환경영향평가 제9권 제2호 : 127~142

방파제 모래치환공사시 부유토사의 거동 특성

맹준호* · 이지왕** · 김병준** · 고정용** · 양권열***
한국환경정책 · 평가연구원*, 한국수권환경연구센터**, 삼성물산주식회사***

Characteristics of Suspended Solids Movement in the Sand Recalmation of Breakwater

Maeng, Jun-Ho* · Lee, Ji-Wang** · Kim, Byung-Jun** · Ko, Jung-Yong** · Yang, Gwon-Yeol***
Korea Environment Institute*, Korea Environmental Research Center for Hydrosphere Co., Ltd.**
Samsung Corporation.***

Abstract

This research was performed for analyzing the transport of suspended solids during the harbor construction. In behalf of the research, we have analyzes the characteristics of suspended solids movement in sand reclamation of breakwater according to age of tide and tidal period at the construction spot of Pusan new harbor.

In the process of sand reclamation, soil was dumped by a dumping device which direct soil from the barge to the bottom of the sea. According to the results from this research, suspended solid concentration was very high in the range of 5m from the dumping point right after the dumping. However these suspended solids settled very quickly and the solids concentration was very beyond 10m from the dumping point.

It is deduced that the movement of solids dumped from barge has the tendencies as following;

1) Most of the dumped solids precipitated quickly after the dumping
2) The rest of the suspended solids are diffused slowly toward the bottom of the water being figured smoothing curve
3) The diffusion movement of suspended solids tend to proceed toward the shore line in a parallel motion with tidal current at the sea-bottom

That is to say, most of the suspended solids precipitated very quickly even though highly concentrated solids produced at the bottom of the solids which did not precipitated spread with the tidal current horizontally along the bottom of the sea.

Keyword: suspended solids, harbor construction

I. 서 론

국내 경제가 급속히 발전함에 따라 연안역에 대한 이용도가 점차 증가하게 되며, 이로 인해 해면의 매립, 항로 및 박지의 준설, 방파제 및 안벽 축조와 같은 항만공사가 더불어 증가되고 있다. 그러나 이러한 연안역의 개발로 인해 해양오염이 날로 심화되고 있으며 이에 대한 관심 또한 크게 증가하고 있다.

항만공사를 시행함으로 인해 해양환경에 미치는 주요 오염물질은 매립 또는 준설 공사중에 발생하는 부유토사이다. 이러한 부유토사가 주변해역으로 확산되어 해양생태계에 피해를 발생시킨다. 이와 같은 영향은 사업지구 해역특성과 부유토사의 발생정도에 따라 국부적으로 차이를 나타내며, 발생정도 또한 공사의 종류, 방법, 규모, 주변의 지형 및 해수유동의 변화폭 등에 따라 상이하게 나타난다. 또한 부유토사가 생물의 생태에 미치는 영향은 부유토사의 정도 및 체류시간, 해양생물 및 해역환경의 특성에 따라 상이하여 현재 이에 대한 완전한 해명이 되어 있지 않다.

따라서 국내에서는 이러한 해양환경에 미치는 영향을 미리 파악하고 저감방안을 수립하기 위한 목적으로 공사시행전 환경영향평가를 실시한다. 환경영향평가는 공사로 인해 발생되는 부유토사가 어느 정도 확산되는가를 예측하기 위하여 수치모형실험을 실시하고 예측결과를 토대로 저감방안을 수립토록 한다. 그러나 환경영향평가의 결과는 현장조사를 통한 실측치와 다르게 나타나는 경우가 확인되고 있어 현지주민들은 환경영향평가를 신뢰하지 않게 되고 환경영향평가 협의시도 이와 같은 문제점으로 인해 영향예측시 최악의 조건으로 예측하게 하여 이를 근거로 저감대책을 마련토록 요구하는 경우가 있다. 따라서 항만공사시의 부유토사의 거동에 대한 조사를 수행할 필요성이 있으나, 많은 시간과 비용이 요구되므로 국내에서는 현재까지 이에 대한 체계적인 연구가 미진한 상태이다.

본 연구는 이러한 부유토사 거동을 파악하기 위한 기초적 연구로 현장조사를 통해 공사시 발생되는 부유토사의 거동을 분석하기 위하여 부산신항만 방파제 공사중 모래치환 공사시의 부유토사의 거동에 대해 조사하였다.

II. 실험방법

1. 대상해역 현황

1) 조석 및 조류특성

연구대상 해역으로 부산신항만 서방파제 건설현장 주변을 선정하였다(그림 1). 해역의 특성은 해양수산부의 국립해양조사원(구 건교부 수로국)에서 조사한 가덕도 천성만내의 T.B.M 381.9cm (D.L)의 장기간 관측자료(78. 1.1~12.31)를 바탕으로 살펴보면 본 해역의 조석특성은 1일 2회조의 전형적인 반일주조형 해역으로, 가덕도에서 진해만 전체에 걸쳐 진폭과 위상이 크게 변화하지 않고 있으며, 가덕도에서의 대조차는 166.0cm이고, 평균조차는 113.4cm, 소조차는 60.8cm이며, 연구해역에서의 대조평균만조위는 178.3cm로 부산항보다 56cm정도 높으나, 우리나라 서해안 및 남해서부에 비해 조차가 작은편에 해당된다.

연구대상 해역의 조류특성을 가덕도 주변해역으로 살펴보면 창·낙조시의 최강유속은 0.1~1.1m/sec 정도이고, 평균대조시의 평균유속은 0.2~0.74m/sec 정도로 파악되었다.

2) 수질특성

가덕도 주변의 염분의 공간적인 특성은 가덕도 동·서쪽 해역이 뚜렷한 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 가덕도 동쪽은 직접적인 담수유입의 영향으로 8.69~32.95‰ 정도의 범위를 나타내며 연안에서 외해쪽으로 갈수록 증가되는 양상

