부유물질에 의해 산란되므로 보다 정밀한 현장검증을 위해서는 층별 검증을 실시하여야 하며, 이 때 음원으로부터 해당 층까지의 부유입자 총량을 함께 반영하여야 한다.

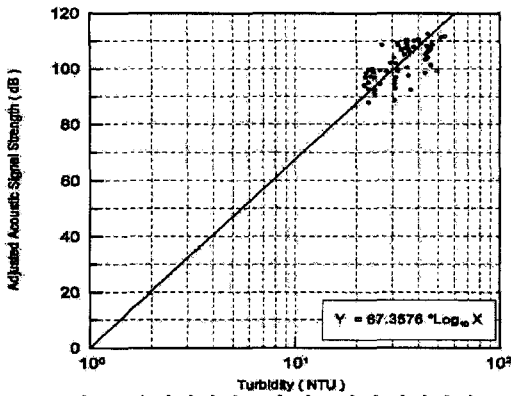


그림 4. 음향반사강도와 탁도와의 상관관계

### 3. 관측결과

소조기인 2000년 12월 18 20일 유속계 RCM9과 수질 측정기 YSI6600을 준설선에 계류(수면 하 3m)하여 얻은 SS의 농도를 그림 5에 제시하였다. 관측시 준설선의 船首는 낙조류 방향을 향하고 있었으며, 관측기기는 船尾에 계류하였다. 따라서 낙조시 관측농도는 준설의 영향을 받지않은 배경농도이며, cutterhead가 船首에 위치하므로 창조시 관측농도는 준설의 영향을 받은 농도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 준설의 영향을 받지 않은 낙조시의 농도는 약 20mg/l 정도이며, 창조로의 轉流 직후 준설의 영향으로 농도가 약 80mg/l 정도로 급격히 증가한다.

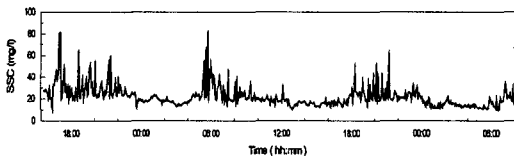


그림 5. 소조기의 SS 시계열

대조기인 2001년 1월 9일과 10일에 준설선에서, 1월 10일에는 ADP와 YSI6600을 이용하여 그림 1의 측선을 따른 이동관측을 실시하였다. 1월 10일 준설선의 총 준설량은 8,150m<sup>3</sup>이었으며, 2회의 작업중지가 있었다. 이동관측이 수행된 4시간 50분 동안의 연속작업시의 준설량은 3,800m<sup>3</sup>이었다. 정점관측에 의한 SS의 농도를 그림 6에 도시하였다. 관측시 船首는 서측을 향하고 있었으며, 관측기기는 船首 左舷側에 고정된 barge 船에 계류하여, 창조시 준설의 영향을 수 있도록 하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이 경우도 낙조시 농도는 약 30-50mg/l 정도이나 저조 전류시 낮은 수심과 준설의 영향으로 약 250 mg/l까지 증가한다. 그림

5와 6에서 주목할 사항은 배경농도와 peak 농도의 차이이다. 즉, 배경농도는 약 20-50 mg/l 정도로 유사하지만 창조시 준설의 영향을 받은 peak 농도는 대조기가 약 250 mg/l로 소조기에 비해 약 3배가 높다. 이는 해저퇴적물의 입도분포가 원인일 수도 있으나, 같은 공사강도로 준설하더라도 부유토사 발생량이 대조기에 큼을 알 수 있다.

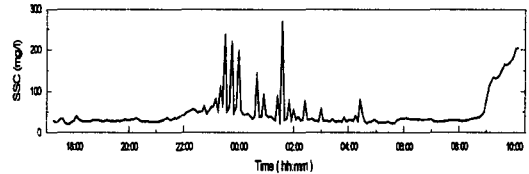


그림 6. 대조기 SS 시계열

TM 380860, 15:30

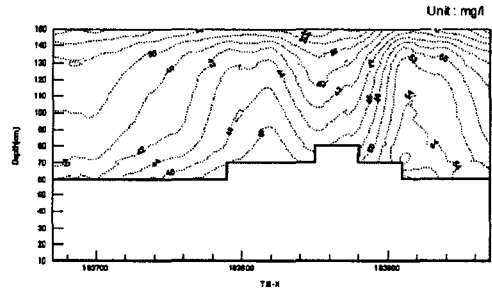


그림 7. 부유퇴적물 농도 단면분포 예

그림 7에 그림 3과 4의 식을 이용하여 그림 1의 동서 단면을 따른 1월 10일 15시 30분의 농도분포를, 그림 8에는 같은 시간의 수심별 유속 및 농도 공간분포를

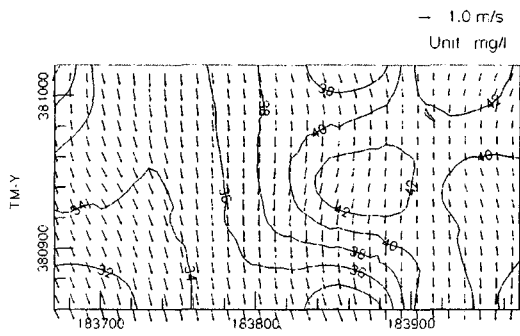


그림 8. 유속 및 SS 평면공간분포 예

제시하였다. 이와 같은 자료는 정밀한 분석을 거쳐 발생원단위 산정에 이용되며 아울러 수치모형의 입력 및 검증자료로 활용될 예정이다.

항만공사에서 발생하는 부유토사의 양을 정확히 산정하기 위한 현장관측 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 탁도계를 이용하여 부유토사(SS)의 양을 측정할 때에는 같은 탁도라 할지라도 토사의 구성성분과 해상상태에 따라 SS가 매우 다르므로 현지의 조건에 맞게 측정기기를 보정한 후에 사용하여야 한다.
- 준설공사를 실시하지 않은 상태에서의 배경농도는 대조기와 소조기의 차이가 거의 없으나 공사중에는 부유토사의 농도는 대조기가 소조기에 비하여 약 3 배 정도 증가하였다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부의 지원을 받아 수행 중인 “부유토사 발생량 평가 및 오탁방지막 효율에 관한 연구용역” 일부이며 현장관측에 도움을 준 김성은 씨 등에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 해양수산부, 2001. 부유토사 발생량 평가 및 오탁방지막 효율에 관한 연구용역.
- Nakai, O., 1978. Turbidity generated by dredging projects, management of bottom sediments containing toxic substances. Proc. of the 3rd US-Japan experts meeting, EP A-600/3-78-084, pp1-47.
- Tubman, M.W. and Corson, W.D., 2000. Acoustic monitoring of dredging related suspended sediment plumes. E RDC TN-DOER-E7. US Army Engineer WES, Vicksburg, MS
- 日本運輸省第4港灣建設局海域整備課, 1982. しゅんせつ埋立による濁り等の影響の事前豫測マニュアル.