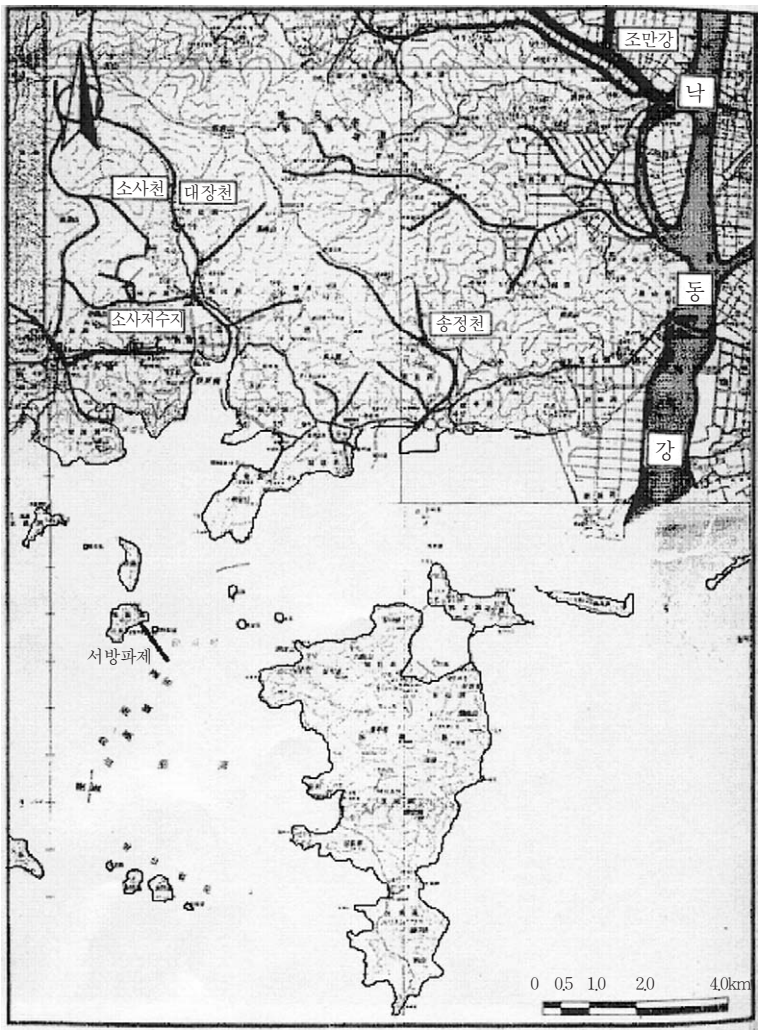


그림 1. 연구대상해역 및 현지관측위치도

을 보이는 반면, 가덕도 서쪽은 큰 변화가 없이 약 31~33‰ 정도의 비교적 균일한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 연안에서 외해쪽으로 갈수록 염분이 증가되는 것은 고온, 고염의 외해수의 영향이라 볼 수 있다.

연구대상 해역의 부유물질의 농도분포는 0.47~34.74mg/l범위이며, 평균 2.96~9.38mg/l로 전체적으로 볼 때 I~III등급으로 다양하게 나타났다. 전반적으로 낙동강 담수가 유입되는 가덕도 동쪽 해역의 부유물질 농도가 높은 편이다.

2. 조사방법

본 연구를 수행하기 위해서 서방파제 지반개량을 위한 모래치환 공사가 진행중인 현지에서 실측관측을 대조기(99. 9.1, 월령: 20.7)와 소조기(99. 10.26 월령: 16.6)로 나누어서, CTD를 사용하여 조령과 조시별에 따른 현장관측을 실시하였다. 이러한 현장관측은 모래치환공사에 사용되어지는 치환모래를 대상을 수행하였으며, 치환모래의 성분은 표 1과 같다.

표 1. 방파제 치환모래 재료에 대한 시방기준

구 분	시방기준
NO. 200번체 통과량	15% 이하
50% 통과입경(D_{50})	0.84mm 이상
균등계수(C_u)	1.82 이상
소성지수	10 이하
상대밀도(D_r)	40% 이하

모래치환공사에 따른 오염물의 확산특성을 파악하기 위하여, 그림 2와 같이 모래투입 지점을 중심으로 직선거리로 5, 10, 50, 100, 200, 500m 별로 구분하여 측정하였고, 연직분포는 공사지역의 평균수심을 고려하여 각각의 측점에서 수심 1m씩 구분하여 연직확산 분포를 조사하였다. 이러한 특성라인은 공사의 규모와 조령 및 조시에 따른 제약 등을 고려하여 A, B, C 3개의 라인을 기본으로 고려하였으며, 대조기 낙조시는 주흐름 방향의 확산분포 특성을 보다 정확히 파악하고자

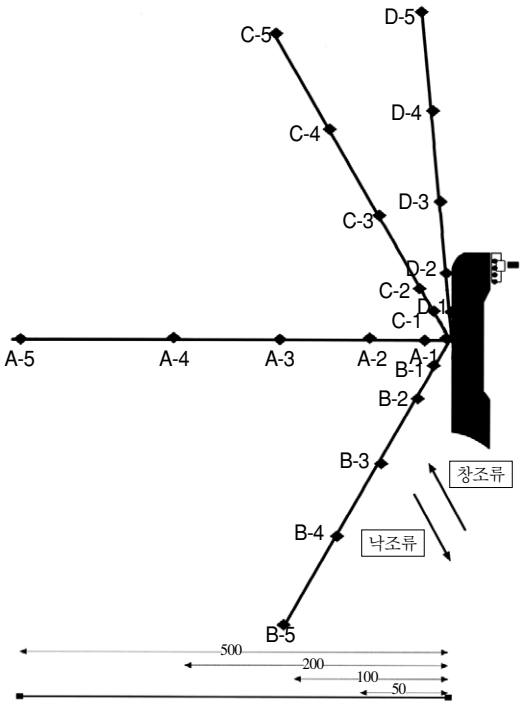


그림 2. 부유토사 관측정점

하나의 라인(D라인)을 포함시켜 그 확산특성을 과학적으로 조사하였다.

부유물질(SS: Suspended Solids)은 해양환경공정시험방법에 따라 잘 혼합된 일정량의 해수시료를 미리 무게를 알고있는 유리섬유 여과지(GF/C)에 여과한 후 103~105℃에서 건조시키고, 황산 데시케이터에 넣어 방냉한 다음 항량될 때까지 건조시킨 후 유리섬유 여과지의 무게를 달아 시료 전·후의 여지 무게의 차를 산출하여 부유물질의 농도를 구하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 조령에 따른 오염물질의 확산특성

본 연구에서는 연구대상 해역인 부산신항만 서방파제 공사지점에서 현장관측 당시의 매립사업 지점에서부터 발생하는 부유토사가 어떻게 이동 확산되는가를 조사하였다. 조사방법은 그림 2와 같은 라인을 따라 서방파제 공사에 따른 부유토사의 거동 특성을 조령 및 조시에 따라 파악하였다.

1) 대조기시의 확산분포

부산신항만 서방파제 공사에 따른 지반치환 공사시 부유토사에 의한 확산범위가 가장 넓을 것으로 사료되는 대조기시 현장관측 자료를 분석하여 수평 및 연직방향으로의 확산분포 특징을 조사하였다. 대조기 창조류시는 A, B, C 라인 별로 수심에 따른 탁도 분포특성을 파악하였고 낙조류시에는 D라인을 추가시켜 조류의 흐름과 부유토사의 확산경향을 보다 정확히 파악하였다.

그림 3은 대조기 낙조류시의 관측자료를 분석한 결과를 도시한 것으로 공사지점에서 거리에 상관없이 대체로 수심 5m 아래지점에서 가장 높은 탁도를 나타냈다. 특히 공사지점에서 가까운 지점일수록 4m이상 수심이 깊어지면 탁도의 값

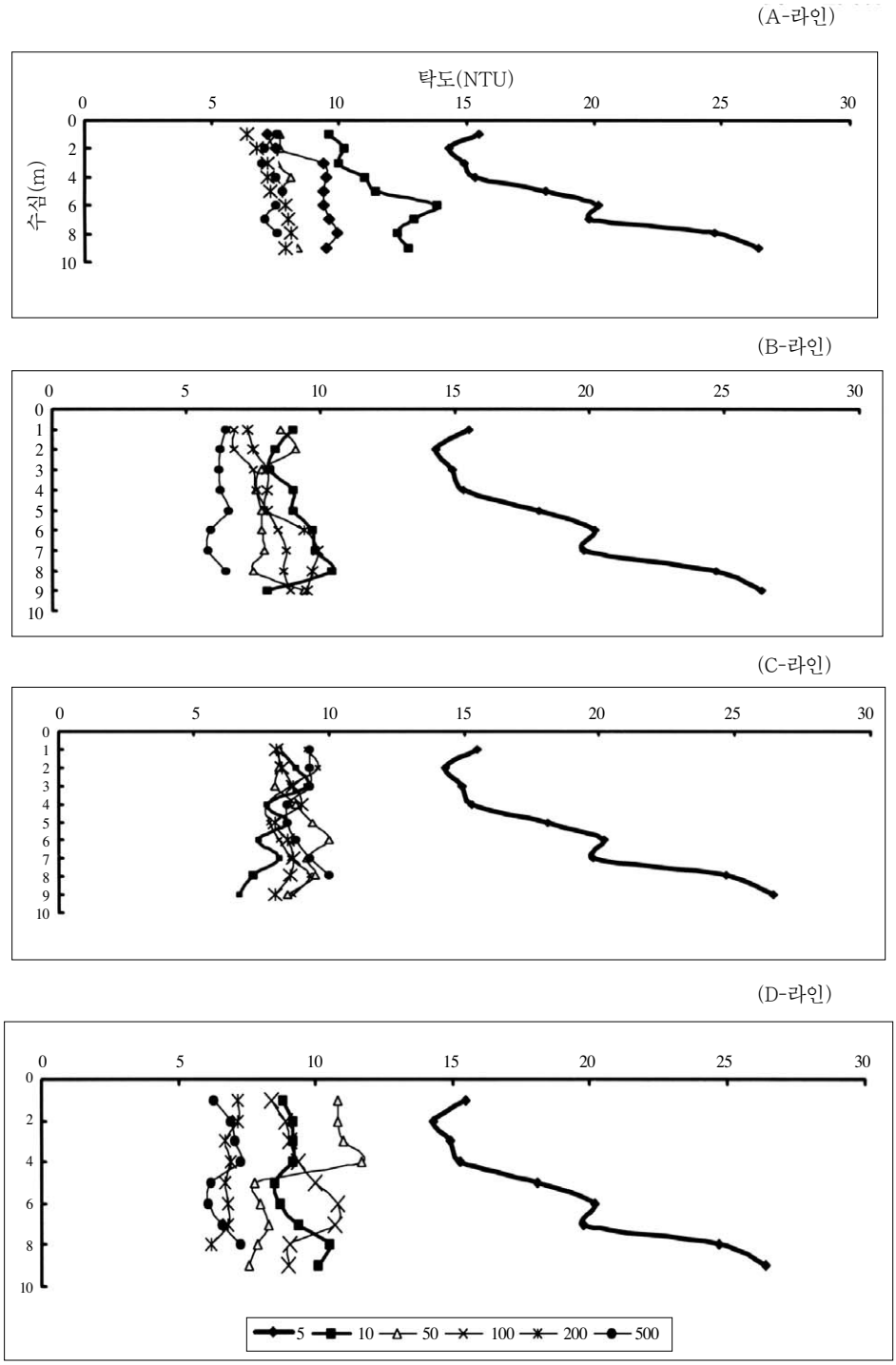
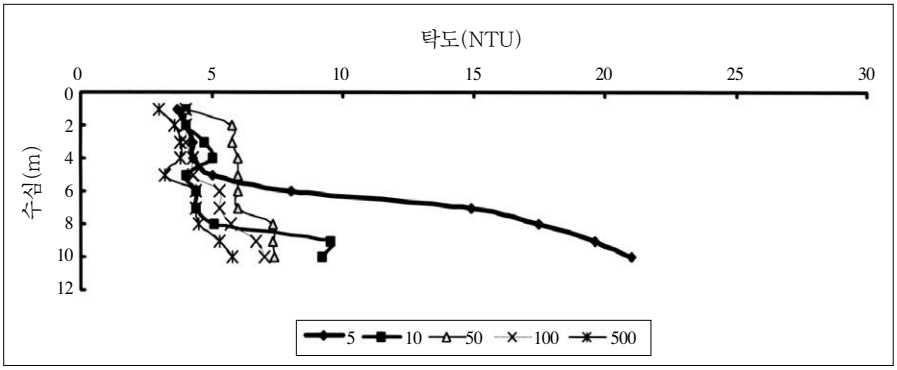
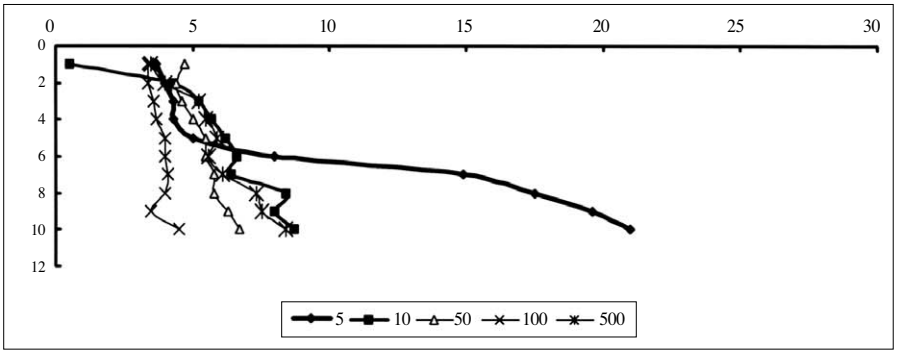


그림 3. 대조기 낙조시 수심별, 거리별 탁도 분포

(A-라인)



(B-라인)



(C-라인)

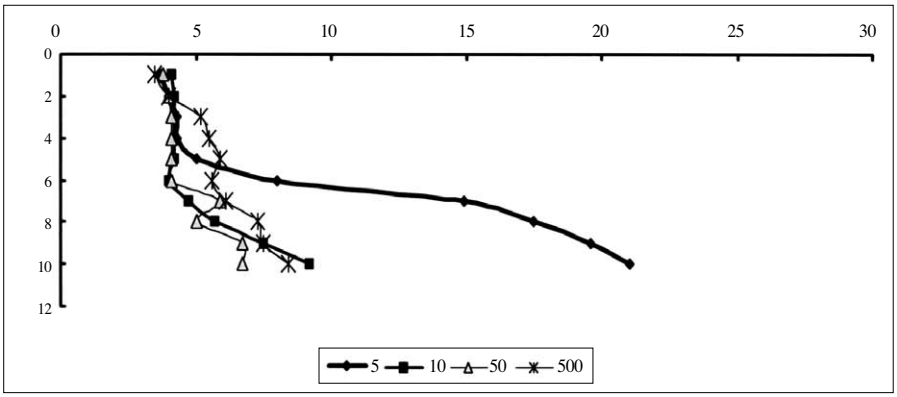


그림 4. 대조기 창조시 수심별, 거리별 탁도 분포

이 높은 수치를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이것은 공사에 사용된 제원이 모래라는 것과 수면에서 철제관을 통해 모래를 투입하여 저면 2~3m 부근에서 모래를 투입하는 공사방법에 따른 영향인 것으로 사료된다.

이러한 관측결과중에서 가장 두드러진 특징은

거리가 5m인 지점의 경우 각각의 라인에 상관없이 수심 3m 보다 깊어지면 수심이 깊어짐에 따라 매우 급속히 탁도값이 커지고 있음을 알 수 있다.

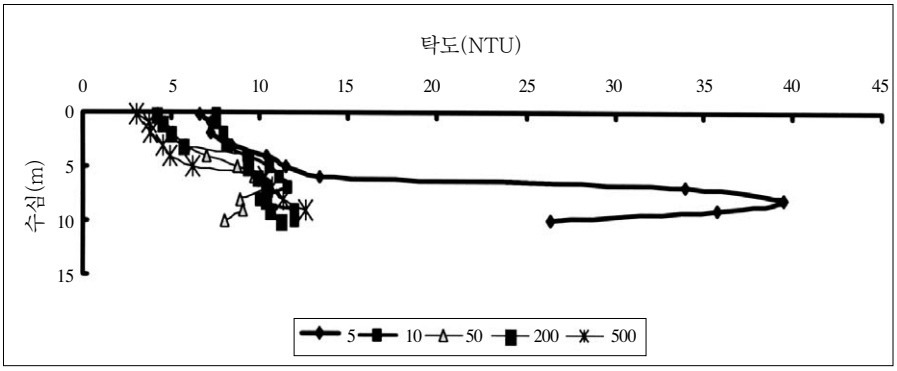
그림 4는 대조기 창조시에 수심별 관측결과를 나타낸 것으로 공사지점에서 50m 정도 떨어진 지점에서 표층에서 중층보다 상대적으로 탁도 수치가 높은값을 나타내었다. 그러나 저층에 가까운 지점에서는 낙조류와 같이 다른층 보다 높은 값을 나타내었다.

따라서 대조기시에 나타나는 결과를 분석해 볼 때 모래치환후 발생원 부근(5m이내) 저층을 중심으로 고농도의 부유토사가 발생하였으나, 대부분의 모래가 곧 침강하였으며, 침강하지 않은 일부의 부유토사가 조류에 의해 저층으로 확산되어 50m 부근에서 부상함을 알 수 있었다.

한편 거리별 탁도분포의 경우 대조기시에는 창·낙조시 전체적으로 공사지점에서 거리가 가까울수록 탁도 값이 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 수심이 깊어질수록 탁도값이 높은 수치를 나타냈으며, 수심이 깊은 지역은 거리가 멀어질수록 탁도값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

특이한 것은 창조시 B라인의 경우 10m 지점에서 표층의 탁도값이 다른 지점에서 보다 급격히 감소하였다가 증가하는 추세를 보이고 있는데 이

(A-라인)



(B-라인)

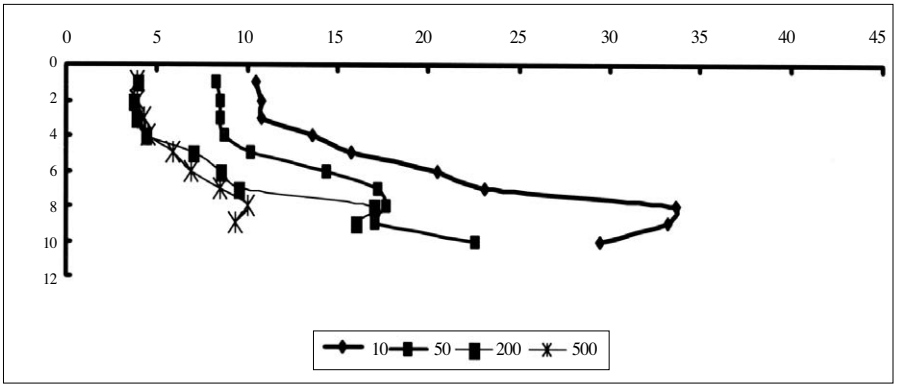


그림 5. 소조기 낙조시의 수심별, 거리별 탁도 분포

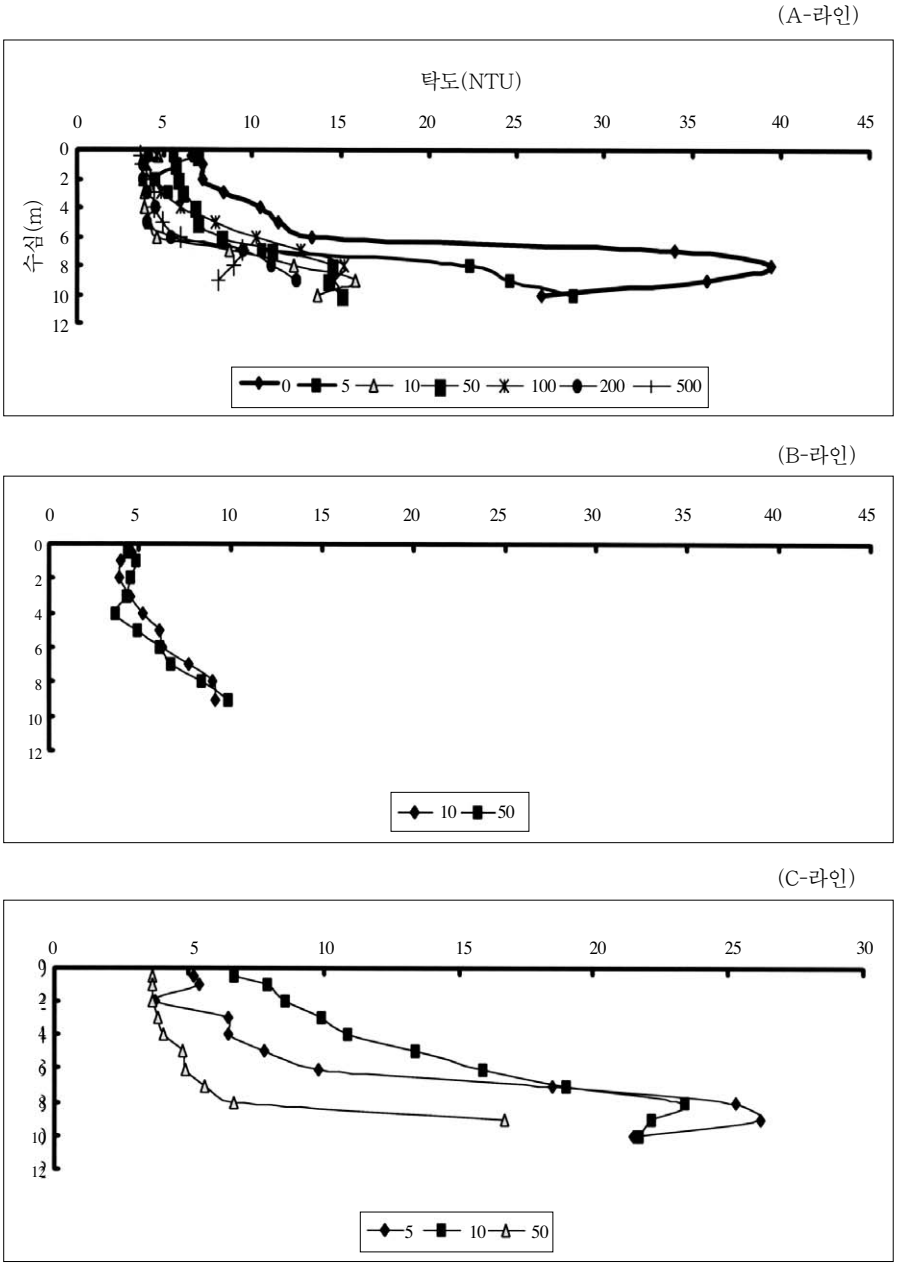


그림 6. 소조기 창조류시의 수심별, 거리별 탁도 분포

는 현지 해역의 흐름에 따른 지형적인 특성으로 파악된다. 따라서 거리별 부유토사의 농도는 발생원 부근 저층에서 고농도의 부유토사가 발현한 후 곧 침강하고 10m 이후 거리별 부유토사의 농도는 증감을 반복하면서 서서히 저하하다가 약 200m 정도까지 확산된 후 침강하여 500m 부근에서는 배경농도를 나타냈다.

거리별 현장관측 탁도결과를 바탕으로 부산 신

항만 서방파제 모래치환 공법에 따른 공사지점에서의 거리에 따른 부유토사의 확산범위를 분석하여 보면 대조기 창·낙조류시 공사시점에서 10m 이내 지점에서는 높은 수치의 탁도값을 나타내었으며, 10m 보다 멀어지면서 10NTU 이하의 탁도값을 나타내는 것으로 나타났다.

2) 소조기시의 확산분포 특성

조령에 따른 부유토사의 확산범위를 파악하기 위하여 소조기시에 서방파제 공사현장에서 취득한 관측자료를 바탕으로 소조기시의 부유토사의 확산특성을 파악하였다(그림 5, 6).

관측결과로부터 파악된 부유토사의 확산특성을 살펴보면 대조기시 보다 수심에 깊어짐에 따라 탁도치가 높아지는 경향을 보여주고 있다. 또한 라인별과 파악하여 보면 조류의 흐름방향으로 관측한 B, C 라인이 A 라인 보다 수심 층별에 따른 탁도치가 확연하게 구분되어 지는 것을 확인할 수 있었다. 소조기시의 가장 두드러진 특징은 미약한 조류흐름에 영향을 받아서 수심 7~8m까지는 수심이 깊어짐에 따라 탁도치가 높게 나타났으나 9~10m 지점에 이르면 탁도치가 급격히 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이것은 소조기시 저층유속에 의해 해저면에 투입된 지반치환용 모래가 미약한 조류의 흐름에 의해 약간 부상하여 진행되는 것으로 사료된다. 이러한 경향은 사업지점에서부터 멀어질수록 점차로 감소됨을 알 수 있다.

한편 거리별 탁도의 확산분포의 특성을 각각의 라인별로 살펴보면 표층에서는 거리에 따른 탁도의 분포가 거의 비슷하거나 일정거리까지는 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 저층에서는 공사지점에서 가까운 거리에서 높은 탁도수치를 나타내다가 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 각각의 라인별 특성을 살펴보면 소조기 낙조시에는 공사지점에서 주흐름 방향으로 관측한 B라인에서는 50m까지 표·저층에서 탁도치가 10NTU 이상을 나타내고 있는 것으로 파악되었으나, 흐름방향이 아닌 A라인의 경우는 10m 지점보다 멀어지면 표층에서는 10NTU 이하의 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 소조기 창조시에는 탁도수치의 차이가 있을 뿐 B라인에서는 10m 지점과 50m 지점의 탁도치가 비슷하게 나타났다. C라인의 경우에는 10m지점에서의 탁도치가 50m에 도달하면 그 수치가 감소하는 경향을 나타내는데 이것은 조류의 영향에 의한 관측결과로 파악된다.

2. 정점별 부유토사의 농도변화

시간에 따른 각각의 정점별 부유토사의 농도변화를 조령과 조시에 따라 나누어 그림 7~10에 나타냈다.

대조기 창조류시에 각각의 라인별로 탁도분포를 살펴보면 표층에서 흐름방향에 위치한 B라인의 농도가 다른 라인보다 높게 나타났으며, 중층과 저층으로 갈수록 투하된 치환모래의 영향으로 흐름방향으로 위치한 C라인의 농도분포가 높게 나타남을 알 수 있었다. 대조기 낙조시의 정점별 농도분포를 살펴보면 대조기 창조시와 비슷한 결과를 나타내고 있으며, 흐름특성에 따른 표·저층의 농도변화를 잘 보여주고 있다.

소조기 창조시에는 대조기와 달리 표층에서는 A라인에 위치한 정점의 탁도수치가 높은값을 나타내고 있으며, 저층으로 갈수록 조류의 방향과 탁도값이 높은 수치를 나타내나, A라인 부근에서 흐름방향으로 탁도수치가 높아지고 있음을 알 수 있다. 이는 지반치환에 사용된 모래가 소조기시의 조류흐름의 영향을 크게 받지 않을 정도의 균등계수를 가진 제원이고 공사방법 또한 저면 바로 위에서 모래를 해상으로 투하하는 공법을 사용하기 때문으로 사료된다. 소조기 낙조시에는 표층에서는 A라인 주변의 값들이 높은 수치를 나타내나, 저층으로 갈수록 흐름방향으로 위치한 B라

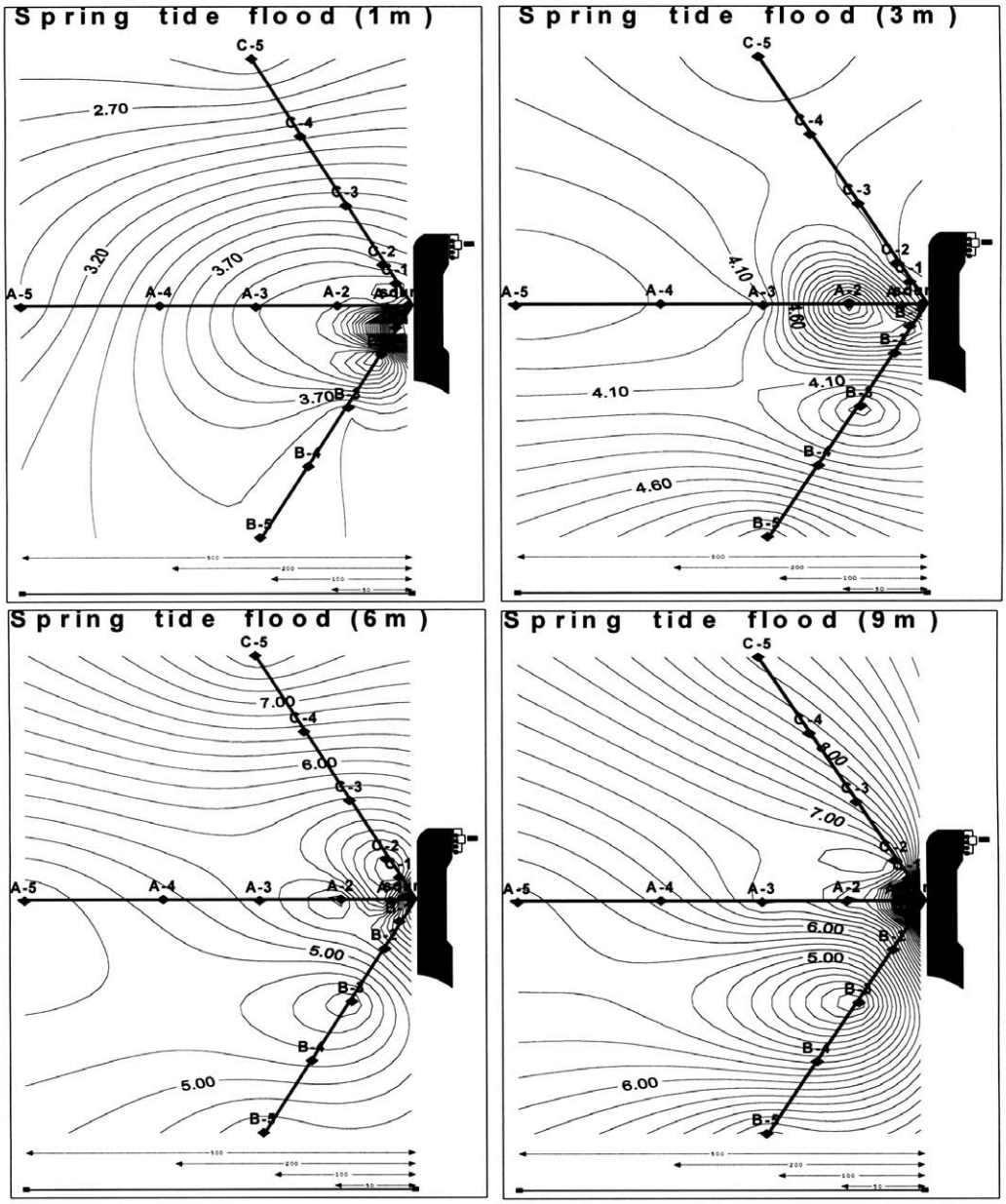


그림 7. 대조기 창조시 정점별 탁도 분포도

인의 값들이 높은 수치를 나타내고 있다.

이상의 정점별 탁도분포에 의한 신항만 모래치환 공사에 따른 부유토사의 거동특성을 살펴보면 모래투하 지점으로부터 50m 이내의 거리에서는 저층에서의 탁도변화가 표층에서의 탁도변화 보다 큰 수치를 나타내고 있으며, 이는 대·소조기

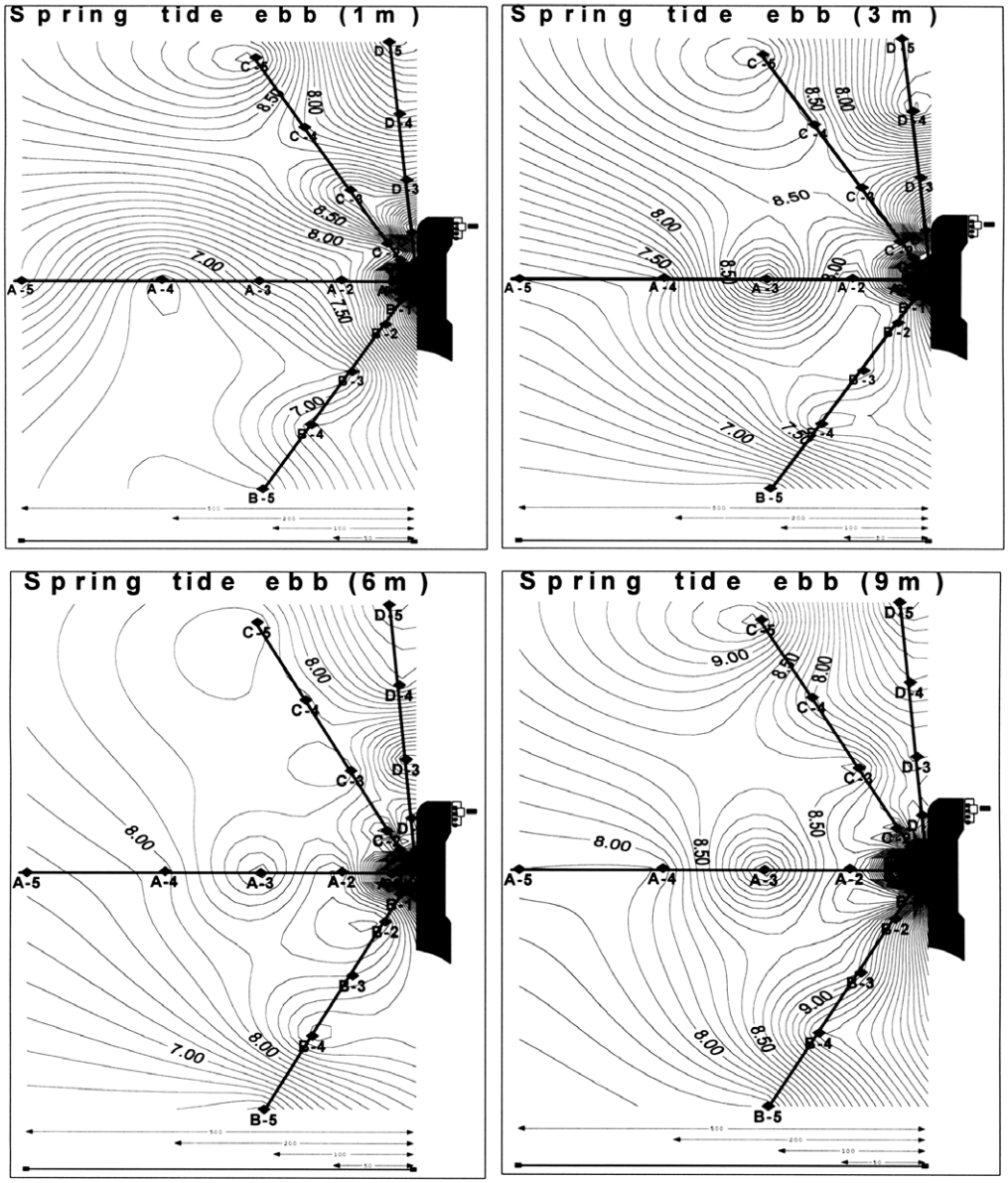


그림 8. 대조기 낙조시 정점별 탁도 분포도

모두 같은 경향으로 나타났다. 한편 대조기시보다 소조기시 약간 높은 탁도분포를 나타냈는데 이는 공사의 진행에 따른 투입모래의 투하량의 증가에 따른 자연적인 부유토사의 증가량에 따른 영향일 것으로 판단되었다.

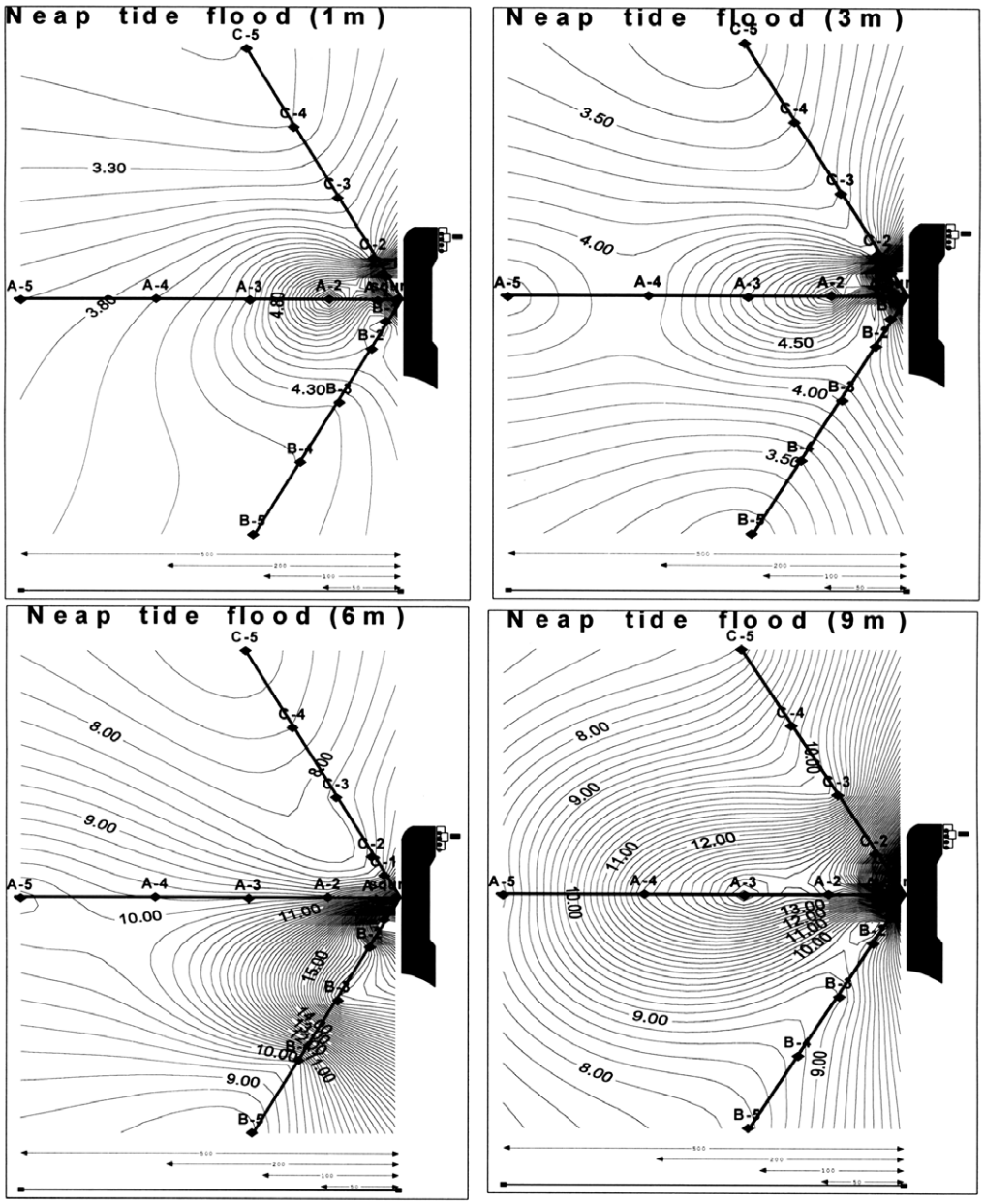


그림 9. 소조기 창조시 정점별 탁도 분포도

3. 매립공사에 의한 SS의 변화 특성

본 연구에서는 부산신항만 서방파제 공사현장에서 대조기 낙조류시 현장관측시기에 라인별로 수심 5m지점에서 현장해수를 채취하여 실험실에서 부유물질의 농도를 분석하였다.

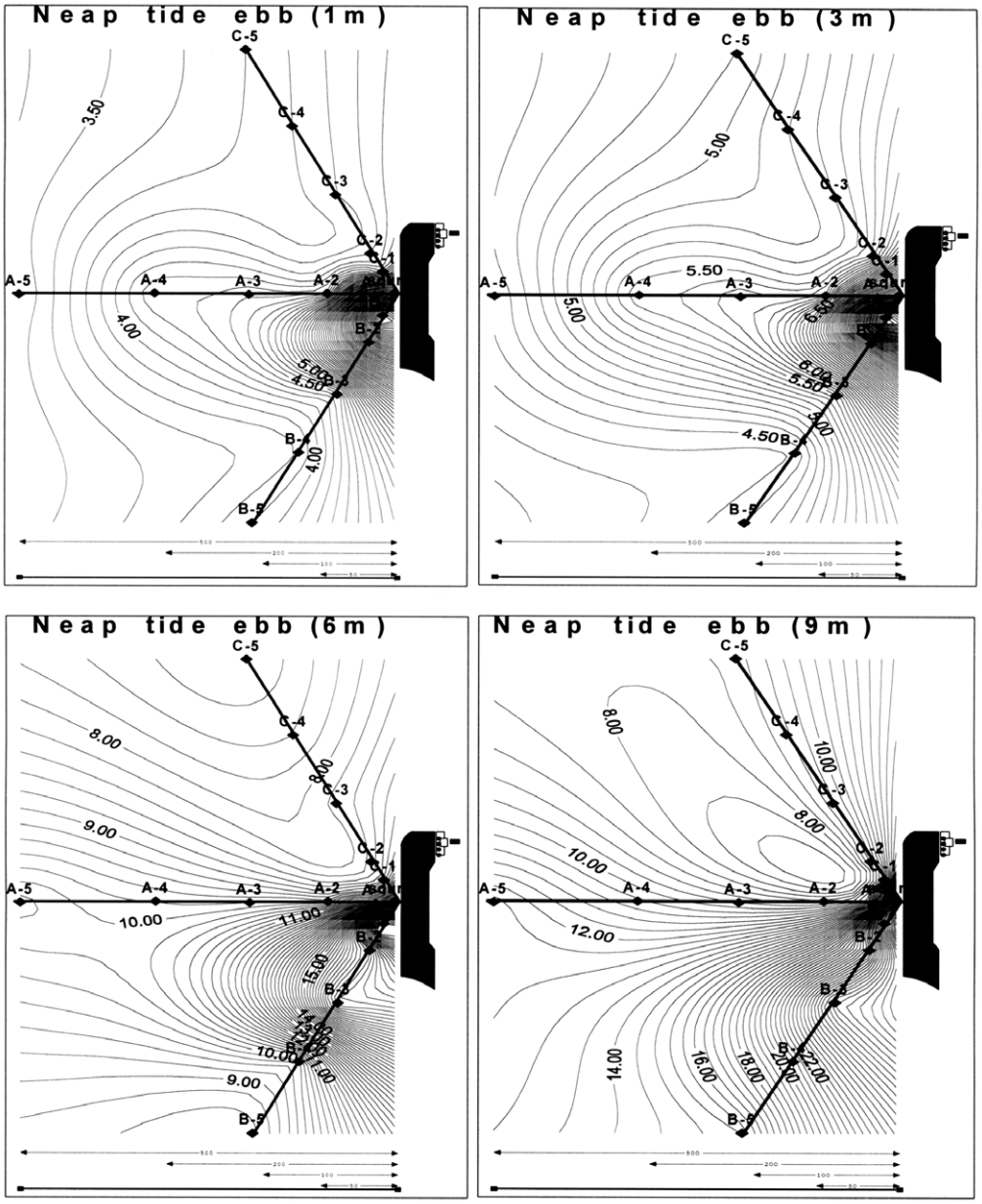
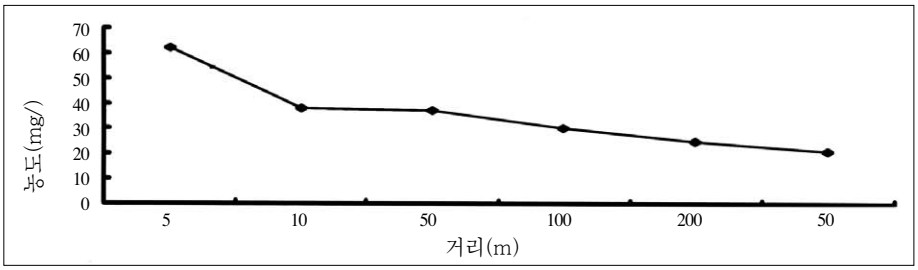


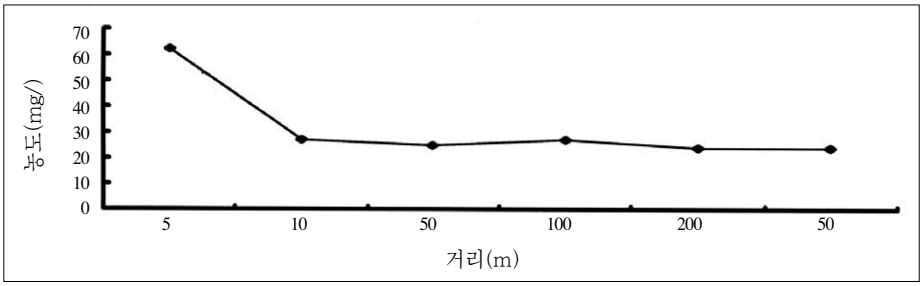
그림 10. 소조기 낙조시 정정별 탁도 분포도

이러한 방법을 통해 산출한 결과를 도시하여 보면 그림 11과 같이 나타났으며, 전반적으로 공사지점에서 거리가 멀어질수록 SS 농도가 작아짐을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 대·소조기의 탁도분포 특성과 같은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이러한 현장관측자료를 실험실

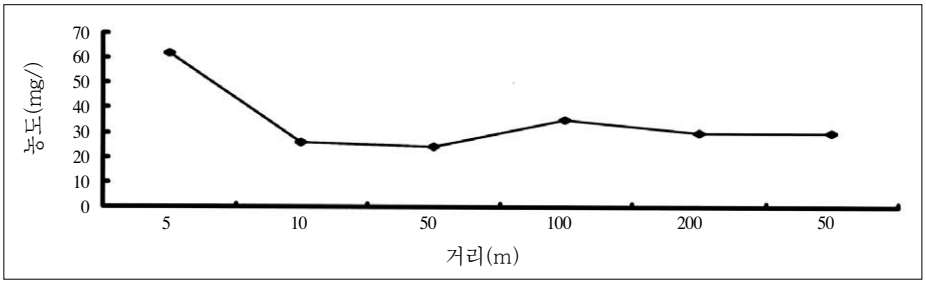
(A-라인)



(B-라인)



(C-라인)



(D-라인)

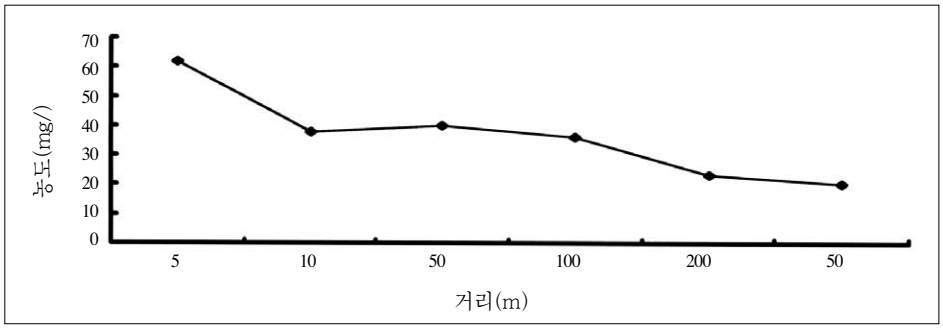


그림 11. 거리에 따른 부유사의 농도변화

에서 분석한 결과 또한 전술한 탁도분포의 특성을 잘 보여주고 있다.

V. 결 론

항만공사 시행시, 특히 매립 및 준설공사에 있어서 부유토사의 발생은 순간적이고 대규모로 일어난다. 그러나 토사투기시 수면밑의 토사의 낙하상황, 해저면에서의 움직임을 실제로 정확히 관찰한다는 것은 불가능에 가깝고, 수리 및 수치모형실험에 의해 어느 정도 예측하는 수밖에 없다. 따라서 이에 대하여 과거에 조사된 사례가 미진한 상태이다. 부유토사의 발생상황은 토사의 종류와 양, 투입방법, 수심, 유동, 해저면의 상태 등에 따라 상이하게 나타나나, 이들 각각의 차이가 부유토사의 발생상황에 어느 정도 관계하는지는 명확하지 않다.

본 조사에서 모래치환공사시 부유토사의 발생은 토사를 투기한 직후에 토운선근처 전체가 저층에서 고농도의 부유토사가 분포하나, 발생원으로부터 5m 범위내에서 곧 침강하여 10m이후 농도가 급격히 저하되었다. 이때 침강하지 않은 일부의 부유토사가 저층으로 확산되었다. 이 시점에서 표층에서는 부유토사는 간혹 토운선 주위에 기포와 더불어 부유하는 것이 보이는 정도였으나, 부유토사의 발생을 외관상으로 뚜렷하게 확인할 수는 없었다. 표층의 부유토사는 일부 해저에 도달한 후 되돌아오는 것과 난니류가 진행될 때 분산운동에 의한 부유토사의 분리 또는 기포와 같이 부상한 것들이다. 표층의 부유토사는 저층과 비교해 비교적 단시간에 소멸되며, 전체적으로 공사지점에서 50~100m 떨어진 지점에서 상대적으로 약간 높은 농도를 나타내 이것은 저층으로 확산된 부유토사가 이 지점에서 일부 부상한 것으로 생각되었다.

모래치환공사시 토운선으로부터 투하된 토사의 거동에 대해서는 다음과 같은 정성적인 경향이 있는 것으로 추정된다.

① 투기한 토사는 대부분 곧 침강한다.
② 침강하지 않는 일부의 토사는 저층으로 완만한 곡선을 그리며 확산한다.
③ 토사의 분산운동은 조류의 흐름에 따라 해저면을 따라 수평으로 전진한다.

즉, 본 조사결과에 의하면 모래치환공사시 부유토사의 발생은 토사를 투기한 직후에 부유토사가 저층에서 발생하였으나 대부분 곧 침강하였으며, 침강하지 않는 일부의 토사는 조류의 흐름에 따라 해저면을 따라 수평으로 확산하였다.

이와 같이 모래치환공사의 경우 부유토사의 확산이 다른 공사(공정)에 비해 상대적으로 적게 발생하는 것은 본 공사에서 투입된 제원이 사질토이고 수면에서 저면 위 2~3m까지 철제관을 통해 모래를 투입하는 방식을 채택하였으며, 또한 모래의 균등지수가 1.82이상의 굵은 모래를 사용하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 본 공사방식에 의한 모래치환공사의 경우 오탁방지막을 설치할 필요성은 없을 것으로 판단된다.

또한 산토나 해사 등의 투기의 경우에 어느 정도 부유토사가 발생하는지에 대해서는 조사하지 못했으나, 부유토사의 거동은 모래의 경우와 비슷한 양상으로 나타날 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 부산지방해양수산청 부산항건설사무소의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. J. J. Leendertse, Aspects of a computational model for long period water wave propagation, RM-5295-PR, The Rand Corporation, May, 2~11. (1967)

2. 運輸省第四港灣建設局海域整備課, 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. (1982)
3. 吉上井 光 昭, 港灣工事における濁りの擧動に關する硏究. (1989)
4. 掘江 殼, 水理模型實驗による海水交換率の算定」第24回 海岸工學論文集, p.491～p.495. (1977)
5. 海運港灣廳, 蔚山港 水理模型 實驗 報告書, p.87. (1983)
6. 海運港灣廳, 蔚山港 水理模型 實驗 報告書. (1983)
7. 海運港灣廳, 波浪觀測資料, p.452. (1984)
8. 洪薰基, 港內 海水交換機能을 考慮한 防波堤의 配置設計에 관한 基礎的 硏究. p47.(1991)
9. 建設部, 太和江 河川 整備 基本計劃. p.84. (1991)
10. 柳靑魯, 朴種和, 李和云, "沿岸域汚染物質の擧動の Simulation model", 日本海岸工學論文集, 39, 930-934. (1992)
11. 慶尙南道, 回夜江, 靑良川, 斗旺川 河川 整備基本計劃. p.32, p.102, p.106, p.113～p.118. (1993)
12. 李錫祐, 韓國港灣水理誌. p.179. (1994)
13. 朴鍾和, 深海波浪 推算模型의 開發 및 汚染物質 輸送에의 應用. 釜山水産大學 博士學位 論文, p.36, p.109. (1994)
14. 海運港灣廳, 鹿洞新港開發事業 環境影響評價書. p.197～p.393 (1995)
15. 尹龍男, 水文學, 淸文閣 p.237. (1996)
16. 韓在錫, 河川水 流入에 따른 蔚山港 周邊海域의 海水流動特性, 釜慶大學校 産業大學院 碩士學位論文. (1996)
17. 전남대학교 환경연구소, 세풍리 간척지 배수로 조성 준설공사 단일오탁방지막의 효과분석, p.1～p.12 (1996)
18. 정종률, 준설공사시 발생하는 부유물질의 확산 및 단일오탁방지막의 효과분석, 韓國海洋工學會誌 第12券 第3號 p.1～p.8 (1998)